

# 三维工艺与 MES 在航天发动机 数字化制造中的应用研究

李亚杰, 何 阳  
(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 为了提高航天发动机数字化研制能力, 对航天发动机数字化制造的理论进行了研究, 包括数字化制造的环节、各环节所使用的数字化工具以及这些工具间的相互关系。重点研究并阐述了三维工艺与 MES (Manufacturing Executive System, 制造执行系统) 在数字化制造中的应用。

**关键词:** 航天发动机; 数字化制造; 三维工艺; 制造执行系统

**中图分类号:** V463-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 01-0090-08

## Application of 3-D process and MES in digitalization manufacture of space engine

LI Ya-jie, HE Yang  
(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** In order to improve the ability of space engine digitalization development, the theory for digitalization manufacture of space engine is studied, including each link in digitalization manufacture, digitalization tools used in each link and mutual relation of the tools. The research was especially focused on three-dimensional process and MES (Manufacturing Execution System) application in the digitalization manufacture.

**Keywords:** space engine; digitalization manufacture; three-dimensional process; MES

## 0 引言

随着计算机、信息技术、通讯网络等科学技术的发展, 数字化制造作为一种新的制造模式得到了广泛的关注与应用, 成为未来制造业发展的重要特征<sup>[1]</sup>。美国波音公司 B-777 型飞机的研制由

于全面采用数字化技术, 研制周期缩短了 50%, 出错返工率减少 75%, 成本降低 25%<sup>[2]</sup>; 美国在先进联合攻击战斗机 (JSF) 的制造过程中采用三维数字化建模、数字化产品定义、虚拟装配等数字化技术使设计和制造时间减少 50%, 维修成本减少 30%, 出错率减少 80%, 开发及制造成本减

收稿日期: 2014-07-09; 修回日期: 2014-08-06

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2010JY033)

作者简介: 李亚杰 (1984—), 男, 博士, 工程师, 研究领域为数字化制造技术

少 50%<sup>[3]</sup>。以上数字化制造技术的先进应用实例证明了数字化制造在缩短研制周期、提高产品质量等方面至关重要的作用和地位。

随着国家对太空探索与研究力度的加大, 对航天企业提出了新的要求, 型号研制任务不断增加。航天发动机是航天企业产品研制的重要组成部分, 其制造是一个复杂的系统工程, 产品结构复杂, 包含大量不同种类的零部件, 加工过程涵盖机加、表面处理、锻造、焊接、装配等众多环节, 其加工与装配过程具有以下特点<sup>[4-5]</sup>: 1) 结构复杂, 变更频繁; 2) 生产周期长; 3) BOM (Bill of Material, 物料清单) 结构复杂且动态多变; 4) 装配工艺复杂, 中间环节多, 易出错; 5) 质量要求严格。现有的航天发动机设计制造能力还不能够完全满足国家和市场的需求, 虽然在部分研制环节中已经实施了多种数字化手段, 但基本上还是采用传统的设计制造方法和管理体系。为了提高液体火箭发动机的数字化研制能力, 缩短与国外先进水平的差距, 西安航天发动机厂在某新型号液体火箭发动机研制中进行数字

化制造技术应用试点。在此基础上, 本文提出了航天发动机数字化制造的理论框架, 并针对与制造过程关系最为密切的三维工艺与 MES 在数字化制造中的应用进行了研究, 探索了实现航天发动机数字化制造的方法。

## 1 航天发动机数字化制造理论与发展趋势

### 1.1 数字化制造理论

数字化制造是在虚拟现实、计算机网络、快速原型、数据库等技术支撑下, 根据用户的需求对产品信息、工艺信息和资源信息进行分析、规划和重组, 实现对产品设计和功能的仿真以及原型制造, 进而快速生产出达到用户要求性能的产品整个制造过程<sup>[6]</sup>。

航天发动机的研制过程包括设计、工艺过程规划、制定生产计划、制造/装配、质量控制等环节。根据工厂型号产品研制过程与型号研制需求, 将数字化制造分为图 1 中的五个环节: 产品

