

## 摘要

数控铣齿机是一种用于铣齿加工的高效专用数控机床。目前,国产数控铣齿机与国外同类产品相比可靠性水平还有一定的差距,在国际市场上竞争力不足,因此,提高数控铣齿机可靠性,使其向着高速、高效、高精度、高可靠性的方向发展,对于提高我国国产数控铣齿机的技术水平,增强其在国内外市场的竞争力有重大的现实意义。

本文以南京工业大学自主研发的 SKXC2000 型数控高速铣齿机为对象,对其进行可靠性评价研究,以提高该类数控高速铣齿机的可靠性为目的;通过故障分析找出影响其可靠性的关键部位或薄弱环节,制定相应的可靠性增长策略,从设计、制造、使用等方面确保产品可靠性的提高,具有实际工程价值。

本文的主要研究内容包括以下几个方面:

1、在 SKXC2000 型数控铣齿机现场试验数据的基础之上,分析了故障间隔时间概率密度曲线的趋势特点,假设趋势服从威布尔分布,通过最小二乘法进行参数估计,并运用相关系数法来进行检验,表明了该型数控铣齿机故障数据服从威布尔分布。

2、分析了数控铣齿机在不同时期发生故障的机理不同,提出采用两重威布尔分布模型对数控铣齿机的故障数据进行分析。通过对故障数据进行两重威布尔分布模型的参数图估计,辨识混合模型参数,采用解析法对模型进行拟合优度检验,利用优选后的分布模型确定可靠性评价指标。

3、采用故障主次图和故障比重比分析方法对 SKXC2000 型数控铣齿机故障进行综合分析。在传统故障主次图分析的基础上,考虑到数控铣齿机各子系统在可靠性分配中的不同要求,将故障比重比引入到故障分析中,准确地反映各系统可靠性与其指标之间的差距,使故障主次图与故障比重比分析方法有机结合,全面、直接地确定数控铣齿机故障纠正的主攻方向,为数控铣齿机可靠性改进设计奠定了基础。

4、提出了 SKXC2000 型数控铣齿机可靠性增长措施的具体内容及保证措施。结合数控铣齿机故障分析中所暴露的薄弱环节及故障产生的原因,提出了相对的可靠性改进措施;从关键工艺的制造和装配方面提出了可靠性增长关键工序的保

证措施, 关键配套外购件的优选措施以及建立早期故障试验制度, 确保数控铣齿机整体性能得以改善。

**关键词:** 数控铣齿机 两重威布尔 可靠性评价体系 可靠性设计

## ABSTRACT

NC Gear Milling Machine is a dedicated high-performance CNC machine tool for a milling process. Currently the level of domestic products is lower than that of the similar products overseas and cannot compete with them. Therefore, it is important to improve the reliability of NC Gear Milling Machine toward the direction of its high-speed, high efficiency, high precision and high reliability for increasing the national prestige, enhancing competitive ability in the international market.

In this paper, this work took Nanjing University of Technology R & D SKXC2000 own high-speed NC Gear Milling Machine as study objects and analyzed failure data . The purpose of reliability evaluation on the NC Gear Milling Machine is to improve product reliability; through failure analysis to identify the impact of its site or the reliability of the key weak link in the reliability of the corresponding growth in the development of strategies, from the design, manufacture, use, etc. to ensure the improvement of product reliability, the value of practical work.

The main research contents include the following:

1、The reliable model analysis is the basis for the evaluation of reliability. Basing on field test data of the SKXC2000 NC Gear Milling Machine, we analyzed the trend characteristics of failure probability density curve, subject to the assumption that the trend of Weibull distribution, through the least-squares parameter estimation method and the application of law to the correlation coefficient test showed that the NC Gear Milling Machine to obey Weibull distribution of failure data.

2、Analysis of the NC Gear Milling Machine at different times in different failure mechanism, the double Weibull distribution model used for NC Gear Milling Machine to analyze the fault data. Failure data of two-parameter Weibull distribution model map is estimated that the mixed model parameters identification using analytic method for model fit test, after the use of optimization to determine the reliability of the distribution model evaluation.

3、We proposed to use one comprehensive method to analyze the failure in NC

Gear Milling Machine. This method combined the primary and secondary chart of failure and the failure proportion to find weak points of reliability in the NC Gear Milling Machine directly. Based on the traditional failure analysis, we can find out the weak points and determine the main attack direction of failure correction and provide basis for the improvement of design and management in the reliability. the failure proportion was also used in the failure analysis, we fully considered various requests in subsystems of reliability in the NC Gear Milling Machine.

4、 According to the reasons of failure, we performed the reliability analysis of NC Gear Milling Machine. According to the reasons of failure and the weak points, reliability of the NC Gear Milling Machine can be improved in design with some proposed measures. The reliability of relative improvement, from the key manufacturing and assembly process proposed measures to ensure the reliability of growth, the key processes to ensure that measures to support outsourcing key parts of the optimization measures and the establishment of an early fault test system to ensure that NC Gear Milling Machine to improve overall performance.

**Keywords:** NC Gear Milling Machine; double mixed Weibull distribution; Reliability; Evaluation system

目 录

摘 要 .....	I
ABSTRACT .....	III
<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 论文研究的背景 .....	1
1.2 可靠性研究的发展现状 .....	2
1.2.1 国外可靠性研究概况 .....	2
1.2.2 国内可靠性研究概况 .....	4
1.3 存在的问题 .....	5
1.4 本文研究的内容 .....	6
<b>第 2 章 基于单威布尔分布的数控铣齿机可靠性评价</b> .....	7
2.1 数控铣齿机简介 .....	8
2.2 现场数据收集及预处理 .....	9
2.2.1 现场数据收集 .....	9
2.2.2 数据预处理 .....	10
2.3 故障间隔时间概率密度的观测值 .....	11
2.4 故障间隔时间分布模型的拟合检验 .....	13
2.4.1 单威布尔分布概述 .....	13
2.4.2 单威布尔分布的参数估计 .....	14
2.4.3 威布尔分布的假设检验 .....	17
2.5 本章小结 .....	20
<b>第 3 章 基于两重威布尔的数控铣齿机可靠性评价</b> .....	21
3.1 两重威布尔混合模型概述 .....	21
3.2 混合模型的参数图估计 .....	22
3.2.1 根据数据点拟合曲线 .....	22
3.2.2 估计参数 .....	26
3.3 拟合优度检验 .....	27

---

3.4 数控铣齿机可靠性评价 .....	29
3.5 本章小结 .....	30
<b>第4章 基于可靠性的数控铣齿机故障综合分析 .....</b>	<b>31</b>
4.1 数控铣齿机故障数据库系统 .....	31
4.2 数控铣齿机故障主次图分析 .....	34
4.3 数控铣齿机故障比重比分析 .....	35
4.3.1 故障比重比概述 .....	35
4.3.2 故障比重比图 .....	37
4.4 数控铣齿机两种分析结果对比 .....	39
4.5 本章小结 .....	41
<b>第5章 数控铣齿机可靠性增长措施 .....</b>	<b>42</b>
5.1 数控铣齿机可靠性改进措施 .....	42
5.1.1 高故障系统的改进措施 .....	42
5.1.2 低故障系统的完善措施 .....	45
5.2 数控铣齿机工艺部分的保证措施 .....	47
5.3 数控铣齿机关键工序的保证措施 .....	48
5.3.1 机床关键工序采取重点控制 .....	48
5.3.2 机床装配过程的严格控制 .....	49
5.4 关键配套件、外购件的优选措施 .....	51
5.5 建立早期故障试验制度 .....	53
5.6 本章小结 .....	54
<b>第6章 结论与展望 .....</b>	<b>55</b>
6.1 结论 .....	55
6.2 展望 .....	56
<b>参考文献 .....</b>	<b>56</b>
<b>在读期间发表文章目录 .....</b>	<b>61</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>62</b>

# 第 1 章 绪论

## 1.1 论文研究的背景

随着制造业的迅速发展,我国已经成为数控机床的应用大户。目前,我国已启动数控机床重大专题任务项目,重点是航空航天、船舶、汽车和发电设备四大行业。《国家长期科学和技术发展规划纲要》要求所列专项重点任务项目技术指标要体现先进性和实用性的结合,技术参数总体达到了国际先进水平,部分指标国际领先。各专题项目实施完成后,将能够大大推动我国机床工业技术进步和产业升级<sup>[1-4]</sup>。

据统计,2007年国产数控机床市场占有率48%,特别是高档数控机床,国货所占百分比只有个位数。进口的高档数控机床,可靠性高,精度可以保持二十年左右不变。我国机床的技术指标如精度、速度等技术参数不是主要问题,与世界先进水平的根本差距在于机床的可靠性和精度保持性。为更多地占有国内和国际数控机床市场,我们就必须通过适时采取措施,不断提高国产数控机床的产量和质量,提升我国数控机床的综合竞争力,从而增强国产数控机床在国际市场上的占有率<sup>[5-6]</sup>。

数控成型铣齿机作为数控机床中技术含量较高的基础数控装备,其内在质量、可靠性、稳定性是保证机床正常而持久使用的基础,是构成产品市场竞争力的最重要的因素。目前,数控成型铣齿机主要依靠国外进口,究其原因是国产数控成型铣齿机的质量和可靠性等方面与世界先进水平相比仍有一定的差距。而用户选购数控成型铣齿机产品时,更多考虑的是产品使用和运行过程中的质量,也就是产品的可靠性。目前,国产数控加工中心的可靠性指标 MTBF 基本在 500~600 小时左右,数控成型铣齿机的 MTBF 已经达到 800~1000 小时,明显高于国产同类产品,但与国外同类产品还有差距。因此,进一步提高可靠性意识,深入分析机床可靠性现状,开发和应用高效的可靠性增长实用技术,减少与进口产品的差距,已经成为推进我国数控装备业发展的关键<sup>[7]</sup>。

本课题来源于 2007 年度高校科研成果产业化推进项目——“数控铣、滚齿复合机床的开发”(JH07-013),它属于国家科技部科技创新基金“先进制造技术”领域中重点支持的“面向行业的高性能专用数控工艺设备”的范畴,是我国未来 15

年力争突破的 16 个重大科技专项之一“高档数控机床与基础制造技术”的主要研究内容。据《2006 中国机床工具工业年鉴》：“十一五”期间，国内外市场需求的产品质量会有较大的提高，中高档数控机床将逐步成为市场需求的主流。

课题研究的目的是对数控成型铣齿机进行可靠性评价研究，进一步提高产品可靠性；通过故障分析找出影响其可靠性的关键部位或薄弱环节，制定相应的增长策略，从设计、制造、使用等方面提高产品的可靠性，推动我国机床工业技术进步和产业升级，具有实际的工程应用价值。

## 1.2 可靠性研究的发展现状

### 1.2.1 国外可靠性研究概况

可靠性工程学至今已在电子工业、航天与宇航工业及自动化工程等领域广泛应用。可以说，现代化技术、现代化工程系统、现代化生产的每一项实际成果都离不开可靠性技术。随着科学技术的迅速发展，可靠性要求已经成为产品的重要技术指标之一，并贯穿于整个产品的研制过程中<sup>[8-11]</sup>。第二次世界大战后期德国首先定量的表达了产品的可靠性，从上世纪 50 年代开始，定量的可靠性才得到广泛的应用，可靠性才被系统的加以研究。美国可靠性研究始于第二次世界大战，初期应用于电子管，应用于机械方面始于上世纪 60 年代初。日本于 1956 年由美国引进的可靠性技术，并将其应用到民用，带来了巨大的经济效益。前苏联于 50 年代就开始了可靠性理论及应用的研究。60 年代以来，空间科学和宇航技术的发展提高了可靠性的研究水平，扩展了其研究范围。对可靠性的研究，已经由电子、航空、宇航、核能等尖端工业部门扩展到电机与电力系统、机械、动力、土木等一般产业部门，扩展到工业产品的各个领域。产品的可靠性，已经成为产品质量的关键指标<sup>[12-13]</sup>。

机床可靠性技术源于前苏联<sup>[14]</sup>。前苏联的学者在参数故障模型、工艺可靠性及可靠性预测等方面对机床可靠性进行了专门的研究；欧美、日本等工业发达国家对数控机床可靠性的研究始于上世纪 80 年代，主要是从数控机床的现场可靠性信息采集入手，建立可靠性信息数据库，开发可靠性评价和故障分析软件，对现场采集的故障信息进行分析和处理，找出故障的分布规律和薄弱环节<sup>[15-16]</sup>。日本新泻大学的藤井义也教授等对 45 台卧式加工中心和 25 台立式加工中心在日

本的机床用户进行了现场跟踪,他们将加工中心分为数控装置、机床本体及附属装置三大类进行分析,并在《机械技术》期刊上公布了考核结果。结果表明日本卧式加工中心的平均故障间隔时间 MTBF 为 700 小时,立式加工中心 MTBF 为 824 小时<sup>[17]</sup>,从记录结果可以看出,机床本体故障占一半,是数控机床可靠性的薄弱环节;英国布拉德福大学 Keller A.Z 等人提出了采用模糊理论进行故障分析与评价的方法,使模糊的不确定性问题得到量化处理<sup>[18-19]</sup>;英国伯明翰大学的研究人员深入到机床用户,对在英国和土耳其使用的 35 台数控机床,进行现场跟踪考核,通过调查表和亲临现场获得故障信息,并在可靠性领域的国际权威杂志上公布了研究结果:数控机床产品整机的故障时间规律服从形状参数为 0.8~1.07 的威布尔分布,呈现恒定风险故障特征,说明产品运行在偶然故障期,其中 CNC 系统服从尺度参数为 233-383 小时的威布尔分布,机械系统服从尺度参数为 208~228 小时的威布尔分布<sup>[20-21]</sup>。此项研究以现场故障数据为基础,为数控机床可靠性评价提供了理论依据;德国作为工业发达的国家之一,数控机床厂商非常重视产品售后的故障信息反馈和可靠性分析,在产品制造、装配、检验的全过程都有质量和可靠性保障体系<sup>[22-23]</sup>。

近年来,许多文献表明世界各国对数控机床的可靠性研究工作越来越重视,在故障分析、可靠性评价、可靠性设计与管理等方面提出了新的理论和方法,推动了可靠性研究工作的快速发展,同时加速了数控机床向着更开放、更协调、更智能、更可靠的方向发展的步伐<sup>[24-25]</sup>。

现今,国外还把对产品可靠性的研究工作提高到节约资源和能源的高度来认识。在可靠性方面,国外数控装置、伺服系统的 MTBF 值已表现出非常高的可靠性。

在国际上早在 1995 年对传统的可靠性定义提出了质疑,可靠性通常被定义为:“产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力”或定义为:“在规定的条件下和规定时间内所允许的故障数”。这就认为随机故障是不可避免的,也是可以接受的。在欧洲开始用无维修使用期(MFOP)取代原先的 MTBF,故障率浴盆曲线分布规律也就被打破,摒弃了随机失效无法避免的观念。因此,当前国际上兴起的在可靠工程中推行失效物理方法的新潮流,设计出不存在随机失效的产品并非没有可能。同时,从故障修理转换到计划预防维修。这就需要产

品研发设计人员必须清楚产品将会怎样发生故障，一般何时发生故障<sup>[26]</sup>。

在可靠性试验方法方面，国外已经经历了现场试验、环境模拟试验、环境应力激发试验以及目前正在兴起的可靠性强化试验。

### 1.2.2 国内可靠性研究概况

我国从 80 年代末开始进行数控机床领域的可靠性研究，90 年代以来，数控机床可靠性的基础研究工作被列入国家重点科技攻关项目。吉林大学数控装备可行性工程研究所是国内开展数控机床可靠性研究最早的单位，在“九五”、“十五”国家重点科技攻关项目和国家“863”项目中，就数控机床可靠性问题进行了较为全面深入的研究，并取得了阶段性成果，使国产数控机床的可靠性从水平有了很大提高<sup>[27]</sup>。

