“温湿度独立控制深井降温系统”科研成果转化教学案例—《暖通空调》

一、科研项目基本信息介绍

项目教学团队由课题负责人陈柳、薛韩玲、张亚平、郇超、赵玉娇、姚红霞组成，团队主持各类科研项目 15 项。其中,国家自然科学基金项目 4 项，省部级项目 3 项，各类企业合作横向项目 8 项，团队成员均活跃在教学科研的第一线，具有丰富的教学经验，这为深化和拓展《暖通空调》案例库奠定了坚实的研究基础。承担国家及省部级项目详细信息见表 1。

表 1 暖通空调课程教学团队承担科研项目

项目名称	项目来源	负责人	起止时间
温湿度独立控制深井降温系统研究	国家自然科学基金	陈柳	2016.01～2018.12
热管抑制爆炸火焰和压力波的耦合热效应研究	国家自然科学基金	张亚平	2017.01～2019.12
矿山管群换热充填体间歇采热中热传递机理与优化调控研究	国家自然科学基金	郇超	2021.01～2023.12
基于相变蓄热充填体的太阳能-地热能跨季节热运移及优化调控研究	国家自然科学基金	赵玉娇	2022.01～2024.12
基于油烟颗粒羽流扩散机理的厨房局部排风罩设计计算方法研究	陕西省科技厅	赵玉娇	2020.01～2021.12
一村一厂式新型太阳能-空气源热泵联合花椒自动烘干机组研发	陕西省科技厅	薛韩玲	2019.01～2020.12
基于管道网络模型的矿床-地热协同开采机理与评价机制研究	陕西省教育厅	赵玉娇	2019.01～2020.12

二、科研促进教学案例

（一）案例 1

1. 温湿度独立控制系统应用于深井降温

针对传统矿井降温系统能耗大和工作面湿度大的问题，结合深井特殊环境及要求，研制出温湿度独立控制新型深井降温系统。系统由空气处理系统、充填采热系统及矿井水系统 3 个子系统组成。充填采热系统为空气处理系统中的转轮除湿机提供再生热源。矿井水系统用于给空气处理系统的表面式冷却器提供冷源。研究了系统的工作原理、热力学过程、热力计算和热性能分析。

温湿度独立控制深井降温系统工作原理如图 1 所示，矿井要处理的空气 A 在风机的作用下，进入一级表面式冷却器，与一级表面式冷却器中的冷水(来自矿井水系统) 进行间接热湿交换，由于矿井空气 A 是高温高湿空气，露点温度较高，空气经一级表面式冷却器完成冷却减湿的空气处理过程，冷却减湿后的空气 B 进入一级转轮除湿机进行升温减湿处理，经一级转轮除湿机减湿后的空气 C 进二级表面式冷却器与二级表面式冷却器中的冷水(来自矿井水系统) 进行间接热湿交换，由于空气 C 露点温度较低，空气被等湿冷却，等湿冷却后的空气 D 进入二级转轮除湿机进行升温减湿处理，经二级转轮除湿机减湿后的空气 E

进入三级表面式冷却器，在三级表面式冷却器中，空气与三级表面式冷却器内的冷水(来自矿井水系统) 进行间接热湿交换，由于空气露点温度较低，空气被等温减湿，处理后的空气为低温低湿的空气 F，通过风筒或直接送入的方式进入工作面。再生空气处理过程为: 在转轮除湿机的电机的带动下，转轮除湿区完成除湿后缓慢转动到转轮再生区，周围矿井风流在再生风机的作用下，通过空气－水换热器(热水来自充填采热系统) 加热空气，加热后的空气通过辅助电加热器进一步加热，达到转轮除湿机所需再生温度，加热后的空气将转轮再生区的水蒸气分离出来，再生后的空气排至回风巷或废旧巷道。通过以上分析，绘制空气处理过程的温湿图如图 2 所示，对应的状态点如图 1 所示，降温系统设在工作面附近。在温湿图中，比较降温系统前的空气状态 A 和降温系统后的空气状态 F，温度和含湿量都有所降低。

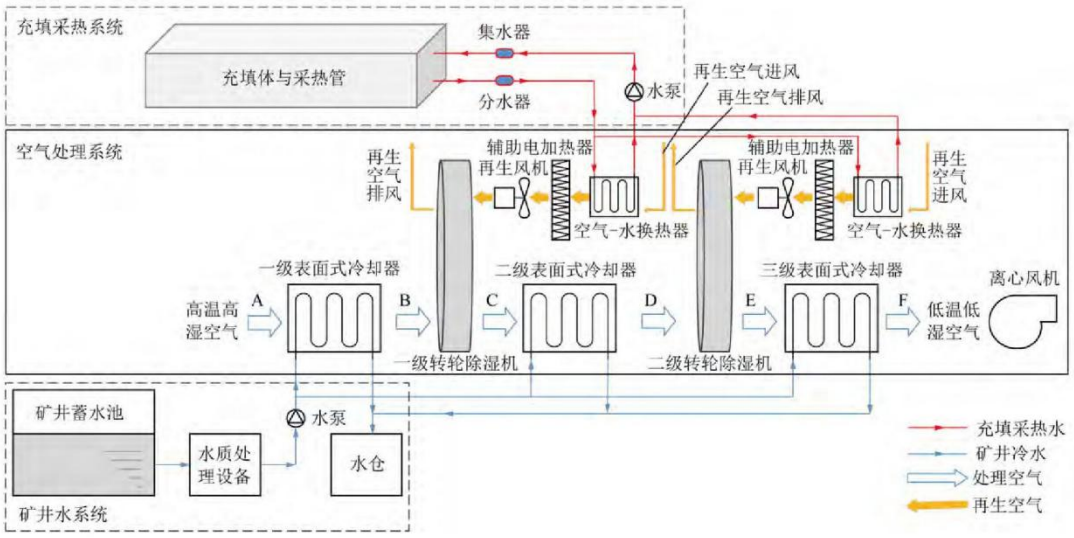


图 1 温湿度独立控制深井降温系统工作原理

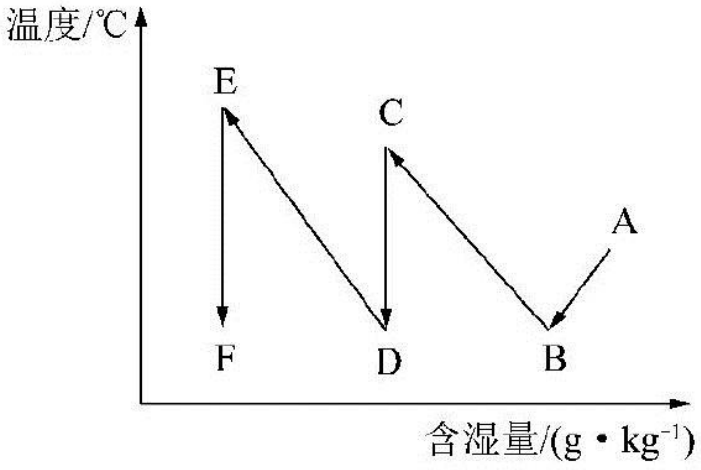


图 2 温湿度独立控制深井降温系统焓湿图

以某铜矿－760 m 中段 56 号－12 采场为例进行温湿度独立控制深井降温系统的热力计算，该铜矿采用充填法来控制地压，相关参数如下：风量 G 为 16.39 m^3/ s; 大气压 B 为 110.262 kPa；降温前的进风空气参数 A：干球温度 t_A 为 32.4 ℃，相对湿度φ_A 为 91.5% 。

降温系统设置在采场附近。矿区可获得的低温矿井水温度 t_w 为 18 ℃。表面式冷却器选择 JW 型，转轮除湿机选用硅胶型，处理空气与再生风量比选用 1：1，再生温度选择 80 ℃，即矿井风流先通过空气－水换热器进行加热，再通过辅助电加热器加热至 80 ℃。热力计算结果表明：降温系统可实现的降温温差为 8.9 ℃，相对湿度降低了 52.9% ，充分实现了降温系统的深度降温除湿功能，并与传统深井降温系统相比，湿度更低，舒适性更优。

2. 案例实际应用效果简介

（1）掌握了热湿交换设备的热力计算方法；

（2）掌握了集中式空气处理设备的空气处理方案的设计方法；

（3）特殊环境下，学习如何应用天然冷源及可再生能源于空气处理方案；

（4）本案例长期用于《暖通空调》课程的理论教学，具有技术前沿性、综合性和实用性特点，能够支撑学生创新能力和知识综合应用能力的培养，启发学生认识并探索解决复杂地下空间环境营造问题。

3. 支撑材料

（1）“温湿度独立控制深井降温系统”国家自然科学基金结题报告

（2） 专著

[1] 陈柳. 深井降温技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2018

（3）已发表的论文

[1] 陈柳.温湿度独立控制系统应用于深井降温[J].金属矿山,2014,(10):133-137.

