

国产数控机床可靠性技术综述*

Review on Reliability Technology of Home-Made NC Machine Tool

重庆大学机械工程学院先进制造技术研究所 张根保
清华大学机械工程学院机械系 王立平



张根保

重庆大学教授,机械制造专业博士生导师,重庆大学机械设计制造研究所所长。长期从事先进制造技术、计算机集成制造系统、数控机床可靠性、现代质量工程、企业信息化等方面的研究。先后主持和参加了国家科技重大专项、国家高科技计划项目、国家自然科学基金重点项目等 60 余项。先后获省部级科技成果一等奖 1 项、二等奖 2 项。

数控机床可靠性相关概念

根据国家标准 GB-6583 的定义,可靠性是指产品在规定的条件下、在规定的时间内完成规定任务的能

本文对数控机床的可靠性技术进行全面论述,包括可靠性设计技术、制造可靠性技术、可靠性试验技术、可靠性评估技术、早期故障消除技术、运行可靠性技术、可靠性管理技术等,最后提出国产数控机床可靠性提升策略。

力。数控机床产品的工作条件一般包括加工尺寸、切削用量、切削功率、使用环境条件、加工材料等设计规定的条件;规定的时间可以是设计确定的运行寿命,也可以是机床大修前的年限,还可以是考核时确定的任何年限;规定的任务是指机床设计时确定的功能,例如加工中心可以完成钻、铣、镗、绞、攻丝等功能。

数控机床的可靠性一般是以故障来表征的,可靠性高就意味着产品在使用过程中所发生的各种故障少。

数控机床属于可修复产品,一般采用平均故障间隔时间(Mean Time Between Failure: MTBF)来衡量其可靠性。MTBF 是个统计学概念,一般可用式(1)计算。

$$MTBF = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^n t_i = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n r_i}, \quad (1)$$

其中, N_0 为在评定周期内机床累计

故障频数; n 为机床抽样台数; t_i 为在评定周期内第 i 台机床的实际工作时间(h); r_i 为在评定周期内第 i 台机床出现的故障频数。

经过近 20 年攻关,国产数控机床的可靠性得到较大的提高,从早期的 100 多小时提高到“十五”期末的 500 多小时。通过《高档数控机床与基础制造装备》国家科技重大专项的实施,使得专项产品的可靠性普遍达到 900h 以上,在“十二五”期间的目标是整机达到 2000h,基本达到国际先进水平,但距 5000h 的国际领先水平仍然存在一定的差距。

数控机床在其寿命周期内的故障发生概率是不同的,可用图 1 的故障率曲线(俗称浴盆曲线)来表示。

本文对数控机床的可靠性技术进行全面论述,包括可靠性设计技术、制造可靠性技术、可靠性试验技术、可靠性评估技术、早期故障消除

* 国家自然科学基金资助项目(50835008、51175527),国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2012ZX04011-031)资助。

