

# 基于3D-PLM协同的航空复杂 产品生命周期质量管理技术研究\*

Research on Aeronautical Complex Product Lifecycle Quality Management  
Technology Based on 3D-PLM Collaboration

西北工业大学机电学院 贾晓亮



贾晓亮

西北工业大学机电学院博士,教授。现从事数字化制造与工艺、制造过程管理、产品生命周期管理研究与应用等工作。

航空复杂产品具有客户需求复杂、产品组成复杂、产品技术复杂、涉及学科专业复杂、制造流程复杂、试验维护复杂、项目管理复杂、工作环境复杂等特点,并且产品生命周期长、技术含量高、生产和质量要求严格。随着市场竞争的加剧和全球化,航空复杂产品制造企业在不断缩短

目前我国航空复杂产品制造企业在 PLM 技术应用方面取得了一定的成果,在主机厂、所之间已经实现了基本的协同研制和生产,虽然这种协同模式未能包含诸如发动机和机载设备的供应商,但已在航空工业内部探索了价值链前端的部分协同,同时也开展了 PLM 多项目并行协同的数字化平台建设,这些都为基于 3D-PLM 协同的产品生命周期质量管理奠定了良好的基础。

制造周期和提高资源利用率的同时,更加趋向于设计、工艺与制造过程以及整个供应链的紧密协同。

西方工业发达国家在航空复杂产品研制领域,实现了用现代设计与集成制造技术对传统生产方式的改造。美国空军 JSF 战斗机研制,将遍布全球 30 多个国家、50 多家公司、5 万名技术人员通过协同设计制造平台,实现了软件、数据、业务、标准的协同工作。空中客车 A380 是又一个协同研制的成功典范,它由西班牙、德国、英国和法国 4 个国家、5 座城市实现异地、异构信息集成和并行协同工作,研制周期比 A340 缩短 25%,成本减少 50%。波音 777 型客机通过数字化设计与制造协同,其整个设计工作实现了无图纸,研发周期缩短 40%,工程返工减少 50%。

美国洛克希德·马丁公司的 F-35 是世界航空工业第一个真正实施产品生命周期管理(Product Lifecycle Management, PLM)的项目,实现了 5 个主要合作伙伴及 35 个供应商之间的实时在线协同,设计周期缩短 35%,制造时间将缩短 66%。

由于航空复杂产品特点要求实现产品生命周期管理,并且随着跨地域、跨厂所的项目协同管理和多项目并行协同的工作模式的推行,航空复杂产品的制造模式围绕 OEM、Partner 和 Supplier 的协作开展,这对航空复杂产品的质量控制和管理提出了更多的要求和挑战,同时航空复杂产品质量管理的内涵发生了演化,质量管理不单单是满足产品设计规范和产品制造的目标,而是产品在生命周期内对客户需求的满足;质量

\* 国家 863/CIMS 主题(2007AA040503)资助。

管理不仅是企业内质量部门的工作,而且是贯穿产品全生命周期、全业务流程和整个供应链的协同工作,面向产品生命周期管理的质量管理成为一项复杂的系统工程。

### 基于 3D-PLM 协同的航空复杂产品生命周期质量管理内涵

产品全生命周期管理是在产品数据管理(Product Data Management, PDM)基础上发展而来的一种全新的管理理念和技术,是对产品从用户需求、产品设计、工艺规划、制造装配、维护服务到报废回收等整个生命周期所涉及的产品、过程、资源进行管理的核心技术。PLM 包含了 PDM 的全部内容,并强调了对产品生命周期内跨越供应链的所有信息的管理和利用。对航空产品实施产品全生命周期管理,可以达到优化设计和生产流程、提高生产效率、缩短研制周期的目的<sup>[1-2]</sup>。

目前,在复杂产品的研制中,产品数据集已实现以三维产品模型为核心载体的设计数据发放,三维产品模型集成了完整的产品数字化定义信息,建立了面向 PLM 以三维模型为核心的设计数据管理手段,三维产品模型成为满足数字化协同研制系统对产品信息从设计开始到生产应用的核心数据,三维产品模型提高信息传递的准确性和效率,使使用者能够更加直观、准确地获取生产检验的信息。以三维产品模型为核心的数据集包含设计、工艺、制造、检验等各部门的信息,各职能部门人员可以共同在单一的产品模型上协同工作,提高了设计效率,同时也提高了产品的可制造性。