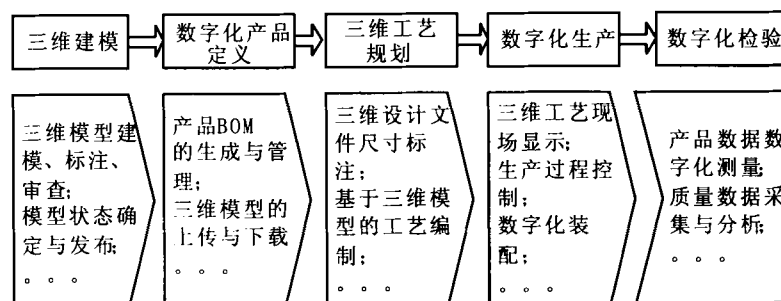


图 1 数字化制造环节

Fig. 1 Links of digitalization manufacture

三维建模、数字化产品定义、三维工艺规划、数字化生产、数字化检验。

数字化制造的内容非常广泛, 包含许多不同的领域<sup>[7]</sup>, 例如仿真领域的几何仿真、物理仿真、运动学、材料力学、热力学等的仿真; 在生产数据数字化领域, 不仅包括产品数据, 还包括相关的工艺数据、制造资源 (设备、工装、刀具、材料等), 还包括工艺的执行过程、质量数据等数据的协同。数字化制造按照所面向的对象可分为

面向设计的虚拟设计<sup>[8]</sup>、虚拟制造<sup>[9]</sup>与面向实体的制造<sup>[10]</sup>。

虚拟设计与虚拟制造技术<sup>[11]</sup>使设计人员与制造人员可以在虚拟环境中进行产品的开发设计, 在投入车间进行正式生产之前可以在虚拟环境中进行工艺规划、工艺设计、工艺仿真和工艺管理<sup>[12]</sup>。这个过程需要用到一系列的专业工具软件和信息管理平台软件。该部分内容主要是关于专业工具软件的应用, 本文不再赘述。

面向实体的制造是数字化设计的延伸,是实现产品制造过程的数字化,需要利用多种管理软件,例如 PLM (Product Lifecycle Management, 产品生命周期管理), ERP (Enterprise Resource Planning, 企业资源计划) 和 MES 等,为制造提供完整、正确和唯一的数据源(包括产品、制造过程、资源等方面的数据)。面向实体的制造是数字化制造的重要环节,实现数字化制造需要先实现制造的数字化与信息化,在此基础上实现全面的数字化制造。对面向实体的数字化制造设计的管理软件以及软件之间的相互关系进行分析,建立了图 2 中的框架模型。

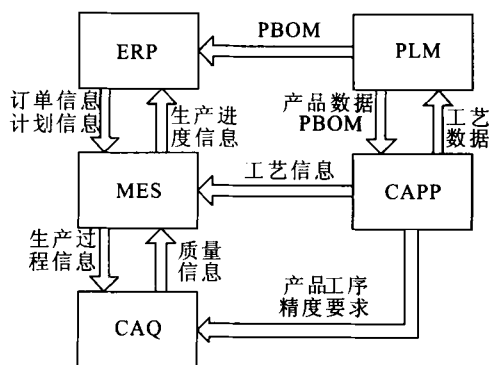


图 2 管理软件关系框架模型

Fig. 2 Relation model of CIM software

PLM 系统负责将设计信息转换为产品信息,依据 EBOM (Engineering Bill of Material, 设计物料清单) 生成 PBOM (Process Bill of Material, 工艺物料清单),并将 PBOM 传给 ERP 与 CAPP (Computer Aided Process Planning, 计算机辅助工艺规划系统),ERP 系统依据 PBOM 进行主要材料消耗定额汇总、辅助材料消耗定额汇总以及外购件消耗定额汇总等。CAPP 依据 PBOM 进行工艺规划,得到产品生产的工艺规程,并将工艺信息传递给 MES, MES 依据从 CAPP 中得到的工艺信息制定生产计划并下发现场指导生产。除此之外 MES 还接收来自 ERP 的诸如定单、物料清单、产品图纸、资源需求、主生产计划、劳动力性能、库存状况、操作程序标准和网络协调计划系统的工作指令。MES 将顾客需求转换成制造计划,进行作业计划与生产调度,决定专用资源。

