

## 面向航天制造企业的制造执行系统研究与应用\*

## Research and Application of Aerospace Manufacturing Enterprise-Oriented Manufacturing Execution System

西北工业大学 谢海剑 何卫平 和延立 陈金亮 段婷婷

**[摘要]** 结合航天制造企业单件小批量、产研结合的生产特点,利用开源中间件产品开发了3层架构的制造执行系统。通过将 workflow 引擎与系统框架集成,实现了生产过程的自动流转和实时的任务状态监控,建立了较完整的企业数据信息流通链路,促进了企业信息化的发展进程。

**关键词:** 中间件 制造执行系统 工作流

**[ABSTRACT]** According to the production characteristics of single piece and small batch production and combination of production with research in aerospace manufacturing enterprise, opensource middleware is applied to develop the manufacturing execution system with 3-layer architecture. By integrating workflow engine into system main frame, automatic circulation of production process and realtime task states monitor are realized. A complete enterprise data flow is established and the development of informationization in aerospace enterprise is promoted.

**Keywords:** Middleware Manufacturing execution system Workflow

20世纪90年代,美国先进制造协会(AMR)首先提出了制造执行系统(Manufacturing Execution System, MES)的概念并引起广泛关注。工业发达国家对MES技术开展了系统的研究,提出了完整的软件体系架构,研制开发了许多比较成功的MES软件产品<sup>[1]</sup>。国内对MES的研究起步较晚,在国家863计划资助下进行了流程工业MES的理论、内涵、体系结构、软件和应用等方面的广泛和深入的研究,并取得了一定的成果,但是在面向离散制造行业的制造执行系统软件方面相对较弱<sup>[2]</sup>。由于生产模式的多变性以及自动化程度的差异性,MES的实施和应用受到了极大的挑战。

我国航天制造企业的生产特点是单件、小批量、

多品种、批产与研制相结合。由于起步比较晚,自动化程度比较低,信息化环节较薄弱,存在的普遍问题有:

(1)纸质卡片贯穿在整个零件加工过程中,零件加工的每一个步骤都需要人工填写相应的生产数据。

(2)管理层信息化程度比较高,ERP/MRP II得到了广泛的应用,但车间层基本上仍然采用传统的手工作坊式生产与管理,自顶向下表现为对生产指令的反应缓慢,自底向上表现为生产执行信息不能及时得到反馈。

(3)缺乏有效的监控生产运行的手段,进度信息以纸质文档或口头的形式传达,缺乏实时性,有效性也存在问题。

(4)车间管理层与控制层之间缺乏良好的信息交互手段,与生产相关的各部门间信息流通不畅,信息粗糙、滞后,追溯困难。

本课题针对某航天制造企业的生产模式和单件小批量、产研结合的生产特点,以实现MES系统最终目标为指导并结合车间的实际情况,成功地构建并实施了MES系统的解决方案。

## 1 系统设计

### 1.1 总体架构设计

经过需求调研分析,该MES系统应用的部门有科研生产处、加工车间、数据中心和仓库等,地理位置分散。结合企业软硬件的实际情况,分析了3种网络体系结构的优缺点<sup>[3]</sup>,采用浏览器/服务器(Browser/Server)的3层网络体系结构,标准的数据库以及J2EE平台作为系统的运行环境,来构建基于B/S的车间制造执行系统。总体结构包括用户界面层、应用系统层、系统支持及数据库层等三大部分。为适应网络应用和扩展性的需要,系统开发实现中采用Freemarker+Webwork+Spring+Hibernate的多层B/S架构,在应用实现的层面上对MES系统体系结构作了进一步的划分。系统总体架构如图1所示。

