

基于 MBD 复合材料结构设计与工艺一体化设计方法研究

撰文 / 中国运载火箭技术研究院研究发展中心 邓云飞 张帆 姚纳新 许健

本文分析了复合材料传统设计模式存在的问题，提出了基于 MBD 的复合材料设计与工艺一体化设计方法并应用到某产品研制过程，取得了良好的应用效果。

一、引言

人类几百年的工业革命历史上，以二维机械制图为代表的产品设计模式至今为止已延续了近二百年，随着近代计算机技术的飞速发展，产品设计模式逐渐向三维数字化设计方向转变，进而到当前世界先进企业形成较为完善的 MBD (Model-Based Definition) 设计模式，如图 1 所示。

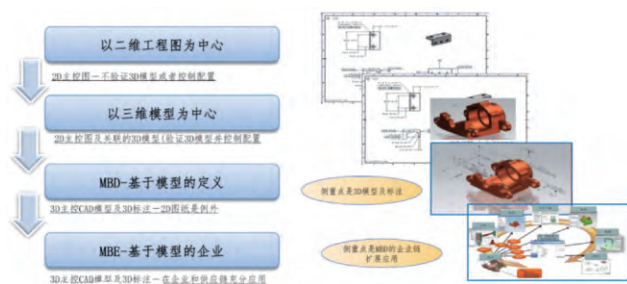


图 1 产品设计模式的演变

对于航空航天飞行器以及先进装备结构设计，复合材料应用逐步提高是技术发展的必然趋势。复合材料在提高产品性能、降低产品重量方面有重要作用，美国波音公司在 2004 年开始的复合材料 787 客机设计中，全面采用基于模型定义 MBD (Model Based Definition) 新技术，取得了显著的应用效果，如图 2 所示。



图 2 波音公司 MBD 模式

二、当前产品设计模式存在的问题

1. MBD 理解存在的问题

MBD 技术是工业 4.0 模式下实现智能化、数字化制造的关键设计技术，相关制造企业必须深刻理解其数字化传递的内涵。当前，国内很多企业处于初步接触三维设计阶段，没有完全理解 MBD 的真实内涵，存在三个显著的认识误区。

(1) 在数据集表达上，没有认识到 MBD 区别二维图时代的革命性意义是模拟量和数字量的根本差别，部分技术人员认为 MBD 就是“三维标注”，是“电子视图”，没有

掌握 MBD 模型包含的数据集的定义, 也不了解模型数据集对制造设备的接口意义, 只是按照传统二维图的方式将大量尺寸标注在模型上。由于“尺寸”本身起源于二维图时代用量具量取两点之间的距离这种模拟量传递方式, 与 MBD 设计数字化传递、智能化制造的思想格格不入, 差了一个时代。笔者通过多年的 MBD 工程研发和研究, 目前国内这个现象十分普遍, 充分表明国内企业在正确理解国外 MBD 设计方法上还存在相当差距。

(2) 在设计流程上, 没有认识到 MBD 基于设计制造一体化的设计流程要求, 部分技术人员认为设计人员实现了三维模型下厂就实现了 MBD。三维模型下厂后, 工艺需要重新生成大量二维工程图或者工艺文件, 或者要求设计补充设计图样和技术文件, 然后进行工艺可行性分析反馈设计, 由此将带来大量不协调问题, 严重降低产品质量, 甚至造成方案翻车, 延缓研制周期。

(3) 在管理模式上, 没有认识到 MBD 基于模型成熟度进行项目管理要求, 部分单位设计上使用三维设计, 管理上仍然按照工作成熟度进行, 而不是根据模型的成熟度划分产品研制阶段, 造成流程冗长, 成本浪费严重。

2. 传统复合材料产品设计方法存在的问题

当前国内对三维设计模式的研究方兴未艾, 但是主要集中在金属结构的研究, 复合材料的设计方法基本仍沿用传统基于设计工艺相对分离, 三维模型与二维图样并存共用的方法, 如图 3 所示。

