

文章编号:0253 - 4339(2014) 04 - 0008 - 08

doi:10. 3969/j. issn. 0253 - 4339. 2014. 04. 008

热舒适空调的能量设计因子研究

王雁 刘光复 张雷 周丹

(合肥工业大学机械与汽车工程学院 合肥 230009)

摘要 为确定热舒适需求与空调节能设计过程中的关键能量设计要素之间的关联性,提出了一种基于热舒适的空调能量设计因子提取及其重要度计算方法。在热舒适空调节能设计过程框架的基础上,建立了基于热舒适需求的功能质量屋,并将热舒适性转化为空调功能及权重等设计信息;分析功能的能量特性,针对与能耗相关的功能,给出了能量设计因子提取策略,以及能量设计因子对热舒适及能耗综合影响程度量化方法。以家用空调为例,提取了基于热舒适的能量设计因子,对容积效率和传热系数两项耦合因子进行了分解,并对整体层能量设计因子的热舒适性及能耗的影响系数进行计算,按综合影响系数由大到小排序,结果为压缩机功率、系统控制方式、通风量和换热量。

关键词 家用空调;能量设计因子;热舒适;节能设计

中图分类号:TB61⁺1; TU831.3; TH122

文献标识码:A

Study on Energy Design Factors of Air Conditioning Based on Thermal Comfort

Wang Yan Liu Guangfu Zhang Lei Zhou Dan

(School of Mechanical & Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009, China)

Abstract In order to determining the relevance between thermal comfort and key energy design elements during energy - saving design process, the method of extracting energy design factors of air conditioning and calculating its weight is proposed. The house of quality based on thermal comfort is built with the energy-saving design frame. The thermal comfort requirements are converted to function and weight of air conditioning. The energy characteristic of the function is analyzed, and the extract means of energy design factors is provided based on the relation of functions with energy. The method of calculating influence degree of energy design factors on thermal comfort and energy consumption is also put forward. Taking the household air conditioning as a case study, the energy design factors based on thermal comfort are extracted. Two coupled factors, volume efficiency and heat transfer coefficient, are decoupled, and the influence coefficient of energy design factors on thermal comfort and energy consumption in overall layer are calculated. The comprehensive influence coefficient in descending order is compressor power, system control mode, ventilation quality and heat exchange amount.

Keywords household air conditioning; energy design factors; thermal comfort; energy-saving design

为满足室内环境的热舒适性需求,人们付出了大量的能源消耗作为其代价。自二十世纪六十年代以来,由于节能的需要,研究人员对热舒适进行了更加深入而广泛的研究,并将其研究成果应用于降低建筑物及其设备能耗^[1]。

热舒适在 ASHRAE Standard 55 中定义为“that condition of mind in which satisfaction is expressed with the thermal environment”^[2],即人体对热环境感觉满意的意识状态。热舒适应用于空调节能的研究主要是从环境参数配置及其控制方面寻求热舒适与节能之间的平衡。李兆坚^[3]分析了室内环境参数、空调

行为对空调能耗的影响,说明了在保证人体热舒适范围内,实现空调节能的可行性。Nicol^[4]从节能的角度提出人体热舒适温度应当是一个动态的过程,应随着室外平均温度的变化而改变。戴朝华等^[5]对热舒适(CI)控制进行了计算机仿真研究,与传统设定温(湿)度控制比较,CI控制更容易、更可控地满足热舒适要求,而且在舒适度相近的条件下节能效果显著。Francesco Calvino^[6]对普通开关式控制和PID模糊控制进行了量化和对比分析,认为无论舒适性还是节能性,PID模糊控制的效果更优。Mossolly等^[7]利用遗传算法对一个教学楼的变风量空调系统进行优

化控制,仿真结果表明,与传统控制策略相比运用优化控制技术可在夏季四个月内节省电能 30.4%。Zhou^[8-9]针对一类办公室置换通风系统提出一种基于神经网络和遗传算法的优化策略,以同时满足热舒适度、IAQ 和节能三个优化目标。

室内气流组织仿真与优化是热舒适应用于空调节能的另一研究热点。Gan^[10]用 CFD 预测机械通风房间的室内环境和空气分布系统总的通风效率。研究认为通风效率与室内达到热舒适的能耗有关,向上置换通风的气流组织能够得到较好的能源利用,但是可能会引起局部热不舒适。端木琳^[11]研究了桌面工位空调系统的送风特性以及对人体热舒适的影响,分析了工位空调所造成的室内热环境场的分布规律,通过对大连一幢小型办公建筑的分析,表明工位空调比常规空调的运行能耗大约节省 20%。

