

药厂暖通系统运行中的节能探讨

赵本杰

华苳生物科技（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。变频螺杆机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，担任华苳生物科技（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、水泵的频繁开停),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。无法准确掌握不同冷热源设备、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 also 具有良好的热回收性能,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、风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技术较为复杂,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

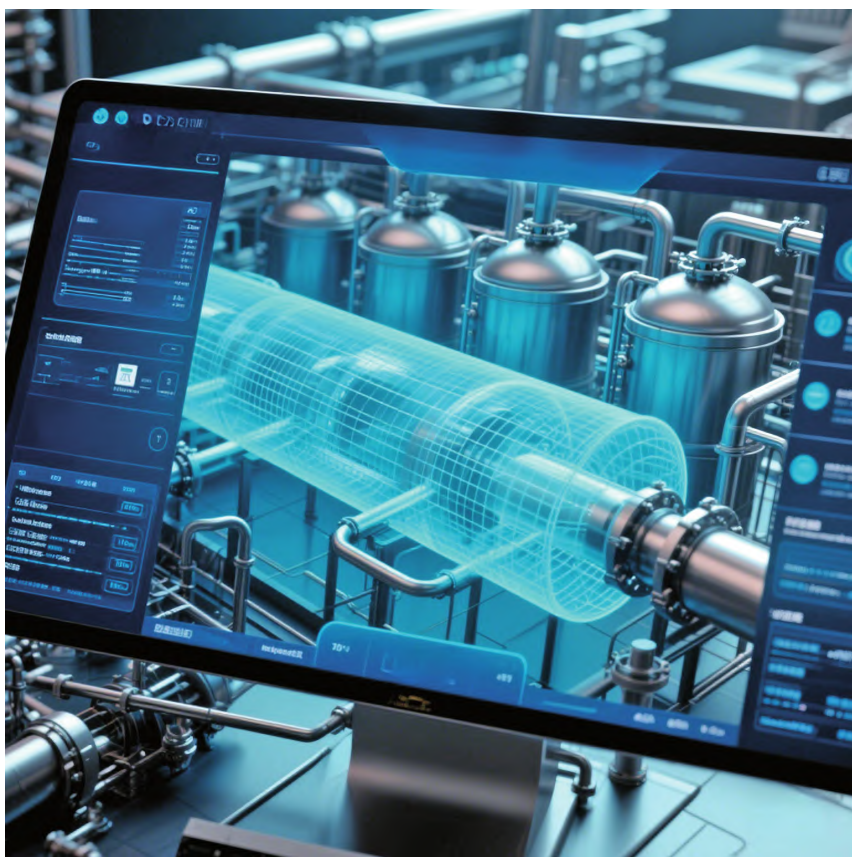
借助数字孪生模型，可以对不同的暖通系统运行策略进行仿真对比。例如，模拟不同的新风引入比例、冷热源设备的启停顺序、水泵和风机的调速方案等对系统能耗和环境控制效果的影响。通过大量的仿真实验，找到最优的运行策略，实现节能与环境控制的平衡。通过仿真优化，将新风引入比例在不同季节和生产时段进行动态调整，在保证车间空气质量的前提下，全年能耗降低了 8%。同时，利用仿真结果可以对操作人员进行培训，使其熟悉不同工况下系统的最佳运行操作方式，提高实际运行管理水平。

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.