

隔离病房气流分布模拟与评价^{*}

同济大学 唐喜庆[☆] 沈晋明 邓伟鹏

摘要 采用 CFD 数值模拟的方法,利用相关评价指标对四种不同气流分布方式进行了比较分析,认为天花板顶送异侧下排是较为理想的气流分布方式。建立了实体模型,对这种气流分布方式的排污效果进行了实验测试,结果令人满意。

关键词 隔离病房 气流分布 数值模拟 顶送异侧下排 实验

Simulation and evaluation of air distribution for isolation wards

By Tang Xiqing[★], Shen Jinming and Deng Weipeng

Abstract Based on the CFD simulation, analyses and compares four air distribution modes using relevant evaluating indexes, and concludes that the top-supplying and opposite down-exhausting air distribution is an optimal mode for isolation wards. With a full-scale model, tests the contamination exclusion effect of the air distribution mode and the result is satisfactory.

Keywords isolation ward, air distribution, numerical simulation, top-supplying and opposite down-exhausting, experiment

★ Tongji University, Shanghai, China

①

0 引言

SARS 疫情之后,为有效应对 SARS 及其他烈性空气途径传染病的隔离与治疗,各级医院纷纷改建或新建隔离病房,病房通风空调系统形式与气流分布引起了人们的高度重视^[1]。至目前,对隔离病房空调系统的设计、运行和管理已有大量的研究和实践,最权威的属美国疾病控制中心 1994 年制定的《卫生设施中预防结核菌传染准则》(Guidelines for preventing the transmission of mycobacterium tuberculosis in health-care facilities)中推荐的隔离病房与气流组织方式^[2-3],此外,在 SARS 期间较有代表性的还有香港非典特工队设计的隔离病房^[4]和北京小汤山医院隔离病房,此类隔离病房的环境控制原理均为控制污染源与传播途径。对隔离病房来说气流组织是关键^[5],因此如何分析与评价隔离病房的通风空调气流组织在控制病毒扩散和防止医院交叉感染方面具有重要的意义。本文采用 CFD 模拟优化与实验校核的方法,采用相关指标对四种典型的隔离病房气流分布方式进行模

拟、分析与评价,寻求适合上海隔离病房的最佳气流分布方式并为隔离病房气流分布的设计与改进提供理论依据。

1 隔离病房气流分布原则

隔离病房主要任务是控制污染源,隔断其传播,减少室内空气混合,保证气流由医护人员工作区流向病人休息区,提高病菌的排除效率。气流分布原则如下。

1) 定向性原则

送风气流流向单一无明显涡流存在^[6]。先经过医护人员站姿呼吸区(约 1.3~1.8 m 高),再流经病人呼吸区,从排风口排出,应尽可能避免上升气流,防止病菌返流。

2) 有效性原则

气流分布应保证一定的排污效率和排热效率,

①☆ 唐喜庆,男,1979 年 10 月生,在读博士研究生
200092 上海市四平路同济大学机械学院
(021) 65988388
E-mail: dosking@163.com

收稿日期: 2004-11-02

一次修回: 2005-01-05

二次修回: 2005-11-25

* 上海科委科技攻关课题“医院空调系统防范非典型肺炎病毒传播与感染应急措施与今后对策研究”(编号: 03DZ19614)的子课题

新鲜空气送入医护人员区并充分稀释室内的污染物;减少病人呼出飞沫的室内滞留时间^[7]。

3) 舒适性原则

要顾及病人的舒适要求、治疗要求与居住性要求。在保证病菌排除效率的同时室内空气应形成使医护人员与病人舒适的速度分布和温湿度场。

4) 人性化原则

尽管 SARS 病人是污染源,但控制设施应注重人性化的设计,以表达对患者的多重关怀,而不要使病人反感,甚至感到受歧视、受敌对。

定向流动是有效性的基础,有效性则是病房安全运行的保证,在实现定向性和有效性的前提下要充分考虑医护人员尤其是病人的舒适性。

2 气流分布评价指标

在满足通风空调的隔离、稀释与排污功能的前提下,不同的气流分布方式也关系到整个系统的能耗和初投资。就气流分布本身而言,评价方法有多种^[8],本文主要选取有关气流分布有效性和舒适性的指标。

2.1 排污效率

排污效率 E_c 是反映通风系统对污染物排除能力的指标,除了与通风流场(换气效率)有关外,还与污染物的特点(如污染物的位置、污染物的密度等)有关。其数学表达式为

$$E_c = \frac{C_e - C_0}{C_z - C_0} \quad (1)$$

式中 C_e ——排风污染物浓度;

