

DOI:10.13196/j.cims.2015.03.010

面向复杂产品装配的多维度工艺数据管理系统

阮斯洁,刘检华⁺,唐承统,庄存波,周子岩

(北京理工大学 机械与车辆学院,北京 100081)

摘要:针对完整准确的复杂产品装配工艺数据包的形成问题,结合复杂产品的装配工艺的粒度、周期和版本的三维动态演变特性,提出一种多维度装配工艺数据管理方法,并开发了面向复杂产品装配的多维度工艺数据管理系统。该系统以流程化工艺信息组织模型为基础,通过分别建立不同粒度、周期阶段、版本间工艺数据的关联关系,生成了装配工艺数据包,实现了工艺数据和演变过程的集成管理。将目前开发的软件系统应用到北京卫星制造厂,取得了良好效果。

关键词:复杂产品;装配工艺;工艺演变;工艺信息模型;数据管理

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A

Multi-dimensional assembly process data management system for complex product

RUAN Si-jie, LIU Jian-hua⁺, TANG Cheng-tong, ZHUANG Cun-bo, ZHOU Zi-yan

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 10081, China)

Abstract: Aiming at the formation problem of complete and accurate assembly process-data-packet for complex product, a multi-dimensional management method of assembly process data was proposed and the process data management system was developed by analyzing the data's dynamic evolution characteristic from the perspectives of granularity, cycle and version. Based on assembly process information organization model, the association relationship between different granularities, cycles and versions process data was established in this system, and the process-data-packet was generated to output the data, which could realize the integrated management of process data and evolution process. The developed system had been validated and applied in aerospace-related manufacturing enterprise.

Key words: complex product; assembly process; process evolution; process information model; data management

0 引言

装配是指依据产品技术条件、装配图纸及工艺文件等规定和要求,将合格的零件、部件、分系统等通过组装和检测,最终形成一个完整产品的全过程^[1]。以导弹、卫星等为代表的复杂产品具有客户需求复杂、产品组成复杂、产品技术复杂、制造过程复杂、项目管理复杂的特点^[2]。在复杂产品研发过程中,完整、准确、实时地记录复杂产品装配工艺(过

程)数据并形成完整的装配工艺数据包,对于实现产品装配工艺的持续性改进和装配质量追溯具有重要意义,但目前这是一个工程难题,主要原因如下:①复杂产品研制过程中通常要经历模型—初样—试样—定型等多个研制阶段,每个阶段都会产生大量且类型复杂的装配工艺(过程)数据,如工艺路线、技术文档、操作记录、质量检验结果等,这些数据会伴随装配过程的产生、传递、变化、累加、最终归档,从而形成数据量庞大、关系复杂的数据流;②复杂产品

收稿日期:2014-05-13;修订日期:2014-12-03。Received 13 May 2014; accepted 03 Dec. 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).

研制过程中因工艺的不稳定性造成装配过程中的返工返修多,从而导致频繁的工艺设计与工艺实施的数据交互,并且由此产生大量的中间状态数据^[3-4];③复杂产品研制周期长,有的甚至长达10年,而其中装配工作量平均占整个产品制造工作量的45%左右(例如我国卫星装配所占的工时约为整个产品研制生产总工时的30%~50%),这种大时间跨度的特点也大大增加了复杂产品装配数据实时记录与汇总的难度。

目前,国内外在工艺信息管理方面形成了不少研究成果,其主要的研究思路是基于产品数据管理(Product Data Management, PDM)系统来实现工艺信息管理。例如王士一等^[5]提出了利用PDM管理工艺过程的方法;大连理工大学贾芑青^[6]从工艺知识和工艺活动两方面实现了工艺信息的管理。

针对工艺执行过程产生的动态工艺信息的管理方面,当前研究成果侧重于制造执行系统(Manufacturing Execution System, MES)与计算机辅助工艺规划(Computer Aided Process Planning, CAPP)系统、PDM系统间的信息集成,或直接在MES系统上增加工艺信息管理功能^[7],实现动态环境下跨平台数据的反馈和共享;Lambregts等^[8]开发了向生产规划系统实时反馈车间生产进度和物料消耗信息的MES,以便进行优化排产;易旺民^[9]等基于统一的产品结构实现了CAPP、MES和航天飞行器集成设计制造(Aerospace Vehicles Integrated Design and Manufacturing, AVIDM)系统间的集成;史晓健^[10]等提出一种基于PDM系统进行工艺更改过程管理的方案,并实现了工艺更改流程的自动运行;西北工业大学张博^[11]等以CAPP-Framework和Teamcenter为基础,提出协同工艺更改方法;在三维工艺动态更改方面,西北工业大学万能^[12]等提出了三维环境下机加工工艺设计、工艺管理、工艺现场应用反馈的闭环系统。

以上研究成果从不同角度探索了制造工艺数据的管理模式,为实现系统间工艺信息的集成与管理奠定了良好的基础。但是复杂产品装配工艺从设计、执行、更改后再执行到最终的归档总结,是一个循环演化的过程,以上研究成果仅从信息集成的角度,而没有从装配工艺演变过程的角度,系统地论装配工艺数据的来源、产生到执行反馈并最终归档的演变过程进行完整地论述,导致当前研究成果中不同种类的工艺数据的记录和管理仍分散在PDM系

统、CAPP、MES和工艺管理系统中,数据间的传递仍需要通过集成接口实现,因而也就无法及时有效地跟踪、反馈并管理各类工艺数据形态和内容的变化,也无法同时满足复杂产品对装配工艺数据包的完整性、一致性和时序性的要求。

针对工艺的演化过程,吕盛坪等^[13]从版本、粒度、工序活动三个维度建立了零件加工工艺信息模型,提出了工艺信息不断演变的表达方法以及可扩展的数据存储模式;李静等^[14]整合了工艺设计、工艺优化、工艺管理功能,构建面向演化过程的工艺管理平台;但是以上研究多针对机械加工工艺,相比之下,以离散手工装配为主且返工返修频繁的复杂产品研制过程中,对非常规信息处理的效率及准确性要求更高。

本文结合复杂产品装配工艺的动态演变特性,从粒度、周期、版本三个维度分析了复杂产品装配工艺信息的演变过程,设计并开发了复杂产品的多维度装配工艺数据管理系统。该系统以流程化的工艺信息组织模型为基础,从三个维度实现了装配工艺数据和演变过程的集成动态管理,并生成装配工艺数据包,从而完整、准确和实时地描述了复杂产品装配工艺数据流。

1 装配工艺数据演变过程分析

工艺数据从产生到归档会经历一系列复杂的变化,这些变迁可以归纳成粒度维(装配工艺对应的产品结构信息粒度)、周期维(所处的装配周期阶段)和版本维(装配工艺版本)三个维度,如图1所示。

(1)从粒度维度上看,复杂产品装配工艺通常包括零件组装、组部件部装和产品总装三个层级。其中,一系列组装活动(工步)组成一个部装活动,一系列部装活动(工序)组成一个总装活动,整个复杂产品的装配过程是由一系列装配活动串(并)联混合而成的。通过工艺活动的累积作用,产品结构经历了从零散的零部件、组部件到最终整个产品的变化过程。

(2)从周期维度上看,复杂产品研制阶段的装配工艺历经了工艺设计、生产调度、工艺执行、工艺问题反馈四个阶段,工艺信息在这四个阶段循环演变成闭环工艺信息流。其中,装配工艺信息在工艺设计、生产调度、工艺执行之间的信息依次流动过程称为正向工艺过程。工艺设计阶段产生的工艺文件,在审批通过形成版本后,跟随计划下发至调度员

