

# 飞机工装制造执行系统的设计与实现

杜 辉<sup>1,2</sup> 叶文华<sup>1</sup> 楼佩煌<sup>1</sup>

1. 南京航空航天大学, 南京, 210016      2. 枣庄学院, 枣庄, 277160

**摘要:** 针对飞机工艺装备制造水平低下、信息化程度不高的问题, 设计开发了飞机工装制造执行系统(MES-AT)。详细介绍了 MES-AT 的主要功能模块和系统结构体系, 重点阐述了基于 CBR 和 MRP II 的生产计划编制、免疫遗传混合算法的模糊调度以及生产信息共享模型等关键方法。在某航空企业工装公司的应用表明, MES-AT 增强了车间的执行能力, 提高了企业的管理效率。

**关键词:** 飞机工装; 制造执行系统; 体系结构; 基于实例推理; 信息共享

**中图分类号:** TP311; TP278      **文章编号:** 1004—132X(2010)21—2578—06

## Design and Implementation of Manufacturing Execution System for Aircraft Tools

Du Hui<sup>1,2</sup> Ye Wenhua<sup>1</sup> Lou Peihuang<sup>1</sup>

1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

2. Zaozhuang University, Zaozhuang, Shandong, 277160

**Abstract:** In order to improve the level of informatization and manufacturing, a manufacturing execution system for aircraft tools(MES-AT) was presented. Based on the research of the system's requirement analysis, system structure and main function modules, the key methods and techniques of MES-AT, such as production planning based on CBR and MRP II, fuzzy scheduling based on immune genetic algorithm, were deeply researched. Its application in a aircraft tools enterprise shows that both production efficiency and quality are improved greatly.

**Key words:** aircraft tool; manufacturing execution system (MES); system structure; case-based reasoning (CBR); information sharing

## 0 引言

飞机工装的制造属于典型的离散型制造, 其生产特点为多品种、小批量, 同时又需要按订单设计、按订单生产。工装制造处于企业设计过程的下游和制造过程的上游, 并且工作量在整个工艺准备中约占 80%, 工装成本占总研制成本的 20%~30%<sup>[1]</sup>, 所以工装生产直接影响企业的产品质量、生产进度和制造成本。目前, 我国航空企业的工装制造水平相对低下, 信息化程度不高, 严重阻碍了企业信息化进程。此外, 对工装制造方面的相关研究仅局限于工装管理软件的研究与开发, 仅仅实现了工装设计的信息共享<sup>[2-10]</sup>, 对工装制造中的车间调度、项目资源调度等关键问题都缺乏深入的研究, 关于工装制造执行系统深入研究的报道也不多。

本文以飞机工装制造企业为研究对象, 通过对工装 MES 关键技术的研究, 遵循实用性、先进性及可扩展性的原则, 开发了以飞机工装管理为核心、支持工装生产的飞机工装制造执行系统(manufacturing execution system for aircraft

tools, MES-AT), 并将其应用到某飞机制造集团的工装公司。实际应用表明, 该系统能合理控制工装库存, 减少生产瓶颈, 较好地实现均衡生产, 亦可使长线产品配套合理, 有效地缩短制造工期。

## 1 MES-AT 系统的需求分析

由于飞机工装企业的生产提前期不确定, 生产计划只有产品节点计划, 生产管理员和调度员在计划的编制上都相应地提前了完工时间, 而且生产计划都是随时下达, 因此造成车间超负荷生产, 现场在制品积压过多, 生产计划的可执行性较差, 特别是在一些长线工装制造车间(如型架制造车间), 计划规定的时间节点准确率仅在 50%左右。在任务的分配上, 生产管理员对所接受的任务工作量只能粗略估计, 无法进行准确的能力平衡。在没有特别指定加工优先级的情况下, 工人自行决定加工先后顺序, 造成零部件加工优先级无法真正实现。生产过程中普遍采用口头传递和反馈生产信息, 信息的采集、传递、反馈不及时, 信息的透明度低、信息共享困难, 生产管理者无法进行快速决策。长线工装产品配套件的进度信息也靠人工跟踪, 不仅工作量大、不能及时掌握所有

收稿日期: 2009—11—30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50775111); 枣庄学院青年科研项目(2009QN10)

配套件生产进度,而且容易发生遗漏情况,造成装配时停工待料。此外,工装设计和工艺实施之间缺乏有效的交流平台,设计更改和工艺更改不统一,工装设计和工艺实施的修改信息不能及时共享。

