



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

建筑遮阳综合节能效果计算引擎的  
研究与开发

姓名：沙华晶

学号：1130999

所在院系：机械与能源工程学院

学科门类：土木工程

学科专业：供热、供燃气、通风及空调工程

指导教师：许鹏 教授

二〇一四年三月



同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to  
Tongji University in conformity with the requirements for  
the degree of Master of Engineering

## **Research and Development of Calculation Engine for Energy-saving Effect of Building Shading System**

Candidate: Huajing Sha

Student Number: 1130999

School: College of Mechanical Engineering

Discipline: Civil Engineering

Major: Heating, Gas Supplying, Ventilation  
and Air Conditioning Engineering

Supervisor: Prof. Peng Xu

March 2014

建筑遮阳综合节能效果计算引擎的研究和开发

沙  
华  
晶

同  
济  
大  
学

## 学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

## 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

## 摘要

透过建筑透光围护结构的太阳辐射得热在建筑总冷负荷中占有很大的比重，因此遮阳对于降低建筑能耗，特别是在炎热地区，具有重要的作用。遮阳并非新兴技术，在古代建筑中就已被建筑师广泛采用。但是随着近年来机械、控制、材料等科学技术的不断进步，各种形式的遮阳设施层出不穷，因此如何评价遮阳性能的优劣以及选择合适的遮阳类型成为了急需解决的问题。就目前来讲，有两种常用的遮阳性能评价手段：通过实验测量其性能指标来评价；软件模拟其对建筑负荷的影响。但是这两种方式都有其不足之处，前者是在特定的实验环境中得到的，不能准确无误地代表遮阳设施在实际环境中节能效果；后者通过软件建模模拟，过程较繁复。为了协助设计师更快更准确的选择合适的遮阳设施，本文开发了一款针对遮阳的快速计算引擎。该计算引擎以 EnergyPlus 为计算内核，涵盖了目前常用的各类活动、固定遮阳设施，具有造作简单，计算准确的特点，不仅能够计算常规的 SC、SHGC 性能指标，而且能非常便捷的计算出特定遮阳设施在实际工况中对空调能耗影响。另外，考虑到遮阳内室内采光有较大影响，在某些情况下会影响到室内照明的使用，因此本计算引擎加入了照明采光模块，计算在采用不同形式遮阳时，可调光照明及空调总能耗的变化。

**关键词：**遮阳、性能评价、EnergyPlus、计算引擎开发

## ABSTRACT

Solar heat gain through building fenestration accounts for large amount of building cooling load, so shading system plays a significant role in saving building energy consumption, especially in hot and warm areas. Shading is not new to architect. It has been widely used since long time ago. With the development of machinery, control and material science, shading technology has also been improved in recent years. With so many types of shading devices, it's an urgent issue to figure out how to evaluate their performance. To analyze the performance of a shading system, traditional method is either conducting experimental tests or through detailed energy and daylighting simulation. However, both methods have some drawbacks. While the former can't reflect the performance in multiple working conditions, the latter is too detailed and cumbersome for designers to work with. To help designers analyze the shading system in a better way, a fast simulation program is proposed and developed in this work. With EnergyPlus as its core simulation engine, it has a well-designed wizard to guide user through the analysis process. The functionalities of Shading include shading, daylighting and energy performance analysis. It is expected that the analysis for shading system can be greatly simplified using this tool. Case studies are also given to illustrate the way Shading works.

**Key Words:** Shading, Performance Evaluation, EnergyPlus, Calculation Engine Development

## 目录

第一章 绪论.....	3
1.1 课题背景.....	3
1.1.1 我国建筑空调能源消耗状况.....	3
1.1.2 建筑遮阳的重要性.....	4
1.2 国内外遮阳研究现状.....	6
1.2.1 国外遮阳技术研究现状.....	6
1.2.2 国内遮阳技术研究现状.....	7
1.2.3 建筑遮阳发展新趋势.....	11
1.2.4 建筑遮阳系统性能评价方法.....	11
1.2.5 建筑遮阳计算软件.....	13
1.3 本论文的主要研究内容.....	16
第二章 EnergyPlus 遮阳计算内核简介 .....	17
2.1 遮阳数学计算模型.....	17
2.1.1 概述.....	17
2.1.2 天空散射辐射模型.....	17
2.1.3 遮阳模型.....	20
2.1.4 窗户模型.....	23
2.2 EnergyPlus 遮阳模拟简介 .....	35
2.3 计算内核的接口分析.....	36
第三章 Shading 的算法设计 .....	39
3.1 开发语言与开发环境.....	39
3.2 程序设计思路.....	39
3.2.1 用户需求分析.....	39
3.2.2 算法结构.....	40
3.2.3 “计算节能量”算法简介.....	41
3.2.4 “计算遮阳系数”算法简介.....	49
3.3 Shading 用法简介 .....	54
3.3.1 计算节能量.....	54
3.3.2 计算遮阳系数.....	66
第四章 Shading 实用性与准确性测试 .....	67

4.1 计算节能量案例分析.....	67
4.1.1 案例一：百叶遮阳.....	67
4.1.2 案例二：水平/竖直遮阳 .....	71
4.1.3 案例三：平推式曲臂遮阳篷.....	72
4.2 遮阳系数验证.....	73
4.2.1 窗户玻璃.....	74
4.2.2 遮阳.....	75
第五章 Shading 计算引擎静态校核 .....	77
5.1 太阳辐射得热系数的静态校核.....	77
5.1.1 试验台简介.....	77
5.1.2 实验测试原理与方法.....	78
5.2 测试结果分析.....	79
5.2.1 3mm 标准平板玻璃 .....	79
5.2.2 织物帘卷.....	81
5.2.3 百叶帘.....	82
第六章 工作总结与展望.....	83
致谢.....	84
参考文献.....	85
个人简历、在校期间发表的学术论文与研究成果.....	88

# 第一章 绪论

## 1.1 课题背景

### 1.1.1 我国建筑空调能源消耗状况

随着我国经济的持续增长和社会的不断进步，我国能源产业有了很大发展。同时，我国也已成为能源消耗大国，仅次于美国，排名世界第二。中国尚处于是发展阶段，城市化水平不超过 40%，工业能耗还是在总能耗中占了最大的比例。建筑能耗在总能耗中的比例相对较低，表示有很大的上升空间。从历年调查数据来看，我国建筑能耗从 1978 年的 10%，上升到 2002 年的 27.6%。而根据发达国家经验，随着一个国家城市化进程的不断推进、城镇建设的发展，以及人民生活水平提高，建筑能耗的比例将逐步增加，并最终达到 35% 左右。因此，建筑将超越工业、交通等其它行业而最终成为能耗大户<sup>[1-4]</sup>。

与建筑相关的能源消耗包括建筑材料生产用能、建筑材料运输用能、房屋建造和维修过程中的用能以及建筑使用过程中的建筑运行能耗。在建筑的全生命周期中，建筑材料和建造过程所消耗的能源一般只占其总的能源消耗的 20% 左右，大部分能源消耗发生在建筑物运行过程中。建筑一般分为工业建筑和民用建筑，工业建筑的能耗在很大程度上与生产要求相关，因此不在本文的讨论范围内。而民用建筑又可分为住宅建筑和公共建筑，公共建筑虽然总面积不大，但其单位面积能耗相较于住宅建筑要高很多，另外，当公共建筑采用中央空调时，其单位建筑面积能耗是小规模不采用中央空调的公共建筑能耗的 3~8 倍<sup>[5]</sup>。2005 年 4 月，国家颁布《公共建筑节能设计标准》(GB50189-2005)，并于 2005 年正式开始实施。标准中指出，在高档建筑的全年能耗中空调制冷与采暖系统能耗占总能耗的 50%-60%，照明占 20%-30%。其中空调制冷能耗中，通过外围护结构的能耗占 40%-50%，处理新风所耗能源占 30%-40%，空气和水输配所耗能源占 25%-30%<sup>[6]</sup>。可见，在一般建筑中，空调能耗占了相当大的比重。设计师为了建筑美观，

越来越多的建筑采用全玻璃幕墙，不仅带来了光污染，更加重了围护结构传热造成的空调能耗，特别是太阳辐射得热。太阳光直接照射进入室内，产生的眩光会导致光环境舒适度变差，更会大大增大夏季的制冷能耗。研究表明，遮阳能显著缓解眩光<sup>[7-10]</sup>，因此建筑遮阳必不可少，其实用性正在被越来越多的人接受。

### 1.1.2 建筑遮阳的重要性

推进建筑节能是我国实现节能减排目标，建设资源节约型、环境友好型社会的重要组成部分。建筑遮阳技术是建筑防热技术的一个组成部分，科学合理地运用遮阳技术能够防御炎热地区民用建筑的室内环境过热，控制围护结构室外综合温度从而降低空调使用能耗。目前这项技术越来越被人们所重视和接受，在发达国家尤其是欧洲城市，几乎家家户户都会根据不同的需求安装各种外遮阳设备，外遮阳已经成为建筑中不可缺少的部分，缺少外遮阳设备的建筑，在他们看来是不完整的建筑。

遮阳设施有很多种类，按照放置位置，遮阳设施可以分为外遮阳设施、中置遮阳设施和内遮阳设施，外遮阳设施的遮阳效果最佳<sup>[11]</sup>，其次是中置遮阳，内遮阳的效果最差。但是由于安全、美观、防尘等其他因素的影响，各种遮阳设施都有其适用于不适用之处<sup>[12-14]</sup>。另外，按照系统可调性能，遮阳设施可分为固定遮阳系统和活动遮阳系统，在冬季，遮阳会在一定程度上阻碍太阳光进入室内，造成供热能耗的增加，活动遮阳系统很好的解决了遮阳问题。

建筑遮阳对建筑室内环境与建筑节能的贡献主要体现在以下几个方面<sup>[15]</sup>：

(1) 降低夏季冷负荷，外遮阳的效果尤其显著。在设置外遮阳后，太阳辐射没有直接到达建筑表面，而是在遮阳设施表面被反射和吸收，只是很少部分通过遮阳设施而到达建筑表面。图 1.1 和图 1.2 分别说明了太阳照射带内遮阳和外遮阳窗户的辐射分配情况。相关研究表明，外遮阳可以将投射到建筑表面的太阳直接辐射降低 80%。

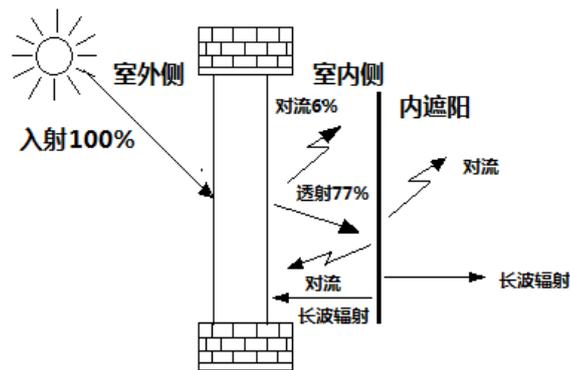


图 1.1 内遮阳设施对太阳辐射的影响

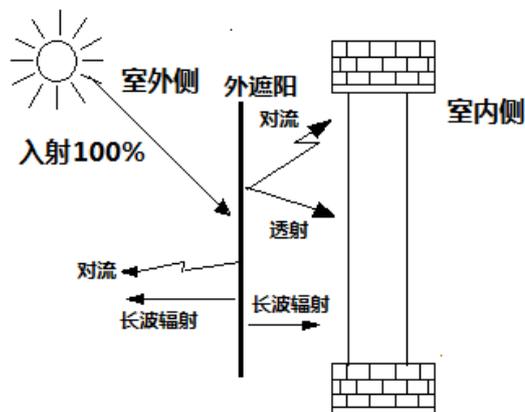


图 1.2 外遮阳设施对太阳辐射的影响

(2) 降低冬季通过窗户的热损失，内遮阳的效果比较显著。当室内温度高于室外温度时，内遮阳设施可以将原本散发到室外的热量反射回室内，或者吸收他们的长波辐射，再以长波辐射的形式释放到室内、室外，此时散向室外部分的热量已经大为减少。

(3) 缓解眩光问题。建筑窗洞在提供自然采光的同时，往往会造成不必要的眩光，增加遮阳设施后，虽然降低了室内的照度水平，但是能够有效得缓解甚至消除眩光问题。

(4) 改善室内热环境的舒适感。遮阳设施能够有效避免冬夏季窗户对人直接产生的冷、热辐射，减少夏季进入室内的直接热辐射，维持室内舒适的平均辐射温度，提高人体舒适感。

## 1.2 国内外遮阳研究现状

### 1.2.1 国外遮阳技术研究现状

国外对遮阳节能效果的理论研究、试验研究方面开展的较早,发展水平也较国内先进,初期比较多的是对遮阳能够阻挡太阳辐射从而达到节能效果的研究,但是遮阳对室内自然采光的影响是不可忽视的,随着建筑系统自动控制的发展,遮阳系统与智能人工照明结合的研究越来越多。

理论研究方面,美国劳伦斯伯克利国家实验室 *Klems* 等人从理论上推导内遮阳和外遮阳太阳辐射得热系数(*SHGC*)的详细计算公式,测试了复杂遮阳系统的双向光学性能。试验研究方面, *Collins* 和 *Phillips* 对建筑外窗百叶遮阳多个参数对辐射和对流传热量的影响进行了大量研究,建立了二维稳态传热的数学模型,利用 *CFD* 软件进行了模拟<sup>[16]</sup>。随着建筑及其系统的不断发展,建筑能耗评估模型变得越来越复杂细致,但是以往的遮阳模型都是基于简单几何形状并对外界环境做了大量的简化得到的,为了更精确的计算出建筑的太阳得热量, *Ylenia Cascone* 等建立了复杂边界条件(包括太阳位置、遮阳构件、植物灌木等外界环境)下的遮阳模型计算遮阳系数,最后用 *MATLAB* 编写计算软件并验证器准确性<sup>[17]</sup>。对于热带地区,遮阳是阻挡太阳直射,减少室内冷负荷的常用方法,但是另一方面遮阳系统同样对室内的自然采光产生削弱作用。*F.M. Al-Shareef* 等针对沙特阿拉伯地区特有的 *Hedjazi* 建筑结构采用的 *Rowshan* 遮阳系统建立了数学模型,并用 *Fortran* 语言编制了软件专门计算在该种遮阳系统下室内各点的光照度,最后通过实验验证了软件的可靠性<sup>[18]</sup>。

在实验测试方面,以美国劳伦斯伯克利国家实验室为中心,在 *ASHRAE*、*NFRC* 和门窗生产厂家的共同努力下,开发了一套建筑外窗现场实验测试 *MoWiTT (Mobile Windows Thermal Test)* 装置,如图 1.3 所示。这套装置由两个大小相同的保温检测箱组成,其主要能完成传热系数的测量和太阳辐射得热系数(*SHGC*)的测量。通过测量实际环境下透过测试箱体窗户的净热流值来计算得到窗户的性能参数,净热流值的测量原理是基于保温计量箱在短时间内的热平衡原

理。为了精确测量热流，并保持保温计量箱内空气温度的恒定，每个热流计量箱内都安装了电加热器、水-空气换热器和大面积内表面热流计，同时还需要精确测量各种附属设备的耗能量(如风机)。整个测试装置可水平移动，调整到任何朝向，可以直接测试太阳辐射得热和能够确定多种门窗及其遮阳组合的遮阳效果。目前用于验证门窗的计算模型和节能效果的比较评价，也是国内各遮阳模拟检测装置的雏形。

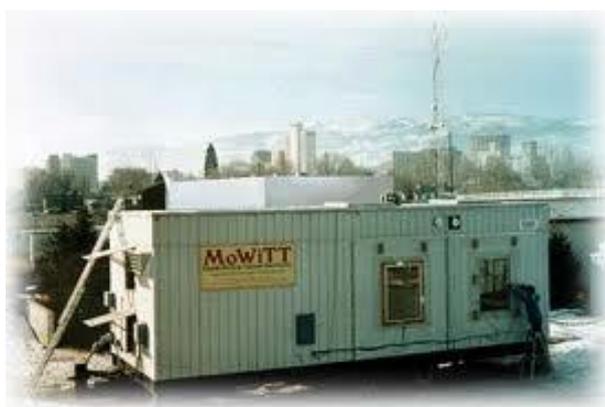


图 1.3 移动窗户热性能实验测试装置 (MoWITT)

## 1.2.2 国内遮阳技术研究现状

相比而言，国内针对遮阳节能效果的理论研究一般通过分析太阳与地球的运行规律，得出不同地区建筑日照特点及其适合的建筑遮阳措施，并形成初步的建筑遮阳计算方法，但主要针对较传统的固定遮阳形式，包括水平式、垂直式、综合式等。大部分关于建筑外遮阳的研究仅定性地探讨了采用在外遮阳技术的必要性、优越性及注意事项，且仅针对南方夏季炎热地区，多数研究采用软件模拟，主要针对固定式外遮阳形式，未考虑可调节的新型遮阳百叶等，缺乏具体相关的理论研究及实测数据。

近年来，国内科研机构加大了对建筑遮阳性能的评估研究。张磊等指出了现有遮阳计算模型仅从几何角度考虑遮阳构建对直射辐射的减小作用，没有考虑对散射辐射的影响这一不足之处。然后分析了散射辐射入射到百叶遮阳板上的光学特性，建立用于计算太阳散射辐射和反射的数学模型，并且根据此模型编制了针对百叶遮阳系统的软件。最后作者将计算结果与 *ISO15099* 中给出的数据做分析

对比,验证了模型的准确性<sup>[19]</sup>。在张磊的另外一篇论文中,作者编制了用于计算透光系数和太阳辐射得热量的计算机程序 *VS(Visual Shade)*,利用 *VS* 软件计算广州地区建筑有无遮阳构建时的得热量,并与 *DeST* 的拟合数据进行比对,验证了软件的正确性,可以用于太阳辐射得热量计算模型并和能耗模拟软件 *DeST* 实现数据共享。此外, *VS* 程序扩充了遮阳构建的模拟数据库,可以对更多的遮阳系统进行模拟计算<sup>[20]</sup>。

龙恩深等分析了遮阳系数对供暖与空调能耗影响差异,以福州为例,根据当地逐时气象数据,分析了建筑空调负荷及供暖负荷的所有时刻对应的逐时太阳辐射,用特征温度法研究当遮阳系数减小时各时刻建筑的空调与供暖能耗及相对变化情况,发现 *DOE-2* 中对于遮阳系数的某些结论值得商榷<sup>[21]</sup>。

邓盼盼针对建筑遮阳系统提出了新的指标—遮阳节能系数 (*SESC*),并详细介绍了其计算方法,相对于原有的遮阳指标,遮阳节能系数综合考虑了太阳直射、散射及反射对遮阳效果的影响。此外,作者利用 *Visual C++* 语言编制了用于计算遮阳节能系数的计算程序—*SE*,最后针对重庆某一办公楼进行计算,并将计算结果与 *DeST* 计算结果进行比较,证明了 *SESC* 和 *SE* 的正确性<sup>[22]</sup>。

刘艳峰等针对中国传统民居外窗遮阳系数展开了研究,分析传统民居的屋檐、檐廊及建筑布局对南向外窗的遮阳作用,分别计算其综合遮阳系数,计算结果表明传统民居的屋檐的遮阳效果随其挑出长度而增大;建筑的东、西侧遮挡物分别在午前和午后对与其正交相邻的外窗具有很好的遮阳效果,两者距离越近,遮阳作用越明显;南侧对面建筑对其北侧建筑外窗的遮阳作用不大<sup>[23]</sup>。

赵明明针对遮阳构建的隔热性能展开研究,定义了隔热系数来表征遮阳系统的隔热性能,并搭建了试验台进行测试,选取不同材质和颜色的遮阳帘,分析其对室内得热的影响,计算其隔热系数<sup>[24]</sup>。

朱燕燕针分析了各类遮阳系统的特点及适用范围,着重针对夏热冬冷地区的地理和气候特征,寻找合适该地区的建筑遮阳设计方法,并利用计算机程序简述设计方法,综述了除建筑遮阳遮挡太阳辐射之外影响建筑物理环境的其他因素,并提出了整合设计的办法<sup>[25]</sup>。

另外在节能法规的制定方面,随着建筑节能的不断推进发展,我国提出了节

能改造的目标与任务：加强新建筑与既有建筑节能改造，重点是新建筑，预计到2020年，我们国家有一半的存量建筑是在未来的15年内建成的。因此新建建筑要执行严格的节能50%标准，北京、上海、天津、重庆这四个直辖市要率先达到节能65%的标准。对于既有建筑，实施分步改造，实现到“十一五”期末，节约1.1亿吨标准煤的目标。为完成上述目标任务，我国制定了一系列的建筑节能设计标准和规范：

(1)《公共建筑节能设计标准》(GB50189-2005)，按照各地气候特征将我国划分为五个气候区，分别为严寒地区A区、B区、寒冷地区，夏热冬冷地区和夏热冬暖地区，并对各个地区围护结构传热系数限值进行了规定。其中对寒冷地区、夏热冬冷地区和夏热冬暖地区遮阳系数的限值进行了规定；

(2)《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ134-2001)，在其“建筑 and 建筑热工节能设计”中，对外窗热工性能作了如下规定：外窗，包括阳台门的透明部份的面积不应过大。不同朝向、不同窗墙面积比的外窗其传热系数应符合规定，外窗宜设置活动外遮阳。

另外，针对建筑外窗的保温隔热以及空气渗透性能的测试制定了相应的测试标准，《建筑外窗保温性能分级及其检测方法》(GB8484-2002)、《建筑外窗空气渗透性能分级及其检测方法》(GB71017-2002)等。随着节能呼声的不断高涨，这些规范的执行力度将越来越来。

在实验测试方面，中国建筑科学研究院物理所根据 NFRC (*National Fenestration Rating Council*) 的相关规定，提出了窗太阳得热系数的实验测量方法，即标定热箱法。并且根据这一方法，研发了国内首台测量窗太阳得热系数的实验装置，如图 1.4 所示。热计量箱为跟踪式，可水平竖直旋转来跟踪太阳在天空的轨迹。水循环系统流量通过涡轮流量计来测量得到。热计量箱内装有风机盘管机组，用于箱内空气与循环水的热交换，保证计量箱内的热环境保持在要求状态。

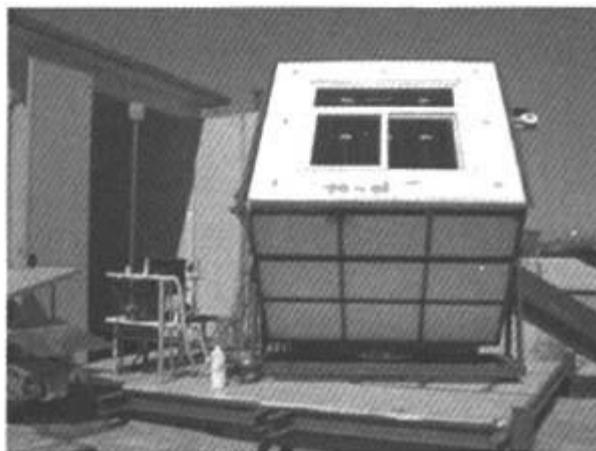


图 1. 4 窗太阳辐射得热系数测定装置

深圳建筑科学研究院研究应用了动态测试遮阳系数的实验设备,该设备分为上下两个大小相同的测试箱,上部的测试箱安装 3mm 普通白玻璃作为比较基准,下部的测试箱体安装不同的遮阳构件,如图 1.5 所示。该测试设备的特点是可以同时测量有遮阳和无遮阳窗户的太阳辐射的热量。该装置为水平方向可以以任意角度进行旋转,垂直方向可以在  $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$  之内进行调节。该装置设计了一个冷水恒温箱体,其主体由电冰箱改装而成。箱内分隔为两个小箱体即混合箱和恒温箱,制冷主机先将冷水通过水泵打入混合箱,与风机盘管系统的回水进行混合再返回制冷主机进行制冷,这样避免了风机盘管出水温度波动大造成的误差。