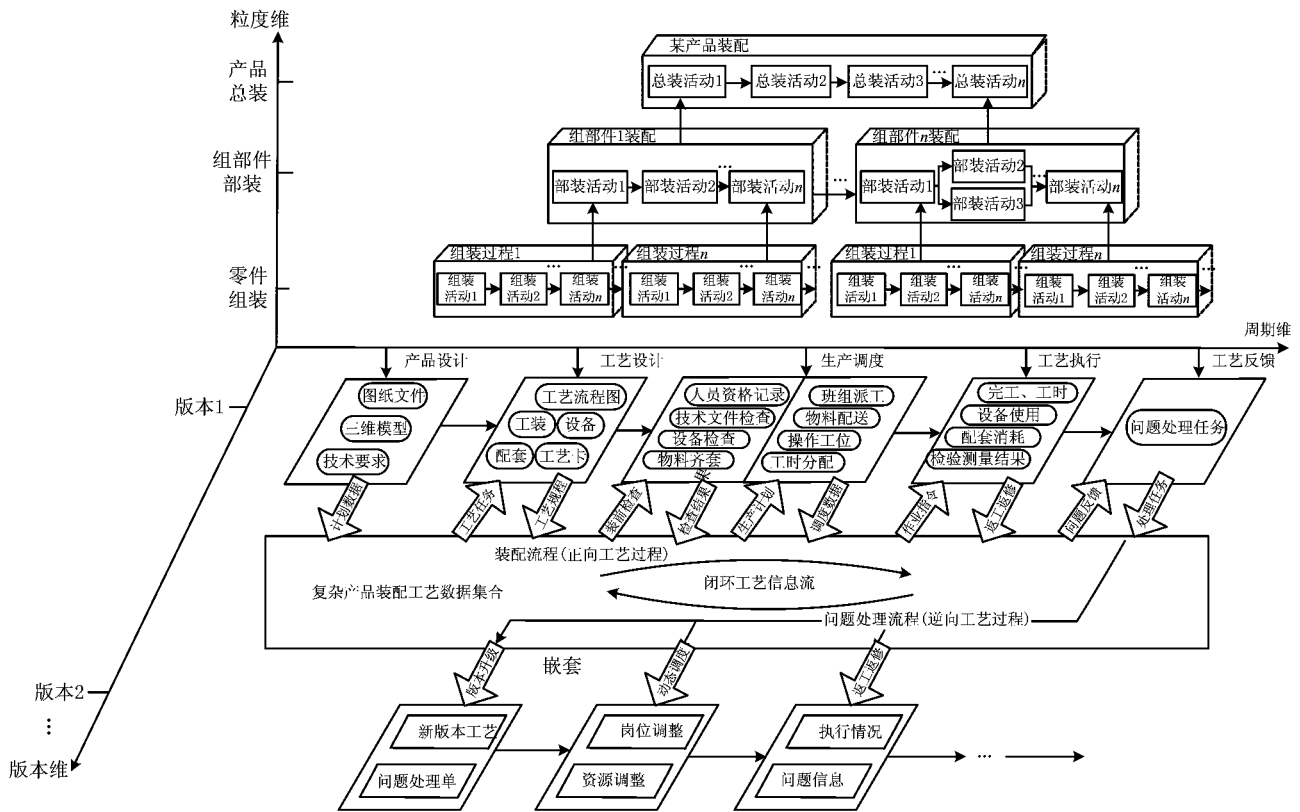


图1 装配工艺演变过程模型

进行调度,分配装配班组、工位、设备、工时等;操作人员接收到调度员下发的指令后进行装配操作,并采集执行数据。当装配现场出现技术问题时(如工艺文件出现问题或检验时发现没有达到工艺文件的技术要求等),车间需要将相关问题信息反馈给上游相关工艺人员,由工艺人员提出问题解决措施,对原工艺进行修改并下发技术问题处理单据;这些单据与更改后的工艺文件一起,共同指导车间操作直至装配任务完成的过程为逆向工艺过程,正向工艺过程与逆向工艺过程结合形成闭环工艺过程。闭环工艺过程中工艺数据形态由静态的工艺设计数据转变为动态的工艺执行数据和反馈更改数据,数据内容从工艺文件、物料配套明细等逐渐扩充到签署信息、检验信息、问题信息、工艺更改信息等,体现了装配工艺伴随装配周期演变的特性。

(3)从版本维度上看,工艺设计结果(工艺规程)会在一段时间内形成一个相对稳定有效的版本。若该工艺规程进行修订和更改,则会造成版本的升级,从而形成版本维度上的装配工艺演变。

2 系统总体结构

依据装配工艺数据流,本文构建了复杂产品装配工艺数据管理系统,系统总体结构如图 2 所示,该系统主要分为工艺设计层、工艺执行层和技术问题处理层。

(1)工艺设计层 装配工艺设计层主要有总装/部装工艺编制任务管理、产品装配结构树的构建以及工艺版本管理等功能。①工艺师首先接收总装/部装的装配工艺制作任务,然后开始进行装配工艺流程的编制,若是总装工艺,则主管工艺师在接收到总装工艺制作任务后,按照分系统的结构和专业属性的不同,绘制总装工艺流程图并分配部装工艺制作任务,工艺师在接收部装工艺制作任务后制作部装工艺^[15];②工艺师在编制部装装配工艺时,工艺信息会添加到产品结构树的对应节点上,从而完善产品装配结构树,方便装配工艺数据的统一管理;③工艺版本管理主要针对由装配工艺问题触发的工艺版本升级的流程管理,包含技术问题处理单编制、工艺更改和临时工艺的编制等。

(2)工艺执行层 装配工艺执行层包含装配工

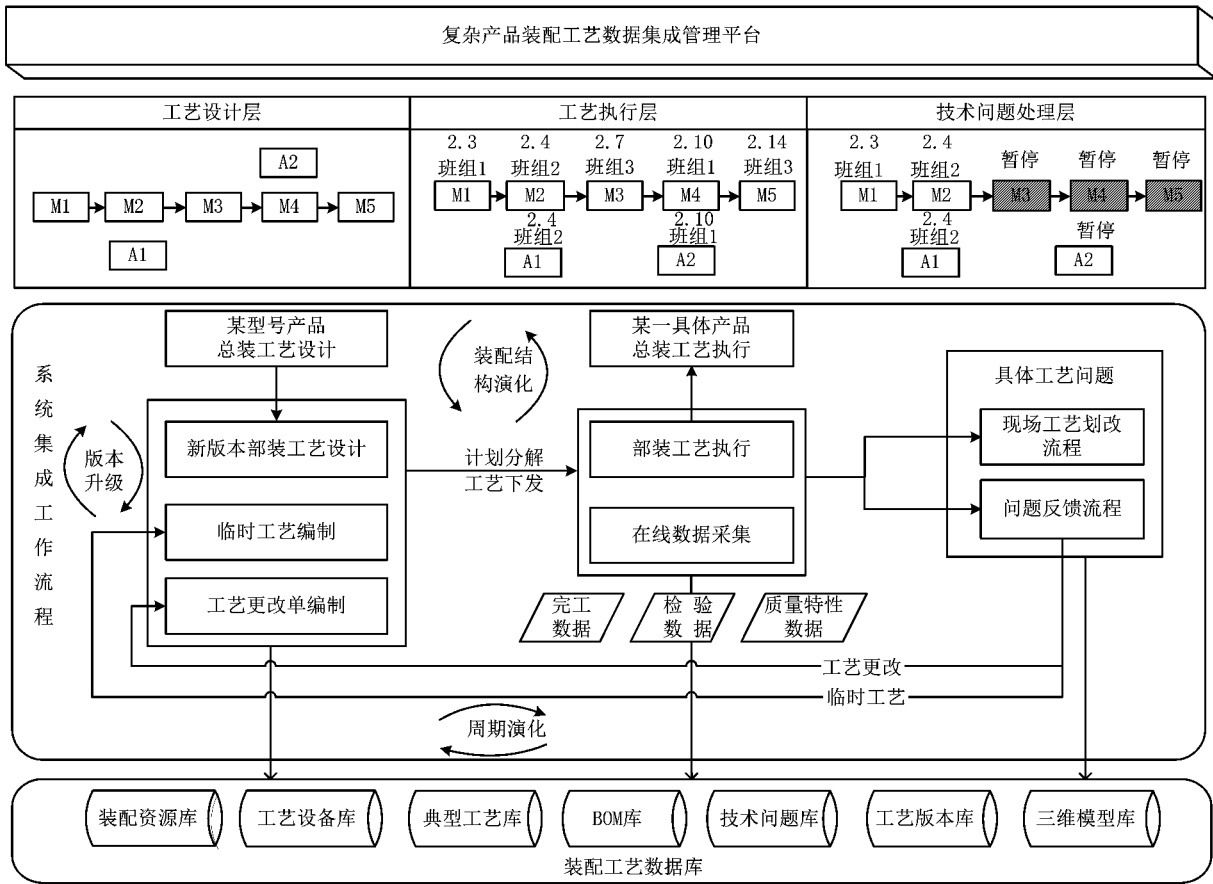


图2 装配工艺数据管理系统总体结构

艺执行过程控制和在线数据采集两部分。装配工艺流程审批通过后,调度会依据流程分配作业计划,装配工人严格依据作业计划和工艺流程进行装配生产,并对每个装配节点进行检验,实时采集填入装配质量检验数据,并经电子签字确认后,才能开展后续装配操作,系统将自动记录每一个装配节点的实际完成时间,为各级管理人员提供装配进度和装配质量监控的数据基础。

