

紡織材料 熱濕傳遞數學模型 及設計反問題

徐定華 著



科學出版社

纺织材料热湿传递数学模型 及设计反问题

徐定华 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以基于人体热湿舒适性的功能性纺织材料与制品为背景,介绍热湿传递数学模型及设计反问题.这类问题在数学上属于重要的反问题研究领域,能为功能性纺织材料设计提供理论基础和科学解释.

纺织材料与制品结构特征(层数与厚度、孔隙率与曲折系数)与性能特征(热传导系数、水汽传递系数、凝水率或者含水率)等决定其热湿传递特征,从而决定了纺织制品的热湿舒适性、高保暖性/高散热性、热防护性等.基于纺织材料与制品的极薄性、多孔与多层性,并伴随着热传导、热辐射、热对流、汽化、凝结等物理化学过程,建立描述织物内部热湿传递规律的耦合微分方程组定解问题,并研究其适定性,构造高性能数值算法.本书系统提出满足纺织制品(服装)设计目标的若干类反问题,构造目标泛函和稳定化数值算法,获得最优解或正则化解.

本书适合应用数学、计算数学、纺织工程、材料学、物理学、能源工程、土木工程等相关专业的教师、研究生和本科生,以及相关领域的实际工作者使用.

图书在版编目(CIP)数据

纺织材料热湿传递数学模型及设计反问题/徐定华著. —北京:科学出版社, 2014

ISBN 978-7-03-039052-3

I. ①纺… II. ①徐… III. ①纺织纤维-热湿舒适性-数学模型-研究 IV. ①TS102

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 260746 号

责任编辑:李欣/责任校对:鲁素
责任印制:赵德静/封面设计:陈敬

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>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年1月第一版 开本:720×1000 1/16

2014年1月第一次印刷 印张:10 1/2

字数:212 000

定价:48.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

我很荣幸为本书写序言。

纺织材料像其他很多材料一样，需要设计并工程化，让其具有某些特殊属性或性能，以满足终端用户的需要。与其他材料（如金属、塑料、电子等）相比，纺织材料工程更具挑战性。原因是一方面在材料-加工-结构变量与材料的性能功效之间缺乏精确的定量关系，另一方面多变量间的相互作用呈现了非线性特征。

然而一切正在转变，这要归功于一代又一代纺织科学家的共同努力。现在，我们可以无限制地利用理论模型和经验公式，来预测纺织材料的性能与功效。当然我们更渴望从预期的终端用户需求的角度，将材料、加工、结构中的参数定量化。这就是数学中的反问题，这使得本书如此有趣而富有价值。

终端用户的需求包括耐用、舒适、保护、可裁剪、美观等。本书基于舒适性，尤其是热湿舒适性，提出并研究纺织材料反问题。这是一个很好的开端，因为全球50%的纺织材料用来制作服装，而且热湿舒适性是服装舒适的主要因素。

舒适或不舒适，是人体、服装、环境之间相互作用的结果。这个相互作用可理解为力学的（如接触舒适性、压力舒适性）或热学的（如热湿舒适性）。基于热湿舒适性的工程上的纺织品设计问题具有特别强的挑战，因为多孔介质纺织材料中包含着复杂的耦合热质传递的动态过程。由于这个研究领域中的许多科学家的努力，多个偏微分方程组模型建立起来了，以描述该过程。

到目前为止，许多研究者把偏微分方程组作为正问题来处理，即给定人体-服装-环境系统中的特殊参数，通过各种有效算法（如有限差分方法、有限体积方法、有限元方法、体积-时域循环算法等）来获得它们的解。但是很少作为反问题来研究，也就是说，基于一些控制条件和终端用户的需求，决定令人满意的材料参数。这样的例子之一是我的研究组对纤维隔热材料孔隙率分布的预测。

纺织材料设计反问题（IPTMD）应该由数学家来进行专门研究。我很高兴地看到越来越多的数学家对此感兴趣，如香港城市大学的 Sun Weiwei 研究组、约克大学的 Huang Huaxiong 研究组、山东大学的 Du Ning 研究组等，这里仅列举其中几个。

据我所知，本书是 IPTMD 的第一本系统化处理的专著。一般来说，从数学上看，反问题是不适定的，即反问题的解往往不满足解的存在性、唯一性、稳定性的要求。本书特别关注获得 IPTMD 适定性结果的挑战，并通过稳定化思想研制了反问题的数值算法。这些方法包括正则化方法、拟解法、直接搜索法、有限差分法、

迭代算法和随机算法.