图 1. 5 遮阳系数测试实验装置图

### 1.2.3 建筑遮阳发展新趋势

建筑遮阳早在古代就已被先贤认知并利用,近代由于科学技术的飞速发展遮阳技术经历了多次革新,遮阳种类和产品层出不穷,遮阳也与其他新技术结合在一起造福人类,其中一项就是遮阳与采光一体化控制<sup>[26]</sup>。

遮阳设施将太阳光阻隔在室外,以减少室内冷负荷,而采光技术则是尽可能地利用太阳光来照明,以减少人工照明的能耗,不难看出,在某种程度上这两者存在矛盾,遮阳与采光一体化控制技术就是在这对矛盾体中寻找平衡。对于采用了自然采光系统的建筑,在选择遮阳设备时应该与传统建筑有所区别,因为不是投射进室内的太阳光越少越好,两者的配合存在节能最优值,这方面的研究目前比较匮乏。

### 1.2.4 建筑遮阳系统性能评价方法

#### 1.2.4.1 指标评价

评价一个事物的优劣,最常用的方法就是制定表征评价对象各方面特性及其相互联系的多个指标,指标的制定需要满足简明、可操作性强并且可量化的要求,对于门窗及遮阳设施的评价也不例外。建筑遮阳有很多种形式,建筑外遮阳包括建筑构件遮阳、绿化遮阳等;建筑内遮阳包括各种窗帘;此外窗户的玻璃液对太阳辐射有一定的遮蔽作用,特别是一些新型玻璃,如 Low-E 玻璃、镀膜玻璃等<sup>[27]</sup>。目前业内在存在多种对窗户及遮阳设施的评价指标,下面介绍几种常用指标。

##### (1) 太阳辐射得热系数 (SHGC)

太阳辐射得热系数也称为太阳能总透射比,是通过玻璃、门窗或幕墙构件成为室内得热量的太阳辐射热与投射到门窗或幕墙构件上的太阳辐射热的比值。太阳能总透射比表征的得热量包括两部分,一部分是直接透过玻璃进入室内的太阳辐射热,另一部分是玻璃及构件吸收太阳辐射热后,再向室内辐射的热量<sup>[28]</sup>。计算公式如下:

$$SHGC(\theta) = \frac{\int_{\lambda} E_D(\lambda)[T(\theta, \lambda) + N_f \lambda(\theta, \lambda)] d\lambda}{\int_{\lambda} E_D(\lambda) d\lambda} \quad (1.1)$$

式中  $\theta$ — 太阳辐射入射角；  
 $E_D(\lambda)$ — 入射太阳光谱辐射力；  
 $T(\theta, \lambda)$ — 玻璃系统的光谱透射比；  
 $\lambda(\theta, \lambda)$ — 玻璃系统的总光谱吸收比；  
 $N_i$ — 第  $i$  层玻璃吸收热向室内侧放热比例。

## (2) 遮阳系数 (SC)

遮阳系数是指在给定的太阳辐射投射角度和太阳辐射波段内, 通过某控制窗户系统的太阳辐射得热系数与通过标准单层平板白玻璃的得热系数的比值。对于 3mm 单层平板标准白玻璃而言, 这一系数对太阳辐射的投射角度和辐射光谱变化并不敏感, 因此在任何一个太阳辐射投射角度和辐射光谱区段内 SC 值基本相同, 因此可以用 3mm 单层平板标准白玻璃的辐射得热系数作为比较基准。在 ASHRAE 规定的夏季工况, ATM 提供的标准太阳光谱条件下, 当收到法向辐射时, 3mm 标准白玻璃的 SHGC 为 0.87, SC 为 1.0。因此, 其他玻璃的遮阳系数的计算公式为:

$$SC = \frac{SHGC(\theta)_{\text{控制}}}{0.87} \quad (1.2)$$

## (3) 建筑外遮阳系数 (SD)

建筑外遮阳系数是针对固定外遮阳而制定的, 基于外窗太阳辐射引起的全年累计冷负荷减少的程度对夏季外遮阳系数进行定义, 采用能耗模拟得到拟合公式<sup>[29]</sup>。《公共建筑节能设计标准》(GB50189-2005) 中给出了由外挑系数(PF)计算外遮阳系数的简化计算公式:

$$SD = aPF^2 + bPF + 1 \quad (1.3)$$

式中,  $a, b, c$  为回归系数, 与建筑所在地理位置、窗户朝向以及遮阳形式 (数值遮阳或水平遮阳) 相关。

## (4) 透光系数 ( $X_s$ )

透光系数的定义为: 有遮阳构造的计算平面由太阳直射所形成的光斑面积与标准计算平面(无遮阳构造)由太阳直射所形成的光斑面积的比值<sup>[30]</sup>。

透光系数是从几何关系上得到的参数,非常直观的反映了遮阳构件对直射辐射的透过率,在太阳辐射中直射辐射占 70%,因此它对评价遮阳设施的遮阳性能以及在外窗太阳辐射得热量的计算中都有非常重要的作用。

综上所述,太阳辐射得热系数(*SHGC*)和遮阳系数(*SC*)的提出是针对窗户玻璃而言的,但是现在也广泛得应用在遮阳设施的评价中,这两个指标是使用最广泛的,但是也有其局限性。由于 *SHGC* 和 *SC* 是在特定的实验工况下测定的,不能都完全反映出实际应用中遮阳产品的优劣。另外, *SD* 值只针对水平和竖直固定外遮阳,  $X_s$  只能衡量遮阳设施对太阳直射辐射的削减作用,都存在很大的局限性。

#### 1.2.4.2 模拟评价

所谓模拟评价,即用针对使用制定门窗或遮阳设施的建筑进行能耗模拟,模拟计算时段可以是全年或任何指定时段,用建筑耗能的高低来反应窗户和遮阳系统性能的优劣。能耗模拟评价优于指标评价之处就是,它可以逐时计算,以动态的形式反映窗户和遮阳设施对太阳辐射的削弱作用,在一定程度上比用单一的指标评价更真实可靠。但是,能耗模拟的最大缺点就在于繁琐,为了能够正确模拟某类窗户或遮阳设施的性能,必须首先建立建筑模型,包括建筑的外形,墙体构造,墙体材料等,其次还需要设置人员、照明、设备等,如果建筑有空调系统,还需要设置空调系统,这是模拟设置最繁琐之处。如此建完模型,就可以通过空调能耗或符合来衡量采用何种窗户或遮阳设施的节能效果更佳,也可以计算遮阳对室内照度的影响。

#### 1.2.5 建筑遮阳计算软件

如上所述,遮阳无论是对于降低建筑能耗还是提高室内热环境及光环境的舒适度都具有非常重要的作用,但是要得到遮阳设施的详细性能需要经过繁琐的计算,一般都需要借助计算机来完成,因此数款针对遮阳模拟计算的软件应运而生。

##### (1) WINDOW

*WINDOW* 是被业内专家公认的应用广泛、功能丰富的玻璃门窗光学性能计

算软件，同时也能计算卷帘、百叶这两种遮阳设施的性能。*WINDOW* 由美国劳伦斯伯克利实验室（*Lawrence Berkeley National Laboratory* 缩写为 *LBNL*）开发，其计算环境条件和玻璃数据库等由美国玻璃门窗分级委员会（*National Fenestration Rating Council* 缩写为 *NFRC*）提供并支持。*WINDOW* 可以计算单片玻璃，中空玻璃，玻璃门窗的所有光学性能，例如传热系数、遮阳系数等，其数据库涵盖了国际上主要玻璃生产厂家的 1800 多种玻璃及相关产品的光学数据。

### (2) *THERM*

*THERM* 也由美国劳伦斯伯克利实验室（*Lawrence Berkeley National Laboratory* 缩写为 *LBNL*）开发，是用有限单元法计算门窗和玻璃边缘稳态传热的软件，计算所用公式和方法基于 *ISO15099 Thermal performance of windows, doors and shading devices*。*THERM* 计算得到的窗框性能数据可以导入 *WINDOW*，与玻璃数据组合成门窗或幕墙整体，计算综合的性能数据。*THERM* 的操作相对比较复杂，需要有一定的熟悉过程。

### (3) *Energyplus*

*Energyplus* 由美国劳伦斯伯克利实验室（*Lawrence Berkeley National Laboratory* 缩写为 *LBNL*）开发，是一个建筑全能耗分析软件，功能强大，具有其他软件所没有的很多优点和功能，由四个主要模块构成：负荷模块、系统模块、设备模块和经济模块。*Energyplus* 内涵计算遮阳性能的模块，但是其最强大的功能在于计算建筑的整体能耗，因此可以通过能耗的高低判断窗户及遮阳设施性能的优劣。*Energyplus* 的气象参数是逐时的，采用各向异性的天空模型以改进倾斜表面的天空散射强度，因此可以逐时模拟窗户及遮阳设施对太阳辐射的作用，这是 *WINDOW* 等软件不具备的功能。另外，*Energyplus* 还可以进行日光照明的模拟，包括计算室内照度、眩光指数以及对人工照明的影响<sup>[30]</sup>。

虽然 *Energyplus* 具备强大的计算引擎，但是其用户界面十分不友好，如图 1.6 非可视化，常常需要借助第三方软件来完成建筑模型的建立，另外，其参数的输入也十分繁琐，因此在实际的商业工程应用中不是很广泛。

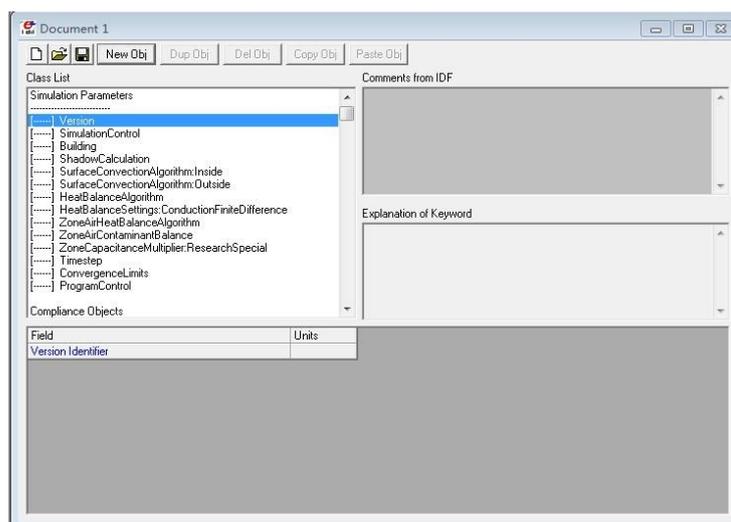


图 1. 6 Energyplus 输入参数编辑器界面

另外, *Energyplus* 只能计算玻璃窗户 (不带遮阳设施) 的 *SHGC*, 其计算方法与 *WINDOW* 不同, 是根据 *SHGC* 的定义采用数学解析的方法, 计算公式如下 [28]:

$$SHGC(\theta) = T^f(\theta) + \sum_{k=1}^L N_k A_k^f(\theta) \quad (1.4)$$

式中  $T^f$  — 玻璃前侧的太阳光透过率;  
 $L$  — 玻璃总层数;  
 $A_k^f$  — 第  $k$  层玻璃的吸收率;  
 $N_k$  — 第  $k$  层玻璃吸收热向室内侧放热比例。

#### (4) *eQUEST*

*eQUEST* 能耗模拟软件是在美国能源部(U.S. Department of Energy)和电力研究院的资助下, 由美同劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)和 *J.J.Hirsch* 及其合作人共同开发。*eQUEST* 与 *Energyplus* 类似, 都是建筑全能耗分析软件, 也可以计算窗户和遮阳设施的节能效果。相较于 *Energyplus* 来说, 功能稍有欠缺, 但 *eQUEST* 的用户使用界面相对友好, 所以应用更加广泛, 是快速能耗模拟软件。

### 1.3 本论文的主要研究内容

综上所述，建筑遮阳是一项非常重要的节能技术，并且对于改善室内环境舒适度也有很重要的作用，因此正确评价遮阳性能的优劣，选择合适的门窗和遮阳设施是十分必要的。评价门窗和遮阳设施的性能最主要的手段就是采用指标量化其性能，例如 *SHGC*，*SC* 等，但是指标评价存在很大的局限性。对于 *SHGC* 的测定，*NFRC* 规定太阳光入射角必须不大于  $5^\circ$ ，但是某些窗玻璃对太阳光的透射及吸收性能会随太阳光入射角的变化有很大的不同，因此仅用 *SHGC* 评价这类玻璃是不准确的。如果用能耗模拟软件，例如 *Energyplus*，其天气参数有逐时的太阳辐射强度和入射角，并且用户可以设定玻璃的光谱特性，能够比较准确的模拟出特性窗户和遮阳设施的节能效果，用节能量来衡量，这就解决了指标评价的不足之处，但是如上所示，能耗模拟的建模过程是很繁琐的，很少有人会愿意仅为了得知某窗户或遮阳设施的性能而投入如此大的劳动力。

基于上述分析，本论文借助 *Energyplus* 的强大计算功能，在其基础之上开发一款专门针对窗户及遮阳设施的，基于动态特性的遮阳节能效果的第三方计算引擎，取名为 *Shading*。所谓基于动态特性，即在真实的暴露条件（太阳光照等）下、在较长时间范围内对遮阳设备的性能进行评估。另外，遮阳与采光的一体化优化设计也是本文的研究内容，即在有采光的前提下选择合适的门窗及遮阳设备达到最节能的效果。

本文的主要研究内容有：

- (1) 研究计算内核—*Energyplus* 的运行原理，分析其输入输出接口，为开发第三方计算引擎—*Shading* 做准备；
- (2) 针对遮阳和采光模拟计算进行用户需求分析，确定 *Shading* 计算引擎能够实现的功能；
- (3) 编写程序，开发 *Shading*；
- (4) 将 *Shading* 计算结果与 *WINDOW* 计算结果比对，进行静态校核；

## 第二章 EnergyPlus 遮阳计算内核简介

### 2.1 遮阳数学计算模型

#### 2.1.1 概述

*Energyplus* 是计算全楼宇各系统所需能耗的计算软件，集合了多个计算程序模块，如图 2.1 所示。其中 *Sky Model Module*（天空模型）、*Shading module*（遮阳模型）、*Window Glass Module*（窗户玻璃模型）是本文涉及到的计算模型。由于实际程序中，上述模型的计算过程十分复杂，由于篇幅限制，下文是对模型主要内容的介绍<sup>[31]</sup>。

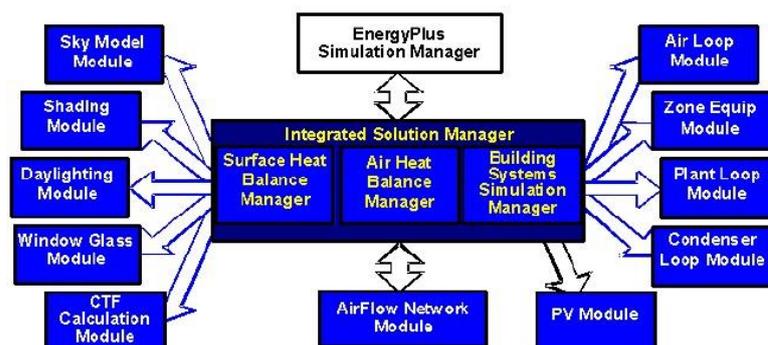


图 2.1 *Energyplus* 程序模块示意图<sup>1</sup>

#### 2.1.2 天空散射辐射模型

*Energyplus* 计算投射到物体外表面的太阳散射辐射需要考虑到的天空辐射分布是各向异性的，计算公式为：

$$AnisoSkyMultiplier_{Surface} \cdot DiffuseSloarIrradiance \quad (2.1)$$

式中  $DiffuseSloarIrradiance$ — 太阳散射辐射；

$Surface$ — 研究表面；

<sup>1</sup> EnergyPlus7.2 Documentation: Getting Started

*AnisoSkyMultiplier*— 由研究表面的朝向、天空辐射分布情况以及遮阳设施决定。

天空辐射模型借鉴了 Perez 的经验模型，该经验模型是基于天空实测数据，天空辐射被拆成以下三个分量：

- (1) 覆盖整个天空的各项同性的辐射分布 (*Isotropic dome*)
- (2) 太阳周边光亮 (*Circumsolar brightening*)
- (3) 水平光亮 (*Horizon brightening*)

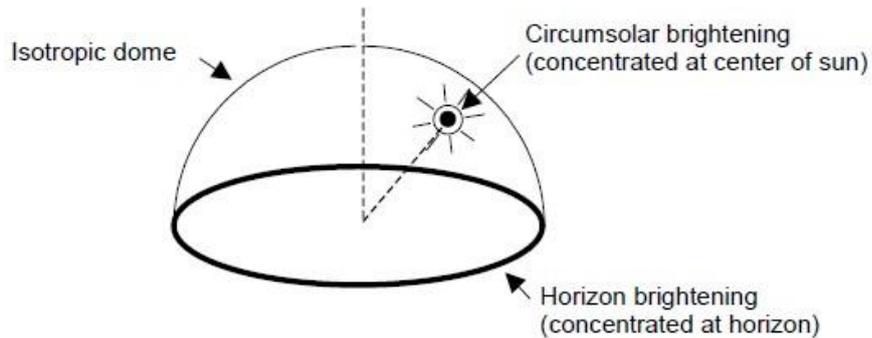


图 2. 2 天空半球模型示意图<sup>2</sup>

以上三个分量与天空情况相关，用两个系数表示：清晰系数 (*clearness factor*) 和明亮系数 (*clearness factor*)。描述太阳周边光亮时，假设其集中于太阳所在的位置。水平光亮被抽象成线光源，并且与方位角无关。

天空散射辐射照射到一个没有遮挡的倾斜表面的辐射量由上述三个分量分别作用并相加：

$$I_{sky} = I_{horizon} + I_{dome} + I_{circumsolar} \quad (2.2)$$

$$I_{horizon} = I_h F_2 \sin S \quad (2.3)$$

$$I_{dome} = I_h (1 - F_1) (1 + \cos S) / 2 \quad (2.4)$$

$$I_{circumsolar} = I_h F_1 a / b \quad (2.5)$$

于是得到：

<sup>2</sup> EnergyPlus7.2 Documentation: Engineering Reference

$$AnisoSkyMult = I_{sky}/DifSolarRad \quad (2.6)$$

式中  $I_h$ — 水平太阳辐射, ( $W/m^2$ );  
 $S$ — 平面倾斜角度 ( $radians$ );  
 $a$ —  $\max(0, \cos\alpha)$ ,  $\alpha$ 为太阳光照射到表面的入射角 ( $radians$ );  
 $b$ —  $\max(0.087, \cos Z)$ ,  $Z$ 为太阳天顶角 ( $radians$ );  
 $F_1$ — 太阳周边光亮系数;  
 $F_2$ — 水平光亮系数;

在遇到遮挡物时, 散射辐射投射到物体表面的计算方法如下, 依然按照上述天空模型, 将总辐射分成三个分量。

将来自水平线方向的辐射按线长平均分成 24 份“水平带”:

$$R_{horizon} = \frac{\text{有遮挡物时来自水平方向辐射}}{\text{无遮挡物时来自水平方向辐射}} = \sum_{i=1}^{24} I_i SF_i \quad (2.7)$$

$$I_i = E(\theta_i) d\theta \cos\alpha_i \quad (2.8)$$

式中  $I_i$ — 第  $i$  个“水平带”来自水平线方向的辐射亮度 ( $W/m^2$ );  
 $SF_i$ — 第  $i$  个“水平带”辐射投射到被遮挡的表面的阴影率 (*sunlit fraction*), 计算方法是假设太阳位于第  $i$  个“水平带”中间位置, 太阳直射光线照射到被遮挡物体表面的阴影比重;  
 $E(\theta_i)$ — “水平带”的辐射照度 ( $W$ ),  $\theta_i = 0^\circ, 15^\circ, \dots, 345^\circ$ ;  
 $d\theta$ — 单位“水平带”所对应的的弧度,  $d\theta = 2\pi/24$ ;  
 $\alpha_i$ — 来自  $\theta_i$  方向光线的入射角 ( $radians$ )。

类似地, 将天空半球面分为 144 个网格, 6 条纬线, 24 条经线, 用  $(i, j)$  表示网格坐标。

$$R_{dome} = \frac{\text{有遮挡物时来自天空半球的辐射}}{\text{无遮挡物时来自天空半球辐射}} = \sum_{i=1}^{24} I_{ij} SF_{ij} \quad (2.9)$$

$$I_{ij} = E(\theta_i, \phi_j) \cos\phi_j d\theta d\phi \cos\alpha_{ij} \quad (2.10)$$

式中  $I_{ij}$  — 来自网格  $(i, j)$  的太阳辐射亮度 ( $W/m^2$ );

$SF_{ij}$ — 来自网格(i,j)的太阳辐射投射到被遮挡的表面的阴影率

(*sunlit fraction*);

$E(\theta_i, \phi_j)$ — 来自网格(i,j)的太阳辐射照度 (W),  $\theta_i = 0^\circ, 15^\circ \dots \dots, 345^\circ$

$\phi_j = 7.5^\circ, 22.5^\circ, \dots \dots, 82.5^\circ$ ;

$\alpha_{ij}$ — 来自 $(\theta_i, \phi_j)$ 方向光线的入射角 (*radians*)。

假设太阳周边光亮集中于太阳所在位置, 那么:

$$R_{circumsolar} = \frac{\text{有遮挡物时来自太阳周边光亮的辐射}}{\text{无遮挡物时来自太阳周边光亮的辐射}} = SF_{sun} \quad (2.11)$$

式中  $F_{sun}$ — 太阳直射光线投射到被遮挡物体表面的阴影率。

因此, 当研究表面被遮挡时, 投射到物体表面的天空散射辐射为:

$$I'_{sky} = R_{horizon}I_{horizon} + R_{dome}I_{dome} + R_{circumsolar}I_{circumsolar} \quad (2.12)$$