[2] 陈柳,杨岚.深井降温技术研究述评[J].煤炭技术,2016,35(01):152-154.

[3] 陈柳,刘浪,张波等.基于蓄热充填体深井吸附降温机理[J].煤炭学报,2018,43(02):483-489.

（4）已授权专利

[1] 陈柳.一种矿用空气冷却设备及冷却方法: CN201610069432.7[P]. 2017-07-11.

[2] 陈柳.矿井涌水冷、热利用的深井降温除湿系统：CN201710292210.6[P]. 2017-08-04.

[3] 刘浪;孙伟博;张波;张小艳;陈柳;王美;王燕;邱华富;王湃;秦学斌;辛杰;方治宇;朱超. 一种利用深井地热的矿井降温系统及方法：CN201710524548.X[P]. 2017-11-10.

（二）案例 2

1. 混合式矿用空冷器热工性能

矿用混合式空冷器由喷淋装置和表面式空冷器组合而成。喷淋装置的喷淋水可采用天然冷源，一方面可承担一部分的矿井降温冷负荷，另一方面冲刷了表面式空冷器表面的大量污垢，提高了表面式空冷器的传热系数。表面式空冷器的冷冻水来自人工冷源，承担另一部分的矿井降温冷负荷。

风机将矿井空气吸入，矿井空气首先与喷淋水直接接触时，对风流进行了第一级冷却（实现冷却减湿的空气处理过程）；第一级冷却后的空气再与表面式空冷器管内冷冻水进行间接接触，将风流进行了深度冷却（实现冷却减湿的空气处理过程），到达混合式空冷器的终状态点，同时喷淋水不断冲刷附着在表面式空冷器管上的污垢，提高了表面式空冷器的传热效率。

矿用混合式空冷器的热工计算方法可利用喷水室和空冷器的热工计算方法，包含喷淋装置设计和空冷器设计 2 大部分设计。1）喷淋装置。进行喷淋装置热工计算的主要目的是要使所选择的喷淋装置能满足下列要求：①喷淋装置能达到的热交换效率系数 η_{p1} 应该等于空气处理过程需要的η_1；②喷淋装置能达到的接触系数η_{p2} 应该等于空气处理过程需要的 η_2；③喷淋装置喷出的水能够吸收的热量应该等于空气失去的热量。2）表面式空冷器。空冷器热工计算主要目的是使所选择的表面式空冷器能满足下列要求：①该空冷器能达到的热交换效率系数η_{k1} 应该等于空气处理过程需要的η_1；②该空冷器能达到的热交换效率系数 η_{k2} 应该等于空气处理过程需要的η_2；③该空冷器能吸收的热量 Q 应该等于空气放出的热量。

某矿井被处理的空气量 G 为 100000m^3/h，当地大气压力为 101325 Pa，空气的初参数为 t_1=35 ℃ ，i_1=90.5kJ/kg，t_{s1}=28.3℃，空气的终参数为 t_2=20 ℃，i_2=55.8 kJ/kg，t_{s2}=19.6℃，矿井地下水水温为 20℃，采用矿用混合式空冷器，对矿用混合式空冷器进行热工性能计算。热工计算表明，矿用混合式空冷器能较好地应用于矿井降温系统，与传统空冷器系统相比，可有效冲刷空冷器表面的污垢，从而提高空冷器的传热系数，并可有效利用天然冷源和高温冷水机组，节约大量的降温能耗。

2. 案例实际应用效果简介

（1）掌握了喷水室的热工计算方法；

（2）掌握了表面式空冷器的热工计算方法；

（3）启发了学生对天然冷源和人工冷源结合应用，在满足环境控制要求的前提下，应最大程度降低能耗。

3. 支撑材料

（1）“温湿度独立控制深井降温系统”国家自然科学基金结题报告

（2） 专著

[1] 陈柳. 深井降温技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2018

（3）已发表的论文

[1] 陈柳,杨岚.深井降温技术研究述评[J].煤炭技术,2016,35(01):152-154.

[2] 陈柳,姚青利.矿用混合式空冷器的研制[J].煤矿机械,2016,37(08):61-62.

[3] 陈柳,姚青利.矿用混合式空冷器的热工计算[J].煤矿安全,2017,48(05):111-113+116.

（4）已授权专利

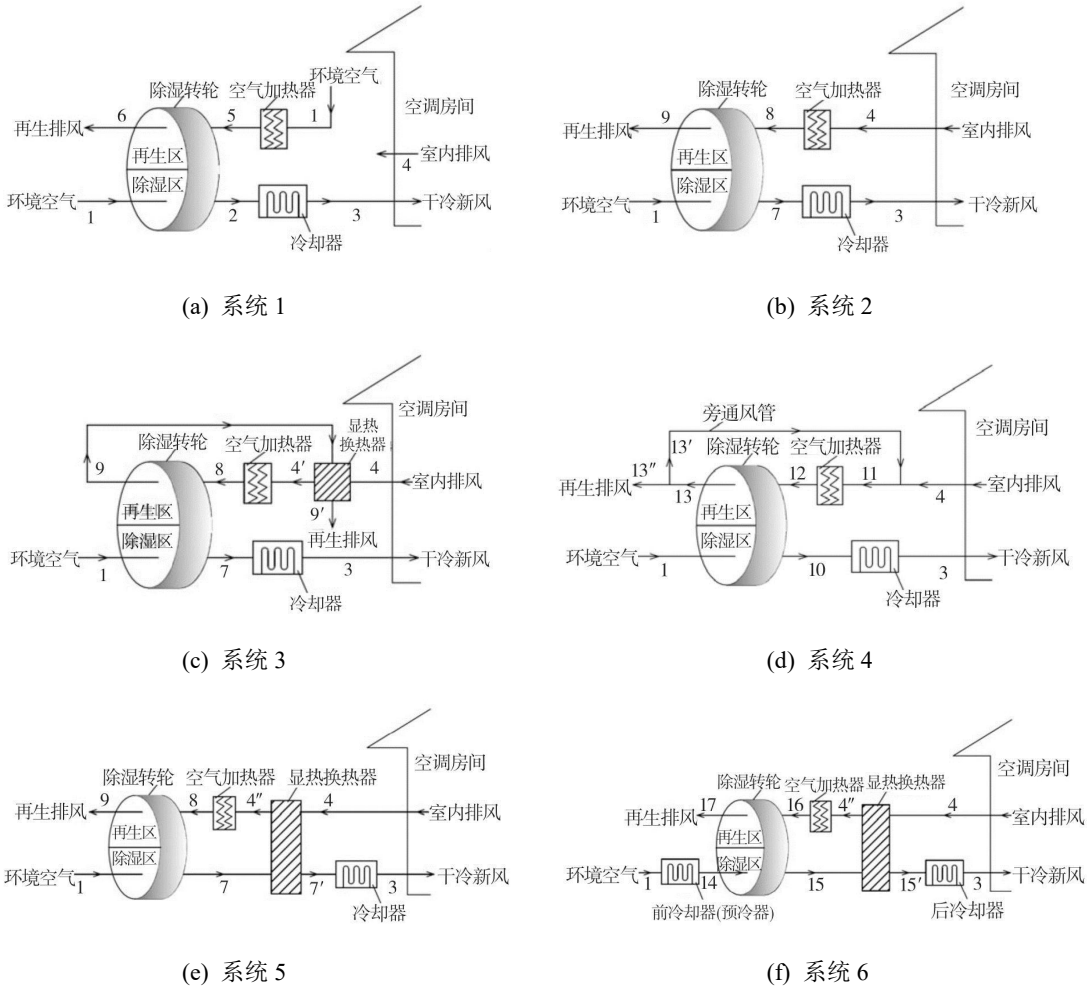
[1] 陈柳.一种矿用空气冷却设备及冷却方法: CN201610069432.7[P]. 2017-07-11.

