

# 复杂重要产品AMRO 技术研究

## AMRO Technology Research for Complex and Critical Product

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 赵 杰 常智勇 孙惠斌 莫 蓉



赵 杰

讲师, 在职博士生, 硕士毕业于西北工业大学航空宇航制造工程专业。现为西北工业大学机电学院教师, 研究方向为航空复杂产品数字化设计制造技术。

以航空航天装备、大型武器装备等为代表的产品在复杂性方面具有典型的产品结构复杂、设计难度大、制造工艺复杂、售后维护要求高等特点; 同时在重要性方面也具备服役场所重要、服务对象重要等特点。这些产品在生命周期过程中对制造、使用、维护的要求极高, 在产品的生

由于复杂重要产品的特殊性质, 其对装配 / 维护 / 维修 / 大修提出了更高的要求。因此, 进行 AMRO 技术研究、系统开发和实施应用, 可以有效提高我国军工行业的产品制造质量, 提升服务水平、保障装备的完好率, 必将对我国军事装备的制造、使用、维护产生深远的影响。

命周期中需要进行例行维护和多次维修及大修 (Maintenance Repair And Overhaul, MRO) 等活动, 以保证其在服役生命周期中的性能始终满足设计要求<sup>[1-2]</sup>。

复杂重要产品的特点, 可以从 2 个方面进行描述, 即复杂性和重要性, 也可分别称之为复杂产品和重要产品。在复杂产品中, 存在着一类产品, 其服役场所和服务对象都比较重要, 作者将其称之为重要产品, 例如航空发动机、大型武器装备等。既复杂又重要的产品, 作者将其定义为“复杂重要产品” (Complex & Critical Product, CCP), 定义如下: 复杂重要产品是指那些产品结构复杂、设计 / 制造过程复杂、服役场所和服务对象重要、维护维修要求高、失效后果严重的一类产品。

与一般产品比较, CCP 的特点体现在如表 1 所示的若干方面。从中可以看出, CCP 的结构复杂, 设计和制造过程复杂, 并且服役服务的场所很重要, 需要进行日常维护、定期大修, 维修技术要求高, 需要专业知识支持。

对工业产品按照产品的复杂度和重要性进行定位, 如图 1 所示, 则 CCP 位于右上角虚线框内, 其研发、制造和维护水平体现了国家的综合工业实力。

### AMRO 技术

MRO 技术源自欧美等西方发达国家, 其本质在于对复杂重要产品的服役全生命周期过程提供维修技术方法、维修数据的支持。对于 MRO 技术的研究可以分为 2 个主要方面。

表1 复杂重要产品特性

对比项	复杂重要产品	一般产品
客户需求	复杂、多变、不固定	相对简单、固定
产品设计	过程复杂,频繁迭代,多学科参与,设计周期长 <sup>[3]</sup>	快速设计、变型设计
产品结构	结构复杂,部件和组件间关系复杂,零件数目数千到上万	结构相对简单,数目较少
生产准备	生产准备周期长,需要专用工装等	一般为通用制造,生产准备周期短
制造工艺	复杂难加工,常见特种工艺加工	常规加工方法
制造流程	制造工艺流程复杂,涉及专业部门繁多	工艺流程相对简单
试验/测试	需要专业实验测试硬件和软件,试验数据需要分析	简单试验测试
产品作用	关系人身安全、军事安全、国家安全	一般用途/民用
服役场所	航空、航天、船舶、武器等	一般/民用
失效后果	重大经济损失,严重威胁使用者和环境安全	经济损失
维护维修	需要日常维护、定期检修/大修,进行寿命控制	一般日常维护或免维护
典型产品	飞机、航空发动机、航天产品、大型武器装备	日常/民用产品

其一是重点研究复杂装备的维修技术、方法、材料、工艺等,例如飞机用复合材料的修补技术、航空发动机的在翼维修技术;其二则关注在复杂产品的全生命周期过程中,采用数字化的方法和工具,来支持产品设计、制造、装配、维修、排故、大修、备件、报废等业务的信息收集和共享,以提高复杂产品的研发能力和服役维修水平。本文的研究重点集中在后者。

产品装配环节在复杂产品的全生命周期中处于一个非常重要的地位。首先,装配是产品交付之前的最后一个制造环节,在上游机加环节产生的质量缺陷必须在装配过程中检查出来并予以修复;其次,产品的装机技术状态也在装配环节进行维护,例如产品的单台份数据、零部件的串换件状况、执行的工艺更改措施等。对于复杂的多型谱产品而言,装配环节的技术状态控制显得尤为重要,必

须落实技术状态控制的“文文相符与文实相符”;最后,与一般产品中由第三方负责大修不同,复杂重要产品的大修操作都由原生产厂商负责,而大修的第一步是产品分解,一般都在制造装配部门完成,分解之后的检查、排故、转工修理也由装配部门发起和控制。维修之后的重新装配也在装配部门完成,同样需要执行与新产品装配相一致的质量和过程控制程序。

