

直升机复合材料构件数字化生产线技术研究

李 薇 刘秀芝 杨楠楠 高大伟

哈尔滨飞机工业集团

摘要: 本文研究了飞机复合材料构件数字化生产线的体系结构, 指出打通数字化生产线的关键在于实现数字化设计中心和数字化制造中心内部各环节数据及之间数据的顺畅流动。介绍了飞机复合材料构件的数字化产品定义、数字化工装设计、数字化工艺设计、数字化制造和生产组织管理以及打通复合材料构件数字化生产线数据流等方面所做的工作和实施效果。

关键词: 直升机 复合材料 数字化 生产线 设计制造

1 概述

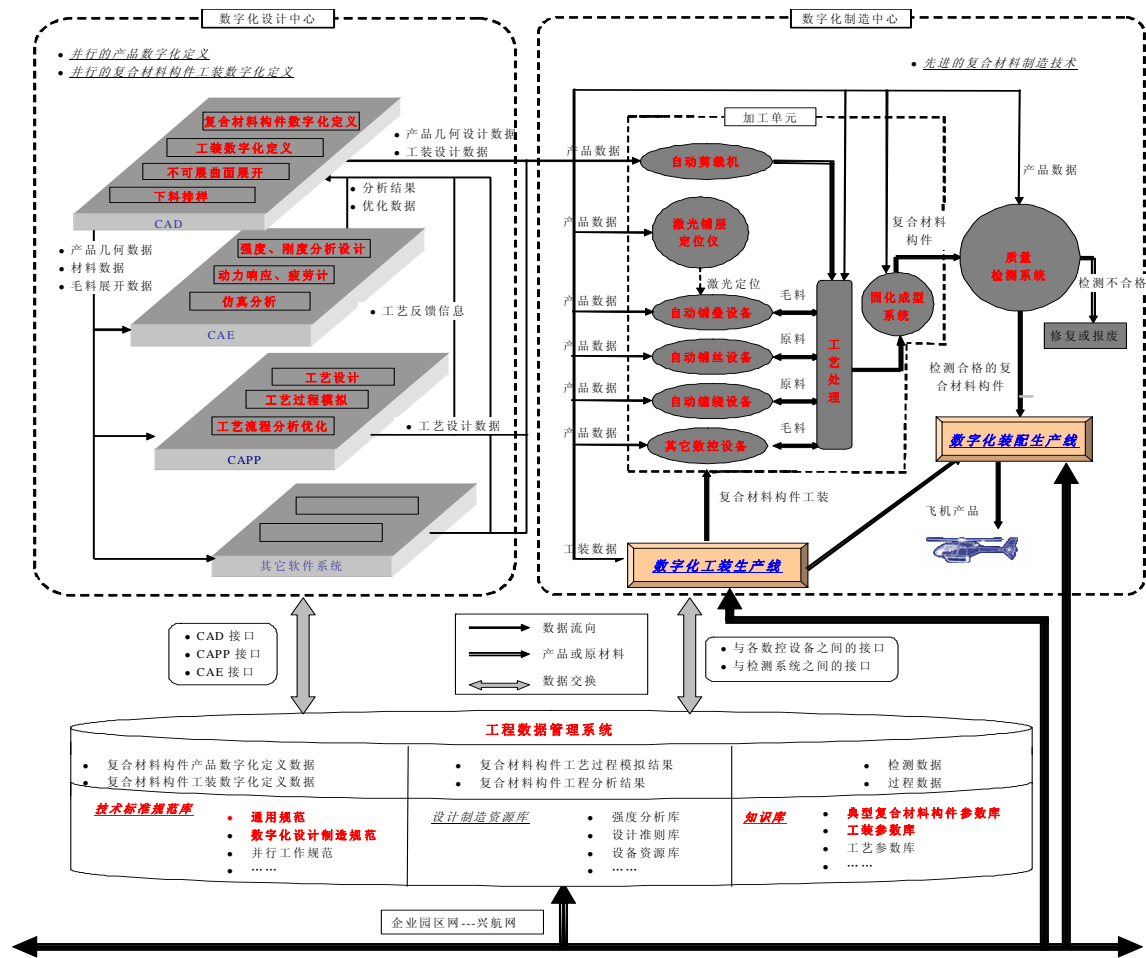
先进复合材料具有比强度和比刚度高、性能可设计、抗疲劳、耐腐蚀性能好和易于整体成形等诸多优点, 将其用于航空航天结构上, 可比常规的金属结构减重 25%~30%, 并可明显改善其气动弹性特性, 提高飞行性能, 这是其它材料无法或难以达到的。随着计算机技术和数控技术的不断发展, 各种各样的软件和数控设备相继出现, 使复合材料构件研制过程以数字量传递成为可能, 为复合材料构件实现数字化制造创造了良好的条件。另一方面, 在国内飞机制造业中, 复合材料构件的设计制造大多仍沿用传统的模拟量尺寸传递体系, 数字化设计制造技术虽得到了实际应用, 并取得了一定的效益, 但基本处于孤立的状态, 尚未实现复合材料构件从设计、工艺、工装、制造到检测整个过程中的信息共享, 没有打通整个数字化设计制造环节, 致使现有的数字化设计制造技术不能充分发挥其应有的作用。美国波音公司在波音 777 型飞机型号研制中采用数字化技术, 使研制周期缩短 50%, 出错返工率减少 75%, 成本降低 25%, 已经成为数字化设计制造技术在飞机研制中应用的标志和里程碑。在波音 787 飞机项目中采用 FiberSIM 软件进行复合材料构件产品的数字化设计, 并将设计数据向全球的合作伙伴进行发放, 保证了复合材料构件数据的唯一性和准确性。飞机复合材料构件数字化生产线技术, 重在将复合材料构件设计制造技术与数字化技术相结合, 实现复合材料构件设计与制造各环节数字化、各环节之间的数据流畅通和复合材料构件在并行工作模式下的设计、工艺、制造、检测、装配全过程的集成。

