

双层皮玻璃幕墙节能 研究综述及探讨

清华大学 刘晶晶[☆]

奥雅纳工程顾问公司北京分公司 张志勤

北京市科委软科学处 李建玲

清华大学 秦佑国

摘要 从传热机理研究、与建筑运行模式结合的研究以及全寿命周期分析三方面总结和
分析了当前国内外双层皮玻璃幕墙热工性能研究的方法和成果,认为应将双层皮玻璃幕墙的
设计纳入建筑设计的全过程,在不同的阶段采用不同的设计方法和工具,以便得到性能优良的
双层皮玻璃幕墙。

关键词 双层皮玻璃幕墙 节能 幕墙设计 自然通风

A review and outlook for double-skin facade research

By Liu Jingjing[★], Zhang Zhiqin, Li Jianling and Qin Youguo

Abstract Presents the methods and achievements of the thermal performance study at home and abroad
for double-skin facade in three aspects: basic mechanism of heat transfer process, combination with building
operation modes, and life cycle assessment. Considers that double-skin facade design should be brought into
the whole building design processes, and corresponding aid design methods and tools should be adopted for
double-skin facade in different phases of building design in order to obtain the high performance double-skin
facade.

Keywords double-skin facade, energy conservation, facade design, natural ventilation

★ Tsinghua University, Beijing, China

①

1 背景

玻璃幕墙几乎是当今世界各大城市高层商业
建筑立面的一致选择,然而,传统玻璃幕墙的冬季
保温和夏季隔热性能都很差,大大增加了建筑的供
热和空调能耗。相比之下,双层皮玻璃幕墙 DSF
(double-skin facade)不仅建筑外观受人青睐,而且
在提高热工性能方面也有较大潜力。然而,只有在
严谨科学设计的前提下它的潜在优势才能发挥出来,
否则可能适得其反。研究表明,DSF 的等效保温
性能并不一定比单层幕墙好^[1],如果双层幕墙夹
层没有采取有效的通风措施,在 DSF 空腔内反而
可能出现过热等不利情况^[2],不仅不利于减小夏季

空调能耗,而且也会因幕墙内表面温度过高而引起
室内不舒适等问题;DSF 的通风性能与许多因素
有关,需要根据外界条件变化不断调节,否则会出现
空气倒灌入室内等不利情况。只有根据具体情
况进行系统设计和控制,DSF 才可能比传统的隔
热玻璃加外遮阳方案有实质性进步^[3]。因此,需要

①[☆] 刘晶晶,女,1981 年 12 月生,在读硕士研究生
100084 北京市海淀区清华大学建筑学院南 111 室
(010) 62785691
E-mail: liujj04@mails. tsinghua. edu. cn
收稿日期:2005-07-27
一次修回:2005-09-07
二次修回:2005-10-13

在设计中结合具体建筑的情况合理选型,认真计算、模拟甚至实验;在运行过程中,应该根据室内外的环境实时控制遮阳百叶、进出风口等构件。

目前,我国的 DSF 建筑处于发展阶段,典型的应用实例有:北京的国家会计学院、国贸旺座、清华大学超低能耗示范楼、北京公馆、锦秋国际大厦、凯晨广场,以及上海的久事大厦等。在将要建成的项目中,奥运射击馆是外循环 DSF 的一种,中青旅大厦采用的是机械内循环幕墙,而昆仑公寓则是典型的内循环 DSF。为了更好地利用这一先进技术,有必要对其目前的研究方法和成果进行总结和分

2 国外相关研究现状

目前关于 DSF 热工性能的研究主要见诸国外文献中,归纳起来主要有三个方面:基本传热研究、与建筑运行模式结合的研究以及全寿命周期分析。作为指导工程决策最有力的依据,全寿命周期分析是整个研究的重要目标,全年能耗模拟是核心问题,传热过程研究是基础。

2.1 基本传热过程分析

研究表明,DSF 的传热过程非常复杂,包括长短波辐射、对流以及导热等,同时受幕墙结构、室外气候条件和室内环境控制的影响。Manz 结合玻璃光学特性和 CFD 方法对 DSF 进行了模拟,得到在不同安装顺序和通风策略下 DSF 中的能量分布,结果表明总太阳得热系数 g 的模拟需要采用包括对流、导热和辐射的 CFD 模型^[2]。

