

文章编号:0253-4339(2019)06-0082-08
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.06.082

基于 Trnsys 的辐射供冷系统模拟研究

付桐玮¹ 李斌¹ 徐鹏飞² 翟晓强¹

(1 上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240; 2 上海船舶研究设计院 上海 201203)

摘要 本文以上海某建筑为研究对象,采用 Trnsys 对该建筑现有地板辐射供冷系统进行模拟研究。根据该建筑的实际情况,为该建筑设计了顶板辐射供冷系统,将两者进行对比分析。结果表明:相比于地板辐射供冷系统,顶板辐射供冷系统对室内热环境调节更快,热惰性更小。整个供冷季节,地板辐射供冷系统能耗为 35 826.2 kW·h,顶板辐射供冷系统能耗为 34 181.9 kW·h,减少了 4.59%。针对该建筑空调系统运行中存在的问题,对顶板辐射供冷空调系统设计了运行时间表,在满足室内热环境标准的前提下,降低系统能耗。在此基础上,针对该建筑空调系统长期定工况运行的问题,分别设计了变水流量控制系统和变水温度控制系统,对比了两种控制系统的实际运行效果。结果表明:变水温度控制系统对室内热环境变化响应更快,且能耗较低。改进系统运行时间表,并采用变水温度控制后,顶板辐射供冷系统供冷季节总能耗为 14 665.3 kW·h,相比于原系统能耗大幅降低。

关键词 空气-水空调系统;变水流量系统;变水温度系统;系统能耗

中图分类号:TU831;TK511.3

文献标识码:A

Simulation of a Radiant Cooling System using Trnsys

Fu Tongwei¹ Li Bin¹ Xu Pengfei² Zhai Xiaoqiang¹

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenic, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China; 2. Shanghai Merchant Ship Design and Research Institute, Shanghai, 201203, China)

Abstract In this study, a building in Shanghai is taken as the study object and the existing floor radiant cooling system of the building is simulated using Trnsys. Then, according to the actual condition of the building, a roof radiant cooling system is designed for the building which is compared to the floor radiant cooling system. The results show that the roof radiant cooling system can more rapidly adjust the indoor environment and has a smaller thermal inertia than that of the floor radiant cooling system. During the entire cooling season, the energy consumption of the floor radiant cooling system is 35 826.2 kW·h and that of the roof radiant cooling system is 34 181.9 kW·h, which is 4.59% lower. Given the continuous operation of the air-conditioning system in the building, a running schedule for the roof radiant cooling system is designed that can reduce the energy consumption of the system on the premise of meeting the indoor thermal environment standard. On this basis, given the long-term constant operating conditions of the air-conditioning system in the building, a variable water flow rate control system and variable water temperature control system are designed, respectively, and the actual operation effects of the two control systems are compared. The results show that the variable water temperature system more quickly responds to the changes in indoor thermal environment and consumes less energy. After improving the system running schedule and adopting variable water temperature control, the total energy consumption of the roof radiant cooling system during the cooling season was 14 665.3 kW·h, much lower than the energy consumption of the original system.

Keywords air-water air-conditioning system; variable water flow rate system; variable water temperature system; system energy consumption

随着社会的发展进步,我国建筑能耗逐渐增加,预计至 2020 年,我国建筑能耗占比将达到 35%^[1]。而在建筑能耗中,空调系统能耗占比将达到 60%^[2],所以,降低空调能耗能够有效降低建筑能耗。人们对室内热环境的要求也越来越高,也会增加建筑空调能耗。因此,寻找高效率的供冷形式是一个重要课题。辐射供冷系统作为一种新型的供冷形式,具有节能、

舒适性强等特点,越来越受到人们关注^[3]。目前,很多学者对辐射供冷系统进行了深入研究,以推动该技术的发展。

在供冷能力方面,Ning Baisong 等^[4]提出了 3 种新型顶板结构,通过实验和模拟研究了其供冷能力,并与原始结构对比,认为新型顶板结构具有更加均匀的顶板表面温度,有利于提高顶板的供冷能力;Luo

Yongqiang 等^[5]对热电辐射顶板系统进行了模拟研究,模拟了顶板温度场,并计算了系统的供冷效率;刘乃铃等^[6]针对顶板辐射供冷系统与人体之间的换热特性进行了研究,认为达到稳定状态时,辐射换热量是对流换热量的 3.5 倍;于国清等^[7]提出一种计算辐射供冷板供冷量的计算方法,并进行了实验验证,结果表明误差在 6.58% 以内,计算方法可信度较高;曹法立等^[8]研究了供水温度对地板辐射供冷系统的影响;张岩等^[9]研究了不同顶板温度时,顶板与墙面、人体的换热量关系。

