



特别专题

制药绿色智造转型

4C2HII





目次 Contents

双碳背景下药厂的节能减碳策略·····	/ 本刊编辑部	3
基于洁净空调系统设计需求的探讨·····	/ 唐现岭	7
药厂暖通系统运行中的节能探讨·····	/ 赵本杰	12
药厂暖通系统节能改造案例分析·····	/ 陈清立 奚秋晨 刘得龙	17
“双碳”背景下药品生产厂房冷水机组节能技术研究·····	/ 朱毅 平丽芬	21

双碳背景下药厂的节能减碳策略

本刊编辑部

摘要: 在“双碳”目标的指导下，制药行业正处于绿色低碳转型的关键时期。为了帮助企业更有效地应对这一挑战，本刊特别邀请了来自制药生产企业和制药设备企业的代表，分享他们在绿色生产实践和节能降碳技术应用等方面的实践经验。这些内容旨在帮助企业深入了解行业绿色低碳转型的挑战与应对策略，为制药行业企业的可持续发展提供前瞻性的思路与可行的解决方案。

关键词: 绿色智能转型；节能减碳；工业物联网能管平台；冷热平衡机；分布式集成冷站；恒温恒湿设备



赵传鹏 正大天晴药业集团南京顺欣制药有限公司 EHS 和设备负责人



董元霖 扬子江药业集团江苏海岸药业有限公司负责人



王健 广东欧科空调制冷有限公司 EK 中国区市场营销总监兼 IECD 事业部总监

PHT 制药业: 在双碳政策背景下，制药企业在高能耗设备改造方面面临哪些技术难题？

赵传鹏: 在双碳政策背景下，制药企业在高能耗设备改造方面面临诸多技术难题。首先，设备能效水平差异大，新旧设备交替导致显著的能效差距。例如，一些企业仍在 COP 值低于 3.0 的老式冷水机组，而先进企业已采用 COP 值超过 6.0 的高效机房系统，能效相差一倍以上，这使得企业整体能耗水平难以维持。

其次，制药企业生产具有间歇性和季节性特点，但能源供应系统多基于最大负荷设计，导致设备大部分时

间都处于“大马拉小车”的低效运行状态。同时，生产设备组合运行缺乏优化调度，难以实现能源梯级利用。最后，高能耗设备的维护管理不到位，定期维护和性能检测执行不力，导致设备运行效率随时间下降。例如，空调过滤器更换不及时、换热器结垢清洗不彻底、蒸汽疏水阀失效等问题普遍存在，直接影响设备能效表现。

PHT 制药业: 面对这些挑战，制药企业应采取哪些应对措施？

赵传鹏: 为应对高能耗设备改造的技术难题，企业需完善能源管理制度，制定系统性的能效提升计划，并

开展全面能源审计以识别关键耗能环节，进而制定节能提效策略。对于洁净车间空调系统 (HVAC)、灭菌设备、冷冻干燥机等高能耗环节，应设定专项目标。同时，建立设备能效档案，实施能效对标管理，并构建设备能效评价体系，制定差异化改造方案。其次，企业应重点开发和推广节能技术。例如，实施空调系统值班模式以降低非生产期间的能耗，采用变频控制技术根据负荷动态调节设备运行状态，以及推进中水回收利用。此外，构建智能化运行维护体系，实时监测设备运行参数，自动预警异常状态，利用 AI 算法优化设备组合运行方案，并实

施预测性维护，以确保设备高效、稳定运行。

PHT 制药业：企业如何制定系统化的数据收集与分析计划，解决用能数据缺失问题？

董元霖：为解决用能数据缺失对能源管理优化的制约，制药企业需构建“采集-分析-应用”全链条数据管理体系。首先，分层级搭建数据采集网络。在工厂总配电室、蒸汽管网、供水系统等关键节点部署智能电表、蒸汽流量计、水表等计量设备，实时采集全厂电、蒸汽、水等能源消耗总量数据，建立企业能耗总台账，为整体能耗监控与成本核算提供基础数据支撑；针对制冷机、空压机、隧道烘箱、冻干机、灭菌柜等高能耗核心设备，加装无线传感器与智能计量模块，按分钟级频率采集设备运行参数（如耗电量、运行时长、温度、压力）及能耗数据，实现单台设备能耗独立计量与实时监控，精准定位高耗能设备及异常能耗波动；对空调机组、水泵、风机等辅助设备安装微型计量装置，覆盖生产车间、公用工程等区域，实现能耗数据的“颗粒度”监测，结合设备启停状态分析非生产时段能耗浪费情况，为节能优化提供细分数据。

其次，构建集成化数据治理平台，深度集成 SCADA、EMS、MES 等工业控制系统数据，建立能耗数据与生产排产计划、设备运行参数、环境温度湿度等多维数据的关联分析模型。通过数据清洗和标准化处理，消除数据孤岛，形成统一的数据资源池，确保数据的准确性、完整性与实时性。最后，建立多维度数据分析应用体系，包括能效基准与标准体系、智能预警与响应机制、多维度对比分析、数据驱动决策优化以及持续迭代与改进，以推动能源管理体系的动态升级。

PHT 制药业：EK 的节能解决方案如何助力制药企业降低公辅能耗并实现绿色转型？

王健：制药企业作为能耗大户，对节能解决方案的需求日益增长。其主要能耗集中在公辅部分，如锅炉、洁净系统、恒温恒湿控制以及局部湿度控制等环节。过去，企业主要聚焦于实现 GMP 标准和满足生产工艺要求，这些方面经过多年发展已较为成熟。如今，随着国家提出新质生产力的发展方向，强调绿色转型和 3060 双碳政策，企业认识到不仅要实现设备功能，还需提升节能低碳水平和整体运行效率。以 EK 高效集成冷站为例，相比传统能效 3.0 左右的冷机站房，高效集成冷站整机能效水平可做到 5.0 以上，综合运行节能率可达 49.5%。通过工厂预制集成，现场快速拼装，工期缩短至 50 ~ 60 天（仅为传统 1/3），最小化生产干扰；分布式就近部署，响应末端负荷快，更易保障恒温恒湿稳定性；通过 EK-AIoT 工业物联网能源优化平台实现智慧运维与全生命周期监控。因此，企业需要思考是否应用了节能低碳技术，以及设备是否能够高效运行并实现数字化管理。

作为制药行业的长期参与者，EK 专注于开发节能低碳解决方案。基于技术研发和丰富项目经验，EK 推出了一系列节能产品。在恒温恒湿控制领域，针对系统能耗高的问题，EK

推出三管制冷凝热回收恒温恒湿方案，通过回收废热降低能耗。在洁净系统方面，EK 的 EC 净化空调设备采用 EC 风墙技术，提高效率并降低能耗。在热能利用上，EK 的工业高温热泵解决方案提供高温热水 / 蒸汽，替代传统锅炉，节能降碳且投资回收期短。对于粉剂和胶囊生产的干燥需求，EK 的 ADR-DRY 一体化高效转轮除湿机，相对传统转轮除湿机节能率高达 60%。这些设备已在制药企业中得到验证。

PHT 制药业：EK 工业物联网智慧能管平台如何提升制药企业的能源与运行效率，保障数据安全？

王健：为实现智慧化运维，企业需借助智能化策略整合工业环境控制设备及其他公辅设备，构建能源管理综合平台。EK 的 EK-AIoT 工业物联网能源优化平台，基于物联网技术连接全域工业环境设备，构建能源数据“监测-分析-优化-进化”四维闭环体系，为客户提供数智化节能增效及数智化运维管理核心价值。该平台为非专业用户提供易管理界面，使设备运行和能源使用情况一目了然。此外，EK-AIoT 平台还可接入工厂内的光伏屋顶和储能电站，为客户打造综合的公辅设备能源管理平台。

在数据安全保障方面，EK-AIoT 工业物联网能源优化平台通过技术与

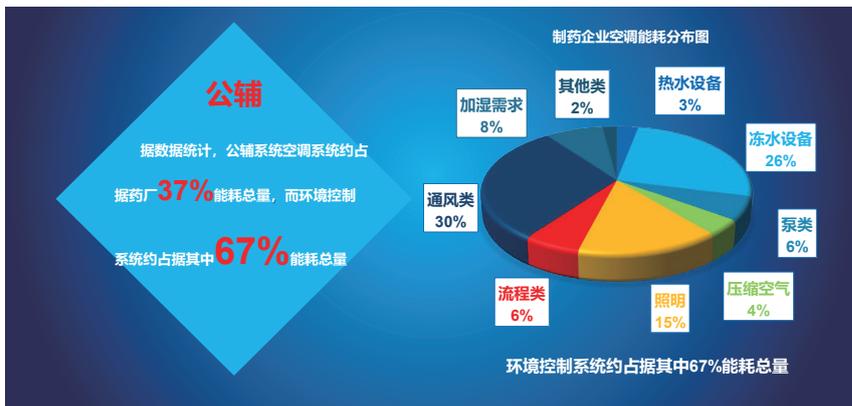


图 1 制药行业公辅能耗情况（图片来源于 EK 工业空调）

物理手段相结合，全方位保障数据的安全性及可靠性，确保制药企业的正常生产和能源管理不受影响。技术层面，EK 采用先进的加密技术，确保数据在传输和存储过程中的安全性，并依托阿里云等成熟云服务提供商的强大安全防护机制，进一步提升数据的安全性。物理层面，EK 设计了与外网完全断开的边缘计算模式，即使不连接外网，也能实现人工智能级别的能源管理，有效防止数据泄露和外部攻击的风险。

PHT 制药业：企业如何通过冷热平衡机实现冷热资源的有效调配和利用，提升能源综合利用率？

董元霖：企业可通过智能管控、技术升级、系统优化及标准化管理四大维度，利用冷热平衡机实现冷热资源的高效调配与能源综合利用。在智能温控与动态负荷管理方面，冷热平衡机集成 PID 控制与 AI 算法，实时监测温度偏差并动态调整能量输出，实现 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 高精度控温，确保冷热资源精准供应。同时，部署节能降碳与负荷管理智慧平台，对空调系统等进行全流程数据监测，实现能耗数字化与在线可视化。通过数据分析定位高能耗环节，依托节能管控系统自动调节设备运行参数，并借助云服务持续优化策略，遵循“监测 - 诊断 - 优化 - 服务”的四步节能路径，实现全生命周期节能管理。

在核心技术升级方面，淘汰低效电机，更换为高效节能电机，并引入热回收技术，将生产废热转化为可利用能源，实现能源循环利用。在系统集成优化与能源协同方面，优化冷热输送管网布局，缩短输送路径，减少管道阻力与热损失，加强管道保温处理，降低传输能耗。将冷热平衡机与空调、生产工艺冷却等系统深度集成，构建“废热回收 - 梯级利用”体系，

实现冷热资源跨系统共享。此外，搭建“光伏 + 储能”综合能源平台，采用荷储一体化互补模式，优先使用清洁能源满足冷热需求，降低电网依赖，缓解用电峰值压力，实现节能降本与碳减排。

在标准化管理与人才赋能方面，制定《冷热系统启停操作规范》，明确夏季冷却水、冷冻水及空调系统的温度设定经济值，规范设备操作流程，避免因人为参数设置不当导致的能源浪费。同时，将冷热资源利用效率、能耗指标纳入部门及个人绩效考核，建立阶梯式奖惩制度，激励员工参与节能管理；定期开展专业培训，提升操作人员对智能设备、节能技术的掌握能力，确保设备运行效能最大化。

PHT 制药业：分布式云智慧高效集成冷站如何解决设备安装周期、成本和节能效果的疑虑？

王健：制药企业用能场景复杂，不同工艺段对温度和用能要求各异。传统集中冷站虽便于管理，但存在长距离输送损耗和能源浪费问题。例如，为满足最严格的工艺需求，集中冷站需供应过低温度的水，导致其他区域能源浪费。随着技术进步，现代设备稳定性和可靠性提高，减少了对备份设备的需求。5G 和物联网技术可实现设备远程监控与管理，无需集中摆放。EK 的分布式冷站顺应这一趋势，可根据工艺需求灵活布置，减少能源输送损耗和浪费。若客户有备用设备需求，可通过中央大屏实现集中管理，保留集中管理便利性的同时，避免了传统集中式冷站的局限。

EK 的分布式云智慧高效集成冷站通过 5G 联网和云平台管理，实现数据加密与高效运行。该冷站采用室外防风防雨设计，基于人工智能的管路设计和运维管理确保设备性能充分发挥。预制化设计减少了现场施工和

调试环节，显著降低成本。传统现场组装机房安装周期长达 110 至 180 天，而 EK 集成冷站仅需 35 至 45 天安装周期，加上 3 ~ 5 天测试即可投入使用。EK 可在合同中承诺冷站能效，确保客户全年运行能耗符合预期。与传统高效机房相比，EK 集成冷站成本降低 40%，节能效果显著，能效提升 42.7%。

