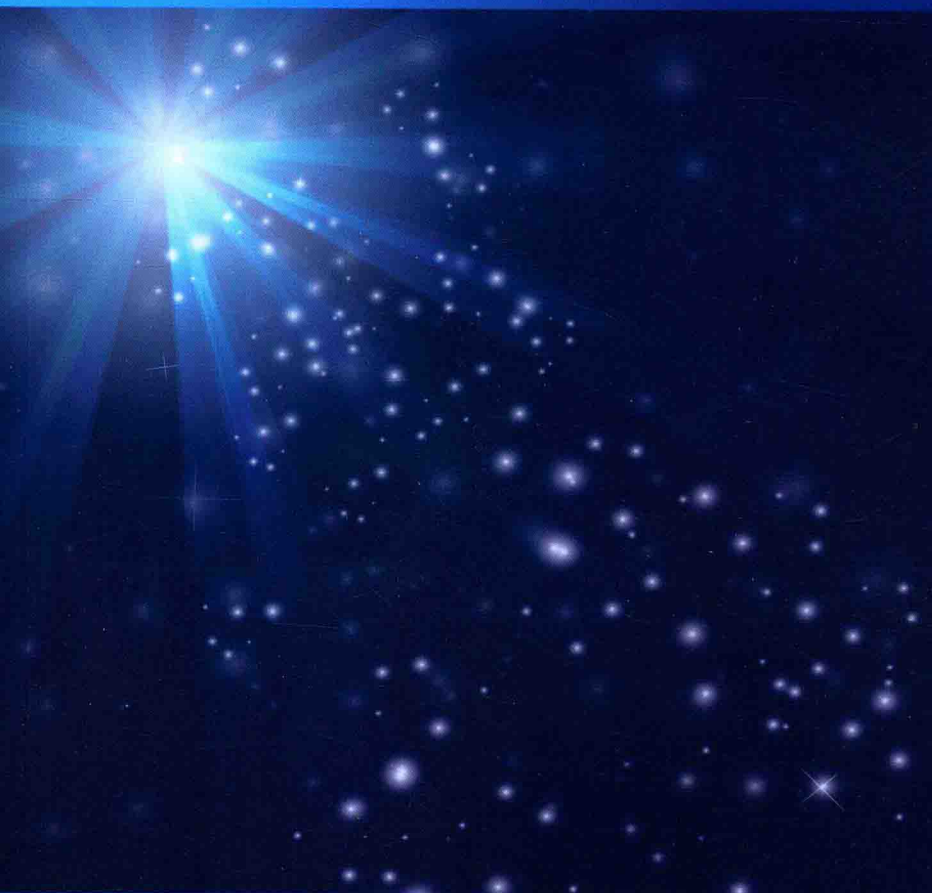


选择性太阳光隧道 及其太阳房

陈 宁 徐暑霞 王利伟 等 著



科学出版社

选择性太阳光隧道及其太阳房

陈 宁 徐暑霞 王利伟 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

随着能源的紧张和环境的日渐恶化,开发利用新能源成了可持续发展的新出路。其中,被动式太阳房就是一种简单的利用太阳能的建筑类型,它不需要机械辅助设备就可以实现对太阳能的综合性利用。本书介绍了一种太阳能利用集热元件——选择性太阳光隧道(即 SST),该元件具有对光线选择性吸收的作用。根据特朗勃墙的原理将 SST 按照一定的排列密度镶嵌在聚苯乙烯板上制成“太阳墙”,并将之呈一定间隙安装在建筑南墙上,利用其对光线的选择性吸收作用达到建筑节能的目的。全书前半部分介绍了 SST 内部封装流体的集热性能,得出了 SST 的热流体特性计算公式;后半部分介绍了安装有此“太阳墙”的建筑冬季室内、外的热舒适性以及节能效果,并得出合理的 SST 排列密度、安装方式以及节能大小,这也为该发明在实际中的运用和推广提供了理论和实践经验。

本书可作为高校能源类以及暖通类教学用书,适用于大多数高校本科以及研究生之用,也为被动式太阳房这一领域的研究人员提供新的思路和方法。

图书在版编目(CIP)数据

选择性太阳光隧道及其太阳房/陈宁等著. —北京:科学出版社,2016.2

ISBN 978-7-03-047127-7

I. ①选… II. ①陈… III. 太阳能技术—研究②太阳能建筑—研究
IV. ①TK51②TU18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 015787 号

责任编辑:胡 凯 李涪汁/责任校对:胡小洁

责任印制:张 伟/封面设计:许 瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 2 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 2 月第一次印刷 印张:8 1/2 插页:2