2 飞机复合材料构件数字化生产线总方案

飞机复合材料构件数字化生产线总方案如图 1 所示。

本工程以计算机网络环境和并行工作模式为基础, 在企业工程数据管理系统支撑下, 由两个大的环节构成——数字化设计中心和数字化制造中心。其中数字化设计中心主要完成复合材料构件的相关设计任务, 包括构件的数字化定义、铺层设计与排样、铺放与缠绕轨迹设计、CAE 分析与仿真、工装设计、工艺设计与制造过程仿

真等，数字化制造中心主要完成毛料剪裁（预浸料和蜂窝）、激光铺层定位、自动铺放、自动铺丝与缠绕、固化成型、切边钻孔、部件装配、质量检测等制造任务。



从图 1 中可以看出，构建复合材料构件数字化生产线，除实现两大环节的数字化外，还必须保证各环节之间数据流畅通。基于数字化生产线总方案，围绕复合材料构件数字化设计、数字化工艺设计、数字化工装设计、数字化制造、数字化检测、并行工作管理、工作流程管理和质量控制等开展研究，并将精益制造理论和思想融合到整个生产体系中。

3 复合材料构件数字化生产线技术研究

3.1 复合材料构件数字化生产线体系

飞机复合材料构件数字化生产线体系研究主要围绕复合材料构件数字化产品设计、数字化工艺设计、数字化工装设计、数字化制造、数字化检测、并行工作管理、工作流程管理、质量控制等开展，并将精益制造理论和思想融合到整个生产体系中。

(1) 复合材料构件数字化生产线构成

复合材料构件生产线平面布置图如图 2 所示：

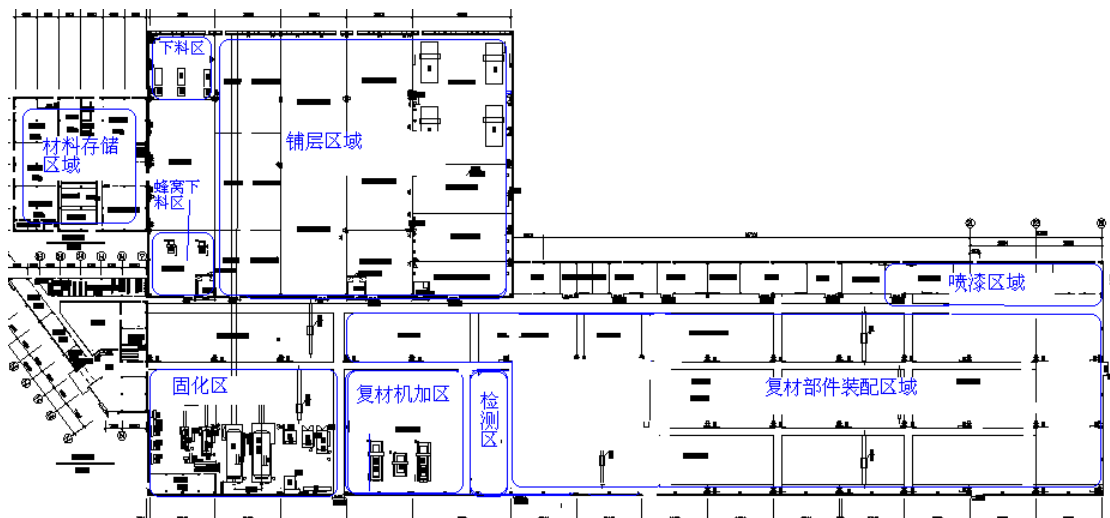


图 2 复合材料生产线平面布置图

从图 2 中我们可以看到：复合材料构件生产线由 9 个区域组成，即材料存储区、预浸料下料区、蜂窝下料区、铺层区、固化区、复材机加区、复材检测区、复材部件装配区、喷漆区。总面积达 5 万余平方米，在亚洲是最大的。在企业近年的技术改造项目实施后每个区域都可实现数字化。

