

S 形试件切削过程动态检测及其关键技术

仇 健

沈阳机床(集团)有限责任公司高档数控机床国家重点实验室,沈阳,110142

摘要:系统分析了国内外现行的五坐标数控机床检测试件的优缺点。结合 3D 建模、理论计算、有限元分析和切削试验分别对 S 形试件的结构特点、型面分布、结构刚度和受力变形等关键技术难题进行了分析。研究发现,S 形试件的表面曲率在型面的不同位置有明显差异,零件型面存在换向和交替穿越机床坐标象限的现象,并且零件的结构刚度在单侧加工时主要有 4 个突越区域,直接导致切削时的变形、振动和精度丧失。最后,对零件的粗加工、精加工两个加工阶段进行了切削过程分析。

关键词:五坐标加工中心;S 形试件;切削加工精度;动态性能

中图分类号:TG506;TG543

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2014.12.008

S form Specimen Cutting Dynamic Performance Testing and Its Key Technologies

Qiu Jian

State Key Laboratory of High Grade NC Machine Tools,

Shenyang Machine Tool(Group) Co., Ltd., Shenyang, 110142

Abstract: A systematic analysis was carried out on the advantages and disadvantages of current testing specimens at home and abroad for five-axis NC machine tools. Combining 3D modelling, theoretical calculations, finite element analysis and cutting experiments, the key technical challenges such as the structural characteristics and surface distribution of S form specimen, structural rigidity and stress and deformation were analyzed, respectively. It is found that there is a clear curvature difference in different locations on the 'S' form specimen surface. Part-surface exists reversing and alternating across the machine coordinate quadrant. And there are 4 main regions where the structure stiffness of 'S' specimens jumps over the suddenly in single side processing, which leads to cutting deformation, vibration and loss of accuracy directly. Finally, two stages of rough and finish cutting process were analyzed.

Key words: five-axis machining center; S form specimen; cutting precision; dynamic performance

0 引言

S 形试件及其测试方法^[1]是成都飞机工业(集团)有限责任公司针对五轴联动机床精度测试而发明的,已获得中美两国发明专利。开展 S 形试件的研究有助于理解和掌握飞机大型复杂整体结构件的多轴联动高速切削加工工艺及其关键技术,发现机床的技术问题,从而提升国产五轴联动机床的制造水平。

S 形试件的主体是一个呈 S 形走向的扭曲曲面形成的等厚度缘条,缘条与坐标平面的夹角连续变化,曲面形状复杂。S 形试件具有薄壁特征,它来源于典型航空结构,其加工状况还能反映机床的刚性、振动等特性。

1 三类试件的对比分析

对比分析美国航天局 NAS 979 试件^[2]、四角锥台试件^[3]以及 S 形试件^[1]在铣削加工过程中对误差的映射性能,从检测零件的设计依据、使用范围、所反映出的机床综合性能^[4]以及零件的加工准备和检测要求等方面综合比较三种试件的性能特点,三类试件的对比分析见表 1,可见 S 形试件更能真实地反映五轴数控机床的动态性能和摆角精度,可有效弥补 NAS 圆锥台和日本四角锥台的缺点,但不可否认的是,S 形试件诞生时间较短,在零件的检测以及检测结果与反映机床问题的量化指标的对应等方面还有很多工作要做。

