

复合材料曲面铺层的数字化展开技术及发展方向

Digital Curved Surface Flattening Technonogy of Composites and Its Development Trend

西北工业大学无人机研究所 蔡闻峰 薛小平
西北工业大学机电学院 邓良才



蔡闻峰

硕士 / 高级工程师, 主要从事小型无人机制造工艺技术研究, 曾主持多个型号无人机的工艺技术工作。主要研究方向为飞机装配技术、复合材料结构制造技术等。

复合材料由于其材料特殊性 & 成型工艺性, 已被广泛应用于现代飞机结构件的制造上。传统的复合材料铺贴下料时简单零件可按尺寸大小裁剪, 复杂形状需先制作样板, 按样板裁剪单向带或织物, 然后手工铺覆到模具上, 再裁掉多余料, 经验性强, 存在尺寸精度差、效率低、生产面

对复合材料曲面数字化展开方法的论述表明, 采用纯几何的方法进行展开, 模型相对简单, 但适用范围有限; 采用力学模型模拟能够更贴近实际情况, 但是计算量比较大, 而且边界条件、初始解不易获取, 展开效率不高, 有待于算法的进一步提高; 采用几何与力学相结合的方法, 再加上相应的工艺约束, 能够快速得到满足工程实际的复合材料曲面展开结果, 将是复合材料数字化展开的一个发展方向。

积大、材料利用率低等缺点, 已经不符合现代飞机数字化设计制造的特点。因此如何快速、准确地得到满足工程实际的复合材料曲面展开结果已成为复合材料数字化设计、制造的关键环节。与传统的复合材料手工下料相比, 曲面数字化展开、下料具有效率高、材料利用率高、产品质量高、可准确估算生产成本等优点, 如图 1 所示。

国外有关复合材料的研究比较早, 并且已经有一些先进的技术投入使用, 带来了可观的经济效益, 而国内有关研究起步较晚, 还存在一定的

差距。现阶段复合材料数字化制造的几个技术难点主要集中在复杂零件曲面的数字化展开、自动下料过程中的毛坯料排样等技术上。本文将重点讨论复合材料曲面数字化展开技术及发展方向。

复合材料数字化展开技术

零件的展开方法一直以来都是人们关注的热点, 较好的展开方法能够更真实地模拟出材料成型过程, 能够很好地控制制造成本。半个多世纪以来, 国内外很多学者对钣金件的展开算法作了深入的研究, 提出了很



图1 复合材料数字化下料及激光投影铺贴

多成熟的算法,而且也都已经运用到了实际生产中。对于复合材料,由于它与金属材料的力学性能的差异较大,所以这些相对成熟的展开算法往往都不太适用,然而由于复合材料数字化制造的迫切需要,长期以来,很多学者置身于复合材料的仿真研究。

由于复合材料各向异性的特点,实际铺设的过程中往往指定一条基线方向,根据复合材料制件的性能要求,对于不同的铺层选择 0° 、 90° 、 45° 、 -45° 方向进行铺设,对于不同的铺设方向,其展开毛坯一般都不相同,即使对于同一个铺层方向,由不同的展开算法得到的展开形状也往往不同。判断一个展开算法的优劣,一般从以下3个指标来评价:

(1) 展开毛坯面积。

将二维的纤维编织布铺设到三维的模具上时,一般都会有一定的变形,因此选用不同的展开方法得到的展开毛坯其面积一般都不相同。对匀质的复合材料,较小的面积意味着重量也较小,相同的铺层数量下,结构的重量也越轻。

(2) 纤维编织布变形能。

纤维编织布的变形能一般根据纤维束的弯曲程度、经线与纬线的夹角变化来定义。变形能越小,成型后残余应力越小,零件成型质量越高。

(3) 是否有起皱或凸起。

实际生产中遇到的零件曲面,从严格数学角度来讲都属于不可展曲面,现有的展开算法都是用近似的方法得到的展开毛坯。对于一些曲率变化较大的区域,如果处理得不好,实际铺设的时候可能会发生褶皱或凸起,这将直接影响到制件的性能,甚至可能会导致生产出废品。

