

DOI : 10.3901/JME.2013.20.130

# 数控机床可靠性技术的研究进展\*

杨兆军<sup>1,2</sup> 陈传海<sup>1,2</sup> 陈 菲<sup>1,2</sup> 李国发<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学机械科学与工程学院 长春 130025 ;

2. 吉林大学机械工业数控装备可靠性技术重点实验室 长春 130025)

**摘要 :** 数控机床是装备制造业的工作母机,其可靠性技术目前已成为制约行业发展的关键共性技术。主要对我国数控机床可靠性技术的研究进展进行综合评述。论述数控机床的可靠性建模技术、故障分析技术、可靠性设计技术和可靠性试验技术的研究历程和技术进展,介绍数控机床关键功能部件可靠性台架试验设备的技术状况。在肯定数控机床可靠性技术取得明显进展的基础上,分析指出研究工作存在的问题和不足,并对数控机床可靠性技术研究的动态和热点进行论述。从产品可靠性技术自身的发展规律和行业需求的角度对数控机床可靠性的技术发展愿景进行了展望。

**关键词 :** 数控机床 可靠性 研究进展

**中图分类号 :** TG659

## Progress in the Research of Reliability Technology of Machine Tools

YANG Zhaojun<sup>1,2</sup> CHEN Chuanhai<sup>1,2</sup> CHEN Fei<sup>1,2</sup> LI Guofa<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025;

2. Key Laboratory of CNC Equipment Reliability Technique of Machinery Industry,  
Jilin University, Changchun 130025)

**Abstract :** The computer numerical control(CNC) machine tools are the important manufacturers of other equipment in equipment manufacturing industry and their reliability level has now become the bottleneck which restricts the industry development. A comprehensive review on the state of the reliability technology research is given. A comprehensive discussion is presented on the situation of the reliability technology of the CNC machine tools in China. And then the techniques of reliability modeling and the failure analysis are discussed as well as the design technique for CNC machine tools and then the characteristics of the field test. And then the bench tests in laboratory are analyzed for key functional parts of CNC machine tools. Based on the progress of machine tools reliability, the problems are stated and the prospective tasks of this field are proposed, simultaneously, the research hotspots and trends are illustrated. The development visions of machine tools reliability are speculated based on the own law and the industry demand of machine tools.

**Key words :** Computer numerical control machine tools Reliability Research development

## 0 前言

数控机床是装备制造业的工作母机,其技术水平的高低代表了一个国家制造业的发展水平。自 2002 年起,我国已连续 10 年成为世界机床消费和进口第一大国<sup>[1-2]</sup>。目前国产数控机床在精度、速度、多轴联动和复合加工等先进功能方面取得了明显进展。但机床功能的维持能力即可靠性与国际水平尚有较大差距。可靠性低是国产数控机床,特别是中高档数控机床市场占有率低的主要原因,已成为国

内机床产业发展的技术瓶颈,引起了行业和学术界的高度关注<sup>[3-4]</sup>。

数控机床作为复杂的机电液系统,它既不像电子产品和机械结构产品那样已经具备了相对成熟的可靠性理论与技术,也不像航空航天产品和武器装备那样已经形成了比较完整的可靠性技术体系。国内数控机床可靠性技术研究工作起步较晚,涉足的机构和研究人员较少,技术积累薄弱,正处于发展阶段。工业发达国家如德国、日本等的机床跨国公司企业掌握了先进和相对成熟的数控机床可靠性设计和试验技术,并视其为企业的核心竞争力和核心机密,严格管控,密不外宣。如何提高数控机床可靠性既是重要的技术问题,也是企业的管理问题。

\* 国家科技重大专项资助项目(2013ZX04011-012)。20130401 收到初稿,20130827 收到修改稿

本文仅从技术层面上对数控机床可靠性的技术状况和研究进展进行综合评述。

## 1 数控机床可靠性的技术进展

20 世纪 70 年代中期,随着数控机床在工业发达国家的普及和先进功能的不断增加,机床的故障问题开始引起行业的关注。英国机床工业协会的 STEWART<sup>[5]</sup>采用数控机床用户现场跟踪试验的方法收集了数控机床的现场故障数据,并对数控机床进行了故障分析,并于 1977 年在 Macclesfield 国际可靠性会议上做了关于数控机床可靠性的报告,报告指出:由于机床故障导致机床的停机时间占整个机床考核时间的 7.6%,每个月机床平均发生 1~2 次故障。1982 年,前苏联的学者<sup>[6]</sup>对数控机床的研究和使用经验进行总结,撰写了数控机床可靠性领域的首本专著《数控机床的精度与可靠性》,书中系统地论述了数控机床可靠性的概念,并给出了相应的评定指标。自 STEWART 和普罗尼科夫的研究之后,数控机床可靠性技术在国际上逐步受到重视。

在国内,北京机床研究所和原吉林工业大学是较早开展数控机床可靠性研究的科研机构,于 20 世纪 80 年代前后开始对数控机床可靠性的概念及其表征方法、数控机床零部件的疲劳强度可靠性进行探讨<sup>[7-10]</sup>。随着数控机床在国内的发展,我国一批专家学者在数控机床可靠性建模和评估、故障分析、可靠性设计和试验、可用性以及维修性等方面开展了积极的研究和探索,取得了一批研究成果。

### 1.1 数控机床可靠性建模

可靠性建模是进行数控机床可靠性评估与分析 and 可靠性设计的前提。20 世纪 60 年代,美国相继颁布了 MIL-HDBK-217、MIL-STD-781、MIL-STD-785 等可靠性标准,其中规定了一般产品的可靠性建模、可靠性预计和可靠性试验等方法。1982 年,KELLER 等<sup>[11]</sup>对 35 台数控机床进行了为期 3 年的现场跟踪试验,分别利用对数正态分布和威布尔分布函数对机床的故障间隔工作时间进行了拟合,建立了数控机床的可靠性模型,并由此得到了数控机床平均故障间隔工作时间(Mean Time between failures, MTBF)的估计值。