EK 的集成冷站设计灵活，无需预留机房，可直接安装在建筑物旁，节省建筑面积。对于分期建厂的企业，它支持按发展进度逐步投入，降低初期投资成本。该冷站易于拆卸和移动，适合租赁厂房或有布局调整需求的企业。客户可根据需要拆装设备，甚至可将设备租赁给他人。此外，设备的尺寸和能力可根据需求调整，便于与现有设备集成。

PHT 制药业：节能型除湿机和恒温恒湿设备如何改善企业的产品质量和生产环境？

赵传鹏：采用节能型除湿机和恒温恒湿设备后，企业的产品质量和生产环境将得到显著改善。在降低质量风险和生产成本方面，AI 驱动的预测性维护可实时监控设备关键部件状态，如滤网更换时间和压缩机运行状况，降低设备故障率，避免因环境失控导致的批次报废，例如冻干制剂因湿度超标而失活。此外，节能型设备相比传统设备能耗降低 30% ~ 50%，特别是采用热回收技术的除湿机，显著减少了能源消耗。这些设备符合 ISO 50001 能源管理体系要求，不仅降低了长期运行成本，还帮助企业避免因环境不达标导致的召回或监管处罚，如 FDA 警告信。

这些设备在无菌生产和特殊工艺需求方面也表现出色。在无菌灌装区，恒温恒湿设备配合 HEPA 过滤系统可维持 A 级洁净度，避免因温湿度波动

基于洁净空调系统设计需求的探讨

唐现岭

山东天振药业有限公司

摘要: 本文以口服固体制剂车间的洁净空调系统为例进行阐述。依据药品生产质量管理规范 (GMP), 深入分析了口服固体制剂车间洁净空调系统设计的目的、空调系统的类型、空调系统的组成、空调系统的关键参数要求、空调的风管系统及空调系统的调试和确认。实践表明, 本文所论述的设计要求可有效控制微生物和尘埃粒子的浓度, 为口服固体制剂的高质量生产提供可靠的环境保障, 对制药行业的工程实践具有参考价值。

关键词: 口服固体制剂; 洁净空调系统; 设计

0 前言

洁净空调系统的设计基于用户需求, 这些需求包括了产品保护等级、产品和工艺需求、建筑设计需求, 以及非 GMP 需求, 如操作人员的保护、监测项目、能耗及安全要求。良好的洁净空调系统运行能显著降低产品污染风险和提升操作人员的舒适度。

1 洁净空调系统的设计目的

洁净空调系统的设计目的主要包括三个方面: 首先, 通过洁净空调系统控制房间的温度、湿度和粒子数, 并利用压差控制防止相邻区域的交叉污染和环境中的粒子的扩散, 从而保护产品; 其次, 为洁净室内的工作人员提供舒适的空气环境, 保障人员健康; 最后, 通过减少污染粒子的排放, 进一步保护人员及工艺流程, 确保整个生产环境的安全与高效。

2 洁净空调系统概述

洁净空调系统是固体制剂厂房中

保障环境质量的关键设施。了解其类型和组成对于优化系统设计和运行至关重要。

2.1 洁净空调系统的类型

洁净空调系统分为两种类型: 一种为直排型, 使用 100% 的室外空气; 另外一种为循环型, 将室外空气和室内回风按一定比例混合使用。

在固体制剂厂房中, 非关键区域 (如办公室、走廊或储藏室) 可直接利用回风。关键区域 (如片剂上料间、原料储存区、包衣间等易引起交叉污染的区域) 应使用经过高效空气过滤器处理的回风或直接排放受污染的空气。图 1 展示了固体制剂车间制粒间的直排型空调系统; 图 2 展示了固体制剂车间混合间的循环型空调系统。

2.2 洁净空调系统空气处理单元的组成

洁净空调系统空气处理单元的组成和部件根据用户需求定制, 涉及相关的设计

和运行参数^[1]。洁净空调系统的其他部件包括排风机、回风机和热回收系统。辅助设备包括空调单元中的锅炉、冷冻机、压缩机和循环泵。

空气处理单元通常采用表热器送风系统或带有表热器的可调节风量箱来控制独立的房间或区域。表热器送风系统主要由表冷器或加热器与送风设备组成。表热器送风系统需要持续送风以保证通风率; 带有表热器的可调节风量箱可根据需要调整风量, 以节约能源。在应用可调节风量箱时, 送



图 1 固体制剂车间制粒间的直排型空调系统

作者简介: 唐现岭, 中级工程师, 任职于山东天振药业有限公司



图2 固体制剂车间混合间的循环型空调系统

风系统应与回风系统、排风系统相匹配，确保在风速较低的情况下，房间仍能保持所需的压差。

3 基于环境和 GMP 要求的设计需求

为了确保固体制剂生产环境符合 GMP 标准并保障产品质量，设计阶段需重点关注粉尘和有害物质的控制措施，以下将分别阐述粉尘控制和有害及毒性物料控制的具体要求。

3.1 粉尘的控制

在生产口服固体制剂的洁净车间，物料处理和生产操作过程中产生的粉尘是最常见的污染源^[2]。因此，生产过程中必须实施粉尘控制措施，以防止产品交叉污染。对于制粒间、混合间、干燥间和压片间等关键区域，应进行风险评估，以决定选用直排空气系统还是经过滤的回风循环空气系统。直排空气系统可有效防止产品或物料通过洁净空调系统扩散。

通风系统应为生产区提供符合产品质量要求的环境条件，确保气流模式能够防止产品污染，并降低生产过程中排放的空气污染物浓度。对于污染物危害程度较高的生产区域，在生产前与整个生产过程中，应采取更严

格的措施来控制粉尘污染。

3.2 有害和毒性物料的控制

应将有害及有毒污染物的浓度控制在目标范围内。在选择控制污染物的方法时，需考虑污染物的特性、工艺设备的设计特点以及设备和操作程序的匹配性。

控制有害及有毒污染物浓度的方法包括采用稀释通风、采

用较高的换气次数和采用局部排风。

稀释通风可有效稀释和排出生产过程中产生的大部分烟雾或气态污染物，提高换气次数可将持续产生的污染浓度降低到较低水平，但这种方法由于需要排出大量气体，导致成本较高。

局部排风则通过特定的气流模式捕捉粉尘或烟雾污染物，尤其在生产操作的制粒、混合、称量或压片等过程中应用时，需要注意以下几点：

- 风罩或隔离设计应便于人员操作，且不得导致工艺污染，风罩的气流应避免操作者呼吸区；
- 为有效排出尘埃粒子，所有分支管路的风速设计应符合要求；
- 对于有爆燃危险的粉尘或烟雾污染物，管路中应设置局部控制装置，并将粉尘或烟雾污染物直接向屋顶排放；
- 局部排风系统的排风会影响房间风量平衡。当房间排风系统正常运行，而局部排风未运行时，应有防止外部空气经局部排风返流的措施。

4 基于关键参数要求的设计需求

洁净空调系统的设计关键在于为整个建筑提供全面的正压，同时在关键区域保持负压。应计算系统的总进

风量和排风量，确保排风量与进风量相匹配，以维持室内气流组织的稳定性。如果排风量过大而进风量不足，会导致室内形成负压，使外界非过滤风被吸入；反之，若进风量远大于排风量，可能会造成室内气流紊乱，不利于维持洁净环境。

4.1 洁净空调系统的关键参数

设计洁净空调系统时，必须明确几个关键参数。在动态条件下，应确定房间可接受的温度及湿度水平^[3]。洁净空调系统的规模与室外空气质量紧密相关。外部空气质量越好，洁净空调系统规模可以相对较小。反之，若外部空气质量不佳，则需考虑空气过滤需求、房间压力控制以及控制微生物污染的需求。

4.1.1 温度

在固体制剂生产车间内，生产房间的温度是一个关键参数。大部分产品、物料和操作工艺都有较宽的耐受温度范围，但暴露时间越长，可耐受的湿度范围就越窄。长时间储存或暴露时，温度对产品和物料的影响会变得尤为显著。

根据美国药典规定，成品的储存温度范围为 15 ~ 30℃，储存房间的温度应控制在 20 ~ 25℃ 之间，最大平均动态温度为 25℃。

4.1.2 相对湿度

相对湿度会影响暴露的吸湿性产品或物料。为了满足产品特定的湿度需求或确保操作人员的舒适度，除湿可通过降低空气温度或者使用除湿器来实现，而加湿则可以通过安装加湿器来完成。洁净空调系统中相对湿度的控制方法包括：

- 加湿控制：实现加湿控制有两种主要方法。首先是蒸汽加湿，它涉及使用蒸汽加湿器将蒸汽直接注入空调系统的送风管道或空调箱内。在制备蒸汽时，一般采用去离子水，这有助于有效减少蒸汽中的粒子含量；其次是

水喷雾加湿，它利用高压喷雾装置将水雾化成微小颗粒，然后将这些颗粒喷入空调系统中。

●除湿控制：进行除湿控制同样有两种策略。首先是冷凝除湿，该方法在空调箱中设置表冷器，使空气温度降低到露点温度以下，导致空气中的水蒸气凝结成水滴，并通过排水系统排出；其次是转轮除湿，转轮除湿机内含有一个吸湿转轮，当空气通过转轮时，其中的水分被转轮中的吸湿剂所吸附。这种除湿方式适用于对湿度要求较高的洁净空调系统。

4.1.3 悬浮粒子

生产口服固体制剂的洁净厂房与无菌工艺厂房不同，没有特定的粒子级别要求。产品污染可能来自外部环境或内部环境，因此应评估空气处理系统的粒子去除能力。

洁净空调系统在使用回风时，应评估产品的交叉污染风险以及室内外粒子情况。同一厂房生产多个品种时，应进行风险评估，以确定是否可以使用经过高效过滤器过滤的回风。对于大多数口服固体制剂的洁净空调系统，采用直排型时，无需使用高效过滤器即可满足空气洁净需求。如果洁净空调系统采用回风循环型，则在送风口或回风口需要安装过滤效率超过 99.97% 的高效过滤器，以防止暴露的产品和物料产生交叉污染。然而，高效过滤器并不适用于过滤压力蒸汽或有害气体。

4.1.4 房间相对压差

房间相对压差决定了气流的方向。对于生产口服固体制剂的洁净房间而言，相同洁净等级区域相邻房间之间的压差要求是大于 +5 Pa，而洁净室与外界环境之间的压差则是大于 +10 Pa。以下几种情况，房间相对压差为关键参数：

●在生产多个品种的区域，若存在干粉状物料暴露且未被有效阻隔或缺

乏捕尘装置时，应保持房间的相对压差，以防止当前房间产生的悬浮粒子被带到其他区域；

●当物料或污染物浓度较高时，保持房间的相对压差至关重要，以防止污染物对操作人员和产品造成影响；

●在连接区域，应控制压差以防止悬浮粒子向各个方向扩散；

●在可能发生悬浮粒子交叉污染的区域，应设置合理的气流方向和流速，以防止因悬浮粒子或污染物返流造成的污染；

●在洁净厂房平衡气流时，保持相对压差是必要的，以实现避免交叉污染和保证气流方向的需求。在进行气流平衡前，应检查房间和建筑是否有明显的泄漏情况，因为泄漏会对气流平衡或者粒子扩散产生重大影响。

4.1.5 换气次数

生产口服固体制剂的洁净厂房建议的换气次数为每小时 6 ~ 20 次。换气次数设计主要受制冷、加热、相对湿度、压力、粒子控制、稀释通风等因素的影响。应根据以上因素制定换气次数范围。

口服固体制剂洁净空调系统换气次数的制定原则主要包括以下几点：

●满足洁净度要求：一般情况下，洁净度等级越高，所需的换气次数也越多。参考《医药工业洁净厂房设计规范》，D 级区域的换气次数不低于每小时 10 次，实际设计时还需综合考虑其他因素；

●考虑生产工艺：口服固体制剂生产中不同的工艺对环境的要求不同。例如，在产尘量大的粉碎、过筛等工序中，需要较高的换气次数以及时排出粉尘，防止粉尘扩散污染其他区域；而对于相对洁净的包装工序，换气次数可适当降低；

●适应人员和设备情况：当厂房内人员数量多、设备发热量和发尘量大时，需要增加换气次数，以维持合适

的温湿度和洁净度。

4.2 洁净空调系统的监测和控制

在洁净空调系统的监测和控制方面，首先，监测装置应设置警戒限，当温度超出规定范围时，应在一段时间内发出报警。同时，定期监测关键点可以发现参数是否超过运行限度，而对 GMP 关键房间参数进行持续监测，则能够确认是否超出正常受控范围。其次，洁净空调系统的控制装置的精度应满足设计要求，传感器和监测器的精度值需确保准确无误。监测和控制关键参数可以通过洁净空调自动化控制系统实现，也可采用人工方法，但如果选择人工监测，则应确保有足够的监测频次，以充分显示参数处于可接受的控制范围之内，并能及时发现偏差，避免对产品或物料造成影响。

