

DOI:10.13196/j.cims.2015.01.013

复杂产品离散装配过程中的物料动态跟踪与管理技术

庄存波,刘检华,唐承统,邢香园

(北京理工大学 机械与车辆学院数字化制造研究所,北京 100081)

摘要:针对复杂产品装配中物料动态跟踪困难、物料信息可追溯性差的问题,提出一种基于流程和条码的复杂产品离散装配过程中的物料动态跟踪与管理技术。分析了复杂产品离散装配中的物料组成和物料流动过程,对基于流程和条码技术的复杂产品离散装配中的物料动态跟踪管理的三个关键实现技术进行了详细论述。阐述了实做物料的内涵,给出了实做物料的生成算法,并通过产品计划树实现了对实做物料信息的有效管理。设计并开发了软件系统,该系统在航天某厂试运行,应用效果良好。

关键词:复杂产品;离散装配;实做物料;动态跟踪;物料管理; workflow; 条形码

中图分类号:TP391.9 **文献标识码:**A

Material dynamic tracking and management technology for discrete assembly process of complex product

ZHUANG Cun-bo, LIU Jian-hua, TANG Cheng-tong, XING Xiang-yuan

(Laboratory of Digital Manufacturing, School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Aiming at the problem of difficult material tracking and material information reviewing for discrete assembly process of complex product, a material dynamic tracking and management technology based on workflow and barcode was proposed. The categorization and the flow process of material were analyzed, and three key implementation techniques on this basis were explained in detail. The concept of implemented material was proposed, the generation algorithm of implemented process was designed and the implemented material information was effectively managed by plan tree. The software system by using this technology was developed and applied in an aerospace-related manufacturing enterprise, and the satisfactory results were obtained.

Key words: complex product; discrete assembly; implemented material; dynamic tracking; material management; workflow; barcode

0 引言

以卫星、导弹为代表的复杂产品装配是典型的离散型装配^[1],具有面向订单生产、研发周期长、涉及的专业领域广、零部件数量多、以手工装配为主、单件或小批量生产等特点^[2]。复杂产品装配过程中存在大量的信息传递和资源协调,需要各个部门协同合作,其过程中的物料(主要包括组成该产品的

仪器设备、主料和辅料以及工具量具等辅具)动态精细化管理一直是工程的难点。尤其需要指出的是,在复杂产品的研制阶段,其装配过程是一个不断尝试、反复试验的过程,由于该过程中存在的生产扰动大、装配周期长和返工返修多等特点,导致产品研制阶段装配过程中的物料动态管理成为当前复杂产品研制的瓶颈问题之一。

目前国内外在物料管理方面的相关研究成果主

收稿日期:2014-04-25;**修订日期:**2014-11-04。Received 25 Apr. 2014; accepted 04 Nov. 2014.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275047);国防基础科研资助项目(A0420132501);总装预先研究资助项目(51318010102)。**Foundation items:** Project supported by the National Natural Science Foundation, China(No. 51275047), the National Defense Fundamental Research Foundation, China(No. A0420132501), and the Defense Pre-Research Fund, China(No. 51318010102).

要侧重于库存管理^[3]、企业资源管理^[4](Enterprise Resource Planning, ERP)和制造执行系统(Manufacturing Execution System, MES)等中的物料管理技术。其中ERP中的物料管理功能主要负责对企业各类物料、基础数据与公用数据等进行统一管理,并对企业内部生产相关的物料采购、库存和销售进行有序管理与控制,为企业的经营生产管理提供保障。然而,以上研究均缺乏装配执行过程中的物料动态跟踪技术方面的成果,导致目前企业管理人员仍缺乏有效的技术手段来掌握物料在车间装配过程中产生的动态数据,包括物料的状态、位置、消耗量、实际操作人员、装配时间、质量等信息,从而无法实现物料的动态跟踪与管理,以至于当车间现场出现生产扰动时,管理人员因无法及时响应而影响产品进度。围绕MES中的物料管理技术,在车间物料配送与路径优化方面,Huang等^[5]结合无线射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)技术设计了实时车辆配送系统,可实时规划运输线路并能够有效管理物料配送情况;Poona等^[6]结合RFID技术并采用遗传算法,设计了生产物料需求配送管理系统,可以在车间现场出现问题时有效快速地分配仓库中的物料资源,保证了车间的生产能力,提高了企业经营的效率以及车间现场生产环境和仓库环境。在车间物料跟踪管理方面,不同学者通过建立物料工艺状态、跟踪模型、跟踪算法等对车间物料的使用情况和运转情况进行跟踪。针对流程式生产过程,大连理工大学张楠等^[7]在分析钢铁行业对物料工艺状态描述要求的基础上,提出基于批次的钢铁行业物料工艺状态描述方法;刘晓冰等^[8]针对钢铁企业流程生产中的物料和合同实时跟踪问题,提出以炉号和生产批次为依据的物料跟踪模型,并采用Java 2平台企业版(Java 2 platform Enterprise Edition, J2EE)开发了面向钢铁企业的物料跟踪管理系统。针对离散生产机械加工过程,哈尔滨工业大学何霆等^[9]为解决离散企业物流管理及其过程中的相关质量问题,提出以物料清单(Bill of Material, BOM)为线索、以单据为中心构造追踪BOM的物流管理模型,并在此基础上提出基于完整信息的物料追踪算法和基于不完整信息的物料追踪算法来生成物料跟踪结果,然而该成果只开展了针对物料的正向追踪(即物料追踪,指跟踪物料在装配过程中的走向,即物料被装配到了哪个产品上),不涉及逆向追踪(即产品追踪,指跟踪某个产品用了哪些批次的哪些物料、数量是多少,以及物料安装使用的人员、工

位和装配时间等)。西北工业大学刘红艳^[10]针对航天企业车间在实施物料管理信息化过程中亟需解决的物料管理手段落后、物料信息采集不及时等现状,提出基于MES的物料管理系统模型,针对每一批次投产的零件,采用在制品跟踪单的方式跟踪在制品的加工活动。针对柔性装配生产过程,合肥工业大学徐辉等^[11]针对机械产品柔性装配过程的特殊性,建立了以工艺配置为导向、工序为中心的产品追踪BOM的扩展模型,并提出一种基于该模型的工序级物料追踪方法,但该方法缺乏对物料反复拆装、出现缺料、质量或者其他问题时的过程跟踪,而且没有提及如何有效管理与物料相关的过程信息。

综上所述,目前国内外的研究成果针对不同行业,从不同角度探索了对车间物料进行跟踪与管理的方法,但大多是针对流程式生产过程、离散生产机械加工过程和基于大批量生产模式的柔性装配线生产过程,较少涉及复杂产品装配中的物料动态跟踪技术。由于复杂产品的制造方式属于工程项目型生产,存在以下问题使得现有的物料动态跟踪研究成果难以应用到复杂产品装配中的物料动态跟踪管理:①经常由1个装配小组负责1个批次产品的装配,大部分装配工作是在一个工位或某几个工位上完成的,大量装配所需的物料扎堆在工位旁边,导致物料管理困难。②复杂产品装配过程经常出现反复拆装的情况,返工返修较多,在产品研制阶段这种现象更为突出;同时,由于航天产品注重产品的可追溯性,需要对关键装配工序的状态和关键件与重要件的使用情况进行严格控制,为此需要对关键件和重要件的每一次装配使用情况、来源和去向、位置、出现的质量问题、缺料问题等进行详细完整的过程记录并进行有效管理,因此其物料动态跟踪已经成为工程难题。

由于缺乏相关方法和工具,当前我国复杂产品离散装配中的物流管理主要集中在领料、报缺料、物料配送及路径规划等环节,没有将物料管理与装配过程融合,导致物料的动态跟踪管理困难,难以实现物料信息的实时动态与统一管理,使得在产品交付时难以全面掌握产品物料的来源、走向、安装过程、质量等信息,并导致后续的质量追溯和维修困难。针对以上问题,本文在分析复杂离散装配物料流动过程的基础上,提出一种基于流程和条码的物料动态跟踪与管理方法。该方法的核心思想是通过引入工作流技术,将物料管理与装配过程相融合来实现物料的动态跟踪管理,并通过引入条码技术来实现

车间物料的唯一标识和信息的实时输入。该方法主要包括两个部分:①以流程为核心,针对装配计划下的每一个具体产品,都生成一个流程化的、由一系列装配流程节点组成的装配工艺流程图,并以装配流程节点为基本单元,将其所涉及的物料信息(包括弹上设备和火工品信息、零部件信息、标准件信息、工装工具信息、主料辅料信息等)、工艺信息、检验信息与对应的装配流程节点相关联;②在生产现场装配时,采用条码对车间实物进行唯一标识和数据录入,并通过对流程图中每个流程节点相关联的物料信息的动态管理与监控(在装配过程中实时采集物料的实际操作人员、装配时间、消耗量、质量、所属装配流程节点等信息,并对数据进行统计分析,且以可视化看板的形式展示),来实现对物料的全过程精细化管控,从而为后续的产品维修和质量追溯提供完整准确的数据源。

1 离散装配过程中的物流分析

复杂产品装配过程中,其物料主要包括产品物料和非产品物料。产品物料主要指用到产品上的物料,包括仪器设备、主料(一般为金属材料)和辅料(一般为非金属材料,如扎带、胶水等)等;非产品物料主要指工装、工具和量具等。