近几年，对数控机床可靠性的研究范围越来越广。其中吉林大学数控机床可行性工程研究所针对数控组合机床样本数据少的情况，研究出适合小样本的数控机床可靠性研究方法；对数控系统的硬件和软件的故障及可靠性设计问题进行研究，并提出了数控系统的可靠性增长技术<sup>[28]</sup>；将灰色与模糊理论应用到数控车床的可靠性研究中，并对首次故障时间分布模型进行了研究，针对可靠性模型选择中出现的同一批数据通过多种假设检验问题，提出一种基于灰关联分析的可靠性模型选择方法<sup>[29]</sup>；将数控机床可靠性研究工作与网络联系起来，开发了可靠性智能网络信息系统，并建立了可靠性异质数据库共享集成模型等。这些研究充分利用了先进技术、理论、方法和手段，推动了可靠性研究工作的进一步发展<sup>[30]</sup>。随着国内制造业的快速发展，企业对可靠性工程技术的关注程度悄然上升。在未来的几年里，国家将花费大量的资金来进行重大和关键产品的寿命和可靠性预测技术的研究，并将出台更多的标准和规范来约束和强制要求企业提高产品的可靠性和质量。在未来的几年内，对可靠性工程技术的关注将继续升温，各行业领域将传来更多的信息。

### 1.3 存在的问题

#### (1) 故障时间分布模型分析有待进一步拓展

国内外对数控机床故障数据进行可靠性分析时,大多采用指数分布、威布尔分布等几种简单模型。然而,对于数控机床特别是数控成型铣齿机这样具有多个子系统的复杂系统,它的故障时间是一个不确定的随机变量,特别是在不同的考核试验期内所发生的故障模式和机理不尽相同,仅采用上述模型往往不够恰当。因此应寻求一种能够同时反映不同故障时期不同故障机理的故障时间分布模型,可以更好地为可靠性数据分析提供依据。

#### (2) 故障分析方法有待进一步改进

在可靠性研究中,主要通过采用故障模式影响及危害性分析查找产品的薄弱环节,并把分析结果反馈给产品的设计、制造及使用单位,以便提高产品的可靠性。但它的不足之处是:

1) 故障分析只考虑了故障模式的严重程度和故障发生的概率。为了使分析结果能更全面、更合理地反映故障的特性和机理,对数控机床的故障分析方法也应进行改进和创新。

2) 对于一些不确定性的故障信息无法处理。应对现有研究方法进行改进,借鉴其他学科的相关理论知识,研究一种定量与定性相结合的分析方法。

## 1.4 本文研究的内容

### (1) 数控铣齿机故障时间分布模型研究及可靠性评价

为了评价数控铣齿机的可靠性,首先对其故障数据进行统计分析,确定分布模型,然后根据所确定的分布模型计算可靠性评价指标,最后评价可靠性水平。数控铣齿机的故障是多种失效原因或失效机理的共同作用下产生的,其中突发性故障和磨耗性故障对应于分布模型的不同特征寿命和形状参数。而通常采用的简单故障时间分布模型只含有一个特征寿命和一个形状参数,分析结果具有一定的片面性。

针对这种情况,本文提出采用两重威布尔分布混合模型对数控成型铣齿机的故障数据进行故障时间模型分析。首先对故障数据分别进行服从单威布尔分布模型和两重威布尔混合模型分析,然后通过图形的拟合优度检验,利用优选后的分布模型确定可靠性评价指标,最后进行数控铣齿机可靠性评价。

### (2) 数控铣齿机故障综合分析

通过对 SKXC2000 型数控铣齿机的现场故障数据进行统计分析,确定其故障薄弱环节。为了提高整机的可靠性,从实际出发,运用故障主次图分析方法和故障比重比分析方法,从不同的角度对数控铣齿机的故障进行分析,将分析结果进行综合排序,得出综合分析结果,确定数控铣齿机可靠性改进的主攻方向。

### (3) 数控铣齿机可靠性改进措施

通过对 SKXC2000 型数控铣齿机的现场故障数据进行统计分析,得出该型数控铣齿机可靠性的最薄弱环节。为了提高整机的可靠性,针对各可靠性薄弱环节提出相应改进措施。

## 第 2 章 基于单威布尔分布的数控铣齿机可靠性评价

机械产品可靠性是衡量机械产品质量的一个重要指标。机械产品的可靠性评价是基于机械产品可靠性模型进行的。对于 SKXC2000 型数控铣齿机的可靠性分析,是基于现场采集的故障数据进行的。首先确定故障数据的分布模型,然后根据故障数据的分布模型选定可靠性分布模型,进行可靠性评价的过程。可靠性分布模型的选定直接影响到可靠性评价结果的合理性。

齿轮制造业贯穿于航空、船舶、车辆、工程和运输机械、机床等数十种行业中。目前,制齿方法主要有滚齿、插齿、剃齿、磨齿、铣齿及珩齿等。铣齿技术发展迅速,它以高速、高效著称,现已逐渐成为广泛采用的加工方式。铣齿加工是一种用单齿或多齿刀具进行的断续切削。铣刀安装在旋转的主轴上,工件安装在工作台上,铣刀作直线运动趋近工件从而实现切削,工件由回转台进行分度。

SKXC2000 型数控高速铣齿机是南京工业大学自行研发的机电一体化产品,目前已经形成产业化,广泛应用于风电、工程机械、建筑机械行业中回转类零件的数控加工,成效显著,受到企业好评。其外形如图 2-1 所示。

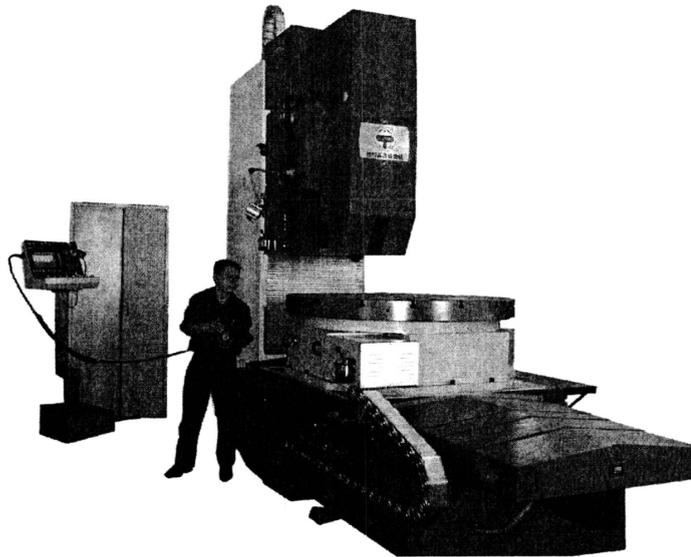


图2-1 SKXC2000数控高速铣齿机

Fig.2-1 SKXC2000 NC high-speed gear milling machine

## 2.1 数控铣齿机简介

数控铣齿机是一种用于铣齿加工的专用机床，结构如图 2-2 所示。该机床属四轴机床，立柱架装在床身上，通过 X 轴丝杠牵引做水平运动；主轴箱随托板安装在立柱侧面，由配重块平衡主轴箱重力，减轻 Y 轴伺服电机的受力，通过 Y 轴丝杠牵引做垂直运动；主轴箱由大功率交流伺服电机驱动，经四级减速将力矩传递给输出轴；铣刀安装在主轴箱的输出轴上。工件安装在工作台上，铣刀作直线运动趋近工件从而实现切削，工件由回转台进行分度。

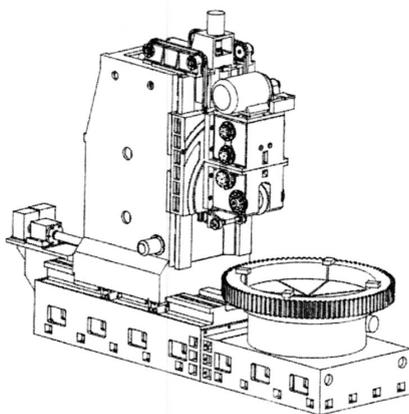


图2-2 SKXC2000数控铣齿机结构图

Fig.2-2 Construction drawing for SKXC2000 NC high-speed gear milling machine

数控齿轮铣削机床首先在美国、瑞士和德国发展并应用。国内以往大多采用滚齿机床加工齿轮，由于加工效率低下无法满足高效加工的要求。近几年才逐渐开始使用齿轮铣削技术，大大提高齿轮加工效率、节约了生产成本。目前国内生产厂家中南京工业大学自主研发的数控高速铣齿机，已经完成了产品研发向产业化的过度，填补了国内空白。我国厂家生产的数控铣齿机床配备的数控系统各不相同，目前在我国应用比较广泛的数控系统有 FANUC 公司和 SIEMENS 公司的产品。

随着科学技术的发展，特别是以下几种技术给铣齿技术注入了新的生机：

- (1) 数控技术的发展可以满足铣齿所要求的各种复杂运动；
- (2) 测量技术的发展可以满足机床的快速和准确分度及插补加工要求；
- (3) 高速铣齿加工技术提高了齿轮加工效率。

数控高速铣齿机床正是在这种背景下应运而生，它能以最经济的价格获得最

大的效益。数控高速铣齿机床主要由主轴系统、液压系统、进给系统、润滑系统、电气系统、伺服单元、排屑系统等部分组成，它的主传动是由大功率交流主轴电机通过同步带和三级齿轮副传动，主轴的转速范围为 60~150r/min。采用 PLC 功能模块对主轴最大承受力矩进行监控，当由于刀片变钝引起的力矩过大时自动停止进给，有效保护刀盘不受破坏；进给系统包括 X 向、Z 向的直线进给以及回转工作台的回转进给，实现四轴三联动加工。水平进给直线运动与垂直进给直线运动通过两个方向的交流伺服电机、行星减速器、滚珠丝杠与拖板或立柱联接来实现；回转工作台的运动由交流伺服电机经齿轮副、行星减速器和蜗轮蜗杆副来实现。

SKXC2000 型数控高速铣齿机是针对大模数、大直径齿轮所开发，当铣刀直径为 400mm 时，加工的最小、最大内齿轮直径分别为 880mm、3000mm，最小、最大外齿轮直径分别为 200mm、2500mm，加装辅助工作台后的加工直径可以增加。

## 2.2 现场数据收集及预处理

本文以 SKXC2000 型数控高速铣齿机为研究对象。故障数据来源于该系列 5 台数控铣齿机在 2 个数控机床使用单位的现场故障数据。

可靠性数据是指在各项可靠性工作及活动中所产生的描述产品可靠性水平及状况的各种数据，它们可以是数字、图表、符号、文字和曲线等形式。收集可靠性数据是为了在产品寿命周期内有效地利用数据，为改进产品的设计、生产提供信息；为管理提供决策依据；为提高产品的可靠性服务。

可靠性数据来源于产品寿命周期各阶段的一切可靠性活动，所以，可靠性数据的来源贯穿于产品设计、制造、试验、使用、维护的整个过程。

### 2.2.1 现场数据收集

总的来说，可靠性数据主要从两方面得到，一是从实验室进行可靠性试验中得到（试验数据）；另一方面从产品实际使用现场得到（现场数据）。试验数据和现场数据通常来自不同的寿命阶段。现场数据只能在产品投入使用后得到，而试验数据主要在产品研制阶段和生产阶段获取。本课题以数控高速铣齿机现场数据

为研究对象。现场数据反映了产品实际使用环境和维护条件下的情况，比实验室的模拟条件更代表了产品的真实情况。

现场数据的收集受到各方面因素的影响，很难做到面面俱到，根据需求分析应选择重点产品和地区作为数据收集点。在进行数据收集以前必须进行需求分析，明确数据收集的内容和目的。根据需求制定所需收集内容的统一规范化的表格，这将便于计算机处理，也便于同部门内部流通，有利于提高工作效率。现场数据的收集中，由于各种因素的影响，数据丢失现象严重，造成数据不完整和不连续，影响了对数据分析。在收集数据时，应对这些情况进行了解，以便对分析结果的修正或作为对评估方法进行研究时的依据。

### 2.2.2 数据预处理

根据该系列5台数控铣齿机在2个数控机床使用单位的现场故障数据，从开始使用起6个月的考核时间内所收集到样本故障数据，见表2-1。该实验属于有替换定时截尾试验，截尾时间为4000小时。

表2-1 试验样本故障数据表  
Table 2-1 Test sample failure data table

机床编号	故障起始时间	故障终止时间	故障现象
A-01	2008-2-9 20:20	2008-2-6 20:00	轴C静止误差监控
A-01	2008-2-12 21:30	2008-2-9 11:00	润滑油泵不供油
A-01	2008-2-18 14:00	2008-2-18 16:00	轴Z驱动报警
A-01	2008-2-20 10:00	2008-2-20 11:00	主轴油路不供油
A-01	2008-3-5 13:20	2008-3-6 15:00	工作台放松不起作用
A-01	2008-4-3 10:10	2008-4-4 0:00	液压钳漏油
A-01	2008-5-5 13:00	2008-5-10 0:00	主轴箱振动声音大
B-01	2008-2-14 18:00	2008-2-13 16:00	X轴丝杠定位不准
B-01	2008-2-18 13:30	2008-2-18 17:00	X向锁紧油缸不松开
B-01	2008-2-23 9:00	2008-2-23 16:00	Z轴丝杠间隙
B-01	2008-3-13 13:40	2008-3-13 17:00	主轴箱发热
B-01	2008-3-29 0:00	2008-3-29 0:00	润滑不启动
B-01	2008-4-1 15:20	2008-4-3 17:00	主轴油路不供油
B-01	2008-6-15 0:00	2008-6-16 0:20	主轴箱振动声音大
B-02	2008-2-5 8:10	2008-2-5 16:00	轴C静止误差监控
B-02	2008-2-14 8:30	2008-2-8 15:00	X轴丝杠间隙
B-02	2008-2-17 9:00	2008-2-19 10:00	液压站不稳定

机床编号	故障起始时间	故障终止时间	故障现象
B-02	2008-2-24 8:20	2008-2-24 10:00	配重链条磨损
B-02	2008-3-1 11:00	2008-3-1 16:00	防尘罩损坏
B-02	2008-4-16 7:30	2008-4-17 17:00	主轴油路不供油
B-02	2008-5-19 8:00	2008-5-20 11:00	主轴箱齿轮损坏
B-03	2008-2-12 9:40	2008-2-8 8:00	X 轴丝杠间隙
B-03	2008-2-15 4:00	2008-2-16 20:00	工作台放松不起作用
B-03	2008-2-17 21:20	2008-2-18 22:00	配重链条磨损
B-03	2008-3-4 18:30	2008-3-4 20:00	X 轴回参考点不准
B-03	2008-3-5 9:00	2008-3-5 11:00	液压钳漏油
B-03	2008-3-15 10:00	2008-3-15 20:00	液压站不稳定
B-03	2008-4-21 14:20	2008-4-21 15:00	主轴油路不供油
B-04	2008-2-8 7:00	2008-2-5 15:00	轴 Z 驱动报警
B-04	2008-2-10 23:00	2008-2-7 20:00	轴 C 静止误差监控
B-04	2008-3-4 13:00	2008-3-4 17:00	主轴箱振动声音大
B-04	2008-3-9 18:20	2008-3-9 20:00	伺服电机损坏
B-04	2008-3-16 14:00	2008-3-16 18:00	液压站不稳定
B-04	2008-4-23 7:30	2008-4-25 9:00	主轴油路不供油
B-04	2008-7-6 15:00	2008-7-8 20:00	主轴箱齿轮损坏

### 2.3 故障间隔时间概率密度的观测值

由概率论可知，正态分布和对数正态分布的概率密度函数曲线呈单峰形，指数分布的概率密度函数曲线呈单调下降形，而威布尔分布的概率密度函数曲线根据其形状参数的不同或呈单峰形或呈单调下降形<sup>[32-33]</sup>。由此可知，根据由观测值所拟合出的曲线形状可初步判断出某一随机变量服从何种分布。

下面由数控铣齿机现场试验故障间隔时间的观测值来拟合其概率密度函数。将故障间隔时间的观测值  $t \in [20, 3723]$  分为 15 组<sup>[34-35]</sup>，得到数控铣齿机故障频率表，如表 2-2 所示。

以每组时间的中值为横坐标，每组的概率密度的观测值  $\hat{f}(t)$  为纵坐标， $\hat{f}(t)$  的计算如下：

$$\hat{f}(t) = \frac{n_i}{n\Delta t_i} \quad (2-1)$$

式中:  $n_i$ —每组故障间隔时间中的故障频数;

$n$ —早期故障总频数, 本试验为 35 次;