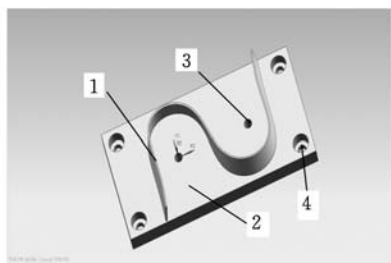
2 三维建模及型面特征

利用高度 $Z=0$ 和 $Z=40$ mm 的各 50 个坐标点建立 S 形试件的两条导线,以上下两条导线相

表1 三类检测试件对比表

		NAS979 锥台	四角锥台	S形试件			
设计依据	产地	美国	日本	中国			
	适用机床	所有五轴	转台五轴	所有五轴, 摆头式优先			
	量化依据	优	优	差			
体现机床综合性能程度	联动轴数	5	3+2	5			
	加减速能力	一般	差	优			
	机床几何精度	优	优	优			
	机床刚度	一般	一般	优			
	机床动态性能	一般	一般	优			
	对数控系统控制精度要求	一般	一般	优			
	Z轴定位精度	一般	差	差			
	摆角转换能力	一般	差	优			
	轴向变换能力	差	差	优			
	轴间转换能力	一般	一般	优			
加工准备	刀具准备	容易	容易	容易			
	试料准备	容易	容易	容易			
	装夹要求	中	低	高			
检测要求		要求	难度	要求	难度	要求	难度
	轮廓精度	高	低	高	低	高	低
	加工时间	低	低	低	低	高	低
	波纹度	低	低	低	低	高	高
	粗糙度	高	中	高	低	高	高
	厚度					高	高
	同轴度	高	低				

连形成的线段为母线进行扫掠形成直纹面,并做厚度为 3 mm 的实体而形成 S 形试件轮廓型面,如图 1 所示。S 形试件由一个呈 S 形状的直纹面等厚缘条和一个矩形基座组合而成。



1. S形缘条 2. 基座 3. 测量基准孔 4. 安装压紧孔

图1 S形试件组成特征

将理想 S 形试件的上下两样条曲线向 $Z=0$ 的平面投影得到图 2, 可见, S 形试件上下两条导线并不重合, 而是在 S 形试件的交叉形成换向, 从而使得刀具在加工该零件时由一段外轮廓加工经过中心位置而进入内轮廓加工, 刀具在中心点必须由回转轴换向而实现开闭角转换, 这在一定程度上可反映五轴联动数控机床加工动态综合精度。零件型面表面呈不规则 S 形, 轮廓曲率在零件各位置均不相同, 且无规律可循, 这使得该零件的加工能够反映机床的随机误差, 更能体现五轴加工的精度要求。综上, S 形试件不仅包含 NAS 979 试件的几何特征, 还具备更多

的曲面特性, 因此其加工精度能更完整地体现五轴联动数控机床的加工精度。

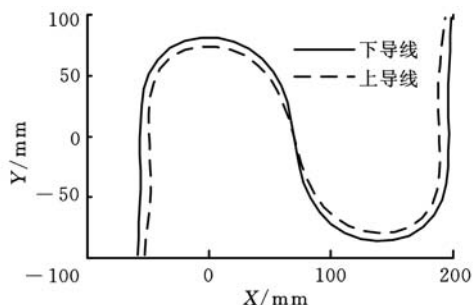


图2 S形试件上样条曲率分析

3 S形试件受力仿真和变形分析

由于 S 形试件曲率和加工换向复杂, 应用试验方法获得的切削力信号很难按照轴向或零件矢量方向精确分解, 故采用一种结合有限元和理论分析的理想状态进行受力分析。首先, 将 S 形试件三维模型导入有限元分析软件 ANSYS 中进行网格划分, 这里采用壳单元类型以及映射网格划分方法来划分网格。然后, 设定模拟的边界条件。由于实际加工中零件底面与机床工作台贴合, 由压板紧密压紧, 并用螺栓实现轴向定位, 故将压板和工作台视为刚性体, 仿真时将零件底面和两个垂直侧面设为固定约束。零件为航空铝合金 7075-T7451, 材料属性如下: 弹性模量 72 GPa, 硬度 HB160, 密度 $2.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 泊松比 0.3。

将试验中机床摆头处于标准轴向位置时测力仪获得的切削力三分量作为理想切削力条件, 并加载于零件敏感位置。将三个轴向力分别为 $F_x=300 \text{ N}$, $F_y=150 \text{ N}$, $F_z=50 \text{ N}$ 的切削力合力分别加载到沿 S 形试件导线距离切入端 20 mm、试件中心、距离切出端 20 mm, 且在垂直方向沿母线距离上表面 5 mm 的位置, 经计算获得加工变形如图 3 所示。可见零件在标准切削力作用下的变形主要表现为法向变形, 并且切入端和切出端的变形幅度相当, 方向相反, 而中心位置由于零件局部刚度略高于导线两端, 变形相对较小。这说明在 S 形试件加工中曲面法向上产生的变形对零件的最终加工精度有直接影响, 而切向力对工件变形的影响相对较小, 可忽略不计。同理可计算得到 S 形试件各位置的变形。

