

中图分类号：TP391

论文编号：10006SY1607220

北京航空航天大学

硕士学位论文

面向柔性装配的制造执行系统 任务管理研究与实现

作者姓名 雷宇翔

学科专业 工业与制造系统工程

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 Implementation of Task Management of Manufacturing Execution System for Flexible Assembly

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

Candidate: Lei Yuxiang

Supervisor: Prof. Yang Jianjun

School of Mechanical Engineering & Automation

Beihang University, Beijing, China

中图分类号：TP391

论文编号：10006SY1607220

硕 士 学 位 论 文

面向柔性装配的制造数据管理 研究与实现

作者姓名	雷宇翔	申请学位级别	学术硕士
指导教师姓名	杨建军	职称	教授
学科专业	工业与制造系统工程	研究方向	信息系统与企业信息化
学习时间自	2016 年 9 月 1 日起	至	2019 年 1 月 15 日止
论文提交日期	2018 年 11 月 19 日	论文答辩日期	2018 年 12 月 日
学位授予单位	北京航空航天大学	学位授予日期	年 月

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过的研究成果，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。

保密学位论文在解密后的使用授权同上。

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

市场竞争的日益激烈、市场的全球化、市场需求的灵活多变，迫使制造企业必须利用信息化技术对企业的整个和制造过程中产生的制造数据进行管理。从而达到降低成本，快速开发产品，适应时刻变化的客户和市场的个性化需求。但是由于制造企业自身条件的限制，相当多的企业缺乏信息化所需的硬件设备、专业的技术人员以及足够的资金，所以这些企业在信息化的建设上基本上没有取得太大进展。

SaaS(Software as a Service, 软件即服务)模式的出现彻底改变了传统应用软件的服务模式，用户不需要购买昂贵的硬件设备，只需一台个人计算机就可以通过互联网连接到应用服务平台并以较低的费用定制适合于自己企业业务流程管理的服务。这种模式为制造企业提供了信息化发展的契机。本文主要针对制造企业的制造数据管理，提出基于 SaaS 模式的 MES 软件架构，并从制造数据的可配置性和工艺的灵活性出发，设计系统的领域信息模型。

首先，分析 SaaS 理论的发展和研究现状，在此基础上对其进行分析，介绍了 SaaS 的基本概念、四级成熟度模型及其优势。然后结合 SaaS 模式的应用特点，分析和比较数据的存储的架构和数据扩展技术，并针对本文要解决的制造企业制造数据管理的问题选择适合的数据存储方案，为搭建基于 SaaS 的制造数据管理系统提供理论基础以及技术支持；

然后，按照信息系统开发的基本思路，针对基于 SaaS 模式的制造数据管理系统进行需求分析，设计出系统的功能架构，并对各个部分的功能模块进行介绍。再从数据的角度对领域模型进行建模；

最后，基于 J2EE 技术架构，应用 Spring+Hibernate+Dorado7 框架，实现制造数据管理系统的功能，完成了原型系统的开发和模拟数据的实验。

关键词：软件即服务，装配制造执行系统，任务管理，微服务，物料需求计划

Abstract

Key words: SaaS , Aassemble Manufacturing Execution System , task management, microservice, MRP

目录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 复杂产品装配的研究现状	2
1.2.2 制造执行系统研究现状	3
1.2.3 SaaS 服务发展研究现状	5
1.3 研究目的及内容.....	6
1.3.1 研究目的	6
1.3.2 研究内容	7
1.4 研究内容与章节安排.....	8
第二章 基于 SaaS 的应用软件开发模式和关键技术研究	10
2.1 SaaS 应用模式介绍	10
2.1.1 SaaS 应用模式基本概念	10
2.1.2 SaaS 模式优势.....	11
2.1.3 SaaS 应用模式的成熟度模型.....	12
2.1.4 基于云计算的其他服务模式	13
2.2 基于 SaaS 模式的装配制造执行系统研发关键技术	14
2.2.1 多用户数据管理模式	14
2.2.2 服务可配置	17
2.2.3 多租户协作生产	21
2.2.4 基于 PSL 的模型统一化.....	22
本章小结.....	24
第三章 基于 SaaS 的装配任务管理模式的系统架构设计	25
3.1 SaaS 服务体系架构	25
3.2 微服务框架设计.....	26
3.2.1 微服务理论研究	26
3.2.2 微服务架构研究现状	27
3.2.3 微服务架构设计方案	28
3.3 基于 SaaS 的微服务系统架构实现	31
本章小结.....	34

第四章 系统主要功能实现技术研究.....	35
4.1 服务功能设计.....	35
4.1.1. 订单任务管理服务设计	35
4.1.2 生产计划管理服务设计	39
4.1.3 在制任务管理服务设计	44
4.1.4 任务执行管理服务设计	48
4.2 基于 SaaS 模式的 MRP 算法优化.....	51
4.2.1 MRP 理论研究.....	51
4.2.2 MRP 算法改进的需求分析.....	53
4.3.3 算法的详细设计	54
本章小结	56
第五章 系统实现与验证.....	58
5.1 系统开发环境与开发技术.....	58
5.1.1 系统开发环境	58
5.1.2 系统运行环境	59
5.2 系统架构与关键模块实现.....	60
5.2.2 数据共享需求分析	60
5.3 系统核心功能展示.....	60
本章小结	60
结论与展望.....	61
致谢.....	62

图清单

图 1	本文技术路线.....	9
图 2	传统软件与 SaaS 软件应用模式对比图.....	11
图 3	SaaS 软件成熟度模型.....	12
图 4	完全独立数据库架构.....	15
图 5	部分独立数据库架构.....	15
图 6	完全共享数据库架构.....	16
图 7	超级管理员用例图.....	18
图 8	普通管理员用例图.....	19
图 9	系统权限管理信息模型.....	19
图 10	用户访问权限控制图.....	20
图 11	零件任务信息模型.....	22
图 12	租户协作生产时序图.....	22
图 13	SaaS 模式软件架构.....	26
图 14	微服务架构技术方案.....	30
图 15	装配任务管理功能模块图.....	32
图 16	装配系统功能模型.....	33
图 17	功能可配置信息模型.....	34
图 18	订单管理员用例图.....	36
图 19	订单状态图.....	37
图 20	订单管理服务信息模型.....	39
图 21	计划管理员用例图.....	40
图 22	生产计划状态图.....	42
图 23	计划管理服务信息模型.....	44
图 24	任务管理员用例图.....	45
图 25	零件任务状态图.....	46
图 26	在制任务管理服务信息模型.....	48

图 27	操作工人用例图.....	49
图 28	工序任务状态图.....	49
图 29	任务执行管理服务信息模型.....	51
图 30	MRP 逻辑关系	52
图 31	眼睛的 BOM 树	53
图 32	MRP 运算流程图	55
图 33	系统技术架构图.....	59

表格清单

表 1	多租户数据库模式比较.....	17
表 2	微服务框架对比.....	29
表 3	订单状态描述表.....	37
表 4	计划状态描述表.....	42
表 5	任务状态描述表.....	46
表 6	工序任务状态描述表.....	49

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

近年来，随着互联网信息时代的进步和先进制造技术的发展，全球工业技术水平、发展模式迎来了重大变革。德国提出“工业 4.0”计划通过智能制造刺激制造业的发展。欧盟提出“2020 增长战略”重点发展智能制造核心技术。韩国、日本等也纷纷提出发展智能制造相应的战略措施。我国在 2015 年推出了“中国制造 2025”战略强调发展智能制造的重要性。

为了顺应智能制造的发展需要，全球制造企业正在从传统的“制造+销售”生产模式向“技术+管理+服务”的复杂生产模式转型，服务化是制造业发展趋势之一。制造业的全球化、一体化促使现代制造业不得不考虑在制造网络中，通过整合跨企业制造资源来实现制造资源和制造能力的共享、协调，建立灵活、动态适应的大型网络服务平台。在这种背景下，李伯虎院士^[1]提出了云的概念，将现有的制造业信息化技术与云计算、物联网等高新技术进行融合，将制造资源和制造能力服务化后进行集中管理，用户通过网络即时获取制造资源或者制造能力，实现制造资源和制造能力的高效共享和协同。云制造的应用将会推进制造业信息化的发展，促进中国制造 2025 的实现。

然而，云制造服务体系面临着众多的挑战，开发一个大规模复杂的协同应用，需要考虑云计算环境下协同技术的具体实现，一般制造领域的软件开发商显得捉襟见肘。当前云计算服务一般可以分为三类：基础设施即服务（IaaS）、平台即服务（PaaS）和软件即服务（SaaS）。IaaS 服务主要是在云资源层和云系统层展开。PaaS 服务主要是在软件层展开，依托于云系统层下的基础资源。SaaS 服务相对于 IaaS 和 PaaS 而言，主要针对云应用软件层提供服务^[2]，SaaS 服务是面向整个区域的分布式应用服务，可以充分实现区域内的制造资源的共享，解决制造资源不完备的问题。

现代装配制造企业的生产完全以市场需求为导向，随着客户需求的个性化日益提高，企业一般采用多品种小批量的生产方式。为了加快对市场需求的响应，企业不再以单一产品的装配需求为主，实现了多企业联合生产，共享生产资源和功能。但是传统的装配制造执行系统不支持多企业联合生产的生产模式，具有局限性，不能适应现代生产装配需求，现代装配制造业急需将制造执行系统部署在云上，根据不同生产企业的需要定制

制造执行系统的各个服务，同时协作装配生产。目前，国内制造业装配自动化实现水平不一，针对不同装配产品的装配流程也都不尽相同，基于云服务模式下的制造执行系统的研究实现还不完善，因此对制造执行系统的设计提出了新的要求与挑战。

综上所述，传统的柔性装配制造执行系统已经不能满足现代装配生产信息化的需求，亟需将装配制造执行系统部署在云上。本课题提出将装配制造执行系统应用 SaaS 模式部署到云环境上。结合工厂实际生产情况，对柔性装配任务管理模型进行研究，验证装配制造执行系统 SaaS 化的可行性。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 复杂产品装配的研究现状

复杂产品是指客户需求复杂、产品组成复杂、产品技术复杂、制造过程复杂、项目管理复杂的一类产品，如航天器、飞机、复杂机电产品、武器系统等。装配制造企业根据产品的类型和工艺的组织形式分为集中装配和离散装配。离散装配的产品一般具有较为复杂的产品 BOM，由大量不同类型的零部件按照规定的功能和要求组装起来^[3]。复杂产品的装配是典型的离散型装配生产模式，具有生产工艺复杂、单件小批量生产、装配周期长且生产不均衡、生产返工返修作业多等特点，使得产品装配的各项任务之间的先行装配关系非常复杂，装配过程数据难以描述且缺乏统一规范的信息模型^[4]。国内外学者已经就复杂产品装配这一课题做了许多的研究。

钱芳，扈静等人^[5]针对机械产品装配过程中的实时物料配送问题，利用物料跟踪管理、数据反馈机制以及物料配送计划，研究与制造执行系统结合的实时物料配送方法，实现装配车间的实时、小批量配送。

傅玉颖，潘晓弘等人^[6]针对装配制造企业供应链运作过程的不确定性，探讨了装配生产过程中协同组件生产批量和再订购点的制定方法，用模糊理论对生产协同问题进行优化求解。

北京理工大学的刘检华、林晓青等人^[7]针对装配制造企业的单件小批量离散生产特点，引入 workflow 管理引擎，探讨了基于 workflow 工作的装配车间的生产控制方法，实现了装配过程和制造数据的统一管理。

Limère, Veronique^[8]针对装配过程齐套配套和现场配送物料的物料供应系统，设计

了任务预齐套和现场备料两种物料供应系统，并且对这两种物料供应系统进行了评估，结果表明使用混合策略具有一定的优势。

常智勇、赵杰、莫蓉等人^[9]以复杂产品的装配现场控制为目标，通过数字化的手段，应用三维数字建模，提出了一个适用于复杂产品装配的数字化管理平台并且开发了原型系统。

刘炜、刘峰等人^[10]针对航空航天企业装配现状，提出了基于搬运机器人的智能化装配生产模式，通过工位的柔性集成技术实现设备重用和装配工艺兼容，保证装配产品的质量。

Hui Cheng, Yuan Li 等人^[11]针对复杂产品装配过程中由于缺少装配资源无法完成装配过程的问题，研究了一种基于遗传算法和蚁群算法的装配顺序规划方法，优化装配路径，最后开发了一个仿真系统装配顺序和装配路径验证算法的有效性。

Wang Jia Li, Mao-Gen 等人^[12]针对复杂产品装配过程难以控制的问题，设计了一种异常控制策略，建立复杂产品装配过程的实时状态模型。最后设计了一个基于工厂现场的异常控制专家系统。

上述的国内外文献综述表明，现阶段对于复杂产品装配的装配过程研究已经有了深入的进展。但是关于复杂产品装配任务管理的研究依然停留在装配过程物料管理和装配物料配送方面。对于多企业之间建立统一的装配信息模型缺乏相关的研究。然而建立装配过程统一信息模型是实现装配制造执行系统的 SaaS 模式化的关键，因此对装配过程进行分析，并且利用 PSL 工具建立装配过程统一模型是本论文研究的重点之一。

1.2.2 制造执行系统研究现状

随着互联网信息时代的进步和先进制造技术的发展，制造型企业开始使用以企业资源计划 (Enterprise Resource Planning, ERP) 为代表的管理信息系统管理企业的生产制造。但是随着市场需求的变化和企业竞争的加剧，制造企业对制造过程的要求不断提高，企业不再仅仅关注计划的执行结果，而是将重心转移到了计划的执行过程，制造执行系统 (MES) 应运而生。制造执行系统的产生有效的实现了制造过程中的的数据传输和共享，弥补了计划和控制系统的断层，同时加强了制造企业对生产过程的管理和控制。制造执行系统的概念兴起于上个世纪 90 年代，20 多年以来国内外学者对 MES 系统的发展趋势及应用进行深入的研究与分析。

杨浩、朱剑英^[13]等人针对分布式制造执行系统的建模,提出了一种模块化、可配置集成的基于多 Agent 的 MES 系统模型,并详细分析了 MES 的功能模型,实现了 MES 系统框架。

北航杨建军教授^[14, 15]的团队针对企业的敏捷制造管理系统的研究现状,分析了制造执行系统各模块的功能和特点,提出了先进的 MES 系统思想构建敏捷车间生产管理系统,同时构建了基于全能体的 MES 解决 MES 系统的敏捷性。

周国利^[16]等人针对面向订单生产的制造企业,分析了制造企业的功能需求和实施环境,设计了基于订单装配的 N 公司的制造执行系统。

Hwa Gyoo Park 等人^[17]针对当前 MES 系统庞大、冗杂、单一的特点,采用分布式面向对象技术,提出采用系统方法和 CORBA 基础设施来开发 MES 系统,将 MES 变为开放、模块化、分布式和可配置的系统,并且开发了原型系统用来验证。

王炳刚、周伟、饶运清、何非^[18]等人对传统制造执行系统的不足和可配置制造执行系统进行了研究,设计了装配流程配置过程的数据模型,提出装配流程配置的方法,根据背景企业的需求,介绍系统各模块的功能,对产品制造流程进行配置,设计了系统软件架构,并对系统进行了开发实现。

沈晓杰、李郡等人^[19]基于 MES 的统计过程控制系统,利用 MES 系统的数据采集能力,解决了大多数企业面临的数据采集不实时的问题,并且提高了企业解决质量问题的效率,帮助企业实现了由质量事后检验转变成事前预防。

国内外专家学者对 MES 系统的研究不仅集中在 MES 系统的应用扩展、以及通过系统方法对传统 MES 系统的重新设计和优化,同时也分析了复杂产品的装配过程,对如飞机、发动机、汽车这样的复杂产品装配过程应用 MES 系统进行了研究。

吴锋、马里等人^[20]针对飞机生产装配过程复杂导致生产计划与调度困难等问题,通过对装配任务调度系统的基础上,提出飞机装配作业调度算法,并且应用到制造执行系统的生产模式中。实现了生产调度优化,并能快速组织装配物料完成生产装配任务。

Gandhi, Prakash 等人^[21]为了提高装配效率、缩短生产周期、提高质量,采用基于 PC 的自动化技术和数据库技术来控制柔性装配制造执行系统,实现了功能模块和软件架构的开发。

Z Yang, PK Wong 等人^[22]针对混合模型装配生产线适应产品快速变化的需求,提出了基于 RFID 新型的 MES 系统,并且提出新的启发式广义拉格朗日分解算法用于模型优化。

Jagdale, Sanjaykumar 等人^[23]设计了一种智能高效的 MES 系统,用于从装配工厂车

间采集数据,提出了 NIRMAN 工厂信息系统的设计,控制和监控复杂的装配生产过程。

综观国内外关于 MES 系统的研究,可以发现对装配 MES 系统的研究停留在 MES 系统的优化控制生产过程以及对 MES 系统架构的优化,丰富 MES 系统的功能模块,但是 MES 系统的应用场景一直停留在单一工厂封闭式应用生产的场景,现阶段随着智能制造和云计算的提出,制造业现在偏向于多企业协作生产共享资源的趋势,传统的 MES 系统已经不能满足日益增长的市场和多变的产品需求,因此,研究将装配制造执行系统部署到云服务器上将是本文的重点之一。

1.2.3 SaaS 服务发展研究现状

随着共享经济在全球的迅速普及和云计算的崛起,一种新的软件服务应用模式——软件即服务 (Software as a service, SaaS) 开始引起广泛关注。SaaS 是软件通过互联网为客户提供软件服务的应用模式,软件服务提供商将自己的软件部署在远程服务器上,客户根据自己的需求通过互联网定制所需要的软件服务。通过 SaaS 模式,企业之间也能够联合制造生产,满足了云制造和“中国制造 2025”对制造型企业提出的整合制造能力和制造资源的需求。作为一种软件服务模式,国内外学者已经进行了一系列的研究。

Demirkan, Haluk, Cheng Hsing 等人^[24]针对 SaaS 模式下的两个核心竞争力——应用基础设施提供商 (Application Infrastructure Provider, AIP) 和应用服务提供商 (Application Service Provider, ASP) 对系统的动态影响,研究不同的协调策略下这两者对 SaaS 系统的性能的影响。

Bezemer, Zaidman 等人^[25]针对 SaaS 模式实现中多租户的问题进行了研究,提出了一种新的软件架构原则,充分利用制造资源,多个租户共享相同的应用程序和数据库实例。提高了硬件资源的使用率和维护的便利性,同时指出错误的架构可能会导致多租户维护的噩梦。

刘士军、向坚持等人^[26, 27]针对中小企业之间的业务协同问题,构建了基于 SaaS 模式的中小企业协同服务支撑平台,研究了基于 Portal 的服务集成方法和基于 SaaS 服务实现企业协同业务的方法,最后通过一个纺织制造企业的订单设计制造协同案例验证基于 SaaS 服务的业务协同系统的可行性。

李卫、张云勇等人^[28]针对电信运营商的 SaaS 业务发展问题,分析了运营商应用 SaaS 模式发展业务的优缺点,通过分析目前开展 SaaS 模式下的电信业务发展情况,提出电

信运营商基于 SaaS 模式发展业务的建议。

范卫锋、吕锋等人^[29]以工装过程为研究对象,分析了大型装配制造企业的生产特点,以多租户个性化业务流程定制为目标,提出了基于 SaaS 模式的工装系统,并进行了系统逻辑结构设计、业务流程设计以及验证模型的实现。

倪能等人^[30]设计并实现了一种 SaaS 化的学校信息管理系统,该系统利用 SaaS 模式的优势弥补了传统软件应用模式下的弊端。该研究主要用到的关键技术是数据库相关技术、数据模型的设计、数据安全等。学校的信息管理系统相对于制造业管理来说,业务流程较为固定,简单。

罗日新等人^[31]实现了一种面向 SaaS 应用的多租户数据管理系统。该研究设计多租户数据管理的分层模型,屏蔽了多租户数据管理的具体实现。并且针对租户对于业务功能可配置的需求,提出了流程定制方法,实现多租户下的业务定制。该系统在脑卒中电子健康档案管理系统中得以应用。

李新明、廖貅武等人^[32]针对 SaaS 服务链中 AIP 和 ASP 间的协调问题,提出协调契约协调两者间的矛盾,实现 SaaS 软件模式下的服务供应链最优化,并通过数值模型验证了模型的有效性。

除了上述一些学术性机构发表的文献,许多行业内的巨头公司将 SaaS 应用到企业信息化和电子商务中取得了巨大的成就。著名的 Salesforce 公司^[33]通过应用 SaaS 模式商业模式,借助 Ajax 技术,切入了多数企业必须的客户关系管理系统 (Customer Relationship Management, CRM),在 CRM 领域取得了领先地位。德国软件公司 SAP^[25]推出了 SaaS 模式的产品 Business By Design,这是目前最全面的 SaaS ERP 产品。

自从 2003 年随着 J2EE 及 .NET 技术出现之后,在线租用应用软件技术取得了突破,国内外研究学者对 SaaS 应用模式的特点和模式应用的研究已经取得了巨大的进步,但是在制造执行系统领域,没有特别深入的研究,因此将柔性装配制造执行系统 SaaS 化将是本课题研究重点之一。

1.3 研究目的及内容

1.3.1 研究目的

本课题旨在验证柔性装配制造执行系统运用 SaaS 应用模式架构的可行性,并且研

究柔性装配制造执行系统 SaaS 化的关键技术，并且实现柔性装配制造执行系统中任务管理模块 SaaS 化。

具体来说，就是围绕基于 SaaS 应用模式的柔性装配制造执行系统展开。研究基于 SaaS 模式的软件开发方法，针对 SaaS 模式对多租户和服务定制化的要求，构建统一的装配制造执行系统任务管理的统一模型，利用微服务的系统框架将制造执行系统的模块拆分成不同的服务，根据不同制造企业现代化智能化程度和业务提供不同的服务配置功能。基于 SaaS 应用模式，将制造执行系统部署在云服务器上，验证柔性装配制造执行系统 SaaS 的可行性。

