

高速电主轴驱动系统性能评价研究

范丽婷,贾正伟,司志鹏,刘继智,张珂

(沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 提出一种基于隐含状态映射机制高速电主轴驱动系统的性能评价方法,以提高数控机床的加工质量,降低设备故障风险。方法 根据驱动系统动态特性提取系统模型特征参数,依据系统模型参数提取特征,获得对应的隐含状态信息;根据仿真分析结果与实际经验相结合来确定电主轴驱动系统的性能评价等级;以高速电主轴驱动系统中变频器内的IGBT器件发生性能退化现象为例进行实验验证。结果 随着剪断键合线数量不断增加,笔者所提方法的隐含退化量不断增大;当剪断四根键合线时,隐含退化量值为0.2183,系统出现失效状态。结论 IGBT器件的不同退化程度所对应的辨识参数能够映射为隐含状态特征,用于驱动系统的性能评价,可以验证该方法的合理性和有效性;笔者所提方法可用于驱动单元发生性能失效前的健康状态评价,能够有效地提高电主轴系统的安全性和可靠性,为构建整个高速电主轴系统的运行评价管理框架奠定基础。

关键词 高速电主轴;驱动系统;隐含状态映射;性能评价

中图分类号 TU512;TG659

文献标志码 A

Performance Diagnosis of the Drive Unit for High Speed Motorized Spindle

FAN Liting, JIA Zhengwei, SI Zhipeng, LIU Jizhi, ZHANG Ke

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: As the key component of the motorized spindle system, the performance of drive unit will directly affect the processing quality of CNC machine tools. This paper proposed a performance diagnosis method for the drive unit based on hidden state mapping model to prevent the motorized spindle from failure. The hidden state model was obtained by feature extraction of the parameter vectors identified from the dynamic responses to test input signals. The thresholds of performance degradation were determined by the hidden state to evaluate the performance of the drive unit in the motorized spindle system. A simulation case was carried out to verify the

收稿日期:2021-03-02

基金项目:国家自然科学基金项目(52175107);辽宁省教育厅项目(lnjc201908)

作者简介:范丽婷(1981—),女,副教授,博士,主要从事机械系统关键部件的健康评估与退化趋势预测等方面研究。

feasibility and effectiveness of the proposed model by taking IGBT degradation failure as an example. The results showed that the model parameters extracted from different degradation degrees of IGBT devices can be mapped to hidden state characteristics and used for performance evaluation of the drive unit. The proposed hidden state mapping model can be used in the framework of monitoring the safety and reliability of the drive unit, and lay the foundation for the prognostic and health management of the motorized spindle system.

Key words: high speed motorized spindle; drive unit; hidden state mapping; performance diagnosis

高速电主轴是高档数控机床关键组成部件,具有体积小、效率高的特点。随着电机控制理论不断发展,高速电主轴在控制上沿用了电机控制的方法,实现了主轴调速响应快的优点^[1]。高速电主轴驱动系统的快速启停变频及高速稳定性能为数控机床在高端制造上创造条件,满足高速机床专业化快速生产加工的需求。

高速电主轴性能评价是对高速电主轴在当前运行阶段工作性能的综合评价。高速电主轴在长期的工作中不可避免地会出现性能衰退现象,分为主轴电机性能衰退及控制器性能衰退,高速电主轴性能退化表现的是累积退化^[2-3]。高速电主轴内部控制形成闭环系统,在运行过程中能够补偿性能退化出现的轻微偏差,即使系统性能出现较严重的性能退化,系统的输出仍在正常范围中,其退化过程存在隐含退化的特点,性能评价指标建立更加困难,难以运用定量计算振动、温度等一些指标进行评价。H. Mo 等^[4]、C. Shi 等^[5]、Y. J. Cheng 等^[6]、F. Chen 等^[7]针对闭环系统退化现象分析进行研究,针对不同的对象进行了闭环系统分析,研究了闭环系统性能退化的过程,并对系统性能进行评价。近几年,众多学者在性能评价方向提出了许多方法:Y. Wang 等^[8]提出物联网系统的可靠性问题,采取层次分析方法和属性决策方法相结合对系统综合评价;R. He 等^[9]提出闭环系统的性能评价困难的问题,采用循环贝叶斯网络建模与动态贝叶斯网络求解相结合的闭环概率可靠性评估方法;范丽婷等^[10]提出高速电主轴整体运行性能评价问题,采用层次分析法确定指标

