# 面向柔性装配的制造执行系统任务管理的研究与实现

# 摘 要·

XXXX.

**关键词：柔性装配；制造执行系统；SaaS；微服务；**

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景及意义

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，云制造服务体系中面临众多的挑战，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。当前云计算服务大致分为三类：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[1]，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。为了加快市场需求的相应。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，基于云服务的制造执行系统的研究还不完善，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[2]。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[3]。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[4]等针对机械产品装配过程中的实时物料配送问题，通过对物料配送计划、物料跟踪管理和实时反馈机制的运用，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[5]等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再订购点和生产批量的问题，用模糊理论对物料库存控制和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[6]等人针对装配制造企业的单件小批量离散生产特点，通过引入工作流管理技术，提出基于工作流的装配车间生产和控制方法，实现了生产过程的装配活动和装配数据的统一管理。

Limère, Veronique[7]针对装配过程齐套配套和现场配送物料的物料供应系统，提出针对齐套配套和现场备料两种供应系统，并对这两种模型进行了评估，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[8]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[9]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[10]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[11]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，建立复杂产品装潢陪过程的实时状态模型。最后射击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过程的研究已经较为成熟。但是目前关于复杂产品装配任务管理的研究主要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

随着制造型企业信息化技术的发展，以企业资源计划（ERP）为代表的管理信息系统开始在制造企业的生产经营中发挥重要的作用。但是随着市场需求的变化和市场竞争的加剧，企业对制造过程的要求不断提高，企业的关注重心从计划的执行结果转移到计划的执行过程，制造执行系统（MES）应运而生。MES的产生弥补了计划和控制系统之间的断层，有效的实现了计划和控制系统的数据传输和共享，同时增强了企业对车间生产的管理和控制。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[12]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[13, 14]的团队针对敏捷制造企业的车间生产管理系统的研究现状，分析了制造执行系统的功能和应用特点，提出了使用先进的MES系统思想和软件建立敏捷车间系统，同时构建了基于全能体的MES解决MES系统的敏捷性。

周国利[15]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[16]针对当前MES系统庞大、冗杂、单一的特点，采用使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[17]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[18]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。

对MES系统的研究不仅集中在对MES系统的应用进行扩展以及通过系统方法对传统的MES系统的重新设计和优化，同时国内外专家学者分析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[19]针对飞机装配作业生产管理复杂的特点以及生产计划与调度难以实现等问题,在研究装配作业调度系统的基础上,提出面向制造执行系统生产模式的飞机装配作业调度系统的结构、功能、模型与调度算法。实现的装配作业调度系统以飞机装配过程为核心,以GIM/GRAI方法为计划决策的依据,利用赋时Petri网建立装配生产线模型,按周期计划安排生产等方法实现生产调度优化,从而使生产现场快速组织装配资源并按时完成生产计划。

Gandhi, Prakash等人[20]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[21]针对混合模型装配生产线适应产品快速变化的需求，提出了基于新型的基于RFID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[22]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

随着服务经济在全球的迅速崛起和云计算的兴起，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是一种同通过Internet提供软件服务的模式，厂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[23]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[24]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[25, 26]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，最后通过一个纹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[25, 26]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[28]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[29]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[29]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个性化的需求，提出了基于配置描述符的流程定制方法，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[30]针对SaaS服务链中AIP和ASP间的协调问题，提出协调契约使免费使用效果达到最优，实现SaaS服务供应链的最优绩效，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[31]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[24]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，没有特别的多研究，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模式的软件研究方法，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，将软件分为不同的模块，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，将装配系统任管理模块拆分出来的功能模块采用微服务的系统框架，将功能模块服务化，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

本文的具体组织结构如下：

第一章，绪论。首先论述本文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、SaaS化服务定制的实现以及SaaS模式下统一模型的建立研究SaaS模式的软件研发的关键技术。

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。对全文的研究进行总结并且对未来的工作进行展望。

全文的技术路线结构如图所示。

# 第二章 基于SaaS的应用软件开发模式和关键技术

## 2.1 SaaS应用模式介绍

### 2.1.1 SaaS模式基本概念

SaaS[32]是Software-as-a-service（软件即服务）的简称，是一种基于互联网提供服务的创新型软件应用模式，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1-a与图1-b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，向软件服务提供商订购需要的软件服务。用户从传统的购买软件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，意味着服务提供商可以通过租赁的形式向租户提供软件服务，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 1-a 传统软件应用模式 图 1-b SaaS软件应用模式

