

恒温恒湿实验室的高效节能运行与改造研究

和晓晓¹, 陈修亮², 张三军^{1,2}, 潘海峰^{1,2*}, 杨勇³, 刘萍³

(1. 华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200241; 2. 华东师范大学公共创新服务平台, 高端装备制造维护中心, 上海 200241; 3. 华东师范大学后勤保障部, 能源与环境管理办公室, 上海 200241)

摘要: 高精度实验室通常具有高洁净度、恒温恒湿等特点, 这些基础环境条件的苛刻要求会导致该类实验室的运行能耗显著高于普通实验室。为匹配节能降碳的国家战略, 针对实验室湿度控制系统的节能改造和温度精细化控制两个方面, 提出一系列行之有效的节能降碳措施。从湿度控制系统进行节能改造, 利用制冷压缩机预除湿的废热回收, 实现新风处理过程中的能量循环利用; 优化温度控制系统, 设立独立温区系统以精细化调节各实验室温度, 克服热负载不均衡导致的冷量分配问题; 采用超低速送风系统改善实验室内部气流组织, 确保热量及时排出; 区别化定制冬、夏季空调运行方案, 精准匹配环境温度变化, 降低能耗。这些措施可以使实验室运行总体能耗节约 40% 以上, 这些实施方案对构建更加绿色节能环保的环境友好型高精度实验室系统具有非常高的借鉴价值。

关键词: 节能降碳; 恒温恒湿; 实验室建设与管理

0 引言

为实现碳达峰碳中和目标, 国家出台的一系列相关文件都提出要在 3~5 年内建设高校碳中和科技创新平台, 培育国家级创新平台, 组建攻关团队, 持续攻关关键技术, 打造碳中和技术创新力量。同时要求公共机构实施节能降碳改造, 推动用能设备更新管理, 到 2025 年将煤炭消费降至 13% 以下, 并培育能效“领跑者”。各类先进实验室是科技创新和人才培养的关键场所, 可以有力地支撑高精度检测实验、高精度设备使用和高水平科研工作开展, 但同时带来的能源消耗和环境影响不容忽视。通过实施节能降碳措施, 不仅能够响应国家节能减排的号召, 还能显著减少能源成本, 优化资源配置。实验室节能降碳的关键在于提高能源使用效率, 使用节能设备, 优化实验流程以减少浪费^[1-3]。同时, 推广节能降碳理念, 采用智能管理系统进行远程控制和能耗监测^[4-6], 这些做法有助于降低能源消耗, 提升实验室形象, 吸引人才和资源^[7]。高精度实验室提供洁净、恒温 and 恒湿环境, 适用于精密测量、半导体、生物医药等领域^[8-10]。这些实验室需要稳定环境以保证实验和产品质量^[11], 因此配备高级空调和湿度控制系统, 实时调节温度和湿度^[12-14]。然而, 维持这种严苛环境条件需要空调和湿度控制系统的持续运行, 实时管理设备产生的热量, 以及维持室内的正压和空气洁净度等, 这些都导致高精度实验室能耗维持在高位^[15-17]。本文旨在通过评估针对高精度实验室高能耗采取的一

