

## 摘 要

不断加剧的市场竞争、产品的多样化和顾客化迫使企业逐渐从传统的高度标准化产品的大规模生产向顾客化产品的小批量生产转移。在此情势下，刚性的生产设备通常难以再发挥出高效率。高的投资效率要求制造设备能够快速的从一种产品转移到另一种产品的生产而无须大的设备重组，资源重组或设备更换。企业为了应对不断加剧的市场竞争、多样化和顾客化的产品需求，急切地需要找到一种有效的途径来提高自身的柔性。

然而，制造系统的柔性不仅取决于系统本身的结构，还取决于其所处的环境。现有的关于改善系统制造柔性的方法的研究或者是将柔性视为系统自身的固有属性，与环境无关，从而这类研究得到的改善方法容易失去与现实的相关性；或者是通过系统面对环境不确定性时的表现针对每个具体的例子提出改善措施，却由于其没有考虑系统结构而得不到具有普适意义的柔性改善方法。本文将系统结构和主要的环境要求结合，研究制造系统和供应链的柔性改善问题，其中着重研究过程柔性的改善问题。本文考虑的环境要求包括两类：一类是产品结构（Bill of Material, BOM）约束，一类是产品需求特征。将系统结构和主要的环境要求结合起来研究制造系统的柔性改善方法能克服上述缺陷。

本文主要研究环境要求（包括产品结构约束和产品需求特征）对制造系统或供应链的过程柔性测度和改善方法的影响，并提出考虑环境要求的过程柔性测度和改善方法。本文研究的意义在于同时综合系统结构本身的特征和外部环境要求，提出一套较为完善的过程柔性测度指标和柔性改善指导规则，解决上述问题。

本文从第一章到第六章的内容安排如下：

第一章回顾了目前关于制造系统和供应链中的柔性测度及其改善方法的相关研究现状，说明了本文的研究内容和研究意义。

第二章和第三章考虑了产品结构约束对制造系统中过程柔性的影响，提出考虑产品结构约束的过程柔性改善规则。其中，第二章提出了一种考虑产品结构约束的制造系统过程柔性测度方法。在产品结构约束下，具有多条装配线的制造系

统的过程柔性应分为两个层次：装配线层次和系统层次。两个层次的过程柔性分别解释为面临内部或外部环境变化时生产能力在不同零部件/产品之间可转移程度的大小。对于每个层次的过程柔性，本章提出了测度方法。该测度方法为分析过程柔性的结构特性和提出柔性改善的指导规则提供了基础。

第三章对两个层次的过程柔性分别分析了其结构特性，并提出了柔性改善的指导规则。结构特性是指关于何种装配线和系统结构具有更高柔性的特性。结构特性的分析以过程柔性的测度方法为基础，指导规则以对结构特性的分析为基础。指导规则能帮助管理者在不需要太多计算量的前提下做出有效的柔性投资决策。

第四章和第五章考虑了需求特征对制造系统和供应链过程柔性的影响。其中，第四章研究了需求特征对制造系统过程柔性的影响，并提出考虑需求特征（包括需求变异性和需求之间的相关性）的过程柔性测度方法。基于提出的过程柔性测度，本章还提出了通过增加一条链来改善一般制造系统的过程柔性的指导规则。

第五章研究了考虑需求特征的供应链过程柔性测度问题。针对现有的过程柔性测度方法，本章指出了其中由于没有考虑需求特征而导致的问题，并提出了一个新的供应链过程柔性测度。该供应链过程柔性测度值与供应链所处的需求分布有关。

第六章总结本文的工作，归纳本文的主要创新点，指出目前本文研究的局限，并根据已取得的研究结果对未来进一步研究的问题进行思考。

本文工作的主要创新点如下：

(1) 提出了考虑环境要求时改善制造系统柔性的一系列指导规则。这些指导规则能够使得管理者不需要通过复杂的计算就能找出改善柔性的满意途径，做出有效的柔性投资决策。

(2) 将制造系统自身的固有属性和产品结构特征结合，提出了一种既能反映系统内部结构特征又能反映产品结构约束影响的过程柔性测度方法。该方法将考虑产品结构约束的过程柔性分为两个层次（装配线层次和系统层次）分别测度。

(3) 同时考虑系统能力转移的容易程度和发生能力转移的概率，分析需求特征对系统过程柔性的影响，提出了考虑需求特征（包括需求变异性和需求之间

的相关性)的过程柔性测度方法。

关键词: 柔性制造系统 过程柔性 产品结构 测度方法 改善规则

## ABSTRACT

The drastic competition of market, customization and variety of products have forced more and more companies to shift from mass production of highly standardized products to the batch production of customized products. In this situation, rigid facility is unable to retain high efficiency in production. The required high return of investment forces the capacity to be quickly shifted from producing one product to another without much setup cost. To respond to the fierce competition and drastically changed demands, companies need eagerly to find an effective way to improve their flexibility.

However, the flexibility of a manufacturing system depends not only on its own capability structure, but also on the environment that it is in. The existing methods for improving flexibility often drop into two groups. Methods in the first group view flexibility as an intrinsic attribute of the system and irrelevant to the environment. So these methods for improving flexibility have the risk of omitting relevance because they omit external demand. Methods in the second group usually present empirical recommendations on flexibility improvement for specific industrial situations. Without considering system structure, however, these methods are case-sensitive in addition to the disadvantages of intensive computation. This thesis synthesizes the capability structure of a manufacturing system and some environmental characteristics, and investigates the flexibility improvement methods for manufacturing systems and supply chains. The main environmental characteristics that are captured in this thesis include two types: bill of material (BOM) constraints and demand characteristics. The research which synthesizes the capability structure and environmental characteristics overcomes the above drawbacks.

The main topics of the thesis are analyzing the impacts of environmental characteristics (including BOM constraints and demand characteristics) on process flexibility measurement and improvement for manufacturing systems and supply

chains, and developing methods for measuring and improving process flexibility considering environmental characteristics.

The organization of the thesis is as follows:

In the first chapter, the literature about the measurement and improvement of flexibility in manufacturing systems and supply chains are reviewed. The content and significance of this thesis are addressed. Chapters 2 and 3 deal with the impact of BOM constraints on process flexibility in manufacturing systems, and propose methods for measuring and improving process flexibility under BOM constraints. In Chapter 2, an effective measurement method is proposed for process flexibility of manufacturing systems. For the manufacturing system that consists of multiple assembly lines, process flexibility under BOM constraints is differentiated into two hierarchical and highly interrelated levels: the assembly line level and the system level. By interpreting process flexibility as the ability to shift capacity among different parts or product types in face of external and/or internal changes, approaches for measuring process flexibility on the two levels are proposed. In Chapter 3, structural properties and the guidelines for improving process flexibility on the two levels are investigated based on the measurement method developed in Chapter 2. The proposed guidelines can help the manager of a manufacturing system to make effective decisions on flexibility improvement without much computation effort. Chapters 4 and 5 consider the impacts of demand characteristics on process flexibility of manufacturing systems and supply chains, respectively. In Chapter 4, the impacts of demand characteristics on process flexibility of manufacturing systems are analyzed, and a flexibility measurement method considering demand variations and demand correlations is developed. Based on the measurement, guidelines for improving flexibility by adding a single link are proposed. In Chapter 5, the measurement method for process flexibility of supply chains in certain demand distributions is investigated. Drawbacks of an existing flexibility measure without considering demand characteristics and system structures are revealed. A new flexibility measure for supply chains is developed which is relevant to the demand distribution that it is in. Chapter 6 concludes the thesis, and gives some directions for

further research.

Innovations and contributions of this thesis are briefly summarized as follows:

(1) Under environmental requirements, guidelines for improving process flexibility of manufacturing systems are proposed, which help the managers to make effective decisions on flexibility improvement without much computation.

(2) By synthesizing the intrinsic attributes of the manufacturing system and the BOM structure of products, a new method for measuring process flexibility is proposed, which reflects both the intrinsic characteristics of the system and the impact of products structures. The method, for the first time, differentiates process flexibility with BOM constraints into two hierarchical and highly interrelated levels: the assembly line level and the system level.

(3) By analyzing the impacts of demand characteristics on process flexibility of manufacturing systems, a synthesizing method which considers simultaneously the ability of capacity shifting and the probability of requiring capacity shifting among products is developed. Both the variations of and correlations between products demands are incorporated into the measurement method. Based on the proposed measurement, guidelines for improving flexibility are developed, which improve flexibility most by adding a single link to the original system.

**Key words:** flexible manufacturing system, process flexibility, bill of material, measurement method, improving guidelines

## 图 序

图 2.1	简单制造系统示例.....	18
图 2.2	从产品类型 $n_1$ 到 $n_3$ 的能力转移过程示例.....	22
图 3.1	九条装配线的结构.....	44
图 4.1	两个制造系统示例.....	56
图 5.1	两阶段供应链示例.....	75
图 5.2	单阶段供应链示例.....	76
图 5.3	$I=5$ 时供应链的 $\mathfrak{R}$ 值.....	82
图 5.4	$I=10$ 时供应链的 $\mathfrak{R}$ 值.....	82

## 表序

表 2.1	三种产品类型的 BOM 结构 .....	19
表 2.2	三条装配线能生产各种产品的最大产量.....	19
表 2.3	三组典型的 BOM 结构 .....	29
表 2.4	当需求服从正态分布时 BPF 指数和改进的 J&G 指数绩效比较.....	31
表 2.5	当需求服从泊松分布时 BPF 指数的绩效 .....	32
表 3.1	三种产品类型的 BOM 结构 .....	42
表 3.2	每条装配线能够生产的每种产品类型的最大产量.....	43
表 3.3	类 1 的绩效 ( $W=20000$ , 需求服从正态分布, $CV_c=0$ ) .....	45
表 3.4	类 2 的绩效 ( $W=21333$ , 需求服从正态分布, $CV_c=0$ ) .....	45
表 3.5	类 3 的绩效 ( $W=22667$ , 需求服从正态分布, $CV_c=0$ ) .....	46
表 3.6	类 1 的绩效 ( $W=20000$ , 需求服从泊松分布) .....	46
表 3.7	类 2 的绩效 ( $W=21333$ , 需求服从泊松分布) .....	46
表 3.8	类 3 的绩效 ( $W=22667$ , 需求服从泊松分布) .....	47
表 3.9	$Y$ 的符号检验的频率表 .....	48
表 4.1	四种产品需求之间的相关系数.....	57
表 4.2	相关系数矩阵 $P_1$ .....	62
表 4.3	相关系数矩阵 $P_2$ .....	62
表 4.4	相关系数矩阵 $P_3$ .....	63
表 4.5	相关系数矩阵 $P_4$ .....	63
表 4.6	相关系数矩阵 $P_5$ .....	63
表 4.7	相关系数矩阵 $P_6$ .....	63
表 4.8	相关系数矩阵 $P_7$ .....	64
表 4.9	相关系数矩阵 $P_8$ .....	64
表 4.10	相关系数矩阵 $P_9$ .....	64
表 4.11	相关系数矩阵 $P_{10}$ .....	64
表 4.12	相关系数矩阵 $P_{11}$ .....	65

表 4.13 相关系数矩阵 $P_{12}$ .....	65
表 4.14 无变异系数差异时 SF 测度和 DSF 测度的一致性比例.....	66
表 4.15 有变异系数差异时 SF 测度和 DSF 测度的一致性比例.....	68
表 4.16 $N=L=3$ 时“最优”系统柔性不低于所有“可能”系统的比例.....	69
表 4.17 $N=L=4$ 时“最优”系统柔性不低于所有“可能”系统的比例.....	69
表 4.18 $N=L=5$ 时“最优”系统柔性不低于所有“可能”系统的比例.....	70
表 4.19 $N=L=6$ 时“最优”系统柔性不低于所有“可能”系统的比例.....	70
表 5.1 测度 $\mathfrak{R}$ 和 $g$ 的绩效比较.....	79

## 中国科学技术大学学位论文相关声明

本人声明所呈交的学位论文,是本人在导师指导下进行研究工作所取得的成果。除已特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含任何他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中作了明确的说明。

本人授权中国科学技术大学拥有学位论文的部分使用权,即:学校有权按有关规定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阅,可以将学位论文编入有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

保密的学位论文在解密后也遵守此规定。

作者签名: 何平

2008 年 11 月 29 日

## 第一章 绪论

近年来,不断加剧的市场竞争、产品的多样化和顾客化给企业带来了巨大的压力,迫使企业从传统的高度标准化产品的大规模生产逐渐向顾客化产品的小批量生产转移。在这种形势下,柔性制造/生产系统(Flexible Manufacturing/Assembly Systems, FMS/FAS)由于其在生产效率、生产质量和产品多样化等方面具有的竞争优势而显得越来越重要。柔性制造系统是一种集机械、电子、自动化、计算机等技术于一体的现代化制造技术,可以解决多产品小批量生产中效率低、周期长、成本高、质量差等问题。

当前制造战略发展的总体趋势是,在管理组织上要求各种管理职能的一体化;在计划与决策系统方面,强调多种层次的决策一体化;在战略目标方面,追求制造系统的柔性及敏捷性(华中生,2000)。企业为了应对不断加剧的市场竞争、多样化和顾客化的产品需求,急切地需要找到一种有效的途径来提高自身的柔性。然而,制造系统的柔性不仅取决于系统本身的结构,还取决于其所处的环境。柔性是系统相对于其所处环境的一种特征(Chryssolouris,2006)。现有的关于改善系统制造柔性的方法的研究主要集中于两类。一类是将柔性视为系统自身的固有属性,与环境无关。这类研究得到的改善方法容易失去与现实的相关性。第二类是将柔性视为系统相对于其所处环境的一种特征,通过系统面对环境不确定性时的表现针对每个具体的例子提出改善措施。然而由于其没有考虑系统结构,得不到具有普适意义的柔性改善方法。本文将系统结构和主要的环境要求结合,研究制造系统和供应链的柔性改善问题。本文考虑的制造系统的环境要求是指影响制造系统柔性的环境因素,具体包括两类:一类是产品结构(Bill of Material, BOM)约束,一类是产品需求特征。产品结构从零部件的需求层次决定了装配线的柔性配置需求,而产品需求特征从产品的需求层次决定了系统的柔性配置需求。这两类环境要求体现了环境对系统柔性测度和改善的影响。将系统结构和主要的环境要求结合能克服上述缺陷。

本章的目的在于说明本文的研究背景与意义,内容安排如下:1.1节介绍柔

性的定义、分类及作用；1.2节介绍制造系统和供应链中的柔性测度和改善方法问题研究现状；1.3节说明在制造系统改善柔性时考虑环境要求的重要性；1.4节介绍本文的研究对象；1.5节介绍本文的研究问题；1.6节说明本文工作的意义并介绍本文的内容组织结构。

## 1.1 柔性概述

从一般意义上讲，柔性是一个系统应对环境的不确定性的能力。具体地说，柔性就是一个组织面对环境的不确定性时使得生产与市场需求匹配的能力（Iravani et al., 2005）。

当前企业面临的竞争形势是，产品的生命周期更短、产品的多样性要求更高，市场需求更难预测，交货周期要求更短。在此情势下，刚性的生产设备通常难以再发挥出高效率。而柔性制造可以使多种产品的批量生产同样具有大规模生产的效率。与大规模生产中的规模经济相对，批量生产中的效率用范围经济来反映（黄飞华和华中生，2004；Panzar and Willig, 1981；Goldhar and Jelinek, 1983；Talaysum et al., 1986；Baumol et al., 1977）。在中等规模中等多样性的生产中，效率主要是通过从一种产品的生产切换到另一种产品的生产过程中准备成本和准备时间的大幅减少来实现的（Sethi and Sethi, 1990）。高的投资效率要求制造设备能够快速地从一种产品转移到另一种产品的生产而无须大的设备重组，资源重组或设备更换。这就要求企业找到一种增加柔性的合适的方法。

近半个世纪以来，对柔性的研究非常广泛。本文主要研究制造系统和供应链中的柔性改善问题，因此本节只讨论与制造柔性相关的内容。

### 1.1.1 制造柔性的定义

关于制造柔性最早的定义可以上溯到1967年Ropohl定义制造柔性为系统元素之间相互整合连接以使得生产设备可以适应不同生产任务的特性（Ropohl, 1967）。Sethi and Sethi（1990）定义制造柔性为系统可以重新组织制造资源来有

效的以可接受的质量生产不同产品的能力。这个定义成为后来学术界对制造柔性进行广泛研究的基础。

### 1.1.2 制造柔性的分类

近三十年中，有大量研究对制造系统中各种类型的柔性进行了定义。尽管如此，到目前为止对于怎样定义柔性仍然没有一致的意见。这是由于柔性本身具有多个维度：柔性可以看成是系统的一个物理性质，决策的一个属性，一个经济指标，或者一个战略工具（Shewchuk and Moodie, 1998）。Sethi and Sethi（1990）把 50 多种关于各种柔性的定义归为 11 类，分别是：机器柔性(machine flexibility)、物料搬运柔性(material handling flexibility)、操作柔性(operation flexibility)、产量柔性(volume flexibility)、零部件选路柔性(routing flexibility)、过程柔性(process flexibility)、产品柔性(product flexibility)、扩张柔性(expansion flexibility)、程序柔性(program flexibility)、生产柔性(production flexibility) 和市场柔性(market flexibility)。这 11 类柔性又可分为三个层次：①基本柔性。主要包括机器柔性、物料搬运柔性以及操作柔性；②系统柔性。主要包括产量柔性、零部件选路柔性、过程柔性、产品柔性以及扩张柔性；③集成柔性。主要包括程序柔性、市场柔性以及生产柔性。关于这些柔性的定义及其相互关系，请参考相关文献（如 Sethi and Sethi, 1990；黄飞华, 2006）。

Shewchuk and Moodie（1998）将制造柔性概念分解为六个属性，依次是：生产需求细分层次(level of manufacturing requirements specification)、研究对象(manufacturing system specification)、制造环境(manufacturing environment specification)、柔性维度(flexibility dimension)、柔性测度方法(flexibility measurement approach) 和时间框架(time frame)。根据该六属性框架，Shewchuk and Moodie 将逾 70 种关于各种柔性的定义和测度进行分解、归类，比较了不同研究者对于同一种柔性的不同定义之间的异同。该六属性框架为总结每种定义和测度的重要方面以及背后的假设提供了一种机制，同时，还为发展新的柔性定义和测度提供了向导。

在柔性的各种术语和定义（Sethi and Sethi, 1990）中，过程柔性引起了研究

者和实践者的特别注意。这是因为当企业想要扩大生产规模和/或范围时，如何实现过程柔性以及需要投资多少生产资源得到足够的柔性是其制造战略的关键问题。本文的主要研究内容围绕制造系统和供应链的过程柔性展开。

Browne et al. (1984) 定义过程柔性如下：过程柔性是衡量机器或系统以多种方式生产给定零部件类型集合的能力。Sethi and Sethi (1990) 定义过程柔性为一个制造系统不需要大调整而可以生产的零部件类型集合的大小。Sethi and Sethi 认为系统的过程柔性由机器的机器柔性、零部件的操作柔性和物料搬运柔性共同决定。Sarker et al. (1994) 定义过程柔性为系统不需要大调整而可以生产不同产品类型的能力。Jordan and Graves (1995) 定义过程柔性为系统在同一个工厂或生产设备上同时生产不同种类产品的能力，指出过程柔性由产品指派决策决定，即指派哪种产品在哪家工厂或哪条生产线上生产。Boyer and Leong (1996) 定义过程柔性为制造型工厂生产多于一种产品的能力。Iravani et al. (2005) 认为过程柔性由系统结构决定，并定义结构柔性如下：结构柔性是系统重新分配生产以应对需求或资源能力的变化的能力。本文采纳 Jordan and Graves (1995) 对过程柔性的定义。过程柔性定义为一个系统或一条装配线同时生产不同产品类型的能力。

### 1.1.3 制造柔性的作用

制造柔性用于缓冲由于环境的不确定性导致的变化对系统生产的影响。环境变化包括内部变化和外部变化 (Garrett, 1986)。内部变化一般包括物料短缺，旷工，机器故障等，外部变化一般包括产品需求量以及产品组合的变化等 (Hua and He, 2008a)。环境的不确定性可能来源于竞争者的行动，顾客偏好的变化，技术革新，新的政策等 (Sethi and Sethi, 1990)。

制造柔性通过生产系统中的柔性技术发挥作用。和刚性技术相比，柔性技术有以下几大优点：

(1) 首先柔性技术比刚性技术 (指只能进行某一种产品或零部件加工的技术) 更能处理生产中的突发情况。由于产品需要各种零部件按照一定的结构组成，

当生产线发生机器故障或者人员旷工时，如果不采用柔性技术，将可能导致生产的瘫痪。由于柔性技术能够同时生产多种零部件，当某台设备发生故障时，其他的设备仍然可以用来生产故障设备所能生产的部件，从而能够保证生产的正常进行。

（2）与刚性技术利于规模经济不同，柔性制造系统更多实现了范围经济的要求。范围经济是相对于规模经济而言的，其含义是指企业同时生产多种产品，由于各种产品之间的协调和关联，可以使生产每种产品的单位成本减少。相关研究表明，刚性技术（或刚性自动化）能够更有效的实现规模经济，而柔性技术（或柔性自动化）则能够更有效的实现范围经济。

（3）柔性技术是企业进行准时化生产以及混流生产的必要条件。经济的全球化和顾客需求的多样化使企业面临着巨大的压力，准时化生产引起了人们的极大关注。准时化生产以消除生产中的一切无效劳动和各种浪费，提高现场效率为目的，要求在需要的时间，按照需要的数量，提供需要的产品。由于准时化生产计划是根据订单制定的而不是按照预测制定的，实行准时化生产首先要求生产平顺化，平顺化生产以确定数量节拍、看板生产和单一生产流程三个基本方法为前提。柔性技术是实行准时化生产的必不可少的条件。所谓混流装配线，有时也特指混合车型组装线，是指在一定时间内，在一条生产线上生产出多种不同型号的产品，产品的种类可以随顾客需求的变化而变化。混流装配线是 JIT 生产方式的具体应用之一，它能在不引起大的产品库存的条件下满足顾客的多样化需求。柔性技术是实现混流装配的前提条件。

（4）最后，在不同的时间范围上，柔性技术的作用不同。在短的时间范围上，产品组合与加工工艺不变，产品需求稳定，产品设计的变化很少。短期柔性的作用在于设备故障、小的设计变动、原材料供应不确定和需求的多变性下，维持生产系统的正常运转。在中期时间范围上，产品设计和产量发生变化而制造系统的结构基本不变。中期柔性的作用在于在新的产品和不同的需求结构下有效利用现有设备与能力进行生产。在长期时间范围上，制造系统本身也发生变化。长期柔性的作用在于改变生产规模而无须对不断发展的操作做大的破坏，增加的投资极少。

## 1.2 制造系统和供应链的柔性研究现状

学术界对制造系统和供应链中的柔性研究大致可分为柔性测度和柔性改善两类。若要增加柔性, 先须对其进行测度。以下分别对制造系统和供应链的柔性测度方法和改善方法的研究现状予以介绍。

### 1.2.1 制造系统的柔性测度

现阶段对柔性的研究主要集中于制造系统中的柔性。要在决策过程中正确的考虑柔性, 需要首先以量化的形式对其定义, 即对其进行测度 (Chryssolouris, 2006)。时至今日, 研究者们提出了测度各种柔性的很多方法。Chryssolouris (2006) 认为现有的制造系统柔性测度方法反映了对柔性的两种观点: 第一种观点认为柔性是一个制造系统固有的属性, 所以能够用反映制造系统特征的函数来测度其大小。第二种观点认为柔性是制造系统相对于外部需求的一种相对属性, 可以通过诸如折现现金流的方式测度 (Son and Park, 1990; Alexopoulos et al. 2007a)。

根据测度方法提出的依据, 现有的制造系统柔性测度方法可分为三类。

第一类测度基于制造系统固有的多功能属性来评价柔性大小。这类测度典型的代表有熵指数, 多功能性指数, 能力转移指数等。Kumar (1987, 1988) 提出用熵指数来测度制造柔性, 认为柔性应该是可选择项的数量以及选择这些选项的自由度的函数。Chang (2008) 定义多功能性指数作为机器柔性的一个属性。这个指数主要考虑了一组机器能够生产的产出的种类数。Iravani et al. (2005) 从能力转移的角度提出了两个指标来测度制造系统的过程柔性。这一类测度通常用来量化一台机器、一组机器, 或一个制造系统的柔性。正如 Chryssolouris (2006) 指出, 这类测度可能会忽略与现实的相关性, 因为它们忽略了外部需求。

第二类测度通过制造系统应对变化时的表现来间接的反映系统的柔性大小。典型的例子如 J&G 指数, 期望短缺指数, 期望收益指数, 改变惩罚指数 (Penalty of Change, POC), 以及折现现金流方法。Jordan and Graves (1995) 提出了 J&G 指数, 它通过计算系统同时存在未满足的需求和过剩能力的概率来测度该系统的

过程柔性大小。期望短缺指数通过计算一个制造系统或一条供应链的期望短缺来反映其柔性大小。这种方法虽然没有被正式的提出来，但是却被很多研究者们使用（如 Graves and Tomlin, 2003; Hua et al., 2008; Hua and He, 2008a, 2008b）。Jaikumar (1984) 用在某特定环境下系统用有限的资源能够处理的产品组合的期望价值来测度系统的过程柔性。Chryssolouris and Lee (1992) 提出了 POC 测度。在该测度方法中，制造系统的柔性大小不仅与系统应对变化的成本有关，还与发生这些变化的概率有关。Alexopoulos et al. (2007a) 提出了基于折现现金流的测度，该测度以系统应对外部变化的不敏感性（以净成本的变异性表示）来反映系统的柔性大小。这类测度能够明确的表示制造系统应对环境变化的绩效。但是，它们也有一个缺陷，即通常忽略了制造系统的固有属性，以至于很难直接从这些柔性测度中找出改善柔性的一般性规则。

