

中图分类号：TP391

论文编号：10006SY1307336

北京航空航天大学
硕士学位论文

装配过程可视化管控系统
研究与应用

作者姓名 张勤学

学科专业 机械工程

指导教师 杨建军 教授

培养院系 机械工程及自动化学院

Research and Application on Assembly Process Visual Management & Control System

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

Candidate: Zhang Qinxue

Supervisor: Prof. Yang Jianjun

School of Mechanical Engineering & Automation

Beihang University, Beijing, China

中图分类号：TP391

论文编号：10006SY1307336

硕 士 学 位 论 文

装配过程可视化管控系统研究与应用

作者姓名	张勤学	申请学位级别	工学硕士
指导教师姓名	杨建军	职 称	教授
学科专业	机械工程	研究方向	信息系统与企业信息化
学习时间自	2013 年 09 月 01 日	起至	2016 年 06 月 01 日止
论文提交日期	2016 年 05 月 27 日	论文答辩日期	2016 年 06 月 03 日
学位授予单位	北京航空航天大学	学位授予日期	年 月 日

关于学位论文的独创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在指导教师指导下独立进行研究工作所取得的成果，论文中有关资料和数据是实事求是的。尽我所知，除文中已经加以标注和致谢外，本论文不包含其他人已经发表或撰写的研究成果，也不包含本人或他人为获得北京航空航天大学或其它教育机构的学位或学历证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对研究所做的任何贡献均已在论文中作出了明确的说明。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文作者签名：_____

日期： 年 月 日

学位论文使用授权书

本人完全同意北京航空航天大学有权使用本学位论文(包括但不限于其印刷版和电子版)，使用方式包括但不限于：保留学位论文，按规定向国家有关部门(机构)送交学位论文，以学术交流为目的赠送和交换学位论文，允许学位论文被查阅、借阅和复印，将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，采用影印、缩印或其他复制手段保存学位论文。

学位论文作者签名：_____

日期： 年 月 日

指导教师签名：_____

日期： 年 月 日

摘要

本论文通过分析由复杂产品的装配生产特点以及管理方式所带来的装配过程管理和控制问题，论述了应用装配制造执行系统进行装配过程管理和控制的方法以实现提高复杂产品的生产效率和装配质量，并对系统实现所要解决的关键技术问题进行了深入的研究。

本文首先论述了制造过程数据建模、可视化以及控制的研究现状，然后论述了国内外装配制造执行系统解决方案的功能特点和技术水平。通过总结复杂产品装配过程管理和控制的解决方法和三维数字化思想，重点论述了复杂产品装配过程管理与控制的关键技术；首先采用以过程为核心定义和组织数据的方法，研究了基于过程规范语言 PSL 的装配过程信息模型，实现装配过程数据的结构化管理，其次，进一步研究了面向状态的装配过程控制方法、基于三维轻模型的装配过程仿真技术以及图形可视化技术，解决装配过程的可视化与控制问题。

最后，开发了基于 J2EE 轻量级框架的装配过程可视化管控原型系统，通过运行系统实例，验证了系统对复杂产品装配过程管理和控制的有效性。因此，装配制造执行系统的应用，能够有效解决复杂产品的装配过程控管理和控制的问题，提高复杂产品的装配生产效率和装配质量。

关键词：复杂产品，过程规范语言，信息模型，装配过程，可视化管控

Abstract

In this paper, by analyzing the issue of assembly process management and control resulted by the production characteristics and management approach of complex product, it discusses the way by applying assembly manufacturing execution system to solve the assembly process management and control in order to improve the productivity and quality of assembly, and the key technical problems of system implementation is further studied.

This paper firstly provides an overview of research status of data modeling, visualization, and control of manufacturing process, and then discusses the features and technical level of the domestic and foreign assembly manufacturing execution system solutions. By summarizing the method and three-dimensional digital ideas of complex product assembly process management and control, this paper focuses on the key technology of assembly process management and control; firstly, the information model of assembly process, which based on process specification language, was studied to achieve structured management of the data by the process-oriented method, and then the state-oriented assembly process control, assembly process simulation based on three-dimensional light model, graphical visualization techniques are further studied to solve the problem of visualization and control of assembly process.

Finally, the prototype system of assembly process visual management and control, which is based on the J2EE framework, is developed, and also the effectiveness is verified by running the system instance. Therefore, the application of system can solve the problem of assembly process management and control of complex product effectively and improve the productivity and quality of assembly.

Key words: Complex product, Process Specification Language, Information model, Assembly process, Visual management and control

目录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状综述	2
1.2.1 制造数据建模理论与标准研究现状	2
1.2.2 制造过程可视化发展现状	4
1.2.3 装配过程控制方法研究现状	5
1.2.4 国外装配执行解决方案	5
1.2.5 国内装配执行解决方案	7
1.3 研究目的及内容	8
1.3.1 研究目的	8
1.3.2 研究内容	8
1.4 论文组织结构	9
第二章 装配过程可视化管控系统总体设计.....	10
2.1 企业装配生产特点与管理现状	10
2.2 系统功能需求分析	11
2.2.1 系统业务流程分析	11
2.2.2 系统功能需求分析	13
2.3 系统总体功能模型设计	17
2.4 系统架构需求分析	18
2.4.1 系统架构模式选型	18
2.4.2 系统架构设计参考	19
2.5 系统总体软件架构设计	20
2.6 系统总体信息模型建模	23
2.6.1 基于 PSL 的装配过程描述	23
2.6.2 装配过程信息模型构建	25
2.7 本章小结	27
第三章 系统主要功能实现技术研究.....	28

3.1 装配工艺管理.....	28
3.1.1 装配工艺数据定义与结构化组织	28
3.1.2 装配工艺约束定义	29
3.1.3 装配工艺集成方法	31
3.2 装配计划任务管理.....	34
3.2.1 计划下达和任务安排	35
3.2.2 装配任务挂接管理	37
3.2.3 装配任务派工管理	39
3.3 装配现场执行管理.....	41
3.3.1 三维装配可视化指导	41
3.3.2 面向状态的装配过程控制方法	44
3.3.3 实例数据采集与管理	48
3.3.4 装配临时操作	51
3.4 装配过程可视化与管控.....	52
3.4.1 基于三维轻模型的装配实例可视化	52
3.4.2 基于 mxGraph 的装配过程可视化	54
3.4.3 装配过程管控实现方法	55
3.5 本章小结.....	56
第四章 装配过程可视化管控系统实现与验证	57
4.1 系统开发环境与技术.....	57
4.1.1 系统开发环境	57
4.1.2 系统运行环境	57
4.2 系统运行实例.....	57
4.2.1 装配工艺管理	58
4.2.2 装配计划任务管理	60
4.2.3 装配现场执行管理	63
4.2.4 装配过程可视化与管控	65
4.3 本章小结.....	68
总结与展望.....	69

参考文献	71
攻读硕士学位期间取得的学术成果	74
致 谢	75

图目录

图 1	系统业务流程.....	12
图 2	基础数据管理用例图.....	15
图 3	工艺管理用例图.....	15
图 4	装配计划任务管理用例图.....	15
图 5	装配现场管理用例图.....	16
图 6	装配过程可视化与管控用例图.....	16
图 7	MESA 标准功能模型.....	17
图 8	系统总体功能模型.....	18
图 9	J2EE 逻辑体系结构	19
图 10	MVC 结构组件关系和功能.....	20
图 11	系统总体软件架构.....	21
图 12	装配过程规范描述.....	24
图 13	系统信息模型.....	25
图 14	工艺数据树形结构层次.....	29
图 15	工艺数据信息模型视图.....	29
图 16	飞机总装基本过程示意图.....	30
图 17	工序间关系定义示意图.....	30
图 18	工艺约束信息模型视图.....	31
图 19	工艺集成方法.....	32
图 20	装配工艺 XML XSD.....	32
图 21	装配工艺 XSD (续).....	33
图 22	装配工艺 XSD (续).....	34
图 23	装配计划下达和任务安排流程.....	35
图 24	计划齐套分析算法.....	36

图 25	装配计划下达和任务安排信息模型视图	37
图 26	任务挂接信息模型视图	38
图 27	自动挂接算法流程图	39
图 28	任务派工方式示意图	40
图 29	装配任务派工信息模型视图	41
图 30	可视化内容	41
图 31	文档管理信息模型视图	42
图 32	装配动画接口类图	43
图 33	装配过程仿真技术原理	43
图 34	装配过程仿真实现算法	44
图 35	装配过程仿真信息模型视图	44
图 36	装配任务状态模型	45
图 37	有限状态机工作原理图	45
图 38	有限状态机实现框架类图	46
图 39	状态转换时序图	47
图 40	面向状态的装配过程控制原理	48
图 41	装配过程控制信息模型视图	48
图 42	装配节点信息加载信息模型视图	49
图 43	装配节点实例数据采集信息模型视图	50
图 44	以过程为核心的实例数据管理	50
图 45	换件信息模型视图	51
图 46	返工返修信息模型视图	52
图 47	基于三维轻模型的装配实例展示方法	53
图 48	可视化技术原理	54
图 49	装配过程管控实现方法	55
图 50	产品定义	58

图 51	工艺录入.....	59
图 52	装配节点配置.....	59
图 53	工艺约束定义.....	60
图 54	工艺集成.....	60
图 55	计划编制与齐套分析.....	61
图 56	计划间物料调整.....	61
图 57	任务安排与分解.....	62
图 58	任务派工.....	62
图 59	装配现场任务接收.....	63
图 60	装配节点信息加载与数据采集.....	64
图 61	检验反馈.....	64
图 62	装配计划进度监控.....	65
图 63	任务树形图.....	66
图 64	任务有向图.....	66
图 65	图形节点菜单内容.....	67
图 66	装配实例三维可视化.....	68

表目录

表 1	数据建模标准或理论对比分析	3
表 2	各层对应的技术与框架	22
表 3	任务节点样式	55

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

复杂产品的装配生产过程是典型的离散型生产模式，具有生产工艺复杂、装配调试周期长、生产不均衡以及生产返工返修任务作业多等特点，这些特点使得复杂产品的装配过程管理和控制一直是工程中的难题^[1,2]。而装配作为复杂产品最后也是最重要的生产环节，是产品功能实现的主要过程，能否对装配过程进行科学的管理和有效的控制，影响着产品装配制造周期和装配质量，进而影响企业的生产效率和制造成本^[3,4]。因此，需要研究装配制造执行系统并将其应用到复杂产品的装配生产管理中去，通过数字化的手段实现复杂产品装配过程可视化管控。

在推进复杂产品装配生产管理的数字化时，需要解决以下几个关键技术问题。首先为实现装配过程数据的结构化管理，需解决装配过程数据的规范描述和建模问题；其次，由于传统二维工艺图纸的装配指导方式可理解性差，容易导致错装、漏装的问题，需要解决三维可视化装配指导在装配现场的技术实现和应用问题；最后，针对复杂产品装配生产过程的实时跟踪和控制以及装配过程追溯的需求，需要解决数据展示的图形可视化技术实现以及过程控制实现的问题。

随着数字化理论、技术的发展，制造过程的数字化定义与管理逐渐成为新的发展方向。制造数据建模理论和标准的不断提出，为制造过程统一规范数据模型建模提供了指导和参考；基于模型定义的方法以模型为中心集成了产品数据信息和制造信息，为产品数据信息和制造信息全生命周期的数字化表达提供了可能^[5]；轻量化技术的发展，使得三维轻模型能够直接传递到装配车间，能够在车间现场直接浏览产品的三维模型以及产品设计和制造信息，并能够浏览装配过程仿真演示，推动了车间现场的无纸化生产^[6,7]；图形技术和虚拟仿真技术的发展，使得在虚拟环境下定义和监控整个制造过程成为现实。因此，数字化理论、技术的发展为复杂产品装配生产的数字化管理提供了理论和技术基础，对于制造企业具有十分重要的意义。

本课题以实现复杂产品的装配过程管理与控制为目标，开发一个适用于装配过程数

据管理以及装配过程可视化与控制的原型系统。以制造数据模型来指导装配过程中工艺数据、计划任务数据和实例数据等装配过程数据的结构化管理，在此基础上采用图形可视化技术实现装配生产进度的可视化监控和追溯，并基于三维轻模型实现装配过程的三维可视化装配指导，以提高复杂产品的装配生产效率和装配质量。

1.2 国内外研究现状综述

1.2.1 制造数据建模理论与标准研究现状

为实现装配过程中大量业务数据的结构化和规范化管理，需要采用规范的数据建模理论或标准建立一个统一规范的数据模型，规范地描述整个装配过程中所涉及到的业务数据对象。

目前国外对制造数据的研究，主要集中在数据建模理论和标准方面，致力于提供一个覆盖产品全生命周期的统一信息模型规范和建模方法，提高系统的可扩展性以及与其他系统的数据集成能力。

工艺规范描述语言(A Language for Process Specification, ALPS)是连接工艺规划需求和产品生产控制要求的中间接口，该规范基于有向图表示法描述工艺活动的时序关系，能够支持并行活动、事件同步、替代工艺、资源管理的全部规范要求^[8]。

企业系统与控制系统集成国际标准(the International Standard for the Integration of Enterprise and Control Systems, ISA-95)简称 S95，由仪表、系统和自动化协会 (ISA) 在 1995 年投票通过；S95 标准定义了企业商业系统和控制系统之间的集成，主要可以分成三个层次，即企业功能部分、信息流部分和控制功能部分^[9]；S95 标准包括模型和术语、对象模型属性定义、企业生产活动定义(包括定义管理、资源管理、生产详细计划、生产部署、生产执行、跟踪、分析和数据采集 8 种基本活动)、生产活动集成接口的对象与属性定义和业务与生产活动接口定义^[10,11,12,13,14]。

开放应用程序组集成规范(Open Applications Group Integration Specification, OAGIS)是开放应用程序组提出的基于 XML 技术的电子商务和应用集成标准^[15]。OAGIS 采用基于 XML 的业务对象文档作为不同系统集成的中间文件，实现企业信息

系统间的数据交换和集成；OAGIS 针对现实中的业务场景，对场景中涉及到的系统、集成目标和业务文档对象作出了详细的规定，以指导不同系统间的信息集成。OAGIS 在制造执行系统(Manufacturing Execution System, MES)与企业资源计划系统、工艺数据管理系统的集成上也制定了集成的标准，因此，只要 MES 在实现时参照 OAGIS 的标准，可以在很大程度上提高 MES 的集成能力^[16]。

基于模型定义(Model Based Definition, MBD)的方法是产品数字化定义的先进方法，以模型为中心，把产品在整个生命周期中需要的所有信息如产品设计信息和制造信息附加在三维模型实体上，只通过模型实体表达产品的完整定义；在生产过程中，将三维模型作为唯一依据，通过模型的传递进行信息流的传播^[17,18]。

过程规范语言(Process Specification Language, PSL)是美国国家标准技术研究院在对已有 26 种过程描述方法归纳和分析的基础上提出的，是基于本体论的过程定义理论体系，采用知识交互格式(Knowledge Interchange Format, KIF)语法，根据定义的基本概念、关系、函数、公理，在基础理论的支撑下为过程术语提供无二义性的表达，对过程进行统一规范的描述，从而实现不同应用系统之间过程信息的自动交换和互操作^[19]。

针对以上理论或标准的描述，对其作如表 1 所示的对比分析。

表 1 数据建模标准或理论对比分析

名称	研究对象、范围	优点、参考依据	局限、发展趋势
ALPS	工艺过程描述	完整的工艺规范描述语言	ALPS 只适合于描述工艺过程
ISA-95	管理和控制系统	提供了企业活动和控制活动的统一接口和数据结构；对象模型、行为模型完备。	需要满足多种工业和行业对企业信息集成的需要，侧重于集成。
OAGIS	集成对象、场景	在不同的系统之间就商务数据和逻辑的描述方面达成一致；业务对象文档，集成场景。	随着应用推广，业务场景描述需细致标准。
MBD	产品数据信息和制造信息	在三维模型上完整表达产品全生命周期信息	保证了数据的完整性和一致性，但数据提取困难，复杂产品的 MBD 表达不直观
PSL	制造过程信息	一种中性的描述制造过程信息的标准建模语言；专门用于复杂制造过程的过程建模，支持过程集成。	仅适用于离散制造过程表达；语义转换时的知识表达力不平衡；本体论中的语义扩展部分尚不完善，需要进一步补充。

通过上述对比分析可以看出, ALPS 只适合描述工艺过程的静态数据信息, 不能够描述执行过程中的动态信息; OAGIS 并不适合制造数据的建模, 但是它提供了一种中性的系统间数据集成的标准, 在系统的集成方面有着重要参考价值; MBD 也不适合制造数据的建模, 但它能够描述产品全生命周期的信息, 并能够在制造过程中提供一致的数据, 非常适合在制造过程中进行数据信息的传递; ISA-95 标准定义了 MES 系统集成时所用的通用术语和模型, 更侧重于系统接口和信息流的定义, 在制造数据建模方面有局限性; PSL 是一种完备的用于复杂制造过程的规范描述语言, 既可以作为系统集成时信息交换的中间语言, 也可以用于过程建模, 对本课题的装配过程建模和规范描述有借鉴意义。

1.2.2 制造过程可视化发展现状

随着制造企业信息化和数字化管理的推进, 制造过程中的大量数据信息需要能够被转换为可感知的、能够快速识别的形式进行展示, 如二维图形图像、三维模型等可视化形式, 达到提高制造过程的可视化程度以及信息的直观性和可理解性的目的。

在制造业信息化早期, 制造数据主要以文本、图表、二维工程图等形式进行呈现; 随着计算机图形技术的发展, 在二维层面上, 各种图形控件的出现, 使得数据信息能够以树形结构、网络结构等更加丰富的形式进行可视化展示, 在三维层面上, 三维计算机辅助设计软件的出现, 使得能够在三维环境下通过三维模型展示产品的形状、拓扑关系以及设计制造信息, 而轻量化技术的发展进一步推动了三维可视化技术和三维模型在制造过程中的应用, 为制造过程提供了强大的 3D 浏览和查询功能, 提升了现场作业的可视化指导水平^[7]; 数字化工厂仿真技术的不断发展, 使得能够在三维环境下对整个生产车间、生产布局、制造资源、物流以及制造过程进行可视化仿真^[20]; 虚拟现实技术的出现, 突破了系统和用户环境之间的界限, 为人们提供了一个三维的、多媒体的虚拟世界, 能够以自然的行为与虚拟世界进行交互, 目前开始应用于飞行模拟、空间技术、医疗、娱乐等领域, 虚拟现实技术未来将在制造业中发挥巨大作用, 如虚拟装配方面^[21]。

综合上述分析可以看出, 计算机图形技术的发展, 推动了制造过程从文本数据展示、

二维图表展示、三维数字化展示向虚拟现实的可视化演变过程；由于二维、三维可视化技术的不断成熟而虚拟现实技术的在制造过程中应用还较少，本文通过运用二维图形可视化技术以及基于轻模型的三维可视化技术实现复杂产品的装配过程可视化。

1.2.3 装配过程控制方法研究现状

复杂产品由大量的零部件组成，其零部件的装配在生产过程中存在串行和并行执行的情况，为了在各个零部件的串行和并行装配执行过程中，控制产品的装配生产进度和避免产品装配过程中错装、漏装事故的发生，需要一种有效的过程控制方法对产品的装配过程进行控制。文献[22]提出了面向手工装配的装配过程控制方法，通过采用 workflow 技术把产品装配过程的控制转化为产品装配生产工艺流程的控制，实现复杂产品的装配进度、状态以及质量的控制^[22]；文献[23]提出了装配过程控制平台，通过建立装配过程的技术状态数据模型，结合 workflow 的思想实现装配过程进度的控制与跟踪^[23]；文献[24]提出一种实时信息驱动的装配过程控制策略，建立装配过程 Petri 网模型并存入装配规则库，通过采集的装配过程实时信息匹配 Petri 网模型，从而确定产品装配的当前进度在 Petri 网中的节点位置和状态，实现产品的装配过程控制^[24]；文献[25]提出了基于事件驱动的装配过程模型，将装配过程中的生产活动抽象为基本元事件，利用事件集中的事件关联关系描述整个装配过程，通过事件触发驱动装配过程的状态发生改变，实现装配过程的实时控制，保证装配生产正确、顺利的进行^[25]。

综合上述对装配过程控制研究现状的分析，本文借鉴上述研究成果中 workflow 和状态控制思想，研究面向状态的装配过程控制方法，通过控制装配过程中每个装配节点的状态实现装配过程的控制。

1.2.4 国外装配执行解决方案

现代企业的制造过程管理正在向着数字化的方向发展，利用数字化管理手段实现对制造过程的高效管理和全局掌控，提高企业的生产效率和行业竞争力。在数字化需求的背景下，国外 MES 软件供应商提供了不少解决方案，比较有代表性的有 SAP 公司的 ME 生产执行系统、Intercim 公司的装配制造执行系统。

SAP 公司是全球最大的企业管理和协同化商务解决方案供应商，其强大的 MES 产品旨在为众多的制造企业提供一站式的生产管理解决方案。SAP ME 作为全球最专业的生产管理解决方案，为制造企业提供计划调度、质量监控、现场管理、数据采集、设备监控、物料追溯和看板管理以及 SPC 统计分析等完整的生产管理功能，具有可配置性的业务解决方案，如利用其提供的流程设计器可以结合实际业务设计出任何生产模式的工艺流程；具有易于操作的界面和用户体验，提供 3D 实时现场作业指导和产品实例追溯功能；具有离散和流程制造的多行业适应性，既可满足航空航天机械制造等离散制造业，也可满足食品、化工等流程制造企业。SAP ME 的柔性计划能力，为离散制造业提供准确的生产计划和排产、调度以及进度监控服务；其强大的本地化执行能力，通过采用条码和 RFID 技术实现对单件物料的全程跟踪和质量监控，并利用报表和看板等手段提高现场管理的实时性和精确性；其实时正确的决策支持能力，通过大量实时报表和 SPC 质量分析等手段，为管理层提供精确的决策依据，提高了管理效率。洛克希德马丁使用 SAP ME 管理其极其复杂的装配生产充分说明了 SAP ME 的制造执行管控能力和先进性。

Intercim 公司在帮助离散制造企业满足规范化要求、促进精益化原则，保证产品质量和确保无纸化生产环境中的工作流程等方面有着 25 年的成功经验；Intercim 强大且非常专业的装配制造执行系统，有着非常丰富的装配执行管理功能，能够很好的将工艺设计和装配过程进行结合；提供实时的在制品进度跟踪管理；能够记录产品的设计和装配过程；能够进行企业现场的生产成本控制；全面监控现场设备的使用状况；提供灵活的报表设计功能^[26]。Intercim 公司一直为波音、空客、宝马、霍尼韦尔等高端且高度规范化的大型领头企业提供软件服务。近年来，Intercim 和达索系统开始联手扩展 PLM 2.0 制造解决方案；Intercim 与达索系统针对 3D 流程计划 and 生产执行的解决方案，将 MES 系统与原本缺乏的 3D 数字化设计相结合，提供了强大的实时 3D 生产进度跟踪和监控的能力，为制造企业提供了更好的生产体验，在工程、制造计划以及生产这三个不同的领域，为知识产权的共享掀起了一场革命性的变革^[27]。

综上所述，国外的装配执行解决方案都已经发展的比较成熟，提供了丰富且强大的功能，系统可扩展性和平台兼容性好，但是由于国内大多数企业管理信息化基础较弱，

规范化和标准化程度较低，而且管理模式、文化背景与国外有很大不同，因此国内企业在应用国外的解决方案时，需要进行软件的个性化定制，费用非常昂贵，限制了企业的装配管理的数字化进程。本文通过结合企业的具体管理现状和实际业务需求，借鉴国外解决方案的三维数字化先进思想，研究企业装配管理的数字化方案，推进企业装配管理的数字进程，降低企业数字化应用成本。

1.2.5 国内装配执行解决方案

对比国外装配执行解决方案的发展，国内的装配执行解决方案还不够完善。山大华天软件有限公司推出了完全自主知识产权的三维装配工艺设计系统和面向离散型装配的协同制造管理平台，其工艺设计系统提供了三维装配工艺设计、规划、仿真与发布等功能，协同制造管理平台提供了装配生产过程执行与监控、精益生产以及全面的质量管理等功能^[28]；北京数码大方科技有限公司完全自主知识产权的 CAXA 数字化解决方案，覆盖了工业产品的设计、工艺、制造管理三个方面，在装配工艺设计方面提供了三维数字化工艺设计与仿真、工艺管理、工艺图表等功能，在装配过程管理方面，以实现实时管控、过程透明为目标，打通了工艺到制造环节的数据通路，能够实时跟踪装配车间生产进度，实现了制造部门与各个环节协同作业并快速做出响应，提供多种数据采集方式保证数据的及时性和准确性^[29]。目前国内数字化装配方案相对于国外而言，在装配数字化制造执行方面，还不具有以实时 3D 的方式展示生产进度和进行产品实例追溯的能力；在应用方面，服务的领域还不够全面，且不具备为高端制造行业提供解决方案的能力；总的来说，在技术水平和产品功能方面还有较大差距，方案的系统性也不够完善。

综上所述，国内装配执行解决方案的发展虽然与国外还有较大差距，但依然取得了不少成果；国内装配执行解决方案所针对的装配生产管理问题和所要实现的目标，在一定程度上与本课题所要解决的问题和实现的目标具有相似性，其成果对本课题研究的装配管理数字化方案有着很好的指导和借鉴意义。

1.3 研究目的及内容

1.3.1 研究目的

针对企业对复杂产品装配过程管理和控制的需求，建立基于三维轻模型的装配过程可视化管控系统，解决复杂产品装配生产过程数据管理分散、可视化程度低以及无法实时干预和控制等问题，实现对复杂产品装配生产过程的可视化管控，提高复杂产品的装配生产效率和装配质量。

