

# 自动换刀装置动态特性测试技术研究及实现\*

李艳生<sup>1</sup>, 张延恒<sup>1</sup>, 孙汉旭<sup>1</sup>, 董海洋<sup>1</sup>, 赵顺利<sup>2</sup>

(1. 北京邮电大学自动化学院 北京, 100876) (2. 大连高金数控集团有限公司 大连, 116620)

**摘要** 为了研究数控机床自动换刀装置的换刀能力和动态特性, 针对目前这方面实验测试技术和手段不足的问题, 研制出了基于虚拟仪器的动态特性测试系统。根据换刀装置的具体结构和动作特点, 提出了在静载和动载条件下测量机械手的夹持能力及在线测量机械手定位误差和刀具碰撞特性的方法, 并设计了传感器安装结构。利用 Labview 可视化特点对各个模块进行界面设计, 为了提高测试效率在后台运用 Matlab 软件进行数据处理计算和特征提取分析。系统除了能够进行采集和分析数据之外, 还具备了基于神经网络的换刀装置综合性能评估的功能, 以供检测人员参考。现场测试结果为研究机床换刀装置的换刀能力和动态特性提供了必要的实验数据支持。

**关键词** 换刀装置; 碰撞测试; 实验仪器; 虚拟仪器

**中图分类号** TH87

## 引言

随着现代数控机床切削速度的提高, 切削时间的不断缩短, 对换刀时间的要求越来越高, 换刀的速度已成为高水平加工中心的一项重要指标。自动换刀装置是专门为大中型加工中心配套, 实现刀具存储和自动交换的重要功能部件, 大大缩短了更换刀具的时间, 在一定程度上提高了数控机床的加工效率<sup>[1]</sup>。

由于自动换刀系统本身结构和动作特点, 在实际工作过程中, 刀具和机械手之间、刀具和刀套之间的碰撞冲击不可避免, 有时还会发生掉刀现象。因此根据其换刀能力的大小, 最大换刀速度和最大刀具重量都做出一定的限制。为了提高换刀装置的换刀能力, 进行换刀稳定性和可靠性方面的研究, 需要对换刀装置的动态特性有准确而全面的了解和掌握, 然而目前关于换刀能力的测试技术的研究很少, 也没有专门针对自动换刀装置的动态特性测试仪器。杨旭日等<sup>[2]</sup>运用虚拟现实技术实现了数控机床换刀系统的运动仿真。郭小兰等<sup>[3]</sup>用有限元方法对换刀机构建模, 仿真分析了动力特性。通过他们的研究, 换刀装置的动态特性和运动规律在理论上有了进一步的掌握, 但是缺少进一步的实验数据分析验证。潘旭东等<sup>[4]</sup>采用多参数集成测试技术并结合了

虚拟仪器技术, 研制出了高压大流量电液换向阀动态特性测试系统。张健滔等<sup>[5]</sup>针对直线超声电机机械特性测试问题, 建立了基于虚拟仪器的直线超声电机机械特性测试系统。在参考以上学者研究基础之上, 笔者以 TH6350 数控机床所配的卧式换刀装置为研究对象, 搭建一个换刀装置动态特性测试系统。首先, 采用动态测量刀具旋转离心偏距和静态测量刀具倾角的方法来研究刀具的换刀能力, 采用测量机械手振动加速度来研究刀具的碰撞问题, 设计出便于安装的传感器的固定结构; 其次, 利用虚拟仪器技术来开发数据采集和分析软件, 基于神经网络非线性逼近特点建立换刀装置综合性能评估模式; 最后, 应用该系统对换刀装置进行实验测试, 提取数据特征, 获取关于自动换刀装置换刀能力和动态特性的信息。

## 1 测试内容及相关原理

### 1.1 测试量确定及其合理性

1) 换刀装置定位误差的测量。本系统通过编码器测量机械手实际旋转输出曲线, 通过磁栅尺测量机械手插拔刀实际位移, 与理论曲线对比来获取换刀装置的定位误差。换刀装置工作时机械手需要在确定的位置抓取刀具和卸载刀具, 这些重要动作