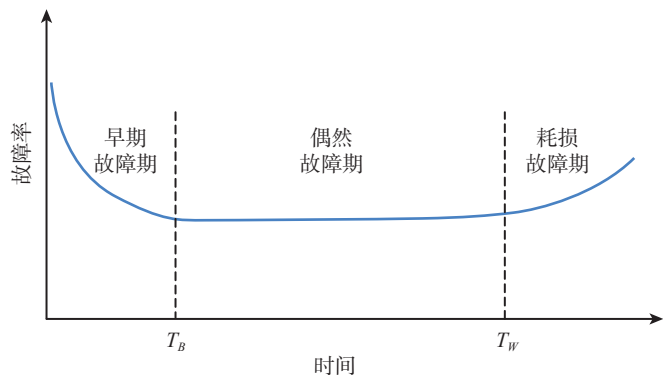


图1 数控机床的故障率曲线

技术、运行可靠性技术、可靠性管理技术等,最后提出国产数控机床可靠性提升策略。

数控机床可靠性设计技术

产品可靠性首先是设计出来,其次才是制造出来的。因此,机床的设计过程在提升可靠性方面具有重大作用。

1 可靠性建模

可靠性建模是根据可靠性分析的需求,针对产品结构建立的逻辑分析模型(又称为可靠性框图)。可靠性模型一般有串联模型、并联模型和混联模型3种类型。如:某精密卧式加工中心由B轴、刀库系统、主轴箱、托盘交换装置、传动装置、电气系统、辅助系统(防护装置、液压系统、冷却系统、排屑系统、润滑系统、气动系统和电气系统)等12单元模块组成,其可靠性模型如图2所示,这是个典型的加工中心可靠性串联模型。

张根保^[1-3]等利用GO法建立了加工中心的整机及各功能部件的任务可靠性模型,这种模型具有建模简单,分析方便等特点。图3是用GO法建立的加工中心B轴传动元任务的GO图模型。

2 可靠性分析

(1)应力分析。

机床的零部件在运行过程中承受的载荷分为两类:工作载荷和非正常载荷。工作载荷是完成设备功能所必需的;非正常载荷则是由于

设计不当和在制造过程造成的,例如加工残余应力、热应力、受力不均衡、刚度不够等,非正常载荷会使零部件的变形加大,造成不正常的磨损和损坏。应力分析的目的就是通过结构设计使得非正常载荷减少到最小。张耀满^[4]等利用热和结构耦合技术仿真计算了主轴箱在热和结构耦合作用下的温度场及热变形,建立了某数控机床主轴箱有限元分析模型,分析确定了主轴部件和主轴箱的热变形趋势,为主轴箱的优化设计和热误差补偿奠定了基础。仇健^[5]等通过主轴恒转速和变转速热误差试验分析主轴箱温度场分布及其对主轴热误差的影响趋势,建立龙门机床误差元素模型,分析影响机床各坐标轴加工精度的主轴热误差分量,并提出结构优化、热平衡、误差补偿建模等3种减少热误差的措施。王维等^[6-8]提出一种数控机床的几何和热误差综

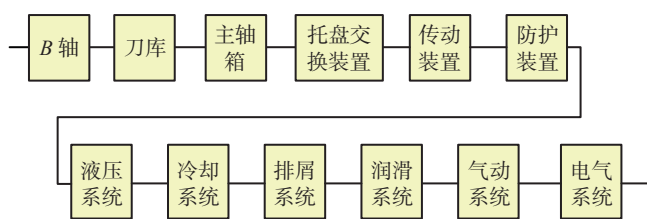


图2 某卧式加工中心整机可靠性框图

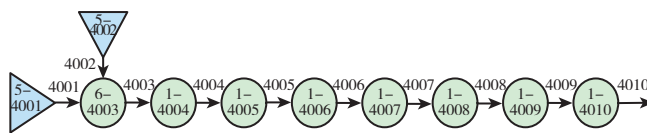


图3 加工中心B轴传动元任务GO图模型

合建模方法,在不同的机床温度状态和工况下进行动态实时补偿,大幅提高了机床的精度。并在针对速高精度数控车床主轴的热应力进行了理论建模与分析。

(2)故障树分析。

故障树(Fault Tree Analysis: FTA)是一种描述故障因果关系的有方向的“树”,是最常用的可靠性分析方法。利用故障树能对机床运行中各种潜在的故障进行识别,具有简明,形象化的特点。张根保^[9]等提出一种机床液压系统故障模式溯源分析方法,对每个底事件的概率重要度和相对概率重要度进行了计算,并阐述了重要度分析在可靠性改进和控制过程中的重要作用。张英芝等^[10-11]运用模糊故障树理论,对数控车床主轴进行了故障树定量分析,求出了在不同置信水平下数控车床主轴发生故障的概率区间。