(1)用户界面层(即表示层)。通过浏览器作为系统的前端,实现信息的录入、查询与分析结果的可视

\* 国防基础研究(B2720060292)和国家自然科学基金(50605051)资助项目。

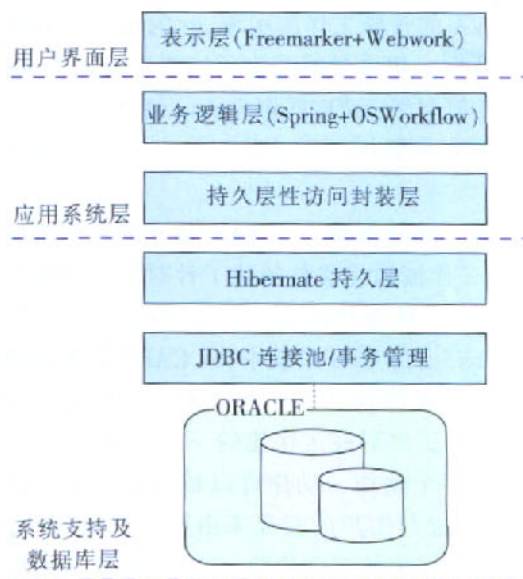


图1 MES系统总体架构  
Fig.1 Architecture of MES system

化展现。这一层包括采用符合MVC模式的Freemarker/Webwork取代传统JSP/Servlet的界面开发方式,以实现更为灵活、柔性的用户交互界面。

(2)应用系统层。该层是所有业务逻辑的实现层,是MES系统的核心部分。这一层负责接收客户端的请求,并将数据库层返回的业务数据进行运算处理返回到用户界面。OSWorkflow工作流引擎负责驱动零件加工流程的自动流转,在Hibernate基础之上封装了持久性访问层,把所有的持久性逻辑全部放到这一层实现。为了能够最大程度地重用系统模块,同时又能和工作流引擎很好地配合,采用了轻量级的Spring框架体系。

(3)系统支持及数据库层。使用Hibernate取代JDBC数据连接和操作方式,实现关系数据到可操作对象实例的映射,并维护数据库连接和数据缓存,提升效率。

## 1.2 系统功能设计

该系统实施的目标生产车间存在的主要问题是完全没有作业计划,生产计划的执行和进度的控制由若干名计调员人工掌握,经常导致生产任务不能按节点完成;加工过程的流转以纸质零件周转卡为中心,负责任务的标识和派发,记录质量检验的数据等,容易造成生产数据的遗失而无法在出现质量问题时得到很好的追溯。该系统主要包括计划调度、派工管理、质量管理、监控管理、用户权限管理和资源管理模块。

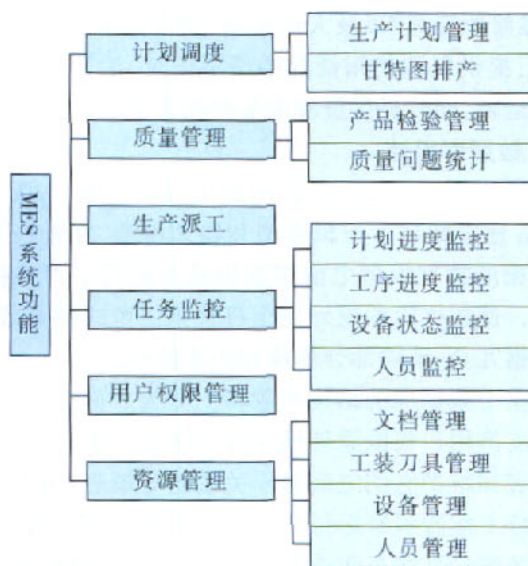


图2 MES系统功能树  
Fig.2 Function tree of MES system

系统功能树<sup>[4]</sup>如图2所示。

(1)用户权限管理。按照用户、角色、权限的层次关系构造本系统的权限管理。系统中定义多个不同的角色,每个角色被赋予各自的功能权限。注册用户被赋予一个或多个角色,建立用户与权限的映射关系,通过在系统的入口处对登陆用户的权限实施强行检查。

(2)计划调度。通过与计划系统的接口获取生产计划和月考核计划,结合车间设备的生产能力,对下发的生产计划进行分解,制定具有可执行性的生产作业计划,通过手工拖动可编辑的甘特图实现作业计划的调度排序并给相应的任务分配制造资源。

(3)质量管理。该模块分为质量检验和质量问题统计两大部分。质量检验有首件三检、工序检验、总检和军代表检验;质量问题统计则是对采集到的质量数据进行统计分析并以图表的形式展现给用户,有利于管理者确定出现质量问题的生产环节并采取相应的措施加以控制。

(4)派工管理。该模块主要根据甘特图排产的结果生成派工单,如果是开始工序则打印零件周转卡,将生产任务派发到人或设备进行生产。

(5)监控管理。监控每一项生产计划的实施进度和每一批零件的工序进度,同时监控设备和人员的实时状态,为生产任务的派工提供依据。

(6)资源管理。包括工艺文档的借阅管理,工装、刀具的出入库管理,设备基本信息的维护和设备保

养、维修的管理<sup>[5]</sup>以及人员管理,用以保证生产的正常进行,提供资源使用情况的历史记录,确保设备能够正确运转,同时提供资源的实时状态信息。

### 1.3 数据库设计

使用 Embarcadero 公司的 CASE 工具产品 ER-Studio 建立数据库逻辑模型和物理模型,在转换为平台相关的物理模型之前将逻辑模型进行了严格的规范化,使数据库的设计完全符合第三范式的要求,消除数据冗余,消除部分依赖和传递依赖。