\* 国家重大科技专项课题资助项目(2011ZX04011-022)  
收稿日期: 2012-09-17; 修回日期: 2013-03-08

的时序配合由复合凸轮的具体结构来控制,但是复合凸轮的输出经过齿轮副和花键副间隙误差以及装配的原始误差的累计,传动到机械手就会产生位姿偏差,影响换刀动作的有序进行。定位误差的大小直接影响到刀具刀柄是否可以准确插入预定位置,对换刀机构的定位误差进行测量是必要的。

2) 机械手夹持能力测量。本系统通过倾角传感器测量刀具的静态倾角,研究其在机械手插刀状态下刀具倾角随刀具质量变化的关系;通过微位移涡流传感器测量刀具动态偏距,研究其在机械手旋转时换刀速度的变化的关系。换刀装置主要通过机械手夹持刀具运动,实现主轴和刀库中刀具的更换,所以机械手的夹持刀具的特性也会影响到换刀装置的换刀性能。根据机械手抓取刀具之后的理论动作曲线分析,可将其分解为旋转换刀和平移插刀两部分的合成,刀具受到的惯性力如式(1)所示。

$$\mathbf{F} = \{\theta(\ddot{\varphi}) R \mathbf{i} + S(\ddot{\varphi}) \mathbf{j} + \theta(\dot{\varphi})^2 R \mathbf{k}\} m \quad (1)$$

其中: $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 为圆柱直角坐标系单位矢量;括号内多项式的第1项表示机械手旋转产生的刀具周向加速度;第2项表示机械手平移产生的刀具水平加速度;第3项表示机械手旋转产生的刀具法向加速度; $m$ 为刀具的质量。

当换刀周期为1 s,机械手臂 $R=0.26$  m时,在不考虑重力情况下,根据式(1)可得刀具合加速度大小,如图1所示。

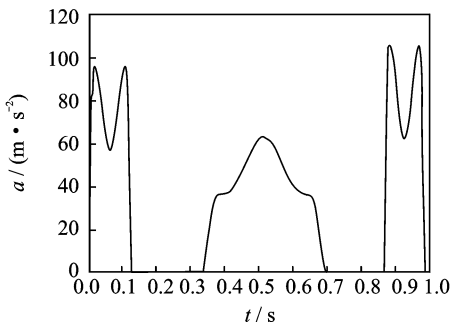


图1 刀具惯性加速度

Fig. 1 Inertial acceleration of tool

在0.2~0.8 s时间段内是机械手握刀运动时间,在0.5 s处的极值代表着刀具的离心力产生的惯性加速度。此时刀具的重力与离心力重合,由离心力的作用刀具在旋转时重心会向外移动,从而产生动态偏距,在离心力不变的情况下动态偏距的大小与机械手夹持能力密切相关。如果离心力过大且机械手夹持能力弱,刀具会从机械手中飞离而掉刀。机械手在水平位置插刀时,刀具由重力作用会向下

倾斜,使刀具中心和主轴孔中心之间存在对刀偏差,在刀具重量一定时,这种偏差的大小与机械手的夹持能力也是密切相关的。如果偏差过大,插刀动作便不会顺利进行。因此,通过动态偏距和静态倾角的测量可以反映出机械手的换刀能力。

3) 碰撞特性的测量。本系统通过压电振动加速度传感器测量机械手的振动状态,提取在机械手抓刀和插刀时刻的碰撞信息。由于定位误差和对刀偏差的存在以及结构本身的原因,再加上零件加工尺寸误差和装配误差,抓刀时机械手与刀具碰撞,插刀时刀具与机床主轴碰撞是不可避免的。碰撞引起的振动能量破坏性较大,对碰撞规律进行研究是必要也是合理的。