[2] 陈柳.矿井涌水冷、热利用的深井降温除湿系统：CN201710292210.6[P]. 2017-08-04.

（三）案例 3

1．转轮除湿空调系统热力循环过程优化

转轮除湿复合式空调系统通常由除湿转轮、空气冷却器和空气加热器组成。除湿转轮承担处理空气的潜热负荷部分，空气冷却器承担处理空气的显热负荷部分。空气加热器通过加热再生空气来实现对除湿转轮的脱附干燥，使较湿润的干燥剂脱附表面水份，恢复除湿能力。空气冷却器可以是表冷器、换热器或直接/间接蒸发冷却器，采用的冷媒可以是高温冷媒，如深井水、高温冷水机组供水等; 空气加热器使用的热源可以是电加热，或者是太阳能、工业余热及废热等低品位能源。将转轮除湿机和不同设备相结合的 6 种转轮除湿空调系统进行能耗分析，在此基础上，提出转轮除湿空调系统热力系统优化措施。6 种转轮除湿空调系统原理图见图 3 所示。



(a) 系统 1　　(b) 系统 2

(c) 系统 3　　(d) 系统 4

(e) 系统 5　　(f) 系统 6

图 3 转轮除湿空调系统原理图

为比较六种转轮除湿空调系统的能耗，以典型夏季工况为例(室外干球温度为 35.1℃，室外相对湿度为 48.0%；室内设计干球温度为 26℃，室内设计相对湿度为 55%)。空调区域所需的送风参数为:送风干球温度 21℃，送风相对湿度 55%，送风量 1kg /s。设备参数为:转轮除湿空调系统用高温冷水机组 *COP* 取 8.9，显热换热器换热效率η取 0.8，热能与电能间转化系数ζ取 0.3，再生风量与处理风量比为 1: 1。计算分析结果表明：室内排风回收措施和吸附热回收措施均能使系统有效节能，预冷处理可以有效降低再生温度。

2. 案例实际应用效果简介

（1）掌握了转轮除湿空调系统的热力优化方法；

（2）掌握常用空气处理设备传热传质数学模型的建立方法；

（3）训练了学生应用空气处理原理和方法解决复杂工程问题，促进学生从更宽广的领域中对比分析暖通空调关键技术及设备的发展趋势，进一步提升学生的科学素养及创新思维能力。

3. 支撑材料

（1）“温湿度独立控制深井降温系统”国家自然科学基金结题报告

（2） 专著

[1] 陈柳. 深井降温技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2018

（3）已发表的论文

[1] Liu Chen, Zhoulei Yu. Research of a rotary desiccant wheel based hybrid air conditioning system with natural cold source[J]. Procedia Engineering,2017,205:492-496.

[2] L. Chen, S. H. Chen, L. Liu, B. Zhang. Experimental investigation of precooling desiccant-wheel air-conditioning system in a high-temperature and high-humidity environment[J]. International Journal of Refrigeration,2018,95(11):83-92.

[3] Liu Chen,Wenjie Deng.Experimental study on desiccant evaporative combined chilled air/chilled water air conditioning systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2021,199(11): 117534.

[4] Liu Chen,Yikun Tan. The performance of a desiccant wheel air conditioning system with high-temperature chilled water from natural cold source[J].Renewable energy, 2020,146(02):2142-2157.

[5] 陈思豪,陈柳.转轮除湿空调系统能耗分析及节能措施研究[J].低温与超导, 2018,46(04):72-76.

[6] 陈思豪,陈柳,高帅帅.转轮除湿复合式空调系统节能措施研究[J].低温与超导, 2018,46(08):58-65.

（4）已授权专利

[1] 陈柳,谭益坤,陈思豪,刘浪,张波,张小艳,王美,赵玉娇,郇超,秦学斌,邱华富.一种低温低湿驱动的双转轮除湿空调系统及其送风方法：CN201811015671.X[P]. 2019-01-04.

[2] 陈柳,石全成,陈闯,杨发妹,邓文杰,褚于颉,封媛.多联机型固体除湿多功能空调系统及其应用方法：CN202110364310.1[P]. 2021-06-25.

（四）案例 4

1．相变蓄冷单元蓄冷及释冷特性

为实现节能降耗，缓和电力供应紧张及电力供求失衡，我国采取了一系列调控手段，蓄冷空调能有效缩减电网容量。蓄冷技术按传统水、冰空调蓄冷技术，制冷机组在蓄冷制冰时蒸发温度比常规非蓄冷空调系统低 8～10℃，不仅限制了蓄冷空调系统可采用的制冷机类型，还造成制冷机 *COP* 下降，相变蓄冷材料的储能密度是同体积显热储能物质的 5～14 倍，可根据空调系统特性选取适宜的相变温度，直接采用常规单工况制冷机蓄冷，可获得较高的蒸发度，提高系统效率。同心套管相变蓄冷单元，采用优态盐作为蓄冷介质，相变蓄冷单元结构原理图见图 4。

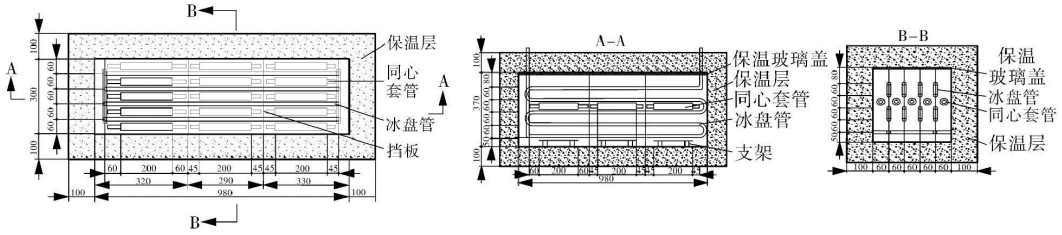


图 4 相变蓄冷单元结构原理图

相变同心套管蓄冷单元的优点在于: 蓄冷、释冷时，套管内外同时进行，蓄冷介质蓄冷、释冷速度快、相变比较均匀，克服了单一的内或外融冰方式的缺点。通过实验研究制冷剂的蒸发温度对相变同心套管蓄冷单元蓄冷特性的影响及载冷剂的温度和流量对释冷特性的影响。实验原理图见图 5 所示。实验系统由制冷系统，蓄冷系统、测试及控制系统组成。

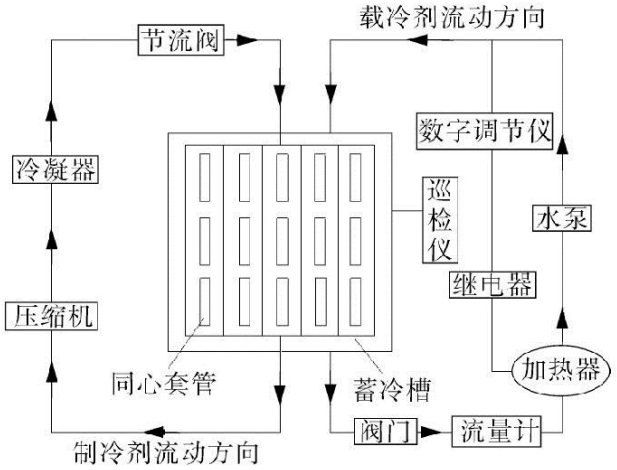


图 5 相变蓄冷单元蓄冷及释冷实验原理图

同心套管中的共晶盐蓄冷系统经历了 3 个蓄冷阶段: 液相显热蓄冷阶段，潜热蓄冷阶段；固相显热蓄冷阶段; 释冷过程也分为 3 个阶段: 固相显热释冷阶段，潜热、显热释冷阶段和液相显热释冷阶段。蓄冷介质的相变温度为 8℃左右。封装优态盐同心套管相变储冷单元具有优良的蓄、释冷特性。制冷剂的蒸发温度对蓄冷的影响较大，制冷剂的蒸发温度越低，结冰越快，结冰率越大，达到同样的结冰率需要的时间也越短。但载冷剂温度越低意味着蒸发温度也越低，制冷效率 *COP* 也会降低。载冷剂的进口温度对蓄冷和释冷过程的影响较大。相比之下载冷剂的流量对蓄冷和释冷过程的影响较小。

2. 案例实际应用效果简介

（1）了解冰蓄冷空调技术的动态发展趋势；

（2）掌握蓄冷单元的强化传热的设计方法；

（3）掌握冰蓄冷空调技术的运行策略及调控手段；

（4）实验训练了学生对冰蓄冷单元节能环保新设备和新工艺有感性的认知，使学生对制冷机组、蓄冷单元、自动控制系统、数据采集系统有深刻的理解和记忆，并体会专业使命感，形成正确的工程伦理观念。

3. 支撑材料

（1）“温湿度独立控制深井降温系统”国家自然科学基金结题报告

（2） 专著

[1] 陈柳. 深井降温技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2018

（3）已发表的论文

[1] 姬长发,李生金,陈柳等.封装优态盐同心套管储冷特性试验研究[J].流体机械,2015,43(12):50-54.

