

## 摘要

随着科学技术的进步, 夹具已经从一种辅助工具发展成为门类齐全的工艺装备。机械加工过程越来越柔性化, 而目前夹具的柔性化程度已经成为产品快速变换和制造系统新建或重组后运行的瓶颈, 将会严重地影响制造系统的设计建造周期、系统生产率、质量和成本。现代制造中迫切需要能够适应产品变化的柔性夹具。

本文以目前产品设计过程中应用的特征建模技术、功能论方法和模块化产品设计方法, 以及计算机辅助夹具设计 (CAFD) 等先进理论为技术支撑, 对批量随机变化生产条件下, 不同规格的产品在一条生产线上进行生产时, 对生产线夹具产生的新要求进行了分析和研究; 提出了多品种产品混线生产的新型柔性夹具概念和设计方法。

首先, 利用特征建模技术建立了产品信息模型, 通过分析零件相似性, 确定了以计算零件相似度为依据的判断产品共线生产的方法。针对可共线生产的产品, 分析其对夹具设计的影响, 提出了夹具应用中的三个需要解决的问题: 调整方式、调整精度和调整时间。

然后, 从系统论角度出发, 分析不同因素对夹具设计的影响, 结合系统建模技术建立了夹具空间模型, 以夹具空间为基础, 利用“切除法”设计柔性夹具设计的思路, 可以完成调整方式的设计; 根据夹具设计的新成果提出了夹具的运动功能分解, 并对运动功能对夹具误差和结构的影响进行了分析, 通过控制夹具的设计误差可以完成夹具调整精度的控制; 在实现夹具设计的基础上, 借鉴准时化生产思想, 设计了夹具调控系统, 作为生产现场管理生产线进程的手段, 解决了柔性夹具应用时的调整时间的问题。

最后, 引入基于规则的知识推理方法和基于实例的知识推理方法, 结合二者的优点建立了以基于“实例+规则”的推理方法为基础的夹具设计流程图; 通过这种方法可以实现夹具的自动化设计, 提高夹具设计效率。

**关键词:** 多品种, 变批量, 生产线, 夹具, 柔性化, 相似度, 功能论

## Abstract

Along with the advancement of science and technology, from a fixture had auxiliary tool development become efficiency process equipment. Machining process more flexible, and the degree of flexibility fixture rapid transformation, and has become the product or manufacturing system operation bottleneck, after recombination will seriously affect the manufacturing system design and build cycle, productivity, quality and cost. Modern manufacturing in urgent need to adapt the product change flexible clamp.

Based on the current product design process of feature modeling technology and application methods and theory of function module design method, and the products CAFD fixture design (cad) and other advanced technical support, the theory of stochastic variation of batch production conditions, different specifications of products in a line of production line, the new requirements of fixtures is analyzed and studied, Put forward many varieties of new product mix line production concept and design method of flexible clamp.

Firstly, using the feature modeling technology product information model, through the analysis of the components, based on the calculation of similarity based on the similarity of the parts of the product line production judgment method. According to the production line of products, analyzes the influence of fixture design of fixture application, and puts forward three problems need to be solved: adjusting mode, adjust the accuracy and adjust the time.

Then, from the angle of system analysis and design of different factors, the influence of fixture system modeling, model is established in jig fixture space, use "radical" design of fixture design, flexible adjustment method can complete the design. According to the new achievement fixture designing forward movement of function decomposition, fixture and movement of fixture structure and function of error is analyzed, and the influence of fixture design error through controlling accuracy can be finished fixture of control, On the basis of fixture design, on-time production design thought, system, a fixture production site management production process, the method to solve the flexible clamp application of adjustment problems.

Finally, based on the knowledge of the rules of case-based reasoning method and knowledge reasoning method, combining with the advantages of both is established based on the examples of the "rules of + based reasoning methods of fixture design flow chart, Through this method can realize the automation design of fixture, improve the efficiency of fixture design.

**Key Words: multi-species, variable-batch, production line, fixture, flexibility, similarity, functional theory**

## 插图索引

图 1.1 CAFD 与其它 CAX 系统之间的信息流.....	5
图 2.1 特征的分类.....	8
图 2.2 零件形状特征示意图.....	9
图 2.3 形状特征的特征树.....	9
图 2.4 形状特征的形状参数及位置参数示意图.....	9
图 2.5 零件的形状特征层次表达模型.....	10
图 2.6 零件的相似性.....	10
图 2.7 特征拓扑关系相似度计算示意图.....	13
图 2.8 支架零件图.....	16
图 2.9 拓扑关系图.....	16
图 3.1 零件示意图.....	18
图 3.2 夹具工作原理.....	19
图 3.3 模块系统和产品族的关系.....	20
图 3.4 基于聚类分析的模块识别.....	21
图 3.5 夹具的功能模型.....	21
图 3.6 夹具功能-特征-结构映射示意图.....	22
图 3.7 夹具整体结构.....	22
图 4.1 夹具设计的三个阶段.....	24
图 4.2 库内容的结构.....	26
图 4.3 零件族信息的层次模型.....	27
图 4.4 虚拟机床建模.....	28
图 4.5 广义定位原理示意图.....	30
图 4.6 夹具资源库的多维数据结构模型.....	31
图 4.7 机械加工示意图.....	31
图 4.8 夹具空间示意图.....	32
图 5.1 双回转数控夹紧装置.....	34
图 5.2 工件的定位.....	35
图 5.3 加工误差示意图.....	37
图 5.4 三种特征面的误差综合.....	38
图 5.5 321 平面定位方式.....	39
图 5.6 一面两销定位.....	40
图 5.7 V 型块定位.....	40
图 6.1 夹具求解方法.....	44
图 6.2 基于“实例+规则”的快速夹具设计系统.....	45
图 6.3 拉式流的物流和信息流.....	47
图 6.4 看板分类.....	48
图 6.5 生产线柔性化夹具系统.....	49
图 6.6 工作流程图.....	49
图 6.7 看板样式.....	50
图 6.8 看板的使用规则.....	50

## 附表索引

表 1.1 现代柔性夹具原理方法及分类表.....	3
表 2.1 生产流程矩阵.....	14
表 2.2 排序后矩阵.....	15
表 2.3 加工方法序列 $P_j$ .....	15
表 4.1 工件因素.....	25
表 4.2 机床因素.....	27
表 4.3 夹具结构.....	29

# 兰州理工大学学位论文原创性声明和使用授权说明

## 原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：曹金涛

日期：2010年 5 月 31 日

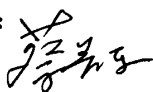
## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并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。本人授权兰州理工大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并通过网络向社会公众提供信息服务。

作者签名：曹金涛

日期：2010年 5 月 31 日

导师签名：



日期：2010年 6 月 1 日

# 第 1 章 绪论

## 1.1 课题的提出和意义

随着科学技术的进步和生产力的发展,国民经济各部门不断要求机械工业提供先进的技术装备,研制新的产品品种,以满足国民经济持续发展和人民生活不断提高的要求;这样一来,促使机械工业的生产形式发生了显著的变化,即多品种、中小批量生产逐渐占据优势。国际生产研究协会的统计表明,目前中、小批量多品种生产的工件品种已占工件种类总数的 85%左右。现代生产要求企业所制造的产品品种经常更新换代,以适应市场的需求与竞争。在这一生产趋势下,制造行业面临着一个两难问题:如何以大批量生产的经济效益进行定制产品的生产。

大批量定制生产(Mass Customization, MC)作为一种正在迅速发展的制造模式,正在试图解决这一问题<sup>[1,2]</sup>。大批量定制生产采用的基本方法是将定制产品的制造问题通过产品重组和过程重组转化为或部分转化为批量制造问题,即提供给用户的是全新的、定制的个性化产品,而实际产品则主要由标准的模块组成。

美国乔治·华盛顿大学于 90 年代初成立的由 45 位著名的未来学家和技术专家组成的新兴技术预测委员会在 1996 年的预测中,从可以预见到的最重要的技术进步中挑选 85 项将要出现的技术,其中就有大批量定制生产(MC)技术。他们预计到 2011 年,汽车、电器等 30%以上的产品将广泛实现大批量定制生产<sup>[3]</sup>。

在大批量定制生产中,机床行业承担双重的任务:①制造装备本身的大批量定制化,这是一种可重构的、模块化的制造装备。组合机床及组合机床生产线已初步体现了大批量定制生产的思想;②为其它行业提供高度柔性、制造成本低廉、能满足大批量定制生产要求的制造装备。在大批量定制生产中,虽然大量采用标准模块组合成定制产品,但还是要快速和低成本地制造一些专用的零部件。

由于产品更新越来越快,使用传统的专用夹具势必造成积压浪费。除了在产品结构设计和产品生产工艺方面进行改革之外,在工艺装备方面也必须改革其狭隘的专用性,使之适应新的生产需要。

夹具作为制造企业中重要的基础工艺装备,已经广泛应用于加工、检测和装配等制造过程中。作为制造规划的一部分,夹具设计的效率直接影响到制造的生产准备时间和产品成本。然而在实际应用中,由于装夹工件和加工条件具有很大的可变性,使工装夹具设计过程趋于复杂,设计结果难于把握。通常夹具设计过程不仅需要大量的生产、加工、工艺和零件数据,同时需要设计人员具有很丰富的领域知识和设计经验。

随着科学技术的进步,夹具已经从一种辅助工具发展成为门类齐全的工艺装备。在批量生产中,企业都习惯于采用传统的专用夹具,一般在具有中等生产能力的工厂里,约有数千甚至近万套专用夹具;在多品种生产的企业中,每隔 3~4 年就要更新 50%~80%的专用夹具,而夹具的实际磨损量仅为 10%~20%,这些夹具留下来往往很难得到重复使用,抛弃它们又实在可惜,因此造成很大的浪费。这些都是一直困扰企业的现实问题。

随着加工技术的发展,机械加工过程越来越柔性化,而目前夹具的柔性化程度已经成为产品快速变换和制造系统新建或重组后运行的瓶颈,将会严重地影响制造系统的设计建造周期、系统生产率、质量和成本。近年来,数控机床、加工中心、成组技术、FMS等新加工技术的应用,对机床夹具提出了如下新的要求:

- (1)能迅速而方便地装备新产品的投产,以缩短生产准备周期,降低生产成本;
- (2)能装夹一组具有相似性特征的工件;
- (3)能适用于精密加工的高精度机床夹具;
- (4)能适用于各种现代化制造技术的新型机床夹具;
- (5)采用以液压站等为动力源的高效夹紧装置,以进一步减轻劳动强度和提高劳动生产率;
- (6)提高机床夹具的标准化程度。

由上述分析经济和技术的发展以及数控、加工中心机床的特点,对机床夹具的使用性能和结构提出了更高更新的要求,需要一种结构简单、精度高、强度高和通用性好、适应性强、柔性高的新型柔性夹具系统。这种夹具能适应不同的机床、不同的产品或同一产品不同的规格型号,能最大限度地满足各种机床夹具的需要。

## 1.2 国内外研究现状

夹具是在工件加工中用来准确定位工件和牢固夹紧工件的工艺装置,在机械制造中占有重要地位。无论是在传统制造业还是现代柔性制造系统中,由于大量的加工操作需要装夹,夹具设计在制造系统中就显得非常重要,它直接影响加工质量、生产效率和制造成本。

在柔性制造系统(Flexible Manufacturing System ,FMS)中,机床已高度柔性化,但是其夹具往往是传统的,这不仅增加了制造成本、延长了生产准备周期,甚至影响生产计划的正常执行;在一个柔性制造系统(FMS)中,夹具设计制造的费用占到整个系统费用的10%~20%。在传统生产模式中往往大量采用专用夹具,而专用夹具的设计制造周期较长,往往是新产品生产技术准备工作的关键之一。可见夹具设计的周期长短和效果对于产品开发的整个周期的长短和产品质量有着举足轻重的作用。

### 1.2.1 柔性夹具

在市场竞争日趋激烈的形势下,产品的生产周期愈来愈短,制造厂商更加意识到需要柔性制造系统(FMS)。如果还使用现有夹具或不用柔性夹具,FMS就不能实现真正的柔性,所以在FMS和计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System, CIMS)中迫切需要能适应产品变化的柔性夹具。

一般来说,柔性夹具是指用同一夹具系统装夹定位在形状与尺寸上有所变化的多种工件<sup>[4]</sup>。但是工件变化可以在小范围,即在相似的形状和尺寸变动不大的范围内,也可在大范围,即零件形状完全不同,尺寸变化也大。所以,柔性概念没有明确的定义和界限。笼统来说,就是指与NC机床、加工中心配合使用的、具有加工多种不同工件能力

的夹具。自 20 世纪 80 年代以后柔性夹具的研究开发主要沿原理和结构均有创新和传统夹具创新两大方向发展，如表 1.1 所示。

表 1.1 现代柔性夹具原理方法及分类表

分类	柔性工作原理	子分类
组合夹具	标准元件的机械装配	槽系组合夹具 孔系组合夹具
可调整夹具	在通用或专用夹具基础上更换元件和调节元件的位置	通用可调夹具 专用可调夹具
模块化程序控制式夹具	用伺服控制机构变动元件的位置	双转台回转式 可移动拇指式
适应性夹具	将定位元件或夹紧元件分解为更小的元素以适应工件的形状连续变化	涡轮叶片式 弯曲长轴式
相变材料夹具	材料物理性质的变化	真相变材料夹具 伪相变材料流态床夹具
仿生抓夹式夹具	形状记忆合金	用于机器人终端器 也可用于夹具

(1)相变材料夹具：目前只能用于曲面定位或加工力轻微的精加工等少数情况，许多问题尚待研究。

(2)适应性夹具：可用于夹持横截面不规则变化的长工件，所以此类夹具也只适合带有曲面的或特定的工件。

(3)模块化程序控制式夹具：此类夹具智能化程度较高；但因为结构太复杂而成本过高，而且柔性有限，不容易在生产中普及。

(4)可调整夹具：传统夹具中，可调整夹具可以适应小范围的柔性，而可调整夹具的使用往往和成组生产组织密切相关，因此也常称为成组夹具。由于现代生产由按库存生产改成按订单生产，和产品种类市场需求的不确定性，不容易组织成组生产，而且可调整钻模的应用日益减少，因此可调整夹具的应用受到限制。

(5)组合夹具：此类夹具易于装配、材料廉价、加工方便、配套元件少、成本低、性能好而受到国内外市场的青睐，成为和加工中心、FMS 配套的主要夹具，成为当代柔性夹具的主流；然而，组合夹具零件繁多、管理困难，而且组装夹具可能刚度不足，这些都成为制约组合夹具发展的问题。以前我国曾搞过组合夹具，并建了不少的组合夹具站。由于信息传递的不畅通，企业在进行夹具设计时往往很难迅速知道组合夹具的规格，如何组合成自己所需的夹具以及从何处可以迅速得到组合夹具，结果组合夹具的发展受到挫折。

## 1.2.2 计算机辅助夹具设计 (CAFD)

随着数字化制造技术的发展，通常建立在经验基础之上的传统制造技术逐渐走上了与理论分析、数学建模相结合的道路，从而提高了解决实际制造问题的科学性。

使用计算机进行辅助设计，可以大量减少夹具的设计时间，提高效率。国内外专家做了大量的研究工作<sup>[5-8]</sup>，推出了一系列的此类开发系统，比如：

(1)黄永强、刘文剑等人开发面向生产的计算机辅助组合夹具设计系统。包括自动选件、元件数据库以及图形库管理、元件交互组装三部分。元件图形库以及交互组装是基



于 AutoCAD 环境建立的。元件自动选择利用了专家系统技术，选件的依据是工件的加工工艺信息、工件形状、尺寸以及夹具总体结构设计。在夹具设计过程中，用户需要首先进行夹具的概念设计，即确定夹具总体结构，夹具的定位夹紧方式、定位夹紧点等，然后才能选择夹具元件。

(2)朱耀祥教授主持开发的、基于成组技术的检索变异式系统。它以 AutoCAD 和 DBASE 为支撑软件。系统构造了一个带有夹具设计信息的编码系统 KJBM，并用编码作为系统输入。这种编码方式为夹具设计提供了简单的、规范化、实用性强和易于检索处理的信息描述方式。系统嵌入了一个组装专家系统，向设计者推荐适当的组装定位方案和可选用的基础件。

(3)P.M Grippo 等开发的一个槽系组合夹具 CAD 系统。系统原理基于成组技术交互生成夹具装配图。系统主要包括绘制零件图部分，检索商用夹具元件库部分及夹具和零件图形库部分。

(4)W.Ma, Z.Lei, Y.Rong 等人研制的计算机辅助标准夹具构型设计系统。当定义了几何模型和夹具元素功能后，最终输出夹具装配图。

总体来说，计算机辅助夹具设计仍处于研究阶段，已经推出的开发系统大多以固定算法模拟实际设计，难以利用经验设计知识，因此不能完全适应夹具设计的要求，而专用夹具方案的自动设计技术则更加不成熟，仍待进一步研究解决。计算机辅助夹具设计领域关键技术问题包括以下几点：

(1)夹具规划 (Fixture Planning)：夹具规划又称为夹具方案设计。主要是根据工件信息、安装规划、加工的刀具机床、夹具组件等信息，规划设计夹具的定位方案和加紧方案。规划设计的结果需要人工的或者自动的验证确定，然后输出某种格式的夹具规划的结果，作为后续工作的输入。这里最主要的是自动化规划设计的推理方法。到目前为止，大多数的 CAFD 研究都集中于在这一方面，发展了数学模型的方法、寻找定位夹紧位置的算法、运动分析、基于规则的系统方法等研究途径。

(2)夹具结构设计自动化。夹具结构自动化设计就是要根据夹具规划的结果，选择元件决定位置和方位，输出夹具装配图、元件明细表、夹具装配说明等信息或者直接输出到机器人装配。在这方面的研究文献很少，上个世纪 90 年代以来有一些研究，但是都不是很成熟，这也是至今未有商品化结构设计自动化软件产生的原因。

(3)夹具功能检查和性能评价。夹具规划、结构自动化设计都要检查某些性能要求。夹具规划中需要检查刀具加工轨迹包络面是否和夹具元件产生干涉。对自动化设计的结果要检查加工精度、刚度和变形、各夹紧点夹紧力作用下的工件稳定性等。这方面都是通过一些算法来进行的。

(4)系统集成和标准化接口技术。夹具的设计组装作为一种工艺装备不可能是孤立存在的，必然要和其他的系统、软件集成。比如：需要从 CAPP 中得到安装规划，需要调用工件 CAD 图数据、元件 CAD 数据，结果要用 CAD 输出，夹具设计人员可以修改夹具的 CAD 图，需要和夹具元件库、夹具设计图纸库、夹具的生产准备和流通、生产作业计划等信息管理系统交互。

近几十年来，计算机辅助夹具设计方法的研究与开发受到越来越多研究人员的关注，但这些方法只适用于夹具的结构设计层面上，忽略了夹具性能评价方面的研究，更谈不上研究性能评估对结构设计的反馈指导作用。然而夹具性能的优劣恰恰决定了夹具结构的功能和效率。另一方面，计算机辅助夹具设计尽管在一定程度上提高了夹具设计的效率，但这些方法本质上仍然局限于传统的经验设计模式，一般难以得到最优的夹具设计结果。

在 CAFD 系统开发时，一方面夹具设计对产品零件 CAD 系统和 CAPP 系统的特殊信息需求，系统能面向夹具设计提供信息，并依据工件安装平衡分析和夹紧力造成工件的变形分析来考虑约束 CAD 的零件结构设计和 CAPP 切削用量的选择。另一方面，夹具设计系统本身各个模块之间也设置信息反馈和设计结果修改环节，以实现夹具设计各阶段任务之间的约束，所以研究计算机辅助夹具设计支持系统的信息集成，从产品零件 CAD、CAPP 系统读取初始信息，并将夹具设计结果信息反馈给产品零件 CAD、CAPP 系统。建立既可以独立运行又具备集成条件的计算机辅助夹具设计支持系统对于缩短产品开发周期，提高设计质量至关重要。夹具 CAD 与 CAD、CAPP、CAM 之间的信息流如图 1.1 所示。

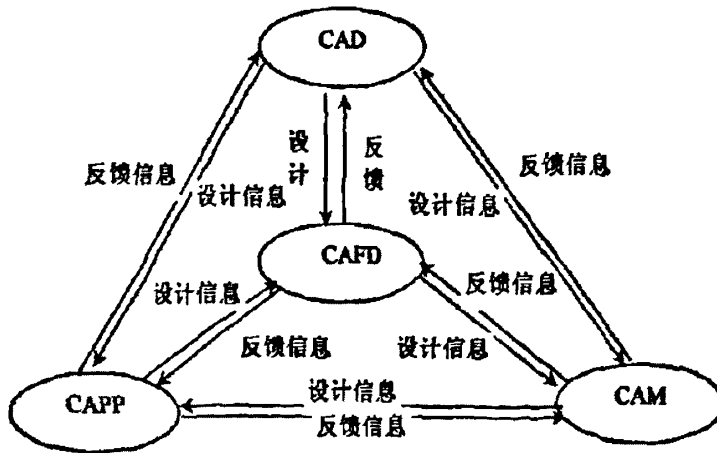


图 1.1 CAFD 与其它 CAX 系统之间的信息流

### 1.2.3 可重构夹具

从专用夹具发展到组合夹具，也因为使用中的各种问题而不能完全适应夹具快速高效设计制造的要求，有人提出了可重构夹具系统来解决这一问题<sup>[9-11]</sup>。可重构夹具首先对现有品种、种类、规格繁多的组合夹具、专用夹具系统的各种零件按其相似形状和功能进行归并简化，组成统一的夹具元件系统。这样将使夹具元件的品种、规格大为减少，有利于设计、制造和使用。根据所要设计的工件特征，预先按照功能要求将夹具元件组装成夹具组件，首先在夹具组件的层次上设计夹具结构，这样就能简化设计过程，使用简化夹具的零件和组件，不仅能增加夹具设计灵活性，并在完成生产任务后，又能够做到部分、大部分或全部零件和组件的重复使用，是一种新型的夹具设计思想和系统。