得到零件的受力变形后, 结合所施加的力载荷大小, 可获得零件在机床加工中的法向刚度。将法向变形和法向刚度在 S 形试件曲面的法向方向上以直线长短表示其大小, 即可直观地看出加工中 S 形试件的法向变形和法向刚度沿曲面的变

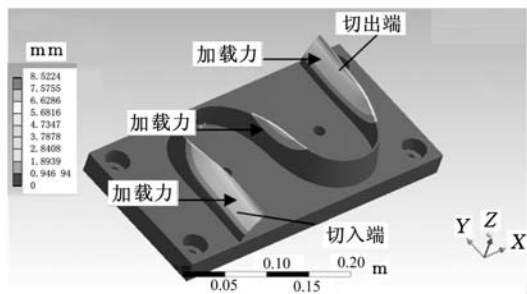


图 3 S 形试件受力分析

化规律^[5-6]。结合铣削 S 形试件的数控加工程序, 得到数控铣床的总体刚度特性随刀具姿态改变的变化规律, 如图 4a 所示^[6-8]。其中, S 形试件法向线段长度表示机床总刚度在 S 形试件不同位置的大小。比较切削时获得的振动信号(图 4b)可发现, 在刚度突变的位置, 振动明显加强, 说明机床系统刚度对加工状态有显著影响, 刀具在切削扫掠到突变区域时, 会产生大幅变形, 从而引起振动, 伴随产生刀具的切不足和过切现象, 最终影响零件的加工精度和加工表面质量。

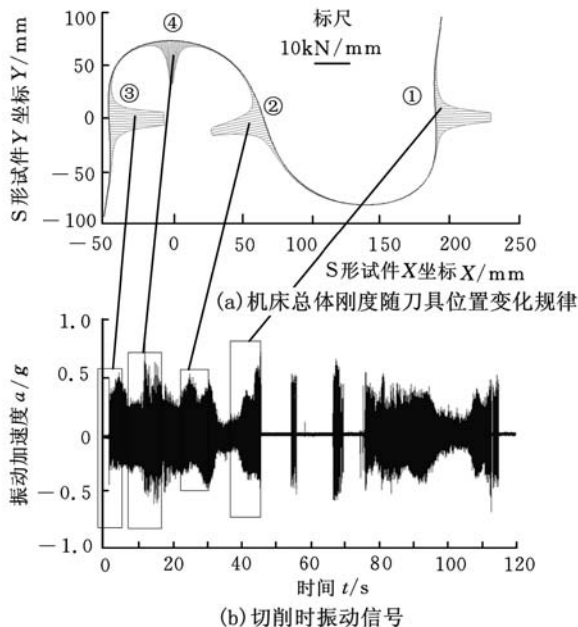


图 4 机床总体刚度特性及对应的加工过程

由单自由度振动系统基础知识可知, 刚度 k 越小, 振动幅值越大。因此, 在铣削 S 形试件过程中, 随着机床-S 形试件系统刚度的变化, 刀具和 S 形试件都将随着加工位置变化产生不同幅值的振动, 即刀具沿 S 形试件加工表面的切削量会发生较大波动, 进而形成较差的表面质量。由图 4 可见, 刀具在经过图中①、②、③、④ 4 个位置时, 会因 S 形试件刚度发生突变而导致刀具的切削受力变形加大, 进而振动加剧, 切削状态波动较大, 从而导致加工表面质量恶化。

4 零件加工过程状态分析

主轴安装三方向加速度传感器用于测量刀具切削工件时传递给刀具和主轴的方向振动量, 由于刀具空间位置时刻在变化(图 5), 所以此处传感器更能反映出刀具在不同位姿^[9]状态下的法向、切向和轴向振动状况。

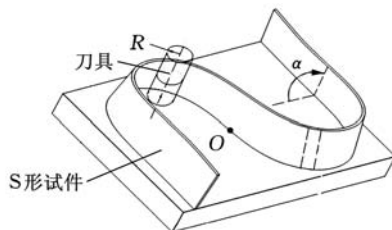


图 5 加工路径示意图

图 6 所示为粗加工 S 形试件一层两侧面时主轴-刀具的振动信号, 此时追求更高的材料去除率, 实际上是三轴加工, 切削过程中记录的主轴 X、Y、Z 向和 S 形试件 X、Y、Z 向信号方向一致。