吉林大学在国内较早开展了数控机床可靠性建模的研究。1995 年,JIA 等<sup>[12]</sup>收集了 24 台国产数控车床转塔刀架 1 年的故障数据,利用近似中位秩公式计算故障间隔工作时间的经验分布函数,以指数分布函数来拟合故障间隔工作时间的分布,运用线性回归方法进行参数估计,得到了该批数控车

床的故障间隔工作时间的指数分布函数,并通过了  $\chi^2$  检验。1999 年,WANG 等<sup>[13]</sup>运用 80 台数控车床的故障数据进行可靠性建模时,发现在置信度水平较低的情况下,其故障间隔工作时间能够通过多种分布函数的假设检验。为此选取贝塔分布、伽马分布、威布尔分布、对数正态分布、极值分布、正态分布为备择模型分别进行函数拟合,然后选取各个拟合出的模型函数与经验分布间的累积误差、概率密度函数与经验分布密度的均方差以及各模型函数的柯尔莫哥洛夫检验统计量为因素集,利用模糊综合评价方法对各模型进行优选,得出其服从对数正态分布的结论。

威布尔分布函数的适用范围广,当其形状参数取不同数值时,可以代表指数分布、瑞利分布和近似代替正态分布<sup>[14]</sup>。戴怡等<sup>[15]</sup>在利用某系列加工中心的故障数据进行可靠性建模时,认为指数分布并不是最接近的分布,因而假设其服从威布尔分布,利用极大似然估计法计算得到了威布尔的分布参数,并通过了 Hollander-Proschan 假设检验。

用于可靠性建模的故障数据通常会存在截尾数据,也是有用的数据资源。DAI 等<sup>[16]</sup>利用残存寿命函数建立了威布尔分布的极大似然函数,并进行了分布参数估计,得到利用了截尾故障数据资源的数控机床可靠性模型。

数控机床属典型的复杂机电液系统,在数控机床寿命周期不同的时段内,故障率的曲线形状也不同,利用一重威布尔分布对故障间隔工作时间进行分布拟合时会存在一定的误差。鉴于此,北京航空航天大学陈殿生等<sup>[17]</sup>提出利用两重威布尔分段模型建立数控机床的可靠性模型,运用威布尔概率纸图分析法进行了参数估计,通过拟合检验证明了分段模型的正确性。

上述方法均假设数控机床出现故障后“修复如初”,与工程实际有一定差异。针对这一问题,上海交通大学的王智明等<sup>[18-19]</sup>在数控机床进行最小维修的假设下,提出利用非齐次泊松过程(Non-homogeneous poisson process, NHPP)和边界强度过程(Bounded intensity process, BIP)模型对故障发生时间进行了建模,运用 Fisher 信息矩阵(Fisher information matrix, FIM)法给出了模型参数的点估计和区间估计。

随着数控机床工作时间的推移,可靠性通常会发生退化,处于偶然故障期的数控机床其失效率也并非常数。以往只考虑故障间隔工作时间而不考虑故障间隔工作时间发生次序所建立的可靠性模型,在用其描述和预计机床可靠性时,往往与实际情况

存在差异,而且随着机床工作时间的推移,差异愈加明显。针对这一问题,吉林大学的杨兆军等<sup>[20]</sup>提出了一种基于故障发生时间的、同时考虑故障间隔工作时间和故障间隔工作时间次序的时间动态可靠性建模方法,所建模型能够描述数控机床在任意时刻的可靠性水平,并以 18 台加工中心为实例进行建模,得到其可靠度随工作时间的变化规律。针对数控机床可靠性退化的问题,JEFFREY 等<sup>[21]</sup>则采用非齐次连续时间马尔可夫链和齐次连续时间半马尔可夫链方法对其进行了可靠性建模,得到了数控机床的瞬态可靠性。

综上所述,数控机床可靠性建模的研究经历了从简单到复杂,从假设“修复如新”到“修复如旧”,从时间静态到动态的过程,使得模型不断接近工程实际,为数控机床的可靠性设计和分析提供了依据。

## 1.2 数控机床故障分析

故障分析是实施数控机床可靠性增长的必要措施。国内外主要采用故障模式影响及其危害性分析(Failure mode, effects and criticality analysis, FMECA)和故障树分析(Fault tree analysis, FTA)等两种方法。

### 1.2.1 数控机床的 FMECA

FMECA 的主要目的是辨认产品的各种故障模式和评价其对产品可靠性的影响,为消除或减少故障的发生提供依据。在进行 FMECA 时,如不进行危害性分析则为故障模式及影响分析(Failure mode and effects analysis, FMEA)。20 世纪 60 年代,航天工业最早应用 FMEA<sup>[22]</sup>,70 年代美国海军和国防部制定了相关的标准,相继应用和推广 FMECA<sup>[23-25]</sup>。80 年代,我国开始有学者对数控机床进行故障分析方法的研究<sup>[26-28]</sup>。1987 年,我国将 FMECA 美国标准引入国内,之后推广应用于国防工业和机械行业<sup>[29]</sup>。

1986 年,英国学者 MCGOLDRICK 等<sup>[30]</sup>采用向专家和操作者进行问卷调查的方式对在英国和土耳其使用的一批相同类型数控机床的故障模式进行了分析,表明数控机床的设计者对其实际运行状况了解不足所导致的设计缺陷是致使数控机床故障频繁的主要原因。

戴怡等<sup>[31]</sup>运用常规 FMEA 方法对立式加工中心的故障进行了分析。从故障模式和故障部位两个角度对其进行了统计分析:零部(元器)件损坏占总故障模式的 42.31%,液、汽、油渗漏故障模式占总故障模式的 26.92%,其他故障模式比较分散;主轴和刀库部位的故障占总故障的 38.46%(其中主轴部位的故障多与换刀有关),润滑系统故障占总故障的

