

先进飞机设计技术发展展望

宁振波, 张晓梅

(中航工业信息技术中心, 北京 100022)

[摘要] 从飞机研发全生命周期各个阶段研制内容和特点出发, 阐述了飞机设计的发展历程和各个研发阶段中飞机设计特点, 介绍了当今最先进的飞机设计技术, 并展望未来发展。

关键词: 可配置的数字化样机; 集成产品协同研发团队; 基于模型的定义; 骨架模型; 关联设计; 基于模型的系统工程; 智能设计

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.05.024



宁振波

中航工业信息技术中心首席顾问,
研究方向为智能制造技术。

装备制造行业的产品研制有 4 个关键的阶段: 方案论证、工程研制、批产交付和服务保障。方案论证包含两个阶段: 一是需求分析、概念设计; 二是总体的方案设计等。工程研制是指产品总体方案冻结后的产品研发阶段, 接着便可进入到生产阶段和服务保障阶段。这 4 个阶段关注的内容是不一样的, 因此指导方法和管理手段完全不同, 但是在系统工

程思想的指导下, 可以把这 4 个阶段统筹考虑。

飞机设计技术的发展

飞机设计经历了从二维图板绘制图纸, 到计算机绘制二维图纸, 到三维数字化样机设计, 再到全三维样机设计的演变过程。二维图研制模式主要是基于图纸的产品研发模式, 没有实现产品数据的充分共享和再利用、数据的关联管理、电子化审签、技术状态精细化管理等, 更谈不上报表的自动生成和自动传递。因此, 基于三维数字化样机的产品研发模式是产品研发的必由之路。

(1) 基于三维模型的协同设计。

基于三维 CAD 软件进行数字样机(Digital Mock-up, DMU)的协同设计, 解决了大量分析、仿真、计算、工艺、装配问题, 并基于 DMU 生成二维工程图。该模式基于产品结构进行产品数据的关联管理, 实现电子化审签和变更管理。由于在三维模型上表达不了用于工艺、制造和检测的全面信息, 仍然将二维图纸作为制造依据。

由于设计数据实现了集中统一管理, 可以有效完成数据共享和再利用; 而且有了数字化样机, 可以基于

集成产品协同研发团队(IPT)开展协同产品研发, 这是飞机设计技术的一次飞跃, 是以三维数字化样机为核心的产品研发模式, 已经解决了大量力学和几何问题, 实现了并行协同产品研发。

波音 777 飞机作为世界上第一个采用全数字化定义技术的大型工程项目, 成为 20 世纪 90 年代制造业应用信息技术的标志性进展。在协同工作的环境与系统中消除了 12000 处干涉问题, 设计更改和返工率减少 50% 以上, 费用下降 30%~60%, 并使分布在 60 多个国家的飞机零件供应商能方便地通过网络数据库实时存取零件信息^[1]。

(2) 全三维样机设计。

全三维样机设计技术在数字化协同产品研发平台上, 实现全三维样机协同设计和管理、基于产品结构的数据关联管理、基于三维模型的工艺设计和管理、基于三维模型电子化审签和变更管理以及技术状态的统一管理和控制; 实现了基于三维模型的一体化产品研制, 取消了二维图; 实现了技术状态的精细化管理和控制; 实现了数据的共享和再利用; 实现了并行协同产品研发。

以波音 787 为代表的新型客机研制过程中,全面采用 MBD 技术,将三维产品制造信息与三维设计信息共同定义到产品的三维模型中,摒弃二维工程图样,将 MBD 模型作为制造的唯一依据^[2]。伴随着国外飞机在国内转包生产,MBD 技术逐渐进入国内航空企业,各主机厂所也开始了 MBD 技术体系的不断探索,并致力于将 MBD 三维模型作为制造的唯一依据。

