

地板辐射协同地道风供冷系统冷水梯级 利用试验研究

张华北^{1,2}, 宋子英^{2,3}, 陈翔燕^{1,2}, 任 渊^{2,3}, 宋 伟^{2,3}

(1. 江苏盛世节能科技有限公司, 江苏 连云港 222000; 2. 江苏省地热能开发工程技术研究中心, 江苏 连云港 222000;
3. 北方工业大学土木工程学院, 北京 100000)

摘要: 地板辐射供冷系统具有房间温度均匀性好、噪声小、运行费用低、舒适度高优点,但从现有研究来看,地板辐射供冷系统的供冷量与结露之间的矛盾极大地影响了系统推广应用。通过搭建基于虚拟自然冷源的地板辐射协同地道风供冷试验台,从冷水梯级利用的角度,探索冷水串联与混水两种模式下的地板辐射协同地道风系统结露特性、供冷特性与能耗特性,分析冷水梯级利用的节能原理。研究结果表明,冷水梯级利用模式由于供水温度在 12 °C 以上并结合地道风不会发生结露现象,以不结露、供冷量大、能耗低为目标,用多目标优化方法分析可得串联供水 0.5 m³/h、送风量 45 m³/h 为最优工况,供冷量为 474.3 W,系统能耗为 238 W。

关键词: 地道风; 地板辐射供冷; 冷水梯级利用; 多目标优化

中图分类号: TK529 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)02-0244-10

“十四五”时期是推动我国能源绿色低碳转型的关键时期,也是对世界气候变化做出应对决策并落实目标的重要阶段^[1],传统供冷方式已无法满足当前形势的严峻要求,新能源、新技术的开发应用迫在眉睫。辐射供冷系统具有温度均匀性好、噪声低、舒适度高优点^[2]。目前,辐射供冷技术在建筑节能中的运用愈加广泛,但结露问题仍制约辐射供冷技术的进一步推广^[3]。地道风系统具有节能效果好、结构简单等特点^[4],若能推广使用自然冷源辐射供冷系统对于建筑节能有着重大意义。辐射供冷系统至今没有解决供冷量与结露之间的矛盾,因此,如何在预防结露的同时,减小能耗并增大供冷量是亟待解决的难题。

国内外学者对此展开了大量工作。辐射供冷系统在单独使用过程中为了满足用户的需求供冷量,供水温度往往比较低,供冷表面极易发生结露现象^[5]。宋守杰等^[6]认为供水流量降低,供水温度也可以相应降低;李琳等^[7]提出优化辐射板的方法为调温层非均匀布置、增加辐射板厚度、装饰层采用吸湿解湿性好的材料;Khan 等^[8]认为充分利用辐射供冷系统的热惯性特点调控系统运行,有利于

提高系统的运行效率,地板辐射供冷系统在夜间蓄存的冷量用于白天供冷,可以减小白天的峰值负荷,降低能耗,且可以提前关闭辐射系统,在满足室内舒适度的要求下实现最大限度的节能。为建立防结露预测控制策略,Jin 等^[9]利用数值模拟分析不同供水流量和供水温度^[10]下辐射板表面温度的动态变化,仿真结果表明固定供水流量时辐射板表面温度主要受室内空气温度、非冷却面平均温度和外窗内表面温度影响,当供水温度升高时,供水温度影响占比最大;当供水温度降低时,室内温度影响占比最大。赵建会等^[11]发现当室内设计相对湿度适当降低或者送风温度高于地板表面温度时,都会提高人员舒适性并且降低了地板结露的风险;苏蒙等^[12]提出当室内湿度增大时,降低送风湿度可以避免由于湿度增加引起地板结露的现象。

目前室内送风多采用新风机组处理,能耗较高,新风系统辅助供冷的方式也在应用,但系统的节能性和经济性还存在一些问题^[13]。刘希臣和王景昱^[14]提出采用地道风技术后,不同气候区均可有效减小新风机组的开启时长,并可大幅度减小新风负荷,普遍新风负荷可减小 30%左右。特别是针对

收稿日期: 2023-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(41602278)

作者简介: 张华北(1971—),男,江苏连云港人,高级工程师,硕士,研究方向为建筑节能与地热能开发;通信作者宋伟(1982—),男,河北沧州人,副教授,博士,研究方向为可再生能源开发。

夏热冬冷地区,新风负荷的减少率最高。朱赤等^[15]提出一种新型诱导送风与辐射复合空调末端,研究不同末端诱导的室内回风能力;Li等^[16]、Sakhri等^[17]在炎热潮湿环境中应用地道风系统提高了建筑性能,肯定了地道风系统的降温除湿能力;刘春阳^[18]通过Fluent建立地道风模型进行模拟分析,模拟结果表明埋管管长越长,地道风系统换热效果越好;Guo等^[19]将地道风系统与独立空气源热泵系统相比,发现地道风系统的除湿能力更强且平均能耗有了很大降低;刘阳等^[20]对地道风系统与换热新风装置进行了耦合研究,发现该系统对室外空气温度波动具有平抑作用,随着时间的延长更为明显,提高了室内热适应性;陈旭等^[21]发现严寒地区被动式建筑新风采用地道风系统可有效降低建筑能耗。

通过对现有文献的梳理可以发现,对于以自然冷源为冷热源、地板辐射作为末端以及地道风作为送风系统除湿手段的辐射系统这种具有创新使用的系统目前研究并不多见。本文通过搭建虚拟自然冷源地板辐射与地道风协同供冷试验台,从冷水梯级利用的角度入手,探索冷水串联与混水两种模式下的地板辐射协同地道风系统结露特性、供冷特性与能耗特性,并用多目标优化方法分析得到最优工况,从而降低系统能耗。

