

利用设备响应状态信息的运行可靠性评估

蔡改改, 陈雪峰, 陈保家, 李兵, 何正嘉

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了保障关键设备的运行安全可靠, 以克服经典的可靠性分析方法难以评估单台运行设备可靠性的不足, 提出了一种利用设备响应状态信息的运行可靠性评估方法. 该方法利用设备响应状态信息, 应用小波包分析和距离评估技术, 提取并优选反映设备运行状态的敏感特征指标, 然后结合比例协变量模型, 给出基本响应协变量函数的定量计算方法, 从而建立了设备的可靠性评估模型, 实现了设备的运行可靠性评估. 该方法通过特征优选将敏感响应协变量特征指标引入到设备可靠性评估中, 实现了基本响应协变量函数的准确定量计算及设备运行可靠性的有效评估. 将该方法应用到数控机床刀具的可靠性分析中, 有效地评估了数控机床刀具的运行可靠性, 并验证了提出方法的合理性和有效性.

关键词: 响应状态信息; 比例协变量模型; 运行可靠性评估

中图分类号: O121.8; G558 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)01-0108-06

Operating Reliability Assessment by Equipment Response Condition Information

CAI Gaigai, CHEN Xuefeng, CHEN Baojia, LI Bing, HE Zhengjia

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Assuring key equipment to run safely is crucial to improve the reliability of mechanical equipment. However, it is difficult for the classical reliability analysis methods to achieve the reliability assessment of single equipment. An operating reliability assessment method by equipment response condition information is proposed. Wavelet packet analysis and distance evaluation are employed to extract and optimize response covariates reflecting the equipment operation state. And combining with proportional covariate model, the quantitative calculation scheme for the baseline response covariate function is proposed. Then the reliability assessment model is established to achieve the reliability assessment, where sensitive response covariate is introduced by means of covariate optimization, and the baseline response covariate function is gained and the operating reliability is evaluated. The proposed strategy is applied to reliability assessment of cutting tool of CNC machine to verify the rationality and efficiency.

Keywords: response condition information; proportional covariate model; operating reliability assessment

可靠性是评价设备质量的重要指标之一, 贯穿在设备的开发、设计、制造、使用及维修保养等各个

环节. 传统的可靠性评估方法基于概率及数理统计理论, 依赖历史失效寿命数据得到一批设备的整体

收稿日期: 2011-04-25. 作者简介: 蔡改改(1986—), 女, 博士生; 陈雪峰(通信作者), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51035007); 霍英东青年教师基金资助项目(121052); 国家“973计划”资助项目(2011CB706805).

网络出版时间: 2011-10-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20111027.0957.009.html>

可靠性^[1],但无法实现反映当前运行设备个体特性的可靠性评估。

设备的运行状态信息能有效反映设备的运行动态特性、工作精度、揭示设备的性能退化规律,为设备运行的可靠性评估提供重要信息。依据设备的状态监测信息提取的特征指标在可靠性领域通常被称为协变量,依赖时间的协变量一般分为两类^[2]:①环境协变量的变化会导致设备故障率的变化,最典型的如工作载荷、环境温度等;②响应协变量的变化是由设备故障率变化引起的,受设备运行动态特性的直接影响,如润滑油中金属磨粒的含量、振动信号特征指标等。考虑到设备运行状态信息在设备可靠性评估中的重要性,国内外许多学者开展了利用设备运行状态信息进行可靠性建模、分析的技术研究,并用于工程实际^[3-8]中。有效提取并优选反映设备运行可靠性的敏感特征指标,是实现设备运行可靠性准确评估的重要条件,以往的研究大多对运行状态信息直接进行时域统计分析,根据经验选取一个或多个时域归一化指标进行建模,但缺少对特征指标的优选,因此影响了可靠性评估模型建模的准确性。此外,这些研究选用环境协变量作为底层状态信息进行可靠性建模,与响应协变量相比,环境协变量不能有效体现设备的运行状态,因此难以实现对其运行可靠性的准确有效评估。比例协变量模型(PCM)是 Sun 等人^[2]于 2006 年提出的,该模型利用设备的响应状态信息,建立设备响应协变量和可靠性之间的关系,但其研究中同样缺少响应协变量特征指标的优选过程,且建模过程中基本响应协变量函数的确定依赖于经验信息,因此可操作性较差。