以某航天器总装企业为例,其装配中的物流过程如图 1 所示,主要包括厂级物流流动、车间级物流流动和工位级物料使用三个阶段。

(1)厂级物流流动 型号计划员(或厂调度员)根据订单任务,在 ERP 系统中编制物料需求计划,并生成对应的物料采购计划和物料生产计划。采购中心根据物料采购计划从供应商采购物料,经检验合格后入一级库房(包括中央齐套库和采购中心库房)。制造车间调度员根据物料生产计划生产自制零部件等物料,经检验合格后入中央齐套库,ERP 系统实时更新库存信息。型号计划员下发装配计划至总装车间,总装车间调度员获取工艺师编制的 BOM 信息,对计划进行分解后调度排产,同时发起装前物料准备任务。车间库管员根据 BOM 去一级库房领料入库,确保计划执行所需的物料齐全后反馈给车间调度员,车间调度员下达作业计划至装配组长。

(2)车间级物流流动 装配组长根据工位领料单去车间库房申请领料,物料齐全后领料至工位物料存放处。如果物料不齐全,则车间库管员根据实际情况申请以下三个流程中的一个,包括直接从物资处领取流程、向一级库房领取物料流程或者申请

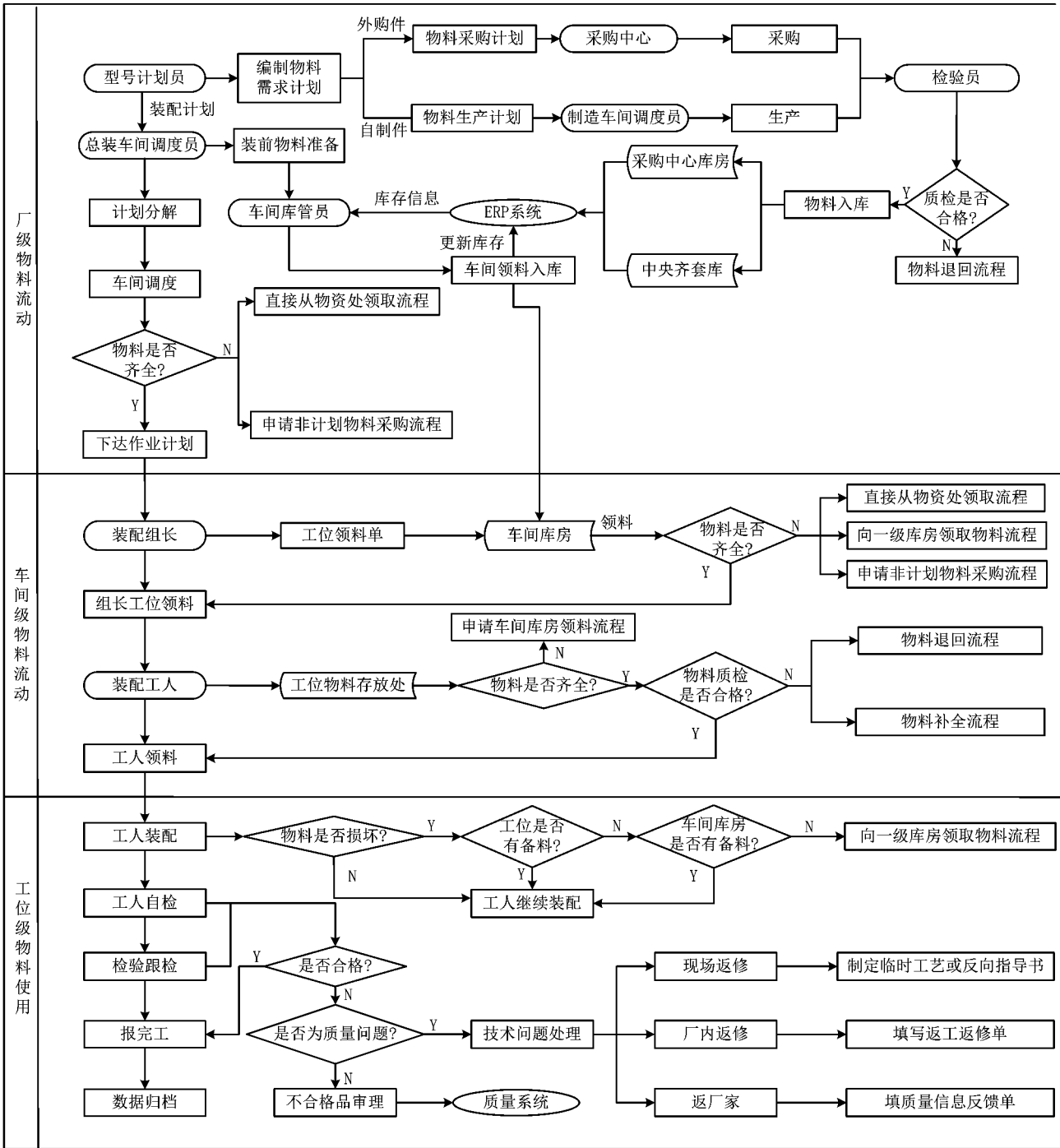
非计划物料采购流程。装配工人根据工序 BOM 去工位领料,保证物料齐全且质检合格后开始装配操作。如果工位物料不齐全,则装配组长去车间库房领料;如果物料质检不合格,则申请物料退回流程和物料补充流程。

(3)工位级物料使用 物料准备齐全后,装配工人进行装配操作,并实时记录装配过程中的物料动态数据,包括实测数据记录信息、签署信息、物料信息等。当出现物料损坏等问题且影响了装配计划的执行时,及时反馈给管理人员,记录物料问题信息,根据物料缺料情况去工位处申请补足物料。如果工位没有备料,则装配组长去车间库房领料;如果车间库房也没有备料,则车间库管员向一级库房领取物料,直到保证物料齐全且不影响装配计划的执行为止。装配工人操作完成后,工人自检,检验员跟检,检验合格后该道工序才算完工。当装配计划下的所有产品的所有工序都完成后,整个装配计划才算完成。在装配计划完成后,装配工人向车间调度员报完工,并由相关人员进行数据归档,将产品装配过程中的质量数据、物料使用和质量数据、检验数据、装配知识和经验以及装配历史记录整理后归档,形成产品履历表,保证装配过程数据的可追溯。

在上述过程中,工位级物料使用阶段是核心,物料的动态跟踪管理主要针对该阶段。物料使用阶段作为装配实施过程中最重要的一个环节,将产生很多动态数据,包括实际使用情况数据、质量数据、问题与经验数据和装配历史数据等,这些数据一方面将为后续产品质量可追溯以及产品维修提供支持,另一方面也为后续该产品的生产提供历史借鉴和经验数据。因此,如何准确实时地采集这些过程数据,并快速、有效、准确地从中获取有用信息,是目前工程中亟需解决的问题。

2 基于流程和条码的离散装配过程物料动态跟踪管理方法

物料动态跟踪管理技术主要是对产品装配过程中物料的位置、质量及使用情况进行动态跟踪,以实现物料信息可追溯并进行全面有效的管理。物料动态跟踪管理是针对与装配过程相关的活动展开的,重点包括物料使用情况的动态管理(装配时间、责任人、装配工位、车间、数量、装配次数、装在哪个产品上及装配历史记录等)、物料质量控制(确保物料质量合格,使装配过程能顺利进行且装配产品符合质量要求)以及物料信息管理(确保物料数据采集完



整,领料数据和实装数据相符合,做到物料信息的有效管理和可追溯)。可追溯性是指通过记载的标识可以追踪到实体的形成历史、应用情况或存储位置的能力。航天产品强调产品的可追溯性,对每件产品尤其是装配完成又发现质量问题的成品,要求能追溯到组成该件产品零/部/组(整)件的编号、批次、装配人员、检验人员、完成时间及装配质量记录等信

息,以便后续追踪处理^[12]。

物料动态跟踪管理将主要对车间实物的实际使用情况、实物质量情况和出现的问题进行动态跟踪与监控,而且在产品装配完成后能对物料信息进行全面有效的管理,保证质量可追溯,其动态跟踪管理流程图如图 2 所示,即各相关人员(包括装配人员、检验员、车间调度员、主管工艺师等)在物料装配使

用、技术问题处理和质量问题处理的每一个阶段都实时记录与物料相关的信息,包括使用信息、质量信息和问题信息,最终形成实做物料信息关联在产品装配计划树上(装配计划树是产品装配结构树的衍生,它继承了产品装配结构树中节点和节点的关系,并在相应的节点下添加装配计划信息、流程信息等),通过产品装配计划树统一管理实做物料信息,实现物料信息的可追溯;最后连同其他装配过程数据归档,形成完整的产品装配过程数据包。

