

# 近零能耗建筑地面辐射供暖末端设计参数优化

冯国会,王茜如,黄凯良,常莎莎,崔航

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要目的** 研究近零能耗建筑地热盘管间距和供水温度之间的最佳匹配模式,解决地面辐射供暖末端参数设计不合理造成的室内温度过高、热泵机组能效偏低等问题。**方法** 利用 TRNSYS 软件计算并分析近零能耗建筑热负荷特征,建立能源系统模型,分析末端参数对室内温度、热舒适、系统能耗的影响,对盘管间距和供水温度进行优化。**结果** 近零能耗建筑利用土壤源热泵结合地面辐射供暖末端供热,当盘管间距 200 mm,热泵供水温度 35 ℃,供暖季初期和末期室温偏高,热舒适性较差。供水温度不变,增大盘管间距至 400 mm,热舒适性提高。盘管间距不变,降低供水温度至 30 ℃,热舒适性达到 II 级。降低供水温度 30 ℃与 45 ℃相比热泵能效提升 12.57%,能源系统供暖季总能耗降低 145.5 kW·h。**结论** 近零能耗建筑供暖季热负荷比普通建筑低,可增大盘管间距为 300~400 mm,降低供水温度为 30~35 ℃,使建筑的热舒适性提高,降低系统能耗。

**关键词** 近零能耗建筑;地面辐射供暖;TRNSYS 模拟;热舒适;节能

中图分类号 TU398.1 文献标志码 A

## Optimization of Design Parameters for Ground Radiant Heating Terminal of Near-Zero Energy Buildings

FENG Guohui, WANG Xiru, HUANG Kailiang, CHANG Shasha, CUI Hang

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** In order to solve the problems of excessively high indoor temperature and low energy efficiency of heat pump units caused by unreasonable design of ground radiant heating parameters, best matching mode between geothermal coil spacing and water supply temperature was studied for near-zero energy consumption buildings. The heat load characteristics of near-zero energy consumption buildings was calculated and analyzed by TRNSYS software. An energy model was established to analyze influence of terminal parameters on indoor temperature, thermal comfort,

收稿日期:2021-06-30

基金项目:国家重点研发计划政府间国际科技创新合作项目(2019YFE0100300);国家自然科学基金项目(51778376)

作者简介:冯国会(1964—),男,教授,博士研究生导师,主要从事建筑节能技术方面研究。

and system energy consumption, and optimize the coil spacing and water supply temperature. The results show that when the ground source heat pump combined with ground radiation heating terminal heating is used in nearly zero energy consumption buildings, when the coil spacing is 200 mm and the water supply temperature of the heat pump is 35 °C, indoor temperature is high at the beginning and end of the heating season, and the thermal comfort is slightly poor. If the water supply temperature remains the same and the coil spacing is increased to 400 mm, the thermal comfort is improved. If the coil spacing remains the same and the water supply temperature reduced to 30 °C, the thermal comfort can reach II grade. When the water supply temperature drops to 30 °C, the energy efficiency of the soil source heat pump increases by 12.57% compared with 45 °C, and the total energy consumption of the energy system in heating season decreases by 145.5 kW·h. Heat load of near-zero energy consumption building in heating season is lower than that of ordinary buildings, the coil spacing can be increased to 300 ~ 400 mm, and the water supply temperature can be reduced to 30 ~ 35 °C, which improves the thermal comfort of the building and reduces the energy consumption of the system.