1 试验相关理论及方法

1.1 自然冷源地板辐射与地道风协同供冷系统

辐射供冷技术是以冷水为介质对围护结构内辐射末端表面进行降温,辐射末端再与房间进行对流与辐射换热,最终使室内环境达到舒适性要求。地板辐射技术冬夏季共用一套末端设备,极大程度减少了设备的初投资费用,且辐射末端均埋于地板下方,不占用室内空间,避免了传统空调的吹风感与冷量不均匀问题,具有热性能稳定、室温均匀和

舒适节能等优点^[22]。由于辐射供冷系统的进水温度可调性较强,土壤源、地表水源、冷却塔等都可以为辐射供冷系统提供冷源(图1),现有的常规冷水机组一般供回水温度为7℃和12℃,不能满足辐射供冷加新风空调系统对不同温度冷源的要求。我国幅员辽阔,自然冷源种类众多,因地制宜高效开发自然冷源可以大幅减少碳排放量。地道风系统是利用地下土壤的冷/热量处理埋管内的空气,在我国夏季大部分地区,地下浅层土壤温度都与室内空气温度有着较大的温差,地道风有着良好的除湿效果,若能将地板辐射供冷系统、地道风系统与自然冷源结合起来,将能在高效开发利用自然冷源的基础上提高建筑环境舒适度。

1.2 冷水系统梯级利用节能原理

冷水梯级利用系统就是将冷冻水管路连接在冷水机组、冷冻水泵、新风机组、辐射盘管末端之间,冷冻水管路依序将其串联,即冷水机组出来的7℃冷冻水,通过冷冻水泵加压经过新风机组后,冷冻水温度升为12℃,再进入辐射盘管末端,热量交换后的冷冻水具体温度随新风量和冷冻水量不同而不同。冷水梯级利用技术节能性已经得到初步肯定^[12],但是与常规空调比较,其节能情况的研究还很少。冷水梯级利用主要依据冷量逐级递减的特点,充分发挥每个阶段冷量的作用,可以提高整个系统的能源利用效率。水的比热容较大,从自然冷源中提取的冷量较多,若仅在新风机组或者辐射末端中进行一次换冷,冷量并不能被充分利用。供冷系统中的每个机组都有自身最经济合理的冷水使用温度范围,当冷水在一个装置中已降至经济适用范围以外时,即可转至另一个能够经济使用冷水的装置中去使用,使总的冷量利用率达到最高水平。

地板辐射协同地道风冷水系统梯级利用系统

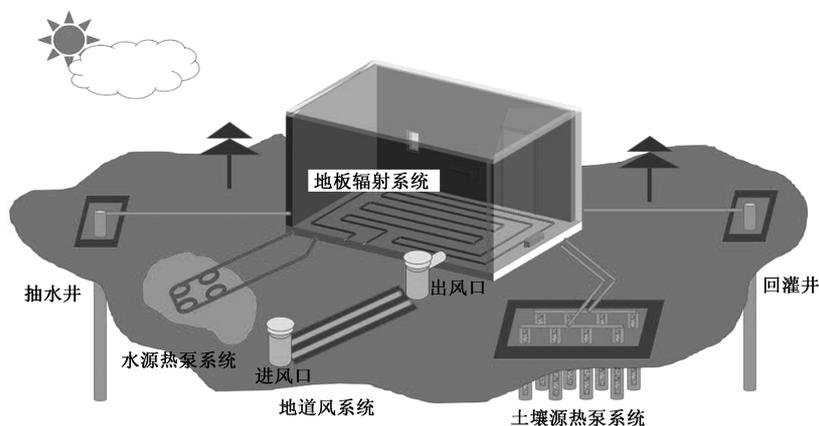


图1 自然冷源地板辐射与地道风协同供冷系统

是将冷水进行逐级利用。如图 2 所示,地道风系统和辐射末端在串联方式下运行时,冷水首先通过处理新风使新风降温除湿,在此阶段低温冷水转换为中冷水,中温冷水继续全部进入辐射末端向室内提供冷量;地道风系统用水与自然冷源混合用于辐射末端即在混水方式下运行时,地道风系统用水先处理新风之后再与自然冷源按一定流量比例关系共同混合,用于辐射末端向室内供冷。

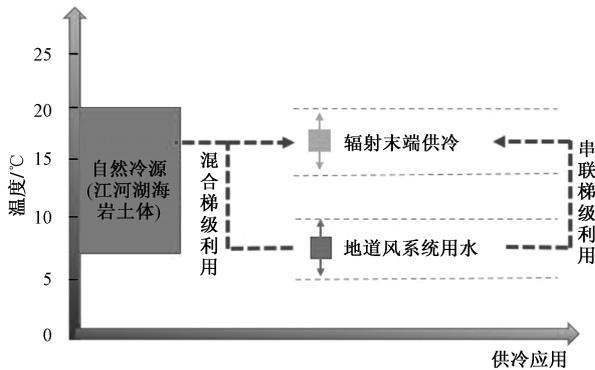


图 2 冷水梯级利用原理

1.3 多目标优化

多目标优化问题在工程应用等现实生活中非常普遍,并且处于非常重要的地位。这些实际问题通常非常复杂、困难,解决多目标优化问题具有非常重要的科研价值和实际意义^[23]。多目标优化问题用文字描述为 D 个决策变量参数、 N 个目标函数、 $m+n$ 个约束条件组成一个优化问题,决策变量与目标函数、约束条件是函数关系。在非劣解集中决策者只能根据具体问题要求选择令其满意的一个非劣解作为最终解。线性加权是多目标优化广泛使用的一种模型,SAW (simple additive weighting) 是其中经典的一类线性加权求和方法。它忽略不同目标函数有不同的单位和范围,通过给不同的目标函数制定相应的权重,将所有的目标函数进行线性加权,用一个综合的效用函数来代表总体优化的目标。最优的效用函数对应的解即被认为是问题的最优解,根据目标的重要程度,设定权重进行线性加权,从而将多个目标转换为单目标的优化问题。通过如下公式进行计算。

$$a_{ij} = 99 \times \frac{f_{ij} - f_j^{**}}{f_j^* - f_j^{**}} + 1 \quad (1)$$

$$f_j^* = f_{ij} \max(i) \quad (2)$$

$$f_j^{**} = f_{ij} \min(i) \quad (3)$$

$$U(X) = \sum_{j=1}^p \omega_j f_j(X) \quad (4)$$

$$\max U(X) = \sum_{j=1}^p \omega_j f_j(X) \quad (5)$$

式中: f_{ij} 为目标属性指标值; a_{ij} 为目标属性指标变换值; f_j^* 为目标属性指标值中的最大值; f_j^{**} 为目标属性指标值中的最小值; ω_j 为目标权系数向量; $U(X)$ 为不同工况下的评价价值。

