

分 类 号_____

学号641510200671144

学校代码 10487

華中科技大學

硕士学位论文

动平衡热压专机精度控制研究

学位申请人：钱学森

学 科 专 业：工程力学

指 导 教 师：曹继光 副教授

答 辩 日 期：2008 年 6 月 1 日

**A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering**

**Development and Accuracy Control of Dynamic
Balancing Hot-press Machine**

Candidate : Qian Xuesen

Major : Engineering Mechanics

Supervisor : Associate Prof. Cao Jiguang

Huazhong University of Science and Technology

Wuhan, Hubei 430074, P. R. China

June , 2008

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到，本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文授权使用授权书

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。本人授权华中科技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。

本论文属于 ☐ 保密，在_____年解密后适用本授权书。
☐ 不保密。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

指导教师签名：

日期： 年 月 日

摘要

专用机床多用于特定零件和特定工序的加工，其具有自动化程度高、精度高和效率高等特点。依据产品检测结果是否满足公差来评定专用机床对于追求高质量的产品有许多不足之处。随着现代制造业的发展，工序能力指数作为一种更加合理的评定标准已经被众多企业所采纳。本课题围绕动平衡热压专机验收标准来对机床工序质量、精度设计和误差补偿进行研究，确保产品质量满足要求。

本文以加工产品工序能力指数要求为出发点，论述工序能力在产品生产过程中的重要性，分析影响工序质量稳定性因素。运用假设判断判定产品工序质量的稳定性，通过对工序能力指数影响因素分析，得出提高工序能力的途径。文中还分析了满足相同公差但工序能力不同的轴和齿轮对成品工序能力的影响。

误差防止和误差补偿是提高机床加工精度的两大手段。在机床设计过程中引入尺寸链原理对机床进行公差优化设计，通过对多种公差分析和公差分配方法进行实例对比，从而提出既满足精度要求又符合经济性的设计方案。在机床固有精度的情况下，分析机床的误差源，采用常规检测手段对机床误差源进行在线检测，依据检测结果对产生误差部件进行建模、计算，然后对机床进行软件补偿，从而保证机床工序能力指数要求。

关键词：工序质量；工序能力指数；尺寸链；公差优化设计；在线检测

Abstract

Special machine tools are most designed for special parts and special procedures of processing, which have high degree of automation, high precision and high efficiency characteristics. Based on whether the product test result meet tolerance to evaluate machine tools has many deficiencies for the pursuit of high-quality products. With the development of modern manufacturing, process capability index as a more reasonable assessment standards have been adopted by many enterprises. This thesis discussed Dynamic Balancing Hot-Press Machine acceptance criteria related process quality, precision design and error compensation, to ensure that products meet quality requirements.

This thesis takes products process capability index requirements as the starting point, detailed the importance of process capability in the production process, analysis of factors affecting stability of the quality processes. Using assumptions judge determine the stability of product quality processes, through the process capability index of factors, processes that enhance the ability of the way. The thesis also takes shaft and gear as an example, comparative analysis the same tolerance but the different materials process capability on the impact of the finished work.

Error avoidance and error compensation are two major means for the improvement of machine tool accuracy. In the process of designing the machine, dimensional chain are used in the tolerance optimization design, through a variety of tolerance examples contrast on analysis methods and tolerance allocation method to obtain a design which meet the Accuracy and economic requirements. In the circumstances of machine tools inherent precision, analysis machine error sources, using conventional means to the source of machine on-line error detection, parts modeling and calculate error on the basis of test results, and then compensation by software, so as to ensure the machine meet the needs of process capability index.

Keywords: Process quality; Process capability index; Dimensional chain;

Tolerance optimization design; On-line inspection

目 录

摘 要

Abstract

1 绪论

1.1 课题的背景和意义(1)

1.2 相关背景资料介绍(2)

2 动平衡热压专机总体分析

2.1 专机结构及功能概述(7)

2.2 专机精度和可靠性介绍(9)

3 工序能力与质量控制

3.1 工序质量分析.....(10)

3.2 工序能力与工序能力指数(13)

3.3 专机工序能力研究(17)

3.4 专机工序能力指数分析(20)

3.5 本章小结.....(27)

4 公差优化精度设计

4.1 公差分析.....(28)

4.2 公差分配.....(31)

4.3 公差优化设计应用实例(33)

4.4 本章小结.....(37)

5 机床在线误差检测及补偿

5.1 误差源分析.....	(38)
5.2 误差检测和误差补偿方法	(40)
5.3 齿轮定位销位置计算	(42)
5.4 本章小结.....	(46)

6 总结与展望

6.1 总结.....	(47)
6.2 展望.....	(48)

致谢.....	(49)
---------	------

参考文献.....	(50)
-----------	------

1 绪论

1.1 课题的背景和意义

本课题来源于神龙汽车有限公司襄樊工厂委托湖北大为电子有限公司设计生产的XF1495 动平衡热压专机。该机床的作用是将平衡轴与斜齿轮进行热压装配，保证平衡轴的最大不平衡量相位与斜齿轮端面某齿槽中线成一定角度。

汽车发动机工作原理是用曲柄连杆机构将活塞的往复运动转变为曲轴的旋转运动，在运动过程中产生往复惯性力，这些力直接通过支撑传到发动机配套工作机械，必然引起较大的振动及噪声，造成很大危害^[1]。国内外最常用的一种方法是采用两根带平衡重块的齿轮轴来抵消这些力，从而达到消除或减小发动机的振动和噪声。

随着人们对汽车的舒适性要求越来越高，必须采取措施来消除或减小发动机的振动和噪声。采用加平衡轴的方法可以显著提高发动机的性能，例如，车内噪声可以降低 $5\text{dB(A)}\sim 10\text{dB(A)}$ ^[2,3]，振动也得到显著下降。面对快速增长的市场需求，实现平衡装置生产国有化是非常必要的。如今四缸发动机最常用的方法是采用两根带平衡重块的平衡齿轮轴来抵消这些力，如PSA、丰田、三菱、别克、克莱斯勒等公司的汽车上都采用这种方法，其工作原理：两平衡轴以相反的方向旋转，其转速为曲轴转速的 2 倍，带平衡重块的平衡轴提供与发动机垂直方向大小相等、方向相反的力，使得活塞向上的力被平衡重块产生的向下的力所抵消^[4]。如图 1-1 为本田雅阁车系平衡轴的布置图，它采用两根带平衡重块的平衡齿轮轴来抵消这些力^[5]。

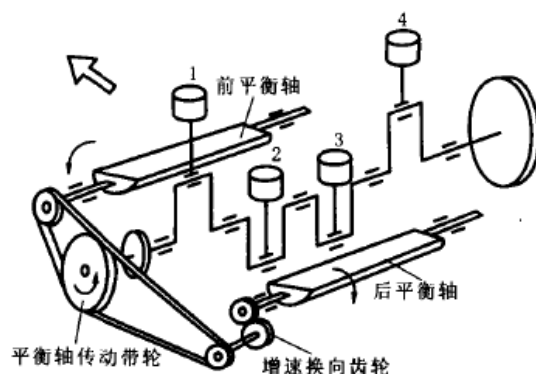


图 1-1 本田雅阁车系平衡轴的布置和传动方式

如何生产合格的平衡齿轮轴是减少振动和噪声的关键环节之一。平衡轴与齿轮的连接采用热压装配，平衡轴与齿轮的配合位置的精度直接影响去除噪声和振动的能力。设计出自动化程度高、精度好的机床，对于提高国产设备的制造水平，加大发动机国产化具有重要现实意义。

本文课题旨在通过对热压装配专机验收参数 C_{PK} 进行分析，掌握工序能力在生产过程中的重要性，分析 C_{PK} 与机床精度关联性；运用均值和方差的区间估计分析专机工序质量的状况，并阐述提高工序质量的途径；引入尺寸链设计，通过合理分配公差设计机床；查找影响工序能力指数的具体原因及对误差进行软件补偿，保证热压装配后的产品满足精度要求。

1.2 相关背景资料介绍

1.2.1 工序质量发展状况

当今世界，质量管理水平已成为衡量一个国家、一个企业经济竞争力的核心因素。质量管理从质量检验阶段发展为统计质量直到今日的全面质量管理，制造过程的质量控制始终是质量管理工作的重中之重，而工序能力是评价制造过程的重要指标。在工序控制中，研究工序能力是为了分析工序质量。但仅有定量化的工序能力不足以判断工序质量状态是否满足要求以及满足的程度，因此，为了达到判定工序质量状态的目的，需要引入工序能力指数的概念。

为了使产品取得更好的市场竞争优势，工序质量控制越来越受到企业界的重视。20 世纪初，美国工程师泰勒（F W Taylor）提出了一套工业管理的理论，主张将产品的检验从制造中分离出来，成为一个独立的工序。1924 年，美国贝尔实验室工程师休哈特（W A Shewhart）提出基于控制图的统计过程控制(Statistical Process Control)理论^[6]，其主要特点是从单纯质量检验事后把关，发展到工序控制，突出了质量的预防性控制与事后检验相结合的管理方式。1950 年日本质量管理学家戴明（W Edwards Deming）博士将SPC的概念引入日本，后邀美国著名管理专家朱兰（J M Juran）到日本讲学，统计方法在日本的企业中开始受到重视并得到广泛应用，而且取得良好的

效果,提高了日本生产产品的质量,增强了其产品的国际竞争力。随着质量管理中统计理论应用的发展,1974年,朱兰博士在《质量控制手册》第三版中论述了工序能力与产品公差的关系及工序能力指数的概念,并且定义工序能力指数为公差范围与工序能力的比值。工序能力指数在日本和美国的企业当中先后逐步加以应用以进行工序能力分析,在拟订制造计划期间用以预测现有工序是否符合设计公差的要求。1985年,日本质量专家田口玄一(Genichi Taguchi)在美国国家标准学会的年会上介绍了工序质量损失函数和基于质量损失的能力指数。1986年,福特汽车公司的质量经理V E Kane在公开发表的文献中系统的介绍了工序能力指数: C_p , C_{PK} , C_{PU} , C_{PL} ; 并且指出指数 C_p 是一个无单位量纲的量,能够很好的评价工序能力的潜力,但是该指数不能很好的解决质量特性值的均值与所期望的目标值之间的不一致问题,因而不能很有效的进行工序能力分析,而指数 C_{PK} 的定义充分考虑了质量特性值的均值与所期望的目标值之间的不一致的问题,因此在工序质量控制的实践中更多的采用此指数进行工序能力分析^[7]。

我国上世纪 50 年代主要以检验为主的质量控制体系,直到 70 年代末才陆续从西方工业国家引进全面质量管理的理论和方法,1980 年,国家经委正式颁布了“工业企业全面质量管理暂行办法”,在广大企业中及时贯彻执行,大大加快了推行全面质量管理的步伐,并取得了明显的经济效益^[8]。20 多年以来,虽然在理论和实践方面取得了很大成就,但在工序质量分析及控制等方面还远远落后于欧美发达国家,很多企业还没有意识到工序能力在生产产品中的重要性,随着市场经济体制的逐步建立和改革开放的进一步深入,要使产品在激烈的市场竞争中取得优良的成绩,树立良好的质量意识,加强工序质量控制,提高产品质量水平,已成为我国经济发展的战略问题。

1.2.2 机床精度概述

机床作为工作母机,其精度决定了产品的加工精度。如何保证机床的加工精度是十分必要的,在机床误差中,几何精度在机床自身误差中占有较大的比重,因此

减少机床的几何精度误差是提高机床精度的方法之一，减少几何精度误差有两种基本方法：误差预防法和误差补偿法^[9]。

误差预防法（error avoidance），即通过提高零件设计制造和装配的水平来消除可能的误差源。该方法从机床设计制造各阶段开始，采取精化措施，提高设计精度，优化机床系统的配置结构，减少机床自身的各种误差和表现误差。公差优化设计是误差预防的重要方法。在机床设计过程中，除了要进行运动、强度、刚度等计算外，还要进行几何精度的设计计算，以确定零件的尺寸公差、形状和位置公差，其目的是保证机器零件能正确地进行装配，并保证在工作时能满足预定的功能要求。在机械装配过程中，为保证各组成零件具有恰当的功能，对各组成零件所定义允许的几何和位置上的误差叫公差。从保证零件的功能和互换性要求来看，必须把加工误差限制在一定范围之内，即要确定零件的公差。产品的公差分配是否合理，直接关系到产品的功能和质量是否合理，直接关系到产品的功能和质量是否能够满足要求，并且还直接决定着产品的制造成本。从产品的功能质量来看，功能质量要求越高，对零件公差要求就越高，而更高的功能公差要求则必然导致制造成本的急剧上升。因此，公差设计的目的是在保证产品质量的前提下尽量降低制造成本，即寻求质量和制造成本之间的平衡。

公差设计（Tolerance Design），即根据已知尺寸链封闭环的上下偏差求解各组成环尺寸的上下偏差，以及根据各组成环尺寸的上下偏差求解封闭环的上下偏差。公差设计是建立在公差设计函数的基础上的，所谓公差设计函数（Tolerance Design Function）就是指装配技术要求，产品的功能要求等与有关尺寸之间的函数关系，如孔轴配合件的配合间隙等数学表示^[10]。公差设计包括公差分析和分配。公差分析是指已知尺寸链中各组成环公差，分析封闭环公差是否满足预定的精度要求。按照计算累积公差所使用的方法，公差分析方法主要有两种：极值法和概率统计法。公差分配（Tolerance Distribution）是指已知封闭环公差，按照一定的方法和约束条件，优化分配各组成环公差。在传统的公差综合过程中，存在着两种不同方法：第一种方法是极值法，它认为封闭环的公差是组成环公差的绝对值相加而得到的，即各组成环的公差之和。在这个思想引导下，在已知封闭环公差的情况下求组成环的公差时，

必然导致了各组成环的公差相对过紧的情况，造成成本不必要的偏高；另一种方法是从统计学的观点出发，根据加工尺寸的分布规律，利用概率统计法求解待确定的公差。Parkson^[11-13]从统计公差的角度出发，提出了统计公差分配的观点。他认为尺寸的分布是可以从加工过程产生的样品数据中得到的，以成本为目标函数，提出了一套程序化的计算公式。WJ.Lee和T.cwoo^[14-15]认为公差是满足一定分布规律的随机变量，并且将以加工成本为优化目标函数、装配和设计要求为约束的公差分配问题转化为一个带有限制条件的多元约束优化问题，并引入了基于二阶矩的可靠性指标。杨将新^[16]在此基础上作了进一步的研究，并提出了基于四阶矩的可靠性指标的公差设计方法。近几年来，公差设计的研究取得了较大的发展，出现了不少新的公差设计理论，如“矢量公差设计”、“并行公差设计”、“分形公差设计”、“稳健公差设计”、“动态公差控制”和一些关于形位公差设计以及计算机辅助工艺规程设计（Computer Aided Process Planning）中公差分析等方面的新理论。综合来讲，在公差设计方面有两大趋势，一是将田口的质量损失模型和稳健设计思想应用到公差设计中来，开展了公差的稳健设计研究；二是面向制造的公差设计方面的研究。