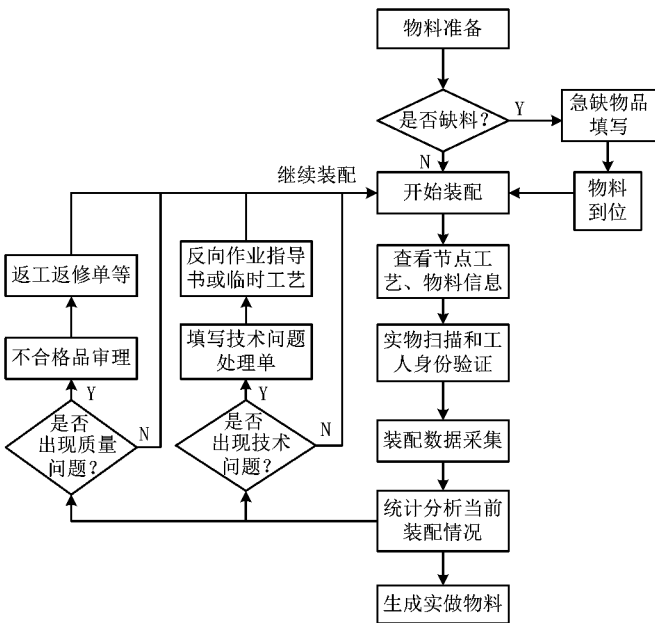


图2 物料动态跟踪管理流程图

基于以上对离散装配型企业的物流过程和物料动态跟踪管理要素的分析,提出一种基于流程和条码的离散装配过程物料动态跟踪管理方法,该方法主要包括三个关键实现技术:

(1)基于流程的结构化装配工艺设计和物料信息管理关联 引入 workflow 管理技术,针对装配计划下的每一个具体产品,都生成一个流程化的、由一系列装配流程节点组成的装配工艺流程图,并将物料信息与对应的装配流程节点相关联。

(2)基于流程的装配节点物料动态信息采集 生产现场装配时使用条码对车间实物进行唯一标识,装配工人按照装配流程图上定义的装配流程节点顺序进行装配操作,根据节点物料清单选择物料实物,采用条码扫描技术快速准确地获取该实物的基本信息,并实时采集装配实施过程中产生的实物使用信息、质量信息等,关联在对应的装配流程节点上。

(3)装配过程中的物料动态跟踪 建立以流程为核心、以条码编号为唯一标识的物料装配过程信息模型,实现单个物料的装配过程信息跟踪与查询;通过对流程图中每个装配流程节点中的 BOM 状态、进度状态、使用情况的可视化监控,实现物料的可视化和精细化管控。在该动态跟踪管理方法的基础上,提出并阐述了实做物料的概念,给出了实做物料的生成算法,并通过建立装配计划树来对实做物料进行管理。

复杂产品装配过程中需要使用的物料数量庞大、种类繁多,难以对每个物料实物都做到精细化跟踪与管理,而且从成本控制、实际操作层面考虑也没有必要做到如此精细,例如对于标准化的螺钉,管理人员更关注的是其所属批次的整体流向,无需了解每个螺钉的流向。因此,为了实现精细化的车间物料跟踪与管理,针对不同类型的物料将采用不同的跟踪管理方式。下面以航天器为例进行详细说明。

根据物料是否装在产品上,航天器装配过程中用到的物料分为弹上物料和非弹上物料。弹上物料包括弹上设备、火工品、仪器仪表、主料(一般为金属材料)、辅料(一般为非金属材料)、零部件和标准件;非弹上物料包括工装、工具和量具。为此,根据物料对产品质量和进度影响的重要性、物料的成本、大小以及是否可以退库等实际情况,将物料分为关键控制物料、普通物料和可重用物料。其中关键控制物料为本文的主要研究对象,其他为辅。

1)关键控制物料 包括弹上设备(如一舱、二舱等)、火工品(如战斗部、安全执行装置等),一般从其他企业采购而来,是产品的重要组成部分,因此成本较高,对产品质量的影响较大,是后续质量追责和产品维修的重要组成部分,也是需要严格控制的物料,因此在物料流动和装配使用过程中采用单件跟踪的方式,实时准确记录与其有关的状态信息(待装、已装、返修等)、质量信息和使用信息(装配时间、装配人员、第几次装配、对应装配工序、装在哪个产品上等)。同时,为保证跟踪的有效性和准确性,采用基于条码的方式,即每一个设备在入库时都贴上唯一的条码,装配前通过扫描条码获取其来源厂家、批次、名称、代号和条码编号等基本信息。

2)普通物料 主要包括零部件和标准件。因为其单个成本相对较低、体积小,库存一般较为充足,单件控制不仅难度大也没有必要,所以通过批次的方式来跟踪管理,每一个批次拥有唯一的条码。通过条码扫描技术和表单填写方式追踪批次物料的去

向以及使用数量、质量、使用人员等信息。

3)可重用物料 主要指工装、工具和量具。工装、大型工具量具(三坐标测量仪等)采用单件跟踪管理方式,小型工具量具(如力矩扳手、温度计、千分尺等)采用批次跟踪管理的方式。单件跟踪与关键控制物料的处理方式类似,即在物料使用过程中,相关人员扫描物料条码信息,实时记录工装、工具和量具的使用记录信息与退库信息,包括使用数量、使用人员、使用工序、使用时间、质检信息、是否退库和退库时间等;批次跟踪与普通物料的处理方式类似,只是多了与退库相关的信息,这里不再赘述。

通过将物料信息与条码信息关联(对于采用批次管理的普通物料、小型工具量具,一个批次对应一个条码;对于采用单件管理的关键控制物料,每一个实物都对应一个条码,但是依然有其所属批次信息),实现对车间实物的唯一标识,确保物料信息采

集和跟踪的准确性。

3 面向复杂产品装配过程的物料动态跟踪管理的实现技术

面向复杂离散装配过程的物料动态跟踪管理的技术实现流程如图 3 所示,主要由基于流程的结构化装配工艺设计和物料信息管理关联、基于流程的装配节点物料动态信息采集、装配过程中的物料动态跟踪三部分组成。

3.1 基于流程的结构化装配工艺设计和物料信息管理关联

在装配工艺设计阶段将装配过程流程化,首先绘制装配工艺流程图,流程图由一系列串(并)联的流程节点组成,流程节点类型包括总装节点和部装流程节点(也可以说是部装工序节点),一个总装节点由若干部装流程节点组成,关于流程图绘制的具