5 基于非 GMP 要求的设计需求

除了满足 GMP 的严格要求外，洁净空调系统的设计还需兼顾操作员工的舒适度以及对有害环境的有效通风管理，以下将分别从这两个方面展开详细说明。

5.1 操作员工舒适度

房间的最高和最低温度、湿度应该符合职业安全健康管理标准。在持续工作期间，建议湿度维持在 35% ~ 55% 之间，温度维持在 18 ~ 26℃ 之间，以确保操作员工的舒适度。

房间湿度过低或过高可能会导致以下问题：

- 湿度过低会增加房间内表面的积尘；
- 湿度过低会产生静电；
- 湿度过高可能导致房间内电子设备故障；
- 湿度过高会加速房间内金属设备等物质的腐蚀；
- 湿度过高会促进房间内微生物的

繁殖和霉菌生长。

5.2 有害环境的通风

在固体制剂生产过程中，有害环境的通风设计至关重要，尤其是针对易燃气体和易爆粉尘的管理。以下将分别介绍易燃气体和易爆粉尘的通风控制措施，以确保生产过程的安全性和空气质量。

5.2.1 易燃气体的通风

在易燃气体的通风管理中，需要根据具体的生产环节和气体特性采取相应的措施，以确保生产安全和空气质量。以下分别针对不同场景进行详细说明：

- 在口服固体制剂的生产过程中，常使用一些溶剂，通常需要设置直排空气系统。例如，在制粒、包衣等环节使用乙醇溶剂时，乙醇挥发的气体可能会积聚在车间内，不仅影响空气质量，还存在火灾风险，因此需要通过排风系统进行直接排出；

- 当使用稀释通风来控制易燃气体时，稀释通风量应由该物质的阈值决定，而不是较低的爆炸极限。物质的阈值是指劳动者在工作场所长期接触某种有害物质而不会对健康产生不良影响的浓度限制；

- 在生产房间内存在易燃气体和混合气体的情况下，应设置直排空气系统，仪表就地排出。

5.2.2 易爆粉尘的通风

在口服固体制剂生产过程中，制剂颗粒在干燥、粉碎、过筛、混合等操作环节会产生大量粉尘。这些粉尘若遇到足够能量的火源，可能会引发爆炸。为预防此类情况，可采取以下措施：

- 合理设计通风系统，根据车间布局、设备位置及产尘情况，设计科学合理的通风系统，确保车间内各个区域都能得到有效的通风换气；

- 选择合适的通风设备，使用防爆型通风机，能有效防止因电机故障、

叶轮摩擦等产生火花引发爆炸；

- 安装高效的空气过滤装置（如中效、高效过滤器），可过滤掉空气中的粉尘颗粒，防止粉尘在车间内循环积聚；

- 联动消防系统，在通风系统的关键部位设置防火阀，一旦发生火灾，防火阀自动关闭，防止火灾通过通风管道蔓延；

- 在局部排风系统设计时，应明确管道内粉尘的输送速度，以防止粉尘在风管内的累积。

此外，集尘器会累积易燃粉尘，为预防集尘器因累积易燃粉尘而引发爆炸，可采取以下措施：

- 与集尘器相连的设备应设置机械和电气保护；

- 选择合适的集尘器，根据粉尘的性质、浓度、粒径等特性，选择匹配的集尘器类型和规格，如布袋式集尘器、旋风式集尘器等；

- 采用具备阻燃、防静电材质的集尘器（如滤袋选用防静电、阻燃的纤维材料），外壳使用防爆的金属或阻燃塑料；

- 控制粉尘浓度和流速，确保粉尘在集尘器入口处的浓度及粉尘在管道内的流速在安全范围内，避免高浓度粉尘积聚。

6 洁净空调系统的空气系统

洁净空调系统的空气系统是确保洁净室环境达标的关键部分，其设计包括风口及集尘器的合理布局和风管系统的优化选择，以下将分别从这两个方面展开详细说明。

6.1 风口及集尘器设置

在洁净室的通风系统设计中，风口和集尘器的合理布局是确保室内空气质量和系统运行效率的关键环节。接下来，我们将分别探讨新风口、排风口以及集尘器的具体设置要求。

6.1.1 新风口设置

新风口应设在室外空气洁净区域，

远离污染源，如烟囪、污水处理站等。同时，应避免新风口处于建筑物的背风面，以防止室外污染物积聚。

新风口处应设置有效的过滤装置（如初效过滤器、中效过滤器等），以去除空气中的灰尘、杂质等污染物，保证进入洁净室的空气达到所需的洁净度要求。

6.1.2 排风口的设置

在进行建筑布局和设计时，若排风口和新风口需叠放，排风口应设置在较高位置，并与新风口保持一定距离，以减少交叉污染的风险。若排风可能引起环境问题，应先对排风进行处理再排放。

对于存在局部污染源的洁净室，排风口应尽量靠近污染源，以便及时有效地排出污染物。

排风口处也应设置有效的过滤装置，如初效过滤器、中效过滤器等。过滤装置可以拦截从排风口排出的污染物，保护室外环境和人员健康；同时，它们还可以阻止室外未经过滤的空气通过排风口倒灌进入室内，有助于维持室内的洁净度，保证洁净空调系统的运行效果。

6.1.3 集尘器的设置

集尘器通常安装在建筑物外部。当存在防爆系统或者直接通向外部的卸爆通道时，集尘器可置于室内任何地方。室内集尘器应临近外墙。使用卸爆通路时，应考虑气候条件，如下雪的影响，以及通风口的安全性。

6.2 风管系统

当房间压差较大时，风管的泄露程度会随时间增加。因此，应从投资成本和运行节能的角度评估使用密封性管道的必要性。

6.2.1 风管的材质

风管的材质多种多样，应结合安装环境等因素综合选择。表面有涂层的风管在安装时应远离未遮盖或暴漏在环境中的产品。在装有加湿器的系

统中,加湿器所在管道的后续部分应选择耐腐蚀风管,以防止风管腐蚀。

通往生产区的风管系统不应使用渗透性或纤维性的风管衬垫和消声器,因为这些材质可能会产生颗粒或滋生微生物。

6.2.2 风管的选择

与标准排风系统相比,集尘排风系统要求更高的风速和更稳定的运行压力。可以考虑使用真空管道替代标准管道系统,因为真空管道可以耐受更高压力,内表面更光滑,密封性更好。

涉及有液体工艺排风的管道可能会发生蒸汽冷凝,因此应使用耐腐蚀材料,如不锈钢或者FRP。法兰或接口应设计为可拆卸,便于风管清洁。管道应按特定形式装配,以防止冷凝液倒流。

7 洁净空调系统的调试报告与确认计划

为了确保洁净空调系统能够高效、稳定地运行并满足设计要求,调试和确认工作是不可或缺的环节。接下来,我们将分别介绍洁净空调系统的调试报告内容以及系统的确认计划。

7.1 洁净空调系统的调试报告

应由具备相应资质的专业人员进行调试,并提交详尽的最终报告。报告内容包括但不限于下述内容:①确保房间压力或气流相关的空气平衡和温度平衡得到妥善处理。②执行高效过滤器的检漏测试。③提供制造商手册和部件清单。④包含预防性维护和运行程序。⑤记录培训情况。⑥竣工文件应包括洁净空调系统示意图、房间气流流向图、控制原理图以及对洁净空调系统运行的功能说明书。

7.2 洁净空调系统的确认计划

制定对系统关键部件和性能的完整确认计划,内容应包括但不限于下述内容:

- 设计确认(DQ):在设计确认

阶段,需要对洁净空调系统进行全面审核与评估。文件审核方面,要仔细检查洁净空调系统的设计图纸、技术规格书等文件,确保设计符合相关标准和规范,满足洁净室的工艺要求。同时,在设计评估环节,需重点评估系统的气流组织、温湿度控制、压差控制、空气过滤等设计参数是否满足洁净室的洁净度、温湿度等指标要求。

- 安装确认(IQ):在安装确认(IQ)阶段,需要对洁净空调系统的设备、管道和电气系统进行全面检查。具体包括:检查空调机组、风机、过滤器、风管等设备的规格和型号是否与设计相符;检查空调水系统、压缩空气系统等管道的安装是否符合规定要求;同时,检查洁净空调系统的电气设备和线路的安装是否符合要求,以确保整个系统的安装质量符合设计和规范标准。

- 运行确认(OQ):在运行确认(OQ)阶段,需要对洁净空调系统进行全面调试。首先进行单机调试,对空调机组、风机、加湿器、加热器等设备进行单机调试,检查设备运行参数是否符合设计要求。随后开展系统调试,对洁净空调系统进行整体调试,调整系统的风量、风压、温湿度、压差等参数,使其达到设计要求。最后进行自控系统调试,检查自控系统的传感器、执行机构、控制器等设备的功能是否正常,以保障整个洁净空调系统能够稳定运行并满足设计要求。

- 性能确认(PQ):性能确认(PQ)包括洁净度测试、温湿度测试和压差测试。在洁净度测试中,应在洁净室静态和动态条件下,对悬浮粒子、微生物等洁净度指标进行测试,以确保洁净室的洁净度符合设计要求和相关标准的规定。同时,还应在洁净室不同位置 and 不同时间进行温湿度测试,检查湿度的均匀性和稳定性,确保温湿度符合工艺要求。

此外,还应测试洁净室与相邻房

间、洁净室与外界环境之间的压差,以确保压差符合设计要求。

8 结语

本文探讨了口服固体制剂车间洁净空调系统设计中需关注的关键因素。通过分析基于环境和GMP的设计要求和基于关键参数的设计要求,进行了详细的阐述。通过合理的选型和对温湿度、洁净度的精准调控,可完全满足GMP标准。实践表明,科学的洁净空调系统可有效降低微生物和尘埃粒子浓度,并实现节能降耗的目标。本文的论述不仅为固体制剂车间的生产提供了有力支持,也为其他同类车间的空调系统设计提供了借鉴。

参考文献:

- [1] 王晋.新版GMP要求下制药厂洁净空调使用与设计分析[J].医药工程设计,2011,32(6):29-31. DOI:10.3969/j.issn.1008-455X.2011.06.007.
- [2] 冯智,钟汉云,芮庆忠.洁净空调控制系统的设计及应用[J].自动化与信息工程,2013(1):45-48. DOI:10.3969/j.issn.1674-2605.2013.01.010.
- [3] 喻国琴,李冰笑,张自端.荆门某药厂综合制剂车间洁净空调系统设计[J].暖通空调,2011,41(9):60-63,86. DOI:10.3969/j.issn.1002-8501.2011.09.014.

药厂暖通系统运行中的节能探讨

赵本杰

华苜生物科技（青岛）股份有限公司

摘要：制药行业作为典型的高能耗产业，暖通空调（HVAC）系统在其能耗结构中占据核心地位，能耗占比达总能耗的40%~60%。本文紧密围绕2025年政府工作报告中提出的绿色低碳转型目标，通过系统性的技术剖析与实际研究，深入探讨了药厂暖通系统的能耗构成、节能技术面临的瓶颈以及智能制造在其中的赋能路径。研究结果表明，冷热源设备与空气处理机组（AHU）是主要的能耗集中点；借助智能控制系统、数字孪生以及能源管理平台的集成应用，有望实现20%~30%的能耗降低。此外，文章还前瞻性地提出了零碳冷热源、AI深度优化等前沿技术方向，旨在为制药企业的绿色转型提供切实可行的实践指导。

关键词：药厂；暖通系统；节能；智能制造；绿色转型

1 引言

在2025年政府工作报告明确强调“深入实施绿色低碳先进技术示范工程”的大背景下，制药行业的节能降耗工作显得尤为迫切。制药过程对环境条件极为严苛，暖通系统需确保洁净车间始终维持恒温恒湿状态，如温度控制在 $22\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，湿度保持在 $45\pm 5\%$ ，同时还要满足换气次数要求。如此严格的环境保障需求，使得暖通系统能耗在制药厂总能耗中占比居高不下。

传统节能技术，如变频调节与热回收技术，虽在一定程度上有助于降低能耗，但因其调控模式相对静态，难以精准契合制药生产过程中随生产批次、时间等因素频繁动态变化的负荷需求。此外，设计上的冗余问题也限制了热回收技术充分发挥节能潜力。因此，在当下追求绿色发展的时代潮流中，将智能制造技术深度融入药厂暖通系统，实现

系统层面的全方位优化，已成为制药行业节能降碳的必然选择与关键突破点。

2 药厂暖通系统能耗构成与痛点分析

2.1 主要耗能环节与占比

在深入剖析药厂暖通系统的主要耗能环节后，我们明确了各环节的能耗占比，并总结出了一系列影响能耗的关键因素。这些因素不仅导致了能源的浪费，还影响了系统的运行效率和稳定性，亟需通过优化和改进来解决。

2.1.1 冷能消耗（约占总能耗25%）

冷能供应主要依赖冷水机组，多数药厂采用传统的螺杆冷水机组，能效比（EER）在3.0左右，在药厂暖通系统能耗中占比较大。老旧机组在部分负荷运行时，效率衰减更为显著，降幅可达30%。其冷水机组同时承担多个洁净车间的冷能供应任务，在夏季天气炎热，生产高峰期间车间生产任务调整，造成负荷波动频繁。定频螺杆冷水机组由于缺乏变频调节功能，在负载波动时频繁启动，无法及时响应负荷变化，导

