

教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助
江苏省创新人才培养基金(BK2001408)资助
航空科学基金(01H52051)资助

FUHE CAILIAO GOUJIAN SHUZHUA ZHIZAO

RUOGAN ZHICHENG-JISHU YANJIU

复合材料构件数字化制造 若干支撑技术研究

陈 功 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

教育部高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助

江苏省创新人才培养基金(BK2001408)资助

航空科学基金(01H52051)资助

复合材料构件数字化制造 若干支撑技术研究

陈 功 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

在“飞机复合材料构件数字化生产线技术”项目的总体论证和各研究单位分工协作的基础上,结合企业的迫切应用需求,围绕复合材料数字化制造过程中的若干关键支撑技术来展开研究,主要包括铺层曲面的区域划分和剪口技术、铺层曲面的展开及优化技术、模具材料的模糊决策、工装零组件批装配技术和工装零组件建库及应用技术的研究等内容。

本书可供相关专业的研究人员借鉴、参考,也可供广大教师和学生使用。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料构件数字化制造若干支撑技术研究 / 陈功

著. —徐州:中国矿业大学出版社,2015.11

ISBN 978-7-5646-2907-6

I. ①复… II. ①陈… III. ①复合材料—构件—制造—数字化 IV. ①TB4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 259055 号

书 名 复合材料构件数字化制造若干支撑技术研究

著 者 陈 功

责任编辑 何晓明 孙建波

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 9.25 字数 210 千字

版次印次 2015 年 11 月第 1 版 2015 年 11 月第 1 次印刷

定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

复合材料构件以其高比强度、高比模量、可设计性、耐热、耐腐蚀、耐疲劳、隐身性好等独特性能而日益受到各行各业的高度重视,并在汽车、兵器、电子、航空、航天等领域得到越来越广泛的应用。复合材料的研究水平和应用程度是一个国家科技发展水平的重要体现,尤其在航空工业,各种先进的飞机无不与先进的复合材料技术紧密联系在一起。

为满足日益提高的飞机复合材料构件生产制造的要求,迫切需要全面应用数字化技术,改造现有的生产制造方式和流程,逐步实现复合材料构件设计、制造的数字化和一体化。本书围绕复合材料构件数字化制造的具体需求,研究数字化制造过程中的若干关键支撑技术,包括复合材料构件铺层曲面的展开预处理、复合材料构件铺层曲面的优化展开、复合材料构件模具材料的智能选择以及复合材料构件工装零组件的快速装配等。本书主要研究内容及成果分为如下五个部分。

第一,针对复合材料构件铺叠成型中预浸料的铺层展开需要,研究了曲面三角化、区域划分、剪口等曲面展开预处理技术。本书提出了一种基于离散高斯曲率的曲面区域划分方法,可有效实现用于铺层曲面展开的曲面区域划分。研究并实现了曲面自适应曲面剪口算法,该算法将曲面上高斯曲率大于用户所给阈值的点作为剪口起始点,再利用最短路径生成算法生成剪口路径,该算法可实现全封闭、单边界、双边界、多边界等类型曲面的自适应剪口。根据复合材料构件铺层曲面展开的实际需求,本书还提出了一种交互式曲面剪口算法,根据用户指定的剪口路径关键点,算法可生成符合用户需求的剪口路径。为了提高材料的下料效率和利用率,简化后续的排样工作,进一步提出了一种剪口路径优化算法,可有效消除锯齿状的剪口路径,实现剪口路径的平直化。

第二,提出了一种以中心三角片为基三角片的“涟漪式”曲面展开方法,该方法能快速获得曲面的初始展开,有效减少累积误差。在获得曲面初始展开的基础上,提出了一种改进的基于弹簧—质点模型的曲面优化展开算法,算法的改进主要体现在以下几个方面:自适应时间步长的应用提高了算法的速度和稳定性;通过对模型中各质点惩罚力的计算,实现了翻转三角片的整体调整;算法还综合利用初速度和忽略初速度两种方法所具有的优点,使得展开过程中翻转三角片

的快速调整、迭代的快速收敛等关键问题得到了较为圆满的解决。该算法能够快速获得网格数量较大的复杂曲面的优化展开,有效消除初始展开及优化过程中出现的翻转三角片,提高了复杂铺层曲面的展开质量。

