

湿热地区人群夏季主动利用气流的 研究(2):气流感受与利用策略*

华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室 张宇峰[☆]

深圳市建筑科学研究院 刘倩妮

华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室 孟庆林

摘要 空气流动是湿热地区人群改善夏季室内热环境的有效方式。通过对某自然通风宿舍 32 名大学生的现场测试与调研,获得了他们对气流和热环境的感受情况,得到了确保满足 80% 热环境满意度前提下充分利用气流、实现舒适与节能兼顾目标的气流综合利用策略。

关键词 湿热地区 热环境 气流 感受 利用策略

Airflow utilization in built environment in hot-humid area of China (2): Perceptions and utilizations of airflow

By Zhang Yufeng[★], Liu Qianni and Meng Qinglin

Abstract Airflow is an effective way for people in hot-humid area of China to improve their thermal environments in summer. Through the field survey on 32 college students in their naturally ventilated dormitories, obtains their perceptions conditions of airflow and thermal environment, and also obtains the strategy of actively utilizing airflow in hot-humid area, which could make full use of airflow while maintaining 80% thermal satisfaction and make good balance between comfort and energy saving.

Keywords hot-humid area, thermal environment, airflow, perception, utilizing strategy

★ State Key Laboratory of Subtropical Building, South China University of Technology, Guangzhou, China

①

0 引言

在我国湿热地区的夏季,如能充分利用自然和人工方式合理营造空气流动,将显著改善室内热环境质量,扩大舒适温湿度范围,缩短空调运行时间,从而减少建筑能耗。为此确立本研究的目标为:通过连续的现场调研,获得湿热地区人群主动利用气流的行为特征及其动机,确定人群对气流感受变化的规律,提出湿热地区建筑利用气流的策略。因篇幅原因,行为与动机部分在本研究的另一篇文章^[1]中论述,本文着重阐述气流感受与利用策略。

人体对气流的感受包括气流强度、吹风感和气流期望等方面。吹风感因其在偏冷环境下引发明显不适较早受到关注,后期被引入到偏热环境中,

描述因气流速度过大而引起的皮肤及黏膜蒸发量增大,以及气流的冲力产生的不愉快的感觉^[2]。在冷吹风感研究的基础上,国内外标准均对空调环境下的风速进行了限制^[3-5]。气流强度反映感知到的气流强弱程度,McIntyre 在用吊扇进行研究的过程中采用心理物理方法,发现感知气流强度与风速的二次幂成正比关系^[6]。气流期望直接反映人们对气流的心理意愿,可用于判断环境气流是否充足,如对美国 ASHRAE RP 884 数据库中气流期望的一项分析^[7]揭示,即使在空调建筑中,仍有很

①☆ 张宇峰,男,1979 年 4 月生,博士,副教授
510640 广州天河五山华南理工大学建筑学院
(020) 87112304
E-mail: zhangyuf@scut.edu.cn
收稿日期:2013-08-13
修回日期:2013-09-17

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50978102),新世纪优秀人才支持计划资助项目

多人希望有更多气流。

气流的利用策略主要反映在风速补偿温度升高这一规律中。早在上世纪 70 年代就有美国研究人员开展偏热环境下不同风速的实验^[8],其后陆续有美国、日本和我国研究人员开展相似研究,得到不同风速所能补偿的温湿度范围。风速补偿温度也作为气流利用原则写进了国内外标准^[3-5]。

以上关于气流感受和利用策略的研究,大多在严格受控的实验室中进行,受试人员被动接受各种设定的气流。而实际建筑中,气流被室内人员主动调节和利用,此时人们的气流感受以及风速补偿的温湿度范围可能与实验室的结果不同。基于此,本文在对我国湿热地区实际建筑进行现场调研的基础上,对湿热地区人群的气流感受和利用行为展开系统的分析和讨论,以期获得湿热地区人群主动利用气流的特征和策略,为湿热地区建筑的空气流动设计与营造提供参考。

1 研究方法

湿热地区人群夏季主动利用气流的调研方法、本文的调研对象及热环境物理测试方法在文献^[1]中已有叙述,这里仅介绍气流感受的调研方法。

气流感受包括气流强度、气流偏好、不适吹风感和气流单调性等方面,其中,气流强度用投票标尺获得,参见图 1a,气流偏好、不适吹风感和气流单调性以选择题的形式出现,分别为:希望气流增强、维持现状还是减弱?有无不适吹风感?气流变化单调还是丰富?