1.3.2 研究内容

本课题的研究内容主要集中在以下几个方面：

1) 基于过程规范语言的信息模型构建

为实现产品制造周期中数据定义的一致性，研究基于过程规范语言 **PSL** 的信息模型构建方法。首先利用 **PSL** 对装配过程中的业务对象及其关系进行规范描述，为其在制造过程中提供一致性的语义表达，在此基础上，采用面向对象的建模方法，完成装配过程信息模型的构建。

2) 面向状态的装配过程控制方法研究

复杂产品装配过程由一系列的装配任务活动节点组成，为解决因装配任务之间复杂的串行和并行执行顺序所导致的装配过程控制问题，研究基于有限状态机的状态控制方法，按照装配过程中每个节点与其前驱、后继节点的顺序约束关系，通过控制每个节点的状态保证装配过程按照正确的顺序约束关系执行，实现对装配过程的控制。

3) 基于 **mxGraph** 和轻模型的可视化技术实现

为满足装配过程的可视化需求，首先，研究 **mxGraph** 的图形化展示和图形交互的实现技术，基于 **mxGraph** 实现以树、网络等图形化形式实时展示装配过程信息，并通过图形交互技术实现装配过程信息的多视图展示和信息定位；其次，研究装配过程数据与轻模型的映射方法以及轻模型浏览技术，利用轻模型浏览平台提供的二次开发接口，通过操纵三维轻模型实现产品实例数据的三维展示和装配过程仿真演示。

4) 基于三维轻模型的可视化管控系统原型设计与实现

采用 Spring+Hibernate+Dorado 轻量级技术框架开发装配过程可视化管控原型系统, 实现装配过程数据的结构化管理、基于轻模型的装配过程仿真和实例三维可视化以及装配过程可视化与控制等功能。

1.4 论文组织结构

本论文共分为四个章节:

第一章: 绪论

本章首先对课题的研究背景及意义进行了概述, 接着分析了制造数据模型研究现状、制造过程可视化发展现状、装配过程控制方法研究现状以及国内外数字化装配解决方案, 在此基础上, 针对企业的实际应用需求提出了论文的研究目的与研究内容。

第二章: 装配过程可视化管控系统总体设计

本章首先对企业装配生产特点与管理现状以及装配过程可视化管控系统的业务流程、功能需求进行了分析, 参考 MESA 标准功能模型建立了系统总体功能模型; 然后, 基于系统架构的需求分析, 参考主流的 J2EE 架构建立了系统的总体软件技术架构; 最后, 论述了基于过程规范语言 PSL 的系统总体信息模型构建。

第三章: 系统主要功能实现技术研究与分析

本章分析了装配过程可视化管控系统主要功能的关键技术。主要从装配过程的工艺管理、计划任务管理、装配现场执行管理和可视化与管控四个方面, 结合系统信息模型, 阐述了关键技术的具体实现方法, 在此基础上实现装配过程的管理与控制。

第四章: 装配过程可视化管控系统的设计与实现

本章首先介绍了系统的开发环境、运行环境, 然后通过运行系统实例, 验证系统的可行性与有效性。

最后, 总结了课题研究成果以及还存在的一些不足之处, 并指出了今后的研究方向和相关工作内容。

第二章 装配过程可视化管控系统总体设计

2.1 企业装配生产特点与管理现状

课题组通过对某企业的装配车间生产管理现状调研，确定该企业装配的产品主要是复杂产品，生产方式为按订单装配(Assemble-to-Order, ATO)。复杂产品的装配生产过程是典型的离散型生产模式，具有生产工艺复杂、装配调试周期长、生产不均衡以及生产返工返修任务作业多等特点。按订单装配是一种较先进的生产组织方式，能够缩短交货期以及减少成品库存，但客户需求不断变化，经常出现生产任务需要变更或改制的情况，生产计划与执行管理难度大。

目前该企业对复杂产品装配过程的管理，主要还是以纸质文档为主进行数据的传递和记录，而装配的生产特点导致了这些非结构化的数据管理较为分散，信息传递效率低下，容易形成信息孤岛。采用二维图纸、纸质工艺文档实施产品的装配指导，对装配的指导不够直观易懂，容易导致错装漏装的情况发生，工人的生产效率也十分低下；以纸质装配过程卡的形式记录产品的装配进度，使得管理层不能实时的掌握生产车间的产品装配执行状况，同时也无法实时的进行装配生产的干预和控制，对产品质量和装配过程的追溯则更加困难。

依据上述企业生产特点和管理现状的分析可知，单分散的纸质文档的数据管理方式已经无法满足复杂产品的装配过程管理的需要，企业迫切需要对装配过程进行数字化管理。因此，首先需要为复杂产品的装配过程数据建立规范的信息模型，实现装配过程数据的结构化管理；其次，需要将三维轻模型应用到装配现场取代二维工艺图纸并对复杂产品的装配顺序进行控制，通过三维可视化指导的方式提高装配过程的直观性和可理解性，同时，严格的装配过程控制保证了产品零部件装配按顺序进行，避免了错装漏装的情况发生；最后，通过看板或终端形式利用可视化技术对装配过程中计划任务的执行状况、进度以及产品的质量状态进行实时监控，通过终端交互，实现装配过程的追溯以及调整和控制。

2.2 系统功能需求分析

2.2.1 系统业务流程分析

在装配生产过程特点和管理现状分析的基础上,进一步分析装配生产过程中的业务处理流程,总结出如图 1 所示业务流程。

在整个装配生产过程中,产品的装配生产流程按照时序可以划分为不同的阶段,各阶段的工作人员按照自己的工作职责共同协作完成产品的装配生产。各阶段涉及到的工作人员主要包括:基础数据管理员、工艺管理员、车间计划员、现场操作人员,其相应的业务职责描述如下:

1) 基础数据管理员

基础数据管理员为企业提供装配过程中所需要的基础数据维护服务,主要包括基础物料、工具工装、文档、设备等数据的创建和维护。

2) 工艺管理员

工艺管理员负责产品数据的定义、产品工艺规程的编辑、文档维护、产品的装配 AO 划分等工作,为产品的计划齐套分析、任务分解、现场装配指导和数据采集提供数据基础。

3) 车间计划员

车间计划员负责产品装配计划的维护,按照订单交货期的要求制定装配计划并分析计划的物料齐套情况,根据齐套情况安排装配生产任务以及下达相关缺件计划指令,并按照产品的装配组织方式进行任务派工,实时跟踪计划和装配生产任务的进度状况,保证产品计划进度能够满足交货期的要求。

4) 现场操作人员

现场操作人员包括装配工人和检验员。装配工人接收生产任务后,参考产品的工艺说明和装配指导执行产品的装配操作,同时反馈任务执行的进度情况、装配过程中产品实例使用的物料和资源等数据,完成装配任务后按照检验需求进行任务报检。检验员按照工艺定义的检验项目逐条检验并反馈实测值,根据检验的结果决定是否发起临时操作

或不合格品审理流程。

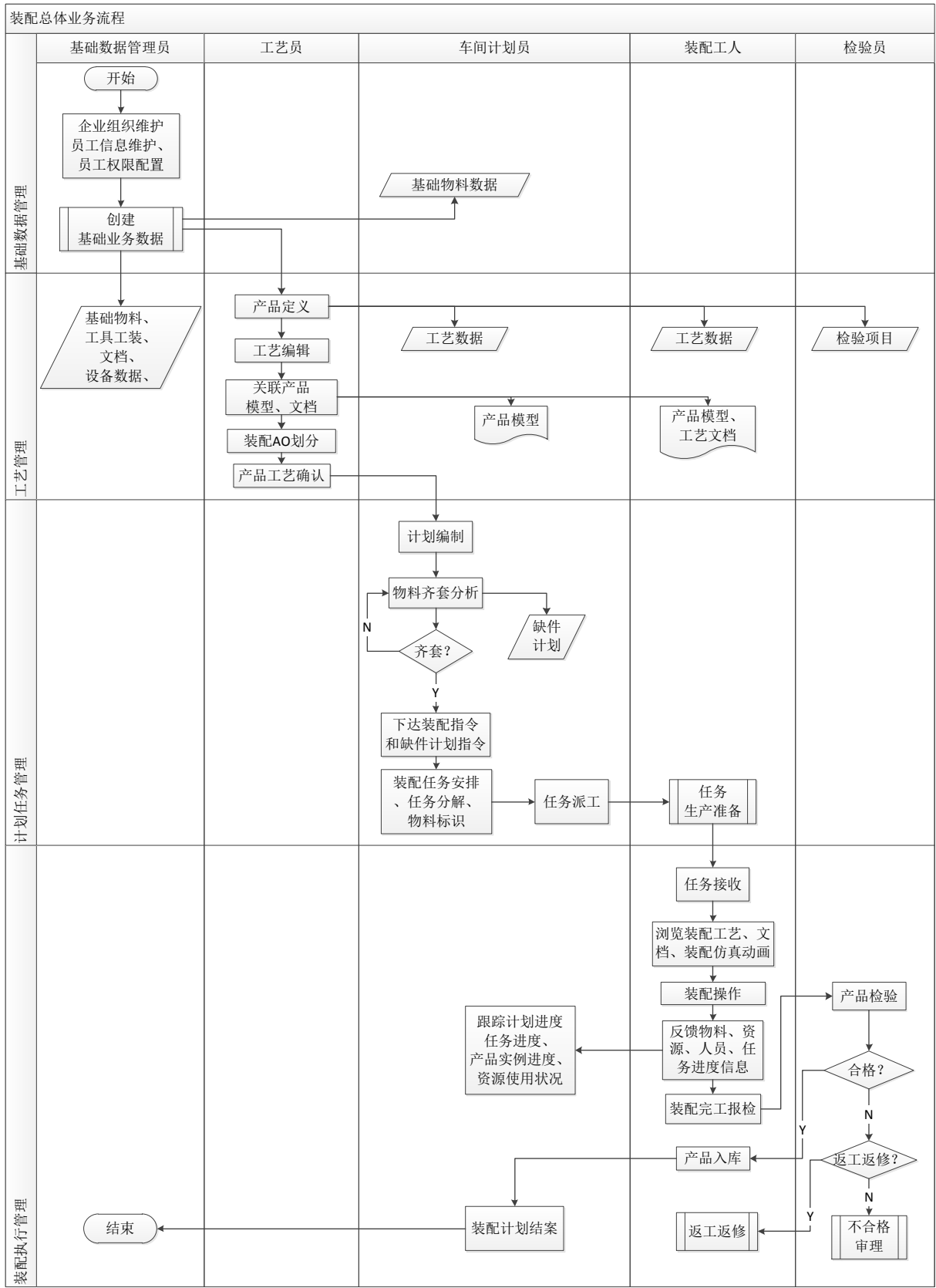


图 1 系统业务流程

2.2.2 系统功能需求分析

依据上述针对企业装配生产特点、管理现状以及系统务流程的分析，总结装配过程可视化管控系统的功能需求包括人员管理、生产资源管理、装配工艺管理、装配计划任务管理、装配现场执行管理和装配过程可视化管控等功能，在系统设计过程中需要重点解决以下几个方面：

1) 装配工艺管理

由于复杂产品的生产工艺复杂，因此在对工艺进行数字化管理时，需要将工艺数据按照结构层次进行结构化管理，并关联信息定义完整的三维轻模型，为装配现场三维装配指导提供模型数据基础；复杂产品的各个装配工序并不是按顺序串行执行的，工序间存在着并行执行的情况，因此需要能够管理工序之间的顺序约束关系；在装配过程中，由于工艺不合理或其他原因可能导致工艺变更的情况出现，因此需要提供工艺的变更管理；鉴于企业可能采用专门的工艺设计系统编制工艺，需要为工艺数据管理模块定义完整的集成接口，并通过自动化的方式实现外部工艺系统编制工艺的集成。

2) 装配计划任务管理

企业的装配生产方式是面向订单装配，因此需要对产品的装配计划和任务按照交货期的要求进行合理安排与控制。车间计划人员需要快速的对产品装配计划进行齐套分析，得到产品的齐套结果和缺件情况，并且能够管理产品计划与子计划、齐套计划、缺件计划之间的约束关系；能够将齐套计划按照复杂产品装配大纲(Assembly Order, AO)生成相应的总装配任务和部装任务，并进行计划与任务、以及装配任务间挂接关系的管理；在面对客户的紧急订单时，能够对计划的库存和在制品占用关系进行变更管理；根据企业不同的装配生产组织方式，能够按照不同生产组织方式进行任务的派工管理。

3) 装配现场执行管理

装配生产现场是装配人员执行所分派装配任务的场所。由于装配现场目前主要采用二维工艺图纸、技术说明等纸质文档指导装配，不但对装配工人知识水平要求高，而且耗费大量时间，降低了装配生产的质量和效率，通过在现场引入三维轻模型，利用三维轻模型进行装配过程仿真指导装配，装配人员能够在三维环境下浏览产品的设计细节、

装配要求和具体装配过程的操作步骤，极大地提高装配生产效率和产品质量；产品的装配是按照产品装配大纲进行划分的，每个装配产品都需要开展许多个部装任务、工序任务，而各个任务之间存在着并行和串行的执行顺序约束关系，为了避免产品装配过程中出现错装、漏装的情况，需要严格控制各个任务按照正确的装配顺序执行，保证每个任务只有在其前面的装配任务完成后才能开始装配；为实现对生产现场的实时全面掌控，在装配现场的数据采集和实时反馈是对现场管理和控制实现的基础，而车间采用手工记录、纸质文件存档的数据采集与反馈方式，存在着数据实时差、传递效率低等问题，无法及时掌握车间装配生产进度并作出快速响应，同时也不利于管理层的装配过程跟踪和追溯，因此需要通过现场终端系统和数据采集设备，以电子档的形式进行车间生产数据的采集，并实时反馈到管理系统中。

4) 装配过程可视化与管控

为实时掌握装配过程生产状况和进度，需要将装配过程中的计划、任务、装配实例等数据以结构化和用户友好的形式进行可视化展示，如表、树、图等形式，并能够结合三维轻模型，在三维环境下以更加直观的方式展示每个装配实例的装配进度情况；为实现对装配过程进行管理和控制，应能够通过可视化跟踪界面的人机交互来驱动或干预业务过程，使得管理层能够根据装配生产状况实现计划安排与派工、计划任务调整、以及消息推送等业务操作，对装配过程进行管理和控制。

结合系统业务流程和上述功能需求，采用统一建模语言(Unified Modeling Language, UML)建模工具构建系统主要功能的用例图，从用户的角度描述系统功能。用例角色主要有基础数据管理员、工艺管理员、车间计划员、装配工人、检验员；主要用例有基础数据管理、工艺管理、装配计划任务管理、装配现场管理和装配过程可视化与管控。

- 1) 基础数据管理用例。描述系统的基础业务数据管理功能，包括用户管理、权限管理、角色管理，以及文档上传、文档浏览、版本维护、资源定义和维护等功能，如图 2 所示。

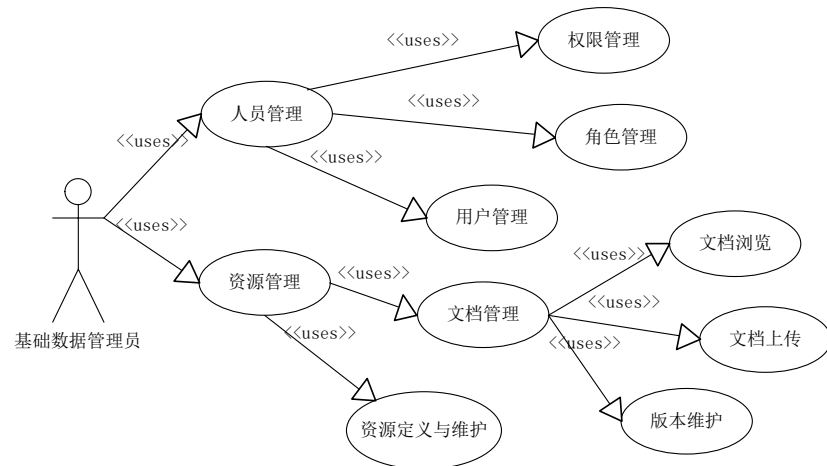


图2 基础数据管理用例图

- 2) 工艺管理用例：描述工艺数据管理所具备的功能，包括产品定义、工艺集成、工序约束定义、工艺数据的定义和变更等功能，如图3所示。

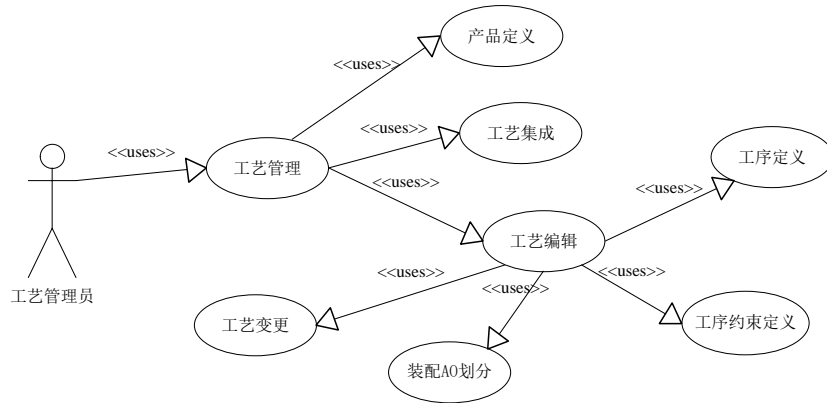


图3 工艺管理用例图

- 3) 装配计划任务管理用例：描述装配计划、任务的管理功能，包括装配计划数据管理、齐套管理、缺件管理、任务分解、任务挂接以及任务派工等功能，如图4所示。

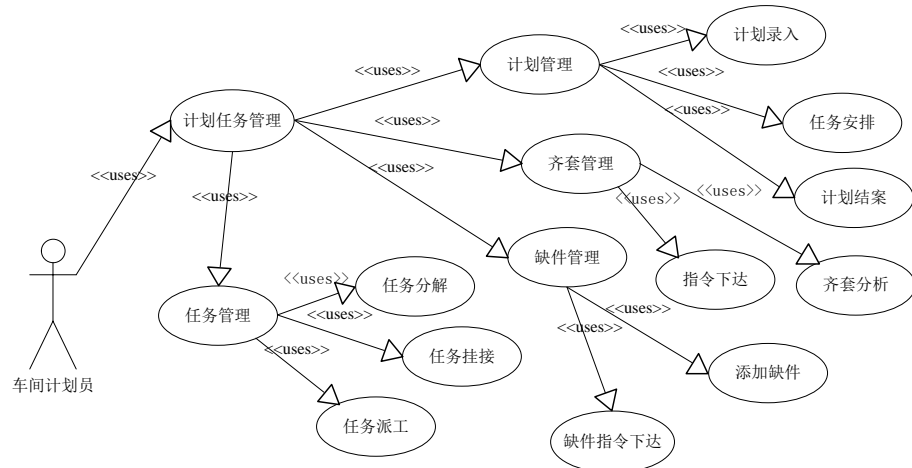


图4 装配计划任务管理用例图

- 4) 装配现场管理用例：描述装配执行与反馈管理，主要包括装配现场任务信息加载、装配指导、装配数据采集和反馈、以及临时操作等功能，如图 5 所示。

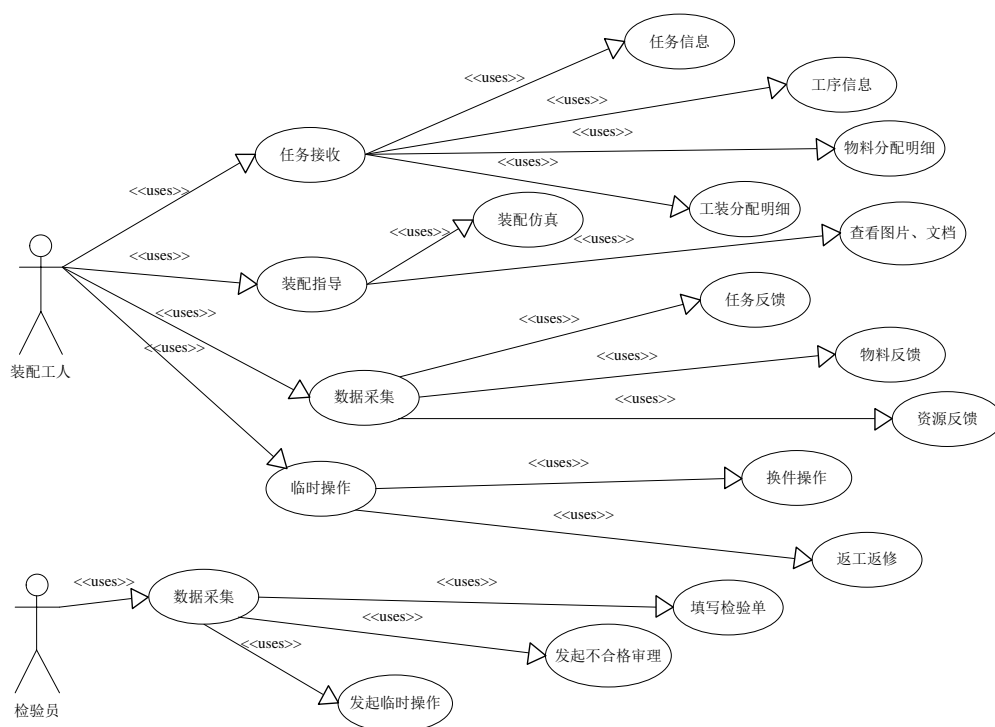


图 5 装配现场管理用例图

- 5) 装配过程可视化与管控用例：描述装配过程进度实时跟踪与控制功能，包括计划任务进度跟踪、装配实例查询、物料谱系查询、计划任务变更控制等功能，如图 6 所示。

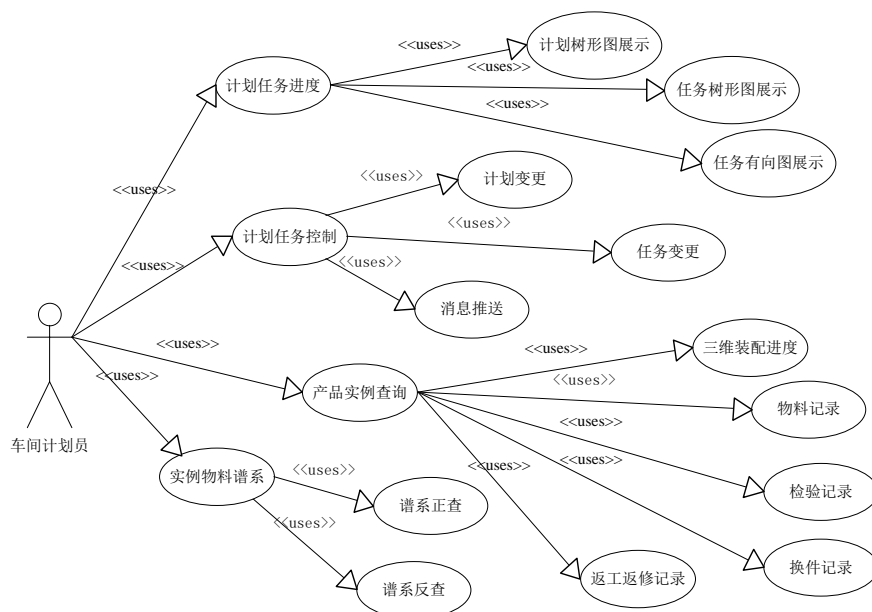


图 6 装配过程可视化与管控用例图

2.3 系统总体功能模型设计

本课题开发的装配过程可视化管控系统,功能模块的划分主要参考 MESA 的标准功能模型,保证各个功能模块最大限度的独立,提高系统的可扩展性和集成性。

1) MES 的标准功能模型

MES 系统是面向制造企业车间执行层的信息管理,由美国先进制造研究机构 (America Manufacturing Research, AMR) 在 90 年代初首次提出, MES 作为沟通上层计划管理系统 ERP 和下层过程控制系统 PCS 的桥梁,通过企业的连续信息流来实现企业信息全集成。MESA(Manufacturing Enterprise Solutions Association)在 2008 年最新发布的 MES 标准功能模型如图 7 所示,模型规定了 MES 系统的功能划分,并定义了与其他商业运作系统的集成接口^[30]。

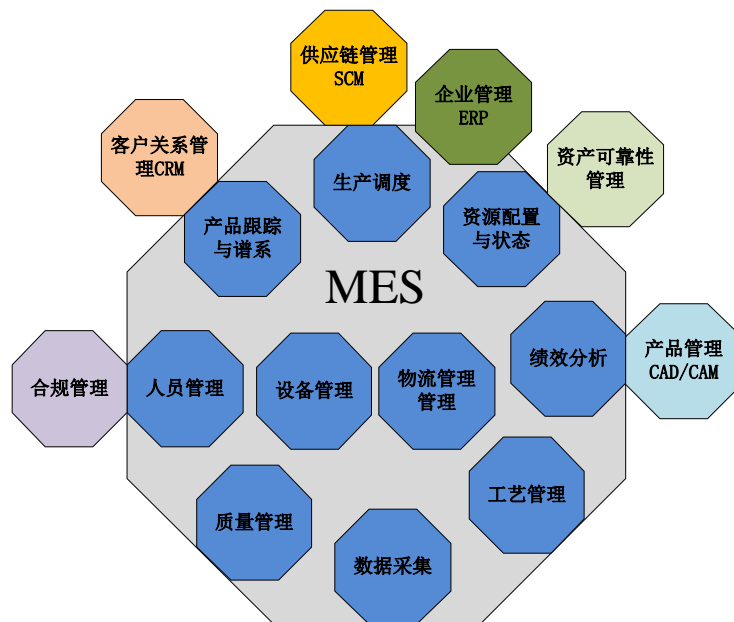


图 7 MESA 标准功能模型

2) 系统总体功能模型

根据前述系统功能需求分析,参考 MESA 标准功能模型,建立如图 8 所示的装配过程可视化管控系统总体功能结构,主要包括人员管理、生产资源管理、工艺管理、计划任务管理、装配现场执行管理、可视化与管控六个模块,同时为了保持系统的扩展性,应提供上层应用和下层控制集成接口。