在热舒适性方面,李锦堂等^[10]研究了辐射吊顶供冷方式的热舒适性,认为辐射吊顶供冷方式要优于对流供冷系统;He Yingdong 等^[11]对辐射供冷桌进行了实验研究,认为辐射供冷桌具有较好的热舒适性,且其冷冻水温度范围广,有节能潜力;于志浩等^[12]研究了辐射吊顶供冷分别结合贴附射流和置换通风的舒适性,结果表明置换通风的舒适性优于贴附射流。

在辐射板温度均匀性方面,Shen Limei 等^[13]进行了热电辐射顶板系统的参数优化设计研究,得出热电辐射顶板的最佳厚度为 0.004 m,这可以有效解决结露问题和温度不均匀性;P. Mustakallio 等^[14-15]对比模拟了 4 种不同的供冷系统,模拟分析了每种系统的室内热环境,认为辐射顶板系统相比于其他系统能提供更舒适的室内热环境;姜载强等^[16]研究了顶棚辐射供冷系统房间的温度分布情况。

在辐射板结露问题方面,张顺波等^[17]建立了一种辐射板传热模型,并通过实验验证了模型的准确性,进而利用该模型对辐射板进行了供冷和结露特性方面的改进;Tang Haida 等^[18]研究了辐射顶板结露水滴落下临界直径,落下过程中的蒸发情况及能被人体感知的最小水滴直径,认为采用超疏水铜板作为辐射板可以有效解决结露问题;Tang Haida 等^[19]从模拟和实验两个角度研究了不同位置辐射板的结露速度,认为顶板结露风险最高,其次是墙壁,地板结露风险最低。

此外,顾珍等^[20]使用 Trnsys 模拟研究了地板辐射供冷控制系统的适宜时间步长,认为开机 1 h 内控制步长为 5 min,之后控制步长为 15 min 为宜;黄奕沅等^[21]对地板辐射供冷系统的除湿问题进行了研究;翁文兵等^[22]提出了一种辐射供冷房间冷负荷的算法。

目前对于辐射供冷结合独立新风系统的系统运行总能耗问题研究较少。本文对上海某办公楼的地板辐射供冷系统进行了模拟研究,并设计顶板辐射供

冷系统与其进行对比,进行了运行时间表的优化,探究了变水流量控制和变水温度控制两种策略对系统的控制效果,对系统能耗进行了研究。

1 建筑模型

1.1 建筑基本结构

本文的研究对象是上海一栋小型办公楼。建筑室内设计温度为 26 ℃,室内设计相对湿度为 60%,设计新风量为人均 30 m³/h。该建筑共 4 层,各层的基本信息如表 1 所示。

表 1 建筑信息

Tab.1 The information of this building

楼层	面积/m ²	体积/m ³	人数
1 层	118.94	386.56	15
2 层	142.05	441.07	8
3 层	142.05	442.49	5
4 层	117.58	376.84	10

建筑外墙墙体结构为 0.01 m 装饰灰泥、0.1 m 隔热板和 0.3 m 混凝土,总传热系数为 0.355 W/(m²·K),各层的外墙面积如表 2 所示。建筑窗体的传热系数为 1.26 W/(m²·K)。

表 2 建筑外墙面积(单位:m²)

Tab.2 The area of external walls (Unit: m²)

楼层	东侧	西侧	南侧	北侧
1 层	56.90	56.90	23.88	23.88
2 层	49.50	49.50	35.00	35.00
3 层	49.70	49.70	35.10	35.10
4 层	40.40	40.40	36.10	36.10

1.2 辐射地板基本信息

该建筑目前的供冷末端为辐射地板,其主要结构从上至下依次为装饰层、混凝土填充层及绝热保温层,水管埋于混凝土填充层中。在绝热保温层下还有防水层、找平层和墙体等结构。但由于绝热保温层热阻很高,可视为绝热材料,向下方传递的冷量可以忽略不计。在模拟计算时,仅需考虑墙体的热性能,而无需考虑其强度等参数。故在模型搭建过程中,不考虑绝热保温层以下的结构,仅构建绝热保温层及以上结构。

冷冻水管材料为耐热聚乙烯(Polyethylene of raised temperature resistance, PE-RT),导热系数为

0.43 W/(m·K)。冷冻水管布置管间距为 0.2 m,管外径为 0.02 m,管壁厚度为 0.002 m。

1.3 辐射顶板基本信息

采用地板辐射供冷时,冷量在室内下部区域产生,需要由下向上传递,室内下方温度<上方温度。而由于冷空气密度>热空气密度,冷空气偏向于沉积在室内底部区域,所以室内垂直方向上冷热空气自然对流的效果减弱,稳定后室内温度在垂直方向上会出现较大的温度梯度。而室内平均温度是综合室内整体区域的空气温度计算得到的,在这种情况下,室内平均温度可能满足室内温度设计条件。但由于室内上下区域存在较大的温度梯度,人们会感觉头部较热,而脚部较冷,影响人体热舒适性。