1.3.2 研究内容

本课题主要是采用 PSL 和 PSLX 统一建模工具对柔性装配制造执行系统中的数据建立信息模型和过程模型，运用 SaaS 的系统架构和微服务的系统框架对柔性装配系统优化。最后通过对柔性装配制造执行系统的任务管理模块 SaaS 化验证该思路的有效性。研究内容具体分为以下四个方面：

（1）SaaS 应用模式关键技术研究

研究 SaaS 应用模式的运用场景和技术难点，分析 SaaS 应用模式下对软件开发的要求，针对 SaaS 化中的多租户和功能可配置的特点对装配制造执行系统的功能模块进行划分，并且修改底层数据库模型。

（2）基于 PSL 和 PSLX 建立柔性装配制造执行系统统一模型

为了适应不同制造企业用户的场景，采用 PSL 和 PSLX 对制造执行系统的数据模型定义，并且分析不同租户对装配系统的需要，构建装配制造执行系统统一模型。

（3）SaaS 模式下柔性装配系统任务管理的业务流程分析和实现

为了适应 SaaS 应用模式对软件的要求，分析装配系统中任务管理的业务流程，根据 SaaS 化下服务可配置的要求，将软件分为不同的子服务，基于建立的统一模型实现各个模块的功能需求。

（4）微服务系统框架的搭建

研究微服务系统框架的技术方案，采用微服务的系统框架，将装配系统任务管理功能模块服务化，将服务与服务之间解耦，并通过服务解耦的设计实现功能服务可配置化。

1.4 研究内容与章节安排

根据论文的研究内容与目标，安排本文结构如下：

第一章，绪论。首先论述课题的研究背景和研究意义，然后对复杂产品装配、制造执行系统和 SaaS 服务发展的国内外研究现状进行分析，并且进行了相关比较。之后阐述了文章研究的主要内容和章节安排，并由此得出了课题研究的技术路线。

第二章，基于 SaaS 的应用软件开发模式和关键技术。首先介绍了 SaaS 的基本概念、优势和成熟度模型，并且简单介绍了基于云计算的另外两种模式——IaaS 和 PaaS。之后研究 SaaS 服务软件研发方法，主要从多租户的数据管理模式、多租户协作生产、软件服务定制化以及装配过程统一模型几个方面研究 SaaS 模式软件开发的关键技术。

第三章，基于 SaaS 的装配任务管理模式的系统架构设计。首先从框架实现的角度，设计 SaaS 化柔性装配制造执行系统的整体技术方案，选择微服务的技术框架来实现 SaaS 模式。然后介绍微服务各个模块的功能，并且根据微服务系统框架思路，结合柔性装配任务管理业务流程，将系统划分成各个系统服务模块。最后研究在微服务框架下的各个服务模块远程调用的方法。

第四章，基于 SaaS 的装配任务管理系统功能开发。首先分析柔性装配制造执行系统各服务模块的业务流程，结合 SaaS 模式的设计方法，构建各个服务的功能模型。然后结合多租户的设计原则，参考 PSLX 中对任务管理各个模型的定义，建立 SaaS 下的柔性制造系统的统一信息模型。最后建立柔性装配系统的过程模型，并且对传统的 MRP 算法做出了改进。

第五章，系统实现与验证。首先对系统的实现环境和运行环境做了详细的介绍，然后对系统内部的各个服务模块的实现进行了详细的介绍。最后对系统的功能进行验证，验证装配制造执行系统任务管理的业务流程的完备性和正确性，验证 SaaS 模式下的多租户的独立生产和协作装配以及验证多租户服务定制化的实现。

第六章，总结与展望。对全文的研究内容总结并且对未来的工作进行展望。全文的技术路线结构图 1 所示。

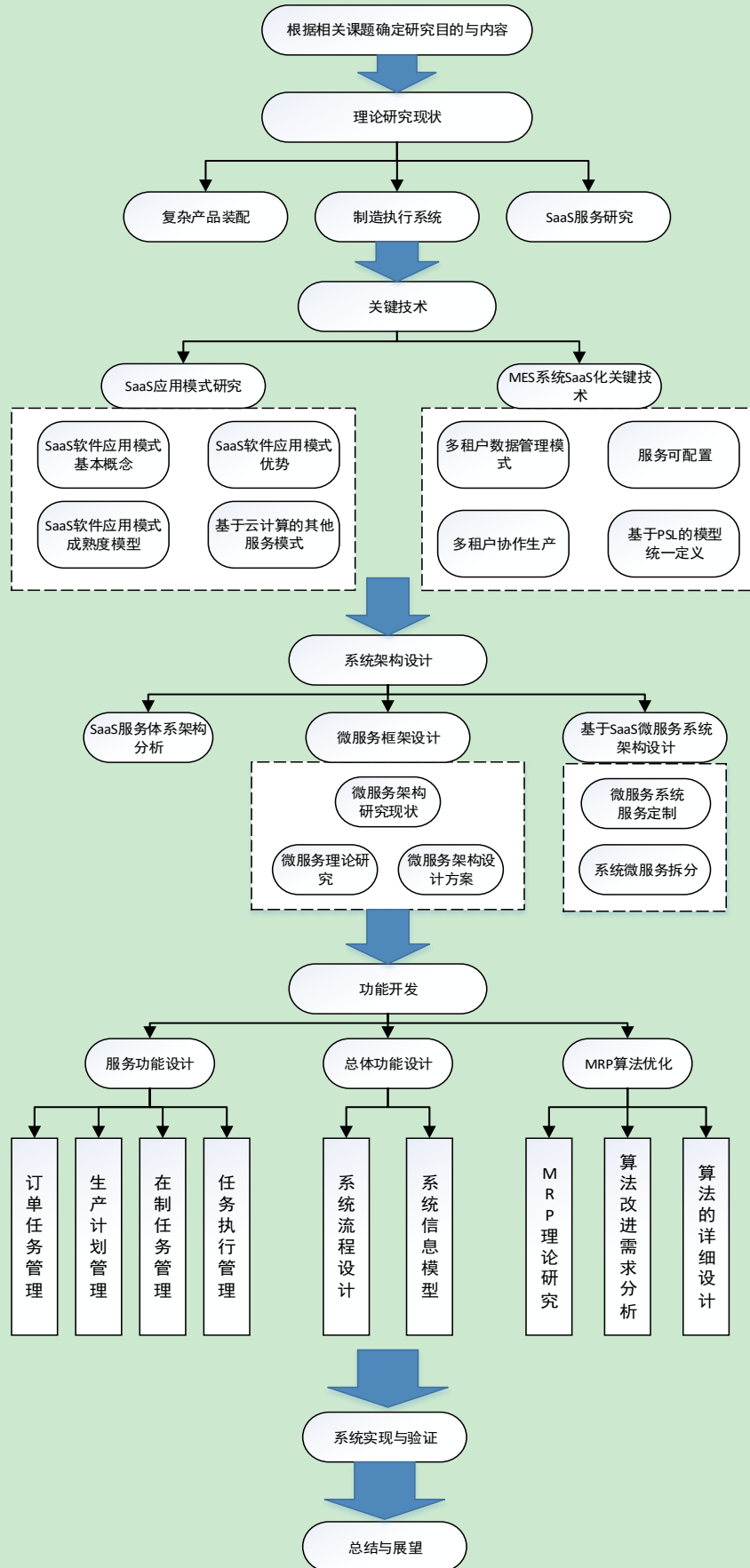


图 1 本文技术路线

第二章 基于 SaaS 的应用软件开发模式和关键技术研究

2.1 SaaS 应用模式介绍

2.1.1 SaaS 应用模式基本概念

SaaS^[32]是 Software-as-a-service（软件即服务）的简称，是一种通过互联网提供软件服务的创新型应用模式，随着通信技术和云计算等技术的应用和发展，SaaS 应用模式开始兴起。与传统的软件应用模式不同，如图 2 所示，企业用户不需要购买软件并在本地安装软件应用，而是通过服务提供商租用服务软件来管理企业的生产经营。软件服务提供商利用先进的互联网技术为企业用户搭建一个信息化管理公共平台，并且负责所有的软件搭建和维护工作，企业可以根据自己的实际需求，包括软件的功能、软件的租用时间、软件的用户量等，向软件服务提供商定制软件服务。用户使用软件的方式转变为租用软件服务，不再需要为购买软件支付巨额费用，也不需要搭建软件和硬件运行平台。同时可以通过有效的技术措施保证企业用户的保密性和安全性。当企业的需求发生改变时，不需要重新购买另一套软件，企业只需要在服务提供商的服务提供平台上配置其他需要的服务即可。

SaaS 应用模式一般有三层含义^[33]：在表现层，SaaS 是一种业务模式，意味着租户可以通过租用服务提供商提供的应用软件服务，解决软件部署和维护的问题，降低了企业用户购买软件的成本；在接口层，SaaS 是一种统一的接口方式，可以方便用户和其他应用在远端进行模块之间的调用，实现服务分离，业务组合，同时不仅是在业务上的一种接口调用，在云计算的三个层次中，位于上层的 SaaS 服务也能使用 IaaS 以及 PaaS 的服务，实现云计算架构的完整实现；在应用实现层，SaaS 是一种软件能力，在软件的实现过程中，需要考虑到资源和能力的共享，使得一套软件能够方便多个租户共同使用。

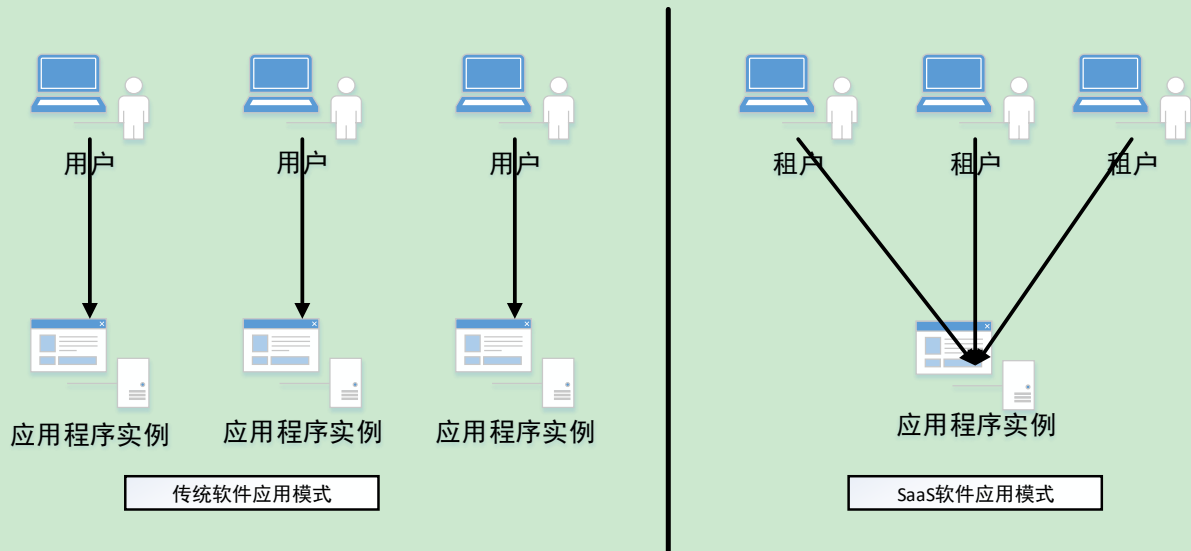


图 2 传统软件与 SaaS 软件应用模式对比图

2.1.2 SaaS 模式优势

SaaS 是一种基于互联网的新兴软件应用模式，与传统的应用模式相比，有以下几个方面的优势。

（1）即订即用。SaaS 模式软件的部署和运维不需要用户的参与，而是部署在软件服务提供商的统一服务器上，用户通过租赁的方式获取软件服务，取消了传统软件的授权收费方式，降低了用户在软硬件方面管理和维护的费用。

（2）成本较低。传统软件的费用一般包括产品费用和后期维护费用，甚至有些软件的后期维护要比购买的成本还要高。而对于 SaaS 应用软件，用户购买的只是服务，不必给软件的升级维护付出额外的费用。因此，低成本的 SaaS 软件服务在中小型企业中很受欢迎。

（3）使用方便。传统软件服务模式受限于控件和时间的限制，需要在用户本地的服务器上安装部署软件，并且通过授权才能使用，一旦软件使用过程中需要维护或者用户对软件提出了新的需求，那么就需要软件研发人员实地调试并重新安装部署。而租户可以在任何时候任何地点通过互联网使用 SaaS 软件服务，从而为租户带来极大的便利。

（4）按需使用。SaaS 模式应用软件只需要提供一套软件系统可以同时支持多个用户，用户根据自己的需要定制所需的服务。如果用户的业务需求发生了变化，可以通过配置 SaaS 软件应用服务来满足业务需求。

（5）安全可靠。SaaS 模式应用软件运行在统一的服务器中，服务提供商采用安全

的数据备份和数据中心等手段保证服务器端的安全可靠，统一管理。而用户是通过浏览器使用软件服务，即使客户端被病毒入侵，也不会影响到 SaaS 软件服务器端的数据安全。

2.1.3 SaaS 应用模式的成熟度模型

微软架构师 Frederick 和 Gianpaolo^[34]就 SaaS 软件研发现状，确定了 SaaS 软件应用的三个特性：可配置、高性能和可扩展。这三个方面决定了应用的可用性、健壮性和灵活性。一般的 SaaS 应用架构可以根据这三个特性划分成四级应用成熟度。如图 3 所示的四种不同的 SaaS 应用架构给出了不同的成熟度模型^[35]。

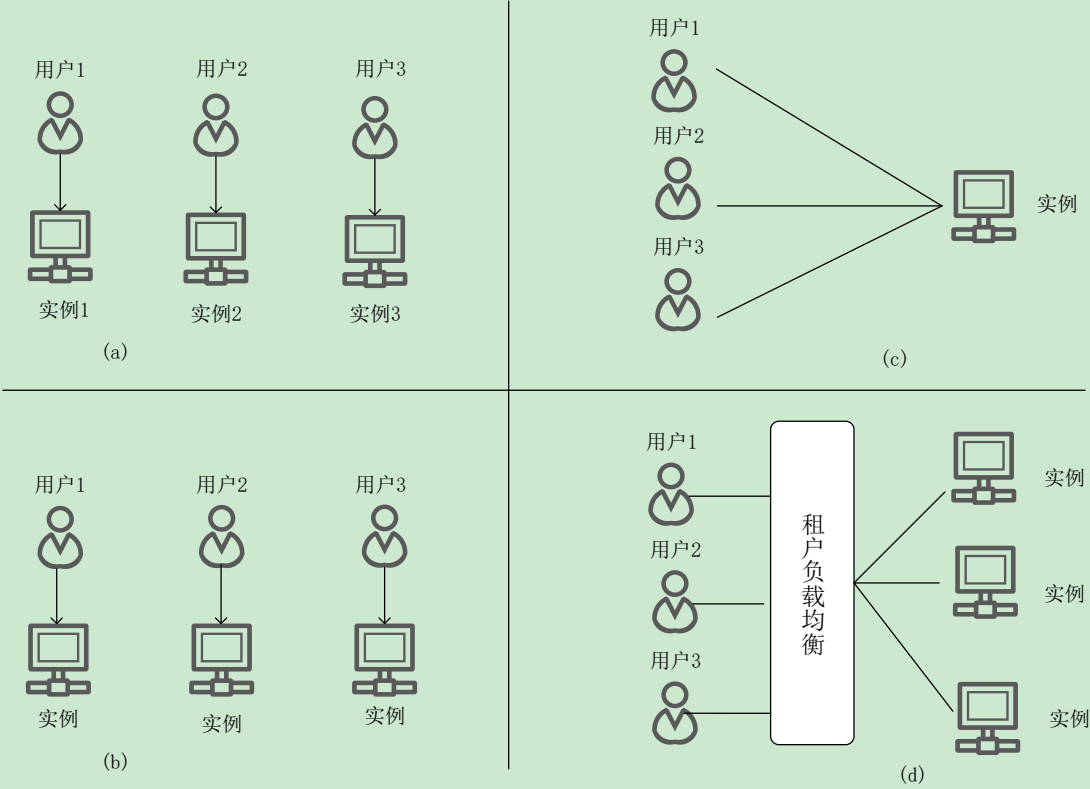


图 3 SaaS 软件成熟度模型

如图(a)所示,初级成熟度的 SaaS 软件与传统的应用软件供应商(Application Service Provider, ASP)提供的软件应用模式相同,在这一级的软件成熟度模型中,软件服务提供商为每个客户设计一个应用实例,并为其部署。每个客户分别拥有特定的应用程序实例,运行在 SaaS 服务器上。这一级成熟度的应用软件与传统的软件应用模式类似,每一位客户的应用实例都是独立的,不同的实例之间是相互隔离的。不同的是软件服务提供商将不同的软件实例统一部署在 SaaS 平台的服务器上。

如图（b）所示，第二级成熟度的 SaaS 要求实现软件的可配置性。在第一级的基础上对用户的应用实例采用相同的代码，服务提供商根据用户的需要提供相应的配置，满足不同客户的需求。当客户对软件的功能发生改变时，软件服务提供商只需要更改少量代码就能满足客户需求。但是客户之间的应用程序仍然是独立的。

如图（c）所示，第三级成熟度上，单实例的应用程序可以支持多租户的需求，也就是多个租户共享同一个软件服务。软件服务提供商通过授权和安全性策略使不同客户的数据能够彼此分开。这种软件架构不再需要服务提供商为每个客户部署专门的单一服务器，充分利用计算机资源，降低成本。

如图（d）所示，第四级成熟度是最高 SaaS 软件应用成熟度，支持可扩展的多租户 SaaS 应用架构。通过负载均衡将客户的服务请求分配到不同的服务器上，通过多个应用实例来分担用户的大量访问，可以让应用软件水平无限扩展，提高软件的灵活性。

2.1.4 基于云计算的其他服务模式

本课题的研究内容围绕将柔性装配制造执行系统实现 SaaS 应用模式这一课题展开，旨在利用先进的云计算平台技术软件，为装配制造企业搭建统一的柔性装配系统软件服务平台。而云计算中云的概念包括三个层次，分别是应用云、平台云以及基础设施云，根据美国国家标准与技术研究院（NIST）提出的云架构理论，云架构包含应用层（Application layer）、平台层（Platform layer）和基础设施层（Infrastructure layer）3 个基本层次。每层的功能都是以服务的形式为用户提供，因此云服务的类型又可以分为 3 层，即基础设施即服务（Infrastructure as a service, IaaS）、平台即服务（Platform as a service, PaaS）、软件即服务（Software as a service, SaaS）。因此，有必要介绍云计算的其他两种服务模式——基础设施及服务（IaaS）以及平台即服务（PaaS）。

基础设施即服务是指将硬件设备等计算资源封装成服务，通过租赁的形式提供给租户使用，允许租户动态申请和释放节点，有着复杂的计费方式和计费模型。运行在 IaaS 的基础平台之上的服务器是所有租户共享的方式运行，因此计算资源的使用效率很高。

平台即服务是指以服务的形式提供给研发人员研发和部署应用程序的平台，租户可以通过这个平台管理部署的应用程序。这种平台一般包括数据库、中间件以及其他开发所需的工具，所有的工具资源都是以服务的形式通过互联网提供。

在软件的开发过程中，云计算服务提供商只需专注于某一层服务架构开发需求的软

件服务，不需要完成三层服务架构的全部设计。如 Amazon 云计算服务 EC2^[36]，Google 的 GAE 和 Salesforce CRM 就只分别向用户提供基础设施层服务、平台层服务和应用层服务。位于云架构上层服务的提供者可以利用下层的架构来实现云计算服务架构，无需服务提供商全部实现。本课题研究对象是基于应用层架构服务软件的设计，因此重点在于对 SaaS 架构的研究与实现。

2.2 基于 SaaS 模式的装配制造执行系统研发关键技术

2.2.1 多用户数据管理模式

现代装配制造企业的生产完全以市场需求为导向，为了加快对市场需求的响应。企业不再以单一产品装配功能为主，实现了多企业联合生产，共享生产资源 and 功能。基于 SaaS 模式的装配制造执行系统面向的是整个装配制造企业集群，服务使用的受众愈多，意味着数据量愈大。基于 SaaS 模式的装配制造执行系统是部署在服务器集群中，通过网络集中访问和调用服务，成本远低于软件部署在本地的情况，同时用户与数据在一定程度上是隔离的^[37]。所以 SaaS 模式下必须保证租户数据的安全可靠。同时服务是以单一实例为多用户服务，并且考虑到制造企业之间的协作和资源共享，必须考虑到用户间数据的相互隔离和数据共享。目前有以下几种管理数据的方法：

(1) 完全独立架构

租户共享 SaaS 软件服务提供商提供的服务器上的工具和应用程序，但是使用相互独立的数据库，实现数据在物理存储和业务逻辑层面同时隔离，这也是数据最安全的存储方式。因为数据存放在不同的物理机上，不用担心个别租户对数据库底层数据结构的改动（如建立数据表的索引、触发器或视图等）对其他租户的数据造成的影响。同时对个别租户的数据备份和恢复也比较快，不用备份和恢复其他所有用户的数据库，一旦发生物理机的损坏或者宕机，也不会造成整个 SaaS 服务的租户同时离线的情况。但是这种方式显然导致 SaaS 服务管理的数据库过多，从而使得使用的物理机等硬件设备的数量增多，意味着高额的硬件成本。也就是通过高成本换取最佳安全性。

因此，这一数据库应用模式是和对数据有着绝对安全性要求的大型企业，如银行、医疗机构等。

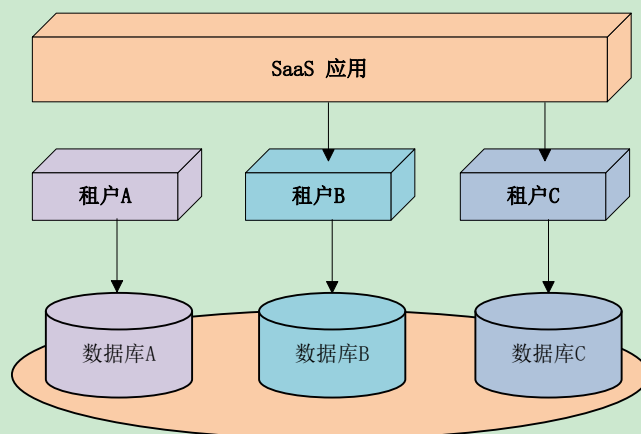


图 4 完全独立数据库架构

（2）部分独立架构

该模式是在完全独立数据库架构的基础上扩大数据共享程度，所有用户的数据共享同一数据库，但是为每一个用户创建各自独立的表结构，形成独立架构。这种模式下，可以使用较少的数据库为大量的用户服务，降低硬件资源成本。独立的表结构也能适应不同用户的需要，扩展数据模型比较方便。但是因为需要为每一个用户创建独立的表结构，使得数据库中表数量过多，在数据安全性和备份恢复方面增加了复杂度，增加管理难度。