[2] 姬长发,王展荣,姬晨阳等.流速对盘管内冰浆流动及换热特性的影响研究[J].制冷技术,2019,39(01):67-71.

（五）案例 5

1. 热泵-太阳能联合干燥系统

热泵干燥一般属于热风低温干燥，干燥温度主要集中在 40～80℃，太阳能干燥比热泵干燥更节能、更环保，但由于太阳能的间歇性、随时间的变化性，导致太阳能干燥系统不稳定。热泵－太阳能联合干燥更具优势，能大幅提高经济效益，且能缩短干燥时间。热泵－太阳能联合干燥系统由干燥房、热泵系统、太阳能系统以及控制系统组成。干燥房采用特别材料建造，其内分为 2 个部分，中间用回风隔板隔开，一部分为物料室，另一部分为加热室。热泵系统由蒸发器、冷凝器、压缩机、节流阀、送风管道、制冷剂流管、制冷剂及风机组成; 太阳能系统由真空管集热器、风管等组成; 控制系统由温度传感器、湿度传感器、数据总线、计算机组成。系统使用循环风，整个风循环系统是一个封闭循环系统，不再引入新风，减少因排风带走热量的损失。

干燥过程热风加热热量由太阳能和热泵提供: 热泵干燥是根据逆卡诺循环，制冷剂在压缩机的动力作用下在整个热泵系统循环，吸收空气的低品位热能在压缩机做功的条件下，产生高品位热能并将热量输送至干燥房，在相关设备的工作下实现热质交换，达到干燥效果; 太阳能利用集热器收集热量，这种能量供应方式清洁，所以当太阳充足时，尽可能多地利用，但受天气影响，所以太阳能只是作为辅助设备。太阳能通过集热器收集，并通过集热器与热管换热，加热回风温度。

干燥过程开始时，打开所有风机，让干燥用的循环风在整个系统循环，再开启热泵，空气被加热成为高温空气。通过总进风管送入干燥房，并通过支管送风到物料车底部，干燥物料。干燥房从上侧排出低温高湿的气体，气体首先来到蒸发器，蒸发器制冷剂要吸热，故空气温度会降低，当降低到机器露点一下就会结露，析出水分达到减湿的效果。空气流出蒸发器，在三通换向阀处根据集热器温度传感器的数据进行空气流向选择: (1) 当数据大于蒸发器出口温度则流向太阳能集热器，经真空集热管换热继而流向热泵冷凝器; (2) 反之则直接流向热泵冷凝器; 在热泵冷凝器吸收热量变为高温低湿的空气，并在风冷冷凝器风机作用下送入干燥室，如此循环往复，在系统设备配合作用下达到加热空气、干燥物料的效果。

在整个系统多处安装传感器和自动控制部件，并反馈到计算机，并设计程序实现全系统自动控制。换向阀根据集热器温度值选择空气流向，干燥房内也设置有温度、湿度传感器，当温度过高或过低可控制热泵的工作情况来控制温度，当湿度达到一定要求系统自动停止。

2. 案例实际应用效果简介

（1）掌握干燥室气流组织设计方法；

（2）掌握复杂干燥系统设计及优化方法；

（3）掌握双热源干燥系统的自动控制设计方案确定；

（4）干燥工业能耗较高，通过案例引入，让学生更加关注能源问题，深刻理解干燥节能的必要性，提倡低碳生产。

3. 支撑材料

（1）“一村一厂式新型太阳能-空气源热泵联合花椒自动烘干机组研发”陕西省科技厅重点项目结题报告

（2）已发表的论文

[1] 李江波,薛韩玲,陈柳.热泵-太阳能花椒干燥系统的设计与数值模拟[J].江苏农业科学,2019,47(14):251-255.
[2] 薛韩玲,朱曌.花椒烘干房温度场模拟及优化研究[J].节能,2019,38(05):67-72.
[3] 薛韩玲,廖帮海,拓雯等.基于湿度控制的大红袍花椒热风干燥动力学与品质研究[J].食品与发酵工业,2023,49(22):149-155.
[4] 薛韩玲,闫钰亭.花椒红外-热风联合干燥动力学及传质特性[J].农机化研究,2023,45(09):209-216.
[5] 薛韩玲,王楠,牛婷婷等.大红袍花椒对流-辐射并联干燥 BP 神经网络模拟与品质研究[J/OL].食品与发酵工业,1-14[2023-12-18]

（3）已授权专利

[1] 薛韩玲,吴业豪,万学宁,陈柳. 一种太阳能辅助热泵干燥系统：CN201910464641.5 [P]. 2019-08-20.
[2] 牛婷婷,王楠,陆泽华,薛韩玲. 一种基于 PLC 的多能源互补干燥系统及控制方法：CN202211175226.6 [P]. 2022-12-23.

（六）案例 6

1. 多能源互补供暖节能系统

随着国家新农村建设的稳步推进，农村住宅的能源利用效率并没有提高，而城镇建筑的能源利用效率逐年增加。北方农村住宅的传统采暖方式，能维持基本的室内热环境要求，但室内空气品质差，室外环境污染严重，同时较低的热效率造成大量能源浪费。因此农村住宅急需新型的采暖方式。空气源热泵和太阳能供暖受环境限制，生物质能具有灵活的特点，多种能源可以发挥其各自的优势，实现优势互补。农村住宅太阳能-空气源热泵-生物质能多能源互补供暖系统原理图如图 6 所示，系统末端采用辐射板方式。

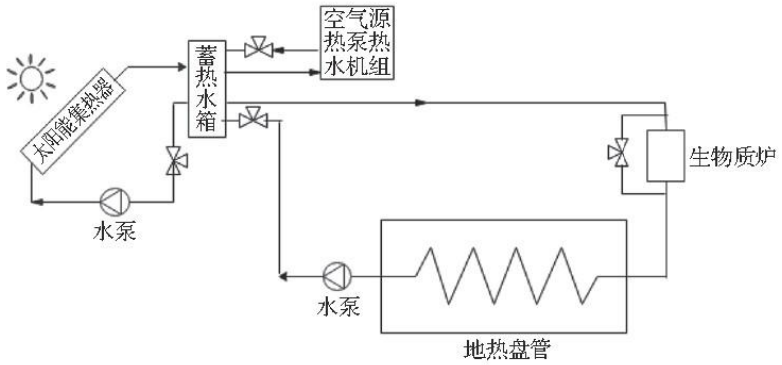


图 6 农村住宅太阳能-空气源热泵-生物质能多能源互补供暖系统原理图

多能源互补供暖系统的运行模式为：太阳能应优先运行，并设计储热水箱，太阳能不足时考虑空气源热泵，当空气源热泵能效较低时，考虑生物质能做辅助热源，该系统可同时在夏季和过渡季节制备生活热水。运行模式为：（1）太阳能热水系统能够满足用户供暖需求时，热泵系统关闭，生物质锅炉不运行，太阳能集热系统承担系统全部负荷；（2）当太阳能不足时，空气源热泵能效高时，采用太阳能和空气源热泵联合运行，生物质锅炉不运行；（3）当太阳能不足、空气源热泵能效较低时，热泵系统开启，生物质锅炉运行。