**Key words:** near-zero energy building; ground radiant heating; TRNSYS simulation; thermal comfort; energy saving

在化石燃料消耗逐年增加的情况下,利用热泵供热可以减少一次能源的消耗<sup>[1-2]</sup>。地面辐射供暖系统以其供水温度低、热舒适性好、具有良好的蓄热性能等优点越来越受到用户的青睐<sup>[3-4]</sup>。地面辐射供暖的计算,主要就是确定盘管间距。在传统的施工设计中,地面辐射供暖工程应由专业人员依据国家现行规范与技术措施进行设计<sup>[5]</sup>。《地面辐射供暖施工手册》中列出了根据经验和实践总结的经验表格,可依据供水温度、室内设计温度、单位地面面积所需有效散热量查得盘管设计间距。近零能耗建筑的实现,设计是重要的环节<sup>[6]</sup>。各国在实现建筑近零能耗的技术路线上基本一致,都是先利用被动式设计降低建筑本体的能耗,如高性能的围护结构设计、良好的气密性能、断绝热桥等措施,其次再利用高效的能源系统进一步减少建筑的能源需求<sup>[7-9]</sup>。一系列技术手段使得近零能耗建筑的热负荷比普通建筑降低很多,单位地面面积所需有效散热量低,超出经验表格的范围,因此现行的设计规范不再适用于近零能耗建筑。设计施工时,按普通建筑的经验选取盘管间距和供水温度,必然造成冬季室内温度过高,热舒适性差,能源系统

能效偏低,能耗偏大等问题。鉴于此,笔者以沈阳市某近零能耗示范建筑为例,利用TRNSYS软件进行热负荷计算,模拟盘管间距和供水温度对室内温度、热舒适情况、热泵机组能效情况和能源系统总能耗的影响,优化近零能耗建筑地面辐射供暖末端设计参数。

## 1 近零能耗建筑热负荷特征分析

### 1.1 建筑概况

该近零能耗示范建筑位于辽宁省沈阳市,用地总面积为334.8 m<sup>2</sup>,是一座集办公、展示为一体的公共建筑。该建筑共两层,1层高3.3 m,包括示范房间1、展厅、厨房、卫生间、会客室、示范房间2、热泵设备机房和控制室;2层高3.6 m,包括办公室、卫生间和开敞办公区。

建筑主体结构为钢框架+现浇聚苯颗粒泡沫混凝土墙体,外墙传热系数为0.1 W/(m<sup>2</sup>·K),采用先进的外门窗密闭技术,外窗传热系数为1.0 W/(m<sup>2</sup>·K),气密性达到8级。窗墙比为:偏西侧0.09,偏南侧0.12,偏北侧0.12,偏东侧0.05,建筑外观图

如图1所示。



图1 建筑外观图

Fig. 1 Picture of the building

## 1.2 热负荷计算分析

利用 TRNBuild 建立近零能耗建筑模型,根据建筑实际情况设置围护结构、内热源、渗透、新风等参数,由于末端设备采用地面辐射供暖末端,计算热负荷时室内计算温度的取值应比采用对流辐射供暖末端的室内计算温度低  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[10]</sup>,建筑各房间供暖室内计算温度取值如表1所示。

表1 各房间供暖室内计算温度

Table 1 Indoor calculated temperature of each room heating

| 房间            | 供暖室内计算温度/ $^{\circ}\text{C}$ |
|---------------|------------------------------|
| 示范房间1、示范房间2   | 16                           |
| 办公室、开敞办公区、控制室 | 18                           |
| 会客室、展厅        | 18                           |
| 厨房            | 13                           |

利用 TRNSYS 软件建立负荷计算模型,模拟日期为11月1日至次年3月31日,时间7296~10920 h。供暖季逐时热负荷如图2所示。从图可以看出,该近零能耗建筑供暖季最大逐时热负荷出现1月16日,9128 h,热负荷为11.19 kW。供暖季累计热负荷8101.73 kW·h,供暖季热指标12.14 W/m<sup>2</sup>。与普通建筑相比,该近零能耗建筑围护结构传热系数低,气密性良好,供暖季累计热负荷较低,热指标较低。供暖季初期和末期由于室外温度较高,逐时热负荷较低,单位地面面积所需有效散热量较低。

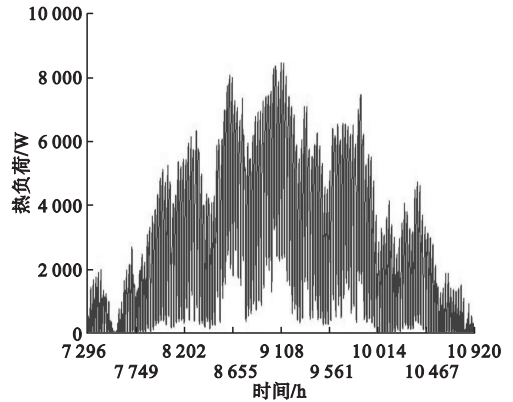


图2 近零能耗建筑供暖季逐时热负荷

Fig. 2 Hourly heat load in heating season for near-zero energy consumption buildings

