

DOI: 10.7652/xjtuxb201309014

一种电流弱信号特征提取方法

陈晓光¹, 徐光华^{1,2}, 梁霖¹, 张四聪¹, 罗爱玲¹

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710054, 西安)

摘要: 针对数控机床主轴电流分析中微弱电流信号被噪声淹没的问题,提出了一种将调制随机共振和 D-J 阈值噪声估计技术用于电流弱信号的特征提取方法。利用调制随机共振技术获得了微弱电流信号的特征频率,在频域上采用 D-J 阈值收缩方法对所测得的电流信号进行噪声估计,从中分离出有用信号,并根据随机共振原理对该有用信号进行了幅值估计。仿真和实验结果表明,该方法可以对数控机床主轴电流信号中的微弱电流特征信号进行频率识别和幅值估计,克服了传统电机电流分析方法无法识别微弱电流信号的缺点,能够准确地提取出微弱电流信号中的特征频率,可对微弱特征信号进行比较准确的幅值估计,因此具有较强的工程实用价值。

关键词: 电流弱信号;调制随机共振;D-J 阈值噪声估计

中图分类号: TP206 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)09-0083-05

A Method of Feature Extraction in Weak Current Signals

CHEN Xiaoguang¹, XU Guanghua^{1,2}, LIANG Lin¹, ZHANG Sicong¹, LUO Ailing¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China)

Abstract: To extract weak current signal features in the spindle current of machine tools, which are often buried in noises, a signal processing method with modulated stochastic resonance and D-J threshold theory is proposed. Modulated stochastic resonance is adopted to amplify the features of weak current signals, and then D-J threshold theory is chosen to make noise estimation for extracting the useful signals. The amplitude is estimated by the stochastic resonance. The simulated and experimental results show that this method enables to accurately identify the weak feature frequencies and estimate the amplitudes of weak current signals properly.

Keywords: weak current signal; modulated stochastic resonance; D-J threshold theory

在高速、重载等工况下,振动、变形、冲击等因素对数控机床的主轴系统、传动系统和进给系统等功能部件会产生较大影响,从而导致了数控机床运动误差增大、加工精度降低甚至寿命缩短等问题的产生。目前,大都采用动态测试、信号处理、数据挖掘和信息融合对数控机床进行综合分析和诊断,为实现数控机床关键功能部件的监测诊断,需要获取相关运行状况的信息。传统获取机械设备动态特征的

方法一般是用外置传感器测量机械设备的振动信号,但由于数控机床自身结构的封闭性,造成外置传感器的测量难以实施,例如重型车床主轴箱体巨大、工作环境恶劣,振动信号耦合性强、信噪比低,因此难以提取出有用的特征信息。电机电流信号分析法是以驱动电机定子电流为信息载体,通过对运动特征的分析来获取电机或电机拖动设备的动态特征信息,采用电流信息监测诊断方法具有信息集成度

收稿日期: 2013-03-06。 作者简介: 陈晓光(1988—),男,博士生;徐光华(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目(2011ZX04016-101)。

网络出版时间: 2013-06-21

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130621.1113.002.html>

高、信息获取方便、信噪比高等优点。

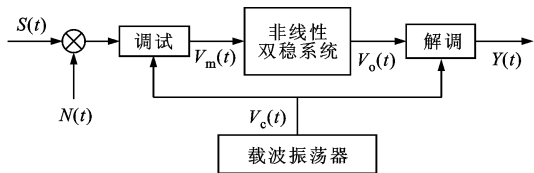
电机电流信号分析法最早应用于电机本体结构的故障诊断,随着电机定子电流法的发展,该方法逐渐拓展到对电机拖动系统中机械运动部件的诊断^[1]。Yacamini 等人发现,通过定子电流可以判断电机拖动系统中的扭矩波动情况^[2],揭示了运动部件特征频率的调制现象,从而开启了电机电流信号分析法在电机拖动系统故障诊断中的应用。Kennedy 等人建立了交流电机拖动系统的轴系模型^[3],证明了电机电流信号分析法在电机拖动系统故障诊断中的可行性。Kia 等人通过变速箱动力学模型,研究机械扭矩对电机定子电流的影响^[4],将电机作为电机拖动系统的扭矩传感器来检测齿轮箱的故障特征。理论研究和实践表明,电机定子电流法在电机拖动系统中的应用是行之有效的,数控机床可以看作是多个电机拖动系统的组合,因此也能通过电机定子电流信号来监测机床机械部件的运动特征。

万年红等人通过循环平稳的方法来提取电流信号中的微弱信号^[5],梁霖等人提出了一种基于免疫随机共振的电流弱信号提取方法^[6]。目前,提取电流信号中微弱信号的文献较少,因此需要研究相应的电流弱信号提取技术,以有效识别复杂传动系统的特征信息。本文将调制随机共振技术和 D-J 阈值噪声估计技术用于电流弱信号的处理,并通过仿真和实验证明了提取电流弱信号特征的可行性。

1 基本原理

1.1 调制随机共振

传统双稳态随机共振理论成立的前提是输入信号的幅值、频率都必须满足小参数条件^[7],电流信号具有较高的频率,直接应用双稳态随机共振原理则无法提取其特征频率,所以引入了调制随机共振,如图 1 所示。



