面向制造的飞机复合材料构件数字化定义

张丽华 范玉青

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191)

摘 要：为满足数字化研制环境中制造环节的数据需求和对构件可制造性的要求，总结了面向制造的飞机复合材料构件数字化定义的完整构成.通过定义方向坐标系来建立方向基准，并根据构件高斯曲率的不同，给出了3种方向坐标系的定义方法和映射规则.给出了三维模型中几何数据的内容、几何数据和复合材料特征对象的关联关系以及材料铺放数据中复合材料特征对象的层次关系.总结了数字化定义中工艺信息的详细内容和定义方法，并采用基于视图的方式组织管理数字化定义数据集.

关 键 词：复合材料；数字化定义；数据组织

中图分类号：TH 166

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)07-0807-05

Digital definition of aircraft composite structures for manufacture

Zhang Lihua Fan Yuqing

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to satisfy the data demands and requests for composite structure's producibility of manufacture process in the composite structures' digital development environment, the whole contents of digital definition of aircraft composite structures for manufacture were summarized. The direction datum for composite structures digital models was constructed by defining direction coordinate systems. According to the difference of composite structures' Gaussian curvature, the direction coordinate systems were divided into three kinds. The definition methods and mapping rules of these three kinds of direction coordinate system were presented. The contents and classification of geometric data, relationship of composite objects to geometric data and the hierarchy of composite objects in the definition data of laminate lay-up in 3D model were studied. The detail contents and definition methods of process information were summarized, and constructing views based on the above-mentioned data classification methods were used to organize and manage the datasets of digital definition.

Key words: composite; digital definition; data organization

与金属零件相比，复合材料构件设计制造具有独特性和复杂性.设计—材料—工艺一体化是复合材料构件研制过程最突出的特点，复合材料构件更加强调设计与制造的集成，更注重在设计阶段解决制造问题.复合材料数字化技术起步较晚，国内多数航空企业仍主要采用手工铺层设计方法进行复合材料构件的设计.进行手工铺层设计时，设计人员首先利用CAD软件建立构件的三维模型，然后基于这一模型，在图纸上手工设计铺层，包括定义铺放顺序、铺设角度、铺层递减和绘制铺层剖面图等.设计完成后，工艺人员通过把铺层图转化为铺放顺序图和下料图来指导工人的手工下料和手工铺放.上述的手工铺层设计存在一系列问题：

1) 设计效率低、无法准确检查铺层厚度和角度等信息；

2) 没有三维铺层设计模型，无法连接几何和非几何信息，工艺信息和制造数据无法准确生成；

收稿日期：2007-06-25

作者简介：张丽华(1978—)，女，山东潍坊人，博士生，zhanglihua1978@sohu.com.

3）信息存放载体多，没有主模型，管理麻烦，易出错且不利于数据共享.

总之，手工铺层设计无法满足目前飞机上大量应用复合材料的需求，国外飞机制造公司开始采用数字化技术来提高构件性能，降低制造成本.

本文针对手工铺层设计存在的问题，通过对我国转包生产的国外复合材料数字化应用技术的跟踪与研究，研究了面向制造的飞机复合材料构件数字化定义的构成，以满足复合材料数字化研制环境中制造环节的数据需求和对构件的可制造性要求.

1 方向坐标系的定义和映射

铺层的铺设角度对复合材料构件的力学性能有很大影响.定义铺设角度和检查铺层纤维路径方向则需要方向基准.因此，除几何基准以外，飞机复合材料构件数字化定义中还需要建立方向基准.关于几何基准可以参考文献[1]，本文不作研究.

方向基准的建立是通过定义方向坐标系来实现的，方向坐标系与几何坐标系不同，它包括从原点引出的4个箭头，分别代表0°，45°，－45°和90° 4个方向，定义了原点位置的纤维沿4个角度的准确方向.确定某一点的纤维路径时，需要将方向坐标系映射到该点后，再计算该点纤维的切线方向在新坐标系中的角度值.将方向坐标系映射到新的位置时，需按照不同的规则进行0°方向的映射.根据构件铺放表面高斯曲率的不同，方向坐标系映射可以分为标准映射、平移映射和径向映射3种类型.对应上述映射类型，方向坐标系分为标准坐标系、平移坐标系和径向坐标系3种，不同的坐标系具有不同的定义方法，正确定义可以高效且准确地进行映射.

