

文章编号: 1671-6612 (2019) 04-414-07

弥散式吊顶送风在商场内区冬季供冷中的适用性分析

赵江东 余涛 雷波

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 针对冬季需供冷的商场内区, 提出采用弥散式吊顶送风系统 (DCVS) 直接引入室外冷空气对内区进行通风降温。通过理论分析, 计算了我国不同气候分区商场在不同人员密度条件下应用该系统时的室内空气温度, 并与排风热回收新风免费供冷系统 (EAHRS) 进行了能耗比较。结果表明, 夏热冬冷地区和温和地区的冬季商场内区供冷中, 随着人员密度的增大, DCVS 适应性变高, 且当人员密度为 0.2 人/m² 到 0.6 人/m² 之间时 80% 以上工作时间段均可保证室内的舒适性标准; 相较 EAHRS, 各地区能耗均有所降低, 其中夏热冬冷地区可减少 40% 的能耗。由此可见, 利用 DCVS 处理商场内区的冬季冷负荷能提供适宜的室内热环境, 节能潜力高, 有较好的推广价值。

【关键词】 商场; 内区供冷; 弥散吊顶送风; 热舒适性; 节能潜力

中图分类号 TU831 文献标识码 A

Applicability of Diffuse Ceiling Ventilation System for Cooling in Winter in Interior Zone of Shopping Mall

Zhao Jiangdong Yu Tao Lei Bo

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 This paper aims to analyze the performance of the diffuse ceiling ventilation system (DCVS) for the cooling in the interior zone of shopping mall in winter. The indoor air temperature is calculated theoretically for the shopping mall in different climate zones using this system with different occupant-densities, the energy saving potential of this system is compared with the exhaust air heat recovery system (EAHRS) as well. Results show that DCVS can be used in shopping malls in hot summer and cold winter zone and temperate zone, and more than 80% of the working time the comfort standard can be met. Compared with the EAHRS, the DCVS used in hot summer and cold winter zone can reduce energy consumption by 40%. Thus, it can be seen that the use of DCVS to deal with the cooling load of the shopping mall in winter is promising, with good indoor thermal environment and high energy saving potential.

【Keywords】 shopping mall; internal cooling; diffuse ceiling ventilation (DCV); thermal comfort; energy saving potential

0 引言

随着社会的高速发展, 商业体体量逐渐扩大, 商场在冬季不可避免的出现了内区。建筑内区冬季

空调负荷整体表现为冷负荷, 随区域内照明、设备、人员等热源发热量的变化而变化。通常情况下, 对于大空间, 将距离外墙 3~8m 以内的区域当作外

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (编号: 2682017CX027)

作者简介: 赵江东 (1993.11-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: nev1127@163.com

通信作者: 余涛 (1987.8-), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, E-mail: yutao073@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2018-08

区, 其余区域即为内区^[1]。为了提高内区冬季的舒适性, 传统工程上会采用分区两管制或四管制的水系统方式进行供冷。这种处理方式虽能保证室内的舒适性, 但系统复杂、管道占用空间大且不节能。随着节能减排等政策的实施, 《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2015)^[2]中明确提出对于冬季或过渡季存在供冷需求的建筑, 应充分利用室外新风来消除室内余热。若采用末端风口直接引入新风, 尤其是室内人员密集、风量需求较大时, 易造成人员强烈的吹冷风感, 影响舒适性。当室外温度过低时, 为了防止结露还会额外增加能耗来对新风预热。弥散式吊顶送风系统 (Diffuse Ceiling Ventilation System, 简称 DCVS) 是一种区别于置换通风和混合通风的新型送风形式, 全年都能使用, 无需另设管路, 可采用大温差小流量送风, 室内人员活动区无吹风感, 气流均匀, 舒适性高, 特别适用于热源比较集中的场合^[3-12]。

针对人员密集的商场内区亟待处理的余热, 本文提出全年采用 DCVS 处理, 并对冬季直接引入室外新风供冷的 DCVS 在全国不同气候区不同人员密度商场建筑中的适用性和节能潜力进行分析。