$\Delta t_i$ —组距, 为 246.9 h。

表2-2 数控铣齿机故障频率

Table 2-2 NC high-speed gear milling machine failure frequency

组号	区间上	区间下	组中值	频数	频率	累计频率
1	20	266.9	143.45	9	0.2571	0.2571
2	266.9	513.8	390.35	7	0.2000	0.4571
3	513.8	760.7	637.25	5	0.1429	0.6000
4	760.7	1007.6	884.15	4	0.1143	0.7143
5	1007.6	1254.5	1131.05	0	0.0000	0.7143
6	1254.5	1501.4	1377.95	3	0.0857	0.8000
7	1501.4	1748.3	1624.85	1	0.0286	0.8286
8	1748.3	1995.2	1871.75	2	0.0571	0.8857
9	1995.2	2242.1	2118.65	1	0.0286	0.9143
10	2242.1	2489	2365.55	0	0.0000	0.9143
11	2489	2735.9	2612.45	1	0.0286	0.9429
12	2735.9	2982.8	2859.35	0	0.0000	0.9429
13	2982.8	3229.7	3106.25	1	0.0286	0.9714
14	3229.7	3476.6	3353.15	0	0.0000	0.9714
15	3476.6	3723.5	3600.05	1	0.0286	1.0000

由此拟合出的概率密度如图 2-3 所示。

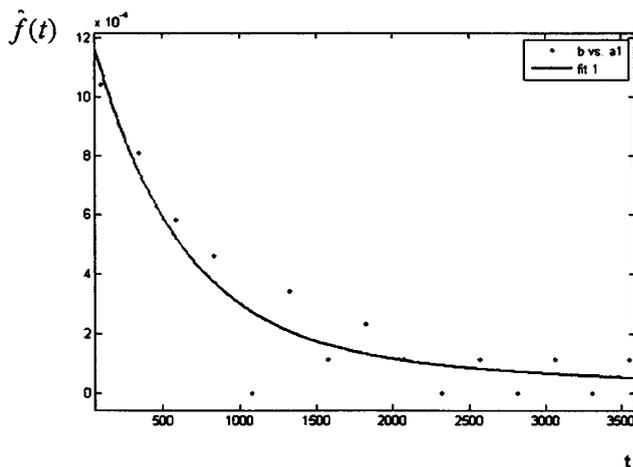


图2-3 故障概率密度图

Figure 2-3 Failure probability density map

由图可知, 故障间隔时间的概率密度曲线呈单调下降趋势, 而且下降到一定时间后趋于平稳。可见, 该数控铣齿机故障间隔时间所服从的分布不会是正态分布或对数正态分布, 而可能是指数分布或威布尔分布。

## 2.4 故障间隔时间分布模型的拟合检验

本文假设数控铣齿机故障间隔时间服从威布尔分布, 通过最小二乘法进行参数估计, 并运用相关系数法来检验威布尔分布, 从而确定该数控铣齿机故障间隔时间的分布规律。

### 2.4.1 单威布尔分布概述

单威布尔分布是在机械强度可靠性分析的计算中经常使用的一种分布形式, 是瑞典的科学家威布尔在研究链强度时提出的一种概率分布函数。

概率分布函数为

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\frac{(t-\gamma)^m}{t_0}\right], \gamma \leq t \leq \infty \quad (2-2)$$

概率密度函数为

$$f(t) = \frac{m}{t_0} (t-\gamma)^{m-1} \exp\left[-\frac{(t-\gamma)^m}{t_0}\right], \gamma \leq t \leq \infty \quad (2-3)$$

当设  $t_0 = \eta^m$  时, 上述二式可写成

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m\right], \gamma \leq t \leq \infty \quad (2-4)$$

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m\right], \gamma \leq t \leq \infty \quad (2-5)$$

式中:  $m$  为形状参数;  $t_0$  为尺度参数;  $\gamma$  为位置参数。当  $t_0$  用  $\eta^m$  代替时,  $\eta$  称为特征寿命或真尺寸参数。根据形状参数  $m$  的数值可以区分产品不同的故障类型。当  $m > 1$  故障率随时间的变化为递增型; 当  $m = 1$  为恒定型; 当  $m < 1$  为递减型。

尺寸参数  $t_0$  起到放大或缩小坐标尺度的作用, 此参数往往与工作条件负载大小有关, 负载大的相应尺度参数要小; 反之亦然。 $\gamma$  的变化影响概率密度曲线的

平移位置, 产品在  $t = \gamma$  之前不发生故障, 在  $t = \gamma$  以后发生故障。

在实际应用中, 往往假设在  $\gamma = 0$  时产品便发生故障。当  $\gamma = 0$  时, 称其为两参数威布尔分布。本文以两参数威布尔分布来研究故障间隔时间的分布规律。

### 2.4.2 单威布尔分布的参数估计

分布类型的参数估计方法可分为图估计法、矩法、极大似然法及最小二乘法等。对于威布尔分布、极值分布等不含积分的累积分布函数采用最小二乘法进行参数估计<sup>[36]</sup>。

假设现场试验中获得  $n$  对试验数据  $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 、...  $(x_n, y_n)$ , 将它们标在直角坐标纸上, 从图形上看, 数据点大体上散布在某条直线的周围, 变量间近似地呈现为线性关系。我们可以首先做出一条直线, 设直线方程为

$$\hat{y} = a + bx \quad (2-6)$$

式中,  $b$  参数为该直线的斜率,  $a$  为截矩。对于最小二乘法,  $a$ 、 $b$  应使

$$E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 = \text{最小值。要使 } E \text{ 取最小值, 用微分求极值的原理,}$$

对上式  $a$ 、 $b$  分别偏微分, 并令其等于 0, 即

$$\frac{\partial E}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) = 0 \quad (2-7)$$

$$\frac{\partial E}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)x_i = 0 \quad (2-8)$$

联立求解上述方程得

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x} \cdot \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2-9)$$

$$\hat{a} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x} \quad (2-10)$$

$$\text{式中, } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$$

代入上述直线方程中, 即得到  $y$  对  $x$  的一元线性回归方程

$$\hat{y} = \hat{a} + \hat{b}x \quad (2-11)$$

首先将试验所得到的故障间隔时间数据按由小到大的次序排列, 并取中位秩作为各试验点的  $y$  值。然后假设一种分布类型, 进行变换后, 即可用上式进行计算, 估计得系数  $a$ ,  $b$  后, 即可进行原函数的参数估计。

对于两参数威布尔分布, 其累积分布函数为

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \quad (2-12)$$

对上式两端进行变换, 并取自然对数得

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right] = m(\ln t - \ln \eta) \quad (2-13)$$

令  $y = \ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right]$ ,  $x = \ln t$ ,  $\hat{b} = m$ ,  $\hat{a} = -m \ln \eta$ , 则

$$\hat{y} = \hat{a} + \hat{b}x \quad (2-14)$$

在计算之前, 需先估计  $F(t_i)$  的值。一般用中位值估计  $F(t_i)$ , 即

$$\hat{F}(t_i) \approx \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad (2-15)$$

通过最小二乘法对威布尔分布的参数进行估计。为了便于处理, 将数控铣齿机故障试验数据整理为表 2-3 所示。

表2-3 故障试验数据整理表  
Table 2-3 Fault test data collated in table

序号	时间 t	x	F(t)	y	x <sup>2</sup>	y <sup>2</sup>	x*y
1	24.16	3.1847	0.0198	-3.9134	10.1423	15.3148	-12.4631
2	71.00	4.2627	0.0480	-3.0116	18.1704	9.0696	-12.8374
3	110.16	4.7019	0.0763	-2.5341	22.1082	6.4214	-11.9150
4	160.00	5.0752	0.1045	-2.2037	25.7574	4.8562	-11.1841
5	190.30	5.2486	0.1328	-1.9488	27.5478	3.7977	-10.2283
6	200.00	5.2983	0.1610	-1.7397	28.0722	3.0267	-9.2177
7	240.50	5.4827	0.1893	-1.5615	30.0602	2.4384	-8.5614
8	250.00	5.5215	0.2175	-1.4054	30.4865	1.9750	-7.7596
9	260.00	5.5607	0.2458	-1.2657	30.9212	1.6019	-7.0380
10	313.00	5.7462	0.2740	-1.1387	33.0189	1.2967	-6.5435

11	325.16	5.7843	0.3023	-1.0219	33.4583	1.0443	-5.9110
12	341.50	5.8333	0.3305	-0.9132	34.0279	0.8339	-5.3270
13	342.00	5.8348	0.3588	-0.8111	34.0450	0.6580	-4.7329
14	386.00	5.9558	0.3870	-0.7146	35.4720	0.5106	-4.2559
15	457.00	6.1247	0.4153	-0.6225	37.5117	0.3876	-3.8129
16	480.30	6.1744	0.4435	-0.5343	38.1234	0.2855	-3.2988
17	687.00	6.5323	0.4718	-0.4491	42.6714	0.2017	-2.9338
18	671.00	6.5088	0.5000	-0.3665	42.3641	0.1343	-2.3855
19	706.50	6.5603	0.5282	-0.2859	43.0378	0.0818	-1.8759
20	721.00	6.5806	0.5565	-0.2070	43.3048	0.0428	-1.3619
21	725.30	6.5866	0.5847	-0.1291	43.3831	0.0167	-0.8505
22	826.30	6.7170	0.6130	-0.0520	45.1175	0.0027	-0.3494
23	917.60	6.8218	0.6412	0.0248	46.5364	0.0006	0.1692
24	962.00	6.8690	0.6695	0.1018	47.1834	0.0104	0.6990
25	990.00	6.8977	0.6977	0.1794	47.5783	0.0322	1.2373
26	1288.00	7.1608	0.7260	0.2582	51.2777	0.0667	1.8489
27	1375.30	7.2264	0.7542	0.3389	52.2212	0.1148	2.4490
28	1418.16	7.2571	0.7825	0.4223	52.6657	0.1784	3.0648
29	1734.30	7.4584	0.8107	0.5096	55.6271	0.2597	3.8007
30	1854.30	7.5253	0.8390	0.6023	56.6296	0.3627	4.5322
31	1895.50	7.5472	0.8672	0.7027	56.9608	0.4938	5.3033
32	2165.00	7.6802	0.8955	0.8146	58.9851	0.6637	6.2566
33	2496.00	7.8224	0.9237	0.9453	61.1906	0.8935	7.3942
34	3112.00	8.0430	0.9520	1.1106	64.6902	1.2334	8.9323
35	3631.00	8.1973	0.9802	1.3670	67.1951	1.8686	11.2053

根据上述计算公式，得

$$\bar{x} = 6.19, \quad \bar{y} = -0.556$$

$$\hat{b} = 0.9116, \quad \hat{a} = -6.1990$$

$$y = \hat{a} + \hat{b}x = -6.1990 + 0.9116x$$

$$\text{则: } m = \hat{b} = 0.9116, \quad \eta = \exp\left(-\frac{\hat{a}}{\hat{b}}\right) = 897.5$$

### 2.4.3 威布尔分布的假设检验

#### 1) 线性相关性检验

对于任一组试验数据,按照上面介绍的公式都能建立线性回归方程,但变量  $x$  与  $y$  之间是否真正存在线性相关的关系,这就是线性相关性检验问题。本文采用线性相关系数检验法。相关系数为

$$\hat{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2)(\sum_{i=1}^n y_i^2 - n\bar{y}^2)}} \quad (2-16)$$

当  $|\hat{\rho}| > \rho_0$  时,则认为  $x$  与  $y$  线性相关,则说明该分布符合威布尔分布。

将值代入上式,得  $\hat{\rho} = 0.9911$ 。当显著性水平  $\alpha = 0.1$  时,相关系数起码值:

$$\rho_0 = 1.645 / \sqrt{(n-1)} = 0.282 \quad (2-17)$$

由于  $|\hat{\rho}| > \rho_0$ , 因此线性回归的效果是显著的,即认为数控高速铣齿机故障间隔时间服从威布尔分布。

#### 2) 分布的拟合优度检验

分布的检验是通过产品可靠性寿命试验获得统计数据来推断产品的寿命分布,推断的依据是拟合优度检验。拟合优度时观测值分布与先验的或拟合观测值的理论分布之间符合程度的度量。

在总体的分布函数完全未知或只知其形式、但不知其参数的情况,为了推断总体的某些性质,提出关于总体的假设。假设检验就是根据样本对所提出的假设做出判断:是接受,还是拒绝。

$K-S$  检验法适用于小样本的情况。 $K-S$  检验法是将  $n$  个试验数据按由小到大的次序排列,根据假设的分布,计算每个数据对应的  $F_0(t_i)$ , 将其与经验分布函数  $F_n(t_i)$  进行比较,其中差值的最大绝对值即检验统计量  $D_n$  的观察值。将  $D_n$  与临界值  $D_{n,\alpha}$  进行比较。满足下列条件,则接受原假设,否则拒绝原假设。

$$D_n = \sup_{-\infty < t < \infty} |F_n(t_i) - F_0(t_i)| = \max\{\delta_i\} \quad (2-18)$$

式中： $F_0(t_i)$ —原假设分布函数；

$F_n(t_i)$ —样本大小为  $n$  的经验分布函数；

$D_{n,\alpha}$ —临界值。

$$d_i = \max \left\{ \left| F_0(t_i) - \frac{i-0.3}{n+0.4} \right| \right\}, i=1,2,\dots,35, n=35 \quad (2-19)$$

假设故障间隔时间服从威布尔分布且  $F_0(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{897.5} \right)^{0.9116} \right]$ ，则检验结

果见表 2-4。

表2-4 分布拟合检验数据处理表  
Table 2-4 Test fitting the distribution of data-processing table

序号	故障时间 t	$F_0(t)$	$F_n(t)$	$D_n$
1	24.16	0.0364	0.0198	0.0166
2	71.00	0.0943	0.0480	0.0462
3	110.16	0.1374	0.0763	0.0611
4	159.00	0.1865	0.1045	0.0820
5	193.66	0.2189	0.1328	0.0862
6	205.50	0.2296	0.1610	0.0686
7	240.50	0.2600	0.1893	0.0707
8	250.00	0.2679	0.2175	0.0504
9	260.00	0.2762	0.2458	0.0304
10	313.00	0.3180	0.2740	0.0440
11	325.16	0.3272	0.3023	0.0249
12	341.50	0.3393	0.3305	0.0088
13	342.00	0.3396	0.3588	0.0191
14	386.00	0.3709	0.3870	0.0162
15	457.00	0.4175	0.4153	0.0023
16	480.33	0.4320	0.4435	0.0115
17	687.00	0.5433	0.4718	0.0716
18	671.00	0.5356	0.5000	0.0356
19	706.50	0.5525	0.5282	0.0242
20	721.00	0.5591	0.5565	0.0027
21	725.33	0.5611	0.5847	0.0236

序号	故障时间 t	$F_0(t)$	$F_n(t)$	$D_n$
22	826.33	0.6044	0.6130	0.0086
23	917.60	0.6395	0.6412	0.0017
24	962.00	0.6554	0.6695	0.0141
25	990.00	0.6650	0.6977	0.0328
26	1288.00	0.7509	0.7260	0.0249
27	1375.33	0.7714	0.7542	0.0171
28	1418.16	0.7807	0.7825	0.0017
29	1734.33	0.8385	0.8107	0.0277
30	1854.66	0.8560	0.8390	0.0170
31	1895.50	0.8615	0.8672	0.0057
32	2165.00	0.8926	0.8955	0.0028
33	2496.00	0.9212	0.9237	0.0025
34	3112.00	0.9552	0.9520	0.0033
35	3631.00	0.9720	0.9802	0.0082

由上表结果知， $D_n$ 的观察值为  $D_n = 0.0862$

取显著性水平  $\alpha = 0.10$ ，则由经验公式得：当  $n = 35$ ，查表  $D_{n,\alpha} = 0.202$ ，因此接收原假设，即认为该产品平均无故障工作时间服从威布尔分布。

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{897.5} \right)^{0.9116} \right] \quad (2-20)$$

## 2.5 本章小结

介绍了数控铣齿机的设计背景、机械结构特点以及应用情况。以 SKXC2000 型数控铣齿机为研究对象,进行现场故障数据的采集及预处理。通过故障间隔时间的概率密度曲线趋势特点,假设趋势服从威布尔分布。通过最小二乘法进行参数估计,并运用相关系数法进行检验,表明该型数控铣齿机故障间隔时间的分布规律服从威布尔分布。

### 第3章 基于两重威布尔的数控铣齿机可靠性评价

以往数控机床的可靠性分析都采用单威布尔分布作为故障模型,其特征寿命和形状参数都只有一个,因此分析结果反映的故障特征也只能是单一形式的。

数控高速铣齿机是集机、电、液、气于一体的复杂系统,其故障是在多种原因或机理的共同作用下产生的,在不同的使用时期所发生的故障特征不尽相同,所以故障数据分布散点图的曲线往往存在拐点,而单威布尔分布拟合图是一条没有拐点的光滑曲线,此时,用这样的曲线去拟合故障数据,在拐点处将会出现较大的误差<sup>[37-38]</sup>。

