低温送风系统气流组织设计与室内环境控制分析

路子业[1]　王　磊[1]　李　磊[1]　韩　瑜[2]　徐宝战[1]

1.中国中元国际工程有限公司 北京 100089

2.融通人力资源开发有限公司北京海淀分公司 北京 100089

【摘　要】：低温送风系统依托送风温差降低循环风量，可缩减风管断面与降低输送能耗，但送风温度过低，易出现下沉过快、局部过冷、吹风感及风口结露等问题。围绕气流组织与室内环境协同控制，分析了送风温度、出口速度、射程、附壁效应及回风位置对温度场和速度场的影响，提出按负荷分区确定送风参数、利用高诱导比末端延长射流扩散距离、结合露点温度修正送风温度和变风量运行策略。研究认为，低温送风设计的关键不在于单纯降低送风温度，而在于维持射流动量、热浮力与热源扰动之间的平衡，使人员活动区温差、残余风速和湿度保持在舒适范围，并兼顾节能与防结露要求。

【关键词】：低温送风；气流组织；射流特性；温度场；热舒适

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.043

公共建筑空调负荷具有时空波动，常规送风系统若长期依靠较大循环风量维持室温，风机能耗、风管占用空间及末端调节压力都会增加。低温送风可提高单位空气的冷量输送能力，但送风温度降低后，射流密度差和浮力效应随之增强，原有按常规送风条件确定的风口形式、送风速度和回风位置可能不再适用。特别是在高湿环境、深进深空间及人员长期停留区域，气流提前下沉、温度分层和局部冷风感更容易出现。设计时需要把射流轨迹、诱导混合、负荷分布、露点控制和人员热舒适放在同一工况下校核，使低温空气在进入活动区前获得充分扩散，并为变负荷运行保留稳定调节余量。

1 低温送风系统运行特性分析

（1）低温送风基本原理：低温送风依靠扩大送风空气与室内空气之间的温差降低系统循环风量，同等显热负荷条件下，送风量与送风温差呈反向变化关系，普通舒适性空调送风温度多处于 12～16℃，低温送风可结合冷源条件控制在 7～10℃，当室内设计温度取 24～26℃时，送风温差可扩大至 14～18℃，单位体积空气承担的冷量随之增加，风管截面积、风机输送功率和竖井占用空间均可相应压缩。工程设计中不能只按低送风温度直接缩减风量，还需复核盘管表面温度、冷冻水参数及末端诱导能力，较多项目会将低温冷源与变风量末端配合使用，使设计工况下的送风量减少约 20%～40%。同时还需核算新风潜热负荷和盘管除湿能力，避免送风温度降低后含湿量控制失稳；部分负荷阶段则依靠风阀和送风温度共同调节，并设置最小送风量边界，使末端射流保持必要动量，防止小风量运行后出现射程不足、房间温度分层或区域冷量分配失衡等。

（2）低温气流运动规律：低温空气密度高于室内空气，送入房间后同时受到初始动量、负浮力和热源上升气流影响，其运动轨迹与普通温差送风存在明显差异，出口速度偏低时，射流尚未完成充分诱导便会提前下沉，在风口附近形成低温区；出口速度偏高时，虽然射程增加，但人员活动区残余风速随之增大，容易出现肩颈和下肢吹风感[1]。顶送方式下常利用散流器或条缝风口形成贴附吊顶的水平射流，借助附壁效应延长气流行程，使冷空气在下降前充分卷吸室内空气，工程中风口初始速度可按约 2.5～4.5 m/s 校核，再结合层高、射程及末端速度修正。当空间净高超过 4.5 m 或送风距离较长时，更适合采用高诱导比散流器、旋流风口或可调喷口，并结合计算流体力学模拟核查射流落点、回流区和温度梯度，使气流进入人员区后的风速处于约 0.15～0.25 m/s 范围，同时避免相邻射流相互干扰后形成局部高速区，并降低人员活动区的热舒适性。

（3）运行工况影响因素：低温送风系统的稳定性与建筑负荷分布关系紧密，外窗太阳辐射、人员密度、照明发热和设备散热会改变局部热羽流强度，若风口仍按均匀间距配置，内外区实际冷量往往出现偏差，外区易形成高温带，内区则可能出现过冷。送风温度降低后，风口表面及支风管外壁温度可能接近室内露点，夏季高湿地区若室内露点达到 15～17℃，而金属风口表面低于露点温度 2～3℃，凝结水风险会明显增加，因而风管保温厚度通常依据防结露计算确定，工程中常见闭孔橡塑材料厚度约 25～30 mm，并重点处理法兰、吊架穿透处及风口颈部冷桥。运行控制还需同步采集送风温度、室内相对湿度、回风温度及表面温度，当露点接近低温表面控制值时，可适度提高送

