

浅析垂直温度梯度效应及应对策略——基于某高铁站暖通设计

高俊剑

同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i7.18240

[摘要] 高大空间建筑作为现代城市发展的重要标志,其功能性与舒适性对暖通空调系统提出了独特挑战。而垂直温度梯度效应,作为高大空间常见热环境问题之一,会导致人员体感不适、空调能耗增加及能源利用效率降低。本文聚焦于高大空间建筑内部普遍存在的垂直温度梯度效应,通过分析其形成机理、关键影响因素,结合具体项目经验阐述应对策略,总结一些心得体会,进行简单地交流探讨,在此抛砖引玉,为各位同行在进行此类项目设计时提供一些思路和参考。

[关键词] 高大空间建筑; 垂直温度梯度效应; 应对策略

中图分类号: TL942+.23 文献标识码: A

Vertical Temperature Stratification in High-Ceiling Spaces——Case Study of an Railway Station HVAC Design

Junjian Gao

Tongji University Architectural Design and Research Institute (Group) Co., Ltd

[Abstract] As iconic symbols of modern urban development, high-ceiling buildings pose unique challenges to HVAC systems in terms of functionality and occupant comfort. Among these challenges, vertical temperature gradient effect—a prevalent thermal environment issue—leads to thermal discomfort, increased energy consumption, and reduced HVAC efficiency. This paper examines the formation mechanisms of thermal stratification in high-ceiling spaces and analyzes key influencing factors. By combining specific project experience, it discusses mitigation strategies, aiming to provide insights for peer reference in similar design projects.

[Key words] High-ceiling buildings; vertical temperature gradient effect; mitigation strategies

引言

随着人们现代生活的需要和建筑技术的发展,如高铁站、机场航站楼、体育馆、大型商场、影剧院、报告厅等高大空间建筑在公共设施中占据越来越重要的地位。这类建筑通常具有空间高大、人员密度高(高峰时可达1-3人/m²)、内部热源多样(人体、照明、电器设备)、功能复杂等特点,其热环境特性与传统建筑存在显著差异。其中,垂直温度梯度效应是高大空间热环境中最突出的问题之一。

1 研究意义

高大空间建筑内,因冷、热空气密度不一,冷空气下降、热空气上升会导致冷热不均,上部则因热空气堆积温度会显著升高,形成垂直温度梯度效应。这种现象表现为空间下冷上热,温差可达5-10℃甚至更大(《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB50736-2012中7.4.7明确,采用置换通风时室内人员活动区0.1m至1.1m高度的空气垂直温差不宜大于3℃),不仅影响建筑内人员舒适度,还会导致空调系统能耗增加(为补偿顶部高温

需提高送风温度或加大冷量输出),造成巨大能源浪费。因此,研究其形成机理并从设计角度提出相应应对策略,对提升高大空间的环境品质与运行效率具有重要意义。

2 垂直温度梯度的形成机理与关键影响因素

2.1 形成机理——高大空间建筑的垂直温度梯度效应本质是“热浮力效应”与“气流组织失效”在建筑内共同作用的结果

①热浮力效应:室内热源(如人体散热、照明设备、电器设备散热等)产生的热空气密度小,自然向上聚集;冷空气(如空调送风)密度大,自然下沉至地面,形成“热顶冷底”的分层现象。

②气流组织失效:若空调送风方式(如散流器送风)未有效覆盖人员活动区,或送风速度<0.2m/s,导致气流无法穿透热空气层,热空气会在室内顶部堆积,从而加剧垂直温差。

2.2 关键影响因素

2.2.1 空调系统设计与运行

(1)送风方式:传统侧送风或散流器集中送风时,冷空气难

避免顶部过热累积。这种自适应调节策略,可以极大程度上做到节能效果。

4 项目设计案例: 内蒙古某高铁车站暖通空调系统设计

4.1 工程概况

本项目为内蒙古自治区乌海市海勃湾区境内一地标建筑,属严寒地区(参照DBJ03-27-2017中3.1.2条文解释)。本项目包含高铁车站站房和站场,暖通专业主要涉及站房。车站总建筑面积为38189.60m²;其中站房建筑面积为9989.67m²。站房地上局部2层,地下1层(架空层),建筑高度22m,最高聚集人数1200人。

4.2 设计参数

4.2.1 室外设计参数(参照内蒙古自治区巴彦淖尔市,见表1)

表1 室外设计参数

| 室外气象参数 | 大气压力 | 空调计算干球温度 | 空调计算湿球温度 | 空调计算日均温度 | 空调计算相对湿度 |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | hPa | ℃(DB) | ℃(WB) | ℃ | % (RH) |
| 夏 | 891.1 | 32.7 | 20.9 | 27.5 | / |
| 冬 | 903.9 | 20.9 | / | / | 51 |
| 室外气象参数 | 供暖室外计算温度 | 通风室外计算温度 | 平均风速 | 最多风向 | |
| | ℃ | ℃ | m/s | | |
| 夏 | / | 28.4 | 2.1 | C E | |
| 冬 | -15.3 | -9.9 | 2 | C W | |