（2）复合材料构件生产线流程

复合材料构件数字化生产线典型流程如图 3 所示：

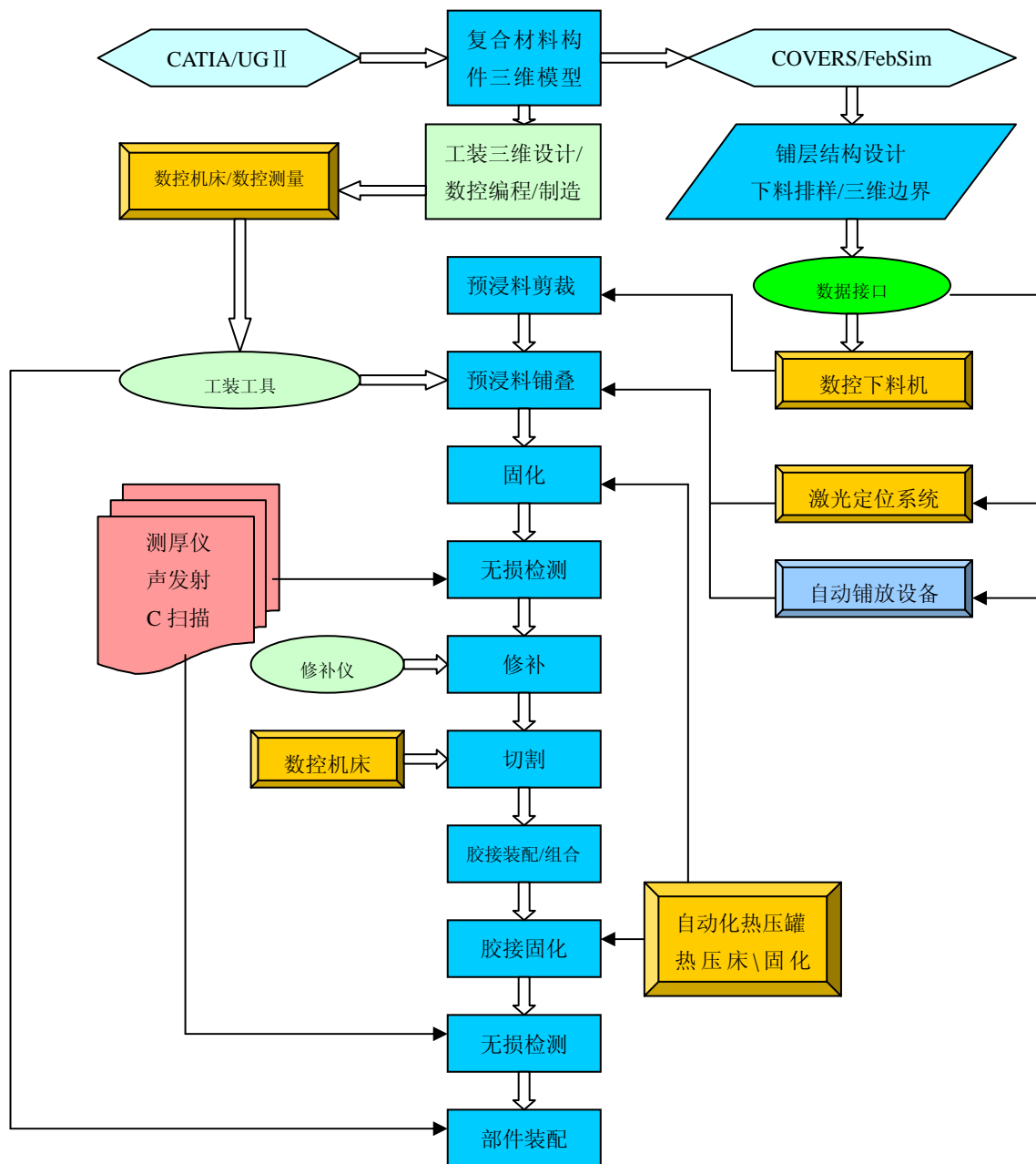


图3 数字化生产线典型流程

3.2 复合材料构件数字化设计技术

复合材料构件的最显著工艺特点是在完成材料制造的同时完成产品的制造。因此，复合材料构件的数字化定义与其它材料零件的定义方法有明显的区别，其数据不仅包含构件的几何信息、铺层信息，还要包含相关的材料制造信息等非几何数据。

3.2.1 FiberSIM 解决方案

FiberSIM 可以完全集成于用户已有的 CAD 系统中，使 CAD 系统成为高性能的设计/制造复合材料构件的软件工具。该软件可以提供专业的工程设计环境，高效地处理复合材料及其结构的复杂性问题，能够捕捉 CAD 系统中复合材料构件的完整定义，管理复合材料数据，在项目内部共享复合材料构件的定义。FiberSIM 复合材料工程设计环境见图 4。

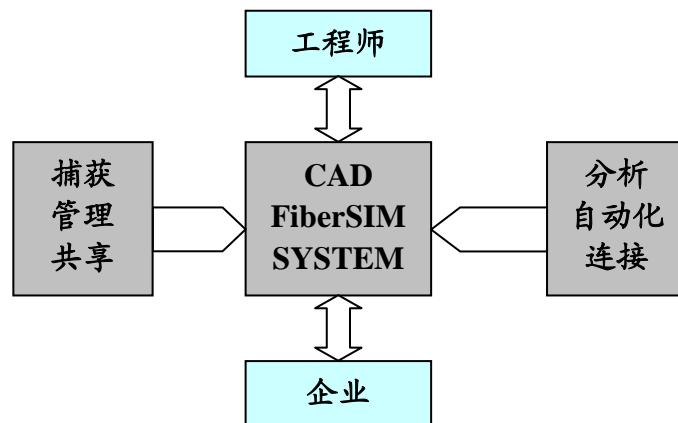


图 4 FiberSIM 复合材料工程设计环境

FiberSIM 软件独有的铺层仿真技术，能够预测复合材料如何与复杂的表面贴合，支持整个复合材料的工程过程，该软件使工程师同时在构件几何、材料、结构要求以及工艺过程约束之间进行权衡，使用 FiberSIM 软件，工程师能快速可视化铺层形状和纤维方向，在设计阶段即发现制造问题，并采取相应的纠正措施，实现 DFM。从初步设计、详细设计直至制造车间，设计师借助该软件很容易创建和转换设计、工程图以及相关的数据，并使零件数据在 FiberSIM 软件、设计、制造以及商业应用之间进行交换和传递。