## 2 系统模型建立

### 2.1 系统热舒适评价指标

人体的热舒适性由人体和环境两方面综合影响,人体因素主要有衣着、活动量及个人体质等<sup>[11]</sup>;环境因素主要有温度、湿度、空气流速等。评价环境热舒适性的方法有热舒适图,热舒适性方程,PMV-PPD指标法等<sup>[12]</sup>,自20世纪70年代以来,国际上普遍采用Fanger基于人体热平衡方程式和ASHRAE七点标度得到的平均热感觉指数-预测不满意率(PMV-PPD)模型作为评价人体热舒适的指标<sup>[13]</sup>。PMV是基于1396个受试者的热感觉投票结果分析提出的<sup>[14]</sup>,用于评价环境的热舒适性偏离热中性环境的程度,PPD是预测一组人对给定的热环境感到不舒适的人数占全部人数的比例。笔者热舒适性评价采用PMV-PPD指标法。《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736—2012)根据我国实际情况制定了适合我国的PMV-PPD值(见表2)。

表2 不同热舒适等级对应的PMV、PPD值

Table 2 PMV and PPD values corresponding to different thermal comfort level

| 热舒适等级 | PMV            | PPD/% | 热舒适性 |
|-------|----------------|-------|------|
| I级    | -0.5~0.5       | ≤10   | 较高   |
| II级   | -1~-0.5, 0.5~1 | ≤27   | 一般   |

## 2.2 能源系统模型

建筑负荷模型、末端装置系统、能源系统模型及相关循环控制模型由 TRNSYS 软件建立。TRNSYS 全称为 Transient System Simulation<sup>[15]</sup> (瞬态系统模拟),最初利用 TRNSYS 模拟太阳能系统<sup>[16]</sup>,后期已开发更

多模块。软件认为一个系统由若干个模块组成,一个模块实现某一特定的功能,因此,在对系统进行仿真模拟时,只要调用实现这些特定功能的模块,给定输入条件,就可以对系统进行模拟分析。图3为土壤源热泵结合地面辐射供暖末端系统运行流程图。