若将地板辐射供冷改为顶板辐射供冷,室内冷源存在于上方,冷空气会自上而下地传递,自然对流效应较强,室内垂直方向上温度梯度减小,温度分布均匀性较好。且采用顶板辐射供冷时,上方空气温度<下方空气温度,这也符合人体“头凉脚暖”的健康原则。所以,针对该建筑基本情况,设计顶板辐射供冷系统,并进行模拟研究,与地板辐射供冷系统进行对比分析。

辐射顶板单元冷冻水管路材质为铜管,辐射板材料为铝板。铜管规格:管间距为 0.2 m,管内径为 0.012 m,单位面积最大供冷量为 83.3 W/m²。

2 空调系统模型

采用 Trnsys 软件建立系统模型,对空调系统进行模拟计算。仿真系统主要分为 4 个部分,分别为建筑模型、气象数据、供冷系统和新风系统,如图 1 所示。

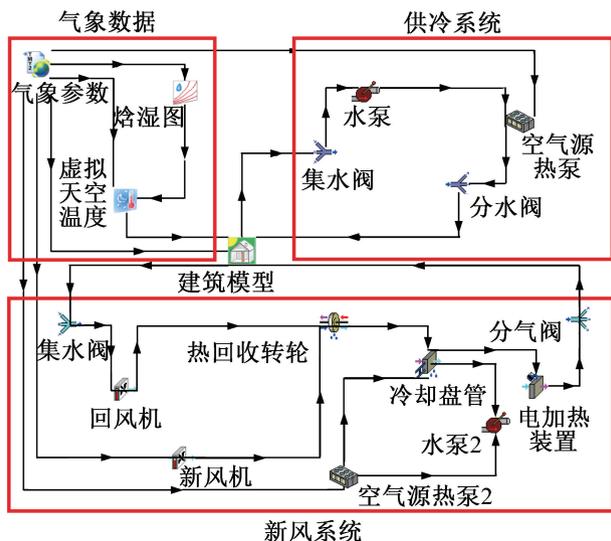


图 1 Trnsys 模拟系统图

Fig.1 Simulation system diagram of Trnsys

2.1 建筑模型

建筑模型采用 Trnsys 中的 type56 模块,引入通过 TRNBuild 软件建立的建筑物理模型。在 TRNBuild 中设定建筑基本的物理信息,定义输入与输出参数,建筑主要参数如表 3 所示。

表 3 建筑模型中的基本参数

Tab.3 The basic parameters in the building model

参数	设定值
建筑初始湿度/%	60
建筑初始温度/℃	26
东侧外墙窗墙比	0.23
西侧外墙窗墙比	0.23
南侧外墙窗墙比	0.32
北侧外墙窗墙比	0.09

2.2 气象数据

在气象数据部分,主要包括气象参数、焓湿图和虚拟天空温度 3 个模块。气象参数采用上海典型气象年数据。典型气象年气象数据的选取以近 30 年的月平均值为依据,从近 10 年的数据中选取某一年各月气象数据接近 30 年的平均值,将该年数据作为典型气象年。焓湿图用于查找当前室外环境对应的湿球温度,输入到虚拟天空温度模块中。然后可以根据虚拟天空温度计算建筑的太阳辐射得热情况。

2.3 供冷系统

采用一台空气源热泵提供冷冻水,将冷冻水输送至辐射板内水管中,用于室内供冷。在该模型中,空气源热泵的数据采用当前建筑实际的空气源热泵的数据,额定功率为 39.2 kW,额定工况下的性能系数 COP=3.21。由于辐射顶板供冷与辐射地板供冷系统的结构不同,故供水温度和流量不同,具体设计参数见 3.1 和 3.2。

2.4 新风系统

新风系统主要包括送风风机、回风风机、热回收转轮、冷却盘管、空气源热泵和再热器等。新风与回风经过风机之后,在热回收转轮处进行热交换,初步降低新风温度,减少后续冷却除湿能耗。新风降温之后,再流经冷却盘管进行冷却除湿。冷却除湿采用一台空气源热泵提供冷冻水,额定功率为 18.8 kW,额定工况下的 COP=3.19。经过冷却除湿后的空气温度通常较低,直接送入室内会产生吹风感,影响人体热舒适性。此外,送风口处温度较低,可能小于室内露点温度,造成送风口结露。所以,新风经冷却除湿

后,需再经过电加热盘管进行加热,加热后送入室内。

新风量根据人数确定,故两种系统的新风系统采用相同的设计。各层新风量按照人均 30 m³/h 并结合表 1 中各层人数进行设定。新风系统冷却除湿使用的冷冻水流量为 3 000 kg/h,设定冷冻水温度为 7 ℃。新风电加热的设定温度为 20 ℃。