2 室内试验研究

2.1 试验台搭建

地板辐射与地道风协同供冷试验台分为辐射供冷系统和地道风系统。辐射供冷系统用于室内供冷,预制设定温度冷水存入冷水供水箱内,冷水供水箱即为模拟虚拟自然冷源;地道风系统利用表冷器与新风机组制作新风,用于承担室内湿负荷以及一部分冷负荷,表冷器与虚拟自然冷源结合进行制冷,试验台实物图如图 3 所示,系统示意图如图 4 所示,主要设备及参数如表 1 所示。

2.2 试验工况

为探究地板辐射协同地道风系统的运行特性,首先利用控制变量法设计试验,通过调节辐射

表 1 地板辐射与地道风协同供冷试验台主要设备及参数

序号	名称	参数
1	测试房间/ m^3	$4.07 \times 2.7 \times 2.32$
2	辐射盘管	De20
3	辐射板面积/ m^2	8.125
4	静压箱/ cm^3	$120 \times 20 \times 10$
5	高温冷水供/回水箱容积/ m^3	0.6
6	冷冻水供/回水箱容积/ m^3	0.6
7	制冷机组制冷功率/W	2 910
8	高温冷水水泵	MHIL204-3/10/E/3-380-50-2-BSR, 最大流量 $5 \text{ m}^3/\text{h}$, 扬程 43 m
9	冷冻水水泵	JET-370S, 最大流量 $3.5 \text{ m}^3/\text{h}$, 扬程 30 m
10	流量计	SLDLWY-Y6C/0.5, 量程 $0.06 \sim 0.6 \text{ m}^3/\text{h}$, 准确度 0.5 级; SLDLWY-Y6C/0.5, 量程 $0.1 \sim 0.6 \text{ m}^3/\text{h}$, 准确度 0.5 级
11	表冷器/cm	$25 \times 13 \times 21$
12	新风机	SE-A150, 最大风量 $594 \text{ m}^3/\text{h}$
13	回风机	HZ-150, 最大风量 $540 \text{ m}^3/\text{h}$
14	室内加热器	管径 12 mm, 长度 60 cm, 功率 800 W
15	室内加湿器	AJ-H960, 额定加湿量 $250 \text{ ml}/\text{h}$
16	采集仪	Agilent 34970A

