

复合材料构件设计、分析、制造一体化

张丽华¹ 范玉青²

(1 武汉工业学院机械工程系, 武汉 430023)

(2 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100083)

文 摘 给出了复合材料构件一体化研制环境基本要素和一体化研制流程, 并对几项关键技术进行了探讨。复合材料构件数字化定义包括几何建模和材料结构建模, 总结了建模过程和数据的组成。根据当前复合材料构件分析无法基于最终真实纤维路径进行的现状, 总结了接口数据的内容和组织, 探讨了通过纤维路径数据到有限元网格的自动映射实现材料铺放数据的自动传递。研究了设计到自动下料系统和激光投影系统的接口数据和集成方式。

关键词 复合材料, 一体化, 数字化定义, 数据集成

Integration of Design, Analysis and Manufacture for Composite Structures

Zhang Lihua¹ Fan Yuqing²

(1 Mechanical Engineering Department, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023)

(2 School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100083)

Abstract Implementing digital composite structure definition was the base of achieving the data integration of design, analysis and manufacture for aircraft composite structures. Basic elements of composite integration developing environment and integration developing flow are given and several key technologies are discussed. The digital composite structure definition consists of the modeling of geometry and the modeling of material structure. The modeling process is summarized. According to the fact that the composite structures can not be analyzed today based on the final shape with true fiber orientations, the content and organization of interface data are summarized. By using automatic mapping of fiber orientation data to the finite element mesh, the automatic data transfer from design to analysis is realized. At last, the data content and integration style of design and nesting and cutting system, design and laser projection system are studied.

Key words Composite, Integration, Digital definition, Data integration

0 引言

复合材料最大的一个工艺特点是零件制造和材料成形同时完成, 这要求结构设计与材料设计同步、结构成型与材料制造同时完成, 从而决定了复合材料构件设计 - 材料 - 工艺三者密不可分, 在研制过程中必须实施设计、分析、制造的一体化。目前国内的航空企业在复合材料数字化技术的应用方面已有了一定基础, 各单项数字化技术已经开始应用, 但是在复合材料构件研制过程中尚未实现设计、分析、制造的

一体化, 这造成了复合材料构件设计和分析以及设计和制造在数据上的分离, 致使复合材料构件分析无法在构件的制造状态下进行, 下料过程只能采用逆向工程和模线、样板进行数据传递, 激光铺层定位系统也很难充分发挥作用。

通过对国内应用现状的分析以及国外复合材料构件数字化技术的跟踪与研究, 本文对复合材料构件设计、分析、制造一体化研制环境、一体化研制流程以及一体化研制中的几项关键技术进行了探讨。

收稿日期: 2009 - 04 - 08

作者简介: 张丽华, 1978年出生, 博士, 主要从事复合材料数字化、先进制造技术等研究工作。E-mail: zhanglihua1978@sohu.com

1 复合材料构件一体化研制

1.1 一体化研制环境

复合材料构件一体化研制环境基本要素包括从设计、分析、工艺直至制造所需的软硬件系统,如图 1 所示。它以复合材料构件设计/制造软件(CPD/CPM)为中心,包括三维 CAD 软件、CAE 软件、CAPP 软件以及复合材料构件数控制造系统,如排样下料系统、激光投影系统、数控加工系统和无损检测系统。国外的数控制造系统中还包括自动铺带设备、纤维自动铺放设备和纤维缠绕设备等,但是目前为止,我国还没有一台这样先进的设备在应用。复合材料构件一体化研制环境以全面采用数字化技术为主要标志,

以复合材料构件设计、分析、工艺软件和复合材料构件数字化制造设备为软硬件基础,采用数字量形式定义、传递和管理复合材料构件研制过程中所包含的全部数字化信息以及这些信息之间的相互关联,从根本上改变传统的复合材料构件生产方式,大幅度提高了复合材料构件设计制造技术的水平。复合材料构件一体化研制环境有两点显著区别于传统的研制方式:(1)采用数字量对产品进行全面描述及数据传递;(2)实现了复合材料构件设计、分析、制造的一体化。基于以上两点,本文对实施复合材料构件一体化研制的几项关键技术:复合材料构件数字化定义、设计、分析数据集成以及设计、制造数据集成进行了研究。