致在负荷低谷时段，额外冷能消耗高达15%，造成了大量的能源浪费。变频螺杆冷水机组在负载变化时能实时调整频率以降低消耗，但低频损耗仍然高达10%。

此外，冷水机组选型与实际冷负荷不匹配，装机容量过大将使它长期处于低负荷低效运行状态，也是造成能耗损耗的重要因素。

2.1.2 热能消耗（约占总能耗25%）

热能供应主要由自由锅炉或市政蒸汽供应。例如，采用天然气立式灌流锅炉，每吨蒸汽成本约为400元左右；而市政工业蒸汽每吨约为300元左右（区域不同，价格不同，仅供参考）。在冬季或对温度要求较高的生产工艺，需要稳定的热能输入。许多药厂的锅炉设备老化，燃烧效率低下，热转换率较低。部分传统锅炉的热效率仅为60%~70%，与先进高效锅炉85%~95%的热效率水平相比，存在显著的差距。

在热媒转换和输送过程中，换热器热损耗、管道散热损失不容忽视。若

作者简介：赵本杰，高级工程师，担任华苜生物科技（青岛）股份有限公司工程设备部经理

管道保温材料质量差、厚度不足或维护不善,热损失可达10%~15%。此外,药厂在热能使用过程中,还存在过度加热、热设备空转等不合理用热方式,进一步加剧了热能浪费。

2.1.3 送风机组能耗消耗(约占总能耗30%)

送风机组的能耗受洁净级别^[1](A、B、C、D)、换风次数、压差梯度以及高效过滤器(HEPA)阻值等多种因素影响。不同洁净级别的车间对空气质量要求差异显著,A级、B级高洁净区对空气洁净度要求极高,需要频繁换气并维持较大的压差梯度,以防止外部污染物侵入。例如,A级洁净区单向流风速0.36~0.54 m/s,B级换气次数≥40次/h,C级换气次数≥20次/h,而D级洁净区换气次数≥15次/h。高换气次数意味着风机需输出更大风量,从而消耗更多电能。

同时,高效过滤器在运行过程中,随着使用时间增加,其阻力会逐渐增大。当HEPA阻力超过初始阻力2倍时,风机为维持恒定送风量,能耗将上升25%。在实际运行中,由于过滤器维护不及时,其阻力往往远超正常范围,进一步加剧风机能耗。

此外,洁净区的压差梯度的合理设置,节约送风机组的冗余和减少更多风量的输出,风机本身的选型和性能也对能耗有重要影响。若风机效率低下、调速性能差,无法根据实际需求精准调节风量,也会导致不必要的能源消耗。风机长期在非高效工况点运行,额外能耗可达10%~15%。

2.1.4 水系统能耗(约占总能耗15%)

水系统主要涵盖冷冻水系统和冷却水系统,其能耗在暖通系统中占有一定比例。在冷冻水系统中,冷冻水泵负责将低温冷冻水输送至各个空调末端设备。然而,由于管道设计不合理(如弯头过多或管径选择不当),会

导致水流阻力增大,扬程损失可达20%~30%。为克服这些额外的阻力,冷冻水泵需增加额外的功率,从而导致能耗的增加。

在冷却水系统中,冷却水泵和冷却塔协同工作,将冷水机组产生的热量散发到大气中。冷却塔的散热效率直接影响冷却水的温度,进而影响冷水机组的性能。如果冷却塔的散热效果不佳(如填料结垢或风机故障等),会导致冷却水温度过高,使冷水机组的冷凝温度升高,制冷效率下降,能耗随之增加。此外,水系统中的阀门控制不当(如阀门开度不合理或存在漏水现象),也会造成能源浪费。据统计,水系统因阀门问题导致的能耗增加约为5%~10%。

2.1.5 其他隐性消耗(约占总能耗5%)

除上述主要能耗环节外,还存在一些隐性消耗。例如,传统的PID控制方式在暖通系统中应用广泛,但难以精确跟踪动态负荷变化。在实际运行中,常出现冷热抵消现象,即制冷设备与制热设备同时运行,相互抵消部分能量,这会额外消耗10%~15%的能源。而且,由于药厂生产具有间歇性特点,在生产间隙或设备调试期间,暖通系统若未及时调整运行参数,仍维持满负荷运行,也会造成能源浪费。此外,设备的频繁启停(如风机、水泵的频繁启停),会产生额外的启动电流冲击,增加能耗,每次启停的额外能耗约为正常运行能耗的1%~3%。同时,由于缺乏对系统整体运行状态的实时监测与数据分析,无法及时发现和解决潜在的能耗问题,也导致了能源的隐性损失。

2.2 能耗痛点总结

针对暖通系统的能耗痛点,深入分析其背后的技术与管理短板,将有助于提出更具针对性的节能优化方案。

2.2.1 静态调控与动态需求矛盾

洁净区的负荷随着生产批次、时间等因素呈现显著的动态变化。药品生

产工艺复杂多样,不同生产阶段对温湿度、洁净度等环境参数的要求差异很大,这导致了负荷的频繁波动。然而,当前大多数药厂的暖通系统在设计时,基于保守原则,按照最大负荷配置设备,缺乏对动态负荷的有效应对机制。在低负荷时段,设备无法灵活调节输出,例如冷水机组不能根据实际冷负荷降低制冷量,风机不能按实际风量需求调速,使得系统运行效率低下,能源浪费严重。据调查,大约70%的药厂存在此类问题,在低负荷运行时,能源浪费可达到30%~50%。

2.2.2 维护滞后

暖通系统设备长期运行,易出现各类问题,影响能效。过滤器作为保障空气洁净度的关键部件,在运行过程中会逐渐被灰尘、微生物等杂质堵塞,导致其阻力增大,通风量下降,进而使风机能耗增加。换热器表面也会因结垢、积尘等原因,降低传热效率,使冷热源设备需要消耗更多能源来维持既定的制冷或制热效果。而且,设备的零部件磨损、老化等问题若未及时发现和处理,会导致设备性能下降,能耗上升。在实际生产中,由于维护计划不合理、监测手段落后,许多药厂不能及时察觉设备性能变化,往往在设备出现严重故障或能耗大幅增加后才进行维护,导致设备能效逐年下降,降幅可达5%~8%。

2.2.3 系统孤岛化

目前,许多药厂的暖通系统与生产设备相互独立,缺乏有效的联动机制。生产设备在运行过程中会产生大量的热量、水汽等,这些因素会对车间的温湿度、空气质量等环境参数产生影响。然而,暖通系统无法实时感知生产设备的运行状态变化,不能及时调整运行参数以适应环境变化。例如,当生产设备开启或关闭时,车间内的热负荷会瞬间改变,但暖通系统仍按原设定参数运行,导致能源利用

效率低下。而且，不同区域的暖通子系统之间也缺乏协调统一的控制，无法从全厂层面实现能源的协同优化，造成能源的不必要浪费。

2.2.4 缺乏精准能耗监测与分析

药厂暖通系统的能耗监测多停留在整体能耗计量层面，缺乏对各关键设备、各运行环节的精准能耗监测。无法准确把握不同冷热源设备、送风机组、水系统设备在不同工况下的能耗情况，也就难以发现能耗过高的具体环节和原因。同时，对能耗数据的分析手段落后，多为简单的数据统计，无法挖掘数据背后隐藏的能耗规律和潜在问题。

3 传统节能技术措施与局限性

3.1 设备升级与热回收技术

为了实现药厂暖通系统的高效节能运行，设备升级与热回收技术成为关键切入点。通过高效冷热源设备的替换和排风热回收技术的应用，能够有效挖掘系统节能潜力，为药厂的可持续发展提供有力支持。

3.1.1 高效冷热源替换

磁悬浮变频离心式冷水机组作为一款新型高效冷源设备，其能效比（EER）通常 ≥ 6.0 ，相较于传统螺杆机，节能效果显著，节能率可达40%。磁悬浮技术通过磁悬浮轴承使转子悬浮运转，消除了机械摩擦，从而大幅降低了能耗。同时，变频调节功能可根据实际冷负荷实时调整制冷量，确保机组在高效工况下运行。

在热源设备升级方面，采用新型高效冷凝锅炉可显著提升热效率。高效冷凝锅炉通过回收烟气中的显热和潜热，热效率可达95%以上，相比传统锅炉提高了20%~30%。

3.1.2 排风热回收

转轮式热交换器是常用的排风热回收设备，可回收排风中70%的显热与潜热。在药厂洁净车间，大量经过处理的洁净空气在满足生产环境需求后

被排出，其中蕴含着大量的能量。转轮式热交换器利用转轮的旋转，将排风中的热量传递给新风，实现能量回收。此外，热管式热交换器也具有较好的热回收性能，其结构简单、运行可靠，在一些空间有限的药厂车间应用效果良好，可回收排风中50%~60%的热量。

3.2 变频技术与系统优化

变频技术与系统优化是提升药厂暖通系统能效的重要手段。通过在水系统和空气处理系统中应用变频水泵与风机、回收冷凝水的热能，以及优化水系统的设计与运行，可以显著降低能耗，提高系统的整体运行效率。

3.2.1 变频水泵与风机

在水系统和空气处理系统中，变频水泵与风机可根据系统实际压差、流量需求动态调节转速。当夜间药厂停产或生产负荷降低时，系统对冷热水流量和送风量的需求减少，变频设备可自动降低转速，减少能耗。据实际运行数据统计，采用变频水泵与风机后，夜间停产时段的能耗可减少30%。而且，变频设备能够实现软启动，避免了启动时的电流冲击，延长了设备使用寿命。

3.2.2 冷凝水回收

冷凝水蕴含大量热能，可用于锅炉补水或其他预热用途。通过建立冷凝水回收系统，将高温冷凝水收集、处理后输送至锅炉，可节约蒸汽成本。安装了冷凝水回收装置和水质处理设备，将冷凝水回收率提高到80%以上，每年节约蒸汽成本15%。同时，冷凝水回收还可减少水资源浪费，降低污水处理成本，具有良好的经济效益和环境效益^[2]。

3.2.3 水系统优化

对水系统进行优化设计和改造，可有效降低能耗。合理选择管道管径，减少弯头、阀门等局部阻力部件，可降低水流阻力，减少扬程损失。采用水力平衡技术，通过安装静态或动态平衡阀，确保各支路水流量分配均匀，避免

部分区域流量过大或过小导致的能源浪费。定期对水系统进行清洗、除垢，保持管道内壁和换热器表面清洁，可提高传热效率，降低设备能耗。

3.3 局限性分析

在实际落地过程中，一系列现实困境严重阻碍节能技术与设备的推广应用，这些局限性主要体现在经济成本、技术整合以及运维管理等多个关键层面。

3.3.1 投资回报周期长

尽管磁悬浮机组和高效冷凝锅炉等先进节能设备的节能效果显著，但其初期采购成本相比传统设备高出约50%。对于资金实力相对较弱的中小企业而言，一次性投入大量资金进行设备升级改造颇具挑战。而且，设备安装调试及配套系统改造等也需要额外资金，这进一步增加了前期成本。以一套中等规模的磁悬浮冷水机组系统为例^[3]，其采购及安装成本大约是传统螺杆机系统的1.5倍，投资回收期通常在3~5年之间。这使得许多中小企业在考虑节能设备升级时感到犹豫。

3.3.2 技术碎片化

当前，热回收、变频等节能技术在药厂中的应用往往相互独立，缺乏系统性的整合。这些技术之间未能形成有效的协同效应，无法充分发挥整体节能潜力。例如，热回收系统回收的能量未能与变频设备的运行控制有效结合，导致回收的能量不能得到合理利用。而且，不同节能技术的供应商各自为政，在系统集成过程中容易出现兼容性问题，影响节能效果的稳定性和持久性。这种技术碎片化的应用方式，极大地限制了综合节能效果，难以实现对药厂暖通系统的全面和深度节能优化。

3.3.3 对运行维护要求高

采用先进节能技术和设备后，对药厂的运行维护人员提出了更高的要求。例如，磁悬浮机组和智能控制系统等设备和较为复杂，需要维护人员

具备专业的知识和技能，能够及时处理设备故障和运行异常。然而，目前许多药厂的维护人员技术水平有限，缺乏对新技术、新设备的了解和维护经验，导致设备在运行过程中不能充分发挥其节能性能，甚至因操作不当、维护不及时引发设备故障，增加了运行成本和能源消耗。

4 智能制造在暖通节能领域的关键应用路径

4.1 智能控制系统

智能控制系统是解决药厂暖通系统能耗问题的关键技术之一。通过集成 AI 动态负荷预测、边缘计算实时调控和自适应控制策略，智能控制系统能够有效应对动态负荷变化，优化设备运行，降低能源消耗，同时确保生产环境的稳定性和可靠性。