将定单完成情况、资源利用情况、人员及出勤情况、物料使用情况、库存统计等的单元生产信息送回 ERP 系统。CAQ (Computer Aided Quality, 计算机辅助质量管理) 接收来自于 MES 的生产过程信息,在对产品进行检验后将相关检验信息返回到 MES 系统, MES 根据得到的质量信息安排后续生产。通过以上管理软件的应用,实现生产过程数字化,即面向实体制造的数字化。

## 1.2 发展趋势

随着三维工艺项目的推进以及后续数字化工具的应用,工厂数字化制造呈现如下趋势:

统一设计部门与制造部门的 CAD 软件实现工厂与设计部门 PDM (Product Data Management, 产品数据管理) 系统集成,确保产品状态可控,提高产品三维模型的使用效率;

采用统一的数据管理系统,实现单一数据源实现设计与制造的协同;

完善 MBD (Model Based Definition, 基于模型定义) 等三维工艺设计工具,形成完善的三维工艺平台;

完善三维工艺标准,规范三维工艺设计中产品的加工、装配仿真等过程,保证仿真结果的一致性、准确性及规范性;

建设专业加工技术及装配仿真优化系统、工艺装备设计系统、标准资源库等,并将这些系统与三维工艺系统进行集成,实现发动机的数字化虚拟制造;

在三维工艺平台基础上进一步实施 ERP、MES、在线检测系统以及质量管理系统等数字化管理软件,实现这些软件间的集成,打破产品数据孤岛使产品数据可以有效流通,实现航天发动机全数字化研制的最终目标。

## 2 三维工艺

目前设计部门通过 AVIDM 系统进行三维模型的下发,厂内相关人员依据各自的工作内容登陆设计部门 PDM 系统下载相应的产品三维模型。由于设计部门的 PDM 系统与工厂采用的 PDM 系统不兼容,因此无法直接采用设计部门的三维模型进行工艺规划以及材料定额核算等工作,设计

BOM 也无法直接作为生产依据, 工艺人员需要根据三维模型重新绘制工序模型, 当产品三维模型发生变化后, 目前的处理方式是用更改后的三维模型覆盖原有的三维模型。这种模式不利于对产品更改内容的对比以及产品状态的控制, 数据的准确性与可靠性得不到保证, 设计部门与生产部门之间无法共享单一数据源。工厂已经建立了 PPS (Process Planning System, 工艺设计系统), 但产品工艺路线、工艺规程等文件仍以 Word 表格形式编制, 晒蓝后下发到现场与二维图纸一起作为现场的生产依据, 操作人员需要根据工艺人员编制的工艺规程与二维图纸理解制造、装配的顺序与要求, 工艺执行过程存在以下缺点:

1) 以二维图纸与纸质工艺规程作为依据进行制造, 可理解性、可执行性差, 工序/工步信息与工序图之间的映射关系不直观, 容易出现歧义, 进而造成制造和装配错误;

2) 二维工序图绘制繁琐, 并且无法为加工与检验等提供三维数据模型;

3) 图纸与工艺信息都保存在纸质文件中, 占用了大量空间并且难以进行查询和管理, 图纸与工艺信息无法在各制造部门之间有效共享。

同时, 工艺规程还是核算材料定额、控制产品生产节点、制定详细作业计划等活动的依据, 工艺数据是一项非常重要的基础数据, 在航天发动机的数字化制造过程中处于重要地位。综上所述, 实施符合航天发动机制造特殊需求的适用于工艺规划与生产现场的三维工艺显得特别重要。工厂目前三维工艺采用 TC (Team Center) 平台, TC 作为工艺规划与数据管理的工具, 结合基于 MBD 等其他数字化工具实现制造工艺的三维数字化。TC 三维工艺主要包括以下模块: 工艺规划模块、工艺设计与仿真模块、BOM 管理模块、工艺数据发布模块和工艺知识管理模块。三维工艺设计过程如图 3 所示。