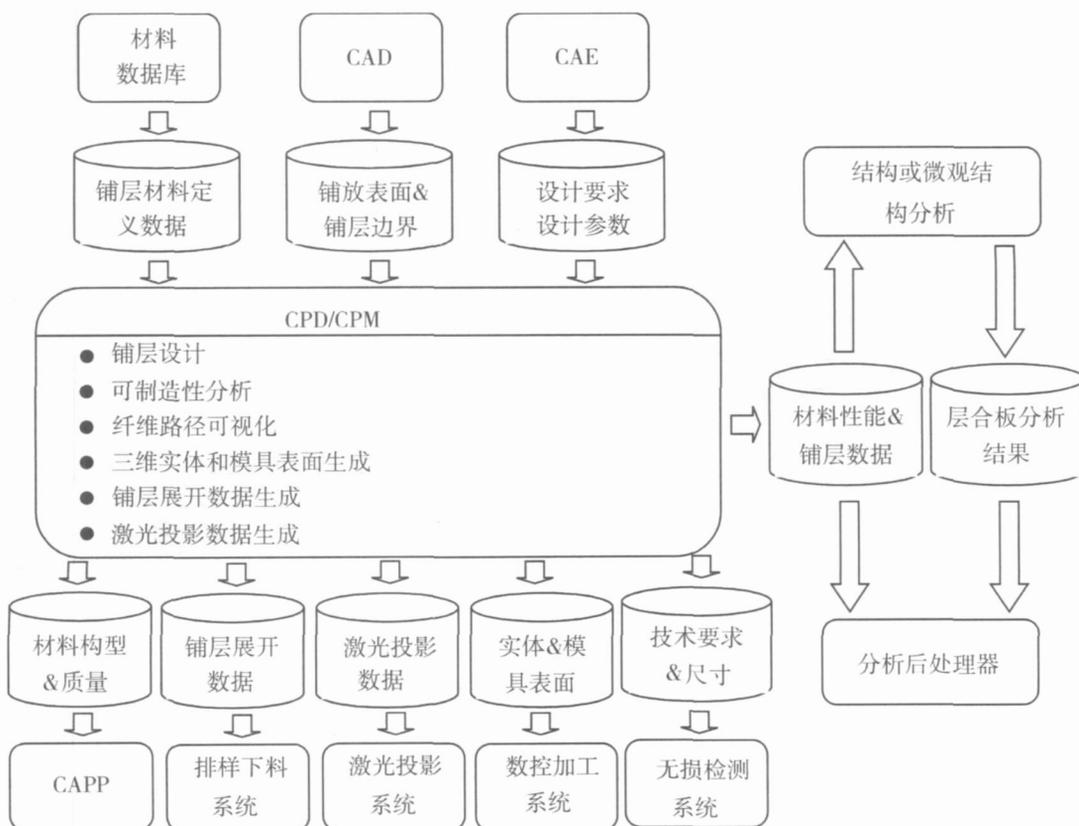


图 1 复合材料构件一体化研制环境基本要素

Fig 1 Basic elements of integrated developing environment for composite structure

1.2 一体化研制流程

复合材料构件研制过程中强调设计、材料、制造的一体化,一体化研制流程如图 2 所示。首先设计人员在三维 CAD 软件集成复合材料构件设计/制造软件的设计平台中进行几何建模和铺层设计,期间需要与分析人员反复交互,确定设计参数,验证设计结果并修改设计直至完成最优设计。与此同时,工艺人员进行工艺设计并在三维主模型的基础上进行可制造性分析,此后生成制造数据,包括排样下料数据、激光

投影数据、数控切割数据等,并将工艺反馈数据返回给设计人员指导修改设计。同时,工装模具设计人员在接到工艺人员制定的工装技术要求后,从设计获取模具表面数据进行工装的设计和制造。工艺设计完成并且工装模具到位后,在制造车间,工人依次进行自动下料、激光辅助定位手工铺放、热压罐固化和切边、钻孔等机械后处理,最后,经无损检测得到最终合格的复合材料产品。

