

增量式编码器测速的 典型问题分析及应对策略

文晓燕 郑琼林 韦克康 王琛琛

(北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

摘要 作为一种常用的测速设备,增量式编码器在电机控制中发挥着重要作用。为了能够更好地利用编码器提高测速和控制效果,本文讨论了编码器应用中常见的几种典型问题。首先,本文根据 T 法和 M 法测速原理确定了测速方法的选择依据,根据查询方式和中断方式程序执行的特点分析了如何合理选择软件实现方式。然后,针对低分辨率编码器的情况,提出了一种连续中断 T 法测速方法,该方法实现比较简单,可以最大程度地利用编码器脉冲、减小测速延时。同时以科研过程中实际遇到的问题展示了编码器安装误差对测速精度的影响,并分析了这种情况下如何选取测速方法。最后,在异步电机试验台上进行了实验,实验结果证明了本文对上述问题的分析及所提应对策略的合理性和有效性。

关键词: 异步电机 增量式编码器 分辨率 安装精度 连续中断 T 法 软件实现方式

中图分类号: TM921.5

Typical Issues Analysis and Corresponding Strategy for Incremental Encoder Speed Measurement

Wen Xiaoyan Zheng Qionglin Wei Kekang Wang Chenchen

(Beijing Jiaotong University Beijing 100044 China)

Abstract Incremental encoder plays an important role in motor drive system. In order to reveal the potential problems in encoder speed measurement, this paper studied several typical issues. First, the basic measurement methods and their merits/demerit are given, and how to choose measurement method and software realization pattern are discussed. Then, for low resolution encoder, a consecutive interrupt T-method(CIT-method) is proposed, with which speed sample frequency can be increased and close-loop control performance is improved. As for installation errors of high resolution encoder, this paper gives a way to elude feedback error by choosing suitable measurement method, and it does work to obtain a better result with the same encoder. At last, experiment results are listed to imply the validity of these analysis and strategies.

Keywords: Asynchronous machine, incremental encoder, resolution, installation accuracy, consecutive interrupt T-method, software realization pattern

1 引言

增量式编码器是电机控制中常用的速度测量设备,通过检测编码器输出的脉冲信号或正弦信号可以计算出电机转速。编码器测速的原理比较简单,

相关的文献也比较多^[1-4],但是关于数字控制系统中速度测量软件实现方式的讨论并不多。另一方面,实际系统中存在很多影响速度测量精度的因素,因此而产生的速度测量误差会降低电机的闭环控制性能。鉴于上述现象的存在,本文以输出信号为两路正交脉冲信号的增量式编码器为例,分析了如何合理选择速度测量软件实现方式的问题,并对实际应

用中非理想因素对测速的影响和相应应对策略进行了讨论。

众所周知,编码器测速方法基本可分为三类:T法、M法和M/T法。一般来讲,T法在低速区优于M法,M法在高速区可以得到更好的测速效果,M/T法理论上可以得到优于前两者的测速精度,但实现方法也比前两种方法复杂。不少文献对基本测速方法进行了改进^[5-7],但都是从理论角度进行分析的,少量文献涉及到编码器本身加工和安装精度等误差对控制系统的影响^[8]。

无论采用哪一种测速方法,输出为脉冲信号的增量式编码器所得到的测速效果都取决于以下两个方面:

(1) 编码器的分辨率,即电机转子轴旋转一圈时编码器输出的脉冲个数。当编码器的分辨率较低时,T法测速中速度测量结果更新很慢,造成转速反馈信号中有很大的时间延迟;而如果采用M法进行测量则所对应的量化误差很大。

(2) 编码器的加工精度和安装精度。因为各种测速原理都是基于匀速旋转情况下编码器脉冲均匀分布的前提而得到的,当传感器的加工或安装精度不够时,会导致编码器脉冲的占空比一致性或者脉冲周期一致性变差,不利于测速快速性和准确性。

在传动系统中,如果利用存在上述情况的传感器所输出的脉冲信号进行测速,那么转速反馈中必然存在延时和误差,无法得到令人满意的控制效果,甚至导致系统不稳定。针对分辨率低而且占空比不为50%的增量式编码器,本文采取一种连续中断测速方式,最大程度地提高了测速采样率、减小测速延时。对于安装因素导致的输出脉冲分布不均匀(即脉冲周期一致性差)的问题,本文主要针对测速方法的选择进行了分析。最后给出了上述问题在实际系统中的体现,并且通过实验验证了所提出方法的有效性。

