



中国制冷简报

2022年专刊:家居环境





序 言

家庭是社会的细胞，承载着诸多社会功能，绝大部分人有一半以上的时间处于“家居环境”中。人在家庭中生活可看作一个大系统，称为“家居环境系统”，系统内各种环境因素同时作用于人体，并且相互耦合，对家庭成员的生理与心理健康、学习与工作效能等均有重要影响。我国把保障人民的健康作为国家的首要任务来抓，2017年习近平总书记提出“健康中国”的发展战略，“健康家居”即是实现这一远大战略的重要组成部分。改善家居环境使其对健康和工效产生正面作用，使人更加舒适和高效，恰恰符合不得病、少得病的“上医治未病”大健康理念。

“家居环境系统”还需要从系统外获取各种能量（如：电能、燃气、燃煤等）和资源（水和食物等），排出各种废物（如CO₂、其他废气、垃圾），会对系统外环境造成重要影响。据报道：英国家庭能耗占社会总能耗的35%，碳排放量为社会总排放的20%。我国的建筑能耗也已经占据全国总能耗的30%左右，逐渐逼近工业能耗和交通能耗。说明“家居环境”和当前的节能、“双碳”目标等国家战略有重大关系，“低碳家居”也是未来发展的新方向。

家居内凡是对人的健康、舒适和工作效能产生影响的各种环境因素，称之为“家居环境因素”，

均属于“家居环境工程”研究的范畴。“家居环境工程”将家居环境看作一个大系统，以系统工程的理论与方法，研究如何调控家居环境因素使之更适合家庭成员的生活与工作，使之更为节能减排。

“家居环境工程”是未来产业，需要未来科学技术的支撑。目前的家居环境控制技术已经得到较好的发展，但仍存在诸多问题。如各项环境控制技术仍只是点状的、局部的，或者是针对部分环境因素，没有将“家居环境”作为统一的整体考虑，未考虑各种因素之间的耦合关系及对人的影响，未从整体出发优化能量和资源的综合高效利用，缺少系统性新技术来降低能源需求、减少碳排放。在当前“健康中国”和“双碳目标”等国家战略指引下，需要从“大健康”和“零排放”的角度重新审视家居环境问题，将家居环境看作一个整体，采用系统工程的理论和方法，构建家居环境科学与工程体系，引领家居环境工程技术的发展，既为人民群众带来美好生活，又支持实现国家战略。

“家居环境工程”是多门科学技术的交叉和深度融合，也是科学技术与文化艺术的深度融合。希望国内科技工作者和艺术工作者共同努力，为改善家居环境添砖加瓦，发挥科技引领作用，为人民群众带来更美好的生活。

——王浚



《中国制冷简报》着重介绍中国制冷、空调、供暖、通风及相关领域的各类信息，旨在推动科技创新，推广应用技术，报道行业动态，促进业内交流，为我国制冷事业的发展服务，为学术及技术交流服务，为培养专业人才服务。

主办单位：中国制冷学会

特邀主编：王 浚

特邀副主编：朱颖心、刘 猛、张寅平、杨一凡

**特邀编委：曹 彬、范 薇、冯 昕、关 欣、
李运泽、路 宾、缪 珂、徐 鸿、
杨旭东、赵 彬、周燕珉、朱克勇**
(按姓氏字母排序)

责任编辑：范 薇

编 辑：邵月月

封面设计：王 昊

编辑部联系方式

地址：北京市海淀区阜成路67号

银都大厦10层

邮编：100142

电话：010-68463224

传真：010-68434679

邮箱：wfan@car.org.cn

版权声明

凡本刊发表的文章、图片，未经本刊允许不得转载。经本刊同意授权刊登，应注明出处，向本刊编辑部及作者邮寄样刊，并向作者寄发稿酬。

C 目录 CONTENTS

- 01 “家居环境工程”——高质量绿色发展的未来产业
..... 王浚，刘猛，朱克勇 (1)
- 02 浅议未来家居环境的发展方向与研究重点
..... 朱颖心 (5)
- 03 家居热环境营造技术展望
..... 曹彬，张楠，吴业宇 (11)
- 04 健康建筑、健康呼吸：室内空气质量设计评价
..... 张寅平，路宾，莫金汉，孟冲 (16)
- 05 浅谈建筑室内空气污染的症结与控制
..... 赵彬，陈忱 (19)
- 06 建筑环境的空气消毒技术与相关问题探讨
..... 冯昕，路宾，张彦国，
曹国庆，梁磊，许钟麟，张惠，周绍洋 (26)
- 07 居家环境适老化设计的原则与要点
..... 周燕珉，秦岭，李广龙 (36)
- 08 农村室内环境现状及改善方法
..... 杨旭东，职远，何馨 (43)
- 09 农村家居环境控制中的建筑被动式热设计技术及应用
..... 袁满，李闯，王为术，李运泽 (49)
- 10 家居环境产品研发、市场及生态建设
..... 徐鸿 (56)
- 11 家庭能源管理系统
..... 关欣，宋子晔 (67)
- 12 家居环境与美学艺术的融合
..... 缪珂 (73)
- 13 智能家居行业生态建设痛点及解决方案
..... 陈挺，董楚楚，高欣婷 (78)
- 14 中国绿色智能餐厨趋势分析
..... 徐守澄，张浩，成权 (83)
- 15 空枕联动：打造优质睡眠环境
..... 艾长滨 (89)

01

“家居环境工程” ——高质量绿色发展的未来产业



王 浚 Wang Jun

北京航空航天大学航空科学与工程学院教授、博士生导师，中国工程院院士，中国制冷学会常务理事。主要研究方向为环境模拟与控制技术、低温与制冷技术，建立了综合性的边缘技术“环境模拟技术”的理论体系，开辟了空气制冷技术新的应用领域，围绕国家重大需求，研制了多种新型环境模拟试验系统，获国家级科技奖3项、部级科技奖18项，授权发明专利40余项，发表论文百余篇。



刘 猛 Liu Meng

北京航空航天大学航空科学与工程学院研究员，博士生导师。主要研究方向为环境模拟与环境试验技术、舱室综合环境控制技术、高效传热与电子设备冷却技术。获得国防科技进步一等奖4项，二等奖1项，发表论文40余篇，获国家发明专利授权20余项。



朱克勇 Zhu Keyong

北京航空航天大学航空科学与工程学院副教授，博士生导师。主要研究方向为环境模拟技术与辐射传热技术。完成了大型沙尘综合环境模拟试验系统的研制，解决了沙尘环境模拟的均匀性、高效性、可靠性方面的技术难题。研究了梯度折射率介质内热辐射传输特性、附着水滴光学窗口热辐射传输特性和粒子热辐射特性。获得国防科技进步一等奖2项，发表论文30余篇，授权发明专利2项。

绝大部分人有三分之二的时间在室内生活和工作,超过三分之一的时间处于“家居环境”中。家居中各种环境因素同时作用于人体,并且相互耦合,对人的健康、舒适(生理和心理的)和工作效能有重大影响。近年来,女性肺癌发病率及死亡率持续升高,尤其是亚洲群体,不吸烟女性肺癌在整体肺癌发病中所占的比例越来越高,其发病原因直指二手烟、厨房油烟、新房装修污染、室内空气污染等问题,均与家居环境有关。家居环境对健康的影响非常重要,我国把保障人民的健康作为国家的首要任务来抓,改善家居环境使其对健康产生正面作用,使人更加舒适和高效,恰恰符合不得病、少得病的“上医治未病”大健康理念,这也是中华民族自古至今最科学的思想。本次“新冠病毒疫情”更突显了健康的重要性、环境因素影响的重要性。

人在家庭内生活可以看作是一个系统,需要消耗各种能量(如:电能、燃气、燃煤等)和资源(水和食物等),也要排出各种废物(如:CO₂、其他废气、垃圾等),对大环境造成重要影响。国外近期资料报道:英国“家居环境”能量消耗占社会总能耗的35%;排出的CO₂为全社会总排放的20%,其2500万户家庭CO₂的年排放量比2700万辆汽车的年排放量还多250万吨。说明“家居环境”和当前的节能、“双碳”目标及节约资源等世界难题及国家重大战略有重大关系。2021年9月27日,北京市发改委发布的《北京市关于进一步完善市场导向的绿色技术创新体系若干措施》中也将“低碳家居”列为重点发展的九大绿色创新技术的新方向。

“家居环境”是未来产业,需要未来科学技术的支撑。目前的家居环境控制技术已经得到较好的发展,但仍存在诸多问题。如各项环境控制技术仍只是点状的、局部的,或者是针对部分环境因素,没有将“家居环境”作为统一的整体考虑,未考虑各种因素之间的耦合关系及对人的影响,未从整体出发优化能量和资源的综合高效利用,缺少系统性新技术来降低能源需求,减少碳排放。在当前的形势下,需要从新的视角、用新的理念开展深入研究。

1 “家居环境”主要构成

广义的“家居环境”因素:凡是对人的健康、

舒适和工作效能产生影响的各种室内因素,均视其为组成因素。这些因素是同时作用于人体,对人的身心健康和工作效能产生不同影响,而且往往这些影响是耦合作用的,但权重不同。

1) 家居空气热湿环境。和人体的热平衡,即热舒适有关。主要是:室内空气的温度、湿度、风速及气流组织。对人的舒适和工作效能有重要影响。

2) 家居空气质量环境。

主要包括:a)室内空气中所含固体颗粒物的颗粒度和浓度,如:PM₁₀、PM_{2.5};b)室内空气中所含微量有害气体的浓度,如:甲醛、苯、硫化物等。c)各种病菌、病毒等有害微生物。

3) 家居安全环境。室内消防、水/气泄漏、防盗、安全防护装备等。

4) 家居餐厨环境。

需要消耗能量、水资源,产生油烟及CO₂,排出热量(用燃气和燃煤等燃料时)。要求节能、减排、回收利用排放热,以及个性化餐饮装备和用具,增加饮食文化元素。

5) 家居卫生环境。清洁、洗涤、厕卫等。除满足相应功能外,还要求安全、舒适、个性化和智能化。

6) 家居存储环境。冰箱、冰柜及各类储物设备。要求安全、个性化和智能化。

7) 家居视觉环境和光环境。房间内饰、布局、灯光等。要求个性化、功能性和艺术性。

8) 家居声环境。

9) 康养和应急医疗救治环境。

10) 家居信息及文化娱乐环境。视频、音频等。

11) 家居电磁环境与健康。

12) 家俱环境。满足功能性、个性化。要求具有良好的视觉效果。

13) 家居几何环境。室内个性化总体空间布置。要求满足生活和工作需求,具有良好的总体视觉效果。

14) 家居能源、资源供给环境。

主要指家庭内水、电、气等能源与资源的供应与使用,要求安全、可靠、智慧、节能、节约资源消耗。

15) 家居其他功能环境

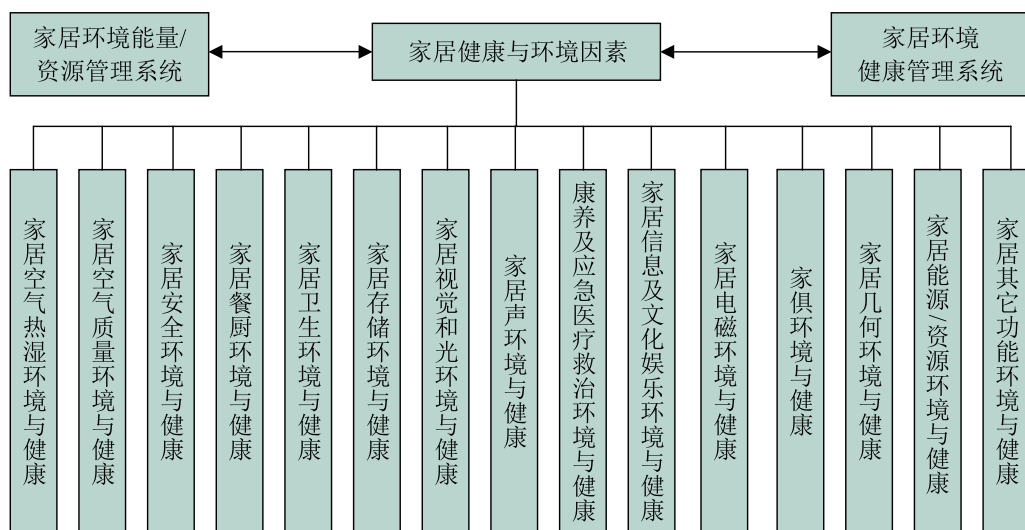


图1 家居环境构成框图

2 对“家居环境”的要求

2.1 功能性要求

“家居环境”的功能是满足高质量的生活和高效率的工作。因此，对它的功能要求是：保证人的安全、健康、舒适和高效率的工作。

2.2 能源、资源和排放要求

2.2.1 能源

- 1) 减少使用的能源种类，最好全用电能。
- 2) 建立家居能源管理系统，统一管理、调配各类用能设备的能源使用，减少家居总能源消耗。
- 3) 回收排放的热能，燃气用具排气热回收。

2.2.2 资源

主要是家居用水的节约和可能的回收循环利用。

2.2.3 排放

如前所述，家居CO₂排放占社会总排放的20%左右。因此，减少家居CO₂排放具有重要意义。可考虑通过用能全电化，家中养殖相关植物和其他降解减排措施，使家居CO₂和其他废气达到零排放和微排放。

2.3 使用性要求

2.3.1 一体化、全电化、个性化、智能化和网络化。

2.3.2 经济、实用和简便。

3 “家居环境工程”——广阔而重要的未来绿色产业

“家居环境工程”对提高广大人民的健康水平和生活质量，节约能量消耗、减少CO₂排放具有重大意义。因此，作为整体是一个发展前途广阔而重要的未来绿色产业领域。

4 “家居环境工程科学”

“家居环境工程科学”是“家居环境”工程这一未来产业的科学支撑。将“家居环境工程”视为一个整体，主要涉及到：多门科学技术的交叉和深度融合，以及科学技术与艺术的深度融合。因此，将是一门新的工程科学技术。它的发展将支撑“家居环境工程”这一未来绿色产业的发展 and 壮大。

5 对“家居环境工程科学”的一些思考

作为一门新的工程科学，对其发展有以下一些考虑：

5.1 理清研究思路

1) 应将室内各种环境因素作为一个同时作用于人体的整体，综合考虑其对人的效应。

2) 同时又必须区分各种环境因素对人体影响点（生理和心理）及影响程度的差异与不同；同时作用和单独作用的耦合影响不同；不同时间段、不同环境因素影响的耦合不同等。

3) 既要研究单环境因素对人的影响，更要对多

环境因素、不同时间段的耦合影响进行研究。

4) 家居环境工程作为一个整体系统是时变的,可用数学模型描述,通过和实验相结合的数值模拟进行研究和分析。

5.2 抓住主要矛盾

理清对人影响的关键耦合环境因素进行单独和耦合影响的研究。可考虑先研究下述几项及它们的综合影响。

1) 家居空气环境。温湿度环境控制、室内气流组织和室内空气净化。

2) 家居餐厨环境。即保证个性化、智能化、高质量的饮食及文化,又要求节能和减排。

3) 家居安全环境。防火、防盗、防撞、防摔、应急救治等,对儿童和老人等群体尤其需要多考虑。

4) 家居声环境。要求声音悦耳,无噪声。

5) 家居视觉环境和光环境。

6) 家居存储环境。特别是食品存储的安全和质量。

7) 家居能量和废气排放管理系统。

8) 家居水环境及其管理系统。

5.3 要和医学及工效学结合,进行环境生理学、环境心理学及工效学的研究。

5.4 建议建立“家居环境工程实验室”。

5.5 培养“家居环境工程”高素质人才队伍,可考虑高校和企业合作的培养模式。

5.6 建立“家居环境示范工程”,可考虑和“家居环境工程实验室”相结合。

“家居环境工程”是“室内环境工程”中最广泛复杂的,对我国“双碳”目标的实现影响重大,需加快其理论、技术和工程的研究,支撑“家居环境”这一未来绿色产业的健康发展。

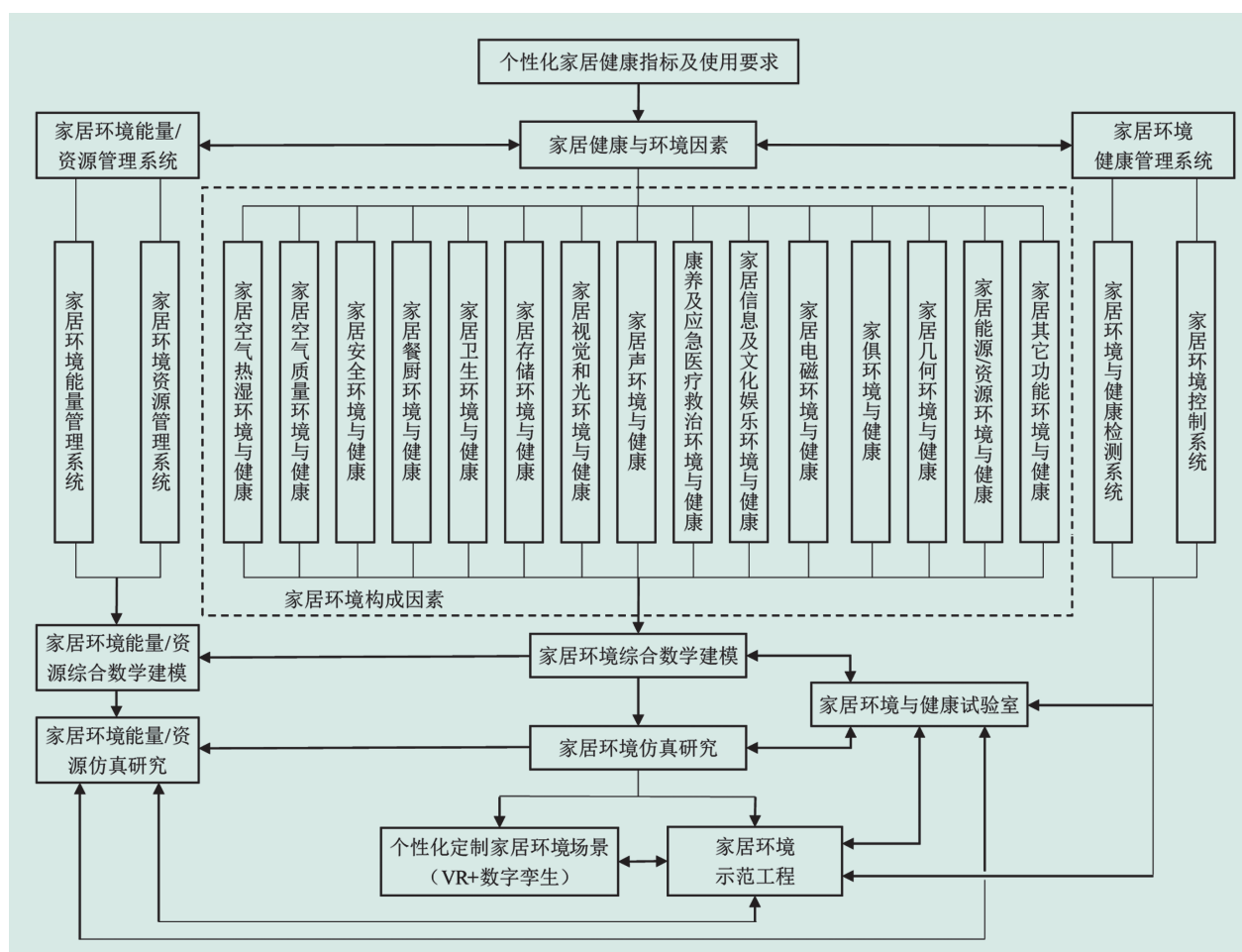


图2 家居环境工程科学研究框图

02 浅议未来家居环境的发展方向与研究重点



朱颖心 Zhu Yingxin

清华大学建筑学院建筑技术科学系，教授，生态规划与绿色建筑教育部重点实验室副主任，建筑环境与能源应用工程专业教指委主任。曾获国家科技进步二等奖、联合国教科文组织亚太文化遗产保护奖、日本空气调和卫生工学会井上宇市亚洲国际奖，中国暖通空调学会吴元炜暖通空调奖。

随着我国的经济的发展，2021年我国人均GDP超过了国际平均线，已经接近高收入国家门槛。因此，我国人民在迈过小康目标之后，追求更美好的生活品质是必然的需求。家居环境与国民的舒适与健康密切相关，因此营建健康舒适的高质量家居环境应该成为政府部门、科研机构、产业等领域需要面临的任务。

为了营造高质量的家居环境，需要针对以下五个基础问题和四个重要的应用领域开展研究。其中，五个基础问题包括：

1) 健康舒适热环境的营造与调控方法

- 2) 室内空气质量的标准与控制方法
- 3) 家居环境的人体工程学问题
- 4) 全电气化家居用品的研发与应用
- 5) 家庭卫生工程

此外，四个重要的应用领域包括：

- 1) 适老与残障人士家居环境
- 2) 儿童与育儿家居环境
- 3) 健康的睡眠环境
- 4) 农宅家居环境

下面将就上述五个基础问题与四个应用领域可能涉及的具体内容展开论述。

1 关于未来家居环境营造的五个基础问题

1.1 健康舒适热环境的营造与调控方法

维持适合的居室热环境是居住建筑维持舒适的首要条件。目前,我国北方城镇住宅已经覆盖集中供暖系统,而家用空调器已经在全国普及。南方地区的冬季供暖多数还是由家用空调器,即分体式热泵机组来提供,但是还有很多家庭采用的是局部采暖设备,如电热辐射器(小太阳)、电热毯、电暖气等。

目前要营造健康舒适的家居热环境,夏季空调存在的问题主要是新风不足,但这个问题完全可以通过适当开窗通风和使用换气扇来解决。更难解决的问题其实集中在冬季采暖,而且北方与南方需要解决的问题的焦点是不一样的。

对于北方地区的集中供暖住户来说,存在的问题是:1)温度难以自行调节,常常导致室内温度过高。2)供暖前和停暖后有一段时间室外温度偏低,人们感到室温过低而不舒服。3)无法实现不同的房间控制各自需要的温度。这种问题在南方家庭自采暖的情况下基本不存在。

这是由于现有大部分的集中供暖系统设计普遍存在的不能独立调控的缺陷导致的。为了保证最不利的用户室温不至于过低,必然要导致其他的用户温度过高,不仅超过22℃,甚至出现堪比夏季室温的现象。有的住户不得已开窗通风以降低室温,但由于大量引入室外干燥空气,导致室内湿度过低引起不适。实际上维持过高的冬季室内温度不仅导致供暖能耗高,而且还会带来不舒适甚至不健康的问题。目前国际上最新的研究表明,人体如果一直缺乏适当的冷暴露,会导致肥胖症与II型糖尿病的发病率增高。

而集中供暖的时间不够长,也是出于节能的考虑。所以,以供暖能耗为主的北方居住建筑首先需要做好节能改造,降低集中供暖系统的单位面积能耗,使得热电联产为热源的集中供暖系统能够为更大面积的居住建筑服务,不需要用燃气、燃油、燃煤锅炉来补热,这样就有可能延长集中供暖的时间。

集中供暖系统需要解决分户独立调节以及分室独立调节的问题,这样就可以做到部分时间部分空间供暖。在同一个家庭中,由于基础代谢率的区

别,老人与儿童需要的室温是不一样的,病人与普通的上班族需要的室温也是不一样的。满足不同人的个性化需求,实际上就是提高了室内热环境的品质。小户型多房间的家庭里会有一些房间长时间没有人使用,上班族的家庭里日间经常没有人。这里面都有巨大的节能潜力。

在北方地区,局部供暖设备同样可以起到满足高品质的个性化热舒适的需求,同时又有很好的节能效果。例如在室温维持在15℃的书房里,使用一个高度达到膝盖的电取暖腿器来保证膝盖以下肢体的温暖,就能够在满足整体热舒适的同时令人感到脚暖头凉,神清气爽,达到了更高的热舒适水平。把室温控制在15℃时的耗热量,要显著低于一直把室温控制在20℃时的耗热量。而电取暖器只有人坐下时才会启用,其电耗又非常低。当人在房间里走动而非静坐时,由于代谢率高,并不需要很高的室温。同理,如果人在家中做家务或者在健身器材上锻炼时,需要的舒适室温是偏低的。因此把整体室温控制得低一些,把人长时间坐卧逗留的位置局部温度提高,即集中供暖系统保障一个满足居住者在室内走动或者做家务时需要的基础室温,并可以分户可调,配合局部个体的电热设施,这样营造出来的居室热环境,更符合家居环境中人体的健康舒适需求,同时又能有效地降低能耗。

对于南方冬季供暖的问题,其实完全可以通过现有的各种各样的采暖设施来解决。已经有共识的观点是南方不适合采用集中供暖系统,分户独立调控加上局部采暖设施就能够达到最佳的热环境控制效果。尤其是分体式热泵空调器由于给室温升温速度快,非常契合南方居住建筑间歇性供暖的需求。目前反映的最多的问题是,分体式热泵空调器在冬天供暖的时候容易造成房间的上热下冷,出现温度分层,导致在房间下部活动的人感到供暖效果不好,电耗甚至会比使用局部电暖器要高。因此需要解决的问题是改善分体式热泵空调器室内末端的供暖方式,例如冬季供暖时可以从下部送风,或者把末端改成送风与辐射式相结合。与北方供暖相似,最佳的家居热环境营造策略应该是:维持一个适合人在室内走动或者做家务时舒适性需求的热环境,再为人体长时间坐卧逗留的局部空间提供与家具结

合的局部电加热设施，当人进入并使用这个局部空间时电加热设施再启动，为局部空间提供一个偏暖的热环境。

要实现这样的目标就需要研发出各种各样与家具配合的局部电加热设备。例如上面提到的电暖腿器，或者安装在桌板下表面的对膝盖进行辐射供暖的设备，以及与座椅、沙发结合的椅背、坐垫加热设施等。目前实现这些局部加热设备从技术上并没有障碍，但需要进行人体局部热舒适的实验来为这类设备的开发提供技术参数支撑。在日本称作“こたつ (Kotatsu)”并广泛使用的传统桌下电加热设施就属于这类设备的一种。而目前在我国南方广泛使用的电热毯（地毯、床垫）也属于此类设备。但对于用于铺在床上改善睡眠热环境的电热毯来说，提高足部的温度是改善睡眠质量的有效手段，因此非常需要开发根据不同的人体部位来分别进行智能化加热的电热毯，不仅有助于改善睡眠的热环境，而且还有助于提高人的睡眠质量。

对于居室的夏季降温来说，没有必要在整个夏季开空调将室内温度恒定在25~26℃。实际上大量的研究成果表明，在自然通风的环境下，室温28℃是被90%以上的居住者认为是舒适的。当采用吊扇或者是风速动态变化的仿自然风扇的时候，人们可以接受的最高温度是30℃，这样的室内环境更接近舒适的室外自然环境。所以应该鼓励人们保持使用电风扇的习惯，发展出安装方便、款式美观的吊扇以及可仿自然风的台扇供人们使用，尤其是可以与空调配合，把室内的空调设定温度控制在29℃上下，同时使用电风扇，就能够在能耗较低的情况下，营造出接近舒适室外环境的室内热环境，避免长期室内外温差过大导致人体热应激能力衰退而出现的“空调病”。

1.2 室内空气质量的标准与控制方法

除了居室的冷热环境被人们关切以外，家居环境的室内空气质量则是近十年来爆发的热点问题。家庭室内空气质量主要的影响因素包括家庭装修以及建材和家具的污染物散发、室外污染物（PM2.5、汽车尾气、臭氧等）、人体散发的二氧化碳、厨房油烟以及燃烧产生物等。针对这些污染物对室内空气质量以及对居民健康的影响，已经有很多国内外的学者开展了大量的研究。

在室内空气质量控制的设备方面，近年来出现了很多产品包括家庭用的室内空气质量监测设备、各种各样的空气净化器，以及各种类型的新风换气机。已经有一部分学者针对应该如何正确使用空气净化器，以及新风换气机在家居环境中使用的适宜性如何开展了深入的研究。

住宅室内的二氧化碳浓度也是人们关注的重要热点。因为二氧化碳浓度往往体现了室内新风量的大小，也是人们主观感受室内空气是否新鲜的一个标志。现在气密性过于好的门窗往往导致了通过窗缝自然渗入到室内的新风量过少，不能满足室内人员的卫生标准要求。在寒冷的冬天或者在炎热的盛夏，依靠居住者开窗通风，则很难控制通风换气量，很可能带来过高的供暖空调能耗，并造成很大的室温波动。如果安装机械驱动的通风换气系统，不仅会在室内产生噪音，而且会显著提高额外的电耗，因为这种通风换气系统一旦开机就要为整个住宅单元内所有的房间同时送新风，不管这些房间哪个有人哪个没有人。因此研发分室独立的被动式智能化新风换气设备是迫切的需求。

1.3 家居环境的人体工程学问题

家居的空间尺度环境实际上是人们首要考虑的最大问题。当居住面积一定的时候，居住面积的有效性对生活品质的影响是巨大的。人们在解决了有栖身之地的问題之后，必然会对自己逗留时间最长的这个私人领域的环境品质提出更高的要求。居室面积的大小是由经济能力决定的，但小户型不等于不需要讲究生活品质。而且越是小的户型，越需要用好每一寸空间，在设计上具有更大的挑战性。因此，人们接下来必然要考虑居室空间的可用性、功能性、高效性和便利性。为了在有限的居室面积条件下尽可能营造出较高的生活质量，除了需要高效利用空间以外，还要考虑套内的空间布局是否适合居住者在室内的活动路线，是否有足够的储物空间。此外，厨房和卫生间的设计是否满足安全、卫生、便利、舒适的需求？厨卫设施以及家具的尺度是否能够让使用者用起来感到方便自如？

上述问题都属于家居环境的人体工程学问题。首先需要由建筑师来解决的户型设计问题。这个问题非常复杂，因为居住建筑麻雀虽小，五脏俱全，

需要建筑师投入很大的精力来研究，才能针对不同年龄、职业、身体条件的人群，以及不同家庭结构的居住者设计出适合的户型。

其次是家装领域和家具用品的问题。选择使用适合质感、色彩的装修材料，能够有效地营造比较开阔的视觉空间感；边角空间的利用能有效增加储物空间。人们对更加优质生活的追求对厨卫的家具、洁具的尺度设计也提出了更高的要求。未来炊具向全电气化转型，将会导致厨房家具设计的重大改变。不同类型的人群，对家居设计的需求差异性是很大的。例如，老年人的视觉退化，需要在照明、环境色彩方面有所倾斜考虑；肢残人士对厨卫设计以及家具的尺度及功能与普通人也存在不同的需求。

因此家居环境领域的研究者与相关产业应该针对不同类型的人群、家庭的需求进行细分化的研究，从而有针对性地开发出满足不同人群需求的产品。

1.4 全电气化家居用品的研发与应用

全球建筑领域的碳排放约占全社会总能耗的1/3，因此建筑领域必然要为全社会实现双碳目标分担重要的责任。降低居住建筑的碳排放需要通过以下两个途径：第一个途径是减少建筑的用能需求，包括对居住建筑进行节能改造、提高家庭用能设备的效率、实现家庭用能设备（包括采暖、空调、生活热水、照明、通风）的个性化独立调控，以及实现针对人员逗留的局部空间提供精准服务来避免能源的无效消耗。第二个途径就是实现居住建筑的全电气化，同时充分利用可再生能源、余热废热以及天然能源来为建筑供能。

2022年3月住建部发布了《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》，列出了九项重点任务，明确提出把推动可再生能源应用、实施建筑电气化等作为重要的举措。要求积极推动以电代气、以电代油，推进炊事、生活热水与采暖等建筑用能电气化，推广高效建筑用电设备、产品。到2025年，建筑用能中电力消费比例超过55%，城镇建筑的可再生能源替代率达到8%。而我国碳中和计划的长远目标是到2060年，非化石能源消费比重达到80%以上。

除电力以外，目前我国家庭直接使用的化石能源主要是燃气。除了部分北方城市的集中供暖系统还有燃煤和燃油锅炉以外，散煤基本上已经退出了

城镇家庭。

目前燃气在城镇家庭中的用途主要是用于炊事、生活热水和采暖（分户壁挂炉）。北方住宅采暖未来主要由以热电联产、废热余热为热源的集中供热系统，以及低温空气源热泵系统来提供。目前，用于提供生活热水的热泵热水器的产品也日臻成熟，逐步在推广应用中。当然，如果有充足的太阳能资源，太阳能热水器应该是更好的替代品。至于炊事，目前的家庭电替代率已经非常高了：微波炉、电饭锅、电热水壶、电烤箱、电炸锅、电火锅、电蒸锅等电炊具已经占据了厨房的大半江山。这些炊具都采用了各种各样的保温或者对食物直接加热的方式，其热效率要远高于明火炊具。很多家庭保留燃气灶主要还是为了炒菜。但实际上电磁炉配合热容较大的炒勺完全能够适应中式快火炒菜的需要，而且还能方便地控制炒菜的油温，有效抑制油烟的产生。

因为电和可再生能源完全可以替代燃气在家居生活中的作用，所以燃气退出住宅建筑已经成为必然趋势。由于燃气在住宅中的使用方式都是直接燃烧来利用它的热量，是典型的把高品位能源低品位用的方式，不符合节能减碳的原则。燃气更好的使用方式是进入大能源系统，例如用于发电。当燃气退出住宅建筑之后，燃气安全问题也就得到了彻底的解决。

实施建筑电气化的新型建筑电力系统的特点之一是采用直流供电。相比于传统的交流供电，直流供电系统省去了很多电能转换环节。由于很多建筑的用电设备最终使用的都是直流电，所以直流供电就可以取消AC/DC的变换环节，不仅可以减少电能的损耗，提高电能利用效率，同时还能消纳光伏发电，而且对于终端用户设备来说更加稳定安全。面对直流供电的家用电器将不需要搭载交直流变换器，家用的电源插板输出将以低压直流为主，因此对于前面所提到的各种用电的局部加热的设施来说更有安全保障。

1.5 家庭卫生工程

由于住宅中厨卫的下水道不仅有污水流通，更是连通楼上楼下住户的通道，有可能成为气体污染物与病毒细菌通过气溶胶传播的通道。尤其是长期

无人使用时，水封干涸，下水道就变成毫无阻拦的空气传播通道了。2003年SARS肆虐期间，香港淘大花园的户间病毒传播案例已经被确认是感染者粪便中的病毒通过下水道传播到其他住户导致很多居民感染。

除了厨卫排水系统以外，衣物洗涤中的霉菌污染问题，垃圾的存放、宠物的厕所和毛发、滋生的螨虫等对居室环境都有重要的影响，因此均需要通过各种渠道予以解决。

2 关于四个应用领域

在解决了上述5个主要的基本问题的基础上，需要在以下4个应用领域着重考虑未来的家居环境发展方向。

2.1 适老与残障人士家居环境

我国已经进入了老龄化社会，未来将有很多老人会与下一代合住或者自己独居。绝大部分的老年人都会采取居家养老的模式，因此为老年人提供适合的家居环境，已经成为了迫切的社会需求。

截止2020年2月，中国有8500万残疾人，约占中国总人口的比例的6.21%。当我们迈入高收入国家门槛的时候，更有义务为残疾人提供更好的居住环境。

老年人与残疾人对家居环境的要求与健康的青壮年人有很大的差别。他们都存在行动不便或视力与听觉障碍、生活自理能力差、思维能力迟钝的不利的特点，因此必然对家居环境会有特殊的要求。例如对温湿度环境、光环境、色彩、呼叫提示声、室内设施与家具的尺度、各种家居用品等都有特殊的要求。这些需要研究人员和企业产业界进行深入的调查研究，开发出能够满足这些特殊人群迫切需求的产品。

2.2 儿童与育儿家居环境

我国已经进入到多孩家庭时代。这类家庭必然要为婴幼儿和其他年龄段的儿童提供适合的父母育儿，或供多位不同年龄的儿童嬉戏、学习、睡眠的环境。因此在居室布局设计的时候，需要考虑父母卧室与儿童卧室的相对关系，并需要为儿童设计尺度和功能合适的家居设施与家具，例如为一位儿童单独使用，或为多位儿童共同使用的床铺、书桌、储物柜等家具。

2.3 健康舒适的睡眠环境

睡眠障碍已经成为目前人群亚健康问题的一大诱因。清华大学的研究发现，影响人们睡眠质量的环境因素按重要程度依次排序为：温度和噪声、湿度、光照、空气质量。众所周知睡眠需要安静的环境。由于人在睡眠中身体的代谢率下降，所以更倾向于较暖的环境，因此睡眠时需要盖被子。但人们经常会发现自己盖的被子跟室内的温湿度环境并不匹配，因此在睡眠中时会被热醒或者冷醒，或者在掀开被子嫌冷盖上被子嫌热的两难中彻夜辗转，严重影响睡眠质量。尽管现在大部分家庭都有空调供暖系统，但由于并不太清楚适合的室内设定温度与自己所盖的被子之间有什么样的关系，因此绝大部分人也很难预设自己睡着后的温度控制值。

很多人早晨是被闹钟叫醒的。唤醒阶段的体验对整个睡眠过程的质量也有严重的影响，甚至影响上午的精神状态。而配合适合的光线变化、环境音响、温度的变化对唤醒体验有着显著的改善作用。在这方面开展研究将会是很有意义的。

卧具的舒适性对睡眠质量是决定性的。枕头与床垫的触感、硬度甚至影响人体脊柱和肌肉群的健康。而被褥的重量与热阻则对睡眠者的近体热湿环境起着决定性的影响。人体睡眠时身体的不同部位对冷热有不同的需求。四肢的肢端，尤其是足部的温度与躯干的温度差别越小就越容易入眠。所以，理想中的床褥和卧具应该也是可以对人体各部位进行独立调温的。

2.4 农宅家居环境

农宅的建筑特点与居住者的需求与城镇住宅有着很大的差别。目前农宅存在的不利之处是围护结构热工性能差、外门外窗外墙过多、门窗的气密性差。所以导致农宅的室内热环境品质差，尤其是冬季室内过冷，采暖消耗的燃料多、费用高。

但与城镇建筑相比，农宅又有如下优势：一是容积率低，有大面积的屋面可以安装太阳能光伏板和太阳能热水器；二是农民保持了勤俭的生活习惯，用能密度低，有可能完全被可再生能源覆盖；三是有秸秆的生物质能源可用于作为炊事、采暖和生活热水的燃料。但是由于传统炉灶燃烧秸秆等生物质能源的效率低，未完全燃烧产生大量有害物质，导

致室内空气质量差，损害居民身体健康。目前已经技术将秸秆压成颗粒，并开发出高效的秸秆燃烧炉，因此充分利用生物质能有效地改善农宅居室环境品质、减轻农民的经济负担已经成为可能。

除了利用太阳能和生物质能源来供暖以外，还可以采用低温空气源热泵为北方农宅冬季供暖。由于农宅具有较大的空间可以安装蓄热水罐，所以还可以在夜间利用电价低谷时的低价电来制热，储存起来用于白天的供暖和生活热水。

因此，很有可能通过综合技术措施为农宅提供更好的室内环境品质的同时，又把农宅变成“零能耗”“零碳”建筑。当然，为了实现这个目标，首先要对农宅建筑进行节能改造，改善围护结构的热

工性能，减少能耗漏洞，才能够通过可再生能源的利用来实现农宅的碳中和。

3 结语

本文结合现有的国内外科研成果，对我国目前居住环境的社会需求进行了分析，提出了5个需要解决的基本技术问题，以及4个有较强需求的应用领域。希望相关的科研人员、工程技术人员以及产业界能够面向这些问题和应用领域进行联合科技攻关。这些工作还需要跨学科的合作，集成信息技术、材料科学、人工智能、生命科学、医疗卫生等领域的新成果，才能有效推进建筑应用领域的科技进步与产业的升级，以创新来求得更大的发展。

03 家居热环境营造 技术展望



曹 彬 Cao Bin

清华大学建筑学院建筑技术科学系，副教授、博士生导师，研究方向为建筑热环境与人体热舒适。入选教育部国家级人才奖励计划青年学者。担任国际室内空气学会热舒适分会秘书、中国建筑学会建筑物理分会理事、中国环境科学学会室内环境与健康分会青委会主任。作为主要完成人获得国家科技进步二等奖，并曾获得国际室内空气学会授予的Yaglou Award、美国暖通空调学会授予的Ralph G. Nevins Physiology and Human Environment Award。



