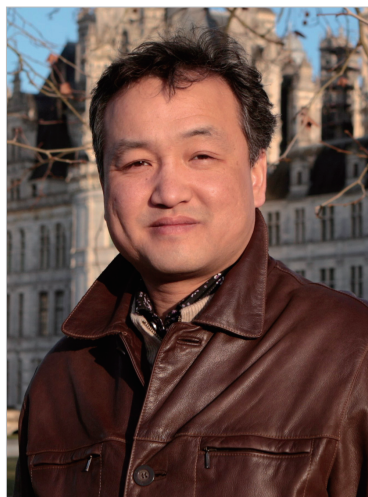


# DFMA技术在航空工业中的应用

## Application of DFMA in Aviation Industry

北京理工大学机械与车辆学院数字化制造研究所 张旭



张旭

工学博士,副教授,就职于北京理工大学机械与车辆学院数字化制造研究所。主要研究方向为基于特征的产品数字化建模、面向制造的特征识别与可制造性分析、协同产品开发、PLM等。

飞机作为一种大型的复杂产品,由于其安全性要求高,使用年限长,需要满足不同使用条件和环境的要求,历来对性能、质量、可靠性等都有严格的要求。各航空企业之间的激烈竞争使航空企业必须以更短的时间、更低的研制成本完成飞机的研制和生产,尽快推向市场。随着各国

随着国际航空业竞争的日益加剧,DFMA已经成为国际航空企业寻求生存与发展、提升竞争能力的有效手段。我国航空企业尽管还处于发展和起步阶段,飞机中的许多核心技术、核心部件和关键材料及制造技术还有待突破,实施DFMA,从产品生命周期的全局优化设计,才能真正提升并增强我国航空工业在制造领域的优势,增强我国航空工业在国际上的竞争力。

经济形势的严峻,不管是军机还是民机,都要求对飞机的总拥有成本(Total Cost of Ownership, TCO)进行控制,包括用户的采购成本、使用成本以及维护成本等,提高飞机的可承受性。由于世界各大航空企业一般都采用全球合作的生产模式,加上飞机的制造过程极为复杂,使对飞机制造成本控制更加困难。

世界各国的航空企业都在探索各种先进的设计和制造模式,采用先进的材料与制造工艺技术,建立全球的合作与协同制造网络,以保持企业的竞争优势。在这种竞争压力下,采用面向制造与装配(Design for

Manufacturing and Assembly, DFMA)的设计策略,通过实施并行工程,实现减低制造成本、缩短产品开发周期、提高客户满意度的目标,已经成为世界各大航空企业必然的选择。

### DFMA 技术概述

#### 1 DFMA 技术内涵

面向制造与装配的设计与精益制造、质量工程等一样,是一种设计理念。DFMA强调在产品设计的各个阶段,对产品加工、装配直至后续维护等进行综合设计和优化,提高产品的可制造性、可装配性、可维护性等。产品的可制造性、可装配性在我

国的工业界一般称为结构工艺性,包括面向机加、铸造、焊接、压力成型等各种单元加工的制造工艺性以及在产品部装、总装阶段的装配工艺性、装配准确性和装配协调性等。

实施 DFMA 的基本思想是通过减少零件数量、简化产品结构,实现减少单个零件的加工时间和总的装配时间,从而减少整个制造成本的目的。DFMA 适用于任何企业和产品,尤其对飞机等大型复杂产品可以起到显著作用。实施 DFMA 理念的企业强调在设计过程中采用并行工程方式,以保证产品的质量能够由设计师及其他开发人员共同实现和保证。因此 DFMA 也被认为是并行工程的核心技术之一。

## 2 DFMA 技术的分类

DFMA 强调在设计各个阶段,尤其是设计的早期,通过建立并行工程团队,使产品设计人员能够对关于材料选择、制造工艺、装配过程、维护过程等进行同步的设计与优化,以减少制造和装配时间,从而降低生产成本,提高产品质量和可靠性。