4.2.2 室内设计参数(候车厅见表2)

表2 主要房间室内设计参数表

| 房间名称 | 夏季 | | 冬季 | | 最小新风量 | 人员密度 |
|------|-------|-------|-------|-------|---------------------|------------------|
| | 温度(℃) | 湿度(%) | 温度(℃) | 湿度(%) | m ³ /h.p | 人/m ³ |
| 候车厅 | 26~28 | 40~70 | 18 | — | 10 | 1200 人 |

4.2.3 建筑物围护结构的热工性能参数

4.3 候车厅空调冷热源

(1) 组合式空调机组和补强机组的冷源为风冷冷水机组一体机。

(2) 采暖及组合式空调机组系统的热源为站区换热站,接入地下混水间计量,系统的定压和补水由站区换热站实现。热水直供散热器系统和组合式空调机组,混水降温后供地暖系统(散热器系统与地暖系统温度不一,采用混水系统可省却一套换热设备,降低成本)。站区换热站供来热水的供回水温度为60/40℃,混水后的温度为55/45℃。

4.4 空调工程

表3 建筑物围护结构热工性能表

| 围护结构部位 | 传热系数(W/m ² ·K) |
|---------------------|---------------------------|
| 地面 | 0.56 |
| 东/南/西/北立面外窗(包括透明幕墙) | 2.2 |
| 网架屋面 | 0.37 |
| 混凝土屋面 | 0.34 |
| 外墙(包括非透明幕墙) | 0.44 |
| 供暖空调房间与非供暖房间的隔墙 | 0.94 |
| 外门(非透明部分) | 1.5 |

4.4.1 空调冷负荷及指标见下表:

表4 空调冷负荷及指标统计表

| 房间名称 | 空调冷负荷(kw) | 冷指标(w/m ²) |
|------|-----------|------------------------|
| 候车厅 | 658 | 146.5 |

4.4.2 系统形式见下表:

表5 候车大厅系统形式

| | 空调系统 | 风口 | 备注 |
|------|-----------|------------------|---------|
| 候车大厅 | 全空气中央空调系统 | 侧面球型喷口送风侧墙底部集中回风 | 组合式空调机组 |

备注:①组合式空调机组,夏季接屋顶的风冷冷水机组一体机用于夏季供冷,冬季接热水系统用于冬季供暖。

②组合式空调机组和空调新风机组均配备便于拆卸的粗效和中效过滤器。

4.4.3 空调自动控制

(1) 组合式空调机组均配有变频风机,各进出口配有风量调节阀。机组的新风和回风比例可自控调节,过渡季节可切换为全新风工作模式。

(2) 热水混水循环泵采用变频控制。空调水系统采用变流量系统。

(3) 组合式空调机组送风机采用变频风机,可根据季节、高峰时段、低谷时间段设定不同的送风量。空调新风机组为定频风机。

(4) 室内设置二氧化碳浓度探测,联锁空调机组的新回风比例调节,调节室内新风量。

(5) 候车厅设置温度传感器,接入空调机房的建筑设备监控系统,实时调节接入空调机组盘管的水流量。

(6) 空调末端系统根据室内温湿度, 实时调节末端的载冷剂的流量; 低温热水混水系统根据供回水管上的压差, 实时调节循环泵水流量; 根据低温水的供水温度, 实时调节一次水的回水量。

4.4.4 上述空调系统设计体现应对解决垂直温度梯度效应的思路如下:

① 采用侧面球型喷口送风, 适宜的送风风速, 保障人员活动区域的覆盖率。

② 中位送风、底部回风的风口设置方式, 结合顶部设置排风(分层空调+顶部排余热设计)。

③ 采用“大空间分区控制”模式(各区域分设空调系统, 且各内机单控), 提高能量利用率。

④ 温度传感器接入监控系统, 可实现基于时间动态变化的调节; 组空机组风机变频, 可实现根据季节、高低峰调节送风量。

以上设计内容, 从影响垂直温度梯度效应的关键因素出发, 从一定程度上减轻垂直温差的问题, 不仅保证人员活动区域的舒适性, 而且提高能量利用效率, 还节能, 避免浪费。

4.5 供暖工程

4.5.1 供暖热负荷及指标见下表:

表6 热负荷及指标统计表

| 房间名称 | 总热负荷(kw) | 热指标(w/m ²) | 地暖热指标(w/m ²) | 空调热指标(w/m ²) |
|----------|-------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 候车厅、服务中心 | 883=630+253 | / | 144.3 | 55.2 |