FiberSIM 可选模块有：分析接口模块、文档生成模块、平面图样输出模块、激光投影模块、纤维铺放接口等，以构件定义信息为源头，向强度分析、工艺设计、工装设计、制造过程仿真和相应的制造设备传递复合材料构件的几何信息、材料信息、铺层信息等。

3.2.2 复合材料构件数字化定义

在设计阶段的产品定义过程中是以工程数据集为核心来组织数据，是支持产品数字化设计、制造全过程的基础，是制造、检验的重要依据。一个数据集是包含产品的几何信息、绘图数据以及相关信息的一个或几个 CAD 模型，一般同时存在三维模型和二维模型，二者分别在三维空间工作模式和二维绘图工作模式中建立，但它们不是完全独立的，二者之间存在着关联关系，二维视图中的元素由空间的实体或曲面引出，对原空间实体或曲面的任何修改都会自动反映在二维视图上。

（1）复合材料构件的三维模型定义

由于其定义方法的特殊性和复杂性，复合材料构件的最终形状是由许多铺放在模具表面的铺层固化形成的，每个零件的不同区域厚度会有所不同，而且是逐步变化的。座舱罩顶棚铺层定义如图 5 所示，通过从设定的铺层信息直接生成铺层表面和三维实体，这些表面可用于制造数字实物模型，生成零件铺叠表面，产生配套工装的内表面和中间铺层表面等。座舱罩顶棚实体模型如图 6 所示，三维实体用于定义构件的形状以及定位特征（如成形面的参考曲面，零件模型的定位点等几何信息），以便在重量和重心分析、数字化预装配、工装设计、运动部件的模拟运动分析等过程中应用。因此，复合材料构件三维实体建模的核心问题是表现材料制造信息的铺

层设计。铺层设计中有两个重用的概念：铺层和铺层集，并且铺层集和铺层都有编号。

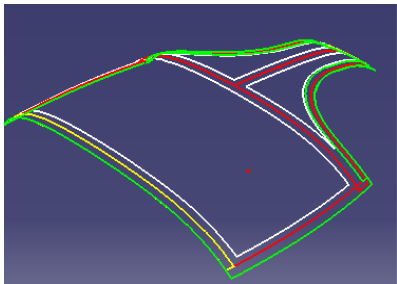


图 5 座舱罩顶棚铺层定义

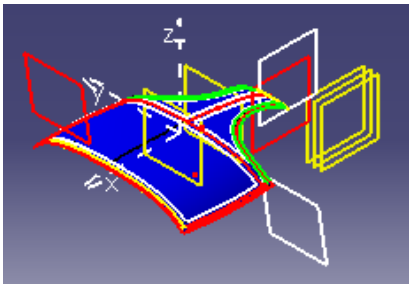


图 6 座舱罩顶棚实体模型

(2) 复合材料构件的二维模型定义

在数据集中，三维模型是最主要的数据，但二维图纸模型也是必不可少的，一般由三维模型生成。在模型的二维视图中，需要完整的定义出复合材料构件的结构形式和几何外形尺寸等信息，在目前生产实际中，二维图纸仍然是进行复合材料构件制造加工、检验、质量保证的重要依据，也是供应商评估和投标的重要依据。在复合材料构件的二维图纸上，需要有剖面示意图、铺层图、铺层标注、铺设取向标注以及铺层表等内容，铺层表用来对照零件的铺层、材料、取向等信息，如图 7 所示。

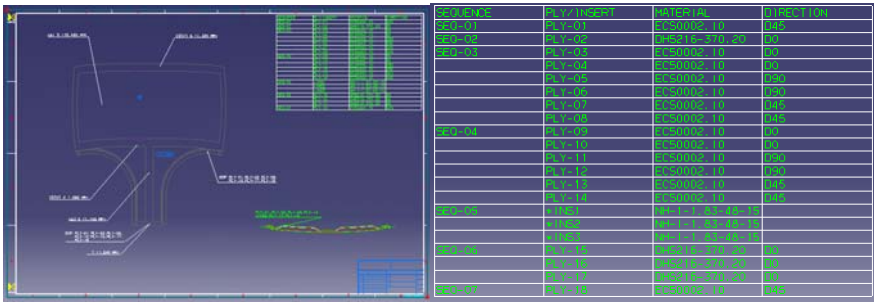


图 7 复合材料构件二维图纸及铺层表的放大图

3.2.3 复合材料构件工艺设计

基于 CAPPFrameWork 和 ORACLE，结合企业复合材料工艺设计及管理的特点，开发了具有企业特点的复合材料构件快速工艺设计系统。系统主要功能模块包括：产品结构管理、工作任务分配、工艺设计审批、工艺知识管理、材料定额信息管理、工艺文档管理、用户角色管理、系统配置工具等。

3.2.4 复合材料构件工装快速设计

工装的数字化设计是实现复合材料构件数字化生产线技术的关键环节之一，主要内容包括标准件库、典型工装结构库的建立，快速装配技术研究和复合材料工装快速设计系统开发等。在项目实施中，利用 CATIA 的建模功能建立组成组件的子零件，然后装配生成组件，组件为 Product 形式。这种解决方案可在 CATIA 交互环境下运行，使用标准件库时，提供三维预览窗口，并且预览模型能示意各主要参数，从而可以直观地了解各参数的意义，进而可以脱离手册的限制，能够在 CATIA 当前装配模型内生成所选组件的实体模型。基于 CATIA 二次开发了标准件批装配模块，实现了基于装配特征的标准件的自动装配。图 8 所示为组件预览界面。

