

外呼吸玻璃幕墙热工特性和能耗分析*

湖南工业大学 王汉青[☆] 陈 裕 寇广孝 王志勇

摘要 以长沙一外呼吸玻璃幕墙为例,建立了热工网络模型和数学模型。采用 Window 6.2 和 EnergyPlus2.2 软件模拟计算了不同幕墙的综合传热系数和设计日冷热负荷。分析了玻璃类型和通风腔宽度对幕墙建筑负荷的影响,并进行了能耗和经济可行性分析。

关键词 外呼吸玻璃幕墙 综合传热系数 冷热负荷 玻璃类型 通风腔宽度

Thermal characteristics and energy consumption analysis of external respiration double-skin facades

By Wang Hanqing[★], Chen Yu, Kou Guangxiao and Wang Zhiyong

Abstract Taking an external respiration double-skin facade building in Changsha as an example, establishes a thermal network model and a mathematical model. Simulates and calculates integrated heat transfer coefficients and design cooling and heating loads for different facade buildings by Window6.2 and EnergyPlus2.2 softwarcs. Analyses the influcnecs of glass type and airspace width, and energy consumption and economic feasibility.

Keywords external respiration double-skin facade, integrated heat transfer coefficient, cooling and heating load, glass type, airspace width

★ Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan Province, China

①

0 引言

外呼吸玻璃幕墙是目前双层通风幕墙中应用最广泛的一种,其基本特征是在外幕墙设置进风口和排风口,内幕墙封闭。该幕墙结构不专设机械通风设备,通过自然通风和烟囱效应实现空气流动。夏季,太阳辐射强烈时,开启风口,进行自然通风,有效减少建筑物的得热;冬季则关闭风口,空气腔起到保温隔热作用^[1-2]。

虽然相对于普通的玻璃幕墙,外呼吸玻璃幕墙具有更好的性能,但是其建造成本也要高出许多。因而,对于是否采用外呼吸玻璃幕墙,必须对其建筑能耗和经济性进行综合分析。

以长沙市一外呼吸玻璃幕墙为基准,利用 Window6.2 和 EnergyPlus 进行设计日负荷计算及运行能耗和经济性、可行性的模拟分析,并与单层玻璃幕墙进行比较,同时通过变换玻璃类型和通风腔宽度等因素分析幕墙建筑能耗的变化。

1 热工模型

1.1 热工网络模型

幕墙安装在正南面,为窗式外呼吸玻璃幕墙,尺寸为 1.5 m×4 m×0.5 m(长×高×宽)。上、下进排风口高度都为 250 mm,运行时夏季开启,冬季关闭。室内设有空调,7—9 月制冷季室温设为 26℃,12—2 月供暖季设为 22℃,空调时间为 08:00—18:00,周末照常开启;过渡季节不开空调。

外呼吸玻璃幕墙热通道的传热过程非常复杂,存在传导、对流、辐射三种传热方式。特别是通风腔内的气流速度和外界环境的风速对热通道的传热特性影响很大。目前,国家现行标准《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—93)附表 2.4“空气间

①☆ 王汉青,男,1963 年 10 月生,博士,教授,博士生导师
412008 湖南省株洲市湖南工业大学 160# 信箱
(0731) 22622085
E-mail:ccyyttbb-2@163.com
收稿日期:2008-07-15
一次修回:2009-01-03
二次修回:2009-09-02

* 湖南省自然科学基金资助项目(编号:08JJ3093)

层热阻值表”中,对厚度 60 mm 以上的密闭空气层冬季热阻值统一规定为 $0.18 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。大量实验测试证明,这样给值不够准确^[3-4]。特别是对于夏季开启风口时的热阻,还没作出明确规定,需要模拟研究计算。分析幕墙的传热机理,可以建立如图 1 所示的热工网络模型^[3]。图中 $h_{co}, h_{rs}, h_{ci}, h_{ri}$