(3)技术问题处理层 工艺执行过程中,当车间现场发现技术问题时,该装配任务暂停,操作人员填写问题反馈单触发问题反馈流程,问题信息反馈至工艺师处。若是现场可以解决的,则进行工艺划改,否则进行工艺更改或编制临时工艺。

3 系统的关键实现技术

3.1 基于流程的工艺信息组织

复杂产品具有以流程为主组织装配的特点,通常按工艺流程图组织装配工作^[16]。针对复杂产品的作业特点,本文提出以流程为主线、以装配活动节点为单元组织装配工艺信息,如图 3 所示。基于流

程的工艺信息组织模型有利于各类工艺数据(工艺、检验、物料)的关联统一管理,可以实现工艺数据的联动修改,同时为细化到工步的工艺执行数据和工艺问题数据的组织奠定基础。

定义 1 装配工艺流程图。工艺流程是指产品由投入到产出,按照一定顺序排列的加工、检验等的制造过程,复杂产品装配工艺流程通常用方框图的形式表达^[17]。其模型描述为: $AF = \{Att, Na, C, FT, MNa\}$ 。其中:流程图的属性集合 $Att = \{BasicInfo, Productnode, Version, Parentflow\}$, 分别定义流程图的基本属性、所对应的产品结构树节点(产品/组部件)、版本及其父版本工艺流程图; Na 为装配流程图 AF 中所有装配活动节点的集合; MNa 为工艺更改的最小工序号; C 为描述各个节点间逻辑关系的集合; FT 为装配流程的层级,包含总装流程和部装流程。

定义 2 装配工艺节点。装配工艺节点为装配流程图的组成元素,代表具体的装配活动。设 Na_i 是装配工艺节点集合 Na 中的一个节点, $Na_i = \{At, Res, Ae_x\}$, $x \in (P, O, R, K, Q, C, T, Atc)$ 。其

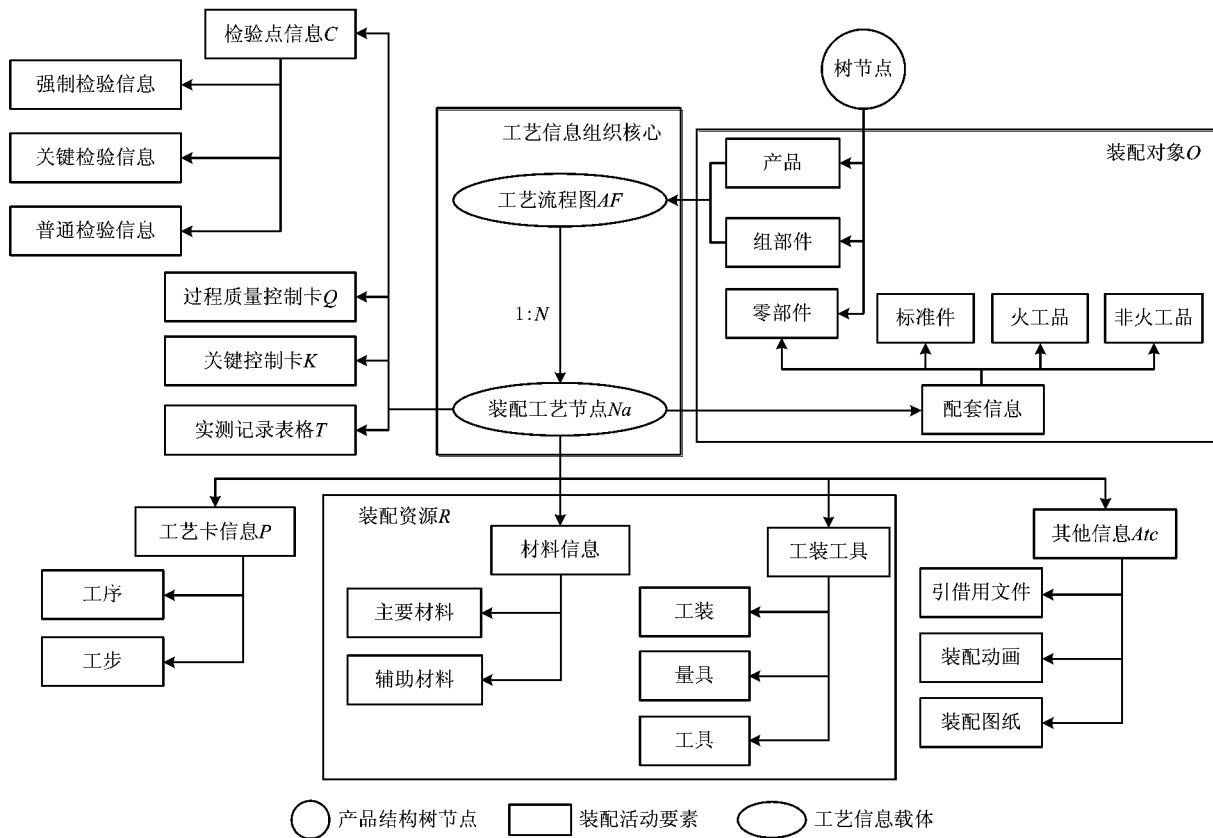


图3 装配工艺信息组织结构

中： At 为装配工艺节点属性，如是否为关键工序、是否为检验点等； Res 为装配节点与其他对象的关系集； Ae_x 为装配工艺节点的活动要素集合，其中 P 为工艺卡内容， O 为装配节点操作的对象， R 为装配节点所使用的资源， K 为关键工序控制内容， Q 为质量控制内容； C 为检验点内容， T 为质量特性参数实测记录表格， Atc 为附属文件等说明信息。

定义 3 装配活动要素。 装配活动的组成要素包含很多类型，分别用以表达装配活动的操作方法、操作对象、使用工具等。各要素可以统一抽象描述为 $Ae = \{A, Re, Ru\}$ 。其中： A 为装配活动要素的基本属性； Re 为活动要素对象与节点、流程或产品结构树的关联关系； Ru 为活动要素配置的规则，由装配节点的属性决定，如只有关键工序才有关键工序控制卡内容等。

3.2 粒度维的工艺流程嵌套管理

在复杂产品装配工艺的粒度维度上，总装装配大多针对的是产品的装配，如卫星总装；部装装配针对的是组部件的装配或者大测试点，如某舱段的装配。通常，总装工艺可细分为多达几十本部装工艺，每本部装工艺中包含数十甚至上百道零件组装机

序，各层级工艺之间的内容具有一定的继承性，如总装 4M1E 检查中对于一个产品的人、机、法、料、环等信息的汇总等。因而需要建立总装、部装、零件组装三个层次之间的嵌套关系，如图 4 所示。

(1) 工艺流程的嵌套 在以流程为核心的工艺信息组织模式中，可以通过工艺流程的嵌套定义来实现信息粒度维度上的关联。建立父级工艺流程的节点与子级工艺流程的关联，形成一种嵌套式的层次关系，如总装节点与部装工艺流程的关联。在数据获取和管理过程中，子级流程中的所有节点信息会汇总形成对父级节点信息的描述。流程的嵌套模式为装配过程的层次化精细化管理奠定了基础，如在装配过程监控中，可以从某一产品的总装装配情况逐层追溯到其中任意一步的执行情况。