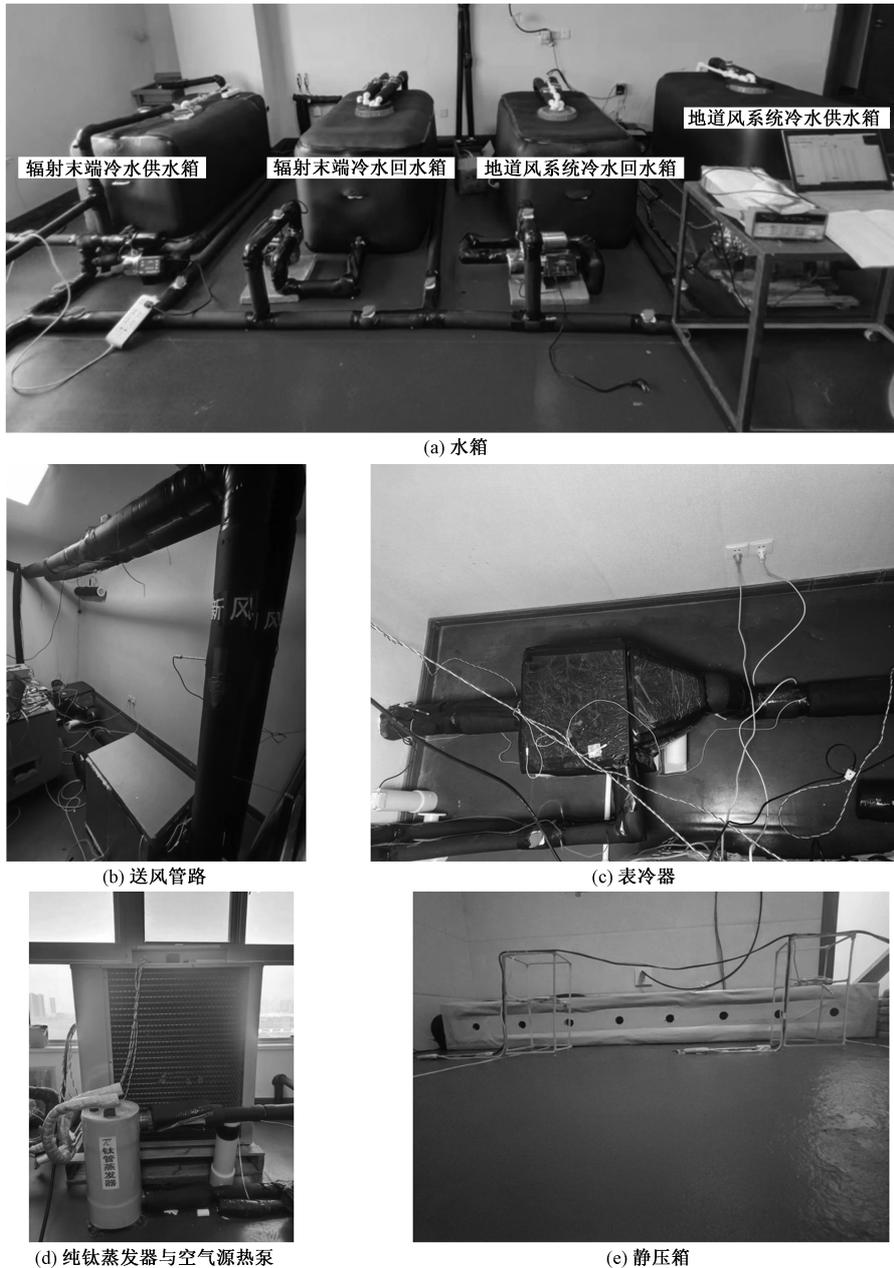


图3 试验台实物

盘管供水温度、房间内加湿量、送风量等参数,对系统的结露特性、供冷特性、能耗特性进行研究。其次对冷水系统梯级利用运行模式进行探讨研究,通过梯级利用的方式对系统的运行特性进行研究。

依据系统运行方式将试验分为3个大类共16个试验工况,其中第一大类为地板辐射系统运行方式,主要包括工况1~工况6,工况1~工况3为试验在相同供水温度、房间内不同加湿量的测试工况,工况4~工况6为试验在房间内相同加湿量、不同供水温度的测试工况。第二大类为地板辐射协同地道风系统运行方式,主要包括工况7~工况13,

工况7和工况8为试验在相同供水温度、房间内相同加湿量、不同送风量且未除湿的测试工况,工况9~工况11为试验在相同供水温度、房间内相同加湿量、不同送风量除湿下的测试工况,工况12和工况13为试验在相同送风量且除湿、房间内相同加湿量、不同供水温度下的测试工况。第三大类为冷水系统梯级利用运行方式,工况14和工况15为试验中地道风系统与辐射末端串联运行下的测试工况,其中试验条件为房间内相同加湿量、相同送风量、不同供水流量;工况16为试验中地道风系统用水与自然冷源混合利用于辐射末端的测试工况。表2为试验工况详情。