24.36%, $z$  向进给系统故障占总故障的 16.67%,其他系统故障比较分散。在应用 FMEA 时,经常需要由专家对各种故障模式的危险度、发生度和探测度进行打分,会产生主观误差。YANG 等<sup>[32]</sup>用模糊隶属度函数表示专家对危险度、发生度和探测度的评分信息,对每个故障模式建立了影响因素空间图,利用加权欧式距离算法推导出风险优先系数的  $\alpha$  截集,最后对其进行了解模糊,得到了故障模式的风险优先系数排序。

FMECA 是 FMEA 的扩展。于捷等<sup>[33]</sup>在应用 FMEA 对一批数控车床进行故障分析的基础上,进行了故障模式的危害性分析,即实施了 FMECA,找出了该批数控车床的薄弱环节:CNC 系统和转塔刀架故障模式的危害性(致命度)最高,是影响该系列数控车床可靠性的关键部件,进而做出了更换 CNC 系统的建议,并对刀架进行了改进设计。传统 FMECA 方法考虑的是故障模式发生频率、故障模式对系统的影响以及故障率三个因素,没有考虑故障发生后的维修对系统的影响。许彬彬<sup>[34]</sup>在进行 FMECA 时考虑了维修程度对数控机床故障模式的影响,利用加权欧式距离和影响因素空间图得出各故障模式的综合风险值,进而找出了数控机床的薄弱环节。南京理工大学金渊源等<sup>[35]</sup>和大连理工大学的 LU 等<sup>[36]</sup>将 FMECA 方法应用到了链式刀库及机械手早期故障筛选试验和盘式刀库及机械手的故障分析中,对 FMECA 的应用进行了拓展。

### 1.2.2 数控机床的 FTA

FTA 是采用特殊的倒立树状逻辑因果关系图对产品的故障原因进行分析的方法。通过 FTA,可以知道可能导致系统发生故障(故障树的顶事件)的基本原因(故障树的底事件),用于判明潜在故障和进行故障诊断,并通过改进设计、故障监测和预防性维修等措施降低故障的发生概率。1961 年美国贝尔实验室在导弹发射控制系统的可靠性研究中首先应用了 FTA,并取得成效。由此,FTA 方法在国际上得到了快速发展和应用<sup>[37]</sup>。

在对数控机床应用 FTA 时,由于故障树结构复杂,计算困难。为了提高计算效率,于捷等<sup>[38]</sup>和陈传海等<sup>[39]</sup>分别利用二进制判决图(Binary decision diagrams, BDD)技术建立了数控机床整机和液压系统故障树,并进行了结构重要度和概率重要度的求解,得到了研究对象的可靠性薄弱环节。苏州大学陈张荣等<sup>[40]</sup>将故障树方法用于数控机床的故障诊断。事先将故障树模型存于计算机中,当机床发生故障时,计算机依据故障信息搜寻能够引起故障发生的最小割集,如与规则匹配,则输出诊断结果;

如没有相匹配的规则,就在人工的干预下添加新的规则,使规则集得到补充。

在进行数控机床 FTA 时,往往有许多底事件的发生概率是未知的,因此,常规 FTA 方法难以适用。LI 等<sup>[41]</sup>利用模糊马尔可夫模型建立了数控机床的液压系统故障树,利用模糊理论推断故障树的不确定信息,计算得到了液压系统的模糊故障率,为数控机床的可靠性改进设计提供了依据。

FMECA 和 FTA 在产品的故障分析中具有重要作用,为使企业能够有效运用其进行数控机床的故障分析,吉林大学的数控装备可靠性技术团队还专门开发了用于数控机床故障分析的计算机软件系统。该软件能够实现对数控机床的故障数据管理、FMECA 和数控机床可靠性评估等功能<sup>[42]</sup>。

### 1.3 数控机床可靠性设计

产品的固有可靠性首先是由设计决定的。目前对复杂机电系统进行可靠性概率设计的理论尚不成熟,对数控机床载荷谱等数据积累还远远不够,为了在设计层面保障数控机床的可靠性水平,研究人员进行了许多探索,并借鉴产品可靠性通用设计原则,逐渐形成了数控机床可靠性综合设计技术,如吉林大学机械工业数控装备可靠性技术重点实验室与大连机床集团有限责任公司和沈阳机床股份有限公司的技术人员共同研究制定了《数控机床可靠性综合设计技术规范》。可靠性综合设计主要包括可靠性设计准则、可靠性分配设计和基于故障分析的可靠性增长设计等。

#### 1.3.1 可靠性设计准则

可靠性设计准则是可靠性设计的经验总结,是将在产品设计过程中为保证产品的可靠性而必须遵循的设计原则制定成规范性的要求条款,用来防止设计人员重复发生已发生过的错误或设计缺陷。吉林大学机械工业数控装备可靠性技术重点实验室与沈阳机床股份有限公司和大连机床集团有限责任公司综合了标准化设计、简化设计、冗余设计、耐环境设计、维修性设计、安全设计和人因设计等可靠性设计原则,并结合数控机床的产品特点,制订了《数控机床的可靠性设计准则》。可靠性设计准则应是一个不断积累和完善的过程。

#### 1.3.2 可靠性分配设计

数控机床可靠性分配是将机床的可靠性指标按照给定的准则和约束条件分配给组成数控机床的各个子系统。在进行数控机床可靠性分配时需要考虑技术水平、重要度、任务情况、维修水平等多种影响因素。

WANG 等<sup>[43]</sup>考虑了数控机床的故障频率、故障

致命度、故障维修性、子系统复杂度、机床制造和装配技术、工作环境和寿命周期费用等 7 个因素对可靠性分配的影响,通过故障率的二元模糊分配比构造了故障率相对模糊分配比矩阵,由专家对分配准则权重打分,获得了数控车床各子系统的可靠性分配值。

在进行可靠性分配时,某一因素对可靠性的影响大小往往无法用确定值表示。针对这一问题,吉林大学杨兆军等<sup>[44]</sup>综合利用现场试验信息和专家经验,使用模糊区间数代替实数表达不确定信息,建立了区间分析、模糊综合评判和层次分析法相结合的数控机床可靠性综合分配模型。模型考虑了故障频繁性、故障危害性、维修性、复杂性、技术水平、费效比等多种影响因素,根据影响程度的大小给每个因素赋予相应的权重;进而对数控机床进行了可靠性分配。