## 1.2 数据处理方法及实际应用

测试系统要适应换刀装置的工作条件,满足在不同的换刀速度下测试的要求,但这给特征量的提取带来困难。由于电机的输出和链传动特性影响,凸轮的输入转速不能保持定值,所以提取机械手的动作信息不能以采集时间为参考。本系统在测试换刀装置特性的同时,专门用1个编码器测量凸轮输入角,通过内部程序处理消去时间参量,得到凸轮输入角度与输出信号之间的数据对映关系。根据凸轮的配合关系<sup>[6]</sup>,编码器角度在35~50°之间,可判定机械手处于抓刀状态;编码器角度在90~140°之间,可判定机械手处于拔刀状态;编码器角度在230~280°之间,可判定机械手处于插刀状态;编码器角度在310~325°之间,可判定机械手处于松刀状态。

系统测试的场所在换刀装置的生产 and 装配车间,分析信号前必须去除噪声。根据小波软阈值去噪原理,对采集信号进行处理,通过对比选择效果最好的参数设置作为程序内的默认值。小波去噪原理是先利用小波变换把时域信号按不同尺度映射到频域,根据频域系数模的阈值把噪声滤除,然后在反变换重构无噪声的有效信号。小波变换及阈值判定原理如式(2~4)<sup>[7]</sup>所示。

$$\hat{w}_{j,k} = \langle z(t), \varphi_{j,k}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{j}} \int_R z(t) \varphi\left(\frac{t-k}{j}\right) dt \quad (2)$$

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(\hat{w}_{j,k}) (|\hat{w}_{j,k}| - \lambda) & |\hat{w}_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |\hat{w}_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (3)$$

$$\lambda = \sigma(2 \log N)^{1/2} \quad (4)$$

其中： $\hat{w}_{j,k}$ 为小波系数； $z(t)$ 为时域信号； $\varphi_{j,k}(t)$ 为小波基； $\lambda$ 为阈值； $\sigma$ 为信号噪声； $N$ 为采样长度。

利用小波软阈值方法对采集的倾斜角传感器信号去噪和低通滤波处理，其结果如图2所示。

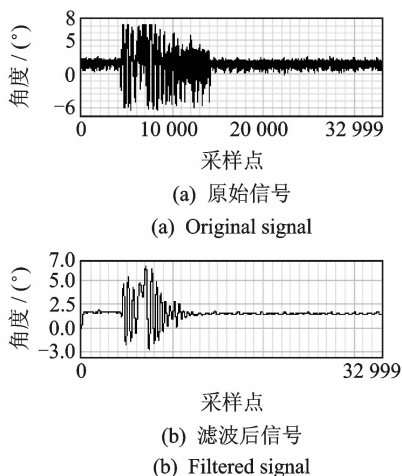


图2 信号去噪效果图

Fig. 2 Results of signal denoising

本系统测试最后要给出换刀装置动态性能的综合评价，评价指标  $A$  取值范围  $0 \sim 100$ 。从所测得的信号中提取出抓刀误差  $x_1$ 、插刀误差  $x_2$ 、抓刀碰撞幅值  $x_3$ 、插刀碰撞幅值  $x_4$ 、刀具静态倾角  $x_5$  及刀具动态偏距  $x_6$ ，一共有6个特征量来反映换刀装置的综合性能。这些量与评价指标之间存在着一定的非线性关系，如式(5)所示，然而函数解析关系的具体形式很难通过理论推导出来

$$A = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) \quad (5)$$

BP神经网络能够解决上述问题，通过对样本数据的自动学习，可以实现任意精度逼近复杂的  $m$  维输入空间到  $n$  维输出空间的非线性映射，并且泛化能力和容错能力很强<sup>[8]</sup>。本系统建立的3层神经网络结构如图3所示，输入层只做归一化处理，隐含层4个神经元用 sigmoid 函数传递，输出层1个神经元用线性函数传递，总的传递按式(5)的形式整理得出表达式(6)