图 8 系统总体功能模型

2.4 系统架构需求分析

2.4.1 系统架构模式选型

系统架构即为软件架构，是软件整体结构与组件的抽象描述，对软件设计具有指导作用。常见的系统架构模式包括单机模式、客户机/服务器模式、多服务结构模式、企业数据交换总线模式等。

单机模式的应用系统是运行在一台物理机上的应用程序；客户机/服务器模式是一种基于请求/响应模式的多机应用系统，建立在局域网或广域网的基础之上，在实现上分为多层的客户端/服务器架构(Client/Server, C/S)和浏览器/服务器架构(Browser/Server, B/S)；多服务结构的模式将应用程序按照功能单元划分为多个独立的应用(即服务)，应用间定义明确的接口采用消息机制或远程过程调用进行通信，共同完成应用系统所有功能；企业数据交换总线模式由多服务结构发展而来，是一种实现企业中不同应用系统间信息交换和集成的架构模式，在大型企业中应用较为广泛。

通过分析企业的业务流程和应用需求可知，企业所需要应用的装配过程管理系统是一个独立的多机应用系统，需要在车间级和管理层分别部署大量应用终端，包括电子看板、平板电脑、PC 机等，所有终端通过企业内部局域网统一访问系统。因此，本文研究的系统架构适合采用客户机/服务器模式，考虑到 C/S 架构需要安装专门的客户端程序，对不同的操作系统需要开发不同的版本，而且在软件升级时需要对所有客户端重新安装

软件，维护成本高，而 B/S 架构的客户端是浏览器，与具体的操作系统无关，具有很好的跨平台性，整个应用系统的所有内容集中部署在服务器端，系统升级时只需要更新服务端，系统的维护成本低，而且平台无关的 Java2 平台企业版(Java2 Platform Enterprise Edition, J2EE)的出现和发展使得 B/S 架构的应用程序设计、开发、部署变得更为简单、高效，并为建立具有可扩展性、可伸缩性以及可维护性的应用系统提供了技术基础，所以系统在实现上采用分层 B/S 架构。

2.4.2 系统架构设计参考

通过上述架构分析可知，装配过程可视化管控系统软件的架构采用 B/S 架构模式。在架构实现时本文采用目前主流的与平台无关的 J2EE 架构，并应用 MVC 模式进行软件分层设计，实现系统的界面展示、业务逻辑和数据的分层和解耦，使得层次内的模块能够复用，有利于软件维护和扩展；

1) J2EE 架构

J2EE 是建立 Java 企业系统的总体平台和编程模型，它定义了相关软件产品实现的规范；它的核心是一组技术规范与指南，采用组件的方式对企业应用进行设计、开发、组装以及部署^[31]。J2EE 采用多层次的、分布式的应用模型，按照客户层、应用服务层和企业数据层的层次对企业应用进行划分，如图 9 所示^[32]。J2EE 的基于组件的分层设计思想为本系统总体架构设计提供了思路和参考，系统的实现也主要采用遵循 J2EE 规范的成熟轻量级框架，主要有数据持久层的 Hibernate 和面向多层的 Spring 等。

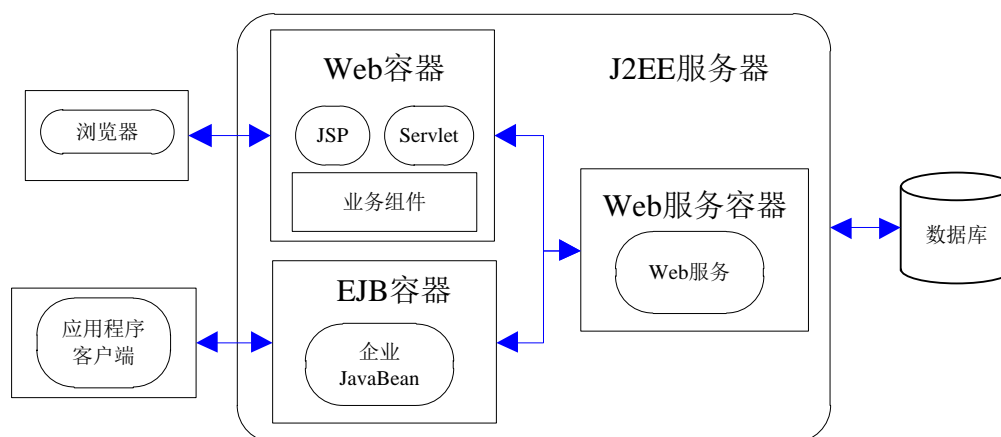


图 9 J2EE 逻辑体系结构

2) MVC 模式

MVC 模式是模型、视图、控制器对应英文单词 Model, View, Controller 的首字母缩写，是一种非常流行的软件设计方法，在二十世纪八十年代的 Small-talk-80 的 GUI 设计中提出，其原理如图 10 所示^[33]。MVC 模式使用展现层、业务逻辑层、数据层解耦的方法组织代码，使得程序结构清晰，代码复用程度更高，易于后期的代码扩展和维护，特别是在升级界面和用户交互时不需要重新编写业务逻辑层的代码。本课题开发的系统采用该模式的思想进行代码的组织，以利于后期业务功能的扩展，同时简化了系统的开发。

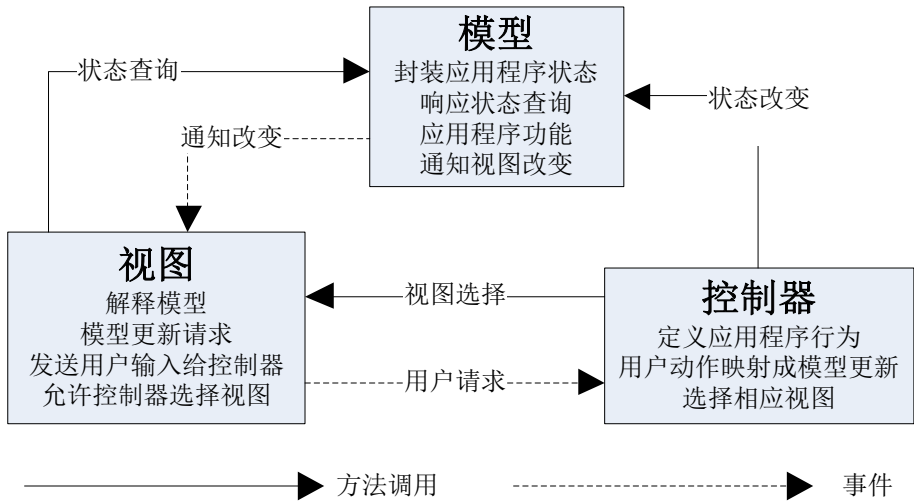


图 10 MVC 结构组件关系和功能

2.5 系统总体软件架构设计

虽然传统的企业级 J2EE 架构开发和部署的难度都非常大，对开发者的技术水平要求高，一般人员使用起来较为困难，但随着技术的发展，许多优秀的轻量级 J2EE 框架层出不穷，这些轻量级框架学习难度小，开发部署的成本都比较低，适合应用于本课题研究的系统的开发。轻量级的 J2EE 框架，采用 MVC 模式将软件系统划分为清晰的多层架构，其优点在于当系统在某一层上采用新的技术进行升级时，其他层次受到的影响很小甚至没有影响，提高了软件系统的柔性和互换性。本文结合轻量级的 J2EE 框架，采用 J2EE Web 系统组件高内聚、低耦合的解耦设计思想以及系统分层的 MVC 模式，设计如图 11 所示的系统总体软件架构。

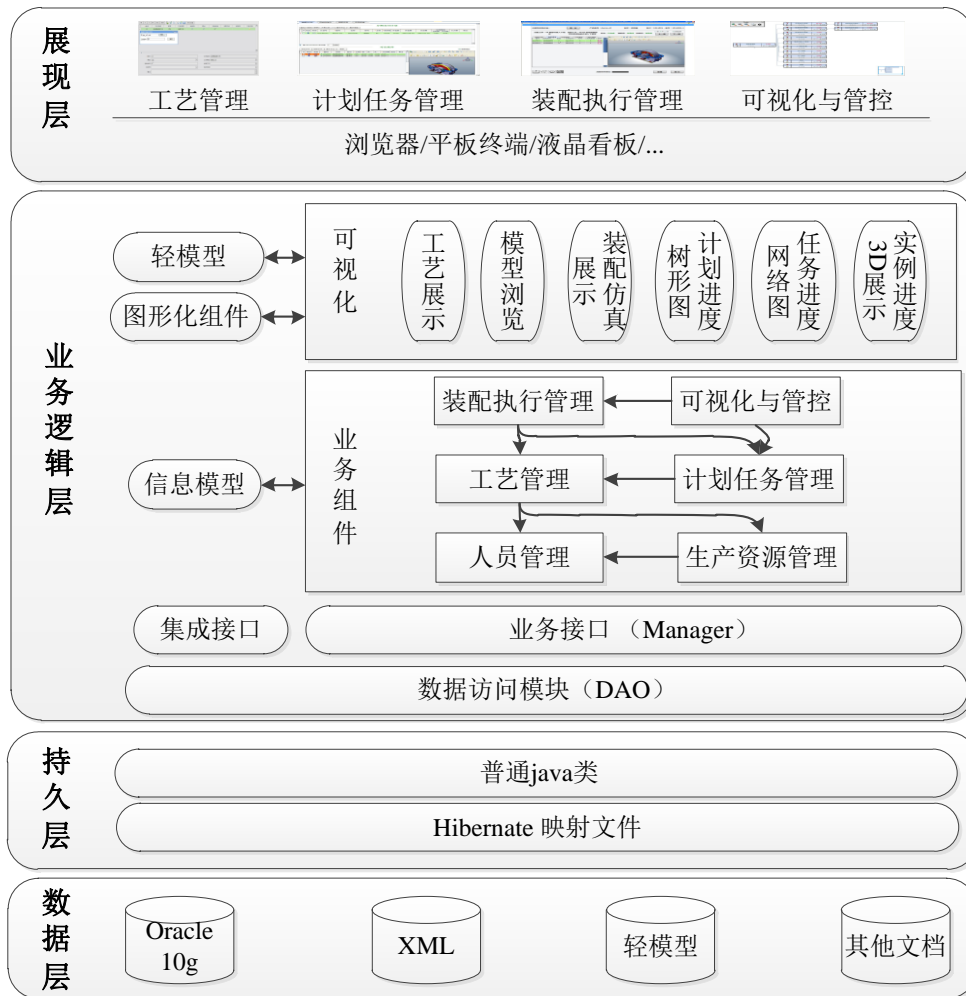


图 11 系统总体软件架构

本课题开发的装配过程可视化管控系统采用 DSH(Dorado+Spring+Hibernate)轻量级框架，从逻辑上将系统划分为 4 层，如图 11 所示，分别为数据层、持久层、业务逻辑层和展现层，各个部分的功能描述如下：

1) 数据层

在数据层共包含四个部分的数据。第一部分是装配可视化管控系统使用的关系型数据库，用来存储系统的数据信息和生产信息，系统运行时所需的表、视图、序列、触发器、函数和存储过程都存储在数据库中。第二部分是集成自外部工艺设计系统的工艺 XML 文件，其中记录着装配工艺的详细信息，用于向系统工艺管理模块传递工艺信息。第三部分是根据 CATIA 中的产品三维设计模型转换得到的三维轻模型，用于传递产品完整的设计信息包括产品数据信息和制造信息，并作为信息的载体，在装配现场提供装配仿真指导以及其他业务展示的需要。第四部分为系统相关的图片、文档等资料，用于

辅助装配生产。

2) 持久层

持久层是用来进行数据库中的物理表和对象的映射,通过映射描述文件来映射物理表和 POJO(Plain Ordinary Java Object)类,使得在业务逻辑实现时,对数据库表的操作能够像操作对象一样,方便的进行增删改查操作,同时,持久层所具有的数据缓存功能,提高了系统的存储性能。

3) 业务逻辑层

业务逻辑层是装配过程可视化管控的核心部分,主要是对来自展现层的业务请求进行处理,根据处理的结果向展现层发送业务数据信息。各个组件在接受业务请求后,一方面调用该组件或其所依赖的相关组件的业务方法处理业务请求,将相关信息持久化到数据库中;另一方面将客户请求的信息或处理结果发送到客户端进行展现,完成来自展现层的用户请求;从而完成用户和系统的交互功能,实现系统业务管理。

4) 展现层

展现层提供用户和系统进行交互的人机界面,实现系统与用户的交互,用户通过在界面上的操作,来驱动相应的业务过程,达到管理的目的。展现层主要是将用户请求发送到服务器端以及接收服务器端返回的业务处理结果并进行展示,系统针对不同的用户提供不同的业务功能。展现层作为用户交互的媒介,人性化的设计和用户体验是开发者需要关注的。

本课题开发的软件系统从逻辑上划分为 4 层,各个层次的实现技术和使用的产品如表 2 所示。

表 2 各层对应的技术与框架

架构层次	实现技术	框架、产品
展现层	Ajax	Dorado5、mxGraph、3DVIA Composer
业务层	AOP/IoC	Spring
	DAO	
持久层	ORM	Hibernate
数据层	JDBC	Oracle 10g

2.6 系统总体信息模型建模

在建立了系统功能模型和软件架构后,需要设计系统的信息模型描述装配过程中的业务数据对象,支撑系统对装配过程数据的结构化管理。为了构建规范的信息模型,本文首先采用 PSL 语言规范装配过程描述,然后在装配过程规范描述的基础上,采用面向对象的建模方法,完成装配过程信息模型的构建。

2.6.1 基于 PSL 的装配过程描述

PSL 理论框架由 3 个部分组成: PSL 核心、基础理论和 PSL 扩展。PSL 核心是一系列用于描述基本过程的公理化语义单元,包括四个原始类(activity, activity-occurrence, timepoint, object),两个原始函数(beginof, endof)和三个原始关系(before, occurrence-of, Participates-in)。基础理论是对 PSL 核心进行普遍适用性扩展的推理理论和相关公理,包括集合论、时限理论和情景演算等。PSL 扩展是对 PSL 核心表达能力的扩充,通过加入新的常量和谓词提供核心以外的过程描述方法,如 PSL 外核扩展、通用活动扩展和排序扩展等。

装配过程描述本质上可以看作是对装配过程中的过程对象和对象之间约束关系的形式化表达,因此引入以过程为核心组织数据的方法,描述过程对象和对象之间的约束关系,并采用 PSL 核心及扩展中定义的类与关系对装配过程进行规范描述,在产品制造的整个生命周期为装配过程中的过程对象和对象间约束关系提供一致性的语义表达,从而规范信息模型的构建。需要指出的是,采用 PSL 语言描述装配过程的目的并不是将其作为与其他信息系统进行信息交换的中间语言,而是借鉴 PSL 对过程建模和规范描述的能力。

下面针对产品装配工艺过程和任务执行过程主要的过程对象和对象关系,描述与 PSL 中的类与关系的映射关系,其与 PSL 的映射具体描述如下:

- 1) 工艺过程中的工艺、工序、工步活动是工艺过程信息中最基本的组成部分,对应于 PSL 核心中四个原始类之一的 Activity(活动)类。

2) 工艺过程中使用的物料、量具、夹具、设备等资源对应于 PSL 四个原始类之一的 Object(对象)类。

3) 工艺过程中的对象关系, 包括工步活动与资源的关系、工步活动与物料的关系等, 对应与 PSL 核心中的 Participates-in(参与)基本关系。

4) 工艺活动与任务活动在装配过程中是定义与实例的关系, 对应于 PSL 中 Activity 类与 Activity-Occurrence(活动实例)类之间的 Occurrence-of(活动发生)关系。

5) 任务作为活动的实例, 在执行过程中包含了活动的时间信息, 对应于 PSL 中四个原始类之一的 Timepoint(时间点)类。

6) 工艺活动与子工艺活动、工序、工步之间的聚合、分解关系, 对应于 PSL 扩展中的 Subactivity(子活动)关系。

7) 装配任务与子装配任务、工序任务、工步任务之间的聚合分解关系, 对应与 PSL 扩展中 Subactivity-Occurrence(子活动发生)关系。

8) 同一结构层次的工艺活动之间的串行、并行以及汇合关系, 对应于 PSL 扩展中的 follows(顺序)、start-synchronization(并行)、end-synchronization(同步)排序关系。

综合上述对过程对象、对象约束关系与 PSL 中定义的类和关系映射的描述, 可以给出如图 12 所示的装配过程规范描述。

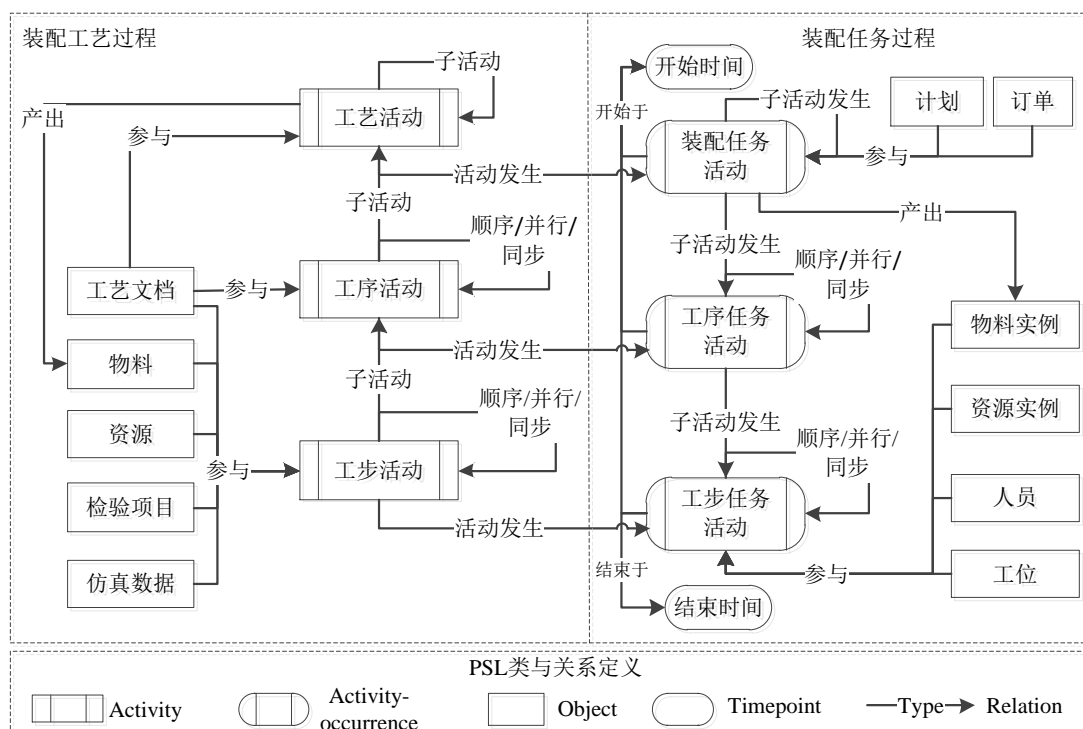


图 12 装配过程规范描述

2.6.2 装配过程信息模型构建

在上述装配过程规范描述的基础上，构建如图 13 所示的系统信息模型，描述装配过程中业务对象表达的详细数据内容以及业务数据对象间的关联关系，支撑系统对装配过程数据的结构化数据管理。

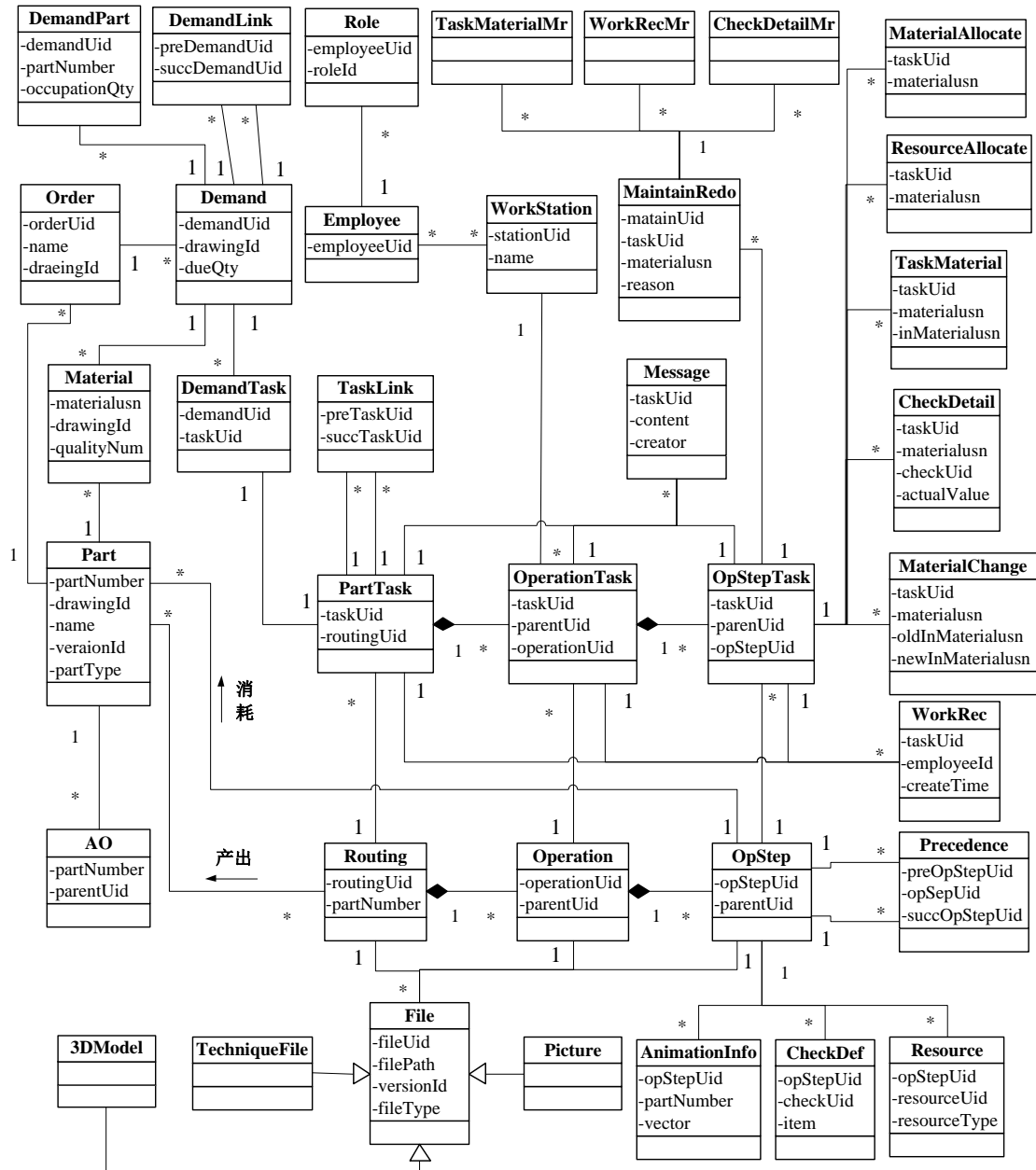


图 13 系统信息模型

整个装配过程中的业务对象可以划分为两部分，一部分是装配生产定义的工艺过程业务对象，主要包括工艺(Routing)、工序(Operation)、工步(OpStep)、产品/零组件(Part)、资源(Resource)、检验项目(CheckDef)、仿真信息(AnimationInfo)、顺序约束(Precedence)

和工艺文档(File)等业务对象, 工艺文档对象可细分为三维轻模型(3DModel)、技术文档(TechniqueFile)和图片(Picture); 另一部分是装配生产执行的装配任务过程业务对象, 主要包括订单(Order)、计划(Demand)、计划链接(DemandLink)、计划物料(DemandPart)、装配大纲(Assembly Order, AO)、产品实例(Material)、装配任务(PartTask)、工序任务(OperationTask)、工步任务(OpStepTask)、分配资源(ResourceAllocate)、分配物料(MaterialAllocate)、工位(WorkStation)、人员(Employee)和父子约束(TaskLink)等业务对象, 并按照动态数据的管理需求, 扩展出任务记录(WorkRec)、返工返修记录(MaintainRedo)、装配物料记录(TaskMaterial)、检验记录(CheckDetail)、换件记录(MaterialChange)和任务消息(Message)等领域对象。针对主要的业务对象, 其具体含义描述如下:

- 1) 产品/零组件对象(Part): 表示装配过程中的产品或部件对象, 描述了产品或部件的固有属性和制造属性。
- 2) 工艺对象(Routing): 表示产品或部件的工艺规程, 描述了工艺规程的属性信息, 如工艺版本、主制部门等。
- 3) 工步对象(OpStep): 描述了产品详细的装配操作的实施方法和步骤, 本文以工步为核心关联装配消耗的物料、使用的资源、检验项目、装配仿真等信息, 是工艺信息管理的基本单位,
- 4) 资源对象(Resource): 表示装配过程中刀具、夹具、量具、辅具、设备等制造资源, 描述了制造资源的属性信息。
- 5) 检验项目对象(CheckDef): 描述了产品装配需要满足的质量要求, 包括尺寸公差、形位公差和粗糙度。
- 6) 仿真信息对象(AnimationInfo): 描述了产品每个零组件对应的装配操作的移动向量, 用于在三维环境下再现装配过程的仿真动作, 实现装配指导。
- 7) 顺序约束对象(Precedence): 描述了产品所有装配工序活动的串行或并行的先行装配约束关系。
- 8) 计划对象(Demand): 表示制定的产品生产计划, 描述了计划的属性信息, 如产品图号、计划数量、交货期等。
- 9) 装配任务(PartTask): 表示具体产品的装配生产任务, 描述了生产任务的属性信息, 如产品图号、使用工艺、生产数量等。