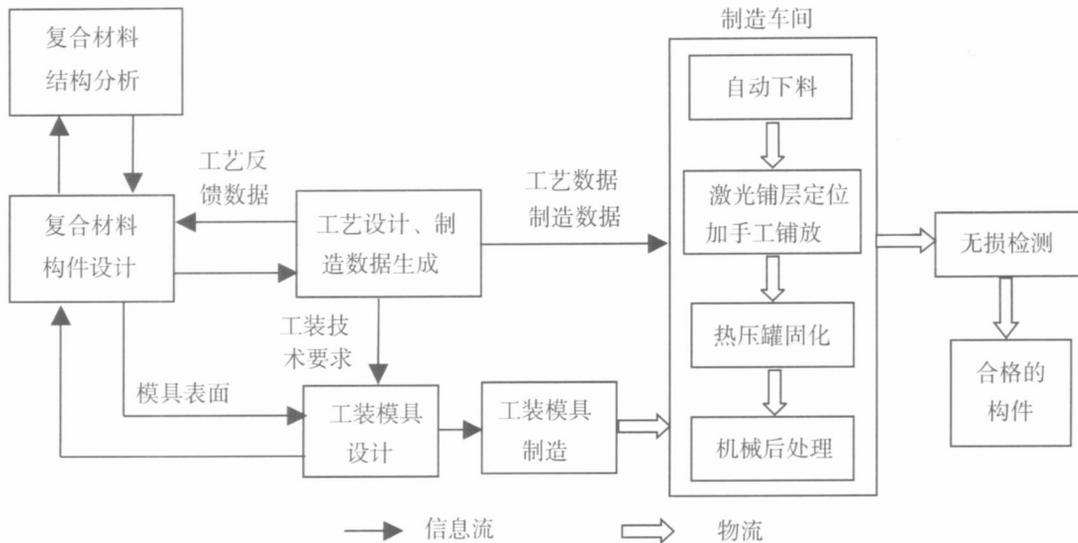


图 2 复合材料构件一体化研制流程

Fig 2 Integrated developing flow of composite structure

2 复合材料构件数字化定义

与金属零件相比,复合材料构件数字化定义的最大区别是需要定义材料的内部结构。复合材料构件数字化定义包括几何建模和材料结构建模两部分,相应的数字化模型也包括几何数据和材料铺放定义数据。

2.1 几何建模

复合材料构件几何建模,与金属零件几何建模没有区别,在 CAD 环境下利用几何建模工具完成^[1]。复合材料构件几何数据主要是曲面和曲线几何,包括定义构件铺放表面、边界和各个铺层边界的几何信息等。

2.2 材料结构建模

复合材料构件数字化定义采用复合材料特征对象(层合板、方向坐标系、区域、铺层、夹芯等)来定义材料内部结构^[2]。几何特征通过与复合材料特征对象相关联来定义构件的材料内部结构和外部形状。材料结构建模过程包括初步设计、详细设计和制造准备三个阶段。

(1)初步设计

基于几何建模创建的铺放表面和边界,以初步的有限元分析结果为依据,设计人员根据构件各部位承受载荷的不同,将铺放表面划分为不同的区域并定义各区域的几何边界和铺层数目。

(2)详细设计

根据区域定义创建铺层数据后,定义铺层递减细节并检查铺层定义的正确性。确认无误后,通过可制造性仿真来模拟复合材料构件在模具表面的铺放情

况,发现存在制造问题的区域并解决制造问题。

(3)制造准备

设计完成并经分析验证后,生成制造数据和技术文档为制造作数据准备。

材料结构建模的核心是铺层设计,铺层包括铺层材料、铺放表面、铺层边界、铺层原点、铺设角度和铺放顺序等数据。其中铺放表面、铺层边界和铺层原点分别与相应的几何特征相关联,铺设角度定义铺层纤维的铺设方向。所有铺层的定义数据按照铺放顺序组织在一起构成复合材料构件的材料铺放数据定义材料的内部结构。

3 复合材料构件设计、分析数据集成

在复合材料构件制造过程中,材料铺敷在复杂模具表面时会产生变形,致使材料纤维路径发生变化,从而导致真实纤维方向与设计方向之间存在差异,这些差异将会对材料性能带来无法预测的影响。但是,目前复合材料构件设计和分析数据的分离致使分析时无法考虑设计方向和制造状态下真实纤维方向之间的差异,因而,分析计算结果不准确。本文以数字化定义模型为基础,通过集成设计和分析数据,来获取真实的纤维路径数据来创建有限元模型。

3.1 数据的传递

复合材料构件设计传递到分析的数据包括几何数据和材料铺放定义数据两部分,几何数据可以通过接口、标准等多种方式实现自动传递。因此,集成的关键在于材料铺放定义数据的自动传递。目前,复合材料构件设计软件 FiberSM 提供了到分析软件 MSC Patran 中 Laminate Modeler 模块的接口,基于设

