

摘 要

随着新技术的不断涌现和经济全球化进程的推进,制造企业的生存环境发生了巨大的变化,顾客个性化和多样化的需求越来越高,产能柔性作为企业在面对环境变化时的调整和适应能力,已成为企业实现快速相应市场和效益最大化的保障。本文以离散型制造企业为对象,研究制造过程产能柔性及其质量控制技术问题,主要研究工作如下:

(1) 从企业面对的不确定性环境出发,以离散型制造企业为对象,分析其制造过程的特征,综述有关产能的概念,分析其内涵,提出了制造过程产能柔性的概念,构建其概念模型;在分析产能柔性影响因素的基础上,进行了制造过程产能柔性定量分析,确定了制造过程产能柔性的关键技术。

(2) 基于广义质量概念和制造过程质量控制的内涵,结合制造过程产能柔性的概念模型及其定量分析方法,分析了制造过程质量控制对产能柔性衡量指标的影响,建立了制造过程产能柔性与质量控制的关系模型,分析认为制造过程质量控制是实现产能柔性的重要手段,而制造过程产能柔性则是质量控制绩效的综合体现。

(3) 零件的工艺规程设计作为制造过程生产技术准备阶段的重要内容,对零件加工质量、生产成本及周期具有重要影响。为了实现制造过程产能柔性的综合优化,以加工时间和成本综合最小为目标,考虑一般企业制造过程的约束条件,建立了零件工艺规程优化数学模型;针对工艺规程优化设计的复杂性,采用改进遗传算法对工艺规程优化数学模型进行研究,并以大模数齿轮工艺规程多目标优化为对象,给出了应用实例。

(4) 针对常规控制图不能适应离散制造企业多品种、小批量生产质量控制问题,通过对企业关键加工工序符合零件族聚类特点的分析,研究了基于零件族聚类的单值——移动极差工序质量预防控制技术;通过对精益和六西格玛有机融合的质量诊断和改进技术的研究,提出了集预防、诊断、改进于一体的质量集成控制技术;构建质量集成控制系统体系结构,描述质量集成控制系统主要模块的功能、运行流程,并通过案例验证了质量集成控制技术的可行性。

关键字: 产能; 产能柔性; 过程质量控制; 工艺优化; 六西格玛

ABSTRACT

With the acceleration of the process of economic globalization and new technological development, the living environment of enterprises have changed enormously, the requirements of individuality and diversification of the customers have been increased, and the competition of the market is more and more severe. As the adjustment and adaptive capacity of the enterprises facing the ever-changed and uncertainty of environment, capacity flexibility is an important guarantee for enterprises to accomplish quick reaction capability of market and obtain the maximum benefits. In the thesis, it focused on capacity flexibility and its' quality control technologies in discrete manufacturing process for manufacturing enterprise. The main research works are as follows:

(1) In order to meet the uncertain environment for enterprises, the characteristics of discrete manufacturing enterprise and capacity during manufacturing process were analyzed and studied, the concept of capacity flexibility of manufacturing process was summarized and analyzed; based on the analysis of the influencing factors of capacity flexibility, quantitative analysis of capacity flexibility was accomplished, and the key technologies of capacity flexibility were determined.

(2) Based on the understanding of general quality and quality control, the concept model and quantitative analysis methods of capacity flexibility were combined, and then the influence of quality control during manufacturing process on estimation indicators of capacity flexibility was researched, the relational model between capacity flexibility and quality control was established, through analyzing the relational model, quality control of manufacturing process is an important way to realize capacity flexibility, and capacity flexibility is integrated representation of quality control.

(3) As an important constitution for productive and technical preparation of manufacturing process, design of process specification of product has great influence on the product quality, manufacturing cost and production cycle. In order to achieve the overall optimization of flexible manufacturing capacity and accomplish the minimum of process time and cost, multi-objective optimization model of parts' process specification on condition of general constraint condition for manufacturing process was established. Based on the complication of optimization design of process specification, the optimization strategies of process specification were studied by means of improved genetic algorithms. And taking the multi-objective optimization of process specification of big modulus gear as the object, and application example was given.

(4) Aim at the problem that general control chart doesn't meet quality control of multi-varieties and small batch for discrete manufacturing, the technique of quality preventive and control based on part' individual-moving range process was investigated; the technique based on the effective integrated ideas of quality analysis and control of Six Sigma and Lean-production was improved, the integration system of quality control was established and the function and operational process of main module were analyzed and described. At last the system established was proved to valid by the application example in manufacturing enterprise.

Keyword: Capacity; Capacity flexibility; Process quality control; Optimization of process; Six sigma

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 李贵夫 日期： 2008.6.18

关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解济南大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借鉴；本人授权济南大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

(保密论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名： 李贵夫 导师签名： 王慧 日期： 2008.6.18

第1章 绪 论

目前,市场多样化、技术复杂化、经济全球化,使企业生存环境发生了巨大变化,尤其对于多品种、小批量的现代离散制造企业,传统的刚性制造系统已不能适应这种多变的市场需求。提高制造过程的产能柔性,实现企业对市场变化的快速、灵活、有效响应,已成为企业生存发展的基础和保障。本文以离散制造企业为对象,针对相对独立制造单元的制造过程,研究产能柔性以及提高产能柔性的若干关键技术,以增强企业的综合竞争能力。

1.1 本文研究的背景

1.1.1 产能柔性与质量控制基本概念

(1) 柔性 with 产能柔性

柔性从多维特征和不同的角度,有多种定义。目前引用较多的是 Mandelbaum 对柔性的定义^[1]:组织对变化的环境快速有效的反应能力。

产能一般认为是生产能力的简称^[2]。近年来研究者从客户经济角度给出了产能新的定义:产能是一个系统完成工作的能力,这种能力具有动态性,它的大小可以通过系统在一定时间内的产出量衡量,但其产出一定是满足客户要求的产出。

企业的产能柔性是指企业在面对内外环境不确定或变化时,能够通过自身软、硬件的综合协调与优化,快速、经济地调整产能,使产能与需求趋于平衡,使企业最佳获利的能力。

制造过程的产能柔性是指制造过程的产能能够适应设计、生产和销售等需求的变化,及其它内外环境的不确定性,保持制造单元绩效的能力;可以表征为制造过程对不同产能的适应性,满足新的需求所花费的时间和费用。

(2) 广义质量与质量控制

国际标准化组织 (ISO) 提出的质量定义^[3]:质量是反映实体满足明确和隐含需要能力特性的总和;实体可以是产品、过程、组织、体系或人以及它们的组合。

从系统的角度看,质量有广义和狭义之分。制造过程质量是按设计要求,通过生产工序制造,实际达到的实物质量,这是狭义的制造过程概念。广义质量不仅从用户而且从社会和制造者的角度去理解质量^[4,5]。制造过程的广义质量应从设计、生产计划、销售以及制造过程本身等角度来理解。制造过程的广义质量要体现良好的生产技术准备(尤其是工艺规程的合理性、质量控制计划的可执行性)、优良的产品质量(狭

义的制造过程质量)、较低的生产成本和较短的生产周期,如图 1.1 所示。可通过三个要素表述制造过程的广义质量,即工序质量 Q 、生产成本 C 和生产周期 T 。本文所指制造过程质量均为制造过程的广义质量。

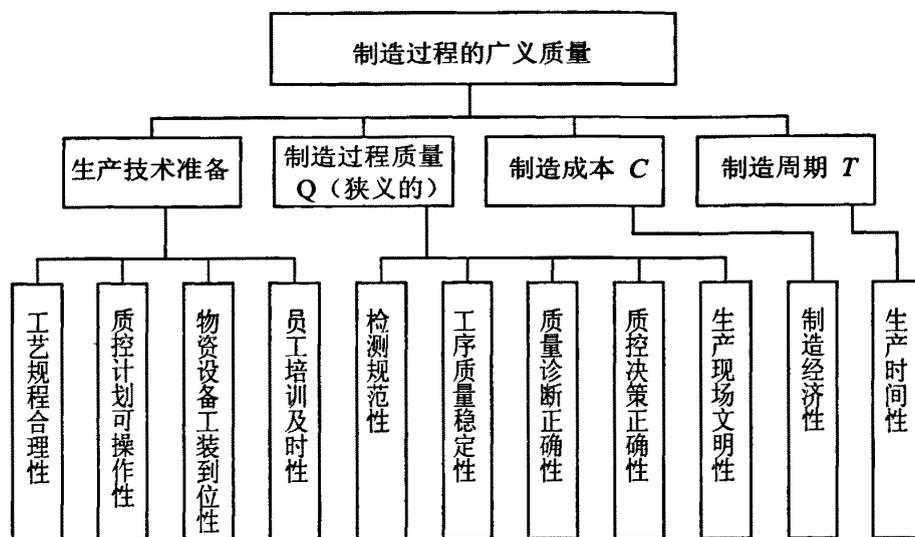


图 1.1 制造过程的广义质量

ISO9000 标准对质量控制的定义是^[6]: 达到质量要求所采取的作业技术和活动。

制造过程的广义质量控制是为了达到制造过程的广义质量要求所采取的作业技术和活动。它包括: 对生产技术准备工作的质量控制、制造过程工序质量控制(狭义质量的控制)和现场生产管理等; 其目的是为了使得制造过程生产的产品具有优良的实物质量、较低的生产成本和较短的生产周期。

1.1.2 离散制造企业对制造过程产能柔性的需求

(1) 离散制造企业对产能柔性的需求

离散制造企业具有典型的多品种、变批量的生产特征,对产能柔性具有较高的需求,主要体现在以下几个方面:

- 市场动态的不可预期性需要企业具备产能柔性

由于市场动态的不可预期性,产品的生命周期越来越短,用户需求呈现多样化与越来越难以预测的趋势,迫使企业不断调整制造过程的产能,以适应市场的动态需求。

- 生产模式的转变需要企业具备产能柔性

离散制造企业由原来的计划经济模式转变为面向订单的生产模式,由原来单一的同规格的大量消费市场裂变为一系列满足不同需求的细分市场,细分市场的出现又进一步强化了产品的多样化,导致产品的多品种小批量生产比例增大。这要求企业能够面对各类客户的个性化需求,具有较好的产能柔性。

- 市场竞争要素的转变需要企业具备产能柔性

企业市场竞争要素已经不再是单一的生产率，而改变为 T （时间）、 Q （质量）、 C （成本）、 S （服务）、 E （环保）等要素的综合。在未来的市场竞争环境中，以时间为基准的竞争将越来越突出，当然产品成本和质量仍是竞争的主要支柱，但时间成为决定竞争胜负的最关键因素。交货期愈短，买方得益于及早使用新产品的效益愈大。这要求企业能够快速响应市场，迅速从一种产能转变为另一种产能。

- 企业提高竞争力需要产能柔性

文献研究表明^[7]，大型企业的竞争力由生存力、发展力和潜力三个层次，共 12 个指标构成。生存力是现实竞争能力，即企业在目前条件下的生存能力，包括企业现有资本规模、市场规模和收益情况，是企业市场能力、生产能力和现有技术水平等的综合体现；发展力是发展竞争能力，即企业已经具有的扩张能力，包括资本的增加、市场的扩张和收益的提高；潜力是潜在竞争力，即企业未来可能拥有的市场竞争能力，包括人力资源能力和研究发展能力等。大型企业的竞争力主要从经济指标衡量，企业为了实现最大的经济效益，必须使它的产能与实际需求相适应，以较低的成本生产客户满意的产品，使企业获利并提高客户满意度。因此，产能柔性对提高竞争竞争力至关重要。

(2) 离散制造企业的制造过程对产能柔性的需求

- 产品设计的多样化需要制造过程产能柔性

离散型企业的设计过程将客户的多样化、个性化需求转变成为一系列复杂的技术资料，由生产计划部门对客户的变批量、急件生产作出规划，而制造过程则是通过生产管理规划将这些技术资料转变为产品的物化过程。制造过程只有具备一定的柔性制造能力、较高的制造过程质量、较大的产能范围，才能适应设计、生产计划部门不断变化的要求。

- 产品生产成本的趋廉性、过程的快速化需要制造过程产能柔性

产品制造过程的成本在产品总成本中占有绝大部分比重，直接影响产品的生产周期，能否快速、低成本地响应生产需求取决于企业制造过程产能柔性的水平。

综上所述，企业及其制造过程对产能柔性的双重需求，对制造过程的产能柔性及其提高措施的研究具有重要的理论意义和应用价值。

1.2 本文研究内容的国内外研究现状

随着汽车、钢铁等特殊行业“产能过剩”论的出现，引起了人们对产能概念的重新思考。以汽车行业为例，在其总量出现过剩趋势的同时，也存在着部分车型供不应求、生产能力不足的现象。因此，国内外各生产企业纷纷注重依靠市场机制，把产业组织结构优化升级和企业内部挖潜调整作为当前发展的重要途径。当前的研究重点主

要集中在企业柔性、制造系统柔性、产能柔性、质量控制技术研究等方面，并形成了一系列的理论及研究成果。

本文在研究制造过程产能柔性，建立其概念模型，并进行定量分析的基础上，从制造过程质量控制技术等方面，研究提高制造过程产能柔性的关键技术。

1.2.1 企业柔性、制造系统柔性

针对企业产能柔性问题的研究，国外自 20 世纪 60 年代开始集中在产量柔性、生产组织柔性、制造资源柔性和人力资源柔性等方面，将企业的产能柔性根据其组成属性进行了比较详细的划分。国内上世纪 80 年代以前，生产系统柔性的研究主要集中在柔性加工设备、柔性生产单元以及柔性生产线的建设等方面；上世纪 80 年代后期开始对企业生产组织柔性和生产控制等方面进行了研究，主要从信息技术对企业管理中的影响分析开始，研究了 CIMS 系统在企业中的应用、制造系统的柔性化、企业柔性的度量方法、度量体系以及企业柔性价值^[7]等，但是有关企业尤其制造过程的产能柔性的概念及理论涉及不多，仅有与之相似的一些概念，如产能弹性、产量柔性和容量柔性等。

企业柔性是一个广义的概念，目前还未形成一个统一的定义，如：Mandelbaum^[1]将企业柔性定义组织对变化的环境快速有效地反应能力；Chung^[8]认为柔性定义是低成本、快速响应变化环境的能力；Buzacott^[9]将企业柔性定义为制造系统所具有的处理变化环境或由环境引起的不稳定性的能力；Grubbstrom^[10]认为，企业柔性在短期是指利用现有的资源和设备适应变化的能力，反映企业使用新资源、新发明、新方法，并整合融入到目前生产系统的一种能力；Gupta^[11]将企业柔性定义为制造系统处理变化的能力。

从制造的角度，考虑企业制造系统的柔性，国内外不少学者对制造系统柔性的概念、度量方法、实现技术进行了研究。Beach^[12]等论述了制造系统柔性的定义、柔性类型及柔性的度量。Boyer^[13]指出制造系统面对变化的需求可以有两个选择：一是购置富余的生产设备或增加库存，二是增加制造系统柔性，并结合实例研究了过程柔性和机械设备柔性。文献[14]认为制造柔性是指制造系统及系统元件对产品多样性及系统内外各种变化及不确定性的适应能力，提出对制造柔性进行分类的概念框架，探讨了制造柔性的度量方法。

1.2.2 产能柔性

产能柔性是企业柔性的一个重要组成部分，反映企业在产能方面快速、低成本响应内外部环境变化、且使企业获利的能力。制造过程的产能柔性则反映制造过程对设计、生产和销售等需求的变化及制造过程内部的变化，能够快速、经济地响应能力。

国内外学者对于产能尚未有统一的定义。文献检索表明^[15-18]，“产能”一词多用

“Capacity”。Regin Tomas^[17]认为：一个组织的产能代表其完成工作的能力，场所、劳动力、设备、信息技术、原材料是一个组织最基础的产能要素，由它们构成作业产能，并进一步构成流程产能，如制造过程产能、设计过程产能等。文献[2]认为：产能指生产设备在一定时间内所能生产的产品数量。我国经济学家管益忻^[19]针对“汽车产能过剩论”认为：必须从客户经济视角重新定义产能，只有适应于需求的生产能力方可称为产能。

关于产能柔性研究，Mark 等^[20]针对由于客户期望值、竞争和技术的快速动态变化增加了市场环境的不确定性，按照能力和产能理论对其进行分类，描述了柔性能力和顾客满意度之间的关系。Moutaz Khouja^[21]等研究了信息技术投资与生产系统的容量柔性投资的关系，认为制造系统的容量柔性是其在不同产量等级下获取生产利润的能力，对柔性制造系统和整体生产规划决策支持与获取系统进行投资，如通过对信息技术投资，改进供应链中的信息流，改善需求预测，可以提高生产系统的容量柔性。武汉理工大学的辜志强^[22]对生产系统的产能柔性进行了系统研究，建立了产能柔性评价指标体系和模糊逻辑规则，构建了企业的随机综合生产计划模型，并从产能柔性的时间维和范围维研究了车间生产调度问题，提出了车间生产控制系统产能柔性功能的实现方法。方爱华^[18]给出了企业生产能力柔性的定义：企业具有迅速提高或降低生产水平，或者迅速将生产能力从一种产品转移到另一种产品的能力，并认为这种柔性的实现依赖于企业柔性的生产组织、柔性的制造过程和柔性的人力资源。资料检索表明：提高企业产能柔性可以从两方面入手：一是增强生产组织管理柔性，提高管理和技术水平；另一方面是加大资金投入，增强制造资源（如设备、信息等）柔性。

1.2.3 制造过程的质量控制技术

自从 20 世纪 20 年代初提出质量管理的概念以来，制造过程的质量控制伴随着技术的发展、需求的变化以及企业管理的实践不断发展和完善，大致经历了质量检验、统计过程控制、全面质量管理、计算机辅助质量控制几个阶段^[4]。

20 世纪初，美国工程师泰勒（F.W.Taylor）提出了一套工业管理的理论，其中之一就是主张将产品的检验从制造中分离出来，成为一个独立的工序，专职检验工序质量。大批量生产的进一步发展，要求用更经济的方法解决工序质量检验问题，并要求事先防止成批废品的产生。休哈特（W.A.Sheuhart）提出运用数理统计学作为工具控制产品质量并预防废品的的方法，即统计过程控制^[23]（Statistical Process Control—SPC），将质量控制的重点设置在制造阶段，尤其是工序质量控制。统计质量控制包括表征工序能力的“ $\pm 3\sigma$ 法”、控制图理论和抽样检验理论等。

由于 SPC 技术的广泛应用，基于 SPC 的工序质量控制技术研究较多。文献[24]提出用“匹配问题”来阐述供应链信息共享对工序质量控制的影响；文献[25]提出一种利用工具数据的实时过程质量控制的方法；文献[26]提出针对质量控制的可视化实

时监测检查方法；文献[27]提出使用自适应模糊 Petri 网对表面粗糙度和加工过程进行质量控制；由于 SPC 技术适于较大样本的控制，所以出现了针对小批量生产的工序质量控制技术研究^[28-30]。文献[31]研究了公差百分数控制图在成组加工质量控制中的应用；文献[32]提出一种基于熵值法的工序质量控制工具。文献[33]提出基于虚拟工序的小批量工序质量控制方法；文献[34]讨论一种基于 t 分布动态控制的小批量生产质量控制方法；文献[24]提出应用贝叶斯预测理论的动态质量控制方法；文献[35]提出应用成组技术来解决小批量生产工序质量控制问题；文献[36]提出应用单值控制图解决小批量生产工序质量控制问题。

随着对质量管理理论及应用的不断深入，研究者认为产品质量的形成过程不仅与生产过程密切相关，而且还与其它一些过程、环节和因素密切相关。全面质量管理（Total Quality Management, TQM）应运而生，它不仅是质量形成的全过程的管理，而且包含了管理对象的全面性、经济效益的全面性等，涉及的是广义质量管理。管理理念的变化，促进了质量控制技术的发展，同时广义质量的概念已愈来愈为人们所接受。闻邦椿院士^[5]于 2007 年提出了面向产品广义质量的综合设计理论与方法，认为产品的广义质量应包括产品的基本功能和辅助功能以及体现产品三大性能的五大要素——狭义质量 Q 、成本 C 、周期 T 、环境 E 和服务 S 。出现了“零缺陷”质量管理^[37-39]、六西格玛管理、精益六西格玛管理等。六西格玛管理通常使用 DMAIC（Define—定义，Measure—测量，Analyze—分析，Improve—改进，Control—控制）业绩改进模型，通过相应的工具和方法，使企业的质量和成本得到根本性改变^[40]；日本质量大师田口玄一提出的正交试验方法^[41]作为分析——改进阶段强有力的工具可以分析质量影响因素，发现最优质量参数组合，是质量改进常用的方法；文献[42]进行了六西格玛质量改进的理论基础研究；文献[43]对六西格玛技术中的 1.5σ 漂移问题进行了系统的分析，并根据过程的动态特性，提出了反映过程动态能力改进的过程能力指数——动态 C_{pk} ，并对六西格玛实施过程提出了监控高 σ 过程质量控制技术。文献[44]阐述了精益和六西格玛的联系与区别；文献[45]对如何有效地结合六西格玛和精益构建了一个基础框架。

随着全面质量管理的实施，研究者开始从设计阶段即进行质量控制技术研究，试图用最低的成本生产出满足客户要求的产品，比较典型的是田口玄一创建的三次设计理论。文献[46]进行了制造过程质量控制与产品设计研究；文献[47]建立了产品设计质量控制层次模型，对当前典型的现代产品设计质量控制技术与方法：六西格玛设计、保质设计等进行了综述。

随着计算机技术的发展，质量控制系统的研究也在朝着自动化、网络化、集成化、智能化等方面发展。Uirich Rembold 等^[48]首次提出 CAQC 概念；文献[49-51]分别提出了工序质量控制系统的框架结构，进行了基于小波概率神经网络智能统计工序质量控制的体系结构研究，网络制造环境下的机械加工质量控制系统研究；文献[52-55]

对质量控制系统设计与开发进行了研究,刘晓冰教授^[55]以钢铁企业质量管理体系开发为例,设计了钢铁企业基于制造执行系统的动态质量控制系统;孙学静^[56]构建了基于神经网络的统计过程控制系统;殷建军^[57]进行了面向多品种、小批量制造环境的过程质量监控方法及嵌入式系统的研究;V. Piuri^[58]研究了计算机智能系统在工序质量控制方面的应用;Shahed Shahir^[59]进行了基于自适应模糊联想存储器的网络质量控制系统研究。

由于新型管理模式和生产方式的不断出现,质量控制技术也在不断变化,其发展趋势体现在以下几方面:

- 并行的、实时的、面向中小批量生产的质量控制理论和技术;
- 重视产品设计阶段对制造质量的影响;
- 制造过程质量控制注重在线实时检测和反馈控制技术;
- 加强计算机在质量管理与控制中的应用。