- 10) 工步任务(OpStepTask): 表示某一具体产品的工步装配活动, 描述了装配活动的具体属性信息, 本文以工步任务为核心建立与具体的物料实例、资源实例、检验项目实例等实例信息的关联关系, 将其作为装配过程管理的基本对象。
- 11) 工位对象(WorkStation): 表示产品的装配生产的工作场所, 是装配活动中必不可少的要素之一, 描述了工位的属性信息。
- 12) 人员对象(Employee): 表示企业中所有的人员, 是装配活动中必不可少的要素之一, 描述了人员的基本属性信息。
- 13) 父子约束对象(TaskLink): 描述了产品的总装任务与部装任务的占用关系。
- 14) 任务记录对象(WorkRec): 表示装配过程中任务的执行记录, 描述了任务的进度和状态等信息。
- 15) 检验记录对象(CheckDetail): 表示某一具体产品中定义的检验项目实例, 描述了检验项目的实际检验情况, 如检验实测值、检验员等。
- 16) 装配物料记录对象(TaskMaterial):, 描述了某一具体产品的每个任务实际使用的物料实例, 可以实现产品的物料谱系查询和跟踪。
- 17) 消息对象(Message): 表示管理层向现场发送的决策消息, 描述了消息的属性信息, 如消息内容、决策者、接收者等。
- 18) 物料对象(Material): 表示客观存在的物料实例, 包括具体的产品、在制品、具体的零组件、资源实例、设备实例等, 描述了物料的属性信息, 如物料名称、物料唯一号、物料类型、物料合格证号等。

2.7 本章小结

本章首先对企业装配生产特点与管理现状以及装配过程可视化管控系统的业务流程、功能需求进行了分析, 参考 MESA 标准功能模型建立了系统总体功能模型; 然后, 基于系统架构的需求分析, 参考主流的 J2EE 架构建立了系统的总体软件技术架构; 最后, 论述了基于过程规范语言 PSL 的系统总体信息模型构建。

第三章 系统主要功能实现技术研究

本章从装配工艺管理、装配计划任务管理、装配现场执行管理以及装配过程可视化与管控四个方面论述系统主要功能的实现技术和方法，主要包括工艺数据的管理与集成方法、装配计划任务数据的管理方法、装配过程控制方法、基于三维轻模型的装配过程仿真技术、实例数据的采集与管理方法以及基于 `mxGraph` 的可视化技术与管控方法。

3.1 装配工艺管理

工艺管理是科学地计划、组织和控制各项工艺工作的全过程^[34]，应能够解决工艺数据的结构化管理、变更、一致性维护等问题，同时，为实现外部工艺系统的工艺数据集成，应提供工艺管理的集成接口。因此，工艺数据的定义与结构化组织和集成接口的定义是工艺管理实现的技术关键。

3.1.1 装配工艺数据定义与结构化组织

工艺数据的定义与结构化组织实质是将工艺规程中所涉及到的数据信息进行抽象并划分为不同的业务数据对象，按照数据信息之间的关系将不同的业务数据对象组织起来，以结构化的形式描述工艺数据，实现工艺数据的结构化管理，为工艺数据的查询、统计、汇总以及共享提供便利。

装配工艺数据按照数据结构特征可以分为结构化数据和非结构化数据，结构化数据包括工艺、工序、工步、物料、资源、检验项目、装配仿真信息等业务数据对象，非结构化数据包括技术文档、图片、产品轻模型等文档对象。

本文采用面向对象的建模方法，建立如图 14 所示的工艺数据树形结构层次，实现工艺数据的结构化组织和管理^[35]。从图中可以看出，对于结构化数据，按照数据本身的从属关系如产品对象与装配工艺对象、工艺对象与工序对象、工序对象与工步对象的关系，可以利用关系型数据库进行数据的结构化存储和管理；而对于非结构化的文档数据，将文档本身存储到文件服务器，并通过文档对象在数据库中建立具体文档的存储目录与结构化数据对象的映射关系，实现非结构化文档数据的结构化组织和管理。

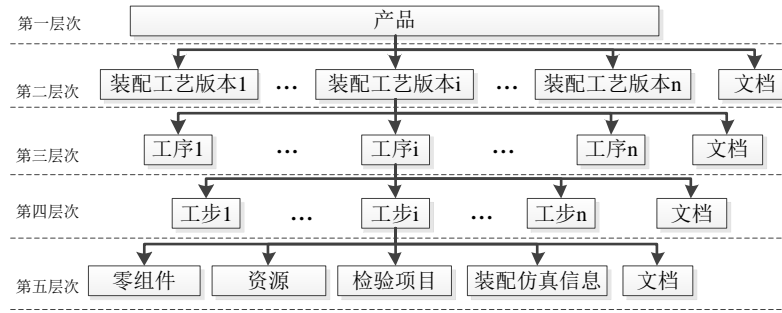


图 14 工艺数据树形结构层次

在工艺数据的树形结构层次中，第一层次表示产品对象，产品对象包括图号、名称、制造类型、批次类型等产品属性和生产属性；第二层次包含产品关联的装配工艺对象和文档对象，工艺对象包括产品图号、名称、版本、主制车间等属性；第三层次包含装配工艺关联的工序对象和文档对象，工序对象包括工序序号、工序名称、内容、工时定额等属性；第四层次包含工序关联的工步对象和文档对象，工步对象包括工步序号、工步名称、内容、工时定额等属性；第五层次表示工步对象关联的零组件、资源、检验项目、装配仿真信息以及工艺文档等对象；各个对象间的关系在信息模型中体现如图 15 所示。

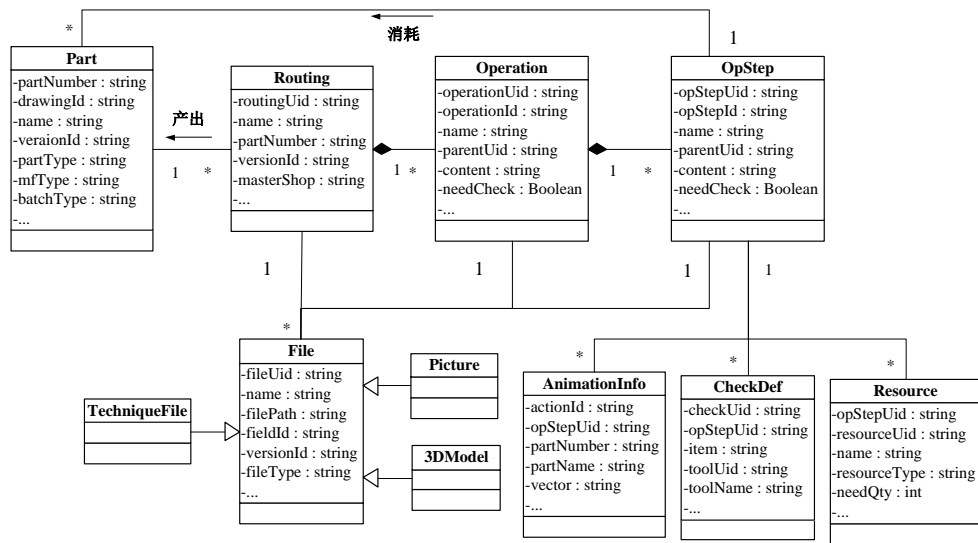


图 15 工艺数据信息模型视图

3.1.2 装配工艺约束定义

装配工艺约束定义是指为产品工艺规程中的每个工序按照产品零部件装配关系记录其所有直接前驱工序和后继工序，描述工序的执行顺序。装配工艺约束的定义是实现产品装配过程控制的基础和保证。

装配复杂产品需要经过大量的装配工序才能装配完成，由于各个装配工序之间具有串行和并行的执行特点，而且总体装配和部件装配也存在着串行和并行的执行特点，使得整个装配工艺的工序在串并行关系的约束下，形成了一个复杂的多分支、网状的有向图结构，如下图 16 所示^[36]。

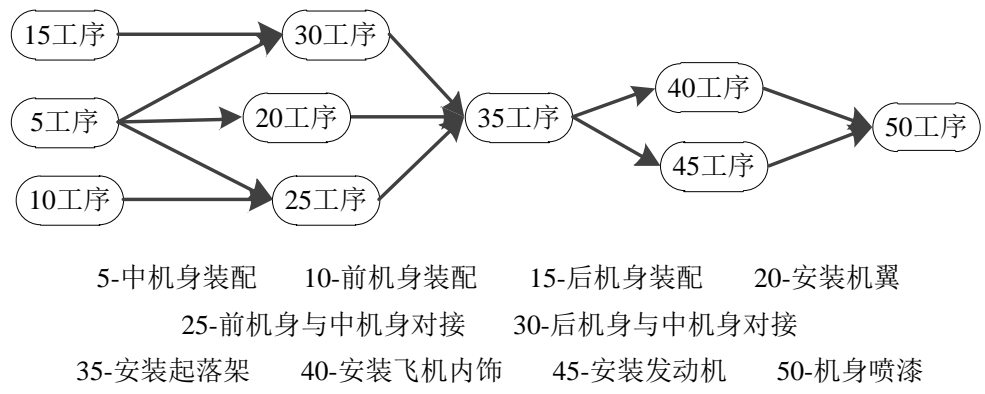
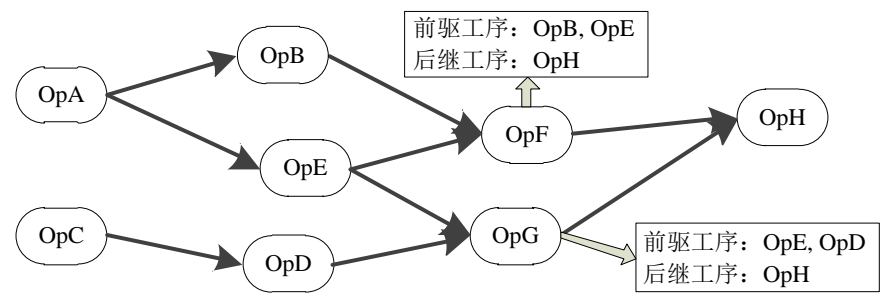


图 16 飞机总装基本过程示意图

从图 16 中工序之间的网络拓扑关系可以看出，工序 5 和工序 10 在工序号上相邻，但它们实际上却处于不同的工艺分支中，即两者之间不具有实质上的前后关系，所以工序号不能决定这种网络化、多分支的工序间顺序约束关系，而真正决定工序间顺序约束关系的是装配体中零部件之间的装配关系。为了表达工序之间的顺序约束关系，通过定义工序与工序之间的先行后继关系，形成一个类似邻接表的存储结构进行顺序约束关系的表达，如图 17 所示，对于装配工艺中的每一道工序都按照装配体的零部件之间的装配关系定义其直接前驱工序和后继工序，这样从任何一个工序开始，都能够按照定义的先行后继关系遍历出整个工艺过程。



本文为了以更为精细的方式进行管理，在工步级定义先行后继关系表达整个工艺的拓扑结构，其顺序约束关系的定义在系统信息模型中的体现如图 18 所示。其中，顺序

约束对象用于表达总装或部装工步之间的顺序约束关系,工步对象与产品/零组件对象的消耗关系和工艺对象与产品/零组件对象的产出关系用于表达总装工步与部装之间的顺序约束关系。通过对装配工艺中顺序约束关系的定义,为控制产品按照正确的装配顺序进行装配提供了数据基础,避免了产品在装配过程中出现的错装和漏装情况。

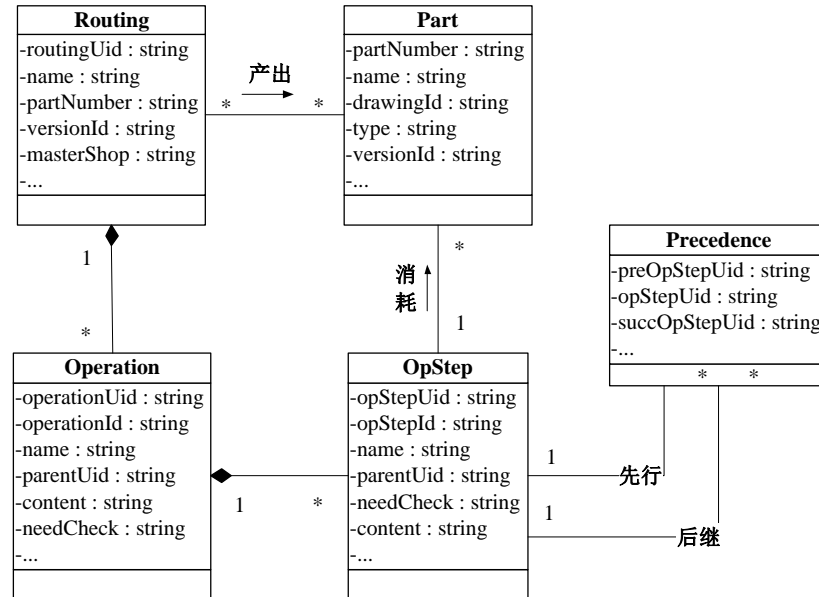


图 18 工艺约束信息模型视图

3.1.3 装配工艺集成方法

鉴于 CAPP、DELMIA 等软件系统由不同的软件制造商开发,使得各个软件的架构、数据存储格式以及使用的数据库存在很大差异,导致 CAPP、DELMIA 等系统和装配过程可视化管控系统不能直接进行工艺数据的交换。为实现系统之间的协同运行,通过定义装配过程可视化管控系统的工艺集成接口,实现与外部工艺系统的数据集成。

本文采用基于中间文件的间接集成方法实现系统间的工艺集成^[37]。由于 XML 语言具有高度规范性、自描述性以及数据描述的灵活性等特点,能够很好的实现系统间异构数据的集成需求,通过定义具有良好结构的产品装配工艺 XML 描述文件,作为工艺集成的中间文件。工艺集成方法如图 19 所示,在设计层,工艺人员在外部工艺设计系统中编制装配工艺,并按照装配工艺描述文件 XSD(XML Schema Definition, XML 模式定义)生成具体产品的 XML 实例文件;在制造执行层,工艺员将 XML 文件实例上传到装配过程可视化管控系统中,系统同样按照 XSD 自动进行解析并结构化存储到数据库中。

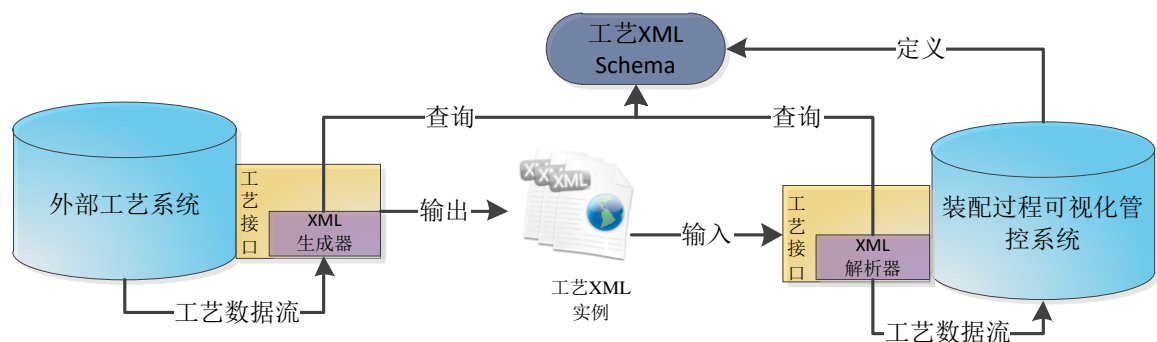


图 19 工艺集成方法

基于系统信息模型对装配工艺所包含业务对象的完整性描述，采用 XSD 描述装配工艺 XML 文件的格式、内容和数据，建立的装配工艺 XML XSD 如图 20、图 21、图 22 所示。

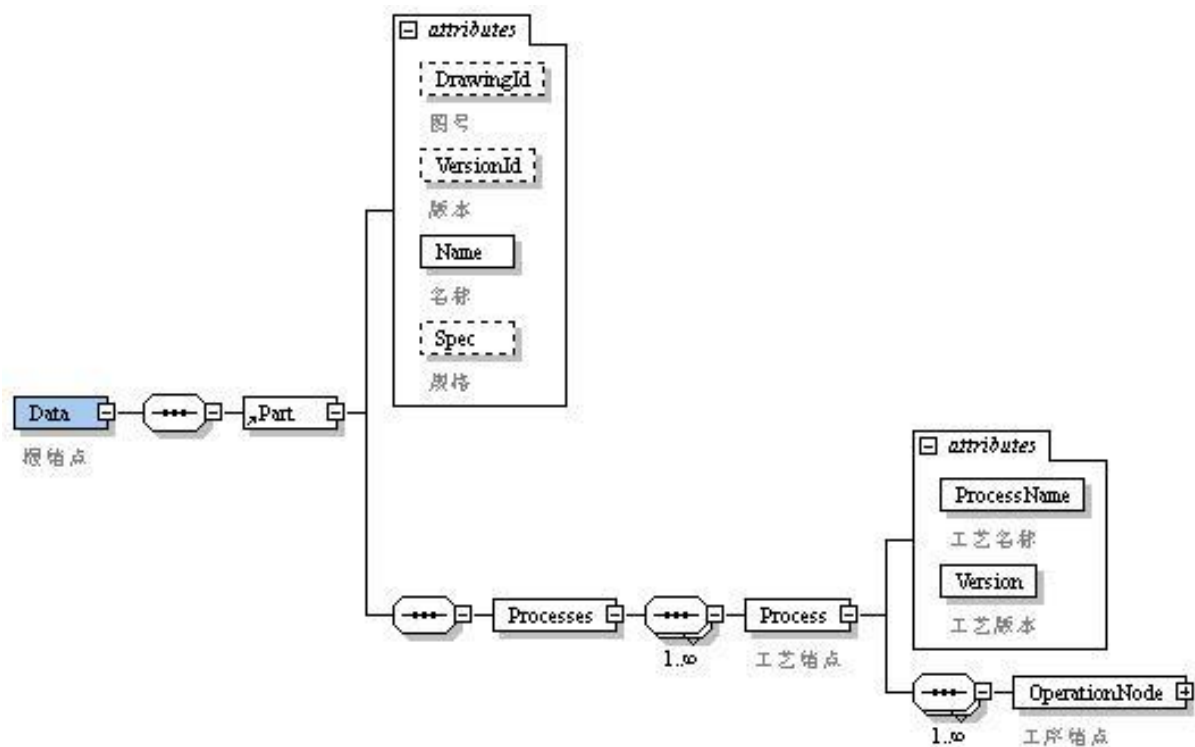


图 20 装配工艺 XML XSD

采用基于 XML 中间文件的工艺集成方式，能够屏蔽与其他系统数据模型、数据格式等方面的差异性，实现装配工艺数据的集成与平台无关。在与不同的工艺设计系统进行工艺集成时，只需要提供装配工艺 XML 描述文件，而本系统只需重点关注 XML 文件描述定义的完整性和通用性，以及 XML 文件解析器的开发。因此，基于 XML 文件的集成方式提高了系统的工艺集成能力，降低了系统之间的集成难度。

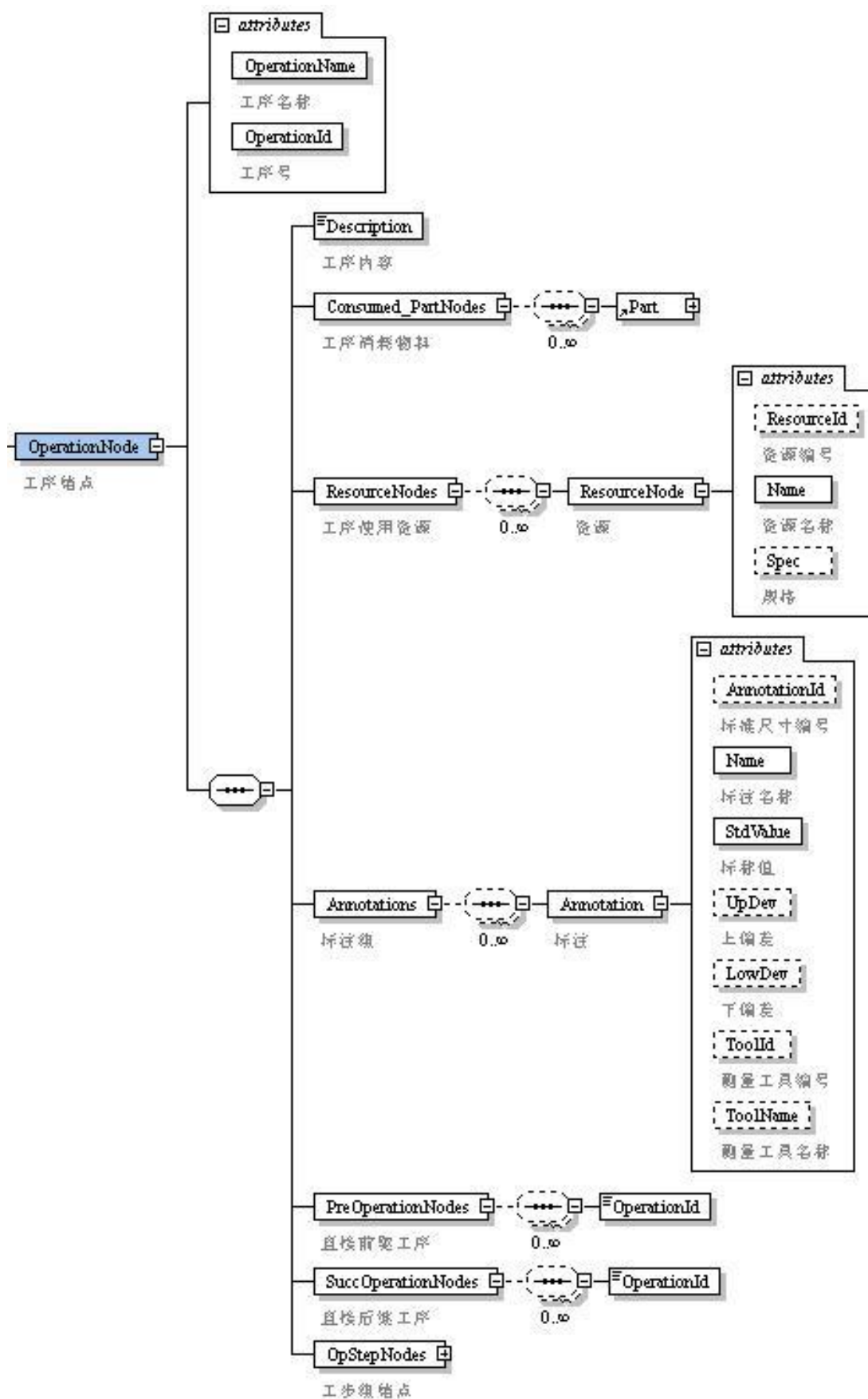


图 21 装配工艺 XSD (续)

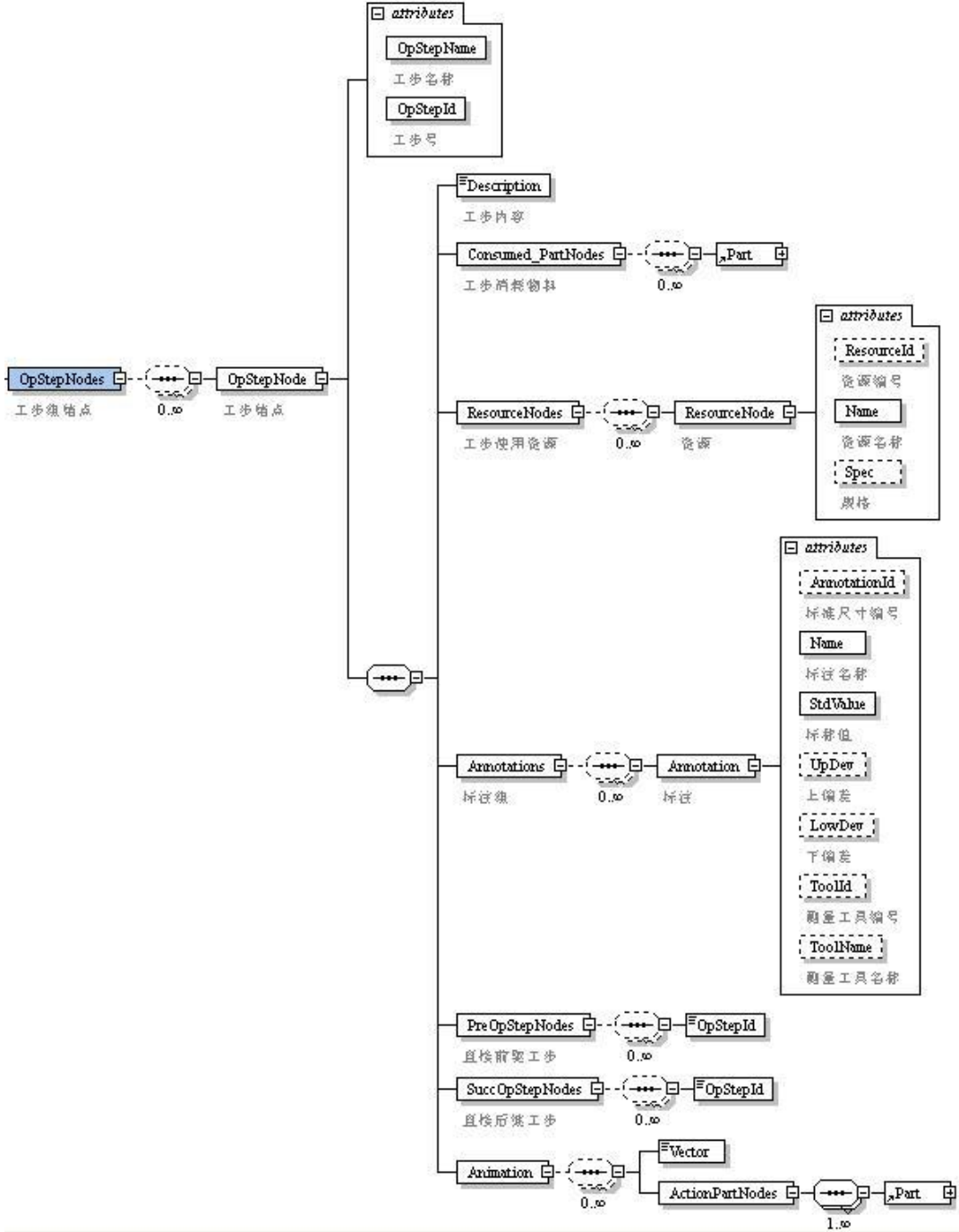


图 22 装配工艺 XSD (续)