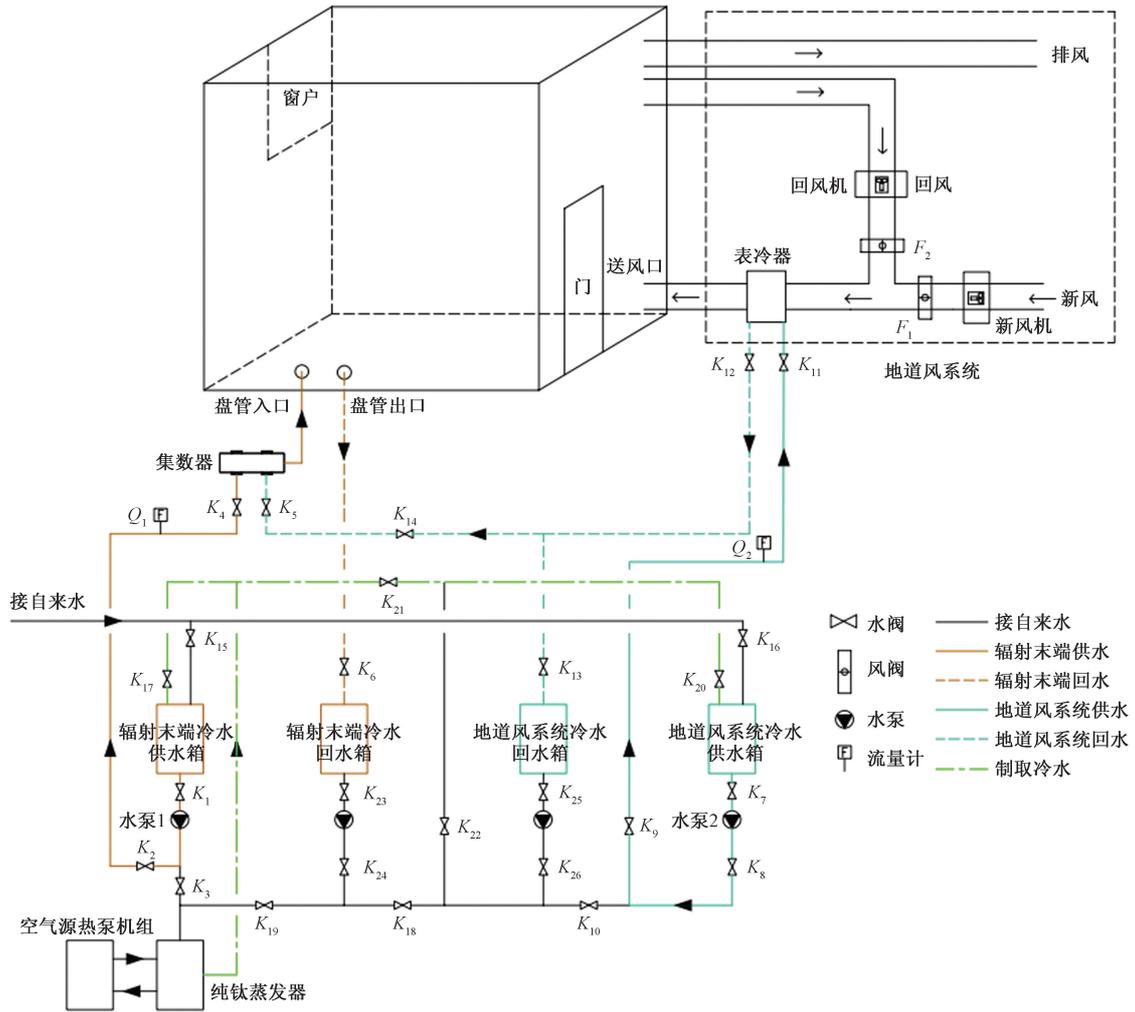


图 4 地板辐射与地道风协同供冷试验台系统

表 2 设计试验工况

运行方式 及条件	工况	盘管供水流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	高温冷水供水		表冷器供水		新风量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	回风量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	加湿量/ ($\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$)	
			温度/ $^{\circ}\text{C}$	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)				
地板辐射 系统	单独地 板辐射	1	0.5	10	0.5	—	—	—	100	
		2	0.5	10	0.5	—	—	—	200	
		3	0.5	10	0.5	—	—	—	300	
		4	0.5	12	0.5	—	—	—	200	
		5	0.5	14	0.5	—	—	—	200	
		6	0.5	16	0.5	—	—	—	200	
地板辐射 协同地道 风系统	回风 未除湿	7	0.5	14	0.5	—	—	30	200	
		8	0.5	14	0.5	—	—	60	200	
	新风除湿	9	0.5	14	0.5	7	0.2	30	—	200
		10	0.5	14	0.5	7	0.2	30	15	200
		11	0.5	14	0.5	7	0.2	30	30	200
		12	0.5	12	0.5	7	0.2	30	15	200
梯级利 用系统	冷水梯 级利用	14	0.2	—	—	7	0.2	30	15	200
		15	0.5	—	—	7	0.5	30	15	200
		16	0.5	16	0.3	7	0.2	30	15	200

2.3 系统运行特性研究

2.3.1 地板辐射协同地道风系统运行特性

结露特性、供冷特性和能耗特性是地板辐射供冷系统的重要运行特性,充分掌握系统运行特性是合理利用系统的先决条件。因此从系统的上述三个方面开展研究,分析单独地板辐射、地板辐射协同地道风在不同供水温度、加湿量、送风状态下的运行特性变化。试验室内初始条件利用加热管把温度调至 31℃、利用加湿器把相对湿度调至 70%,试验前通过风机盘管吹动使室内温湿度均匀,利用新风箱将空气处理为 35℃作为地道风的初始条件。

由试验结果分析可得,当加湿量分别为 100 g/h、200 g/h 和 300 g/h 时,地面总结露量分别为 0.05 g、0.07 g 和 0.09 g。可以知道,随着加湿量的增加,地面总结露量也逐渐增加,室内加湿量与地面总结露量呈正相关。当回风量分别为 0 m³/h、30 m³/h 和 60 m³/h 时,地面总结露量为 0 g、1.58 g 和 6.74 g。可以发现不同回风量且未经过除湿情况下随着回风量的增加,地面总结露量也逐渐增加,在回风未除湿的情况下均存在强烈的结露情况。

在系统运行稳定阶段,不同供水温度 10℃、12℃、14℃、16℃ 所对应的房间单位面积供冷量分别为 41.1 W/m²、34.7 W/m²、33.9 W/m²、28.1 W/m²,地板供冷量分别为 334.5 W、282.5 W、275.8 W、228.6 W。图 5 是地板供水温度为 14℃,不同送风量且经过除湿处理下的系统供冷量对比。由图 5 可知,在送风量为 30 m³/h 时,系统总供冷量为 458.9 W,其中地板供冷量占总供冷量的 56%,送风系统供冷量占 44%,此时地板对房间的供冷能力强于送风系统的供冷能力,送风系统中加入回风后,地板对房间的供冷量占系统供冷量的比值逐渐减小,加入 30 m³/h 的回风后,送风系统对房间的供冷量和地板对房间的供冷量仅相差 20 W。随着送风量的增加,送风系统的供冷量随之增加,但当送风量继续增加,送风系统供冷量增加的并不明显,这是因为送风系统中的表冷器换热能力有限,随着送风量增加,送风温度逐渐升高,换热能力有所降低,导致供冷量虽然有增加但变化不明显。送风量为 45 m³/h 时系统的供冷量相较于其他工况略为偏低,这是由于风量较大,室内气流组织紊乱,换热并不充分。图 6 是在相同送风量且经过除湿后,改变供水温度,系统的供冷量之间的对比。由图 6 可知,在供水温度为 14℃ 时,其中系统总供冷量为

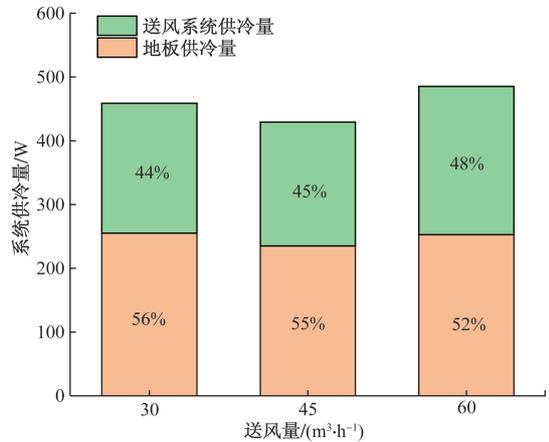


图 5 相同供水温度不同送风量下系统供冷量对比

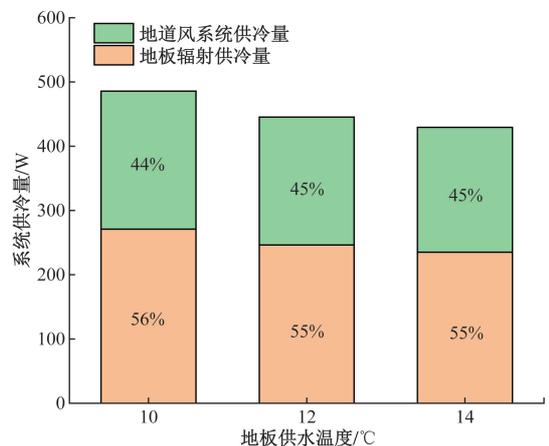


图 6 相同送风量不同供水温度下供冷量对比

429.4 W,地板供冷量占总供冷量的 55%,地道风系统供冷量占 45%,此时地板对房间的供冷能力强于地道风系统的供冷能力,地板供水温度降低后,地板对房间的供冷量占系统供冷量的比值逐渐增大,系统总供冷量也逐渐增大。相同送风状态下,地板供水温度在 10~14℃ 时,地板承担 55%~56% 供冷量,地道风系统承担 44%~45% 供冷量。