制定合理的工艺规程是生产技术准备的主要工作之一,是保证制造过程质量的源头,通常情况下,每个工件往往有多条可供选择的加工工艺规程,这就使得选择最佳工艺规程成为企业渴望解决的问题,工艺规程优化设计为制定合理的工艺规程提供了一条可能的途径。工艺规程优化配置^[60](Process Regulation Optimization, PRO)是指在可行的工艺规程中,规划最佳的工艺规程配置,使得制造系统达到最佳的运行性能。

资料检索表明,工艺规程优化主要集中在工序序列优化和切削参数优化。Sundaram^[61]使用特殊的数据结构来解决加工序列约束问题,为了防止不可行解的产生,他们提出了两种方法:①除掉所有的不可行解;②利用树形结构枚举所有的可行解;Rho^[62]使用优先级矩阵,以最少刀具变化和最少走刀时间为目标进行加工序列优化,但文章没有考虑基于有限制造资源的加工序列的合法性;Vancza 和 Markus^[63]将基因算法应用于加工序列,采用代表零件特征的元素串表示加工序列进行优化;I Drstvensek^[64]等提出了基于队列排序和数据库排列的工艺排序优化;Wong 等^[65]论述了基于特征检测规划的工序排列。切削参数优化主要方法有神经网络方法^[66]、模拟退火法^[67]、遗传算法等以及这些方法的变异和混合。

近年来国内也有一些学者开展了工艺规程优化方面的研究。文献[68]等进行了基于遗传算法的面向特征加工的工序过程排序研究。文献[69]提出一种求解最短路线动态规划问题的遗传算法,并应用于某产品制造工艺流程价值优化。文献[70]采用二进制编码方式求解最短路线问题,运算效率比较低。李建勇教授等^[60]针对FMS工艺路线优化配置问题提出了一种混合遗传算法,该算法在遗传算法中引入了具有启发式规则的余量随机分配算子,可以将超过约束条件的余量随机分配到个体中去,通过按照一定规则的调整将不可行个体引入可行域,实现了利用遗传算法求解工艺路线的约束优化问题,提高了运行效率。文献[71]也采用遗传算法对非线性工艺规划中零件加工方案决策问题进行了探讨。

鉴于工艺规程与企业工程实际的密切性^[72],工艺规程优化设计的发展趋势主要体现在:①兼顾加工质量、生产周期、制造成本的多目标优化设计;②充分考虑企业制造资源约束与生产计划约束的工艺规程优化设计。

1.2.4 目前仍存在的问题

总结与本文主要内容相关的国内外研究现状与发展趋势,目前存在的主要问题归纳如下:

(1) 针对制造过程产能柔性的研究较少且不够深入

目前对制造过程产能柔性的研究较少,除了辜志强^[22]进行了中小企业产能柔性及其在生产控制中的应用研究外,国内外有关制造过程产能柔性方面的研究涉及很少。现有研究中对产能的概念还存在模糊认识,没有将产能与市场需求有效结合起来,行业某些产品过剩即认为该行业产能过剩,造成产能的盲目调整。在对产能概念内涵的准确把握,对制造过程进行有效调节等方面,还有大量的研究工作要做。

(2) 综合考虑制造过程指标的工艺规程多目标优化设计研究较少

虽然对工艺规程优化的研究较多,但多集中在单目标优化问题求解方面。对企业具有实际意义和应用价值的面向制造过程产能柔性进行制造时间和成本综合最小化的研究较少。

(3) 面向制造过程的质量集成控制技术研究较少

目前关于质量控制技术的研究大多集中于 SPC 的改进技术,解决工序质量的预防控制;精益和六西格玛工具方法的有机融合与实施研究较少。预防控制与基于精益六西格玛的诊断、改进集成的质量控制技术的研究,将使工序质量、制造成本和时间综合达到企业的期望值,使制造过程产能柔性达到最佳水平,增强企业的竞争实力。

1.3 本文工作的目的和意义

多样化的需求和动态不确定的环境是当前企业面临的重要挑战,柔性已经成为企业获胜的主要影响因素,成为企业竞争力的决定性指标。产能柔性作为组织在面临环境变化和不确定性时的调整和适应能力,是企业化解内外部干扰、维持企业运行方向和速度,实现需求快速响应和效益最大化的重要保障。本文离散制造企业为对象,具体针对企业的制造过程,研究产能柔性以及提高制造过程产能柔性的关键技术。以产品制造时间和成本综合最小化为目标,通过工艺规程优化寻求合理的工艺规程,以质量集成控制技术为手段,实现制造过程产能柔性水平的提高;从提高制造单元柔性角度,进行产品开发,探讨提高制造过程产能柔性的措施。以提高制造过程的产能柔性

为研究目的，本文的研究意义主要表现在以下几个方面：

- 指导企业从不同角度开展提高制造过程产能柔性的研究。制造过程产能柔性的矢量描述，给企业提供了提高制造过程产能柔性的途径：扩大产能范围、减少应对新需求的时间和费用等方面，以实现制造过程产能柔性，优化综合指标。

- 为提高制造过程产能柔性提供新的途径和解决方法。通过面向制造过程产能柔性的工艺规程优化、制造过程质量集成控制及提高制造单元的柔性的设计等，为提高制造过程产能柔性提供新的途径。

- 提高离散制造企业应对市场波动的适应能力。制造过程产能柔性作为企业产能柔性的重要支撑，通过本课题以提高制造过程产能柔性为目的的研究，可以提高制造过程经济、快速响应不确定环境的能力，从而为企业应对市场波动奠定强有力的基础。

- 全面保证制造过程的质量。从保障工序质量、控制生产周期以及成本的角度实施集预防、分析诊断、改进控制于一体的集成质量控制策略，并进行集成质量控制系统的研究，有效保障制造过程的质量。

1.4 本文的主要研究内容

本文的主要研究内容由以下几方面构成：

(1) 制造过程产能柔性基础技术

从企业面对的不确定生存环境的需求出发，进行制造过程产能柔性基础技术研究。包括：分析离散制造企业制造过程的特征，提出制造过程产能柔性的概念，并进行定量分析，构建制造过程产能柔性的概念模型。

(2) 制造过程的产能柔性与质量控制关系分析

基于制造过程产能柔性的研究，结合广义质量的概念和质量控制的内涵，分别从费用、周期、产能范围等方面分析制造过程质量控制对产能柔性的影响，进行制造过程产能柔性与质量控制的关系辨析，建立制造过程产能柔性与质量控制的关系模型。

(3) 面向制造过程产能柔性的工艺规程优化研究

零件的工艺规程设计作为生产技术准备的重要内容，是整个生产技术准备的基础，对零件加工质量、生产成本及周期具有重要影响。为实现制造过程产能柔性测度指标的综合优化，以零部件制造成本和周期综合最小为目标，进行零件的工艺规程多目标优化研究，利用改进遗传算法，从制造过程的源头进行质量控制，并进行工程实例应用。

(4) 面向制造过程产能柔性的质量集成控制技术

面向制造过程产能柔性的测度指标，研究集工序质量预防、质量诊断和改进于一体的制造过程质量集成控制技术。包括：基于零件族聚类的单值——移动极差工序质量预防控制技术研究；精益和六西格玛有机融合的质量诊断、改进技术研究，通过控制产品制造质量、流程速度，有效降低不增值的成本，实现制造过程工序质量、周期、成本的综合优化，提高制造过程的产能柔性；构建质量集成控制系统体系结构，描述质量集成控制系统主要模块的运行流程；并通过案例验证质量控制技术的可行性。

第 2 章 制造过程产能柔性基础技术

本章以多品种、小批量生产的离散制造企业制造过程为对象，分析其制造过程特征，研究制造过程产能柔性问题，探讨制造过程产能柔性基础技术。

2.1 离散制造企业制造过程的特征分析

制造过程指通过制造单元及其相应的组织管理，将原材料、信息等输入转化为产品输出的过程。

(1) 类型特征

制造过程根据生产方式不同，可分为离散型、连续型和混合型生产。其生产规模可分为：大批量、少品种，中批量、中等品种，小批量、多品种三种规模。生产规模与生产方式有一定的关联，生产规模不同，对制造过程的柔性要求也不同，如表 2.1 所示。

表 2.1 生产方式、生产规模与柔性的关系

生产类型	生产规模	对制造过程柔性要求
离散型	小批量、多品种	高
混合型	中批量、中等品种	中
连续型	大批量、少品种	低

本文主要针对离散制造企业多品种、小批量生产的制造过程。

(2) 系统特性

制造过程可视为由若干硬件（如装备、厂房、劳动力、原材料等）、软件（如生产工艺、制造技术、制造信息、生产管理等）以及这些软件硬件所构成的多项作业活动（如加工作业、运输、检验等）有机组合而成的系统。具备系统所具有的集成性特点，使得它的功能大于各项作业功能的简单相加。

(3) 转换特性

转换特性是制造过程最主要的特性。制造过程的主要作用是将材料通过机器和工具转变为有用的零部件。制造过程的转化特性主要反映在将设计、生产计划、销售等的输入转换为产品输出的过程，见图 2.1。输入为资源，它是活动实现的保证条件，输入资源包括物质资源和信息资源。输出为产品，包括半成品和成品。

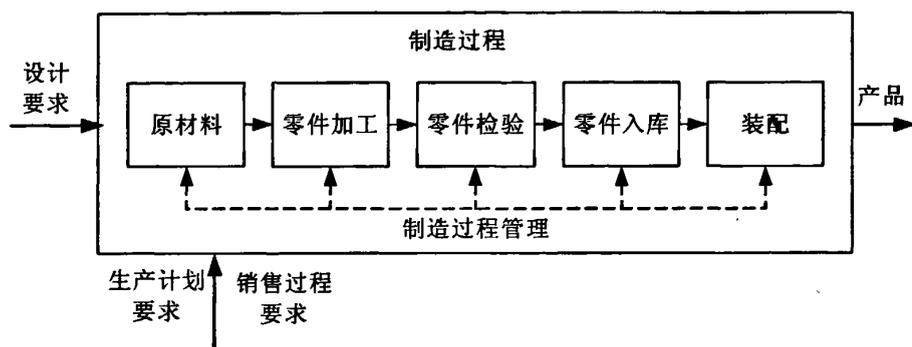


图 2.1 制造过程的转化特性

(4) 动态特性

制造过程的动态性主要体现在以下几个方面：

- 制造过程始终处于外部信息、物料的输入和有形产品或半成品的输出这一动态过程中；
- 制造过程的软硬件始终处于不断的运动中；
- 制造过程为了满足设计、生产计划等需求变化，始终处于不断发展、更新和完善中。

2.2 制造过程产能柔性的概念模型

2.2.1 制造过程产能柔性的概念及内涵

(1) 制造过程的产能

- 生产能力

关于生产能力一般性的概念指^[18]：生产能力常被视为一个系统在一定时间内可以实现的最大产出量。文献[73]描述的企业生产能力为：企业生产能力是在一定时期内企业各生产环节、全部生产性固定资产（包括机器设备、厂房、作业面积和其它生产性设施等），在保持一定比例关系条件下，并在原材料、燃料、动能供应充分、劳动力配备合理的情况下，所能达到的最大年产量。它强调的是在一定时间内在各种条件都匹配的前提下所能达到的最大产出量。

企业的生产能力一般分为设计能力、计划能力、查定能力。设计能力指企业在工厂设计时，设计任务书和技术文件中所规定的生产能力。计划能力指企业在计划年度内所能达到的生产能力。查定能力指企业产品生产方案和技术组织条件发生了重大变化时，重新调查核定的生产能力。

- 制造过程的产能

- ① 产能的概念

关于产能有几种不同的定义,一般认为^[2]:产能是生产能力的简称,是指生产设备在一定的时间内所能生产的产品数量。我国经济学家管益忻^[2]针对“汽车产能过剩论”认为:必须从客户经济视角重新定义产能,被客户认可的生产能力方能称为产能。Regin Tomas^[17]给出产能如下定义:一个组织的产能代表其完成工作,且能为组织创造效益的能力。他认为场所、劳动力、设备、信息技术、原材料是一个组织最基础的产能要素,这些要素的产能以及由它们组合而成的作业的产能相互作用,共同组成组织的整体潜力。

综上所述,产能是能为企业创造效益的生产能力,在一定时间范围内是稳定的,但并不是固定不变的,它随着企业的发展、技术组织条件、需求的变化而变化。

本文认为:产能是一个系统完成工作的能力,这种能力具有动态性,它的大小可以通过系统在一定时间内的产出量衡量,但其产出一定是满足客户要求,为系统带来效益的产出。

② 制造过程的产能

根据制造过程的特征,结合一般系统产能的概念,提出制造过程产能的概念:制造过程产能是完成加工生产零部件的能力,其能力大小取决于制造过程各个环节的效率以及所有参与作业活动的资源的有效作业时间,可以通过一定时间内所产出的零部件数量衡量,但该产出一定是满足设计、生产计划、销售等要求的产出,且使制造过程保持一定绩效。

③ 制造过程产能的内涵

制造过程产能的动态性。激烈的市场竞争使企业始终围绕能否适应市场需求,获得效益而展开。因此企业的制造过程始终追求产能与需求的平衡,处于不断变化过程中,具有一定的动态性。

制造过程产能的潜在性。制造过程的产能柔性虽然受到系统条件的限制,但不会是确定性无变化的,具有较充裕的潜在能力。下面通过对设备产能的定量分析来说明。参照查定能力的计算方法^[73],以设备产能为例,表示为:

$$C_e = \frac{F_s}{T_m} = \frac{(D_y - D_k)t\eta}{T_1 + T_2 + T_3} \quad (2.1)$$

式中: C_e ——设备产能;

F_s ——设备有效作业时间;

T_m ——单位假定产品的耗时数。假定产品是由企业生产的各种产品按其比例构成的一种假想产品;

D_y ——一定时间段内制度工作时间;

D_k ——一定时间段内节假日数;

t ——每日制度工作小时数;

η ——设备利用率, $\eta = \text{设备实际开动时数} / (\text{制度开动时数} - \text{设备检修时数})$;

T_1 ——零部件制造过程中无失误正常耗时；

T_2 ——零部件制造过程中产生的废品耗时；

T_3 ——零部件制造过程中返修耗时。

由式(2.1)可以看出，制造过程产能受效率影响很大，减少单位产品耗时 T_m ，特别是减少加工等待时间和出现废品及返工浪费的时间，对提高效率有较大促进；另外，设备利用率也有较大的可操作空间，加强设备保养，可有效减少设备检修时数，制造过程产能存在较大的潜在性。

制造过程产能调整的局限性。由于制造过程产能受到系统条件限制，它是在各种条件匹配合理、效率和资源利用率在期望值情况下的最大产出，所以产能调整的结果在系统投入和管理组织方式无重大变化情况下，局限在其设计生产能力范围之内。另外，根据“木桶原理”，制造过程的产能将受到产能最低的作业限制。

制造过程产能的基本构成。制造过程产能由一系列作业的产能（如生产组织管理、加工作业、物流、工艺规划等的产能）构成，而这些作业的产能又由制造过程的基本要素的产能（如设备、人员、信息、原材料的产能）构成。

(2) 制造过程产能柔性的概念及内涵

● 制造过程产能柔性的概念

柔性已经成为与成本、质量、交货期同等重要的衡量企业竞争力的指标。然而由于柔性的多维特征和考虑角度（经济、战略、制造）不同，柔性的定义各不相同。传统的观点认为：柔性是应对组织内外环境不确定性的一种机制^[74]；Mandelbaum^[1]把柔性定义为：组织对变化的环境有效作出响应的能力。从经济学的角度，Upton^[75]认为柔性是组织在时间、成本、执行等方面最小惩罚下的一种反映或转换能力。从制造的角度，Sethi 认为^[76]：制造柔性是指企业重组制造资源以便有效生产可接受质量的产品能力；Swamidass^[77]等认为：制造柔性是系统能够成功地适应环境的改变和加工的要求，主要指生产系统处理由环境引起的不稳定性的能力；袁红兵等^[14]认为制造柔性是指制造系统及系统元件对产品多样性及系统内外各种变化及不确定性的适应能力。

结合产能、柔性的概念以及制造过程的特征，本文认为制造过程产能柔性是指：制造过程的产能能够适应设计、生产计划、销售等需求的变化以及其它内外环境的不确定性，保持系统绩效的能力。可以表征为：制造过程对不同产能的适应性以及满足新的需求所花费的时间、费用。即制造过程的产能柔性可以通过制造过程的产能范围、响应新的需求所花费的时间、费用来衡量。产能范围越大，花费的时间和费用越少，表示应对不同需求的能力越强，表明制造过程的产能柔性越大。

制造过程的产能柔性可以通过式(2.2)描述：

$$C_1 + \Delta C \rightarrow C_0 \quad (2.2)$$

式中： C_0 表示制造过程对于一种新的需求所需要的产能；

C_1 表示在需求未输入至制造过程之前，制造过程在一定时间内相对稳定的实际产能；

ΔC 表示为了满足新的需求，保持制造过程绩效，必须进行的产能调整量，以使 C_1 趋近于 C_0 。 ΔC 可为“+”或“-”值，当需求大于实际产能，即 $C_0 > C_1$ 时， $\Delta C > 0$ ，此时需要增加制造过程产能；反之，则 $\Delta C < 0$ ，实际产能出现部分过剩，具有一定柔性的制造过程，应该有能力通过其它方式处理这部分产能，使制造过程仍保持一定绩效。

● 制造过程产能柔性的内涵

① 制造过程产能柔性的矢量描述

制造过程的产能柔性可以用产能范围、变换时间、变换费用三个矢量描述，如图 2.2 所示。 F 表示产能柔性矢量， F_R 、 F_T 、 F_C 分别表示产能柔性矢量在 3 个方向：产能范围 R 、变换时间 T 、变换费用 C 上的投影。借助于产能柔性的矢量描述，不仅可以从三个矢量方向分别衡量制造过程的产能柔性，还

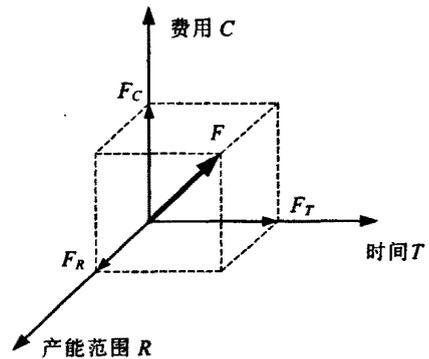


图 2.2 制造过程产能柔性矢量描述

还可以用产能柔性的矢量模 $|\vec{F}| = \sqrt{F_R^2 + F_T^2 + F_C^2}$

全面比较不同制造过程或同一制造过程在不同时期产能柔性的大小。

② 制造过程产能柔性的基本构成

制造过程的产能柔性基本构成如图 2.3 所示，它由相关作业的产能柔性构成，如工艺、加工作业、物流、生产管理的产能柔性等；而作业的产能柔性又由制造过程基本要素的产能柔性构成，如设备、人力资源、信息（加工信息、质量信息等）、原材料的产能柔性等。

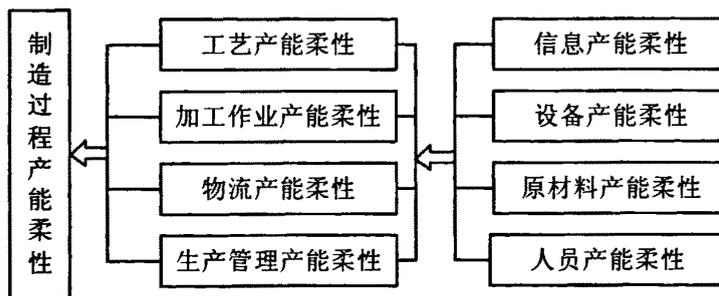


图 2.3 制造过程的产能柔性基本构成

③ 制造过程产能柔性的运行特性

制造过程能够针对新的需求采取新的运行方式以适应需求变化的能力，称为制造

过程的运行产能柔性。它是固有的产能柔性在各种环境中的运行结果，与一定时期内的运行情况和环境变化有关。

2.2.2 制造过程产能柔性的主要影响因素

本文从产能柔性矢量描述角度，提出制造过程产能柔性的主要影响因素，如图 2.4 所示。

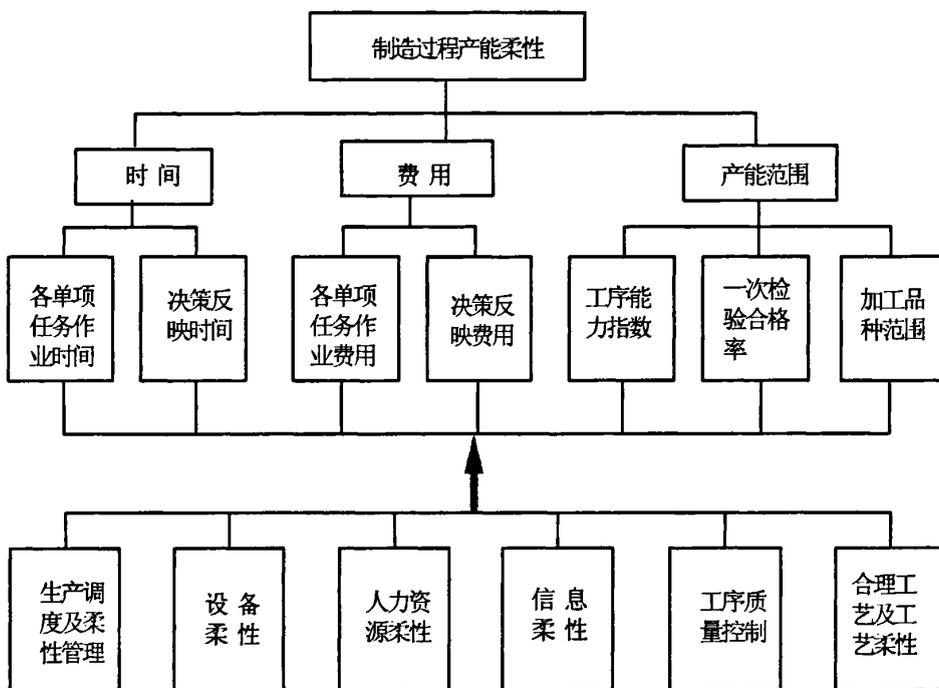


图 2.4 制造过程产能柔性主要影响因素

对于时间可以区分为应对需求变化的决策时间和实现决策必要的时间，前者属于决策反应时间，实现决策必要的单项任务时间属于效率问题。同样对于费用而言，包括决策反应费用和生产成本。因此，制造过程快速、低成本地响应需求，面临两方面问题：一是减少制造过程的决策反应时间和费用；二是提高制造过程所有作业的效率，并降低每个作业的成本。

关于制造过程产能范围，它取决于制造过程的质量、生产效率以及加工品种范围。受到制造过程的基本要素如设备、人员、信息等的柔性影响，同时也与主要作业的柔性密切相关，如工艺规程、制造过程的质量控制、组织管理等。