误差补偿法（error compensation），即通过分析测量现有误差，建立误差补偿的数学模型，通过一个附加的误差补偿系统，人为地在原有系统上引入一个附加误差源，使之与现有误差表现相抵消，以减少误差。机床误差补偿的基本思想就是人为地造出一种新的误差去抵消或大大减少当前成为问题的原始误差，通过测量、分析、统计及归纳等措施掌握原始误差的特点和规律，建立误差数学模型以及误差补偿模型，从而减少因机床误差而产生的加工误差，提高零件的加工精度。这种方法在满足一定的精度要求前提下，则可大大降低设备制造的成本，具有非常显著的经济效益。通过误差补偿不仅可以提高制造数控机床的精度等级，同时也可以对现有机床的精度进行升级^[17]。研究表明，几何误差和由温度引起的误差约占机床总体误差的70%，在温度变化影响很小时，几何误差就占误差的主要部分。几何误差相对稳定，易于进行误差补偿^[18,19]。

1.3 本文的主要工作

本文从动平衡热压专机生产产品的尺寸误差范围和工序能力指数展开研究，分析工序质量的稳定性与工序能力指数的关联性，为了提高专机的加工精度，文中采用尺寸链公差设计和误差补偿两种方法来提高专机的加工精度。本论文的主要工作包括：

1、阐述设计动平衡热压专机的现实意义，论述工序质量、公差设计、误差补偿技术在机床加工精度中的作用。

2、叙述专机的工作原理，介绍专机各加工工位的作用及工作流程，阐述专机设计过程中为提高加工精度所采取的设计。

3、运用均值和方差的区间估计对加工产品工序质量稳定性进行分析；计算产品的 C_{PK} 值，对于能力不足的情况下，分析影响工序质量的因素，寻找提高工序能力的途径；分析在产品质量均匀分布情况下如何缩小产品的公差以及如何通过 C_{PK} 值来确定机床的设计精度；以轴和齿轮为例说明运用 C_{PK} 检测产品质量的现实意义。

4、介绍尺寸链的相关知识，提出尺寸数学模型，对比极值法和概率分布法两种常用公差设计方法的优劣，并提出基于零件公差与制造成本模型。以轴检测台为例对比分析各种公差设计的优劣和成本，论述即符合精度要求又符合经济性的设计手段。

5、运用杠杆千分尺对机床误差源进行在线检测，根据检测结果进行计算、建模分析，然后采用软件的方法对误差进行补偿，从而进一步保证机床的加工精度。

2 动平衡热压专机总体分析

2.1 专机结构及功能概述

动平衡热压专机的任务是对汽车 AEB 平衡轴进行动平衡测量，在最大不平衡量相位处钻标记孔，然后将轴顶入齿轮内圈中进行热套配合，保证热套后齿轮的某齿端面凹槽中线与轴的最大不平衡量相位成一定的夹角（如图 5-7 所示）。由于要在同一机床上对两种不同类型的平衡轴和齿轮加工，所以在机床的设计过程中必须充分考虑通用性原则，根据其工作任务该机床分为四工位：检测工位、上下料工位、动平衡钻孔工位和热压工位。专机平面布局图如图 2-1 所示：

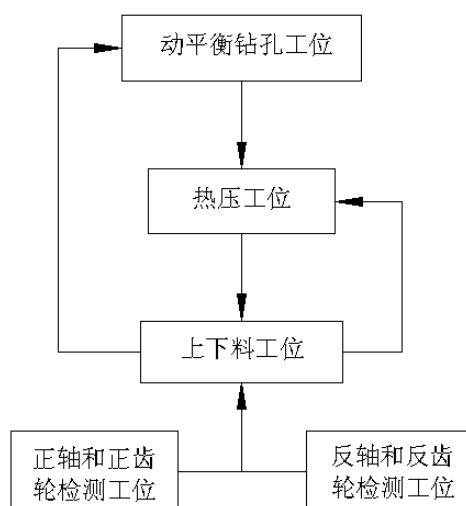


图 2-1 专机工位布局图

1、检测工位 由于热套配合的齿轮和轴存在较大的误差，这些误差对最终产品精度影响很大，为了降低其影响，设计过程中采用检测台对齿轮和轴进行检测，然后对误差进行补偿，其原理：对齿轮和轴的长度进行检测，将检测数据传送到 PC 机上，通过解算得出动平衡过程中的补偿角度，根据补偿角度对轴进行旋转补偿，从而降低由于齿轮和轴的误差对最终产品精度的影响。由于轴和齿轮的误差为 $\pm 0.1\text{ mm}$ ，而检测台的精度为 $\pm 0.01\text{ mm}$ ，所以通过检测补偿可以大大降低齿轮和轴的误差影响。

2、上下料工位 上下料工位的作用：定位轴和齿轮的轴向位置；定位齿轮沿轴旋转位置；运用气缸的合理运动分配上下料位置与机械手夹持位置，方便操作人员

操作。

3、动平衡钻孔工位 机械手夹取上下料工位的轴放入动平衡机中，通过对轴进行动平衡测量找出平衡轴的最大不平衡量相位，启动钻削电机对最大不平衡量相位处进行钻孔标识，再次启动平衡机对检测台测得的误差角度进行补偿。

4、热压工位 机械手夹持齿轮运送至加热工位，运用中频感应加热装置对齿轮内圈进行加热。用机械手将动平衡钻孔工位的轴运送至热压工位，运用气缸将轴推入已经加热后的齿轮内圈中，完成热压装。

动平衡、热压专机工作流程如下所示：

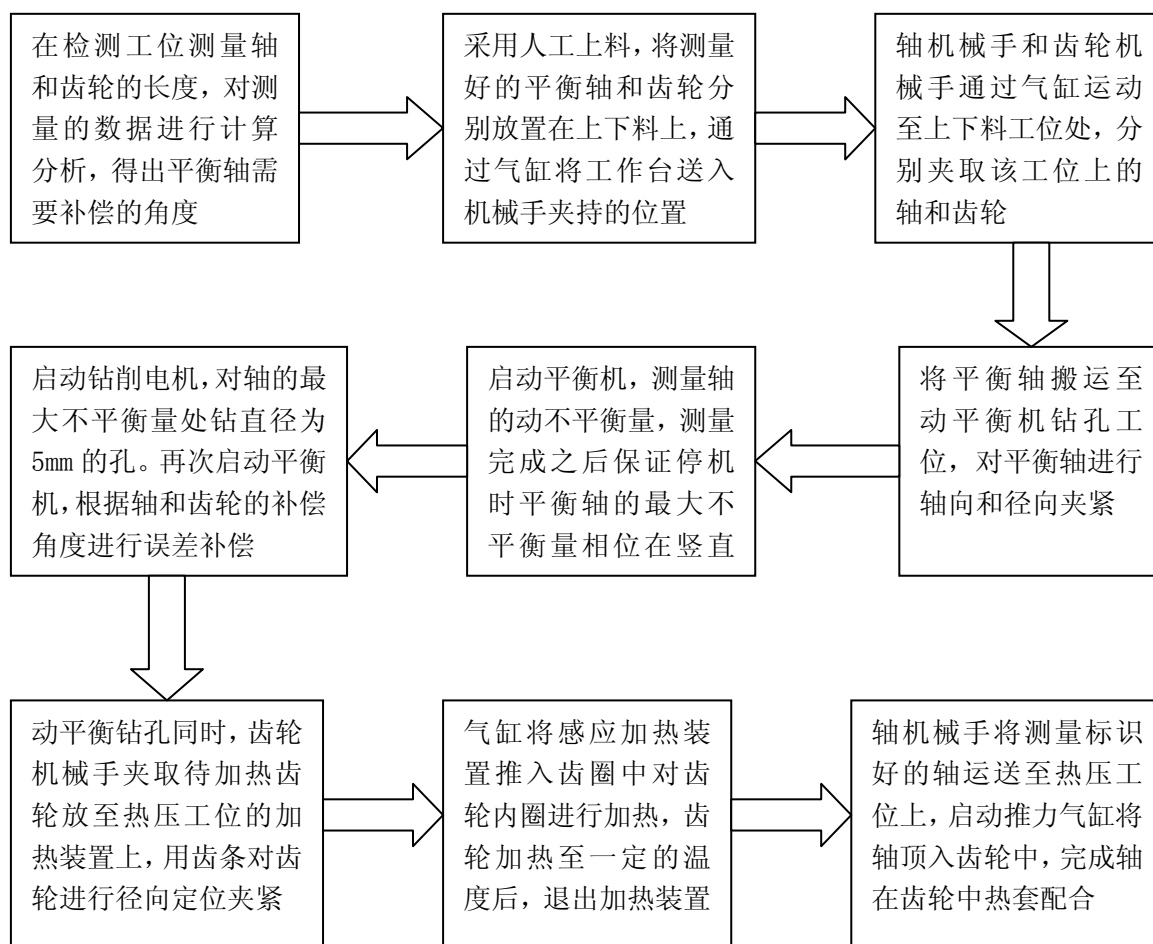


图 2-2 专机工作流程图

2.2 专机精度和可靠性介绍

为了保证专机的性能，在方案和结构设计过程中充分考虑精度稳定性和可靠性原理，以下介绍在设计过程中采用的精度设计方法：

1、在精度要求严格的位置采用定位销 定位销能够很好的保证机床运动的稳定性，同时以定位销为基准定位其他加工尺寸，可以有效保证零件的加工精度和部件之间的位置精度。

2、限位块与气缸组合的运用 气缸以其经济性和运行快速性被广泛采用，运用限位块可以对气缸的进行精确定位，气缸中的气压可以持续保证定位时精度，增强机床的稳定性。

3、兼顾经济性要求合理选用标准件 标准件是专业厂家生产，其经济性和精度要求可以得到充分保障，专机中的运动导轨采用 THK 产品，其精度非常高，在使用过程中无须润滑，在安装导轨过程中运用压块压紧导轨底座，防止导轨安装槽间隙导引起部件在运动过程中的横向摆动。

4、运用信誉度高的厂家产品 由于专机工作要求精度高，对于工作部件应该选用精度高、品牌可靠的产品。专机的气动元件采用 Festo 产品；标记孔钻削电机采用日本 TAC 技研主轴电机，其回转精度可达 2 μm 。

5、运用导杆和加强筋的设计理念 为了保证机床在加工过程中结构的可靠性和运动的平稳性，在热压工位的立板处运用加强筋对结构进行加固，在机械手上下运动过程中采用导杆保证气缸运行精度和平稳性等。

3 工序能力与质量控制

3.1 工序质量分析

3.1.1 工序质量的波动性

产品的质量是由企业各项工作质量和生产过程的工序质量来决定的。构成生产过程的基本环节是工序。虽然现代工业产品是多种多样的，生产过程也互不相同，但他们都有一个共同的特点，即都是由每道工序加工生产出来的，每一道工序的质量好坏，最终都直接或间接的影响产品的质量，所以工序质量是形成产品质量最基本的环节。如果生产过程中每一道工序的质量都能得到保证，那么产品质量也就会得到保证，也就是产品质量的好坏取决于工序质量的好坏。在实际生产过程中，生产出来的产品是不完全相同的，在质量控制中，这种现象被称为质量波动。根据波动表现的性质和形式，工序质量的波动可以分为正常波动和异常波动^[8]。

1、正常波动 正常波动又称为随机波动，他是由于一些偶然原因所引起的。如原材料性质的微小差异，机床的微小振动，刀具的正常磨损，夹具的微小松动，工人操作上的微小变化等等。正常波动对产品质量波动影响较小，而且不容易识别，试图消除这些波动技术难度大。所以由随机波动引起的工序质量波动，是难以避免的，只能承认其存在的相对合理性。因此，一般认为这是正常的波动。

2、异常波动 异常波动又称系统波动，指由于系统误差而造成的波动。例如，原材料中夹进了不同规格材的材料，机床振动过大，刀具的过度磨损，夹具的严重松动，机床刀具安装和调整的不准确等等。异常波动对产品质量波动影响较大，而且容易识别，必须予以消除。

影响产品质量波动的因素有很多，影响较大的因素主要包括操作人员（Man）、机器（Machine）、材料（Material）、工艺方法（Method）、测试手段（Measure）和环境条件（Environment）（简称为 5M1E）。只有“5M1E”全部保持正常稳定，才能保证工序状态正常（如图 3-1 所示）。知道影响产品质量波动的因素，目的是为了在实际应用中对这些众多的影响因素进行分类归纳和统计分析，一方面分析因素影响工

序质量的相对程度，另一方面要分析这些因素之间的相互关联，以确定可控因素和不可控因素，从而提出相应的技术措施，为进行工序质量控制提供科学依据。

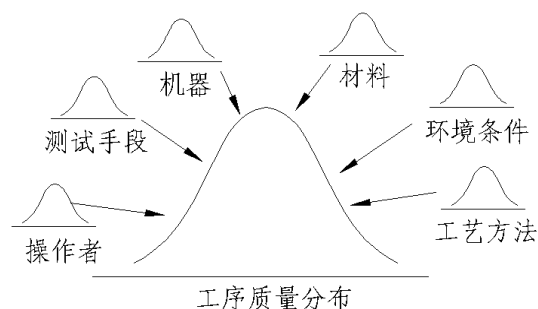


图 3-1 工序质量影响因素

3.1.2 工序质量分析

工序质量波动值是随机变量，通过其产品质量波动表现出来。依据大数定律，大量产品的质量波动必然呈现出一定的规律性，遵循一定的概率分布。依据中心极限定律（ n 个独立同分布的随即变量之和趋于正态分布），可以得到一群相互独立的具有同分布的连续型质量特性值的综合，当他们的波动属于正常波动时，其分布一般服从正态分布或渐进正态分布，其分布函数表达式为：

$$P(a < x < b) = \int_a^b \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (3-1)$$