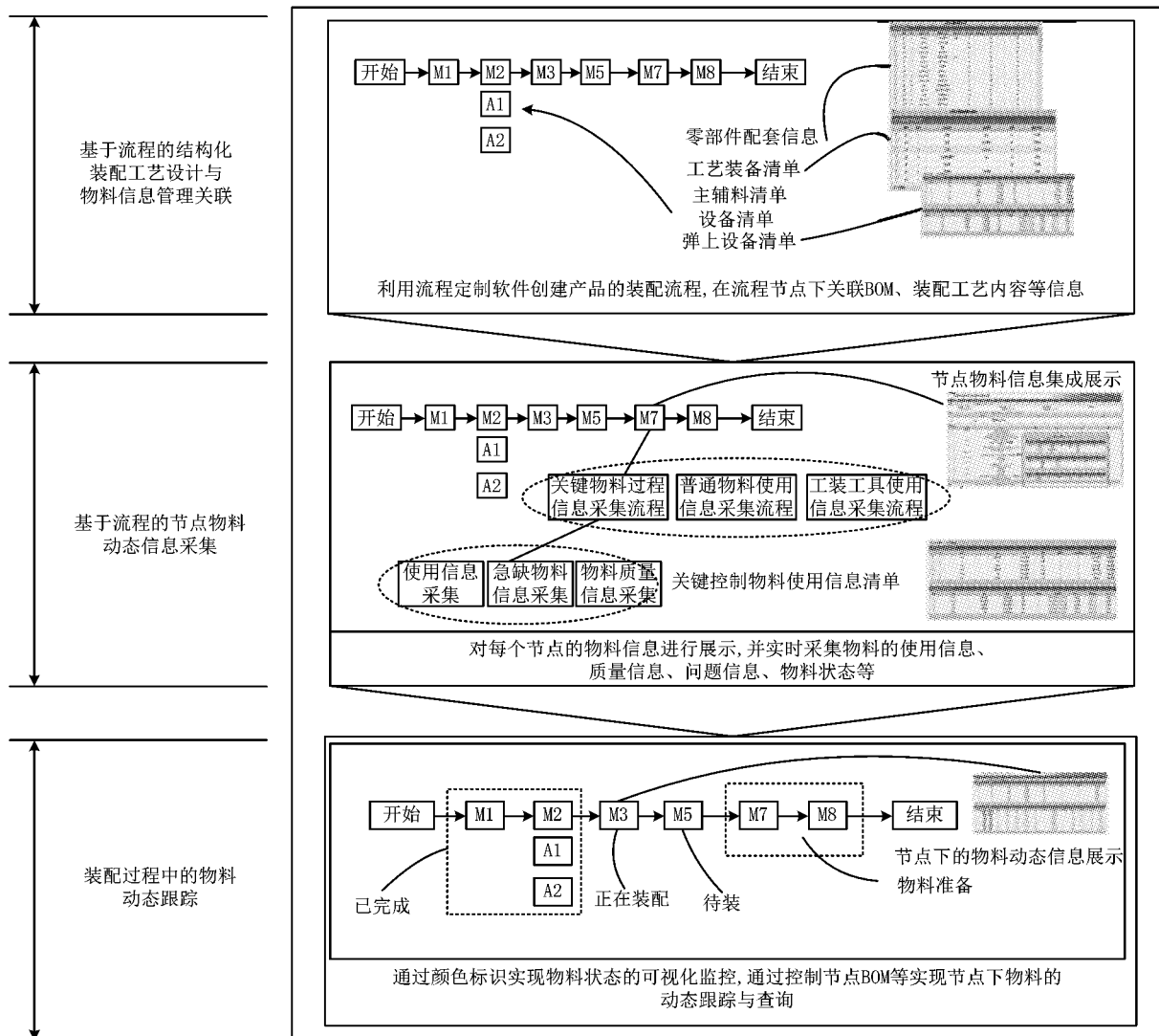


图3 复杂离散装配过程的物料动态跟踪管理技术实现流程

体描述参见文献[13]。针对流程图中的每一个部装流程节点,其上关联了节点基本信息、工序内容信

息、质量控制信息和物料清单信息,流程化的装配工艺信息模型如图 4 所示。

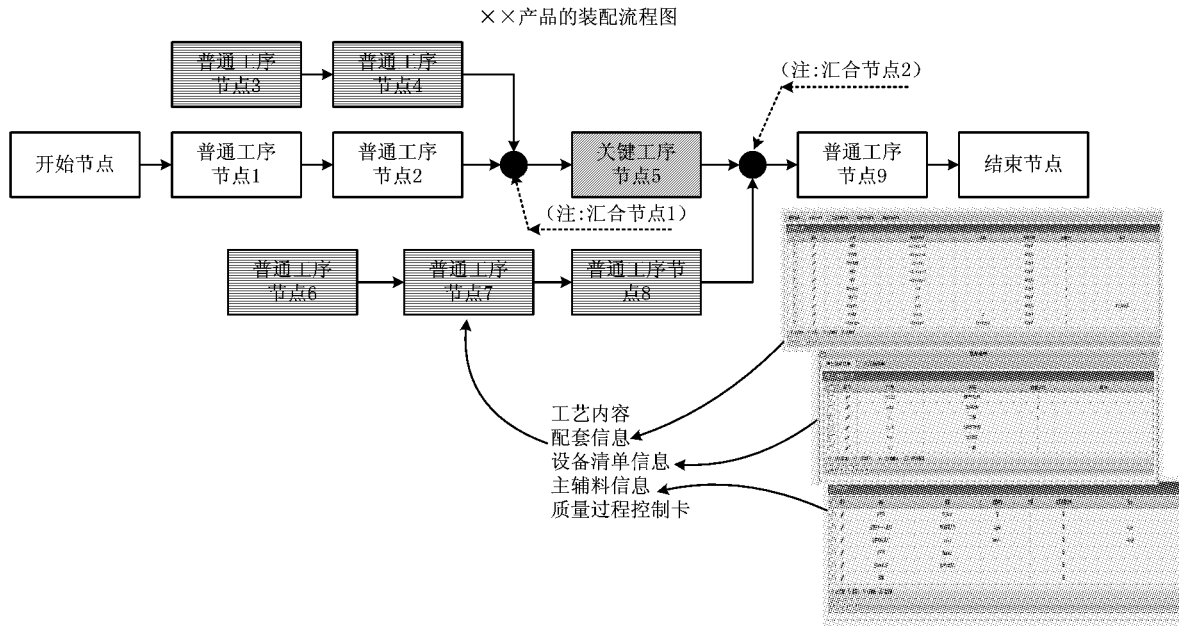


图4 面向流程的装配工艺信息模型

针对图 4 中的每个部装流程节点,将完成该节点的工艺内容信息、质量过程控制卡内容、BOM 等信息加载到该节点上。针对普通工序节点 7,其 BOM 信息及节点其他工艺信息添加界面如图 5 所示,图中右边为 BOM 信息添加页面中的零件清单信息添加界面。



图5 装配流程节点BOM信息添加界面

根据物料种类的不同,将 BOM 分为零部件清单、标准件清单、工装工具清单、主要材料清单、辅料材料清单、设备清单和火工品清单。以工装工具清单和设备清单为例,其信息添加界面如图 6 和图 7 所示。

3.2 基于流程的装配节点物料动态信息采集

在生产调度阶段,调度人员接收装配计划与技术文件资料,给装配工艺流程中的每个装配节点添加装配资源约束(人员、工位)与时间约束,完成工艺流程向具体的车间实际装配流程的实例化转变。

由于在装配工艺设计阶段,零部件清单、标准件

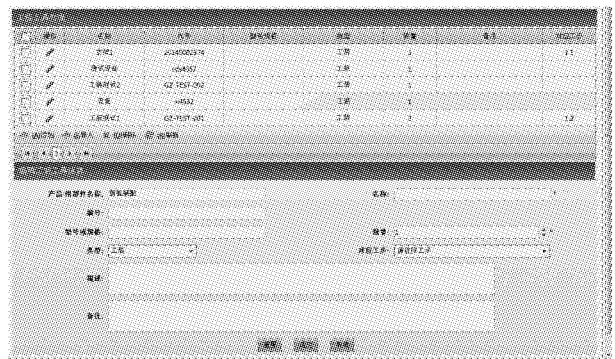


图6 工装工具清单信息添加界面

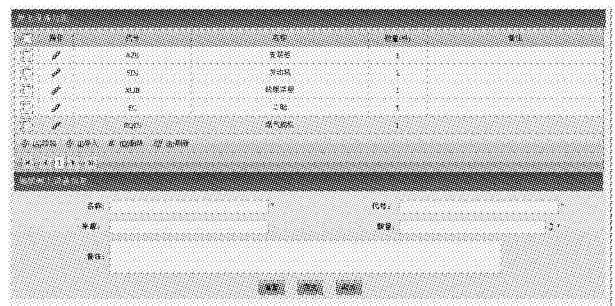


图7 弹上设备清单信息添加界面

清单、工装工具清单和弹上设备清单等各种类型的物料信息以及其他指导装配的工艺信息与装配流程节点进行了结构化关联,装配工人在装配过程中,可以根据装配流程图上的每个流程节点查看对应的工序内容、质量控制内容、节点 BOM 等信息,从而指

导其合理使用物料完成装配操作。在装配计划执行阶段,装配工人根据装配流程图上定义的装配流程节点顺序,并依据相关技术文件和工艺文件进行装配操作。

在节点装配过程中,操作者需要实时采集该节点下的物料过程数据。装配人员或检验人员根据与流程节点相关联的 BOM,选中需要采集的物料对象,采取对应的采集方法、流程或设备,按照要求依

次对采集对象进行数据采集(包括使用数据、质量数据和缺料数据等),对已采集的数据实时地进行存储和传输。完成某个节点下的所有采集任务和装配操作后转入下一个装配节点的操作和数据采集流程。基于工作流的装配流程与物料数据采集流程嵌套示意图如图 8 所示。针对不同类型的物料(见第 2 章对物料的分类),采用不同的数据采集流程和采集方式来采集装配过程中动态产生的物料信息。

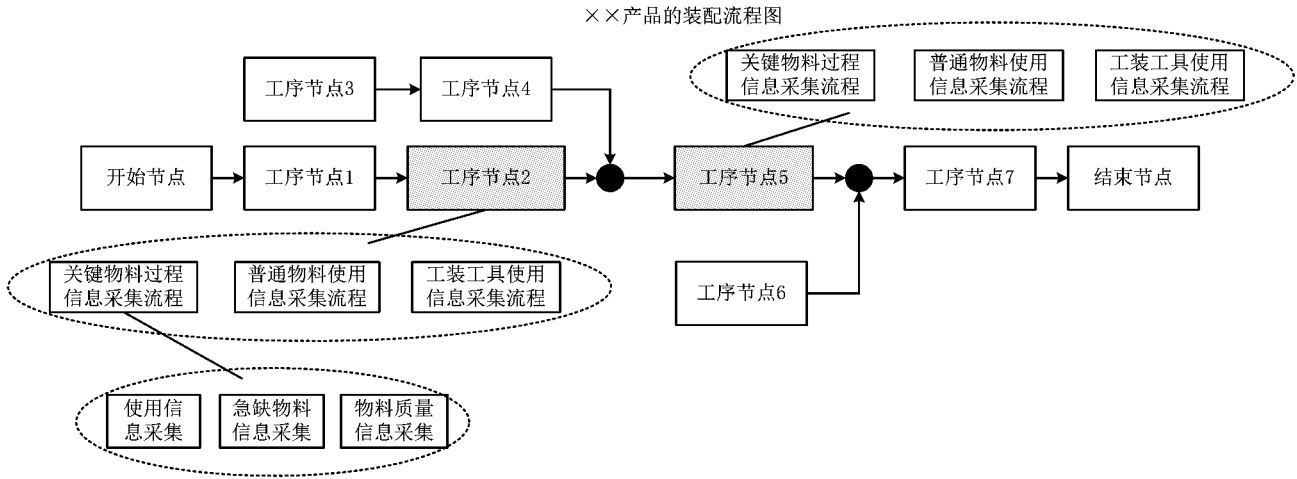


图8 装配流程与物料数据采集流程嵌套示意图

(1) 弹上设备等关键控制物料

弹上设备、火工品等关键控制物料的数据采集流程如图 9 所示。装配工人每使用一个设备,都用条码枪扫描对应的条码并进行身份确认,系统自动记录物料使用的装配节点、第几次装配以及装配人

员、装配时间等责任信息,更新工艺清单列表中对对应物料的状态和数量使用情况,形成该物料的实做数据。电磁敏感类、火工品等部组件的条码一般贴在外包装上(通过对条码进行分类编码来确保其安全性),操作者在使用前对相应外包装上的条码进行扫描。

