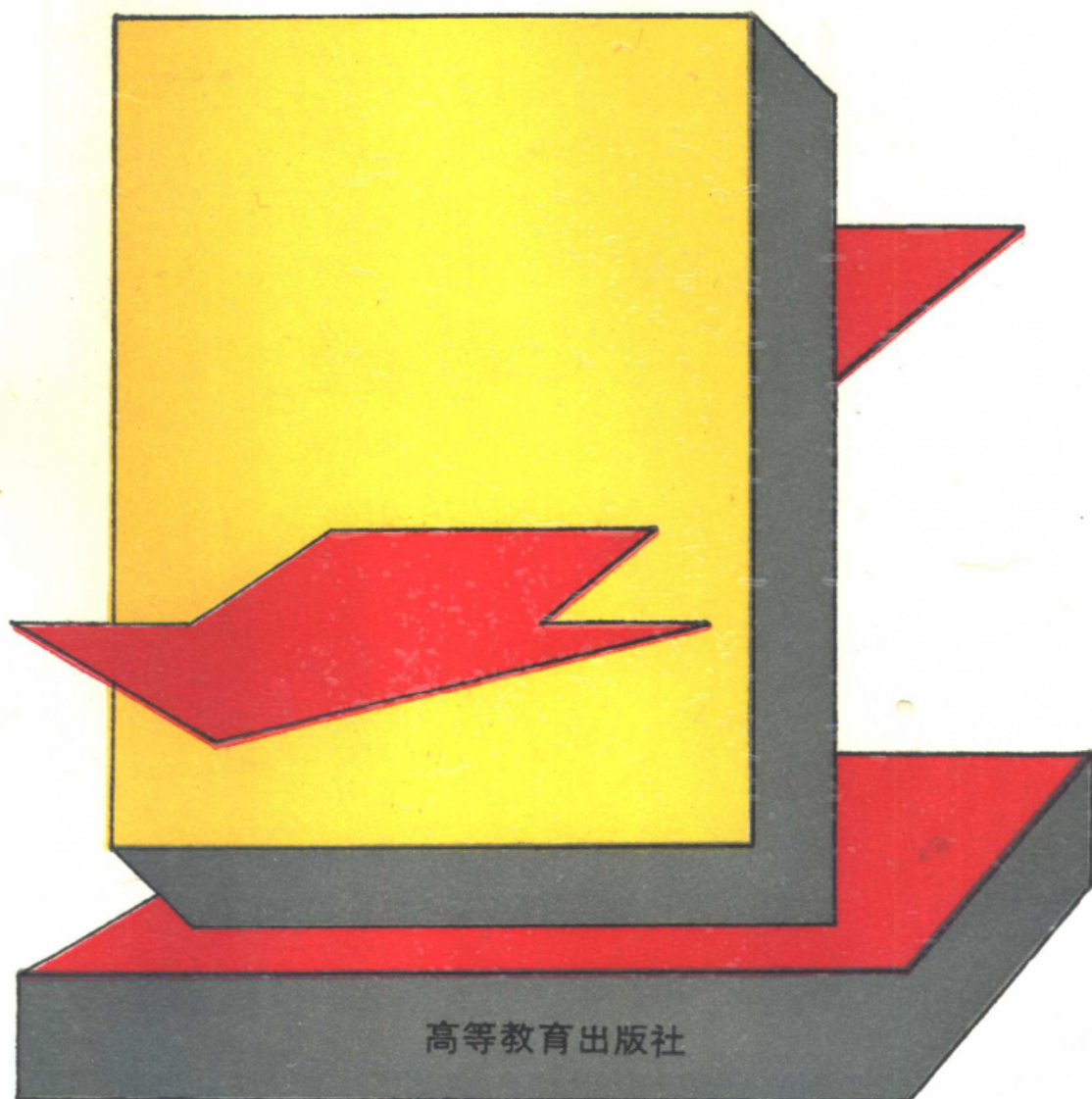


计算传热研究与应用进展

中国工程热物理学会计算传热专业组 编

张洪济 主编



高等教育出版社

TK124

7.9-2

ISBN7-04-004844-2/TH · 363

定价：40.00 元

计算传热研究与应用进展

中国工程热物理学会计算传热专业组 编

张洪济 主编

高等教育出版社

(京)112号

内 容 简 介

本文集收编了1993年11月在贵阳召开的中国工程热物理学会第五届全国计算传热学术会议上发表的学术论文66篇,它在一定程度上反映了近年来我国在计算传热学这一分支学科领域中开展科学研究的动向和已取得的某些主要成果。

本文集共分五个部分:数值计算方法(7篇),热传导(8篇),相变传热(11篇),流动与对流换热(29篇),辐射换热与换热设备(11篇)。

本文集可供从事计算传热及相关研究与应用的科技人员、高等院校师生参考。

计算机热研究与应用进展

中国工程热物理学会计算传热专业组 编

张洪济 主编

*

高等教育出版社出版发行

北京海淀菀峰图书文献服务部印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 18.25 插页 字数 473,000