(2) 层次化的装配工艺树 工艺数据在粒度维度上的演变与产品结构具有紧密联系，因而采用产品结构树实现对数据的集成管理。针对每个型号的产品建立统一的装配物料清单 (Bill of Material, BOM)，将总装工艺设计及执行数据挂接在产品节点下，部装工艺设计及执行数据挂接在组部件节点下，形成层次清晰的产品装配工艺树，便于工艺数据

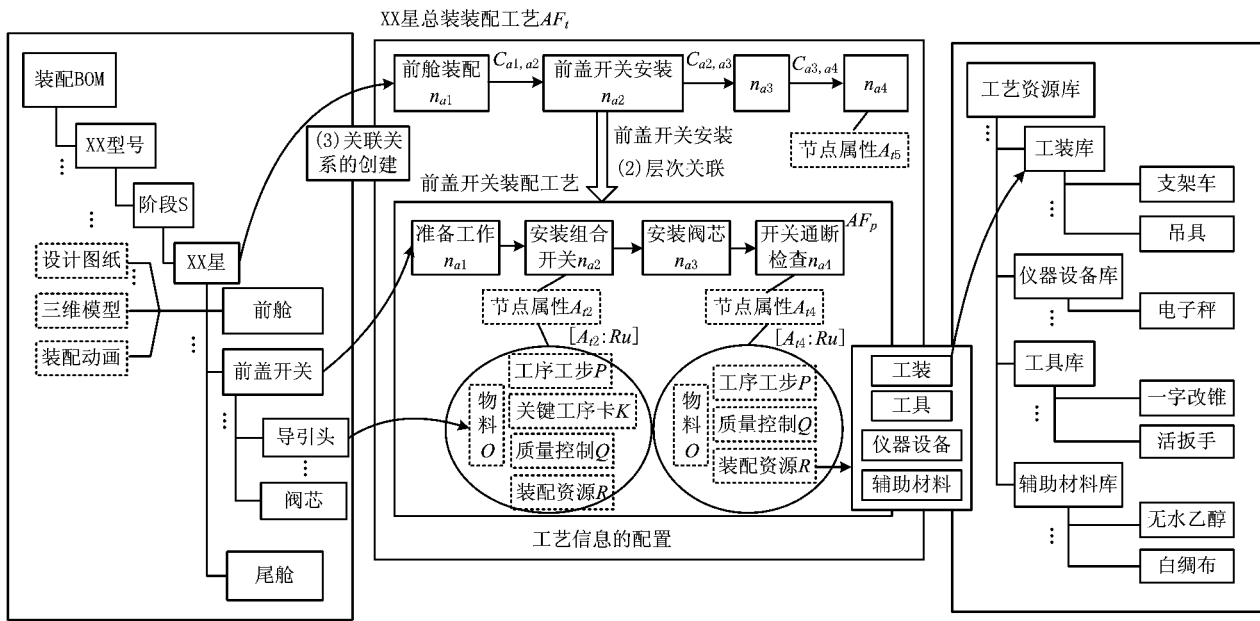


图4 工艺数据的粒度维嵌套关联模型

的管理查询。例如,当以部装节点为核心添加装配活动所需的配套信息时,可以导入 BOM 信息,并将 BOM 上来源于设计端的设计图纸、轻量化三维模型或动画与工艺流程关联。

(3)基于 BOM 的工艺资源库 通过建立装配工艺流程与产品结构树、装配工艺节点与工艺资源的关联关系,可以形成基于 BOM 的实时工艺资源库,统计汇总该型号下产品或组部件装配中所使用的工装、仪器设备、标准件、火工品等。在实际装配过程中,工艺流程会发生更改,依托装配工艺资源与装配节点的关联关系,资源数据会依据工艺流程中工序的增删和调整进行实时动态的更新。

3.3 周期维的闭环工艺数据流管理

装配工艺在周期维度上的演变主要体现在闭环工艺过程中,工艺设计与工艺执行的频繁交互形成了闭环工艺数据流,有效整合工艺数据流中的各类数据是研究的重点。复杂产品装配生产过程是典型的工作流,因而引入工作流思想^[18]开展装配工艺数据管理工作。本文将设计归档状态的工艺流程作为过程定义,将发放车间实际执行的工艺作为过程实例,工艺从设计归档状态到发放车间状态的转换过程即为工艺的实例化。在以流程为核心的信息组织模型中,将实例化后的工艺流程称为实例流程,实例流程的节点称为实例节点。

3.3.1 装配工艺流程的映射

装配工艺流程与实例流程的演变映射完成了静

态域到动态域的过渡,主要体现在流程的映射和工艺信息的映射。伴随着业务流程的进行,映射过程中会产生计划、任务等信息,这些信息会在映射过程中完成与实例流程和实例节点的关联,如图 5 所示。

在生产调度阶段,当调度人员接受装配计划后,需要将计划分解成相应产品数量的装配任务,每一个装配任务即是一个实例流程执行任务。工艺流程结构中所有的节点、节点逻辑关系集等均遵循实例化规则,生成相应数量的实例节点集及逻辑关系集,构成了相互关联且相对独立的若干实例流程,每个实例流程包含该装配任务的预计完成时间、执行车间等信息。流程映射完毕,车间调度员依据工艺内容,将物料、工时等分配到实例化的装配节点,驱动装配活动执行。

工艺信息的映射是在装配节点映射的基础上实现的,实例化只针对结构化的并且需要补充实施数据的信息,由于工艺设计和工艺执行所关注的数据存储内容不同,实例化的过程中舍弃了设计属性,如工艺内容等,添加了执行属性,如责任人、签署时间等,从而实现流程对流程、节点对节点、要素对要素的一一对应关系。

3.3.2 逆向工艺过程信息的组织

装配现场发现的工艺问题信息作为动态工艺数据的一部分,是工艺动态演变的驱动因素之一。工艺问题处理信息以问题处理过程为核心组织,工艺问题的处理过程可以归纳为工艺划改、临时工艺以及工艺更改三种类型,表 1 为三种处理过程的比较。