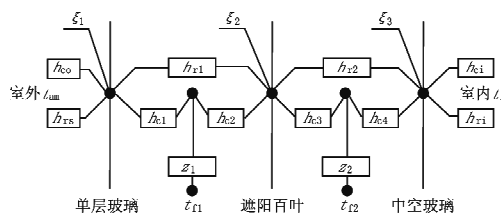


图 1 外呼吸幕墙的热工网络图

分别为外侧玻璃与室外的表面传热系数和辐射换热系数,以及内侧玻璃与室内的表面传热系数和辐射换热系数; h_{r1}, h_{r2} 分别为外侧和内侧玻璃与遮阳百叶的辐射换热系数; h_{c1} 和 h_{c2} 为空气腔内气流与玻璃的表面传热系数, h_{c3} 和 h_{c4} 为空气腔内气流与百叶的表面传热系数。 I 为太阳能在玻璃垂直表面上的太阳辐射照度; ξ_1, ξ_2, ξ_3 为玻璃和百叶的太阳能吸收比; $t_i, t_{am}, t_{f1}, t_{f2}$ 分别为室内、外环境温度和内、外空气腔温度; Z_1, Z_2 分别为内外侧空气腔的能量热传递系数。

1.2 数学计算模型

结合图 1,根据能量守恒定律,分别对内、外侧玻璃,内、外侧空气腔和中间遮阳百叶 5 个独立对象建立热平衡方程^[5]。

外侧单层玻璃的热平衡方程:

$$I\xi_1 = h_{r1}(t_{sg} - t_b) + U_t(t_{sg} - t_{am}) + h_{c1}(t_{sg} - t_{f1}) \quad (1)$$

外侧空气腔的热平衡方程:

$$h_{c1}(t_{sg} - t_{f1}) + h_{c2}(t_b - t_{f1}) = q_1 \quad (2)$$

内侧空气腔的热平衡方程:

$$h_{c3}(t_b - t_{f2}) + h_{c4}(t_{f2} - t_{dg}) = q_2 \quad (3)$$

内侧双层玻璃的热平衡方程:

$$I\xi_3 = h_{c4}(t_{dg} - t_{f2}) + U_b(t_{dg} - t_i) + h_{c1}(t_{dg} - t_b) \quad (4)$$

遮阳百叶的热平衡方程:

$$I\xi_2 = h_{c2}(t_b - t_{f1}) + h_{c3}(t_b - t_{f2}) + h_{r1}(t_b - t_{sg}) + h_{r2}(t_b - t_{dg}) \quad (5)$$

式(1)~(5)中 t_{sg}, t_b, t_{dg} 分别为外侧玻璃温度、

百叶温度和内侧玻璃温度; U_t 为外侧玻璃和室外空气的表面传热系数和辐射换热系数之和; U_b 为内侧玻璃和室内空气的表面传热系数和辐射系数之和; q_1, q_2 分别为外侧和内侧空气腔带走的热量。

式(1)~(5)是关于 $t_{sg}, t_{f1}, t_{f2}, t_b, t_{dg}$ 的 5 个独立方程,构成了外呼吸幕墙的热工数学计算模型。 t_{am}, t_i 都能通过实验获得,方程各节点参数如辐射换热系数和表面传热系数的确定采用简化措施^[6]:1) 简化太阳辐射能的计算,认为散射系统的效果近似于直射系统;2) 空气的初始物理参数可按室内外平均温度查得;3) 取夏季空气腔空气流速的迭代初值为 0.3 m/s ,步长为 0.001 m/s ;冬季空气腔关闭,取零。利用 Matlab 迭代即能求解各节点的参数。

通过以上计算模型和简化假设,便能求出外呼吸玻璃幕墙的总热阻 R 和综合传热系数 U ,进而求出外呼吸玻璃幕墙建筑的冷热负荷和能耗。

2 玻璃类型对幕墙负荷的影响

幕墙玻璃类型不同时,室内为达到相应的热舒适度,建筑能耗就不同。利用 LBNL(Lawrence Berkeley National Laboratory)实验室的专业窗户计算软件 Window 6.2^①,模拟计算各种外呼吸幕墙的热工特性。该软件利用通用的传热分析方法进行模拟计算,通过输入各透射材料的光学特性参数(透过比、吸收比、反射比)、热工特性参数(材料的导热系数、厚度),可以用来计算共同工作时各种材料的吸收比、透射体系总体的透射比、传热系数等。