先进飞机设计关键技术分析

1 基于全局构型管理的 DMU 设计

(1) 完整 DMU 设计和管理。

完整 DMU 包含:产品结构+三维 CAD 模型+轻量化三维模型+模型属性信息+数据受控。为了实现产品全研制周期的无图化产品研发,需要定义完整的 DMU,并将数字化样机应用于产品研制的各个环节,实现基于三维模型的一体化产品研发。DMU 的数据源头是 MBD 模型,在 PDM 系统实施中,将对 MBD 模型进行有效管理。

为了确保工艺、工装、检验等部门能够有效利用设计环节发放正确的三维 MBD 模型,重要的一点是需要 PDM 实现基于配置的 CDMU (Configured DMU, CDMU) 管理,在给出一定的配置条件时,能够过滤出不同几何位置、不同架次等形式的 DMU,展开多种方式的协调工作,例如设计与制造之间的接口协调,制造与制造之间的交付状态协调。

针对配置好的 MBD 模型,确定型号的工艺分离面,定义装配工位、段位等,接收到设计数据以后还需要进行厂际交付状态确定等工艺规划工作。在 PDM 系统实施过程中,将利用 PDM 系统强大的基于可配置的数字样机管理能力,提供 3D 可视化、可交互环境下的工艺规划能力。

(2) 基于模型的产品配置设计和管理。

为实现对历史数据重用,需要对历史模型和设计规则、逻辑规则进行重用,最终实现可配置的产品。基于模型的产品配置是把具有模块化体系结构的产品,基于设计平台定义可创建、可配置、可验证的产品,通过创建可重复使用的产品模块,以及定义它们如何接合和装配,设计师即可快速创建和验证客户定制的任何产品。

从产品研制模式的演变过程(图 1)来看,基于模型的产品配置是满足个性化需求和快速配置的最佳方案,可实现以业务为驱动力的结构化产品选配,最终实现基于管理平台的企业级自顶向下研制过程。

2 基于 5 级成熟度并行协同设计

(1) 产品成熟度的定义。

根据飞机研发过程中产品数据完善程度,定义了飞机研发的 5 级成熟度(表 1)。

(2) 基于产品成熟度预发放的并行产品研发。

设计制造并行工程的开展很大程度上要借助于成熟度预发放管理来实现,成熟度数据预发放管理的主要目的是在设计数据正式发放之前,将达到一定成熟度的设计数据发布给相关业务部门,相关业务部门的工艺、工装、采购和制造等部门能够并

行地开展相关工作,同时对设计开展相应的审查工作,及早发现存在的问题,从而实现设计制造的并行工程,以加快飞机研制的进度^[3]。

3 基于骨架模型定义的在线设计

基于骨架模型的自顶向下(Top-down)设计是保证产品质量、加快产品开发速度、实现数字化协同设计的有效手段。自顶向下设计采用先确定整体基本参数,然后用三维骨架进行整体总布置、部件总布置,最后基于骨架模型进行零部件设计和绘图的过程。通过基于骨架模型的自顶向下设计方法,设计意图的变更可以自顶向下传递,直到传递到最底层的零件和图纸,从而使产品的修改性大大提高,修改的工作量也大大降低,同时还能保证各部件设计的一致性。基于骨架模型的自顶向下设计的关键在于建立一整套适合于三维产品设计的自顶向下设计方法并采用三维骨架模型控制和协调产品设计,实现设计信息的正确传递,加快协调速度和准确度;利用自顶向下传递设计参数和约束,加速产品修改,实现快速设计迭代。