美国国家研究院在 1998 年提出的《2020 年制造业挑战预测》中把可重构制造系统

列为 2020 年前制造业面临的十大关键技术之首，国内外学者付出了大量的精力和实践对其进行研究。但是到目前为止，可重构制造系统的理论研究虽已取得了一定的进展，但整个研究工作还没有形成完整的体系，可重构制造系统的原型尚未制造出来。

可重构夹具设计思想来源于可重构制造系统。可重构制造系统使之能够通过对其制造系统结构及其组成单元进行快速重组或更新，及时调整制造系统的功能和生产能力，以利用对制造设备及其模块或组件的重拍、更替、剪裁、嵌套和革新等手段对系统进行重新组态、更新过程、变换功能或改变系统的输出。

可重构夹具在成组夹具的基础上又向前跨进一步，可重构夹具是为了适应可重构制造而产生的一种新的夹具理念和装夹系统，是传统组合夹具、柔性夹具的延伸和发展。

可重构夹具对提高制造系统快速响应产品变化的能力，缩短产品设计制造周期，增加制造系统的柔性，降低成本，提高产品质量等都具有十分重要的意义。可重构夹具与常规的组合夹具、柔性夹具等相比，具有以下特点：①可重构性好；②可扩充性好；③开放性好；④适应性强；⑤响应新产品和重构的速度很快。

可重构夹具仍处于理论研究阶段，没有成型的产品可以应用，并且仍然有许多问题需要解决。

### 1.3 论文的主要研究内容

本文对国内外夹具设计理论及实践进行了大量研究工作，结合机械产品模块化设计原理、人工智能技术等，对面向生产线的新型柔性夹具系统的关键支持技术问题展开较为深入的研究：

第一章阐述了当前市场形势下制造业面临的机遇与挑战，特别是夹具行业存在的问题。介绍了国内外关于柔性夹具设计制造理论及方法研究的现状。

第二章首先应用特征建模技术建立产品信息模型，然后分析零件的相似性得出产品可共线生产的条件；并利用相似性推导出量化产品相似程度的方法——相似度计算。

第三章首先分析了产品共线生产时对夹具产生的要求，然后运用功能论方法和模块化产品设计方法为基础分析夹具的工作原理，推导夹具的整体结构。

第四章运用系统论方法分析工件、夹具、机床各自对夹具设计的影响，利用特征建模技术建立了工件和机床的模型库，然后分析目前夹具设计方法的局限，提出以夹具空间为基础，利用“切除法”设计柔性夹具的思路。

第五章在分析目前柔性夹具结构的基础上，提出夹具元件的运动功能，指出通过元件的运动调整夹具结构而实现夹具的柔性化是一种可行的方法，然后分析运动元件对于夹具误差的影响。

第六章介绍基于实例和规则的知识推理方法，设计快速夹具设计系统流程图；然后借鉴准时化生产理论提出柔性夹具现场调控系统。

最后，总结全文并提出应该继续改进的工作。

## 第 2 章 基于共用生产线生产的产品族

### 2.1 产品信息模型

特征建模技术是随着计算机技术的发展而出现的,是新一代 CAD/CAM 集成系统的关键技术之一,是产品模型技术的核心,建立基于特征的统一而完备的产品信息模型,从根本上解决产品在设计、生产、质量控制和组织管理等各个环节的数据交换和共享问题,成为 CAD 技术下一步的发展方向,CIMS 日益受到人们的重视,更促进了特征建模技术的发展。

#### 2.1.1 特征的定义和分类

1978 年美国麻省理工大学 (MIT) Gossard 教授指导的学士论文“CAD 中基于特征的零件表示”首次提出了“特征”的概念<sup>[12]</sup>,由此揭开了特征建模技术的序幕。1988 年末,ISO 颁布的 PDES/STEP 标准草案,将形状、公差和材料特征列为产品信息模型的构成要素,从而使特征获得了法定地位。

特征是具有工程含义的几何实体,为了表达产品的完整信息而提出的一个概念<sup>[13]</sup>。特征是对诸如零件形状、工艺和功能等与零件描述相关的信息集合的综合描述,是反映零件特点的可按一定的规则分类的产品描述信息。特征是产品信息的集合,它不仅具有按一定拓扑关系组成的特定形状,且反映特定的工程语义,它兼有形状和功能两种属性,从它的名称和语义足以联想其特定几何形状、拓扑关系、典型功能、绘图表示方法、制造技术和公差要求,适宜在设计、分析和制造中使用。特征模型在几何模型的基础上又进一步抽取出一一些高层信息,通过特征进行描述、搜集和操作,如:支持概念设计的功能特征、支持详细设计的形状特征、支持计划和加工活动的制造特征以及支持人机交互的设计特征等。

广义上讲,特征是包含设计信息和制造信息的集合。我们比较倾向于将特征定义为零件属性的描述,特征是零件形状、材料、精度或其他属性的“信息集合”,这些信息是产品生命周期中各阶段如设计、分析和制造所必须的。从这个意义上讲,特征有形状特征、精度特征、管理特征、材料特征、装配特征、性能分析特征和附加特征。在这些特征中,形状特征是产品信息模型中最主要的特征信息之一,它是其它非几何特征信息(如精度特征、材料特征)的载体,非几何特征信息作为属性或约束附加在形状特征的组成要素上。因此特征建模的关键取决于形状特征的表达,如图 2.1 所示。

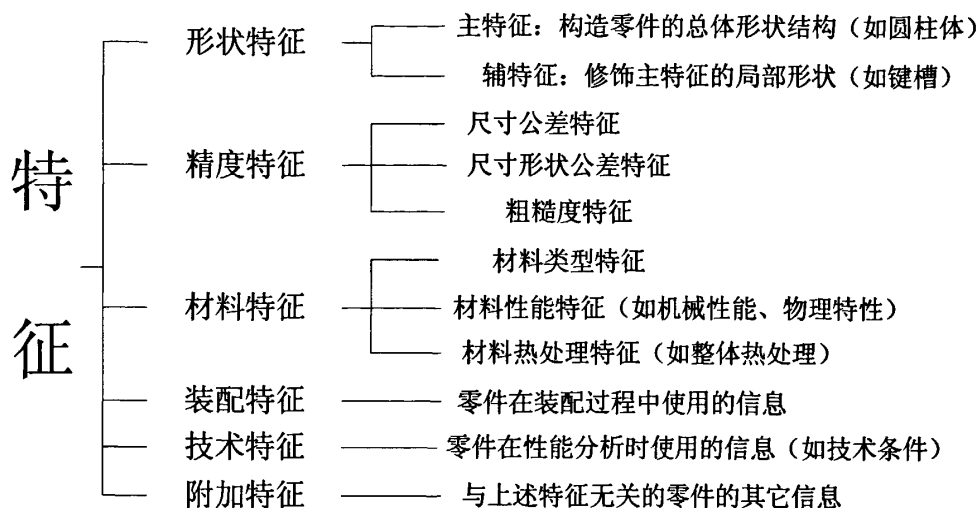


图 2.1 特征的分类

### 2.1.2 基于特征的零件建模

当前的 CAD 软件(UG、PRO/E 等)虽然在一定程度上采用了特征技术,但它们的核心理念是 B-Rep 和 CSG<sup>[14,15]</sup>,对同一零件的表达可能存在多种方式。不同的工程应用对特征的定义和分类各有侧重,特征的通用性并不完善<sup>[14,16]</sup>。为了评价产品族零件的相似性,有必要重新规范零件的特征体系,建立统一的零件信息表达模型。

#### 1、形状特征的定义及分类

形状特征是具有一定拓扑关系的几何实体,这些实体是构造零件形状的基本单元,包含零件几何形状信息和拓扑结构信息<sup>[17]</sup>。根据零件的形体组成特点来划分形状特征,零件的总形体可划分为若干部分,每一部分是某一种基本形体。确定基本形体的原则是:①形状规则且匹配零件上某一位置的实体结构;②具有普遍性,在不同的零件中反复出现;③具有工程意义,可通过特定的加工方法成形。按照基本形体的几何形状,形状特征可分为长方体、圆柱体、圆锥体、棱柱体、扫描体等基本类型;根据基本形体的表达功能,形状特征又分为主特征和辅特征两大类。主特征形成零件的主体形状骨架,是辅特征的载体;辅特征形成零件的次要几何形状,是对主特征的局部修饰和补充。

#### 2、形状特征的拓扑关系表达

零件由若干个形状特征组成,特征之间存在一定的拓扑关系。拓扑关系是所有特征对之间关系的组合,表明特征在空间中的相互位置状态。特征对之间的关系包括邻接关系和包含关系。邻接关系指两个特征有公共平面,且总占据空间为两特征各占据空间之和;包含关系指某一特征位于另一特征内部,总占据空间为两特征各占据空间之差。如图 2.2 所示,特征 1、2 之间及特征 2、3 之间是邻接关系,特征 2、4 之间是包含关系。零件形状特征按照它们之间的拓扑关系形成树状结构——特征树,图 2.2 中零件的形状特征树如图 2.3 所示,图 2.3 清楚地反映了零件特征体系的拓扑结构。

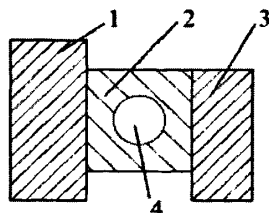


图 2.2 零件形状特征示意图

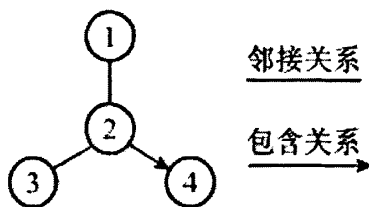


图 2.3 形状特征的特征树

### 3、形状特征的特征参数表达

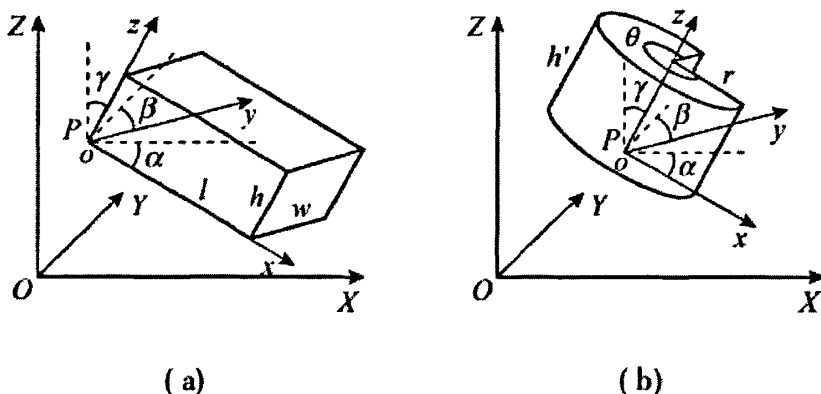


图 2.4 形状特征的形状参数及位置参数示意图

零件的每个形状特征都可由一组惟一的特征参数集来约束，形状特征的特征参数分为形状参数和位置参数两类，如图 2.4 所示。形状参数描述特征的形体尺寸大小，如图 2.4(a)中的(l, w, h)及图 2.4(b)中的(r, h', θ)。位置参数描述特征的空间位置为表达特征的位置，先建立一个零件整体坐标系，并在每个特征上指定一个基准点 P，给出 P 在整体坐标系中的坐标( $X_P, Y_P, Z_P$ )，然后以基准点 P 作为坐标原点建立特征的局部坐标系，分别找到局部坐标系和整体坐标系的对应坐标轴 x-X、y-Y、z-Z 之间的旋转角  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 。因此，形状特征的位置参数为 $\{(X_P, Y_P, Z_P), (\alpha, \beta, \gamma)\}$ 。

### 4、零件的形状特征模型

基于形状特征，可建立统一的零件信息表达模型，如图 2.5 所示。该模型包含形状特征分类信息、特征树信息和特征参数信息，分别在 4 个层次进行表达：类型层表达零件的形状特征划分和分类情况；拓扑关系层以特征树结构形式描述零件形状特征之间的空间关系；形状层通过形状参数来实现特征几何形状的定量表达；位置层利用位置参数来约束特征的空间位置。

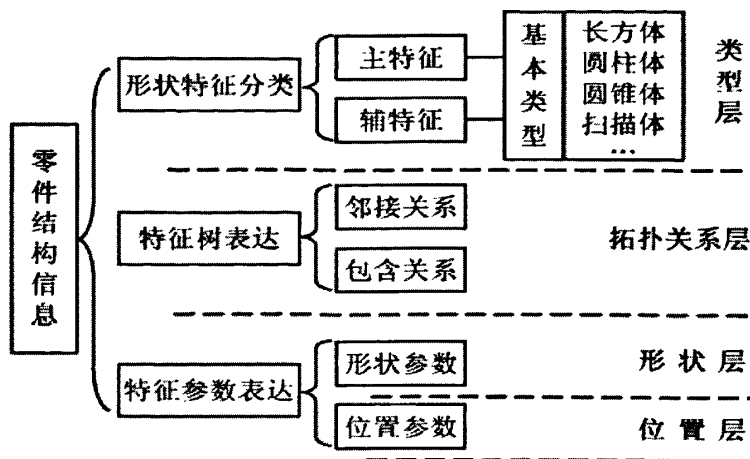


图 2.5 零件的形状特征层次表达模型

## 2.2 可共线生产的产品族

### 2.2.1 零件的相似性

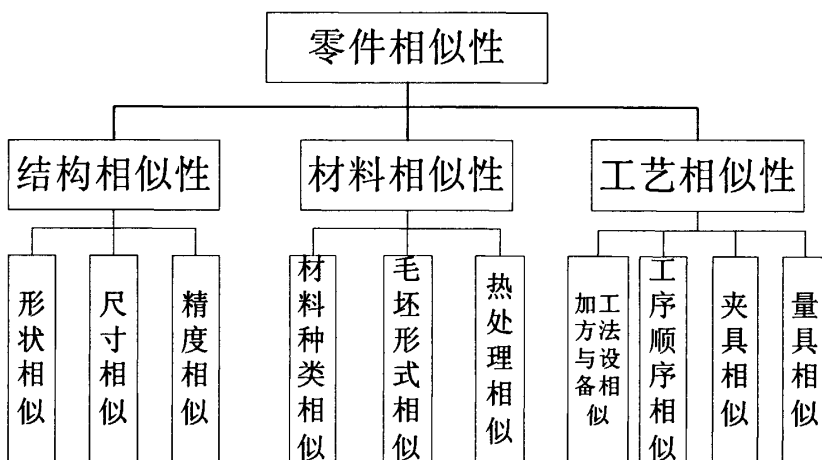


图 2.6 零件的相似性

组成机械产品的零件经分析，大致可分为三类：1、复杂件或特殊件：结构上差别大，再用性低（例如机床床身等），约占零件种数的 5%~10%；2、相似件：属中等复杂程度，在不同产品中相似程度高而具有一定的通用性（如各类轴），品种多、数量大，约占零件种数的 70%；3、简单件或标准件：结构简单，再用性高，一般已组织专业化大量生产（如螺钉）。

由上述分析可知，除标准件外，自制件中的绝大多数是相似件。虽然相似件中每一种零件之间并不相同，但它们在功能、结构和加工工艺等方面存在着大量的相似性，如图 2.6 所示。

根据零件的相似性，可以按不同的标准将零件分组。常见的零件分组方式有两大类<sup>[18]</sup>：一类是面向工艺的分组方法，如生产流程分析法、顺序分枝法、聚类分析法、相似性系数法等；另一类是根据零件分类编码系统进行分组，如特征码位法、码域法、特征

码位码域法等。

面向工艺的分组方法均以生产流程分析(Production Flow Analysis, PFA)图为基础。应用 PFA 法的前提是已知该零件的工艺过程(包括工艺顺序和所用设备),通过相同或相似的工艺路线将零件聚集在一起成组。这是划分工艺组(包括调整组、数控组等)或管理组(同期投产组等)的好方法。PFA 方法的缺点是应用了现有的工艺路线,没有考虑这些工艺路线是否合理和是否经过优化。

根据零件分类编码系统划分零件组,主要是考虑零件的相似性。该方法在分组过程中只考虑部分工艺信息,但不考虑设备,它是将几何形状相似的零件划分至同一零件组。使用该种方法划分的零件组通常应用于计算机辅助工艺规程设计(CAPP)。因为 CAPP 系统要求全面而正确的零件描述信息,而根据零件分类编码系统进行分组对零件的描述较为全面,其中既包含了零件的几何形状信息,也包含了零件的材料及部分工艺信息,所以此方法基本上可以满足 CAPP 系统的需求。

## 2.2.2 可共线生产的产品

近年来,制造企业从实际需要出发,在开发新产品时总是优先考虑开发可共用同一柔性生产线生产的多种产品类型;在企业内部改造生产条件时,会以扩展生产线的生产能力,使之可以加工多个规格的产品为优先目标。这一方法既可以满足市场产品多样化的需求,又可以降低企业的生产成本,提升企业竞争力。

生产线是连续流动的生产活动,产品从初始状态经过一个连续的工艺流程顺序被加工为制成品。因此,产品除了结构上的相似性,其工艺路线也必须具有相似性才有可能实现“共线加工”。另外,生产线所使用的资源和加工能力相对固定,因此,产品的结构尺寸必须在一定的范围之内才能够“共线加工”。

文献[19]所做的建立 R 和 XR 型缸体共用柔性加工线的工艺方案就是这样的例子。方案中的 R 和 XR 型缸体属于同一系列产品,产品图样主要尺寸相同或相近,如缸孔直径、主轴承孔直径、总长、总宽,以及缸体底面工艺销孔等都相同;主油道、水套结构等尺寸相差不多。总高尺寸、平衡轴孔结构等不同。具体如下:

### 1、相同或相近之处:

(1) R 和 XR 型缸体缸孔直径均为:  $F 95(-0.018-+0.012)$ ;

(2) R 和 XR 型缸体主轴承孔直径均为:  $F 64(+0.004-+0.022)$ ;

(3) R 和 XR 型缸体底面工艺销孔: 尺寸和位置均一样;

(4) R 和 XR 型缸体曲轴止推面与主轴孔的垂直度要求: 0.025。

(5) 缸体清洁度: 油道内杂质不得大于 6 毫克; 除油道外缸体整机杂质不得大于 300 毫克。

(6) R 和 XR 型缸体长、宽分别为: 444.5、359.5 和 444.5、359.5;

(7) 工件材料 HT250 铸铁。

### 2、不同之处:

(1) R 和 XR 型缸体主油道孔, 均贯穿缸体, 高度位置不一样。

(2) R 和 XR 型缸体高分别为: 277.5 和 296;



(3)XR 型缸体有两条平衡轴孔, 直径 F41、F41.5 和 F42, 贯穿缸体深 240; R 型缸体无平衡轴孔。

从上例可以看出, 如果要实现产品的共用生产线生产, 这些产品需要具备一定的条件: (1)总体结构、形状相同或者相近; (2)工艺结构相同或相近, 便于设计工艺路线; (3)工序内容相近, 即加工特征相似。本文中把满足这样条件的一组产品称为可共线生产的产品。通过比较零件的相似性对零件按照共线生产进行分组时, 不仅要考量几何特征的相似性, 还要考量工艺相似性及加工特征相似性, 最后综合考虑集成相似度, 确定分组。

## 2.3 产品相似度计算

### 2.3.1 相似度计算问题

为了考察零件的相似程度, 量化相似性, 本文引入相似度的概念, 作为衡量零件相似程度的标准。在相似度的计算中首先需要确定用以评价实例(产品信息模型中的实际产品模型)相似性的相似因子集<sup>[20]</sup>

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\} \quad (2-1)$$

其中  $S_1, S_2, \dots, S_n$  为影响实例相似程度的不同相似因子。根据设计要求与设计经验, 设定相似因子的权重  $u_j$ , 用以量化该相似因子对相似程度的影响。对于一个相似因子集, 其所有因子的相似权重<sup>[21]</sup>之和:

$$\sum_{j=1}^n u_j = 1 \quad (2-2)$$

然后确定当前所需求解对象相对应的相似因子值集  $S = \{S_{1o}, S_{2o}, \dots, S_{no}\}$ , 以及实例库中各个对应实例的相似因子值集  $S = \{S_{1c}, S_{2c}, \dots, S_{nc}\}$ 。当前求解对象与实例的相似度为  $K$ :

$$K = \sum_{j=1}^n K_{AB} \times u_j \quad (2-3)$$

其中,  $K_{AB}$  表示对应因子的相似比,  $u_j$  为权重。其取值规律为: 当  $0 \leq S_{jo}/S_{jc} \leq 1$  时,  $K_{AB} = S_{jo}/S_{jc}$ ; 当  $0 \leq S_{jc}/S_{jo} \leq 1$  时,  $K_{AB} = S_{jc}/S_{jo}$ 。