在运用 Window 软件的基础上,再利用 EnergyPlus 2.2 对通过模拟单元的幕墙引起的负荷进行计算。本文中模拟单元的具体尺寸为:高 4 m,宽 1.5 m,空气腔宽度 200~1 100 mm,未定。设该单元其他参数如建筑材料、朝向及室内参数都相同,仅计算、比较通过幕墙形成的负荷。不同玻璃类型组合幕墙的性能参数和冷热负荷分别见表 1,2。

由表 1,2 可以看出,各种外呼吸玻璃幕墙的综合传热系数都比中空 Low-e 玻璃幕墙小。

① Finlayson E U, Arasteh D K, Huizenga C, et al. Window 6.2: documentation of calculation procedures. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008

表 1 不同玻璃类型组合幕墙性能参数

玻璃类型		外层			内层		
方案	组合形式	透射比	反射比	吸收比	透射比	反射比	吸收比
1#	中空 Low-e+内遮阳百叶	0.41	0.28/0.36	0.31			
2#	浮法-浮法+浮法	0.80	0.07/0.07	0.13	0.68	0.12/0.12	0.11/0.08
3#	浮法-镀膜+浮法	0.80	0.07/0.07	0.13	0.46	0.14/0.15	0.34/0.07
4#	浮法-单层 Low-e+浮法	0.80	0.07/0.07	0.13	0.48	0.24/0.23	0.22/0.06
5#	钢化-浮法+浮法	0.59	0.14/0.26	0.28	0.68	0.12/0.12	0.11/0.08
6#	钢化-单层 Low-e+浮法	0.59	0.14/0.26	0.28	0.48	0.24/0.23	0.22/0.06
7#	钢化-单层 Low-e+单层 Low-e	0.59	0.14/0.26	0.28	0.41	0.25/0.32	0.23/0.12

注:表中幕墙都设遮阳百叶,1#为普通中空 Low-e 玻璃幕墙,2#~7#均为外呼吸玻璃幕墙,浮法-浮法+浮法表示外层为普通浮法玻璃,内层为两块中空浮法玻璃,其他同理。

表 2 不同玻璃类型组合幕墙的冷热负荷

	方案 1#	方案 2#	方案 3#	方案 4#	方案 5#	方案 6#	方案 7#
太阳得热因子 SHGC	0.643	0.868	0.777	0.742	0.998	0.883	0.790
夏季综合传热系数/(W/(m ² ·K))	1.594	1.333	1.140	1.004	0.887	0.701	0.649
冬季综合传热系数/(W/(m ² ·K))	2.230	1.410	1.214	1.090	1.124	0.897	0.767
夏季设计日冷负荷/(kWh/d)	8.31	7.69	6.82	6.08	5.43	4.45	4.09
冬季设计日热负荷/(kWh/d)	3.03	1.86	1.60	1.48	1.44	1.18	1.01

注:夏季综合传热系数指在通风口开启、太阳辐射照度取日平均值、通风腔宽度为 500 mm 时计算所得;冬季综合传热系数指在通风口关闭时计算所得;设计日负荷指在空调开启时段通过该幕墙形成的设计日冷热负荷。

通过相同面积(6 m²)的幕墙形成的冷热负荷中,2#~7# 6 种外呼吸玻璃幕墙都比 1#带遮阳的中空 Low-e 玻璃幕墙小。5#~7#幕墙,与 1#幕墙相比,日冷热负荷减少 35%以上,尤其是 7#幕墙,冷热负荷都减少 50%以上。

2#~4#幕墙最外层都是普通单层浮法玻璃,5#~7#外层为透明钢化玻璃。2#~4#幕墙,5#~7#幕墙的太阳得热因子 SHGC 和冬夏综合传热系数依次减小,它们所对应的冬夏冷热负荷也依次减小,双层通风玻璃幕墙的外层玻璃性能对幕墙整体性能有很大影响。

2#和 6#,3#和 7#的太阳得热因子 SHGC 基本相同,但 6#和 7#幕墙的冷负荷明显较 2#和 3#小,这是由于夏季综合传热系数起了重要作用。例如表中 5#幕墙的太阳得热因子 SHGC 较 4#幕墙大,但由于 5#幕墙的夏季综合传热系数较 4#幕墙小很多,故 5#幕墙的夏季设计日冷负荷仍较 4#幕墙小。但在冬季,太阳得热因子 SHGC 影响较大,