第三类测度通过将制造系统的固有属性和一些外部需求特征结合起来测度系统的柔性。机械系统类比法和基于 PF 矩阵的测度属于此类。机械系统类比法 (Bechrakis et al., 1997; Chryssolouris et al., 1998, Georgoulis et al., 2007; Alexopoulos et al., 2007b, 2008) 将制造系统的需求响应过程类比成机械系统的压力响应过程，从而制造柔性被定义为系统应对动态需求的能力和迅速程度。由于这类方法将制造系统类比成机械系统，这类方法为寻找改善制造系统柔性的一般性规则提供了潜在的可能性。人们可以首先探寻使得简单机械系统更具有柔性的结构特性，然后推广到制造系统。对于只有一条装配线的制造系统，Hua et al. (2008) 提出了基于 PF 矩阵的柔性测度，将制造系统的多功能性和多种产品的 BOM 约束结合起来测度制造系统的过程柔性。在其文中，过程柔性被定义为能力在需求类型之间可转移的程度，其测度考虑了产品结构约束对能力转移的影响。一方面，能力转移的程度是制造系统的一项固有属性；另一方面，产品的 BOM 约束反映了外部需求的特征。由于在柔性测度中直接考虑了装配线的结构，文章提出了改善柔性的一些指导规则。然而，基于 PF 矩阵的测度很难推广到具有多条装配线的制造系统。

### 1.2.2 制造系统的柔性改善方法

测度柔性的最终目的是为了找出一条经济有效的途径来改善柔性，所以一种量化柔性的方法通常隐含着对应的柔性改善方法。根据对应的柔性测度方法的特征，可将现有的柔性改善方法分为三类。

第一类方法是基于制造系统固有属性而提出的一般性原则。例如，当不考虑产品结构约束时，Jordan and Graves (1995) 提出了指导柔性制造系统能力规划的“链式策略”。“链式策略”要求工厂和产品构成一个或多个连接尽可能多工厂和产品的链。当产品需求负相关或者独立，工厂能力和产品需求“匹配”（即可以分配资源使得每种需求类型在平均意义上都能得到满足，见 Iravani et al. (2005)）时，这项指导规则是非常有效的。Slomp and Molleman (2002) 将劳动力柔性定义为多功能性 (multi-functionality) 水平，在此基础上提出了“员工导向的交叉培训”策略，意思是尽量使得每位员工的多功能性平均分布，即每位员工拥有的技能数尽可能相同。因为这类柔性测度忽略了外部需求，从而据此提出的指导规则只在典型的外部条件下具有一般意义，可能失去与现实的相关性 (Chryssolouris, 2006)。

第二类方法通常针对具体的行业情况提出改善柔性的实际建议。这类方法视柔性为制造系统和其外部变化之间的相对属性，常常通过求解优化问题 (Eppen et al., 1989; Hua and Banerjee, 2000a; Hua and Liang, 2004) 或者计算实验 (Alexopoulos et al., 2007a; Gong and Hu, 2008) 来得到改善柔性或者能力/柔性投资决策的建议。除了需要复杂的计算以及局限于具体案例外，这类方法还需要非常复杂的数据，这在现实的行业环境中通常是很难办到的 (Alexopoulos et al., 2007b)。

第三类方法通过将制造系统的固有属性和一些外部需求特征结合起来提出改善柔性的一般性规则。基于对应的柔性测度，很容易找出改善柔性的一般性规则。测度柔性的机械系统类比法 (Chryssolouris et al., 1998; Georgoulis et al., 2007; Alexopoulos et al., 2007b) 提供了找出改善制造系统柔性的一般性规则的可能性。然而，基于这类方法的研究非常有限。对于只有一条装配线的制造系统，Hua et al. (2008) 基于其提出的 PF 矩阵测度，提出了改善柔性以及能力扩张的一些指导规则。这些规则在一定程度上具有普适意义，即它们不局限于特定的或

典型的外部变化。然而，他们的研究很难推广到具有多条装配线的制造系统。

### 1.2.3 供应链的柔性研究

供应链管理中存在着多种不确定性，如市场需求，供应提前期，产品质量和信息延迟等不确定性（Giannoccaro et al., 2003）。因此，供应链管理的一个核心问题是供应链上的企业如何应对这种环境的变化和不确定性；供应链管理的另一个核心问题就是供应链上的企业如何进行有效的协作来满足多样化需求。改善供应链的柔性是应对这两个问题的重要手段（De Groote, 1994）。

相对于制造系统的柔性研究，学术界对于供应链的制造柔性研究非常有限。尽管有很多实践类文献讨论了供应链柔性的重要性，很少有文献研究供应链柔性的构成、测度以及改善方法（Duclos et al., 2003）。供应链柔性大多从制造系统的柔性衍生而来。制造柔性在供应链柔性中占据了重要的角色。然而，由于供应链由多家企业组成，供应链柔性也必须由一家企业的内部柔性拓展到多家企业。

供应链柔性的主要柔性种类包括：

产品柔性，指供应链开发新产品和改进现有产品，满足顾客特定需求的能力（Vickery et al., 1999）。产品柔性的特点是产品种类多，特色丰富，并且可以不断有新产品推出。产品柔性反映了供应链对顾客个性化需求的满足能力。

生产柔性，指供应链改变整体输出水平的能力（Vickery et al., 1999），即面对顾客需求波动，在生产系统能够有效运行的前提下，所能够提供的各类产品产量的变动范围。

过程柔性，指供应链通过调整生产安排以适应市场需求不确定性的能力。由于供应链的过程柔性通常与供应链的结构相关，因此也被称为供应链的结构柔性。

混合柔性，指供应商在给定期间内改变产品生产种类的能力，即在一定时间内所能生产的不同产品的品种数量或生产完一种产品后转换到另一种产品生产的容易程度（刘蕾 等，2005）。

时间柔性，也称为交货柔性，是供应链改变生产计划调整交货日期的能力（Milner, 2005），反应了供应链满足顾客需求的速度。

投放柔性，指供应链能够快速投放多样化新产品到市场的能力（Vickery et al., 1999）。

获取柔性，指供应链能够提供广泛的或者集中的分销以覆盖市场的能力。

物流柔性，指供应链能够采用不同的物流策略以连接产品和市场的能力，如将产品投入市场，或者从供应商采购零部件等（Garavelli, 2003）。

供应链柔性以其成员企业的生产系统柔性为基础，但它与生产系统柔性关注的层次不同。企业生产系统柔性关注具体的生产过程；而供应链柔性并不关注具体生产过程的柔性和具体的操作工序，它关注的是整个供应链系统的产出。换言之，生产系统柔性中的机器柔性、物料运输方式的柔性、零部件的操作柔性、零部件的选路柔性、扩张柔性和程序柔性等已经不是供应链柔性关注的重点。供应链柔性关注的重点是由各成员企业组成的供应链网络满足多样化不确定需求的能力。而这种能力既与供应链网络的结构有关，也与给定供应链网络结构下的生产计划安排相关。

对供应链柔性的测度以及改善方法的研究目前还不多见。Gong（2008）用产品混合柔性表示供应链总柔性，建立了一个最优化模型来衡量供应链柔性的大小。产品混合柔性定义为在一个制造设备上不需要大的调整成本而可以生产多种产品的能力（Gerwin, 1993）。模型以供应链总利润作为经济指标，将机器柔性，员工柔性，选路柔性和信息技术作为约束条件。这个测度的缺点是其局限于供应链在特定环境下的绩效，不能反映供应链柔性本身的大小，从而导致不同环境下的供应链柔性不可比。

在供应链柔性研究中，过程柔性是其中的一个重要内容。供应链的过程柔性涉及每个成员企业的过程柔性和物流柔性。供应链成员企业的过程柔性可能是完全柔性的（能生产所有的产品）、刚性的（只能生产一种产品）或有限柔性的（介于刚性和完全柔性之间）。进一步需要关注的问题是供应链柔性到底能给供应链带来哪些好处，以及如何提高供应链的柔性等。

Graves and Tomlin（2003）研究了一类多产品多阶段的供应链的过程柔性。供应链的过程柔性被定义为供应链上一个生产设备能够生产多种产品的能力。他们发现了供应链上两个独特的现象：浮动瓶颈（floating bottlenecks）和跨阶段瓶颈（stage-spanning bottlenecks）。浮动瓶颈是需求不确定性的直接产物。如果需

求确定，那么供应链上的瓶颈就在单阶段供应链短缺 (stand-alone shortfall, 本文以下简称“单机短缺”) 最大的阶段 (本文以下简称“单机瓶颈阶段”)。如果需求不确定，那么由于供应链的不完全柔性，单机瓶颈在任意需求情形下就可能从一个阶段浮动到另一个阶段，这时浮动瓶颈就产生了。当供应链总短缺严格大于最大的单机短缺时，供应链发生瓶颈的地方不止一个阶段，这时跨阶段瓶颈就产生了。浮动瓶颈和跨阶段瓶颈都会减弱供应链柔性配置的效果。为了测度供应链的过程柔性并找出柔性改善规则，Graves and Tomlin (2003) 引入了一个柔性测度  $g$ ，并说明了增加这个量就会减少供应链的低效率，从而提高供应链的柔性。然而，这个测度也被证明是有问题的，详见本文第五章。

对于供应链柔性的改善规则，目前的研究还仅限于经验阶段。Avittathur and Swamidass (2007) 通过对位于印度的美国制造企业的供应商进行调查，发现刚性的工厂跟刚性的供应商搭配能获得最大的利润，柔性工厂跟柔性供应商搭配能获得高于平均水平的利润，工厂和供应商柔性不匹配将导致工厂利润低于平均水平。Graves and Tomlin (2003) 通过算例发现适用于制造系统柔性配置的“链式策略”在中小规模的供应链 (阶段数不大于 10，产品数不多于 20) 中仍然适用，而且只要每阶段都应用“链式策略”，不需要每阶段的结构都相同，就可以获得很高的柔性。

### 1.3 考虑环境要求在测度和改善制造柔性中的意义

本文认为，柔性是系统相对于其所处环境的一种相对属性。系统的柔性不仅取决于系统设计时所确定的设备与运输系统等硬件配置因素 (包括工厂-产品结构和机器-零部件结构)，还取决于其所处的环境中的要求。具体的，本文考虑的系统环境要求包括产品结构约束和产品需求特征。将系统结构和环境要求相结合提出的柔性测度既能反映出系统在特定环境中应对变化的能力，又能据此提出有针对性而不失普适性的柔性改善指导规则。以下将分别讨论在测度和改善柔性的过程中考虑产品结构约束和产品需求特征的意义。

### 1.3.1 实现柔性的过程中考虑产品结构约束的重要性

在有关柔性的众多研究文献中,许多研究者都将产品看成一个整体而不去关心它由哪些零部件类型组成或者它由哪些机器生产 (Rajagopalan, 1993; Jordan and Graves, 1995; Van Mieghem, 1998)。从产品的制造过程看,不同的产品其本质是通过产品结构表现出来的 (Yeung et al. 1999; Tseng et al. 2005), 产品结构描述了每单位产品中所需各种零部件的类型和数量。由于顾客化的需求主要表现为产品的多样性,而产品的多样性在实质上可以表现为产品中零部件的不同组成结构。产品结构正反映了这种零部件的组成结构,因而是反映顾客化需求的有效手段。因此,在测度和改善柔性的过程中考虑产品结构具有重要的实际意义 (Hua et al., 2008):

- (1) 获得更高的柔性。不同的产品用不同的 BOM 表示。如果不考虑 BOM 约束对柔性的影响,现有的柔性改善策略可能会导致较低的柔性。
- (2) 提高企业响应顾客需求的能力。随着商业竞争的加剧,产品生命周期逐渐缩短,这就意味着必须不断的开发新产品。在实现柔性的过程中考虑产品结构能使得企业更容易开发新产品,提高企业响应顾客需求的能力。
- (3) 降低库存水平和相关的成本。考虑了 BOM 约束后,就会自然的避免生产冗余的零部件。不满足 BOM 要求的多余零部件会导致能力的浪费和库存成本的增加。
- (4) 为供应链协调提供公共的平台。下游制造商的 BOM 约束在其选择供应商时起着关键作用 (Yan et al., 2003), 而且能为供应商选择库存策略提供指导 (Huang et al., 2005)。

### 1.3.2 实现柔性的过程中考虑需求特征的重要性

本文主要考虑两种需求特征: 单种产品需求的变异性 (用变异系数表示) 和不同产品的需求之间的相关性 (用相关系数表示)。大量文献和经验表明, 产品需求的变异性对能力决策和柔性投资有着重要的影响。产品需求变异性大, 则需

要较高的柔性；产品需求变异性小，则不需要太多的柔性（Goyal et al., 2006; Molleman and Slomp, 1999）。换句话说，产品需求的不同变异性程度会对系统中柔性能力对系统柔性的贡献程度产生影响。同时，产品需求之间的相关性也不能忽视。由于一家制造系统生产的各种产品的需求之间常常在一定程度上正相关或者负相关（Netessine et al., 2002），不同产品需求之间的相关性在能力和柔性决策中也需要考虑。

需求相关性对柔性的影响可以解释如下：当两种产品的需求正相关时，能力需要在这两种产品的生产之间转移的概率很小（Jordan and Graves, 1995），除非两种产品的边际利润贡献（marginal contributions）相差很大（Van Mieghem, 1998; Bish and Wang, 2004）。然而，这种情形下发生能力转移的原因是金融方面的（financial）而不是风险集中，需要综合产品的出售价格和产品的生产成本信息，本文仅从通过能力转移应对需求变化的角度考虑需求相关性对柔性的影响。所以，即使系统中生产这两种产品的柔性很高（即有多种资源能够同时生产这两种产品），这些柔性价值也得不到实现。另一方面，如果两种产品的需求相互独立或者负相关，能力需要在这两种产品的生产之间转移的概率相对较大。如果系统中能够在这两种产品的生产之间转移的能力很多，那么系统在应对两种产品需求变化方面的柔性就很高。如果系统中能够在这两种产品的生产之间转移的能力很少，很明显，系统应对这两种产品需求变化方面的柔性就很低。需求相关性对柔性的影响分析和 Chryssolouris and Lee（1992）提出的 POC 指标的原理类似。POC 指标隐含着，系统的柔性不仅取决于系统应对变化的容易程度，还取决于这种变化发生的概率。一句话，两种产品需求之间的相关系数越大，生产这两种产品的柔性能力对系统柔性的影响越小；反之越大。

产品需求变异性对柔性的影响更简单。如果一种产品需求的变异系数很小，如 0.1，那么这种产品的需求发生较大变化的概率很小，基本上不需要投资太多的柔性用于生产这种产品。换句话说，即使有多种资源能够生产这种产品，这些柔性资源也不会对系统的柔性有太多贡献。反之，如果一种产品需求的变异系数很大，如 2，那么这种产品的需求发生较大变化的概率很大，能力在生产一种产品的多种资源之间发生转移的概率就大，就需要投资较多的柔性用于这种产品的生产。生产这种产品的资源的柔性大小在很大程度上决定了系统柔性的大小。总

结起来，一种产品需求的变异系数越大，生产这种产品的柔性能力对系统柔性的影响就越大；反之越小。

综上所述，对于给定结构的系统，需求特征在决定其柔性大小时起着重要的作用，因此在实现柔性的过程中考虑需求特征是很必要的。

#### 1.4 本文的研究对象

本文的主要研究对象分为两类。考虑产品结构约束时，本文的研究对象为具有多条装配线，用于生产多种产品类型来满足市场需求的制造系统。在该制造系统中，每种产品类型都由一些零部件类型组成。每种产品类型的结构都用它的BOM表表示。每条装配线都由一些机器组成。每种机器可以加工一种或多种零部件类型。一条装配线能否生产一种产品类型取决于该装配线上机器的柔性和该产品的BOM约束。考虑产品需求特征时，本文的研究对象为在具有多家工厂，在一定需求分布下生产多种产品的制造系统或供应链。当研究对象为供应链时，本文假设每种产品在供应链上每个阶段都需要被加工。

#### 1.5 本文的研究问题

在市场竞争不断加剧、产品越来越趋向于多样化和顾客化的今天，如何合理的投资柔性设备，用有限的资源满足不确定的需求是企业的重要战略目标。而这个目标对于制造系统来说就体现为如何实现较高的过程柔性，或称过程柔性的改善问题。在制造系统中实现过程柔性时考虑环境要求能带来很多好处，但同时也会使得柔性的测度和改善问题更加复杂，甚至一些基本的概念也需要重新定义。

本文主要研究环境要求（包括产品BOM约束和产品需求特征）对制造系统或供应链的过程柔性测度和改善方法的影响，并提出考虑环境要求的过程柔性测度和改善方法。

## 1.6 本文的研究意义和内容组织

如前所述,目前学术界对柔性的改善方法的研究可分为三类:第一类方法是基于制造系统固有属性而提出的一般性原则。这类方法忽略了外部需求,从而提出的指导规则只在典型的外部条件下具有一般意义,可能失去与现实的相关性。第二类方法通常针对具体的行业情况提出改善柔性的实际建议。除了需要复杂的计算以及局限于具体案例外,这类方法还需要非常复杂的数据,这在现实的行业环境中通常是很难办到的。第三类方法通过将制造系统的固有属性和一些外部需求特征结合起来提出改善柔性的一般性规则。这类方法能较好的解决上述两种问题,但是这类研究非常有限。

本文研究的意义在于同时考虑系统结构本身的特征和外部环境要求(产品结构约束或需求特征),提出一套较为完善的过程柔性测度指标和柔性改善指导规则,解决上述问题。通过指导规则来改善柔性能够使得管理者不需要通过复杂的计算就能找出改善柔性的满意途径,做出有效的柔性投资决策,实践起来方便。

本文从第二章到第六章的内容安排如下:

第二章在考虑产品结构约束的前提下提出了一种测度制造系统过程柔性的方法。对于具有多条装配线的制造系统,在产品结构约束下的过程柔性应分为两个层次:装配线层次和系统层次。两个层次的过程柔性分别解释为面临内部或外部环境变化时生产能力在不同零部件/产品之间可转移程度的大小。对于每个层次的过程柔性,本章提出了测度方法。该测度方法为分析过程柔性的结构特性和提出柔性改善指导规则提供了基础。

第三章在第二章的基础上,对两个层次的过程柔性分别分析了其结构特性,并提出了柔性改善的指导规则。结构特性是指关于何种装配线和系统结构具有更高柔性的特性。结构特性的分析以过程柔性的测度方法为基础,指导规则以对结构特性的分析为基础。指导规则能帮助管理者在不需要太多计算量的前提下做出有效的柔性投资决策。

第四章研究了需求特征对系统过程柔性的影响,并提出考虑需求特征(包括需求变异性和需求之间的相关性)的过程柔性测度方法。基于提出的过程柔性测度,本章还提出了通过增加一条链来改善一般制造系统的过程柔性的指导规则。

第五章研究了考虑需求特征的供应链过程柔性测度问题。针对现有的过程柔

性测度方法,本章指出了其中由于没有考虑需求特征而导致的问题,并提出了一个新的供应链过程柔性测度。该供应链过程柔性测度值的大小与供应链所处的环境中产品需求分布有关。

第六章总结本文的工作,归纳本文的主要创新点,指出目前本文研究的局限,并根据已取得的研究结果对未来进一步值得研究的问题和方向进行思考。

## 第二章 考虑产品结构约束的过程柔性测度方法

本章研究具有多条装配线的制造系统的过程柔性的测度问题。首先以印刷电路板（Printed Wiring Board, PWB）的生产为例，说明考虑产品结构约束对过程柔性的影响，然后将考虑产品结构约束下的过程柔性分为两个层次：装配线层次和系统层次。分别对每个层次的过程柔性提出测度方法，最后通过实例研究说明了提出的测度的可行性和有效性。

### 2.1 考虑产品结构约束对过程柔性的影响

过程柔性定义为在同一条装配线上同时生产不同产品类型的能力。这个定义源自 Jordan and Graves (1995) 的定义，和 Browne et al. (1984) 或 Sethi and Sethi (1990) 给出的传统定义略不相同。在某种程度上，本章的定义和 Chryssolouris (2006) 定义的产品柔性有点类似。采用这个定义是因为产品结构约束涉及到一条装配线上可进行多种操作的机器。过程柔性侧重于制造系统应对内部或外部变化的能力。

在产品结构约束下，制造系统的一条装配线能生产一种产品类型当且仅当该产品 BOM 表中列出的所有零部件类型都能被这条装配线上的机器加工。所以，要测度考虑产品结构约束下的过程柔性，必须将不同层次的柔性结合起来，即基础层次 (the basic level) 和系统层次 (the system level) (Sethi and Sethi, 1990)。尽管目前已有很多方法测度各种类型的柔性，在产品结构约束下测度过程柔性还是一项挑战。

为了说明产品结构约束对过程柔性的影响，先看下面的一个简单例子。

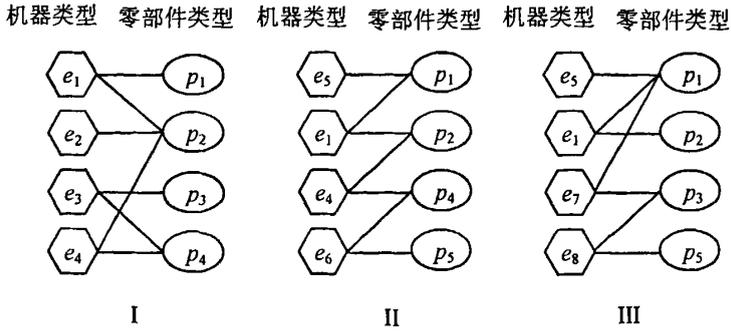


图 2.1 简单制造系统示例

图 2.1 所示的制造系统由三条装配线组成，每条装配线（I，II，III）都有四台机器（图中用六边形表示），每台机器根据其机器柔性大小能生产一种或几种零部件类型（图中用椭圆形表示）。系统中共有 8 种机器类型（ $e_1$ - $e_8$ ），5 种零部件类型（ $p_1$ - $p_5$ ）。一条装配线中每台机器的柔性用链集合来表示。一条连接一种机器类型  $j$  和一种零部件类型  $i$  的链表示机器类型  $j$  能加工零部件类型  $i$ 。例如，在图 2.1 中，跟机器类型  $e_4$  相连的有两条链，分别连接零部件类型  $p_2$  和  $p_4$ ，这就表示机器类型  $e_4$  能同时加工零部件类型  $p_2$  和  $p_4$ ，而不需要设备调整成本，或者设备调整对生产的影响很小以至于可以忽略。自动装配线上的机器人或 PWB 装配线上的插置机器（placement machines）都是这类设备的典型例子（Jordan and Graves, 1995; Hua and Banerjee, 2000a）。在 PWB 装配系统中，一条 PWB 装配线将多个电子元器件（或称为零部件）插置到一块 PWB 上。这些元器件可以分为五类，如小块（Small Chip, SC）、大块（Large Chip, LC）、异型块（Odd-Shaped Chip, OS）（如连接器及片脚）、高精度插置（Hi-Precise, HP）（如高度集成的电路块的插置）和辅加块（Direct Chip Attach, DCA）（需附加流量分配操作）。每种插置机器能够将特定的零部件类型安插在一个 PWB 上（即一个产品类型）。一些插置机器组成了一条装配线，它能够生产一些产品类型。

本章假设任意一种机器类型加工任意一种其能加工的零部件类型都需要一单位时间，所以，一台机器在任意零部件组合下都具有相同的能力。

假设图 2.1 中所示的制造系统可以生产三种产品类型，每种产品类型的 BOM 结构如表 2.1 所示。例如，一单位产品  $n_1$  需要 20 单位的零部件  $p_1$ ，40 单位的零

部件  $p_2$  和 20 单位的零部件  $p_3$ 。

表 2.1 三种产品类型的 BOM 结构

产品类型	零部件类型 $p_1$	零部件类型 $p_2$	零部件类型 $p_3$	零部件类型 $p_4$	零部件类型 $p_5$
$n_1$	20	40	20	0	0
$n_2$	30	20	0	30	0
$n_3$	60	10	0	0	10

在表 2.1 所示的产品结构约束下，每条装配线能够生产每种产品的最大产量（产品单位）可以通过求解一个线性规划问题得到（见附录 2.A 中的规划 A1）。表 2.2 列出了当每台机器在计划期内都能加工 1000 单位零部件情形下每条装配线能够生产每种产品的最大产量。

表 2.2 三条装配线能生产各种产品的最大产量

装配线	产品类型 $n_1$	产品类型 $n_2$	产品类型 $n_3$
I	50	33	0
II	0	50	33
III	25	0	50

从表 2.2 可以看出，图 2.1 所示的制造系统有一定程度的过程柔性，因为每条装配线能够生产两种产品类型。这样，该系统具有一定的应对外部和内部变化的能力（Chryssolouris and Lee, 1992），即由于每条装配线都具有生产多种产品的能力，当需求或资源发生变化时，可以直接或间接的将装配线的生产能力从一种产品转移到另一种产品（Iravani et al., 2005）。直观上，能力可转移的程度越高，则系统应对需求变化（如产品需求量以及产品组合的变化等）和资源能力变化（如物料短缺，旷工，机器故障等）的能力就越强。所以本章将能力可转移程度定义为制造系统过程柔性的测度。

当不考虑产品结构约束时，Iravani et al. (2005) 定义制造系统的过程柔性为重置生产以应对需求或资源变化的能力，并基于此提出了过程柔性的测度方法。

在他们的测度方法中, 如果一个制造系统中的一家工厂(对应于此处的一条装配线)能够生产多种产品, 他们假设该工厂的能力可以完全的从一种产品的生产转移到另一种产品的生产。这样, 过程柔性就完全由制造系统的结构(即工厂的多功能性配置结构)决定。然而, 当考虑产品结构时, 情况就不同了。例如, 图 2.1 中装配线 I 能生产产品  $n_1$  和  $n_2$ , 但是该装配线只有 66% ( $=33 \times (30+20+30) / 4000 \times 100\%$ ) 的能力可以从产品  $n_1$  的生产转移到产品  $n_2$  的生产。这就意味着, 当考虑产品结构时, 制造系统的能力可转移程度不仅仅由制造系统的结构决定, 而且也受到产品结构的影响。