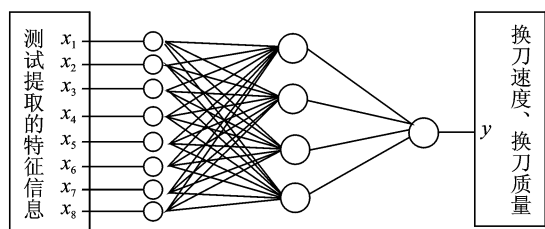


图3 神经网络结构图

Fig. 3 Structure of neural network

$$A = \sum_{j=1}^4 a_j \left( \frac{1}{1 + e^{-\sum_{i=1}^6 w_{i,j} x_i}} \right) \quad (6)$$

其中： $w_{i,j}$ 为输入层到隐含层的连接权值； $a_j$ 为隐含层到输出层的连接权值。

本系统的神经网络评估模块是用来获取一些不能通过直接测量得到信息，通过训练建立起测试特征值与综合评价指标的对应关系，这里面的综合指标是不易测得的量，如最大换刀速度、最大换刀质量等。通过在一定换刀速度和刀具质量范围内，用搭建的系统测试获得特征数据建立样本，经过训练的神经网络  $P$  可以根据特征数据的变化趋势自动对换刀装置的换刀速度和换刀质量进行预测。由于特征值只允许在一定的范围内变化，通过在极限条件下测试建立极限换刀速度  $v_0$  和极限换刀质量  $g_0$  的特征值故障空间  $Q$ 。通过  $Q$  输入  $P$  就可对最大换刀速度  $v_m$  和最大换刀质量  $g_m$  进行预测，针对不同的换刀装置以  $Q$  空间基本不变为基准，但  $v_m$  与  $v_0$ 、 $g_m$  与  $g_0$  可以不相等，预测结果可供测试人员参考。

## 2 测试系统的搭建

### 2.1 硬件系统的组成

系统的硬件组成如图4所示，编码器和磁栅尺输出的脉冲信号通过计数器转换成模拟电压信号；压电振动加速度传感器和涡流微位移传感器输出的电荷信号通过电荷电压转换模块也转换成模拟电压信号；倾角传感器本身输出的就是模拟电压信号。各个传感器变换后的电压信号通过调理电路缩放至  $-10 \sim 10$  V 范围，再输入到 MCC 采集卡内做 A/D 转换，对应的数字信号通过 USB 串口输送到工业计算机中，利用编写的软件进行数据处理；液晶屏幕显示数据采集和处理结果；电机控制换刀装置的换刀速度。

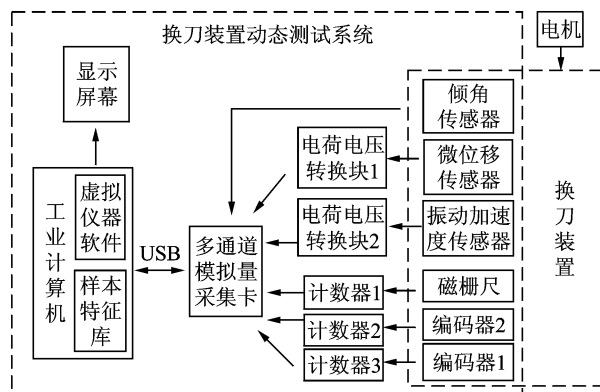


图4 测试系统的硬件组成

Fig. 4 Composition of test system

### 2.2 传感器的安装和固定

传感器在换刀装置上的具体安装位置如图 5 所示。复合凸轮 1 号位置处安装编码器 1,用来测量复合凸轮的输入角度,提供所有信号特征提取的统一参考点;锥齿轮 2 号位置处安装编码器 2,用来测量机械手的旋转输出角度;花键副边缘滚动轴承的 3 号位置处安装磁栅尺,用来测量机械手的水平移动距离;机械手 4 号位置处安装有振动加速度传感器用来测量机械手振动;花键副外套 5 号位置处安装有涡流微位移传感器用来测量刀具的离心动态偏距;刀具的末端 6 号位置处安装倾角传感器用来测量刀具的静态倾斜角度。