1.1 标准坐标系的定义和标准映射

标准坐标系适用于高斯曲率为负的复合材料构件，多数复合材料构件采用这种坐标系.定义标准坐标系前首先需要创建坐标系几何，如图1，包括铺放表面、铺放表面上的一个点和过该点的一条曲面切线.其中，点定义方向坐标系的原点，切线方向代表方向坐标系的0°方向；90°正方向则按照右手定则将0°方向绕过坐标原点的曲面法线方向旋转90°得到，进而确定其它2个角度方向，如图2.标准映射与纤维如何铺敷在模具表面上相关联，0°方向的映射与构件表面的曲率保持一致，如图2中过A点沿OA方向主曲率的切线即为该点映射得到0°方向线，其它角度正方向由右手定则得到.

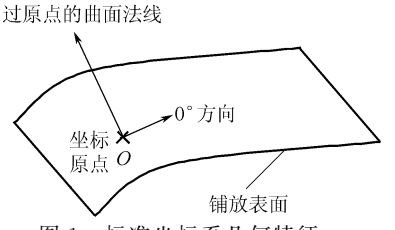


图1 标准坐标系几何特征

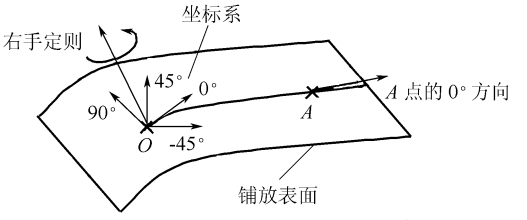


图2 标准坐标系的定义和映射

1.2 平移坐标系的定义和平移映射

平移坐标系适用于高斯曲率为0的旋转曲面构件.平移坐标系在过零件轴线的平面内定义，0°方向与零件的轴线共线，如图3.进行平移映射时，应保持0°方向指向零件的轴线方向，其它角度正方向通过右手定则确定，图3中画出了构件表面映射得到的一条0°方向线.

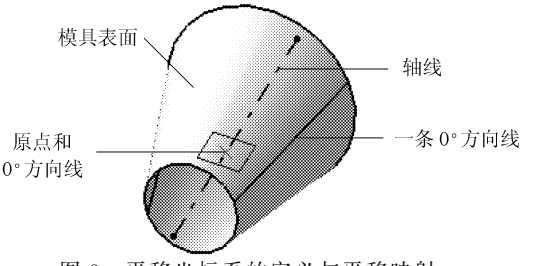


图3 平移坐标系的定义与平移映射

1.3 径向坐标系的定义和径向映射

径向坐标系适用于高斯曲率为正的球形、盘碟和碗状零件，最典型的例子是碟形卫星天线和雷达.定义径向坐标系时，原点位于圆形构件的中心，0°方向由中心点开始，指向过该点的半径的切线方向.进行径向映射时，0°方向始终沿构件的半径方向.

2 三维主模型

与金属零件相比，复合材料构件数字化定义最大的区别是必须定义材料的内部结构.因此，复合材料构件数字化定义内容包含几何数据和材料铺放数据2部分.这2类数据在三维主模型中定义，并且相互关联共同描述完整的复合材料构件，

后续的工艺信息和制造数据是该主模型的拓延和衍生.

2.1　几何数据

复合材料构件几何建模是在通用的 CAD 软件中完成的,与金属零件的几何建模没有区别[2].复合材料构件几何数据主要是表示铺放表面和边界的曲面和曲线几何.根据用途不同,将复合材料构件几何数据分为参考几何、建造几何和工程几何 3 类.

1) 参考几何

参考几何是引用外部几何模型的几何特征,包括坐标系统、主尺寸表面(MDS,Master Dimension Surface)和具有全局属性的几何特征、模具表面等.引用外部参考几何的目的是根据飞机气动布局以及对结构安排的要求,定义出构件的外形基准及位置基准.