此外,飞机工装制造企业每年都有许多订单同时在线,按订单确定的多项目共存,由于资源紧张,不同项目之间存在资源的争夺,项目之间缺乏有效的统一调度。如何对共享资源进行合理规划,实施多项目资源调度是 MES—AT 需要解决的突出问题之一。

基于以上对现行工装制造过程的分析,确定 MES—AT 系统的主要需求为以下几个方面:

(1)利用网络管理与控制主要生产过程。在订单管理方面,实现网络订单的电子评审;在生产计划管理方面,通过网络实现计划的下达,相应部门可以在权限范围内接收到生产管理室下达的计划,计划调整的信息能及时传递到车间和工段;工时的定额、申报、审批实现网络化,对工人和车间的实际工时能实现自动统计。在生产任务与订单的管理方面,实现任务与订单的实时状态的跟踪。

(2)生产信息的实时共享。企业相关人员能够及时了解半天或一天的生产进度情况和生产中存在的问题,能及时、有效地加以解决,对问题的解决状况能公开透明。此外,工装制造执行系统为管理决策者提供必要的生产信息。

(3)生产计划的管理与能力平衡。相关人员能查阅已完成计划和未完成计划的相关信息,并能统计每月的计划完成情况。生产管理室能掌握各个制造部门的生产能力和现有的生产任务,在计划下达特别是紧急计划下达的时候能系统考虑各个制造部门的现有生产任务,从而在一定程度上对各个生产部门的能力进行平衡。同样,制造分部在对计划的进一步下达时也对相应车间进行能力平衡。

(4)生产进度与配套管理。依据工装配套表和生产计划对配套零件的生产进度进行跟踪,特别是长线零部件,能及时掌握生产进度并及时处理生产中的问题,并按照配套零件的实际生产情况合理安排装配任务。

(5)材料与成附件的计划、采购以及库存的管理。及时更新材料和成附件的库存信息,实现库存信息的高度共享,工装设计时就充分考虑现有的材料和成附件,以便工装设计完成后及时生成相应的采购计划。

(6)在制品管理。要求对在制品的投入、产

出、领用、周转做到有数、有据、有制度、有秩序,能够实现长线产品的在制品跟踪与管理。

## 2 MES—AT 系统设计

### 2.1 系统整体数据流模型

在分析了目标企业业务流程和需求分析的基础上,将 MES—AT 系统流程分为九个处理单元:生产任务管理、外协管理、项目管理、生产计划管理、工装设计管理、派工管理、生产进度监控、信息查询与统计以及产品质量管理。系统的数据流模型如图 1 所示。

### 2.2 系统功能

在对目标企业实地调研的基础上,依据企业需求以及系统设计原则,将 MES—AT 系统分为以下十个功能模块。

(1)系统管理模块。实现系统的日常管理,并维护整个系统的一致性和完整性,为系统管理员的行为提供支撑,系统管理员可添加、删除系统用户,并分配相应的权限。

(2)基础数据管理模块。包括车间日历、部门信息管理、设备信息管理以及物料基本信息管理,该模块为整个系统提供基础数据。

(3)订单管理模块。支持以客户需求驱动、基于模块化设计的产品快速配置以及订单接收、分类归档和查询。

(4)BOM 管理模块。分为 EBOM 和 MBOM 的数据管理。包括,BOM 的创建、修改、删除以及 BOM 浏览、查询、分析和打印;模块化 BOM 库的构建、修改以及 BOM 多视图管理。

(5)生产计划与调度模块。该模块是 MES—AT 的核心模块,主要由以下几个子功能模块组成。①生产计划编制与调整子模块。依据库存预测和网络计划编制工厂级的年、月生产计划;并依据实际的生产进度和订单的情况进行合理的调整。该子模块还包括工序计划的编制和调整、单元/工段各级部门工序加工计划的编制与调度。②MRP 子模块。依据主生产计划和库存生成采购计划、制造计划 and 外协计划。按有限能力计划和无限能力计划两种方法进行能力平衡,生成能力与负荷分布图。③派工和完工管理子模块。对设备或操作人员进行派工,并对完工进度进行管理;记录工时与材料消耗,对零件流动情况进行跟踪。④生产进度管理子模块。采集生产信息以实现实际生产计划执行情况的快速反馈。重点实现长线产品配套零部件的管理,可通过项目号查询配套件清单、配套件生产、采购进度情况、配套件