<http://www.yhclgy.com> 宇航材料工艺 2010年 第1期

计模型可以自动生成分析软件的输入文件格式,供分析软件直接调用。

FiberSM到MSC Patran Laminate Modeler的接口数据包括一个主文件和一系列铺层定义文件。其中主文件的扩展名为*.fmd,是FiberSM-MSD-Directory的缩写;铺层定义文件扩展名为*.fm1,是FiberSM-MSD-Layup的缩写^[3]。主文件是铺层定义文件的目录文件,以层合板的名称加.fmd后缀的格式进行命名,比如,LAM001.fmd,它包含接口数据中的所有铺层定义文件的文件名,按照铺层在复合材料构件中的铺放顺序来排列铺层定义文件名。铺层定义文件是Laminate Modeler模块要求的铺放文件,每个铺层对应一个文件,描述各铺层制造状态下的真实纤维路径,采用铺层名称加.fm1后缀的格式命名,比如,LAM001-P001.fm1,铺层定义文件见表1。

表1 铺层定义文件说明

Tab 1 Explanation of ply definition file

各部分名称	说明
头部 (Header)	铺层文件基本信息,包括文件名称、数据来源等
节点 (Node)	设计软件生成的取样点信息,包括节点 D和坐标值等
单元 (Element)	连接节点的单元定义
铺层 (Ply)	单元和节点的铺层定义,包括铺层名称、铺层材料 D和样式 D等
模式 (Pattern)	单元原点和纤维路径信息
材料 (Material)	单元的材料定义,包括材料名称、材料厚度等
全局铺放定义 (Global Layup)	层合板设计模块的要求铺放定义

3.2 纤维路径数据到有限元网格的映射

进行复合材料构件分析计算时,首先将几何特征传递到分析软件,并划分网格。网格生成后,分析软件通过数据接口,允许用户在添加材料属性时使用包含铺层数据的接口数据文件,使分析软件获取铺层定义和制造状态的纤维路径数据,并将纤维路径数据赋给网格单元。纤维路径数据插入有限元模型中每个单元时,需要根据用户定义的公差进行纤维路径数据到每个单元的映射。用户定义公差包括距离公差和角度公差,距离公差 D 是纤维路径生成点沿曲面法线方向到单元质心的距离;角度公差 θ 是纤维路径生成点与单元质心连线与过单元质心曲面法线的夹角,其定义见图3。当纤维路径生成点落在这两个公差

之内时,就把该点的纤维路径数据赋给该单元。制造状态的纤维路径数据到有限元网格的自动映射,实现了设计数据到分析软件的集成。设计和分析的集成不仅使创建的有限元模型更加准确,还允许分析人员在设计的任意环节读取制造状态的设计数据检验其是否符合设计要求。

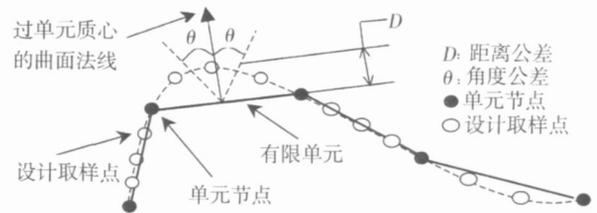


图3 纤维路径数据到有限元网格的映射

Fig 3 Mapping of fiber orientation data to finite mesh

4 复合材料构件设计、制造数据集成

随着各种复合材料数控制造设备的研制成功,复合材料构件数字化制造成为降低复合材料构件制造成本、提高构件性能的主要手段之一。复合材料构件设计软件通过制造数据接口,可以生成排样下料系统、激光投影系统、自动铺带设备和纤维自动铺放设备的输入数据,直接驱动设备的运行,从而实现设计数据到制造设备的无缝集成。

4.1 设计数据到自动下料系统的集成

为使下料过程更准确、更快捷,采用专门的数控切割设备-数字化下料设备进行预浸料的平面切割,实现预浸料的自动下料。

4.1.1 排样下料数据

针对每个铺层,复合材料构件设计软件可以生成支持多种下料系统数据格式的排样下料数据,包括Cutting Edge、Gerber、GEM、Lectra和Magestic下料系统以及Optimation排样软件等^[3]。排样下料数据包含铺层展开几何和非几何数据两部分。

一个铺层对应一个铺层展开几何文件,该文件按照前缀+铺层名称+后缀的格式命名,其中前缀可以是零件名称、零件号或者没有前缀,文件后缀与支持的排样下料系统相关,如mag,ppi,igs或dxf等。铺层展开几何可以采用IGES和DXF两种格式描述,包括铺层边界、孔、铺层原点、铺设方向和铺层标记等几何实体。这些几何实体在CAD图纸中通过设定层、颜色、线型的不同属性来组织,可以快速识别和验证关键属性,不仅节省时间,而且减少了潜在的危险。