2 增量式编码器测速的相关问题

2.1 基本测速方法

关于增量式编码器基本测速方法及各自的优缺点,这里不再赘述,为了便于描述直接给出结论:

(1) T法测速是在编码器相邻脉冲的时间间隔内对已知频率为 f_c 的高频脉冲计数,根据所得计数值 m_1 及频率 f_c 计算电机转速,原理示意图如图1所示。设编码器分辨率为 P ,则电机转速测量值为^[1]

$$n = \frac{60f_c}{Pm_1} \quad (1)$$

T法测速的量化误差^[1]为 $1/m_1$ 。

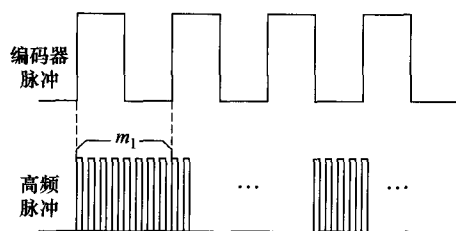


图1 T法测速原理示意图

Fig.1 T-method principle of speed measurement

(2) M法测速是在设定的检测时间 T_c (单位为s)内,对编码器脉冲进行记数,根据检测到的脉冲数 m_2 计算电机转速,原理示意图如图2所示。

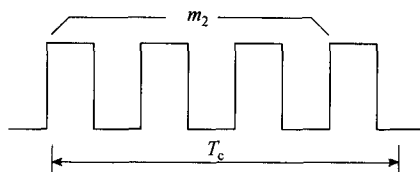


图2 M法测速原理示意图

Fig.2 M-method principle of speed measurement

设编码器分辨率为 P ,则转速测量值为

$$n = \frac{60m_2}{PT_c} \quad (2)$$

M法测速的量化误差^[1]为 $1/m_2$ 。

2.2 编码器分辨率的影响

从T法、M法的测速原理和量化误差可以看出:编码器的分辨率越低,即 P 越小,T法中速度值更新的时间间隔越长,导致测速延时大、实时性差;M法中, P 越小,同样时间内得到的脉冲计数值 m_2 越小,量化误差越大。

如果编码器分辨率太高,T法测速时速度更新延时可以忽略,但 m_1 会很小,量化误差增大;M法测速得到的 m_2 足够大,能够保证量化误差满足要求。

所以,从测速方法的选择来说,编码器分辨率高时优先选择M法,分辨率很低时优先选择T法。

2.3 编码器加工精度的影响

当编码器分辨率较低时,为了得到更好的测速效果,比较有效的方法是同时检测编码器脉冲的上升沿和下降沿,即“双沿检测”。这样一来,对于有两路正交脉冲输出的编码器而言,电机每转一圈得到的脉冲个数为分辨率的4倍,T法测速的更新频率提高四倍,M法测速的量化误差减小为1/4。

不管使用T法还是M法,双沿检测的有效性都基于一个前提:转速不变时两路编码器脉冲均匀分

布, 并且占空比均为 50%。但是, 编码器加工过程中往往存在误差, 导致占空比为 50%这个前提不能满足。如果这个条件得不到满足, 双沿同时检测不仅不能提高测速效果, 反而会导致测速结果误差更大。

2.4 编码器安装精度

对分辨率足够高的编码器来说, 速度采样率和量化误差都不是问题。但是编码器分辨率越高往往对安装精度的要求也越高, 细微的安装偏差就有可能造成严重的测速误差。安装中比较容易出现的问题有偏心、码盘面与转子轴线垂直度不够等, 结果输出脉冲的周期一致性会受到严重影响。有时在电机旋转一圈的过程中, 会在某个区域测量误差比较大, 导致转速控制中存在周期性波动。

3 解决测速问题的实用方法

3.1 测速程序的软件实现方式

数字控制系统中一般有两种软件实现方式: 查询方式和中断方式。以 TMS320LF2407A 处理器实现速度测量为例, 查询方式是指在软件流程的固定位置执行具有测速功能的一段程序; 中断方式是指利用 2407A 捕获单元的中断功能, 当满足中断条件(已有一次或两次捕获的情况下, 再次发生捕获)时触发中断并执行具有测速功能的中断子程序。