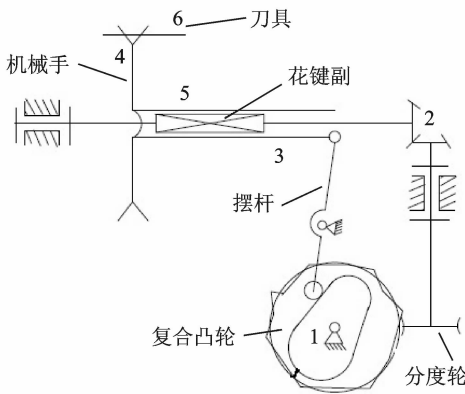


图 5 传感器位置图  
Fig.5 Sensor locations

振动传感器可通过胶粘的方式固定,编码器和磁栅尺可通过磁力座固定,但是倾角传感器和涡流位移传感器必须设计专用的结构来固定,其固定结构和方式如图 6 所示。倾角传感器安装在固定架 1 槽内,支架 1 以套筒的形式安装在刀具的末端;涡流位移传感器安装在固定架 2 上临近刀具一侧,支架 2 固定在花键副外套上,并且具有伸缩机构来调整传感器与刀具间的距离。

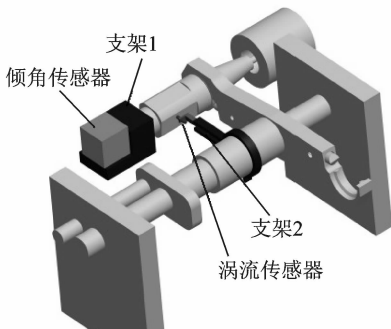


图 6 传感器的安装  
Fig.6 Sensor installations

### 2.3 软件功能结构及编程实现

搭建的换刀装置动态特性测试系统的功能结构如图 7 所示。安装好传感器之后,启动软件系统进入开始界面,可选择输出特性、碰撞特性和机械手特性内容进行测试,数据采集完成后,内部 Matlab 程序将自动提取出所需要特征向量。式(5)中的神经网络结构参数可以通过调用样本库在线训练得到,也可以通过调用历史训练结果来获取。完成评估换刀装置综合性能之后,可选择存储和打印测试结果。在信号采集过程中可实时观察数据信息,预判是否合理,具有清除数据功能,及时重新测量。

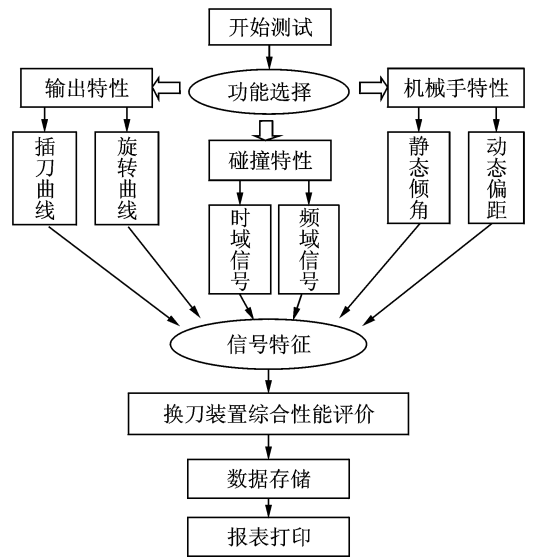


图 7 测试系统的软件功能  
Fig.7 Software functions of test system

本系统的软件程序共有 7 个界面,通过一个选择界面,分别进入各个子模块进行相应的测试与分析。功能选择模块如图 8 所示。



图 8 功能选择界面

Fig.8 Function selection interface

程序中多次用到信号的采集程序,采集函数应用采集卡自带的 Labview 函数,选择多通道连续采

集模式。由开始采集按钮控制选择结构,先在后台进行采集设置,在 While 循环中调用采集函数和实时显示采集数据图像,计算机每秒采集 2 000 次数据,由硬件计时控制采样间隔,设置软件每次从缓存中提取 200 个采样数据。利用 Matlab 来进行神经网络的训练和综合性能评价,样本训练数据可在界面直接输入,也可以通过文本文件读取数据,在界面设置网络训练参数,利用 Matlab script 与 Matlab 交互进行网络学习,结果直接通过 save() 函数存储。上部的选择结构实现训练神经网络训练功能,下部的选择结构利用 load() 函数调用训练好的网络进行换刀装置的综合性能评价。测序中需要对换刀装置的理论定位点和实际定位点进行计算和提取,测试信号小波去噪等,这些功能是通过 Matlab 节点进行处理和计算的,除此之外还有报表打印、频域变换、不同模块间的参数传递等。