如尽管 5#幕墙的冬季综合传热系数较 4#幕墙大,但 5#幕墙的热负荷却小于 4#幕墙。因而,设计外呼吸玻璃幕墙时,不但要考虑其综合传热系数,还要考虑太阳得热因子等玻璃性能参数。一般同类别的外呼吸玻璃幕墙中,夏季综合传热系数较小而太阳得热因子 SHGC 较大的幕墙较为节能。

3 通风腔宽度对幕墙冷负荷的影响

外呼吸玻璃幕墙冬季运行时,关闭上、下两端的进排风口,通风腔内的空气在阳光照射下温度升高,形成温室效应。因而,在冬季,通风腔宽度的变化对通过幕墙形成的热负荷影响不大^[3]。夏季运行时,风口开启进行自然通风,当外界辐照度和风口大小保持不变时,改变幕墙通风腔宽度,因热压等形成的对流气流速度场也会发生变化,随气流排出的热量也随之改变,从而改变通风腔内空气的温度场,进而改变外呼吸玻璃幕墙的综合传热系数^[7]。不同空气腔宽度幕墙的夏季综合传热系数和冷负荷见表 3。

表 3 不同空气腔宽度幕墙的夏季综合传热系数和冷负荷

空气腔宽度/mm	方案 3#		方案 4#		方案 5#		方案 6#	
	传热系数/(W/(m ² ·K))	冷负荷/(kWh)	传热系数/(W/(m ² ·K))	冷负荷/(kWh)	传热系数/(W/(m ² ·K))	冷负荷/(kWh)	传热系数/(W/(m ² ·K))	冷负荷/(kWh)
1 100	1.042	6.29	0.906	5.57	0.789	4.94	0.608	3.93
800	1.066	6.42	0.942	5.79	0.835	5.15	0.643	4.13
500	1.140	6.82	1.004	6.08	0.887	5.43	0.701	4.45
200	1.299	7.70	1.151	6.92	1.038	6.26	0.851	5.22

由表 3 可以看出,相同玻璃类型的外呼吸幕墙,随着空气腔宽度的增加,夏季综合传热系数变小,透过幕墙形成的冷负荷也越来越小,外呼吸幕墙的热工性能提高。同种幕墙空气腔宽度由 200 mm 增大至 500 mm 时,幕墙综合传热系数和冷负荷明显减小,幕墙热工性能明显提高;当幕墙空气腔宽度继续增大至 1 100 mm 时,幕墙的热工性能变化并不十分显著。可见,同种幕墙空气腔的宽度越小,夏季综合传热系数越大,越不利于改善玻璃幕墙的热工性能;空气腔宽度过大,虽然提高了幕墙的热工性能,但建筑物的进深和办公空间也随之减小。综合各种经济因素,一般空气腔宽度取 500 mm 左右时,幕墙的热工性能得到较好发挥,也不影响建筑物本身功用。如清华大学的超低能耗示范楼中,外呼吸幕墙的通风腔宽度取 500 mm,这是综合了幕墙热工特性和工程实际考虑后确定的。