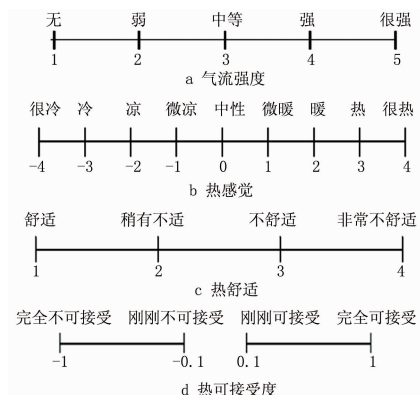


图 1 气流和热感受用投票标尺

整体热环境评价包括热感觉、热舒适和热可接受度,采用图 1b~d 给出的标尺进行投票。考虑调研建筑夏季可能出现很热的情况,采用 9 点标尺作热感觉投票。

调研从 2011 年 5 月 22 日始,至 2011 年 10 月 24 日止,涵盖整个夏季,共计得到 22 周、1 092 组原始调研数据。

2 结果分析

人们对气流的感受和利用,可能因气流利用手段不同而不同,故将原始调研数据分为“开窗通风”和“使用风扇”2 组,前者对应于仅开门开窗自然通风的情况,此时公用和自备风扇均关闭,后者对应于门窗和风扇同时开启使用的情况。经统计,“开窗通风”组共有 277 组有效数据,集中在 10 月、9 月和 5 月等夏季低温期,“使用风扇”组共有 751 组有效数据,集中在夏季高温期(有关夏季低温期和高温期的定义和区分见文献^[1])。

以下分析分别对“开窗通风”和“使用风扇”2 组数据展开。

2.1 气流感受

2.1.1 开窗通风

开窗通风时,受试者感知的气流强度随其所处环境风速的变化如图 2 所示。图中各点为分组后

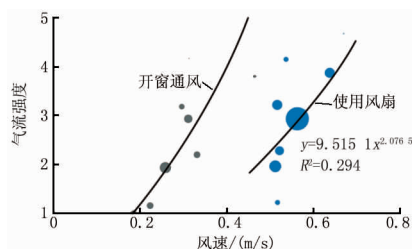


图 2 开窗通风和使用风扇时气流强度随风速的变化

的平均值,分组以气流强度为指标,间隔 0.5 为一组,数据点面积大小代表其所在组样本量的多少,曲线为按样本量加权回归的结果。

由图 2 可知,开窗通风时室内风速较低,集中在 0.2~0.4 m/s 之间,受试者感知的气流强度在 1~3 之间分布,气流强度与风速呈幂函数变化关系,指数接近 2,这与以往研究^[6]揭示的主观风强与动压,也即风速的平方成正比的结果相近。开始有风感的阈值为 0.2 m/s,这也与以往研究相对应。受试者感知的气流强度平均值为 2,即“弱”。

虽然感知气流为弱,但多数受试者仍希望气流维持现状(74%),只有少数(23%)受试者希望增强,这与开窗通风时段室内外较低的温度湿度有关;全部数据中,认为有不适吹风感的比例仅为 1%,

说明门窗开启形成的自然通风不会带来不适吹风感;气流单调性统计结果显示,70%的人觉得室外吹入气流变化单调,30%的人觉得丰富。

2.1.2 使用风扇

使用风扇时,受试者感知的气流强度随其所处环境风速的变化如图 2 所示。

使用风扇时,室内风速较大,分布在 0.5~0.7 m/s。与开窗通风的情况相似,气流强度与风速的二次幂成正比,但不同的是,同样的气流强度对应的风速值明显偏大,这可能是由于环境温度提高所致,温度越高,感受同等气流强度对应的阈值越高。平均气流强度接近 3,即“中等”。

有关气流感受的其余统计结果如下:41%的人希望风速增强,57%的人希望保持当时的风速,只有 2%的人希望减弱,由此可见,风扇的使用尚未完全满足受试者对气流的需求;有近 10%的人感受到不适吹风感,主要来自于“吹在身上不均匀”;感到气流变化丰富和单调的比例各占一半。