3.3 复合材料构件数字化制造技术

3.3.1 预浸料数控下料

图 9 下料数据

复合材料专用设计/制造软件 FiberSIM 基于构件的 CAD 三维设计数据生成激光投影数据输入到激光投影系统中，通过特殊反光镜，控制激光束将构件铺层形状轮廓线上的点依次投影到模具表面，由于点投影的更迭移动速度极快（每秒 300m 以上），在操作者眼中，模具或零件表面会生成相应的边界轮廓线，操作者可根据该轮廓线进行有关的定位操作（如定位铺叠等），从而实现各铺层的精确定位，免除了传统的铺叠样板。图 10 是基于构件的三维实体模型生成激光投影数据的过程。

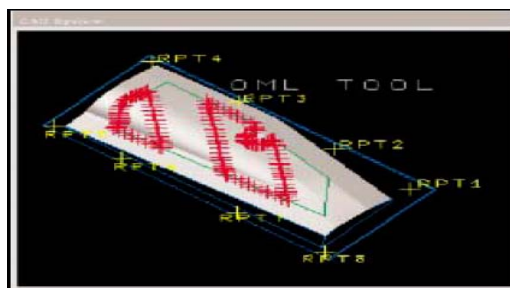


图 10 激光投影数据的生成

复合材料构件数字化生产线以全面采用数字化技术为主要标志,采用计算机定义、描述、管理和使用复合材料构件开发过程中所包含的数据以及这些数据之间的相互关联。复合材料构件数字化设计和数字化制造是复

合材料构件数字化生产线的主要组成部分，两部分通过设计与制造之间的数据传递、转换实现数据的集成。

3.4.1 数字化生产线数据传递关系

复合材料构件数字化生产线与传统生产方式的显著区别在于采用数字量形式对产品进行全面描述及数据传递，实现复合材料设计、材料、工艺的一体化。生产线数据流主要包括设计软件与分析软件之间的数据传递，产品设计与工装设计间的数据传递，设计与工艺之间的数据传递，设计与制造系统的数据传递等。图 11 是复合材料构件数字化生产线数据传递关系。

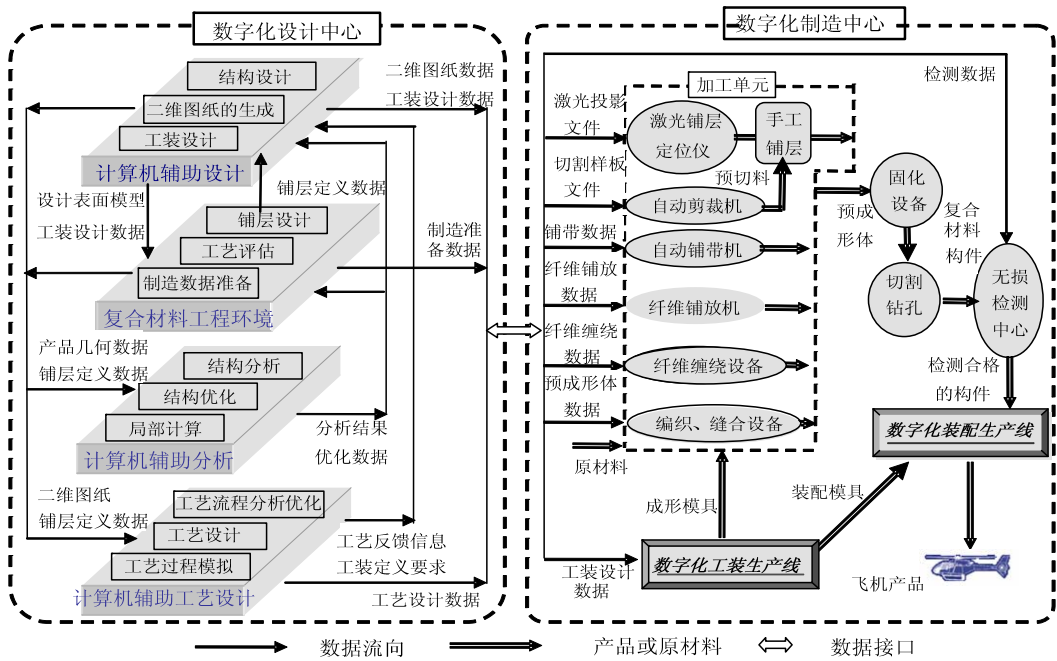


图 11 复合材料构件数字化生产线数据传递关系

(1) 设计软件与分析软件之间的数据传递

典型的复合材料构件设计首先基于预期的载荷确定设计要求，结合分析提出的设计要求以及其它使用环境等要求初步选定材料和成形工艺。初步选定材料和成形工艺后，通过 FiberSIM 软件与分析软件之间的接口将几何模型和粗略的铺层定义数据输入有限元分析软件进行结构计算以及结构优化，并将区域划分以及各区域的详细铺层定义数据反馈回复合材料工程环境进行铺层详细设计，设计完毕再将铺层详细定义数据包括纤维真实走向和其它细节等输入分析软件包进行设计验证，如此反复修改、验证直至达到最优设计，分析是对设计结果的验证，设计满足分析提出的要求，设计人员与分析人员之间组成了一个闭环。

