

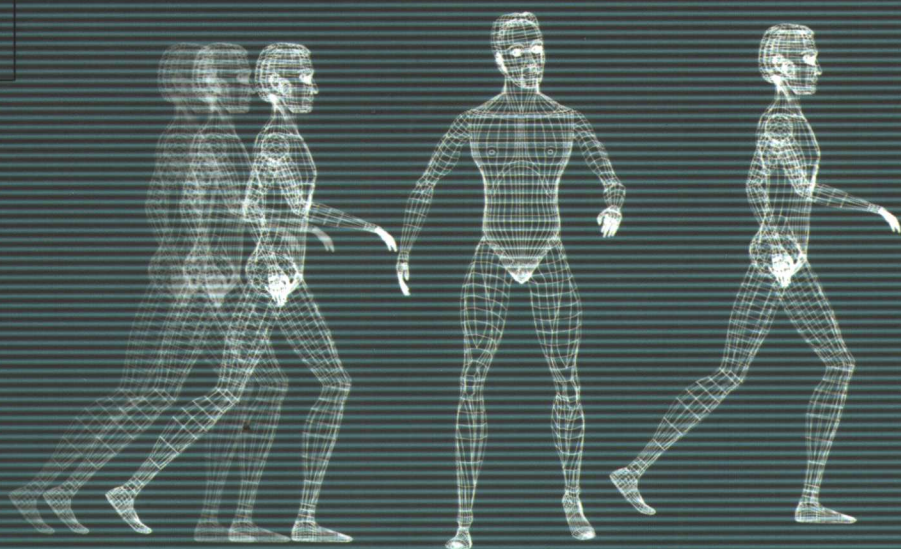
航空宇航科学与技术

国防科工委「十五」规划专著



人体热调节系统的 数学模拟

袁修干 著



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划专著·航空宇航科学与技术

人体热调节系统的数学模拟

袁修干 著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书是论述人体热调节系统数学模拟的专著。全书共分7章,第1章为绪论;第2章为准二维人体热调节数学模型;第3章为热环境下二维人体热调节数学模型;第4章为冷环境下二维人体热调节系统数学模型;第5章为冷热宽温度环境下二维人体热调节数学模型;第6章为人体热调节系统数学模型在舱外航天服热设计中的应用;第7章为人体热调节系统数学模型在舱外航天服手套热分析中的应用。书后有附录A,为人体的几何参数、热物理参数及生理参数的确定;附录B,为差分求解方法中的节点离散方程;附录C,为人体生物热方程的有限元数值求解。本书内容新颖,学术性及应用性强,体现了我国自主研究成果,具有人体科学与工程学科间的有机结合的特色。

本书可供航空航天、医学工程、航海、交通、建筑、空调等技术领域有关研究和工程技术人员、教学人员及其他相关人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

人体热调节系统的数学模拟/袁修干著. —北京:北京航空航天大学出版社,2005.5

ISBN 7-81077-578-2

I. 人… II. 袁… III. 人体—体温调节—数学模拟 IV. V339.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第108071号

人体热调节系统的数学模拟

袁修干 著

责任编辑 陶金福

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(100083) 发行部电话:010-82317024

<http://www.buaapress.com.cn>

E-mail: bhpresse@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

开本:850×1168 1/32 印张:18.125 字数:487千字

2005年5月第1版 2005年5月第1次印刷 印数:2000册

ISBN 7-81077-578-2 定价:30.00元

国防科工委“十五”规划专著编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：陈一坚 屠森林

编 委：王文生 王泽山 卢伯英 乔少杰

刘建业 张华祝 张近乐 张金麟

杨志宏 杨海成 肖锦清 苏秀华

辛玖林 陈一坚 陈鹏飞 武博祎

侯深渊 凌 球 聂 武 谈和平

屠森林 崔玉祥 崔锐捷 焦清介

葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了



一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍。他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育,特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防



特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家、学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著书稿进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著书稿,覆盖了航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者。他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等院校,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展



阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

1960年后,人体热调节系统的数学模拟是一非常活跃的研究领域,参与的研究者们遍及世界科技发达的主要国家。推动其研究的强劲动力,是航空航天、生理学及医疗、建筑空调和航海等技术领域的发展需求;特别是载人航天和航空领域对温度环境中人体热舒适、工效评定和热防护装备设计的高要求,以及现代生理学及医疗技术对人体温度场准确描述和预测的高要求,大大推动了人体热调节系统数学模拟研究的飞速发展。