张 楠 Zhang Nan

清华大学建筑学院建筑技术科学系，博士后、助理研究员，入选清华大学“水木学者”计划。主要从事睡眠环境与人体热舒适研究。



吴业宇 Wu Yeyu

清华大学建筑学院建筑技术科学系，博士研究生。

家居环境涵盖范围广泛,包括热环境、声环境、光环境、空气环境等。作为现代人活动的重要场所,住宅中多种因素共同决定了家居环境的质量,其中热环境对人的影响尤为显著^[1]。事实上,人类学习建造房屋的初衷之一,便是营造用于栖身的适宜热环境,以减缓自然界酷暑、严寒等天气的侵扰。而空调、采暖、通风等设备在住宅中的普及,使人们不再受制于自然界气候的影响,拥有了自主营造家居热环境的能力。

随着经济社会的发展和生活水平的提升,居民对于家居环境也有了更高的期待。智能家居概念的出现,为家居热环境的智能化、个性化创造了条件。与此同时,“低碳”与“健康”已成为建筑领域关注的目标,家居热环境营造的发展也应契合这一总体趋势。在这样的背景下,笔者认为家居热环境领域可以重点关注两方面问题:一是对人体热舒适需求的精准识别与个性化调节技术,二是人体在睡眠状态下的热需求规律及舒适性提升措施。

1 家居热环境需求识别与个性调节技术

目前,家居环境中的热环境调节手段以使用家用空调为主,给予了用户对室内热环境的控制权。然而在实际生活中,尽管使用了空调,用户满意度却并未得到实质性提升的现象经常发生,其主要原因在于用户对于自身的冷热需求和对空调的控制操作之间的关系不明确,从而盲目调节空调温度设定值,导致既不能实现热舒适,还可能带来不必要的能源消耗。近年来,基于热舒适研究领域经典的预测平均投票指标(predicted mean vote, PMV),部分家用空调产品推出了智能PMV模式,对室内热环境偏离热中性(PMV=0)的程度进行自动判断和调节。虽然PMV对热感觉的预测精度已被证明存在一定局限性^[2],且对于“热中性是否意味着舒适”也存在诸多讨论^[3-4],但PMV模式仍是家居热环境营造在创新道路上迈出的重要一步。伴随着物联网、人工智能的飞速进步,建筑环境营造技术逐步走向智能化、个性化已成必然趋势。

目前,与家居热环境相关的智能产品形态和工作模式大多仍处于“单品”阶段,例如分别通过房间温控器和可穿戴设备监测室内温湿度和人的生理参数,

然后人为从手机等终端读取数据信息。下一阶段的主要目标,应是打通数据壁垒,实现信息互通和自动化、智能化控制。根据已有研究,从设备与人的关系出发,大致可以将家居热环境智能化产品分为感知端(需求识别)和控制端(个体调节)两方面。

感知端的作用是通过传感器网络实现对人员实时冷热状态的识别。目前的热环境自控系统对于调控需求的判别依据,主要是由室内温湿度传感器等获得的热环境参数,这种方式基于统一的热环境标准,却忽视了室内人员的个体舒适性诉求。家居环境恰恰是高度个性化的空间,对家居热环境的营造应该重视用户的实际需求和个体差异,为其提供个体尺度的“精准热服务”,这就要对用户的实时冷热状态进行识别,在监测室内热环境参数的基础上,引入更能直观表征人体状态的参数,包括皮肤温度、心率、脑电波等。例如,清华大学团队^[5]利用红外测温的方式获得人体面部皮肤温度,分析了数据驱动算法在仅以皮肤温度作为输入参数时的个体热感觉预测性能,发现即使是基于群体数据,该方法依旧体现出不逊色于PMV模型的预测表现。南洋理工大学团队^[6-7]基于可穿戴传感设备分别开展了针对心率和脑电波的研究,证明了基于生理参数的机器学习模型在热舒适预测上的可行性。此外,采用摄像头对人员的动作、姿态进行采集和识别,进而判断是否存在热不适的方法也得到了研究者们的关注^[8],但其中涉及的隐私问题则需要进一步探讨。

控制端所涵盖的范围不仅包括传统的针对整体环境的空调设备,还包括个体舒适系统(personal comfort system, PCS)。传统的空调设备,通过空气对流或热辐射对人体进行间接调节,其提供的冷量或热量,绝大部分都消耗在空气或室内表面这些中间传热媒介上,而真正作用于人体的能量则占比很小,从满足人员舒适性需求这一视角来看,是能源消耗较大的方式。而PCS旨在为人员提供个体尺度的“精准热服务”,将冷量或热量直接提供给人体,从而可以放宽对背景环境的要求,并且当同一空间内有多人存在、空调设备无法满足需求差异的时候,可以通过PCS进行有针对性地个体调节。目前,PCS已被认为是降低空调能耗,同时提高人员舒适度的有效手段^[9]。

尽管PCS这一概念的提出时间较短,但它的雏形,尤其是个体采暖设备,在人类的室内活动历史

中早已可见。其中较为典型的形式包括我国湖南、安徽、江西等地，居民常使用的被称为“火桶”的传统坐具，以及迄今在日本家庭仍被普遍使用的局部采暖用具——暖桌（Kotatsu）。随着人类历史进入电气时代，电火桶和电暖桌也应运而生。近年来，清华大学团队^[9-10]研发了接触式冷热调节座椅，可以实现对人体与座椅不同接触部位的独立控制，提升人员的整体舒适性。而Kim等^[11]则根据人员对调温座椅的控制行为建立了个体舒适模型，为感知端和控制端的有机融合提出了新的方案。根据Hoyt等^[12]的研究结果，由于PCS的使用，放宽了背景空调温度的设定范围，这能够带来可观的节约能源效益。

PCS在家居环境中可以有丰富的呈现方式，既可以是单独的设备，也可以与桌椅、寝具等家具相结合。随着智能家居平台的建设完善和物联网的发展，PCS既可以与人员可穿戴设备进行信息连接，针对人体实时状态来营造最适宜的个性化环境，也可以与整体环境营造设备集成，以支持智能家居系统的能效优化运行，最终实现提升家居热环境满意度和节能减碳的双赢目标。

2 睡眠热环境需求及提升措施

睡眠占据了人类约三分之一的生命时长。对于白天在外工作的人来说，其在家居环境中最主要的活动内容便是睡眠。在居民对于家居环境质量的要求普遍提升的趋势下，应该加强对睡眠环境的关注。

睡眠质量与人体健康息息相关。研究表明，睡眠不足或者睡眠质量差会损害身体的多个重要系统，包括神经系统、心血管系统、内分泌系统、免疫系统和肌肉系统^[13-15]。根据世界睡眠协会的最新报告，当前人们的睡眠质量问题十分严峻，威胁着世界上45%人口的健康和生活质量^[16]。中国睡眠研究会2017年发布的《中国青年睡眠指数白皮书》^[17]显示，近一半的青年人群认为自己睡眠质量不佳。清华大学的调研结果表明，有31%的受访者近一个月的睡眠质量不佳^[18]。从线上消费数据来看，助眠家居产品的消费趋势逐年走高，睡眠质量已成为社会关注的热点话题^[19]。

正常的睡眠过程由非快速眼动期（NREM）和快速眼动期（REM）组成，非快速眼动期又可以分为浅睡期（N1，N2）和深睡期（N3，也称为慢波睡眠）

^[20]。睡眠过程中NREM和REM交替出现，交替一次为一个睡眠周期，成年人的夜间睡眠一般包含4~5个睡眠周期^[21]。很多学者研究发现，人体睡眠节律和体温节律是密切相关的。白天人体的核心温度和近端皮肤温度较高，而远端皮肤温度较低；夜间人体核心温度下降，近端皮肤温度也会下降，而手脚温度上升，近端和远端的皮肤温差减小。入睡往往发生在核心温度的下降期，觉醒（睡眠的结束）一般出现在体温节律的上升阶段。

从上世纪70年代起，就有学者从生理学领域开展了温度对人类睡眠影响的实验研究，发现偏离中性的冷/热环境暴露都会增加睡眠潜伏期，减少睡眠总时长以及深睡期和快速眼动期时长，增加觉醒时间和降低睡眠效率^[22-26]。同时根据人体核心温度、皮肤温度、出汗率、耗氧量、心率等各项生理参数变化，可以发现睡眠状态和清醒状态的热调节生理基础和热感觉评价都有着显著差异。相比清醒状态，人在睡眠时的代谢率比清醒静坐时下降约30%，心率下降约20%。睡眠状态的热调节功能也发生了改变，主要表现为在非快速眼动期和慢波睡眠期，出汗调节的阈值下降；在快速眼动期，人体的热调节功能受到抑制，体温更容易受外界环境干扰而产生变化，从而增加觉醒。在热感觉评价和行为调节方面，清醒状态下人的热感觉可以实时反馈给大脑，人可以主动地根据自己的热感觉进行服装调节或者开关窗、开关空调以保持自己的热舒适和健康。但是在睡眠状态下，人只有被冻醒或者热醒后才能感受到热感觉反馈，进而产生行为调节。即便是在半睡半醒的状态下调节被子的覆盖比例，此时的行为调节意味着睡眠已经受到了干扰，睡眠质量下降。因此，通过感知人体生理参数的变化调控卧室热环境对睡眠质量的提升具有重要意义。

除了热环境会影响睡眠质量外，光环境、声环境和空气品质也会对睡眠产生一定的影响。首先，光的非视觉效应会影响人体生物节律，白天增加自然光暴露，夜间减少强光暴露，有助于加强生物节律，改善睡眠质量^[27]。同时光敏细胞对不同波长光的敏感性不同，蓝光对褪黑素分泌也有显著的抑制作用，因此在入睡前应减少电子屏幕的使用。清华大学建筑声学实验室的研究表明背景噪声会干扰睡眠，背景噪声级越高，深度睡眠时长越短，32dBA是深度睡眠最佳背景

噪声级。上海交通大学团队通过实验研究发现, 较低的睡眠环境二氧化碳浓度有利于提高睡眠质量, 且对应着更好的醒后认知表现与更高的工作效率, 建议将卧室二氧化碳浓度控制在800ppm左右^[28]。

目前, 市场上可应用于改善家居睡眠环境的设备有空调、风扇、电热毯、助眠灯、香薰等。空调的睡眠模式主要是从节能和降噪的角度设计的, 制冷工况下温度随时间阶梯式上升, 制热工况下温度随时间阶梯式下降, 一段时间后会比设定值上升或下降2~3℃, 之后保持稳定不变, 在实际使用中, 常有夏季半夜被热醒的情况发生。电热毯是夏热冬冷地区冬季常用的寝具辅助加热设备, 根据已有调研结果, 其舒适性和安全性都有待改善和提升。助眠灯和香薰等产品的科学依据还有待探究和验证, 其改善睡眠质量的效果也因人而异。现有产品的功能均具有一定的局限性, 仅考虑单一环境因素的影响, 并且和用户之间的互动和反馈调节十分有限。未来, 营造适宜睡眠的家居环境可以充分考虑热、光、声和空气品质的影响, 考虑人们睡眠的特性, 结合目前发展较为成熟的智能家居产品, 采用多末端配合的智能控制模式, 对睡眠环境进行“感、知、控”一体的动态调控。其中, “感”主要涉及到通过简单的家居数据监测设备进行多维度的生理参数及环境参数的采集, “知”基于采集的数据对人体的状态进行评估, 包括对清醒(活动状态)和睡眠(睡眠分期)的判断, “控”则以人体最优睡眠质量为控制目标, 在感知过程得到的评估结果的基础上对末端设备进行调控, 可控制的设备包括但不限于空调、风扇、灯、窗户、窗帘等, 从而实现“感、知、控”一体化的睡眠环境营造。同时可以在后台程序中融入机器学习的控制算法, 在获得一定用户使用数据的基础上进行智能动态控制, 进一步改善用户睡眠质量, 提升家居环境的舒适和健康性能。

3 总结

随着“碳达峰、碳中和”和“健康中国”等国家战略的大力实施, 住宅作为最主要的建筑类型之一和人们重要的生活场所, 家居环境营造的技术革新势在必行。本文针对家居热环境营造的创新方向进行了展望, 一方面是研发对人体热舒适需求的精准识别与个性化调节技术, 另一方面是对人体在睡眠状态下的热

需求规律及舒适性提升措施进行研发。智能家居、物联网、可穿戴设备等技术领域的快速发展, 将为上述家居热环境营造的两个创新方向提供有力支持。

参考文献

- [1] PARK J Y, NAGY Z. Comprehensive analysis of the relationship between thermal comfort and building control research - A data-driven literature review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 2664-2679.
- [2] CHEUNG T, SCHIAVON S, PARKINSON T, et al. Analysis of the accuracy on PMV-PPD model using the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II[J/OL]. *Building and Environment*, 2019, 153: 205-217. DOI:10.1016/j.buildenv.2019.01.055.
- [3] HUMPHREYS M A, HANCOCK M. Do people like to feel “neutral”? Exploring the variation of the desired thermal sensation on the ASHRAE scale[J/OL]. *Energy and Buildings*, 2007, 39(7): 867-874. DOI:10.1016/j.enbuild.2007.02.014.
- [4] 朱颖心. 热舒适的“度”, 多少算合适? [J]. *世界建筑*, 2015, 7: 35-37.
- [5] WU Y, CAO B. Recognition and prediction of individual thermal comfort requirement based on local skin temperature[J/OL]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 49. DOI:10.1016/j.jobe.2022.104025.
- [6] SHAN X, YANG E H. Supervised machine learning of thermal comfort under different indoor temperatures using EEG measurements[J/OL]. *Energy and Buildings*, 2020, 225. DOI:10.1016/j.enbuild.2020.110305.
- [7] CHAUDHURI T, SOH Y C, LI H, et al. Machine learning driven personal comfort prediction by wearable sensing of pulse rate and skin temperature[J/OL]. *Building and Environment*, 2020, 170. DOI:10.1016/j.buildenv.2019.106615.
- [8] RAWAL R, SCHWEIKER M, KAZANCI O B, et al. Personal comfort systems: a review on comfort, energy, and economics[J]. *Energy and Buildings*, 2020, 214: 109858.
- [9] YANG H, DENG Y, CAO B, et al. Study on the local and overall thermal perceptions under nonuniform thermal exposure using a cooling chair[J/OL]. *Building and Environment*, 2020, 176. DOI:10.1016/j.buildenv.2020.106864.
- [10] YANG H, CAO B, ZHU Y. Study on the effects of chair heating in cold indoor environments from the perspective of local thermal sensation[J/OL]. *Energy and Buildings*, 2018, 180: 16-28. DOI:10.1016/j.enbuild.2018.09.003.
- [11] KIM J, ZHOU Y, SCHIAVON S, et al. Personal comfort models: Predicting individuals' thermal preference

- using occupant heating and cooling behavior and machine learning[J/OL]. *Building and Environment*, 2018, 129: 96-106. DOI:10.1016/j.buildenv. 2017. 12. 011.
- [12] HOYT T, ARENS E, ZHANG H. Extending air temperature setpoints: Simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings[J/OL]. *Building and Environment*, 2015, 88: 89-96. DOI:10.1016/j.buildenv. 2014. 09. 010.
- [13] GANGWISCH J E, MALASPINA D, BODEN-ALBALA B, et al. Inadequate sleep as a risk factor for obesity: analyses of the NHANES I[J]. *Sleep*, 2005, 28(10): 1289-1296.
- [14] MILEWSKI M D, SKAGGS D L, BISHOP G A, et al. Chronic lack of sleep is associated with increased sports injuries in adolescent athletes[J]. *Journal of Pediatric Orthopedics*, 2014, 34(2): 129-133.
- [15] RUDNICKA A R, NIGHTINGALE C M, DONIN A S, et al. Sleep duration and risk of type 2 diabetes[J]. *Pediatrics*, 2017, 140(3): e20170338.
- [16] World Sleep Day Toolkit [N/OL]. [2020-02-10]. <http://worldsleepday.org/toolkit>
- [17] 中国睡眠研究会, 慕思寝具. 中国青年睡眠指数白皮书, 2017.
- [18] ZHANG Nan, CAO Bin, ZHU Yingxin. Indoor environment and sleep quality: a research based on online survey and field study[J]. *Building and Environment*, 2018, 137: 198-207.
- [19] 中国睡眠研究会, 慕思寝具. 中国互联网网民睡眠指数白皮书, 2018.
- [20] KRYGER M, ROTH T, DEMENT B. Principles and practice of sleep medicine[M]. 2nd ed. Philadelphia: Elsevier, 2017.
- [21] HIRSHKOWITZ M, SHARAFKHANEH A. Normal sleep-recording and scoring techniques[M]. *Handbook of Clinical Neurology*. Amsterdam: Elsevier, 2011: 29-43.
- [22] HASKELL E H, PALCA J W, WALKER J M, et al. Metabolism and thermoregulation during stages of sleep in humans exposed to heat and cold[J]. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 1981, 51(4): 948-954.
- [23] CANDAS V, LIBERT J P, MUZET A. Heating and cooling stimulations during SWS and REM sleep in man[J]. *Journal of Thermal Biology*, 1982, 7(3): 155-158.
- [24] SAGOT J C, AMOROS C, CANDAS V, et al. Sweating responses and body temperatures during nocturnal sleep in humans[J]. *The American Journal of Physiology*, 1987, 252(3 Pt 2): R462-R470.
- [25] OKAMOTO-MIZUNO K, MIZUNO K, MICHIE S, et al. Effects of humid heat exposure on human sleep stages and body temperature[J]. *Sleep*, 1999, 22(6): 767-773.
- [26] LAN Li, PAN Li, LIAN Zhiwei, et al. Experimental study on thermal comfort of sleeping people at different air temperatures[J]. *Building and Environment*, 2014, 73: 24-31.
- [27] XIAO Hui, CAI Huiling, LI Xuefeng. Non-visual effects of indoor light environment on humans: a review[J]. *Physiology & Behavior*, 2021, 228: 113195.
- [28] XU Xinbo, LIAN Zhiwei, SHEN Jingyun, et al. Experimental study on sleep quality affected by carbon dioxide concentration[J]. *Indoor Air*, 2021, 31(2): 440-453.

04 健康建筑、健康呼吸： 室内空气质量设计评价



张寅平 Zhang Yinping

清华大学建筑学院建筑技术科学系教授，主要从事建筑空气环境研究，现任室内空气质量北京市重点实验室主任，清华大学建筑环境检测中心主任，国际室内空气科学院副主席，中国环境学会室内环境与健康分会主任委员和Energy and Buildings副主编。



路 宾 Lu Bin

中国建筑科学研究院建筑环境与能源研究院副院长，国家空调设备质量监督检验中心主任，教授级高级工程师，获国务院工程技术政府特殊津贴。主要从事工程应用领域暖通空调专业、建筑节能技术和空气净化技术的研发。多次参加国家科技攻关项目及国家科技支撑计划，主编国家和行业标准10余项，出版专著9部，发表论文40余篇，获省部级科技进步奖10项。



莫金汉 Mo Jinhan

男，博士，清华大学建筑学院建筑技术科学系长聘副教授，建筑环境与设备研究所副所长，清华大学建筑环境检测中心空气室主任。主要研究方向是建筑室内空气组分的界面传递与分离。



孟 冲 Meng Chong

博士，教授级高工，中国建筑科学研究院有限公司健康建筑研究所所长、中国城市科学研究会秘书长助理等。主要从事建筑环境与节能、绿色建筑、健康建筑等方面的科研开发、标准编制及技术管理和咨询工作。

健康建筑是我国建筑领域发展的新方向，是“健康中国”战略的重要部分。中国建筑学会2017年1月颁布实施了《健康建筑评价标准》（T/ASC 02—2016），它是在学习和借鉴美国等发达国家的经验（如美国的WELL标准）基础上基于我国国情和大量实践及相关研究的结晶之作，可作为中国健康建筑理念和实践的出发点里程碑。该标准通过多学科交叉、多行业合作，对建筑的空气、水、舒适、健身、人文、服务、创新和提高进行评价，包括控制项和打分项，评出建筑的健康级别，从高到低依次为：三星、二星、一星、不达标。

空气部分的评分在总分（100分）中占了近25分，室内空气质量如达不到控制项要求，就不能获评“健康建筑”。该标准对我国建筑室内空气质量提升起到了积极促进作用，并将有力推动相关研究和行业的发展。在该标准编制过程中，我们也深感由于相关行业的条块分割严重，导致不同行业相关标准和技术间不匹配从而难以贯通实施，严重阻碍了健康建筑营造、评价和运维。为此，我们围绕其中的一些关键问题进行破解，下面以建筑室内空气质量设计评价为例，介绍一下我们的工作。

1 源头控制最重要

室内材料和物品释放的甲醛、苯等挥发性有机化合物（volatile organic compounds, VOCs）污染、大气雾霾导致的室内PM2.5污染，是引发肺癌等疾病以及造成我国民众早死的最主要原因之一。传统建筑工程室内空气质量测评控技术和标准体系着重于有污染“事后控”，缺乏“事前防”环节和技术手段，难以防患于未然。克服传统技术和标准体系的不足、构建以“事前防”为主、“事后控”为辅的室内空气质量测评控技术和标准体系，是破解上述问题的关键。

为何建筑室内空气污染难以防患于未然呢？根本原因是我国以往的室内空气质量测评控技术和标准体系存在缺陷：1）缺乏设计评价环节；2）防控链上的建材、家具、通风净化设备和建筑工程（包含建筑装饰装修）各管自己行业那一段，彼此采用的技术参数和标准不匹配，因此位于整个防控链下游的建筑工程行业缺乏设计选材或设备选型必备的

产品性能参数，无法对室内空气质量进行设计评价或称预评价，实现室内空气污染的“事前防”，更谈不上对建筑室内空气质量进行“运行优化控制与评价”了（见图1）。

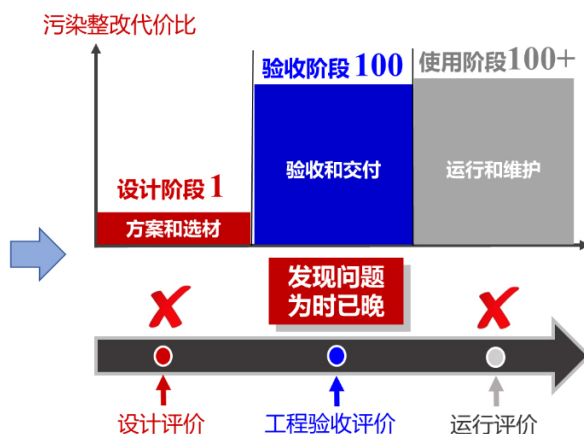


图1 以往建筑工程室内空气质量控制体系缺陷

以年产值几千亿元的人造板行业为例，多项人造板污染物限量国家或行业以往的标准是以材料中甲醛含量作为污染度判据，无法用于建筑工程室内空气质量设计与评价。研究发现，产品的VOCs“含量”和“释放量”“释放速率”间并没有必然关系，常见室温条件下甲醛可释放量远小于其含量。室内空气温湿度、材料的负释量对材料污染物释放速率影响显著，标准测试条件下获得的释放速率无法外推到实际使用条件。会出现即使所有室内材料和物品均满足国家和行业VOCs限量标准，但室内空气污染物浓度仍会超标。

建筑净化设备的选择也面临困难。以往空气净化器或新风机的净化性能核心指标只有洁净空气量（CADR）或过滤效率，缺乏净化寿命指标。因此在建筑使用期，净化设备性能与能耗、净化材料更换周期和运维成本均无法估量。

为了能快速准确测定用于建筑室内空气质量评价的材料和家具VOCs释放特性参数，我们发明了“逐时浓度测定法”。它不同于美国和欧洲多国标准采用的稳定状态通风测试方法，而是关注密闭条件下VOCs浓度的瞬时浓度变化。这个方法一方面克服了欧美方法不能测定释放机理参数的不足，另一方面将释放率的测试时间从7~28天降低至3天以下，

测试成本也大幅降低。此外，我们还研发了用于测试设备校准、方法准确度校核的“VOCs标准释放源”，为准确测定VOCs释放机理参数提供了保障。

基于室内空气质量设计评价必备的材料“释放机理参数”，我们使建筑工程的源头测评成为了可能，在测试累积材料参数数据库的同时，将方法与设备逐步向行业推行应用。

2 高效净化不可或缺

源头控制，我们可尽可能保证室内VOCs浓度达标。然而，当室内环境无法避免使用过量材料和物品来实现用户所要的功能时，就需要通过净化手段来控制室内VOCs污染。此外，空气净化（包括新风过滤）也是解决大气PM2.5等室外污染进入室内危害健康的最重要手段。以往国内外空气净化器标准采用洁净空气量（CADR）或净化去除率来评价设备的净化能力，缺失了评价其净化寿命的参数，难以评价设备长时间运行后的净化效果。

我们提出了反映净化材料去除污染物寿命的指标——累积净化量CCM，发明了其测试方法与设备，被我国《空气净化器》国家标准采用。

3 综合防控是关键

针对以往对建筑工程室内空气质量控制体系中缺乏设计评价环节的不足，我们提出在《健康建筑评价标准》中增加设计评价环境，并研发了关键技术，主要为“室内空气质量预评价模型及软件”。基于材料、家具、净化设备机理参数，项目团队建立了室内空气质量设计评价软件、数据库和模拟平台，可预测建筑在实际使用条件下多种典型污染物浓度，判断建材、家具、净化设备是否合适，为建筑工程装饰装修选材、设备选型、运行通风策略等提供方案建议，被《健康建筑评价标准》（T/ASC 02）、《公共建筑室内空气质量控制设计标准》（JGJ/T 461—2019）采用，可实现建筑工程室内空气污染的“事前防”。

4 技术创新要应用推广

在家具建材方面，我国新修、制订的《室内装饰装修材料人造板及其制品中甲醛释放限量》（GB 18580—2017）等相关技术标准中，已摒弃家具建材甲醛“含量”的萃取法测定，转而采用环境舱测定“释放率”。项目组提出的释放机理参数检测方法也正在建材和家具行业应用与推广，被国家及行业标准采用，研发的检测方法及设备产品，已被30余家质检机构采用，用于家具建材产品污染物释放特性检测。

在净化设备方面，累积净化量CCM及其测量方法已成为了我国《空气净化器》国家标准的必测指标和方法。项目组研发的净化性能瓶颈识别和调控提升技术及相关检测设备，也被直接应用于多国（中、美、日、韩、荷）53家检测机构和空气净化器企业，项目组研发的净化性能提升材料与结构，被用于三五二公司的空气净化器新产品的性能提升。

在建筑工程方面，在《健康建筑评价标准》《公共建筑室内空气质量控制设计标准》等标准将建筑工程“设计评价”纳入考评环节，助力了我国健康建筑、绿色建筑建设和推广，为民众的呼吸健康提供了科技支撑。2017年以来，采用《健康建筑评价标准》获评健康建筑的建筑面积超过3000万平方米，遍及我国20个省/直辖市。

项目成果还被应用于我国舰船和载人空间站等特殊室内空间的空气质量改善。例如，基于项目成果，我们与中国航天员科研训练中心合作开发了舱室VOCs净化技术，应用于我国载人空间站净化装置；采用逐时浓度法，识别了舰船内VOCs种类和释放强度。未来，我们将继续深入开展室内空气质量测评研究，让室内空气从“防止生病”向“提升健康”迈进，让大家可以真正放心、自由地“健康呼吸”！

05 浅谈建筑室内空气污染的症结与控制



赵彬 Zhao Bin

清华大学建筑学院建筑技术科学系长聘教授，博士生导师。研究方向为建筑室内空气污染动力学、空气污染人群暴露和健康效应评估、通风与洁净技术。所提出的室内气溶胶颗粒动力学模型被国际首个商用计算流体力学软件PHOENICS正式采用，已被应用于多个洁净室设计和受限空间传染病气溶胶传播风险评估；开发我国室内空气污染源强数据库，已应用于各类室内环境设计。迄今以第一或通讯作者发表SCI期刊论文110余篇，被引7300余次，H-index为47（Google Scholar）。连续多年入选斯坦福大学全球Top2科学家榜单、Elsevier中国高被引学者。



陈忱 Chen Chen

博士，分别于2016年、2021年在清华大学建筑学院建筑技术科学系获工学学士和博士学位，主要研究方向为室内空气质量和颗粒物污染控制。以第一作者发表9篇SCI论文和1项软件著作权，期刊累计影响因子70，并以第二作者发表8篇SCI论文，获钱易环境奖、夏安世优秀学生奖、清华大学优秀博士毕业生及优秀博士学位论文。

2011年以来,在我国大范围频发的雾霾天气严重影响人们的日常生活和身体健康,成为国家关注、民众警惕的“心肺之患”。雾霾天气是对大气中各种悬浮颗粒物含量超标的笼统表述,其中PM2.5(细颗粒物,空气动力学直径不超过 $2.5\mu\text{m}$ 的颗粒物)被认为是雾霾的主要组成部分。近年来,随着《大气污染防治行动计划》的执行,室外空气质量已得到极大的改善,以北京为例,PM2.5浓度从2013年的 $89\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至2021年的 $33\mu\text{g}/\text{m}^3$,达到我国二级标准(年平均浓度 $\leq 35\mu\text{g}/\text{m}^3$)。然而,这与世界卫生组织新近发布的全球空气质量准则(AGI,年平均浓度 $\leq 5\mu\text{g}/\text{m}^3$)仍有较大差距。

纳入环境空气质量评估的污染物指标还有PM10(可吸入颗粒物,空气动力学直径不超过 $10\mu\text{m}$ 的颗粒物)、 SO_2 (二氧化硫)、 NO_2 (二氧化氮)、 O_3 (臭氧)、CO(一氧化碳)。近年来,比PM2.5、PM10更为细小的UFP(超细颗粒物,空气动力学直径不超过 $0.1\mu\text{m}$ 的颗粒物)也因其健康危害引起了国内外学者的关注。上述污染物均会伴随着建筑通风

进入到室内环境中,对人们的健康造成危害。

除了建筑外部空气质量污染引起的“外患”,另一方面,室内空气污染还面临着严峻的“内忧”。室内装饰装修材料及家具会散发出的VOC(挥发性有机化合物,包括甲醛(HCHO)和苯系物等)、SVOC(半挥发性有机物,包括邻苯二甲酸酯、多环芳烃等)会影响人体心血管系统、呼吸系统和神经系统。多种VOC和SVOC被国际癌症研究署认为有致癌效应。2018年多位租客在某些甲醛超标房居住后发现健康问题,使得室内污染再次引起社会各界的关注和警惕。

综合相关国际组织、各国制定的空气污染物标准或指南可以发现,现阶段我国室内空气面临较为严峻的“外患内忧”,提出的各项标准切合当前实际情况但仍与国际上有一定差距,我国室内空气污染的治理和控制仍任重而道远。下面将就上述典型污染物在我国建筑室内的污染来源与控制方法,从“外患”与“内忧”两个角度展开论述。

表1 有关空气质量标准或指南

污染物	中国 ^a	美国 ^b	欧盟 ^c	世界卫生组织 ^d
PM2.5	室外: 一级: 年平均 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24 h平均 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$; 二级: 年平均 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24 h平均 $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。	室外: 一级: 年平均 $12\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24 h平均 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$; 二级: 年平均 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24 h平均 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。	室外: 年平均 $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。	室外&室内: 年平均 $5\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24 h平均 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。
PM10	室外: 一级: 年平均 $40\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24 h平均 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$; 二级: 年平均 $70\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24 h平均 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 室内: 24 h平均 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。	室外: 一级&二级: 24 h平均 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。	室外: 年平均 $40\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24 h平均 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。	室外&室内: 年平均 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24 h平均 $45\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。
SO_2	室外: 一级: 年平均 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24 h平均 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1 h平均 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$; 二级: 年平均 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24 h平均 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1 h平均 $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 室内: 1 h平均 $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。	室外: 一级: 1 h平均 75ppb ; 二级: 3 h平均 0.5ppm 。	室外: 24 h平均 $125\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1 h平均 $350\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。	室外&室内: 24 h平均 $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。
NO_2	室外: 一级&二级: 年平均 $40\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24 h平均 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1 h平均 $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 室内: 1 h平均 $240\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。	室外: 一级: 年平均 53ppb , 1 h平均 100ppb ; 二级: 年平均 53ppb 。	室外: 年平均 $40\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1 h平均 $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。	室外&室内: 年平均 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24 h平均 $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。
CO	室外: 一级&二级: 24 h平均 $4\text{mg}/\text{m}^3$, 1 h平均 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 。 室内: 1 h平均 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 。	室外: 一级: 8 h平均 9ppm , 1 h平均 35ppm 。	室外: 日最大8 h平均 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 。	室外&室内: 24 h平均 $4\text{mg}/\text{m}^3$ 。

O ₃	室外：一级：日最大8 h平均100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，1 h平均160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；二级：日最大8 h平均160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，1 h平均200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 室内：1 h平均160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。	室外：一级&二级：日最大8 h平均0.070 ppm。	室外：日最大8 h平均120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。	室外&室内：暖季峰值(6个月)60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，日最大8 h平均100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。
HCHO	室内：1 h平均100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。	室内(加州)：年平均9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，8 h平均9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，1 h平均55 mg/m^3 。		

^a 室外：《GB 3095—2012 环境空气质量标准》，室内：《GB/T 18883—2002 室内空气质量标准》；

^b 室外：United States Environmental Protection Agency. National Ambient Air Quality Standards, 2015，室内(加州)：The California Environmental Protection Agency's Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA). OEHHA Acute, 8-hour and Chronic Reference Exposure Level (REL), 2019；

^c 室外：Air Quality Standards, 2019；

^d 室外&室外：WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization: Geneva, 2021。

1 污染来源

1.1 外患

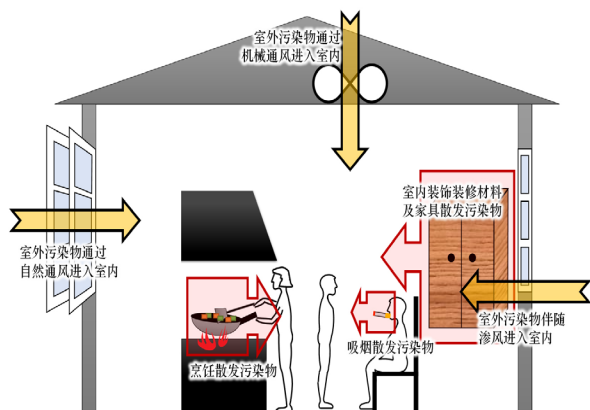


图1 室内空气污染的来源

建筑三种常见的通风或换气形式(自然通风、渗风、机械通风)都会使得室外污染物进入室内环境，形成人员对空气污染物的暴露。

自然通风由风压或者热压驱动，室外污染物会通过门窗进入室内环境，通常认为由自然通风引入的污染物浓度约等于室外浓度。渗风是无组织的室外新风经过建筑围护结构的缝隙进入室内，室外污染物在缝隙内有所沉积而被去除，但仍有一定比例的污染物能够进入到室内环境，通常称这一比例为穿透系数，典型室外污染物PM_{2.5}、PM₁₀、UFP、O₃、NO₂、SO₂的穿透系数分别约为0.95、0.55、0.61、1、1、1。以我国住宅为例，若综合考虑人

员开窗情境，上述室外污染物进入室内后，经过沉积至室内各表面的损失，仍有较高比例的室外污染物悬浮于室内空气中，这一比例为渗透系数，PM_{2.5}、PM₁₀、UFP、O₃、NO₂、SO₂的渗透系数分别约为0.68、0.42、0.66、0.34、0.50、0.40。即以PM_{2.5}为例，95%（渗风情况）至100%（自然通风情况）的室外PM_{2.5}能够经过围护结构进入室内，部分沉积至室内各表面后，仍有68%源于室外的PM_{2.5}会悬浮于室内空气中，危害人员的健康，换言之，建筑围护结构并不似想象中的铜墙铁壁，在引进新风的同时，难以将室外污染物隔绝在外。

那么，将通风交给机械通风系统，在新风进入室内前就进行过滤，能解决这一问题吗？难。机械通风系统若包含室外新风管道，室外新风中的污染物的确会在过滤后，仅有较少的、剩余的污染物会进入到室内。然而，机械新风系统易受到风量、正压难以维持、安装口不严密等复杂工程因素影响，进入室内的比例未必如预期的低。对市售新风系统的调研结果表明，绝大多数装有机机械新风系统的家庭，新风换气次数不足1 h⁻¹，多为0.5 h⁻¹，有限的新风量是无法维持室内微正压的，因此，运行期间仍存在室外污染物随渗风进入室内的过程，渗风换气次数约为0.2 h⁻¹，也就是进入室内的新风中约有17%~28%的比例无法经过机械新风过滤器处理。家用新风系统内通常采用粗中效过滤器，过滤效率有限，近年来出现较多采用颗粒物去除效率90%以上的

高效过滤器，若假设过滤效率高达95%，考虑仍存在渗风的前提下，约有20%~30%的室外颗粒物能够进入室内，与真正的过滤效率95%存在着不小的差距。

1.2 内忧

部分学者研发了多种快速、准确测量VOC、SVOC的测试方法，例如，用于快速测定家具VOCs释放速率的密闭舱线性段法，与现行采用大型直流实验舱的GB/T 35607—2017方法相比，可将20 h的测试时长缩短至2 h；使用固相微萃取的M-history法克服了传统SVOC采样方法需要抽气且误差大的难题，测试时长比原有方法缩短了20倍以上（≤8 h）。

学者们还提出了一种适用于模拟干材料在实际建筑中受温湿度综合影响时的散发模型和数值处理方法，并在实际建筑中进行了长达20000 h（2年以上）的实测，对模型进行了验证，并测试得出多种干材料、湿材料散发VOC的源强；有学者对我国8个城市上千个住宅的TVOC浓度进行实测。亦有部分学者聚焦于SVOC，对我国多种常见平板材料散发邻苯二甲酸酯（PAE）的特性进行实测，或对室内积尘相、颗粒相的SVOC含量实测。以上实测结果表明，我国住宅室内TVOC浓度在104~1151 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，约有20%的住宅中的TVOC浓度不满足我国国家标准600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的限制。有学者综述SVOC实测数据，发现B(a)P（苯并[a]芘）这种SVOC的气相浓度平均约为4 ng/m^3 、颗粒相浓度平均约为7 ng/m^3 ，大幅超出我国国家标准。

我国二手烟导致的污染严峻，中国烟民数量占世界总数的30%，且中国是世界上最大的香烟生产国家和香烟消费国家。虽然《公共场所控制吸烟条例》自2014年起在多个城市严格执行，但“禁烟令”无法解决住宅等私人空间中的二手烟问题，我国有60%~70%的非吸烟者在家庭面临二手烟问题。通过建立室内源散发污染物的源强测试方法，可综合考虑通风和颗粒物动力学，并基于此方法，选定我国市面上最畅销7种香烟，测定得出人员吸烟散发PM_{2.5}、UFP的源强分别为2.25 mg/min 、 2.51×10^{12} 个/min，吸一支烟共散发高达17.63 mg 的PM_{2.5}和 1.98×10^{13} 个UFP，从而在短时间内使得室内PM_{2.5}和UFP浓度急剧上升，PM_{2.5}浓度水平能远超WHO的室外准则值约300倍。

民以食为天，烹饪不可避免地成为我国住宅内另一主要污染源。烹饪时产生的污染物来源包括油烟和燃料燃烧。对于油烟，中式烹饪翻炒为主的方式使得其散发的油烟相较于西式烹饪更多，在食材和油被高温处理的过程中，有机成分会热分解成颗粒物和有害气体，颗粒物上还附着大量有害成分，例如多环芳烃、有致癌效应的重金属。25种典型中式菜肴烹饪过程的测定结果表明，得出中式烹饪散发PM_{2.5}、UFP、HCHO、TVOC的源强分别高达2.06 mg/min 、 9.10×10^{13} 个/min、1.27 mg/min 、1.35 mg/min 。通过正交实验分析各类影响因素，我们发现炒和煎的方式在相同时间内散发的PM_{2.5}质量、UFP数量、HCHO质量、TVOC质量、PM_{2.5}上的PAH质量分别是蒸和煮的40倍、8倍、3.5倍、8倍、2.5倍以上，且分量越大、散发的PM_{2.5}越少，五人份菜肴的烹饪过程比一人份散发的PM_{2.5}少80%以上。油温超出油的烟点后，散发的PM_{2.5}会增加300多倍，当油温高于烟点时，使用橄榄油会散发较多PM_{2.5}，家庭烹饪时油温一般低于烟点，而低于烟点时，油的种类对污染物散发没有显著影响。通过较大规模调研中国人的烹饪习惯，结合室内外活动、通风等重要参数，基于质量守恒原理，可以建立空气污染物暴露分析模型对室内和室外来源PM_{2.5}暴露分别进行模拟，结果表明，烹饪源贡献了我国城市居民PM_{2.5}暴露的40%。