除了对地板辐射系统不同运行情况的特性分析,对系统进行能耗掌握也具有关键作用,对不同运行情况的能耗进行整理如表 3 所示。根据不同运行情况实际所使用的设备也不同,导致最终能耗情况存在差异,在单独采用地板辐射供冷时如工况 1~工况 6,系统运行过程主要设备为高温冷水水泵,系统总能耗为 200 W。在采用地板辐射和新风时如工况 9,系统运行过程主要设备为高温冷水水泵、冷冻水水泵和新风机,系统总能耗为 386 W。在采用地板辐射和新回风时如工况 10~工况 13,系统运行过程主要设备为高温冷水水泵、冷冻水水泵、新风机

和回风机,系统总能耗为 418~446 W。系统冷水梯级利用如工况 14 和工况 15,系统运行过程主要设备为冷冻水水泵、新风机和回风机,根据不同供水流量需求,调节水泵的压力,系统总能耗为 208~238 W。混水运行过程即工况 16,系统运行过程主要设备为高温冷水水泵、冷冻水水泵、新风机和回风机,系统总能耗为 418 W。

表 3 不同工况能耗对比

运行条件	工况	总能耗/W
单独地板辐射	1	200
	2	200
	3	200
	4	200
	5	200
	6	200
回风未除湿	7	237
	8	260
送风除湿	9	386
	10	418
	11	446
	12	446
	13	446

通过对测试结果进行分析得出,供水温度为 10~16 °C 时单独地板辐射的供冷量为 228.6~334.5 W,能耗为 200 W,在此基础上增加地道风系统后,供水温度为 14 °C,送风量在 30~60 m³/h 时,系统供冷量提高了 66.4%~76%,系统能耗增加至 386~446 W,送风能明显提高室内供冷效果,但也会相应增加系统能耗。

2.3.2 冷水系统梯级利用运行模式探讨

地板辐射系统与新风协同供冷才能达到降温除湿的效果,但是处理新风必然会增大系统能耗,因此从冷水梯级利用的角度入手,探索冷水串联与混水两种模式下的地板辐射协同地道风系统结露特性、供冷特性与能耗特性,分析冷水梯级利用的节能原理。

根据工况 14~工况 16 可知,梯级利用供水温度均在 12 °C 以上,所以地表温度下降幅度均小于贴附层露点温度下降幅度且地表温度始终高于露点温度,无结露风险。图 7 是串联供水用于地板供水,冷水流量不同时地板辐射系统与地道风系统供冷量的对比关系。由图 7 可知,随着供水流量的增加,系统供冷量也随之增大,供水流量的变化对地板供冷量变化影响较大。当地板供冷量为 241.5 W,地道风系统供冷量为 192.5 W,系统中地板供冷量占总供冷量的 55.65%,地道风系统占比为 44.35%。

图 8 为梯级利用模式与地板不同供水温度时的供冷量对比分析,送风量均为 45 m³/h。串联流量为 0.5 m³/h 时的供冷量最高,为 474.29 W,仅次于供水温度为 10 °C 时的 485.7 W。表 4 为梯级利用模式与其他模式能耗对比,串联供水能耗远低于普通地板辐射供冷联合新风时的能耗,这是因为串联供冷只有一条冷冻水路,仅需开一个冷冻水泵,而普通地板辐射与新风联合则是两条冷冻水路,水泵能耗较高。混水模式由于是两条水路混合,因此水泵能耗也较高。在相同供冷效果下冷水串联能耗更低。

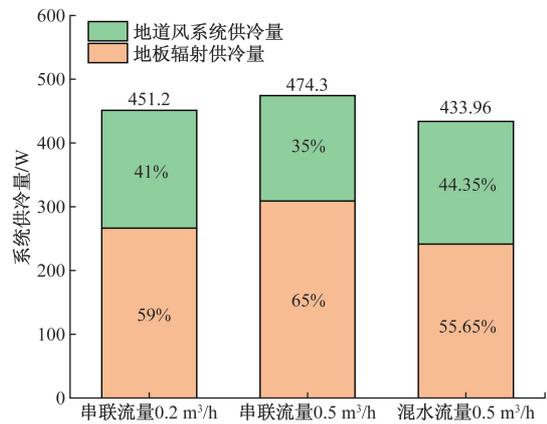


图 7 不同流量下系统供冷量对比

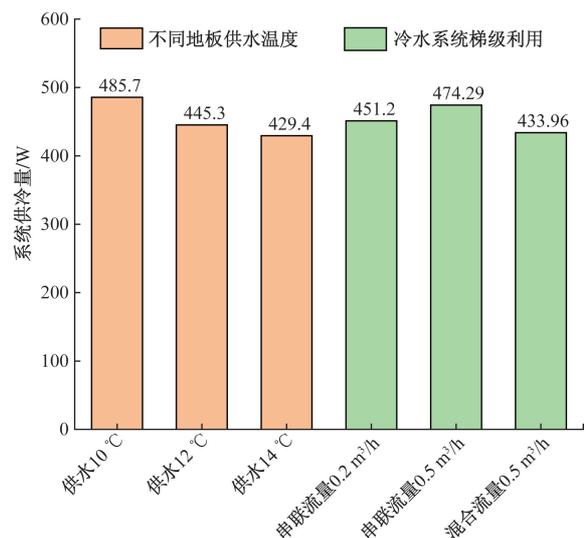


图 8 梯级利用与其他模式供冷量对比

表 4 梯级利用与其他模式能耗对比

工况	供水 10 °C	供水 12 °C	供水 14 °C	串联流量 0.2 / (m ³ ·h ⁻¹)	串联流量 0.5 / (m ³ ·h ⁻¹)	混水流量 0.5 / (m ³ ·h ⁻¹)
能耗	418	418	418	208	238	418