C_z ——室内平均污染物浓度;

C_0 ——送风污染物浓度。

2.2 排热效率

排热效率 E_t 用来评价通风系统的排热能力,可用下式表示:

$$E_t = \frac{t_e - t_0}{t_z - t_0} \quad (2)$$

式中 t_e ——排风温度;

t_z ——室内平均温度;

t_0 ——送风温度。

排热效率又称能量利用因数,反映的是室内的温度梯度,即室内的热力分层特性,对于全新风或单纯的通风系统来说,能量利用因数越高,系统的节能性越好,但过大的温度梯度又会影响人体的舒适性。

2.3 局部吹风不满意率 PD (percentage of people

draft dissatisfaction)^[9]

Fanger 和 Melikov 等人将湍流强度作为表征气流湍动的变量,给出了因吹风感引起的不满意率 PD 的计算公式,定义式如下:

$$PD = (34 - t)(v - 0.05)^{0.62} (3.14 + 0.37vT_u) \quad (3)$$

式中 t ——温度,℃;

v ——平均风速,m/s;

T_u ——湍流强度,%。

ISO 7730 指出,为了避免局部吹风感,人员活动区内的 PD 值不应超过 15%。

3 隔离病房气流分布模拟

在环境中,对病菌分布影响最大的是送风气流。因此要有效地控制污染,就必须研究与评价微环境中的气流模型,优化气流分布形式。影响室内气流分布的因素很多^[4],包括送排(回)风方式以及风口的形式、位置、数量,风口的风速、房间换气次数、室内热源、房间几何形状以及房间的具体功能等,但室内主导气流流向主要由送排风方式决定。本文主要对此进行模拟分析,先通过 CFD 计算分析,得出理论最优气流分布方式,在此基础上搭建实体模型,再通过实验测试数据进行校核与再优化,修改实体模型,得出最佳气流组织方式,大大减少了实验测试次数。

3.1 CFD 模拟设定

空调室内的气流属于常温、常压及低速下的流动,可以视为不可压缩流动^[10]。由于实际空气是黏性流体,流动基本为湍流流动。将空气设定为理想气体,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控制方程,其通用形式为^[11]

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{V}\phi) = \text{div}(\Gamma_0 \text{grad}\phi) + S_0 \quad (4)$$

式中 ρ 为密度; ϕ 为通用变量; \mathbf{V} 为速度矢量; Γ_0 为广义扩散系数; S_0 为广义源项。

本文采用计算流体力学软件包 Fluent6.1 进行模拟,对离散方法作出如下选择。

1) 对压力 p 选用标准方法,压力速度耦合采用 SIMPLE 算法。

2) 湍流动能 K 和湍流动能耗散率 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} 。

4) 选用标准 $K-\epsilon$ 方程。

3.2 气流分布方式模拟与比较

气流模型设计应尽可能提高通风与排污效率^[12]。为了使整个房间实现较为理想的气流组织,常常将送风口安装到病人对侧上方稍高位置上,排风口安装在病人侧床后靠近地板墙上的位置,国内外 SARS 病房与肺结核病房大致如此,只不过送排风形式与位置略有不同。这样的布置使得向下运动的清洁空气通过呼吸及工作区直接从地面排走,使清洁空气最先流向医护人员在房间的可能位置,然后流向传染源并排风,这样未受感染的人员不会处于传染源和排风口位置之间。医护人员进入隔离室时应尽量站在空调送风的上风处,以减少接触到病菌的机会。

为了对气流分布方式进行更准确的模拟分析,寻求最佳送排风方式,我们建造了多用途隔离病房实体模型(如图 1 所示),采用了回风口带高效过滤器的自循环机组和独立新风,其设计风量(按换气次数计)参数为:新风 2 h^{-1} ,回风 10 h^{-1} ,排风 8 h^{-1} ,负压风 6 h^{-1} ,将实测数据与数值计算结果进行对比可以提高模拟精度。