对于燃料燃烧，清洁燃料的燃烧排放的污染物远低于固态燃料。我国农村长期使用低效传统用能设备燃烧煤炭、生物质等固体燃料进行炊事和采暖活动，学者们对此进行了详尽调研，并发现冬季清洁取暖行动使得清洁能源的占比从20%增至74%，生活源对室外PM_{2.5}贡献从12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，对室内PM_{2.5}贡献从209 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，减少了人群60%的暴露。而我国农村地区生物质资源丰富，大部分会通过露天燃烧和还田的方式进行消纳，露天燃烧生物质不仅浪费资源，还会产生大量空气污染物。对此，有学者们致力于农村地区生物质的清洁利用，开发生物质清洁炊事炉替代传统柴灶，使得厨房CO瞬时浓度峰值降低83%，24 h平均浓度降低82%，PM_{2.5}瞬时浓度峰值降低40%，24 h平均浓度降低80%，全年CO、NO_x和PM_{2.5}的减排率分别

为65%、40%和86%。使用生物质清洁采暖炉替代传统燃煤后，每季度CO、NO_x和PM2.5减排率分别为94%~99%、0~76%和68%~98%，CO₂减排率为100%。而对于城市地区，往往使用天然气等清洁燃料，但天然气的燃烧过程依然会散发NO₂，其产生NO₂的速率高达4.98~7.03 μg/kJ。对室内和室外来源NO₂暴露的模拟分析表明，发现使用天然气作为能源的烹饪过程是城市住宅室内最重要的NO₂来源，我国城市居民吸入的空气中平均有10.8 μg/m³的NO₂是在烹饪过程中产生的，大约为吸入NO₂总量的三分之一。

目前，清华大学开发的“室内空气污染源强数据库软件”，可快捷查询涵盖人员活动、室内装饰装修、通风所对应的多种污染物（PM2.5、PM10、UFP、O₃、VOC、SVOC）源强数据；以及“室内污染物（SVOCs/PM）浓度/暴露模拟计算软件”，可预测PM2.5、PM10、SVOC的浓度和暴露水平。清华大学、深圳建科院联合研究开发了“IndoorPACT（室内装饰装修污染预测与控制工具）”，可对建筑VOC污染进行预评估。

2 控制方法

室外雾霾严重时，常有市民戏谑自己为“人肉除霾机”。那么，以北京市为例，其多达两千万的人口对雾霾的缓解有作用吗？北京市面积约16410平方公里，对流层高度约11公里，对于这 $1.8 \times 10^{14} \text{ m}^3$ 的空间，“人肉除霾机”负责的人均空间 $8.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。人在休息或坐的时候呼吸量约为6 L/min (0.36 m³/h)，即使在极重体力活动时，呼吸量约为55 L/min (3.3 m³/h)，这与市面上净化器300~400 m³/h的CADR值(洁净空气量；空气净化器提供洁净空气的额定速率)相差甚远，净化器对应的房间体积约为60~130 m³，远小于“人肉除霾机”负责的空间。可见，“人肉除霾机”对室外雾霾几乎没有缓解作用。

2.1 外患与内忧的平衡：机械通风与自然通风结合净化器的比较

对于从室外源源不断进入室内的污染物，我们应如何使用前文提及的机械通风系统和空气净化器呢？首先回归到引进室外新风的需求上，新风的引进会带来室外污染物，但新风量是与人的健康、舒

适和工作效率息息相关的，也能够稀释前文阐述的建材等室内源散发的污染物，通常采用CO₂作为室内通风情况的标志物。因此，既要引进足够的新风，又要尽可能地处理新风中的污染物。

以住宅为例，对比使用机械通风系统和使用净化器结合自然通风两种方式，发现自然通风结合净化器的方式能更好地控制室内PM2.5和SVOC，其中，对于两种具有致癌风险的SVOC——BaPeq（等效苯并芘）和DEHP（邻苯二甲酸二（2-乙基）己酯），使用机械通风系统由于长期平均换气量较小，非但未能有效降低BaPeq相关的癌症风险，甚至增大了与DEHP相关的癌症风险。但当室外空气长时间不宜开窗时，这一方式会导致室内CO₂浓度较高，而机械通风系统可持续供应小风量新风，使得室内CO₂浓度长时间内较稳定。对于两个系统的能耗而言，自然通风结合净化器的方式全年运行能耗远低于机械新风系统，更加节能。净化器全年积尘量也远低于机械新风系统，滤芯更换频率较低，所对应的维护成本较低。若不及时维护、更换滤芯，机械新风系统风道的积尘有可能带来严重的二次污染问题。有基于模拟的研究表明，仅1.11 g/m³的风道积灰即能与一次半小时的烹饪活动造成的影响相近，且由风道再悬浮造成的颗粒物暴露中还有非常多的微生物，危害更大。另一方面，正如前文所阐述的，机械新风系统的控制效果易受到风量、正压难以维持、安装口不严密等复杂因素影响，安装施工要求较为严格。综上所述，对于住宅建筑，相比于机械通风系统，自然通风结合净化器的方式是营造室内空气环境更为节能、有效的选择。

2.2 净化器：控制效果与费效比较

我国市面上过滤器去除颗粒物的效率测量结果表明，F级别和HEPA级别对PM2.5的去除效率分别约为42%、89%，对PM10分别约为50%、90%，对UFP分别约为77%、99%。机械通风系统中常选用F级别，而净化器中往往选用HEPA级别。国内外多个研究团队致力于研发高效低阻的过滤材料，例如，具有静电响应的低阻滤材、金属有机骨架配合物（MOF）基滤膜。当滤材面速为0.054 m/s时，HEPA滤材和MOF滤材去除UFP的效率均在98%以上，但MOF滤材的压阻可低至59 Pa，远低于300 Pa的HEPA

滤材压阻。新材料的开发有望进一步降低净化所需的能耗,提供高效节能的控制选择。

基于净化器对颗粒物高效去除的效果,我们将使用净化器所需的成本与减少人群PM_{2.5}暴露带来的健康收益进行对比,净化器的CADR (m³/h) 需是房间体积 (m³) 的3~5倍以上。我们在全局层面设定室内PM_{2.5}控制目标分别为35、25、15和10 μg/m³这几种情况下,降至35 μg/m³或25 μg/m³均是减少人群PM_{2.5}暴露的经济且有效的策略。若目标为25 μg/m³,初投资、电耗、滤材更换的成本是1750亿元,将暴露减少量对应的疾病负担减少量折算为经济收益,得出的健康收益为2660亿元。其中,在全局层面有近80%的城市人均净收益(健康效益货币价值减去成本)为正,其余城市中成本与收益之间的缺口最高可达人均可支配收入的2%,且大多数城市人群使用空气净化器的成本不到当地人均可支配收入的1%。进一步论证了采用净化器施行控制的经济性和有效性。

此外,还可通过开发系列净化技术为实现高效节能控制提供可能,例如一种热泳空气净化装置及方法、一种与风扇结合的复合去除PM_{2.5}和臭氧的简易装置、住宅外窗-净化器智能联动控制系统、一种基于光伏发电的自行车空气净化器、一种无动力无噪声的防霾通风器等。

有学者对净化器去除VOC的效果进行研究,发现若在高污染、渗透通风、温湿度适中的房间内使用净化器,假设每天开启4 h,以净化器性能衰减衡量,大约使用7~12 d,去除VOC的CADR会衰减至初始值的50%;以房间VOC浓度(实际效果)衡量,大约使用4~30 d,无法再将浓度控制在限值以下,具体时长与换气次数密切相关。对于室内VOC的去除,保持净化器常开并不是最合适的使用方法,而应在室内出现严重污染的情况下使用净化器。连续使用一段时间后,若VOC污染已经得到了有效控制,最好暂停净化器并将其转移到扩散条件良好的室外,或是更换滤芯。有学者开发了一种原位热再生的气态污染物净化片及其净化方法,通过净化-热再生法定期对净化材料进行再生,使得材料性能长期维持在较高水平。

2.3 烹饪(内忧)的控制: 烹饪习惯、通风与防护

根据前文阐述的烹饪污染散发特性,居民可通过调整部分燃料使用方式、烹饪习惯,降低烹饪散发的污染。包括:减少固态燃料的使用,通过使用“生物质清洁炊事炉”、清洁燃气灶或电磁炉大幅降低污染物浓度;相比于高散发的炒、煎、炸方式,更多考虑采用蒸、煮方式;尽量把小份菜肴做成大锅菜;尽量避免高油温烹饪,并选用烟点较高的食用油。

抽油烟机是厨房排污的重要通风控制手段,我们的调研结果表明约可排出50%的污染物,选用风量较大、风口较接近炉灶的抽油烟机能够实现更好的控制,例如侧吸式抽油烟机一般优于顶吸式。非开放式厨房的抽油烟机风量 (m³/h) 需是厨房体积 (m³) 的30~50倍以上,开放式厨房则需要更大的风量,在烹饪期间选用最高档位风量,并开启厨房窗户。对于开放式厨房,可给抽油烟机加装侧挡板,可对自下而上的高温油烟有一定阻隔作用,在不影响人员活动的前提下,挡板尺寸越大越好,方形挡板的效果可能优于三角形挡板。在烹饪结束后,建议继续开启抽油烟机5~15 min,并关闭厨房门,避免油烟的扩散。

我国居民最常采用炒的烹饪方式,如果抽油烟机的效率不足,人员有可能暴露在高浓度的PM_{2.5}中,这一浓度可能高达几百甚至上千μg/m³,不亚于室外雾霾严重、PM_{2.5}浓度高于250 μg/m³的情况,在这样的情况下,建议配搭口罩。由于烹饪散发的主要是油性颗粒物,建议佩戴口罩,KN95型号口罩针对非油性颗粒物可去除近90%的PM_{2.5},针对油性颗粒物的KP95型号口罩效率会更高。

在烹饪前后,仍有可能有部分油烟逸散至客厅等活动空间,针对这部分污染可参考前文阐述的净化器控制方式,选用合适CADR的净化器,并将其放置在离烹饪源较远的地方,减少高浓度的油烟对其损耗,同时宜尽量靠近人员活动区域,保证控制效果,在使用时需注意及时更换过滤及吸附材料。

2.4 病毒气溶胶的控制

由于近年来新冠疫情态势严峻,气溶胶传播亦是公共卫生安全关注的焦点,本文对病毒气溶胶的控制展开初步讨论。对于公共建筑,属于多

人员聚集环境，很可能存在潜在的感染病人，可参看《疫情防控期间公共建筑空调通风系统运行管理指南》。而对于住宅建筑，人员固定且较少，根据2018年《全国人口和就业统计年鉴》，平均每户人数约为3人，因此主要关注外部来源途径，假设感染者均已隔离就医，不针对住宅内部已有感染者的情形进行讨论。

一是对于住宅整体建设来说，建议采用变压式、主副式共用烟道，并在烟道口加装下垂式止逆阀，而对于单户家庭，最重要的是保证烟机自身带有排烟止逆阀，且止逆阀定期更换以确保未因黏腻的油垢失效，避免厨房排风通过公共管道进入未开排风扇、或排风扇密闭性能不好的毗邻住宅厨房。

二是对于身处高密度高层住宅且邻里中已有确诊患者的情况，建议其他住宅的居民在春夏之季打开各自的排气扇或者整栋楼的中央排气系统；而在寒冷季节，建议通过不时地打开外窗来加强室内自然通风，以达到净化室内空气的效果。这是因为2003年SARS爆发的香港淘大花园案例表明病毒传播风险与感染者的分布和楼层之间的气流流向以及小区风速场存在一定联系。当时处于春夏之季，居民

采用开窗实现自然通风，跨户传播受室外风向影响较大，浮升力引起的不同楼层同侧窗户之间的排风和进风的串联效应可能引起污染物的级联传播，约有5%的下层排风会进入上层，而相反地，寒冷季节建筑内部的竖直通道内形成“烟囱效应”影响逐渐变大，适合开启外窗。

3 总结

我国住宅建筑同时面临“外患”与“内忧”两类污染源，室外雾霾会伴随通风进入室内，室内装饰装修、吸烟、烹饪亦会散发大量污染物，给室内空气污染的控制带来挑战。对于住宅建筑，相比于机械通风系统，自然通风结合净化器的方式是营造室内空气环境更为节能、有效、经济的选择，相关净化技术、设备的发展能够进一步改善效果、降低能耗。对于烹饪活动，可以通过改变烹饪和通风习惯、用能方式减少污染散发，亦可选用更好通风的抽油烟机，佩戴口罩、开启抽油烟机以进行防护。为进一步加强住宅户间防疫，应及时维护排烟止逆阀，并根据不同季节特点，采用不同通风方式。

06 建筑环境的空气消毒 技术与相关问题探讨



冯 昕 Feng Xin

中国建筑科学研究院净化空调技术中心技术总监，全国暖通空调及空气净化设备标委会副秘书长、空气净化分委会秘书长，全国洁净室及相关受控环境标准委员会委员，住房和城乡建设部建筑环境与节能标委会委员，ISO/TC 142“空气及其他气体净化设备”工作组专家。



路 宾 Lu Bin

中国建筑科学研究院建筑环境与能源研究院副院长，国家空调设备质量监督检验中心主任，教授级高级工程师，获国务院工程技术政府特殊津贴。主要从事工程应用领域暖通空调专业、建筑节能技术和空气净化技术的研发。多次参加国家科技攻关项目及国家科技支撑计划，主编国家和行业标准10余项，出版专著9部，发表论文40余篇，获省部级科技进步奖10项。



张彦国 Zhang Yanguo

中国建筑科学研究院环能科技净化中心主任，教授级高工、注册建造师和咨询工程师，长期从事洁净室、生物安全、实验室等领域室内环境控制的科研和应用工作，主持、参加多项国家重点专项课题，主编多本标准规范，多次获奖。



曹国庆 Cao Guoqing

博士，研究员，博导，副主任，“十三五”国家重点研发计划项目负责人。兼任国家卫生健康标准委员会医疗卫生建设装备标准专业委员会委员、全国暖通空调学会净化专业委员会副秘书长、中国工程建设标准化协会建筑环境与节能专业委员会常务委员。



梁磊 Liang Lei

建科环能科技有限公司教授级高工，任中国医药设备工程协会、中国疫苗行业协会、中国实验动物学会相关专委会副主任委员，中国合格评定国家认可委员会、国家卫健委病原微生物实验室生物安全评审专家委员会委员，《暖通空调》杂志社青年委员。



许钟麟 Xu Zhonglin

研究员，出席科学大会。一直奋战在中国建筑科学研究院净化空调技术中心第一线。现任全国暖通学会净化专业委员会、医用洁净设备与工程分会名誉主委会长。获医用洁净设备与工程分会及中国医院建设大会终身成就奖、第5届中国光华工程科技奖、四项国家奖等。



张惠 Zhang Hui

建科环能科技有限公司高级工程师，长期从事洁净室、生物安全、实验室等领域室内环境控制的科研和应用工作，先后参与并完成多项国家重点专项课题，参编多本国家、行业标准规范。



周绍洋 Zhou Shaoyang

本科毕业于湖南大学建筑环境与能源应用工程专业，现为中国建筑科学研究院研二在读学生，专业为供热、供燃气、通风及空调工程，研究方向为净化空调与室内空气品质。

始于2019年底，由中国率先发现并报告的新冠肺炎疫情（COVID-19）绵延至今，已导致全球接近4.5亿人感染，超过600万人死亡，对全球宏观经济造成了空前的经济损失。作为一种典型的空气传播疾病，除做好个人防护措施外，对于存在风险的室内空间，也需要使用空气净化措施或手段实现空间净化、消毒。疫情期间，空间净化及消毒技术层出不穷，但工程技术人员必须认识到，不同的技术具有不同的应用场景及适用条件，使用不当则反而容易造成风险及污染感染事件。基于上述想法，本文将介绍目前较为成熟的针对空气中悬浮微生物的净化技术，并对其适用条件和使用过程中需要特别关注的问题开展探讨，希望能够为广大工程技术人员进行相关工程项目的设计、施工改造以及运行维护提供有益的参考。

1 空气中悬浮微生物主要净化消毒处理技术

人们对于环境空气中微生物的认识与研究可以追溯到19世纪中期，微生物领域研究重要开创者之一，法国科学家巴斯德（Louis Pasteur）用著名的曲颈瓶试验证实了空气微生物的存在。一般来说，空气中微生物主要包括细菌、病毒、真菌、孢子及花粉等植物微生物几个主要门类，其来源主要为土壤、灰尘、江河湖海、动物、植物以及人类本身。空气消毒，是指杀灭密闭空间内空气中悬浮微生物，使其达到无害化的处理^[1]，依据净化消毒技术对于微生物杀灭能力的不同，传统上将其分为四个作用水平^[2]：

- 1) 灭菌：可杀灭一切微生物（包括细菌芽孢）达到灭菌保证水平的方法。
- 2) 高水平消毒：可以杀灭各种微生物，对细

菌芽孢杀灭达到消毒效果的方法。这类消毒方法应能杀灭一切细菌繁殖体（包括结核分枝杆菌）、病毒、真菌及其孢子和绝大多数细菌芽孢。

3) 中水平消毒：可以杀灭和去除细菌芽孢以外的各种病原微生物的消毒方法。

4) 低水平消毒：只能杀灭细菌繁殖体（分枝杆菌除外）和亲脂病毒的化学消毒剂和通风换气、冲洗等机械除菌法。

根据我国现行的2002版《消毒技术规范》，合格的空气消毒措施需满足：1、模拟现场试验条件下对白色葡萄球菌的杀灭率99.90%以上；2、现场试验条件下空气中自然菌消亡率90.00%以上。针对环境空气中的悬浮微生物净化消毒技术，主要有物理过滤拦截、物理法、以及采用各类消毒剂的化学法等。其中，物理过滤拦截主要依靠纤维过滤材料按尺度大小拦截空气中悬浮气溶胶的特性。现有研究表明，不同效率级别的深层过滤材料对于颗粒物的拦截过滤效率主要取决于气溶胶的大小尺寸。大多数过滤材料对于100~250 nm颗粒物净化过滤效率最低，而不管颗粒物尺寸小于该范围还是大于粒径范围，其净化过滤效率都会随着颗粒物粒径远离该粒径范围而逐渐升高。物理法技术包括高温热力消毒以及紫外照射杀菌技术，当高温作用于微生物时，使细胞膜的结构变化，酶钝化，蛋白质凝固，从而使细胞死亡。紫外照射杀菌（ultraviolet germicidal irradiation, UVGI）主要通过特定波长的紫外线的照射，促使病原微生物DNA/RNA链断裂，消除活性或

传染性。化学法包括过氧化氢熏蒸、臭氧熏蒸等，主要利用特定化学物质的强氧化性破坏组成微生物的蛋白质从而消除其活性。

1.1 基于物理拦截以及过滤机理的净化处理技术

利用物理拦截以及纤维过滤技术进行空气中悬浮微生物的净化去除，是最为传统和可靠的技术选择，这项技术的发端可一直追溯至19世纪末口罩的诞生。基于物理拦截以及过滤机理的净化设备针对颗粒物的大小尺寸而非生物特性发挥净化功能。根据伦敦公共卫生实验室Noble的测试结果^[3]：1) 空气中与疾病有关的带菌粒子直径一般为4~20 μm。2) 来自人体的微生物大都附着在12~15 μm的微尘粒上。我国的研究学者许钟麟等也曾提出细菌等价直径的概念，因为大多数微生物并不能在空气中独立存在，常常附着在比其大数倍的灰尘颗粒表面。一方面灰尘中所蕴涵的有机碳可为微生物的存活提供养分，另一方面，灰尘颗粒可以吸附并保存一定水分，而这对微生物的生存以及繁殖至关重要。国内曾有研究表明空气中的细菌浓度与3.5 μm空气尘粒浓度间存在一定相关关系，测试结果也表明几种纤维过滤材料对大气杂菌的过滤效率与4~5 μm颗粒物过滤效率相当^[4]。天津大学涂光备也通过比对试验得出纤维过滤装置对大气菌的过滤效率与大气尘计数效率有较好的线性关系^[5]。表1给出了国外研究学者所总结的一些相关研究中不同过滤等级过滤器对微生物的过滤效率试验结果。

表1不同等级过滤器对微生物的过滤效率试验结果^[6]

过滤器	试验微生物		透过率	参考文献
	名称	尺寸		
一般通风过滤器	豚草花粉	20 μm	48%~98%	Annis 1965
低效率过滤器	豚草花粉	15~25 μm	25%~76%	Sutton et al. 1965
高效过滤器（DOP透过率0.02%）	大肠杆菌T1噬菌体	0.1 μm	0.004%	Harstad et al. 1967
高效过滤器（DOP透过率0.006%）			0.00085%	
高效过滤器（DOP透过率0.011%）			0.0044%	
静电除尘器	印度沙雷氏菌	0.5×1 μm	3%~8%	Decker et al. 1951
	大肠杆菌T3菌体	0.1 μm	0~20%	
静电除尘器	球芽孢杆菌	2.5 μm	3%	Margard and Logsdon 1965
静电除尘器（风速0.68~1.88 m/s）	球芽孢杆菌	0.5~0.9 μm	0.2%~25.5%	Rickman 1992
	烟曲霉菌芽孢	2.0~3.5 μm	0.3%~6.9%	

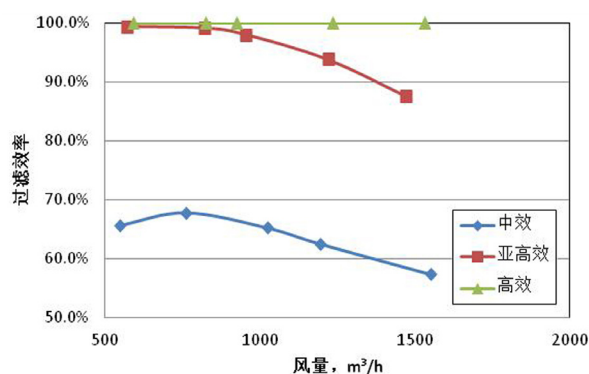


图1 中效、亚高效以及高效过滤器不同风量下的滤菌效率试验结果

从表1中可以看出，对于给定颗粒物过滤效率的高效过滤器（DOP透过率0.006%~0.02%），其对于裸体尺寸为0.1 μm的大肠杆菌T1噬菌体透过率基本比DOP过滤效率约低1个数量级。考虑到DOP测试中的颗粒物中值粒径为0.18~0.22 μm，与大肠杆菌T1噬菌体尺寸相差不大，比对结果显示即使在实验气溶胶发生条件下，也很难得到单个悬浮的微生物气溶胶。图1给出了作者团队对额定风量均为1000 m³的F5级别中效、H10级别亚高效以及H13级别高效过滤器不同风量下的滤菌效率试验结果，试验菌种采用白色葡萄球菌。从试验结果可以看出，过滤器对白色葡萄球菌的过滤效率会明显高于其标称的颗粒物效率，例如，对于标称效率不低于85%（0.1~0.2 μm）的亚高效过滤器，其额定风量下的滤菌效率达到98%；对于标称效率不低于99.95%（0.1~0.2 μm）的高效过滤器，其额定风量下的滤菌效率达到99.997%。此外，与颗粒物的过滤效率随风量变化规律类似，随着风量的提高，各级别过滤器都会呈现不同程度的滤菌效率下降现象，中效和亚高效过滤器在风量由额定的1000 m³提高到1500 m³时，滤菌效率下降约10%，提示我们在过滤器使用过程中，必须严格控制其运行风量，不得超风量运行。

而对于病毒来说，虽然其自身物理尺寸仅约为0.01~0.1 μm左右，相比细菌要小很多，但病毒在环境空气中的存在方式同样是附着在尘粒及其他颗粒物上。病毒进入空气中时所最终形成的粒子大小取决于导致其脱离生存环境进入空气的机械或生物作用力大小，而与病毒自身大小无关。Sellers等^[7]曾报

道，自身尺寸仅为25~30 nm的口蹄疫病毒散布到空气中后，使用多级液体装机采样器进行采样，结果表明，65%~71%的携带病毒气溶胶粒子直径大于6 μm，19%~24%的携带病毒粒子直径为3~6 μm，而只有10%~11%直径小于3 μm。黄子才等^[3]在全国六大味精厂测量空气中L-谷氨酸有害噬菌体病毒的采样结果表明，大约80%的携带病毒粒子尺寸为1.6~4.6 μm，大约20%在1.4~1.5 μm，而在0.65~1.1 μm之间的噬菌体粒子仅占0.9%。表2给出了作者团队对某型号航天用高效空气过滤器所做的细菌（枯草芽孢杆菌黑色变种，约1.0 μm）以及病毒（大肠杆菌T3噬菌体，约0.1 μm）过滤效果比对测试，测试结果显示二者过滤效率基本相当，其各自携带微生物气溶胶粒子尺寸基本相当，均与微生物单体尺寸关系不大。

表2 同一台高效过滤器的滤菌及滤病毒比对试验结果

	枯草芽孢杆菌黑色变种	大肠杆菌T3噬菌体
试验风量 / (m³/h)	100	100
上游微生物浓度均值 / (CFU/m³)	6.86×10^4	7.45×10^4
下游微生物浓度均值 / (CFU/m³)	2.36	4.7
微生物滤除效率 / %	99.9966	99.9937

1.2 紫外杀菌技术

紫外线指波长在100~400 nm区间的光线，按生物学作用差异一般分为UVA（波长介于320~420 nm）、UVB（波长介于280~320 nm）、UVC（波长介于200~280 nm）以及真空紫外线（100~200 nm）。从其发展历程来看，紫外线照射消毒是一种古老而又简单的物理消毒方法，它在近代历史上人类与疾病的抗争中发挥了重要作用。紫外线的消毒功能最早由英国科学家Downes和Blunt发现，他们首次发现经太阳照射后，某些菌类停止了繁殖活动，随后这一现象被证实为太阳光中紫外线所发挥的作用，在此基础上，1909年，世界上诞生了第一个紫外线水消毒装置。1929年，紫外线杀菌机理被发现：UVC波段紫外线直接被DNA吸收，并造成以下主要损伤^[8]：

- 1) 相邻嘧啶形成环丁烷嘧啶二聚体；

- 2) 形成嘧啶-酮光产物;
- 3) 氨基酸吸收紫外线使蛋白质变性能;
- 4) 导致酶的钝化, 破坏酶活性中心的氢键;
- 5) 波长小于230 nm的紫外线可导致DNA链断裂, 从而造成细胞死亡。

图2和图3分别给出了DNA对不同波长紫外线的吸收比例, 以及不同波长紫外线的相应杀菌效果^[9]。

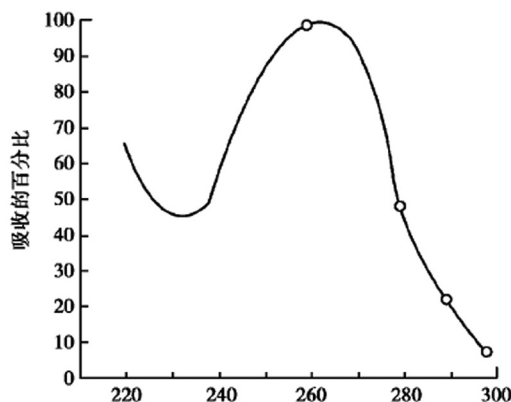


图2 DNA对不同波长紫外线的吸收^[9]

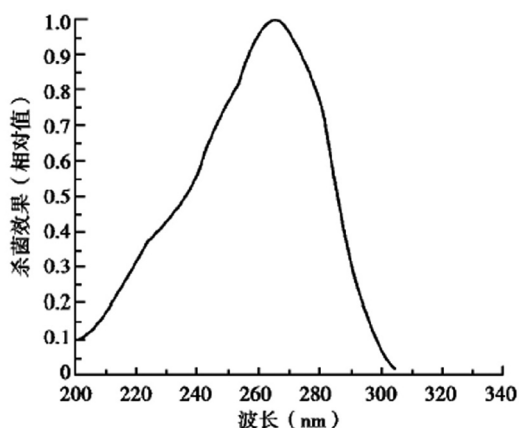


图3 不同波长紫外线杀菌效果^[9]

紫外线杀菌之所以能够在过去100多年的时间得到充分的应用, 主要原因在于其所具备的以下主要特点:

1) 杀菌的广泛性: 紫外线的消毒杀菌功能通过DNA或RNA核酸直接吸收实现, 因此细菌、病毒、真菌甚至高等动植物的细胞都可获得消毒杀灭效果。

2) 杀菌的快速性: 当近距离使用高强度紫外灯时, 可在1s或更短的时间杀灭细菌, 这种快速性是其他许多生物、物理以及化学消毒方法所无法比拟

的。

3) 使用经济性: 传统的紫外杀菌消毒设备只有紫外灯管和相应电源, 其用电功率与日常照明用具基本相当, 运行能耗远低于绝大多数的消毒灭菌设备。

在实际灭菌效果方面, 表3给出了紫外线辐照强度等级和典型微生物的杀灭率。

表3 紫外线辐照强度等级和典型微生物的杀灭率^[10]

紫外线剂量等级	剂量 ($\mu\text{W}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$)	杀灭率/%			
		炭疽杆菌	流感病毒	天花病毒	结核菌
1	1	0	0	0	0
5	50	1	6	7	10
10	500	8	45	53	66
15	4000	49	99	100	100
20	20000	96	100	100	100

基于大量的现有研究表明, 紫外线照射杀菌技术在消毒效果上完全可满足一般使用建筑使用环境对于物体表面以及小型封闭空间空气的消毒要求。但必须关注紫外线消毒装置在实际使用中所带来的各种安全性问题, 这一部分内容将在本文后面进行详细论述。

1.3 基于静电的空气微生物净化技术

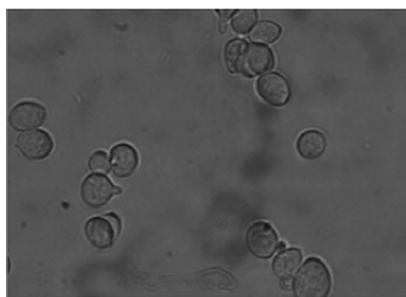
静电是实现净化设备空气净化功能的重要手段之一, 其主要通过带电集尘装置等人工营造的电场, 利用静电吸附功能实现对空气中悬浮颗粒物的捕集功能。主要包括以下技术形式:

1) 给纤维过滤器所使用过滤材料纤维上增加静电电荷实现对空气中微生物的净化消毒: 郭佳佳^[11]通过比对测试发现滤料静电消除前后对粘质沙雷氏菌的过滤效率存在明显差异, 其所测试的一种F8级别及一种F7级别化纤过滤材料在消静电处理前对粘质沙雷氏菌的过滤效率均接近100%, 但在消静电处理后, F8滤料对粘质沙雷氏菌的过滤效率降为约20%, F7滤料对粘质沙雷氏菌的过滤效率降为约10%, 显示静电吸附对于以液滴形态存在的微生物仍可发挥较大作用。

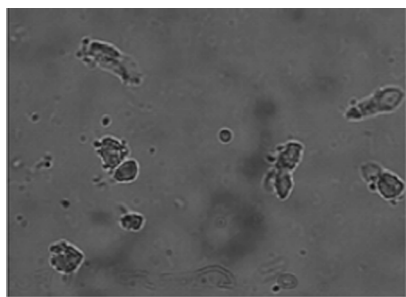
2) 利用高压放电措施电离空气, 在空气中形成大量的游离正离子和电子, 这些游离离子通过与空气中携带微生物的颗粒物碰撞接触使之带电, 并在

集尘极所形成的定向电场中加速运动并最终被集尘板捕获。董非等^[12]曾对一种常见的利用静电吸附并配合过滤器的室内空气净化机进行实验室及现场净化消毒测试，测试结果显示，在对颗粒物净化效率仅为75%条件下，该净化机在20 m³气雾室内开机作用30 min，对空气中人工发生的白色葡萄球菌杀灭率为99.98%；在90 m³房间中开机作用60 min，对室内空气中自然菌的杀灭率达到90%以上。

3) 电离空气过程中，静电净化器的电晕极在放电条件下，放电区域索性的高能电子可轰击气体分子生成大量强氧化性粒子，破坏微生物细胞结构，从而实现杀菌消毒效果。刘新等^[13]曾对一种上述原理装置的消毒灭菌效果进行了实验研究，研究结果表明，在排除了电晕所导致的高温灭活、紫外辐射以及臭氧影响的基础上，在电晕极间电压为2.0 kV/cm，处理时间为35 s的操作条件下，该装置对城市污水处理厂活性污泥所提取培育微生物气溶胶杀灭效率大于97.9%。同时，研究者通过显微镜观测到了微生物细胞形态被放电所产生自由基(·OH)处理前后的形态变化(图4)，观测结果显示，强氧化性自由基可氧化分解微生物的细胞壁和细胞膜，从而使得微生物细胞结构破坏，内容物流出，从而导致细胞死亡。



(a) 自由基处理前细胞形态



(b) 自由基处理后细胞形态

图4 自由基处理前后灰霉菌孢子形态变化^[13]

1.4 气体熏蒸消毒技术

对于已经确知存在大面积污染的房间或空间，气体熏蒸消毒一般作为首选的空间消毒措施，这是因为上述常规消毒手段均存在各种不同的局限性，例如，紫外线作为一种短波辐射，只能杀灭可被直接照射的空气及物体表面微生物，而依赖通风系统进行空气悬浮微生物净化杀灭的技术措施则可能导致微生物气溶胶的二次飞扬以及相应的扩散污染。而气体消毒剂因为具有良好的扩散性及穿透性，可同时实现空间内的物体表面消毒以及空气消毒，因此对于具有复杂内部空间及表面材料特征的各种建筑内部空间具有良好的适应性及消毒灭菌效果。以汽化过氧化氢为例，现有研究表明，其对于结核分枝杆菌、炭疽杆菌芽孢、枯草杆菌芽孢、嗜热杆菌芽孢、猪霍乱沙门氏菌等多种微生物均可实现杀灭值大于6的灭菌水平消毒。

一般而言，常见的气体消毒剂主要包括：

1) 醛类消毒剂：醛类消毒剂中的甲醛是最早实际应用的消毒之一，目前应用历史已超百年，目前已被正式可对结核杆菌、结核分枝杆菌、铜绿假单胞菌噬菌体等多种微生物可实现灭菌水平消毒^[14]，英国甲醛消毒委员会在1958年就报道过使用甲醛气体熏蒸可杀灭天花病毒。但甲醛具有潜在致癌性，对人体健康具有负面影响，因此目前在人居建筑领域的应用已经越来越少。

2) 强氧化剂：典型的强氧化消毒剂主要包括过氧乙酸以及过氧化氢，其中过氧化氢的分解产物仅为水和氧气，对应用环境以及人员健康更为友好，因而得到了最为广泛的应用。过氧化氢的杀菌机理研究中，Melly等^[15]的研究较为详细，该研究以野生枯草杆菌的多种突变型芽孢作为目标菌，研究结果表明过氧化氢处理后的目标菌虽然细胞形态完整，但无法对核酸着色，丧失芽孢萌发、繁殖能力。

3) 含氯消毒剂：含氯气体消毒剂中较为常见的是二氧化氯(CLO₂)，二氧化氯可与微生物蛋白质中的部分氨基酸发生氧化还原反应，导致其分解破坏，同时，二氧化氯对细胞壁有较好的吸附和透过性能，可有效氧化破坏细胞内含巯基的蛋白酶，从而影响微生物中蛋白质的合成，并最终导致微生物死亡^[16]。二氧化氯虽然不像过氧化氢那样，最终分

解产物完全对人体与环境无害，但其杀菌原理表明在对病原微生物具有较好的杀灭效果的同时，对人体却不会产生严重毒副作用。这是因为细菌等微生物属于原核细胞生物，其酶一般分布于细胞膜近表面，容易受到攻击，而动物属于真核细胞生物，酶系统处于细胞器保护中。一般来说各生物属对于二氧化氯的敏感顺序为：非细胞病毒>单细胞原核生物>原细胞真核生物>多细胞真核生物>高等动植物^[17]。

而在实际消毒效果研究方面，丁伟等^[18]曾随机抽取了南宁市7类公共场所28个房间作为消毒对象，分别采用过氧化氢（3%）、过氧乙酸（0.5%）、二氧化氯（100 mg/L）以及甲醛（100 g/500 mL）进行现场空气消毒效果比对，比对结果显示，4种消毒剂现场消毒效果均达到不低于90%的现场消毒效果评价要求，但过氧化氢的消毒效果最佳，平均消除率达98.11%。此外，Ogata等^[19]开展了超低浓度二氧化氯针对流感病毒的感染预防动物试验，研究结果表明，在存在A型流感病毒的空气中，当二氧化氯浓度约为0.1 mg/m³时，暴露15 min的小鼠16天后仍全部存活，但不存在二氧化氯时，对照组小鼠死亡70%。而在医院现场进行的研究也表明超低浓度二氧化氯对微生物有持续抑制作用^[20]。

2 选择及使用空气净化消毒技术需关注的主要问题

2.1 物理拦截技术

传统的空气过滤器只拦截微生物，但对所拦截的微生物并没有杀灭功能，相反的，过滤器自身特性以及使用过程中的积尘往往能够为其所拦截微生物提供一定的水分及有机碳养分，从而使得过滤器在处理不当反而易成为建筑屋内微生物污染的一个潜在来源。因此，在使用过滤器作为环境空气微生物净化处理措施时需要注意以下问题：

1) 仅依靠过滤器自身无法解决微生物在过滤材料上的孳生问题。天津大学刘俊杰团队曾通过实验研究证明在适宜的温度、湿度以及过滤材料上负载有营养物质时，微生物可在过滤材料上生长，并可观测到涵盖延滞期、指数期、稳定期和衰亡期4个阶段的完整生存周期^[21-22]。Kemp等^[23]将新的纤

维过滤材料和多层化纤过滤材料在大气环境中连续使用8周，发现从第2周起，两种过滤材料上微生物数量迅速增加，虽然化纤过滤材料上微生物总量略低，但4周后两种过滤材料上微生物总量接近一致。Martikainen等^[24]曾调查11栋公共建筑所使用通风过滤器发现每克过滤材料上的细菌及霉菌含量分别约为 $3 \times 10^3 \sim 1.9 \times 10^5$ CFU及 $7 \times 10^2 \sim 2.5 \times 10^5$ CFU，而在营养物质充足的情况下即使温度低至4℃，仍可观测到过滤材料上微生物的活动。Neumeister等^[25]通过对柏林市中心一座大型会议中心通风系统用过滤器进行调查发现，尽管仅粗效预过滤器就可实现约84%的微生物净化过滤效率，但在过滤材料通过荧光纤维镜也观测到了约800处霉菌生长。为解决过滤材料所拦截微生物的孳生问题，一个通常容易被想到的解决方案就是为过滤纤维表面复合添加抗菌剂，Verdenelli的研究表明^[26]，经抗菌剂处理的过滤材料在头7天培养期内基本不会有细菌和真菌繁殖，但在长达100天的培养期间，抗菌剂效果随时间逐渐衰竭。美国ASHRAE针对这一问题曾资助研究项目“对这一问题曾资助研究项目随时间逐渐icacy of antimicrobial treatments of fibrous air filters”，研究结果表明^[6]：对于因使用而导致积尘的过滤器，即使经过复合添加抗菌剂处理，也无法避免微生物孳生。该研究将经过抗菌处理和未经抗菌处理的过滤器安装于同一通风空调机组内连续使用4个月后进行菌落计数分析，试验结果表明，经过抗菌处理过滤器的细菌测试结果为 (14900 ± 5100) CFU，而未经抗菌处理的过滤器细菌测试结果为 (12700 ± 3900) CFU，二者之间没有显著差别。