1 系统原理



图 1 吊顶板材料实图

Fig.1 Material of diffuse ceiling

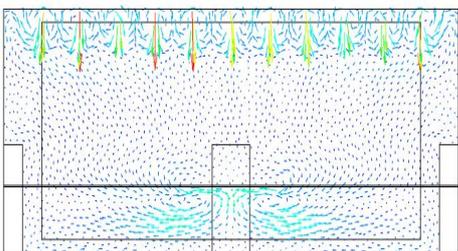
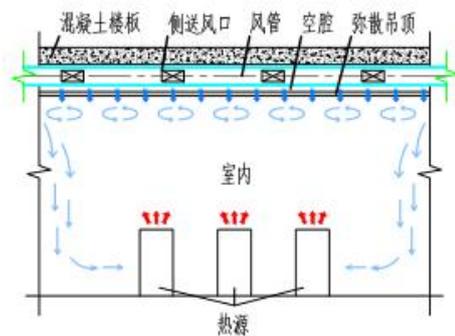


图 2 DCV 系统速度分布图^[11]

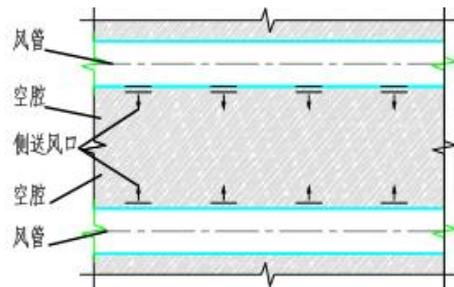
Fig.2 Velocity profile of DCVS

DCVS 起源于欧洲, 最初在猪圈^[3]等牲畜场所的通风系统中使用并取得一定成效, 近几年其研究

转向公共建筑, 在教室^[5-8]、办公室^[9-10]等实际建筑中均有涉及, 但还未研究商场等大型人员密集场所。DCVS 和常规送风系统一样全年均可使用, DCVS 无需设置末端风口, 该系统采用由木屑粘合而成的多孔吊顶板 (如图 1) 和两板之间的缝隙作为送风口, 与楼板之间的空腔为一静压箱, 送风进入空腔后通过分布在弥散式吊顶板上的大面积细孔送入室内。此外, DCVS 在冬季需供冷的区域中使用, 由于空气下压作用, 如图 2 所示, 天花板周围所接触的均为冷空气, 分散后的均匀低速送风迅速与室内空气混合, 提高室内舒适性的同时降低了吊顶板结露的可能性。从国内外研究文献^[7-12]可知, 该系统不仅初投资小, 节能降噪, 多孔末端阻力小, 还能送低温大流量空气, 且室内人员活动区毫无吹风感, 非常适用于人员集中、通风量需求大的场合。



(a) 系统剖面示意图



(b) 系统平面示意图

图 3 商场内区弥散吊顶送风示意图

Fig.3 Schematic diagram of DCVS

因此, 本文提出将 DCVS 用于商场全年空调系统的方案, 夏季经冷源处理好的低温空气通过弥散吊顶送入室内, 由于系统的独特优势, 可以采用大温差小流量送风方式, 从而减小输配系统的尺寸, 降低运输能耗; 冬季内区供冷时, 系统可直接引入室外新风消除余热。本文着重对冬季供冷进行分

析。如图3所示，吊顶板采用多孔的石膏板或木屑粘合而成的隔音板材，整个吊顶作为送风口，送风管安装在吊顶板与混凝土楼板之间的空腔内，冬季新风经过侧开风口送入空腔，由于压力的作用，通过多孔天花板的新风被均匀分散，且充斥在吊顶板周围，使天花板无结露危险。送入室内的冷空气与上升热气流有效迅速混合，整个室内的空气流速极低。

2 适用性分析

2.1 商场内区建筑负荷特性分析

商场建筑室内人员密度大且与新风需求量正相关，随节假日等波动。不同商场建筑体量不同，用途功能各异，整体负荷也不一，且内区负荷与室外气象参数无关。为了有一定的参考价值，本文选取不同人员密度单位面积商场内区进行分析。参考