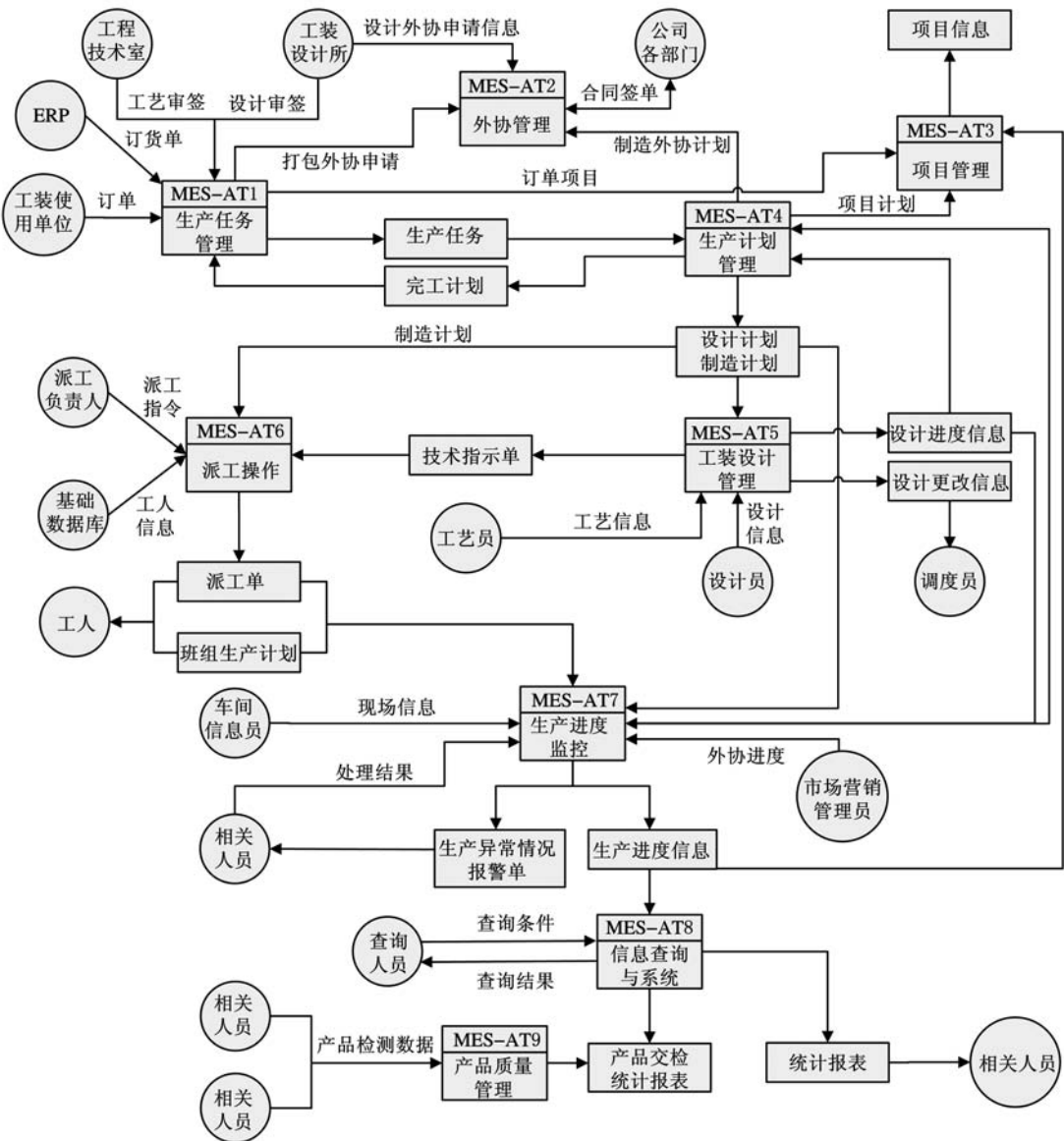


图 1 MES-AT 数据流模型

在生产现场的确切位置,并对生产进度滞后的零件和缺件进行提示与报警。

(6)物料管理模块。包括物料的采购管理与外协管理、物料库存管理、工段投料管理以及在制品管理。该模块能够实现物料的分散管理和信息共享,做到进度、状态、数量、位置等信息的准确反馈<sup>[11]</sup>。