因此，控制过滤器上的微生物孳生问题关键还需要从微生物生长繁殖的必要环境条件入手，水分以及必要的营养物质是微生物生长繁殖的两大必要条件，作为拦截一切灰尘颗粒的过滤器，显然无法避免富含有机碳、可为微生物生存提供养分的灰尘存在，就必须合理控制过滤器所处环境的湿度条件，避免过滤器长期在潮湿环境下工作。但在现实应用条件下，大多数一般通风系统中，过滤器与表冷器、加湿器等一同安装于组合式空调机组中，难以保证有利的湿度控制条件，针对这一问题，许钟麟等^[27]曾提出一种为组合式空调机组增加辅助干燥

灭菌的技术，该技术为组合式空调机组增设一个包含干燥用风机、电加热器以及循环管路的电热干燥系统，在系统停止运行期间，将空调机组内迅速升温至约60℃并维持至少30 min。原理上，大多数细菌病毒等微生物可在此条件下达到灭活条件，例如新型冠状病毒的灭活条件为56℃下30 min，因此该技术可在很大程度上解决过滤器的微生物孳生问题。

2) 当过滤器存在残存活性微生物风险时，必须关注过滤器的安全更换以及后续无害化处理问题，避免工作人员与过滤上存活微生物产生接触从而导致感染事件的发生。在使用风险较高的高级别生物安全实验室应用领域，对于高风险的高效排风过滤器如何进行在线消毒灭菌、安全更换已经有了较为成熟的技术基础，复旦大学韩文东等^[28]就曾报道通过对生物安全三级实验室的核心区排风高效过滤器进行甲醛熏蒸消毒，对所放置的4种生物指示剂均可实现完全灭菌。但在医院等相对低风险建筑环境，对于过滤器的安全更换以及消毒、无害化处理的关注则不够。针对这一问题，作者建议在存在潜在感染风险的室内环境中，当使用过滤器作为净化处理措施时，应避免过滤器在被充分消毒灭菌前被暴露在清洁区域空气中，并应避免工作人员与未消毒过滤器产生直接皮肤接触。可通过熏蒸或喷洒消毒剂等方式在过滤器被卸下前进行消毒灭菌，消毒后被卸下的过滤器应存放于密封袋内并按医疗废弃物标准进行后续的无害化处理，同时也必须注意工作人员在消毒、拆卸、包装以及运输过程中的个人防护。

2.2 紫外照射杀菌技术

紫外照射杀菌技术消毒效率高、作用快速、经济性好，但目前其主要应用领域仍局限于污水处理（据报道，目前约有25%的西方国家工业和生活污水处理厂使用紫外杀菌技术^[9]）、物体表面消毒以及小型封闭空间空气消毒。这主要是由于紫外线目前自身所存在的一些基础技术障碍：

1) 紫外线的杀菌消毒效果受多种环境因素影响，居喜娟等^[29]通过实验研究证明，在10~30℃常规室温范围内，随温度降低，紫外线消毒效果下降；房间相对湿度达到90%时、房间中喷有机物（浓度为

10%小牛血清菌悬液）也同样导致紫外线消毒效果下降。此外，紫外线杀菌技术的本质仍是依赖于紫外线的辐射传播机理，因此当使用过程中紫外灯管积尘或者空气中颗粒物的散射功能都会对紫外线的实际杀菌效果产生不利影响。

2) 紫外线对人体健康有一定危害。常见健康影响包括红斑病、白内障、电光性眼炎、皮肤红斑反应等。波长小于250 nm紫外线作用于空气还可产生光化学烟雾以及臭氧等有害气体。张银娟等^[30]曾报道2例因紫外线空气消毒产生臭氧所导致的呼吸道过敏反应的病例，2例病例在进入术前使用紫外线消毒30 min手术室后，均出现不同程度的咳嗽、胸闷、呼吸困难、脉搏与呼吸加快等临床反应，经脱离环境和抗过敏等治疗后症状缓解。张润莉等^[31]也曾报道过在病房中有病患时进行紫外线空气消毒，导致病人呼吸抑制，经及时抢救方恢复正常的临床病例。

3) 紫外杀菌具有可逆性^[32-34]。与传统的热力及化学杀菌不同，紫外线照射杀菌有时是可逆的，这是由于DNA损伤后，细胞有四种修复作用酶系统：光复活、切除修复、重组修复和诱导修复。其主要作用机理如下：

● 光复活：通过可见光激活细胞的光复活酶，分解紫外线照射形成的嘧啶二聚体，使得DNA复制可以顺利进行。光复活作用是一种高度专一的修复方式，它只作用于紫外线引起的嘧啶二聚体。光复活酶在生物界分布广泛，不仅低等的单细胞生物有，鸟类也有，但高等哺乳动物却没有。

● 切除修复：这是在一系列生物酶的共同作用下，将DNA链中的受损伤部位切除，并以完整的那一条链为模板，合成出被切除的部分，然后使得DNA恢复正常结构。这是较为普遍的一种修复机制，对多种损伤均能其修复作用，但有些变异的菌种却丧失了这种功能，所以表现为紫外线耐受性很差。

● 重组修复：通过DNA聚合酶和连接酶的作用，使得DNA的损伤可通过DNA分子间的多次重组来逐渐得到修复。

● 诱导修复或SOS修复：RecA蛋白质所参与的可诱导修复作用，称为SOS修复，也称应急反应。当DNA损伤太大导致合成停止，DNA链上留下许多大

缺口时, RecA能与这些缺口结合并发生DNA链之间的重组交换, 加快复制和修复, 该系统可以快速修复由紫外线引发的大面积损伤, 应急反应主要包括DNA修复和变异两方面。其中变异是诱导微生物产生更有利于其生存的变化。现有研究表明, 细菌的修复能力很强, 0℃条件下2 min即可完成快修复, 而慢修复在37℃条件下40~60 min也可完成。

4) 紫外杀菌的所导致的细菌耐药性变异问题。微生物经紫外线照射后呈现多向性结果, 有些被彻底灭活, 有些则保持存活, 有些死而复活, 而有些则发生了不同程度的变异, 而变异的方向同样多种多样, 有的具备了更强的紫外线抵抗力, 有的可耐化学杀菌剂, 有的生化性能变了, 而目前研究较为关注的则是部分细菌对抗生素产生了耐药性变异。Meckes等^[35]发现, 经45 mJ/cm²的紫外线消毒后, 水中大肠杆菌对四环素和氯霉素的耐药率高于消毒前, 并且多重耐药大肠菌群的比例也显著升高。陈艳华等^[36]曾报道医院空气中微生物的耐药性高达72%~76.9%, 远高于社区, 有学者认为这可能与基层医院大量使用紫外线进行空气消毒有关。王燕等^[37]曾报道短时间的紫外线照射并传代培养后, 细菌发生较为明显的耐药性变异, 其中, 第四代褪色沙雷菌对阿莫西林/克拉维酸的敏感性由中介变为耐药, 第八代褪色沙雷菌对氨基南由敏感变为中介, 第十二代褪色沙雷菌对头孢呋辛由中介变为耐药。孙荣同等^[38]发现, 将阴沟杆菌和表皮葡萄球菌经紫外线照射诱导后, 阴沟杆菌第8代对5种抗生素呈现耐药性, 而且其存活时间也更长了(抗紫外), 其中, 对氨苄西林和亚胺培南由敏感转为耐药, 对阿莫西林/棒酸由中介转为耐药, 对氨基南、哌拉西林/他唑巴坦以及替卡西林/棒酸由敏感转为中介; 而表皮葡萄球菌第8代对红霉素由敏感转为耐药, 对四环素则由耐药转为敏感。

2.3 气体熏蒸消毒技术

采用气体熏蒸消毒技术, 尤其是在较大空间内采用化学制剂进行熏蒸消毒处理时, 则必须要考虑消毒剂的使用对于人体健康、环境以及微生物生态环境的影响^[39]。新冠疫情爆发以来, 全国已经进行了多次的大范围环境终末消毒, 仅在2020年初的疫情初期, 武汉地区投放的消毒剂就达到2000多吨,

而2020年2月期间生态环境部门对1562个饮用水源地开展了余氯监测, 受疫情防控开展的消杀工作等影响, 47个饮用水源地余氯有检出^[40]。消毒剂的大量投放, 会与环境中的自然有机物发生反应, 产生消毒副产物(disinfectant byproducts, DBPs), 目前已知的DBPs主要包括三卤甲烷类(trihalomethanes, THMs)、卤乙酸(haloacetic acids, HAAs)以及卤乙腈(haloacetonitriles, HANs)等^[41]。以THM4为例, DBPs对人体的主要健康负担包括膀胱癌^[42], 婴儿早产^[43]以及流产^[44]。一项欧洲的分析研究显示, 饮用水中THM4 > 50 μg/L的人群中男性膀胱癌发病率比THM4 < 5 μg/L的人群高47%^[45]。因此, 采用消毒气体进行熏蒸消毒时, 就必须根据消毒空间特性、环境影响等因素合理选择消毒剂种类。

3 结论

综上所述, 过滤、紫外辐照、静电以及消毒气体熏蒸均可基本满足空气消毒需求, 但其不同的技术原理决定了其必然存在不同的适用场景以及适用条件, 工程技术人员在进行相应的设计、施工、改造以及装置运行维护过程中应根据具体需求选择适用的技术, 并关注其对应的潜在风险, 避免因技术措施使用不当或维护不当导致的不利后果。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 空气消毒剂通用要求: GB 27948—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [2] 中华人民共和国卫生部, 消毒技术规范[S], 2002.
- [3] 于玺华. 现代空气微生物学[M]. 北京: 人民军医出版社, 2002.
- [4] 李恒业. 大气中生物粒子的等效率直径及其有效滤材的研究[C]//中国电子学会洁净技术分会第二届学术年会论文集. 1986, 170-174
- [5] 涂光备, 张少凡. 纤维型滤料滤菌、滤尘效率关系的实验研究[J]. 洁净与空调技术, 1994(3): 13-15.
- [6] Karin K.Foarde, James T. Hanley, ASHRAE 909-RP, Determine the efficacy of antimicrobial treatments of fibrous air filters, ASHRAE, 1996:9.
- [7] SELLERS R F, PARKER J. Airborne excretion of foot-and-mouth disease virus[J]. The Journal of Hygiene, 1969, 67(4): 671-677.
- [8] 薛广波. 现代消毒学[M]. 北京: 人民军医出版社, 2002.
- [9] 丁有生. 紫外杀菌灯技术与应用的发展[J]. 灯与照明,

- 2015, 39(2): 1-4.
- [10] 于玺华. 空气净化是除去悬浮菌的主要手段[J]. 暖通空调, 2011, 41(2): 32-37.
- [11] 郭佳佳. 玻璃纤维和化学纤维滤料对悬浮细菌颗粒的过滤性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [12] 董非, 李爱萍, 杨彬, 等. 医用空气净化消毒器杀菌效果的试验观察[J]. 中国卫生检验杂志, 2007, 17(6): 1088-1089.
- [13] 刘新, 康颖, 邹芳, 等. 电晕放电自由基簇射技术杀菌实验研究[J]. 载人航天, 2015, 21(2): 125-129.
- [14] 占雅静, 陈清. 室内空气消毒方法的研究进展[J]. 实用医学杂志, 2007, 23(24): 3967-3969.
- [15] MELLY E, COWAN A E, SETLOW P. Studies on the mechanism of killing of *Bacillus subtilis* spores by hydrogen peroxide[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2002, 93(2): 316-325.
- [16] 陈聪龙, 张星, 林玉霞. 二氧化氯消毒机理的研究与应用[J]. 医药工程设计, 2002, 23(4): 17-20.
- [17] 田颖, 黄丽萍, 王晶日. 二氧化氯和氯用于饮水消毒的对比[J]. 大连铁道学院学报, 2000, 21(2): 96-99.
- [18] 丁伟, 陈绍运, 陈竞, 等. 公共场所室内空气消毒效果的研究[J]. 广西医科大学学报, 2008, 25(5): 815-817.
- [19] OGATA N, SHIBATA T. Protective effect of low-concentration chlorine dioxide gas against influenza A virus infection[J]. *The Journal of General Virology*, 2008, 89(1): 60-67.
- [20] OGATA N, SAKASEGAWA M, MIURA T, et al. Inactivation of airborne bacteria and viruses using extremely low concentrations of chlorine dioxide gas[J]. *Pharmacology*, 2016, 97(5/6): 301-306.
- [21] 韩贵媛. 微生物气溶胶在纤维滤料上过滤和繁殖规律的研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [22] 孟蕾. 微生物气溶胶在空气纤维滤料上的繁殖和次生污染研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [23] KEMP P C, NEUMEISTER-KEMP H G, LYSEK G, et al. Survival and growth of micro-organisms on air filtration media during initial loading[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(28): 4739-4749.
- [24] MARTIKAINEN P J, ASIKAINEN A, NEVALAINEN A, et al. Microbial growth on ventilation filter materials[J]. *Indoor Air*, 1990(3): 203-206.
- [25] NEUMEISTER H G, MORITZ M, SCHLEIBINGER H, et al. Investigation on allergic potential induced by fungi on air filters of HVAC systems[J]. *Indoor Air*, 1996(3): 125-130.
- [26] VERDENELLI M C, CECCHINI C, ORPIANESI C, et al. Efficacy of antimicrobial filter treatments on microbial colonization of air panel filters[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2003, 94(1): 9-15.
- [27] 许钟麟, 赵伟, 孙宁. 适用于医院净化空调机组的干燥灭菌装置: 中国, 201520478015.9[P].
- [28] 韩文东, 孙志平, 丁悦娜, 等. 生物安全三级实验室核心区排风高效空气过滤器原位消毒的研究[J]. 微生物与感染, 2012, 7(3): 146-151.
- [29] 居喜娟, 薛广波, 卞雪莲, 等. 紫外线空气消毒器除菌效果的研究, *中国消毒学杂志*, 1994, 11(4): 223-226.
- [30] 张娟银, 朱军. 紫外线空气消毒所产生臭氧引起呼吸道过敏病例报告[J]. *中国消毒学杂志*, 1996, 13(2): 100-101.
- [31] 张润莉, 李凤英. 紫外线空气消毒致病人呼吸抑制一例报告[J]. *中华护理杂志*, 1997, 32(4): 248.
- [32] 于玺华. 紫外线照射消毒技术的特性及应用解析[J]. 暖通空调, 2010, 40(7): 58-62.
- [33] 沈同, 王镜岩, 生物化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [34] 池振明. 现代微生物生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [35] MECKES M C. Effect of UV light disinfection on antibiotic-resistant coliforms in wastewater effluents[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1982, 43(2): 371-377.
- [36] 陈艳华, 李晖, 陆一平, 等. 医院空气中细菌分类及耐药性分析[J]. *中国抗生素杂志*, 2006, 31(8): 505-507.
- [37] 王燕, 周垚, 张映华, 等. 紫外线照射对细菌耐药性的影响[J]. *中华医院感染学杂志*, 2010(20): 3355-3356, 3363.
- [38] 孙荣同, 王明义, 高海娥, 等. 紫外线照射对两种不同类型细菌的影响[J]. *中国消毒学杂志*, 2009, 26(2): 158-161.
- [39] 万家秀, 刘吉宁, 石振华. 在新冠病毒疫情下空气消毒及对环境的影响[J]. *医药化工*, 2021, 47(10): 175-177.
- [40] http://www.mee.gov.cn/ywgz/ssthjbh/dbssthjgl/202003/t20200311_768408.shtml
- [41] 宝露尔. 三类卤代消毒副产物的分布特征及生成影响因素初探[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2016.
- [42] COSTET N, VILLANUEVA C M, JAAKKOLA J J K, et al. Water disinfection by-products and bladder cancer: is there a European specificity? A pooled and meta-analysis of European case control studies[J]. *Occupational & Environmental Medicine*, 2011, 68 (5), 379-385.
- [43] WRIGHT J M, EVANS A, KAUFMAN J A, et al. Disinfection by-product exposures and the risk of specific cardiac birth defects[J]. *Environ Health Perspect.* 2017, 125 (2), 269-277.
- [44] WALLER K, SWAN S H, DELORENZE G, et al. Trihalomethanes in drinking water and spontaneous abortion[J]. *Epidemiology*, 1998, 9 (2), 134-140.
- [45] LI X F, MITCH W. Drinking water disinfection byproducts (DBPs) and human health effects: multidisciplinary challenges and opportunities[J]. *Environmental Science & Technology*. 2018, 52(4), 1681-1689.

07 居家环境适老化设计的原则与要点



周燕珉 Zhou Yanmin

清华大学建筑学院教授、博士生导师，中国老年学和老年医学学会标准化委员会主任委员。长期致力于住宅建筑和老年建筑的设计与研究工作，承担国家级和省部级课题10余项，参编和评审标准10余部，发表学术论文70余篇，出版相关书籍20余本。



秦 岭 Qin Ling

清华大学建筑学院博士后、助理研究员，合作导师为周燕珉教授。主要研究领域为适老居住环境设计与改造，作为课题组核心成员参与多项国家级和省部级科研课题的研究工作，出版专著译著3部、专著书章11篇，发表期刊论文和会议论文20余篇。



李广龙 Li Guanglong

清华大学建筑学院周燕珉教授工作室主任建筑师。2010年清华大学建筑学专业毕业后就职于周燕珉教授工作室，长期从事老年建筑设计及理论、住宅精细化设计等方面研究工作，作为主要科研和设计人员、主持、负责、参与相关科研和设计项目数十项。

截至2021年底，我国65岁以上人口占比达到了14.2%¹，标志着我国已经进入了深度老龄化。

“十四五”规划明确将“积极应对人口老龄化”上升为国家战略，中共中央、国务院《关于加强新时代老龄工作的意见》将“打造老年宜居环境”列为主要工作任务。在我国现行的养老服务体系当中，居家养老是绝大多数老年人的现实选择。作为老年人居住生活最为主要的空间载体，居家环境的安全性、便利性和舒适性至关重要。对老年人的居家环境进行适老化设计与改造，已成为我国人口老龄化发展进程当中一项长期、持续性的需求。近年来，国家高度重视为老年人营造适宜的居住环境，对于既有住宅，大力推动居家适老化改造工程，“十四五”将迎来大规模实践的高峰期；对于新建住宅，也正在积极推动适老化住房的顶层设计，探索建立完善发展适老化住房的体制机制和政策措施²。

然而目前，我国在居家环境适老化设计与改造方面还处在发展的初期阶段，存在诸多问题，一定程度上影响了老年人的生活品质。例如，在设计师当中，适老化设计的知识理念还未能得到广泛普及；在市场上，专门针对老年人群设计的家居产品还很不齐全，特别是在老旧住宅改造的应用场景下，适用的设施设备尤其匮乏；近年来，虽然已

经出现了提供居家适老化设计与改造服务的专业机构，但其在服务流程、服务内容等方面还缺乏针对老年人群特征的精细化考虑……

居家环境的适老化设计是一项系统工程，需要建筑设计、产品研发、施工建造、养老服务等多领域人员的通力协作。在我国人口老龄化程度日益加深的背景下，每一个行业都应该对老年人的需求予以考虑，结合各自专业为老年人进行适老化转型。

笔者研究团队长期开展老年宜居环境建设相关的研究与实践，结合自身的调研和设计经验，针对居家环境的适老化设计总结了9条原则和60条要点，在此与各位业界同仁交流分享，旨在为大家思考新时代家居行业转型发展提供“适老化”的视角。

1 居家环境适老化设计的9个原则

总体而言，老年人对于居家环境的基本需求可概括为安全、便利和舒适，在设计当中具体通过9个原则加以应对，为方便记忆，可概括为“四通一平、两多两匀”（图1）。其中，“四通一平”指视线通、声音通、路径通、空气通、地面平；“两多两匀”指储藏多、台面多、光线匀、温度匀，下面将逐一说明。



图1 居家环境适老化设计的原则总结

原则1：视线通

在住宅设计中做到“视线通”有助于加强老年人与照护者之间的联系，使老年人在遇到困难时可得到及时的帮助，提高居住的安全性。

加强住宅视线通透的主要方法是利用开敞空间、洞口及镜子的设置来加强视线联系（图2）。具体方法体现在以下三方面。

1) 公共空间尽量开敞：起居厅、餐厅等空间采用开敞式设计，以达到套内空间通透、视线通达的效果。

2) 半公共空间可设置洞口和镜子：条件允许时，厨房、阳台等空间可通过设置门洞、窗洞或镜子等，加强相邻空间之间的视线联系，方便照护者及时关注到老年人的情况。

3) 私密空间采用透光隔断：卧室和卫生间等私密空间，可以在门上局部安装半透明玻璃或透光不透影的隔断，来了解卧室和卫生间内老年人的情况。

¹ 数据来源：国家统计局，2022

² 住房和城乡建设部部长王蒙徽，2021



通过门洞对位实现视线通透



通过镜子的反射，老人坐在起居厅沙发上不用起身即可观察到入户门的人员进出情况

图2 视线通原则下住宅空间的适老化设计示例

原则2：声音通

与“视线通”相类似，“声音通”的目的也是为了增强老年人与照护者之间的联系，除提升居住安全性的作用之外，还有助于增进家人之间的情感联系。

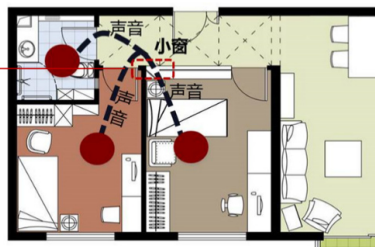


图3 老年人卧室与过道间设置玻璃隔断和窗户，加强卧室、过道和卫生间的声音联系

“声音通”主要通过套内空间的开敞式设计以及部分空间中增加门洞、窗洞等设计手法来实现。图3所示案例中，中部的卧室朝向内部走廊一侧开设小窗，一方面利于通风，另一方面也使两卧室及卫生间之间在声音上更加通达。当老年人在卧室或卫生间中有紧急需求或发生危险时，照护者能够及时听到老年人呼叫的声音并做出响应。

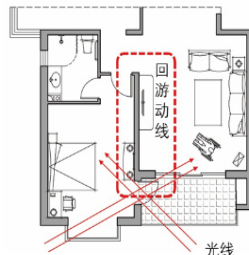
原则3：路径通

受到身体机能衰退的影响，老年人的移动能力、反应能力等都会出现不同程度的衰退，因此在居家环境的设计当中，应做到“路径通”，即保证连接各空间的路径便捷通畅。一方面，不得在路径上放置花盆、纸箱、凳子等不易被注意到的低矮物品，以避免老年人发生跌倒事故；另一方面，应注意缩短老年人在住宅当中的移动距离，这对于行动不便、需要使用助行器械的老年人而言尤其重要。

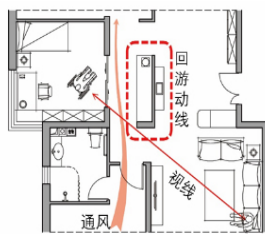
有条件时，可创造“回游动线”，方便老年人在家中活动，同时也有助于改善室内的通风采光条件，增进视线和声音上的联系。住宅中有条件形成“回游动线”的位置主要分布在图4中所示的四处。



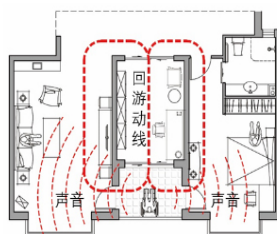
起居厅、厨房与阳台之间



卧室与起居厅、阳台之间



走廊空间



阳台与相邻其他空间之间

图4 住宅中有条件形成“回游动线”的位置示例

原则4：空气通

“空气通”即保证室内空间的自然通风，这有利于保持空气清新，提高居住舒适度，促进老年人

的身心健康。为加强空气流通，设计时需留意门窗洞口的位置和大小，并尽量使门窗对位，以促进对流通风（图5）。

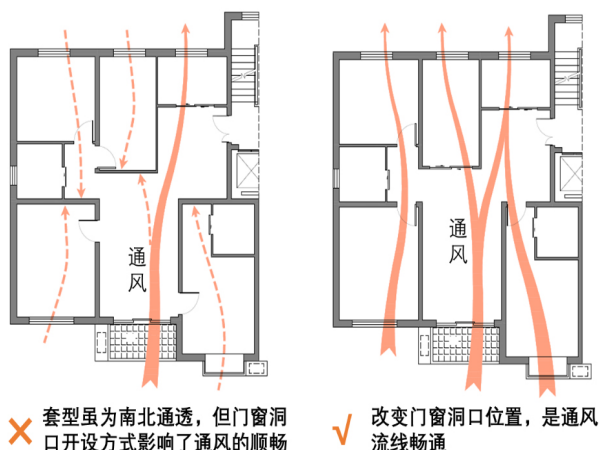


图5 同一住宅套型中不同门窗洞口位置和开启方式的通风效果对比

原则5：地面平

调查数据显示，跌倒是65岁以上老年人伤害死亡的主要原因，半数以上的老年人跌倒事故发生在家中，而住宅中地面的高差正是引发老年人跌倒的主要原因。相比于台阶等较为明显的高差，一些较小的、不易被察觉的高差，更容易引起磕绊、摔伤等事故。当高差超过2厘米时，就会对行动不便和使用轮椅的老年人通行造成障碍。

因此，在居家环境的设计当中需特别注意妥善处理高差问题，尽量保证地面平整，避免出现高差，以保障老年人的通行安全。

通常情况下，住宅中容易产生高差的位置主要涉及以下几处，需特别注意这些位置的地面平整问题：

- 1) 铺装材料交接处：如地板与地砖交接处等；
- 2) 用水空间内外交接处：如厨房、卫生间的门口等；
- 3) 阳台与室内交接处：阳台门口；
- 4) 户外与户内交接处：入户门。

一些家庭会在地面上铺设地毯或地垫，起到防滑和美化空间的作用。但需要注意的是，一些地毯和地垫容易褶皱或起翘，所形成的高差容易绊倒老年人；还有些小块地毯或地垫容易在地面上滑动，造成老年人跌倒；部分地毯或地垫的绒毛较长，不利于轮椅等

助行器械通过。因此，在老年人的居住环境当中应慎用地毯和地垫，如果希望在某个空间内铺设，应最好铺满整个空间；小块地垫应与地面固定，避免滑动。



图6 住宅中常见的地面高差问题及对应的正确处理
方式

原则6：储藏多

调研发现，老年人大多习惯在家中留存较多的旧物，因此老年人住房应加强储藏空间设计，做到分类明晰、储量充足。

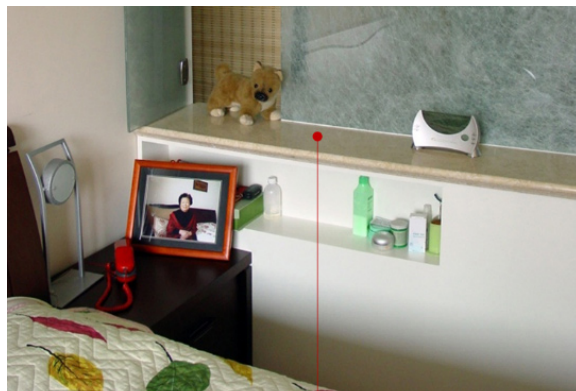
储藏空间既应包括集中式的储物间和壁柜，也应包括分散的、与相关功能空间就近布置的柜体、置物架等储藏空间（图7），这样才能使老年人家中的物品各得其所、井然有序。



集中储藏空间



洗衣机上方的储藏空间



柜子上部提供台面供老人撑扶



卫生间储藏空间



玄关储藏空间

图7 住宅储藏空间设置示例

原则7：台面多

老年人的居住环境当中需要“台面多”，主要是基于以下两个方面的考虑。

1) 便于存放常用物品：随着记忆力的减退，更多老年人希望将常用物品存放在容易看到和取放的台面上，以便寻找和随手取用。

2) 便于撑扶保持平衡：老年人在家中移动时，台面可起到扶手的作用。另外，当老年人需要弯腰拿取较低位置的物品时，台面也可用于辅助老年人保持身体平衡。

在设计实践当中，台面可采用低柜、低台的形式进行设置，也可将高柜的中部留为台面（图8）。便于老年人撑扶的台面高度为75~90cm。



柜子分为上下两部分，中部提供台面存放常用物品

图8 老年人住宅中的台面设置示例

原则8：光线匀

相比于年轻人，老年人每天在家中居住生活的时间更长，对于日照的要求也更高，因此更加需要为住宅中的主要生活空间争取良好的朝向和日照条件。

随着年龄的增长，老年人的视力会出现衰退，眼睛对于光线的敏感性也会出现逐渐下降，因此老年人居住环境应具有良好的自然采光和人工照明。一方面，要充分利用门窗，引入自然光线；另一方面，照明灯具的布置应保证光线均匀，并适当提高照度。

对于光线不易到达的住宅中部区域，如过道、卫生间、储藏室等，可通过在墙面上开窗，设置玻璃隔断，将门进行半透明设计，或利用镜子反射光线等手法，来加强中部空间的自然采光。

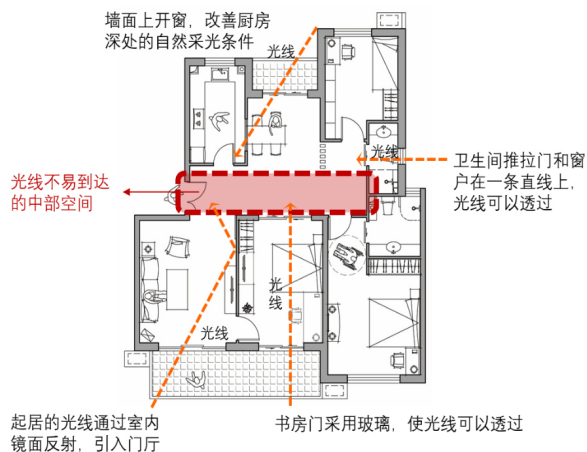
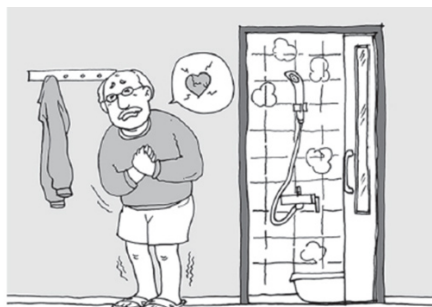


图9 加强套内中部空间采光的设计方法示例

原则9：温度匀

老年人对室内环境的舒适性要求较高，既要求室内温度和湿度保持在一定的舒适范围内，又要保证温度分布的均匀性（图10）。住宅内各个空间应根据使用面积、开窗情况、空间使用需求等因素合理配置地暖、散热器的采暖设施，并做好外墙的保温处理。卫生间可通过设置浴霸、暖风机等设备，保证老年人洗浴时温度的舒适性。



✗ 温湿度的剧烈变化易引发老年人的慢性疾病发作



✓ 老年人的主要活动空间应具有较好的日照和保温条件

图10 老年人对于室内空间环境温湿度需求示意

此外，住宅设计中还可考虑在套内安排适宜的空间，以便把一些户外活动引入室内进行。例如，条件允许时，可将开敞阳台改造为阳光房，老年人在阳光房内活动不仅可以享有与室外相近的日照条件，还可避免刮风、雨雪、雾霾等恶劣天气对其生活的影响，防止因温度和湿度变化而引起的感冒等疾病。

2 居家环境适老化设计的60条要点

在上述9条原则的基础上，为便于指导设计实践，笔者总结了居家环境适老化设计的60条要点（表1），这些要点分别从门厅、起居厅、餐厅、厨房、卫生间、卧室、阳台等主要空间，以及套内常用的设施设备和智能家居共9个部分提出了具体的注意事项。

为方便读者理解这60条要点的重要程度，进而在设计实践中灵活运用，我们对每一条要点提出相应的设置建议。其中，“●”对应的要点，是指在大多数情况下需要尽量做到的，最关乎老年人居家安全、便利的内容；“○”对应的要点，是指在条件允许时，或有实际需要时，可以考虑添加的内容，能够进一步提高老年人的生活质量。

表1 居家环境适老化设计的60条要点

序号	要点	设置建议
（一）门厅的适老化设计要点		
1	需考虑老年人坐姿换鞋需求	●
2	选择适合老年人使用的换鞋凳	●
3	注意鞋柜与门的位置关系	●
4	鞋柜高度需便于老年人撑扶，底部可留空	○
（二）起居厅的适老化设计要点		
5	考虑乘坐轮椅老年人的位置	○
6	沙发、茶几的摆放需便于老年人进出	●
7	选择适合老年人使用的茶几	○
8	沙发选型需注意适老	○
9	避免空调正吹沙发	●
10	地面材质应防滑、防反光	●
（三）餐厅的适老化设计要点		
11	加强餐厅与厨房的视线联系	○
12	考虑就餐时也可以看到电视	○
13	餐桌旁宜留出轮椅专用位置	○

(四) 厨房的适老化设计要点		
14	吊柜需防止磕碰	●
15	吊柜下方可加设中部柜	○
16	操作台面宜连续	○
17	炉灶、水池的两侧和之间均需留出台面	○
18	微波炉宜放在操作台面上, 不宜过高或过低	●
19	厨房内有条件时可布置小餐台	○
20	冰箱旁要留有接手台面	○
(五) 卫生间的适老化设计要点		
21	需注意卫生间干湿分离	●
22	选择适合老年人使用的盥洗台	○
23	盥洗台旁侧墙上宜布置毛巾杆	○
24	卫生间门尽量采用推拉门或外开门	●
25	尽量采用冷热水混水龙头	○
26	淋浴间需设置扶手, 并用浴帘隔断	●
27	花洒高度宜可调节	○
28	淋浴间宜考虑摆放浴凳	○
29	坐便器旁宜设置扶手	●
(六) 卧室的适老化设计要点		
30	卧室宜考虑老年夫妇分床休息的需求	○
31	床的尺寸需适中, 不宜过大或过小	○
32	床的选型与布置需满足老年人使用需求	○
33	床的材质需考虑老年人接触时的舒适感	○
34	主灯宜设双控开关	○
35	空调送风方向不要正对床头	●
36	床头柜要适合老年人使用	○
(七) 阳台的适老化设计要点		
37	封闭阳台上宜布置洗衣机, 以便洗晾衣集中	○
38	晾衣杆需考虑低位操作的可能	○
39	注意阳台门的高差处理	●
40	阳台门的尺寸要利于通行	○
(八) 设施设备的适老化设计要点		
41	开关面板需利于老年人分辨和操作	●
42	各类把手需便于老年人抓握用力	●
43	插座宜根据使用部位适当抬高	○
44	灯具的选择宜适合老年人使用	●
45	主要空间宜有两处灯源	○
46	有阅读和精细操作的部位可加强局部照明	○
47	插座布置需考虑家具的多种摆放形式	○
48	座椅需轻便、稳定, 便于老年人移动、起坐	●
49	需保证门的通行宽度	●
50	需置物的窗台上方可考虑设置一段固定扇	○

51	可考虑采用地板采暖	○
52	需保证老年人方便地使用热水	○
53	需注重卫生间排水、排风问题	●
(九) 智能家居的适老化设计要点		
54	坐便器旁宜预留插座, 以便设置智能便座	○
55	可视对讲系统需考虑老年人使用需求	○
56	宜在卧室和卫生间安装紧急呼叫器	○
57	可在门厅设置电源总控开关	○
58	可设置红外探测器感应老年人行动	○
59	宜采用可调节式的光源	○
60	可考虑采用遥控器操作窗帘、油烟机等	○

3 结语

本文主要对居家环境适老化设计提出了9个原则和60条要点, 希望这些内容能够为从事相关行业的同仁提供一定的参考。

与新建适老住房相比, 对既有建筑进行适老化改造难度更大。受限于既有建筑的结构和规模, 能够对建筑本体实施的改造非常有限, 需要更多借助设施设备产品改善老年人的居住环境、提升他们的生活质量。

然而目前, 我国在这方面的设施设备研发领域还较为薄弱, 市场上适用于居家环境改造的设施设备种类和数量都非常有限。因此, 希望设施设备厂商能够看到老年人需求的特殊性, 加强适老化设施设备的研发力度, 丰富市场上的产品选择, 进而切实解决老年人家庭居住环境当中存在的问题和困难, 提高他们的生活品质。

参考文献

- [1] 周燕珉, 李广龙. 适老家装图集——从9个原则到60条要点[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [2] 周燕珉, 程晓青, 林菊英, 等. 老年住宅[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [3] 周燕珉. 漫画老年家装[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [4] 周燕珉, 秦岭. 老龄化背景下城市新旧住宅的适老化转型[J]. 时代建筑, 2016(6): 22-28.
- [5] 周燕珉, 等. 住宅精细化设计II [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

08 农村室内环境现状 及改善方法



杨旭东 Yang Xudong

清华大学建筑学院副院长、教育部特聘教授、国际期刊Building and Environment主编。国际能源署建筑与社区节能委员会（IEA-EBC）执委和中国代表、国际期刊Building Simulation创办人和主编（2007—2020）。长期从事建筑节能及建筑环境领域国际前沿研究，主持国家自然科学基金重点项目、国家“973”课题、国家“十一五”、“十二五”、“十三五”科技支撑项目、联合国环境署等重大科研课题100余项。发表SCI论文160多篇。



职 远 Zhi Yuan

清华大学建筑学院建筑技术科学系博士研究生。主要从事于农村分布式能源技术、农村户内用能负荷分析、气态污染物净化相关研究，已发表相关SCI论文2篇。



何 馨 He Xin

清华大学建筑学院建筑技术科学系硕士研究生。研究方向为村镇建筑节能和清洁取暖技术路径。参与了“村镇微分布式功能技术研究”“长治市可再生能源应用及试点方案研究”“内蒙古自治区以及青海省农村散煤治理技术策略及商业模式研究”等重点课题的研究。

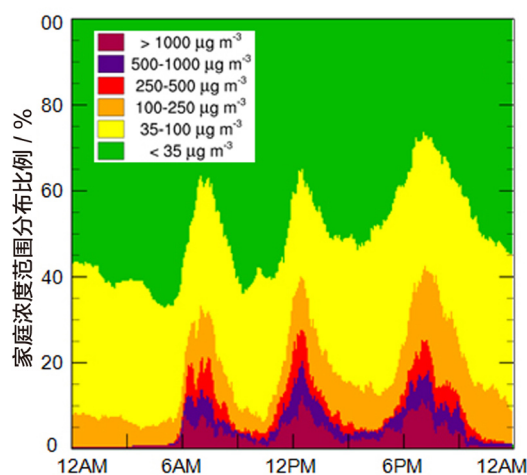
1 农村建筑室内环境现状及主要问题

截止到2018年,我国共有5.64亿农村人口,农村住宅建筑面积229亿 m^2 ,占全国总建筑面积的38%^[1]。每年农村生活用能总量约为3.11亿tce,其中包括用于取暖、炊事(含生活热水)、空调、生活用电(包括照明和各类家电)的能耗,统计的能源种类包括:煤炭(散煤、蜂窝煤)、液化石油气、电力、天然气等商品能,以及以木柴和秸秆为主的非商品能。较多的散煤和散烧生物质用能带来了严重的环境污染和健康问题。1吨散煤燃烧与1吨电厂用煤相比,多排放7倍的 SO_2 、2倍的 NO_x 和66倍的 $\text{PM}_{2.5}$ 。对于京津冀地区,散煤仅占总能耗的3%,却贡献了12%~32%的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放,以及33%的农村地区健康问题。流行病学研究表明,长时间暴露于高浓度的污染环境中,农村居民的身体健康会受到极大的危害,导致中国日益增长的心血管疾病负担(心血管动脉硬化、血压升高等)和死亡率的升高。在中国云南地区的研究发现去除其他变量的影响后,年龄较大妇女在受到使用生物质做饭所产生的 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露影响时,每对数单位的 $\text{PM}_{2.5}$ 增加量会导致 $(4.1 \pm 2.6) \text{ mm Hg}$ 的收缩压升高^[2],由此推算会造成中国每年有23.1万妇女死亡,且其中黑炭暴露对血压的影响比 $\text{PM}_{2.5}$ 更强。根据世界卫生组织报告^[3],2019年中国有103万人死于空气污染,其中62%发生在农村。因此,农村室内环境现状并不乐观,需要引起人们的重视。