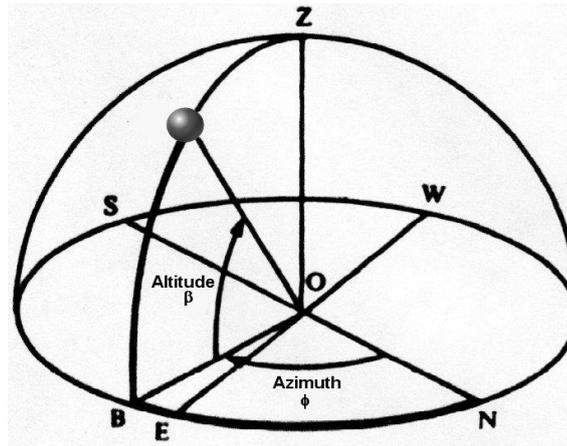
当存在遮挡时

$$AnisoSkyMult = I'_{sky}/DifSolarRad \quad (2.13)$$

### 2.1.3 遮阳模型

这里讨论的遮阳模型是指建筑自身或外界事物对照射到建筑表面的太阳辐射的遮挡, 卷帘或百叶与窗户玻璃之间的传热计算等在下文予以说明。

太阳位置由太阳高度角 $\beta$ 和太阳方位角 $\psi$ 确定, 如图 2.3 所示。

图 2.3 太阳位置示意图<sup>3</sup>

在计算建筑太阳辐射得热时，需要知道建筑的哪些部分暴露在太阳直射之下，哪些部分被其他物体遮挡住了。以图 2.4 为例说明如何计算阴影，表面 1,4,5 为向阳面，表面 2,3 为背阳面，如图所示的阴影面积可以理解为是表面 1,2,3,4,5 同时遮挡形成的，也可以理解为是表面 1,4,5 或表面 2,3 遮挡形成的，显然理解为最后一种最简单。

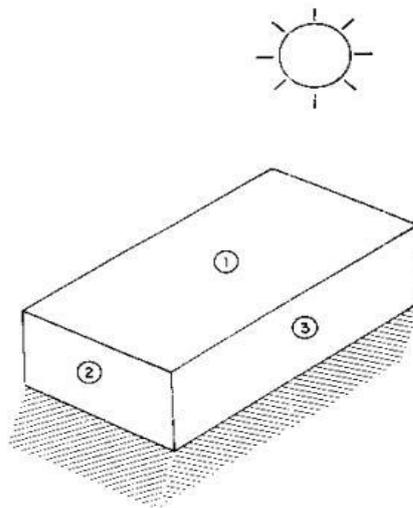
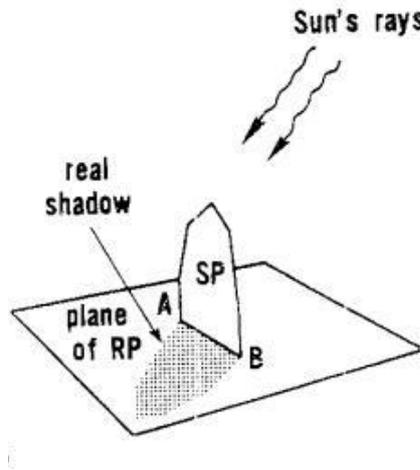


图 2.4 阴影计算示意图

接下来，研究单个表面的阴影计算，将产生阴影的表面称为“投射面”(SP)，接收阴影的表面称为“接收面 (RP)”

<sup>3</sup> EnergyPlus7.2 Documentation: Engineering Reference

图 2.5 单表面阴影计算示例<sup>4</sup>

坐标为  $(x, y, z)$  的  $SP$  上的点投射到  $RP$  上的坐标为  $(x', y', z')$

$$x' = x - \frac{z \cdot a}{\cos\theta} \quad (2.14)$$

$$y' = y - \frac{z \cdot b}{\cos\theta} \quad (2.15)$$

$$a = \sin\psi \cdot CS_1 - \cos\psi \cdot CS_2 \quad (2.16)$$

$$b = -\cos\psi \cdot \cos\phi \cdot CS_1 - \sin\psi \cos\phi \cdot CS_2 + \sin\phi \cdot CS_3 \quad (2.17)$$

式中  $\theta$ — 太阳光到表面的入射角；

$\psi$ — 太阳方位角；

$\phi$ — 投射表面倾角，指  $Z$  轴与该表面垂线的夹角

$CS_1, CS_2, CS_3$ — 投射表面外法线与  $x, y, z$  轴的夹角的余弦值

建筑外表面的太阳得热包括表面对太阳直射辐射和散射辐射的吸收量。

$$Q_{so} = \alpha(I_b \cdot \cos\theta \cdot \frac{S_s}{S} + I_s \cdot F_{ss} + I_g \cdot F_{sg}) \quad (2.18)$$

$$F_{ss} = \frac{1 + \cos\theta}{2} \quad (2.19)$$

<sup>4</sup> EnergyPlus7.2 Documentation: Engineering Reference

$$F_{sg} = \frac{1 - \cos\theta}{2} \quad (2.20)$$

式中

- $\alpha$ — 表面的吸热率;
- $A$ — 太阳光线入射角;
- $S$ — 表面面积;
- $S_s$ — 太阳直射面积;
- $I_b$ — 直射辐射强度;
- $I_s$ — 天空散射辐射强度;
- $I_g$ — 地面反射的散射辐射强度;
- $F_{ss}$ — 表面和天空的角系数;
- $F_{sg}$ — 表面和地面的角系数;
- $\theta$ — 太阳光到表面的入射角。

#### 2.1.4 窗户模型

在这个计算模型中，整个窗户是通过一层一层不同材料叠加形成的，包括：玻璃、中空气体、窗框、隔条以及遮阳设备等等。

##### 2.1.4.1 玻璃

窗户吸收及透过的太阳辐射量取决于该窗户各层材料的穿透率、反射率以及吸收率。被窗户吸收的太阳辐射影响了围护结构内侧温度，从而影响了室内得热量，透过窗户到达室内的太阳辐射被内墙或内窗吸收，也影响了室内热平衡。另外，窗户的可见光穿透率对室内自然采光的影响也是非常大的。

下面讨论由  $N$  层玻璃叠加构成的窗户的性能。在以下数学模型中：

$T_{i,j}$  表示从第  $i$  层玻璃到第  $j$  层玻璃的穿透率；

$R_{i,j}^f$  表示从第  $i$  层玻璃到第  $j$  层玻璃的前反射率；

$R_{i,j}^b$  表示从第  $i$  层玻璃到第  $j$  层玻璃的后反射率；

$A_j$  表示第  $j$  层玻璃的吸收率。

这里第 1 层表示最靠近室外的一层，第  $N$  层表示最靠近室内的一侧。玻璃“前侧”是指靠近室外的一层，“后侧”是指靠近室内的一侧。

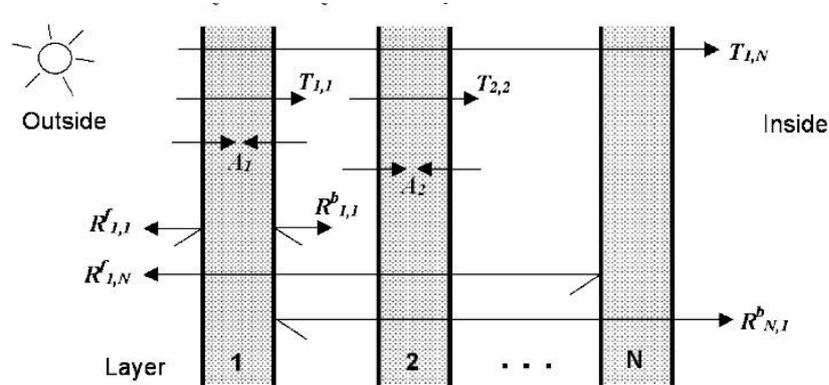


图 2. 6 多层玻璃传热示意图<sup>5</sup>

$$T_{i,j} = \frac{T_{i,j-1}T_{j,j}}{1-R_{j,j}^f R_{j-1,i}^b} \quad (2.21)$$

$$R_{i,j}^f = R_{i,j-1}^f + \frac{T_{i,j-1}^2 R_{j,j}^f}{1-R_{j,j}^f R_{j-1,i}^b} \quad (2.22)$$

$$R_{j,i}^b = R_{j,j}^b + \frac{T_{j,j}^2 R_{j-1,i}^b}{1-R_{j-1,i}^b R_{j,j}^f} \quad (2.23)$$

$$A_j^f = \frac{T_{1,j-1}(1-T_{j,j}-R_{j,j}^f)}{1-R_{j,N}^f R_{j-1,1}^b} + \frac{T_{1,j}R_{j+1,N}^f(1-T_{i,j}-R_{j,j}^b)}{1-R_{j,N}^f R_{j-1,1}^b} \quad (2.24)$$

上述公式中，所有变量都是光谱波长 $\lambda$ 的方程，当用光谱平均时，需要对光谱进行积分平均。

$$P = \frac{\int P(\lambda)E(\lambda)d\lambda}{\int E(\lambda)d\lambda} \quad (2.25)$$

#### 2. 1. 4. 2 遮阳设备

遮阳设备对窗户吸收、透过的长波辐射及短波辐射都有影响，影响效果与遮阳设备的位置（室内、室外、玻璃中间）、穿透率、遮阳材料与玻璃之间的相互反射性相关。下面主要讨论遮阳帘和百叶这两种材料的遮阳效果计算方法，遮阳

<sup>5</sup> EnergyPlus7.2 Documentation: Engineering Reference

帘能够将所有太阳辐射均匀漫反射出去，没有直射辐射透过遮阳帘，因此假设遮阳帘的穿透率 $\tau_{sh}$ 、反射率 $\rho_{sh}$ 、吸收率 $\alpha_{sh}$ 对于其前后侧都是相同的。与遮阳帘不同，百叶的光学特性与光线入射角度有很大的关系，也与百叶的角度有关，部分光线可以直接透过也叶片之间的空隙照射到窗户上。

### 1) 遮阳帘

下面讨论遮阳帘对短波辐射的遮挡作用。照射到窗户上的短波辐射包括以下几种：

- (1) 太阳直射辐射、天空散射辐射、地面散射辐射；
- (2) 被外界物体或建筑本身反射的直射或散射辐射；
- (3) 被室内墙体反射的散射辐射；
- (4) 直接透过外窗照射到室内的太阳辐射；
- (5) 来自照明灯具的散射辐射。

对于外遮阳帘：

$$T_{sys}(\phi) = T_{1,N}^{dif} \frac{\tau_{sh}}{1-R_f^{dif} \rho_{sh}} \quad (2.26)$$

$$T_{sys}^{dif} = T_{1,N}^{dif} \frac{\tau_{sh}}{1-R_f^{dif} \rho_{sh}} \quad (2.27)$$

$$A_{j,f}^{sys}(\phi) = A_{j,f}^{dif} \frac{\tau_{sh}}{1-R_f \rho_{sh}}, \quad j=1 \text{ to } N \quad (2.28)$$

$$A_{j,f}^{dif,sys} = A_{j,f}^{dif} \frac{\tau_{sh}}{1-R_f \rho_{sh}}, \quad j=1 \text{ to } N \quad (2.29)$$

$$A_{j,b}^{dif,sys} = A_{j,f}^{dif} \frac{\tau_{sh}}{1-R_f \rho_{sh}}, \quad j=1 \text{ to } N \quad (2.30)$$

$$\alpha_{sh}^{sys} = \alpha_{sh} \left(1 + \frac{\tau_{sh} R_f}{1-R_f \rho_{sh}}\right) \quad (2.31)$$

对于内遮阳帘：

$$T_{sys}(\phi) = T_{1,N}(\phi) \frac{\tau_{sh}}{1-R_b^{dif} \rho_{sh}} \quad (2.32)$$

$$T_{sys}^{dif} = T_{1,N}^{dif} \frac{\tau_{sh}}{1-R_b^{dif} \rho_{sh}} \quad (2.33)$$

$$A_{j,f}^{sys}(\phi) = A_{j,f}(\phi) + T_{1,N}(\phi) \frac{\rho_{sh}}{1-R_b^{dif} \rho_{sh}} A_{j,b}^{dif}, \quad j=1 \text{ to } N \quad (2.34)$$

$$A_{j,f}^{sys,dif} = A_{j,f}^{dif} + T_{1,N}^{dif}(\phi) \frac{\rho_{sh}}{1-R_b^{dif} \rho_{sh}} A_{j,b}^{dif}, \quad j=1 \text{ to } N \quad (2.35)$$

$$A_{j,f}^{sys,dif} = \frac{\tau_{sh}}{1-R_b^{dif} \rho_{sh}} A_{j,b}^{dif}, \quad j=1 \text{ to } N \quad (2.36)$$

$$\alpha_{sh}^{sys}(\phi) = T_{1,N}(\phi) \frac{\alpha_{sh}}{1-R_b^{dif} \rho_{sh}} \quad (2.37)$$

$$\alpha_{sh}^{dif,sys}(\phi) = T_{1,N}^{dif} \frac{\alpha_{sh}}{1-R_b^{dif} \rho_{sh}} \quad (2.38)$$

上述计算公式中， $T$ ， $\tau$ 表示透过率； $A$ ， $\alpha$ 表示吸收率； $R$ ， $\rho$ 表示反射率； $sys$ 表示带卷帘遮阳的窗户系统； $sh$ 表示卷帘本身； $dif$ 表示散射辐射； $f$ 表示前侧； $b$ 表示后侧； $1$ ， $j$ ， $N$ 表示层数（包括卷帘在内）。

下面讨论带有遮阳帘的窗户对长波辐射的影响，长波辐射包括：

- (1) 来自天空、地面以及外界物体的热辐射；
- (2) 房间其他表面投射到窗户内表面的热辐射；
- (3) 来自室内热源投射到窗户内表面的长波辐射，比如：照明灯具、设备等。

遮阳帘的发射率与玻璃和遮阳帘之间的长波反射特性相关，如下式所示：

$$\varepsilon_{sh}^{lw,sys} = \varepsilon_{sh}^{lw} \left( 1 + \frac{\tau_{sh}^{lw} \rho_{gl}^{lw}}{1 - \rho_{sh}^{lw} \rho_{gl}^{lw}} \right) \quad (2.39)$$

式中  $\rho_{gl}^{lw}$ — 对于外遮阳帘是指最外层玻璃的长波反射率，对于内遮阳帘是指最里层玻璃的长波反射率。这里假设长波吸收率为 0；

$\varepsilon_{sh}^{lw,sys}$ — 卷帘的长波辐射发射率；

$\tau_{sh}^{lw}$ — 卷帘的长波辐射投射率。

当有遮阳帘存在时，玻璃内层（对于内遮阳帘）或玻璃外层（对于外遮阳帘）的表面发射率为：

$$\varepsilon_{gl}^{lw,sys} = \varepsilon_{gl}^{lw} \frac{\tau_{sh}^{lw}}{1 - \rho_{sh}^{lw} \rho_{gl}^{lw}} \quad (2.40)$$

## 2) 百叶

在模型中,百叶被定义为一串等距离的水平或竖直的叶片,并认为所有叶片的光学特性是相同的,而百叶整体的光学特性与叶片的几何形状及光学性能相关,在计算时,做了以下几点假设:

- (1) 叶片是扁平的;
- (2) 叶片和窗玻璃之间的相互反射与光谱无关,即计算时应用的事光谱平均参数;
- (3) 叶片是理想漫反射物体,光线经叶片反射后变成了各向同性的光线,与入射角无关。同样,叶片对于来自各个方向的光线的吸收率也是相同的。如果叶片的穿透率不为零,那么穿透率也是各向同性的,与光线入射角度无关;
- (4) 叶片边缘处与墙体的相互反射不在考虑范围内;
- (5) 忽略叶片表面存在的能允许光线直射的孔洞。

在以下计算过程中,涉及到的百叶的光学性能参数如下表所示:

表 2. 1 百叶光学性能变量

$\tau_{dir,dif}$	直射光线透过叶片变为散射光线的穿透率
$\tau_{dif,dif}$	散射光线透过叶片变为散射光线的穿透率
$\rho_{dir,dif}^f, \rho_{dir,dif}^b$	直射光线分别经叶片前、后反射称为散射光线的反射率
$\rho_{dif,dif}^f, \rho_{dif,dif}^b$	散射光线分别经叶片前、后反射称为散射光线的反射率

假设直射光线经穿透和反射之后全部变为散射光线,所以 $\tau_{dir,dir} = 0$ ,

$\rho_{dir,dir}^f = 0, \rho_{dir,dir}^b = 0$ 。另外,百叶被假定为理想漫反射物体,所以 $\tau_{dir,dif}$ ,

$\rho_{dir,dif}^f, \rho_{dir,dif}^b$ 与光线的入射角度无关。

在计算叶片对太阳直射辐射的作用时,每个叶片被分成 2 个部分,所以图中叶片包围的单位由 6 个部分组成,用  $S_1$ - $S_6$  表示。 $S_1$  和  $S_2$  的长度等于叶片间距  $h$ 。 $S_3$  和  $S_4$  接受光线的直接照射,因此整个单元接受的光线包括经  $S_4$  反射后的光线

以及透过  $S_3$  的光线（如果穿透率不为零）。

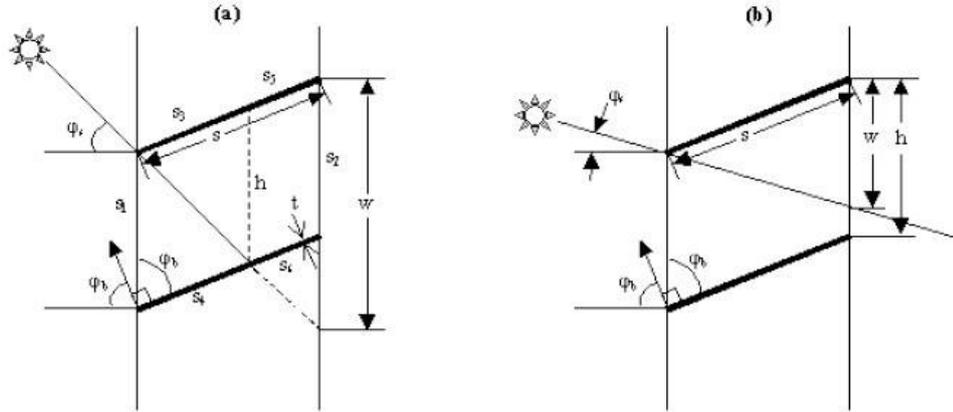


图 2.7 光线直接穿过叶片间隙示意图<sup>6</sup>

如图  $b$  中所示，在某些情况下，光线直接穿过了叶片之间的间隙，没有接触到叶片的任何部分，因此直射光线穿过叶片仍然是直射光线的穿透率为：

$$\tau_{bl,f}^{dir,dir} = 1 - \frac{|w|}{h}, \quad |w| \leq h \quad (2.41)$$

$$w = s \frac{\cos(\varphi_b - \varphi_s)}{\cos \varphi_s} \quad (2.42)$$

在计算直射光线经投射变为散射光线时，采用辐射法，用到以下几个变量：

$J_i$ — 来自第  $i$  个表面的投射到叶片单元内的辐射量；

$G_i$ — 投射到第  $i$  个表面的辐射量；

$Q_i$ — 来自第  $i$  个表面的总辐射量。

$$J_1 = Q_1 \quad (2.43)$$

$$J_2 = Q_2 \quad (2.44)$$

$$J_3 = Q_3 + \rho_{dif,dif}^b G_3 + \tau_{dif,dif} G_4 \quad (2.45)$$

$$J_4 = Q_4 + \tau_{dif,dif} G_3 + \rho_{dif,dif}^f G_4 \quad (2.46)$$

<sup>6</sup> EnergyPlus7.2 Documentation: Engineering Reference

$$J_5 = Q_5 + \rho_{dif,dif}^b G_5 + \tau_{dif,dif} G_6 \quad (2.47)$$

$$J_6 = Q_6 + \tau_{dif,dif} G_5 + \rho_{dif,dif}^f G_6 \quad (2.48)$$

另外

$$G_i = \sum_{j=1}^6 J_i F_{i,j}, \quad i = 1,6 \quad (2.49)$$

式中  $F_{i,j}$  为表面  $S_i$  和  $S_j$  之间的角系数。

根据  $J_1 = Q_1 = 0$ ,  $J_2 = Q_2 = 0$ , 得到以下公式:

$$J_3 - \rho_{dif,dif}^b \sum_{j=3}^6 J_i F_{j,3} - \tau_{dif,dif} \sum_{j=3}^6 J_j F_{j,4} = Q_3 \quad (2.50)$$

$$J_4 - \tau_{dif,dif} \sum_{j=3}^6 J_i F_{j,3} - \rho_{dif,dif}^f \sum_{j=3}^6 J_j F_{j,4} = Q_4 \quad (2.51)$$

$$J_5 - \rho_{dif,dif}^b \sum_{j=3}^6 J_i F_{j,5} - \tau_{dif,dif} \sum_{j=3}^6 J_j F_{j,6} = Q_5 \quad (2.52)$$

$$J_6 - \tau_{dif,dif} \sum_{j=3}^6 J_i F_{j,3} - \rho_{dif,dif}^f \sum_{j=3}^6 J_j F_{j,6} = Q_6 \quad (2.53)$$

直射光线穿透叶片后变成散射光线的穿透率计算如下:

$$Q_1 = Q_2 = Q_5 = Q_6 = 0 \quad (2.54)$$

$$J_1 = J_2 = 0 \quad (2.55)$$

$$\left. \begin{array}{l} Q_3 = \tau_{dir,dif} \\ Q_4 = \rho_{dir,dif}^f \end{array} \right\} \varphi_b \leq \varphi_s + \pi/2 \quad (2.56)$$

$$\left. \begin{array}{l} Q_3 = \rho_{dir,dif}^f \\ Q_4 = \tau_{dir,dif} \end{array} \right\} \varphi_b > \varphi_s + \pi/2 \quad (2.57)$$

对于照射到该叶片单元的光线, 直射-散射穿透率和反射率分别为:

$$\tau_{bl,f}^{dir,dif} = G_2 \quad (2.58)$$

$$\rho_{bl,f}^{dir,dif} = G_1 \quad (2.59)$$

式中：

$$G_2 = \sum_{j=3}^6 J_i F_{j2} \quad (2.60)$$

$$G_1 = \sum_{j=3}^6 J_i F_{j1} \quad (2.61)$$

百叶前侧吸收率为：

$$\alpha_{bl,f}^{dir} = 1 - \tau_{bl,f}^{dir,dif} - \tau_{bl,f}^{dir,dir} - \rho_{bl,f}^{dir,dif} \quad (2.62)$$

百叶对于太阳辐射和可见光的直射-散射计算是根据各自不同的性能分开进行的。由于光线随光线入射角的不同而呈现出不同的特性，因此在计算中入射角计算范围是从 $-90^\circ$  到  $90^\circ$ ，每隔  $5^\circ$  计算一次。模型中百叶角度的控制方式有 3 种：（1）百叶始终与太阳光线垂直；（2）叶片角度可调；（3）叶片角度固定。在计算时叶片的角度范围为 $-90^\circ$  到  $90^\circ$ ，每隔  $10^\circ$  计算一次，其他角度则用插值法求得。

在计算叶片对散射辐射的作用（仅有散射-散射作用）时，同样将取两块叶片进行研究，将每块叶片分为 2 个部分，这样取定的研究单元由 6 小部分组成。

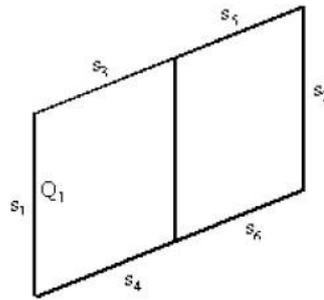


图 2. 8 百叶对散射辐射作用计算示意图<sup>7</sup>

对于叶片的前侧特性，有  $Q_1 = 1$ ，其他  $Q_i = 0$ ，运用如上方法，可以得到：

$$\tau_{bl,f}^{dif,dif} = G_2 \quad (2.63)$$

<sup>7</sup> EnergyPlus7.2 Documentation: Engineering Reference

$$\rho_{bl,f}^{dif,dif} = G_1 \quad (2.64)$$

$$\alpha_{bl,f}^{dif} = 1 - \tau_{bl,f}^{dif,dif} - \rho_{bl,f}^{dif,dif} \quad (2.65)$$