(2) 设计与工艺之间的数据传递

工艺设计是连接产品设计和制造的桥梁，是产品从数字化概念定义走向实物的必不可少的信息转换环节。工艺部门接收设计部门发放的产品设计数据包括二维图纸、技术文件等，包含了产品的项目信息，构型信息，零组件的几何、材料、铺层信息。工艺人员对产品的设计结构进行分解和转换，变成可用于指导生产的工艺结构。与此同时，对每一个要生产的零组件设计其加工工艺，设计或选择其工装夹具，指定原材料和计算材料定额，统计标准件、外购件等非生产零件的需求，编排工时定额等。工艺部门除了产生用于指导生产的工艺规程数据文件外，还要进行材料定额等各种统计汇总，并将数据传向采购、库存、调度等生产准备和管理部门，以

保证生产的顺利进行。

(3) 设计与工装之间的数据传递

设计传递到工装系统的数据包括：二维图纸、三维模型、技术文档等。

(4) 设计与制造系统的数据传递

设计传递到制造系统的数据包括铺层展开图、下料数据、激光投影数据、技术文档、纤维铺放数据等。

铺层展开图：铺层设计完成后，应用 FiberSIM 软件曲面展开技术，将构件的三维实体模型逐层展开生成铺层的展开数据，将每一个曲面铺层展开为一个对应的二维平面图形，用以输入到排样系统和自动下料机进行自动排料和自动剪裁。

激光投影文件：应用 FiberSIM 软件，基于构件的 CAD 三维设计数据生成激光投影数据，输入到激光投影系统中进行铺层定位，在成形模具上进行激光投影。

3.4.2 典型应用系统集成

对应复合材料构件数字化生产线中的数据流动关系（如图 12 所示），需要集成的应用系统包括设计系统内部的集成、设计系统与分析系统的集成、设计系统与工艺设计系统的集成、设计系统与工装设计系统的集成、以及设计系统与制造系统的集成等。

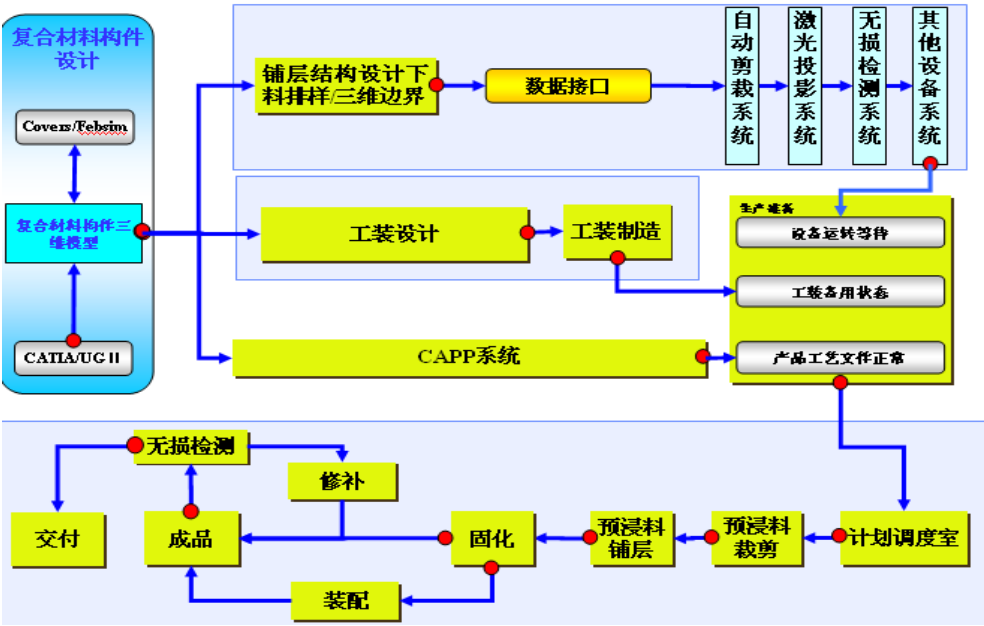


图 12 数字化生产线中的数据流集成

(1) 设计系统内部的集成

复合材料构件数字化设计为后续优化、分析、制造等环节提供数据的源头，是构建复合材料构件数字化生产线的基础。除常用的 CAD 外，复合材料专用设计/制造软件是实施复合材料构件数字化设计不可缺少的工具。目前世界领先的复合材料专用设计/制造软件有 CATIA CPD 模块和 VISTAGY 公司开发的 FiberSIM 软件。前者与 CATIA 系统全面集成，后者亦能完全集成到 CATIA、Pro/E、以及 UG 等 CAD 软件中。复合材料专用设计/制造软件与已有 CAD 系统的集成提供了高效的复合材料数字化设计/制造工具。

(2) 设计系统与分析系统的集成

复合材料构件数字化设计/制造软件 FiberSIM 提供数据接口输出进行有限元分析所必需的数据，保证了设计和分析共享同一 CAD 主模型。

(3) 设计系统与工艺快速设计系统的集成

设计系统与工艺快速设计系统之间通过数据接口实现复合材料构件二维图纸、技术文件、BOM 等信息的集成与共享。

(4) 设计系统与工装设计系统的集成

在并行设计工作环境中，产品设计与工装设计在同一平台上实现无缝集成，工装设计工程师直接利用产品设计工程师提供的复合材料构件产品三维数据进行复合材料构件工装的设计，并将工装边界信息传递给产品设计工程师进行复合材料构件预浸料铺层的详细设计。