由于一条装配线的过程柔性和一个制造系统的过程柔性迥异, 本章将过程柔性去分为两个层次: 装配线层次(记为 PF/I) 和系统层次(记为 PF/S)。PF/I 定义为一条装配线上的机器的能力在不同零部件类型之间可转移的程度。PF/S 定义为一个制造系统上的装配线的能力在不同产品类型之间可转移的程度。这两个层次的过程柔性紧密相关, PF/I 是 PF/S 的基础。对每个层次的过程柔性, 本章将给出其测度方法。

## 2.2 装配线的过程柔性测度

假设一个制造系统拥有  $L$  条装配线, 每条装配线由  $E$  种机器类型组成。这个制造系统生产的产品集合记为  $\Gamma$ 。产品集  $\Gamma$  含有  $N$  种产品类型, 每种产品类型的结构都可以用 BOM 表表示为  $s_{np}$  ( $n=1,2,\dots,N$ ;  $p=1,2,\dots,P$ ),  $s_{np}$  表示生产一单位产品类型  $n$  需要的零部件类型  $p$  的数量。那么,  $\Gamma = \{(s_{n1}, s_{n2}, \dots, s_{nP}) | n=1,2,\dots,N\}$ 。

对于  $\forall l \in \{1,2,\dots,L\}$ , 装配线  $l$  用一个  $E$  维向量表示:  $\mathbf{m}_l = (m_l^e)_{E \times 1}$ , 其中  $m_l^e$  表示该装配线中机器类型  $e$  的数量。在计划期内机器类型  $e$  的能力记为  $c^e$  (零部件单位)。对于  $\forall e \in \{1,2,\dots,E\}$ , 机器类型  $e$  的柔性用  $P$  维向量表示:  $\mathbf{f}_e = (f_e^p)_{P \times 1}$ , 其中, 若机器类型  $e$  的能加工零部件类型  $p$  则  $f_e^p = 1$ ; 否则  $f_e^p = 0$ 。

如果装配线  $l$  ( $l=1,2,\dots,L$ ) 能生产产品类型  $n$  ( $n \in \Gamma$ ), 即对  $\forall p \in \{1,2,\dots,P\}$ , 如果  $s_{np} > 0$  则  $\sum_{e=1}^E m_l^e f_e^p > 0$ , 那么可以说装配线  $l$  和产品类型  $n$  之间有一条弧相连,

弧的权重为  $w_{nl}$ 。权重  $w_{nl}$  定义为装配线  $l$  在计划期内能生产产品类型  $n$  的最大数量（零部件单位），计算公式如下：

$$w_{nl} = q_{nl} \sum_{p=1}^P s_{np} \quad (2.1)$$

在公式 (2.1) 中， $q_{nl}$  表示装配线  $l$  在计划期内能生产产品类型  $n$  的最大数量（产品单位），这个量能通过求解附录 2.A 中的规划 A1 得到。如果  $w_{nl}$  等于 0，则意味着装配线  $l$  和产品类型  $n$  之间没有弧相连。在这里请注意两个术语的区别：“链”（link）和“弧”（arc）。链描述了一台机器能否加工一种零部件类型的能力，而弧描述了一条装配线能够生产一种产品类型的能力。在产品结构约束的影响下，一条装配线生产不同产品时其能力可能不同。

前面我们定义装配线  $l$  ( $l=1,2,\dots,L$ ) 的过程柔性为其中的机器的能力在不同零部件类型之间可转移的程度，PF// 实质上取决于这条装配线上机器的柔性和产品集合  $\Gamma$  中产品的结构约束。如果这条装配线上机器的柔性很高，则在生产任意产品时有更多的机器能力可以在不同零部件类型中转移。给定产品类型  $n$  ( $n \in \Gamma$ )，能力利用率  $w_{nl} / \sum_{e=1}^E m_l^e c^e$  ( $l=1,2,\dots,L$ ) 描述了装配线  $l$  在生产产品类型  $n$  时为了满足 BOM 约束而可以发生能力转移的程度。这样，装配线  $l$  的过程柔性 PF// 就可以用整个产品集合上装配线  $l$  的平均能力利用率来表示。

**定义 1** 给定产品集合  $\Gamma$  的 BOM 约束  $\Gamma = \{(s_{n1}, s_{n2}, \dots, s_{nP}) \mid n=1,2,\dots,N\}$ ，以及所有装配线结构  $\mathbf{m}_l = (m_l^e)_{E \times 1}$  ( $l \in \{1,2,\dots,L\}$ )，装配线  $l$  的 PF// 大小为  $\sum_{n=1}^N w_{nl} / (N \cdot \sum_{e=1}^E m_l^e c^e)$ 。

从定义 1 可知， $\text{PF//} \in [0,1]$ 。当一条装配线不能生产产品集  $\Gamma$  中的任意产品时，PF// 等于 0。当一条装配线具有完全柔性时，PF// 等于 1。在产品结构约束下，一条装配线具有完全柔性定义如下：

**定义 2** 如果  $\sum_{n=1}^N w_{nl} = N \cdot \sum_{e=1}^E m_l^e c^e$ ，那么装配线  $l$  具有完全柔性。

定义 2 也可以作为判断一条装配线是否具有完全柔性的条件。在产品结构约束下, 定义 2 定义的完全柔性条件是非常苛刻的。与不考虑产品结构约束下的完全柔性概念 (Jordan and Graves, 1995) 不同, 如果一条装配线能生产产品集  $\Gamma$  中的所有产品, 但是在某些产品组合下该装配线的能力不能完全被利用, 则不可以说其具有完全柔性。

### 2.3 制造系统的过程柔性测度

对于上文所描述的制造系统, PF/S 定义为装配线的能力在不同产品类型之间可转移的程度。为了更清晰的描述能力转移过程, 仍以图 2.1 中的制造系统为例。如果三种产品类型的需求都是确定的且都等于 50 单位, 那么该制造系统可以通过指派装配线 I, II 和 III 分别生产产品类型  $n_1$ ,  $n_2$  和  $n_3$  来满足所有产品需求。如果市场需求发生波动, 产品类型  $n_3$  的需求从 50 单位大幅上升而产品类型  $n_1$  的需求从 50 单位大幅下跌, 那么该系统需要将能力尽可能的从生产产品类型  $n_1$  转移到生产产品类型  $n_3$ 。能力转移的过程可以通过两条不同路径来完成, 这两条路径由系统中装配线的能力结构决定, 即  $(n_1) \rightarrow \text{I} \rightarrow (n_2) \rightarrow \text{II} \rightarrow (n_3)$  和  $(n_1) \rightarrow \text{III} \rightarrow (n_3)$ , 如图 2.2 所示。

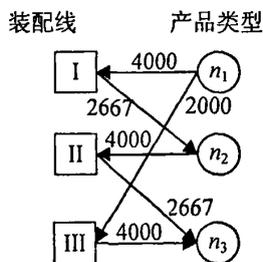


图 2.2 从产品类型  $n_1$  到  $n_3$  的能力转移过程示例

在图 2.2 中, 矩形表示装配线, 圆形表示产品类型。连接一条装配线和一种产品类型的弧表示这条装配线能生产这种产品类型, 弧上的数字表示这条弧的权重。从图 2.2 可以看出, 从这两条路径上可以转移的最大能力分别为 2667 和 2000

单位（零部件单位）。所以，从产品类型  $n_1$  到  $n_3$  可转移的最大总能力为 4667（2667+2000）单位。

一般的，能力从一种产品类型的生产转移到另一种产品类型的生产，转移的能力是在连接这两种产品类型的路径上传输的。在一条路径上可以传输的最大能力等于构成这条路径的所有弧的权重中的最小者。如果在一个制造系统中，连接产品类型  $n$  和  $t$  ( $n, t \in \{1, 2, \dots, N\}$ ,  $n \neq t$ ) 的非重复路径有  $k$  条，那么从生产产品类型  $n$  到生产产品类型  $t$  能够转移的最大能力就等于这  $k$  条路径上的最小权重的总和。

为了描述制造系统能力可转移的程度，定义“BPF”矩阵（Process Flexibility matrix under BOM constraints，简称 BPF 矩阵）。

定义 3 给定产品集合  $\Gamma$  的 BOM 约束  $\Gamma = \{(s_{n1}, s_{n2}, \dots, s_{np}) \mid n = 1, 2, \dots, N\}$ ，以及所有装配线结构  $\mathbf{m}_l = (m_l^i)_{E \times I}$  ( $l \in \{1, 2, \dots, L\}$ )，BPF 矩阵的非对角线元素， $b_m$ ，定义如下：

$$b_m = \sum_k \left( \min_{(r,l) \in A_m^k} w_{rl} \right), \quad n, t \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad n \neq t, \quad (2.2)$$

其中， $w_{rl}$  是连接装配线  $l$  和产品类型  $r$  的弧  $(r, l)$  的权重， $A_m^k$  是构成从产品类型  $n$  到  $t$  的第  $k$  条路径的所有弧的集合。

非对角线元素  $b_m$  可以解释为从产品类型  $n$  到产品类型  $t$  可转移的总能力。对任意的制造系统，给定产品集合  $\Gamma$  的 BOM 约束  $\Gamma$ ，非对角线元素  $b_m$  ( $n, t \in \{1, 2, \dots, N\}$ ,  $n \neq t$ ) 可以通过求解附录 2.A 中最大流问题 (A5) 确定。

由于能力从生产一种产品类型转移到自身没有物理意义，定义 BPF 矩阵的对角线元素  $b_{nn}$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) 为制造系统生产产品类型  $n$  的总能力。

定义 4 给定产品集合  $\Gamma$  的 BOM 约束  $\Gamma = \{(s_{n1}, s_{n2}, \dots, s_{np}) \mid n = 1, 2, \dots, N\}$ ，以及所有装配线结构  $\mathbf{m}_l = (m_l^i)_{E \times I}$  ( $l \in \{1, 2, \dots, L\}$ )，BPF 矩阵的对角线元素  $b_{nn}$ ，定义为

$$b_m = \sum_{l=1}^L w_{nl}, \quad n=1, \dots, N. \quad (2.3)$$

从以上定义，可以立即得到以下结论：

- (I) 如果 BPF 矩阵的一个非对角线元素增加，那么制造系统在不同产品类型之间的能力转移可转移程度会增加；
- (II) 如果 BPF 矩阵的一个对角线元素增加，那么制造系统在应对该对角线元素对应的产品类型的需求和能力变异性方面的能力会增加。

以上两个结论隐含的意思是，BPF 矩阵的各个元素值越大，制造系统的 PF/S 越大。

尽管 BPF 矩阵能够描述制造系统的过程柔性，但是通过直接比较两个矩阵来比较两个制造系统的过程柔性是不方便的。所以我们将 BPF 矩阵中的信息压缩成一个标量的形式。类似于 Iravani et al. (2005) 的做法，基于 BPF 矩阵，构建两个指数（简称 BPF 指数）：（1）平均值指数，和（2）特征值指数。

- （1）平均值指数通过计算 BPF 矩阵中所有元素的平均值得到。这个指数可以解释为在产品类型间可转移能力的平均值。这个指数对 BPF 矩阵中大元素的位置不敏感，所以另外构建特征值指数。
- （2）特征值指数通过计算 BPF 矩阵的最大特征值得到。这个指数没有实际的物理意义。对于给定产品结构的制造系统，从定义 3 和 4 可以看出，BPF 矩阵是一个实数阵，对称阵和非负阵，所以它的特征值也是非负的实数。可以表明，随着 BPF 矩阵中任意元素增加，该矩阵的最大特征值也会增加，而且特征值指数对矩阵中元素的位置和变化比较敏感。

对于 PF/S，也可以定义完全柔性。

**定义 5** 如果一个制造系统能生产产品集合  $\Gamma$  中的所有产品类型，且任意装配线的能力都能在不同产品类型之间完全转移，那么这个制造系统对于产品集合  $\Gamma$  就是完全柔性的。

进一步分析 PF// 和 PF/S 之间的关系，很明显，PF/S 达到完全柔性当且仅当每条装配线的 PF// 达到完全柔性。这样，不考虑产品结构下的完全柔性的概念

仅仅是考虑产品结构下 PF/S 完全柔性的一个特例，即假设所有弧的权重都相等。

以下的命题描述了一个制造系统的 PF/S 达到完全柔性的条件。

**命题 1** 给定产品集合  $\Gamma$  的 BOM 约束  $\Gamma = \{(s_{n1}, s_{n2}, \dots, s_{np}) \mid n=1, 2, \dots, N\}$ ，以及所有装配线结构  $\mathbf{m}_l = (m_l^e)_{E \times I}$  ( $l \in \{1, 2, \dots, L\}$ )，一个制造系统的 PF/S 达到完全柔性当且仅当

$$\frac{s_{np}}{\sum_{p=1}^P s_{np}} \sum_{e=1}^E m_l^e c^e \leq \sum_{e \in \{e_l, l^p, n_l\}} m_l^e c^e, \quad p=1, 2, \dots, P, \quad l=1, 2, \dots, L, \quad n=1, 2, \dots, N. \quad (2.4)$$

命题 1 的证明在附录 2.B 中给出。

不等式 (2.4) 中描述的 PF/S 达到完全柔性的条件可解释如下：不等式 (2.4) 的左边表示产品集合  $\Gamma$  的 BOM 约束所要求的 PF/S；不等式 (2.4) 的右边 (RHS) 表示制造系统的结构决定的可得的 PF/S。对于集合  $\Gamma$  中每一种产品类型，如果该产品类型所要求的 PF/S (不等式 (2.4) 的左边) 不会比制造系统可得的 PF/S (不等式 (2.4) 的右边) 大，则该制造系统对于产品集合  $\Gamma$  是具有 PF/S 完全柔性的。反过来也成立。

## 2.4 实例研究

本节通过实例研究验证所提出测度的有效性和适用性。在实例中，比较 BPF 指数 (包括平均值指数和特征值指数) 和改进的 J&G 指数，并采用期望短缺指数作为柔性测度的比较基准。

在实例研究中，首先随机生成一些制造系统，然后按照某个特定的柔性测度指标 (包括 BPF 指数和改进的 J&G 指数) 或者基准指标 (期望短缺指数) 对任意两个制造系统的柔性进行两两排序比较，接着计算每个柔性测度指标和基准指标一致的序对占所有序对的比例。把这个比较称为该测度指标的一致性比例。本章所提出的测度的有效性就通过计算它们的一致性比例并和改善的 J&G 指数的一致性相比较来验证。

为了表明提出的测度适用于真实的制造系统，我们进行一系列实例研究，假设一些典型的产品结构，不同的市场需求分布（正态分布或者泊松分布），不同的需求变异性，以及不同的能力变异性。

下面首先介绍期望短缺指数，然后简要解释它可以作为比较基准的原因。

### 2.4.1 期望短缺指数

期望短缺指数是通过计算一个制造系统的最小期望短缺来测度其柔性的。通常通过基于模拟实验的方法计算得到（Jordan and Graves, 1995; Graves and Tomlin, 2003; Hua et al., 2008）。之所以用基于模拟实验的方法是因为很难通过解析的方法求哪怕只有三家工厂、生产三种产品的制造系统的最小期望短缺。

记  $d_n$  和  $h_n$  分别为产品类型  $n$  ( $n=1, \dots, N$ ) 某一期的需求实现值和对应的短缺。

在计算一个制造系统的期望短缺时， $h_n$  通过求解下面的规划确定：

$$\min \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P s_{np} h_n \quad (2.5)$$

$$s.t. \sum_{l=1}^L \sum_p s_{np} q_{nl} + h_n \geq d_n, \quad n=1, \dots, N \quad (2.6)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P s_{np} q_{nl} \leq \sum_{e=1}^E m_l^e c^e, \quad l=1, \dots, L, \quad (2.7)$$

$$\sum_{n=1}^N s_{np} q_{nl} \leq \sum_{e \in \{e | f_e^p = 1\}} m_l^e c^e, \quad s_{np} \neq 0; p=1, \dots, P; l=1, \dots, L, \quad (2.8)$$

$$h_n \geq 0, \quad n=1, \dots, N. \quad (2.9)$$

目标函数 (2.5) 在满足需求约束 (2.6)、能力约束 (2.7) (2.8) 的前提下使得所有产品类型的总短缺最小化。

当机器的能力确定时，期望短缺可以作为一个制造系统的柔性测度。这个结论可以解释如下：对于由一些装配线组成的制造系统而言，因为需求的实现值围绕着均值浮动，制造系统需要将装配线的能力不断的重新安排生产不同的产品，具体的安排方法由模型 (2.5) 给出。在这个能力转移过程中，没有得到满足的

需求（或称为短缺）可以被看成是需求（产品组合）改变导致的对制造系统的惩罚（penalty of change, POC）（Chryssolouris and Lee, 1992）。POC 越小，柔性越高（Chryssolouris, 2006）。所以，这个指数能够作为评价其他柔性指数的基准。当生产能力不确定时，这个结论可以作类似的解释。

#### 2.4.2 改进的 J&G 指数

当不考虑产品结构约束时，若产品需求服从正态分布，Jordan and Graves（1995）定义了一个适用于一般的柔性制造系统的过程柔性测度（本章中称为“J&G 指数”）。该测度值是取以下概率值在任意产品子集  $M$  ( $M \subseteq I$ ) 上的最大值：

$$\Pi(M) = \Pr\{0 < a\} \Pr\{0 > b\}, \quad (2.10)$$

其中，

$$a = \sum_{n \in M} D_n - \sum_{l \in P(M)} C_l, \quad b = \sum_{n \in M} D_n - \sum_{l \in P(M)} C_l. \quad (2.11)$$

这里， $D_n$  表示产品类型  $n$  在一个计划期内的需求， $C_l$  表示装配线  $l$  的能力， $P(M)$  表示能够生产集合  $M$  中任意产品类型的装配线的集合。

在产品结构约束下，J&G 指数不再直接适用。当考虑产品结构约束时，装配线  $l$  的能力  $C_l$  对不同产品类型来说是不同的。在这种情况下，我们对  $C_l$  作如下的处理：对能够生产集合  $M$  中任意产品类型的装配线  $l$ ， $C_l$  取装配线  $l$  能够生产的集合  $M$  中各种产品类型的产量中的最大值；对于不能生产集合  $M$  中任意产品类型的装配线  $l$ ， $C_l$  取装配线  $l$  能够生产的集合  $M$  外任意产品类型的产量中的最大值。对  $C_l$  的处理用数学表达式表示如下：

$$(a) \text{ 对 } \forall l \in P(M), C_l' = \max_{n \in M} q_n; \quad (2.12)$$

$$(b) \text{ 对 } \forall l \notin P(M), C_l' = \max_{n \in M} q_n. \quad (2.13)$$

基于此处理，我们提出改进的 J&G 指数的定义，如下：

定义 6 给定产品集合  $\Gamma$  的 BOM 约束  $\Gamma = \{(s_{n1}, s_{n2}, \dots, s_{np}) \mid n = 1, 2, \dots, N\}$ , 以及所有装配线结构  $\mathbf{m}_l = (m_l^e)_{E \times I}$  ( $l \in \{1, 2, \dots, L\}$ ), 柔性制造系统的过程柔性可以通过如下概率在任意产品子集  $M$  上的最大值来测度:

$$\Pi'(M) = \Pr\{0 < a'\} \Pr\{0 > b'\}, \quad (2.14)$$

其中,  $a' = \sum_{n \in M} D_n - \sum_{l \in P(M)} C_l'$ ,  $b' = \sum_{n \in M} D_n - \sum_{l \in P(M)} C_l'$ ,  $C_l'$  在式 (2.12) 和 (2.13) 中定义。

从定义 6 可以看出, 如果  $\Pi'(M)$  很大, 就有机会通过增加柔性来使得有更多的能力可用于集合  $M$  中产品类型的生产, 从而降低期望短缺。如果  $\Pi'(M)$  很小, 再增加柔性来生产集合  $M$  中的产品类型基本上不会带来更多的好处。

### 2.4.3 实例设计

本节设计 24 组实例来验证提出的测度方法。每组实验中, 都有 50 个随机生成的制造系统, 确定的或随机的机器能力, 一组产品结构约束, 和一种特定的需求分布。

#### (1) 制造系统

在每组实验中, 随即生成 50 个制造系统。在每个系统中, 假设有四条装配线 ( $L=4$ ), 生产三种产品 ( $N=3$ )。每条装配线由 5 台机器 (或机器类型) 组成。每台机器的能力可能是确定的 ( $c^e=1000$ ), 或者随机且服从正态分布的 ( $c^e \sim N(1000, 100)$  或  $c^e \sim N(1000, 50)$ )。当机器能力随机时, 假设能力截取  $\mu \pm 2\sigma$  或者  $\mu \pm 4\sigma$  以使得一台机器在计划期内的能力总是在 800-1200 的范围内。之所以假设能力为随机时的情况, 是为了研究系统内部变化 (如物料短缺、旷工、机器故障等) 对提出的测度的适用性的影响。

在生成 50 个制造系统时, 设每种机器类型能够加工每种零部件类型的概率为 0.2, 此外还设定以下限制:

- (a) 每种机器类型能够加工至少一种零部件类型;

(b) 每条装配线能够生产至少一种产品类型。

我们通过这些随机生成的链来反映不同实际情形下可能出现的各种各样的制造系统。

## (2) BOM 约束和需求分布

假设三组典型的产品结构约束，以此来测度所提出测度对不同产品类型的适用性。三组 BOM 约束如表 2.3 所示。

表 2.3 三组典型的 BOM 结构

组	产品类型	零部件类型 $p_1$	零部件类型 $p_2$	零部件类型 $p_3$	零部件类型 $p_4$	零部件类型 $p_5$
S <sub>1</sub>	$n_1$	5	15	20	8	12
	$n_2$	10	7	15	3	15
	$n_3$	25	11	9	32	23
S <sub>2</sub>	$n_1$	12	25	23	0	0
	$n_2$	21	0	18	0	11
	$n_3$	35	0	0	27	38
S <sub>3</sub>	$n_1$	28	10	22	0	0
	$n_2$	12	7	28	0	3
	$n_3$	14	21	5	40	20

从表 2.3 可以看出：

- (a) 在第一组 BOM 约束 S<sub>1</sub> 中，每种产品类型都需要所有类型的零部件，而且每单位不同产品类型所需要的同一种零部件的数量相对比较均匀；
- (b) 在第二组 BOM 约束 S<sub>2</sub> 中，每种产品类型都需要一种公用的零部件类型和两种独特的零部件类型；
- (c) 在第三组 BOM 约束 S<sub>3</sub> 中，每种产品类型所需要的零部件种类数依次增加。

如表 2.3 所示，每单位各种产品类型所需要的零部件的总数量分别为 60，50 和 100 单位。

假设在每组 BOM 约束中，三种产品类型的需求  $D_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 是相互独立的

随机变量，均值分别为 100, 120 和 80 单位。 $D_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 可能服从泊松分布（需求的均值等于方差）或者正态分布（变异系数从 0.2 到 1 逐步变化）。假设正态分布的市场需求是因为改进的 J&G 指数在这种需求分布下容易计算，而在其他需求分布下很难应用。对于拥有较大的市场规模的产品类型来说，这种假设是合理的 (Jordan and Graves, 1995)。对于一个制造/装配系统，产品的需求通常假设是服从泊松分布的 (Alexopoulos et al., 2007b)。对于这种需求分布，我们仅计算本章提出的测度的一致性比例。

#### 2.4.4 结果

在每组实验中，我们用各个柔性测度指标评价任意两个制造系统的柔性，然后做排序比较得到序对。对于同一组中 50 个制造系统，根据每个柔性测度指标可做出 1225 次两两比较，得到 1225 个序对。计算期望短缺指数的步骤为：

- (1) 根据产品需求分布随机采样，得到需求实现值；
- (2) 如果能力随机，则根据能力分布随机采样，得到能力实现值；
- (3) 在给定需求实现值和能力实现值下，应用模型 (2.5)；
- (4) 在这组实现值下计算最小总短缺值。

这个程序重复执行（实验中取 1000 次），以此产生可靠的期望短缺估计值。

在 24 组实验中，前 15 组实验假设能力确定，需求服从正态分布。需求的变异系数（记为  $CV_{demand}$ ）从 0.2 变到 1，步长为 0.2。在这些假设下，计算 BPF 指数的一致性比例，并和改进的 J&G 指数比较。15 组实验的结果整理如表 2.4。

在表 2.4 中，一致性比例和不一致性比例分别用“C%”和“I%”表示。在每组实验中，一致性比例和不一致性比例的和常常小于 100%，这是因为还有一部分制造系统不能被特定的柔性测度区分。这部分制造系统的比例对于本章提出的 BPF 指数比较小，而对于改进的 J&G 指数非常大，特别是当需求的变异系数很小的时候。

表 2.4 当需求服从正态分布时 BPF 指数和改进的 J&amp;G 指数绩效比较

	$CV_{demand}$	BPF 特征值指数		BPF 平均值指数		改进的 J&G 指数	
		C%	I%	C%	I%	C%	I%
$S_1$	0.2	68.08	30.86	68.00	30.94	0.57	0
	0.4	68.48	31.52	67.42	32.58	51.35	27.82
	0.6	72.33	26.53	72.08	26.53	62.78	20.16
	0.8	71.43	27.76	71.43	27.76	59.02	15.18
	1	70.11	29.64	69.98	29.84	62.78	20.16
	<b>Average</b>	<b>70.09</b>	<b>29.26</b>	<b>69.78</b>	<b>29.53</b>	<b>47.30</b>	<b>16.66</b>
$S_2$	0.2	75.10	24.82	74.78	25.14	41.88	33.22
	0.4	70.86	29.14	71.10	28.90	55.51	42.64
	0.6	77.88	22.04	77.55	22.37	62.04	37.47
	0.8	84.24	15.76	84.33	15.67	72.24	27.35
	1	78.20	21.80	80.00	20.00	70.20	29.22
	<b>Average</b>	<b>77.26</b>	<b>22.71</b>	<b>77.55</b>	<b>22.42</b>	<b>60.37</b>	<b>33.98</b>
$S_3$	0.2	87.18	12.41	88.08	11.51	0.49	0
	0.4	87.27	12.73	88.65	11.35	59.35	33.80
	0.6	88.00	12.00	88.24	11.76	65.88	31.76
	0.8	88.57	11.43	89.55	10.45	68.98	28.24
	1	87.92	12.00	88.73	11.18	72.82	24.82
	<b>Average</b>	<b>87.79</b>	<b>12.11</b>	<b>88.65</b>	<b>11.25</b>	<b>53.50</b>	<b>23.72</b>