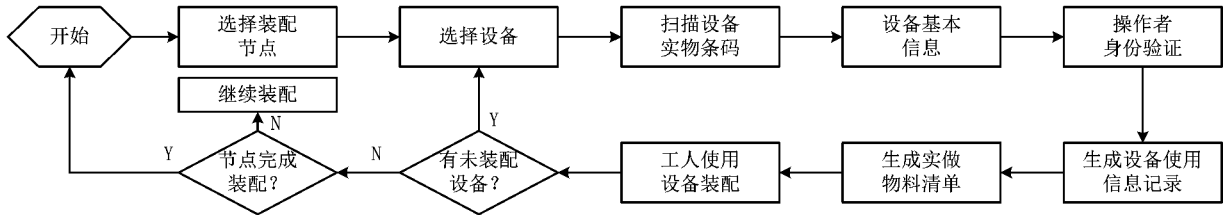


图9 关键控制物料信息采集流程

以图 4 中的装配流程节点 7 为例,说明物料使用信息的采集过程。假设与装配节点 7 相关联的弹上设备清单中包括 2 个燃气舵机,每个燃气舵机实物在车间都有唯一的条码进行标识。装配工人在使用其中的一个燃气舵机时,用条码枪扫描对应的条码获取该实物的基本信息(名称、编号、来源、备注信息等),签署(即身份确认)后开始装配操作,系统自动生成该燃气舵机的一条使用记录信息并显示在弹上设备使用信息列表中;与此同时,设备清单列表中对应物料的未使用数量从 2 变为 1,状态由未使用

变为“部分使用”。当装配工人按照相同步骤使用完另外一个燃气舵机后,生成一条新的弹上设备使用记录,设备清单列表中对对应物料的未使用数量变为 0,状态也将相应地变为“已全部使用”,表示该类物料都已经装配完成。弹上设备物料清单与实际使用展示页面如图 10 所示。

在复杂产品装配过程中,产品经常会出现检验不合格的情况,尤其在产品研制阶段,其装配过程是一个不断尝试、反复试验的过程,存在大量返工返修现象^[14],导致产品反复拆装,每一次装配操作,设备

图10 装配节点物料使用信息展示页面

实物的使用信息都会发生改变,因此实时准确地记录每一次的装配操作信息,对保证产品的可追溯性以及质量追责具有重大的意义。

当产品出现技术问题时,型号工艺员提出该技术的解决方案,同时填写技术问题处理单,检验员、型号工艺员和设计人员共同签字后才算审理通过。技术问题处理单审理通过后,型号工艺员将反向作业指导书或临时工艺提交给车间调度员,车间调度员将反向作业指导书或临时工艺下发至车间钳工和检验员来指导现场装配和检验。当钳工进行反向作业或者根据临时工艺进行操作时,关键控制物料使用信息采集流程和正常装配时的流程一致,系统实时记录物料的使用记录信息,具体包括使用该物料的装配工序、对应的工艺文件类型(反向作业指

导书或临时工艺)、第几次装配以及装配人员、装配时间等信息。

当在装配过程中发现某弹上设备质量不合格时,检验员按照要求填写相应的审理单并提交给审理人员进行审理。主管工艺师审理通过并签署后,填写返工返修单,将设备返给厂家,系统记录相关实物信息、对应装配节点信息、质量问题记录信息、签署信息以及对应的返工返修单信息。

另外,在装配现场,作为产品装配的主要组成部分,若弹上设备缺料则将导致装配计划难以继续执行,必须待设备齐套后才能开工,影响了交货期。当出现设备缺料问题时,一方面,装配工人在该节点下添加急缺物料信息,并反馈至车间调度员。车间调度员根据反馈的信息及时处理,保证物料迅速到位,以免影响装配进度。而且,车间调度员在总装生产日报中存在问题一栏进行急缺物料缺项记录,说明预计齐套时间并进行看板展示,并作为问题与经验知识库数据来源的一部分统一管理。另一方面,装配工人可以发起跨序操作申请,填写申请原因;经检验员和主管工艺师签署同意并说明原因和解决措施,装配工人方可进行跨序操作;系统对相关过程信息进行记录,自动成为产品质量数据记录的一部分。设备缺料问题处理流程如图 11 所示。

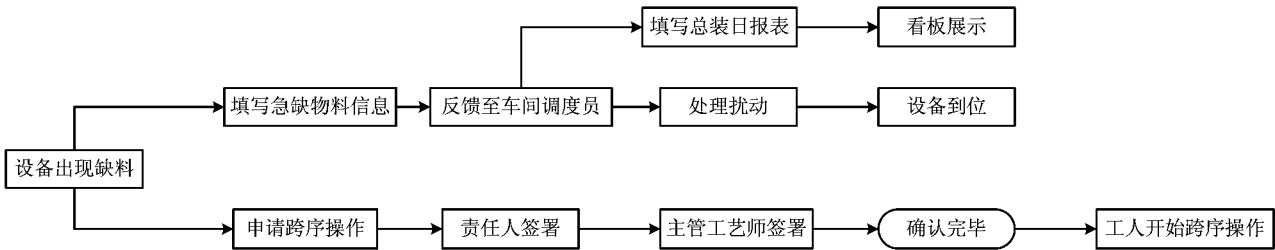


图11 设备缺料问题处理流程

(2)普通物料

针对零部件、标准件等普通物料,采用基于条码扫描和手工填写相结合的方式采集物料的动态使用信息,零部件、标准件的条码贴在装载批次物料的包装盒上,其数据采集流程如图 12 所示。当装配工人在装配过程中使用这些物料时,首先找到 BOM 中对应的包装盒,用条码枪扫描装载物料包装盒上的条码,获取物料名称、代号、规格、所属批次等信息,并填写物料实际使用数量等信息后签署确认,系统自动记录装配人员、装配时间、所属装配节点、工位、所属批次等信息。在产品追溯阶段,既可以通过批次号查询到批次物料的流向、消耗量等信息,也可以通过数据统计分析获取某个具体产品消耗该批次物

料的数量以及所对应的工序节点信息。

(3)工装和大型量器具

工装和大型量器具采用与关键控制物料类似的处理方式,装配工人在准备使用之前扫描对应条码并进行身份确认,系统更新物料使用状态并记录使用人员、使用时间、使用节点、使用工位、使用产品等信息。工装完成后,型号相关负责人提出工装清退需求,生产保障人员及时组织工装退还或退库,记录相关退库信息,相关数据采集流程如图 13 所示。

3.3 装配过程中的物料动态跟踪

装配过程中的物料动态跟踪包括两方面:①对单个物料实际装配过程信息的跟踪;②对装配流程节点下物料动态信息的跟踪。

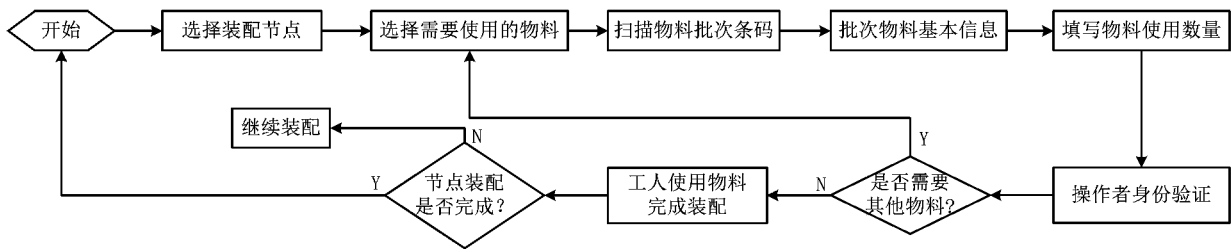


图12 普通物料使用信息采集流程图

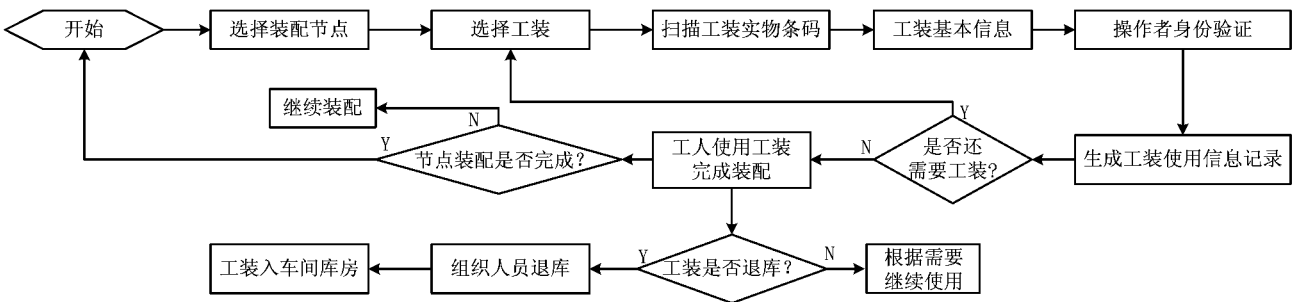


图13 工装动态信息采集流程

(1)对单个物料实际装配过程信息的跟踪与查询

在实际装配过程中,有时需要对某些关键性物料、工装工具等进行跟踪,获取其走向、位置信息、状态信息、齐套情况、质量信息和使用信息等。然而,在装配过程中,各种正向、逆向流程以及现场的实际问题产生了很多物料动态数据,各种数据之间相互关联融合,构成了复杂的数据结构。如何理清它们之间的关系,建立合理的数据结构模型,快速、准确地获取各个层次用户所需的物料数据至关重要。本文运用面向对象的思想,结合关系数据库的理论,以弹上设备为例,建立了如图 14 所示的物料装配过程信息统一建模语言(Unified Modeling Language, UML)类图。