因此，此模式适用于业务逻辑不复杂，并且数据量和用户不多的应用软件服务。

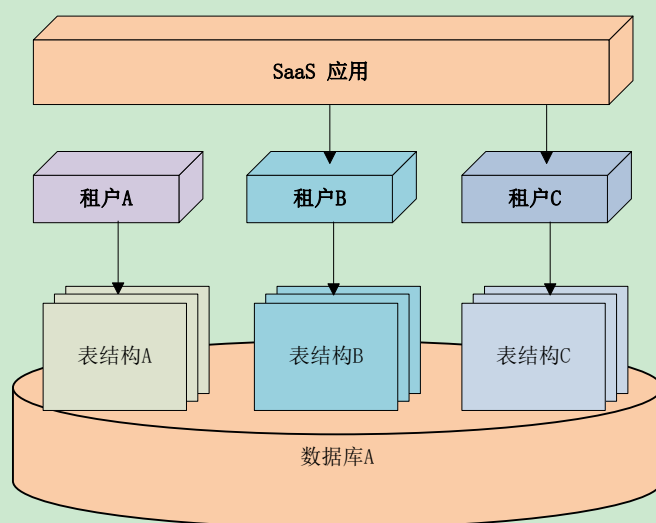


图 5 部分独立数据库架构

(3) 完全共享架构

该模式下所有用户的数据完全共享，所有用户共享数据库和数据表。多个用户相同数据模型的记录存储在同一张表中，并且通过用户的 ID 或者企业的域名作为不同用户数据的区别。相对于前两种数据库架构，这种共享模式硬件资源成本最低，支持大量用户。但是因为所有用户共享数据库数据表，导致数据的安全和维护工作变得复杂。

因此，该模式性价比最高，适用于以较少服务器满足大量用户的应用场景。

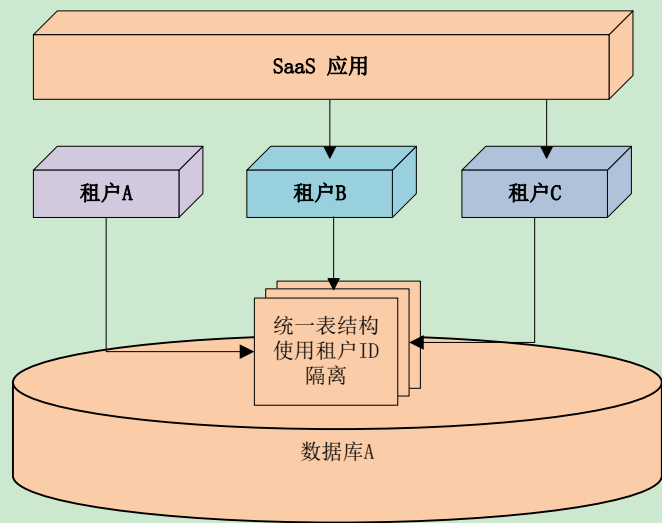


图 6 完全共享数据库架构

(4) 三种方案的比较

综上所述，三种数据存储方案各有其优缺点，要根据具体情况选用最合适的方案。三种方案的比较如错误!未找到引用源。。

本课题面向的是制造业中众多的装配企业，有大量的潜在用户，考虑到硬件资源成本的问题，完全独立架构不适合装配系统的数据库设计。其次考虑到装配系统流程复杂，数据模型较多，需要定义大量的数据表保存数据，且有历史数据的累计，为每一个用户单独设计数据表是不现实的，相对于数据表的增加，数据记录的增加更能减轻数据库的负载。其次，完全共享数据库架构可以大大节省硬件成本，降低维护难度。因此完全共享的数据库架构更适合本课题装配系统的研发。

表 1 多租户数据库模式比较

	独立数据库	部分独立数据库	完全共享数据库
共享级别	低	中等	高
用户数量	少	中等	大
使用成本	高	中等	低
数据安全性与隔离	高	中等	低
数据可配置性	直接实现	直接实现	需要特定方式实现
数据备份与恢复	复杂	中等	简单
硬件开销性价比	低	中等	高

2.2.2 服务可配置

当前各个装配制造企业的装配现代化程度不一，并且装配的业务流程也都不尽相同。因此当前的柔性装配制造执行系统都是独立运行于各个制造企业之中，无法达到数据的共享和业务的平移流转。基于 SaaS 的装配系统是以单一的装配 MES 实例为云平台上众多的制造企业服务，但是每个装配制造企业用户对于服务的需求也不尽相同，也就意味着 SaaS 装配系统软件需要为每一个企业用户提供与传统应用软件实例相同的服务，也就是需要实现软件功能的可配置性。每个用户根据自己企业的装批生产流程和现代化程度定制相应的服务，并且保存配置信息。SaaS 软件通过对企业用户的身份验证，提供相应的功能。

应用软件实现 SaaS 模式的前提就是为用户提供一个应用软件模板，使用户能在应用模板上定制需要的服务，模板以标准的应用服务为基础实现。模板中一部分应用为所有用户都需要的应用，另一部分应用则可以由用户根据自己的特殊需求定制。用户可以定制的服务可以称为可配置服务点^[38]。装配制造企业用户需要租用服务时确定需要的配置服务点，完成服务配置工作，得到满足企业需求的软件应用服务，并将企业用户的相关配置信息存储到数据库中。在完成企业用户的服务配置之后，企业内工作人员需要根据人员的权限配置需求的界面、服务等得到最终的企业应用服务。

根据现阶段装配制造企业的业务流程和功能需要，本课题研究的服务可配置点应用从三个方面实现：

(1) 装配制造业务服务配置，装配制造企业间的装配业务流程不同，需要对装配过程中的订单管理、生产计划管理、在制任务管理、现场任务执行管理等功能组成部分进行专项配置，实现每个装配企业的装配业务流程标准，因此设置了 SaaS 软件超级管理员为每一个企业级租户配置信息和功能，如图 7 所示：

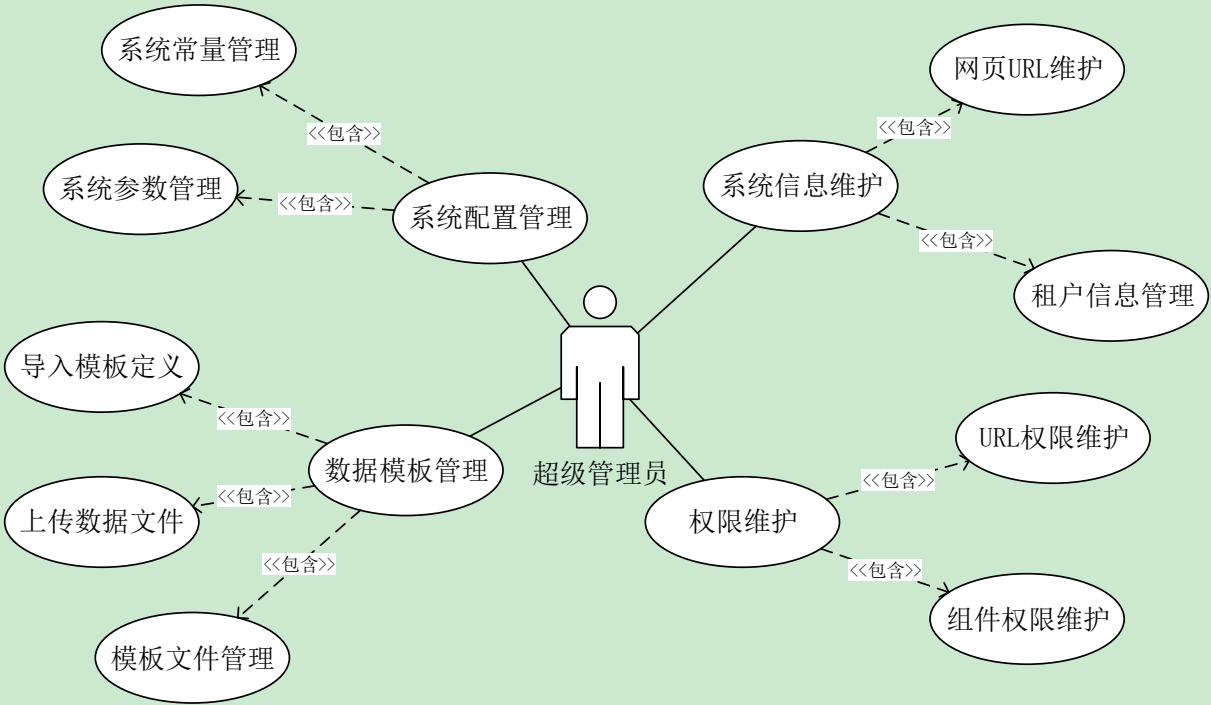


图 7 超级管理员用例图

(2) 企业内部员工服务配置，每个装配企业都有一定的员工数量，每个员工都有各自的角色和职能，因此需要为每一个员工配置相应的界面和功能，系统通过权限控制和服务认证进行控制管理。为每一个企业租户设置普通管理员权限，设计普通管理员用例图如图所示：

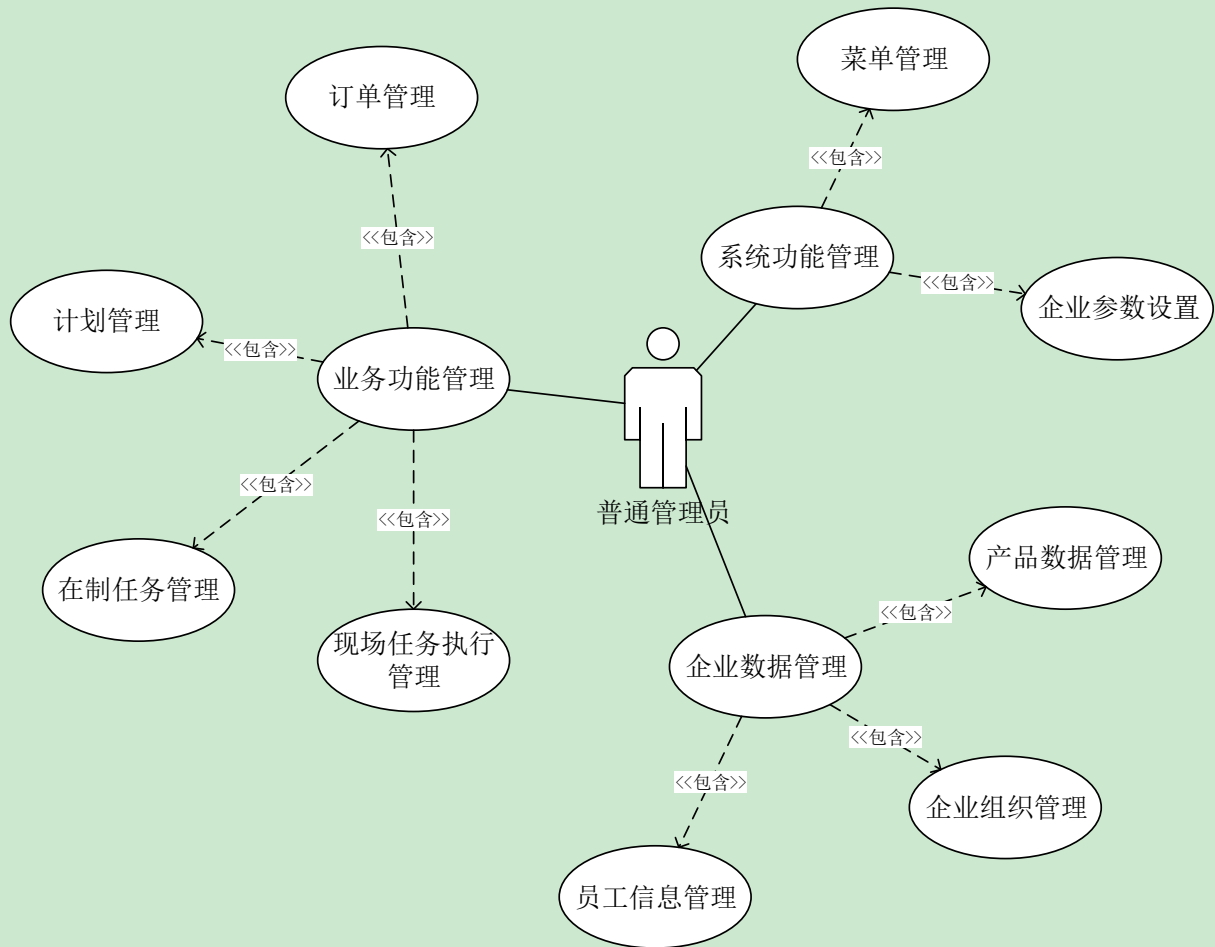


图 8 普通管理员用例图

(3) 多租户权限配置

多租户的权限控制是实现功能可配置的关键技术，通过对用户访问界面的控制，可以实现功能对部分用户关闭的需求。

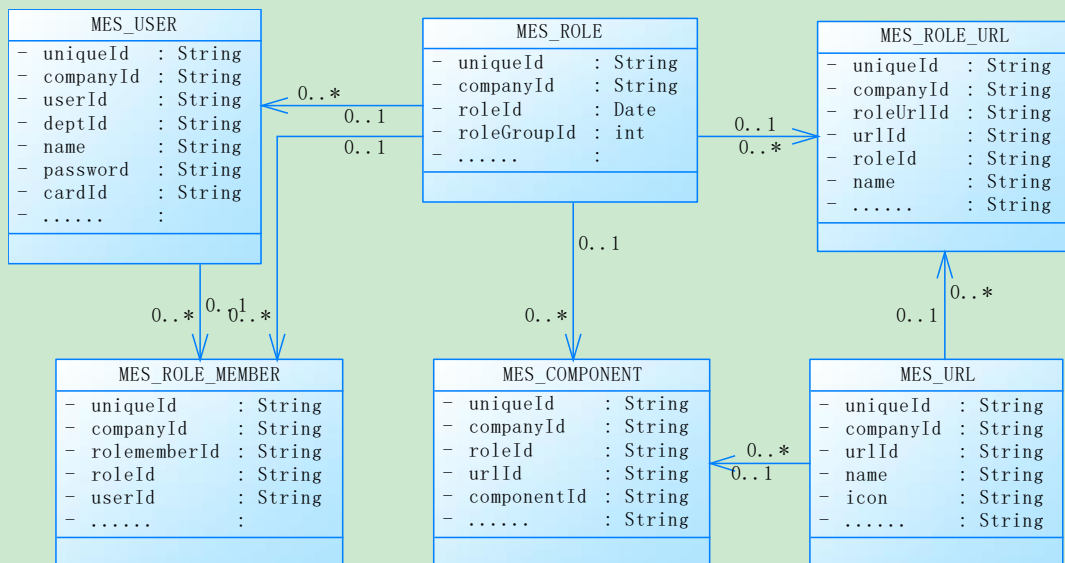


图 9 系统权限管理信息模型

权限控制数据模型如图 19，权限主要分为两层，一层是页面级的权限控制，一层是控件层的权限控制。页面级权限控制是基于 MES_ROLE_URL 通过角色的 url 权限进行页面访问的控制。控件层的权限控制信息存储于 MES_COMPONENT 数据表，通过页面中控件的主键来控制访问权限。登录后权限控制过程如图 20。首先通过用户与角色关联表 MES_ROLE_MEMBER 查找用户的角色信息，因为角色与用户的关联关系是一对多的，所以可以获取一个用户角色列表。根据角色列表 MES_ROLE 列表可以从角色 URL 数据表 MES_ROLE_URL 获取 URL 信息，最后通过查看 MES_COMPONENT 界面控件权限禁止表可以获取完整的 URL 权限信息进行页面初始化。

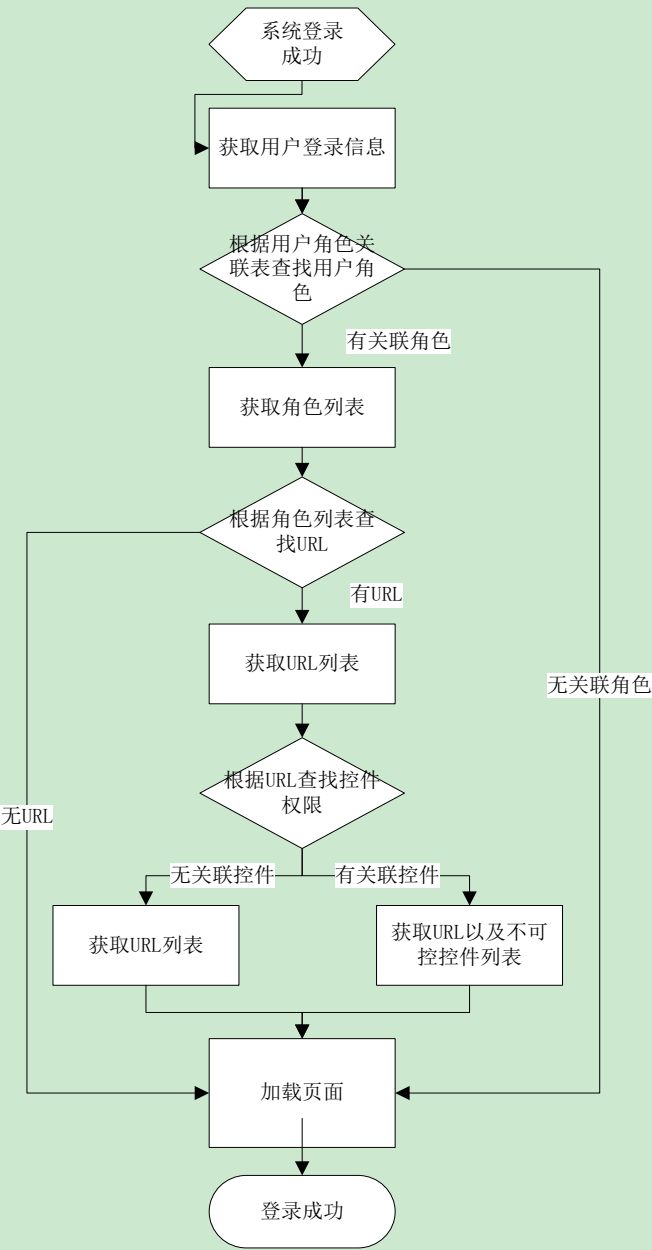


图 10 用户访问权限控制图

用户根据自己的用户名密码正确登录之后，将会在数据库中查找当前用户的角色和企业，如果没有相关角色，那么说明企业租户没有为当前用户分配权限，是不可访问的状态。其次，如果找到了人员角色，那么根据人员角色找到可以访问的 URL 列表，通过 URL 查找 BDF2 的相应空间，最后完成界面的渲染，返回给登录用户，实现用户访问权限的配置。

2.2.3 多租户协作生产

现代装配制造企业为了适应市场的需求，不再以满足单一产品的装配为目标，需要加强多企业之间的联合生产，共享生产能力和生产资源。如飞机的生产装配过程，飞机的装配可以分为构件装配、部件装配和总装配等阶段。构件装配是将一组零件装配成比较简单的构建，如翼梁、翼肋和隔框等；部件装配是将一组零件和构件装配成比较复杂的部件，如机翼、垂尾、机头、机身前段、机身中段、机身后段等；总装配是将所有部件组装成整架飞机。这些装配过程一般都是专门化装配生产，最后在总装厂进行总装配生产。SaaS 服务是面向整个区域的分布式应用服务，充分实现区域内的制造资源的共享，解决制造资源不完备的问题。因此采用 SaaS 模式的软件研发思路能够完全满足多租户协同制造的应用场景。但是，传统的装配制造执行系统是针对企业单一产品生产过程，任务模型和装配过程不适应多企业协作生产的场景。因此需要对任务模型和协作生产过程进行优化设计。

首先对零件任务的信息模型进行设计，满足多租户协作装配制造的应用场景。装配任务不在仅仅表征任务的信息，还得设置任务的主制对象。在任务模型中如图 9 所示，添加了主制企业和请制企业的信息，表示一个任务可以从一个企业中发布到另一个企业，那么发布任务的企业就是请求制造企业即请制企业，接受任务的企业为主制企业。在实际生产的过程中，不仅要考虑到企业之间的协作生产，还要考虑到企业内部出现的部门之间流转任务协作生产的情况，因此在零件任务模型中增加了主制车间和请制车间的信息。

PartTask (零件任务)	
- ID	: int
- MCompanyCode	: int
- PCompanyCode	: int
- MasterShop	: int
- PShop	: int
- part	: int
- routing	: int

图 11 零件任务信息模型

其次对企业装配过程优化,如图 10 所示,在装配任务流程开始之前,企业使用 MRP 算法对主生产计划分解产生采购需求和生产子任务,对于能在本企业生产的装配需求下发到该企业的生产车间中生产,如果是采购需求或者不在本企业内执行的任务,可以将该任务发放到统一任务管理处,等待协作企业接受任务,然后在该企业生产交付给原企业。如果是本企业车间内部可以进行的生任务那么下发到车间生产。直到该产品装配所有的需求任务完成后,开始产品的总装配,最后完成交付。