(7)外协管理模块。实现工序外协、制造外协以及打包外协的审批,外协计划、外协合同、外协厂商管理,以及外协进度和质量。

(8)项目管理模块。该模块主要实现以下三个功能。①项目定义分解。依据订单进行项目立项,确定项目优先级和网络计划并进行任务分解。②项目资源管理。根据项目的实际进度,对制造资源进行调度,依据项目的优先级进行资源的分配和调整。③项目跟踪与监控。提供项目跟踪和

汇总报告功能,权限人员能够获得项目的最新进度,若项目出现问题,事件警示通知将自动发送给相关人员。项目经理还能以甘特图方式浏览项目进度的宏观情况。

(9)消息定向发布与反馈模块。该模块包括登录管理、消息发布、消息接收、消息查询与反馈、消息管理、消息统计等九个子模块。用户登录系统后,可在接收人下拉列表框中选择消息的接收者,方便快捷地实现消息“一对多”或“一对一”的在线发布。权限用户可以对历史消息进行查询,并对生产例外情况的处理结果进行评价,从而实现例外信息的定向发布、反馈、评价的闭环控制,实现生产例外信息的高度共享。

(10)数字化全面质量管理模块。借鉴文献<sup>[12]</sup>的“面向产品生命周期的全面质量管理”思想,以质量规划、质量监控与质量改进为基础,以



产品质量、操作命令、资源管理为主线,围绕工装全生命周期实现数字化全面质量管理,实现决策层、管理层、执行层间的双向质量信息集成,提高制造过程的质量控制能力与质量反应能力。该模块由四个子功能模块组成:质量规划、质量检验、质量统计分析和质量改进。质量规划子模块完成工序检验的定义、方式和内容,以及各工序的质量规范。质量统计分析了子模块主要完成加工过程中检验记录的录入、修改、保存和检验记录报表。该子模块能够实现缺陷产品统计、报警与历史追溯,对于不合格产品,系统会自动产生不合格品处理通知单,并通知相关人员进行审核处理,制订出相应的预防或改进措施<sup>[13]</sup>。

### 3 系统的关键方法与实现技术

#### 3.1 基于 CBR 和 MRP 的生产计划编制方法

(1)未有新订单时按库存生产,根据库存和预测的方法编制通用件的生产计划;有新订单则按订单生产,根据订单创建项目,编制相应的项目计划和生产计划,如图 2 所示。生产计划包括两个

层次:一是工厂级的生产计划,该计划是粗生产计划,包括年、月生产计划和通用件生产计划,以及订单项目的网络计划;另一个是车间作业计划,它是工厂生产计划的细化。采用 MRP II 与 OPT 相结合的方式,编制节点计划(粗计划)和工序级计划(详细计划)构建车间生产计划;对 BOM 进行编码,使编码包含物料所处层次、数量、装配关系等信息,然后利用 BOM 编码及其提前和拖后惩罚函数来检验生产计划的可行性。生产计划编制中,特别注重长线工装产品的齐套性和关键设备负荷的均衡性。

(2)基于实例推理技术(case based reasoning, CBR)的工时估算。根据预测编制生产计划前,采用基于实例推理技术计算工装的工序工时和总工时。先建立零件加工特征实例,然后建立基于实例推理的零件工时估算模型<sup>[14]</sup>,采用加工特征实例与典型加工工艺方案来估算零件工时,较好地克服了传统工时制订方法的局限性,从而提高了生产计划的准确性<sup>[15]</sup>。