该模型以流程为核心组织过程数据,以条码为车间实物唯一标识,通过条码扫描获取物料基本信息,将装配过程与物料管理融合,在装配过程中实时采集物料的使用信息、质量信息、问题信息并关联在实例化的流程节点上。由于每个计划下的每个具体产品都对应了一份实例化的装配流程图,装配流程图又是由一个个实例化的流程节点组成,通过该模型可以实现针对单个物料的装配过程信息的搜索与管理。

基于该模型,用户通过物料的属性信息(物料名称、代号、规格、条码号等)就可以实时快速获取和搜索到与该物料相关的装配过程信息,包括物料的质量

信息、使用信息以及出现的一些问题信息,从而实现了物料的有效跟踪。其中使用信息包括该物料装到了哪个产品上、使用该物料的装配流程节点(节点关联了相应的 BOM 信息及工艺内容等信息)、装配人员、装配时间、工位和车间信息。问题信息包括物料的齐套情况(是否缺料、何时能够到达等)、技术问题处理以及对应的单据等。

(2)装配流程节点下的物料信息的动态跟踪

装配节点下的物料动态跟踪包括物料状态的可视化监控以及流程节点下的物料过程信息跟踪与查询。

物料状态的可视化监控是指通过装配节点状态的监控来实现对物料状态的精细化、可视化监控。在装配实施过程中,虽然有装配流程图对装配过程进行图形化显示,但是并不能形象化地表达每个装配流程节点的实际执行状态和物料状态,不利于车间管理人员实时监控产品的装配执行状况和物料使用情况。为了形象化表达装配节点的实际执行状态和物料使用情况,通过引入颜色集,对装配流程图中的装配节点进行着色,形象展示装配节点的不同状态,提高流程图的可视化程度。颜色集合与节点状态的对应关系如表 1 所示。

当所有节点均为红色时,表明装配计划还没有开始,物料仍然处在一级库房;当所有工序节点为绿色时,表明该计划结束,物料处于已完成状态;当车间调度员发起 4M1E 审查任务后,装配计划进入物

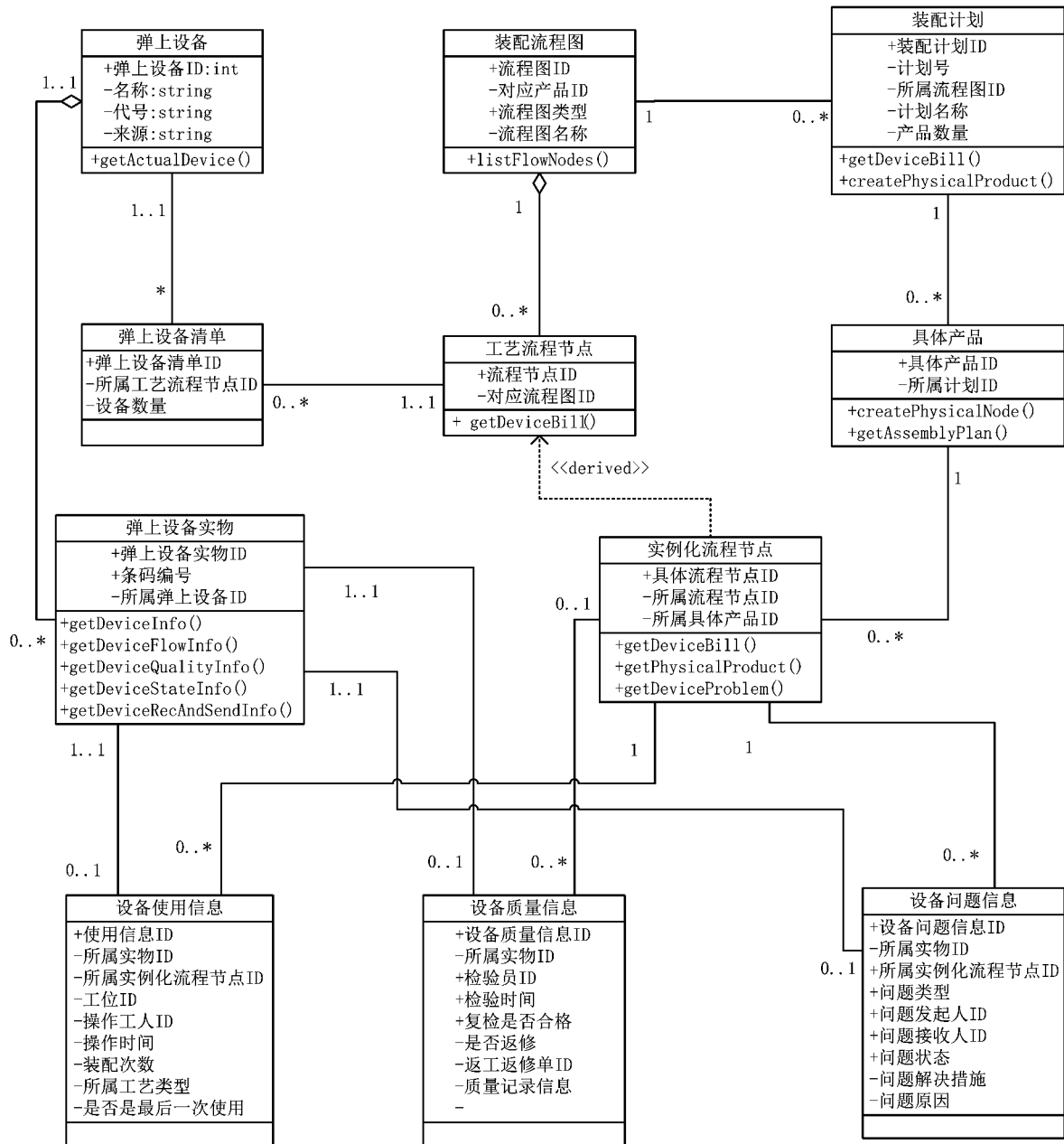


图14 弹上设备装配过程信息模型

表 1 工序状态的颜色集

装配节点状态	颜色
未开工	深红色
工位物料准备	橙色
待装配	浅蓝色
正在装配	蓝色
物料质量问题	黄色
物料缺料问题	黑色
挂起状态	灰色
完成状态	绿色

料准备阶段,此时节点由深红色变为橙色;当物料准备齐全后,装配工人根据节点 BOM 领料,此时节点由橙色变为浅蓝色,表示该节点处于待装配状态;当在物料准备齐全后,该节点责任人正在进行装配操作,节点状态变为蓝色;当节点因为物料出现损坏等质量问题、将进入返修或报废流程时,节点颜色自动变为黄色;当节点出现物料缺料时,责任人申请急缺物料,节点颜色自动变为黑色;当该节点不需要执行时,进行挂起操作,节点颜色变为灰色。如图 15 所示为装配节点状态示意图。

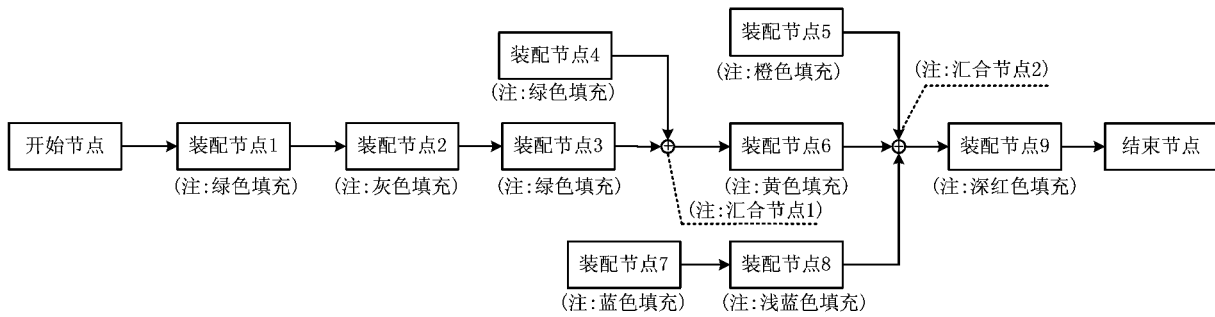


图15 装配节点物料状态可视化展示

另一方面,根据 3.2 节所述基于流程节点的装配节点物料信息采集方法,车间实时采集的与物料相关的过程信息与具体产品下的各个装配节点相关联,因此用户需要对各个产品下的流程节点物料信息进行跟踪与查询,以便掌握流程节点下车间物料实物的具体情况,及时解决出现的物料问题。装配流程节点下的物料动态信息展示界面如图 16 所示。