权重,进行高速电主轴综合性能量化评价;Jin Mengshi 等^[11]提出了运用非线性系统识别方法来识别关节结构损坏与理想偏差。

基于上述分析,笔者对高速电主轴驱动系统的性能评价研究,分析闭环控制特点以及性能监测的难点,提出一种基于隐含退化量的控制系统性能评价方法;通过提取能够表征驱动系统性能的特征参数,将特征参数与正常状态下特征参数偏离距离作为系统性能评价指标,并应用于高速电主轴电主轴驱动系统中,实现高速电主轴驱动系统的健康评价,为高速电主轴的维护检修提供参考。

1 控制系统数学模型

矢量控制方法是控制原理上经典的控制方法,其思想是通过转速控制和转矩控制的解耦实现等效直流控制的效果。笔者以高速电主轴驱动控制系统为研究背景,驱动控制系统数学模型为电压方程、磁链方程和转矩方程。

电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s P & -\omega_1 L_s & L_m P & -\omega_1 L_m \\ \omega_1 L_s & R_s + L_s P & \omega_1 L_m & L_m P \\ L_m P & -\omega_1 L_m & R_r + L_r P & -\omega_s L_r \\ \omega_s L_m & L_m P & \omega_s L_r & R_r + L_r P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

磁链方程:

$$\begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (2)$$

转矩方程:

$$T_e = n_p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}). \quad (3)$$

根据上述控制方程实现矢量控制。ARX 模型要求提供输入信号 $u(t)$, 输出信号 $y(t)$, 即可建立其数学模型, ARX 模型对控制系统模型表示方式也称为“黑箱”建模^[12-14], $e(t)$ 为噪声, 其模型如图 1 所示。

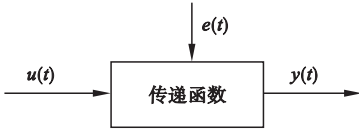


图1 ARX 模型

Fig. 1 The ARX model

2 控制系统隐含退化量及评价指标的建立

高速电主轴驱动系统评价过程分为性能评价指标建立及评价等级划分。针对控制系统的闭环补偿特性, 检测人员很难通过输出信号判定系统的退化程度, 因此在控制系统的性能评价方法加入隐含退化量, 选择隐含退化量建立性能评价指标。运用辨识方法提取高速电主轴驱动系统特征参数, 通过距离方法获得性能变化量, 运用仿真及实际经验相结合的方法确定评价等级, 系统评价流程如图 2 所示。

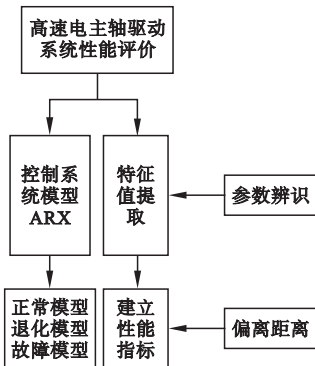


图2 健康评价流程图

Fig. 2 The flow chart for health evaluation process

2.1 控制系统隐含退化量

隐含退化量是控制系统在故障失效前运行性能的变化量, 系统的闭环控制使得设备

维护人员很难通过测量外在可测系统输出量直接估计系统的健康状况, 该系统性能退化过程称为隐含退化过程, 产生的性能变化量为隐含退化量。

控制系统的表达式为

$$y^n(t) + a_1 y^{(n-1)}(t) + \dots + a_n y(t) = b_0 u^m(t) + b_1 u^{(m-1)}(t) + \dots + b_m u(t). \quad (4)$$

式中: y 为系统输出测量信号; u 为系统的输入测量信号; $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m$, 分别为系统辨识参数和系统性能隐含变化参数。用 t 表示离散时间, 系统的状态方程可表示如下^[15]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, t, u, L) + v, \\ x(t_0) = x_0. \end{cases} \quad (5)$$

式中: f 为系统的动态特性; u 为系统输入; L 为系统隐含退化量, 其由性能变化参数 $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m$ 计算获得; v 为系统干扰; x_0 为初始状态。

以特征提取获得的高速电主轴驱动系统性能参数作为笔者研究的隐含退化量。

2.2 评价指标建立

选择 Prbs 激励信号激励闭环控制系统, 采集输入输出信号, 辨识出系统参数, 运用采集数据进行参数辨识, 将每次获得的辨识参数运用有效的方法进行比较分析, 提取其特征^[16-17]。