4.1.1 AI 动态负荷预测

LSTM（长短期记忆）神经网络作为先进的人工智能算法，在药厂暖通系统的动态负荷预测方面展现出显著的优势。通过对大量历史温湿度数据、生产批次数据、设备运行数据以及外部环境数据（如天气温度、湿度等）的学习和分析，LSTM 神经网络能够准确预测未来 24 h 甚至更长时间的温湿度需求。引入 LSTM 神经网络进行动态负荷预测后^[4]，成功减少了冷热抵消能耗，再热能耗降低了 18%。在实际应用中，该算法可根据不同季节、不同生产工艺阶段的特点，自动调整预测模型参数，提高预测精度。而且，通过与实时监测数据的对比分析，能够及时发现异常情况并进行预警，为系统的优化控制提供了可靠依据。

4.1.2 边缘计算实时调控

通过结合模糊控制算法与边缘计算技术，可实现对暖通系统的实时且精准的调控。传统控制系统在响应负荷变化时存在分钟级延迟，这容易导致温湿度超调。而边缘计算将数据处理和控制

决策功能下沉到设备端附近，大大缩短了数据传输和处理时间，使系统响应延迟从分钟级降至秒级。模糊控制算法根据设定的模糊规则，综合考虑多个输入变量（如温度、湿度、负荷变化率等），快速准确地调整设备运行参数（如冷水机组的制冷量、风机的转速、阀门的开度等），有效避免温湿度超调，确保洁净车间环境的稳定性，同时降低能源消耗。采用边缘计算实时调控系统后，温湿度波动范围控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 3\%$ 以内，能耗降低了 15%。

4.1.3 自适应控制策略

采用自适应控制策略，可使暖通系统根据自身运行状态和外部环境变化自动调整控制参数和运行模式。通过实时监测设备的能耗、性能指标等参数，系统能够判断当前运行状态是否处于最优，并根据预设的优化目标自动调整控制策略。例如，当冷水机组的能效比下降时，系统可自动调整冷冻水的供水温度、流量以及冷却塔的运行参数，以提高机组的运行效率。自适应控制策略能够有效应对生产过程中的不确定性因素，如生产工艺调整、设备老化等，始终保持暖通系统在高效节能状态下运行。

4.2 数字孪生与仿真优化

数字孪生与仿真优化是实现药厂暖通系统精细化管理和节能降耗的重要手段。通过构建高精度的虚拟模型和进行优化运行策略的仿真分析，能够为系统的优化设计和高效运行提供科学依据，从而有效提升系统的整体性能。

4.2.1 虚拟建模

基于建筑信息模型（BIM）技术构建的数字孪生体^[5]，为药厂暖通系统的优化提供了强大的工具。通过对实际车间的精准虚拟建模，能够在虚拟环境中对不同的设备选型方案进行模拟和分析。例如，某车间在进行数字孪生建模后，经过详细的模拟计算，将冷水机组容量从 800 RT 成功降至

600 RT，在满足车间制冷需求的同时，每年可节电 50 万 kWh，实现了设备的合理选型与节能优化。在建模过程中，不仅考虑建筑结构、设备布局等静态因素，还融入设备运行特性、负荷动态变化等动态数据，使模型更贴合实际运行情况。利用该数字孪生模型，还能对不同工况下系统的运行性能进行评估，如模拟极端天气条件或生产负荷突变时暖通系统的响应，提前发现潜在问题并制定应对策略。

4.2.2 优化运行策略仿真

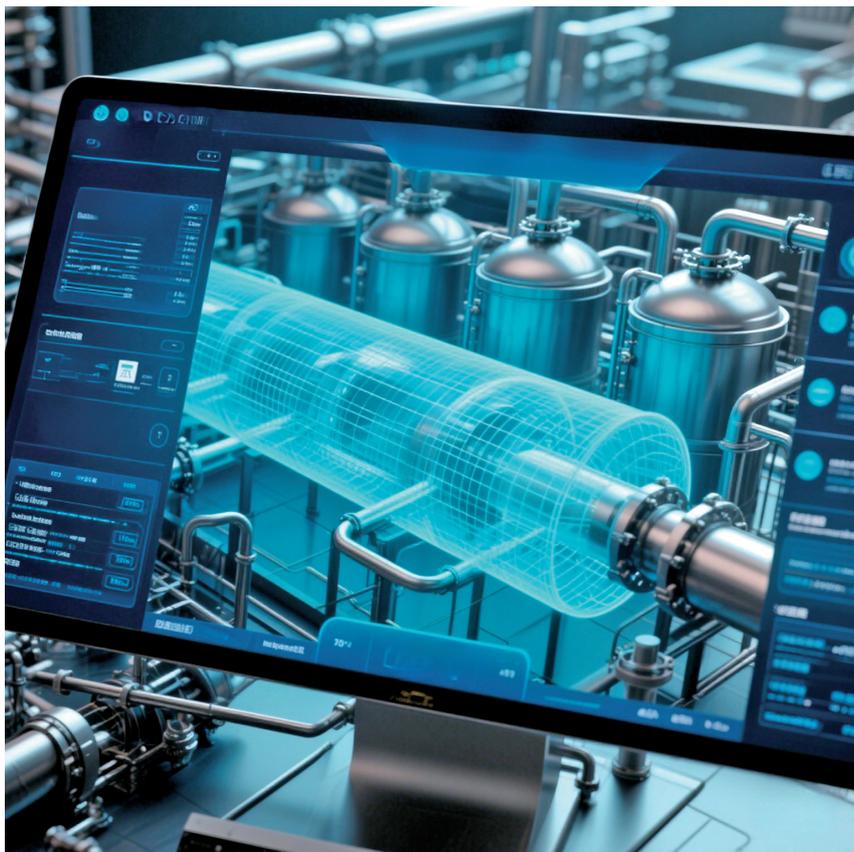
借助数字孪生模型，可以对不同的暖通系统运行策略进行仿真对比。例如，模拟不同的新风引入比例、冷热源设备的启停顺序、水泵和风机的调速方案等对系统能耗和环境控制效果的影响。通过大量的仿真实验，找到最优的运行策略，实现节能与环境控制的平衡。通过仿真优化，将新风引入比例在不同季节和生产时段进行动态调整，在保证车间空气质量的前提下，全年能耗降低了 8%。同时，利用仿真结果可以对操作人员进行培训，使其熟悉不同工况下系统的最佳运行操作方式，提高实际运行管理水平。

4.3 能源管理平台集成

为了进一步优化药厂暖通系统的能源管理，能源管理平台集成技术应运而生。通过与 MES 系统的联动、实时监测与分析能耗数据，以及区块链能效认证，能源管理平台能够实现能源利用的精细化管理，提升系统的整体能效。

4.3.1 MES 联动

制造执行系统（MES）与暖通系统的集成，能够实现两者之间的信息共享与协同工作。根据 MES 系统提供的生产计划，暖通系统可以自动切换运行模式。例如，在批次间隔期，生产设备处于低负荷或停机状态，此时暖通系统可自动切换至低风量模式运行，在保证车间基本环境要求的同时，有效



数字孪生综合管理系统

降低能耗。通过实时获取 MES 系统中的生产进度、设备运行状态等信息，暖通系统还能提前调整设备运行参数，避免因生产变化导致的能源浪费。例如，当 MES 系统显示某区域生产设备即将启动，暖通系统可提前提升该区域的温湿度控制精度，同时合理增加送风量，确保生产环境迅速满足要求，而在设备启动完成后，又能及时优化运行参数，降低能耗。这种联动机制使得能源利用更加合理高效，经实践验证，可使暖通系统能耗降低 10% ~ 15%。

4.3.2 能源数据实时监测与分析

能源管理平台集成各类智能电表、水表、气表等能源计量设备，对暖通系统的能耗数据进行实时采集和监测。通过对这些数据的深度分析，如能耗趋势分析、能耗分布分析、设备能耗对比分析等，能够清晰了解系统的能耗状况，找出能耗高的环节和时段。例如，通过能耗趋势分析发现某台冷水机组在特

定时间段能耗异常升高，进一步分析确定是由于冷凝器结垢导致制冷效率下降。基于数据分析结果，可制定针对性的节能措施，如安排设备维护计划、优化设备运行参数等。同时，利用数据挖掘技术，还能发现能耗数据之间的潜在关联，为进一步优化能源管理提供依据。

4.3.3 区块链能效认证

将暖通系统的能耗数据实时上传至区块链平台，利用区块链技术的不可篡改特性，生成真实可靠的碳排放报告。这不仅有助于药厂对自身的能源消耗和碳排放情况进行准确评估，还能为参与碳排放交易等相关活动提供有力的数据支持。在区块链平台上，各参与方可以共享和验证能耗数据，确保数据的公正性和可信度。而且，通过与其他药厂的能耗数据对比，药厂可以发现自身在能源管理方面的优势和不足，借鉴先进经验，不断提升能源利用效率，推

动药厂在绿色发展道路上不断前进。

5 结论

药厂暖通系统的节能工作不能仅局限于单一设备的升级改造，而是需要向全系统智能化重构的方向转变。通过引入智能制造技术，实现动态负荷的精准匹配、设备的预测性维护以及多能源之间的协同优化，能够有效突破传统节能技术的瓶颈，推动药厂朝着“近零碳车间”的目标迈进。

展望未来，随着人工智能、数字孪生与清洁能源技术的不断发展和深度融合，药厂暖通系统将不再仅仅是一个成本中心，而是有望转化为药厂绿色竞争力的核心要素。这将为制药行业的高质量可持续发展提供强有力的支撑，使他们在满足日益严格的环保要求的同时，实现经济效益与环境效益的双赢。

参考文献：

- [1] 国家药品监督管理局. 药品生产质量管理规范 (GMP) 实施指南[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2022.
- [2] 陈明华, 刘伟. 制药企业在蒸汽和空调系统的节能分析[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(11): 205-206.
- [3] 王建军, 李红梅. 制药企业 HVAC 系统节能技术应用分析[J]. 节能技术, 2023, 41(3): 45-49.
- [4] 李敏, 陈伟, 等. 基于 LSTM 的制药车间暖通系统动态负荷预测方法[J]. 自动化学报, 2024, 50(2): 345-356.
- [5] 张立新, 王昊, 等. 基于数字孪生的制药洁净厂房 HVAC 系统多目标优化[J]. 暖通空调, 2023, 53(8): 1-8.

药厂暖通系统节能改造案例分析

陈清立 奚秋晨 刘得龙

江苏利泰尔药业有限公司

摘要: 据调查,在制药企业中,能源消耗成本中电力所占比例最高,而暖通系统在电力消耗中的比重超过了60%。这一现象的主要原因在于需要维持洁净区的温度、湿度和空气净化标准,以保障药品的质量与安全。本文以江苏利泰尔药业有限公司(以下简称江苏利泰尔药业)的暖通系统改造项目为例,分析了系统当前存在的问题,并提出了相应的改造方案以提高二次能源供应的效率。同时,以江苏利泰尔药业的D级固体高活车间的改造为例,展示了在确保符合规范的前提下,通过优化BMS系统的分区规划以及调整洁净区的温度、湿度、换气次数等参数,实现了高效能源利用。

关键词: 制药;能源;高效机房;BMS;HVAC;节能

制药企业的能源消耗主要集中在水、电、蒸汽这三个方面。根据调研,商业化生产的制药企业每年的能源成本大约在1000万~3000万之间,其中电力消耗占据了最大比例。这主要是为了维持洁净区的温度、湿度、空气净化的状况,以确保药品的质量和安全。

以江苏利泰尔药业2024年9月份的用电量为例,通过智能化数据采集系统对冷水机组扩容改造后的用电情况进行分析,如表1所示。结果显示:在制药行业中,暖通系统的电力消耗占据最大份额,其占比超过了60%,如图1所示。

在暖通系统中,冷冻机房(包括冷水机组、冷却泵、冷冻泵、冷却塔)消耗了暖通电能的79%,其中冷水机组的能耗占比最高,约为53%;而暖通空调(HVAC)的能耗约占21%,如图2所示。因此,能源的高效供给和使用,对企业的节能降耗具有至关重要的作用。

表1 各区域用电情况

各区域用电情况(kWh)							总计
B101 车间	B102 车间	B301 车间	B302 车间	质检楼	其他 设备	暖通 设备	
5823	8502	29094	7969	43436	82003	272713	449540