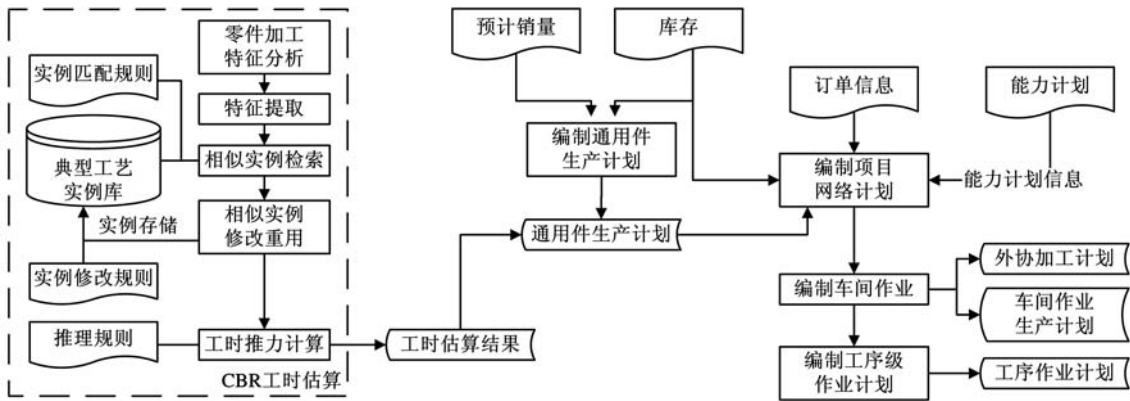


图 2 MES-AT 中生产计划编制模型

#### 3.2 模块化 BOM 及基于单一数据源的 BOM 多视图管理方法

模块化 BOM 是按照装配最终产品的要求来组建模块,模块化的过程就是将产品分解成低层次的模块的过程。采用模块化 BOM,将每一个部件看成是一个独立的产品,不必考虑部件的层次码,在设计中凡是用到该模块结构无需重新输入数据,只需引用该模块。

BOM 多视图管理采用基于单一数据源(single source of product data, SSPD)的多视图映射技术,能克服多部门应用过程中 BOM 数据的不一致和冗余,减少产品生命周期中数据重复提取等事务活动,能缩短产品设计制造周期<sup>[16]</sup>。在借鉴文献<sup>[14]</sup>研究结果基础上,使用单一数据源来保证各个部门 BOM 数据的一致性。SSPD 将各

个部门生成或使用的产品数据形成逻辑上的统一整体,为产品数据的访问与操作提供单一的数据源。整个 MES-AT 系统都以 SSPD 作为数据访问的唯一数据源头,系统从 SSPD 读取数据,并将它们生成的数据存回 SSPD 之中供其他子系统使用。通过定义虚拟部件、中间部件和外协部件以及相关映射函数,实现了设计 BOM、工艺 BOM 和制造 BOM 之间的转换<sup>[17]</sup>。

#### 3.3 免疫遗传混合算法的模糊调度方法

飞机工装制造是典型的小批量生产,关键工件的加工时间具有不确定性,依据订单分项目进行生产和管理,多项目同时生产,产品的交货期也具有不确定性,所以 MES-AT 必须解决不确定制造信息环境下的车间调度问题,并充分考虑多目标(交货期和负荷均衡)优化调度问题。

人工免疫算法(artificial immune algorithm, AI)是基于免疫系统的学习算法,具有良好的系统应答性和自主性,对于干扰具有较强的自平衡能力。此外,人工免疫算法处理的抗原也可以是多样的,如目标函数、订单数量、机器故障等,使得免疫算法具有较其他单纯算法更大的解决生产调度优化问题的潜力<sup>[18]</sup>,特别适合飞机工装制造的信息不确定条件下的车间调度问题求解,并且大量的研究也表明了免疫算法对求解调度问题的有效性和高效性<sup>[19-22]</sup>。

在 MES-AT 系统中,将关键零部件的加工时间模糊化,用改进后的基于欧氏距离的人工免疫算法研究车间作业调度方法,并将人工免疫算法与遗传算法进行有机的结合形成免疫遗传算法

(immune genetic algorithm),以改进免疫算法的调度求解效率,并切实提高基于免疫算法的车间作业调度的实用性。

3.4 生产例外信息的定向发布、接收、反馈技术<sup>[23]</sup>

工装公司现有生产过程中信息交流不畅、信息共享程度低,致使决策层由于缺少必要的支持信息而无法快速有效地进行决策。为了实现生产过程中信息的高度共享,采用了生产例外信息的定向发布与反馈技术,开发了相应的模块,具体的数据流模型见图 3。该模块基本上实现了信息的实时共享,同时也实现了信息发布与反馈的闭环控制,为生产管理决策者提供了必要的信息。