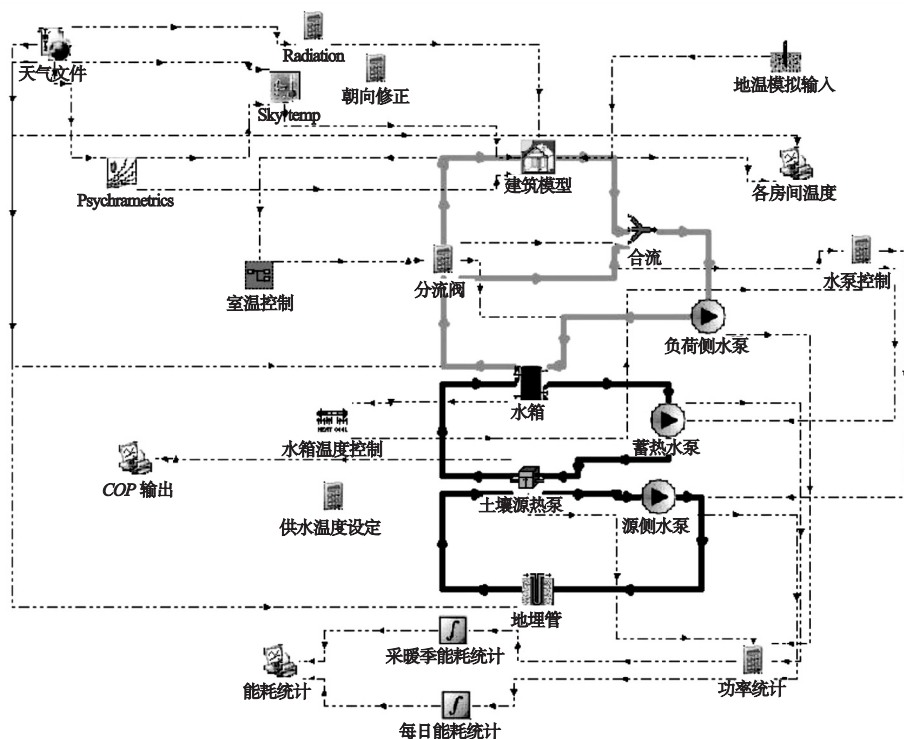


图3 能源系统运行流程图

Fig. 3 Energy system operation flow chart

## 3 结果与分析

### 3.1 末端设计参数对室内环境的影响

#### 3.1.1 设计参数对热舒适的影响

以示范房间2作为典型房间,模拟在不控制土壤源热泵启停时,供水温度35℃、盘管间距200mm的室内温度和热舒适情况。示范房间2供暖季逐时温度如图4所示。整个供暖季最低室内温度出现在9 128 h,为18.06℃,全年最高室内温度出现在10 915 h,达到28.14℃,全年平均温度为22.8℃。供暖初期和末期由于室外温度相对较高,室内温度偏高,整个供暖季逐时室内温度均高于设计温度。供暖季共3 624 h,其

中412 h温度为18~20℃,1 120 h温度为20~22℃,892 h温度为22~24℃,1 200 h温度达到24℃以上。

利用Type65c模块输出供暖季逐时PMV、PPD,整个供暖季PMV为-0.43~1.41,其中2 025 h为-0.5~0.5,1 174 h为0.5~1,PMV约有88.27%的时间为-1~1。整个供暖季PPD为5%~45.8%,PPD约有55%的时间小于等于10%,90%的时间小于等于27%,即达到II级。热舒适性达不到II级的时间全部集中在供暖初期和末期,此时人体热感觉较热。供暖季初期和末期由于室外温度相对较高,且近零能耗建筑密闭性优良,按普通建筑设计地面辐射供暖末端参数,会造



成室内温度过高,热舒适性较差。

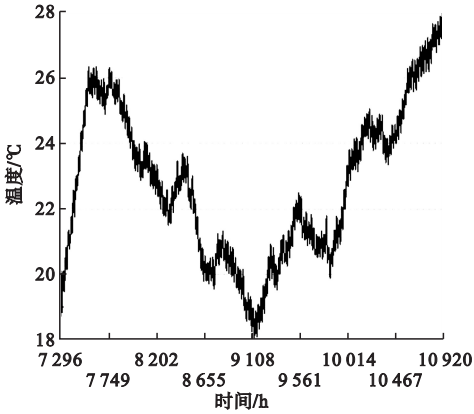


图4 典型房间供暖季逐时温度

Fig. 4 Hourly temperature of typical room in heating season

### 3.1.2 盘管间距对热舒适的影响

保持供水温度 35 °C,增大盘管间距至 400 mm,输出供暖季逐时室内温度,供暖季最低室内温度出现在 9 128 h,为 17.3 °C,最高室内温度出现在 10 915 h,为 27.68 °C,全年平均温度为 22.1 °C,供暖季室内温度稍有降低,可以满足用户需求。

输出供暖季逐时  $PMV$ 、 $PPD$  情况,整个供暖季  $PMV$  为  $-0.57 \sim 1.31$ ,其中 2 296 h 为  $-0.5 \sim 0.5$ ,1 116 h 为  $0.5 \sim 1$  或  $-1 \sim -0.5$ , $PMV$  约有 94.15% 的时间为  $-1 \sim 1$ 。整个供暖季  $PPD$  为 5% ~ 40.86%, $PPD$  约有 62.11% 的时间小于等于 10%,95.17% 的时间小于等于 27%。热舒适性达到 II 级的时间有所增加,热舒适性有所提高。

### 3.1.3 供水温度对热舒适的影响

盘管间距不变,保持 200 mm,降低供水温度至 30 °C,输出房间供暖季逐时温度,供暖季最低室内温度为 15.2 °C,最高室内温度为 25.2 °C,供暖季平均室内温度 20.0 °C,高于室内设计温度,整个供暖季仅有供暖中期 24 h 的室内温度低于 16 °C,可以满足用户对室内温度的需求。