1994年12月第1版 1994年12月第1次印刷

印数 0001—260

ISBN7-04-004844-2/TH·363

定价:40.00元

前 言

70年代以来,由于高速电子计算机的迅速发展,微型计算机的逐步完善、推广与普及,利用数值计算方法研究传热问题得到了很大发展,形成了计算传热学这一新兴的传热学分支学科。计算传热学的主要优点是,能以较少的费用和较短的时间预示出有实用意义的研究结果,对投资大及周期长的实验研究课题,更显示出它作为一种新颖而有效的研究方法的特色,受到广大传热科技工作者的重视。近20年来,计算传热学从形成到蓬勃发展,以及在工程技术各领域中的成功应用,充分显示了它的巨大活力。

在国内,计算传热学也早在70年代就开始发展,80年代初形成新的分支学科,特别是研究生的扩大培养,壮大了计算传热研究的队伍,提高了研究的深度和广度。1985年10月在杭州召开的全国首届计算传热学术会议,标志着我国计算传热学科的发展进入了一个新的阶段。此后,计算传热学术论文不仅继续出现在各种与传热和流动相关的学术会议和学报上,而且还每两年召开一次全国计算传热学术会议(第二届会议1987年10月在南京,第三届会议1989年10月在上海,第四届会议1991年11月在济南),各种学术交流活动频繁;多种有关的专著、教材和译著相继出(再)版;更多的院校开设了计算传热学课程。在应用方面,已经用数值计算方法求解了一批科学技术和工程领域中的实际问题,取得了有重要价值的研究成果,显示了它对于科学技术和国民经济发展的促进作用。

传热问题的数值计算与分析解法和实验研究一起构成了研究、解决传热问题的完整方法体系,它们各具优势,相辅相成。可以认为,实验测定、理论分析与数值计算有机而协调的结合,是研究传热问题的理想而有效的方法。

为了促进计算传热学学术研究与成果交流,根据第四届全国计算传热学术会议的倡议,中国工程热物理学会计算传热专业组决定,1993年11月在贵阳市举行第五届全国计算传热学术会议。这本文集收编了经过严格评审、录用,并在此次会议上宣读的学术论文66篇。为便于查阅,将全部论文分列为数值计算方法、热传导、相变传热、流动与对流换热、辐射换热与换热设备等五个部分,各种工程应用则贯穿于其中,涉及的面较为广泛。文集在一定程度上反映了我国近年来计算传热学研究的学术动向和已取得的某些主要成果。正是在这个意义上,本文集取名“计算传热研究与应用进展”。值得指出的是,从收编论文的情况可以看出,计算传热研究的发展是不平衡的,在高等院校和部分科研单位比较活跃,且论文作者相对集中,而在设计和生产部门队伍相对较弱,发展较慢。因此,在继续提高计算传热学术研究水平的同时,需要进一步加强工程应用研究和推广工作,以不断壮大和扩展计算传热队伍,创造更大的经济效益和社会效益,使计算传热学的巨大活力更充分地发挥出来。

本文集由中国工程热物理学会计算传热专业组编,张洪济任主编。本届会议的召开和论文集的出版得到了传热传质学分会领导的重视和关心,论文作者给予了积极的合作与支持,谨在此一并致谢。期望本文集能有助于“八五”后期我国计算传热学科的繁荣与发展,在促进科技进步和国民经济发展中起到它应起的作用。

由于编者水平有限,编辑工作时间短促,文集中缺点和错误在所难免,欢迎读者批评指正。

编 者

1993年5月于重庆大学

目 录

一、数值计算方法

NHT9301	导热反问题的傅里叶逆变换方法	1
	张 辉、陈善年、徐益谦 (东南大学)	
NHT9302	测量误差对温度场数值计算精度影响的计算机模拟分析	5
	胡亚才、屠传经 (浙江大学)	
NHT9303	SIMPLE 型算法使用中的一些问题	9
	陈 熙 (清华大学)	
NHT9304	一种改进的 SIMPLE 算法	13
	王中铮、谷 操、郭新川、刘可心、李汝俊 (天津大学)	
NHT9305	热分层流动计算中的差分格式初步研究	17
	杨志民 (中国原子能科学研究院)、 席时桐 (上海交通大学)	
NHT9306	论计算流体流动和传热的同位网格方法	21
	虞维平、陈善年 (东南大学)	
NHT9307	传热及流动问题的蒙特卡罗解法	25
	陈善年、崔晓钰、张 辉 (东南大学)	

二、热传导

NHT9308	一维扩展表面稳态导热两点边值问题数值方法讨论	29
	翟贵立 (重庆大学)	
NHT9309	椭圆管矩形翅片肋效率的数值计算	33
	张春雨、李 妩 (西安交通大学)	
NHT9310	二维翅片的传热分析与计算	37
	张洪济、李隆键、杨迎七 (重庆大学)	
NHT9311	高温金属管道的应力分析与监测	41
	孙奉仲、陆 煜 (山东工业大学)	
NHT9312	瞬态线热源法测试血液热导率的数值分析	44
	刘小云、张洪济、童明伟 (重庆大学)	
NHT9313	在脉冲热源作用下环流器线圈温度响应的计算	49
	谢 威 (中国核动力研究设计院)	
NHT9314	周期性移动热源作用下复杂物体计算体边界条件选取的误差比较	53
	王良璧、陶文铨 (西安交通大学)	
NHT9315	RC 网络法及电子装置温度试验外壳热状态	57
	黄晓齐 (贵州工学院)	