### 3 误差估计与现场测试

由于测试换刀装置时标准输出信号用标准仪器不容易取到,所以采用理论分析得到换刀周期为 3 s 时被测量的大致变化规律来设计实验,应用标准测量仪器与所制备的仪器同时进行测量,利用对比结果估计相对最大误差,其具体测量结果如表 1 所示。应用自主研发的换刀装置综合测试系统,在机床厂对 TH6350 数控机床所配的卧式换刀装置进行测试。测试过程部分实物如图 9 所示,由于篇幅限制仅以其中的碰撞特性部分测试结果展示,如图 10 所示。

在不同的换刀速度条件下对换刀装置进行测试,所得测试结果统计如表 2 所示。在 200 N 刀重条件下随着换刀速度的增加,静态倾角基本不变,换刀装置的定位误差和碰撞幅值均有变大趋势。在不

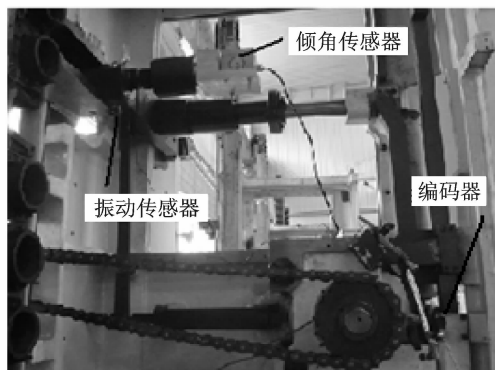


图 9 测试实物图

Fig.9 Physical test image

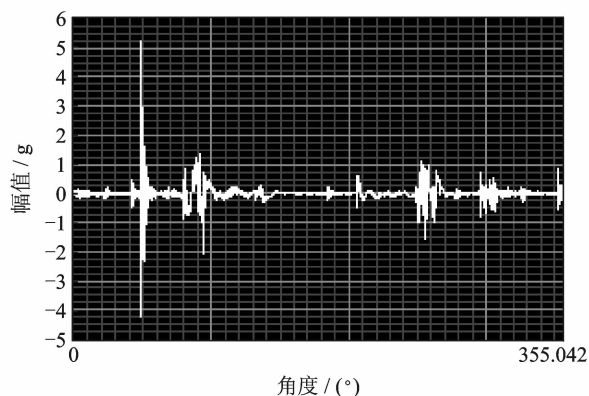


图 10 碰撞特性结果

Fig.10 Results of collision characteristics

表 1 测试系统误差参数

Tab.1 Test system error parameters

最大误差估计	传感器精度	通道误差/%	结果误差
旋转输入	0.1%	0.024	0.11%
旋转输出	0.1%	0.024	0.11%
位移输出	20 $\mu\text{m}$	0.024	25 $\mu\text{m}$
动态偏距	0.25%	0.024	0.3%
静态倾角	0.15%	0.024	0.2%
冲击检测	0.000 2 g	0.024	0.005 g

同的刀具重量条件下对换刀装置进行测试,所得测试结果统计如表 3 所示。在 3 s 换刀周期下随着刀具的增加,静态倾角与动态偏距变大趋势明显,定位误差和碰撞幅值变化规律不明显。