从表 2.4 可以看出, 和改进的 J&G 指数相比, BPF 指数在考虑产品结构约束时测度制造系统的过程柔性方面表现要好得多。市场需求的变异性对 BPF 指数绩效的影响很小, 但是对改进的 J&G 指数绩效的影响很大。BPF 指数在 BOM 约束  $S_2$  和  $S_3$  下的表现要比在 BOM 约束  $S_1$  下稍好。这是合理的, 因为当不同产品的 BOM 约束差异很小 (如 BOM 约束  $S_1$ ) 时, 不同的产品组合要求的能力转移也很小。在这种情形下, 用最小期望短缺描述的过程柔性带来的收益也很小。另外, 可以发现 BPF 特征值指数和 BPF 平均值指数在测度制造系统的过程柔性

方面几乎具有等同的效果。

后 9 组实验中, 假设需求服从泊松分布, 能力是确定的 ( $CV_{capacity}=0$ ) 或者随机且服从正态分布 ( $CV_{capacity}=0.05$  or  $0.1$ )。计算 BPF 指数的一致性比例, 结果整理如表 2.5 所示。

表 2.5 当需求服从泊松分布时 BPF 指数的绩效

	BPF 特征值指数						BPF 平均值指数					
	$CV_{capacity}=0$		$CV_{capacity}=0.05$		$CV_{capacity}=0.1$		$CV_{capacity}=0$		$CV_{capacity}=0.05$		$CV_{capacity}=0.1$	
	C%	I%	C%	I%	C%	I%	C%	I%	C%	I%	C%	I%
S <sub>1</sub>	64.08	33.55	61.80	37.80	59.84	39.18	63.76	33.88	62.20	37.39	59.84	39.27
S <sub>2</sub>	82.37	17.63	70.53	29.39	69.14	30.86	82.94	17.06	70.86	29.06	70.37	29.63
S <sub>3</sub>	88.65	10.94	87.84	12.16	87.10	12.90	90.20	9.39	88.33	11.67	86.78	13.22

从表 2.5 可以看出, 源于物料短缺、旷工或机器故障导致的能力的不确定性对本章提出的 BPF 指数的绩效稍微有一点负面的影响。从表 2.4 和表 2.5 的结果可以得出如下结论: BPF 指数对于真实的制造系统是有效的且广泛适用的。

## 2.5 本章小结

对于由多条装配线组成的制造系统, 本章提出了一种在产品结构约束下测度其过程柔性的方法。在产品结构约束下, 一条装配线的过程柔性 (即 PF/I) 和一个制造系统的过程柔性 (即 PF/S) 是不同的。所以, 基于过程柔性可以用能力在不同的零部件/产品类型之间可转移程度来衡量的思想, 本章分别对 PF/I 和 PF/S 提出了测度方法。本章还分析了 PF/I 和 PF/S 之间的关系。实例研究的结果显示提出的测度方法在预测制造系统面临外部和/或内部变化时其绩效的好坏方面是很有效的。市场需求的变异性和能力的不确定性对提出的测度的绩效几乎没有影响。本章提出的 BPF 特征值指数和 BPF 平均值指数在测度制造系统的 PF/S 方面几乎是等效的。由于所提出的测度综合了制造系统自身的多功能性特征和多种产品的 BOM 约束的影响, 它们为进一步分析过程柔性的结构特性以及提出柔

性改善的指导规则提供了潜在的可能性。

## 附录 2

附录 2.A 求解 BPF 矩阵非对角线元素  $b_{nl}$  的方法

我们采用两步的方法来求解 BPF 矩阵非对角线元素  $b_{nl}$ 。第一步是求解一个线性规划得到每条装配线能生产的每种产品类型的最大产量  $q_{nl}$  ( $n=1,2,\dots,N$ ;  $l=1,2,\dots,L$ )。第二步是求解一个最大流问题得到 BPF 矩阵的非对角线元素。

每条装配线能生产的每种产品类型的最大产量  $q_{nl}$  可以通过求解下述规划 (A1) 得到:

$$\max q_{nl} \quad (\text{A1})$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{p=1}^P s_{np} q_{nl} \leq \sum_{e=1}^E m_e^f c_e^f, \quad (\text{A2})$$

$$s_{np} q_{nl} \leq \sum_{e \in \{e | f_e^f = 1\}} m_e^f c_e^f, \quad s_{np} \neq 0; p=1,\dots,P. \quad (\text{A3})$$

在不等式 (A2) 中, 显然机器类型  $e$  的柔性应该满足以下条件:

$$f_e^f s_{e\bar{p}} > 0, \quad \exists \bar{p} \in \{1,2,\dots,P\}. \quad (\text{A4})$$

当求得  $q_{nl}$  以后, 连接装配线  $l$  和产品类型  $n$  的弧的权重可以计算为

$$w_{nl} = q_{nl} \sum_{p=1}^P s_{np} \quad (n=1,2,\dots,N; l=1,2,\dots,L).$$

记  $B$  为所有权重不为零的弧的集合。记  $x_{ij}$  为从节点  $i$  (装配线或产品类型) 到节点  $j$  (产品类型或装配线) 转移的能力 (零部件单位)。不失一般性, 假设节点  $i$  为产品类型, 节点  $j$  为装配线。BPF 矩阵的非对角线元素  $b_{nt}$  ( $n,t=1,2,\dots,N$ ,  $n \neq t$ ) 由下面的最大流问题确定:

$$\begin{aligned}
& \max b_n \\
s.t. & \sum_{\{j|(i,j) \in B\}} x_{ij} - \sum_{\{j|(j,i) \in B\}} x_{ji} = 0, \text{ for all } i \neq n, t \\
& \sum_{\{j|(n,j) \in B\}} x_{nj} - \sum_{\{j|(j,n) \in B\}} x_{jn} = b_n \\
& \sum_{\{j|(i,j) \in B\}} x_{ij} - \sum_{\{j|(j,i) \in B\}} x_{ji} = -b_n \\
& 0 \leq x_{ij} \leq w_{ij}, 0 \leq x_{ji} \leq w_{ji}, \text{ for all } (i,j) \in B
\end{aligned} \tag{A5}$$

## 附录 2.B 命题 1 的证明

先证充分条件。

对于  $\forall l \in \{1, 2, \dots, L\}$ ,  $\forall n \in \{1, 2, \dots, N\}$ , 如果装配线  $l$  的结构满足

$$\frac{S_{np}}{P} \sum_{e=1}^E m_i^e c^e \leq \sum_{e \in \{e|f_i^e=1\}} m_i^e c^e, \quad p=1, 2, \dots, P, \tag{B1}$$

那么很明显, 对于  $\forall p \in \{1, 2, \dots, P\}$ , 装配线  $l$  能加工的产品类型  $n$  中零部件类型  $p$

的最大能力为  $\frac{S_{np}}{P} \sum_{e=1}^E m_i^e c^e$ , 且生产产品类型  $n$  的最大总能力为

$$\sum_{p=1}^P \left( \frac{S_{np}}{P} \sum_{e=1}^E m_i^e c^e \right) = \sum_{e=1}^E m_i^e c^e. \text{ 这就意味着装配线 } l \text{ 对于集合 } \Gamma \text{ 中任意产品类型 } n$$

都是完全柔性的。根据定义 5, 这个制造系统对产品集合  $\Gamma$  具有完全柔性。

再证必要条件。

必要条件可用归谬法证明。假设不等式 (B1) 不满足, 即存在  $l' \in \{1, 2, \dots, L\}$ ,

$n' \in \{1, 2, \dots, N\}$  和  $p' \in \{1, 2, \dots, P\}$ , 满足

$$\frac{S_{n'p'}}{P} \sum_{e=1}^E m_i^e c^e > \sum_{e \in \{e|f_i^e=1\}} m_i^e c^e, \tag{B2}$$

该制造系统仍然对产品集合  $\Gamma$  具有完全柔性。

回顾确定  $q_{n'l}$  的模型 (A1)。根据 (A3)，有

$$s_{n'p} q_{n'l} \leq \sum_{e \in \{e | f_e^p = 1\}} m_r^e c^e. \quad (\text{B3})$$

将不等式 (B2) 和 (B3) 合并，得到

$$s_{n'p} q_{n'l} < \frac{s_{n'p'}}{\sum_{p=1}^P s_{n'p}} \sum_{e=1}^E m_r^e c^e. \quad (\text{B4})$$

在不等式 (B4) 两边各乘以  $\frac{\sum_{p=1}^P s_{n'p}}{s_{n'p'}}$ ，得到

$$w_{n'l} < \sum_{e=1}^E m_r^e c^e. \quad (\text{B5})$$

不等式 (B5) 意味着制造系统对产品集合  $\Gamma$  不具有完全柔性。  
得证。

### 第三章 考虑产品结构约束的过程柔性改善方法

本章在第二章的基础上，对两个层次的过程柔性（装配线层次和系统层次）分别分析其结构特性，并提出过程柔性改善的指导规则。结构特性是指关于何种装配线和系统结构具有更高的柔性的特征。结构特性的分析以过程柔性的测度方法为基础，指导规则以对结构特性的分析为基础。实例研究的结果显示结构特性和指导规则对于真实的制造系统是有效而且广泛适用的。本章的主要内容安排如下：基于第二章提出的过程柔性测度，3.1 节分析了装配线层次的过程柔性的结构特性和柔性改善方法；3.2 节分析了系统层次的过程柔性的结构特性和柔性改善方法；3.3 节设计了模拟试验，对本章分析结构特性的主要结论以及提出的柔性改善规则，验证其有效性和适用性。

#### 3.1 装配线过程柔性的结构特性及改善方法

沿用前一章的标记。在测度考虑产品集  $\Gamma = \{(s_{n1}, s_{n2}, \dots, s_{np}) | n=1, 2, \dots, N\}$  的结构约束的过程柔性时，有两个量在决定制造系统的柔性大小时起着很重要的作用：

$$\frac{s_{np}}{\sum_{p=1}^P s_{np}} \sum_{e=1}^E m_i^e c^e \text{ 和 } \sum_{e \in \{e | I_i^e = 1\}} m_i^e c^e \quad (\text{Hua and He, 2008a}).$$

$\Gamma$  中产品类型的结构约束决定要求的柔性，而后一个量表示由制造系统的能力结构决定的可得的柔性。如果前者不必后者大，那么这个制造系统就可以说是具有完全柔性的，即它能够生产集合  $\Gamma$  中所有产品类型，并且任意一条装配线的能力都能在不同产品类型之间实现完全转移。

为了研究有产品结构约束的 PF/l 的结构特性，首先考虑一种特殊情况，即制造系统中只有一条装配线  $l$  ( $l \in \{1, 2, \dots, L\}$ )，生产一种产品类型  $n$  ( $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ )。在这种情形下，以上的分析意味着如果要求的柔性比可得的柔性大的话，装配线  $l$  在生产产品类型  $n$  时存在着一定程度的结构偏离。定义装配线  $l$  加工产品类型  $n$

的零部件类型  $p$  时的结构偏离 ( $ASD'_{np}$ ) 如下:

$$ASD'_{np} = \left( \frac{s_{np}}{P} \sum_{e=1}^E m_i^e c^e - \sum_{e \in \{e|f_i^e=1\}} m_i^e c^e \right)^+, n=1, \dots, N, p=1, \dots, P, l=1, \dots, L. \quad (3.1)$$

在 (3.1) 式中,  $(x)^+ = \max \{x, 0\}$ 。  $ASD'_{np}$  有如下的性质:

**命题 1** 给定产品集合  $\Gamma$  的 BOM 约束  $\Gamma = \{(s_{n1}, s_{n2}, \dots, s_{nP}) | n=1, 2, \dots, N\}$ , 装配线  $l$  ( $l \in \{1, 2, \dots, L\}$ ) 生产产品类型  $n$  的 PF/l 随着  $ASD'_{np}$  ( $n=1, 2, \dots, N; p=1, 2, \dots, P$ ) 的降低而非减。

命题 1 的证明在附录 3.A 中给出。

命题 1 意味着, 要提高装配线  $l$  生产产品类型  $n$  的 PF/l, 需要降低  $ASD'_{np}$  ( $n=1, 2, \dots, N; p=1, 2, \dots, P$ )。根据式 (3.1) 中  $ASD'_{np}$  的定义,  $ASD'_{np}$  的降低可以通过在零部件类型  $p$  和装配线中的机器之间增加链接来实现。

当对  $\forall n \in \{1, 2, \dots, N\}$  存在多种零部件类型使得  $ASD'_{np} > 0$  时, 从命题 1 的证明可以看出, 只有降低一种特定的零部件的  $ASD'_{np}$  才能有效地改善装配线的 PF/l。我们有如下推论:

**推论 1** 给定装配线  $l$  的结构  $\mathbf{m}_l = (m_i^e)_{E \times l}$  ( $l \in \{1, 2, \dots, L\}$ ), 如果产品类型  $n$  ( $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ ) 的两种零部件  $p'_n$  和  $p''_n$  ( $p'_n, p''_n \in \{1, 2, \dots, P\}, p'_n \neq p''_n$ ) 满足以下的条件:  $ASD'_{np'_n} > 0, ASD'_{np''_n} > 0, \sum_{e \in \{e|f_i^e=1\}} m_i^e c^e / s_{np'_n} > \sum_{e \in \{e|f_i^e=1\}} m_i^e c^e / s_{np''_n}$ , 那么装配线  $l$  生产产品类型  $n$  的 PF/l 不会随着  $ASD'_{np'_n}$  的降低而提高。

记  $p_n = \arg \left( \min_p \sum_{e \in \{e|f_i^e=1\}} m_i^e c^e / s_{np} \right)$ 。根据推论 1, 如果  $ASD'_{np_n} > 0$ , 装配线  $l$  生产产

产品类型  $n$  的 PF//l 可以通过  $ASD'_{np}$  的降低而得到改善。零部件类型  $p_n$  称为产品类型  $n$  的瓶颈零部件（记为 BNPT）。

当存在多种产品时，类似的可以辨别出产品集合  $\Gamma$  的 BNPT，如下：

$$p^* = \arg \left( \min_{n,p} \sum_{e \in \{e|I_e^p=1\}} m_i^e c^e / s_{np} \right). \quad (3.2)$$

为了提高装配线  $l$  生产集合  $\Gamma$  中产品类型的 PF//l，命题 1 说明应该降低  $ASD'_{np}$  ( $n=1,2,\dots,N$ ;  $p=1,2,\dots,P$ )；推论 1 进一步指出因该提高该装配线生产 BNPT 的能力。现在我们总结提高 PF//l 的指导规则如下：

在产品结构约束下提高 PF//l 的指导规则：

- (1) 找出每种产品和产品集合  $\Gamma$  的 BNPT；
- (2) 提高装配线上不能生产 BNPT 的机器的柔性，在该机器和 BNPT 之间增加链，使其能够生产 BNPT。

以上“提高 PF//l 的指导规则”实质上是一种瓶颈集中原则，可以循环的应用来提高装配线的过程柔性。当任意产品类型都没有 BNPT 时，这条装配线就已经是完全柔性了。这是很显然的，因为这时对于  $n=1,2,\dots,N$  和  $p=1,2,\dots,P$ ，都有  $ASD'_{np} = 0$ 。

### 3.2 制造系统过程柔性的结构特性及改善方法

为了研究产品结构约束下的 PF/S 的结构特性，首先考虑一种有特殊结构（即能力可转移结构）的制造系统。

一个制造系统如果满足以下条件，则被定义为具有能力可转移结构 (capacity-transferable structure, 简记为 CTS)：

$$b_n = \min(b_m, b_t), \quad \forall n, t \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad n \neq t. \quad (3.3)$$

具有能力可转移结构的制造系统称为 CTS 系统。CTS 系统的条件要求在任意两种产品类型之间可转移的最大能力为生产这两种产品类型的最大能力中的

较小值。这是一个很严格的条件，只有一些特殊的结构才具有这个条件，如 PF/S 完全柔性结构 (Hua and He, 2008a)，和所有弧权重相等的  $D$ -链式结构 (Hopp et al., 2004)。研究 CTS 系统的原因是它对于 PF/S 具有很好的结构特性，能够启发我们在产品结构约束下找出 PF/S 的一般的结构特性。

考虑两个 CTS 系统  $S_1$  和  $S_2$ 。记  $b_m^S$  ( $S = S_1$  or  $S_2$ ;  $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ ) 为 CTS 系统  $S$  的 BPF 矩阵的对角线元素；记  $b_{nt}^S$  ( $S = S_1$  or  $S_2$ ;  $n, t \in \{1, 2, \dots, N\}$ ;  $n \neq t$ ) 为 CTS 系统  $S$  的 BPF 矩阵的非对角线元素。有如下的引理：

引理 1 在两个 CTS 系统  $S_1$  和  $S_2$  中，如果对于  $\forall n, t \in \{1, 2, \dots, N\}$ ,  $n \neq t$ , 有  $b_m^{S_1} = b_n^{S_1}$ ,

$b_{mm}^{S_2} \neq b_{nn}^{S_2}$ ,  $\sum_{n=1}^N b_{mm}^{S_1} = \sum_{n=1}^N b_{nn}^{S_2}$ , 那么系统  $S_1$  的 PF/S 高于系统  $S_2$  的 PF/S。

引理 1 的证明在附录 3.B 中给出。

由于一个制造系统所有弧的总权重是由能力和柔性（链数）投资决定的，为了反映系统结构对 PF/S 的影响，下面比较具有相同总权重的不同制造系统的 PF/S。

引理 1 表示，对于一个 CTS 系统，BPF 矩阵的对角线元素之间的差异大小在决定系统的 PF/S 大小时起着很重要的作用。所以定义

$$\delta = \sum_{n=1}^{N-1} \left( \sum_{t=n+1}^N |b_{nn} - b_{tt}| \right) \quad (3.4)$$

为 BPF 矩阵所有对角线元素的累积绝对差异。这个量描述了生产产品集合  $\Gamma$  中各种产品类型的总能力的分散程度。这样，我们有了命题 2。

命题 2 对于所有弧的总权重固定的 CTS 系统，如果  $\delta$  减少，则 PF/S 增加。

命题 2 的证明在附录 3.C 中给出。

命题 2 意味着，CTS 系统的 PF/S 可以通过减少生产产品集合  $\Gamma$  中各种产品类型的总能力的分散程度来得到提高。当 BPF 矩阵的所有对角线元素相等（即  $\delta=0$ ）时 PF/S 达到最大值。

对于不具有 CTS 的制造系统,很难从解析的角度证明这个结论。然而,在大量的实例研究中,我们观察到这个性质对于不具有 CTS 的制造系统来说,从统计意义上也是成立的。这个观察结论将通过下一节的统计检验得到证实。

根据这个观察结论,制造系统的 PF/S 能够通过使得生产每种产品类型的总能力尽量相等来得到提高,这可以通过产品和装配线之间的指派关系实现。

此外,BPF 矩阵的定义暗示着,改善制造系统的 PF/S 可以通过增加 BPF 矩阵的对角线和非对角线元素来完成。这又可以通过在加权网络结构上任意两种产品类型之间增加连通路程,在每条路径上增加可转移的能力来实现。Iravani et al., (2005) 已经证明,给定弧的总数, $D$ -链式结构能提供链接两种产品类型最多的路径数。给定一定数量的路径,直观上,如果构成每条路径的弧上的权重之间差异很小,那么在这条路径上就可以有更大比例的能力可被转移。而这又可以通过应用“在产品结构约束下提高 PF// 的指导规则”来实现。

基于以上的分析,我们总结在产品结构约束下提高 PF/S 的指导规则如下:

在产品结构约束下提高 PF/S 的指导规则:

- (1) 通过产品指派方法尽量使得跟每种产品类型相连的弧的总权重相等;
- (2) 通过应用“在产品结构约束下提高 PF// 的指导规则”尽量使得跟每条装配线相连的弧的总权重相等;
- (3) 尽量构成连接尽可能多的装配线和产品类型的回路。

以上“在产品结构约束下提高 PF/S 的指导规则”是具有普遍意义的,意思是它们不局限于特定的或典型的环境。通过应用这些指导规则,制造系统的管理者们能够在不需要太多计算量的前提下作出柔性改善的有效决策。

### 3.3 实例研究

在本节中,我们通过实例研究来验证过程柔性的结构特性以及柔性改善的指导规则的有效性和适用性。在实例研究中,类似于 Hua and He (2008a),也用期望短缺指数作为 PF/S 的基准指标。

给定三种产品类型的 BOM 约束,首先生成一些制造系统,然后对每个系统

计算所有弧的总权重和  $\delta$  值。接下来通过统计检验验证上一节中关于制造系统 PF/S 和  $\delta$  值之间关系的结论。柔性改善的指导规则的有效性也通过观察具有不同结构的制造系统的绩效来验证。

### 3.3.1 实例设计

假设一个制造系统用来满足三种产品类型的市场需求 ( $N=3$ )。三种产品类型的需求  $D_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 是相互独立的随机变量, 均值分别为 30, 50 和 70 单位。三种产品类型的 BOM 结构如表 3.1 所示。为了便于比较, 我们取每单位各种产品的所有零部件数量总和均为 80。

表 3.1 三种产品类型的 BOM 结构

产品类型	零部件类型 $p_1$	零部件类型 $p_2$	零部件类型 $p_3$	零部件类型 $p_4$	零部件类型 $p_5$
$n_1$	10	60	10	0	0
$n_2$	30	30	0	20	0
$n_3$	60	10	0	0	10

在给定产品结构约束下, 我们通过比较拥有相同总权重但不同  $\delta$  值的制造系统的绩效来验证得到的结论。为了进一步说明本章工作在真实制造系统中的适用性, 我们也在不同的市场需求分布 (正态分布或泊松分布), 不同的需求变异性, 以及不同的能力变异性下进行上述比较。

为了使得不同的制造系统可比较, 我们利用九条装配线构造不同的制造系统。首先, 生成九条装配线, 每条都由从 12 种机器类型中选出的四种机器类型组成; 然后从九条装配线中任选三条构造一个制造系统 ( $L=3$ )。九条装配线的结构以及其中机器类型的柔性结构如图 3.1 所示。假设每种机器类型加工任意一种它能加工的零部件需要一单位时间。每台机器的能力可能是确定的 ( $c^e=1000$ ) 或者随机的且服从正态分布 ( $c^e \sim N(1000, 100)$  或  $c^e \sim N(1000, 50)$ )。当机器能力随机时, 假设能力截取  $\mu \pm 2\sigma$  或  $\mu \pm 4\sigma$ , 以使得一台机器在计划期内的能力

总在 800-1200 的范围内。给定每台机器的平均能力，九条装配线能够生产的每种产品类型的最大产量（产品单位）可以计算出来，列于表 3.2。

表 3.2 每条装配线能够生产的每种产品类型的最大产量

装配线	产品类型 $n_1$	产品类型 $n_2$	产品类型 $n_3$
I	50	33	0
II	0	50	33
III	33	0	50
IV	33	50	0
V	0	33	50
VI	50	0	33
VII	50	50	0
VIII	0	50	50
IX	50	0	50

为了保证每个系统能够生产所有的三种产品类型，我们从九条装配线的 84 种组合 ( $C_9^3 = 9! / [(9-3)!3!] = 84$ ) 中排除三种组合。这样，在后面的实验中只会计算并比较 81 个制造系统的绩效。根据 Hua and He (2008a) 提出的过程柔性测度方法和式 (3.4) 对  $\delta$  的定义，可以计算出每个制造系统的  $\delta$  值和所有弧的总权重（记为  $W$ ）。为了使得这些制造系统可比较，将 81 个系统基于  $W$  值分为四类。在同一个类中的制造系统有着相同的  $W$  值， $W$  值不同的制造系统被分到不同的类中。得到的四个类（类 1, 2, 3, 4）中分别有 20, 42, 18 和 1 个制造系统。

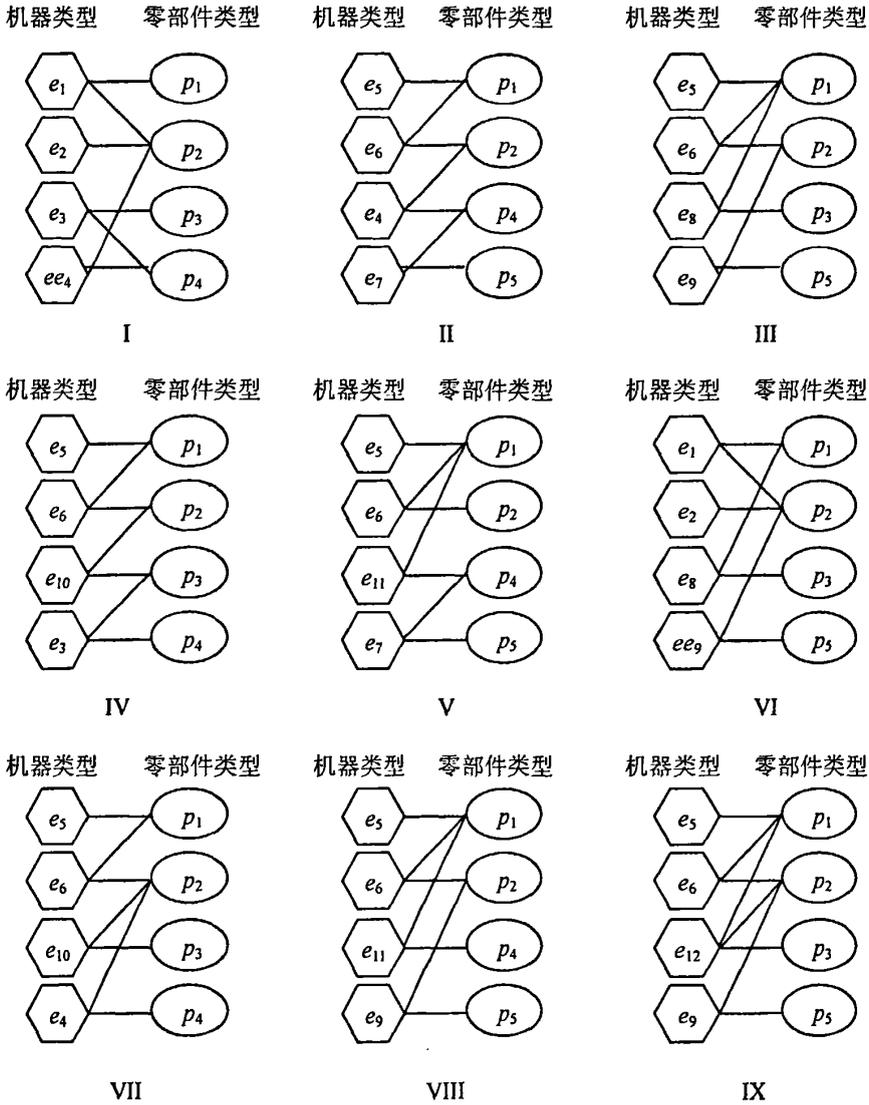


图 3.1 九条装配线的结构

### 3.3.2 结果

为了反映不同的外部和/或内部变化情景，我们进行八组实验。在这八组实验中，前五组实验假设能力确定 ( $CV_c=0$ )，需求服从正态分布。改变需求变异系数 ( $CV_d$ ) 从 0.2 变到 1，步长为 0.2。在每组实验中，计算 81 个系统的期望短