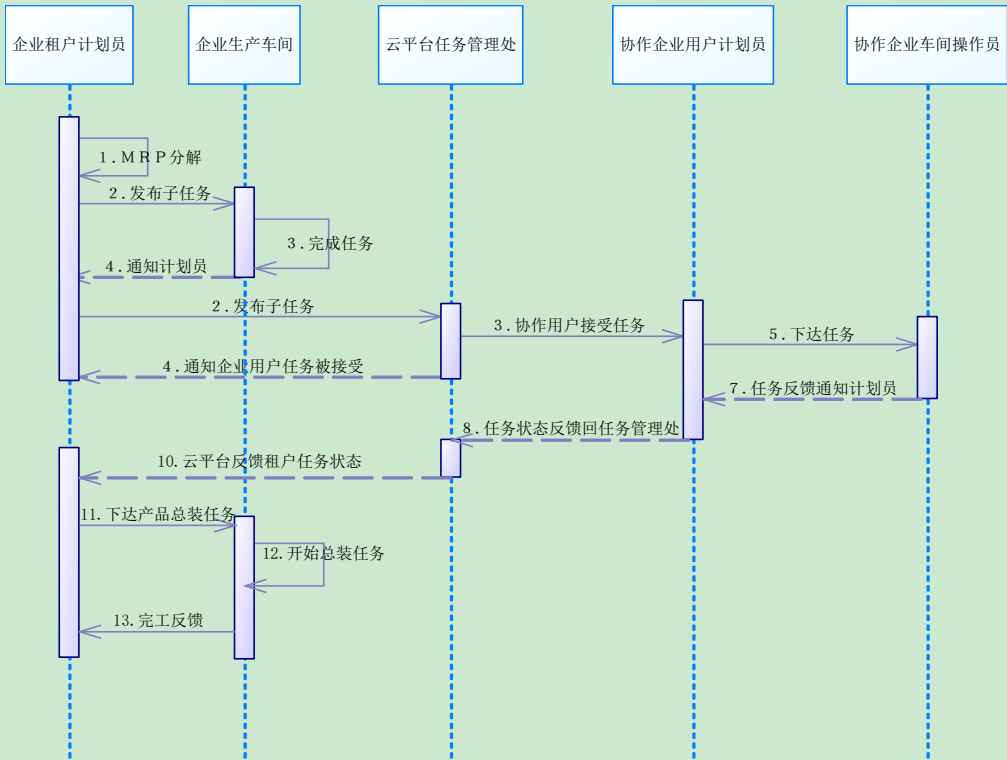


图 12 租户协作生产时序图

2.2.4 基于 PSL 的模型统一化

现阶段装配制造企业对于装配 MES 系统的使用都是基于本企业对于装配过程个性化的需求设计。并且装配制造企业对数据的管理方式大部分采用分散管理，多点集成的形

式,因此会产生数据属性、结构、存储不一致的情况。导致产品生命周期各阶段信息很难传递和交换,导致信息闭塞,形成信息孤岛^[39]。这种信息闭塞以及装配制造模型的不统一严重阻碍了装配系统 SaaS 化的进程。解决该问题的一条有效途径是将先进的管理理念与信息技术相结合,通过过程集成实现装配过程的各阶段之间,以及产品全生命周期的信息交互和协同。

PSL 是美国标准化技术局(NIST)根据制造企业工程经验提出的一种规范化的过程描述方法,目标是在整个产品生命周期中提供一致的表达方法,是实现异构系统间过程信息交互的统一标准语言。为了满足 SaaS 模式下装配系统对平台所有制造企业的制造数据的定义,本文将采用 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。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,满足不同企业间以及不同业务场景对装配过程描述的需要,满足装配产品生命周期制造数据一致性的要求。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。

下面针对产品装配任务执行过程主要的过程对象和对象关系,描述 PSL 中类与关系之间的映射关系,其于 PSL 的映射关系具体描述如下:

(1) 装配过程中的订单(Order)、主生产计划(MPS)、生产指令(Demand)是最基本的组成部分,对应于四个原始类的 Activity 类。

(2) 工艺活动(routing)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-Occurence 类之间的关系。

(3) 生产任务(PartTask)作为活动的实例,在执行的过程中包含了活动的时间信息,对应于 PSL 四个原始类中的时间(Timepoint)类。

(4) 装配过程中对象关系包含主生产计划与物料清单(BOM)、主生产计划与生产指令、生产指令与生产任务、订单明细(OrderDetail)与主生产计划。

(5) 装配过程中工艺与零件任务的聚合和分解关系,对应于 PSL 扩展中 Subactivity 关系。

(6) 同一层次的活动与活动之间的串行、并行以及汇合关系,对应于 PSL 扩展中的 follows、start-synchronized、end-synchronized 排序关系。

本章小结

本章首先介绍了 SaaS 应用模式的基本概念和四级成熟度模型,并分析了 SaaS 应用模式的优势。然后主要研究了系统研发的关键技术:首先对数据库架构进行比较和分析,再对数据扩展存储方案进行了分析和比较。并选择了基于共享数据库、共享架构方案的名称值对的数据配置和扩展方案。最终对制造过程中领域信息模型建模技术进行了介绍,主要是 PSL 和 ISA-95 标准。最后介绍了微服务软件架构的概念,并比较了几个比较主流的微服务实现框架并确定本课题采用 Spring Cloud 实现微服务软件架构的方案。

第三章 基于 SaaS 的装配任务管理模式系统架构设计

3.1 SaaS 服务体系架构

SaaS 软件服务平台是服务提供商与企业租户之间的中介平台，是装配制造执行系统实现的基础。如图 11 所示，SaaS 服务体系架构从下至上主要包括以下几个方面：

数据逻辑存储层：在第二章多数据管理模式中已经介绍过，主要是在多租户数据管理的层面，保证多租户的数据安全，实现租户在同一软件应用实例上的数据隔离同时又能适用多租户协作生产的场景，实现多租户的数据存储。本文在数据逻辑存储中使用完全共享的数据库架构。

数据访问层：是业务逻辑访问数据存储层的接口，实现数据库中记录行的 CRUD 操作及访问控制。本文将基于 hibernate 等 ORM 数据库框架实现对数据的操作。

业务逻辑层：实现装配系统的基本业务逻辑处理，对应于装配系统任务管理的基本功能操作，基于访问控制和业务规则对系统的数据进行操作，同时保证数据的一致性、隔离性和持久性。

组合服务层：具有业务整合功能，将相关联的基本业务功能单位组合成独立、完整的功能服务单元，对应于装配制造执行系统而言，需要将装配系统的功能服务拆分成独立的功能服务单元，可以通过服务单元的配置实现租户企业功能的可配置性，是实现 SaaS 软件功能可配置的关键。

虚拟应用层：在组合服务层拆分出的服务单元的基础上，企业租户配置需要的服务功能单元和用户的界面。相当于为每一个企业配置一个软件应用实例，每个企业都对应一个虚拟应用。也即是对组合服务层的服务单元配置。

界面控制层：即展现层，用户通过浏览器或者移动设备访问 SaaS 软件服务，在界面控制层识别登陆用户所属租户及其身份信息，通过登录人员的角色和权限配置用户界面。

可扩展组件：对数据安全、容错保护、服务安全、消息通知等方面提供支持。服务框架包括消息队列、安全中心、用户交互等服务框架。

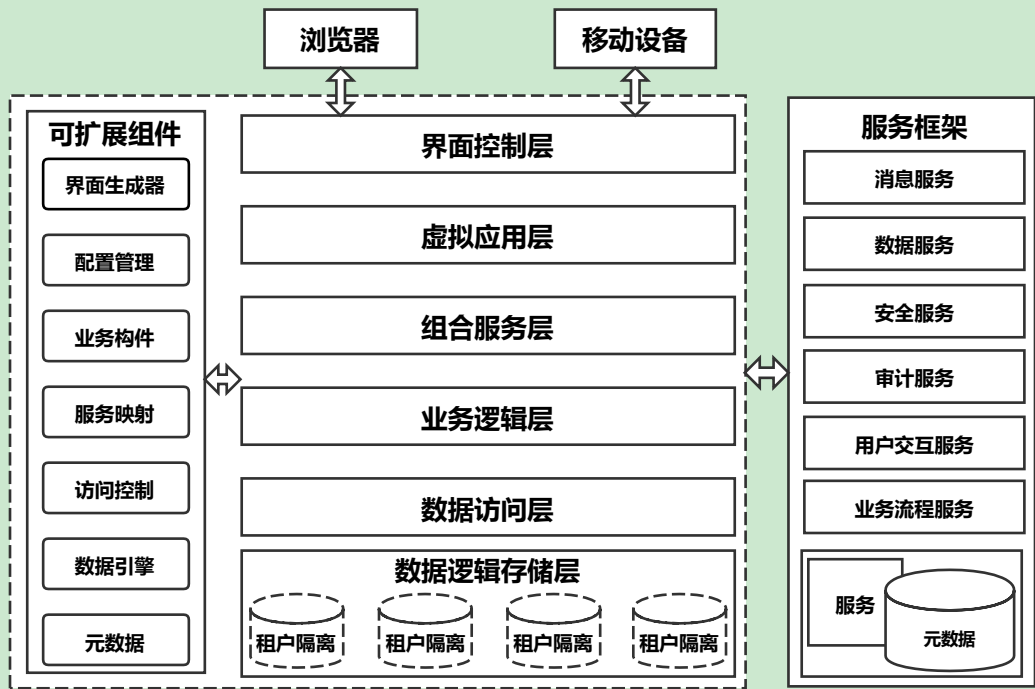


图 13 SaaS 模式软件架构

在第二章中分析了 SaaS 软件设计的关键技术主要包括多用户数据管理模式、服务可配置、多租户协作和装配过程统一模型的建立。其中数据管理模式和装配过程模型体现在数据逻辑存储层和数据访问层，服务可配置和多租户协作体现在业务逻辑层和组合服务层。SaaS 模式是一种软件设计思路，具体的代码实现还需要有技术方案的支撑，为了适应组合服务层中的服务单元的设计，决定采用微服务的系统技术方案实现软件设计。

3.2 微服务框架设计

3.2.1 微服务理论研究

随着互联网和信息技术的发展，软件系统架构设计方案从单体式架构到面向服务架构一直在不断演进。近年来，面向服务的架构方式由于其灵活、解耦、规范化等诸多优势。被广泛应用于大型企业的系统架构。但是目前的面向服务架构也存在系统庞大、逻辑复杂、维护困难、研发成本高、可扩展性低等问题^[40]。对于面向服务架构的设计缺点，国内外互联网企业探索通过微服务架构方式优化系统服务化的构建和管理。微服务和面向企业服务专门化软件设计方案最大的不同就是舍弃企业服务总线，旨在通过将功能分解到各个离散的服务中易实现对解决方案的解耦，将大型复杂的企业级服务系统应用分割成单一功能的小服务。每一个服务都是一个独立的功能模块，可以在短时间内完成启

动部署，并且可以通过分布式部署实现主备防灾。每一服务都是一个独立的实体，可以分别部署在 SaaS 平台上。服务之间通过 http 和 https 网络传输协议进行网络通信，传递数据。

相对于分布式系统和面向服务的架构而言，微服务有以下一些好处：微服务的实现不会受到语言和技术栈的限制，每个服务可以使用最适合当前业务需求的技术来实现；微服务的系统健壮性更强，当系统的某个服务不可用时，不会导致整个系统的级联故障；微服务架构中，每一个单独的模块都可以为不同的应用程序提供服务，可以使用不同的方式构建应用；单一服务的体量小且功能单一，可以更轻易的重构和重写服务。

从 SaaS 软件四级成熟度模型上看，微服务的系统架构由于将复杂的系统分割成一个个微小自制的服务，服务之间的耦合度降低，各个微服务功能可以灵活的重用，增加了 SaaS 服务软件重构的灵活性；从 SaaS 软件服务可配置的要求上看，微服务架构划分组织是通过业务来划分服务而不是技术，租户可以在定制服务时，可以通过各个微服务模块功能的权限对租户开放，实现宏观服务的配置，不需要对具体的业务代码实现用户隔离；从数据隔离上看，微服务之间的数据调用是通过网络服务来实现数据的传递与调用，在数据逻辑处理层面减少了不同租户之间数据交互，增强了数据隔离性和安全性。

经过上述分析，微服务的系统技术方案相对于传统的软件设计方案有众多的优势，并且更适合 SaaS 模式下的软件设计方案，因此本课题采用微服务来研究 SaaS 模式下的装配系统实现。

3.2.2 微服务架构研究现状

微服务的概念是在 2012 年出现的，作为加快 Web 和移动应用程序进程的一种方法，2014 年开始受到各方的关注，2015 年是微服务的元年，越来越多的论坛、社区、blog 以及互联网行业巨头开始对微服务进行讨论和时间，进一步推动了微服务的发展和创新。国内外研究学者也就微服务的发展和应用进行了很多的研究。

郭栋、王伟、曾国荪等人^[41]针对云件技术的发展，基于微服务架构，提出了一种新的云件 PaaS 平台，在不修改传统软件的情况下，直接将软件部署到远程服务器上，并且通过浏览器远程访问软件服务。通过采用微服务架构设计，使云件平台具有较好的可扩展性、容灾性、灵活配置和简易部署等特性。

孟永胜、曹海萍等人^[42]针对现代软件系统可扩展性的课题，研究了微服务系统架构

的功能分解的过程，实现对复杂软件的解耦解决方案，并且提供了一种基于微服务架构动态扩展软件功能的方法。

彭雪涛、梁卓明等人^[43]针对智慧校园的建设课题，分析了云端微服务架构及其应用优势，提出了基于智慧校园建设的微服务云端平台设计，包括信息服务的获取、教育资源的共享、基于学习数据的智能分析与评价等服务。

Hui Kang、Michael Le 等人^[44]结合新型的容器技术，使用 OpenStack 作为案例研究，启用动态服务注册于发现，基于容器的微服务式 DevOps 的效率，并研究了无状态和有状态容器化组件的可扩展性。解决了云基础架构管理设计的局限性。

Khanda Kevin、Salikhov Dilshat 等人^[45]利用先进的传感器网络以及以 Jolie 编程语言为中心的分布式微服务架构，研究用于支持智能建筑的应用平台，讨论了基于微服务架构的应用平台的特性和优势，并设计了原型系统。

北京农商银行^[46]对微服务架构进行了深入的研究，并从银行的信息系统入手，研究了微服务软件研发路线，将传统的面向单体的软件转变为微服务系统能够架构，并于 2016 年启动服务网关，冲过应用系统，取得突破性进展。

微服务系统架构自诞生之初开始就在互联网行业掀起了一阵飓风，微服务的设计方案涉及到生活的方方面面，尤其与云计算服务联系紧密，是实现云平台架构的关键技术方案。

3.2.3 微服务架构设计方案

当前的微服务系统架构主要有两种实现方式：一种是由 alibaba 开发的 Dubbo 框架，另一种是 Spring 开源社区发布的 SpringCloud 框架。如表 2 微服务框架对比所示，SpringCloud 与 Dubbo 框架相比，SpringCloud 框架的系统结构更简单，通过传统的 SpringMVC 架构加上注册中心的功能实现 SpringCloud 架构，而 dubbo 需要使用各种复杂的 url, protocol 等技术；从性能上看，dubbo 的网络消耗小于 SpringCloud，但是现在随着网络技术的发展，网络消耗已经不会对系统造成太大问题；从开发难易度上，dubbo 的开发难度极大，对 jar 包的版本和代码库的依赖极大，SpringCloud 比较自由，接口管控层面比较高效。

表 2 微服务框架对比

	SpringCloud	Dubbo
开发难度	难度小，自由	难度大，不便管理
系统结构	简单	复杂
系统应用	应用广泛	应用广泛
技术支持	开源社区活跃	停止技术支持
性能	网络消耗较大	Rpc 调用网络消耗小

经过上述对比，本课题决定采用开发难度较小，技术支持较强的 SpringCloud 框架来实现本课题的微服务架构。

微服务主要用来实现 SaaS 服务体系中的组合服务层、数据逻辑访问层以及展现层的设计。其中展现层基于快速开发工具 Dorado 集成开发，完成用户界面的设计。采用 http 和 https 网络传输协议与后台服务解耦，将展现层和服务应用层之间的逻辑分离。通过 Restful 中间件对服务之间接口调用进行数据交互。使用 Axure RP 快速原型工具对界面 UI 进行设计，同时在 Dorado 的基础上使用 H5、jsp 等前端技术和 BootStrap、React 等前端技术框架研发界面。

其次，应用服务层分为业务逻辑服务和架构技术服务。其中架构技术服务主要包注册中心、负载均衡、容错保护、数据通信、服务安全等模块的设计。注册中心提供服务发现的能力，服务启动时向注册中心注册自己的信息，注册中心是微服务的基础，本课题主要通过 SpringCloud 下的 Eureka 组件实现注册中心的功能；负载均衡是 SaaS 模式第四级成熟度模型的关键，租户的所有请求首先经过负载均衡合理的分配到每一个服务中，减轻服务器的负载，支持多个实例来分担用户的大量访问，可以让应用软件水平无限扩展，本课题通过 SpringCloud 框架下的 Ribbon 组件实现基于 HTTP 和 TCP 网络传输协议的负载均衡器；服务容错保护机制用来保护服务由于网络原因或者服务自身的问题导致调用服务异常，为了解决这一问题，使用 SpringCloud 框架下的 Hystrix 组件实现断路器、线路隔离等保护功能；为了实现各个微小子服务之间的服务通讯，SpringCloud 提供了两种通讯方式 RestTemplate 和 Feign，两种通信方式都是基于网络传输，实现 HTTP

远程调用，功能相同；微服务中所有的 Rest 传输调用最终都是暴露在公网上，那么需要保证网络上的公司私人业务的安全性，防止信息泄露，本课题利用 SpringCloud 下的 SpringSecurity 实现网络传输安全。SpringCloud 框架在架构技术层面众多服务要求提供了技术支持，不需要做出太大的改动，因此架构技术层面不是本课题研究的重点，将直接利用这些微服务组件提供支持

应用服务层还包括业务逻辑服务，是将装配制造执行系统任务管理的模块拆分成几个独立的子服务，分别部署在不同的物理机或者虚拟容器中。业务逻辑服务运用架构技术服务提供的整个微服务运行的环境，与数据存储层和用户交互，在业务逻辑层进行逻辑处理，然后将渲染的界面传递给用户，实现人机交互。业务逻辑层是整个装配制造执行系统的核心，为了实现 SaaS 模式对软件功能可配置的要求以及第四级成熟度模型对软件灵活性和可拓展的要求，需要将传统的装配系统中的业务逻辑拆分成独立的子服务。

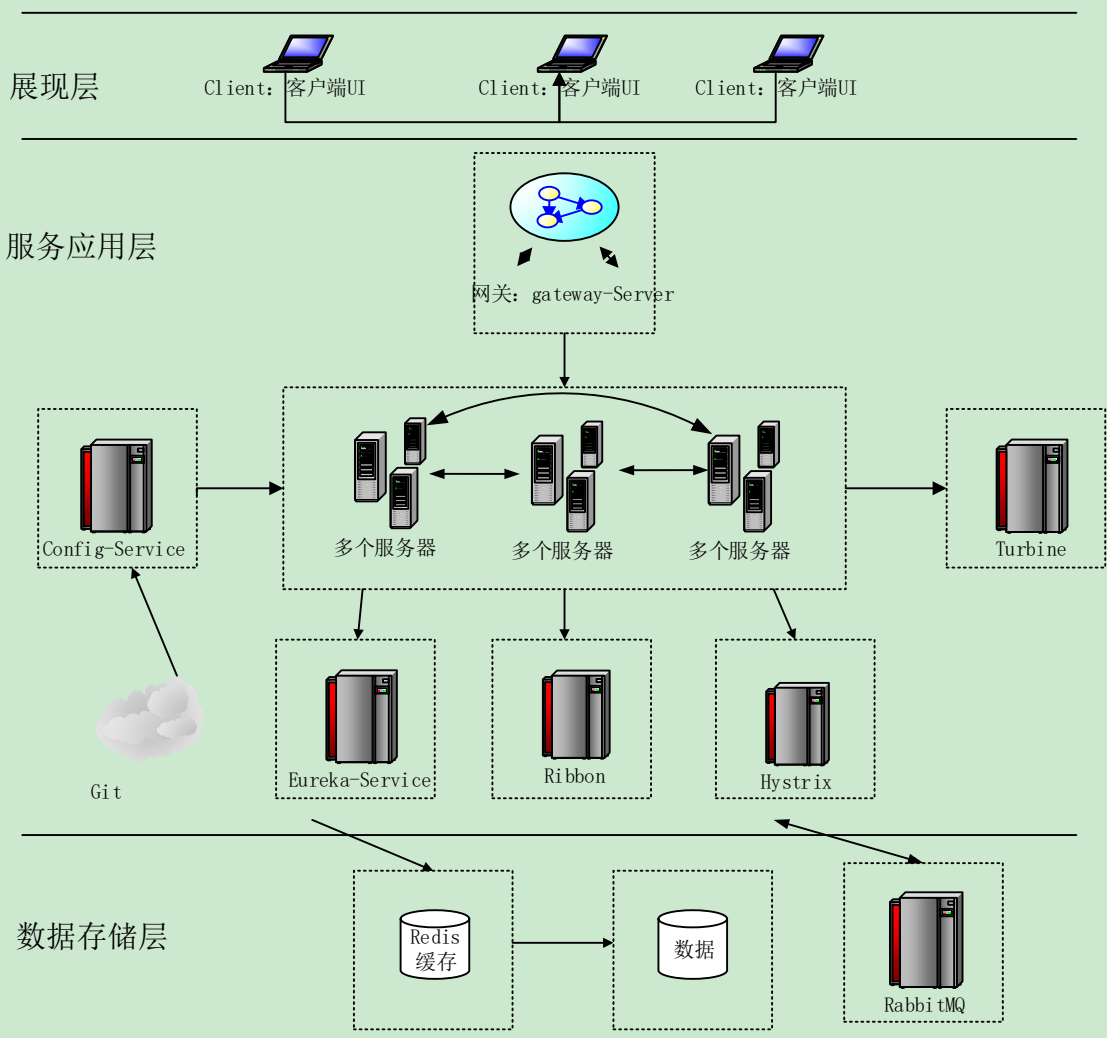


图 14 微服务架构技术方案

综上所述，本课题就微服务技术架构方案实现的关键问题在于对业务逻辑服务层面的拆分，以及各个子服务的功能实现。然后在微服务实现的基础上配置用户的业务流程。接下来，本文将具体论述使用微服务的系统技术方案实现装配制造执行系统软件的 SaaS 化。