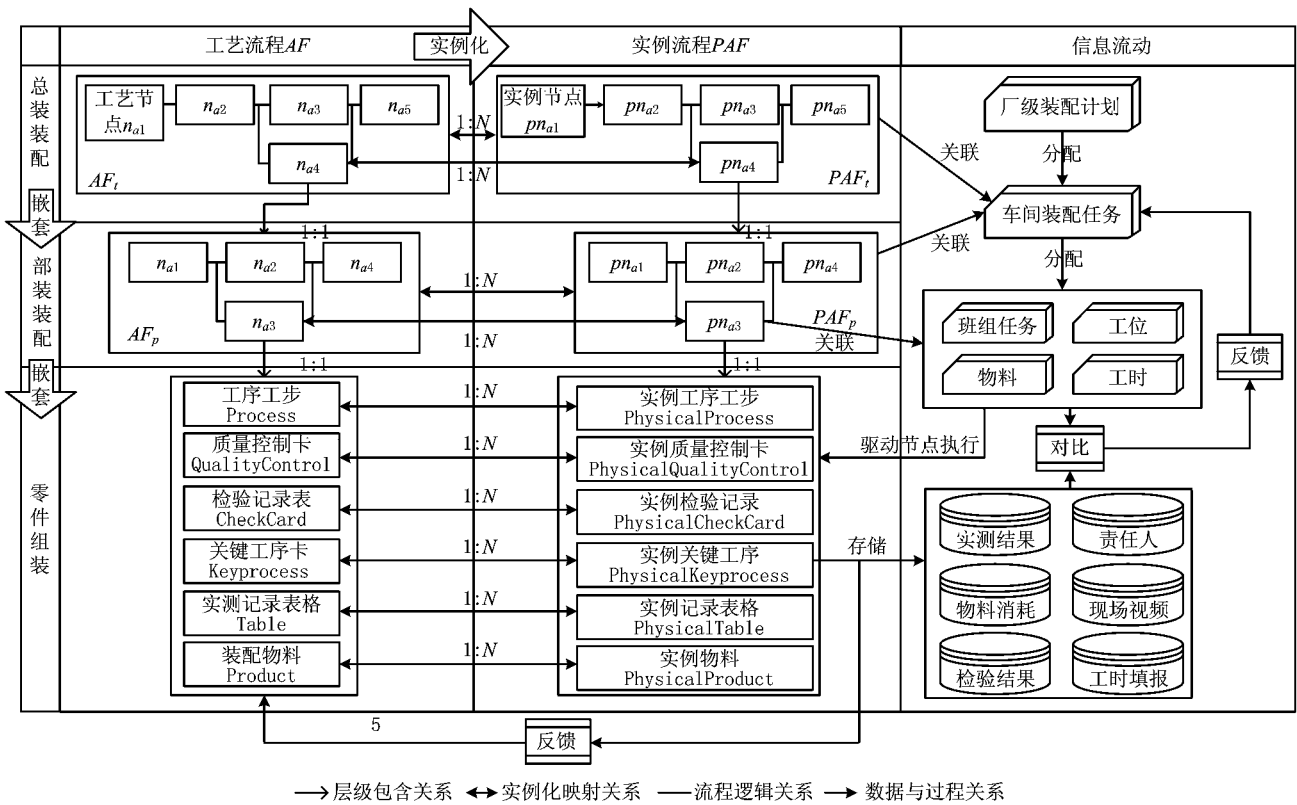


图5 装配工艺的演变映射与信息流

表 1 三种工艺问题处理流程的比较

过程类型	操作对象	工艺修订特点	工艺执行过程特点
工艺划改	实例工步 实例工序	针对单条工艺数据的划改, 替换单条工艺内容	不影响原工艺执行过程, 不做动态调度
临时工艺	临时工艺单	原工艺流程的补充工艺	增加临时工艺任务的装配计划, 资源做补充调整
工艺更改	原工艺副本	整本替代原工艺内容	重新配置物资与生产计划

以工艺问题处理过程为核心的逆向工艺信息模型如图 6 所示。工艺划改过程针对的是实例化的工序工步, 每个对象划改一次就会生成一条划改过程数据, 以工艺划改过程为核心组织划改信息, 记录划改次数, 并与实例对象关联, 工艺划改只替换单条工艺内容, 不影响原工艺执行过程及资源分配; 临时工艺过程针对临时工艺通知单, 若工艺任务属性值为临时工艺, 则其所附属的工艺流程为主工艺, 临时工艺作为主工艺的补充工艺, 下发车间时需要补充任务和资源; 工艺更改过程针对原工艺流程, 工艺更改单与原装配工艺流程相关联, 若工艺任务属性值为非临时工艺, 则父版本工艺为工艺更改替换的原工艺流程, 工艺更改时需依据具体情况进行资源和生产计划的调整。每次更改后的工艺称为最新版本的主工艺, 在主工艺版本更改前, 临时工艺和工艺划改只作为当前版本的附属工艺, 每次工艺

更改版本更新时, 应当融合父版本主工艺及其附属工艺。

3.3.3 工艺更改的数据一致性维护

当工艺执行现场发现技术问题后, 经工艺师评定后若需要进行工艺更改, 则新版本工艺流程、实例流程与父版本工艺流程、实例流程间会存在数据不一致且整合困难的问题, 主要体现在: ①新版本工艺流程对父版本工艺流程中的逆向工艺过程信息(包括临时工艺、工艺划改在内)的整合及其更改权限的控制; ②新版本实例流程对更改内容以及父版本实例流程中工艺执行信息的继承和整合。本文从工程应用角度出发, 提出以下解决方案: ①对已执行的工序节点进行工艺更改权限控制; ②设计工艺实例化算法, 获取准确的新版本工艺实例。

(1) 工艺更改权限控制 在某份工艺提交工艺更改时, 车间已签署的装配工序集合即会锁定, 不再

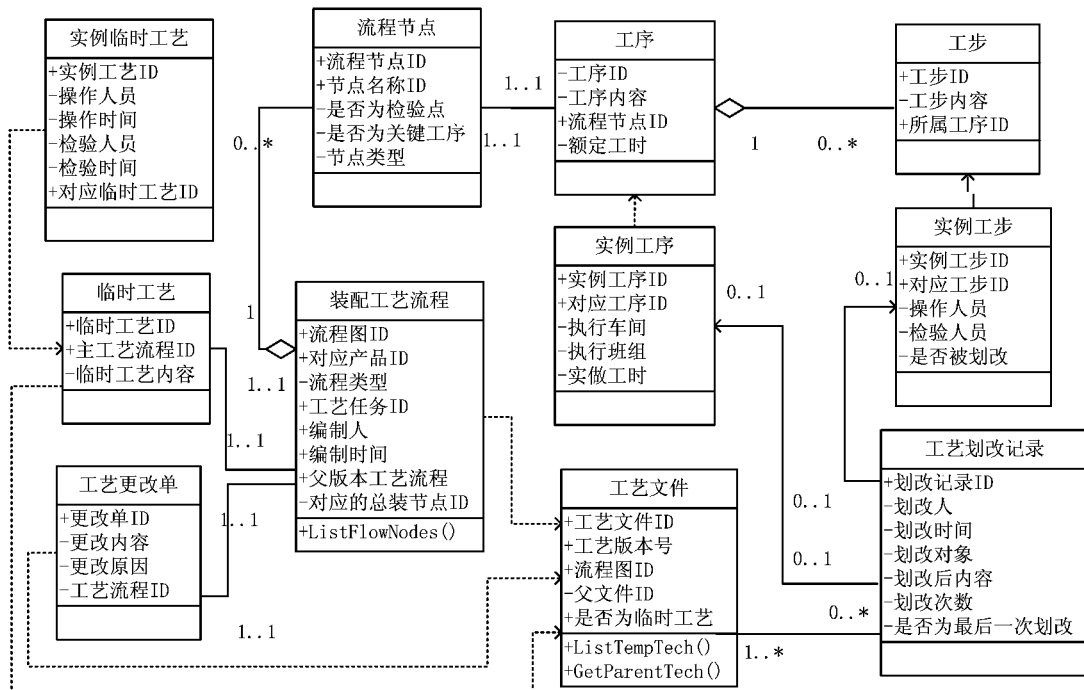


图6 逆向工艺过程信息模型

赋予可更改的权限。若需更改已执行的装配工序，或者在已执行的装配工序集合间增加一道工序时，需要对锁定的工序解锁，系统将自动记录已更改的工序号最小的工序，该道工序后面的所有工序必须重新采集数据。工艺更改不可以删除已签署的装配工序，已执行的临时工艺不允许更改。

(2) 装配工艺实例化算法 将更改后的工艺流程进行实例化，得到实例流程。其中，父版本中已执行的临时工艺直接通过关联关系查询，无需重新实例化。

算法1 装配工艺实例化算法。

输入: 装配工艺更改任务 AT ;

输出: 装配工艺实例流程 ET 。

步骤1 获取 AT 下的所有装配节点集合 $Na = \{Na_1, Na_2, \dots, Na_n\}, n \in Z^+$, 分别建立新生节点集 Na_R 及其实例节点集 PNa_R 、继承节点集 Na_I 及其实例节点集 PNa_I 、过渡节点集 Na_M 。

步骤2 获取 AT 的父版本工艺 AT_p 及其执行工艺 ET_p , 获取 ET_p 下的所有实例节点集 $PNa_p = \{PNa_{p1}, PNa_{p2}, \dots, PNa_{pm}\}, m \in Z^+$ 。

步骤3 若 $MNa > 0$, 则设 $i = MNa$, 任取 $Na_k \in Na$, 若 $k \geq i$, 则将 Na_k 加入集合 Na_R ; 若 $k < i$, 则将 Na_k 加入集合 Na_M ; 将 Na_k 从 Na 中剔除, 若 $Na_k = \emptyset$, 则转步骤5, 否则重复步骤3。

步骤4 若 $MNa = 0$, 则任取 $Na_k \in Na$, 若

PNa_k 包含采集数据时, 则将 PNa_k 加入 Na_I , 否则加入 Na_R , 将 Na_k 从 Na 中剔除, 若 $Na_k = \emptyset$, 则转步骤6, 否则重复步骤4。