重庆大学张根保等<sup>[45]</sup>在进行数控机床可靠性分配时,引入“任务”的概念,根据数控机床的加工总任务,建立了数控机床的任务剖面层次模型,利用模糊分析方法处理多领域专家的意见和研发过程的风险性,在此基础上实现了对数控机床的可靠性分配。

#### 1.3.3 基于故障分析的可靠性增长设计

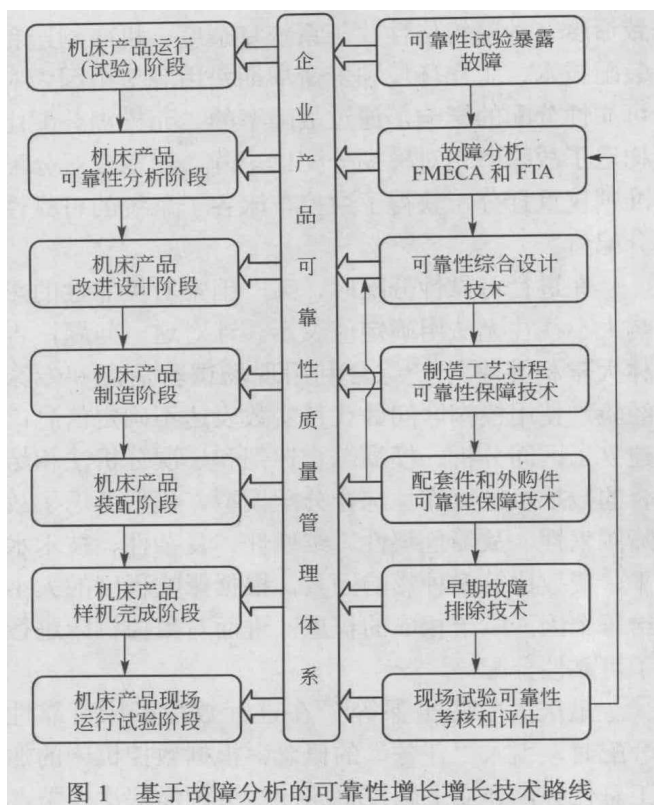
数控机床的可靠性增长伴随其全生命周期。图 1 是吉林大学机械工业数控装备可靠性技术团队凝练出的基于故障分析的数控机床可靠性增长技术路线框图。该框图共有两条主线:左边的一条是数控机床的全生命周期过程,右边的一条是伴随数控机床生命周期过程所需要实施的系列可靠性技术,以实现数控机床可靠性循环增长。基于故障分析的可靠性增长设计是该数控机床可靠性增长技术路线的核心技术,已在多家数控机床行业的骨干企业推广应用。

### 1.4 数控机床可靠性试验

可靠性试验是产品可靠性保障的基础性工作,是获取故障数据、建立可靠性模型、进行故障分析和可靠性设计的客观依据。数控机床的可靠性试验主要分为整机的机床用户现场可靠性试验和功能部件的实验室台架可靠性试验。

现场试验属于常规应力试验,可以进行大样本试验,能够全面、充分暴露故障并能真实地反映数控机床的可靠性水平,主要适用于可靠性增长试验、可靠性评估试验。现场可靠性试验主要缺点是试验周期长、工作环境艰苦并且试验条件不可控,但由于长期以来不具备数控机床可靠性台架试验的能力,现场试验几乎是其唯一的可靠性试验方法。吉





林大学机械工业数控装备可靠性技术重点实验室制定了《数控机床可靠性现场试验技术规范》，并进行了大量的数控机床的现场试验，具有丰富的现场试验经验。

实验室台架试验可以进行可靠性加速试验和故障的主动激发试验，相比于现场可靠性试验，其试验条件可控，试验效率高。21 世纪以来，国内部分企业和高校搭建了一些数控机床关键功能部件的可靠性试验台，能够进行一些空运转可靠性试验。

2009 年开始，吉林大学机械工业数控装备可靠性技术重点实验室根据加速试验应遵循不改变故障模式和故障机理的原则，在满足载荷种类和大小、载荷速度和频率以及耐久性三项基本要求的条件下，借鉴成熟的汽车发动机及关键总成的可靠性试验原理与技术，研发了具有工况模拟能力的数控机床关键功能部件的可靠性试验系统。如电主轴(图 2)、动力伺服刀架(图 3)、转塔刀架(图 4)、盘式刀库(图 5)和链式刀库(图 6)等可靠性试验系统。数控机床关键功能部件主轴和动力刀架可靠性试验系统均具有电液伺服动态切削力模拟加载和测功机扭矩加载功能，突破了国内以往不能进行工况模拟试验的落后局面。该成果已获多项国家专利授权<sup>[46-49]</sup>。并已在机床行业的骨干企业推广应用。