目前有很多数值方法和实验方法用于对 DSF 中的流动和传热过程的研究,Grabe 用代数方程计算分析了 DSF 内温度场和速度场特点,指出自然对流计算中采用湍流流态下得到的阻力系数可能会产生错误,为设计人员提供了一种简易快捷的分析工具^[4]。Manz 采用 CFD 方法对不同高宽比的封闭空腔内自然对流换热过程进行了数值模拟,将模拟得到的 Nu 与五个经验公式进行了对比,发现除了一个公式外,其余经验公式偏差不超过 20%^[5]。Gan 采用 CFD 方法模拟多层窗户的传热系数,结合导热和辐射热阻计算来得到双层玻璃的总热阻,研究表明,玻璃表面传热系数和整个窗户的传热系数均随内外玻璃温差呈线性变化,但是对前者影响显著,对后者的影响在温和气候地区可以

忽略^[6]。Zollner 等人对夹层内太阳辐射引起的湍流混合对流流动的平均总表面传热系数进行了实验研究,结果表明对于不同的夹层宽度应该采用不同的模型^[7]。

以上结果均是针对特定条件下 DSF 系统的传热过程研究得到的,虽然不能直接应用于 DSF 能耗的分析,但是可以指导建立模型和简化模型。

2.2 与建筑运行模式结合的研究

2.2.1 自然通风模式

除了良好的隔声效果外,DSF 系统最大的优势就是具有自然通风能力。出于隔声、防盗、防风和防雨考虑,普通幕墙建筑不得不常年关闭窗户,不仅增加了建筑能耗,而且使室内空气质量恶化,危害室内人员的身心健康。在 1990 年以后,全球变暖的现实使得自然通风更加受到重视^[8-10],有研究表明,如果能采用自然通风,室内舒适温度可以明显提高^[11]。因此详细研究 DSF 的通风问题有实际意义。

目前 DSF 通风研究主要基于两种方法,一种是对已经建成的建筑进行常年监测,分析其自然通风特点,积累设计和运行经验。这些结果不仅有利于指导建立数学模型,而且可以指导工程设计。例如 Pasquay 对德国的 3 幢 DSF 建筑进行了长期监测^[12],其中 Siemens 大厦没有空调系统,采用夜间通风、不设吊顶等措施可以满足建筑环境基本要求;Victoria 保险公司大厦采用吊顶辐射制冷,没有机械通风,每天的冷负荷峰值在 $20 \sim 30 \text{ W/m}^2$ 之间;RWE 有制冷系统和机械通风。Pasquay 指出,DSF 并不是在任何地方和任何建筑中使用都节能,一些模拟假设的边界条件需要仔细考虑,例如,幕墙周边的温度往往要比气象观测温度高;对于每层隔断的 DSF,幕墙中的换气量更取决于风速和风向,而不是烟囱效应;在设计中应该将双层幕墙空间与通风口隔断,以防止夏季热风倒灌,或者设计小面积的 DSF 而不是整面,或者像德国的 Debis 中心那样在炎热季节完全打开外表幕墙,但是这种设计的造价较高,同时导致冬季保温性能降低。

另一种方法是建立理想建筑模型,采用软件模拟在不同室外气候条件和幕墙结构下的通风特点,据此制定通风策略。Gratia 等人在这方面做了大量的工作,分析了办公建筑中朝向、风速和风向对

幕墙夜间通风的影响,探讨了白天自然通风的可行性。分析 8 种天气状况下 DSF 运行模式后指出,幕墙的动态使用非常重要,其操作与室内外的气候条件密切相关,错误的操作可能带来严重的后果;只有当幕墙间距小于 40 cm 才会存在明显的压力损失,在大多数幕墙中,主要压力损失出现在空气出口;对于南向幕墙,自然通风开口大小对夹层内温度影响很大,但是在北向则影响很小,在夜间利用穿堂风非常必要^[13-16]。采用 DSF 减小了热负荷但是增加了冷负荷,其显著的节能效果只能通过提高自然通风性能和延长通风时间来达到。荷兰学者的研究表明,简单的夜间机械通风能降低 40% 的装机容量和能耗,如果考虑采用可控窗户以及天气预测系统,节能潜力将达到 70%^[17]。