三、相变传热

NHT9316	封闭空腔内固液相变时考虑液相自然对流的 Neumann 问题	61
	王补宣、马 骥 (清华大学)	

NHT9317	固固相变对十七烷凝固过程影响的研究	66.
	张玉文、陈钟硕（西安交通大学）	
NHT9318	第三类边界条件下半无限大区域内过热液体的凝固	70
	陈明勇、张玉文、陈钟硕（西安交通大学）	
NHT9319	有分散热源时矩形腔内过冷固体的熔化	74
	张玉文、陈钟硕（西安交通大学）	
NHT9320	高温相变材料在重力热管外表面凝固的耦合计算	78
	胡杭英、吴存真（浙江大学）、顾文斌（江西省科学院）	
NHT9321	合金凝固过程中传递现象的数值模拟及应用	82
	顾江平、赵勇、刘庄（清华大学）	
NHT9322	求解双组分溶液固化过程的交点修正法	87
	金援越、王启杰、陈钟硕（西安交通大学）	
NHT9323	初始过热度对双组分溶液固化过程影响的数值分析	91
	金援越、王启杰、陈钟硕（西安交通大学）	
NHT9324	非牛顿流体在薄型腔中流动与传热的有限元计算	95
	陈罕、周昆颖、李素云（北京化工学院）	
NHT9325	非共沸混合工质水平圆管外膜状凝结的理论解析	99
	魏杰、陈民、魏保太（天津大学）	
NHT9326	狭窄通道内液膜蒸发冷却研究	103
	郭新川、赵戌贵、王中铮（天津大学）	

四、流动与对流换热

4. 1 流动

NHT9327	在注塑充模过程与流动分析时复杂构件的简化处理	107
	张政、郑坚强（北京化工学院）	
NHT9328	梯度法在平行通道自然循环两相流动不稳定性研究中的应用	112
	许圣华（苏州大学）、浦保荣（上海交通大学）	
NHT9329	液体中弱冲击波与气泡干涉时温度及压力传播的数值解析	116
	归志明（东南大学）	
NHT9330	圆锥—圆柱形腔体中流动的数值模拟	119
	李沛文、陶文铨（西安交通大学）	
NHT9331	RH 真空脱气系统循环流动的数值计算	123
	李宝宽、郝冀成（东北大学）	
NHT9332	有限空间内相交射流的数值模拟	127
	章旋、徐通模、郭宏生、惠世恩（西安交通大学）	
NHT9333	沿曲线表面的无粘一边界层迭代计算的边界元法	132
	林成先、辛明道（重庆大学）、廖艾贤（西南交通大学）	

4. 2 自然对流

NHT9334	环状扇形通道内自然对流的等价性问题	136
	吕树申、陶文铨（西安交通大学）	
NHT9335	钠冷快堆（LMFBR）失流事故工况下自然对流衰变热排除的数值研究	140
	何波涌、陈汉平、徐济均（上海交通大学）	

NHT9336	具有平行隔板的倾斜矩形腔体内自然对流传热数值分析	144
	孙学军、陆煜 (山东工业大学)	
NHT9337	分隔板对部分开口空腔内自然对流的影响	147
	夏吉良、高明聪、辛明道、张洪济 (重庆大学)	
NHT9338	相互耦合的多封闭腔内的自然对流换热	151
	赵长颖、陶文铨 (西安交通大学)	
NHT9339	底部离散加热顶部冷却的二维空腔内的自然对流数值分析	156
	陈礼、李隆键、张洪济 (重庆大学)	
NHT9340	圆内双槽形体自然对流换热的数值计算	160
	李惠珍、李妩、陶文铨 (西安交通大学)	
NHT9341	竖环形空腔紊流自然对流的数值模拟	164
	倪高霞、杨强生 (上海交通大学)	
4. 3 受迫层流		
NHT9342	第三类边界条件下矩形通道内充分发展对流换热的分析及数值解	168
	辛荣昌、陶文铨 (西安交通大学)	
NHT9343	旋转空腔内冲击式换热的数值计算	172
	康海军、陶文铨 (西安交通大学)	
NHT9344	一个混合对流问题的数值解	176
	陆煜、孙奉仲 (山东工业大学)	
NHT9345	超临界压力水在竖直圆管内受迫与混合对流传热与传质	179
	姜培学、任泽霏、王补宣 (清华大学)	
NHT9346	外管壁对流换热条件下管内层流传热传质耦合问题的数值解	184
	巨永林、张玉文、陈钟硕 (西安交通大学)	
4. 4 受迫湍流		
NHT9347	采用 $K-\epsilon$ 模型对稳态和非稳态热分层流动的数值模拟	188
	席时桐、黄海 (上海交通大学)	
NHT9348	空调房间中墙体内部面对流换热的数值研究	192
	顾瑞英 (西安冶金建筑学院)、武文斐 (包头钢铁学院)	
NHT9349	复杂条件下空腔中的湍流脉动与对流热损失	196
	林成先、辛明道、张洪济 (重庆大学)	
4. 5 多孔介质传热传质		
NHT9350	含湿多孔体的非稳态传热研究	202
	季杰、高举文、葛新石 (中国科学技术大学)	
NHT9351	冻干过程热质耦合效应的数值计算	207
	施明恒、冯梅、虞维平 (东南大学)	
NHT9352	具有内热源的矩形空间多孔介质中非牛顿流体自然对流的数值分析	211
	陈振乾、施明恒、虞维平 (东南大学)	
NHT9353	逼近表面浅埋于湿饱和多孔介质中的水平圆柱周围非达西流自然对流	215
	D. M. Christopher (柯道友)、王补宣 (清华大学)	
NHT9354	多孔介质中暂态自然对流传热传质	219
	陈宝明、方肇洪 (山东建筑工程学院)	