式中 μ —— 分布均值； σ —— 分布标准差。

工序能力是指工序稳定状态下的正常波动幅度，本文所研究的专机需要计算 C_{PK} 值，那么一定要保证工序是正常波动的，所以在专机投入生产前一定要消除异常波动，保证工序质量的稳定性，即产品质量符合正态分布。如果不能确定该分布是否属于正态分布，则需要做质量特性值分布的正态检验。专机在计算工序能力指数 C_{PK} 值前如果不进行工序质量判断，加工产品的质量很可能达不到验收 C_{PK} 值，从而浪费大量原材料。如果对小样本进行工序能力进行粗略判断，对于判断不合格的情况找出原因，然后采取措施进行改进；对于合格的情况则继续加工，将大大增强产品验收合格的概率。本文根据实际情况采用参数 μ 和 σ 的估计值来对工序稳定性进行预

测，其方法如下：

参数 μ 和 σ 的估计值所表征的工序总体质量满足要求，则工序必处于控制状态或稳定状态。在生产过程中按一定规则抽取样本，判断 μ 和 σ 的波动幅度是否处于允许范围。如果判定 μ 和 σ 允许范围，便认为工序处于控制状态；否则，便可以认为工序处于不稳定状态^[20]。判断工序状态是否处于控制状态的思路表述为在生产的产品中，随机抽取一个样本，计算出均值 \bar{x} 与标准差 $\sigma_{\bar{x}}$ ，此 \bar{x} 和 $\sigma_{\bar{x}}$ 就反映取样时刻的工序均值 μ_1 和标准差 σ_1 的大小，故应根据 \bar{x} 和 $\sigma_{\bar{x}}$ 值来估计判断 μ_1 与 σ_1 是否等于工序总体参数 μ_0 与 σ_0 。在此采用工序稳定假设方法，假设 $H_0: \mu_1 = \mu_0, \sigma_1 = \sigma_0$ 。在分析过程中判断 $|\bar{x} - \mu_0|$ 或 $|\sigma_{\bar{x}} - \sigma_0|$ 的数值，当他们的值小于某一数值时，判定假设 H_0 成立，我们认为工序未发生异常波动。工序状态的判断程序表述如下：

1、工序均值 μ 稳定性判断：

(1) 首先假设 $H_0: \mu_1 = \mu_0$ ，确定判断结论的置信度，一般用 $1 - \alpha$ 表示，其中 α 是确定判断发生错误的最大可能性（如图 3-2 所示）。

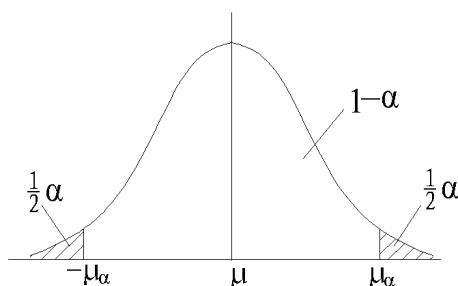


图 3-2 置信度正态分布图

(2) 采样分析数据，根据数据计算统计量。统计量计算公式为：

$$\mu = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\sigma / \sqrt{n}} \qquad \bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \qquad (3-2)$$

(3) 通过查正态分布双侧分位数表判断临界值 μ_{α} ，然后判断工序均值 μ 的稳定性。当 $|\mu| \geq \mu_{\alpha}$ ，舍弃假设 H_0 ，即判断工序均值 μ 发生了异常波动而处于不稳定状态。

当 $|\mu| \leq \mu_\alpha$ ，接受假设 H_0 ，即判断工序均值 μ 处于稳定状态。

(4) 制订对策。通过统计推断，可以识别工序的正常波动与异常波动，对于异常波动采取对策，使工序处于稳定状态。

2、工序标准差 σ 稳定性判断：

(1) 首先假设 $H_0: \sigma^2 = \sigma_0^2$ ，确定判断结论的置信度，一般用 $1-\alpha$ 表示，其中 α 是确定判断发生错误的最大可能性（如图 3-2 所示）。

(2) 采样分析数据，根据数据计算统计量。统计量计算公式为：

$$S = \sum (x_i - \bar{x})^2 \quad \bar{x} = \sum x_i / n \quad \chi^2 = S / \sigma^2 \quad (3-3)$$

(3) 通过查 χ^2 分布分位数表，求 $\chi^2_{(n-1, \frac{\alpha}{2})}$ 和 $\chi^2_{(n-1, 1-\frac{\alpha}{2})}$ ，然后判断工序标准差的稳定性。当 $\chi^2 \geq \chi^2_{(n-1, \frac{\alpha}{2})}$ 或 $\chi^2 \leq \chi^2_{(n-1, 1-\frac{\alpha}{2})}$ ，舍弃假设 H_0 ，即判断工序的标准差发生了异常波动而处于不稳定状态。当 $\chi^2_{(n-1, 1-\frac{\alpha}{2})} < \chi^2 < \chi^2_{(n-1, \frac{\alpha}{2})}$ ，接受假设 H_0 ，即判断工序的标准差处于稳定状态。

(4) 制订对策。通过统计推断，可以识别工序的正常波动与异常波动，对于异常波动采取对策，使工序处于稳定状态。

3.2 工序能力与工序能力指数

3.2.1 工序能力

工序能力是指工序在一定时间内，处于控制状态(稳定状态)下使生产的产品达到一定水平的能力^[21]。所谓稳定的生产状态，是指工序未受到不良因素影响，在一定持续期内，控制状态下，实现其运动结果均一性的正常波动。如果工序存在异常，则必须追查原因采取改进措施，使工序恢复稳定状态，然后才可计算工序能力。产品的制造质量主要取决于工序能力的高低。如果工序能力高，产品质量的波动就小，就愈容易满足质量要求。

工序能力可用工序质量特性值分布的分散性特征来度量，用符号 $B=6\sigma$ 表示， σ

为正态分布的标准偏差，它反映正态曲线的胖瘦程度，如果正态曲线胖，则说明大部分质量偏离均值 μ ，工序能力差。如果正态曲线瘦则说明大部分质量接近均值 μ ，工序能力好。不同标准差所反映的曲线如图 3-4 所示。之所以用 6σ 来描述工序能力，是因为当生产过程处于稳定的控制状态时，在 $\mu \pm 3\sigma$ 范围内的产品占了整个产品的 99.73%，即几乎包括了所有产品，因此用 6σ 来描述工序能力大小是比较全面的，当范围扩大一些，比如取 $\mu \pm 4\sigma$ ，在此范围里面可包括整个产品的 99.994%。这样会更加全面一些，但从 6σ 到 8σ ，波动范围增加了 2σ ，而包括的产品比例却增加不多，这从经济意义来看是不好的，因此，我们一般取 $B=6\sigma$ ，这是从兼顾全面性与经济性两方面来考虑的。公式中 $\sigma^2 = \sigma_r^2 + \sigma_j^2 + \sigma_c^2 + \sigma_f^2 + \sigma_{cl}^2 + \sigma_h^2$ ，由公式知，工序受控状态下加工质量的保证能力受“5M1E”因素的影响^[22,23]。

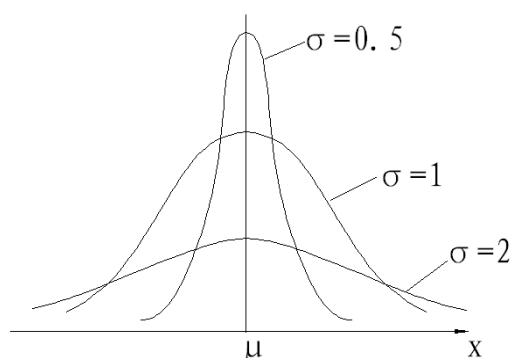


图 3-4 不同标准差正态分布曲线

工序能力指标大致有以下四个方面的用途：

- 1、生产实际中，用以选择经济合理的工序方案 即通过预测对质量标准的符合程度，确定工序工艺设备工艺方法和监测方法。实际应用中，工序能力的大小应和质量要求相适应，过小的 B 值可能在经济上造成不必要的浪费。
- 2、协调工序之间的相互关系 工序设计时，要规定各道工序的加工余量、定位基准等，了解每道工序的能力对工序设计是有益的。
- 3、验证工序质量保证能力 分析工序质量缺陷因素，估计工序不合格率，控制工序实际加工质量。

4、为市场分析开发设计提供数据信息 要了解和分析工序质量，必须调查工序能力，即对产品生产过程的工序采用一定的方法进行检测，并与标准对比，判定工序是否满足质量要求，是否处于稳定状态。

3.2.2 工序能力指数计算

产品的生产制造过程也是产品质量的形成过程，如何将产品质量控制在设计的范围内，是质量管理控制工作中的重点。研究工序能力是为了分析工序质量状态。但仅有定量化的工序能力不足以满足工序质量状态是否满足要求以及满足的程度，因此，为了反映和衡量工序能力满足技术要求的程度，引入工序能力指数的概念。

工序能力指数 (Process Capability Index)^[24,25]是指加工质量标准 (通常是公差) 与工序能力的比值，用符号 C_p 表示，如果质量标准公差用 T 表示，工序能力用 6σ 描述。之所以用 6σ 来描述，是因为当生产过程处于受控状态时， $P(\mu - 3\sigma < x < \mu + 3\sigma) = 99.73\%$ ，也就是说取工序能力为 6σ ，则有 99.73% 的产品为合格品 (如图 3-5)，则工序能力指数的一般表达式为：

$$C_p = \frac{T}{6\sigma} \approx \frac{T}{6S} \quad (3-4)$$

式中 S ——样本的标准偏差，其表达式为：

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3-5)$$

式中 x_i ——第 i 个测量值； \bar{x} ——样本平均值； n ——样本容量。

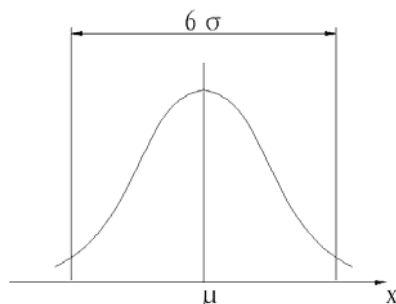


图 3-5 6σ 正态分布

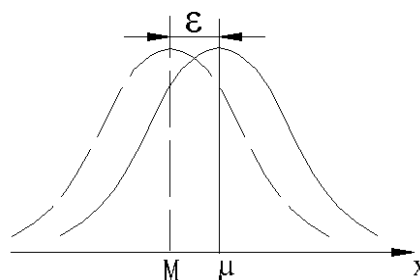


图 3-6 中心偏移量为 ε 正态分布

在生产实际中，质量特性的实际分布中心往往与质量标准的中心（公差带中心）不重合而产生一定的偏差，如图 3-6 所示在这种情况下，首先应将实际分布中心 μ 与质量标准中心相重合，然后再计算工序能力指数。这时的工序能力指数用 C_{PK} 表示。如果记质量特性值分布中心与质量标准中心的绝对偏移量 $|\mu - M|$ 为 ε ， k 为相对偏移量， $k = \frac{2\varepsilon}{T}$ ，则有：

$$C_{PK} = (1 - k)C_P = \frac{T - 2\varepsilon}{6\sigma} \approx \frac{T - 2\varepsilon}{6S} \quad (3-6)$$

3.2.3 工序能力评价

工序能力指数客观且定量的反映了工序能力满足质量标准的程度. 他与加工精度和成本有关. 因此要根据工序能力指数的大小对工序的加工能力进行分析和评价, 既要保证质量又要符合经济性的要求。工序能力标准如表 3-1 所示：

表 3-1 工序能力评定及处理

级别	C_{PK}	能力指数	处理措施
特级	$C_{PK} > 1.67$	能力过高	①放宽检查 ②降低设备精度，节约成本
一级	$1.67 \geq C_{PK} > 1.33$	能力充足	①对非关键工序放宽检查 ②简化质量检验
二级	$1.33 \geq C_{PK} > 1$	能力尚可	① 对工序进行严格控制和监督 ② $C_{PK} \rightarrow 1$ 时，应检查设备
三级	$1 \geq C_{PK} > 0.67$	能力不足	①分析能力不足原因，并采取改进措施 ②严格质量检查，加强不合格品管理
四级	$0.67 \geq C_{PK}$	能力严重不足	①采取紧急措施，提高工序能力 ②实行全数检验，剔除不合格品

3.3 专机工序能力研究

本文以神龙汽车有限公司“XF1495 动平衡热压专机”为案例，分析专机加工产品的工序能力，目的是使该机床生产出来的产品满足验收标准，计算产品的 C_{PK} 值并与验收标准进行对比，对于不足之处快速采取措施，使专机满足验收要求。本节以反旋转轴总成热压后公差 $5^{\circ}2' \pm 1^{\circ}$ ，工序能力指数 $C_{PK} \geq 1$ 分析专机的工序能力。

3.3.1 工序能力调查

工序能力是工序在稳定状态下能够生产出合格产品的能力，因此工序能力调查的目的首先是为了调查企业生产出合格品的能力，亦即工序保证产品质量能力的大小。它采用一定的方法，对选定的调查对象测量其质量特性，判断工序能力是否充足，并制定相应的改进措施的全部活动，它是发现问题解决问题的有效方法。图 3-7 为针对动平衡热压专机的工序能力调查方法。

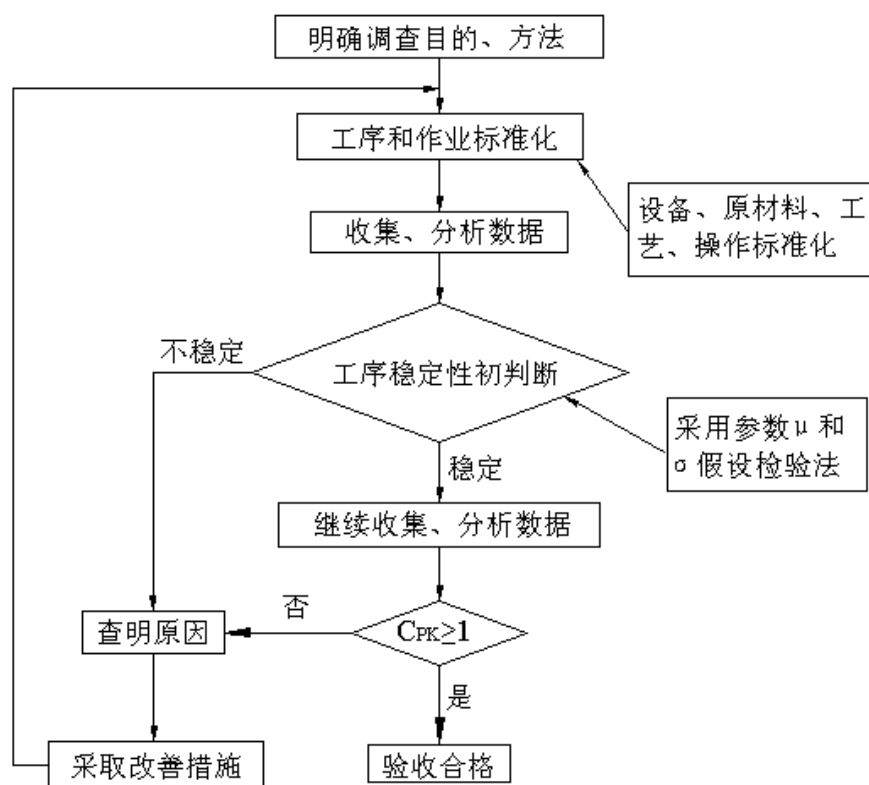


图 3-7 专机的工序能力调查流程图

3.3.2 专机工序能力分析

1、工序和作业的标准化

在加工零件之前对机床进行检查，克服粗大误差：检测钻孔用钻头中心线与动平衡机的中心线是否在同一个中垂面上；齿轮销的定位是否准确，在搬运和夹持过程中是否发生旋转；机床加工时稳定性如何，是否有大的振动。对操作人员进行培训，使其操作规范。