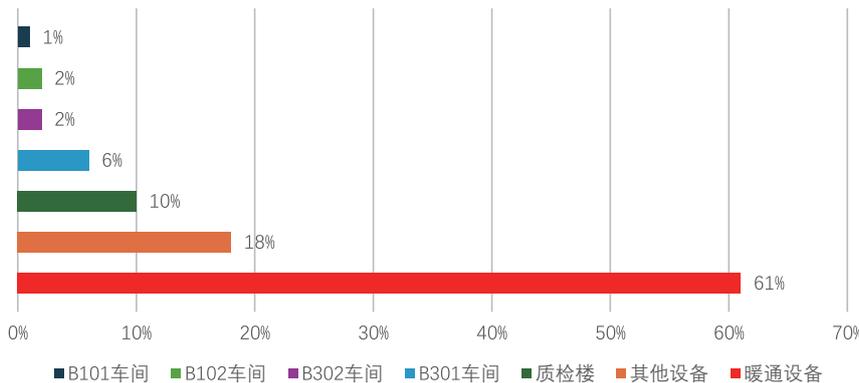


图1 各区域用电占比

1 当前暖通系统面临的问题

1.1 改造前冷冻机房能效低下

改造前冷冻机房的能效表现不佳,主要问题包括设备老化、运行效率低下等,这些因素共同导致了能源的大量浪费。具体问题如下:

- 设备老化导致机组效率低下,主要依靠手动操作,故障率高,系统稳定性差;
- 前期未进行水力平衡设计,导致

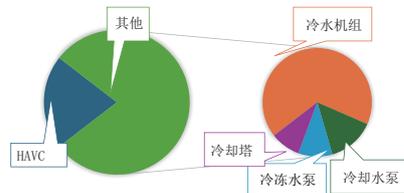


图2 暖通各设备用电占比

主机、泵、塔等配置不合理,系统阻力大,能源浪费严重;

- 冷水机组、水泵、冷却塔长期以定频运行,导致成本浪费。

1.2 HVAC使用浪费

随着全球对能源消耗的关注日益增加,暖通系统在能效方面正面临严峻挑战。许多现有的暖通系统设计和运行方式效率低下,导致了大量的能

源浪费。具体表现在：

- 系统无法在生产、消毒、值班等多种模式下自动切换，这导致了高风险和低效率；

- 现有的 BMS 能力弱，为保障车间环境工艺参数不超标，控制参数始终在中间值保守运行，导致能源浪费严重；

- 净化车间洁净度和压差控制不佳，异常较多，为保障合规生产，需增加送风量，导致能源浪费严重；

- 空调系统设计分区不合理，无法根据阶段性生产安排，启停非工作区域空调系统，造成能源浪费。

2 节能改进方向

2.1 冷冻机房改造策略——建设高效机房

建设高效机房是一个全面的过程，涵盖了冷水机组及相关设备的精心挑选、设计优化、稳定的系统控制、专业的安装施工以及智能化的调试和运维等环节。

一个高效的机房其 SCOP 值应 ≥ 5.0（见式 1），而目前国内多数由人工操作控制的冷水机房平均 SCOP 低于 3.0，能效提升空间显著。

$$\text{机房能效 (SCOP)} = \frac{Q(\text{总冷量})}{W(\text{主机}) + W(\text{冷冻水泵}) + W(\text{冷却水泵}) + W(\text{冷却塔})} \quad (1)$$

2.1.1 提高能源转化率、提供高效二次能源

通过技术改进，提高单机 COP 值（选用高效冷水机组、冷冻塔、水泵），提高机房综合能效比，高效提供二次能源。

例如，江苏利泰尔药业在改造升级前的系统配置包括 2 台螺杆机、2 台工频冷冻泵、2 台工频冷却泵和工频冷却塔，所有操作完全依赖于人工手动进行。经过验证，SCOP 为 2.92，具体数据如表 2 所示。针对此情况，公司采取了改造措施，对主机进行扩容，选用高效冷水机组、冷冻塔和水泵，

旨在提高单机的 COP，详细信息见表 3。

优化管道设计以降低管路阻力，根据实际负荷情况通过 AI 自动寻优系统，做好水力平衡，通过调节机组、水泵、冷却塔工作状态，使系统以最小化的电力消耗来满足末端设备对温湿度的需求（变流量控制），从而提高机房效能。

群控系统全面监控机组的运行状况，借助内置的主动优化机制，持续收集并分析数据，以实现自我调整。预期在一年内完成 SCOP 的优化工作，达成节能降耗的目标。

根据使用末端的需求和外界环境条件，在确保末端使用正常的前提下，通过调整机组出水温度（即变温控制）来提高系统的整体能效比（SCOP）。数据显示（见图 3），当主机运行在变温模式（绿色）时，相比于定温模式（红色），系统能耗降低约 17%，主机能耗降低了 8%。

2.1.2 高效机房群控，实现变流量控制与节能统计

在 2024 年 10 月中旬，我们对机

房完成了改造升级。随后的测试验证数据显示，在相同的末端用冷条件下（见图 4），机房的整体能耗降低了约 65%，SCOP 值提升了约 50%，初步实现了高效机房的目标。预计后续的全年运行中，机房系统的 SCOP 值将稳定维持在 5.0 以上。按照每日运行 8 h，年运行 300 天计算，全年可节省费用约 18 万元。

2.2 优化能源使用——提高 HVAC 系统效率

车间净化环境的建立依赖于冷冻机房提供的能源，通过净化空调系统转化为满足生产要求的空气洁净度（压差）、温度、湿度等关键指标。随着行业对规范理解的加深以及相关技术的进步（例如，净化车间建造材料的升级、工艺设备的密闭化水平提高、高效过滤器的容尘量和过滤效率提升，以及全球“碳达峰”“碳中和”战略等因素的共同推动），现行 2010 版 GMP 规范已与国际标准接轨。净化车间的换气次数、温度、湿度等指标已取消了规定数值，为企业的暖通系统节能工作

表 2 升级改造前的系统状况

主机	冷冻水泵	冷却水泵	冷却塔	SCOP
2 台螺杆机	2 台工频泵	2 台工频泵	400 m ³ 工频	2.92

表 3 升级改造后的系统状况

主机	冷冻水泵	冷却水泵	冷却塔	SCOP
2 台螺杆机 + 1 台磁悬浮	2 台变频泵 + 1 台工频泵（备用）	2 台变频泵 + 1 台工频泵（备用）	400 m ³ 工频 + 600 m ³ 变频	5.83

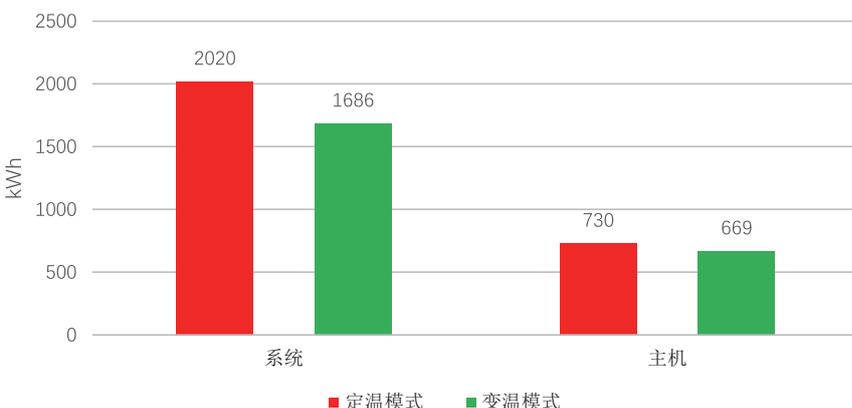


图 3 定水温与变水温的能耗对比

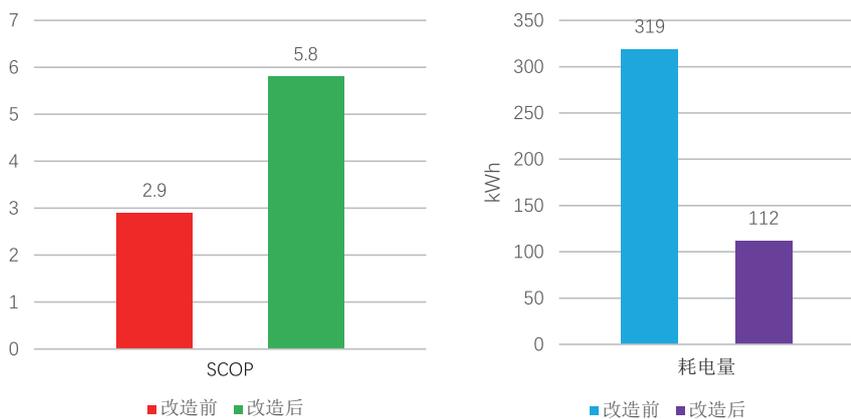


图4 改造前后耗电量及系统COP对比

提供了方法和法律依据。

2.2.1 优化BMS系统

通过系统化调节整个洁净空调系统的风量平衡与压差动态控制,实现不同换气次数下洁净度合规、压差梯度稳定。采用全量余度平衡阀(见图5中红框)对新风量与排风量进行联动调节,根据各功能间实时监测数据,通过PID算法动态调节风机的运行频率;同时,采用风量余度平衡测控阀(见图5中橙框)和风量差量余度平衡测控阀(见图5中绿框)控制各功能间风量,实现送风量、洁净室压力的余度平衡控制,确保压差梯度稳定。

2.2.2 根据不同的生产环境调整送风量(换气次数)以降低风机的能耗

洁净空调系统风量调整是一个完整的系统风量调节再平衡的过程,不仅是机组总送风量的简单调节,还需实现新风量、排风量等同步调整,以确保在不影响洁净环境的前提下,整体风量得以降低,从而实现节能运行。在确保洁净环境符合标准的基础上,测试不同换气次数下的机组能耗。

换气次数的设计不仅影响送风机的技术参数和电机功率,还决定了电缆及配电的承载能力,以及风道尺寸的选择。设计不合理不仅会对工程项目的成本产生重大影响,还可能导致能源的浪费。

本次测试的是江苏利泰尔药业的

D级固体制剂高活性制造车间。鉴于高活性产品生产的特殊要求,该车间的空调系统配置包含1台全新风机组、1台新风加回风机组以及1台转轮除湿机,此系统的能源消耗相对较高。

以下数据是测试江苏利泰尔药业B102车间2台HVAC在不同换气次数(8次、15次、20次)下所消耗的电能。如图6和图7所示。

根据统计数据,在确保合规的前

提下(见表4),我们可以洞察到相关的趋势和得出结论。

2.2.3 根据产品工艺要求适当调整湿度控制范围

变温度实验:依照国标《GB/T 26759-2011 中央空调水系统节能控制装置技术规范》的原则^[1],计划开展为期22天的温度交替实验。在实验过程中,第1天、第3天至第21天的奇数天,温度控制在21℃(蓝色标记),相对湿度维持在65%。而第2天、第4天至第22天的偶数天,温度调整至25℃(绿色标记),相对湿度同样保持在65%。具体能耗统计如图8所示。

在进行温度交替实验时,我们保持了恒定的控制湿度和车间生产环境(静态)。结果显示,当控制温度设定为25℃时,相较于21℃的设定,能耗降低了约16%,不包括蒸汽节能费用。由于外部环境平均温度已降至低于20℃,测试条件不再具备,因此今年未进行进一步测试。目前,我们仅

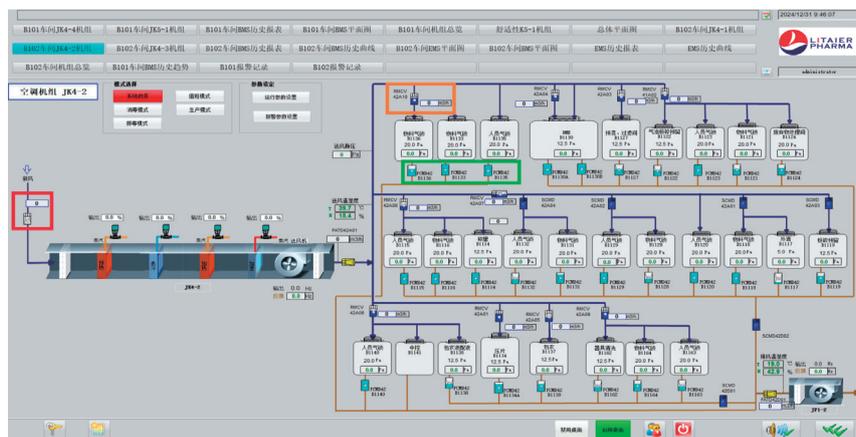


图5 BMS系统图

JK4-1空调机组													
序号	换气次数	送风量	送风机频率(HZ)	送风机电流(A)	送风机电压(V)	送风机功率(KW)	排风机频率(HZ)	排风机电流(A)	排风机电压(V)	排风机功率(KW)	测试时长	送风机额定功率	排风机额定功率
1	8	10181	28	13	125	2.1	14.6	2.3	123	0.1	3	18.5	22
2	15	12451	33	16	170	3.2	24.6	2.3	162	0.2	3		
3	20	17800	45	22	320	8.2	24.7	2.3	202	0.2	3		
值班模式(8次)	电表开始数值	23397.523	电表开始数值	23406.019	电表开始数值	2348.463	电表开始数值	23446.25	电流互感器倍数	75/5A	安装位置	一楼技术夹层	
	电表结束数值	23406.019	电表结束数值	23418.463	电表结束数值	23446.25	电表结束数值	23446.25					
	消耗功率(Kwh)	8.496	消耗功率(Kwh)	12.444	消耗功率(Kwh)	27.787							