表1 工作时间段不同工况人员时间指派

Table 1 Time assignment for different working conditions

| 工况 | 10:00 | 11:00 | 12:00 | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 | 20:00 | 21:00 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 工作日 | 0.6 | 0.4 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 0.8 | 0.5 | 0.5 | 0.8 | 0.8 | 0.6 | 0.2 |
| 节假日 | 0.8 | 0.5 | 0.5 | 0.8 | 1.0 | 1.0 | 0.6 | 0.6 | 1.0 | 1.0 | 0.8 | 0.5 |

照明冷负荷取 30W/m²，设备负荷取 15W/m²，照明、设备的时间指派均按 100%进行设计。典型设计时刻室内负荷各项参数值如下表2所示。

表2 最大时刻各项负荷统计

Table 2 Each sub-item load in maximum-load time

| 新风量 | 人体显热 | 照明负荷 | 设备负荷 | 总得热 |
|-------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| m ³ /(m ² ·h) | W/m ² | W/m ² | W/m ² | W/m ² |
| 8.0 | 26.8 | 27.3 | 12.0 | 66.1 |

2.2 适用性评价指标

DCVS 直接引入室外新风消除余热的可行性可以采用新风供冷能力和室内舒适性判定。

根据式(3)可计算单位面积新风能消除的余热量：

$$Q_{air} = \rho G(h_{in} - h_{air}) \quad (3)$$

式中： ρ 为室外空气密度，kg/m³； G 为单位面积最小新风量，m³/h； h_{in} 为室内空气焓值（分别取 20℃、22℃对应焓值），kJ/kg； h_{air} 为室外空气焓值，kJ/kg。

当式(3)计算值小于室内余热时，表明适当

相关规范^[13,14]，冬季内区室内设计状态点干球温度取 21℃，相对湿度 $\phi=40\%$ （由于舒适性因人而异，室内设计参数温度可上下浮动 1℃）；商场人员密度按 0.2~0.6 人/m²共五种工况分别取值，本文以 0.4 人/m²作为示例计算，最小新风量 20m³/(h·p)，商场逐时人员百分比分为工作日、节假日两类，如表1所示。根据式(1)、式(2)可计算单位面积人体负荷和新风量：

$$Q_{\lambda} = q_s n_0 n_1 \phi C_{LQ} \quad (1)$$

$$G = G_0 n_0 n_1 \quad (2)$$

式中： q_s 为 21℃轻度劳动时成年男子散热量，181W（显热 87W，潜热 94W）； n_0 为商业区单位人群密度，0.4 人/m²； n_1 为室内人员时间指派，如表1； ϕ 是群集系数，0.89； C_{LQ} 为冷负荷系数，0.93； G_0 为每人最小新风量，20m³/(h·p)。

加大新风量可消除室内余热，DCVS 适用。

此外，基于 DCVS 送风特性^[15]而言，如图4所示，当送风量过小（低于最小新风量标准），如图中左侧部分，室内空气品质无法得到保证，当送风温差过大，会造成室内的吹冷风感或垂直温度梯度过大，若在送风温差范围内，风速过高，同样也会引起室内人员的吹风感，影响舒适性。因此，最佳送风状态范围确定为图中的中间空白区域。

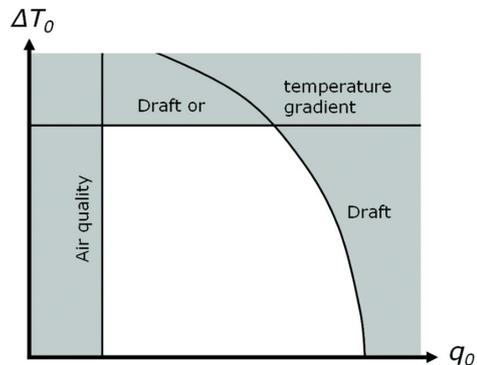


图4 q₀-ΔT 模型示意图^[15]

Fig.4 Schematic diagram of q₀-ΔT model

综合上述标准，本文采用的评价指标为：在室

外温度高于 2 °C 的前提下, 送入室内的风量处于最小新风量与最大送风量 (10 倍最小新风量) 之间, 能够保证室内温度在 20~22 °C 时, 表明采用该系统时室内能够满足舒适性需求。