2、工序状态的稳定性判断

由公式(3-6) 和 $\varepsilon = |\mu - M|$ 可得 $C_{PK} = \frac{T - 2|\mu - M|}{6\sigma}$ ，由公式可知工序能力指数

与均值 μ 和标准差 σ 有关， μ 和 σ 稳定性判断对于查找影响 C_{PK} 值的因素具有重要作用。由于该判断需要产品数量少，计算方便，适合于机床工序质量的初判断。

初始加工 4 个产品，判定 μ 与 σ 是否处于允许范围，从而判断工序是否处于失控或稳定状态。已知工序均值 $\mu_0 = 5^\circ 2'$ ，标准差 $\sigma = 20'$ ，假设初始加工 4 个产品检测值为： $x_1 = 5^\circ 41'$ ， $x_2 = 4^\circ 48'$ ， $x_3 = 5^\circ 21'$ ， $x_4 = 4^\circ 41'$ ，以按 $\alpha = 0.01$ 的条件下，检定工序质量 μ 和 σ 的稳定性。

(1) 均值 μ 稳定性判断

由式 (3-2) 得

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \frac{(5^\circ 41' + 4^\circ 48' + 5^\circ 21' + 5^\circ 01')}{4} = 5^\circ 13' \\ \mu &= \frac{\sqrt{4}(5^\circ 13' - 5^\circ 2')}{20'} = 1.1\end{aligned}$$

查正态分布双侧分数表得：

$$\mu_\alpha = \mu_{0.01} = 2.57$$

因为 $\mu < \mu_{0.01}$ ，所以可以得出结论说，有 $1 - \alpha = 99\%$ 的把握确认工序均值 μ 是稳定的。

(2) 标准差 σ 稳定性判断

由式 (3-3) 得

$$\bar{x} = \frac{(5^\circ 41' + 4^\circ 48' + 5^\circ 21' + 5^\circ 01')}{4} = 5^\circ 13'$$

$$S = (5^\circ 41' - 5^\circ 13')^2 + (4^\circ 48' - 5^\circ 13')^2 + (5^\circ 21' - 5^\circ 13')^2 + (5^\circ 01' - 5^\circ 13')^2 = 1617$$

$$\chi^2 = \frac{S}{\sigma^2} = 1617 / 400 = 4.04$$

查 χ^2 分布位数表得:

$$\chi^2(3, 0.005) = 12.84$$

$$\chi^2(3, 0.995) = 0.07$$

因为 $\chi^2(3, 0.995) < \chi^2 < \chi^2(3, 0.005)$, 所以可以得出结论说, 有 $1-\alpha=99\%$ 的把握确认工序标准差 σ 是稳定的。

通过以上判断可以得出该机床工序质量稳定性的可能性为 99%, 对该机床加工的产品进行工序能力指数计算, 满足要求的可能性比较大。

3、工序能力指数计算

μ 和 σ 稳定性判断只能对工序质量有个大致判断, 工序稳定性判断并不能保证工序能力指数 $C_{PK} \geq 1$, 需要进一步加工产品来计算产品的工序能力指数是否满足验收要求。假设加工的 30 个产品实际测量值依次为: $5^\circ 35'$ $5^\circ 31'$ $5^\circ 41'$ $5^\circ 37'$ $5^\circ 08'$ $4^\circ 45'$ $5^\circ 15'$ $5^\circ 12'$ $5^\circ 38'$ $4^\circ 58'$ $5^\circ 08'$ $4^\circ 52'$ $5^\circ 11'$ $5^\circ 06'$ $5^\circ 17'$ $4^\circ 49'$ $5^\circ 43'$ $5^\circ 01'$ $5^\circ 33'$ $5^\circ 22'$ $5^\circ 04'$ $5^\circ 18'$ $5^\circ 39'$ $5^\circ 08'$ $5^\circ 12'$ $5^\circ 43'$ $4^\circ 48'$ $5^\circ 27'$ $5^\circ 17'$ $5^\circ 33'$, 对以上数据计算可得:

$$\bar{x} = 5^\circ 17'$$

$$\sigma = 17'$$

由式 (3-6) 知

$$C_{PK} = \frac{T - 2\varepsilon}{6\sigma} = \frac{120' - 2(5^\circ 17' - 5^\circ 2')}{102'} = 0.88$$

由于 $C_{PK} = 0.88 < 1$, 说明产品验收不合格, 需要提高工序能力。

4、提高工序能力措施

工序能力指数公式 $C_{PK} = (1-k)C_p = \frac{T-2\varepsilon}{6\sigma}$ 可以知道，影响工序能力指数有三个变量，即工序产品质量给定公差 T ；工序加工的样本分布中心与产品质量给定公差中心的偏移量 ε ；样本的标准偏差 σ 。由于验收公差不可变，因此要提高工序能力可以从偏移量 ε 和样本的标准偏差 σ 两个方面进行考虑。

(1) 调整工序加工分布中心，减少偏移量 ε 。由加工计算值可知偏移量为 $19'$ ，偏移量在该机床中比较容易补偿。例如可以改变平衡轴的停位相位，对于偏移量为 $19'$ 的情况下，可以在原来停机相位的基础上多旋转一定的角度以得到补偿。

(2) 减少工序加工的分散度，缩小标准偏差 σ 。要缩小标准差，由图 3-1 可知需要从工序因素“5M1E”找原因。对于所研究机床可采用以下方法缩小标准差：①修订工艺，改进工艺方法。②对关键工序的操作人员进行培训，提高技术水平。③分析动平衡机的稳定性，如果出现平衡机停位重复精度差情况则需要提高停位精度。④查看机床运行过程中的稳定性，机床运行过程中是否有大振动。⑤分析检测台对来料补偿精度。

5、根据分析的原因进行修改，重新加工产品计算产品的工序能力指数，直到合格为止。

3.4 专机工序能力指数分析

由多个随机变量的函数的分布推论：若 $X_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2), (i=1, 2, \dots, n)$ ，且它们相互独立，则它们的和 $Y = X_1 + X_2 + \dots + X_n$ 仍然服从正态分布，且有 $Y \sim N(\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n, \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2)$ [27,28]。

当零件的尺寸为 X_i ，最后组合尺寸为 Y ，如果 X_i 服从独立的正态分布，具有均值 $\overline{X_i}$ 和方差 σ_i^2 ，于是 Y 也服从正态分布，其均值 $\overline{X_Y}$ 和方差 σ_Y^2 为：

$$\overline{X_Y} = \sum_{i=1}^n \overline{X_i} \quad (3-7)$$

$$\sigma_Y^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \quad (3-8)$$

3.4.1 机床设计公差计算

齿轮轴的检测公差为 $\pm 1^\circ$ ，实际检测中要满足精度要求，公差必须符合正态分布，在实际生产中是比较困难的。为了达到验收标准，可以采取缩小公差的方法，实际设计过程中缩小多少才最合适，与加工产品的分布状况有关。均匀分布是指产品的加工精度在公差范围内是均等的，在实际生产过程中可以得到保证。以下则依据均匀分布来给出验收公差。

设均匀分布的公差为 T' ，则分布密度函数

$$p(x) = \frac{1}{T'} \quad |x| \leq \frac{T'}{2} \quad (3-9)$$

由均匀分布方差公式

$$D(X) = E(X^2) - [E(X)]^2 \quad (3-10)$$

得

$$\sigma = \sqrt{D(X)} = \frac{T'}{2\sqrt{3}}$$

由公式 (3-4) $C_{PK} = \frac{T}{6\sigma}$ ，得

$$T' = \frac{\sqrt{3}T}{3C_{PK}} \quad (3-11)$$

式中 T ——验收给定的公差，为 $\pm 1^\circ$ ；

C_{PK} ——验收指标， $C_{PK} \geq 1$ 。

则可得加工过程为均匀分布时，其验收的公差为

$$T' = \frac{2\sqrt{3}}{3} = 1.15^\circ$$

为了保证产品的 C_{PK} 值，应该缩小验收时的公差，即由 $\pm 1^\circ$ 缩小为 $\pm 0.575^\circ$ ，由以上分析可知仅依据检验公差来加工产品是不正确的。

3.4.2 机械能力指数 C_M 计算

由分析可知产品最终工序与“5M1E”有关。当发现工序能力不足时，首先要调查机械能力。如果发现机械能力充分，则需把工序能力的提高放在机械以外的因素上。所谓机械能力是指，机械设备所固有的、实现其保证工序质量均一性的正常波动量，或者说，机械能力是工序中仅由机械设备因素引起的质量波动^[29,30]。设工序的质量波动为 σ^2 ，机械设备的质量波动为 σ_m^2 ，机械设备以外的其他工序构成因素的质量波动为 σ_0^2 ，其表达可以为：

$$\sigma^2 = \sigma_m^2 + \sigma_0^2 \quad (3-12)$$

σ_p^2 与 σ_m^2 在数量上存在以下关系

$$\sigma_m = \frac{3}{4}\sigma \quad (3-13)$$

由

$$C_{PK} = \frac{T}{6\sigma}$$

得

$$C_M = \frac{T}{8\sigma} \quad (3-14)$$

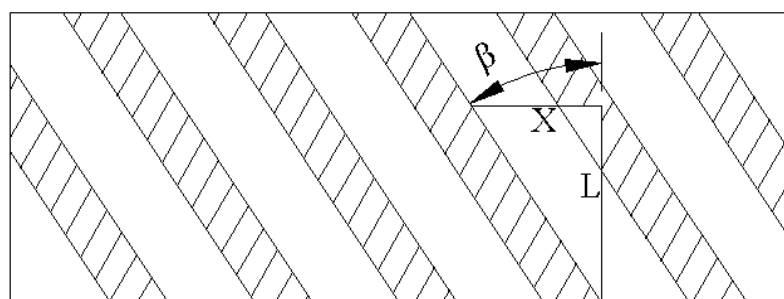
当机床加工过程中符合均匀分布，则由式(3-11)可计算机床的设计公差：

$$T' = \frac{\sqrt{3}T}{3C_{PK}} = \frac{\sqrt{3}T}{4C_M} = 0.866^\circ$$

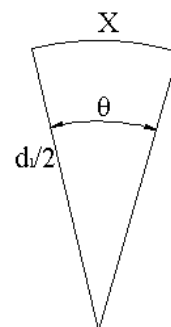
为了保证加工精度，在机床设计过程中应该缩小公差，即由 $\pm 1^\circ$ 缩小为 $\pm 0.433^\circ$ ，通过以上分析可知机床设计时应保证的机床的加工公差为 $\pm 0.433^\circ$ 。

3.4.3 材料误差影响分析

工件轴与齿轮的公差均为 $\pm 0.1 \text{ mm}$ ，这些误差直接影响加工后产品的精度，由于齿轮与轴为来料产品，不能确定其工序能力，以下讨论当来料符合公差要求，但不同的工序质量，对整体精度的影响。以轴与齿轮工序能力比较好(满足正态分布)和轴与齿轮工序能力比较差(满足均匀分布)两种情况来讨论。



(a) 薄齿轮沿分度圆展开图



(b) 轴向旋转角度关系图

图 3-8 薄齿轮端面与径向参数关系图

首先讨论长度误差与补偿角度的关系，图 3-8 为薄齿轮端面与径向参数关系图，图 3-8(a)中 β ， L 与 X 之间的关系表示为：

$$\tan \beta = \frac{X}{L} \quad (3-15)$$

式中 β ——分度分度圆柱螺旋角， $\beta = 33.75^\circ$ ；

X ——分度圆圆周线距离；

L ——轴向距离。

设轴向移动的距离为 L ，由公式（3-8）得：

$$X = L \tan \beta$$

(3-16)

如图 3-8 (b) 所示 X ， θ 与 $\frac{d_1}{2}$ 之间的关系为

$$\theta = \frac{180}{\pi} \times \frac{2X}{d_1} \quad (3-17)$$

式中 d_1 ——分度圆直径， $d_1 = 75.25 \text{ mm}$ 。

所以轴向移动的距离 L 与旋转角度 θ 关系式为：

$$\theta = \frac{180}{\pi} \times \frac{2L \tan \beta}{d_1} \quad (3-18)$$

1、轴和齿轮符合正态分布

由公式(3-8)可知 $\sigma^2 = \sigma_r^2 + \sigma_j^2 + \sigma_c^2 + \sigma_f^2 + \sigma_{cl}^2 + \sigma_h^2$ (3-19)

式中 σ ——最终产品的标准差, $\sigma = \frac{T}{6C_{PK}}$; (3-20)

由最终产品的检测公差为 $\pm 1^\circ$, 得 $T = 2^\circ$ 。

由检验要求 $C_{PK} \geq 1$, 取 $C_{PK} = 1$ 。

所以 $\sigma = \frac{T}{6C_{PK}} = \frac{2}{6} = 0.333$

σ_c ——材料标准差; $\sigma_c = \sqrt{\sigma_{cl}^2 + \sigma_{c2}^2}$ (3-21)