自然通风是 DSF 节能潜力的关键,但是考虑室外气候变化的复杂性,DSF 的自然通风性能仍然是今后研究的重点和难点。

2.2.2 空调模式

对于大部分的建筑,需要结合幕墙、HVAC 和控制三方面综合分析,利用商业能耗模拟软件和根据网络法原理编程计算。Stec 等人对这三个方面在不同组合情况下的综合性能进行了分析,对于窗户、阀门和百叶制定不同的控制原则和优先等级,对于各种组合均从空调系统能耗和装机容量两个方面进行分析。模拟表明,虽然 DSF 初投资高,但是由此带来的低 HVAC 装机成本以及运行成本可以弥补 DSF 的高投资^[17]。Kragh 对不同类型的 DSF 和不同类型的空调系统的结合作了实验研究^[18],从而总结出它们的搭配规律。这些研究为设备师在进行设备系统方案选择时提供决策依据。李保峰对中国夏热冬冷气候条件下 DSF 的热工性能作了大量实验研究,提出外循环式更适宜这种气候,而夹层宽度以 400 mm 为宜,夏季通风应以风压为主而不是热压,遮阳百叶以及内外幕墙比较理想的材料分别是穿孔的铝合金和高透玻璃^[19]。

2.2.3 改进型幕墙研究

将标准的 DSF 与其他结构形式进行组合,可以得到许多适合具体情况的设计。Balocco 采用稳态热平衡方法,对冬季和夏季大理石挂板通风墙系统的效果进行了模拟分析,结果表明当夹层宽度大于 7 cm 时,可以获得良好的显热冷却效果;在冬季,保温层则是决定效果的关键^[20]。Li 在

TRNSYS 中建立了包括集成光伏玻璃幕墙和太阳能回收系统的模型,结果发现采用光伏玻璃幕墙的建筑在所有地区冷负荷偏高,而供暖负荷则和地区有关系^[21]。Stec 等人采用数值模拟和实验研究的方法对 DSF 中种植植物的效果进行了研究,模拟结果表明植物可以降低 20% 的系统装机容量,也能降低能耗,但是未就植物对供暖的影响进行分析^[22]。Ding 等人则研究了在一个 8 层的办公楼同时引入 DSF 和中庭的效果,对这个建筑进行了缩小比例实验和 CFD 模拟分析。结果表明,室内与 DSF 之间的开口大小需要进行优化分析,一般低层与顶层的换气次数相差很多,因此需要对开口大小进行调节以达到平衡的效果^[23]。

2.3 全寿命周期分析研究

尽管 DSF 系统初投资比普通幕墙高很多,但是带来的制冷机装机容量减少以及可能的能耗降低却非常显著,同时由此可能带来整体排放量的降低,因此从全寿命周期的角度进行分析是非常必要的。

目前从全寿命周期分析(特别是全年建筑能耗分析)角度研究 DSF 的还很少,主要研究指标包括全寿命经济分析和全寿命温室气体排放量。比较有代表性的是土耳其学者 Cetiner 对伊斯坦布尔的温和气候下,不同类型的 DSF 所作的能耗效率和经济效率两方面的研究。结果表明,最节能的双层幕墙比最节能的单层幕墙节能 22.84%;但投资最少的双层幕墙比投资最少的单层幕墙费用高 25%。在双层幕墙系统中,最节能方案比最费能方案节能 33.9%;投资最高方案比投资最低方案在全寿命周期内节省费用 7.7%。采用遮阳技术有利于减少建筑能耗和投资^[24]。从综合经济性和环境影响两方面来看,虽然高性能窗在全寿命周期中给环境造成的影响稍大,但是和它带来的节能效果相比微不足道^[25]。Sekhar 等人对炎热潮湿地区一幢外层采用高反射玻璃、内层采用双层 Low-e 玻璃的 20 层 DSF 建筑进行了研究,这种 DSF 具有良好的节能效果和采旋光性能,研究者分别就建筑冷负荷、能耗和温室气体排放量等与其他类型窗户进行了比较,并进行了经济性分析^[26]。

目前还没有一种方法可以单独把 DSF 建筑的全年能耗计算得既全面又准确。笔者认为主要有以下四方面原因:1) 传热过程复杂,传导、对流和

辐射三种方式互相耦合;2) 影响因素多且关联性高,例如调节遮阳百叶的角度就可能改变室内的太阳辐射得热、DSF 中的对流换热量、照明需要等等,从而改变供热或制冷需求及相应的能耗;3) 较为准确地计算建筑的全年能耗必须借助动态能耗模拟软件,而对于 DSF 当中的诸多参数的选取都不是根据经验就可以设置正确的,还需要借助其他方法,如 CFD 模拟(通常适用于稳态计算)、风洞试验等;4) 动态模拟中的室外边界条件应是建筑周围的微气候参数,而非实际中因条件不具备而采用的城市气象参数,尤其是两者当中的风向和风速的差异给模拟带来了最显著的误差。