3.3 基于 SaaS 的微服务系统架构实现

20 世纪初，制造业从手工作坊开始向大规模生产进化，制造业开始提倡使用泰勒的科学管理理念生产制造。70 年代中期市场竞争进一步加剧，制造业开始向大量个性化生产靠拢，要求企业具有柔性和应变能力。但是大部分装配制造企业都是根据本企业生产的产品对象设计专业化的生产流程和生产模型，根据装配形式方面的特征，我国的工程机械装配形式主要有两种^[47]：移动装配形式与固定装配形式。同时根据装配现代化程度的不同，部分制造企业严格实现了 MRPII

、ERP、MES 等现代化管理方法，部分企业根据自身的资金以及生产现状实现的部分现代化管理方法。

用户在 SaaS 软件平台上定制服务的前提就是服务平台为用户提供一个应用模板，模板以标准的应用服务为基础实现。因此在实现装配制造系统 SaaS 时，需要考虑到所有企业用户的实际情况，设计一个模板装配制造执行系统，适用于所有企业。每个用户根据自己企业的装批生产流程和现代化程度定制相应的服务，并且保存配置信息。

根据制造企业现代化生产管理的科学方法，结合本课题对柔性装配制造执行系统的研究，对装配系统通用任务管理的功能设计如下图，将传统的装配系统任务管理服务拆分成四个服务：订单管理、主生产计划管理、生产指令管理和任务执行管理。

订单管理是一个企业的生产规划和产品系列大纲，用来协调满足经营规划所需求的产量与可用资源之间的差距，也是一个装配生产过程的开始。企业的订单管理是企业经营战略的具体体现，同时是主生产计划（Master Production Schedule, MPS）的依据。因此订单管理服务是整个装配系统任务管理的开端。订单管理的功能包括对预测和生产订单数据集的管理、用户信息维护等

主生产计划是对企业生产订单的细化，用来协调生产需求和可用资源之间的差距，主生产计划是以企业的生产规划即订单为输入，安排详细的进度计划。主生产计划 MPS

在制造业中广泛应用，驱动整个生产和控制系统，因此主生产计划是装配系统任务管理服务中不可或缺的一环。

主生产计划知识最终产品的计划，但是一个产品可能由成百上千种相关物料组成，需要对主生产计划进行 MRP 运算得到详细的物料需求计划，也就是生成生产指令，每一个生产指令都是一个单独的物料需求。包括制造需求和采购需求。因此，生产指令也是其中装配任务管理服务中的一环。

最后就是任务执行管理服务，这是所有装配制造业生产流程的核心，车间生产作业控制的目的是通过对制造过程中任务的计划、执行和监控提高生产资源的利用率，达到提高生产率的目的。

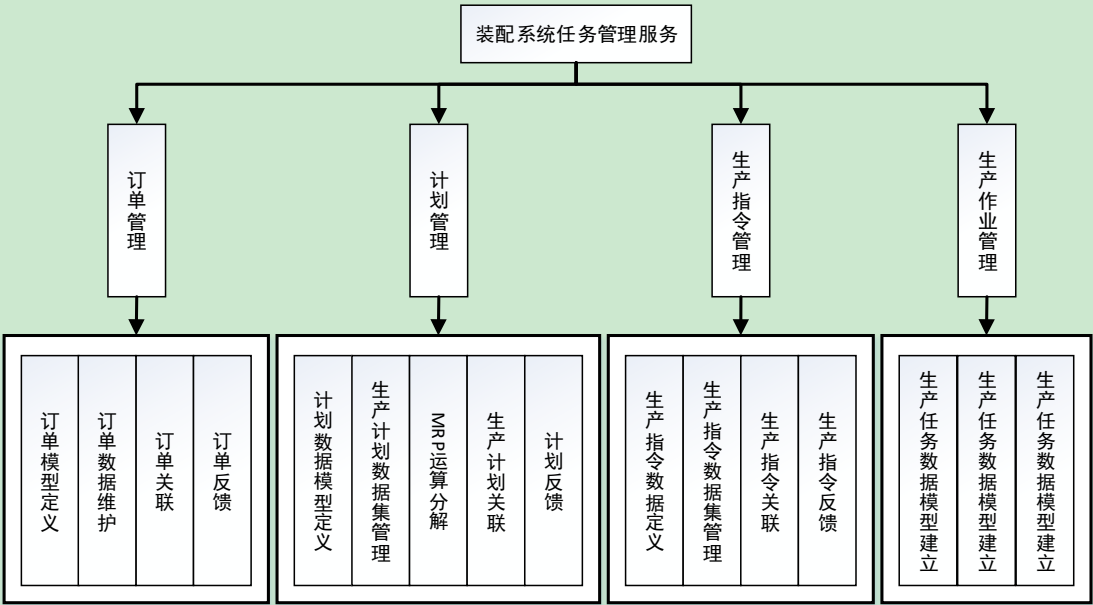


图 15 装配任务管理功能模块图

本课题将装配系统任务管理服务拆分成订单管理、计划管理、生产指令管理和任务管理。不同的装配制造企业可以实现不同流程的配置。装配现代化程度较高的企业可以定制所有服务流程，装配系统流程如图 13 所示，从订单管理开始，订单管理员对订单数据集进行维护。计划员通过订单和计划的关联，将订单产品需求数据通过网络传输协议传送到计划管理服务，经过计划管理的 MRP 运算产生制造需求和物料需求。然后将生产指令下发到生产作业管理服务中，生产在制任务或者是和当前的在制任务进行关联，然后车间工人拿到任务进行生产，并且将任务的状态返回到上一级的服务，通知任务完

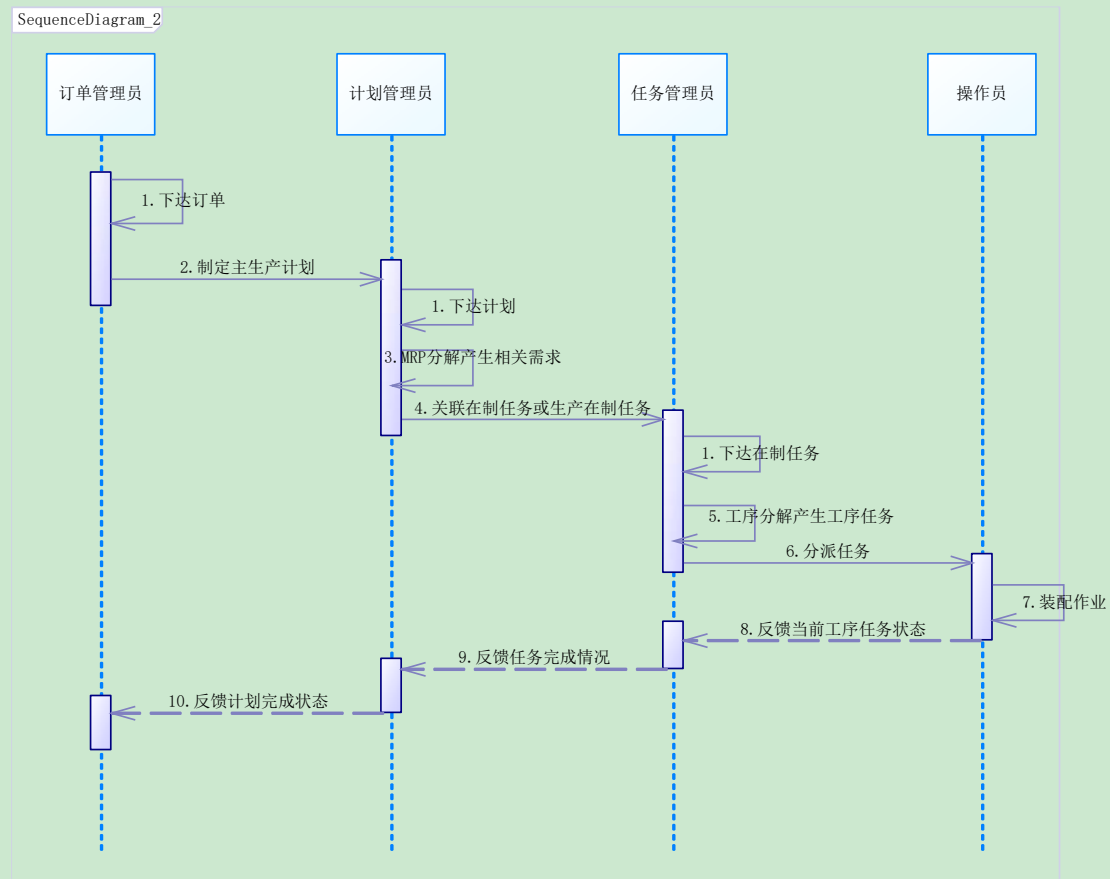


图 16 装配系统功能模型

成或者报废等信息。计划员根据任务反馈的状态实时反馈给订单层面，通知订单管理员订单的完成情况。

在微服务系统架构设计的基础上，将传统的装配制造执行系统的任务管理按照业务流程逻辑拆分成四个子服务：订单管理、主生产计划管理、生产指令管理、生产作业管理。但是从装配制造企业的角度上看，只有部分企业完整使用这套科学的制造管理方法。在装配现代化较低的企业，企业的装配管理比较落后，企业的信息化生产过程是从计划层面开始，将订单层面的服务交给 ERP 或者其他专业系统来实现，在装配 MES 流程中只需要将生产计划作为输入进行生产。在装配现代化更低的企业，企业直接根据生产指令生产，之间将生产指令下达到车间，不考虑物料、库存等信息，工人根据任务信息直接生产，生产的状态信息直接反映企业的生产状况，不需要将车间的任务状态向上反馈。

因此，需要根据不同的企业级租户配置相应的信息。微服务的一个好处就将传统的复杂业务逻辑拆分成小服务，将服务与服务之间解耦。每一个服务都是一个可以独立运行子服务，所以可以从微服务的架构层面实现租户企业级功能的配置。租户可以按

照自己的实际需要选择需要使用的功能。这里功能的可配置性是根据租户的角色定义来的。

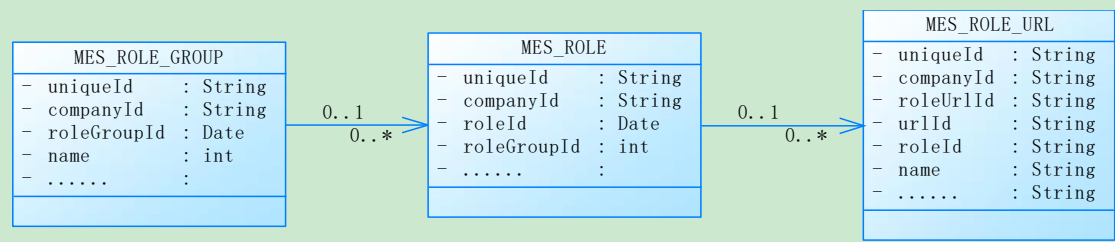


图 17 功能可配置信息模型

这里的角色可以配置企业内工作人员角色的主要功能，每个角色的功能都是按照实际职能划分的。首先对所有的角色划分成一个组，这个组就是对应的企业级租户，企业下面的所有员工都属于这个组。所以可以通过 SaaS 超级管理员为整个企业组配置需要的子服务。例如：企业需要在制任务管理服务、现场任务执行服务，那么就可以通过软件的超级管理员为整个组配置这两个服务包。然后组内的管理员也即是企业管理员根据企业内部人员承担的任务分配角色，同时分配可以访问的界面的权限，企业内所有人员的权限构成了整个企业的服务职能。因此通过组到个人实现功能配置的实现。

本章小结

本章首先探讨了基于 SaaS 服务的柔性装配系统的任务管理的需求，根据 SaaS 模式的特性，提出了 SaaS 服务的体系架构，并且提出基于微服务框架的系统技术方案。然后介绍微服务各个模块的功能，并且根据微服务系统框架思路，结合柔性装配任务管理业务流程，将系统划分成各个系统服务模块。最后研究在微服务框架下的各个服务模块远程调用的方法。接下来将要介绍根据微服务方案拆分的各个服务的具体功能实现。

第四章 系统主要功能实现技术研究

4.1 服务功能设计

用例图^[48]主要从系统用户的角度考虑系统需要提供哪些功能和服务。根据前文分析装配制造执行系统可以分为订单管理服务、计划管理服务、任务管理服务和现场任务执行服务。分析各个服务的功能，确定系统角色，得到用例图中的参与者包括：订单管理员、计划员、任务管理员、操作工人。从而确定每个子服务的系统边界和范围。不同的参与者对应系统的不同业务需求。因此本章将使用用例图确定各个服务的功能边界和业务需求。

用例图是从服务模块的整体功能考虑系统的设计，没有结合系统的业务流程考虑。而状态图是对模型元素的动态行为进行建模，将系统的业务行为进行建模。UML 状态图^[49]是由类的实例对象的状态和这些状态的变化转移组成。因此本章将从订单、计划、任务对象建立状态图，通过对象状态变化的事件展示服务的业务流程。

最后将结合 PSL 过程规范语言产品对装配任务执行过程主要的过程对象建立详细的信息模型。并且结合 SaaS 模式对软件设计的要求对对象模型进行改进。

4.1.1. 订单任务管理服务设计

4.1.1.1 功能模型

订单任务管理是整个装配任务管理系统的开始，订单使企业自身和客户之间的业务纽带。订单的管理信息有助于企业在制定计划、物流管理、资金管理做出最有效的决策。从用例图分析订单管理服务的基本功能，描述订单任务管理服务的功能模型。

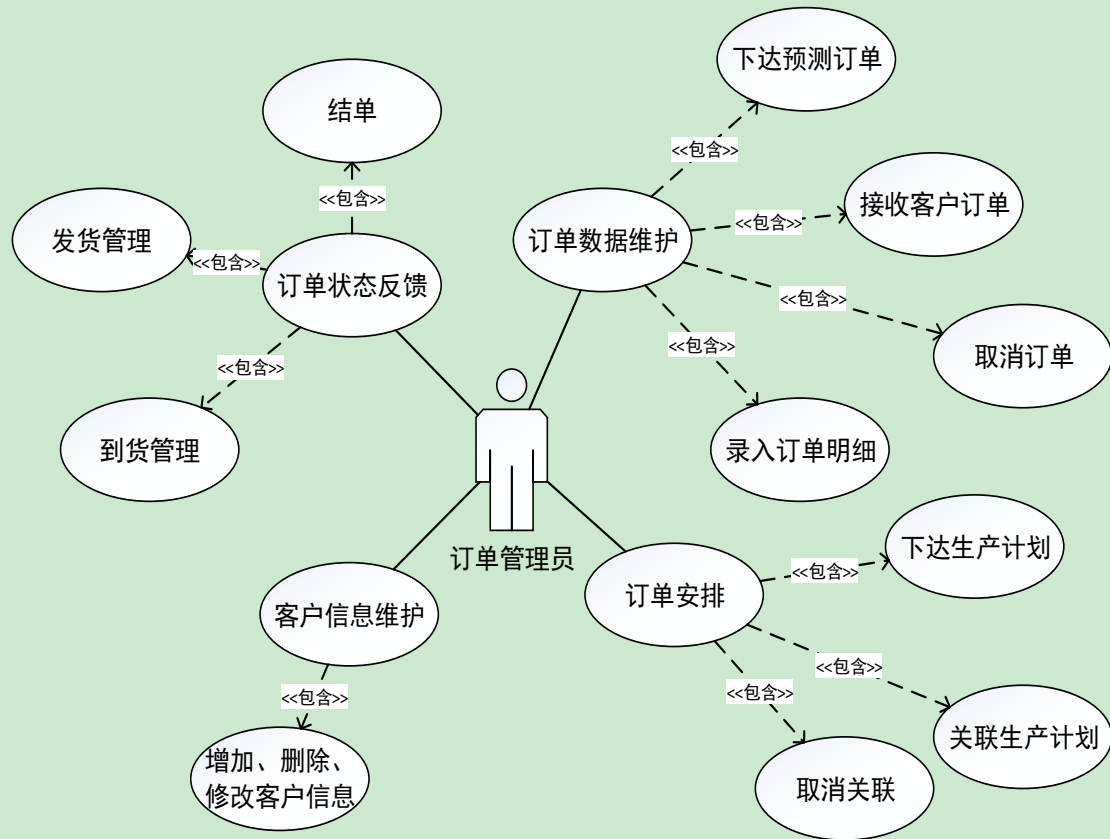


图 18 订单管理员用例图

如图 11 所示，为订单任务管理模块分配了订单任务管理员的角色，订单管理员主要包括以下职能：

(1) 订单数据维护：订单数据集的维护，包括录入制造企业预测的生产需求、从客户上接收到的订单，对下达的订单置取消、下达、完成等状态，还需要录入改订单的详细生产资料。

(2) 订单安排：和生产计划数据集进行关联，提供从订单到生产计划的关联关系，可以直接从订单的信息下达生产计划，也可以将订单直接与现有的生产计划关联，通过生产计划的完成状态反馈到订单，通知订单管理员订单的完成状态。

(3) 订单状态反馈：根据订单的完成状态，通知订单管理员发货、收货以及结账等操作。

(4) 客户信息维护：订单的一个重要信息就是对客户的管理，将发来的订单按照客户分组管理，并且维护客户的信息。

4.1.1.2 过程模型

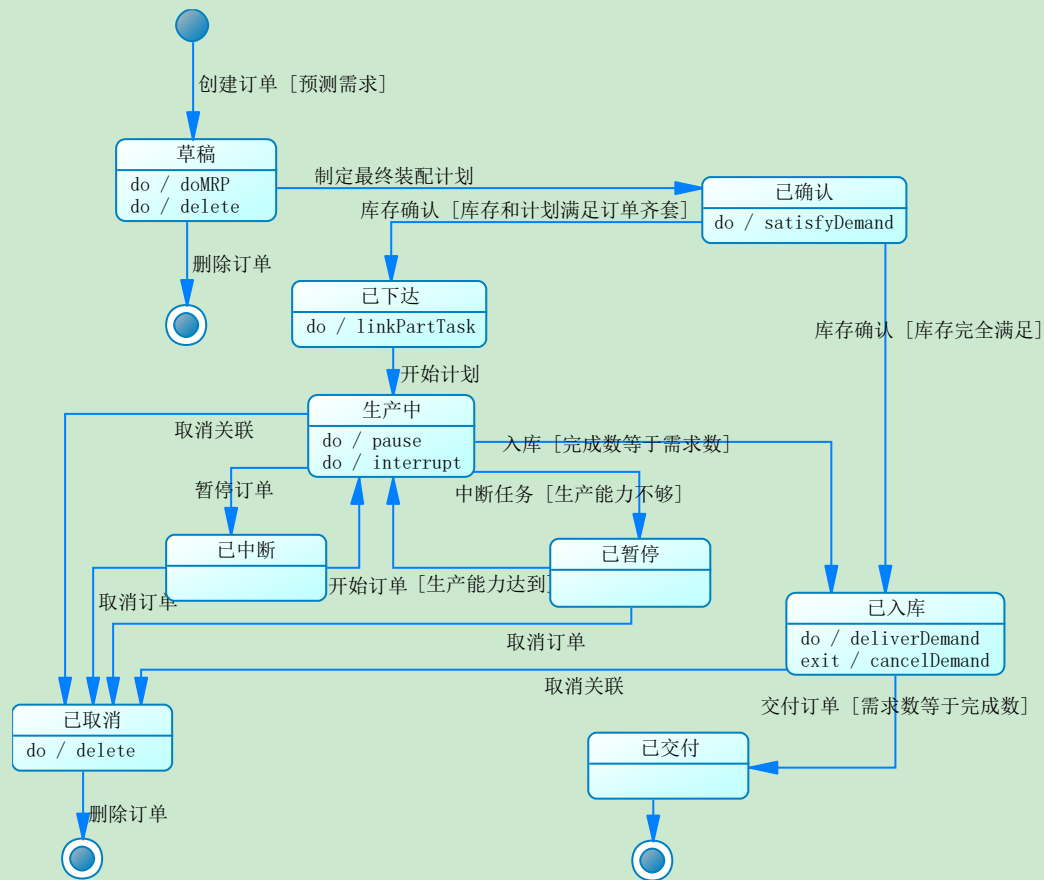


图 19 订单状态图

从用例图对订单管理服务的边界和功能进行了详细的设计，在订单管理服务中主要是对订单数据集的操作。在订单数据集的操作过程中，订单的状态会根据当前发生的事件以及下游的计划数据集对订单数据的反馈发生转变。因此，绘制了订单状态图，如图所示对订单服务管理里面的事件流程进行详细设计。如表 2 所示对状态图中的关键事件和状态的描述：

表 3 订单状态描述表

状态	描述
草稿	接收客户订单或者创建新订单。
已确认	对订单进行分析，确定最终装配计划。
已下达	将订单和生产计划关联，将订单的需求反映到生产计划上。
生产中	生产计划开始，反馈到订单开始生产，为生产中订单。
已中断	订单管理员手动置订单状态为已中断，暂停订单需求的生

	产装配。
已暂停	订单关联的生产计划因为生产能力不足导致生产暂停，置订单为已暂停状态。
已取消	取消订单。
已入库	将已完成的订单，将满足订单的库存打上标识，此时订单状态为已入库。
已交付	将满足订单的库存发给客户，此时订单的状态为已交付

4.1.1.3 信息模型

通过对订单管理服务的功能、流程和事件进行分析，对订单管理服务的功能模型和过程模型做了详细的描述。在订单管理服务中涉及到对订单模型的操作，同时订单模型和计划模型之间需要关联，因此利用 PSL 规范语言对订单和计划之间的关系进行表达，设计订单管理服务的信息模型：

（1）订单（Order）、生产计划（MPS）是最基本的组成部分，对应于四个原始类中的 Activity 类。

（2）描述需求的物料（Part）信息、物料清单（BOM）、客户（Customer）信息对应于四个原始类中的 Object 类

（3）订单和生产计划的对象链接关系，对应于 PSL 和心中原始类的参与（Participates-in）关系。

（4）订单中包含订单明细对需求的详细描述，他们之间存在聚合关系，这种关系对应于 PSL 扩展中的子活动关系（Subactivity）。

根据以上结合 PSL 对订单管理服务中的对象描述，同时为了满足多租户数据模型设计，为每一张表中添加了 companyID 字段标识每一个租户的数据，建立如图 13 的关系模型：