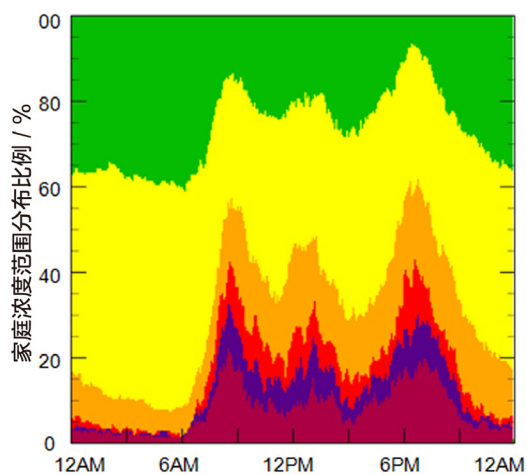
1.1 农村室内污染现状分析

通过在2014和2015年对我国南方某县11个自然村约200户农户的实地调研发现,大约有90%的家庭都把木柴作为主要的炊事燃料,其次为LPG、沼气和电;而且由于地处高海拔地区,冬季大约有95%的家庭通过把木柴或木炭放置在火盆内敞口燃烧作为主要的取暖方式。测试后发现由此导致冬季室内 $\text{PM}_{2.5}$ 、 CO 、 NO 和 NO_2 的平均浓度分别是夏季的2.5倍、1.6倍、2.6倍和1.5倍。而且无论夏季还是冬季,由于受早、中、晚炊事的影响,农户全天的逐时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度会出现三次峰值,如图1所示。夏季时约三分之一农户的峰值浓度位于 $100 \sim 250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的范围,冬季时约三分之一农户的峰值浓度位于 $250 \sim 500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的范围。按照世界卫生组织标准室内

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度指导标准为 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$,夏季室内 $\text{PM}_{2.5}$ 三个峰值浓度超标率分别为64%、66%和73%;冬季室内 $\text{PM}_{2.5}$ 三个峰值浓度超标率分别为86%、82%和93%。综合评价结果表明,该地区夏季室内空气重污染占34%,中污染占21.3%。冬季受室内烤火、熏腊肉和房间密闭性提高等因素的影响,室内空气重污染比例上升到76.5%,中污染比例占15.7%。



(a) 夏季



(b) 冬季

图1 我国南方某县200个农户使用传统炉灶直接燃烧木柴导致夏季和冬季室内 $\text{PM}_{2.5}$ 实时浓度分布曲线

在北方地区,2016年对北方某6个自然村约220户农户的实地调研发现,60%以上的家庭使用传统柴灶进行炊事活动,且有约94%的农户使用燃煤土暖气作为主要取暖方式。所调研村户均能耗煤炭3.47 t、薪柴19.11 kg、秸秆27.91 kg,煤炭使用量超过建筑能耗的80%。对内蒙古赤峰市6个自然村约100户农户的

实地调研发现，有超过90%的家庭都把玉米秸秆和木柴作为主要的炊事燃料，且有超过80%的农户使用燃煤土暖气作为主要取暖方式，农户一般会将土暖气煤炉和柴灶安置在厨房内，也有个别农户直接将煤炉放置在卧室内。

实测结果表明，普通柴灶的开放式填料口结构会造成农户在进行炊事活动时短时间内产生更高浓度的室内空气污染，瞬时浓度可超过 $8000\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，但持续时间相对较短；而由于农户一天内需要对室内燃煤取暖炉进行多次的加煤、搅拌煤等行为，所以燃煤取暖炉更容易造成长时间的较高浓度的PM_{2.5}污染。同时，根据农户全天的跟踪测试可以发现，各种生活状态的农户在厨房的停留时间都是很短的，最长不超过4小时，约占一天时间的17%，但厨房对人体PM_{2.5}的暴露量的贡献却是最大的，贡献率范围在49.0%~68.8%之间。农户停留在厨房的时间为做饭和吃饭的时间，这段时间内厨房PM_{2.5}浓度高达 $1752\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，所以虽然农户在厨房的停留时间短，但暴露量却非常高。

在上述室内空气污染的影响下，南方所测试农户的冬季人体PM_{2.5}平均暴露浓度（几何均值： $169\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）是夏季（几何均值： $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）的2.1倍。冬季人体CO的平均暴露浓度（1.9ppm）是夏季（0.6ppm）的2.9倍。而北方地区农户冬季时为了减少农宅的冷风渗透，大多数会将门窗外面整体用塑料薄膜进行覆盖，而且整个冬季都不开窗，造成室内换气次数过小，这样更容易加重室内空气污染程度。测试结果表明，北方地区农户的冬季人体PM_{2.5}平均暴露浓度接近南方农户冬季暴露水平的2倍。

1.2 农村室内污染原因分析

农村地区家庭固体燃料燃烧被公认为是造成环境污染以及区域和全球性气候变化的主要原因之一，同时也是一种主要的环境性健康风险影响因子^[4-6]。农村固体燃料直接燃烧会产生大量的污染物（如CO、SO₂、NO_x、颗粒物等）和温室气体CO₂。

对于北方地区来说，冬季取暖是室内空气污染的主要源头之一。不同的取暖形式对室内空气质量的影响也不同。例如一些填料口在室内的传统火炕（图2（a）），在烧炕的时候有大量烟气进入到室内；还有一些农户直接将取暖炉（图2（b））放置

到室内，虽然炉子与烟囱相连接，但是总会有一部分CO、PM_{2.5}等从炉盖等缝隙处泄露出来，造成安全隐患；对于采用土暖气煤炉+散热器取暖的农户，也不宜将锅炉放置在室内（图2（d）），否则烟气也会泄露到室内，造成一定程度的污染。



(a) 传统火炕 (b) 取暖炉 (c) 煤炉



(d) 兼具炊事功能的土暖气煤炉+散热器

图2 北方农村既有不同取暖形式

对于南方地区来说，尤其是在一些气候寒冷的山区，采用火盆（图3（a））、甚至直接地上烧柴烤火（图3（b））的方式仍很普遍，也导致污染物大量直接排放到室内，对人体健康构成了直接的威胁。



(a) 火盆 (b) 地上木柴直接烤火

图3 南方农村既有不同取暖形式

除了取暖以外，农村地区用敞口柴灶（图4（a））或火膛（图4（b））进行炊事也较为常见。这些炊事方式没有烟囱向室外排烟，燃烧产生的烟气直接散发到室内，造成的室内污染尤为严重。即使是安装了烟囱的柴灶（图4（c））和煤灶（图4

(d))，部分燃烧污染物也从填料口直接泄漏到厨房里造成污染。



(a) 敞口柴灶



(b) 室内火膛



(c) 传统柴灶



(d) 煤灶

图4 不同炊事方式对室内空气污染影响

2 室内环境改善原则

根据前文对农村室内环境的现状分析，造成农村室内环境恶劣的原因主要有两方面：1) 农村地区家庭固体燃料燃烧；2) 居住者的不良生活习惯。其中，固体燃料燃烧占主导地位，燃料燃烧不仅会危害室内环境的空气品质，还会将污染物排放到大气内，造成区域性的大气污染。同时，大气环境的恶化又会加剧室内空气品质的恶化，形成恶性循环。尤其是北方农村由于冬季供暖的需要，固体燃料消耗量更大，因此，北方农村的室内环境更为恶劣。

为了降低室内污染物对人体健康的危害，一般有三种方法：1) 去除污染源，从源头降低污染物对人体健康的风险；2) 阻断污染物的传播路径，如进行通风稀释，使用净化设备；3) 防止污染物与人体接触，如使用个体防护手段，佩戴口罩等。但是，对于农村建筑，并不是以上方案都能适用。首先，农村经济水平相比城市还比较落后，农民很难承受成本较高的方案，如使用净化设备等；同时，由于农村不同房间不直接相连，需要穿越院子到达，同时由于做农活的需要，农民需要频繁进出房间，农民在室内的时间是间断性的，因此，个体防护手段会妨碍农民的行动，难以得到普及。

所以，用于改善农村室内环境的方案要满足以下两个要求：1) 成本低；2) 灵活性高。综上所述，从源头治理，是改善农村室内环境的首选方案。而农村室内环境的污染源来自于：固体燃料燃烧和农民不良生活习惯，要想从源头上减少污染物的产生，从而改善室内环境品质，就要减少或者改善固体燃料的燃烧。农民燃烧固体燃料通常有两个目的：供暖和炊事，改进供暖和炊事方式，从而减少固体燃料的燃烧，可以从源头上改善农村室内的环境质量。

3 室内环境改善方案

3.1 改进农村供暖方式

2017—2019年期间，京津冀大气污染通道为主地区共有43个城市经过竞争进入中央财政支持的冬季清洁取暖试点行动计划。截止2020年底，2+26城市和汾渭平原农村地区累计完成散煤替代约2677万户左右，各试点城市清洁取暖率显著提升，第一批试点城市城区平均清洁取暖率达到99.31%，城乡结合部、所辖县及农村地区的平均清洁取暖率达到88.59%，其中廊坊、济南、开封、鹤壁等城市的城乡结合部、所辖县及农村地区的平均清洁取暖率达到100%。第二批试点城市城区平均清洁取暖率达到96.23%，城乡结合部、所辖县及农村地区的平均清洁取暖率达到79.62%，其中长治市和安阳市的城乡结合部、所辖县及农村地区的平均清洁取暖率接近100%。第三批试点城市城区平均清洁取暖率达到77.92%，城乡结合部、所辖县及农村地区的平均清洁取暖率达到71.55%。其中，部分城市如鹤壁推广采用“四一模式”，即初投资不高于1万元，年运行费用不超过1000元，一键式操作设备以及一个地区采用一个整体规划，改善了农民的供暖效果并大幅降低了供暖带来的空气品质恶化的问题。

煤改清洁能源工程有效促进环境空气质量改善。根据环保部分的初步统计，全国PM_{2.5} 年平均值由2017的43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至2020的33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，如图5所示。第一批试点城市经过三年试点，PM_{2.5}平均浓度从2016—2017年秋冬季的109.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至2019—2020年秋冬季的69.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，下降36.3%，空气质量改善显著。第二批试点城市经过两年的试点，PM_{2.5}平均

浓度从2017—2018年秋冬季的 $80.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至2019—2020年秋冬季的 $71.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，下降11.4%。第三批试点城市经过一年试点，PM2.5平均浓度从2018—2019年秋冬季的 $73.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至2019—2020年秋冬季的 $13.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，下降13.8%，空气质量改善也较为明显。

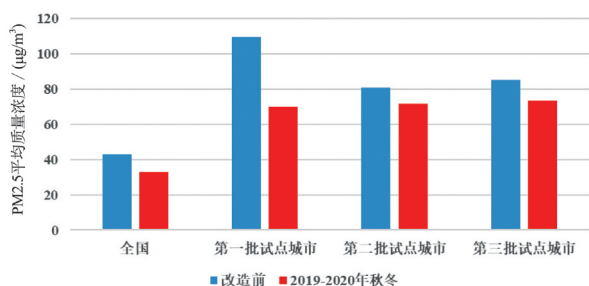


图5 全国及北方清洁取暖试点城市PM2.5浓度变化

根据《2019中国生态环境状况公报》，2019年全国337个城市优良天数比例平均为82%，337个城市累计发生严重污染天数为452天，比2018年减少183天，其中“2+26”城市优良天数比例平均为53.1%，比2017年上升3.8个百分点，汾渭平原城市优良天数比例平均为61.7%，比2017年上升9.6个百分点。

同时，通过对北京市房山区某村2013年和2018年取暖季室外空气PM2.5的连续监测数据对比，量化分析了清洁取暖的实施对农村地区室外空气质量的影响。该村的农户在2013年基本使用煤炉、火炕等取暖方式，在2018年绝大多数农户改为低温空气源热泵取暖。监测所用仪器为DASIBI 7201型β射线法悬浮颗粒分析仪（图6），记录间隔为1min，监测地点均为村内位置相对较高的村委会二层楼顶，排除了仪器安装位置差异带来的影响。

图7所示为2013年和2018年该村1~3月大气日均PM2.5浓度变化情况。其浓度的变化趋势与北京市平均大气监测数据基本一致。2013年该村1~3月大气日均PM2.5浓度平均值为 $139\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，2018年该值为 $62\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，降低了55%。环保部于2012年发布的《环境空气质量标准》GB 3095—2012规定环境空气中的PM2.5控制浓度一级标准为日平均浓度 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，二级标准为日平均浓度 $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。农村地区执行二级标准。通过该村日均PM2.5浓度概率密度分布分析可知，2013年日均浓度最多分布在 $120\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右，而在2018

年则最多分布在 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右，说明日均室外PM2.5浓度逐渐正在向低浓度逐渐靠近，能达到二级标准甚至一级标准的天数将会越来越多。清洁取暖的实施对于改善室外空气质量具有明显的效果。



图6 2013年和2018年北京市房山区某村室外环境监测所用仪器

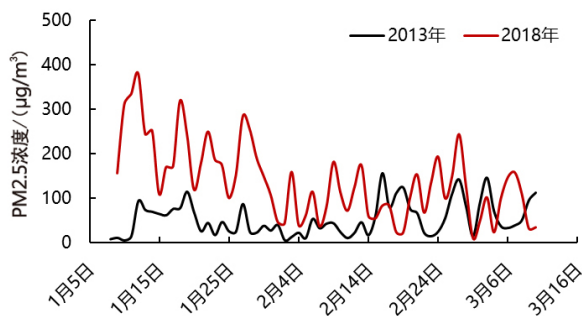


图7 2013年和2018年北京市某村1~3月大气日均PM2.5浓度

据有关学者研究，2013—2017年间全国人群PM2.5暴露水平从 $61.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至 $42.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，下降32%。减排是中国近年来空气质量改善的主导因素，而年际间气象条件变化影响较小。减排和气象条件变化对全国人群PM2.5暴露水平下降的贡献分别为91%和9%。其中，减排措施中民用燃料清洁化对空气质量改善明显，使全国人群PM2.5浓度暴露水平下降了 $2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

3.2 改进炊事方式

目前还有相当一部分比例的农民使用燃煤或者直接燃烧秸秆等生物质能进行炊事活动，燃烧所产生的CO、NO₂、SO₂等污染物会严重影响室内环境品质，而减少炊事活动中的固体燃烧可以从源头上

改善这个问题。目前农村已经在使用天然气、液化石油气作为燃料进行炊事活动，这样可以极大地减少炊事活动中燃烧所释放的污染问题。也有家庭使用电磁炉等电热设备，这样可以彻底解决炊事活动中释放燃烧产物的问题。在北方冬季，由于生物质能储备较多（如玉米秸秆、树枝等），村民做饭时还会选择直接燃烧生物质能，这样会造成燃料燃烧不充分，释放有害污染物以及大量烟尘，既浪费了燃料，又使得室内环境恶化。有效的解决办法是将生物质统一进行粉碎、压缩处理，生产为生物质颗粒燃料，然后利用改进的燃烧炉具（见图8）进行燃烧，可以减少燃烧过程中的有害物质排放。



图8 智能型生物质颗粒供暖炊事两用炉

近几年，在山东、山西、河北、河南、黑龙江等地开展了生物质清洁取暖试点，取得了较好的示范效果。农户使用智能型生物质颗粒燃料取暖炉的热效率可达80%以上（相较于普通煤炉40%~50%的热效率提升一倍左右，能够在使用低热值的秸秆燃料的情况下输出与煤相当的热量），每户年消耗玉米秸秆、小麦秸秆、树枝等农业废弃物加工的颗粒燃料2~3t左右，实现了农林废弃物的高效利用和农户的减支增收。

3.3 改善居住者不良习惯

除了固体燃料的燃烧，居住者的不良习惯也是造成农村室内环境恶化的一个重要因素。在调研中发现，油烟机的普及率在农村还比较低，即使有的

家庭安装了油烟机，使用频率也比较低，但是做饭中会产生PM_{2.5}、VOCs以及燃烧产物等有害物质，影响室内空气品质；同时，在北方农村，农民为了保暖，几乎不开启窗户，导致房间内的污染物难以排出室内；除此之外，冬季南方农村居民在室内使用“火盆”、燃煤炉等直接燃烧的取暖设备，这样会产生SO₂、NO₂、CO等污染物，造成室内环境恶化。还有一些居住者的习惯如：抽烟、在室内加工农业产品（如烟熏肉）等也会加剧室内环境污染。而改善这些不良习惯，无疑会减少室内的污染源，改善室内环境质量。

4 结束语

农村住宅室内环境品质不容乐观，主要原因是供暖及炊事活动中固体燃料的燃烧，以及居住者的不良生活习惯导致的。要改善农村家居环境，需要从源头入手，改进农村供暖方式、改进炊事用具，以及改变居住者的不良生活习惯，是解决农村家居环境恶化的重要方法。

参考文献

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告2020 [R]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020
- [2] BAUMGARTNER J, SCHAUER J J, EZZATI M, et al. Indoor air pollution and blood pressure in adult women living in rural China[J]. Environmental Health Perspectives, 2011, 119(10): 1390-1395.
- [3] <https://www.who.int/>
- [4] CHAFE Z A, BRAUER M, KLIMONT Z, et al. Household cooking with solid fuels contributes to ambient PM_{2.5} air pollution and the burden of disease[J]. Environmental Health Perspectives, 2014, 122(12): 1314-1320.
- [5] ZHAO Bin, ZHENG Haotian, WANG Shuxiao, et al. Change in household fuels dominates the decrease in PM 2.5 exposure and premature mortality in China in 2005-2015[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(49): 12401-12406.
- [6] WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). WHO guidelines for indoor air quality: household fuel combustion [S]. WHO, 2014.

09

农村家居环境控制中的建筑被动式热设计技术及应用



袁 满 Yuan Man

北京航空航天大学航空科学与工程学院博士研究生。主要从事庭院建筑被动式节能技术、飞行器热管理及电子设备冷却技术、空间系统多学科性能优化及其智能控制技术等相关研究，已发表相关SCI论文5篇。



李 闯 Li Chuang

华北水利水电大学电力学院硕士研究生。主要从事庭院建筑被动式节能技术、土壤热修复、航天及化工等领域多相流和传热问题理论的相关研究，已发表相关SCI论文4篇。



王为术 Wang Weishu

华北水利水电大学教授，电力学院副院长，研究生导师。河南省科技创新杰出青年、河南省动力工程及工程热物理重点学科带头人、河南省创新型科技团队学术带头人。长期从事水利水电、淡水资源、能源、动力、核工程、航天及化工等领域多相流和传热问题的理论、实验和数值研究。



李运泽 Li Yunze

北京航空航天大学航空科学与工程学院教授，人机与环境工程专业/制冷及低温工程专业博士生导师。主要从事家居环境控制、建筑被动式节能技术、飞行器能量管理及新能源技术等方向的科研工作。目前已主持完成973课题1项、863课题5项，国家自然科学基金、航空科学基金等科研项目50余项。

农村家居环境控制与建筑的热设计关系密切，加上其建筑呈分布式特点，采取集中供暖的挑战大，墙体缺少专门的保温措施，导致冬季自取暖时不仅能耗大、能源利用率低、碳排放量高，而且室内温度水平低、温度分布不均匀的普遍现象。北航科研团队通过研究国内外先进的建筑节能技术，以河北省邢台市坐北朝南和坐南朝北的两种典型农村四合院建筑为例，研究北方农村旨在改善其冬季热环境的“零能耗”被动式热设计策略，首次提出了“顶部阳光间”的概念，解决了北侧房间温度低的难题，在有效降低农村建筑能耗的同时，明显改善了建筑内部日常家居空间的光照条件和温度分布均匀性，对未来农村低耗能建筑节能技术的发展起到

了推动作用。

1 农村庭院建筑能耗及碳排放现状

随着我国经济的快速发展，建筑能耗已经占据全国总能耗的30%左右，逐渐逼近工业能耗和交通能耗^[1-2]，如图1所示。目前，我国农村建筑占地面积约278亿m²，其能耗占建筑总能耗的40%左右，相当于 2×10^8 吨标准煤的消耗量^[3]。农村家庭能耗消费主要集中于室内取暖和炊事，约占到农村家庭总能耗的88%，所需能源主要来自于生物质能（秸秆、枯枝等）和煤炭，其碳排放量占国内建筑总碳排放量的21%，约4.08亿吨CO₂^[4]。

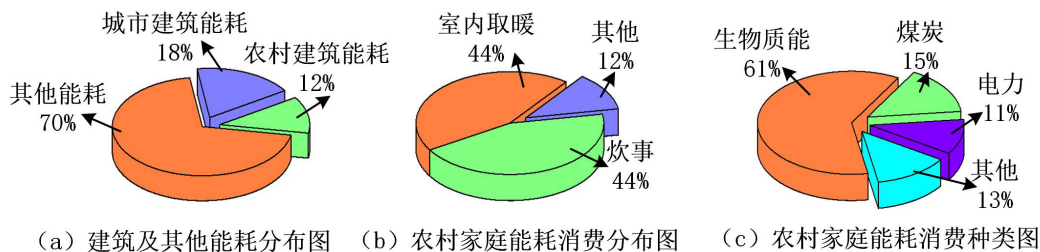


图1 农村家庭建筑能耗相关分布图

2 农村庭院建筑传统被动式热设计技术及优化途径

2.1 传统正向阳光间及优缺点

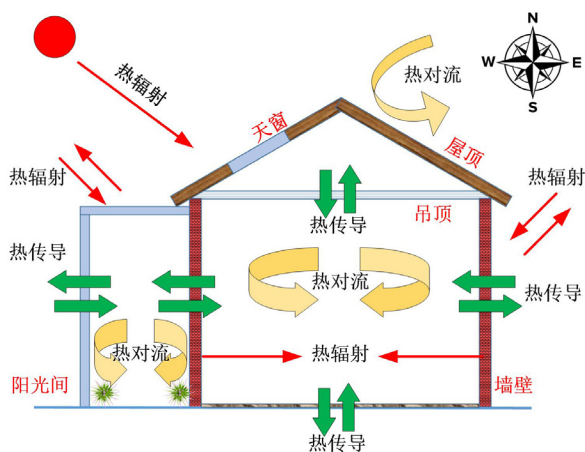


图2 传统阳光间

阳光间是一种利用“温室效应”原理的被动式热设计技术，是降低建筑能耗的有效手段，一般布置在向阳侧，被称为传统阳光间或正向阳光间，如

图2所示。在冬季白天，阳光通过玻璃板进入阳光间和南侧房间内，可以明显提高房间内的温度和采光度，到了晚上，阳光间内的空气层增加了房间围护结构与外界环境的传热热阻，有效的降低了室内热量的流失速度。

但是，随着家居环境需求的变化，庭院建筑纵深呈逐渐增加的态势，传统阳光间已不能满足建筑内部温度均匀性和采光要求。无采暖措施下，北侧房间的温度会变得更低。

2.2 农村庭院建筑围护结构现状及节能优化策略

农村庭院建筑围护结构主要包括屋顶、外墙、窗户、地面和庭院等。由图2可以看出，建筑围护结构作为房间内部与外界环境换热的主要桥梁，采取一定的保温措施可以减少建筑内部热量的流失。

现有农村庭院建筑中，墙体结构一般由两块240mm的黏土实心砖组成，没有采取任何的保温措施；建筑物的向阳侧仅开1~2扇单层玻璃的小窗户，阳光不能充分的进入室内，窗户的密封性也非常差；屋顶一般做成斜坡状，以防漏为主，几乎没

有任何的保温措施。以上几点现象在农村庭院建筑中普遍存在，这导致了冬天冷夏天热的境况，因此维持建筑内部温度时需要消耗更多的能耗。

下面是部分研究学者对农村庭院建筑围护结构进行的优化改造和节能策略。

1) 基于Trombe墙的墙体热设计

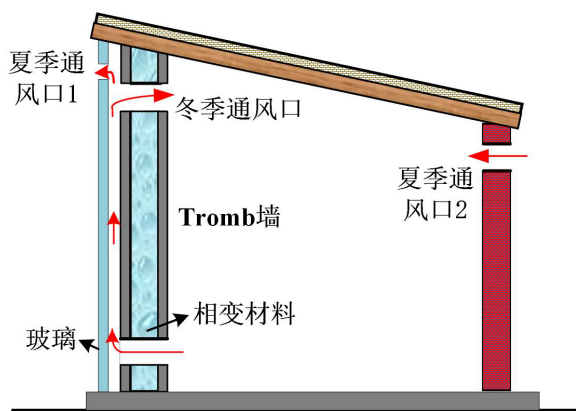


图3 Trombe墙

Telkes^[5]提出的Trombe墙是目前应用最广泛的墙体结构，其主要原理是利用相变材料与墙体单元结合来提高墙体的集热蓄热能力，以此来减小房间内的温度波动，图3是Trombe墙技术应用的一个经典案例。冬季白天，太阳辐射透过玻璃对墙壁进行加热，太阳辐射通过墙体导热和通风口空气的对流换热向房间进行供暖，达到提高室温目的，到了晚上，蓄热墙白天吸收的太阳辐射会以热辐射的形式向房间内传递热量，以维持室内温度。夏季时，玻璃盖板采取遮光措施，然后关闭冬季通风口，打开夏季通风口，利用夹层的“热烟囱”效应实现房间的降温和自然通风。

2) 节能环保的绿色屋顶

屋顶主要由面层（彩钢板、瓦等）、防水层、望板以及木屋架构成，其坡度、面积、开窗比等都会影响到建筑能耗的大小^[6]。目前对屋顶的被动式改造一般是在屋顶设置天窗来提高室内的自然通风，也有学者在屋顶种植绿色植物，利用其“蒸腾作用”降温 and “光合作用”吸收周围环境中的CO₂。

3) 密封性强且采光度好的低发射率玻璃外窗

窗户是建筑围护结构中散热量最大的结构，接近55%的热量都是通过窗户渗漏损失的^[7]。被动式热

设计中常采用双层或多层的低发射率（Low-E）玻璃来改善室内的采光度，并且在玻璃板之间填充惰性气体来减小窗户的换热系数，使得太阳辐射能够充分进入室内的同时，又减缓了窗户的渗漏现象。

2.3 农村庭院建筑被动式热设计与可再生能源的有效结合

在农村庭院建筑被动式热设计基础之上与可再生能源进行结合，可以提高热舒适性和房间温度的均匀性。可再生能源主要包括太阳能、生物质能、地热能 and 风能，其中属太阳能在农村最易利用。

太阳能利用比较成熟的技术包括太阳能热水器和光伏发电^[8-9]。太阳能热水器加热的水一般用于炊事、洗澡等活动，也有学者利用太阳能集热与电辅助加热的水流入散热器对建筑进行供暖。由于成本原因，光伏发电目前仅为庭院建筑提供基本的照明、加热等小型电力，相信随着科技的发展、微网并网技术的成熟以及人类对清洁能源的追求，其必将成为家庭建筑中不可或缺的节能技术。

3 北航团队在农村庭院建筑被动式热设计方向的研究进展

通过对农村庭院建筑被动式热设计技术的研究，北航团队以河北省邢台市坐北朝南（南向建筑）和坐南朝北（北向建筑）的两种典型农村四合院建筑为例，研究了北方农村冬季在被动式热设计策略下房间内温度分布以及采光的情况，采用的软件分别是DesignBuilder^[10]和EnergyPlus^[11]。

3.1 基于顶部阳光间和正向阳光间的南向建筑被动式热设计节能策略

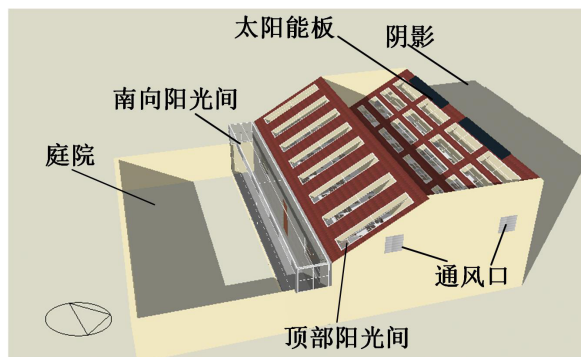


图4 坐北朝南建筑可视化模型（DesignBuilder渲染）

图4是南向建筑经过被动式热设计之后的可视化模型，主要由庭院、南（正）向阳光间、顶部阳光间、围护结构和太阳能热水器系统组成，详细改造内容如下。

3.1.1 南向建筑围护结构被动式热设计策略

南向建筑围护结构除了南墙外都采用了外保温措施，顶部阳光间屋顶采用的是双层Low-E玻璃。南侧设计有正向阳光间，因此将南墙构建成了集热蓄热墙，墙内相变材料的蓄热热源来自太阳辐射，为了强化正向阳光间与其毗邻房间的换热效果，南墙没有采用保温措施。北墙也被构建成为集热蓄热墙，墙内相变材料的蓄热热源来自太阳能热水器里的热水，为了防止热量向外渗透，北墙采用了外保温的措施。

3.1.2 南向建筑顶部阳光间相关结构的被动式热设计

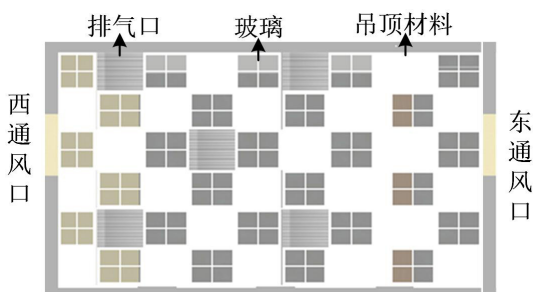


图5 吊顶的结构示意图

顶部阳光间是利用斜屋顶和改造后的吊顶之间形成封闭空间，利用“温室效应”原理构建而成的阳光间，如图4所示。改造后的吊顶如图5所示，排气口、玻璃和吊顶板相间布置，太阳辐射可以透过顶部阳光间进入室内，能够增强房间内采光度和提高室内温度。顶部阳光间的东西侧开有通风口，可以与吊顶处的排气口配合来强化室内的自然通风。

3.1.3 南向建筑内部房间布局的原理

南向建筑南侧布置有正向阳光间，因此南侧房间的保温效果和采光度都相当好，可以将主卧、客厅布置在此。中国北方的冬天常刮西北风，可以将厨房布置在西北角，通过炊事活动来提高厨房的温度，并且可以对卫生间和主卧起到保温效果。客卧住人的时间比较少，安置在建筑的东北角。规划后的房间布局如图6所示。

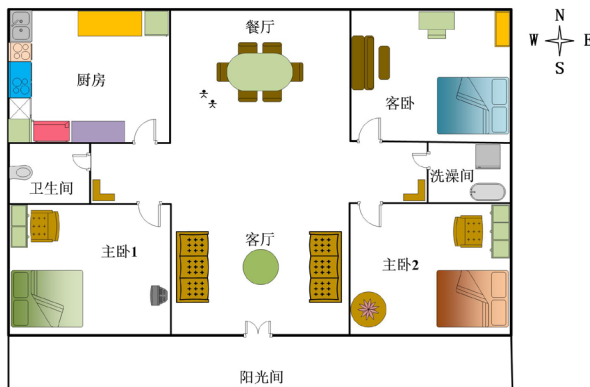


图6 南向建筑内部房间结构布局

3.1.4 基于太阳能光热技术的北侧房间供暖系统

我国北方农村建筑的北墙是背阴面，太阳无法对墙体进行加热，太阳能热水器与集热蓄热墙相结合正好可以解决这一难题，该类型的太阳能板被安装在屋顶顶部，如图4所示。北墙是集热蓄热墙，墙内嵌有水管，太阳能热水器和电辅助加热器可以相互配合对相变材料进行加热。白天以太阳能热水器加热为主，晚上根据房间温度需求适时采用电辅助加热。系统内的热水可以用于洗澡、炊事，系统外的热水也可以进入系统，避免能源浪费，如图7所示。

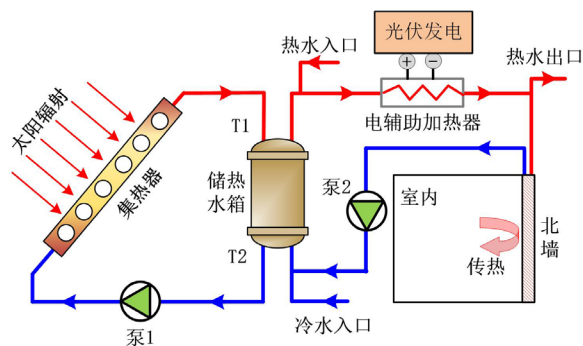


图7 太阳能光热技术供暖系统

3.2 基于顶部阳光间和反向阳光间的北向建筑被动式热设计节能策略

图8是北向建筑被动式热设计之后的可视化模型，主要由庭院、北（反）向阳光间、顶部阳光间、围护结构和太阳能热水器系统组成。

北向建筑围护结构的南墙采用了外保温的措施防止热量流失，并且在南侧的外侧增加了一层玻璃盖板，从而强化室内的传热与自然通风，其原理如

图3所示。北墙紧挨着反向阳光间，被设计成集热蓄热墙，因此没有采取保温措施。其余围护结构的保温措施与南向建筑相同。

北向建筑顶部阳光间的玻璃窗安置在屋顶立面墙上，吊顶的改造与图5类似。太阳能光热技术原理与图7相同，唯一的区别是太阳能板安装在屋顶的立面墙上。

两种典型建筑的房间布局原理是相似的，该类型建筑的主卧紧挨反向阳光间，但是由于太阳辐射不能充分的进入到室内，因此通过太阳能热水器供热系统对房间进行补充供暖。南向由于光照充足，集热蓄热墙可以给南侧房间进行供暖，因此其它卧室被安排在此。

两种类型建筑利用的被动式热设计技术原理相似，下面以南向建筑的被动式热设计为例进行说明。

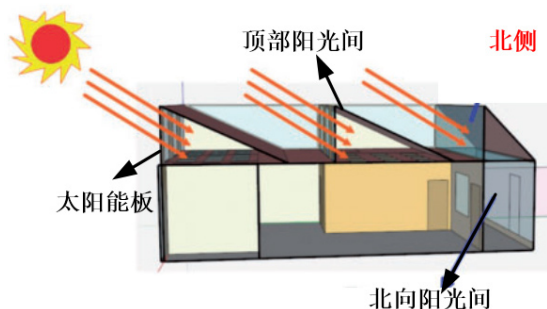


图8 坐南朝北建筑可视化模型 (EnergyPlus渲染)

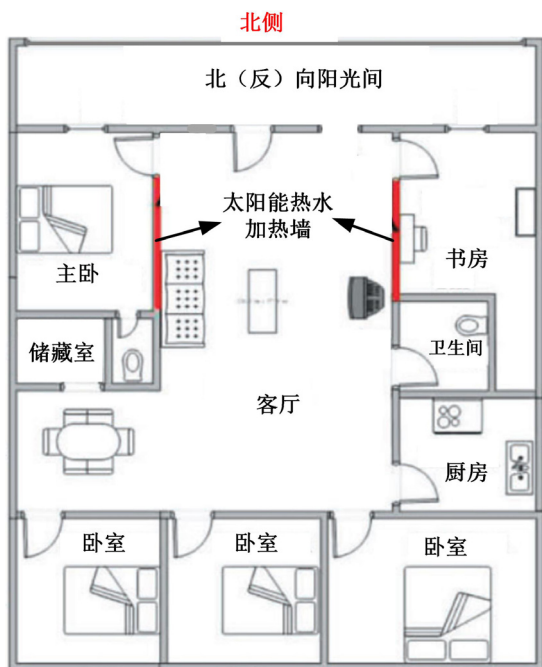


图9 北向建筑内部房间结构布局

3.3 南向建筑被动式热设计的仿真结果与讨论

3.3.1 不同被动式热设计策略对房间温度的影响

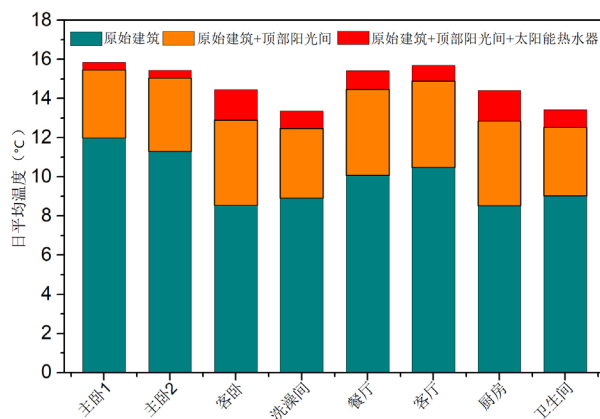


图10 房间温度分布

图10是在不同的热设计策略下，建筑内部房间的平均温度分布图。原始建筑仅设计有南向阳光间，从图中可以看出，主卧的日平均温度相对较高，但各个房间的温度均低于12℃。在原始建筑（含有正向阳光间）的基础之上增加顶部阳光间后，每个房间的温度都提高了3.5℃左右，温度得到了很大的改善。还可以看出，增加了太阳能热水供暖系统后，客卧、厨房的温度增加了2℃左右，整个建筑的平均温度达到了14.75℃，均匀性得到了有效的提高。由于餐厅是半封闭空间，北墙提供的热量向其它房间进行了扩散，导致了客厅、餐厅、卫生间和洗澡间的温度都得到了不同程度的提高，但对主卧温度的影响较小。

3.3.2 顶部阳光间和正向阳光间对室内采光的影响

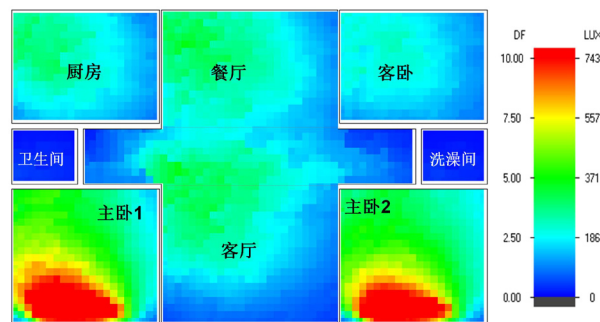


图11 南向建筑内部房间采光分布云图

图11是下午三点左右时房间的采光分布云图。从图中可以看出，由于采用了顶部阳光间和正向阳光间设计，除了洗澡间和卫生间的采光性能比较差之

外，其余房间的自然采光都非常好。洗澡间和卫生间的使用频率较低，不影响整个建筑的采光性能。

表1 不同类型房间的采光数据

房间类型	面积/m ²	UDI _{100~2000} /%	平均DF /%
主卧1	15.84	99.7	6.4
主卧2	15.84	99.7	5.9
客卧	15.84	96.1	2.2
厨房	13.22	97.5	2.6
客厅	50.63	82.8	2.5
洗澡间	2.87	0	0.4
卫生间	2.87	0	0.3

有用的日光照度（useful-daylight-illuminance, UDI）和采光因子（daylight factor, DF）是评价建筑采光性能常用的两个性能指标。当建筑空间的80%的照度水平在100 lx和2000 lx之间（ $UDI_{100-2000} \geq 80\%$ ）和建筑空间的50%的采光因子不低于2.1%时，认为

建筑的自然采光性能较好。表1是各个房间的采光数据，可以看出，建筑空间的 $UDI_{100-2000}$ 和DF值远远满足两个评价标准。

3.3.3 南向建筑被动式热设计后的能耗和经济性分析

南向建筑的被动式设计主要是在屋顶改造和太阳能热水系统上进行了投资，因此计算热设计所需投资时，仅考虑改造前后屋顶和太阳能热水系统的造价差，相关数据如表2所示。可以看出，原始建筑在屋顶上的投资为28410.72元，取暖期间的建筑热耗为9332.01kW·h（包含400kW·h的采光能耗），建筑被动式改造后在屋顶上的投资为41263.51元，取暖期间的建筑能耗为5336.73kW·h，因此需要额外投资12852.79元。被动式建筑每年能够节约热耗3995.28kW·h，约2397.168元，仅从节约热耗的角度计算，预计5年之后即可回本。

表2 建筑改造前后的造价和能耗对比

名称	建筑被动式改造前			建筑被动式改造后		
	面积/m ²	单价/元	价格/元	面积/m ²	单价/元	价格/元
立墙	23.48	95	2230.6	84.18	95	7997.1
斜坡	152.21	172	26180.12	81.63	172	14040.36
玻璃	0	265	0	55.57	265	14760.5
太阳能热水系统/元	0			4500		
建筑热耗/kW·h	8932.01+400（采光用电）			5336.73		
总花费/元	28410.72			41263.51		
建筑节能/（kW·h/年）	3995.28					
建筑节能节约/（元/年）	3995.28（kW·h/年）×0.6（元/kW·h）= 2397.168					
额外投资/元	12852.79					
回本年限/年	5					

4 结论

通过对农村庭院建筑被动式热设计的研究，得到以下结论：

1) 农村庭院建筑的结构布局和被动式热设计策略能够有效的改善家居环境需求，减少碳排放的同时提高居民的热舒适性。

2) 采用顶部阳光间和传统阳光间的被动式建筑平均温度达到了14℃左右，比不采取相应措施时的房间温度高7℃左右，可以有效的降低建筑能耗，提

高家居空间的光照条件。

3) 被动式热设计技术与可再生能源相结合，可以改善建筑内房间温度的均匀性，提高可再生能源的利用率。

参考文献

- [1] 韩永明, 韩少卿. 中国农村家庭能源消费与节能分析[J]. 节能, 2020, 39(5): 165-169.
- [2] 中国建筑节能协会能耗统计专委会. 2018中国建筑能耗研究报告[J]. 建筑, 2019 (2): 26-31.

