

 国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



近代织物力学和稳定性 分析理论

张义同 编著



北京大学出版社



国家自然科学基金研究
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



近代织物力学和稳定性 分析理论

张煦 编著

北京大学出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

近代织物力学和稳定性分析理论/张义同编著. —北京:北京大学出版社, 2003. 3

ISBN 7-301-06228-1

I. 近… II. 张… III. 平纹织物-织物性能-力学性能测试-形态稳定性-分析 IV. TS106.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 019932 号

书 名: 近代织物力学和稳定性分析理论

著作责任者: 张义同 编著

责任编辑: 周月梅

标准书号: ISBN 7-301-06228-1/O · 0563

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn> 电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752021

排 版 者: 高新特激光照排中心 62637627

印 刷 者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

850 毫米×1168 毫米 32 开本 5.125 印张 133 千字

2003 年 3 月第 1 版 2003 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 14.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,翻版必究

前 言

织物力学的研究始于20世纪20年代,至今已有80多年的历史。其发展大致可以分为三个阶段。从20世纪20年代初到40年代中,这是第一阶段,关于纺织品的研究开始涉及其力学性质,称为起始阶段。第二阶段从20世纪40年代中到80年代末,为发展阶段。在这一阶段,开始研究织物在拉伸、弯曲、面内剪切时表现出来的力学性质;对织物的撕裂特性、拉伸强度进行理论与实验研究;开始用织物的力学参数(如纯弯曲、剪切、拉伸曲线等)用作织物的手感指标(hand evaluation);出现了如KES (Kawabata Evaluation System for Fabric,卡屋巴太织物评价系统)等的织物试验装置,用于对织物进行拉伸、剪切、纯弯和表面性质等实验。从20世纪80年代末至今,是织物力学发展的鼎盛时期,一个突出的表现是每年在Textile Research Journal(在美国出版)和Journal of Textile Institute(在英国出版)上发表的关于织物力学方面的论文增加很多,90年代的年平均发表的论文数约是80年代初平均数的2~3倍,有时几乎成了力学专辑。其研究领域除了第二阶段所进行的研究继续深入外,出现了两个前沿的研究热点:对织物悬垂(draping)和织物屈曲的模拟。这是由于服装计算机辅助设计(CAD, Computer Associate Dising)的技术需求所带动的。把穿在模特身上的时装用计算机逼真而精确地模拟出来(精确到能用于服装的设计、裁剪),用计算机为人们量体裁衣,是人们多年梦寐以求的愿望。这就是服装CAD的核心——“试衣系统”。它对一个国家的服装工业和人们穿着的影响是不言而喻的。

对织物悬垂的模拟,基本的方法是把在初始构型下的织物看成正交异性薄板,用大变形的曲壳单元,对织物在自重作用下的变

形进行有限元计算。这样的模拟显然可以进行下去,没有原则的困难。关于这方面的工作,已发表了许多论文,尽管在模拟精度上还存在一些问题。

但对织物屈曲的模拟却遇到了意想不到的困难。关于织物屈曲的理论分析或数值模拟的论文难得见到。一位美国的博士在其博士论文中,在模拟织物铺在圆桌上的悬垂时遇到了屈曲问题,他根据实验观察到的屈曲模态,对织物做了同样模态的初始形状假设,回避了屈曲分析。

在织物屈曲研究中遇到的困难,涉及到织物力学中的一个基本问题——织物的本构模型。

长期以来,织物力学界一直把织物看作和织物增强复合材料薄板一样的正交异性材料薄板,没有人对此提出过异议。在这个正交异性薄板的模型下,国际上对织物作了大量的悬垂模拟,其结果似乎也能说得过去。但织物屈曲和正交异性板的屈曲完全一样吗?它有没有自己的特点呢?它有没有什么特殊的屈曲现象是正交异性薄板没有的呢?实验告诉我们:织物在受到与经向/纬向成 45° 方向的单向拉伸时,会发生明显的离面屈曲。未见报道正交异性薄板会发生这样的屈曲。