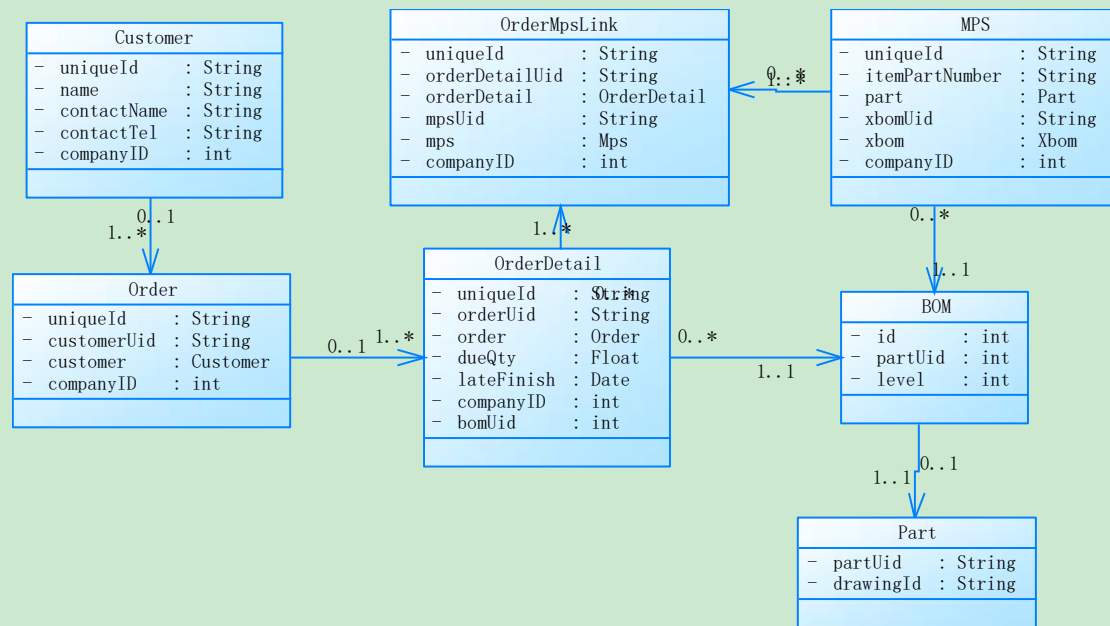


图 20 订单管理服务信息模型

4.1.2 生产计划管理服务设计

4.1.2.1 功能模型

计划管理服务可以作为订单任务管理的下游，同时也可以作为整个装配过程的开始。计划是生产任务中的关键环节，用来协调生产需求与可用资源之间的差距，充分利用企业资源，协调生产与市场。生产计划管理员负责接收上游订单生成的主生产计划或者主动创建主生产计划，并且维护生产计划数据集。计划管理的核心就是对物料需求计划的实现，将产品级别的主生产计划分解出相关需求计划。首先从用例图分析生产计划管理服务的基本功能，描述订单任务管理服务的功能模型。为操作生产计划管理服务的人员分配角色和权限。

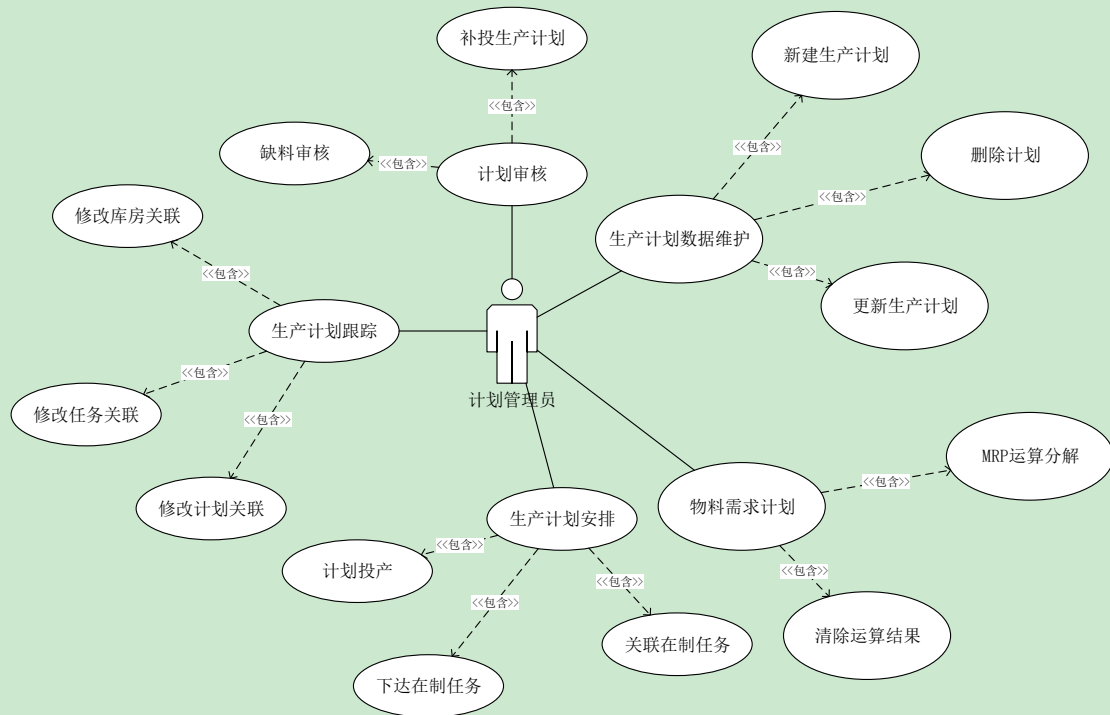


图 21 计划管理员用例图

如图 14 所示，为计划管理模块分配了计划管理员的角色，计划管理员主要包括以下职能：

(1) 生产计划的维护：主要包括生产计划的新建、删除、更新，同时还要管理从订单服务的生产计划。管理生产计划和订单之间的关联关系，将生产计划的状态反馈给订单。同时作为 SaaS 服务的一个可配置服务点，计划管理服务可以直接作为整个装配系统的开端，不需要接收到来自订单的生产计划。企业可以自己通过下达生产计划，然后根据生产计划的状态监控整个生产过程。其次，没有配置订单服务的企业，生产计划的状态也就不会向上继续反馈。

(2) 物料需求计划：物料需求计划是整个计划管理服务的核心，因为在生产计划层面，企业下达的是产品级的生产计划，但是一个产品如飞机可能由成百上千的零部件组成，因此需要通过物料需求计划来通过 BOM 和库存信息实现产品需求的分解，得到制造需求和采购需求。同时还要考虑到企业对于物料需求计划的多种使用模式，包括清除运算结果，多个产品需求同时计算的操作等。关于物料需求计划的算法将在后文详细设计。

(3) 生产计划安排：主要是对生产计划和在制任务数据集之间的操作。包括直接根据生产计划对任务投产产生在制。也可以直接和在制任务关联，通过在制任务来交付该

生产计划。因为部分企业的现代化生产水平较为落后，可能没有生产计划这一层面的服务，对于物料需求计划都是通过计划员的纸张作业来完成，然后根据计算出来的制造需求再在装配系统中下达任务去执行。这样设计可以满足这样的制造企业的要求，直接下达在制任务。

(4) 计划审核：计划员需要时时关注当前计划的执行情况，在审核过程中可能出现意外情况：与分配好的库存因为紧急事件被领走了等等，会出现计划无法完成的情况，这个时候需要计划员通过计划审核功能调整物料需求计划计算出来的结果，或者是补投计划等。

(5) 计划跟踪：以产品级计划 BOM 的形式展开提供计划员审查，同时可以根据车间的反馈状况和库房的物料信息修改计划关联的库房库存和在制任务。

4.1.2.2 过程模型

通过用例图设计了计划管理服务的功能模型，为计划管理服务设计了计划管理员角色，主要负责和计划数据集的交互。在对计划数据集操作的过程中，计划的状态随着计划员操作、上游订单数据的关联和下游任务数据的反馈等事件发生转变，通过这些事件可以对计划管理服务的流程进行详细的设计。因此对计划模型绘制了状态机表征这些事件和状态，从状态图描述服务的过程模型，如图 15 所示。

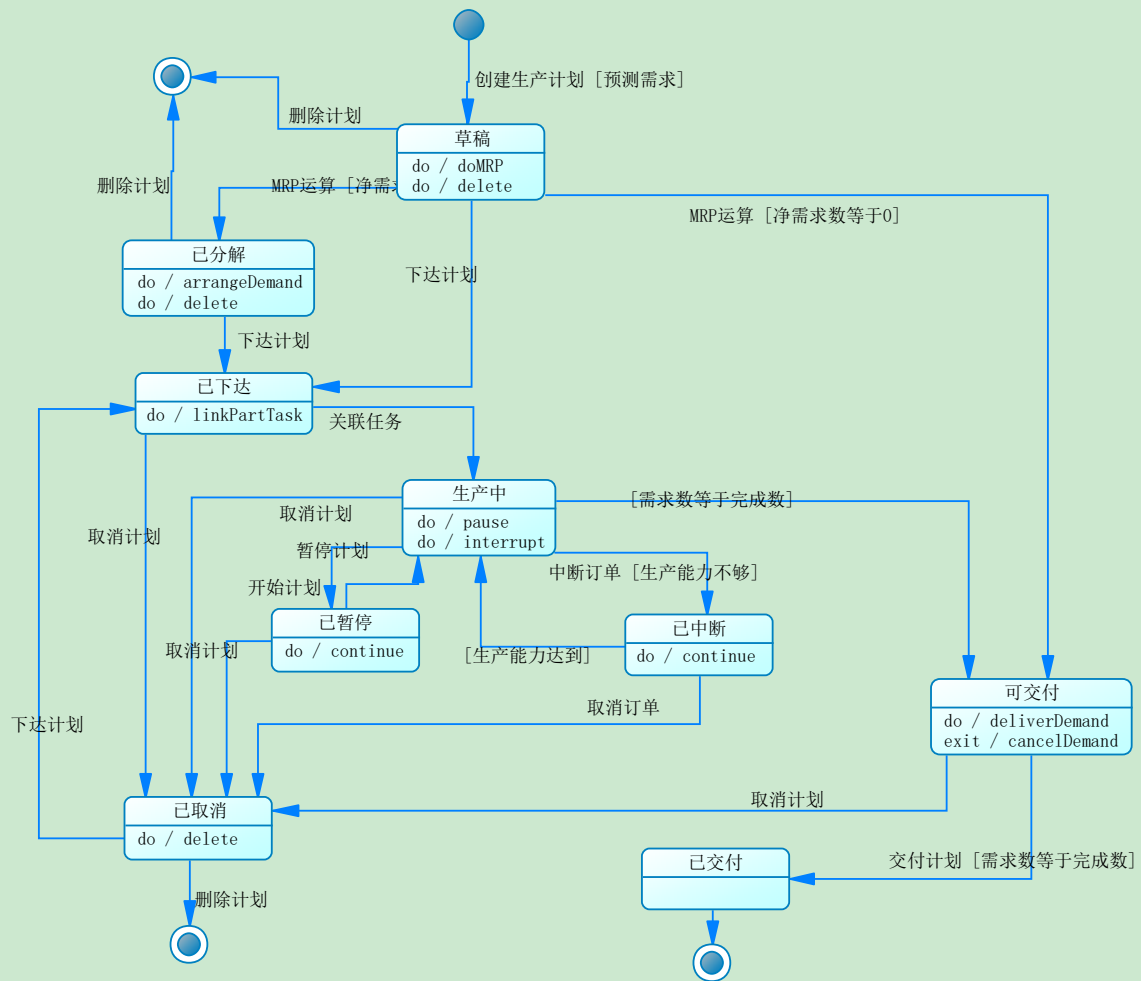


图 22 生产计划状态图

生产计划状态图以生产计划为研究对象，描述了计划对象的生命周期，描绘计划的状态及引起计划状态转换的事件，表示订单管理服务的行为，下表对这些行为及事件做了完整的描述，如表 3 所示。

表 4 计划状态描述表

状态	描述
草稿	对于新建的生产计划为草稿状态。
已分解	生产计划经过 MRP 运算之后为已分解状态。
已下达	将独立需求的生产计划下达或者将独立需求的相关需求下达，那么该独立需求的生产计划状态为已下达。
生产中	已下达的生产计划关联在制任务之后，或者根据生产计划下达在制任务，生产计划为生产中的状态。
已暂停	计划员根据调整人工暂停当前生产计划，生产计划为已

	暂停。
已中断	由于生产能力的不足，生产计划关联的在制任务被迫停止，生产计划为已中断的状态。
已取消	将计划标为取消状态，表示生产计划作废。
可交付	生产计划独立需求关联的所有在制任务都已完成，那么此时的计划状态是已交付状态。
已交付	生产计划的独立需求全部完工交检出库，是生产计划最终完工的节点。

4.1.1.3 信息模型

通过对计划管理服务的功能、流程和事件进行分析，对计划管理服务的功能模型和过程模型做了详细的描述。在计划管理服务中涉及到对计划模型的操作，同时订单数据集和计划数据集、计划数据集和任务数据集之间存在关联，因此利用 PSL 规范语言对订单和计划之间的关系进行表达，设计订单管理服务的信息模型：

(1) 订单明细 (Order)、生产计划 (MPS) 是最基本的组成部分，对应于四个原始类中的 Activity 类。

(2) 描述需求的物料 (Part) 信息、物料清单 (BOM)、库存信息 (Warehouse) 对应于四个原始类中的 Object 类。

(3) 计划 (Demand) 和计划 (Demand) 的对象链接关系、生产计划 (Demand) 和在制任务的对象连接关系，对应于 PSL 和心中原始类的参与 (Participates-in) 关系。

(4) 主生产计划 (MPS) 和相关需求计划 (Demand)，他们之间存在聚合关系，这种关系对应于 PSL 扩展中的子活动关系 (Subactivity)。

(5) 任务 (PartTask) 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 (Routing) 与任务 (PartTask) 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。

根据以上结合 PSL 对订单管理服务中的对象描述，同时为了满足多租户数据模型设计，为每一张表中添加了 companyID 字段标识每一个租户的数据，建立如下图的关系模

型:

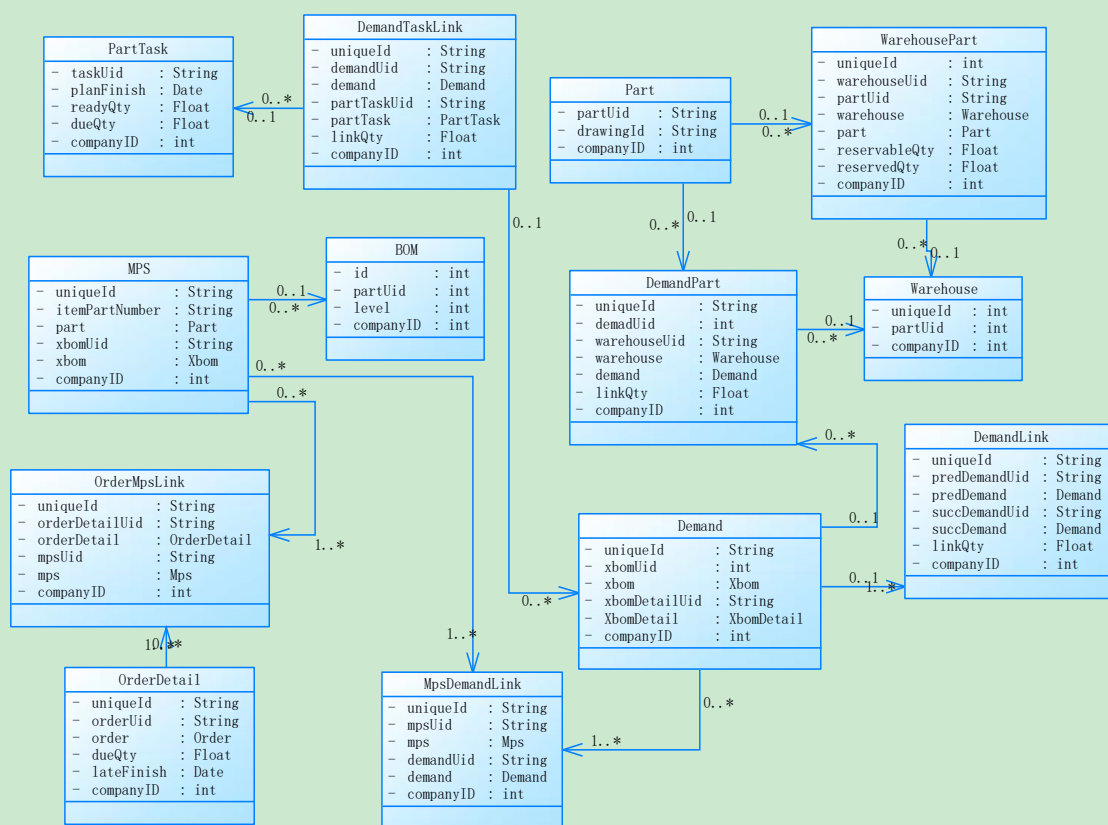


图 23 计划管理服务信息模型

4.1.3 在制任务管理服务设计

4.1.3.1 功能模型

在制任务管理服务可以作为计划任务管理的下游，同时也可以作为整个装配过程的开始。任务是整个生产管理的核心，也是现场工人实际操作的对象。目前制造业偏向于制造资源和制造能力共享，这也是当前 SaaS 软件对多租户资源共享的要求。因此在设计在制任务管理的功能模型时，需要考虑到企业间任务的流转和生产。同时协作任务不仅在企业间需要考虑，同时需要考虑在制任务在一个企业内部不同工厂间外协加工。从用例图分析在制任务管理的基本功能，描述任务管理的功能模型。为在制任务计划管理服务的操作人员分配角色和权限。

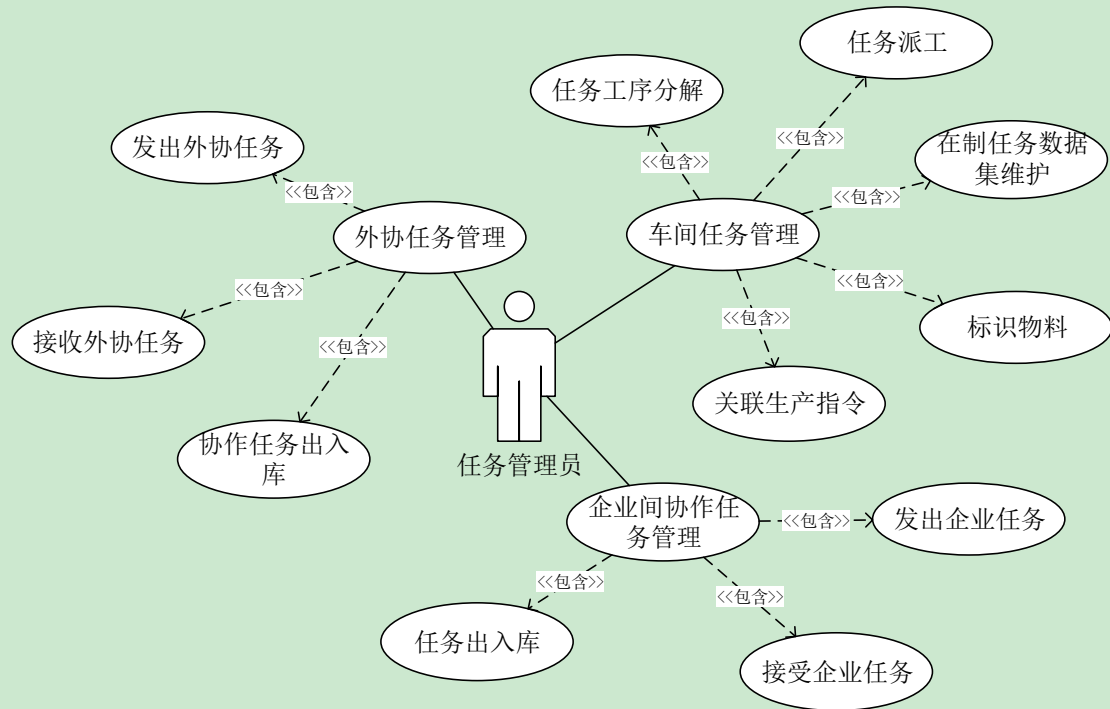


图 24 任务管理员用例图

如图 17 所示，在制任务管理模块分配了任务管理员的角色，任务管理员主要包括以下职能：

(1) 车间任务管理：需要一批中的零件任务打上标识，用来跟踪零件的生产装配过程。将零件任务根据工艺分解成工序任务，然后将工序任务分派给现场的车间工人加工装配。还需要维护任务数据集，提供直接下达任务的操作，可以不经过生产计划和指令的关联，适用于生产装配现代化落后的装配企业，企业直接下达装配任务生产。

(2) 协作任务管理：提供外协任务，可以将任务发给同企业的其他车间生产，也可以接受从其他车间发来的协作任务。同时可以对任务处理，完工出入库等操作。

(3) 委外任务管理：和协作任务管理类似，不同的是委外任务针对的是不同的生产企业，协作任务针对的是同一生产企业内部的不同生产车间。企业通过委外任务可以实现多企业联合生产，共享生产资源 and 功能。

4.1.3.2 过程模型

通过用例图设计了在制任务管理服务的功能模型，为任务管理服务设计了计划管理员角色，主要负责和任务数据集的交互。在对任务数据集操作的过程中，任务的状态随着任务管理员操作、上游计划数据和下游工人数据的反馈等事件发生转变，通过这些事件可以对计划管理服务的流程进行详细的设计。因此对计划模型绘制了状态机表征这些