针对上述情况,本文拟采用两重威布尔分布混合模型进行分析研究。通过图形的拟合优度检验的分析进行模型优选,利用优选后的分布模型确定可靠性评价指标。

#### 3.1 两重威布尔混合模型概述

由于威布尔分布模型形状参数的变化,使其富有弹性,在工程实际中,它已被广泛应用于对大量的机械、电子元件的失效进行建模,故本文选用威布尔分布作为组成混合模型的基本模型。

混合分布属于同一种分布,但他们的参数值不同。设 $F_i(t)$ 是随机变量 $X_i$ 的累计分布函数,  $i=1,2,\dots,k$ 。于是一个 $k$ 重混合累积分布函数被定义为

$$F(t) = \sum_{i=1}^k P_i F_i(t) \quad 0 \leq P_i \leq 1 \text{ 且 } \sum_{i=1}^k P_i = 1 \quad (3-1)$$

通常称 $F_i(t)$ 为第 $i$ 个随机变量 $X_i$ 所属总体的累积分布函数,  $P_i$ 称为混合参数。

在生命周期内各零部件在不同时期内发生的故障分为突发性故障和磨耗性故障两大类:突发性故障,具有较短特征寿命,主要由装配缺陷和系统内部的固有缺陷造成;而磨耗性故障,具有最长特征寿命,主要由于长期使用磨耗造成的,这种情况适合于混合模型。

当 $k=2$ 时,称两重混合累积分布函数,函数表达式为:

$$F(t) = pF_1(t) + qF_2(t) \quad (3-2)$$

式中,  $t \geq 0, 0 \leq p \leq 1$  且  $p+q=1$ 。  $p$ 、 $q$  为比例参数,  $F_1(t)$  和  $F_2(t)$  为简单的两参数或者三参数的威布尔分布, 本章采用两参数的威布尔分布

令

$$F_1(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta_1}\right)^{m_1}\right], 0 \leq t \leq \infty \quad (3-3)$$

$$f_1(t) = \frac{m_1}{\eta_1} \left(\frac{t}{\eta_1}\right)^{m_1-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta_1}\right)^{m_1}\right], 0 \leq t \leq \infty \quad (3-4)$$

$$F_2(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta_2}\right)^{m_2}\right], 0 \leq t \leq \infty \quad (3-5)$$

$$f_2(t) = \frac{m_2}{\eta_2} \left(\frac{t}{\eta_2}\right)^{m_2-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta_2}\right)^{m_2}\right], 0 \leq t \leq \infty \quad (3-6)$$

其中:  $m_1$ 、 $m_2$  为形状参数,  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  为尺度参数<sup>[39-42]</sup>。

## 3.2 混合模型的参数图估计

概念纸方法是利用非直线方程的线性化, 将一些曲线方程经过坐标尺度变换以后在坐标系中变成一条直线。按分布函数的关系经过变换成了新的坐标, 印有新坐标的专用纸。本章采用的图估计法是在威布尔概率纸(Weibull Plotting Paper, 简称 WPP) 上进行的<sup>[43-45]</sup>。

### 3.2.1 根据数据点拟合曲线

在绘制 WPP 图之前先要对数据进行威布尔变换, 变换过程如下:

对于两参数威布尔分布, 其可靠性函数为

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \quad (3-7)$$

式中:  $t \geq 0$ ;  $m > 0$ ,  $m$  为形状参数;  $\eta > 0$ ,  $\eta$  为尺度参数。对上式两端进行变换, 并取自然对数得

$$\ln(-\ln(R(t))) = m \ln t - m \ln \eta \quad (3-8)$$

$$\text{令 } y = \ln(-\ln(R(t))), \quad x = \ln t \quad (3-9)$$

式 3-10 成为  $x - y$  坐标系下的一条直线

$$y = m(x - \ln \eta) \quad (3-10)$$

式 3-9 称为威布尔变换，它实质上完成了对威布尔模型的线性化。

设失效数据为： $t_1, t_2, \dots, t_n, (t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n)$ ，其可靠度可由下面中位秩估计公式给出

$$R(t) = 1 - \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (3-11)$$

这样就得到一个数组列

$$(t_1, R_1), (t_2, R_2), \dots, (t_n, R_n) \quad (3-12)$$

对数组列使用变换式 3-9 得到

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n) \quad (3-13)$$

所谓数据的 WPP 图就是上面数组列在  $x - y$  平面内的图形。对于该批数控铣齿机可靠度估计值及威布尔变换见下表 3-1。

表3-1 故障数据威布尔变换表  
Table 3-1 Weibull failure data conversion table

序号	故障时间 t	$F_n(t)$	$R_i$	x	y
1	24.16	0.0198	0.9802	3.1847	-3.9134
2	71.00	0.0480	0.9520	4.2627	-3.0116
3	110.16	0.0763	0.9237	4.7019	-2.5341
4	159.00	0.1045	0.8955	5.0689	-2.2037
5	193.66	0.1328	0.8672	5.2661	-1.9488
6	205.50	0.1610	0.8390	5.3254	-1.7397
7	240.50	0.1893	0.8107	5.4827	-1.5615
8	250.00	0.2175	0.7825	5.5215	-1.4054
9	260.00	0.2458	0.7542	5.5607	-1.2657
10	313.00	0.2740	0.7260	5.7462	-1.1387
11	325.16	0.3023	0.6977	5.7843	-1.0219
12	341.50	0.3305	0.6695	5.8333	-0.9132
13	342.00	0.3588	0.6412	5.8348	-0.8111
14	386.00	0.3870	0.6130	5.9558	-0.7146
15	457.00	0.4153	0.5847	6.1247	-0.6225

序号	故障时间 t	$F_n(t)$	$R_i$	x	y
16	480.33	0.4435	0.5565	6.1745	-0.5343
17	687.00	0.4718	0.5282	6.5323	-0.4491
18	671.00	0.5000	0.5000	6.5088	-0.3665
19	706.50	0.5282	0.4718	6.5603	-0.2859
20	721.00	0.5565	0.4435	6.5806	-0.2070
21	725.33	0.5847	0.4153	6.5866	-0.1291
22	826.33	0.6130	0.3870	6.7170	-0.0520
23	917.60	0.6412	0.3588	6.8218	0.0248
24	962.00	0.6695	0.3305	6.8690	0.1018
25	990.00	0.6977	0.3023	6.8977	0.1794
26	1288.00	0.7260	0.2740	7.1608	0.2582
27	1375.33	0.7542	0.2458	7.2264	0.3389
28	1418.16	0.7825	0.2175	7.2571	0.4223
29	1734.33	0.8107	0.1893	7.4584	0.5096
30	1854.66	0.8390	0.1610	7.5255	0.6023
31	1895.50	0.8672	0.1328	7.5472	0.7027
32	2165.00	0.8955	0.1045	7.6802	0.8146
33	2496.00	0.9237	0.0763	7.8224	0.9453
34	3112.00	0.9520	0.0480	8.0430	1.1106
35	3631.00	0.9802	0.0198	8.1973	1.3670

用表 3-1 中经过威布尔变换后的数据，在  $x-y$  坐标系下画出 WPP 图，如图 3-1 所示：

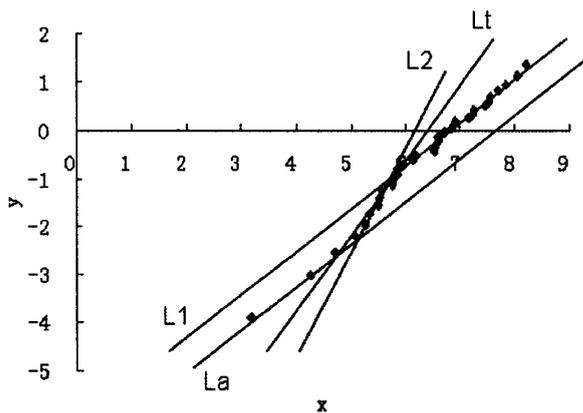


图3-1 数控铣齿机故障数据的WPP图

Figure 3-1 Fault NC high-speed gear milling machine WPP map data

由散点组成的 WPP 图,可以看出数据点并不是大致地分布在一条直线周围,所以用单一的威布尔分布去拟合该批数据是不合适的,应该用两重威布尔混合模型去拟合。

根据 WPP 图的形状和已知不同参数范围的 WPP 图相比较可知,它属于  $m_1 < m_2, \eta_1 < \eta_2$  的情况。通过 WPP 图上的数据点拟合一条光滑曲线,记这条曲线为 C。两重威布尔混合模型的可靠性函数是

$$R(t) = pR_1(t) + qR_2(t) = p \exp\left[-(t/\eta_1)^{m_1}\right] + q \exp\left[-(t/\eta_2)^{m_2}\right] \quad (3-14)$$

式中:  $t \geq 0, 0 \leq p \leq 1, p + q = 1$ 。

当  $m_1 \neq m_2$  时,不失一般性,假设  $m_1 < m_2$ 。当  $m_1 = m_2$  时,要求  $\eta_1 \neq \eta_2$ , 否则,模型将成为一个简单威布尔分布。因此这种情况下,假定  $\eta_1 > \eta_2$  [44]。

由式 3-9 得

$$y(x) = \ln\left(-\ln\left(R(e^x)\right)\right) \text{ 和 } x = \ln t \quad (3-15)$$

这样所谓的 WPP 图就是函数  $y(x)$  的图形。在式 3-15 中,当  $p=1$ ,  $R(t) = R_1(t)$ 。此时, C 成为一条直线

$$y = m_1(x - \ln \eta_1) \quad (3-16)$$

该直线记作  $L_1$ 。类似地,当  $p=0$ ,  $R(t) = R_2(t)$ 。这时 C 将成为另外一条直线

$$y = m_2(x - \ln \eta_2) \quad (3-17)$$

记这条直线为  $L_2$ 。这两种极端情况都使混合模型退化为简单威布尔模型。所以,我们限定  $0 < p < 1$ 。令点 I 是  $L_1$  和  $L_2$  的交点,  $x_I$  和  $y_I$  是点 A 的坐标,则由式 3-16 和 3-17 可得

$$x_I = \frac{m_1 \ln(\eta_1) - m_2 \ln(\eta_2)}{m_1 - m_2} \quad (3-18)$$

$$y_I = \frac{m_1 m_2}{m_1 - m_2} \ln\left(\frac{\eta_1}{\eta_2}\right) \quad (3-19)$$

### 3.2.2 估计参数

(1) 估计参数  $m_1, \eta_1, p, q$

将式 3-14 代入式 3-15 并简化得曲线 C 的表达式为

$$y = \beta_1 x + \ln \left[ \frac{(e^{\beta_1 x} / \eta_1^{\beta_1}) + (e^{\beta_2 x} / \eta_2^{\beta_2}) - \ln(p \exp(e^{\beta_2 x} / \eta_2^{\beta_2}) + q \exp(e^{\beta_1 x} / \eta_1^{\beta_1}))}{e^{\beta_1 x}} \right] \quad (3-20)$$

$$= \beta_1 x + \ln \left[ \eta_1^{-\beta_1} - e^{-\beta_1 x} \ln \left( p + q \exp \left( \frac{\eta_2^{\beta_2} e^{\beta_2 x} - \eta_1^{\beta_1} e^{\beta_2 x}}{\eta_1^{\beta_1} \eta_2^{\beta_2}} \right) \right) \right]$$

可以证明存在下面的关系

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} \left\{ e^{-\beta_1 x} \ln \left( p + q \exp \left( \frac{\eta_2^{\beta_2} e^{\beta_2 x} - \eta_1^{\beta_1} e^{\beta_2 x}}{\eta_1^{\beta_1} \eta_2^{\beta_2}} \right) \right) \right\} = q \eta_1^{-m_1} \quad (3-21)$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \left\{ e^{-\beta_1 x} \ln \left( p + q \exp \left( \frac{\eta_2^{\beta_2} e^{\beta_2 x} - \eta_1^{\beta_1} e^{\beta_2 x}}{\eta_1^{\beta_1} \eta_2^{\beta_2}} \right) \right) \right\} = 0 \quad (3-22)$$

所以 C 的两条渐近线分别为:

当  $x \rightarrow -\infty$  的渐近线  $L_\alpha$ , 其方程为

$$y = m_1 (x - \ln(\eta_1)) + \ln(p) \quad (3-23)$$

当  $x \rightarrow -\infty$  的渐近线  $L_1$ , 其方程为

$$y = m_1 (x - \ln(\eta_1)) \quad (3-24)$$

$L_1$  和  $L_\alpha$  相互平行, 其垂直距离为  $|\ln(p)|$ 。在 WPP 图 3-1 上画出两条渐近线  $L_1$  与  $L_\alpha$ , 渐进线的斜率即为  $m_1$ , 求得  $m_1 = 0.882$ 。由式 3-24 得在  $x$  轴上的截距为  $\ln(\eta_1)$ , 故从  $x$  轴上的截距为 6.8, 求得  $\eta_1 = 897.84$ 。由两条渐近线  $L_1$  与  $L_\alpha$  在  $y$  轴上的截距之差为  $|\ln(p)|$ , 由此关系可求得  $p = 0.562, q = 1 - p = 0.438$ 。

(2) 估计参数  $m_2, \eta_2$

对式 3-14 求导得

$$y'(x) = p m_1 s_1(x) + 1 m_2 s_2(x) \quad (3-25)$$

式中:  $s_i(x) = [R_i(e^x) \ln [R_i(e^x)]] / [R(e^x) \ln [R(e^x)]]$ ,  $i = 1, 2$

在渐进线  $L_1$  和曲线的交点即交点  $I$  处,  $R_1 = R_2$ , 因此  $s_1(x) = s_2(x)$ 。

$$y'(x) \Big|_{x=x_I} = \bar{m} = pm_1 + qm_2 \quad (3-26)$$

即  $y'(x) \Big|_{x=x_I} = \bar{m} = 0.562 * 0.882 + 0.438m_2$

在  $L_1$  与  $L_2$  交点  $I(0.564, -1.262)$  处, 由 *MATLAB* 软件对数据点先进行多项式拟合, 而后求出曲线  $C$  在  $I$  点的斜率即  $\bar{m} = 1.3345$ 。

再由式 3-26 可计算出  $m_2 = 1.915$ 。在交点  $I$  处画斜率为  $m_2$  的直线, 该直线即为  $L_2$ , 从它在  $x$  轴上的截距为  $\ln(\eta_2)$ , 求得  $\eta_2 = 454.8$ , 得到两重威布尔混合模型的参数的图估计值见表 3-2。

表3-2 图估计法求得的参数  
Table 3-2 Chart estimated parameters obtained

$p$	$m_1$	$\eta_1$	$q$	$m_2$	$\eta_2$
0.562	0.882	897.84	0.438	1.915	454.8

### 3.3 拟合优度检验

利用概率纸进行拟合图的比较, 虽然比较直观、简捷, 但不够精确, 没有说服力, 也不能给出定量的判断。因此还要进行解析法的拟合优度检验。拟合优度检验是在分布类型初选之后, 为了最终确定故障时间的分布类型而进行的检验, 是通过产品可靠性寿命试验获得的统计数据来推断产品的分布, 推断的依据是拟合优度检验。拟合优度检验是观察值的分布与拟合值理论分布之间符合程度的度量。

下面本文用解析检验法对混合模型进行拟合优度检验。

常用的解析检验法有皮尔逊  $\chi^2$  检验法、柯尔莫哥洛夫-斯米尔洛夫 (K-S) 检验法等<sup>[46]</sup>。对于两重威布尔分布混合模型我们依然采用 K-S 检验, 方法同单威布尔分布模型的检验过程。对单威布尔分布的检验结果见表 2-4。

$$F(t) = 0.562 \left[ 1 - \exp \left( - \left( \frac{t}{897.84} \right)^{0.882} \right) \right] + 0.438 \left[ 1 - \exp \left( - \left( \frac{t}{454.8} \right)^{1.915} \right) \right] \quad (3-32)$$