3 研究方向展望

为了最终把 DSF 的节能和生态优势充分发挥出来,在建筑设计过程中的三个阶段(方案设计、初步设计和施工图设计)应该有不同的任务和相应的辅助设计手段,如图 1 所示。

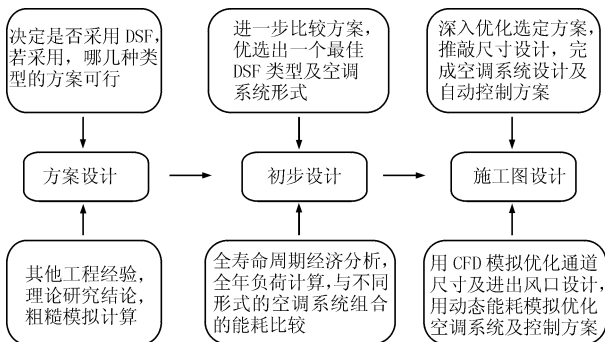


图 1 不同建筑设计阶段针对 DSF 的决策任务和手段

在方案设计阶段,由于已确定的建筑信息非常有限,必须给建筑师一些比理论计算研究更为感性的知识,最好能基于建成项目的经验和理论研究的结论制定出一些方便查询的表格和手册,编制一些简单易学的程序来初步选择方案。美国麻省理工学院开发的 Design Advisor 就是一个有益的尝试^[27]。

在初步设计阶段,建筑的空调系统方案以及幕墙系统的基本尺寸有待确定,可以把既有的几个方案与不同的空调系统组合,根据全年负荷、能耗模拟及经济分析进行优选。对于重大项目还应该进行风洞实验。根据文献^[28],笔者认为目前比较可行的计算 DSF 建筑全年能耗的方法是:把带有网络法计算模块的能耗模拟软件(如 IES)作为主要计算工具,其中一些参数和边界条件的设定采用

CFD 方法计算给出,例如 DSF 通道内的局部阻力系数、建筑表面的风压分布、进风口的实际空气温度等。目前清华大学正研究 DSF 多节点传热模型与房间热模型联立求解的模拟方法。

在最后的施工图阶段,主要是深入优化选定的方案,推敲尺寸设计和设备选型,并完成自动控制方案,所用工具与上一阶段类似,但在模型的深度和参数的准确性上有所增加。

4 结论

双层皮玻璃幕墙的设计对运行效果有至关重要的影响,目前的相关研究已经取得了许多成果,本文从传热机理、与建筑运行模式结合以及全寿命周期分析三个方面进行总结和分析。建议将 DSF 的设计引入到建筑设计的全过程中,在不同的阶段采用不同的设计方法和工具,从而最大限度发挥其热工性能优势,真正实现其节能效益。

参考文献

- [1] 薛志峰. 超低能耗建筑技术及应用[M]. 北京:中国工业出版社, 2005
- [2] Manz H. Total solar energy transmittance of glass double facades with free convection[J]. Energy and Buildings, 2004, 36 (2): 127-136
- [3] Saelens D. Energy performance assessment of multiple-skin facades[D]. KU, Leuven: Laboratory for Building Physics, 2002
- [4] von Grabe J. A prediction tool for the temperature field of double facades[J]. Energy and Buildings, 2002, 34 (9): 891-899
- [5] Manz H. Numerical simulation of heat transfer by natural convection in cavities of facade elements[J]. Energy and Buildings, 2003, 35 (3): 305-311
- [6] Gan Guohui. Thermal transmittance of multiple glazing: computational fluid dynamics prediction[J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21 (15): 1583-1592
- [7] Zollner A, Winter E R F, Viskanta R. Experimental studies of combined heat transfer in turbulent mixed convection fluid flows in double-skin-facades [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45 (22): 4401-4408
- [8] Allard F. Natural Ventilation in Buildings: a Design Handbook[M]. London: James & James, 1998
- [9] Liddament M W. A Guide to Energy Efficient Ventilation [M]. Coventry: Air Infiltration and Ventilation Centre, 1996
- [10] Dickson D. Ventilation Technology in Large Non-Domestic Buildings [M]. Coventry: Air Infiltration