在复杂产品的研制和生产中,质量控制过程负责确定制造过程产出的产品对设计规范的遵从,是衡量产品设计与制造的手段。复杂产品的研发和生产过程中产生的质量数据是产品数字化制造、计量、检验与管

理的基础数据,对产品研制周期、质量和制造成本具有重要影响,是复杂产品研制和生产的关键基础技术之

理相比较,基于 3D-PLM 协同的产品生命周期质量管理内涵演变如图 1 所示。

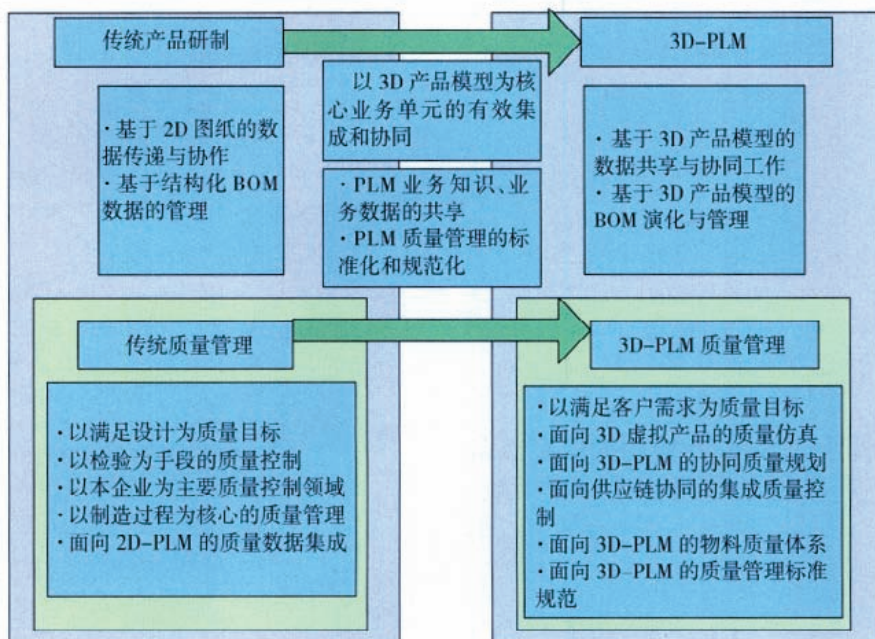


图1 基于3D-PLM协同的产品生命周期质量管理内涵演变

一。复杂产品基于 3D-PLM 协同的产品生命周期质量管理目标是建立一个面向 3D-PLM 协同研制、产品生命周期质量管理需要的平台系统,通过网络组成虚拟的协同工作团队,基于单一的三维产品模型数据源为核心,形成一个分布式、动态的协同工作环境,用于支撑相关设计、制造单位和供应商高效地协同进行质量管理工作。

航空复杂产品基于 3D-PLM 协同的产品生命周期质量管理体系面向产品生命周期,对其质量相关数据和业务流程进行统一存储、组织、管理和控制,确保质量相关数据的一致性、有效性、安全性、完整性和可追溯性,与协同环境中的其他业务系统有机协作,共同完成面向产品生命周期依据的特定标准,是对产品进行规划、设计、制造、检测、计量、运输、储存、销售、售后服务、生态回收等全程操作的以三维数字化数据为核心的质量业务过程。与传统的面向车间制造和数据集成为主的传统质量管

(1) 基于 3D-PLM 协同的产品生命周期质量管理不仅仅是面向车间制造和数据集成,而是面向产品生命周期的相关业务领域。

(2) 基于 3D-PLM 协同的产品生命周期质量管理的目标不仅仅是以满足设计规范为目标,而是从 PLM 角度以满足用户的需求为最终目标。

(3) 基于 3D-PLM 协同的产品生命周期质量管理不仅仅是以企业内部为质量控制领域,而是面向产品供应链的集成质量控制,考虑整个产品供应链的质量管理。

(4) 基于 3D-PLM 协同的产品生命周期质量管理不是产品研制的目标,而是以客户的需求满足为目标,是客户需求推动、产品服务拉动为目标的质量管理。

(5) 基于 3D-PLM 协同的产品生命周期质量管理不仅仅是以物理产品的检验为手段的质量控制,而是首先以基于 3D 虚拟产品的质量仿真预防为主。

(6) 基于 3D-PLM 协同的产品

生命周期质量管理在技术手段上是  
以三维产品模型为数字化协同研制的  
核心数据,以三维产品模型为核心  
的数据集包含需求、设计、工艺、制  
造、检验等各部门信息,各职能部门  
人员可共同在一个产品模型上协同  
工作,提高设计效率和产品质量。