目前国内外公开出版关于人体热调节系统数学模拟的书籍多为学术论文集,或者是基于人体热平衡分析和一维数学建模而撰写的著作,尚未见到基于二维数学建模方法而可面向工程应用撰写的学术专著。本书出版是抛砖引玉,望能引起业界的关注。

我与合作研究者们,应航空航天发展需求,对二维人体热调节系统的数学模拟,进行了历时近20年的研究,发表论文约40篇,部分研究结果在实际中得到应用;研究成果获得国家科技进步三等奖1项,省部级一、二等奖各1项,省部级三等奖3项。现将我们的研究结果撰写成本书,供研究及工程科技人员在工作中参考,祈望对今后的研究能起一点微薄作用。合作研究者有:杨春信、沙斌、徐向东、操作、邱义芬、丁立、廖晓红、桑民敬等。

本书内容主体选材于我们的研究成果,同时也反映



了国内外近期的研究成果和进展。撰写中力求从生物物理基础、数值求解方法和工程应用背景及三者的有机联系,去论述人体热调节系统建模仿真中的有关问题。书中虽着重论述人体热调节系统的数学模拟在航空航天领域中的应用,但对其他领域的温度环境热舒适、工效评价和热防护装备设计均可使用。

本书共分十部分:第1章——绪论;第2章——准二维人体热调节系统数学模型;第3章——热环境下二维人体热调节系统数学模型;第4章——冷环境下二维人体热调节系统数学模型;第5章——冷热宽温度环境下二维人体热调节系统数学模型;第6章——人体热调节系统数学模型在舱外航天服热设计中的应用;第7章——人体热调节系统数学模型在舱外航天服手套热分析中的应用;附录A——人体的几何参数、热物理参数及生理参数的确定;附录B——差分求解方法中的节点离散方程;附录C——人体生物热方程的有限元数值求解。

合作研究者杨春信、沙斌、徐向东、操作、邱义芬、丁立提供了有关章节的文字资料。董大勇、韩龙柱、张皓、许昕等四位研究生参与撰写中的图文编排工作。由于我们的学术水平有限,书中不当之处敬请读者、专家们指正。

袁修干

2004年4月

主要符号

大写英文字母

<i>A</i>	面积, 人体面积, m^2
<i>B</i>	血流量, 分配系数, m^3/s
$\dot{B}$	单位体积血流量, $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
<i>C</i>	热容, $\text{J}/^\circ\text{C}$ 冷觉信号, $^\circ\text{C}$
<i>D</i>	直径, m
<i>F</i>	效应器输出信号敏感因数, 因子
<i>Gr</i>	格拉晓夫数
<i>Gz</i>	格雷兹数
<i>H</i>	风冷指数, W/m^2 身高, m 或 cm
<i>K</i>	系数(控制、增益、比例等)
<i>L</i>	工作负荷 长度, m
<i>Nu</i>	努塞尔数
<i>P</i>	指令系数
<i>Pr</i>	普朗特数
<i>R</i>	热阻, $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ 服装热阻, clo $1\text{clo}=0.155 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$
$\bar{R}$	呼吸热交换比例
<i>Re</i>	雷诺数
<i>S</i>	指令系数, 感受器输出信号
<i>T</i>	热力学温度, K
<i>V</i>	体积, m^3

W 机械功, 温觉信号, W

Y 年龄, a

Z 有效传热能力, $\text{W}/^\circ\text{C}$

小写英文字母

<i>a</i>	热扩散率, m^2/s
<i>c</i>	比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$
<i>d</i>	含湿量
<i>f</i>	信号
f_r	人体与环境之间的辐射角系数
<i>h</i>	传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
<i>k</i>	比例系数
<i>m</i>	质量, 体重, kg
$\dot{m}$	质量流量, kg/s
$\dot{m}_v$	质量单位体积流量, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
<i>p</i>	压力, Pa
<i>q</i>	单位面积热流, W/m^2
q_v	单位体积热流, W/m^3
<i>r</i>	潜热, J/kg
<i>s</i>	人体单位面积储存能量变化率, W/m^2
<i>t</i>	摄氏温度, $^\circ\text{C}$
<i>v</i>	速度, m/s
<i>x</i>	空间坐标
<i>y</i>	空间坐标