整个数据库的结构在逻辑上分为 3 部分:第 1 部分是支持用户权限管理模块的系统用户表、角色表、权限表和维护它们之间对应关系的分解表;第 2 部分为支持 workflow 引擎运行所必需的系统表,考虑到该 workflow 系统只是在车间内部运行,用户权限管理模块定义的表已能够很好地满足要求,因此没有定义额外的与 workflow 相关的组织机构管理表;第 3 部分也是最重要的部分,是支持企业商业规则的一系列的表。考虑到企业的生产性质,通过在第 3 部分的每一张表里添加一个标识位以达到数据假删除的目的,虽然在表现形式上数据已被删除,但用户的删除操作只是改变数据的标识位而该记录仍然存在于数据库相关表中。这种做法的缺点是随着数据的日积月累,数据量的不断增大而导致系统性能的降低,考虑到企业在数据维护方面的技术能力比较强,可以通过人为的定期备份或删除一定的数据来达到瘦身的目的。数据库物理模型主要部分如图 3 所示。

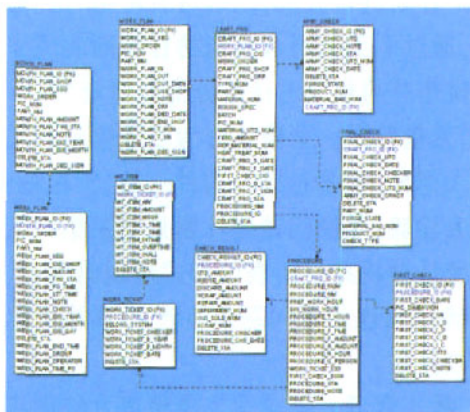


图 3 数据库物理模型

Fig.3 Physical model of database

## 2 关键技术

### 2.1 工作流模型驱动

OSWorkflow 是 Opensymphony 组织开发的一个

基于 JAVA 的开源工作流引擎,它的最大特点就是极高的灵活性,更重要的是它可以很容易地同 MES 系统使用的轻量级 J2EE 框架 Spring 整合到一起并很容易地得到依赖解析、组件装配和生命周期管理的支持。

OSWorkflow 的核心是 XML 格式的工作流描述文件,一个工作流描述文件描述了针对特定流程所有的步骤(Steps)、状态(States)、路径(Transitions)和方法(Functions)。在 MES 系统中,从 CAPP 系统获得的零件生产工艺规程就是工作流描述文件自动生成的依据。每一道工序对应工作流的一个步骤,每一个步骤有一个或多个动作,动作可以被设置为是否自动执行,或者通过与用户的交互来由程序选择执行,因此零件生产过程中的首件检验、工序检验就是流程中步骤的动作,在步骤的动作里完成零件生产执行数据的持久化和跳转到下一个步骤。由于零件的生产过程必须严格按照工艺规程定义的工序步骤顺序进行,完成了上一道工序的加工才能进入到下一道工序的加工,因此每一个流程都只有一条路径。描述文件生成后立即被加载到工作流引擎解释执行,调度员可以根据实际情况选择挂起或终止某一个流程。

### 2.2 数据对象的持久化

传统的 JDBC 连接方式存在的问题是,每一次数据访问必须经过建立数据库连接、打开数据库、存取数据、关闭数据库这一系列步骤,这样既消耗资源又费时,频繁发生会导致系统性能急剧下降,甚至崩溃,如果在程序段中没有正确关闭 ResultSet、Statement、Connection 资源,执行该段程序时留下没有关闭的连接,还会造成数据库连接泄露<sup>[6]</sup>。MES 系统采用对象关系映射(Object-Relation Mapping, ORM)工具 Hibernate 完成对数据的持久化操作。Hibernate 内建的连接池提供和控制开放的数据库连接,因此可以重用已经存在的数据库连接,避免打开和关闭数据库带来的延迟;二级的数据缓存机制显著地降低了数据库的操作频率;数据库中的关系数据被映射成为操作方便的普通 JAVA 对象,提高了开发效率。