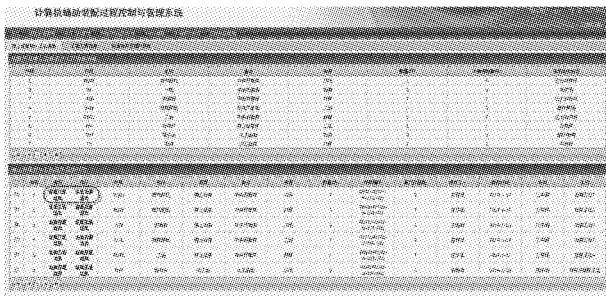


图16 装配流程节点下的物料动态信息展示界面

4 实做物料的生成

复杂产品由于产品组成复杂、零部件组成数量庞大、工艺变动频繁,在装配过程中必然产生大量的物料实做数据。在产品装配完成后,管理人员很难从大量的表单数据和纸质文档中获取有效的物料信息,例如某个关键控制物料装到了哪个产品上、谁装配的、何时进行的装配操作、拆装了几次等;又如产品的物料实际消耗量是多少、哪些物料的急缺影响了装配计划的执行等。因此,如何快速获取并有效地管理物料的实做数据一直是工程中的难点。通常,物料在装配过程中实际产生的动态数据集也称为实做物料(或称为实做 BOM)。

所谓实做物料,是指从车间物料实物使用、检验、问题处理的角度,在实际装配执行过程中动态产生的与物料实物相关的过程数据记录信息,以及组成最终产品的物料统计信息集合。实做物料记作

RM,包括物料使用(PS)信息、物料质量(MQ)信息、物料问题(WP)信息。实做物料作为车间生产最终的归档依据,反映了产品装配过程中完整的物料数据,为后续产品可追溯性分析和经验与知识积累提供了重要的数据基础。

结合图 14 所示的模型,以物料使用信息为例,给出如下相关模型表达式:

定义 1 单个物料使用事件模型。物料使用事件模型可表示为 $MU_n = \{M_k, BC_k, t_n, P_n, W_n, PN_i, S_n, IR_n, IL_n\}$ 。其中: M_k 表示物料编号; BC_k 表示物料条码编号; t_n 表示使用时间; P_n 表示操作人员; W_n 表示工位编号; PN_i 表示流程节点; S_n 表示第几次装配; IR_n 表示物料使用所属工艺类型,包括正常工艺、临时工艺和反向作业指导书; $IL_n \in \{0, 1\}$ 为同一对象最终装配判定变量,如果本次装配是该对象的最后一次装配使用,则 $IL_n = 1$,否则 $IL_n = 0$ 。

定义 2 实例化装配工艺模型。实例化装配工艺模型表示为 $PF = \{FD, FT, FB, PD\}$ 。其中: FD 为装配工艺流程图; $FT \in \{0, 1, 2\}$ 为工艺类型变量, $FT = 2$ 为反向作业指导书, $FT = 1$ 为临时工艺, $FT = 0$ 为正常工艺; FB 为装配工艺基本属性集合,包括工艺文件名称、编号、版本、负责人、编制人员、批准日期、完成日期等; PD 为所属具体产品。

定义 3 父工艺和子工艺。当 P_b 是针对 P_a 所下发的临时工艺或者反向作业指导书时,称工艺 P_b 是工艺 P_a 的子工艺,工艺 P_a 是工艺 P_b 的父工艺。一份工艺最多只有一份父工艺,但可有多份子工艺。

当某个弹上设备实物因为某种原因不止一次装配时,每一次装配都需要进行过程记录。在单个物料使用事件模型中,对同一个实物对象每进行一次装配操作,首先获取最近的一次记录信息(此时其 $IL = 1$),置 $IL = 0$,并获取其是第几次装配 S_n ;同时置该对象的使用记录中的 $IL = 1, S_n = S_n + 1$ 。

基于上述理论,设计了实做物料中装配使用信息生成的相关算法,物料质量信息与问题信息的生

成算法与此类似,不再赘述。装配使用信息、物料质量信息、物料问题信息之间通过唯一的条码编号进行关联和对应,共同组成某实物的实做物料信息。

算法 1 获取某个弹上设备实物的最后一次装配使用记录信息。

输入:弹上设备实物 DE 。

输出:最后一次使用记录 DR_{last} 。

步骤 1 根据实物 DE 中的条码编号信息 BC 获取使用记录集合 $MU = \{MU_i | i=1, 2, \dots, n\}$ 。

步骤 2 若 $MU = \emptyset$,则将 MU 赋给最后一次使用记录 DR_{last} ,转步骤 4;否则,转步骤 3。

步骤 3 任取 $MU_k \in MU$,若 $IL_k = 1$,则将 MU_k 赋给 DR_{last} ,转步骤 4;否则将 MU_k 从 MU 中剔除,转步骤 2。

步骤 4 输出 DR_{last} ,算法结束。

算法 2 获取某个具体产品上所有弹上设备实物的装配使用记录信息。

输入:具体产品 PD ;

输出:弹上设备使用记录信息集合 LMU 。

步骤 1 获取实例化装配工艺集合, $PF = \{PF_i | i=1, 2, \dots, n\}$,令 $i=1$ 。

步骤 2 若 $i \geq n$,则转步骤 10;否则,转步骤 3。

步骤 3 获取 PF_i 下的实例化流程节点集合, $PN = \{PN_j | j=1, 2, \dots, m\}$,令 $j=1$ 。

步骤 4 若 $j \geq m$,则转步骤 9;否则,转步骤 5。

步骤 5 获取 PN_i 下的弹上设备使用记录集合, $MU = \{MU_k | k=1, 2, \dots, l\}$,令 $k=1$ 。

步骤 6 若 $k \geq l$,则转步骤 8;否则,转步骤 7。

步骤 7 将 MU_k 添加入集合 LMU 中, $k=k+1$,转步骤 6。

步骤 8 令 $j=j+1$,转步骤 3。

步骤 9 令 $i=i+1$,转步骤 2。

步骤 10 对集合 LMU 按弹上设备使用记录信息中的字段 BC 进行正排序,输出 LMU ,算法结束。

算法 3 获取某个批次弹上设备的最终去向(装在哪些产品上)。

输入:某弹上设备批次 DB 。

输出:具体产品集合 LPD 。

步骤 1 根据批次号和物料编号获取某弹上设备批次 DB 下的弹上设备实物集合, $DE = \{DE_i | i=1, 2, \dots, n\}$,令 $i=1$ 。

步骤 2 若 $i=n$,则转步骤 5;否则,转步骤 3。

步骤 3 根据算法 1 获取 DE_i 的最后一次装配使用记录信息 DR_{last} ,以及记录信息中的所属流程

节点 PN_i ,并根据 PN_i 获取具体产品信息 PD_i 。

步骤 4 遍历 LPD ,若不存在 LPD_j 中的具体产品编号与 PD_i 的具体产品编号相同,则将 PD_i 加入具体产品集合 LPD 中,令 $i=i+1$,转步骤 2;否则直接令 $i=i+1$,转步骤 2。

步骤 5 输出 LPD ,算法结束。

5 系统的实现与验证

基于上述对复杂产品装配车间物流管理的研究成果,采用 Microsoft Visual Studio 2008, Microsoft .Net Framework 3.5 与 AJAX(asynchronous Javascript and XML)技术,开发了 B/S(browser/server)架构的计算机辅助装配过程控制与管理软件系统(Visual Production Process Control & Management, VPPC)。该系统包括复杂产品装配工艺设计、节点物料信息采集与展示、物料信息管理等核心模块,通过基于流程车间物料数据实时采集与展示以及基于产品装配计划树的物料信息查询机制,实现了装配车间精细化的物流管理。目前,该系统已在航天某厂试运行,应用效果良好。

在装配工艺设计阶段,采用基于流程的结构化装配工艺设计技术。工艺师首先绘制装配流程图,流程图由各个流程节点组成,装配工艺流程图绘制界面如图 17 所示。装配流程图绘制完成后,再分别对每个流程节点添加工艺内容、检验内容和 BOM 信息,节点物料信息添加界面如 3.1 节的图 5 所示。

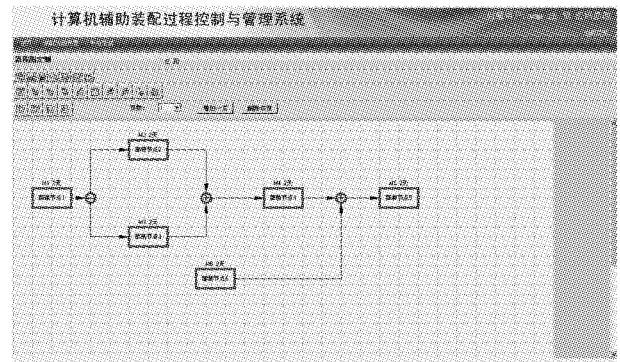


图17 装配流程图绘制界面

图 18 所示为该系统中基于流程的装配工艺流程及节点状态展示界面,图中所示为某舱段的部装工艺流程图,一个流程图节点表示一道装配工序,并通过不同的颜色标识直观形象地显示节点状态和产品的装配进度。物料准备齐全后,装配工人点击对应的流程节点,进入如图 19 所示的车间装配现场部装流程节点工艺和 BOM 集成展示界面,查看节点