评价指标是对上文辨识参数进行特征提取得到, 当前向量特征提取的方法很多, 而笔者以系统运行辨识参数与正常辨识参数进行比较的思路设计, 选择参数偏离的趋势大小作为衡量性能好坏的标准^[18]。有研究成果^[19]是将支持向量积上的偏离距离作为评价指标, 选择曼哈顿距离作为 KNN 的聚类标准进行分类, 在很多的求取方法上选择适合笔者研究的方法。

曼哈顿距离指标建立方法:

$$dist = |x_1 - y_1| + |x_2 - y_2| + \dots +$$

$$|x_n - y_n| = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|. \quad (6)$$

取平均值做差指标建立方法:

$$dist = \left| \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} - \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} \right|. \quad (7)$$

欧式距离指标建立方法:

$$dist = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}. \quad (8)$$

综上,笔者选择性能参数运算距离作为高速电主轴驱动系统性能评价指标。

2.3 健康等级划分

面对系统的过程退化,针对不同退化程度定义不同评价等级^[20]。高速电主轴驱动系统评价等级是对系统性能状况的综合评价,驱动系统退化现象限定在正常系统和故障系统之间的工作过程。将系统性能分为健康、预警和故障三个等级。根据驱动器出厂时正常状态性能指标值作为标准,将驱动器临界失效时性能评价价值作为预警与故障的界线值;驱动系统正常状态下的评价价值设为上界,驱动系统发生失效时的评价价值设为评价下界,再结合具体的加工制造需求确定更明确的中间等级界线。对于高速电主轴驱动系统性能等级的划分见表1。评价价值 HI 是将评价指标 L 进行最大-最小标准化处理得到。根据表1可以获得电主轴运行状况等级。

表1 等级评价划分表

Table 1 The grade evaluation table

评价等级	评价价值 HI
健康	$[0.75, 1)$
预警	$[0.35, 0.75)$
故障	$(0, 0.35)$

3 实验验证及分析

为验证笔者所提出特征参数的提取与系统退化过程健康评价等级映射的方法,笔者进行了实验验证。功率变流器元件 IGBT 在设备运行过程发挥着重要作用,在性能上较容易退化,以加速 IGBT 元件退化进行实验,

以往学者提到在设备运行的过程中,IGBT 元件的导通电阻不断地增大^[21];文献[22]叙述了通过剪短键合线的方式加速 IGBT 性能退化,并且键合线的剪断根数影响着器件退化的程度。根据 IGBT 退化机理分析,其退化的两种方式是键合线脱落和铝金属层重构,本实验选择较容易操作的剪短键合线来实现键合线脱落的等效效果^[23]。实验使用电主轴型号为 100MD60Y4, IGBT 模块为英飞凌 FF50R12RT4。

实验分为仿真实验和实验室实验两部分。通过仿真实验确定效果较优的欧式距离值评价方法,按照前文所述搭建的电主轴驱动系统矢量控制仿真模型,依据前文内阻变化的规律调节导通电阻,设置合适的 Prbs 激励信号,收集仿真过程输入输出数据,通过辨识流程确定系统性能退化参数。将隐含退化的参数分别按照曼哈顿距离、平均值距离和欧式距离的原则进行特征提取,选择区分度较为明显的欧式距离作为评价指标。通过不断的调节导通电阻的值来模拟 IGBT 的性能退化过程,曼哈顿距离、求平均值之间距离和欧式距离作为评价指标的仿真图见图3。

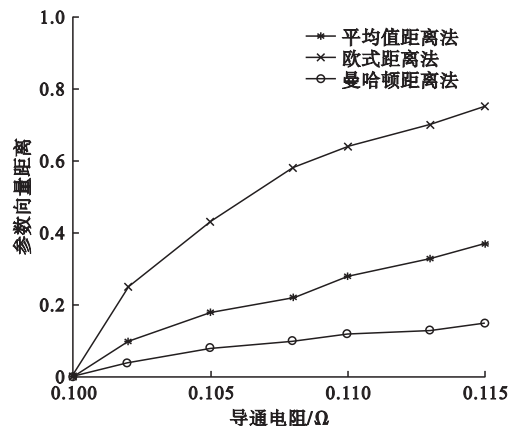


图3 指标建立方法仿真图

Fig. 3 The simulation diagram for establishing the indicator

运用欧式距离进行求取时,选择的参数权重均为1,将系统变化参数代入欧式距离公式,评价指标 L 的求取公式如下:

$$L = \sqrt{(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2 + \dots + (a_n - b_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2} \quad (9)$$