下标注

a 环境,空气
ar 动脉
b 血液,基础
bas 基础
c 核心,对流,冷感,周向,收缩
ch 座椅
cl 服装
co 收缩
cr 临界
cond 导热
conv 对流
d 扩张
di 扩张
dry 干态
e 蒸发,活动,有效
ed 扩散(无感)蒸发
er 误差
es 出汗(有感)蒸发
ev 蒸发
exh 呼出
f 脂肪,面积因子
gen 产热
hyp 下丘脑
i 单元,节段号
in 入口
l 腿部,肺部
m 代谢,肌肉
out 出口
p 压力

r 辐射,实际,相对
res 呼吸
s 皮肤
set 调定,设定
sh 寒颤
st 储存
sw 出汗
V 体积
ve 静脉
w 冷却液,水
wcg 液(水)冷服
wk 做功

希腊字母

α 指令分配系数
 β 体积膨胀系数
 δ 距离,厚度, m
 ϵ 黑度
 η 空间坐标
 λ 导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$
 μ 动力粘度, $kg/(m \cdot s)$
 ν [运动]粘度, m^2/s
 ξ 空间坐标
 ρ 密度, kg/m^3
 σ 斯忒藩-玻耳兹曼常数, $W(m^2 \cdot K^4)$
 τ 时间、时间常数, s
 Φ 热流量, W
 φ 相对湿度
 ω 百分数

目 录

第 1 章 绪 论

1.1 人体热调节系统数学模型研究概述	1
1.1.1 人体温度分布的研究	2
1.1.2 人体热调节的研究	7
1.1.3 边界条件的处理	12
1.1.4 国外人体热调节数学模型研究的总结	14
1.1.5 我国人体热调节数学模型研究的回顾	17
1.1.6 本书主要内容	18
1.2 本书内容涉及的研究工作背景	22
1.2.1 非均匀温度环境下人体热调节系统数学模型研究	22
1.2.2 冷环境下的人体热调节系统数学模型研究	25
1.2.3 冷热宽温度环境下的人体热调节系统数学模型研究	28
1.2.4 人体热调节系统数学模型在舱外航天服热设计中的应用	30
1.2.5 人体热调节系统数学模型在舱外航天服手套热分析中的应用	34
参考文献	37

第 2 章 准二维人体热调节系统数学模型

2.1 人体温度控制系统的组成和原理	48
2.1.1 被控系统的数学模型	50
2.1.2 控制系统的数学模型	65
2.2 实验结果与模拟计算结果的比较	70
2.2.1 液冷服实验简介	70
2.2.2 实验数据处理	71
2.2.3 实验结果与模拟结果的对比分析	72



参考文献	82
第3章 热环境下二维人体热调节系统数学模型	
3.1 人体热调节系统数学模型	85
3.1.1 人体热调节系统的组成	85
3.1.2 人体热调节生理学基础	86
3.1.3 人体热调节系统数学模型概述	92
3.2 被控系统数学模型	93
3.2.1 人体的划分	93
3.2.2 人体几何参数及质量的确定	95
3.2.3 人体热物理参数与热生理参数	96
3.3 控制系统数学模型	100
3.3.1 人体热调节的生理学模型	100
3.3.2 控制系统数学模型简要回顾	102
3.3.3 控制系统数学模型的建立	104
3.4 人体血液对流换热分析	118
3.4.1 血液对流换热模型	118
3.4.2 血管换热效率	123
3.4.3 血液对流换热分类	125
3.4.4 血流对流换热计算模型及中央血液热平衡方程	126
3.4.5 中央血液的能量平衡方程	128
3.5 人体生物热方程	129
3.5.1 人体生物热方程的推导	129
3.5.2 关于生物热方程的讨论	132
3.6 人体生物热方程的数值求解方法	133
3.6.1 控制方程的离散	133
3.6.2 生物热方程源项的线化处理	136
3.6.3 节点离散方程	138
3.6.4 血液温度的计算	148
3.6.5 人体温度场计算过程	149
3.7 人体生物热方程的边界条件	150
3.7.1 人体同环境间的换热途径	150