(7) 基于 3D-PLM 协同的产品  
生命周期质量管理涵盖研发、工艺、  
市场销售、客户服务、产品服务以及  
产品回收的质量控制方法与体系,并  
扩展到产品全生命周期、全价值链的  
其他部门和业务环节的 PLM 追溯。

### 基于 3D-PLM 协同的航空复杂 产品生命周期质量管理模型

随着数字化设计技术的快速发  
展,航空复杂产品结构由三维设计协  
调逐步发展演变为全三维设计,真正  
实现无纸化设计与制造。航空复杂  
产品三维产品模型是设计、制造、装  
配、检验的唯一有效数据,基于 3D-  
PLM 协同实现产品的三维数字化协  
调和产品生命周期质量管理是技术  
发展的必然结果。航空复杂产品的  
全三维设计技术引发非几何信息表  
达方式的变革;同时也引发产品结  
构设计协调方式的变革,由过去的基  
于独立单元数据传递、共享到基于  
3D 产品模型的在线协同关联设计,  
并按照产品数据的成熟度模型进行  
协同工作,定义协同级别;并按照业  
务工作内容,定义各个业务阶段的质  
量评判标准和以 3D 产品模型为载  
体的质量管理数据集定义,以支持航  
空复杂产品生命周期质量管理。

航空复杂产品基于 3D-PLM 协  
同的产品生命周期质量模型分别围  
绕虚拟产品和物理产品 2 条主线,实  
现 PLM 内基于信息驱动的产品物料  
协同质量控制。虚拟产品以 3D 产  
品模型为核心,覆盖产品生命周期  
所有信息,虚拟产品的数据集演化  
阶段分别以设计 BOM (Engineering  
Bill of Material, EBOM)、工 艺

BOM( ( Planning Bill of Material,  
PBOM)、制造 BOM(Manufacturing  
Bill of Material, MBOM)、服务 BOM  
(Service Bill of Material, SBOM)、  
回收 BOM(Disposal Bill of Material,  
DBOM) 为主要视图;物理产品以实  
际生产中物料的变化为核心,覆盖产  
品生命周期的所有业务。在整个航  
空复杂产品基于 3D-PLM 协同的产  
品生命周期质量模型中,客户需求是  
质量管理的输入和目标,在 PLM 及  
供应链协同的支撑下,实现产品的交  
付和生命周期使用,如图 2 所示。

产品质量数据的关联;作为企业战  
略的产品生命周期质量,使产品研  
发、过程改善和技术应用与客户需  
求的目标相符合。物料清单 BOM 是  
产品生命周期质量管理组织产品数  
据的重要形式,它包含产品需求信  
息、设计信息和工艺信息等,是联  
系设计、工艺、生产等部门的重要  
纽带,建立以 BOM 为核心的产品数  
据流是产品生命周期质量管理的一  
项核心工作。对于航空复杂产品而  
言,由于产品涉及机械、电子、软  
件等,因此 BOM 的结构很复杂。产  
品生命周期