NHT9355	干燥数学模型中参数的确定	225
	李 蔚 (西安公路学院)、涂 颀 (天津大学)	

五、辐射换热与换热设备

NHT9356	用均匀离散射线法计算辐射直接交换面积	229
	李本文、宁宝林 (东北大学)	
NHT9357	漫灰竖直平板上的二维受热空腔内的非稳态边界层流动与复合传热	233
	林成先、辛明道、张洪济 (重庆大学)	
NHT9358	风冷离相封闭母线散热的数值计算	239
	陈钟硕、张玉文 (西安交通大学)、刘咸定 (西安冶金建筑学院)	
NHT9359	MHD 发电用高温再生式热交换器燃烧室的传热解析	243
	程永元 (东南大学)、金润植、吉川邦夫 (日本东京工业大学)	
NHT9360	导热反问题在石墨化电炉连续测温技术上的应用	247
	林传兴、张宏伟、李红利 (东北大学)	
NHT9361	数值方法在脉管制冷机工作过程模拟中的应用	252
	王 超、吴沛宜、陈钟硕 (西安交通大学)	
NHT9362	马蹄焰玻璃池窑中二维流动与传热的数值模拟	256
	胡智敏 (西北轻工业学院)、吕树申、陶文铨 (西安交通大学)	
NHT9363	高炉内气体流动和传热的数值模拟	261
	严定臻、郝冀成 (东北大学)	
NHT9364	新型管口保护结构的传热研究	265
	张洪济、李隆键 (重庆大学)	
NHT9365	热网最佳比压降的确定和数值计算	269
	华丹坡、马春元、冯 原 (山东工业大学)	
NHT9366	管口高温热保护结构的优化分析与计算	273
	李隆键、张洪济 (重庆大学)	

CONTENTS

1. Numerical Method

NHT9301	Inverse Fourier Transform Approach to Inverse Heat Conduction Problems	1
	Zhang Hui, Chen Shannian, Xu Yiqian (Southeast University)	
NHT9302	Computer Simulation of the Effect of Error in Measuring on the Accuracy of Numerical Calculation of Temperature Field	5
	Hu Yacai, Tu Chuanjing (Zhejiang University)	
NHT9303	Some Problems Encountered in the Application of the SIMPLE-Type Algorithm	9
	Chen Xi (Tsinghua University)	
NHT9304	An Enhancement of the SIMPLE Method	13
	Wang Zhongzheng, Gu Cao, Guo Xinchuan, Liu Kexin, Li Rujun (Tianjin University)	
NHT9305	Study of Difference Scheme for Thermal Stratified Flow	17
	Yang Zhimin (China Institute of Atomic Energy), Xi shitong (Shanghai Jiaotong University)	
NHT9306	On Colocated-Grid Method for Numerical Fluid Flow and Heat Transfer	21
	Yu Weiping, Chen Shannian (Southeast University)	
NHT9307	Monte Carlo Method for Fluid Flow and Heat Transfer	25
	Chen Shannian, Cui Xiaoyu, Zhang Hui (Southeast University)	

2. Heat Conduction

NHT9308	Discussion on the Numerical Solution of the Two-point Boundary Value Problem for the Steady Heat Conduction in One-Dimensional Extended Surface	29
	Zhai Guli (Chongqing University)	
NHT9309	Numerical Calculation of Fin Efficiency for Rectangular Fins on Elliptic Tube	33
	Zhang Chunyu, Li Wu (Xi'an Jiaotong University)	
NHT9310	Analysis and Numerical Calculation of Heat Transfer in Two-Dimensional Fins	37
	Zhang Hongji, Li Longjian, Yang Yingqi (Chongqing University)	
NHT9311	Analysis and Monitoring of Stress in Metal Pipes with High Temperature	41
	Sun Fengzhong, Lu Yu (Shandong Polytechnic University)	
NHT9312	Numerical Study of Transient Line-Source Method for Measuring Thermal Conductivity of Blood	44
	Liu Xiaoyun, Zhang Hongji, Tong Mingwei (Chongqing University)	
NHT9313	Numerical Calculation of the Temperature Response for the Coil in Tokmak Facility under the Action of Pulse Heat-Source	49
	Xie Wei (Nuclear Power Institute of China)	
NHT9314	Comparison of Boundary Conditions of Computational Domain for Complex Geometries with Periodic Heat Sources	53
	Wang Liangbi, Tao Wenquan (Xi'an Jiaotong University)	
NHT9315	RC Network and Thermal State of Electronic Equipment Case in the Temperature Test ...	57
	Huang Xiaoqi (Guizhou Institute of Technology)	