针对以上问题,本文提出了一种利用设备响应状态信息的运行可靠性评估方法,对于监测得到的设备响应状态信息,应用小波包分析技术获取并构建精细准确的特征指标向量,采用距离评估技术优选最能表征设备性能退化的敏感特征指标,克服以往响应协变量特征指标选取的盲目性。因此,定量地计算基本响应协变量函数,建立比例协变量可靠性评估模型,可最终实现设备运行可靠性的定量评估。

1 比例协变量模型

根据设备响应状态信息提取的响应协变量,可有效地反映设备故障率的变化,比例协变量模型通过建立设备响应协变量与故障率之间的关系,获取设备运行可靠性的评价指标。其形式^[2]为

$$h(t)=\psi(Z_r(t))/c_0(t) \tag{1}$$

式中: $h(t)$ 表示故障率函数; $\psi(Z_r(t))$ 表示响应协变量函数,反映设备的运行状态,并随时间变化而变化; $Z_r(t)$ 表示响应协变量; $c_0(t)$ 表示基本响应协变量函数,反映了系统的故障率函数与响应协变量之间的关系。

在 PCM 模型中,建立合适的响应协变量函数,对确定基本响应协变量函数、准确估计设备的故障率起着关键作用。为简化计算过程,提高计算效率,本文选用单一的响应协变量特征指标,用 $Z_r(t)$ 替代 $\psi(Z_r(t))$,将模型简化为

$$h(t)=Z_r(t)/c_0(t) \tag{2}$$

利用比例协变量模型计算得到设备的故障率函数,由故障率函数与可靠度之间的关系得到当前运行设备的可靠度为

$$R(t)=\exp\left(-\int_0^t h(t)dt\right) \tag{3}$$

2 运行可靠性评估方法

针对监测获取的设备响应状态信息,利用小波包分析技术^[9]和距离评估技术^[10],提取并优选反映设备运行状态的敏感响应协变量特征指标。结合比例协变量模型定量地计算基本响应协变量函数,建立了设备的可靠性评估模型(见图 1),从而实现了设备运行可靠性的评估。具体步骤如下。

步骤 1 确定失效分布,对获取的一组设备的失效寿命数据 $\{\tau_n\}$ ($n=1,2,\cdots,m_f$), m_f 为失效样本数,利用失效分布假设检验确定设备的失效分布。本文选用威布尔分布来描述机械设备的失效分布,其分布形式为

$$F(t)=1-\exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \tag{4}$$

式中: β 为威布尔分布的形状参数; η 为威布尔分布的尺度参数。

步骤 2 根据历史失效寿命数据,采用极大似然估计算法来确定 β 和 η ,其中初始故障率函数

$$h_{in}(t)=\frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \tag{5}$$

步骤 3 提取并优选响应协变量。针对监测到的设备响应状态信息,选择合适的小波基函数,计算 m 层小波包分解后各频带能量 $P_{m,1},P_{m,2},\cdots,P_{m,2^m}$ 及小波能量熵^[11] I ,构建特征指标向量

$$\mathbf{K}=(P_{m,1},P_{m,2},\cdots,P_{m,2^m},I) \tag{6}$$

利用距离评估技术计算 $\mathbf{K}$ 中第 i 个特征指标的距离评估因子 α_i ,选取 α_i 最大的特征指标,即与设备性能退化敏感度最高的特征指标作为可靠性评估模型

中的响应协变量.

步骤4 根据 $h_{in}(t)$ 以及由步骤3选取的响应协变量,依据基本响应协变量函数

$$c_0(t_i) = \frac{Z_r(t_i)}{h_{in}(t_i)} = \frac{Z_r(t_i)}{\beta/\eta(t_i/\eta)^{\beta-1}}, \quad i = 1, 2, \dots, m_c$$

(7)

获得一组离散的基本响应协变量函数值. 其中 m_c 表示响应状态信息变量的个数. 选取合适的基本响应协变量参数形式,运用回归分析技术对 $c_0(t)$ 进行参数估计,实现定量计算.