BOM 以及工艺内容等信息。

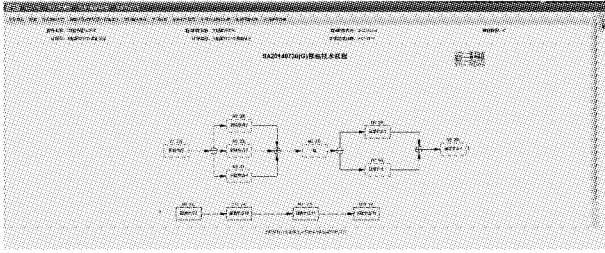


图18 车间装配工艺流程及节点状态展示界面

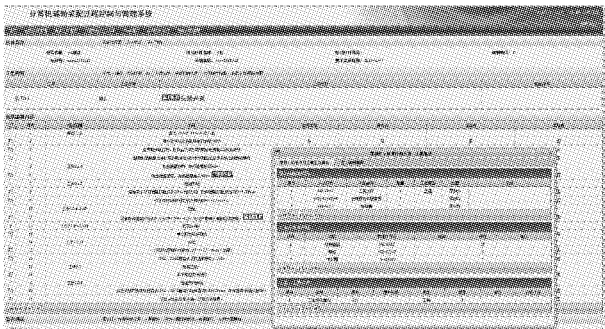


图19 车间装配现场部装流程节点工艺和物料清单集成展示界面

以弹上设备为例,装配操作人员在工艺信息的指导下,根据清单信息选择物料,扫描对应的物料条码并进行身份确认后开始装配操作,系统自动记录物料装配使用信息,并更新工艺清单列表中对物料的状态和数量使用情况,形成该物料的实做数据信息,节点的设备清单信息及使用信息界面展示如

3.2 节的图 10 所示,条码扫描及身份确认页面如图 20 所示。

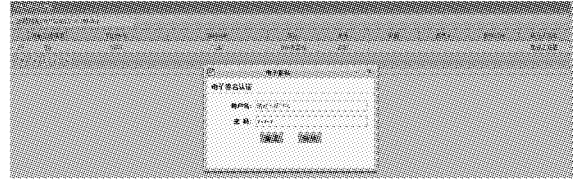


图20 条码扫描及身份确认页面

装配过程中的实做物料信息可在如图 21 所示的物料信息查询及管理界面进行快速查询,包括基于产品装配计划树的查询和基于物料属性的查询两种方式,用户点击列表中的“查看工艺信息”和“查看质量信息”,可以查看对应物料装配使用时所对应的详细工艺信息和质量过程记录信息。

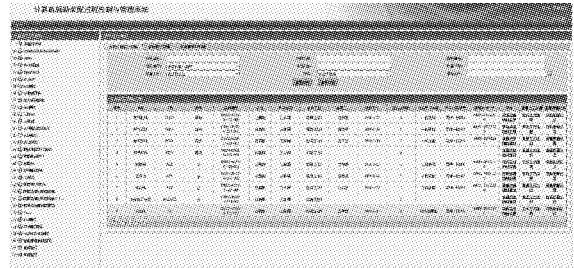


图21 物料信息查询及管理界面

如图 22 所示为通过算法 2 得到的某具体产品的弹上设备和火工品使用记录表的 PDF 输出。

型号代号	××导弹	任务代号	dd001-20140101	产品名称	××导弹××批 第×发	产品图号	XXDD-001-001		
序号	名称	代号	来源	条码编号	车间	工位	操作者	操作时间	使用工序名称
1	燃气舵机	RQDJ	25所	D01S140101-R-231-001	三车间	总装工位1	庄存波	2014-1-10	一舱装配
2	安装板	AZB	25所	D01S140102-G-105-001	三车间	总装工位1	庄存波	2014-1-12	三舱装配
3	安全执行装置	AQZXZZ	25所	D01S140102-A-103-002	三车间	总装工位1	庄存波	2014-1-14	结构件装配
4	发动机	FDJ	25所	D01S140103-F-100-007	三车间	总装工位5	庄存波	2014-1-17	发动机装配
5	导引头	DYT	25所	D01S140103-D-150-007	三车间	总装工位5	庄存波	2014-1-17	安装导引头
6	引线	YX	25所	D01S140103-Y-107-002	三车间	总装工位5	阮斯洁	2014-1-18	安装导引头
7	控制设备	KZSB	25所	D01S140103-K-107-005	三车间	总装工位5	周子岩	2014-1-19	控制设备安装
备注									第1页 共1页

图22 弹上设备使用记录表的PDF输出

6 结束语

本文针对复杂产品装配车间物料跟踪困难、物

流信息管理方式落后、物流信息可追溯性差的问题,提出一种基于流程和条码的复杂产品离散装配过程物料动态跟踪与管理方法。该方法通过引入工作流

技术实现装配过程与物料管理的有效融合,利用条码技术对车间实物进行唯一标识,保证了物料信息采集的准确性和实时性。该方法很好地解决了车间装配现场物料动态跟踪困难的问题,填补了质量问题追溯在物料领域的空白,保证了产品信息的可追溯性。在此基础上提出了实做物料的概念和形式化表达方法,阐述了实做物料的内涵和生成算法,并通过建立装配计划树实现了对实做物料信息的统一管理,便于用户快速获取所需要的车间实做物料信息。在此理论基础上设计并开发了建立系统软件,目前该软件系统已在航天某厂试运行,应用效果良好。

目前 RFID 技术在数据采集的准确性、数据的读写能力、对环境的抵抗力、数据存储量等方面比条码技术更加优越,因此如何将该技术有效应用于复杂产品装配过程中的物料数据准确实时采集以及车间物流的动态跟踪,是未来的一个重要研究方向。

参考文献:

- [1] LI Bohu, CHAI Xudong. Virtual prototyping engineering for complex product[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2002, 8(9): 678-683(in Chinese). [李伯虎, 柴旭东. 复杂产品虚拟样机工程[J]. 计算机集成制造系统, 2002, 8(9): 678-683.]
- [2] LIU Jianhua, DING Xiangfeng, YUAN Ding, et al. Computer aided assembly process control & management system for complex product[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(8): 1622-1633(in Chinese). [刘检华, 丁向峰, 袁丁, 等. 复杂产品计算机辅助装配过程控制与管理系统[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(8): 1622-1633.]
- [3] JIA Zhenyuan, ZHANG Nannan, WANG Linping. Data management of small and medium-sized manufacturing enterprise inventory management system[J]. CAD/CAM yu Zhizaoye Xinxihua, 2005(6): 34-36(in Chinese). [贾振元, 张楠楠, 王林平. 中小制造企业信息管理系统库存数据管理[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2005(6): 34-36.]
- [4] ZHAO Yan. The research and development of material management system for ERP[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003(in Chinese). [赵岩. 面向 ERP 环境物料管理系统的研究和开发[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.]
- [5] WANG Yizhong, OSCAR K W HO, HUANG G Q, et al. Study on RFID-Enabled real-time vehicle management system in logistics[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Automation and Logistics. Piscataway, N. J. USA: IEEE Press, 2008: 2234-2238.
- [6] POONA T C, CHOYA K L, LAUB H C C W. An efficient

production material demand order management system for a mould manufacturing company[J]. Production Planning & Control, 2011, 22(8): 754-766.

- [7] ZHANG Nan, BO Hongguang, LIU Xiaobing, et al. Batch-based description method of material process state for iron & steel industry[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(4): 785-792(in Chinese). [张楠, 薄洪光, 刘晓冰, 等. 基于批次的钢铁行业物料工艺状态描述方法[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(4): 785-792.]
- [8] LIU Xiaobing, ZHANG Hao, MA Yue, et al. Research on material tracking management system for iron and steel enterprises[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(10): 1403-1407(in Chinese). [刘晓冰, 张浩, 马跃, 等. 钢铁企业物料跟踪管理系统研究[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(10): 1403-1407.]
- [9] HE Ting, GUO Tianming, XU Hanchuan. Model of logistics management supporting material tracking[J]. Application Research of Computers, 2009, 26(11): 4197-4201(in Chinese). [何霆, 郭天明, 徐汉川. 支持物料追踪的物流管理模型[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(11): 4197-4201.]
- [10] LIU Hongyan. The research of material management for MES[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007(in Chinese). [刘红艳. 面向 MES 的物料管理研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.]
- [11] XU Hui, GE Maogen, ZHANG Mingxin. Study on material tracking method to assembly process for MES[J]. Mechanical Engineer, 2011(7): 1-3(in Chinese). [徐辉, 葛茂根, 张铭鑫. 面向 MES 的柔性装配过程物料追踪方法研究[J]. 机械工程师, 2011(7): 1-3.]
- [12] LIU Jianhua, BAI Shuqing, DUAN Hua, et al. Computer aided assembly process control method for manual assembly[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(12): 2391-2398(in Chinese). [刘检华, 白书清, 段华, 等. 面向手工装配的计算机辅助装配过程控制方法[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(12): 2391-2398.]
- [13] ZHANG Jiapeng, LIU Jianhua, NING Ruxin. Assembly process generation and information integration technique based on workflow[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(9): 1145-1151(in Chinese). [张佳朋, 刘检华, 宁汝新. 基于工作流的产品装配工艺生成及信息集成技术研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(9): 1145-1151.]
- [14] SUN Gang, WAN Bile, LIU Jianhua, et al. Secondary planet assembly process design and applied technology based on 3D model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(11): 2343-2350(in Chinese). [孙刚, 万毕乐, 刘检华, 等. 基于三维模型的卫星装配工艺设计与应用技术[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(11): 2343-2350.]

作者简介:

- 庄存波(1991—),男,江西高安人,博士研究生,研究方向:装配 MES 系统, E-mail: zcb9103@163.com;
 刘检华(1977—),男,江西萍乡人,教授,博士生导师,研究方向:数字化装配与检测技术;
 唐承统(1952—),男,四川大足人,教授,博士生导师,研究方向:数字化制造技术;
 邢香园(1990—),男,河北沧州人,硕士研究生,研究方向:制造执行系统技术。