字数:160 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着人类对居住环境要求的不断提高，建筑能耗也呈不断增长的趋势。建筑节能的重要性日益凸显。利用太阳能提供建筑采暖或空调，以降低建筑能耗的思路早已有之，但目前在实用上仍存在太阳集热器与建筑一体化程度不足，影响建筑物外观，主动太阳能采暖/制冷系统复杂、成本偏高，太阳集热器对阳光的吸收无选择性，夏季闲置易过热等问题。

针对上述情况，笔者开发了一种新型太阳能热利用元件，并将其命名为选择性太阳光隧道(selective solar tunnel，以下简称 SST)。SST 的隧道结构具有对阳光选择性吸收的特点，即只在冬季吸收太阳辐射，其他季节，尤其是夏季极少接收太阳辐射，满足冬季采暖与夏季防止建筑升温的双重要求。

SST 无任何可动部件，可成阵列与多种建筑结构融合，形成各种低成本、选择性太阳能集热外墙体。SST 墙体的安装类似著名的特朗伯墙(trombe wall)：SST 墙体成一定间隙地挂装于建筑物南墙外面，冬季通过夹层间空气对流向建筑物提供热能；夏季则将阳光反射出建筑南墙，减少建筑得热。从而形成综合建筑节能的效果。

本书结合作者近年来的研究成果，详细介绍了 SST 相关技术的发展，SST 结构及选择性实现的原理、不同季节 SST 内部传热分析、SST 内部传热量及集热效率计算的方法以及 SST 太阳房的运行经验。

希望通过本书推广和普及 SST 技术。由于作者水平所限，书中不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 中国能源现状与建筑能耗	1
1.1.2 太阳能与建筑一体化	2
1.2 国内外研究现状	2
1.3 选择性太阳光隧道 (SST)	3
1.3.1 选择性太阳光隧道简介	3
1.3.2 选择性太阳光隧道的设计原理	4
本章小结	6
第二章 SST 热流体特性研究	7
2.1 封闭空间内自然对流换热的研究概况	7
2.2 热流体特性研究的方法	7
2.3 太阳辐射模型	8
2.4 基于光线跟踪法的 SST 光线分析	11
2.4.1 光线跟踪法模型的建立	11
2.4.2 光线跟踪算法的实现	12
2.5 流场模型的建立与分析	16
2.5.1 模型的建立	16
2.5.2 基本假设	17
2.5.3 流动与换热基本方程	19
2.5.4 流动和热边界条件	22
2.6 基于 ANSYS 的数值计算	24
2.6.1 流动和传热有限元分析	24
2.6.2 计算结果与分析	27
2.7 影响 SST 内部空气流动和传热特性的因素分析	31
2.7.1 SST 流动和传热模型无量纲控制方程	31
2.7.2 影响 SST 内部空气流动和传热特性的因素	34
本章小结	36

第三章 SST 夏季工况热流体特性研究	37
3.1 SST 传热特性的数值模拟分析	37
3.1.1 有限体积分析过程	37
3.1.2 后处理过程	37
3.1.3 结果分析	38
3.2 SST 实验系统	38
3.2.1 实验装置	38
3.2.2 实验过程	41
3.2.3 实验结果与分析	42
3.3 影响 SST 内部流体流动和传热特性的因素	43
本章小结	52
第四章 SST 太阳房冬季室外热特性研究	54
4.1 SST 太阳房冬季工况理论分析	54
4.1.1 太阳辐射入射及吸收过程	54
4.1.2 室内方向传热	55
4.1.3 室外方向传热	55
4.2 SST 太阳房冬季工况热特性实验研究	58
4.2.1 SST 太阳墙的制作	58
4.2.2 SST 太阳房实验台搭建	60
4.2.3 数据测量与实验仪器	61
4.3 实验结果与分析	63
4.3.1 吸收板温度分布规律研究	64
4.3.2 冬季典型日实验结果与分析	70
4.4 SST 太阳房冬季工况热特性影响因素研究	75
4.4.1 太阳辐射强度	75
4.4.2 室外风速	77
4.4.3 室外温度	79
4.4.4 运行方式	80
4.5 SST 太阳房热损失研究	82
4.5.1 其他影响因素的讨论	82
4.5.2 SST 墙热损失分析	83
4.5.3 单 SST 热损失计算	84
4.5.4 SST 墙整体热损失计算方法	87