应用 TRNSYS 软件对典型农村住宅整个供暖季逐时采暖负荷进行模拟。其负荷计算模型如图 7 所示。应用 TRNSYS 软件对提出的农村住宅多能源互补供暖系统进行仿真模拟，建立包括太阳能集热器、热水循环泵、生物质锅炉、空气源热泵、蓄热水箱等部件在内模型部件。太阳能-空气源热泵-生物质能多能源互补供暖系统仿真模型图如图 8 所示。以典型农村建筑为例，计算了采用太阳能系统供热的西安地区农村建筑采暖期太阳能贡献率高达 42.2%。

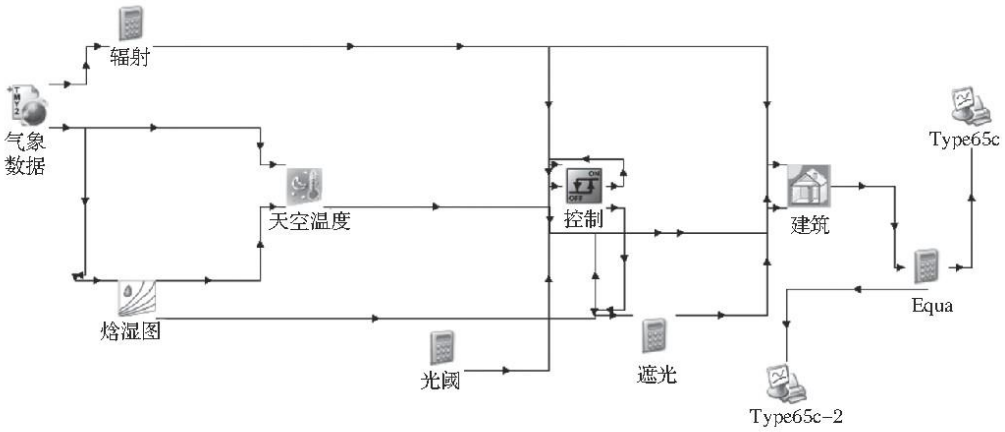


图 7 建筑负荷模拟模型图

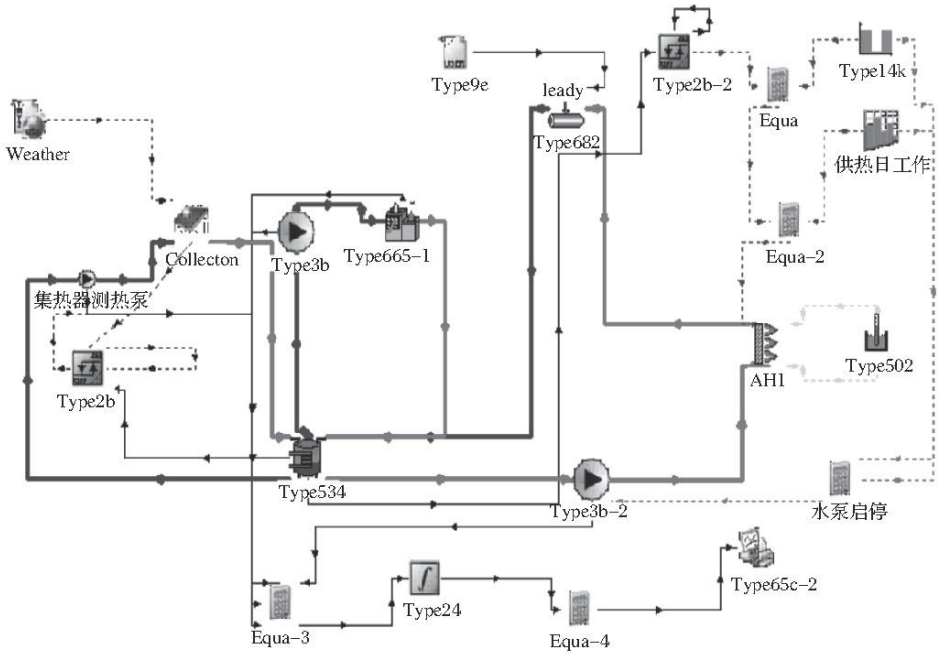


图 8 太阳能-空气源热泵-生物质能多能源互补供暖系统仿真模型图

2. 案例实际应用效果简介

（1）掌握低温地板辐射供暖的设计方法及关键技术；

（2）掌握闭式热水供热系统外网辐射末端的连接形式及调控方法；

（3）掌握低温供暖辐射系统热媒多能互补方案确定及热媒参数的确定；

（4）强化学生以“舒适节能”为核心，以“清洁采暖”为方向，应用多种能源优势互补的创新性方案，在工程实践中贯彻执行节能减排的方针政策和技术路线。

3. 支撑材料

（1）已发表的论文

[1] Yi Liu, Liu Chen. Study on heat recovery air conditioning system with adsorption dehumidification by solar[C].The 11th International Symposium on Heating，Ventilation and Air Conditioning, 2019, 913-921.

[2] 陈思豪,陈柳.基于太阳能驱动转轮除湿的蒸发冷却冷水系统[J].低温与超导,2019,47(02):57-62.

[3] 陈闯,韩健飞,张锐等.农村住宅多能源互补供暖节能技术[J].节能,2020,39(03):49-51.

[4] 范红,陈柳.太阳能驱动转轮吸附空调系统冬季供热性能研究[J].建筑科学,2020,36(08):85-91.

（2）已授权专利

[1] 陈柳,陈闯,杨发妹,石全成,褚于颉,邓文杰.一种多能源互补的除湿转轮空调系统及其使用方法：CN 202110892752.3[P]. 2021-10-29.

（七）案例 7

1. 辐射供冷空调系统

辐射供冷是指降低围护结构内表面中一个或多个表面的温度，形成冷辐射面，依靠辐射面与人体、家具及围护结构其余表面的辐射热交换进行降温的空调末端方式。由于辐射供冷系统中辐射传热所占份额在 50%以上，当采用辐射供冷时室内作用温度可比传统空调系统降低 1~2℃。辐射空调系统集新风置换与湿度调节两大功能于一体，通过改变新风湿度来调节室内空气的湿度。辐射空调系统的温湿度可以分开独立调控，以达到最适宜的温湿度组合。

建立如图 9 所示的辐射供冷空调房间模型图。通过数值模拟研究送风参数在不同送风形式下对辐射板结露和舒适性的影响。

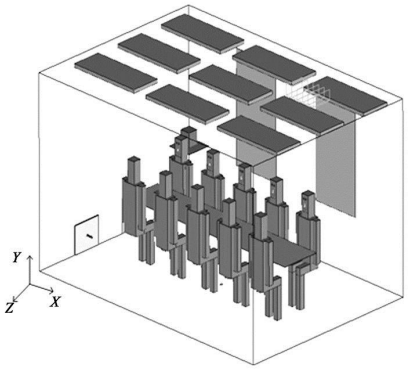


图 9 辐射供冷空调房间模型图

数值模拟了送风温度为 20℃，送风量为 300 m^3/ h，不同送风含湿量条件下，送风方式为下部送风。模拟结果表明：（1）新风依靠自身重力向地面扩散，以类似层流的状态缓慢向上移动，遇到人体等热源后，速度加速向上移动，在热源侧上方存在明显的涡旋，在近辐射板处，气流平缓的水平自左向右流动。平面处绝大部分气流沿水平方向有规律流动，靠近外墙处，受阻挡作用，气流整体方向向上；（2）送风含湿量的改变对温度场的影响很小。房间存在较明显的温度分层现象，房间下部冷而上部热；（3）送风含湿量的变化对房间湿度分布影响较大，低送风含湿量时，辐射板下方空气湿度降低，形成一层干燥的空气保护层，将辐射板与空间下部高湿气流隔开。高送风含湿量时，房间整体湿度较高，辐射板下方受人体散湿的影响，会有结露的风险。（4）当室内设计状态点温度 26℃、相对湿度 45%，辐射板下方能形成一层干燥的空气保护层，将辐射板与空间下部高湿气流隔开，房间平均 PMV-PPD 值分别为 0. 48 /22%。

2. 案例实际应用效果简介

（1）了解辐射供冷空调技术的动态发展趋势；

（2）掌握辐射供冷空调的多种新风方式对舒适性的影响；

（3）了解辐射供冷气流组织的数值模拟方法；

（4）用联系的观点分析空调系统中整体系统与部件的关系，部件与部件之间的关系，结合节能、舒适和低碳的理念，开展空调产品的创新设计。

3. 支撑材料

（1）“温湿度独立控制深井降温系统”国家自然科学基金结题报告

（2） 专著

[1] 陈柳. 深井降温技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2018

（3）已发表的论文

[1] Hong Fan, Liu Chen. Analysis of heat and mass exchange performance of enthalpy recovery wheel[C].The 11th International Symposium on Heating， Ventilation and Air Conditioning, 2019, 489-499.