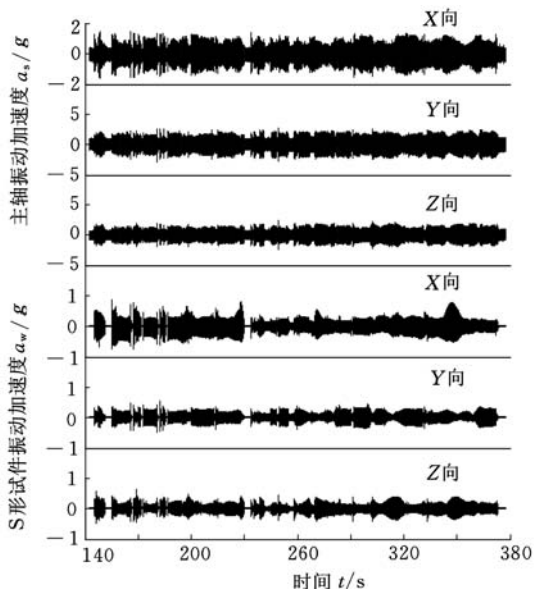


图 6 粗加工时主轴和 S 形试件单层双侧振动信号

上述测试的目的是衡量机床粗加工 S 形试件的效率, 即机床的加工精度和效率是机床设计追求的两大目标。机床的结构刚度直接影响零部件的加工精度, 而结构的动态特性决定机床的生产效率, 本测试在机床定型试制后, 通过对粗加工时的振动信号进行提取, 来衡量机床承受给定切削用量下的加工状态, 可间接评价机床的生产能力。并且测试信号没有发生急剧的振荡, 说明机床在粗加工时不发生切削颤振。而颤振属于机床的自激振动, 是在一定的条件下产生的, 与机床结构及切削条件有关, 此处切削状况良好, 说明机床的动态性能优异, 还存在很大的提高生产效率的潜力。

对于精加工,将三方向加速度传感器分别安装在主轴端面和工件基座上,主轴传感器的坐标方向能够在加工过程中始终与主轴坐标一致,而工件传感器坐标方向始终与机床坐标方向一致。切削一层单侧获得的主轴和S形试件振动信号及其频谱分别如图7和图8所示。可见,S形试件在不同位置处的材料去除量、切削负荷及冲击不同,并且零件不同位置的结构刚度存在差别,因此,加工后的零件精度、表面质量有明显差异。

