

## 1.1 柔性制造单元

### 1.1.1 柔性制造单元的外延

#### 1. 数字化制造的意义

制造业直接体现一个国家或地区的经济和综合实力,体现一个国家或地区的生产力水平,是国民经济的主体,是立国之本、强国之基、兴国之器。

随着时代的变迁,制造业的发展重点也发生了巨大的变化。从18世纪开始,随着科学技术的发展及需求的牵引,人类社会逐渐进入工业革命时代。如图1.1所示,历史上的工业革命有三次,可大致归纳为第一次机械化工业革命、第二次电气化工业革命和第三次数字化工业革命,而正在到来的第四次工业革命则是以智能化——新一代人工智能(artificial intelligence, AI)为标志的智能制造。

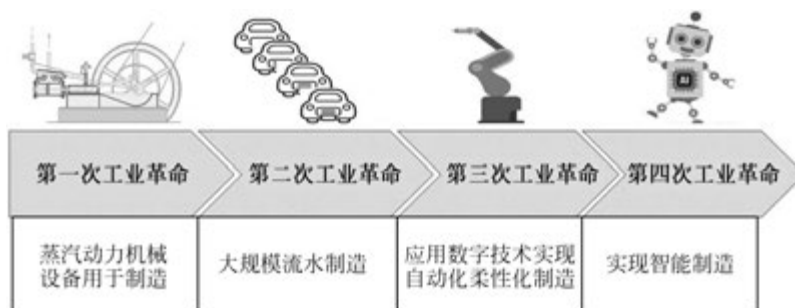


图 1.1 工业革命的历史发展路程

人工智能好比智能制造的“大脑”,它使制造系统更加柔性、敏捷和智能,从而使制造系统快速应对不可预测的环境变化,实现智能制造系统与混沌环境的和谐。数字化制造是智能制造的基础,没有数字化,智能制造将是无源之水、无本之木。数字化制造是实现智能制造的必由之路,或者说,实现制造业数字化转型(digital transformation)是智能制造成功的关键所在。

数字化制造起源于20世纪中期,主要技术与系统有CAX/PDM/PLM、SCM/ERP/

CRM、APO/MES/WMS 及 SCADA/FCS/PLC 等。数十年来,国内外对数字化制造的研究和应用越来越深入,但是对数字化制造的定义却没有统一的定论。美国国家标准与技术研究院(NIST)将数字化制造定义为:在整个产品生命周期内,通过数字化技术提高产品、流程、企业的性能,同时缩短周期,降低成本。本书编者认为,数字化制造是指紧密围绕制造系统自身的业务场景,在精益管理(业务过程化、过程模块化、模块标准化)的基础之上,通过标准化、数字化、网络化和智能化技术系统,实现制造过程的全面集成和数据的互联互通;并在此基础之上,拓展和增强制造系统的数据感知、自主决策和精准执行能力,实现从以“过程为中心”的事务处理方式向以“数据为核心”的智能决策方式转变,从而优化制造过程、创新管理手段、变革商业模式、提升系统柔性,实现制造系统的提质、增效、降本、绿色和安全可持续发展目标,以适应复杂多变的环境。

数字化在企业发展过程中的作用已经从提升效率和劳动生产力的辅助角色上升为企业基础创新和创造的使能者,进而演变为支持企业数字化转型(转型为数字商业模式、数字运行模式、数字生产模式、数字人才和技能)的核心角色。数字化将助力传统制造企业实现如下转型升级。

(1) 实现向大规模定制化制造的转型。传统制造业是以少品种、大批量的“大规模制造”方式展开的,流水线生产按库存来销售。而在市场竞争激烈、用户需求不断变化及产品个性化需求逐步增强的时代,企业借助物联网、大数据和云计算,可与用户进行深度交互,广泛征集需求,运用大数据分析建立排产模型,依托柔性生产线(一条生产线可以生产不同型号的产品),在保持规模经济性的同时提供个性化的产品,实现向以用户为中心的大规模定制化制造的转型,有效满足市场的多样化需求,解决制造业长期存在的库存和产能问题,实现产销动态平衡。