上述舒适与节能研究主要基于环境参数设置、优化与控制,而针对热舒适与产品设计过程的关键能量设计要素之间的关联性研究较少。为此,本文从产品设计角度出发,建立热舒适驱动的空调节能设计过程模型,给出能量设计因子提取及热舒适和能耗影响程度量化方法。

1 热舒适驱动的节能设计过程框架

满足人体热舒适需求,创造令人满意的室内环境是空调设计的根本出发点和核心要求。热舒适驱动的空调节能设计过程有两种基本途径:一是间接节能,即在不增加能耗的条件下提高热舒适满意度水平;二是直接节能,即在不降低热舒适满意度水平的条件下降低产品能耗。实现这两种节能途径的基本设计过程如图 1 所示。

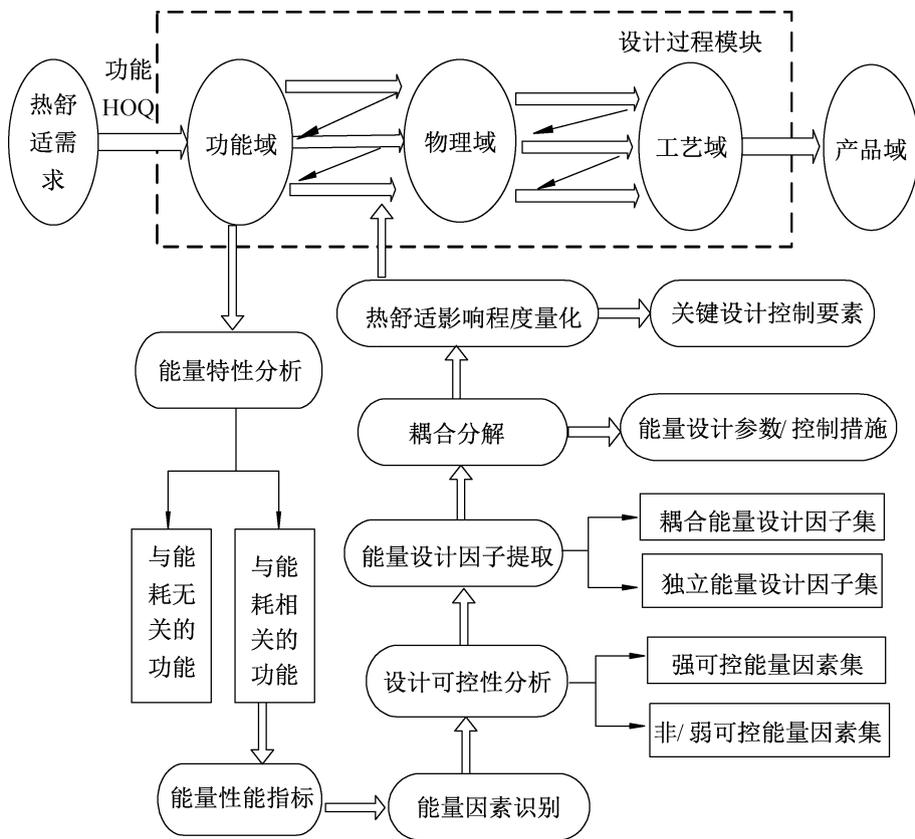


图 1 热舒适驱动的空调节能设计过程

Fig. 1 Energy-saving design process of air conditioning driven by thermal comfort

设计过程从热舒适需求出发,利用质量功能配置方法将其转化为从设计角度出发的产品功能需求和产品设计参数。质量功能配置(Quality Function Development)方法^[12-13]在综合 QFD 模型、ASI-QFD 模型、GOAL/QPC 模型的基础上逐渐形成了多种改进模型,各种模型的展开结构基础都是质量屋(House of Quality, HoQ)。

在建立基于热舒适需求的功能 HoQ 基础上,对功能进行能量特性分析。对于与热舒适需求相关但与能耗无关的功能,可以直接进行功能与结构之间的“Z”形映射,通过产品结构优化设计,实现在能耗不变的条件下提高热舒适满意度水平的设计目标。

对与能量消耗相关的功能,通过识别与能量性能指标相关的能量因素,提取能量设计因子,针对其中

耦合因子,通过耦合分解,将其转换为具体的产品能量设计参数/措施^[14],并进行热舒适影响程度量化,找出影响热舒适和能耗的关键要素,调控设计过程,实现直接节能设计目标。