(3)故障模式影响与危害性分析。

故障模式影响与危害性分析(Failure Mode Effects and Criticality Analysis: FMECA)是故障模式及影响分析(FMEA)和危害性分析(CA)的综合,这是一种以故障模式分析为基础,以故障影响改进为目标的分析技术。它通过逐一分析各组成部分的不同故障对机床运行的影响,全面识别设计中的薄弱环节和关键控制环节,并为评价和改进产品设计的可靠性提供基本信息。国内外不少学者进行了FMECA的相关研究。戴城国^[12]等提出一种基于模糊综合评判的FMECA方法,通过建立因素集、评价集和权重集等的步骤,实施

模糊综合评价,得到评判结果,从而可以确定各故障模式之间的相对危害度大小并进行排序。黄兆哲^[13]等提出一种基于模糊评价法与灰色关联决策的 FMECA 分析方法,利用模糊评价方法,将故障模式影响及危害性分析中的定性指标定量化,并结合灰色关联决策方法确定故障模式危害度的顺序,提高了分析的准确性。

3 可靠性设计

(1) 可靠性预计。

可靠性预计是依据产品的工程经验、历史故障数据、当前技术水平和组成零部件的可靠性状况,预测产品实际可能达到的可靠度。根据可靠性预计的结果,可以修改设计方案,改进薄弱环节,达到提高产品可靠性的目的。可靠性预计的方法一般有性能参数法、相似设备法和失效率预计法。张海波^[14]应用 FMECA 法对某型号数控系统的故障多发部位进行了研究,指出了该数控系统及其相关功能部件的可靠性薄弱环节,为数控系统的可靠性设计和分析提供了依据。张根保^[15]等把灰色系统理论引入到 GO 法可靠性分析中,建立起一种考虑加工中心各功能部件在不同工况下的动态可靠性预测模型。

(2) 可靠性分配。

可靠性分配是指把机床的可靠性指标按照一定的准则分配给各个组成单元,使机床的可靠性达到设计要求。如果某一部件的实际可靠性达不到分配的指标要求,可以通过修改设计方案或采用可靠性更高的部件来替换。可靠性分配的要害是了解零部件可能达到的可靠度以及确定合理的分配方法。张根保^[16]等针对数控机床加工零件过程的动态性特征,将多阶段任务系统理论和任务可靠性原理结合起来,提出一种基于任务的可靠性分配方法,可以确定运行时间、重要程度、复杂程度、技术水平和工作状况等 5 个影响可靠性分

配的重要因素。杨明顺^[17-18]等提出一种基于神经网络的模糊可靠性分配方法,它有效地利用了设计专家的知识 and 已有的设计数据,适合于设计条件不很明确时对可靠性进行粗略分配。

数控机床制造可靠性技术

制造是保证可靠性的重要环节,它与设计过程共同形成产品的固有可靠性。

1 进货质量控制

大多数机床外购件往往属于小批量生产,供应商的质量保证能力不强,产品质量问题频出。为了提高零部件的质量和可靠性,必须从供应商质量管理提升和产品质量入厂把关入手,才能最终提高零部件质量和可靠性。林成汉^[19]等以供应商质量管理为中心点,结合博弈论着重研究在供应链环境下应该如何进行供应商质量管理,并提升供应商质量管理能力。张素婷^[20]等从供应商评价、生产件批准、日常质量管理等方面出发,结合日常在供应商质量管理方面所做的工作,探讨供应商质量管理。黄敬猛^[21]等提出了零件质量指数(PQI)和首样通过指数(ISPI) 2 个指标来反映供应商的产品质量控制能力,并且根据产品质量数据动态地评价供应商的质量控制能力,为企业选择供应商提供有力的依据。

2 加工一致性控制

零部件的加工精度对产品性能稳定性和可靠性具有很大影响,例如,在公差范围内的两对零件进行装配,如果两对零件的精度分别达到其上下极限偏差,那么,得到的配合性能会有很大的差别。因此,为了提高产品的性能和可靠性,必须对零件的加工精度进行控制,提高零部件质量的一致性。提高加工一致性的手段主要是提高过程能力指数,由于过程能力指数都是无量纲的简单数,不仅对生产过程的状态提供了简洁明了