步骤5 若 $Na_M \neq \emptyset$, 则任取 $Na_x \in Na_M$, 若 PNa_x 包含采集数据, 则将 Na_x 加入 Na_I , 否则将 Na_x 加入 Na_R ; 将 Na_x 从 Na_M 中剔除, 若 $Na_M = \emptyset$, 则转步骤6, 否则重复步骤5。

步骤6 若 $Na_R \neq \emptyset$, 则任取 $Na_z \in Na_R$, 实例化节点 Na_z 为 PNa_z , 将实例节点 PNa_z 加入节点集 PNa_R ; 若 $Na_I \neq \emptyset$, 则转步骤7, 否则记 $PNa_I = \emptyset$ 。

步骤7 任取 $Na_y \in Na_I$, 实例化节点 Na_y 为 PNa_y , 获取该实例节点的父版本实例节点 PNa_{py} 的划改记录集合 $PM = \{PM_1, PM_2, \dots, PM_q\}, q \in Z^+$, 若 $PM \neq \emptyset$, 则转步骤8, 否则转步骤9, 将 Na_y 从 Na_I 中剔除。

步骤8 任取 $PM_z \in PM$, 若 PM_z 属于最后一次划改, 则将 PM_z 中的修改内容赋值给 PNa_{py} , 转步骤9; 否则转步骤8, 将 PM_z 从 PM 中剔除。

步骤9 将 PNa_{py} 的采集数据属性值赋值给 PNa_y , 将 PNa_y 加入节点集 PNa_I , 若 $Na_I \neq \emptyset$, 则转步骤7, 否则得到 PNa_I 。输出 ET 下的所有实例节点集 $PNa = \{PNa_R, PNa_I\}$, 算法结束。

该算法的流程为: ①获取父版本实例工艺集中未执行的装配节点; ②获取虽已执行但仍被更改的

装配节点;③获取跨序执行情况下未执行的装配节点;④对未执行节点进行实例化操作;⑤对已执行节点进行实例化,若有工艺划改记录,则获取最终划改实例替换原对象实例;⑥将父版本实例节点的采集数据赋值给实例化节点。

3.4 版本维的工艺关联管理

工艺版本是工艺信息在一段时期内相对稳定的数据状态,记录了装配工艺的演变历史。在基于工作流的装配工艺管理中,工艺在版本维度上的变迁体现在两部分:①工艺设计阶段多级审批过程导致的版本升级;②工艺执行阶段针对技术问题的工艺变更导致的版本升级。目前,国内外在工艺版本管理方面的研究成果中,针对逆向流程产生的多工艺版本的动态关联性的研究成果较少,本文着重阐述针对逆向流程的工艺版本管理。

版本的演变是在继承原有工艺版本的基础上,生成一份新的初始工艺,该工艺会作为补充、修改和替换的基础,与原版本相互关联且各自独立。系统自动建立新版本工艺与旧版本工艺(包含主工艺、临时工艺和工艺划改记录)的关联关系。

为体现三种逆向工艺过程,采用“〈工艺更改版本号〉.〈临时工艺版本号〉.〈工艺划改版本号〉”的版本命名规则,形成线性版本管理模型。新版本装配工艺 V_{i+1} 可以表示为 $V_{i+1} \leftarrow \sum_i^n V_i$, 其中 V_i 表示第 i 个版本的装配工艺,可以表示为 $V_i = V_{modify} \cup V_{temp} \cup V_{change}$, $i = modify + temp + change$, 每一版本的工艺都是工艺更改、临时工艺、工艺划改三种修改结果的集合。每一次工艺修改,均进行版本升级,以版本号 2.1.3 为例,即第二次更改后的主工艺版本上,添加了一份临时工艺,并进行了三次工艺划改。通过这种方式,可以直观地显示逆向工艺流程的执行次数,并可方便地得到工艺版本间的先后次序。

3.5 装配工艺数据包的生成

产品设计数据与装配工艺数据构成上、下游关系,而装配工艺是装配实施过程的技术指导和管理依据,指导工艺活动生产出符合设计要求、质量稳定和成本低的产品。因此,在工艺频繁更改的动态环境下,装配工艺数据的管理应当确保工艺基线、设计基线以及装配实施数据这三个层面的一致性^[19],同时保证各类工艺数据的联动性和完整性。

从装配工艺的产生到归档的整个过程来看,与复杂产品装配工艺活动相关的所有静态和动态数据

都应纳入装配工艺数据包的管理范畴中,完整的装配工艺数据包应主要包括产品设计输入数据、工艺设计数据和现场实施数据等三方面:①产品设计输入数据主要包含反映产品装配结构的设计 BOM 和设计图纸(或三维模型)等,这类数据是装配工艺设计的基础和来源;②工艺设计数据是装配工艺数据包的主体内容,记录了最终装配工艺的形成历程,包含工艺文件、检验检测记录表、物料配套、工装工具、临时工艺、工艺更改、现场技术问题等;③现场工艺执行数据作为工艺执行的过程记录,是复杂产品装配工艺质量控制的依据,主要包含工艺签署信息和实测检验记录信息等。

装配工艺数据包关注的不仅是最终形态的工艺数据,还有工艺从源头到最终形成的整个演变过程的数据记录集合,完整的装配工艺数据将为复杂产品质量追溯和工艺持续改进提供数据源。装配工艺数据包是工艺的整体形成过程的数据记录集合,结合实际情况,在建立了多维度工艺数据关联关系的基础上,研究装配工艺数据包的生成算法,如图 7 所示。

该装配工艺数据包生成算法的流程为:①获取具体产品装配任务所绑定的总装工艺流程;②获取该总装工艺流程下的部装主工艺流程,该主工艺关联的临时工艺、三维轻量化模型及装配动画;③获取主工艺流程和临时工艺的实例,并获取针对实例对象的划改记录,对每个被划改对象以最终划改后实例替代原实例;④循环获取父版本部装主工艺,直至主工艺版本为 1;⑤循环获取其他总装节点下的工艺流程及实例流程集合。

4 系统的具体实现与应用

基于上述研究,本文利用 Microsoft Visual Studio 2008 和 Microsoft .Net Framework 3.5 工具开发了浏览器/服务器(Browser/Server, B/S)架构的复杂产品多维度装配工艺数据管理系统。该系统主要包括层级装配工艺设计、闭环动态装配工艺信息管理、装配工艺版本管理三个方面,功能结构如图 8 所示。目前,该装配工艺数据管理系统已在航天某厂应用验证,其应用效果良好。

图 9 为层级装配工艺设计过程,工艺师首先在 BOM 结构的产品节点下绘制总装装配工艺流程,并针对总装节点绘制部装工艺流程图,系统自动关联部装工艺流程图与 BOM 结构的组部件节点(前

