

隔断式风机盘管工位空调系统 气流组织与微环境评价

华北电力大学 荆有印[☆] 郑国忠^{*}

摘要 采用 $K-\epsilon$ 三维湍流模型对一典型办公室工作区微环境进行了数值模拟,对三种送风速度下工作区的温度场、速度场以及人体吹风感和预期不满意百分率进行了分析研究。结果表明,房间温度呈分区分布,工位送风效率较高,可实现总体节能;在合适的送风速度下,可避免吹风感,保证良好的热舒适性。

关键词 隔断式风机盘管 工位空调 数值模拟 气流组织 吹风感 预期不满意百分率

Air distribution and microenvironment evaluation for partition-type fan-coil unit task air conditioning systems

By Jing Youyin[★] and Zheng Guozhong

Abstract Numerically simulates the microenvironment for typical office workspace with partition-type fan-coil unit (PFCU) task air conditioning system by a $K-\epsilon$ three-dimensional turbulent model. Analyses and studies the temperature and velocity distribution, the draught rating (DR) and the predicted percentage of dissatisfied (PPD) at three supply air velocities. The results show that the room temperature distribution appears zoning and air supplying efficiency is higher, which can achieve total energy conservation, and that the task air conditioning mode can provide better thermal comfort environment without draught rating when the air supply velocity is well designed.

Keywords partition-type fan-coil unit, task air conditioning, numerical simulation, air distribution, draught rating, predicted percentage of dissatisfied

★ North China Electric Power University, Baoding, Hebei Province, China

①

0 引言

由于室内人员具有不同的生理和心理反应、衣着量、活动水平、对空气温度和气流的个体偏好,以及人体对房间温度变化有不同的时间响应等,因此,传统空调的全空间调节具有局限性,通常不能同时满足所有人对热感觉和空气质量的要求。工位空调的出现,使每个人能够按照自己喜好调节其所在局部环境;此外,能在保证办公人员呼吸区域空气质量良好的前提下,达到节约能源的目的。由于工作区送风以及个人热控系统可以显著改善工作区微环境,因此可以适当提高室内背景温度,从而大大降低室内负荷。有研究表明,如果人体上半

部分的风速控制在 1 m/s 或者更高,则有可能将背景温度提高到 $31\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当室内温度设定值从 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提高到 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,总的冷负荷能够降低 $35\%\sim 50\%$ ^[1]。由此可见,工位空调节能效果显著。

工位空调系统在形式上可分为地板式、桌面式

①☆ 荆有印,男,1953年3月生,大学,教授

* 071003 河北省保定市华北电力大学 374 信箱

(0312) 7522443 (O) 13315278861

E-mail: ansystem@126.com

收稿日期:2005-11-18

一次修回:2006-01-09

二次修回:2006-05-09

和隔断式系统。本文以文献[2-5]提出的安装在每个工作台上的风机盘管系统(隔断式系统)为研究对象,根据文献[3]建立的隔断式风机盘管(PFCU)实验测试系统,采用 CFD 模拟技术分析了该系统在不同的送风速度下的室内流场、温度场分布以及工作区微环境评价。

1 隔断式风机盘管工位空调系统

1.1 隔断式风机盘管工位空调

随着人们对工位空调研究的深入,工位空调的系统形式日趋丰富。Chiang 等人提出了一种新型的 PFCU 装置^[2-3],而后 Pan 等人^[4-5]在该 PFCU 的基础上增加了换气装置,从而强化了其灵活性,进一步物化了 PFCU 概念^[4-5]。下面对该隔断式风机盘管工位空调系统进行简单介绍。

该 PFCU 模块(见图 1)由一般办公室隔断改

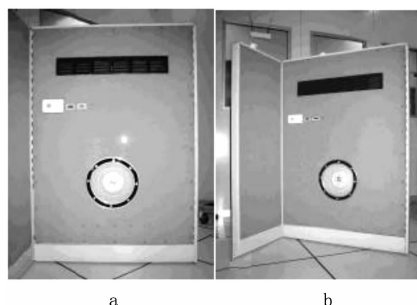


图 1 隔断式风机盘管工位空调模块

装而成,其主要部分包括办公室隔断(宽 100 cm,高 135 cm,深 5 cm)、换热盘管、热媒输送管与送风扇等。送风口位于机体上半部,安装有可调的百叶;回风口位于机体的下部,配备有两个并联的横流扇(cross fan)。每个隔断式工位空调的最大送风量为 60 L/s,即送风速度为 1 m/s,7℃冷水通过安装在隔断内的隔热聚乙烯管送到冷却盘管。