2) 建造几何

建造几何是设计人员依据参考几何利用 CAD 软件的基本功能构建的描述复合材料构件外形、几何尺寸的基本信息.

3) 工程几何

工程几何包含描述复合材料构件所必须的几何特征,在参考几何和建造几何的基础上创建.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)来定义材料内部结构[3].工程几何通过与特征对象相关联来定义构件的形状和尺寸.根据关联的特征对象不同,工程几何分为方向坐标系几何、层合板几何、区域几何、铺层几何和夹芯几何 5 类,特征对象与几何特征的关联关系见表 1.

表 1　复合材料特征对象与几何特征的关联关系

特征对象	关联几何特征
层合板	铺放表面和表示层合板边界的曲线
方向坐标系	铺放表面上的点和 0°方向矢量
区域	铺放表面上表示区域边界的曲线
铺层	表示铺层边界的曲线和铺放开始点
夹芯	表示夹芯边界和截面形状的实体模型

2.2　材料铺放数据

复合材料特征对象按照层次关系组织成材料铺放数据定义材料的内部结构.

1) 复合材料特征对象

复合材料特征对象与构成复合材料构件的组件相对应:层合板可以看作复合材料构件本身;区域是构件表面具有恒定厚度的部分,一个复合材料构件可以包含一个或多个区域;铺层代表复合材料构件中的单一材料片,是复合材料构件最基本的制造单元.

① 层合板对象(laminate)

层合板对象是铺层、夹芯和子层合板的组织工具,同时也为组成层合板的组件定义铺放表面和边界.每个复合材料构件至少包含一个层合板对象,当层合板铺放表面由于铺层叠加或插入夹芯发生很大变化时,需要创建子层合板.子层合板与新的铺放表面相关联,是组成复合材料构件的子集.层合板对象的几何属性包括铺放表面和层合板边界,非几何数据包括层合板名称、零件号等,如果是子层合板还包含父层合板的名称.

② 区域(zone)和过渡区域对象(transition zone)

为了减重,构件上不同部位的铺层数目随载荷的变化而相应改变,这导致了层合板厚度的明显改变,同时也增加了设计的复杂性.针对这一点,在铺放表面划分区域可以简化设计.区域对象包括几何特征和非几何数据,几何特征定义区域边界,非几何数据包括区域名称、方向坐标系和材料描述数据.材料描述定义该区域上的材料设计数据,包括铺层数目、铺层材料和铺层百分比.

为保证相邻区域在厚度上连续,需要采用过渡区域来实现铺层厚度的渐变.过渡区域连接 2 个相邻区域,定义 2 区域之间的铺层递减关系,并生成铺层递减边界.过渡区域对象包括过渡区域名称、相关联的 2 个相邻区域、过渡区域边界、交错轮廓和偏移定义等属性数据.过渡区域边界指定区域过渡起始和终止的位置.过渡区域的交错轮廓和偏移定义确定铺层递减类型和偏移类型,据此可以生成递减铺层的边界.

③ 铺层对象(ply)

材料结构建模的核心是铺层设计,铺层是组成复合材料构件的最基本单位.铺层对象存储所有描述铺层的几何和非几何信息,包括铺层 ID、铺层边界、铺层原点、铺层材料、铺设角度、参考方向坐标系和铺放顺序等数据属性.铺层边界描述铺层铺放的轮廓,多采用封闭的曲线来定义,铺层原点定义铺放的开始点.铺设角度是铺层纤维的铺设方向,是纤维在方向坐标系中的角度值.铺放顺序代表一个铺层在复合材料构件中的铺设次序,它自贴模面开始以 10 的倍数增加,是组织材料铺放定义的一个关键数据.

④ 夹芯对象(core)

有些情况下,复合材料构件中包含夹芯结构,夹芯同铺层一样也是构成复合材料构件的组件之一.夹芯对象包含夹芯 ID、铺放顺序、夹芯材料和夹芯几何等属性数据.一个夹芯在复合材料构件

的铺放中占据一个位置,铺放顺序的定义要综合考虑构件中包含的所有铺层和夹芯.夹芯几何通过引用外部的数字化模型来描述夹芯边界和截面形状.