的指示,同时也方便操作员及时发现问题、解决问题,使生产过程处于较高的过程能力状态,较少损耗,节省开支。重庆大学张根保教授课题组^[22]在归纳总结工序质量控制及过程能力指数相关理论的基础上,对基于过程能力指数的工序质量控制及抽样检验方案进行了研究。

3 可靠性驱动的装配工艺

据调查,装配环节造成的机床故障会占到总故障数的 40% 以上,因此,对装配过程进行可靠性控制是非常主要的,包括可靠性装配工艺、清洁装配和无应力装配。

传统的机床装配工艺都是以精度保证为核心制定的,缺乏对可靠性的考量。重庆大学张根保教授课题组^[23-25]提出可靠性驱动的装配工艺的学术思想,以机床的谱系研究为切入点,以结构化分解为手段,得到零部件的元动作,再以元动作为核心进行可靠性、精度和精度寿命的一体化分析和计算,采用链接模型及 DSM 设计结构矩阵对元动作的装配过程进行建模及装配关键质量控制,即将可靠性、精度、精度寿命的一体化控制,再从元动作逐步综合,最后得到整机的可靠性、精度和精度寿命。

装配环境的清洁度对装配质量具有很大影响,对于高精度产品的装配,环境的影响更加突出。董维川^[26]提出了清洁度及装配清洁度的概念,并对清洁度的测定及分析方法、清洁度等级、分析报告和保证体系等进行了阐述与研究。

张根保^[27-28]等针对液压系统清洁度对整个系统故障影响缺乏量化分析方法和工具,液压系统故障及故障源的多样性问题,对液压系统的清洁度和故障进行分析,首次提出“清洁度熵”的概念,分析清洁度对液压系统故障的影响,建立了液压系统故障源的特性判断矩阵,将液压系统非破坏性故障追溯到各零件、油液等的清洁度,建立了清洁度熵的数学模

型,并运用专家打分法对各清洁度熵综合权重进行评价与排序,提取影响系统性能的关键故障源。

由于装配操作不当,会使得零部件产生附加应力,造成变形和过度磨损。因此,减少装配应力是装配环节必须关注的问题。刘检华^[29]提出无应力装配的概念,采用虚拟技术,从过程和物理特性的角度实时地模拟装配现场和装配过程中可能出现的各种问题和现象,为实现产品的科学装配和装配质量预测提供了有效途径,可以大幅度减少装配应力。

4 现场管理

与质量管理一样,影响产品制造可靠性的因素有5M1E(人、机、料、法、环、测),产品出现的质量和可靠性问题大多是由于这6个因素控制不当而产生的,因此要在制造过程中控制可靠性,就必须从这6个因素着手。另外,国内企业的人员素质较低,很难严格遵守操作规程,这是造成国产机床可靠性差的主要原因。因此,要加强工艺纪律管理。董晓林^[30]提出“5M1E”是引起产品质量波动的6大因素。控制正常波动、消除异常波动是现场质量管理的工作重点。并以客车轴承故障为例,对造成产品质量不合格的原因进行了剖析,阐明过程质量分析方法。李裕民^[31]论述了工艺纪律在机械加工行业中的重要性,它是提高产品质量的关键,是企业的基础,论文从贯彻执行工艺纪律着手,运用科学的管理方法,在生产过程中严格遵守工艺纪律,稳定产品质量取得了较好的效果。

数控机床可靠性试验技术

试验是保证和提高产品可靠性的重要手段,可以说,没有试验就没有可靠性。可靠性试验是对产品的可靠性进行调查、分析和评价的一种手段,其目的是发现在设计、材料、制造、装配工艺方面的各种缺陷,为改善产品的性能,提高可靠性