(2) 实现制造向服务化的延伸和转型。传统制造企业是以生产产品为中心,根据产品成本、物流成本和一定的利润定价,通过销售产品获取利润。产品售出之后,一般不干预产品的使用过程和运营效率,只有当产品出现问题的时候,才提供运维和维保。制造向服务化延伸和转型是指企业通过在产品上添加感知模块实现产品联网与运行数据采集,并利用大数据分析提供多样化服务,实现由销售产品向销售服务的拓展与转型,有效延伸价值链条,扩展利润空间。制造业服务化延伸和转型已经成为越来越多制造企业销售收入和利润的主要来源,成为制造业竞争优势的核心。

## 2. 数字化制造的模式

如图 1.2 所示,数字化制造模型分为如下三个层次。

### 1) 数字化企业层

数字化企业层(digital enterprise layer)位于数字化制造模型的最高层,该层基于全面、实时和准确的工业大数据,辅助企业管理者面对行业环境的复杂多变做出敏捷反应和科学决策,实现包括客户、企业员工、供应商和合作伙伴在内的全价值链优化协同,制订合理有效的企业中长期生产计划等。该层主要解决企业生产什么、生产多少的问题。该层具有代表性的数字化系统有:战略企业管理(strategy enterprise management, SEM),客户关系管理(customer relationship management, CRM),供应链管理(supply chain management, SCM),CAX

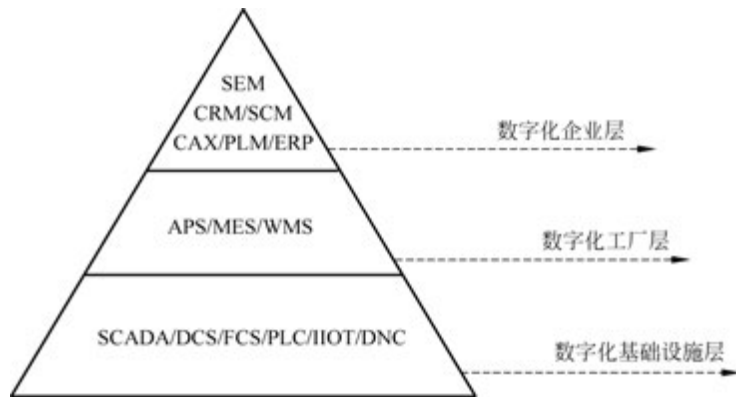


图 1.2 数字化制造模型的两个层次

(包含计算机辅助设计(computer aided design, CAD)、计算机辅助工程(computer aided engineering, CAE)、计算机辅助工艺规划(computer aided process planning, CAPP)及计算机辅助制造(computer aided manufacturing, CAM)), 产品生命周期管理(product lifecycle management, PLM)及企业资源计划(enterprise resource planning, ERP)等。

### 2) 数字化工厂层

数字化工厂层(digital factory layer)位于数字化制造模型的中间部位, 介于数字化企业层和数字化基础设施层之间, 负责对整个工厂的生产调度、物流管理、设备运维、质量控制和能耗监控等制造活动进行控制, 解决企业怎么生产的问题, 实现从订单下达到订单完成的整个生产过程的优化管控。该层具有代表性的数字化系统有: 高级计划与排程(advanced planning & scheduling, APS)、制造执行系统(manufacturing execution system, MES)及仓库管理系统(warehouse management system, WMS)等。

### 3) 数字化基础设施层

数字化基础设施层(digital infrastructure layer)位于数字化制造模型的最底层, 该层功能体现为对生产过程和设备的控制。该层数字化系统主要有: 监控与数据采集系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)、分散控制系统(distributed control system, DCS)、现场总线控制系统(fieldbus control system, FCS)、可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)、工业物联网(industrial internet of things, IIOT)及分布式数控(distributed numerical control, DNC)等。

## 3. 数字化工厂的作用和类型

### 1) 数字化工厂的作用

数字化工厂是指将传统工厂的生产流程、设备、人员、信息等要素进行数字化、网络化和智能化的改造, 实现生产过程的可视化、可控化、可预测化。数字化工厂通过集成先进的制造技术、信息技术、管理技术和人工智能技术, 形成了一个高度集成、高效协同、灵活可变的制造系统。