### 2.1.2 SaaS模式优势

SaaS作为一种新兴的软件应用模式，与传统的软件应用模式相比，有以下几个方面的优势。

（1）软件的服务模式从购买转变为租赁。SaaS服务提供商将应用软件部署在统一的服务器上，取消了传统的软件授权收费方式，降低了用户在软硬件方面管理和维护的费用。相对于传统软件而言，SaaS模式在软件部署、管理、升级维护等方面均有较大的优势。

（2）SaaS项目部署周期短、风险低。与传统软件相比，SaaS模式统一管理服务器上部署的软件，即使部署失败，也不会向传统软件部署一样所有前期投入几乎全部浪费，降低了项目投资的风险。

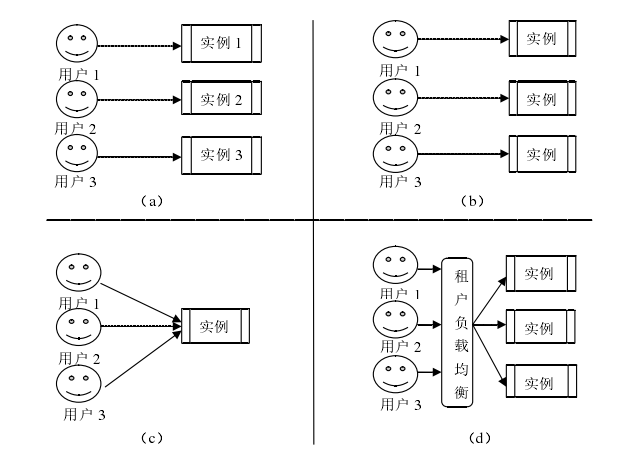
（3）使用方便。传统软件服务模式受限于控件和时间的限制，需要在用户本地的服务器上安装部署软件，并且通过授权才能使用，一旦软件使用过程中需要维护或者用户对软件提出了新的需求，那么就需要软件研发人员实地调试并重新安装部署。而SaaS模式服务软件可以方便租户在何时何地都能通过Internet接入使用，无需安装，从而为租户带来极大的便利。

（4）服务定制。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，如果用户对软件的功能需求发生了变化，可以通过更改用户定制的服务达到需求目的。

（5）安全可靠。SaaS模式应用软件运行在服务提供商的统一的服务器中，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客户端来访问软件服务，即使客户端被木马软件入侵，不会影响到服务器端的数据安全。实现应用和部署分离。

### 2.1.3 SaaS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]。



如图（a）所示，第一级成熟度的SaaS模式与传统的应用软件供应商（如ASP）提供的软件应用模式相同，在这种软件成熟度模型中，软件提供商为每个客户定制一套软件，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。这一级的成熟度实例与传统的软件应用模式类似，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。当客户提出新需求时，只需要对代码做少量的更改就能立刻满足客户的需要。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。通过负载均衡为每一个客户分配到不同的应用实例上，通过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，提高软件的灵活度。

### 2.1.4 基于云计算的其他服务模式

本课题的研究内容主要是围绕柔性装配制造执行系统SaaS化这一课题展开，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。而云计算中的云分为基础设施云、平台云以及应用云，反映了云计算架构的基本层次。美国国家标准与技术研究院（NIST）提出云架构包含基础设施层（Infrastructre layer）、平台层(Platform layer)和应用层(Application layer) 3 个基本层次。其每层的功能以服务的形式提供出来，这就是云服务类型分类方式的来源，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，云计算服务提供商专注于云架构中的某一层服务架构开发服务，而无需同时提供三个层次的服务。如Amazon云计算服务EC2[36]，Google的 GAE和Saleforce 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。事实上，上层服务的提供者可以利用位于下层的服务架构来实现云计算服务架构，无需服务提供商自己实现所有架构和功能。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，为了加快市场需求的相应。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，共享生产资源和功能。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存取数据，成本低于部署在本地的情况，但是也就意味着用户与数据在一定程度是隔离的[37]。所以SaaS模式下必须保证数据的安全可靠。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，实现数据在物理和逻辑层面同时隔离，这也是用户认为的数据最安全的方式。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，一旦发生物理机的顺坏或者宕机，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。

（2）部分独立架构

该模式是在完全独立架构的基础上扩大数据共享程度，所有用户给你共享数据库，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。

（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。

本课题研究的是面向的制造业中众多的装配企业，有大量的潜在用户基础，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，因此完全共享的数据库架构更适合装配系统的研发。

### 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。

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。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两个方面实现：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、主生产计划管理、生产指令管理、装配任务管理、反馈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；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。如图为配置服务的整体架构：