第三,提出了一种基于网格边的复杂曲面优化展开的新方法。该方法以曲面三角网格中各网格边长为优化变量,以展开前后网格边长误差最小为优化目标,以网格中各内部点均可展为约束条件,并采用牛顿法和矩阵分块等方法对该优化问题进行求解,构造出与原始曲面网格边长误差最小的可展曲面,再对构造出的可展曲面用“涟漪式”展开方法进行展开,从而实现复杂曲面的优化展开。该方法具有稳定、收敛速度快、展开精度高、展开操作简单等优点,可应用于网格数量较小的复杂铺层曲面的优化展开。

第四,设计复合材料构件铺叠成型模具时,模具材料的选择至关重要。在分析研究复合材料构件模具材料选择的知识和经验的基础上,本书提出了一种模具材料选择模糊决策方法,该方法运用加权多因素模糊模式识别技术,同时结合基于规则的推理(RBR)技术和权重动态调整技术,实现了具有一定自适应功能的复合材料构件模具材料的模糊决策。

最后,针对复合材料构件工装快速装配的要求,提出了“批装配”的概念,解决了“批装配”实现过程中装配特征的定义、零件实例化、实时预览等关键技术,实现了螺栓联接、螺钉联接、销联接等零组件的快速装配设计,大大减轻了设计人员的装配设计工作,提高了装配设计的效率。在对当前典型工装组件库中的实体模型、零组件参数表、组件的预览方法、组件实例化方法等进行分析研究的基础上,提出了组件库建库工具的总体框架,并在CATIA上开发了该组件建库工具,实现了组件的建立、查询、预览、调用以及主要参数的显示等功能。

希望本书的研究成果能够为复合材料构件数字化制造行业的发展带来一些新的思路及相关关键技术的支撑。书中难免存在不到之处,敬请专家和读者批评指正。

著 者

2015年9月

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 引言	1
1.2 复合材料构件数字化制造相关支撑技术及其研究现状	2
1.3 本书的选题背景和研究内容.....	10
第二章 复合材料构件铺层曲面的展开预处理	16
2.1 引言.....	16
2.2 曲面离散三角网格模型的建立及其高斯曲率估算.....	17
2.3 基于高斯曲率的铺层区域划分.....	27
2.4 铺层剪口技术.....	33
2.5 本章小结.....	57
第三章 复合材料构件铺层曲面的展开及优化	58
3.1 引言.....	58
3.2 铺层曲面的初始展开.....	60
3.3 铺层曲面的展开优化.....	64
3.4 基于网格边的铺层曲面优化展开.....	74
3.5 曲面展开误差的可视化.....	83
3.6 本章小结.....	87
第四章 复合材料构件模具材料的模糊决策	88
4.1 引言.....	88
4.2 复合材料构件模具材料的多因素模糊模式识别.....	89
4.3 基于规则的材料决策检验.....	92
4.4 加权模糊模式识别中的权重调整.....	93
4.5 本章小结.....	95

第五章 复合材料构件工装零组件的快速装配	96
5.1 引言	96
5.2 零组件的批装配技术	98
5.3 组件的快速装配技术	106
5.4 零组件库的管理	118
5.5 本章小结	121
第六章 结束语	123
6.1 研究内容及成果总结	123
6.2 今后工作展望	124
参考文献	126
致谢	139

第一章 绪 论

1.1 引言

复合材料构件以其高比强度、高比模量、耐热、耐腐蚀、耐疲劳、隐身性好等独特性能而日益受到各行各业的高度重视,并在汽车、兵器、电子、航空、航天等领域得到越来越广泛的应用。复合材料的研究水平和应用程度是一个国家科技发展水平的重要体现,尤其在航空工业,各种先进的飞机无不与先进的复合材料技术紧密联系在一起。

目前,全球两大飞机制造商——美国波音公司和欧洲空客公司都很关注先进复合材料技术在民用飞机,特别是大型客机上的应用。从波音公司的 B737 到 B787 飞机,从空客公司的 A320 系列飞机到目前世界上最大的民用飞机 A380,都能够很明显地看到复合材料技术在这两家公司民用飞机上的应用情况。例如,空客 A340 上复合材料的用量占整个结构重量的 8%,波音 B777 占 11%;A380 客机上的复合材料用量为其结构重量的 22%,而这还不包括玻璃纤维增强铝材料(GLARE)在内,GLARE 的使用不仅扩大了碳纤维增强复合材料的使用范围,而且提高了飞机液压系统的能力,从而使其净重量减少到 240 t 左右,比采用波音 B747 技术制造的近似尺寸的飞机轻 10~15 t^[1]。而于 2007 年 7 月正式下线的波音 B787 更是加大了复合材料的使用量,复合材料用量达到其结构重量的 50%,从而使 B787 飞机不仅成为当时复合材料应用比例最高的商用喷气飞机,也是首架在机翼主承力结构上采用复合材料的大型飞机。大量采用复合材料从而降低了飞机重量,同时采用新型的发动机和创新的流线型机翼设计,这些使 B787 比同类飞机节省 20% 的燃油消耗^[2]。根据以上数据不难预测,伴随着先进复合材料技术的日趋成熟,复合材料在飞机上的应用会越来越广,可以说,没有复合材料的进步和工业化生产,就不可能有现代航空航天技术的飞速发展。