总之，制造过程的产能柔性，无论时间、费用或产能范围均受到制造过程基本要素及主要作业的影响。

2.2.3 制造过程产能柔性的概念模型

所谓概念模型主要表现为系统的一组相关的概念，它是由一组概念通过各种概念间的关系组成的概念体系，抽象地描述系统对象的结构和行为两方面的特征和关系^[78]。建立概念模型有助于从整体上理解和认识各子系统之间的静态关系和动态关系。

在分析制造过程产能柔性的内涵及其影响因素的基础上，基于面向对象思想^[78-80]，构建制造过程产能柔性概念模型，如图 2.5 所示。制造过程产能柔性的驱动力来源于设计、销售、生产计划等过程的新的需求，因此与该需求变化密切相关；更重要的是与制造过程作业的产能柔性和生产组织管理的产能柔性关联，二者又均与质量控制相关。

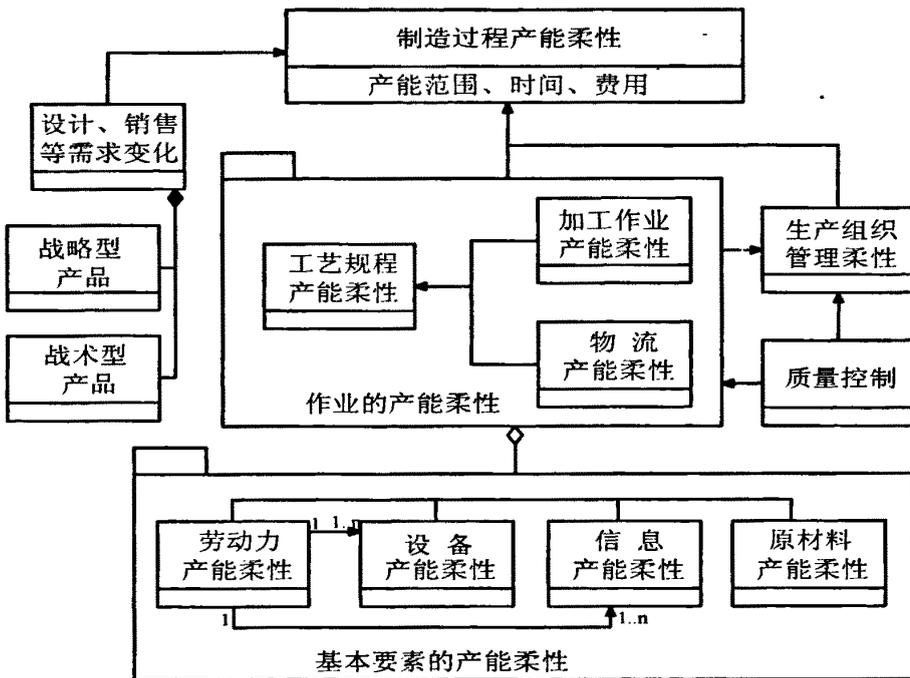


图 2.5 制造过程产能柔性的概念模型

作业的产能柔性由基本要素的产能柔性构成，包括劳动力、设备、信息、原材料产能柔性。其中劳动力对象与设备对象及信息对象的关联均属于“一对一”或“一对多”的关系。在该模型中质量控制通过对各个作业及生产组织管理的控制实现对制造过程产能柔性的影响。

2.3 制造过程产能柔性的定量分析

柔性的度量是柔性研究中的一个关键问题，已有许多研究报道^[81-82]。但是具体操作和改进柔性仍比较困难。本文提出具有可操作性的制造过程产能柔性度量方法，为从定量的角度理解制造过程相关因素对产能柔性度量指标的影响提供理论基础和技术支持。

2.3.1 制造过程产能柔性函数

为了更准确地描述制造过程的产能柔性,设计了制造过程产能柔性函数,在这个函数中,制造过程的产能柔性 \bar{F} 被表示为制造过程硬件要素 H 、软件要素 S 和外部环境变化要素 E 的函数,如式(2.3)所示。

$$\bar{F} = \bar{F}_R + \bar{F}_T + \bar{F}_C = \bar{f}(H, S, E) \quad (2.3)$$

式中, H 表示制造过程硬件要素的集合。硬件要素在系统建成后,变化范围已经确定,在制造过程运行过程中不易发生较大变化。硬件要素是制造过程产能柔性的基础,主要包括:①生产设施,包括设备的多品种生产适应能力,对不同类型零件、工艺指标以及加工速度等的调节能力;设备功能的变化幅度、可重组能力等;②生产技术,包括原有工艺方案和工艺设备的兼容能力、加工检验技术等;③劳动力资源,包括工艺技术人员、工人、生产管理人员的技术水平等;④信息要素,包括制造过程中产生的各种加工信息、质量信息以及信息支持平台等。

S 为制造过程中软件要素的集合。软件要素的产能柔性在制造过程运行过程中是可调节的,不同的管理方式会导致不同的结果,且影响和制约着制造过程硬件要素的产能柔性,主要包括:①制造过程中的决策产能柔性,它更多地考虑环境变化采取可能的措施;②制造过程中生产管理的产能柔性;③生产控制柔性,制造过程中对环境变化、内部故障的预防、调节能力。软件要素的产能柔性会影响和制约制造过程硬件要素的产能柔性,软件要素的产能柔性在制造过程运行过程中调节成本相对较低。

E 为制造过程中遇到的内部和外部的各种变化,即环境的不确定性。内外部环境的状态对制造过程的产能柔性会产生很大影响,无法人为控制。主要包括3个方面:①设计过程随顾客需求变化而导致的输入不确定性;②供应商原材料的供货时间、价格、质量等的不确定性;③制造过程的不确定性,由于制造过程调度、设备故障、工人技术和状态不稳定性等因素引起的内部环境的不确定性对制造过程的产能柔性具有很大影响。

对于以上描述,可以利用函数 $\bar{F} = \bar{f}(H, S, E)$ 对制造过程的产能柔性作进一步说明:

制造过程产能柔性的大小用柔性函数的值 $|\bar{f}(H, S, E)|$ 表示,由产能柔性的矢量模求得,见式(2.4)。

$$|\bar{F}| = |\bar{f}(H, S, E)| = \sqrt{F_R^2 + F_T^2 + F_C^2} \quad (2.4)$$

产能柔性函数值的大小依赖制造过程的硬件 H 、软件 S ,更依赖于软硬件要素的互相匹配、协调。

考虑一定时期内环境要求的最大产能柔性,建设制造过程固有的产能柔性,如式

(2.5) 所示；制造过程固有的产能柔性建设不可贪大求全，其投资和运行费用要小于制造过程的盈利能力，见式 (2.6)，即：

$$f_i(H, S) \leq f_i(E), \quad i \in (R, T, C) \quad (2.5)$$

$$C(H) + C(S) \leq A \quad (2.6)$$

式中 $f_i(H, S)$ 、 $f_i(E)$ 分别为固有的产能柔性建设和环境要求的制造过程最大产能柔性在产能范围、变换时间、变换成本上的投影； $C(H)$ 、 $C(S)$ 分别为制造过程硬件 (H) 和软件 (S) 所需要的投资和运行费用； A 为制造过程的赢利能力。

由上述分析可知，制造过程的产能柔性函数值并非越大越好，它必须受到式 (2.5)、(2.6) 所示以及软硬件要素互相匹配的条件约束。在满足约束条件下，产能柔性值越大，制造过程的产能柔性越好。

2.3.2 制造过程产能柔性的度量

(1) 产能柔性度量方法

为了求得制造过程在某一时期某种运行环境下产能柔性的大小，指导柔性改进，需要对产能柔性进行度量。本文从制造过程产能柔性的矢量描述和柔性矢量模的角度，探讨产能柔性的度量方法，设计如下适用于度量产能柔性的方法。

选择评价制造过程产能柔性的矩阵型度量指标，如表 2.2 所示。表中评价要素是指在评价制造过程的产能柔性时根据不同系统的特点，选择影响系统产能柔性的不同因素。 R_i 、 T_i 、 C_i 是对评价要素 i 从产能柔性的三个分量分别选取的具有代表性的度量指标。

表 2.2 产能柔性度量指标

评价要素	权重	产能柔性度量指标		
(i)	(w_i)	产能范围	变换时间	变换费用
评价要素 1	w_1	R_1	T_1	C_1
...
评价要素 i	w_i	R_i	T_i	C_i

计算各评价要素产能柔性的度量值，进行归一化处理^[22]，求得制造过程产能柔性值。计算各评价要素在产能柔性三个指标上的度量值，由于在 3 个分量上的量纲不同，其取值可能相差悬殊，影响矢量模的代表性，需进行归一化处理。具体方法为：在可以获得比较完备的行业统计数据的基础上，可由专家给出各项评价指标的理想值 I_{R_i} 、 I_{T_i} 、 I_{C_i} ，将欲评价的实际指标值与理想值进行比较，得到评价要素在该指标下

的柔性度量值，见式 (2.7) ~ (2.9)，最后通过 (2.10) 计算制造过程产能柔性的大小。

$$a_i = F_{Ri} / I_{Ri} \quad (2.7)$$

$$b_i = I_{Ti} / F_{Ti} \quad (2.8)$$

$$c_i = I_{Ci} / F_{Ci} \quad (2.9)$$

$$|\vec{F}| = \sqrt{a_i^2 + b_i^2 + c_i^2} \quad (2.10)$$

(2) 制造过程产能柔性的度量

对于任何一个企业其产能柔性主要反映在决策反应能力和实现决策的实现反应能力以及两方面的协调^[83]。对于制造过程而言，把它作为一个独立的系统研究，同样可由上述两方面的能力反映，称为制造过程的决策反应能力和实现反应能力。对于决策能力而言，不仅要求保证决策的正确性而且要求较快的决策速度和较低的决策费用，它可以保证系统高效、低耗、有序地运行。而对实现反应能力同样有产能范围、费用和时间要求。构造出表 2.3 所示制造过程产能柔性评价要素和度量指标，合理选择制造过程在各个分量方向上的评价指标是进行产能柔性度量的关键。

表 2.3 制造过程产能柔性度量指标

评价要素	权重	产能柔性度量指标			
i	w_i		产能范围	变换时间	变换费用
制造过程 决策反应 能力	w_0	评价指标	决策正确率 η_1	决策时间 T_1	决策费用 C_1
		实际值	F_{η_1}	F_{T_1}	F_{C_1}
		理想值	I_{η_1}	I_{T_1}	I_{C_1}
制造过程 实现反应 能力	w_1	评价指标	一次检验合格率 Y	设备停工等待时间的比率 T_2	质量成本与总成本比率 C_2^*
		指标内容	$Y = \prod_{i=1}^n Y_i$	$T_2 = (T_s + T_w) / T_c$	$C_2^* = C_q / (C_f + C_q)$
		实际值	F_{Y_2}	F_{T_2}	$F_{C_2^*}$
		理想值	I_{Y_2}	I_{T_2}	$I_{C_2^*}$

● 评价指标的选择

决策反应能力和实现反应能力在三个方向上的评价指标的选择原则是：应充分反映系统内部对两评价要素有重要影响的指标。

① 决策反应能力评价指标选择

分别用决策的正确率、决策时间、决策费用作为评价指标。决策的正确率可反映决策的质量，正确率越高， F_{η_1} / I_{η_1} 对产能柔性的影响越大；因此，可以用决策的正确率作为决策质量方面的评价指标；为了保证高的决策质量，需要一定的决策时间和费用，实际决策时间和费用越小， I_{T_1} / F_{T_1} 、 I_{C_1} / F_{C_1} 越大（时间、费用的理想值小于实际值），则系统产能柔性越大。因此，可以用决策的正确率、决策时间和决策费用作为评价指标。

② 实现反应能力评价指标选择

产能范围指标选择一次检验合格率。一次检验合格率 Y 充分考虑了加工过程中零件的返修、废品等损失，可以客观地反映实际情况。若某制造单元的制造过程有 n 个工序，各工序的一次检验合格率分别为 Y_1 、 Y_2 、 \dots 、 Y_n ，则制造单元的一次检验合格率为^[43]：

$$Y = Y_1 \times Y_2 \times \dots \times Y_n = \prod_{i=1}^n Y_i \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (2.11)$$

表 2.3 中的理想值 I_{y_2} 可以结合企业实际情况，综合考虑设计要求及经济性，制定一个符合实际的一次检验合格率。一次检验合格率的实际值 F_{y_2} 越高， F_{y_2} / I_{y_2} 的值越大，反映系统适应新的需求在质量方面的产能柔性越大。表明以一次检验合格率为评价指标是适宜的。

变换时间的评价指标选择系统中加工等待时间的比率 T_2 。在制造过程接受新的需求时，可能有若干个零部件的加工要求，但其中必有一个零部件，它的制造周期最长，称这一零部件为关键零部件。令 t_s 为该零件的加工准备时间、 t_w 为加工等待时间、 t_m 为加工时间。同时令 $T_c = t_s + t_w + t_m$ 。这样，将 T_2 定义为^[81]：

$$T_2 = (T_s + T_w) / T_c \quad (2.12)$$

随着 T_2 的减少，其理想值与实际值的比值 I_{T_2} / F_{T_2} 增加，产能柔性函数值增大，表明可以将设备停工等待时间的比率作为评价指标。

变换费用指标本文选择对于新的需求其质量成本与总成本的比率。假设新的需求有 h 个零部件，令 C_f^i 、 C_q^i 分别为制造第 i 个零部件的基本成本和质量成本（相关概念在后续章节中介绍），同时设 $C_f = \sum_{i=1}^h C_f^i$ ， $C_q = \sum_{i=1}^h C_q^i$ ，表 2.3 中的质量成本与

总成本的比率 C_2^* 为:

$$C_2^* = \frac{C_q}{C_f + C_q} \quad (2.13)$$

随着 C_q 的减少, C_2^* 也在减少 (C_q 在总成本中的比例较小, 但可调节性较强),

评价指标 C_2^* 的理想值与实际值的比值 $I_{C_2^*} / I_{F_2^*}$ 增加, 产能柔性函数值增大, 因此,

可以将质量成本与总成本的比率作为评价指标。

● 制造过程的产能柔性指标归一化处理

分别对评价要素的各指标值进行归一化处理, 得:

$$a_1 = F_m / I_m, \quad b_1 = I_{T_1} / F_{T_1}, \quad c_1 = I_{C_1} / F_{C_1}$$

$$a_2 = F_{y_2} / I_{y_2}, \quad b_2 = I_{T_2} / F_{T_2}, \quad c_2 = I_{C_2} / F_{C_2}$$

● 制造过程的产能柔性测度

经过产能柔性指标的归一化处理, 可以求得新的需求输入后制造过程产能柔性的函数值。

制造过程的决策产能柔性函数值为:

$$|\bar{F}_1| = \sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2} \quad (2.14)$$

制造过程的决策实现产能柔性函数值为:

$$|\bar{F}_2| = \sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2} \quad (2.15)$$

制造过程总的产能柔性函数值为:

$$|\bar{F}| = w_1 |\bar{F}_1| + w_2 |\bar{F}_2| \quad (2.16)$$

由以上方法可以看出, 度量制造过程的产能柔性的关键是选择评价对象在柔性特征上的评价要素, 确定恰当的权重和选择具有代表性的评价指标。这些应根据具体情况科学合理地选择。

2.4 本章小结

本章首先分析了离散型制造企业制造过程的特征; 在理解产能及柔性概念的基础上, 提出了制造过程产能柔性的概念, 分析了产能柔性影响因素, 建立了制造过程产能柔性的概念模型, 提出了制造过程产能柔性定量分析方法。

第3章 制造过程的产能柔性 with 质量控制关系分析

本章结合制造过程产能柔性概念模型及其定量分析方法,分析制造过程质量控制的内涵,探讨制造过程的产能柔性 with 质量控制的关系。

3.1 制造过程质量

对质量概念的定义由于人们在不同的角度去研究而不同。国际标准化组织给出的定义:反映实体满足明确和隐含需求的能力的特性总和。日本著名的质量管理学家田口玄一从社会损失的角度给出的质量定义:产品上市后给社会造成的损失,但是由于产品功能本身产生的损失除外。美国质量管理专家朱兰给出的质量定义:质量就是适应性。

从系统的角度看,质量有广义质量和狭义质量之分。

所谓狭义质量,是指仅仅从用户的角度去看质量,既要求产品满足性能好,可信性、安全性和适应性高,寿命周期经济性好,能按时交货,使用寿命长,售前售后服务好等。有时,人们更将质量狭义地理解为产品的精度。很显然,狭义质量概念是不全面的。

所谓广义质量,是指不仅从用户的角度去看质量,同时还应从制造者和社会的角度去理解质量。制造过程的广义质量,应从设计、生产计划、销售以及制造过程本身等角度审视。设计过程要求制造的产品能满足设计质量;销售过程要求产品制造周期短、满足客户交货期、性能良好、成本低,能使企业获得最大利润;制造者希望有合理的工艺规程指导加工,各工序质量均合格,不良品率低。制造过程的广义质量要体现良好的生产技术准备、优良的产品质量(狭义的制造过程质量)、较低的生产成本、较短的生产周期。可以通过3个要素体现,即工序质量 Q 、生产成本 C 、生产周期 T 。本文所指制造过程质量均为制造过程广义质量。

3.2 制造过程质量控制

3.2.1 制造过程质量控制的内涵

ISO9000 标准将质量控制定义为:达到质量要求所采取的作业技术和活动。这就是说,质量控制是为了通过监视质量形成过程,消除质量环上所有阶段引起不合格或不满意效果的因素,以达到质量要求,获取经济效益,而采用的各种质量作业技术和活动。因此,质量控制贯穿于质量形成的全过程,包括质量检测、设计质量控制、工序质量控制、工作质量控制、供应商质量控制等。质量控制的主要内容包括^[6]:确定控制对象;制定控制计划和标准;实施基于控制技术的控制计划,并在实施过程中进

行连续监视、评价和验证；纠正不符合设计和操作程序的现象；排除质量形成过程中的不良因素，使其恢复为正常状态。质量控制的目的在于，控制产品和服务产生、形成或实现过程中的各个环节并使它们达到规定的要求，把缺陷控制在其形成的早期并加以消除。

制造过程的质量控制是指：为达到制造过程的质量要求所采取的作业技术和活动。它应该包括：对生产技术准备工作的质量控制（尤其是工艺规程的合理性、质量控制计划的可执行性）、制造过程工序质量控制、现场文明生产管理，见图 3.1。其目的是为了使得制造过程生产的产品有一个优良的实物质量、较低的生产成本和较短的生产周期。

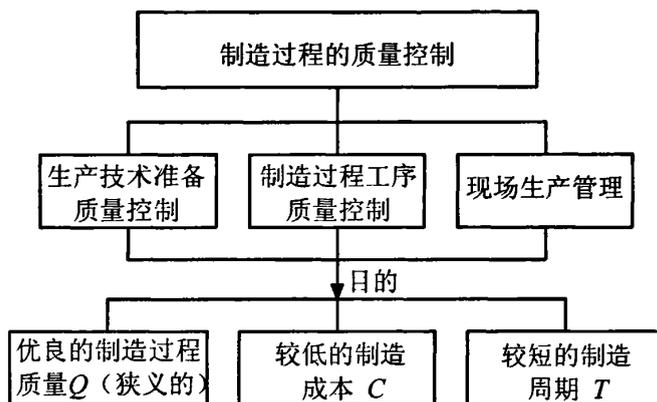


图 3.1 制造过程的质量控制框图

3.2.2 制造过程质量控制系统

在进行质量控制时，必须对需要控制的过程、质量检测点、测量方法、测量数量和检测人员等几个方面进行决策，决策完成后即可构成一个完整的质量控制系统。

(1) 过程分析

一切质量管理工作都必须从过程本身开始。在进行质量控制前，必须分析生产某种产品或服务的相关过程。一个大的过程可能包括许多小的过程，通过采用流程图分析方法对这些过程进行描述和分解，以确定影响产品或服务质量的关键环节，本文主要针对制造过程进行质量控制。

(2) 质量检测点确定

在确定需要控制的每一个过程后，必须找到每一个过程中需要测量或测试的关键点。一个过程的检测点可能很多，但每一项检测都会增加产品或服务的成本，所以应在最容易出现质量问题的地方进行检验。典型的检测点包括：

- 生产前的外购原材料检验：为了保证生产过程的顺利进行，首先要通过检验

保证原材料质量。当然，如果供应商具有质量认证证书，此检验可以免除。另外，在 JIT（准时化生产）中，不提倡对外购件进行检验，认为这个过程不增加价值，是一种“浪费”。

- 生产过程中产品检验：典型的生产中检验是在不可逆的操作过程之前或高附加值操作之前。因为这些操作一旦进行，将严重影响质量并造成较大的损失。生产中的检验还能判断过程是否处于受控状态，若检验结果表明质量波动较大，则需要及时采取措施纠正。

- 生产后的产成品检验：为了在交付顾客前修正产品的缺陷，需要在产品入库或发送前进行检验。

(3) 检验方法

检验方法分为计数检验和计量检验。计数检验是对缺陷数、不合格率等离散变量进行检验；计量检验是对长度、高度、重量、强度等连续变量的计量。在生产过程中的质量控制还要考虑使用何种类型控制技术，质量控制技术包括两大类：抽样检验和过程质量控制。抽样检验通常应用于在生产前对原材料的检验或生产后对成品的检验，根据随机样本的质量检验结果决定是否接受该批原材料或产品。制造过程质量控制是指对生产过程中的产品随机样本进行检验，以判断该过程是否在预定标准内生产。自 1924 年，休哈特提出控制图以来，经过近几十年的发展，过程质量控制技术已经广泛地应用到质量管理中，在实践中产生了许多种新的方法。如直方图、相关图、排列图、控制图和因果图等“QC 七种工具”以及关联图、系统图、KJ 法、矩阵图法和矩阵数据分析法等“新 QC 七种工具”。应用这些方法可以从经常变化的生产过程中，系统地收集与产品有关的各种数据，并用统计方法对数据进行整理、加工和分析，进而画出各种图表，找出质量变化的规律，实现对质量的预防控制。近几年出现的六西格玛质量管理概念通过 DMAIC 流程可以对过程中出现的质量问题进行判断、改进。

(4) 检验样本大小

确定检验数量有全检和抽样检验两种方式。确定检验数量的指导原则是不合格品造成的损失和检验成本相比较。假设有一批 500 个单位的产品，产品不合格率为 2%，每个不合格品造成的维修费、赔偿费等成本为 100 元，则如果不对这批产品进行检验的话，总损失为 $100 \times 10 = 1000$ 元。若这批产品的检验费低于 1000 元，应该对其进行全检。当然，除了成本因素，还要考虑其他因素。如涉及人身安全的产品，就需要进行 100% 检验，而对破坏性检验则采用抽样检验。