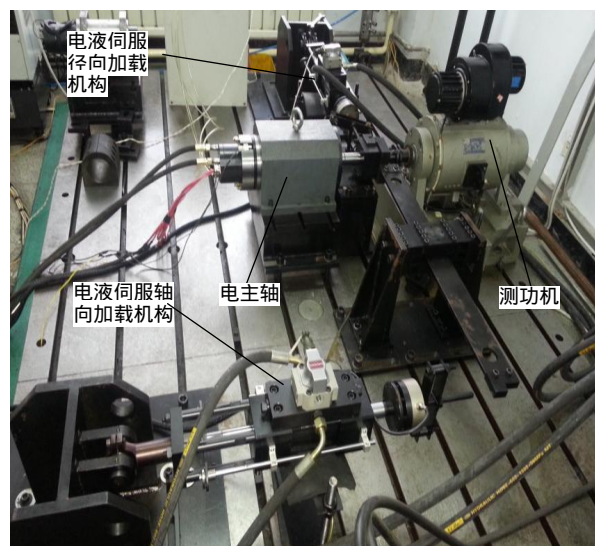


图2 电主轴可靠性试验系统

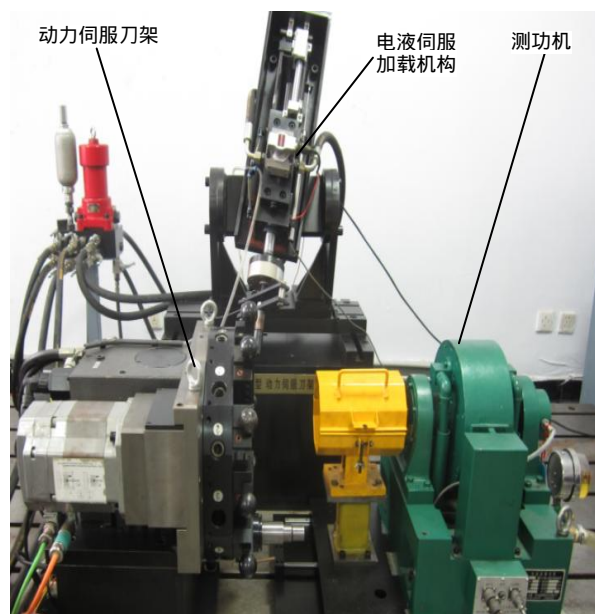


图3 动力伺服刀架可靠性试验系统

### 1.5 数控机床可靠性的技术发展动态

数控机床可靠性技术在取得了明显进展的同时，呈现以下发展动态：在可靠性建模方面，“修复如旧”的假设和时间动态模型更加接近工程实际，将会受到更多的关注。在故障分析方面，从 FMEA 向 FMECA 发展，使其更易于找出机床可靠性的薄弱环节，FTA 亦被用于机床的计算机辅助故障诊断，显现出良好的智能化应用趋势。在可靠性设计方面，正在形成包括可靠性设计准则、可靠性分配设计和可靠性增长设计的数控机床可靠性综合设计理念与方法，并将形成以此为核心理念的数控机床全生命周期可靠性增长技术。在可靠性试验方面，能够模拟真实工况的数控机床功能部件的可靠性试验系统的研制、开发功能部件可靠性台架加速试验技术的开发正在成为可靠性试验领域的研究热点。此外，随着



图 4 转塔刀架可靠性试验系统



图 5 盘式刀库可靠性试验系统



图 6 链式刀库可靠性试验系统

数控机床的网络化、智能化以及机械故障诊断技术的发展<sup>[50]</sup>，机床故障的远程监控和故障预警也已成为数控机床可靠性技术领域的热点课题。

## 2 机床可靠性技术研究存在的问题

在数控机床可靠性技术研究方面，虽然取得了明显的进展，但必须清醒地认识到，国内数控机床可靠性技术与工业发达国家相比还处于落后状态，主要存在以下问题。

### 2.1 数控机床可靠性研究的学者和机构较少

数控机床是一个故障模式多样、故障机理复杂、可修复的复杂系统，其可靠性的研究工作在技术上多学科交叉、时间上贯穿全生命周期、空间上涉及多部门协同，是一项复杂的系统工程。因此数控机床可靠性技术的研究工作周期长、耗资大、出成果慢，需要科研团队产学研合作长期工作才可能取得成效。相比于其他关键共性技术的研究，目前国内对数控机床可靠性研究的科技投入力度较小，专门从事该方向研究的科研机构和研究团队较少，尚未形成完整的技术体系。相关部门应加大投入，积极进行政策引导。

### 2.2 数控机床可靠性数据积累薄弱

数控机床的可靠性数据不仅包括故障数据，还应包括维修数据和载荷数据。目前数控机床的故障和维修数据已经有了一定的积累，但是其载荷数据积累严重不足。已有数据只是针对于某一型号或某一用户，未覆盖量大面广的数控车床和加工中心，也未涵盖不同用户行业，不具有普遍性。载荷数据积累不足，难以编制数控机床整机、功能部件和关键零件的载荷谱，可靠性设计依据不够充分，特别是不能进行可靠性概率设计，造成产品的固有可靠性水平先天不足。

### 2.3 数控机床故障机理研究不足

故障机理研究是指针对故障现象通过理论与试验分析得到反映产品故障本质的物理或化学原因。现有研究偏重于在故障独立的假设下，利用机床的故障数据进行可靠性建模与评估和故障模式影响及危害性分析，根据评估分析结果采取更换零部件和改变结构等设计改进措施。但由于故障机理研究不足，对产生故障的物理本质、故障之间的相关性和共因故障等问题认识不清，往往造成过度改进而增加成本，甚至出现改进无效的情况。

### 2.4 重机床整机、轻功能部件

数控机床主要是由各类功能部件和数控系统及支撑结构组成的，因此机床的可靠性与机床功能



部件的可靠性,特别是关键功能部件的可靠性密切相关。保障功能部件的可靠性水平是德、日、瑞士等机床工业发达国家保证数控机床可靠性的主要技术途径。国内的中高档数控机床曾长期大量采用进口关键功能部件,国内机床功能部件企业的技术能力薄弱,大多处于产品中低端的低成本竞争阶段,使得研究机构的工作重心偏重机床整机。其次,整机可靠性的研究通常是进行现场跟踪试验,不需要可靠性试验设备,介入的门槛较低;而功能部件可靠性的研究目前尚需要自主研发功能部件的可靠性台架试验设备,介入的难度较大,使一些研究者望而却步。

### 2.5 数控机床维修性和可用性重视不够

用户在可靠性方面对产品的最高要求是“要用时即能用”。对于数控机床这一典型的可修复产品,就是既要求其故障间隔工作时间长,又要求其出现故障后功能恢复容易、维修时间短。也就是既要求其可靠性高,又要求其维修性好。同时考虑可靠性和维修性的指标就是可用性,也称为广义可靠性。目前机床行业、检测机构和科研课题指标在产品可靠性方面尚只对可靠度指标进行考核,因此,研究者对数控机床的维修性和可用性重视不够,虽然已有文章进行了研究<sup>[51-53]</sup>,但从满足机床用户需求的角