2.3 不同地区适用性分析

为分析该系统在不同地区不同人员密度条件下的适用性, 按照上一小节描述的评价指标对整个冬季分析计算, 搜集 5 个气候分区的典型城市冬季 (11 月 16 日~次年 3 月 15 日) 10:00 至 21:00 共计 1440 h 的气候参数, 按月份划分, 在系统开启时间内, 统计累积逐时满足小时数占运行总小时数的比例, 即为 DCVS 在该地区当月的满足率, 如式 (4)。

$$\beta = \frac{a}{A} \quad (4)$$

式中: β 为满足率; a 为当月满足时刻累积小时数, h ; A 为当月系统运行总时长, h 。

选取 5 个代表城市五种人员密度情况进行计算分析, 结果如图 5 至图 9 所示。

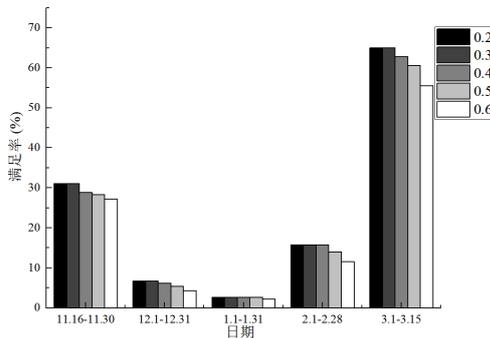


图 5 沈阳地区不同人员密度适用性结果

Fig.5 Results in Shenyang with different occupant densities

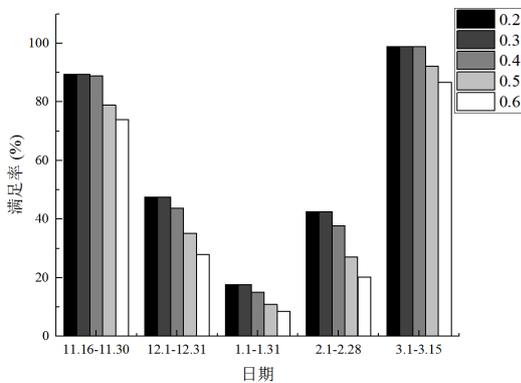


图 6 北京地区不同人员密度适用性结果

Fig.6 Results in Beijing with different occupant densities

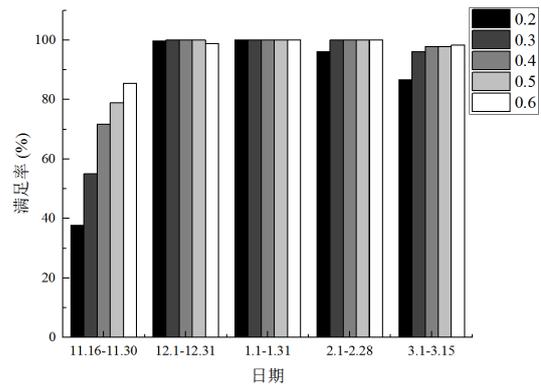


图 7 成都地区不同人员密度适用性结果

Fig.7 Results in Chengdu with different occupant densities

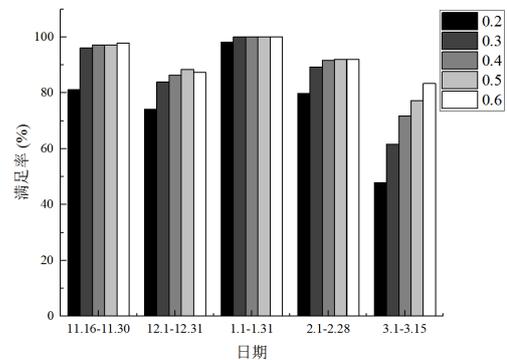


图 8 昆明地区不同人员密度适用性结果

Fig.8 Results in Kunming with different occupant densities

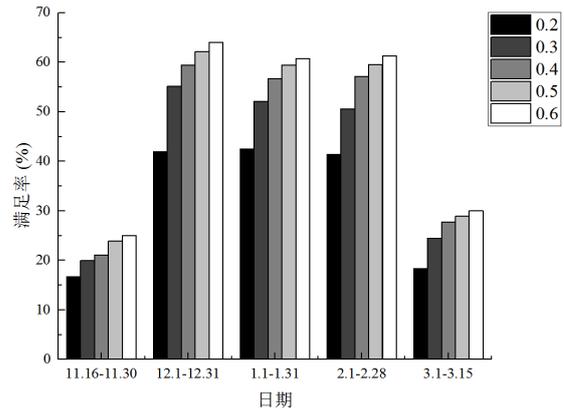


图 9 广州地区不同人员密度适用性结果

Fig.9 Results in Guangzhou with different occupant densities

由图 5 至图 9 可见, 各工况成都地区和昆明地区冬季满足率均达到 80%, 成都地区甚至高达 90%, 表明 DCVS 在夏热冬冷地区和温和地区适用性最好。且随着人员密度的增大, 该系统在这两个