σ_{cl} ——轴的标准差; $\sigma_{cl} = \frac{T_{cl}}{6C_{PK}}$

工件轴的公差为 $\pm 0.1 \text{ mm}$, 由公式(3-18)得 $T_{cl} = 0.2^\circ$

所以 $\sigma_{cl} = \frac{T_{cl}}{6C_{PK}} = \frac{0.2}{6} = 0.033$

σ_{c2} ——齿轮的标准差; $\sigma_{c2} = \frac{T_{c2}}{6C_{PK}}$

工件轴的公差为 $\pm 0.1 \text{ mm}$, 由公式(3-18)得 $T_{c2} = 0.2^\circ$

所以 $\sigma_{c2} = \frac{T_{c2}}{6C_{PK}} = \frac{0.2}{6} = 0.033$

则 $\sigma_c = \sqrt{\sigma_{cl}^2 + \sigma_{c2}^2} = 0.047$

材料标准差占最终产品标准差比例为 $\frac{\sigma_c}{\sigma} = \frac{0.047}{0.333} = 0.14$

2、轴和齿轮符合均匀分布

由公式(3-8)可知 $\sigma^2 = \sigma_r^2 + \sigma_j^2 + \sigma_c^2 + \sigma_f^2 + \sigma_{cl}^2 + \sigma_h^2$

式中 σ ——最终产品的标准差; $\sigma = \frac{T}{6C_{PK}} = 0.333$

σ_c ——材料标准差； $\sigma_c = \sqrt{\sigma_{c1}^2 + \sigma_{c2}^2}$

σ_{c1} ——轴的标准差 $\sigma_{c1} = K \frac{T_{c1}}{6C_{PK}}$ ；

工件轴的公差为 $\pm 0.1 \text{ mm}$ ，由公式(3-18)得 $T_z = 0.2^\circ$

K ——相对分布系数，当为均匀分布时 $K = \sqrt{3}$

所以 $\sigma_{c1} = K \frac{T_{c2}}{6C_{PK}} = \frac{0.2\sqrt{3}}{6} = 0.058$

σ_{c2} ——齿轮的标准差； $\sigma_{c2} = K \frac{T_{c2}}{6C_{PK}} = 0.058$

则 $\sigma_c = \sqrt{\sigma_{c1}^2 + \sigma_{c2}^2} = 0.082$

材料标准差占最终产品标准差比例为 $\frac{\sigma_c}{\sigma} = \frac{0.082}{0.333} = 0.25$

由以上分析结果可得，同一个产品其加工误差同时满足要求，不同的工序能力对最终产品影响比例是不同的。所以在生产过程中每道工序的能力值决定最终产品的质量。在连续流程性生产的条件下，下游工序的产品质量是由该工序的工作质量和上游工序的产品质量共同决定的；反过来，下游工序不仅受上游工序的质量因素的影响，而且可以对上游工序的某些质量特性进行控制和再调整（如进行误差补偿），使最终产品满足最终的质量要求。

3.4.4 轴长误差与齿轮误差的补偿

在实际生产过程中，为了保证产品的合格，我们尽量减少“5M1E”影响因素。齿轮与轴的公差已知，但工序能力是未知的，如果工序中的加工能力为均匀分布，其标准差占最终产品的标准差比重为 25%，为了减少材料误差对整体精度的影响，我们可以采用误差补偿的方法。即生产加工之前，在检测精度为 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 的检测台上对轴和齿轮进行测量，将采集的数据通过解算，然后对轴旋转一定的角度进行补偿。如果检具符合正态分布，则补偿后齿轮与轴标准差占整体标准差的比例为 1.4%；

如果检具符合均匀分布，则补偿后齿轮与轴标准差占整体标准差的比例为 2.5%，这样大大增强产品的工序能力。补偿角度关系如式(3-18)所示。

当 θ 为正，轴应逆时针旋转进行补偿； θ 为负，轴应顺时针旋转进行补偿（参考图 5-4，从左向右看）。由于厚齿轮旋向与薄齿轮相反，但螺旋角与分度圆直径与薄齿轮相等，故补偿角度公式与薄齿轮相同，但轴旋转方向应与薄齿轮相反(参考图 5-5)。由公式(3-18)可得不同误差 l 的情况下，补偿角度 θ 如表 3-2 所示。式中 l 为轴长误差和齿厚误差的代数之和， $\beta = 33.75^\circ$ ， $d_1 = 75.25 \text{ mm}$ 。

表 3-2 长度误差与补偿角度关系

零件		误差 1	误差 2	误差 3	误差 4	误差 5
厚齿 轮轴 总成	轴长误差(mm)	0.05	0.05	0.08	-0.1	0
	齿厚误差(mm)	0.08	-0.1	0.06	-0.1	-0.08
	总误差 l (mm)	0.13	-0.05	0.14	-0.2	-0.08
	补偿角度 $\theta(^{\circ})$	0.13	-0.05	0.14	-0.2	-0.08
	轴补偿旋向	顺时针	逆时针	顺时针	逆时针	逆时针
薄齿 轮轴 总成	轴长误差(mm)	0.05	0.05	0.04	-0.02	0.1
	齿厚误差(mm)	0.08	-0.1	0.02	-0.08	0
	总误差 l (mm)	0.13	-0.05	0.06	-0.1	0.1
	补偿角度 $\theta(^{\circ})$	0.13	-0.05	0.06	-0.1	0.1
	轴补偿旋向	逆时针	顺时针	逆时针	顺时针	逆时针

l 与 θ 的关系曲线图为：

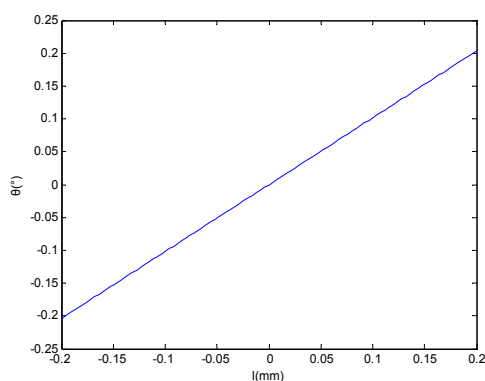


图 3-9 误差 l 与补偿角度 θ 的关系曲线图

3.5 本章小结

本章围绕 C_{PK} 值有关问题进行研究，其主要工作为：

1、首先分析机床波动性影响因素，及如何消除机床的异常波动，运用正态总体均值 μ 和标准差 σ 来判断专机工序质量的稳定性，对于不稳定的情况，查找影响工序质量的原因，从而提高工序能力指数。

2、分析工序能力指数 C_{PK} 值和公差之间关系，在实际加工中在不能保证产品质量正态分布的情况下如何缩小产品加工公差来保证 C_{PK} 值。

3、工序质量很大部分由机器能力决定，文中探讨如何根据加工产品的工序能力指数值分配机床的设计精度，以此作为机床设计精度的依据。

4、工序质量由“5M1E”决定，在生产过程中应尽可能降低这些因素对产品质量的影响，文中运用检测轴和齿轮误差并进行补偿的方法来降低轴和齿轮误差对产品质量的影响。

4 公差优化精度设计

设计与研制机器和设备时，最主要的要求是：在满足于预先规定精度要求的前提下，尽力降低成本，以期获得最大的经济效益。对于机械制造业来说，在提高质量降低功耗与成本方面等所提出问题的解决手段之一是利用尺寸链理论进行的精度设计^[31]，因此，尺寸链的分析与计算是机械设计的重要步骤之一。尺寸链是在机器装配或零件加工过程中，由相互连接的尺寸形成的封闭尺寸组，它具有两个基本特性：封闭性和公差与偏差的内在联系性^[32]。华中理工大学CAD中心对基于特征的装配尺寸链自动生成进行了研究，通过一个二维整数数组来形成零件邻接矩阵来表示装配体中各零件之间的装配关系，在分析零件邻接矩阵后得到装配信息，从而形成装配信息数据库^[33,34]。机器的制造质量与耗费的劳动量，很大程度上取决于正确地规定各种不同零件制造时的尺寸公差。以下通过对公差分析和公差分配来优化公差的设计。

4.1 公差分析

公差分析(Tolerance Analysis)也叫公差验证(Tolerance Verification),就是指已知各组成环的尺寸和公差，确定最终装配后所要保证封闭环的公差。公差分析方法主要有极值法和统计法。极值法是当零件尺寸处于上下极限值的情况下所进行的公差分析，这种方法不考虑零件尺寸在公差带内的分布，只考虑零件尺寸是否落在公差带内。因此设计出的零件合格率为100%，但由于各组成环的公差都很小，从而提高了加工成本。统计公差法指在计算装配公差时，假定各零件尺寸服从一定的概率分布，装配公差与零件公差之间是线性关系。通过假设使得实际情况得到了简化，从而可以利用标准的优化方法来解决统计公差综合问题。

4.1.1 极值法

极值法是从零部件的完全互换性要求出发，依据各环尺寸的极限值求解的计算方法，即假设各组成环的误差同时达到极限偏差情况下的公差计算方法。在大批量生产的条件下，只要各组成环的误差控制在所要求的公差带内，就可以保证产品百

分之百合格。用极值法求解能使有关零件具有完全互换性，产品的使用要求能得到重复保证^[35]。极值法计算公式为：

$$1、\text{封闭环基本尺寸：} A_0 = \sum_{i=1}^n \xi_i A_i \quad (4-1)$$

式中 A_0 ——封闭环基本尺寸；

A_i, ξ_i ——第 i 组成环的基本尺寸及传递系数；

n ——组成环。

$$2、\text{封闭环基本尺寸：} \Delta_0 = \sum_{i=1}^n \xi_i \Delta_i \quad (4-2)$$

式中： Δ_0 ——封闭环的中间偏差；

Δ_i ——第 i 组成环的中间偏差。

$$3、\text{封闭环基本尺寸：} T_0 = \sum_{i=1}^n |\xi_i| T_i \quad (4-3)$$

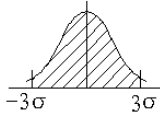
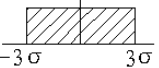
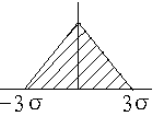
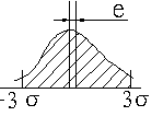
式中： T_0 ——封闭环公差。

4.1.2 概率统计法

极值计算法是按尺寸链中各环都处于极限状态时考虑的。但是，由生产实践可知，在成批大量生产时，工件的实际尺寸的分布都是随机的，多数情况下可考虑成正态分布或偏态分布，各环获得极限尺寸的概率很低，各组成环同时为极限尺寸的概率则更低，因此，只有环数较少时才用极值法计算。而大批量生产的多环尺寸链，如采用概率法计算，不仅能保证产品的互换性，还能明显的提高生产经济效益。概率统计法以一定置信水平为依据，通常封闭环趋近正态分布，取置信水平 $P=99.73\%$ ，封闭环相对分布稀疏 $K=1$ ；统计法不但要求确定链中各环的公差与极限偏差，而且还需要知道实际尺寸在其公差带内分布的信息，如表 4-1 所示^[36]。表中的 κ 为相对不对称系数，表征分布曲线的不对称的程度。 K 为相对分布系数，它表征尺寸分布分散的程度。统计法适用于封闭环精度高，组成环环数较多的尺寸链。应用统计法可

能使各组成环获得较为宽松的公差量^[37]。概率法计算公式为：

表 4-1 尺寸分布应 κ 、 K 值

分布特征	正态分布	均匀分布	三角分布	瑞利分布
分布曲线				
$\kappa=2e/T$	0	0	0	-0.28
$K=6\sigma/T$	1	1.73	1.22	1.14

$$1、\text{封闭环基本尺寸：} A_0 = \sum_{i=1}^n \xi_i A_i \quad (4-4)$$

式中： A_0 ——封闭环基本尺寸；

A_i, ξ_i ——第 i 组成环的基本尺寸及传递系数；

n ——组成环。

$$2、\text{封闭环中间偏差：} \Delta_0 = \sum_{i=1}^n \xi_i (\Delta_i + \kappa_i \frac{T_i}{2}) \quad (4-5)$$

式中： Δ_0 ——封闭环的中间偏差；

Δ_i ——第 i 组成环的中间偏差；

κ_i ——第 i 组成环的相对不对称系数。

$$3、\text{封闭环统计公差：} T_0 = \frac{1}{K_0} \sqrt{\sum_{i=1}^n \xi_i^2 K_i^2 T_i^2} \quad (4-6)$$

式中： T_0 ——封闭环公差；

K_0 ——封闭环相对分布系数；

K_i ——第 i 组成环的相对分布系数。

4.2 公差分配

公差分配 (Tolerance Allocation) 也叫公差综合 (Tolerance Synthesis), 是指在保证产品装配技术要求下规定各组成环尺寸的经济合理的公差。公差的最优化分配设计法是指建立公差模型 (加工成本公差模型, 装配失效模型) 和约束条件 (装配功能要求, 工序选择条件等), 利用各种优化算法进行公差分配。公差优化设计实质上是一个以尺寸链 (或传动链) 组成的零部件制造成本最小为目标, 以设计技术条件和预期装配成功率为约束的数学规划问题, 也是一个多随机变量的优化问题。很显然, 公差分析是公差优化设计的一个环节, 因而公差分析的效率直接决定着公差优化设计的效率。进行公差分配时, 首先将已给定公差的组成环 n_s 和待决定公差的组成环 n_t , 则组成环总环数 n 为:

$$n = n_s + n_t \quad (4-7)$$

公差分配进行公差计算时, 可用极值法和概率法, 这两种算法的使用范围与公差分析, 在上一节中已论述。把已给定公差的组成环和待决定公差的组成环分别表示。通过公差分析可知概率法在实际应用更加合理, 也符合其经济性, 本文在公差分配过程中运用概率法来求解, 其公式为^[38]:

$$T_0 = \frac{1}{K_0} \sqrt{\sum_{j=1}^{n_s} \xi_j^2 K_j^2 T_j^2 + \sum_{i=1}^{n_t} \xi_i^2 K_i^2 T_i^2} \quad (4-8)$$

式中: ξ_i 、 K_i 、 T_i ——待解决环公差的传递系数、相对分布系数和公差;

ξ_j 、 K_j 、 T_j ——已给定公差的传递系数、相对分布系数和公差;

K_0 、 T_0 ——封闭环的相对分布系数和公差。

4.2.1 相等公差法

相等公差法是指对待公差的全部组成环取相等的公差。相等的公差称为平均公差, 用 T 表示。通常平均公差仅供参考或用以评估尺寸链各环平均的公差等级, 只有在零件尺寸大小相近工艺方法相似条件下, 才使用相等公差。相同的公差称为平均