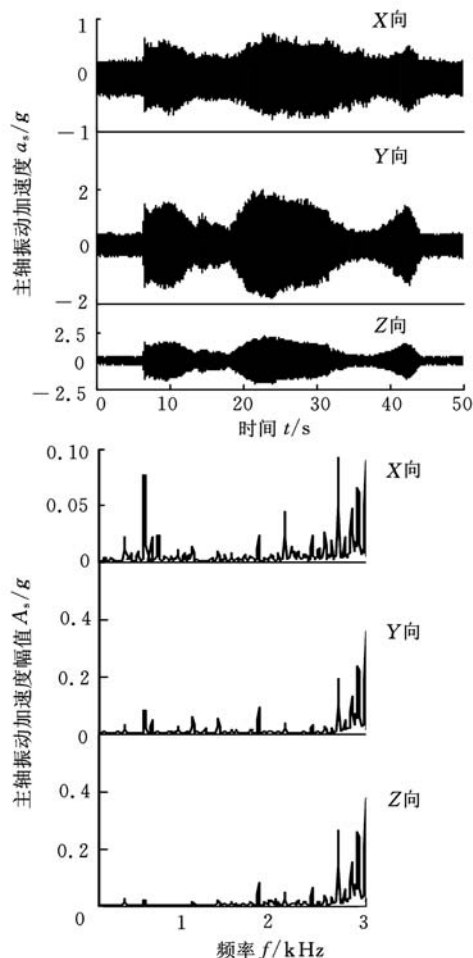


图7 精加工主轴振动加速度及其频谱

对主轴和S形试件振动信号频率进行统计,形成频率分布表,两齿铣刀在机床主轴最高转速24 000 r/min以下的主要频率列于表2中。

主轴的频率峰值主要有50 Hz、100 Hz、200 Hz、300 Hz、250 Hz,工件的频率峰值主要有450 Hz、525 Hz、600 Hz、675 Hz。可见300 Hz和600 Hz在S形试件和主轴两个传感器上都是主要频率,因此,这两个频率是由切削时刀具和工件接触所激发的切削频率,与切削参数主轴转速9000 r/min和4500 r/min成1倍频和1/2倍频,在选择切削参数时应尽可能避开与9000 r/min成倍数的转速。另外,当主轴低于9000 r/min时,还可能激发出主轴的频率,引起主轴系统振动,而工件

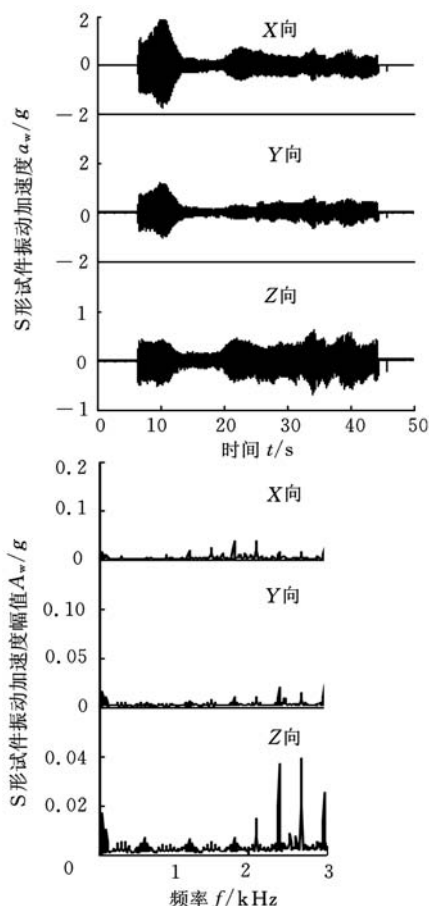


图8 精加工S形试件振动加速度及其频谱

的频率相对较高,一般空转时很难激发。为了更直观地了解切削S形试件时的时域和频域特性,以及时频特性间的联系,经MATLAB软件计算得到时频域分析,如图9所示。

表2 频率分布表

	频率 (Hz)	齿数	转速(r/min)	
			刀具切削	主轴空转
主 轴	50	2	1500	3000
	100	2	3000	6000
	200	2	6000	12 000
	250	2	7500	15 000
	300	2	9000	18 000
	600	2	18 000	36 000
S 形 试 件	300	2	9000	18 000
	450	2	13 500	27 000
	525	2	15 750	31 500
	600	2	18 000	36 000
	675	2	20 250	40 500

最终加工后获得的S形试件如图10所示。加工后,在现场不借助精密检测仪器的条件下,利用视觉观察和触觉等方法可大致衡量出加工的质量,初步判断加工质量较高。图11所示为测量平面距底座平面高度 h 分别为10 mm、22.5 mm、

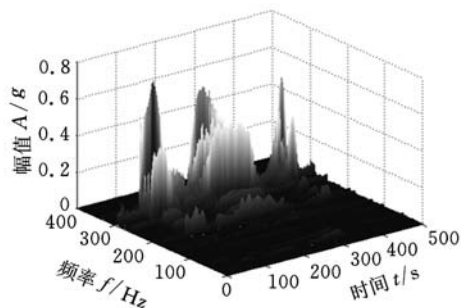
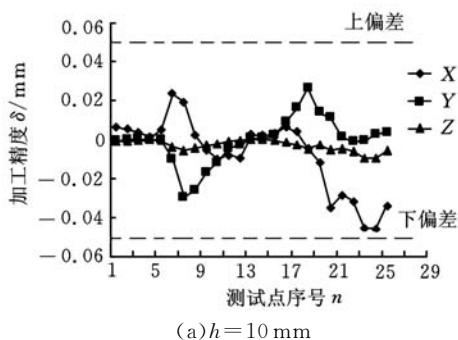