风温度或增强除湿能力；外区负荷突增时则优先调整分区风量，使低温运行、负荷响应和防结露控制保持协调，并结合朝向、各时段及人员变化修正参数，避免设定值偏离实际工况。

2 低温送风系统气流组织设计

（1）送风参数合理确定：送风参数宜依据房间显热负荷、设定温度和允许风速确定，设计阶段可按逐时负荷计算各空调分区冷量，再依据送风温差反算所需风量，按风口有效面积校核出口速度；若只按峰值冷负荷选取统一送风量，部分负荷工况易出现风量过小、射流坠落及局部冷量不足[2]。办公空间室温取 24～26℃时，低温送风温度可按冷源能力及除湿要求控制在 8～10℃附近，风口出口速度需兼顾射程、噪声和诱导比，末端进入人员活动区后的平均风速宜控制在 0.2 m/s 左右，并核查最远服务点温差和末端速度；朝向差异明显的外围区，可分别计算太阳辐射与围护结构传热峰值负荷，避免按平均负荷统一分配风量。采用变风量系统后，末端最小风量不宜单纯压低，可依据风口维持附壁射流所需的最低速度设置下限，结合室温偏差、VAV 阀位和回风状态修正设定值；小负荷阶段适度回升送风温度，使末端保持必要动量，避免低风量导致气流覆盖范围缩小、垂直温差增大及内外区冷热分配失衡，同时校核新风量下限，避免低负荷时室内空气品质下降。

（2）送回风方式优化：普通办公区采用顶送顶回时，送风口与回风口若距离过近，低温空气未充分卷吸室内空气便进入回风通道，易形成短路，散流器可布置于人员区上方并避开固定工位，回风口设置于房间中央、走道侧或显热负荷集中区，使冷空气沿吊顶扩散后进入活动区。高大中庭、展厅、候车厅等空间可采用侧送、旋流送风或喷口远距离送风，依据层高、射程和末端速度确定喷口角度与标高，利用上部空间完成空气诱导与温度衰减，防止低温气流直接落入人员密集区；挑空、夹层或大面积玻璃幕墙场所还需复核热羽流对主射流的偏转作用，必要时在外围区设置独立送风支路。外窗和玻璃幕墙附近受太阳辐射影响较大时，可提高外围区送风比例，并将回风口与射流核心区错开布置；若房间进深较大，可采用分区送回风或多排风口组织气流，结合 CFD 计算检查回流涡、滞流区和温度分层，并在门厅、走道交界处校核压差和串流影响，使各区域冷量与实际负荷匹配，减少局部短路与冷热空气相互干扰，便于运行阶段分区调节。

（3）送风末端布置设计：低温送风末端选型需考虑诱导比、扩散角、射程、噪声和防结露性能，普通方形散流器适用于规则办公区，条缝风口适合狭长房间及连续吊顶区域，旋流风口、球形喷口多用于净高较大的公共空间；选型宜依据厂家实测射程、落差和有效面积校核，避免套用常温送风样本参数。散流器宜避开固定座位、会议席和服务台正上方，并控制相邻射流交汇位置避开人员头颈高度，条缝风口可利用可调叶片改变射流方向，冷负荷较高时采用贴顶水平送风，过渡季或低负荷时适度调整出风角度，稳定送风覆盖范围；对噪声要求较高的会议室和办公区，还需核查风口颈部风速及局部阻力，避免开度过小产生气流噪声[3]。金属风口与低温支管连接处需增设连续保温套和防潮层，法兰、软接及吊架穿越处重点封闭，风口边框与吊顶接触缝采用密封材料处理；对高湿区域可设置表面温度监测点，风口温度接近室内露点时调整送风温度或除湿强度，并检查保温层接缝和冷桥部位，减少凝露、滴水及吊顶受潮痕迹，以利运行。

3 低温送风室内环境控制

（1）室内温度场控制：低温送风的温度控制重点并非追求更低室温，而是削弱人员活动区的水平温差和垂直温差，使冷量分配与实际负荷保持一致。办公空间可将距地 1.1 m 位置作为坐姿人员热环境评价的重要测点，并在 0.1 m、0.6 m 和 1.7 m 附近布置辅助测点，连续记录踝部、躯干与头部高度的空气温度；若上下温差持续扩大，往往说明低温射流下沉过快、风口诱导不足或回风位置对主气流产生牵引，需要结合风口角度、送风速度及回风口位置进行修正。外区受太阳辐射和围护结构传热影响，冷负荷波动通常高于内区，可设置独立 VAV 箱按区域调节风量，外围护结构一侧维持较高送风比例，内区则依据人员密度、照明和设备散热变化降低送风量，同时将房间温度传感器布置在远离风口、门洞及外窗直射的位置，避免局部温度干扰控制信号；当室温接近设定值后，系统宜逐步回升送风温度，而不是持续压低末端风量，使散流器保持必要射流动量，并结合回风温度和 VAV 开度修正控制量，减少局部冷区、温度分层以及频繁调节引起的室温波动。外窗附近可增加监测点，校核负荷突变时温度响应与区域均匀性。

