

工业厂房高温环境下暖通通风系统的降温效率与能耗分析

张凯 丁海峰

日照市胜通管业有限公司 山东省日照市 276801

【摘要】: 工业厂房高温环境受设备显热释放、围护结构得热及排风组织不足共同影响,易造成作业区热舒适下降与通风能耗增加。本文以无锡某 7200 m² 机械加工厂房为对象,构建降温效率量化模型,并结合运行数据分析送风频率、设备开机率、室外温度及排风机运行时间对系统能耗的影响。在此基础上,提出基于热负荷识别、送风参数修正和高位排风比例调整的优化方案。结果表明,优化后降温效率由 65% 提高至 78%,单位时间能耗由 120 kWh/h 降至 95 kWh/h,作业区平均温度由 33.2 °C 降至 30.1 °C,岗位送风有效覆盖率提高至 86%,说明该方案能够兼顾降温效果与节能运行需求。

【关键词】: 工业厂房; 暖通通风; 降温效率; 能耗优化; 参数调整

0 引言

工业厂房在连续生产过程中往往存在热源密集、空间跨度大、热量上浮明显等特征,传统固定风量或固定频率通风方式难以适应生产负荷波动,容易出现局部高温与能耗偏高并存的问题。开展暖通通风系统降温效率与能耗优化研究,有助于提升岗位热环境质量,降低运行成本,并为同类型工业建筑节能改造提供依据。

目前,已有的研究仅是基于单一风量调节或末端送风改进等方面的内容,缺乏对热负荷动态变化、送风参数与排风组织协同优化的系统量化分析。本文结合无锡某机械加工厂房特点构建降温效率模型,探讨了送风频率、设备开机率、室外温度、排风时长对能耗的耦合影响,提出基于热负荷识别、送风修正和高位排风比例调整三步方法,摆脱传统的固定阈值控制模式,根据产热强度实时调整了风量分配及排热路径,在满足岗位热舒适要求下显著减少通风能耗。结果为多热源、大跨度工业厂房可调通风设计提供了可量化的依据。

1 工业厂房高温环境与暖通通风系统现状分析

工业厂房高温环境通常由生产设备显热释放、围护结构太阳辐射得热以及工艺排风组织不足共同作用形成,热量在大跨度厂房上部空间持续积聚,并且把作业区温度推向高于室外气象条件的运行状态。鉴于机械加工、冶金压延以及电子装配车间对岗位热舒适和设备稳定性的需求差异,暖通通风系统多选用全面通风、岗位送风以及屋顶排风组合方式来开展热量迁移控制。其中,全面通风指依靠送排风量置换室内污染空气以及余热空气的组织方式,岗位送风则把低温气流输送至人员活动高度。进一步观察现有系统运行状态可见,风口布置与热源分布之间常存在偏离,送风射流难以覆盖主要产热区域,排风路径还容易受行车梁、管廊以及高位设备阻挡,导致冷量输送效率下降。由此来看,工业厂房通风降温问题并非单纯增加风量即可解决,还需结合热源强度、空间高度、气流组织以及运行

能耗开展系统性分析。

2 暖通通风系统降温效率与能耗的量化分析

2.1 降温效率量化模型构建

工业厂房暖通通风系统的降温效率需要把热负荷迁移过程转化为可计算指标,单纯以送风温度或换气次数评价系统性能,难以反映高位热积聚以及作业区热舒适之间的耦合关系。鉴于机械加工厂房内机床电机、液压站以及切削液循环装置持续释放显热,模型构建可把室内余热量、送风焓差以及室内外温差当作核心变量来使用。热负荷指单位时间内进入厂房并且需要由通风系统排出的热量,送风参数则主要囊括送风量以及送风温度。为表征系统把理论可移除热量转化为实际降温效果的能力,可将作业区温度下降幅度与通风系统对应热量输送能力进行关联,降温效率计算公式如下:

$$\eta_c = \frac{\rho c_p L (T_i - T_s)}{Q_h + \rho c_p L (T_o - T_s)} \times 100\%$$

其中, η_c 表示降温效率, ρ 表示空气密度,单位为 kg/m³, c_p 表示空气定压比热容,单位为 kJ/kg·K, L 表示送风量,单位为 m³/s, T_i 表示作业区平均温度,单位为 °C, T_s 表示送风温度,单位为 °C, T_o 表示室外空气温度,单位为 °C, Q_h 表示厂房显热负荷,单位为 kW。

该模型把送风冷却能力放置在厂房热扰动背景下进行衡量,能够避免仅凭风量增减判断系统优劣的偏差。进一步观察可知,当热源集中于设备上方或排风组织受阻时, L 的提高未必同步带来 η_c 的提升,因此模型还需结合风口位置、射流衰减以及回风短路情况开展参数校核。

2.2 能耗影响因素实证分析

江苏无锡锡山经济技术开发区一座机械加工厂房可作为能耗影响因素分析对象,该厂房建筑面积为 7200 m²,檐口高度为 12 m,内部布置 46 台数控加工中心、8 台空压机辅助设备以及 4 套屋顶排风机组,暖通通风系统选用变频送风机、岗