系列节能减排措施, 探讨具有高度通用性的高精度实验室节能减排方案, 为这一类具有高能耗特点的实验室探索一系列行之有效的、可推广复制的节能降碳运行管理策略。

1 实验室湿度控制的节能运行与改造

恒温恒湿是高精度实验室的典型特征之一。以高精度光学类实验室和检测实验为例, 湿度环境往往关系到精密测量设备与元件是否能正常使用, 例如痕量检测、半导体材料检测、高灵敏光学测试和光谱测试等对环境湿度非常敏感。对于受季风性气候影响的城市(如长三角地区), 实验室湿度的控制则更为重要, 如果需要全年工况湿度保持在 50% 以下, 目前最常用的解决方案是利用转轮除湿机系统, 如图 1(a)所示。首先, 经过初级过滤的室外空气通过前表冷器进行预除湿, 预除湿后的新风再通过转轮进行处理, 转轮是由特殊吸湿材料制成的蜂窝状结构, 具有良好的空气透过性与水分吸附性。经过转轮后, 可得到干燥的空气, 该过程称为“新风处理”。经过转轮吸湿, 处理风便可输入下一处理环节。然而, 为了保证转轮模块持续、高效的除湿能力, 需要通过技术手段将转轮吸收的水分排出。该过程通常采用热释放的形式将转轮吸湿材料吸附的水分蒸发而实现, 该过程称为“转轮再生”。转轮水分的热释放热量一般来源于再生加热器对新风进行电加热, 最高可加热至 140℃。加热后的再生风经 1/4 扇窗对转轮进行加热, 加热后转轮吸附的水分变成水蒸气同再生风一起排到室外, 实现转

基金项目: 华东师范大学实验技术研究项目 (ECNUETR-2024-8)

第一作者: 和晓晓, 博士, 工程师, 研究方向为光学、实验室管理。

*** 通信作者:** 潘海峰, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为光学、实验室管理。Email: hfpan@phy.ecnu.edu.cn

轮的再生。转轮除湿机拥有高效的除湿性能，被广泛应用于现代光学实验室、电子实验室、半导体制备以及生物制药等实验室的湿度控制。传统的转轮除湿机的使用虽然能实现精准湿度控制，但是在整个除湿过程中，新风的预除湿和处理风的再生加热需要消耗大量的电能，且不可以重复利用。本文在使用传统的转轮除湿机的基础上，设计并实现了将新风的预除湿和处理风的再生加热环节联动的节能改造方案，实现能量的循环利用，大幅降低能量消耗。如图 1(b)所示，通过在前表冷段与再生加热段中间增加制冷压缩机，制冷压缩机可以将实现空气的预除湿，而制冷过程中压缩机产生的废热可以对再生风进行加热，从而降低再生加热的功率，达到能量的循环利用的目的。

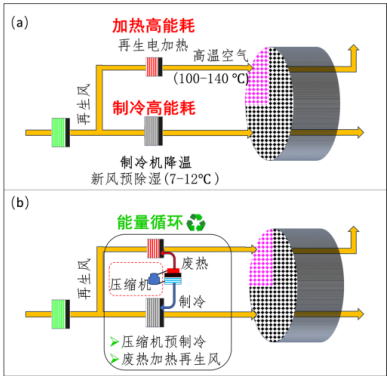


图 1 传统除湿机 (a)，节能改造除湿机 (b) 工作原理图

为了深入探究节能改造除湿机的节能效果，本文测量了节能改造除湿机与传统除湿机在不同环境湿度下的耗电量，覆盖了从高温、低温到梅雨季等极端天气条件，确保了数据的广泛代表性和准确性。如图 2 所示为节能改造除湿机与传统除湿机在耗电量上的对比。除节能改造模块外，这两台除湿机的其他规格完全相同。为了进一步确保数据的准确性，通过控制两型除湿机的使用工况，使之尽可能接近。两台除湿机控制的实验室面积均为 320 m²，房间数量均为 6 间，且实验室内科研仪器设备的运行工况以及湿度设定（均为 40%）也保持了一致。从数据中可以明显看出，传统除湿机的月耗电量接近 18000 kWh，特别是在环境相对湿度较高的 6 月至 9 月期间，其月耗电量甚至超过了 20000 kWh 时。图 2 中的黑色点线图则代表了上海闵行区月平均相对湿度的变化趋势，从中可以观察到传统除湿机的能耗对环境相对湿度具有显著的依赖性。相比之下，节能改造除湿机的耗电量则显得相对稳定，受环境湿度波动的影响较小，月耗电量稳定在 10000 kWh 左右低位运行，耗电量仅为传统除湿机耗电量的 56%。数据对比显示，对除湿机进行节能改造，可显著降低维持该类实验室湿度恒定的能耗。