（2）风速与热舒适控制：人员对低温送风的不适往往来自局部冷风而非平均室温，颈部、手臂和小腿长时间处于低温高速气流中，即使房间平均温度满足设计值，仍可能产生明显吹风感，因而风口位置需要与固定工位、床位、服务台和会议席保持合理偏移。设计校核可将人员活动区 0.1～1.7 m 高度范围内的速度场作为重点，常规办公状态下局部平均风速宜控制

在约 0.15～0.25 m/s，并结合送风温度、服装热阻和人员代谢水平判断热舒适状态，当送风温度较低时，同一风速产生的冷刺激更强，需避免射流核心直接进入头颈和腿部区域；对于会议室、开放办公区等人员停留时间较长的空间，还可将 PMV、PPD 及吹风不满意率作为辅助评价指标[4]。空间布局调整后，原有气流路径可能受到隔断、家具和设备柜影响，开敞办公区增设 1.5 m 以上高隔断时，贴顶射流可能被迫提前转向并形成局部下冲气流，因此运行复核宜结合现场风速测点或烟雾示踪观察回流方向，必要时调整风口叶片角度、末端风量和送风温度，使速度衰减与人员分布重新匹配，并降低区域间热舒适差异。典型工位增加实测点，核对人员区风速。

（3）湿度结露与运行调节：低温送风系统在高湿气候下更依赖稳定的除湿控制，空气处理机组宜利用低露点送风承担潜热负荷，使室内相对湿度通常保持在 40%～60%范围，并将送风温度、室内露点和风口表面温度纳入同一运行判断，避免金属风口及支管外壁长期处于露点以下[5]。冷却盘管需结合冷冻水供回水温度、迎面风速、盘管排数和空气旁通系数校核除湿能力，冷凝水盘保持连续排水坡度并设置可靠水封，风管法兰、检修门、软连接和吊架穿透等位置则连续铺设保温与防潮层，接口处采用密封胶或专用胶带封闭，以降低水汽渗入后形成冷桥的风险；高湿季节可在典型风口颈部和低温支管表面布置温度传感器，并与室内温湿度信号联动。部分负荷运行时，控制系统可依据室内相对湿度、计算露点、VAV 开度和回风状态修正送风温度设定值，湿度偏高时维持较低盘管出风露点并保证足够除湿时长，显热负荷下降而湿度稳定后再适度提高送风温度，若出现风口表面温度逼近露点的情况，则优先增强除湿或提高表面温度，使节能、热舒适与防结露保持协调。夜间低负荷运行还需保留循环风量，防止风量过低削弱除湿并引起湿度回升。

4 总结

低温送风系统在扩大送风温差、降低循环风量和压缩风管空间方面具有价值，但运行效果取决于气流组织、负荷分布与湿度控制的协调。设计阶段需结合房间冷负荷、层高、人员位置及末端特性确定送风温度、出口速度和回风位置，并利用附壁射流、高诱导比风口及分区变风量控制减弱冷风下沉和局部过冷。运行阶段监测室温、风速、相对湿度和露点状态，依据负荷变化修正送风温度与末端风量，并加强风管、风口及节点的保温防潮处理。将射流特性、热舒适评价和防结露控制纳入统一设计，可增强低温送风稳定性，在保证活动区环境品质的基础上降低空气输送能耗，为系统工程应用与精细化调节提供依据。

参考文献：

[1] 丁勇,胡玉婷,胡熠.基于既有公共建筑室内热环境改善的气流组织优化研究[J].暖通空调,2023,53(06):150-155+170.

[2] 林栋炫.典型方腔夏季工况风口布置与送风方式模拟优化分析[J].建筑节能,2022,50(07):90-94.

[3] 邓华艳.不同通风方式室内热舒适实验测量与主观调查研究[J].建筑节能,2022,50(08):96-101.

[4] 杨世忠,刘艳丽,曹会东.基于改进 Homothetic Tube MPC 算法的变风量系统温度控制[J].信息与控制,2024,53(05):642-651.

[5] 刘珊珊.基于 Airpak 的小型会议室热环境和空气品质分析[J].城市建筑,2025,22(14):123-126.