地区的满足率也在提高。夏热冬暖地区冬季室外气温较为温和，与室内空气的焓差较小，因此需要的新风量大，特别是冬季初期和末期时间段，易造成室内强烈的吹风感，因此广州地区在全年最冷时刻满足率高于冬季初末期；而严寒地区和寒冷地区满足率较低，沈阳不同人员密度下满足率均不足20%，北京地区满足率在50%左右，这两个地区随着人员密度的增大，满足率降低。由于冬季室外温度过低，室内外温差较大，人员密度增大的同时，新风最小需求量也同步增大，从而造成新风带入的冷量远大于室内余热，所以随着人员密度增大，其满足率反而降低。

因此，DCVS用于商场冬季内区供冷在夏热冬冷地区和温和地区适用性高，具有广阔的应用前景；对于寒冷地区和严寒地区单独引用室外新风供冷满足率虽然较低，但若预先利用室内排风对新风进行预热，或按一定比例混合后再通过弥散吊顶送入室内，其舒适性将得到保证，DCVS在这两个气候分区同样也能适用。

3 节能性分析

对于冬季商场内区需供冷的建筑，目前常用的供冷方式包括冷水机组或空气源热泵等制冷源供冷、冷却塔免费供冷、排风热回收预热新风免费供冷系统（Exhaust Air Heat Recovery Systems，简称EAHRS）等。EAHRS是利用转轮将排风的热量进行回收，回收的热量被用来预热新风，以防结露。相比其他两种供冷方式，节省了冷水机组、水泵、冷却塔等设备的运行功耗，节能潜力最高。针对上节分析结果，本节将选取适用性高的成都、昆明两地商场建筑，将DCVS和EAHRS的冬季供冷能耗进行对比分析。为了统一，当系统不满足室内舒适性需求时，均考虑开启以冷水机组为主机，系统COP为3.0的系统进行供冷。

3.1 DCVS 能耗

对上一小节得到的各地不同人员密度条件下的适用性进行分析统计，当DCVS能够保证室内舒适性需求时，冬季仅需开启风机引入室外新风，无其他能耗，风机送风量采用式（5）计算，而风机能耗计算均取为文献[2]中所给数据：商业、酒店建筑全空气系统风道系统单位风量耗功率 W_s 为 $0.3W/(m^3/h)$ 。当DCVS不适用时，则考虑采用冷水机组供冷消除室内余热，系统能耗按照COP为3.0进行计算。

$$G = Q / [\rho(h_{in} - h_{air})] \quad (5)$$

3.2 EAHRS 能耗

EAHRS不仅包括送风机和回风机的能耗，热回收转轮也会消耗功率，且为 $0.13W/(m^3/h)$ [18]。EAHRS一个重要指标是回收效率，受迎面风速、排风量与新风量之比、新风温度、新风含湿量等多因素影响。为了统一，本文计算时考虑逐时排风量与新风量之比为0.8，迎面风速取2.0 m/s。全热交换效率仅与新风温度和含湿量有关。设计工况的全热交换效率取为76% [1]。根据文献[17]冬季全热交换逐时效率可按以下经验公式进行计算：