2.2 热感受

气流感受是人群主动利用气流效果的一部分,为更全面地衡量气流对人们主观感受的影响作用,选择包括温湿度、辐射和气流影响在内的热感受加以分析。

2.2.1 热感觉

为确定热感觉与所处热环境的关系,引入可全面考虑热环境各影响因素的标准有效温度作为热环境的表征指标。

将现场测得的空气温湿度、风速和平均辐射温度 4 个物理参数,与服装热阻、新陈代谢率和受试者的体重与体表面积等个人参数作为已知条件,利用两节点模型,计算得到每一组原始数据对应的标准有效温度。分别对“开窗通风”和“使用风扇”2 组数据进行分析,热感觉随标准有效温度的变化如图 3 所示。

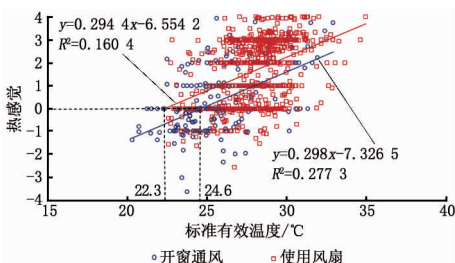


图 3 热感觉随标准有效温度的变化

2 种情况下,热感觉与标准有效温度均呈近似的线性关系,斜率相近,约为 0.3,也即标准有效温度每提高 1℃,热感觉对应上升 0.3 个标尺刻度单位;开窗通风和使用风扇 2 种情况下对应的热中性温度分别为 24.6℃和 22.3℃,风扇的使用使热中性温度降低了 2.3℃。

2.2.2 热可接受度

热可接受度是人体结合以往感受经验和认知,对所处热环境的综合评判。热可接受度与热感觉的变化关系如图 4 所示。

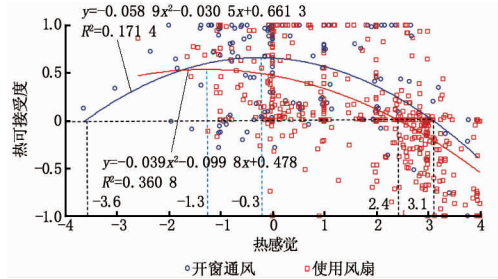


图 4 热可接受度随热感觉的变化

热可接受度与热感觉近似呈二次多项式关系,接受度最高的热感觉分别为-0.3(开窗通风)和-1.3(使用风扇),也即,使用风扇时,受试者偏好的热感觉从“中性”偏移至“稍凉”,向凉的方向推移了 1 个标尺刻度单位。可接受热感觉的阈值,也即接受度为 0 的热感觉,为-3.6 和 3.1(开窗通风)及 2.4(使用风扇),也即,热感觉九点标尺中从“冷”至“暖”的 6 个感觉刻度均为可接受,使用风扇时,可接受的感觉范围随热偏好一起,向冷的方向偏移。

2.2.3 热舒适

热舒适是衡量人体对热环境综合评价的另一重要指标,其与热可接受度的关系如图 5 所示。

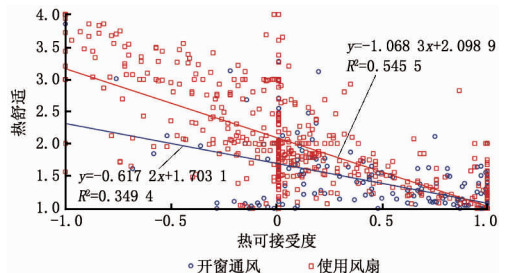


图 5 热舒适随热可接受度的变化

“完全可接受”对应于“舒适”,“刚刚可接受”对应于热舒适投票值 1.7(开窗通风)和 2.1(使用风扇),也即,“舒适”和“稍有不适”均为可接受。

综上,热感觉与标准有效温度呈线性关系,可接受度与热感觉呈二次多项式关系,热舒适与接受度一一对应,这些规律与以往研究结果^[10]相近。

与以往不同的是开窗通风与使用风扇 2 种情况下受试者主观热感受的差异。中性偏热环境下,相较于开窗通风,受试者在使用风扇时的热感觉更强,热可接受度更低。风扇提供的风速调节范围更大,带来的控制感更强,但增强的控制感并没有带来接受度的提高,而是相反,这与以往的研究结果^[11]不同。