数字化工厂的作用主要体现在通过数字化技术对制造全过程进行动态重构与优化, 从

而提升生产效率与响应速度,降低运营成本与资源浪费,提高产品质量与一致性,增强柔性制造能力,实现全链条协同与透明化管理,推动绿色可持续化发展。

数字化工厂是连接企业计划层与车间控制层的枢纽,是人、机、料、法、环、测等全生产要素的综合管理系统。

数字化工厂的核心功能模块主要包括生产计划与调度、质量控制、设备维护、数据采集与分析、库存与物料管理、工艺管理、追溯与追踪、集成与接口管理等。

数字化工厂是将产品从设计意图转化为实体产品的关键环节,填补了企业计划层与车间控制层之间的“鸿沟”,因此它在数字化企业层与数字化基础设施层之间起着“枢纽”的重要作用,如图 1.3 所示。

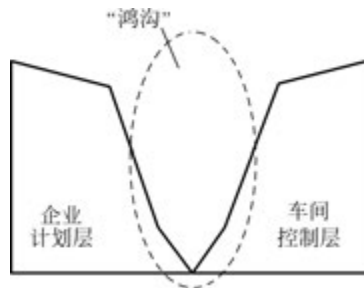


图 1.3 数字化工厂层起着枢纽的重要作用

## 2) 数字化工厂的类型

数字化工厂大致分为流程型工厂 (process manufacturing) 和离散型工厂 (discrete manufacturing) 两大类,它们之间的对比如表 1.1 所示。

表 1.1 流程型工厂与离散型工厂的对比

| 对比项  | 流程型工厂   | 离散型工厂  |
|------|---|--|
| 主要特性 | 工艺过程是连续的,物料呈连续状态通过整个制造过程;工厂自动化程度较高;设备注重稳定性和高效性以满足批量生产的需求  | 多品种、小批量制造模式;产品经由一系列不连续的工序制造而成;工艺复杂多变;制造系统具有较高的制造柔性             |
| 应用行业 | 石化、食品、医药、电力、能源、水泥、造纸、冶金等行业  | 汽车、飞机、兵器、航天、船舶、电子设备、机床、家用电器等行业                                 |
| 基础数据 | 物料(material)和物料批次(batch);<br>资源(resource);<br>生产版本(production version)包含:<br>主配方(master recipe);<br>物料清单(BOM) | 物料;<br>工作中心(work center);<br>工艺路线(routing);<br>物料清单;<br>生产辅助资源 |
| 生产计划 | 销售预测计划+销售订单;<br>模拟计划(simulative planning);<br>物料需求计划(MRP)   | 销售预测计划+销售订单;<br>模拟计划;<br>物料需求计划                                |

续表

| 对比项  | 流程型工厂  | 离散型工厂   |
|------|--|---|
| 生产控制 | <p>流程订单(process order)控制工厂内部的全部生产过程,即开始于需求计划,结束于产成品发货。主要制造过程如下:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 订单创建;</li> <li>(2) 原料及设备能力的可用性检查;</li> <li>(3) 生产调度计划及优化(CRP);</li> <li>(4) 订单成本计划(costing);</li> <li>(5) 生产版本确定;</li> <li>(6) 原料批次确定和产品批次编码分派;</li> <li>(7) 物料数量计算;</li> <li>(8) 订单下达;</li> <li>(9) 下达过程指令到过程控制系统;</li> <li>(10) 从过程控制系统上传实际过程数据;</li> <li>(11) 物料下达;</li> <li>(12) 工时、数量报工;</li> <li>(13) 在线质量检测;</li> <li>(14) 产品及副产品(co-product)入库;</li> <li>(15) 订单月结;</li> <li>(16) 批次档案管理;</li> <li>(17) 订单存档</li> </ol> | <p>生产订单(production order)控制工厂内部的全部生产过程,即开始于需求计划,结束于产成品发货。主要制造过程如下:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 订单创建;</li> <li>(2) 组件、工具及设备能力可用性检查;</li> <li>(3) 生产调度计划及优化;</li> <li>(4) 订单成本计划;</li> <li>(5) 订单下达;</li> <li>(6) 下达过程指令到过程控制系统;</li> <li>(7) 从过程控制系统上传实际过程数据;</li> <li>(8) 物料下达;</li> <li>(9) 工时、数量报工;</li> <li>(10) 在线质量检测;</li> <li>(11) 产成品收货入库;</li> <li>(12) 订单月结;</li> <li>(13) 订单存档</li> </ol> |