国外的应用情况表明,先进的复合材料技术为飞机制造企业带来了巨大的效益,而复合材料数字化设计、数字化制造技术对扩大复合材料的应用具有重要意义。例如,JSF(联合攻击战斗机计划,Joint Strike Fighter)在复合材料进气道

的研制中,采用数字化设计和数字化纤维铺放等技术,最终将设计时间由 300 h 减少到 150 h,制造时间由 450 h 减少到 200 h;而西科斯基公司在 S-92 直升机座舱罩的研制中通过实施多项先进技术,降低开发时间 27%,减少更改超过 90%。在整体成形的“首相 I 号”机身的制造过程中,采用了数字化纤维铺放技术,与手工铺层相比,结构重量减少了 20%,材料浪费减少了 60%^[3,4]。

目前,我国在复合材料构件数字化设计、制造技术方面的应用研究尚处于起步阶段,进一步发展和推广复合材料构件数字化设计、数字化制造技术,必将使复合材料获得更为广泛的应用。

1.2 复合材料构件数字化制造相关支撑技术及其研究现状

复合材料构件数字化制造实施过程中涉及众多支撑技术,主要包括复杂铺层曲面的区域划分和剪口等预处理技术、铺层曲面的展开及优化技术、模具选材的决策技术、模具和夹具快速设计技术、模架的选型及快速设计技术、工装零部件的快速装配技术、铺层排样技术、数控下料技术、激光定位技术,以及成型工艺的仿真、优化技术等,这些技术的研究与实现需要多个单位、众多学者共同参与才能最终完成。本书在“飞机复合材料构件数字化生产线技术”项目的总体论证和各研究单位分工协作的基础上,结合企业的迫切应用需求,围绕复合材料数字化制造过程中的若干关键支撑技术来展开研究,主要包括铺层曲面的区域划分和剪口技术、铺层曲面的展开及优化技术、模具材料的模糊决策、工装零部件批装配技术和工装零部件建库及应用技术的研究,下面仅论述与本书研究内容相关的支撑技术研究现状。

1.2.1 复合材料构件铺层曲面的区域划分及剪口技术

复合材料构件数字化制造过程中,为了提高下料的速度和精度,并增加材料的利用率,往往采用自动裁剪机进行全自动机械式下料。铺层所用的编织纤维布是平面二维的,而复合材料构件表面是空间三维的,因此,运用自动裁剪机下料前必须求取复合材料构件表面上每一区域三维铺层曲面片所对应的二维平面几何轮廓数据,这就必然要涉及空间三维曲面展开到二维平面的问题。同时,铺层曲面的展开也是复合材料构件数字化制造过程中可制造性分析、优化排样、激光定位、自动铺贴等环节的基础。

对复杂不可展铺层曲面进行展开前,通常需要对这些曲面进行区域划分、剪口等展开预处理工作,使其达到制造精度要求,再对其进行展开。即使对于一些可展曲面,如没有开口的圆锥面、圆柱面以及一些全封闭的曲面,也必须通过剪

口才能将它们展开到平面上。另外,为了使每一铺层的剪口位置互相错开,往往需要在待展曲面上交互地进行剪口或区域划分工作。

近年来,针对复杂曲面的区域划分及剪口技术,国内外研究中已经取得了一定的成果,提出了一些曲面剪口和区域划分的方法。

席平^[5]将复杂曲面先分割为若干个条状区域,对每一区域用直纹面进行逼近,再将直纹面进行三角网格分割,进而获得曲面的展开结果。Hoschek^[6]采用两个方向的带状区域去逼近原始曲面。这些方法所获得的曲面展开结果中,一般都存在条带间的缝隙或重叠,需对展开结果做进一步处理。

针对复杂的双参数曲面,Shimada等^[7]提出了使用有限元法对曲面进行展开的算法,该算法基于曲面离散网格模型,运用区域划分的曲面展开思想对曲面进行展开,但其所使用的曲面区域划分算法过于简单,无法处理复杂的曲面展开问题。Parida等^[8]提出了一种三角平面网格法,将曲面离散三角片逐一变换到指定的平面上,但是该算法在曲面展开的过程中容易产生较大的累积误差和较多的裂纹。