同样地，在计算叶片后侧特性时，取 $Q_1 = 1$ ，其他 $Q_i = 0$

下面讨论百叶对于天空和地面散射辐射的影响。对于安装在垂直窗户上的水平百叶，散射辐射来自天空抑或来自地面的区别是很大的，如下图所示，将天空和地面简化成单位光源。

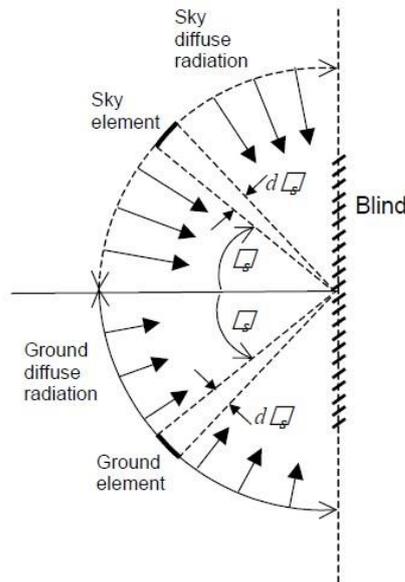


图 2. 9 天空及地面散射-散射辐射计算示意图<sup>8</sup>

首先说明几个参数的含义：

$\tau_{bl,f}^{gnd-dif,dif}$  — 叶片前侧对于地面散射辐射的穿透率；

$\tau_{bl,f}^{sky-dif,dif}$  — 叶片前侧对于天空散射辐射的穿透率；

$\rho_{bl,f}^{gnd-dif,dif}$  — 叶片前侧对于地面散射辐射的反射率；

$\rho_{bl,f}^{sky-dif,dif}$  — 叶片前侧对于天空散射辐射的反射率；

$\alpha_{bl,f}^{gnd-dif,dif}$  — 叶片前侧对于地面散射辐射的吸收率；

<sup>8</sup> EnergyPlus7.2 Documentation: Engineering Reference

$\alpha_{bl,f}^{sky-dif,dif}$  — 叶片前侧对于天空散射辐射的吸收率。

假设来自地面或天空光源的入射角为 $\phi_s$ 。

对于天空辐射：

$$\tau_{bl,f}^{sky-dif,dif} = \frac{\int_0^{\pi/2} [\tau_{bl,f}^{dir,dir}(\phi_s) + \tau_{bl,f}^{dir,dif}(\phi_s)] I_{sky}(\phi_s) \cos\phi_s d\phi_s}{\int_0^{\pi/2} I_{sky}(\phi_s) \cos\phi_s d\phi_s} \quad (2.66)$$

$$\rho_{bl,f}^{sky-dif,dif} = \frac{\int_0^{\pi/2} \rho_{bl,f}^{dir,dif} I_{sky}(\phi_s) \cos\phi_s d\phi_s}{\int_0^{\pi/2} I_{sky}(\phi_s) \cos\phi_s d\phi_s} \quad (2.67)$$

$$\alpha_{bl,f}^{sky-dif,dif} = \frac{\int_0^{\pi/2} \alpha_{bl,f}^{dir} I_{sky}(\phi_s) \cos\phi_s d\phi_s}{\int_0^{\pi/2} I_{sky}(\phi_s) \cos\phi_s d\phi_s} \quad (2.68)$$

如果假设天空辐射是各向同性的，即 $I_{sky}$ 与入射角 $\phi_s$ 无关，可以得到：

$$\tau_{bl,f}^{sky-dif,dif} = \int_0^{\pi/2} [\tau_{bl,f}^{dir,dir} + \tau_{bl,f}^{dir,dif}] \cos\phi_s d\phi_s \quad (2.69)$$

$$\rho_{bl,f}^{sky-dif,dif} = \int_0^{\pi/2} \rho_{bl,f}^{dir,dif} \cos\phi_s d\phi_s \quad (2.70)$$

$$\alpha_{bl,f}^{sky-dif,dif} = \int_0^{\pi/2} \alpha_{bl,f}^{dir} \cos\phi_s d\phi_s \quad (2.71)$$

计算地面辐射时，只需将上述公式中 $\phi_s$ 得范围变为 $-\pi/2$ 到 $0$ 。

当窗户安装百叶遮阳后，及构成了百叶-窗系统，位于与百叶和窗户单体区分，百叶-窗系统用“sys”下标表示，百叶用“bl”表示，窗户用“gl”表示。

对内置百叶遮阳：

$$T_{f,sys}^{dir,all}(\phi, \phi_s) = T_{gl}^{dir}(\phi) (\tau_{bl,f}^{dir,dir}(\phi_s) + \tau_{bl,f}^{dir,dif}(\phi_s) + \frac{\tau_{bl,f}^{dif} \rho_{bl,f}^{dir,dif}(\phi_s) R_{gl,b}^{dif}}{1 - \rho_{bl,f}^{dif} R_{gl,b}^{dif}}) \quad (2.72)$$

$$A_{gl,j,f}^{dir,sys}(\phi, \phi_s) = A_{gl,j,f}^{dir}(\phi) + \frac{T_{gl}^{dif}(\phi) \alpha_{gl,j,b}^{dif}(\phi_s) \rho_{bl,f}^{dir}(\phi_s)}{1 - \rho_{bl,f}^{dif} R_{gl,b}^{dif}} \quad (2.73)$$

$$\alpha_{bl,f}^{dir,sys}(\phi, \phi_s) = T_{gl}^{dir}(\phi) (\alpha_{bl,f}^{dir}(\phi_s) + \frac{\rho_{bl,f}^{dir}(\phi_s) R_{gl,b}^{dif} \alpha_{bl,f}^{dif}}{1 - \rho_{bl,f}^{dif} R_{gl,b}^{dif}}) \quad (2.74)$$

$$T_{f,sys}^{dif,dif} = \frac{T_{gl}^{dif} \tau_{bl,f}^{dif,dif}}{1 - \rho_{bl,f}^{dif} R_{gl,b}^{dif}} \quad (2.75)$$

$$T_{f,sys}^{sky-dif,dif} = \frac{T_{gl}^{dif} \tau_{bl,f}^{sky-dif,dif}}{1 - \rho_{bl,f}^{sky-dif} R_{gl,b}^{dif}} \quad (2.76)$$

$$T_{f,sys}^{gnd-dif,dif} = \frac{T_{gl}^{dif} \tau_{bl,f}^{gnd-dif,dif}}{1 - \rho_{bl,f}^{gnd-dif} R_{gl,b}^{dif}} \quad (2.77)$$

$$A_{gl,j,f}^{dir,sys} = A_{gl,j,f}^{dif} + \frac{T_{gl}^{dif} \rho_{bl,f}^{dif} A_{gl,j,b}^{dif}}{1 - \rho_{bl,f}^{dif} R_{gl,b}^{dif}}, \quad j = 1, N \quad (2.78)$$

$$A_{gl,j,f}^{sky-dif,sys} = A_{gl,j,f}^{dif} + \frac{T_{gl}^{dif} \rho_{bl,f}^{sky-dif} A_{gl,j,b}^{dif}}{1 - \rho_{bl,f}^{sky-dif} R_{gl,b}^{dif}}, \quad j = 1, N \quad (2.79)$$

$$A_{gl,j,f}^{gnd-dif,sys} = A_{gl,j,f}^{dif} + \frac{T_{gl}^{dif} \rho_{bl,f}^{gnd-dif} A_{gl,j,b}^{dif}}{1 - \rho_{bl,f}^{gnd-dif} R_{gl,b}^{dif}}, \quad j = 1, N \quad (2.80)$$

$$\alpha_{bl,f}^{dif,sys} = \frac{T_{gl}^{dif} \alpha_{bl,f}^{dif}}{1 - \rho_{bl,f}^{dif} R_{gl,b}^{dif}} \quad (2.81)$$

$$\alpha_{bl,f}^{sky-dif,sys} = \frac{T_{gl}^{dif} \alpha_{bl,f}^{sky-dif}}{1 - \rho_{bl,f}^{sky-dif} R_{gl,b}^{dif}} \quad (2.82)$$

$$\alpha_{bl,f}^{gnd-dif,sys} = \frac{T_{gl}^{dif} \alpha_{bl,f}^{gnd-dif}}{1 - \rho_{bl,f}^{gnd-dif} R_{gl,b}^{dif}} \quad (2.83)$$

对外置百叶遮阳:

$$T_{f,sys}^{dir,all}(\phi, \phi_s) = \tau_{bl,f}^{dir,dir}(\phi_s) \left( T_{bl,f}^{dir}(\phi) + \frac{T_{gl}^{dif} \rho_{gl,f}^{dir} R_{gl,f}^{dif}}{1 - \rho_{bl,b}^{dif} R_{gl,f}^{dif}} \right) + \frac{\tau_{bl}^{dir,dif}(\phi_s) T_{gl}^{dif}}{1 - R_{gl,f}^{dif} \rho_{bl,b}^{dif}} \quad (2.84)$$

$$A_{gl,j,f}^{dir,sys}(\phi, \phi_s) = \tau_{bl,f}^{dir,dir}(\phi_s) A_{gl,j,f}^{dir}(\phi) + \frac{(\tau_{bl,f}^{dir,dir}(\phi_s) R_{gl}^{dir}(\phi) \rho_{bl,b}^{dir}(\phi_s) + \tau_{bl,f}^{dir,dif}(\phi_s) A_{gl,j,f}^{dif})}{1 - R_{gl,f}^{dif} \rho_{bl,b}^{dif}} \quad (2.85)$$

$$\alpha_{bl,f}^{dir,sys}(\phi, \phi_s) = \alpha_{bl,f}^{dir}(\phi_s) + \alpha_{bl,b}^{dir}(\phi_s) R_{gl,f}^{dif}(\phi) \tau_{bl,f}^{dir,dir}(\phi_s) + \frac{\alpha_{bl,b}^{dif} R_{gl,f}^{dif}}{1 - R_{gl,f}^{dif} \rho_{bl,b}^{dif}} (R_{gl,f}^{dir}(\phi) \tau_{bl,f}^{dir,dir}(\phi_s) \rho_{bl,b}^{dir}(\phi_s) + \tau_{bl,f}^{dir,dif}(\phi_s)) \quad (2.86)$$

$$T_{f,sys}^{dif,dif} = \frac{T_{gl}^{dif} \tau_{bl,f}^{dif,dif}}{1 - \rho_{bl,f}^{dif} R_{gl,b}^{dif}} \quad (2.87)$$

$$T_{f,sys}^{sky-dif,dif} = \frac{T_{gl}^{dif} \tau_{bl,f}^{sky-dif,dif}}{1 - \rho_{bl,f}^{dif} R_{gl,b}^{dif}} \quad (2.88)$$

$$T_{f,sys}^{gnd-dif,dif} = \frac{\tau_{bl,f}^{dif} \tau_{bl,f}^{gnd-dif,dif}}{1 - \rho_{bl,f}^{dif} R_{gl,b}^{dif}} \quad (2.89)$$

$$A_{gl,j,f}^{dif,sys} = \frac{\tau_{bl,f}^{dif,dif} A_{gl,j,f}^{dif}}{1 - \rho_{bl,f}^{dif} R_{gl,b}^{dif}}, \quad j = 1, N \quad (2.90)$$

$$A_{gl,j,f}^{sky-dif,sys} = \frac{\tau_{bl,f}^{sky-dif,dif} A_{gl,j,f}^{dif}}{1 - \rho_{bl,f}^{dif} R_{gl,b}^{dif}}, \quad j = 1, N \quad (2.91)$$

$$A_{gl,j,f}^{gnd-dif,sys} = \frac{\tau_{bl,f}^{gnd-dif,dif} A_{gl,j,f}^{dif}}{1 - \rho_{bl,f}^{dif} R_{gl,b}^{dif}}, \quad j = 1, N \quad (2.92)$$

$$\alpha_{bl,f}^{dif,sys} = \alpha_{bl,f}^{dif} + \frac{\tau_{gl}^{dif,dif} R_{gl,f}^{dif}}{1 - \rho_{bl,b}^{dif} R_{gl,b}^{dif}} \alpha_{bl,b}^{dif} \quad (2.93)$$

$$\alpha_{bl,f}^{sky-dif,sys} = \alpha_{bl,f}^{sky-dif} + \frac{\tau_{gl}^{sky-dif,dif} R_{gl,f}^{dif}}{1 - \rho_{bl,b}^{dif} R_{gl,b}^{dif}} \alpha_{bl,b}^{dif} \quad (2.94)$$

$$\alpha_{bl,f}^{gnd-dif,sys} = \alpha_{bl,f}^{gnd-dif} + \frac{\tau_{gl}^{gnd-dif,dif} R_{gl,f}^{dif}}{1 - \rho_{bl,b}^{dif} R_{gl,b}^{dif}} \alpha_{bl,b}^{dif} \quad (2.95)$$

该模型计算被百叶和窗户吸收长波辐射量，百叶的有效发射率（即长波吸收率）由下面公式计算得到：

$$\varepsilon_{bl}^{lw,eff} = \varepsilon_{bl}^{lw} \left( 1 + \frac{\tau_{bl}^{lw} \rho_{gl}^{lw}}{1 - \rho_{bl,b}^{lw} \rho_{gl}^{lw}} \right) \quad (2.96)$$

式中，对外置百叶， $\rho_{gl}^{lw}$ 表示最外层玻璃表面长波反射率；对内置百叶表示最里层玻璃表面长波发射率。

最里层玻璃（对于内置百叶）或最外层玻璃（对于外置玻璃）表面有效发射率为：

$$\varepsilon_{gl}^{lw,eff} = \varepsilon_{gl}^{lw} \frac{\tau_{bl}^{lw}}{1 - \rho_{bl,b}^{lw} \rho_{gl}^{lw}} \quad (2.97)$$

对于百叶-窗系统的内侧有效发射率为：

$$\varepsilon_{ins}^{lw,eff} = \varepsilon_{bl}^{lw,eff} + \varepsilon_{gl}^{lw,eff} \quad (2.98)$$

用来计算窗户对室内平均辐射温度贡献的窗户有效温度为：

$$T^{eff} = \frac{\varepsilon_{bl}^{lw,eff} T_{bl} + \varepsilon_{gl}^{lw,eff} T_{gl}}{\varepsilon_{bl}^{lw,eff} + \varepsilon_{gl}^{lw,eff}} \quad (2.99)$$

## 2.2 EnergyPlus 遮阳模拟简介

*EnergyPlus* 是针对建筑全楼宇进行能耗分析的工具，因此在使用 *EnergyPlus* 计算遮阳设备的节能效果时，遮阳设备必须依附建筑，用建筑负荷或室内舒适度来衡量遮阳设备的性能，下面以活动遮阳为例简单介绍 *EnergyPlus* 在进行遮阳模拟时的参数设置及使用方法。

如图 2.10 所示为遮阳模拟的参数设置，可以将其分为如下几大类：模拟设置、地理位置、时间表设置、材料设置、围护结构设置、遮阳设置、室内设备设置及输出设置。“模拟设置”是针对软件算法、计算步长、允许残差等内容的定义；“地理位置”定义了建筑所在的经度、纬度、海拔等信息；“时间表”是活动遮阳及建筑设备的控制说明；“材料设置”定义了建筑墙体材料、窗户材料、遮阳材料等的物理特性；“围护结构设置”则是在三维坐标系中将建筑的每个平面用坐标的形式定义从而勾勒出建筑的外形；“遮阳设置”中定义了遮阳类型、控制方式等信息；“室内设备”主要包括照明和空调系统，由于在本课题中，需要用建筑的冷负荷变化来衡量遮阳性能，因此这里的空调系统不是实际存在的系统，而是 *EnergyPlus* 中专门用来计算建筑负荷的一套理想系统：

“*IdealLoadAirSystem*”。最后，还需要对输出变量进行定义，选择输出变量和输出频率。

上述内容仅是对用 *EnergyPlus* 进行遮阳模拟计算的简单说明，在每一大类的参数中，还需要进行更详细的设置，如图 2.11 所示为活动遮阳的参数编辑界面。首先选择遮阳类型和遮阳安放位置，遮阳类型包括百叶、卷帘等；遮阳位置包括内遮阳、外遮阳和中置遮阳。如果采用中置遮阳，还需要描述整个中置遮阳窗的构造。*EnergyPlus* 提供了多种遮阳控制模式，常用的包括常开、常关、时间表控制、室内温度控制、室内眩光控制、室外辐射强度控制等，其中眩光控制是与照明自动控制联动的，即照明系统必须采用光感自动控制，否则该遮阳控制策略将失效。



图 2. 10 EnergyPlus 遮阳模拟参数设置

Field	Units	Obj1
Name		southwindowblindcontrol
Shading Type		betweenglassblind
Construction with Shading Name		southwindowshadingcons
Shading Control Type		OnIfScheduleAllows
Schedule Name		blindcontrol
Setpoint	W/m2, W or deg	0
Shading Control Is Scheduled		Yes
Glare Control Is Active		
Shading Device Material Name		
Type of Slat Angle Control for Blinds		FixedSlatAngle
Slat Angle Schedule Name		
Setpoint 2	W/m2 or deg C	

图 2. 11 遮阳类型及控制设置

## 2.3 计算内核的接口分析

由于本文以 *EnergyPlus* 作为计算内核，在进行工具的设计开发前，应该对

*EnergyPlus* 输入输出接口进行研究，并熟悉软件的运行过程，为二次开发做好准备。

*EnergyPlus* 主程序通过调入输入数据文件(*IDF*)和气象文件 (*EPW*)，根据输入数据定义文件(*input data dictionary*)对相关的输入数据进行转换，*EnergyPlus* 主程序每一个模块中相关的子程序(*GetInput*)去读取与模块对应的数据，然后主程序执行相应的运算过程。最后 *EnergyPlus* 根据用户的要求生成相应的输出文件，并且可以转化为电子数据表格或其他形式以供制表或者总结之用<sup>[31]</sup>。图 2.12 是计算流程的简图。

输入数据文件 (*IDF*) 是特定格式的文本文档，这是 *Energyplus* 与第三方程序结合的桥梁。第三方程序生成 *IDF* 文件，再启动 *Energyplus.exe* 来读取数据并模拟运行，得出计算结果。由 *Energyplus.exe* 计算出来的数据存储在文本文档中，为了方便阅读，还需要调用其他 *Energyplus* 的后处理程序将数据转存到 *csv* (逗号分隔值) 文件中，可用 *Excel* 打开阅读。

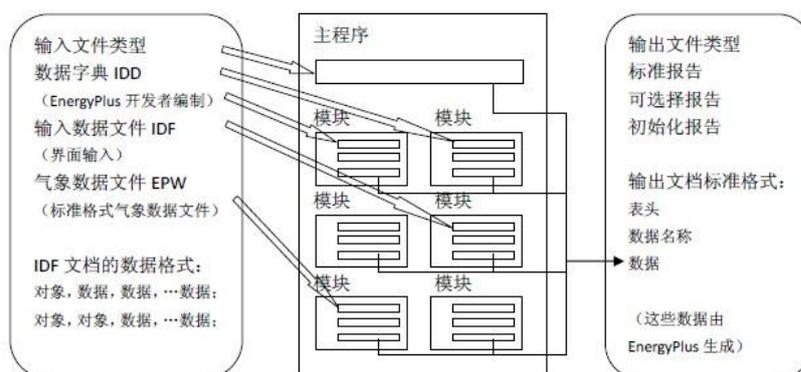


图 2.12 EnergyPlus 计算流程图

*Energyplus* 能够完成多种遮阳模式的模拟计算，是目前流行模拟软件中的佼佼者。*Energyplus* 之所以很灵活，可以实现众多模拟功能，是因为它并将独立计算模块尽可能细化，给用户创造更多的自由搭配空间，而其他模拟软件则不同，为了简化参数的输入过程，很多模块都已固化，只保留了常用的几项功能。正因为如此，*Energyplus* 对于初学者来说是很难操作的，很多人都觉得无从下手，并且目前除了其自带的英文使用手册，也没有其他更实用的使用教程，这在一定程度上阻碍了其得到广泛应用，因此目前已有很多人在尝试在 *Energyplus* 的基础上

开发第三方程序，充分利用 *Energyplus* 强大的计算内核。*VisualEPlus* 是同济大学、山东大学、中国建科院以及美国能源部联合开发的，基于 *EnergyPlus* 的中英文用户界面工具<sup>[32]</sup>。*jEPlus* 是英国德蒙福特大学的 *Yi Zhang* 基于 *EnergyPlus* 开发的参数分析软件<sup>[33]</sup>。

## 第三章 *Shading* 的算法设计

### 3.1 开发语言与开发环境

本程序采用相对成熟稳定且简单的 *Visual Basic* 来编写。

*Shading* 是计算引擎，没有界面，其输入参数存储以 *XML* 格式存储。*XML* 是可扩展的标记语言 (*Extensible Markup Language*)，所谓可扩展，是指允许用户按照 *XML* 规则自定义标记。*XML* 是以文本文档形式来描述的一种文件格式，因此具有跨平台功能。*XML* 的跨平台特性还在于它提供了一种不同数据源之间进行数据交换的公共标准，是一种公共的交互平台<sup>[34]</sup>。正因为 *XML* 具有上述特性，本文选择它来暂时存数输入参数，方便后期编写软件界面。

### 3.2 程序设计思路

本文的研究目的就是借助 *Energyplus* 的计算内核完成对目前常用遮阳模式及采光的模拟计算，开发一款专门计算各类遮阳设施的节能性能及指标的计算引擎— *Shading*，输入及输出变量全部为中文，目标用户包括建筑设计师和暖通工程师设计。

#### 3.2.1 用户需求分析

用户需求分析是指在系统设计之前和设计开发过程中对用户要求所作的调查与分析，是系统设计、系统完善和系统维护的依据。简而言之，用户需求分析就是明确该程序能够完成哪些功能。