根据上述方法, 可以在相应实例集中遍历所有可选实例, 提取相似度较大的实例作为相似实例。

### 2.3.2 几何特征相似度

在产品族中, 如果零件具有相同的名称, 则它们的功能大体一致, 结构形状也基本相同。零件相似主要是它们的形状特征体系的相似, 即特征之间拓扑关系的相似和特征参数约束的相似。分析零件形状特征体系的相似程度, 就能够量化评价零件的相似性<sup>[17]</sup>。

#### 1、形状特征的拓扑关系相似度

如果两个零件各自包含的形状特征的类型、特征的空间联系状态都是一一对应的, 则它们形状特征的拓扑关系相似。可通过计算相似度来度量拓扑关系的相似程度, 若拓扑关系相似度大于限定的阈值, 则认为两个零件的形状特征拓扑关系相似。

设零件 A 的形状特征个数为  $K_f$ 、特征关系的数量为  $K_r$ ，零件 B 的形状特征数量为  $L_f$ 、特征关系数量为  $L_r$ ，A 和 B 相对应的特征个数为  $m$ 、对应的空间关系数量为  $n$ ，则形状特征拓扑关系相似度的计算公式为：

$$S_i(AB) = \frac{1}{M+N} \left( \sum_{i=1}^m \alpha_i f_i + \sum_{j=1}^n \beta_j r_j \right) \quad (2-4)$$

式中： $M = K_f + L_f - m$ ； $N = K_r + L_r - n$ ； $f_i$  和  $r_j$  为对应特征的各种类型相似属性值和对应特征关系的相似属性值； $\alpha_i$  和  $\beta_j$  分别为它们的相似系数。

对于拓扑关系的相似性判断，特征类型和特征间关系这两个要素的影响同等重要，因此， $f_i$  和  $r_j$  均取值为 1。如果相应特征的类型相同，则  $\alpha_i$  取 1；否则，为对应特征的全部类型数的倒数。 $\beta_j$  的取值同理。

图 2.7 所示为 2 个零件的形状特征树，图中编号相同的特征的类型一致，特征对之间的关系有邻接和包含两种，则它们的特征拓扑关系相似度计算如下：

$$S_i(AB) = \frac{1 \times 1 + 1 \times 1 + 1 \times 1 + 1 \times 1}{(5+4-4) + (4+3-3)} + \frac{1 \times 1 + 0.5 \times 1 + 1 \times 1}{(5+4-4) + (4+3-3)} \approx 0.722$$

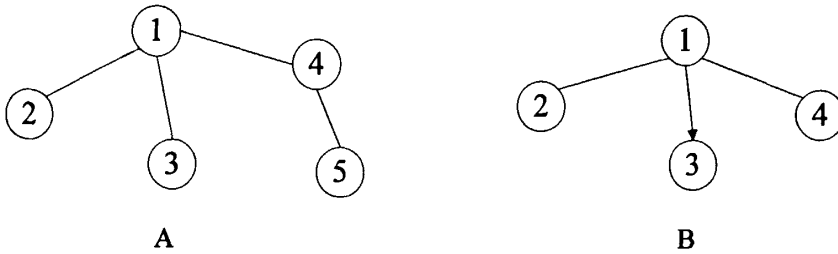


图 2.7 特征拓扑关系相似度计算示意图

### 2、几何形状相似度

对于同类型的形状特征，特征几何形状相似是指特征的形状参数约束一一对应。计算特征的形状相似度可以判断特征形状的相似程度。

设两个类型相同的形状特征 A 和 B，它们的形状参数分别为  $x_{iA}$  和  $x_{iB}$ ，则形状相似度的计算公式：

$$S_s(AB) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \omega_i \times f_i^2(x_{iA}, x_{iB})} \quad (2-5)$$

式中： $f(x_{iA}, x_{iB}) = \frac{\min(x_{iA}, x_{iB})}{\max(x_{iA}, x_{iB})}$  为第  $i$  参数的相似函数； $x_i$  为特征的第  $i$  形状参数； $\omega_i$  为第  $i$  参数的权重系数，其取值一般要根据工程实际经验和领域专家的知识。

### 3、位置相似度

对于同类型的形状特征，其位置相似是指特征的位置参数约束一一对应。计算特征的位置相似度可以判断特征位置的相似程度。

设两个类型相同的形状特征 A 和 B，它们的位置相似度是特征基点位置相似度和特征旋转角相似度的乘积，即：

$$S_l(AB) = S_c(AB) \times S_a(AB)$$

式中： $S_c(AB)$  和  $S_a(AB)$  的计算方法同式 2-5；其相似函数为：

$$f_i(x_{iA}, x_{iB}) = \begin{cases} 1, \dots, x_{iA} = x_{iB} \\ \frac{|x_{iA} + x_{iB}|}{2 \max(|x_{iA}|, |x_{iB}|)}, \dots, x_{iA} \neq x_{iB} \end{cases}$$

零件的相似性评价要从特征的拓扑关系、位置参数约束、几何形状 3 个方面进行，而主特征是考察的重点，在主特征相似的前提下，辅特征的相似分析才有意义。评价流程如下：

(1) 建立产品族中名称相同的各零件的形状特征体系，明确它们各自的主、辅特征以及辅、主特征的隶属关系。

(2) 对各零件的主特征进行类型匹配，计算主特征的拓扑关系相似度。零件主特征的拓扑关系应完全相似，即相似度等于 1；否则，零件的结构差别较大，相似程度不高。

(3) 计算各零件主特征的形状及位置相似度，确立主特征间的匹配关系。若两个主特征的类型相同、形状相似度  $S_s$  大于阈值  $T_s$  和位置相似度  $S_l$  大于阈值  $T_l$ ，则它们具有匹配关系。

(4) 根据主特征的匹配关系，对不同零件各主特征所包含的辅特征进行类型匹配，分别计算对应辅特征的形状及位置相似度。

(5) 计算匹配主特征所属辅特征的相似度：

$$S_F = \sqrt{0.5 \times (S_{sF}^2 + S_{lF}^2)};$$

其中： $S_{sF}^2 = \sum \omega_i \times S_{sFi}^2$ ， $S_{lF}^2 = \sum \omega_i \times S_{lFi}^2$ ， $\omega_i$  为权重系数。

若不同零件满足主特征的拓扑关系完全相似；对应的主特征具有相似匹配关系；各组匹配主特征所属辅特征的相似度  $S_F$  均大于限定的阈值则这些零件相似。辅特征形成零件的次要结构，它们之间的拓扑关系对零件相似性的影响不大，没有必要分析。

### 2.3.3 工艺过程相似度

相似程度比较分析法的基本思想是：分析比较不同零件的加工工艺，将具有相同工艺操作的零件归并为一组<sup>[22]</sup>。

相似程度比较分析法的算法及具体分析如下：

(1) 形成零件生产流程矩阵  $M_{ij}$ 。在零件生产流程矩阵中，每一行表示一个零件，每一列表示一种加工方法(机床)。第  $i$  个零件需  $j$  列加工方法(机床)加工时，令  $M_{ij}=1$ ，否则  $M_{ij}=0$ 。具体情况如表 2.1 所示，表中零件总数  $N=7$ ，加工方法总数为  $L=7$ 。

表 2.1 生产流程矩阵

M <sub>ij</sub>	加工方法(机床)序号							N
	1	2	3	4	5	6	7	
1	0	1	1	0	1	1	1	5
2	1	0	1	0	0	1	0	3
3	1	0	1	1	0	1	0	4
4	1	1	1	1	1	1	1	7
5	0	0	1	1	0	1	0	3
6	0	1	0	0	0	0	1	2

(2) 排序。使  $M_{ij}$  按零件加工工艺复杂程度顺序排列，即工艺步数越多，越排在矩阵

前面。该步的目的是为下一步选一相似程度比较分析基准，同时，在相似程度比较分析时可以减少分析比较的次数，以提高排序效率，结果见表 2.2。

表 2.2 排序后矩阵

M <sub>ij</sub>	加工方法(机床)序号							N
	1	2	3	4	5	6	7	
4	1	1	1	1	1	1	1	7
1	0	1	1	0	1	1	1	5
3	1	0	1	1	0	1	0	4
2	1	0	1	0	0	1	0	3
5	0	0	1	1	0	1	0	3
6	0	1	0	0	0	0	1	2

(3)设置基准工艺。设置相似程度比较分析的基准工艺，即某零件组的加工方法序列 P<sub>j</sub>(一维数组)。为了进行相似程度比较分析，必须初定一个以资比较的加工方法序列。该加工方法序列可直接选取加工工艺最复杂的零件的加工方法序列，也可以在分析诸多零件加工工艺的基础上人为地选取并形成加工序列矩阵 P<sub>j</sub>(一维数组)。j 与零件加工生产流程矩阵 M<sub>ij</sub>中的 j 相同，即 j=1, 2, …, L。如果该零件需经 j 种加工方法加工，则 P<sub>j</sub>=1，否则 P<sub>j</sub>=0，具体情况如表 2.3 所示。

表 2.3 加工方法序列 P<sub>j</sub>

加工方法序号	1	2	3	4	5	6	7
加工方法序列	1	0	1	1	0	1	0

(4)相似程度比较分析。将零件生产流程矩阵 M<sub>ij</sub>中的所有零件的加工方法序列依次与零件组加工方法序列矩阵 P<sub>j</sub>相比较，凡具有共同工艺操作( $\sum_{j=1}^L M_{ij} * P_j \geq K, K=1$ )的零件即为该零件组的零件。故：①对第 i 个零件，如  $\sum_{j=1}^L M_{ij} * P_j \geq K(K=1)$ ，则将该零件所需而零件组加工序列矩阵 P<sub>j</sub>中还有的加工方法增加到 P<sub>j</sub>中去。即将 P<sub>j</sub>=0 改为 P<sub>j</sub>=1。②将该零件及其加工方法序列增加到该零件组矩阵 M1<sub>ij</sub>中去。③将该零件及其加工方法序列从零件生产流程矩阵 M<sub>ij</sub>中去掉。

(5)执行过程。如果零件组加工序列矩阵 P<sub>j</sub>在第四步前后有变化，则再次执行第四步，否则，属于该零件组的所有零件及其加工方法序列已形成，将 P<sub>j</sub>、M<sub>ij</sub>存储后，执行第三步，以形成下一个零件组。如果 M<sub>ij</sub>中所有零件都处理完毕，即 M<sub>ij</sub>为“空”，则结束。

(6)结束。经上述方法处理后，原零件生产流程矩阵 M<sub>ij</sub>可得到二个零件组及其加工序列矩阵 P<sub>j</sub>。

### 2.3.4 制造属性相似性计算

制造属性主要包括精度特征和材料特征<sup>[23]</sup>。精度特征是影响夹具元件选择的主要因素，本文主要考虑的制造属性也就是精度特征。本文采用阈值方法评价精度特征的相似性：

$$S_{pre} = \begin{cases} 1, \dots P \geq L \\ 0, \dots P < L \end{cases}$$

式中,  $S_{pre}$  为位置相似度;  $P$  为精度值;  $L$  为预定义的阈值。

相似度计算中要考虑零件结构方面的特征和加工工艺的特征, 通过计算相似度确定新产品是否可以加入生产线。

在相似度的计算过程中, 设定一个范围区间, 如果相似度在该区间内, 则表示新零件可以与基础件共线生产; 在企业初始建库阶段, 实例信息较少, 可放宽相似度的计算条件; 如果事例库比较大, 则要限制相似度的计算条件。

## 2.4 产品举例

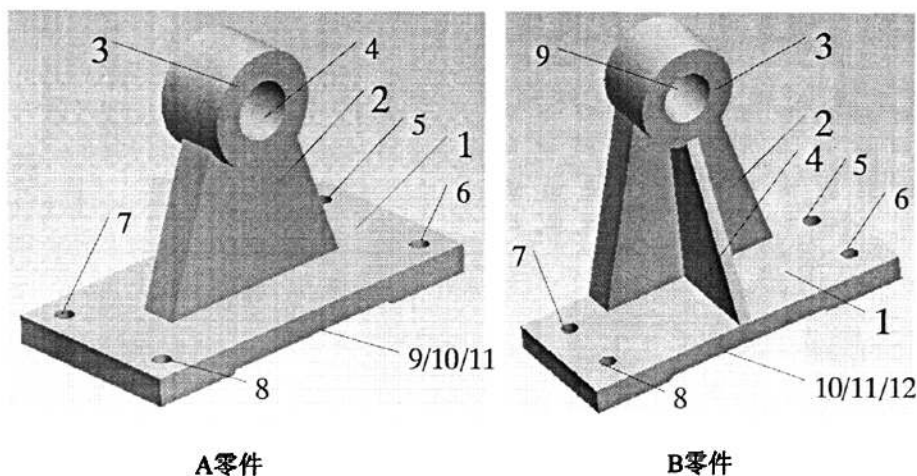


图 2.8 支架零件图

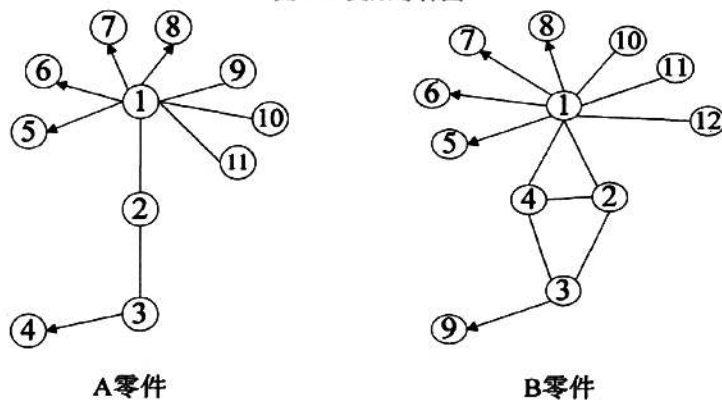


图 2.9 拓扑关系图

以图 2.8 所示两种支架为例说明相似度的计算过程。

1、几何特征相似度:

两种零件的拓扑关系如图 2.9 所示, 则可以得出:

A:  $K_f=11, K_r=10$ ; B:  $L_f=12, L_r=13; m=11, n=10; f_i=r_i=1; \alpha_i=\beta_i=1$

$M=11+12-11=12; N=10+13-10=13$ .

$$\text{相似度: } S_i(AB) = \frac{1}{12+13} \left( \sum_{i=1}^{11} 1*1 + \sum_{i=1}^{10} 1*1 \right) = 0.84$$

## 2、形状相似度:

要先计算主特征的相似度，从图中可以看出要计算特征 123 的相似度。计算时式(2—5)中的权重系数分别取为 0.45、0.45 和 0.1；而特征 3 个方向的位置参数同等重要，式(2—6)中权重系数均取为 1/3。主特征形状相似度及位置相似度的计算结果为：

$$S_{s1}(AB)=0.915; S_{s2}(AB)=0.994; S_{s3}(AB)=1.000;$$

$$S_{l1}(AB)=1.000; S_{l2}(AB)=1.000; S_{l3}(AB)=1.000;$$

按照两个零件主特征的匹配关系，分别计算对应辅特征的形状及位置相似度；计算各组匹配主特征所包含辅特征的相似度，结果分别为：1.000，1.000，1.000，1.0000，1.000。分析两个零件的加工工艺，可以看出其加工工序相同，其工艺相似度取为 1；制造属性形似度  $S_{pre} = 1$  由上述分析，可以确定 A B 两个零件可以共线生产。

## 本章小结

本章首先利用特征建模技术建立了产品信息模型，然后在分析零件相似性基础上，提出了可以共用柔性生产线的产品的条件；引入考量零件相似性程度的量化方法——相似度计算，分析了计算过程中的各种影响因素，推导出相似度的计算公式，通过计算零件的相似度，可以把零件按可否共线生产进行分组。

## 第 3 章 基于可共线产品的柔性夹具

### 3.1 生产线柔性夹具要求分析

第 2 章确定了可以在同一生产线上生产的几种 (2~5) 产品的规格。生产线生产是将选定的产品按相同的工艺规则排列工序顺序, 按工序组织生产, 是间歇连续生产。对于可共线生产的产品族而言, 同一工序的加工内容相同, 则可以使用同一套柔性夹具进行加工。有多少个机加工工序, 即需要多少套夹具。通过分析产品加工特点, 在同一工序上使用同一套夹具时, 夹具需要满足以下要求:

1、调整方式: 即柔性化, 要求夹具可以根据零件族尺寸的变化调整相关的定位、夹紧元件, 完成不同零件的装夹工作; 对于有些加工内容来说, 也可以与机床工作台配合, 共同完成尺寸调整工作。调整方式的选择首先要分析零件的尺寸变化情况, 然后选择定位和夹紧方式。如图 3.1 所示零件。

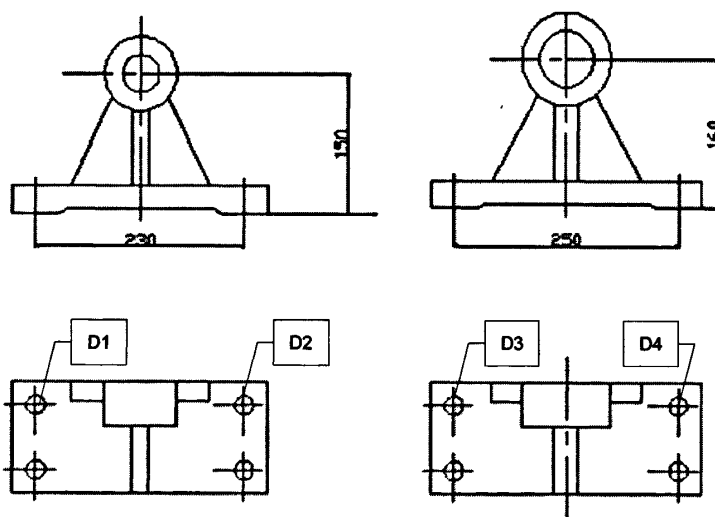


图 3.1 零件示意图

首先分析两个零件的尺寸变化: 零件中两个轴承孔的直径不同, 加工时需要选择合适的刀具; 轴承孔中心到底板的高度不同, 由 150mm 变化到 160mm, 要求夹具可以垂直升降 10mm, 使孔心与机床主轴线重合; 底板螺纹孔间距不同, 由 230mm 变化到 250mm, 如果以一面两孔定位方式定位, 选择横向两个孔为定位孔, 则从左面零件换为右面零件时, 需要调整两个定位销之间的距离, 调整的距离就是底板定位方向上两孔间距之差 20mm。假设一个定位销固定 ( $D_1$  和  $D_3$ ), 则要求另一定位销可以水平移动 20mm 的距离 (及  $D_2$  和  $D_4$  之间的变化); 同时夹具体可以水平移动, 以保证孔心线回到机床主轴线上。通过以上分析, 就可以明确夹具的调整方式要求。

2、调整精度: 要求零件变更时, 夹具调整与零件尺寸变化的综合误差可控, 以保证零件的加工精度。如图 3.1 中, 可移动定位销运动轨迹的精度, 高度  $L_3$ 、 $L_4$  变化时孔心线的圆柱度等。

3、调整时间: 夹具元件可调整, 什么时间调整? 生产线生产是流生产过程, 必须

保证信息的有效传递，使生产线上的每一工位都可以在需要的时间知道自己所需要的工作，及时调整夹具状态，才能保障生产的顺利进行。假设先 A 零件生产 200 个，然后 B 零件生产 300 个。则在 A 零件生产完毕后，夹具需要调整，必须将这一信息有效传递到生产线的工位上。

本论文在提出基于可共线产品的柔性化夹具整体结构后，将着重研究这三个问题。

### 3.2 基于可共线产品的柔性夹具

#### 3.2.1 夹具工作原理

基于可共线产品，设计一种新的柔性化夹具，这种夹具针对不同批次的待加工零件，不用更换夹具元件或重新进行夹具的设计与组建，而只是调整某些元件的空间位置便能适应该批次零件的装夹要求。它的优点是只需通过夹具的结构调整，而不是通过更换夹具元件的方法来满足零件的装夹要求。图 3.2 是该类夹具的工作原理。

工作时，将夹具定位、夹紧元件等装置调整至 A 位置；当由工件 A 换成工件 B 时，通过夹具体运动调整通路将相关元件调整到工件 B 所需要的定位和夹紧机构的位置即可实现加工要求。