按照上述方法, 对该批数据进行处理, 其结果见表 3-3。

表3-3 拟合优度检验数据处理表  
Table 3-3 fit test data processing table

序号	故障时间 t	$F_x(t)$	$F_n(t)$	$D_n$
1	24.16	0.0238	0.0198	0.0040
2	71.00	0.0656	0.0480	0.0176
3	110.16	0.1018	0.0763	0.0255
4	159.00	0.1493	0.1045	0.0448
5	193.66	0.1845	0.1328	0.0517
6	205.50	0.1968	0.1610	0.0358
7	240.50	0.2336	0.1893	0.0444
8	250.00	0.2438	0.2175	0.0262
9	260.00	0.2545	0.2458	0.0087
10	313.00	0.3115	0.2740	0.0375
11	325.16	0.3246	0.3023	0.0223
12	341.50	0.3421	0.3305	0.0116
13	342.00	0.3427	0.3588	0.0161
14	386.00	0.3894	0.3870	0.0024
15	457.00	0.4618	0.4153	0.0466
16	480.33	0.4846	0.4435	0.0410
17	687.00	0.6529	0.4718	0.1811
18	671.00	0.6421	0.5000	0.1421
19	706.50	0.6654	0.5282	0.1372
20	721.00	0.6744	0.5565	0.1179
21	725.33	0.6770	0.5847	0.0923
22	826.33	0.7307	0.6130	0.1177
23	917.60	0.7683	0.6412	0.1270
24	962.00	0.7834	0.6695	0.1139
25	990.00	0.7921	0.6977	0.0944
26	1288.00	0.8555	0.7260	0.1295
27	1375.33	0.8678	0.7542	0.1136
28	1418.16	0.8733	0.7825	0.0908

序号	故障时间 t	$F_x(t)$	$F_n(t)$	$D_n$
29	1734.33	0.9059	0.8107	0.0951
30	1854.66	0.9156	0.8390	0.0766
31	1895.50	0.9187	0.8672	0.0514
32	2165.00	0.9361	0.8955	0.0406
33	2496.00	0.9522	0.9237	0.0285
34	3112.00	0.9718	0.9520	0.0199
35	3631.00	0.9818	0.9802	0.0016

由上表结果知,  $D_n$  的观察值为  $D_n = 0.1811$

取显著性水平  $\alpha = 0.10$ , 则由经验公式得: 当  $n = 35$ , 查表  $D_{n,\alpha} = 0.202$ 。则假设检验统计量  $D_n = 0.1811 < D_{n,\alpha}$ , 符合检验的条件, 因此这批数据接受两重威布尔混合模型。

### 3.4 数控铣齿机可靠性评价

经过分析已经确定了故障间隔时间的分布类型及参数, 本文在此基础上进行可靠性特征量的评价及 MTBF 的估计。数控铣齿机的故障间隔时间是指产品相邻两次故障间的工作时间。可靠性指标有平均故障工作时间, 可用 MTBF (Mean Time Between Failures) 表示, 它是故障间隔时间  $t$  的数学期望  $E(t)$ <sup>[47-51]</sup>。

对于两参数威布尔分布模型的 MTBF 的点估计按下式计算

$$\begin{aligned}
 E(t) &= \int_0^{\infty} tf(t)dt = p\eta_1\Gamma\left(\frac{1}{m_1} + 1\right) + q\eta_2\Gamma\left(\frac{1}{m_2} + 1\right) \\
 &= 0.562 \times 897.84 \times \Gamma\left(\frac{1}{0.882} + 1\right) + 0.438 \times 454.8 \times \Gamma\left(\frac{1}{1.915} + 1\right) \\
 &= 714.7(h)
 \end{aligned} \tag{3-33}$$

计算结果表明该数控铣齿机的可靠性水平有了很大提升。

### 3.5 本章小结

介绍了数控机床的可靠性分析采用单威布尔分布作为故障分布模型局限性，拟采用两重威布尔分布模型对数控铣齿机的故障数据进行分析。在现场统计数据的基础上，运用概念纸方法作出数控铣齿机故障数据的 WPP 图，利用 WPP 图进行参数估计，从图形的拟合优度检验的分析进行模型优选，利用优选后的分布模型确定可靠性评价指标。

## 第4章 基于可靠性的数控铣齿机故障综合分析

故障分析是可靠性研究的重要内容之一,也是进行产品可靠性改进设计的前提和基础,目的在于通过故障分析找出产品的薄弱环节和潜在弱点,并把故障分析结果反馈给设计、制造部门及使用单位,逐步改正薄弱环节的设计、制造、装配及配套件和外购件中的缺陷,以便从设计、制造、使用和维护等各方面采取对策和措施提高产品的可靠性<sup>[52-56]</sup>。

目前,对于数控铣齿机故障分析方法很多,根据不同的故障模式采取相应的故障分析方法。较常用的故障分析方法有统计分析法、分步分析法、故障树分析法、故障主次图法和故障比重比法等。

本文从实际出发,运用故障主次图法和故障比重比法从不同的角度对数控铣齿机的故障进行分析,将分析结果进行综合排序并进行对比,得出综合分析结果,确定数控铣齿机可靠性改进的主攻方向。

### 4.1 数控铣齿机故障数据库系统

数控机床的可靠性是在不断地“试验—使用—改进—实验”的过程中提高的。其过程主要是通过通过对现场试验数据进行故障分析来实现,所以说在产品可靠性设计及使用、维修中都离不开可靠性数据。只有在拥有真实、可靠的数据的基础上,我们才能进行完善的故障分析和较合理的可靠性设计,才能对数控机床改进设计、使用、维修等提出合理的意见。

可靠性数据的积累是一个长期的、艰巨的过程,在此过程中必须对数据进行有效的组织和管理,而这是手工难以完成的,必须借助于计算机数据库技术。为了今后数控铣齿机标准数据库的建立方便,本文规定了相应的代码。

在分析产品故障时,一般从产品的故障现象入手,通过故障模式找出故障原因和故障机理。所谓故障模式,就是故障的表现形式。针对数控铣齿机的具体结构,将故障模式分为:损坏、松动、失调、动作、功能、工艺、环保及其它等九种类型,从而制定出故障模式代码表 4-1。

表4-1数控铣齿机故障模式代码表

Table 4-1 large-scale NC high-speed gear milling machine failure mode code table

类型	01-损坏型						02-松动型								
	故障模式	01 零 部 件 损 坏	02 元 器 件 损 坏	03 液 部 件 损 坏	04 电 机 损 坏	05 护 罩 损 坏	06 线 路 断 路	01 紧 固 件 松 动	02 锁 紧 部 件 松 动	03 预 紧 机 构 松 动	04 线 路 连 接 不 良	05 零 部 件 脱 落	06 零 部 件 松 动	07 元 器 件 松 动	08 元 器 件 脱 落
类型	03-功能型						04-环保型			05-工艺型					
	故障模式	01 运 动 部 件 冲 击 大	02 基 础 部 件 振 动	03 液 压 控 制 失 灵	04 传 感 部 件 失 灵	05 元 器 件 功 能 丧 失	06 电 机 不 能 正 常 工 作	07 未 按 程 序 指 令 执 行	08 数 据 或 程 序 丢 失	09 报 警 器 失 灵	01 液 、 油 渗 漏	02 噪 声 过 大	03 产 生、 有 害 气 体	01 几 何 精 度 超 标	02 定 位 精 度 超 标
类型	06-失调型						07-动作型			08-其它型					
	故障模式	01 运 动 部 件 间 隙	02 运 动 部 件 速 度 失 调	03 液 压 元 件 流 量 不 当	04 压 力 调 整 不 当	05 行 程 不 当	06 电 机 过 载	01 运 动 部 件 无 动 作	02 转 位 、 移 位 不 准 确	03 回 参 考 点 不 准	04 定 向 不 准	05 运 动 部 件 爬 行	06 驱 动 报 警	01 润 滑 不 良	02 误 报 警

将数控铣齿机划分为如表 4-2 所示的子系统与部件及其代码。

表4-2数控铣齿机故障部位代码表

Table 4-2 large-scale NC high-speed gear milling machine fault code table positions

部位代码	机床部位	部位代码	机床部位
S	主轴系统	L	润滑系统
D	液压系统	W	冷却系统
X	X 轴进给系统	K	排屑系统
Z	Z 轴进给系统	V	数控系统
C	C 轴进给系统	E	电柜
NC	电气系统	Q	整体防护
F	伺服单元	R	其它

为了研究各种故障模式的机理，建立了故障原因代码表，如表 4-3 所示。

表4-3 数控铣齿机故障原因代码表

Table 4-3 large-scale NC high-speed gear milling machine failure reason code table

原因代码	故障原因	原因代码	故障原因	原因代码	故障原因
01	断裂	14	松动	27	过载
02	变形	15	脱落	28	开路
03	卡住	16	间隙不适	29	短路
04	烧坏	17	压力不适	30	窜动
05	击穿	18	行程不适	31	误操作
06	磨损	19	堵塞	32	CNC 参数错
07	点蚀	20	渗漏	33	元器件损坏
08	蠕变	21	压力不稳	34	零部件损坏
09	错位	22	漂移	35	装配不良
10	划伤	23	过热	36	调整不当
11	老化	24	过压、过流	37	干扰
12	腐蚀	25	润滑不充分	38	其他
13	侵蚀	26	缺油		

## 4.2 数控铣齿机故障主次图分析

故障主次图又叫巴雷特图或排列图，它是分析、查找系统故障主要原因、主要故障模式等因素的直观图表，应用十分广泛，它以系统的故障原因、故障模式或故障部位为横坐标，以故障原因、故障模式或故障部位发生的频率为纵坐标，按故障频率大小，依次由大到小画图，最后将频率累计起来。

一般情况下，累计频率 0~0.8 的故障原因、故障模式或故障部位为关键故障原因、关键故障模式或关键故障部位，0.8~0.9 的故障原因、故障模式或故障部位为主要故障原因、主要故障模式或主要故障部位，0.9~1.0 的故障原因、故障模式或故障部位为次要故障原因、次要故障模式或次要故障部位<sup>[57]</sup>。

对数控铣齿机现场故障数据的统计，归纳和分类结果列于表 4-4 中。并根据故障主次图法作图 4-1。

表4-4 该型数控铣齿机故障部位频次、频率表

Table 4-4 the NC high-speed gear milling machine of the frequency of failure, frequency table

序号	部位代码	机床部位	频次	频率
1	S	主轴系统	12	0.343
2	D	液压系统	6	0.171
3	X	X 轴进给系统	5	0.143
4	Z	Z 轴进给系统	3	0.086
5	C	C 轴进给系统	3	0.086
6	L	润滑系统	2	0.057
7	V	数控系统	2	0.057
8	Q	整体防护	1	0.029
9	F	伺服单元	1	0.029

由数控铣齿机故障部位频率表和主次图可以看出影响数控铣齿机可靠性的关键子系统为主轴组件、液压系统、进给系统。关键子系统是发生故障最频繁的部位，它们的故障次数共约占 82.9%，其中主轴系统故障频率最高，达 34.3%；居于第二位的是液压系统，为 17.1%；居于第三位的是 X 轴进给系统，为 14.3%。主轴系统是发生故障最频繁的部位，其故障率远远高于其它部件或子系统，是影响数控铣齿机整机可靠性的主要因素。当前，对主轴系统进行可靠性改进设计，

提高其可靠性水平是提高整机可靠性的前提，只有子系统的可靠性得到保证，才能使整机的可靠性水平得到大幅度地提高。

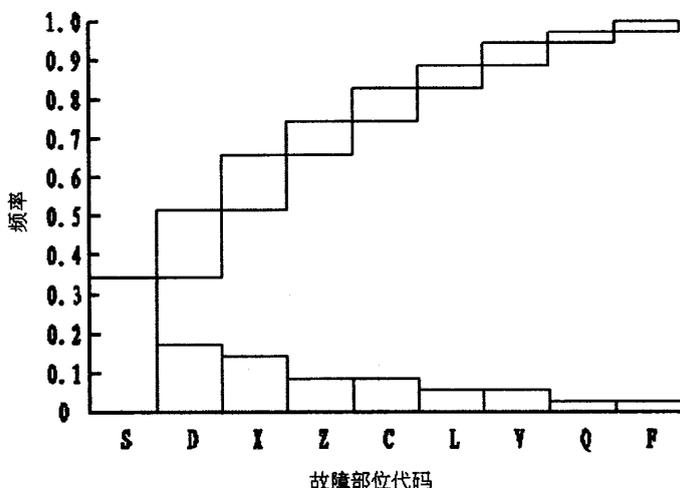


图4-1 该型数控铣齿机故障部位主次图

Figure 4-1 The NC high-speed gear milling machine parts of primary and secondary fault map

### 4.3 数控铣齿机故障比重比分析

#### 4.3.1 故障比重比概述

故障比重比图是两个故障百分比之比，按比值（称作比重比）的大小排列的主次图。这两个百分比，一个是开发阶段可靠性指标分配时，给定的各个子系统的故障率占整机故障率的百分比；另一个是用户实际使用时对应的故障百分比。

当某个子系统比重比大于1时，说明该子系统的故障率已经“超标”，即就相对比率来说，该子系统已经超出给定的比率了。反之，如果比重比小于1，则该子系统故障数在给定的比率之下，其可靠性水平相对来说是较高的<sup>[58-61]</sup>。

考虑到各组成部分的可靠性指标，选用故障率比  $K$  作为评价某子系统是否成为提高机床整机可靠性主攻方向的参数

$$K = \frac{\lambda_E}{\lambda_o} = \frac{M_o}{M_E} \quad \lambda_E = r/s \quad (4-1)$$

式中： $\lambda_E$  — 某子系统的故障率实际值；

$\lambda_o$  — 某子系统的故障率指标；

$M_o$  — 某子系统的 MTBF 指标;

$M_E$  — 某子系统的 MTBF 实际值;

$r$  — 统计期内该子系统的故障数;

$s$  — 统计期内所有产品的使用时间;

若  $K > 1$  则表明该子系统的实际故障率大于该子系统的故障率指标, 应采取措施, 提高该子系统的可靠性, 降低其实际故障率值, 满足给定的故障率指标。

用  $K_z$  表示整机的故障率比; 则

$$K_z = \frac{M_{z.o}}{M_{z.E}} = \frac{\lambda_{z.E}}{\lambda_{z.o}} \quad \lambda_{z.E} = r_z / s \quad (4-2)$$

式中:  $M_{z.o}$  — 整机的 MTBF 指标;

$M_{z.E}$  — 整机的 MTBF 实际值;

$\lambda_{z.E}$  — 整机故障率的实际值;

$\lambda_{z.o}$  — 整机的故障率指标;

$r_z$  — 统计期内产品整机的故障总数;;

显然, 若整机符合可靠性指标的设计, 必须满足:  $K_z \leq 1$

由上得出

$$K = \frac{\lambda_E}{\lambda_o} = \frac{\lambda_E}{\lambda_{z.E}} \cdot \frac{\lambda_{z.o}}{\lambda_o} \cdot \frac{\lambda_{z.E}}{\lambda_{z.o}} = \frac{r}{r_z} \cdot \frac{\lambda_{z.o}}{\lambda_o} \cdot K_z \quad (4-3)$$

$\frac{r}{r_z}$  为实际统计中该子系统的故障频次比,  $\frac{\lambda_{z.o}}{\lambda_o}$  则为在进行可靠性指标分配

时, 该子系统的故障率占整机故障率的比重的倒数。

$$\text{设} \quad Q_E = \frac{r}{r_z}, Q_o = \frac{\lambda_o}{\lambda_{z.o}} \quad (4-4)$$

式中:  $Q_E$  为故障频次百分比, 表示某子系统实际发生故障数占整机发生故障总数的百分比;  $Q_o$  为故障率百分比, 表示某子系统的故障率在可靠性分配中占整机故障率的百分比。

代入上式得 (4-5)

$$K = \frac{Q_E}{Q_0} \cdot K_Z = C \cdot K_Z$$

式中:  $C = \frac{Q_E}{Q_0}$  — 故障比重比; (4-6)

由上式可知,各子系统的故障率比  $K$  取决与两个参数。一是故障比重比  $C$ ,  $C$  值可由产品可靠性设计时,可靠性分配和用户使用中的故障统计数据确定;二是整机的故障率比。在实际应用中可利用上式产品某些组成部分的可靠性水平及是否应成为提高产品可靠性的主攻方向做出判断,其中,故障比重比  $C$  由于含故障统计结果,在这些判断中是关键因素。所以常常用故障比重比  $C$  判断可靠性改进的主攻方向。