(5) 检验人员

检验人员的确定可采用操作工人和专职检验人员相结合的原则。在六西格玛管理中，通常由操作工人完成大部分检验任务。

3.3 制造过程的产能柔性与控制关系

通过对制造过程的产能柔性分析以及对质量控制的理解，本文提出制造过程产能柔性与控制的关系模型，如图 3.2 所示。

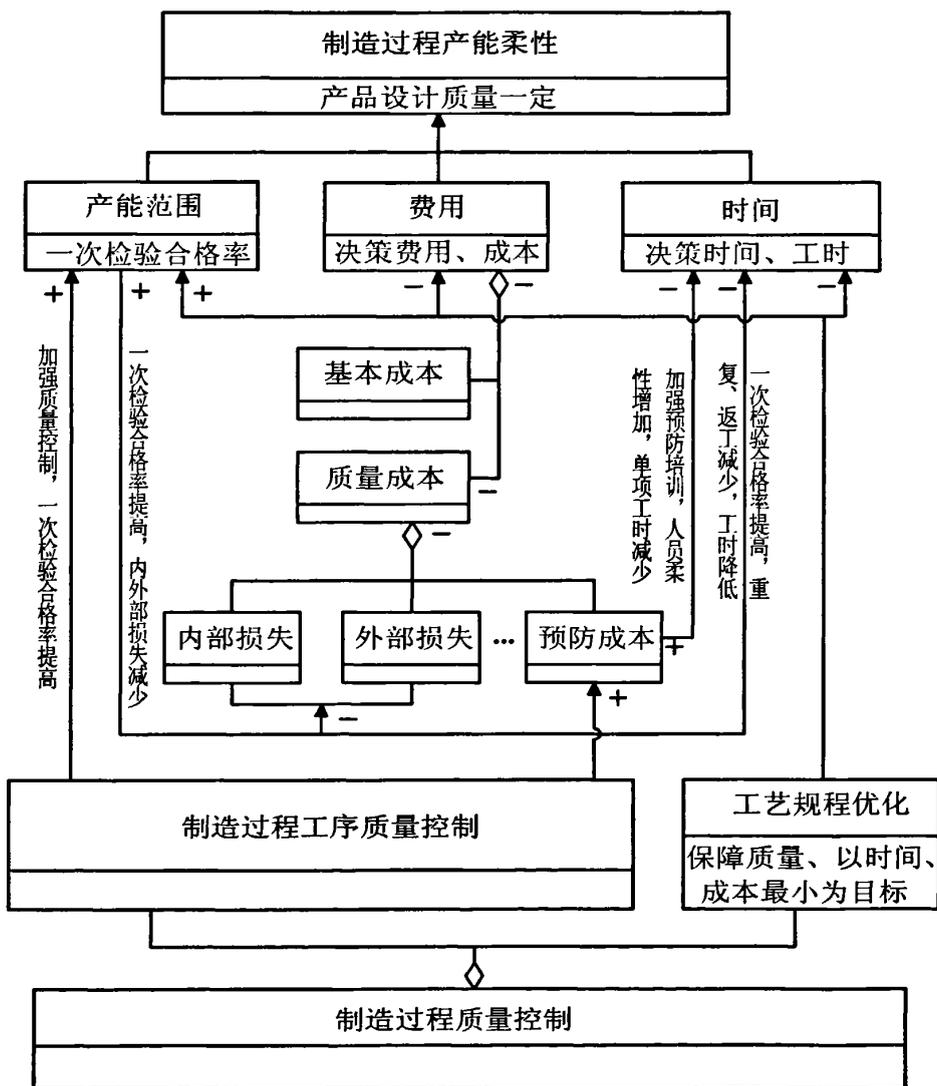


图 3.2 制造过程产能柔性与控制关系模型

制造过程的产能范围、应对新的需求的费用、时间指标体现了制造过程的产能柔性。如图 3.2 所示，从制造过程工序质量控制和工艺规程优化两个方面来进行制造过

程质量控制，可以通过制造过程质量控制提高零部件一次检验合格率、控制质量成本和工时，提高制造过程产能柔性。图中“+”表示对该项指标有正向作用，“-”则表示使该指标下降。

3.3.1 制造过程质量控制是实现产能柔性的重要手段

(1) 质量控制对产能范围的影响

制造过程质量控制对产能范围呈现正向 (+) 作用。质量控制技术主要包括：基于数理统计的统计过程控制、针对制造过程质量问题的六西格玛控制、同时控制制造过程流程速度和质量的精益六西格玛管理。预防控制可及早发现工序质量问题，不至于造成太大浪费；精益六西格玛针对制造过程中出现的质量问题可以科学地寻求问题根源，并提出改进方案。通过一系列质量控制措施的实施，可以有效控制加工能力指数在企业规定的范围内，保障制造过程质量，提高一次检验合格率，从而提高一定时间内的产出量，增加产能范围。正如文献[53]所言，推行六西格玛质量管理法使美国通用电气公司产品的不良率由千分之三降到接近百万分之三点四。

(2) 质量控制对质量成本的影响

制造过程质量控制可使质量成本呈现下降趋势。质量控制理论将企业的总成本分为三部分^[51]，无失误运作成本 (EFC)、符合要求的成本 (Price of Conformance, POC)、不符合要求的成本 (Price of Nonconformance, PONC)，如图 3.3 所示。无失误运作成本，即按原先的项目

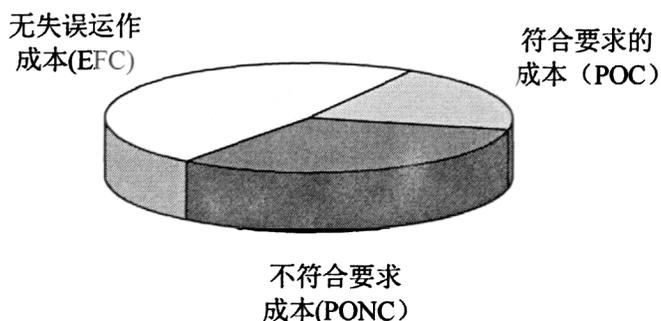


图 3.3 成本分布

设计要求，并假定在不产生任何浪费、返工或不符合要求的代价下，所投入的物资、装备、劳务和能源等资产；符合要求的成本，即为了避免出现偏差所投入的培训、审核、检测、预防性维护、验证等费用；不符合要求的成本，即在工作中尽管努力去满足内部和外部客户的要求，但仍然会出现诸如返工、报废、临时服务、重复运行等情形，由此造成的损失即 PONC 我们也称之为隐性损失。国家标准给出了质量成本的定义^[4]：为了确保满意的质量而发生的费用以及没有达到满意质量而造成的损失。把无失误运作成本称为基本成本，把 POC 和 PONC 统称为质量成本。质量成本包括^[6]：
①内部损失：指产品出厂前，因不满足规定的质量要求而花费的一切费用。包括报废损失费、返工或返修损失费、降级损失费、停工损失费、产品质量事故处理费等费用；

②外部损失：指产品出厂后，因不满足规定的质量要求而支付的有关费用废品损失。
 ③预防成本：用于预防产生不合格品或发生故障而需要的各项费用；④鉴定成本：为评定产品是否符合质量要求而需要的一切费用。

加强质量控制即从制造过程工序质量控制和工艺流程优化这两个方面进行控制，将促使产品一次检验合格率提高，大大减少废品数和返修品数，使得发生在废品损失和返修等方面的费用减少，从而使得内、外损失减少，从而降低了产品的质量成本，适应了产能柔性对成本的要求。

质量控制对质量成本与总成本比率的影响可以通过第二章中的式(2.13)来进行定量反映。

(3) 质量控制对生产周期的影响

在产品的设计质量一定的前提下，随着制造过程质量控制措施的加强，一方面零部件一次检验合格率提高，返工及重复加工时间减少，同时也提高了生产效率，缩短了生产周期；另一方面，对于新的需求，采取强化培训措施，虽然增加了预防成本，但由于员工效率的增加，同样可减少加工工时；再一方面，采取精益与六西格玛结合的控制策略，通过减少不增值的等待、准备时间，可有效地缩短周期。因此，在产品的设计质量一定时，加强质量控制可以缩短生产周期，适应产能柔性对时间的要求。

(4) 工艺流程优化对制造过程质量、成本、周期的影响

合理的工艺流程作为制造过程操作程序的标准，是实现质量控制的基础、保障制造过程质量的源头。合理的工艺流程可以通过工艺流程优化解决，为了实现产能柔性指标的综合优化，可以在保障产品质量的前提下，以制造过程成本、周期最小或次最小为目标进行多目标优化设计。经过优化得到合理的零件族工艺流程，一方面可以实现加工过程的高质量、低成本、短周期的目标，另一方面，对于产品品种的变化，可以较快地实现类似零件的工艺流程的变换。从而对产能柔性的三个指标产生有利影响。

3.3.2 制造过程产能柔性是质量控制绩效的综合体现

质量控制作为一种保障制造过程质量的手段，不能定量地表示出来，但它可以通过制造过程工序质量 Q 、制造周期 T 以及生产成本 C 的变化等指标间接反映。

经过前述分析，制造过程质量控制对三个指标均有较大影响，其影响结果可以通过式第二章中的式(2.11)、(2.12)、(2.13)、(2.16)具体体现。而这些指标恰恰可以体现制造过程产能柔性的大小。因此，可以得到制造过程的产能柔性和制造过程质量控制的关系图，如图3.4所示。

通过各种质量控制技术对制造过程进行质量控制，可以提高零件一次性检验合格

率，降低成本和周期，其值可以通过 (2.11)、(2.12) 和 (2.13) 计算获得。由此可知对制造过程进行质量控制可以使得制造过程的产能范围、周期和成本得到综合优化，即成为质量控制绩效的综合体现。同时由第二章分析可知，该三指标反映了制造过程产能柔性的大小，因此，制造过程的产能柔性充分体现了质量控制的综合效果。

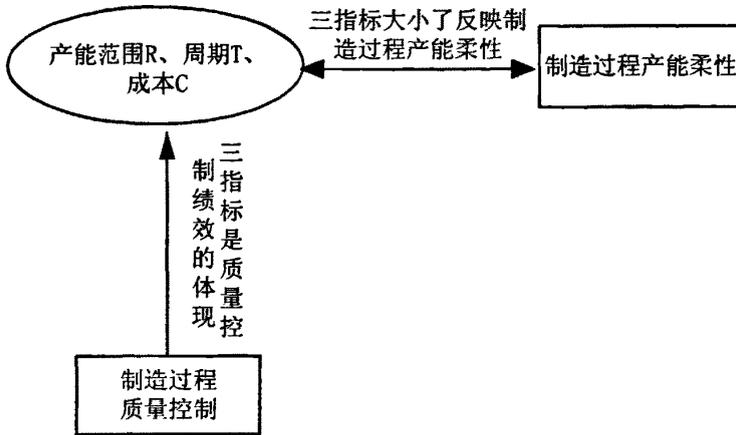


图 3.4 制造过程产能柔性 with 质量控制关系辨析图

3.4 本章小结

本章基于制造过程的广义质量概念和制造过程质量控制的内涵，结合制造过程产能柔性的基础技术，研究了质量控制对产能柔性指标的影响，建立了制造过程产能柔性 with 质量控制的关系模型。

第4章 面向制造过程产能柔性的零件工艺规程优化设计

工艺规程的制定作为生产技术准备工作的重要方面,是指导生产的主要技术规范,对制造过程产能柔性具有重要影响。制造单元在同一生产阶段中往往不只加工一种工件,而每个工件也往往具有多种可供选择的加工工艺规程^[60]。工艺规程优化设计是指在可行的工艺规程中,寻求最佳的工艺规程,使得制造过程达到最佳运行性能。工艺规程的优劣直接影响零部件的加工质量、设备负荷,进而影响制造过程的生产效率、生产周期等。工艺规程的优劣将直接作用于制造过程产能柔性的三个指标:产能范围、费用、时间,是进行制造过程规划设计时必须解决的基本问题。本章从提高制造过程产能柔性的角度,提出综合考虑制造过程时间和成本的多目标优化数学模型,采用改进遗传算法,进行工艺规程优化设计,并给出应用案例。

4.1 面向制造过程产能柔性的零件工艺规程优化数学模型

4.1.1 零件加工工艺规程优化问题

零件工艺规程的制定是一个比较复杂的过程。一个典型工艺路线的产生一般通过以下几个步骤^[84]:

- 加工方法选择:一个零件被若干具有加工意义的加工特征所描述,例如孔、槽、倒角等。对于每一个加工特征,寻找所有能够得到加工特征属性(形状、尺寸、公差和表面粗糙度)的加工方法。

- 加工方法排序:基于排序约束对所有的加工方法进行排序。如粗加工位于半精加工、精加工之前,平面加工一般位于平面上的孔加工之前。

- 机床、刀具、夹具、量具选择:基于加工方法和制造资源模型的关联,选择机床和刀具。

- 机床、刀具切削参数选择。

在传统的工艺计划中,一般首先选择加工方法,然后进行加工方法排序,再进行机床和刀具的选择,这往往会产生矛盾的结果^[84]。所以,加工方法、机床、刀具及其参数的选择应当同时考虑,一并决策。

加工方法不同,直接影响机床类型、刀具及其参数选择,进而会直接影响加工质量、时间及成本。

本文为了提高制造过程的产能柔性,将零件加工工艺规程优化的两分目标规划如下:

- ① 制造时间最短。加工方法不同,或加工方法相同而设备、参数选择等不同,会造成加工时间的差异。因此,本文规定对同一加工特征在保证质量的前提下,优先

选择加工时间最短的工艺流程。

② 制造成本最低。在保证几何特征加工精度的前提下，应优先选择使得加工成本最低的工艺流程。

综上所述，本文的工艺流程优化是以保障产品质量、且使加工时间最短、生产成本最低为目标，充分体现了以提高制造过程产能柔性、满足客户需求，提高企业竞争能力为目的的宗旨。

4.1.2 工艺流程优化分目标函数

(1) 制造过程时间函数

产品的生产周期取决于制造过程中制造周期最长的关键零部件。针对多品种、小批量离散制造企业，为使工艺流程优化更具实际意义，制造过程时间函数的描述以零件族的典型零件加工为研究对象，研究其制造过程的时间函数表达。零件的制造时间由若干工序的加工时间及工序间的变换时间决定。因此，根据产能柔性的要求，完成一个零件加工所需时间可以表示为：

$$\min F_1(X) = \sum_{i=1}^k t_i + TMC = \sum_{i=1}^k (t_{mi} + t_{ai} + \frac{t_{ci}}{T_i} t_{ci}) + TMC \quad (4.1)$$

$$TMC = TMC I \sum_{i=1}^{k-1} \Omega(M_{i+1} - M_i) \quad (4.2)$$

$$\Omega(M_{i+1} - M_i) = \begin{cases} 0 & M_{i+1} = M_i \\ 1 & M_{i+1} \neq M_i \end{cases} \quad (4.3)$$

式中： X ——自变量，表示要选择的工序加工方法、对应的设备、刀具及其切削参数；

t_i ——第 i 道工序所需要的时间；

t_{mi} ——第 i 道工序的切削时间；

t_{ai} ——第 i 道工序的除去换刀时间的辅助时间（如装夹、调整时间等）；

t_{ci} ——第 i 道工序的换刀时间；

T_i ——第 i 道工序刀具耐用度；

$i=1, 2, \dots, k$ ，表示零件的各加工工序序列号；

TMC ——机床的更换时间；

$TMC I$ ——机床更换时间系数；

M_i ——第 i 个操作所用机床的 ID 号。

(2) 制造过程成本函数

制造过程的基本成本主要取决于完成零件各工序的操作人员费用、设备费用、刀

具费用以及机床变换成本^[85]。其表达式如式 (4.4)，同样根据产能柔性的要求，也希望它趋近于最小化，即：

$$\min F_2(x) = \sum_{i=1}^k c_i + MCC = \sum_{i=1}^k c_{mi} [t_{mi} + t_{ai} + \frac{t_{mi}}{T_i} (t_{ci} + \frac{c_{ri}}{c_{mi}})] + MCC \quad (4.4)$$

$$MCC = MCCI \sum_{i=1}^{k-1} \Omega (M_{i+1} - M_i) \quad (4.5)$$

式中： c_i ——第 i 道工序的加工成本；

c_{mi} ——第 i 道工序工时费用（包括操作人员和机器费用）；

c_{ri} ——第 i 道工序刀具费用；

MCC ——机床变换成本；

$MCCI$ ——机床变换成本指数。

MCC 表示在加工过程中，每变换一次机床所需要的成本，例如人工成本、运输成本等。

上述 (4.4) 式中的 c_{mi} 作为第 i 道工序工时费用，可以通过相关工艺手册或工艺数据库查询。由 (4.1) 和 (4.4) 可知，影响加工时间和成本的主要因素是加工及调整等时间因素，下面以车床为例，以加工时间最小为目标，建立面向几何特征加工的优化数学模型。

4.1.3 零件车削加工工艺优化数学模型

根据零件的几何特征不同，有多种加工方法。常用的加工方法包括车削、铣削、磨削、钻削、刨削、镗削、齿轮加工等。即使对于同一优化目标，加工方法不同，优化数学模型表达式也不尽相同。由于零件结构的复杂性，往往采用多种方法方能完成一个零件的加工。为了建立零件的工艺规程优化数学模型，有必要了解不同加工方法的数学模型表达，这里仅以车削加工为例建立车削加工的优化数学模型。

(1) 切削时间函数

为了缩短生产周期，往往对比较复杂、加工时间较长的零件族进行工艺规程优化，这类零件的切削加工时间相对辅助时间占有较大比例。如某齿轮，粗精车外圆、端面，加工时间为 5.3 小时，辅助时间为 0.7 小时；在滚齿机上半精加工该轮齿，其加工工时为 18 小时，辅助时间为 2 小时。为此这里主要讨论切削时间 t_m 的影响因素，且 t_m 对加工成本也有较大影响。资料显示^[86] t_m 受加工设备、工件尺寸、切削深度和进给量、设备参数等影响，对于车削加工，其切削时间表达式为：

$$t_m = \frac{(L_0 + L_1 + L_2)h}{n \times f \times a_p} \quad (4.6)$$

式中： L_0 ——切削长度；mm；

L_1 ——入切量，mm；

L_2 ——超切量，mm；

h ——加工余量，mm；

f ——刀具进给量，mm/r；

n ——机床主轴转速，r/min；

α_p ——切削深度，mm。

就零件某个工序而言，毛坯尺寸、加工余量可以看作定值。因此，对于零件的某种几何形状特征，在确定了加工设备的情况下，其加工时间主要取决于设备参数以及切削用量参数的选择。

(2) 约束条件

约束分为边界约束和函数约束，本例中的约束条件如下：

$$n_{\min} < n < n_{\max}$$

$$f_{\min} < f < f_{\max}$$

$$\alpha_{\min} < \alpha_p < \alpha_{\max}$$

式中： n_{\min} 、 n_{\max} 分别为机床主轴转速的最小值和最大值，其余类同。

按照优化设计的数学模型表达方式^[87]，对于车削加工，若仅以加工时间最小为优化目标，其优化数学模型可以表示为：

$$\text{求： } X = [x_1, x_2, x_3]^T = [n, f, \alpha_p]^T$$

$$\text{使： } \min f(X) = \frac{(L_0 + L_1 + L_2)h}{x_1 \times x_2 \times x_3} \quad (4.7)$$

$$\text{s.t. } \begin{cases} x_{1\min} < x_1 < x_{1\max} \\ x_{2\min} < x_2 < x_{2\max} \\ x_{3\min} < x_3 < x_{3\max} \end{cases}$$

式中： x_{\min} 、 x_{\max} 分别为设计变量的两个极限值。

4.1.4 面向制造过程产能柔性的零件工艺规程优化数学模型

(1) 工艺规程优化目标

分目标函数或者追求成本最低，或者追求速度最快，属于单目标优化问题。然而，制造过程的产能柔性期望快速、低成本地生产客户满意的产品，需要兼顾时间和成本，使制造过程指标达到综合最优。减少制造过程中零件的拥挤，减少等待时间，会在一定程度上降低成本。但是，制造时间和成本有时也相互矛盾，譬如，企业为了争取一

些交货期短的大订单,可能会采取增加成本的方法,采用高精度、高效率设备,由高级技工操作完成等。如何既兼顾时间,又考虑成本,使制造过程综合指标优良,必须进行多目标优化,构造一个新的目标函数,使制造时间和成本综合最优,以达到提高产能柔性的目的。本文对前述分目标函数应用加权求和法,构造如式(4.8)所示的目标函数表达式。通过求解 $f(X)$ 的最大值,可以使得加工时间和成本达到综合最小。

$$f(X) = \omega_1 f_1(X) + \omega_2 f_2(X) \quad (4.8)$$

$$f_1(X) = T_0 / F_1(X) = T_0 / (\sum_{i=1}^k t_i + TMC) \quad (4.9)$$

$$f_2(X) = C_0 / F_2(X) = C_0 / (\sum_{i=1}^k c_i + MCC) \quad (4.10)$$

式中: ω_1 、 ω_2 为加权系数,根据实际需求的重要程度选择,且 $\omega_1 + \omega_2 = 1$; T_0 、 C_0 可参考标杆企业的同类零件的加工时间、成本确定,具有一定的前瞻性,作为对原分目标进行归一化、无量纲处理的标准。

式(4.9)、(4.10)分别表示对原分目标 $F_1(X)$ 、 $F_2(X)$ 进行归一化、无量纲处理, $f_1(X)$ 、 $f_2(X)$ 表示 $F_1(X)$ 、 $F_2(X)$ 无量纲化处理结果。

(2) 约束条件

工艺规程的优化必须考虑制造过程的资源及其它相关约束,优化的工艺规程才具有实际意义。主要约束条件包括:加工设备、切削刀具、交货期约束等。

● 设备约束

① 设备加工能力约束

$$\sum_{i=1}^k \sum_{M_i=1}^n t_{iM_i,p} X_{iM_i,p} \leq F_M \quad (4.11)$$

式中: $t_{iM_i,p}$ ——工件 p 的第 i 道工序在设备 M_i 上单位加工时间;

$X_{iM_i,p}$ ——工件 p 的第 i 道工序在设备 M_i 上加工数量;

F_M ——设备 M 在交货期内的加工能力(时间)。

② 设备功率约束

$$0 < p_c = \frac{F_z v}{6 \times 10^4} < p_m \eta \quad (4.12)$$

式中: p_c ——切削功率;

p_m ——设备电动功率;

η ——传动机构效率;

v ——切削速度;

F_z ——切削力, $F_z = c\beta \alpha'_p f^m v^b$;

c ——系数，与加工材料、加工方式、刀具材料、刀具角度及加工方式等有关；

β ——实际切削条件与实验切削条件不同时的修正系数；

l 、 m 、 b ——指数；

③ 切削参数约束

机床主轴转速 n 、刀具进给量 f 、切削深度 a_p 的约束：

$$\begin{aligned} n_{min} < n < n_{max} \\ f_{min} < f < f_{max} \\ \alpha_{min} < \alpha_p < \alpha_{max} \end{aligned} \quad (4.13)$$