3 系统模拟仿真

3.1 地板辐射供冷运行工况

建筑目前采用的供冷末端为辐射地板,故在该模型中,运行工况参数的选取均按照实际运行状况选取。其中供冷系统冷冻水的供水温度为 14 ℃,冷冻水总流量为 6 000 kg/h,冷冻水流量按照 1.1 中各层建筑面积进行分配。

3.2 顶板辐射供冷运行工况

顶板辐射供冷不同于地板辐射供冷。地板辐射供冷系统的水管被混凝土覆盖,上方还有其他结构;而顶板辐射水管嵌入铝板之中,铝板与空气直接接触。故顶板辐射的传热阻力<地板辐射,不宜采用温度过低的冷冻水,否则会出现顶板结露现象。所以,需要对顶板辐射系统重新设计运行参数。

使用 Trnsys 计算该建筑 6~9 月冷负荷,得到建筑各层的最大冷负荷。新风的送风温度为 20 ℃,室内设计温度为 26 ℃,故新风系统能够承担部分室内冷负荷,剩余室内冷负荷则由顶板辐射供冷系统承担。建筑各层的负荷如表 4 所示。

表 4 建筑各层负荷情况(单位:kW)

Tab.4 The load of each floor (Unit: kW)

楼层	最大冷负荷	新风冷量	剩余冷负荷
1 层	3.97	2.23	1.74
2 层	4.44	1.22	3.21
3 层	4.13	0.82	3.32
4 层	4.54	1.39	3.15

室内设计温度为 26 ℃,室内设计相对湿度为 60%,可以查得室内露点温度为 17.6 ℃。为防止辐射顶板及冷冻水管结露,冷冻水温度要高于室内露点温度 1~2 ℃,故设计冷冻水供水温度为 19 ℃。设计冷冻水供回水温差为 2 ℃,计算得到各层冷冻水流量如表 5 所示。

3.3 结果对比

选取 7 月的一个典型日对上述两种系统进行仿真模拟,以建筑 2 层为例,地板辐射供冷系统与顶板

辐射供冷系统的室内外温度参数模拟结果分别如图 2 和图 3 所示。

表 5 建筑各层冷冻水流量

Tab.5 The frozen water flow rate of each floor

楼层	冷冻水流量/(kg/h)
1 层	857.1
2 层	1584.3
3 层	1634.8
4 层	1552.1

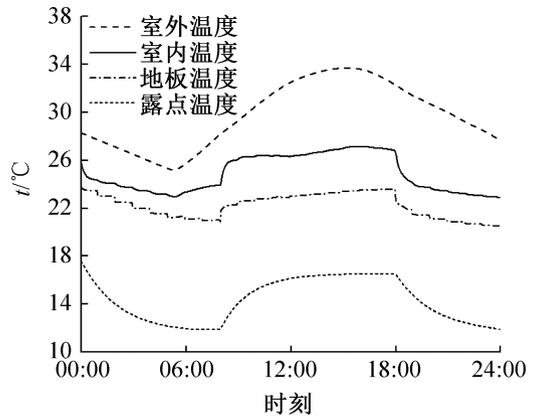


图 2 地板辐射供冷系统温度参数随时间的变化

Fig.2 Temperature parameter variation diagram of floor radiant cooling system

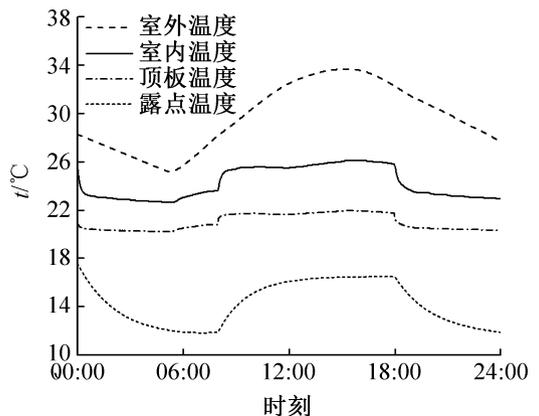


图 3 顶板辐射供冷系统温度参数随时间的变化

Fig.3 Temperature parameter variation diagram of roof radiant cooling system

通过对比图 2 和图 3 可知,辐射顶板降温速度相较于辐射地板有很大的提升。对于地板辐射供冷系统,地板温度在 00:00—08:00 持续降低,始终没有达到稳定状态;对于顶板辐射供冷系统,在 00:00 时开始提供冷冻水,约 0.5 h 后,顶板温度即基本达到稳定状态。这是由于辐射顶板的冷冻水管直接经过