步骤5 更新故障率函数,获取新的响应状态信息,提取新的响应协变量 $\{Z_r(t_j)\}$, $j = 1, 2, \dots, m_n$, 由下式得到离散的故障率

$$\tilde{h}(t_i) = \frac{Z_r(t_i)}{c_0(t_i)},$$

$$i = 1, 2, \dots, m_c, m_c + 1, \dots, m_c + m_n \quad (8)$$

式中: m_n 表示新的响应状态信息变量的个数. 利用极大似然估计算法估计设备故障率函数的参数,实现设备故障率函数的更新.

步骤6 利用更新后的故障率函数计算设备的可靠度,并根据给定的可靠度阈值确定设备的失效寿命.

步骤7 根据可靠性评估结果,指导生产维修及更换策略.

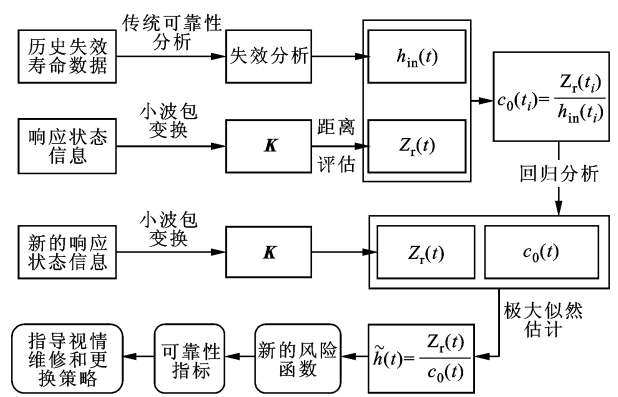


图1 设备运行可靠性评估方法流程图

3 实验与数据分析

能否保证产品在运行过程中安全可靠是机械产品竞争的焦点^[12],而我国的中高档数控机床与国外同类产品的差距集中体现在机床的稳定性和可靠性方面^[13]. 数控机床刀具系统是数控机床中十分重要的一个组成部分. 工业统计表明,刀具失效是引起数控机床加工中断的首要因素^[14],由此引起的崩刀、卷刀、刀夹及机床损坏,进而导致数控机床故障停机

的时间占数控机床总故障停机时间的 1/5~1/3,同时刀具磨损误差也是影响加工精度的重要因素^[15].

为积累数控机床刀具加工过程中的响应状态信息及失效寿命数据,实验以友嘉精机 FTC-20 数控车床为实验平台,采集 CNMG120408-HM 车刀加工 45 号钢过程中的振动信号,利用最高分辨率为 0.01 mm 的 MZDH0670 系列变倍单筒视频显微光学系统,测量并读取刀具后刀面的磨损量 V_B . 实验过程中的切削参数及数据采集参数如表 1 所示. 图 2 为实际测试时所用视频显微光学系统以及振动传感器的安装位置现场图.

表1 刀具磨损寿命实验参数

切削速度/ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	200
进给量/ $\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$	0.15
切削深度/mm	2
采样频率/Hz	32 768
采样时间/s	2

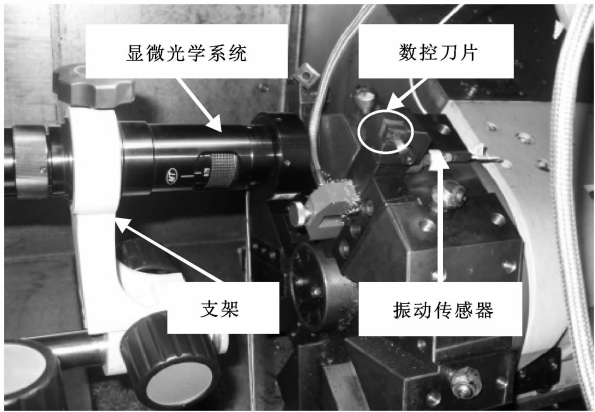


图2 数控机床刀具磨损寿命实验系统装置图

对于数控机床加工刀具,国际标准 ISO3685-1-977 中规定,以 1/2 背吃刀量处测得的后刀面磨损量作为刀具的磨钝测量基准. 同时,根据外圆车刀加工碳钢的精车磨钝标准,在实验过程中将刀具后刀面的 $V_B=0.6 \text{ mm}$ 作为刀具的失效阈值. 在相同工况下,首先选取 10 把刀具进行实验,监测其响应状态信息及失效寿命 τ (见表 2).