1.2 实验系统^[3]

本文给出了文献[3]关于 PFCU 工位空调系统的实验测试及结果以供本文数值模拟数学物理模型的建立以及结果的验证。

实验小室^[3](4.6 m×3.7 m×2.7 m(长×宽×高))有两面墙与环境温度控制在 30℃的区间相邻(用于模拟夏季气候条件),其余两面为内墙,分别与过道和另一测试房间相邻,过道与测试房间都没有采取空气调节措施。该实验小室装有 480 个 T 形热电偶,形成一个三维矩阵来测量室内温度。

该实验系统包括一套办公桌椅、两片装有 PFCU 隔断、三片一般的办公室隔断、一个电脑桌、一台电脑、一个实验室人体模型(thermal manikin),其中所有的隔断具有相同的高度和厚度(高 1.4 m,厚 6 cm)。将两片装有 PFCU 的隔断与三片一般办公室隔断连接组合,形成一个典型的办公个人工作区,再将办公桌椅、人体模型与电脑设备组合起来,以模拟一般办公室人员的工作环境。第一片装有 PFCU 的隔断安装在人体模型正前方,供给正前方所需的空调;第二片装有 PFCU 的隔断则安装在人体模型的右侧方,以供给工作区侧面所需之空调,见图 2。

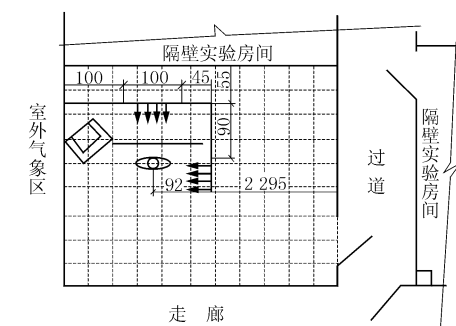


图 2 PFCU 测试现场布置平面图

图 3 为文献[3]中测试得到的 1.1 m 高度平面温度等值线图。从图中可以看出,工位送风从送风口送出后,在人体处汇合,用户可以根据个人喜好改变送风方向。

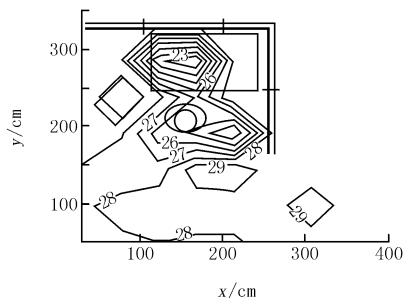


图 3 1.1 m 高度平面温度等值线图
(图中数值单位为℃)

2 模拟计算

本文根据文献[3]给出的 PFCU 实验测试系统建立数学模型,利用 CFD 方法,根据实验工况进行数值模拟以验证模拟结果的正确性,并另外选取送风速度为 0.3, 0.5, 0.9 m/s 的三种工况,对其进行数值模拟以研究工位空调的性能及其工作区微环境评价。

2.1 数学模型

为了简化问题,作如下假设^[6]:

1) 空调房间室内空气为不可压缩流体,且符合 Boussinesq 假设,即认为流体密度变化仅对浮升力产生影响;

2) 流动为稳态湍流;

3) 流场具有高湍流 Re 数,流体的湍流黏性各向同性;

4) 气流为低速不可压缩流动,可忽略由流体黏性力做功所引起的耗散热;

5) 不考虑漏风的影响,有空调送风时,门和窗关闭,认为室内空气密性良好。

选择 $K-\epsilon$ 两方程模型作为湍流模型。由 K 方程、 ϵ 方程、动量方程、能量方程、连续方程一起构成了室内空气流动与换热的基本方程,其通用形式为^[7]

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{V}\phi) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\phi) + S \quad (1)$$

式中 ρ 为密度, ϕ 为因变量, $\mathbf{V}$ 为速度矢量, Γ 为扩散系数, S 为源项。

2.2 边界条件

墙壁壁面取对流换热边界条件,墙体综合传热系数 $K=1.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;天花板、室内地板、电脑及桌椅等作为绝热边界条件处理,并均取无滑移边界条件。边界条件定义见表 1。

表 1 边界条件定义

边界类型	边界条件
工位空调送风口	速度入口
工位空调回风口	压力出口
墙	对流传热导热边界
电脑显示器	固定热流量
人	固定温度
天花板、地板	绝热

对离散方法作出如下选择:

1) 压力 p 选用二阶方法,压力速度耦合采用 SIMPLE 算法;

2) 湍流动能 K 、湍流动能耗散率 ϵ 、能量和动量选用一阶迎风格式;

3) 收敛准则——各流动项残差小于 10^{-3} ,能量项残差小于 10^{-6} 。

由于实际的传热过程是强制对流换热和自然对流换热相结合,所以,在计算中考虑重力作用的影响^[8-9]。

3 工位空调微环境评价

工位空调的送风气流在工作区域形成的微环境直接影响人的舒适性以及工作效率,因此,除了采用速度和温度指标进行评价外,还可以采用其他指标评价。文献[10]采用吹风感 DR (draught rating)对工位空调气流进行评价。文献[11-12]则采用预期平均评价 PMV (predicted mean vote)指标对工位空调在工作区形成的微环境进行了评价。预期不满意百分率 PPD (predicted percentage of dissatisfied)指标是建立在 PMV 指标之上的,是为了反映有多少人对环境不满意这一比例而建立起来的指标^[13],因此,本文采用 DR 和 PPD 指标进行评价。

3.1 吹风感

吹风感 DR 定义为由空气流动造成的人体所不希望的局部冷却感。在 ISO 标准中用下式定义^[14]:

$$DR = (34 - t_a)(v - 0.05)^{0.62}(0.37vT_u + 3.14) \quad (2)$$

式中 T_u 为湍流强度,%; t_a 为空气温度,℃; v 为气流平均速度, m/s,当 $v < 0.05 \text{ m/s}$ 时,取 $v = 0.05 \text{ m/s}$ 。当 $DR > 100\%$ 时,取 $DR = 100\%$ 。在实际应用中,要求 DR 小于 20% ^[10]。

3.2 预期不满意百分率

ISO7730 的推荐值为 $PPD < 10\%$,相当于在人群中允许有 10% 的人感觉不满意。

湍流状态下 PPD 与平均气流速度和空气温度的关系由下式给出^[15]:

$$PPD = 1380 \left(\frac{v - 0.04}{t_a - 13.7} + 0.0293 \right)^2 - 0.000857 \quad (3)$$

4 模拟结果分析

4.1 模拟验证

图 4,5 为根据文献[3]实验工况作出的模拟图。对比模拟结果与实验结果,发现二者基本吻合,在大体趋势上是一致的,仅在局部存在着一些差别,但误差在工程允许范围之内。证明前面建立在各种假设上的数学模型是正确的,包括边界条件的处理、湍流模型的选择、离散方法的选择、计算网格的划分、松弛系数的选取等,这为后续的其他大量模拟提供了合适的方法,为对隔断式工位空调的进一步研究打下了基础。

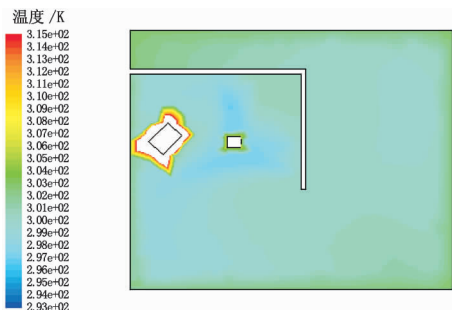


图 4 1.1 m 高度平面温度模拟图

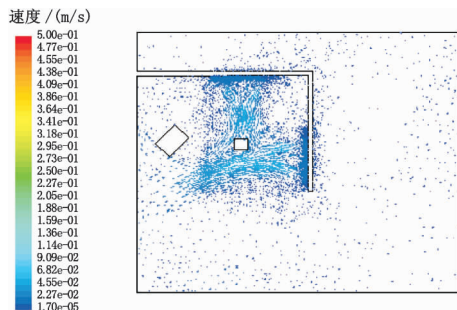


图 5 1.1 m 高度平面气流模拟图

4.2 模拟结果分析^[15-16]

采用上述模型,模拟了送风速度为 0.3, 0.5, 0.9 m/s 三种工况下空调房间的温度场、速度场。选取两个代表性截面 A ($z-y$ 平面, 穿过人体中心) 和 B ($x-y$ 平面, 高度 1.1 m) 进行分析。

4.2.1 温度场分布

图 6 给出了三种送风速度下截面 A 的温度分布。从图中可以看出,随着送风速度的增大,送风量增大,人体呼吸区的温度降低,周围的温度也降低。当送风速度为 0.3 m/s 时,温度场分布较合