从仿真模型的使用上通常可以分为两大类:几何仿真模型、力学仿真模型^[1]。下面介绍几种常见织物三维仿真模型。

1 基于几何仿真模型的复合材料展开

对于织物的变形机理,最早的研究是针对服装设计制造领域的,1986年Weil Jerry^[2]首次提出了一种基于几何理论的布料仿真技术,这是标志性的文献。提出了对一种悬挂的三维织物在受到一定约束时的三维效果描述,该技术的计算过程分两个步

骤,第一步是根据织物内部约束,计算出织物约束点大致形状,第二步是计算出织物所有点的几何位置,描述织物的几何形状。

基于几何的方法的优点是模型相对比较简单,不用考虑材料的各种属性,织物铺设时的变形主要由曲面上各处的曲率决定。基于几何的曲面展开的方法,又分为两个研究方向:一是将三维曲面上的节点直接投影到平面上,得到的展开二维图;另一种模拟织物的变形过程,将二维织物铺附到三维曲面上得到变形的织物,再还原到平面毛坯。

J. McCartney等^[3]面向服装制造提出了一种正交各向异性的材料模型,在双参数曲面上进行三角细化,当曲面为不可展曲面的时候,展开后的二维平面网格将产生局部能量集中,经过能量最小化的方法得出二维展开模型,其中允许展开后的曲面有裂缝。Azariadis和Aspragathos^[4]改进了J. McCartney等的方法,使展开后曲面的裂缝极小化。前一类方法一般基于优化原理或用能量模型,在给出一个优化目标后,作逐步逼近展开。

将三维曲面上的节点投影到平面上的方法是假设曲面面上的每一点均可展,构造出一个与原曲面近似的可展曲面,再将这个近似可展曲面展开。这种方法一般要进行较为复杂的数学运算,需迭代求解大型的方程组,运算效率较低。

Masaki Aono^[5-7]等利用几何方法在非均匀有理B样条曲面上进行三维复合材料的铺设仿真,运用“Tchebychev Net”模型对曲面进行铺设,得到二维复合材料在三维曲面上的铺设结果。

Masaki Aono的研究结果表明了铺设时选择曲面上高斯曲率绝对值最大的点作为铺设起点,并以沿该点的主曲率最大的方向作为基线进行铺设,得到的展开毛坯最好——展开

面积最小、变形能最小。

模拟二维织物在曲面上铺设变形的织物展开的方法一般做了以下的假设:

(a) 铺设的时候沿着纤维束方向的受力很小,织物的经线和纬线在铺设的时候长度不发生变化;

(b) 经线和纬线之间摩擦系数比较大,织物变形时经线和纬线之间不发生相对滑动,只有夹角发生变化。

复合材料的弹性模量通常都比较大,铺设时候一般也不会施加太大的外力来强制使编织布变形,而且平纹编织布一般都编织得比较密,所以对于平纹编织复合材料,这样的两个假设是合理的。但是对于单向带、单向布等编织方式,假设(b)将不再适用,特别是当曲面的曲率变化比较大的时候,展开毛料可能会有较大的误差。

2 基于力学仿真模型的复合材料展开

基于力学模型的织物铺设仿真模型主要有粒子模型、有限元模型、弹簧质点模型等,力学模型综合考虑了织物的材料类型、摩擦系数、纤维编织方式等因素,得出的结果比较贴近真实情况,基于力学模型的织物变形仿真技术逐渐成为主流方法。

2.1 粒子模型

该模型由 Breen 等^[8]提出,他们将经线和纬线的交点看作一个个粒子,整块织物是相应粒子的集合。悬垂过程中,粒子和粒子之间以及粒子和周围环境之间存在着相互的物理作用。Eberhardt 等^[9]也提出了一种基于粒子模型的布料仿真算法,在该算法中采用了快速的微分方程的数值解法,因而提高了算法的效率。

从离散介质的角度看,粒子模型是最接近织物本质的一个模型,各个能量的表达式依靠试验确定,因而它的模拟比较逼真。但它的缺点也很明显:计算量庞大,效率较低,不符

合实时性的要求;确定粒子间相互作用的能量表达式通过复杂的试验确定,这些表达式是试验表象的数学抽象,物理意义不甚明了,表达式的确定很难说是完全准确客观的。

2.2 有限元模型

有限元模型从宏观角度把织物看作连续介质,静态变形一般用有限元方法模拟。J.R.Collier 等^[10]使用由薄膜单元和板弯曲单元迭加成的平面壳单元计算织物的悬垂;J.W.Eischen 等^[11]应用几何精确壳理论模拟织物悬垂,提出一种自适应的弧长控制算法迭代求解有限元方程,并考虑了碰撞问题,得到了较准确的有限元结果,他们利用自己建立的模型开发了一个用于服装设计制造的模拟软件。