- [3] LI Baiyi, YOU Liyao, ZHENG Min, et al. Energy consumption pattern and indoor thermal environment of residential building in rural China[J]. Energy and Built Environment, 2020, 1(3): 327-336.
- [4] 王静. 我国农村环境污染现状原因及对策的研究[J]. 环境与发展, 2018, 30(10): 76, 78.
- [5] TELKES M. Trombe wall with phase change storage material[C]//Proceedings of the 2nd National Passive Solar Conference, Philadelphia, PA, USA, 1978: 271.
- [6] SKARNING G C J, HVIID C A, SVENDSEN S. The cost efficiency of improved roof windows in two well-lit nearly zero-energy houses in Copenhagen[J]. Energy and Buildings, 2017, 140: 399-417.
- [7] 王丽颖, 丘雨佳. 对德国被动式居住建筑节能技术的考察[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2013, 14(3): 38-40.
- [8] 孟昱, 周浩泽, 董学香, 等. 一种面向建筑空调的太阳能跨季节应用系统节能性分析[J]. 河南科技, 2021, 40(2), 133-136.
- [9] SOULIOTIS M, PANARAS G, FOKAIDES P A, et al. Solar water heating for social housing: Energy analysis and Life Cycle Assessment [J]. Energy & Buildings, 2018, 169.
- [10] WANG W, YUAN M, LI Y Z, et al. Numerical investigation on the impact of an on-top sunspace passive heating approach for typical rural buildings in northern China [J]. Solar Energy, 2019, 186:300-310.
- [11] WANG W, LI C, LI Y Z, et al. A novel on-top inverse sunspace conception and the passive heating effects on a typical northern China rural house [J]. Indoor and built environment, 2019, 28(10):1406-1421.

10 家居环境产品研发、市场及生态建设



徐 鸿 Xu Hong

教授级高级工程师，现任中国家用电器研究院总工程师，兼任中国制冷学会副理事长、中国制冷学会小型制冷机低温生物医学专业委员会主任。多年来致力于制冷工程检测装备、家电用高效直流变频技术、家电领域性能测试装置、测量控制自动化标准等相关研究。主持工信部中国制造2025转型升级等国家及省部级项目10余项。曾荣获中国轻工业联合会科技进步一等奖1项、二等奖2项、三等奖1项，山东省科技进步一等奖1项。获授权国家发明专利9件，参与制定国际、国家标准10余项。

家居环境由空气环境、水环境、声环境、光环境、电磁环境、餐厨环境、睡眠环境等诸多因素构成。在这些环境因素中，涵盖了家电、家具、照明灯具、五金、陶瓷、塑料等多个行业的多种产品。产品的性能升级、应用技术的更新迭代对家居环境的影响较大，特别是在传感技术和现代信息技术飞速发展的背景下，需要通过对现有家居产品技术研发情况及市场及生态进行剖析，从而建立面向智能、绿色、低碳、健康的生活环境体系。与此同时，加强家居环境相关产业链现状研究，了解产业链各环节上龙头企业发挥的作用，为未来家居环境生态建设发展提供借鉴和参考。

1 家居环境相关产品研发情况

1.1 研发投入

随着人们对健康、舒适家居环境需求的日益增长，包括家电、家具、照明等产业在内的家居环境相关行业均在通过研发创新以提升行业竞争力。企业也在不断加大研发投入，通过加强人才队伍建设、开发和运用新的研发工具等研发行为，提升产品水平。以家具和家电行业为例：2019年，家具行业企业数量为8.4万家，在研发投入方面，2013年第三次全国经济普查数据显示，中国家具制造业规模以上企业的研究与试验发展经费支出为22.5亿元，经费投入强度为0.34%；2019年第四次全国经济普查

时，为68.0亿元和0.95%；2020年全国科技经费投入统计时，为90.7亿元和1.28%，行业研发投入整体提升幅度较大。家电行业的相关数据显示，2020年，海尔智家、美的集团、格力电器、海信集团等行业头部企业，全年研发投入共计超过300亿元，研发人员加总超过5万人。2020年度中国轻工业竞争力报告也指出，家电行业头部企业科研投入占营业收入比重为3.36%。

在企业不断提升研发投入和不断进行研发行为的作用下，家居环境相关产品在技术、新材料和新工艺的应用方面均有显著提高，产品性能逐年增强。在家居环境电器领域，美的集团持续对人工智能、芯片、传感器、大数据、云计算等新兴技术领域进行投入与研究，拥有家电行业规模最大的人工智能团队，致力于以大数据和AI为驱动，赋予产品、机器、流程、系统的感知、认知、理解和决策的能力，打造以“没有交互”为目标的智能家居环境产品；在照明灯具方面，近年来，随着LED技术引发的照明行业的蓬勃发展，欧普照明积极推进照明技术的数字化、智能化发展，为产品及整体照明解决方案的升级变革提供有力支撑，满足不同人群、不同时间、不同场景下的健康照明需要。在市场需求的不间断拉动下，家居环境产品企业研发能力显著增强。

1.2 研发水平

1.2.1 当前技术水平

我国家居行业在自主研发和产品设计能力方面均有较大突破，与发达国家同类产业比较整体处于中等水平。在家居空气环境中，主要涉及的产品包括，空气调节器、空气净化器、新风机组、空气盒子等，这些空气产品能够满足家居环境热舒适性及空气品质的需求，其功能主要依靠电机驱动技术、电热控制技术实现，通过促进室内外空气交换，降低环境中的二氧化碳浓度，提升空气中的氧气含量；通过过滤技术、主动消杀技术去除家庭环境中的颗粒物、甲醛、TVOCs及细菌和微生物等。随着传感技术、识别技术和通讯技术的发展，该类器具可以通过搭载各类传感器，识别污染物以及人体所在位置，并将感知数据辨识分析后，通过多种器具协同为人们提供最优空气解决方案。此外，家居空

气环境产品还能够自动测算滤网使用情况，提醒更换耗材及自清洁，防止空间环境中二次污染的情况发生。空气环境产品所搭载的无风感、低能耗、低噪声技术，有效提升了产品的舒适性和健康属性，整体技术水平可以满足当下市场需求。

家居用水环境中，主要分为饮用水和生活用水。饮水方面，主要通过净水类产品以实现家庭饮水安全，目前，净水产品主要应用反渗透技术、多级过滤技术净化水源。反渗透技术净化效果优异，但存在废水比相对较高，以及水质口感和对人体有益矿物质缺失等问题；多级过滤技术则在过滤重金属和农药、抗菌素等方面存在缺陷，需要进一步加强技术迭代。生活用水方面，洗浴用水健康化需求不断提升，对水温 and 水质提出了更高的要求，家用电热水器现有技术能够实现优化出水结构，有效去除“夹层水”，使洗浴用水即开即热，保证出水恒温；通过应用抗菌材料及搭载水质净化系统，能够实现净化余氯、水质除菌和软化等效果，为人们提供健康洁净的洗浴用水。

家居光环境中，不同场景下均需要高品质的照明光源，目前，LED全光谱技术得到了广泛应用，通过提高光谱的连续性和完整性，使得光源质量得到了大幅度提升。LED的高显色指数，智能调色技术，则进一步控制光源的亮度和频率，减少蓝光及频闪危害，保护视力健康。照明通讯技术的发展应用，可以有效实现家居光通讯，融合LED固有的微型化和集成化优势，使得家居全屋场景中光源智能化需求得以满足。

着眼于智能技术的创新方向，以传感技术、5G传输技术、大数据、云计算、边缘计算、人工智能、区块链为代表的新兴技术，将进一步提升家居行业的技术水平和家居产品的更新迭代，为消费者提供智能、便捷、舒适的家居环境，满足人民对于美好生活的需要。

1.2.2 标准化建设情况

标准决定质量，行业的标准化水平能够规范产品质量、引导行业高质量发展，进一步促进行业技术水平的提升。现对家居环境中的空气环境、水环境、声环境、光环境相关标准及调节环境的产品的相关标准进行归纳，主要内容如表1至表4所示。

表1 空气环境相关标准

标准号	标准名称
GB 50325—2001	《民用建筑工程室内环境污染控制规范》
GB/T 18883—2002	《室内空气质量标准》
GB 18580—2001	《室内装饰装修材料人造板及其制品中甲醛释放限量》
GB 18581—2001	《室内装饰装修材料溶剂型木器涂料中有害物质限量》
GB 18582—2001	《室内装饰装修材料内墙涂料中有害物质限量》
GB 18583—2001	《室内装饰装修材料胶粘剂中有害物质限量》
GB 18584—2001	《室内装饰装修材料木家具中有害物质限量》
GB 18585—2001	《室内装饰装修材料壁纸中有害物质限量》
GB 18586—2001	《室内装饰装修材料聚氯乙烯卷材地板中有害物质限量》
GB 18587—2001	《室内装饰装修材料地毯、地毯衬垫及地毯胶粘剂有害物质释放限量》
GB 18588—2001	《混凝土外加剂中释放氨的限量》
GB 6566—2001	《建筑材料放射性核素限量》
GB/T 7725—2004	《房间空气调节器》
GB 21455—2019	《房间空气调节器能效限定值及能效等级》
GB/T 18801—2015	《空气净化器》
GB 36893—2018	《空气净化器能效限定值及能效等级》
GB/T 24985—2010	《家用和类似用途房间空气调节器可靠性试验方法》
GB/T 24986.4—2017	《家用和类似用途电器可靠性评价方法 第4部分：房间空气调节器的特殊要求》
GB/T 38047.2—2021	《智能家用电器可靠性评价方法 第2部分：房间空气调节器的特殊要求》
QB/T 5542—2021	《绿色设计产品评价技术规范 房间空气调节器》
QB/T 5580—2021	《家用和类似用途新风净化机》

表2 水环境相关标准

标准号	标准名称
GB 5749—2006	《生活饮用水卫生标准》
GB/T 50331—2002	《城市居民生活用水量标准》
GB/T 5750	《生活饮用水标准检测方法》系列标准
GB/T 5750.1—2006	《生活饮用水标准检验方法 总则》
GB/T 5750.2—2006	《生活饮用水标准检验方法 水样的采集和保存》
GB/T 5750.3—2006	《生活饮用水标准检验方法 水质分析质量控制》
GB/T 5750.4—2006	《生活饮用水标准检验方法 感官性状和物理指标》
GB/T 5750.5—2006	《生活饮用水标准检验方法 无机非金属指标》
GB/T 5750.6—2006	《生活饮用水标准检验方法 金属指标》
GB/T 5750.7—2006	《生活饮用水标准检验方法 有机物综合指标》
GB/T 5750.8—2006	《生活饮用水标准检验方法 有机物指标》
GB/T 5750.9—2006	《生活饮用水标准检验方法 农药指标》

GB/T 5750.10—2006	《生活饮用水标准检验方法 消毒副产物指标》
GB/T 5750.11—2006	《生活饮用水标准检验方法 消毒剂指标》
GB/T 5750.12—2006	《生活饮用水标准检验方法 消毒剂指标》
GB/T 5750.13—2006	《生活饮用水标准检验方法 放射性指标》
GB 34914—2017	《反渗透净水机水效限定值及水效等级》
GB 34914—2021	《净水机水效限定值及水效等级》
QB/T 4143—2010	《家用和类似用途超滤净水机》
QB/T 4144—2010	《家用和类似用途反渗透净水机》

表3 声环境相关标准

标准号	标准名称
GB 3096—2008	《声环境质量标准》
GB 22337—2008	《社会生活环境噪声排放标准》
GB/T 4214.1—2017	《家用和类似用途电器噪声测试方法 通用要求》
GB/T 4214.2—2020	《家用和类似用途电器噪声测试方法 真空吸尘器的特殊要求》
GB/T 4214.3—2008	《家用和类似用途电器噪声测试方法 洗碗机的特殊要求》
GB/T 4214.4—2020	《家用和类似用途电器噪声测试方法 洗衣机和离心式脱水机的特殊要求》
GB/T 4214.5—2008	《家用和类似用途电器噪声测试方法 电动剃须刀的特殊要求》
GB/T 4214.6—2008	《家用和类似用途电器噪声测试方法 毛发护理器具的特殊要求》
GB/T 4214.7—2020	《家用和类似用途电器噪声测试方法 滚筒式干衣机的特殊要求》
GB/T 4214.8—2021	《家用和类似用途电器噪声测试方法 电灶、烤箱、烤架、微波炉及其组合器具的特殊要求》
GB/T 4214.9—2021	《家用和类似用途电器噪声测试方法 风扇的特殊要求》
GB/T 4214.10—2021	《家用和类似用途电器噪声测试方法 确定和检验噪声声明示值的程序》
GB/T 4214.11—2021	《家用和类似用途电器噪声测试方法 电动食品加工器具的特殊要求》
GB/T 4214.12—2021	《家用和类似用途电器噪声测试方法 风扇式加热器的特殊要求》
GB/T 4214.13—2021	《家用和类似用途电器噪声测试方法 吸油烟机及其他烹饪烟气吸排装置的特殊要求》
GB/T 4214.14—2021	《家用和类似用途电器噪声测试方法 电冰箱、冷冻食品储藏箱和食品冷冻箱的特殊要求》
GB/T 4214.15—2021	《家用和类似用途电器噪声测试方法 储热式室内加热器的特殊要求》
QB/T 4705—2014	《家用和类似用途电器噪声测试方法 按摩椅的特殊要求》

表4 光环境相关标准

标准号	标准名称
GB/T 5700—2008	《照明测量方法》
GB/T 7922—2008	《照明光源颜色的测量方法》
GB/T 12454—2017	《光环境评价方法》
GB/T 31463.1—2015	《家用和类似用途灯具的连接装置 第1部分：通用要求》
GB/T 31463.2—2015	《家用和类似用途灯具的连接装置 第2部分：DCL用标准活页》
GB/T 33721—2017	《LED灯具可靠性试验方法》

GB/T 39394—2020	《LED灯、LED灯具和LED模块的测试方法》
GB/Z 39942—2021	《应用GB/T 20145评价光源和灯具的蓝光危害》（等同采用IEC国际标准：IEC TR 62778:2014）
GB/T 40775—2021	《生态设计产品评价技术规范 灯具》
QB 2907—2007	《地面嵌入式灯具》
QB/T 4847—2015	《LED平板灯具》
QB/T 5039—2017	《LED灯具性能测试方法》
QB 1551—1992	《灯具油漆涂层》
JB/T 13568—2018	《LED节能灯具用开关》

此外，现有的家居环境产品在标准化方面还针对健康功能进行标准体系构建，对现有产品抗菌/病毒、净化以及营养、家居舒适性等提出评价标准。标准主要表现在技术发展和产品类别两个维度上。在技术发展维度，涉及消毒、除菌和净化功能的标准主要指健康安全系列、产品性能系列和零部件系列等。在产品类别维度，涉及消毒、除菌和净化功能的标准主要指制冷器具、清洁器具、厨房器具、美容器具、保健器具、水处理设备等系列。健康安全强制性标准规定了家用和类似用途电器涉及健康安全的通用要求，标准涉及的健康安全包括辐射、毒性等方面可能对人体健康产生危害的因素。如GB 21551《家用和类似用途电器的抗菌、除菌、净化功能》系列标准，涉及抗菌材料、空气净化器、电冰箱、洗衣机、空调器等产品。

1.3 未来发展方向

家居环境中，适宜的温湿度、洁净新鲜的空气、洁净的水质、舒适的光照等都是评价健康环境的标准，而长期保持这一环境条件，需要智能技术与家居产品的协调发展才可实现。同时，人在家居环境中生活，需要大量消耗各种能量和资源，并排出各种废物，会对大环境造成重要影响。这也说明了家居环境与实现资源节约、绿色节能、推动“双碳”目标达成的国家重大战略有着紧密关系。

因此，应以智能为手段，以舒适、便捷、健康为目标，以绿色、节能为永恒的主题，实现家居环境的智能化、绿色化、健康化发展，满足人民美好生活需要。

1.3.1 智能化

将物联网技术、5G技术、云计算、人工智能、

大数据、区块链等与家居产品融合，开展家居环境相关产品互联互通、物联网操作系统安全内核、信息安全技术研究，扩大其网络化、数据化和信息共享化应用，建立统一规范的信息互联、安全标准体系，从而实现从单机到联网，从自动到智能，从独立控制到联动，从提供解决方案到生态建立，最终形成智能家居系统，不断为用户提供新的智能化解决方案。

1.3.2 绿色化

绿色发展是通过合理利用自然环境资源，防止人文环境与自然环境的污染，保护地球上的生物和生态自然环境，促进和推动人类与自然和谐共生。家居环境作为人们主要的生活场所对绿色发展具有重要影响，在家居环境建设中，选择无毒无害、低排放、可循环再利用的绿色环保材料、提升材料的循环利用率，降低室内污染物和有害辐射的生成量；同时，开展家居环境相关产品节能技术研究，构建整套新能源家居系统，完善各类产品的节能评价标准，实现能源利用率的大幅提高及新能源的高效利用和转换；另外，基于大数据学习、训练等技术，优化家居产品各执行器间的耦合控制，实现家居产品在特定场景下的联动。

1.3.3 健康化

健康家居应从生理、心理、社会三方面满足人们的健康需求，全面打造健康、舒适、有品质的整体家居环境。家居的空气、水、声、光、电磁等环境，以及室内动植物对环境的影响，都与人的健康密切相关。从健康化角度考虑，应开展空气温湿度、空气品质和气流分布、噪声及声品质、光健康及光品质、电磁辐射防护等方面的技术研究，减少

家居中存在的空气污染、水污染、噪声污染、光污染、辐射污染等，降低家居环境中对人体健康的隐患，针对人体的体质状态开展个性化室内环境参数控制，满足人们对于高质量生活环境的需求。研究家居环境对用户居住健康性、舒适性的影响因素，建立适合各地区居住者的舒适性模型和舒适性数据平台，开展各类家居产品工业设计与人体工学研究，最终大幅提升家居环境的健康性和舒适性。

2 家居环境相关产品市场情况

2.1 主要产品市场规模

在家居的诸多环境中，都缺少不了家电、家具、照明灯具、陶瓷、室内装饰、消费电子等产品的身影，以满足人们在生活、工作、娱乐等方面的要求。以下介绍几类主要的家居产品市场规模：

2.1.1 家电

2020年家电行业出口4582亿元（品类不含彩电），同比增长24.2%；国内累计销售7297亿元（品类涉及彩电、白电、厨卫、小家电产品），较上一年同期下滑9.2%。2021年我国家电行业的营收规模、出口和内销较上一年取得了恢复。据中国家用电器研究院、全国家用电器工业信息中心数据显示，行业2021年规模以上家用电力器具制造企业营业收入规模1.7万亿元，同比增长15.5%，非电力家用器具制造业（如燃气及类似能源家用器具制造）0.9万亿元。2021年出口6382亿元，同比增长14.1%；国内累计销售7543亿元（品类涉及彩电、白电、厨卫、小家电产品），较上一年同期同比增长3.4%，有明显提升。

龙头企业：海尔智家、美的集团、格力电器、海信集团等。

2.1.2 家具

作为耐用消费品行业，家具行业2020年受新冠疫情冲击影响较大。据工信部消费品工业司数据显示，2020年我国家具制造业产量91221.0万件，同比下降1.0%；营业收入6875.4亿元，同比下降6.0%；利润总额417.7亿元，同比下降11.1%。到2021年，家具行业逐步恢复，消费需求有所回暖，行业运行呈现改善局面。据中国家具协会发布数据显示，2021年全年我国家具行业规模以上企业6647家，累计产

量11.2亿件，同比增长14.01%；营业收入8004.60亿元，同比增长13.5%；利润总额433.70亿元，同比增长0.9%；全国家具类限额以上企业累计实现商品零售额1666.8亿元，同比增长14.5%。

龙头企业：欧派家居、索菲亚、喜临门、皮阿诺、顾家家居等。

2.1.3 照明

据工信部消费品工业司数据显示，2020年，全国照明制造业主要产品中，灯具及照明装置完成产量42.8亿套（台、个），同比下降6.5%；全国规模以上照明器具制造企业营业收入3363.5亿元，同比下降8.1%；实现利润总额198.8亿元，同比下降14.9%。截至2021年1—8月，全国照明制造业主要产品中，灯具及照明装置完成产量34.7亿套（台、个），同比增长31.4%；全国规模以上照明器具制造企业营业收入2336.6亿元，同比增长19.2%；实现利润总额126.0亿元，同比增长19.7%。

从产品细分角度分析，据中国轻工业网相关数据显示，2021年全年，全国电光源产量同比增长32.48%，其中白炽灯泡产量同比增长17.11%，荧光灯产量同比降低4.32%；灯具及照明装置产量同比增长16.16%。在营收和出口方面，照明器具制造业2021年营业收入同比增长13.23%，其中，电光源制造业同比增长9.18%，照明灯具制造业同比增长13.11%；利润总额同比增长4.02%，其中，电光源制造业同比降低0.32%，照明灯具制造业同比增长6.51%；全行业共完成出口总额654.70亿美元，同比增长达24.50%。

龙头企业：欧普照明、佛山照明、欧司朗、雷士照明、阳光照明、飞利浦、松下照明、三雄·极光、TCL等。

2.1.4 陶瓷

中国陶瓷全球闻名、誉满古今，对世界文明产生了深远影响。陶瓷行业是我国的优势产业，目前，全国陶瓷规模以上企业3000多家，年主营业务收入超过6000亿元。行业对外贸易发展增长较为稳定，据海关总署统计数据显示，2020年我国陶瓷产品出口1736.5328亿元，进口92.9752亿元；2021年出口1983.9211亿元，进口122.8541亿元。

从产品细分角度看，据中国建筑卫生陶瓷协会

数据显示,2021年,我国建筑陶瓷出口量为6.01亿平方米,同比下降3.40%,出口额40.99亿美元,同比下降0.70%;卫生陶瓷出口量为1.10亿件,同比增长16.82%,出口额达98.78亿美元,同比增长12.13%,平均每件为89.87美元/件,比上一年下降4.02%。

龙头企业:威尔斯陶瓷·岩板、顺辉瓷砖·岩板、大角鹿瓷砖、能强瓷砖·岩板、白兔瓷砖等。

2.2 市场对家居环境提升需求

2.2.1 空气环境

PM_{2.5}、花粉等固体颗粒物,甲醛、苯、臭氧等有机污染物和化学气体,螨虫、细菌、霉菌、病毒等微生物,都是室内空气的主要污染物。其来源包括家电、家居用品、人的行为(烹饪、清扫等)、外界大气环境影响(雾霾、柳絮、花粉等),对室内空气品质和舒适性产生影响。同时,人员长期居住产生的二氧化碳等气体持续累积,也会导致室内空气质量下降。因此,对空气环境相关产品提出的需求为:可以智能调节空气环境,对空气含氧量、二氧化碳浓度、颗粒物、气态污染物、微生物等进行实时监测,通过快速制冷、制热技术,无风感技术以及空气净化、消毒技术、新风技术等,为家居环境内人员提供洁净、舒适的空气环境,并快速去除室内导致疾病的细菌、微生物,保护人们远离病原微生物的危害。另外,使用更环保的材料,可大幅减少有毒有害物质在室内的释放量。

2.2.2 水环境

家居水环境涵盖日常饮水、生活用水等,水中的铁锈、泥沙、重金属、塑料微颗粒、细菌、病毒、农药和抗生素残留、钙离子和镁离子含量,均会影响水的品质。水中的有害物质会通过饮水摄入、皮肤吸收、随水的雾化或水蒸气吸入等途径侵入人体,对人体健康产生危害。因此,对家居水环境相关产品提出的需求为:净水设备需要对日常饮水、生活用水进行高效的过滤和净化,去除水中的有害物质,并保留对人体有益的一些矿物质元素;通过在提升水效、节能降噪、延长滤芯寿命、节约原材料等方面研发的新技术,赋能净水产品多样化场景应用,令家居水环境受到更全面的净化和保护;同时研究制备富氢水、低氘水等技术,更加科学合理的利用水中健康有益的元素,提高人体健康

水平。

2.2.3 光环境

光环境是影响人们空间体验最直接的因素,光线的波长、强度、明暗变化,均对人的生理和心理产生极其深远的影响,例如日光灯的频闪和荧光屏的帧幅闪动重叠,会伤害人的视觉系统。健康的光环境应能满足功能性要求(照明)、装饰性要求(美观)、生理健康和心理健康要求。在开发光环境相关产品时,应遵循光健康理念,使用更加科学的照明方式。明确室内不同功能性区域对照明的不同需求,合理利用天然光,科学设计室内人工光源;做到光谱均衡,尽量接近太阳光谱;调节光的亮度、显色度和不同的光色谱比例,限制眩光、减少光污染,设计出适合不同人群及家居空间使用的健康光照产品;另外还应在提高灯具寿命的基础上,实现灯具的绿色、高能效。

2.2.4 声环境

健康的声环境有利于人们的生活作息。过度的噪声会引起耳鸣、听力受损、神经系统功能紊乱、焦躁不安、情绪波动等,对人的生理和心理健康都有很大影响。家居声环境中除了来自室外的噪声,还有由人们的日常活动、长期运行的家电(吸尘器、料理机、电冰箱、空调器等)等产生的噪声。在营造家居声环境方面,可利用吸声、隔声、消声、扩散等声学手段,对建筑内部进行低噪声、优良音质的处理。建筑楼层之间采用有效的结构进行隔声、减振;合理划分居室空间,保证不同区域的私密性,将噪声敏感房间与产生噪声的区域隔开,例如卧室、书房等与客厅、厨房等空间隔开;室内墙体、门窗等设计隔声结构,选择吸声材料,有效控制噪声、音质;加强家居产品中机械、设备部件的降噪处理;利用白噪音遮盖附近的人声及大部分噪声,营造良好、舒适、健康的声环境,对特定人群起到安神的作用。

2.2.5 餐厨环境

餐厨环境中,厨房油烟是空气污染的重要来源之一,其含有多种有害物质及致癌物质,过量吸入后会刺激呼吸道、食欲减退、头晕恶心,长期吸入甚至会诱发肺癌;烹饪期间,吸油烟机、豆浆机、榨汁机等电器的运转,以及通过煎炒烹炸等方式制

作食物的过程中产生的噪声会极大影响厨房的声环境；食品表面和内部易附着农药残留和病原微生物等各种污染物，食物变质或腐烂时易滋生病原微生物并释放异味和化学气体，也会影响餐厨的局部环境和冰箱内部环境。因此，对于餐厨环境相关产品的需求包括：过滤厨房油烟中的有毒有害物质，降低餐厨设备运行时的噪声，清除食品表面的农药残留和其他污染物，使用具有保鲜功能的冰箱延长食品保鲜时间，并通过智能监控冰箱中食物的状态，提醒用户及时清理即将变质的食物。

2.2.6 睡眠环境

健康且高质量的睡眠同良好的睡眠环境有很大关系，改善睡眠质量对身体健康和工作效率的提高都具有有利影响。卧室内的空气、声、光、气味，以及寝具的选择，都会影响睡眠情况。因此在睡眠环境中，应通过空调器、加湿器、空气净化器、新风系统、制氧机、智能音响、智能灯具、智能窗帘、床品、香薰灯等，制造适宜的温湿度、洁净的空气、适合夜间睡眠的光照强度、舒缓的背景音、助眠的香薰气味，软硬适中的床垫和枕头，为健康的睡眠环境提供条件。同时，可以联动智能家居系统，动态监测人的睡眠状态，云端分析睡眠数据，根据人体状态灵活调控居家产品的设定，打造个性化舒适的睡眠环境。

3 家居环境相关产业生态建设情况

当前，建筑、建材、家电、家具等影响家居环境的相关产业融合发展态势强劲，相关产品成套购买的消费趋势显著，主要产业集群、产业链相融共生、协同发展的“泛家居”产业生态日渐成型，家居环境相关产业生态链、产业链关键环节聚集效应突出，各行业龙头企业也在加速向相关品类渗透，形成横跨多个相关产业的家居环境龙头品牌。

3.1 家居环境相关产业各环节在产业生态中的影响

健康舒适的建筑环境质量包括房间体围护结构、装饰材料、空气、水、光线和噪声等方面。

3.1.1 围护结构

建筑环境四周的墙体、门和窗等都属于围护结构。根据在建筑物中的位置，分为内围护结构和外围护结构两种。侧窗、外门、屋顶和外墙都属于外

围护结构，用以抵御风雨、太阳直射和温度变化等，其性能是耐久、防潮、防火、保温、隔热和防水。楼板、内门窗和隔墙等都属于内围护结构，其作用是分隔室内空间，其性能则是隔视线和隔声等。

盼盼木业集团研发的产品融合了桥洞力学原理，降低结构固有频率从而降低诊断和噪声，通过采用微孔径吸湿、纳米吸醛、生物抑菌、B级阻燃、保温瓶效应、扣件易装等技术，促进了维护结构的绿色与环保。

皇雅门窗、派雅门窗、美驰门窗、安晨门窗等企业涉及断桥铝门窗、塑钢门窗、隔断门、淋浴房、铝木复合门窗、新型纱门纱窗、断桥铝型材等内围护结构产品的生产，推动无缝焊接系统门窗的普及，同时发展优质中空玻璃、密封胶条、铝合金塑料、水性漆表面涂装、铝合金电动卷帘等辅助产品。

3.1.2 空气净化

建筑室内环境中我国尤其以甲醛、苯等有机污染物污染较重，重点需去除空气中微生物、过滤掉污染成分，以保证室内空气的健康安全。空气净化器以其安装简单、维护方便、净化速度快，成为消除家居空气污染的首选。新风换气也是一种快捷、低能耗改善室内空气品质的方法，同时由于人类的呼吸活动，使得室内空气二氧化碳含量增加，氧气含量减少，因此，带有热交换及过滤功能的新风机应运而生。

上品健康（广东）有限公司主要针对挥发性有机化合物（VOC）的收集和无害化处理、花粉、粉尘等微粒子的物理性捕捉、低温催化分解、除湿、除雾、加湿技术的研发，同时具有空气过滤器原材料研发、过滤器的风阻、效率的优化及针对空气净化器的CADR值的测试、加湿器的加湿量判定测试及各种化学过滤器在气相状态下对有害气体的分解能力的测试和各种保鲜产品的保鲜效果的测试等能力。

科德宝阿波罗公司可提供空气/饮用水的过滤净化产品及其整体解决方案，包括室内空气净化器、新风系统、净水器、空调、冰箱、吸尘器、厨房家电、加湿器、医疗净化器、办公设备等各类应用，并提供更加广泛的创新过滤产品和解决方案组合，产品涵盖物理过滤器、化学过滤器、健康过滤器、冰箱除臭保鲜器、水滤芯、新风系统滤芯和其他滤

芯。

夏普的PC净离子群技术不同于被动过滤的方式，向空气释放与自然界相同的正、负离子，加大滤网面积，主动抑制空气中的病毒、细菌、甲醛和霉菌等有害物质，起到发挥作用，形成水（H₂O）返回至空气中。

亚都创新推出的净化器，融合了24h颗粒物探测技术，可显示实时颗粒物浓度。根据显示结果，自动选择适宜的风量运行速度，以达到最佳净化效果。同时，整合了催化活性炭吸收分解、动态除菌技术等众多领先技术，能够有效除尘、除烟、除异味、除甲醛以及除细菌病毒等微生物，全面净化室内空气。采用的由非常细小的有机纤维交织而成的HEPA滤网，早期应用于精密实验室、医药生产、原子研究和外科手术等需要高洁净度的场所，对微粒的捕捉能力很强，针对0.3微米的粒子净化率为99.97%。

3.1.3 室内热环境

建筑环境中室内外热湿作用对室内热环境有相应的影响，如果想要获得良好的室内热环境就需要了解当地的气候和变化规律特征，以此作为设计依据。热环境设备可以有效地改善室内热环境，从而增加人体的舒适感和幸福感。

海尔集团卡萨帝银河空调集智慧AI、感知人体、恒温送风（柜机为新风）、全空间除菌系统于一体。搭载双向恒温送风系统，快速恒温舒适，同时具有双极离子除菌能力。

格力电器采用空调风道新技术，将传统的柜式空调内流场改变为冷暖独立双气流流场，热风直接可送到人体的膝盖以下位置，提高人体的热舒适性。该新风道能将送风温差降低1.5℃，有效提高室内温度场的均匀性，从而提高室内空气品质，并达到节能的目的。

美的集团在人体自适应热舒适理论和评价方法、热环境多参数耦合设计技术、高效运营技术和装备研发等方面拥有重大技术突破。在针对节能技术、工程设计方法、装备开放等建筑热环境研发创新中，既参与建筑热环境绿色营造空调产品标准体系构建，承担“基于热舒适指标的房间空调器动态调控策略研究”和“长江流域建筑供暖空调解决方

案和相应系统”等项目课题，组织进行空调器恒温除湿、温湿度双控、动态舒适性控制等核心技术研发。“基于温湿风补偿的舒适空调及节能运行”的技术成果与国家目前正在大力推进的“双碳战略”息息相关。

3.1.4 餐厨环境舒适度

住宅中厨房和餐厅对环境的影响巨大，我国目前家庭厨房中使用的燃料大多数是天然气、管道煤气等，在厨房烹饪过程中会产生一些有毒有害物质及散发大量的烟气和热量，如果通风不好，将对室内的卫生情况以及热环境造成不良的影响，同时农药、微生物在食物上的残留也对人体的健康产生不良影响。当前市面上吸油烟机主推“大风量”，但是忽略了针对有毒有害物质的去除，忽略了气流的组织和风量平衡，造成局部气流循环短路，对人的健康造成影响的同时也影响了环境的舒适度。此外，果蔬清洗机的应用对果蔬外表面的清洗具有积极的作用，电动饮食电器的低噪音设计也是餐厨环境的关键因素之一。

方太集团研发的制冷吸油烟机，解决夏季厨房环境闷热难耐的难题，其双风道切换科技，让吸排、制冷协同运作，不受干扰，无冷凝水、无外置风机。研发了高效静电分离油烟治理技术，根据油脂结构不同所带来导电率的不同，以及通过电场时作用于油脂物上的静电力的差别而进行油脂分离，对于清除残留油脂具有很好的效果。

老板电器采用拢吸形态创新设计的三面灵拢大吸力油烟机，可通过两侧挡板将侧边的油烟拢住并吸走，彻底解决了侧吸式油烟机双侧漏烟的难题。其最新的双劲芯7.0系统和独家数字电机，以25m³大风量刷新大吸力新标准。同时具有多维降噪、AI隔空智控，ROKI智能烹饪系统等功能。与“拢烟多两面”的油烟机新品互通联动的是十级大火力的紫焰强火灶具、拥有150℃高温蒸技术的蒸烤一体机以及强力洗洗碗机。老板电器创造性的以“烟、灶、蒸、洗”为组合的“四件套新品”，直面传统成套厨电的痛点，示范行业套系化标准，构建了“中国新厨房”生态体系。

3.1.5 噪声防护

排除人们生活不需要的外部声音干扰，是建筑

环境中需要解决的问题，同时在家居生活过程中产生的噪声污染也不容忽视。如长期运行的空调器、电冰箱、空气净化器、电暖气等；中长期运行的洗衣机、干衣机、洗碗机、吸油烟机等；短期运行的吸尘器、除螨机、食品加工机、废弃食物处理器等。

方太集团研发的长耳鸮仿生飞羽叶轮，实现消噪与减阻的完美平衡。鸮形目鸟类进化出的高效飞行和静音特性，对于改善风机叶片、飞机机翼等空气动力机械的气动性能和声学特性具有借鉴意义，为增效降噪研究提供了新的研究思路和方法。通过建立仿生叶片结构模型，确定了最佳波浪数和波浪高度，在提供强劲动力的同时实现低至48dB的静音效果，这类仿生波浪叶片在核电汽轮机中也有应用。

海尔集团提出了一种利用洗衣机自重实现油压自流平原理的技术方案，实现了洗衣机一放即稳、低振静音，有效解决洗衣机振动噪声问题，实现了洗衣机多维立体减振降噪，提高了运行的平稳性。

格力工业制品旗下凯邦电机生产制造的吸尘器用超高速电机转速高达16万转/分，吸尘器的吸入效率最高可达55%，最大真空度可达28kPa，在极大地提升了吸尘器的吸力的同时还兼顾了低噪声和可靠性。为承受高转速产生的离心力，电机转子系统采用高强度碳纤维防护技术，集成化轴承系统，保证电机在超高速下长期可靠的运行。电机的叶轮则采用超高速、高功率密度斜流式设计，实现叶轮气动与强度协同的设计，降低了噪声的同时电池续航能力也提升了10%以上。

A.O.史密斯、美的、COLMO、老板、华帝、苏泊尔等电器品牌持续创新家用电器静音技术，通过提升产品标准，将产品噪声控制在了优良水平。

3.1.6 光环境

人们正常的生活、学习和工作离不开良好的光环境，在建筑中对光环境要给予足够的重视。最新的医学研究显示，阳光可以让一些癌细胞停止生长，其中包括一些乳腺癌、淋巴瘤等。健康的室内空间应该让阳光的作用充分得到发挥，对人体的健康、环境满意度、情绪和睡眠质量产生正面的影响，电器上的电源指示灯照度应当适度，最好有自动降低照度的功能。

随着LED技术引发照明行业的蓬勃发展，艾迈斯欧司朗推出新款白光LED，通过新型的荧光粉，为没有自然光照的室内种植作物照明提供高效的白光LED，高效解决植物照明。

欧普照明自主研发接近于自然光谱的灯具，不但能提供更为舒适的视觉感受，还可以帮助人们调节生理及心理健康。同时也在发展数字电源系统及通过对驱动电源与控制盒的接口进行数字化定义。

3.1.7 建筑家居装饰

建筑环境中的墙壁颜色有利于人的情绪稳定，避免强烈刺激的颜色和装饰纹路。使用地板的时候要注意垫层材料的环保性，如果释放性高会危害室内空气质量，对人的健康造成威胁。如果要选用瓷砖的话要尽量避免瓷砖光亮，要选用哑光瓷砖，增加防滑系数。

中国市场主要以圣象、大自然、和邦盛世、扬子地板为龙头企业，联手海尔U+发布了四大智能家居产品，研发出零醛智造地板、负离子健康实木地板、智热地板、塑胶弹性地板、“水立防6面防潮科技”，推出的“除醛工艺”把握了环保健康的发展趋势。

东鹏陶瓷覆盖整装卫浴、木地板绿色材料、整体家居等业务，实现整体大家居的智能化、信息化、标准化制造。在玻化、釉面破、仿古破、幕墙瓷板、洁具等陶瓷产品体系方面具有领先优势。

蒙娜丽莎3mm高强韧陶瓷岩板、9000mm×1800mm超大规格抛光陶瓷板，以及6100mm×1830mm×10.5mm高性能大规格陶瓷大板，超大规格尺寸、连超精密抛光技术、绵延展的高清纹理等多项硬核技术实现陶瓷大板关键技术领域赶超。开展“新型陶瓷材料研究+数智融合环保”新模式探索，赋能全产业链发展。

3.1.8 家居净水

人们对于家居饮水的关注度在不断提升，需提升出水水质、提升废水比、提升智能化率。目前，饮用水水源受污染的情况日益严重，消毒副产物、重金属以及微生物等威胁着人们的健康。水质污染物的种类也不断增加，出现了内分泌污染物、抗生素-药物残留及其代谢物、塑料微颗粒等。因此各种形式的净水器和饮水机也在建筑环境中逐渐开始普及。

美的净水器创新研发微气泡系统，利用高压使气体在水中溶解，再通过减压将水中溶解气体释放，形成微气泡水，轻松吸附表面突起，实现深层去农残。采用Fresh专利无陈水系统，采用纯水回流系统，解决首杯水TDS值高的问题，水质恒定，五级双芯精细过滤，总大肠菌群去除率高达99.99%。