4 能耗和经济可行性分析

由表 2,3 可以看出,最外层使用透明钢化玻璃比使用浮法玻璃的负荷减小 20% 以上,如 2# 和 5# 幕墙,内层都使用双层中空普通浮法玻璃,而外层分别使用浮法和钢化玻璃。该双层幕墙建筑,南面幕墙面积为 $66\text{ m} \times 3.6\text{ m} \times 5 \times 0.9$ (宽度 $\times$ 层高 $\times$ 层数 $\times$ 窗墙比) = $1\,069.2\text{ m}^2$ 。按照理论计算,若空调夏季制冷的能效比 $COP = 2.6$,冬季 $COP = 3.0$ (均为市场上最低的空调能效比),制冷、供暖季都按 90 d 计,则根据第 2 章的分析,5# 幕墙比 2# 幕墙夏季节能 $90\text{ d} \times (7.69\text{ kWh/d} - 5.43\text{ kWh/d}) \div 2.6 = 78.23\text{ kWh}$,冬季节能 $90\text{ d} \times (1.86\text{ kWh/d} - 1.44\text{ kWh/d}) \div 3.0 = 12.60\text{ kWh}$,共节约 90.83 kWh 的电量,因而可推算出该双层幕墙建筑冬夏共节能 $90.83\text{ kWh} \times 1\,069.2\text{ m}^2 \div 6.0\text{ m}^2 = 16\,185.91\text{ kWh}$ 。按照市场电价 0.6 元/(kWh) 计算,一年可节省 9 711.54 元;透明钢化玻璃的价格为 140 元/ m^2 ,浮法玻璃的价格为 55 元/ m^2 ,透明钢化玻璃比浮法玻璃的造价增加约 $(140\text{ 元}/\text{m}^2 - 55\text{ 元}/\text{m}^2) \times 1\,069.2\text{ m}^2 = 90\,882\text{ 元}$,回收期为 10 a。而外呼吸双层通风幕墙设计寿命通常都在 20~30 a,甚至 40 a 以上^[8]。最外层使用透明钢化玻璃,除了能收回初投资外,后期还能节约运行费用,因而一般通风幕墙最外层都选用透明钢化玻璃。

同理,比较 5#~7# 幕墙内层所使用的 3 种

中空玻璃,以 6# 幕墙内层所采用的单层 Low-e 玻璃+普通浮法玻璃为基准,6# 幕墙与 5# 幕墙相比每年可节约电量 7 435.22 kWh,按照市场价,普通双层浮法中空玻璃为 180 元/ m^2 ,单层 Low-e 玻璃+普通浮法玻璃约为 250 元/ m^2 ,同样按照电价 0.6 元/(kWh) 计,回收期为 17 a,显然能在幕墙正常使用期间通过节能收回成本;6# 幕墙与 7# 幕墙相比,热工性能差别并不明显,而单层 Low-e 玻璃+普通浮法玻璃的市场价格仅为双层 Low-e 玻璃价格的 1/2,综合考虑初投资和能耗,在长沙地区,外呼吸幕墙内层选用单层 Low-e 玻璃+普通浮法玻璃既经济又节能。在美国,以 Low-e+普通浮法玻璃生产的中空双层玻璃普及率已达 83%,在我国也有大力推广的前景。综合各种经济因素,6# 幕墙这种组合形式是现今外呼吸玻璃幕墙中的最佳配置。

5 结论

以一外呼吸幕墙为模型,建立了热工网络,并采用 Window6.2 和 EnergyPlus2.2 软件模拟计算了各种幕墙的综合传热系数和冷热负荷,分别考察了玻璃类型、通风腔宽度等对外呼吸幕墙建筑负荷的影响,并进行了能耗和经济可行性分析,得出如下结论。

1) 外呼吸双层通风幕墙的空调冷热负荷均小于传统单层 Low-e 玻璃幕墙,一般采用的外呼吸幕墙的空调冷热总负荷减少量在 35% 左右,节能优势明显。

2) 玻璃类型对幕墙冷热负荷影响很大,相似结构的外呼吸玻璃幕墙中,性能最优的 7# 幕墙冷热总负荷仅是 2# 幕墙的 53%,节能效果受玻璃类型影响较大。

3) 增加外呼吸幕墙通风腔的宽度,能减小幕墙综合传热系数和冷负荷,提高外呼吸幕墙的热工性能。如果采用遮阳措施,当幕墙宽度为 500 mm 时,既可满足减少围护结构热损失的要求,改善玻璃幕墙的热工性能,又可增加建筑使用面积。

4) 夏季,外呼吸玻璃幕墙的综合传热系数对能耗的作用较太阳得热因子 SHGC 大,冬季则刚好相反。一般同类别的外呼吸玻璃幕墙间,夏季综合传热系数较小,而太阳得热因子 SHGC 较大的幕墙节能效果最好。

(下转第 73 页)