本课题开发的程序主要是用来计算遮阳设备的节能效果，在查阅了相关文献和咨询专

和咨询专业人士后，总结了在用户需求分析阶段需要解决的关键问题，如

表 3.1

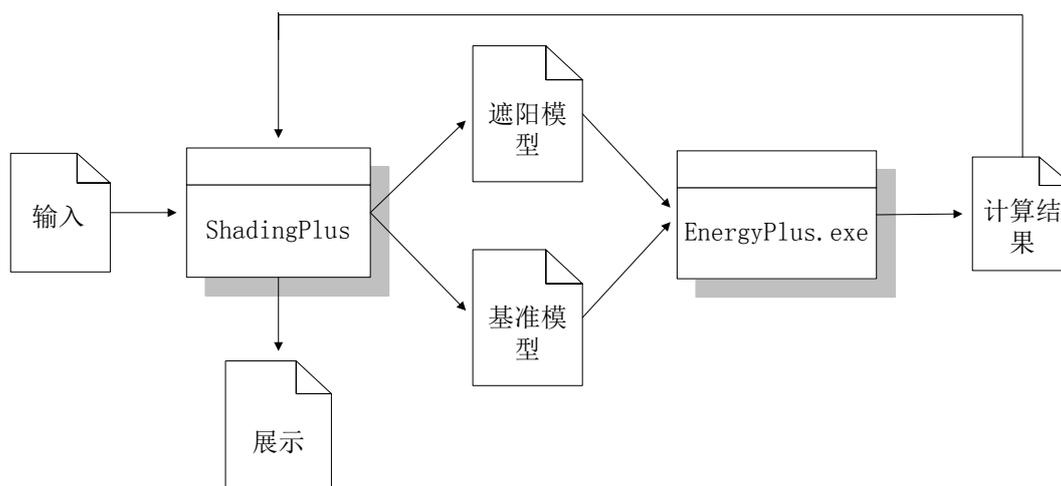
表 3. 1 用户需求分析概要

序号	问题	解决方案
1	适用情况	1、评价不同遮阳设备的节能效果；2、初步设计阶段选用合适遮阳设备
2	遮阳性能评价方法	1、遮阳模型和基准模型相比的动态节能量，节能量用空调负荷及空调耗电量来体现；2、性能指标，SHGC、SC
3	遮阳种类	1、固定遮阳：水平遮阳、竖直遮阳、综合遮阳、挡板遮阳、水平翻板遮阳、竖直翻板遮阳；2、活动遮阳：百叶遮阳、卷帘遮阳、平推式曲臂遮阳篷、摆转式曲臂遮阳篷、折叠式曲臂遮阳篷、斜伸式曲臂遮阳篷
4	影响遮阳的因素	1、遮阳所在地区、房间概况；2、窗户特点、玻璃材料；3、遮阳形式、材料及控制方式；4、照明强度及控制方式

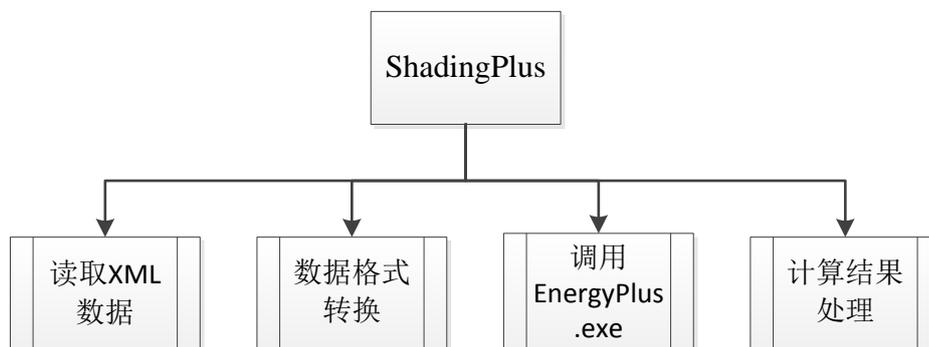
### 3. 2. 2 算法结构

首先 *Shading* 读取 XML 文档中存数的数据，经过计算及格式转换，生成 IDF 文件，然后调用 *Energyplus.exe* 进行模拟计算，并得到计算结果，最后 *Shading* 对 *Energyplus* 计算结果数据进行简化处理，得到用户易于理解的数据并报告。

*Shading* 具备的功能主要是计算遮阳设备的动态性能和静态指标，分别是通过节能量和遮阳系数来反应的。对于节能量的计算，需要有比较基准，将遮阳模型和基准模型进行对比得到节能量。因此可以看到图 3. 1 中有两个 IDF 文件，一个对应的是遮阳模型，另一个则对应基准模型，这两个模型建立完成后，分别进行模拟计算，最后 *Shading* 读取计算出的结果数据，进行处理后再输出。

图 3.1 *Shading* 设计思路

根据上述分析，将 *Shading* 的算法分为四大模块，如图 3.2 所示，其中“数据格式转换”模块是最重要，也是最复杂的，下面将选取该模块中的主要程序的算法做详细介绍。

图 3.2 *Shading* 内部算法模块

### 3.2.3 “计算节能量”算法简介

#### 3.2.3.1 建筑模型

在 *Shading* 中，建筑模型的确定有两种方式：（1）自定义建筑模型；（2）典型建筑模型。所谓自定义建筑模型，顾名思义，即用户自行定义建筑的几何尺寸及内部系统使用情况。典型建筑模型是对实际建筑的简化模型，但是能反映同一类建筑的普遍特性，在这里用建筑中人员、照明、设备以及空调系统的使用情况

来反映。不同类型建筑的内部负荷不同，其对遮阳的选择及运行策略存在比较大的影响。例如一般办公楼建筑，通常是夏季制冷、冬季供热，因此夏季需要使用遮阳装置来削减太阳辐射，冬季应尽可能增加太阳辐射来降低供热能耗；但是对于商场建筑，由于其内部热负荷很大，在冬季部分时间仍需制冷，因此其遮阳策略需要进行调整。

### (1) 自定义建筑模型

在 *EnergyPlus* 中，通过定义每个围护结构平面的坐标确定整个建筑的几何形状，这是一项很繁琐的工作，大多数用户会选择使用第三方软件(如 *DesignBuilder*, *SketchUp* 等)直接画出几何模型。对于遮阳计算，建筑外形对遮阳节能效果的影响很小，因此在本课题中使用简单的单房间建筑，用户只需简单地输入长、宽、高，即可确定房间的几何外形。

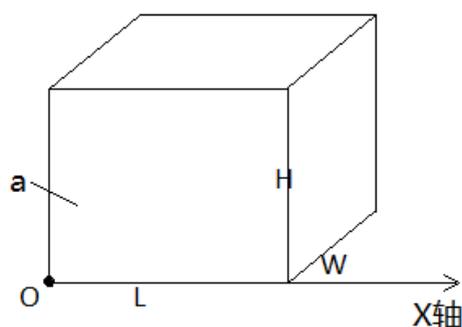


图 3.3 几何模型建立示意图

如图 3.3 所示建筑，以 O 点为原点，其坐标为 (0,0,0)。则对于 a 平面，其四个顶点的坐标为 (0,0,0) (L,0,0) (L,0,H) (0,0,H)，从而可以在坐标系中确定了平面 a 的位置，同理可以确定其他墙面的位置。

在每个朝向都可以设置一扇窗户（包括天窗），同样根据窗户的宽和高即可确定其坐标。

### (2) 典型建筑模型

典型建筑模型代表了该类建筑的一般特性，对于研究新技术、进行建筑优化设计、制定建筑规范都有很重要的作用。

目前，*Shading* 可以模拟办公楼、商场、旅馆、住宅这四类建筑类型。对于每一类典型建筑模型，本计算引擎已经内置了各个类型建筑的空调系统，不需要

用户自行输入。例如办公楼，根据一般办公楼的使用时间，设置了一天內空调的开启时间；根据各地区的相关标准设置了空调温度；并且按照各地气候特征分别设置了制冷和采暖的切换时间；另外，同样对人员、照明和设备的情况进行了相应的设置，能够反映出不同建筑类型的使用特征和空调负荷特征。表 3.2 和图 3.4 列出了上述四种建筑的空调、人员、照明密度和设备密度设置。

表 3.2 模型设置参数

	空调温度设置 ( $^{\circ}\text{C}$ )	空调开启 时间	人员 ( $\text{m}^2/\text{人}$ )	照明 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	设备 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
办公楼	24/20	8:00-18:00	5	8	13
商场	24/20	9:00-22:00	3	15	9
酒店	24/20	全天	15	10	9
住宅	26/18	18:00-次日 8:00	20	7	12



图 3.4 供冷采暖季的划分

### 3.2.3.2 遮阳模型

*Shading* 目前支持六类固定遮阳和六类活动遮阳，其中固定遮阳和四类活动遮阳是在 *EnergyPlus* 中的 *Shading:Building:Detailed* 模块基础上开发的。与围护结构的设置方式类似，*EnergyPlus* 中设置固定遮阳也是通过三维坐标确定的，如图 3.4 所示，可以“*Transmittance Schedule Name*”这一项来设置遮阳构件的太阳辐射穿透率的变化情况。下面分别以水平遮阳和平推式活动遮阳篷为例说明遮阳模型的建立。

Field	Units	Obj1
Name		
Transmittance Schedule Name		
Number of Vertices		autocalculate
Vertex 1 X-coordinate	m	
Vertex 1 Y-coordinate	m	
Vertex 1 Z-coordinate	m	
Vertex 2 X-coordinate	m	
Vertex 2 Y-coordinate	m	
Vertex 2 Z-coordinate	m	
Vertex 3 X-coordinate	m	
Vertex 3 Y-coordinate	m	
Vertex 3 Z-coordinate	m	
Vertex 4 X-coordinate	m	
Vertex 4 Y-coordinate	m	
Vertex 4 Z-coordinate	m	

图 3.5 *EnergyPlus* 遮阳设置

## (1) 水平遮阳

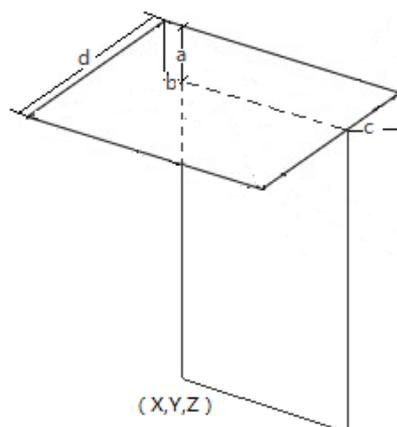


图 3.6 水平遮阳示意图

如图 3.5 所示为水平遮阳的示意图，需要用户输入的参数为：遮阳板到窗台上沿的垂直距离  $a$ ，遮阳板左边缘到窗户左边缘的距离  $b$ ，窗户右边缘到遮阳板右边缘的距离  $c$ ，遮阳板的长度  $d$ 。此时窗户的四个顶点坐标已知，假设左下角点的坐标为  $(X,Y,Z)$ ，则通过简单的几何计算，就可以得到遮阳板的坐标。

在这里，遮阳板是不透光的，因此穿透率 (*Transmittance*) 始终为 0。

## (2) 平推式曲臂遮阳篷

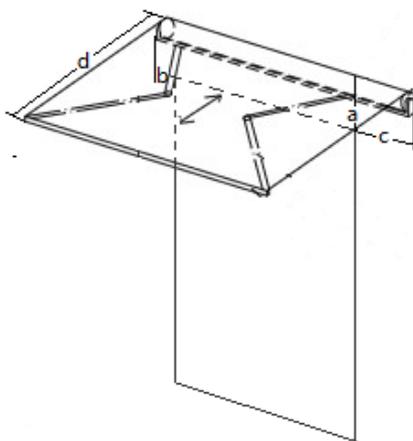


图 3.7 平推式曲臂遮阳篷示意图

如图 3.6 所示为平推式曲臂遮阳篷的示意图，其运动轨迹为曲臂推动连杆使引布杆发生平推运动，从而实现伸展和收回的曲臂遮阳篷。需要用户输入的参数为：遮阳板到窗户上沿的垂直距离  $a$ ，遮阳板左边缘到窗户左边缘的距离  $b$ ，窗户右边缘到遮阳板右边缘的距离  $c$ ，遮阳板的长度  $d$ ，遮阳篷与垂直墙面的角度以及遮阳篷的展开率时间表（即在某个时间段其帘布的展开比例）。结合以上参数和窗户坐标，可以很容易的得到遮阳篷在全部撑开时的模型。但是遮阳篷是活动的，可以随使用者的意愿随意展开篷布，如何根据用户设置的使用时间表来模拟出遮阳篷展开或（部分）收起状态，是重点需要解决的问题。

对于上述问题，本课题采用类似于“有限差分法”的解决方法。将遮阳篷分成 10 个面积相等的子帘布，如图 3.7 所示，分别建立 10 个子帘布的几何模型。根据用户在时间表中设置的展开率，改变相应帘布的穿透率，可以近似实现帘布的动态效果。假设在某个时间段内，帘布的展开率 50%，即在帘布 1-5 的位置阳光是可以完全透过的，因此在模型中将这 5 块帘布的穿透率设为 1，其他帘布的穿透率保持设定值。其算法如图 3.8 所示，其中  $r$  表示展开率（用户输入， $0 < r < 1$ ）， $\tau$  表示帘布穿透率（用户输入）， $s$  表示时间表中不同  $r$  的个数。需要注意的是，图中所示为单一时间段内判断逻辑，实际模型中，用户会设置多个时间段，因此该判断需要执行多次。

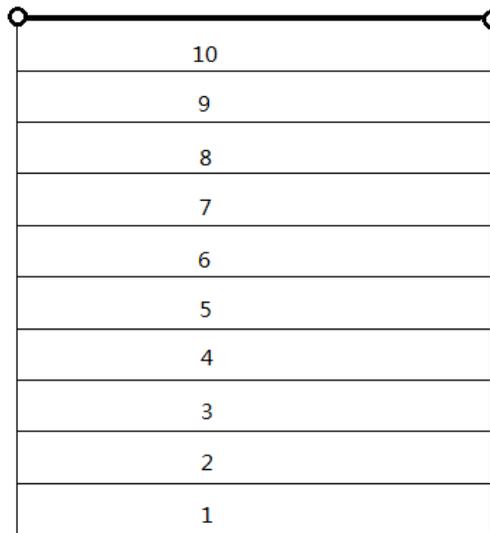


图 3. 8 平推式曲臂遮阳篷模型简化

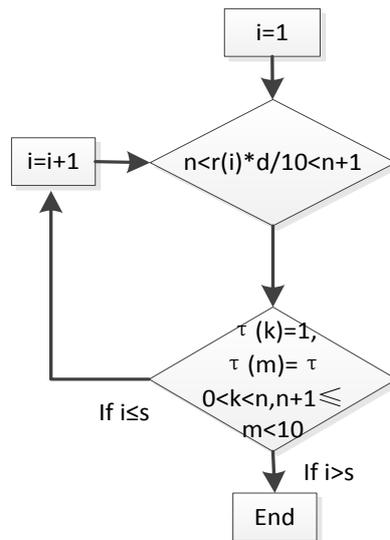


图 3. 9 平推式曲臂遮阳篷模型算法逻辑

### (3) 摆转式曲臂遮阳篷

如图 3.9 所示为摆转式曲臂遮阳篷的简化图，其运动轨迹为曲臂摆转推动引布杆运动，从而实现伸展和收回的遮阳篷，这里假设曲臂的一端固定在遮阳篷全部伸展时帘布的中间位置。用户需要输入的参数包括遮阳篷底部到窗户上部的距离  $a$ ，遮阳篷左端到窗户左端的距离  $b$ ，帘布长度  $c$ （全部伸展时），以及在不同

时刻帘布垂直墙面的夹角。

根据曲臂遮阳篷的运动轨迹特征，将其模型简化如图 3.10 所示，图中所示为侧视图。帘布从全部展开到收回的过程中，其与墙壁的夹角从  $0^\circ$  变为  $90^\circ$ ，图中 1-10 代表了帘布运动轨迹的几个典型位置，帘布处于相邻两个位置时夹角相同。根据用户在时间表中设置的夹角值，改变相应帘布的穿透率，可以近似实现帘布的动态运动。假设某时刻用户设定帘布的倾角为  $45^\circ$ ，那么帘布 5 的穿透率为设定值，其他帘布的穿透率均为 1。

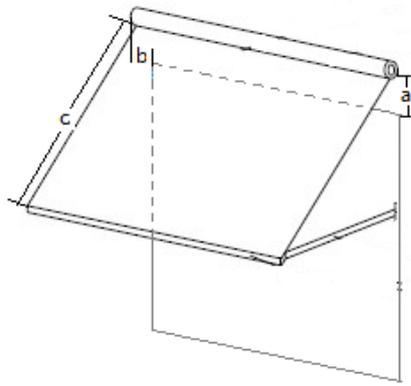


图 3.10 摆转式曲臂遮阳篷示意图

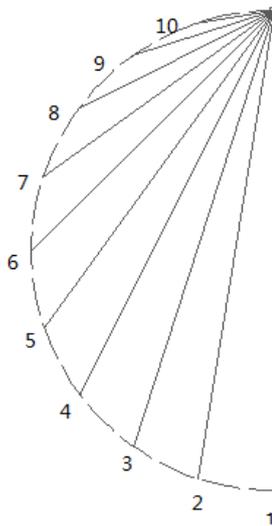


图 3.11 摆转式曲臂遮阳篷模型简化

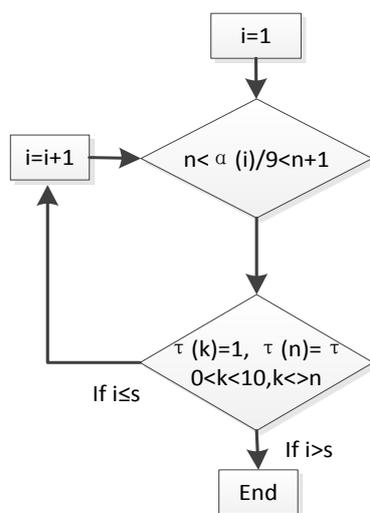


图 3. 12 摆转式曲臂遮阳篷模型算法逻辑

#### (4) 斜伸式曲臂遮阳篷

如图 3. 12 所示为斜伸式曲臂遮阳篷的示意图，其运动轨迹相较于其他几种遮阳篷比较复杂，曲臂可沿直线方向运动，并可摆转推动引布杆运动，从而实现伸展和收回的遮阳篷。其中导向杆可上下移动，曲臂既可以上下移动又可转动。用户需要输入遮阳篷根部到窗户上部的距离  $a$ ，窗户端到帘布左端的距离  $b$ ，引布杆到窗户的水平距离  $c$ ，引布杆到遮阳篷根部的垂直距离  $d$  来确定某一时刻该遮阳篷的位置。

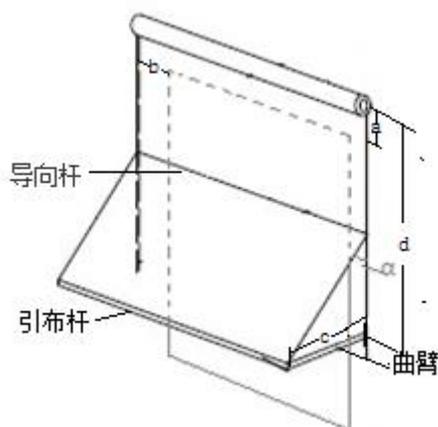


图 3. 13 斜伸式曲臂遮阳篷示意图

### (5) 折叠式曲臂遮阳篷

如图 3.13 (a) 所示为曲臂遮阳篷示意图, 为简化建模过程, 将遮阳篷简化为图 (b) 所示。这里假设折叠式曲臂遮阳篷的运动状态为全部展开或全部收回。

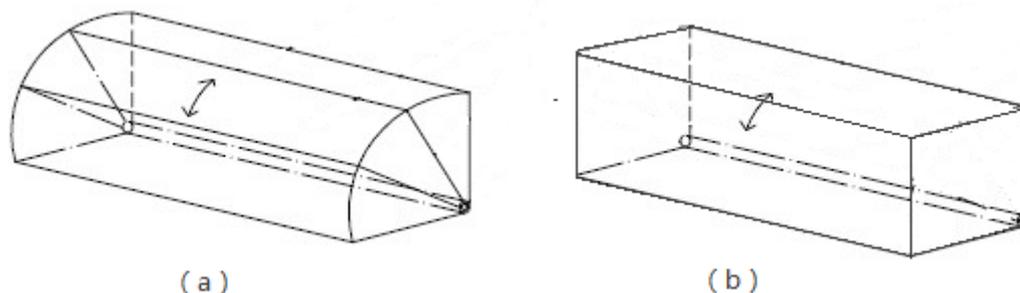


图 3.14 折叠式曲臂遮阳篷示意图

#### 3.2.3.3 节能量计算

对于遮阳设备的节能效果, 最直观的反应是其对削减空调系统能耗的作用大小, 因此 *EnergyPlus* 中的 *IdealLoadAirSystem* 模块被用来建筑负荷并折算成耗电量, 以此作为衡量指标。*IdealLoadAirSystem* 是专门用来计算建筑负荷的, 不考虑冷机、风机、水泵等的损耗。制冷能耗和供热能耗是根据负荷和 *COP* 估算出来的, 制冷季 *COP* 取 3.0, 采暖季 *COP* 取 2.8, 总能耗即为一年内照明能耗、制冷能耗和供热能耗之和。

在 *Shading* 中, 可以输出遮阳建筑模型和基准建筑模型的全年逐时、逐日、逐月的空调负荷、窗户得热量, 分析遮阳设施对建筑的动态影响; 也可以得到遮阳模型相对于基准模型的全年能耗降低率, 直观地比较遮阳设备的优劣。

#### 3.2.4 “计算遮阳系数” 算法简介

虽然用遮阳系数来衡量遮阳设备性能存在一定的不合理性, 但是就目前为止, 遮阳系数仍被工程师广泛使用, 因此除了计算节能量外, 计算遮阳系数是本软件的另一大功能。

遮阳系数是由太阳辐射得热系数经过简单计算得到的。太阳辐射得热系数是指通过门窗进入室内的太阳辐射得热量与太阳直射辐射的比值。太阳辐射得热量包括直接透过门窗的太阳辐射量以及被门窗吸收后通过辐射、导热、对流等方式

进入室内的热量，计算公式如下<sup>[28]</sup>：

$$SHGC(\theta) = T^f(\theta) + \sum_{k=1}^L N_k \alpha_k^f(\theta) \quad (3.1)$$

式中， $T^f(\theta)$ —太阳辐射入射角为 $\theta$ 时玻璃前侧的透射率；

$L$ —玻璃层数；

$\alpha_k^f$ —第  $k$  层玻璃的前侧吸收率；

$N_k$ —第  $k$  层玻璃吸收热向室内侧放热比例。

*Energyplus* 和 *WINDOW* 都是基于上述方法计算 *SHGC*。*Energyplus* 本身只能计算窗户模型（不包括遮阳设备）的太阳辐射得热系数（*SHGC*），并且不具备计算遮阳系数（*SC*）的模块；而 *WINDOW* 可以计算带贴附式遮阳设备（例如卷帘、百叶等）的多层玻璃窗，当窗户装有类似水平遮阳、竖直遮阳、遮阳篷的遮阳设备时，*WINDOW* 无法计算其综合遮阳系数。

下面摘录了 *EnergyPlus* 的计算 *SHGC* 的部分代码，可以看出其计算方法与常规实测方法完全不同。

```

Rbare = 1.0D0/scon(1)           ' 计算玻璃的导热热阻
Rtot = rOut + Rbare + rIn      ' 计算总热阻
SHGC = AbsBeamNorm(1) * (rOut + (0.5/scon(1)))/Rtot ' 太阳辐射被玻璃吸收并进入
                                                                    室内的部分
SHGC = SHGC + AbsBeamShadeNorm ' 遮阳构件吸收的太阳辐射
SHGC = SHGC + TSolNorm        ' 直接穿透玻璃到达室内的太阳辐射