Chen等提出用多片可展曲面去逼近一张曲面的方法,但这种方法还只能做一个方向的带状拼接。Elber^[10]给出了一种改进的基于法曲率等参数线的二分法自动分片技术,优化了分割位置,减少了不必要的分割,但仍属于带状分割的范畴。陈动人等^[11]提出了一种基于曲面“伪直母线”的自适应分片方法,该方法较好地抓住了曲面的几何特征,但在处理某些复杂曲面时,经常会出现孔洞和零碎小片过多的问题。

刘胜兰^[12]针对三角网格模型的数据组织特点,提出了一种基于特征的块边界扩展生长的数据分块方法,并用整体融合、分解融合和边界光滑等方法对各区域进行优化,分块结果基本符合零件的特征结构,但该方法主要用于结构特征的反求和建立,对于其在曲面展开方面的应用仍需做进一步的研究。

曲面剪口是实现复杂不可展曲面近似展开的另一重要手段,曲面剪口的关键是剪口位置的确定和剪口路径的生成。

Wang等^[13]提出从高斯曲率值大于用户所给阈值的点开始进行剪口,通过对曲面网格上各点权值的计算来生成最短切割路径,但该算法还无法处理多边界曲面的剪口,对双边界曲面的处理也比较简单,算法的适应性有待加强。李基拓等^[14]提出了一种三角化曲面网格的自动切割算法,在高斯曲率较高的顶点和曲面边界之间生成切割路径,切割路径的生成有两个约束条件,即尽可能短而直,尽可能经过曲面的棱边,在此基础上建立并优化初始切割路径树,删除短小切割路径,并使优化后的切割路径尽可能光滑。

测地线法^[15,16]是求取两点间最短距离的一种数学方法,但是目前还缺乏有

效地在空间三维离散网格上求取测地线的方法。据统计,目前提出的两点间最短路径的算法大约有 17 种,Zhan 等^[17]对其中的 15 种进行了测试,结果显示有 3 种效果比较好,它们分别是 TQQ 算法(graph growth with two queues)、DKA 算法(the Dijkstra's algorithm implemented with approximate buckets)以及 DKD 算法(the Dijkstra's algorithm implemented with doublebuckets),其中 TQQ 算法的基础是图理论,较适合于计算单源点到其他所有网格点间的最短距离;后两种算法则是基于 Dijkstra 的算法,更适合于计算两点间的最短路径问题。南京航空航天大学张丽艳等^[18,19]提出一种任意三角网格模型上两点间的近似最短路径算法,该算法首先将三角网格模型表示为带权图,然后用 Dijkstra 算法搜索两顶点间的最短路径,并将其作为两点间最短路径的初始近似,通过对相关三角形边不断迭代细分,并构造每次细分后的新带权图,最终逼近网格模型上两点间的最短路径,该算法的实现较为复杂,计算量大,直接将其应用于曲面展开时,还经常会出现畸形狭长三角片的情况。Kanai 等^[20]提出了一种在多边形网格上生成近似最短路径的方法,该方法也是以 Dijkstra 算法为基础,可将精度控制在 0.4% 以内,但速度却比 CH 算法^[21]快 100~1 000 倍。

1.2.2 复合材料构件铺层曲面的展开及优化技术

复杂自由曲面在飞机、船舶、汽车、家电乃至人们生活所必需的服装、制鞋等行业中正得到越来越多的应用。这些复杂自由曲面中有很多都是不可展的,但是从制造工程等角度考虑,又必须展开或近似展开这些曲面,以满足设计误差分析、下料等要求。复杂曲面展开问题的研究可追溯到 30 多年前,Manning 于 1980 年在 CAD 杂志上发表了关于复杂曲面展开的论文,提出了基于等距树的计算机模式化裁剪方法,并应用于制鞋工业^[22]。此后,国内外众多学者针对不同应用领域、采用不同的展开方法,做了多项研究工作。

对曲面按照其可展性进行划分,可分为可展曲面和复杂不可展曲面两种。对于可展曲面,如柱面、锥面和切线曲面等,张玉峰、陈靖芯等^[23,24]直接采用解析法来对其进行展开,但这些方法一般只能针对某一特定类型的曲面,且计算求解过程较复杂、烦琐,因而很难得到推广应用。本书主要研究复杂不可展铺层曲面的展开方法,运用这些方法展开可展曲面时,同样可以获得高精度的展开结果。