2) 材料铺放数据

复合材料构件包含的所有铺层和夹芯按照铺放顺序组织在一起构成材料铺放数据定义材料的内部结构和制造过程,如图4.当插入夹芯core 001时,铺放表面发生变化,ply 003应对应子层合板的铺放表面和边界.

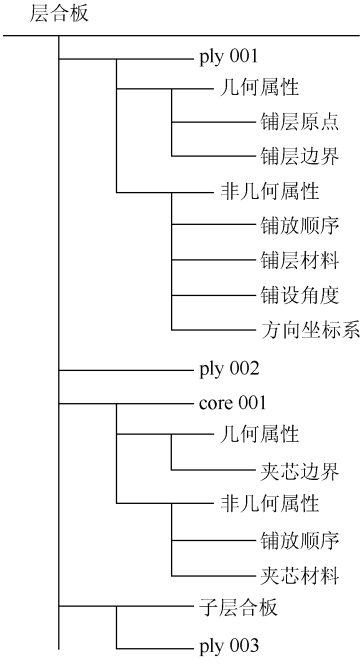


图4 材料铺放数据层次结构

3 工艺信息

设计与制造工艺紧密结合是复合材料构件研制的突出特点,材料铺放定义反映材料的制造过程.数字化定义过程中,设计人员除完成设计定义外,还需发现、解决制造问题并定义制造过程中的工艺信息.数字化定义中包含的工艺信息包括材料余量、铺层展开图、三维实体和模具表面等工艺数据.

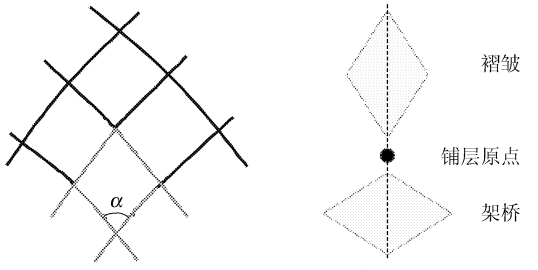
1) 材料余量

复杂的复合材料构件在制造时需要预留一定的材料余量,固化成型后工人再按照设计尺寸进行切割修边.整个构件的材料余量在制造过程中由各铺层的材料余量来体现.定义层合板的设计边界和制造边界后,与层合板设计边界相交的铺层通过将相交边扩展至层合板制造边界从而得到铺层的制造边界,设计边界和制造边界之间即为铺层材料余量.对于自身封闭的铺层,则无需定义材料余量.

2) 可制造性仿真及铺层展开图

复合材料铺放在复杂模具表面时,会产生制造问题,可制造性仿真通过模拟纤维的铺敷情况,可以发现存在制造问题的区域并及早解决[4].可制造性仿真结果采用不同的颜色表示区域的可制造性,材料变形区域用灰色的菱形纤维单元表示,如图5a.材料变形分为褶皱和架桥2种类型,分别是由于局部区域材料过多或不足造成的.褶皱采用沿着过铺层原点直线方向拉长的灰色纤维单元表示;而架桥则采用沿该方向缩短的灰色纤维单元表示,如图5b.

复合材料构件制造过程中,大量采用创建剪口来消除材料变形.剪口分为长条形和V形2种,长条形剪口用于消除褶皱,V形剪口则用于消除架桥.创建剪口时,最佳剪口路径应从初始变形纤维单元开始,穿过灰色区域中心延伸到铺层边界.当创建剪口不可行或铺层超出材料宽度时,则必须将铺层分片.消除材料变形后,铺层成为可制造的,铺层展开图也将会符合铺层的原始形状.对于含有V形剪口的铺层,铺层展开图包括带有V形剪口的原始铺层和一个填补V形区域的楔形补片.



a 材料变形 b 褶皱和架桥

图5 材料变形的表示形式

3) 三维实体

复合材料构件的最终形状由设定的铺层、夹芯和铺放表面决定,通过跟踪厚度方向上的铺层数目,可以利用顶层和底层的铺层生成偏移表面来创建三维实体[4].三维实体详细描述构件的形状及定位特征,可用于重量和重心分析、数字化预装配、运动部件的模拟运动分析等过程.