3. Phase Change Heat Transfer

NHT9316	Neumann Problem; Natural Convection Controlled Freezing in an Enclosure	61
	Wang Buxuan, Ma Ji (Tsinghua University)	
NHT9317	Effect of Solid-Solid Phase Change on Solidification of n-Heptadecane	66
	Zhang Yuwen, Chen Zhongqi (Xi'an Jiaotong University)	
NHT9318	Solidification of Super-Heated Liquid in a Semi-Infinite Zone with the Third Kind of Boundary Condition	70
	Chen Mingyong, Zhang Yuwen, Chen Zhongqi (Xi'an Jiaotong University)	
NHT9319	Effect of Subcooling on Melting in an Enclosure with Discrete Heat Sources	74
	Zhang Yuwen, Chen Zhongqi (Xi'an Jiaotong University)	
NHT9320	Coupled Calculation of High Temperature Phase Change Medium Freezing Outside Two-Phase Closed Thermosyphon	78
	Hu Hangying, Wu Cunzhen (Zhejiang University), Gu Wenbin (Jiangxi Academy of Sciences)	
NHT9321	Numerical Simulation and Application of Transport Phenomena during the Solidification of Alloy	82
	Gu Jiangping, Zhao Yong, Liu Zhuang (Tsinghua University)	
NHT9322	Intersecting-Point Modifying Method for Solving Solidification Problem of Binary Solutions	87
	Jin Yuanyue, Wang Qijie, Chen Zhongqi (Xi'an Jiaotong University)	
NHT9323	Numerical Study of the Effect of the Initial Superheat on Solidification Process of Binary Solutions	91
	Jin Yuanyue, Wang Qijie, Chen Zhongqi (Xi'an Jiaotong University)	
NHT9324	Finite Element Analysis for the Flow and Heat Transfer of Non-Newtonian Fluid in a Thin Cavity	95
	Chen Han, Zhou Kunying, Li Suyun (Beijing Institute of Chemical Technology)	
NHT9325	Theoretical Solution of the Filmwise Condensation of Nonazeotropic Binary Mixture on a Horizontal Tube	99
	Wei Jie, Chen Min, Wei Baotai (Tianjin University)	
NHT9326	Film Evaporation in Narrow Channels	103
	Guo Xinchuan, Zhao Xugui, Wang Zhongzhen (Tianjin University)	

4. Fluid Flow and Convective Heat Transfer

4.1 Fluid Flow

NHT9327	Simplified Treatment of Complex Construction Members in the Flow Analysis of Injection Molding Process	107
	Zhang Zheng, Zheng Jianqiang (Beijing Institute of Chemical Technology)	
NHT9328	The Application of Gradient Method in the Study of Two-Phase Flow Instability in Natural Circulation Loops with Parallel Channels	112
	Xu Shenghua (Suzhou University), Pu Baorong (Shanghai Jiaotong University)	
NHT9329	Numerical Study of Temperature and Pressure Propagation in a Liquid with an Air Bubble Interfered in by a Weak Shock Wave	116
	Shuai Zhiming (Southeast University)	

NHT9330	Numerical Simulation of Fluid Flows in Conical-Cylindrical Cavity	118
	Li Peiwen, Tao Wenquan(Xi'an Jiaotong University)	
NHT9331	Numerical Calculation of Circulation Flow in RH Vacuum Degassing Systems	120
	Li Baokuan, He Jicheng(Northeast University)	
NHT9332	Numerical Simulation of Two Intersecting Jets in a Finite Space	127
	Zhang Xuan, Xu Tongmo, Guo Hongsheng, Hui Shien(Xi'an Jiaotong University)	
NHT9333	Boundary Element Method for the Nonviscous-Boundary Layer Iterative Computation along Curved Surfaces	132
	Lin Chengxian, Xin Mingdao (Chongqing University)	
	Liao Aixian (Southwest Jiaotong University)	
4.2 Natural Convection Heat Transfer		
NHT9334	Identical Problems of Natural Convections in Annular Sectors	136
	Lu Shushen, Tao Wenquan(Xi'an Jiaotong University)	
NHT9335	Numerical Study of Decay Heat Removal by Natural Convection in LMFBR	140
	He Boyong, Chen Hanping, Xu Jijun(Shanghai Jiaotong University)	
NHT9336	Numerical Analysis of Natural Convection in Inclined Rectangular Enclosures with a Partition	144
	Sun Xuejun, Lu Yu(Shandong Polytechnic University)	
NHT9337	Effect of Conducting Divider on Natural Convection in a Partially Open Cavity	147
	Xia Jiliang, Gao Mingcong, Xin Mingdao, Zhang Hongji(Chongqing University)	
NHT9338	Natural Convection in Conjugated Multi-Enclosures	151
	Zhao Changyin, Tao Wenquan(Xi'an Jiaotong University)	
NHT9339	Numerical Study of Natural Convection in an Enclosure Discretely Heated at the Bottom and Cooled from the Top	156
	Chen Li, Li Longjian, Zhang Hongji(Chongqing University)	
NHT9340	Numerical Simulation of Natural Convection in Circular Enclosure with an Internal Slotted Square Cylinder	160
	Li Huizhen, Li Wu, Tao Wenquan(Xi'an Jiaotong University)	
NHT9341	Numerical Simulation of Turbulent Natural Convection in a Vertically Annular Enclosure	164
	Ni Gaoxia, Yang Qiangsheng(Shanghai Jiaotong University)	
4.3 Forced Laminar Convection Heat Transfer		
NHT9342	Analytical and Numerical Solution of Fully Developed Convective Heat Transfer in Square Duct with Convection Boundary Conditions	168
	Xin Rongchang, Tao Wenquan(Xi'an Jiaotong University)	
NHT9343	Numerical Simulation of Laminar Jet Impingement Heat Transfer in Rotating Cylinders	172
	Kang Haijun, Tao Wenquan(Xi'an Jiaotong University)	
NHT9344	Numerical Solution of a Mixed Convection Problem	176
	Lu Yu, Sun Fenzhong(Shandong Polytechnic University)	
NHT9345	Forced and Mixed Convective Heat and Mass Transfer of Water at Super-Critical Pressures in Vertical Tubes	179
	Jiang Peixue, Ren Zepei, Wang Buxuan(Tsinghua University)	
NHT9346	Numerical Solution of a Laminar Coupled Heat-Mass Transfer in a Tube with Convective Heat Transfer on the Outside Wall	184