度,还远未达到应有的重视程度。

尚需指出的是:数控机床可靠性的技术需求来自企业,技术的研究离不开企业,技术的应用也在企业。因此,应在机床企业建立产品的可靠性技术管理体系,以保障产学研合作研发的顺利实施和可靠性技术研究成果在企业的有效应用。同时,不断提高机床企业的可靠性技术自主研发能力,使企业逐渐成为数控机床可靠性的技术研发主体。

的发展规律和和行业需求的角度进行技术展望,主要应实现以下技术愿景。

一是要强化全生命周期可靠性的技术理念,研究开发数控机床全生命周期过程各阶段的可靠性技术。在可靠性试验、建模、分析、设计等研究的基础上,进一步开展或加强数控机床制造可靠性、安装调试可靠性、早期故障排除、运输可靠性、使用可靠性、维修性设计和预防性维修策略等可靠性技术的研究,为数控机床提供全生命周期的可靠性保障技术。

二是要构建数控机床可靠性技术体系。通过对全生命周期过程各项可靠性技术的长期研究,对研究成果不断积累和完善,筛选凝练出覆盖数控机床全生命周期的各项核心技术,在此基础上制定系列的数控机床可靠性技术规范和技术标准,建立和开发动态的数控机床可靠性技术共享数据库和故障案例库,逐步形成具有数控机床行业特色的产品可靠性技术体系。

## 3 结论与展望

数控机床可靠性技术研究经历 30 余年,在机床的可靠性建模、故障分析、可靠性设计和可靠性试验等方面取得了明显进展。本领域学术水平不断提高,研究成果为机床行业产品可靠性水平的提高和产品的升级提供了技术支持。目前正在形成可靠性动态建模、故障树智能化应用、可靠性综合设计、功能部件可靠性台架加速试验、机床故障的远程监控和故障预警等数控机床可靠性技术领域的研究热点。在取得明显进展的同时还存在着专门从事数控机床可靠性研究的学者和机构较少、数控机床可靠性数据积累薄弱和重视机床整机的可靠性研究、轻视功能部件的可靠性研究等问题,对数控机床的故障机理、数控机床维修性和可用性的研究亦重视不够。这些问题应通过相关部门的政策引导以吸引更多的研究人员进入、并通过本领域的专家学者对研究内容的调整来加以解决。

目前,数控机床可靠性技术已成为机床行业最主要的共性关键技术之一,提高数控机床的可靠性已成为全行业的迫切需求。从数控机床可靠性技术

## 参 考 文 献

- [1] 中国机械工业联合会. 中国机床消费额连续十年居全球第一[EB/OL]. [2013-02-28]. <http://www.cmiao.com.cn/cms/hyzx/263.htm>.  
China Machinery Industry Federation. The machine tools consumption of China nabbed the top spot for ten consecutive years [EB/OL]. [2013-02-28]. <http://www.cmiao.com.cn/cms/hyzx/263.htm>.
- [2] 徐树滋. 2002 年世界机床生产和销售统计[J]. 世界制造技术与装备市场, 2003(6): 56-59.  
XU Shuzi. The statistics of machine tools production and sales of the world in 2002[J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2003(6): 56-59.
- [3] 数控机床质量的可靠性成为行业市场发展的重点[EB/OL]. [2012-10-25]. <http://www.mei.net.cn/jcgj/201210/458624.html>.  
The reliability of the machine tool become the focus of the machine tools market development[EB/OL]. [2012-10-25]. <http://www.mei.net.cn/jcgj/201210/458624.html>.