缺，然后将类 1, 2, 3 中的系统的绩效分别汇总于表 3.3-表 3.5。在计算每个制造系统的期望短缺指数时，采用 Hua and He (2008a)中描述的模拟程序。类 4 中的制造系统的绩效没有列出，因为类 4 中只有一个制造系统，无法比较。

正如表 3.3-表 3.5 所示，同一个类中的不同制造系统可能有相同的  $\delta$  值。所以，在每个类中，我们将具有相同  $\delta$  值的制造系统归为同一个组，只汇报每个组中各个制造系统的期望短缺指数的平均值。在表 3.3-表 3.5 中，斜体字表示具有链式结构的制造系统的绩效。

表 3.3 类 1 的绩效 ( $W=20000$ , 需求服从正态分布,  $CV_c=0$ )

组	$\delta$	系统数	期望短缺指数平均值				
			$CV_d=0.2$	$CV_d=0.4$	$CV_d=0.6$	$CV_d=0.8$	$CV_d=1.0$
Group 1	<i>0.00</i>	2	<i>433.2</i>	<i>893.73</i>	<i>1543.3</i>	<i>2569.95</i>	<i>3834.5</i>
Group 2	<i>5333.33</i>	6	<i>770.54</i>	<i>1144.58</i>	<i>1748.53</i>	<i>2769.6</i>	<i>4022.5</i>
Group 3	10666.67	6	803.97	1210.7	1835.93	2850.68	4083.03
Group 4	16000.00	6	1637.07	1866.55	2377.75	3335.35	4514.67

表 3.4 类 2 的绩效 ( $W=21333$ , 需求服从正态分布,  $CV_c=0$ )

组	$\delta$	系统数	期望短缺指数平均值				
			$CV_d=0.2$	$CV_d=0.4$	$CV_d=0.6$	$CV_d=0.8$	$CV_d=1.0$
Group 1	<i>2666.67</i>	9	<i>497.87</i>	<i>911.37</i>	<i>1541.38</i>	<i>2532.82</i>	<i>3802.01</i>
Group 2	<i>5333.33</i>	3	<i>584.02</i>	<i>984.56</i>	<i>1605.2</i>	<i>2581.27</i>	<i>3839.63</i>
Group 3	10666.67	6	788.83	1179.26	1802.92	2786.03	4020.17
Group 4	13333.33	12	803.58	1202.50	1817.54	2816.03	4048.56
Group 5	16000.00	6	1599.21	1804.52	2304.78	3222.23	4393.57
Group 6	18666.67	6	1637.04	1863.22	2369.45	3315.15	4492.27

表 3.5 类 3 的绩效 ( $W=22667$ , 需求服从正态分布,  $CV_c=0$ )

组	$\delta$	系统数	期望短缺指数平均值				
			$CV_d=0.2$	$CV_d=0.4$	$CV_d=0.6$	$CV_d=0.8$	$CV_d=1.0$
Group 1	2666.67	6	400.24	812.47	1449.35	2400.62	3676.52
Group 2	13333.33	6	787.23	1164.03	1776.27	2736.72	3973.63
Group 3	16000.00	6	803.19	1194.3	1799.15	2781.35	4014.05

在后三组实验中, 假设每种产品类型的需求服从泊松分布, 机器的能力是确定的 ( $CV_c=0$ ) 或者随机的 ( $CV_c=0.05$  或  $0.1$ )。在每组实验中, 同样的计算 81 个制造系统的期望短缺, 并将类 1, 2, 3 中的制造系统的绩效汇总于表 3.6-表 3.8。

表 3.6 类 1 的绩效 ( $W=20000$ , 需求服从泊松分布)

组	$\delta$	系统数	期望短缺指数平均值		
			$CV_c=0$	$CV_c=0.05$	$CV_c=0.1$
Group 1	0.00	2	385.00	407.61	469.75
Group 2	5333.33	6	791.12	799.24	834.92
Group 3	10666.67	6	800.60	813.07	874.36
Group 4	16000.00	6	1659.91	1661.45	1699.1

表 3.7 类 2 的绩效 ( $W=21333$ , 需求服从泊松分布)

组	$\delta$	系统数	期望短缺指数平均值		
			$CV_c=0$	$CV_c=0.05$	$CV_c=0.1$
Group 1	2666.67	9	473.84	479.19	538.75
Group 2	5333.33	3	574.05	581.51	638.01
Group 3	10666.67	6	790.05	800.34	877.75
Group 4	13333.33	12	800.13	814.7	871.19
Group 5	16000.00	6	1627.00	1637.93	1661.02
Group 6	18666.67	6	1659.91	1669.93	1697.72

表 3.8 类 3 的绩效 ( $W=22667$ , 需求服从泊松分布)

组	$\delta$	系统数	期望短缺指数平均值		
			$CV_c=0$	$CV_c=0.05$	$CV_c=0.1$
Group 1	2666.67	6	361.71	383.08	443.03
Group 2	13333.33	6	788.8	808.42	862.88
Group 3	16000.00	6	799.67	815.90	866.18

通过观察表 3.3-表 3.8 的结果, 我们有如下的结论:

- (1) 在所有弧的总权重相同 (即在同一个类中) 的情况下,  $\delta$  值较大的制造系统其期望短缺也较大, 或者说 PF/S 较低;
- (2) 在每个类中, 拥有链式结构的制造系统和其它制造系统相比总是有着更小的  $\delta$  值和更高的 PF/S;
- (3) 具有相同  $\delta$  值的制造系统中, 所有弧的总权重更大者有更小的期望短缺, 或更高的 PF/S。

为了进一步验证以上的这些结论, 下面做一些统计检验。定义两个随机变量  $X_1$  和  $X_2$ , 分别为一个制造系统对 (两个制造系统) 中相对较低  $\delta$  值和较高  $\delta$  值的制造系统的期望短缺。然后在同一个类的不同组中选择两个制造系统作为 ( $X_1, X_2$ ) 的样本观测值, 检验  $X_2$  是否在统计意义上大于  $X_1$ 。以上的抽样方法使得任一个样本中两个制造系统的所有弧的总权重都相等, 这样就使得这两个制造系统可比。

定义变量  $Y$  来表示  $X_2$  和  $X_1$  之间的差, 即  $Y = X_2 - X_1$ 。记  $Y$  的中位数为  $med$ 。

应用符号检验 (Dixon and Mood, 1946) 来验证  $X_1$  和  $X_2$  之间的关系。

原假设和备择假设如下:

$$H_0: med=0;$$

$$H_1: med \neq 0.$$

当需求服从泊松分布, 机器能力随机且服从正态分布 ( $CV_c=0.05$ ) 时, 我们从类 1, 2 和 3 中取样, 做假设检验。从三个类中取样的  $Y$  的观测值个数分别为 144, 711 和 108。 $Y$  的均值分别为 223.55, 578.69 和 288.55。 $Y$  的符号检验的频

率表如表 3.9 所示。

表 3.9  $Y$  的符号检验的频率表

	类 1 中的样本	类 2 中的样本	类 3 中的样本
Negative	42	201	21
Positive	102	510	87
Ties	0	0	0
Total	144	711	108

从类 1, 2 或 3 中取样执行的假设检验都在 0.01 的显著性水平下拒绝了原假设, 即  $x_2$  的均值显著大于  $x_1$  的均值, 无论是从哪个类中取样。我们也从其他组实验中或者具有不同参数的制造系统中取样并做了统计检验, 得到了相似的结果。由于 81 个制造系统中只有 1 个系统有 CTS (即类 4 中的那一个制造系统), 这些统计检验的结果显示前一节中提出的观察结论是成立的。也就是说, 命题 2 当制造系统不具有 CTS 时仍然在统计意义上是成立的。

### 3.4 本章小结

柔性测度方法提供了柔性改善方法的基础。基于综合了制造系统自身结构特征和产品结构约束影响的柔性测度方法 (Hua and He, 2008a), 本章从两个层次 (PF// 和 PF/S) 研究了使一个制造系统柔性提高的结构特性。对于 PF//, 我们发现加工瓶颈零部件的能力限制了装配线的柔性。对于 PF/S, 我们观察到并且验证了生产不同产品类型的总能力的分散程度在改善制造系统的过程柔性的过程中起着很重要的作用。基于结构特性提出的柔性改善指导规则能帮助管理者在不需要太多计算量的前提下做出有效的柔性投资决策。

## 附录 3

## 附录 3.A 命题 1 的证明

为了证明的方便, 现将 Hua and He (2008a)附录 (A) 中规划 (A1) 重写如下:

装配线  $l$  能生产产品类型  $n$  的最大产量 ( $q_{nl}$ ) 由下面的规划确定:

$$\max q_{nl} \quad (\text{A1})$$

$$s.t. \quad \sum_{p=1}^P s_{np} q_{nl} \leq \sum_{e=1}^E m_i^e c^e, \quad (\text{A2})$$

$$s_{np} q_{nl} \leq \sum_{e \in \{e | f_e^p = 1\}} m_i^e c^e, \quad s_{np} \neq 0; p = 1, \dots, P. \quad (\text{A3})$$

在不等式 (A2) 中, 显然机器类型  $e$  的柔性应该满足以下条件:

$$f_e^{\bar{p}} s_{n\bar{p}} > 0, \quad \exists \bar{p} \in \{1, 2, \dots, P\}. \quad (\text{A4})$$

根据  $ASD'_{np}$  的定义,  $ASD'_{np} > 0$  当且仅当以下条件满足:

$$\frac{s_{np}}{\sum_{p=1}^P s_{np}} \sum_{e=1}^E m_i^e c^e > \sum_{e \in \{e | f_e^{p_n} = 1\}} m_i^e c^e \quad (\text{A5})$$

当存在一个零部件类型  $p_n$  ( $p_n \in \{1, 2, \dots, P\}$ ) 满足不等式 (A5) 时, 根据  $ASD'_{np}$  的定义, 很明显  $ASD'_{np_n}$  的减小可以通过减少满足  $e \in \{e | f_e^{p_n} = 0\}$  条件的  $m_i^e$  的值, 或者通过柔性投资增加集合  $\{e | f_e^{p_n} = 1\}$  的大小来实现。由于前者可能会导致  $ASD'_{np}$  ( $\bar{p} = 1, 2, \dots, P; \bar{p} \neq p_n$ ) 的增加, 不能单独处理, 所以我们仅考虑后面的方法。因为  $ASD'_{np}$  的减少只有当至少存在一种零部件类型满足不等式 (A5) 时才可能实现, 下面分两种情形证明该命题。

**Case 1** 只有一种零部件类型满足不等式 (A5) 时

在这种情形下, 设存在零部件类型  $p_n$  ( $p_n \in \{1, 2, \dots, P\}$ ) 满足

$$\frac{S_{np_n}}{\sum_{p=1}^P S_{np}} \sum_{e=1}^E m_i^e c^e > \sum_{e \in \{e | f_e^{p_n} = 1\}} m_i^e c^e ; \quad (\text{A6})$$

对于  $\forall p \in \{1, 2, \dots, P\}$ ,  $p \neq p_n$ ,

$$\frac{S_{np}}{\sum_{p=1}^P S_{np}} \sum_{e=1}^E m_i^e c^e \leq \sum_{e \in \{e | f_e^p = 1\}} m_i^e c^e . \quad (\text{A7})$$

规划 (A1) 的约束 (A2) 可以重写为

$$s_{np_n} q_{nl} \leq \frac{S_{np_n}}{\sum_{p=1}^P S_{np}} \sum_{e=1}^E m_i^e c^e . \quad (\text{A8})$$

对于  $p = p_n$ , 根据规划 (A1) 的约束 (A3), 有

$$s_{np_n} q_{nl} \leq \sum_{e \in \{e | f_e^{p_n} = 1\}} m_i^e c^e . \quad (\text{A9})$$

不等式 (A6), (A8) 和 (A9) 暗示着规划 (A1) 的约束 (A2) 相对于  $p = p_n$  时的约束 (A3) 是冗余的。

对于  $\forall p \in \{1, 2, \dots, P\}$ ,  $p \neq p_n$ , 约束 (A2) 可以重写为

$$s_{np} q_{nl} \leq \frac{S_{np}}{\sum_{p=1}^P S_{np}} \sum_{e=1}^E m_i^e c^e , \quad (\text{A10})$$

不等式 (A7) 和 (A10) 暗示着, 在规划 (A1) 中, 对于  $\forall p \in \{1, 2, \dots, P\}$ ,  $p \neq p_n$  的约束 (A3) 相对于  $p = p_n$  时的约束 (A3) 是冗余的。

这样,

$$s_{np_n} q_{nl} \leq \sum_{e \in \{e | f_e^{p_n} = 1\}} m_i^e c^e \quad (\text{A11})$$

是最大化  $q_{nl}$  的规划中唯一的紧约束。如果集合  $\{e | f_e^{p_n} = 1\}$  的大小通过柔性投资增加了, 则不等式 (A11) 意味着  $q_{nl}$  以及  $\sum_{n=1}^N w_{nl} / (N \cdot \sum_{e=1}^E m_i^e c^e)$  都会增加。

## Case 2 多种零部件类型满足不等式 (A5)

不失一般性, 假设

$$\frac{S_{np}}{P} \sum_{e=1}^E m_i^e c^e > \sum_{e \in \{e|f_e^p=1\}} m_i^e c^e, \quad p \in \{1, 2, \dots, P_1\}, \quad (\text{A12})$$

和

$$\frac{S_{np}}{P} \sum_{e=1}^E m_i^e c^e \leq \sum_{e \in \{e|f_e^p=1\}} m_i^e c^e, \quad p \in \{P_1+1, \dots, P\}. \quad (\text{A13})$$

对于  $\forall p \in \{1, 2, \dots, P_1\}$ , 规划 (A1) 的约束 (A2) 可以重写为

$$s_{np} q_{ni} \leq \frac{S_{np}}{\sum_{p=1}^P S_{np}} \sum_{e=1}^E m_i^e c^e, \quad (\text{A14})$$

对于  $\forall p \in \{1, 2, \dots, P_1\}$ , 根据规划 (A1) 的约束 (A3), 有

$$s_{np} q_{ni} \leq \sum_{e \in \{e|f_e^p=1\}} m_i^e c^e \quad (\text{A15})$$

不等式 (A12), (A14) 和 (A15) 意味着规划 (A1) 的约束 (A2) 相对于  $p=1, 2, \dots, P_1$  时的约束 (A3) 是冗余的。

对于  $p \in \{P_1+1, \dots, P\}$ , 根据约束 (A2), 有

$$s_{np} q_{ni} \leq \frac{S_{np}}{\sum_{p=1}^P S_{np}} \sum_{e=1}^E m_i^e c^e, \quad (\text{A16})$$

不等式 (A13) 和 (A16) 意味着,  $p=1, 2, \dots, P_1$  时的约束 (A3) 相对于  $p=1, 2, \dots, P_1$  时的约束 (A3) 是冗余的。

对于  $p=1, 2, \dots, P_1$ , 约束 (A3) 可以重写为

$$q_{ni} \leq \sum_{e \in \{e|f_e^p=1\}} m_i^e c^e / s_{np}, \quad s_{np} \neq 0; \quad p=1, 2, \dots, P_1. \quad (\text{A17})$$

不等式 (A17) 意味着  $p^* = \arg(\min_p \sum_{e \in \{e|f_e^p=1\}} m_i^e c^e / s_{np})$  时的约束 (A3) 是最大化  $q_{ni}$  时唯一的紧约束。所以如果集合  $\{e|f_e^{p^*}=1\}$  的大小通过柔性投资增加了, 则  $q_{ni}$  以及  $\sum_{n=1}^N w_{ni} / (N \cdot \sum_{e=1}^E m_i^e c^e)$  都会增加; 如果生产除  $p^*$  外的其他零部件的柔性增加了, 则

$q_n$  以及  $\sum_{n=1}^N w_n / (N \cdot \sum_{e=1}^E m_e^c c^e)$  都不会改变。

总结起来, 装配线  $l (l \in \{1, 2, \dots, L\})$  对产品集合  $\Gamma$  的 PF/ $l$  随着  $ASD_{np}^l (n=1, 2, \dots, N; p=1, 2, \dots, P)$  的降低而非减。

得证。

### 附录 3.B 引理 1 的证明

由于系统  $S_1$  和  $S_2$  都生产相同种类的产品类型, 我们只需要比较两个系统的 BPF 矩阵的所有元素之和。

对于系统  $S_1$ , 因为  $b_{mm}^{S_1} = b_{tt}^{S_1} (\forall n, t \in \{1, 2, \dots, N\}; n \neq t)$ , 我们记  $b_{mm}^{S_1} (n=1, 2, \dots, N)$  为一个常量  $\bar{b}$ 。对于系统  $S_2$ , 不失一般性, 假设

$$b_{11}^{S_2} \leq b_{22}^{S_2} \leq \dots \leq b_{NN}^{S_2}。 \quad (B1)$$

在不等式 (B1) 中, 至少有一个严格不等式成立。

由于

$$\sum_{n=1}^N b_{mm}^{S_1} = \sum_{n=1}^N b_{mm}^{S_2}, \quad (B2)$$

我们只需要比较制造系统  $S_1$  和  $S_2$  的 BPF 矩阵的所有非对角线元素之和。

回顾关于 CTS 系统的定义,

$$b_{nn} = \min(b_{mm}, b_{tt}), \quad \forall n, t \in \{1, 2, \dots, N\}, n \neq t。 \quad (B3)$$

因为

$$b_{mm}^{S_1} = b_{tt}^{S_1} = \bar{b}, \quad \forall n, t \in \{1, 2, \dots, N\}, n \neq t, \quad (B4)$$

我们有

$$b_{nn}^{S_1} = \bar{b}, \quad \forall n, t \in \{1, 2, \dots, N\}, n \neq t, \quad (B5)$$

和

$$\bar{b} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N b_{mm}^{S_1}。 \quad (B6)$$

从式 (B2) 和 (B6), 我们有

$$\bar{b} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N b_m^{s_2}. \quad (\text{B7})$$

对于  $\forall j \in \{1, 2, \dots, N-1\}$ , 等式 (B7) 可以重写为

$$\bar{b} = \frac{1}{N} \left( \sum_{n=1}^j b_m^{s_2} + \sum_{n=j+1}^N b_m^{s_2} \right). \quad (\text{B8})$$

记  $\bar{b}' = \frac{1}{j} \sum_{n=1}^j b_m^{s_2}$ ,  $\bar{b}'' = \frac{1}{N-j} \sum_{n=j+1}^N b_m^{s_2}$ , 则等式 (B8) 可以重写为

$$\bar{b} = \lambda \bar{b}' + (1-\lambda) \bar{b}'', \quad (\text{B9})$$

其中,  $\lambda = \frac{j}{N} \in (0, 1)$ 。

由于  $b_{11}^{s_1} \leq b_{22}^{s_1} \leq \dots \leq b_{NN}^{s_1}$ , 且至少有一个严格不等式成立, 我们有  $\bar{b}' < \bar{b}''$ 。等式 (B9) 暗示着  $\bar{b} > \bar{b}'$ , 可以重写为

$$\bar{b} > \frac{1}{j} \sum_{n=1}^j b_m^{s_2}. \quad (\text{B10})$$

对于制造系统  $S_1$  和  $S_2$ , 将制造系统  $S_1$  的 BPF 矩阵的非对角线元素累加, 得到

$$2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{l=n+1}^N b_n^{s_1} = 2((N-1)\bar{b} + (N-2)\bar{b} + \dots + 2\bar{b} + \bar{b}), \quad (\text{B11})$$

将制造系统  $S_2$  的 BPF 矩阵的非对角线元素累加, 得到

$$2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{l=n+1}^N b_m^{s_2} = 2 \left( \sum_{n=1}^{N-1} b_m^{s_2} + \sum_{n=1}^{N-2} b_m^{s_2} + \dots + \sum_{n=1}^2 b_m^{s_2} + b_{11}^{s_2} \right). \quad (\text{B12})$$

不等式 (B10) 暗示着等式 (B11) 的右边每项都比等式 (B12) 右边对应的每项要大。所以, 对于产品集合  $\Gamma$ , 系统  $S_1$  的 BPF 平均值指数比系统  $S_2$  的 BPF 平均值指数高。

得证。

### 附录 3.C 命题 2 的证明

由于不同的 CTS 系统其所有弧的总权重相同, 我们有

$$\sum_{m=1}^N b_m = K, \quad (\text{C1})$$

其中,  $K$  是一个常数。

不失一般性, 我们假设

$$b_{11} \leq b_{22} \leq \dots \leq b_{NN}。 \quad (C2)$$

对于一个 CTS 系统, 记其 BPF 矩阵中所有非对角线元素之和为

$$Y = 2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{t=n+1}^N b_{nt}。 \quad (C3)$$

根据 CTS 系统的定义, 我们有

$$b_{nt} = \min(b_{nn}, b_{tt}), \quad \forall n, t \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad n \neq t。 \quad (C4)$$

不等式 (C2) 和等式 (C4) 隐含着

$$Y = 2 \left( \sum_{n=1}^{N-1} b_{nn} + \sum_{n=1}^{N-2} b_{nn} + \dots + \sum_{n=1}^2 b_{nn} + b_{11} \right)。 \quad (C5)$$

记

$$Z = 2 \left( b_{NN} + \sum_{n=N-1}^N b_{nn} + \dots + \sum_{n=3}^N b_{nn} + \sum_{n=2}^N b_{nn} \right), \quad (C6)$$

将 (C5) 和 (C6) 两边分别相加, 得到

$$Z + Y = 2(N-1)K。 \quad (C7)$$

回顾  $\delta$  的定义,

$$\delta = \sum_{n=1}^{N-1} \left( \sum_{t=n+1}^N (b_{tt} - b_{nn}) \right)。 \quad (C8)$$

将等式 (C6) 的两边分别减去等式 (C6) 的两边, 得到

$$Z - Y = 2\delta。 \quad (C9)$$

从等式 (C7) 和 (C9), 我们有

$$Y = (N-1)K - \delta。 \quad (C10)$$

在给定  $N$  和  $K$  下, 等式 (C10) 意味着,  $Y$  随着  $\delta$  值的减小而增加。由于两个系统的 BPF 矩阵的对角线元素之和为一个常数, 用 BPF 平均值指数测度的 CTS 系统对产品集合  $\Gamma$  的 PF/S 随着  $\delta$  值的减小而增加。

得证。

## 第四章 考虑产品需求特征的过程柔性测度及改善方法

对于在特定需求情景下的制造系统,本章研究需求特征对系统过程柔性的影响,并提出考虑需求特征(包括需求变异性和需求之间的相关性)的过程柔性测度方法。基于提出的过程柔性测度,本章还提出了通过增加一条链来改善一般制造系统的过程柔性的指导规则。本章内容安排如下:4.1节说明需求特征对过程柔性测度的影响;在此基础上,4.2节提出了考虑需求特征的过程柔性测度方法;4.3节提出在考虑产品需求特征时改善一般制造系统的过程柔性的指导规则;4.4节通过实例研究验证了本章提出的测度方法和柔性改善指导的有效性。

### 4.1 产品需求特征对过程柔性的影响

现有的关于柔性测度的文献反映了两种看待柔性的观点(Chryssolouris and Lee, 1992)。第一种观点认为柔性是系统自身固有的属性,与外在环境无关;第二种观点认为柔性是制造系统相对于外部环境的一种相对属性,测度时应该结合需求特征。在本章中,我们赞同第二种观点,认为产品需求的变异性和需求之间的相关性都会对柔性的大小造成影响。

很多文献表明,产品需求的变异性对能力决策和柔性投资有着重要的影响。产品需求变异性大,则需要较高的柔性,产品需求变异性小,则不需要太多的柔性(Goyal et al., 2006; Molleman and Slomp, 1999)。换句话说,产品需求的不同变异程度会对柔性的重要性产生影响。同时,产品需求之间的相关性也不能忽视。由于一家制造系统生产的各种产品的需求之间常常在一定程度正相关或者负相关(Netessine et al., 2002),不同产品需求之间的相关性在能力和柔性决策中也很重要。

本章考虑两种需求特征:不同产品的需求之间的相关性(用相关系数表示,简记为CC)和单种产品需求的变异性(用变异系数表示,简记为CV)。需求相关性对过程柔性的影响可以解释如下:当两种产品的需求正相关时,能力需要在