曲面参数化是与曲面展开密切相关的工作,Floater 等^[25]对曲面参数化的各种方法进行了总结,Sheffer 等^[26]提出了 ABF 方法对曲面进行参数化,该方法能有效消除网格中的三角片翻转,但该方法以网格的优化角度和网格中某一边的长度来展开整个平面网格,容易产生累积误差,同时构造和求解大型线性方

程组也影响了算法的效率。另外,纹理映射也是与曲面展开密切相关的一项工作^[27]。参数化和纹理映射一般对展开算法的精度要求并不是很高,且基本不涉及区域划分、剪口等预处理工作。

根据曲面展开所采用的理论方法的特点,可以将曲面展开方法从整体上分为几何方法和力学方法两种类型^[28]。几何方法一般是从曲面的几何特性出发,按一定的规则,例如尽量保持面积不变、长度不变或角度不变等,将整张曲面展开到平面上;力学方法则主要从分析和模拟曲面材料中的应力与应变出发,计算曲面的优化展开结果。

(1) 几何方法曲面展开

苏步青等^[29]将不可展曲面的平面近似展开归结为一个无约束极值问题,其目标是使展开前后曲面网格上对应结点与其相邻结点之间距离差值的平方和最小。Sheffer 等^[26,30]则以展开前后网格上对应角度的误差最小作为优化目标,来求取优化的平面展开网格。Wang 等^[31]则以网格上每一点均可展为约束条件,以可展网格上各点与原曲面网格上对应点距离和最小为优化目标,直接优化构造出原曲面的可展曲面,再将构造出的可展曲面进行展开。这些方法一般需要进行较为复杂的数学运算,在优化迭代过程中需求解大型方程组,曲面网格顶点数较多时一般效率较低。

Hinds 等^[32]基于高斯曲率将复杂曲面划分为多条近似可展的椭圆形或双曲形的区域,将各区域展开后再按一定方式排列起来,从而获得曲面的近似展开。杨继新等^[33]用一种“刮大白”的方法将服装曲面分割为几个分片,在每一个分片的两条空间曲线之间构造可展曲面来逼近这些曲面片,从而获得复杂曲面的展开。席平^[5]提出了一种曲面展开方法,该方法将零件曲面划分为若干个条状区域,对每一区域用一条直纹面进行逼近,从而获得曲面的展开,为了消除上述展开方法所得展开结果中的重叠与裂缝,席平进一步给出了力学修正法^[34]和几何修正法^[35]。Parida 等^[8]提出了一种用于复合材料分层曲面的展开方法,首先将曲面分片近似展开,然后调整展开的各平面片之间的裂缝与重叠区域,使裂缝与重叠符合复合材料设计的要求。上述条带划分的展开方法所获得的初始展开结果中一般都存在大量的重叠和裂缝,需要对其进行较为复杂的处理才能获得准确、完整的展开结果。

Azariadis 等^[36]根据高斯曲率和测地线原理对复杂曲面进行了初始展开,并对初始展开中存在的裂缝和重叠给出了消除优化策略,随后,他们又提出一种用于纹理映射的“引导条”曲面展开算法^[37],首先根据高斯曲率和测地曲率给出曲面的展开路径及合适的“引导条”,使初始展开平面中条形区域之间的裂缝和重叠最小,然后在平面上以引导条为参考将曲面上的其他条形区域逐步展开,但用

该算法所获得的展开结果中依然存在裂缝和重叠。Azariadis 等^[16]于 2001 年进一步提出两种曲面展开的全局优化算法,即无约束全局优化法和可控制局部精度的全局优化法,这些曲面展开算法主要应用于图形纹理映射和制鞋行业的鞋样设计中。

毛昕^[38]提出了一种“基带”方法来展开复杂曲面,并给出了曲面展开误差及曲面可展度的计算方法,后来又进一步对曲面可展度的衡量方法进行了修正^[39],避免了抛物点对可展度计算的影响,并利用可展度对“基带”曲面展开方法进行了改进,使曲面展开精度有所提高。Choa 等^[40]通过映射函数的误差最小化,得到参数化曲面片与其三角形区域之间的局部近似等距映射,同时给出了一种保证三角域与空间参数域之间拓扑同构的稳定算法。

(2) 力学方法曲面展开

Shimada 等^[41]运用有限元方法提出了一种复杂曲面近似展开的动态优化方法,首先将目标曲面离散成条状区域,然后展开每一块条形区域,并通过两阶段算法来获取一个较好的初始展开,最后通过求解一个多步决策过程来得到曲面的最终展开形状。