输出 30 °C 供水温度下供暖季逐时  $PMV$ 、 $PPD$ ,与 35 °C 供水温度对比如图 5 所

示。整个供暖季  $PMV$  为  $-0.94 \sim 0.86$ ,100% 的时间处于  $-1 \sim 1$ ,其中 2 481 h 为  $-0.5 \sim 0.5$ 。整个供暖季  $PPD$  为 5 ~ 23.85%,均小于等于 27%, $PPD$  值中约有 66.23% 的时间小于等于 10%。整个供暖季热舒适性均达到 II 级以上,相比 35 °C 供水温度,热舒适性提高,效果显著。

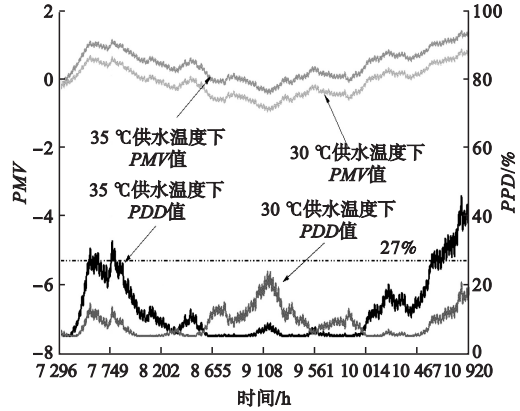


图5 不同供水温度的  $PMV$ 、 $PPD$  值对比

Fig. 5  $PMV$  and  $PPD$  values of different water supply temperatures

## 3.2 供水温度对能源系统能耗的影响

### 3.2.1 控制策略

增加温度控制模块 Type108 对各房间室温分别进行控制,当所有房间温度均达到设定值时,水泵停止。只要有一个房间温度不达标,则负荷侧水泵启动,蓄热水泵和源侧水泵依然由水箱温度控制。优化控制策略后,各房间室温得到稳定的控制,还可以有效地减少能耗。供水温度 35 °C,盘管间距 200 mm,不控制室温和控制室温后的系统能耗对比如图 6 所示。供暖季 11 月初至次年 3 月末共 5 个月,其中 1 月份水泵能耗和热泵能耗最大,系统总能耗最大。供暖季热泵能耗一直大于水泵能耗,当不控制室温时,整个供暖季水泵总能耗为 1 035.63 kW·h,热泵总能耗为 1 951.50 kW·h,能源系统总能耗为 2 987.13 kW·h。增加室温控制后,供暖季水泵总能耗为 845.10 kW·h,降低 18.4%,热泵总能耗为 1 454.98 kW·h,降低 25.4%,能源系统总能耗为 2 300.08 kW·h,降低 687.05 kW·h,与优化控制策略前相比能源系统总能耗降低了 23%。

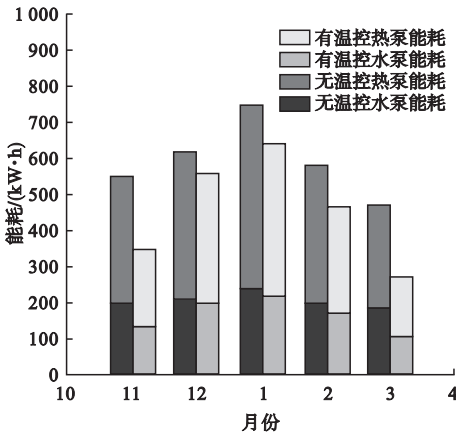


图6 控制室温前后的供暖季系统能耗对比

Fig. 6 Comparison of system energy consumption in heating season before and after room temperature control

3.2.2 供水温度对 COP 和能耗的影响

固定盘管间距为 200 mm,对比供水温度

45 °C, 40 °C, 35 °C, 30 °C 下土壤源热泵机组的 COP 和供暖季能源系统的能耗,图 7 为不同供水温度下土壤源热泵机组 COP 供暖季逐时变化情况。供水温度 45 °C 时,供暖季平均 COP 为 3.50;供水温度 40 °C 时,供暖季平均 COP 为 3.65;供水温度 35 °C 时,供暖季平均 COP 为 3.78;供水温度 30 °C 时,供暖季平均 COP 为 3.94。当供水温度降低至 30 °C,与 45 °C 供水温度相比土壤源热泵能效提升 12.57%。