这两种产品的生产之间转移的概率很小 (Jordan and Graves, 1995), 除非两种产品的边际贡献 (marginal contributions) 相差很大 (Van Mieghem, 1998; Bish and Wang, 2004)。然而, 这种情形下发生能力转移的原因是金融方面的 (financial) 而不是风险集中, 需要综合产品的出售价格和产品的生产成本信息, 本文仅从通过能力转移应对需求变化的角度考虑需求相关性对柔性的影响。所以, 即使系统中这两种产品的生产柔性很高 (即有多种资源能够同时生产这两种产品), 生产这两种产品的柔性价值也得不到实现。另一方面, 如果两种产品的需求相互独立或者负相关, 能力需要在这两种产品的生产之间转移的概率相对较大。如果系统中能够在这两种产品的生产之间转移的能力很多, 那么系统在应对两种产品需求变化方面的柔性就很高。如果系统中能够在这两种产品的生产之间转移的能力很少, 很明显, 系统应对这两种产品需求变化方面的柔性就很低。需求相关性对过程柔性的影响分析和 Chrissolouris and Lee (1992) 提出的 POC 指标的原理类似。POC 指标隐含着, 系统的柔性不仅取决于系统应对变化的容易程度, 还取决于这种变化发生的概率。一句话, 两种产品需求之间的相关系数越大, 生产这两种产品的柔性能力对系统柔性的影响越小; 反之越大。在本章中, 相关系数越大指的是, 当需求正相关时相关系数趋向于 1, 当需求负相关时相关系数趋向于 0。

需求相关性对过程柔性的影响可以用下面的例子表示。如图 5.1 所示, 有两个制造系统 (I 和 II), 每个系统有四家工厂, 生产四种产品 (A, B, C 和 D)。工厂用矩形表示, 产品用圆形表示。连接一家工厂和一种产品的链表示这家工厂能够生产这种产品。注意到这两家工厂有着相同的总链数。

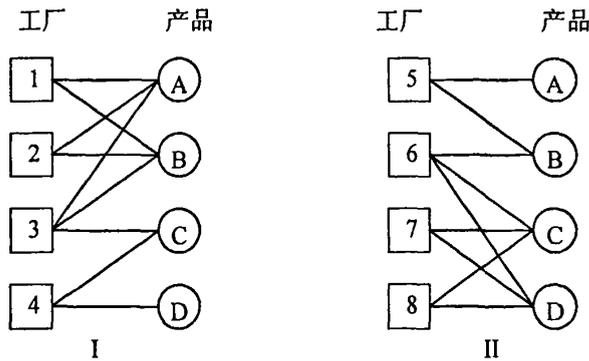


图 4.1 两个制造系统示例

假设每种产品的需求都服从正态分布  $N(100, 40^2)$ ，四种产品之间的相关系数矩阵（记为 P）如表 4.1 所示：

表 4.1 四种产品需求之间的相关系数

	A	B	C	D
A	1	0.8	0.2	-0.1
B	0.8	1	0.1	-0.2
C	0.2	0.1	1	-0.5
D	-0.1	-0.2	-0.5	1

从表 4.1 可以看出，产品 A 和 B 的需求强正相关，而产品 C 和 D 的需求强负相关，其他需求关系均为弱正（负）相关。假设两个系统中每家工厂的能力均为 100 单位，任意一家工厂生产任意一种其能生产的产品都需要一单位能力。在 1000 次模拟需求实现值下计算每个系统所有产品的需求总短缺的平均值分别为 40.3 和 37.6 单位。这就表示，在相同的需求环境下，系统 II 比系统 I 应对需求变化的能力更高，或者说系统 II 比系统 I 具有更高的柔性。这是因为，由于四种产品的需求之间具有一定的相关性，产品 A 和 B 之间能力需要发生转移以应对这两种产品需求的变化概率很小，而产品 C 和 D 之间能力需要发生转移以应对这两种产品需求的变化概率很大，系统 II 的结构使得在能力需要转移的概率很大的地方投资了较高的柔性（连接产品 C 和 D 的路径数很多），而系统 I 没有。

然而，不考虑产品需求特征的测度（如 Iravani et al. (2005) 提出的 SF 指数）表明两个系统的过程柔性相同（两个系统的 SF 平均值指数和特征值指数分别为 1.5625 和 6.9142）。

产品需求变异性对过程柔性的影响就相对简单些。如果一种产品需求的变异系数很小，如 0.1，那么这种产品的需求发生较大变化的概率很小，基本上不需要投资太多的柔性用于生产这种产品。换句话说，即使有多种资源能够生产这种产品，这些柔性资源也不会对系统的柔性有太多贡献。反之，如果一种产品需求的变异系数很大，如 2，那么这种产品的需求发生较大变化的概率很大，能力在

生产一种产品的多种资源之间发生转移的概率就大,就需要投资较多的柔性用于这种产品的生产。生产这种产品的资源的柔性大小在很大程度上决定了系统柔性的大小。总结起来,一种产品需求的变异系数越大,生产这种产品的柔性能力对系统柔性的影响就越大;反之越小。

## 4.2 考虑产品需求特征的过程柔性测度

由于产品需求特征对过程柔性有着重要的影响,在测度制造系统的过程柔性时应该考虑需求特征。根据前面的分析,本节提出一种考虑产品需求特征的过程柔性测度方法。

在 Iravani et al. (2005) 定义的 SF 矩阵的基础上,我们定义一个新的过程柔性矩阵。我们称之为 DSF 矩阵,因为它同时考虑了产品需求特征和系统结构。

考虑一个由  $L$  家工厂组成生产  $N$  种产品的制造系统。记  $CV_i$  ( $i=1, \dots, N$ ) 为产品  $i$  的需求变异系数,记  $\rho_{ij}$  ( $i=1, \dots, N; j=1, \dots, N$ ) 为产品  $i$  和  $j$  的需求之间的相关系数。

记  $m_{ij}$  ( $i=1, \dots, N; j=1, \dots, N$ ) 为 SF 矩阵中第  $i$  行第  $j$  列的元素,记  $f_{ij}$  ( $i=1, \dots, N; j=1, \dots, N$ ) 为 DSF 矩阵中对应位置的元素。对于 SF 矩阵和 DSF 矩阵中对应位置的元素,设

$$f_{ij} = m_{ij} x_{ij}, \quad i=1, \dots, N; \quad j=1, \dots, N. \quad (4.1)$$

等式 (4.1) 表示, DSF 矩阵中任一元素都是 SF 矩阵中对应位置的元素和系数矩阵  $X$  对应位置的元素的乘积。系数矩阵  $X$  的元素定义如下。

对于矩阵  $X$  的对角线元素,有

$$x_{ii} = \frac{CV_i}{\max_j CV_j}, \quad i=1, \dots, N. \quad (4.2)$$

等式 (4.2) 的意思是,  $x_{ii}$  取产品  $i$  需求的变异系数和所有产品的需求的变异系数中最大值的比。这个比例表示生产这种产品的资源的柔性程度在系统柔性中的重要性程度。

对于矩阵  $X$  的非对角线元素, 有

$$x_{ij} = \frac{1 - \rho_{ij}}{2}, \quad i=1, \dots, N, \quad j=1, \dots, N, \quad i \neq j. \quad (4.3)$$

等式 (4.3) 的意思是,  $x_{ij}$  设为产品  $i$  和  $j$  需求之间的相关系数的一个线性函数, 表示能力需要在这两种产品之间转移的概率大小。

对于系数矩阵  $X$  的每项元素, 都有  $0 \leq x_{ij} \leq 1$ 。

如此设置系数矩阵的理由如下。当两种产品的需求完全负相关时, 能力在两种产品之间转移的概率达到最大值, 即 1; 当两种产品的需求完全正相关时, 能力在两种产品之间转移的概率达到最小值, 即 0; 当两种产品的需求相互独立时, 能力在两种产品之间转移的概率取中间值, 即 0.5。如果一种产品的需求变异系数在所有产品中是最大的, 那么能力在能生产这种产品的所有资源之间发生转移的概率在所有产品中也是最大的; 如果一种产品的需求变异系数在所有产品中是最小的, 那么能力在能生产这种产品的所有资源之间发生转移的概率在所有产品中也是最小的。

基于 DSF 矩阵的指数 (平均值指数和特征值指数, 简称为 DSF 指数) 可以通过计算 DSF 矩阵所有元素的平均值和最大特征值来求得, 分别记为 DSF-mean 和 DSF-eigen。对于图 4.1 中所示的两个系统, 可以计算出系统 I 和系统 II 的 DSF-mean 指数分别为 0.94 和 1.11。系统 I 和系统 II 的 DSF-eigen 指数分别为 3.91 和 5.51。这两个指数都反映了系统 II 具有比系统 I 更高的过程柔性, 尽管两个系统有相同的总链数。可以看出, DSF 指数能够正确的区分图 4.1 中两个系统的过程柔性。

### 4.3 柔性投资指导规则

基于本章提出的过程柔性测度, 本节研究柔性投资的指导规则。具体的, 我们将要找出如果要在原有系统的结构上增加一条链 (即使得一家工厂能够生产之前其不能生产的产品), 这条链应该加在哪里。

由于对于任意的系统结构找出一般的柔性投资指导规则是很困难的, 所以我

们首先研究一种特殊的结构,即能力可转移结构(capacity-transferable structure II, 简记为 CTSII):

$$m_{ij} = \min\{m_{ii}, m_{jj}\}, \quad \forall i, j = 1, \dots, N; \quad i \neq j, \quad (4.4)$$

其中,  $m_{ij}$  ( $i=1, \dots, N; j=1, \dots, N$ ) 是系统的 SF 矩阵中第  $i$  行第  $j$  列的元素。

具有能力可转移结构的系统称为 CTSII 系统。CTSII 系统的条件是,任意两种产品之间能立刻转移的路径数等于分别跟两种产品相连的工厂数目中的较小值。这里定义的 CTSII 系统和第三章中定义的 CTS 系统略有差别,第三章中的定义包含了弧(在本章中称为链,因为不考虑机器和零部件层次的结构)的权重,而在此处没有包含。此处定义的 CTSII 系统在实践中很常见,包括但不局限于  $D$ -链式结构系统。

为了找出 CTSII 系统的下一条链应该加在哪里,我们对提出的过程柔性测度进行分析。基于 DSF 平均值指数,我们有以下的命题。

**命题 1** 在一个生产  $N$  种产品的 CTSII 系统中,记  $CV_i$  ( $i=1, \dots, N$ ) 为产品  $i$  的需求变异系数,记  $\rho_{ij}$  ( $i=1, \dots, N; j=1, \dots, N$ ) 为产品  $i$  和  $j$  的需求之间的相关系数。假设一个 CTSII 系统增加一条链后仍为 CTSII 系统。为了最大程度提高过程柔性,

下一条链应该连接产品  $i^*$ , 其中,  $i^* = \arg \left\{ \max_i \left\{ \frac{CV_i}{\max_j \{CV_j\}} + \sum_{j \in \arg\{m_{ij}, 2m_{ii}\}} \frac{1-\rho_{ij}}{2} \right\} \right\}$ 。

命题 1 的证明在附录 4.A 中给出。

命题 1 意味着,对于一个 CTSII 系统,若要通过增加一条链来最大程度的增加系统的过程柔性,这条链应该连接这样一种产品:目前能够生产它的工厂数最少,有着很大的需求变异系数,和其他产品的相关系数尽可能小。然而,命题 1 没有指出这条链应该和哪家工厂相连。从解析的角度很难找出最优的答案,然而,直观上,被选择的工厂应该具有以下的特点:目前能够生产的产品数最少,它现在能够生产的产品和该链连接的产品的需求之间的相关系数尽可能小。

对于一般的不具有 CTSII 的制造系统,我们提出以下的增加一条链的指导规

则：

- (1) 在系统能够生产的所有产品中，选择一种能够被最少工厂生产的产品。如果有多于一种产品被选中，则选择使得函数  $f(t)$  尽可能大的产品  $t$ ，其中

$$f(t) = \frac{CV_t}{\max_j \{CV_j\}} + \sum_{i \in \arg\{m_i > m_t\}} \frac{1 - \rho_{it}}{2}, \text{ 记该产品为 } t^*;$$

- (2) 在系统的所有工厂中，选择能生产产品最少而目前不能生产产品  $t^*$  的工厂。如果有多于一家工厂被选中，则选择其中使得其生产的所有产品和产品  $t^*$  的相关系数之和最小的工厂。记该工厂为  $k^*$ 。
- (3) 在工厂  $k^*$  和产品  $t^*$  之间增加一条链，即提高工厂  $k^*$  的柔性使得其也能生产产品  $t^*$ 。
- (4) 尽可能的构成链式结构。

#### 4.4 实例研究

本节通过实例研究来验证本章提出的柔性测度，以及据此提出的柔性改善指导规则的有效性和适用性。

##### 4.4.1 柔性测度有效性验证

为了验证提出的测度的有效性和适用性，本节通过实例研究比较 DSF 指数和 SF 指数在区分柔性大小方面的绩效。如同 Hua and He (2008a)，实例中仍选取最小期望短缺指数（简称为 SHF 指数）为比较基准。

在实例中，首先生成一定数量的制造系统，然后根据特定的柔性指标（DSF 指数，SF 指数）或者基准指标（SHF 指数）对任意的一对制造系统的过程柔性进行比较，然后计算根据每个指标得到的序对和基准指标得到的序对相一致的比例。我们称该比例为该指标的一致性比例。提出的测度的有效性通过计算其一致性比例，并和 SF 指数的一致性比例比较来验证。为了说明提出的测度对于真实制造系统的适用性，实例中还假设不同的需求特征，包括一系列典型的相关系数矩阵和具有不同变异系数的市场需求分布。

#### 4.4.1.1 实例设计

本节设计了 24 组实例来验证提出的测度的有效性和适用性。每组实例中，都有共用的 50 个随机生成的制造系统，确定的工厂能力，一个特定的需求相关系数矩阵和一种需求分布。

##### (1) 制造系统

在这 24 组实例研究中，随机生成 50 个制造系统。在每个制造系统中，假设有四家工厂 ( $L=4$ )，生产四种产品，即 A, B, C 和 D ( $N=4$ )。每家工厂的能力确定，设为每计划期内 100 单位。在生成 50 个制造系统时，使得每家工厂能够生产每种产品的概率（记为  $Pr$ ）均为 0.3，并且满足：

- (a) 每家工厂至少能够生产一种产品；
- (b) 每种产品能够被至少一家工厂生产。

##### (2) 需求分布

用 12 个需求相关系数矩阵来验证提出的测度在不同相关性情境下的适用性。记这 12 个相关系数矩阵分别为  $P_1$ - $P_{12}$ 。这 12 个相关系数矩阵分别列于表 4.2-表 4.13 中。

表 4.2 相关系数矩阵  $P_1$

	A	B	C	D
A	1	0	0	0
B	0	1	0	0
C	0	0	1	0
D	0	0	0	1

表 4.3 相关系数矩阵  $P_2$

	A	B	C	D
A	1	0.2	0	0
B	0.2	1	0	0
C	0	0	1	-0.2
D	0	0	-0.2	1

表 4.4 相关系数矩阵  $P_3$ 

	A	B	C	D
A	1	0.8	0	0
B	0.8	1	0	0
C	0	0	1	-0.2
D	0	0	-0.2	1

表 4.5 相关系数矩阵  $P_4$ 

	A	B	C	D
A	1	0.2	0	0
B	0.2	1	0	0
C	0	0	1	-0.8
D	0	0	-0.8	1

表 4.6 相关系数矩阵  $P_5$ 

	A	B	C	D
A	1	0.8	0	0
B	0.8	1	0	0
C	0	0	1	-0.8
D	0	0	-0.8	1

表 4.7 相关系数矩阵  $P_6$ 

	A	B	C	D
A	1	0.2	0.3	-0.1
B	0.2	1	0.5	-0.1
C	0.3	0.5	1	-0.2
D	-0.1	-0.1	-0.2	1

表 4.8 相关系数矩阵  $P_7$ 

	A	B	C	D
A	1	0.8	-0.1	0.2
B	0.8	1	-0.2	0.5
C	-0.1	-0.2	1	-0.2
D	0.2	0.5	-0.2	1

表 4.9 相关系数矩阵  $P_8$ 

	A	B	C	D
A	1	0.2	-0.2	0.5
B	0.2	1	-0.3	0.2
C	-0.2	-0.3	1	-0.8
D	0.5	0.2	-0.8	1

表 4.10 相关系数矩阵  $P_9$ 

	A	B	C	D
A	1	0.8	0.1	-0.2
B	0.8	1	0.2	-0.3
C	0.1	0.2	1	-0.8
D	-0.2	-0.3	-0.8	1

表 4.11 相关系数矩阵  $P_{10}$ 

	A	B	C	D
A	1	0.5	0.5	0.5
B	0.5	1	0.5	0.5
C	0.5	0.5	1	0.5
D	0.5	0.5	0.5	1

表 4.12 相关系数矩阵  $P_{11}$ 

	A	B	C	D
A	1	0.8	0.5	0.2
B	0.8	1	0.8	0.5
C	0.5	0.8	1	0.2
D	0.2	0.5	0.2	1

表 4.13 相关系数矩阵  $P_{12}$ 

	A	B	C	D
A	1	-0.8	0.5	-0.5
B	-0.8	1	-0.8	0.5
C	0.5	-0.8	1	-0.8
D	-0.5	0.5	-0.8	1

这 12 个相关系数矩阵可以归为两类。第一类包括  $P_1$ - $P_5$ 。在这类相关系数矩阵中, 六个产品需求对中有四个或以上产品需求对是独立的。其他的产品需求对分别为强(弱)正相关, 强(弱)负相关的组合。第二类相关系数矩阵包括  $P_6$ - $P_{12}$ 。在这类相关系数矩阵中, 任意产品对的需求之间都是相关的(正相关或负相关)。除了  $P_{10}$  外, 其他各个矩阵中各个产品对的需求相关系数大多不同。相关系数矩阵  $P_{10}$  中, 任意两种产品的需求之间都是正相关, 而且相关系数相同, 均为 0.5。

在前 12 组实例中, 假设四种产品的需求都是服从正态分布  $N(100, 40^2)$  的, 截取  $\mu \pm 2\sigma$ 。这样, 所以四种产品的需求的变异系数均相同, 均为 0.4。之所以设定这样的需求变异系数是为了验证提出的测度在只考虑需求相关性情形下的有效性和适用性, 因为不同产品的需求变异性没有差别。

在后 12 组实例中, 假设四种产品的需求仍然服从正态分布  $N(\mu, \sigma^2)$ , 截取  $\mu \pm 2\sigma$ 。每种产品的期望需求仍然为 100 单位, 然而, 四种产品的需求变异系数 ( $\sigma/\mu$ ) 分别设为 0.2, 0.4, 0.6 和 0.8。在这些假定下进行实例研究是为了验证提出的测度在同时考虑需求相关性和需求变异性情形下的有效性和适用性。

在本节的实例中,服从给定分布和给定相关系数的需求实现值是通过乔列斯基因子分解(Cholesky Factorization)方法得到的(李志伟, 2007)。

#### 4.4.1.2 结果

在每组实例中,我们根据每个特定的柔性测度指标(DSF 指数或 SF 指数)或基准指标(SHF 指数)评价每两个制造系统的柔性,得到柔性序对。对于 50 个制造系统,根据每个柔性测度指标可以有 1225 次成对比较,并给出 1225 个序对。

需要指出的是,DSF 指数或 SF 指数越大表示系统的过程柔性越高,反之越低;SHF 指数越大表示系统的过程柔性越低,反之越高。

在每组实例中,我们选取 SF 指数(SF 平均值指数和 SF 特征值指数)中一致性比例较高的一种,记为  $SF_{\max}$ 。同样,选取 DSF 指数(DSF 平均值指数和 DSF 特征值指数)中一致性比例较高的一种,记为  $DSF_{\max}$ 。前 12 组实例中各个指标的绩效如表 4.14 表示。

表 4.14 无变异系数差异时 SF 测度和 DSF 测度的一致性比例

相关系数矩阵	$SF_{\max}$	$DSF_{\max}$	$DSF_{\max}-SF_{\max}$
$P_1$	75.79	75.79	0
$P_2$	76.84	81.58	4.74
$P_3$	76.32	82.63	6.31
$P_4$	72.63	80.53	7.90
$P_5$	73.16	80.00	6.84
$P_6$	73.68	84.74	11.06
$P_7$	74.21	85.26	11.05
$P_8$	70.53	83.68	13.15
$P_9$	74.21	87.37	13.16
$P_{10}$	75.26	75.26	0
$P_{11}$	71.05	85.26	14.21
$P_{12}$	80.00	90.53	10.53
平均值	74.47	82.72	8.25

从表 4.14 的结果可以看出, DSF 指数的一致性比例普遍高于 SF 指数, 最大差异达到 14.21 个百分点。有两组实例中 DSF 指数和 SF 指数绩效相同, 即相关系数矩阵为  $P_1$  和  $P_{10}$  的两组实例。相关系数矩阵为  $P_1$  的实例中, 所有产品的需求都是相互独立的; 相关系数矩阵为  $P_{10}$  的实例中, 所有产品的需求都是正相关的, 而且相关系数相等。在这两种情形下, DSF 矩阵和 SF 矩阵很相似, 差别仅在于 DSF 矩阵的非对角线元素均等于 SF 矩阵的非对角线元素乘以一个相等的系数。

如同前面对相关系数矩阵的分类, 这两类实例研究的结果也有较大差别。在第一类相关系数矩阵 (即  $P_1$ - $P_5$ ) 的实例中, DSF 指数和 SF 指数的一致性比例差别不太明显 (少于 10 个百分点)。这是因为在这类相关系数矩阵中, 六对产品需求对中至少有四对或以上独立的, 这就导致能力在这些产品对之间转移的概率没有太大差别, 从而需求特征对过程柔性的影响不明显。在第二类相关系数矩阵 (即  $P_6$ - $P_{12}$ ) 的实例中, DSF 指数和 SF 指数的一致性比例差别显著 (除了  $P_{10}$  的实例外, 其他的均大于 10 个百分点)。这是因为产品对的需求相关系数之间存在较大差异, 使得能力在这些产品对之间转移的概率也存在较大差别, 从而需求特征对过程柔性的影响较明显。

前 12 组实例研究的结果表明, 当产品对的需求相关性之间存在较大差异时, 考虑了需求特征的 DSF 指数比不考虑需求特征的 SF 指数的绩效要好得多。另外, 前 12 组实例研究的结果还表明, 当产品的需求变异系数存在差异时, 这种差异性对过程柔性的影响也很重要。这一点通过后面的 12 组实例研究将得到证实。

当产品需求变异系数不同时, 后 12 组实例研究的结果整理如表 4.15 所示。

从表 4.15 可以看出, DSF 指数的一致性比例仍然普遍高于 SF 指数。更重要的是, 对于相关系数矩阵为  $P_1$  和  $P_{10}$  的两组实例, 考虑了需求特征的 DSF 指数比不考虑需求特征的 SF 指数的一致性比例高。这就意味着, 如果产品需求的变异系数之间存在差异, 也有必要将这个需求特征考虑到过程柔性的测度之中。

表 4.15 有变异系数差异时 SF 测度和 DSF 测度的一致性比例

相关系数矩阵	SF <sub>max</sub>	DSF <sub>max</sub>	DSF <sub>max</sub> -SF <sub>max</sub>
P <sub>1</sub>	84.21	90.00	5.79
P <sub>2</sub>	84.21	90.53	6.32
P <sub>3</sub>	82.63	90.00	7.37
P <sub>4</sub>	84.74	92.11	7.37
P <sub>5</sub>	83.16	91.05	7.89
P <sub>6</sub>	82.11	87.89	5.78
P <sub>7</sub>	83.16	90.00	6.84
P <sub>8</sub>	84.21	92.63	8.42
P <sub>9</sub>	82.11	88.95	6.84
P <sub>10</sub>	86.32	92.11	5.79
P <sub>11</sub>	80.53	88.95	8.42
P <sub>12</sub>	82.11	85.26	3.15
平均值	83.29	89.96	6.67

#### 4.4.2 指导规则有效性验证

为了验证 4.3 节提出的指导规则对于一般的非 CTSII 系统的有效性和适用性, 本节进行一套实例研究。在实例中, 首先随机生成一个制造系统, 然后根据提出的指导规则增加一条链构造一个“最优”的新系统(以下记为“最优”系统), 同时用枚举法在原有系统的任意位置增加一条链构造所有“可能”的新系统(以下记为“可能”系统)。“可能”的系统数目取决于原有系统结构中可增加链的空缺位置数目多少。提出的指导规则的有效性和适用性通过比较该“最优”的新系统和所有“可能”的新系统的柔性之间的大小关系来验证。

##### 4.4.2.1 实例设计

###### (1) 制造系统

在每组实例研究中, 随机生成一个制造系统。在每个制造系统中, 假设有一

定数量的工厂和等数量的产品 ( $L=N=3, 4, 5, 6$ )。每家工厂的能力确定, 设为每计划期内 100 单位。在生成这个制造系统时, 使得每家工厂能够生产每种产品的概率取几个数值 ( $Pr=0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ ), 并且满足:

- (a) 每家工厂至少能够生产一种产品;
- (b) 每种产品能够被至少一家工厂生产。

这样, 我们共进行 16 组实例研究, 每组生成一个制造系统。

#### (2) 需求分布

在每组实例中, 随机生成任意两种产品的需求相关系数, 均从均匀分布  $U(-0.8, 0.8)$  上取值。每种产品的需求都服从均值为 100 的正态分布, 变异系数从均匀分布  $U(0.1, 1)$  上取值。

#### 4.4.2.2 结果

在每组实例研究中, 制造系统的过程柔性用五个指标测度, 即 SF 平均值、SF 特征值、DSF 平均值、DSF 特征值和 SHF 指数。“最优”系统的柔性不低于任意一个“可能”系统的柔性的概率列于表 4.16-表 4.19 中。在这些表中, 每组实例中用枚举法产生的“可能”系统的数目用  $M$  表示。

表 4.16  $N=L=3$  时“最优”系统柔性不低于所有“可能”系统的比例

$Pr$	$M$	SF-eigen (%)	SF-mean (%)	DSF-eigen (%)	DSF-mean (%)	SHF (%)
0.1	4	100	100	66.67	100	100
0.2	5	50	100	75.00	100	100
0.3	6	100	100	100	100	100
0.4	2	100	100	100	100	100

表 4.17  $N=L=4$  时“最优”系统柔性不低于所有“可能”系统的比例

$Pr$	$M$	SF-eigen (%)	SF-mean (%)	DSF-eigen (%)	DSF-mean (%)	SHF (%)
0.1	12	100	100	100	100	90.91
0.2	9	50.00	87.50	62.50	87.50	75.00
0.3	6	100	100	60	100	100
0.4	7	100	100	100	100	100