骨架模型作为三维协同设计的核心纽带、信息交换及传递的载体,通过原有文本任务书的融入,真正实

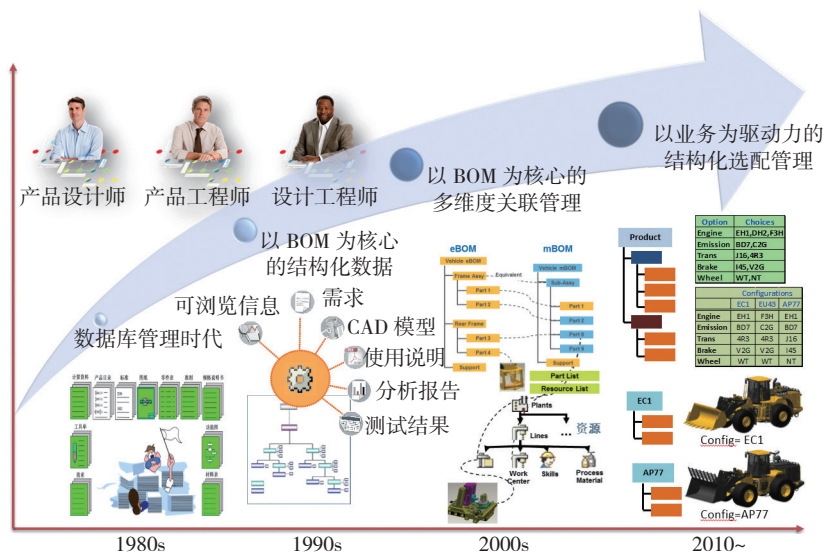


图1 产品研制模式的演变

Fig.1 Evolution of product development mode

表1 飞机产品研发的5级成熟度

成熟度等级	工程设计内容描述	主要指标	制造工程内容描述
1	(1)定义各部件IPT技术要求、制造要求、质量要求、交付清单; (2)各部件WBS、SOW、IWS	建立零部件,零部件编号、名称和功能已经确定	完成工艺总方案,编制工艺总流水
2	(1)开始设计、定义零件特性、种类、材料、结构形式、主要尺寸、重要公差; (2)对主要通路进行协调	(1)完成零件材料和外廓尺寸定义; (2)确定部组件空间占位和基本外廓尺寸	制定材料和物资产品的采购计划
3	(1)零部件接口尺寸协调; (2)编制长周期零件制造清单、锻铸件清单; (3)编制初始BOM; (4)编制新材料使用清单	(1)完成零件接口尺寸协调; (2)完成系统管路和线束敷设	完成工艺总布局设计,进行关键工艺技术攻关
4	(1)完成产品结构(标准件、成品); (2)全机装配和检查,定义装配属性、要求、间隙、公差和技术要求; (3)新研标准件规格、数量清单	(1)完成零件详细设计、三维建模; (2)长周期零件预发放	完成工艺工装详细设计
5	(1)补充二维图样定义; (2)产品定义数据审签	完成零部件分析、装配检查和工艺审查	完成工艺工装最终设计

现任务书的三维化,保证流程受控,并保持与设计数据的关联、变更、协调等一致。为了建立基于骨架模型的三维任务书研发模式,需要在实际型号设计中自顶向下的设计指导规范加以应用和掌握,同时总结出具备可操作性的三维协同设计规范,建立单位内标准,进而推广应用。

4 面向制造检验过程的MBD设计

MBD技术是随着数字化设计与制造技术的广泛应用,在三维CAD技术、设计制造一体化技术日趋成熟的基础上发展起来的。在许多情况下三维MBD模型为技术交流和信息传递的主要方式,用于开展各种设计和验证活动。因此,基于三维模型的MBD产品研发技术将逐渐成为产品研制的主流模式^[4]。

(1)基于模型定义的规范。建立规范的三维模型定义过程和使用流程,包括设计信息的传递、产品设计的流程、CAD工具使用的标准化。产品设计不仅仅是产品知识的体现,在CAD工具使用上也应该有标准的流程与方法。通过基于模型设计的应用制定相应的规范,包括基础标准规范、业务操作规范、设计与工艺流程规范等。

(2)基于模型的三维标注。基于模型的三维标注是实现数字化制造的基础,它以数字化方式对产品进行准确描述。通过对三维模型的标注和分类组织管理,完整准确地表达产品零部件本身的几何属性、工艺属性、制造信息、质量检测属性以及管理属性等信息,满足制造过程各阶段对数据的需求,保证产品设计制造过程中的协调性。