铝板与空气换热,铝板的热阻较小,冷量能够快速传递至室内。而辐射地板的管路需要埋于混凝土中,且地板表面须有装饰层,这些结构增加了传热阻力,冷量不能快速地向外传递。

在 08:00 时室内人员与设备负荷产生,室内温度开始上升。经过 1 h 之后,室内温度基本恒定。18:00 之后,人员与设备负荷为 0,供冷系统继续工作,室内温度下降。考察 08:00—18:00 时有人员与设备负荷时的建筑热环境参数。对于地板辐射供冷系统,根据数据可得,室内平均温度为 26.58 °C,地板平均温度为 23.07 °C。新风系统连续运行,室内湿度持续处于较低状态,露点温度最高为 16.92 °C,因此可以保证不会出现结露的现象。对于顶板辐射供冷系统,室内温度整体降低,平均温度为 25.73 °C,降低了 0.85 °C;顶板平均温度为 21.79 °C,降低了 1.28 °C;露点温度最高为 16.90 °C。可以发现地板辐射供冷系统的供水温度较低,但表面温度反而较高。这是由于地板结构较复杂,很多冷量被地板吸收储存起来,具有较大的热惰性。

以 6~9 月整个供冷季为模拟时长,统计两种系统的系统部件总能耗,如表 6 所示。

表 6 两种供冷系统中各部件能耗

Tab.6 The energy consumption of each components in two cooling systems

部件	地板辐射/ (kW·h)	顶板辐射/ (kW·h)	变化率/%
供冷热泵	10 595.0	9 147.9	-13.64
冷冻水泵	4 782.0	4 483.4	-6.24
除湿热泵	9 544.2	9 700.6	1.64
电加热器	10 905.0	10 850.0	-0.51
总和	35 826.2	34 181.9	-4.59

注:变化率=(顶板辐射供冷能耗-地板辐射供冷能耗)/地板辐射供冷能耗。

由表 6 可知,相较于地板辐射供冷系统,顶板辐射供冷系统的供冷热泵能耗下降较多,各部件总能耗降低了 4.59%。这是由于地板辐射供冷管路包裹于混凝土之中,大量冷量被地板储存起来,无法释放。若要为室内提供与顶板辐射供冷系统相同的冷量,地板辐射供冷系统就需要产生更多冷量,导致地板辐射供冷系统有更大的能耗。

4 系统优化与控制

根据上述研究结果,可以发现顶板辐射供冷系统

相较于地板辐射供冷系统具有更好地温度调节能力,热惰性较低,提供相同冷量时能耗较低,且符合人体“头凉脚暖”的健康原则。故在上述研究基础上,对顶板辐射供冷系统进行进一步的优化控制,使空调系统能够更加舒适节能。

4.1 供冷系统运行时间表优化

该建筑空调系统目前的运行状况是 24 h 持续运行。但该建筑为办公楼,无需 24 h 满足设计温湿度,造成较多的能源浪费,不符合节能减排的基本要求。所以,需要对空调系统进行运行时间表的优化,并适当地调整供冷系统冷冻水参数,使其既能在工作时间满足设计要求,又能够降低系统能耗。

工作日及工作时间为每周一至周五 08:00—18:00,非工作日无人办公,可以考虑将供冷系统的启停控制时间表设计为与工作时间相同。但顶板辐射供冷系统没有地板辐射供冷系统的蓄冷特性,若在晚上不运行供冷系统,在建筑内部就会积蓄大量热量,导致在运行初始阶段难以快速调节室内温湿度至设计要求,影响人员的舒适性。所以,将供冷系统运行时间表设计为每日 07:00—18:00,相比工作时间提早 1 h 运行,以处理夜间产生的室内余热。

同样,供冷系统在周末也不能完全关闭,应适当运行。根据 Trnsys 计算得到该建筑 6~9 月的逐时冷负荷,统计各周非工作日平均日冷负荷与工作日平均日冷负荷,调整非工作日的冷冻水供应流量为工作日的 50%,运行时间与工作日相同,以消除非工作日的室内余热,防止室内积存大量热量。

空调系统运行时间减少后,若仍按照前文的设计流量运行,就不能满足供冷需求。且 6 月和 9 月热负荷较低,若流量恒定不变,就会造成 6 月和 9 月温度偏低。所以,需要重新对供水流量进行设定,对于不同月份,分别设定流量,以满足设计要求。结合空调系统运行时间及供冷季期间不同月份的冷负荷差异性,适当调节各月份的冷冻水供水流量,如表 7 所示。