[2] Yi Liu, Liu Chen. Study on heat recovery air conditioning system with adsorption dehumidification by solar[C].The 11th International Symposium on Heating， Ventilation and Air Conditioning, 2019, 913-921.

[3] 刘异,陈柳.高温热泵转轮除湿及辐射供冷空调系统性能研究[J].建筑科学,2020,36(08):92-98.

（八）案例 8

1. 诱导式重力循环柜降温除湿优化

毛细管辐射空调以其舒适、无噪音、节能等优点迅速发展，但是毛细管辐射空调在夏季单独运行时出现结露现象的缺点，限制了它的推广应用。将重力循环柜处理回风，作为补冷末端，从设备结构上进行了进行优化改进，直接将处理后的新风引入柜体内，增大了重力循环柜的处理风量，使设备制冷能力大大增加。同时可解决新风除湿能力差、能耗高等问题。

诱导式重力循环柜空调系统的原理图见图 10 所示，诱导式重力循环柜内部为毛细辐射管网，柜体顶部是新风入口，柜体侧面上部为回风口，柜体侧面下部为送风口。新风机组将室外新风冷却除湿后，经柜体顶部新风口送入诱导式重力循环柜。在送风诱导和冷热空气的密度差的综合作用下，室内回风经柜体上部回风口进入柜体，与新风进行混合，混合后的空气经柜内毛细管被冷却到送风状态点，送风在重力作用下，沿管道下降，并从柜体侧面下部送风口送入室内。同时，诱导式重力循环柜外壳与周围环境进行辐射热交换，进一步降低室内温度。

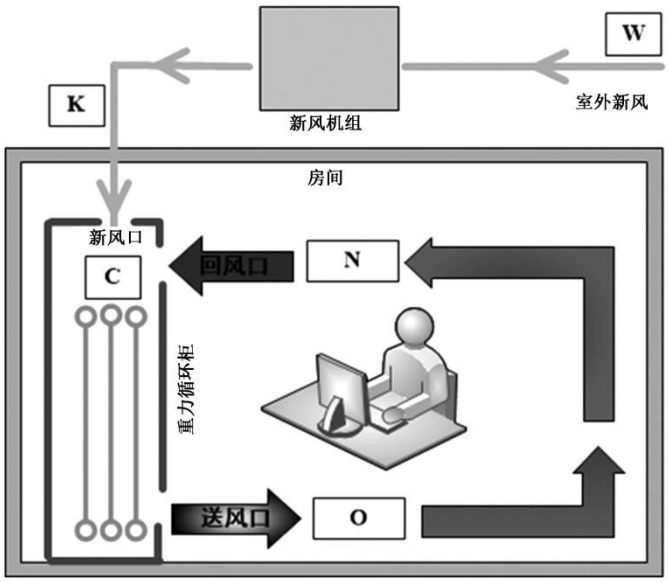


图 10 诱导式重力循环柜原理图

诱导式重力循环柜结构图如图 11 所示，内置 5 排毛细辐射管，毛细管材料为外径 4.3 mm 的聚丙烯管。管道布局为上供上回的送回水方式。底部设有一个冷凝盘，可以收集和排放从毛细管表面滴下的冷凝水。实验结果表明：随着供水温度的增加，回水温度随之增加，毛细管表面及柜体内部平均温度升高，辐射供冷量和对流供冷量都减少，但辐射占比基本无变化。室内温度响应时间与供水温度变化趋势基本一致，在系统启动 40 min 后趋于平缓。室内相对湿度，在起始阶段主要受新风影响，系统启动 20 min 后，室内湿度同时受到供水温度影响; 供水温度为 10～14℃，PMV 在-0.5～0.5 之间，能满足人体舒适度I级要求。

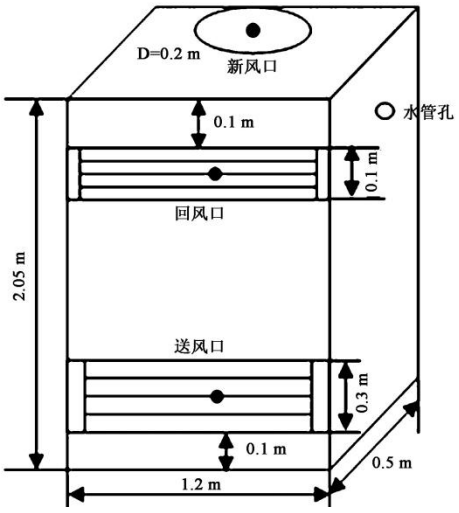


图 11 诱导式重力循环柜实验装置图

2. 案例实际应用效果简介

（1）了解诱导式空调系统的多种形式及发展动态；

（2）掌握诱导式空调末端性能参数的确定方法；

（3）掌握冰蓄冷空调技术的运行策略及调控手段；

（4）领会空调产品在多次测试中不断完善，培养学生的科学精神。

3. 支撑材料

（1）“温湿度独立控制深井降温系统”国家自然科学基金结题报告

（2）已发表的论文

[1] Jiangbo Li, Liu Chen. Study on independent air conditioning system based on the temperature and humidity of rotary dehumidifier and heat pipe[C].The 11th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, 2019, 97-105.

[2] 刘异,陈柳.高温热泵转轮除湿及辐射供冷空调系统性能研究[J].建筑科学,2020,36(08):92-98.

[3] 刘异,陈闯,邓文杰等.诱导式重力循环柜性能实验研究[J].建筑科学,2022,38(06):119-125.

（九）案例 9

1．太阳能驱动除湿转轮与蒸发冷却复合空调系统

太阳能驱动除湿转轮与蒸发冷却复合空调系统的原理如图 12 所示。空气处理热力学过程如图 13 所示。新风处理系统分为处理空气区和再生空气区。在处理空气区，室外空气通过一级空气冷却器预冷后温度降低，再通过除湿转轮进行等焓减湿，由于存在吸附热使空气温度升高。高温低湿的空气再通过二级空气冷却器降温冷却，成为低温低湿的干燥空气，然后进入直接蒸发冷却器与冷水进行热湿交换，变为低温湿空气并送入空调房间。在再生空气区，环境空气先通过空气-水换热器加热，当太阳能不能提供所需再生热量时，开启电加热器加热到设定的再生温度，再生空气经解吸脱附由再生风机排至室外。高温冷水的制备是在新风处理区中实现。状态点 4 的空气具有很低的湿球温度，通过蒸发冷却器后可制备接近状态点 4 湿球温度的高温冷水。蒸发冷却系统制备的高温冷水分为 2 个环路，一个环路连接新风处理区，另一个环路与室内显热空调末端连接。