TC 负责接收上游设计单位的三维图纸与设计 BOM (EBOM), 并根据 EBOM 与三维图纸建立 PBOM。在工程环境中进行 MBOM (Manufacturing Bill of Material, 制造物料清单) 的构建与审批, 三维工艺路线编制, 三维工艺设计、仿真与

验证以及三维工艺的审核与输出, 并对三维工艺数据进行管理, 包括 PBOM 管理、MBOM 管理、变更管理、人员权限管理、工艺数据管理、制造资源管理、审批流程管理、三维数据接受与发放等。工程环境通过预先设计的接口将 BOM 信息与三维工艺信息输出到 MES 与 ERP 中作为安排生产、核算成本等的依据。其中工艺编制流程为: 厂级工艺部门在 TC 中编制工艺路线, 将三维模型作为任务分发到相应车间的工艺部门, 车间最终将工艺任务下发到具体的工艺人员, 由相应人员完成工艺规程的编制。

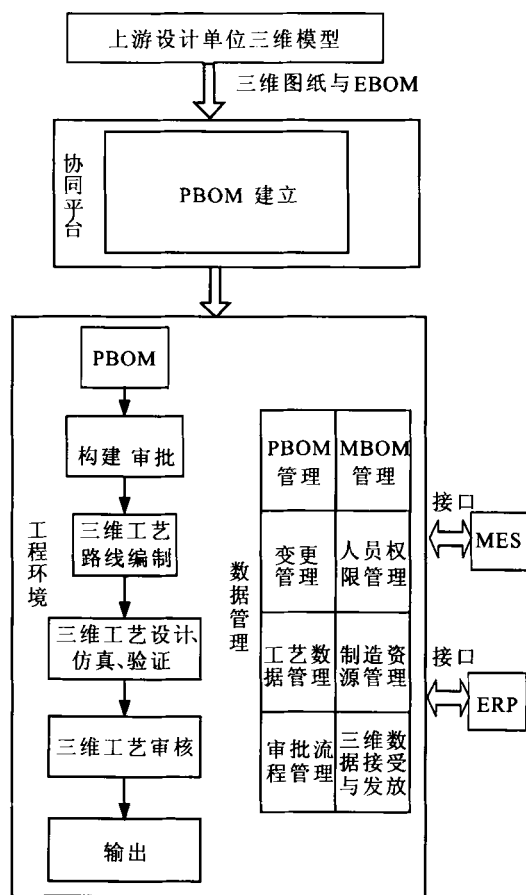


图 3 三维工艺设计过程

Fig. 3 Design of three-dimensional process

构建三维工艺设计平台, 开展三维工艺设计, 可以充分发挥 MBD 等优势, 提升工艺规划和工艺设计的质量, 提高工艺规程对生产过程的指导意义。三维工艺设计平台与 ERP、MES 等管理平台的集成打通了三维工艺设计和现场生产的可视化、数字化, 对于提高航天发动机

的数字化研制和生产能力,缩短产品研制周期,提高产品质量,降低制造成本具有重要的现实意义。

### 3 制造执行系统

目前工厂各车间仍然采用传统的人工管理方式对制造过程进行管理,利用工序跟踪卡、质量跟踪卡等纸质文件记录制造过程中产生的相关数据,这种管理方法存在以下缺点:

- 1) 实时性不强,无法获取实时的制造信息供计划层与决策层使用;
- 2) 制造信息都保存在纸质表格中,信息统计与查询工作量大,效率低;
- 3) 无法有效控制在制品的加工过程,管理人员需要到现场查看才能获取在制品的位置、状态等信息;
- 4) 制造数据无法直接向上层计划系统 ERP 进行反馈,导致 ERP 由于缺乏现场数据支持而无法根据生产实际及时调整生产计划,实施效果大打折扣。