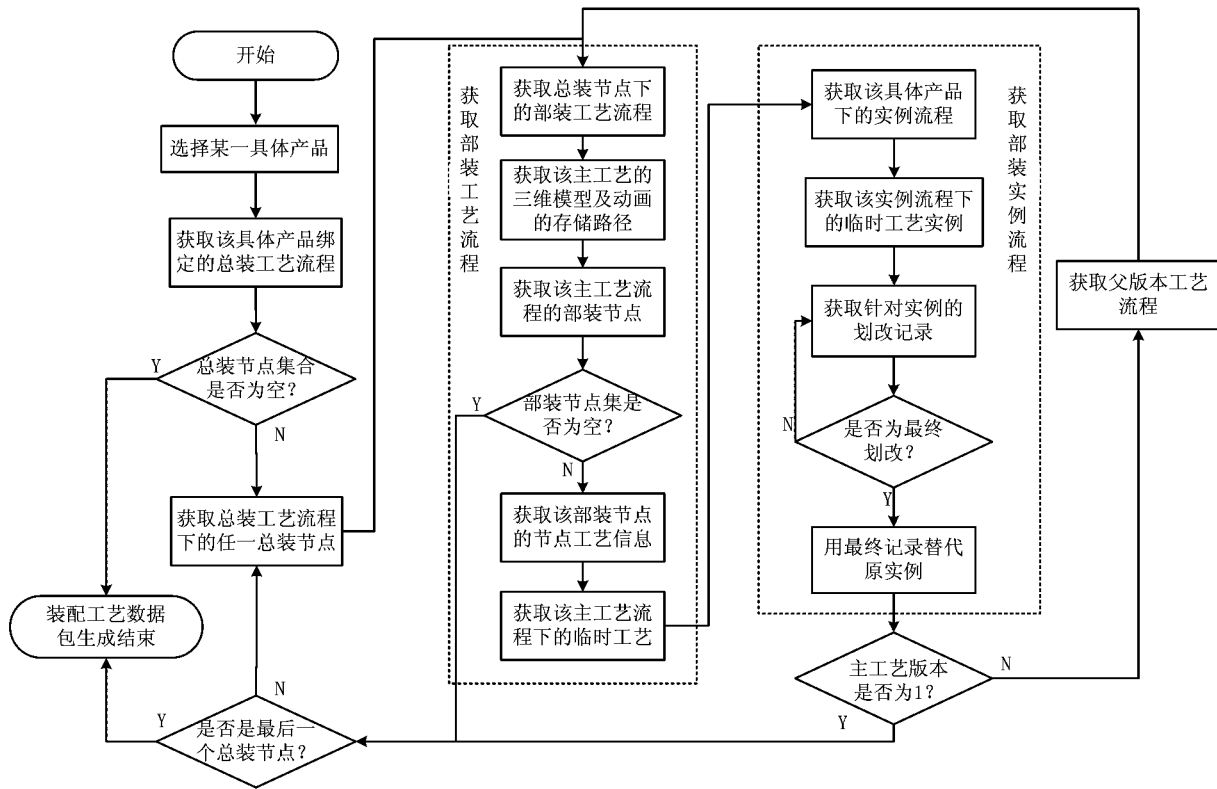


图7 装配工艺数据包的生成算法流程

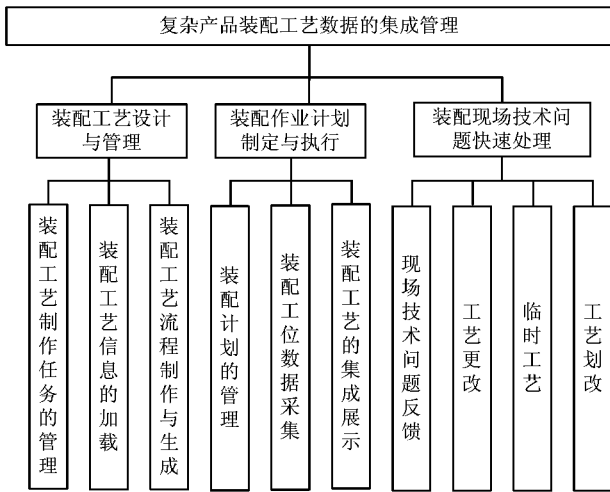


图8 装配工艺数据管理系统的功能结构

舱),在编制工序工艺时导入 BOM 结构中包含三维模型的零部件信息,并构建层次化装配工艺流程结构。装配工艺流程图绘制完毕,工艺师对装配节点的属性进行定义和赋值。部装节点装配工艺信息的添加如图 10 所示,该工序为关键工序,可以针对节点添加工艺卡内容、检验卡、关键工序控制卡、三维装配动画、质量控制内容、配套以及工装工具信息等,从而构建以流程图为主线、以节点为载体的装配工艺流程。

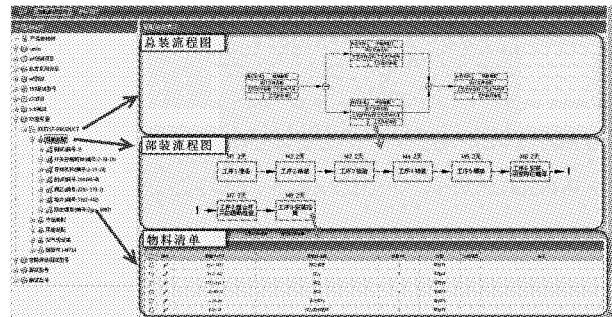


图9 层级装配工艺设计

图 11 为工艺流程执行时,车间现场装配节点工艺信息集成展示及装配实施数据采集界面,操作人员 and 检验员需要按照工艺内容进行装配操作,并依据工艺要求进行签署并填写数据采集信息,签署的过程严格按照装配工艺要求的顺序执行,签署完毕后装配数据将不再具备更改的权限。采集的动态装配工艺执行数据包含实际操作工时、检验测量记录表、质量特性数据记录表格、现场照片视频等。

图 12 为车间现场工艺划改处理过程,工步 6.2 的初始工艺内容为“在开关控制机构的另一端加砝码,把开关支架竖起,靠砝码的力量把插销拔出,砝码的重量在 100~500 g 之间为合格”。车间实际操作过程中,拔出力小于 100 g,未满足工艺要求,因而



图10 节点装配工艺信息添加界面



图12 车间工艺划改界面

在执行工艺流程图展示页面即可查看该临时工艺的内容,操作人员按照临时工艺的内容进行操作并签署,如图 14 所示。



图11 装配工艺执行信息采集页面



图13 工艺师编制临时工艺界面

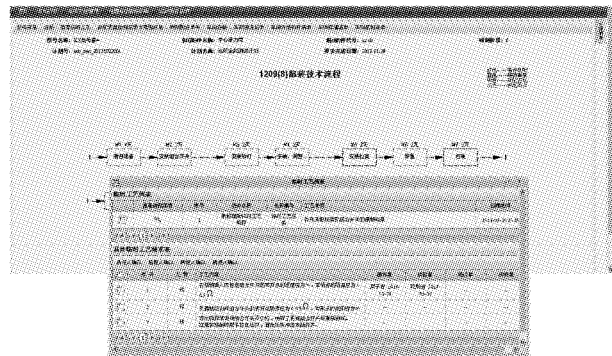


图14 临时工艺执行界面

由现场责任人发起工艺问题并由系统反馈至工艺师处。工艺师在现场评定之后,选择该道工序进行划改,增加内容“若拔出出力小于 100 g,则在钢球下加调整垫片进行调整,直至符合要求”,由工艺师签署通过并提交,系统记录该道工序本次划改时间和划改次数。其中,“@+数字”中数字代表的是该道工序的划改次数,通过这种数据管理方式可以完整复现车间现场工艺划改过程。

图 13 为车间现场临时工艺处理过程。在车间执行过程中,为保证组合开关的质量,增加对组合开关的通断检查,由工艺师针对原某舱段的装配工艺下发临时工艺任务,并编制临时工艺的具体内容。PDM 系统审批完毕之后,该临时工艺下发至车间,

装配工艺数据包以系统最终生成的 PDF 格式的工艺文件为展现形式。系统依据企业的装配工艺文件格式定制工艺文件模板,实时地从数据库中提取结构化工艺信息,输出符合要求的工艺文档。工艺文档中包含工艺设计信息(最终指导车间操作的装配工艺、临时工艺、划改工艺以及工艺更改单等)以及工艺执行过程信息(现场采集的完工签署信息及检验结果等)。

如图 15 所示,以某一装配任务实时输出的工艺文档为例,取其中的装配工艺卡、临时工艺通知单以

及关键工序实测数据记录表进行详细说明。该装配任务执行到了第六道工序,装配工艺卡片中包含所有工序工步的内容及截至第六道工序的完工签署信息,其中,工步 6.2 在执行过程中被划改了一次;第四道工序为关键工序,关键工序实测数据记录卡中

包含了图样(工艺文件)要求及检验结果;此外,该工艺中增加的临时工艺“某舱段装配组合开关的通断检查”会跟随其主工艺一起输出,临时工艺通知单中包含了临时工艺内容及签署信息。

北京卫星制造厂		首件(关键)工序(工步)实测数据记录卡										任务号	zcb_test_20131022001
		首件 <input type="checkbox"/> 关键 <input checked="" type="checkbox"/>											
型号	1209	阶段	8	图号	xx-clt	名称	中心承力筒	产品标识	/	本批数量	1		
车间	工序号	工序名称	图样(工艺文件)要求		自检结果	自检者	互检结果	互检者	专检结果	专检结论	专检者	日期	
工艺室	4	安装、调整限位螺母	检查组合开关上的传动元件与开关压板接触是否良好,传动元件应能		合格	庄存波	合格	周子岩					