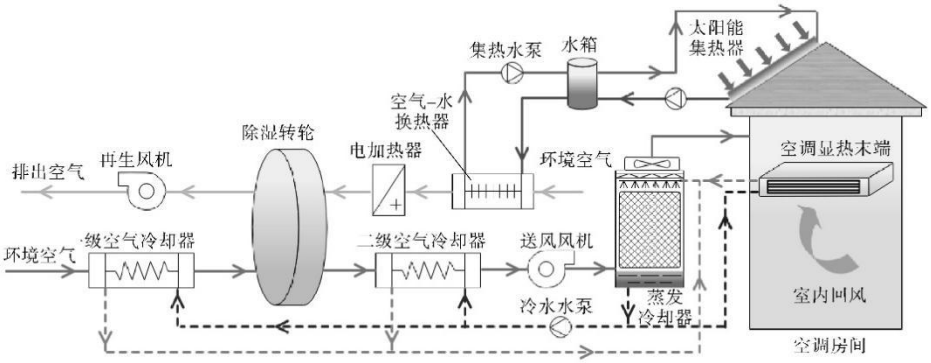


图 12 太阳能驱动除湿转轮与蒸发冷却复合空调系统原理图

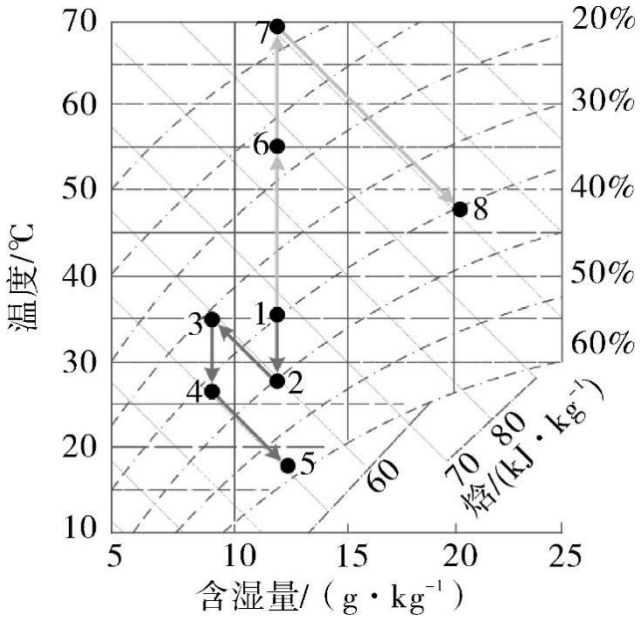


图 13 太阳能驱动除湿转轮与蒸发冷却复合空调系统焓湿图

应用 TRNSYS 对广州某典型建筑进行建模，建筑的总面积为 54 m^2，窗户位于朝南和朝北的外墙上，窗墙比为 0.20。外墙、屋顶和窗户的传热系数分别为 0.848，0.642，1.264 W/（m^2·K），太阳能吸收率为 0.6。建筑内共 10 人，每人的显热和潜热分别为 65，55 W，照明为 10 W/m^2，设备总功率为 2 000 W，室内设计温度和相对湿度分别取 27 ℃和 60%。应用 TRNSYS 瞬时系统模拟软件对系统进行建模和仿真，太阳能驱动除湿转轮与蒸发冷却复合空调系统的仿真模型如图 14 所示。

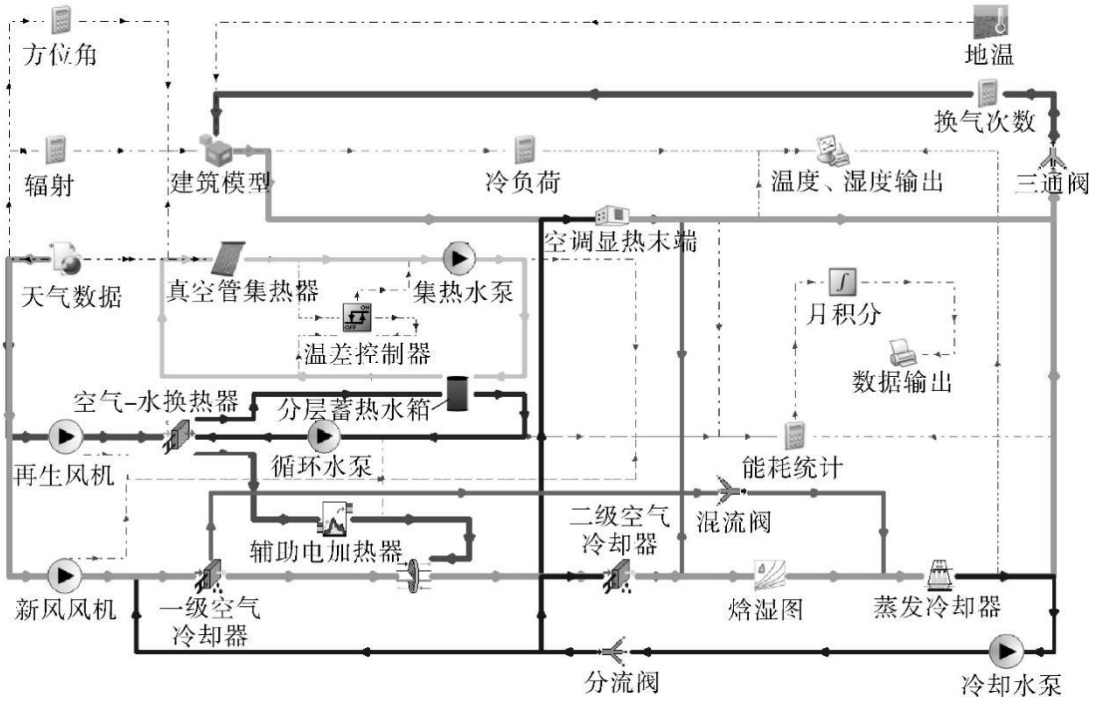


图 14 太阳能驱动除湿转轮与蒸发冷却复合空调系统仿真模型图

仿真结果表明：系统可实现温湿度独立控制，对新风进行降温除湿的同时制备出高温冷水。在炎热潮湿的气候下，系统能够维持空调房间的温度为 25.6~26.8 ℃，相对湿度为 57%~62%，具有良好的室内热舒适环境。

2. 案例实际应用效果简介

（1）了解温湿度独立控制空调系统的冷热源形式；

（2）掌握温湿度独立控制空调系统的设计方法；

（3）教学案例与除湿技术、蒸发冷却和太阳能光热技术相融合，对知识体系进行融合与创新，增强学生的专业认同感和使命感。

3. 支撑材料

（1）“温湿度独立控制深井降温系统”国家自然科学基金结题报告

（2）已发表的论文

[1] L. Chen, S. H. Chen, L. Liu, B. Zhang. Experimental investigation of precooling desiccant-wheel air-conditioning system in a high-temperature and high-humidity environment[J]. International Journal of Refrigeration,2018,95(11):83-92.

[2] Liu Chen,Yikun Tan. The performance of a desiccant wheel air conditioning system with

high-temperature chilled water from natural cold source[J].Renewable energy, 2020,146(02):2142-2157.

[3] Liu Chen,Wenjie Deng.Experimental study on desiccant evaporative combined chilled air/chilled water air conditioning systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2021,199(11): 117534.

[4] 陈思豪,陈柳,高帅帅.转轮除湿复合式空调系统节能措施研究[J].低温与超导,2018,46(08):58-65.

[5] 陈思豪,陈柳.基于太阳能驱动转轮除湿的蒸发冷却冷水系统[J].低温与超导,2019,47(02):57-62.

[6] 邓文杰,陈柳,褚于颉.太阳能驱动除湿转轮与蒸发冷却复合空调系统性能研究[J].流体机械,2022,50(09):43-50+57.

（3）已授权专利

[1] 陈柳,陈闯,杨发妹,石全成,褚于颉,邓文杰.一种多能源互补的除湿转轮空调系统及其使用方法：CN 202110892752.3[P]. 2021-10-29.

[2] 陈柳,石全成,陈闯,杨发妹,邓文杰,褚于颉,封媛.多联机型固体除湿多功能空调系统及其应用方法：CN202110364310.1[P]. 2021-06-25.