事件和状态，从状态图描述服务的过程模型，如图 18 所示。

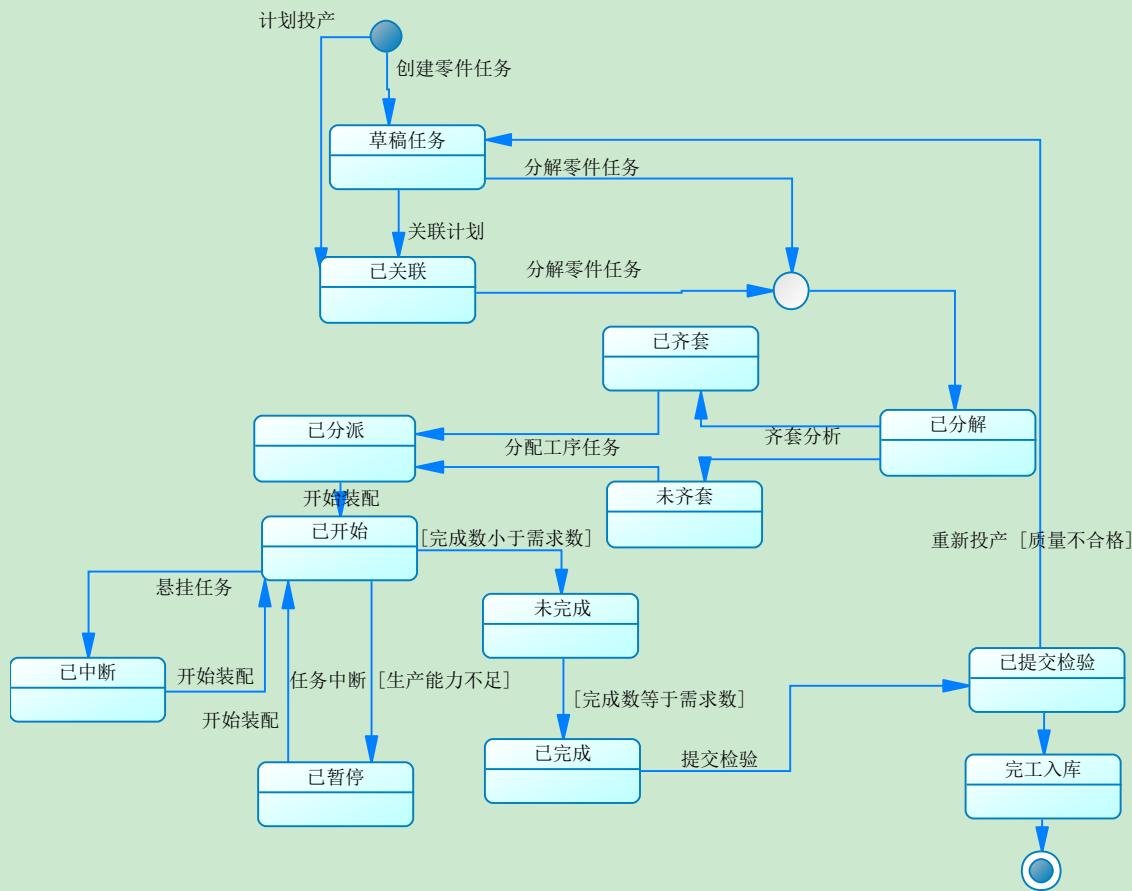


图 25 零件任务状态图

零件任务状态图以零件任务为研究对象，描述了零件任务对象的生命周期，描绘零件任务的状态及引起任务状态转换的事件，表示在制任务管理服务的行为，下表对这些行为及事件做了完整的描述，如表 4 所示。

表 5 任务状态描述表

状态	描述
草稿	新建的零件任务或者从计划管理中生成的在制任务为草稿状态。
已关联	与计划关联之后的在制任务状态为已关联状态。
已分解	将零件任务按照工艺分解成工序任务，在制任务状态为已分解。
已齐套	对零件任务齐套分析，可以齐套的零件任务为已齐套的状态。
未齐套	对零件任务齐套分析，不能齐套的零件任务为已齐套的状态。
已分派	对零件任务分解产生的工序任务分派给现场工人，零件任务状态为已分派。

已开始	分派给工人的工序任务开始加工，对应的零件任务状态为已开始。
已中断	任务管理员手动悬挂任务，任务状态为已中断。
已暂停	任务由于生产能力不足导致任务暂停，任务状态为已暂停。
已完成	所有的任务需求完成，需求数等于计划数，任务状态为已完成。
已交检	将已经完成的任务交给检验处检验，任务状态为已交检。
完工入库	检验完成，将加工完成的产品入库，任务结束。任务状态为完工入库。

4.1.3.3 信息模型

通过对在制任务管理服务的功能、流程和事件进行分析，对任务管理服务的功能模型和过程模型做了详细的描述。在任务管理服务中涉及到对任务模型的操作，同时计划数据集和零件任务数据集、零件任务数据集和工序任务数据集之间存在关联，因此利用 PSL 规范语言对订单管理服务的信息模型进行设计：

(1) 描述需求的物料 (Part) 信息、人员 (Employee) 信息对应于四个原始类中的 Object 类。

(2) 计划 (Demand) 和计划关系 (DemandLink) 的对象链接关系、生产计划 (Demand) 和在制任务 (PartTask) 的对象连接关系，对应于 PSL 和心中原始类的参与 (Participates-in) 关系。

(3) 主生产计划 (Demand) 和相关需求计划 (Demand)，他们之间存在聚合关系，这种关系对应于 PSL 扩展中的子活动关系 (Subactivity)。

(4) 零件任务 (PartTask) 和工序任务 (OperationTask) 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。

(5) 工艺 (Routing) 与任务 (PartTask) 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。

根据以上结合 PSL 对订单管理服务中的对象描述，同时为了满足多租户数据模型设计，为每一张表中添加了 companyID 字段标识每一个租户的数据，建立如下图的关系模型：

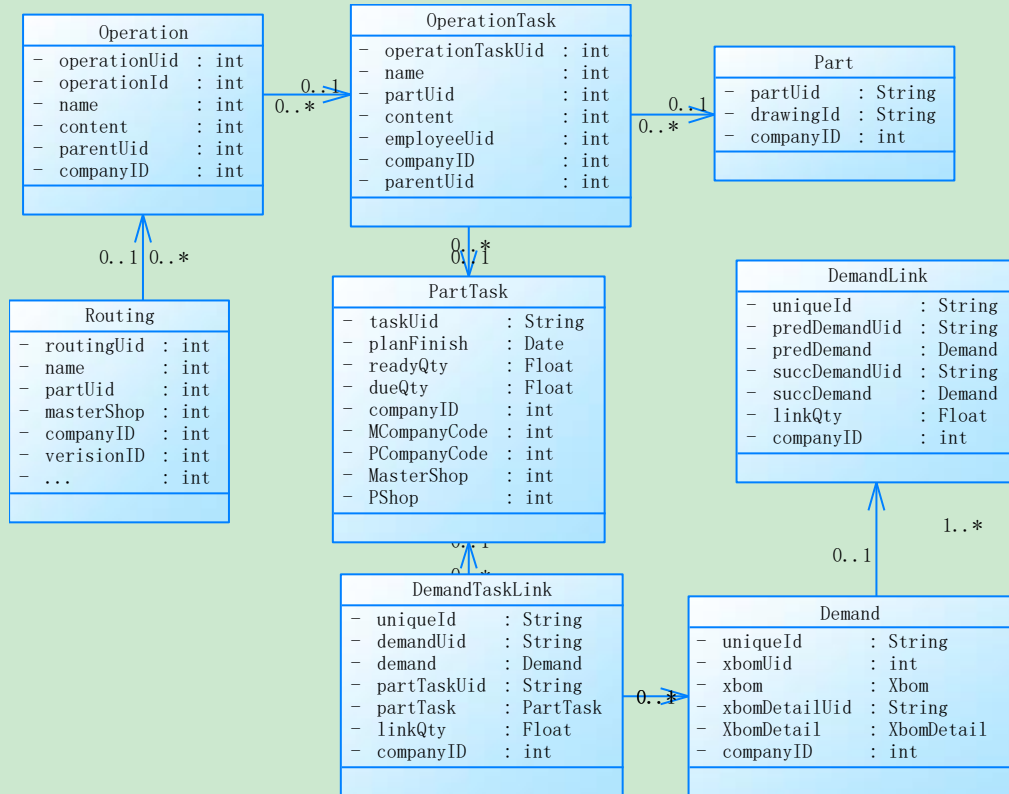


图 26 在制任务管理服务信息模型

4.1.4 任务执行管理服务设计

4.1.4.1 功能模型

任务执行管理服务是专门为现场工人加工装配设计的服务，旨在加快装配过程无纸化的进程，传统的离散型手工装配在装配过程中需要填写大量的纸质装饰记录，企业需要大量的库存去存放这些装饰记录，一旦需要对某件产品的装配过程进行追溯，那么会非常的困难。同时工人在车间现场装配时，需要花费大量时间填写装饰记录，严重影响生产效率。因此通过对现场工人的用例图分析任务执行管理服务功能模型。

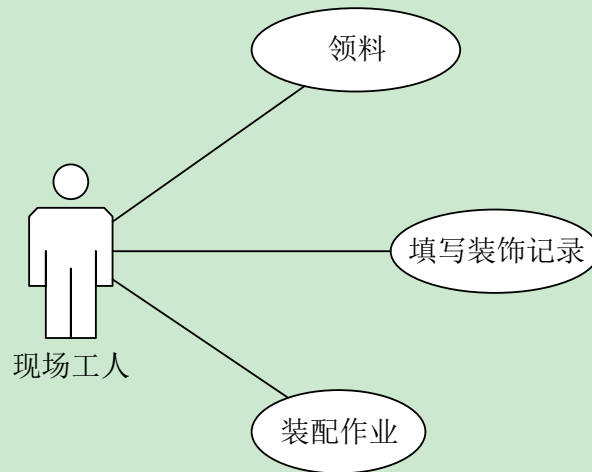


图 27 操作工人用例图

如图 19 所示, 为在任务执行模块分配了操作员的角色, 操作员主要包括以下职能:

- (1) 领料: 领取当前任务所需要的物料。
- (2) 填写装饰记录: 根据工序中对装配的要求, 填写装饰记录。
- (3) 装配作业: 这是现场工人的操作核心, 需要通过装配制造系统开始和完成装配。

4.1.4.2 过程模型

通过现场操作员的用例图分析了现场操作人员的职能, 然后对现场工序任务的状态分析, 绘制现场执行的工序任务状态图, 如图 28。

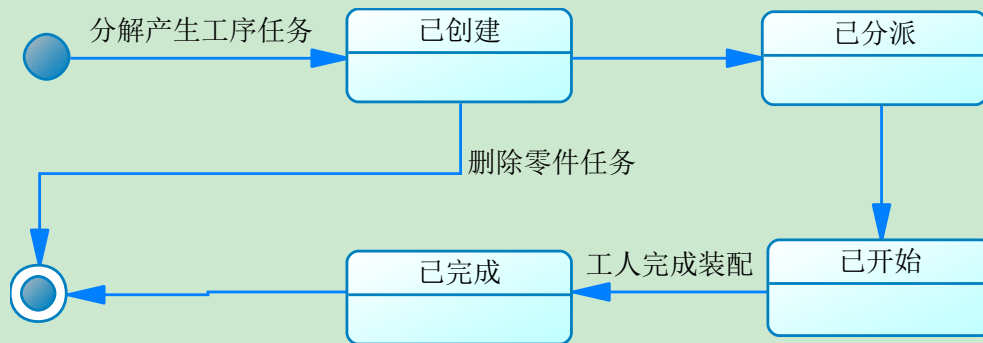


图 28 工序任务状态图

工序任务状态图以工序任务为研究对象, 描述了工序任务对象的生命周期、工序任务的状态及引起任务状态转换的事件, 表示工序任务管理服务的行为, 下表对这些行为及事件做了完整的描述, 如表 5 所示。

表 6 工序任务状态描述表

状态	描述
----	----

已创建	零件任务经过工序分解产生工序任务，此时为已创建状态。
已分派	将分解产生的工序任务分派给车间现场工人。
已开始	操作工人开始装配，工序任务为已开始的状态。
已完成	操作工人完成装配，工序任务为已完成的状态。

4.1.4.3 信息模型

现场任务执行管理服务主要是对无纸化的一个实现，操作工人针对工序任务数据集进行维护，实时记录任务的完成情况，并且向上游服务反馈数据进度，使每一个服务的管理员都能监控，因此利用 PSL 规范语言对订单管理服务的信息模型进行设计：

（1）描述需求的物料（Part）信息、库存信息（Warehouse）、人员（Employee）信息对应于四个原始类中的 Object 类。

（2）零件任务（PartTask）和工序任务（OperationTask）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。

（3）工艺活动（Routing）与工序活动（Operation）之间的聚合、分解关系，对应于 PSL 扩展中的 Subactivity(子活动)关系。

根据以上结合 PSL 对订单管理服务中的对象描述，同时为了满足多租户数据模型设计，为每一张表中添加了 companyID 字段标识每一个租户的数据。另外在对零件任务建模时考虑到了企业内和企业间任务的协作，但是工序任务由零件任务分解产生，因此不需要考虑多个企业租户之间数据共享的问题，只需要通过 companyID 字段对多租户数据隔离。建立如下图的关系模型：

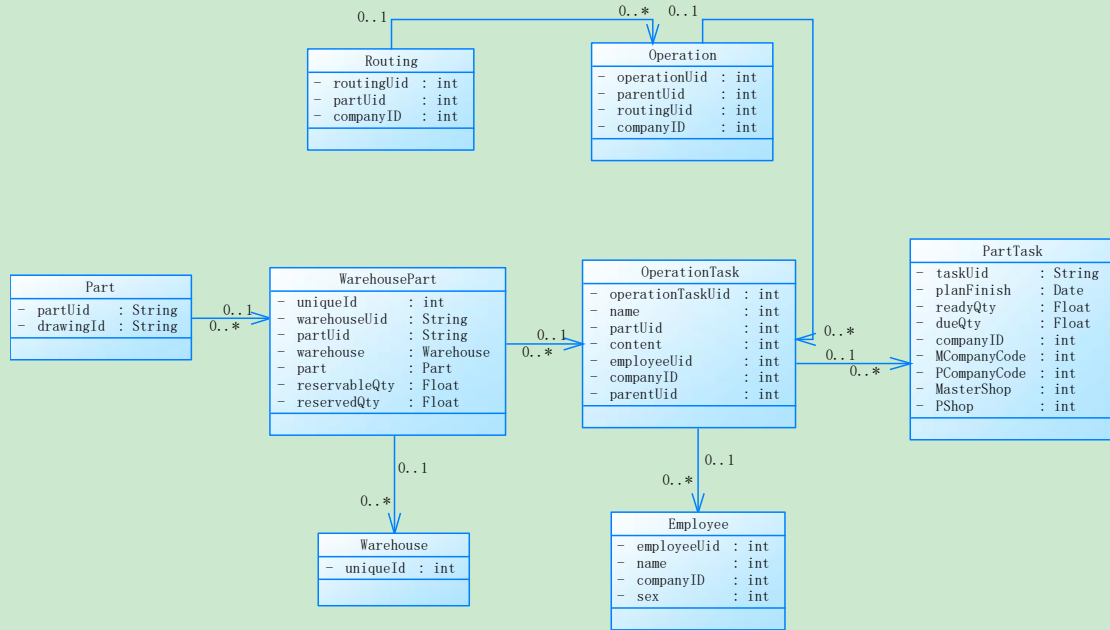


图 29 任务执行管理服务信息模型

4.2 基于 SaaS 模式的 MRP 算法优化

4.2.1 MRP 理论研究

在制造业的生产经营中，一方面为了生产的连续进行，需要对生产过程中的在制品、半成品以及采购的原材料、毛坯、零部件进行仓储，满足市场的需求。另一方面，在仓储的过程中，库存占用了大量的资金，为了加快制造企业的资金周转，需要降低库存，因此在企业生产中就会产生库存和生产需要之间的矛盾。为了平衡两者之间的矛盾，物料需求计划（Material Requirement Planning, MRP）应运而生，MRP 是一种精确的生产计划系统，同时也是有效的物料控制计划。MRP 的目的就是为了在满足物料需要的前提下，是库存水平保持在最低值，协调库存和生产需要之间的矛盾。（装配需要使用到 MRP 算法）复杂产品的装配过程一般由总装、部装（大部装、小部装）、组装、零件装配过程组成，那么在对复杂产品装配过程中会占用大量的库存资源用来仓储装配过程中需要用到的原材料、零部件以及生产中的在制品和半成品。因此为了协调装配过程中的仓储和生产之间的矛盾，本文将研究并实现 MRP 算法。

MRP 算法于 20 世纪 60 年代兴起于美国，发展到现在已经较为成熟，国内外学者对于 MRP 算法的研究与具体实现都已经发展的比较完备。柯耀杰、韦拥欧等人^[50]针对汽车装配制造企业，分析了汽车在装配过程中物料需求计划制定和实施过程中存在的问

题，从信息系统和管理流程和降低成本方面进行研究，优化了汽车装配过程中的物料需求计划。张迪、党少杰等人^[51]在 JIT 思想的基础上，提出了基于生产节拍的物料需求计划的计算方法，从 Job Shop 作业车间的物料计划优化入手，确定配送物料的物料需求计划。Plenert, Gerhard 等人^[52]着眼于当前 MRP 算法对企业生产制造的影响，从 JIT、优化生产技术（OPT）、约束理论（TOC）和瓶颈分配方法（BAM）等方面优化 MRP 算法，并寻找可以替代 MRP 的方案。

制造企业内部的物料需求^[53]可以分为独立需求和相关需求两种类型。独立需求由企业外部决定，企业生产一般可以分为备货生产和订单生产。因此企业可以根据已经接到的订单以及企业内部对产品需求的预测，得到对物料的独立需求。而相关需求可以根据独立需求的产品结构组成关系得到。

MRP 的基本原理^[54]就是根据独立需求的产品结构各层次物料的从属和数量关系，以企业对产品需求的预测和订单为计划对象，以产品的交货期为时间基准倒排计划，推算出制造装配所需物料的准确时间和数量，这是一种优先计划的方法。物料需求计划 MRP 的原理如图所示。MRP 有三个输入：主生产计划（Master Production Schedule, MPS）、物料清单（Bill of Material, BOM）和库存信息（Warehouse）。主生产计划 MPS 是针对企业生产对象的生产计划，包括生产数量和交货期。生产数量是已经下达的订单和市场预测得到的产品需求。物料清单 BOM 表示产品的组成机构，也是 MRP 分解必须的因素。库存状态表示企业仓库中零部件及产品的物料数量。经过 MRP 计算之后可以得到物料的采购计划和自制组件的加工计划。

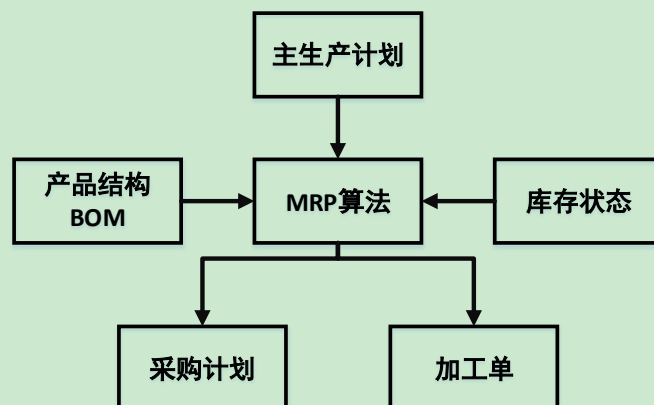


图 30 MRP 逻辑关系

4.2.2 MRP 算法改进的需求分析

目前 MRP 算法在计算机辅助生产管理软件上的实现,多采用国际上比较通用的 MRPII 的思想:先对 BOM 表进行分解,确定各物料在 BOM 中的层级关系,不同层级零部件的层次以最底层层数为基准,如图 31 所示的眼镜的 BOM 树,螺钉分别在第 1 层和 2 层中出现,那么螺钉的层次就为 2,然后搜索分解表,访问主生产计划中该物料的需求数量和交货期,根据分解表和库存信息逐层推算出自制件的加工计划和采购件的采购计划。

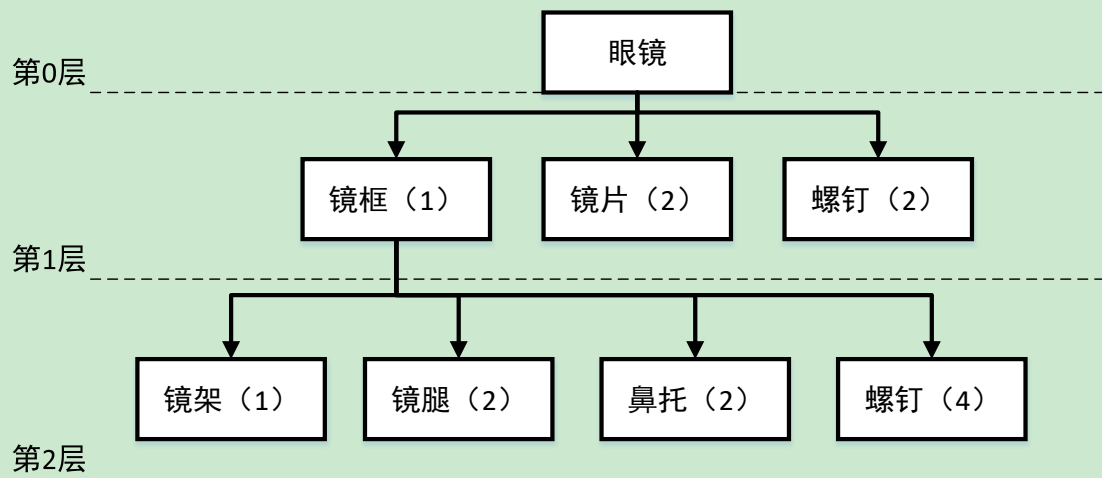


图 31 眼睛的 BOM 树

但是传统的 MRP 算法并没有在 SaaS 场景下使用的经验,当前的制造型企业内部的物料需求计划是针对当前企业内部独立制造生产设定的,没有考虑到多企业共享制造资源和制造能力的情况。因此为了使 SaaS 环境下的多企业之间制造资源和制造能力的共享协作,需要对传统的物料需求计划 MRP 进行调整。同时,当前的 MRP 计算都是针对制造型企业内部的制造业务流程设计的,但是不同企业的制造业务流程和装配能力的现代化程度都不尽相同,部分制造企业没有完全实现 I-MES 的标准业务流程,因此需要实现 MRP 算法的参数化。根据不同企业的需要设置合适的参数,适应多种企业租户的需求。