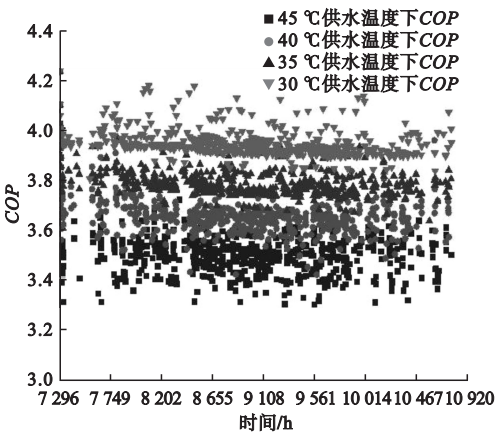


图7 不同供水温度下热泵 COP 供暖季逐时变化情况

Fig. 7 Hourly changes of heat pump COP under different water supply temperatures in heating season

输出不同供水温度下的供暖季能耗情况如图 8 所示。当供水温度为 45 °C, 40 °C, 35 °C, 30 °C 时,总能耗分别为 2 375.3 kW·h, 2 390.5 kW·h, 2 300.1 kW·h, 2 229.8 kW·h。降低供水温度,为维持室内温度和水箱设定温度,水泵启动时间增加,因此水泵总能耗逐渐增加,但由于土壤源热泵机组能耗逐渐降低,供水温度 45 °C 和 40 °C 时系统总能耗相差不多,降低供水温度至 35 °C, 30 °C, 系统总能耗继续降低。当供水温度降低至 30 °C,与 45 °C 供水温度相比能源系统总能耗降低 145.5 kW·h,降低了 6.13%。

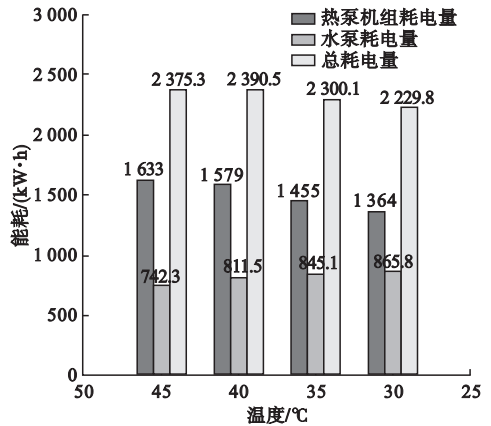


图8 不同供水温度下供暖季能耗情况

Fig. 8 Energy consumption in heating season under different water supply temperature

3.3 盘管间距和供水温度的最优匹配模式

为确定盘管间距和供水温度之间的最优匹配模式,分别设置盘管间距为 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm, 350 mm, 400 mm;供水温度为 25 °C, 30 °C, 35 °C, 40 °C, 45 °C, 输出供暖季 PMV, 各工况的模拟结果如图 9 所示。45 °C 供水温度,不同盘管间距下,人体热感觉均温暖;40 °C 供水温度,不同盘管间距下,人体热感觉均较温暖;25 °C 供水温度,不同盘管间距下,人体热感觉均较凉。盘管间距增大,PMV 逐渐降低,但盘管间距对热舒适的影响没有供水温度影响显著(见图 9)。当 PMV 为 0 时,人体热感觉适中,热舒适性达到最优,此时最佳供水温