- [4] 中国机床工具工业协会. 机床工具行业“十二五”发展规划[M]. 北京：工业和信息化部装备工业司，2011.  
China Machine Tool Industry Association. 12th Five-year development program of machine tool industry[M]. Beijing：Machinery Industry Department of Ministry of Industry and Information，2011.
- [5] STEWART E. A survey of machine tool breakdowns[R]. MTIRA：Macclesfield，1977.
- [6] Проников А С. Точность и надежность станков с числовым[M]. Москва：МАШИНОСТРОЕНИЕ，1982.  
POSNIKOFF A C. Accuracy and reliability of machine tools[M]. Moscow：Engineering，1982.
- [7] 树志. 对数控系统可靠性、稳定性的一些认识-谈数控系统抗干扰措施[J]. 机床，1976(3)：1-4.  
SHU Zhi. To some understanding on reliability and stability of NC-anti-jamming measures NC[J]. Machine Tools，1976(3)：1-4.
- [8] 蔡亲民. 试论数控机床及数控系统可靠性的特征量[J]. 机床，1992(7)：49-51.  
CAI Qinmin. Reliability characteristics of machine tools and CNC[J]. Machine Tools，1992(7)：49-51.
- [9] 贾亚洲. 机床滚动轴承的动力分析与疲劳计算[J]. 机械强度，1987(4)：66-72.  
JIA Yazhou. Dynamic analysis and calculation of fatigue loading of machine tool rolling bearing[J]. Journal of Mechanical Strength，1987(4)：66-72.
- [10] JIA Yazhou. Analysis and calculation of fatigue loading of machine tool gears[J]. Int. J. Fat.，1991，13(6)：483-487.
- [11] KELLER A Z，KAMATH A R. Reliability analysis of CNC machine tools[J]. Reliability Engineering，1982，3(6)：449-473.
- [12] JIA Yazhou，WANG Molin，JIA Zhixin. Probability distribution of machining center failures[J]. Reliability Engineering and System Safety，1995，50：121-125.
- [13] WANG Yiqiang，JIA Yazhou，YU Junyi，et al. Failure probabilistic model of CNC lathe[J]. Reliability Engineering and System Safety，1999，65：307-314.
- [14] CHARLES E E. An introduction to reliability and maintainability engineering[M]. Illinois：Waveland Press Inc，2005.
- [15] 戴怡，周云飞，陈学东，等. 加工中心故障分布规律及其研究方法[J]. 系统工程与电子技术，2004，26(3)：413-415.  
DAI Yi，ZHOU Yunfei，CHEN Xuedong，et al. Failure distribution law of a machining center and its study[J]. Systems Engineering and Electronics，2004，26(3)：413-415.
- [16] DAI Yi，ZHOU Yunfei，JIA Yazhou. Distribution of time between failures of machining center based on type I censored data[J]. Reliability Engineering and System Safety，2003，79：377-379.
- [17] 陈殿生，王田苗，魏洪兴. 数控车床故障分布的两重威布尔分段模型[J]. 北京航空航天大学学报，2005，31(7)：766-769.  
CHEN Diansheng，WANG Tianmiao，WEI Hongxing. Sectional model involving two Weibull distributions for CNC lathe failure probability[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2005，31(7)：766-769.
- [18] 王智明，杨建国，王国强，等. 多台数控机床最小维修的可靠性评估[J]. 哈尔滨工业大学学报，2011，43(7)：127-130.  
WANG Zhiming，YANG Jianguo，WANG Guoqiang，et al. Reliability assessment of multiple NC machine tools with minimal repair[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2011，43(7)：127-130.
- [19] 王智明，杨建国. 数控机床可靠性评估中的边界强度过程[J]. 上海交通大学学报，2012，46(10)：1623-1631.  
WANG Zhiming，YANG Jianguo. Bounded intensity process and its applications in reliability assessment of NC machine tools[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University，2012，46(10)：1623-1631.
- [20] 杨兆军，李小兵，许彬彬，等. 加工中心时间动态可靠性建模[J]. 机械工程学报，2012，48(2)：16-22.  
YANG Zhaojun，LI Xiaobing，XU Binbin，et al. Time dynamic reliability modelling of machining center[J]. Journal of Mechanical Engineering，2012，48(2)：16-22.
- [21] JEFFREY P K，STEVEN M C，MARK E O，et al. Reliability of manufacturing equipment in complex environments[J]. Annals of Operations Research，2011，10：1-26.
- [22] AMZEN H E. Failure mode and effect analysis：A powerful engineering tool for component and system optimization[C]// Proceedings of the Fifth Reliability and Maintainability Conference，March，New York，1966：355-371.
- [23] Department of Defense，United States of America. MIL-STD-1629A Procedures for performing a Failure Mode，Effects，and Criticality Analysis[S]. Washington：Military Standard，2000.
- [24] International Electrotechnical Commission. IEC60712 Analysis techniques for system reliability-procedure for



- failure mode and effects analysis[S]. Geneva : International Standard , 2006.
- [25] FLEISCHER J , SCHOPP M. Increasing the reliability of machine tools by use of an FMEA-based condition monitoring system[J]. VDI Verlag GMBH ,2007(2) :55-64.
- [26] 张宏年. 金属切削机床故障分析法[J]. 机床 , 1981(3) : 5-13.
- ZHANG Hongnian. Failures analysis of metal cutting machine tool[J]. Machine Tools , 1981(3) : 5-13.
- [27] 张集盛. 组合机床可靠性问题初探[J]. 组合机床与自动化加工技术 , 1987(9) : 7-11.
- ZHANG Jisheng. An early research on reliability of modular machine tool[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique , 1987(9) : 7-11.
- [28] 朱永志 , 刘道新. MZ2015 型全自动内圆磨床的故障分布及其可靠性分析[J]. 上海机床 , 1989(4) : 33-39.
- ZHU Yongzhi , LIU Daoxin. The failure distribution and reliability analysis of fully automatic internal grinder MZ2015[J]. Shanghai Machine Tool Works , 1989(4) : 33-39.
- [29] 国家标准局. GB7826-87 系统可靠性分析技术失效模式和效应分析程序[S]. 北京 : 中华人民共和国国家军用标准 , 1987.
- National Bureau of Standards. GB7826-87 Procedure of failure mode and effects analysis[S]. Beijing : GJB of the People's Republic of China , 1987.
- [30] MCGOLDRICK P F , KULLUK H. Machine tool reliability-A critical factor in manufacturing systems[J]. Reliability Engineering , 1986 , 14(3) : 205-221.
- [31] 戴怡 , 贾亚洲 , 申桂香. 立式加工中心的故障分析与改进措施[J]. 中国机械工程 , 2001 , 12(11) : 1209-1211.
- DAI Yi , JIA Yazhou , SHEN Guixiang. Failure analysis and reliability improvement for vertical machining center[J]. China Mechanical Engineering , 2001 , 12(11) : 1209-1211.
- [32] YANG Zhaojun , XU Binbin , CHEN Fei , et al . A new failure mode and effects analysis model of CNC machine tool using fuzzy theory[C]// 2010 IEEE International Conference on Information and Automation , June 20-23 , 2010 , Harbin Engineering University , Harbin : IEEE , 2010 : 582-587 .
- [33] 于捷 , 贾亚洲. 数控车床故障模式影响与致命性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报 , 2005 , 37(12) : 1725-1727.
- YU Jie , JIA Yazhou. Failure mode effect and criticality analysis on certain serial CNC lathes[J]. Journal of Harbin Institute of Technology , 2005 , 37(12) : 1725-1727.
- [34] 许彬彬. 基于维修程度的数控机床可靠性建模与分析[D]. 长春 : 吉林大学 , 2011.
- XU Binbin. Study on reliability modeling and analysis of CNC machine tools based on maintenance degree[D]. Changchun : Jilin University , 2011.
- [35] 金渊源 , 冯虎田 , 李春梅 , 等. 链式刀库及机械手早期故障筛选试验机分析方法[J]. 组合机床与自动化加工技术 , 2012(12) : 72-75.
- JIN Yuanyuan , FENG Hutian , LI Chunmei , et al. The early malfunction test and the analysis method of chain machine and the manipulator[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique , 2012(12) : 72-75.
- [36] LU Xiaohong , JIA Zhenyuan , GAO Shennan , et al. Failure mode effects and criticality analysis (FMECA) of circular tool magazine and ATC[J]. J. Fail. Anal. and Preven. , 2013 , 13 : 207-216.
- [37] REZVANI A R. Reliability analysis of a flexible machining cell[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology , 1986 , 1(4) : 55-68.
- [38] 于捷 , 孙立大 , 石耀霖 , 等. 基于 BDD 技术的数控机床故障树重要度分析[J]. 机床与液压 , 2008 , 36(12) : 186-189.
- YU Jie , SUN Lida , SHI Yaolin , et al. Analysis of fault tree importance of CNC machine tools based on BDD[J]. Machine Tools & Hydraulics , 2008 , 36(12) : 186-189.
- [39] 陈传海 , 杨兆军 , 陈菲 , 等. 基于 BDD 技术的数控机床故障树分析[J]. 工程与试验 , 2010 , 50(3) : 13-16.
- CHEN Chuanhai , YANG Zhaojun , CHEN Fei , et al. Fault tree analysis on CNC machine tools based on BDD technology[J]. Engineering & Test , 2010 , 50(3) : 13-16.
- [40] 陈张荣 , 李云飞. 数控机床故障的远程预警和诊断系统[J]. 苏州大学学报 , 2011 , 31(1) : 21-24.
- CHEN Zhangrong , LI Yunfei. The remote warning and diagnosis system for CNC[J]. Journal of Soochow University , 2011 , 31(1) : 21-24.
- [41] LI Yanfeng , HUANG Hongzhou , LIU Yu , et al. A new fault tree analysis method : fuzzy dynamic fault tree analysis[J]. Eksploatacja i Niezawodność-Maintenance and Reliability , 2012 , 14 (3) : 208-214.
- [42] 罗巍. 数控机床故障分析与可靠性评价技术的研究[D]. 长春 : 吉林大学 , 2011.
- LUO Wei. Research on failure analysis and reliability evaluation technology for CNC machine tools[D]. Changchun : Jilin University , 2011.
- [43] WANG Yiqiang , RICHARD C M , ZUO Mingjian , et al. A comprehensive reliability allocation method for design