采用织物的正交异性本构模型能模拟出织物这种屈曲现象吗?若答案是“能”,则说明正交异性本构模型对织物还是可用的,至少没有到必须修改的地步;若答案是“不能”,则说明必须对织物的正交异性本构模型加以改进。答案“能”与“不能”一字之差,在这里显得十分重要。必须保证这个答案的精确性。必须采用精确的稳定性分析理论来准确地回答“能”还是“不能”。

我们选择了近十多年来在国外发展起来的三维有限变形弹性失稳分析理论。这是一个始于 A. E. Green, M. A. Biot, 又由 R. W. Ogden 和 Y. B. Fu 等充分发展了的一个“大变形上叠加小变形”的稳定性分析方法,它既可以做屈曲的临界分析,也可做缺陷敏感性分析、后屈曲分析、动态演化分析等。特别是这种屈曲分析

允许临界构型是大变形,这对织物的屈曲分析是必须的,因为织物屈曲时变形很大。与这些分析相联系的是符号推导软件(如 MATHEMATICA)的使用。符号推导软件是数学机械化研究和计算机技术结合的硕果,是科技发展对理论工作者的恩赐。没有符号推导软件,对稳定性精确的线性分析或非线性分析都是难以进行的。这种稳定性分析的理论和方法在国内的介绍较少看到,我们在书中花了少许篇幅,对这一稳定性分析理论的基本内容作了简要的介绍。

基于织物传统的正交异性本构模型,采用有限变形弹性失稳分析理论,我们严格证明了织物受到与经向/纬向成 45° 方向的单向拉伸时,不可能发生离面屈曲。但是织物的这种屈曲在实验中已经观察到,这使我们可以得出结论:织物的传统的正交异性本构模型没有完全刻画出织物的力学性质。

其实,织物和织物增强复合材料薄板在细观结构上的差别是明显的。织物是编织而成的,织物在变形中,其纤维可以绕其交织点相互转动;在织物增强复合材料薄板中,织物虽然也是编织而成的,但它的编织结构已被环氧树脂所固化,其纤维已不能绕其交织点相互转动。这即是说,织物有其细观编织结构,而细观编织结构在织物增强复合材料薄板中已不复存在。

通过对织物细观编织结构的力学分析和严格的推导,我们建立了织物的细观本构模型。基于此模型,采用和前面分析中所采用的完全相同的分析过程,我们证明了织物在受到与经向/纬向成 45° 方向的单向拉伸时,离面屈曲的发生是可能的;同时也证明了织物在受到沿经向/纬向方向的单向拉伸时,离面屈曲不可能发生,这与实验结果也是一致的。我们还对织物受到与经向/纬向成任意角度方向的单向拉伸时的屈曲、以及受简单剪切时的屈曲等进行了分析,给出了一系列解析的结果。这些解析结果不但在理论上具有重要意义,也为织物屈曲的数值模拟奠定了基础。

基于织物的细观编织结构,建立织物的细观本构理论,对织物力学的发展是必须的。在这以前,织物力学的控制方程全部是固体

力学(板壳力学)的控制方程,本构方程是想当然地借用了正交异性材料的本构理论,对织物所做的强度分析和变形(如悬垂)分析,本质上属于正交异性柔韧板壳的力学分析,这以前的织物力学可称之为**传统织物力学**。

织物细观本构理论的建立和对织物特有的屈曲现象的解析分析的成功,标志着织物力学研究的一个新的开始。从此,织物有了自己特有的本构理论,也以其特有的屈曲现象使得人们不能再把织物和正交异性薄板以及其他的诸如塑料膜、纸张等材料同等看待。织物就是织物,它有其特有的编织结构。织物和正交异性薄板有本质的不同,不管正交异性薄板多么薄、多么柔软。

基于织物细观本构理论的织物的变形(特别是悬垂)分析和屈曲分析,将会出现崭新的局面。对织物悬垂的模拟从上世纪90年代初便开始了,也发表了不少的论文,但行内的人都知道,模拟的精度不高,甚至可以说很差。本书作者及其合作者曾经在这方面做过大量的工作,由于模拟的精度不好,许多模拟结果没有发表。模拟精度不高的一般表现是织物显得过于刚硬。至于织物屈曲的分析,在织物细观本构理论提出以前,则未见到屈曲解析分析的报道。