DFMA 根据所达到的目标,可划分为面向制造的设计(Design for Manufacture, DFM)、面向装配的设计(Design for Assembly, DFA)、面向测试的设计(Design for Testing, DFT)、面向服务的设计(Design for Service, DFS)、面向环境的设计(Design for Environment, DFE)等。其中 DFM 是根据企业自身及供应商的工艺水平和制造能力,综合考虑零件的设计对零件制造过程中材料处理、加工成型、质量检验等环节的影响,通过对材料选择、结构设计、尺寸公差等的改进和优化,使零件能够在企业已有设备资源条件下,经济、高效、高质量地制造和生产。采用 DFM 技术,可以在设计阶段对不同设计方案进行制造时间和成本的快速定量分析,比较与评价各种结构设计与工艺方案。设计人员根据 DFM 评价的结果,对

零件进行及时改进设计,使零件在满足性能指标的同时,具有最好的加工工艺性。DFA 是针对产品在制造过程中的装配和检验,以及维护过程中的拆卸和组装等操作,采用规划、评价、仿真等技术手段对装配结构进行分析、评价,并进一步提出改进建议。

## 3 实施 DFMA 对产品的影响

DFA 技术在 20 世纪 70 年代初由美国 Boothroyd 教授提出,其最初的目的是希望通过减少零件的数量以达到减少装配环节的目的。但是,在企业中应用 DFA 技术后发现,采用 DFA 技术最大的成果是减少了零件的数量,从而减少了零件的制造时间和成本,并进一步减少了装配时间和成本。因此,实施 DFMA 必须首先从产品的总体结构出发,通过材料选择、结构优化,尽可能减少零件的数量和种类,并尽可能采用标准化的零件和结构,最终实现降低加工与装配时间的目标。

因此,DFMA 的实施贯穿了产品设计的全过程,既包括了涉及产品总体的宏观 DFM 技术,如产品平台的构建、模块化设计、供应链构造等,也包括了与局部的零部件的形状、尺寸、联接方式等有关的微观层面的 DFM 技术。在总体或概念设计阶段,可以通过对产品总体布局的调整和优化,如采用一体化设计或模块化设计的思想,采用新型材料的功能复合部件的设计,大幅度减少零件的种类。在详细设计阶段,根据制造工艺和设备要求,对零部件的形状、连接方式等进行优化,达到减少制造难度,缩短加工与装配时间的目标。DFMA 可以应用于新产品开发阶段和已有产品的改型优化中。在新产品开发中,设计师在概念设计中通过减少零部件数量、简化产品结构的方式,来保证产品的设计指标和性能要求,并使产品方便装配。在产品的改型中,设计师通过重现设计或优化已有的组件,以优化产品的性能,并简

化制造和装配环节。为了最大程度地应用 DFMA 技术,要求设计师必须具有对制造工艺、材料等领域的相关知识,设计与工艺人员必须紧密合作以确定最佳的设计和制造方案。

## 4 DFMA 的技术方法

在具体的 DFMA 的实施中,通常采用以下技术方案。

- 建立并行工程团队,采用设计制造一体化的设计模式。

通过建立并行工程团队,由设计与制造工艺人员等共同完成产品的设计,并对产品的材料选择、加工工艺、装配过程、检验方法、维修与维护过程等进行综合的分析。该方法也称为工程与制造同步驱动的设计(Engineering and Manufacturing Driving Design)。

- 建立 DFMA 的设计准则,以手册、标准规范的形式指导设计。

总结归纳 DFMA 的设计准则,指导设计人员的设计。常用的设计准则包括最少零件数原则、标准化与通用化设计、易于加工的零件设计、满足经济加工能力的精度设计原则、易于装配操作的设计原则(方便定位、易于搬运、防差错设计、方便连接与紧固等)、模块化设计、便于自动化制造、便于检验的设计、稳健设计方法等。设计准则通常以手册、规范等形式发放给设计人员进行参考。