表 4.18  $N=L=5$  时“最优”系统柔性不低于所有“可能”系统的比例

$Pr$	$M$	SF-eigen (%)	SF-mean (%)	DSF-eigen (%)	DSF-mean (%)	SHF (%)
0.1	20	100	100	94.74	100	84.21
0.2	15	92.86	92.86	100	100	100
0.3	13	100	100	100	100	75.00
0.4	17	100	100	75.00	100	75.00

表 4.19  $N=L=6$  时“最优”系统柔性不低于所有“可能”系统的比例

$Pr$	$M$	SF-eigen (%)	SF-mean (%)	DSF-eigen (%)	DSF-mean (%)	SHF (%)
0.1	25	62.50	100	58.33	100	87.50
0.2	23	100	100	100	100	100
0.3	18	100	100	82.35	100	100
0.4	14	100	100	76.92	100	84.62

从表 4.16-表 4.19 中可以看出, 在广泛的各种情景下 (不同总链数, 不同工厂和产品总数, 随机需求特征), 所有的过程柔性测度都显示根据指导规则构造的“最优”系统的过程柔性几乎都比用枚举法构造的所有“可能”系统的过程柔性高。结果说明, 通过增加一条链来提高柔性的指导规则是有效的。

#### 4.5 本章小结

本章研究了需求特征对系统过程柔性的影响, 并提出了考虑需求特征 (包括需求变异性和需求之间的相关性) 的过程柔性测度方法。该测度方法同时考虑了能力在产品之间可转移的程度和发生能力转移的概率。实例研究表明, 提出的测度比已有的不考虑需求特征的过程柔性测度在判断制造系统过程柔性大小方面有更好的绩效。基于提出的过程柔性测度, 本章还提出了通过增加一条链来改善一般制造系统的过程柔性的指导规则。实例研究结果显示, 根据指导规则构造的“最优”系统的过程柔性几乎都比用枚举法构造的所有“可能”系统的过程柔性高。

## 附录 4

## 附录 4.A 命题 1 的证明

设共有  $N$  种产品。为了证明方便, 系统总柔性用 DSF 矩阵所有项之和表示。在 CTSII 系统中, 有  $m_{ij} = \min\{m_i, m_j\}$ 。增加链前, 系统的总柔性 (DSF 矩阵所有项之和) 为

$$DSF_1 = \sum_{i=1}^N m_i \left( \frac{CV_i}{\max_j \{CV_j\}} \right) + \sum_{i \in \arg\{m_i > m_u\}} m_i \left( \frac{1 - \rho_{iu}}{2} \right) + \sum_{j \in \arg\{m_j \leq m_u\}} m_{ij} \left( \frac{1 - \rho_{ju}}{2} \right) + \sum_{i, j \in \arg\{m_i \geq m_j\} \setminus \{t\}} m_{ij} \left( \frac{1 - \rho_{ij}}{2} \right) \quad (A1)$$

现增加一条链与产品  $t$  相连。设增加链后系统仍为 CTSII 结构, 系统的总柔性 (DSF 矩阵所有项之和) 为

$$DSF_2 = \sum_{i \neq t} m_i \left( \frac{CV_i}{\max_j \{CV_j\}} \right) + (m_u + 1) \left( \frac{CV_t}{\max_j \{CV_j\}} \right) + \sum_{i \in \arg\{m_i > m_u\}} (m_u + 1) \left( \frac{1 - \rho_{iu}}{2} \right) + \sum_{j \in \arg\{m_j \leq m_u\}} m_{jt} \left( \frac{1 - \rho_{ju}}{2} \right) + \sum_{i, j \in \arg\{m_i \geq m_j\} \setminus \{t\}} m_{ij} \left( \frac{1 - \rho_{ij}}{2} \right) \quad (A2)$$

式 (A2) 减去式 (A1), 得

$$\Delta DSF = DSF_2 - DSF_1 = \frac{CV_t}{\max_j \{CV_j\}} + \sum_{i \in \arg\{m_i > m_u\}} \left( \frac{1 - \rho_{iu}}{2} \right) \quad (A3)$$

若要增加一条链连接产品  $t$ , 使得  $\Delta DSF$  最大, 须有

$$i^* = \arg \left\{ \max_i \left\{ \frac{CV_i}{\max_j \{CV_j\}} + \sum_{i \in \arg\{m_i > m_u\}} \frac{1 - \rho_{iu}}{2} \right\} \right\}$$

得证。

## 第五章 考虑产品需求特征的供应链过程柔性测度

本章考虑一条多产品、多阶段供应链，其中每种产品都需要在每个阶段进行加工。迄今为止，关于供应链过程柔性测度的研究文献屈指可数，本章针对Graves and Tomlin (2003) 提出的供应链过程柔性测度方法，指出其中存在的问题，并提出了一个新的供应链过程柔性测度方法，该测度建立在考虑产品需求特征的基础上。本章内容安排如下：5.1节回顾与供应链过程柔性测度有关的研究文献；5.2节回顾Graves and Tomlin (2003) 提出的供应链过程柔性测度，并通过两个例子说明其中存在的问题；5.3节提出一个新的供应链过程柔性测度；5.4节通过实例研究比较提出的新测度和Graves and Tomlin (2003) 提出的测度，说明提出的测度的优越性。

### 5.1 引言

最近几十年中，对供应链在理论和应用上的研究不计其数，供应链理论得到了长足的发展。然而，对于供应链柔性，尤其是供应链过程柔性的研究所见不多。最近在*Management Science*上，Graves and Tomlin (2003) 发表的一篇文章比较深入的探讨了供应链过程柔性的测度问题。他们发现了供应链上两个独特的现象：浮动瓶颈 (floating bottlenecks) 和跨阶段瓶颈 (stage-spanning bottlenecks)。浮动瓶颈是需求不确定性的直接产物。如果需求确定，那么供应链上的瓶颈就在单阶段供应链短缺 (stand-alone shortfall, 简称“单机短缺”) 最大的阶段 (简称“单机瓶颈阶段”)。如果需求不确定，那么由于供应链的不完全柔性，单机瓶颈在任意需求情形下就可能从一个阶段浮动到另一个阶段。当供应链总短缺严格大于最大的单机短缺时，供应链发生瓶颈的地方不止一个阶段，跨阶段瓶颈就产生了。浮动瓶颈和跨阶段瓶颈都会减少供应链柔性配置的效果。为了测度供应链的过程柔性并识别柔性改善规则，Graves and Tomlin (2003) 引入了一个柔性测度  $g$  (以下简称为G&T测度)，并说明了增加这个量就会减少供应链的低效率，从

而提高供应链的柔性。

除了G&T测度外，我们未找到研究多阶段供应链的过程柔性测度。然而， $g$ 在描述供应链的过程柔性方面也是有问题的。尽管目前对于一个好的柔性测度尚无统一的标准，但是我们认为以下两点是基本要求：(1) 一个好的过程柔性测度能够较好的区分具有不同过程柔性的供应链；(2) 它和供应链的真实过程柔性应该是一致的。但是，正如下节将要说明的，G&T测度很难满足这两点基本要求。

## 5.2 G&T 测度

Graves and Tomlin (2003) 考虑了一条由 $K$ 个阶段组成、生产 $I$ 种不同产品的供应链，其中每种产品都需要在每个阶段进行加工。除此之外，对于供应链的结构没有特别的限制。阶段 $k$  ( $k=1,2,\dots,K$ ) 中有 $J_k$ 家工厂，这里的工厂指任何具有处理能力的资源。阶段 $k$ 中的产品-工厂链 $(i,j)$ 的集合用 $A_k$ 表示。在阶段 $k$ 中，工厂 $j$ 能够加工产品 $i$ 当且仅当 $(i,j) \in A_k$ 。类似的，在阶段 $k$ 中能够加工集合 $M$ 中一种或多种产品的工厂的集合记为 $P^k(M) = \bigcup_{i \in M} P^k(i)$ 。为了使得解析可行，且简化表达，假设对于所有满足 $(i,j) \in A_k$ 的产品 $i$ ，工厂 $j$ 加工一单位任意产品 $i$ 都需要相同的能力。这样，阶段 $k$ 中工厂 $j$ 的能力， $c_j^k$ ，就可以定义为该工厂在计划期内能够加工的产品数量。为了集中于柔性而不是能力的讨论，假设供应链的结构和其环境是“匹配”的，即供应链的每个阶段的总能力都至少和总期望需求一样大。

对于以上描述的多阶段供应链，Graves and Tomlin (2003) 提出了一个柔性测度方法。这个方法首先定义单阶段供应链的柔性测度 $g_k$ ：

$$g_k = \min_M \{g_k(M) : |P^k(M)| < J_k\}, \quad k=1,2,\dots,K, \quad (5.1)$$

其中， $g_k(M) = \frac{\sum_{j \in P^k(M)} c_j^k - |M| \bar{c}^k}{\bar{c}^k} = \frac{\sum_{j \in P^k(M)} c_j^k}{\bar{c}^k} - |M|$ ， $\bar{c}^k = \frac{\sum_{j=1}^{J_k} c_j^k}{I}$ ， $|\cdot|$ 表示一个集合

的元素多少。对于完全柔性的单阶段供应链，即每家工厂都能够生产所有产品，

Graves and Tomlin (2003) 约定用 $g_k = I - 1$ 来表示其柔性大小。

多阶段供应链的过程柔性（G&T测度）则可以定义为

$$g = \min_k \{g_k\} \quad (5.2)$$

为了评价供应链柔性测度指标的绩效,类似于单阶段制造系统中使用的方法 (Jordan and Graves, 1995; Graves and Tomlin, 2003; Iravani et al., 2005), 我们用“供应链未能满足的期望需求短缺”作为基准。我们用这个基准来说明G&T测度在区分有着明显不同过程柔性的两条供应链的柔性大小时表现很差,而且还可能和基准不一致。下面用粮和简单离子来直观的说明G&T测度存在的主要问题。

**例1** 假设有两条供应链, 分别记为SC 1和SC 2, 如图5.1所示。每条供应链由两阶段组成, 每阶段中有三家工厂 (图中用矩形表示), 能够生产三种不同的产品 (图中用圆形表示)。连接一家工厂和一种产品的链表示这家工厂能够生产对应的产品。计划期内产品1, 2和3的需求服从均值分别为150, 50和100, 变异系数均为0.5的正态分布。两条供应链的所有阶段中每家工厂的能力均为100单位。

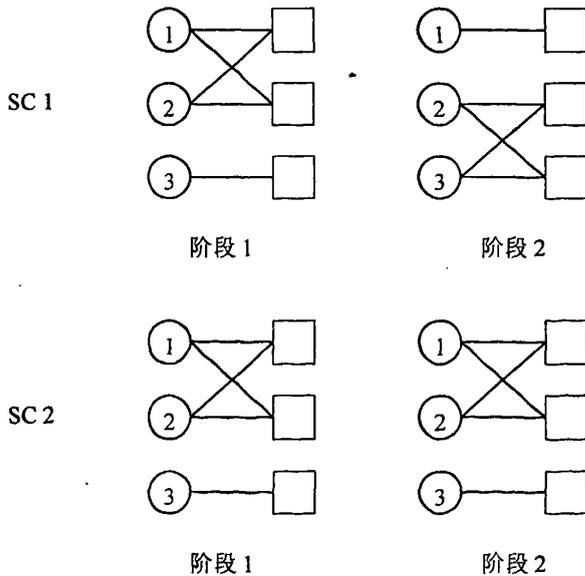


图 5.1 两阶段供应链示例

根据G&T测度的定义, 这两条供应链的柔性相同,  $g$ 值都等于0。我们模拟

1000次需求实现值来估计两条供应链的期望短缺。计算结果显示SC 1和SC 2的期望短缺分别为76.38和45.96单位。这意味着，在给定的产品需求下，SC 2的柔性比SC 1的柔性高。

为了分析这种柔性测度的不一致现象发生的原因，我们检查了计算结果，发现，浮动瓶颈在供应链SC 1中发生而在SC 2中没有发生；跨阶段瓶颈在SC 1中发生的概率较高（近似等于0.37）而在SC 2中从不会发生。SC 1的柔性较低因为浮动瓶颈和跨阶段瓶颈减少了其应对三种产品的不确定需求的能力。由于G&T测度忽视了这两个与多阶段供应链密切相关的重要因素，它不能区分SC 1和SC 2的柔性。

即使对于单阶段供应链，G&T测度也可能给出和基准不一致的判断。根据G&T测度的定义，产品和工厂之间链数较多会导致剩余能力较多，从而隐含着较高的过程柔性。然而，下面这个简单例子说明这也不一定正确。

**例2** 考虑两条单阶段供应链，SC 3和SC 4，如图5.2所示。产品1, 2和3的需求服从均值分别为100, 250和50，变异系数均为0.5的正态分布。两条供应链中工厂a, b, c的能力均分别为100, 200和100单位。

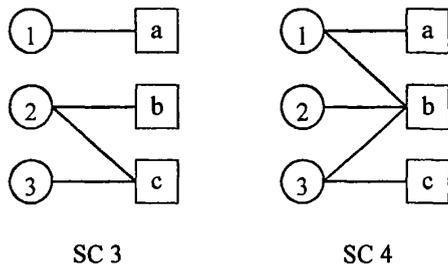


图 5.2 单阶段供应链示例

SC 3和SC 4的g值分别为-0.5和0.25。也就是说，G&T测度表明SC 4的柔性比SC 3的柔性高。然而，SC 3和SC 4的期望短缺估计值分别为72.29和95.40单位，这意味着SC 3的柔性比SC 4的柔性高。尽管SC 4比SC 3的总链数多，但是SC 3中跟产品2相连的链数比SC 4中对应的链数多。由于三种产品的需求是不均衡的，导致结构柔性更高的不是任意一个产品集合剩余能力更多，而是能力和需求更匹配。

通过分析以上例子，我们观察到G&T测度的绩效差归结于其定义存在两个问题：(1) 忽视了供应链的结构信息，这导致了它不能反映跨阶段瓶颈；(2) 忽视了产品的需求信息，这导致了它不能反映可能存在的浮动瓶颈。G&T测度中的这两个问题使得其在评价多阶段供应链甚至单阶段供应链的柔性时绩效很差。下一节中我们将提出一种用于评价多阶段供应链过程柔性的测度方法。

### 5.3 新的供应链过程柔性测度

基于Jordan and Graves (1995) 提出的单阶段制造系统的过程柔性测度（以下简记为J&G测度），本节提出以下用于评价多阶段供应链柔性的概率测度：

$$\mathfrak{R} = \Pr \left[ \max_M \left\{ \sum_{i \in M} D_i - \min_{L_1, \dots, L_K} \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{j \in P_{(M)}^k} c_j^k \right\} \right\} > \max \left\{ 0, \sum_{i=1}^I D_i - \min_k \left\{ \sum_{j=1}^{J_k} c_j^k \right\} \right\} \right], \quad (5.3)$$

其中， $D_i$  表示产品 $i$ 的随机需求， $M$ 是任意的产品子集， $L_1, \dots, L_K$  是集合 $M$ 的一种分割， $P_{(M)}^k$  是阶段 $k$ 中能够生产集合 $M$ 中任意产品的工厂集合。

在式(5.3)中， $\min_{L_1, \dots, L_K} \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{j \in P_{(M)}^k} c_j^k \right\}$ 是多阶段供应链中能够生产集合 $M$ 中产品的

总产量的一个上界（由于能力限制），这样式(5.3)中概率不等式的左边项就是供应链最小短缺的一个下界（Graves and Tomlin, 2003）。对于阶段数少于3或者产品数少于3的供应链，或者完全柔性的供应链和完全刚性的供应链，这个上界

和下界是精确的（Graves and Tomlin, 2003）。 $\min_k \left\{ \sum_{j=1}^{J_k} c_j^k \right\}$ 表示这条供应链如果是

完全柔性的话它能够生产的所有产品的最大产量。所以， $\mathfrak{R}$  测度就衡量了供应链中总短缺超过完全柔性供应链中总短缺的概率。如果这个概率很小，则可以期望该供应链的柔性很高。

下面的命题描述了提出的测度的一些基本性质。

**命题1**  $K\mathfrak{R}$  是一条供应链中发生浮动瓶颈的概率的一个上界。

**命题2**  $\mathfrak{R}$  是一条供应链中发生跨阶段瓶颈的概率的一个上界。

这两个命题的证明在附录5.A和附录5.B中给出。

这两个命题意味着我们提出的柔性测度能够反映浮动瓶颈和跨阶段瓶颈对柔性的影响，所以应该能够较好的区分具有不同过程柔性的两条供应链的柔性。下节中将通过实例研究来评价提出的柔性测度。

## 5.4 实例研究

### 5.4.1 供应链测度有效性验证

为了验证提出的测度 $\mathfrak{R}$ 的有效性，我们以期望短缺为基准，评价测度 $\mathfrak{R}$ 和基准之间的差距，并和G&T提出的测度和基准之间的差距作比较。

随机生成100条三阶段供应链( $K=3$ )，每阶段都有四家工厂( $J_k=4, k=1,2,3$ )生产四种产品( $I=4$ )。在生成这100条供应链时，使得每家工厂能够加工四种产品中任意一种的概率为 $p$ ，另外满足以下约束：

- (a) 在每个阶段，每家工厂至少能够生产一种产品；
- (b) 在每个阶段，每种产品能够被至少一家工厂生产。

假设一条供应链的任意阶段中的工厂都具有在计划期内能加工100单位任意产品的能力（即 $c_{j,k}^i=100, \forall j,k$ ）。假设四种产品的需求独立同分布于 $N(\mu, \sigma)$ ， $\mu=100, \sigma=25$ ，截取 $\mu \pm 2\sigma$ 部分。对于每条随机生成的供应链，用1000次模拟需求实现值下的总短缺的平均值近似估计每条供应链的期望短缺。

在给定概率 $p$ 下，根据 $\mathfrak{R}$ ， $g$ 或期望短缺将100条随机生成的供应链的过程柔性作成对比较（共有4950次不同的比较，得到4950个序对）。直观上，较小的 $p$ 值近似对应于刚性的供应链，较大的 $p$ 值近似对应于完全柔性的供应链。在一个序对中，若两条供应链的柔性测度的差小于其中测度值较大者的0.01%，我们认为这两条供应链的柔性大小没有差别。基于基准指标（期望短缺指数），我们计算每个测度指标和基准指标的一致性比例。由于式（5.3）中概率不等式的左边项实质上是所有产品在生产计划问题（ $P1(\mathbf{d}, \mathbf{A})$ ，见Graves and Tomlin（2003）pp 909）中最小总短缺的下界，在所有的实验中计算 $\mathfrak{R}$ 值时，我们用模型 $P1(\mathbf{d}, \mathbf{A})$

的最优目标函数值（最小总短缺值）代替式（5.3）中概率不等式的左边项。

测度 $\mathfrak{R}$ （和 $g$ ）的绩效用四个指标评价：（1）一致性比例（即根据 $\mathfrak{R}$ 或 $g$ 得到的序对和基准指标得到的序对一致的比例，简记为C%）；（2）不一致性比例（即根据 $\mathfrak{R}$ 或 $g$ 得到的序对和基准指标得到的序对不一致的比例，简记为I%）；（3）不能区分的比例（即根据 $\mathfrak{R}$ 或 $g$ 不能区分而基准指标能区分的序对所占的比例，简记为ND%）；和（4）能区分的比例（即根据 $\mathfrak{R}$ 或 $g$ 能区分而基准指标不能区分的序对所占的比例，简记为D%）。

概率 $p$ 值从0.1到0.9变化，步长为0.1。 $\mathfrak{R}$ 和 $g$ 的绩效汇于表5.1。表5.1的结果显示，我们的测度 $\mathfrak{R}$ 能够很好的描述供应链的过程柔性。

表 5.1 测度 $\mathfrak{R}$ 和 $g$ 的绩效比较

$p$	绩效指标	$\mathfrak{R}$		$g$	
		比例	平均 $\Delta$	比例	平均 $\Delta$
0.1	C%	99.94	0.48	90.20	0
	I%	6.06e-4	1.38	0	0
	ND%	0	0	9.80	4.86
	D%	0	0	0	0
0.2	C%	98.89	2.40	47.52	0
	I%	0.67	0.65	0	0
	ND%	0.44	0.83	52.48	4.54
	D%	0	0	0	0
0.3	C%	96.93	7.62	10.55	2.99
	I%	2.75	0.57	2.02e-4	2.40
	ND%	0.32	0.55	89.43	7.93
	D%	0	0	0	0
0.4	C%	96.10	15.88	6.63	28.71
	I%	3.76	1.18	0	0
	ND%	0.14	1.00	93.37	14.36
	D%	0	0	0	0

0.5	C%	95.66	15.61	31.09	20.93
	I%	4.20	1.66	1.68	5.93
	ND%	0.14	1.55	67.23	12.5
	D%	0	0	0	0
0.6	C%	95.76	16.25	48.91	18.90
	I%	4.18	1.15	6.48	5.54
	ND%	6.06e-4	1.11	44.61	13.48
	D%	0	0	0	0
0.7	C%	97.11	11.13	63.03	10.10
	I%	2.87	0.82	3.70	4.87
	ND%	2.02e-4	0.28	30.12	14.24
	D%	0	0	3.15	0
0.8	C%	99.23	5.42	60.59	5.15
	I%	0.77	0.50	2.02	10.80
	ND%	0	0	13.94	14.66
	D%	0	0	23.45	0
0.9	C%	100	0	53.37	0
	I%	0	0	0	0
	ND%	0	0	0	0
	D%	0	0	46.63	0

表5.1的结果还显示,  $g$ 测度在 $p$ 值很小或很大时绩效相对较好, 在其他 $p$ 值范围内绩效很差。回顾前面提到的, 一个好的柔性测度指标应该具有能够区分不同柔性的两条供应链的能力。为了检验两个柔性指标在这方面的能力, 我们进一步定义一个衡量两条制造系统柔性差异程度的量,  $\Delta_{ij}$ , 如下:

$$\Delta_{ij} = \begin{cases} \frac{|ES_i - ES_j|}{\max\{ES_i, ES_j\}} & \text{如果 } \max\{ES_i, ES_j\} \neq 0, \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (5.4)$$

其中,  $ES_i$  和  $ES_j$  分别表示供应链 $i$ 和 $j$ 的期望短缺。

很显然, 如果 $\Delta_j$ 更大, 则这两条供应链的过程柔性的差异越显著。在不同的概率 $p$ 值下, 我们计算出每类供应链比较对中平均的 $\Delta$ 值并汇总于表5.1中。表5.1的结果表明, 本章提出的柔性测度能够正确地区分具有高的 $\Delta$ 值的供应链对。G&T测度只有在 $p$ 值很小或很大时有着较高的正确区分具有高的 $\Delta$ 值的供应链对, 而对于大多数具有高的 $\Delta$ 值的供应链对, G&T测度不能区分。

#### 5.4.2 “链式效应”验证

Graves and Tomlin (2003) 还发现, 每阶段都有链式结构的多阶段供应链有很高的柔性, 即制造系统中的“链式效应”在供应链中仍然有效。这个结论用本章提出的测度也可以得到证实。以下将通过实例研究验证有链式结构的供应链的 $\alpha$ 值很小。

定义一种 $h$ -类供应链, 在这类供应链中, 每种产品在每个阶段都能够被 $h$ 家工厂加工, 每家工厂能够加工 $h$ 种产品。和Graves and Tomlin (2003) 类似, 我们在实例研究中假设供应链中每阶段有 $I$ 家工厂, 其中,  $I$ 为供应链中可以生产的产品种类数, 每家工厂的能力都为100单位。假设产品需求均独立同分布于 $N(\mu, \sigma)$ ,  $\mu=100$ ,  $\sigma=25$ , 截取 $\mu \pm 2\sigma$ 部分。对于给定的供应链结构, 产品需求向量 $\mathbf{d}$ 是随机生成的。在每种需求实现值下, 用Graves and Tomlin (2003) 中的规划 $P1(\mathbf{d}, \mathbf{A})$ 来确定最小短缺。用1000次需求实现值来估计期望短缺。

变动 $h$ 值从1到3取值。 $h=1$ 的供应链是非柔性的(或称刚性的), 其他两种类型的供应链根据链式策略(Jordan and Graves, 1995)构造。取 $I=5$ , 计算五条供应链的 $\alpha$ 值, 这五条供应链的总阶段数分别为 $K=1, 2, 3, 4, 5$ 。计算结果如图5.3所示。

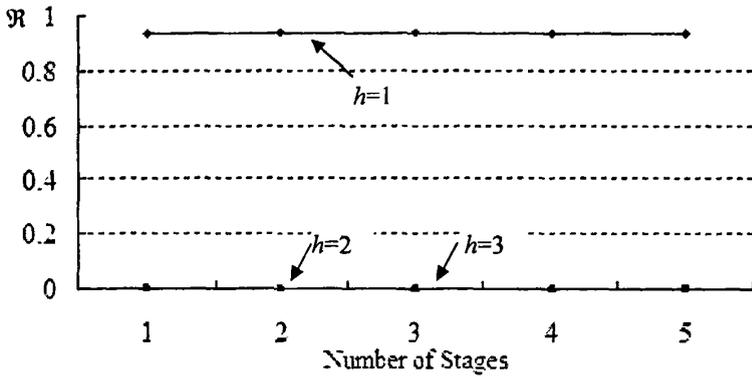
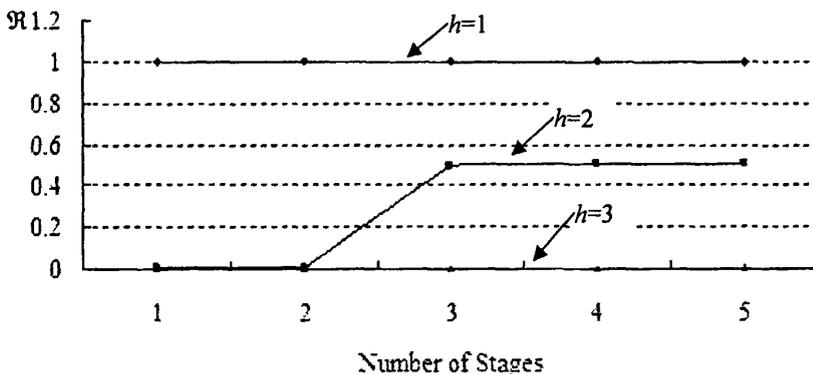
图 5.3  $I=5$  时供应链的  $R$  值

