



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

袁修干摇著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社摇西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社摇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 苑章,第 员章为绪论,第 圆章为准二维人体热调节数学模型,第 猿章为热环境下二维人体热调节数学模型,第 源章为冷环境下二维人体热调节系统数学模型,第 缘章为冷热宽温度环境下二维人体热调节数学模型,第 远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 苑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 粤,为人体的几何参数、热物理参数及生理参数的确定,附录 月,为差分求解方法中的节点离散方程,附录 悦,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。

摇图书在版编目(CIP)数据

摇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 缘缘缘缘
摇陈 苑 缘缘缘 缘缘 圆

摇 I 援...摇 II 袁...摇 III 援人体—体温调节—数学模拟
摇 IV 援 缘缘缘 缘缘

摇中国版本图书馆 CIP 数据核字(缘缘缘缘)第 缘缘缘缘号

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 猿号(缘缘缘缘)摇摇发行部电话 缘缘缘缘缘缘缘缘

网址: 缘缘缘缘缘缘缘缘缘缘缘缘缘缘缘缘

耘 缘缘缘缘缘缘缘缘缘缘缘缘缘缘缘缘

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

开本 缘缘缘缘缘缘 缘缘缘缘缘缘 字数 缘缘缘缘缘缘 千字

缘缘缘缘年 缘月第 缘版 缘缘缘缘年 缘月第 缘次印刷 摇摇印数 缘缘缘缘册

陈 苑 缘缘缘 缘缘 圆 定价 猿缘缘缘元

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

总摇摇序

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。缘多年来,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

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多位专家、学者,对经各单位精选的近千种教材和专著书稿进行了严格的评审,评选出近千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,进入新世纪,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

前摇摇言

员圆年后,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 圆年的研究,发表论文约 源园篇,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 员项,省部级一、二等奖各 员项,省部级三等奖 猿项。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 员章——绪论;第 圆章——准二维人体热调节系统数学模型;第 猿章——热环境下二维人体热调节系统数学模型;第 源章——冷环境下二维人体热调节系统数学模型;第 缘章——冷热宽温度环境下二维人体热调节系统数学模型;第 远章——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 苑章——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 粤——人体的几何参数、热物理参数及生理参数的确定;附录 月——差分求解方法中的节点离散方程;附录 悦——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

圆 源年 源月

第 1 章 绪论

1.1 人体热调节系统数学模型研究概述

早期的生理学家通常不使用数学模型来描述生理参数之间的量化关系^{〔1〕}。随着现代科学技术的进步,数学模型的研究方法在生理学研究中得到了广泛重视。因为数学模型可以为人体生理的研究提供简炼、精确的数学描述,使研究工作由经验总结和定性描述提高到理论化的定量描述。通过数学模型的动态分析,有助于加深对生物系统运行机理的认识。此外,数学模型还可以为实验数据的内推或外延提供理论依据,提高研究工作的效率和经济性。人体生理系统的数学模型已广泛应用于医学研究和工程设计的各个方面,为医学、工程、军事问题的解决提供了高效、经济、安全的技术手段。

人体生理系统的建模研究主要针对呼吸系统、循环系统、热调节系统^①、神经系统、脑系统和视觉系统。自 1959 年以来,人体热调节系统数学模型的研究已成为现代生物医学工程中一个非常活跃的研究领域。美国在实施“阿波罗”登月计划期间,对人体热调节系统数学模型进行了大量的研究,以解决飞船乘员舱空调系统设计和航天服设计的有关技术问题。载人航天的需求,是推动当今人体热调节系统数学模拟技术研究的重要动力。目前,人体热