位送风末端以及高位排风装置组合运行。结合 2023 年 7 月至 8 月工作日运行记录,系统能耗主要受送风频率、设备运行时长以及室外环境温度共同作用。送风频率直接改变风机轴功率,频率由 35 Hz 提高至 50 Hz 时,风机电耗呈现非线性增长特性,这一变化与风机相似定律中的功率随转速近似三次方变化相契合。设备运行时长影响显热负荷累积,连续加工超过 6 h 后,厂房上部热量更易形成稳定热羽流,排风机需要维持较高频率来开展热量迁移。环境温度则改变送风与室内空气之间的换热潜力,室外温度接近 35 ℃ 时,新风冷却余量下降,系统往往依靠增加循环风量来维持岗位区域温度。相关性分析可把小时电耗作为因变量,把送风频率、主设备开机率、室外干球温度以及排风机运行时间作为自变量来开展 Pearson 相关检验。结果判读应重点关注相关系数方向以及显著性水平,其中送风频率和主设备开机率通常表现出更强关联,说明能耗优化不宜只压低送风温度,还应把风量分配与生产负荷波动进行联动。

2.3 能耗优化的通风系统参数调整方案设计

围绕无锡机械加工厂房的通风运行特性,能耗优化方案需要把实时热负荷识别、送风温度修正以及风量分配调整纳入同一控制链条,而不是依靠固定频率进行长周期运行。现场可在机床集中区、人员作业带以及屋顶排风口布设温度、风速以及设备电流采集点,设备电流用于反映加工负荷变化,作业带温度用于判断人员热暴露水平。控制系统接收数据后,对厂房显热负荷进行滚动估算,并且把负荷等级映射为送风温度设定值以及风机频率区间。低负荷时,系统把岗位送风量维持在满足人员热舒适的下限,同时降低屋顶排风频率;高负荷时,则把风量优先分配至数控加工中心密集区域,并且提高高位排风比例,减少热空气向作业区回落。通风系统能耗可由风机、电制冷以及辅助循环设备共同表征,计算公式如下:

$$E_t = \sum_{j=1}^n \left(\frac{P_{f,j}}{\eta_{f,j}} t_j + P_{c,j} t_j + P_{a,j} t_j \right)$$

其中, E_t 表示统计周期内通风系统总能耗,单位为 kWh, $P_{f,j}$ 表示第 j 个运行时段风机轴功率,单位为 kW, $\eta_{f,j}$ 表示对应时段风机运行效率, t_j 表示第 j 个运行时段长度,单位为 h, $P_{c,j}$ 表示制冷或冷却设备功率,单位为 kW, $P_{a,j}$ 表示辅助循环设备功率,单位为 kW, n 表示统计周期内划分

的运行时段数量。

具体参数优化流程见图1。该流程把数据采集、负荷判断、参数生成、执行反馈以及偏差修正串联起来,可为厂房运行人员开展送风温度、送风频率以及排风比例的动态调整提供操作依据。

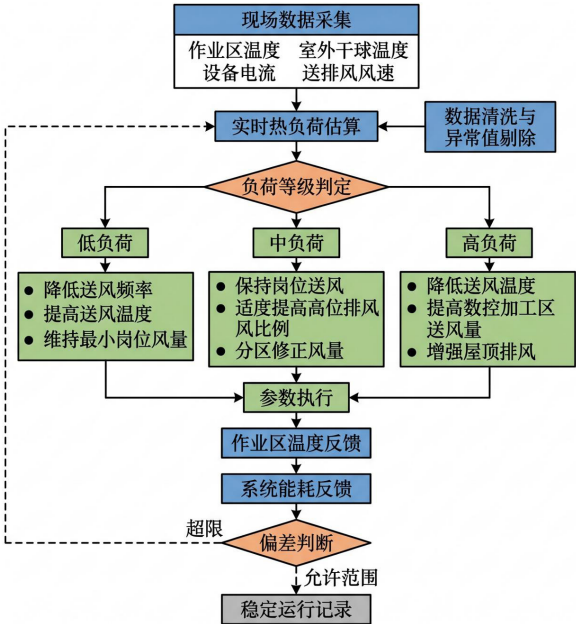


图1 暖通通风系统参数优化流程图

3 系统优化后的降温效果与能耗对比评估

3.1 优化前后性能指标对比分析

结合无锡机械加工厂房 7 月至 8 月工作日运行记录以及参数调整后的稳定运行状态,系统性能评价把降温效率、单位时间能耗、作业区平均温度以及岗位送风有效覆盖率当作主要指标来使用。优化前系统以固定频率运行占比较高,送风射流与数控加工中心集中产热区域存在偏离,降温效率为 65%,单位时间能耗达到 120 kWh/h,作业区平均温度维持在 33.2 ℃。经过送风频率分区控制、高位排风比例修正以及岗位送风量再分配后,热空气向厂房上部迁移的路径更加顺畅,作业带冷量滞留时间有所延长。由表 1 可见,优化后降温效率提高至 78%,单位时间能耗下降至 95 kWh/h,能耗降幅为 20.83%,作业区平均温度降至 30.1 ℃。该变化说明参数优化并非依靠单纯压低送风温度来换取降温效果,而是把风量输送方向、排热路径以及生产负荷波动进行了联动调整,因而在降低电耗的同时改善了岗位区域热环境。