2 基于热舒适的功能 HoQ

基于热舒适的功能 HoQ 是将人体热舒适需求转化为产品功能指标及其权重的工具。功能 HoQ 组成如图 2 所示,基本过程为:确立热舒适需求及其初始重要度→调查竞争对手和待改进产品的热舒适需求满意度→制定改进后产品希望达到顾客满意度的目标值→计算热舒适需求最终重要度→建立功能与热舒适需求关联矩阵→根据需求重要度及关联矩阵确定功能重要度。各步骤计算方法见文献^[13]。

结合热舒适影响因素及评价指标可以初步确定热舒适需求内容。人体热舒适受物理、生理和心理等因素的综合影响,其中有六个主要影响因素:空气温度、空气速度、相对湿度和平均辐射温度、人体活动量和服装热阻。大多数热舒适评价指标均是基于这六项因素的不同组合而提出的,如有效温度 ET、标准有效温度 SET、PMV-PPD 指标等。另外,国际热舒适标

准 ISO7730—1994 规定了冷吹风感(draft)引起的局部热不舒适情况,ISO7730—2005 增加了竖直空气温度差、冷暖地板、辐射温度不对称性等局部热不舒适、非稳态热环境等内容^[15]。通过访谈、调查表以及网络收集等调查方法,进一步收集需求信息。最后对相似的需求进行整理、精简,可以把它们变换为 HoQ 技术所需要的顾客需求形式。人体热舒适需求结构如图 3 所示。

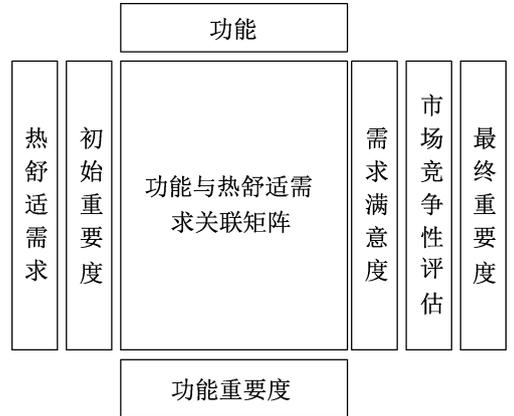


图 2 基于热舒适的功能 HoQ

Fig. 2 Function HoQ based on thermal comfort

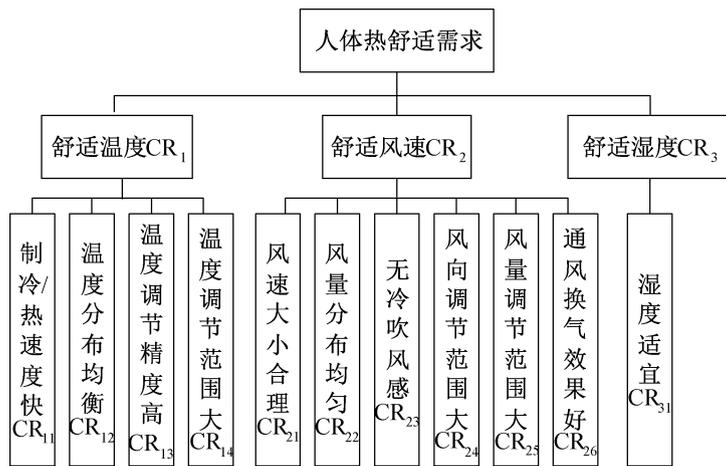


图 3 人体热舒适需求结构

Fig. 3 Human thermal comfort requirements structure

在确定热舒适需求的基础上,可以构建产品满足热舒适需求应具备的目标功能系统。该系统应满足:每一项需求都有至少一项功能与其对应,且对应关系至少有一项为“强相关”,否则目标功能系统不足;每一项功能都至少有一项需求与其对应,且对应关系至少有一项为“强相关”,否则目标功能系统过剩。

基于热舒适需求的功能系统如图 4 所示。采用文献^[13]中 AHP 法、比例标度计算热舒适需求及功能权重。设 α_i 为第 i 个热舒适需求权重, F_{ij} 为第 i 个热舒适需求和第 j 个功能之间的关联度值,用 1,3,

5 表示。其中,5 表示关联度强,可理解成为了满足某种需求必需具备某种功能;3 表示一般,可理解成为了满足某种顾客需求可以采用不同的功能与之对应;1 表示关联度弱。 λ'_j, λ_j 分别为第 j 个功能的重要度和权重,则:

$$\lambda'_j = \sum_{i=1}^m \alpha_i F_{ij}, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$\lambda_j = \lambda'_j / \sum_{j=1}^n \lambda'_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