表2 数控机床刀具的失效寿命

刀具编号	1	2	3	4	5
τ/min	93.02	87.46	88.86	97.63	80.19
刀具编号	6	7	8	9	10
τ/min	90.24	104.51	101.55	97.25	99.44

对 10 把刀具的失效寿命进行威布尔分布拟合检验,发现刀具失效寿命分布与威布尔分布之间的拟合度良好,因此选择威布尔分布来表征刀具的失效寿命分布是合理的. 采用极大似然估计算法对 τ 进行威布尔分布的参数估计,得到 τ 的威布尔分布及刀具的故障率函数分别为

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{97.20}\right)^{14.99}\right]$$
$$h_{in}(t) = \frac{15.99}{97.20}\left(\frac{t}{97.20}\right)^{14.99}$$

针对刀具振动信号的特点,应选择具有正交性、紧支性、对称性以及具有一定消失矩的小波基函数,来提取刀具磨损过程中的显著响应特征指标. Daubechies 系列小波基既具有 N 阶消失矩,又具有紧支性,并且是近似对称的,因此本文选择 $N=10$ 的 Daubechies 小波基,即 db10 小波基对刀具振动信号进行分解. 为确定合适的小波包分解层数,对刀具原始振动信号进行频谱分析,获取刀具信号能量集中的频带. 根据振动信号的采样频率和信号能量集中的频带范围,确定的小波包分解层数为 4. 计算小波包分解后的各频带能量及小波能量熵,构建

$$\mathbf{K} = (P_{4,1}, P_{4,2}, \dots, P_{4,16}, I)$$

根据设定的阈值划分刀具的不同磨损状态,由刀具后刀面磨损量将刀具运行状态划分为轻微磨损、严重磨损及失效状态. 根据距离评估技术原则,同一类的类内特征距离最小,不同类的类间距离最大,计算 $\mathbf{K}$ 中第 i 个特征指标的距离评估因子 α_i 并排序^[10],选取 α_i 最大的特征指标作为敏感特征指标. 图 3 中 α_i 最大的特征指标为 $P_{4,9}$,即第 9 频带归一化能量,该指标对刀具的磨损退化敏感度最高,因此选取其作为响应协变量输入到可靠性评估模型中.

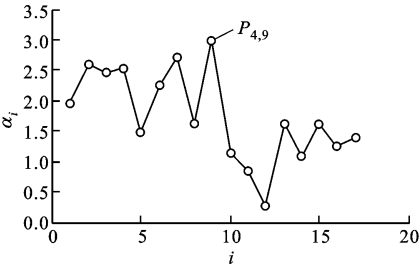


图 3 各特征指标的距离评估因子

不失一般性,以其中 5 号刀具为例,利用 db10 小波对其振动信号进行 4 层小波包分解,提取的第 9 频带归一化能量变化趋势如图 4 所示. 从图 4 中可看出,在刀具的运行过程中,随刀具退化,第 9 频

带归一化能量的变化趋势明显.

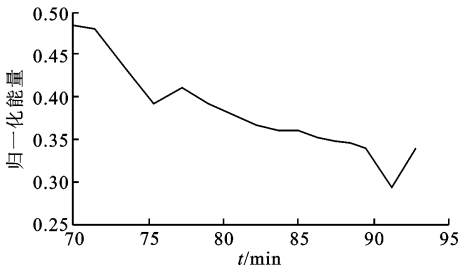


图 4 第 9 频带归一化能量的变化趋势

按照运行可靠性评估方法中的步骤 4,由式(7)得到基本响应协变量函数的离散值,基本响应协变量函数选用乘法形式 $c_0(t) = at^b$,利用回归技术对其进行参数估计,定量得到

$$c_0(t) = 3.01 \times 10^{32} t^{-16.18}$$

对待评估的第 11 把刀具进行切削实验以获取新的刀具振动信号,同样选用 db10 小波对其进行 4 层小波包分解,求取各频带的能量. 根据特征指标优选结果,选取第 9 频带归一化能量作为响应协变量,其第 9 频带归一化能量的变化趋势如图 5 所示.