水平,减少维修及保障费用提供科学依据。目前国内外对于数控机床可靠性试验技术的研究主要集中在可靠性试验的设计方法和应用研究上。其中,重庆大学张根保教授课题组^[32-34]设计了一种可靠性强化试验方案,采用多种应力共同组成综合应力试验剖面,使得在较短时间内激发出数控转台的故障;提出了数控机床整机及关键功能部件的可靠性试验方法,采用多种应力共同作用使得数控机床的潜在故障在较短时间内激发出来。陈循等^[35]在加速试验应用需求分析的基础上,提出加速试验的技术体系,对目前加速试验的研究与应用现状进行综述和分析,对我国发展加速试验技术提出以指南与规范推进应用等的对策思考。

数控机床可靠性评估技术

可靠性评估是利用产品寿命周期试验或运行所产生的故障数据,在给置信度的条件下,对数控机床的零部件或整机的固有可靠性(例如MTBF值)进行分析和认定的过程。数控机床属于多品种、小批量产品,往往还具有定制的性质,且数控机床的寿命周期较长,很难获得大量的、具有可比性的故障数据。数控机床的可靠性评估往往具有小样本数据的特征。数控机床的可靠性评估首先面对的问题是评估数据的收集,其次是如何从少量的数据中提取出(或补充)大量对评估有用的信息。数控机床可靠性评估中的数据主要来源于实验室、制造过程和运行现场。

数控机床可靠性估计技术是当前国内外学者研究的热点问题。为了评估数控机床的可靠性,王智明、张根保等^[36]提出了用AIC、BIC信息准则选择多台机床故障间隔时间的分布模型和模型参数的方法,提高了区间估计的精度。王智明、张根保等^[37]为解决数控(NC)机床最小维修的可靠性评估问题,提出了基于随

机点过程的多台NC机床时间截尾可靠性评估的可修系统,建立了故障时间的非齐次泊松过程(NHPP)模型。

Z Wang、J Yang和G Wang^[38]等对数控机床的可靠性进行分析,研究提出了三参数Weibull混合模型。用实例证明:三参数威布尔分布的混合模型具有比其他的Weibull模型更好的优点,适合用于多个故障模式和原因的多个数控机床失效数据的建模。

数控机床早期故障消除技术

从故障率浴盆曲线可以看出,在机床制造完成后的一段时间内,机床的故障呈多发状态,随着时间的推移,故障数会逐渐减少,直到进入偶然故障期。这个时间段持续的时间长短根据产品类型、生产规模和制造水平而变,国产加工中心的这一时间段可能有1200h左右。很多国内机床制造企业在产品装配调试完成后,会空运转36~48h,这种低负载、短周期的试运行,基本上激发不出故障,使得大量的早期故障到用户处才能发现。对用户而言,会对国产机床丧失信心;对制造企业而言,会增加大量的售后维修费用。因此,需要将早期故障尽量消除在制造企业。为了实现早期故障消除,首先需要根据历史数据利用数据拟合技术建立量化的浴盆曲线。找出早期故障期和偶然故障期的时间拐点,作为早期故障消除的依据。还需要在制造企业建立早期故障消除的闭环体系结构,通过完整的故障树分析发现潜在的故障,通过大量试验、加速加载运行、用户试用激发和发现早期故障,并向设计和制造过程反馈,通过设计方案修改和制造过程改善将早期故障消除在设计制造阶段。

重庆大学张根保教授课题组对卧式加工中心故障率浴盆曲线进行了量化研究,提出了卧式加工中

心整机及各关键功能部件的早期故障消除技术^[39-40],并获得了数控机床整机、数控转台、数控机床托盘交换架的早期故障检测方法的发明专利^[41-43],将系列加工中心现场收集的故障数据以及其维修记录信息分别运用了单威布尔分布模型和两重威布尔分段模型对其故障数据进行了可靠性建模分析,对早期失效期的故障时间数据分布规律进行了较深入的研究,并对拟合模型上的时间拐点即早期故障期持续时间进行了确定。进而对加工中心早期故障模式影响做了深入分析,并针对分析结果提出有针对性的可靠性改进与保障措施。通过卧式加工中心早期故障试验,找出其早期故障模式,进行早期故障严重度分析,针对性地提出可靠性改进建议和可靠性保证措施,降低加工中心在使用过程中发生故障的频率,提高其使用可靠性。