- and Ventilation Centre, 1998
- [11] Rennie D, Parand F. Environmental Design Guide for Naturally Ventilated and Daylight Offices [M]. Watford: Building Research Establishment Ltd, 1998
- [12] 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
- [13] Elisabeth G, André De H. Natural cooling strategies efficiency in an office building with a double-skin facade[J]. Energy and Buildings, 2004, 36 (11): 1139-1152
- [14] Elisabeth G, André De H. Natural ventilation in a double-skin facade[J]. Energy and Buildings, 2004, 36 (2): 137-146
- [15] Elisabeth G, André De H. Optimal operation of a south double-skin facade[J]. Energy and Buildings, 2004, 36 (1): 41-60
- [16] Elisabeth G, André De H. Is day natural ventilation still possible in office buildings with a double-skin facade? [J]. Building and Environment, 2004, 36 (4): 399-409
- [17] Stec W J, van Paassen A H C. Symbiosis of the double skin facade with the HVAC system [J]. Energy and Buildings, 2005, 37 (5): 461-469
- [18] Kragh M. Monitoring of advanced facades and environmental systems[C]// The Proceedings of the National Conference 'Whole-life performance of facades' 2001 Bath
- [19] 李保峰. 夏热冬冷地区适应气候变化的建筑表皮实验研究[D]. 北京:清华大学, 2004
- [20] Balocco C. A simple model to study ventilated facades energy performance[J]. Energy and Buildings, 2002, 34 (5): 469-475
- [21] Li Mei, Infield D, Eicker U, et al. Thermal modelling of a building with an integrated ventilated PV facade[J]. Energy and Buildings, 2003, 35 (6): 605-617
- [22] Stec W J, van Paassen A H C, Maziarz A. Modeling the double skin facade with plants[J]. Energy and Buildings, 2005, 37 (5): 419-427
- [23] Ding Wenting, Hasemi Yuji, Yamada Tokiyoshi. Natural ventilation performance of a double-skin facade with a solar chimney [J]. Energy and Buildings, 2005, 37 (4): 411-418
- [24] Cetiner Ikbali, Ozkan Ertan. An approach for the evaluation of energy and cost efficiency of glass facades[J]. Energy and Buildings, 2005, 37 (6): 673-684
- [25] Citherlet Stephane, Guglielmo Francesca Di, Gay Jean-Bernard. Window and advanced glazing systems life cycle assessment [J]. Energy and Buildings, 2000, 32 (3): 225-234
- [26] Sekhar S C, Lim Kenneth, Toon Cher. On the study of energy performance and life cycle cost of smart windows[J]. Energy and Buildings, 1998, 28 (3): 307-316
- [27] <http://designadvisor.mit.edu/design/>
- [28] Hensen J. Modeling and simulation of double-skin facade systems[G]// ASHRAE Trans, 2002, 108(2)
- 简讯 •
- ## 05R407《蒸汽凝结水回收及疏水装置的选用与安装》
- 本图集由机械工业第一设计研究院按照建设部《关于印发〈2004 年国家建筑标准设计编制工作计划〉的通知》(建质[2004]46 号文), 依据国家有关标准、规范, 对原国家标准图集 97R407《热力设备与管道疏水装置》进行修编, 增加了蒸汽疏水阀、蒸汽凝结水回收装置选用及安装方面的有关内容, 对原图集作了进一步完善并更名为《蒸汽凝结水回收及疏水装置的选用与安装》。
- 图集内容包括疏水阀法兰和螺纹两种连接方式的安装、蒸汽疏水阀设计选用说明、各种类型的蒸汽疏水阀及气体疏水阀性能参数图表、疏水阀和集水管及启动疏水管安装材料表以及部分蒸汽凝结水回收装置的安装图及性能参数图表等。
- 本图集适用于一般工业及民用建筑工程热力设备及管道的疏水、空气及其他惰性气体管路系统的排水以及蒸汽热力系统凝结水的回收等。
- ## 05R401-3《常压蓄热水箱》
- 蓄热水箱是电锅炉蓄热供暖的重要设备之一, 需要规范设计与安装, 按建设部建质[2004]46 号文《2004 年国家建筑标准设计编制工作计划》的要求, 北京国电华信电力工程有限公司编制了《常压蓄热水箱》国家标准图集。
- 图集与《蓄热式电锅炉房设计施工图集》配套使用, 水箱类型为现场制作钢板方型水箱, 11 种几何容积。并按相同几何容积(长×宽×高)又分成了 18 种规格, 每种规格的水箱都列出了总图、箱体图、接管表、零件明细表、附件图, 以及为了保证水箱的蓄热能力, 水箱内设有的布水系统和按 18 个水箱的规格编制选用表。
- 本图集适用于民用建筑蓄热式电锅炉房中蓄热水箱的设计与安装; 使用水的温度不高于 100℃。也可用于一般工业及民用的生产、生活的储水装置。用于生活热水时应符合相应的生活用水规定。
- (中国建筑标准设计研究院)