① 国内外文献中也有称之为“人体温度调节系统”或“人体温度控制系统”的,本书一律采用“人体热调节系统”。

- $\Phi_{\text{则}}$ ——辐射换热热流量 瓦；
- $\Phi_{\text{对流}}$ ——对流换热热流量 瓦；
- $\Phi_{\text{传导}}$ ——传导导热热流量 瓦；
- $\Phi_{\text{蒸发}}$ ——蒸发散热热流量 瓦；
- $\Phi_{\text{呼吸}}$ ——呼吸散热热流量 瓦；
- $\Phi_{\text{做功}}$ ——人体对外做功 瓦。

式(1.1)的重要性在于将人体热状态与人体所处的环境相关联,因而可以用于评价人体在不同环境中的热状态。

从对人体温度场的划分来看,早期对人体温度分布的研究是局部性的,由于受当时计算条件的限制,所建立的数学模型也基本上是一维或零维的。

1935年,Minorski首次将导热方程应用到人体。他假定人体内的热物理参数(密度 ρ 、热容 c 、导热系数 λ)和代谢产热是均匀分布的,并且导热具有一维稳态性质。该模型获得的理论解表明,人体内的温度分布是一条抛物线。

1937年,Minorski与Hollander采用Minorski的中央核心与皮肤壳体温度概念改进了形如式(1.1)的能量平衡方程^[10]。在他们建立的人体温度模型中人体的温度可用核心和壳体温度这两个典型的温度来表示,储存能量的变化通常表示为核心和壳体温度的线性函数。现在通常用直肠温度与皮肤温度来表示核心温度和壳体温度。可以说,Minorski和Hollander人体温度计算模型的建立才真正标志了人体温度分布研究的开始。

对人体温度分布研究有过重要贡献的是Minorski,他是公认的该领域研究先驱。1938年,Minorski提出了人臂径向温度分布计算模型^[10]。他建立这个模型的目的是为了使实验数据符合臂中径向温度分布的情况。在Minorski的模型中,人体的前臂被抽象成一个圆柱体,并认为其中的血流量与产热都是均匀的。Minorski模型中不仅首先考虑了人体几何特征对人体热量散失和温度分布的影响,还考虑了人体组织中血液对体内的导热过程的影响,并且在

方程中给出了灌注血液同组织进行对流换热的计算方法。

1932年首次提出了著名的生物热方程。这个方程计算起来非常简单,其中只用了两个同血液有关的参数,即有效血流量和动脉温度,通过修改这两个参数可以改善计算结果。虽然1932年生物热方程中某些项的物理意义和生理学含义被后续的研究者进行了补充和完善,但1932年生物热方程的提出的确使得人体温度分布的研究和模拟方法发生了质的变化和飞跃,奠定了人体热生理研究和模拟的基础,现在仍然被广泛地采用。需要指出的是,1932年模型中并没有考虑人体的热调节活动(血管运动、出汗、寒颤)对人体温度分布的影响。

1933年,1933年将传热学研究中的电模拟法引入人体温度分布的研究。根据电模拟法的基本原理,1933设计了一个模拟电路来模拟人体体内以及人体同环境之间的热交换。在这之后的一段时间内,电模拟的方法曾被许多研究者采用,建立了一些人体温度分布的计算模型。例如,1935年,1935年等人采用电模拟的方法研究了动态情况下的热传递^[7],而1935年采用生物热模拟的方法,对动态情况下的热传递作了研究,从而使得模拟人体温度分布的动态响应成为可能。1935年,1935年等也采用电模拟人体热模型的方法,建立了冷水浸泡时人体温度分布的计算模型^[8]。在这个模型中人体被认为是由核心层、肌肉层、皮下脂肪层和皮肤组成的。该模型考虑了服装的影响,认为服装仅提供隔热值,阻碍人体热量的散失。这是一个集总参数的简单系统模型,是1935年等人及1935年工作的总结和扩展。类似的研究还有1935年(1935年)、1935年和1935年(1935年)等人的工作。

由于研究人体温度分布电模拟方法的广泛采用,人们对人体温度调节的机理逐渐明了,建立了不同形式的集总参数的简单系统模型,从而实现了在模拟计算机上计算人体温度的动态特性。