（十）案例 10

1．近零能耗建筑新风系统

近零能源建筑适应气候特征和自然条件，通过被动式技术手段，最大幅度降低建筑供暖供冷需求，最大幅度提高能源设备与系统效率，利用可再生能源，优化能源系统运行，以最少的能源消耗提供舒适室内环境，其建筑能耗水平应较相关国家标准和行业标准降低60~75%以上。在现行标准下，近零能耗建筑需要满足能耗及气密性两项约束性指标。近零能耗建筑作为节能建筑的再发展，以其低能耗、高室内舒适性的特点象征着未来建筑的发展趋势。建筑所处的地区不同，建筑的冷热负荷也大不相同，在不同地区提出应用不同的通风技术可有效缓解建筑能耗过大的问题。合理的通风技术可以大幅降低建筑所需的能耗。适当的通风策略可以在不考虑室内热舒适的情况下提高建筑物的能量性能。对传统建筑中的空调系统已经进行了大量研究以降低运行能耗，而对于近零能耗建筑冷热负荷较低这一特点，选择传统建筑的空调系统会造成能源浪费。因而对于近零能耗建筑新风系统的选择原则应和近零能耗建筑所处地区有紧密的联系。

典型近零能耗建筑如图 15 所示。该近零能耗建筑总建筑面积为 240 m^2，层高 3 m，共两层均为地上层。设定建筑北向窗墙比为 0.2，南向窗墙比为 0.17。



图 15 近零能耗建筑模型图

近零能耗建筑新风系统由太阳能系统模块和热管型转轮新风系统模块组成，如图 16 所示。其中热管型转轮新风系统模块旨在将室外空气处理至近零能耗建筑要求的温湿度区间内。太阳能模块分为太阳能热水系统、光伏系统和光伏/光热系统三种系统。其中太阳能热水系统由平板集热器，水泵、水箱和控制器组成，旨在向热管型转轮新风系统提供热水，通过空气-水换热器提供所需的热量，若热水温度较低，则利用辅助加热器中的电加热器进行加热。光伏系统由太阳能电池组，太阳能控制器，蓄电池组，逆变器组成。利用光伏系统中的蓄电池组向空调系统中的用电设备提供所需电量。光伏光热系统由光伏/热集热器，蓄热水箱，控制器，蓄电池组，逆变器和换热器组成，不但可提供热水给空气-水换热器以满足热管型转轮新风系统对热量需求，还可提供电量给用电设备来维持热管型转轮新风系统中用电设备的运行。根据不同季节近零能耗建筑的需求，通过控制阀门的启停实现不同工况的变化。根

据近零能耗建筑全年负荷变化情况，通过控制阀门的启闭，实现冬夏季不同的空气处理需求。

图 17 所示为三种太阳能驱动转轮空调系统模型原理图。太阳能热水系统和光伏系统与光伏光热系统的连接类似，其中太阳能热水系统使用平板太阳能集热器，通过热水回路提供热量；光伏系统 Type 103 型光伏阵列，通过逆变器与蓄电池模块组提供电量。

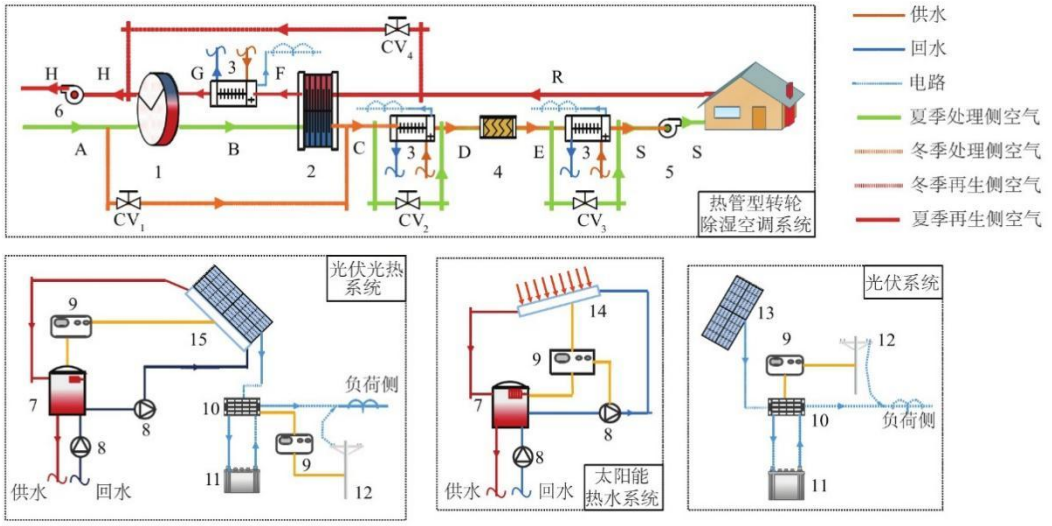


图 16 近零能耗建筑新风系统原理图

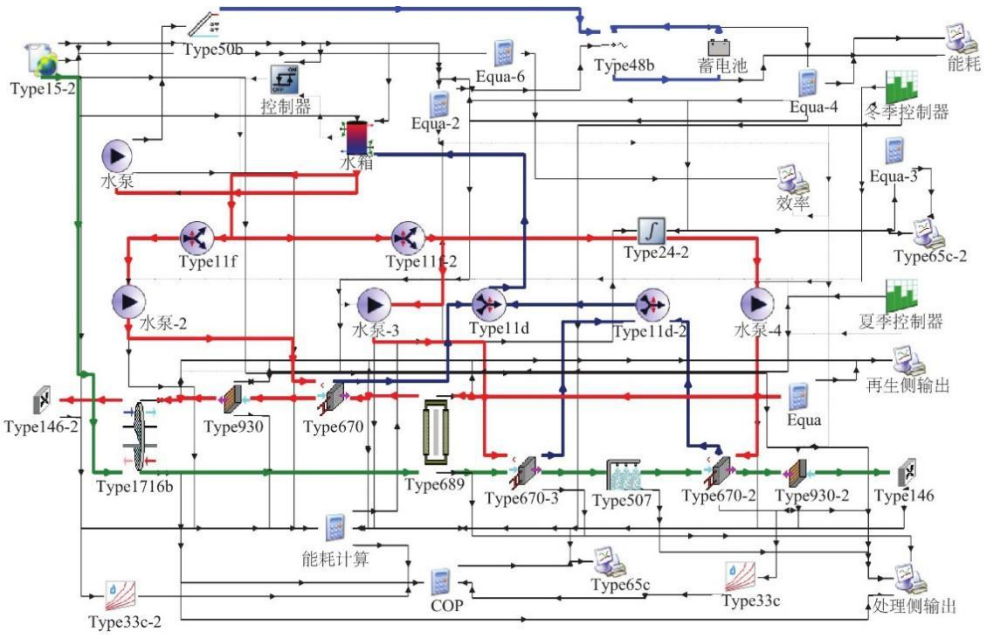


图 17 近零能耗建筑新风系统模型图

三种太阳能系统均能降低热管型转轮除湿空调系统能耗，通过对比太阳能保证率、全年累计能量以及 *COP*，太阳能驱动转轮空调系统使用光伏光热系统最优。利用光伏光热系统的太阳能驱动转轮空调系统 *COP* 相较于传统系统提高了两倍，平均能耗降低了 64.7%。

2. 案例实际应用效果简介

（1）了解碳中和时代近零能耗建筑的发展动态；

（2）掌握近零能耗建筑关键技术；

（3） 教学案例融合空调建筑热环境营造技术、绿色建筑技术、可再生能源利用等研究热点，有助于提升学生对对建筑能耗、建筑余热回收、新能源利用、绿色制冷空调技术等热点领域的关注度。

3. 支撑材料

（1）已发表的论文

[1] Liu Chen,Yikun Tan. The performance of a desiccant wheel air conditioning system with high-temperature chilled water from natural cold source[J].Renewable energy, 2020,146(02):2142-2157.

[2] Liu Chen,Wenjie Deng.Experimental study on desiccant evaporative combined chilled air/chilled water air conditioning systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2021,199(11): 117534.

[3] Liu Chen,Yujie Chu,Wenjie Deng. Experimental investigation of dedicated desiccant wheel outdoor air cooling systems for nearly zero energy buildings[J]. International Journal of Refrigeration,2022,134(02):265-277.

[4] 邓文杰,陈柳,褚于颉.太阳能驱动除湿转轮与蒸发冷却复合空调系统性能研究[J].流体机械,2022,50(09):43-50.

[5] 褚于颉,陈柳,邓文杰等.太阳能驱动转轮空调在近零能耗建筑中的应用[J].太阳能学报,2023,44(04):464-471.

（2）已授权专利

[1] 陈柳,陈闯,杨发妹,石全成,褚于颉,邓文杰.一种多能源互补的除湿转轮空调系统及其使用方法：CN 202110892752.3[P]. 2021-10-29.

[2] 陈柳,石全成,陈闯,杨发妹,邓文杰,褚于颉,封媛.多联机型固体除湿多功能空调系统及其应用方法：CN202110364310.1[P]. 2021-06-25.