本书作者基于热湿舒适性研究了单层材料的厚度、有效热传导率、孔隙率的决定问题, 双层材料的厚度决定问题. 书中的研制技术可用于更广泛的材料设计领域, 沿着这个方向, 我深信本书是将来丰硕研究成果的开端.

我初识徐教授是三年前, 经由我的同学、纺织工程教授周小红介绍. 周教授与徐教授为同事. 给我印象特别深刻的是徐教授对学术探索的热情与执着. 我很高兴地看到本书在短时间内撰写完成, 并深信我们将看到他的更多新成果.

范金土 (Fan Jintu)

康奈尔大学人类生态学学院纤维科学与服装设计系教授, 系主任

2013 年 9 月 5 日于康奈尔大学伊萨卡校区

前 言

材料科学研究材料的属性和应用, 目的在于合成和制造新材料、改进材料、理解和预测材料的属性、在一段时间内这些属性的演变和控制. 直到最近, 材料科学还主要是对金属、陶瓷、塑料的经验型研究. 如今材料科学成为一门基于物理科学、工程和数学的, 迅速增长的知识体.

—— 美国科学院院士、数学家 A. Friedman

你们的讨论涉及一个很重要的研究领域, 这个领域决定着—个国家科学和技术的进步, 是关系着我们的教育体系的核心学科.

—— 法国前总统密特朗在 1992 年给世界数学家大会去信时写道

从一道大学生数学建模竞赛题“婴儿纸尿裤的最优设计”, 到工业设计中的大量产品设计及优化问题, 让人自然联想到纺织制品 (如服装) 设计直至纺织材料设计这一重要领域. 应用数学理论与方法研究纺织材料设计, 是一种有价值的探索, 企望对产品设计的理论分析、实验指导、研究开发颇有裨益.

纺织材料与制品设计是一个真实的问题, 反问题理论与方法是一个虚拟、仿真的数学世界, 纺织材料设计反问题则是从真实到虚拟的一个映射 (MAP). 本书中, 我们解决纺织材料与制品设计的思维方式与技术方法则是从建模、算法到程序的实现路线图, 即

模型 (model) + 算法 (algorithm) + 程序 (programme) = MAP.

从这个角度看, 数学是计算机模拟或仿真的核心.

(一) 纺织材料的研发背景、研究内容与方法

纺织材料是服装、功能纺织品研发与生产的重要原料. “服装舒适、生活幸福” (better clothing, happier life), “智能服装、产业升级” (smarter clothing, more upgraded industries) 是人们的共识. 纺织材料传统上主要是用于服装, 具有遮羞、保暖、透湿、防辐射、增减压力、呈现美观等功能. 随着科技发展和社会需求变化, 纺织材料在医用、家居用、产业用受到关注, 并在纺织行业中所占比重越来越大.

目前功能性纺织材料与制品的研发, 如高保暖纤维与面料、易吸湿纤维与面料、会呼吸复合面料等大多都是基于材料的结构特征和物理、化学特征, 随后在实

验室(如“暖体假人”实验室中的对服装用纺织制品的热湿传递测试)进行新材料的性能测试、分析与改进. 这种研究方法总体上属于实验研究, 具有成本高、周期长、设备要求高和缺乏有效的理论指导等特征.

随着科学技术的进步, 纺织材料热湿传递、压力分布、接触摩擦等方面的数学物理研究、计算方法及其数值模拟技术的快速发展, 为纺织材料的研发提供了理论研究和计算模拟这两种不可或缺的研究方法. 这些方法或技术具有成本低、周期短的特征, 为纺织材料的研发提供理论依据和实验解释.

(二) 纺织材料设计反问题的数学归结

在材料科学、生命科学、遥感技术、图像处理、无损探伤、工业控制、管理决策、计算机 CAD 等领域中, 提出了各种各样的反问题. 这些反问题常常划分为识别问题、控制问题、设计问题等. 这些问题的提出在理论上具有鲜明的创新性与挑战性, 在应用上具有广泛的前景. 本书针对纺织制品——服装, 首次提出纺织材料设计反问题, 这是数学物理反问题的一个新领域, 可视为应用数学与计算数学的一个分支, 也是数学与纺织工程成功交叉融合的、富有发展前途的研究领域.