式中: $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m$ 为辨识参数。

实验部分通过不断增加剪断键合线根数的方法,等效电主轴驱动系统性能不断退化的效果。实验设备包括电主轴部分、控制器、润滑、冷却及信号传感器等,搭建的平台及 IGBT 的放大效果见图 4、图 5 所示。

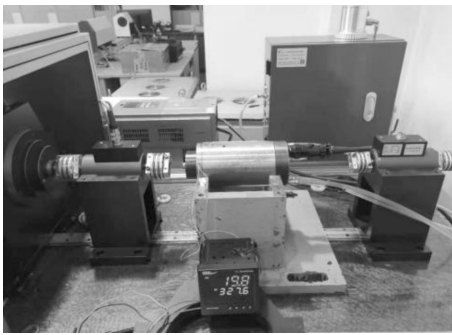


图 4 实验平台

Fig. 4 The experiment platform

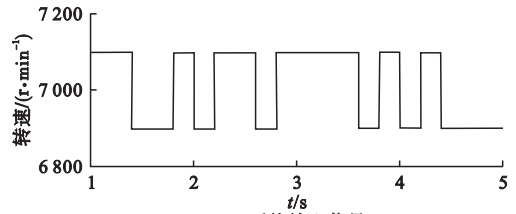


图 5 IGBT 放大图

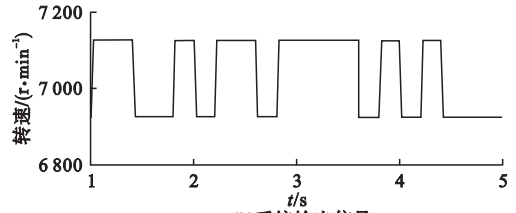
Fig. 5 The enlarge view of IGBT

在实验验证过程,通过控制剪断键合线的数量来模拟 IGBT 退化的程度,每一次的剪断过程都需要进行一次性能评价过程,提取性能隐含变化量。实验需要检测 5 组,分别为未剪断键合线,剪断 1~4 根键合线;对采集信号参数辨识,获得特征参数向量,计算性能评价指标值。

未剪断键合线时,控制系统输入输出如图 6 所示,系统真实输出与辨识输出拟合图如图 7 所示。



(a)系统输入信号



(b)系统输出信号

图 6 未剪断 IGBT 键合线时输入输出

Fig. 6 The input and output of IGBT with normal bonding wires

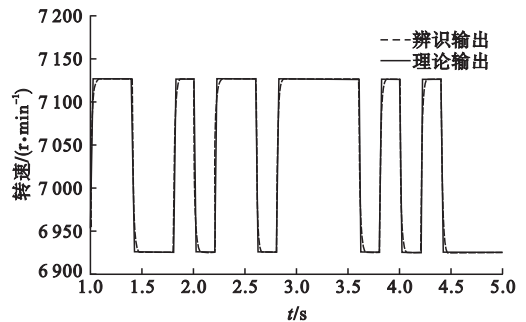


图 7 未剪断键合线时输出拟合线

Fig. 7 The output fitting curve of IGBT with normal bonding wires

实验辨识参数结果如表 2 所示。从表 2 可以看出,剪断键合线根数的变化导致辨识参数不断的发生变化,上述对本方法有效性的证明结果一致,辨识方法适应于笔者的研究。

表 2 系统辨识参数统计表

Table 2 The parameter statistics table for system identification

键合线剪断数量/根	a_1	a_2	b_1	b_2
0	-1.631 2	0.638 4	0.426 6	-0.419 2
1	-1.638 8	0.645 9	0.422 9	-0.416 6
2	-1.643 8	0.649 8	0.534 6	-0.416 4
3	-1.718 5	0.724 1	0.337 0	-0.331 3
4	-1.639 0	0.546 1	0.624 3	-0.417 1

运用笔者提出的欧式距离作为驱动系统性能评价指标的方法,将辨识参数按照本方法进行特征提取,得到评价指标 L 的统计结果:当剪断键合线数量分别为 0,1,2,3,4 时,对应的 L 值分别为 0,0.011 6,0.109 4,0.175 3,0.218 3。