产品代号		临时工艺通知单		名称	代号	通知单号	有效期限	
XX-3C1				某舱段	XX3FHC			
序号	工种	工艺内容及要求			操作者	检验者	转运者	接受者
		补充某舱段装配组合开关的通断检查						
1	钳	在插销插入时检查组合开关的常开点的阻值应为 ∞ ,常闭点的阻值应为 $<0.5\Omega$			周子岩 20140330	阮斯洁 20140330	庄存波 20140511	孟倩 20140511

装配工艺卡				型号名称	组(部)件名称	组(部)件代号	
				某型号	某舱段	XX3FHC	
零件明细表		投产批次	产品编号	每台数量	阶段标记		
序号	名称	代号	数量	工序	工种	工艺内容及要求	
				6	钳装	安装拉簧	
				6.1		将开关控制机构的插销插进导向机构上的导板的长槽内,直到插销尖头和开关支架右边平齐。	
				6.2	(01)	在开关控制机构的另一端加砝码,把开关支架竖起,靠砝码的力量将插销拔出(砝码的大小为100~500g之间为合格)。如果拔出小于100g,则在钢球下加调整垫片进行调整,直至符合要求。	
				7	钳装	安装开关控制机构	
				7.1		把压板向右拉,直到压板中间孔与阀体上的小孔对正,把开关控制机构的插销插入导板槽中,穿过阀体上的小孔,使插销箭头和开关支架右侧平齐	
				8	钳装	将装好的前盖开关放入牛皮纸袋内。检验合格后,称重并记录。	
				编制	周子岩	20131213	
				校对	刘刚	20130903	
更改标记	更改单号	签名	日期	更改标记	更改单号	签名	日期
				共 2 页		第 2 页	

图15 装配工艺文件输出

5 结束语

本文从保证装配工艺数据完整性的角度出发,分析了装配工艺在粒度、周期、版本三个维度的演变过程,提出一种多维度装配工艺数据管理方法,并开发了面向复杂产品装配的多维度工艺数据管理系统。该系统以流程为核心组织装配工艺信息,定义了粒度维和版本维工艺信息的关联关系,实现了工艺流程与实例流程的演变映射与工艺更改时的数据整合,在此基础上生成了装配工艺数据包。该系统将设计、工艺、实物等各类相关数据进行有效的整合,完整地记录和跟踪工艺信息的演变,为复杂产品

装配工艺的持续性改进和装配过程质量追溯提供了有效的数据支撑,保证了工艺数据的完整性和实时一致性,提高了装配过程中信息共享的效率和多部门协同工作的能力。所开发的系统在北京卫星制造厂正式上线运行,应用效果良好。下一步将对数据挖掘方向进行深入研究,为装配工艺的改进和优化提供支持。

参考文献:

[1] SHANG Yuru, FU Daxin, LI Chuansheng, et al. Basic knowledge of aerospace technology II [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005(in Chinese). [尚育如, 富大欣, 李川生, 等. 航天工艺基础知识培训教材(下)[M]. 北

- 京:中国宇航出版社,2005.]
- [2] 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.]
- [3] 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技术[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(8): 1622-1633.]
- [4] ZHANG Jiapeng, LIU Jianhua, NING Ruxin, et al. Integration management method of process and data for discrete assembly [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(4): 716-725 (in Chinese). [张佳朋, 刘检华, 宁汝新, 等. 面向离散型装配的过程和数据集成管理技术[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(4): 716-725.]
- [5] WANG Shiyi, ZHANG Chunlei, WEN Hongchang. Management of processing technique based on PDM [J]. Manufacturing Automation, 2011, 33(10): 44-47 (in Chinese). [王士一, 张春磊, 温洪昌. 基于 PDM 的工艺过程管理方法[J]. 制造业自动化, 2011, 33(10): 44-47.]
- [6] JIA Wuqing. Research and implementation of process management information system [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2011 (in Chinese). [贾若青. 工艺管理信息系统的研究与实现[D]. 大连: 大连交通大学, 2011.]
- [7] SAUER O. Trends in manufacturing execution systems [C] // Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology Advances in Intelligent and Soft Computing. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2010: 685-693.
- [8] LAMBREGTS K, VAN WILGEN P, CHAKRABORTY M. Improvement of production scheduling by closing the loop with MES [J]. Steel Times International, 2006, 30(5): 24-25.
- [9] YI Wangmin, MA Qiang, LI Manli, et al. CAPP/MES/AV-IDM integrated system based on product structure tree [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(5): 640-642 (in Chinese). [易旺民, 马强, 李曼丽, 等. 基于产品数据结构的 CAPP/MES/AVIDM 集成技术研究[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(5): 640-642.]
- [10] SHI Xiaojian, QIAO Lihong. Implementation of process change management in PDM [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(1): 240-244 (in Chinese). [史晓健, 乔立红. 在 PDM 中实现工艺更改过程管理[J]. 航空学报, 2007, 28(1): 240-244.]
- [11] ZHANG Bo, JIA Xiaoliang, SHI Bingkun. Process change for aeronautic complex production PLM-oriented collaborative environment [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2013, 49(4): 48-54 (in Chinese). [张博, 贾晓亮, 石炳坤. PLM 协同环境下航空复杂产品工艺更改技术研究[J]. 航空精密制造技术, 2013, 49(4): 48-54.]
- [12] WAN Neng, CHANG Zhiyong, MO Rong. Three dimensional new mode of matching process planning [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(9): 1873-1879 (in Chinese). [万能, 常智勇, 莫蓉. 机加工工艺设计的三维新模式研究[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(9): 1873-1879.]
- [13] LYU Shengping, QIAO Lihong, ZHANG Jin. Multi-dimensional modeling for manufacturing process information [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(12): 2577-2582 (in Chinese). [吕盛坪, 乔立红, 张金. 多维度制造工艺信息建模[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(12): 2577-2582.]
- [14] LI Jing, WANG Qingwen, SUN Qingxin. Integrated information platform oriented to process evolution [J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(7): 147-150 (in Chinese). [李静, 王庆文, 孙青欣. 面向工艺演化过程的一体化信息平台[J]. 制造业自动化, 2014, 36(7): 147-150.]
- [15] 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.]
- [16] LIU Jianhua, LIN Xiaoqing, LIU Jinshan, et al. Assembly workshop product planning & control technology based on workflow [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(4): 754-762, 771 (in Chinese). [刘检华, 林晓青, 刘金山, 等. 基于工作流的装配车间生产过程计划和控制技术[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(4): 754-762, 771.]
- [17] SHANG Yuru, FU Daxin, LI Chuansheng, et al. Basic knowledge of aerospace technology I [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005 (in Chinese). [尚育如, 富大欣, 李川生, 等. 航天工艺基础知识培训教材(上)[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.]
- [18] SHI Meilin, YANG Guangxin, XIANG Yong, et al. WfMS: Workflow management system [J]. Chinese Journal of Computers, 1999, 22(3): 325-334 (in Chinese). [史美林, 杨光信, 向勇, 等. WfMS: workflow 管理系统[J]. 计算机学报, 1999, 22(3): 325-334.]
- [19] SUN Gang, YI Wangmin, MA Qiang, et al. The structure and the integrated application of spacecraft assembly process data [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(2): 210-214 (in Chinese). [孙刚, 易旺民, 马强, 等. 航天器总装工艺数据结构化与集成应用[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(2): 210-214.]

作者简介:

- 阮斯洁(1991—),女,安徽马鞍山人,硕士研究生,研究方向:数字化装配工艺设计与管理技术, E-mail: sjruan@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,通信作者, E-mail: jeffliu@bit.edu.cn;
- 唐承统(1952—),男,四川大竹人,教授,博士生导师,研究方向:数字化制造技术;
- 庄存波(1991—),男,江西高安人,博士研究生,研究方向:装配 MES 系统;
- 周子岩(1989—),男,河南鹤壁人,硕士研究生,研究方向:装配工艺设计技术。