纺织材料与制品为各向同性、多孔介质. 其结构参数包括厚度 (L, m)、孔隙率 ($\varepsilon, \%$)、孔半径 (r, m)、曲折系数 (τ); 研究纺织制品热湿传递涉及的主要物理参数是导热系数 ($\kappa, W \cdot (m \cdot K)^{-1}$) 或热阻、湿阻. 并假设由人体代谢所产生的热量以热传导、热辐射、热对流、水蒸气蒸发等形式扩散.

纺织材料与制品的厚度、热传导率、微观结构与编织方式、穿着方式等决定了纺织材料的热湿传递特征, 形成了人体对服装的热湿舒适性的感受. 因此基于“人体-服装-环境”系统, 瞄准人体的热湿舒适性等, 合理而且科学地决定服装材料的结构参数、物理化学参数, 为纺织材料设计提供理论基础和科学解释, 为新材料研制提出新思路.

另外纺织材料与制品的弹性模量、Poisson 比决定了它的压力特征, 它们是影响人体的压力舒适性的主要因素.

服装热湿舒适性的有关文献表明, 内衣内侧至皮肤表面间服装微气候区的最舒适条件为: 温度为 $(32 \pm 1) ^\circ C$, 相对湿度为 $50\% \pm 10\%$, 气流速度为 $(0.25 \pm 0.15) m \cdot s^{-1}$.

与服装压力舒适性相关的研究表明, 人体不同部位具有不同的压力舒适阈值, 即不同部位在不同的压力舒适阈值区间感觉最舒适, 压力过大或太小时人体都会感觉不舒服.

因此针对纺织材料与制品, 纺织材料设计反问题 (inverse problems of textile material design, IPTMD) 总体上可以归结为: 根据人体的舒适性要求(如人体皮肤与服装内侧间的微气候区的热湿舒适性指标、人体皮肤的压力舒适性或接触舒适

性指标等),合理给出附加的测量数据(如人体所处环境温度与湿度数据、弹性纺织材料的变形数据等),最优决定纺织材料与制品的结构参数、物理参数中的一个或多个。

IPTMD 是一类设计问题,对单层纺织制品(如织物),可分为织物厚度决定反问题(inverse problems of textile thickness determination, IPTTD)、织物孔隙率决定反问题(inverse problems of textile porosity determination, IPTPD)、织物热传导率决定反问题(inverse problems of textile heat-conductivity determination, IPTHD)、织物弹性参数决定反问题(inverse problems of textile elasticity determination, IPTED),还有厚度与热传导率同时决定、热传导率与弹性参数同时决定等反问题。

对多层织物来看,可提出各种形式的多层多参数同时决定反问题。所有这些问题都值得深入系统地研究。

本书仅考虑基于人体的热湿舒适性决定服装面料的结构参数与物理参数。

(三) 纺织材料设计反问题研究难度与数学上的挑战

在研究纺织材料设计反问题的过程中,需要获得正反问题的理论结果,研究有效的求解方法并进行数值模拟。由于织物内部包含着复杂的热湿传递特征和大变形,控制方程往往是非线性、多个物理量耦合的常微分方程组或偏微分方程组,边界上具有热湿交换和能量传递,因此该项研究富有挑战。

本书以基于人体热湿舒适性的轻薄型高暖透湿纺织材料为背景,介绍热湿传递数学模型及材料设计反问题。我们需要深入研究正问题模型的适定性理论、反问题的条件适定性理论,研制反问题的高精度算法,并获得反问题数值算法的稳定性与收敛率等。

由于纺织材料与制品的极薄性、多孔与多层性,并伴随着热传导、热辐射、热对流、汽化、凝结等物理化学过程,其数学模型往往是复杂的耦合微分方程组的定解问题。我们要对热湿传递规律进行数学建模,并利用近代微分理论、泛函分析理论、非线性科学方法进行适定性分析,构造高性能数值算法。本书系统提出了满足材料与面料设计目标的若干反问题(如决定材料的厚度、孔隙率、热传导系数等),构造了目标泛函和稳定化数值算法,获得了反问题的最优解或正则化解。