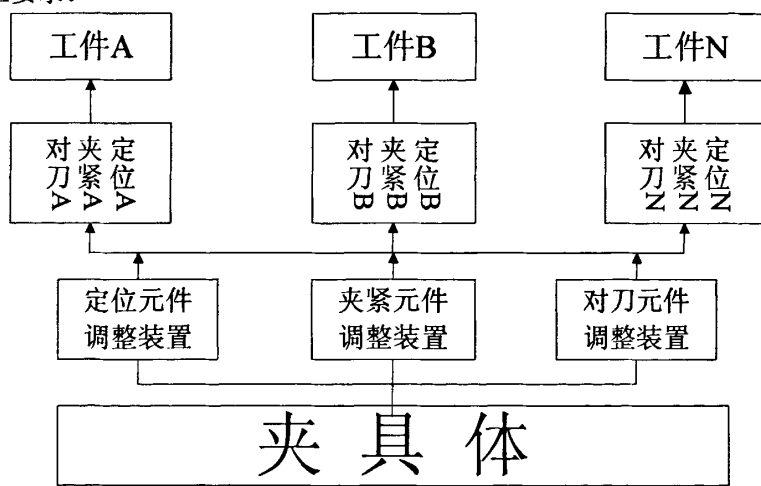


图 3.2 夹具工作原理

该类夹具是由一系列统一化、标准化的元件和合件组成，借鉴了结构可调整夹具、组合夹具、成组夹具的优点，组装又像专用夹具那样简单可靠，又有可调整元件，调整方便。为了便于夹具与机床定位连接，夹具基体有统一标准的定位连接位置。

#### 3.2.2 夹具整体结构

##### 1、模块化产品的构成

传统产品设计是从零件（器件）设计入手，逐步完成部件及整机设计，由零件（元器件）直接组成产品。这种方式不仅不能适应复杂产品和系统工程的需要，而且不能满足市场需求多样化的需要，不能适应激烈的市场竞争形势。

解决问题的出路在于对产品的构成和结构模式进行改革，即运用标准化理论，掌握



用最少要素的组合来构成最多产品品种的标准化设计技术，将产品构成单元中分成不变的（通用的）固定部分和实现多样化效果的变动部分，将这两部分巧妙地组合起来构成新产品或使产品多样化。

模块化产品的构成模式可用一个简单的公式表达<sup>[24]</sup>：

新产品（系统）=通用模块（不变部分）+专用模块（变动部分）。

新产品不是由新的零件及元器件直接构成，而是由通用模块（占多数）和专用模块（占少数）组成，新产品设计主要变成为少量新（专用）模块的设计。这种模块化的产品结构模式，类似的产品构成产品族，使产品结构呈现柔性化，如图 3.3 所示。

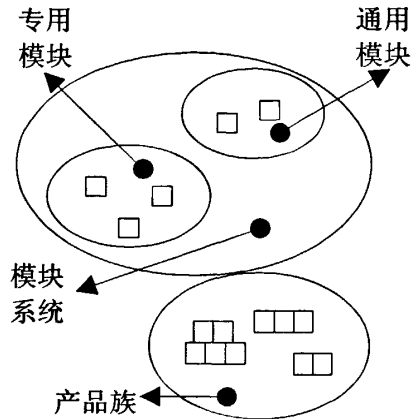


图 3.3 模块系统和产品族的关系

## 2、功能论方法

功能论方法是一种新型的设计方法学，其主要内容包括：功能定义、功能整理和功能定量分析。功能设计既是设计问题的认识方法也是设计问题的求解手段。因而从功能设计方法的角度出发，经过功能定义、功能分解，求出子功能的原理解，进行功能构造，最后通过评价与决策得出最优的原理方案。功能论方法的基本原理方案包括总功能分析、子功能分解、子功能求解、原理方案综合、评价与决策<sup>[25]</sup>。

以功能相关分析为主进行模块划分的方法是将产品的总功能分解为一系列子功能，并按照一定的相关性影响因素进行聚类分析，如从子功能之间的功能相关、装配相关、信息相关、空间相关的角度对功能进行分类划分。提出一种功能模型量化建模方法，将模型中各个子功能与产品中传递的能量流、物流和信号流相关联，并以客户需求程度为衡量尺度，建立需求、功能数据库，并将功能与需求的关系量化，由此作为模块划分与模块发展的主要依据。

结构是功能的载体，功能的聚类最终还要映射为一定结构体。因此，也可以直接针对结构单元进行相关性分析，这时研究重点应放在产品结构布局和结构部件的组成及其之间的联接方式上。如考虑到产品结构在生命周期(设计、制造、装配、回收性、升级等)过程中的影响因素，通过相关分析把这些因素关联到结构单元上，利用算法把结构单元聚集成模块。文献[26]通过在部件、模块、分系统、系统四个层次上分析产品模块化的可能性及其相应的接口约束，研究生产中企业协作关系对于模块化的影响。图 3.4 概括了基于相关性分析进行模块划分的原理。

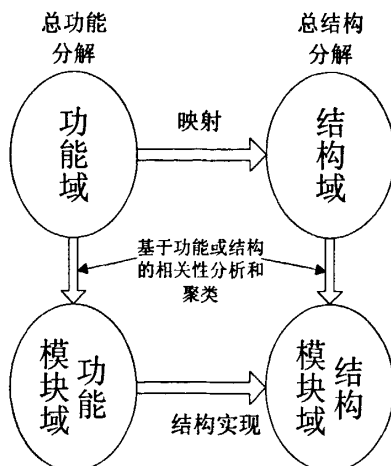


图 3.4 基于聚类分析的模块识别

### 3、夹具的功能分解和功能模型<sup>[27]</sup>

夹具应满足定位稳定性、定位惟一性、夹紧稳定性和总体约束 4 个功能要求。夹具概念设计阶段是将夹具的功能要求向结构形式转化，所以夹具功能设计任务的重点集中在满足上述功能方面。根据夹具在功能和结构上的分级特性，在机床夹具概念设计中，用层次分解的方法建立机床夹具功能结构。基于对功能的分类及夹具设计的基本原理，夹具的总功能可以分解为定位功能、夹紧功能、运动功能、安装功能和分度功能等，而每一功能又可以继续细分。每个分解后的功能单元可以用具体的行为状态参数描述，如图 3.5 所示。

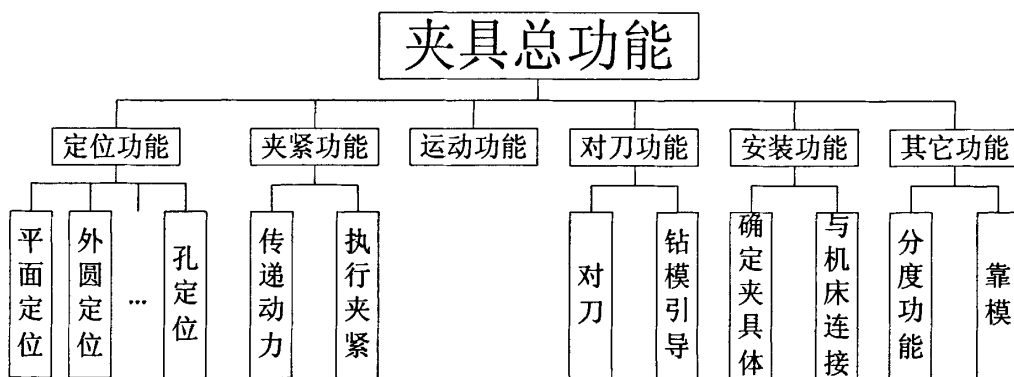


图 3.5 夹具的功能模型

### 4、夹具的功能-特征-结构映射模型<sup>[28]</sup>

建立夹具功能模型后，根据夹具的总体功能要求，经过功能分解，进行工作原理求解和实现工作原理方案的构思和系统化设计。功能设计是一个自上而下的试探性求解过程，对总功能进行分解与综合，可以逐步从定性的功能转化为详细的物理结构描述。本文在功能和结构之间加入功能特征，形成功能-特征-结构映射的设计模型，来统一描述夹具功能设计过程各阶段的状态。这里的特征是功能意义上的一组与夹具概念设计的描述相关的信息集合。特征描述了结构的功能属性，利用特征作为功能和结构之间的桥梁，找到满足功能的特征后，再与结构匹配，从而更有利于功能-结构映射的实现。设计模型分为功能层、特征层和结构层 3 层。功能层是基于功能方法论基础对夹具总功能进行

分解后得到的最小单元功能；特征层是满足夹具功能的匹配特征；结构层是与特征层的特征匹配的夹具零部件，并根据不同的功能和特征分成不同的结构模块。

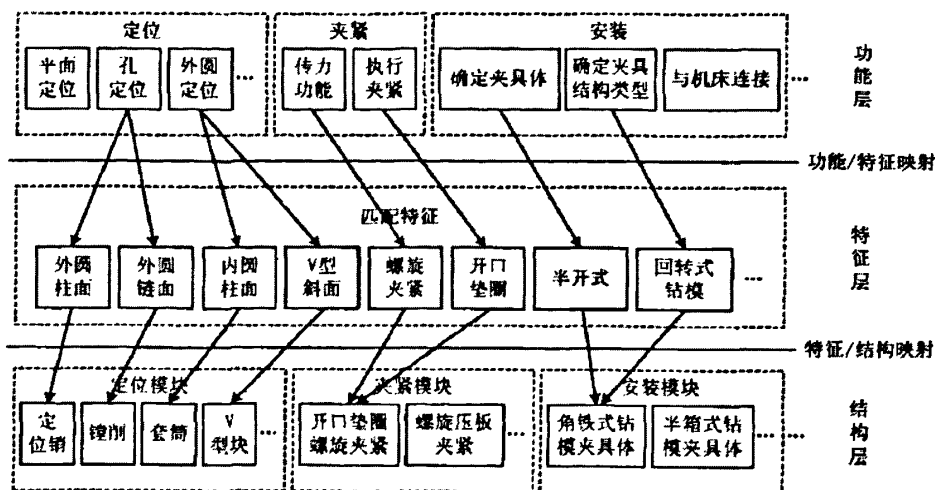


图 3.6 夹具功能-特征-结构映射示意图

该模型的映射过程，包括功能-特征映射和特征-结构映射。功能-特征映射是把夹具的总功能分解成若干子功能，每个子功能又可以分解为更小的功能单元。不同的结构由不同的特征来描述，每个特征都满足一定的功能，这种功能-特征的对应关系要比功能到零件的对应关系简单，容易实现。而特征-结构映射是在找到与功能匹配的特征后，根据不同的描述特征与夹具零部件库中的夹具结构模块来匹配，得到符合功能要求的结构类型，形成夹具的方案，以便进行下一步的技术设计。图 3.6 是夹具功能-特征-结构映射的示意图。

### 5、夹具整体结构

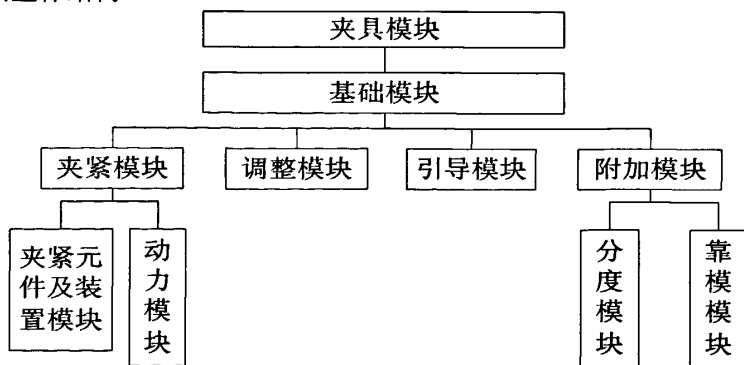


图 3.7 夹具整体结构

应用功能论方法和模块化产品设计方法，可以得到以模块化为基础的柔性夹具的整体结构，如图 3.7 所示。夹具的模块化是在夹具的标准化和组合化的基础上发展起来的一种新型夹具。机床夹具按图 3.7 所示分成基础模块(包括夹具体、定位元件及其装置、连接元件)、夹紧模块、引导模块、附加模块。夹紧模块包括夹紧元件及其装置模块和动力模块。附加模块包括分度模块、靠模装置模块和工件抬起模块。采用模块化集成夹具设计，可将各类机床夹具的构成模块标准化，并将其存储于模块库中。根据零件加工工序要求调用相应的模块或稍加修改组成即可，这样不仅大大缩短了夹具设计和制造的

周期，而且由于模块的标准化，更有利于提高加工精度和生产率，降低加工成本。

## 本章小结

本章首先分析了产品族共线生产时对夹具的三个要求——调整方式、调整精度和调整时间；然后分析了产品族共线生产时所需柔性夹具的工作原理，最后应用模块化产品设计方法和功能论方法设计了具有元件调节能力的柔性夹具的整体结构。

## 第 4 章 夹具空间

### 4.1 夹具设计过程分析

夹具自动设计一般分为概念设计、结构设计、详细设计三个阶段<sup>[29]</sup>(图 3.1)。概念设计是第一阶段,也是最有创造性的阶段<sup>[30]</sup>。概念设计的核心任务是实现从功能要求到结构说明的转换。夹具概念设计所考虑的功能要求可分为两类:第一类是性能要求,主要指定位唯一性、定位稳定性、夹紧稳定性及总体约束;第二类要求是夹具的结构刚性、成本及易操作、易于维修等要求。第二类要求涉及夹具元件及操作件的具体结构,在概念设计阶段不可能详细考虑。所以夹具概念设计的任务重点是满足第一类要求,即夹具的性能要求上。夹具概念设计的结构说明是概念设计的结果,可以用夹具功能构造图来表示,它是以被加工零件的外形为基础,用特征名称或代码标识出零件上的全部夹具特征表面。此处夹具特征是指被加工零件上能用于定位、支撑和夹紧的那些特征的总称。由于功能构造图表示出了工件方位、总体尺寸和具体的夹具特征,所以已成为具体的可选方案。

从夹具的性能要求到夹具功能构造图的转换需要自动处理工件几何方位、切削力大小及作用域、夹具特征的分析 and 识别、夹具功能抽象和转换、功能构造图的优选以及三维功能构造图的生成和标记等等。为了完成这些工作,首先应在概念的层次上对具体的零件进行几何抽象。

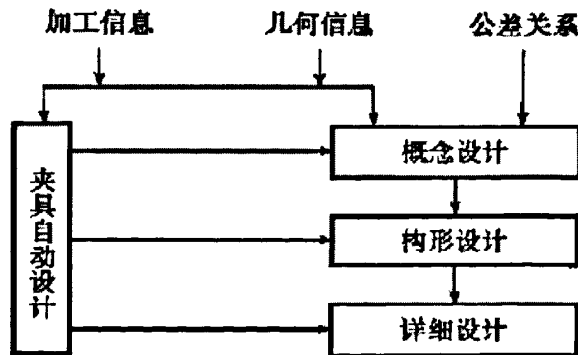


图 4.1 夹具设计的三个阶段

从图 4.1 可以看出,即使是在现代设计过程中,也是直接以工件的工序特征和工艺特征为输入条件,继而进行夹具结构设计的。这当然有夹具设计理论的约束因素在制约,但是却造成了夹具设计过程中“柔性化”的缺失,因为设计人员只需要针对具体零件设计单一的夹具体就可以完成自己的工作,没有必要考虑“柔性化”的概念。

### 4.2 从系统论看夹具设计

系统的概念和思想是人类从千百年来的活动和生产实践中孕育出来的,也是人们认识世界和改造世界的经验积累,但是直到 20 世纪中叶经过总结才逐步上升为一门比较完整的新学科。它能正确反映客观事物间的相互联系、相互制约、整体协调和动态

发展等特点。有学者提出：人类社会当今正处在系统工程时代<sup>[31]</sup>！

从整体与部分的关系和作用来分析，系统是指由若干个可以相互区别、相互依存、相互联系与作用的要素（或部分）所组成，具有某种结构和特定功能，处在一定的环境中，以达到某种预定的目标的有机整体。

系统的结构是指系统内部各组成部分之间在空间、时间等方面的有机联系、相互作用的组织机构、方式和秩序。从一般意义上说，系统的结构可以用以下式子表示： $S=\{E, R\}$

这里，S 表示系统（system），E 表示要素（elements）的集合，R 表示建立在集合 E 上的各种关系（relations）的集合。

从系统论的角度出发，夹具与工件、机床构成了一个系统，其中夹具、工件、机床是三个要素，它们之间的相互制约关系，共同完成对工件的加工目标。夹具又可以看做是由定位元件、夹紧元件、夹具体、对刀及辅助元件等构成的一个系统；夹具将待加工的工件固定在机床的正确位置上。

#### 4.2.1 工件因素

夹具设计是一个由工序件特征驱动的结构设计过程，工件因素对夹具设计有直接和重要的影响。设计人员设计夹具时，首先要获取零件的工序顺序和工艺尺寸，按照工序的具体加工内容设计夹具的结构。分析夹具设计过程可知，工件的形状特征和批量对夹具结构的影响最为直接。由零件的相似性可知，通过相似性分析，绝大部分零件可以通过变型设计得到。

表 4.1 工件因素

基本信息	产品名称、工件名称、工件图号
工件材料	钢件、铸件、铝件、其它
工件形状特征	箱体、轴、盘、套、拨叉、板壳、杆、其它
工件批量	大、中、小
加工面几何特征	平面、外圆、内孔、台阶面、型腔、槽
工序性质	粗加工、半精加工、精加工
工序件热处理状态	正火、调质、淬火、退火、未处理
多工位加工性质	不规则、矩形、水平圆周、径向圆周
主定位面特征	平面、外圆、内孔、型面、锥孔、中心孔
主定位面加工状态	未加工、粗加工、精加工

变型设计是关于设计方法和过程的一种分类定义，是指提取已存在的设计或设计计划，作特定的修改以产生一个和原产品相似的新产品<sup>[32]</sup>。这种修改一般不破坏原产品的基本原理和基本结构特征，是一种参数的修改或结构的局部调整或两者兼而有之，其目的是快速、高质量、低成本地生产新产品，以满足不断变化的市场的要求，Pahl 和 Beitz<sup>[33]</sup>最早将设计分为初次设计(original design)、适应设计(adaptive design)、变型设计(variant design)，并指出在实际的设计工作中大约 70%属于适应性设计和变型设计。事实上产品设计几乎大多数都是从已有的产品中进化而来的，所谓的初次设计、适应性设计和变型设计仅仅是对原来产品的利用程度不同而言。

在产品开发设计过程中，零件库中的零件直接作为产品的一个部分，提供给具有不

同要求的设计系统使用，这就要求零件信息必须要有完整的产品定义描述。因为零件实例繁多，为方便数据管理与检索，本文采用面向对象的机理建立零件库，对类和类之间的结构化来进行描述、组织和管理零件和相关信息。在零件库中，用3种类来描述库内容。通用模型类定义零件族，功能模型类对同类零件从不同角度进行表达，功能视图类是描述零件信息的视点和视角的集合。它们之间的关系可以用两种语义进行描述。其中，功能模型类与总体模型类是“is view of”的关系，即根据零件类的不同视图，产生相应的功能模型（例如实体模型、有限元模型等）来完整地表达零件类。功能视图类与功能模型类是“creat view”的关系，表示根据某一视图生成相应的模型，如功能模型是根据功能视图生成的。图 4.2 以六角头螺栓的几何视图为例来描述库内容的结构。

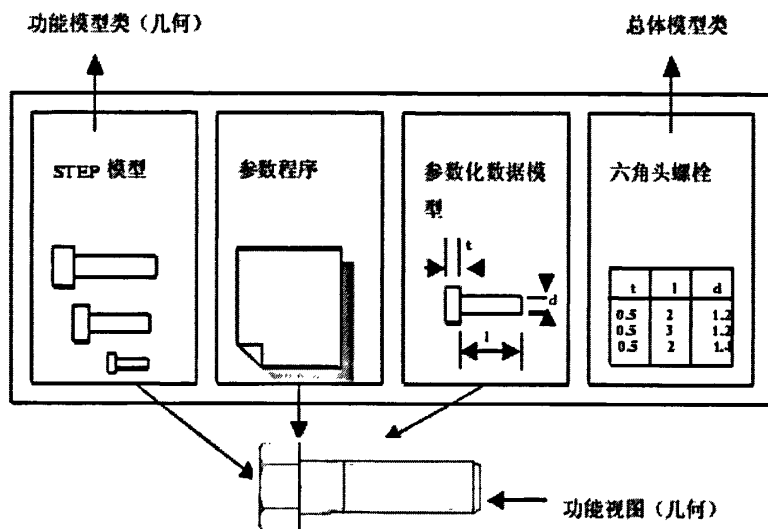


图 4.2 库内容的结构

产品设计通常是不同领域、不同地域的设计团队协作完成的，零件库作为零件资源共享的桥梁，不仅零件数量庞大、描述的内容复杂，而且存在零件信息来源于不同的零件供应商，其大小和结构不同等问题，所以要实现数据共享，首先需要对零件库中零件及其属性构造一种合理的描述方法。在零件库的构造中，零件信息是以零件族的形式组织和描述的。首先将零件分组纳入到各零件族中，形成一个分层结构，然后采用字典方法描述零件族和零件的特性，建立各字典元素。

零件族层次结构是一个具有单一继承关系的树状结构，按分类层次的高低，将零件族分为通用零件族（Generic Part Family）和简单零件族（Simple Part Family）两层<sup>[34]</sup>。其中，通用零件族构建零件资源的分类体系，是快速查询、检索零件的基础。而简单零件族则是将通用零件族拆分为具有相同描述定义结构的零件集合，简单零件族必须实例化为单个的零件。图 4.3 为描述零件信息的层次模型。在图 4.3 中，将零件族分为上下两层。上层是通用零件族，属于技术领域的分类，根据不同的应用目的采用不同的分类方法。例如可根据国际标准分类法 ISO/IEC ICS 来定义其层次结构。也可采用 DIN 4000 将零件分为标准层、分标准层、分表层和分图层 4 层。但无论采用哪一种分类方法，在对零件库数据进行组织时的研究重点都在如何合理组织企业资源，为资源的快速检索和