表 2 不同换刀速度测试结果

Tab.2 Test results at different speeds of changing tool

特征数据	4 s 周期	3 s 周期	2 s 周期
抓刀误差/ $^{\circ}$	1.2	1.5	2.0
插刀误差/ $^{\circ}$	1.6	1.8	2.2
动态偏距/mm	0.5	1.1	1.8
抓刀振动加速度/g	10	20	50
插刀振动加速度/g	5	8	15
静态倾角/rad	0.06	0.062	0.062

表 3 不同刀具重量测试结果

Tab.3 Test results at different tool weights

特征数据	刀重 100 N	刀重 200 N	刀重 300 N
抓刀误差/ $^{\circ}$	1.3	1.5	1.5
插刀误差/ $^{\circ}$	1.7	1.8	1.7
动态偏距/mm	0.7	1.1	1.5
抓刀振动加速度/g	17	20	19
插刀振动加速度/g	7.5	8	8.1
静态倾角/rad	0.04	0.06	0.07

## 4 结束语

根据换刀装置特点,分析测量输出特性、碰撞特性和机械手特性的必要性,确定了物理量的测量方法,测量的内容能够反映换刀装置各方面动态特性。设计了倾角传感器和涡流位移传感器的固定结构,并搭建了基于虚拟仪器的换刀装置动态特性测试系统,系统后台应用 Matlab 进行数据处理,完成了滤波、提取特征等计算。对测试系统进行了误差分析,现场测试结果能够满足研究需要,为研究换刀装置特性提供重要实验数据资源。为了研究测量的特征值具体的变化规律和准确预测最大换刀速度和刀具质量,还需要测试大量数据样本和进一步的数据分析及验证。

### 参 考 文 献

- [1] 韩越梅. 加工中心自动换刀装置的研究进展[J]. 装备制造技术, 2010, 38(5): 128-129.  
Han Yuemei. Analysis and development of automatic tool changer[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2010, 38(5): 128-129. (in Chinese)
- [2] 杨旭日, 王丹虹, 田春霞. 基于 EON 的数控机床换刀系统运动仿真[J]. 实验技术与管理, 2008, 25(7): 88-92.  
Yang Xuri, Wang Danhong, Tian Chunxia. Simulation of the CNC exchanging knives system based on EON [J]. Experimental Technology and Management, 2008, 25(7): 88-92. (in Chinese)
- [3] 郭小兰, 周新民, 崔涛. TH6350 卧式加工中心自动换刀机构有限元建模及动力特性分析[J]. 西南林学院学报, 2006, 26(2): 76-79.  
Guo Xiaolan, Zhou Xinmin, Cui Tao. Finite element modeling of automatic tool changer and dynamic characteristics analysis of ATC TH6350 bed machining center[J]. Journal of Southwest Forestry College, 2006, 26(2): 76-79. (in Chinese)
- [4] 潘旭东, 王广林, 胡洋, 等. 高压大流量电液换向阀动态特性测试系统[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(4): 252-256.  
Pan Xundong, Wang Guanglin, Hu Yang, et al. Dynamic characteristic test system for high pressure and flow electro-hydraulic directional control valve [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(4): 252-256. (in Chinese)
- [5] 张健滔, 姚志安, 宋小刚, 等. 基于虚拟仪器的直线超声电机机械特性测试[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(2): 218-222.  
Zhang Jiantao, Yao Zhian, Song Xiaogang, et al. Mechanical characteristics of linear ultrasonic motors based on virtual instrument [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(2): 218-222. (in Chinese)
- [6] 刘静. 双凸轮联动自动换刀技术的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [7] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding [J]. IEEE Trans. Inform Theory, 1995, 41(3): 613-627.
- [8] 毛晓东, 林贵平, 郁嘉. 过载与弹射速度关系研究及神经网络实现 [J]. 航空学报, 2010, 31(10): 1907-1913.  
Mao Xiaodong, Lin Guiping, Yu Jia. Study of relationship between load factor and ejection velocity and its neural network implementation [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2010, 31(10): 1907-1913. (in Chinese)



**第一作者简介:** 李艳生 男, 1983 年 8 月生, 博士研究生。主要研究方向为先进机器人技术。

Email: liyansheng0@163.com