### 2.3 基于模版的表现层技术

Freemarker 是基于 JAVA 实现的模版引擎技术。模版+数据模型=输出,通过改变数据模型的内容实现数据的动态输出。与传统的 HTML 页面不同的是,用 Freemarker 标记替换需要动态输出的部分,形成模版文件,服务器端根据客户端请求返回数据内容,将对应的模版文件加载到模版引擎中,在引擎中完成模版

与数据模型的绑定,并用数据模型中的内容替换模版中的相应标记,最后把最终结果返回到客户端。通过使用 Freemarker 模版技术,能够很好地将表现层和逻辑层分离开来。

### 3 系统实现及特点

#### 3.1 生产进度实时监控

在 MESA 定义的 MES 系统功能模型中,非常重要的一个功能点就是生产过程的实时监控。当生产任务开始执行后, workflow 引擎解释过程模型文件,根据过程模型和 workflow 相关数据为批次作业的生产过程进行导航,提供便捷的现场信息采集与执行反馈的实现手段,利用客户端采集的任务状态数据驱动过程执行,并实时通知工人更新任务监视界面,保证正确的工人在正确的时候得到正确的信息,实现在制品加工过程的自动流转。同时 workflow 引擎根据客户端采集的工序加工的进度和质量信息,汇总后为管理员提供图形化的实时生产进度信息,如图 4 所示。



图 4 生产进度监控

Fig.4 Production schedule monitor

#### 3.2 强大的统计分析能力

(1) workflow 引擎在驱动生产过程自动运行的同时,在每一个活动都会把重要的生产信息通过 Hibernate 提供的接口存入到数据库中,为后续的统计分析提供信息的来源。

(2) 质量信息统计与分析:分类查看不同时间段内生产过程中发生质量问题的次数以及相应的处理情况,并以图形化方式汇总展现质量问题产生的原因。

(3) 工时信息的统计:多层次统计零件生产工时信息,包括工人工时、班组工时、产品工时、车间月工时统计,一方面为工人报酬计算提供可靠的数据,另

一方面为零件工艺流程的改进提供参考。

#### 3.3 可配置与可重用

(1) 可配置主要体现在系统功能上。系统管理员根据人员的变动和角色的转换,为用户灵活分配系统操作权限,在避免越权行使职能的同时也解决了重要系统用户无法完成本职工作而导致业务逻辑无法顺利执行的问题。

(2) 可重用主要体现在功能模块上。得益于系统架构的灵活性, MES 系统各功能模块是相互独立、完备的功能模型,通过不同的组合适应企业发展过程中需求的变更,具备良好的可重用性和可扩展性。

#### 3.4 甘特图排产

车间详细作业计划的制定和排产是 MES 的核心功能之一,是提高车间生产效益的基础和关键。系统通过采用富客户端技术,实现了对作业计划进行基于甘特图的可视化的拖动编辑,为车间制定计划时提供每一台设备完整的任务信息,减少了计调员的工作量,极大地提高了系统的易操作性,如图 5 所示。

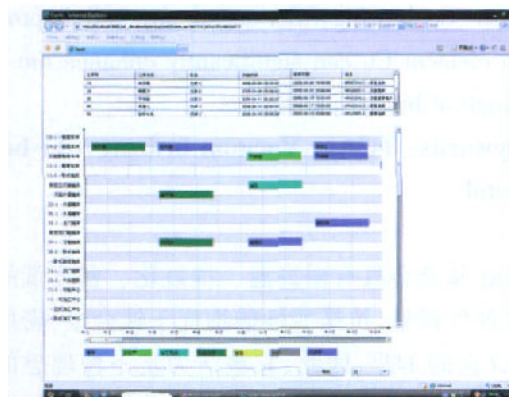


图 5 甘特图排产

Fig.5 Scheduling by Gantt chart

### 4 结束语

本课题最终实现了面向航天离散制造企业的 MES 系统,目前已在该企业得到全面的应用,在很大程度上改善了车间的生产管理,在提高车间执行能力和应变能力的同时为企业领导层决策提供准确的信息,促进了企业信息化的发展进程。下一步工作将是根据用户的需求对功能进行完善和扩展。

#### 参 考 文 献

- [1] Yang S L, Li T F. Agility evaluation of mass customization product manufacturing. Journal of Materials Processing Technology, 2002(129): 640-644. (下转第 69 页)

ceedings Symposium Weldability of Materials, ASM Fall Meeting, Detroit, Sept 1990: 247-258.