梯级利用模式供水温度在 12 ℃ 以上,结合地道风系统没有结露风险,且供冷量较大,供冷量随着供水流量增大而增大,在相同供冷效果下冷水串联由于只有一条水路能耗更低,地道风与地板辐射供水均为自然冷源出水,实现了冷量的逐级利用,降低了系统设备费用与环境污染,具有节能、环保的特点。

3 多目标优化手段分析最优运行参数

根据试验得到的 16 种工况记为 $A_1 \sim A_{16}$,现考虑 3 个方案属性:结露量 f_1 ,供冷量 f_2 ,能耗 f_3 。不同工况分别关于目标属性的指标值 f_{ij} 如表 5 所示,通过如下公式作无量纲的标准化处理得到变换后的指标值如表 6 所示。设结露量、供冷量、能耗各自的权系数向量为 $\omega=(0.2,0.5,0.3)$,通过线性加权和评价函数式(3)~式(4)和式(3)~式(5)将多目标问题转换为单目标问题,最终不同工况的评价值如表 7 所示。

通过多目标优化方法对不同工况进行分析,以不结露、供冷量大、能耗低为目标,根据评价值的大小来区分工况的优劣性,评价值越低越符合目标。若只选取一个最优工况,则最优工况为工况 15;若以评价值 35 为界限求得多个优选工况,再按照评价值的大小确定这些工况的优选性,其先后排列顺序为工况 15>工况 14>工况 11>工况 1,其中系统冷水梯级利用串联方式具有一定的优势,在实际情况中可灵活选用。

最优工况 15 是系统冷水梯级利用过程中表冷器回水直接作为地板供水的方式,表冷器供水温度为 7 ℃,表冷器和地板辐射盘管的供水流量一致均为 0.5 m³/h,地道风系统中送风量为 45 m³/h,其中新风量为 30 m³/h,回风量为 15 m³/h。在该工况下送风在经过除湿处理后地面未结露,房间供冷量为 474.3 W,系统能耗为 238 W,系统在该工况下供冷量较高,由于采用梯级利用方式系统能耗较低。优选工况中工况 14 和工况 15 为系统冷水梯级利用方式,其余工况为系统在新风和回风除湿情况下的方式,工况 9 和工况 11 为相同地板供水温度下,不同送风量的情况;工况 12 和工况 13 为相同送风量,不同地板供水温度的情况。

4 结论

本文从预防结露、提高供冷量、降低能耗的角度出发,搭建地板辐射与地道风协同供冷试验台,分析系统在不同供水温度、加湿量、送风状态下的运行特性变化,并针对性结合冷水梯级利用模式,用多目标函数手段分析最优工况,从而降低系统能耗,得出结论如下。

表 5 不同工况下目标属性指标值

f_{ij}	f_1	f_2	f_3
A_1	0.05	334.5	200
A_2	0.07	334.5	200
A_3	0.09	334.5	200
A_4	0.08	282.5	200
A_5	0.00	275.8	200
A_6	0.00	228.6	200
A_7	1.58	275.8	237
A_8	6.74	275.8	260
A_9	0.00	458.9	386
A_{10}	0.00	429.4	418
A_{11}	0.00	485.3	446
A_{12}	0.00	445.3	446
A_{13}	0.28	485.7	446
A_{14}	0.00	451.2	208
A_{15}	0.00	474.3	238
A_{16}	0.00	434.0	418

表 6 不同工况下目标属性指标值变换

a_{ij}	f_1	f_2	f_3
A_1	1.73	72.26	1.00
A_2	2.03	72.26	1.00
A_3	2.32	72.26	1.00
A_4	2.18	96.83	1.00
A_5	1.00	100.00	1.00
A_6	1.00	122.30	1.00
A_7	24.21	100.00	15.89
A_8	100.00	100.00	25.15
A_9	1.00	13.48	75.85
A_{10}	1.00	27.42	88.73
A_{11}	1.00	1.00	100.00
A_{12}	1.00	19.90	100.00
A_{13}	5.11	0.81	100.00
A_{14}	1.00	17.11	4.22
A_{15}	1.00	6.19	16.29
A_{16}	1.00	25.24	88.73

表 7 不同工况评价值

工况	评价值
A_1	36.78
A_2	36.83
A_3	36.89
A_4	49.15
A_5	50.50
A_6	61.65
A_7	59.61
A_8	77.54
A_9	29.69
A_{10}	40.53
A_{11}	30.70
A_{12}	40.15
A_{13}	31.43
A_{14}	10.02
A_{15}	8.19
A_{16}	39.44

(1)随着加湿量的增加,地面总结露量也逐渐增加,室内加湿量与地面总结露量呈正相关。回风不除湿的情况下各区域都有明显的结露现象,回风量为 $60\text{ m}^3/\text{h}$ 时各区域结露量均明显高于回风量为 $30\text{ m}^3/\text{h}$ 时,因此在利用地板辐射协同地道风供冷时必须对送风进行除湿处理且回风量不宜过大,送风除湿之后室内无结露风险。

(2)室内送风能明显提高室内供冷效果,但是送风系统除湿会提高系统能耗。冷水梯级利用模式由于供水温度在 $12\text{ }^\circ\text{C}$ 以上并且结合送风不会发生结露现象,串联供水由于只有一条冷冻水路,相同供冷效果下冷水串联能耗比混水供水能耗更低。以不结露、供冷量大、能耗低为目标,多目标优化分析可得串联供水 $0.5\text{ m}^3/\text{h}$,送风量 $45\text{ m}^3/\text{h}$ 为最优工况,供冷量为 474.3 W ,系统能耗为 238 W ,无结露现象。