随着键合线剪断根数的不断增加, L 值不断增加,本实验结果与理论相一致,变化趋势图见图 8。将图 8 按照归一化方法进行转化,将隐含退化量坐标值转化为系统健康状况百分比,其转化图如图 9 所示。

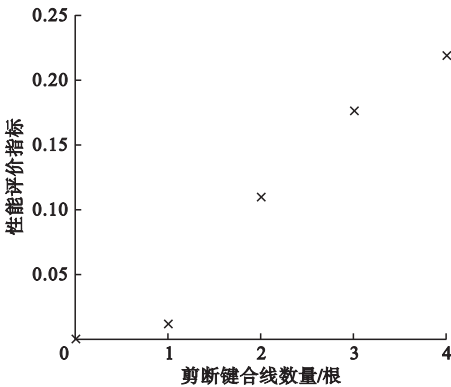


图 8 隐含退化量变化趋势图

Fig. 8 The trend of hidden state with different bounding wires

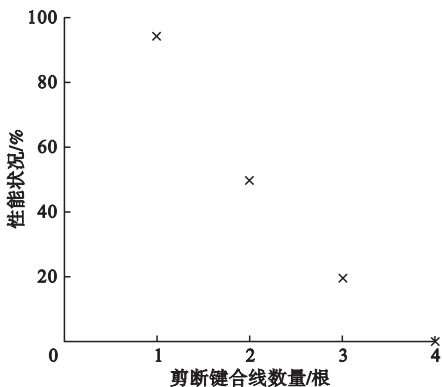


图 9 性能状况与键合线根数关系图

Fig. 9 The relationship between performance indicator and different bonding wires

由图可知,未剪断键合线时的性能状态为 100%,在总共 6 根键合线 IGBT 中剪断 4 根时,功率器件处于失效状态。通过实验将笔者的评价方法运用于高速电主轴驱动系统,能够对系统的性能作出正确的评价。

4 结论

(1) 高速电主轴驱动系统在运行过程中存在隐含退化过程,笔者提出的性能评价方法解决了性能退化量不可测条件下系统健康评价难题;运用此方法可辨识出系统性能变化的隐含参数,可以采用当前参数值与标准值进行求距离比较的方法建立性能评价指标。

(2) 剪断键合线加速驱动系统性能退化实验的结果与理论分析一致,评价方法可很好地应用在高速电主轴驱动系统的健康评价中,给维修人员提供更多的维保信息,能够降低设备的故障率,增加工作安全性。

参考文献

- [1] 吴玉厚,李颂华. 数控机床高速主轴系统 [M]. 北京:科学出版社,2012.
(WU Yuhou, LI Songhua. High speed spindle system for CNC machine tools [M]. Beijing: Science Press, 2012.)
- [2] 范丽婷,荆晓瑞,张珂,等. 基于 PLS 的高速电主轴热变形建模与分析 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(4):738-744.
(FAN Liting, JING Xiaorui, ZHANG Ke, et al. Thermal deformation modeling and analysis of high speed motorized spindle based on PLS [J]. Journal of Shenyang jianhu university (natural science), 2020,36(4):738-744.)
- [3] 熊万里,李芳芳,纪宗辉,等. 滚动轴承电主轴系统动力学研究综述 [J]. 制造技术与机床,2010(3):25-31.
(Xiong Wanli, L I Fangfang, J I Zonghui, et al. Review on the dynamics of rolling bearings motorized spindle system [J]. Manufacturing technology & machine tool, 2010(3):25-31.)
- [4] MO H, SANSAVINI G, XIE M. Performance-based maintenance of gas turbines for reliable control of degraded power systems [J]. Mechanical systems and signal processing, 2018,103:398-412.
- [5] SHI C, WANG S, WANG X, et al. Active fault-tolerant control of dissimilar redundant actuation system based on performance degradation reference models [J]. Journal of the Franklin institute, 2016,354(2):1087-1108.
- [6] CHENG Y J, SONG D W, LU C, et al. Performance degradation assessment for aircraft environmental control system: a method based on visual cognition [J]. ISA transactions,