3.2 装配计划任务管理

装配计划任务管理包括计划管理、齐套管理、缺件管理和任务管理。本节结合信息模型以计划下达和任务安排的流程论述计划任务数据的管理方法，并针对复杂产品总装和部装任务异步安排以及集中分散的装配组织方式，论述了装配任务挂接和派工管理的技术关键点。

3.2.1 计划下达和任务安排

1) 计划下达和任务安排流程

装配车间在接到客户的装配订单时，装配计划员根据订单的交货期要求制定产品的装配计划，并根据库存物料情况进行装配指令的下达和任务的安排，其具体流程如图 23 所示。

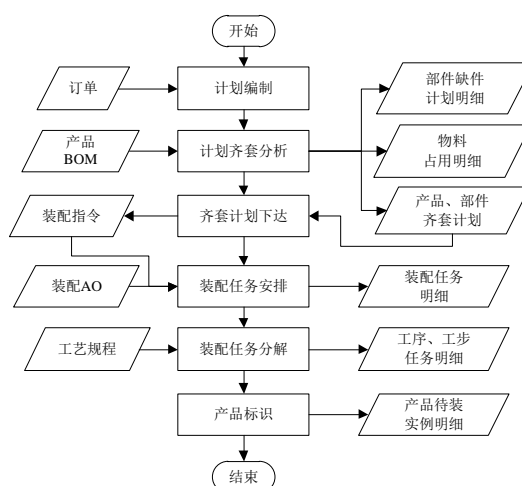


图 23 装配计划下达和任务安排流程

(1) 装配计划编制

装配计划员接收到产品装配订单后，按照订单的产品、数量、交货期等要求，根据车间实际生产状况和生产能力制定产品的装配计划，并将装配计划录入到系统中。

(2) 装配计划齐套分析

装配计划录入后，装配计划员依据产品 BOM 结构，计算当前库存和在制品能够满足的齐套数量和计划的缺件情况，生成部件缺件计划明细、物料占用明细以及产品和部件齐套计划。为了提高生产效率，在产品未齐套而组成产品的部件已齐套时，需要能够将物料满足的部件先投入生产，因此生成部件齐套计划。

(3) 齐套计划下达

车间计划员根据生成的产品和部件齐套计划，可以按照实际生产需要一起生成产品和部件的装配指令，也可以只生成产品装配指令或部件装配指令。

(4) 装配任务安排

装配指令生成后，车间计划员根据产品的批次类型(单件批或多件批)以及产品的 AO 划分，下达装配指令并生成装配任务记录；在下达指令时可以参考车间的实际生产状况，

灵活的把一个装配指令拆分成多个装配任务。

(5) 装配任务分解

装配任务生成后,为了能够对产品的装配过程中的信息和状态进行更细粒度的监控,需要将装配任务按照工艺规程分解为更细的工序和工步任务。

(6) 产品标识

完成装配任务分解后,为了能够区分和跟踪装配任务中的产品装配实例,需要在系统中进行实例注册,为每个实例生成唯一标识。

2) 计划齐套分析算法

(1) 算法输入

装配计划唯一号。装配计划唯一号表示按照订单制定的装配生产计划的唯一标识。

(2) 算法输出

物料占用记录、缺件计划以及计划齐套数量。物料占用记录表示装配生产计划在投产前对库存和在制品物料的占用关系;缺件计划表示为满足装配生产计划的物料需求而需要下达的零部件生产计划;计划齐套数量表示当前库存物料和在制品所能满足的产品物料配套数量。

(3) 算法流程图

如图 24 的流程图所示,物料齐套算法依据产品装配计划的需求数通过递归遍历产品的 BOM 结构,按照物料的库存和在制品情况计算每个物料的占用情况、缺件情况以及齐套数,生成产品装配计划的物料占用记录、缺件计划,并以所有物料中齐套数量最小值作为产品的齐套数量。

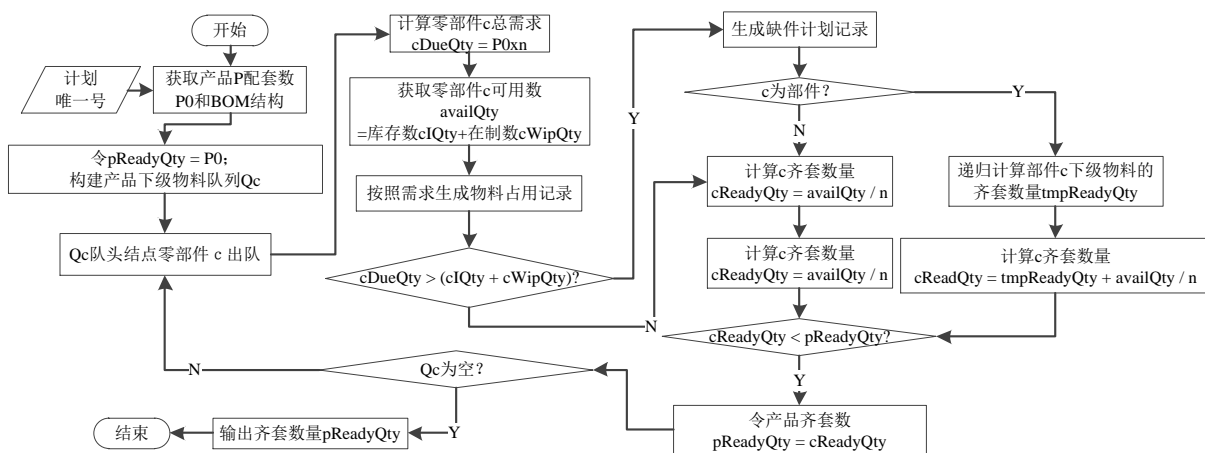


图 24 计划齐套分析算法

3) 计划下达和任务安排信息模型支撑

在装配需求下达过程中, 录入装配计划产生了 Demand 对象的实例, 装配计划齐套分析后生成库存物料占用明细和缺件计划明细, 即产生了 DemandPart 对象(占用物料)的实例、Demand 对象(缺件计划)、DemandLink 对象(装配计划与缺件计划映射关系)的实例。在任务安排过程中, 生成任务记录时产生了 PartTask 对象的实例和 DemandTask 对象(装配计划与任务映射关系)的实例; 在按照工艺规程进行任务分解时, 产生了 OperationTask 对象实例; 在进行产品标识时, 产生了 Material 对象的实例。对象之间的关系在信息模型中的体现如图 25 所示。

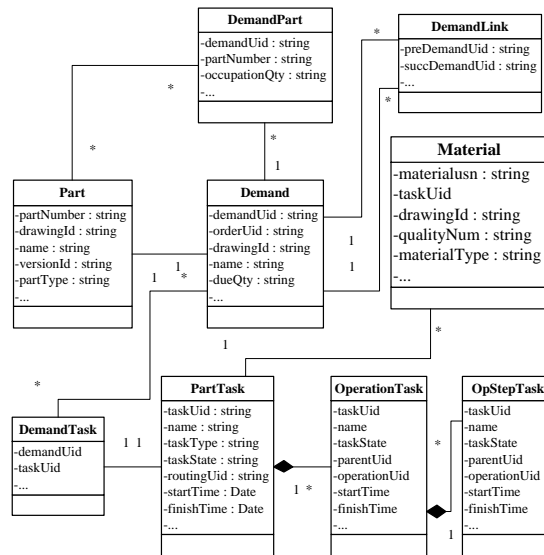


图 25 装配计划下达和任务安排信息模型视图

3.2.2 装配任务挂接管理

装配任务挂接是指在某一产品总体装配任务和部件装配任务都已下达后, 为总装和部装任务建立映射关系。复杂产品由于组成复杂, 其装配一般分为总装配和部件装配, 在装配生产时, 为了提高产品的生产效率降低延误率, 在产品除了部件暂不满足而其他物料需求满足或者某些部件物料需求满足而产品其他物料暂不满足的情况下, 往往会先下达总装任务或部装任务, 使得总装任务和部装任务并不是同步投入生产, 因此需要为总装任务和部装任务建立占用关系, 说明部件任务为哪一个总装任务所服务, 避免产品装配过程中在领取部装任务生产的部件时出现混乱; 同时, 通过建立的占用关系, 管理层能够在装配任务网络图上监控产品整个装配任务的进度和装配情况, 及时调整总装或

部装任务的进度，保证任务间装配进度的协调性。装配任务挂接存在以下两种情况：

- (1) 存在已经投入生产的在制部件装配任务，且该任务对应的在制部件未被其他在制产品所占用，需要通过手动挂接的方式建立总装任务和部件任务的占用关系。
- (2) 不存在在制的部件装配任务，但组成部件的零组件满足总装任务的需求量，装配计划员在下达总装任务对应的缺件部件计划装配指令后，在进行任务安排时，需要通过自动挂接的方式建立总装任务和安排的部件任务之间的占用关系。

1) 任务挂接的模型支撑

在建立总装任务和部装任务的映射关系时，即产生了 TaskLink 对象的实例数据，TaskLink 对象和 PartTask 对象的关系如图 26 所示。PartTask 对象的 linkedQty 和 unlinkedQty 属性用于描述缺件部装任务已挂接和未挂接到总装任务的实例数量，TaskLink 对象的 linkQty 属性用于描述总装任务占用部件任务的实例数量。

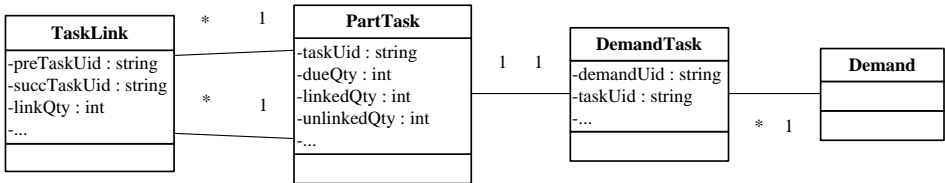


图 26 任务挂接信息模型视图

2) 任务挂接算法分析

针对前述任务挂接的分析，任务挂接分为手动挂接和自动挂接两种方式。手动挂接是指车间计划员手工选择已下达的总装任务和部装任务，创建两者之间的映射关系；自动挂接是指车间计划员在下达缺件部件任务时，系统根据缺件部件计划和产品装配计划的关系，自动搜索总装任务并创建与总装任务的映射关系。鉴于手动挂接实现较为简单，下面针对自动挂接算法进行分析：

(1) 算法输入

缺件任务唯一号 taskUid。该任务唯一号表示当前生成的缺件部件任务的唯一标识。

(2) 算法输出

任务映射关系。表示总装任务和占用的缺件部件任务建立的映射关系，即 TaskLink 对象的实例数据在数据库中的持久化表达。

(3) 算法流程图

如图 27 的流程图所示，自动挂接算法通过搜索出产品计划的所有总装任务和对应

缺件的所有部装任务，遍历所有任务并计算每个任务的挂接情况，以保证在总装任务和部装任务单件批和多件批安排的不确定性的情况下，能够正确建立任务之间的占用关系。

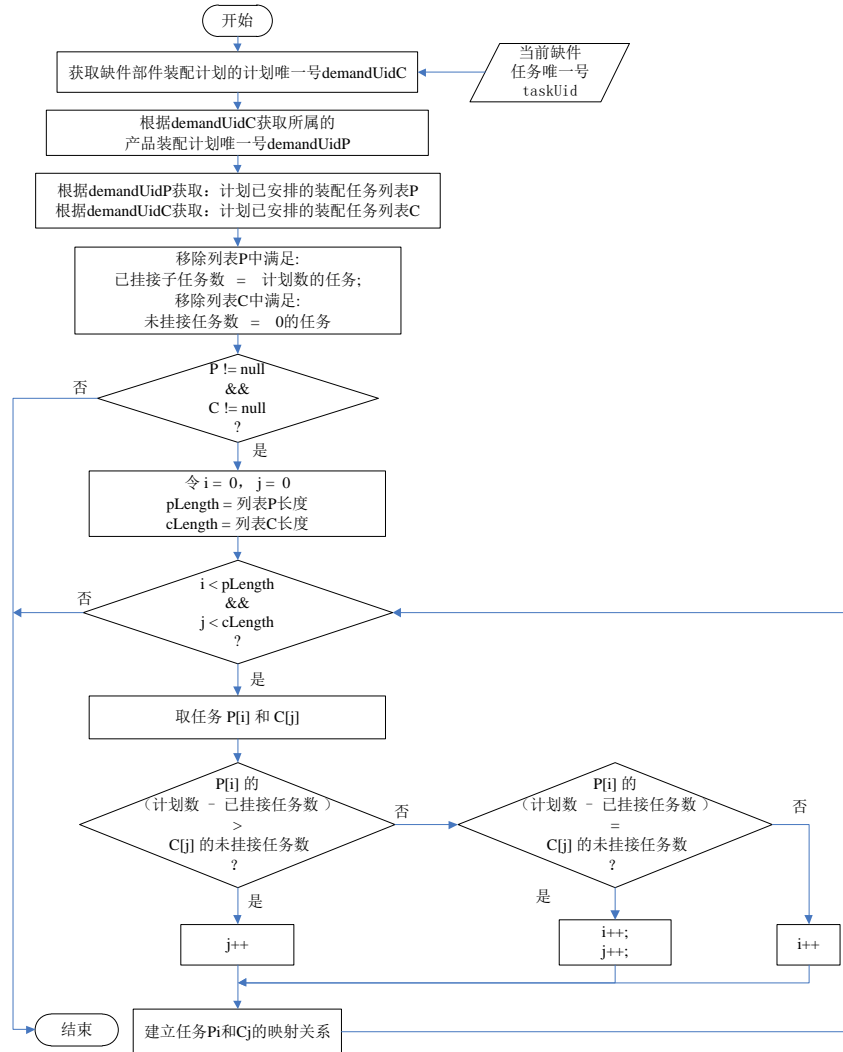


图 27 自动挂接算法流程图

3.2.3 装配任务派工管理

装配任务派工是指在完成装配任务的工序分解后，按照产品的装配生产组织形式将工序任务分派到指定的装配工位，完成任务指令的下达。

1) 装配生产组织方式^[38]

企业中装配生产组织形式按照产品结构和生产批量的大小，一般分为固定式和移动式。本文研究的装配系统所面向的是生产复杂产品的离散型企业，其装配生产组织方式为固定式装配。在这种装配生产组织方式下，产品或部件的整个装配过程都在固定的工作地点完成，装配过程中产品或部件的位置不变，固定式有以下三种组织形式：

(1) 集中固定式装配。全部装配工作由一组工人在一个工作地点集中完成，这种装配组织形式，要求工人技术水平高，而且装配时间长，多适用于单件小批生产。

(2) 分散固定式装配（又称多组固定式装配）。这种装配形式是把产品的全部装配过程分解为组部件装配和总装配，各部件的装配和产品的总装由几组工人在不同的工作地点分别进行。

(3) 产品固定式流水装配。将装配过程分成若干个独立的装配工序，分别由几组工人负责，各组工人按工序顺序依次到各装配地点对固定不动的装配对象进行装配。

2) 装配任务派工方法

在生成装配任务并进行工序分解后，通过任务派工将任务分派到车间装配，工人通过工位终端领取分派的任务进行装配。为了满足固定式装配的三种组织方式，在派工时以工序任务为单位将任务分派到工位上，如图 28 所示，对于集中固定式装配，将产品装配任务的所有工序任务都分派到某一工位上；对于分散固定式装配，将产品总装配的所有工序任务和部件装配的所有工序任务分派到不同工位上；对于产品固定式流水装配，将产品装配任务的所有工序任务分派到固定工位，同时为若干个独立的工序任务分别指定所属班组标识。

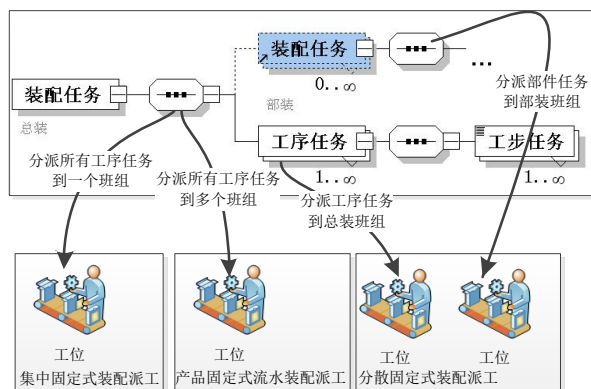


图 28 任务派工方式示意图

3) 装配任务派工信息模型支撑

装配任务派工管理涉及到的领域对象主要有 PartTask(装配任务)、OperationTask(工序任务)、AssembleStation(工位)、TaskDispatch(任务派工记录)、Employee(人员)，对象之间的关系在系统信息模型中的视图如图 29 所示。在执行任务分派时，产生了

TaskDispatch 对象的实例，该实例实际上是 OperationTask 对象实例、AssembleStation 对象实例和 Employee 对象实例的映射关系。

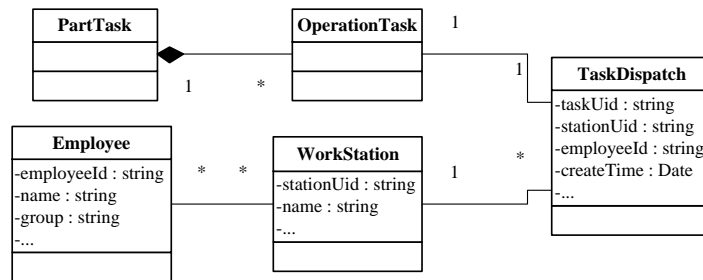


图 29 装配任务派工信息模型视图

3.3 装配现场执行管理

装配现场执行管理主要包括分派任务的接收、任务信息加载与展示、三维装配可视化指导、实例数据采集与反馈、以及换件、返工返修、发起不合格审理等功能。针对传统装配指导方式容易导致错装漏装以及纸质文档的记录方式管理层无法实时监控现场执行进度的问题，基于轻模型的装配过程仿真技术、面向状态的装配过程控制方法、装配过程实例数据的实时采集是装配现场执行与控制实现的技术关键。

3.3.1 三维装配可视化指导

3.3.1.1 可视化文件

目前企业装配车间在执行产品装配作业时，主要是采用纸质的工艺卡片、纸质图片和二维工程图纸等作为装配过程指导的手段，由于纸质文档不够直观易懂，导致工人难以快速理解装配要点，容易导致产品出现错装、漏装的情况，降低了生产效率和产品质量。鉴于目前三维可视化指导在企业中的应用处于过渡阶段，可视化文件以产品三维轻模型为主，以技术文档、图片文件等为辅，如图 30 所示：

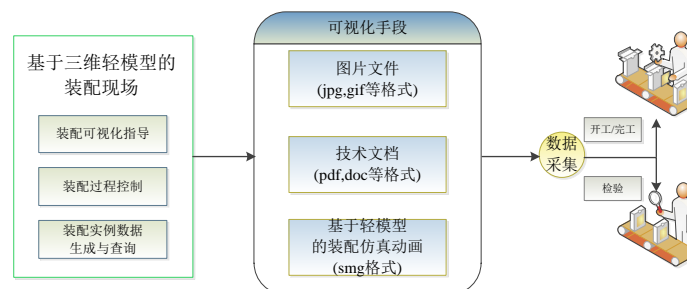


图 30 可视化内容

装配现场的可视化指导以三维轻模型为主为操作人员提供装配仿真演示和其它装配制造信息提示，同时辅以工序图片、技术文档等进行指导，主要包括：

(1) 图片可视化文件

图片可视化文件主要是产品三维模型图片或产品装配关键点的照片，是一种静态的、不可交互的文件，作为现场指导的辅助性手段。

(2) 技术文档可视化文件

技术文档主要是产品装配过程中装配操作的相关技术要求和技术规范信息，作为现场指导的辅助文档供工人查询使用。

(3) 三维轻量化模型

三维轻模型是装配指导的主要可视化文件，通过在现场应用终端集成轻模型浏览平台，为装配人员提供在线的装配过程仿真动画演示，同时，装配人员也能够与模型进行交互，如查看检验定义信息和制造信息。

可视化文件以图片、pdf 文档和轻模型等文件形式存储于文件服务器上，所有文件的命名、文件路径、文件类型、文档版本、文件唯一号等属性按照统一的数据结构映射到信息模型中，以实现文件的结构化管理，可视化文件的映射关系在系统信息模型中的视图体现如图 31 所示。

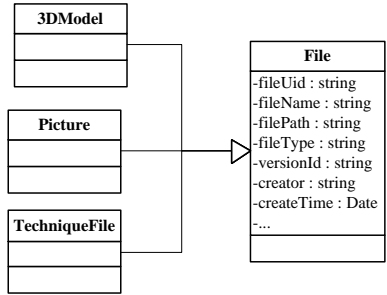


图 31 文档管理信息模型视图

3.3.1.2 装配过程仿真技术实现

装配过程仿真是指通过在装配现场终端集成 3DVIA 轻模型浏览平台，采用轻模型浏览技术操纵三维轻模型重现装配产品的每个零部件的具体装配操作过程。装配过程仿真可以为工人提供直观的三维装配可视化指导，使工人在装配时无需阅读复杂难懂的二

维工程图纸，有效地避免错装和漏装情况的发生，提高了产品装配效率和质量。

装配过程仿真主要包括工步动画、工序动画、产品完整装配动画，其他如装配历史回顾可以利用工步动画或工序动画组合实现，其实现类图如图 32 所示。类图中定义了仿真接口 `Animation`、接口实现类 `3DVIAAnimation` 和仿真代理类 `AnimationAgent`；`Animation` 接口定义了仿真动画的方法，`3DVIAAnimation` 类基于 3DVIA Composer 平台提供的原生 API 对 `Animation` 接口进行了实现，`AnimationAgent` 类作为 `3DVIAAnimation` 实现类的代理，向业务逻辑提供装配仿真调用入口。通过定义接口和仿真代理对象的设计方式，实现系统业务逻辑和轻量化平台的解耦，当需要采用其他轻量化平台时，只需要重新实现 `Animation` 接口并将实现类重新注入到 `AnimationAgent` 对象中即可，而不需要重构系统的业务逻辑实现。

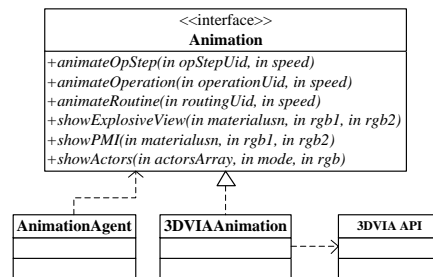


图 32 装配动画接口类图

装配过程仿真技术原理如图 33 所示，具体描述如下：通过在装配现场终端集成 3DVIA 轻模型浏览平台，当装配作业开始时系统根据当前装配任务作业信息从服务器加载相应产品三维轻模型、装配仿真信息，以及装配仿真的实现库文件，并按照装配人员的业务操作事件通过仿真接口调用相应的仿真实现算法将隐藏的零组件按照装配动作顺序逐一显示并移动，并保持装配动作完成后的形态，实现装配过程的装配动作仿真。

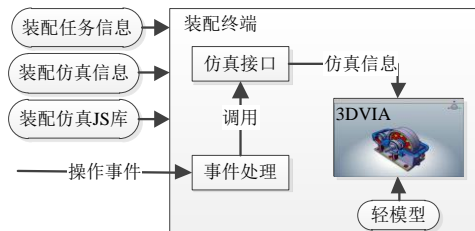


图 33 装配过程仿真技术原理

装配过程仿真实现算法如图 34 所示，算法的输入为产品使用工艺的唯一号，输出为装配过程仿真动作序列。

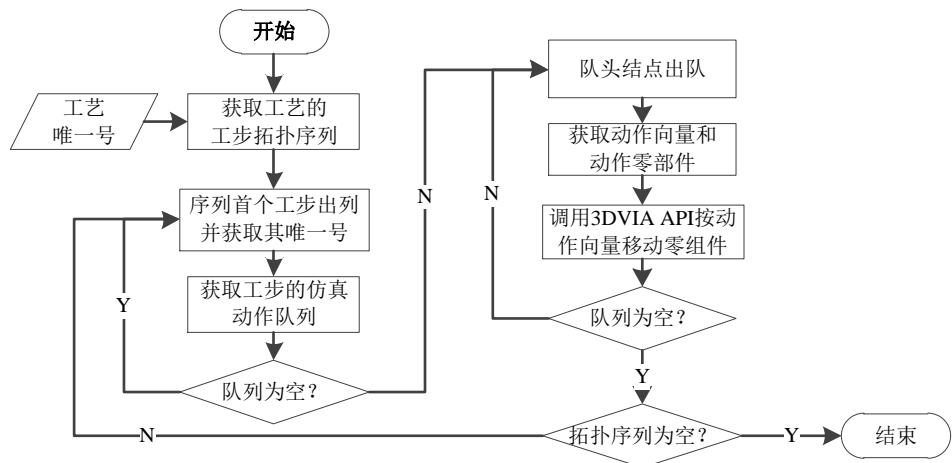


图 34 装配过程仿真实现算法

装配过程仿真实实现的信息模型支撑如图 35 所示，在定义装配产品时，为产品关联三维轻模型文件，通过 3DModel 对象的实例建立轻模型与产品对象的关联；在定义产品装配工艺时，通过 AnimationInfo 对象的实例建立装配仿真动作关键帧信息和对应零组件信息与工步的关联，从而支撑了装配过程的仿真实实现。