(3)地板辐射供冷系统协同地道风的冷热源均为自然冷源,串联供水利用同一条自然冷源出水为地道风系统以及辐射末端供水,实现了冷量的逐级利用,降低了系统设备费用与环境污染,具有节能、环保的特点,值得推广应用。

参考文献

- [1] 曾鸣,王永利,张硕,等.“十四五”能源规划与“30·60”双碳目标实现过程中的12个关键问题[J]. 中国电力企业管理, 2021, 622(1): 41-43.
- [2] 赵英博,章文杰,贡桐丹,等. 送风方式对辐射供冷系统防结露效果的模拟研究[J]. 制冷与空调(四川), 2022, 36(2): 203-208.
- [3] 陈伟,涂敏,张子文,等. 含密封空气层冷辐射板的换热分析与实验测试[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(15): 6368-6377.
- [4] 代雪梅,苏华. 地道风系统对室内热环境影响研究综述[J]. 山西建筑, 2022, 48(1): 156-159.
- [5] 吴琪珑,田国良,马振杰,等. 北方夏季住宅小区集中地板供冷的实验研究[J]. 建筑节能(中英文), 2022, 50(5): 37-40.
- [6] 宋守杰,任婧,苏蒙,等. 地板辐射供冷系统优化控制模拟研究[J]. 山东建筑大学学报, 2022, 37(3): 60-67.
- [7] 李琳,田琦,李勇刚,等. 模块化调温节能装饰墙板辐射供冷的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(15): 143-148.
- [8] KHAN R J, BHUIYAN M Z H, AHMED DH. Investigation of heat transfer of a building wall in the presence of phase change material (PCM)[J]. Energy and Built Environment, 2020, 1(2): 199-206.
- [9] JIN W, JING J, JIA L, et al. The dynamic effect of supply water flow regulation on surface temperature changes of radiant ceiling panel for cooling operation[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 52.
- [10] JIN W, MA J, JIA L, et al. Dynamic variation of surface temperatures on the radiant ceiling cooling panel based on the different supply water temperature adjustments[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 53.
- [11] 赵建会,朱彬,崔保天,等. 新型复合空调系统的结露情况及舒适性数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(27): 11031-11037.
- [12] 苏蒙,刘吉营,周世玉,等. 辐射供冷和置换通风系统地板防结露数值模拟[J]. 山东建筑大学学报, 2022, 37(2): 49-59.
- [13] 刘衍,李晨,张辰,等. 我国空气源热泵地板辐射系统分区研究[J]. 暖通空调, 2021(1): 114-120.
- [14] 刘希臣,王景昱. 不同气候区新风地道预处理节能潜力分析[J]. 制冷, 2020, 39(3): 12-17.
- [15] 朱赤,张小松,徐国英,等. 诱导送风与辐射复合空调夏季运行特性及系统能效分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021(6): 1779-1788.
- [16] LI J X, CARLOS J B, JOHN K C, et al. Evaluating the energy-saving potential of earth-air heat exchanger (EAHX) for passivhaus standard buildings in different climates in China[J]. Energy and Buildings, 2023, 288, 113005.
- [17] SAKHRI, YOUNES M, HOUARI A. Experimental investigation of the performance of earth-to-air heat exchangers in arid environments[J]. Journal of Arid Environments, 2020, 180, 104215.
- [18] 刘春阳. 西北寒冷地区地道风系统性能实测及配置优化研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
- [19] GUO X, Wei H B, He X, et al. Experimental evaluation of an earth-to-air heat exchanger and air source heat pump hybrid indoor air conditioning system[J]. Energy and Buildings, 2022, 256, 111752.
- [20] 刘阳,孙金栋,张哲宁,等. 地道风系统与换热新风装置的耦合应用研究[J]. 暖通空调, 2022, 52(9): 129-133.
- [21] 陈旭,孙金栋,张雨铭,等. 严寒地区被动式建筑地道风系统应用分析[J]. 建筑热能通风空调, 2021, 40(4): 77-80.
- [22] 赵忠超,蒋朋朋,赵凯,等. 地板辐射供暖室内热舒适性分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(1): 321-328.
- [23] 刘继新,杨宋瑞雪,江灏,等. 航站楼离港资源配置优化方法研究综述[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(5): 1812-1822.

Experimental Study on the Utilization of Cold Water Cascade by Floor Radiation and Tunnel Air Cooling System

ZHANG Huabei^{1,2}, SONG Ziyi^{2,3}, CHEN Xiangyan^{1,2}, REN Yuan^{2,3}, SONG Wei^{2,3}

(1. Jiangsu Shengshi Energy-Saving Technology Co. Ltd., Lianyungang 222000, Jiangsu, China;

2. Geothermal Energy Development Engineering Technology Research Center of Jiangsu Province, Lianyungang 222000, Jiangsu, China;

3. School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100000, China)

Abstract: The floor radiant cooling system has the advantages of good room temperature uniformity, low noise, low operating cost and high comfort, but from the existing research, the contradiction between the cooling capacity and condensation of the floor radiant cooling system greatly affects the promotion and application of the system. By building a floor radiation synergistic tunnel wind cooling test bench based on virtual natural cooling source, the condensation characteristics, cooling characteristics and energy consumption characteristics of floor radiation synergistic tunnel wind system under the two modes of cold water tandem and mixed water from the perspective of cold water cascade utilization was explored, and the energy-saving principle of cold water cascade utilization was analyzed. The results show that the cold water cascade utilization mode can obtain a series water supply of 0.5 m³/h, an air supply volume of 45 m³/h as the optimal working condition, a cooling capacity of 474.3 W and a system energy consumption of 238 W due to the water supply temperature above 12 °C and the absence of condensation in combination with tunnel wind.

Keywords: tunnel wind; radiant floor cooling; cold water cascade utilization; multi-objective optimization