2.3 选择风速

风速是气流利用最直接和重要的表征指标,以下分开窗通风和使用风扇 2 种情况,分析受试者选择的风速随室内环境的变化情况。

2.3.1 开窗通风

空气温度、湿度和平均辐射温度均会影响人体的热感受,继而影响风速的调节和选择,参考以往研究^[1],选择综合考虑以上三因素的新有效温度作为热环境指标。取现场测试得到的温湿度与平均辐射温度,以及诸项个人参数,依两节点模型计算得到每一组数据对应的新有效温度,而后按 0.5℃ 间隔分组,将全部“开窗通风”数据分为 21 组,计算每组的新有效温度与风速平均值,分析其变化关系,结果如图 6 所示。

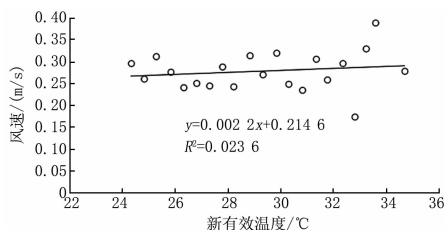


图 6 开窗通风时风速随新有效温度的变化

开窗通风时,风速有随新有效温度升高而增大的趋势,但趋势十分微弱,可近似认为风速在 0.25~0.3 m/s 间小范围波动。风速微弱的变化趋势与自然通风的形成机制有关,开窗通风形成的室内风速,受室外来风、建筑布局、开窗位置和室内通风路径等因素制约和影响,不会仅因为门窗开启出现大幅度的变化。

因开窗通风完全由受试者按自己的需求调节,形成的风速因人而异,分析风速的离散程度可知,其标准偏差在不同温湿度环境下变化不大,约为

0.13 m/s,如近似认为选择风速呈正态分布,则可知绝大多数人选择的风速在平均风速±0.26 m/s 范围内。

2.3.2 使用风扇

与开窗通风的微弱变化不同,风扇由受试者主动控制,风速可在大范围内自由调节,形成的风速随新有效温度的变化如图 7 所示。图中各点为分组后的平均值,“使用风扇”数据按新有效温度 0.5℃ 间隔分组,共分得 22 组。

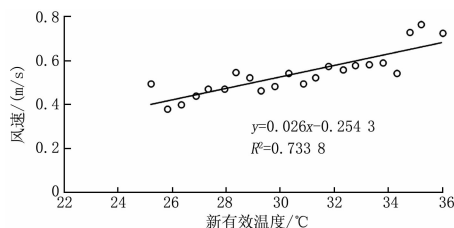


图 7 使用风扇时风速随新有效温度的变化

使用风扇时,风速随新有效温度呈显著的线性关系,温度每上升 4℃,风速增加近 0.1 m/s。风扇形成的室内风速在 0.4~0.7 m/s 范围内变化。与开窗通风一致,分析风速的个体差异可知,选择风速的平均标准偏差为 0.16 m/s,绝大多数人选择的风速在平均风速±0.32 m/s 范围内。

风速作为气流利用行为的重要结果,其变化特征在很大程度上反映了行为及其动机的特征。由本研究前一部分工作得知,门窗的开启不单以热环境动机为主,还兼顾通风换气,故门窗的开启率随新有效温度的变化较为松散和缓慢,而风扇的行为以热环境动机为主,故风扇的使用率随新有效温度变化十分明显和剧烈,呈较好的 S 形关系^[1]。本文得到的风速随新有效温度的变化结果,与行为及动机结果的趋势一致。

2.4 利用策略

明确利用气流的适宜温湿度条件及适宜风速范围,是制定气流利用策略的关键。以下对 2 种利用气流手段分别加以分析,确定气流的综合利用策略。

2.4.1 开窗通风

为确定开窗利用自然通风时的适宜热环境和风速范围,选新有效温度为热环境指标,满意百分比与风速为因变量,分析其随新有效温度变化的关系,结果如图 8 所示。数据按新有效温度分组,方法同 2.3 节。满意百分比为同组中热可接受度大