重用提供有效手段。下层为简单零件族。简单零件族通过事物特性表来标识和定义。在事物特性表中除了继承通用零件族的分类特性，还描述零件的几何特性、功能特性、制造特性及其相关算法等。由于事物特性表具有完整的零件信息，因此可以针对不同的专业需求生成不同的技术模型，例如三维实体模型、有限元模型、工艺等，并将其实例化，即生成具体的零件模型。

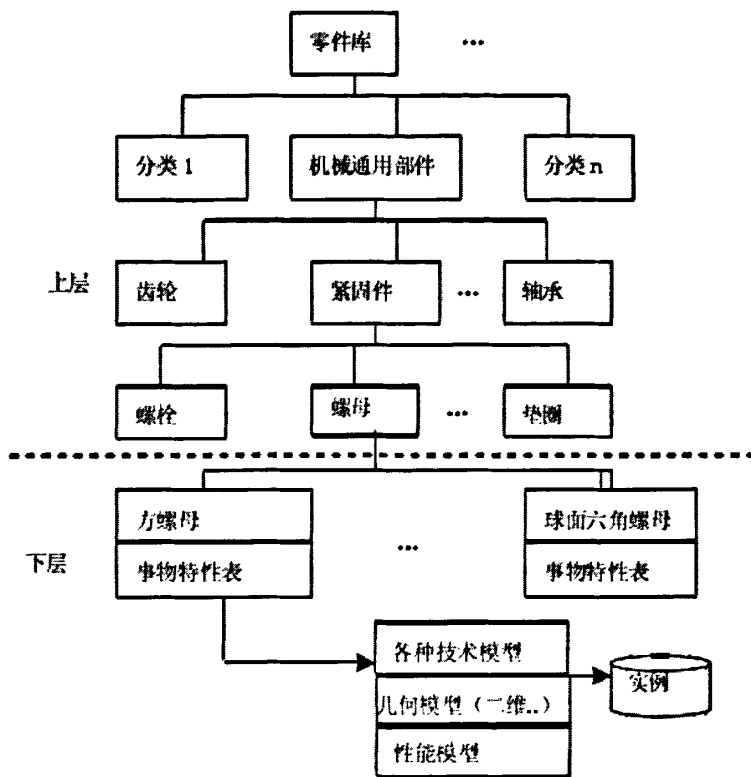


图 4.3 零件族信息的层次模型

按上述方法建立基于特征的零件模型数据库，存储待用。

### 4.2.2 机床因素

在夹具的分类方法中，有一种方法是按机床将夹具分为车床夹具、铣床夹具、镗床夹具和钻床夹具等，因为机床种类的不同，夹具的结构设计、约束条件等都有所不同；即使是同一类机床，工作台的结构和布置会影响夹具体接口的设计、夹紧路线的确定等；刀具的运动形式会影响夹具元件的布局；机床的加工范围跨度、机床辅助结构（排屑、冷却）等都会对夹具的结构布局产生影响。表 4.2 列出了部分机床因素对夹具设计的影响。

表 4.2 机床因素

机床类型	车、铣、钻、镗、其它
机床型号	
机床主轴形式	水平、垂直
刀具形式	指状、片状、盘状、成型
工作台布置	

随着现代科学技术的发展，特别是计算机技术的进步，制造领域出现了虚拟制造



(Virtual Manufacturing, VM) 的概念。它是利用仿真与虚拟现实技术, 在高性能计算机及高速网络的支持下, 采用群组协同工作, 通过模型来模拟和预估产品功能、性能及可加工性等各方面存在的问题, 实现产品制造的本质过程, 包括产品的设计、工艺规划、加工制造、性能分析、质量检验, 并进行过程管理与控制。走出仅仅依赖经验的狭小天地, 发展到全方位预报阶段。

要实现这样的目标, 就有必要利用计算机把实际的制造环境模拟出来。虚拟机床 (Virtual Machine Tool) 是随着虚拟制造技术发展而提出的一个新的研究领域, 它的最终目的是为虚拟制造建立一个真实的加工环境, 在计算机屏幕上实现加工过程的仿真<sup>[30]</sup>。虚拟机床是真实机床在计算机内的模拟, 要根据具体的机床来完成虚拟机床的结构参数的确定。而且虚拟机床的结论是需要由真实机床来检验的, 只有与真实机床相一致的结论才是正确的结论。欲进行程序的仿真, 首要问题是构建仿真平台, 方便而准确地建立实际机床的仿真模型是实现加工仿真的保证。

建立虚拟机床, 需要建立加工过程模块、控制系统模块、机床运动仿真模块等各个模块<sup>[35]</sup>。因为机床的类型各式各样, 品种千变万化, 要想能够表达各种机床, 就需要采用模块化的原理, 定制各种标准的模块, 这样经过少量的修改就可以建立各种机床的模型。各模块应该标准化、通用化、集成化、层次化、灵便化、经济化、并具有互换性、相容性和相关性, 使系统具有开放性和适应性。加工过程模块根据机床动力学和热力学的理论预测加工结果, 其中包括切削力、刀具磨损、表面质量及加工误差等。

对于虚拟机床建模, 常用的有两种方法<sup>[36,37]</sup>: 一种是通过高级语言编程借助 OpenGL 三维图形引擎功能实现机床几何建模和运动仿真。另一种是通过 CAD 软件建立虚拟机床几何建模或直接利用虚拟制造软件来实现, 例如 VERICUT 等。在虚拟制造软件中, 一般均由厂家配置了常见机床的控制系统, 可直接调用, 这样不仅可以免去编程建立机床几何模型的麻烦, 而且还免去用编程来设置各数控指令的含义及运动方式, 所以更为方便快捷。

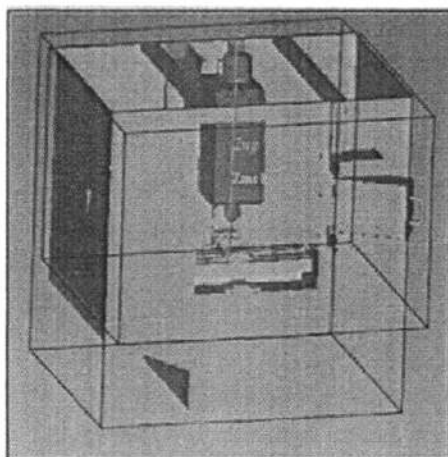


图 4.4 虚拟机床建模

根据 ZXD-32D 型铣床的结构, 先用 Pro/ENGINEER 将数控铣床模型绘制出来。其结构包括床身基体、左右运动部件 X 轴、前后运动部件 Y 轴、上下运动部件 Z 轴和主

轴部件等几个部分，并且将所有完成的模块零件转存为 STL 形式的文件。机床在 VERICUT 环境下建立的模型如图 4.4 所示。

从整体角度考虑，机床更多的是一种广义的约束条件。这种约束条件是企业制造环境的一个重要组成部分。制造环境反映了企业的组织和控制结构、企业的资源配置及其制造能力。产品生命期的各个阶段都与它有密切的联系，如生产计划的制定、工艺规程的设计、制造过程的控制与实施都必须以制造环境为背景。

虽然在一个企业中产品的整个生产过程均与制造环境密切相关，但各阶段对制造环境的信息需求却不尽相同，各有侧重。传统的做法是各子系统根据自己对制造环境信息的需求，抽取各自的信息，在这种模式中各系统只考虑自己的环境信息需求，没有对企业制造环境作统一和完整的定义，这必然带来以下问题<sup>[38]</sup>：对制造环境信息的定义缺乏一致性，导致各应用系统之间难以进行信息交换，各用户之间难以达成信息共识；许多环境信息重复定义，导致许多工作重复进行并增加了数据的冗余度；环境信息附属于各应用系统，导致数据分散，难以管理和维护，以及应用系统随环境数据的变化而变，难以实现应用系统的通用化和商品化。

因此，建立一种集成化的制造环境模型，为企业的产品变型决策提供更为科学的量化条件，对企业来说有重大意义。该模型应具备下列几点要求：① 突破传统的各自为政的做法，以信息集成为前提，对 CIMS 中的制造环境作统一的定义，其数据模型应能为各应用系统所共享；② 模型应独立于任何应用系统，即为中性的；③ 模型应能为应用系统或用户提供直接的和易于理解的使用接口，即为面向应用的；④ 模型应是开放的、易于扩充的和易于维护的。

建立企业的制造环境模型，有利于企业在宏观上把握自身的生产能力，对企业接受订单或者调整企业生产结构，都有比较积极地影响。在制造环境的诸多因素中，更多的是一种广义的约束，对于机加工企业来说，与夹具设计最直接相关的因素是能力对象类，即各种机床的约束。

### 4.2.3 夹具本身结构

表 4.3 夹具结构

夹具名称	
夹具类型	车床夹具、铣床夹具、钻床夹具、镗床夹具等
定位组件	三面(3-2-1)、一面两销、大面短销、长V+平面、双V端面、小锥度心轴、其它
定位元件	支撑钉、支撑块、定位销、定位块、V形块、心轴
夹紧组件	顶夹紧、侧夹紧、定心夹紧
夹紧元件	涨开心轴、压紧螺钉、T形块卸压板、回转压板、铰链压板、其它
对刀与引导组件	对刀；引导
其它组件	分度、靠模、机床连接、起吊
夹具体	

机床夹具各式各样、互不相同，但可以从不同的夹具结构类型中概括出一般夹具所普遍共有的结构组成部分，并进而获得一般的夹具分析与设计方法：

- ①定位元件：确定工件在夹具中的位置，实现工件的定位；
- ②夹紧元件：提供夹紧力，将工件夹牢压紧在定位元件，保证工件在加工过程中不

因受力而产生移动和转动；

③夹具体：夹具的基本骨架，通过它将夹具所有元件连接起来而构成一个整体；

④引导装置：引导或确定刀具与工件被加工表面之间的正确位置；

⑤其他装置：为了满足艰巨的特殊功能要求，各种夹具还要设计其他的元件和装置，如分度装置、定向键等。

在夹具设计过程中，定位是为了使工件在静止状态下得到确切位置，夹紧是保证加工过程中零件受力时而不致破坏原有的正确位置；传统夹具设计过程多采用“定位-夹紧”模式。六点定位原理主要为确定刚体的空间静态位置，然而机械产品是靠运动完成其相应功能的，这种运动是可控的，或者说产品的每个零件的空间位置是动态可确定的。所以它并未从结构设计角度考虑如何实现定位和限位，也没有根据机械产品功能上的各种要求综合考虑实际的定位问题，因而致使条理性差，操作起来常有矛盾产生，使得机械结构设计主要根据经验进行，难以实现自动化，不适用于产品结构设计。

机床技术的发展对夹具设计提出了新的要求，六点定位原理的限制越来越明显，研究人员开始寻找新的理论来解决夹具设计中出现的问题。文献[39]中提出的广义定位原理就是一种新的尝试。构成机械产品的每个零件在四维空间中都必须具有确定的位置，即零件的12个空间自由度(包括3对直移自由度和3对转动自由度，即： $+X$ 、 $-X$ 、 $+Y$ 、 $-Y$ 、 $+Z$ 、 $-Z$ 、 $+Tx$ 、 $-Tx$ 、 $+Ty$ 、 $-Ty$ 、 $+Tz$ 、 $-Tz$ )全部消除，这就是机械产品的广义定位原理，如图4.5所示。广义定位原理阐明了机械产品中每一零件都应遵循的法则，即每个零件的广义定位都是依靠与其直接相关的零件来达到。因此，零件广义定位是产品达到最终设计状态的一个非常重要的综合约束条件，可以作为产品概念设计自动化和结构设计自动化的理论基础，进而实现零件的自动综合设计。

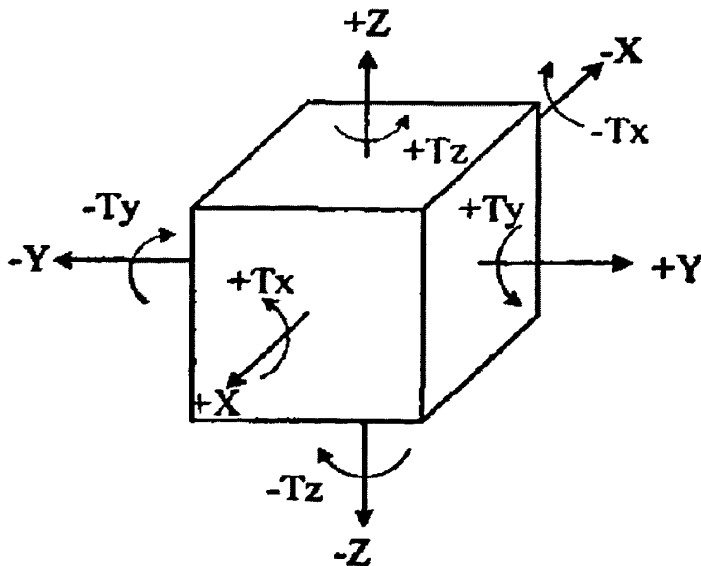


图 4.5 广义定位原理示意图

夹具设计不仅需要零件的几何信息，而且需要零件的工艺信息和制造信息，如表面粗糙度、形位公差、材料、零件的加工顺序、刀具以及机床等信息。所以在机床夹具设

计资源库应包含机床夹具设计中所涉及到的各类信息，因此，系统的管理方法和方便检索途径是建立夹具设计资源库的关键。本文采用以夹具为主题的基于关系数据库的事实表/维表的多维数据组织结构，如图 4.6 所示<sup>[40]</sup>。所有的信息维都是围绕夹具事实表而组织的，并通过关系连接成一个星型的数据模型，便于夹具设计过程中信息的管理。

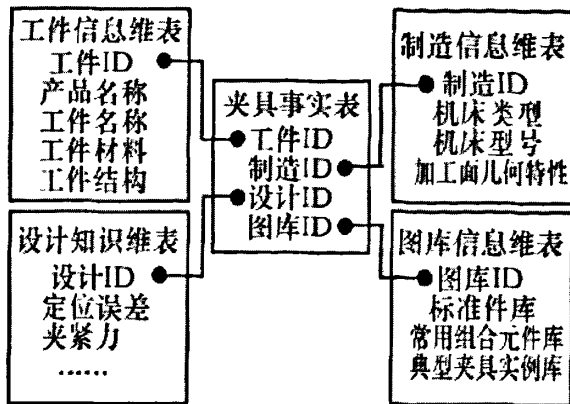


图 4.6 夹具资源库的多维数据结构模型

通过以上分析，建立零件模型库，设计人员可以在产品、夹具设计时方便地调取相似的产品实例进行比较分析；建立机床模型库后，设计人员在生产进行夹具设计时，可以首先调取生产线所用的机床型号，用于分析设计参数的选取；通过对夹具设计方法和设计资源的分析，设计人员可以了解夹具设计的先进理论和调用相似实例。下节内容是应用以上三项内容的一种尝试。

### 4.3 夹具空间的概念

#### 4.3.1 夹具空间定义

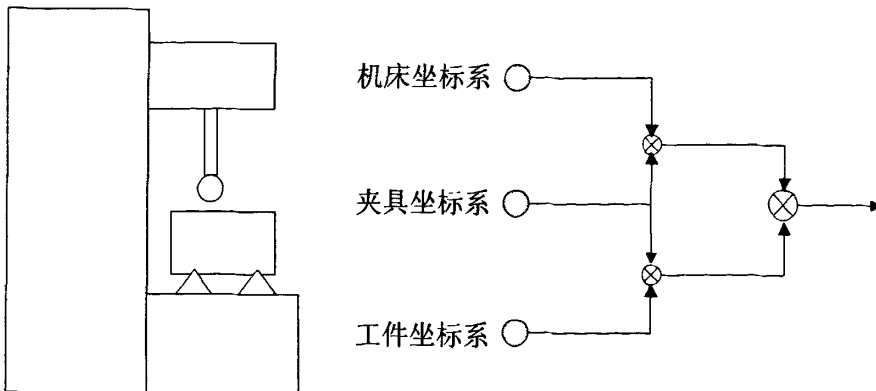


图 4.7 机械加工示意图

在机械加工过程中，夹具作为中间体把工件固定在机床的相应位置上，使三者处在正确的位置，完成加工过程。三者之间的联系可以通过坐标系之间的转换完成，如图 4.7 所示。

企业生产线确定后，机床随之确定；设计人员可以从机床资源库中将机床模型提取出来。另外，从零件库中提取零件模型，将可以共线生产的产品实例一起提取出来。采

用相对坐标方法，即将零件特征置于特定的坐标系下进行比较。相对坐标系按如下方法确定：将零件抽象化，找出最小包络模型，并选取某一零件（可以选取最大或最小件）为基础模型；坐标原点取包络模型的中心，加工特征的方向定义为 Z 轴，另外两个方向分别取包络模型另外两个边的方向，按照右手法则生成坐标系 Ccase；对于待考量的零件，使最小包络模型中心重合于坐标系 Ccase 的原点，加工特征方向与 Z 轴重合，其他两个方向长轴对应于基础模型的长轴，短轴对应于基础模型的短轴，以这样的方式放置于坐标系 Ccase 中，可以方便地得到零件间尺寸的差异数据。

将零件模型放置于虚拟机床模型中，通过坐标变换确定零件需要放置的正确位置。由机床加工范围确定的尺寸空间可以分为两部分，一部分是被零件模型占据的空间；而另外一部分则可以用作夹具构件存在的空间，本文把这部分空间定义为夹具空间，如图 4.8 所示。图中立方体表示机床加工范围确定的尺寸空间，将零件放置其中，零件占据了阴影部分的空间，则其余的空间原则上都可以用作夹具元件安放的空间，即夹具空间。

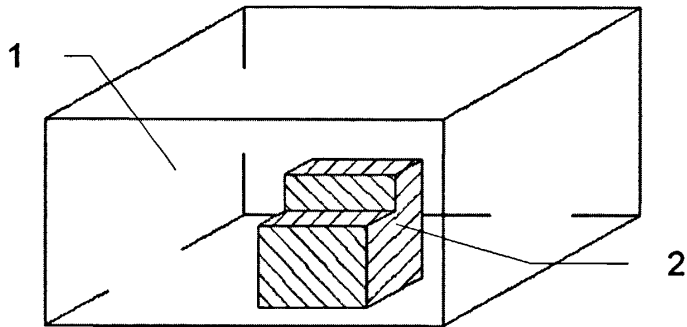


图 4.8 夹具空间示意图

### 4.3.2 设计方法

传统的夹具设计方法是从定位、夹紧、引导元件等逐步完成夹具整体结构的设计，可以称为生成式设计方法；利用夹具空间的概念，本文提出另外一种设计思路——切除式设计方法。设计思路如下：

1. 将零件模型放置于机床模型中，按上节所述方法，将零件模型和机床模型加工范围空间进行布尔运算，其差集所占据的空间即为夹具空间；假设夹具元件充满整个空间，则零件被固定在正确的位置上。

2. 将空间划分成不同的网格，设计人员可以根据经验排除部分没有夹具作用的网格，初步确定夹具构件区域；夹具构件应避开机床刀具运动轨迹、冷却系统及照明等辅助系统，将这些系统经过的空间网格排除。

3. 通过相似度计算，确定零件尺寸的变化范围，以及尺寸变化的方向；以此确定夹具元件的调整方向及尺寸；对夹具定位及夹紧结构进行细化，完成夹具设计。

4. 确定机床工作台的方位，对夹具结构进行完善，实现夹具结构与工作台的连接，完成夹具整体结构；对夹具结构进行干涉检查，如发生干涉，则进行改进。

5. 对夹具结构进行优化设计。

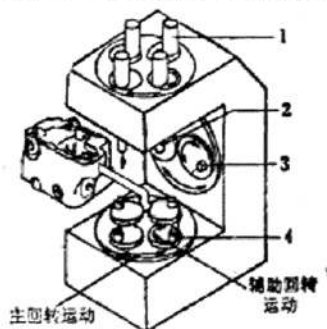
## 本章小结

本章首先分析了目前夹具设计过程存在的问题，然后从系统论角度分析影响夹具设计的工件、机床和夹具本身三个因素，利用这些因素完成夹具空间的定义，以夹具空间为基础，提出采用“切除法”设计柔性夹具的思路，该方法可以直接实现夹具元件调整方式的设计，完成第三章提出的第一个要求。

## 第5章 夹具的运动功能分析

### 5.1 柔性夹具的运动能力

所谓柔性夹具，是指用同一夹具系统装夹定位在形状与尺寸上有所变化的多种工件。从目前的柔性夹具看，可以通过夹具组成元件的不同组合、调整，实现夹具的柔性，例如组合夹具、可调整夹具；对此类夹具，一次组装一旦完成，其结构就成为专用夹具，一直到该批零件完成加工，夹具组件才可以拆卸，组装成另外的夹具。



- 1、液压夹紧油缸 2、夹紧元件  
3、侧向定位元件 4、定位元件

图 5.1 双回转数控夹紧装置

另外，可以通过夹具元件的运动，控制夹具元件移动到所需位置来实现柔性，例如模块化程序控制式夹具、仿生抓夹式夹具、相变材料夹具，这类夹具从成本、加工能力、结构等方面来说距离实际应用还有很远，但是这些都是真正意义上的柔性夹具。以双回转数控夹紧装置（图 5.1）为例，说明夹具的运动过程。