节能改造型除湿机的高效节能来源于前表冷制冷产生废热的回收，通过除湿机运行参数，可以更直观地解释节能型除湿机的节能原因。表 1 所示为两型除湿机组部分实时运行参数。可以明显看出，节能改造型除湿机在前表冷水阀开度为 0% 的情况下，前冷器温度仍然可以维持在 10℃ 以下（7.3℃），满足前表冷对新风的预除湿。然而传统除湿机需要额外打开前冷水

阀（~40% 开度），才能将新风预除湿温度降低至 8.8℃。同时，节能型除湿机制冷过程中产生的废热可以补充（甚至替代）再生加热，如图所示节能改造后除湿机再生加热功率为 0%，即可满足转轮再生所需要的热量。而传统除湿机再生加热功率需要开启至 30%，才能够满足再生过程对温度的需求。再生加热过程需要消耗大量电能（最大再生加热功率 81 kW），降低再生加热过程中能耗是除湿机节能改造的关键。另外，节能改造机组由于能耗降低，干空气温度也随之降低，减轻了后表冷对温度控制的压力。表中后表冷段所示，节能改造机组后表冷水阀开度仅有 2.4%，而传统除湿机后表冷水阀需要增加开度（21%）才能将干空气降低至实验室所需温度。可见，节能改造型除湿机不仅可直接降低能源消耗，而且可降低前、后表冷对冷量的需求。

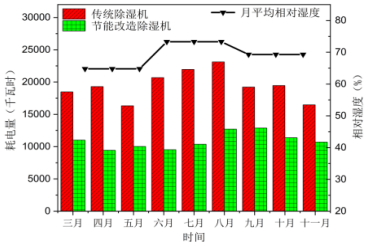


图 2 节能改造除湿机与传统除湿机耗电对比

表 1 除湿机部分运行参数

序号	项目	对照机组	节能改造机组
1	预除湿温度	8.8℃	7.3℃
2	预除湿制冷量(94 kW)	40%	0%
3	再生加热(81 kW)	30%	0%
4	后表制冷冷量(123 kW)	21%	2.4%

注：本表数据来源于除湿机实时运行数据(2024 年 6 月 20 日 9 时 17 分)，环境温度 25℃，相对湿度 93%。

2 实验室温度控制的节能运行与改造

温度变化会显而易见地引发物体热胀冷缩，会导致高精度设备尤其是自制实验系统稳定性、重复性变差，从而影响高精度科研实验的开展。影响实验室温度控制精度的原因有很多。首先，实验室不同区域发热往往不均衡，导致空调系统冷量分配不均衡，从而增加能耗。在高精度实验室设计之初应根据不同区域的发热量差异，合理布局回风和冷量配给，实现高效率的热量传导。其次，室外环境温度季节性变化，空调机组制冷响应滞后，也容易导致实验室温度发生波动。此外，实验室高功率发热设备集中，工作时间和非工作时间的热量释放差异等因素也会影响室内温度的控制。目前，为了克服上述种种问题，往往采用加大实验室冷量供应的粗放型管理方案，造成较大的能源消耗。本文提出一系列精细化实验室温度控制方案，可以在相对低能耗的条件下，有效提高实验室热交换效率。