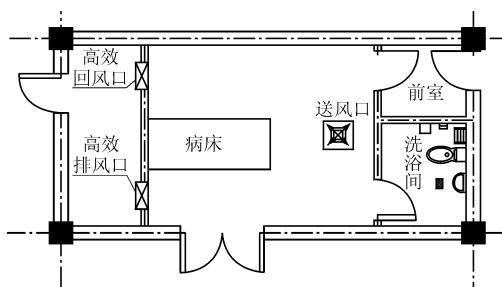


图 1 隔离病房实体模型平面图

对病房内气流分布模拟时,因前室相对病房为正压,其门缝渗透风量有利于病房内从医护人员到病人的定向气流形成,而病房相对卫生间为正压,除门缝处风速较大外,对整个房间的流场影响不是很大,因此暂不考虑 3 个房间之间的区域压差影响,对病房单独进行模拟,模拟时房间设为零压,缝隙空气渗透为零,即送风量保持不变,按设计的回、排风比例进行通风。病房尺寸为 $3.78 \text{ m} \times 3.4 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高),病床尺寸为 $2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ (长 \times 宽)。

模拟的气流分布方式如下。

1) 方式 1:天花板顶送异侧下排(如图 2 所示)。

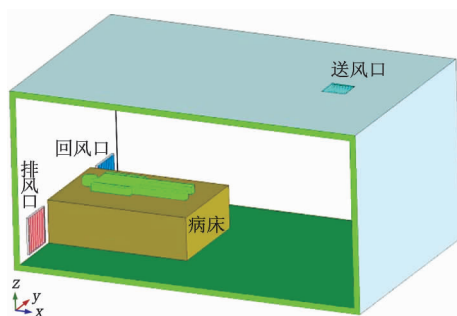


图 2 天花板顶送异侧下排示意图

2) 方式 2:天花板顶送异侧下排+床头局部排风(如图 3 所示)。

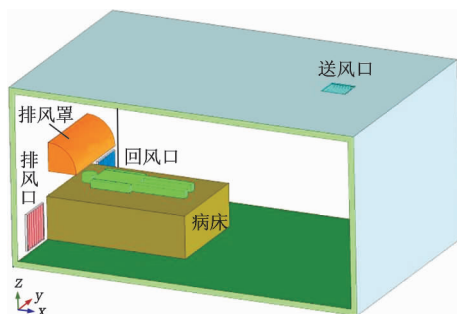


图 3 天花板顶送异侧下排+床头局部排风示意图

3) 方式 3:一侧送风另一侧排风^[2](如图 4 所示)。

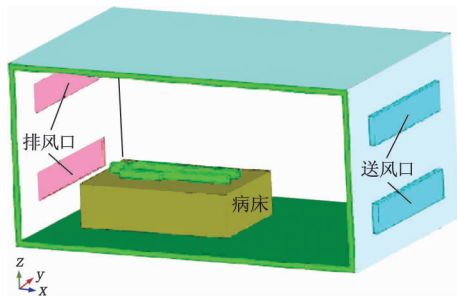


图 4 一侧送风另一侧排风示意图

4) 方式 4:顶送两侧墙底部排风^[2](如图 5 所示)。

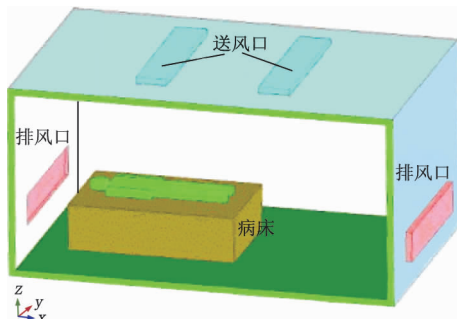


图 5 顶送两侧墙底部排风示意图

以上气流分布方式各自的流场模拟结果如图 6 所示,评价指标比较见表 1。

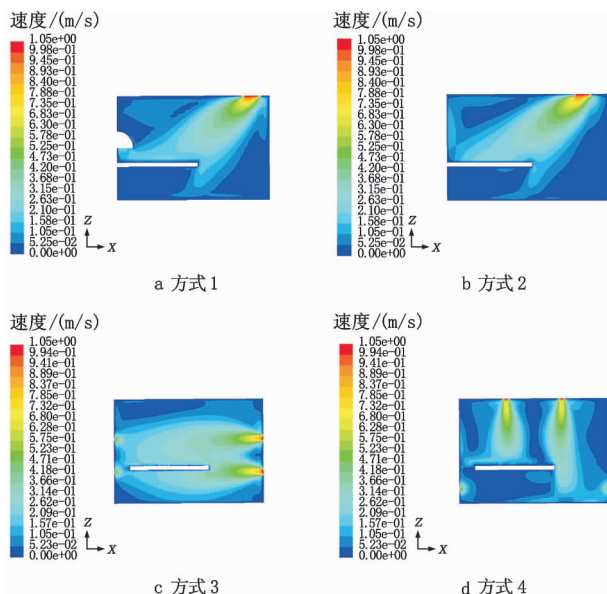


图 6 不同气流分布方式速度场模拟结果

表 1 不同气流分布方式评价指标比较

	排污效率	排热效率	PD 值/%
方式 1	2.1	1.6	5.5
方式 2	4.4	4.6	10.1
方式 3	1.9	1.1	9.5
方式 4	1.8	1.0	3.9