(5) 设计系统与制造系统的集成

除采用数字量形式对复合材料构件进行全面描述及数据传递之外，复合材料构件数字化设计/制造软件 FiberSIM 提供数据接口以联系设计和制造环节，在并行设计过程中使制造与设计定义直接结合，实现了设计到制造车间的无缝集成，其集成过程如图 13 所示。复合材料设计人员完成铺层设计后，自动从设定的铺层定义生成三维实体后，基于该三维 CAD 模型生成铺层展开数据，为制造做数据准备，铺层展开数据进一步提取生成下料机专用的下料文件和支持 Virtek 和 General Scanning 等激光投影系统的激光投影编码（或提供中介 APT 格式文件），通过数据接口将上述文件信息分别输入到自动剪裁机和激光铺层定位系统，自动进行优化排样、下料以及各铺层的精确定位。

3.4.3 复合材料构件制造过程数据管理系统开发

复合材料车间制造执行系统是实现协同生产、信息的集成共享和生产精细化管理的手段。该系统主要实现的功能包括：生产作业计划和调度管理、物料需求配送管理、零件执行跟踪、库房管理、岗位管理、人员管理、权限管理和统计管理，以及 ERP 和 CAPP 接口等功能。系统框架图如图 14 所示。

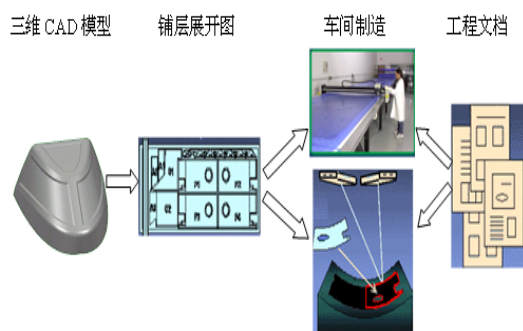


图 13 设计系统到制造车间的集成

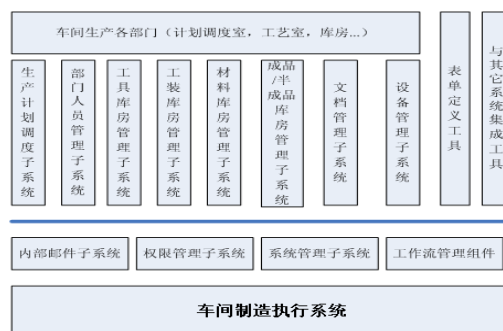


图 14 车间制造执行系统框架图

4 取得的成果

复合材料构件数字化生产线建设是一项庞大而复杂的系统工程，我们本着总体规划、分步实施的原则开展了项目的初步研究并取得了一些阶段性成果，主要有：

（1）制定了我国第一条飞机复合材料构件数字化生产线的总体建设方案，初步建立了复合材料构件数字化生产线体系框架，对国内飞机制造业研究建立复合材料构件数字化生产线具有重要参考价值；

（2）改变了长期以来一直采用金属件设计方法进行复合材料构件设计的模式，对复合材料构件产品每一铺层进行数字化定义，实现了将复合材料构件产品数字化定义数据从设计初期传递至工装设计、工艺设计、数控剪裁设备和激光铺层定位系统，基本打通了复合材料构件在现有计算机软、硬件及数字化制造设备条件下从设计到制造过程的数据流；

（3）以复合材料构件研制流程为主线，研究复合材料构件数字化工程环境中数据拓延和传递关系，开发了复合材料构件制造过程信息管理系统、工艺快速设计系统、工装快速设计工具集等软件系统和数据接口、实现了 CAD/CAPP/CAM/ERP 的集成；

（4）初步建立了工艺基础数据库、工装标准件库、典型工装结构库；

（5）编制了复合材料制件工装建模要求和数控编程通用要求两项航空行业标准。

5 实例验证

5.1 直升机全复合材料座舱罩顶棚研制

在直升机全复合材料座舱罩顶棚设计过程中，应用数字化手段进行构件的数字化产品设计、数字化工艺设计、数字化工装设计、数字化制造及数字化检测等，验证了从设计、工艺、工装到制造的数字化流程（见图 15）。