注:生产订单也可以使用生产版本和批次管理。

柔性制造单元(flexible manufacturing cell,FMC)属于离散型制造模式,它提供了一种完整的多品种、小批量、短交期的数字化工厂解决方案,因此可将柔性制造单元看作“最小的离散型数字化工厂”,即麻雀虽小,五脏俱全。通过众多柔性制造单元的分工合作,整个数字化工厂就可以通过标准化、积木式、模块化、分区化的方式自由地变换组合,从而极大地提升数字化工厂适应内外部环境变化的能力。

## 1.1.2 柔性制造单元的内涵

### 1. 刚性生产与柔性制造

在需求快速多变的今天,制造业企业最重要的一项能力是敏捷应对复杂的、不确定的内外部环境,快速满足客户的需求变化。敏捷应对包括决策智能化、设计标准化、制造柔性化等一系列策略,其中,制造柔性化是指一个制造设备或系统对生产需求变化的适应能力。制造柔性化主要体现在制造设备柔性化、工艺柔性化、产品柔性化、环境柔性化和控制系统柔性化等方面。

“柔性制造”是相对于“刚性生产线”而言的,传统的“刚性”自动化生产线,其加工设备是专为某一类产品设计的专用机床,加工工艺是固定的,适用于单一品种的大批量以产定需的生产方式;而柔性制造是以差异化需求为导向、以需定产的多品种、中小批量、短交期、离散型的大规模定制化生产模式,其设备通用,工序成组,没有固定的生产节拍,采用非顺序化的

物料输送等。

大规模定制化以减少产品内部多样化、增加产品外部多样化为目标,建立在相似性原理、重用性原理、全局性原理和定制点原理等基础之上;大规模定制化为解决定制与大批量之间的矛盾指明了方向和思路;大规模定制化可用于大批量定制的设计、管理和制造等各环节。

大规模定制化的基本原理如下。

(1) 相似性原理。相似性是指大规模个性化定制产品族在客户需求、产品功能、产品结构、零件几何特性及生产过程等方面存在的相似性。定制的关键是识别和利用不同产品和过程中存在的大量相似性。

(2) 重用性原理。重用性是指大规模个性化定制产品族中相似单元的可重新组合和可重复利用性质。大规模定制产品族中存在大量的相似单元,通过这些单元的重用,将定制产品的生产问题转化为或部分转化为批量生产问题。

(3) 全局性原理。全局性原理要求从全局出发,解决批量生产与定制生产的矛盾,面向整个产品族和产品族全生命周期提高相似性,并尽可能将相似性转化为重用性。

(4) 定制点原理。定制点是指企业生产活动由面向库存的生产转向面向客户订单的定制生产的转换点。

## 2. 柔性制造系统的发展

自1967年英国莫林斯(Molins)公司建成首条柔性制造系统(FMS)开始,FMS便以其独特的优势发展颇为迅速。FMS能够根据制造任务或生产环境的变化迅速进行调整,实现多品种、中小批量的柔性化和个性化生产;同时,FMS还可以大幅节约人力成本,提高生产率,缩短生产周期,降低在制品数量,更重要的是解决产品加工的同—性问题,提高产品质量水平。20世纪90年代后,FMS出现了新的发展趋势,即向着柔性制造单元(FMC)的方向发展,这种发展方向出现的主要原因是FMS需要巨大投资但生产柔性有限。

FMC是20世纪90年代发展起来的简易的、小型化、经济型、具有模块化高柔性的制造系统,其功能介于单台数控机床与传统柔性制造系统之间,其具有投资少、柔性高的特点,因而得到了充分发展,深受企业欢迎。

FMC彼此之间都是独立平等的,不存在隶属关系,各FMC都能独立完成各自的任务而不受其他单元干预;同时,FMC之间可以通过工艺成组技术和模块化的方式进行灵活组合,这种以模块化方式构建的新型FMS完全不同于传统的FMS。新型FMS不再是一条传统的、僵硬的线性流水线的布局形式,而是将新型FMS分解为若干个分布的模块化封装组件,然后通过过程重组(工序重构)的形式将这些模块化组件动态地连接在一起,这种组合方式解构了雷打不动的串行工序,重新思考工序间的自由组合,因此具有更大的制造柔性,给予了企业更大的灵活性,为实现用户最大差异化提供了制造系统保障。传统的FMS是面向已知产品满足生产需求;而新型的FMS是面向未知产品进行生产的。