● 刀具耐用度约束

$$T_{min} < T < T_{max} \quad (4.14)$$

式中： T ——刀具耐用度， $T = \frac{C_T}{v^{1/u} f^{1/r} \alpha_p^{1/s}}$ ；

C_T ——耐用度系数；

u 、 r 、 s ——指数，随切削条件而变。

● 交货期约束

$$F_1(X) \leq T_c$$

式中： T_c ——订单交货期

上述约束条件可以根据实际情况或不同需求进行增减，也可根据实际情况进行再设计。

(3) 工艺规程优化的数学模型

由面向制造过程产能柔性的目标函数、制造过程的约束条件，构建工艺规程优化数学模型如下：

$$\text{求： } X = [x_1, x_2, \dots, x_b, \dots]^T$$

$$\text{使： } \max f(X) = \omega_1 f_1(X) + \omega_2 f_2(X) \quad (4.15)$$

$$\text{s. t. } g(X) \leq 0$$

式中： $g(X)$ 表示设计变量的变化范围。

4.2 面向制造过程产能柔性的零件工艺规程优化方法

在制造系统规划设计和运行控制所应用的理论和方法中，遗传算法（Genetic Algorithms, GA）不仅具有全局寻优功能，而且对目标函数和设计变量要求少，甚至不要求显式表达目标函数，因此从优化模型上看，GA 非常适合用于求解工艺规程优化问题^[85,88-89]。遗传算法的很多执行策略能在概率意义上收敛到问题的全局最优解，被称为是一种稳健的全局搜索算法而广泛应用。

然而基本遗传算法 (SGA) 依然存在较多问题, 因此, 国内外学者对基本遗传算法进行了一些改进。主要从个体编码、适应度函数确定、遗传操作算子、控制参数的选择等方面进行。概括起来主要有^[90-91]: ①改进遗传算法的组成成分或使用技术。②混和遗传算法 (Hybrid Genetic Algorithm)。③采用动态自适应技术, 在进化过程中调整算法控制参数和编码精度。④采用非标准的遗传操作算子。⑤采用并行算法, 以提高遗传算法的运行速度。

由于工艺规程优化设计涉及的变量较多, 如针对不同几何特征的加工方法选择、加工方法所对应的机床、刀具的选择以及切削用量等的选择, 故在编码方法上采用 SGA 将使个体变得非常复杂。为了克服个体编码的复杂性, 也为了提高工艺规程优化计算的效率, 本文在构建工艺规程优化数学模型的基础上, 采用改进遗传算法进行工艺规程优化设计。

面向制造过程产能柔性的工艺规程优化数学模型见式 (4.15), 结合工艺规程优化设计特点和改进遗传算法的基本原理, 设计如图 4.1 所示的优化算法流程。

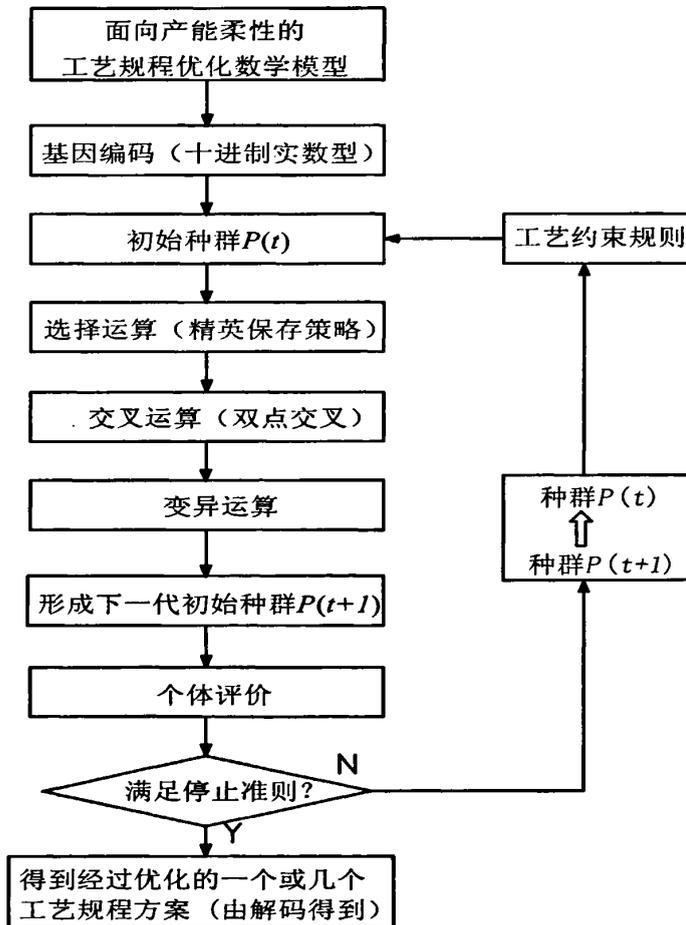


图 4.1 基于改进遗传算法的工艺规程优化算法流程

(1) 基因编码

对于工艺规程优化问题,本文基于改进遗传算法采用一种实数值编码形式进行编码。具体方法为:用一个基因组表达零件的一个加工操作,若干个有序的基因组组成一条染色体,代表一种工艺规划方案,基因组的先后位置代表了加工的顺序。假定零件的每个加工操作由多个加工元组成,分别为被加工零件的特征加工方法 ID、机床 ID、刀具 ID 和切削参数 P ,用 GG 表示对应一个加工操作的基因组,则可以表示如下:

$$GG = \{IDO, IDM, IDT, P\} \tag{4.16}$$

式中: IDO 、 IDM 、 IDT 分别用两位十进制数表示;

$P = [\alpha_p, f, n]$ 表示切削向量,其中,切削深度 α_p 的精度设为 0.1;进给量 f 精度设为 0.01;加工该几何特征的机床主轴转速 n 用四位十进制数表示。

IDO 、 IDM 、 IDT 、 P 分别属于不同的集合,如下式所示。

$$\begin{aligned} IDO_i &\in \{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{in}\} \\ IDM_i &\in \{M_{i1}, M_{i2}, \dots, M_{in}\} \\ IDT_i &\in \{T_{i1}, T_{i2}, \dots, T_{ik}\} \\ P_i &\in \{P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{im}\} \end{aligned} \tag{4.17}$$

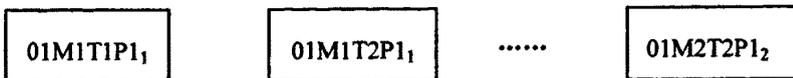
式中 $\{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{in}\}$ 表示加工该零件需要 n 种特征加工方法; $\{M_{i1}, M_{i2}, \dots, M_{in}\}$ 表示加工零件所有可用的机床集; $\{T_{i1}, T_{i2}, \dots, T_{ik}\}$ 表示加工该零件所有可用的刀具集; $\{P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{im}\}$ 表示具体特征加工方法的参数集。

如加工某齿轮外圆柱面时,假设此特征方法 ID 为 01,加工机床有立式车床 M1 和数控车床 M2,对应刀具有 T1 和 T2,切削参数为 P ,见表 4.1 所示:

表 4.1 加工特征所对应的加工方法、机床、刀具、切削参数

加工特征	加工方法	机床	刀具	切削参数
外圆柱面	车削—01	M1—01	T1—01	$P1_1(1.0,0.50,0800)$
		M2—02	T2—02	$P1_2(0.8,0.50,1500)$

由于加工方法与机床和刀具之间的一对多关系,可以形成若干基因组如下所示:



按照本文所约定的编码规则,其对应的编码分别为:

0101011.00.50800, 0101021.00.50800, …… , 0102020.80.51500

各个基因组按照零件加工工序进行排列形成了多个染色体，构成初始种群。如下所示：

$$01M1T1P1_1 | 02M3T3P2_1 | 03M5T6P3_1 | \dots\dots$$

$$01M2T1P1_2 | 03M5T7P3_2 | 02M4T3P2_2 | \dots\dots$$

为了保障初始种群的有效性，至少有一条染色体参照实际加工情况确定，其他可以随机生成。初始种群的数量一般建议的取值范围是 20-100^[92]。

(2) 适应度函数

工艺规程优化的目的是为了得到在一定工艺资源环境下使零件制造成本和时间达到综合最小的加工工艺规划，以提高产能柔性。基于遗传算法的优化问题求解需要一种评价机制来评价个体对生存环境的适应性，以决定它们是否被生存环境所淘汰。所以，这种评价机制应代表求解问题的目标函数，即加工成本、加工时间的综合。本文将求解问题通过转化变成了求极大值问题，见式 (4.15)，而且目标函数值始终为正值。按照适应度函数的规定^[90]，这里可直接将目标函数作为适应度函数，如式(4.18)所示。目标函数值的大小决定了个体的适应度大小，适应度高，就有更大的机率被选择到下一代，而适应度很低的个体，则可能被选择机制所淘汰。

$$F(X) = f(X) = \omega_1 \frac{T_0}{\sum_{i=1}^k T(X) + TMC} + \omega_2 \frac{C_0}{\sum_{i=1}^k C(X) + MCC} \quad (4.18)$$

(3) 遗传运算

● 选择运算

在本算法中，选择的原则采用精英保存法，使用最优保存策略进化模型 (Elitist Model) 进行优胜劣汰操作。即当前群体中适应度最高的个体不参与交叉运算和变异运算，而是用它来替换掉本代群体中经过交叉、变异等操作后产生的适应度最低的个体^[89]。该策略的实施可保证迄今为止所得到的最优个体不会被交叉、变异等遗传运算所破坏，它是遗传法收敛性的一个重要保证条件。

但该方法也容易使得某个局部最优个体不易被淘汰掉反而快速扩散，从而使得算法的全局搜索能力不强。为了避免陷入局部最优，在 GA 终止条件的确定中引入局部最优徘徊策略，其基本思想是，当群体中部分优秀个体的平均适应度达到收敛精度时，先不立即退出循环，而重复寻优过程，重复步小于 5~10，同时加大交叉率 P_c 和变异率 P_m ，使 GA 充分发挥多点、并行搜索的长处，以获得全局的最优解。

● 交叉运算

在通常情况下，交叉是随机进行的。本研究中为保证交叉后的个体有效，应对交叉进行限制，在本交叉运算中，我们采取了一种改进的算法^[84]，具体步骤如下：

① 选择 2 个个体作为父辈染色体，随机选择 2 个交叉点，从而在每个父辈染色体中确定 1 个片断。

② 按照一个父辈染色体的相应元素的顺序来调整另一个父辈染色体中的片断内的各元素的顺序，其余元素的顺序保持不变。

③ 交换上述两个父辈染色体交叉点内调整顺序后的片断，得到新的子染色体。

以上述的两个父辈染色体为例，取交叉点如图 4.2 所示，经过交叉运算，形成一个新的子代染色体如图 4.3 所示。

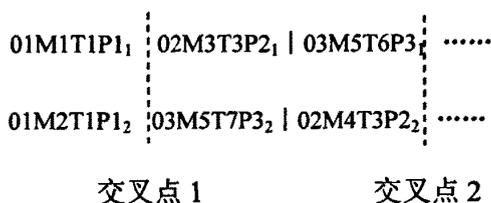


图 4.2 两个父代染色体双点交叉运算

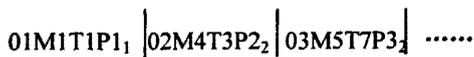


图 4.3 双点交叉操作得到的子染色体

● 变异运算

变异在本算法中占有极其重要的地位，主要实现特征加工的操作选择。为此，需要建立每个基因位的可用列表集，如表 4.2 所示。变异运算主要采取如下操作：在个体中随机选择某个基因组，以可用列表集中的机床位、刀具位和相应的切削参数位为依据，对基因组内的加工元实施变异操作，以保证个体的有效性。如图 4.4 所示给出了某染色体的机床位和刀具位变异后的结果；然后，进一步对相应切削参数进行变异运算，切削参数与切削数学模型相关，可以在约束范围内随机取值，改变切削变量的值即对基因组的切削参数位实行了变异操作。为了保护杰出群体，变异率的取值一般很低，取值范围为 0.001~0.01^[84]。

表 4.2 零件的可用机床刀具列表

特征加工方法	可用机床集	可用刀具集
O1	M1 M2	T1 T2
O2	M3 M4	T3 T4 T5

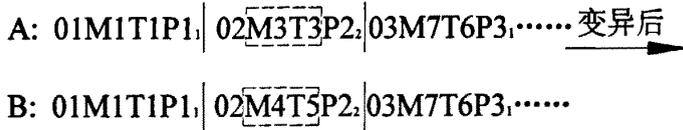
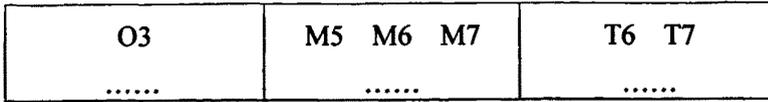


图 4.4 染色体变异运算

以上过程被反复地迭代执行，直到满足演化的终止条件。通常使用的演化终止条件为达到特定的代数或者演化的最后几代之间的平均适应值不再发生明显变化。经过若干代进化，可在工艺方案解空间中得到最优或接近最优的个体，即得到最优或次优的若干个工艺规程。上述算法可以通过 Matlab 优化软件实现。

4.3 面向制造过程产能柔性的零件工艺规程优化设计案例

本文选择如图 4.5 所示大模数直齿圆柱齿轮作为典型零件进行工艺规程优化设计。大模数齿轮为重型机床中的变速齿轮，一般选择模数较大的齿轮。该类零件加工时间较长，且在重型工程机械中属于比较典型的一类零件。

(1) 齿轮的设计要求

如图 4.5 所示为直齿圆柱齿轮结构简图，其主要参数及技术要求如下：

- 齿圈材料：45°
- 模数 $M=18$
- 齿数 $Z=41$
- 压力角 $\alpha_0=20^\circ$
- 精度等级：8HL GB/T10095-1988
- 热处理：调质 T235
- 齿部硬度 HRC48~52。

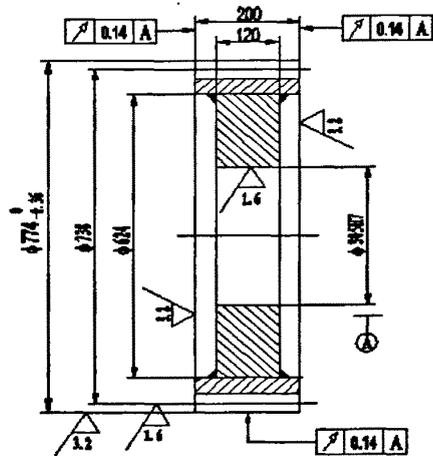


图 4.5 齿轮结构简图

(2) 大模数齿轮工艺规程优化数学模型

由于大模数齿轮尺寸较大，其实际加工情况为：机械加工的时间和费用相对于其他辅助时间和费用要大的多。因此，这里在进行工艺规程优化建模时仅考虑齿轮加工时间和加工成本。

按照前述的工艺规程优化数学模型，齿轮加工优化数学模型可以由式 (4.8)、(4.9)、(4.10)、(4.15) 表示。

根据齿轮的结构特征分析,其主要加工工序为:车削、粗滚齿及半精滚齿、磨齿等。查阅相关切削手册及资料^[93],在此分别给出车削、滚齿、磨齿的加工时间表达式,如式(4.6)、(4.19)、(4.20)所示:

$$t_m = \frac{(L_0 + L_1 + L_2)Z}{n \times f \times q} \times i \quad (4.19)$$

$$t_m = Z[n_1(\frac{W_s}{v_1} + t_1) + n_2(\frac{W_s}{v_2} + t_1)] + n_3 t_3 \quad (4.20)$$

式中符号表示含义如下:

t_m ——切削加工时间, min;

Z ——齿轮齿数;

q ——滚刀头数, 本例中 $q=1$;

n_1 ——粗磨圈数;

n_2 ——精磨圈数;

t_1 ——分度时间, min;

W_s ——展成运动长度, mm;

v_1 ——粗磨进给速度, mm/min;

v_2 ——精磨进给速度, mm/min;

n_3 ——所需的修正砂轮次数;

t_3 ——砂轮修正的时间, min。

第 i 道工序机械加工成本由(4.4)式变换后得式(4.21)。

$$c_{mi}^* = c_{mi} t_{mi} (1 + \frac{1}{T_i} \times \frac{c_{ri}}{c_{mi}}) \quad (4.21)$$

(3) 基于改进遗传算法的齿轮工艺规程优化计算

● 编码规则

对大模数齿轮的工艺优化的编码我们在此采用了实数编码的形式进行编码,按照零件特征加工方法 ID、机床 ID、刀具 ID 和切削参数 P 顺序对各工序进行编码,形成一个遗传染色体。具体编码规则在 4.2 已阐述,在此不在赘述。

结合本齿轮的加工特征和企业的设备资源,在保障质量的前提下,参考有关切削手册^[93]分别建立如表 4.3、4.4、4.5 所示加工特征方法、加工机床及刀具列表。在齿轮加工前齿圈与辅板焊接。

● 适应度函数

本例采用如式(4.22)所示与目标函数相同的适应度函数。

$$F(X) = \omega_1 \times \frac{T_0}{f_1(x)} + \omega_2 \times \frac{C_0}{f_2(x)} \quad (4.22)$$

表 4.3 特征加工方法

零件加工特征	加工方法
齿轮外圆 01	车削
齿轮内孔 02	
齿轮端面 03	
轮齿 04	粗滚、粗铣、粗刨
	半精滚齿
	磨齿

表 4.4 加工机床及其成本指数

机床类型	机床型号	成本指数 MCI
立式车床 M01	C512A	80
滚齿机 M02	FO-25	110
龙门铣床 M03	X2012A	100
龙门刨 M04	B2016A/1	90
磨齿机 M05	ZSTZ1250	140

注：C512A：最大工件回转直径为 $\phi 1250\text{mm}$ 的立式车床

FO-25：最大工件回转直径为 $\phi 2500\text{mm}$ 、最大模数为 25 的滚齿机

X2012A：最大加工尺寸为 $4500 \times 1500 \times 1100$ 的龙门铣床

B2016A/1：最大加工范围为 $4000 \times 1600 \times 1250$ 的龙门刨床

ZSTZ1250：最大加工直径为 $\phi 1250\text{mm}$ 、模数为 2~18 的磨齿机

表 4.5 刀具及其成本指数

刀具编号	刀具类型	成本指数 TCI
T01	合金车刀	8
T02	滚刀	20
T04	指型铣刀	12
T05	齿轮毛坯铣刀	15
T06	刨刀	10
T07	磨前滚刀	20
T08	砂轮	12

● 遗传运算及其优化结果

在上述建立了各工序加工时间、成本、机床、刀具列表等的基础上，对大模数齿轮进行遗传优化操作，本例采用了精英选择、两点交叉运算方法。交叉概率取 0.8，变异概率取 0.059，选取遗传迭代数 200 次作为终止规则，得到如图 4.6 所示优化解变化趋势以及最优和接近最优的几个工艺规程，表 4.6 所示为适应度函数值最大即加工时间和加工成本综合最小的优化机械加工工艺规程，此工艺规程所对应的适应度函数值为 1.4148，权系数 ω_1 和 ω_2 分别为 0.8、0.2。

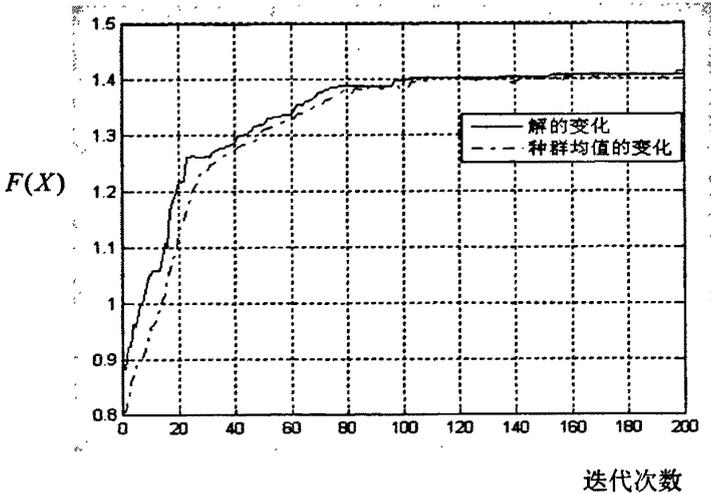


图 4.6 优化解变化趋势

表 4.6 大模数齿轮机械加工工艺规程优化结果

机械加工工序	加工特征方法	机床型号	刀具	切削参数		
				进给量 (mm/r) (磨齿时为进给速度 mm/min)	吃刀深度 (mm)	转速 (r/min)
1	粗车外圆	C512A	合金钢车刀	0.80	4.8	30
	精车外圆	C512A	合金钢车刀	0.30	0.5	50
	车端面	C512A	合金钢车刀	0.80	4.5	30
	精车端面	C512A	合金钢车刀	0.20	0.5	40
	粗车内孔	C512A	合金钢车刀	0.80	4.6	40

	精车内孔		C512A	合金钢 车刀	0.30	0.5	60
2	粗滚齿		FO-25	滚刀	2.50	2次走刀	25
	半精滚齿		FO-25	磨前 滚刀	1.50	1次走刀	30
3	磨 齿	粗	ZSTZ	砂轮	730	粗磨 3 圈	
		精	1250		320	精磨 2 圈	

4.4 本章小结

本章在分析制造过程产能柔性度量指标：时间、成本、产能范围的基础上，在保证质量前提下，以加工时间和成本综合最小为目标，建立了面向制造过程产能柔性的零件工艺规程多目标优化数学模型；考虑到工艺规程优化的复杂性，选择改进遗传算法作为优化算法；并以大模数齿轮工艺规程多目标优化为对象，给出了工程应用实例。

第 5 章 面向制造过程产能柔性的质量集成控制

制造过程的质量控制对协调产品制造质量、周期、成本三个指标，提高其产能柔性具有重要作用。目前制造过程质量控制大多局限于采用常规的 SPC 预防控制措施进行工序质量控制，并且对出现的质量问题常采取经验的处理方法，缺乏科学依据。本章以提高制造过程产能柔性为目标，提出制造过程质量集成控制技术，构建质量集成控制体系结构，并给出应用实例。

5.1 面向制造过程产能柔性的质量集成控制技术

5.1.1 面向制造过程产能柔性的质量集成控制过程

随着市场需求多样化、个性化特点的日趋明显，多品种、小批量生产模式呈现主流趋势，常规的 SPC 技术应用受到限制，经验处理方式远远不能适应多变的环境。为此本文提出一种面向制造过程产能柔性，集预防、诊断、改进于一体的质量集成控制技术；其控制过程包括工序质量预防阶段、质量分析诊断阶段和改进控制阶段，如图 5.1 所示。