由图 6 可见:

方式 1,在送风温差的下沉作用下调整合适的人射角度,从医护人员工作区到病人活动区可形成较为理想的定向气流。

方式 2,采用局部排风的原理来加强病人呼吸区污染空气的排放,可起到一定作用,但在床头布置排风罩不可避免地会产生一定的噪声以及引起病人面部吹风感,而且需要占用一定空间,对病人的活动也会产生一定的影响,需综合考虑院方与住院病人意见而决定是否采用。

方式 3,单侧墙送风另侧墙排风似乎可形成整齐的平行流,有利于保护医护人员,但送风速度较小时射程难以保证,速度较大则会产生噪声,尤其是在病人头部位置;而且由于气流水平射入,部分气流射入高度处于人员活动的范围,易受干扰。

方式 4,容易形成涡流,气流分别自两边排出,但在旋涡存在的情况下可能将病人卧姿呼吸区的气流卷起,且不能保证从医护人员到病人的定向气

流。

从表 1 可见,尽管方式 2 的排污及排热效果最好,但局部吹风不满意率较高。从人性化设计的角度出发,考虑隔离病房内病人的舒适性与设置排风罩的心理感受,并根据 CFD 模拟与实测分析比较的结果,最终选择方式 1。

4 实验测试

4.1 气流分布演示与模拟

按方式 1 建立实体模型,采用乙二醇发烟模拟患者呼吸效果并对烟气扩散拍照记录,同时用 CFD 计算的方法对污染物流向进行定性模拟,污染物的扩散情况如图 7~9 所示。

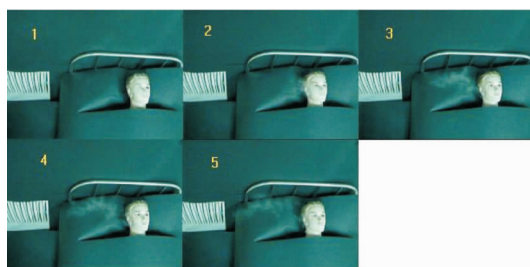


图 7 污染物在水平方向扩散的演示图

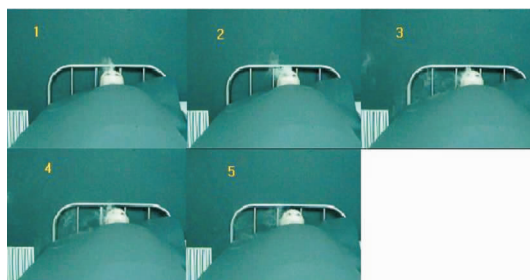


图 8 污染物在垂直方向扩散的演示图

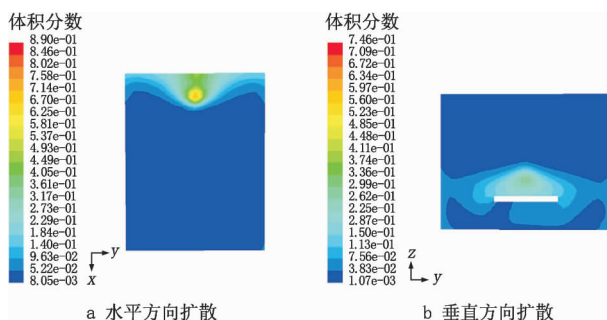


图 9 污染物扩散模拟图

由烟气演示和数值模拟结果可见,污染物自患者口中释放出后,在定向气流的作用下,由患者流向排风口,不向医护人员工作区扩散。说明该气流分布方式可以有效地排除患者释放出的污染物,防止污染物向室内扩散。

4.2 室内排污效率的测定

在患者呼吸区连续释放污染物(以盘香发烟桶代表患者连续释放污染物),在通风稳定的情况下,采用 LZJ-01D 型尘埃粒子计数器串接空气稀释器(稀释比为 1:10)来测量送风、排风以及站姿呼吸区(取距地面 1.5 m 高平面)的污染物浓度分布。