度出现在 30 ~ 35 °C。

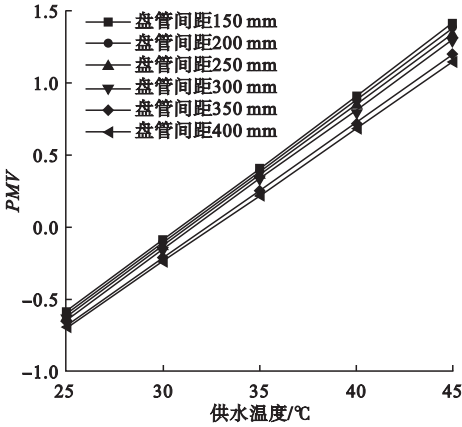


图9 不同工况下供暖季 PMV 值

Fig. 9 PMV value in heating season under different working conditions

输出各工况下供暖季 PPD, 供水温度 45 °C 时, 增大盘管间距 PPD 降低, 热舒适性提高, 但增大盘管间距至 400 mm, PPD 为 35.93%, 热舒适性依然达不到 II 级, 供水温度 40 °C 时, 热舒适性相比 45 °C 提高, 但达不到 I 级。供水温度 25 °C 时, 随着盘管间距增大, 热舒适性降低, 盘管间距 100 mm 时热舒适性依然达不到 II 级。各盘管间距下 PPD 最小值均出现在 30 ~ 35 °C。因此设置盘管间距为 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm, 350 mm, 400 mm; 供水温度为 29 °C, 30 °C, 31 °C, 32 °C, 33 °C, 34 °C, 35 °C, 寻找以热舒适性最高为优化目标的盘管间距和供水温度最佳匹配模式。

输出各工况下 PPD 如图 10 所示, 不同盘管间距, 供水温度从 29 °C 升高至 35 °C 时, PPD 均呈现先降低后升高的趋势, 但不同供水温度下, 盘管间距对 PPD 的影响不同, 当供水温度为 29 ~ 31 °C, 盘管间距增大, PPD 增大, 热舒适性降低; 当供水温度为 33 °C 至 35 °C, 盘管间距增大, PPD 降低, 热舒适性提高; 供水温度 32 °C 时, 盘管间距对 PPD 影响不大。最佳匹配模式为: 150 mm、200 mm、250 mm 盘管间距对应的最优供水温度为 31 °C, 300 mm、350 mm 盘管间距对应的最

优供水温度为 32 °C, 400 mm 盘管间距对应的最优供水温度为 33 °C, 此时热舒适性均能达到 I 级。近零能耗建筑使用地面辐射供暖末端时, 供水温度可降低为 30 ~ 35 °C, 盘管间距可适当增大为 300 ~ 400 mm。

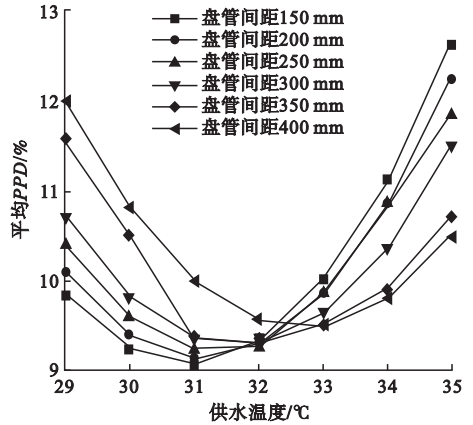


图10 不同工况下供暖季 PPD 值

Fig. 10 PPD value in heating season under different working conditions

### 4 结论

(1) 近零能耗建筑利用土壤源热泵结合地面辐射供暖末端供热, 当盘管间距 200 mm, 热泵供水温度 35 °C, 典型房间供暖季初期和末期室温偏高, 热舒适性稍差; 增大盘管间距或降低供水温度可提高热舒适性。

(2) 增加室温控制系统使水泵能耗降低 18.4%, 热泵能耗降低 25.4%, 系统总能耗降低 687.05 kW·h, 降低了 23%。

(3) 供水温度降低为 30 °C, 相比 45 °C 供水温度时热泵能效提升 12.57%, 总能耗降低 145.5 kW·h。

(4) 供水温度和盘管间距的最佳匹配模式为: 150 mm、200 mm、250 mm 盘管间距对应的最优供水温度为 31 °C, 300 mm、350 mm 盘管间距对应的最优供水温度为 32 °C, 400 mm 盘管间距对应的最优供水温度为 33 °C, 此时热舒适性均能达到 I 级。近零能耗建筑使用地面辐射供暖末端时, 供水温度可降低为 30 ~ 35 °C, 盘管间距可增大为