图5.3的结果显示,  $h=1$ 的供应链绩效很差, 即期望短缺几乎总是比完全柔性供应链大。相反,  $h \geq 2$ 的供应链绩效等于完全柔性时的供应链绩效。这些结果和Graves and Tomlin (2003) 文中图5显示的实例研究的结果一致, 其中 $h=2$  和3的供应链的绩效显著优于 $h=1$ 的供应链。

Graves and Tomlin (2003) 还观察到产品数或阶段数较大的供应链需要比 $h=2$ 更高的柔性。这个结论也可以通过我们的柔性测度得到证实。取 $I=10$ , 图5.4显示了五条供应链分别在 $h=1, 2, 3$ 时的  $R$  值。 $h=2$ 的供应链当阶段数小于3时绩效很好。如果阶段数大于等于3, 只有 $h \geq 3$ 的供应链才具有接近完全柔性供应链的绩效。

图 5.4  $I=10$  时供应链的  $R$  值

实例研究的结果显示,当供应链有中等数量的阶段(10个或者更少),中等种类的产品(20个或者更少)时,每一阶段供应链的设计原则如下:(1)尽量形成一个包含尽量多产品和工厂的完整的链;(2)尽量使与每种产品相关联的工厂的能力相等;(3)尽量使与工厂相关联的产品的期望需求相等。当有更多的产品或者更多的阶段时,在保持供应链的链结构情况下增加产品和工厂的弧来增加柔性,能够显著提高供应链的效率。

## 5.5 本章小结

在本章中,我们研究了供应链的过程柔性测度。在发现学术界对供应链过程柔性研究很少的同时,我们还发现 Graves and Tomlin (2003) 提出的供应链过程柔性测度指标既不能反映供应链的结构,也不能反映需求信息,所以不能正确地测度供应链的过程柔性。基于 Jordan and Graves (1995) 对单阶段制造系统的柔性测度方法,本章提出了一个考虑需求分布特征的多阶段供应链过程柔性测度指标。实例研究的结果显示该指标是有效的。

Graves and Tomlin (2003) 发现和分析的两类瓶颈现象是很有启发意义的。G&T 测度的出发点集中于供应链的结构特性。一个简单的柔性测度,如 G&T 测度,能够从解析的角度分析供应链无效 (supply-chain inefficiencies)。然而,作为供应链的柔性测度,G&T 测度指标尚存在一定的问题。正如本章指出的,导致结构柔性更高的不是任意一个产品集合剩余能力更多,而是能力和需求更匹配。

尽管我们在 (5.3) 中定义的柔性测度在描述多阶段供应链的柔性方面有比较好的绩效,但是这个测度只能借助于计算机模拟实验得到,所以应用起来不太方便。以后的研究可以尝试构造一个用于评价多阶段供应链柔性的简单测度,如同 Iravani et al. (2005) 对单阶段制造系统提出的测度一样。

## 附录 5

## 附录 5.A 命题 1 的证明

当假设每阶段都有相同总能力时, Graves and Tomlin (2003) 已经证明, 供应链发生浮动瓶颈的概率的一个上界是

$$\Omega_{\mathcal{F}} = 1 - \prod_{k=2}^K \left( 1 - \Pr[SF_k(\mathbf{D}, \mathbf{A}_k) > SF_k(\mathbf{D}, TF_k)] \right), \quad (\text{A1})$$

其中, 随机变量  $SF_k(\mathbf{D}, \mathbf{A}_k)$  为阶段  $k$  的单机短缺,  $SF_k(\mathbf{D}, TF_k)$  是当供应链为完全柔性时阶段  $k$  的单机短缺。对于一个需求实现值向量  $\mathbf{d}$ , 阶段  $k$  的短缺为  $sf_k(\mathbf{d}, \mathbf{A}_k)$ , 可以通过求解 Graves and Tomlin (2003) 文中的模型  $\text{Pl}(\mathbf{d}, \mathbf{A})$  得到。

测度  $\mathcal{R}$  可以重写为

$$\mathcal{R} = \Pr[SF(\mathbf{D}, \mathbf{A}) > SF(\mathbf{D}, TF)], \quad (\text{A2})$$

其中  $\mathbf{A}$  为供应链的柔性配置结构, 随机变量  $SF(\mathbf{D}, \mathbf{A})$  为供应链的总短缺,  $SF(\mathbf{D}, TF)$  是当供应链为完全柔性时的总短缺。

在给定需求实现值向量  $\mathbf{d}$  下, 由于每个阶段的单机短缺不可能超过整个供应链的总短缺, 我们有

$$sf(\mathbf{d}, \mathbf{A}) \geq sf_k(\mathbf{d}, \mathbf{A}_k), \quad \forall k = 1, \dots, K. \quad (\text{A3})$$

如果所有阶段上的工厂都是完全柔性, 那么显然有

$$sf(\mathbf{d}, TF) = sf_k(\mathbf{d}, TF_k), \quad \forall k = 1, \dots, K. \quad (\text{A4})$$

式 (A3) 和 (A4) 隐含着

$$\Pr[SF(\mathbf{D}, \mathbf{A}) > SF(\mathbf{D}, TF)] \geq \Pr[SF_k(\mathbf{D}, \mathbf{A}_k) > SF_k(\mathbf{D}, TF_k)]. \quad (\text{A5})$$

由于  $0 \leq \Pr[SF_k(\mathbf{D}, \mathbf{A}_k) > SF_k(\mathbf{D}, TF_k)] \leq 1$ , 根据式 (A1) 和 (A5), 我们有

$$\Omega_{\mathcal{F}} \leq \sum_{k=1}^K \Pr[SF_k(\mathbf{D}, \mathbf{A}_k) > SF_k(\mathbf{D}, TF_k)] \leq K\mathcal{R}.$$

得证。

## 附录 5.B 命题 2 的证明

记  $\Omega_S(M, L_1, \dots, L_k)$  为集合  $M$  的一个划分  $(M, L_1, \dots, L_k)$  是跨阶段瓶颈的概率上界。Tomlin (2000) 已经证明了这个上界可以表示为

$$\Omega_S(M, L_1, \dots, L_k) = \Pr \left[ \sum_{i \in M} D_i - \sum_{n=1}^N \sum_{j \in P_n^{k_n}(L_k)} c_j^{k_n} > \max \left\{ 0, \sum_{i=1}^I D_i - \min_k \left\{ \sum_{j=1}^{J_k} c_j^k \right\} \right\} \right], \quad (\text{B1})$$

其中,  $N$  为  $(M, L_1, \dots, L_k)$  中非空集合  $L_k$  的数目,  $k_1, \dots, k_N$  表示非空集合  $L_k$  对应的阶段。

从式 (B1), 我们有

$$\Omega_S(M, L_1, \dots, L_k) \leq \Pr \left[ \max_M \left\{ \sum_{i \in M} D_i - \sum_{n=1}^N \sum_{j \in P_n^{k_n}(L_k)} c_j^{k_n} \right\} > \max \left\{ 0, \sum_{i=1}^I D_i - \min_k \left\{ \sum_{j=1}^{J_k} c_j^k \right\} \right\} \right]. \quad (\text{B2})$$

对于任意产品集合  $M$ , 显然有

$$\min_{L_1, \dots, L_k} \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{j \in P^k(L_k)} c_j^k \right\} \leq \sum_{n=1}^N \sum_{j \in P_n^{k_n}(L_k)} c_j^{k_n}, \quad \forall (L_1, \dots, L_k). \quad (\text{B3})$$

在给定需求实现值向量  $\mathbf{d} = \{d_1, \dots, d_I\}$  下, 式 (B3) 隐含着

$$\sum_{i \in M} d_i - \min_{L_1, \dots, L_k} \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{j \in P^k(L_k)} c_j^k \right\} \geq \sum_{i \in M} d_i - \sum_{n=1}^N \sum_{j \in P_n^{k_n}(L_k)} c_j^{k_n}, \quad \forall (L_1, \dots, L_k). \quad (\text{B4})$$

根据式 (B4), 我们有

$$\begin{aligned} \mathfrak{R} &= \Pr \left[ \max_M \left\{ \sum_{i \in M} D_i - \min_{L_1, \dots, L_k} \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{j \in P^k(L_k)} c_j^k \right\} \right\} > \max \left\{ 0, \sum_{i=1}^I D_i - \min_k \left\{ \sum_{j=1}^{J_k} c_j^k \right\} \right\} \right] \\ &\geq \Pr \left[ \max_M \left\{ \sum_{i \in M} D_i - \sum_{n=1}^N \sum_{j \in P_n^{k_n}(L_k)} c_j^{k_n} \right\} > \max \left\{ 0, \sum_{i=1}^I D_i - \min_k \left\{ \sum_{j=1}^{J_k} c_j^k \right\} \right\} \right]. \quad (\text{B5}) \end{aligned}$$

式(B2)和(B5)意味着,  $\mathfrak{R}$  值是针对产品集合  $M$  的任意一个分割  $(M, L_1, \dots, L_k)$  成为跨阶段瓶颈的概率  $\Omega_S(M, L_1, \dots, L_k)$  的一个上界。

得证。

## 第六章 总结与展望

### 6.1 全文总结

在顾客期望、市场竞争、技术发展变化日益剧烈的今天,企业为了保持恒久的竞争优势,纷纷采用柔性的生产技术来实现企业的目标。柔性已经成为继成本、质量之后企业发展的第三道门坎。过程柔性由于其在企业能力规划和战略扩张时的重要作用而被越来越多的企业所重视。

本文主要研究环境要求(包括产品 BOM 约束和产品需求特征)对制造系统或供应链的过程柔性测度和改善方法的影响,并提出考虑环境要求的过程柔性测度和改善方法。在产品 BOM 约束下,本文综合了系统结构和产品结构信息,提出了适用于多装配线系统的过程柔性测度方法,并据此方法提出了一套改善制造系统及其装配线的过程柔性的规则。考虑产品需求特征时,本文提出了一套制造系统过程柔性的测度方法,以及改善过程柔性的指导规则。考虑产品需求分布特征,本文还提出了一种测度供应链过程柔性的方法。

本文工作的主要创新点如下:

(1) 提出了考虑环境要求时改善制造系统柔性的一系列指导规则。这些指导规则能够使得管理者不需要通过复杂的计算就能找出改善柔性的满意途径,做出有效的柔性投资决策。

(2) 将制造系统自身的固有属性和产品结构特征结合,提出了一种既能反映系统内部结构特征又能反映产品结构约束影响的过程柔性测度方法。该方法将考虑产品结构约束的过程柔性分为两个层次(装配线层次和系统层次)分别测度。

(3) 同时考虑系统能力转移的容易程度和发生能力转移的概率,分析需求特征对系统过程柔性的影响,提出了考虑需求特征(包括需求变异性和需求之间的相关性)的过程柔性测度方法。

## 6.2 不足和展望

本文的不足之处主要在于,由于受到数据的可得性限制,本文很多方法和结论的验证都停留在模拟实验的基础上,在实际生产中的应用有待进一步证实。此外,建立本文具体模型和方法的假设较多也是本文的一个局限。

进一步的研究方向可能有以下几个方面:

(1) 本文研究的考虑产品结构约束的过程柔性测度和改善方法都假设每台机器在处理不同零部件类型时所需要的处理时间都相同。然而在现实中,这个假设常常难以满足。当加工不同零部件类型的处理时间差异或者设备准备时间不能忽略时,考虑产品结构约束的过程柔性测度和改善方法需要重新分析。此外,能力发生转移时产生的成本也值得考虑。这可能作为未来进一步的研究方向之一。

(2) 本文研究的考虑产品结构约束的过程柔性测度和改善方法都是针对并行制造系统的。对于串行制造系统中产品结构约束对过程柔性的影响的分析可能与此有所不同。针对串行制造系统,分析产品结构约束对过程柔性的影响,并提出新的过程柔性测度及改善方法可以作为未来的研究方向之一。

(3) 本文对于供应链的过程柔性研究只局限于过程柔性测度,而且这个测度无法通过解析的方法直接求得,只能借助于计算机模拟实验得到,所以应用起来不太方便。以后的研究可以尝试构造一个用于评价多阶段供应链柔性的简单测度,并且基于供应链的测度方法提出改善供应链过程柔性的指导规则。

(4) 为了研究方便,本文对于两类环境要求(产品结构约束和产品需求特征)对过程柔性的影响是分开考虑的。将这两类环境要求同时和系统结构特征结合也是未来的研究方向之一。

## 参考文献

- 华中生. 2000. 一类柔性制造系统能力规划问题的研究 [D]: [博士]. 合肥: 中国科学技术大学.
- 刘蕾, 唐小我, 丁奕翔. 2005. 供应链管理模式下的供应商柔性评价[J]. 商业研究, (15): 6-8.
- 李志伟. 2007. 相关随机变量的蒙特卡罗模拟 [J]. 统计与决策, (3): 9-10.
- 黄飞华. 2006. 考虑 BOM 的柔性制造系统能力规划问题研究 [D]: [博士]. 合肥: 中国科学技术大学.
- 黄飞华, 华中生. 2004. 范围经济下的生产能力扩充和技术选择问题[J]. 计算机集成制造系统, (3): 259-263.
- Alexopoulos K, Mourtzis D, Papakostas N, Chryssolouris G. 2007a. DESYMA-assessing flexibility for the lifecycle of manufacturing systems [J]. International Journal of Production Research, 45(7): 1683-1694.
- Alexopoulos K, Papakostas N, Mourtzis D, Gogos P, Chryssolouris G. 2007b. Quantifying the flexibility of a manufacturing system by applying the transfer function [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 20(6): 538-547.
- Alexopoulos K, Papakostas N, Mourtzis D, Gogos P, Chryssolouris G. 2008. Oscillator analogy for modelling the manufacturing systems dynamics [J]. International Journal of Production Research, 46(10): 2547-2563.
- Avittathur B, Swamidass P. 2007. Matching plant flexibility and supplier flexibility: Lessons from small suppliers of U.S. manufacturing plants in India [J]. Journal of Operations Management, 25 (3): 717-735.
- Baumol WJ, Bailey EE, Willig RD. 1977. Weak Invisible Hand Theorems on the Sustainability of Multiproduct Natural Monopoly[J]. The American Economic Review, 67(3): 350-365.
- Bechrakis K, Karagiannis S, Chryssolouris G. 1997. The  $\zeta$ -analogy method for the

- modeling of manufacturing systems [C]. In: Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Manufacturing Processes & Systems, Budapest, Hungary, 166-169.
- Bish, E.K., Wang, Q., 2004. Optimal investment strategies for flexible resources, considering pricing and correlated demands [J]. *Operations Research*, 52(6), 954-964.
- Boyer KK, Leong GK. 1996. Manufacturing flexibility at the plant level [J]. *Omega*, 24(5): 495-510.
- Browne J, Dubois D, Rathmill K, Sethi SP, Stecke KE. 1984. Classification of Flexible Manufacturing Systems [J]. *The FMS Magazine*, 2(2): 114-117.
- Chang A-Y. 2008. An attribute approach to the measurement of machine group flexibility [J]. *European Journal of Operational Research*, 194(3): 774-786.
- Chryssolouris G. 2006. *Manufacturing systems: theory and practice* [M]. 2nd Ed. New York: Springer-Verlag.
- Chryssolouris G, Lee M. 1992. An assessment of flexibility in manufacturing systems [J]. *Manufacturing Review*, 5(2): 105-116.
- Chryssolouris G, Anifantis N, Karagiannis S. 1998. An approach to the dynamic modelling of manufacturing systems [J]. *International Journal of Production Research*, 36(2): 475-483.
- De Groote X. 1994. The flexibility of production processes: A general framework [J]. *Management Science*, 40(7): 993-945.
- Dixon WJ, Mood AM. 1946. The statistical sign test [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 41(236): 557-566.
- Duclos LK, Vokurka RJ, Lummus RR. 2003. A conceptual model of supply chain flexibility [J]. *Industrial Management and Data Systems*, 103(6): 446-456.
- Eppen GD, Martin RK, Schrage L. 1989. A scenario approach to capacity planning [J]. *Operations Research*, 37(4): 517-527.
- Garavelli AC. 2003. Flexibility configurations for the supply chain management [J]. *International Journal of Production Economics*, 85: 141-153.
- Garrett SE. 1986. Strategy First: A Case in FMS Justification [C]. In Proceedings of

- the Second ORSA/TIMS Conference on Flexible Manufacturing Systems (Ann Arbor, MI), K.E. Stecke and R. Suri (Eds.), Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 17-30.
- Georgoulas K, Papakostas N, Makris S, Chryssolouris G. 2007. A toolbox approach for flexibility measurements in diverse environments [J]. *Annals of CIRP*, 56(1): 423-426.
- Gerwin D. 1993. Manufacturing flexibility: a strategic perspective [J]. *Management Science*, 39(4): 395 - 410.
- Giannoccaro I, Pontrandolfo P, Scozzi B. 2003. Uncertainty in supply chain inventory management: a fuzzy approach [J]. *European Journal of Operational Research*, 149: 185 - 196.
- Goldhar JD, Jelinek M. 1983. Plan for Economics of Scope [J]. *Harvard Business Review*, 61: 141-148.
- Gong ZJ. 2008. An economic evaluation model of supply chain flexibility [J]. *European Journal of Operational Research*, 184(2): 745 - 758.
- Gong ZJ, Hu S. 2008. An economic evaluation model of product mix flexibility [J]. *Omega*, 36 (5): 852-864.
- Goyal, M., Netessine, S., Randall, T., 2006. Deployment of manufacturing flexibility: an empirical analysis of the North American automotive industry [C]. In: *Manufacturing & science operations management conference (INFORMS), MSOM 2006, Atlanta, US.*
- Graves SC, Tomlin BT. 2003. Process flexibility in supply chains [J]. *Management Science*, 49(7): 907-919.
- Hopp WJ, Tekin E, Van Oyen MP. 2004. Benefits of skill chaining in serial production lines with cross-trained workers [J]. *Management Science*, 50(1): 83-98.
- Hua ZS, Banerjee P. 2000a. Aggregate line capacity design for PWB assembly systems [J]. *International Journal of Production Research*, 38 (11): 2417-2441.
- Hua ZS, Banerjee P. 2000b. A model for line capacity design for PWB assembly systems [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 16(4): 241-257.

- Hua ZS, He P. 2008a. Process flexibility under bill of material constraints: part I—an effective measuring approach [J]. *International Journal of Production Research*, doi: 10.1080/00207540802534699 (in press).
- Hua ZS, He P. 2008b. Process flexibility under bill of material constraints: part II—structural properties and improving principles [J]. *International Journal of Production Research*, doi: 10.1080/00207540802534749 (in press).
- Hua ZS, Huang FH, Zhang B. 2008. Process flexibility with bill of material constraints [J]. *International Journal of Production Research*, 46(6): 1567- 1586.
- Hua ZS, Liang L. 2004. Heuristics to scenario-based capacity expansion problem of PWB assembly systems [C]. In: CASDMKM2004, LNAI (Lecture Notes in Artificial Intelligence) 3327. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 135-144.
- Huang GQ, Zhang X, Liang L. 2005. Towards integrated optimal configuration of platform products, manufacturing processes, and supply chains [J]. *Journal of Operations Management*, 23(3/4): 267-290.
- Iravani SM, Van oyen MP, Sims KT. 2005. Structural flexibility: a new perspective on the design of manufacturing and service operations [J]. *Management Science*, 51(2): 151–166.
- Jaikumar R. 1984. Flexible manufacturing systems: a managerial perspective [R]. WP #1-784-078, Harvard Business School, Boston, MA (January).
- Jordan WC, Graves SC. 1995. Principles on the benefits of manufacturing process flexibility [J]. *Management Science*, 41(4): 577-594.
- Kumar V. 1987. Entropic measures of manufacturing flexibility [J]. *International Journal of Production Research*, 25(7): 957-966.
- Kumar V. 1988. Measurement of loading and operations flexibility in flexible manufacturing systems: an information-theoretic approach [J]. *Annals of Operations Research*, 15(1): 65-80.
- Milner JM. 2005. Order quantity and timing flexibility in supply chains: the role of demand characteristics [J]. *Management science*, 51(6): 970-985.
- Molleman, E. and Slomp, J., 1999. Functional flexibility and team performance [J].

- International Journal of Production Research, 37(8), 1837-1858.
- Netessine, S., Dobson, G. and Shumsky, R.A., 2002. Flexible service capacity: optimal investment and the impact of demand correlation [J]. *Operations Research*, 50(2), 375 - 388.
- Panzar JC, Willig RD. 1981. Economics of Scope [J]. *American Economic Review*, 71(2): 268-272.
- Rajagopalan S. 1993. Flexible versus dedicated technology: a capacity expansion model [J]. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 5(2): 129-142.
- Ropohl G. 1967. Zum Begriff der Flexibilitaet [J]. *Werkstattstechnik*, 57: 644.
- Sarker BR, Krishnamurthy S, Kuthethur SG. 1994. A survey and critical review of flexibility measures in manufacturing systems [J]. *Production Planning and Control*, 5 (6): 512-523.
- Sethi AK, Sethi SP. 1990. Flexibility in manufacturing: a survey [J]. *International Journal of Flexible Manufacturing System*, 2(4): 289-328.
- Shewchuk JP, Moodie CL. 1998. Definition and Classification of Manufacturing Flexibility Types and Measures [J]. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 10(4): 325-349
- Slomp J, Molleman E. 2002. Cross-training policies and team performance [J]. *International Journal of Production Research*, 40(5): 1193-1219.
- Son YK, Park CS. 1990. Quantifying opportunity costs associated with adding manufacturing flexibility [J]. *International Journal of Production Research*, 28(6): 1183-1194.
- Talaysum AT, Hassan Z, Wisnosky D, Goldhar JD. 1986. Scale vs. Scope: The Long-Run Economics of the CIM/FMS Factory [C]. In: *Advances in Production Management Systems*, 85, E. Szelke and J. Browne (Eds.), Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Tomlin B. 2000. Supply chain design: Capacity, flexibility and wholesale price strategies [D]. Ph. D. thesis, Sloan School of Management, MIT, Cambridge, MA.

- Tseng HE, Chang CC, Chang SH. 2005. Applying case-based reasoning for product configuration in mass customization environments [J]. *Expert Systems with Applications*, 29(4): 913-925.
- Van Mieghem JA. 1998. Investment strategies for flexible resources [J]. *Management Science*, 44(8): 1071-1078.
- Vickery S, Calantone R, Droge C. 1999. Supply chain flexibility: an empirical study [J]. *The Journal of Supply Chain Management*, 35(3): 16-24.
- Yan H, Yu ZX, Edwin Cheng TC. 2003. A strategic model for supply chain design with logical constraints: formulation and solution [J]. *Computers and Operations Research*, 30(14): 2135-2155.
- Yeung JHY, Wong WCK, Ma L, Law JS. 1999. MPS with multiple freeze fences in multi-product multi-level MRP systems [J]. *International Journal of Production Research*, 37(13): 2977-2996.

## 致 谢

五年的时光，转瞬即逝。在我写完这篇学位论文的最后一页时，我衷心地感谢我的导师华中生教授！恩师对我的教诲犹如我人生路上航行的路标，每当我在十字路口迷失方向时，恩师总是不厌其烦的点拨我，为我指明方向。恩师严谨的治学态度堪称学术界的典范，在我发表的每一篇论文以及本文的写作中，都浸透着恩师辛勤的汗水。恩师让我明白，什么叫做真正的科研。恩师科学的研究方法、严谨的学术作风、勤奋的工作态度以及正直的思想品格都将是我一生学习的目标和努力的方向。恩师对我的教诲将使我受益一生。

感谢徐晓燕老师在我攻博期间在学习和生活上的关心与支持！感谢梁樑教授、陈华平教授及管理学院其他老师在我的课程学习过程中给予的无私帮助和指导！特别感谢研究生班主任郭平老师、杨文铸老师，本科班主任吕萍老师、李晓燕老师对我在学习和生活方面的指导和关怀！

感谢我的父母含辛茹苦的养育之恩！他们的开明和远见使我在学业之路上一帆风顺。感谢我的弟弟何超、妻子甘洁对我学习和生活上的理解和支持！我永生感激不尽！

感谢实验室所有师兄姐妹！感谢已毕业的师兄江文奇、卞亦文、李四杰、黄飞华、张斌、杨杰、查迎春，师姐陈晓伶对我在学习和生活上的关心和帮助！感谢王昱、吴三平、丁胡送、张雪梅、孙燕红、章魏等在学习过程中对我的启迪和在生活中带来的欢乐！特别感谢杜少甫博士在论文格式和排版方面的帮助！

谨以此文献给所有关心、爱护、支持和帮助过我的人们，以表达我对他（她）们衷心的感谢和深深的祝福！

何 平  
2008年11月于合肥

## 在读期间发表的学术论文与取得的研究成果

### 一、已发表和待发表的文章

1. Hua ZS, He P, Bian YW. 2008. Improving eco-efficiency of a system through allocation of non-discretionary input. *International Journal of Information and Management Sciences*, 19 (1):75-91.
2. He P, Hua ZS. 2008. Compensation analysis with additive DEA model. *Kybernetes*, 37 (9/10): 1331-1338.
3. He P, Xu XY. 2008. Improving process flexibility through products assignment with bill of material constraints. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, doi:10.1016/j.rcim (in press).
4. Hua ZS, He P. 2008. Process flexibility under bill of material constraints: part I—an effective measuring approach. *International Journal of Production Research*, doi: 10.1080/00207540802534699 (in press).
5. Hua ZS, He P. 2008. Process flexibility under bill of material constraints: part II—structural properties and improving principles. *International Journal of Production Research*, doi: 10.1080/00207540802534749 (in press).
6. Hua ZS, He P. 2008. Note on process flexibility in supply chains. Working paper.

### 二、科研项目

1. 政府委托项目《合肥市物流产业发展的五年规划及相关政策研究》，2005年3月—2006年4月，主要参与人
2. 中国科学技术大学创新基金项目《考虑BOM的柔性制造系统和供应链能力规划问题》，2007年10月—2008年11月，负责人