4.2.1 测点布置

测量室内污染物浓度时,将医护人员工作区分为三个部分:医护 1 区(测点 1~3),医护 2 区(测点 4~6),医护 3 区(测点 7~14)。分区及测点布置如图 10 所示。

4.2.2 测量结果

以 0.3 μm 的粒子作为测量对象,由于带高效过滤器的循环机组不断过滤循环,在系统开机运行 1 h 后测得病房内背景浓度为 1 337 个/L,考虑病

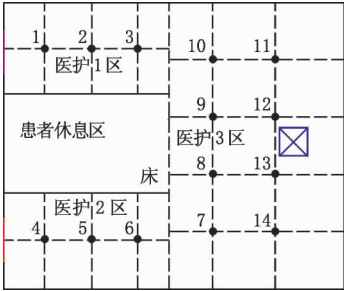


图 10 污染物浓度测量平面布置图

房背景浓度较低及发烟浓度较高(两者相差两个数量级),故忽略背景浓度的影响,实际测量值如表 2,3 所示。

表 2 风口污染物浓度			个/L
送风口浓度	排风口浓度	回风口浓度	
19 987	293 654	296 827	

表 3 医护区污染物浓度														个/L
医护 1 区			医护 2 区			医护 3 区								
测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6	测点 7	测点 8	测点 9	测点 10	测点 11	测点 12	测点 13	测点 14	
污染物浓度	159 113	149 544	144 936	192 353	139 774	159 247	146 636	173 168	143 352	176 513	156 347	157 869	147 364	163 622

医护 1~3 区站姿呼吸平面内污染物平均浓度分别为 151 198,163 792,158 109 个/L。

平面内排污效率 =
$$\frac{\text{房间排风污染物浓度} - \text{房间送风污染物浓度}}{\text{平面内平均污染物浓度} - \text{房间送风污染物浓度}}$$

(5)

由式(5)计算出医护区站姿呼吸平面排污效率,见表 4。

表 4 医护区站姿呼吸平面排污效率			
医护 1 区	医护 2 区	医护 3 区	医护区平均排污效率
2.1	1.9	2.0	2.0

实验测得医护区站姿呼吸平面的平均排污效率为 2.0,采用 CO₂ 模拟人体呼吸排出的污染物,得到站姿呼吸平面的平均排污效率为 1.9,考虑到污染物散发模拟与实际情况的差异,二者基本吻合,说明天花板顶送异侧下排的气流分布方式具有较好的排污效果,能及时地排除室内污染物。在实施过程中深受医护人员欢迎,而且病人也最容易接受这种气流分布方式,并未感到关闭在特殊的隔离病房,大大改善了治疗心理。

5 结论

本文采用 CFD 数值模拟的方法,利用相关评价指标对 4 种不同气流分布方式进行比较分析,并在隔离病房实体模型的大量实验测试的基础上,对隔离病房的气流分布进行各项参数比较与综合评

定义平面内排污效率表达式为

价,得出天花板顶送异侧下排的气流分布方式可实现较为理想的病房气流分布,并推荐为上海多用途隔离病房最佳配置^[13-14]。此项成果作为上海市抗 SARS 课题一个子课题通过了鉴定,并应用到上海传染病医院、上海肺科医院与公共卫生中心等工程中。

参考文献

[1] 沈晋明. 医院病房暖通空调设计[J]. 洁净与空调技术,2002(增刊):53-58

[2] CDC USA. Guidelines for preventing the transmission of mycobacterium tuberculosis in health-care facilities [R], 1994

[3] 沈晋明,刘云祥. 隔离病房与非典病房通风空调设计[J]. 暖通空调,2003,33(4):10-14

[4] 陈帆,张志刚,罗福德,等. 多病床非典病房的气流分布研究[J]. 建筑热能通风空调,2004,23(1):21-33

[5] 沈晋明. 正确认识空调系统防范非典型肺炎[J]. 暖通空调,2003,33(3),暖通空调与 SARS 特集:16-19

[6] WHO. Hospital Infection Control Guidance for Severe Acute Respiratory Syndrome [EB/OL]. [2003-04]. <http://www.who.int/csr/sars/infectioncontrol/en>