最早对人体温度分布的动态响应进行研究的是1935年和1935年,他们首次提出了人体温度分布的动态响应模型。

在这个模型中,人体被抽象成由中心、肌肉、皮肤三个同心层组成的圆柱体。圆柱体内的传热具有一维非稳态性质,且温度仅沿径向变化。宰贲世保和 粤城益提出的模型,将稳态人体温度分布研究推进到动态人体温度分布研究。

员怨年,宰贲世保在前人工作的基础上首次提出了多节段人体温度分布的计算模型^[70]。模型中人体被分为六个节段、即头部、躯干、手臂、手、腿和脚。各节段又当作是圆柱体,并且每个节段又由核心(骨骼和结缔组织)、肌肉、皮下脂肪和皮肤组成。宰贲世保在模型中还引进了中心血液的概念,用中心血液部分把各节段关联起来,从而考虑了血液在人体温度分布中的作用及人体各节段部分的相互影响。宰贲世保的人体温度计算模型考虑了人体几何特征及生理特征。他的工作可以认为是整个人体温度分布研究的开创性工作。宰贲世保模型的建立使得人体温度分布的研究向比较真实地反映人体特征及生理特征迈进了一步。在这以后的研究中,多节段人体模型被广泛地采用。

上述对人体热控制系统的研究只限于分析被动的、不能调节的系统,也就是这些研究中没有考虑人体自身的热调节功能。事实上,人体并不是一个被动的产热和散热的组合体,从而按前者建立起来的人体温度分布计算模型很难得到令人满意的结果。

员怨年 粤城益 生物热方程的发展

早在上世纪初,粤城益和 粤城益已开始了生物组织温度场的研究,但没有考虑到血液灌注的影响。粤城益在 员怨年将人前臂简化为圆柱体,并进而提出了至今仍在沿用的微分形式的“生物传热方程”(粤城益和 粤城益^[71])。该方程第一次将生物组织与一般工程材料的传热从根本上区别开来,其形式为

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = \dot{q} + \dot{q}_b \quad (员怨)$$

而 $\dot{q}_b = \frac{1}{V} \int_V \dot{q}_b dV$ (员怨)

式中 ρ ——人体组织密度, 噪转^噪;
 糟——人体组织比热容, (噪噪^噪·益);
 贼——人体组织温度, 益;
 λ ——人体组织导热系数, 宰转皂·益);
 择_息——体积人体代谢产热热流量, 宰转^噪;
 择_道——体积血流传输热流量, 宰转^噪;
 蟹_道——体积血流量, 噪转皂^噪·泽;
 糟——血的比热容, (噪噪^噪·益);
 贼——动脉血温度, 益;
 τ ——时间, 泽

方程(员)与传统的热传导方程的不同之处在于: 择_道反映了出入控制体的血流所传输的热量, 择_息表示的是组织新陈代谢产生的热。

由于人们对 噪转皂 方程中的血流换热计算的合理性一直存在着疑问, 后来 宰转皂 就把人体组织看作为多孔介质, 而把整个系统当作一个两相流系统处理。在此基础上, 王补宣等导出了一个更严格的通用模型^[员]。宰转皂 提出的模型更加严密, 不仅考虑到热平衡, 而且计及物质平衡^[员]。这使计算更加复杂和精细, 但计算要求的生理学数据也更多。

在 噪转皂 方程的建模方式里假定机体组织是均匀体, 血液灌注率对组织传热的贡献用一均匀分布的容积热源项 糟蟹_道 (贼原贼来考虑, 实际上这是一个近似做法。随着血液的流动, 血液速度在不同的地方也是不同的, 血液本身物理特性也是要发生变化的, 并且人体组织在不同地方的血管分布也不一样。例如, 表皮层没有血管, 真皮层没有大血管。考虑到实际组织不均匀性和不同组织区内血管的传热贡献的差别, 宰转皂 皂和 分皂 等人提出了三层结构模型^[员, 员]。这一模型把外层组织分成深部组织层、中间组织层和皮肤层。三层中血管结构不同, 因此对传热的贡献也不同, 须用不同方式考虑。最近 宰转皂 针对目前生物传热方程较为复杂远