JK4-2空调机组													
序号	换气次数	送风量	送风机频率(HZ)	送风机电流(A)	送风机电压(V)	送风机功率(KW)	排风机频率(HZ)	排风机电流(A)	排风机电压(V)	排风机功率(KW)	测试时长	送风机额定功率	排风机额定功率
1	8	10181	28	13	125	2.1	14.6	2.3	123	0.1	3	18.5	22
2	15	12451	33	16	170	3.2	24.6	2.3	162	0.2	3		
3	20	17800	45	22	320	8.2	24.7	2.3	202	0.2	3		
值班模式(8次)	电表开始数值	23397.523	电表开始数值	23406.019	电表开始数值	2348.463	电表开始数值	23446.25	电流互感器倍数	75/5A	安装位置	一楼技术夹层	
	电表结束数值	23406.019	电表结束数值	23418.463	电表结束数值	23446.25	电表结束数值	23446.25					
	消耗功率(Kwh)	8.496	消耗功率(Kwh)	12.444	消耗功率(Kwh)	27.787							

图6 电能统计

收集了 14 天的数据。

在变湿度实验中，依照国标《GB/T 26759-2011 中央空调水系统节能控制装置技术规范》的原则^[1]，计划开展为期 22 天的交替实验。实验中，第 1 天、

第 3 天第 21 天的奇数天，湿度控制在 65%（蓝色标记），温度为 25℃；第 2 天、第 4 天至第 22 天的偶数天，湿度控制在 50%（红色标记），温度为 25℃。具体能耗统计如图 9 所示。

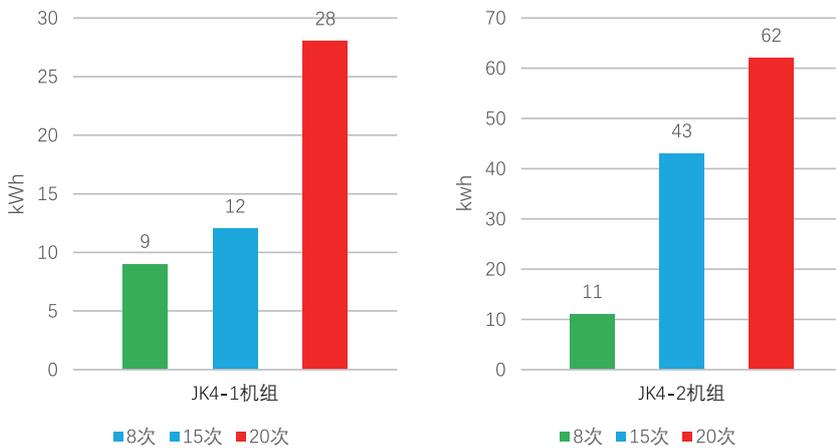


图 7 改变换气次数电能对比

表 4 测试结果

JK4-1	相较于 15 次换气次数，8 次换气次数的能耗平均降低了 31.5%。
	相较于 20 次换气次数，15 次换气次数的能耗平均降低了 55.4%。
JK4-2	相较于 15 次换气次数，8 次换气次数的能耗平均降低了 74.4%。
	相较于 20 次换气次数，15 次换气次数的能耗平均降低了 30.6%。

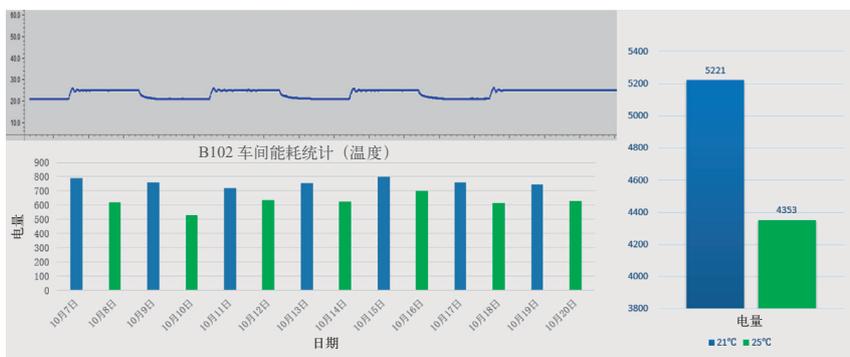


图 8 调整控制温度前后的电能消耗统计对比

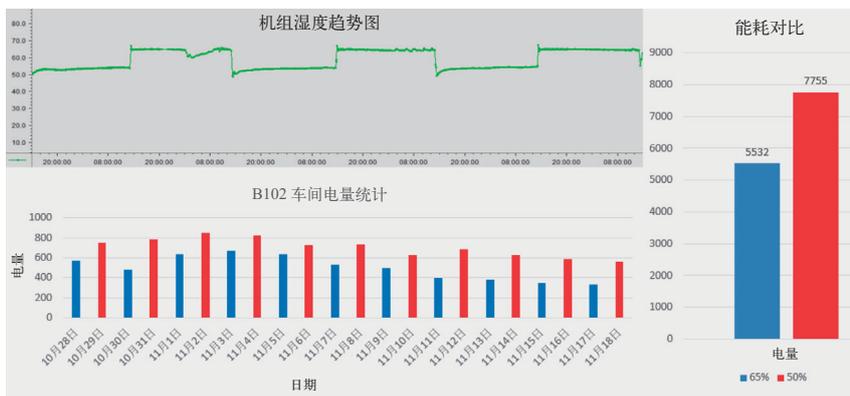


图 9 改变控制湿度前后的电能消耗统计对比

通过湿度交替实验，我们保持了相似的控制温度和车间生产环境（静态），实验表明，控制湿度在 65% 时，相较于 50% 的湿度，能耗降低了约 28%（不包含蒸汽节能费用）。

2.2.4 根据阶段性生产安排，规划空调系统的区域化运行策略

在本次生产车间改造中，我们规划了两条相对独立的生产线：一条为 HME 生产线，另一条用于干法 / 湿法生产。依据不同阶段的生产需求，空调系统可以分区独立运行。当仅需使用其中一条生产线时，可以选择性地关闭 1 台机组（如 JK4-2），从而有效减少不必要的能源消耗。为了防止不同生产阶段空调系统分区运行对洁净环境的影响，我们采用了全量余度平衡控制系统，确保工况变化前后洁净环境的合规性。仅此一项措施，每月就能节省 7000 元的 HVAC 使用电费。

3 总结

通过对机房和生产车间的高效改造，以及实施 HVAC 系统的温度与湿度控制调整和换气频率的优化计算，我们预计每年在暖通系统上的电费支出可节省约 27 万元。此外，我们计划开展第二阶段的节能措施，包括冷水机组水温调整和蒸汽使用的进一步节减。

暖通系统的节能涉及电力、蒸汽、自来水等多个方面的节能。关键在于高效能源转换与末端利用，通过 HVAC+BMS 系统减少浪费。净化车间的控制参数需要根据制造需求和季节变化进行调整，并非全年恒温恒湿。暖通系统的节能需在实践中结合实际情况采取行动，持续改善可降低成本和节约资源，使用节约才是最大的节约。

参考文献：

[1] GB/T 26759-2011，中央空调水系统节能控制装置技术规范[S].

“双碳”背景下药品生产厂房 冷水机组节能技术研究

朱毅 平丽芬*

中国医学科学院医学生物学研究所

摘要: 在制药行业中, 药品生产厂房的洁净区需要保持恒温恒压的生产环境条件。冷水机组为药品生产厂房提供了必要的制冷支持, 但其运行能耗较高。本研究以冷水机组相关的节能要素为对象, 深入分析了冷水机组选型前的节能技术、运行中的节能技术以及维护保养的节能技术, 旨在为冷水机组的高效运行提供节能技术方案和改进建议。本研究旨在为制药企业冷水机组节能提供具备指导意义的基础理论与实践方法, 以实现国家“双碳”政策下的节能目标, 推动制药企业向绿色低碳转型和高质量发展迈进。

关键词: 药品生产; 冷水机组; 节能技术; 能效提升; 高质量发展

在国家“十四五”规划和“双碳”国家大战略目标的指导下, 以及国家对制药业的各种支持政策推动下, 药品生产厂房冷水机组的节能技术应用与研究, 将对制药企业实现节能降碳目标发挥关键作用。

1 节能技术在冷水机组中的应用重要性

在制药企业的日常生产活动中, 各个生产环节都需要消耗水、电、气(汽)等能源以提供支持。特别是在空调系统的运行中, 对水、电的能源消耗尤为显著。冷水机组的耗电量占据厂房用电量的20%~30%, 在夏季用电量高峰时, 这一比例可高达30%^[1]。因此, 为了减少制药企业的能源消耗, 提高设施和设备的性能, 以

及提高能源利用效率, 节能技术在空调系统冷水机组中的应用变得至关重要。

1.1 节约能源

随着制药业的持续发展, 药品生产厂房的建设也在增加, 水、电的能源消耗在制药企业的生产保障成本中占比较大。采用节能技术能够减少企业的运营成本, 提高企业的经济效益。同时, 在节约能源方面, 水、电的能耗用量减少, 能够缓解当前能源供应紧张的局面, 降低废弃物的处理成本。企业能够实现经济可持续发展的良好状态, 从而提高企业经济效益。

1.2 减少环境污染

药品生产厂房空调制冷系统冷水机组节能技术的应用能够有效促进能源的高效利用, 有效减少空调系统中冷水机组设备运行产生的氟利昂气体、二氧化碳气体、氮氧化物等温室气体^[2]。节能技术的应用与推广, 能够有效减少污染物的产生量, 有助于改善环境质量^[3-4], 应对全球气候变化挑战, 实现环境保护和经济发展的双赢。

1.3 保证生产环境的质量

在药品生产厂房的洁净区生产环境中, 需要保证生产环境的恒温、恒压状态^[5-6]。为了保证药品生产环境的质量, 避免生产环境温度和压差带来的偏差及影响, 节能技术的应用能够保证空调系统冷水机组设施、设备的正常运行, 维持药品生产厂房的恒温、恒压状态, 为药品生产厂房持续保持稳定的生产环境。

1.4 促进产业结构升级

药品生产企业为了实现节能降碳的环保目标与要求, 往往需要应用一些节能技术与措施, 这通常涉及引进先进的生产设施和设备, 改进生产工艺模式。这样能够促进制药企业的产业结构积极调整, 推动制药业产业结构的升级。

2 冷水机组选型前的节能技术策略

在药品生产厂房的中央空调系统中, 冷水机组作为整个系统提供冷量的核心设备, 持续为空调系统提供制

作者简介: 朱毅为本文第一作者, 工程师, 主要研究方向为电气工程、冷水机组节能技术研究; 平丽芬为本文通讯作者, 助理研究员, 主要研究方向为肠道病毒71型灭活疫苗的研究与生产、细胞培养、半成品制备、实验溶液管理。

冷。设备的合理选型直接影响到整个空调系统的冷负荷量、使用率、制冷效率、设备运行稳定性等关键运行因素，因此，合理选择冷水机组是实现节能降耗的关键技术措施。

2.1 制冷量的合理选择

在冷水机组设备选型时，制冷量的合理选择是确保冷水机组高效运行的关键，冷水机组需要保证具备足够的制冷能力来达到有效的制冷效果，关键在于合理、科学地计算制冷量。

2.2.1 计算制冷量以选择合适的冷水机组

在冷水机组设计选型阶段，需根据药品生产厂房建筑的功能区布局、空调使用要求以及实际制冷量需求进行冷负荷计算，从而统计出药品生产厂房所需总冷负荷量。以此数据为基准，进行冷水机组选型的制冷量计算。

2.2.2 依据特性曲线确定制冷量以选择冷水机组

通常，冷水机组设备的生产制造厂家会通过试验绘制出特性曲线^[7]，通过这些曲线可以观察到不同冷凝温度下制冷量、功率、蒸发温度之间的曲线变化。因此，了解厂房建筑设计的总冷负荷后，通过对比特性曲线，即可确定冷水机组的制冷量。

2.2 冷水机组的选型

根据药品生产厂房生产工艺的实际需求，对冷水机组进行选型。可选择风冷式、水冷式、活塞机、螺杆机、磁悬浮等多种机型。根据冷水机组压缩机工作原理的不同，可选择定频式或变频式压缩机。基于不同的需求，可选择不同型号的冷水机组。在冷水机组的日常运行过程中，实际能耗受多种因素影响。在日常运行中发现，影响能耗的因素众多，但导致冷水机组压缩机持续高负荷运行，从而耗费大量电能的两个主要因素是运行环境温度 and 冷冻水出水温度。因此，在冷水机组选型时，应特别关注这两个关

键因素。

2.3 新技术的应用

随着冷水机组新技术的进步与发展，变频冷水机组以其卓越的节能特性，已成为冷水机组市场上高效节能的制冷设备。变频冷水机组的变频调速技术主要通过变频器控制压缩机电机转速，进而调节制冷剂的流量和压力，实现制冷量的精确控制和连续调节。这种调节方式能精确控制水温，满足不同工艺过程的需求。当空调系统负荷较低时，冷水机组的压缩机降低频率，减少能耗；而当空调系统负荷高峰时，冷水机组的压缩机提高频率，保证制冷量的稳定输出。变频冷水机组根据空调系统实际负荷需求，自动调节压缩机转速，按需供给制冷能量，从而达到持续节能。