表 7 不同月份冷冻水供水流量

Tab.7 The frozen water flow rate in different months

月份	冷冻水流量/(kg/h)
6 月	5 058.4
7 月	7 127.8
8 月	7 217.8
9 月	5 633.2

4.2 供冷系统运行参数控制

目前该系统仅各月的供水流量不同,每个月仍定流量运行。但在实际运行过程中,每个月的数据也会有很大波动。因此考虑在表 7 所示的基础运行流量的前提下,对供冷系统分别设计冷冻水变水流量控制和冷冻水变水温度控制,对比两者的控制效果。

1) 冷冻水变水流量控制

该建筑的室内设计温度为 26 °C。控制策略为当室内温度 ≥ 27 °C 时,供水流量为基础运行流量增加 10%;当室内温度 ≤ 25 °C 时,供水流量为基础运行流量减少 10%;当 25 °C < 室内温度 < 27 °C 时,供水流量介于基础运行流量 $\pm 10\%$ 之间,采用比例运算方法选取流量。

2) 冷冻水变水温度控制

目前供冷系统冷冻水供水温度为 19 °C。根据 3.3 中模拟结果,建筑的最高露点温度为 16.9 °C,供水温度高于露点温度较多。所以,可以对该系统进行冷冻水变水温度控制,将供水温度设定为在 18 ~ 20 °C 之间动态变化,温度控制信号采用室内温度。室内设计温度为 26 °C,当室内温度 ≥ 27 °C 时,供水温度采用 18 °C;当室内温度 ≤ 25 °C 时,供水温度采用 20 °C;当 25 °C < 室内温度 < 27 °C 时,供水温度在 18 ~ 20 °C 之间,室内温度越高,供水温度越低,采用比例运算方法选取供水温度。

4.3 模拟结果及分析

根据 4.1 及 4.2 的优化及控制策略,分别模拟变水流量控制系统和变水温度控制系统实际运行情况。

1) 室内热环境分析

选取 7 月的典型日对两种系统进行模拟分析。图 4 所示为变水流量控制系统的室内温度的模拟结果。由图 4 可知,07 : 00 开始提供冷冻水,顶板温度与室内温度在 1 h 后,基本达到稳定状态。顶板温度稳定在 22 °C 附近,室内温度维持在 26 °C 附近,可以满足室内温度设计要求。开始供水之后,室内露点温度有所下降,低于 18 °C,不会有结露的情况发生。

图 5 所示为变水温度系统的室内温度的模拟结果。对比图 4 与图 5 可知,在 07 : 00 时开始提供冷冻水之后,相比于变水流量控制系统,变水温度控制系统的冷却顶板温度很快达到稳定状态。经过一段时间稳定之后,温度参数与变水流量控制系统基本相同,均能够满足室内温度设计要求,且不会出现结露的情况。

2) 系统能耗分析

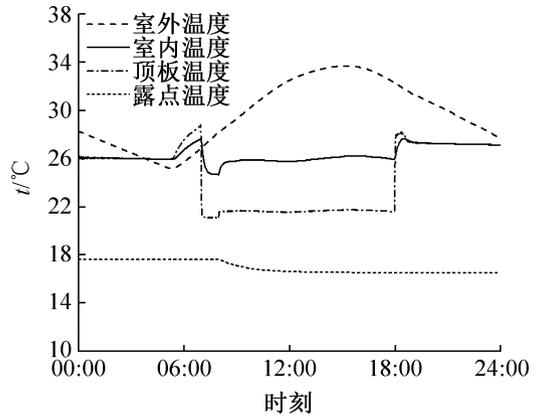


图 4 变水流量系统温度参数随时间的变化

Fig.4 Temperature parameter variation diagram of variable water flow rate system

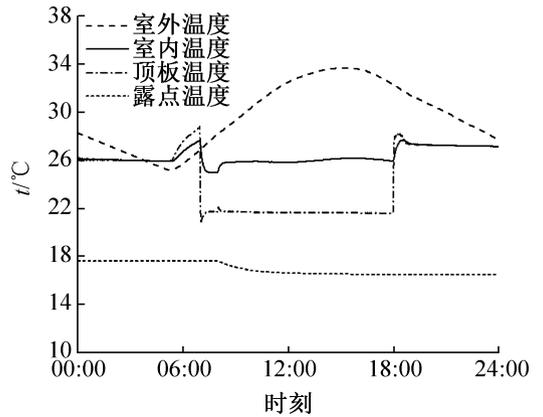


图 5 变水温度系统温度参数随时间的变化

Fig.5 Temperature parameter variation diagram of variable water temperature system

对整个供冷季进行模拟,统计 6~9 月的系统能耗,结果如表 8 所示。

表 8 两种控制方式下系统供冷季能耗 (单位: kW·h)

Tab.8 The energy consumption of two control systems in cooling season (Unit: kW·h)

部件	变流量控制系统	变温度控制系统
供冷热泵	6 515.7	6 520.1
冷冻水泵	1 862.7	1 805.5
除湿热泵	3 471.2	3 462.3
电加热器	2 874.4	2 877.4
总和	14 725.0	14 665.3