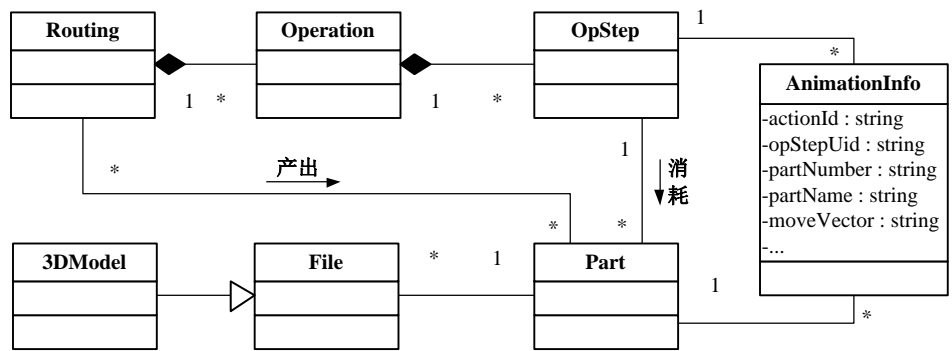


图 35 装配过程仿真信息模型视图

3.3.2 面向状态的装配过程控制方法

复杂产品装配过程由一系列的装配任务活动组成，装配任务在整个生命周期中，由装配生产过程中的事件驱动其状态的变化，而状态的变化反映着装配任务的进度和执行状况，因此，可以通过控制装配任务的状态实现装配任务的执行进展控制，进而达到控制整个装配过程的目的。

1) 装配任务状态控制方法

装配任务的状态有草稿、已下达、已分解、已派工、已开始、检验、返工返修、已取消、已完成，其状态模型如图 36 所示。

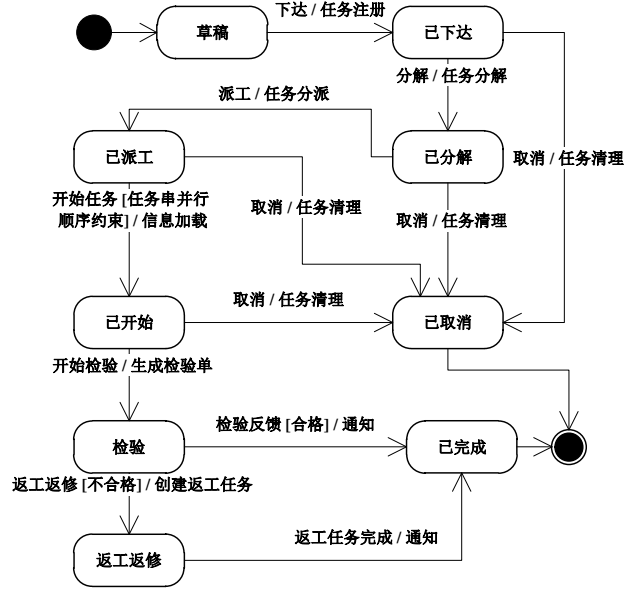


图 36 装配任务状态模型

鉴于装配任务的状态较多、状态之间转换维护复杂等问题，本文采用有限状态机 (Finite State Machine, FSM) 实现装配任务状态的管理和控制，简化状态维护的难度，提高状态控制实现逻辑的可重用性和可扩展性^[39]。

有限状态机工作原理如图 37 所示，当系统中对象的源状态的某个事件发生后，在满足状态转换的监护条件时，系统将顺序执行源状态退出动作、转换动作和目标状态进入动作，并将源状态转换为目标状态。

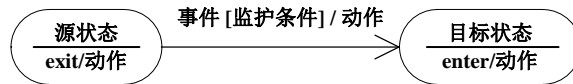


图 37 有限状态机工作原理图

本文设计的有限状态机 FSM 由状态、事件、转换和动作组成，其数学描述语言如下：一个有限状态机 FSM 是一个七元组，

$$M = (S, E, \varphi, M, \delta, s_0, F),$$

其中， S 是一个有穷集，集合中的每个元素称为状态； E 为有穷的事件输入集，每个元素对应一个事件； φ 为转换函数，是 $S \times E \rightarrow S$ 上的映射； M 是有穷集，集合中的每个元素称为动作； δ 是动作映射函数，是 $S \times E \rightarrow M$ 上的映射； s_0 是 S 中的元素，是唯一的一个初态； F 是 S 的一个子集，是一个终态集。

本文利用面向对象的设计方法，构建了如图 38 所示的通用有限状态机框架类图^[40]，

实现了状态转换动作和有限状态机实现逻辑的解耦，使得状态控制的实现逻辑结构清晰且易于扩展，从而能够以更加高效、简洁的方式对装配任务的状态进行管理和控制。

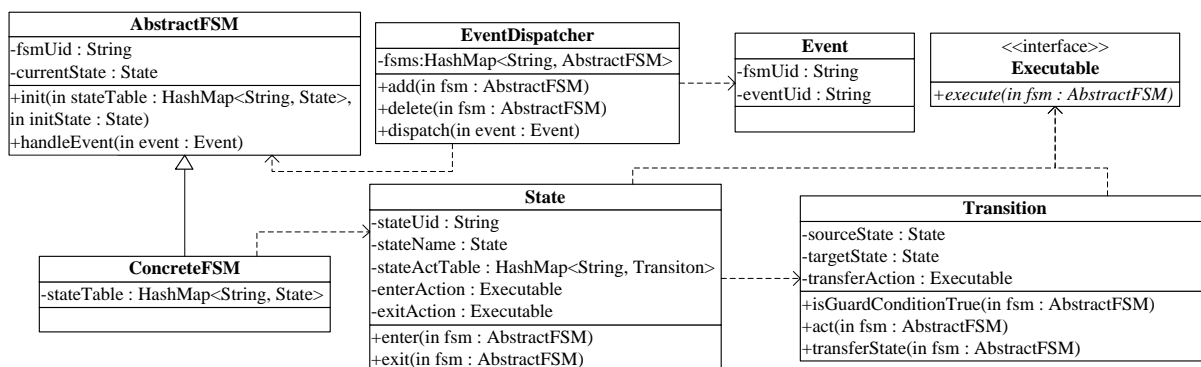


图 38 有限状态机实现框架类图

框架中各个类的定义具体描述如下：

Event: 事件类，事件主要包含事件 ID 和指向具体有限状态机的 ID。

EventDispatcher: 事件调度类，主要负责有限状态机实例的维护如添加、删除操作，以及对系统内的操作事件进行分派，通过 `dispatch(event)` 方法将事件分派到具体的有限状态机上进行处理。

AbstractFSM: 有限状态机抽象类，定义了有限状态机的公共属性和方法，属性主要是状态机实例号和当前状态；方法主要是有限状态机实例的初始化方法和事件处理方法。

ConcreteFSM: 具体有限状态机类，定义了有限状态机的状态表，即每个状态名称与状态对象的映射。

State: 状态类，定义了状态的唯一号、状态名称、状态动作表以及进入和退出动作，状态动作表即为该状态接受的事件与转换对象的映射。

Transition: 转换类，定义了转换操作的源状态、目标状态、转换动作以及监护条件判断方法、动作方法和状态转移方法。

Executable: 动作接口，有限状态机的状态离开动作、转换动作和状态进入动作都通过调用该接口实现，使得状态机控制逻辑与动作实现逻辑解耦。

装配任务的状态转移控制过程如图 39 时序图所示，该时序图描述了对象之间的交互关系。在装配任务执行过程中，操作者触发相关的事件并由系统生成事件对象发送到

事件分派器：事件分派器根据事件中包含的有限状态机 ID 将事件分派到具体的有限状态机上，并调用其事件处理方法 `handleEvent(event)`，状态机首先查询当前状态的状态动作表，然后依据事件 ID 在状态动作表中查询出转换对象；通过转换对象的 `isGuardConditionTrue(fsm)` 方法返回值确定是否进行状态转移，若返回 `true`，则依次执行源状态退出操作、转换动作、目标状态进入操作，最后执行状态转移方法，实现装配任务的状态管理和控制。

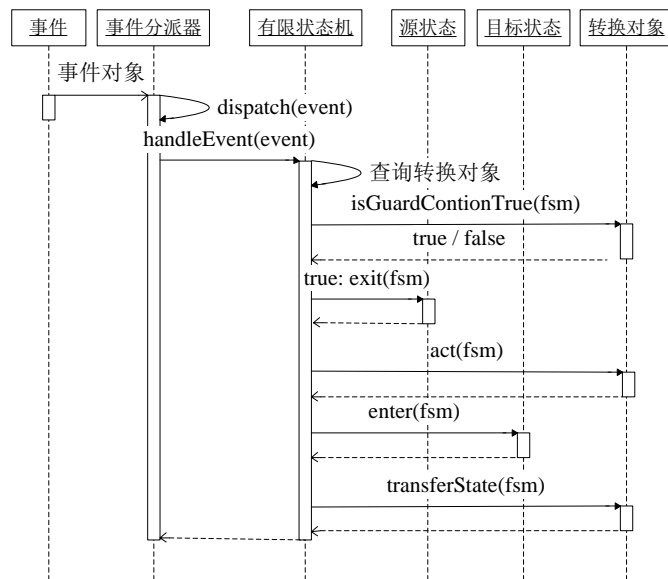


图 39 状态转换时序图

2) 面向状态的装配过程控制原理

复杂产品装配过程中的各个装配任务活动之间存在着串行和并行的执行顺序，因此，依据装配工艺中定义的顺序约束关系和物料消耗与产出关系，通过控制每个工步任务的所有直接前驱任务的完成状态，能够保证每个任务活动按照正确的顺序执行。

面向状态的装配过程控制原理如图 40 所示，通过装配工艺中定义的先行后继约束关系和物料消耗与产出关系，可以将任务按照装配关系约束成一个有向无环图结构，每个任务存在一个或多个先行后继约束关系并对应着一个有限状态机，状态机接受该任务的事件并控制状态转移，因此，产品在装配过程中是否能够开始某个任务的装配(Task_G)，系统会根据该任务在整个任务有向图中搜索其所有直接前驱任务(Task_T , Task_E)，并查询每个直接前驱任务对应有限状态机的当前状态，如果存在未完成状态的直接前驱任务，则系统拒绝任务开始操作，反之系统则接受任务开始操作，保证了任务执行顺序的正确

性, 从而实现了对整个装配任务执行过程的控制。

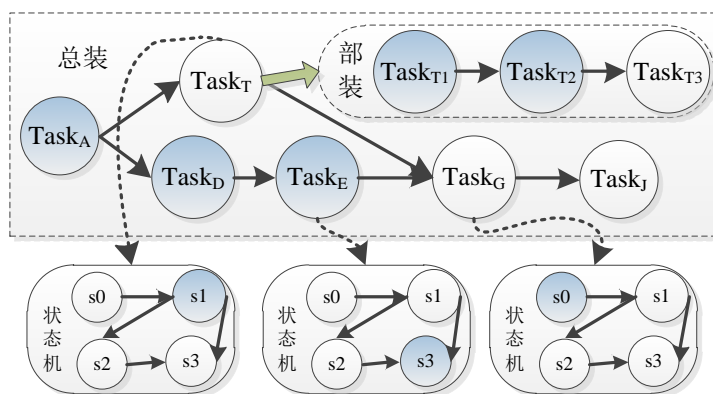


图 40 面向状态的装配过程控制原理

3) 装配过程控制信息模型支撑

支撑装配过程控制的信息模型视图如图 41 所示,由于产品的装配任务是按照工艺、工序和工步的层次关系进行生成的,因此工步任务继承了工步之间的顺序约束关系,即 **Precedence** 对象的实例;总装任务与部装任务的链接关系,在 **TaskLink** 对象的实例中得到表达;工步任务与部装任务的顺序关系,通过工步任务消耗的 **Material** 对象的实例与部装任务产出的 **Material** 对象实例的关系进行了表达,从而支撑了任务有向图的生成和装配过程控制。

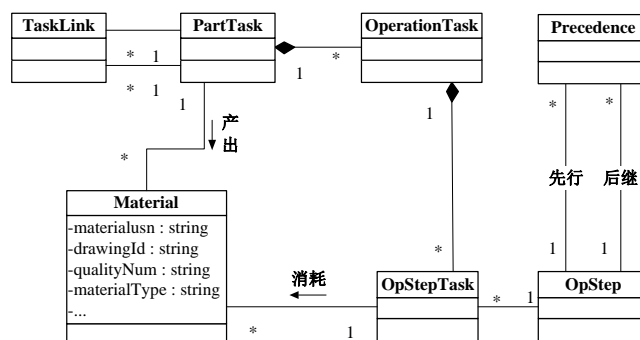


图 41 装配过程控制信息模型视图

3.3.3 实例数据采集与管理

实例数据的实时采集与管理是实现装配过程实时可视化跟踪与控制的基础和关键，为细化装配过程的管理，本文以工步任务作为装配节点加载工艺定义信息，并按照产品装配任务的执行顺序对每个装配节点逐一进行装配实例的数据采集，以过程为核心进行实例数据的组织和管理。

1) 装配节点定义信息加载

每个装配节点加载的工艺信息主要为工序详情、物料清单、质量信息以及工艺文件等信息，具体描述如下：

- (1) 工序详情，包括工序装配的详细工艺内容、产品主制车间，工时定额等；
- (2) 物料清单，包括该工步需要消耗的零组件和标准件及其数量、装配过程中用到的工装与工具清单、辅料清单等；
- (3) 质量信息，包括质量检验项目清单以及质量规范等；
- (4) 工艺文件，包括产品三维轻模型、工艺图片以及相关产品技术规范文档等。

装配节点信息加载的信息模型支撑如图 42 所示。

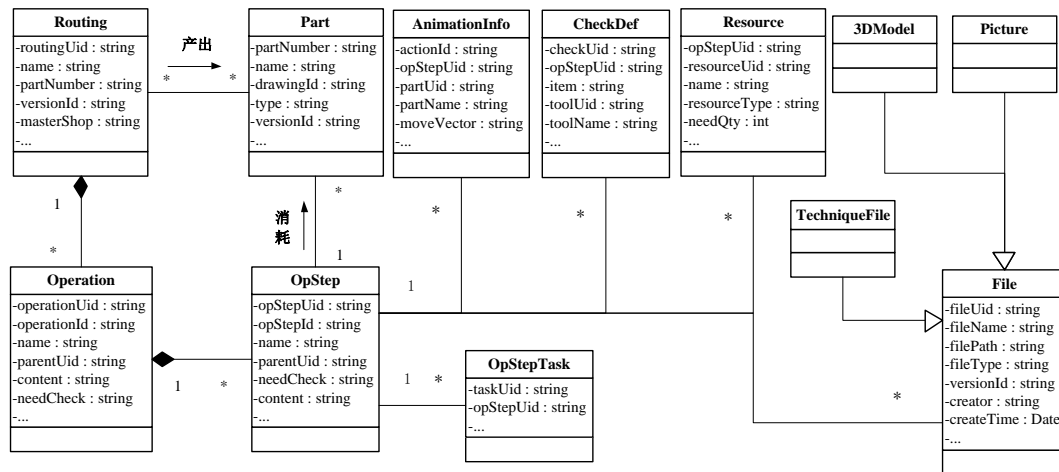


图 42 装配节点信息加载信息模型视图

2) 装配节点实例数据采集

产品实例数据采集的目的是为产品装配过程跟踪和追溯提供数据基础，基于条码自动识别技术的装配节点实例数据的采集主要分为物料数据、任务作业记录和质量数据三类，具体描述如下：

(1) 物料数据采集

物料数据主要包括具体装配产品所消耗零组件的批次、合格证号、物料唯一标识等信息，以及装配过程中使用到的各种工具、装备、辅具、量具，包括工具的唯一号，借用或领用时间等信息。

(2) 任务作业记录

任务作业记录主要包括装配任务完成数量、任务状态信息、操作人员信息、任务完成时间、工时定额、换件信息以及返工返修信息等。

(3) 质量数据采集

装配质量数据主要包括检验实测值、不合格品审理状态、检验员、检验时间、合格数量等信息。每个单件产品在装配过程中，由操作工人确定装配物料，并经过检验员检验确认之后，即可生成装配质量的数据，同时将实测值动态关联三维模型。

装配节点实例数据采集的信息模型支撑如图 43 所示。

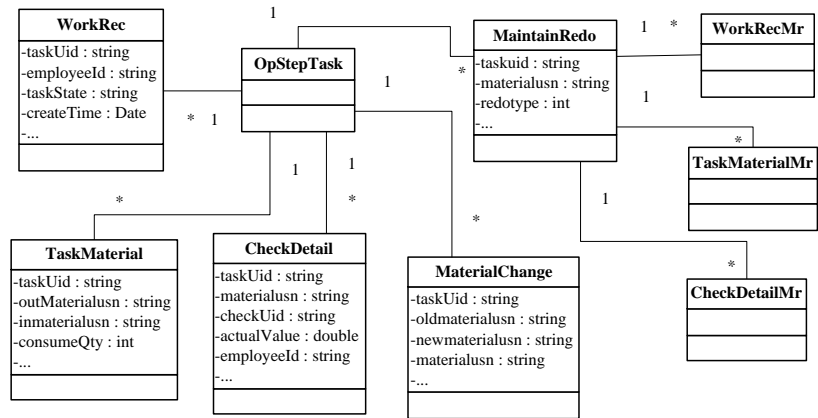


图 43 装配节点实例数据采集信息模型视图

3) 实例数据管理

产品装配实例数据管理主要是为了实现装配过程的跟踪和追溯，通过采用以过程为核心组织数据的方法，将产品的零部件使用情况、产品的组成情况、装配操作记录、资源使用情况、检验信息等装配过程数据，按照装配节点(工步任务)的层次结构组织起来，如图 44 所示，实现对随着装配生产的进行而动态变化的产品实例数据的实时跟踪和追溯。

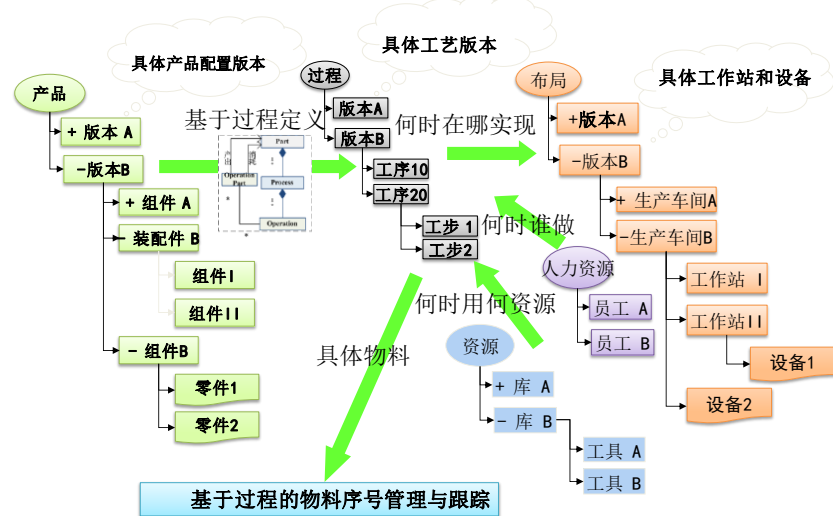


图 44 以过程为核心的实例数据管理

以过程为核心按照装配节点层次结构组织产品实例数据，可以很方便地进行装配物料谱系的查询。装配物料谱系查询可以分为正查和反查两种方式。正查是以装配产品实例作为参数，按照 BOM 结构层次查询该产品消耗的所有零组件，其意义在于能够直观的看到装配产品所装配的物料明细；反查则是以实际零组件作为参数，查询该零组件或者同批次物料被哪些装配产品实例所消耗，其意义在于当某个装配产品上某一个零组件发生质量问题时，可以快速定位使用同批次零组件的所有产品，从而及时排查出其他装配产品是否存在同样问题。

3.3.4 装配临时操作

1) 换件操作

在装配过程中，装配工人在进行装配操作时，由于某种原因(如尺寸问题)导致所领取的某个零组件无法正常装配到主装配体上，这时工人需要对该零组件进行换件，工人在通过检验员的确认后，重新领用新的零组件进行装配，但同时需要记录被替换下的零组件的详细信息，如零件唯一号、合格证、换件原因、换件时间等，实现装配产品的质量追溯性。

为了能够对装配过程中的换件操作进行记录，保证对产品质量的追溯性，通过建立装配任务、产品实例、任务分配物料和替换零组件的映射关系，来支持换件操作的完整记录，其信息模型支撑如图 45 所示，模型中通过 TaskMaterial 对象的实例表达装配物料与装配任务中某个具体的产品的映射关系，如果发生换件时，通过 MaterialChange 对象的实例建立替换物料和 TaskMaterial 对象实例的映射来记录换件关系，即使出现多次换件，也能够将换件历史正确的记录下来。

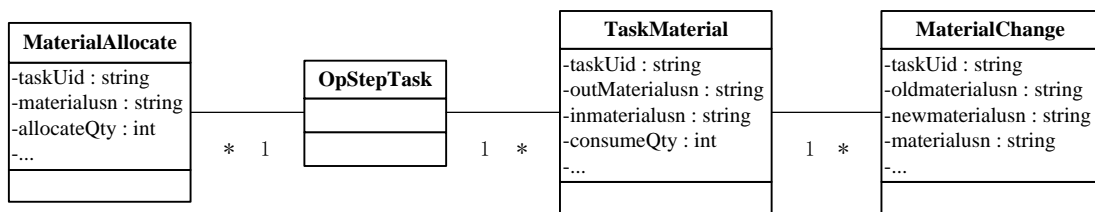


图 45 换件信息模型视图

2) 返工返修操作

除了换件操作，装配现场还会出现返工返修操作，装配过程中的返工返修操作是指

因为质量问题原因将某装配工序退回到初始状态，重新进行装配，与此同时，还需要记录已完成任务的所有详细信息，以保证质量追溯。

在系统设计中，采用建立任务关联的所有信息的镜像存储结构的方法，将原有反馈数据转移到镜像结构中，同时将任务原有所有信息重置到未装配状态，通过 MaintainRedo 对象的实例建立镜像结构中任务信息和任务的映射关系，从而可以查询到每个任务的返工返修记录信息，保证了装配的可逆性与追溯性，返工返修操作的信息模型支撑如图 46 所示。

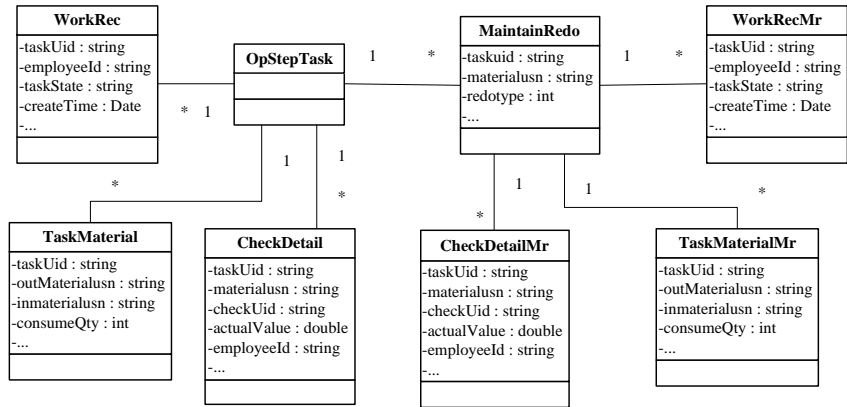


图 46 返工返修信息模型视图

3.4 装配过程可视化与管控

装配过程可视化与管控是在装配计划和任务指令下达后，对已投产计划、任务、产品实例的执行进展进行实时可视化跟踪和控制，可视化跟踪包括产品实例进度三维展示、计划进度展示、任务进度展示、物料谱系查询等，控制包括计划任务变更控制、计划物料调整、消息推送等。因此，产品实例的三维展示、计划任务进度的图形化展示以及装配过程的管控方法是实现装配过程可视化与管控的技术关键。

3.4.1 基于三维轻模型的装配实例可视化

基于三维轻模型的装配实例展示是指针对车间中任意一个具体的在装产品，在三维环境下通过轻模型呈现该产品的已装配零组件、未装配零组件以及已检和未检的检验项目，其实现方法如图 47 所示。

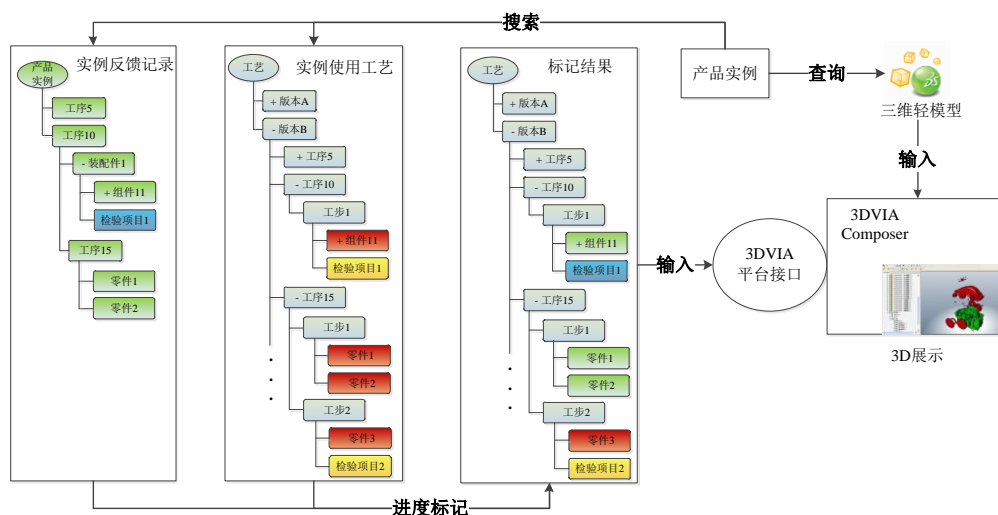


图 47 基于三维轻模型的装配实例展示方法

基于三维轻模型的装配实例展示方法，主要是通过获取装配实例的实际装配物料信息和产品的工艺定义信息，利用 3DVIA Composer 平台提供的接口实现装配实例在三维轻模型上的展示，其具体实现描述如下：