Yiqiang Wang等^[44]通过对9台加工中心进行出厂前试验测试,采集数控机床出厂前试验故障数据,建立了早期故障数据库,对数控机床早期故障消除技术进行了建模,以消除数控机床早期故障,提高机床可靠性。

数控机床运行可靠性技术

数控机床的运行可靠性包括机床的安装调试、维护保养、维修、运行环境控制、加工条件控制等。统计数据表明,机床由于运行因素引起的故障会占到总故障数的20%左右。在安装调试中,垫铁的布置和调整具有重要的意义,特别是对于大型机床而言,由于垫铁的布置和调整不当,会使机床大型结构件发生变形,影响机床的精度和精度寿命。陕西秦川机械发展股份有限公司杨奇俊^[45]等人发明了一种机床计量垫铁,可以测量及显示垫铁本身承受的压力大小为调试、安装机床提供可靠技术数据。大连智云自动化装备股份有限公司郭玉坤^[46]提出了智能垫铁的概念,并获得了“智能垫铁选择系统及方法”的发明专利,该智能垫铁能选择模块化的PLC程序。同时,牛炳辉等^[47-50]对垫铁进行了研究,采用浮顶式垫铁技术解决了由于地面不平造成的机床不稳定问题,可以大幅度减少由于垫铁引起的变形。机床的精度、精度寿命和可靠性与维护保养水平密切相关,由于维护保养不到位会大幅度提高机床的故障率,也会大幅度缩短机床的精度寿命。重庆大学张根保教授的课题组提出运行可靠性^[51-53]监控的概念,开发了用户开机强制维护保养界面,可以强制用户在运行机床前对机床进行必要的保养,该课题组同时还对数控系统进行了二次开发,并获得了“数控机床工作参数监测系统”的实用新型专利,可以实现对工作环境(湿度、温度、振动、灰尘等)、油液清洁度和极限加工条件进行在线监控和预警。

因此,为了从本质上提高国产数控机床的可靠性,需要在企业建立系统的可靠性管理体系,并持续在企业实施。重庆大学张根保教授课题组提出“可靠性管理体系”的概念,并先后在宁江机床、秦川机床、浙江亚威、扬州锻压等企业建立起完整的可靠性管理体系,在提升上述企业的产品可靠性方面发挥了较大作用。可靠性管理体系一般包括以下内容:可靠性组织机构和职责、可靠性数据管理规范、可靠性评审管理、可靠性检核表系统、可靠性评价管理、油品管理办法、可靠性推进中的激励制度、产品研发阶段可靠性文件及规范、加工阶段可靠性控制文件及规范、装配阶段可靠性控制文件及规范、安装调试及用户可靠性管理规范、可靠性实验文件及规范、采购可靠性控制文件及规范等。可靠性管理体系的结构如图4所示。