Liu、Chen、Sowerby 等^[42,43]根据滑移线理论提出了一种用于计算拉伸件毛料的算法,正如作者自己所指出,其展开结果中存在与 Henky 方程相矛盾的地方,后来他们对展开滑移场中的平面应力进行了优化,使其符合 Henky 方程,从而得到了优化的毛料形状。

McCartney、Hinds 等^[44,45]提出了一种纺织物曲面的展开算法,优化目标是从平面形状成形为空间形状时所需的能量最小,算法中着重考虑偏离可展曲面的程度、衡量能量的因素以及基于能量分布的织物几何形状预测,最后得到曲面的优化展开,使得曲面的展开结果与织物的材料特性相关联。

Carignan 等^[46]提出了一种用于服装裁剪片的二维到三维的映射算法,该算法运用了牛顿运动定律,在缝合力的作用下,初始的二维裁剪片自动变形,并缝合到人体模型上,最后将这种映射算法用于服装穿着效果的仿真,但算法没有考虑服装裁剪片由三维到二维的展开。

徐国艳、施法中^[47-49]提出了一种有限元逆算法,采用变形理论,同时通过非线性分析法,确定初始毛料中各节点的位置,从给定零件的最终形状尺寸和过程条件出发,沿冲压成型过程相反的方向求解毛料形状,已知变量是零件最终的几何形状和初始状态的厚度,未知变量是初始状态的形状和最终的厚度,该方法可以较准确、快速地求得冲压件的毛料外形。

Yu 等^[50]提出了一种复杂曲面展开的约束非线性优化方法,首先建立一个初始展开模型,使得曲面到平面的展开中只有拉伸应力,然后提出了沿等参线和

沿主曲率线的两种优化展开方法,沿主曲率线展开时得到的应变梯度更符合实际,但这两种方法并无很大区别。为提高算法效率,可将曲面划分成一定数量的分片,但由此而得到的最后结果未必是全局最优结果。

张其林等^[51,52]提出一种将任意空间曲面近似展开为平面的准则,并证明了该准则与有限元法中节点残余力向量等于零的等效性,曲面展开时首先将空间曲面离散成为三角形网格,然后将该网格展开到平面上。展开准则是展开前后对应线段长度差的平方和最小,通过空间和平面上的线段、节点组成铰接杆体系来建立优化模型,从而将曲面展开的几何问题转化为铰接杆体系的力学结构问题。

樊劲等^[53,54]提出了运用弹簧—质点模型来对曲面的初始展开进行优化,实现了2D到3D和3D到2D的裁片转换算法。该算法的基本思想是将平面展开三角网格与对应的空间网格在网格边长上存在的差异看成是弹簧的拉伸或压缩,从而对各个网格点(质点)产生拉力或推力,使各质点向着释放弹簧能量的方向移动,最终稳定状态下的网格即为优化展开网格。随后,弹簧—质点模型在许多曲面展开系统中得到了应用和改进。王弘、王昌凌等^[13,55-57]在其曲面展开系统中运用了弹簧—质点模型,并通过改变模型中局部弹性系数来实现曲面展开过程中局部精度的控制。Li等^[58]通过在弹簧—质点模型中添加惩罚力的方法来消除展开网格中的重叠三角片。毛国栋等^[59,60]在弹簧—质点系统中忽略了质点运动的惯性,有效防止了优化过程中的振荡和发散。

Azariadis等^[61]提出一种任意曲面全局优化展开的改进算法,该算法首先将曲面初始展开到平面上,然后将展开优化表示为约束最小化问题,这些约束可用来控制曲面展开的局部准确度,最后用遗传算法来求解此约束最小化问题,从而获得曲面的优化展开。王俊彪、张贤杰等^[28,62,63]提出了一种基于单元变形能的优化展开算法,该算法以拓扑等价映射所得到的结果为初始值,以曲面网格单元由平面状态到空间状态的总变形能最小为目标,对展开网格的尺寸与形状进行优化,从而得到曲面的优化展开结果。

1.2.3 复合材料构件制造工艺及模具设计

目前,对复合材料的研究主要集中在成型工艺、材料性能、结构设计等方面。铺层法是目前国内外广泛应用的一种复合材料构件成型的方法,研究热点主要集中在以纤维角、铺层顺序等作为设计变量对铺层进行优化,使层合板的屈曲载荷最大^[64-68],修英姝等^[69]提出了采用神经网络和遗传算法来优化设计复合材料层合板,建立了满足铺层结构稳定性的优化铺层体系。铺层中,增强纤维材料选择及编织方法、计算机模型的建立与分析、蜂窝夹层的材料与结构等方面的研究