这种装置是由相互无关的主回转运动和辅助回转运动叠加而成，根据每个箱体零件的定位、夹紧要求而确定。其夹紧过程如下：根据某一箱体定位、夹紧的要求编制程序；此程序运行后，将底部的 4 个定位支承和侧面的 2 个支承元件，通过主辅回转运动，调整到箱体要求的定位处，夹具顶部的四个液压夹紧油缸也同时调整到要求的夹紧位置，然后箱体零件被放在定位元件上，最后由顶部油缸的活塞下移，将箱体零件夹紧。

在传统夹具中，运动也是缺少不了的部分，例如夹具的夹紧过程、定位元件的运动件（完成定位过程）。通过分析上述夹具的运动原理，本文提出将夹具的运动功能独立出来进行研究，分析其对夹具整体的影响。需要考虑以下几个方面：

①定位元件的运动，定位是夹具设计成败的关键。在产品尺寸发生变化时，定位元件的位置是否需要变化，变动量是多少，如何实现（移动——参考槽系组合夹具加工运动导轨），定位元件移动对定位误差的影响。

②夹紧元件：产品变化、定位元件位置变化后，夹紧元件的布置应该如何变化，夹紧路径是否发生变化，夹紧力如何确定。

③夹具整体结构：夹具整体刚度会发生什么变化，夹具的加工误差应该如何确定等。

## 5.2 夹具运动功能对定位误差的影响

### 5.2.1 定位误差计算模型

传统的夹具精度一般采用二维分析法，但是该方法只能对尺寸误差作计算，在对工件的形状和位置精度要求日益提高的情况下无能为力。矩阵计算法较好地解决了这个问题；而且它适合计算机自动计算，特别是各种误差具有方向性，可以识别<sup>[41-43]</sup>。

夹具加工过程中各种误差因素和工序尺寸公差 $\delta_1$ 的关系可用下式表示(工序角度公差 $\delta_a$ 和 $\delta_1$ 类似)

$$\delta_1 \approx (\delta_{dw}^2 + \delta_{jj}^2 + \delta_{jg}^2 + \delta_{az}^2 + \delta_{dj}^2)^{\frac{1}{2}}$$

式中： $\delta_{dw}$ ——定位误差(是由工件定位基准和工序基准不重合引起的基准不重合误差，以及由工件定位基准的制造误差引起的误差和夹具元件的制造误差引起的误差)；

$\delta_{jj}$ ——夹紧误差(系工件夹紧时夹具支撑部分与工件接触表面的接触变形所引起的误差)；

$\delta_{jg}$ ——加工时工艺系统的受力变形、热变形和刀具磨损所引起的误差，统称加工误差；

$\delta_{az}$ ——夹具在机床上的安装误差；

$\delta_{dj}$ ——刀具误差，包括刀具对刀调整误差和刀具轴线相对于钻套孔的偏斜。

在数控机床和加工中心上加工工件时，由于其具有补偿功能，基本上可以消除夹具在机床上的安装误差 $\delta_{az}$ 和刀具误差 $\delta_{dj}$ ，误差计算公式可以简化为：

$$\delta_1 = \delta_{dw} + \delta_{jj} + \delta_{jg}$$

定位误差 $\delta_{dw}$ 属于系统误差，它是误差的重要组成部分，可以通过调整夹具方案减小定位误差。夹紧误差 $\delta_{jj}$ 和加工误差 $\delta_{jg}$ 属随机误差，情况比较复杂，在工艺手册和相关书籍中有一些实验或经验的综合数据可供参考。因此对特定夹具设计方案下工件定位误差的分析和计算，是精度评价的主要部分。

#### 1、工件上一点定位误差的计算

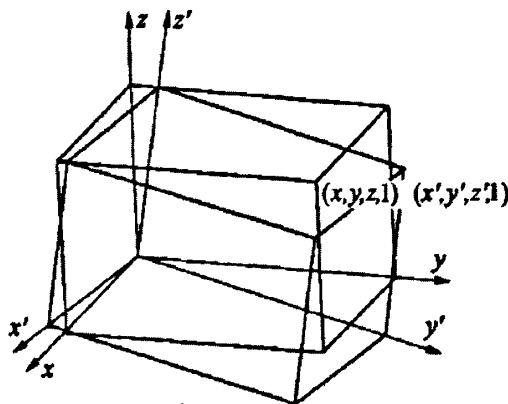


图 5.2 工件的定位

假设工件是一个刚体，由空间某一确定位置向另一位置变动，可以通过坐标变换来



实现。工件在空间的任何运动都可归结为相对该坐标系的 6 种运动, 即 3 种移动和 3 种转动。约束这 6 个自由度, 就实现了工件的定位, 参见图 5.2。

假设在空间先后绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴逆时针方向转动  $\varphi$ 、 $\psi$ 、 $\theta$  角, 并沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴方向平移  $x_0$ 、 $y_0$ 、 $z_0$ , 则工件上任一点的坐标  $(x, y, z, 1)$  变成  $(x', y', z', 1)$ :

$$(x', y', z', 1) = (x, y, z, 1) \cdot R_T$$

其变换矩阵  $R_T$  为:

$$R_T = \begin{pmatrix} \cos\psi \cos\theta & \cos\psi \sin\theta & -\sin\psi & 0 \\ \sin\varphi \sin\psi \cos\theta - \cos\psi \sin\theta & \sin\varphi \cos\psi \sin\theta + \cos\varphi \cos\theta & \sin\varphi \cos\psi & 0 \\ \cos\varphi \sin\psi \cos\theta + \sin\psi \sin\theta & \sin\theta \cos\varphi \sin\psi - \sin\varphi \cos\theta & \cos\varphi \cos\psi & 0 \\ x_0 & y_0 & z_0 & 1 \end{pmatrix}$$

令  $\Delta\varphi$ 、 $\Delta\psi$ 、 $\Delta\theta$  分别表示工件绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的转角误差,  $\Delta x_0$ 、 $\Delta y_0$ 、 $\Delta z_0$  分别表示工件沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴坐标方向可能产生的微小位移, 即平移误差,  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  分别表示工件上任一点  $(x, y, z, 1)$  沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴方向上的尺寸偏移。考虑到转角误差很小, 故其余弦函数取值为 1, 正弦函数高于二次的可以略去。其矩阵表达式  $R_L$  为:

$$( \Delta x, \Delta y, \Delta z, 1 ) = ( x, y, z, 1 ) \cdot R_L$$

$$R_L = \begin{pmatrix} 0 & \sin\Delta\theta & -\sin\Delta\psi & 0 \\ -\sin\Delta\theta & 0 & \sin\Delta\varphi & 0 \\ \sin\Delta\psi & -\sin\Delta\varphi & 0 & 0 \\ \Delta x_0 & \Delta y_0 & \Delta z_0 & 1 \end{pmatrix}$$

误差计算中还要考虑误差的方向性, 一般规定: 当加工误差使被加工尺寸增大时, 误差的方向为正, 反之为负。考虑到夹具与工件误差方向的随机性, 每个转角误差又是独立的, 可能的最大定位误差应是每个转角误差单独引起的定位误差的绝对值之和, 公式变为:

$$\begin{aligned} \Delta x &= |-y \sin\Delta\theta + \Delta x_\theta| + |z \sin\Delta\psi + \Delta x_\psi| + \Delta x_0 \\ \Delta y &= |x \sin\Delta\theta + \Delta y_\theta| + |-z \sin\Delta\varphi + \Delta x_\varphi| + \Delta y_0 \\ \Delta z &= |-x \sin\Delta\psi + \Delta z_\psi| + |y \sin\Delta\varphi + \Delta z_\varphi| + \Delta z_0 \end{aligned} \quad (5-1)$$

式中,  $\Delta x_\theta$ 、 $\Delta y_\theta$  分别表示由转角误差  $\theta$  引起的工件沿  $x$ 、 $y$  方向的平移误差;  $\Delta x_\psi$ 、 $\Delta z_\psi$  分别表示由转角误差  $\psi$  引起的沿  $x$ 、 $z$  方向的平移误差;  $\Delta y_\varphi$ 、 $\Delta z_\varphi$  分别表示由转角误差  $\varphi$  引起的沿  $y$ 、 $z$  方向的平移误差;  $\Delta x_0$ 、 $\Delta y_0$ 、 $\Delta z_0$  分别为沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的其他平移误差。计算出来的误差为双向误差。

## 2、定位误差对加工精度的影响

工件加工精度包括尺寸精度、表面形状和位置精度。尺寸误差是相对于尺寸精度而言的, 指实际尺寸相对于公称尺寸的变动量。位置精度包括平行度、垂直度、同轴度、位移度、径向跳动和端面跳动等 7 项。定位误差对它们造成很大的影响。

表面形状精度包括平面度、圆度、圆柱度、椭圆度等 6 项, 主要由刀具的几何形状、机床加工中的振动和刀具切削变形引起, 这里不进行讨论。

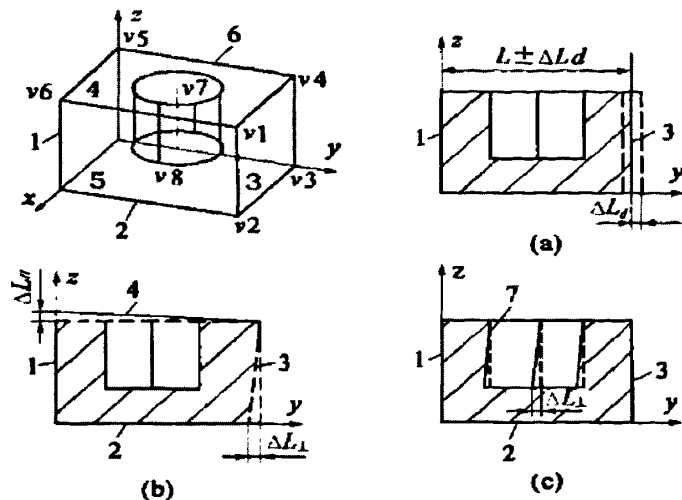


图 5.3 加工误差示意图

以图 5.3 的工件为例，工件以 1、2、5 平面定位，加工 3、4 平面和内孔面 7。要求计算该定位方式下的定位误差，在工件上建立坐标系。尺寸  $L$  由定位面 1 和被加工面 3 所形成。定位不准确产生的尺寸误差用  $\Delta L_d$  来表示。如果被加工面 3 的顶点为  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$ ，对应的点的定位误差为  $\Delta L_1$ 、 $\Delta L_2$ 、 $\Delta L_3$ 、 $\Delta L_4$ ，则：

$$\Delta L_d = \max(\Delta L_1, \Delta L_2, \dots, \Delta L_i), i = 1, 2, 3, 4,$$

因为  $L$  沿  $y$  方向，则： $\Delta L_d = \max(\Delta y_1, \Delta y_2, \dots, \Delta y_i), i = 1, 2, 3, 4。$

将被加工面 3 的顶点  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$  的坐标值代入公式(1)即可算出  $\Delta L_d$ 。

设  $\Delta L_{dx}$ 、 $\Delta L_{dy}$ 、 $\Delta L_{dz}$  分别表示沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向由定位引起的尺寸误差， $n$  为被加工面的顶点数，定位误差可计算如下：

$$\Delta L_x = \max(\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_i), i = 1, 2, \dots, n$$

$$\Delta L_y = \max(\Delta y_1, \Delta y_2, \dots, \Delta y_i), i = 1, 2, \dots, n$$

$$\Delta L_z = \max(\Delta z_1, \Delta z_2, \dots, \Delta z_i), i = 1, 2, \dots, n$$

(5-2)

如图 5.3b 所示，定位不准确引起的被加工面 4 对定位面 2 的平行度误差  $\Delta L_{//}$  和被加工面 3 对定位面 2 的垂直度误差  $\Delta L_{\perp}$  可简化为：

$$\Delta L_{//} = \max(|\Delta z_i - \Delta z_j|), i, j = 1, 4, 5, 6, i \neq j$$

$$\Delta L_{\perp} = \max(|\Delta y_i - \Delta y_j|), i, j = 1, 2, 3, 4, i \neq j$$

### 3、误差综合

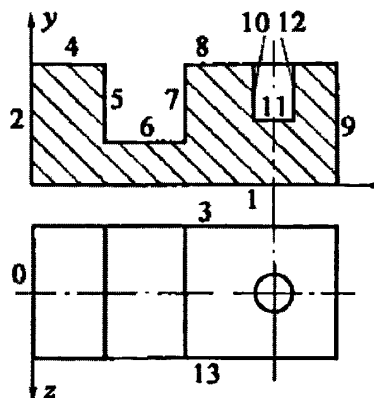


图 5.4 三种特征面的误差综合

可以将一道工序中的工件表面划分为定位面、被加工面和其他面三种，其中，其他面指既不是定位面又不是被加工面的表面。形成相应的三种尺寸类型：被加工面-被加工面(m-m)；被加工面-定位面(m-d)；被加工面-其他面(m-o)。在图 5.4 中，工件以 1、2、3 平面定位，加工 5、6、7、8、10、11、12 平面。由于是一次装夹，被加工面-被加工面形成的尺寸，如  $L_{5-7}$ ，只与刀具和机床加工工艺系统有关，与定位误差无关。被加工面-其他面形成的尺寸，如  $L_{2-5}$ ，可由公式(5-2)计算得到。被加工面-其他面形成的尺寸，如  $L_{7-9}$ ，定位误差由定位过程的误差与基准不重合误差两方面合成。它可以分解为被加工面-定位面  $L_{7-2}$ 、定位面-其他面  $L_{7-9}$  两个尺寸。被加工面-其他面的尺寸公差  $\Delta L_{2-9}$  即为基准不重合误差，总的定位误差为  $\Delta L_{7-9} = \Delta L_{7-2} + \Delta L_{2-9}$ 。

### 5.2.2 三类典型定位方式下的定位误差分析

常用的 3 种定位方式有 321 平面定位，一面两销定位和 V 型块定位。利用矩阵算法，分析具体定位方式下工件的 3 种平移和 3 种转动，给出工件各表面特征，就可以在计算机上实现三维定位误差的自动核算。

#### 1、321 平面定位

321 平面定位指用 3 个相互垂直的平面来实现工件的定位。工件上 3 点定位面称为第 1 定位基准面，一般放在基础板上或用 3 个支承钉来定位。工件上的 2 点定位面称为第 2 定位基准面，由支承板或 2 个支承钉来定位。另 1 个定位面为第 3 定位基准面，用 1 个支承钉定位。如图 5.5 所示，在工件上建立直角坐标系。取 3 个定位基准面的交点为坐标原点，分别取第 1、2 基准面，第 1、3 基准面和第 2、3 基准面的交线为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴。

当产品尺寸变化引起定位面的运动时，从分析可以得出，在保持产品表面与定位面接触的条件下，三定位面的运动都是平行移动，即由定位元件移动产生的误差只影响三个方向的移动误差。设三定位面的有效工作长度为  $L_x$ 、 $L_y$ 、 $L_z$ ，因定位面移动产生的误差为  $\Delta L_x$ 、 $\Delta L_y$ 、 $\Delta L_z$ ，其对工件坐标值的影响表现为：

$$\begin{aligned} x' &= x + \Delta L_x \\ y' &= y + \Delta L_y \\ z' &= z + \Delta L_z \end{aligned} \quad (5-3)$$

将 (5-3) 式代入公式 (5-1) 和 (5-2)，并经过误差综合，得到工件的定位误差。

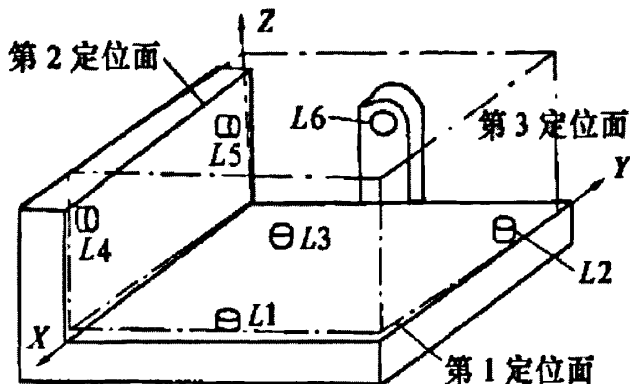


图 5.5 321 平面定位方式

## 2、一面两销定位

一面两销定位是由 1 个大平面和两个垂直于大平面的定位销组合定位，其中 1 个定位销是圆柱销，另 1 个是菱形销，是一种最典型而常用的定位方式。如图 5.5 所示，取圆柱销与大平面的交点为坐标原点，圆柱销轴线方向为 z 轴，底面为 XOY 平面。定位销和定位孔的尺寸误差及其孔销之间的间隙，使工件产生平移误差

$\Delta x_0$ 、 $\Delta y_0$  和绕圆柱销 z 轴的转角误差  $\Delta \theta$ 。由大平面定位时，基础板本身的平行度误差可能引起工件绕 x、y 轴的转角误差  $\Delta \phi$ 、 $\Delta \psi$ 。因定位销、孔之间存在间隙，由  $\Delta \phi$ 、 $\Delta \psi$  引起的平移误差可忽略不计。

设两定位销原来的间距为 L，采取一固定一运动方式，运动销沿连心线移动  $\Delta L$ ，产生的误差为  $\Delta L_y$ 。由运动产生的转角误差可以忽略。设圆柱销、菱形销的直径为

$d_1 \pm \Delta d_1$ 、 $d_2 \pm \Delta d_2$ ，相应定位孔的直径为  $D_1 \pm \Delta D_1$ 、 $D_2 \pm \Delta D_2$ ，圆柱销、孔之间的保证间隙为  $cle_1$ ，菱形销、孔之间的保证间隙为  $cle_2$ ，基础板的平行度误差为  $\Delta \alpha$ ，则：

$$\Delta \varphi = \Delta \psi = \Delta \alpha$$

$$\Delta \theta = \tan^{-1} (2\Delta d_1 + 2\Delta d_2 + 2\Delta D_1 + 2\Delta D_2 + cle_1 + cle_2) / (L + \Delta L + \Delta L_y)$$

$$\Delta x_0 = \Delta y_0 = 2\Delta d_1 + 2\Delta D_1 + cle_1$$

代入公式 (5-1) 和 (5-2)，得到工件的定位误差。

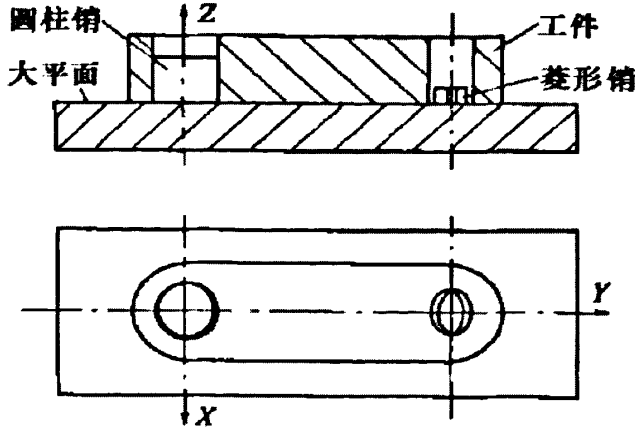


图 5.6 一面两销定位

### 3、V 型块定位

用 V 型块定位外圆表面时，主要起对中作用。如图 5.7 所示，建立直角坐标系。设工件定位外圆直径为  $D \pm \Delta D$ ，V 型块两斜面的夹角为  $\alpha \pm \Delta \alpha$ ，V 型槽深度误差为  $T \pm \Delta T$ ，引起 x、z 向的平移误差为  $\Delta x_0$  和  $\Delta z_0$ 。以加工中典型的 x 向加工尺寸  $L_4, L_5, L_6$  和 z 向加工尺寸  $L_1, L_2, L_3$  为例。由于 V 型块和工件外圆的尺寸偏差主要影响平移量，可以近似认为  $\Delta \phi = \Delta \psi = \Delta \theta = 0$ ，代入公式(5-1)、(5-2)得到工件尺寸的定位误差为：

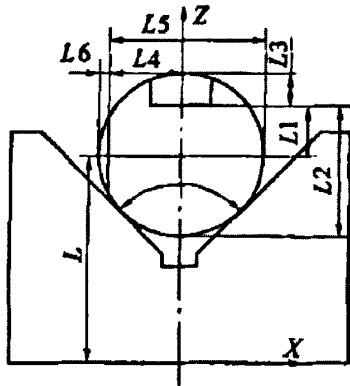


图 5.7 V 型块定位

分析外圆直径变化时，需要 V 型块上下运动使圆心保持不变为前提，设 V 型块运动产生的误差为  $\Delta L_z, \Delta L_x$ 。

$$\Delta L_1 = \Delta z_0 = \frac{\Delta D + \Delta L_z}{2 \sin(\alpha/2)} + \frac{D(1 - \cos \Delta \alpha)}{2 [\sin^{-1}(\alpha/2) - \sin^{-1}(\alpha \pm \Delta \alpha/2)]} \pm \frac{\Delta T}{2}$$

$$\Delta L_2 = \Delta z_0 = \frac{(\Delta D + \Delta L_z) [\sin^{-1}(\alpha/2) - 1]}{2} + \frac{D(1 - \cos \Delta \alpha)}{2 \sin(\alpha/2)} + \frac{D}{2 [\sin^{-1}(\alpha/2) - \sin^{-1}(\alpha \pm \Delta \alpha/2)]} \pm \frac{\Delta T}{2}$$

$$\Delta L_3 = \Delta z_0 = -\left\{ \frac{(\Delta D + \Delta L_z) [\sin^{-1}(\alpha/2) + 1]}{2} - \frac{D(1 - \cos \Delta \alpha)}{2 \sin(\alpha/2)} - \frac{D}{2 [\sin^{-1}(\alpha/2) - \sin^{-1}(\alpha \pm \Delta \alpha/2)]} \right\} \pm \frac{\Delta T}{2}$$

$$\Delta L_4 = \Delta x_0 = \frac{D \sin \Delta \alpha}{2 \sin(\alpha/2)} \pm \Delta L_x$$

$$\Delta L_5 = \Delta L_6 = \frac{D \sin \Delta \alpha}{2 \sin(\alpha/2)} + \frac{\Delta D}{2} \pm \Delta L_x$$