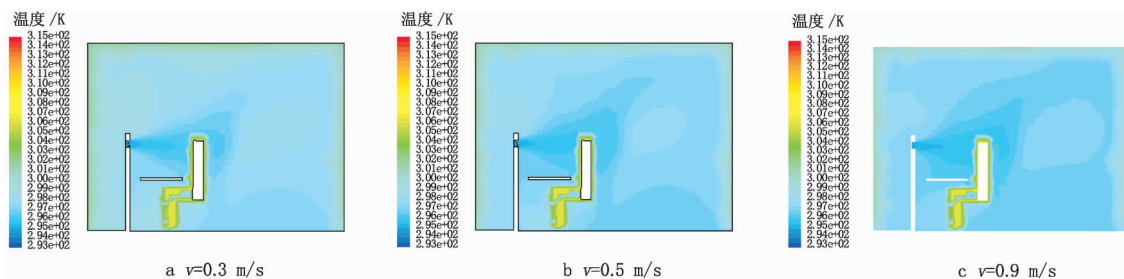


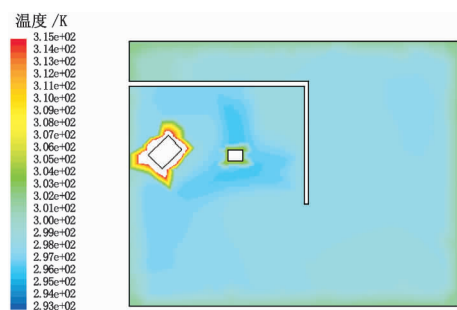
图 6 三种送风速度下截面 A 的温度分布

理;当送风速度为 0.5, 0.9 m/s 时,送风气流溢出工作区间,在人的头顶上方形成一个较大的低温带。随着送风速度的增大,工位空调的作用区域向下延伸,甚至蔓延至大部分房间区域。

图 7 给出了送风速度为 0.3 m/s 时截面 B 的温度分布。由图 7 可以看出,工作区及房间温度呈现分区分布,人体正好处于工位送风区,合理地利用了工位送风,工作区温度也较房间其他区域温度低,可见,工位送风效率很高,具有节能的优点。

4.2.2 气流分布

图 8 为三种送风速度下截面 A 的气流分布。冷空气从工位送风口送入室内后,速度迅速衰

图 7 $v=0.3$ m/s 时截面 B 的温度分布

减。工位送风直接将新风送到人体呼吸区。由于直接处在工位送风区,人体呼吸区域气流强烈,人体上部由于气流的卷吸作用,相对于邻近区域气流稍强,

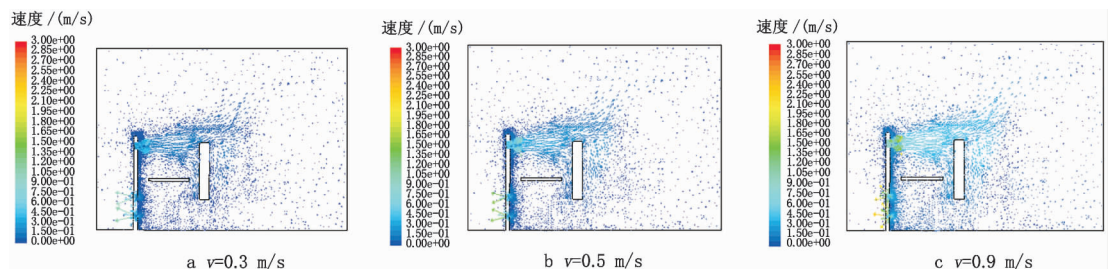


图 8 三种送风速度下截面 A 的气流分布

非工作区域气流流动均匀。当工位送风速度较低时,射程短,所能影响的范围小;送风速度越大,射流所能影响的范围越大,并逐渐扩大到房间下部。当送风速度为 0.3, 0.5 m/s 时,呼吸区气流速度均小于 0.3 m/s,符合人体舒适性对于气流速度的要求;当送风速度为 0.9 m/s 时,人体头部上方及头顶前方由于距工位送风口距离较近,气流速度达到 0.5 m/s,超过气流速度的要求,但由于是局部通风,平均室温较高,增加空气流动是有益的。