我们知道,面内压应力的存在,是膜和薄板类构件屈曲的根本原因。织物细观本构理论表明,沿织物的任何非经向(或非纬向)拉伸,都会在织物面内产生压应力,这使得织物非常容易屈曲。

织物面内的压缩模量比较小,这是织物力学界的共识。但具体是多少,没有量的概念,因为没有办法(也还没有相应的测试装置)来直接测量它。我们提出了一种方法,可以根据由KES测得的拉伸曲线和纯弯曲曲线来算出压缩模量曲线。这些在本书中作了介绍。

作者还对初始斜交异性本构理论进行了一些一般性的研究,目的是构造比正交异性更一般的本构理论,用于对斜交编织的织物或斜交编织增强复合材料的本构描述,用于对正交编织的织物在大变形下的欧拉描述。鉴于材料常数的实验测试结果是在变形构型下给出的,而有限元计算又往往使用在初始构型下给出的本

构方程,我们探讨了本构方程由于参考构型的变化而引起的本构方程的变化。这部分内容在本书也辟一章作了介绍。

织物屈曲分析中采用的这种稳定性分析的理论和方法,也被作者用于未解决的各向异性板的一些失稳问题的分析,本书在最后一章介绍了作者在这方面一些有关的工作。这些工作都是在国家自然科学基金的资助下进行的。

织物细观本构理论的建立和对织物一些重要屈曲现象的成功的解析分析,是织物力学研究的重要进展,是近代织物力学发展的一个标志,同时也丰富和发展了近代稳定性分析。当然,这些也只是一个新的开始。还有许多工作需要继续进行。例如:现在的织物细观本构理论是针对平纹织物的细观编织结构建立的,其框架和方法虽有一般性,但对斜纹织物和缎纹织物,其细观本构理论的建立仍有一些具体工作要做;还有许多织物的屈曲现象(特别是局部屈曲)难以求得解析解,还有待于用有限元方法求数值解;屈曲和分岔的非线性分析正在深入发展,还有许多问题有待解决;初始斜交异性本构理论也还只是一个基本的框架,对具体的材料(如织物等)还需要做一些补充的工作;等等。作者希望这本书的出版能为这些工作的进一步开展提供一个基础,起到抛砖引玉的作用。

本文部分成果是作者访问英国时完成的,作者对英国 Keele 大学数学系 Y. B. Fu 教授的热情接待和富有成果的合作表示衷心的感谢。

严宗达教授和杨海元教授曾审阅过本书的部分初稿,提出了宝贵的意见,作者谨致以衷心的感谢。

作者衷心感谢国家自然科学基金的资助,这些研究成果是在这一资助下取得的;感谢国家自然科学基金研究成果专著出版基金的资助,使得这一专著得以出版面世。

书中的不当或错误之处,欢迎读者批评指正。

张义同

2001 年 3 月 初稿于天津大学新园村

2002 年 8 月 修改于天津大学新园村

目 录

前言	(1)
----------	-----

第一部分 织物的细观本构理论

绪论	(3)
第一章 织物的细观本构理论	(10)
1.1 织物的细观编织结构	(10)
1.2 织物细观编织结构的力学模型	(13)
1.3 细观编织结构的力学分析	(15)
1.3.1 一般应力状态	(15)
1.3.2 纯剪切中胞的应力分析	(16)
1.3.3 纯剪切中胞的应变分析	(18)
1.4 织物的本构方程	(19)
第二章 织物力学性能的测试	(23)
2.1 织物力学性能测试设备	(23)
2.2 测试条件与试件制备	(23)
2.3 织物的弯曲刚度测试	(24)
2.4 织物的纯弯曲实验	(26)
2.5 织物的拉伸实验	(27)
2.6 织物的剪切实验	(27)
2.7 织物面内压缩模量的计算	(28)
第三章 斜交异性大变形本构方程	(36)
3.1 几个基本定理	(36)

3.2	斜交异性大变形的几个问题·····	(41)
3.3	变形构型下斜交异性大变形本构方程·····	(44)
3.4	拉格朗日描述下斜交异性大变形本构方程·····	(45)