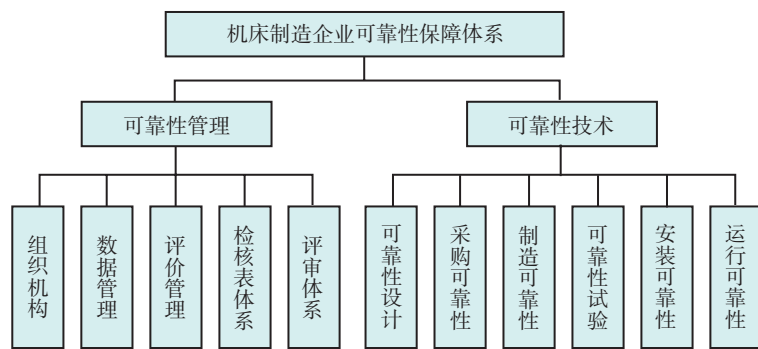


图4 机床制造企业可靠性管理体系

同时对数控机床运行可靠性检测系统进行了研究,把检测、电子与计算机技术相结合解决了数控系统运行可靠性保障问题,可以及时发现机床运行中的故障苗头。

数控机床可靠性管理技术

国产数控机床可靠性差除了技术水平差外,很大原因在于管理技术的落后。包括人员的素质差、工作的随意性强、缺乏成熟的可靠性管理标准(包括设计标准、试验标准、管理标准等)和系统的可靠性管理体系。

国产数控机床可靠性提升策略

数控机床属于典型的多品种、小批量产品,实施可靠性的特点不仅与汽车、电子等大批量产品不同,与飞机、火箭等产品也不相同,需要结合机床的特点提出针对性强的实施策略。归纳起来,笔者认为:为了提高国产机床的可靠性,需要从打造企业的可靠性增长能力入手,增强企业自身的“可靠性”素质,才能确保制造出比国外更可靠的产品。具体讲,需

要在企业打造4种能力:可靠性预防能力(主要体现在设计方面)、可靠性控制能力(主要体现在制造方面)、可靠性基础能力(主要体现在试验手段方面)和可靠性保障能力(主要体现在管理方面)。

1 预防能力:可靠性设计与分析

国内机床制造企业在进行产品设计时,基本上不做可靠性设计与分析,从源头上就带来可靠性差的隐患。为了提升可靠性预防能力,就必须从设计和分析入手,在企业搭建可靠性设计与分析平台,该平台应该包括以下功能:故障树分析、故障模式影响与危害性分析、结构应力均衡性分析及优化、电磁兼容性分析技术、可靠性建模、可靠性预计、可靠性分配、可靠性评估、可靠性基础数据管理等。

2 控制能力:制造过程可靠性保障

制造过程是设计意图的具体体现,但国内企业所加工的零部件的一致性很差,在装配工艺中基本不考虑可靠性问题,所谓的精度调整事实上就是“敲打”轴承改变配合状态,造成轴承的附加应力大,不仅造成精度的快速丧失,还会增加产品的故障。为了提高制造控制能力,应该从以下几个方面入手:对零件加工的一致性进行控制;对部件装配的可靠性进行控制;对整机装配的可靠性进行控制;对加工过程的残余应力进行控制。

3 基础能力:可靠性试验手段和规范

国内企业普遍缺乏可靠性试验手段,一般只做精度检验和功能验证,在出厂之前基本上发现不了故障,把故障都带给用户。部分企业尽管制造了一些试验装置,但缺乏适当的可靠性试验规范,或者发现不了问题,甚至对试验装置弃而不用,发挥不了作用。为了提高企业的基础能力,需要做好以下工作:通过用户现场跟踪试验采集产品的故障数据(或

者开发机床的机载信息采集平台)、搭建功能部件的可靠性试验台、建立整机可靠性试验加载装置、建立成套试验规范、建立早期故障消除的技术体系。

4 保障能力:可靠性管理体系

国内主机企业的可靠性增长能力低下,那么,配套件生产企业比主机企业更差,基本上没有“可靠性”的概念,造成配套件质量极其低劣,满足不了主机企业的要求。长期以来,受计划经济的影响,再加上用户的需求旺盛,国内机床制造企业普遍不关注可靠性,大部分企业都没有形成一套系统、规范的可靠性保障体系。此外,用户“粗放型”使用国产机床,缺乏必要的维护和保养,也加剧了国产机床的不可靠。为了提升企业的可靠性保障能力,需要开展以下工作:配套件可靠性保障、可靠性保障体系的建立、可靠性管理体系的运行、用户可靠性控制等。