针对不同实验室热负载不同，导致空调机组冷量分配不均的问题建设独立送风系统，实现每间实验室温度精细化调节。热负载不同带来最直接的问题就是，由于大发热量的实验室需要较大冷量来维持实验室温度稳定，因此增加了空调制冷功率。对于同一温控系统下的小发热量的实验室，空调制冷功率的增加势必会严重拉低该实验室的温度。为了维持小发热量实验室温度恒定，末端加热器将高功率运行，从而带来了双重能耗。若每个实验室配置独立的温控系统，则可避免实验室热负载不同带来的空调制冷分配不均的问题。然而，对于大型恒温实验室（超净面积> 200 m²）通常采用统一的温度控制系统，来实现高能效比。为每间实验室建造独立的空调系统，不仅会增加建造和维护成本，而且增加了空调系统的基础能耗，不利于节能降碳。因此需要在统一的空调系统与实验室独立温度控制两者之间制定合理的温度控制方案。精密光谱国重实验室将总使用面积约 3500 m² 的 28 间恒温恒湿实验房间分成 10 个独立温区，实现实验室温度的精细化调节，一定程度上克服了由于冷量分配不均衡导致能耗升高的问题。区别于单独的空调温度控制，独立送风系统仅需通过控制后表冷的温控水阀的流量与送风风量，就可维持每间实验室温度稳定。该方案下，实验室温度调节不依赖于空调系统制冷功率的调节，降低了空调系统制冷功率的频繁调节。

导致实验室温度控制精度不理想的因素较多，最主要的原因是实验室送、回风气流被扰乱，科研设备工作散发的热量无法有效、及时地通过回风排出。这种情况随着实验室设施、设备以及辅助工具的入驻更为明显，例如仪器架、科研设备的密集摆放，将整体实验室物理分割为若干单元。按照传统的送一回风方案，送一回风通路很容易被阻断，导致热量无法高效排出，使得实验室局部温度过高，增加制冷系统的能耗。通过改变实验室设备摆放来优化实验室内部送一回风气流通路，虽然一定程度上可以缓解实验室局部温度过高的问题，但是没有从根本上解决送一回风流通问题。超低速送风系统（如图 3 所示）将送风管路输送过来的洁净空气首先在混流层中进行散流，使其充满整个混流层。混流层整个底部为微孔结构，冷空气将从实验室顶部的微孔板均匀、整体、无死角下压，将热空气从实验室底部的回风窗带离。该方案的优点在于送一回风通路不受实验室内部设备摆放的影响，提高了实验室热交换效率。

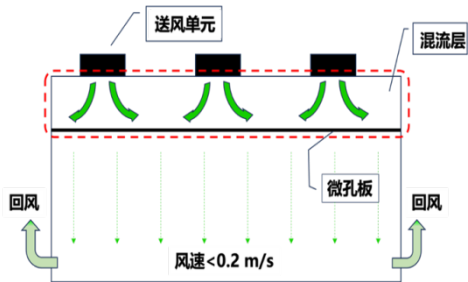


图 3 超低速送风系统

针对不同时间室外环境温度变化引起空调机组能耗增加的

问题，制定了冬、夏季空调系统运行方案。例如精密光谱国重实验室所在的上海地区，夏季平均气温为 21~28℃，冬季平均气温为 4~12℃。由于冬夏两季温差巨大，如果空调系统全年按照统一的参数运行是不合理的。在夏季高温时（如上海夏季最高气温可达 42℃），需要增加空调制冷功率以满足实验室冷量的需求，并根据实验室温度变化曲线调整管路水流量和制冷温度阈值至 5℃，以达到节能降碳的目的。而在冬季低温环境下（最低可至 -6℃），则可以利用自然环境作为空调系统的冷量补充，适当降低空调系统的制冷功率，在不影响实验室温度稳定的前提下将制冷水温调整至 7℃。此外，考虑到工作时间与非工作时间实验室内发热存在低谷时段的特点，送风系统也被设计成正常模式和节能模式两种工作状态，其中节能模式下的送风量可根据实际需求设置为正常模式的 60%~80%，并能够实现固定时间的自动切换，从而既保证了实验室内温度的稳定又有效降低了整个温控系统的综合能耗。为了验证节能改造除湿机的长效节能效果，图 4 对比了 2019 年改造初期与持续至 2024 年运行的机组实际耗电量数据。在 2019 年 6 月 25 日至 7 月 19 日期间，传统除湿机日均耗电量超过 800 kWh，而经过节能改造后除湿机日均耗电量则保持在 600 kWh 以下；到了 2024 年同期，传统除湿机通过优化机组运行参数使得日均耗电量降至 700 kWh 左右，但相比之下，持续优化中的节能改造除湿机将进一步将日均耗电量控制在 350 kWh 以内。这表明，在过去五年间不间断运行及合理调整能源使用策略后，该类型除湿设备依然保持着较高的能效比。