```

*ISO15099*中给出了计算*SHGC*的另一种方法<sup>[35]</sup>：

$$\tau_s = \frac{q_{int} - q_{int}(I_s=0)}{I_s} \quad (3.2)$$

式中， $\tau_s$ —太阳辐射总透射比，表示由于太阳照射在门窗构件上而成为室内得热的部分；

$I_s$ —太阳直射辐射量；

$q_{int}$ —在特定太阳直射辐射条件下通过门窗系统进入室内的热流密度；

$q_{int}(I_s = 0)$ —在无太阳直射辐射条件下通过门窗系统进入室内的热流密度；

很显然,  $\tau_s$  与 *SHGC* 具有相同的含义, 只是表述方式略有差异, 而且  $\tau_s$  的计算方法立足于太阳辐射得热系数的原始定义, 更容易操作, 可以通过模拟或实验的方式进行。另外, *WINDOW* 无法计算的水平遮阳、竖直遮阳及各类遮阳篷的综合遮阳系数均可通过本算法解决。

*NFRC 201-2010[E0A1] (Procedure for Interim Standard Test Method for Measuring the Solar Heat Gain Coefficient of Fenestration Systems Using Calorimetry Hot Box Methods)* 是美国门窗热效评级委员会编写的关于测试太阳辐射得热系数 (*SHGC*) 的指导手册, 测试对象包括玻璃门窗及其遮阳系统。手册中规定的实验工况如表 3.3<sup>[36]</sup>, 并且给出了多种测量 *SHGC* 的方法, 其中最常用的是热箱法, 实验设备如图 3.15 所示<sup>[37]</sup>。热计量箱近似绝热, 但是在投入实验之前还是需要对其进行标定, 在原本安装窗的地方安装一块标定板, 可以在一定条件下同时测量壁面温差和热量, 得到箱壁热流与温差的函数关系式。热计量箱置于一个可活动的实验房间内, 进行标定时房间关闭, 为标定提供恒定的环境, 实测时推开房间, 使热计量箱暴露在室外环境中, 测量窗的太阳辐射得热量。

为了给热计量箱提供相对稳定的环境, 同时计量窗的太阳辐射得热量, 必须在箱体内设置一套空调系统。空调耗冷量减去热计量箱壁面吸收的热量和通过长湖的温差传热量就等于窗的太阳辐射得热。为了减少或消除透过窗试件进入热计量箱的太阳辐射对箱壁内表面温度测量的影响, 箱体内部装有吸收板。

测量 *SHGC* 的光源可以是自然光源或人工光源, 并且光线入射角必须保持在  $5^\circ$  以内, 因此采用自然光源进行实验室, 实验箱体需要设计成跟踪式, 及时根据太阳角度调整箱体朝向。

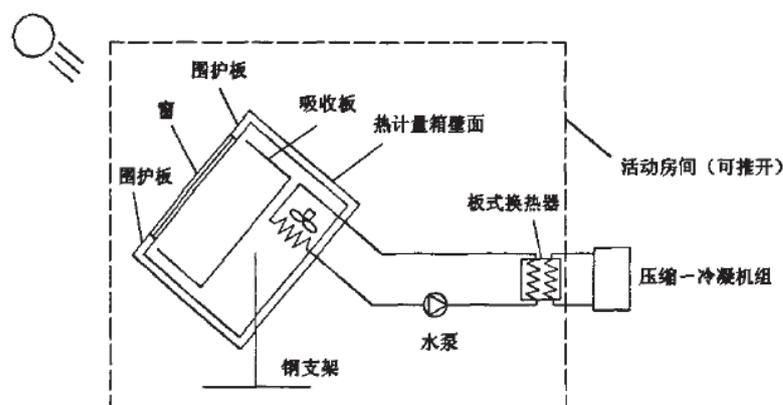


图 3.15 热计量箱设备示意图

表 3. 3 NFRC 规定工况

变量	变量值
外界温度	32℃
室内温度	24℃
风度	2.75m/s
风向	迎风
太阳光入射角	小于 5°
太阳直射辐射	783W/m <sup>2</sup>
天空温度	32℃
天空发射率	1.00

由于 *EnergyPlus* 可以建立各种建筑模型，其围护结构性能可以随意改变，甚至模拟各种极端情况，比如绝热。另外，用户可以修改其天气参数。根据上述特点，笔者猜想可以通过用 *EnergyPlus* 模拟 NFRC 规定的实验工况来计算各类门窗系统的遮阳系数，而不用通过实际测量。

根据 NFRC 规定工况，本程序对 *Energyplus* 做了如下设置和改动来模拟计算 SHGC，建筑模型如图 3.16 所示，窗户设在顶部，窗墙比接近 100%。具体模型设置及天气文件改动见表 3.4，其中前三项设置是为了使太阳辐射入射角保持在 5° 以内。房间温度采用 *EnergyPlus* 特有的理想空调系统 (*IdealAirLoadSystem*) 控制在 24℃。最后模型输出的变量为 9 月 23 日 12:00-13:00 的投射到窗户系统外表面的太阳直射辐射量和窗户得热量。

*EnergyPlus* 无法直接输出“太阳辐射得热”变量，但是可以得到“窗户得热量”。根据公式(3.3)，分别计算有/无太阳直射辐射情况下的窗户得热量，两者相减即为太阳辐射得热量。

通过上述模拟设置，可以得到：

$$SHGC = \frac{\text{窗户得热量(有直射辐射)} - \text{窗户得热量(无直射辐射)}}{\text{太阳直射辐射量}} \quad (3.3)$$

$$SC = \frac{SHGC}{0.87} \quad (3.4)$$

表 3. 4 计算 SHGC 模拟设置

序号	内容
1	建筑所在地的纬度为 0
2	窗户为天窗
3	模拟时间段为 9 月 23 日（秋分）12: 00 至 13: 00
4	外界温度 32℃（在天气文件中修改）
5	房间温度 24℃
6	太阳直射辐射 783W/m <sup>2</sup> 、0W/m <sup>2</sup> （在天气文件中修改）
7	风速 2.75m/s（在天气文件中修改）
8	房间壁面绝热

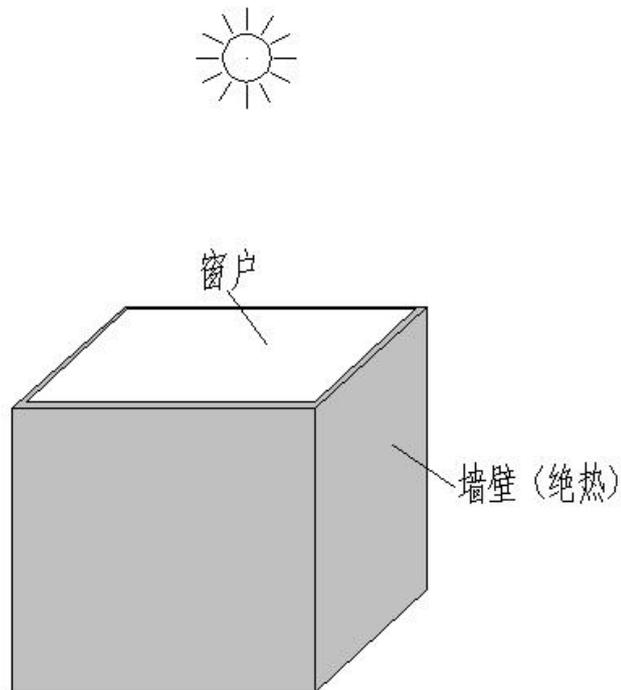


图 3. 16 “计算遮阳系数”模型示意图

### 3.3 *Shading* 用法简介

*Shading* 是一款专门计算各类遮阳节能效果的计算引擎。如上文所述，评价遮阳性能主要有两种手段，分别是利用指标 (*SHGC*, *SC* 等) 和建筑能耗来评价。*Shading* 的主要功能分两部分，分别是计算节能量和计算遮阳系数。

#### 3.3.1 计算节能量

该模块是本计算引擎的主要部分，能够计算位于指定气候区，指定遮阳系统全年的节能量，输出频率可自定义，方便分析遮阳设备在全年范围内的动态节能特性。建筑类型对遮阳的设计也是有比较大的影响的，因此本计算引擎针对遮阳设备所在建筑的外形设定特别设置了两个选项：

- (1) 自定义，用户自行设定遮阳设备所在房间的长、宽、高，窗户的尺寸等内容（也可选择默认值），这比较适用于评价单个遮阳设备的性能；
- (2) 选择内置在计算引擎中的典型建筑模型，目前已有的建筑类型包括办公、商场、住宅、旅馆。所谓典型建筑模型，是指该模型能够基本反映出该类建筑的实际使用情况以及能耗特征的建筑模型。这一功能适用于评价不同建筑类型适用的遮阳系统，是本计算引擎的特点。

同一种遮阳设施用在不同的建筑中会达到截然不同的效果，最显而易见的例子就是住宅建筑和商场建筑。一般来说，住宅夏季制冷，冬季采暖，而遮阳会降低冬季进入室内的太阳辐射，从而增加供热能耗，遮阳起负面作用；但是商场建筑不同，由于其人员和照明等产生的内热很大，因此在冬季也需要制冷，这时遮阳起正面作用，因此遮阳设施的效果决不能一概而论。

本计算引擎的输入参数分类

表 3.5 所示。

表 3.5 输入参数分类

分类	详细
建筑概况	建筑所在城市、房间尺寸等
窗户及遮阳材料	材料特征参数，如太阳辐射透射比、导热率、厚度等
遮阳控制	开始时刻、结束时刻及该时间段内的变量控制值
空调控制	开始时刻、结束时刻及该时间段内的变量控制值
窗户	窗户大小、构造等
遮阳	遮阳种类、控制策略、定位参数等
照明	照明密度、自然采光设定值、眩光指数等
输出	基准模型、输出频率等

### 3.3.1.1 模拟设置



图 3.17 “模拟设置”参数编辑界面

点开“模拟设置”左侧的倒三角将其展开，可以得到图 3.17 所示的编辑界面，可以选择是否进行采光计算，以及模型类型的选择，采用自定义建筑或典型模型建筑。

### 3.3.1.2 建筑概况



图 3.18 “建筑概况”参数编辑界面

点开“建筑概况”左侧的倒三角将其展开，得到图 3.18 所示的编辑界面。这一类主要是对遮阳装置所在的房间、空调使用情况、遮阳控制进行设定，并且需要对后面需要用到的玻璃和遮阳材料（仅包括百叶和卷帘）进行参数设定，后续过程只需调用其名称即可。

因目前该计算引擎支持计算北京、上海、广州这三个地区。为了契合 *Energyplus* 的输入规则，这里引入了“相对偏角”这一概念来表示建筑的朝向。“相对偏角”是指建筑北向和实际北向的相对夹角（顺时针为正），而“建筑北向”是方便在坐标系中定义建筑位置而设定的概念。下面通过一个例子来说明这一规则。

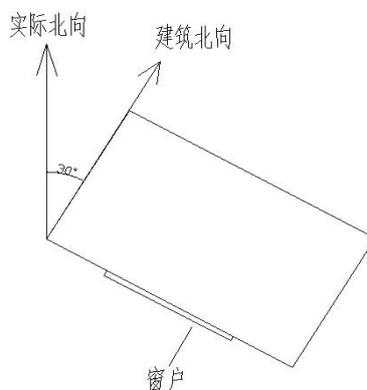


图 3.19 “相对偏角”说明示意图

图 3.19 所示的建筑，窗户的朝向为南偏西 30°，在本计算引擎中，假设建筑北向即为实际北向，那么窗户位于南向，只需要将“相对偏角”设定为 30° 即可，因此在后续设定过程中，窗户的朝向只允许填写南向、东向、西向、北向和天窗这 5 类，再结合“相对偏角”的设定来反应实际的窗户朝向。

若用户需要进行自然采光的计算，用户还需要房间的尺寸和反射率等计算的必要条件。

玻璃材料、百叶材料和卷帘材料的输入参数较多，用户可以自行填写，如果缺乏这类数据，本软件提供了多种常用材料的数据，用户只要进行复制粘贴即可。

对于多层玻璃窗户的夹层气体材料，只需填写气体名称和厚度，可选填的气体包括空气 (*Air*)、氩气 (*Argon*)、氪气 (*Krypton*)、氙气 (*Xenon*) 这四类。

接下来的参数是关于时间表的设置，所谓“时间表”即认为设定在一年中某段时间及一天中某段时间内被控对象处于什么状态。这里主要有三类控制时间表。

- (1) 空调控制相关时间表，用来设置空调的启闭状态以及制冷或供热的设定温度；
- (2) 照明控制时间表，用来设定照明的启闭状态；
- (3) 遮阳设备控制时间表，用来控制各类遮阳设备在不同时间段所处的状态。

“空调使用时间表”、“制冷时段房间温度设定表”、“供热时段房间温度设定表”这三项是针对房间空调使用情况所做的设置。

### 3.3.1.3 窗户设置

窗户参数设置的编辑界面如图 3.20 所示，“朝向”可以选择南向 (*south*)、东向 (*east*)、西向 (*west*)、北向 (*north*) 或天窗 (*sky*)。

窗户设置	
▲ 朝向	
○ 朝向	
○ 窗户名称	
▲ 窗户尺寸	
○ 宽	
○ 高	
○ 下边缘到楼板距离	
▼ 窗户性能	

图 3.20 窗户参数设置示意图

窗户性能的参数编辑界面图 3.21 所示，这里用户有三种选择方案：

1. 窗户的性能满足所在地区的公共建筑节能设计要求，主要是指窗户的平均传热系数；
2. 窗户采用 3mm 标准平板玻璃；
3. 自定义，这里窗户的构件思想是将前面已经设置好的玻璃、夹层气体（若存在）从外到内依次选填在“各层材料”这项中，若窗户需要考虑窗框及隔条的影响，也可以设置窗框和隔条。



图 3.21 窗户性能参数设置示意图

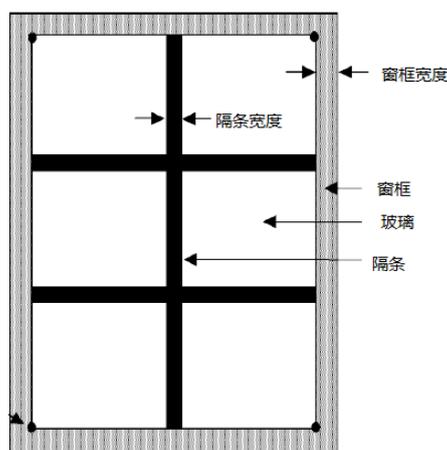


图 3.22 窗框隔条示意图

### 3.3.1.4 遮阳设置

如图 3.23 所示，本计算引擎共支持 6 类固定遮阳、6 类活动遮阳。



图 3.23 遮阳设置示意图



图 3.24 水平遮阳板参数设置

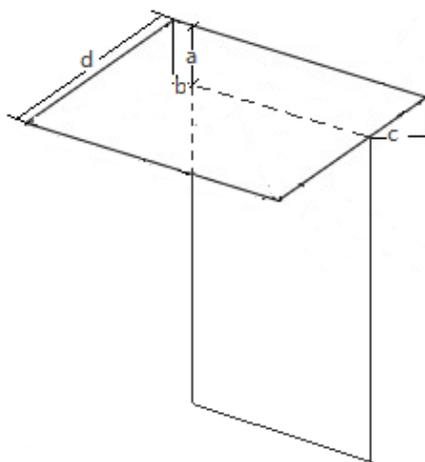


图 3.25 水平遮阳板示意图



图 3. 26 垂直遮阳板参数设置

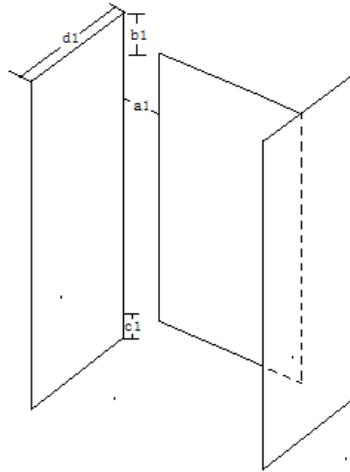


图 3. 27 垂直遮阳板示意图



图 3. 28 综合遮阳板设参数设置

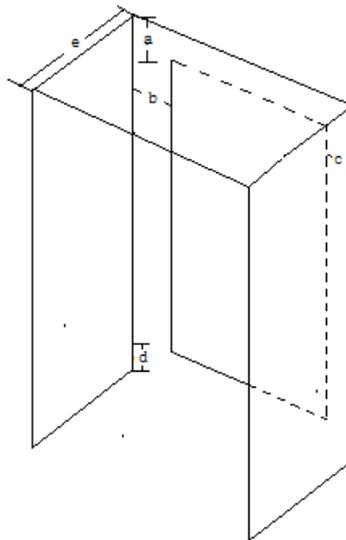


图 3. 29 综合遮阳板示意图



图 3. 30 挡板遮阳参数设置

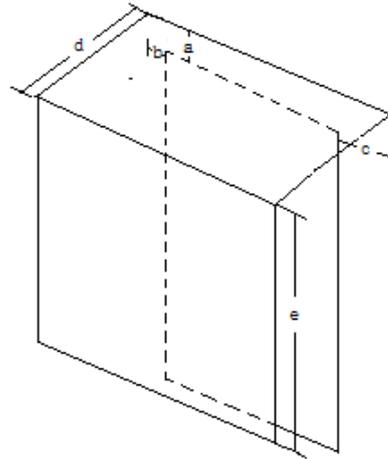


图 3. 31 挡板遮阳示意图



图 3. 32 翻板外遮阳设置示意图

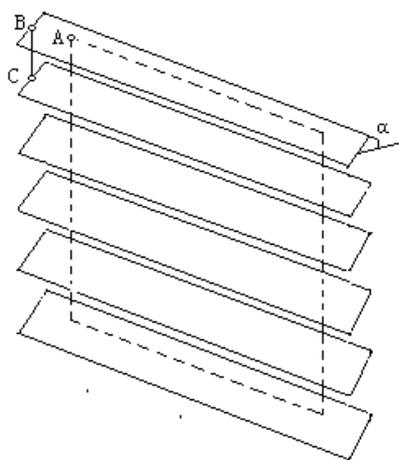


图 3. 33 水平翻板外遮阳示意图

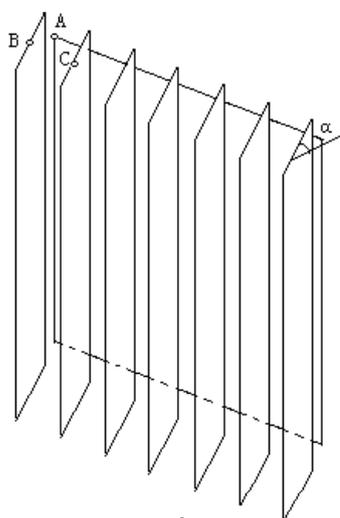


图 3. 34 垂直翻板外遮阳示意图

在本计算引擎中，包括 6 类活动遮阳，分别是百叶遮阳、卷帘遮阳、平推式曲臂遮阳篷、摆转式曲臂遮阳篷、斜伸式曲臂遮阳篷、折叠式曲臂遮阳篷。

百叶遮阳的设置参数编辑界面如图 3. 35 所示。“安装位置”可以选择外百叶 (*exteriorblind*)、中置百叶 (*betweenglassblind*) 和内百叶 (*interiorblind*)， “叶片材料”前面已经设定完成，此处只需选填相应叶片材料的名称。

叶片的控制方式有三种，叶片角度固定，叶片始终垂直于太阳直射光线，或叶片的角度通过时间表控制。百叶遮阳系统的运行状态控制有三种，通过时间表控制；当室内温度超过临界温度时开启遮阳系统，否则关闭；当室内眩光指数高于设定值时开启遮阳系统，否则关闭(该选项只能当采光控制开启时才能使用)。

百叶遮阳	
安装位置	
叶片材料	
叶片角度控制方式	
选择控制方式	
叶片角度控制时间表名称	
控制方式	
选择控制方式	
百叶启闭控制时间表名称	
临界温度值	
临界眩光指数	

图 3.35 百叶遮阳参数设置

卷帘遮阳的控制设置于百叶遮阳类似，同样有三种控制方式。

卷帘遮阳	
安装位置	
卷帘材料	
控制方式	
选择控制方式	
卷帘启闭控制时间表名称	
临界温度值	
临界眩光指数	

图 3.36 卷帘遮阳参数设置

四类活动遮阳篷的设置如图 3.37 所示，首先需要设定其几何参数，各参数含义请对照。然后选填对应的控制时间表，最后需要设定帘布的阳光透射比。

平推式曲臂遮阳篷	
几何设置	
遮阳篷根部距窗上边缘的距离 a	
遮阳篷左边缘距窗左边缘的距离 b	
遮阳篷右边缘距窗右边缘的距离 c	
遮阳篷长度 d	
倾角 $\alpha$	
平推式曲臂遮阳篷控制时间表名称	
帘布阳光透射率	
摆转式遮阳篷	
几何设置	
遮阳篷根部距窗上边缘的距离 a	
遮阳篷左边缘距窗左边缘的距离 b	
遮阳篷长度 c	
摆转式遮阳篷控制时间表名称	
帘布阳光透射率	
斜伸式遮阳篷	
斜伸式遮阳篷控制时间表名称	
帘布阳光透射率	
折叠遮阳篷	
几何设置	
遮阳篷根部距窗上边缘的距离 a	
遮阳篷左边缘距窗左边缘的距离 b	
遮阳篷引布杆距窗水平距离 c	
遮阳篷引布杆距根部垂直距离 d	
折叠式遮阳篷控制时间表名称	
帘布阳光透射率	

图 3.37 活动遮阳篷参数设置

### 3.3.1.5 采光设置

这里是对照度随自然光强度自动变化的照明进行的设定。“强度”是指人工照明的强度，单位为  $W/m^2$ ，控制方式有 3 种，“1”表示照明亮度可连续调控，“2”表示亮度可阶级调控（阶数需设定，见下文），“3”表示在亮度高于某一竖直时可连续调控，当小于这一数值时照明直接关闭。

自然采光的控制需要在室内设定感应点位置来实现，感应点位置最多可以设置两个，感应点位置 X, Y 的设定见图 3.38，Z 表示设定点与地面的距离。当感应点个数为 2 时，可以通过复制粘贴“感应点位置”这一项来增加。

“感应点 1 控制比重”表示有感应点 1 控制的室内面积比例。“感应点照度设定值”是控制照明亮度的关键，当感应点接收到的自然光照度小于设定值时，照明开启，保证该点的照度值不小于设定值。“临界眩光指数”的设定需要与遮阳关联，而且仅限于百叶遮阳和卷帘遮阳，且必须遮阳控制方式为“3”。“阶梯照明阶数”是当人工照明的控制方式为“2”时对照明亮度调节级数的设定。

“连续照明最小功率输出”和“连续照明最小亮度输出”是针对控制方式“1”和“3”的设定，当控制方式为“1”时表示照明系统功率和亮度可达到的最小值，当控制方式为“3”时表示照明关闭临界点的功率和亮度。

采光设置	
▲ 人工照明	
○ 强度	
○ 控制方式	
▲ 自然采光	
○ 感应点个数	
▲ 感应点位置	
	○ X
	○ Y
	○ Z
○ 感应点 1 控制比重	
○ 感应点照度设定值	
○ 临界眩光指数	
○ 阶梯照明级数	
○ 连续照明最小功率输出率	
○ 连续照明最小亮度输出率	