(四) 本书的读者对象

本书适合应用数学、计算数学专业,纺织工程专业,材料学、物理学、能源工程、土木工程等相关专业的教师、研究生和本科生,以及相关领域的研究人员、实际工作者使用。

(五) 特别感谢

本书得以出版,我们要感谢国家自然科学基金委员会数理学部数学处对我们研究工作的资助(批准号:11071221),感谢解放军理工大学黄思训教授、复旦大学程晋教授的宝贵建议、鼓励与指导.感谢美国 Texas A&M University 的 William Rundell 教授、希腊雅典大学的 John Rassias 教授、日本东京大学的 Masahiro Yamamoto 教授、美国 University of Louisville 的 Yongzhi Xu 教授来校访问期间的有益讨论.

要特别感谢周小红教授,是她将作者带进了纺织材料设计的数理分析领域,她为这项研究提供了大量的研究资料和指导,参与了研究组的学术讨论,并给予了尽可能多的帮助、支持、指导!感谢美国 Cornell University 的 Fan Jintu 教授,他的论文资料是我们这项研究的基础,他的学术访问激励了我们的研究,感谢他为本书作序.感谢香港理工大学的 Li Yi 教授、加拿大 York University 的 Huang Huaxiong 教授、香港城市大学的 Sun Weiwei 教授等,他们的论文资料、学术讨论对我们的研究给予了有益的启示和鼓励.感谢参考文献中的所有作者,他们的研究工作让我们颇受启发、收益良多.

还要感谢 TBIS(Textile Bioengineering and Informatics Society)2010 年国际会议(上海东华大学,2010 年 5 月)的学术委员会对我们研究论文的评价,会上将我们的论文评为 Outstanding Research Paper;感谢 International Conference on Inverse Problems(香港城市大学,2010 年 12 月)的学术委员会对我们研究报告的评价,会上将我们的学术报告评为 Outstanding Presentation,并授予证书和奖品.

感谢“纺织材料设计反问题”讨论班的成员:浙江理工大学的徐映红副教授、翁鸣博士、陈瑞林讲师,浙江医学高等专科学校的葛美宝讲师,还有研究生程建新、陈远波、文雷、崔芑等;感谢复旦大学博士生许伯熹在有关问题数值算法与编程计算上贡献.他们都是纺织材料设计反问题研究的合作者,付出了大量精力,取得了不少有价值的研究成果.

在本书撰写过程中,徐定华对本书做了整体设计,撰写了前言、第 1 章、第 10 章、第 11 章前四节等,并对全书统稿、修改、定稿;讨论班的成员协助作者撰写了部分章节,具体情况如下:葛美宝:3.1 节、第 5 章;陈远波:2.2 节、第 7 章;崔芑:2.1 节、第 4 章、第 9 章;文雷:3.2 节、第 6 章、第 8 章;徐映红:11.5 节.

由于作者水平所限,书中难免有不妥之处,欢迎读者批评指正.

作 者

2013 年 8 月于杭州·金沙学府

符 号 表

$T(x, t), T(x)$	织物层的温度 (K 或 $^{\circ}\text{C}$)
$T_0(t)$	织物内侧处的温度 (K 或 $^{\circ}\text{C}$)
$T_1(t)$	织物外侧处的温度 (K 或 $^{\circ}\text{C}$)
T_0	单层织物内侧温度 (K 或 $^{\circ}\text{C}$)
T_L	单层织物外侧温度 (K 或 $^{\circ}\text{C}$)
$T_1(t)$	织物层初始温度 (K 或 $^{\circ}\text{C}$)
T_{\min}	温度的最小值 (K 或 $^{\circ}\text{C}$)
T_{\max}	温度的最大值 (K 或 $^{\circ}\text{C}$)
T^*	舒适状态下温度的最佳经验值 (K 或 $^{\circ}\text{C}$)
$\text{RH}(x, t)$	织物层的相对湿度 (%)
$\text{RH}_0(t)$	织物内侧处的相对湿度 (%)
$\text{RH}_1(t)$	织物外侧处的相对湿度 (%)
RH_{\min}	相对湿度的最小值 (%)
RH_{\max}	相对湿度的最大值 (%)
$\text{RH}^*, \text{RH}_A, \text{RH}'$	舒适状态下相对湿度的最佳经验值 (%)
$C_a(x, t)$	织物层的水蒸气浓度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
$C_a^*(x, t)$	饱和水蒸气浓度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
$C_E(t)$	环境水蒸气浓度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
$C_0(t)$	织物内侧处的水蒸气浓度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
$C_1(t)$	织物外侧处的水蒸气浓度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
$C_1(t)$	织物层初始水蒸气浓度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
w	蒸汽分率 (或相对湿度)(%)
m_v	水蒸气质量通量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
$m_{v,0}$	织物内侧水蒸气质量通量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
p_v	水蒸气压力 (Pa)
$p_{v,L}$	织物外侧水蒸气压力 (Pa)
P_{sat}	饱和水蒸气压力 (Pa)
$F_L(x, t)$	向左总热辐射 ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
$F_R(x, t)$	向右总热辐射 ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
$\Gamma(x, t)$	凝结率、吸附率或者结冰率 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$)
q	热通量 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
j	质量通量 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
l, L	长度 (m)