如今的FMC不仅能完成机械加工,还能完成钣金加工、锻造、焊接、铸造、激光、电火花等多种加工方式,以及喷漆、热处理、注塑和橡胶膜制等工作。而从整个制造业生产的产品来看,现在的FMC已不再局限于生产机床、汽车、飞机、舰船等产品,而是逐步扩展并应用于计算机、手机、半导体、化工等产品的生产之中。

### 3. 柔性制造单元的组成

FMC 由 2~4 个数控加工系统组成,它们之间由自动化物料储运系统连接,并由计算机控制,形成一个小型化、经济型、高效率和高柔性的计算机控制制造系统。

FMC 由以下子系统组成。

#### 1) 加工子系统

加工子系统的功能是以任意顺序自动加工各种工件,并能自动更换工件、变换加工工具,通常由若干台数控机床和在线质量检测系统(如三坐标测量仪)构成。

每台数控机床都自带刀库,可以自动换刀,但机床刀库中的刀具数量存在上限。在工厂层面有刀具管理系统,它可以对工厂的中央刀库和 FMC 的机床刀库进行统一管理。

#### 2) 物料储运子系统

物料储运子系统一般由工件装卸站、托盘缓冲站、物料运送装置(如 AGV(自动导向小车)、上下料工业机器人、输送线)和自动化立体仓库等组成,主要用于完成工件、托盘以及其他辅助物料的装卸、运输和储存等工作。

#### 3) 控制子系统

有关资料表明,机械制造过程中 95% 的时间消耗在非切削过程中,而在 5% 的加工时间中,切削时间只占 30%,辅助时间(如排队、安装、调整、卸载、等待等时间)占了 70%。因此,只有对 FMC 的制造过程进行全面协调与控制,才能从整体上实现“多快好省”的优化目标。由此可见,FMC 整体性能的优劣,除了受 5M2E,即人(man)、机(machine)、料(material)、法(method)、测(measurement)、环(enviroment)和能(energe)等因素的影响外,很大程度上还取决于 FMC 控制系统性能的优劣。

FMC 的控制子系统是 FMC 的“大脑”和“神经网络中枢”,它贯穿系统的各方面和各层级,协调和控制系统的各环节(如加工设备、质检系统、物流设施、设施维护、操作人员等),按“优化的动作序列”协调一致地运行,以获得系统最佳运行效果。

FMC 控制子系统的整体性能是由体系架构、智能程度、建模方法和实现技术等方面决定的。

#### 4) 与其他系统的集成

柔性制造单元还可与其他系统(如 CAX/PLM/ERP/APO/MES/WMS/SCADA/IIOT 等系统)实现集成。

### 4. 上海大学“上海市智能制造及机器人重点实验室”的 FMC 简介

如图 1.4 所示,上海大学“上海市智能制造及机器人重点实验室”携手上海发那科机器人有限公司、罗克韦尔自动化(中国)有限公司、思科(中国)有限公司、上海 ABB 工程有限公司、中科新松有限公司、卡尔蔡司(上海)管理有限公司共同研发和建设了面向汽车零部件制造的柔性制造单元。

该柔性制造单元由 AGV 系统(图 1.5)、立体仓库、搬运机器人、数控机床、三坐标测量仪(图 1.6)和单元控制系统等组成。在智能控制系统的控制与协调下,AGV 小车自动运输物料;线首的机器人通过 3D(三维)视觉进行拆垛;线间的桁架机器人(图 1.7)进行上、下料,数控机床进行自动加工,测量仪对成品进行质量检测;线尾的机器人通过 2D(二维)视觉进行堆垛。



图 1.4 上海大学“上海市智能制造及机器人重点实验室”的柔性制造单元



图 1.5 上海大学“上海市智能制造及机器人重点实验室”的 AGV



图 1.6 上海大学“上海市智能制造及机器人重点实验室”的三坐标测量仪



图 1.7 上海大学“上海市智能制造及机器人重点实验室”的桁架机器人

## 1.2 离散事件动态系统

### 1.2.1 系统

随着生产的发展,生产工具、生产设备、产品与工程结构均变得越来越复杂,这种复杂性主要表现在其内部各组成部分之间,同时它们与外界环境之间的联系也变得越来越密切,以致其中某部分的变化可能引起一连串的反应而波及全局,即“牵一发而动全身”。在这种情况下,孤立地研究各部分已不能满足要求,而必须将有关部分联系起来,作为一个有机的整体进行认识、分析和处理。这个有机整体被称为“系统”。