300~400 mm,以达到提高建筑热舒适性,节能的效果。

## 参考文献

- [1] SIMONETTI R, MOLINAROLI L, MANZOLINI G. Experimental and analytical study of an innovative integrated dual-source evaporator for solar-assisted heat pumps [J]. *Solar energy*, 2019, 194: 939–951.
- [2] 黄立萍. 基于可持续生活方式的居民环境行为实现过程研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2020.  
(HUANG Liping. Study on the realization process of residents' environmental behavior based on sustainable life style [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2010.)
- [3] 邓杰, 王瑛, 王成琳, 等. 太阳能低温地板辐射采暖的 TRNSYS 模拟研究[J]. 制冷与空调(四川), 2013, 27(5): 499–503.  
(DENG Jie, WANG Ying, WANG Chenglin, et al. Research of solar assisted low-temperature floor heating simulation by TRNSYS [J]. *Refrigeration and air conditioning (Sichuan)*, 2013, 27(5): 499–503.)
- [4] CHEN Y, ATHIENITIS A K. Three-dimensional numerical investigation of the effect of cover materials on heat transfer in floor heating systems [J]. *Ashrae transactions*, 1998, 104(2): 1350–1355.
- [5] 赵文田. 地面辐射供暖设计施工手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.  
(ZHAO Wentian. Floor radiant heating design and construction manual [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.)
- [6] 冯国会, 徐小龙, 王悦, 等. 以能耗为导向的近零能耗建筑围护结构设计参数敏感性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(6): 1069–1077.  
(FENG Guohui, XU Xiaolong, WANG Yue, et al. Sensitivity analysis of nearly zero energy buildings envelope design parameters based on energy consumption [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university (natural science)*, 2018, 34(6): 1069–1077.)
- [7] 周文倩. 辽宁省近零能耗建筑能耗及气密性指标的确定[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.  
(ZHOU Wenqian. Determination of energy consumption and air tightness index of nearly zero energy building of Liaoning province [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.)
- [8] 张时聪, 徐伟, 姜益强, 等. 国际典型“零能耗建筑”示范工程技术路线研究[J]. 暖通空调, 2014, 44(1): 52–59.  
(ZHANG Shicong, XU Wei, JIANG Yiqiang, et al. Research on demonstration project technology roadmap of zero energy buildings abroad [J]. *Heating ventilating & air conditioning*, 2014, 44(1): 52–59.)
- [9] MARSZAL A J, HEISELBERG P, BOURRELLE J S, et al. Zero energy building—a review of definitions and calculation methodologies [J]. *Energy and buildings*, 2011, 43(4): 971–979.
- [10] 凌疆. 辐射供暖供冷负荷计算方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.  
(LING Jiang. Calculation method of radiant heating and cooling load [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.)
- [11] 任晓芬. 地板辐射供暖方式热舒适性与节能性分析研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2008.  
(REN Xiaofen. Thermal comfort and energy conservation study of radiant floor heating [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2008.)
- [12] 杨进. 辐射采暖的热舒适性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.  
(YANG Jin. Research on thermal comfort of radiant heating [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2006.)
- [13] 徐刚, 安启启, 杨杰, 等. 考虑个体差异性的 PMV-PPD 人体热舒适性评估模型及应用[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(1): 55–61.  
(XU Gang, AN Qiqi, YANG Jie, et al. Evaluation and its application of an improved PMV-PPD model based on individual differences [J]. *Journal of Xi'an university of science and technology*, 2021, 41(1): 55–61.)
- [14] 何颖东. 个人舒适系统作用下的热舒适及用能行为特性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.  
(HE Yingdong. Research on characteristics of thermal comfort and energy-use behaviors of occupants with personal comfort systems [D]. Changsha: Hunan University, 2019.)
- [15] 尹丽媛. 基于 TRNSYS 的太阳能耦合土壤源热泵系统仿真研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.  
(YI Liyuan. Simulation study on TRNSYS based solar-earth source heat pump system [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013.)
- [16] 林兴斌, 潘毅群, 黄治钟. 基于 TRNSYS 的 HVAC 控制系统的仿真[J]. 建筑节能, 2010, 38(2): 44–49.  
(LIN Xingbin, PAN Yiqun, HUANG Zhizhong. Emulation of HVAC control systems based on TRNSYS [J]. *Building energy efficiency*, 2010, 38(2): 44–49.)  
(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)