- 2021,113:64-80.
- [7] CHEN F, YANG Y, TANG B, et al. Performance degradation prediction of mechanical equipment based on optimized multi-kernel relevant vector machine and fuzzy information granulation [J]. Measurement, 2019,151:107116.
- [8] WANG Y. Construction and simulation of performance evaluation index system of internet of things based on cloud model [J]. Computer communications, 2020,153:177-187.
- [9] HE R, CHEN G, SHEN X, et al. Reliability assessment of repairable closed-loop process systems under uncertainties [J]. ISA transactions, 2020,104:222-232.
- [10] 范丽婷,陈加凯,张丽秀,等.高速电主轴运行状态评价指标体系的建立与分析[J].制造技术与机床,2018(1):90-95.
(FAN Liting, CHEN Jiakai, ZHANG Lixiu, et al. Establishment and analysis of running state evaluation index system of high-speed motorized spindle [J]. Manufacturing technology and machine tools, 2018(1):90-95.)
- [11] JIN Mengshi, BRAKE M R W, SONG Hanwen. Comparison of nonlinear system identification methods for free decay measurements with application to jointed structures [J]. Journal of sound and vibration, 2019,453:268-293.
- [12] 范丽婷,贾正伟,司志鹏,等.高速电主轴驱动系统性能评价研究[J].机电产品开发与创新,2021,34(4):3.
(FAN Liting, JIA Zhengwei, SI Zhipeng, et al. Performance evaluation of high speed motorized spindle drive system [J]. Electromechanical product development and innovation, 2021,34(4):3.)
- [13] SOVERINI U, S DERSTR M T. Frequency domain identification of ARX models in the presence of additive input-output noise [J]. IFAC papers online, 2017,50(1):6226-6231.
- [14] GU Xi, GUO Weihong, JIN Xiaoning. Performance evaluation for manufacturing systems under control limit maintenance policy [J]. Journal of manufacturing systems, 2020,55:221-232.
- [15] 潘玉娜,陈进.小波包-支持向量数据描述在轴承性能退化评估中的应用研究[J].振动与冲击,2009(4):164-167.
(PAN Yuna, CHEN Jin. Research on application of wavelet packet-support vector data description in bearing performance degradation assessment [J]. Vibration and shock, 2009(4):164-167.)
- [16] 蒋云鹏,陈茂银,周东华.带隐含退化过程非线性动态系统预测维护策略[J].华中科技大学学报(自然科学版),2009,37(增刊1):14-17.
(JIANG Yunpeng, CHEN Maoyin, ZHOU Donghua. Predictive maintenance strategies for nonlinear dynamic systems with implicit degradation processes [J]. Journal of huazhong university of science and technology (natural science), 2009,37(S1):14-17.)
- [17] KAWAGUCHI T, MARUTA I, OSAMURA K, et al. Difference-based identification method for systems with rate-independent hysteresis and its application to rechargeable battery [J]. IFAC papers online, 2018,51(15):150-155
- [18] 谷雯.基于系统辨识的动态过程健康度监测与诊断[D].杭州:浙江大学,2019.
(GU Wen. Dynamic process health monitoring and diagnosis based on system identification [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.)
- [19] WANG Y. Construction and simulation of performance evaluation index system of internet of things based on cloud model [J]. Computer communications, 2020,153:177-187.
- [20] 姜艳军,邓兆祥,龚为伦.变速器敲击性能量化评价指标建立[J].振动.测试与诊断,2019,39(5):960-966.
(JIANG Yanjun, DENG Zhaoxiang, GONG Weilun. Establishment of quantitative evaluation index of transmission knock performance [J]. Vibration-testing and diagnosis, 2009(4):164-167.)
- [21] HALICK M S M, KANDASAMY K, JET T K, et al. Online computation of IGBT on-state resistance for off-shelf three-phase two-level power converter systems [J]. Microelectronics reliability, 2016,64:379-386.
- [22] 王海波.基于短路电流的IGBT模块状态评估方法的研究[D].重庆:重庆大学,2018.
(WANG Haibo. Research on status evaluation method of IGBT module based on short circuit current [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.)
- [23] 李亚萍,周锥维,孙鹏菊.基于模块跨导的IGBT键合线健康状态准在线监测方法[J].中国电机工程学报,2018,38(23):7035-7044.
(LI Yaping, ZHOU Luowei, SUN Pengju. Quasi-on-line health monitoring method of IGBT bonding line based on module transconductance [J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(23):7035-7044.)
(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)