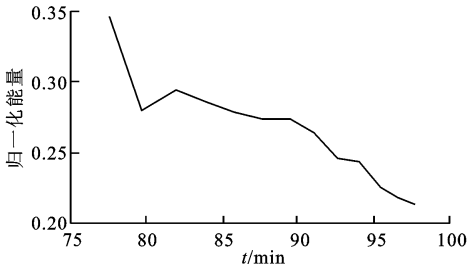


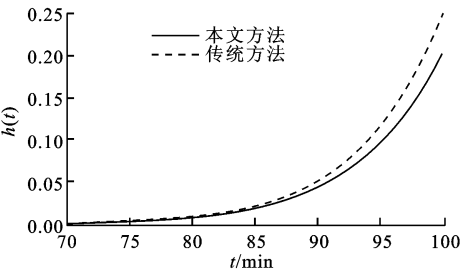
图 5 11 号刀具在第 9 频带的能量变化趋势

由基本响应协变量函数求取对应时刻的 $c_0(t_i)$,由式(4)获得离散的故障率函数值,采用极大似然估计算法对故障率函数进行参数估计,更新获得新的故障率函数为

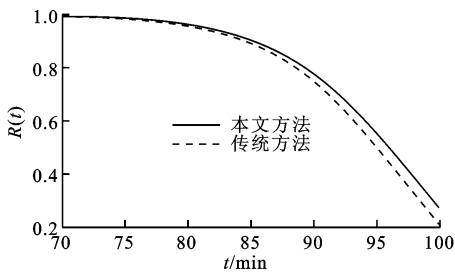
$$\tilde{h}(t) = \frac{15.51}{98.26}\left(\frac{t}{98.26}\right)^{14.51}$$

由式(3)即可求得 11 号刀具的可靠度. 将本文方法与传统的可靠性评估方法进行对比,两种方法分别得到的刀具故障率曲线及可靠度曲线的比较结果见图 6.

根据工程实际,将 $R(t)=0.5$ 作为刀具的失效阈值,则由更新后的故障率函数计算得到的刀具失效寿命为 95.97 min,而根据初始故障率函数计算得到的失效寿命为 94.98 min,在刀具实际运行中,第 11 把刀具的实际失效寿命为 96.83 min,由这 2



(a)故障率



(b)可靠度

图6 两种算法的故障率与可靠度曲线比较

种方法得到的评估结果及误差如表3所示. 根据计算结果,当刀具运行时间为96.83 min时,由本文提出的方法得到的刀具可靠度为0.346,与工程实际相符.

表3 可靠性评估结果对比

方法	实际失效寿命/min	估计寿命/min	误差/%
传统	96.83	94.98	1.91
本文	96.83	95.97	0.89

通过以上分析,验证了本文提出方法的有效性和实用性,且利用本文方法获取的可靠性评价指标有效地反映了当前运行刀具的个体特性. 因此,对于相同工况下的同种型号刀具,只需监测刀具的振动信息,运用本文提出的方法即可获得其运行过程中某时刻的可靠度,也可获得给定刀具可靠度阈值后的失效寿命. 这为判断数控机床刀具的运行状态,及时进行刀具的更换提供了依据,可有效指导生产和维修.

4 结 论

(1)本文利用设备运行过程中的响应状态信息,针对其特点,选用合适的小波基函数,利用小波包变换和距离评估技术,提取并优选对设备运行状态敏感的特征指标,揭示响应状态信息与设备运行状态变化间的关系,同时也避免了以往响应协变量选取

的盲目性.