4) 模具表面

从复合材料构件几何特征中提取模具表面,并在模具表面布置工装定位孔后,模具表面数据一方面用于生成支持激光投影系统的工装校准文件,另一方面交付工装设计人员支持工装设计.工装定位孔排列在铺放工装的切割线以外,用于放

置工装定位头,以进行铺层投影时的激光头校正.

4　数字化定义中的非几何信息

除上述的设计定义数据和工艺信息外,数字化定义中还包含尺寸、公差、标注和注释等非几何信息,用来说明构件的设计意图、工艺处理说明定义和材料说明定义.由于消除了二维图纸,对于关键尺寸和特定几何公差直接在三维模型上标注即可.工艺处理说明定义和材料说明定义是文本内容,在三维模型中采用旗标和注释定义,相应的文本内容在零件表中给出,两者之间通过注释 ID 相关联.每个复合材料构件数字化模型对应一个零件表,用于组织和定义模型中的非几何信息,两者通过零件号进行标识.

5　数字化定义的组织管理

完整描述一个复合材料构件,需要几何数据、材料铺放数据、工艺信息和非几何信息,数据不仅繁多,而且复杂.因此,本文通过定义不同的视图,以区分数字化定义数据集中不同类型的数据.根据上文的数据组织方式,将数字化定义数据内容进行分类,将同种类型的数据存放于产品结构树中相同的几何实体集(几何数据)或属性集(非几何数据)中组成不同的视图,并定义视图过滤机制来组织数据,如图 6.基于视图的组织管理模式可以实现数据的快速定位和查找,使设计人员可以准确获取相关信息.

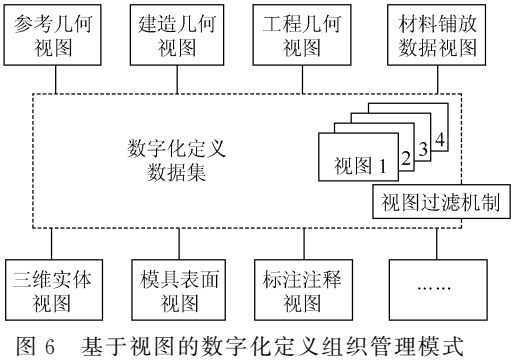


图 6　基于视图的数字化定义组织管理模式

6　结 束 语

面向制造的飞机复合材料构件数字化定义消除了手工铺层设计存在的问题,不仅在设计阶段发现、解决制造问题,而且基于三维主模型可以自动生成制造数据,驱动制造设备的运行,从而实现设计数据到制造的无缝集成.实施复合材料构件数字化定义是快速研制高性能、低成本复合材料构件,扩大复合材料在飞机上应用的关键.

国内某航空企业采用数字化技术重新设计制造某直升机座舱罩顶棚,采用 CATIA 集成 FiberSIM 软件作为设计平台,实施面向制造的复合构件数字化定义,并且基于数字化模型生成自动下料和激光投影数据,采用自动下料和激光铺层定位辅助手工铺放代替以往的手工下料和手工定位铺放.最终,与手工铺层设计和手工铺放生产的座舱罩顶棚件相比,数字化设计制造的座舱罩顶棚件缩短制造周期 30%,降低制造成本 20%,降低结构重量 8%.

参考文献(References)

[1] 卢鹄,范玉青.飞机结构产品的数字化定义[J].北京航空航天大学学报,2006,32(5):526－530
Lu Hu, Fan Yuqing. Digital definition of aircraft structure product[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(5): 526－530(in Chinese)

[2] Aronsson A. Design, modeling and drafting of composite structures[D]. Sweden: Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Lulea University of Technology, 2004

[3] Bernardon E D. FiberSIM, CAD integrated software tools for computer manufacturing and design [C]//International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings). Covina, CA: Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 1998, 43(2): 1248－1256

[4] Klintworth J, Guillermin O. Integrated design, analysis and manufacturing of composite structures [C]//International SAMPE Technical Conference. Boston: Society for the Advanced of Material and Process Engineering, 2000, 32: 53－67

(责任编辑:文丽芳)