本文虽然没有对室内空气质量进行量化分析,但是从气流的流线情况来看,该气流模式有利于污染物的排除,尤其是在人的呼吸区内,空气质量是优良的。

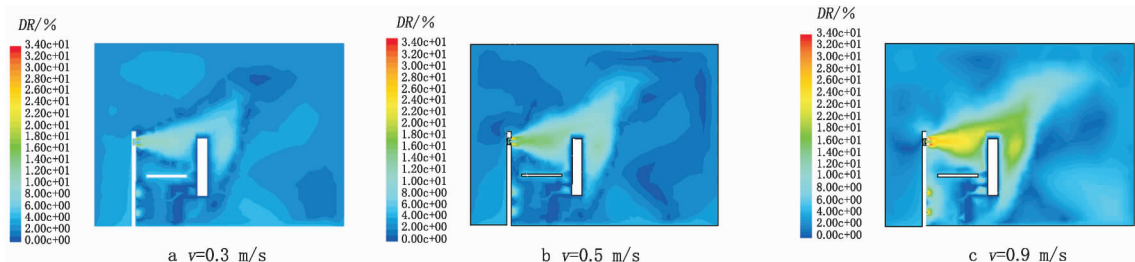


图 9 三种送风速度下截面 A 的吹风感分布

4.2.4 PPD 分布

根据 PPD 计算公式,初步预测了工位送风时人体对工作环境的不满意度。图 10 给出了三种送风速度下同一截面的 PPD 分布。从模拟结果可以看出,除个别位置如送风口附近外,其他位置均保持了良好的热舒适性,人体对工作区环境的满意

4.2.3 吹风感分布

根据文献[14]给出的 DR 计算公式,通过处理后,可以得出工位送风的吹风感分布图,如图 9 所示。从图中可以看出,工位送风时人员产生吹风感的区域主要在风口附近,随着工位送风速度的增加,人体上部、人体呼吸区、头部上方及头顶前方的吹风感增强,由于空气流动而造成的人体不希望的局部冷却感也增强。因此,在设计工位空调时,必须考虑人体的吹风感要求,防止产生吹冷风感。图 9 显示, $v=0.3, 0.5$ m/s 时,人体呼吸区及人体周围吹风感 DR 均小于 20%,基本符合人体舒适性要求;当 $v=0.9$ m/s 时,人体前方风口附近吹风感为 25%,可能会对热舒适产生一些影响。

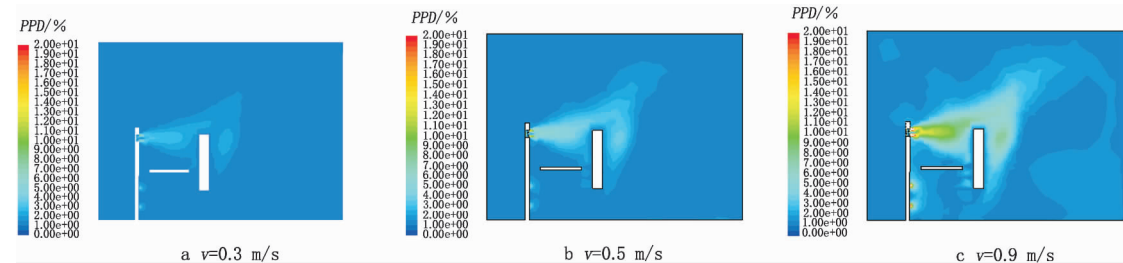


图 10 三种送风速度下截面 A 的 PPD 分布

度较高。随着送风速度的增大,由于人体头部距离工位送风口较近,吹风感增强,因此,头部周围不满意度增加,不满意度区域主要分布在工位送风口的送风区。三种工况下人体周围 PPD 均小于 10%,说明人体对工作环境满意度较高。