资,但今后维护管理的问题会很多,长期运行后是否真正节能和节约运行费用还有待实践的考验。

5.2 自然能源的利用

5.2.1 自然通风

有效利用自然能源,首选的是自然通风措施。在国内,已有清华大学研究院办公楼、山东交通学院艺术教育中心、厦门大学漳州新校区主楼等尝试采用了“生态建筑”的设计形式。

自然通风的主要方式有:穿越式通风、浮力烟囱式通风、单侧式局部通风等,或是这三种方式合用的混合式通风。当然,自然通风的使用也是有一些先决条件的,如建筑物形态的限制、室内环境的标准和得热量的大小等,其中建筑设计是最重要的条件,如果可开启的窗户很少、门窗很密闭,那么本身就失去了形成“穿堂风”的条件。

5.2.2 新风供冷

对于已设计了全空气集中空调系统的建筑物及场所,如大礼堂、报告厅、体育馆、音乐厅等,在过渡季或初冬可以很方便地利用双风机式的空调箱,作全新风的自然冷却运行;如果是单风机式的空调箱,可以增设与风量匹配的变风量式排风风机箱。

5.2.3 蒸发冷却

在夏季比较炎热的地区,可参考美国和东南亚国家一些城市的做法,在校园内的室外或半室外的公共空间上方,设置一些水喷雾管或水喷雾风扇。这些装置与周围的绿化及景观很容易协调,并不显得突兀,运行成本也不高,是环保型的“绿色自然空调机”。

5.2.4 水(地)热源利用

对于校区内一些独栋的空调建筑物或一个小区内的空调建筑物,也可考虑采用水源热泵系统或地源热泵系统,但是要了解清楚当地的水文地质情

况和政府部门是否允许打井;此外,应尽量利用太阳能。当然,利用自然能源,必须详细研究当地的自然条件,不能破坏自然资源,应充分考虑到自然能源的变化及不确定性对实际使用效果的影响。

参考文献

- [1] 教育部. 教发[2004]2号 普通高等学校建筑规划面积指标[G]
- [2] 建设部工程质量安全监督与行业发展司,中国建筑标准设计研究所. 全国民用建筑工程设计技术措施 暖通空调·动力[M]. 北京:中国计划出版社,2003:4-9,133-136
- [3] 建设部. GB 50189—2005 公共建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005:3-11
- [4] 姚杨,姜益强,马最良. 大连理工大学体育馆暖通空调设计[J]. 暖通空调,2005,35(3):92-95
- [5] 何冰,周建戎. 深圳职业技术学院体育馆空调设计[J]. 暖通空调,2004,34(10):85-87
- [6] 公安部. GB 50045—95 高层民用建筑设计防火规范(2005年版)[S]. 北京:中国计划出版社,2005:36-42
- [7] 公安部上海消防科学研究所,上海市消防局. DGJ 08-88—2000 民用建筑防排烟技术规程[S]. 上海:上海市工程建设标准化办公室,2000:6-16
- [8] 顾哲,华晨. 杭州下沙高教园区规划设计[J]. 建筑学报,2005(3):22-25
- [9] 广州大学城建设指挥部. 广州大学城建筑设计通则[G],2003
- [10] 李传义,邓新勇. 广州大学城规划的新理念与城市建设新技术[J]. 建筑学报,2005(3):54-58
- [11] 王钊,张宇翔,陈祖铭,等. 广州大学城区域供冷系统论证、设计、建设及运营[C]//2005 中日热泵蓄能技术与产品交流会论文集. 北京:中国建筑科学研究院,2005
- [12] 范存养. 大空间建筑空调设计及工程实录[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001
- [13] 李华东. 高技术生态建筑[M]. 天津:天津大学出版社,2002
- [14] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社,2001
- [15] CDC USA. Guidelines for environmental infection control in health-care facilities [EB/OL]. [2003-06-06]. <http://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/rr5210a1.htm>
- [16] 沈晋明. 多用途隔离病房和无凝水空调技术[J]. 建筑热能通风空调,2005,24(3):22-26
- [17] 邓伟鹏,沈晋明. 采用 CFD 方法模拟隔离病区的压力分布[J]. 暖通空调,2005,35(9):19-22
- [18] Recommended Guidelines for Inspection of Isolation Wards for SARS Patients [EB/OL]. [2003-06-14]. <http://www.iosh.gov.tw/eversion/sarse.htm>
- [19] 赵荣义,范存养,薛殿华,等. 空气调节[M]. 3版. 北京:中国建筑工业出版社,1994
- [20] Fanger P O, Melikov A K, Hanzawa H, et al. Turbulence and draft[J]. ASHRAE J, 1989, 31(4):18-23
- [21] 梅启元. 空调房间气流分布的数值计算与模拟[D]. 南京:南京理工大学,2002

(上接第 12 页)