(1) 工序质量预防阶段

对于多品种、小批量生产模式的离散制造企业，其产品制造过程首先要根据典型零件族的优化工艺规程，确定关键工序，设立工序质量控制点；然后，选择合适的工序质量预防控制方法，进行工序质量预防控制。由于常规的 SPC 技术应用的局限性，研究实用性强、面向多品种、小批量生产模式的质量预防控制技术成为企业迫切需要解决的问题。为此本文基于 SPC 理论和聚类原理，提出面向零件族的单值——移动极差预防控制方法。

(2) 质量分析诊断阶段

在产品制造过程中，既要保证质量，又要使整个流程有较高的运行速度，在预防控制的基础上，针对出现的具体质量问题，利用精益六西格玛方法进行制造过程质量分析诊断。对关键工序质量问题以及制造过程运行速度不能满足客户交货期的问题，重点应用试验设计方法和时间陷阱分析方法进行诊断，分析影响质量和速度的关键因素。

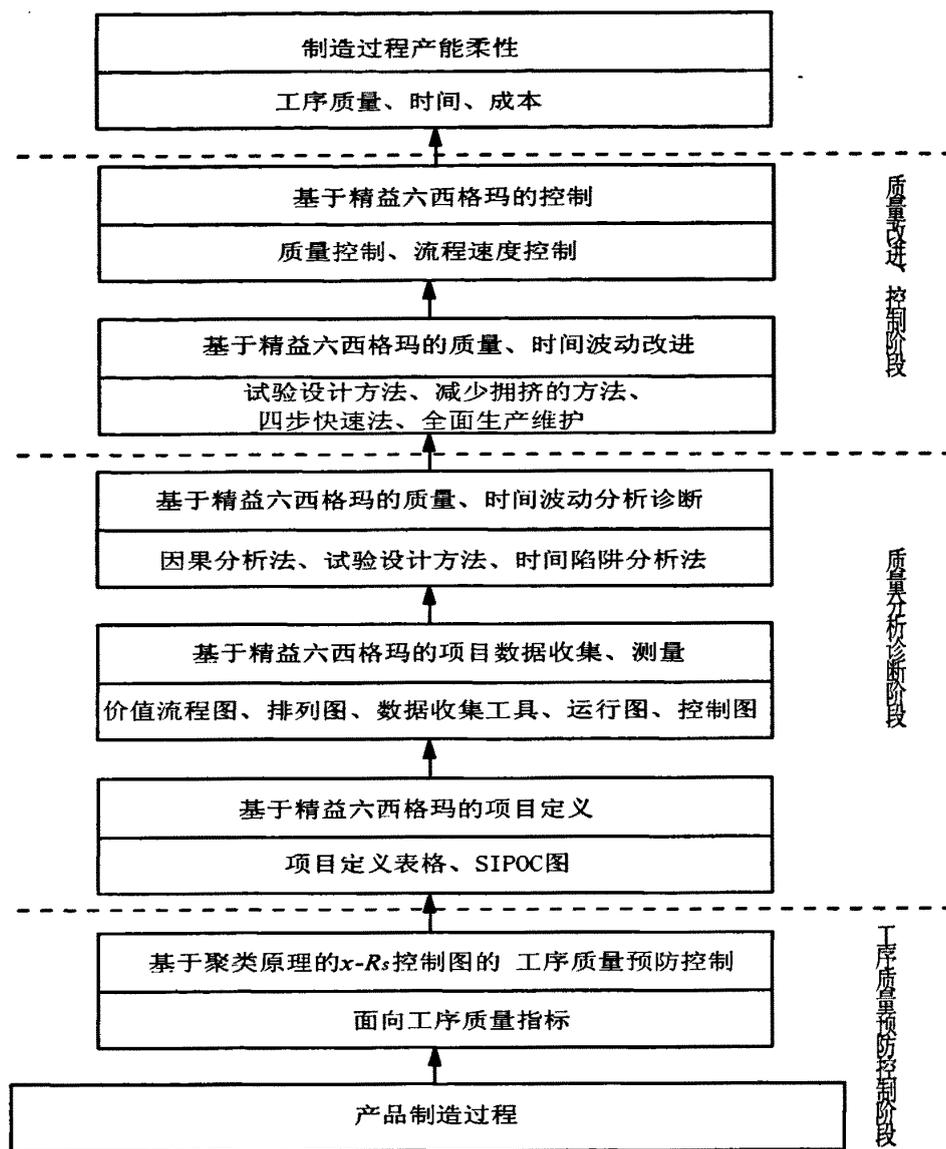


图 5.1 面向产能柔性的制造过程质量集成控制过程

(3) 改进控制阶段

通过上一阶段的诊断分析,利用试验设计方法确定使工序质量特征值最优的影响因素组合;利用精益工具,如拉动系统模式,适时释放在制品数量,减少在制品拥挤;对于准备时间较长的工序采用四步快速法,减少准备时间,并加强设备全面维护。通过一系列精益和六西格玛工具的应用,改进并控制制造过程的质量和速度,追求制造过程质量和速度的最佳组合,并且使过程中不增值的成本降低。

通过制造过程质量集成控制策略的实施,可以有效预防质量问题的产生;而对于出现的质量问题,通过科学的诊断、改进措施的实施,可以使得制造过程同时达到工

序质量、速度、成本指标的综合优化,从而提高制造过程产能柔性。

5.1.2 面向零件族的工序质量预防控制

由于市场的不确定性和用户需求的多样化,制造企业一般为订单生产模式,属于多品种、单件或小批量生产,而 SPC 技术适于大批量生产,需要样本容量至少在 20-25 个以上。因此,SPC 技术在该类企业中的应用面临以下困难:

- 由于缺少样本,很难对过程的参数进行估计,确定有意义的控制极限。
- 即使每一类零件用一张控制图,由于缺少样本,对判断产品质量的变异规律没有指导意义,并且由于控制图数量的增加,给制造过程稳定性评估与管理带来困难。

零件族加工为解决这个问题提供了一种思路。零件族加工是利用被加工零件的形状特征、材料、加工方法等方面的相似性,制定相似的工艺规程,特别对一些关键工序,需要考虑工装/刀具的齐备性、操作人员的熟练性和机床的稳定性等客观因素,往往将相似零件安排在同一台设备上加工。事实上,相关企业广泛采用这种零件族加工方法,在工序质量、加工周期、成本方面都取得了显著的效果。零件族加工为获得足够样本控制关键工序质量奠定了基础。

针对多品种、小批量生产模式下的质量控制技术,有研究者进行了相关研究,并提出了一些解决方法^[28-30]。本文主要基于聚类原理,进行面向零件族的单值——移动极差预防控制技术研究。

(1) 统计工程聚类原理

假定随机变量 Y_1 分布函数、期望值和方差分别为: $f(Y_1)$ 、 $E(Y_1)=\mu_1$ 、 $Var(Y_1)=\sigma_1^2$; 另一随机变量 Y_2 分布函数、期望值和方差分别为: $f(Y_2)$ 、 $E(Y_2)=\mu_2$ 、 $Var(Y_2)=\sigma_2^2$ 。

若随机变量 Y 是由 Y_1 和 Y_2 混合组成的,则:

$$\begin{aligned} E(Y) &= \alpha_1 E(Y_1) + \alpha_2 E(Y_2) = \alpha_1 \mu_1 + \alpha_2 \mu_2 \\ Var(Y) &= \alpha_1 Var(Y_1) + \alpha_2 Var(Y_2) + \alpha_1 \alpha_2 (\mu_1 - \mu_2)^2 \\ &= \alpha_1 \sigma_1^2 + \alpha_2 \sigma_2^2 + \alpha_1 \alpha_2 (\mu_1 - \mu_2)^2 \end{aligned}$$

α_i 是随机变量 Y_i 在混合样本空间中的概率, $\sum_{i=1}^k \alpha_i = 1$ 。

将上述原理推广到 k 元混合分布的情形,为简化问题,假设 $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu$, 设 Y 来自各个分布的概率分别为 α_1 、 α_2 、 \dots 、 α_k , 则聚类后随机变量 Y 具有以下性质:

$$E(Y) = \alpha_1 \mu_1 + \alpha_2 \mu_2 + \dots + \alpha_k \mu_k = \sum_{i=1}^k \alpha_i \mu_i = \mu \sum_{i=1}^k \alpha_i \quad (5.1)$$

$$Var(Y) = \alpha_1 \sigma_1^2 + \alpha_2 \sigma_2^2 + \dots + \alpha_k \sigma_k^2 = \sum_{i=1}^k \alpha_i \sigma_i^2 \quad (5.2)$$

(2) 基于聚类原理的零件族样本构建

首先假定零件族的某些特征值是在一个共同的、无显著性差异的工序下生产出来的。即零件族是在无显著性差异的人（操作人员）、机（机床、刀具、夹具）、料（零件材料）、法（加工方法）、环（环境）、测（测量方法）（简称 5M1E）等条件下，生产出具有相似质量特征值的产品。事实上，企业为了保障质量、提高效率，对于零件族的关键工序加工，往往采取同一台设备、由同一个或两个人操作的方法，加工零件族的类似几何特征，因此这种假设具有工程依据。

由于零件族中零件的尺寸不同，其关键工序质量特征的实测值有较大差异，其均值亦不相同。假设零件族有 m 种零件，每种零件有 n_i 个组成。在某关键工序，每种零件的均值、方差分别为： μ_i 、 σ_i^2 ($i=1,2,\dots,m$)，第 i 种零件每个件的实测值为 X_{ij} ($i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n_i$)。则 X_{ij} 服从正态分布，即： $X_{ij} \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$ 。

若将零件的实测值经过式 (5.3) 所示的变换，则形成新的质量特征值 Y_{ij} ：

$$Y_{ij} = X_{ij} - \bar{X}_i \quad (5.3)$$

由于影响该工序质量的 5M1E（人、机、料、法、环、测）因素基本相同，故变换后的各类零件的平均值 \bar{Y}_i 的期望值可以认为相同，即：

$$E(\bar{Y}_i) = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_m \approx 0$$

σ_i 表示第 i 种零件在该关键工序加工尺寸的变化范围，同样由于与 5M1E 密切相关，根据假设条件，可以认为：

$$Var(Y) = \sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_i = \sigma$$

将零件族的各个实测值 $X_{ij} \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$ 经过 $Y_{ij} = X_{ij} - \bar{X}_i$ 的数据变换，将 m 个小类进行聚类，即可得到 $k = \sum_{i=1}^m n_i$ 个数据，构成一个大的样本 S 。

根据统计过程聚类原理，按照式 (5.1)、(5.2)，样本 S 的均值、方差为：

$$E(Y) = \sum_{i=1}^k \alpha_i \mu_i = 0 \quad (5.4)$$

$$Var(Y) = \sum_{i=1}^k \alpha_i \sigma_i^2 = \sigma^2 \quad (5.5)$$

即零件族聚类后样本 S 的随机变量服从统一的正态分布，即： $Y \sim (0, \sigma^2)$ 。

(3) 面向零件族的单值——移动极差控制

根据零件族聚类样本 S 随机变量服从正态分布的特性,按照单值—极差控制图原理^[4], 确定 x 和极差 R_S 的控制界限。

- x 控制图控制界限

由于 μ 的估计值 $=\bar{x}=0$, σ 的估计值 $=\bar{R}_S/d_2$

根据 x - R_S 控制图原理, 样本 S 的 x 控制图控制界限为:

$$UCL=\bar{x}+2.66\bar{R}_S=2.66\bar{R}_S \quad (5.6)$$

$$LCL=\bar{x}-2.66\bar{R}_S=-2.66\bar{R}_S \quad (5.7)$$

$$CL=\bar{x}=0 \quad (5.8)$$

- R_S 控制图控制界限

样本 S 的 R_S 控制图控制图的控制界限为:

$$UCL=3.267\bar{R}_S \quad (5.9)$$

$$LCL=D_3\bar{R}_S=0 \quad (5.10)$$

$$CL=\bar{R}_S=\frac{\sum_{i=2}^k R_{Si}}{k-1} \quad (5.11)$$

5.1.3 基于精益六西格玛的制造过程质量诊断与改进技术

(1) 制造过程产能柔性对六西格玛与精益生产融合的需求

制造过程的产能柔性要求快速、低成本地调整产能,生产客户满意的产品,即要求速度与工序质量的良好结合,同时降低成本,提高制造过程绩效。六西格玛和精益生产理念的融合,可以使得速度与工序质量达到完美结合^[94]。

- 六西格玛和精益生产

六西格玛关注顾客所认为的缺陷问题,其核心是强调在有利的工作框架,即 DMAIC (D—定义, M—测量, A—分析, I—改进, C—控制) 运行模式下,依靠基于数据的决策以及对质量工具全面的理解和运用,有效地减少质量偏差或波动,从而减少由于出现废品和返工造成的成本和时间的损失,降低成本,使企业获得高的效益。

精益生产关注的是使过程速度最大化。其核心是通过工具分析对过程的每个活动进行过程波动和延误时间的分析,并把不产生效益的活动和相关的成本去除,实现过程速度的最大化,生产周期的最短化和成本的最小化,快速占领市场。

一般认为,速度的提高肯定会带来质量的下降,然而精益生产通过适时释放在制品的数量 (WIP),减少拥挤,即减少价值增值步骤之间不必要的等待时间,加快流程速度,缩短提前期^[94],如式 5.12 所示。

$$\text{提前期} = \frac{\text{在制品数量WIP}}{\text{单位时间完成的工作量}} \quad (5.12)$$

● 制造过程产能柔性对精益六西格玛的需求

M. L. George^[94]从数学的角度证明只有快速响应的过程才能获得好的工序质量，而只有高质量的过程才能获得快速的运转，并用图 5.2 形象地描述了速度、质量和成本的关系。图中水平坐标描述的是缺陷率（六西格玛的目标），垂直于纸面的轴表示周转时间（精益的目标），最有价值的是纵坐标，它显示了在生产中不增值的成本，越靠近原点，成本越低，状态越理想。如果仅降低缺陷或者降低运转时间可以降低成本，但只有同时提高质量和速度才能获得最低的成本。因此，只有精益六西格玛才能同时达到工序质量、速度、成本三者综合最优，使得制造过程的产能柔性达到一个良好的状态。

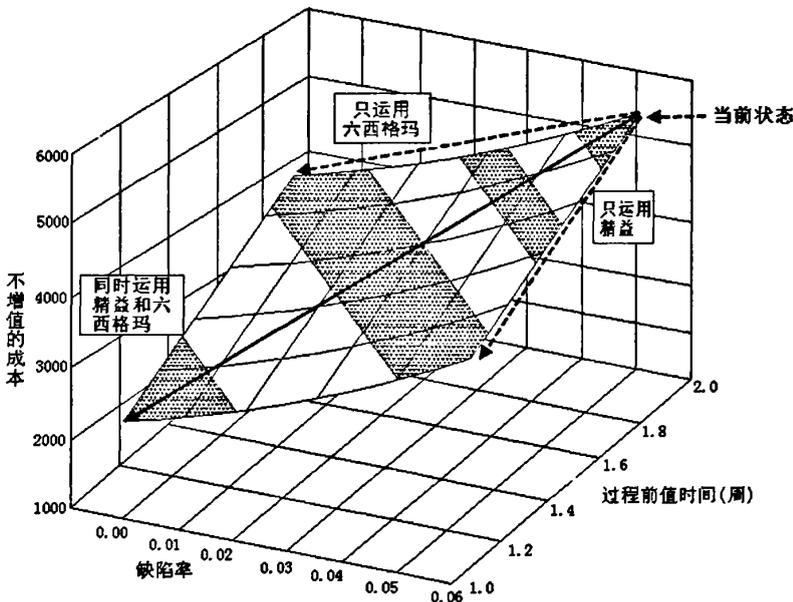


图 5.2 速度、工序质量和成本的关系

(2) 面向制造过程产能柔性的精益六西格玛的实施

面向制造过程产能柔性的精益六西格玛的实施，主要体现在质量集成控制的分析诊断与改进阶段，核心是精益和六西格玛工具的有机融合。质量分析诊断阶段包括：对欲改进的质量问题描述、相关数据测量、数据分析诊断；改进阶段包括：改进措施、控制并保持改进效果。

● 质量分析诊断阶段

① 质量问题描述

质量问题的描述主要明确界定欲改进的项目或流程。可使用两个工具：项目定义

表格和 SIPOC 图。

项目定义表格的作用是记录项目的关键信息；而 SIPOC 图则属于精益工具，描述对于改进的项目其供应商、客户信息，输入、产出形式及其要求，更重要的是描述解决质量问题的内部实施步骤——流程，使项目组成员对流程进行一次高层面的审视。

② 相关数据测量

从影响工序质量特征值、工序间等待的大量因素中，按其影响大小初步排列顺序，评价测量系统的可靠性，并进行质量问题相关数据测量。常用工具包括：流程特性工具、优先级工具、数据收集工具、识别差异工具。

流程特性工具主要是价值流程图的绘制，属于精益工具，它是在 SIPOC 图的基础上，添加详细信息形成价值流程图，以测量流程的提前期和周期效率；优先级工具包括排列图、因果图关系矩阵等；数据收集工具中的标准重复性和再现分析用于评价测量系统的可靠性。

识别差异工具主要有运行图和控制图。

③ 数据分析诊断

数据分析诊断主要寻求质量波动的影响因素以及造成时间延迟的步骤。一般采用如下方法：

因果分析法^[4]。确定某个输入与输出是否存在某种关系的简单工具，用于寻求质量产生的原因，但只能定性分析对输出的影响。

试验设计方法 (DOE)^[40]。该方法是对试验方案进行优化设计，以降低实验误差和生产费用，减少实验工作量并对试验结果进行科学分析的一种方法。它主要用于质量波动改进，可以同时分析几个输入变量变化对输出的影响，较快地查找某工序质量特征值的关键影响因素，并可定量分析对输出的影响程度。可通过统计分析软件如 Minitab 等实现。

时间陷阱分析法^[94]。时间陷阱是指按照 20/80 原则，造成 80% 时间延迟的是由于不超过 20% 的活动造成的，这 20% 范围内的活动称之为时间陷阱。时间陷阱分析属于精益工具，通过供应链加速器软件确定哪些活动是时间陷阱。

● 改进阶段

工序质量问题不仅使得不合格率增加，而且导致时间的延迟。资料统计表明^[94]，10% 的废品率会导致 38% 的时间延迟，如图 5.3 所示。所以改进工序质量对产能柔性指标具有综合作用。

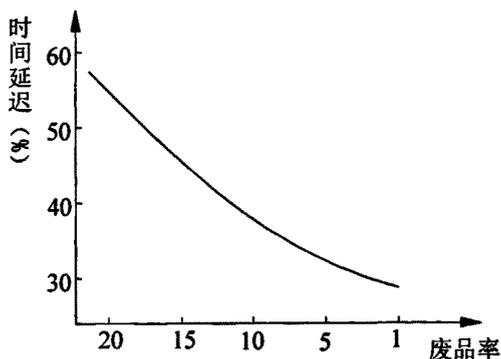


图 5.3 废品率对时间延迟的影响

① 改进措施。针对质量波动和时间陷

阱采取改进措施。主要方法包括：试验设计法、减少造成拥挤的方法、四步快速方法和全面生产维护等。

试验设计法：主要用于质量波动改进，不仅可以诊断工序质量影响因素，而且通过对试验结果的分析，可以求得使输出最优的因素组合，即改进方案。

减少拥挤的方法：拥挤是造成时间延迟的主要原因，拥挤的工序属于时间陷阱。减少拥挤的方法主要有储备、三分法和后备能力。

四步快速法：这种方法主要针对准备时间较长的工序。准备时间对于整个流程的时间延迟的影响呈线性关系，如图 5.4 所示。四步快速法可有效缩短准备时间。

全面生产维护：全面生产维护可以减少停工的时间，加快流程速度，提高设备的利用率，有利于提高产能。

② **控制措施。**常常采用控制图等工具对改进的方案进行有效地控制，监控改进效果。将改进后的过程程序化、制度化。

总之，精益六西格玛的实施是六西格玛与精益工具有机融合的过程，即在作为六西格玛核心的改进模式中合理地融入精益工具和方法，形成一个有机的整体运行模式。通过对关键工序的精益六西格玛改进，可以有效地控制制造过程的工序质量和速度，降低成本，同时增加一定时间内的产出，提高制造过程的产能柔性。

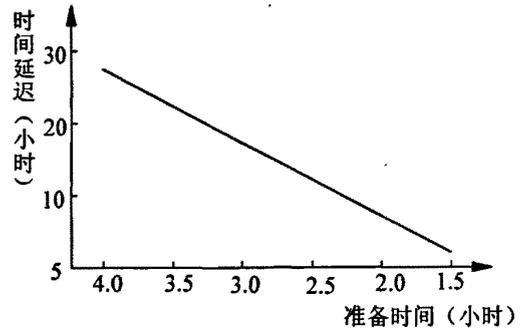


图 5.4 准备时间对时间延迟的影响

5.2 面向制造过程产能柔性的质量集成控制方案设计

5.2.1 面向制造过程产能柔性的质量集成控制系统体系结构

目前，在离散型制造企业中，制造过程的质量控制大多是通过质量计划下达、序后生产检验和质量统计报表等形式进行静态质量管理，即使应用了质量控制系统也只是关注质量管理信息的维护和查询，而没有真正实现对产品生产过程的闭环质量控制。为此，作者从控制制造过程工序质量、生产周期和成本的角度，以提高制造过程产能柔性为目标，构建如图 5.5 所示的质量集成控制系统（Quality Integration Control System, QICS）三层框架结构。