在数字实现时, 可以根据编码器分辨率选择软件实现方式: 当编码器分辨率足够高时适宜选择查询方式, 既可以保证足够的速度更新率, 又能避免捕获中断频繁发生影响程序运行可靠性; 当编码器分辨率比较低时, 应优先选择中断方式, 这样可以尽量减小测速延时和量化误差。

3.2 低分辨率与连续中断 T 法测速

在本文所讨论的交流传动互馈试验台中, 有两个转速编码器, 其中一个分辨率为 60, 另一个为 1248。对于分辨率为 60 这样的编码器来说, 应该采用 T 法测速, 但是基本 T 法测速延时太大。为了提高测速精度需要采取双沿检测的方法, 理论上双沿检测可以大大提高 T 法测速的采样率, 但是这要求脉冲占空比一致为 50%, 否则在计算速度时必须考虑占空比的因素, 还要考虑转速方向, 软件实现复杂。

当电机匀速运行时, 测得 60 分辨率编码器输出的连续 6 个脉冲占空比依次是 51.13%, 51.33%, 51.02%, 51.11%, 51.12%和 51.35%, 另一路脉冲情况类似。可以看出脉冲的占空比并非 50%, 不过占空比一致性比较好。因此, 本文采用一种连续中断 T 法(CIT-method)测速, 可以实现双沿检测又不

必考虑占空比和转速方向的影响, 原理如图 3 所示。

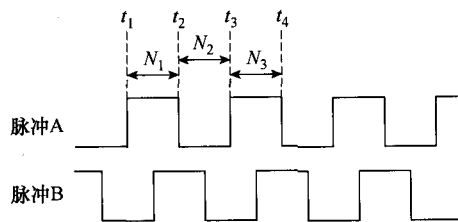


图3 连续中断T法测速原理

Fig.3 CIT-method speed measurement principle

图 3 中, 在 t_1 和 t_2 时刻分别检测到脉冲 A 的上升沿和下降沿, 并且得到 $t_1 \sim t_2$ 之间的高频脉冲计数值 N_1 , 在 t_3 时刻检测上升沿得到 $t_2 \sim t_3$ 之间的高频脉冲计数值 N_2 , 此时可以得到转速 $n = 60f_c / [P(N_1 + N_2)]$ 。在 t_4 时刻得到计数值 N_3 时, 又可以根据 N_2 和 N_3 计算转速为 $n = 60f_c / [P(N_2 + N_3)]$ 。当后续脉冲沿来临时, 计算方式依次类推。B 相脉冲测速与此相同。

可以看出, 除了第一次转速计算之外, 每个脉冲沿到来时都可以对转速结果进行更新, 比单纯检测上升沿或者下降沿得到的采样率提高一倍。对于两路正交脉冲来说, 约每 1/4 个脉冲周期更新一次转速结果, 相当于把编码器分辨率提高了 4 倍。

为了进一步减小测速延时, 选择中断方式执行测速程序。2407A 捕获单元发生至少两次捕获时可以触发中断, 而当测速程序执行两次 FIFO 堆栈读操作后, 状态寄存器中相应捕获单元 FIFO 栈状态位随即清零, 这样的话必须再发生两次捕获才能触发中断, 即再等两次捕获才能计算速度。为了在每次捕获(即每个脉冲沿)时都能更新转速, 本文采取软件改写捕获次数状态寄存器的方法: 在读取捕获单元 FIFO 堆栈后通过软件对状态寄存器进行写操作, 将其设置为“有一次捕获”的状态, 从而保证下一次捕获时发出中断请求, 实现连续中断测速功能。

3.3 编码器安装精度不够的情况

编码器的安装方式有实心轴编码器、轴套型等多种类型, 无论哪种安装方式, 都必须保证码盘平面与电机转子轴线垂直, 否则编码器输出信号质量就会受到影响。本文讨论的测速编码器由齿轮和测速传感器两部分组成, 其中齿轮固定在转子轴上, 传感器安装在电机端盖的固定孔上, 具体安装示意图如图 4 所示, 该编码器的分辨率是 1248。