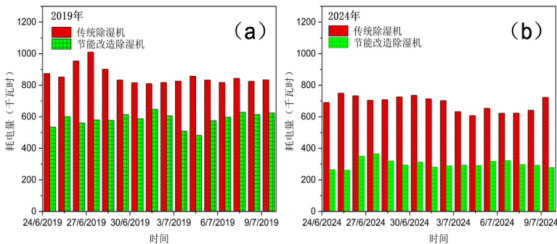


图 4 ① 2019 年传统除湿机、节能改造除湿机日耗电量；
② 2024 年传统除湿机、节能改造除湿机日耗电量

此外，作为温度控制节能策略的补充手段，单独为实验室高发热设备配置灰区空间，是一种科学、合理且具有很好性价比的方法。实验室洁净度、温度、湿度等指标要求较高，因此维持实验室的单位物理空间成本较高。激光器、真空系统等大型科研仪器的辅助设备（冷水机、真空泵），不仅占用了宝贵的实验室空间，而且这些设备工作时散发的热量严重影响实验室温度，给实验室温度控制带来巨大负荷。与核心精密设备相比，这类设备通常对环境要求不高，因此将该类设备放置在专用的灰区，与恒温恒湿实验室隔离，这不仅可以有效降低实验室发热量，也能极大改善振动、噪音等因素对核心实验区域的不利影响。在实际运行管理中，还进一步回收利用用于恒温恒湿实验室温度控制的冷冻水系统的冗余冷量，一方面通过热

交换空气散流器对灰区空间的环境温度进行调节,另一方面通过水循环板式热交换器构建独立运行的二级水冷系统,用于灰区发热设备的集中冷却水供应,进一步提高了能量利用效率。这些补充策略的使用,也能有效地降低实验室的运行能耗,值得在未来的工作中进一步地发掘、研究和运用。

作为典型的开展高精度光学实验的专业科研基地,华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室(以下简称精密光谱国重实验室)拥有使用面积约 3500 m² 的恒温恒湿实验空间,由多台套高精密的湿度和温度控制系统统一控制,并实现全年不间断运行,温度控制精度为 (22±0.5)℃,湿度控制精度为 (35±5)%。实验室主要能耗来源于转轮除湿机、空调温控系统以及实验室内部的仪器设备。在实验室运行管理实践中,工程技术团队开展了一系列精细化节能减排的管理措施和技术改造(图 5 所示),有效地实现了运行能耗的大幅降低,根据学校能源与环境管理办公室的用电数据分析,实验室温湿度控制系统年用电量由 2.55×10⁶ kWh 下降至 1.24×10⁶ kWh,仅电费一项每年为学校节约近 80 万元。这充分证明这些节能减排措施不仅行之有效,而且具有非常显著的投入产出比,非常具有推广价值。