系统是由相互联系、相互作用的若干部分构成的,具有一定目的、功能和行为(一定的运动规律)的整体。其实在自然界、社会或工程中,存在各式各样的系统,任何一个系统莫不处于与外界(其他系统)的相互联系中,也莫不处于运动变化中。

组成系统的各部分可以是元件,也可以是下一级系统,后者称为“子系统”,而整个系统又可以是上一级系统的子系统。必须注意,一个系统的特性并不是其元件或子系统特性的简单总和。比起元件或子系统的特性,系统特性要复杂得多、丰富得多。要了解一个系统,不仅需要了解其各组成部分,而且必须了解各部分之间的关系。例如,制造系统由制造资源(物质、能量、数据、组织等)这样的单元构成,这些制造资源通过设施布局、生产工艺流程及生产调度计划等相互依存、相互制约,以实现生产特定的产品、提供特定的服务等系统功能。

综上所述,系统是由系统的输入、系统的输出及系统的特性组成的。系统的特性包括系统的状态、系统的逻辑结构(logical structure)和系统的可调参数(tunable parameters)。系统的状态是指系统的动态状况,即系统在某时刻的状况,具体来说,系统在某一时刻 $t_0$ 的状态是在系统输入已知的条件下,唯一确定所有 $t \geq t_0$ 时刻系统输出所需的系统信息,也就是说,状态是历史信息的某种函数;系统的逻辑结构与系统的可调参数是指系统输入与输出

之间的某种函数(function)关系,这种函数关系可以用“过程”形象地描述,“过程”通常被定义为将输入转换(映射)为输出的方法、活动和步骤。

### 1.2.2 连续变量动态系统与离散事件动态系统

根据系统状态转移是一直在发生,还是仅仅发生于离散的时间点,可将系统分为连续变量动态系统(continuous variable dynamic system, CVDS)和离散事件动态系统(discrete event dynamic system, DEDS)。

#### 1. 连续变量动态系统须满足两个关键特征

(1) 系统状态必须是连续的,该特征确保我们将系统状态定义为连续变量,常见的位置、速度、加速度、温度、流量等物理量都属于连续变量。

(2) 状态转移必须是时间驱动的,该特征表明系统状态随时间而变化,因此,时间变量是这类系统的自变量。

#### 2. 离散事件动态系统须满足两个关键特征

(1) 状态空间是离散的。

(2) 状态转移是事件驱动的,即系统的状态仅仅在某些时间点上通过瞬间状态转移而变化,每一次转移都与一个事件相关联。

根据上述特征,给出离散事件动态系统的非正规定义:离散事件动态系统是离散状态、事件驱动的系统,即其状态转移完全依赖异步离散事件在时间域上的发生。柔性制造是一种典型的、复杂的离散事件动态系统。

#### 3. 离散事件动态系统的建模方法

为了对系统进行分析、设计、控制和优化,首先必须建立系统的模型,以便定量地描述系统。

对于连续变量动态系统,其静态模型一般用代数方程描述,而其动态模型则需要用微分方程或微分方程的离散形式——差分方程描述。

对于离散事件动态系统,目前主要建模理论与方法如下。

##### 1) 自动机/形式语言方法

自动机/形式语言方法是由 Ramadge 和 Wonham 提出的研究离散事件动态系统的一种建模方法,其核心是基于自动机/形式语言的离散事件动态系统监控理论,着重于研究离散事件动态系统在逻辑层次的建模与控制问题。其基本特点在于,将自动机分别作为被控对象、监控器和闭环离散事件过程的逻辑层次模型,将形式语言作为分析系统行为的基本工具。

相对而言,基于自动机/形式语言的离散事件动态系统的建模方法,在处理标准逻辑规范范围的监控问题方面,已经形成较为系统和完善的理论与方法,但在处理实时、并发等更复杂的规范范围内的监控问题方面还有待改进和成熟。