- 建立 DFMA 的指标体系和评价准则。

实施 DFMA 的一项重要工作就是在对已有产品进行大量统计分析的基础上,建立适合于企业自身产品和生产特点的 DFMA 评价指标体系和评价准则,如典型零件的加工时间、典型的装配操作时间、材料成本、单位工时成本等。通过建立适合于企业自身产品特点和制造资源能力的评价指标体系和准则,使设计与工艺人员能够快速、准确地对产品进行评价。如最初的 Hitachi AEM (Assembly Evaluation Method) 方

法和 Boothroyd DFA 方法,以及之后日本的 DAC (Design for Assembly Cost-effectiveness)、英国的 Lucas 以及德国的 AOPD (Assembly-Oriented Product Design),都是针对产品装配环节提出的对产品的评价指标和准则。Boothroyd DFA 方法由美国的 G. Boothroyd 和 P. Dewhurst 共同提出,该方法的基本内容与步骤如下:(1)选择装配方法;(2)计算理论最少零件数;(3)估算实际装配时间和成本;(4)计算 DFA 指标;(5)提出改进修改建议。上述方法根据零部件的材料、形状、装配关系等对影响装配操作的各项影响因素进行打分评价,最终通过对多个方案的比较,进行可装配性的评价。

· 采用计算机辅助分析工具,对零件的形状、装配过程、制造成本等进行分析,对多种设计方案进行比较和优化。

目前常用的工具包括 BDI 公司的 DFMA 系列软件中的 DFM Current Costing,可以实现对零件加工成本的计算,DFA Product Simplification 实现对装配结构简化的分析(图 1);Galorath 公司的 SEER for Manufacturing(SEER-MFG)可以实现对制造成本的分析(图 2);Geometric 公司的 DFMPPro 可以实现与 CAD 环境集成的机加、注塑模具、钣金成型等零件进行几何可加工性的检查和析等(图 3)。

### 国外航空企业中 DFMA 的应用

DFMA 技术受到各国政府和研究机构的重视,如美国 DoD、DARPA、NIST、NSF、ONR 等长期以来一直支持开发 DFM 等相关技术的研究。在许多国外大型的航空企业中 DFMA 技术也已经得到多年的应用,并取得了显著的效果。

在洛克希德·马丁公司 F-35 的研制中,提出了设计时间减少 50%、

制造时间减少 66%、加工时间减少 90%、分立零件减少 50%、维护支持时间减少 50% 等严格且苛刻的目标。因此,在 F35 中全面应用了大量先进的设计技术、数字化技术以及新材料、新工艺。并采用了工程与制造同步驱动的 DFM 的设计模式,最终实现了将零件数量减少 50%,加工时间减少 95%,制造成本降低 50%,取消了装配紧固件和装配中的钻孔,使制造周期从 15 个月缩短到 5 个月,达到了每月 17 架次的生产能力。

如在波音公司,其制造过程中的

一个重大难点是孔加工。以往波音公司每天大约需要加工 120 万个孔。而通过采用 DFM 的设计策略,以焊接工艺替代了原来的铆接和连接方法,不仅减少了大量孔加工的大型设备,同时还提高产品质量约 20% 以上。

在麦道 Northrop B-2 轰炸机的研制中也大量采用了基于可制造性的设计、制造一体化集成技术,降低设计和制造因返工、废品和缺陷的故障率 60%,缩短研制周期 50% 以上。在 AH64D 阿帕奇直升机研制