4.5.2 候车厅供暖末端系统设计

本站房在候车厅设置地板辐射采暖系统。加热盘管敷设在垫层内, 盘管间距200mm。采暖水干管为水平同程式, 采暖干管敷设在架空层内。其他区域采用散热器采暖系统, 选用钢制内防腐散热器(见下表)。

表7 散热器选型表

| 散热器中心距(mm) | 单片标态散热量(W/片) | 备注 |
|------------|--------------|----------------|
| 600 | 133.3 | 中心距表示为图纸中片数厚+A |
| 1600 | 288 | |

4.6 通风工程

(1) 主要出入口设置电热式贯流式风幕机, 其通过高速气流形成空气屏障, 有效阻隔室外低温空气侵入, 防止室内热量流失, 维持室内温度稳定, 减少空调能耗, 同时延长设备使用寿命, 还兼具防尘、防虫等辅助功能。

(2) 所有直通大气的风机均配有自闭阀门, 连锁风机启闭(防止冷空气灌入, 保护设备、空间不受冻害, 可减少能耗)。

(3) 所有送风口均自带风量调节装置。

4.7 节能设计

(1) 空调系统、供暖系统根据《公共建筑节能设计标准》

GB50189-2015第4.3.9条公式计算后满足要求, 单元式空调的SEER值均不低于《建筑节能与可再生能源利用通用规范》GB55015-2021表3.2.13-1的规定。冷、热水循环系统均采用变频水泵, 进一步降低水系统的输配能耗。

(2) 管道和设备采用高效保温材料, 从而降低冷(热)量的损失。

(3) 建筑专业通过对围护结构的热工分析和全年能耗的分析, 确定了满足国家节能设计标准的各围护结构热工性能指标。

(4) 设置集中供冷供热系统的自动控制系统, 提供系统优化运行和能耗控制策略, 实现节能运行及能源管理。

5 结论与展望

高大空间建筑的垂直温度梯度效应是热浮力效应、气流组织失效及围护结构热工特性共同作用的结果, 可从“源头控制(围护结构隔热)-过程优化(气流组织优化)-动态调节(智能控制)”多维度协同。实践表明, 低速地板送风、分层空调、外遮阳与屋顶隔热、智能传感器控制等技术组合可有效将垂直温差控制在2℃以内, 显著提升热舒适性及节能效果。

未来研究可进一步结合CFD(计算流体力学)模拟优化送风口布局, 探索机器学习的动态预测控制(如借助AI、大数据等方式根据客流预测提前调整空调参数), 并关注新型材料(如相变储能天花板)在垂直温度梯度效应控制中的应用潜力, 通过这些来减轻垂直温差的影响, 让高大空间建筑更舒适、更节能。

以上便是笔者结合具体项目对高大空间垂直温度梯度效应及应对策略的浅见, 供专家、同行批评、指正。作为暖通专业工作者, 谨以此文, 在此领域尽微薄之力, 贡献自己的一砖一瓦。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50736-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.《公共建筑节能设计标准》GB50189-2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

[3] 章熙民,任泽霏,梅飞鸣.传热学(第五版)[M].北京:中国建筑工业出版社.

[4] 朱颖心,张寅平,李先庭,等.建筑环境学[M].北京:中国建筑工业出版社,2024.

[5] 马明梅.高大空间建筑暖通空调系统设计与节能作用分析[A].中国设备工程,2024,06(下)-0123-03.

[6] 李莉.高大空间公共建筑中暖通空调系统的设计研究[J].中国厨卫,2024,23(5):328-330.

[7] 甄宝喜文/图.高大空间建筑暖通空调设计特点与节能对策探究[J].中华民居,2024,17(3):146-149.

[8] 李孟.高大空间暖通空调通风系统设计研究[J].设备管理与维修,2024(8):155-157.

[9] 徐钦.公共建筑中的高大空间暖通空调系统设计要点[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2023.

[10]陈晓辉,崔敏.高大空间温度梯度解决方案——以西安赛格商业广场中庭空调及通风设计为例[J].《暖通空调》,2022,52(5):23-26.

[11]马明梅.高大空间建筑暖通空调系统设计与节能作用分析[J].中国设备工程,2024(12):123-125.

[12]刘瑞军.高大空间公共建筑暖通空调系统设计分析[J].山西建筑,2017,43(32):108-109.

[13]李跃虎.高大空间公共建筑暖通空调系统设计的要点分析[J].山西建筑,2016,42(23):3.

[14]庞路婷.高层建筑物大空间采暖方式研究[J].城市建设理论研究:电子版,2012,(032):1-3.

[15]黄晨,李美玲.大空间建筑室内垂直温度分布的研究[J].暖通空调,1999,29(5):28-33.

[16]田兆东.CFD技术在连通类高大空间空调系统设计中的应用研究[D].哈尔滨工业大学,2006.

作者简介:

高俊剑(1990--),男,汉族,安徽省宿松县人,本科,中级,研究方向:高大空间建筑垂直温差效应工程应对策略。