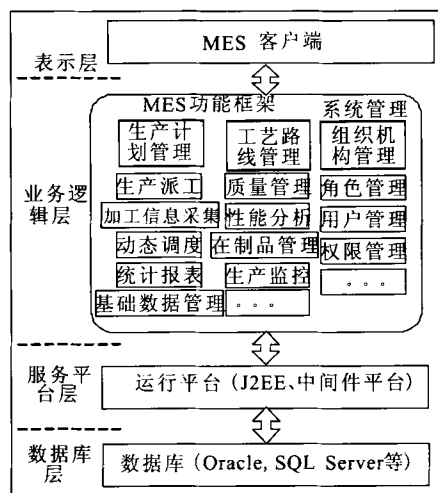


图4 MES框架

Fig. 4 MES Frame structure

MES是位于上层生产计划系统(MRP/II/ERP)和底层工业控制之间,面向车间层的生产管理技术与实时信息系统<sup>[13]</sup>。MES汇集了车间从订单下达到产品生产完成的整个生产过程信息,并利用实时准确的制造信息对车间发生的活动进行响

应,同时向企业决策层提供生产任务评价信息,对车间制造过程优化运行<sup>[14]</sup>。通过MES可以有效控制产品的生产过程,实现工艺执行过程数字化,没有MES的制造不是真正意义上的数字化制造。MES的框架结构如图4所示。

MES的功能主要包括生产计划管理、工艺路线管理、生产派工(工序级详细作业计划)、质量管理、加工信息采集、性能分析、动态调度、在制品管理、统计报表、生产监控、基础数据管理、系统管理等模块<sup>[15]</sup>。其中:

- 生产计划管理模块实现对上层计划系统生产任务的接收与录入;
- 工艺路线管理实现从CAPP中获取工艺信息并对这些信息进行维护,当CAPP中的工艺信息发生变化后将变化反映到MES的质量跟踪卡(生产跟踪卡)中,保持两者的一致;
- 生产派工负责对上级计划进行分解,结合车间实际生产情况与产品工艺信息制定工序级生产计划安排生产;
- 质量管理负责从CAQ中获取相关质量信息,并将质量信息反馈给ERP;
- 加工信息采集负责对工序的开始时间、结束时间、操作者、设备、加工数量等信息进行采集,汇总后供统计报表、生产监控等功能使用;
- 性能分析依据采集到的实时生产数据对车间生产情况、设备负荷等进行分析,并以报表或可视化的形式进行输出,作为决策层进行生产决策的根据;
- 动态调度实现对生产任务的临时调整,包括对设备、人员等的调整;
- 在制品管理以数据采集功能中采集到的数据为基础,提供在制品的详细信息(包括在制品的位置、状态、数量、流转信息等);
- 统计报表功能按照预先设定的规则对生产数据进行分析与汇总,以报表形式输出,作为工时统计、生产进度总结等的依据;
- 生产监控提供作业计划的执行状态、设备运行状态、在制品流转信息以及生产过程中出现的异常信息等,结合设备布局图、甘特图等可视化工具还可以实现以上信息的图形化显示;

- 基础数据管理负责管理与生产相关的各项基础数据,包括定额工时、工艺信息、设备信息、人员状态信息等;

- 系统管理提供对登录人员的权限管理以及车间的组织机构管理等。

MES 强调制造计划的执行和产品制造过程的控制,能够优化管理程序,强化管理过程,提高车间自动化管理水平,量化管理效能,提高管理的透明化和敏捷性<sup>[16]</sup>。应用 MES 可以打开车间的“制造黑箱”,可以及时、准确、高效的收集生产现场产生的各类信息,保证生产过程能够顺利、流畅进行,实现生产现场管理的信息化与数字化,提高车间现场的管理水平,最终提高车间的生产效率与型号研制水平。