因此,装配在复杂产品的MRO过程中地位突出,作用显著,是MRO过程中

必不可少的技术环节(如图2所示)。在构建MRO支撑和管理数字化平台中,也必须包含对于装配的过程和质量控制。作者认为,应对MRO技术的内涵和外延进行适当拓展,将装配环节纳入其中,形成完整的覆盖复杂产品服役全生命周期的AMRO(Assembly/Maintenance/Repair & Overhaul),即装配/维护/维修/大修解决方案。

### AMRO 技术框架

为了涵盖从装配开始到产品服役过程的全过程,AMRO技术框架从3个层次上进行支持,如图3所示。

基础数据层管理所有与产品装配过程、质量控制、服役状态、寿命控制、试验测试等相关的基础数据,都形成数据库和

知识库,并且以单台份BOM的形式进行数据组织、管理和共享;这些数据库和知识库,通过存储更加细粒度的信息,以支持进行精确细致的比对分析。这些数据库与知识库的集合,形成了产品的电子化和结构化的档案。

在业务逻辑层,以底层基础数据库为支撑,全面管理复杂重要产品AMRO过程中的各种业务活动逻辑。各项业务逻辑分为三条主线:

(1)支持AMRO的生产过程控制。根据产品的服役状态、维修记录以及寿命数据,科学合理地制订维修大修计划,以计划为基础,分为装配和维修任务,控制任务的执行过程,同时在任务执行过程中,应用维修排故知识库技术,实现合理高效的维护维修。根据产品的使用状况,合理安排备件的生产、存储和调度,实现以最小的备件生产代价,快捷地满足服役使用需求;

(2)支持AMRO的技术状态控制,构建与试验系统的数据接口及统一的数据管理平台。在装配维修过程中,依赖各种技术控制手段,满足装配维修中的技术状态定义、技术状态纪实、技术状态控制,确实保证“文文相符及文实相符”。在技术状态控制的过程中,实现装配维修过程质量控制,实现技术状态和质量的事前规划、执行监控以及事后分析等;

(3)服役和寿命控制。通过记

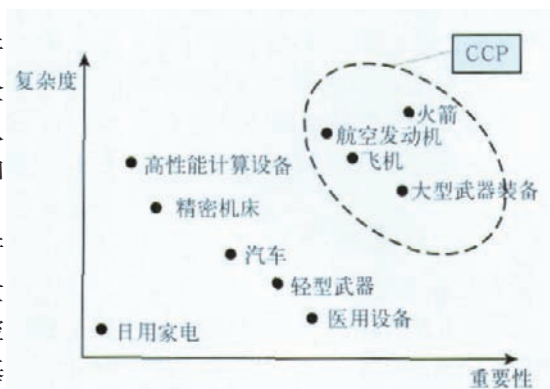


图1 复杂重要产品的定位

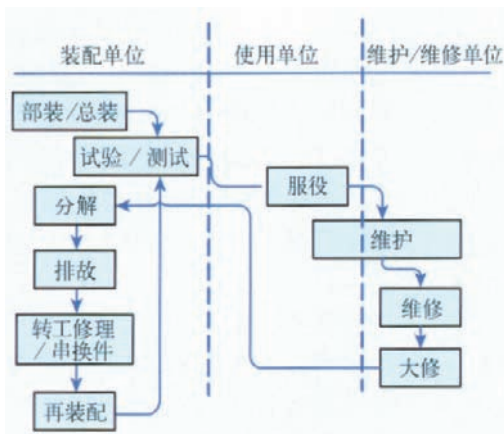


图2 复杂产品AMRO过程

录复杂重要产品的服役使用历史,形成完整的整机使用履历;以单台份BOM数据为依据,分解/构建重要零部件的使用履历,将使用履历转换为产品及部件的使用寿命。依靠寿命定义、寿命跟踪,形成寿命预警,并以此来指导装配维修计划的制定以及备件生产的合理计划和调度。在系统大量寿命数据和使用记录的支持下,同时结合装配过程中形成的技术状态和质量数据,进行技术状态/服役性能/质量数据的关联分析,研究其中的数据关联关系,其分析结果可以用来形成排故知识库、改进装配质量控制手段、提升装配维修工艺精益性、提升售后服务能力和水平,更进一步,则可以为复杂重要产品的改进/改型提供支持。

在应用层面,依赖于基于SOA的平台总线,形成各个业务逻辑的集成,并支持与其他各种信息化应用系统的数据交换,为装配、使用、维护三类典型用户提供支持。装配/试验单位在平台的支持下,向服役使用单位交付符合各项要求的产品;维修维护单位以平台为基础,提供更加合理、高效的维护服务保障。