根据 λ_j 值从大到小对功能重要度进行排序。如

表 1 所示。

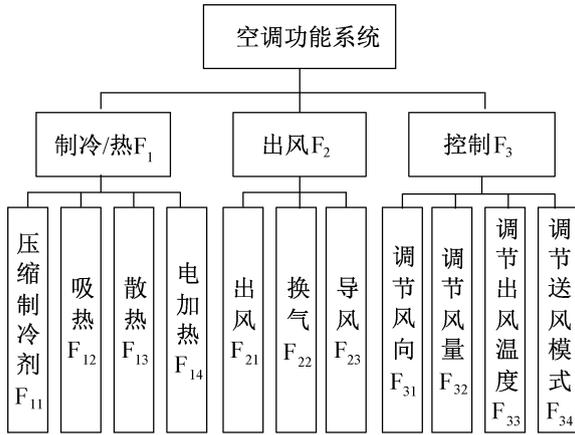


图 4 基于热舒适的功能系统

Fig. 4 Function system based on thermal comfort

3 能量设计因子提取及量化

产品功能的能耗相关性可以结合功能与结构之间的映射,判断产品在使用过程中与功能相关的结构是否耗能来确定。针对与能耗相关的功能,通过提取能量设计因子(Energy Design Factor, EDF)来调控相应设计过程。EDF 的提取与量化能够明确产品总体设计和关键零部件设计或选择的重点。

3.1 EDF 提取过程

能量设计因子是设计过程中反映产品能量性能的设计控制机制与控制要素,通过设计参数、指标、变量等进行表达^[14]。EDF 与设计过程相一致,一般包括整机、部件和零件三个级别。

表 1 热舒适需求—功能相关关系

Tab. 1 Thermal comfort requirements-function correlation ship

需求 CR	权重 α_i	功能											
		F ₁₁	F ₁₂	F ₁₃	F ₁₄	F ₂₁	F ₂₂	F ₂₃	F ₃₁	F ₃₂	F ₃₃	F ₃₄	
CR ₁₁	0.170	5	5	5		3	3			3			
CR ₁₂	0.135					5	3					3	
CR ₁₃	0.040											5	
CR ₁₄	0.078	3	5	3	5		5					5	
CR ₂₁	0.131											3	
CR ₂₂	0.083								3			5	
CR ₂₃	0.109									3	3	5	
CR ₂₄	0.067									5			
CR ₂₅	0.025											5	
CR ₂₆	0.071						5	5			1	5	
CR ₃₁	0.092		3	3								3	5
功能重要度 λ'_j		1.084	1.516	1.36	0.39	1.185	1.66	0.604	0.662	1.841	1.816	0.815	
功能权重 λ_j		0.084	0.117	0.105	0.031	0.092	0.128	0.047	0.051	0.142	0.140	0.063	
重要度排序		7	4	5	11	6	3	10	9	1	2	8	

EDF 是直接节能优化设计的关键,提取过程如图 1 所示,首先分析功能的能量性能指标,识别对能量性能指标有影响的能量因素。能量因素是指对能量传递、转换、消耗或储存等产品能量性能产生影响的各种要素,能量因素可能非常多,而且有部分能量因素与产品的设计过程无关,取决于实际的使用环境、运行条件及操作方法。通过专家判断、模糊分析和聚类分析等方法可以筛选出对能量

性能具有重大影响的、且与设计过程相关的强可控能量因素。然后对强可控能量设计因素集进行定量与定性分析,结合设计过程信息模型,分析其间的相互关联性,提取出 EDF 集。最后针对耦合因子,结合相关专业知识和仿真、实验等工具以及相应的耦合分解机制,协调解决矛盾,将耦合 EDF 转换为具体的产品能量设计参数与取值建议(或控制措施与控制目标)。

3.2 EDF 影响程度量化

EDF 具有层次性,每层设计过程一般包含多项 EDF,如何在这众多的 EDF 中抓住重点,找寻最有价值的优化设计方向,是产品直接能量优化设计的关键。同时,EDF 对设计过程的调控不能降低产品热舒适水平,因此,需要对设计过程内部的若干 EDF 对能耗及热舒适综合影响程度进行量化。相关信息可以根据产品性能曲线、经验数据等信息,通过专家判断和模糊数学方法来确定。本文采用基于三角模糊数的两两比较方法对能耗及热舒适影响程度进行度量^[16]。方法如下:

1) 给出三角模糊数与影响程度语言变量的对应关系^[16],如表 2。

表 2 语言变量及对应的三角模糊数

Tab. 2 Linguistic variable and corresponding triangular fuzzy number

序号	语言变量	三角模糊数
1	弱	(0, 0, 0.3)
2	较弱	(0.1, 0.3, 0.5)
3	一般	(0.3, 0.5, 0.7)
4	较强	(0.5, 0.7, 0.9)
5	强	(0.7, 1, 1)

2) 分别以能耗影响程度、各项功能影响程度为准则,构造同一层次 EDF 之间相对重要性的三角模糊数互补判断矩阵 $R, R = (r_{ij})_{n \times n}$,其中 $r_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$, l_{ij}, m_{ij}, u_{ij} 分别表示元素 C_i 和 C_j 相对某一评判准则进行比较时,专家给出的最保守估计、最可能估计和最乐观估计,其数值应满足:① $l_{ij} \leq m_{ij} \leq u_{ij}, l_{ij} + u_{ji} = m_{ij} + m_{ji} = u_{ij} + l_{ji} = 1, \forall i, j = 1, 2, \dots, n$, 且 $i \neq j$; ② $r_{ii} = 0 = (0, 0, 0)$ 。

3) 对得到的三角模糊数互补判断矩阵进行清晰化处理。设 s 个专家给出的三角模糊数互补判断矩阵集为:

$$\{R^k | R^k = (r_{ij}^k)_{n \times n} = (l_{ij}^k, m_{ij}^k, u_{ij}^k)_{n \times n}, k = 1, 2, \dots, s\}$$

则评价结果的平均三角模糊数为:

$$r_{ij} = \frac{1}{s}(r_{ij}^1 + r_{ij}^2 + \dots + r_{ij}^s) = \left(\frac{1}{s} \sum_{k=1}^s l_{ij}^k, \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s m_{ij}^k, \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s u_{ij}^k\right) \quad (3)$$

由公式(4)计算模糊相对权重:

$$x_i = \frac{\sum_{j=1}^n r_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij}}$$

$$= \left(\frac{\sum_{j=1}^n l_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n m_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ij}} \right) \quad (4)$$

由公式(5)计算清晰化处理结果:

$$\omega_i = \frac{l_i + 2m_i + u_i}{4}, i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

(4) 设由上述方法得到 EDF_i 的第 j 项功能影响系数为 ω_{ij} , 则热舒适影响系数为:

$$\omega_{ci} = \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot \omega_{ij} \quad (6)$$

式中: λ_j 表示功能权重,由表 1 可知。

(5) 若能耗影响系数为 ω_{ei} , 则综合影响系数为:

$$\varpi_i = \sqrt{\omega_{ei} \omega_{ci}} \quad (7)$$

4 家用空调 EDF 分析

在基于热舒适的功能系统中,出风、导风和调节风向这三项功能与能耗无关,可以通过优化相应结构的设计参数,出风角度、出风口位置和数量等,达到既定的热舒适需求满意度值。对其余功能需要进行能量设计因子提取与量化分析。下面以家用空调为例,说明具体过程。

4.1 EDF 提取

家用空调的设计参数通常包括工况参数、运行参数、性能参数、结构参数和材料参数,其中工况参数、运行参数通常是由使用环境和运行状况决定的,属于非设计可控参数,材料参数受材料性质、环境及技术等因素约束,设计可控性也较低,只有部分性能参数和结构参数具有可控性,且对空调能耗影响较大。家用空调功能、能量性能指标及能量因素可控性分析如表 3 所示。

压缩制冷剂功能对应的能量性能指标为压缩机功率,计算公式见文献[17],影响因素包括吸/排气压力/温度、压缩机容积效率、电效率、制冷剂流量、电机转速、制冷剂及润滑油类型等。其中,吸/排气压力、吸/排气温度主要受制冷剂类型、蒸发/冷凝温度影响,家用空调制冷剂、润滑油受材料性质及压缩机材料影响,设计可控性较低。压缩机容积效率、电效率为压缩机性能参数,制冷剂流量和电机转速与空调运行控制方式相关,都属于强设计可控能量因素。

空调吸热和散热功能对应的能量性能指标分别为吸热量和散热量,可以根据热交换量计算公式得到^[17],影响因素包括冷凝热负荷、传热系数、传热面积和换热温差,其中,换热温差受室内、外环境温度、蒸发/冷凝温度影响,冷凝热负荷由运行工况决定,设