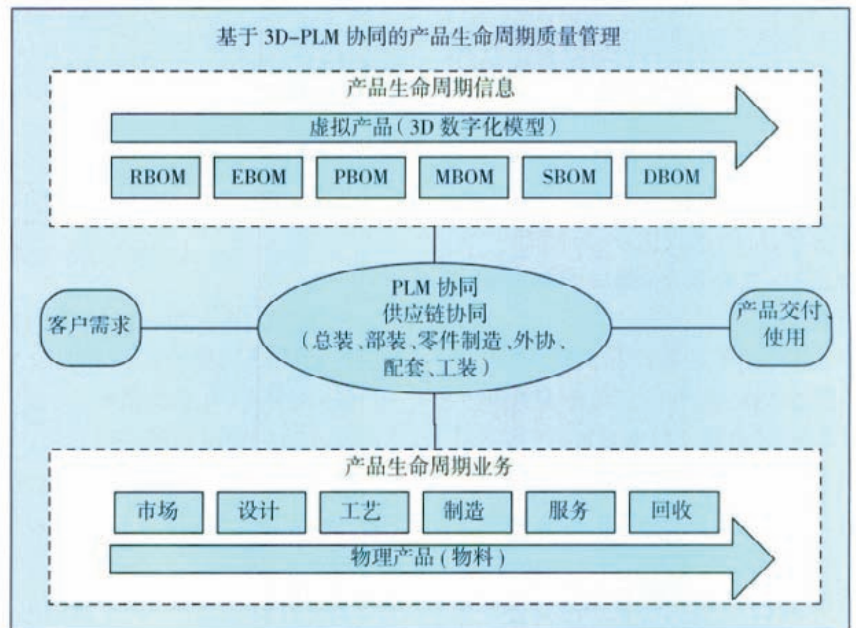


图2 基于3D-PLM协同的产品生命周期质量模型

可追溯性是航空复杂产品质量  
生命周期管理的重要内容,可追溯性  
迫使制造商对产品的 PLM 相关联的  
所有产品业务、数据和物料实现可追  
溯,从原型设计到装配、测试、配送以  
及市场跟踪,所有这些都是包含在产  
品生命周期质量循环管理中。要正  
确地实现产品生命周期质量管理,建  
立起历史性、可预知、可操作的方向  
以防止出现质量问题。

(1) 产品生命周期质量信息模  
型。产品生命周期质量信息模型反  
映产品实时可视化状态,通过有效信  
息驱动产品开发和质量改善,并追溯

质量管理 BOM 涉及机械、电子、软件  
等产品设计数据、工艺数据、生产数  
据、检验数据等,由于 BOM 的阶段  
性和多视图的特性,按照产品生命周  
期不同阶段对 BOM 进行划分,可得到  
不同的阶段和视图。

产品的需求管理对于产品生命  
周期质量具有重要的意义,客户需  
求与规范的理解与映射是产品设计的  
输入,越早在产品生命周期中实施质  
量管理,产品的质量越容易得到控  
制。在产品需求分析阶段开始产品  
质量管理是最理想的,然后衔接到设  
计、工艺、制造、质保和服务,应用于

产品的可追溯性和符合性,最终形成一个完整的循环。

(2) 产品生命周期质量业务模型。在航空复杂产品研制工作中,为了有效解决产品研制周期长、工作效率低等问题,必须依赖 3D-PLM 协同建立以客户需求驱动的产品生命周期质量业务模型,基于统一的协同运行环境和管理框架,解决产品研制过程中的需求、设计、工艺、质量、检验、计量、工装等的协同工作需求。从质量业务的规划、BOM 管理、质量体系设计、质量仿真和验证、测量与检验等工作出发,以基于 3D 模型的设计、工艺和制造过程的协同工作和客户满意为目标考虑最优的解决方案,形成覆盖产品概念设计、产品设计、工艺规划、产品生产、质量控制、生产制造的质量协同工作模式,以集成产品、工艺和资源规划数据,支持产品 PLM 整个过程中的质量管理工作模式和流程。并以 3D 产品模型为载体,建立适合整个 3D-PLM 中所有阶段质量业务管理需求的业务关联模型。

(3) 产品生命周期质量协同模型。基于 3D-PLM 协同平台,建立单一产品数据源和统一的用户权限、数据模型工作流程管理,实现质量管理系统与产品设计、生产制造等业务部门的有效协同;基于 XML 方式的数据集成,确保产品研制数据的单源性、全面性和准确性,实现产品生命周期数据的统一管理和全面共享。建立面向质量服务的供应商质量管理协同管理体系和标准规范保证 OEM、Partner、Supplier 间的质量协同。产品生命周期质量协同模型应以企业的三维产品数据为核心,提供包含概念设计、产品设计、工艺规划、产品制造、工装设计/制造、产品维护等在内的完整的产品全生命周期解决方案,涵盖整个产品生命周期和供应链,协同支持产品定义信息的生成、管理、分发和使用,推动创新产

品的研发,提高产品研制效率,实现协同工作,缩短上市周期,并提高产品质量和服务水平。

### 基于 3D-PLM 协同的航空复杂产品生命周期质量管理技术

航空复杂产品基于 3D-PLM 协同的产品生命周期质量管理基于产品质量标准,围绕虚拟产品和物理产品 2 条主线,实现 PLM 内基于信息驱动的产品物料协同质量控制,并以现代质量管理理论、先进的数字化设计与制造技术、IT 技术、物流与自动化技术、先进制造技术等为依托,在基于 3D-PLM 协同的统一产品生命周期质量模型的基础上,覆盖产品生命周期业务中关于产品质量数据内容、质量数据关联、质量活动追溯等,在 PLM 及供应链协同的支撑下,实现产品的交付和生命周期使用。基于 3D-PLM 协同的产品生命周期质量和传统质量管理在技术上最大的区别就是改模拟量传递为数字量传递;把串行工作模式变为并行工作模式,其带来的必然结果是缩短产品研制周期,提高产品质量,降低研制成本(图 3)。