图 4 所示的安装方式中容易出现的问题是端盖圆心与转子轴线不重合、齿轮平面与转子轴线的垂直度不够、传感器轴线与齿轮平面平行度不够等。

当安装中存在上述问题, 转子匀速旋转一圈时得到的编码器脉冲周期不一致, 严重时会造成测速结果中存在明显波动。

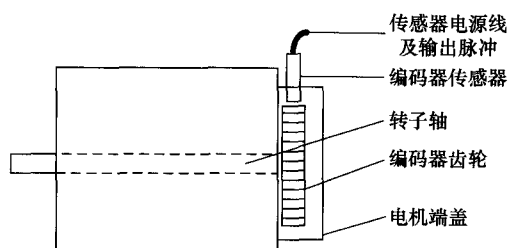


图4 转速编码器安装示意图

Fig.4 Diagram for speed encoder installation

编码器安装完成后, 当电机以转子频率 $f_r=2\text{Hz}$ 空载运行时, 该编码器脉冲 T 法测速得到的结果如图 5 所示。在图 5 所示的这段时间内转子转过 3 圈。可见, 转速测量结果中误差非常大。

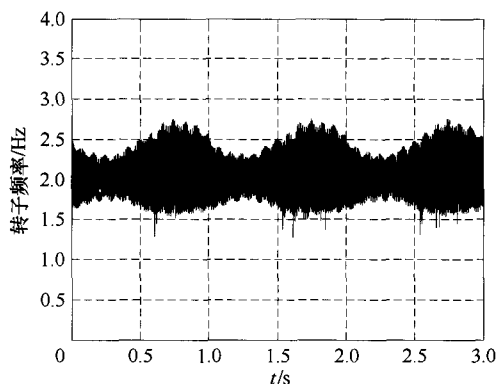


图5 传感器安装不到位时T法测速结果

Fig.5 T-method result when encoder badly installed

进一步校正电机端盖、传感器的位置和角度后, 电机运行于 $f_r=2\text{Hz}$ 时该编码器 T 法测速结果如图 6 所示。很明显, 校正后的测试结果有了大幅改善, 但仍然有一簇测速误差较大的区域周期性地出现, 其频率等于转子旋转机械频率。

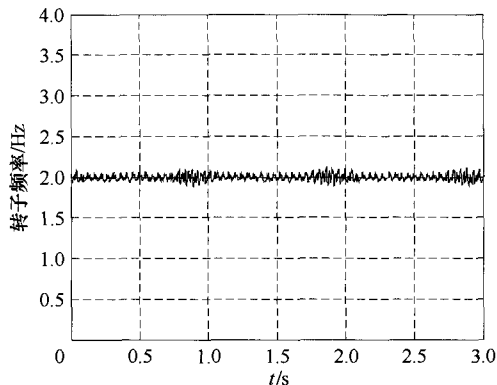


图6 校正编码器后T法测速结果

Fig.6 T-method result after correcting encoder

要想消除这个现象需要更高精度的安装校正, 有时候这个目标是难以达到的。低速时这个测速扰动频率比较低, 对控制效果的影响不明显。但是随着速度升高扰动频率越来越高, 对转速控制性能的影响也越来越严重。因为编码器分辨率高, 高速区每个控制周期内编码器脉冲个数增多, M 法测速所得到的连续几个脉冲周期的转速平均值。所以, 此时应该选择 M 法测速或者 T 法和 M 法组合测速。这种方法软件实现简单, 而且可以得到良好效果。

4 实验验证

为了验证上述分析及应对策略的效果, 在异步电机试验台上进行了实验验证。图7~图10中, 转子频率按左侧标尺读数, 电机相电流按右侧标尺读数。

4.1 连续中断 T 法测速的效果

使用分辨率为 60 的编码器, 只检测脉冲 A 和 B 上升沿。当电机带载 $750\text{N}\cdot\text{m}$ 时, 转子频率给定由 $5\sim-5\text{Hz}$ 的过程中, 转速给定值、测量值和相电流波形如图 7 所示。当采用连续中断测速法后, 同样实验条件下得到的试验结果如图 8 所示。