### 4.3.2 故障比重比图

由该型数控铣齿机的 MTBF 可知,与生产厂家要求的 800 小时的可靠性设计指标还有一定差距。为了进一步分析解决问题,可靠性设计部门考虑到数控铣齿机的各个分系统在实际应用中的重要性、结构复杂性、工作环境、维修性、零部件的成熟性以及工作时间等因素,综合评定给予该数控铣齿机各子系统的各因素进行加权值分配。以主轴系统为标准单元,其各项分配加权因子为 1,其它系统与主轴系统相比较,取值如表 4-5 所示。

表4-5 可靠性影响因素加权因子分配表

Table 4-5 Factors Affecting the weighted reliability factor allocation table

机 床 子 系 统	重要性 k1 (大小)	复杂性 k2 (高低)	环境 因素 k3	维修性 k4 (难易)	成熟 性 k5	工作时间 k6 (长短)	可靠性指 标分配 Moj(h)
主轴系统	1	1	1	1	1	1	6635.48
液压系统	1.1375	0.8	1.05	1	1.2	0.75	7716.12
X 轴进给	0.8875	1.025	0.85	0.85	1.15	1.2	7315.82
Z 轴进给	0.8875	1.025	0.85	0.85	1.15	1.2	7315.82
C 轴进给	0.8875	1.025	0.85	0.85	1.15	1.2	7315.82
润滑系统	1.55	0.7	1.1	1.5	1	1	3706.45
数控系统	0.8875	0.85	0.85	0.6	1.2	0.9	15969.49
整体防护	1.5	0.45	0.9	1.5	1.2	0.9	6742.35
伺服单元	0.7375	1.2	0.65	0.7	1.3	1	12675.77

按照文献<sup>[62-63]</sup>提供的分配公式

$$M_{Oj} = \frac{\sum_{j=1}^n \prod_{i=1}^n k_{ji}}{\prod_{i=1}^n k_{ji}} M_{Z.O}; i = 1, 2, \dots, 6, j = 1, 2, \dots, 9 \quad (4-7)$$

式中： $M_{Z.O}$  — 整机平均故障间隔时间；

$M_{Oj}$  — 第  $j$  个子系统平均故障间隔时间；

$k_{ij}$  — 第  $j$  个子系统的第  $i$  个分配加权因子；

由上式计算的数控铣齿机个子系统的可靠性指标分配结果见表 4-5。

通过可靠性指标分配结果，由下面两个公式计算出各子系统在可靠性分配中的故障率指标和整机的故障率指标

$$\lambda_{z.o} = 1/M_{z.o} = 1/800 = 0.00125 \quad (4-8)$$

$$\lambda_{Oj} = 1/M_{Oj} = \{0.000150, 0.000129, 0.000136, 0.000136, 0.000136, 0.000269, 0.000062, 0.000148, 0.000078\} \quad (4-9)$$

由故障频次主次图法可知该数控铣齿机的 9 个故障子系统的故障频次百分比见表 4-6。则由公式 4-4 和公式 4-6 计算出个子系统的故障率百分比和故障比重比见表 4-6。

表4-6 数控铣齿机故障比重比表

Table 4-6 large-scale NC high-speed gear milling machine than the proportion of fault table

机床子系统	故障频次百分比 Qej	故障率指标 $\lambda_{oj}$	故障率百分比 Qoj	故障比重比 Cj
主轴系统	34.286	0.000150	12.058	2.843
液压系统	17.143	0.000129	10.370	1.653
X 轴进给系	14.286	0.000136	10.932	1.307
Z 轴进给系	8.571	0.000136	10.932	0.784
C 轴进给系	8.571	0.000136	10.932	0.784
润滑系统	5.714	0.000269	21.624	0.264
数控系统	5.714	0.000062	4.984	1.147
整体防护	2.857	0.000148	11.897	0.240
伺服单元	2.857	0.000078	6.270	0.456

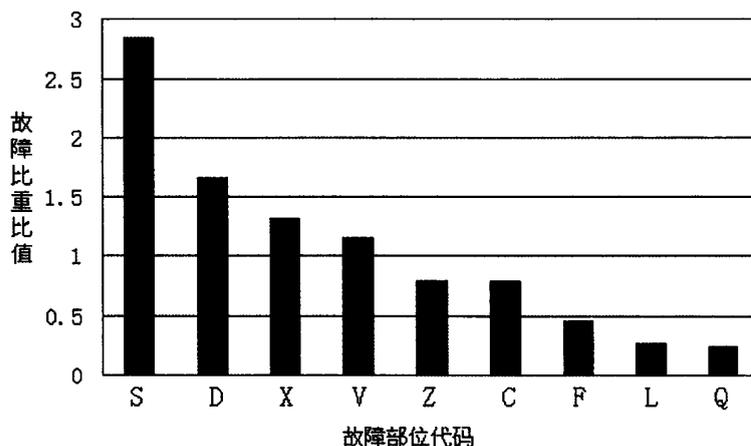


图4-2数控铣齿机故障比重比图

Fig. 4-2 large-scale NC high-speed gear milling machine than the proportion of fault figure

通过表 4-6 和故障比重比图 4-2 可以看出该数控铣齿机的故障子系统中，实际故障率与指标值之间的差距较大的子系统分别为：主轴系统、液压系统、X 轴进给系统、电气系统，它们的比重比值都大于 1，应对这几个子系统重点进行可靠性改进。其它子系统的故障比重比都小于 1，说明其故障率基本符合相应的指标值。

#### 4.4 数控铣齿机两种分析结果对比

将数控铣齿机的两种不同角度的故障分析的结果及其排序情况列于表 4-7。

表4-7 数控铣齿机故障排序比表

Table 4-7 Fault NC high-speed gear milling machine table

机床子系统	故障主次图法		故障比重比法	
	结果	排序	结果	排序
主轴系统	0.343	1	2.843	1
液压系统	0.171	2	1.653	2
X 轴进给系统	0.143	3	1.307	3
Z 轴进给系统	0.086	4	0.784	5
C 轴进给系统	0.086	5	0.784	6
润滑系统	0.057	6	0.264	8
数控系统	0.057	7	1.147	4
整体防护	0.029	8	0.240	9
伺服单元	0.029	9	0.456	7

从上面的结果对比分析可以看出,进行故障分析时所考虑的因素不同,分析的结果也不尽相同。当考虑各子系统的不同可靠性要求通过故障比重比的方法分析时,其结果与仅考虑故障频次高低的故障主次图法是有所不同:

(1) 从数控铣齿机的故障比重比图排序与故障频次主次排序,都发现主轴系统、液压系统、X轴进给系统都排在前三位,是故障发生频率较高的部位,是影响该型数控铣齿机可靠性的主要因素。

(2) 数控铣齿机各子系统的故障比重比图排序与故障频次主次排序相比也发生一些变化,其中数控系统在故障百分比主次排序中仅仅排在第7位,故障百分比为5.7,可靠性问题似乎并不十分突出,但是在故障比重比主次排序中,数控系统的故障比重比为1.147,排在第4位,实际故障率与可靠性指标相差最大。这说明数控系统虽然故障发生的次数较小,但是由于在可靠性分配时分配给该系统一个很高的指标MTBF值,尽管实际中仅仅发生了两次故障,但是其故障率与指标值仍然有很大的差距,是一个被故障百分比隐藏了的可靠性薄弱环节。但这与实际并不矛盾,因为该型数控铣齿机所配的数控系统为德国西门子数控系统,具有较高的可靠性,所以才有这样的结果。

(3) 主轴系统、液压系统、进给系统不仅故障率高,实际故障率与指标之间差距也大,均超过1,在两种分析中相差不是很明显,都排列前三,因此应主要对这几个子系统采取措施,提高可靠性。其它子系统的故障比重比值均小于1,说明已经基本达到了可靠性设计的要求,暂时可以不做重点改进,即使偶有故障发生通过简单处理就可以解决,但需随时注意检修。

本文认为将几种分析结果进行加权综合分析,能更快更准的抓住问题的主要矛盾提供了理论依据,对实际解决问题起到指导性作用。

## 4.5 本章小结

在现场统计数据的基础上,运用故障主次图法和故障比重比法从不同的角度对数控铣齿机的故障进行分析,将分析结果进行综合排序并进行对比,得出主轴系统、液压系统是该型数控铣齿机的可靠性薄弱环节,确定数控铣齿机可靠性改进的主攻方向。

## 第5章 数控铣齿机可靠性增长措施

数控铣齿机的可靠性增长是在不断地“试验—使用—改进—实验”的过程中逐步实现的<sup>[64-66]</sup>。其过程主要是通过到现场试验数据进行故障分析,指出可靠性薄弱环节即对整机危害性较大的部位,反馈给生产厂家,逐步改正薄弱环节的设计、制造、装配及配套件和外购件中的缺陷,不断提高产品可靠性。可靠性增长是针对产品的可靠性或故障而言的,设计为产品的可靠性奠定基础,而制造及装配过程则保证了可靠性的实现,两者共同决定了产品的固有可靠性<sup>[67]</sup>。因此,首先在设计中要通过各种具体的可靠性设计方法并结合第五章的内容,设计预防和改进措施有效地消除数控铣齿机各种隐患和薄弱环节,采取有效措施保证制造和装配过程中的可靠性,同时通过早期故障试验充分暴露数控铣齿机设计、工艺、装配等方面的缺陷,采取相应措施将早期故障尽可能在出厂前消除,以达到可靠性增长的目的。

通过对 SKXC2000 型数控高速铣齿机的现场故障数据进行统计分析,得出该型数控铣齿机可靠性的最薄弱环节。为了提高整机的可靠性,本文针对各可靠性薄弱环节提出相应改进措施。

### 5.1 数控铣齿机可靠性改进措施

#### 5.1.1 高故障系统的改进措施

##### (1) 主轴箱系统

主轴箱是该型数控铣齿机的主要运动部件,也是可靠性的最薄弱环节,故障频率达 34.4%,故障比重比达 2.84。在加工过程中,主轴箱的故障主要有噪音过大、主轴箱漏油、主轴箱发热等。

##### a. 主轴箱噪音控制措施

主轴箱使用过程中噪音过大的原因有三种:一是主轴齿轮直径大、厚度薄容易产生振动、噪音过大。应尽量选用相对较厚的齿轮,减少震动。如不易选用较厚齿轮,在齿轮上每隔 120 度的位置钻孔可有效减小振动、降低噪音;二是主轴弯曲导致加工过程中传动不平稳而出现噪音过大现象。主轴弯曲主要由于主轴的刚性不够,应在工艺上进行改进。在加工主轴前先对毛坯进行预热处理,先正火

以消除应力然后粗车,再用淬火加高温回火进行调质,再半精加工做动平衡,这样可有效提高了主轴刚性、减少噪音。同时还可以加大主轴平衡螺孔,并增加放松垫片,改善主轴平衡度,减少振动,提高加工精度,降低噪声;三是加装辅助工作台后,加工直径虽然变大,但工作台刚度大大降低,受力后引起工作台弹性变形,形成对主轴箱的冲击。因此在机床使用过程中尽量不要加装辅助工作台,应加大对大直径工作台的开发力度,解决目前大直径工作台精度不高的技术难题,使大直径工作台尽早应用到工程实际,满足大直径工件的齿轮加工。

#### b. 主轴箱漏油控制措施

主轴箱漏油主要是由于密封圈装配孔加工精度不够、密封圈装配不紧、主轴箱升温密封圈变形等情况引起。在密封圈装配孔加工过程中,一定要严格按照质量控制要求实施,确保加工精度达到设计要求。在购买密封圈时尽量选用耐磨性和减摩性较好的垫圈,保证垫圈的质量。尽量避免主轴箱漏油现象的发生,减少环境污染。改进冷却保证主轴箱温度在允许范围内,提高密封性能。

#### c. 主轴箱升温控制措施

主轴箱升温过高主要由于主轴箱轴承润滑不良造成的,应改善润滑条件。建议改变原来的润滑方式或采用更高一级精度的轴承;合理选用润滑油(尽量选用环保型润滑油);疏通油路;控制润滑油的注入量等,降低主轴箱升温,提高主轴箱的可靠性。

### (2) 液压系统

液压系统是该型数控铣齿机的主要系统,也是可靠性的最薄弱环节之一,故障频率达 17.1%,故障比重比达 1.65。液压技术是比较新型的工业技术,在国民经济多领域中得到越来越广泛的应用。但由于设计、制造和使用上多种因素,液压设备在使用过程中经常会出现这样或那样的故障,使其性能达不到设计要求甚至不能正常工作。该型数控铣齿机液压系统故障主要有系统压力波动影响压力继电器正常工作、液压缸漏油严重、断电后液压缸不起夹紧拖板的作用。

#### a. 液压系统压力波动控制措施

在该数控铣齿机原液压系统设置抗干涉的液压回路。原设计要求当数控系统发出指令给压力继电器,压力继电器发讯给控制电磁阀接通油路使液压钳夹紧,夹紧后发讯,数控系统控制进给轴进行铣削加工,但因受系统压力波动影响,压

力继电器不能及时工作。此外,在夹紧的过程中,由于阀的内泄漏也会产生松动,从而影响加工质量。针对上述情况,在改进的设计中使整个系统采用两台蓄能器,这样可使四台压力继电器处于抗干涉的正常工作状态。

#### b. 液压钳漏油控制措施

液压钳漏油不但影响了机床的性能降低了加工精度,而且污染了周围环境,一种成熟的产品是不允许这种情况存在的。为了解决液压钳漏油现象,一是确保液压零部件的加工精度达到设计要求,严格规范外协加工件的入厂质量;二是选购质量好的密封件,国内产品达不到要求的,一定要用进口高质量产品代替,确保整机质量。

#### c. 断电后液压钳不起夹紧控制措施

在不影响液压系统油路结构关系的前提下,在液压泵至减压阀的油路之间增设一个单向阀。这样,当驱动液压泵的电动机突然断电时,进入夹紧液压钳的液压油失去液压泵的输出压力油,此时夹紧液压缸里的压力大于液压泵出口压力,油液便向液压泵回流,而单向阀正好截断液压泵至夹紧液压缸的逆向回路,使夹紧液压钳中还保持着一定的压力油来夹紧拖板,使其不会将拖板重力完全由电机抱轧机构承担。同时,该单向阀还对液压系统和液压泵起保护作用。

### (3) 进给系统控制措施

进给系统是该型数控铣齿机的主要运动部件,也是可靠性的最薄弱环节之一,故障频率达 14.3%,故障比重比达 1.30。进给系统故障主要体现在定位不准。一是由于伺服电机与传动丝杠之间的联轴器的止退螺丝松动,造成连接器与伺服电机轴的联接部分间隙过大使旋转不同步。建议选用新型不松动止退螺丝代替原有的止退螺丝。二是因为丝杠质量存在问题,丝杠螺母使用一段时间反向间隙过大,需要厂家调整丝杠螺母间隙到允许的范围。三是因为立柱太重,导轨面加工精度不到位,丝杠低速运动时容易产生爬行现象,降低机床的运动响应速度,降低工件的加工精度。因此在改进设计时尽量选用适用大扭矩、不易松脱的联轴器;采购质量一流的滚珠丝杠生产厂家的产品;确保导轨表面的加工精度、刮研质量,消除运动爬行现象。

### 5.1.2 低故障系统的完善措施

#### (1) 润滑系统

润滑系统主要故障为润滑油管脱落, 润滑不良造成运动轴承磨损产生噪声过大, 油管接头松动导致的主轴箱进油管漏油。数控铣齿机在加工过程中易产生振动, 使液压管路接头松动, 导致密封件损坏; 平衡缸活塞杆与密封件的径向磨损及粗糙的表面将磨损密封件; 此外, 由于高温和长期油浸也会损坏密封件, 削弱密封效果, 从而性能下降。所以对关键部位(如导轨)采用构造动力减振结构方法, 使其振动尽量减小, 还应在底座支脚上增加防振装置, 削弱机械冲击, 减少振动, 降低噪声污染; 改善润滑油过滤装置; 对油缸和管路进行改进, 润滑油路开排气槽; 全面清洗, 清除氧化皮, 金属小颗粒等杂质, 保证油液清洁; 选择高质量的油管或采用铜管代替原来的塑料管, 改善因温度高时塑料管变软、脱落造成泄漏的现象, 改善润滑效果同时减少环境污染; 改变原有的循环式润滑方式为油气润滑方式。因为原有的方式采用液压泵供油强力润滑, 由于润滑油的交换量比较大, 所以需要液压泵专门负责抽吸润滑后存留在箱内的油液。而且经常会由于抽油时间调整的不合适导致润滑油外溢以及密封装置本身有破损等缺陷造成的润滑油渗漏, 既易发生故障, 又不利于环保。而油气润滑方式是新兴的环保型的润滑方式, 能够大大避免环境污染, 为每个轴承单独供油, 且定时定量, 既保证了所需流量, 又无油雾扩散符合环保要求; 用环保型润滑剂代替原有的传统润滑剂, 减少矿物质中有毒有害物质对环境的污染; 加强对外购、外协件管理, 对于油管、密封件等配套件应进行优选, 严把进厂检验关。