[5] 秦优琼,孙凤莲. Ti3Al 基合金钎焊技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2003.

[6] Mmaterials Park. Handbook of Ternary Alloy Phase Diagrams. ASM International, 1994: 4121.

[7] 潘晖,毛唯. Ti15Cu15Ni 钎焊 Ti3Al 接头组织研究. 第十一次全国焊接会议论文集,2005. (责编 悠然)

(上接第 65 页)

[2] 蔡宗淡,李小宁. 制造执行系统的生产管理控制研究. 计算机工程与应用,2006,16(07):184-187.

[3] 周丹晨,殷国富,龙红能,等. 基于 WEB 的制造信息集成化管理系统. 计算机集成制造系统,2003,9(2):96-100.

[4] 陈金亮,何卫平,董蓉,等. 支持快速扩散制造的制造执行系统研究. 计算机工程与应用,2007,43(18):207-210.

[5] 周海涛. 基于 Web 的设备管理信息系统的研究与实现[D]. 西安:西北工业大学,2006.

[6] 段婷婷,何卫平,张维,等. 基于 WEB 全生命周期设备管理系统. 计算机应用研究,2008,25(2):625-627.

(责编 晓霖)

(本刊记者 依然)

## 中国航空工业国际峰会 2008 在上海隆重召开

在中国商用飞机有限责任公司、亚太航空协会等国内外权威机构的支持下,“中国航空工业国际峰会”于 2008 年 12 月 3 日至 12 月 4 日在上海证大丽笙酒店举行。本次会议由上海市航空学会和全球领袖研究院联合主办,由全球领袖研究院承办。

中国航空工业国际峰会是这样平台:让行业内部人士能够在一起交流分享各自的信息与观点,甚至达成合作协议。

这次峰会在国际相关机构的支持下,荟萃了全球航空工业及相关行业的决策人,包括全球顶尖的飞机制造商、航空公司和航空科研公司等领导和高层管理者以及金融投资与信息咨询机构。重点探讨全球商用飞机的市场发展,全球飞机制造企业在中国的市场战略,以及航空工业的现代化解决方案等。这次会议是一次致力于合作交流、共同发展的高层盛会。

## 《航空制造技术》征稿启事

### 总体要求

文章要求内容准确,论点明确,论据充分,篇幅一般不超过 6 000 字。论文包括题名、作者姓名、作者单位、摘要、关键词、正文、参考文献。另请在稿件首页脚注处写明论文所属课题或基金项目类型及其批准号。请提供 Word 格式电子文件。

### 具体要求

1. 中英文题名,中文题名一般不超过 20 个字符。
2. 中英文摘要,摘要应具独立性和自明性,不用“本文”、“作者”等词。一般在 100 字左右。
3. 3-5 个中英文关键词。
4. 正文与标题,正文为 5 号宋体。文中标题一律左顶格排版,序号后空一个字再接排标题。引言编号为“0”,可省去编号和“引言”二字。一级标题“1,2,3,…”为小 4 号黑体;二级标题“1.1,1.2,…”为 5 号黑体;三级标题“1.1.1,1.1.2,…”为 5 号楷体。
5. 量和单位,文中技术词语、计量单位与符号应符合国家公布的标准,符合 GB 规定的量和单位名称、符号和书写规则。应注意外文字母的正斜体、黑白

体、大小写和上下角标的表示。

6. 插图(图题需提供中英文),图中如有外文要译成中文,插图精度为原大不小于 300dpi,插图格式为.tiff,.dwg 或矢量格式。

7. 表格,建议用三线表。给出表序和中文表题,表中有外文的要译成中文。

8. 参考文献,只列出已经公开出版、且在文中直接引用的主要文献。参考文献按文中出现的先后顺序编号。各类文献的著录格式请参阅《GBT 7714-2005 文后参考文献著录规则》。

9. 请勿一稿多投,稿件投递 90 天内未收到本刊稿件接受通知的,作者可自行处理,无论刊登与否恕不退稿,请作者自留底稿。

10. 请务必注明第一作者或联系人的详细通讯地址、邮政编码、办公电话、手机、传真、email 等联系方式,以便及时与作者沟通。

电话:010-85700465

传真:010-85700466

Email:ed@amte.net.cn

通信地址:北京市 340 信箱杂志社(100024)