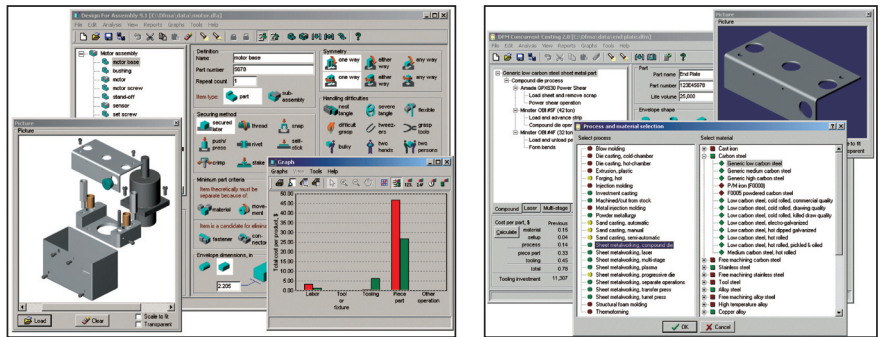


图1 DFMA公司DFM Current Costing和DFA Product Simplification使用界面

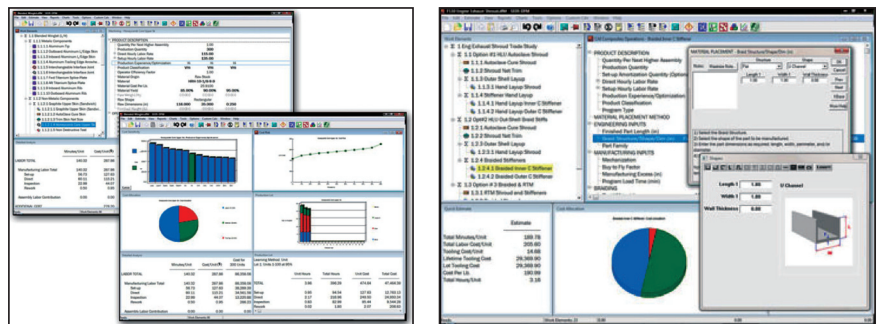


图2 Galorath公司的SEER for Manufacturing使用界面

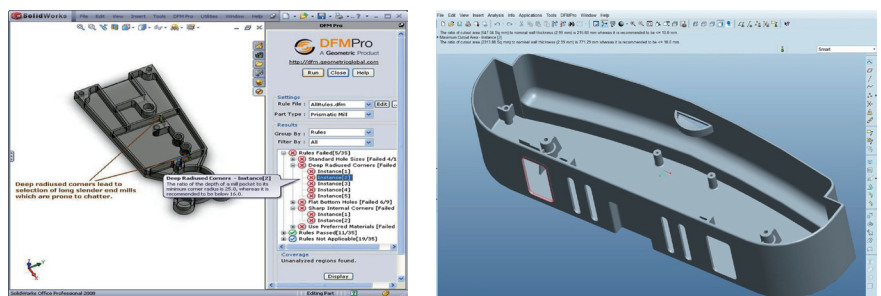


图3 Geometric公司的DFMPPro机械加工界面

中采用了可制造性分析技术,使产品在高速切削、复合结构装配和铝合金的超塑成型加工中具有良好的结构,提高了产品的研制速度、制造质量和设备的利用率。采用 DFMA 软件使飞行仪表盘的设计零件数从 74 减少到 9,加工时间由 305h 减少到 20h,装配/安装时间从 149/153h 缩短到 8/153h,减少总成本 74%。

据 BDI 公司对超过 100 家采用 DFMA 技术的公司的统计,采用 DFMA 技术可以帮助企业平均减少装配时间 13%,缩短加工周期 17%,减少零件数量和相关成本 9%,实现在质量和可靠性方面的改进 22%,缩短上市周期 39%。

## DFMA 在我国航空工业中的应用现状

我国航空制造业正在经历快速的发展,已经在核心技术和关键零部件上取得了重大突破,并建立了包括先进材料加工、数字化柔性装配等技术在内的飞机数字化制造体系。数字化设计制造、并行工程、设计制造一体化等技术在航空企业中得到了广泛应用,基于 MBD 的三维数字化设计与制造、数字化预装配、制造过程仿真等先进技术的应用为企业提升设计和制造能力提供了有力的支撑。而 DFMA 作为并行工程的一项核心技术,也日益得到航空企业的重视。