第二部分 增量变形稳定性分析理论

第四章	变形分析 ·····	(51)
4.1	变形,运动和变形梯度 ·····	(51)
4.2	微体积和微面积的变化·····	(53)
4.3	微线段的变形——伸长和剪切·····	(55)
4.4	变形梯度张量的极分解与刚体转动·····	(56)
4.5	应变张量·····	(60)
4.6	几种变形举例·····	(62)
4.7	运动分析·····	(66)
第五章	守恒原理 ·····	(71)
5.1	质量守恒·····	(71)
5.2	动量和动量矩守恒·····	(73)
5.3	柯西公式和柯西应力·····	(74)
5.4	控制方程·····	(75)
5.5	名义应力张量·····	(76)
5.6	拉格朗日型控制方程·····	(77)
5.7	共轭应力张量·····	(79)
第六章	增量变形理论 ·····	(82)
6.1	变形增量和应变增量·····	(82)
6.2	应力增量和弹性模量·····	(84)
6.3	瞬时模量·····	(85)
6.4	增量变形边界值问题·····	(88)

第三部分 屈 曲 分 析

第七章 织物的屈曲分析	(93)
7.1 织物屈曲的特点	(93)
7.2 织物受与经向/纬向成 45° 方向单向拉伸时的 屈曲	(93)
7.2.1 坐标系和符号	(94)
7.2.2 织物的本构表述	(95)
7.2.3 平衡方程和边界条件	(97)
7.2.4 基于织物传统正交异性本构模型的屈曲分析	(99)
7.2.5 基于织物细观本构模型的屈曲分析	(104)
7.3 织物受沿经向/纬向方向单向拉伸时的屈曲	(107)
7.4 织物受沿任意方向单向拉伸时的屈曲	(108)
7.4.1 均匀变形场	(109)
7.4.2 控制方程	(111)
7.4.3 屈曲分析	(113)
7.4.4 特例与一般解曲线	(117)
7.5 织物受沿任意方向简单剪切时的屈曲	(119)
7.5.1 简单剪切变形	(119)
7.5.2 屈曲分析	(122)
第八章 各向异性薄板屈曲的几个问题	(126)
8.1 各向异性薄板受单向压缩时的屈曲	(126)
8.1.1 各向异性薄板受单向压缩时的变形	(126)
8.1.2 控制方程	(128)
8.1.3 屈曲分析	(131)
8.2 正交异性薄板受沿非材料主轴方向压缩时 的屈曲	(132)
8.3 各向异性薄板受简单剪切时的离面屈曲	(135)

8.3.1	受简单剪切时的变形	(135)
8.3.2	控制方程	(137)
8.3.3	屈曲分析	(139)
8.4	正交异性薄板受沿任意方向简单剪切时 的离面屈曲	(139)
参考文献		(144)

第一部分

织物的细观本构理论

绪 论

织物有着悠久的历史,它在人类的进步和社会发展中起过十分重要的作用.人类从用树叶和兽皮遮体到穿戴织物,是人类文明的一大进步.据一些学者的研究,在中国的历史上最早出现的可能是麻织物,然后是丝织物——中华民族的瑰宝,再后是棉织物——棉花是从外国引入中国的.

科学技术的进步改变了人类的许多生活方式,但人类这个用织物做衣服的几千年的生活方式至今未变.现代社会虽然能直接造出塑料布之类的布,但没有人用它做衣服,原因之一可能是它不透气,但这不是主要的,因为若是,人类定可造出透气的塑料布,而不必把塑料先制成纤维,再纺成纱,再织成布.人类不厌其烦地选择了这样一套复杂的生产程序,是因为这样做织物便有了塑料布之类的非编织布的不可比拟的优点:有高的拉伸强度(比塑料布的拉伸强度高),又很柔软(比塑料布柔软),且透气、保暖.

织物的这些优良的力学和物理性质是源于它的纱线的纤维丛结构和织物的编织结构.图1是平纹织物的纱线及编织结构示意图.