### 2.2.3 多租户协作

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在不同的专门化装配生产，最后在总装厂进行总装配生产。

针对这种多企业联合生产的制造装配模式

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。因此在设计基于SaaS模式的柔性装配制造执行系统时，需要考虑到多企业的联合生产装配。

1. 多租户协作装配的现状
2. 通过设置协作任务，协作任务中

实例：飞机的装配地点，离散装配

不仅企业内部有外协工作，企业之间也可以实现外协生产制造

### 2.2.4 基于PSL的模型统一化（模型驱动）

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通过过程集成,将先进的管理理念与信息技术相结合，实现产品开发过程的各阶段之间，以及产品开发与产品生命周期下游其他过程之间的信息交互和协同。因此通过分析不同制造企业用户的场景，并且研究不同业务场景下对装配系统的需要，基于过程规范语言（Process Specification Language, PSL）构建产品装配制造过程统一信息模型，满足装配产品生命周期制造数据一致性的要求。

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猫叔方法，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。

③基于PSL构建装配过程统一模型的方法 和PSLX（Planning and Scheduling Language on XML Specification）规范

## 本章小结

本章首先对SaaS模式做了详细的介绍，根据柔性装配制造执行系统和SaaS模式的要求，从多租户数据管理模式、服务可配置、多租户协作装配和统一模型的建立四个方面对SaaS模式MES软件研发的关键技术做了详细的介绍。下一章将从这几个关键技术出发，研究基于SaaS的装配任务管理模式的系统架构。