$$\eta = 0.8781 - 0.0098t - 0.0045d \quad (6)$$

式中： t 为室外空气干球温度， $^{\circ}C$ ； d 为室外空气含湿量， g/kg 。

预热后的新风温度过高时送风量往往偏大，不仅加大风机压头，同时易造成室内的吹风感。因此本文做出如下规定：当室外温度低于 $10^{\circ}C$ 时，通过热回收将新风预热至 $10^{\circ}C$ 后送入室内；若室外温度高于 $10^{\circ}C$ ，则直接引入新风。经分析校核发现室外新风预热至 $10^{\circ}C$ 时的全热交换效率均小于实际值，表明假设成立。同样，EAHRS不满足时，采用COP为3.0的供冷系统制冷消除余热。

将成都地区和昆明地区不同人员密度商场两种系统单位面积能耗计算结果汇总于表3、表4。

表3 成都地区两种方案不同人员密度能耗对比

Table 3 Comparisons of energy consumption between two schemes in Chengdu

| 参数 | DCVS | EAHRS |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 人员密度 | 0.2 | | 0.3 | | 0.4 | | 0.5 | | 0.6 | |
| 新风量/ m^3/h | 17919.8 | 20252.1 | 22291.8 | 27052.2 | 26079.9 | 31016.5 | 29252.2 | 34223.8 | 32462.3 | 36908.7 |
| 排风量/ m^3/h | 14335.8 | 16201.6 | 17833.5 | 21641.8 | 20863.9 | 24813.2 | 23401.8 | 27379.0 | 25969.8 | 29527.0 |

续表 3 成都地区两种方案不同人员密度能耗对比

| 参数 | DCVS | EAHRS |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 风机能耗/W | 9676.7 | 10936.1 | 12037.6 | 14608.2 | 14083.1 | 16748.9 | 15796.2 | 18480.8 | 17529.6 | 19930.7 |
| 转轮能耗/W | | 4739.0 | | 6330.2 | | 7257.9 | | 8008.4 | | 8636.6 |
| 机组能耗/W | 2573.1 | 6005.4 | 1611.6 | 2284.8 | 1082.1 | 1333.7 | 881.9 | 872.6 | 745.3 | 677.7 |
| 总能耗/W | 12249.8 | 21680.4 | 13649.2 | 23223.3 | 15165.2 | 25340.5 | 16678.1 | 27361.8 | 18274. | 29245.0 |

表 4 昆明地区两种方案不同人员密度能耗对比

Table 4 Comparisons of energy consumption between two schemes in Kunming

| 参数 | DCVS | EAHRS |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 人员密度 | 0.2 | | 0.3 | | 0.4 | | 0.5 | | 0.6 | |
| 新风量/m ³ /h | 20538.3 | 13565.0 | 28391.9 | 23990.3 | 34122.5 | 30426.0 | 39053.5 | 35172.7 | 43435.8 | 39194.4 |
| 排风量/m ³ /h | 16430.6 | 10852.0 | 22713.5 | 19192.2 | 27298.0 | 24340.8 | 31242.8 | 28138.1 | 34748.6 | 31355.5 |
| 风机能耗/W | 11090.7 | 7325.1 | 15331.6 | 12954.7 | 18426.2 | 16430.0 | 21088.9 | 18993.2 | 23455.3 | 21165.0 |
| 转轮能耗/W | | 3174.2 | | 5613.7 | | 7119.7 | | 8230.4 | | 9171.5 |
| 机组能耗/W | 5177.0 | 13483.5 | 3216.5 | 8395.6 | 2698.7 | 6654.0 | 2464.4 | 6037.3 | 2445.2 | 5747.7 |
| 总能耗/W | 16267.6 | 23982.8 | 18548.1 | 26964.1 | 21124.9 | 30203.7 | 23553.3 | 33261.0 | 25900.5 | 36084.2 |