#### (2) 电气系统

电气系统主要故障是稳压电源缺相引起机床电气上 KA4 线圈断路; 空气开关接触不良导致主轴电机风机跳闸; 位置编码器的信号线和电机的动力线混在一起, 造成干扰使机床返回参考时的位置变化等。应选择高质量的稳压电源和空气开关代替现有的稳压电源和空气开关。从新布置位置编码器的反馈信号线和电器的动力线, 分开走线, 避免干扰。

#### (3) 床身和导轨

床身是数控铣齿机的主要支承件。目前, 采用钢板焊接床身结构代替传统的铸件是床身制造的一种新工艺。由于铸造过程环境污染严重、能耗高, 因此采用

铸件床身不利于改善机床的性能。在合理的设计和工艺安排下,钢板焊接床身结构不但可提高机床的强度和刚性,而且由于减少了铸造工艺而大大减少了机床在制造过程中的环境污染和能源消耗,具有良好的环保特性。

导轨是数控铣齿机的主要构件之一,它的精度直接影响加工工件的尺寸精度。原有导轨塑料贴面的油槽结构为“弓”字形,导轨面宽度方向润滑效果不好,有时出现传动轴无法移动的现象,影响加工质量。应尽量改进导轨润滑油槽的结构,保证整个导轨面宽度方向上有充分的润滑油,减少摩擦,降低噪声,提高可靠性。

数控铣齿机导轨采用的是铸铁贴塑导轨,铸造过程对环境污染大。应尽量采用镶钢贴塑导轨,不仅能够减小摩擦系数,提高耐磨性,减振消声,工艺性好,而且其可拆卸性设计大大缩短了拆卸时间,方便装配和更换;其耐磨性好,能有效地防止爬行;具有自润滑性,可提高导轨寿命;机床报废后贴塑层易分离,并且导轨和床身可重复使用,明显降低了制造和维护成本,具有良好的经济和生态效益。

#### (4) 整机优化设计

根据机床经常发生泄露的原因,有针对性地在必要的位置加装接油盘;管路连接处采用更好的密封措施;将固定式操作面板改为可移动的形式,便于操作和实施监控;改原控制面板上的按钮为绝缘按钮,以防止操作工用带水的手按按钮时,出现重大事故。由于床身前端和立柱与床身联接处漏水,尽量改进原有分水式水盘。机油可回收的油路设计,使回流的机油可重复使用,减少机床周围环境污染,达到清洁生产的要求。

通过部件尺寸优化,机床体积小型化,不仅可节约金属材料,而且节约占地空间,降低安装、搬运费用,同时可使刀库、电气柜等部件集中安置在床身中,避免尘埃污染。良好的人机环境设计开阔的视野,柔和的光线,方便的操作性使操作者能够在良好、舒适的环境下工作。要能从前面、侧面等方向,大视野地来观察加工情况,保证良好的人机操作关系。

严格产品开发程序,加强设计评审、验证、确认工作。制定相应的有关设计评审、验证、确认的控制程序,规定在设计各阶段对应进行的产品评审和验证、确认的职责及方法,确保设计输入目标明确,设计输出严谨合理、满足要求,制

造中有据可依, 检验验证后心中有数。这样既可在早期消除不可靠的隐患, 又能在生产制造后及时了解不足、及时更正。

## 5.2 数控铣齿机工艺部分的保证措施

工艺技术是设计质量的延伸, 也是生产质量的基础保证。要实现机床可靠性设计, 工艺设计是必不可少的关键环节。为了提高产品的可靠性, 不仅从管理着手严格工艺流程, 而且从技术上寻求突破。

### (1) 对重点工序进行重点策划

管理上制定相关程序文件, 规定工艺部门的职责和工作程序。特别对生产过程中影响产品质量的制造过程要及早进行工艺策划, 对直接影响质量的工序进行严格控制, 确保产品质量符合规定的要求。

在设计中, 设计人员应依据相应标准, 根据零件对产品质量影响的重要程度, 将其划分为 A 类 (关键零件), B 类 (重要零件), C 类 (一般零件)。并对零件中相应的特性也进行划分, 划分出 [A] 级特性 (关键特性), [B] 级特性 (重要特性), [C] 级特性 (一般特性)。以便工艺人员针对不同的重要性采取不同层次的控制, 对涉及 A 级质量特性的工序, 必须实施重点策划。编制质量控制方法和相关工艺文件, 对工艺过程和工艺装配进行验证。对所使用设备要进行认可, 同样, 对热处理、喷涂等特殊工序采取同样方法控制。

### (2) 加强工艺设计技术力量, 开展计算机辅助工艺设计 (CAPP)

采用计算机编制工艺、材料额定, 在数控机床上加工的零件, 编制好加工程序。采用先进工装, 提高加工质量的可靠性。

### (3) 推广低温化学工艺技术

对易变形零件, 采用离子氮化、气体软氮化、碳氮共渗, 提高零件综合机械性能和寿命。

### (4) 推动振动时效工艺技术, 充分消除零件内应力, 以取代天然时效。

### (5) 选用新型环保型刀具, 提高加工质量。

(6) 通过技术改造, 制作专用工装, 完善加工方法, 改善加工精度等级, 提高机床传动水平。

### (7) 增加检验工装, 完善检测手段, 保证机床出厂质量。

### 5.3 数控铣齿机关键工序的保证措施

数控铣齿机的可靠性是一个综合性、复杂的系统工程，生产制造是其中十分重要的一环。生产厂与协作厂应该加强从零件加工到装配全过程生产管理，特别注意对关键件、关键工序及装配过程的质量控制。质量控制部门首先将主轴箱等零部件的制造及装配工序作为关键工序，建立其质量控制点，并在生产中据此对各关键工序进行严格控制。

从零件加工开始直至整机装配完毕，要严格按照作业标准书进行。操作工人在本工序加工完毕后，进行严格的检验，合格后才能转入下一工序；负责某一关键工序的工人在加工本工序前，必须对上一工序进行严格的检验，上一工序合格后才能进行本工序的加工；质量控制部门应对各关键工序分别进行严格的检验，通过上述这种自检、互检专检相结合的检验制度，严把主轴等零部件制造与装配的质量关。

#### 5.3.1 机床关键工序采取重点控制

##### (1) 主轴箱箱体及部件加工

主轴箱箱体加工应保证主轴孔的公共轴线对导轨的平行度  $0.005\text{mm}$ ，这是影响主轴进给精度的关键。工艺人员应针对零件的特点，设计切实可行、方便可靠的工艺品流程，在粗加工、半精加工后应充分消除零件的内应力，然后再精加工，减少零件变形的可能性，提高零件尺寸精度的稳定性。

主轴箱部件是机床动力输出的关键部件，其制造质量直接影响机床的精度等级，在加工过程中应重点抓以下两个环节：

a. 采取人工时效、稳定等措施，消除零件的内应力，最大限度地减小零件变形的可能，使其具有良好的精度保持性，最后一道工序超精磨是决定主轴箱最终精度的关键工序，由经验丰富的师傅在恒温的环境中加工，在恒温的条件下测量，不仅使磨削表面的误差值在规定的公差范围内，而且在常温下装配时，过盈量恰到好处，不会产生新的应力，对保持主轴部件精度的稳定十分有益。

b. 主轴箱轴承对配合轴颈的公差有严格要求，应采取按轴承逐一配磨主轴的办法，使过盈量控制在  $0-0.003\text{mm}$  范围内，圆柱度及两支撑轴径的同轴度均不大于  $0.002\text{mm}$ 。经磨削的主轴安装孔的径向跳动，达到端面外  $0.007\text{mm}$ ，距

端面 300mm 处 0.017mm。这些严格要求，为实现主轴箱部件高刚性、高精度、高寿命打下良好的基础。

## (2) 导轨加工

机床导轨是立柱、底座等基础部件的重要工作部位，它的受力情况比较复杂，既要承受运动部件的压力，还要使运动部件具有良好的运动特性，保证高速移动不振动，低速进给不爬行，灵敏度高，即使在重负载下也能实现长期连续工作。为此，在导轨的结构和加工方面采取了相应的保证措施。

a. 导轨的表面处理：该批数控铣齿机导轨表面都应进行高频淬火，淬火硬度应控制在 HRC48-52 范围内，厚度应达到 2mm 以上，以减少导轨的磨损，延长机床的使用寿命，节省资源。

b. 导轨磨削工序设计要求采用周边磨削工艺精磨导轨各面，确保导轨的平直度不低于 0.01/1000mm。达到这项指标，除设备精度予以保证外，操作者还应采取如开车前空运转预热等方法，使机床各部趋于平衡，以及一些防振、减振措施，最大限度地消除外界及机床自身振动的影响，从而为整机装配及数控铣齿机精度稳定性创造条件，降低噪声，减少污染。

### 5.3.2 机床装配过程的严格控制

在数控铣齿机装配过程中，制订严格的现场管理规程，使装配全过程始终处于很好的工件环境中，避免一切可能影响装配质量的不良因素。首先抓好部件装配质量，在此基础上，进而抓好整机的装配质量，注意关键部位的装配，不放过任何一个细小的环节，大处着眼，小处着手，在抓全过程装配质量的同时，重点抓住对整机质量有较大影响的部件的装配。

#### (1) 主轴部件装配

a. 主轴部件的装配由专人在专用的装配间内完成，以便于保持环境清洁卫生，避免其他因素的干扰。待装的零件妥善存放，避免磕碰划伤。装配过程中，时刻注意不让线头及其他杂物带进配合副的间隙，导致主轴发热、影响主轴精度。

b. 优选主轴轴承的型号、配合方式，确定预加负荷量、中间隔套的跨距，并按要求选用润滑油的品种。选择合适的主轴装配，消除轴承游隙，延长主轴轴承的使用寿命。

c. 主轴部件装配完成后, 首先要检查装配质量, 检验径向跳动, 合格后才准予整机装配。厂内制定数控铣齿机验收技术要求, 对主轴部件进行严格考核, 从低速到高速, 必须连续运转 2 小时, 考核主轴发热情况、噪音等指标, 停机后立即检验主轴的回转精度和径向跳动。制定从设计、工艺到加工、装配的质量保证措施, 确保主轴各项精度符合设计要求。

### (2) 导轨刮研

导轨加工前, 导轨和工作部件都已经过时效处理, 消除内应力。为保证导轨的精度和延长使用寿命, 刮研是一种常用的工艺方法。床身、底座装配时要按标准平板刮研导轨, 使接触斑点分布均匀, 达到每平方厘米 25 个点, 以提高导轨的接触性能。增加导轨的承载能力, 导轨的作用是支撑运动部件, 刮研的目的不仅仅是改善静态条件下导轨的承受状况。更重要的是考虑运动部件在受力的情况下, 也就是说, 当机床工作时, 特别是大负荷切削时, 运动部件作用于导轨上的力, 使导轨产生微量弹性变形, 运动部件也会产生振动, 装配刮研时, 应有意识使导轨一端略微抬高, 以抵消切削力使导轨产生的变形, 保证运动部件运行平稳, 从而提高机床的工作精度。

### (3) 全防护罩装配

数控铣齿机的全防护罩、电气柜等板型零件都是厂内部完成的, 特别是全防护罩, 体积大, 容易变形, 焊装组合后, 首先是检查外观质量并进行漏水试验和检查。

全防护罩是最后装到机床上的, 它座落在水盘上, 并与机床床身及挂在床身两侧的气动元件防护罩和电气柜紧密组合, 为使全防护罩装配后不变形、不漏水, 装配时, 一是调整三块水盘防水沿的等高, 使全防护罩安放后没有缝隙。二是调整气动元件防护罩、电气柜与全防护罩接触面的垂直, 使之共面, 做到与全防护罩完全贴合。

全防护罩装配后要进行三项严格检查。一是外型美观、规整、不允许扭曲变形, 与之结合的面无缝隙。二是全防护罩上用于装卸工件的门开关灵活, 结合严密, 造型美观。三是不漏水。为降低刀具切削时的温度延长刀具寿命, 改善切削条件, 采用了大流量冷却冲洗, 全防护罩各部分, 包括门和视窗等均不允许漏水, 出厂前都要经过严格的检验。检验时间由原来 20 分钟加长到达 2 个小时, 使防

护罩的防水功能得到进一步提高。

## 5.4 关键配套件、外购件的优选措施

关键配套件、外购件的可靠性是产品可靠性管理工作的重点。由故障分析结果可知,该型数控铣齿机由外购外协件引起的故障率很高,主要原因是密封圈与密封套、油管与管接头、压力表、开关、电扇等质量不过关。严重影响着数控铣齿机的可靠性,因此要提高该数控铣齿机的可靠性水平,必须对关键配套件、外购件进行优选。

### (1) 采购产品质量的可靠性保证措施

采取综合评价打分的方法,对配套产品的供应商进行优选。为保证采购产品的质量,要制定评价和物资采购控制程序,加强产品质量保证能力的监督。同时对关键配套件、外购件要提出可靠性指标要求,严把采购品的进厂检验关。根据企业核心业务与非核心业务对供应商进行分类,在竞争环境分析和对供应商评价的基础上,有目标地选择供应商。实施绿色供应链合作关系,对企业核心业务发展,要与供应商实施战略合作,建立信任机制,优化信息渠道,建立风险预测、监控、预警机制,保证供应链整体决策优化,消除冲突等弊端。

对于供应商的选择必须综合考虑候选供应商在各个方面的表现,不但需要对供应商所提供产品的质量、价格和服务等进行严格审查,还要对供应商的业绩和环境指标进行评价。实施绿色采购使企业节省材料和资源的使用,降低采购成本。采购行为中充分考虑环境因素,实现资源的循环作用。在保证基本功能、性能指标要求的前提下,尽量选择节能环保型产品,减少污染,保护资源。建立绿色供应商的综合评价体系如图 5-1,由专业技术人员组成评审组对供应商的质量方针、质量管理现况、技术管理现况、生产管理现况、用户反馈和用户满意度、质量管理文件、员工培训大纲、质量奖罚规定、过程质量控制记录、关键工序点控制及产品绿色度等进行考察,根据考察结果编制《供应商质量保证能力评价书》,建立供应商档案,按综合评价及业绩选择最佳供应商,建立长期合作伙伴关系。

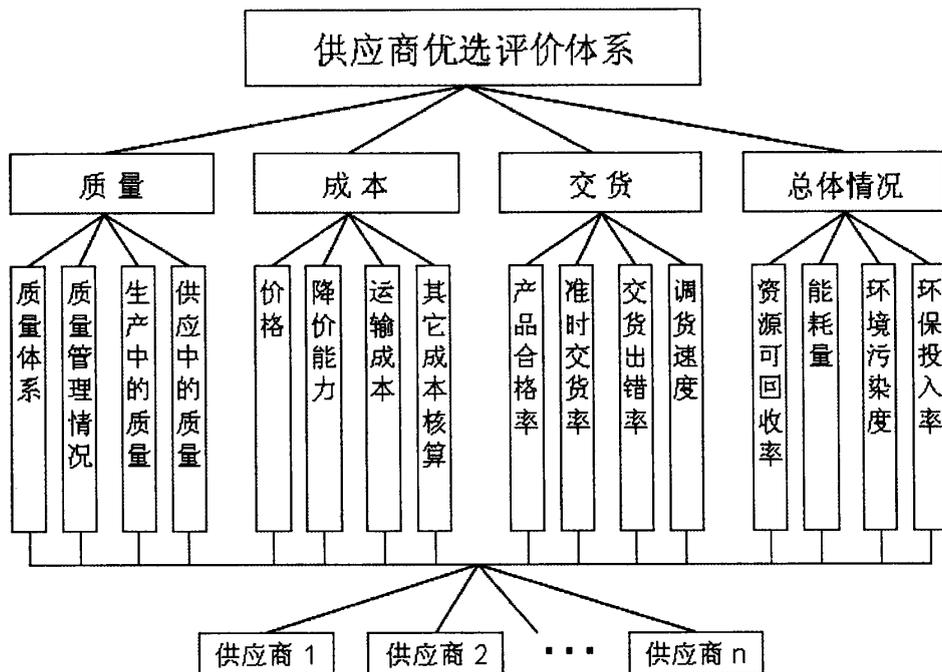


图5-1 供应商选优评价体系

Figure 5-1 Evaluation of the supplier selection system

### (2) 物资采购控制程序

物资采购是外购、外协活动中确保产品质量和可靠性的重要环节。为此我们特别强调在过程方法下由供方、组织、顾客形成的供应链。供应链的实质是连接相应组织的价值链。因此企业采购必须分工明确、制度完善。