传统的定频冷水机组压缩机以恒定速度运行，一旦启动，便以固定的频率工作，无论外界负荷如何变化，压缩机都以满载状态运转，导致能源的不必要浪费。基于设备能效比的对比，变频冷水机组远优于定频冷水机组。据行业相关统计数据，变频冷水机组的应用平均可实现 10% ~ 30% 的节能效果。如冷水机组 COP 值与负载性能曲线图所示（见图 1），以相同制冷功率的冷水机组进行试验对比，在相同负载和条件下，定频冷水机组的 COP 值随着负荷增加而逐渐增大，

而变频冷水机组的 COP 值随着负荷的增加或者减小，呈现出平稳状态。

3 冷水机组运行中的节能技术策略

冷水机组在日常的运行活动中实施节能技术的目的就是在满足厂房生产活动制冷需求的前提下，通过优化设备运行参数和系统控制等方法来实现设备可靠供冷和能耗降低，从而实现节能降耗。

3.1 合理设定出水温度

根据药品生产厂房生产工艺的实际需求，为冷水机组设定合适的出水温度和回水温度。在冷水机组的实际运行中发现，适当地将冷水机组冷冻水出水温度逐级提升 1℃，冷水机组的电流监测值相应呈现梯度下降。依照这样的出水温度设定需求，在不同季节可以灵活调整出水温度，以实现降低能耗的目的。

3.2 冷冻水大小温差和流量的控制

根据冷量计算公式： $Q=M \times c_p \times DT$ （其中，Q 代表冷量、M 代表流量、 c_p 代表比热容、DT 代表温差），冷水机组产生的冷量 Q 与冷冻水的温差 DT 和流量 M 有关。在冷水机组实际生产运行中，当两台冷水机组的制冷功率相同时，理论上产生的制冷量应一致。假设水的比热容为一个恒定的常数，通过改变冷冻水

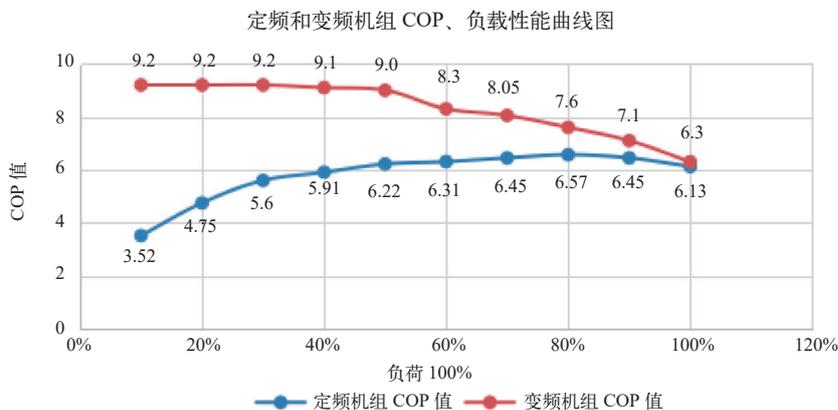


图 1 冷水机组 COP 值与负载性能曲线图

表 2 冷水机组冷凝器铜管污垢系数与冷水机组温差、COP 增加百分比数据表

污垢系数 m ² ·℃/kW	温差 增加℃	COP 增加百分比
0.11	1	2.23%
0.17	2	5.07%
0.23	3	8.27%
0.285	4	11.91%
0.35	5	15.09%

高效、稳定、节能运行的基础，也是实现节能降耗的有效措施。制定和实施合理的维护保养可以减少冷水机组能耗，避免因设备性能下降导致设备能耗增加。

4.1 换热器的清洗

空调系统中循环水的补充主要采用工业冷水，但工业冷水的水质较差，含有大量杂质和微生物。水在机组和管道内持续循环，加上蒸发浓缩等因素，导致冷水机组冷凝器换热铜管内壁堆积大量水垢或污垢，降低了循环水与冷媒之间的热交换效率。随着时间推移，铜管内壁水垢逐渐增厚，冷水机组的制冷效果下降，能耗增加。如表 2 所示，冷水机组冷凝器铜管的污垢系数逐渐增强，冷冻水进出水温差逐渐增加，冷水机组压缩机的 COP（制冷量与耗电功率的比值）增加百分比也逐渐上升。

通常，冷水机组冷凝器的清洗工作应安排在工作负荷较低的时段，如春季或秋冬季节，以避开炎热的夏季。冷水机组冷凝器的清洗方法包括物理机械除垢、化学酸洗除垢、电子磁水除垢技术等^[8]。在“双碳”节能减排的导向下，新产品和新技术的指引下，冷凝器胶球在线清洗装置这一智慧产品应运而生。它能够实时快速地清洗冷凝器铜管内壁，确保冷水机组的换热效率始终保持在最佳水平，从而实现节能降耗的目标。如表 3 所示，通过对比冷水机组冷凝器铜管结垢厚度与冷凝器清洗前后耗电量的数据，可以发现，随着冷水机组冷凝器铜管结

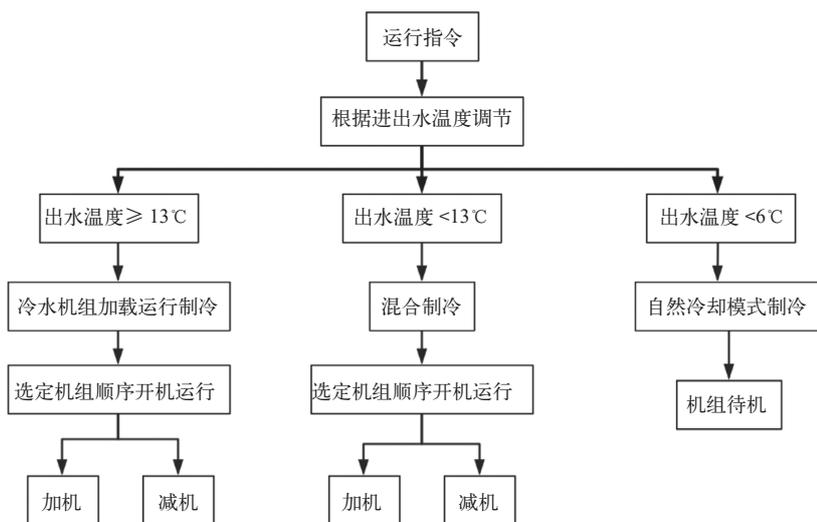


图 2 冷水机组群控模式控制流程图

的进出水温差或冷冻水的循环流量，可以改变冷水机组的制冷量。

3.3 群控系统的启停控制

根据药品生产厂房生产工艺所需的冷负荷量要求，结合所选的冷水机组类型，对冷水机组进行群控设计。通常情况下，控制系统在接收到运行指令后，会启动相应的运行模式控制流程。一般而言，存在三种冷水机组控制模式，用于管理多台冷水机组，确保冷水机组群达到最佳的综合能效。

图 2 所示的是冷水机组群控模式控制流程图，该群控模式采用供回水温度控制法进行调节。在三种运行模式中，冷却水泵和冷冻水泵均保持正常运行状态，而冷却塔和冷水机组则按照需求开启。冷水机组群控系统在接收到开机指令后，会根据冷水机组的回水温度来确定冷水机组的启动时机。当冷水机组回水温度 $\geq 13^\circ\text{C}$ 时，冷水机组启动，群控系统 will 决定开启冷水机组的台数和选择开机的顺序，并选择加机运行或减机运行，以此来

控制冷水机组的台数；当冷水机组回水温度 $< 13^\circ\text{C}$ 时，冷水机组将切换至混合制冷模式运行，并开始减载，群控系统再次决定开启冷水机组的台数，并选择加机运行还是减机运行；而当冷水机组回水温度降至 6°C 以下时，冷水机组将采用自然冷却模式制冷，并处于待机状态。

如冷水机组运行系统能耗数据对比表（见表 1）所示，冷水机组系统运行包括冷水机组、冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔等设备。这些设备的供电端均安装电能表进行能耗计量。对同一套冷水机组运行设备进行电能耗用数据采集，记录 10 个日历天的耗电量数据，分别记录冷水机组各设备在常规系统运行和群控系统控制下运行的耗电量，计算出耗电量和节电率，为药品生产厂房的技术提升提供参考。

4 冷水机组维护保养的节能技术策略

冷水机组的维护保养是确保设备

表 1 冷水机组运行系统各设备能耗数据对比表

设备名称	常规系统/kWh	群控系统/kWh	节电量/kWh	节电率/%
冷水机组	2251778	2087625	164153	7.2%
冷冻水泵	445240	423765	21475	4.8%
冷却水泵	371142	355211	15931	4.3%
冷却塔	327120	245214	81906	25%

表3 冷水机组冷凝器铜管结垢厚度与冷凝器清洗前后的耗电量数据对比表

铜管结垢厚度	未清洗铜管的耗电量 /kWh	清洗铜管后的耗电量 /kWh	增加电能消耗百分比 /%
0.8 mm	240 kWh	217 kWh	10%
1.6 mm	269.6 kWh	219 kWh	22%
3.2 mm	354.1 kWh	223 kWh	57%

垢厚度的增加，冷水机组的耗电量也相应地增加。基于这些分析和观点，可以得出结论：优质的水质供给在很大程度上有助于延缓甚至阻止结垢现象的发生，而定期进行冷凝器铜管的清洗和维护措施，能确保冷水机组长期稳定高效地运行。

4.2 制冷剂的检查

制冷剂是冷水机组运行中制冷循环的工质，在压缩、冷凝、膨胀、蒸发这4个主要阶段中，负责将冷量传递给冷冻水，实现制冷循环的目标。为了确保冷水机组的制冷效率能够持续保持在最佳状态，定期对制冷剂进行检查，确保其量适宜且状态优良，是维持冷水机组高效运行的关键。在冷水机组制冷剂的充装过程中，应遵循用户手册或者机组运行标准化操作流程，严格执行制冷剂的品类、充注量、充注压力等关键要素要求。当冷水机组的制冷剂供应不足时，其制冷效率会降低，导致制冷量减少，进而影响冷冻水的供应。为了实现所需的制冷效果，必须延长冷水机组的运行时间，这将导致更高的能耗。相反，如果制冷剂充注过量，不仅会造成制

冷剂的浪费，还会增加压缩机的运行负担，同样会消耗更多的能源。因此，定期检查和及时补充制冷剂是维持冷水机组最佳节能状态的关键。

4.3 润滑系统

压缩机是冷水机组制冷运行的核心部件，其在对外做功的过程中，内腔体的部件相互接触与摩擦。良好的润滑系统能够延长压缩机的使用寿命，提高机组的制冷效率，从而降低能耗。在冷水机组运行过程中，机组润滑系统的设计创新和技术进步是实现节能、高效、环保制冷的重要途径。在维护保养冷水机组时，定期检查和更换润滑油，确保润滑油品质和适宜的油位，能使压缩机运行更顺畅，提高机组运行效率。

5 结语

综上所述，为实现药品生产厂房冷水机组的节能技术应用，必须从多角度进行综合考虑，分别从冷水机组选型、运行、维护保养等各个方面，进行系统的分析和研究，以持续优化冷水机组的运行能耗。这些节能措施不仅能够助力制药企业节能降耗和增加经济效益，更能实现“碳达峰”

和“碳中和”的目标。

参考文献：

- [1] 杨红斌, 朱毅, 杜有径, 等. 节能理念在某生物疫苗生产厂房设计中的运用[J]. 中国科技纵横, 2024(1): 44-46.
- [2] 杨磊, 朱毅, 郭佩超, 等. 浅析疫苗生产GMP厂房空调系统节能环保技术策略[J]. 中国科技纵横, 2022(21): 21-23.
- [3] 平丽芬, 朱毅. 浅析实验室危化品试剂的安全管理[J]. 机电安全, 2023(5): 13-15.
- [4] 平丽芬, 林小瑞, 朱毅, 等. 制药企业实验室安全管理的应用与实践[J]. 现代职业安全, 2024(5): 101-103.
- [5] 国家食品药品监督管理局. 药品生产质量管理规范(2010年修订)[S]. 2010.
- [6] 平丽芬, 朱毅. 基于药品生产质量管理规范对疫苗生产中的生产要素控制研究[J]. 流程工业, 2024(10): 12-13.
- [7] 梅光行. 大型建筑冷源系统调控与节能优化技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [8] 王峰, 李剑锋, 朱毅, 等. 疫苗生产厂房冷水机组可移动式胶球清洗装置的应用[J]. 中国科技纵横, 2023(17): 93-95.



记录双碳背景下工业企业的变革之路



扫码看专题



机械工业信息研究院



用视频讲好工业故事



制药业官方微信