对比 DCVS 与 EAHRS 的能耗, 成都地区 DCVS 单位面积商业内区冬季能耗只有 EAHRS 的 60%, 且能提供整个供暖季 90% 以上的能耗, 该比例随着人员密度增大而上升。昆明地区相比 EAHRS 可节约 30% 的能耗。两种系统处理冬季内区冷负荷时, 在无需开启功率大的机组, 初投资较为接近的前提下, DCVS 更加节能经济。

4 结论

本文提出将 DCVS 用于商场全年空调系统, 对内区冬季供冷的送风方案进行了详细分析说明: 该系统可以送入大风量、大温差条件下的新风, 通过弥散式多孔天花板均匀分散地送入室内, 冷空气在吊顶附近与室内热空气有效混合, 无结露危险, 低温送风也不会对人员活动区产生冷风感。经理论分析和计算, 得出 DCVS 在夏热冬冷地区和温和地区具有广阔的应用前景, 且随着人员密度的加大, 适用率上升, 当人员密度从 0.2 人/m² 到 0.6 人/m² 均能保证 80% 以上工作时间段室内环境均处于舒适范围。相比于 EAHRS, DCVS 冬季单位面积商业内区能耗温和地区和夏热冬冷地区分别减少 30%、40%, 节能效益可观。当然, 本文仅对该系统冬季内区供冷进行分析说明, 对于寒冷地区和严寒地区舒适性不佳的时段, 还可以考虑将室外新风与室内

回风按一定比例混合后送入室内, 以提高送风温度, 提高舒适性时间段比例。

参考文献:

- [1] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册 (第 2 版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] GB 50189—2015, 公共建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [3] T T Chow, X Y Yang. Ventilation performance in operating theatres against airborne infection: review of research activities and practical guidance[J]. J. Hosp. Infect. 2004, 56(2): 85-92.
- [4] L Jacobsen. Air Motion and Thermal Environment in Pig Housing Facilities with Diffuse Inlet[D]. Department of Civil Engineering, Aalborg University, Denmark, 2008.
- [5] M H Kristensen. Field study evaluation of diffuse ceiling ventilation in classroom during real operating conditions[J]. Energy and Buildings, 2017, 138: 26-34.
- [6] Chen Zhang, M H Kristensen, J S Jensen. Parametrical analysis on the diffuse ceiling ventilation by experimental and numerical studies[J]. Energy and Buildings, 2016, 111: 87-97.
- [7] P Jacobs, B Knoll. Diffuse ceiling ventilation for fresh classroom[C] in: 30th AIVC Conference Trends in High

- Performance Buildings, 2009.
- [8] P Jacobs, E C M van Oeffelen, B Knoll. Diffuse ceiling ventilation, a new concept for healthy and productive classrooms[C] in: Proceedings of the 11th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Copenhagen, Denmark, 1, 2008:1-8.
- [9] Tao Yu, P Heiselberg, B Lei. A novel system solution for cooling and ventilation in office buildings: A review of applied technologies and a case study[J]. Energy and Buildings, 2015,90:142-155.
- [10] Yang H. Experimental and numerical analysis of diffuse ceiling ventilation[D]. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2011.
- [11] P V Nielsen, P L Jensen, L Rong. Diffuse ceiling inlet systems and the room air distribution[C]. Clima 2010:10th REHVA World Congress, 2010.
- [12] Jianhua Fan, Christian Anker Hviid, Honglu Yang. Performance analysis of a new design of office diffuse ceiling ventilation system[J]. Energy and Buildings, 2013,59:73-81.
- [13] GB 50735—2012,民用建筑暖通通风与空调设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [14] JGJ 48—2014,商店建筑设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [15] P V Nielsen. Analysis and design of room air distribution systems[J]. HVAC&R Research, 2007,13:987-997.
- [16] 中国气象局气象信息中心气象资料室,清华大学建筑技术科学系.中国建筑热环境分析专用气象数据集[M].北京:中国建筑工业出版社,2005
- [17] 徐胡清.夏热冬冷地区空调排风热回收节能性分析[D].合肥:合肥工业大学,2010.
- [18] 孙静.上海某办公楼中全热回收转轮应用的技术经济性分析[J].洁净与空调技术,2012,(2):49-51.