海尔集团和爱玛特净水器专注于家庭饮用水健康领域，推出全屋深度净水方案，系统的解决了家庭的纯净饮水、软化用水、生活热水、采暖四大用水需求，推出“中央超滤、末端除氯”的科学全屋深度净水技术，研发出“双核净化”、“多路分体”、“多核调质”等多种适合国内水质的深度净水工艺和结构技术。将家庭饮水、厨房用水、洗漱、沐浴及洗衣等生活饮用水进行全方位深度净化，以全面深度保护家人身体健康及热水器、洗衣机、浴缸、淋浴器、智能马桶等家用涉水设备。

4 家居环境相关产业生态发展趋势

依托我国健全的工业体系，我国家居产业拥有全球最完整的产业生态系统，特别在智能化、健康化等技术应用领域已居世界先进水平。随着技术进步，人们对美好生活需求的增长，打造舒适健康的环境成为社会发展的主要问题，这需要智能技术与健康家电的协调发展来解决，有专家预测未来中国家居产业将会达到20万亿的产值。

在现代信息时代的建筑中，家居环境逐步将家居装饰与家居产品的设计趋于协调统一，它们由独立的个体走向家居一体化的道路，现代智能家居已融入到人们的生活当中。未来家居将成为一种生活

的界面，通过它，我们和其他人、物品、数据、图像等进行交流。家居环境已经跨越了历史、虚拟世界和现实的界限，跨越了时间和空间的界限，人们感受到了一种新的生活方式。

随着5G网络的到来，越来越多的厂商开始切入智能家居赛道，智能家居场景正在处于高速增长态势。随着万物互联互通的时代越来越近，很多传统厂商已经赶上了奔向智能时代的快车。海尔也是诸多传统厂商转型成功的企业之一，三翼鸟作为海尔智家旗下场景品牌，产品提供了空调、冰箱、洗衣机、热水器等设备，覆盖客厅、卧室、书房、阳台、厨房、浴室、卫生间等场景，提供全屋空气、全屋用水、视听等智慧家庭全场景解决方案。在场景价值方面，“三翼鸟”方案多而全。生态价值方面，“三翼鸟”将各领域、各行业、各品类合作伙伴链入智家体验云平台。

随着智能门锁、扫地机器人、智能语音音箱、智能冰箱等诸多智能家居涌入市场。繁杂的品类和复杂的控制已经让用户疲惫不堪。智慧家庭需要通过整合设计、材料、施工等多元领域资源，涵盖家电、衣柜、照明等多个生活领域，覆盖丰富的个性化场景。另外，智慧家庭设备具有巨量供应厂家，需要良好的联动性和扩展性，现有的智能设备通过互联互通接入家庭场景中，从而体验到更加智能化的居家生活，共同形成合力创造出巨大的蝴蝶效应，实时享受物联网时代的乐趣。当代越来越多的智能设备开始进入居家生活中，如何在智能化的提升过程中，保证居家环境的生活品质，是我们首先要关注的问题。

11

家庭能源 管理系统



关 欣 Guan Xin

女，副教授，现任上海理工大学新能源研究所副所长。研究方向强化换热及新能源利用技术，新能源在智能电网及家庭能源管理关键技术的应用。



宋子晔 Song Ziye

男，上海理工大学动力工程专业硕士研究生，研究方向能源大数据。

随着我国商业、工业、居民生活的快速发展，电力能源的消耗也大幅增加。2019年中国发电总量为75034.3亿kW·h，较前一年增幅为4.7%；全国发电装机容量20.1亿kW，比上年底增长5.8%，其中化石能源发电装机容量占比高达59.2%^[1]。化石能源属于传统能源，在我国及世界范围内可开采量有限，其需求的提升引起了严峻的能源紧缺问题；另一方面这类能源的消耗会产生大量CO₂、SO₂气体，造成的环境问题同样不可忽视。能源危机和环境污染成为世界电力行业发展的重大挑战，如何在改进传统能源使用方式的同时提升可再生能源利用率，优化电网模式，已然成为值得电力行业深入研究的课题^[2]。

传统电网通过集中式的大规模发电机组向用户需求侧供电，缺乏可再生能源接入设备；同时一定量的传统输配模式无法适应可再生能源发电的波动性及随机性；此外，设备利用率以及信息实时化等各方面的不足也体现了传统电网的弊端。传统电网难以满足新时期背景下提升电力生产、分配和传输效率的需求，电力发展模式急需转变^[3]。在现代信息技术和传统电网的结合下，产生了智能电网（Smart grid）这一概念。智能电网建立在集成的、高速双向通信网络的基础上，并通过先进的传感和测量技术、设备技术、控制方法以及决策支持系统技术的应用，提高了电网的安全性、经济性、高效性以及环境友好性^[4]。在智能电网中除了大型发电厂，其用户侧还存在着许多分布式可再生能源发电设备，例如住宅区的屋顶光伏发电系统以及风力发电系统等。随着智能电网的普及，用户需求侧的角色也发生了转变，不再是被动消费，而是开始逐渐具备自我调度能力。

家庭能量管理系统（Household Energy Management System, HEMS）是智能电网在家庭用电侧的应用，它是以智能电网为基础，以高级测量体系（Advanced Metering Infrastructure, AMI）及需求响应（Demand Response, DR）两大技术为支撑，整合家庭中所有发电、用电、储能设备为一体进行控制管理的智能化网络控制系统^[5]。其中发电设备即家用屋顶光伏电池板或风力发电机，用电设备即常见的居民日常家用电器，蓄电设备即家用蓄电池等。随着智能电网在

居民用户侧的普及和推广，如何在家用能量管理系统中高效整合发电、蓄电、用电设备以获取收益成为当前热点的研究问题之一。在HEMS中，智能终端可依据未来实时电价和可再生能源发电量，参考用户用电喜好，制定最优用电策略以指导用户用电行为。通过用电调度优化不仅可以提升可再生能源消纳率，而且可以获得电费、用户满意度以及电网稳定性提升等多方面收益^[6]。

1 家庭能量管理系统组成

随着电网技术的发展，物联网（Internet of Things, IoT）这一概念被整合到现代建筑中以满足居民舒适性、安全性以及效率性等各方面用电需求^[7]。物联网推动智能传感器和其他先进计量装置的部署，使远程用电信息交互以及监测和驱动电器成为可能。从需求侧的角度看，HEMS符合电网的智能化进程，它能够与家用设备和公用事业设备进行交互并通过调整设备运行时间表以应对外部信息，例如最新的电网价格或气象预报；同时HEMS实现了可再生能源发电的接入，允许用户使用光伏或风力发电满足自身生活用电需求或售电盈利。HEMS主要由智能电表、家用电器、用户交互终端、中央控制平台以及分布式发电设备组成并通过这些设备实现其功能，见图1。

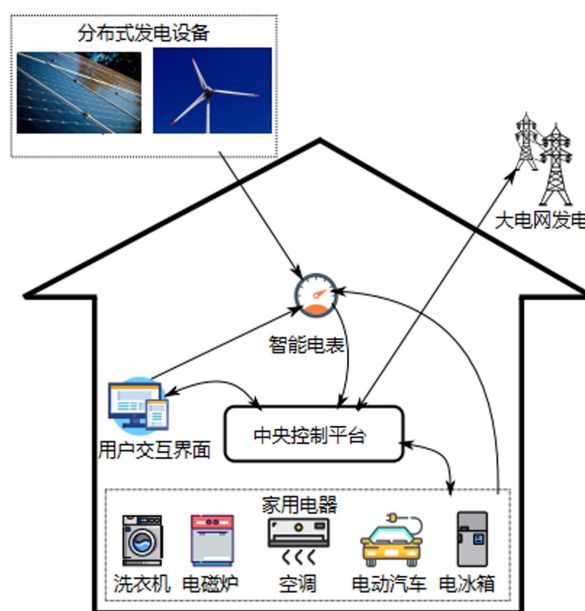


图1 家用能量管理系统结构图

1.1 智能电表

智能电表是一种先进的计量装置，它基于现代通信技术、计算机技术和测量技术，收集、分析和处理电能信息数据，其基本原理是依靠A/D变流器或计量芯片实时采集用户的电流和电压，利用CPU进行分析处理，实现前后、峰谷或四象限电能的计算，通过通信和显示进一步输出电力内容。除了传统电表具有的用电量记录和电能传输的功能之外，智能电表还可以被用于测量一些物理量，例如温度、湿度、光强等，同时它还收集各个家用电器具体的能源消耗以及用户用电行为数据^[8]。考虑到分布式能源发电的接入，智能电表还具备了双向多费率计量功能以及用户端控制功能。

此外，基于智能电表而构建的高级测量体系为用户提供更详细的信息，用户可以更好地管理自己的用电情况，从而实现节约用电、减少温室气体排放的目的；售电方可以根据用户的需求灵活设置实时电价从而促进电力市场价格体系的改革；配电方可以更快地发现故障并及时响应，从而加强对电网的控制和管理。总而言之，智能电表的出现方便了HEMS和大电网的双向沟通。

1.2 智能家用电器

智能家用电器在传统家用电器的基础上增加了微处理器、传感器以及网络通信技术，它可以自动感知住宅空间以及家电设备服务状态并且自动接收执行控制命令。智能家用电器作为HEMS的组成部分，能够与住宅内其它电器以及智能电表、中央控制平台配合实现智能家居功能。

和传统家用电器相比，智能家用电器具有网络化、智能化、兼容化、节能化、简易化的特点。各种智能家用电器自动根据周围环境调节工作状态以达到最佳效果（能源节约、用户满意），无需人为干预；并通过家用局域网或制造商服务站连接，实现信息共享。对于不同厂商的设备，也能在系统中有效整合。不同电器的功能有所差异，但一般都具备远程控制、远程报警、语音控制、自动调节的功能^[9]。

1.3 用户交互终端与中央控制平台

用户交互终端是让居民和HEMS互动的设备，终端界面展示各电器能量使用情况和电费情况，以

及未来电价和天气情况等。用户也可以通过交互终端向系统传递指令，例如设定用电偏好、电器优先级、电器运行时段范围等^[10]。近年来触屏技术的发展使得用户终端形态有了很大的改变，除了家用电脑之外用户可以通过智能手机或者平板电脑随时随地远程向HEMS输入指令。

中央控制平台是内置于用户交互终端中的智能计算框架，它旨在管理和优化能源使用方案。中央控制平台接收智能电表信息并采用调度机制，通过优化算法计算，安排参与调度的智能家用电器工作时序。用电方案的制定会参考多种目标，例如电费、用电曲线削峰填谷和温室气体排放。

1.4 分布式发电设备

在我国家用分布式发电设备通常为屋顶光伏电池板发电和小型风机发电，其中前者更为普及。通过本地微型太阳能和风能系统，单个家庭也正在成为电力生产的参与者。当发电量超过本身需求时，产生的盈余可以用来注入蓄电设备供随后使用，或按一定功率上传大电网。为了保证电网的安全稳定，多余电能上传功率存在实时限制，这就要求大电网与本地微发电系统之间做好交互工作，设立稳定的双向通信网络作为支撑。发电方可以利用先进的计量基础设施（AMI）和远程控制自动化系统获知各户具体的分布式发电信息，并且以更高的精度预测区域未来用电需求，在降低发电成本的同时减少电力浪费。

1.5 蓄能设备

家用能量管理系统中的蓄能设备一方面可以收纳无法实时使用的光伏发电电量，提升可再生能源利用率；另一方面可以通过调节充放电策略在用电需求低谷期买电，高峰期用电，缓解区域用电压力并为用户带来经济收益。电力蓄能设备有多种形式，例如蓄电池、电容器、重力势能储能电站等，其中蓄电池较为适合参与住宅用电调配。常见的蓄电池有：锂电池、铅酸电池、镍镉电池、钠硫电池、液流电池等^[11]。

2 家庭能量管理系统技术支撑

2.1 高级测量系统

高级测量系统是建立在智能电表多种数据测量

功能基础上，以双向通讯网络和家用局域网(Home Area Net, HAN)为依托，具备测量、采集、存储、传输四大功能的系统。

智能电表和传统电表相比增加了双向计量、电能监控、数据存储、双向通讯等功能。除了传统电能之外，智能电表还可以记录传输分布式发电量以及用户出售给供电商的电量，同时接受供电商发布的实时电价。从提升安全性角度而言，智能电表能监控用电情况，及时分析处理电力故障且杜绝偷电现象。智能电表是家庭能量管理系统的核心设备，它为家庭能量调度和用户需求侧响应提供了技术支撑。

双向通讯网络负责家庭用电方和供电商的对接，是供需两侧交互的纽带，也是双向智能控制最基本的要求。其中网络传输分为两种，第一种是近距离传输，是智能电表向中央控制平台的信息

传递，通常使用的方式为电力线通信（Power Line Communication, PLC），这种通信方式通过电流传递讯号，讯号在接收端被解调器分离并传输至计算机或其余终端；另外一种网络传输为远距离传输，是中央控制平台向供电商的信息传递，主要是用户通过无线公网（General Packet Radio Service, GPRS）向供电商发送历史用电数据以及可再生能源发电情况，并从供电商处接收未来实时电价数据等需求响应信息。

家用局域网是用于HEMS内部各设备信息交流的网络，它将HEMS中各部分整合为一个整体。由于家用负载类型复杂，故家庭局域网络适宜采用无线网络。常见的家庭局域网络技术包括：ZigBee、Bluetooth、WiFi等，具体技术对比见表1。其中基于IEEE 802.11协议的WiFi技术目前在家用能量管理系统中最为常用^[12]。

表1 HEMS无线网络技术对比

	WIFI	Bluetooth	ZigBee
标准协议	IEEE 802.11	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.4
传输速率	11或54Mbps	1Mbps	20/40/250kbps
能耗	很高	低	很低
传输距离	>100m	10m	10-100m
网络结构	中心指向网络	临时小型网络	对等网络，星型或网状网络

2.2 需求响应技术

需求响应是指电网系统运行时消费者对供电商提供的实时信息作出响应，且在符合电网约束和自身用电需求的前提下改变其电力消费形式的市场参与行为。用户的响应形式分为三种：用电量高峰期减少用电、转移高峰用电至非高峰时段、高峰期使用可再生能源发电。需求响应大体分为基于价格的需求响应和基于激励的需求响应两类，具体需求响应类型如图2所示。

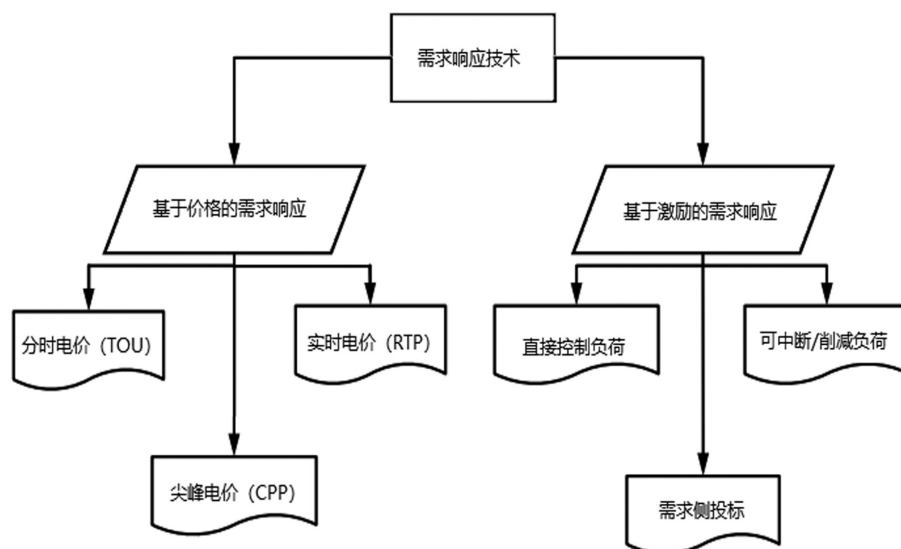


图2 需求响应技术类型

2.2.1 基于价格的需求响应

在基于价格的需求响应技术项目中，用户以在指定时间内减少用电量来获得经济利益或购电折扣。供电商向用户传递变化的电价信息，消费者根据电价信息主动调整家庭用电量，并根据不同的需求响应方案（如分时电价、实时电价、尖峰电价等）跟踪用电成本^[13]。这些需求响应方案在一天内都存在电价的高峰期和低谷期，区域用电量较高时即为电价高峰期，旨在引导用户将用电行为转移到用电量低谷期，减轻电网压力，但不同方案在电价细节上各有不同。

分时电价（TOU）将用电时段分为用电高峰时段和非高峰时段，用电高峰时段的电费相对更高。不同时段电价存在差异是因为在高峰时段需要动用峰值发电厂来满足高电力需求，这些峰值发电厂的发电能源主要为石油、煤炭、天然气等较为昂贵的不可再生能源；再者为了满足峰值电力需求，电力公司需要对现有的发电设施进行扩建，这也增加了发电成本。分时电价方案的制定考虑到天气、季节、能源需求情况等诸多因素，它提前一个月预测出峰值用电时段，使得用户可以有充足的时间进行用电规划，在高峰时段将他们的分布式发电设备产生的电能出售给电网获取收益，在非高峰时段使用低廉的大电网电力。随着电力储存系统的普及，分时电价为智能电网用户带来的经济收益将更加可观。分时电价方案较为简单，它将每天划分为两个时段，和其他一些按小时划分电价的方案相比，缓解了相应电网疲劳，便于用户理解和实施。

尖峰电价（CPP）则是用电紧急高峰情况下的一种措施，属于对分时电价的一种补充，它主要针对某些用电需求远高于其他高峰时段的特殊时段。在这些时段，发电成本极高，超出了分时电价方案的定价范围。例如福岛核电站泄露事故后该核电站不能继续供电，此时采用尖峰电价方案将电价急剧提高，削减系统负荷，起到了在短时间内控制电力系统稳定的作用。供电商在特殊情况下采用尖峰电价，在大多数的正常情况下采用分时电价。供电商一般会提前二十四小时通知，如果供电商不能准确预测尖峰时段，该电价方案将无法达到理想效果。

实时电价（RTP）是最能准确反应电价和发电成本之间关系的一种电价方案。实时电价会每隔半小时更新电价，所以它对智能电表和通讯技术提出了更高的要求。实时电价利用电力价格的导向作用调控电力设备发电量以及用户耗电量，以达到电力系统供需平衡，它既可以帮助消费者进行合理的用电规划，尽量避免在高电价时刻用电从而降低用电成本，又可以平缓负荷波动，增加电力系统的安全和稳定性。在技术可以满足的前提下，供电商实时电价的更新速度越快，电价的导向作用越准确。

2.2.2 基于激励的需求响应

基于激励的需求响应一般是指供电商在电力紧缺或其他特殊情况下利用补偿政策激励电力用户，使其减少家用负载的运行，从而降低电力系统的运行压力。这种补偿一般是以直接经济补偿或电价优惠形式执行。这种调控措施避免了大规模停电的可能性，保障了电力网络的稳定运行，同时也为用户带来了经济收益。基于激励的需求响应项目可分为基于计划的激励型项目（包括直接负荷控制、可中断负荷）和基于市场的激励型项目（需求侧投标）^[14]。

直接负荷控制项目起源于上个世纪六十年代的美国，并兴起于上个世纪八九十年代。它是指供电商在特殊情况下只短时间提前通知或不通知用户，利用遥控强行调整或关闭用户的家用负载（空调和热水器）以降低高峰时段的用电负荷。随着智能家电的普及和通信技术的进步，直接负荷控制将愈发成熟。

可中断负荷项目是指消费者在和供电商在签署协议的前提下，在高峰时刻响应供电商的信号降低耗电量并按照协议获得经济补偿。如果用户的用电行为违反了该条款，将会受到惩罚。可中断负荷的受众主要为工业或商业用户，其有效性主要和中断时间以及中断次数等有关。

需求侧投标是指用户提前向供电商表明其在某电价下愿意削减的负荷或在愿意削减一定负荷时所期望的电价。辅助服务项目中用户以其愿意削减的负荷参与市场竞标，如果竞标成功，将与供电商达成负荷削减协议并获得支付。

3 结束语

随着当今智能与物联住宅的出现,家居环境也正朝着信息与智能化的方向发展。家庭能源管理系统正是其中重要的一环。家庭能源管理系统使实时监测家庭用电量、远程控制和规划设备运行成为可能。这些系统增强了传统家庭的“智能”功能,在新电网模式中发挥了积极作用。日益增长的电力需求和智能电网的出现为家庭能源管理系统在节能减排上提供了新的机会。该系统通常通过考虑多个因素(如能源成本、环境问题、负荷曲线和消费者舒适度)来创建最佳用电计划。随着智能电表的部署,使用具有需求响应功能的家庭能源管理系统执行负载控制已成为可能。在未来,智能家居的渗透和智能电网的普及将进一步推动家居环境的成本可控化和生活便捷化。

参考文献

- [1] 前瞻产业研究院. 2020年中国电力行业发展现状分析[J]. 电器工业, 2020(10): 48-50.
- [2] 郑漳华, 艾芊. 微电网的研究现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 27-31, 58.
- [3] MAHMOOD A, JAVAID N, RAZZAQ S. A review of wireless communications for smart grid[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41: 248-260.
- [4] 桑梓强. 电路通信系统在智能电网中的应用[J]. 中小企业管理与科技, 2015(9): 217.
- [5] 金森钧. 基于分布式发电和储能的家庭能量管理系统设计与优化调度算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [6] 王伟, 何光宇, 万钧力, 等. 用户侧能量管理系统初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 10-15.
- [7] 曹军威, 万宇鑫, 涂国煜, 等. 智能电网信息系统体系结构研究[J]. 计算机学报, 2013, 36(1): 143-167.
- [8] 彭小圣, 邓迪元, 程时杰, 等. 面向智能电网应用的电力大数据关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 503-511.
- [9] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.
- [10] 宋亚奇, 周国亮, 朱永利. 智能电网大数据处理技术现状与挑战[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 927-935.
- [11] 梁廷婷. 各种储能方式对比分析及抽水蓄能技术发展趋势探讨[C]//抽水蓄能电站工程建设文集, 2018, 24-28.
- [12] KHAN A R, MAHMOOD A, SAFDAR A, et al. Load forecasting, dynamic pricing and DSM in smart grid: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 54: 1311-1322.
- [13] 王蓓蓓. 面向智能电网的用户需求响应特性和能力研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3654-3663.
- [14] 王冬容. 激励型需求侧响应在美国的应用[J]. 电力需求侧管理, 2010, 12(01): 74-77.

12 家居环境与美学艺术的融合



缪珂 Liao Ke

上海理工大学工业设计系教师；优地设计创始人/设计总监；主要研究方向为整合产品创新设计、设计价值链与设计产业化，服务规模型企业50余家，擅长挖掘新场景新品类产品开发设计，包括海尔AI晾叠一体机系列产品开发设计（自主专利、技术开发、成果转化）等；设计作品获得包括德国iF产品设计奖、美国IDEA 产品设计奖、意大利 A' Design Award银奖在内的国内外知名设计奖项20余项；获得发明、实用新型专利80余项；获得上海理工大学教学成果一等奖、创新创业优秀指导教师一等奖等荣誉。

“家”在中国人心中一直是一种特殊的存在，浓厚的亲情氛围、群居团圆、共同生活的文化习惯都赋予了国人对家庭生活的美好期许。随着我国综合国力的飞速提升，产业结构的不断升级，我国人民走在了从站起来到富起来再到强起来的不断进阶之路上，总书记说，“国家不断发展的目标就是不断满足广大人民群众对美好生活的向往”，而一个个小家的幸福生活就是国家强盛的体现之一。同时，自1998年房改以来，房地产行业随快速城市化的迅猛发展，国人的住房结构、需求和品质都发生了巨大的变化，房地产业的持久繁荣也带动了建材、家具、家居和家电等上下游产业链的兴盛。但

当下，我国也正在经历经济增速换挡、产业结构升级和不断做强“中产阶级”的转型过程中，在这一进程中，人们对家的想象也在不断激发。有一点值得注意的是，随着物质生活的更为富足，大众的审美也迎来巨大提升，美学艺术在家居环境中扮演着越来越重要的角色，“新审美、新家居”，家居环境与美学艺术的深度融合正在进行时。

1 家居环境美学艺术需求的爆发

如今，家居环境早已不是单纯物理意义上的空间概念，更不是简单意义上的空间装修、展呈。“家”，因为有人的存在与介入而有了生命力，家

居环境也因为有人的参与和感知有了活力。随着生活水平的提高,美术艺术需求在家居环境中大爆发,特别是近年来崛起的“新中产”群体,从“有的住”到“住的好”,再到“住出质量”、“住出个性”,美学艺术在“颜值即正义”的时代正在重塑家居环境的新标准,而这些新标准也在反推家装、家居、家电等相关行业转型升级。

1.1 进阶的新审美

财经作家吴晓波在其《2018新中产白皮书》^[1]的调研报告中,首次从价值观、经济、职业以及教育4个方面给出了新中产人群的用户画像,之前作者曾从家居生活环境特征、用户行为习惯特征、心理特征、新审美偏好特征4个方面进行诠释以勾勒新中产人群的生活情境特征初貌^[2]。其中,新审美作为重要特征之一在对家居环境的美学营造上具有一定参考价值。新审美的这种“新”呈现出进阶性的特征,相较于出生于物质较为贫乏时期的“50后”、“60后”、“70后”至“90后”,甚至到所谓的“Z世代-1995至2009”,新审美不断进化,经历了缺失、盲目崇洋到逐渐兼收并蓄、民族文化自信的过程^[2]。此外,更呈现出圈层化、个性化、艺术化和多元化的特征,基于兴趣、共同爱好的圈层化,个性化、艺术化的表达,愈发多元化的呈现是当下年轻消费者审美的现状。

1.2 新审美新家居

新审美的进阶性催生新家居的迭代性,“快速迭代”似乎不只是我们今天身处互联网社会的生活、生存状态缩影,更是一种社会、产业综合性趋势,反映在家居环境领域便是层出不穷的新家居品牌。圈层化、个性化、艺术化和多元化的新审美特征使得消费者不再简单满足家装风格的被动定义,这些新家居品牌正是抓住了当下新审美潮流的趋势,用更为细分化的品类、产品和服务去重新建构家居环境。如定位为中国年轻新中产提供“生动明艳”、“品质精细”和“价格宜人”产品的新家居品牌“造作”,通过整合全球设计师和中国优质供应链,以“设计美学”、“线上效率”等优势脱颖而出,取得了良好的市场与出圈效应。在以前,提及中式家装风格和中式家具,第一联想到的往往都是“上了年纪”的消费层。但“梵几”品牌扎根东方土壤的理念传达,在设计与生活、东方与西方、现代与未来之间找到了一种平衡,将自然带入居家空间中,重新定义了“新中式”美学意象,并且深受当下年轻人喜爱。以及将传统工艺应用于现代设计实验式表达的“感物”地板,鲜花作为重要软装点缀的“野兽派”都深度把握了这种新审美趋势,在不断重塑我们的家居环境过程中再表达与传播新美好生活情境范式(图1)。



图1 新审美催生的新家居品牌(造作、梵几、感物和“野兽派”)

2 家居环境中的“四化”美

家装、家具、家电、软装和信息交互系统构成了我们今天家居环境的主要软硬件要素,而不同人员的参与,使得这个家居环境有了真正的意义。人在家居环境中的行为以及背后的各类心理、情感需求是家居环境区别于一般其他环境的核心。在“新审美、新家居”的趋势下,我们的家居环境呈现出一种“四化”美倾向,包括:“隐性化”的家电、

“艺术化”的软装和“智能化”的系统,以及更为“融合化”的家居环境。

2.1 “隐形化”的家电

家电是现代文明与生活水平的重要表征,电视奠定了“客厅文化”促进了家庭氛围,洗衣机的发明与普及解放了妇女,冰箱、空调的广泛使用大大提升了我们的生活品质与幸福感。今天,无论是黑电、白电,以及各类我们传统认知上的大家电都在



图2 LG Object Collection空间美学家电

呈现出一种“隐形化”倾向，产品的尺寸不是越大越好、功能不是越多越酷炫，产品与品牌本身更不是炫耀的工具。这种刻意“隐形化”的审美与设计趋势，一方面是满足新审美趋势；另一方面也是众多家电企业正在积极探索嵌入式家电、家装和家具一体化趋势下的家电与家居环境的巧妙融合，如韩国的LG率先提出了“空间美学家电”的概念，并在其“Object Collection 奕然”产品系列上实践（图2），如LG Object Collection冰箱采用独嵌两用设计，由用户自己定义个性化玩法，冰箱的多彩外观除了表达产品的“个性”，更是充分还用户于选择权，选择适配自身家装的整体色感氛围，试图将科技以美学、人性化的方式进行再表达，这种“隐形化”的美是从直白自我表达向“含蓄”隐晦表达转向的高级美。

2.2 “艺术化”的软装

今天，商品房精装修交付已成为标配的趋势

下，消费者对于审美、个性化的偏好表达很大程度上都寄托在软装上，软装本身也在跳脱原来理解上的狭隘范畴，家具、家电、绿植、鲜花、书籍、艺术品和收藏等都在成为用户表达自身美学品味、生活品质等重要发生载体。由《外滩画报》前总编徐沪生创立精品电商平台“一条”最初定位于日常生活美学购物平台，但经过数年的积累已成为新中产重要的生活美学信息平台。“一条”最近还开辟了“一条艺术馆”出售众多画廊、艺术机构以及新锐艺术家的艺术品，这些艺术品很多都是被买家装进了家中作为软装，来充分表达其独特的艺术品味，这背后是新中产审美消费猛烈增长的趋势。生活方式与艺术品的结合，“把家变成博物馆、艺术馆”和“艺术化”的软装也正在影响着家具产品的设计，如“造作”的“美术馆系列”柜体，把画框形态作为柜体识别特征的设计理念背后，更多是在诠释“把家变成画”的美好愿景。



图3 一条艺术馆与造作美术馆系列家具

2.3 “智能化”的系统

智能物联正在深刻改变着我们每个人的生活，身处前人工智能时代，“智慧家”似乎是必备的，我们的家居环境也自然地进入了泛在智能时代，

只不过这种智能不应该是一味生硬和外显的，如何自然表达是关键。实现“智慧家”背后有着“智能化”的信息交互和控制系统作为支撑，而呈现在前台的产品硬件和软件界面交互成为用户感知产品、

环境和智能的入口。因此，从美学角度，家居环境要形成高品质的美学体验必须要重视这些入口，产品实体交互、互联互通和交互界面是否易用，视觉美感是否符合目标群体的要求，看不见的信息交互能否既体现科技美又具有易用与实用美成为了重要议题。目前，华为的鸿蒙、海尔智家、美的、小米等品牌都在努力打造围绕智慧家庭的系统生态，这个生态中有硬件、软件和交互系统以及人的参与。值得注意的是，能让用户感知到的科技美才是真正价值所在。

2.4 “融合化”的家居环境

家居环境的“四化”美最后一个“融合化”指的是环境、家具、家居产品、智能家居产品和物联控制系统等软硬件的一体化高度融合趋势，这种“融合”主要体现出“交融——交互——交流”的具体特征关系（图4）。在产品嵌入式与集成化的设计趋势下，产品更加融入生活情境与场景，体现产品与家居环境的“交融”；智能家居的快速发展使得人与产品、环境的交互变成刚需，接近于人的更自然的交互方式、交互界面，生物传感器的应用，以及表情、肢体语言等多维通道交互模式的探索使得家居环境的融合化更需要考虑“交互”的因素；同时，随着智能物联技术的推进，“数据”的作用日益显著，协同、网络、整列、云计算、协调智能的小单元成为关键词，使得家居环境变成了“人——物——环境——数据”交流的产所，因而这种“融合化”呈现出高品质的特征，家居环境的融合“美”也在随着技术与需求的迭代不断进化。



图4 “交融——交互——交流”家居环境的“融合化”

3 家居环境中的“微观”场景美学塑造

数据、智能、物联和移动互联网正在加速改变人们的生活方式，身处高速变革时代的人们在信息爆炸、碎片化时间、机遇与压力并存的挑战下也

在追求着各类美好生活，以及生活中的各种“小确幸”，即流淌在生活的每个瞬间且稍纵即逝的美好。“微观”相对于“宏观”，在社科角度可以指从小的方面去观察，同时，更是一种视角，一种从细微之处发现、营造“美”的视角。这种“微观”也在深刻影响着我们的家居环境中的场景美学策略。

3.1 场景美学深入人心

什么是场景？1956年，戈夫曼在其著作《日常生活中的自我呈现》，将场景这一概念引入到社会学研究当中，并提出了“拟剧理论”^[3]，因此它不是冰冷的物理空间，是有温度、有情节的。场景类比新闻五要素：时间、地点、人物、事件和连接方式（交互），同时场景依赖于人，人的意识和行为决定了场景^[4]，同时，场景又是不断进化与迭代的。

“场景实验室”吴声对商业场景有着深入的研究，并在其著作《场景纪元》中对商业场景中各类新品牌、新物种、新产品、新模式、新IP有了细致的阐述，并架构了场景设计力及其设计方法。吴声提及的这些场景正是我们美好生活片段的高度集成，我们今天已经习惯了更新颖的购物中心、体验中心、民宿、主题餐厅、展览、美术馆和博物馆等各类场景中的美好节点，并随手记和分享，这种“在场感”^[5]和“氛围感”已经成为了生活方式的一部分，同时，这种极具感染力的节点式场景美学已经深入人心，正成为新中产新审美的重要体现之一。

3.2 “微观”节点渐成刚需

传统意义上的家居环境是通过功能来划分物理空间的，但今天的家居环境美学品质却是由家居环境中众多的“微观”节点场景所构成的，这些节点本身横跨或打破原有空间定义束缚，越来越由用户的个性化需求与喜好所决定。如，在当下年轻人热衷于中西餐美食生活结合的情境下，开放式厨房越来越被本土消费者所接受，而连接厨房与客厅的岛台也慢慢成为装修中的标配，岛台节点并不只是多功能操作台或辅助餐桌，更是用户分享美食制作成果、精美餐厨具、设计感风格化精品小家电陈列的“微观”节点，同样，餐边柜除了承担传统收纳功能外也更成为家居环境中主人的小型“博古架”，岛台+餐边柜的组合成为跨界厨房与客厅的美好“微

观”节点。类似的节点还包括有设计感的沙发单品或组合+绿植花卉软装搭配节点、床头柜节点、露台/阳光房节点、窗景构成节点和光影光效节点等，这

些“微观”节点是用户日常生活中各类场景美学要素和美好生活意象的具体投射，也成为了家居环境美学品质营造的重要抓手。



图5 家居环境中的“微观”节点

3.3 “分享家”乐在其中

拥有海量用户的生活方式展示与消费决策平台“小红书”的口号是：“标记美好生活”。当我们今天已经习惯各种“打卡”，随手记录与分享美好生活片段的生活方式后，家居环境中的各类要素的配置与设计策略也在因此而改变。家居环境中各类能够被记录和分享的，满足“社交化”传播的软硬件节点正在崛起，能够出片的精品家具、从照明向投射功能转向的氛围灯具、黑科技的家电、风格化/系列化色彩出挑的小家电、特殊CMF质感的柜门、具备学习能力的家居产品、一体化智能控制和个性化的软装与收藏也在不断在各类社交平台上被分享、传播。人们热衷于讨论美好的事物、彰显个性化美学品味与生活调性，并逐渐形成社群。越来越多的“分享家”乐在其中的背后，是生活方式从独乐乐到众乐乐的转变，更是今天家居环境美学营造考虑的重点，即如何将“家”打造成为传播个性化美好生活的场景？

4 结语

家居环境的改变是生活方式变迁的投影，在人们追求美好生活的过程中，个性化、艺术化和高

品质的美学需求越来越成为家居环境营造的主导因素，标准化、流程化和纯功能性的需求逐渐退位。在智能、物联等技术浪潮下，以新时代新中产为主流的消费人群正在重塑我们对于家庭生活的想象。一切能够满足这些美好想象的产品、服务、模式都将迎来新的市场机遇，以及在审美力越来越重要的当下，任何家居环境中的各类要素都应当重新思考当下的“新审美”是怎样的，会如何发展？动态的追踪、适应、引领新美学变化，不断更新美好家居环境。

参考文献

- [1] 巴九灵. 2018新中产人群画像[J]. 记者观察, 2018, 28: 22-24.
- [2] 缪珂, 肖亦奇, 施斌. 新中产生活情境下智能家居产品设计策略研究[J]. 包装工程, 2021, 42(18): 410-415.
- [3] 戈夫曼. 日常生活中的自我呈现[M]. 冯刚, 译. 杭州: 浙江人民出版社, 1989.
- [4] 缪珂. 互联网与智能化时代的产品设计思维和方法研究[J]. 包装工程, 2017, 38(18): 166-170.
- [5] 梅罗维茨. 消失的地域: 电子媒介对社会行为的影响[M]. 肖志军, 译. 北京: 清华大学出版社, 2002.