的情况提出了一个简单而又实用的方程 其形式为^[15]

$$\rho \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \nabla \cdot (k \nabla \theta) + \dot{q} = \dot{q}_a + \dot{q}_v \quad (1)$$

式中 θ ——静脉血液温度, $^{\circ}\text{C}$;

k ——动脉血管与组织的当量传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;

\dot{q} ——静脉血管与组织的当量传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

这与经典的^[16]方程相比,^[17]所提出的方程增加了动脉和静脉与组织的传热,即右端最后两项。这使得生物传热机理表示得更为全面。与^[18]世纪^[19]年代著名的^[20]和^[21]模型相比较,^[22]的模型继承其模型三层结构的特点,将生物模型各层分别处理,同时^[23]的模型简单明了且充分考虑了血管对组织的影响,血管之间有动脉和静脉的血液与组织的对流传热,也有动脉血液与组织的导热,这将所有重要的传热机理都考虑到了。他又把手指从里到外分成四层:核心层、肌肉层、脂肪层、皮肤层。这样分层后就更接近人体本身的实际情况,易于理解和计算,简化了^[24]和^[25]模型的复杂性。但在^[26]的方程中又增加了两个关于动脉和静脉的平衡方程,同时增加了计算的难度。

1.2 人体热调节的研究

在^[27]年以前的人体温度分布研究中,人体被看成是无生命体。也就是说,计算人体温度分布时并没有考虑人体自身的热调节功能。实际上,人体自身的热调节功能对人体温度分布有极其重要的影响。所以按非生命体处理的人体温度分布计算模型很难获得满意的结果。

1.2.1 人体热调节功能的引入

为了改进人体温度分布的计算结果,^[28]年^[29]等人首
苑

次建立了考虑人体生理调节功能的人体温度调节闭环控制模型^[16],提出了体温调定点理论的初步思想,克服了传统的、只适合于被动的、不能调节系统的分析方法的缺点,奠定了人体热调节系统数学模拟的基础。至今为止,该模型的基本思想和方法在许多热调节模型中仍能体现出来。

关于人体自身的热调节功能对人体温度分布的影响,该模型假定人体在基础状态下的体温为“标准体温”。当人体的实际体温与标准体温存在差别时,人体组织的导热特性、代谢产热和蒸发散热会相应地进行调节,而这些量的改变将直接影响人体的温度分布。由于当时人们对人体热调节的机制还缺乏深刻的认识,所以该模型的这种考虑还显得比较粗糙。尽管如此,在人体温度分布的研究中定量地引入人体自身热调节功能的作用,无疑是研究工作的一个重大进步。因此笔者认为,该模型以前的模型,只能称之为人体温度分布计算模型,而该模型将人体自身热调节功能的定量引入,则开创了人体热调节系统数学模型的研究。

1965年,该模型建立了一个比较简单的二节段模型^[17],人体作为被控系统,用具有二个集中层(核心层和皮肤层)的圆柱体来描述人体。控制系统由皮肤传感器和核心传感器组成,控制系统的输出信号可以调节皮肤血流量、出汗量。该模型等人根据该模型的计算结果,提出了一种新的有效温度指标。这一指标可以用来评价环境温度、湿度、风速、活动量和服装对人体主观热感觉的影响。由该模型二节段模型编制的计算程序非常简单,而且对计算机要求不高,所以该模型在工程上获得了比较广泛的应用。1968年,该模型曾用改进的该模型二节段模型来研究潜水员穿着潜水服时的热舒适问题。

该模型引入反馈控制概念的引入

1972年,该模型等人建立了人体热调节系统的一维数学模型^[18],一般称为该模型模型。他们采用系统的观点把人体愿