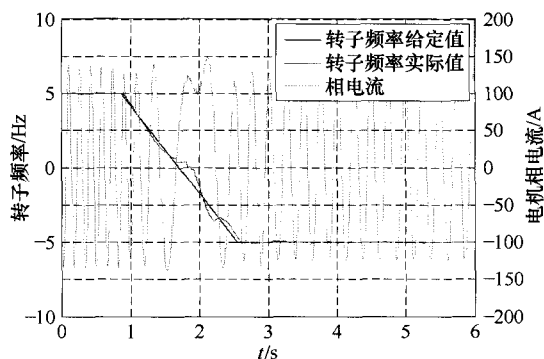


图7 T法测速转速控制效果, 带载 $750\text{N}\cdot\text{m}$

Fig.7 Speed control using T-method, $750\text{N}\cdot\text{m}$ load

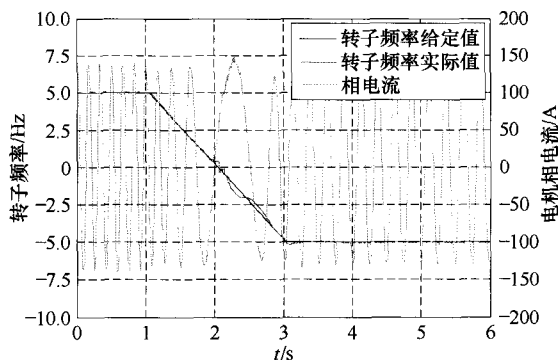


图8 连续中断 T 法测速转速控制效果, 带载 $750\text{N}\cdot\text{m}$

Fig.8 Speed control using CIT-method, $750\text{N}\cdot\text{m}$ load

在图 7 中, 转速为 $\pm 5\text{Hz}$ 时稳态速度误差几乎

为零, 而且开始减速时速度能够跟踪给定值。但是, 当转子频率低于 2Hz 时转速跟随效果变差, 以至于速度过零后需要一个很大的调节过程。采用连续中断 T 法测速的图 8 中, 从 5Hz 一直到接近零转速都能跟踪给定值, 只有非常接近零速时跟踪出现误差。不过转速过零后的调节过程仍然比较平稳。

4.2 不同测速方法对控制效果的影响

实验中使用 1248 分辨率编码器和 T 法测速, 当转子频率给定 40Hz 时试验结果如图 9 所示。由于编码器安装精度不够, T 法测速精度很差, 转速反馈的波动导致系统控制效果恶劣: 转速波动范围大, 电机相电流波形畸变严重, 幅值有振荡。

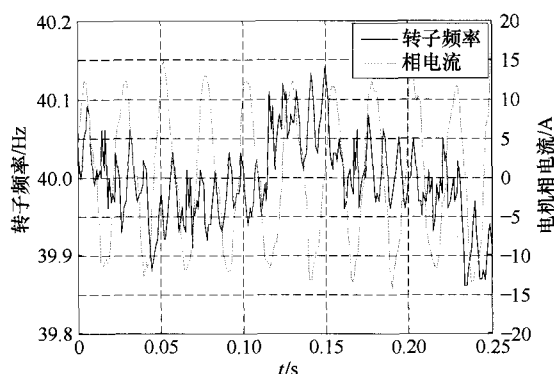


图 9 T 法测速, 转子频率 40Hz 矢量控制结果

Fig.9 Vector control with T-method, rotor, $f_r=40\text{Hz}$

当采用低速区 T 法测速, 高速区 T 法 M 法组合方式后, 同样实验条件下得到的控制效果如图 10 所示。非常明显, 当采用 T 法 M 法组合测速后, 转速波动范围缩小了大约 5 倍, 而且相电流波形大大改善, 畸变小而且幅值稳定。

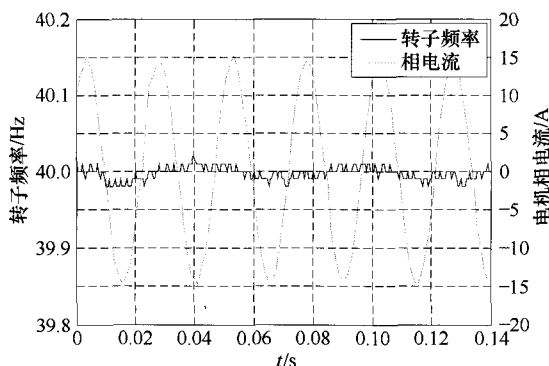


图 10 T 法 M 法组合测速, 40Hz 矢量控制结果

Fig.10 Vector control with combined T- and

M- methods, $f_r=40\text{Hz}$

5 结论

鉴于相关文献不足的现象, 本文对增量式编码器实际应用中的典型问题进行了分析, 并且得到以下结论:

(1) 实际应用的编码器确实存在加工和安装精度不够的问题, 并且会给控制性能造成很大影响。

(2) 文中针对低分辨率编码器提出的连续中断 T 法测速能够明显改善实际控制系统性能, 比如被控量转速和电机电流波形。

(3) 高分辨率编码器安装精度不足引入测速误差的问题, 可以通过合理选择测速方法规避反馈误差, 改善控制效果。

参考文献

- [1] 宋刚, 秦月霞, 张凯, 等. 基于普通编码器的高精度测速方法[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(8): 1169-1172.
Song Gang, Qin Yuexia, Zhang Kai, et al. Approach and realization to improve the measuring accuracy with low resolution encoder[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2002, 36(8): 1169-1172.
- [2] 石忠东, 陈培正, 陈定积, 等. 高精度数字测速及动态位置检测算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(8): 1021-1024.
Shi Zhongdong, Chen Peizheng, Chen Dingji, et al. High resolution digital velocity detection and dynamic position detection methods[J]. J Tsinghua Univ(Sci & Tech), 2004, 44(8): 1021-1024.
- [3] 廖戎, 刘鹏, 孙永刚. 发动机试验中转速的数字测量方法[J]. 测试技术学报, 2004, 18 (增刊): 141-145.
Liao Rong, Liu Kun, Sun Yonggang. The numeric measurement of rotative velocity in the engine test[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2004, 18 (Supp): 141-145.
- [4] 马艳歌, 贾凯, 徐方, 等. 转速自适应测量方法及其在 DSP 上的实现[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6) (增刊): 2361-2364.
Ma Yange, Jia Kai, Xu Fang, et al. Motor velocity adaptive measurement and its implementation based on DSP[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 2361-2364.
- [5] Tsuji T, Hashimoto T, Kobayashi H, et al. A

(下转第 209 页)

- model based vulnerability assessment to large-scale power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(25): 118-122.
- [11] Carreras B A, Newman D E, Dobson I. Evidence for self-organized criticality in a time series of electric power system blackouts[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2004: 1733-1740.
- [12] Jie Chen, James S, Dobson I. Cascading dynamics and mitigation assessment in power system disturbances via a hidden failure model[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2005, 27(5): 318-326.
- [13] Watts D J. A simple model of global cascades on random networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002, 99(9): 5766-5771.
- [14] Dobson I, Carreras B A, Newman D E. A branching process approximation to cascading load dependent system failure[C]. Hawaii International Conference on System Science, Hawaii, USA, 2004: 65-71.
- [15] Chen Qiming, McCalley J D. Identifying high risk $n-k$ contingencies for online security assessment[J]. IEEE Transactions on Power System, 2005, 20(2): 823-834.
- [16] 丁理杰, 曹一家, 刘美君. 复杂电力网络的连锁故障动态模型与分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(4): 641-646.
- Ding Lijie, Cao Yijia, Liu Meijun. Dynamic modeling and analysis on cascading failure of complex power grids[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2008, 42(4): 641-646.
- [17] Jie Chen, Thorp J S, Manu Parashar. Analysis of electric power system disturbance data[C]. Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, USA, 2001: 719-727.
- [18] 邓慧琼, 艾欣, 张东英, 等. 基于不确定多属性决策理论的电网连锁故障模式搜索[J]. 电网技术, 2005, 29(13): 50-55.
- Deng Huiqiong, Ai Xin, Zhang Dongying, et al. Search technique for power system cascading outages based on uncertain multiple attribute decision-making[J]. Power System Technology, 2005, 29(13): 50-55.
- [19] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
-
- 作者简介**
- 王英英 女, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事配电网故障诊断、电力系统连锁故障和大电网风险评估研究。
- 罗毅 男, 1966 年生, 博士, 副教授, 主要从事 EMS/DMS 以及电力系统运行与控制方面研究工作。
-
- ~~~~~
- (上接第 189 页)
- wide-range velocity measurement method for motion control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(2): 510-519.
- [6] Hagiwara N, Suzuki Y, Murase H. A method of improving the resolution and accuracy of rotary encoders using a code compensation technique[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1992, 41(1): 98-101.
- [7] Wang Zhong, Li Guojie, Sun Yuanzhang, et al. Effect of erroneous position measurements in vector-controlled doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(1): 59-69.
- [8] Bascetta L, Magnani G, Rocco P, et al. Performance limitations in field-oriented control for asynchronous machines with low resolution position sensing[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(3): 559-573.
-
- 作者简介**
- 文晓燕 女, 1981 年生, 博士研究生, 主要从事大功率交流传动系统控制的研究。
- 郑琼林 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事轨道交通牵引供电与交流传动的研究。