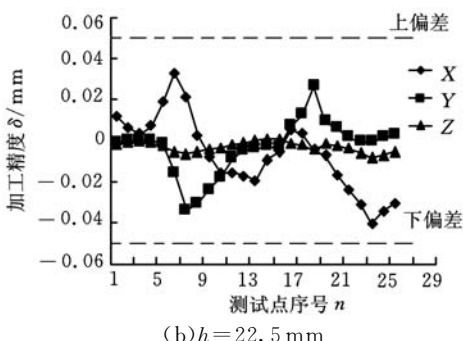
图 9 S 形试件单侧面的时频域分析



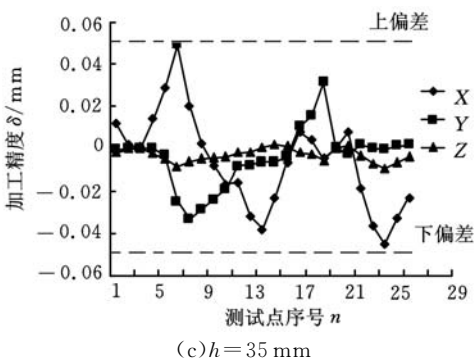
图 10 加工后的 S 形试件



(a) $h=10\text{ mm}$



(b) $h=22.5\text{ mm}$



(c) $h=35\text{ mm}$

图 11 加工后零件检测精度

35 mm 时加工后零件三个轴向 25 个测试点的检测精度,可见各点都达到设计要求。

5 结论

(1) 系统分析了国内外现行的五坐标数控机床检测试件的优缺点,以及 S 形试件的结构特点。S 形试件更能反映多轴机床的运动学动态性能、加工精度、加工状况以及机床的结构刚性和振动特性。

(2) 零件的结构刚度在单侧加工时主要有 4 个突越区域,在突越区附近刚度的大幅变化是直接导致切削变形、振动和精度丧失的主要原因。

(3) 零件粗加工阶段的切削状态平稳,可间接说明所使用机床的生产能力较强。零件在精加工阶段进行的切削过程中表现出了多个明显的频率分布,频率为 300 Hz 和 600 Hz 时刀具切削工件激发出切削振动。

参考文献:

- [1] Song Zhiyong, Cui Yawen, S-shape Detection Test Piece and a Detection Method for Detection the Precision of the Numerical Control Milling Machine: US, 20100004777 A1[P], 2010-01-07.
- [2] National Aerospace Standard. NAS 979-1969, Uniform Cutting Tests - NAS Series: Metal Cutting Equipment Specifications[S]. Washington D. C.: Aerospace Industries Association of America, 1969.
- [3] 堤正臣. 5 轴数控机床检验规格(ISO)的最新动向[R]. 沈阳:沈阳机床(集团)有限责任公司, 2010.
- [4] American National Standards Committee. ASME B 5. 54-2005 Methods for Performance Evaluation of Computer Numerically Controlled Machining Centers[S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2005.
- [5] 丁杰雄, 谭阳, 崔浪浪, 等. 一种五轴机床检验试件轮廓误差的处理与显示技术研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012(10): 39-43.
- [6] Ding Jiexiong, Tan Yang, Cui Langlang, et al. Study on Processing and Displaying Contour Error at Testing Specimen for Five-axis Machine Tool[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2012(10): 39-43.
- [7] 杜丽, 王伟. 五轴联动数控机床加工精度测试[R]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [8] 杜丽, 崔浪浪, 赵波, 等. 基于 S 型检验试件的数控机床动态性能辨识新方法[J]. 制造技术与机床, 2012(12): 152-156.

Du Li, Cui Langlang, Zhao Bo, et al. New Method of

(下转第 1629 页)