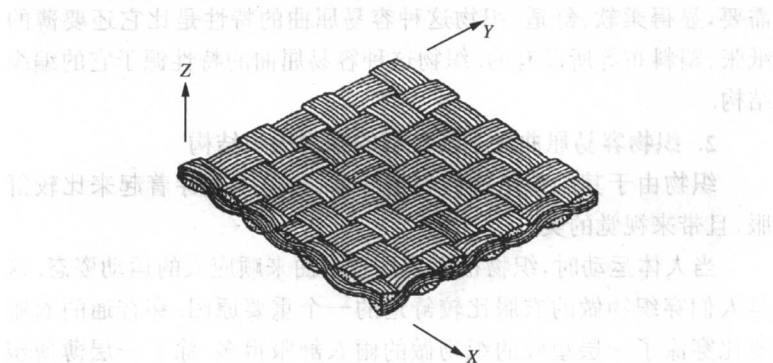


图 0.1 平纹织物的纱线及编织结构

1. 为什么要先纺纱再织布

大家知道,起重机使用的钢丝绳,具有和它相同横截面面积的钢筋相同的拉伸承载能力,但要比钢筋柔软得多.从“材料力学”的计算可以知道,具有和钢筋相同横截面面积的、由 N 根钢丝拧成的钢丝绳,其弯曲刚度只是钢筋的 $1/N$.

在电器柜里,连接固定不动的电器的导线用的都是单股导线;而经常需要移动的导线,用的都是多股导线.这是由于多股导线弯曲刚度小,方便弯曲,不容易折断.

织物纱线的结构和钢丝绳类似,它有很高的拉伸强度,又有很低的弯曲刚度,这使得用纱线织成的织物,既结实又柔软.在古代,是用棉花的纤维纺成纱,再用纱织成布的.在近代,人类发明了晴纶等人工合成材料,但仍然要把这些人工合成材料经过特殊的喷头,制成像棉花纤维那样的细小纤维,再纺成纱,再用纱织成化纤布.也有不经过纺纱直接用塑料丝进行编织的,但织出来的不是布,是防蚊子和苍蝇的窗纱.它很不柔软,没有人用它做衣服.

纱线比较柔软,织出来的布也比较柔软——这是织物之所以“柔软”的第一个原因.

织物之所以“柔软”,还有更重要的第二个原因:织物容易屈曲(即容易褶皱),这使得用织物做成的衣服容易顺应人体活动的需要,显得柔软、舒适.织物这种容易屈曲的特性是比它还要薄的纸张、塑料布等所没有的.织物这种容易屈曲的特性源于它的编织结构.

2. 织物容易屈曲源于其特有的细观编织结构

织物由于其编织结构而容易屈曲,由此人们穿着起来比较舒服,且带来视觉的美.

当人体运动时,织物很容易通过屈曲来顺应人的运动姿态.这是人们穿织物做的衣服比较舒适的一个重要原因.穿普通的衣服要比穿涂了一层塑胶的织物做的雨衣舒服得多.涂了一层薄薄塑胶的织物的弯曲刚度和普通织物的弯曲刚度并无太大的差别,但

穿在身上的感觉却不一样.原因是,涂了一层塑胶的织物,其细观编织结构已被固化,已不再是织物了,已变成了织物增强复合材料,它不像原来的织物那么容易屈曲了.普通人们对织物这种柔软的特性只是停留在“感觉”阶段,没有把它和织物容易屈曲特性联系起来.织物力学界的专家们认识到了这种联系^[2,78],他们列出了许多织物的屈曲现象,阐述了织物屈曲与穿着舒适性之间的关系,强调了研究织物屈曲的重要性.

织物容易屈曲,不但使人们穿着起来舒适,还可带来视觉的美.图 0.2 中褶皱的绸布,如花似波.



图 0.2 织物褶皱的艺术

织物的“容易褶皱”表现在在相同的载荷情况下与它类似的一些材料(如纸张、塑料布等)不会屈曲,而织物则很容易屈曲.另外,织物的面内剪切模量也比纸张或塑料布的剪切模量小很多.

织物为什么会具有这些优良的特性呢?显然,不是因为它薄(因为纸张和塑料布比一般的织物都要薄),而是由于它特有细观编织结构.

织物有平纹织物、斜纹织物、缎纹织物等多种,见图 0.3 所示.它们各自在织法上略有差别,但有一个共同点:都是由纤维交叉