本章小结	87
第五章 SST 太阳房冬季室内热特性研究	88
5.1 室内环境热舒适性评价	88
5.2 SST 太阳房建筑采暖的节能性分析	88
5.2.1 室内空气热平衡方程	88
5.2.2 SST 外墙太阳房的节能性	88
5.3 SST 太阳房实验系统	88
5.3.1 测点布置	88
5.3.2 测试方法	88
5.3.3 实验过程	88
5.4 SST 太阳房实验结果与分析	88
5.4.1 白天运行工况分析	88
5.4.2 白天运行工况节能性分析	88
5.4.3 夜间运行工况分析	88
本章小结	88
参考文献	88
附录	88
彩图	

第一章 绪 论

1.1 研究背景

1.1.1 中国能源现状与建筑能耗

我国目前在能源利用上存在三大问题：能源总量不足、能源质量较低以及能源利用率低下。我国的人均能源可采储量位于全球的平均水平之下，能源总量情况也并不乐观。虽然我国的水能资源蕴藏量、煤炭、石油以及天然气的探明储量就全球水平而言较为可观，但就能源总量来说我国并不充足^[1]。根据 BP 提供的 2010 年世界能源的统计报告，我国的石油、煤炭、天然气的储采比分别为 12.1 年、48 年、41.8 年^[2]。另外，我国的能源消耗多为劣质煤炭，较低的能源质量严重影响了生态环境。再者，由于能源利用技术的落后，我国的能源利用率远低于西方发达国家^[3]。

随着建筑总量的不断增加以及人类对建筑舒适度要求的提高，建筑能耗在各国能源消费构成中所占的比例越来越大。据统计，发达国家建筑能耗可占国家总能耗的四分之一至三分之一，而目前我国建筑能耗大约占全国能源消费总量的 30%。我国正处于城市化高速发展过程中，可以预见，建筑能耗占全国能源消费总量的比例将进一步扩大。近年来，我国能源供应短缺问题日益凸显、能源成本不断提高，而建筑节能被普遍认为是各种节能途径中潜力最大、最为直接有效的方式^[4,5]。因此，深入持久地开展建筑节能工作意义十分重大。

西方发达国家开展建筑节能方面的研究和应用较早，它们在建筑节能理念和技术方面遥遥领先。最初强调建筑节能，后来又强调在建筑中保温、减少热损失，20 世纪 90 年代重点为提高建筑中的能源利用率，目前建筑节能的主要内容是建筑能源的可持续性^[6-12]。我国建筑节能研究起步较晚，能源浪费现象严重，面对日益严峻的能源形势，必须重视建筑节能技术的研究。在《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》中把建筑节能与绿色建筑列为优先发展领域，包括建筑节能技术与设备、可再生能源装置与建筑一体化应用技术、节能绿色建材以及建筑节能技术标准等内容。现今我国建筑节能技术主要有：太阳能利用、围护结构节能、建筑设备节能以及采光照明等领域。其中，

由于太阳能清洁和用之不竭的特性,太阳能与建筑一体化技术格外受到关注。

1.1.2 太阳能与建筑一体化

将太阳能合理地利用到建筑上是目前建筑节能的有效途径^[13]。太阳能是一种理想的可再生能源,具有清洁、成本低、无污染、辐射能量巨大且取之不尽等优点。我国是太阳能资源十分丰富的国家,2/3 以上的国土面积年日照在 2200 小时以上,年辐照总量大约 3340~8360MJ/m²,每平方米每年可产生相当于 110~280kg 标准煤的热量^[14]。

太阳能在建筑节能方面的利用主要包括:太阳能热水器、太阳房、太阳灶、空调与制冷等领域。太阳房是利用太阳能降低建筑采暖能耗的主要形式,通常可以分为被动式和主动式太阳房^[15]。

主动式太阳房一般由集热器、传热流体、蓄热器、控制系统及适当的辅助能源系统构成。它需要热交换器、水泵和风机等设备,电源也是不可缺少的。主动式太阳房室内温度稳定舒适,日波动小,不仅可以供暖、供热水,与吸收/吸附式制冷机配合还可以供冷。但是它系统复杂、设备多,所以初投资和维持费用都比被动式太阳能采暖高。受经济水平的制约,主动式太阳能供暖系统在我国的发展一直比较缓慢。