# 第三章 基于SaaS的装配任务管理模式的系统架构设计

## 3.1 需求分析

## 3.2 服务体系架构

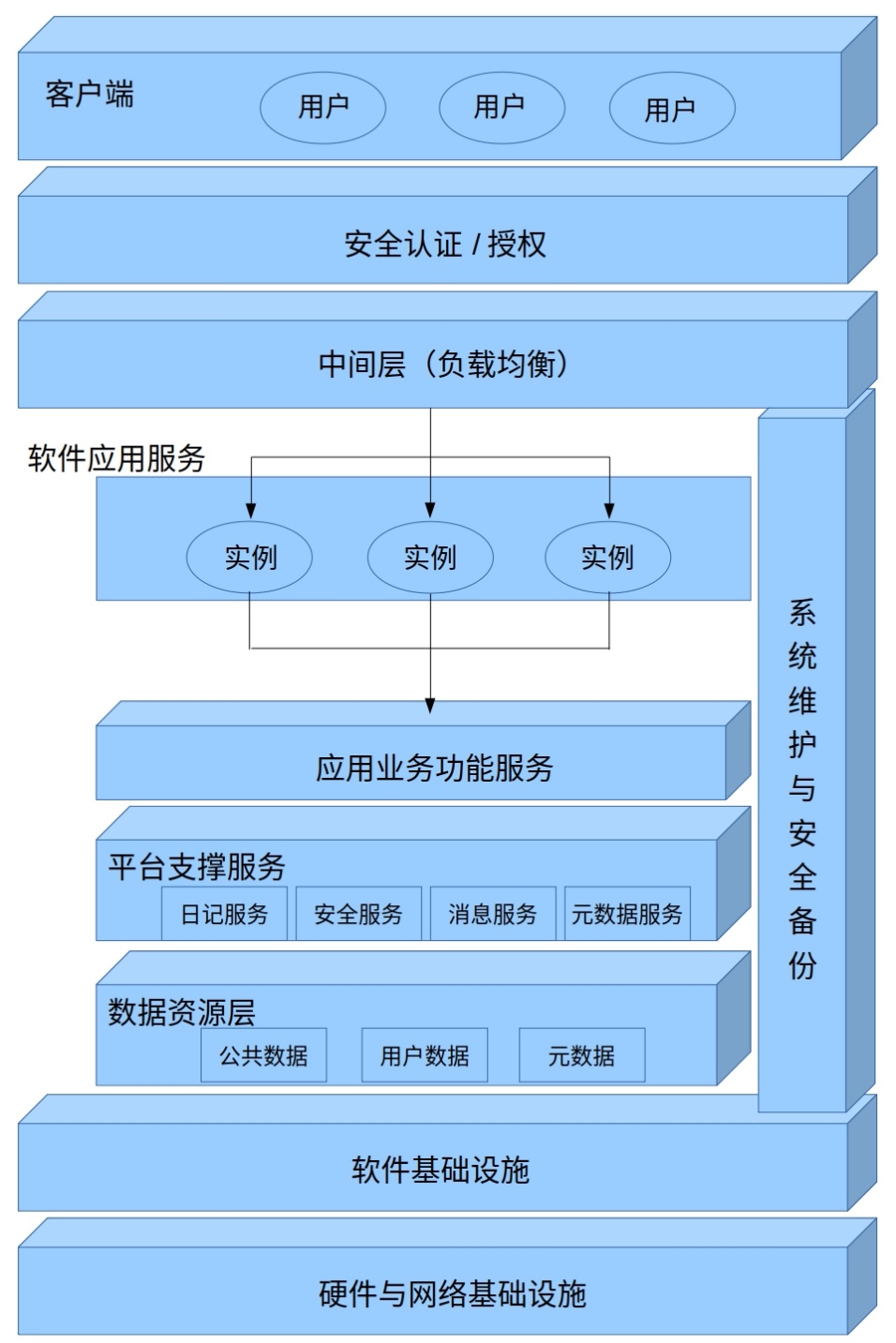


图 2 SaaS模式软件架构

分析SaaS应用模式的特点，采用微服务的系统框架来实现SaaS的应用模式。

## 3.3 微服务框架设计

### 3.3.1 微服务理论研究

### 3.3.2 微服务优势和现状

### 3.3.3 微服务架构设计方案（基于SaaS模式）



图 3 微服务系统设计方案

## 3.4 基于SaaS微服务系统实现

怎么实现系统调用，结合SaaS应用模式拆分服务，从服务定制的角度和柔性装配的角度

系统服务拆分，将系统划分为：订单任务管理服务、生产计划管理服务、生产指令管理服务、任务执行管理服务。通过服务的定制化为租户配置需要的业务服务功能。

### 3.4.1 服务定制化

### 3.4.1.1 服务定制化需求分析

①从组织维度，不同的组织（车间、工段、班组等）需要不同的系统功能。

②从业务维度，不同的人员角色需要配置当前人员需要的系统功能。

③从功能维度，根据不同工厂装配自动化的实现程度，配置系统功能。

不同维度的数据统一模型。

### 3.4.1.2 微服务拆分方案

采用微服务的系统设计方案，将柔性装配任务管理系统拆分出不同的服务模块，保证服务的可用性，服务之间数据的一致性（各服务之间相互调用）。

防止陷入微服务模式化陷阱。

根据当前制造企业的装配现状，计划拆分的服务：

订单任务管理服务

生产计划管理服务

生产指令管理服务

任务执行管理服务

### 3.4.1.3 服务配置

拆分出不同的业务，从组织、业务和功能角度为定制服务的角色分配系统功能。

### 3.4.2 SaaS多租户管理

### 3.4.2.1 多租户数据模型设计（数据一致性、数据隔离性、数据传播、数据分组）

数据隔离性：将不同租户之间的数据分离开。

数据传播：实现不同租户之间协作装配。

数据分组：保证不同租户之间数据资源共享。

### 3.4.2.2 多租户协作设计

## 3.4 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 基于SaaS的装配任务管理系统功能开发

## 4.2 柔性装配任务管理功能模型

①通过用例图和流程图确定各个服务之间的功能边界

### 4.2.1 订单任务管理服务（从用例图去分析功能）

### 4.2.2 生产计划管理服务

### 4.2.3 生产指令管理服务

### 4.2.4 任务执行管理服务

## 4.3 柔性装配任务管理信息模型（详细的统一模型的设计，PSL信息模型）

### 4.3.1 订单任务信息模型（从类图以及信息模型以及其他的图去描述管理过程）

### 4.3.2 生产计划信息模型

### 4.3.3 生产指令信息模型

### 4.3.4 任务执行信息模型

## 4.4 柔性装配任务管理过程模型（服务流程控制）

### 4.4.1 总体过程模型（从流程图中去描述这些过程）

### 4.4.2 任务执行过程模型

## 4.5 基于SaaS模式的MRP算法优化

### 4.5.1 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。为了解决这种矛盾，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是总装、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[40]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[41]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[42]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[43]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[44]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）和库存状态。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 5 MRP逻辑关系

### 4.5.2 算法详细设计

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 6眼镜的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

③列出需求点，分点去论述（图），最后通过流程图和公式设计

③在SaaS应用模式下的对MRP提出的新要求（能够适应不同装配模式的要求）（为了适应多租户，可以查找到另一个用户的数据，主要是库存的共享，对库存进行分析，不要和供应链扯上关系）。