公差，用 T_{av} 表示，待定公差以 $T_i = T_{av}$ 代入式 (4-8)，得

$$T_{av} = \sqrt{\frac{K_0^2 T_0^2 - \sum_{j=1}^{n_s} \xi_j^2 K_j^2 T_j^2}{\sum_{i=1}^{n_l} \xi_i^2 K_i^2}} \quad (4-9)$$

4.2.2 相等精度法

相等精度法是指对于待定公差的全部组成环取相同的公差等级。要决定组成环的公差等级，必须求得划分公差等级的系数。按 GB1800-1998 规定，公差 $T = \alpha I$ ， α 是公差等级系数， I 是公差因子，在常用尺寸段内 I 取决于下式：

$$I = 0.45 \sqrt[3]{D} + 0.001D \quad (4-10)$$

式中 D ——基本尺寸，按尺寸段的几何平均值计。

待解决公差的组成环中，用 $T_i = \alpha I_i$ 代入式 (4-8)，得

$$\alpha = \sqrt{\frac{K_0^2 T_0^2 - \sum_{j=1}^{n_s} \xi_j^2 K_j^2 T_j^2}{\sum_{i=1}^{n_l} \xi_i^2 K_i^2 I_i^2}} \quad (4-11)$$

4.2.3 最小成本法

对于一定的加工尺寸，若要求的加工精度越高，公差越小，则所需的成本就越高^[39,40]。当成本与公差成二次函数关系，根据对实际生产数据进行统计和处理的基础上，提出了以下关于公差与成本公式：

$$C = A + \frac{B}{T^2} \quad (4-12)$$

式中： C ——零件制造成本；

A ——与公差大小无关的常数；

B ——与公差大小有关的常数。

对上式运用拉格朗日乘数法极值，可以在最小成本的情况下求得各组成环的公差与成本公式：

$$T_1 = \frac{B_1^{\frac{1}{4}} (K_0^2 T_0^2 - \sum_{j=1}^{n_s} \xi_j^2 K_j^2 T_j^2)}{(\xi_1 K_1)^2 (\sum_{i=1}^{n_i} B_i^2 \xi_i K_i)^{\frac{1}{2}}} \quad (4-13)$$

4.3 公差优化设计应用实例

图 4-1 为齿轮轴检测台剖视图，该检测台是测量工件轴长度，测量精度保证在 $\pm 0.01\text{mm}$ ，所以在设计过程中应该充分考虑公差设计。在轴测量工作过程中，零件 1 需在轴承 2 和轴承 3 中旋转运动，为了使零件 1 能够自由旋转，应尽量保证安装后两轴承的中心在同一条线上，经过综合考虑，设计时要求误差保持在 $A_0 = 0_{-0.2}^{+0.2}$ 范围内。 A_0 与其它四个尺寸连接成封闭的尺寸链。以下通过公差分析与公差分配方法来探讨各种方法的合理性，通过不同方法进行对比，选择最优化的设计方案。

已知：组成环尺寸 $A_1 = 158_{-0.1}^{+0.1} \text{ mm}$, $A_2 = 38.5_{-0.05}^{+0.05} \text{ mm}$, $A_3 = 13_{-0.05}^{+0.05} \text{ mm}$, $A_4 = 132.5_{-0.1}^{+0.1} \text{ mm}$ 。由于各组成环加工是偶然性的，可以近似采用三角分布，相对分布系数 $K_1 = K_2 = K_3 = K_4 = 1.22$ ，组成环误差相对封闭环来讲是偶然性误差，封闭环误差是组成环的综合，一般情况下，封闭环分布曲线接近于正态分布， $K_0 = 1$ 。传递系数 $\xi_1 = -1$, $\xi_2 = 1$, $\xi_3 = -1$, $\xi_4 = 1$ 。

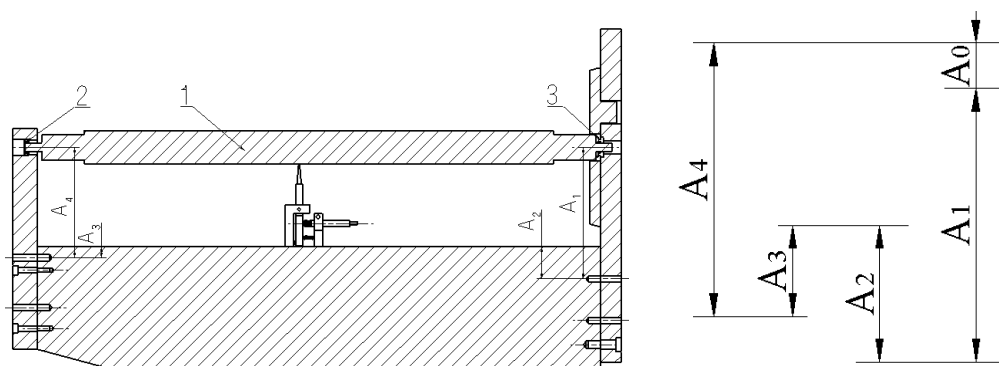


图 4-1 轴检测台轴承孔尺寸链

1—旋转零件； 2—深沟球轴承； 3—止推轴承

4.3.1 公差分析方法

1、相等公差法

校核封闭环极值公差：

$$T_0 = \sum_{i=1}^n |\xi_i| T_i = 0.2 + 0.2 + 0.1 + 0.1 = 0.6 \text{ mm}$$

校核结果： $T_0 > 0.4$ 封闭环公差大于规定要求，应适当缩小各组成环的公差。但势必会增加产品的制造成本。

2、概率统计法

校核该封闭环的尺寸公差：

$$T_0 = \frac{1}{K_0} \sqrt{\sum_{i=1}^n \xi_i^2 K_i^2 T_i^2} = 0.316 \text{ mm}$$

校核结果：封闭环公差满足要求，符合装配要求。

4.3.2 公差分配

1、相等公差法

由公式(4-9)可知各环平均公差：

$$T_{av} = \frac{1}{1.22} \sqrt{\frac{0.4^2}{4}} = 0.164 \text{ mm}$$

2、相等精度法

根据各尺寸链的长度查公差因子数值得

$$I_1 = 2.52, \quad I_2 = 1.56, \quad I_3 = 1.08, \quad I_4 = 2.52$$

将数据代入(4-11)得

$$a = \frac{1}{1.22} \sqrt{\frac{0.4^2 \times 1000^2}{2.52^2 \times 2 + 1.56^2 + 1.08^2}} = 81.2$$

由公差等级系数数值表可得公差均可按 IT10 决定。通过计算可知：

$$T_1 = 0.16 \text{ mm}, \quad T_2 = 0.1 \text{ mm}, \quad T_3 = 0.07 \text{ mm}, \quad T_4 = 0.16 \text{ mm}$$

由(4-8)校核:

$$T_0 = 1.22\sqrt{0.16^2 + 0.1^2 + 0.07^2 + 0.16^2} = 0.292 \text{ mm}$$

公差分配有很大富余, 应适当扩大公差范围, 取

$$T_1 = 0.2 \text{ mm}, T_2 = 0.12 \text{ mm}, T_3 = 0.1 \text{ mm}, T_4 = 0.2 \text{ mm}$$

$$T_0 = 1.22\sqrt{0.2^2 + 0.12^2 + 0.1^2 + 0.2^2} = 0.394 < 0.4 \text{ mm}$$

满足封闭环预定要求。

3、基于成本的公差分配

各环基本尺寸可能采用的公差范围及其相应的制造成本列于表 4-1

表 4-1 公差与成本表

环	基本尺寸 (mm)	公差范围 T(mm)	制造成本 C (成本单位)	
			B(与 T 有关)	A(与 T 有关)
A ₁	158	0.30~0.10	13	20
A ₂	38.5	0.30~0.05	8	10
A ₃	13	0.30~0.05	8	10
A ₄	132.5	0.30~0.10	10	15

系数 B 的确定:

由成本—公差模型式 (4-12) 可得成本—公差曲线如图 4-2 所示

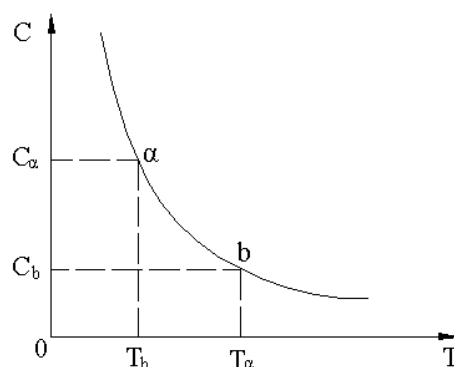


图 4-2 公差与成本曲线图

设 a、b 是曲线上的两点, 则

$$C_a = A + \frac{B}{T_a^2} \qquad C_b = A + \frac{B}{T_b^2}$$

于是可得

$$B = (C_a - C_b) \left/ \left(\frac{1}{T_a^2} - \frac{1}{T_b^2} \right) \right. \quad (4-14)$$

将表 4-1 中数据代入上式可得

$$\begin{aligned} B_1 &= (48 - 35) \left/ \left(\frac{1}{0.10^2} - \frac{1}{0.30^2} \right) \right. = 0.14625 \\ B_2 &= (28 - 20) \left/ \left(\frac{1}{0.05^2} - \frac{1}{0.30^2} \right) \right. = 0.02058 \\ B_3 &= (28 - 20) \left/ \left(\frac{1}{0.05^2} - \frac{1}{0.30^2} \right) \right. = 0.02058 \\ B_4 &= (40 - 30) \left/ \left(\frac{1}{0.10^2} - \frac{1}{0.30^2} \right) \right. = 0.1125 \end{aligned}$$

将以上数据带入式(4-13)得

$$T_1 = 0.202 \text{ mm} \quad T_2 = 0.124 \text{ mm} \quad T_3 = 0.124 \text{ mm} \quad T_4 = 0.189 \text{ mm}$$

取 $T_1 = 0.2 \text{ mm} \quad T_2 = 0.12 \text{ mm} \quad T_3 = 0.12 \text{ mm} \quad T_4 = 0.19 \text{ mm}$

计算各环成本，按式(4-12)得

$$\begin{aligned} A_1: \quad C_1 &= 20 + \frac{0.14625}{0.2^2} = 23.66 \\ A_2: \quad C_2 &= 10 + \frac{0.02058}{0.12^2} = 11.43 \\ A_3: \quad C_2 &= 10 + \frac{0.02058}{0.12^2} = 11.43 \\ A_4: \quad C_4 &= 15 + \frac{0.1125}{0.19^2} = 18.12 \end{aligned}$$

总成本 $C_\Sigma = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = 64.64$

若各环取相等公差：

由 $T_{av} = \frac{1}{1.22} \sqrt{\frac{0.4^2}{4}} = 0.164$ 带入式(4-12)，得

$$C_\Sigma = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = 25.44 + 10.77 + 10.77 + 19.18 = 66.16$$

若各环取相等精度：

由 $T_1 = 0.2$, $T_2 = 0.12$, $T_3 = 0.1$, $T_4 = 0.2$ 带入式(4-12), 得

$$C_{\Sigma} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = 23.66 + 11.43 + 12.06 + 17.81 = 64.96$$

4.3.3 公差优化探讨

由实例分析结果可以得出, 公差设计在产品过程中的作用非常大, 它不但能保证生产产品的精度, 合理的公差分配还能够大大降低加工成本。通过对两种公差分析的计算结果可以看出用极值法计算, 完全能够确保装配后尺寸精度, 对于组成环公差容易保证的情况下可以采用, 对于加工精度难于保证的公差, 采用概率法计算, 可以大大减少加工难度。

在公差分配实例过程中均采用概率公差法, 通过对三种公差分配方法的计算结果可以看出在满足相同的装配公差时, 采用相等公差法加工成本最高, 最小成本法加工成本最低, 相等精度法比最小成本要高一些。由于最小成本法计算比较复杂, 需要调查大量的公差成本模型, 实际设计过程中操作性不强, 相等精度法是考虑精度满足相等公差等级, 在实际生产过程中公差等级与加工成本是成比例关系的, 相等公差等级法在实际生产过程中的成本要优于相等公差法。

4.4 本章小结

本章首先介绍基于尺寸链的公差设计在机床设计过程中的重要性, 给出尺寸链数学模型, 对比分析极值法和概率分布法两种公差分析, 阐述基于相等公差法和相等精度法的具体应用, 并提出基于零件公差与制造成本模型。以轴检测台轴承处尺寸链设计为例分析对比各种公差设计的优劣, 论述既符合精度要求又符合经济性的设计方法。

5 机床在线误差检测及补偿

零件的加工精度主要取决于数控机床的精度，误差补偿是在现有机床无法达到加工精度情况下采取的一种方法，也是优化机床加工能力的手段。尤其随着软件业的发展，找出造成误差的主要原因，计算出误差的大小和方位，然后对误差进行软件补偿。误差补偿内容主要包括误差源查找、误差量检测、补偿方法。

5.1 误差源分析

本专机的任务是对齿轮和轴进行热压配合，保证齿轮端面某一齿槽中心相位与轴最大不平衡量相位成一定角度(如图 5-7 所示)。热压配合后齿轮轴的质量检测要求如表 5-1 所示：

表 5-1 产品验收要求

零件	项目		要求
反转轴总成	钻孔的尺寸和直径为 5 的孔的位置	$\Phi 5 \pm 0.25$	1b
		深度 2.9—3.05	1b
		$0^\circ \pm 1^\circ$	1b
		$\Phi 2.3 (2.1-2.25)$	1c
		10 ± 0.25	1c
	齿轮在轴上热套之后的方向	166.15 ± 0.1	1b
		$5^\circ 02' \pm 1^\circ$	1b
旋转轴总成	钻孔的尺寸和直径为 5 的孔的位置	$\Phi 5 \pm 0.25$	1b
		深度 2.9—3.05	1b
		$0^\circ \pm 1^\circ$	1b
		$\Phi 2.3 (2.1-2.25)$	1c
		10 ± 0.25	1c
	齿轮在轴上热套之后的方向	166.15 ± 0.1	1b
		$9^\circ 25' \pm 1^\circ$	1b

1b: 在线检具上测量, 作 C_{AM} 和 C_{PK} 。目标: 30 件 $C_{AM} \geq 1.33$, $C_{PK} \geq 1$

1c: 表面状况或几何状况, 目标: 30 件中抽检 5 件, 5 件合格:

机床误差主要包括几何误差和热误差两大类, 对于加工精度的不同, 两类误差占机床误差的比例是不同的, 本文主要讨论几何误差。根据对机床整个工作流程进行分析, 误差源主要包括以下几个方面:

1、动平衡机停位的准确性。动平衡机对平衡轴进行动平衡测量, 测量轴的最大不平衡量相位, 保证停机时最大不平衡量相位在竖直最底端。

2、钻孔时, 标记孔中心应该在过齿轮轴轴线的竖直平面上。即表 5-1 中钻 $\Phi 5\text{mm}$ 孔时, 孔位置检测要符合 $0^\circ \pm 1^\circ$ 要求 (如图 5-1 所示)。

3、齿条夹持齿轮过程中, 齿轮夹紧过程中的角度旋转误差。齿轮沿轴向旋转的位置是在上料工位上通过销来定位 (如图 5-3 所示), 然后用机械手将其平移至热压工位, 如果齿条的夹持过程中齿轮发生旋转, 将直接影响产品的加工质量 (如图 5-2 所示)。

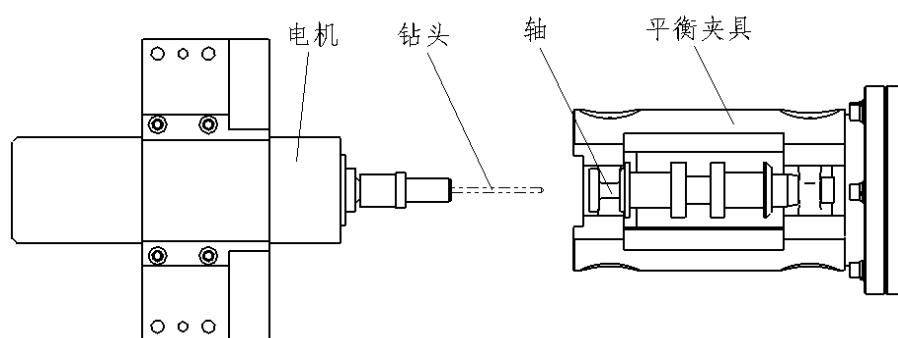


图 5-1 动平衡、钻孔

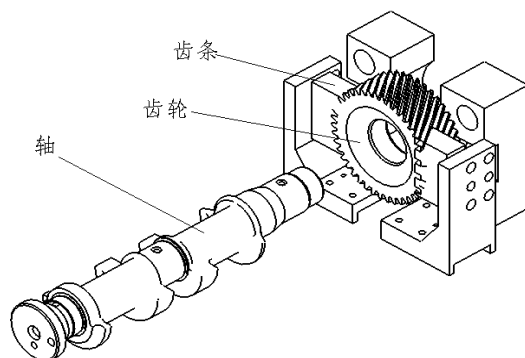


图 5-2 热压配合

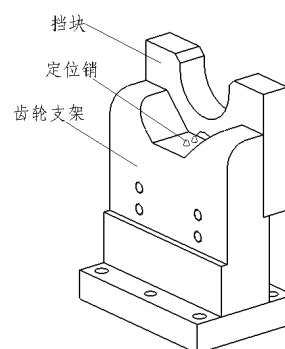


图 5-3 齿轮定位

5.2 误差检测和误差补偿方法

误差的测量是误差补偿的关键。误差检测仪器根据检测对象及补偿精度要求有许多种，如千分尺、磁尺、激光干涉仪、三坐标测量机等，在实际操作中应该根据要求选择不同的检测设备。为了获得准确的机床工作空间的误差值，误差测量必须遵守以下规则：一致性，数控机床误差的测量条件应和使用条件一致；完备性，测量应尽可能反映所有工作条件下整个机床工作空间的实际情况；重复性，测量精度要满足要求，测量结果的可重复性好，能真实反映机床的运动情况；简便性，并要求测量仪器尽可能简单，操作方便。本文根据实际情况采用车间常用的量具千分表（精度可达 $1\ \mu\text{m}$ ）配合表座在线检测机床的误差^[41, 42]，重在叙述分析在线检测的方法。

5.2.1 钻头轴线与齿轮轴轴线的竖直平面误差检测

轴端面如右图 5-4 所示，其中 A 为轴工艺孔，其直径为 $\Phi 7.42\ \text{mm}$ ，工艺孔与轴为同轴度，B 为动平衡后钻的孔，其直径为 $\Phi 5\ \text{mm}$ ，在加工过程中尽量保证孔 B 的中心在 oa 线上，即 L 尽可能小，检测 L 的长度，看是否在符合的误差之内，如果超出误差，对其进行误差补偿。由于孔的直径比较小，检测工具采用杠杆千分表^[43]。

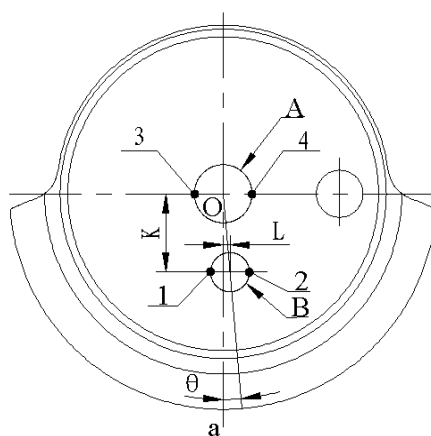


图 5-4 轴端面图

1、检测方法：

- (1) 用表架固定好千分表，当表头触及点 A 圆 3 点处，对千分表清零；
- (2) 调节表架，千分表竖直下降，采集 B 圆 1 点处千分表数据 x_1 ；

(3) 调节表架，当表头触及点 A 圆 4 点处，对千分表清零；

(4) 调节表架，千分表竖直下降，采集 B 圆 1 点处千分表数据 x_2 。

B 孔实际直径为： $\Phi(7.42 - x_1 - x_2) \text{ mm}$

则
$$L = \frac{(7.42 - x_1 - x_2)}{2} + x_1 - \frac{7.42}{2} = \frac{x_1 - x_2}{2} \text{ mm}$$

2、补偿方法:

当 B 圆发生偏移距离 L 时,可以采用硬件和软件两种方法对其进行补偿。硬件方法则采用对机床的零件进行修磨调整,使钻孔中心在 OA 线上,即 $L=0$ 。软件补偿方法则通过偏移的距离转化成偏移的角度,然后通过动平衡机的停位对误差进行补偿。

偏移距离 L、竖直距离 K、角度 θ 的关系为:

$$\theta = \frac{180L}{\pi K}$$

式中 $K=10\text{mm}$, 所以偏移误差 L 与补偿角度的关系为:

$$\theta = \frac{18L}{\pi} \quad (5-1)$$

5.2.2 齿轮角度旋转误差

在齿条夹持齿轮的过程中,齿轮可能存在三个方向的运动:水平移动、竖直移动、围绕齿轮中心的转动。图 5-5 为某一齿廓在装夹过程中的变化图,曲线 a 为装夹前的齿廓线,曲线 c 为装夹后的齿廓线,在装夹过程中可以把齿轮运动过程分解为齿轮围绕中心旋转 θ , 得到虚线 b, 然后横向移动距离 x_1 , 竖直移动距离 y_1 , 最终得到曲线 c。

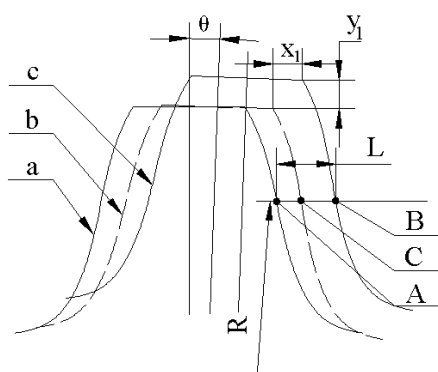


图 5-5 齿廓线变化图

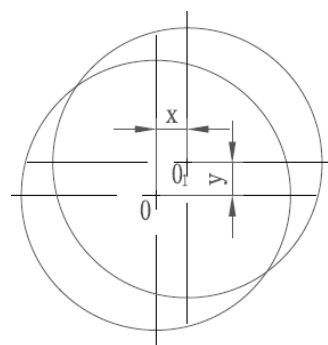


图 5-6 齿轮内圈变化图

图 5-6 为齿轮在装夹过程中, 齿轮中心移动的距离。与图 5-5 对比可得:

$$x = x_1 \quad y = y_1$$

图 5-6 中 x 、 y 的数值可采用杠杆千分表对齿圈测量获得。

由齿轮的参数可知该齿轮的压力角为 14° , 由齿轮竖直移动 y 而产生的横向移动距离的关系:

$$x' = y \tan 14^\circ = 0.25y$$

因旋转而使齿移动的距离:

$$AC = AB - CB = L - x - 0.25y$$

点 A 到圆心的半径为 R , 则齿轮旋转的角度与 L 的关系为:

$$\theta = \frac{360(L - x - 0.25y)}{2\pi R} \quad (5-2)$$

式中: L ——齿上用千分表测出的数据;

x ——齿内圈用杠杆千分表测出齿轮中心水平移动的数据;

y ——齿内圈用杠杆千分表测出齿轮中心水平移动的数据;

R ——齿上测点到齿轮中心的距离。

5.3 齿轮定位销位置计算

5.3.1 旋转轴齿轮销的位置计算

旋转轴齿轮压装后的齿轮轴检测方法: 在如图 5-7 所示 166.15 mm 处, 采集齿轮底端凹槽中心点, 然后通过计算得出该凹槽中心点沿螺旋角 β 移动至最左端的情况下与中垂线的角度, 该角度范围在 $9^\circ 25' \pm 1^\circ$ 之间才能合格。已知齿轮厚度 12 mm, 该斜齿轮为右旋齿轮, 螺旋角 β 为 33.75° , 分度圆直径 d_1 为 $\Phi 75.25$ mm, 要求出当凹槽在竖直线时, 齿轮端面向右移动的距离。齿轮沿分度圆展开如图 3-8 所示:

图 3-8 中 β , L 与 X 之间的关系表示为

$$\tan \beta = \frac{X}{L} \quad (5-3)$$

由于齿轮定位销在如图 5-7 齿轮的顶部, 现求顶点向左第一个凹槽中线离顶点的角度 θ

$$\theta = \frac{360 \times 19}{41} - 9^\circ 25' - 180^\circ = -3.75^\circ$$

当 θ 等于 37.5° 时,

$$X = \frac{\pi d_1 \theta}{360} = \frac{\pi \times 75.25 \times 3.75}{360} = 2.463 \text{ mm}$$

由式(5-3)可得

$$L = \frac{X}{\tan \beta} = \frac{2.463}{0.688} = 3.686 \text{ mm}$$

即销的位置距离右端面距离

$$D = 12 - 3.686 = 8.314 \text{ mm}$$

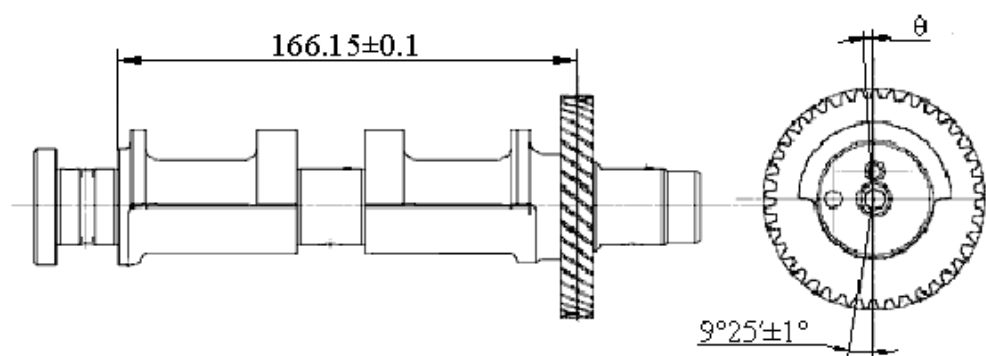


图 5-7 旋转轴总成检测图

5.3.2 反转轴齿轮销的位置计算

旋转轴齿轮压装后的齿轮轴检测方法: 在如图 5-8 所示 166.15 mm 处, 采集齿轮底端凹槽中心点, 然后通过计算得出该凹槽中心点沿螺旋角 β 移动至最左端的情况下与中垂线的角度, 该角度范围在 $5^\circ 2' \pm 1^\circ$ 之间才能合格。已知齿轮厚度 30 mm, 该斜齿轮为左旋齿轮, 螺旋角 β 为 33.75° , 分度圆直径 d_1 为 $\Phi 75.25$ mm, 需要求出当凹槽在竖直线上时, 齿轮端面向右移动的距离 D。齿轮沿分度圆展开如图 5-9 所示:

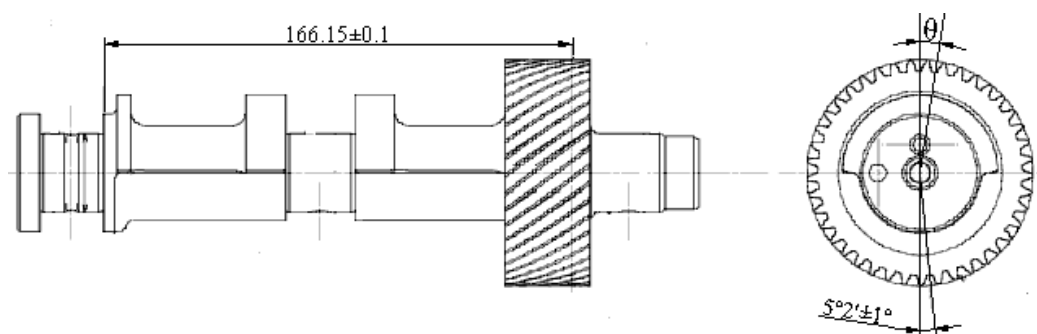
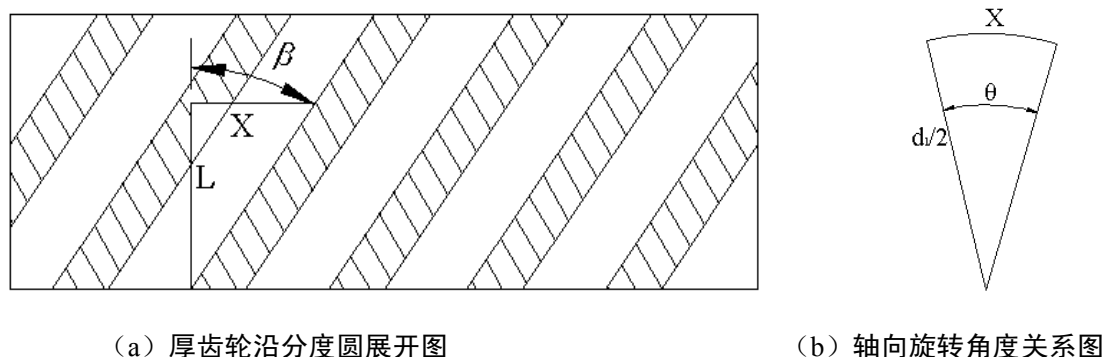