表征一个故障,并据此建立起故障应力和故障的直接关系,是一种有效的表征方式。

(2)模糊综合评判方法可以实现系统故障对故障应力的评判和选择,是一种充分利用专家先验知识来解决故障机理不明确的可靠性问题的方法。

(3)以卧式加工中心端齿盘分度式数控转台为对象进行了实例分析,证明了基于模糊综合评判的加速可靠性增长试验加速应力选择方法的可用性,以及其方法的先进性。加速应力选择方法的研究是可靠性试验理论的重要内容,同时也对可靠性试验技术发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 国防科学技术工业委员会. GJB 1407-92 可靠性增长试验[S]. 北京:中国标准出版社,1992.
- [2] 周源泉,朱新伟. 论加速可靠性增长试验(I)[J]. 推进技术,2000,21(6):7-10.
Zhou Yuanquan, Zhu Xinwei, Research on Accelerated Reliability Growth Test(I)[J]. Journal of Propulsion Technology,2000,21(6):7-10.
- [3] Upadhyayula K, Dasgupta A. Guidelines for Physics-of-failure Based Accelerated Stress Testing[C]// Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium. Anaheim,1998:345-357.
- [4] Yeo K P. Planning Step Stress Life Test with a Target Acceleration Factor[J]. IEEE Transactions on Reliability,1999,48(1):61-67.
- [5] 张根保,许智,何文辉,等. 加工中心数控转台可靠性强化试验方法研究[J]. 中国机械工程,2011,22(8):948-951.
Zhang Genbao, Xu Zhi, He Wenhui, et al. Research on Reliability Enhancement Testing Method of NC Rotary Table [J]. China Mechanical Engineering, 2011,22(8):948-951.
- [6] 王国强,张根保,洪涛,等. 基于任务的数控机床加工过程可靠性建模技术研究[J]. 中国机械工程,2013,24(10):1296-1302.
Wang Guoqiang, Zhang Genbao, Hong Tao, et al. Research on Reliability Modeling Technology for Machining Process of CNC Machine Tools Based on Task[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(10):1296-1302.
- [7] 张根保,涂林,许智,等. 双工位数控转台可靠性试验技术及失效分析[J]. 机械科学与技术,2011,30(10):147-152.
Zhang Genbao, Tu Lin, Xu Zhi, et al. Reliability Test Technique and Failure Analysis of Double-post NC Rotary Table[J]. Mechanical Science and Technolo-

gy for Aerospace Engineering, 2011, 30(10):147-152.

- [8] 陈文华,武海军,潘骏,等. 小型潜水电泵可靠性强化试验方法的研究[J]. 中国机械工程,2008,19(13):1606-1609.
Chen Wenhua, Wu Haijun, Pan Jun, et al. Research on Reliability Enhancement Testing Method of Small-sized Submersible Pumps[J]. China Mechanical Engineering,2008,19(13):1606-1609.
- [9] 李超,尹霞,陈琨,等. 可靠性强化试验技术现状及展望[J]. 质量与可靠性,2007(2):29-33.
Li Chao, Yin Xia, Chen Kun, et al. Present Situation and Prospect of Reliability Enhancement Test Technology[J]. Quality and Reliability,2007(2):29-33.
- [10] 涂林. 卧式加工中心可靠性试验技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2011.
- [11] 李士勇. 工程模糊数学及应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.

(编辑 陈 勇)

作者简介:张根保,男,1953年生。重庆大学机械工程学院教授、博士研究生导师。主要研究方向为现代质量工程、先进制造技术、可重构制造装备和企业信息化等。发表论文 280 余篇。
郭书恒,男,1988年生。重庆大学机械工程学院硕士研究生。
柳 剑,男,1985年生。重庆大学机械工程学院博士研究生。

(上接第 1604 页)

- Identification on the Dynamic Performance Factors of CNC Machine Tool Based on the "S" Specimen [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2012(12):152-156.
- [8] 谢东,丁杰雄,霍彦波,等. 数控机床转动轴进给系统轮廓误差分析[J]. 中国机械工程,2012,23(12):1387-1392.
Xie Dong, Ding Jiexiong, Huo Yanbo, et al. Contour Error Analysis for Rotation Feed Axis in CNC Machines[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(12):1387-1392.
- [9] 闫蓉,彭芳瑜,李斌,等. 多轴数控加工刀具姿态优化及其刚度性能指标分析[J]. 中国机械工程,2008,19(22):2645-2649.
Yan Rong, Peng Fangyu, Li Bin, et al. Tool-posture Optimization and Stiffness Index Analysis for Multi-axis NC Machine Tools[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(22):2645-2649.

(编辑 陈 勇)

作者简介:仇 健,男,1981年生。沈阳机床(集团)有限责任公司高档数控机床国家重点实验室高级工程师、博士。主要研究方向为切削技术、数控机床性能测试和优化。发表论文 30 余篇。