(3)基于模型的设计和检查。基于模型的三维产品设计过程中,需要考虑产品的工艺性、制造性和维护性,实现面向工艺、制造和维护的三维模型设计。针对已经完成的三维模型进行三维模型检查,包括设计审查、工艺审查、标准化审查等,确保三维模型满足设计要求、工艺要求、标准化要求和维护要求等。

(4)基于模型的检验。在三维工程图模型上标注有检验信息,在工艺设计过程中为具体工艺指派设计模型后,可以将三维工程图上标注的检验信息导入到具体工序上,在输出工艺卡时也输出这些信息。检验人员通过浏览、剖切、测量获得三维模型的具体形状和大小,快速理解设计模型。检验人员通过浏览工艺卡获得需要检验

的尺寸,参照工艺卡进行检验。

5 基于关联技术的数字样机更新设计

关联设计技术是飞机先进设计技术之一,在新型飞机设计过程中发挥着重要作用。通过定义飞机设计总体参数及传递上下游和各专业之间接口关系的骨架模型,实现设计信息的有效传递、制约和控制,实现上下游和各专业之间的关联设计。

飞机关联设计需要定义关联设计规范,建立关联设计环境,通过PDM系统实现关联信息的管理。

(1)关联设计信息的定义。在三维设计过程中,通过参数化设计技术建立模型之间的相互依赖关系,将上游设计的几何特征(如点、线、面、基准、轴、坐标系等)作为驱动参数,建立模型与模型之间的驱动关系,从而实现上下游设计间的关联。关联设计的核心是基于模型划分的理论模型(也称骨架模型)和接口体系定义。接口就是下游设计参考上游设计的几何元素,把决定设计对象的具有联系的接口的集合称为设计对象的骨架,对应的数模称为骨架模型^[5]。

(2)关联设计信息的传递。在飞机设计中,借助数字化技术,通过骨架模型建立、控制和传递这种影响关系,实现上下游设计信息的快速传递与更改驱动,实现了各个专业的自动化关联设计,保证了结构、系统布置设计数据的唯一性和一致性。骨架模型的几何元素与共享机制为数据共享和自顶向下的设计模式提供了强有力的技术支撑,也有效支持了飞机结构和系统从总体布置到零件设计、装配设计采用自顶向下的设计方式,大大提高了协同设计的效率和质量。

关联技术使得上下游专业设计数据的协调性、一致性得到保证,关联模型的更改信息得到自动传递,并在拓扑关系不改变情况下实现零部件模型的自动更改,成为驱动多专

业并行设计、实现快速设计迭代和工程更改的重要技术手段,它的采用减少了协调与迭代时间,提高了协调效率,缩短了设计周期。

6 基于虚拟现实的多专业仿真设计

基于虚拟现实的多专业仿真设计以全三维模型为核心实现全型号的数字设计、计算、分析、仿真以及产品优化设计,构建面向设计工程师的敏捷分析模式,应用 MCAD 和 CAE 的集成应用能力,实现设计、计算、分析、优化一体化。

在型号研制过程中,基于模型的三维数字样机不断完善,仿真验证和评审就应该展开,而不是等到设计完全结束后再去检查和验证。虚拟样机的验证和分析应该用在从方案论证、生产、装配到维修培训,以及商务过程中的一系列活动中。当虚拟模型用来代替实际模型验证设计时,通过可配置的数字化样机能力,在数字化环境下实现飞机总体、机电、航电、液压、飞控等多专业的设计协调及模拟装配,从而提前进行质量验证。

结合最佳性能的平台、图形集群多通道设备、投影系统、虚拟外设、全人体追踪设备等的联合使用,构建虚拟产品会议中心(图 2),建立能让小组聚集在一起进行大规模设计检查的理想方法,从而能让多个用户同时完全投入相同的虚拟环境中;营造一个可以为内部管理、合作伙伴和客户提提供多功能描述的合作环境;提高发现和解决产品问题的能力,工程师可以从用户的角度而不必使用