被动式太阳房主要根据当地气候条件,利用太阳的直接辐射能,依靠建筑结构造成的吸热、隔热、保温、通风等特性,来达到冬暖夏凉的目的。被动式太阳房集蓄热构件与建筑构件为一体,受到各国科研工作者的青睐,但这种集热方式受昼夜温度波动较大^[16,17]。

被动式太阳房易于建造,也不用安装特殊的动力设备,技术核心在于如何利用“太阳墙”实现太阳能的收集和储存。

1.2 国内外研究现状

被动式太阳房按其利用太阳能的热过程和方式,一般分为三种:直接受益式(direct)、集热墙式(trombe wall)和附加阳光间式(attached sunspace)。1956 年法国学者特朗勃等提出,在透明玻璃窗后砌一道重型结构墙作为集热装置的太阳房,称为集热墙式太阳房,也称为特朗勃式太阳房。按照有无通风孔又可分为有通风口集热墙式与无通风口集热墙式。对于有通风口集热墙,白天阳光加热墙体,主要通过上下开口的对流向室内传热;夜间,通风口关闭,通过墙体的传热向室内供热。无通风口集热墙主要通过墙体传热向室内供热。集热墙

有无通风孔对热工性能也有较大影响,相关分析显示,对于 37cm 的集热墙来讲,有通风孔的供暖效率是无通风孔的 3 倍。但是无通风口蓄热墙的传热集中在晚上、夜间供热较多。有通风口集热墙对太阳能的利用效率为 30%~45%^[18]。

1990 年瑞士的 Rolf Peter 博士和加拿大康旭公司总裁 John Hollick 共同申请了太阳墙发明专利,标志着太阳墙的诞生。Van Decker^[19]通过实验研究了在 0~5m/s 风速范围内,集热板小孔按矩形和三角形分布时换热效率的变化,并分析了空气在集热板外表面、小孔内和空腔内上升过程的换热对总的换热量的影响,给出了一种新的换热效率预测模型。Awbi 等^[20,21]采用 CFD 软件模拟分析了空腔内空气的流动状态和外墙的传热量,研究了夏季太阳墙自然通风时的通风量,并用实验数据验证模拟结果的正确性。Gawlik 等^[22]采用 CFD 数值模拟方法研究了室外风速、渗流速度、集热板几何尺寸等因素对太阳墙空气集热器热损失的影响。Leon^[23]对太阳墙系统各个部件用能量平衡微分方程进行数学建模,通过迭代求解对影响太阳墙集热效率的各个因素进行了分析,发现集热板外表面吸收率、孔径和风量对太阳墙热性能影响最大。

我国对于太阳墙的研究相比国外晚很多,近几年我国对太阳墙的研究在逐渐增多。王崇杰、何文晶等^[24,25]对太阳墙在建筑采暖、通风方面的应用进行了详细介绍,并且对其集热性能进行了测评和改进。徐冬和欧阳莉^[26,27]对多孔太阳墙的多孔板应用了多孔介质模型,并采用局部热力学不平衡双能量方程,应用二维模型从整体模拟各个影响因素对集热性能的影响,并基于效率得出了各个因素的取值大小。王远锋^[28]建立了太阳墙系统的数学模型,通过数值模拟计算分析了影响太阳墙系统热性能的主要因素(包括太阳辐射强度、室外空气温度、室外风向、室外风速、孔口吸入速度)。吴兴^[29]采用 CFD 模拟软件分别从局部和整体两个方面对太阳墙进行了数值模拟,分析了渗流流速、孔径、孔距、空腔厚度等影响因素对其热性能的影响。

1.3 选择性太阳光隧道(SST)

1.3.1 选择性太阳光隧道简介

选择性太阳光隧道(selective solar tunnel, SST)是中国矿业大学电力工程学院陈宁教授提出的一种新型的太阳能集热元件。它借鉴了复合抛物面(CPC)聚光集热器的原理,通过特殊的几何结构设计,根据冬季和夏季太阳高度角的不同,对光线进行选择吸收。在冬季,太阳高度角比较低,光线可以全部进入