图 3.38 采光设置示意图

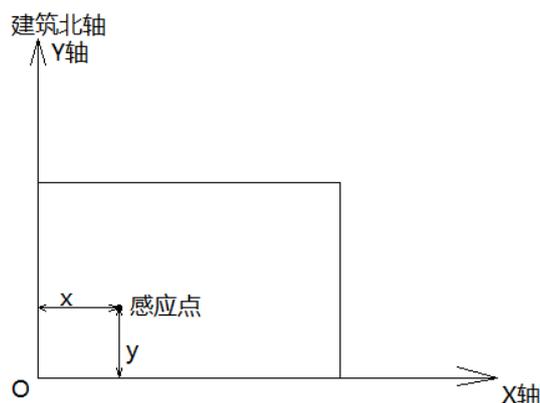


图 3.39 感应点位置设定示意图

### 3.3.1.6 输出设置

本计算引擎是计算遮阳装置的节能量，因此需要有比较基准，这里提供两类比较基准：

1. 撤去遮阳设备的窗户，窗玻璃和窗框隔条保持与用户设定一致；
2. 采用 3mm 标准平板白玻璃，不包括遮阳设备，并且窗玻璃为 3mm 标准平板白玻璃。

本计算引擎支持多种输出频率，包括逐时 (*hourly*)、逐日 (*daily*)、逐月 (*monthly*)、全年 (*annual*)，注意需填写括号中的英文字符。

最后，本计算引擎能够输出的参数包括

1. 设定模型和基准模型的窗户得热量、房间冷负荷、房间热负荷、照明能耗，分别列在 *Result* 文件夹的 *ProposedModel* 和 *BaseModel* 两个 *Excel* 表中；
2. 设定模型和基准模型峰值冷负荷、峰值热负荷、全年制冷量、全年制热量，遮阳对全年照明能耗的影响率、遮阳对全年总能耗（照明和空调能耗的总和）的影响率，列在 *Result* 文件夹中的 *Result* 文本文件中。

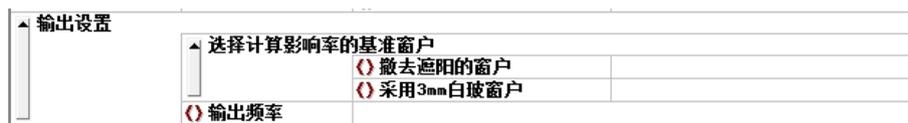


图 3.40 输出设置示意图

需要说明的是，制冷能耗和供热能耗是根据负荷和 *COP* 估算出来的，制冷季 *COP* 取 3.0，采暖季 *COP* 取 2.8，总能耗即为一年内照明能耗、制冷能耗和

供热能耗之和。

### 3.3.2 计算遮阳系数

太阳辐射得热系数 (*SHGC*) 和遮阳系数 (*SC*) 是两个最常用的衡量遮阳性能的指标，也是 *Shading* 支持的只要功能之一，相较于“计算节能量”的设置，“计算遮阳系数”的模拟设置相对简单。只需要设置“窗户”和“遮阳”及其相关控制时间表即可。

## 第四章 *Shading* 实用性与准确性测试

在采用 *Shading* 进行模拟前，非常重要的一个工作就是根据相关的标准或规范，采用典型案例对模型和软件进行测试，以验证其可靠性。本章将针对工具的可靠性和实用性加以验证。

*Shading* 有“计算节能量”和“计算遮阳系数”两部分，其中，计算节能量依托的计算内核—*Energyplus* 已被广泛接受，因此本文不再进行节能量计算的准确性测试，而是通过部分案例来展示其计算过程和结果。对于遮阳系数的计算，*Shading* 采用了通过模拟实测环境的方法计算得到，需要进行准确性验证。

### 4.1 计算节能量案例分析

在以下计算案例中，仅考虑遮阳对夏季制冷能耗的影响，制冷季空调的开启时间为每天 8:00-18:00。对于活动遮阳，仅当空调开启时使用，其余时间收起；对于固定遮阳，则始终保持原状态。制冷能耗的降低率是遮阳模型与基准模型对比得到的，在这里，基准模型与遮阳的区别仅为没有遮阳设备，其余均保持一致。

#### 4.1.1 案例一：百叶遮阳

在实际生活中，百叶遮阳的应用十分广泛，它不仅可以阻挡反射太阳直射辐射，反射散射光增强室内照度，而且能保证室内私密性<sup>[38]</sup>。在本案例中，就百叶位置、朝向、叶片角度和材料等作为控制因素分析其对制冷能耗和室内照度的影响。

表 4. 1 百叶遮阳模拟信息

控制因素		其他建模信息
遮阳位置	外遮阳百叶、中置遮阳百叶、内遮阳百叶	城市：上海； 房间大小：3m*3m*3m 窗墙比：25% 窗户玻璃：3mm 标准平板玻璃（对于中置遮阳，内外两层玻璃均为 3mm 标准平板玻璃）
朝向	东、南、西、北	
叶片角度	15° ,30° ,45° ,60° ,75° ,90°	
叶片材料	高反射率、中反射率、低反射率	

模拟结果如图 4. 1 至图 4. 6 所示，其中图 4. 1 至图 4. 4 是不同百叶遮阳对制冷能耗的影响，图 4. 5、图 4. 6 展示了百叶遮阳对室内照度的影响。

如图 4. 1 所示，当百叶遮阳处于不同位置时，其对建筑能耗存在不同的效果，其中，外遮阳百叶的节能效果最好，其次是中置百叶和内百叶，模拟结果与实际相符。如图 4. 2 所示为遮阳在不同朝向时对建筑能耗的影响，模拟结果表明对于西向遮阳对制冷能耗的降低贡献最大，北向几乎可以不考虑采用遮阳措施。当然，本案例的模拟结果不存在通用性，因为遮阳的适用性存在很强的地域差异，对于上海地区来说，夏季西晒很严重，因此，对西向窗户采用遮阳装置很有必要。百叶材料也对其节能效果有影响，图 4. 3 所示为当百叶采用 3 中不同反射率材料时，空调制冷能耗的变化情况，可以看出反射率较小的材料能够阻挡更多的太阳辐射。

百叶叶片角度变化时，制冷能耗也会发生比较大的变化，如图 4. 4 所示，从节约空调能耗的角度考虑，当叶片角度逐渐增大，透过叶片的太阳直射辐射越大，导致室内冷负荷增加，节能效果降低。但是当叶片角度较小时，室内自然采光会受到影响，当照度低于工作照度临界值时，即需要开启或增加照明亮度，导致照明能耗的增加。这里模拟了南向窗户安装百叶外遮阳后室内照度对百叶角度的变化情况，如图 4. 5 所示，图中从左往右显示了室内从南到北的照度值变化情况，可以看出，当百叶角度从 15° 变到 90° 时，相应的照度发生了很大的变化，叶片角度为 90° 时，室内大部分区域都满足一般办公室的照度要求，但是当叶片角度为 15° 时，照度最大值也低于限定值，必须开启人工照明系统。因此，百叶叶片的角度不是越小越好，特别是当室内照明系统为光感自动控制时，需要同

时考虑冷负荷和照明要求来寻求遮阳控制的最优方式。

另外，百叶遮阳对于削减室内眩光有很大的效果。图 4.6 所示为有无遮阳装置时室内设定点照度在一天内的变化情况（设定点位于房间中央 0.8m 处），当无遮阳时，设定点的眩光值始终高于 22（满足舒适性要求），而当安装百叶遮阳后，眩光值有了很明显的改善。

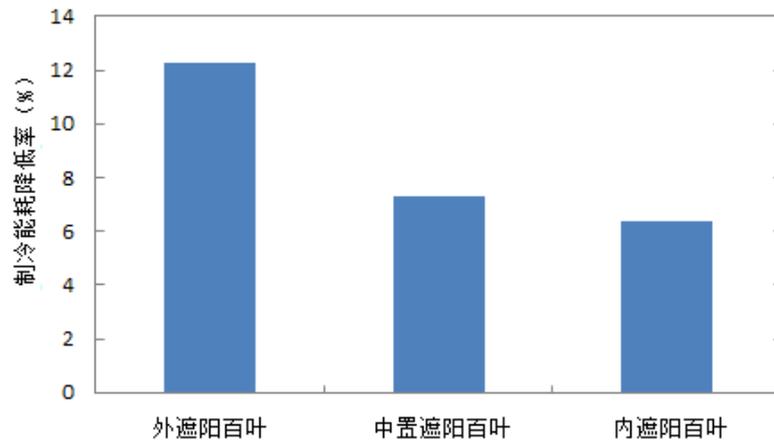


图 4.1 百叶类型对制冷能耗的影响

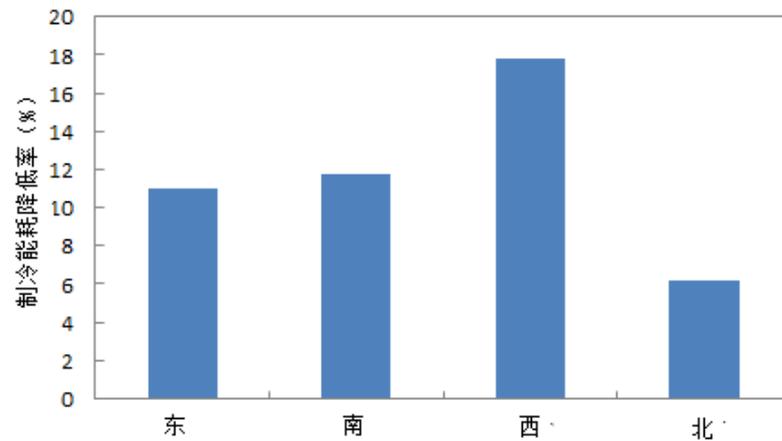


图 4.2 百叶朝向对制冷能耗的影响

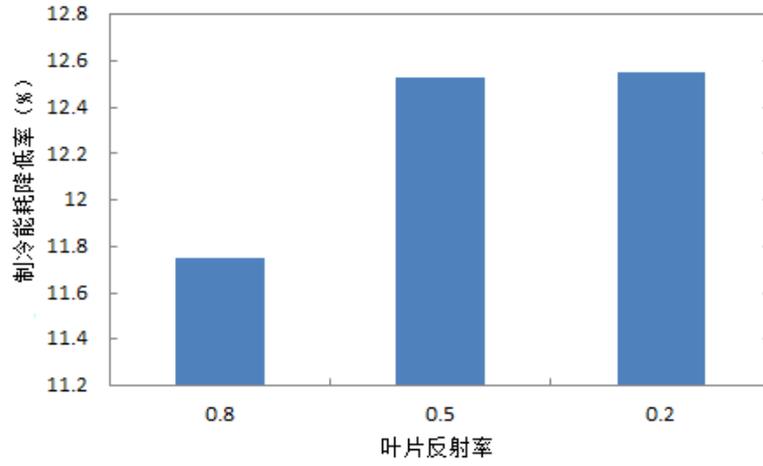


图 4.3 叶片反射率对制冷能耗的影响

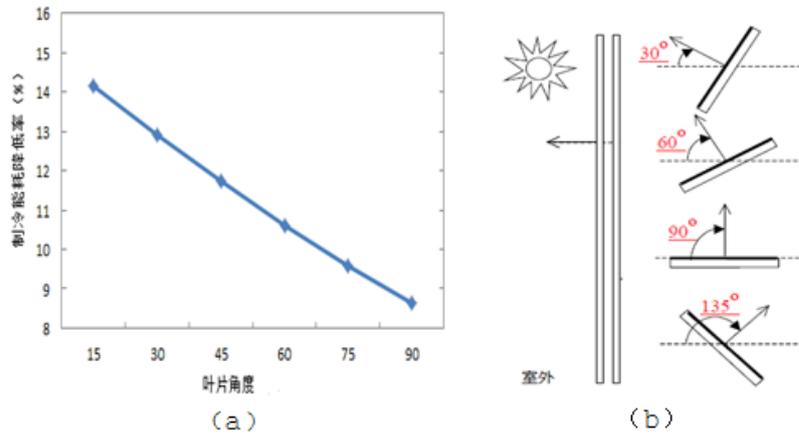


图 4.4 百叶角度对制冷能耗的影响

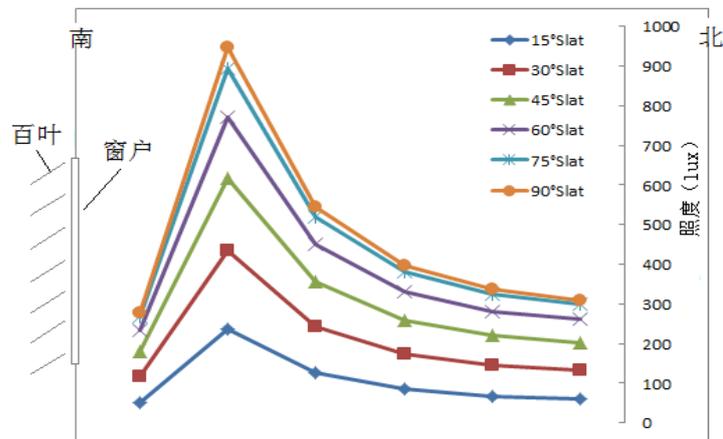


图 4.5 南向百叶对室内照度分布的影响

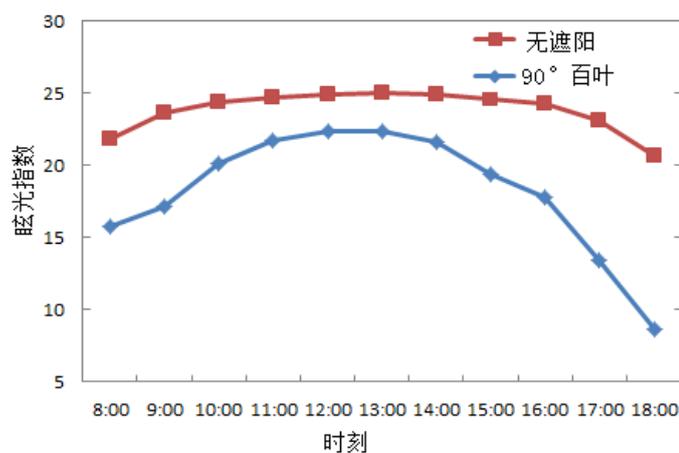


图 4. 6 有无百叶时室内眩光指数的变化

#### 4.1.2 案例二：水平/竖直遮阳

水平遮阳和竖直遮阳是使用最广泛的遮阳形式，可以阻挡太阳直射辐射，创造良好的室内光环境，其对室内空调冷热负荷也有较大的影响<sup>[39]</sup>。在本案例中，选择挑檐系数和朝向作为控制参数来讨论水平/竖直遮阳对室内冷负荷的影响。挑檐系数是指遮阳板长度与遮阳板根部到距其较远的窗边缘距离之比。

表 4. 2 水平/竖直遮阳模拟信息

控制因素		其他建模信息
朝向	东、南、西、北	城市：上海； 房间大小：3m*3m*3m
挑檐系数	0,0.2,0.4,0.6,0.8,1	窗墙比：25% 窗户玻璃：3mm 标准平板玻璃

从图 4.7 中可以看出，水平遮阳和竖直遮阳应用在不同朝向时其节能效果有比较大的区别，水平遮阳比较适合遮挡南向和西向的太阳辐射，而竖直遮阳比较适合遮阳东向和南向的太阳辐射。另外，在北向应用竖直遮阳也能取得一定的节能效果。

图 4.8 反映了遮阳板外挑系数对室内冷负荷的影响情况，总体来说，挑檐系数越大，节能效果越好，但是从图中可以看出，当挑檐系数大于 0.6 时，制冷能

耗降低率的增长幅度减小，因此可以看出遮阳板并不是越长越好。

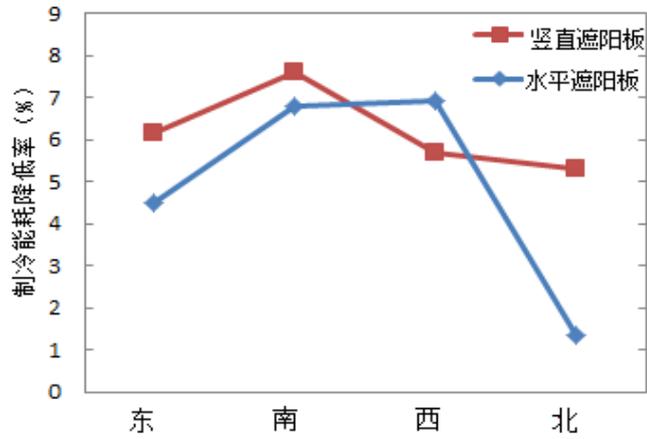


图 4.7 不同朝向遮阳板对制冷能耗的影响

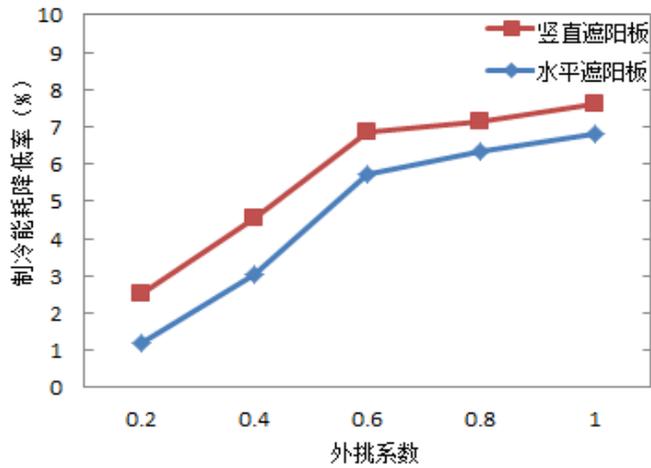


图 4.8 外挑系数对制冷能耗的影响

#### 4.1.3 案例三：平推式曲臂遮阳篷

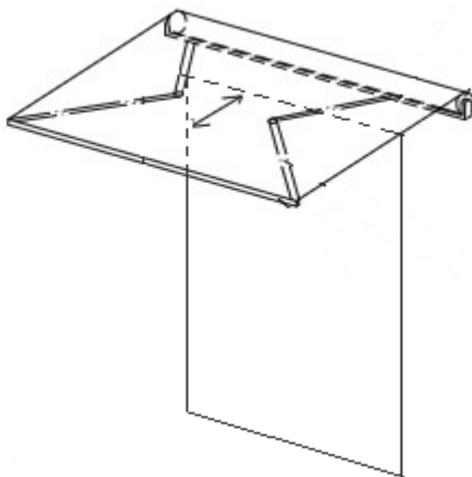


图 4.9 平推式曲臂遮阳篷示意图

现如今遮阳篷的应用越来越广泛，如图 4.9 所示为平推式曲臂遮阳篷，其几个构造类似于水平固定遮阳，但是它可以根据使用者需求伸缩，夏季展开遮挡阳光，冬季收起，充分利用太阳光，具有较强的灵活性。遮阳篷适用于低层、多层建筑的门窗口外遮阳，遮阳篷的材料一般为涤纶或亚克力面料，有一定的透光性，本案例改变帘布的透光率来模拟遮阳篷的节能效果，如图 4.10 所示，模拟结果与经验相吻合，穿透率越大，节能效果越差。

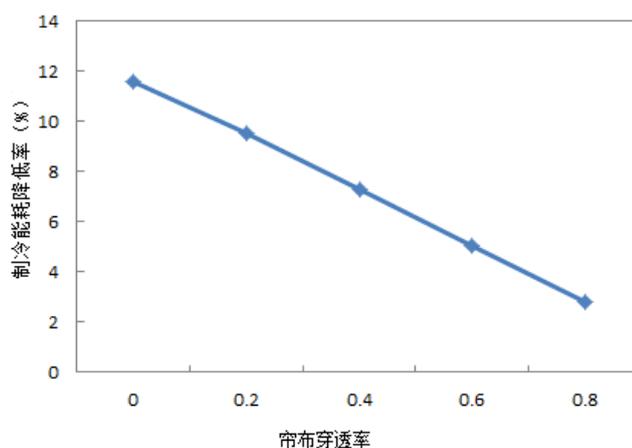


图 4.10 帘布穿透率对制冷能耗的影响

## 4.2 遮阳系数验证

目前业内常用的窗户及遮阳设施计算软件是 *WINDOW*，它可以计算单层或多层窗户的太阳辐射得热系数和遮阳系数，以及带百叶遮阳和卷帘遮阳的窗户的

太阳辐射得热系数和遮阳系数。由于太阳辐射得热系数和遮阳系数成比例，下面将选取几类窗户和遮阳设施分别用 *WINDOW* 和 *Shading* 进行太阳辐射得热系数的计算对比来验证 *Shading* 算法的准确性。

#### 4.2.1 窗户玻璃

表 4.3 窗户玻璃的 SHGC 验证

玻璃种类	<i>SHGC(Shading)</i>	<i>SHGC(WINDOW)</i>
3mm 白玻 <sup>9</sup>	0.859	0.86
3mm Browns	0.740	0.733
3mm Grey	0.727	0.708
Low-E	0.649	0.659
3 mm 白玻+12 <sup>10</sup> A <sup>11</sup> +3 mm 白玻	0.763	0.763
3 mm 白玻+铝合金窗框	0.708	0.682

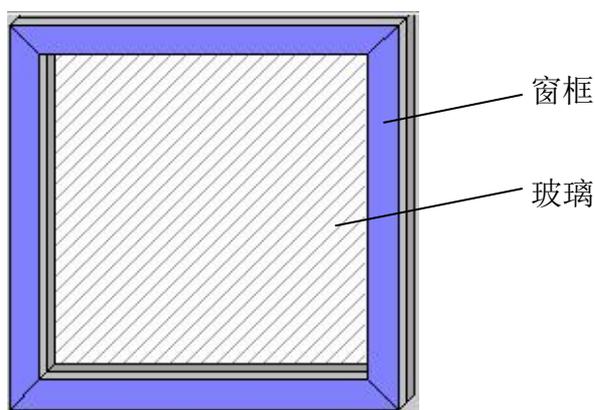


图 4.11 带铝合金窗框窗户示意图

表 4.3 中罗列了几种单层玻璃窗户、多层玻璃窗户以及带带铝合金窗框窗户（如图 4.11，玻璃与窗框面积比为 0.2）的 *SHGC* 计算对比，不难发现，*Shading* 和 *WINDOW* 的计算结果又很好的吻合性，说明 *Shading* 在计算窗户玻璃的遮阳

<sup>9</sup> 即 3mm 普通平板玻璃

<sup>10</sup> 数字 *n* 表示厚度为 *n mm*

<sup>11</sup> A 表示空气夹层

指标具有比较高的准确性。

## 4.2.2 遮阳

### (1) 外遮阳百叶

表 4.4 外遮阳百叶窗的 *SHGC* 验证

叶片角度	<i>SHGC(Shading)</i>	<i>SHGC(WINDOW)</i>
30°	0.167	0.156
45°	0.265	0.248
60°	0.464	0.458
90°	0.871	0.885

表 4.4 是外遮阳百叶窗的 *SHGC* 计算结果，窗玻璃是 3mm 普通平板玻璃，从表中对比结果可以看出，*Shading* 的计算与 *WINDOW* 计算结果非常相近，误差基本保持在 10% 以内。

### (2) 中置百叶

表 4.5 中置百叶窗的 *SHGC* 验证

叶片角度	<i>SHGC(Shading)</i>	<i>SHGC(WINDOW)</i>
30°	0.287	0.244
45°	0.350	0.328
60°	0.467	0.484
90°	0.695	0.764