(1) 管理决策层

质量管理决策层是 QICS 的最高层次，负责企业质量的计划、管理和决策。质量管理决策包括：制定工序质量、成本、生产周期指标；制定质量保障规范；进行质量、

流程速度问题最终决策；管理质量文档；综合统计、分析工序质量、成本、工时，发现制造过程影响产能柔性的薄弱环节，为调整产能柔性提供可靠信息。

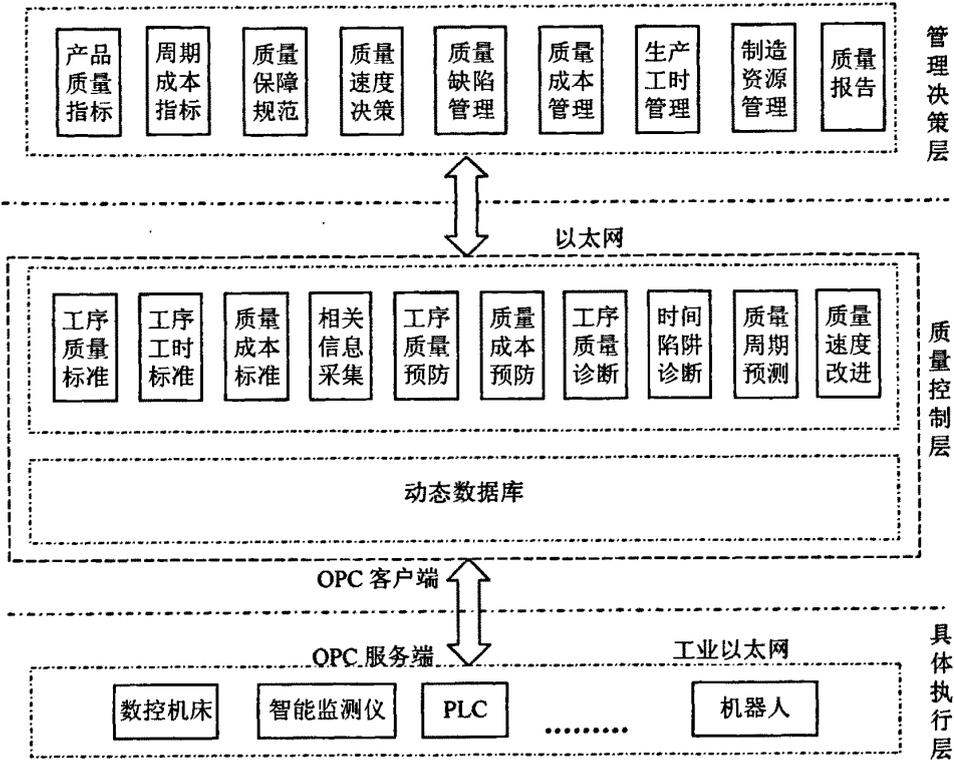


图 5.5 质量集成控制系统体系结构

(2) 质量控制层

质量控制层是质量 QICS 的核心层，同时起着承上启下的作用。质量控制层的功能为：质量数据采集、预防控制、分析诊断、改进与跟踪、分析诊断报告的生成以及在线质量反馈控制等。具体为：根据质量、成本、生产周期指标及质量保障规范所制定工序质量、工序工时、质量成本标准，将采集的底层有关信息过滤，实时送达正确的地点，并存入动态数据库；通过对实测的信息进行预防控制处理或与标准信息比对，判断工序状态或制造流程的稳定性，实时做出评价或预警，实现质量预防控制；对于出现的质量问题或制造过程的拥挤现象，通过精益六西格玛工具软件的分析诊断，寻求影响质量、速度的关键因素，同时提出改进方案。

(3) 执行层

执行层是 QICS 系统的最底层，主要功能是执行检测、控制以及信息采集。即通过信息预处理存入相关数据库，为质量控制提供依据；同时，接受来自控制、决策层的反馈信息，实时做出调整，以控制底层设备的运行。

5.2.2 质量集成控制系统主要模块分析

(1) QICS 功能模块

如图5.5所示, 质量集成控制系统主要包括如下功能模块:

- 数据库模块

通过数据采集和预处理, 将底层车间的数控加工设备、自动检测设备、零件工序加工等参数以及工序实际工时等信息, 存入数据库, 为制造过程质量管理与控制提供现场数据与资料。

- 标准及指标管理模块

根据零件的工艺流程选择关键工序, 制定零件的工序质量标准、工时标准、质量成本标准。工序质量、成本、周期指标是企业根据同行业标杆企业及本企业实际以及客户要求所制定的各种指标, 如产品一次检验合格率、废品率、回用率、质量损失、生产周期等指标。

- 相关信息采集模块

将从工序质量专用检测装置(如各种传感器)、各种数字设备(如自动检测设备、加工中心所带的测量头)、数控加工程序等采集的各种质量信息, 或者人工录入的信息(如加工工时信息)等, 经过分类处理, 分别存入相应的数据库。

- 工序质量预防控制模块

针对采集的工序质量信息, 经过数据变换, 根据样本容量情况采用常规的 SPC 或面向零件族的 SPC 的控制图进行质量预防控制; 而针对成本和工时, 主要通过实测值和标准比对, 进行预防控制, 对于接近于边界的情况实时予以警告。

- 质量分析诊断——改进模块

针对出现的工序质量、流程拥挤等问题, 选择嵌入系统的精益六西格玛工具软件, 如用于质量分析诊断的 Minitab 工具软件、时间陷阱分析软件等进行分析, 寻求关键影响因素, 并找到最佳因素组合, 为改进工序质量和流程提供技术支持。

- 质量决策——反馈模块

质量控制层的相关信息通过信息处理传至管理决策层, 由专家或专家库进行决策, 决策方法主要依据统计、分析、诊断结果, 同时结合专家的实践经验与企业实际情况做出最终决策。决策的技术及管理信息经过信息过滤反馈至执行层的正确地点, 并进行调整, 如修正数控设备程序, 调整设备运行参数, 或调整在制品数量, 减少流程拥挤等, 以实现制造过程质量集成控制。

- 管理决策层其他功能模块

管理决策层的质量保障规范是针对某项产品、项目或合同, 规定专门的质量措施、资源和活动顺序, 为达到质量目标所进行的筹划安排; 其他管理模块如工序质量缺陷管理、质量成本管理、生产工时管理等则是对某个项目在工序质量、费用、时间

方面做出统计汇总,根据汇总结果与指标的比对,可以发现影响产能柔性的薄弱环节,为提高制造过程产能柔性提供依据。

(2) 质量集成控制系统结构

根据上述质量集成控制系统中主要模块功能的描述,提出了动态质量控制系统的结构单元,如图 5.6 所示,包括规划标准、信息采集、预防控制、分析诊断、管理决策模块,各模块由前面所描述的主要子模块组成。

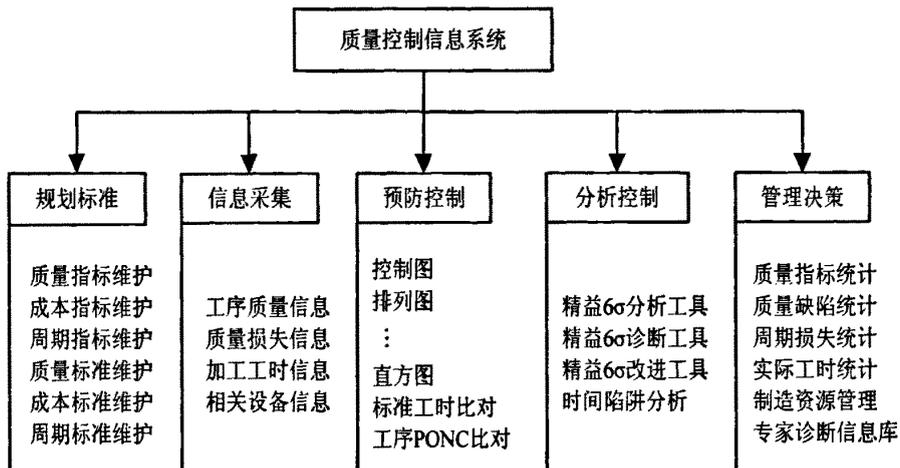


图 5.6 质量集成控制系统主要结构单元

5.2.3 质量集成控制系统运行流程

QICS 系统是一个动态循环过程,按照质量活动请求、现场数据采集与预处理、质量预防控制、诊断与改进、决策与反馈等流程运行,构建质量集成控制系统运行流程,如图 5.7 所示。

(1) 质量活动请求

通常情况下质量控制活动是从管理层的质量控制定义开始的,发送请求到质量标准和指标模块,质量标准和指标模块将设计分解后的质量规范、成本、周期等信息发送到管理层、控制层和执行层相关模块;质量控制资源管理模块收到质量标准和指标相关信息后,将进行人员、设备、原材料等资源的调度和分配,并将此信息传递给质量采集执行模块。

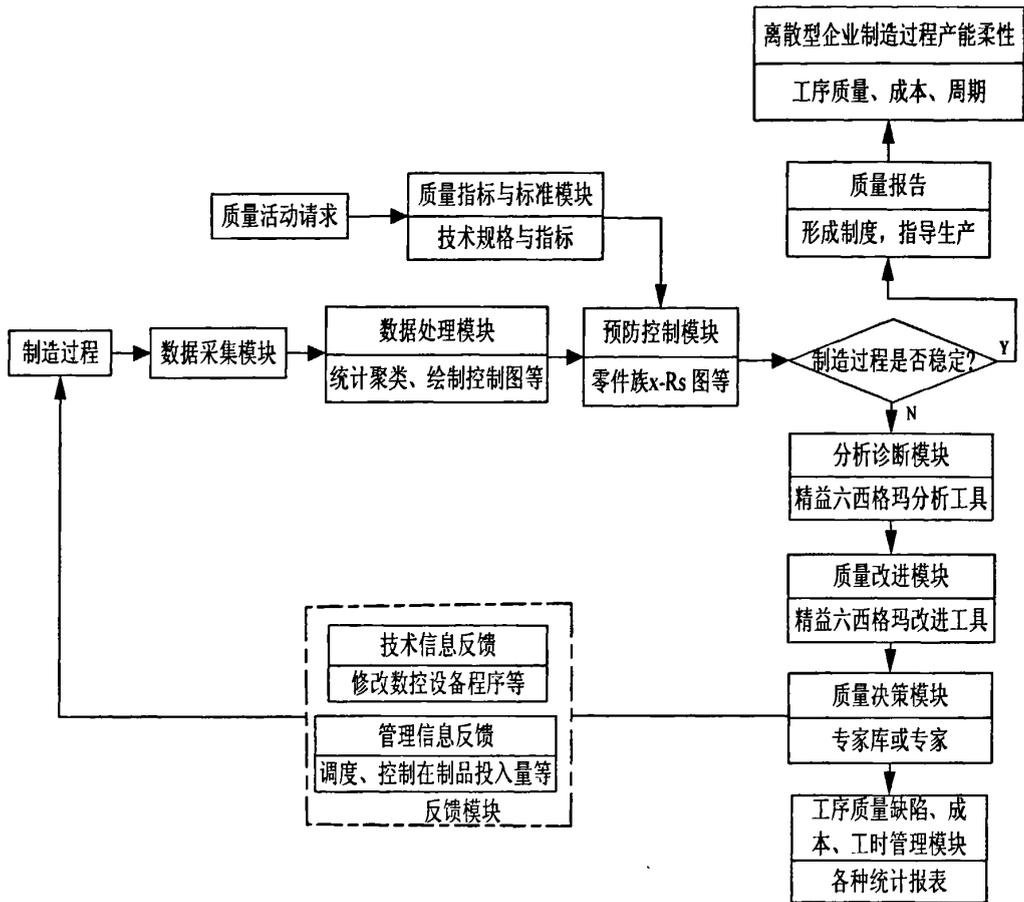


图 5.7 质量集成控制系统运行流程

(2) 现场数据采集与预处理

质量采集执行模块收到来自质量标准和指标模块的信息后，做好相应准备。当收到质量采集请求时，开始进行在线或是离线数据的采集，并实时将过程中产生的各类状态信息传递给质量信息采集模块；质量信息采集模块将来自设备或是其他活动的信息，进行分类，并将它们按照统一的标准进行描述和存储，以实现信息在系统中的高效共享和传输。

(3) 质量预防控制与诊断

工序质量分析模块根据质量信息采集模块发送来的质量特征数据，进行统计质量控制，绘制出控制图，对工序质量进行分析，视结果或将信息输出给管理模块继续保持工作状态或输送给质量诊断模块，进行质量问题诊断；质量诊断模块对出现的工序质量异常情况、过程拥挤甚至 PONC 超标等情况，进行诊断，找出影响广义质量的关键因素，并将诊断结果实时发送给质量改进模块；改进模块进行改进方案设计。

(4) 决策与反馈

改进模块通过网络将质量改进方案交由上层质量决策模块进行评估决策,经质量决策模块确认后,将质量改进方案反馈至相关制造单元,如柔性制造系统主控程序、车间调度人员等,从而及时调整后续的生产过程,尽量减少因质量异常而造成的损失。继续重复上述过程,实时监控改进效果。

5.3 应用案例

针对本章所提出的质量集成控制技术,为了验证面向零件族的工序质量预防控制方法的正确性,并保障零件族关键工序质量,以重型机床传动机构中大模数齿轮的关键加工工序为对象,以设备为控制点,进行工序质量预防控制;对齿轮加工工艺改进过程中出现的质量问题,进行分析诊断,提出改进建议。

5.3.1 案例一——大模数类齿轮的关键工序质量预防控制

大模数齿轮为重型机床的传动机构中的变速齿轮,一般选择模数较大的齿轮。本例以磨齿工序所用设备——磨齿机为工序质量控制点,应用面向零件族的工序质量预防控制方法进行工序质量控制。

重型机床的传动机构中的齿轮工作载荷较大,一定公差范围内的侧隙可以保证齿轮在受热变形情况下能正常工作且便于润滑,往往将公法线平均长度偏差作为大模数齿轮主要检测项目之一。

(1) 数据采集与变换

采集数据,计算各类零件平均值 \bar{X}_i 。表 5.1 所示为几种不同模数、齿数的齿轮精加工轮齿部分所得的公法线实测值 X_{ij} ,该数据为在同一台磨齿机上由同一名员工操作采取同一种方法测得。

数据变换,构成较大容量样本 S 。根据零件族工序质量控制方法,将实测数据 X_i 按式 (5.3) 进行变换,得到新的质量控制特征值 Y_j (见表 5.2),由此构成符合同一正态分布的统计样本 Y_{ij} ,即: $Y \sim (0, \sigma^2)$ 。

计算移动极差 R_{sj} 。应用欲嵌入 QICS 中的 Minitab 软件对样本 S 自动计算移动极差 R_{sj} 数列,如表 5.2 所示。

表 5.1 齿轮族公法线实测数据

序号	模数 M	齿数 Z	公法线			实测尺寸 平均值 (mm)
			跨齿数	设计尺寸(mm)	实测尺寸(mm)	
1	18	23	3	138.64 ^{-0.28} _{-0.36}	138.64-0.34	138.64-0.32
2					138.64-0.30	

3					138.64-0.30	
4					138.64-0.32	
5					138.64-0.32	
6					138.64-0.30	
7					138.64-0.34	
8					138.64-0.32	
9	18	21	3	$138.14_{-0.32}^{-0.25}$	138.14-0.28	138.14-0.29
10					138.14-0.29	
11					138.14-0.28	
12					138.14-0.30	
13					138.14-0.27	
14					138.14-0.29	
15					138.14-0.27	
16					138.14-0.29	
17					138.14-0.30	
18					138.14-0.32	
19	16	21	3	$122.79_{-0.25}^{-0.20}$	122.79-0.22	122.79-0.23
20					122.79-0.25	
21					122.79-0.21	
22					122.79-0.24	
23					122.79-0.20	
24					122.79-0.24	
25	20	17	2	$93.33_{-0.32}^{-0.256}$	93.33-0.32	93.33-0.31
26					93.33-0.30	
27					93.33-0.32	
28					93.33-0.30	
29					93.33-0.32	
30					93.33-0.32	

表 5.2 零件族尺寸数值变换后的质量特征值

子样号	$X_j - \bar{X}_i$	R_s	子样号	$X_j - \bar{X}_i$	R_s
1	-0.02	—	17	-0.01	0.01
2	0.02	0.04	18	-0.03	0.02
3	0.02	0	19	0.01	0.04
4	0	0.02	20	-0.02	0.03

5	0	0	21	0.02	0.04
6	0.02	0.02	22	-0.01	0.03
7	-0.02	0.04	23	0.03	0.04
8	0	0.02	24	-0.01	0.04
9	0.01	0.01	25	-0.01	0
10	0	0.01	26	0.01	0.02
11	0.01	0.01	27	-0.01	0.02
12	-0.01	0.02	28	0.01	0.02
13	0.02	0.03	29	-0.01	0.02
14	0	0.02	30	-0.01	0
15	0.02	0.02			
16	0	0.02	合计	0.03	0.61

(2) 基于零件族单值——移动极差 ($\bar{x}-R_S$) 控制图的工序质量控制

● 基于零件族的 $\bar{x}-R_S$ 控制图

由 Minitab 软件统计分析得到如图 5.8 所示的 $\bar{x}-R_S$ 控制图。

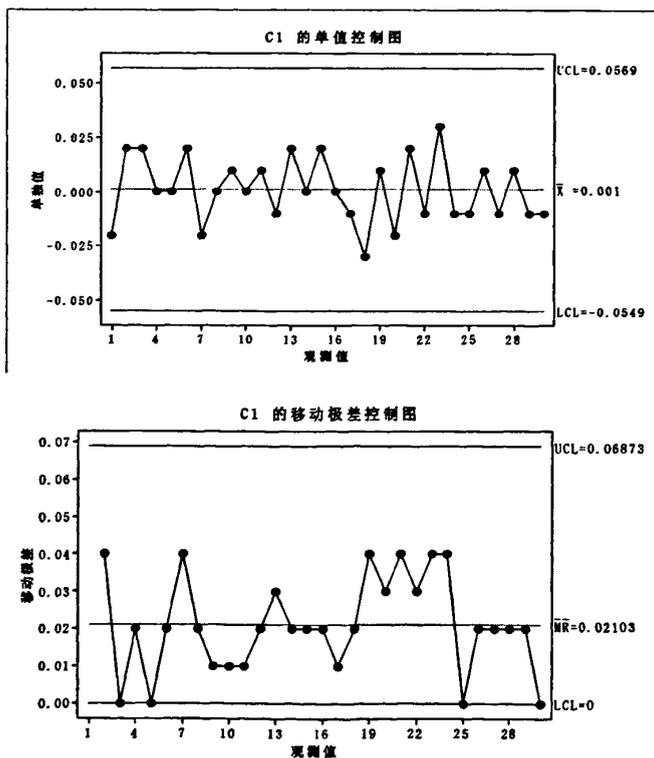


图 5.8 大模数齿轮族单值——移动极差控制图

● 结果分析

从实测数据看所有齿轮的公法线均在各自设计要求范围内，工序质量合格。而从 $x - R_s$ 看，经过数据变换、零件族聚类构成的大样本，其各个点同样均落在大样本控制界限范围内，工序质量稳定，与实际情况吻合，表明面向零件族的工序质量预防控制技术的可行性。

5.3.2 案例二——大模数齿轮工序质量诊断与改进

齿轮的最后一道工序——磨齿可以使齿轮加工精度稳定，工序处于受控状态。然而，由于齿轮磨削效率较低，成本高，企业欲采用“以滚带磨”的方式加工，即在滚齿机上滚切硬齿面。由此，轮齿部分加工工艺改为：滚齿—热处理—硬滚（硬齿面滚切）。为稳妥起见，企业就 $M = 18, Z = 41$ 的齿轮进行了项目试验，发现某些指标未能达到精度要求，如影响载荷均布性的齿向误差。针对这一质量问题，本节采用质量诊断与改进工具软件 Minitab，寻求影响质量的主要原因，提出改进方案。

(1) 试验设计计划

制定试验设计计划的目的是确定项目关键特性指标。分析认为：作为载荷较大的齿轮，影响载荷均匀性的主要指标——齿向误差应作为关键质量特征值加以控制，建立了如表 5.3 所示试验计划表。

表 5.3 试验计划表

项目名： <u>低速级齿轮精度改善</u>		日期：_____年_____月_____日
目标： <u>影响载荷均布性指标控制在目标以内</u>		
输出特性指标		
关键特性	规格 (μm)	是否用于 DOE
齿轮齿向误差	≤ 38	是
齿轮齿形误差	≤ 56	否
齿距极限偏差	± 50	否

(2) 试验设计方案

经过分析，认为影响齿向误差的主要因素为：滚齿机类型 A（主要是刀架导轨精度及刚度等）、工件硬度 B、刀具材料 C，因此提出如表 5.4 所示试验方案。其中：水平是试验中各因素的不同取值，本例中因素 A、B、C 均有 2 个水平，如因素 A（滚齿机类型）其取值为：-1、1，分别表示国产卧式滚齿机和日本生产卧式滚齿机；因

素 B 取值为：-1、1，则表示淬火前后材料的两种不同硬度。

表 5.4 试验设计方案

质量特征输出值		影响因素	水平 1	水平 2
			-1	+1
质量特征名称	目标	A: 滚齿机类型	国产 卧式滚齿机	日本产 卧式滚齿机
齿轮齿向误差	$\leq 38\mu m$	B: 工件硬度	HB215-245	HRC48-51
		C: 刀具材料	高速钢	硬质合金

(3) 分部试验设计组合及其试验结果

按全因子试验设计应该做 2^3 次即 8 次试验，但在本试验中有些组合是不可行的，同时资源消耗过大且浪费时间，分部试验设计解决了这个问题，它从全因子试验组合中挑选有代表性的子集构成分部试验设计组合。本试验采用分部试验设计方法，取得如表 5.5 所示试验数据（试验重复三次，仅列出部分数据）。

表 5.5 试验数据

试验	因素			轮齿齿向误差					
	A	B	C	1 [#] 齿	1 [#] 齿	21 [#] 齿	21 [#] 齿	31 [#] 齿	31 [#] 齿
1	-1	-1	1	42.639	66.4421	59.0014	33.3962	87.6539	119.464
2	-1	1	-1	50.304	40.9372	58.7564	85.4876	38.5870	42.7658
3	1	-1	-1	58.125	70.9123	22.7282	21.4191	25.3396	32.2396
4	1	1	1	42.113	32.7280	53.1394	78.3627	11.5693	31.7038

(4) 工序质量诊断与改进

● 关键影响因素分析

利用 Minitab 软件进行试验结果分析与预测。将表 5.5 所示试验数据输入 Minitab 软件，通过对试验数据分析，输出主要数据如图 5.9 所示。按 Minitab 软件约定， $P < 0.05$ 所对应的因素为显著因素，故 A 为对输出变量的显著影响因素。从 Pareto 图(图 5.10)也可进一步说明超出直线的因素 A，即滚齿机类型是输出质量特性指标的重要影响因素，其次是因素 C，即滚刀材料。