集热器被吸收板吸收，进而为室内供暖；夏季它能够将光线反射出集热器，进而防止建筑升温，达到冬暖夏凉的目的。

实际应用上，可将较多数量的 SST 组成集热器阵列，直接嵌入建筑外墙的材料中，构成对太阳光具有选择性吸收的太阳能集热墙。根据 SST 排列密度和方式的不同，可以在外墙板表面形成各种图案达到美观效果。SST 墙在建筑上的使用方法可以借鉴特朗伯墙 (trombe wall)，将其成一定间隙固定在南墙外，冬季通过加热夹层空气完成向室内的供暖。

1.3.2 选择性太阳光隧道的设计原理

1) SST 的设计与光学特性

选择性太阳光隧道 (SST) 是应用在建筑采暖方面的特殊的复合抛物面 (CPC) 聚光集热器。聚光器上下线形 a 和 a' 是对称于主轴 m 的抛物线，两者的焦点分别为 P 和 P' 。两抛物线对称轴过焦点 P 和 P' 的平行线 b 和 b' 与主轴 m 的夹角 ($\pm \theta$) 为接收半角。当光线以接收半角 θ 入射时，光线经过一次反射之后正好到达吸收板边缘 P' 点。SST 的设计原理如图 1-1 所示。

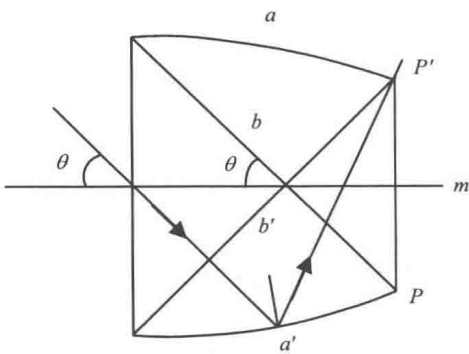


图 1-1 SST 的设计原理

采用光线跟踪法，可以得出不同光线入射角 θ_i 下 SST 的光学特性。在接收半角 θ 范围内入射的光线都将汇聚到吸收板上，而大于接收半角范围的人射光线经过一次或多次反射后最终从 SST 射出。不同入射角下 SST 的工作原理如图 1-2 所示。

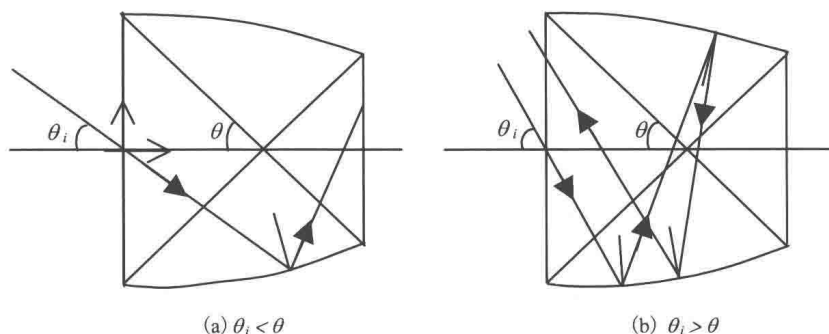


图 1-2 不同入射角下 SST 的光学特性

2) SST 的尺寸关系与聚光比

设 d_1 为 SST 的入口口径, d_2 为吸收板的口径, L 为 SST 的长度, 通过几何关系可以计算出 SST 的抛物线方程及尺寸关系为

$$y = x^2 / 4f = x^2 / [2d_2(1 + \sin \theta)] \quad (1-1)$$

$$d_2 = d_1 \sin \theta \quad (1-2)$$

SST 的长度:

$$L = \frac{(d_1 + d_2) \times \cot \theta}{2} \quad (1-3)$$

SST 的聚光比:

$$C = d_1 / d_2 = 1 / \sin \theta \quad (1-4)$$

由上面的关系可知, 接收半角 θ 的大小十分关键。它既决定了光线入射角的接收范围, 同时决定了 SST 的聚光比。且当接收半角 θ 和入口口径 d_1 确定后, SST 的尺寸便确定了。

3) SST 的选择性

当 SST 主轴与水平面平行、开口方向正南时, 光线对 SST 的入射角等于太阳高度角。若以当地冬季最大太阳高度角作为接收半角 θ 来设计 SST, 在整个采暖季, 由于太阳光的入射角均小于接收半角, 故均会被 SST 吸收板吸收。在