- of CNC lathes[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 72: 247-252.
- [44] 杨兆军, 郝庆波, 陈菲, 等. 基于区间分析的数控机床可靠性模糊综合分配方法[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(3): 321-329.
- YANG Zhaojun, HAO Qingbo, CHEN Fei, et al. A comprehensive fuzzy reliability allocation method of NC machine tools based on interval analysis[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(3): 321-329.
- [45] 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[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(4): 768-774.
- ZHANG Genbao, LIU Jian, WANG Guoqiang. Fuzzy reliability allocation of CNC machine tools based on task[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(4): 768-774.
- [46] 杨兆军, 呼焱, 陈菲, 等. 高速电主轴动态加载装置: 中国, CN102426097A[P]. 2012-04-25.
- YANG Zhaojun, HU Ye, CHEN Fei, et al. Dynamic loading device for high speed motorized spindle: China, CN102426097A[P]. 2012-04-25.
- [47] 杨兆军, 陈菲, 李国发, 等. 由测功机和液压混合加载的动力伺服刀架可靠性试验台: 中国, CN 102735484A[P]. 2012-10-17.
- YANG Zhaojun, CHEN Fei, LI Guofa, et al. Reliability testing system of dynamic servo turret with commixture loading through electromagnetism and dynamometer: China, CN 102735484A[P]. 2012-10-17.
- [48] 杨兆军, 陈菲, 张富, 等. 具有电液伺服加载装置的数控转塔刀架可靠性试验系统: 中国, ZL 201010288469.1[P]. 2011-11-23.
- YANG Zhaojun, CHEN Fei, ZHANG Fu, et al. Reliability testing system with servo harmony loading system for turret: China, ZL 201010288469.1[P]. 2011-11-23.
- [49] 杨兆军, 呼焱, 李国发, 等. 机械手拉刀力及插刀力的测量及记录装置: 中国, CN102430960A[P]. 2012-05-02.
- YANG Zhaojun, HU Ye, LI Guofa, et al. Force measure and recording device for releasing tool and slotting tool: China, CN102430960A[P]. 2012-05-02.
- [50] 王国彪, 何正嘉, 陈雪峰, 等. 机械故障诊断基础研究“何去何从”[J]. 机械工程学报, 2013, 49(1): 63-72.
- WANG Guobiao, HE Zhengjia, CHEN Xuefeng, et al. Basic research on machinery fault diagnosis-what is the prescription[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(1): 63-72.
- [51] 申桂香, 谷东伟, 张英芝, 等. 数控机床最佳预防维修时间的确定[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(1): 7-10.
- SHEN Guixiang, GU Dongwei, ZHANG Yingzhi, et al. Optimal preventive maintenance interval period of CNC[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(1): 7-10.
- [52] 张英芝, 申桂香, 吴甦, 等. 数控机床可用度分析[J]. 制造技术与机床, 2010(1): 124-126.
- ZHANG Yingzhi, SHEN Guixiang, WU Su, et al. Analyses of availability for NC machine tools[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2010(1): 124-126.
- [53] BHUPESH K L, MAKARAND S K. Optimal maintenance schedule decisions for machine tools considering the user's cost structure[J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(20): 5859-5871.

作者简介: 杨兆军, 男, 1956 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为数控机床可靠性技术。

E-mail: yzj@jlu.edu.cn

陈传海, 男, 1983 年出生, 博士研究生。主要研究方向为数控机床故障分析技术。

E-mail: cchchina@foxmail.com

陈菲, 女, 1970 年出生, 副教授。主要研究方向为数控机床可靠性设计与试验技术。

E-mail: chench\_china@163.com

李国发, 男, 1970 年出生, 教授。主要研究方向为数控机床可靠性设计与试验技术。

E-mail: ligf@jlu.edu.cn