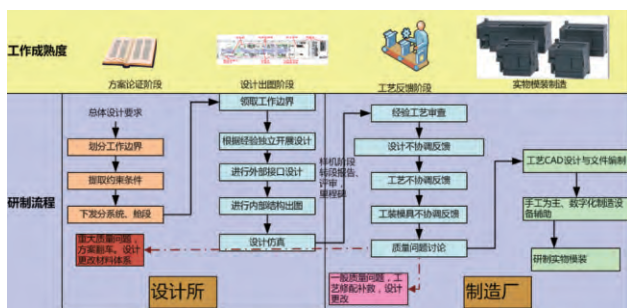


图 3 传统复合材料结构产品研制流程

传统研制模式下, 基于三维模型和二维文件并存传递、串行工程的方法设计质量粗放、效率低, 无法满足新一代面向工业 4.0 产品“优性能、高质量、高效率”的要求, 具体存在以下三个关键的问题亟需解决。

(1) 传统设计与工艺缺乏有效的协同设计环境和规范,

串行的模式研制效率低。

(2) 传统设计采用三维模型和二维图样结合的方法, 数据源不唯一, 质量控制难。

(3) 传统的设计工艺结合弱, 产品研制精细化程度低, 性能不够优化。

三、基于 MBD 的复合材料产品生产工艺一体化方法研究

1. MBD 信息表达规范及实现方法

MBD 技术现已经成为国内外先进制造企业全寿命周期数字化解决途径。复合材料 MBD 设计的核心内容是通过唯一的三维模型, 集成所有的设计信息和必要的工艺信息, 统一全过程数据源。三维模型的数据集表达方法是其中一项主要内容。通过调研国外先进企业数据集表达方法, 总结出适用于复合材料结构零件数据集定义方法。包括零件属性信息、零件注释信息、零件几何信息和铺层信息等, 图 4 所示为完整的零件 MBD 数据集定义, 对于先进碳纤维树脂基复合材料结构没有合金代码、最终热处理等项, 如图 4 所示。

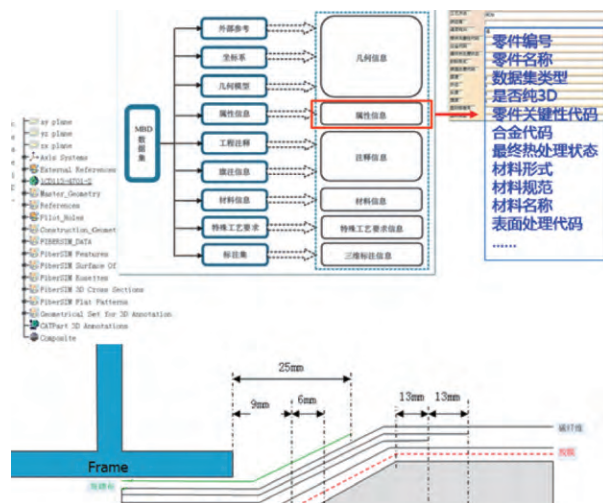


图 4 完整的零件 MBD 数据集定义示意

2. 数据集在制造中的识别和重用技术

三维模型数据集的基于集成化表达、数字化制造方式, 需对设计下游的活动, 包括工艺、工装和制造等进行顺势牵引拉动。因此, MBD 数据集必须考虑这类数据能够被下游识别和重用, 从下游的需求来看, 这些数字化特征需要向工艺规划、数字化测量检验、数字化制造和数字化维护等专业传递, 这需要下游人员在 MBD 设计顶层文件的时候就参与

进来, 确保设计数据的可用性, 如图 5 所示。

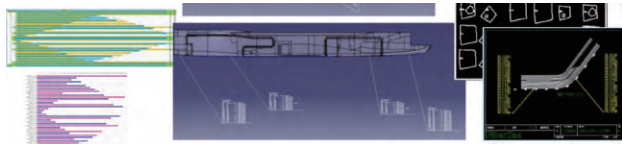


图 5 面向下游的 MBD 零件信息

3. 设计工艺一体化精细化设计流程

复合材料的材料设计与结构设计同步, 材料设计的工艺性和科学性直接影响设计结构的精细化程度以及方案的可行性。复合材料结构的精细化设计程度也是减轻结构重量、提高制造精度、提高产品质量、降低产品成本的重要途径。通过借鉴国外先进企业 MBD 研制经验, 构造以 VPM/FIBERSIM 平台为依托, 以模型为核心的设计、制造一体化精细化设计流程, 并形成相关规范体系进行流程固化。总体流程如图 6 所示。