图 5-8 反转轴总成检测图



(a) 厚齿轮沿分度圆展开图

(b) 轴向旋转角度关系图

图 5-9 厚齿轮展开图

图 5-9 中 β , L 与 X 之间的关系表示为

$$\tan \beta = \frac{X}{L} \quad (5-4)$$

由于齿轮定位销在如图 5-8 所示齿轮的顶部, 现求顶点向右第一个凹槽中线离顶点的角度 θ

$$\theta = \frac{360 \times 22}{41} - 5^\circ 2' - 180^\circ = 8.13^\circ$$

当 θ 等 8.13° 时

$$X = \frac{\pi d_1 \theta}{360} = \frac{\pi \times 75.25 \times 8.13}{360} = 5.339 \text{ mm}$$

由式(5-4)可得

$$L = \frac{X}{\tan \beta} = \frac{5.339}{0.688} = 7.993 \text{ mm}$$

即销的位置距离右端面为

$$D = 30 - 7.993 = 22.007 \text{ mm}$$

该齿轮的端面齿距：

$$D' = \frac{360}{41} \times \frac{\pi}{180} \times \frac{d_1}{2} = 5.766 \text{ mm}$$

则可以求出该齿轮旋转一个齿距角时，齿轮沿端面移动的距离为：

$$L' = \frac{D'}{\tan \alpha} = 8.629 \text{ mm}$$

故上料机构反转轴齿轮定位销离右端的距离为：

$$D = 22.007 - n L' \text{ mm} \quad (n \text{ 取值为 } 0, 1, 2)$$

$$\text{则} \quad D_1 = 22.007 \text{ mm} \quad D_2 = 13.378 \text{ mm} \quad D_3 = 4.749 \text{ mm}$$

5.3.3 齿轮定位销的位置计算

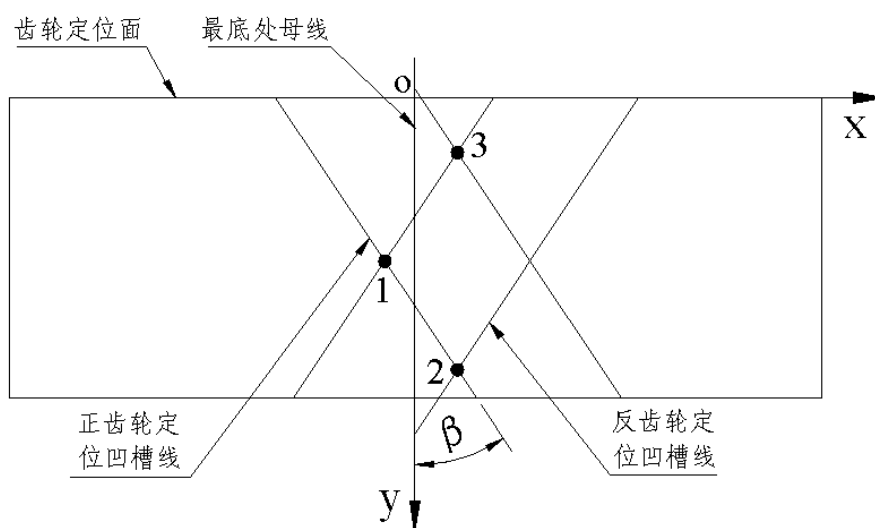


图 5-10 正、反齿轮定位面相交示意图

由于两个齿轮在同一个上下料工作台定位(如图 5-3 所示)，如果都采用在竖直最底端进行销定位,从计算的数据可以得出不同齿轮定位销距离定位面距离是不同的,如果共用一个工作台必然产生干涉。齿轮一个左旋，一个右旋，如果按计算的位置放置,一定找到两齿轮凹槽相交的位置，图 5-10 为正齿轮与反齿轮凹槽在定位面上的相交情况，图中相交点为两齿轮凹槽相交点，如果在这些点安装定位销，则该销为两个齿轮定位的共用销。由于在定位过程中采用距离最底处母线最近点定位的方式比较可靠，所以可采用图中 1、2、3 点定位。为了保证销的定位可靠性，应该在母线左右两侧各取一个点作为定位销的位置。由于点 3 距离端面比较近，定位厚齿轮不

是很稳定，故采用点 1、2 作为定位齿轮销位置。以端面线为 x 轴，以最底处母线为 y 轴，则可求出两齿轮定位的共用销位置。

点 1 在坐标系上的位置为：

$$x_1 = \frac{(4.749 - 8.314) \tan \beta}{2} = -1.211 \text{ mm}$$
$$y_1 = \frac{(4.749 + 8.314)}{2} = 6.532 \text{ mm}$$

点 2 在坐标系上的位置为：

$$x_2 = \frac{(13.378 - 8.314) \tan \beta}{2} = 1.692 \text{ mm}$$
$$y_2 = \frac{(13.378 + 8.314)}{2} = 10.846 \text{ mm}$$

5.4 本章小结

本章运用杠杆千分表对机床误差源进行在线检测，根据检测结果进行计算、建模分析，然后用软件的方法对误差进行补偿，从而进一步保证机床的加工精度。齿轮定位的准确性决定加工精度，设计过程中采用销对齿轮外圈进行定位，由于两齿轮的差异性，文中采用共用销对两种齿轮进行定位，并计算得出销的具体位置。

6 总结与展望

6.1 总结

动平衡热压专机加工的平衡齿轮轴是用来平衡往复式发动机运动过程中产生往复惯性力，平衡齿轮轴的精度直接影响发动机性能的优劣。本以动平衡热压专机验收标准 C_{PK} 值为切入点，对机床工序质量、精度设计和误差补偿进行研究，确保专机加工产品满足精度要求。本论文的主要工作总结如下：

1、分析 C_{PK} 值与那些参数有关，采用正态总体均值 μ 和标准差 σ 来判断机床工序质量的稳定性，对于工序能力不足的情况下，查找可能影响工序质量的原因，从而提高工序能力指数。

2、探讨如何评定机床能力指数及机床能力指数与工序能力指数的关系。分析了工序能力指数与 C_{PK} 值和给定公差的关系，在实际加工中在不能保证产品质量正态分布的情况下如何缩小产品加工公差来保证 C_{PK} 值。

3、工序质量由“5M1E”决定，在生产过程中应尽可能降低“5M1E”对产品质量的影响，文中采用检测台检测来料并进行补偿的方法降低来料误差对产品质量的影响。用 C_{PK} 值检测产品质量越来越被许多企业所采用，文中以轴和齿轮为例说明运用 C_{PK} 值检测产品质量的现实意义。

4、介绍尺寸链的相关知识，提出尺寸数学模型，分析了公差设计中采用的极值法和概率分布法，并提出基于零件公差与制造成本模型。以轴检测台为例分析对比各种公差设计的优劣和成本，论述既符合精度要求又符合经济性的设计方法。

5、运用杠杆千分表对机床误差源进行在线检测，根据检测结果进行计算、建模分析补偿方法，然后用软件的方法对其进行误差补偿，从而进一步保证机床的加工精度。

6、齿轮定位的准确性确定产品的质量，设计过程中采用销对齿轮外圈进行定位，

由于两齿轮的差异性，而专机为通用机床，文中采用共用销对齿轮进行定位，并计算得出销的具体位置。

6.2 展望

随着汽车的普及，发动机生产的国有化具有重要意义，提高专机的加工精度为提高发动机的质量具有重要作用。本课题机通过三个方面来探讨提高产品的加工精度，这些方法主要针对动平衡热压专机来阐述，通用型还存在一些不足，有待进一步研究之处：

1、文中主要研究提高工序质量的方法以及分析影响工序能力直属的原因，对于影响工序质量有六大因素，文中重点分析如何提高来料和机器因素，对于其他因素没有过多研究。

2、尺寸链公差设计实用性还有些不足，只是应用在关键部件的设计，如何有效的集成运用到 CAD 软件中去，方便设计人员使用，有待进一步研究。

3、根据实际情况分析，文中只对影响机床几何误差进行检测，影响机床误差因素有很多，包括几何误差、热误差、动态误差等，这些误差在该机床中影响不是很大，但也占一定比例，可以进一步进行研究。

致谢

时光飞逝，转眼之间本人即将完成硕士研究生阶段的学习。在此我要深深感谢我的导师曹继光老师，感谢他自始至终给予的悉心指导和耐心帮助。曹继光老师一直以他严谨的治学态度和诲人不倦的育人精神熏陶和影响着我，不但在我的学业上付出了极大的精力和热情，在生活中也给予了无微不至的关怀和帮助。在此论文完成之际，谨向曹老师致以深深的敬意和衷心的感谢！

同时，郑重感谢我的父母和家人。感谢他们对我成长注入了那么多心血，感谢他们多年以来始终如一地关心支持我的学习、生活和各个方面。

感谢实验室的王莉博士、祝小涛硕士、余江森硕士、朱亚兵硕士、张波硕士、陈巧硕士，感谢张鹏博士、杨洞硕士、罗春龙硕士以及湖北大为电子有限公司的谢体详、李建民、张纯龙等工程师，感谢他们对我日常学习、生活和工作给予的诸多帮助。

谨以此文献给所有关心、帮助和支持过我的人！

钱学森

2008年5月于喻园

参考文献

- [1] 刘云兰, 王琦, 罗福强. 高速往复式内燃机平衡轴设计分析. 江苏大学学报, 2002, 23(1): 30-33
- [2] Georg Heuser et al. Der neue Forde 2.3L Motormit Ausgleichswellen. MTZ58(1997)1: 10-18
- [3] Rudolf Flierl et al. Der neue BMW 4-Zylinder Motor in neuer 318i. Aachener Kolloquium Fahr-zeug and Motorentechnik. 1998: 101-103
- [4] 陈幼平, 刘安生. 发动机减振平衡轴及振动故障系统的研究. 汽车运输, 1999,(6): 21-22
- [5] 吴际璋, 尹相泉, 袁锡仓. 发动机平衡轴装错的通病何在?. 汽车使用与维护, 2004,(11): 15-16
- [6] Shewhart W A. Economic Control of Quality Manufactured Product. Van Nostrand Company, New York, 1931
- [7] 易新颜. 基于工序能力指数的工序质量控制研究[硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2004
- [8] 张根保. 现代质量工程. 北京: 机械工业出版社, 2000
- [9] 贾敏中, 詹友基. 机床几何误差和运动误差及其误差补偿技术. 机电技术, 2004,(2): 77-80
- [10] 吴昭同. 计算机辅助公差优化设计. 浙江: 浙江大学出版社, 1999
- [11] Parkson D B. The application of reliability methods to tolerancing. ASME J. of Mech. Des. 1982(104): 612-618
- [12] Parkson D B. Assessment and optimization of Dimensional tolerances. Computer-aided design. 16(1):191-199
- [13] Parkson D B. Tolerancing of Component Dimensions in CAD. Computer Aided Design. 1984, 16(1): 25-32
- [14] W J Lee and T C Woo. Optimum selection of discrete tolerances. ASME Journal of

- mechanisms, transmission, and automation in design. 1989(111): 243-251
- [15] W J Lee and T C Woo. Tolerances: their analysis and synthesis. ASME Journal of engineering for Industry.1990(110): 113-121
- [16] 杨将新. 基于装配成功率的公差优化设计系统研究[博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 1996
- [17] Mou J, Liu C R. An adaptive methodology for machine tool error correction. ASME Transactions, Journal of Engineering for Industry,1995,117:389-399
- [18] 倪军. 数控机床误差补偿研究的回顾与展望. 中国机械工程, 1997,8(1): 29-32
- [19] 张国雄. 误差修正-提高坐标测量机精度的重要方向. 机床, 1980,8: 37-39
- [20] 王世芳. 工序控制论. 武汉: 华中理工大学, 1991
- [21] 张公绪. 新编质量管理学. 北京: 高等教育出版社, 1998
- [22] Juran J M. E D Quality Control Handbook. 3rd ed. Mc Graw-Hill, New York, NY. 1974: 50-53
- [23] Kane V E. Process Capability Indices. Journal of Quality Technology.1986,18:41-52
- [24] 李祥林. 工序能力分析在工序控制中的应用. 机械研究与应用, 2007,(6): 64-66
- [25] 赵妙霞, 贾九红, 郑玉巧. 工序控制方法中工序能力的分析. 甘肃工业大学学报, 2003,(12): 49-51
- [26] 汪伟浩. 提高车轴头加工工序能力途径的分析与探讨. 中国科技信息, 2006,(24): 62-64.
- [27] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计(第二版). 北京: 高等教育出版社,1989
- [28] 李良能. 组合质量特性的工序能力分析与设计. 电子质量, 1992,(3): 35-37
- [29] 李纯甫. 统计公差与机械精度. 北京: 机械工业出版社, 1990
- [30] 张荣瑞. 尺寸链原理及其应用. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [31] 李柱. 互换性与测量技术基础. 北京: 计量出版社, 1984
- [32] 朱正德. 机械加工设备能力的评定指标-机器能力指数. 上海机床,2002,(1): 7-9
- [33] 赵天奇, 邓建春. 面向 FMS 生产调度和控制的零件动态工艺模型研究. 中国机

- 械工程.1998, 9(9): 36-38.
- [34] 王洋, 王春河. 基于特征的装配尺寸链自动生成及分析的研究. 计算机辅助设计与图形学学报, 1998, 2(10): 138-144
- [35] 李纯甫. 尺寸链分析与计算. 北京: 中国标准出版社, 1990
- [36] 张琳娜. 精度设计与质量控制基础. 北京: 中国计量出版社, 1991
- [37] Swami D N, Joshua U T. Review of Statistical Approaches to Tolerance Analysis. Computer—Aided Design, 1995, 27(5): 6-15
- [38] 尹启承. 工序能力与工序能力指数. 北京: 中国农业出版社. 1983
- [39] Speckhart F H. Calculation of tolerance based on a minimum cost approach. Journal of Engineering for Industry. 1972, 94(2):447-453
- [40] Spotts M F. Allocation of tolerances to minimize cost of assembly. Journal of Engineering for Industry. 1973: 762-764
- [41] 梁国明等. 常用量具检定和使用 150 问. 北京: 机械工业出版社, 1996
- [42] 周龙声. 机床精度检测. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [43] 田俊成, 史百工. 杠杆千分表的改制. 工具技术, 2004, 38(6):70-71