但是由于 DFMA 技术的应用和实施涉及到设计理论、工艺技术、制造能力、信息化基础、管理体制等诸多方面,在我国航空工业整体能力和水平与国际先进企业还存在一定差距的情况下,航空企业在实施 DFMA 中还存在以下的困难。

(1) 设计水平和制造能力的不足制约了对设计的持续改进能力。

我国民用航空还处于起步阶段,在基础的设计理论、工艺技术和工业基础等方面还存在一定差距。在实

施 DFMA 中,不管是根据制造能力进行设计改进,还是对改进的材料和结构采用新的制造工艺和设备,都需要坚实的设计理论和制造能力做支撑。如波音公司通过采用先进的搅拌摩擦焊技术替代了传统的铆接,从而减少了大量的孔加工;采用新型复合材料,减少了生产现场大型制造设备的使用;采用激光定位技术大量替代了传统的定位夹具和装配工具,这些都是以其雄厚的设计基础、材料技术和先进制造能力为基础的。

(2) 我国航空企业还处于发展阶段,产品制造周期与制造成本等在设计中还未得到足够的重视。

我国航空企业目前面临的迫切问题依然是核心技术的突破和关键零部件的制造,技术突破和产品研发成功的紧迫性远高于对成本、周期和效率的要求。因此,尽管一些企业采用了并行工程、设计制造一体化等技术,但取得的成效极为有限。随着我国航空业的不断发展,必将逐步走入国际竞争,届时将对成本和效率有更加严格的要求。实施 DFMA 将是我国航空制造业发展的必然趋势。

(3) 缺乏有效的手段和方法,难以保证 DFMA 分析的准确和科学。

在我国的航空航天等行业都建立了与结构工艺性相关的标准规范、设计指南和程序文件,对设计方法、设计流程等进行规范,建立了各研制阶段的工艺检查和会签制度,由工艺人员参与产品设计,发现设计中的可制造性问题,提出改进的意见和建议。同时借助加工仿真、虚拟装配等对制造过程进行仿真分析,对制造过程进行验证。但是,工艺检查和工艺会签主要基于工艺人员的经验,对可制造性难以严格、科学的定量评价;仿真分析也一般是在详细设计的后期,除非发生重大的制造问题,一般也难以对设计进行改进。因此,开发支持研制各个阶段的数字化 DFMA 工具,实现对可制造性知识和经验的

积累,实现对三维模型的定量分析,实现对成本、制造周期等的准确评价,是保证 DFMA 成功应用于产品研制的重要条件。

## 结论

随着国际航空业竞争的日益加剧,DFMA 已经成为国际航空企业寻求生存与发展、提升竞争能力的有效手段。我国航空企业尽管还处于发展和起步阶段,飞机中的许多核心技术、核心部件和关键材料及制造技术还有待突破,实施 DFMA,从产品生命周期的全局优化设计,才能真正提升并增强我国航空工业在制造领域的优势,增强我国航空工业在国际上的竞争力。

DFMA 并不是一项独立的技术,需要在先进的设计理论、新材料、新工艺等基础技术的支撑下,通过改变现有的管理体制和流程,改进产品的评价指标体系才能取得成功。当前数字化设计制造技术的发展为 DFMA 技术的发展提供了广阔的前景。基于模型的定义(MBD)、数字化样机、虚拟制造与仿真等技术,为进行科学、准确的可制造性、可装配性评价提供了技术基础。目前,采用数字化技术进行 DFMA 相关技术研究的领域主要包括总体方案设计中的可制造性分析与评价;基于可制造性约束和知识的产品建模技术;面向制造的模型检查与验证技术;针对各类制造工艺的结构件可制造性分析与评价;飞机数字化预装配与 DFA 分析;虚拟装配与仿真技术。

从“十五”、“十一五”到“十二五”,国家已经在相关领域资助了大量的 DFMA 基础研究和工程应用项目。随着对 DFMA 认识的提高,以及技术的不断成熟与完善,DFMA 技术必将为我国航空制造技术的快速发展做出贡献。

(责编 良辰)