表 4.5 是中置百叶窗的 *SHGC* 计算结果，窗玻璃是 3mm 普通平板玻璃，从表中对比结果可以看出，*Shading* 的计算结果与 *WINDOW* 计算结果非常相近，误差基本保持在 10% 以内

### (3) 内遮阳百叶

表 4. 6 内遮阳百叶窗的 SHGC 验证

叶片角度	<i>SHGC(Shading)</i>	<i>SHGC(WINDOW)</i>
30°	0.311	0.348
45°	0.412	0.447
60°	0.565	0.602
90°	0.855	0.855

表 4. 6 是内遮阳百叶窗的 SHGC 计算结果，窗玻璃是 3mm 普通平板玻璃，从表中对比结果可以看出，*Shading* 的计算结果与 *WINDOW* 计算结果非常相近，误差基本保持在 10% 以内。

## 第五章 Shading 计算引擎静态校核

### 5.1 太阳辐射得热系数的静态校核

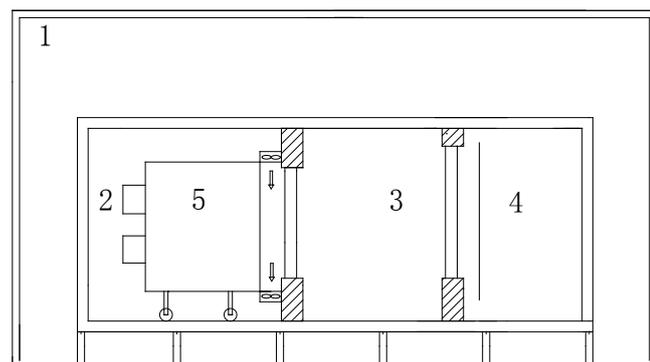
#### 5.1.1 试验台简介

本课题提出了一种新的遮阳系数计算方法，为了检验其正确性，对 3mm 标准平板玻璃、织物卷帘和百叶帘（在不同叶片倾角状态下）在基于人工光源的遮阳系统测试平台进行试验测试，并利用本课题提出的方法进行模拟计算<sup>[40]</sup>。

该平台位于上海市建筑科学研究院的建筑门窗和遮阳热工实验室内，测试平台由内部三个箱体，外部一个防护箱构成，能满足门窗、玻璃及遮阳产品的遮阳系数、传热系数、太阳得热系数等性能测试，见图 5.1、图 5.2。



图 5.1 遮阳系统测试平台外观图



1. 防护箱；2. 夏季箱；3. 室内箱；4. 冬季箱；5. 人工模拟光源

图 5.2 遮阳系统测试平台示意图

遮阳系数和太阳得热系数的测试需要夏季箱体、室内箱体和防护箱体共同完成；而传热系数的测量则需要由冬季箱体、室内箱体和防护箱体共同完成，在本实验中不需要使用冬季箱体。防护箱将测试箱体和外界环境隔离，保证室内箱体的内外壁面温度一致，减少外界环境对室内计量箱的影响。夏季箱用于模拟夏季室外的环境条件，包括人工模拟光源、风速模拟系统、温度控制设备等。室内箱用于模拟室内的环境条件，包括电加热器、冷却盘管等。冬季箱用于模拟冬季的室外环境条件，包括导流板、温度控制设备等。

### 5.1.2 实验测试原理与方法

遮阳系数测试有室外夏季箱体和室内箱体共同工作进行测试，室外夏季箱体模拟夏季室外的太阳辐射、空气温度场、风速等，室内箱体模拟室内空气温度场、风速等。在标准测试工况下，分别测试有遮阳时通过测试洞口的净得热量和无遮阳时通过 3mm 白玻璃的净得热量，两者的比值为遮阳产品的遮阳系数，见下式：

$$S_c = \frac{q_2}{q_1} \quad (5.1)$$

$$q_1 = \rho \times q_v \times C_p \times (t_c - t_j) - q_f + M_1 \cdot \Delta\theta_1 + M_2 \cdot \Delta\theta_2 \quad (5.2)$$

$$q_2 = \rho \times q_v' \times C_p \times (t_c' - t_j') - q_f' + M_1 \cdot \Delta\theta_1' + M_2 \cdot \Delta\theta_2' \quad (5.3)$$

式中， $S_c$ —试件的遮阳系数；

$q_1$ —试件完全收回（或未安装）时，进入到室内箱体的净热量， $W$ ；

$q_2$ —试件完全展开时，进入到室内箱体的净热量， $W$ ；

$q_f$ —辅助加热器的加热量， $W$ ；

$M_1$ —由标定试验确定的室内箱体外壁热流系数， $W/K$ ；

$M_2$ —由标定试验确定的试件框热流系数， $W/K$ ；

$\Delta\theta_1$ —室内箱外壁内外表面面积加权平均温度之差， $W$ ；

$\Delta\theta_2$ —试件框冷热侧表面面积加权平均温度之差， $W$ ；

$\rho$ —水的密度， $kg/m^3$ ，一般取 103；

$C_p$ —水的定压比热， $kJ/kg \cdot K$ ，常温时取 4.2；

$q_v$ —风机盘管内循环水的体积流量， $m^3/s$ ；

$t_c$ 、 $t_j$ —循环水的出水、进水温度，℃；

由于仅靠风机盘管不能精确控制测量室温度，因此该试验台增加了辅助加热器来控制房间温度。

## 5.2 测试结果分析

### 5.2.1 3mm 标准平板玻璃

将 3mm 标准玻璃（参数已知）安装在测试洞口，如图 5.3 所示，试验前设置好各箱体及冷水温度，其中防护箱设置为 26℃，夏季箱体为 35℃，冷水机组出水温度为 12℃，室内辅助加热功率根据室内温度变化手动调节，保证室内箱体温度在 26℃±1℃ 范围内。图 5.4 为三个箱体内温度的变化曲线，图 5.5 为加热功率的变化曲线，图 5.6 为风机盘管进出水温度的变化曲线。从图 5.4 可以看出系统启动后，防护箱体和夏季箱体能较快的稳定，而室内箱体以及进水温度会有相应的波动，这是由于试验采用手动调节室内箱加热功率时，在对试件遮阳性能不确定的情况下，需大致估计需要的辅助加热功率，根据室内箱温度变化进行调整。本次试验中对加热功率做了 3 次调整，分别是为 0W、682W、306W，如图 5.5 所示。在经过加热功率调整后，室内箱体的温度在中午 12:00 左右达到稳定，而此时风机盘管的进出水温度还在不断上升，且比较缓慢，但两者差值始终比较恒定，在经过约半个小时的上升后达到稳定，根据稳定时采集数据计算得到通过 3mm 白玻璃的净得热量  $q_1$  为 1965W。

普通透明 3mm 标准玻璃的参数  $U=5.8\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，太阳得热系数的按下述公式进行计算：

$$SHGC = \frac{q_1 - U \cdot \Delta T}{I \cdot A} \quad (5.4)$$

通过计算得到 3mm 标准玻璃的 SHGC 为 0.86，与理论值及表 4.3 中所示计算结果十分吻合，说明本课题算法的合理性。

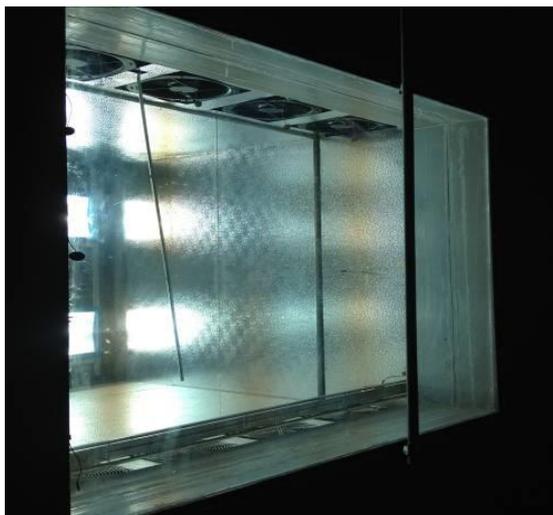


图 5.3 3mm 标准玻璃安装图

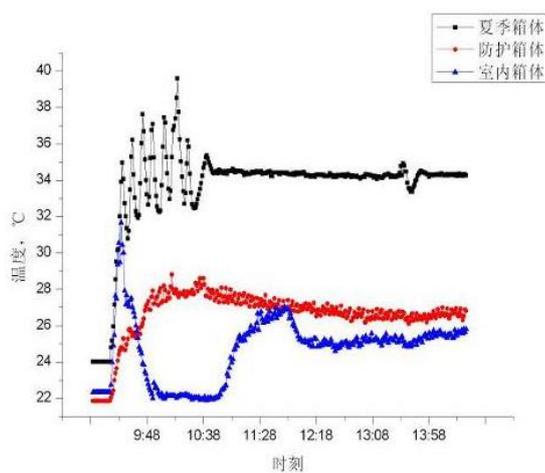


图 5.4 3mm 标准玻璃测试箱体温度变化图

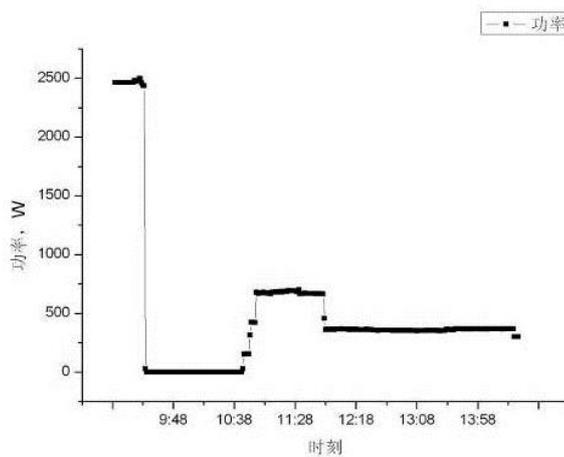


图 5.5 3mm 标准玻璃测试加热功率变化图

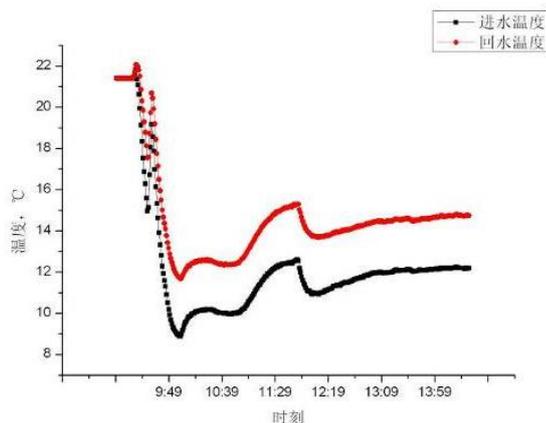


图 5.6 3mm 白玻璃测试进回水温度变化图

### 5.2.2 织物帘卷

将织物软卷帘安装在 3mm 白玻璃外侧构成外遮阳系统，如图 5.7 所示。其测试过程同 3mm 白玻璃，根据稳定后采集数据计算得到通过组合体的净热量  $q_2$  为 453W，按公式 (5.1) 进行计算得到遮阳系数  $SC=0.23$ 。

其光学参数如表 5.1 所示，将其代入 *Shading* 计算得到遮阳系数为 0.21，再次说明 *Shading* 计算遮阳系数及太阳辐射得热系数的准确性。

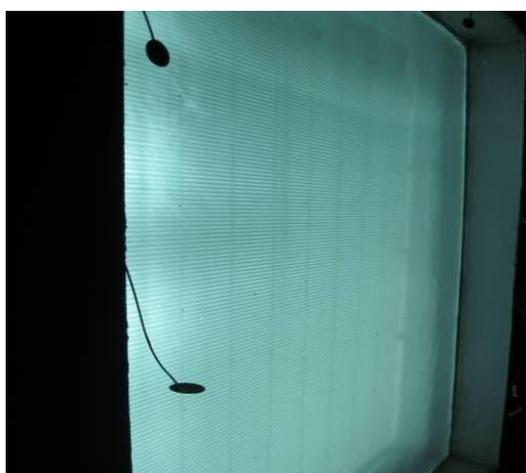


图 5.7 卷帘安装图

表 5.1 织物软卷帘光学参数

可见透射比	可见反射比	太阳透射比	太阳反射比	长波辐射半球发射比	长波辐射透射比
0.05	0.37	0.055	0.37	0.76	0

### 5.2.3 百叶帘

将百叶卷帘安装在 3mm 白玻璃外侧构成外遮阳系统，如图 5.8 所示。在百叶叶片角度为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  时测量其遮阳系数，其测试过程同 3mm 白玻璃，其光学参数如表 5.2 所示，试验台测得其遮阳系数分别为 0.21, 0.29, 0.69, 用 *Shading* 计算得到的遮阳系数分别为 0.15, 0.26, 0.99。

不难发现，当叶片角度为  $90^\circ$  时（此时叶片垂直于窗户），实测数据与模拟数据存在较大偏差，这是由于百叶模型的简化造成的。前文中提到，在 *EnergyPlus* 中，百叶的叶片模型被简化为没有弧度的平面，而且厚度几乎忽略不计，因此从理论上讲，此时百叶的遮阳效果几乎为 0，遮阳系数接近 1。但是实际上，百叶叶片是有弧度的曲面，即使叶片垂直于窗户时也能遮挡一部分光线。



图 5.8 百叶安装图

表 5.2 百叶帘光学参数

可见透射比	前侧可见反射比	后侧可见反射比	太阳透射比	前侧太阳反射比	后侧太阳反射比	长波辐射半球发射比	前侧长波辐射发射比	后侧长波辐射发射比
0	0.58	0.59	0	0.54	0.55	0	0.899	0.876

## 第六章 工作总结与展望

本文列举了几种现有遮阳系统性能评价方法,并分析其优劣,其中指标评价方法简单且应用广泛,但是不能全面反映遮阳设施在太阳辐射角度不断变化的实际环境中的运行性能;利用能耗模拟软件动态模拟遮阳性能则能比较准确地反映遮阳的运行效果,但是需要结合遮阳所在建筑本身,操作麻烦。针对上述问题,本文开发了一种专门针对建筑遮阳进行性能分析的计算引擎,该计算引擎基于权威能耗模拟软件—*EnergyPlus*,以此作为计算内核,结合用户在进行遮阳分析的软件使用习惯及目前常用的六类遮阳形式,在保证计算结果准确性的前提下,将参数输入作简化处理,可以计算当朝向、窗墙比、遮阳控制策略及照明使用情况不同的条件下遮阳设施的运行效果。另外,考虑到目前 *SHGC* 及 *SC* 仍是评价遮阳性能的主流方法,该计算引擎也提供了相应的计算功能,其算法不同于主流的遮阳系数计算软件—*WINDOW*,经过几组案例对比,发现该计算引擎的 *SHGC* 计算结果与 *WINDOW* 计算结果很接近,验证了其准确性和实用性。

当然,由于时间和精力有限,本文还存在很多不足及需要进一步研究的地方:

- (1) 该软件的对遮阳性能的评价是通过建筑负荷和能耗来表现的,尚不能很全面地展示遮阳设施对建筑的影响,比如有无遮阳设施的房间的过热情况等。
- (2) 考虑到国家对建筑节能的要求越来越严格,遮阳势必也将成为一个重要的衡量对象,为了便于工程师和设计师选择合适的遮阳设备,该软件可以考虑增加模块来考察建筑的遮阳性能是否满足各地规范要求。
- (3) 该软件尚处于内核开发阶段,未有完整的界面,因此在使用时稍有不便,在后续工作中会加以完善。
- (4) 在上文中提到目前遮阳设施的评价方法多而杂,但就遮阳系数而言就存在数种,包括遮阳系数、外遮阳系数、综合遮阳系数等等,希望在后续工作中能将这一问题加以研究解决。

## 致谢

研究生生涯快要宣告结束了，两年半的学习生活很短暂，但是也丰富多彩。我一直认为研究生时期是一段很特殊的时光，不同于懵懵懂懂，象牙塔内的本科生活，也不同于充满各种压力的现实生活。在这里，我不仅学习到了很多更前沿的专业知识，使自己的视野不断开阔，也锻炼了自己面对各种事情的应变能力，心理素质和交际能力都有所提升，但是我的内心依旧保持着那份纯真与实在，没有变得世故圆滑，所以我很庆幸我来到了同济。

首先我要感谢我的导师-许鹏教授，感谢他对我工作上的肯定和生活上的关心，这对我来说是莫大的鼓励。他在学术上严格要求，在专业领域给予我太多的教导与启迪，带我走进一个全新的领域。更多的是，他对事业的执着精神与对治学的严谨态度使我感同身受，收益终身。

感谢李铮伟老师、韩延民老师和史建国老师对我工作上的帮助和指导；感谢 434 课题组的各位师弟师妹们的帮助；还要感谢我亲爱的室友们，是你们让我在同济的生活变得尤其温暖和有趣。

最后，期望自己在未来的工作中保持认知热情与实践精神，一路上无论是机遇还是挫折，都会是我人生的宝贵财富。

## 参考文献

- [1]中华人民共和国建设部. 建筑节能“九五”计划和2010年规划, 1995
- [2]中华人民共和国建设部. 建设都能源“十五”规划纲要, 2002,
- [3]江亿. 建筑节能潜力大.人民日报, 2005
- [4]龙惟定, 王长庆, 丁文婷. 试论中国的能源结构与空调冷热源的选择取向. 暖通空调, 2000 Vol.30(5): 27-32
- [5]清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2009. 北京, 中国建筑工业出版社, 2009
- [6]GB50189-2005, 公共建筑节能设计标准
- [7]Chauvel J, Collins B, Dogniaux R, Longmore J. Glare from windows: current views of the problem. *Lighting, Research and Technology* 1982(14):31-46.
- [8]Moeck M, Lee ES, Rubin MD. Visual quality assessment of electrochromic glazings. Report LBNL-3947. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1996.
- [9]Dubois MC. Shading devices and daylight quality: an evaluation based on simple performance indicators. *Lighting, Research and Technology* 2003 (1):61-76.
- [10]Gugliermetti F, Bisegna F, A model study of light control systems operating with electrochromic windows. *Lighting, Research and Technology*, in publication.
- [11]Gugliermetti F, Bisegna F. External shadings and glazing materials as passive systems to improve energy consumption and indoor comfort in office buildings. Proceedings of the AIVC International Conference. Lyon, 23 - 26 October 2002.
- [12]IESN. IES LIGHTING HANDBOOK—Reference Volume. Illuminating Engineering Society of North America. Baltimore, MD: Waverly Press; 1984.
- [13]Yener A. A method of obtaining visual comfort using fixed shading devices in rooms. *Building and Environment* 1999(34):285 - 91.
- [14]Yener A. A study on the daylight availability of rooms with various solar control alternatives. Proceedings of CIE International Lighting Congress.

- Istanbul, Turkey, 12 - 14 September 2001.
- [15]李峥嵘, 赵群, 展磊. 建筑遮阳与节能. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009
- [16]Collins, Harrison, Oosthuizen, Naylor et al. Sensitivity analysis of heat transfer from an irradiated window and horizontal louvered blind assembly. ASHRAE Transactions 2002(1):503-511
- [17]Ylenia Cascone, Vincenzo Corrado, Valentina Serra, Calculation procedure of the shading factor under complex boundary conditions, Solar Energy 2011 (85) 2524 - 2539
- [18]F.M. Al-Shareefa, D.J. Oldhamb, D.J. Carterb, A computer model for predicting the daylight performance of complex parallel shading systems, Building and Environment 2001 (36) 605 - 618
- [19]张磊, 孟庆林. 百叶外遮阳太阳散射辐射计算模型及程序实现. 土木建筑与环境工程, 2009 Vol.31(6):92-95
- [20]张磊. 建筑外遮阳系数的确定方法: [硕士学位论文]. 广东: 华南理工大学, 2004
- [21]龙恩深, 王勇, 肖益民, 付祥钊. 遮阳系数对供暖与空调能耗影响差异的逐时解析. 暖通空调 HV&AC. 2005 Vol.35(6):46-51
- [22]邓盼盼. 建筑遮阳节能计算及对自然通风影响的研究: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2011
- [23]刘艳峰, 刘加平, 张继良. 中国传统民居外遮阳系数研究. 太阳能学报, 2008, Vol.28(12):70-75
- [24]赵明明. 建筑遮阳隔热性能测试方法研究: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2009.
- [25]朱燕燕. 夏热冬冷地区建筑遮阳系统设计及其节能评价: [硕士学位论文]. 四川: 西南交通大学, 2007
- [26]刘翼, 蒋荃. 建筑遮阳的现状与标准与评价进展. “十一五”全国建筑节能技术创新成果应用交流会暨 2010 年年会论文集. 2010
- [27]任俊, 王鹏. 遮阳系数的原理及其测试分析. 暖通空调 HV&AC. 2012, Vol.42(3):114-118
- [28]American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. 2009 ASHRAE Handbook Fundamentals
- [29]申杰, 赵立华. 基于全年太阳辐射热的建筑外遮阳系数简化计算方研究. 科学技术与工程. 2012, Vol.12(5):95-98

- [30]潘毅群, 吴刚, Volker Hartkopf. 建筑全能耗分析软件 EnergyPlus 及其应用.暖通空调 HV&AC. 2004,Vol.34(9):2-7
- [31]EnergyPlus7.2 Documentation: Input Output Reference, 2012, 10
- [32]潘毅群, 李歧强, 周辉等. *VisualEPlus—EnergyPlus* 的中英文图形化界面工具. 全国暖通制冷 2010 年学术年会, 2010
- [33]<http://www.iesd.dmu.ac.uk/~yzhang/wiki/doku.php?id=software:java:jeplus>
- [34]周从军. XML 程序设计.天津: 天津大学出版社. 2010
- [35]ISO15099. Thermal performance of windows, doors and shading devices — Detailed calculations
- [36]Lawrence Berkeley National Laboratory. THERM 6.3 / WINDOW 6.3 NFRC Simulation Manual.2011
- [37]解勇. 窗太阳辐射得热系数测定方法研究与检测设备开发: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学., 2006
- [38]Athanasios Tzempelikos, The impact of venetian blind geometry and tilt angle on view, direct light transmission and interior illuminance, *Solar Energy*, 2008(82) 1172 - 1191
- [39]S. RAEISSI, M. TAHERI, Optimum Overhang Dimensions for Energy Saving,*Building and Environment*, 1998(33) 293 -302
- [40]岳鹏, 张华. 建筑遮阳产品遮阳性能检测技术研究.门窗. 2012, Vol.12(1):44-46

## 个人简历、在校期间发表的学术论文与研究成果

### 个人简历：

沙华晶，女，1989年8月生。

2011年7月毕业于南京工业大学，建筑环境与设备工程专业，获得学士学位。

2011年9月进入同济大学，供热、供燃气、通风及空调工程，攻读学术硕士学位。

### 已发表论文：

[1]沙华晶，许鹏，汤雯雯. 夏热冬冷地区遮阳及自然采光节能优化设计. 建筑节能，2012年第9期

[2]沙华晶，许鹏.中国典型建筑模型的建立. 同济大学机械与能源工程百年院庆论文集.

[3]沈昶，许鹏，沙华晶.常见建筑节能改造技术用于既有公共建筑的效能分析. 暖通空调，2013年第2期

[4]朱明亚，潘毅群，沙华晶，许鹏，黄治钟. 气候变化条件下中国典型城市未来天气参数与建筑能源需求预测. 建筑节能，2013年第3期