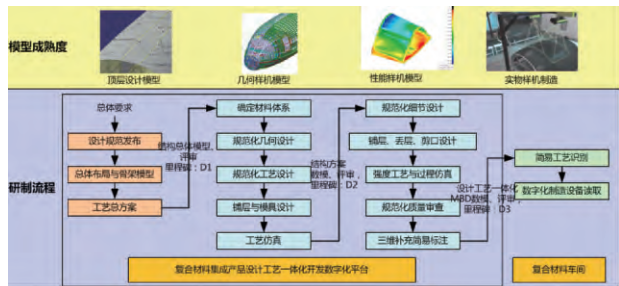


图 6 复合材料设计工艺一体化总体流程

四、应用实例

在某复合材料舱体设计过程中, 完成了复合材料设计工艺一体化详细流程方法构建, 具体流程包括以下几个方面。

(1) 建立产品结构树。产品结构树是指在数字化平台上, 根据产品图号分配表为基础建立的零组件父子级关系, 形成产品结构树。

(2) 建立骨架模型。根据前期产品方案初步论证的结果, 设计部门在产品结构树上的特定位置建立主骨架模型, 如产品理论外形、框梁站位平面、接口协调轴线等作为产品结构设计的顶层几何基准。

(3) 初步设计。骨架模型完成设计和发布后, 各工作包的设计人员设计零件时一般应根据骨架模型进行设计, 确定零件的边界和模具面、坐标系等信息并完成初步实体方案设计用于接口协调。如图 7、图 8 所示。

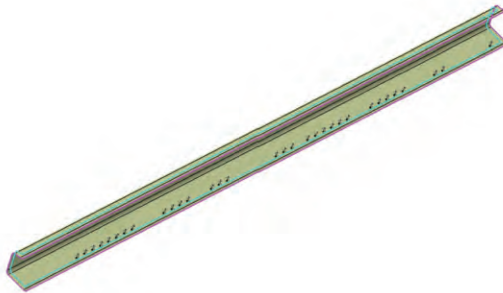


图 7 基于骨架模型生成初步几何

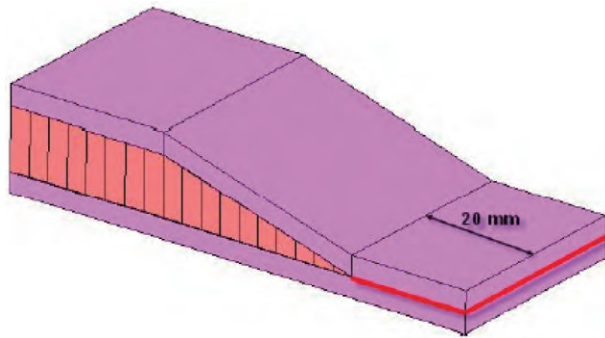


图 8 建立初步几何实体模型

(4) 铺层设计。联合制造人员进行工艺分析, 包括铺层分区方式、分区数量、丢层方案和圆角过渡等都基于复合材料设计和工艺特点进行多次评价确定, 确定合理的复合材料铺层序列、铺层角度和铺层分区。