Ju Yonglin, Zhang Yuwen, Chen Zhongji (Xi'an Jiaotong University)

4.4 Forced Turbulent Convection Heat Transfer

- NHT9347 Numerical Simulations of Steady and Unsteady Flows of Thermal Stratification by Using a $K-\epsilon$ Turbulence Model 188
Xi Shitong, Huang Hai (Shanghai Jiaotong University)
- NHT9348 Numerical Study of Convection Heat Transfer coefficient on the Inside Surface of the Wall in an Air Conditioning Room 192
Gui Ruiying (Xi'an Institute of Metallurgy and Construction Engineering)
Wu Wenfei (Baotou Steel Institute)
- NHT9349 Turbulent Fluctuation and Convective Heat Loss in Cavities under Complex Conditions ... 196
Lin Chengxian, Xin Mingdao, Zhang Hongji (Chongqing University)

4.5 Heat and Mass Transfer in Porous Medium

- NHT9350 Study of the Transient Heat Transfer of Moisture Porous Medium 202
Ji Jie, Gao Juwen, Ge Xinshi (University of Science and Technology of China)
- NHT9351 Numerical Calculation of Conjugated Heat-Mass Transfer in Freeze-Drying Process 207
Shi Mingheng, Feng Mei, Yu Weiping (Southeast University)
- NHT9352 Numerical Study of Natural Convection for Non-Newtonian Fluid in a Square Enclosure with Porous Medium and Internal Heat Source 211
Chen Zhenqian, Shi Mingheng, Yu Weiping (Southeast University)
- NHT9353 Non-Darcy Natural Convection around a Horizontal Cylinder Buried near the Surface of a Fluid-Saturated Porous Medium 215
D. M. Christopher, Wang Buxuan (Tsinghua University)
- NHT9354 Transient Natural Convection Heat and Mass Transfer in a Porous Medium 219
Chen Baoming, Fang Zhaohong (Shandong Architectural and Civil Engineering Institute)
- NHT9355 An Estimation of Optimal Parameters in Mathematical Drying Models 225
Li Wei (Xi'an Highway Institute), Tu Jie (Tianjin University)

5. Radiative Heat Transfer and Heat Exchange Equipment

- NHT9356 Uniform Emission Ray Method for Radiative Direct Exchange Areas in Enclosure with Participating Media 229
Li Benwen, Ning Baolin (Northeast University)
- NHT9357 Unsteady Boundary-Layer Flow and Combined Heat Transfer in a Heated 2-D Cavity Located in a Diffuse-Grey Vertical Plate 233
Lin Chengxian, Xin Mingdao, Zhang Hongji (Chongqing University)
- NHT9358 Numerical Calculation of Heat Dissipation of an Enclosed Isolated-Phase Circular Bus with Forced Convective Cooling 239
Chen Zhongqi, Zhang Yuwen (Xi'an Jiaotong University)
Liu Xianding (Xi'an Institute of Metallurgy and Construction Engineering)
- NHT9359 Heat Transfer Analysis of High Temperature Regenerative Heat Exchanger Combustor for MHD Power Generation 243
Cheng Yongyuan (Southeast University)
- NHT9360 Continuous Determination of the Temperature in Graphitizing Resistance Furnace Using Inverse Heat Conduction Method 247
Lin Chuanxing, Zhang Hongwei, Li Hongli (Northeast University)

NHT9361	Numerical Method Applied to Simulate the Working Process of Pulse Tube Refrigerator...	252
	Wang Chao, Wu Peiyi, Chen Zhongqi (Xi'an Jiaotong University)	
NHT9362	Two-Dimensional Numerical Simulation of Flow and Heat Transrer in U-Flame Glass Tank Furnace	256
	Hu Zhimin (Northwest Institute of Lingt Industry)	
	Lu Shushen, Tao Wenquan (Xi'an Jiaotong University)	
NHT9363	Numerical Simulation of Gas Flow and Heat Transfer in Blast Furnaces	261
	Yan Dingliu, He Jicheng (Northeast University)	
NHT9364	Heat Transfer Study in a New Type of Tube-Mouth Protection Structure	265
	Zhang Hongji, Li Longjian (Chongqing University)	
NHT9365	Determination and Numerical Calculation of the Optimal Unit Pressure Drop of Heating Network	269
	Hua Danpo, Ma Chunyuan, Feng Yuan (Shandong Polytechnic University)	
NHT9366	Optimization of the High-Temperature Thermal-Protection Structure for the Tube-Mouth	273
	Li Longjian, Zhang Hongji (Chongqing University)	