大量的相关研究和工程尝试。针对长江流域需要研发高性能的温湿度分控的户用机组。

还有一种较为简单的提高能效比的方法是在除湿时段采用小型除湿机,不用热湿联控机组。

5.3 以户为单元,独立运行

长江流域是否也应推行集中供暖和空调?这是构建技术体系必须回答的问题。通过对居住实态调查和分析研究,根据对降温、通风、供暖、除湿各个时段的深入分析,发现该地区居住建筑没有必要持续供暖和空调,社会调查发现各家庭需要空调供暖的时间差异也很大,而且不同人的热舒适感也有明显差异。空调供暖是使用者自己付费,人们普遍要求对空调供暖的自我调控权。因此长江流域无论是集中还是分散,都必须实现以户为单元的调控方式。考虑到各户在室时间不一致,使用空调供暖的时间更不一致,户间传热将浪费大量冷热量,因此,应对楼板和分户墙提出保温隔热要求。

由于全年各时段的工况转换必须与建筑的遮阳调节和窗户开闭相配合,普通家庭难以掌握,需要配备建筑节能专家,指导居民科学地调节遮阳,开闭窗户,运行机组。更高层次的是由建筑节能专家运行系统直接运行。

6 结论

由于长江流域的气候特征、建筑特点、居民生活习惯等因素具有独特性和复杂性,故其居住建筑的节能方法不同于国内外传统设计方法。上述被

(上接第 51 页)

设计投资建设外呼吸玻璃幕墙,需综合考虑节能、造价和建筑美观的因素,并最大限度地利用室内空间。本文仅讨论了外呼吸玻璃幕墙的综合传热系数和透过幕墙形成的冷热负荷,但外呼吸幕墙受到如太阳辐射、风速及建筑高度等因素的影响,热工特性非常复杂,需要通过实验和 CFD 模拟技术详细分析呼吸幕墙的传热特点,建立外呼吸幕墙的综合传热系数的数据库,以便于外呼吸幕墙在实际工程中推广和应用。

参考文献:

- [1] 赵西安. 双层通风幕墙的构造及工程应用[J]. 建筑技术, 2002, 33(9): 651-655
- [2] 汪铮, 李保峰, 白雪. 可呼吸的表皮——积极适应气候的“双层皮”幕墙解析[J]. 华中建筑, 2002, 20(1): 22-27

动式与主动式技术的结合构建了长江流域建筑节能技术体系,可概括为:调节阳光、改进通风、隔热防潮、户为单元和温湿分控等几个方面。该技术体系建立了室内热湿环境控制调节策略,在提高室内热湿环境质量与节能之间具有良好的平衡、协调和统一性,使控制策略对长江流域复杂多变的气候具有高度的适应性;摒弃了国内外寒冷地区的集中供暖和公共建筑的集中空调技术体系,提出了适用于长江流域社会经济水平、居住文化特点的以户为单元的居住建筑节能运行方案,具有高度的灵活性和自主性。

与长江流域居住建筑相适宜的技术体系可使长江流域住宅的年累积冷热耗量平均不大于 $91 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;当户式降温除湿供暖专用机组季节能效比达到 3.8 以上时,长江流域住宅室内热湿环境控制的电耗平均不大于 $24 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,比《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》建立的长江流域居住建筑节能技术体系节能 45%,与《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》实施以前的技术相比节能 70%。

该技术体系还需要分城市进行工程上的可行性研究和工程试验、示范,编制各城市的实施细则,才能使上述节能率成为现实。

参考文献:

- [1] 付祥钊, 杨李宁, 马晓雯, 等. 夏热冬冷地区居住建筑空调能耗预测[J]. 暖通空调, 2007, 37(11): 1-5
- [3] 程义华, 撒世忠, 周亚素, 等. 带遮阳百叶热通道幕墙的热工数学模型[J]. 建筑热能通风空调, 2006, 25(4): 10-15
- [4] Poirazis H, Rosenfeld J L J. Modelling of double skin facades-results obtained using WIS [R]. Denmark: Technical University of Denmark, 2003
- [5] Bernardes M A dos S, VoB A, Weinrebe G. Thermal and technical analysis of solar chimneys[J]. Solar Energy, 2003, 75(6): 511-524
- [6] 陈海辉, 邓先和, 熊建明. 热通道玻璃幕墙的热工计算[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2003, 31(3): 89-92
- [7] Pasquay T. Natural ventilation in high-rise buildings with double facades, saving or waste of energy[J]. Energy and Buildings, 2004, 36(4): 381-389
- [8] 中国建筑科学研究院. JGJ 102—2003 玻璃幕墙工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003