## 4 应用实例

### 4.1 三维工艺

西安航天发动机厂针对某型发动机研制进行了三维工艺项目建设,结合工厂业务特点开发了三维工艺管理平台,主要功能如下:

#### 1) 设计模型管理

在三维工艺平台中统一进行设计模型的接收、管理与下发,取代了以往的纸质晒蓝文件下发模式,采用严格的权限控制策略,由工艺处负责对模型进行版本管理与维护,实现了模型的单一数据源,确保模型版本受控以及模型的一致性与正确性。图 5 为三维工艺数据管理框架。

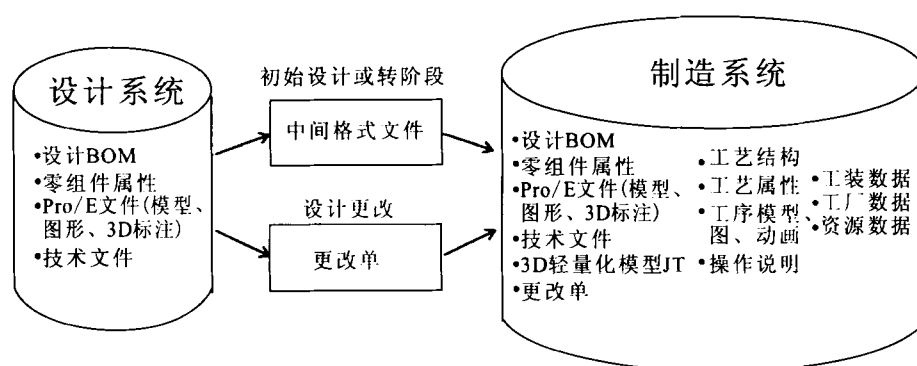


图 5 三维工艺数据管理框架

Fig. 5 Data management frame of three-dimensional process

#### 2) 结构化工艺路线与材料定额编制

自动生成设计 BOM 作为编制工艺路线与材料定额的依据,直接导入 IPT (Integrated Product Team, 集成产品协同) 阶段确定的工艺路线,提高工艺路线编制效率,实现厂级工艺与设计的协同;自动进行汇总生成电子工艺路线表,供 ERP 进行车间分工、排产与编制材料定额等功能使用。

根据工艺路线自动汇总生成各类材料消耗明细表及汇总表,便于进行型号研制成本与价格核算,提高成本核算准确性,大大减少定额人员工作量,提高工作效率。

#### 3) 三维工艺设计与现场展示

在 IPT 阶段产生的设计模型基础上建立工序模型,实现工艺与设计的协同,缩短工艺准备周期;将仿真视频等可视化文件作为附件对工人操作进行指导,使工艺表达更加多元化;根据三维工艺现场应用需求配置了触摸屏终端,在现场实现了三维工艺与数控程序调用,对“三维到现场”与“三维到机床”进行了初步探索。图 6 为在现场展示的三维机加工序卡片。

通过三维工艺平台实现工艺设计、现场加工的全三维,使工厂具备接收与应用设计单位全三维数字化模型的能力,在平台中对设计模型与技术状态进行统一管理,实现了单一数据源,为制造执行系统、质量管理体系等提供工艺数据支

撑；建立三维模型和实现基于产品结构的模型管理，全面使用机械加工、钣金、焊接、铸造等仿真软件，大幅提升了工艺设计的效率和质量，取消实物验证，使工艺设计能力产生了质的飞跃；在三维工艺应用中对原二维工艺管理流程进行了梳理，通过对业务流程进行优化与合并，将流程数量从原有 42 个缩小至 17 个，并对流程执行过程进行了优化，去掉了流程中的不合理环节，大大提高了工艺管理流程的效率。通过三维工艺平台打通了三维到工艺、三维到现场、三维到设备的通路，初步形成了三维数字化工艺设计体系，为提升工艺设计数字化能力起到了关键作用。