夏季,除早上与傍晚的较短时间以外,太阳光的入射角均大于接收半角,最终会被反射回环境中。如此,SST 便可以实现冬季采暖、夏季隔热的功能。

本章小结

本章主要介绍了我国的能源现状以及太阳能在建筑上的应用,并说明了国内外对于太阳能以及太阳房的研究现状,最后介绍了选择性太阳光隧道的结构、设计原理以及应用。

第二章 SST 热流体特性研究

2.1 封闭空间内自然对流换热的研究概况

SST 利用其结构上的特殊性,达到了汇聚、选择吸收光线的效果。不过,冬季 SST 吸收太阳辐射会导致 SST 吸收面和透光面的温度发生差异,从而使 SST 内封装流体发生自然对流,造成热对流损失,这对 SST 的性能有很大的影响;夏季由于不能接收到太阳辐射,会导致 SST 吸收面的温度小于外界透光面的温度,同样会造成 SST 内封装流体发生对流换热,使外界热量传递给室内。因此,研究选择性太阳光隧道内部的热流体特性以抑制腔内自然对流非常必要。研究 SST 内部的热流体特性主要是研究在重力场的作用下,由四周壁面围成的封闭腔内由于流体的温度差形成密度差和浮升力,使流体产生的自然对流现象。

有限空间内的自然对流包括几个复杂的物理特性。最关键的要素是流动与影响密度分布的传递参数之间的相互耦合,例如:温度和种类浓度。封闭空间内流体的自然对流的原理表征了变化的对抗力之间特定的相互作用,如惯性力、浮力和黏性力。另外,还涉及流体流动与能量传递的耦合。近年来,封闭空腔内的自然对流的研究主要有四类:①由均一热壁面(等温或等热流)引起的非规则自然对流;②由单个局部热源引起的自然对流;③由多个相同类型与强度的离散热源引起的自然对流;④含有内部热源或具有传热墙体的共扼自然对流。

2.2 热流体特性研究的方法

对于 SST 的热流体特性研究是一个特殊的、不规则的三维封闭空间的自然对流与导热耦合、流体与固体耦合的复杂问题。选择性太阳光隧道(SST)内热流体特性的研究,主要有实验法、理论分析方法、数值算法。

实验法直接接近流场和温度场的实际情况,是进行分析和研究的方法。对于 SST 的温度场的研究,可以利用热电偶等温度传感器测量各点的温度,考虑到 SST 的体积较小,布点很不方便,而且当热电偶传感器探头深入到 SST 内部时,实质上影响了其内部的流场和温度场,对实验研究造成了一定的影响,对于流场的研究是实验法不能直接实现的。因此做了关于 SST 吸热板外侧的温度

场实验研究, 作为数值计算的验证。

理论分析法在整个求解过程中物理概念与逻辑推理都比较清晰, 它主要对某一类流动和传热问题的偏微分方程及相应的定解条件进行数学求解, 从而获得流场和温度场的分析解, 求解过程所依据的数学基础比较严密, 能清晰地显示各种因素如物性条件、初始条件、边界条件等对物体流动和温度分布的影响。但是, 由于数学上的困难, 目前只能得到个别简单的对流换热问题的分析解, 对于本书这种几何形状特殊, 边界条件复杂的问题, 用理论分析法求解困难相当大, 在本书中, 仅将理论分析法作为理论推导的基础。

数值计算法是针对某一流动和传热问题, 以质量、动量守恒和能量守恒建立其控制方程组, 给出流体运动区域内的离散解。只要离散点(节点)分布得足够稠密, 数值解就有足够的准确度。目前国际上关于流场数值计算方法的研究十分活跃, 其基本体系正在逐步完善。大量商业化的计算流体力学软件已广泛应用到工程技术的各个领域, 并发挥出巨大的作用, 为复杂几何模型, 复杂边界条件的数值计算提供了有利的条件。因此, 本书主要采用数值计算法。

2.3 太阳辐射模型

建立一个计算地面接收到的太阳辐射模型, 对 SST 内光线分析及研究其内热源的强度与分布至关重要。

1) 太阳辐射的相关角度

(1) 太阳赤纬角 δ 。日地中心的连线与赤道面的夹角, 并规定以北为正。每天的赤纬角可以表示为

$$\delta = 35.45 \sin[360 \times (284 + n) / 365] \quad (2-1)$$

式中, n ——所求日期在一年中的日子数。

(2) 太阳时角 ω 。用角度表示。它以一昼夜为变化周期, 每昼夜变化为 $\pm 180^\circ$, 太阳午时 $\omega = 0$, 上午取正值, 下午取负值, 每小时相当于 15° 。