由表 8 可知,两种控制系统能耗总体变化较小,变水流量控制系统的水泵能耗 > 变水温度控制系统的水泵能耗。这是由于变水流量控制系统在温度 > 26 °C 时,冷冻水流量会有所增加,因此水泵能耗也会

增加。同时,可以注意到,该系统的除湿热泵能耗约占总能耗的 24%,电加热能耗约占总能耗的 20%,两者占比高达 44%。这是冷却除湿后新风温度过低所致。除湿热泵降低了空气温度,而电加热又升高了空气温度,这两个部件的功耗有很大部分被浪费,可以考虑采用转轮吸附除湿或吸收除湿的方式。这两种除湿方式能够直接降低空气湿度,且可以与顶板辐射供冷系统采用同一套冷冻水系统,用于降低新风温度。这样既可以降低系统能耗,又能降低系统的管理控制难度。

5 结论

本文对上海某办公楼的地板辐射供冷空调系统进行了模拟研究,并针对该建筑的实际情况设计了顶板辐射供冷空调系统,将两者进行了对比。根据该办公楼的实际供冷需求,对空调系统运行进行了合理的时间表优化,并分别设计了变水流量控制系统和变水温度控制系统。综合上述研究,得出如下结论:

1) 顶板辐射供冷系统能耗<地板辐射供冷系统能耗,整个供冷季总能耗减少了 4.59%。且顶板辐射供冷系统的传热速度较快,热惰性较低,能够尽快释放冷冻水的冷量,调节室内热环境。

2) 对于顶板辐射供冷系统,变水流量控制与变水温度控制均能够很好地对室内温度进行调控,温度基本能够保持在 26℃,变水温度控制系统对温度变化响应速度更快。

3) 对于顶板辐射供冷系统,变水温度控制系统能耗<变水流量控制的系统能耗,适宜采用变水温度控制系统,能耗较低。

4) 新风冷却除湿系统能耗占系统总能耗达到 44%,其中有很大一部分能量浪费,可以采用其他除湿方式如转轮除湿、吸收除湿,代替冷却除湿,以进一步降低系统能耗。

本文受泰州市“双创计划”项目资助。(The project was supported by the Taizhou High-level Innovation and Entrepreneurship Talent Introduction Plan.)

参考文献

[1] 司小雷. 我国的建筑能耗现状及解决对策[J]. 建筑节能, 2008(2): 71-75. (SI Xiaolei. The present situation of the Chinese building energy consumption and some countermeasures [J]. Building Energy Efficiency, 2008(2): 71-75.)

[2] 胡玮, 陈立定. 基于 Trnsys 的水冷型中央空调系统建模与仿真[J]. 系统仿真技术, 2011, 7(3): 218-222, 228.

(HU Wei, CHEN Liding. Modeling and simulation of a water-cooled central air conditioning system based of Trnsys [J]. System Simulation Technology, 2011, 7(3): 218-222, 228.)

[3] 李灵, 张秀平, 贾磊, 等. 辐射供冷关键技术的分析与讨论[J]. 制冷技术, 2013, 33(3): 16-20. (LI Jiong, ZHANG Xiuping, JIA Lei, et al. Analysis and discussion on key technology of radiant cooling[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2013, 33(3): 16-20.)

[4] NING Baisong, CHEN Youming, LIU Hui, et al. Cooling capacity improvement for a radiant ceiling panel with uniform surface temperature distribution[J]. Building and Environment, 2016, 102: 64-72.

[5] LUO Yongqiang, ZHANG Ling, LIU Zhongbing, et al. Modeling of the surface temperature field of a thermoelectric radiant ceiling panel system [J]. Applied Energy, 2016, 162: 675-686.

[6] 刘乃玲, 刘英杰, 方肇洪. 顶棚辐射供冷房间人体与环境换热的实验研究[J]. 制冷学报, 2012, 33(6): 26-31. (LIU Nailong, LIU Yingjie, FANG Zhaohong. Experimental research on heat transfer between human body and the environment in ceiling radiant cooling room [J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(6): 26-31.)

[7] 于国清, 贾文哲, 赵彦杰. 辐射吊顶单元供冷量的理论计算模型及实验验证[J]. 制冷学报, 2014, 35(2): 115-118. (YU Guoqing, JIA Wenzhe, ZHAO Yanjie. Theoretical calculation model and experimental validation of the radiant ceiling unit cooling capacity [J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(2): 115-118.)

[8] 曹法立, 邹同华, 马丽君, 等. 地板辐射供冷地板构造层及室内温度场的研究[J]. 制冷技术, 2010, 30(4): 23-25, 32. (CAO Fali, ZOU Tonghua, MA Lijun, et al. Study on floor structural layer and indoor temperature field of radiant floor cooling [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2010, 30(4): 23-25, 32.)