导热反问题的傅里叶逆变换方法

张 辉 陈善年 徐益谦

(东南大学)

内容摘要 本文给出了求解待定边界条件导热反问题的傅里叶逆变换解法。选择适当的采样时间步长,用频域滤波方法对边界条件进行处理,可以控制随机测量误差的影响,得到待定边界条件的合理近似解。

一、概 述

根据在物体内部点上测量得到的温度随时间的变化规律来确定未知的边界条件被称为导热反问题。由于导热过程具有衰减和滞后的特点,根据物体内部的温度的变化规律来求解边界条件时,温度的测量误差就会被放大,使得到的边界条件与实际情况有很大的差别。当温度和边界条件的采样间隔较小时,这种情况尤其严重^[1,2]。通常的解决办法是从解的重新定义出发,用最小二乘逼近法或辅以正则法求解^[2~4],得到的解是稳定的。本文通过傅里叶变换把导热反问题转到频率域中进行研究,着重考察时间步长的影响和误差的控制,并在此基础上建立一种新的求解算法。

二、导热反问题的傅里叶逆变换解法

1. 导热反问题的数学描述常物性条件下,通过简单的数学处理,可以把待定边界条件的导热反问题转化为初始条件为零,除待定的边界条件外,其余边界条件都为齐次的标准形式^[4]。对一维导热问题:

$$\begin{aligned}\rho c \frac{\partial T}{\partial t} &= \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} & 0 \leq x \leq L \\ T(0, x) &= 0 & t = 0 \\ b(t) &= \text{待定} & x = 0 \\ b(t) &= 0 & x = L\end{aligned}\quad (1)$$

如果测得物体内部某点 x_p 上的温度 $T(t, x_p) = g(t)$, 可以把 $b(t)$ 与 $T(t, x_p)$ 之间的关系用线性变换来表达:

$$A[b(t)] = g(t) \quad (2)$$

其中 A 是一个线性变换。

2. 导热反问题的傅里叶逆变换解

令 $b(t)$ 的傅里叶变换为 $B(f)$, $g(t)$ 的傅里叶变换为 $G(f)$, 即

$$F[b(t)] = B(f)$$

$$F[g(t)] = G(f)$$

当取 $b(t)$ 为单位脉冲函数 $\delta(t)$ 时, 可以从以上的导热微分方程中解出 x_p 点上相应的温度变化规律 $h(t)$, 并且有

$$F[\delta(t)] = 1$$

$$F[h(t)] = H(f)$$

$H(f)$ 称为线性系统式(1)的频率响应函数。利用频率响应函数,把式(1)变换成

$$B(f)H(f) = G(f)$$

进一步处理

$$B(f) = \frac{G(f)}{H(f)} \quad (3)$$

对 $B(f)$ 进行傅里叶逆变换可以得到 $b(t)$:

$$b(t) = F^{-1}[B(f)] = F^{-1}\left[\frac{G(f)}{H(f)}\right] \quad (4)$$

傅里叶变换和逆变换用 FFT 算法进行, $h(t)$ 可以由式(1)的数值解或实验求出。

三、 采样间隔和总采样时间的影响

一般认为^[1,2], 温度和边界条件的采样间隔越小, 计算精度就越高。而实际上, 减小采样间隔是要得到高频变化的特征, 而高频边界条件的影响在物体内部衰减幅度很大, 不易与随机测量误差区别开来。所以, 减小时间步长未必能提高精度。另外, 由于导热过程的滞后, 边界条件对内部的影响需一段延迟才能反映出来, 温度采样的时间要足够长才能得到边界条件变化的信息。因此可以肯定, 延长温度的总采样时间对计算结果会有明显的改善。可以通过数值模拟的方法说明上述观点。假设待定的边界条件是第二类(或第一类)的, 预先给定边界条件的变化规律如图 1 所示。根据这个边界条件可以解导热微分方程式(1), 得到 x_r 点上的温度变化规律, 然后在根据这个温度变化规律反过来求边界条件并与已知的边界条件进行对比。图 2 是 10 秒内以 0.01 秒为间隔, 共计 1024 个采样点时得到的计算结果, 计算得到的边界条件是严重波动的。而图 3 是在 32 秒内以 0.5 秒为间隔共 64 个采样点得到的结果。通过对比可以看出, 后者的计算结果与原设定的边界条件基本一致, 而且几乎没有波动。