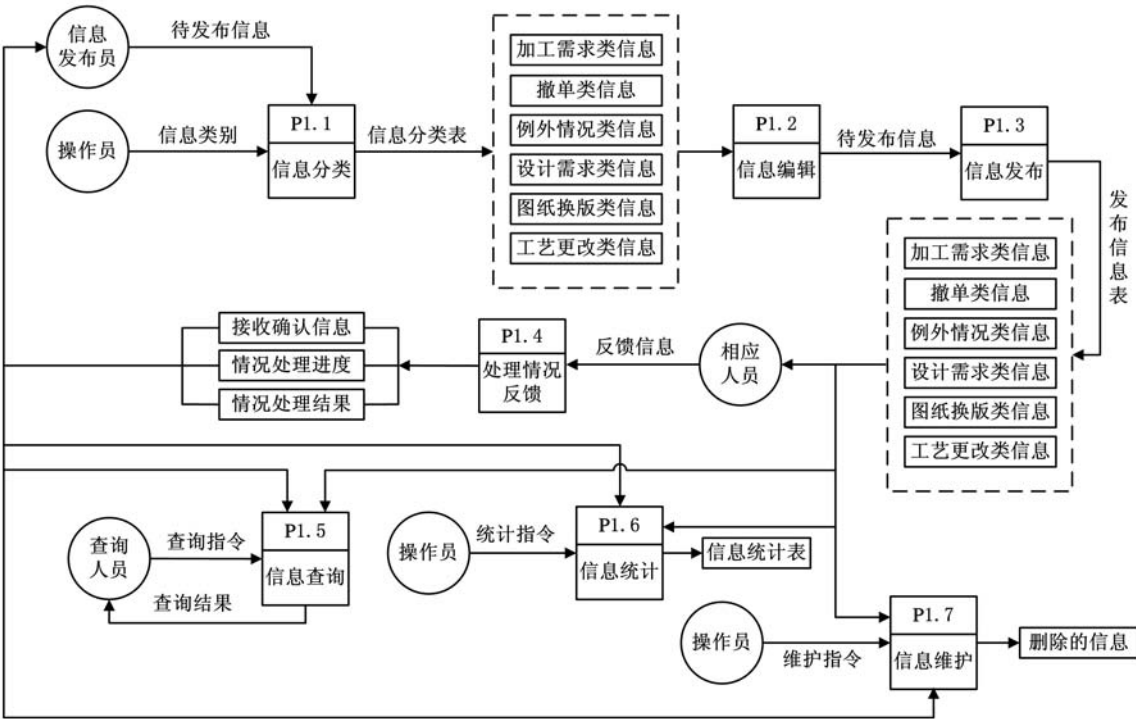


图 3 生产例外信息的定向发布/反馈数据流模型

3.5 构件技术

为了避免重复开发,降低软件开发成本,依据软件复用和构件理论,将 MES-AT 的构件库划分为通用构件和专用构件两大类。通用构件是整个系统中完全不变或者变化不大的构件,在进行其他类似的系统设计时,可以直接或稍微修改后嵌入到新系统中,如登录页面、显示页面、常用按钮、查询构件、统计报表等。专用构件是与特定领域相关的,如工装编码构件、工装借用构件、工装归还构件等。

3.6 存储过程技术

存储过程(stored procedure)是为了完成特定功能的一组 SQL 语句集,用户通过指定存储过

程的名字及参数来执行它。使用存储过程的方法能在很大程度上增强 SQL 语言的功能和灵活性,当企业流程或规则发生变化时,无需修改任何应用程序,只需在服务器中修改存储过程即可。此外,使用存储过程实现对数据库的各种操作,系统的数据层能够提供对 SQL Sever 2000 的高效访问,既可以减少对数据库的访问次数,同时又可避免用户访问的瓶颈问题,也使得 MES-AT 的数据访问层对数据库的逻辑更改更具灵活性,以利于自身的维护以及与其他信息系统的集成。

4 系统体系结构设计

在对 B/S 模式与 C/S 模式对比分析的基础

上,结合飞机工装制造企业的实际生产特点,MES—AT 采用 C/S 模式。MES—AT 采用面向对象技术,通过组件化的设计方法,保证系统的灵活性和可扩充性。系统基本框架和主要应用系统均基于 Web 技术实现,客户端用 Web 浏览器作为用户界面,车间操作人员和相关的管理决策人员通过浏览器上网即可使用本系统。服务器端采用 SQL Server 2000 存储数据,用户通过客户端向 Web 服务器发送请求,Web 服务器调用处理后将结果返回客户端。

## 5 结束语

MES—AT 系统已应用到某飞机制造集团的工装分公司,应用结果表明:该系统在很大程度上改善了车间的生产管理,增强了车间的执行能力,提高了企业的管理效率,很大程度上缩短了长线工装产品的生产工期,提高了企业的整体生产效率。飞机工装制造是典型的离散型制造模式,符合当前多品种、小批量的主流生产方式,今后,在实际应用过程中将对 MES—AT 进一步完善,并推广到更多的离散型机械制造企业中去。