(5) 模具设计。根据设计给定的初步铺层方案, 工装人员同步开展基于外形面的模具设计, 分析设计曲面的可制造性并设计合理的模具制造方案, 如图 9 所示。

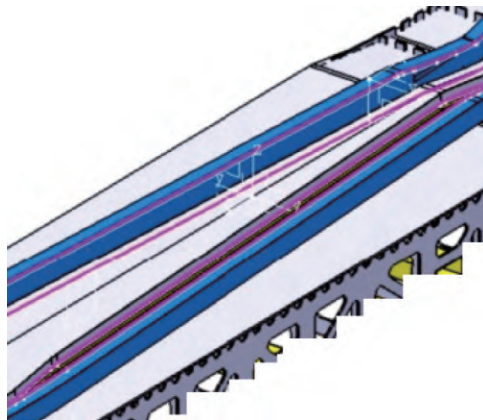


图 9 模具设计

(6) 强度分析。分析人员根据设计提供的三维模型, 提取几何信息和铺层信息, 利用统一的数字化协同平台开展

强度分析并实时反馈设计，进行高效迭代，以获取最优几何尺寸、结构布局和铺层优化数据，如图 10 所示。

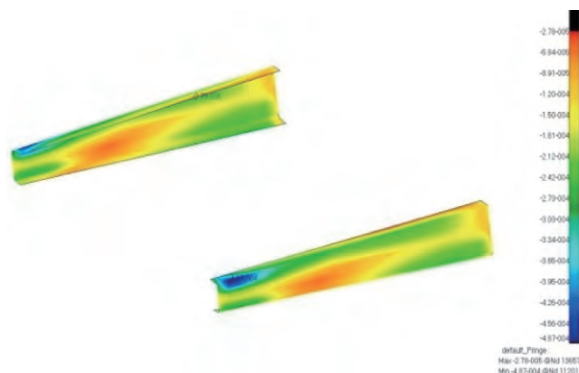


图 10 强度分析

(7) 详细设计。完成零件的详细几何包括圆角、下陷、铺层分区、过渡和剪口的设计，并定义零件之间的连接关系，如图 11、图 12 所示。

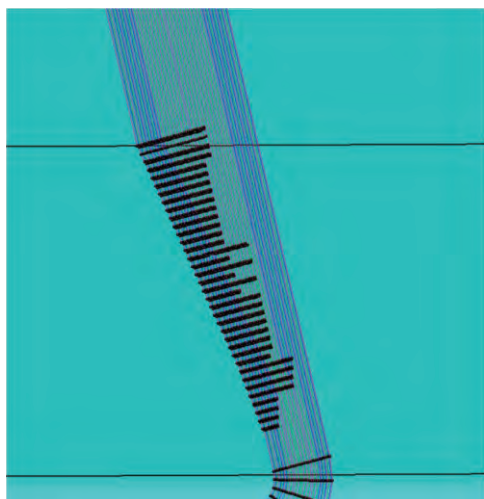


图 11 丢层区过渡



图 12 详细设计实体

(8) 可制造性仿真。设计人员完成模型创建后，工艺人员用同一设计平台进行铺层展开、下料分析和纤维工艺仿

真等，并直接生成复合材料数字化设备如激光定位仪、自动下料机和自动铺放机可识别的工艺文件，并与设计模型关联。实现了在产品研发阶段对复合材料的铺层可行性分析、热压罐成型变形分析等，将传统模式下只能通过实物制造阶段暴露的问题提前解决，避免了设计方案不协调或者翻车的可能性，极大提高了产品质量，如图 13、图 14 所示。

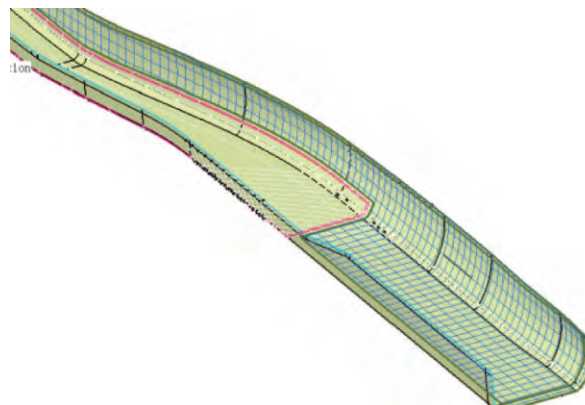


图 13 材料纤维铺放工艺仿真

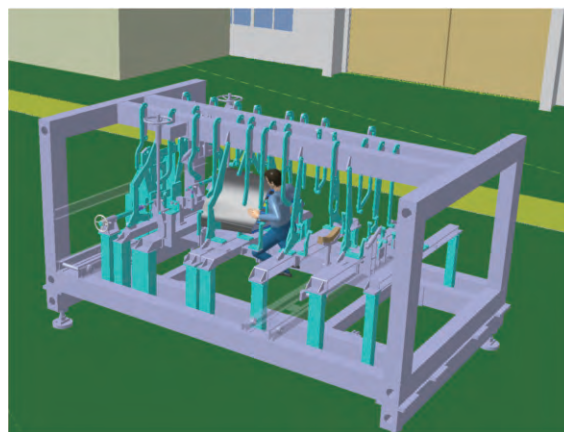


图 14 设计及装配工艺一体化协同模型

(9) 三维标注。完成产品几何与非几何主要数据集定义后，应将制造所需的其它补充信息通过三维标注的形式集成到模型。如铺层序列、分区、剖面图、铺层表和技术要求等，并生成相应的视图，方便制造人员读取。注意能用模型数据集表达的就不要标注，更不要大量标注尺寸，一般只标注关键尺寸和公差，普通几何公差在技术条件中说明，如图 15 所示。