参考文献

- [1] 张根保,王国强. GO法在汽车可靠性研究中的应用. 汽车工程, 2009,31(9):887-892.
- [2] Zhang G B, Wang G Q, Zeng H F. Research and Implementation of Quality Control System of Product Design. 2009 IEEE International Conference on Information and Automation n (ICIA2009), 22-25 June, Zhuhai/Macau, China. (EI:20094812502000).
- [3] 张根保,王国强,何文辉,等. 基于任务的数控机床的可靠性分配技术研究. 中国机械工程, 2010,21(19):2269-2272.
- [4] 张耀满,刘启伟. 数控车床主轴部件及其主轴箱热特性有限元分析. 东北大学学报, 2011,32(4):571-574.
- [5] 仇健,刘春时. 龙门数控机床主轴热误差及其改善措施. 机械工程学报, 2012,48(21):149-157.
- [6] 王维,杨建国. 数控机床几何误差与热误差综合建模及其实时补偿. 机械工程学报, 2012,48(7):165-179.
- [7] 郭策,孙庆鸿. 高速高精度数控车床主轴系统的热特性分析及热变形计算. 东南大学学报(自科版), 2005,35(2):231-234.
- [8] 白志富,陈五一. 球铰刚度计算模

型及靠冗余支链实现. 机械工程学报, 2006,42(10):143-145.

- [9] 张根保,张恒,庞继红. 数控机床液压系统故障溯源及分析. 计算机应用研究, 2012,29(4):1356-1370.
- [10] 张英芝,申桂香,薛玉霞,等. 数控车床主轴模糊故障树分析. 吉林大学学报(工学版), 2006,36(2):65-68.
- [11] 周真,马德仲,于晓洋. 模糊灰关联分析方法在故障树分析中的应用. 电机与控制学报, 2012,16(3):60-64.
- [12] 戴城国,王晓红. 基于模糊综合评价的电液伺服阀 FMECA. 北京航空航天大学学报, 2011,37(12):1575-1578.
- [13] 黄兆哲,贾庆祥. 基于模糊评价法与灰色关联决策的 FMECA 在高速精密冲床可靠性分析中的应用[C]. //2012年全国机械行业可靠性技术学术交流会暨第四届可靠性工程分会第四次全体委员大会论文集,中国吉林长春:中国机械工程学会可靠性工程分会, 2012:92-96.
- [14] 张海波,贾亚洲,周广文,等. 数控系统故障模式、影响及危害度分析(FMECA). 中国机械工程, 2004,15(6):491-493.
- [15] 张根保,李岳,柳剑,等. 加工中心托盘自动交换装置液压系统的可靠性分析. 中国机械工程, 2013,24(2):143-148.
- [16] 张根保,柳剑,王国强. 基于任务的数控机床模糊可靠性分配方法. 计算机集成制造系统, 2012,18(4):768-774.
- [17] 杨明顺,林志航,陈琨. 基于神经网络的模糊可靠性分配. 机床与液压, 2002(1):19-21.
- [18] 彭宝华,赵建印,孙权. 复杂系统可靠性分配的层次分析法. 电子产品可靠性与环境试验, 2005,12(6):58-62.
- [19] 林成汉. 供应商质量管理研究[D]. 厦门:厦门大学, 2005.
- [20] 张素婷. 供应商质量管理. 现代商业, 2011:172-173.
- [21] 黄敬猛,姜少飞,柴国钟,等. 基于零件质量指数的外购件质量控制方法研究. 轻工机械, 2010,28(05):125-127.
- [22] 李玉玲. 基于过程能力指数的工序质量控制研究[D]. 重庆:重庆大学, 2008.6.
- [23] 张根保,刘佳,葛红玉. 装配可靠性的动态贝叶斯网络建模与分析. 中国机械工程, 2012,23(02):211-215.

本文共有参考文献53篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 亦非)