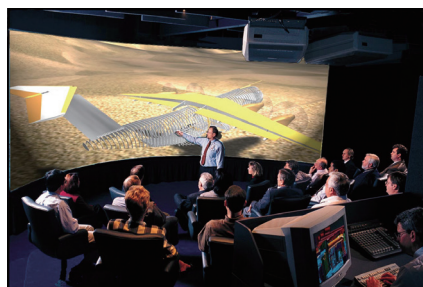


图2 基于虚拟样机的设计评审和产品展示

Fig.2 Design review and product display based on virtual prototype

任何原型法来设计虚拟产品;缩短制造过程,提高利润率,并最终提高产品的整体竞争力。

7 基于模型的系统工程设计

飞机研发涉及总体、结构、气动、强度、机械、电子、电气、软件等诸多学科技术运用和集成优化,融合了可靠性、维护性、保障性等多类工程专业的切入和开展,其系统内部体系结构及与外部背景环境的相互关联中充分体现“系统之系统(System of Systems, SOS)”的本质属性。在未来联合作战以及商用航空通勤的运行概念中,飞机利益攸关者的要求和需求不断增加,系统内部及与背景环境的交联关系的复杂度不断提高,系统和子系统设计与综合的复杂度和风险不断增大,并且随着系统智能化要求越来越高,传统的基于文件的系统工程已经难以驾驭需求定义、运行方案设计、功能设计、架构设计、方案权衡等过程,必须引入和开发支撑飞机创新的开发方法论、流程集和工具软件,基于模型的系统工程就是其中一种先进方法和实现模式。

基于模型的系统工程(Model Based System Engineering, MBSE)实施的目标是建立健全要素完整的、面向发展的基于模型的系统工程框架,

通过该框架支撑业务全面、协调、可持续发展。通过导入基于模型的系统工程方法论与最佳实践,在飞机开发方案阶段实现详实的需求定义与系统功能设计,并进行架构设计与综合,生成系统需求、功能与架构基线,产生需求规格、产品规范、接口控制文档等。MBSE 强调场景驱动的需求捕捉和分析,通过建立需求、功能与架构模型,实现从需求到功能、架构的分解与分配,通过模型执行实现系统需求和功能逻辑的验证与确认。在产品生命周期中 MBSE 向后衔接系统仿真和产品详细设计,指导和控制各个工程技术、专业工程领域的设计、综合与验证,将构成系统的元素加以合理的定义和配置,达到系统整体功能和性能指标的优化^[6](图 3)。

MBSE 应用是一个较为长期的过程,为了实现最终目标,有必要采取渐进式、分阶段建设,每阶段解决一部分问题,见到一定的效果,实现特定的目标。分阶段建设可以降低实施风险,避免突然大范围调整设计人员工作流程的情况,有利于系统工程的稳步推进^[7]。