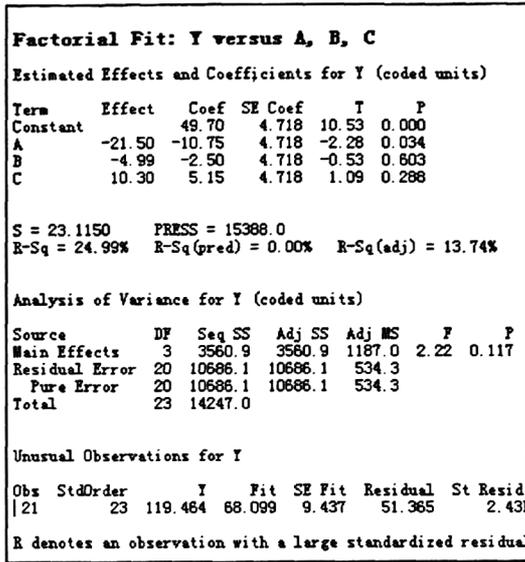


图 5.9 Minitab 诊断分析输出数据

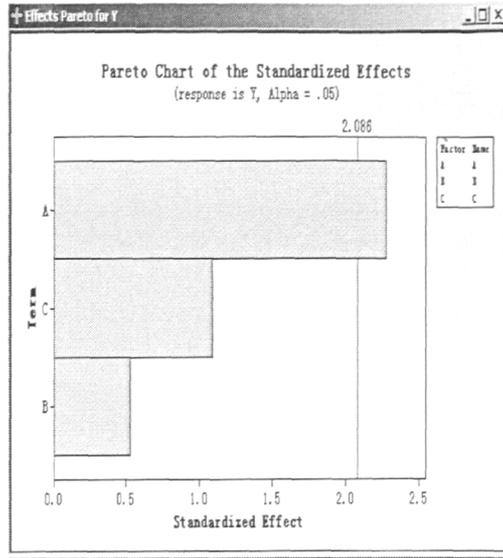


图 5.10 各因素影响 Pareto 图

● 最优组合分析及其结果预测

① 输出结果回归分析及最优组合

在分析了关键影响因素的基础上，为了从定量的角度了解 A、B、C 三个因素对齿形误差的影响，利用 Minitab 软件对实验数据进行回归分析，得到图 5.11、图 5.12 分析结果。由图 5.11 可知 Y 的回归方程为：

$$Y = 49.7 - 10.8A - 2.50B + 5.15C$$

式中：Y 为齿轮齿向误差。

② 试验结果总结与预测：

A 齿向误差显著影响因素为 A，即滚齿机类型；

B 在目前工艺装备条件下，齿轮齿形误差的最优值是 36.29，所对应的各因素组合（即最优组合）为：日本产卧式滚齿机、工件硬度为 HB215-245、刀具材料为高速钢；

C 淬火后，在日本产卧式滚齿机上采用硬质合金刀具（即第 4 组组合：1、1、1）加工，精度会有所下降（齿向误差为 41.6），以滚代磨在目前试验情况下难以达到精度要求（齿向误差 $\leq 38\mu m$ ）；若仍采用滚切加工作为精加工工序，需要调整为精度和刚度级别高的滚切加工设备。

由图 5.12 的分析数据中可以得到 Y 值的最优值为 36.29，该数据有 95% 的可置信度满足 Y 的目标值 $\leq 38\mu m$ ，根据表 4.5，此时 Y 值所对应的影响因素 A、B、C 的水平，即最优组合为：1、-1、-1。

Regression Analysis: Y versus A, B, C				
The Regression equation is				
$Y = 49.7 - 10.8 A - 2.50 B + 5.15 C$				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	49.701	4.718	10.53	0.000
A	-10.752	4.718	-2.28	0.034
B	-2.496	4.718	-0.53	0.603
C	5.150	4.718	1.09	0.288

Predicted Values for New Observations				
New Obs	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
1	68.10	9.44	(48.41, 87.78)	(16.02, 120.18)
2	52.81	9.44	(33.12, 72.49)	(0.73, 104.89)
3	36.29	9.44	(16.61, 55.98)	(-15.79, 88.37)
4	41.60	9.44	(21.92, 61.29)	(-10.48, 93.68)

图 5.11 实验数据回归分析结果

图 5.12 实验分析预测结果

5.4 本章小结

本章针对制造过程产能柔性的工序质量、时间、成本指标，从提高产能柔性的角度，提出了制造过程质量集成控制技术。主要包括：多品种、小批量生产模式下，基于聚类原理的零件族单值——移动极差预防控制技术；精益与六西格玛有机融合的质量诊断、改进技术的实施模式。构建了质量集成控制系统体系结构，描述了主要模块的功能，提出了质量集成控制系统的主要结构单元；最后通过案例，验证了质量集成控制技术的可行性。

第6章 总结与展望

6.1 全文总结

制造过程产能柔性作为企业面对复杂多变的市场环境和不确定性时的调节适应能力,是提高企业应对动态变化的市场需求能力的基础,也是企业快速实现客户需求订单和利润最大化的重要保证。

本文依托山东省科技攻关项目(2007GG10004004)的支持,针对离散型制造企业的生产特征,并结合相关企业的实际生产情况,从理论分析和实际应用两个方面对制造过程的产能柔性及其质量控制技术进行了研究,对提高企业的竞争能力具有重要的意义。

全文的主要研究成果与创新点如下:

(1) 提出了制造过程产能柔性的概念,建立了制造过程产能柔性的概念模型,并对其进行了定量分析。

(2) 针对建立的产能柔性的概念模型,结合制造过程广义质量概念,分析制造过程质量控制的内涵,建立了制造过程产能柔性与质量控制的关联模型。

(3) 针对制造过程产能柔性的衡量指标,考虑企业制造资源及交货期等约束条件,建立了以时间、制造成本综合最小为优化目标的工艺规程优化数学模型;研究了基于改进遗传算法的工艺规程优化策略,并进行了实例应用。结果表明建立的工艺规程优化数学模型以及采取的优化策略是提高企业制造过程产能柔性的一种有效方法。

(4) 基于SPC理论和聚类原理,研究了面向零件族的单值——移动极差预防控制技术,针对质量问题研究精益与六西格玛有机融合的质量诊断、改进技术实施策略,提出了集预防、诊断、改进于一体的质量集成控制技术,可实现工序质量、生产周期、成本的综合优化,提高制造过程的产能柔性。通过实例验证了质量集成控制技术的可行性。

6.2 工作展望

为了进一步深化和完善本文的研究,作者认为还需要从以下几个方面继续进行研究:

(1) 进一步开展制造过程产能柔性的应用研究,如设备柔性、产品设计质量、信息柔性、人力资源柔性等对制造过程产能柔性的影响,构建制造过程产能柔性的评价体系,使得企业全方位了解制造过程产能柔性薄弱环节,以采取针对性措施,进一步提高制造过程的产能柔性,并结合实例进行相关验证。

(2) 本文只是对质量集成控制系统的开发做了部分研究工作,需要进一步加强系

统的开发，并逐渐形成与企业其他系统的集成运行，使得系统具有良好的集成性、信息处理的可靠性，为企业实现全面质量管理奠定基础。

致谢

本文是在导师王慧教授的悉心指导下完成的，从论文的立题、调研、相关内容的研究和实例验证到撰写及审定，都倾注了王老师大量的心血。王老师忘我的工作精神、严谨的治学作风和实事求是的科研态度给我留下了深刻的印象；在生活上王老师也给了我无微不至的关怀。王老师的渊博知识和高尚人格对我今后的工作和学识的影响是巨大的，值此论文完成之际，向导师致以最崇高的敬意和最真诚的感谢！

在课题进展及论文撰写过程中，得到了昃向博教授和济南二机床集团公司的李玉霞高工的许多指导和帮助，特别是在实例研究方面，在此特别感谢。同时还要感谢机械学院各位老师对我的教导，老师们的渊博知识和敬业的精神令我受益匪浅。

感谢我的父母和家人并将此文献给他们，也正是他多年来的关爱、支持和鼓励使得我有勇气、有信心面对人生中的每一次选择并获得今天的成绩。

感谢所有关心我和帮助我的朋友们。

参考文献

- [1] R. Beach, A. P. Muhlemann, D. H. R. Price, et al. A manufacturing flexibility. *European Journal of Operational Research*, 2000, 122: 41-57
- [2] 生产计划及物料控制证书课程. <http://hi.baidu.com/jiangxilzm/blog/item/fd0e04d82ea63a3533fa1cf9.html>, 2006-11-10
- [3] 刘广第. 质量管理学. 北京: 清华大学出版社, 2000
- [4] 张根宝. 现代质量工程. 北京: 机械工业出版社, 2004
- [5] 闻邦椿, 张国忠, 柳洪义. 面向产品广义质量的综合设计理论与方法. 北京: 科学出版社, 2007
- [6] 张伯坚. 2000 新版质量管理体系国家标准理解与实施. 北京: 国防工业出版社, 2004
- [7] 何荆, 尚国强. 浙江大型制造业企业竞争力研究. <http://hi.baidu.com/betto/blog/item/e835a96406089df0f636547b.html>, 2007-02-29
- [8] Chung C H, Chen I J. Managing Flexibility of Flexible Manufacturing Systems for Competitive Edge. The Selection and Evaluation of Advanced manufacturing Technologies, Berlin: Springer-Verlag, 1990
- [9] Buzacott J A. The Fundamental Principles of Flexibility in Manufacturing Systems. In: Proceedings of the International Conference Systems, Brighton ,U.K., 1982
- [10] Grubbstrom R W, Olhager J. Productivity and flexibility: fundamental relations between two major properties and performance measures of the production system. *International Journal of Production Economics*, 1997, 52(3): 73-82
- [11] Gupta D, Buzacott J A. A Framework for Understanding Flexibility of Manufacturing Systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 1989, 8(2): 89-97
- [12] R. Beach, A. P. Muhlemann, D. H. R. Price, et al. Sharp. A review of manufacturing flexibility. *European Journal of Operational Research*, 2000(122): 41-57
- [13] Kenneth K Boyer, G Keong Leong. Manufacturing flexibility at the plant level. *The International Journal of Management Science*, 1996, 24(5): 495-510
- [14] 袁红兵, 黄新燕, 李小宁. 制造柔性的概念框架及其度量. *高技术通讯*, 2000(5): 50-53
- [15] Reginald Tomas Yu-Lee. Why capacity trumps costs. *Journal of Corporate Accounting & Finance*. 2003, 14(3): 17-22
- [16] Reginald Tomas Yu-Lee. Determining the financial value of implementing lean. *Journal of Corporate Accounting & Finance*. 2006, 17(3): 79-88
- [17] Regin Tomas 著. 产能管理 (燕清 译). 北京: 中国人民大学出版社, 2005

- [18] 方爱华, 张光明. 生产与运营管理. 武汉: 武汉大学出版社, 2005
- [19] 管益忻. 直面客户经济, 打造全新“产能观”. <http://blog.sina.com.cn/u/4a32e84a0100015>, 2007-01-12
- [20] Qingyu Zhang, Mark A. Vonderembse, Jeen-Su Lim. Manufacturing flexibility: defining and analyzing relationships among competence, capability, and customer satisfaction. *Journal of Operations Management*, 2003(21): 173-191
- [21] Moutaz Khouja, Ram L. Kumar. Information Technology Investments and Volume-flexibility in Production Systems. (<http://www.tandf.co.uk/journals/>), 2002, 40(1): 205-221
- [22] 辜志强. 中小企业产能柔性及其在车间生产控制中的应用研究: [博士研究生学位论文]. 武汉: 武汉理工大学机电工程学院, 2006
- [23] 施国洪. 质量控制与可靠性工程基础. 北京: 化学工业出版社, 2005
- [24] Fugee Tsung. Impact of Information Sharing on Statistical Quality Control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics---Part A: Systems and Humans*, 2000, 30(2): 211-216
- [25] Costas J. Spanos, Mmnber, Hai-Fang Guo, et al. Real-Time Statistical Process control Using Tool Data. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*. 1992, 5(4): 308-318
- [26] Bharati, MacGregor, J.F. Multivariate Image Analysis for process monitoring and control. *Industrial Engineering and Chemical Research*, 1998, 37: 4715-4724
- [27] Z. Kasirovalad, M.R. dabed Motlagh, M. A. Shadmani. An Intelligent Modular Modelling Approach for Quality Control of CNC Machines Product Using Adaptive Fuzzy Petri Nets. In: 2004 8th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision Kunming, China, 2004
- [28] 余忠华, 吴昭同. 面向小批量制造过程的质量控制方法研究. *机械工程学报*, 2001, 37(8): 60-64
- [29] 高清, 马玉林, 程子建. 多品种小批量生产质量控制图的研究. *哈尔滨工业大学学报*, 1997, 29(1): 53-55
- [30] Jing Sun, Gongxu Zhang. The Statistical Process Control of the Near Zero-Noncomforming Process. In: *Proceedings of ICIT3 Congress, the Hong Kong Baptist University 1998*
- [31] 赵文波, 刘援朝, 牟永善. 关于在成组加工质量控制中应用公差百分数控制图的研究. *制造技术与机床*, 2006, 10: 51-53
- [32] 和金生, 曹亚克. 一种基于熵值法的工序质量控制工具. *工程机械*, 2006, 9: 79-82
- [33] 王丽颖, 孙丽, 王秀伦. 基于虚拟工序的小批量工序质量控制方法研究. *计算机集成制造系统*, 2006, 12(8): 89-91
- [34] 杨世元, 吴德会, 苏海涛. 基于小批量制造过程的动态质量控制限及其简便计算方法. *中国机械工程*, 2006, 17(14): 45-47
- [35] 袁普及. 基于成组技术的质量控制的研究: [硕士研究生学位论文]. 南京: 南京航空航天大学

- 学, 2003
- [36] 杨晓慧, 宋士龙, 谷德义. 面向柔性制造系统的统计质量控制. 系统工程理论与实践, 2003(2): 24-26
- [37] (美) 克劳士比 著. 质量免费 (杨钢, 林海译). 北京: 中国人民大学出版社, 2006
- [38] 杨钢. 零缺陷大道. 北京: 北京大学出版社, 2006
- [39] 亓四华. 制造质量零废品控制理论与技术的研究: [博士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2001
- [40] 张弛. 六西格玛试验设计. 广州: 广东经济出版社, 2003
- [41] 文放怀. 田口方法. 广州: 广东经济出版社, 2006
- [42] 刘伟, 马义中. 六西格玛质量改进的理论基础研究. 河南大学学报 (自然科学版), 2005, 35(1): 19-22
- [43] 刘伟, 马义中. 六西格玛过程能力与控制技术研究. 河南大学学报 (自然科学版), 2007(1): 25-29
- [44] 顾青峰. 有效地结合六西格玛和精益. 中国质量, 2005(9): 49-51
- [45] 张文博, 申晓惠, 张仲鹏. 基于企业管理创新的研究—精益六西格玛的理论分析. 集团经济研究, 2007(7): 133-134
- [46] 秦现生, 同淑荣. 制造过程质量控制与产品设计. 航空工程与维修, 1999(1): 34-36
- [47] 何益海. 现代产品设计质量控制技术与方法研究. <http://www.paper.edu.cn>, 2007-03-25
- [48] Uirich Rembold, Marcel Dekker, INC. Computer Integrated Manufacturing Technology and Systems. New York and Basel, 1985: 87-90
- [49] 于涛, 张树生. 工序质量控制系统研究. 世界标准化与质量管理, 1999, 8(9): 7-10
- [50] 吴少雄. 智能统计工序质量控制的体系研究. 计算机集成制造系统-CIMS, 2006, 11(12): 1832-1837
- [51] 赵明光, 易红. 网络化制造环境下机械加工质量控制系统的设计与实现. 中国制造业信息化, 2005, 32(2): 82-85
- [52] 赵丽萍, 王明东. 基于 Web 工作流的质量控制系统模型的研究. 计算机集成制造系统-CIMS, 2004, 10(5): 502-507
- [53] 王美清, 唐晓青. 产品协同设计质量控制模型研究. 计算机集成制造系统-CIMS, 2006, 12(5): 1542-1545
- [54] 张赤斌, 安向东. 基于检验优化的动态质量控制系统模型研究. 现代生产与管理技术, 2006, 23(2): 91-94
- [55] 刘晓冰, 刘彩燕, 马跃. 基于制造执行系统的动态质量控制系统研究. 计算机集成制造系统, 2005, 11(1): 133-137
- [56] 孙学静, 刘飞. 基于 ART1 神经网络的统计过程控制系统. 控制理论与应, 2006, 25(5): 1-3
- [57] 殷建军. 面向多品种、小批量制造环境的过程质量监控方法及嵌入式系统的研究: [博士学

- 位论文]. 杭州: 浙江大学, 2004
- [58] V. Piuri, F. Scotti .Computational Intelligence in Industrial Quality Control. SPCINK, 1999(7): 87-90
- [59] Shahed Shahir, Xiang Chen. Adaptive Fuzzy Associative Memery for Online Quality Control. IEEE, Transactions on Systems, Man and Cybernetics—Part A: Systems and Humans, 2003, 30(2): 242-246
- [60] 李建勇. 基于混合遗传算法的工艺路线优化配置. 机械科学与技术, 2003, 22(6): 885-888
- [61] Sundaram, R.M., G. M. Process planning and machining sequence. Computers and Industrial Engineering. 1986, 11: 184-188
- [62] Rho. H. M., Geelink, R. Van't Erve, et al. An Integrated cutting tool selection and operation sequencing method. Annals of CIRP, 1992, 41: 517-520
- [63] Vancza, J. and Markus, A. Genetic algorithms in process planning. Computers in industry, 1991, 17: 181-194
- [64] I. Drstvensek, M. Ficko, I. Pahole, et al. A Model of Simulation Environment for Prediction and Optimization of Production Processes. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155-156: 1641-1646
- [65] F S Y Wong, K B Chuah, P K Venuvinod. Automated Inspection Process Planning: Algorithmic Inspection Feature Recognition and Inspection Case Representation for CBR. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2006, 22(1): 56-68
- [66] Uros Z, Franci C. Optimization of cutting conditions during cutting by using neural network. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2003(19): 189-199
- [67] Franci C, Joze B. Optimization of cutting process by GA approach. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2003(19): 113-121
- [68] 朱海平, 肖诗旺, 黄刚. 基于遗传算法的工序过程排序研究. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(3): 50-53
- [69] 杨青, 邱苑华. 基于遗传算法的制造流程价值优化. 系统工程学报, 2005, 20(5): 524-529
- [70] 曹鲁寅, 罗斌, 钦明浩. 用遗传算法求解最短路径问题. 合肥工业大学学报, 1996, 19(3): 112-116
- [71] 秦宝荣, 姜少飞, 王宁生. 基于遗传算法的零件多加工方案组合优化方法. 中国机械工程, 2005, 16(12): 1076-1079
- [72] M. Kumar, S. Raiotia. Integration of scheduling with computer aided process planning. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 13(8): 297-300
- [73] 董孝铭. 工业企业生产能力查定原理与方法. 北京: 中国铁道出版社, 1995
- [74] 华中生. 柔性制造系统和柔性供应链. 北京: 科学出版社, 2006
- [75] Upton D M, Process range in manufacturing: An empirical study of flexibility. Management

- Science, 1997, 43(8): 1079-1092
- [76] Sethi A K, Sethi S P. Flexibility in manufacturing: a survey. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 1990, 2(4): 289-328
- [77] Swamidass P M.. *Manufacturing Flexibility*. In: *Operations Management Association Monograph*. TX, 1988
- [78] 贾涑, 郝振明, 徐晓丹. 基于面向对象技术概念模型的研究. *计算机工程与应用*, 2003(10): 116-117
- [79] 国刚, 周峰, 孙更新. *软件工程统一建模原理与实践教程*. 北京: 电子工业出版社, 2007
- [80] [美]Joseph Schmuller 著. *UM 基础、案例与应用*. (李虎, 王美英, 万里威译). 北京: 人民邮电出版社, 2002
- [81] 伍乃骐, 于兆勤. 实现大规模定制的柔性分析. *计算机集成制造系统-CIMS*, 2003, 9(9): 797-802
- [82] 吴东鹰, 方云安, 王浣尘. 柔性制造系统柔性度量模型. *组合机床与自动化加工技术*, 1994(9): 31-36
- [83] 龚代华, 陈荣秋. 企业柔性研究中存在的若干问题. *管理工程学报*, 1999, 13(1): 73-74
- [84] 王忠宾, 王宁生, 陈禹六. 基于遗传算法的工艺路线优化决策. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, 44(7): 988-992
- [85] 刘晓芳, 赵万生, 迟关心等. 基于改进遗传算法的工艺过程优化设计. 2003, 14(2): 137-140
- [86] 王先逵. *机械制造工艺学*. 北京: 清华大学出版社, 1989
- [87] 孙靖民, 梁迎春, 陈时锦. *机械结构优化设计*. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004
- [88] 秦宝荣, 姜少飞, 王宁生. 基于遗传算法的零件多加工方案组合优化方法. *中国机械工程*, 2005, 16(12): 1076-1079
- [89] 田锡大, 杜娟, 张振明. STEP-CAPP 系统中的非线性工艺设计和工艺优化技术. *计算机集成制造系统*, 2007, 13(2): 228-233
- [90] 雷英杰. *MATLAB 遗传算法工具箱及应用*. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005
- [91] 牛志诚, 李乃成. 一种新的混合遗传算法及其性能分析. *工程数学学报*, 2003(4): 58-61
- [92] Rudolph G. Convergence analysis of canonical genetic algorithms. *IEEE Transon Neural Networks*, 1994, 5(1): 96-101
- [93] 陈宏钧. *实用金属切削手册*. 北京: 机械工业出版社, 2005
- [94] (美)M. L. George 著. 方海萍, 魏青江译. *精益六西格玛*. 北京: 机械工业出版社, 2003

附录：攻读硕士期间的研究成果

发表论文：

- [1] 李贵夫, 王慧, 昃向博. 面向装备制造企业产能柔性的工艺规程优化. 组合机床与自动化加工技术, 2008(1): 80-83
- [2] 李贵夫, 王慧. 离散型制造企业的质量控制技术研究. 济南大学学报(自然科学版), 2007, 21: 49-53
- [3] 李贵夫, 王慧, 崔卫华. 制造系统产能柔性 with 资源重构研究. 山东科技大学学报(自然科学版), 2007, 26: 287-289
- [4] Guifu Li, Hui Wang, Weihua Cui, et al. Research on Quality Control Technology of Capacity Flexibility Oriented to Multi-Specification & Small Batch. IEEE WiCOM2008, Dalian, 2008 (已录用)
- [5] Hui Wang, Guifu Li, Weihua Cui. Research on Quality Control Technology in Manufacturing Process Oriented to Quality, Cost and Speed. PDMS2007, Chongqing, 2007
- [6] WANG Hui, LI Gangyan, LI Guifu. Research on Key Technique of the New Type Self-Driven Towing Machine for Cable. ITIC2006, Hangzhou, 2006 (EI 收录)
- [7] Hui Wang, Gangyan Li, Guifu Li. Research on Quality Control Technology in Manufacturing Process Based on Flexibility of Production Capability. IEEE WiCOM2007, Shanghai, 2007 (EI 收录)
- [8] 王慧, 李刚炎, 李贵夫, 等. 基于车间信息集成的动态工序质量控制技术研究与应用. 组合机床与自动化加工技术, 2007(10): 98-102

参与的科研项目：

山东省科技攻关项目：重型机床制造过程质量控制关键技术研究 with 系统开发 (项目编号：2007GG10004004)

获奖情况：

- [1] 山东省首届“齐鲁研究生学术论坛——信息与机电分论坛”，获得优秀论文奖
- [2] 济南大学第三届研究生创新论坛，获得三等奖