## 参考文献:

- [1] 魏法杰. 航空企业工装管理分层计划方法研究[J]. 航空学报,2001,22(1):78-82.
- [2] 鞠晓华,张振明,田锡天,等. 航空企业工装管理系统的研究[J]. 机械与电子,2006(10):11-14.
- [3] 裴丽,田锡天,许建新,等. 基于 PDM 的航空企业工装管理系统研究[J]. 机械与电子,2006(9):54-57.
- [4] 薛进,孙树栋,魏平,等. NET 框架下四层体系结构的工装管理系统的设计与实现[J]. 制造业信息化,2004,26(10):56-59.
- [5] 侯伟,何卫平,殷锐,等. 面向航空企业的工装快速准备研究[J]. 机床与液压,2007,35(2):39-42.
- [6] 孙宜然,赵嵩正. 基于. NET 的工装生命周期管理信息系统的设计与实现[J]. 计算机工程与设计,2006,27(18):3463-3466.
- [7] 杨铁江,王仲奇,田禄俊,等. 基于 B/S 的飞机工装零件库系统的设计与实现[J]. 计算机工程与设计,2006,27(7):1127-1130.
- [8] 侯伟,何卫平,房亚东,等. 基于 Web 的工装全生命周期管理系统的研究[J]. 机床与液压,2006,34(9):37-40.
- [9] Muhammad Y, Lu H, Fan Yuqing, et al. Manufacturing Execution System for a Subsidiary of Aerospace Manufacturing Industry [C]//International Conference on Computer and Automation Engineering. Washington:IEEE Computer Society,2009:208

-212.

- [10] Chen J L. Research on Manufacturing Execution System in Aerospace Manufacturing Enterprises [C]//2nd International Conference on Modelling and Simulation. Manchester,2009:150-155.
- [11] 于志君. 工装 MES 中的物料管理系统研究与开发 [D]. 南京:南京航空航天大学,2008.
- [12] 邓军,余忠华,杨基平,等. 面向产品生命周期的全面质量管理体系[J]. 浙江大学学报(工学版),2005,39(4):500-505.
- [13] 谢海剑,何卫平,和延立,等. 面向航天制造企业的制造执行系统研究与应用[J]. 航空制造技术,2008(24):62-65.
- [14] 龚清洪. 基于加工特征实例的零件工时预测评估[J]. 工具技术,2009,43(3):58-61.
- [15] 杨青海,祁国宁,黄哲人,等. 基于案例推理和事物特性表的零件工时估算方法[J]. 计算机集成制造系统,2007,43(5):99-105.
- [16] 蒋辉,范玉青. 基于单一产品数据源的 BOM 管理[J]. 北京航空航天大学学报,2003,29(5):447-450.
- [17] 黄学文,范玉顺. BOM 多视图和视图之间映射模型的研究[J]. 机械工程学报,2005,41(4):97-101.
- [18] 张会红,顾幸生,汪鹏君,等. 基于免疫算法的生产调度现状与展望[J]. 计算机集成制造系统,2008,14(11):2082-2089.
- [19] 常征,黄明,朱光明. 一种基于免疫原理的新优化遗传算法[J]. 计算机集成制造系统—CIMS,2005,11(7):1048-1055.
- [20] Zuo Xingquan, Fan Yushun. Solving the Job Shop Scheduling Problem by an Immune Algorithm [C]//Proceedings of the 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2005: 3282 - 3287.
- [21] 黄席樾,张著洪. 基于免疫应答原理的多目标优化免疫算法及其应用[J]. 信息与控制,2003,32(3):209-213.
- [22] 牛刚刚,孙树栋,余建军,等. 免疫进化算法求解静态 Job Shop 调度[J]. 机械工程学报,2006,42(5):87-91.
- [23] 杜辉. 制造执行系统中即时消息模块的设计与实现[J]. 枣庄学院学报,2009,43(5):26-29.

(编辑 王艳丽)

**作者简介:**杜 辉,男,1978 年生。南京航空航天大学机电学院博士研究生,枣庄学院物理与电子工程系讲师。研究方向为现代集成制造、自动控制系统。发表论文 15 篇。叶文华,男,1965 年生。南京航空航天大学机电学院教授、博士研究生导师。楼佩煌,男,1962 年生。南京航空航天大学机电学院教授、博士研究生导师。