设计可控性均较低。传热系数/面积受换热器的结构参数、布局方式和迎面风速等参数影响,设计可控性较高。

换气功能对应的主要结构为风机,能量性能指标为送风量,计算公式见文献[18],影响因素包括风机功率、风机效率和风压。其中,风机功率与流量、风压及风机效率有关,流量和风压受风机运行工况影响,设计可控性较低。风机效率受叶轮转速和叶片角度等结构参数影响,为强设计可控因素。

调节风量、出风温度及送风模式三项控制功能对应的能量性能指标为不同工作状态转换过程中的系

统损耗,该值很难由公式计算得到,影响因素包括压缩机、风机的运行时间及其控制方式,其中运行时间受外界条件影响,设计可控性较低,系统满负荷/部分负荷控制方式是强设计可控变量。

电加热一般用于冬季热泵制热量不足时的辅助加热,对于冬季供暖或室外温度较高的地区意义不大,且由于该功能对热舒适需求的贡献度最小,因此,不作进一步分析。

通过上述定量及定性分析,剔除其中重复与冗余因素,提取空调 EDF 如图 5 所示。

表 3 家用空调的功能、能量性能指标及能量因素

Tab. 3 Function, energy performance index and energy elements of household air conditioning

功能	能量性能指标	能量因素	
		非/弱设计可控因素	强设计可控因素
压缩制冷剂	压缩机功率	吸气压力、排气压力、吸气温度、排气温度、制冷剂、润滑油、蒸发温度、冷凝温度	压缩机容积效率、电效率、电机转速、制冷剂流量
吸热	吸热量	换热温差	传热系数、传热面积
散热	散热量	换热温差、冷凝热负荷	传热系数、传热面积
换气	送风量	流量、风压	风机功率、风机效率、转速
控制	系统损耗	运行时间	满负荷/部分负荷控制方式

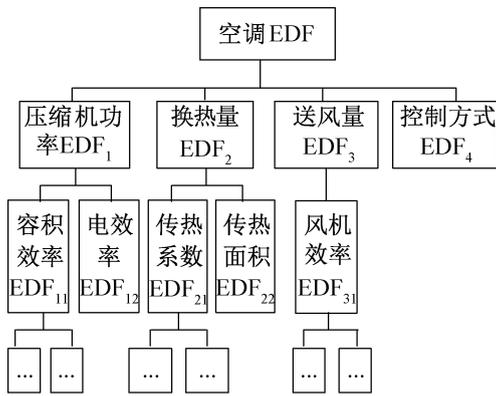


图 5 家用空调 EDF 集

Fig. 5 EDF set of household air conditioning

4.2 耦合 EDF 分解

在上述提取的 EDF 中,EDF₂₂和 EDF₄为独立能量设计因子,可以直接作为能量设计参数对设计过程进行调控。EDF₁₁、EDF₁₂、EDF₂₁和 EDF₃₁均为耦合能量设计因子,需要进行耦合分解,下面以 EDF₁₁和 EDF₂₁为例,介绍耦合分解过程。

EDF₁₁是容积系数、压力系数、温度系数和泄漏系数的乘积,其耦合分解过程如图 6 所示。

对上述参数作定性与定量分析,结合仿真和实

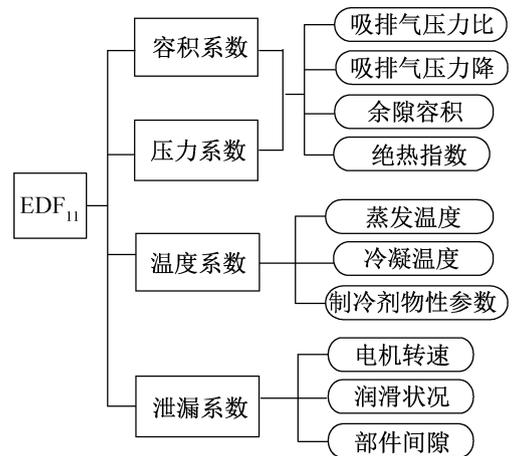


图 6 EDF₁₁ 耦合分解过程

Fig. 6 Coupling decomposition process of EDF₁₁

验,将压缩机容积效率分解成能量设计参数集:EDF₁₁ = {余隙容积, 排气方式, 吸气管直径, 电机转速}。压缩机容积效率的能量优化目标为减小泵体余隙,优化排气方式和吸气管直径以及控制电机运转。

传热系数 EDF₂₁耦合要素较为复杂,以翅片管式换热器的传热系数 K 为例,其计算公式如下^[17]:

$$K = \left[\frac{d_o}{h_i d_i} + \frac{r_o}{\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_o \beta \eta_f} + r_o + r_b \right]^{-1} \quad (8)$$