表1 优化前后降温效率与能耗对比表

指标	优化前	优化后	变化幅度
降温效率	65%	78%	提高13个百分点
单位时间能耗	120 kWh/h	95 kWh/h	降低20.83%
作业区平均温度	33.2 ℃	30.1 ℃	降低3.1 ℃
岗位送风有效覆盖率	71%	86%	提高15个百分点
屋顶排风机平均运行频率	48 Hz	41 Hz	降低14.58%

3.2 优化方案的经济效益与可行性评估

从工程投入角度来看,该优化方案主要涉及变频控制逻辑

调整、温度与风速采集点增设、设备电流监测接入以及岗位送风末端局部改造,合计设备改造费用约为5万元。按照优化前后单位时间能耗差值25 kWh/h测算,并且结合厂房年有效运行960 h以及工业用电综合电价1.0元/kWh,年节省电费约为2.4万元,投资回收期约为2.1年。该回收周期处于机械加工厂房节能改造可接受范围内,且改造过程未改变主体围护结构以及主要工艺设备布置,对连续生产干扰较小。需重点关注的是,方案运行效果依赖传感数据稳定性以及控制参数滚动修正能力,运行人员需要开展送风频率、排风比例以及岗位温度阈值的日常校核。从推广价值来看,该方案适宜用于设备显热负荷占比较高、厂房空间高度较大、原有通风系统具备变频调节基础的工业建筑,可为同类型机械加工车间开展低成本节能降温改造提供可操作路径。

4 结语

针对机械加工厂房高温运行问题,本文从降温效率模型、

能耗影响因素和参数优化路径等方面开展分析,验证了送风频率分区控制、岗位送风再分配及高位排风协同调节的有效性。优化方案投资约5万元,年节省电费约2.4万元,回收期约2.1年,具备较好的工程可行性。后续应用中,应加强传感数据校核与控制参数动态修正,以保障系统长期稳定节能运行。

本文提出的“热负荷识别+送风修正+排风协同”闭环控制框架,不仅使得降温效率由65%提升至78%、单位能耗降低20.8%,更重要的是实现了可复制性极高、投资少、回收快的改造模式。相较于常规的全面通风或简单变频降速方案,这一方案主张冷量在产热密集区内空间精准投放并且使热羽流向上快速迁移,避免冷热空气掺混而导致无用循环。未来可以进一步结合动态负荷预测算法和无线传感网络对多车间联动的群智能优化,也可结合夏季高峰电价需量管理策略,通过预冷或者负荷平移等手段挖掘经济性。为类似机械加工、铸造及电子装配车间高温治理与节能运行提供直接参考。

参考文献

- [1] 朱佳彬,张翼.工业企业数据机房气流组织优化及热环境评价指标分析[J]. 节能, 2025, 44(10):20-24.
- [2] 李俊,刘鸣,王荣,曾婷婷,王玉娇.干热气候区高温冷水空调系统运行特性分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2025, 57(03):428-436.
- [3] 李涵,安晶晶,王闯,燕达.辐射制冷膜在夏热冬暖地区典型建筑中的技术适宜性研究[J]. 建筑科学, 2025, 41(06):57-67.
- [4] 高维,陈可夫.天津市某封闭厂房自然通风系统设计[J]. 建筑节能(中英文), 2025, 53(11):139-142+147.
- [5] 乔锦涛. T-S矿山智能通风机的工业应用实践[J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14(12):267-268+273.
- [6] 甲斐田武延, マーティン ビール アンダーセン, 森昌司. 蒸気供給ヒートポンプシステムの技術経済性分析(高温冷媒の採用と水蒸気圧縮機の撤去によるコスト削減の可能性): 熱工学, 内燃機関, 動力エネルギーシステム[J]. 日本機械学会論文集, 2025, 91(943):
- [7] 陈玉,何亚勇,尹宝玲.新风系统对数据机房热环境的影响及其优化策略[J]. 电信工程技术与标准化, 2024, 37(10):35-40.
- [8] 冯梁俊,彭星煜,蒋炜,许艺欣,段青杰.基于(火用)分析的天然气处理厂增压系统节能优化[J]. 石油与天然气化工, 2025, 54(04):146-152.
- [9] 仲璐璐. 工业园区压缩空气系统建模与运行优化[D]. 导师: 王伟. 大连理工大学, 2024.

作者简介: 张凯(1983—), 男, 汉族, 大专, 研究方向为暖通工程。