r	孔半径 (m)
$\varepsilon, \varepsilon_1, \varepsilon_2$	孔隙率 (%)
τ	曲折率
$\kappa, \kappa_1, \kappa_2$	热传导率 ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
λ	潜热 ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
h	对流传热系数 ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
ΔH_{vap}	气化焓变 ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)
C_v	有效体积热容 ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$)
D_a	水蒸气在空气中的扩散系数 ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
D_{sur}	表面扩散系数 ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
h_c	水蒸气从织物外侧到环境的对流系数 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
K	表面浓度和体积浓度间的平衡常数
K_w	水蒸气传质系数 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
ω	抗阻率
k_1, k_2	与分子质量和气体常数有关的常数
η	热体积膨胀系数 (m^{-1})
ζ	浓度体积膨胀系数 (m^{-1})
β	辐射吸收常数 (m^{-1})
σ	Boltzmann 常数 ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}\cdot\text{s}^{-1}$)
e, ξ_1, ξ_2	辐射率 ($\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)
g	重力加速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
μ	黏度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
ρ	密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
air	空气
eff	有效变量
S	皮肤
Vap	水蒸气
MF	微气候区和织物的边界
FE	织物和环境的边界
F	织物
MC	微气候区
E	环境

目 录

序

前言

符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 功能性纺织材料设计的背景	1
1.1.1 功能性纺织材料的行业与研发背景	1
1.1.2 功能性纺织材料设计的研究内容与方法	2
1.1.3 功能性纺织材料设计的研究进展	2
1.2 基于热湿舒适性的纺织材料设计反问题的数学归结	3
1.2.1 人体-服装-环境系统与服装热湿舒适性	3
1.2.2 织物内热湿传递性能的描述	6
1.2.3 织物内热湿传递规律的研究及其进展	7
1.2.4 纺织材料设计反问题的提出与分类	8
1.3 功能性纺织材料设计反问题的研究方法	9
1.3.1 理论研究方法	10
1.3.2 数值算法研究	10
1.3.3 研究目标	11
1.4 本书内容展开框架	11
参考文献	12
第 2 章 纺织材料热湿传递数学模型: 稳态模型	17
2.1 稳态模型一: 常温环境条件下的织物热湿传递模型	17
2.1.1 模型概略图和假设	17
2.1.2 数学模型	18
2.1.3 模型的求解	20
2.1.4 数值算法: 粒子群算法	21
2.1.5 数值实现	22
2.2 稳态模型二: 具平行圆柱孔织物热湿传递模型	24
2.2.1 建模假设	24
2.2.2 数学模型	25
2.2.3 理论结果	25