### (3) 质量联保制度

对于重大成套工程项目实施过程中，与主要配套分包厂商组成质量联保体，施行质量联保制度，共同承担质量责任。

### (4) 编制元器件大纲

设计部门按使用条件重点考虑设计结构和元器件选型，明确关键元器件、主要元器件的可靠性指标要求，编制元器件大纲，并根据考核业绩优选供应商。元器件大纲主要包括选用元器件的管理机构、职责及权限、元器件采购控制方案、元器件优选程序、对供应商的选用要求与元器件的检验要求。通过采取以上保证措施，外购外协件的质量得到了一定程度的提高，机床故障有所下降；由于采购时充分考虑到外购外协件的，相应地提高了整机的绿色度。但是影响外购外协件质量的因素广泛而复杂，我们需要继续做好对供应商的评价、选择和动态控制、

严把进货检验关的工作。

## 5.5 建立早期故障试验制度

(1) 必须严格进行整机早期故障试验—出厂前连续空运转试验。

(2) 研制关键部件试验台，进行总装前关键部件的实验室试验。

(3) 对电箱进行总装前 40km 以上山区三级公路颠簸试验，消除电箱松、脱、虚等隐患。

(4) 实行两次验收制度：出厂前在厂内进行第一次验收，验收项目为功能试验(手动功能试验、空运转试验)、负荷试验(最大承载工件重量运转试验、主轴系统最大功率试验)、精度检验(几何精度检验、定位精度检验、工作精度检验)、机床自动测量功能试验、早期故障试验(72h 连续空运转试验)、对用户工件试切试验，这些项目均合格后才能发往用户；在用户现场进行第二次验收，验收项目同上，其中早期故障试验时间为连续空运转 50 小时。

## 5.6 本章小结

针对该型数控铣齿机可靠性的各薄弱环节，提出了相应的可靠性改进措施、工艺部分的保证措施、关键工序的保证措施、关键配套外购件的优选措施以及建立早期故障试验制度，确保数控铣齿机整体性能得以改善。

## 第 6 章 结论与展望

### 6.1 结论

本文以南京工业大学自主研发的 SKXC2000 型数控铣齿机为研究对象, 根据现场故障数据, 运用数理统计的方法进行分析, 得出该型数控铣齿机的可靠性评价指标。通过故障分析确定其可靠性改进的主攻方向, 针对薄弱环节提出相应的改进措施。

论文所做主要工作的结论归纳如下:

(1) 通过对现场定时截尾故障试验数据的分析, 得出故障间隔时间的概率密度曲线图, 假设故障数据服从威布尔分布, 通过最小二乘法进行参数估计, 并运用相关系数法来进行检验, 确定了该型数控铣齿机故障数据服从威布尔分布。

(2) 根据数控铣齿机不同时期发生故障的机理不同, 提出采用两重威布尔分布模型对数控铣齿机的故障数据进行分析。运用概念纸方法作出数控铣齿机故障数据的 WPP 图, 利用 WPP 图进行参数估计, 对确定参数的模型进行拟合优度检验, 结果表明故障数据符合两重威布尔分布。

在确定分布模型基础之上, 计算得出数控铣齿机可靠性的评价指标的估计值为: 故障间隔时间 (MTBF) 714.7 小时。结果表明该型数控铣齿机的故障间隔时间与国外先进的数控机床的 1000 小时还有一定差距。

(3) 采用故障主次图和故障比重比方法对数控铣齿机故障进行了综合分析。将故障比重比分析方法引入数控铣齿机的故障分析中, 能够更准确地反映各系统可靠性与其指标之间的差距。对数控铣齿机的故障信息进行了综合分析排序, 得出影响数控铣齿机可靠性的关键子系统依次为: 主轴系统、液压系统、进给系统。产生故障的主要原因分别为: 元器件损坏、松动、渗漏、间隙不适、润滑不充分、装配不良、老化和堵塞。此方法解决了以往分析方法的片面性, 使分析结果更能反映实际情况, 为数控铣齿机以及其它机电产品的故障分析提供较实用的理论依据。

(4) 提出了该型数控铣齿机可靠性增长的具体保证措施。针对其可靠性的各薄弱环节, 提出了相应的可靠性改进措施、工艺部分的保证措施、关键工序的保证措施、关键配套外购件的优选措施以及建立早期故障试验制度。

## 6.2 展望

为了提高数控铣齿机的可靠性水平,对其各功能部件进行深入研究以及整体结构进行优化就显得尤为重要。在以后的研究工作中可以从以下几个方面来进一步开展工作:

(1) 发展适用于数控铣齿机可靠性分析的新方法。数控铣齿机是典型的机电一体化产品。目前,电子产品的可靠性技术研究已经发展的比较成熟,机械产品可靠性技术研究也取得了很大进展,但机械及电子综合考虑的可靠性研究方法还很不成熟。为了提高数控铣齿机的可靠性分析的准确度,需要发展机电综合可靠性研究方法。

(2) 需要对执行改进措施后的 SKXC2000 型数控高速铣齿机进行可靠性评价,并对改进前后的可靠性评价指标进行对比。

(3) 发展数控铣齿机可靠性增长实验研究。要对数控铣齿机进行有计划的激发其薄弱环节使其失效、分析其失效的原因和改进设计,并证明改进措施的有效性,进而达到提高机床整体可靠性的目的。

(4) 国内目前尚无随机有限元通用软件。国外流行的通用的有限元软件,如 ANSYS、MARC、MSC/NASTRAN 以及 CAD 软件中的有限元模型都不具备可靠性分析功能,并且这些软件都是商品化的。可以采用基于三维机械系统和通用有限元系统,以及高级语言运用 ActiveX 自动化技术,实现两者跨软件平台操作,开发出有限元可靠性预测系统软件。根据采集的数据直接分析其可靠性,与传统的数值计算方法相比速度快、效率高。

## 参考文献

- [1] 许郁生. 中国机床工业的发展和市场需求[J]. 2007(2): 50-58.
- [2] 熊永超, 陶勇. 国产数控机床现状及发展趋势[J]. 煤矿机械, 2005, 27(3).
- [3] 鲁方霞, 邓朝晖. 数控机床的发展趋势及国内发展现状[J]. 工具技术, 2006.
- [4] 吴柏林. 发展国产高档数控机床要提速[J]. 中国军转民, 2006(Z1): 26-28.
- [5] 中国机床工具工业协会. 世界经济与机床市场[J]. 2007(2): 104-106.
- [6] 张祖明. 机械产品可靠性体系的研究与展望[J]. 机械设计与制造, 1994, (3).
- [7] 王桂萍. 加工中心可靠性及绿色性评价体系与增长技术研究. [D]. 吉林大学, 2008.
- [8] 黄祥瑞. 可靠性工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [9] 金碧辉. 系统可靠性工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [10] 李良巧. 机械可靠性设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [11] 徐宏伟. 机械零件可靠性设计理论研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2003.
- [12] Rao S.S, Reddy C.P. Reliability analysis of machine tool structures[J]. Journal of Engineering for Industry, 1977, 99(4): 882-888.
- [13] 孙志礼, 陈良玉. 实用机械可靠性设计理论与方法[M]. 北京: 科学技术出版社, 2003.
- [14] A. C. 普罗尼科夫. 数控机床的精度与可靠性[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [15] Chirkov A.L, Makarov N.V, Gavryushin A.I, Plekhanova V.M. Enhancing The reliability of NC machines and FMMS by running them in at the manufacturers works[J]. Soviet Engineering Research, 1989, 9(3): 114-115.
- [16] Rao S.S, Reddy C.P. Reliability analysis of machine tool structures[J]. Journal of Engineering for Industry, 1977, 99(4): 882-888.
- [17] 王桂萍, 贾亚洲, 申桂香, 乔巍巍. 基于故障比重比的加工中心整机故障分析及可靠性改进措施[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008, 38(sup): 119-122.
- [18] Fleming P.V, Kara-Zaitri C, Keller A.Z. Application of fuzzy reasoning to failure mode and effect analysis[J]. Symposium on the Society of Reliability

- Engineers, 1991(2): 288.
- [19] Keller A.Z, Beng C, Kara-Zaitri C. Further applications of fuzzy logic to reliability assessment and safety analysis[C]. Reliability in Electronics-elected, Proceedings of the Seventh Symposium on Reliability in Electronics, Aug29-Sep2, 1988, Budapest, Hung.
- [20] McGoldrick P F, Kulluk H. Machine Tool Reliability---A Critical Factor in Manufacturing Systems[J]. Reliability Engineering, 1986(14): 205-221.
- [21] Jones J A, Hayes J A. Use of a field failure database for improvement of product reliability[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1997(55): 131~134.
- [22] 贾亚洲. 提高数控机床可靠性加快振兴装备制造业的关键[J]. 中国制造业信息化, 2006(3): 42-43.
- [23] 贾亚洲. 提高国产数控机床可靠性水平[J]数控机床市场 2006(5): 92-99.
- [24] Madhu J, Rakhee, Sandhya M. Reliability analysis of redundant repairable system with degraded failure[J]. International Journal of Engineering, 2004, 17(2): 171-182.
- [25] Kim B S, Lee S H, Kim J S, Song J Y. Reliability assessment approach using failure mode analysis in machining center[J]. Key Engineering Materials, 2006, 321-323(II): 1535-1538.
- [26] 高社生, 张玲霞. 可靠性理论与工程应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [27] 周广文. 数控组合机床故障模型及可靠性管理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [28] 张海波. 数控系统可靠性设计与增长技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [29] 张英芝. 基于模糊与灰色理论的数控车床可靠性分析[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [30] 刘学军. 数控装备可靠性智能网络信息系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [31] 迟向磊. 我国数控机床可靠性研究概况[J]. 机械工艺师, 2001, (3): 22~23.
- [32] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1979.
- [33] 韩芝隆. 概率论与数理统计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.

- [34] 贺国芳. 可靠性数据的收集与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [35] Jones J A, Hayes J A. Use of a field failure database for improvement of product reliability[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 1997(55): 131~134.
- [36] 蒋仁言, 左明健. 可靠性模型与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [37] 金星, 洪延姬. 系统可靠性评定方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [38] 赵继俊, 邹经湘, 张锡清. 混合威布尔分布的参数优化估计[J]. *机械科学与技术*, 2001, 20 (1): 14-16.
- [39] 王超, 王金. 机械可靠性工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
- [40] Zhou G W, Jia Y Z, Zhang H B, Wang G P. A new single-sample failure model and its application to a special CNC system[J]. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 2005, 22(4): 421~430.
- [41] 吴波, 黎明发. 机械零件与系统可靠性模型[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [42] 贾志成, 申桂香, 胡仲翔, 张日明, 王桂萍. 基于生命周期的数控机床寿命分布模型及控制[J]. *机床与液压*, 2008, 36(1): 164-167.
- [43] 李忠明. 数控机床可靠性模型的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2002.
- [44] 蒋仁言. 威布尔模型族[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [45] Moltoft J. Behind the “bathtub” —curve, a new model and its consequences[J]. *Microelectron Reliab*, 1983, 23(3): 489-500.
- [46] 冯振宇, 诸德培. 威布尔分布的拟合优度检验[J]. *机械强度*, 1996, 18(4): 28-31.
- [47] 陈晓彤, 赵廷弟, 王云飞等. 可靠性实用指南[M]. 北京: 北京航空航天大学
- [48] 喻天翔. 复杂机械系统可靠性理论研究与应用[D]. 西安: 西安理工大学, 2003.
- [49] 胡昌寿. 航天可靠性设计手册[M]. 北京, 机械工业出版社, 1999.
- [50] 李海全, 李刚. 系统可靠性分析与设计[M]. 上海: 科学技术出版社, 2003.
- [51] 刘惟信. 机械优化设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [52] 王建新. 加工中心的可靠性设计方法研究[D]. 长春: 吉林工业大学, 2000.
- [53] Jia Y Z, Jia Z X. Fatigue Load and reliability design of machine tool

- component[J]. *Int J Fatigue*. 1993, 15(1): 47-52.
- [54] 孙伟, 高连华, 姚新民, 万晓伟. 机械产品的可靠性设计方法研究[J]. *机械工业标准化与质量*, 2007(8): 40-42.
- [55] Ditlevsen O. Narrow reliability bounds for structural system[J]. *J. Struct. Meth*, 1997, (4): 453~472.
- [56] 徐进. 机械工程系统的维修可靠性研究[J]. *机械研究与应用*, 2003, 16(4): 29~30.
- [57] 陈殿生. 数控机床可信性工程关键技术的研究大论文[D]. 长春: 吉林大学 2004.
- [58] 陈国华, 徐玉华. 故障比重比及其在提高房间空调可靠性中的应用[J]. *制冷与空调*, 2002(2): 43-46.
- [59] 乔巍巍, 贾亚洲, 王桂萍, 张学文. 数控系统软件故障可靠性分析[J]. *制造技术与机床*, 2006(10): 45-46.
- [60] Madhu J, Rakhee, Sandhya M. Reliability analysis of redundant repairable system with degraded failure[J]. *International Journal of Engineering*, 2004, 17(2): 171-182.
- [61] 张英芝. 数控车床故障分布规律及可靠性[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(1): 156-159.
- [62] 刘红旗, 陈世兴. 产品绿色度的综合评价模型和方法体系[J]. *中国机械工程*, 2000, 11(9): 1013-1016.
- [63] 王桂萍, 贾亚洲, 乔巍巍, 张日明. 故障比重比在数控机床故障分析中的应用[J]. *机床与液压*, 2008, 36(1): 174-177.
- [64] 莫黎. 可靠性增长设计技术[J]. *舰船电子工程*, 2004, 24(6): 139-142.
- [65] 王春秀. 数控机床使用中的可靠性增长[J]. *宁夏工程技术*, 2002, (3): 238~239.
- [66] 程晓民. 卧式加工中心液压系统早期故障严重度分析及其防止措施[J]. *机电工程*, 2003, 20(5): 38-40.
- [67] 陆廷孝, 郑鹏洲. 可靠性设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

## 在读期间发表文章目录

### 发表文章:

- [1] 邹辉, 黄筱调, 洪荣晶. 基于两重威布尔分布的大型数控铣齿机可靠性评价 [J]. 机械设计与制造, 2010, (2). (已录用, 中文核心)
- [2] 邹辉, 黄筱调, 洪荣晶. 基于可靠性的大型数控铣齿机故障综合分析 [J]. 机械设计与制造, 2010, (2). (已录用, 中文核心)
- [3] 邹辉, 黄筱调, 洪荣晶. 回转支承双圆弧滚道磨削砂轮修整方法优化 [J]. 机床与液压, 2008, (12). (已发表, 中文核心)

### 申请专利:

- [1] 黄筱调, 洪荣晶, 邹辉. 用于回转支承滚道切削加工的成型方法 [P]. 中国: ZL 2009100281466. (发明, 已授权)

## 致 谢

在论文完成之际，我谨以最诚挚的心情向为本篇论文提供过真诚的帮助和支持的老师、同学、亲友和家人表示衷心的感谢！

本文是在导师黄筱调教授的悉心指导下完成的。导师广博的学识以及严谨扎实的科研作风给我留下了深刻的印象，他严格要求学生，督促我认真对待研究，将使我终生受益。可以说，在这三年的学习期间，本人学业的完成和个人的成长都离不开黄老师的教诲和帮助，学到了做人、做事、做学问的道理，学到了认真、扎实的工作作风，也特别感谢洪荣晶老师在这三年中对我学习和工作的关心和帮助。

衷心感谢培育和关心我的家人。在他们的全力支持和帮助下，我才能够全身心地投入到学习和研究之中，顺利完成学业并如期完成论文工作。

衷心感谢评阅本论文的专家及老师们！