[9] 张岩, 冯圣红. 顶板辐射供冷房间节能性的探讨[J]. 建筑节能, 2012, 40(2): 6-8. (ZHANG Yan, FENG Shenghong. Energy efficiency of the room with radiant cooling ceiling panel [J]. Building Energy Efficiency, 2012, 40(2): 6-8.)

[10] 李锦堂, 孙宗宇, 李骥, 等. 辐射吊顶供冷方式节能舒适性研究[J]. 建筑科学, 2015, 31(10): 169-177. (LI Jingtang, SUN Zongyu, LI Ji, et al. Study on energy saving and thermal comfort of radiant cooling ceiling air conditioning system [J]. Building Science, 2015, 31(10): 169-177.)

[11] HE Yingdong, LI Nianping, HE Meiling, et al. Using radiant cooling desk for maintaining comfort in hot environment [J]. Energy & Buildings, 2017, 145: 144-154.

- [12] 于志浩, 金梧凤, 刘艳超. 辐射吊顶供冷与不同新风系统复合时的性能研究[J]. 制冷技术, 2013, 33(4): 37-40. (YU Zhihao, JIN Wufeng, LIU Yanchao. Investigation on performance of radiant ceiling cooling coupled with different fresh air systems[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2013, 33(4): 37-40.)
- [13] SHEN Limei, TU Zhilong, HU Qiang, et al. The optimization design and parametric study of thermoelectric radiant cooling and heating panel[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 688-697.
- [14] MUSTAKALLIO P, BOLASHIKOV Z, KOSTOV K, et al. Thermal environment in simulated offices with convective and radiant cooling systems under cooling (summer) mode of operation[J]. Building and Environment, 2016, 100: 82-91.
- [15] MUSTAKALLIO P, BOLASHIKOV Z, REZGALS L, et al. Thermal environment in a simulated double office room with convective and radiant cooling systems[J]. Building and Environment, 2017, 123: 88-100.
- [16] 娄载强, 杨冬, 张云婷, 等. 顶棚辐射供冷房间的温度分布探析[J]. 制冷技术, 2013, 33(3): 59-60, 69. (LOU Zaiqiang, YANG Dong, ZHANG Yunting, et al. Analysis of temperature distribution of ceiling radiant cooling room[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2013, 33(3): 59-60, 69.)
- [17] 张顺波, 宁柏松, 陈友明, 等. 含空气层冷辐射板的改进及供冷和抗结露性能分析[J]. 制冷学报, 2015, 36(5): 94-100, 112. (ZHANG Shunbo, NING Baisong, CHEN Youming, et al. Analysis on cooling capacity and anti-condensation ability of improved chilled radiant panel containing thinner air layer[J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(5): 94-100, 112.)
- [18] TANG Haida, LIU Xiaohua, LI Haoyue, et al. Study on

the reduction of condensation risks on the radiant cooling ceiling with superhydrophobic treatment[J]. Building and Environment, 2016, 100: 135-144.

- [19] TANG Haida, LIU Xiaohua, JIANG Yi. Theoretical and experimental study of condensation rates on radiant cooling surfaces in humid air[J]. Building and Environment, 2016, 97: 1-10.
- [20] 顾珍, 王胜男, 冯炼. 基于 Trnsys 的复合式地板辐射供冷控制系统的仿真[J]. 制冷与空调(四川), 2013, 27(6): 603-606. (GU Zhen, WANG Shengnan, FENG Lian. Simulation of hybrid radiant floor cooling control systems based on Trnsys[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2013, 27(6): 603-606.)
- [21] 黄奕沅, 张玲, 陈光明. 地板辐射供冷除湿问题探索[J]. 暖通空调, 2003, 33(3): 47-48, 51. (HUANG Yiyun, ZHANG Ling, CHEN Guangming. Dehumidification for floor cooling[J]. Journal of HV & AC, 2003, 33(3): 47-48, 51.)
- [22] 翁文兵, 李勇, 李聪. 辐射供冷房间冷负荷计算方法的研究[J]. 建筑节能, 2016, 44(1): 1-6. (WENG Wenbing, LI Yong, LI Cong. Cooling load calculation method for radiant cooling room[J]. Building Energy Efficiency, 2016, 44(1): 1-6.)

通信作者简介

翟晓强, 男, 教授, 上海交通大学制冷与低温工程研究所, (021) 34206296, E-mail: xqzhai@sju.edu.cn. 研究方向: 绿色建筑能源系统。

About the corresponding author

Zhai Xiaoliang, male, professor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, +86 21-34206296, E-mail: xqzhai@sju.edu.cn. Research fields: green building energy system.