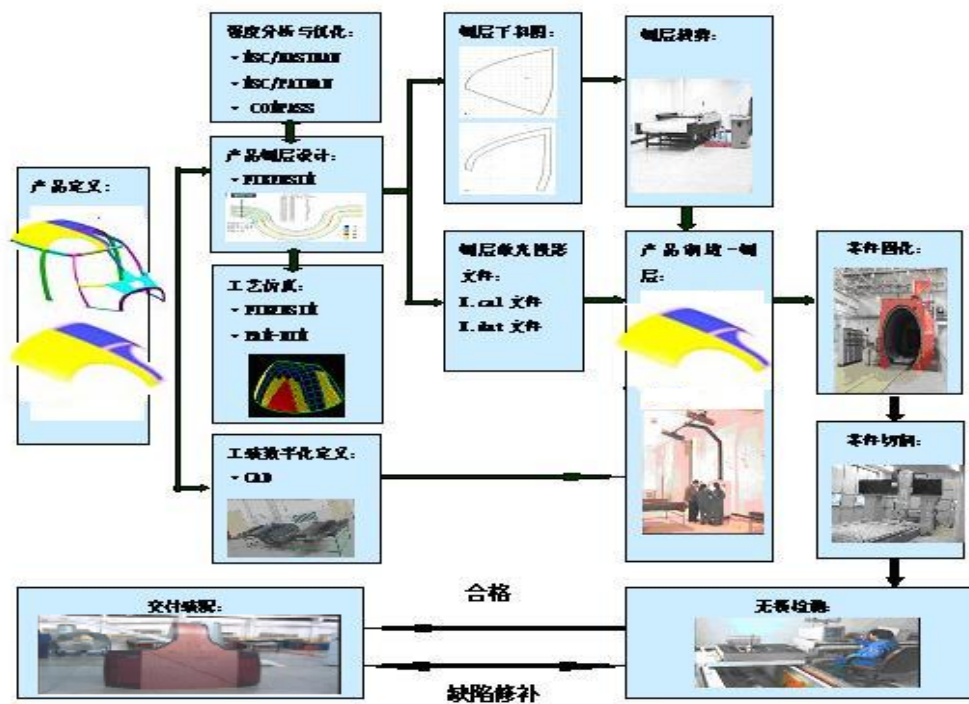


图 15 设计与工艺制造一体化流程图

5.2 蜂窝夹层结构板件设计

蜂窝夹层结构板件设计应将蜂窝下面的铺层和蜂窝上面的铺层各设计一个 laminate，便于铺层展开。各铺层展开时有时会存在问题，为保证铺层精度和便于工人操作，有些铺层下料文件需进行适当调整，以满足需要。

(1) 蜂窝下面带有开孔的铺层需带着开口展开成下料图，但对于带有开口超幅宽的铺层，软件展开下料图（见图 16），需要在下料微机上对铺层下料文件进行调整（见图 17）；

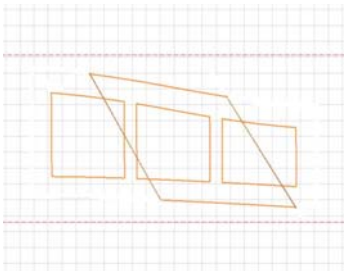


图 16

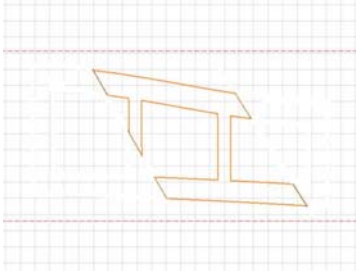


图 17

(2) 对于蜂窝夹层结构板件，由于蜂窝具有一定的高度，蜂窝上面板的铺层通过 FiberSIM 软件生成的下料图，不是很规范（见图 18），与相应铺层的激光投影范围不协调，制造困难，需要对不规范的平面图样输出文件进行调整（见图 19），调整时要参考各铺层的激光投影范围进行调整，经首件验证后，确定各铺层准确的下料图。

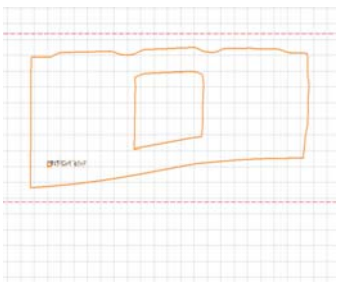


图 18

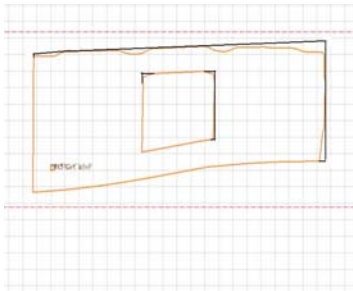


图 19

6 结束语

飞机复合材料构件数字化生产线技术研究内容涵盖了复合材料构件数字化生产线体系、复合材料构件数字化设计、复合材料构件数字化制造、复合材料构件数字化检测、复合材料构件数字化生产线集成技术五大部分，本项目以制定我国第一条飞机复合材料构件数字化生产线的总体建设方案为首要任务，理清思路，突出重点，并充分吸收国内外先进的经验，以打通复合材料构件从产品设计到工艺设计、工装设计、构件制造等过程的数据流为首要目标开展各项研究工作，取得了阶段性研究成果，对航空、航天等行业建立数字化复合材料构件生产线具有重要的参考作用。

参考文献

[1] 中国航空研究院，复合材料结构设计手册，航空工业出版社，2001

- [2] 杨乃宾、章怡宁, 复合材料飞机结构设计, 航空工业出版社, 2002
- [3] 欧洲航天局, 复合材料设计手册, 航空航天部飞机强度研究所, 1992
- [4] 戴棣、谢富原, 航空复合材料结构的先进制造技术, 航空复合材料预研二十年回顾与展望研讨会论文集, 2001
- [5] 沃丁柱主编, 复合材料大全, 化学工业出版社, 2000
- [6] Robert A. Moore, TOOL ENGINEERING AND MANUFACTURING SYSTEM (TEAMS), Presented at the American Helicopter Society 55th Annual Forum, 1999
- [7] 刘秀芝、黄领才等, 复合材料数字化技术研究应用, 第十三届全国复合材料学术会议论文集, 第 919 页, 2004
- [8] 李翌辉, 孙树栋, 何卫平等. 打通飞机数字化生产线的流程研究[J], 航空制造技术, 2005 (2) : 28-33
- [9] 刘善国, 国外飞机先进制造技术趋势[J], 航空科学技术, 2003 (4) : 26-29
- [10] 徐微, 王普. 数字化设计制造技术在飞机研制中的应用研究与实践- “九五” 航空 CIMS 工程[J], 航空制造技术, 2001 (4) : 19, 20, 34