企业在计算物料的制造需求和采购需求时,需要考虑库存的信息,但是有的企业对于具体的库存是由要求的,并不是所有的库存都能用来满足当前的物料需求,因此重新优化 MRP 算法时需要考虑库房的选择性。其次,在产品的 BOM 层级结构上,会出现相同物料分布在 BOM 的不同层级上,公式 (4-1) 描述了节点物料需求的交货期计算方式,子节点的物料需求交货期(sub lateFinish)等于父节点交货期(parent lateFinish)减去子节点物料加工的提前期(sub leadTime)。根据该公式计算得到的两个不同层级的相同

物料的交货期是不同的，传统的物料需求计划会将该物料的毛需求量合并在一起，做唯一的一个独立的相关需求计划，没有考虑到企业生产内部物料配送的情况，不同的企业生产有不同的合并计算方式，因此需要对此种情况实现参数配置化，优化 MRP 算法。

$$\text{sub lateFinish} = \text{parent lateFinish} - \text{sub leadTime} \quad (4-1)$$

4.3.3 算法的详细设计

本节将从企业对物料需求合并以及库房可配置的需求出发，对 MRP 算法进行优化。针对物料需求合并的情况，企业会根据自身的生产能力以及物料配送能力，将交货期差别不太大的物料需求项合并成一个独立需求，但是如果交货期差别太大，那么企业不会合并需求，而是当作两个需求来生产。但是不同的企业生产能力和物料配送能力是不同的，因此将这种合并计算方式参数化，提供一个合并天数的参数用来表示交货期差别在多少天之内的需求项可以合并，适应所有企业的生产方式。然后需要考虑物料的生产批量问题，每个物料都有生产批量的属性，不同企业的物料有不同的生产批量规则，需要根据物料的批量规则计算物料的需求。

本节从这两个属性的设置对 MRP 算法的优化进行了详细的设计，如图 32 所示。

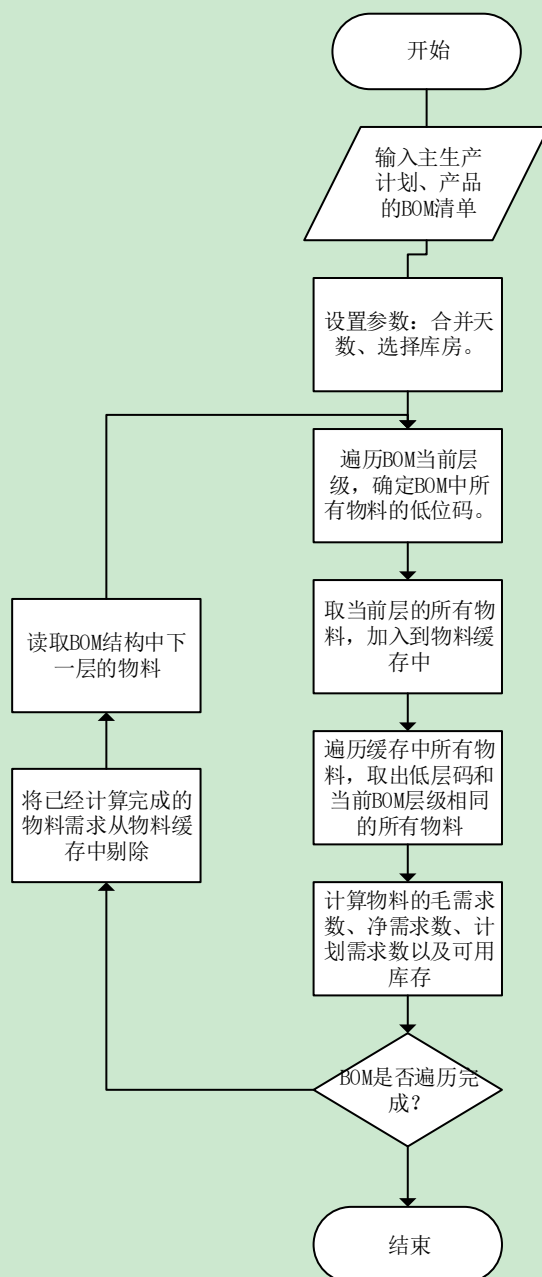


图 32 MRP 运算流程图

MRP 运算过程如下：

(1) 计算当前 BOM 结果中所有物料的低层码，相同物料的低层码以最低层物料为准。

(2) 根据根节点产品需求的交货期（LateFinish）和物料制造的提前期（LeadTime），求出物料的最晚开始加工时间（LateStart），如公式（4-2）。

$$\text{最晚开始时间} = \text{交货期} - \text{提前期} \quad (4-2)$$

(3) 取出 BOM 结构中当前物料的下层子节点物料，将这些物料加入到物料缓存中

等待处理。

(4) 遍历物料缓存中的所有物料，取出这些物料中低层码和当前遍历的 BOM 层级相同的物料，根据上层物料的计划投入量和上下层数量关系计算物料的毛需求。

(5) 推算 (4) 中已经计算毛需求的物料的净需求量，如公式 (4-3)，需要辅助设置“PAB 值”进行净需求的判断和核算。这一步中需要考虑合并天数的问题，需要根据企业设置的合并天数，将交货期满足这个条件的物料需求合并成一个需求，计算该物料的毛需求量。同时根据选择的库房推算需求数。

$$\text{PAB 值} = \text{可用库存} + \text{计划接收量} - \text{毛需求} \quad (4-3)$$

$$\text{当 PAB 值} \geq \text{安全库存, 净需求} = 0 \quad (4-4)$$

$$\text{当 PAB 值} < \text{安全库存, 净需求} = \text{安全库存} - \text{PAB 值} \quad (4-5)$$

(6) 根据生产批量推算计算需求数。

$$\text{当净需求} > 0, \text{计划需求数} = N * \text{批量} \quad (4-6)$$

$$\text{满足计划数} \geq \text{净需求} > (N - 1) * \text{批量} \quad (4-7)$$

(7) 计算预计可用库存数。

$$\text{预计可用库存} = \text{需求数} + \text{PAB 值} \quad (4-8)$$

(8) 保存计划，将计算完成的物料从缓存中剔除，计算 BOM 下一层物料，重复 (4) 到 (7)，循环计算直到 BOM 遍历完成。

对于 MRP 算法的改进主要体现在第 (4) 步和第 (6) 步，第四部中可以根据合并天数的设置，将不同的需求项合批变成同一需求，减少装配的加工准备时间。其次提供库房的选择，可以提高工厂装配时物料选择的灵活性。最后就是生产批量的设定，平衡存储费用和生产准备费的矛盾。

本章小结

本章针对微服务拆分出来的订单任务管理服务、生产计划管理服务、生产指令管理服务以及现场任务执行服务，结合 SaaS 模式对应用软件的要求，分别从功能模型和信息模型进行了详细的设计，然后对整个装配过程的过程模型进行了描述。最后对传统的

MRP 算法进行了改进，是 MRP 算法跟能适应 SaaS 软件下多租户的要求。下一章将对整个系统的实现进行验证。

第五章 系统实现与验证

5.1 系统开发环境与开发技术

5.1.1 系统开发环境

- Windows7、8、10 32/64 位操作系统
- Java 语言开发工具包(JDK1.8+)
- Eclipse J2EE 版本+Dorado7 插件
- Google 浏览器、360 浏览器或者使用谷歌内核浏览器
- Oracle11g 数据库
- SpringCloud 微服务框架
- Tomcat 服务器
- Maven 仓库
- Git 代码版本工具

上述这些开发技术核心依托于 SpringCloud 开源框架。在底层数据库层面，借助 spring+hibernate 数据库 ORM 持久化框架，搭建数据库表记录和程序代码实体间的映射。通过 hql 数据操作语言实现对数据库记录的增删改查等操作。在展现层，基于 Dorado7 的 eclipse 插件，对用户界面进行开发，同时引入 H5、JavaScript 和 JSP 等前端网页语言与用户操作交互。对于图标的显示，引入了基于 JQuery 的 Enterprise-Charts 插件进行数据的可视化。利用 tomcat 服务器作为前端网页的容器，提供处理浏览器请求的 web 服务。利用 Maven 仓库管理整套系统的 jar 包构建，通过 git 版本控制工具实现代码的迭代。整个系统的技术架构如图 33 所示。

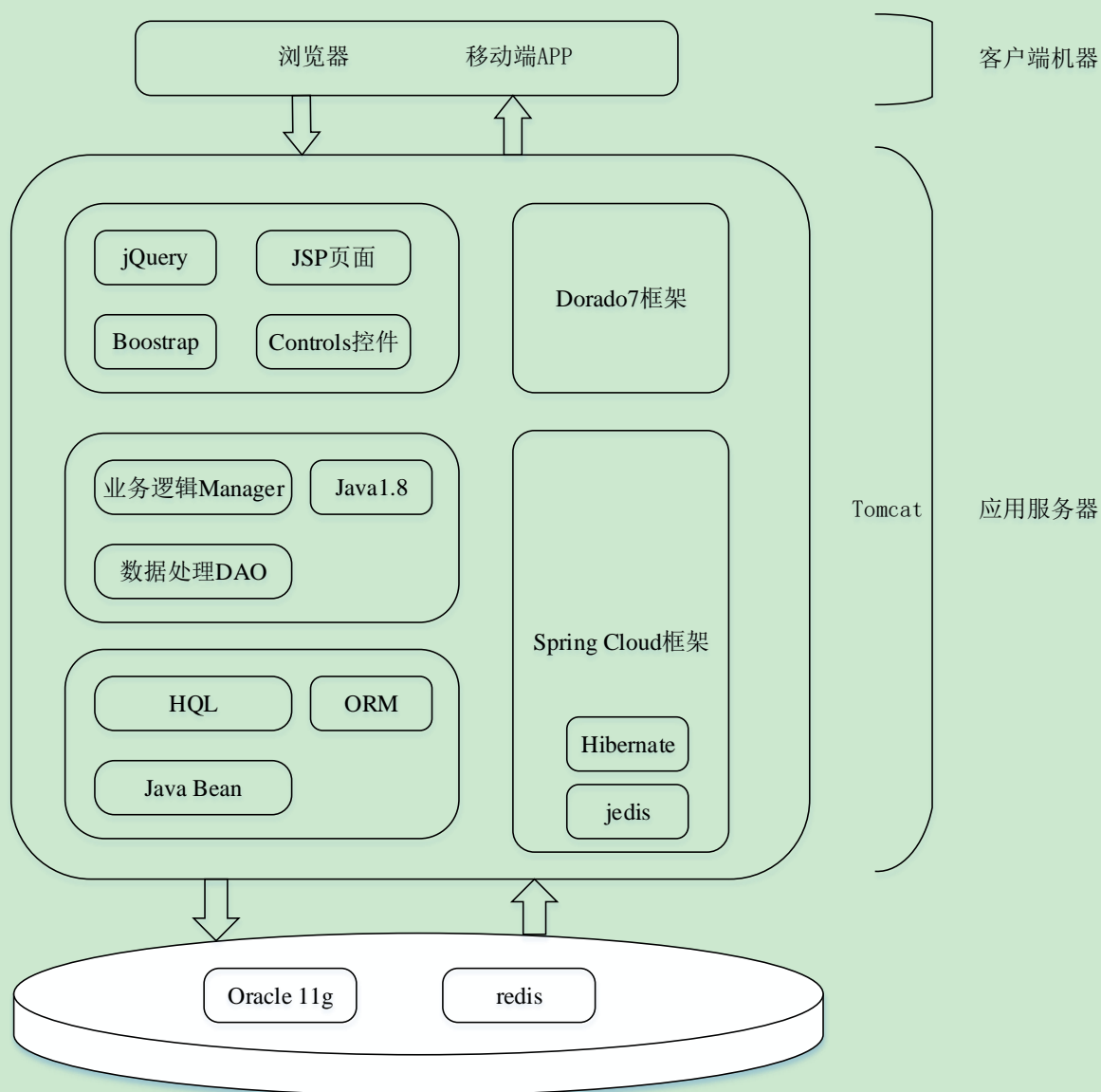


图 33 系统技术架构图

5.1.2 系统运行环境

(1) 客户端

- 操作系统没有限制
- Google 浏览器、360 浏览器或者使用谷歌内核浏览器

(2) 服务端

基于 SaaS 应用环境用户只需要客户端进行远程访问。

SaaS 服务提供者系统运行环境：

● 前台服务服务器：

- apache-tomcat-8.0.26 服务容器

- Java 语言开发工具包(JDK1.8+)
- 后台微服务服务器：
 - Java 语言开发工具包(JDK1.8+)
- 数据库服务器：
 - Oracle11g 数据库
 - Redis 缓存

5.2 系统架构与关键模块实现

本系统是在现有的装配制造执行系统的基础上进行设计和开发的。

5.2.2 数据共享需求分析

5.3 系统核心功能展示

本章小结

结论与展望

本文针对柔性装配，并从功能模型、过程模型、信息模型给出了系统的详细设计方案；研究了 SaaS 应用模式软件

致谢

光阴似箭，日月如梭。转眼间就到了即将毕业的时间，在论文完成之际，对三年来帮助过我的老师和同学们表达由衷的谢意。

首先，要衷心的感谢我的导师杨建军教授在研究学习中对我的谆谆教导，本论文实在杨老师的细心指导下完成的。在研究生期间，杨老师学识渊博、治学严谨、良好的专业素养和高效的做事风格，将使我终生受益并铭记于心。

其次，对机械工程及自动化学院工业与制造系统工程辛勤付出的各位老师，表达深深的敬意与感谢。正是各位老师不遗余力地帮助我们解决在学习科研和生活中遇到的各种问题，才能使我们在学术氛围浓厚的学习科研环境中不断进步。感谢你们孜孜不倦的教学态度和辛勤工作的敬业精神。

然后，我要感谢我所在的实验室的各位兄弟们。感谢邓必超、周勇、韩宝安、黄壮、刘欣、方鹏程等师兄在软件设计和科研问题上的热心指导，让我学到了很多课本上学不到的知识，不仅帮助我提高了技术水平，还提高了我的专业技能。同时，我要感谢我的同窗刘晨硕、温春生，他们是我学习和生活中的强大助力，遇到困难时我们相互探讨相互鼓励，一起解决问题度过难关。感谢刘诚悦、张文昊、闫成龙、冉小川和孔祥龙等师弟，在我的课题完成中提供了莫大的帮助。

借此机会，我还要感谢一直陪伴在我身边的家人。感谢我的父母对我的支持，他们是我坚实的后盾，在每一个难熬的日子，给我鼓励，给我动力，是我在科研路上能够奋发向前。

最后，感谢各位评审老师，在百忙之中评阅我的论文，并提出宝贵意见，谢谢！

校对报告

当前使用的样式是 [北京航空航天大学学报]

当前文档包含的题录共77条

有0条题录存在必填字段内容缺失的问题

所有题录的数据正常

参考文献

- [1] 李伯虎, 张霖, 任磊, 等. 云制造典型特征、关键技术与应用[J]. 计算机集成制造系统. 2012(07): 1345-1356.
- [2] 邢蕊. 基于SaaS的天津市制造业信息化平台的研究[D]. 天津理工大学, 2012.
- [3] 吴坤. 物联网环境下的整车装配过程运行管理方法及应用研究[D]. 合肥工业大学, 2015.
- [4] 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. 2016(03): 18-24.
- [5] 钱芳, 扈静, 葛茂根, 等. 面向机械产品装配过程的物料配送方法研究[J]. 机械工程师. 2011(05): 34-37.
- [6] 傅玉颖, 潘晓弘. 模糊不确定下多物料库存控制与生产批量优化[J]. 浙江大学学报(工学版). 2008(06): 1046-1050.
- [7] 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(04): 755-762.
- [8] Limère V. To kit or not to kit: optimizing part feeding in the automotive assembly industry[J]. 4OR. 2013, 11(1): 97-98.
- [9] 常智勇, 赵杰, 莫蓉. 复杂产品装配执行过程数字化技术[J]. 南京航空航天大学学报. 2009(05): 564-569.
- [10] 刘炜, 刘峰, 倪阳咏, 等. 航天复杂产品智能化装配技术应用研究[J]. 宇航总体技术. 2018(01): 33-36.
- [11] Hui C, Yuan L, Zhang K F. Efficient method of assembly sequence planning based on GAAA and optimizing by assembly path feedback for complex product[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009, 42(11-12): 1205.
- [12] Liu M Z, Wang J L, Mao-Gen G E, et al. Research on abnormal control strategy oriented to complex product assembly process[J]. Journal of Hefei University of Technology. 2011.
- [13] 杨浩, 朱剑英. 基于多Agent的分布式制造执行系统的建模[J]. 中国机械工程. 2004(11): 33-37.
- [14] 张书亨, 杨建军, 邹学礼. 面向敏捷制造车间的制造执行系统研究[J]. 新技术新工艺. 2000(12): 2-4.
- [15] 周华, 杨建军, 邓家盛. 基于全能体的MES构建[J]. 制造业自动化. 2001(02): 13-16.
- [16] 周国利. 基于订单装配的制造执行系统(MES)在N公司的应用[D]. 湖南工业大学, 2013.
- [17] Cheng F, Shen E, Deng J, et al. Development of a distributed object-oriented system framework for the computer-integrated manufacturing execution system: Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146) Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146)[Z]. 1998: 2116-2121.

- [18] 王炳刚, 周伟, 饶运清, 等. 装配流程可配置的制造执行系统的研究与应用[J]. 现代制造工程. 2007(11): 8-12.
- [19] 沈晓杰, 李郡. 基于制造执行系统的统计过程控制在质量管理上的应用[J]. 工业控制计算机. 2012(09): 108-109.
- [20] 吴锋, 马里. 面向MES的装配作业调度系统研究[J]. 杭州电子科技大学学报. 2010(04): 72-76.
- [21] Gandhi P. A Manufacturing Execution System using Siemens' PC Based Automation Technology[J]. 2003.
- [22] Addition I. Modeling of RFID-Enabled Real-Time Manufacturing Execution System in Mixed-Model Assembly Lines[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, (2015-1-14). 2015, 2015(1): 1-15.
- [23] Jagdale K S, Patil S A, Parchandekar S K. A Smart Manufacturing Execution System[J].
- [24] Demirkan H, Cheng H, Bandyopadhyay S. Coordination Strategies in an SaaS Supply Chain[J]. Journal of Management Information Systems. 2010, 26(4): 119-143.
- [25] Bezemer C P, Zaidman A. Multi-tenant SaaS applications: maintenance dream or nightmare?[C]. 2010.
- [26] 刘士军, 张勇, 杨成伟. 基于SaaS服务的中小企业业务协同系统[J]. 东南大学学报(自然科学版). 2011(03): 458-462.
- [27] 向坚持, 陈晓红. SaaS模式的中小企业客户关系管理研究[J]. 计算机工程与应用. 2009(19): 232-235.
- [28] 李卫, 张云勇, 郭志斌, 等. 电信运营商SaaS业务发展研究[J]. 电信科学. 2012(01): 132-136.
- [29] 范卫锋, 吕锋, 贾现召, 等. 基于SaaS模式的大型装备制造业工装信息系统研究[J]. 矿山机械. 2014(08): 117-120.
- [30] 赵立君, 范晓晖. SaaS技术的发展和演进[J]. 现代电信科技. 2007(12): 46-48.
- [31] 罗日新. 面向SAAS应用的多租户数据管理系统研究与实现[D]. 哈尔滨工业大学, 2012.
- [32] 李新明, 廖貅武, 刘洋. 基于SaaS模式的服务供应链协调研究[J]. 中国管理科学. 2013(02): 98-106.
- [33] 霍小军. SaaS模式在电子政务中的应用初探[J]. 电子政务. 2008(01): 73-87.
- [34] 朱华锋, 李伯鸣. 制造数据管理系统的总体设计及其功能实现[J]. 计算机工程. 2000, 26(10): 23-25.
- [35] 刘威, 乔立红, 杨建军. 基于服务的制造数据管理[J]. 计算机集成制造系统. 2009, 15(7): 1342-1348.
- [36] 白俊杰. 虚拟单元制造车间的规划与调度关键技术研究[D]. 南京航空航天大学, 2011.
- [37] 刘晓冰, 孟永胜, 邢英杰, 等. MES环境下组件化制造数据集成管理的研究与实现[J]. 航空制造技术. 2006(03): 73-77.
- [38] 乔东平, 肖艳秋, 罗国富. 面向过程的复杂产品制造数据管理[J]. 现代制造工程. 2013(5): 44-49.
- [39] 林明哲, 杨建军. 基于过程配置的MES制造数据管理方法与应用[J]. 成组技术与生产现代化. 2012, 29(3): 51-57.
- [40] Vegetti M, Larrateguy L, Gonnet S, et al. A Semantic Web-Based Architecture to Support Product Data Management Systems[C]. 2008.
- [41] Feng X. Semantic web technology applied for description of product data in ship collaborative design[C]. 2009.

- [42] Kabbedijk J, Pors M, Jansen S, et al. Multi-tenant Architecture Comparison[C]. 2014.
- [43] 吕海洋, 杨建军. 基于PSL的制造过程信息模型研究与应用[J]. 制造业自动化. 2010, 32(4): 14-17.
- [44] 吕海洋, 杨建军. 基于PSL的制造过程信息模型研究与应用[J]. 制造业自动化. 2010(04): 14-17.
- [45] 高磊, 乔立红. 基于过程规范语言的复杂工艺过程模型建立方法[J]. 航空学报. 2008, 29(4): 1068-1072.
- [46] Kleppe A G, Warmer J, Bast W. MDA Explained: The Model Driven Architecture: Practice and Promise[J]. 2003.
- [47] 葛维进, 陈卓宁, 陈万领, 等. 专用CAPP定义工具的研究和实践[J]. 现代制造工程. 2001(4): 14-16.