式中: d_i 为圆管内径; d_o 为外径; λ 为管壁材料热导率; h_i 为管内壁的表面传热系数; h_o 为管外壁的表面传热系数; η_f 为翅片效率; β 为肋化系数; 管壁与肋片的污垢热阻为 r_o ; 接触热阻为 r_b 。上述参数中, d_i 、 d_o 、 β 、 λ 、 r_o 、 r_b 为独立设计参数, h_i 、 h_o 、 η_f 仍存在耦合关系, 还需进一步细化分解, 通过建立这些参数的表达式, 将传热系数分解成能量设计参数集: $K = \{ \text{片材, 片厚, 片型, 管材, 管径, 管型, 布局方式, 迎面风速} \}$ 。

4.3 影响系数计算

以整体层 EDF 为例, 说明计算过程。首先给出三位专家对整体层 EDF 能耗影响程度及各项功能影响程度的评分结果, 由于篇幅所限, 本文仅给出能耗影响评价数据, 如表 4。然后将评价结果转换为三角

模糊数, 根据公式 (3) 得到平均三角模糊数判断矩阵, 最后根据公式 (4) ~ (7) 计算能耗影响系数、各项功能影响系数、热舒适影响系数及综合影响系数, 见表 5 ~ 6。由结果可知, 在整体层设计过程中, EDF 对热舒适影响系数从大到小依次为: 通风量 > 换热量 > 控制方式 > 压缩机功率, 能耗影响系数及综合影响系数从大到小均为: 压缩机功率 > 控制方式 > 通风量 > 换热量。

重复上述步骤计算部件层/零件层 EDF 综合影响系数, 由此得到的数值仅代表该层 EDF 对部件层/零件层局部的影响系数, 不能表示对全局的影响程度。若需要获取整体的影响系数, 则需从部件层/零件层回溯至整体层的根节点, 其间涉及的各个 EDF 的 ω 乘积即为整体影响系数。

表 4 能耗影响程度专家评价结果

Tab. 4 Expert evaluation result of energy consumption influence degree

	EDF ₁		EDF ₂		EDF ₃		EDF ₄				
EDF ₁	*		强	较强	强	较强	较强	强	一般	一般	较强
EDF ₂	弱	较弱	弱	*		较弱	较弱	一般	弱	较弱	较弱
EDF ₃	较弱	较弱	弱	较强	较强	一般		*	一般	较弱	较弱
EDF ₄	一般	一般	较弱	强	较强	较强	一般	较强	较强		*

表 5 能耗影响程度判断矩阵

Tab. 5 Energy consumption influence degree judgment matrix

	EDF ₁	EDF ₂	EDF ₃	EDF ₄	ω_{ei}
EDF ₁	(0, 0, 0)	(0. 63, 0. 9, 0. 97)	(0. 57, 0. 8, 0. 93)	(0. 43, 0. 63, 0. 83)	0. 425
EDF ₂	(0. 03, 0. 1, 0. 47)	(0, 0, 0)	(0. 17, 0. 37, 0. 57)	(0. 07, 0. 2, 0. 43)	0. 162
EDF ₃	(0. 07, 0. 2, 0. 43)	(0. 43, 0. 63, 0. 83)	(0, 0, 0)	(0. 17, 0. 37, 0. 57)	0. 242
EDF ₄	(0. 17, 0. 37, 0. 57)	(0. 57, 0. 8, 0. 93)	(0. 43, 0. 63, 0. 83)	(0, 0, 0)	0. 341

表 6 热舒适/综合影响系数

Tab. 6 Thermal comfort/ comprehensive influence coefficient

λ_j \ ω_{fj}	EDF ₁	EDF ₂	EDF ₃	EDF ₄	
F ₁₁	0. 084	0. 506	0. 161	0	0. 483
F ₁₂	0. 117	0. 286	0. 502	0. 382	0
F ₁₃	0. 105	0. 367	0. 465	0. 258	0
F ₂₂	0. 128	0	0. 251	0. 47	0. 47
F ₃₂	0. 142	0	0. 251	0. 543	0. 397
F ₃₃	0. 140	0. 502	0. 261	0	0. 387
F ₃₄	0. 063	0. 162	0. 164	0. 546	0. 278
ω_{ei}	0. 195	0. 236	0. 243	0. 229	
i	0. 288	0. 195	0. 242	0. 265	

5 总结

结合 QFD 方法与公理设计理论建立了热舒适驱动的空调节能设计过程模型, 构建了基于热舒适需求的空调功能 HoQ, 将热舒适需求转化为空调功能及其权重等设计信息。在分析功能的能量特性基础上, 针对与能耗相关的功能, 提出了 EDF 的提取策略及对热舒适与能耗综合影响系数的量化方法。