(10) 模型下厂发放。三维模型下厂技术状态控制为制造业公认的难题，为了实现设计模型下厂发放版本有效管理，应对每个三维模型设计“三维模型数据发放通知单”随

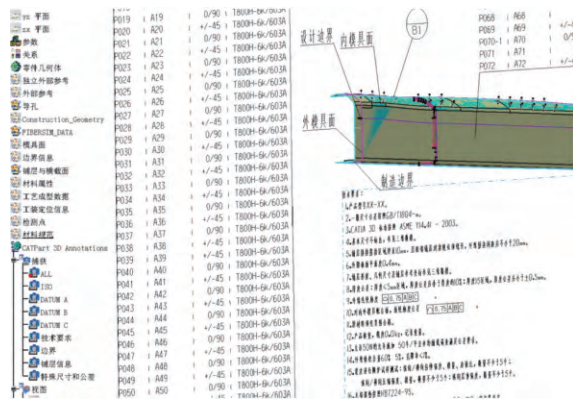


图 15 三维标注

三维模型一同发放。该通知单上注明模型的零件号、名称和版次，并按照企业质量管理规范进行签字确认。一般零件的发放通知单上应由设计员提出，经过设计组长校对，设计主任审核，制造部门会签，标准化部门审查，项目技术负责人批准后交给构型管理人员发放，如图 16 所示。

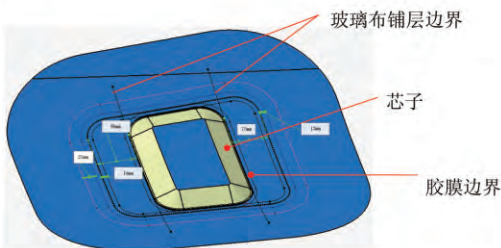


图 16 三维设计电子样机下厂示意模型

(11) 加工制造。通过应用复合材料设计、制造专用软件的开发以及各种复合材料数控制造设备（如预浸料自动剪裁设备、激光投影设备等）。依托复合材料 MBD 技术，完成零件制造阶段全三维数字化生产，从根本上改变传统复合材料的设计制造方式，采用数字量形式对产品进行全面描述和数据传递，实现了设计与制造之间数据的无缝集成，如图 17、图 18 所示。

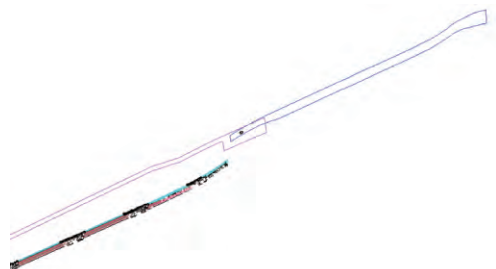


图 17 自动排样效果图



图 18 自动剪裁设备

(12) 设计变更和构型管理。三维模型下厂后，如需要对设计信息进行变更，则需要进行模型升版，需要发放新的“三维模型数据发放通知单”，通知单上注明概括性的变更内容，具体的变更信息应在模型中定义。构型管理人员对设计基线和变更情况进行汇总和管理并与制造部门保持实时协调，确保设计更改闭环。

五、结语

综上所述，通过将本课题中针对基于 MBD 的复合材料设计工艺一体化方法的研究，具体应用到复合材料舱段的结构设计中，取得了显著的应用效果（图 19）。课题研究所形成的数字化平台、标准规范和研制流程可广泛推广到其它复合材料产品研制中去，为后续产品实现结构性能提升、研制周期降低奠定了技术基础。IM

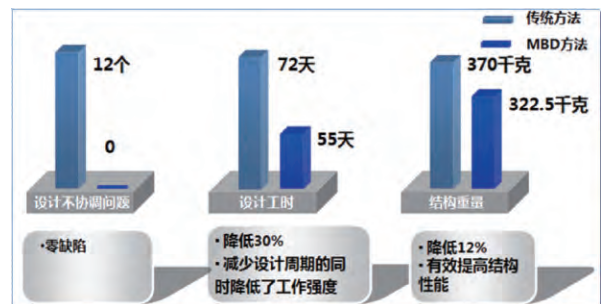


图 19 方法应用综合效果图