也受到了国内外众多学者的关注。对于三维编织复合材料的力学分析一般是按照纤维构造建立力学分析模型,如纤维斜模型、三细胞模型等,分析方法通常基于经典的层板理论,这些模型除能计算基本的力学性能和弹性常数外,三细胞模型还可以计算双模量和损伤影响,而且适用于三维四向、五向及多向编织^[70-73]。刘振国等^[74]对三维四向编织复合材料的参数化建模技术进行了研究,提出了一种“米”字形枝状体胞的计算模型,较为真实地模拟了该材料的微观结构;在此基础上讨论了相应的边界条件和约束条件,并应用有限元方法计算了该材料的纵向、横向弹性模量。复合材料 RTM(Resin Transfer Molding)成型工艺技术是目前欧美低成本树脂基复合材料技术发展的两大主要方向之一,也是目前先进复合材料技术的一个主要研究热点^[75-78],每届 SAMPE 及 SPI 年会上均有十几篇与 RTM 相关的论文发表,美国 F-22 先进战斗机上采用 RTM 工艺制造的复合材料零部件已多达 400 余件,国外预计 RTM 工艺技术将成为 21 世纪复合材料的主导成型工艺技术之一,具有重要的技术、环保和市场意义。梁志勇等^[79]以计算机模拟分析技术的实际工程应用为目的,在普通 Windows 窗口下实现各类平面构件 RTM 工艺过程的控制体积单元/有限元算法(CV/FEM),进行工艺过程的压力场及树脂流场的模拟分析,旨在发现树脂黏度、注射压力及预成型体渗透特性等对 RTM 工艺过程的影响规律。复合材料纤维缠绕法也是一种典型的复合材料构件成型方法,近年来正受到越来越多的关注和应用。Cohen、Mertiny、Banerjee 等^[80-82]建立了复合材料纤维缠绕模型,分析缠绕参数对于构件的质量、强度、性能等的影响。王增加等^[83]简要概述了纤维缠绕成型 CAD/CAM 系统的总体方案、关键技术和优化设计等,并介绍了国内外的研究进展。南京航空航天大学的熊慧^[84]对自动铺丝束 CAM 技术进行了研究与开发。美国 Phillips 石油公司^[85]则对高分子量 PPS 工艺进行了研究,主要用于制造编织物和薄膜。国内邢玉清等^[86]对高分子量的工艺性以及中长纤维增强高分子量 PPS 热塑性复合材料的制备方法进行了研究,确定了用 PPS 悬浮液对中长纤维进行含浸的工艺是制造这种复合材料较为有效的方法。Walter^[87]对热胀成型法进行了综述。肖少伯^[88]介绍了热胀成型法对芯模材料的基本要求,同时介绍了用热胀成型法成型复合材料产品的工艺质量和力学性能。

目前,直接针对复合材料构件模具设计方面的研究相对较少,Brouwer 等^[89]对尺寸较大的复合材料构件的真空注射 RTM 成型模具进行了研究和开发。赵渠森、牛春匀、田嘉生等^[90-92]给出了常用的复合材料构件模具材料及其热学、力学等物理性能参数,同时给出了模具设计的一般要求和模具材料选择的一般方法。何颖等^[93]介绍了几种用于热压罐成型中温固化复合材料的模具——铝模具、钢模具和碳纤维/环氧复合材料模具,并对其优缺点进行了比较。

1.2.4 复合材料构件工装零组件快速装配技术

目前,装配技术的研究主要集中在新的装配约束方式^[94-99]、装配顺序规划^[100-102]、装配路径规划^[103]、装配工艺规划^[104-107]、虚拟装配设计^[108-112]、基于知识的装配^[113-115]等方面。在传统理论中,通常使用一个 4×4 转换矩阵来计算待装配零件的位置^[116,117],但是这些方法计算复杂,难以理解,整个过程显得枯燥乏味。因此,如何简化装配过程、提高装配速度就成为计算机辅助装配设计的一个亟待解决的问题,零组件快速、智能装配方面的研究正受到国内外众多学者的关注与支持。

Tzafestas 等^[114]讨论了自动装配环境的基本要求和基于知识装配技术的优点,通过分析大量已有的基于知识的装配模型,得出模糊逻辑和模糊推理技术可更精确地用于基于知识的装配模型,基于模糊技术,他们设计并实现了一种层次装配专家系统。Zha 等^[115]则将装配知识组织成人工智能中的 Petri 网,并将其用于智能化机器人的柔性装配系统。这些基于知识的快速装配方法的实现需要建立在产品完整的装配知识体系的基础上。