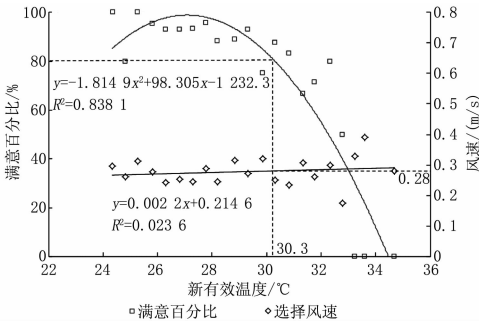


图8 开窗通风的气流利用策略分析

于0的投票数占总投票数的比例。

由图8可知,开窗通风时,满意百分比与新有效温度呈二次多项式关系,随着温度升高,满意百分比先升后降,与此同时,受试者开启门窗形成的室内风速有微弱提高。以目前国内外标准划定的80%满意率为基准,确定此基准对应的热环境上限温度为30.3℃,此时的平均风速为0.28 m/s,考虑个体差异,得到风速的上限为0.54 m/s。也即,当开窗通风的室内风速平均达0.28 m/s,最大可达0.54 m/s时,适宜的热环境新有效温度可提高至30.3℃。

2.4.2 使用风扇

同理分析可得使用风扇的数据,如图9所示。

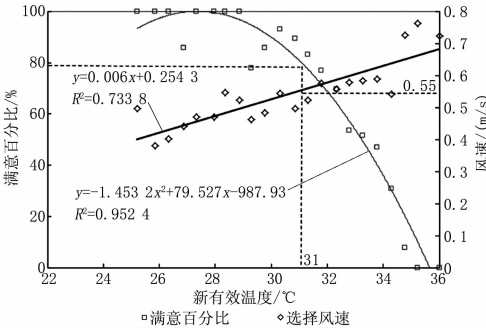


图9 使用风扇的气流利用策略分析

与开窗通风类似,使用风扇时,受试者的满意百分比随新有效温度呈二次多项式关系变化。取80%满意率划线,得到使用风扇适宜的热环境上限温度为31.0℃,平均风速为0.55 m/s,最大风速为0.87 m/s。这一风速上限的确定明确了风速补偿温湿度提高的可用限度。

2.4.3 综合利用策略

综合以上分析,结合本研究上一部分工作得到的行为动机结果,得到湿热地区建筑综合利用气流的策略如图10所示。

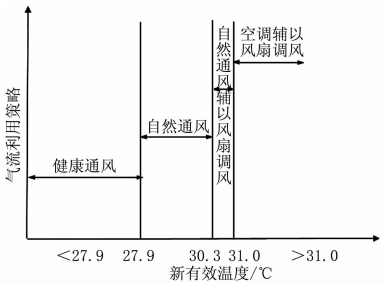


图10 以新有效温度为指标的气流综合利用策略

以新有效温度为室内热环境指标,当其低于27.9℃时,气流利用以开窗健康通风为主,目标在于保证室内空气品质;当新有效温度在27.9~30.3℃时,气流利用以开窗自然通风为主,目标为改善人体热舒适,此时形成的室内风速一般在0.5 m/s以下;当新有效温度在30.3~31.0℃时,气流利用以风扇调风辅以自然通风,形成的室内风速不宜超过0.9 m/s;当新有效温度超过31.0℃时,建议采用空调辅以风扇调风的方式,确保达到80%的室内环境满意度。

考虑夏季的平均状况,也即相对湿度70%、平均辐射温度比空气温度高0.3℃,以及受试者的平均服装热阻0.3 clo、活动量1.1 met、体重55 kg和体表面积1.6 m²,可计算得到新有效温度对应的空气温度,由此得到以室内空气温度为特征指标的气流利用策略:

- 1) 空气温度低于27.4℃时,开窗健康通风;
- 2) 空气温度在27.4~29.3℃时,开窗自然通风;
- 3) 空气温度在29.3~30℃时,自然通风辅以风扇调风;
- 4) 空气温度超过30℃时,开启空调并辅以风扇调风。

上述策略综合考虑了开窗通风和使用风扇2种常见的气流利用形式,兼顾气流对室内热环境和空气品质的影响作用,在保证80%热满意度的前提下,实现室内气流的最大程度利用。上述策略为兼顾舒适和节能,实现建筑的绿色和可持续发展提供了有价值的参考。

以本文的调研对象为例,以空气温度为指标统计整个夏季各种气流利用方式的有效作用时段,结果如图11所示。

3 结论

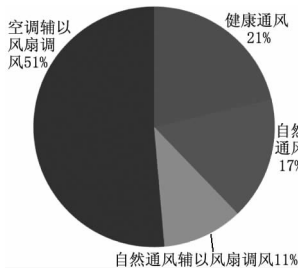


图 11 各种气流利用方式的有效作用时段比例

3.1 湿热地区的夏季低温期以开窗通风为主,气流强度“弱”,无吹风感,能保证多数人满意;夏季高温期以使用风扇为主,气流强度“中等”,仅能满足一般情况下的需求,存在因气流不均导致的吹风感。