(3) 太阳高度角 α_s 。入射太阳光线与水平面的夹角。具体关系是

$$\sin \alpha_s = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (2-2)$$

式中, α_s ——太阳高度角;

φ ——当地纬度, 并规定北半球取正值, 南半球取负值;

δ ——太阳赤纬角;

ω ——太阳时角。

SST 正南水平放置, 则 SST 所获得的太阳辐射量主要取决于太阳高度角 α_s 。

(4) 太阳方位角 γ_s 。入射光线的地面投影线与正南方向的夹角, 并规定正南方为零度, 向西为正, 向东为负, 变化范围是 $-180^\circ \sim +180^\circ$ 。其计算公式为

$$\sin \gamma_s = \cos \delta \sin \omega / \cos \alpha_s \quad (2-3)$$

$$\cos \gamma_s = (\sin \alpha_s \sin \varphi - \sin \delta) / (\cos \alpha_s \cos \varphi) \quad (2-4)$$

2) 太阳辐射的计算

太阳不断以电磁波的形式向宇宙空间辐射能量, 称为太阳辐射。地球周围大气层厚度约为 30 公里, 太阳辐射进入大气层中, 遇到空气分子及悬浮在空中而直径小于太阳辐射波长的微尘时(如液滴、雾、冰晶、微尘、空气分子等)就有散射作用发生。太阳辐射经过大气层的吸收、散射的衰减和变向等作用后, 对地面的太阳总辐射由直接辐射(占总能量 90%左右)和散射辐射(也称天空辐射)两部分构成, 辐射的强度和分布也有所改变。

在地球大气层边界处平均日地距离时, 单位时间内垂直于辐射传播方向单位面积上所获得的太阳辐射量叫做太阳常数, 用 I_0 表示, 由于日-地距离在一年中是变化的, 因此太阳常数也随着不同。各月份的太阳常数列于表 2-1 中。

表 2-1 各月份的太阳常数值

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$I_0 / (\text{W/m}^2)$	1419	1407	1391	1367	1347	1329	1321	1328	1343	1363	1385	1406

现在已经获得了大气层外表面的太阳辐射量 I_0 , 便可以根据模型求得地面上 SST 表面的太阳直射辐射 I_n 。太阳光线通过大气层时将衰减, 其衰减量与通过大气层的长度成正比, 对于厚度为 dI 的大气层, 太阳光线通过后的太阳辐射量可由下式表示

$$dI = -K I dm / \sin \alpha_s \quad (2-5)$$

式中, dI ——太阳光线通过大气层后的太阳辐射量 (W/m^2);

K ——大气的消光系数 (m^{-1});

I ——进入微元大气层的太阳辐射量 (W/m^2) ;
 dm ——所研究的微元大气层的厚度 (m) ;
 α_s ——太阳高度角 (rad) 。

由式 (2-5) 变形可得

$$dI / I = -K dm / \sin \alpha_s \quad (2-6)$$

对式 (2-6) 进行积分

$$\int_{I_0}^{I_n} dI / I = K / \sin \alpha_s \int_0^l dm \quad (2-7)$$

式中, I_n ——到达地面的太阳直接辐射量 (W/m^2) ;

l ——大气层厚度 (m) 。

式 (2-7) 积分后, 可得

$$I_n = I_0 \exp(-Kl / \sin \alpha_s) \quad (2-8)$$

令

$$\varepsilon = \exp (-Kl) \quad (2-9)$$

ε 称为大气透过率, 其意义是当太阳在天顶角时 ($\alpha_s = 90^\circ$), 到达地面的太阳辐射强度与大气层外表面太阳辐射强度之比。将式 (2-9) 代入式 (2-8) 中可得

$$I_n = I_0 \varepsilon^{1/\sin \alpha_s} \quad (2-10)$$

地面的散射辐射强度与海拔高度、纬度、太阳高度角等诸多因素有关。因此, 其理论计算比较复杂且不准确。对于晴天来说, 散射辐射的方向可以近似地认为与直射辐射相同。但是, 当天气为阴天多云时, 散射辐射对于水平面的入射角当作 60° 处理。

按照 Berlage 在晴天时观测的天空日照量导出的假定天空是等灰度扩散的理论得出地面上的散射辐射

$$I_d = 1/2 I_0 \sin \alpha_s (1 - P^{1/\sin \alpha_s}) / (1 - 1.41 \ln P) \quad (2-11)$$