### 5.3 设计实例

使用本文的设计方法，作者设计了第3章中轴承座的夹具，结构图如5.8所示。该夹具可以用于孔中心高为150mm的多种零件的钻、镗孔加工，定位销变化范围为115mm。零件固定于夹具上底板，上底板可以通过导轨沿下底板中心线水平移动，用于调整孔中心线与机床主轴重合。

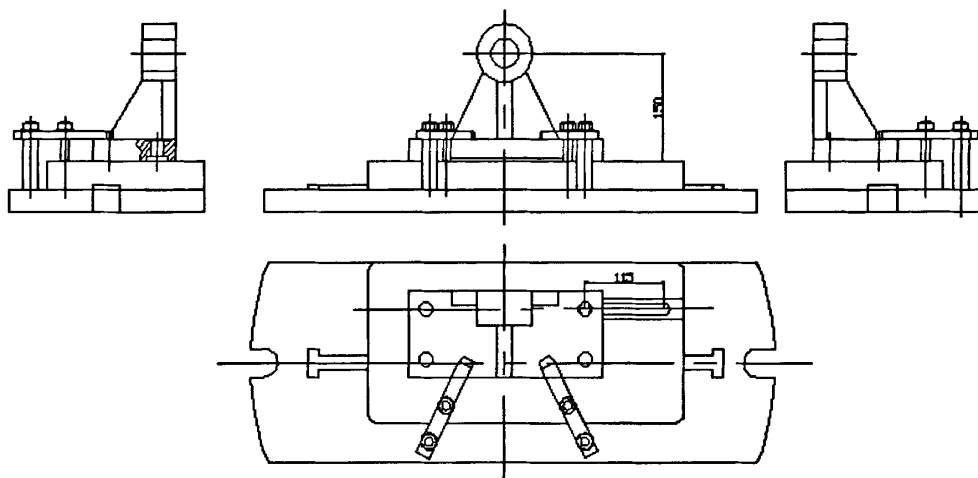


图 5.8 夹具结构图

### 本章小结

本章在分析现有柔性夹具结构基础上，提出独立的夹具运动功能；并应用三维定位误差的分析方法分析了运动部件对夹具误差的影响，实现了对柔性夹具调整精度的控制，完成第三章的第二个要求。最后，应用本文的设计方法实现了前文举例中轴承座零件的夹具结构图。

## 第6章 夹具设计流程及调节系统

前面两章分别研究了第三章中提出的调整方式和调整精度控制这两个问题。本章将对调整时间这个问题进行研究。在这之前，要介绍夹具自动化设计的有关内容。

### 6.1 知识推理方法简介

#### 6.1.1 基于规则的知识推理方法

知识推理就是根据已知信息和条件，利用系统所具有的知识，根据一定的策略进行推理，最后得出结论。推理机是模仿专家思维方式的核心，它决定在设计中的某个阶段启用哪条经验规则。

基于规则的推理系统(Rule-based Reasoning, RBR)又称产生式系统，其表现形式单一，容易为用户所理解，因此成为最重要的知识表示方法。但同时它又有许多缺点，如规则间的相互关系不明显，知识的整体形象难以把握；处理效率低；推理缺乏灵活性，容易出现饱和问题；与真正专家的知识结构不同等。而且基于规则的推理只能对事先预想到并提供了规则的事件进行推理，不能灵活适应外部情况的变化，对于处理过的问题没有记忆是导致所开发的专家系统效率低下的一个主要原因。基于规则推理用于解决复杂的现实问题，如规划、调度和设计等。该技术的特点在于它具有极强的演绎推理能力，该技术的不足之处在于它在解决规划或调度问题时，要求必须“从头开始”。有关规则的具体规定可以参看文献[44]。

#### 6.1.2 基于实例的知识推理方法

##### 1、基于实例的推理技术

基于实例推理(Case-based reasoning, CBR)是人工智能的一个分支学科，基于实例推理技术是一种相似推理方法，其核心是基于过去求解类似问题的成功经验和实例，获取当前设计问题的一种类比推理模式<sup>[45,46]</sup>。它利用以往求解类似问题的以实例形式表示的经验知识进行推理，从而获得当前问题求解结果的一种推理模式。

根据 Aamodt & Plaza 提出的 4R 模型，整个推理过程可以分为四个阶段：检索(Retrieval)、重用(Reuse)、修正(Revise)和更新(Retain)。推理过程也可划分为以下 4 个阶段：

(1)问题描述 基于实例的推理在很大程度上依赖于它所收集实例的结构和方法。为了进行有效的检索和重用，需要决定每个案例应该存储的内容，并为其找到一个合适的结构。

(2)实例检索 根据每个实例的问题描述特征，对实际条件和实例进行相似性评估，在实例库中检索并获取最相似实例和解决方案。

(3)实例修改 相似实例和实际要求之间如果存在冲突，就需要对冲突进行裁决，以获得一个合理的解决方法。

(4)保存实例 把当前问题以及合理的解决方案作为一个新的实例存入到实例库中，

以便积累经验。

系统首先根据问题描述生成查询实例。在实例库中检索出与查询实例最为接近的库存实例。综合分析查询实例和库存实例，通过重用过程生成候选实例。然后经过修正过程对实例进行验证和修改生成修正实例，最后通过更新过程将修正实例转换为学习实例，并更新实例库。同产生式或其它基于规则的推理系统相比，CBR 系统是以一种完全不同的方式来解决实际问题，克服了许多 RBR 系统的不足。

基于实例的推理方法根据以往的设计经验——Case 来进行问题求解。Case 中包括问题的说明和解决方案等信息。事实上，在实际求解问题的过程中，人们通常采用首先找出跟当前问题相关的、以往的相似问题(Case)，然后对这些相似问题进行修改，使它们能够满足新的设计问题需求的方法。应用基于实例的推理正是体现了人类解决问题的这种认知过程。作为一种设计综合模式，CBR 是具有吸引力的。

## 2、实例的表示

基于实例推理的知识表示方法，通常并不会是一种全新的知识表示方法，而是在以往的知识表示方法如一阶逻辑、产生式规则、框架或语义网络上的一级抽象<sup>[47]</sup>。因此，其实现方法应基于现有的知识表示方法。本文采用面向对象的知识表示方法来表达夹具设计实例。从本质上讲，面向对象的知识表达方法，是将多种单一的知识表达方法(规则、框架和过程等)，按照面向对象的程序设计原则，组成一种混合知识表达形式。表达设计实例的知识划分为两种类型：一种是可以描述为具有二元组模式的特征属性值对；另一种是不能描述为具有二元组模式的相关设计知识，包括设计经验和设计准则等，这里我们称之为方法(Methods)。实例描述对应于面向对象技术中类的概念。特征属性值对包含实例设计问题的前提条件和方案信息，它对应于面向对象技术的类中数据成员的概念。相关设计知识描述实例设计过程中，所采用的经验知识和求解策略，它相当于面向对象技术中类的成员函数。

实例方法表描述设计实例的设计经验和设计准则等相关设计知识可施行的各种方法的定义，或给出实现相应操作所需执行的一段程序代码。

基于实例推理与基于功能的夹具结构分解结合在一起，构成夹具的求解方法，如图 6.1 所示。



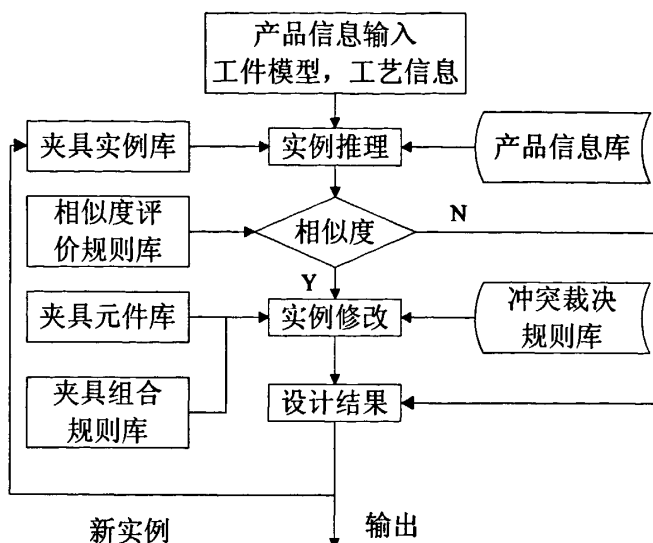


图 6.1 夹具求解方法

### 6.1.3 “实例+规则”的混合推理方法

基于实例推理较之基于规则的系统具有自动学习能力,而且系统的建立和维护也相对容易:它可以较好地模拟专家的联想、直觉、类比、归纳、学习和记忆等思维过程。随着实例库的增长,系统的“经验”将会越来越丰富。CBR 技术解决问题的思路是寻找一个类似的、成功的过去案例,并对其进行修改直至符合当前问题的需要,是一种“跳过开始”的方法。但是,由于缺乏演绎能力,使得单独的 CBR 推理显得过于牵强、不可解释且缺乏系统性;同时, CBR 对深入分析支持不够,对其常用的层次索引而言,逐层检索亦会导致推理器低效。因此,将 CBR 技术与演绎推理能力极强的 RBR 技术相结合,两者取长补短,从而使整个系统达到更高智能水平,具有十分重要的意义。两种技术的结合,不仅会大大增强系统的灵活性及其综合推理能力,还会明显减轻实例检索与实例库的负担。

因此 CBR 和 RBR 的混合推理受到学者的关注和研究。根据国内外有关文献<sup>[48]</sup>, CBR 和 RBR 在一个系统中共存方式有两种:

- 1) CBR 和 RBR 相互独立,其目的是在多种知识源的基础上,尽量提高推理的准确性。主要涉及两个方面:①解决何时、如何激发 CBR 和 RBR;②集中解决如何协调 CBR 和 RBR 结果之间的冲突。
- 2) CBR 和 RBR 能相互转化,其目的是在单一的推理机制下,尽量提高推理效率。①将所有规则转化为实例,减少产生式系统推理机的问题求解空间;②将所有实例转化为规则,主要由专用的转化算法实现数据的压缩表示或对实例的有效访问。

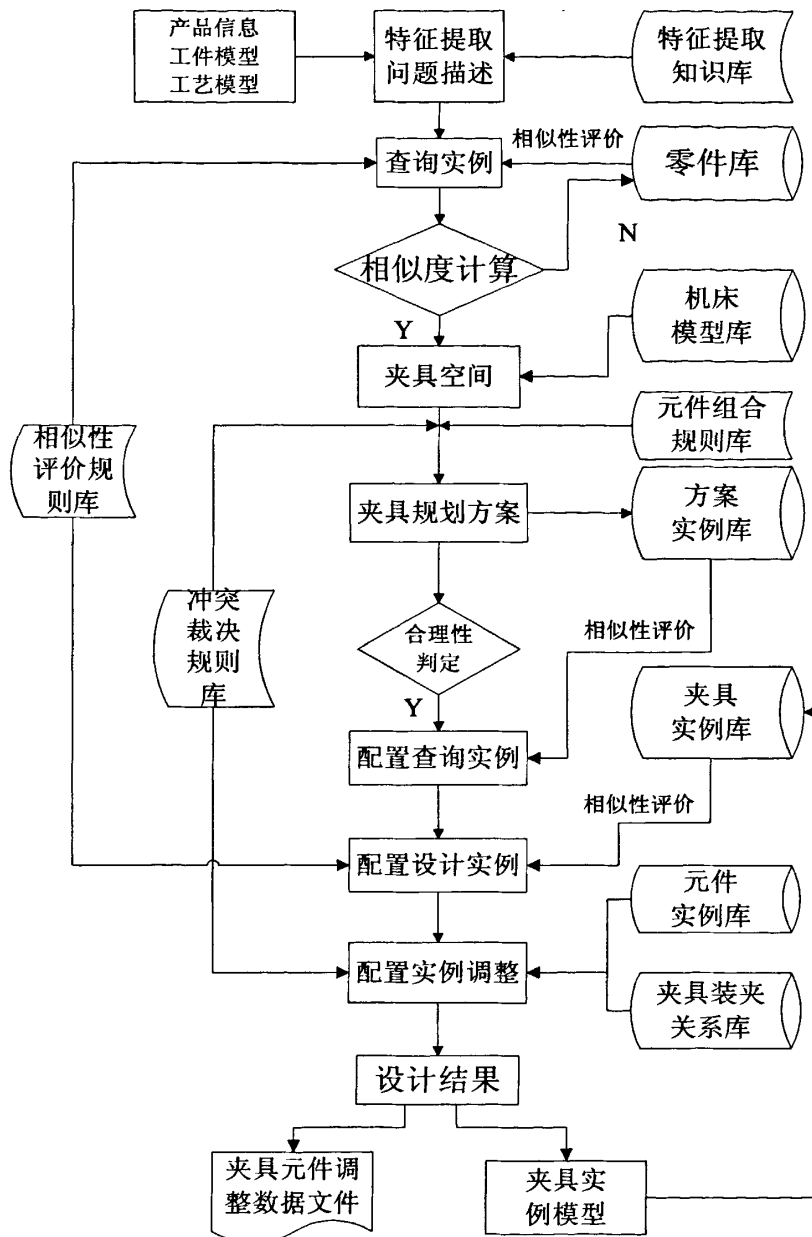


图 6.2 基于“实例+规则”的快速夹具设计系统

CBR 和 RBR 的混合推理一般有两种模式：①先进行 RBR 推理形成初始方案，不成功再进行 CBR 推理；②先进行 CBR 推理，不成功再运行 RBR。但这两种串行方式用于机械设计都存在一定的缺陷。机械设计领域的确存在可用于 RBR 的一般规律，但这些规律还不足以保证 RBR 形成完整的解决方案。CBR 可以得到解决方案，但在设计之初就开始检索大量数据。不仅影响了效率，而且由于机械设计中的一些信息难于准确描述，结果的可靠性也难以保证。同时，简单的替换型方法论模式将 CBR 过程和 RBR 过程割裂开，CBR 和 RBR 都不能充分利用已有的推理结果，形成信息的浪费。针对以上问题，提出 TCBR 和 RBR 混合推理模型，并应用在夹具的方案规划设计中，由于系统中实例和规则采用同一的编码机制，提高了知识服务的主动性和高效性。用基于规则推理(RBR)

减小检索范围，优化实例检索的质量并提高实例修改的自动化水平。

#### 6.1.4 夹具设计流程

本文在基于“实例+规则”推理求解方法的支持下，构造的快速夹具设计系统(RFDS)结构如图 6.2 所示。整个设计过程可以分为三个阶段：第一阶段为问题描述阶段。系统根据用户的输入获取相关的产品信息，这些信息包括相关的工件模型和工艺模型。应用特征抽取知识，提取能够表达模型特征的特性，生成问题描述码(即查询实例)。问题描述也可以手工完成。即由用户描述当前设计问题的特征，系统根据用户的描述生成查询实例，查询实例生成之后，设计准备阶段完成。第二个阶段为夹具方案设计阶段。系统根据查询实例，结合方案规划规则库中的内容，通过层次组织结构从夹具方案规划实例库检索出相关的设计实例。

这一阶段系统注重的是设计实例中的装夹规划信息，因此检索出的实例称为规划实例。系统以规划实例为基础，应用规划实例调整规则和知识进行实例的调整，生成装夹规划方案，通过系统的验证和用户的认可确定最终的装夹规划方案；第三个阶段为配置设计阶段。系统根据用户认可的装夹规划方案和设计准备阶段生成的查询实例生成配置查询实例，应用配置查询实例，从层次结构中的配置设计实例库中检索出相关的设计实例。这一阶段系统注重的是设计实例中的配置设计信息，因此检索出的实例称为配置设计实例，系统以配置设计实例为基础，应用配置设计实例调整知识和装夹元件库进行实例的调整，生成夹具配置方案，通过系统的验证和用户的认可确定最终的配置设计方案。

从图 6.2 中可以明显地看出在夹具设计过程中具有两个实例推理过程，一个应用在夹具装夹规划设计阶段，一个应用在夹具配置设计阶段。如果只应用一个 CBR 过程，即直接以工件信息和工艺信息为输入，通过 CBR 过程检索出配置设计方案并进行调整的话存在两个问题。一是在一次 CBR 推理中需要考虑两方面的信息，系统处理的数据量比较大。二是一次 CBR 推理检索出的相似实例实际上是装夹规划的相似实例，在装夹规划调整之后对于配置设计已经不是最佳的相似实例。如果不进行第二次 CBR 推理，夹具配置设计就不是基于实例的。

## 6.2 夹具调控系统

### 6.2.1 准时化生产简介

精益生产是通过系统结构、人员组织、运行方式和市场供求等方面的变革，使生产系统能很快适应用户需求不断变化，并能使生产过程中一切无用、多余的东西被精简，最终达到包括市场供销在内的生产的各方面最好的结果<sup>[49]</sup>。与传统的大生产方式不同，其特色是“多品种，小批量”。其核心是消除一切无效劳动和浪费，它把目标确定在尽善尽美上，通过不断地降低成本、提高质量、增强生产灵活性、实现无废品和零库存等手段确保企业在市场竞争中的优势，同时，精益生产把责任下放到组织结构的各个层次，采用小组工作法，充分调动全体职工的积极性和聪明才智，把缺陷和浪费及时地消灭在每一个岗位。精益生产方式的

实质是管理过程，包括人事组织管理的优化，大力精简中间管理层，进行组织扁平化改革，减少非直接生产人员；推行生产均衡化同步化，实现零库存与柔性生产；推行全生产过程（包括整个供应链）的质量保证体系，实现零不良；减少和降低任何环节上的浪费，实现零浪费；最终实现拉动式准时化生产方式。

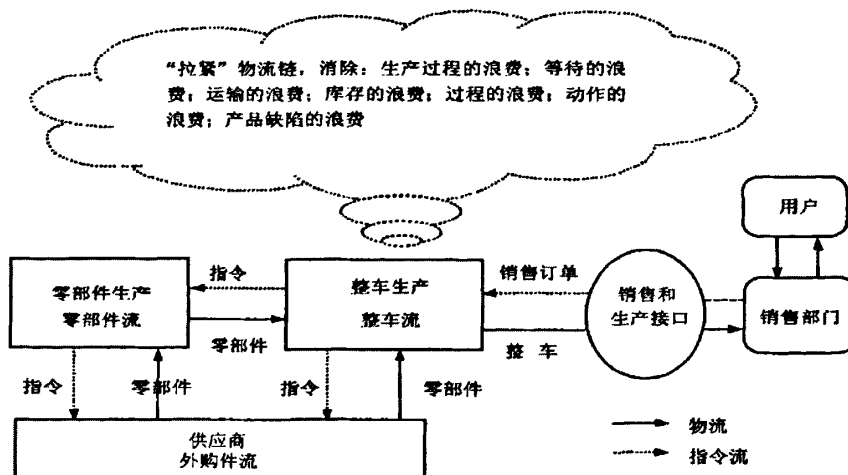


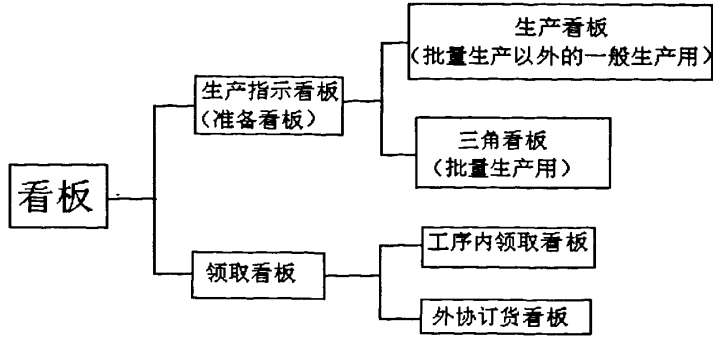
图 6.3 拉式流的物流和信息流<sup>[50]</sup>

准时化生产方式（Just in time, JIT）实质是保持物质流和信息流在生产中的同步，实现以恰当数量的物料，在恰当的时候进入恰当的地方，生产出恰当质量的产品。这种方法可以减少库存，缩短工时，降低成本，提高生产效率。JIT 生产方式的基本思想是“只在需要的时候，按需要的量，生产所需的产品”，也就是追求一种无库存，或库存达到最小的生产系统。JIT 的基本思想是生产的计划和控制及库存的管理。JIT 以订单驱动，通过看板，采用拉动方式把供、产、销紧密地衔接起来，使物资储备，成本库存和在制品大为减少，提高了生产效率。如图 6.3 所示。