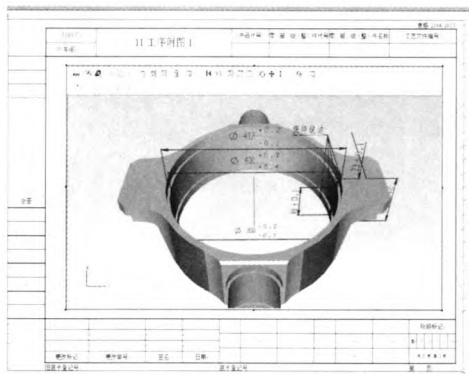


图 6 三维机加工序卡片

Fig. 6 Three-dimensional process card

4.2 制造执行系统

西安航天发动机厂针对机械加工车间单件、小批量、多品种、科研和批产混线生产的业务模式，以工艺数据为基础、生产计划为驱动、质量管理为主导进行了制造执行系统实施与应用。机加车间 MES 框架如图 7 所示。

MES 系统主要包括计划排产管理、车间调度管理、现场作业管理、车间质量管理、数据采集管理、物料配套管理、基础建模管理、系统安全管理、数字化看板管理和综合统计分析等模块，并实现了与现有三维工艺系统（Teamcenter）、Avidm 系统、ERP 系统（Dynamic AX）、DNC（Distributed Numerical Control，分布式数控）系统的集成，打通了车间管理环节间的数据流通过路，实现了生产现场的实时采集与产品的实时追踪。结合 MES 系统对生产流程与车间资源进行了优化配置，提高车间的生产效率与设备利用率，缩短产品制造周期，提高工厂交付能力。