Zhao 等^[12]提出一个新颖的方法:几何约束的有限元方法。该方法在有限元模型中引入了几何约束,假设悬垂变形过程中织物的经纬线长度不变,在三角形平板弯曲单元中引入几何约束条件,得到修正的单元泛函,以此为基础进行有限元算式推导、计算,其用在曲面展开中效果较好。

有限元模型是目前发展的一个趋势。它从连续介质的本质上计算织物的变形,其他模型多是一种等效的模拟,这决定有限元模型更真实,而且有限元模型的本构关系的表达原则上没有粒子模型的复杂。

有限元模拟织物变形的模型中主要问题是:(1)大变形非线性的处理,直接关系到结果的准确性,这要求非线性变形的理论描述必须准确,单元的选取一定要适当;(2)由于对不同织物材料特性的描述的不准确,必定带来计算结果的不准确;(3)比较而言,计算效率比较低,满足不了实时性的要求^[1]。

2.3 弹簧质点模型

Provot^[13]建立了一个弹簧质点模型,他将布匹设想为一个质点的

集合,质点之间的相互关系归结为质点间的弹簧作用,弹簧分为3类:柔性弹簧、结构弹簧和剪切弹簧,用弹簧的变形能来模拟复合材料编织布的变形情况。在不考虑接触的情况下 Provot 方法的模型更接近复合材料的物理性质,可以更好地模拟出材料在空间中的情形。

樊劲等^[14]提出了一种用于服装设计二维/三维映射算法,该方法采用了简单的弹簧质点变形模型,实现了服装裁剪片从二维到三维映射及三维到二维映射的过程。Charlie C.L Wang 等^[15]在研究复合材料铺层在自由曲面上铺设的过程中,也采用了基于弹簧质点模型的方法,实现了复杂曲面从三维空间到二维平面的网格映射,并在几何微分面上进行插入剪切缝来消除起皱和拉裂等缺陷。西工大的符文贞等^[16]提出了一个平面二维复合材料纤维垫铺设到三维自由曲面的模拟铺设算法,该算法采用了非线性对角弹簧模型,更精确地描述了复合材料铺设过程中剪切力的变化。

弹性变形模型应用范围广、物理直观性强,在织物变形的仿真中应用最多。该模型简单易用,算法容易实现,计算效率较高,但是弹簧模型相对比较简单,反映材料特性也比较少,需要进一步完善模型才能达到最好的效果。

基于力学的模型更贴近实际铺设过程,但是实现起来也更复杂。除了计算效率低,另外计算时的边界条件、初始解都不容易确定,最难的一点也是最重要的一点就是复合材料的本构关系不好确定。

以上提出的几种复合材料展开方法中,几何方法仿真速度快,但织物性能的表达比较弱,用户不容易根据自己的需要来选择织物材料并根据织物的受力情况进行仿真;力学方法效果逼真,也可选择织物材料等,但边界条件定义比较复杂,如果

边界条件定义不够准确,得到的结果也难以令人满意。实际运用时,要根据需要,并结合现有的软硬件条件选择一种适当的方法来进行模拟,以取得比较理想的仿真效果。

复合材料曲面数字化展开方法存在的问题

本文描述了现阶段复合材料展开方面的一些主流研究成果,虽然关于复合材料的研究有了很大的进展,也有了一些比较实用的算法,但是还存在很多问题没有解决。主要有以下两方面的问题。

(1)对复合材料本身性能的研究不足。

由于复合材料大规模应用还主要集中在最近几十年,对复合材料的比较全面的研究也不是太多,而且一直都有新的复合材料被研究人员制造出来,相对金属材料等来讲,复合材料还属于一门比较新的学科。关于复合材料的本构关系等性能参数还有待研究人员进一步深入研究,只有对复合材料的成形性能研究得更透彻,才有可能建立更贴近实际的复合材料曲面展开数学模型。