提取了家用空调的 EDF, 对容积效率和传热系数进行分解, 并对整体层 EDF 的影响系数进行计算。结果表明: 在整体层 EDF 中, 压缩机功率的能耗影响系数及综合影响系数均为最大, 其次是系统控制方式。因此, 根据室内热负荷选择功率大小合理的压缩机型号, 采取一定的措施提高压缩机容积效率和电效

率,优化空调系统控制策略是实现舒适节能的重要途径。该方法同样适用于其它舒适类空调产品的节能优化设计。

参考文献

[1] Noël Djongyang, René Tchinda, Donatien Njomo. Thermal comfort: A review paper [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14: 2626-2640.

[2] ANSI/ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55-2004. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy [S]. Atlanta, GA, 2004.

[3] 李兆坚, 江亿, 魏庆芄. 环境参数与空调行为对住宅空调能耗影响调查分析 [J]. *暖通空调*, 2007, 37(8): 67-45. (Li Zhaojian, Jiang Yi, Wei Qingpeng. Survey and analysis on influence of environment parameters and residents behaviors on air conditioning energy consumption on residential building [J]. *Journal of HV&AC*, 2007, 37(8): 67-45.)

[4] Nicol J F, Humphreys M A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings [J]. *Energy and Buildings*, 2002, 34(6): 563-572.

[5] 戴朝华, 朱云芳, 冯涛. CI 控制的舒适性与节能性研究 [J]. *制冷学报*, 2005, 26(3): 57-60. (Dai Chaohua, Zhu Yunfang, Feng Tao. Study on comfort and energy conservation of CI control [J]. *Journal of refrigeration*, 2005, 26(3): 57-60.)

[6] Calvino F, Maria L G, Massimo M, et al. Comparing different control strategies for indoor thermal comfort aimed at the evaluation of the energy cost of quality of building [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30: 2386-2395.

[7] Mossolly M, Ghali K, Ghaddar N. Optimal control strategy for a multi-zone air conditioning system using a genetic algorithm [J]. *Energy*, 2009, 34(1): 58-66.

[8] Zhou L, Haghight F. Optimization of ventilation system design and operation in office environment, Part I: Methodology [J]. *Building and Environment*, 2009, 44(4): 651-656.

[9] Zhou L, Haghight F. Optimization of ventilation systems in office environment, Part II: Results and discussions [J]. *Building and Environment*, 2009, 44(4): 657-665.

[10] Gan G. Thermal transmittance of multiple glazing computa-

tional fluid dynamics prediction [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2001, 21(15): 1583-1592.

[11] 端木琳. 桌面工位空调系统室内热环境与热舒适性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.

[12] 项媛媛. 基于 QFD 的顾客导向产品功能设计方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.

[13] 李延来, 唐加福, 姚建明, 等. 质量屋构建的研究进展 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(3): 57-70. (Li Yanlai, Tang Jiafu, Yao Jianming, et al. Progress of researches on building house of quality [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(3): 57-70.)

[14] 周丹, 刘光复, 何平. 数控机床能量设计因子提取方法研究 [J]. *中国机械工程*, 2011, 22(3): 351-355. (Zhou Dan, Liu Guangfu, He Ping. Study on extracting method of energy design factors for NC machines [J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(3): 351-355.)

[15] ISO. ISO7730-2005 Ergonomics of the thermal environment analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria Geneva [S]. Switzerland, 2005.

[16] 王世明, 岑詠霆. 排序决策的三角模糊数方法 [J]. *工业工程与管理*, 2009(1): 44-47. (Wang Shiming, Cen Yongting. Triangle Fuzzy Number Approach of Sequence Decision [J]. *Industrial Engineering and Management*, 2009(1): 44-47.)

[17] 彦启森. 制冷技术及其应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 125-129, 195-199.

[18] 吴玉林, 陈庆光, 刘树红. 通风机和压缩机 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 10-12.

作者简介

刘光复, 男 (1945 -), 教授, 博士生导师, 合肥工业大学机械与汽车工程学院, (0551) 62901006, E-mail: gfliu@hfut.edu.cn. 研究方向: 绿色设计及制造。

About the author

Liu Guangfu (1945 -), male, Ph. D./Prof, School of Mechanical & Automotive Engineering, Hefei University of Technology, (0551) 62901006, E-mail: gfliu@hfut.edu.cn. Research fields: green design and manufacturing.