未来发展

随着信息技术和工业技术的发展,飞机设计技术也将越来越智能



图3 基于模型的系统工程

Fig.3 Model based system engineering

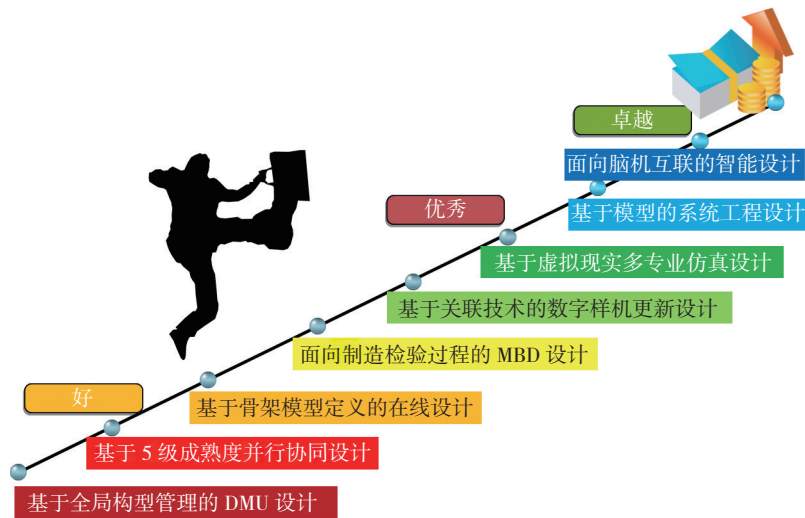


图4 飞机设计技术的发展和展望

Fig.4 Development and prospect of aircraft design technology

化,面向脑机互联的智能设计将是未来飞机设计的发展趋势(图4)。

2013年德国工业4.0出现以后,在网络化、数字化基础上的智能制造已经成为工业热点,而智能制造是以智能设计为基础的。如果说现在的设计还是基于鼠标、屏幕、各类大型CAD软件的手工设计,叫做“所见即所得”的话,那么,下一步为简化设计、工艺、制造工程师的工作,可以用“所言即所得”的方法,最终可以发展到“所想即所得”。这些并非只是梦想,按照TRIZ创新理论的思想,所有人类产品的发展都是基于物质、能量以及信息^[8]。从固体到液体到气体,最高境界就是场^[9],按照最新人工智能的进展情况,用脑电波(电磁场)控制设计已经不是一个梦想,其基础是知识管理。

结束语

航空工业被称为工业之花,许多技术往往是在航空领域率先得到应用和发展,信息化技术的发展近年来也对航空技术的发展起到了很大的促进作用。文中阐述了当今最先进的飞机设计技术及未来发展趋势,希望能对未来飞机的研发提供参考,也希望对其他行业的产品研发提供借鉴,推进制造业产品的研发。

参考文献

- [1] 范玉青. 现代飞机制造技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2000.
FAN Yuqing. Modern aircraft manufacturing technology[M]. Beijing: Beihang University Press, 2000.
- [2] 范玉青. 大型飞机制造数字化工程[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
FAN Yuqing. Large aircraft manufacturing

digital engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.

[3] 田富君,田锡天,耿俊浩,等. 基于模型定义的工艺信息建模及应用[J]. 计算机集成制造系统,2012,18(5):913-919.

TIAN Fujun, TIAN Xitian, GENG Junhao, et al. Modeling and application of process information based on model definition[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012,18(5):913-919.

[4] 余志强,陈嵩,孙炜,等. 基于MBD的三维数模在飞机制造过程中的应用[J]. 航空制造技术,2009(S2):82-85.

YU Zhiqiang, CHEN Song, SUN Wei, et al. Application technology of 3D digital model based on MBD in aircraft manufacturing process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(S2):82-85.

[5] 刘俊堂,刘看旺. 关联设计技术在飞机研制中的应用[J]. 航空制造技术,2008(14):45-47.

LIU Juntang, LIU Kanwang. Application of association design technology in aircraft development[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(14):45-47.

[6] 鄢永军. 推动基于模型的系统工程在航空型号研制中的应用[N]. 中国航空报,2013-10-17(T03).

QIE Yongjun. Application of model based system engineering in aviation model development[N]. China Aviation News, 2013-10-17(T03).

[7] 鄢永军. 体系化推进基于模型的系统工程[N]. 中国航空报,2014-06-19(T03).

QIE Yongjun. System based model based system engineering[N]. China Aviation News, 2014-06-19(T03).

[8] 赵敏. TRIZ入门及实践[M]. 北京:科学出版社,2009.

ZHAO Min. TRIZ introduction and practice[M]. Beijing: Science Press, 2009.

[9] 赵敏. TRIZ进阶及实战[M]. 北京:机械工业出版社,2015.

ZHAO Min. TRIZ enhancement and practical applications[M]. Beijing: China Machine Press, 2015.

Development and Prospect of Advanced Aircraft Design Technology

NING Zhenbo, ZHANG Xiaomei

(China Aviation Industry Information Technology Center, Beijing 100022, China)

[ABSTRACT] Based on the contents and characteristics of each stage of aircraft development life cycle, the aircraft design development process and features are expounded, meanwhile the most advanced aircraft design technology, and the future development are described.

Keywords: CDMU; IPT; MBD; Skeleton mold; Associated design; Model based system engineering; Intelligent design

(责编 李丹)