## 关键技术

### 1 装配过程控制

复杂重要产品的装配更依赖人工操作,其不确定性因素使装配过程控制难度比较大,会形成错装、漏装、

装配顺序错误、装配多余物等问题,需要更严格的装配控制手段<sup>[4]</sup>。

从装配过程控制的粒度来看,可划分为比较宏观的装配任务过程控制,以及比较细粒度的装配工序过程控制。装配任务过程针对复杂重要产品的各大部/组件,管理其中先后顺序关系,协调其间的零部件发配料数据,控制总装、试验、分解、排故等过程的顺序以及各业务过程间的数据传递。而装配工序过程控制,则对装配、排故、大修等工艺过程中规定的各工序间的顺序依赖关系和并行关系进行控制,并同时在工艺执行过程中监控技术状态的落实状况,搜集质量数据。

在装配过程控制的过程中搜集的实时任务进度信息和质量数据,被反馈给维修大修管理中心进行合理的资源调度和计划制定,以及反馈给装配质量控制系统进行质量数据的保存和分析。

### 2 履历和寿命管理

履历信息中包含了产品零部件的单台份物料信息,细化到批次或单件号、外协/外购件的质量合格证明、装配修理过程中的质量和操作人员信息、转工修理记录、串换件记录、试验性能记录等。

而寿命信息则来源于复杂重要产品在外场服役过程中的使用记录。一般而言,使用记录中只体现了整机的使用状态、使用时间等信息。由于整机的寿命取决于其中关键零部件的寿命,而关键零部件又经常发生新换件以及两台产品之间的串换件,因此对于零部件的寿命计算和跟踪是确保复杂重要产品安全服役、按计划维护、到寿大修的重要保证。

为此,对履历数据进行拓展,使其能够按照台份和单件的粒度来存储和管理整机及其关键零部件的服役使用状态、已经使用时间,根据寿

命管理方法,进行剩余寿命计算和审核。结合在役产品的剩余寿命统计分析结果,以及备件库存状况,指导合理的备件生产计划制定。

### 3 单台份管理

由于复杂重要产品的重要性,需要对其服役全寿命周期进行信息跟踪。其基础性的工作是单台份管理,即在产品型号制造BOM(Manufacturing Bill of Material, MBOM)的基础上,为每一个独立的产品构建独立的单台份MBOM。上述2种MBOM的关系类似于面向对象技术中的类(Class)与对象(Object)或者是模板(Template)与实例(Instance)的关系。此时的单台份MBOM中不包含原材料等生产过程中需要的制造数据,但在MBOM节点中所包含的图号、物料号基础上,增加了每一个物料的批次号或单件号信息,与产品实物一一对应。

对于复杂重要产品,在其服役生命周期过程中,当进行维护、维修、大修时,经常会由于质量原因或生产调度原因,对于其中的关键零部件进行串件、换件。所谓串件,指两台同型号产品调换某一个或几个零部件;而换件则是以新零部件替换产品上的旧零部件。对复杂重要产品进行串换件时,对零件物理实体进行更换的同时,还应当将与串换零部件相关的批次/单件信息、履历信息、质量信息、服役和寿命信息、技术状态信息等进行更新,以保证产品服役过程中的全数字化跟踪。

### 4 技术状态控制

与一般产品不同,复杂重要产品的技术状态包含3个方面,即装机技术状态,服役技术状态,以及维护/维修/大修技术状态。表达装机技术状态的基本元素包括:装配过程中产生的零部件装机清单(包含批次号和单件号)、执行的装配工艺、装配履历表、装配质量检验表、落实的技术文件、交付试验报告等。服役技

术状态中包含的基本数据元素包括：交付物料清单、装机地点、服役使用记录、服役故障记录、日常维护记录等。维修/维护/大修技术状态中所包含的基本数据元素包括：定期维护记录、故障维修记录、维修申换件状况、大修分解工艺、临时工艺规程、大修排故状况、维修转工记录等。

技术状态控制的目的是上述基本元素及其他之间的关联关系要得到明确的定义、维护、检查和存储，同时保证这些具有关联关系的基本元素能够反映产品实物的状态。应该以单台份的 MBOM 为各项技术文件的组织架构和管理载体，将各项技术文件分解到 MBOM 的节点上。同时在产品装配、服役使用、维修大修时，及时更新各项数据。例如当发生如本节第三部分所述申换件时，与申换件实物相关的 MBOM 节点也随之申换，从而维护了技术状态。

## 5 多应用系统集成

复杂产品的 AMRO 应用涉及到产品的装配、质检、试验、交付、服役、维修、维护、大修等诸多环节，信息链条长、数据量大，在目前的信息系统建设现状下，不存在某种单一系统能够管理中所有的业务流程和数据，必然是多系统共同协作，综合集成来提供完整的 AMRO 支持。