3.7.2	人体着装条件下的外边界条件	154
3.7.3	着液冷服时的外边界条件	158
3.7.4	统一形式的外边界条件	164
3.8	非均匀热辐射对人体温度影响的实验研究	165
3.8.1	试验设计	165
3.8.2	实验结果及其分析	171
3.9	典型温度环境条件的计算结果	181
3.9.1	低温环境	181
3.9.2	高温环境	183
3.9.3	计算结果同实验结果的对比分析	189
3.9.4	程序动态性能考核	206
3.9.5	同其他模型计算结果的比较	215
3.10	热-振动复合环境下人体热调节系统数学模型	219
3.10.1	热-振动复合环境因素对人体热调节的影响	219
3.10.2	热-振动复合环境下人体热调节系统数学模型	220
	参考文献	225
第4章 冷环境下二维人体热调节系统数学模型		
4.1	冷环境对人体的影响及其评价	231
4.1.1	冷环境对人体的影响	231
4.1.2	对冷环境影响的评价与应用	236
4.1.3	风冷指数	240
4.1.4	冷耐受能力	241
4.2	人体与环境间的热交换	251
4.2.1	干换热	251
4.2.2	湿换热	255
4.2.3	服装对热交换的影响	257
4.3	冷环境下人体温度调节系统数学模型	261
4.3.1	人体热调节系统与人体温度调节	261
4.3.2	冷环境下人体温度调节系统数学模型概述	265
4.3.3	受控系统数学模型	266
4.3.4	控制系统数学模型	276



4.4 人体生物热方程数值求解	285
4.4.1 数值求解方法	285
4.4.2 离散网格	285
4.4.3 离散方程的一般形式	289
4.4.4 血液温度的计算	292
4.4.5 人体温度场的求解	293
4.5 冷环境下人体温度分布的实验研究与数值模拟	294
4.5.1 实验研究	294
4.5.2 计算结果与对比分析	304
4.5.3 讨 论	333
参考文献	333
第5章 冷热宽温度环境下二维人体热调节系统数学模型	
5.1 冷热宽温度环境下人体热调节系统的数学模型	338
5.1.1 人体热调节模型概述	338
5.1.2 人体的划分	340
5.1.3 模型参数的选择	340
5.1.4 数学模型的建立	342
5.2 人体生物热方程的有限元数值求解	355
5.2.1 单元网格划分	355
5.2.2 有限元方程建立	357
5.3 冷热宽温度范围人体温度分布的实验研究及数值模拟	364
5.3.1 实验概况	364
5.3.2 实验结果与计算结果的对比与分析	367
参考文献	387
第6章 人体热调节系统数学模型在舱外航天服热设计中的应用	
6.1 “人体-液冷服-环境”的传热数学模型	389
6.1.1 液冷服结构	389
6.1.2 液冷服换热管网传热模型	390
6.1.3 “人体-液冷服-环境”热系统数学模型	393
6.1.4 实验与计算结果的对比分析	399



6.2 “人体-液冷通风保温服-外环境”的传热数学模型	411
6.2.1 通风保温服与内、外环境换热	411
6.2.2 通风系统的热分析	417
6.2.3 人体-液冷通风保温服-外环境的传热数学模型	422
6.3 出舱航天服液冷通风保温服的实验研究	428
6.3.1 实验目的	428
6.3.2 实验原理	429
6.3.3 实验状态及程序	430
6.3.4 被试人员及实验设备	435
6.3.5 实验测量参数	436
6.3.6 实验及计算结果的对比分析	436
参考文献	449
第7章 人体热调节系统数学模型在舱外航天服手套热分析中的应用	
7.1 舱外航天服手套及低温作业工效	454
7.1.1 舱外航天服手套	455
7.1.2 舱外航天服手套的低温作业工效	458
7.2 “手-手套-外环境”热系统数学模型	462
7.2.1 手的物理模型和参数	462
7.2.2 手的生物热方程	465
7.2.3 手的传热边界数学模型	467
7.3 手和舱外航天服手套的温度分布实验研究	469
7.3.1 实验设计	470
7.3.2 实验结果分析	475
7.4 计算与实验结果比较分析	484
7.4.1 裸露手的温度场	485
7.4.2 模拟手套不加热时手-手套的温度场	489
7.4.3 模拟手套加热时手-手套的温度场	492
参考文献	495
附录A 人体的几何参数、热物理参数及生理参数的确定	
A.1 身体的密度、脂肪与非脂肪质量 ^[1]	500