5 结束语

对航天发动机数字化制造进行了研究，着重研究了与生产关系最为密切的三维工艺与制造执行系统在航天发动机数字化制造中的应用。数字

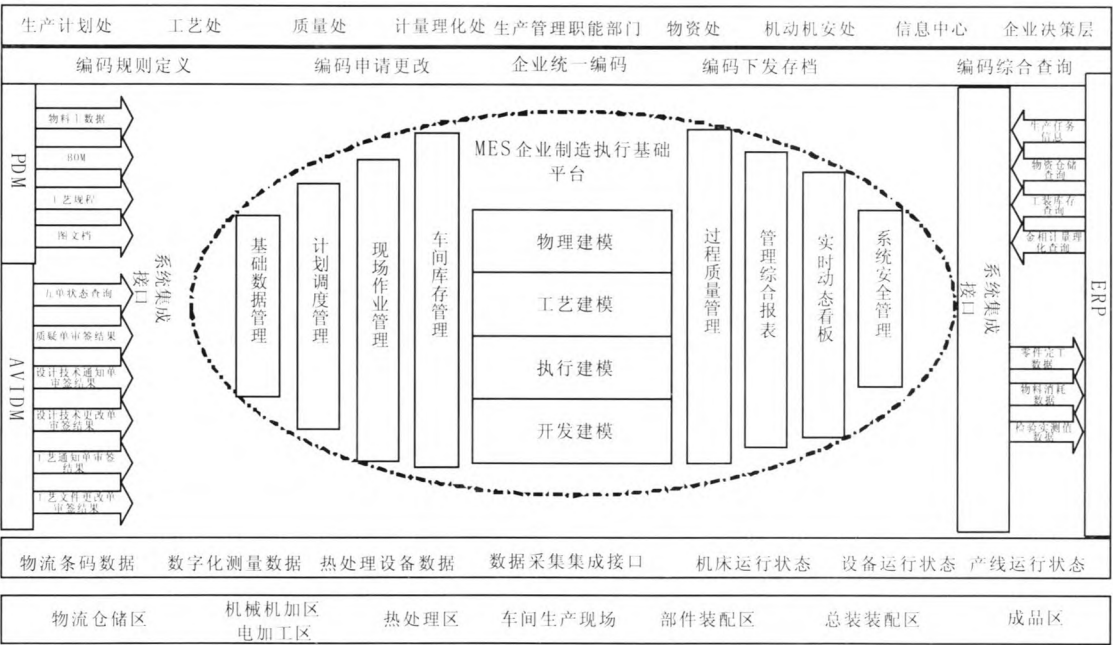


图 7 机加车间 MES 框架

Fig. 7 MES frame of manufacture work-shop

化制造对型号产品研制过程有重要意义, 西安航天发动机厂通过三维工艺与 MES 的应用大大缩短了型号研制周期, 大幅提高工厂研制能力与交付能力。航天发动机数字化制造目前处于起步阶段, 实现数字化制造是个长期、复杂的系统工程, 需要不断对应用系统进行完善, 加强支撑体系与相关标准的建设, 在此基础上推进航天发动机的数字化制造进程。

#### 参考文献:

- [1] 于勇, 陶剑, 范玉青. 大型飞机数字化设计制造技术应用综述[J]. 航空制造技术. 2009 (11): 56-60.
- [2] 徐微, 王普. 数字化设计制造技术在飞机研制中的应用研究与实践[J]. 航空产品数字化设计与制造. 2001 (4): 19-20.
- [3] 任晓华. JSF 制造技术综述[J]. 航空制造技术. 2002 (2): 43-48.
- [4] 李飞, 章乐平. 航天器数字化协同设计技术研究[J]. 导弹与航天运载技术. 2013 (1): 71-74.
- [5] 孙莹, 汤科, 邹新军. 航天产品三维数字化制造模式探索与实践[J]. 航天制造技术. 2012 (6): 30-33.
- [6] 周祖德, 李刚炎. 数字制造的现状与发展[J]. 中国机械工程. 2002, 13(6): 531-534.
- [7] 邵毅, 张开富, 李原, 等. 飞机数字化产品开发[J]. 航空制造技术. 2003 (9): 31-37.
- [8] 吴丹. 飞机产品数字化定义技术[J]. 航空产品数字化设计与制造. 2001 (4): 31-25.
- [9] 宁汝新, 刘检华. 数字化制造中的建模和仿真技术[J]. 机械谏工程学报. 2006, 42(7): 132-137.
- [10] 赵强, 许建新. 面向数字化制造的工艺执行系统关键技术研究[J]. 机械科学与技术. 2012, 31(12): 1910-1915.
- [11] 吴建香. 数字化虚拟制造技术的研究与应用[J]. 航空制造技术. 2010 (23): 89-92.
- [12] 唐晓东, 高红. 虚拟装配仿真技术在飞机研制阶段中的应用[J]. 航空制造技术. 2009 (24): 69-71.
- [13] 饶运清, 李培根等. 制造执行系统的现状与发展趋势[J]. 机械科学与技术. 2002, 21(6): 1011-1016.
- [14] 金星, 杜宝瑞. 离散航空制造业 MES 系统设计与实施[J]. 航空制造技术. 2011 (7): 43-46.
- [15] 陈绍文. MES 将航空制造引向新水平[J]. 航空制造技术. 2010 (16): 60-61.
- [16] 饶运清, 李培根, 李淑霞, 等. 制造执行系统的现状与发展趋势[J]. 机械科学与技术. 2002, 21(6): 1011-1016.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 89 页)

#### 参考文献:

- [1] 李亚裕. 液体推进剂[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- [2] 中国人民解放军总装备部. GJB5403-2005 无水肼安全应用准则[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2005.
- [3] 周学志. 危险化学品事故处理技术手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [4] 全国危险化学品管理标准化技术委员会. 危险化学品标准汇编 - 包装、储运卷容器和运输车辆标准[M]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [5] 国防科工委后勤部. 火箭推进剂监测防护与污染治理[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1993.
- [6] 孙维生. 常见危险化学品速查手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [7] 安继儒, 郭强. 金属材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [8] 左景伊, 左禹. 腐蚀数据与选材手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1995.

(编辑: 王建喜)