(2)未充分考虑复合材料铺层方法。

复合材料制件的成形性能很大一部分取决于铺层方法,由于采用的方法不同,展开的毛坯也存在一定的差异。比如对于曲面上不可展区域,通常都采用插入剪口的方式来处理,但是剪口处在铺设时选择搭接或对接,其展开的毛坯料肯定会有差异;对于毛坯的外轮廓的处理也必须考虑到下料工艺,因为通常展开的毛坯外轮廓线都是不规则曲线,如果采用手工裁剪的话,一般技术人员更喜欢裁直边;如果在铺设的时候没有高精度的定位设备,还必须考虑裁剪时留足够的余量,否则很容易导致废品。目前已有的算法多是从理论的角度来研究的,对于成形的工艺条

件几乎没有考虑,但在实际生产中复合材料铺层方法是绝对不能忽略的一个因素。

复合材料曲面数字化展开技术的发展方向

(1)工艺可行性。

工艺条件是复合材料生产的关键因素,对于可展曲面,要根据工艺需求展出合理的结果;对于不可展曲面,要能够通过一定的解决途径(如插入剪切缝等)给出工艺上能够实现的解决方案,这样得出的结果才有意义。

(2)集成性。

复合材料曲面数字化展开是连接复合材料数字化设计、制造的关键环节,复合材料的展开算法应该能够直接接受设计部门的数据,并能根据展开结果评价该设计方案,以便及时调整设计方案,以此来降低产品的试制成本,展开结果还应能够直接用于数字化下料、铺层设备,实现数据共享。

(3)快速性。

飞机结构复合材料化是飞机结构设计的趋势,飞机复合材料零部件批量少、种类多、形状复杂,复合材料制件的生产效率直接决定的整机的生产效率,所以快速性也必将是复合材料展开的一个研究方向,一些并行算法也将会引入复合材料仿真系统上来。

(4)通用性。

由于飞机复合材料零件的类型多,材料种类多,复合材料曲面展开软件要能够适应不同的曲面形状和材料,在同一个软件下,要能够对飞机上不同类型的复合材料曲面给出一个合理的展开形状。

结束语

对复合材料曲面数字化展开方法的论述表明采用纯几何的方法进行展开,模型相对简单,但适用范围

有限;采用力学模型模拟能够更贴近实际情况,但是计算量比较大,而且边界条件、初始解不易获取,展开效率不高,有待于算法的进一步提高;采用几何与力学相结合的方法,再加上相应的工艺约束,能够快速得到满足工程实际的复合材料曲面展开结果,将是复合材料数字化展开的一个发展方向。

参考文献

- [1] 张庆丰,乐清洪,马泽恩. 织造变形的物理仿真技术. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001, 13(5):449-454.
- [2] Jerry W. The synthesis of cloth objects. Computer Graphics (ACM), 1986, 20(4): 49-54.
- [3] McCartney J, Hinds B K, Chong K W. Pattern flattening for orthotropic materials. Computer-Aided Design, 2005, 37: 631-644.
- [4] Phillip A, Nikos A. Design of plane developments of doubly curved surfaces. Computer-Aided Design, 1997, 29(10):675-685.
- [5] Aono M, Denti P, Breen D E. Fitting a woven cloth model to a curved surface: Dart insertion. IEEE Computer Graphics and Applications (Computer Graphics in Textiles and Apparel), 1996, 16(5): 60-70.
- [6] Aono M, Denti P, Breen D E. Fitting a woven-cloth model to a curved surface: Mapping algorithms. 1994.
- [7] Aono M, Breen D E, Wozny M J. Modeling methods for the design of 3D broadcloth composite parts. Computer-Aided Design, 2001, 33(13):989-1007.
- [8] Breen D E, Housez D H, Wozny M J. Predicting the drape of woven cloth using interacting particles//Proceedings of SIGGRAPH. New York: ACM Press, 1994: 365-372.
- [9] Eberhardt B, Weber A, Strasser W. A fast, flexible, particlesystem model for clothdraping. IEEE Computer Graphics & Applications, 1996, 16(4): 52-59.
- [10] Collier J R, Collier B J. Drape prediction by means of finiteelement analysis. Journal of the Textile Institute, 1991, 82(1): 96-107.

本文共有参考文献 16 篇,因篇幅有限,未能全部列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)