(1) 基于 3D-PLM 协同的航空复杂产品生命周期质量数据管理。面向 3D-PLM 协同的产品生命周期质量数据管理以 3D 产品模型为核心数据载体,建立以 BOM 为核心的产品数据流,适合整个 3D-PLM 中所有阶段质量业务管理需求的数据关联模型,在协同产品数据管理平台的支持下,保证整个供应链内产品需求数据、设计数据、工艺数据、生产数据、服务数据之间的一致和共享。美国波音公司 DCAC/MRM 项目历时 5 年,将 14 种 BOM 系统统一到单一的 BOM 系统。DCAC/MRM 项目的目标是使业务流程在 PLM 内顺畅,提高效率为客户提供更好的服务<sup>[3]</sup>。同时将 30 种变更流程统一到一致的变更流程,数据的准确性由原来的 60%~70% 提高到现在的 99.7% 以上,这是航空产品生命周期质量数据管理的很好的实例。

(2) 面向 3D-PLM 协同的虚拟产品质量控制。

面向 3D-PLM 协同的虚拟产品质量控制在产品需求阶段,采用 3D 快速建模,通过 3D 模型进行产品设计需求分析,最大程度保证客户需求

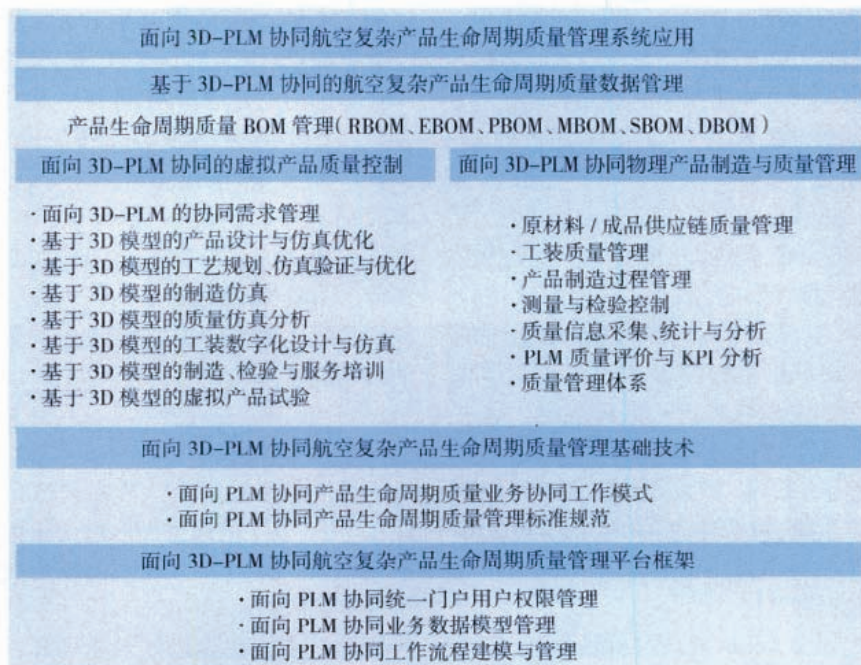


图3 基于3D-PLM协同的航空复杂产品生命周期质量管理技术

的正确获取和可视化,从源头保证设计输入和需求质量;在产品阶段,通过3D数字化设计,建立3D产品模型,进行基于数字样机的数字化预装配以及设计仿真,保证产品设计质量;在产品工艺阶段,基于3D产品模型进行工艺规划,并基于产品3D产品模型和工装申请进行工装数字化设计,实现工艺仿真、验证与优化,从而保证工艺质量;在产品制造阶段,进行基于3D产品模型的制造系统仿真、产品检验,并进行质量仿真分析,保证制造质量;在产品使用、服务阶段,通过基于3D产品模型的服务培训,保证产品使用及维护、维修、大修、数字化检验、拆解、回收的正确开展,从而保证服务质量;在产品实验阶段,利用数字化模型代替实物原型进行虚拟试验,在虚拟产品环境中,进行产品性能的试验分析。