在上述业务链条中，涉及到应用系统包括：ERP 系统，其管理职责在于进行装配大修生产任务的计划制定，生产任务的调度；PDM 系统，管理产品设计数据，工艺数据等。质量管理系统 (Quality Management, QM)，记录产品的装配质量；试验数据管理系统 (Testing Data Management, TDM)，管理产品的试验计划、试验过程、试验数据等；售后服务支持系统 (Customer Support, CS)，管理产品的外场服役使用状态，服役寿命，维修记录等。装配综合管控系统，管理装配现场的 MBOM、装配过程、质量数据等。

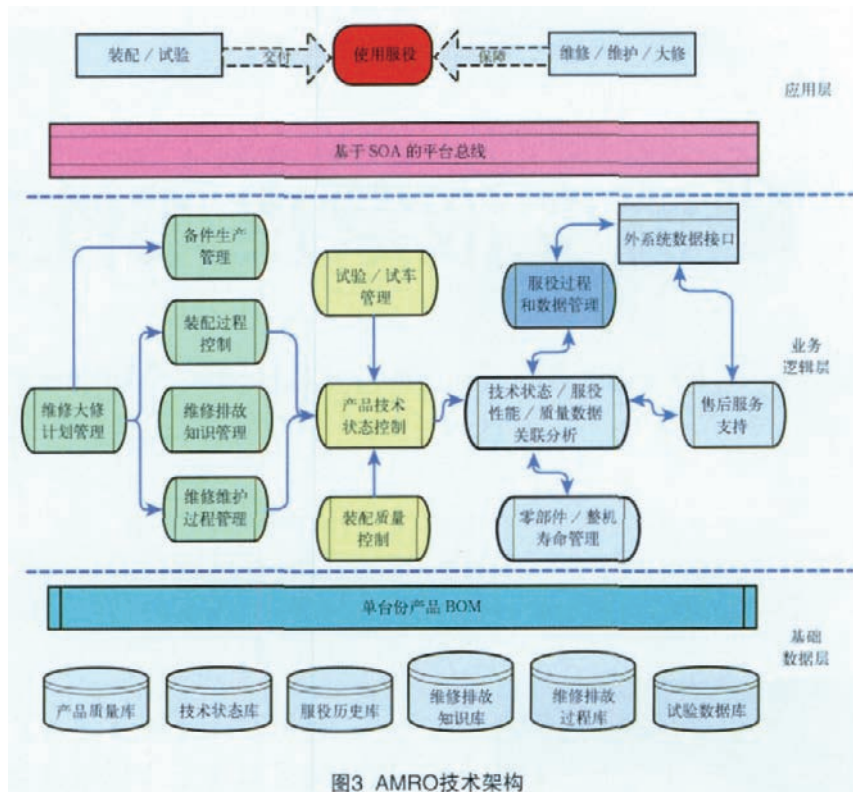


图3 AMRO技术架构

多个应用系统集成时，可行的解决方案是应用基于 SOA 思想的 ESB (Enterprise Service Bus, 企业服务总线) 技术，ESB 可以提供最基本的连接中枢，用于构建 AMRO 业务流的数据总线，能够有效的降低系统之间以及系统内部各模块之间的耦合度。在 ESB 模式下，AMRO 业务链条上的各种应用可以统一高效地获取和共享数据，当新的业务过程和应用系统加入时，也可以方便地集成进来。

## 应用案例

作者所在的团队，与国内某航空发动机制造企业合作，研究开发并实施应用了一套面向航空发动机这一典型复杂重要产品的装配执行现场综合管控的集成应用系统 (ADS 2.0)。系统以工艺精益化、质量控制、生产控制为应用主线，实现了装配单台份 MBOM 管理、装配质量的数据实时收集和控制、履历信息的电子化管理、EBOM/PBOM/MBOM/QBOM/ 综合集成、 workflow 驱动的装配任务管理、装配现场技术状态的控制、数字化军检

等，管理了百余台某型航空发动机的装配生产数据，初步实现了 AMRO 中装配环节的数字化管理<sup>[5-6]</sup>。系统应用后，有效降低了发动机错漏装率，减少了提前返厂维修次数，取得显著的军事和经济效益。后续将以 AMRO 的整体思想为牵引，将应用范围扩大到维修大修环节，并将 AMRO 中数据管理的理念从“电子化”更进一步升级为“结构化”，实现更加高效和智能的数字化支持。

## 结论

由于复杂重要产品的特殊性质，其对装配/维护/维修/大修提出了更高的要求。因此，进行 AMRO 技术研究、系统开发和实施应用，可以有效提高我国军工行业的产品制造质量，提升服务水平、保障装备的完好率，必将对我国军事装备的制造、使用、维护产生深远的影响。

本文共有参考文献 6 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 侧卫)