3.2 相较于开窗通风,受试者在使用风扇时的热中性温度更低,偏好热感觉移向凉的方向。

综合不同气流利用手段的结果,得到湿热地区夏季主动利用气流的策略如下:

- 1) 空气温度低于 27.4℃时,开窗健康通风;
- 2) 空气温度在 27.4~29.3℃时,开窗自然通风,室内风速一般在 0.5 m/s 以下;
- 3) 空气温度在 29.3~30℃时,自然通风辅以风扇调风,室内风速不宜超过 0.9 m/s;
- 4) 空气温度超过 30℃时,开启空调并辅以风扇调风。

以上策略能确保在满足 80%热环境满意度的前提下充分利用气流,从而达到舒适与节能兼顾的目标。

3.3 本文的研究结果为加深对气流及热环境感受的认识、促进自然通风和风扇的优化设计,以及实现舒适节能兼顾的建筑设计提供了基础和重要信息。

~~~~~  
(上接第 89 页)

表 3 3 种系统所需制冷量、风量的计算结果

|      | 送风点温度/℃ | 新风所需制冷量/kW | 回风所需制冷量/kW | 再热量/kW | 回风量/(m³/h) | 送风量/(m³/h) |
|------|---------|------------|------------|--------|------------|------------|
| 系统 1 | 16.3    | 81         | 144        |        | 20 715     | 29 715     |
| 系统 2 | 18      | 81         | 144        | 13     | 27 007     | 36 007     |
| 系统 3 | 18      | 81         | 144        |        | 27 007     | 36 007     |

由表 3 可知,3 种系统的送风温差分别为 9.7,8,8℃,机组总冷量分别为 225,238,225 kW,系统 2 要多消耗 13 kW 的再热量,系统 3 可利用 36%的高温冷源的冷量,同时可使冷源的装机容量由 1 758 kW 降为 1 430 kW,故系统 3 最节能。

3 结语

参考文献:

[1] 张宇峰,刘倩妮,孟庆林. 湿热地区人群夏季主动利用气流的研究(1):行为与动机[J]. 暖通空调,2014: 44(1):29-35

[2] 夏一哉. 气流脉动强度与频率对人体热感觉的影响研究[D]. 北京:清华大学,2000

[3] ASHRAE. ASHRAE standard 55-2004 Thermal environmental conditions for human occupancy[S]. Atlanta: ASHRAE, 2004

[4] ISO. ISO International standard 7730 Ergonomics of the thermal environment—analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria[S]. Geneva: ISO, 2005

[5] 清华大学,中国标准化研究院. GB/T 5701—2008 室内热环境条件[S]. 北京:中国标准出版社, 2008

[6] McIntyre D A. Preferred air speeds for comfort in warm conditions[G]// ASHRAE Trans, 1978, 84 (2): 264-277

[7] Hoyt T, Zhang H, Arens E. Draft or breeze? Preferences for air movement in office buildings and schools from the ASHRAE database[C]// Healthy Buildings 2009. Syracuse, NY, USA, 2009

[8] Rohles F H, Woods J E, Nevins R G. The effect of air movement and temperature on the thermal sensations of sedentary man[G]// ASHRAE Trans, 1974, 80(1): 101-119

[9] ISO. ISO International Standard 7726 Ergonomics of the thermal environment—instruments for measuring physical quantities[S]. Geneva: ISO, 1998

[10] Zhang Y, Zhao R. Overall thermal sensation, acceptability and comfort [J]. Building and Environment, 2008, 43(1): 44-50

[11] Paciuk M. The role of personal control of the environment in thermal comfort and satisfaction at the workplace[C]// Coming of Age, 21th Annual Conference of the Environmental Design Research Association. Champaign-Urbana,1990

改变后的一次回风全空气空调系统(系统 3)新、回风单独处理,不需要消耗再热量就能满足设定的送风温差,且可利用高温冷源,具有一定的节能性。

参考文献:

[1] 马最良,姚杨. 民用建筑空调设计[M]. 2 版. 北京:化学工业出版社,2009:75