利用装配特征和装配约束进行装配是实现快速装配的一种典型方法,Ye 等^[118]将注塑模中的装配零件分为独立于产品的零件和依赖于产品的零件,并分别为其建立相应的装配特征,采用基于特征和面向对象的方法建立了注塑模的层次装配模型,运用该模型可以比较容易地实现面向装配的设计(DFA),但模型的建立需要设计者在设计相关零件时就要非常清楚零件上相关几何特征对于装配的意义。潘志毅^[119]提出了一种自动装配设计方法,该方法采用特征联系的思想封装装配知识,建立了“栈式”自动装配规则,通过装配运算操作实现自动装配,将该方法应用于管道建模时,原来复杂的配对过程被转化为简单的装配姿态的选择,但利用该方式实现自动装配时,需要进行较为复杂和严格的装配特征定义、装配约束编码等工作,对待装配零件和装配模型的设计提出了很严格的要求。张萍^[120]提出了一种基于装配特征的零件快速装配方法,该方法根据零件及其装配特征的参考原点和装配基准面来确定待装配零件的移动位置和方向,最后将这一方法应用于夹具联接件的自动装配中,提高了联接单元的装配速度。张宏星等^[121]结合自动装配的实际需要,给出了装配特征的定义及相应的属性结构,并在 UG 开发环境下予以实现。这些以装配特征定义和装配特征编码为基础的快速装配方法需要在待装配零组件和装配模型上定义严格的特征和编码,增加了待装配零组件和产品装配模型的设计工作量与难度。

直接建立和求解零件之间的装配约束关系也是一种快速装配设计的实现方

法,金天国等^[122]给出了自动确定和求解装配元件的尺寸或位置的启发式算法,该方法能使设计者在计算机辅助装配设计时,对零件的尺寸和位置进行调节,从而使设计者较为全面地考虑装配关系。沈梅等^[123]实现了一个 FBCODMIS 系统,该系统能从设计模型中直接产生出加工特征和装配特征,用户在零件模型上指定了装配区域内的任一个面后,系统会自动产生满足该子装配的装配特征面集、关联矩阵及配合特征。郭玉申等^[124]以 DFA 分级装配模型为研究重点,根据不同零件之间的相对位置姿态,建立基于几何特征间的邻接关系和以位置姿态矩阵为未知变量的方程组,最后采用“牛顿—拉斐森”迭代法和最小二乘法来求解此非线性方程组。陈晓霞等^[125]给出了通过特征向量变换来求解装配约束的方法。这些方法一般计算较为烦琐、容易出错,且不能充分利用现有 CAD 系统的零件装配位置求解功能。

现代 CAD 系统中,特征造型是面向单个零件的,在处理跨零件特征时不仅造型效率低,而且破坏了这类跨零件特征的明确工程意义。黄翔等^[126]在研究这类特征内在的跨零件性、局部修改性及装配关系的基础上,将面向零件的特征造型向面向装配的跨零件特征造型进行延伸,提出了虚零件的概念,并通过数学模型表达了装配建模时通过虚零件对装配对象实体模型自动进行修改的关系,该方法实际应用时需要在相关零件设计时便建立起“跨零件特征”,在已有的复合材料构件工装模型上则不易实现。

1.3 本书的选题背景和研究内容

我国的复合材料构件设计、制造技术经过 30 多年的学习引进、自主研究和开发应用,在一定程度上取得了很大进步,但复合材料构件的数字化设计、制造技术还基本没有得到工程应用,成型方法仍然停留在手工铺贴和热压灌固化等技术层面上。引进的数控剪裁、激光投影辅助铺叠等设备在一定程度上提高了自动化程度,但是还没有质的提高。

从数字化技术应用角度来看,我国复合材料构件的数字化设计制造技术层次较低,仅仅是单纯的单项技术的应用。由于没有形成复合材料构件的数字化制造生产线,因此大多只能采用逆向工程技术和模拟量传递,设计效率低,精度差;多数企业数字化技术应用范围很小,尚未建立集成的数字化复合材料构件设计、制造环境;尚未健全数字化设计、制造管理制度和规范等。因此到目前为止,中国国内还没有一家航空企业能够真正实现复合材料构件数字化设计、制造的一体化。

为满足日益提高的飞机复合材料构件生产制造要求,在引进先进的数字化