(2)结合比例协变量模型及回归分析、极大似然估计等算法,实现了基本响应协变量函数的定量计算,避免了以往基于经验信息利用比例协变量模型进行设备可靠性评估的主观性,并实现了设备故障率函数的更新. 获取的可靠性评价指标有效反映了当前运行设备的个体特性.

(3)对现有的数控机床进行可靠性评估时,由于缺少历史失效寿命数据及历史运行状态信息,因此可以参考原有类似机床的历史失效寿命,结合现有机床的实时响应状态信息,运用本文提出的方法对初始故障率函数进行更新,从而实现现有机床的运行可靠性评估.

参考文献:

[1] HENG A S Y. Intelligent prognostics of machinery health utilizing suspended condition monitoring data [D]. Brisbane, Australia; Queensland University of Technology, 2009.

[2] SUN Y, MA L, MATHEW J, et al. Mechanical systems hazard estimation using condition monitoring [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(5): 1189-1201.

[3] EBLING C E. An introduction to reliability and maintainability engineering [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1997: 24-128.

[4] LIN Changching, TSENG H. A neural network application for reliability modeling and condition-based predictive maintenance [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 25(1): 174-179.

[5] LIAO H, ZHAO W, GUO H. Predicting remaining useful life of an individual unit using proportional hazards model and logistic regression model [C]// Annual Reliability and Maintainability Symposium 2006 Proceedings. Newport Beach, USA: Institute of Electrical & Electronics Engineers, 2006:127-132.

[6] LIAO H, QIU H, LEE J, et al. A predictive tool for remaining useful life estimation of rotating machinery components [C]// Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference 2005. Long Beach, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2005: 24-28.

[7] YOU M, LI L, MENG G. Two-zone proportional hazard model for equipment remaining useful life prediction [J]. Journal of Manufacturing Science and En-

- gineering, 2010, 132: 041008. 1-041008. 6.
- [8] 丁锋,何正嘉,訾艳阳,等. 基于设备状态振动特征的比例故障率模型可靠性评估[J]. 机械工程学报, 2009, 45(12): 89-94.
- DING Feng, HE Zhengjia, ZI Yanyang, et al. Reliability assessment based on equipment condition vibration feature using proportional hazards model [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45 (12): 89-94.
- [9] 何正嘉,訾艳阳,张西宁. 现代信号处理及工程实例[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2007: 128-132.
- [10] 雷亚国,何正嘉,訾艳阳,等. 基于特征评估和神经网络的机械故障诊断模型[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(5): 558-562.
- LEI Yaguo, HE Zhengjia, ZI Yanyang, et al. Mechanical fault diagnosis model based on feature evaluation and neural networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(5): 558-562.
- [11] 何正友,刘志刚,钱清泉. 小波熵理论及其在电力系统中应用的可行性探讨[J]. 电网技术, 2008, 28(21): 17-21.
- HE Zhengyou, LIU Zhigang, QIAN Qingquan. Study on wavelet entropy theory and adaptability of its application in power system [J]. Power System Technology, 2008, 28 (21): 17-21.
- [12] 张义民. 机械可靠性设计的内涵与递进[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 167-188.
- ZHANG Yimin. Connotation and development of mechanical reliability-based design [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 167-188.
- [13] 徐建平,夏国平. 我国装备制造业的国际比较及对策研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(20): 2510-2518.
- XU Jianping, XIA Guoping. Research on the international comparison and countermeasure of equipment manufacturing in china [J]. Chinese Mechanical Engineering, 2008, 19(20): 2510-2518.
- [14] 曾祥超,陈捷. 数控机床刀具磨损监测实验数据处理方法研究[J]. 机械设计与制造, 2009(1): 213-215.
- ZENG Xiangchao, CHEN Jie. Study of data processing method for CNC tool wear monitoring [J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(1): 213-215.
- [15] 谢平,刘彬. 一种基于小波网络的切削刀具故障监测[J]. 机械工程学报, 2002, 38(2): 108-111.
- XIE Ping, LIU Bin. Fault detection on cutting tools based wavelet neural network [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(2): 108-111.

(编辑 管咏梅)