排样下料数据中的非几何信息包括文件名称,零件名称,零件号,铺层名称,原材料,铺放顺序等数据,不同的排样下料系统要求以不同的方式处理几何数据和非几何数据。第一种方式是将非几何数据与几

何数据合并为一个文件,非几何信息插入到铺层展开几何文件的头部;第二种方式是将非几何数据单独组织成文件。

4.1.2 设计数据到自动下料系统的集成

首先自动下料系统的控制软件读取设计软件输出的排样下料数据,然后在原材料宽度约束下将同一材料相同铺设角度的各铺层展开几何形状重新排列,利用控制软件的优化排样功能或专门的优化排样软件生成优化排样数据,以便最大限度的利用原材料。根据优化排样数据,排样软件或控制软件自动生成数控切割文件,即走刀路径。自动下料系统读取数控切割文件,自动进行下料。

4.2 设计数据到激光投影系统的集成

复合材料构件手工铺放时铺层定位困难,随着铺放的进行,误差积累越来越大。激光投影系统通过在模具表面(或构件表面)显示铺层轮廓来实现铺层准确定位。

4.2.1 激光数据文件

基于数字化模型,复合材料构件设计软件可以生成支持 Assembly Guidance, General Scanning, LPT, Virtek等激光投影系统的激光数据文件^[3]。激光数据文件包括激光投影数据和工装校准数据两部分。激光投影数据是进行铺层投影的源文件,包含铺层形状、铺层原点、铺设方向和铺层标记等。其中,铺层形状投影数据由一系列引导激光路径的三维点组成,图4是设计软件生成的部分铺层形状激光投影数据,它包含了铺层轮廓上一些离散点的三维坐标数据。

```
START SEQ_01-PLY_01
START ROSETIE
P 3
11.924.500000 -762.679089 498.010782
11.924.500000 -806.858182 474.604946
11.874.509586 -762.220632 497.153726
END ROSETIE
START P001
P 118
-24.66035 0.98617 0.98685
-23.83581 5.53576 0.99029
-22.92595 10.11292 0.99194
-22.42008 12.46343 0.99217
-21.87868 14.82288 0.99182
-21.53495 16.24370 0.99141
.....
END P001
```

图4 部分激光投影数据

Fig 4 Parts of laser projection data

坐标值。工装定位点布置在铺放工装上,通过扫描工装定位头来校准激光投影系统。不同的激光投影系统采用不同的方式处理工装校准数据,有些系统将校准数据和激光投影数据存放在一个文件中,而有些系统则将校准数据单独存放生成工装校准文件,例如Virtek系统。图5是支持Virtek系统的工装校准数据,它包括7个工装定位点。

7			
T3	46.982000	565.529000	272.600000
T4	74.540000	565.529000	272.993000
T5	93.816000	578.905000	274.568000
T1	0.148000	578.905000	273.702000
T2	19.424000	565.530000	272.206000
T6	74.541000	586.264000	274.568000
T7	46.981000	588.468000	274.568000

图5 支持Virtek系统的工装校准数据

Fig 5 Tool calibration data of Virtek system

4.2.2 设计数据到激光投影系统的集成

激光投影系统读取激光投影数据依次对铺层轮廓上的点进行投影,由于点投影的更迭移动速度极快,在操作者眼中,模具(或模具上零件)表面会生成相应的铺层边界轮廓线。操作者可以根据该轮廓线进行有关的定位操作。

5 结论

复合材料构件设计、分析、制造一体化实现了构件三维模型到制造的无缝集成,可以极大减少不准确的铺层尺寸和铺设方向,提高产品质量,同时自动下料和优化排样减少了材料浪费,激光铺层定位消除了手工切割样板和手工铺层样本,降低了成本。复合材料构件设计、分析、制造一体化是快速研制高性能、低成本复合材料构件的关键。

参考文献

- 1 Klintworth J, Guillerjrn in O. Integrated design, analysis and manufacturing of composite structures In: 32nd International SAMPE technical conference; Boston, MA, USA, 2000: 53 ~ 67
- 2 Bemardon E.D. FiberSM, CAD integrated software tools for computer manufacturing and design Materials and Process Affordability: Keys to the Future Vol 43 II, Anaheim, California, USA, 1998: 1 248 ~ 1 256
- 3 FiberSM Catia User Guide Vistagy, Waltham, Massachusetts, 2000

工装校准数据是工装定位点在理论坐标系中的

(编辑 李洪泉)