2.2.4	数值算法	28
2.2.5	数值实现	29
	参考文献	31
第 3 章	纺织材料热湿传递数学模型：动态模型	32
3.1	单层动态模型：低温环境条件下的织物热湿传递模型	32
3.1.1	建模假设	32
3.1.2	数学模型	33
3.1.3	数值算法	35
3.1.4	数值实现	37
3.2	双层动态模型：低温环境条件下的织物热湿传递模型	41
3.2.1	建模假设	41
3.2.2	数学模型	42
3.2.3	理论结果	44
3.2.4	数值算法	49
3.2.5	数值实现	52
3.2.6	结果分析与评注	56
	参考文献	56
第 4 章	纺织材料厚度决定反问题：单层稳态模型	58
4.1	纺织材料厚度决定反问题的数学提法	58
4.2	IPTTD 的数值计算	59
4.3	IPTTD 的验证	61
	参考文献	62
第 5 章	纺织材料厚度决定反问题：单层动态模型	64
5.1	数学提法	64
5.2	数值算法	67
5.2.1	算法设计思想	67
5.2.2	数值计算实例	71
5.2.3	结果分析与可视化	71
5.3	几点注记	73
	参考文献	73
第 6 章	纺织材料厚度决定反问题：双层动态模型	75
6.1	数学提法	75
6.2	数值算法	76
6.2.1	算法设计思想	76
6.2.2	数值计算实例	77

6.3	数值计算验证	80
6.4	结果分析与可视化	83
6.5	几点注记	83
	参考文献	84
第 7 章	纺织材料热传导率决定反问题: 单层静态模型	85
7.1	数学提法	85
7.2	IPTHD 的数值算法	86
7.2.1	算法设计思想	86
7.2.2	数值计算实例	89
7.3	结果分析与可视化	92
7.4	几点注记	93
	参考文献	93
第 8 章	纺织材料孔隙率决定反问题: 单层动态模型	95
8.1	数学提法	95
8.2	IPTPD 的数值算法	96
8.2.1	算法设计思想	96
8.2.2	数值计算实例	97
8.2.3	结果分析与可视化	98
8.3	几点注记	100
	参考文献	100
第 9 章	织物材料多参数同时决定反问题: 单层稳态模型	102
9.1	厚度与热传导率同时决定的反问题的数学提法	102
9.2	IPT(TH)D 的数值计算	103
9.2.1	数值计算实例	103
9.2.2	算法有效性	104
9.3	IPT(TH)D 的验证	106
9.4	厚度、热传导率与孔隙率同时决定的反问题的数学提法	108
9.5	IPT(THP)D 的数值计算实例	108
9.6	IPT(THP)D 的验证	109
	参考文献	111
第 10 章	纺织材料设计反问题的未来研究方向	112
10.1	未来功能性纺织材料设计的实际需求	112
10.2	功能性纺织材料设计反问题的未来研究内容	113
10.3	功能性纺织材料设计反问题的研究课题举例	114
	参考文献	115

第 11 章 反问题的计算方法	117
11.1 反问题的特征	117
11.1.1 反问题例子	117
11.1.2 反问题的三个主要特征	119
11.1.3 反问题研究的沿革	121
11.2 线性代数方程组的正则化方法	122
11.2.1 病态方程组的特征	122
11.2.2 病态方程组的正则化方法	125
11.2.3 正则化参数的最优选取策略	129
11.3 算子方程的正则化方法	130
11.3.1 算子方程的特征	131
11.3.2 算子方程的正则化方法	132
11.3.3 算子方程的正则化参数选取策略	137
11.4 贝叶斯统计推断方法	142
11.4.1 最大似然估计	142
11.4.2 贝叶斯估计方法	142
11.4.3 EM 算法	144
11.4.4 有限维随机模型的贝叶斯统计推断方法	145
11.5 优化问题的直接搜索方法和随机搜索方法	146
11.5.1 黄金分割法	146
11.5.2 模式搜索法	148
11.5.3 粒子群方法	149
11.5.4 模拟退火算法	150
参考文献	150
索引	152

第1章 绪 论

当今工业研发的最大产出之需求只能靠更多地使用数学方法来满足。比如仿真方法可大规模地减少复杂产品开发中的实验和建设耗费。

—— 德国戴姆勒公司研发总监 Weule 教授

本章在综述功能性纺织材料设计的行业背景、研究内容与方法、研究进展的基础上，基于人体热湿舒适性，在“人体-服装-环境”系统框架下，提出纺织材料设计反问题的数学归结及分类，并对纺织材料设计反问题的数学理论研究、数值算法研制、数值模拟与实现等系列问题提出解决思路与策略。