- (1) 首先根据产品实例的物料唯一标识，获取该产品实例在装配执行过程中反馈的消耗物料记录和检验项目实测记录；
- (2) 根据产品实例的物料唯一标识，获取实例所属的装配任务，并依据装配任务查询产品实例使用的工艺版本，然后通过该版本工艺获取产品定义的消耗物料和检验项目；
- (3) 按照产品实例的消耗物料记录和检验项目实测记录，对产品定义的消耗物料和检验项目进行标记，将所有的定义物料标记为已装或未装，将所有的检验项目标记为已检或未检；
- (4) 在三维环境下，通过 3DVIA Composer 平台提供的接口输入产品定义物料和检验项目的标记结果，操纵轻模型改变零组件和检验项目的显示颜色，把已装的零组件用绿色标记，未装的用红色标记，已检的检验项目用蓝色标记，未检的采用黄色标记，同时，将未装配的零组件以爆炸图的形式展示，从而实现装配实例的 3D 展示。

通过在三维环境下展示产品实例的装配进度情况，可以更加直观的了解产品装配状况，能够针对具体产品的装配过程控制作出更加快速的响应和有效的决策。

3.4.2 基于 mxGraph 的装配过程可视化

基于 **mxGraph** 的装配过程可视化主要是将装配生产过程中的计划、任务数据,采用图形化技术按照树形图和有向图的形式进行结构化组织和展示。**mxGraph** 是一个提供交互式图表和图形应用程序功能的图形库,专为使用客户端-服务器架构而设计,提供了可编程的图形样式定义、图形交互功能,支持图形分析,本文基于 **mxGraph** 的装配过程可视化技术原理如图 48 所示。

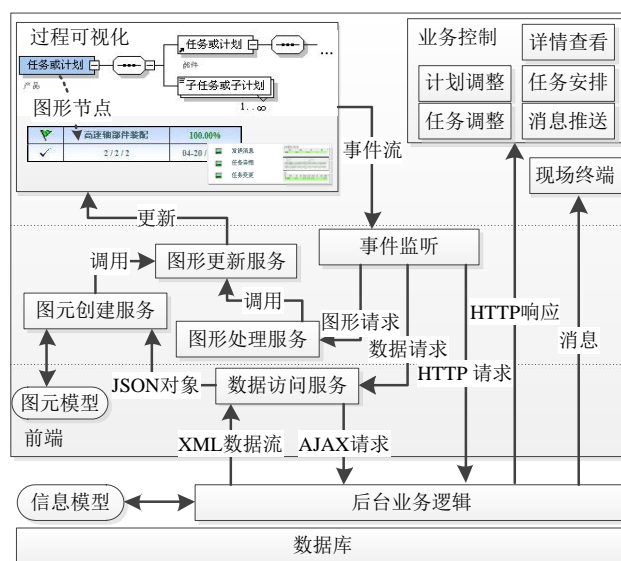


图 48 可视化技术原理

首先利用 **mxGraph** 提供的图元模板定制图形节点中的样式模型和节点数据模型(即图元模型), 然后针对不同视图数据的请求, 以 **AJAX** 的方式从数据库中将装配过程数据对象(计划或任务数据对象)依据信息模型定义的约束关系以 **XML** 格式形式组织并传输到前端, 在前端将 **XML** 数据解析为 **JSON** 对象, 并将数据映射到图形节点的数据模型中, 通过数据之间的约束关系(如任务间的顺序关系)采用有向边组织图形节点, 形成树形图或者有向图, 直观的展示装配过程的进展和过程数据的业务关系; 其次, 利用 **mxGraph** 的图形交互功能, 通过监听与可视化图形的交互事件, 以事件响应的方式实现装配过程信息的动态加载、多视图展示和特定信息的搜索定位, 以及触发不同的业务过程(如任务安排、消息推送、详情查看等), 为装配过程管控提供了技术基础。

有向图或树形图中的每个节点对应装配过程中的一个任务或计划，下面以任务树形图中的节点进行说明。任务树形图中的节点样式如表 3 所示，在节点中采用颜色旗帜来

标识该节点的完成状态；采用状态图标标识节点的当前状态，包括已下达、已开始、检验、返工返修、已完成等状态；采用百分比的形式展示节点安排数量的完成比例；采用文本的形式展示当前节点安排的数量和完成数，以及当前装配结点的计划完成时间和实际完成时间。

表 3 任务节点样式

旗帜图标	结点名称	完成百分比
状态图标	计划数/任务数/完成数	预期完成时间/实际完成时间

在装配车间生产过程中，通过树形图和有向图的方式对装配过程中的计划和任务进行图形化展示，使得管理层能够以更加直观的方式监控车间装配生产的实时总体执行情况，而图形交互的事件处理则为管理层对整个装配过程管控提供了技术基础。

3.4.3 装配过程管控实现方法

装配过程的管控是管理层按照产品订单的交货期要求主动安排任务并推动装配现场的任务执行、装配现场通过装配进度拉动管理层的计划与任务安排、管理层根据装配现场的实际情况作出快速响应和调整的一个动态平衡的过程，装配过程管控的实现方法如图 49 所示。

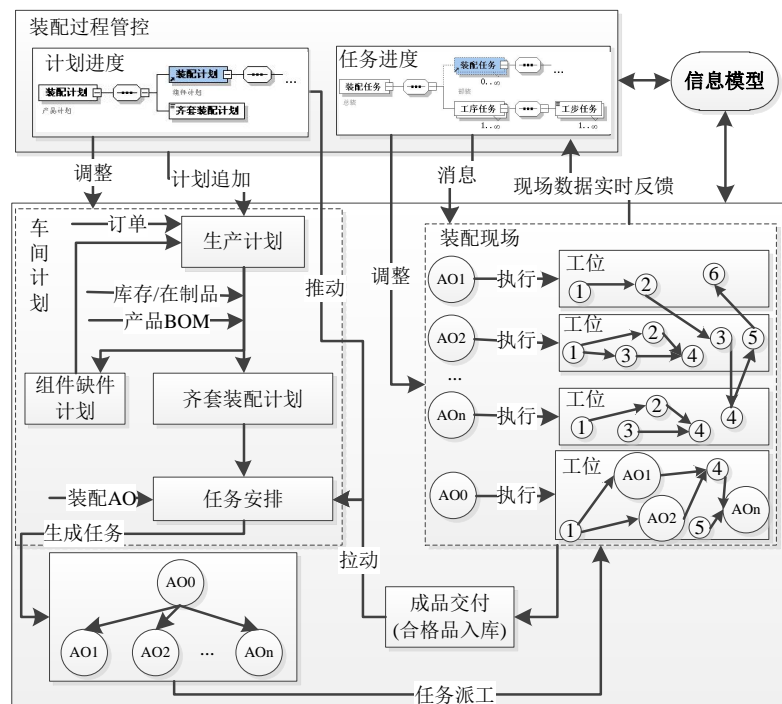


图 49 装配过程管控实现方法

车间计划层在接收产品装配订单后，按照订单交货期的要求编制产品生产计划，通过对库存和在制品的物料情况进行分析，生成齐套装配计划，并依据车间生产能力主动进行齐套装配计划和缺件计划的任务安排和派工，推动装配现场任务的执行，针对紧急计划的插入，车间计划层通过图形化界面能够进行计划和计划占用物料的调整。装配现场人员通过现场终端接收计划层分派的装配任务，按照任务的顺序约束关系逐一执行，并根据任务的执行情况反馈任务进度、作业记录等现场实时数据，为车间计划层的实时管控提供数据，使车间计划层能够实时监控整个产品装配计划以及任务的进度和状态，同时拉动计划层安排装配计划和任务。车间计划层通过图形化界面实时监控整个装配任务的进度和状况，按照产品部装指令与总装指令存在的顺序约束关系，向进度缓慢的任务发送消息督促任务加快执行，控制整个装配过程中生产任务间进度的协调性，同时，能够根据现场的突发情况，对装配现场任务完成时间、状态等进行调整和控制。综上所述，通过对管理层与车间现场推拉的互动管理，实现了装配过程的闭环管理和控制，能够很好地提高车间生产效率，缩短产品交货周期，降低延误率。

3.5 本章小结

本章详细分析了装配过程可视化管控系统核心功能的关键技术。主要从装配过程的工艺管理、计划任务管理、现场执行与控制 and 可视化与管控四个方面，结合系统信息模型，阐述了关键技术的具体实现方法，在此基础上实现装配过程的管理与控制。

第四章 装配过程可视化管控系统实现与验证

4.1 系统开发环境与技术

4.1.1 系统开发环境

1) 客户端

- ✓ Windows7 32/64 位/Windows XP 32/64 位操作系统
- ✓ Java 语言开发工具包(JDK1.6+)
- ✓ MyEclipse 6.5+集成开发环境
- ✓ Web 浏览器 IE6+
- ✓ 3DVIA Composer Player 轻模型浏览器

2) 服务端

- ✓ Windows Server 2005/2008 32/64 位操作系统
- ✓ Java 语言运行环境(JRE1.6+)
- ✓ Oracle10g 数据库
- ✓ JBoss4.2+服务器

4.1.2 系统运行环境

1) 客户端

- ✓ Windows7 32/64 位/Windows XP 32/64 位操作系统
- ✓ Web 浏览器 IE6+
- ✓ 3DVIA Composer Player 轻模型浏览器

2) 服务端

- ✓ Windows Server 2005/2008 32/64 位操作系统
- ✓ Java 语言运行环境(JRE1.6+)
- ✓ Oracle10g 数据库
- ✓ JBoss4.2+服务器

4.2 系统运行实例

本文在课题组 MES 系统的基础上, 基于系统的架构设计, 完成了装配过程可视化管控系统的开发。本系统主要包括装配工艺管理、装配计划任务管理、装配执行管理和装配过程可视化与管控四个部分, 涉及到管理层和装配现场不同角色的人员。

4.2.1 装配工艺管理

装配工艺管理模块的系统验证主要从产品定义、工艺编辑、工艺集成这几个方面进行论述，具体描述如下：

1) 产品定义

产品定义是在系统中为装配的产品录入需要管理的信息，包括定义产品基本属性、生产属性等信息，同时为产品上传并关联产品需要的图片、文档和三维轻模型，如图 50 所示。

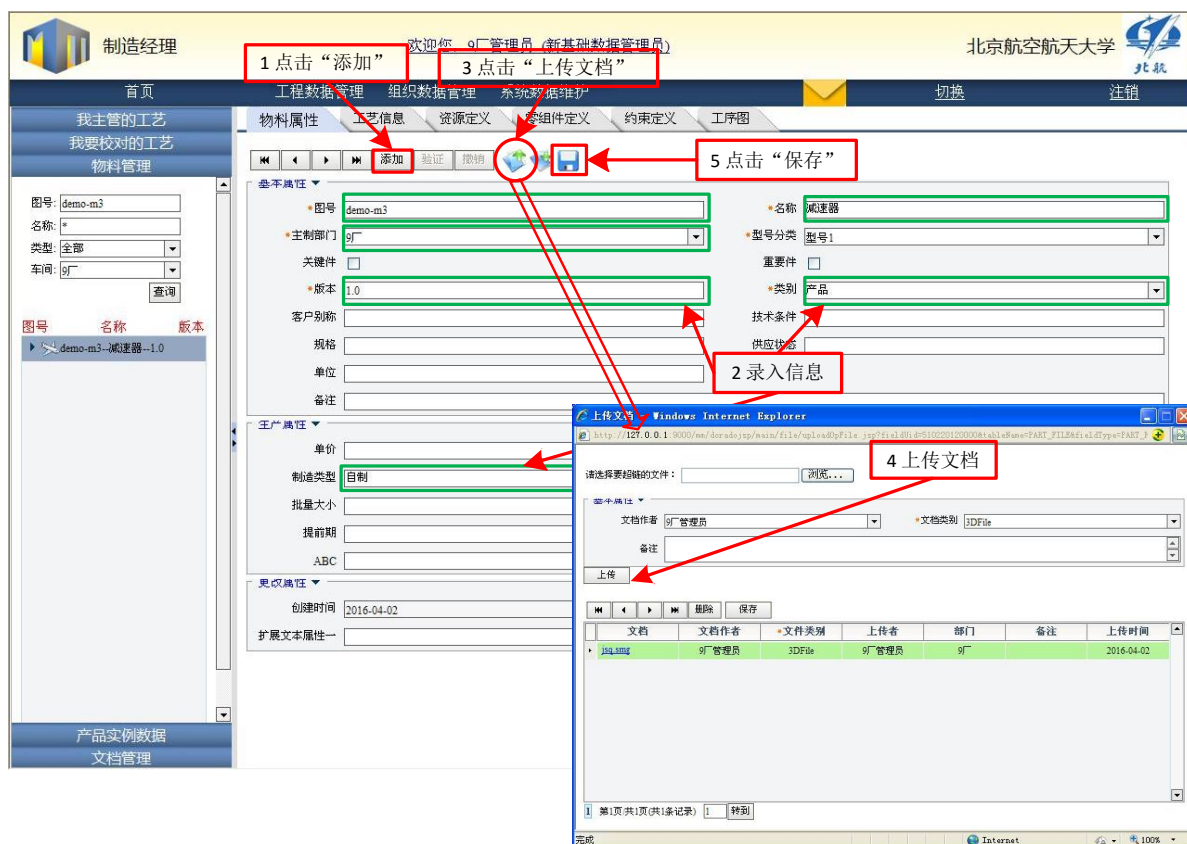


图 50 产品定义

2) 工艺编辑

工艺编辑是在系统中以手动的方式进行产品装配工艺规程的编制和录入，包括工序、工步的详细定义，如图 51 所示；装配工艺以装配工步作为装配节点，每个装配节点可以定义消耗的零组件物料、使用的刀夹量等资源、产品检验项目、工步使用的图片和模型文档等信息，如图 52 所示；在完成装配节点定义后，按照产品的装配关系，可以定义工步的执行顺序约束关系，如图 53 所示。

1 2

添加 删除 类似创建

版本	工艺名称	类型	工艺类型	有效性	默认	主制车间	主管工艺	校对员	工艺文档
1.0	减速器装配工艺		装配工艺	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	9厂			

工序详细内容

<<返回 添加 删除 验证 撤销 保存

序号	名称	详细	查看工步	内容	工序概要	关键	工种	类型	物料数	资源数	检验	工序文档
5	机体密封试验	编辑	工步(+)	机体密封试验		<input type="checkbox"/>		正常工序	0	0	<input type="checkbox"/>	
10	轴部件装入下箱体	编辑	工步(+)	轴部件装入下箱体		<input type="checkbox"/>		正常工序	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	
15	上下箱体合箱	编辑	工步(+)	上下箱体合箱		<input type="checkbox"/>		正常工序	0	0	<input type="checkbox"/>	
20	合上端盖	编辑	工步(+)	合上端盖		<input type="checkbox"/>		正常工序	0	0	<input type="checkbox"/>	
25	合上盖板	编辑	工步(+)	合上盖板		<input type="checkbox"/>		正常工序	0	0	<input type="checkbox"/>	
30	涂油	编辑	工步(+)	涂油		<input type="checkbox"/>		正常工序	0	0	<input type="checkbox"/>	
35	涂漆	编辑	工步(+)	涂漆		<input type="checkbox"/>		正常工序	0	0	<input type="checkbox"/>	

工步详细内容

<<返回 添加 删除 验证 撤销 保存

序号	名称	内容	工序概要	工种	类型	物料数量	资源数量	详细	检验	工步文档
15.05	用定位销定位上...	用定位销定位上箱体			正常工步	2	2	编辑	<input type="checkbox"/>	
15.10	螺栓连接上下箱体	螺栓连接上下箱体			正常工步	2	0	编辑	<input type="checkbox"/>	
15.15	拧紧螺母，紧固...	拧紧螺母，紧固上下箱体连接			正常工步	2	0	编辑	<input type="checkbox"/>	

图 51 工艺录入

图号:demo-m3 工步号: 10.05 工步名称:将高速轴部件和低速轴部件装入下箱体

工步信息 配置物料 配置资源 检验信息 工步文档上传

添加 删除 验证 撤销 保存

消耗物料						产出物料		
图号	类型	名称	消耗类型	数量	单位	图号	类型	名称
jsq201002034	组件	高速轴部件		1.00		demo-m3	产品	减速器
jsq201002035	组件	低速轴部件		1.00		demo-m3	产品	减速器

图号:demo-m3 工步号: 10.05 工步名称:将高速轴部件和低速轴部件装入下箱体

工步信息 配置物料 配置资源 检验信息 工步文档上传

添加 删除 验证 撤销 历史导入 保存 准备包完备: ☐ 设置

资源编号	资源名称	图号	数量	资源类型	规格	使用类型	有效性
11054820	检验齿轮用测量头	P57683	1	千分尺	0003/Am0.15*M2.5-6H	生产使用	<input type="checkbox"/>

图号:demo-m3 工步号: 10.05 工步名称:将高速轴部件和低速轴部件装入下箱体

工步信息 配置物料 配置资源 检验信息 工步文档上传

添加 删除 验证 撤销 保存

基本信息

工步号: 10.05 工步名称: 将高速轴部件和低速轴部件装入下箱体

工序概要:

序号	类型	标准值	公差...	公差...	测量...	单位	上下...	检验...
1	形位公...	0.08	0.08	0.00 A		mm		形位公...
2	直径	100	1.00	-1.20		mm		尺寸1

图号:demo-m3 工步号: 10.05 工步名称:将高速轴部件和低速轴部件装入下箱体

工步信息 配置物料 配置资源 检验信息 工步文档上传

请选择要超链的文件: 浏览...

文档属性

文档作者: 文档类别: 3DFILE

备注:

上传

删除 保存

文档	文档作者	文件类别	上传者	部门	备注	上传时间
jsq201002034.smg		3DFILE				2016-04-02
jsq201002035.smg		3DFILE				2016-04-02

图 52 装配节点配置



图 53 工艺约束定义

3) 工艺集成

在完成产品的信息定义后，接着为产品录入装配工艺规程，工艺集成的方式实现了外部工艺系统所编制工艺的快速录入，首先将外部工艺系统生成的工艺 XML 文件上传到系统中，然后解析 XML 文件把其中的工艺数据存储到系统中，如图 54 所示。



图 54 工艺集成

4.2.2 装配计划任务管理

装配计划任务管理模块的系统验证主要从计划编制与齐套分析、计划间物料调整、任务安排与分解以及任务派工这几个方面进行论述，具体描述如下：

1) 计划编制与齐套分析

装配计划员按照产品订单数量、交货期等要求录入装配计划，对装配计划进行物料的齐套分析，获取计划的齐套数量和缺件计划表，计划员可以根据实际情况进行缺件计

划和齐套计划的下达，同时，还能够三维轻模型上查看缺件物料，如图 55 所示。



图 55 计划编制与齐套分析

2) 计划间物料调整

由于不同的装配计划紧急程度不一样，可能存在一些交货期较晚的计划已经完成了齐套分析，并占用了库存的共用件数量，这些占用的共用件可以通过物料调整的方式重新分配给交货期较紧的计划，让紧急计划先开始投入装配生产，如图 56 所示。

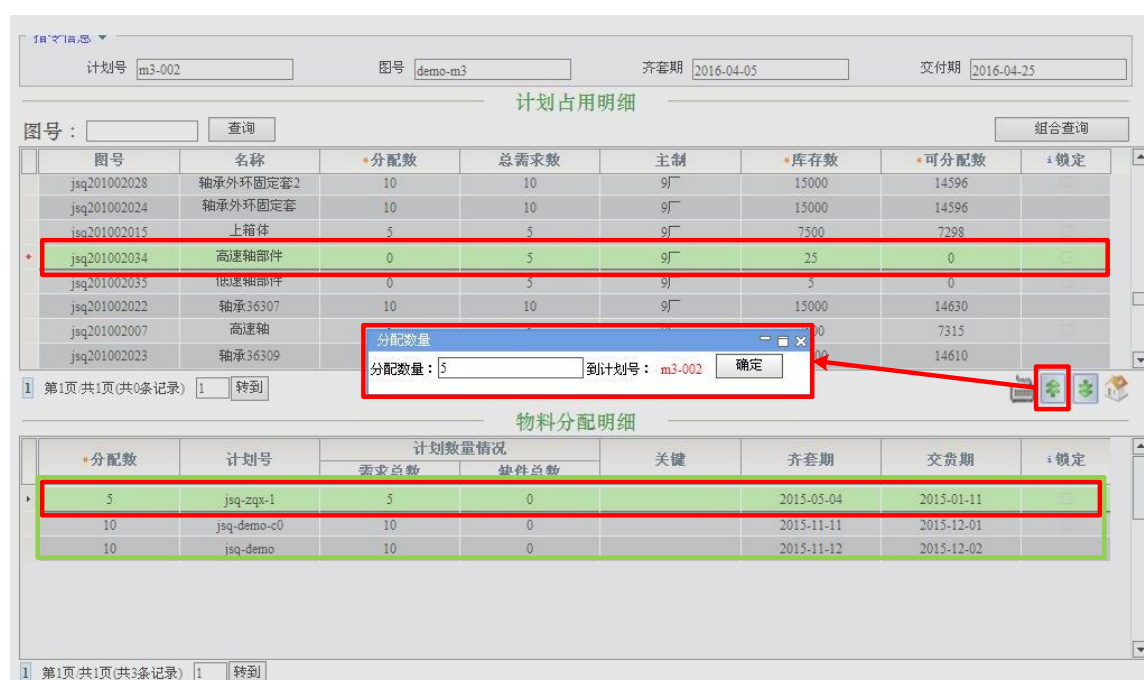


图 56 计划间物料调整

3) 任务安排与分解

计划经过齐套分析后，可以对已齐套的装配计划进行装配任务的安排。如图 57 所示，齐套的计划可以分批次进行安排，任务安排后需要进一步对任务按照工艺规程进行任务分解，最后按照任务所安排的数量在系统中进行产品实例标识。



图 57 任务安排与分解

4) 任务派工

任务完成分解后，计划员可以看到所有已分解的待派工任务，如图 58 所示，通过将装配任务的所有工序任务分派到一个工位或不同工位，可以灵活的组织产品的装配生产方式。



图 58 任务派工

4.2.3 装配现场执行管理

装配执行管理模块的系统验证主要从装配现场任务接受、装配节点信息加载与数据采集、检验反馈这三个方面进行论述，具体描述如下：

1) 装配现场任务接收

在装配现场工位的终端系统上，如图 59 所示，工人通过刷卡登陆系统，可以接收到计划层分派的个人任务和班组任务，可以查看每个产品实例的装配进度，并且可以根据实际情况选择任务开始进行装配。

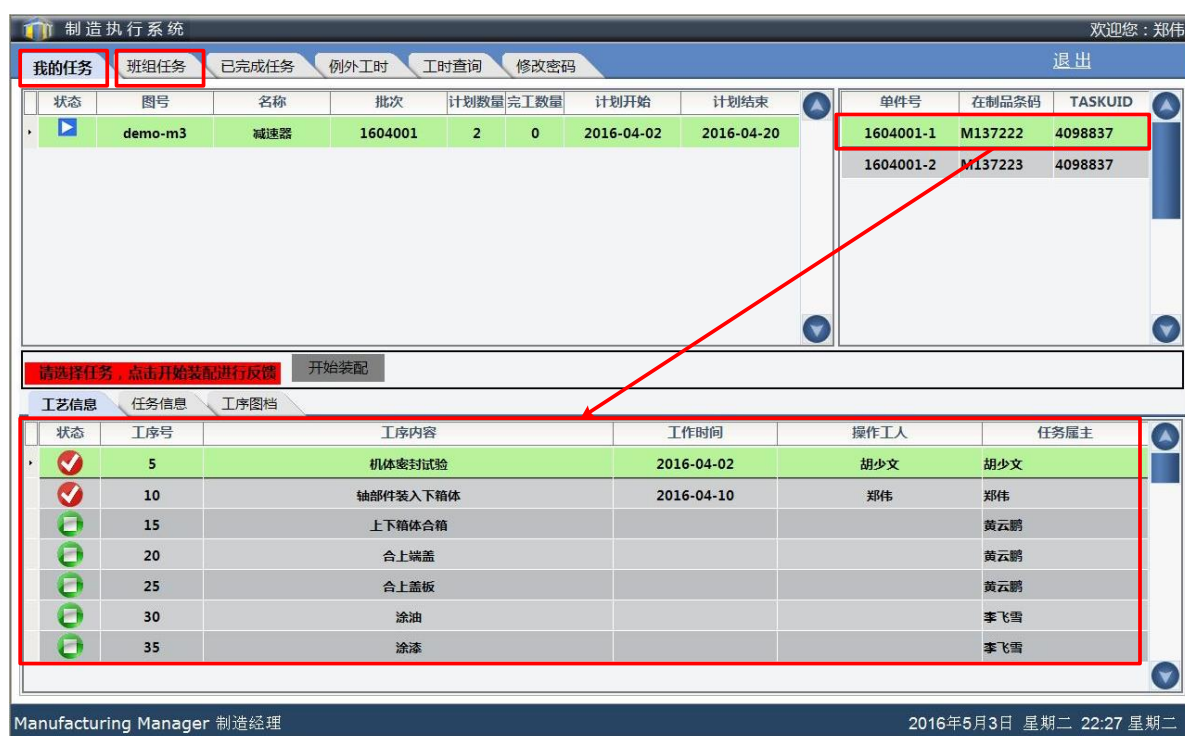


图 59 装配现场任务接收

2) 装配节点信息加载与数据采集

工人在接收任务后，从库房领取物料即可开始装配，如图 60 所示，在装配界面，针对每个装配节点加载任务的工艺内容、消耗零组件、检验项目、使用工装、工艺文档等信息，工人能够根据自身情况选择是否查看装配过程仿真指导，能够在三维轻模型上查看检验项目的定义信息、以刷条码的方式进行物料和资源信息的反馈、以手动输入的方式进行检验项目实测值的反馈、以及物料换件操作的反馈，最后，工人能够实时接收到来自上层推送的决策消息。