(3)面向3D-PLM协同的物理产品质量控制。

装配制造和机加制造是航空复杂产品面向PLM协同的物理产品质量控制的重要环节。物理产品质量控制是在虚拟产品质量控制的基础和数据支持下,聚焦于产品制造过程所涉及的零部件、工序、物料、工装、夹具、设备、工位、工具等,并与现场生产信息采集反馈有机结合,反映产品物料流程、生产反馈、制造过程,并对基于3D产品模型和制造概念的产品和资源交互性进行动态评估,支持制造优化,实现真实产品的质量控制和追溯,并从制造过程中获取设备、零件、工作站、班次和包含员工的实时缺陷报告等,在产品发出前排除保证期索赔和返工的可能等。通过产品质量生命周期管理系统,采用标签、条形码、VIN码、批次、序列号和批量等,可以根据BOM定义单个零件或者组件以精确定义和追踪制造过程和产品<sup>[4]</sup>。

(4)面向3D-PLM协同产品生命周期质量管理技术基础。

面向3D-PLM协同需求,从产品质量管理业务的规划,产品需求、产品设计、产品工艺、产品制造、产品服务、产品回收各个阶段的质量控制与管理工作出发,以基于3D产品模型、PLM和供应链的设计、工艺和制造过程的协同工作和研制周期为目标考虑最优的解决方案,形成覆盖产品概念设计、产品设计、工艺规划、产品生产、质量控制、生产制造的质量管理协同工作模式,以集成产品、工艺和资源规划数据,支持产品PLM整个过程中的质量工作模式和流程。

航空复杂产品面向PLM协同产品生命周期质量管理涉及多厂所、多业务、多产品、多流程协同,并综合应用各种先进单元技术,必须建立面向3D-PLM协同产品生命周期质量标准规范体系,在各个阶段保证工作质量,如在设计阶段建立3D建模标准规范,使用自动化的3D模型定义检查工具,从源头保证设计建模质量。

(5)面向3D-PLM协同航空复杂产品生命周期管理平台框架。

基于3D-PLM协同平台,建立单一产品数据源和统一的用户权限、数据模型工作流程管理,实现面向3D-PLM协同产品生命周期质量管理体系与产品设计、工艺、生产制造、服务等业务部门的有效协同,确保产品研制数据的单源性、全面性和准确性,实现产品生命周期数据的统一管理和全面共享。在PLM内协同工作,并通过现场信息的采集,为生命周期内前一阶段提供反馈,从而改进各阶段的工作质量,实现生命周期内质量的持续改进与提升。

## 结论

目前我国航空复杂产品制造企业在PLM技术应用方面取得了一定的成果,在主机厂、所之间已经实现了基本的协同研制和生产,虽然这种协同模式未能包含诸如发动机和机载设备的供应商,但已在航空工业内

部探索了价值链前端的部分协同,同时也开展了PLM多项目并行协同的数字化平台建设,这些都为基于3D-PLM协同的产品生命周期质量管理奠定了良好的基础。目前,从国家层面已经将自主大型客机的市场瞄准国际市场,而民机的产品质量要求极为严格,这是保证产品具有市场的最重要因素之一,这也正是实践基于3D-PLM协同的产品生命周期质量管理的一个契机。

在实施3D-PLM协同的产品生命周期质量管理的过程中,需要从PLM协同的角度加强PLM业务系统的建设,保证基于3D-PLM协同的产品生命周期质量管理的航空复杂产品制造企业具有全过程数字化、全方位数字化和全产品数字化的特征,实现产品从市场需求开始,概念设计、初步设计、详细设计、试验仿真、生产制造、市场营销、售后服务、直至产品报废的全生命周期各个环节的数字化;保证产品涉及的供应链在整个业务过程中全面实现以3D产品为核心的数字化;产品本身及所包括的机械系统、发动机、光学仪器、强电系统、弱电系统、电磁等全部配套产品全部面向PLM协同的数据管理模式、形成单一数据源的全机BOM,不但在几何上,而且在管理信息上全部采用数字化方式描述,这是实施3D-PLM协同的产品生命周期质量管理的基础。在实施过程中,还要注重整个质量业务流程的优化,针对以3D产品模型为核心的数据管理,建立相应的业务流程和管理模式变革以及标准规范,将PLM协同的应用模式和管理思想融入其中,实现面向供应链、面向产品生命周期和全业务流程的质量协同。

本文共有参考文献4篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)