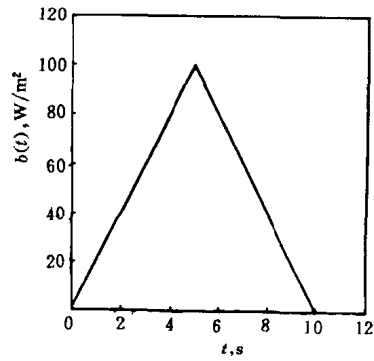


图 1 预定的边界热流变化规律

四、 频域滤波处理

实际测量中, 物体内部的温度总是带有随机测量误差的, 这些随机误差在频谱上的特征是高频脉动, 这些高频脉动的幅度甚至比真实的温度脉动幅度都要大。由于导热过程中, 边界条件的影响在物体内部衰减很多, 所以在由物体内部的温度变化计算边界条件时, 随机误差就会和真实的温度脉动一起被放大, 使得到的边界条件严重失真。为了解决这个问题, 必须设法把真实的温度变化规律与随机误差分离出来。

图 4a 是在给定图 1 的边界条件时, 在没有误差的情况下, 根据从物体内部点 x_r 上得出的温度变化规律的傅里叶变换和频率响应函数由式(3)得到的 $B(f)$ 。根据这条曲线得到的边界条件与图 1 完全一致。图 4b 是在测点温度数据上人为加入 10% 误差时的 $B(f)$ 。由图 4b 可以看出, 随机误差主要表现为高频分量。

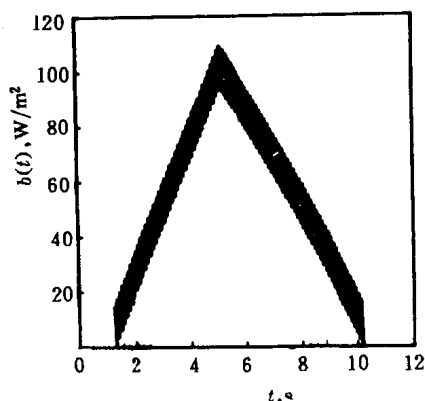


图2 小时间间隔的计算结果

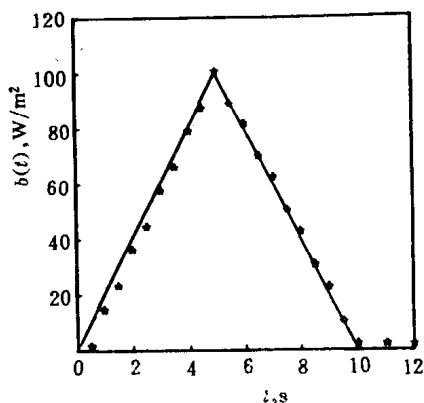
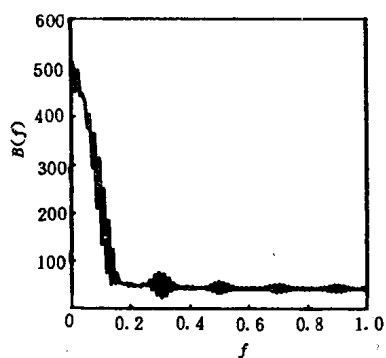
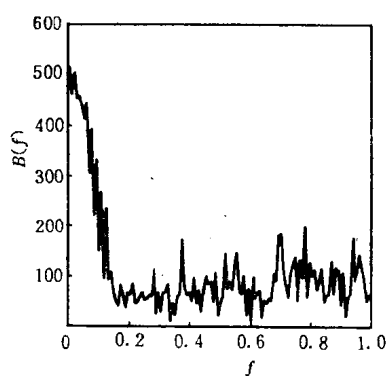


图3 大时间间隔的计算结果



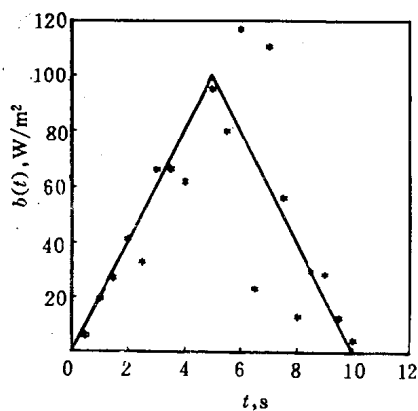
(a)测量数据无误差的情况



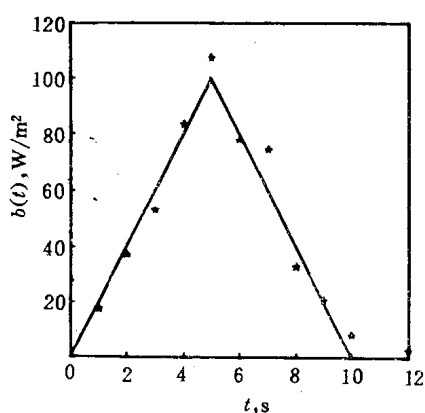
(b)测量数据有误差的情况

图4

如果直接用带有误差的 $B(f)$ 计算 $b(t)$, 其结果将产生严重的波动, 如图 5a 所示。解决波动的一个方法是采用频域的低通滤波技术。由于导热过程中高频分量幅值衰减很大, 可以认为 $B(f)$ 中高于某一频率的数据完全是随机误差所致。截断这些高频分量, 把余下的低频分量做傅里叶反变换, 得到的 $b(t)$ 即为近似的边界条件。图 5b 是经过频域滤波后的边界条件的计算结果。经过滤波后, 计算精度有明显的改善。



(a)未滤波处理的计算结果



(b)滤波处理后的计算结果

图5