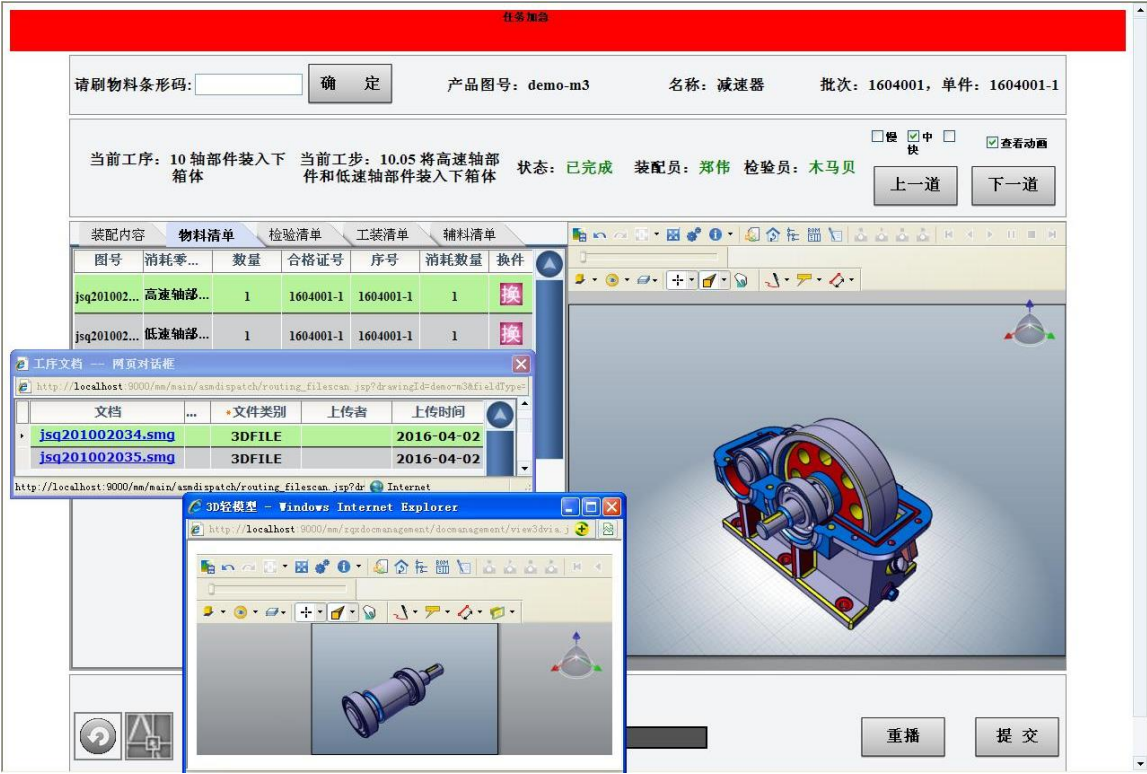


图 60 装配节点信息加载与数据采集

3) 检验反馈

检验员登录到终端系统后，通过刷入产品实例的物料码，能够查看产品的工艺内容、检验项目以及工具清单信息，通过手工录入的方式反馈检验项目的实测值，同时可以根据检验结果发起不合格审理流程或返工返修流程，如图 61 所示。



图 61 检验反馈

4.2.4 装配过程可视化与管控

装配过程可视化管控模块的系统验证从装配计划进度监控、装配任务进度监控、装配实例三维可视化这三个方面进行论述，具体描述如下：

1) 装配计划进度监控

在装配计划完成齐套分析后，如图 62 所示，在计划监控界面，计划员可以实时查看计划的安排数量、缺件计划及其安排数量、以及装配计划的完成进度，同时，计划员可以根据计划的进度通过节点菜单交互的方式进行计划的安排和调整。

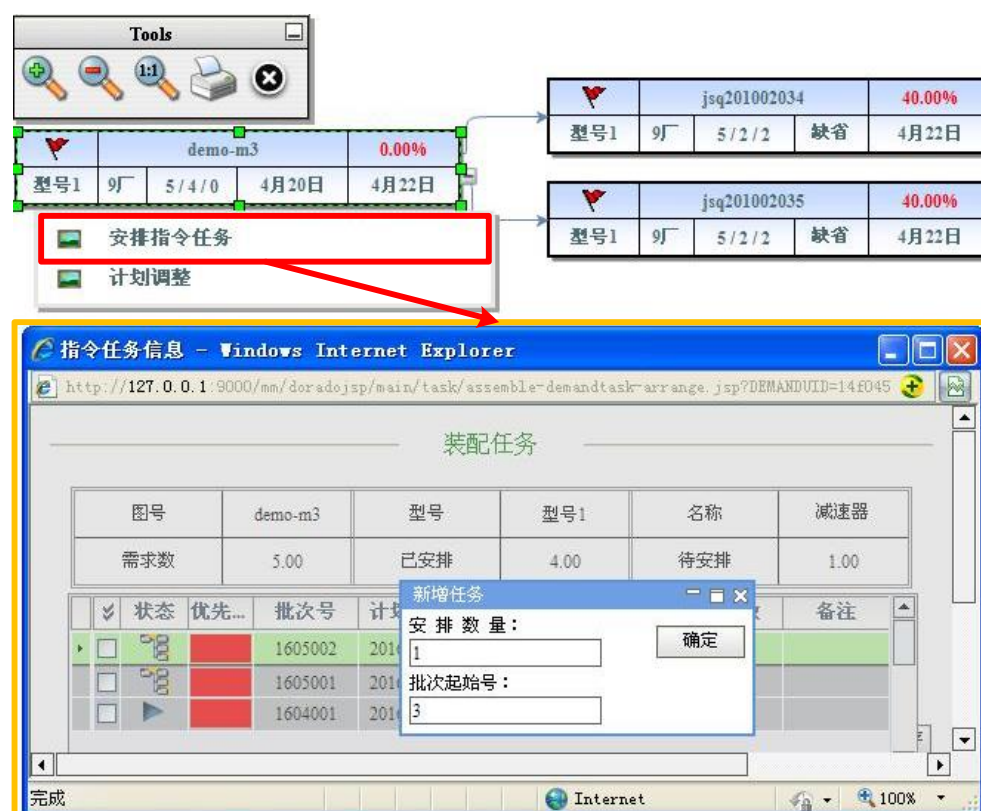


图 62 装配计划进度监控

2) 装配任务进度监控

装配任务生成并完成派工后，计划员可以通过任务树形图和有向图的方式监控任务的执行进度。

如图 63 所示，在任务树形图中，每个图形节点对应一个装配任务，并按照总装、部装、工序、工步任务的层次组织图形节点形成树状结构，每个图形节点展示了任务的完成状态、当前状态、任务名称、完成进度等信息；计划员可以对整个任务从不同视图进行监控，如监控组件级任务、监控未完成任务、监控某节点所有下级节点等。



图 63 任务树形图

如图 64 所示，在任务有向图中，每个图形节点对应一个工步任务，各个任务按照装配约束关系进行组织，形成有向图结构，使计划员能够直观的看出任务间的相互约束关系；计划员通过图形节点菜单，可以查看每个任务详细情况、向任务现场发送消息以及进行任务属性变更。

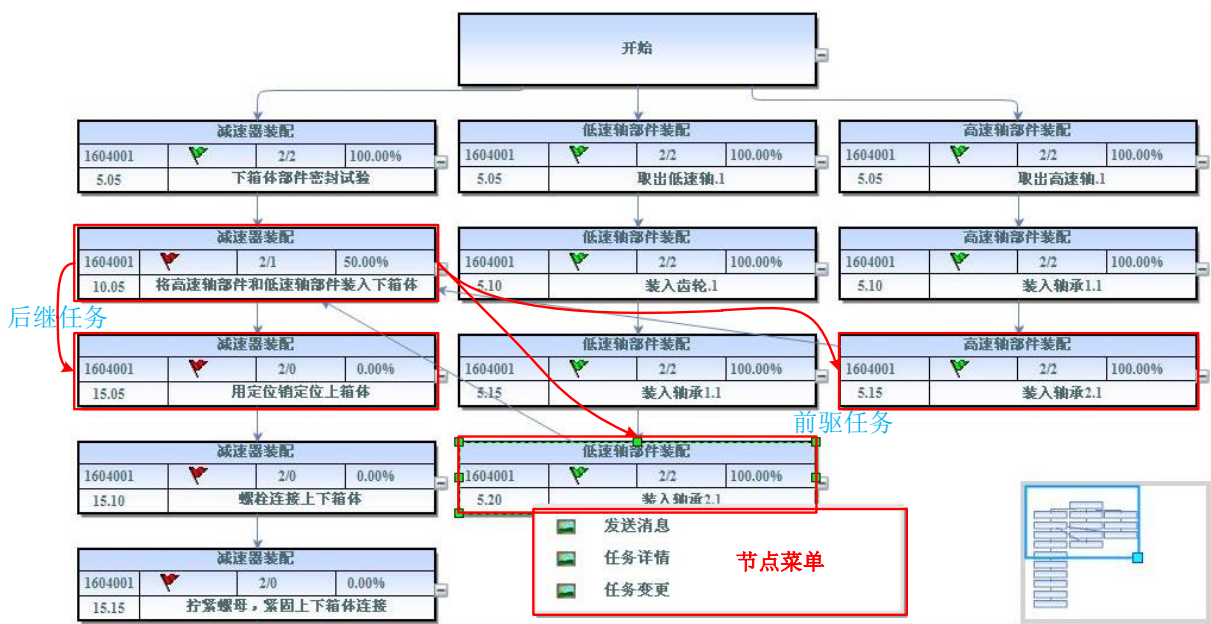


图 64 任务有向图

如图 65 所示，计划员通过树或图的图形节点菜单，可以查看任务详细情况、向任

务现场发送消息以及进行任务属性变更。

[添加](#)
[删除](#)
[提交](#)
[取消](#)
[决策历史](#)
[刷新](#)

发送消息

任务名称	决策信息	时间	创建者
▶ 减速器装配	任务加急	2016-04-12	csk

任务信息

任务名称: 减速器装配

主制部门: 9厂

计划数量: 2.00

完成数量: 0.00

任务状态: 已开始

是否检验: 是

任务详情

型号: 型号1

批次: 1604001

计划完成: 2016-04-20

实际完成:

创建时间: 2016-04-02

已检验数量: 0

装配物料明细

产出物料码	零件名称	需求数量	消耗物料码	批次	序号	合格证号	消耗数量	创建时间
▶ M137222	高速轴部件	1.00	M137224	1604001	1604001-1	1604001-1	1.00	2016-04-10
M137222	低速轴部件	1.00	M137226	1604001	1604001-1	1604001-1	1.00	2016-04-10
M137222	下箱体部件	1.00	M136782	zqx-1	1	zqxc001	1.00	2016-04-02
	M10螺母	2.00					0.00	
	上箱体	1.00					0.00	
	盖板	1.00					0.00	

1 2 3 第1页 共3页 (共18条记录) 1 转到

检验明细

物料码	工序号	序号	尺寸名称	标准值	下偏差	上偏差	实测值	检验员	检验时间
▶ M137223	10.05 2099	2099	形位公差.1	0.08		0.08			
M137223	10.05 2100	2100	尺寸.1	100	-1.20	1.00			
M137222	10.05 2099	2099	形位公差.1	0.08	0.00	0.08	0.09	术马贝	2016-04-10
M137222	10.05 2100	2100	尺寸.1	100	-1.20	1.00	97.5	术马贝	2016-04-10

1 第1页 共1页 (共4条记录) 1 转到

换件明细

产出物料码	零组件名称	工序号	旧物料码	新物料码	装配员	检验员	换件数量	创建时间

1 第1页 共1页 (共0条记录) 1 转到

[提交](#)

任务变更

状态	任务名称	批次	数量	最晚结束	计划开始	计划完成	检验	完成数	创建时间
▶	▶ 减速器装配	1604001	2	2016-04-22	2016-04-02	2016-04-20	✓	0	2016-04-02

图 65 图形节点菜单内容

3) 装配实例三维可视化

针对每个具体的实例，如图 66 所示，利用三维轻模型在三维环境下展示产品实例的装配进度，并通过颜色标记突出显示已装、未装的零组件，以及已检和未检的检验项目，使计划员更加清晰直观的了解装配实例的进展；同时，计划员可以查看装配实例的任务执行明细。

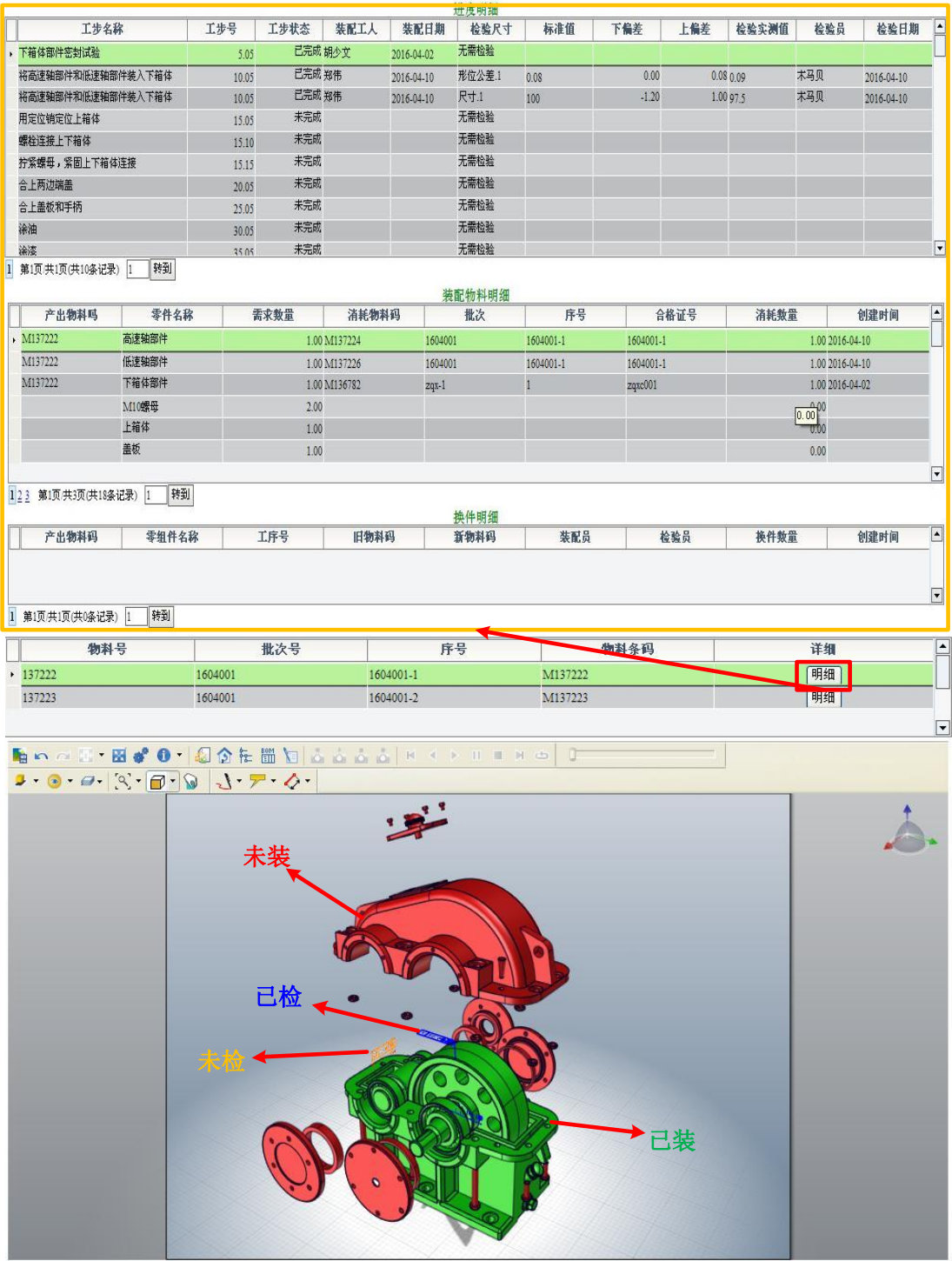


图 66 装配实例三维可视化

4.3 本章小结

本章首先介绍了管控系统的开发环境、运行环境，然后在开发完成的系统上，以齿轮减速器为例，验证了系统具有一定的可行性与有效性。

总结与展望

本论文针对离散制造企业对复杂产品装配过程的管理和控制需求，基于过程规范语言 PSL 构建装配过程信息模型，实现对装配过程数据的规范描述和结构化管理；在建立的信息模型基础上，参考 MESA 标准建立装配过程可视化管控系统的功能模型，开发基于三维轻模型的装配过程可视化管控系统，实现装配过程的数据结构化管理、可视化与控制。

本论文主要完成的工作描述如下：

- 1) 构建了基于 PSL 的装配过程信息模型。为实现装配过程数据的规范描述和结构化管理，采用过程规范语言 PSL 对装配过程进行规范描述，并在此基础上，采用面向对象的建模方法构建装配过程信息模型，实现对装配过程数据的规范描述和结构化管理。
- 2) 实现了基于三维轻模型的可视化装配指导。为解决以二维工艺图纸进行装配指导的效率低下以及可理解性差的问题，在产品和工艺定义时关联三维轻模型以及装配过程的仿真信息，通过装配现场应用终端集成 3DVIA 的轻模型浏览平台，以直接操纵轻模型的方式为装配人员提供在线的三维可视化装配指导。
- 3) 开发了装配过程可视化管控原型系统。分析了系统的功能需求，参考 MESA 标准建立系统的功能模型，并设计了系统的软件架构，基本完成了装配过程中工艺管理、计划任务管理、装配现场执行与控制、以及可视化与管控的主要功能，通过实例验证了系统具有一定的可行性与有效性。

由于时间和精力的限制，论文还存在一些问题和不足之处需要进一步研究并改善，主要包括以下几点：

- 1) 在工艺管理模块，本文主要考虑了工艺与外部系统的集成、工艺数据的定义管理，目前还没有解决在实际装配过程中可能存在的工艺变更情况，为了使工艺管理能够适应实际的业务需求，需要结合实际业务在工艺的变更管理方面作进一步的研究和扩展。
- 2) 在计划任务管理模块，本文主要解决了计划管理问题，并没有考虑与 ERP 系统的计划集成问题，为了使本系统能够与 ERP 系统进行集成和协同工作，在今后的工作中应该设计并实现与 ERP 系统之间的集成接口。

3) 在装配过程可视化管控方面，本文完成了装配过程的可视化展示，但在管控方面还不够完善，目前只完成了装配现场的装配过程控制、以及计划和任务的基本变更调整，因此，在今后的工作中需要重点研究复杂的计划任务调整和变更的解决方法。

参考文献

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 李舒. 面向飞机制造的三维装配仿真及制造执行管理[D]. 上海: 复旦大学, 2011
- [4] 王朋. 基于TECNOMATIX的数字化装配工艺规划及后处理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012
- [5] 巩玉强. MBD在国内飞机研制中的应用现状与问题探讨[J]. 航空制造技术. 2015(18): 50-54
- [6] 杨亮. 航天器典型产品三维模型轻量化转换技术研究[D]. 廊坊: 北华航天工业学院, 2015
- [7] 赵伟. 基于轻量化模型的三维装配动画研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006
- [8] BRYAN A. CATRON, STEVEN R. RAY. ALPS - A Language for Process Specification[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 1991. 4(2): 105-113
- [9] 王文辉, 李刚炎, 刘诏书. 基于S95标准的装饰布生产车间设备组织优化的研究[J]. 中国制造业信息化. 2006. 35(7): 15-18
- [10] The Instrumentation, Systems, and Automation Society(ISA). ANSI/ISA-95.00.01 -2007: Enterprise-Control System Integration Part1: Models and Terminology[S]. http://www.isa.org:S_950001.pdf, 2007
- [11] The Instrumentation, Systems, and Automation Society(ISA). ANSI/ISA-95.00.02 -2007: Enterprise-Control System Integration Part2: Object Model Attributes[S]. http://www.isa.org:S_950002.pdf, 2007
- [12] The Instrumentation, Systems, and Automation Society(ISA). ANSI/ISA-95.00.03 -2007:

Enterprise-Control System Integration Part3: Models of Manufacturing Operations Management[S]. http://www.isa.org:S_950003.pdf, 2007

[13]The Instrumentation, Systems, and Automation Society(ISA). ANSI/ISA-95.00.04 -2007: Enterprise-Control System Integration Part4: Objects and Attributes for Manufacturing Operations Management Integration[S]. http://www.isa.org:S_950004.pdf, 2007

[14]The Instrumentation, Systems, and Automation Society(ISA). ANSI/ISA-95.00.05 -2007: Enterprise-Control System Integration Part5: Business-to-Manufacturing Transactions[S]. http://www.isa.org:S_950005.pdf, 2007

[15]Open Application Group. Open Application Group Integration Specification Release 9.0[EB/OL]. <http://www.openapplications.org>, 2006

[16]阎志华, 丁秋林. 基于OAGIS的制造执行系统的研究[J]. 机械科学与技术. 2004. 23(9): 1054-1056

[17]梅中义. 基于MBD的飞机数字化装配技术[J]. 航空制造技术. 2010(18): 40-45

[18]谢利. 基于MBD的三维工程化设计应用[J]. 智能制造. 2015(7): 60-62

[19]Craig Schlenoff, Michael Gruninger, Florence Tisot et al. The Process Specification Language (PSL) Overview and Version 1.0 Specification[J]. 2000: 1-83

[20]陈媛媛. 面向离散制造的数字化工厂应用技术研究[J]. 电子世界. 2014(8): 49-50

[21]夏平均, 陈朋, 郎跃东等. 虚拟装配技术的研究综述[J]. 系统仿真学报. 2009. 21(8): 2267-2272

[22]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

[23]王宏光, 常智勇, 张海明. 面向航空发动机装配过程管理与控制关键技术研究[J]. 电子设计工程. 2013. 21(9): 18-20

[24]钟岳昕. 机械产品装配过程在制品跟踪及控制策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015

[25]Xisheng Lv, Haibo Shi, Wenli Shang. On discrete assembly process modeling method

based on event-driven strategy[M], 2008: 414-418

[26]陈亮. 三维轻模型在制造过程管理中的应用研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2015

[27]达索系统和Intercim联手扩展PLM2.0制造解决方案[J]. 现代制造. 2009(12): 21

[28]中国科学技术部国际合作司调研组. 借助国际合作提升我国制造业信息化软件水平——山东华天软件公司国际合作成果调研报告[J]. 全球科技经济瞭望. 2013(5): 24-29

[29]CAXA数字化设计与制造解决方案[J]. 国防制造技术. 2012(2): 17-20

[30]Manufacturing Enterprise Solutions Association. MESA Model[EB/OL]. <http://www.mesa.org>, 2008

[31]Paul J. Perrone, Krishna Chaganti. J2EE: Developer's Handbook[M]. New York: Pearson Education, 2003

[32]Martin Bond 美. 21天学通J2EE(第2版)[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006

[33]任中方, 张华, 闫明松等. MVC模式研究的综述[J]. 计算机应用研究. 2004. 21(10): 1-4

[34]王秀伦. 现代工艺管理技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004

[35]刘金锋, 倪中华, 刘晓军等. 基于工艺模型的工艺信息表达与管理技术[J]. 计算机集成制造系统. 2015. 21(7): 1756-1763

[36]于勇, 陶剑, 范玉青. 波音787飞机装配技术及其装配过程[J]. 航空制造技术. 2009(14)

[37]丁小进, 王遵彤, 乔非. ERP与MES的集成新模式研究[J]. 机电一体化. 2007. 13(3): 9-13

[38]孙树栋. 生产运作与管理[M]. 北京: 科学出版社, 2010

[39]谭同超. 有限状态机及其应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2013

[40]徐小良, 汪乐宇, 周泓. 有限状态机的一种实现框架[J]. 工程设计学报. 2003. 10(5): 251-255

攻读硕士学位期间取得的学术成果

[1] 张勤学, 杨建军. 面向复杂产品的装配过程可视化管控系统[J]. 成组技术与生产现代化. 已录用(4).

致 谢

在本论文完成之际，首先要向我的指导老师杨建军教授表示衷心的感谢！杨老师渊博的知识、严谨求实的学术作风以及一丝不苟的治学态度，深深地影响着我以后的学习与工作，让我受益匪浅，我深深感激杨老师的悉心栽培。

感谢机械自动化学院 720 系的全体老师，他们敬业的精神和辛勤的工作，为我们创造了学术氛围浓厚的学习和科研环境。

感谢课题组的廖庆妙师兄和邓必超老师三年来在学习和课题上给予我的指导和启发。感谢张家谔、周勇、韩宝安博士师兄以及已经毕业的戴为鸣、牛凯、刘泓汛、宋贺腾、陈亮等各位师兄在软件开发与课题上给予我的指导和帮助。感谢同窗三年的张晨晖、刘振在学习上给予我的支持和帮助。

在即将结束漫长而充实的学校教育之际，特别感谢我的父母和家人，这些年是你们一直在背后默默为我付出，给予我莫大的鼓励和关怀，你们将永远是我奋斗和克服困难的动力。

最后，感谢各位老师百忙中评阅本论文，并提出宝贵意见。