13 智能家居行业生态 建设痛点及解决方案



陈 挺 Chen Ting

博士，先后毕业于清华大学和德国汉堡工业大学。现任美的集团IoT物联技术部长，同时担任IEC智能控制器工作组专家、Wi-Fi联盟用户体验工作组副主席、广东省智能家电创新中心技术副总监、广东省物联网协会专家委员。曾参与多项智能家电国家标准制定。



董楚楚 Dong Chuchu

博士，现任美的集团IoT AIoT创新研究高级工程师，主要承担IoT设备互联互通协议、面向端边云多层分布式架构的智能协作感知技术等相关研究工作。先后负责智能家居物联网架构、端边协同策略以及多模态融合感知等研究与开发工作。



高欣婷 Gao Xinting

美的集团IoT公关传播经理

在政策与技术的驱动下，智能家居行业进入高速发展阶段。技术上，人工智能芯片、硬件、算法、平台等技术快速发展和不断成熟，5G商用加强连接能力，智能家居产品形态全面革新。政策上，“十四五”规划纲要描述了数字生活新图景：“推动购物消费、居家生活、旅游休闲、交通出行等各类场景数字化，打造智慧共享、和睦共治的新型数字生活。丰富数字生活体验，发展数字家庭。”

市场分析公司IDC的数据显示，2021中国智能家居设备市场出货量为2.3亿台，同比增长14.6%。纵观目前这个不断扩大的市场，现存不少产品用户体验不佳的问题，尤其表现在跨品牌和跨品类智能家电不能完全互联互通，具体体现在：

1) 生态碎片化。物联网厂商对智能家居的认知还停留在以控制为目的，不断抢占入口。商业利益考虑的太多，用户诉求考虑的太少，打造入口中心化生态，建立封闭利益。根据全球移动通信系统协会（GSMA）的数据，去年全球物联网设备已经多达126亿，到2025年可能接近250亿，几乎一个想法就催生一款硬件，每一家厂商都想开发一个App，结果是各家协议不同，彼此断裂，各自为政。

2) 设备不是深度智能，无法自主决策。设备依靠人的操控和云端决策，所谓的“智能”不过是简单地把人的意图传递给云端服务器，由人来控制设备，人需要操心的事情一件不少，这违背了智能家居的初心，推高用户学习和使用成本的同时，也把大量设备变成了人通过云端“指挥”的“执行机器”。

设备的连接是用户使用智能家居的第一道门槛，但解决跨品牌和跨品类的智能家电互联互通的问题只是基础，物联网时代智慧家庭的转型，应该是改变传统家电行业的商业模式，同时还需要搭建软件的服务平台，即物联网操作系统（Operating System for Internet of Things, IoT OS），物联网操作系统是一种在嵌入式实时操作系统基础上发展出来的、面向物联网技术架构和应用场景的软件平台^[1-2]。传统嵌入式操作系统一方面由于封闭性、体积较大、功耗较高等原因无法直接适用于物联网设备；嵌入式OS只是完成了物理硬件的抽象，实现了应用软件与智能终端硬件的解耦，并不是真正的物

联网操作系统。另一方面，传统嵌入式OS由于以往是为支持单一功能而定制的操作系统，所以无法通过加载运行丰富多样的应用程序来扩充产品的功能。因此，物联网操作系统需要进一步发展创新。

同时，现存的物联网操作系统都是通用型的，缺乏对智慧家庭产业现状的有效解决，物联网时代缺少面向智慧家庭的为用户提供一致服务的操作系统。行业需要有自主可控的安全物联网操作系统，加速智慧家庭落地。

1 物联网开源操作系统应使不同品牌、不同产品互联互通

物联网的服务对象直接面向大众消费者，因此在运维模式、网络架构、数据处理上都与传统模式有很大区别，物联网操作系统从独立封闭走向开放互联。同时，随着通信、人工智能、大数据等技术不断发展成熟，物联网终端智能化不断加深，亟待提升能力的终端设备给物联网操作系统提出了新需求^[3]：

1) 为实现不同厂家和不同品类设备的互联互通和互操作，物联网操作系统必须实现互通性要求；

2) 物联网设备资源受限，低功耗成为物联网操作系统的必备特性；

3) 联网设备不断增加，网络安全亟待提升，从操作系统层面保障软硬件安全成为必须^[4]；

4) 物联网设备形态功能各异，需增加软硬件的支撑能力；物联网操作系统可以将形态各异的网络设备呈现为具有抽象接口的外围设备，通过调用统一的编程接口实现跨设备任务，并为用户和开发者提供一个统一抽象的虚拟化管理界面^[5]。

5) 针对大量异构终端，物联网操作系统需要实现模块化需求，实现可裁剪和快速定制。

同时，家庭智能化水平提升也会带来设备数据量的不断增加，跟云端集中控制相比，各设备间通过本地化的相互通信，实现边缘协同，能更好地适应高速低延时的应用要求，也能进一步保障用户隐私。借鉴云计算的分布式操作系统概念，物联网操作系统的分布式能力也是未来研究的重点方向。华为2019年发布的HarmonyOS提出了分布式软总线的概念。区别于云计算的分布式算力共享，物联网操作系统更强调的是物与物能力的共享协同，操作系

统对上层应用提供的业务能力也不再局限于本地，更加注重通过云、边、端协同调度，实现用户无感知的服务和体验^[6]。HarmonyOS是华为基于开源项目OpenHarmony开发的面向多种全场景智能设备的分布式操作系统，旨在创造一个超级虚拟终端互联的世界，将人、设备、场景有机地联系在一起，将消费者在全场景生活中接触的多种智能终端实现极速发现、极速连接、硬件互助、资源共享，用合适的设备提供合适的场景体验。在传统的单设备系统能力的基础上，OpenHarmony提出了基于同一套系统能力、适配多种终端形态的分布式理念，能够支持多种终端设备；OpenHarmony采用了组件化的设计方案，可以根据设备的资源能力和业务特征进行灵活裁剪，满足不同形态的终端设备对于操作系统的要求。

为推动家居物联网领域的长远发展，解决传统家电制造企业面临的产品智能化挑战，如芯片、操作系统、物联网协议、人工智能技术等问题产生的产品之间互通性不足、协议标准不统一、用户交互体验差等问题，美的也在积极寻求与开源项目OpenHarmony的合作，革新智能家电和智能硬件的技术和用户体验，共同推动智能家居产业的升级。2021年10月，美的发布了美的物联网操作系统1.0，是智能家居行业内首个基于OpenHarmony 2.0开发的分布式物联网操作系统，致力为各产品多品牌互联互通、设备间自主协同、云端一体化、AI交互赋能等问题提供全新的解决方案。这套开源的操作系统诞生意味着不管是哪个品牌的设备，都可以做到互联互通，不需要第三方的入口或中介，做到真正的开放互联，为用户提供更丰富的增值服务和更出色的跨场景体验，具体体现如下：

1) 物物直接相连，能力共享

传统的智能是人把信息通过入口设备传递到云端，云端分析处理后再传递信息到设备，设备之间的“通信”也需要通过云端这个“中介”，这导致设备间的联动有迟滞性。

当设备搭载了相同的物联网操作系统，可以实现物物相连，设备联动速度更快。同时，智能家电可承载轻量的边缘计算任务，减轻云平台的负荷，提升设备联动效果。

这便是美的操作系统的运行逻辑。美的物联网操作系统通过软总线（设备间的虚拟通信通道）的方式让设备可以自主建立连接。同时，操作系统通过“端侧物模型”定义了设备间的共同通信语言，让所有设备能相互“理解”，实现设备间的能力共享。

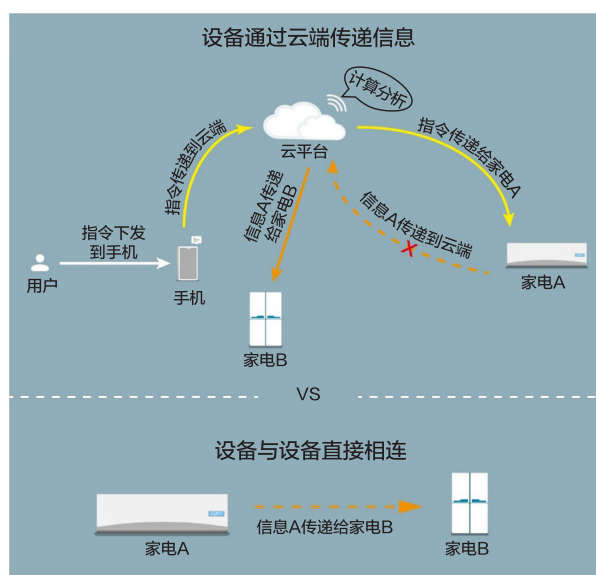


图1 设备信息传输的两种模式对比

比如，通过客厅的温湿度计可以检测温湿度，卧室的空调、加湿器共享温湿度数据，联动开启，确保家里舒适环境。各个设备发挥自身的优势，实现能力互通，无需补齐短板，同时打破了物理空间的限制。

除此之外，物联网操作系统还可以提高设备协同的稳定性，即使路由器断网，设备间还是可以本地自主协同传输信息。同时，家电与家电之间能够实现自动联网，一台家电可以给另外一台家电配网，减少人的联网操作。

2) 设备自决策，主动提供服务

真正的智能家居是实现设备的智能，家电即“电脑”。通过物联网操作系统中集成AI自学习能力，家电可以学习用户习惯并形成自决策模型，主动给用户服务。这就类似于今天大家打开新闻App，并不是我们主动去搜索要看什么新闻，而是App主动推荐新闻给你，你喜欢看的内容都被记录下来，形成一个算法推荐。而智能家居也应该是这种主动式的服务，设备高度智能，自身就可以完成感知、决

策、执行等一系列过程。

3) 真正的生态合作是互通信息，各自决策

与物联网一样，互联网的本质也是连接，但平台发展到极致，却催生了更多的封闭和垄断，所谓的生态合作伙伴都有主从之分，信息可以共享，决策权必须归平台。

美的认为这样的合作不是真正意义上的生态合作。真正的生态合作是设备与设备之间互通信息，但设备有决策权，而不是被控制。美的发送信息给其他厂商设备，该厂商设备可以决定要怎么做，提供什么服务给用户。这就类似公司里每个部门都要有主观能动性，而不是等着总经理指挥，所有部门应该协同做事，互通信息，各自决策各自执行，发挥自身能力共同运转系统。

4) 提供丰富的物联网原生应用

物联网原生应用是在物联网OS上开发的各种智能应用，直接供用户使用。物联网OS一方面提供物联网原生应用运行的环境，另一方面负责处理物联网原生应用的基础逻辑；目前家电产品智能化基本都是各个产品的单兵能力，未来智慧家居领域全屋智能场景的落地需要发展更多更好的家居物联网原生智能应用，让用户可以随时随地、更加方便地进行交互体验。例如，现在的智能手机能够加载各式各样的应用，未来智能家电也应该能够动态加载各式各样的物联网智能原生应用。

美的物联网操作系统未来将支持丰富的智能原生应用动态加载，同时为开发者和合作伙伴提供更便捷的开发环境和更强大的应用生态，类似安卓系统一样，只需要实现一次业务逻辑，所有底层的调度由系统来完成。举个例子，美的体脂称里面搭载的健康提醒、健康监测服务可以与任何一个厂商合作开发，还可以不断增加更多的应用服务。未来，用户买一台搭载了美的物联网操作系统的设备，可以实现升级，用户可以下载新家电应用（类似安卓手机下载应用软件），享有越来越丰富的服务，最大程度地增加产品价值。

2 智能家居平台与终端回归用户服务本质

回顾智能家居的发展过程，平台与终端之间一直并驱争先，平台厂商希望智能运算、决策的能力

掌握在平台上，终端厂商企图摆脱其他平台的“控制”，选择建立自有平台。但其实这是一个悖论，平台存在的意义应该是让终端更好地服务用户，而不是互相抢占市场份额，用户要的不是App这些平台去控制一堆家电，而是要家电能主动给自己提供服务价值。美的通过发布物联网操作系统，为终端厂商发出了自己的声音：所有终端设备都可以有独立决策和执行的能力，可以实现功能服务，传递用户价值。

当设备有了统一的操作系统，所有的产品都可以直接互通，用户对平台的依赖度就会降低，不再在意这个产品是否可以被某个平台所控制，厂商也无法通过平台来捆绑消费者。当平台影响购买的因素被抹去，智能家居就会回归设备本身，谁的设备功能好，谁的设备自主和协同智能能力更强，谁的设备运算分析能力强，谁就更能被用户认可。有出色硬件制造的能力和掌握大数据分析能力的智能家居厂商，在下半场的智能家居鏖战里更容易拔得头筹。

2021年，美的以金牌捐赠人的身份正式加入开放原子开源基金会，并成为OpenHarmony项目群A类捐赠人。作为开源生态的先行者与开放原子开源基金会在智能家居、医疗、楼宇以及工业领域实现全面深度合作，双方共同推动美的物联网操作系统的更新迭代，共同助力开源系统的发展进入跨越式的快车道。

3 美的首次提出“元家居”概念，打造全新的物联网应用与交互

智能家居物联网如今正朝着四大方面趋势演变：远程控制过渡到场景联动、封闭的生态圈转变为开放互联、单一入口控制转变成多入口、产品能力从中心控制转变为分布式控制，这些趋势正在促使智能家电从被动响应用户需求变成能够实时感知用户行为提供主动服务的智能设备。

为适应这一趋势，美的在2021年智能化大会上首次创新性地提出了“元家居”的概念：基于感知、通信、人工智能、大数据、虚拟现实等基础技术，将物理空间（人、物、环境），互联网空间（信息、服务），虚拟空间（元宇宙）相结合，实现数字家庭孪生，为用户提供全新的物联网应用与

交互体验。元家居整合了美的强大的产品能力和前沿技术，可以为用户提供一种全新的智能家居体验服务，譬如用户可以在门店让用户带上VR头盔，体验各种不同的全屋智能家居场景，这将大大提升用户体验和门店购买转化率。针对线上渠道，也可以支持在美的美居App、小程序等入口级应用上，将真实物理设备映射到全景视频中去，让用户可以轻松自定义联动场景，结合人工智能语音等技术，为用户营造一个虚实结合的操作体验，提升用户满意度。

未来的智能家居物联网开放平台，将集成多模式分布式感知技术、大数据、人工智能以及云边端一体化技术，构建未来家庭信息模型，支持更多家居物联网原生应用场景；同时，结合数据洞察、数字孪生等技术，实现从环境感知、用户行为分析、场景辅助决策到自主联动场景的转变；通过打造“硬件+软件+内容+服务”的综合智能产品，支持多设备全屋智能场景联动，构建海量多样的智能原生应用，最终为用户提供更多智慧决策，改善用户生

活环境提升居住体验，实现更便捷的智慧生活。

未来的智能家居产业将以深度智能产品研发、全屋智能场景落地、原生智能应用创新三大方面为主要方向，致力于创造多场景、多入口、多应用的云边端物联网生态平台，最终实现家电电脑化，开创元家居新时代。

参考文献

- [1] 何小庆. 物联网操作系统的现状与未来[J]. 张江科技评论, 2019(3): 63-65.
- [2] 潘爱民. 物联网操作系统的研究与实践[J]. 电子产品世界, 2019, 26(8): 35-39, 32.
- [3] 王玫. 物联网操作系统进展研究[J]. 电信网技术, 2017(5): 8-11.
- [4] 彭安妮, 周威, 贾岩, 等. 物联网操作系统安全研究综述[J]. 通信学报, 2018, 39(3): 22-34.
- [5] BRUSH A J . An operating system for the home[J]. Usenix, 2016.
- [6] 胡亚欣, 李红伟, 焦利敏, 等. 搭载Harmony OS智能家电的研究[J]. 家电科技, 2021(S1): 486-488.

14 中国绿色智能 餐厨趋势分析



徐守澄 Xu Shoucheng

现任美的家用空调事业部厨房空调产品经理；长期致力于厨房场景产品创新研究工作，在此领域取得20余项国内外设计奖项，共申请专利200余件。



张 浩 Zhang Hao

现任美的家用空调事业部家用中央空调产品开发中心主任。长期开展制冷制热效果、节能、静音及舒适性等方面的研发工作，在此领域取得了重大技术突破，共申请专利300余件，主持和参与制修订国家及行业标准5项，地方及团体标准20余项，负责国家科研项目2项，广东省高新技术产品9项，7项科研成果被鉴定为“国际领先”，获得省部级以上奖励9项。



成 权 Cheng Quan

现任美的家用空调事业部新场景孵化中心用户研究主任工程师兼企划。长期致力于空调产品的用户研究、用户体验、产品企划等工作，曾担任美的集团用户体验测评分委会组长，主导制定美的结构化用户体验测评规范等。

1 背景

1.1 餐厨品质升级

消费升级近两年是许多人热议的一个话题。随着改革开放带来的变化，人们的生活品质也渐渐提高。而随着我们生活方式和消费环境的改变，以及购物渠道变得越来越宽广，我们的选择余地也变得越来越来多。

全国家用电器工业信息中心研究部部长宋敬学认为，厨电产品既要“求同”也要“求异”。比如油烟机和灶具产品分别追求大风量和大火力，这可以有效改善厨房环境中的重油烟环境。净水产品则追求大通量和用户交互，这是行业发展主流的趋势。“异”则是强调产品的差异化和精细化，主要为了立足消费者真实体验进行升级。

时下的厨电市场，为满足消费者日益多元化的消费需求，不仅传统品类的功能不断丰富，一些新的品类也不断涌现。根据全国家用电器工业信息中心研究数据显示，2021年中国厨卫市场主要品类高端产品零售额占比普遍超过20%，其中燃气灶、洗碗机、集成灶、燃气热水器、电热水器增长更加明显。

消费升级让我们的生活变得更加有品质、有保障。随着中国家庭的消费提升，厨房也经历了从硬件升级到追求品质，再到品味生活的跨越式发展。这不仅仅是基于科技的驱动，同时基于国人生活方式的迭代和对美好生活的不懈追求。业内相信，以消费升级为导向，厨电市场正迎来全新的发展机遇。

1.2 餐厨环境对健康的影响

厨房是每个家庭必不可少的地方，所以烹饪对人类而言是一件非常重要的事情。但是，很多人不知道厨房炒菜所带来的油烟对人类健康有很大的危害。厨房油烟是食用油和食物在高温加热条件下，经过一系列的复杂变化产生的热氧化分解物。其中部分分解产物以烟雾的形式散发到空中从而形成油烟。油烟成分与加热温度有着密不可分的关系。当炒菜温度达170℃时只有少量油烟产生，当温度达到250℃时就会产生大量油烟，油烟气的成分非常复杂且含有一些高致癌物。

厨房油烟可以随着空气进入人体呼吸道，在厨

房待久了可能会导致食欲减退等症状。该症状在医学上称为油烟综合症。所以经常做饭的人就会形成本来很饿，但是做完饭后就没有胃口了。据研究发现当食用油到达150℃时其中的甘油就会生成油烟的主要成分丙烯醛，它具有强烈的辛辣味，所以对呼吸器官都具有较大的刺激，可能会引起鼻炎，咽喉炎和气管炎等呼吸疾病。美国一家癌症研究中心指出，针对肺癌研究发现长期做饭的家庭主妇和从事厨师工作的人肺癌发病率较高。

1.3 节能减碳宏观政策对餐厨环境的影响

能效标识是表示家用电器产品能效高低的一种分级方法。它不仅起着市场准入机制作用，它还是消费者选择家电产品的一个重要参考依据。在国内，北京和深圳等地区选择低能效等级的产品还可以享受到实际的优惠政策。

随着国内经济的快速发展，如今中国已经成为世界家电最大制造地之一和最大消费市场，同时也是家电消费最大市场。据有关部门的调查数据表明，近年来我国居民用电量每年以10%~15%速度增长，远大于同期全国电力消费总量增长的速度。水电和燃气价格的上升让消费者在家电产品的能效因素开始重视起来，而厨房电器又是家庭用电的重点之一。有人说，20世纪比厅堂，21世纪比厨房。厨房产品已成为影响消费者生活品质的重要组成部分。一直以来厨房行业家电产品种类和品牌繁多，厨房电器的能效状况也并不理想。因此厨房电器是否节能也成为消费者选择的一大标准。

2 餐厨消费趋势及行业发展

2.1 中西厨环境分析

中式厨房结构一般包括洗菜区、备菜区和烹饪区三个部分。中国厨房面积在整个户型里占比不大，小户型留给厨房的空间更少，再加上厨房内电器和物品杂而多，拥挤就成了中国厨房的通病。有报告指出中国家庭平均拥有2个砧板、3把菜刀、4口锅、4个小家电、8个调味罐、11套餐具。其中烹饪锅是厨房中比较占地方的电器，在现代趋势下多功能锅会在未来生活中成为用户的首选。中国人比较喜欢炒菜，因为中式的饮食习惯是煎炒烹炸，所以大多数家庭的厨房都油烟较大，然后造成味道比较大，油烟成厨房老大难

题。传统油烟机性能的欠缺将健康隐患埋在了每个人身边。大量的油烟逃离出来散在空气中，危害着人的健康，这将会导致呼吸系统疾病高发。所以中式厨房用户装修喜欢强力的油烟机。中式烹饪都偏向于喜欢爆炒，这很难避免油渍飞溅，导致台面、墙上和油烟机上都沾满油烟。很长一段时间后冷却的油烟会越来越顽固，这会使用户很难清理，并且厨房会有异味，还会容易滋生细菌。中国近年来开始有些家庭配备了洗碗机，但是中国人习惯用碗和盆，因为其构造比较深，所以洗碗机没有那么容易可以将其清洗的非常干净。

西方家庭普遍为开放式厨房。他们平时烹饪都是以烤箱为主，所以很整洁没什么油烟。岛台是西方厨房的另一个大的特色，就是在厨房中间再加个烹饪或料理台。一家人可以在一起享受做饭的乐趣，甚至还可以直接当餐桌使用。西方的厨房一般都配备了一台嵌入式洗碗机，国外的餐具大多是扁平的盘与碟，通常来说按照他们的习惯油比较少，所以洗碗机很容易将它们洗干净。

2.2 行业发展分析

2.2.1 家电产品趋势

随着科技发展和经济条件提高。以及家电市场消费群体的年轻化。厨房家电行业未来发展的主要方向必定是高度集成、绿色环保、智能节能和远程可控。

智能化是厨房未来发展的趋势。通过互联厨房多种电器，实现产品与产品、产品与用户间的交互。同时可以在统一的触摸屏和手机的集成控制下，随意操控任意厨电，远程查看厨房空气状况和燃气安全状态，将传统厨房打造成了互联互通的智慧厨房。

随着消费水平提升，新型嵌入式厨卫电器收获越来越多的关注。嵌入式厨卫电器造型简约时尚，能够完美嵌入橱柜节省厨房空间，视觉上更为开阔整洁，使用中便捷性也丝毫不打折扣。随着年轻一代成为主要消费主力，嵌入式厨卫电器会主打未来的消费趋势。这也是嵌入式厨卫电器未来增长的最大动力。

集成灶是当下火热的家用厨房电器。集成灶智能化的意义在于实现产品功能多维度提升的同时也要满足实用度和体验感，这才是智能化餐厨家电行业发展的意义所在。2021年的很多数据表明蒸烤一体集成灶逐渐成为主流产品。它同时配备了烟机、蒸箱、燃气

灶和烤箱等功能，实实在在的让厨房空间利用率大幅提升，这对于小户型家庭非常友好。智能化的集成灶上面还会有一个智能化屏幕，人们可以选择菜谱进行做菜，或者在做饭时听电台和看剧来给做饭带来更多的乐趣。

2.2.2 家电能源趋势

清洁能源家电成为趋势。电磁炉有许多好处，它具有多种功能来满足家庭蒸、煮、炖和煎炸的各种需求。另外使用过程中没有明火，这大幅减少了厨房的环境污染。清洁也更方便，只需用湿布擦拭即可。如果有顽固污垢，可使用一些特殊的清洁剂进行清洁。此外，与存在意外泄漏风险的燃气灶相比，电磁炉本身具有多种安全保护措施，使用起来更安全。同时，面板在使用过程中不会产生热量，从而避免了灼伤的危险。即使家里有老人孩子，也更加无后顾之忧。最后，方便携带也是电磁炉的一个相对明显的优点。其结构简单、体积小，携带不成问题。

现在越来越多人使用太阳能热水器，它能够系统全自动静态运行，并且最重要的是环保节能利国利民。太阳能是可再生能源，具有取之不尽和环保无污染的特点，只要有阳光它就能够正常运行。太阳能热水器节能效果明显，它可以节省不少电费。

3 绿色智能餐厨的技术路径

3.1 节能技术

3.1.1 相变储能技术

相变储能是指在一定的温度范围内，利用相变材料（phase change material, PCM）本身相态或结构变化，向环境自动吸收或释放潜热，从而达到调控温度的目的。相变储能可以改变能量使用的时空分布，提高能源的使用效率。

相变储能的工作原理是利用材料从一种状态转变为另一种状态时热力学状态（焓）的变化。例如，当冰融化成水时，它会从周边吸收热量，并在再次凝固时释放热量。在这种吸热热量和释放热量的过程中相变材料温度保持基本恒定，即在小范围的温度变化中转换较大的能量。

美的高端品牌COLMO就在电热水器产品中应用了这一技术。它通过固液两种状态的转变吸收和释放能量，从而产生热水。这一产品彻底解决了热罐

式电热水器储水的方式，没有了死水和水垢的沉积的问题，因此洗澡水可以更加干净和新鲜。

这一相变技术未来将有机会应用于厨房空调等大功率家用电器，实现余热的储能、回收和利用，从而达到节能、低碳的目的。



图1 美的COLMO一款运用相变储能材料的水热水器

3.1.2 变频技术

近年来随着微电子技术和大规模集成电路的发展，变频器越来越被生活生产所接受，变频家电变得越来越普及。而在众多的变频电器当中，空调是一个耗电大户，而变频空调可以达到很好的节能效果，所以变频技术也是未来节能降耗的趋势。变频空调是指加装了变频器的常规空调。压缩机是空调的核心零部件，而变频器是一种控制和调节压缩机转速的控制系统，通过控制压缩机处于最佳转速来提高能效比，可以达到比传统空调节能30%以上的效果。变频空调主机可根据房间温度自动提供冷量或热量；当室温达到设定温度后，空调可以低功率运行来维持该温度。而传统的定频空调压缩机则依靠其连续的启停压缩机来调节室温，房间温度波动范围大，而且会更加的费电。依靠变频压缩机改变转速来控制室温，可以使得室温波动小，节约电能，而且舒适性更佳，从而实现既节能又舒适的温度控制体验。

3.1.3 光伏发电技术

光伏发电技术可以将太阳能直接转化为电能，

它利用了半导体界面的光伏效应。这项技术应用的关键是太阳能板的使用，对太阳能板进行封装和保护，然后将其串联起来就可以形成一个大面积的光伏发电装置。光伏发电这项技术的优势是没有地域上的差异，只要有太阳光照射就可以进行发电。而且光伏发电安全可靠、无噪声、低污染，其施工周期也比较短。



图2 太阳能光伏屋顶

太阳能屋顶是太阳能发电装置在普通房屋顶部安装的光伏发电装置，这项产品及技术可以应用在城乡建筑领域。光伏瓦是具有光伏发电功能的特殊瓦片组合，其具有隔热、防水的特点，还能进行发电。它直接安装在屋顶上，就像普通的瓦片一样，可以提供部分的生活热水和生活用电，降低家庭能耗。

3.1.4 物联网、智能化技术

物联网是信息技术产业的一次重大革新。物联网是按照约定的协议将任何的物体与网络连接起来，物体之间可以进行信息的交换和交流，以实现各种智能化的功能。而智能技术是物联网的关键技术之一，通过它可以有效地达到某种预期目的，通过将智能技术植入物体中，则物体可以具有一定的智能，并且能与用户进行通信。

物联网技术和智能技术在厨房的典型应用场景是“烟炉联动”。随着消费升级，厨房已经从一个满足基本温饱的地方升级成了一个代表用户生活品位和生活质量的地方，甚至成了一个家庭的社交中心。而且用户对厨房电器集成化和套系化的需求

明显，成套购买是厨电的新需求。根据统计数据显示，烟灶成套购买产品的零售量达到44%。早在2017年美的就开始布局了智能烟灶联动的产品，通过人工智能降低了用户操作的复杂度，实现了厨房品质生活的智能化应用场景。

3.2 健康烹饪技术

3.2.1 新风、除味技术

厨房新风系统可以安装在厨房吊顶内部，在运行时不会发出较大噪音。再加上通风效果十分强大，可以快速排除厨房里面的异味，让人们在厨房烧菜有个安静舒适的良好环境。厨房新风系统不仅仅局限于此，强大的通风功能可以排出污浊的空气，并进行彻底的过滤净化，再通过送风口引进室外的新鲜空气。它还有一个好处就可以补充室内的氧量。众所周知人们在使用厨房时都会打开窗户通风，其中的原因不仅仅是排出厨房内的异味，更重要补充室内新鲜的氧气。因为人们在使用明火炒菜过程时消耗了大量氧气，使室内含氧量极具减少，可能会让人感觉到呼吸困难和胸闷等。厨房新风系统技术一定程度上解决了厨房这一难题。

3.2.2 电磁烹饪技术

民以食为天的说法在古间就开始流传。如今烹饪在中国家庭日常生活中的重要性逐渐提高，得心应手的厨房电器也成为了现代厨房中的新宠。在近几年厨房电器市场中嵌入式电磁炉产品已经逐渐取代传统燃气灶，成为了新一代消费者的前卫选择。

嵌入式电磁炉在欧美等国家已经十分流行且普及。其产品优势十分明显，没有明火加热。电磁炉在开启时不会对厨房环境特别是温度造成太多的影响，利于打造舒适洁净的厨房空间。其次拥有精准的火力调节能力，并且搭配更多的智能化功能。嵌入式电磁炉可以大幅提高烹饪效率且满足众口难调的口味需求。

GE Appliances四头电磁炉搭载有美国FIRSTBUILD研发中心的精准控温技术，无论是低温恒温的烹饪还是高温的猛火爆炒它都能满足用户的多样烹饪需求。它不仅同时具备和超越了传统灶具的基本功能，还有效提升了用户烹饪体验。该产品搭载3400W的大火力灶头，普通的电磁炉功率大约是2800W的峰值功率。另外它还有两个七寸的灶

头，它也可以实现2400W的火力。这两个灶头的特色在于能够实现一键并联从而可以使用它来进行铁板烧。如果用户搭配铝制烧烤盘，在家就可以享受烧烤乐趣。另外还有温和加热食物的“melt功能”灶头。主要针对需要小火慢炖及怕烧焦的食物烹饪，例如煲汤、加热黄油和煮奶等。该产品四头电磁灶内有多项智能科技技术，其中一项技术是自动调控最佳烹饪时间和火力，温度在29~93℃范围内更确保 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的精细控制，主要利用食材探测温度传感探头来全面掌握烹饪食物温度。

在厨房电器产品高端化、智能化需求日益凸显的趋势下，电磁灶烹饪技术可以带来的是很好的智能科技烹饪新体验。它以轻松便捷的方式，在各种烹饪之间自由切换。

3.2.3 厨余垃圾处理技术

厨房垃圾是餐饮垃圾和厨房垃圾的总称。厨房垃圾约占城市生活垃圾的30%~50%。厨房垃圾会繁衍非常多的细菌，因为该种垃圾中的水分约占总量的70%~90%。并且含有大量的有机物、油脂和盐等。这或许还会成为疾病感染的来源。

我国餐厨垃圾处理有以下四种技术：

1) 厌氧消化技术。

该方法在无氧条件下将微生物分解有机物时产生的甲烷和二氧化碳等气体用来发电，这可以有效将厨余垃圾减量化和资源化。

2) 全相厌氧模式

该方法主要把垃圾中的固体粉碎制浆后，与沥青液一起送入厌氧罐消化产生沼气来提高沼气的产量。

3) 好氧生物技术

该方法是在有氧条件下通过微生物代谢活动将厨余垃圾转化成有机肥。

4) 饲料化技术

该方法主要是通过生物转化，杀菌消毒和脱盐等工艺最终产生蛋白饲料添加剂等可用物质。

4 总结与展望

1) 在中国消费升级的大背景下，消费者对餐厨环境健康的重视程度越来越强，特别是在厨房装修和厨房家电购买上的投入越来越多。

2) 在国内外环保相关政策的推动下, 节能降耗技术不断得到推广应用, 餐厨家电也比以往更加注重节能省电。

3) 智能化技术的应用, 使得餐厨环境及用户体验变得更加友好, 不但减轻了用户在烹饪方面的负担, 餐厨环境也更加的安全可靠。

总而言之, 消费者对于健康、节能、环保、智能等方面比以往更加关注。相信在不久的将来, 更多、更先进的环保节能及健康烹饪新技术应用到餐厨烹饪及餐厨空气处理家电中, 必定会极大的提升我国健康、节能、环保、智能的餐厨环境管理。

15 空枕联动： 打造优质睡眠环境



艾长滨 Ai Changbin

毕业于北京理工大学光电学院，获硕士研究生学位，现任青岛海尔空调器有限总公司智慧卧室企划经理，主要负责卧室场景企划及技术实现。从家居家电融合、智慧赋能、一站式服务，打造智慧卧室整套解决方案。

人的一生中有1/3是用来睡眠的，睡眠质量尤为重要。但是近年来，随着中国经济的飞速发展，国民的睡眠时长却在减少。从2013年至今，国民平均减少了近2小时的睡眠时间。与此同时，我国睡眠经济蓬勃发展，2020年中国睡眠经济市场规模达3778.6亿元，全球睡眠经济的商业规模已达到万亿以上。据苏宁发布的双十一消费报告显示，2020年双十一期间，助眠类产品销量同比激增789.5%。而据央视

财经报道，双十一购买进口助眠产品的人数中，00后同比增长434%。2021年中国失眠人群主要集中在经济相对发达的一、二线城市，其中二线城市占30.2%，占比最大。从年龄结构来看，2021年中国失眠人群以22~40岁的中青年为主，其中31~40岁占43.4%，占比最大。另外，中国失眠人群女性占比较大，占失眠人群总数的54%。

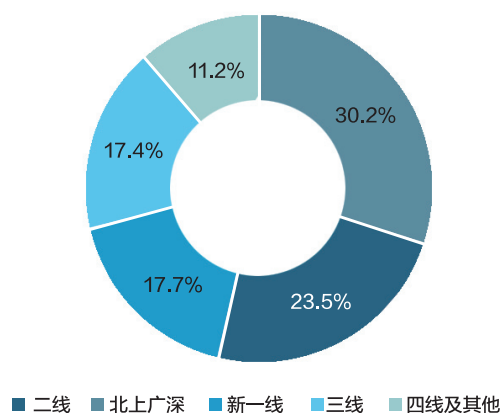


图1 2021年中国失眠人群地域分布

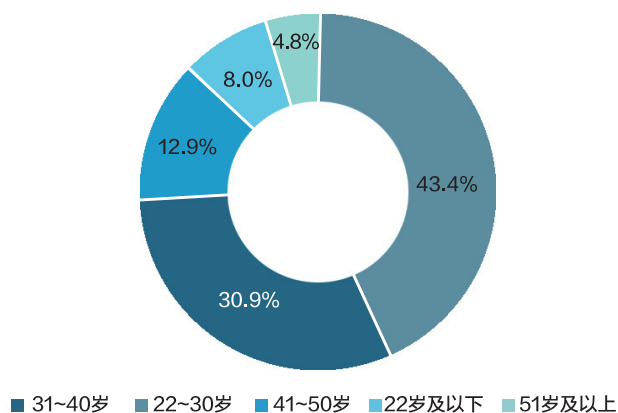


图2 2021年中国失眠人群年龄结构

从2016年到2020年，全国有超过2200家与睡眠相关的企业成立，2016—2017年间睡眠行业曾出现一个融资小高峰，京东、罗莱家纺、喜马拉雅网络等企业都以投资的方式布局睡眠行业。三星、科大讯飞、亚马逊、苹果等科技公司先后推出睡眠监测手表、手环等仪器。蒙牛、可口可乐等快消巨头则推出了助眠功能的饮品。

在影响国民睡眠质量的因素中，心理压力占比最大，其次是熬夜习惯，饮食与环境因素排名第三。

环境因素中，噪音、寝具不舒适、温度为最主要影响因素。舒适的睡眠环境对提升睡眠质量有着重要影响，其中噪音及寝具不舒适被超6成受访者认为是影响睡眠质量的主要环境因素。

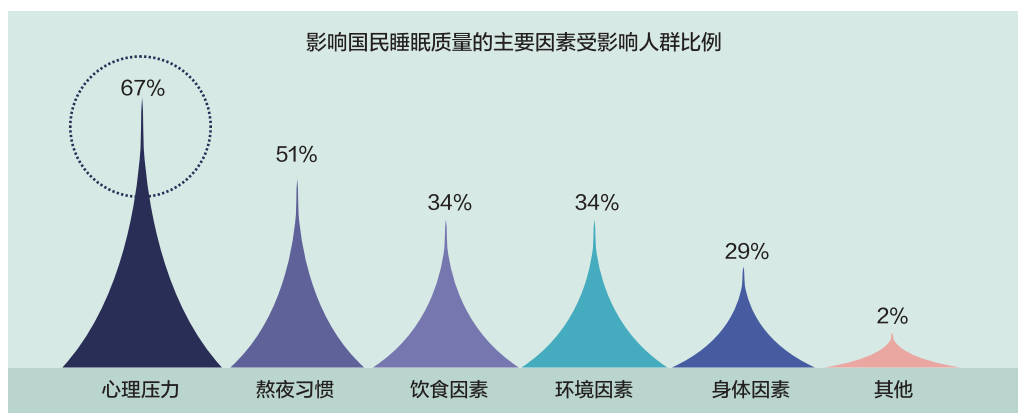


图3 影响国民睡眠质量的主要因素受影响人群比例

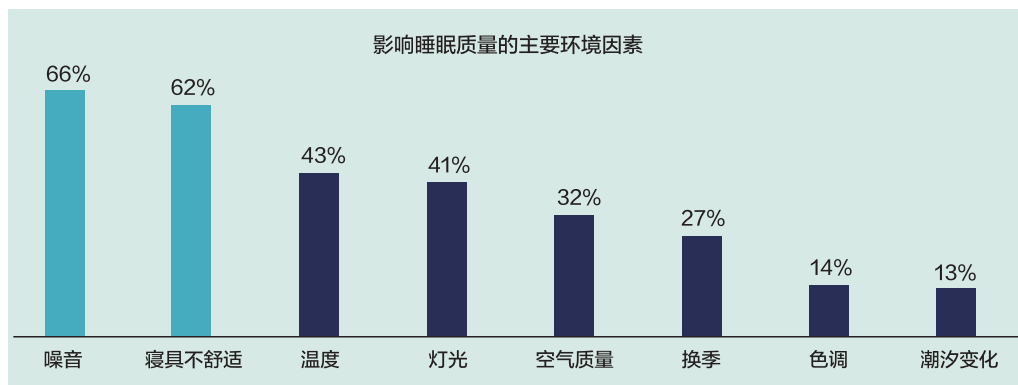


图4 影响睡眠质量的主要环境因素

海尔智慧卧室从用户睡眠健康角度出发，推出空枕联动场景方案。通过智能枕实时监测睡眠过程中的呼吸、心率、体动等数据判断睡眠状态，并实时联动空调和加湿器，调节室内的温湿度，让人夏天不会被冻醒或热醒，冬天保持睡眠过程中的室内湿度，避免起床后口干舌燥。同时，智能枕检测到用户睡着，能自动调节智慧功能床高度，同时关闭灯光、窗帘、电视，这一点对老人非常适用。对于儿童，智能枕还能联动智能音箱，儿童睡前通过智能音箱播放睡前故事，检测到儿童入睡后，自动关闭音箱。用户每天起床后，手机会自动收到昨晚的睡眠报告推送，睡眠报告中包括睡眠评分，睡眠分期（睡眠时长、深睡、浅睡、REM），呼吸，心

率，体动，睡眠建议等内容。

在开发过程中，海尔智慧卧室联合中国标准化研究院、海尔超前研发中心等，在软硬件方面输出多项成果，一款新型的睡眠检测仪以及多套自主研发算法，包括睡眠分期算法，智慧控温控湿算法，睡眠建议算法等。同时，以海尔智慧卧室为主，联合各单位，共同发布《基于大数据的智慧家庭服务平台评价技术规范 第4部分：智慧卧室》和《居家室内环境评价 第二部分 睡眠场景》两项团体标准。为了更好的服务用户，海尔还积极打造行业首个睡眠健康管理平台，将睡眠用户沉淀到平台中，实现睡眠检测、计算、调控、服务一体化。



图5 海尔推出的空枕联动场景解决方案

广告征集启事

《制冷学报》是经中国科学技术协会和国家科技部批准的由中国制冷学会主办的国家一级学术期刊，创刊于1979年，双月刊，大16开本。《制冷学报》主要反映制冷科技领域中低温与超导、制冷机器与设备、食品冷冻、冷藏工艺、冷藏运输、空调热泵、低温医学及器械等方面的科学技术研究与应用、科技动态和信息报道以及学术技术交流活动等。

《制冷学报》主要读者分布于各专业设计院、大专院校、设备制造企业、专业工程公司、制冷空调使用单位及与制冷空调专业相关的各个行业。发行量为6000册/期。对中国制冷学会理事、各专业委员会、各地方制冷学会、学会团体会员和个人会员均免费赠阅。

《中国制冷简报》是由中国制冷学会主办的刊登制冷空调行业综合信息的双月刊，逢单月出版，发行量为 10000 册/期。它着力于介绍中国制冷空调领域的各类信息，刊登行业新闻及科技文章，旨在推动科技创新，推广应用技术，报道行业动态，促进业内交流。

《中国制冷简报》主要读者分布于各专业设计院、设备制造企业、专业工程公司、大专院校、制冷空调使用单位及与制冷空调专业相关的各个行业。《中国制冷简报》刊登大量实用型信息，主要有企业纵览，行业信息，学会动态，技术论坛，标准指南，科技创新，专利推广，国际交流，展会、学术会议信息等内容。本刊在中国制冷学会主办的各类会议以及中国制冷展上广泛赠阅。

名称	广告版位	色彩	尺寸(宽×高)/(mm×mm)	价格/元	备注
制冷学报	封底	四色	210×285	12000	
	封2	四色	210×285	9000	
	封3	四色	210×285	9000	
中国制冷简报常规	封面	四色	200×205	12000	无折扣
	封面折页	四色	210×2×285	15000	
	封二	四色	210×285	7000	
	封三	四色	210×285	7000	
	封底	四色	210×285	9000	
	首插页	四色	210×285	7000	
	目次前页	四色	210×285	7000	
	中心跨页	四色	210×2×285	10000	
	插页	四色	210×285	5000	—
	文中1/2版	四色	170×120; 85×245	3000	右手页
	文中1/3版	四色	170×95; 55×245	2000	下半版或右手页右半版
	文中1/4版	四色	85×120; 170×60	1500	下 1/3 版或右手页右1/3 版
中国制冷简报专刊 (不定期出版)	封面折页	四色	210×2×285	25000	
	封二	四色	210×285	15000	无折扣
	封三	四色	210×285	15000	无折扣
	封底	四色	210×285	20000	无折扣
	首插页	四色	210×285	15000	无折扣
	目次前页	四色	210×285	15000	无折扣
	中心跨页	四色	210×2×285	20000	无折扣
	插页	四色	210×285	10000	无折扣

欢迎国内外企业刊登各类广告，展示企业品牌形象，中国制冷学会单位会员在《制冷学报》与《中国制冷简报》常规刊发布广告（封面除外）可以享受八折优惠。

联系方式：

联系人：范薇
电话：010-68463224
传真：010-68434679

邮箱：wfan@car.org.cn
联系地址：北京海淀区阜成路 67 号银都大厦 10 层；100142