①流程图

②计算公式

### 4.5.3 不同模块下算法的适应性（参数配置）（物料的库存在不同的地方属于供应链之间的问题）

### 4.5.4 数据一致性

## 本章小结

# 第五章 系统实现与验证

## 5.1 系统开发环境与技术

### 5.1.1 系统开发环境

### 5.1.2 系统运行环境

## 5.2 系统架构与关键模块实现

### 5.2.1 SaaS服务订制化

根据各租户装配流程和装配现代化的实现程度定制以下服务。

主要实现以下几点：1.服务之间数据的传输。2.根据租户的装配流程实现从订单🡪计划🡪生产指令🡪生产任务🡪反馈的流程，也可以自定义需要的服务，比如部分制造业企业是直接下达生产计划，那么可以从计划🡪生产指令🡪生产任务🡪反馈的流程。某些制造企业的装配现代化程度较低，那么可以直接配置从下达生产指令或者生产任务开始，来配置整个服务。因此可以实现从装配服务的模块化到制造企业装配MES的实例化。3.根据各个用户之间的协作关系，管理多租户的制造数据，并且实现各个租户定制的柔性装配制造执行系统之间业务流转，制造外协。

### 5.2.1.1 订单管理

①订单数据集管理

②订单和计划数据集关联

### 5.2.1.2 计划管理

①计划数据集管理

②物料需求计划MRP改进

③计划和生产指令数据集关联

### 5.2.1.3 生产指令管理

①生产指令数据集管理

②生产指令和生产任务数据集关联

③生产指令层级关联

### 5.2.1.4 生产任务管理

①生产任务数据集管理（AO，FO）

②生产任务完工反馈管理

### 5.2.2 SaaS多租户功能

①多租户独立生产

②多租户协作

## 5.3 实例展示(主要是界面展示，整个业务流程)

①SaaS化多租户应用展示

②SaaS化定制服务展示

③业务功能展示（从下达订单到任务完工反馈整个流程的展示）

## 本章小结

# 第六章 总结与展望

## 6.1 工作总结

## 6.2 工作展望

# 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，对三年来帮助我的人表达由衷的谢意。

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！

# 参考文献

**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46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] 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] Limère V. To kit or not to kit: optimizing part feeding in the automotive assembly industry[J]. 4OR. 2013, 11(1): 97-98.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 张书亭，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.

[14] 周华，杨建军，邓家盚. 基于全能体的MES构建[J]. 制造业自动化. 2001(02): 13-16.

[15] 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.

[16] 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]. 19982116-2121.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 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.

[20] Gandhi P. A Manufacturing Execution System using Siemens' PC Based Automation Technology[J]. 2003.

[21] 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.

[22] Jagdale K S, Patil S A, Parchandekar S K. A Smart Manufacturing Execution System[J].

[23] Demirkan H, Cheng H, Bandyopadhyay S. Coordination Strategies in an SaaS Supply Chain[J]. Journal of Management Information Systems. 2010, 26(4): 119-143.

[24] Bezemer C P, Zaidman A. Multi-tenant SaaS applications:maintenance dream or nightmare?[C]. 2010.

[25] 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.

[26] 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.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 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.

[30] 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.

[31] 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.

[32] 刘蒲. 基于SaaS模式下中小企业信息化建设研究[D]. 延边大学, 2014.

[33] 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.

[34] Kwok T, Nguyen T, Lam L. A Software as a Service with Multi-tenancy Support for an Electronic Contract Management Application[C]. IEEE, 2008.

[35] 陈强. 基于SaaS模式的题库平台研究[D]. 首都经济贸易大学, 2017.

[36] 袁玉宇，胡文博. 基于IaaS云计算平台的弹性计费模型[J]. 中兴通讯技术. 2012(06): 34-37.

[37] 叶利娜. 基于SaaS模式的工艺设计服务研究[D]. 浙江大学, 2010.

[38] Mietzner R, Leymann F. Generation of BPEL Customization Processes for SaaS Applications from Variability Descriptors[C]. 2008.

[39] 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.

[40] 柯耀杰，韦拥欧. 汽车企业物料需求计划优化控制研究[J]. 企业科技与发展. 2013(14): 25-27.

[41] 张迪. 基于节拍预测的Job Shop作业车间物料需求计划研究[D]. 合肥工业大学, 2017.

[42] Plenert G. Focusing material requirements planning (MRP) towards performance[J]. European Journal of Operational Research. 1999, 119(1): 91-99.

[43] 洪跃山，胡燕. 物料需求计划的实现方法[J]. 电脑与信息技术. 2002(01): 50-52.

[44] 程控革扬. Mrp Ⅱ/ERP原理与应用[M]. 清华大学出版社, 2006.