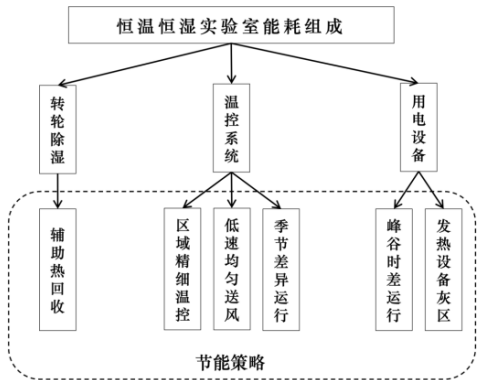


图 5 实验室节能减排方案设计

3 结 论

高精度实验室在追求恒温、恒湿环境控制的同时,面临着显著的能源消耗与环境影响挑战。针对这一现状,本文提出了一系列有针对性的节能降碳策略,通过技术创新与系统优化,成功实现了实验室能效的显著提升。湿度控制方面,通过对转轮除湿机进行节能改造,引入制冷压缩机预除湿和废热回收技术,不仅显著降低了再生加热能耗,还实现了新风处理过程中能量的循环利用。在温度控制层面,通过构建独立送风系统,实现了实验室温度的精细化调节。构建超低速送风系统,解决了实验室送-回风布局不合理等问题,改善了实验室内部气流循环,确保热量及时排出。冬夏季、峰谷时段空调运行根据环境温度变化适时调整系统参数,确保了实验室温度稳定的同时降低了能耗。建设高发热设备集中安置的“灰区”能够进一步

减少实验室内部热负载,降低了空调系统的运行压力,提升了空调系统能量使用效率。综上所述,本文所提出的高精度实验室节能策略,涵盖了湿度控制、温度控制、布局优化等多个关键环节,通过实施这些精细化节能改造策略,成功实现了实验室能源消耗的显著降低,为高精度实验室的绿色发展提供了实用且具有推广价值的解决方案。

参考文献

[1] 王清勤,曹国庆,刘志坚.高等级生物安全实验室采用循环风问题探讨[J].科学通报,2024,69(07):834-841.

[2] 孙伟,卢俊琛,莫层聪,等.零碳实验室建设方案[J].实验室检测,2024,2(02):78-83.

[3] 崔森.恒温恒湿实验室日常管理分析[J].中国纤检,2023,(12):50-51.

[4] 唱思琪,龚强.双碳背景下高校实验室低碳建设——以风洞实验室建设为例[J].实验室研究与探索,2023,42(07):274-278,292.

[5] 段辉,曹同成,夏本明,等.高校化学实验室通风系统改造与节能研究[J].实验技术与管理,2023,40(05):190-195.

[6] 余善恩,李真,陈张平,等.基于校园一卡通的开放实验室节能系统研究[J].实验技术与管理,2016,33(12):263-265,270.

[7] 杨静.紧扣国家能源战略致力节能减排研究——中科院工程热物理研究所节能减排系统研究获重大成果[J].中国能源,2008,30(11):26.

[8] 樊红霞,顾聪,钱维兰,等.浅谈高校化学实验室的节能减排[J].广东化工,2014,41(16):140,121.

[9] 李成刚.实验室暖通的风量控制[J].建筑工程技术与设计,2014,(14):783,791.

[10] 蒋晋生,许学年,张韦达,等.某生物安全实验室节能控制方案[J].暖通空调,2009,39(05):142-144,154.

[11] 朱兹锦,郑炯炯.医学实验室直流全新风空调系统热回收节能措施浅析[J].暖通空调,2023,53(S01):369-374.

[12] 张秀英.高校光学超净实验室管理模式探讨[J].分析仪器,2019,(05):71-74.

[13] 张宇,蔡颖玲.热管新风机组除湿性能测试与分析[J].实验室研究与探索,2023,42(07):99-103.

[14] 何思源,高理福,文佳岚,等.热泵式溶液除湿新风机组性能研究[J].制冷与空调,2021,21(03):20-24,63.

[15] 朱兹锦,郑炯炯.医学实验室直流全新风空调系统热回收节能措施浅析[J].暖通空调,2023,53(S1):369-374.

[16] 韩婷丽.生物安全类实验室通风空调设计要点[J].工业微生物,2023,53(02):95-97.

[17] 文福,杜然,舒刚,等.某检化验中心大楼通风空调系统设计[J].建筑热能通风空调,2020,39(03):103-105.