准时化生产是要保证在必要的时间和必要的地点，生产必要数量的产品，以应付多品种少量的要求<sup>[51]</sup>。准时化生产的必要条件是，使各道工序知道正确的生产时间及正确的生产数量。因此说，看板（Kanban）是实现准时化生产的最重要手段。

“看板”管理的英文为“Kanban”，这个词来自于日本，意味着“口令”或者“指令”。看板管理在作业管理中采用了“拉动式”方法。“拉动式”方法是从由代表顾客需求的订单开始，根据市场需求制定主生产计划和总装顺序计划，从产品总装配出发，每个工作中心按照当时对零部件的需要，向前工序提出要求，发出工作指令，前工序工作中心完全按照这些指令进行生产，这样反工艺顺序地逐级“拉动”前面的工作中心，甚至“拉”到供应厂或协作厂。“拉动”是靠看板系统来实现的，看板起到指令的作用。

看板的基本功能是运送工作指令，本质是传递信息的载体。实现看板功能可以通过不同的形式，针对不同的形式有相应的使用规则。看板总体可以分为：生产指示看板和领取看板三类，详细分类情况见图 6.4<sup>[51]</sup>。



## 6.2.2 车间生产管理现状分析

准时化生产强调生产现场管理的合理化，因此要实现准时化生产，首先要改进车间管理现状。机械加工车间是制造企业的一个典型车间，普通的机械加工车间一般由各种普通机床、辅具(刀具、量具、夹具等)、被加工工件、图纸及工艺文件和人员等组成。CIMS 环境下的自动化加工车间是由自动化加工设备(加工中心、数控机床、自动生产线等)、辅具(刀具库、夹具、三坐标测量机等)、物料运输设备和存储系统(传送带、有轨小车、搬运机器人、自动化立体仓库等)、物料、NC 程序、人员、通信和控制设备(计算机、电缆等)等组成。不管是普通的机械加工车间，还是 CIMS 环境下的自动化加工车间，车间的生产管理都是车间的神经中枢，它是车间生产能否正常和优化运行的关键。据美国 Ingersoll 铣床公司的分析<sup>[51]</sup>：在传统的制造工厂中，从原材料进厂到成品出厂，对一个机械零件来说，只有 5%的时间是在机床上，95%的时间零件在不同的地点和不同的机床之间运输或等待，而这 5%的时间中仅 30%的时间是切削时间，即总时间的 1.5%为切削时间。这一结果表明，要增加企业的效益，不能只从提高 5%的机床时间入手，而应有效地进行生产管理，减少生产中的辅助时间和库存时间提高设备的利用率等。

一般车间管理的主要功能是以生产为主线，以完成工厂下达的生产任务或外协订单要求为最终目的，并在任务实施中对生产过程进行各种数据监控、传输、统计等。以机械加工车间为例，具体管理内容主要有：编制车间生产计划、作业排序、生产调度、检查生产进度、生产统计、向工厂反馈车间中的问题、质量检查与控制等。管理的形式多是每天车间碰头会、现场检查、工厂调度会等。这种管理方式简单灵活，但是存在着效率低下、人为干预过多、信息传递实时性差、计划编制不准确、技术文档保存和查找不方便等缺陷。在目前激烈的市场竞争下，企业用这种管理方式很难达到满足产品 T(时间)、Q(质量)、C(成本)、S(服务)的要求。

因此，本文在基于可共线生产的产品生产线柔性夹具基础上，应用精益生产和准时化生产的有关理论，设计了车间生产管理系统，旨在解决现有车间管理中的不足，把车间中与生产相关的各种数据用计算机存储和管理，实现设计部门、生产调度部门、车间与工作站之间的信息实时传输。

### 6.2.3 车间管理流程

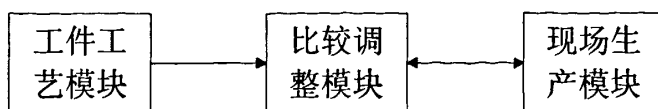


图 6.5 生产线柔性化夹具系统

以基于可共线生产的产品生产线柔性夹具为基础，本文提出由工件工艺模块、比较调整模块和现场生产模块三部分组成的生产线柔性化夹具系统（图 6.5），与夹具本身构成一个现场管理系统。工件信息输入环节完成外来新的工件生产任务到生产之前的准备工作，将工件信息转化为系统可以直接应用的生产信息。比较环节将新工件与原来工件进行比较，计算出夹具需要调整的具体数据，并将之输出。调整信息环节将以比较环节的输出为依据对夹具进行调整，使之做好生产准备工作。最后核实生产是否准备完毕，是则开始进行生产，没有则返回比较环节，重新进行数据比对。

(1) 工件工艺模块：将新的工件生产任务转化为系统可以直接应用的生产信息。以外界的工件信息为输入条件，如果满足系统条件，则进行工艺分析，转化为系统可以应用的工艺信息。

(2) 比较调整模块：以前一模块输出的工艺信息为输入条件，将新工件的信息与生产线当前工件信息进行比较，计算两者之间的差异，得出生产线每一工位上夹具需要调整的数据信息。根据生产批量计算夹具调整时间，并通知现场生产模块。

(3) 现场生产模块：以上文提到的生产线柔性化夹具组成生产流水线，根据前面模块的条件完成工件的生产任务，是整个系统的核心部分。以比较调整模块的输出数据为依据，调整夹具到适合新工件加工的位置。正确，则进行新工件的加工；否则，就返回比较调整模块进行二次分析。其工作流程如图 6.6 所示。

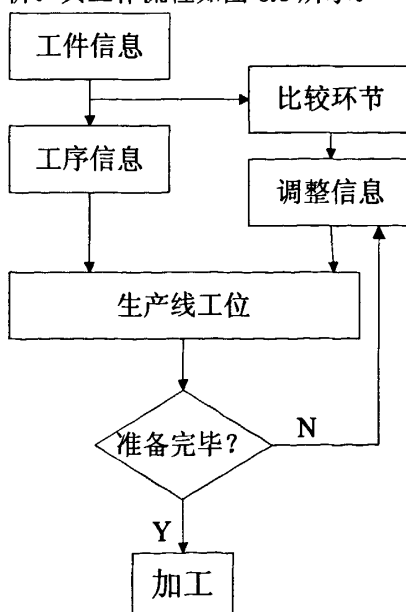


图 6.6 工作流程图

在生产现场，每一个产品上都附有一张生产卡片，卡片记录产品序号和生产信息，

卡片随着产品在生产线上移动。当一个批次的零件生产完毕，下一个零件产生尺寸变化时，系统将生产夹具调整信息，将此信息制成卡片，随前一批次的最后一个零件移动，通知生产线在生产完后进行夹具尺寸调整。

### 6.2.4 生产组织方式的选择

准时化生产方式强调生产计划的平准性，在编制生产计划时，按照批量和生产时间把不同的产品按节拍分配到生产线上，以保证生产计划的平稳性。这种方式在汽车整装线上优势非常明显，但是如果应用在本文所论述的零件生产线上，势必要频繁调整夹具的定位、夹紧元件，容易造成生产误差。

在分析各种生产组织方式的优缺点后，本文选用间歇型流程组织方式组织生产。间歇型流程可以在同样的设备上生产多种产品，工艺装备的转换是在完成一批产品之后，要进行另一批产品生产之前的间隙时间进行。这种方式换装时间较长，但是可以减少换装次数，保证同一批零件的生产精度。

前工序： 印字	零件示意图		后工序： 绕端脚
	零件名称：胶壳		
出料口位置号： A/F-3 FPA 房	零件代号：H1339QNL		入料口位置号： L-08
	装载容器：千晴胶管		
	标准容量：39/管		
	运输工具：人力		
	看板编号：5/15		

图 6.7 看板样式

按准时化生产方式的要求，只有在有订单时才进行生产。订单产生即对产品产生需求，将这种需求反向求解，从最后一道工序开始依次向前一道工序索取相应数量的产品。这些信息以看板为载体在生产线上传递，形成生产过程的信息流。常见的看板形式如图 6.7 所示。

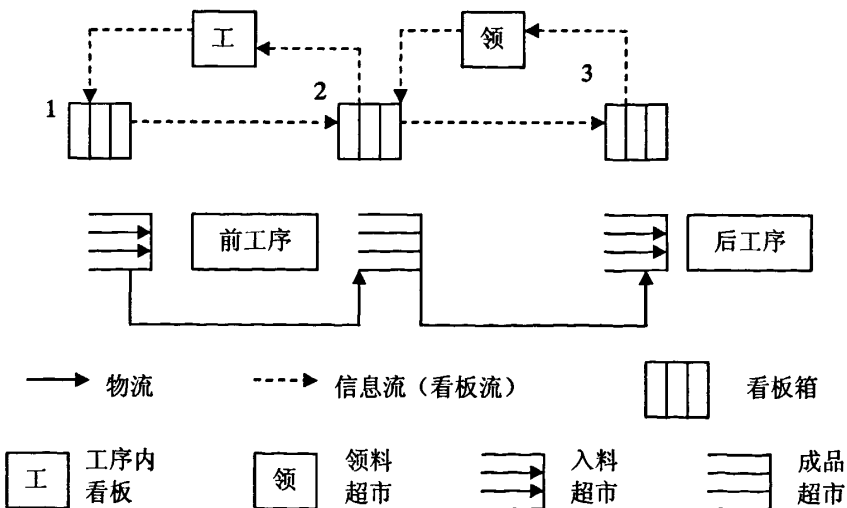


图 6.8 看板的使用规则

工序间看板是后工序到前工序领取需要的零部件时使用。工序间看板的使用规则见图 6.8 所示，当后工序从入料超市领取一箱物料时，将箱上所附看板摘下投入看板箱 1

内，等该箱零件加工完毕后再将空箱返还至入料超市处。物料员在规定时间内将看板箱 3 内所有看板和空箱拿取至前工序成品超市处，根据看板数量从此超市内领取所需零件，同时将被取零件的工序内看板放至看板箱 2 内，所需零件与工序间看板一起返回。

## 本章小结

本章首先介绍了基于规则的推理方法和基于实例的推理方法，结合二者的优点选用基于“实例+规则”的推理方法设计了夹具的设计流程；然后针对生产线柔性夹具的调整时间问题进行研究，借鉴准时化生产思想设计了应用现场生产管理的夹具调控系统。



## 结论与展望

本文针对批量随机变化生产条件下,不同规格的产品在一条生产线上进行生产时,对生产线夹具产生的新要求,以面向对象的设计方法和计算机集成制造系统的相关理论为基础,结合柔性夹具发展的新发展,对柔性夹具设计的理论和方法进行研究,建立了基于可共线生产的产品族的柔性夹具系统的设计模型。研究工作和结论如下:

1、利用基于特征的建模方法,建立了在设计、工艺、制造系统间通用的产品信息模型,同时利用面向对象的设计方法建立了零件的数字化模型库;同时采用模块化的虚拟机床建模技术建立了机床的模型库。在进行生产线夹具设计时,可以在零件库和机床库中调取对应的模型,产生夹具需求信息。

2、分析了零件的相似性,引入考量零件相似性程度的量化方法——相似度计算,分析计算过程中的各种影响因素,推导出相似度的计算公式。通过计算零件相似度可以判断产品是否可以共线生产。

3、从系统论角度出发,分析不同因素对夹具设计的影响,结合系统建模技术建立了夹具空间模型,以夹具空间为基础,提出了应用“切除法”进行柔性夹具设计的思路,该方法可以实现夹具运动元件的直接生成。然后分析运动功能对夹具误差和结构的影响,实现对夹具调整精度的控制。

4、引入基于实例的知识推理方法和基于规则的知识推理方法,设计了基于“实例+规则”的知识推理方法的夹具设计流程图;通过这种夹具自动化过程,可以提高夹具的设计效率。

5、在基于共线生产的柔性夹具基础上,借鉴准时化生产思想,建立了夹具现场调控系统,可以实现对混线生产条件下的现场实时管理。

本文虽然在柔性夹具的设计理论和方法研究方面取得了一定的成果,但是,针对目前柔性夹具设计过程中中所存在的问题,还需要进一步做更多的工作:

1、提出了夹具空间的初步概念和设计思路,虽然通过分析设计简单夹具验证了其可行性,但是如何利用夹具空间进行夹具设计还可以做进一步的分析。

2、提出的柔性夹具运动功能模块的概念,通过误差分析证明其可操作性,但是对于运动功能模块向具体结构模块的转换仍然需要进一步分析。

3、提出的基于“实例+规则”的夹具设计流程,其中使用的规则多有引用现有规则的地方,虽然可以使用,但是可以进一步设计更加方便的规则方法。

4、提出了夹具现场调控系统,准时化生产方式的应用对生产现场的要求较高,在改善生产现场条件的同时提高夹具调控系统的应用效率方面可以进一步研究。

## 参考文献

- [1] Beaty, R.T. Mass customisation, *Manufacturing Engineer*, 1996(5), 217~220.
- [2] Eastwood, Margaret A., Implementing mass customisation, *Computers in Industry*, 1996(3), 171~174.
- [3] Rogers, G.G, Bottaci, L., Modular Production system:a new manufacturing paradigm, *Joural of Intelligent Manufacturing*, 1997(8), 147~156
- [4] 唐东, 成晔.柔性夹具及其设计方法研究[J]. *制造技术与机床* 1999.2
- [5] 融亦鸣, 朱耀祥, 罗振避.计算机辅助夹具设计[M].北京: 机械工业出版社, 2002
- [6] 柏全民, 刘文剑.基于特征与参数化的夹具半智能化设计方法[J]. *计算机辅助设计与制造*, 1998.9
- [7] 柏合民, 金天国.半智能化夹具设计工程数据库的研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2000.2
- [8] 徐雷. 基于知识的计算机辅助夹具设计支持技术研究[博士学位论文]. 四川大学, 2006.
- [9] 陈猛, 徐宗俊, 郭刚.可重构制造系统及其关键支持技术[J].*制造业自动化*, 2002.5
- [10]王战春, 贾振元, 张永顺.面向可重构制造系统的敏捷夹具设计[J].*机械设计与制造*, 2003.4
- [11]王战春. 快速可重构夹具设计[D]. 大连理工大学硕士学位论文, 2003
- [12]高兆法, 欧宗瑛.产品信息模型中形状特征的表达研究[J].*组合机床与自动化加工技术*, 1999, 8: 4~7
- [13]陈定方, 罗亚波.虚拟设计[M].机械工业出版社, 2002
- [14]El-Mehalawi M, Miller R A. A database system of mechanical components based on geometric and topological similarity. Part I: Representation[J].*Computer Aided Design*, 2003, 35(1): 83-94.
- [15]潘双夏, 徐有忠, 冯培恩等.面向并行设计的特征识别与模型重构方法[J].*计算机辅助设计与图形学学报*, 2003, 15(8): 984-991.
- [16]Coma O, Mascle C, Ve' ron P. Geometric and formfeature recognition tools applied to a design for assembly methodology [ J].*Computer Aided Design*, 2003, 35(13): 1193-1210.
- [17]韦俊民, 金隼, 林忠钦等.产品族设计中的零件相似性评价方法[J].*上海交通大学学报*, 2007, 7 (41): 1218~1222
- [18]唐耀红.面向大规模定制的计算机辅助夹具设计系统的研究[D].天津大学硕士学位论文, 2004
- [19]许斌. 建立 R 和 XR 型缸体共用柔性加工线的工艺方案[工程硕士学位论文]. 四川大学, 2005.

- [20] Ian Watson, Srinath P. Case-based Design:a review and analysis of building design application[J].AIEDAM.1997(11):59~87.
- [21] 孙晓斌, 杨海成. 基于实例的设计方法研究[J]. 机械设计与制造, 2000 (1): 49~51.
- [22] 张跃华. 零件分类成组的相似程度比较分析[J]. 成都大学学报, 2003.6(22): 44~46
- [23] 刘金山, 廖文和等. 基于特征相似性的夹具变型设计方法研究[J]. 中国机械工程, 2008.2 (4): 379~384
- [24] 童时中. 模块化原理设计方法及应用[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [25] 侯亮. 机械产品模块化开发原理、方法及其应用实践[博士后学位论文]. 浙江大学, 2003.
- [26] Hsuan Juliana. Impacts of supplier—buyer relationships on modularization in new product development. European Journal of Purchasing & Supply Management, 1999(5):197—209
- [27] 李宏亮, 王英杰等. 模块化集成夹具在机械加工机床上的应用[J]. 一重技术, 2004, 4: 37-38.
- [28] 刘长安, 杨志宏, 郜勇等. 基于功能特征结构映射的夹具设计模型与方法[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(8): 1192-1197.
- [29] 刘璇, 周细文, 沈晓红. 夹具概念设计中的工件方位分析[J]. 机械设计与研究, 2001, 6 (2): 64-67
- [30] Yon-Chun Chou, R.A.Srinivas and Sujit Saraf. Automatic Design of Machining Fixtures: Conceptual Design[J]. Int J. Adv. Manuf Technol, 1994, (9): 3-12.
- [31] 喻湘存, 熊曙初. 系统工程教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [32] 刘达斌. 支持大规模客户化定制的产品设计关键支持技术的研究[博士论文]. 重庆大学, 2002.4
- [33] Pahl G, Beitz W. Engineering design : a systematic approach. London, The Design Council, 1984, Springer-Verlag, 1996.
- [34] 徐雷, 殷国富等. 面向敏捷制造的数字化零件库建模方法[J]. 计算机工程, 2004.7, 13 (30): 148~150
- [35] 卢继平, 郑力, 徐家球等. 虚拟机床建模与仿真, 1999.7: 21~24
- [36] 杨国哲, 葛研军等. 虚拟机床的建模研究[J]. 机械设计与制造, 2002.6: 53~54
- [37] 吴陈燕, 黄振沛. 基于 VERICUT 的虚拟机床建模技术研究[J]. 98~100
- [38] 王丽亚, 严隽琪等. 面向对象的制造环境建模研究[J]. 上海交通大学学报, 1996, 30(2): 110-116.
- [39] 高常青. 机械产品快速创新设计及其关键技术的研究[博士学位论文]. 山东大学, 2006.4
- [40] 徐雷, 殷国富, 胡晓兵, 宁芊. 机床夹具设计资源库构建方法研究[J]. 现代制造工程, 2005.5: 8~11

- [41]刘雯林,熊蔡华等. 夹具的定位误差模型[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(7): 72-74.
- [42]许朝山 夹具定位误差的分析计算[J].机械工程师, 1998, (4):40-41.
- [43]康秀梅,朱耀祥. 夹具三维定位误差的计算机辅助分析[J]. 制造技术与机床, 2003, (11):59-64.
- [44]王岩,张士杰. CAPP 中产生式规则的检查方法[J].计算机工程, 2005.8, 15 (31): 62~64
- [45]徐雷,殷国富,宁芊,李双跃.基于功能实例推理的敏捷夹具设计[J].计算机集成制造系统, 2005.4, 4 (11): 458~466
- [46]王三武,余竟成,吴宏观,等.敏捷夹具句型设计系统的体系结构、知识表达与推理策略[J].机械与电子, 2002, (4):15-18
- [47]史琦,敬石开,李原,杨海成. 基于实例推理的夹具设计知识表示方法研究 机械设计, 2001.11 (1): 1~3
- [48]Rissland.E.L,Skalak.D.B.CABARET:rule integration in a hybrid architecture[J].International Journal of Man-Machine studies.1991(34):839~887
- [49]方明.精益生产新模式[J].现代物流, 2005.2: 30~32
- [50]石毅鹏,陆佑德,杨家新.拉式流生产管理方式及其应用[J].武汉理工大学学报, 2004.6 (3): 127~130
- [51]潘尔顺.生产计划与控制[M].上海:上海交通大学出版社 2003
- [52]贾广飞,杨铁男,高雪强. CIMS 环境下的车间生产管理系统研究[J].制造业自动化, 2002.12, 12 (24): 12~14

## 致 谢

在硕士毕业论文完成之际，我谨向所有指导、帮助和关心过我的老师、家人和同学们表示最诚挚的感谢！

在这三年的研究生学习期间，导师蔡善乐副教授严谨的治学态度、渊博的学术知识、敏锐的科研眼光和高瞻远瞩的学术思想与一丝不苟的工作态度给我留下深刻的印象，使我受益终生。无论在学习、生活中，蔡老师都给予我无微不至的关怀、指导和支持，逐步培养了我独立处理问题和进行科学研究的能力。在此，对蔡老师致以最崇高的敬意和深深的感谢。

在这里，还要感谢秦磊、王嵘等同学在课题研究和论文写作过程中给予我的大力支持，他们的指导和帮助使我在今后的工作中受益匪浅。

还要真诚地感谢我的家人和朋友对我的支持与理解，是他们给予了我不断进取和学习的动力，感谢所有支持和帮助过我的人。

最后，感谢参加我论文评审和答辩的各位专家、学者。

## 附录 A 攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 蔡善乐, 曹金涛, 李怀印. 基于组合机床生产线夹具柔性化研究. 新技术新工艺, 2010, 1: 40-42