1.1 功能性纺织材料设计的背景

纺织材料是纺织服装产业链的前端环节和基础支撑。材料技术的发展，直接影响着整个产业的发展，新材料的创新和应用可直接带来整个产业的进步。企业要占领纺织领域的制高点，研发具有高科技含量的新型纺织原材料是关键。功能性纺织材料 (functional textile materials) 设计是满足服装用、家用、医用、产业用纺织品开发等特殊需求而展开的，具有生活、生产的多重背景^[1]。

1.1.1 功能性纺织材料的行业与研发背景

在全球一体化进程中，劳动力、资本、技术等生产要素的跨国流动引发了世界范围的纺织服装生产区域的结构变化，经历了多次产业转移。从二十世纪六十年代开始，欧洲、美国、日本等发达国家和地区的棉纺织工业逐渐衰退，以韩国、中国香港和中国台湾等国家或地区为代表的亚洲新兴工业化纺织工业日益兴起。八十年代后中国、印度、巴基斯坦等国纺织产业发展迅速，特别在中国，纺织服装产业是传统优势产业，在繁荣市场、扩大出口、吸纳就业、增加收入、促进城镇化发展等方面发挥重要作用。目前我国已具备世界上规模最大、产业链最完整的纺织工业体系，从纺织原料生产、纺纱、织布、染整到服装，成为全球纺织服装第一生产国、第一出口国。

但是我国纺织服装产业存在着天然纤维原料产能大幅减低、原料价格上涨、产品能耗高、新材料研发力度不够等问题，因此研制功能性纺织材料特别是复合材

料、改性材料尤为重要。

近年来,功能性纺织材料的开发成为整个行业发展的动力,也满足了人们对功能型产品,如服装、家居纺织品、医用纺织品、工业用纺织品等的需求。从世界纺织纤维制品的发展看,服装用、家用、产业用纺织纤维各占近三分之一。但从今后四十年的发展趋势看,服装用纤维增长已趋于饱和,家用纺织品总量仍略有上升,而产业用纺织品总量将有重大增长。根据这一趋势,今后产业用纺织品的研发重点是开发高性能纤维,服装用和家用纺织品的研发重点是开发新功能纤维。

1.1.2 功能性纺织材料设计的研究内容与方法

功能性纺织材料的研究通常包括纳米纺织材料与智能材料、天然环保有机(无机)生物功能材料、差异化功能高性能化纤材料等。相关的技术领域包括功能纤维及纺织材料的研究、功能材料的制备技术、功能纺织材料性能检测方法与指标等。

功能纺织材料设计指的是针对功能纺织品的要求,如普通服装的舒适性、热防护服装的隔热性、高保温纺织材料的轻薄性、医用纺织品的特殊要求等,研制新材料,特别要决定新材料的结构特征、物理性质和化学性质等。

从服装而言,纵观其历史,纺织服装产品的创新在时装(fashion)领域不断推陈出新。随着科技的发展,人们生活方式多样化,时装不再是单一地强调其外观,消费者越来越注重服装的功能。作为第二层皮肤,服装能调节人体与外界环境的相互作用,赋予其舒适、保暖、防水、透气等功能。随着人类社会的不断发展,纺织服装产品以人为本的特性将得到极致的发展,这给纺织服装产品创新提出了新要求。

功能性纺织服装产品的设计内容包括产品性能技术指标、产品创新设计、产品设计与制造衔接技术与装备、产品生物功能检测方法等。特别要强调的是产品创新设计,其研究内容包括服装三维动态工学设计、服装热生理功能设计、服装生物力学功能设计、服装生物医学功能设计、高性能运动服装设计与应用等。

针对上述研究内容,功能纺织服装产品设计的研究方法总体上是实验方法,包括调查分析、试验检测、计算机模拟方法等。通过实验方法可获得产品性能指标,研制新产品,获得新产品的功能特征。

1.1.3 功能性纺织材料设计的研究进展

围绕功能性纺织材料设计,特别是功能性纺织服装产品设计,研究人员开展了一系列的研究与开发,涌现了大量的发明专利。

从以往二十年的专利创新记录来看,服装热湿舒适产品的开发已有很好的发展,日本、欧洲国家做了很多基础研究工作。研究重点是运用纺织材料、纱线设计、面料设计、服装样板设计、服装结构设计来综合完成服装生物力学、热湿生理功能设计。因此需要建立先进的生物力学、热湿生理功能检测及评价体系,对产品的最