5 结论

5.1 工位送风将新风直接送到人体呼吸区域,在人体工作区形成了一种比较合理的流场模式和较好的空气质量。

5.2 工作区及房间温度呈现分区分布,人体正好处于工位送风区,合理地利用了工位送风,随着送风速度的增大,送风量增大,人体呼吸区的温度降低,人体周围的温度也降低。

5.3 工位送风存在吹风感的可能,在设计工位空调时,必须考虑人体的吹风感要求,防止产生吹冷风感。本文三种工况下人体呼吸区及人体周围吹风感基本符合人体舒适性要求。

5.4 本文三种工况下除个别位置如送风口附近外,其他位置均保持了良好的热舒适性,人体对工作区环境的满意度较高。

5.5 隔断式工位空调是一种全新的空气调节策略,是一种节能、对环境友好、以人为本的调节方式,有着广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Zhao Rongyi, Xia Yizai, Li Jun. New conditioning strategies for improving the thermal environment [C]// Proceedings of International Symposium on Building and Urban Environmental Engineering. Tianjin, 1997
- [2] Chiang H C, Yen M C, Hu R. Numerical study of personal air conditioning system composed of partition-type fan-coil units and a dedicated outside air system[C]// Proceedings of Room Vent 2002. Copenhagen, Denmark, 2002
- [3] Chiang H C, Su C C, Pan C S, et al. Study of an innovative partition-type personal modulation air-conditioning system[C]// Proceedings of Indoor Air 2002. Monterey, 2002
- [4] Pan C S, Wu H S, Chiang H C, et al. Experimental study on the air change effectiveness of a personalized air-condition and ventilation system[C]// Proceedings of the 26th National Conference on Theoretical and Applied Mechanics. Taiwan, 2002
- [5] Pan C S, Chiang H C, Yen M C, et al. Thermal comfort and energy saving of a personalized PFCU air-conditioning system[J]. Energy and Buildings, 2005, 37: 443-449
- [6] 黄雪莲. 空调房间内的三维非均温气流组织的数值研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2003
- [7] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
- [8] 吴春燕. 室内流场和温度场的数值模拟[D]. 上海: 东华大学, 2003
- [9] 张智, 涂旺荣, 金培耕, 等. 空调制冷/制热时室内气流及温度分布数值研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(4): 457-460
- [10] Gao Naiping, Niu Jianlei. CFD study on micro-environment around human body and personalized ventilation[J]. Building and Environment, 2004, 39: 795-805
- [11] 端木琳, 舒海文, 杜国付. 工位空调送风气流微环境评价[J]. 暖通空调, 2004, 34(12): 7-9
- [12] 杜国付. 工位空调末端装置送风性能的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2003
- [13] 魏润柏, 徐文华. 热环境[M]. 上海: 同济大学出版社, 1994
- [14] ISO 7730—1994 Moderate thermal environments—determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort[S]
- [15] 赵震. 置换空调室内空气品质的数值模拟研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2002
- [16] 端木琳, 舒海文, 杜国付. 工位空调送风静压箱及其送风气流性能评价[J]. 暖通空调, 2004, 34(10): 17-20

· 会讯 ·

2006 年欧亚可持续城市发展国际会议 在重庆召开

2006 年 4 月 5~6 日欧亚可持续城市发展国际会议在重庆召开。重庆大学城市建设与环境工程学院院长李百战教授任大会主席。建设部科学技术司武涌副司长作为特邀嘉宾出席大会,并作了题为《为建筑节能的立法》的演讲。英国皇家特许建筑设备工程师协会主席 David Hughes 先生、世界可再生能源网主席 Ali Sayigh 先生、英国剑桥大学 Runming Yao 博士、丹麦奥尔堡大学 Per Heiselberg 教授、丹麦奥尔堡大学 Mary-Ann Knudstrup 教授、葡萄牙里斯本大学 Manuel Correia Guedes 教授及 Manuel Pinheiro 教授、英国 Reading 大学 Derek Clements-Croome 教授、香港理工大学 Andrew Baldwin 教授、香港专业物业(服务)有限公司主席 Nick Brook 先生、香港大学 K. W. Chau 教授、英国伍尔弗汉普顿大学 David Heesom 博士、英国伦敦帝国学院 Gary Hunt 博士、荷兰瓦赫宁根大学 A. R. Mels 博士、日本东京大学 Chun-Ming Hsieh 博士以及同济大学龙惟定教授、哈尔滨工业大学张吉礼教授、华南理工大学孟庆林教

授、湖南大学张国强教授、天津大学朱能教授、西安建筑科技大学刘加平教授以及清华大学魏庆■博士参加大会并作了主题发言。与会专家就可持续城市和建筑设计、城市建设管理和绿色建筑战略、能源政策、可再生能源以及个案研究等课题进行了讨论。会议认为,中国正处于快速工业化和城镇化的进程中,经济保持了高速的发展,城市发展和城市建设取得了巨大的成就。同时,中国现代化建设中的资源环境问题也变得十分突出,推进可持续发展成为中国的必然选择。这就要求树立以人为本、全面协调、可持续发展的科学发展观,加快建设资源节约型、环境友好型社会,大力发展循环经济,加大环境保护力度,切实保护好自然生态,认真解决好环境问题,在全社会形成资源节约的增长方式和健康文明的消费方式,促进国民经济和社会的可持续发展,构建和谐社会。作为一个发展中的人口大国,中国能顺利实现国民经济的可持续发展,具有全球意义。

(刘 方)