$S(t)$: 弱周期信号; $N(t)$: 高斯白噪声; $V_c(t)$: 调制频率的载波信号; $V_o(t)$: 双稳态系统输出信号; $Y(t)$: 最终输出信号

图 1 调制随机共振原理图

调制信号

$$V_m(t) = S(t)V_c(t) =$$

$$A\cos 2\pi(f-f_c)t + A\cos 2\pi(f+f_c)t =$$

$$V_{m1}(t) + V_{m2}(t) \quad (1)$$

$$S(t) = A\cos(2\pi ft); V_c(t) = 2\cos 2\pi f_c t$$

式中: A 为信号幅值; f_c 为调制频率。设 $\Delta = f - f_c$, 调节 f_c 的大小使 $\Delta \ll 1$, 从而产生满足双稳态随机共振小参数条件的低频信号 $V_{m1}(t)$ 、 $V_{m2}(t)$ 。经双稳态系统作用后, 得到输出信号

$$V_o(t) = M_1 V_{m1}(t) + M_2 V_{m2}(t) \quad (2)$$

式中: M_1 、 M_2 为双稳态系统参数。根据双稳态系统的周期响应特性, 由于 $\Delta \ll 1$, 所以 $V_{m1}(t)$ 被放大。

1.2 频域 D-J 阈值噪声估计

对实际信号进行噪声估计时, 需要根据信号自身的特点采用合适的噪声估计算法。针对平稳信号, Donoho 等人提出了一种用于估计白噪声标准差的中值估计算法^[8], 即根据 D-J 阈值的噪声方差进行估计。假设数据序列 $S[k]$ 的标准差

$$\sigma = ((\sum_{k=0}^{K-1} (S[k] - \bar{S})^2) / (K - 1))^{1/2} \quad (3)$$

式中: $\bar{S}$ 为 $S[k]$ 的均值; K 为数据长度; k 为整数, 且 $0 \leq k \leq K$ 。该数据序列的方差

$$v(S) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} (S[k] - \bar{S})^2 = \frac{K-1}{K} \sigma^2 \approx \sigma^2 \quad (4)$$

利用频谱序列傅里叶变换系数的标准差进行阈值收缩, 得到 D-J 阈值

$$T = \sigma(2\lg K)^{1/2} \quad (5)$$

2 电流弱信号的处理方法

数控机床功能部件的运行特征频率在电机电流中的表现为工频两侧的边频带。由于许多功能部件的扭矩波动很弱, 因此电流信号中的特征频率容易被淹没。对于在频谱图中不能直接分辨的微弱特征频率, 调制随机共振和 D-J 阈值噪声估计的电流弱信号处理方法的步骤如下。

步骤 1 先对采集到的电流信号进行频谱分析, 在频谱图中, 如果特征频率易于分辨, 则直接提取幅值, 如果特征频率被噪声淹没, 则对信号进行陷波处理。

步骤 2 将得到的信号进行调制随机共振分析, 找出特征频率。

步骤 3 通过 D-J 阈值收缩算法对信号的频谱进行处理后, 得到噪声的频谱估计。频谱中小于 D-J 阈值的为噪声, 而大于 D-J 阈值的傅里叶变换系数被认为是有效信号。在 D-J 阈值分析中, 考虑准迭代方法, 直到 σ 的相对变化量小于预设的容限

$$|r(\sigma_m)| = \left| \frac{\sigma_m - \sigma_{m-1}}{\sigma_{m-1}} \right| < \epsilon \tag{6}$$

式中: σ_m 为第 m 次迭代的标准差。

步骤 4 利用 D-J 阈值噪声估计理论进行噪声估计,进而得到噪声强度

$$D = \frac{1}{n} \sum_{\omega=0}^{\omega_n} \frac{1}{2\pi} F(\omega) * F(\omega) \tag{7}$$

式中: n 为数据长度; ω 为频率; ω_n 为频率最大值。利用得到的噪声强度,以及随机共振原理对特征频率的估计幅值为

$$\overline{A} = \frac{A(f,D)D(4r_k^2 + f^2)^{1/2}}{2r_k^2 x_m^2} \tag{8}$$

式中: r_k 为 Kramers 跃迁率; x_m 为势低点。

3 仿真信号验证

3.1 调制随机共振在模拟信号中的验证

设输入信号为 $S(t)=0.3\cos(2\pi f)$, $f=50\text{ Hz}$, 时域图和频谱图分别如图 2 所示。加入高斯白噪声的 $D=5$, 时域图和频谱图分别如图 3 所示。

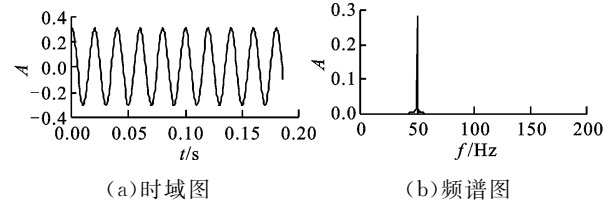


图 2 输入信号的时域图和频谱图

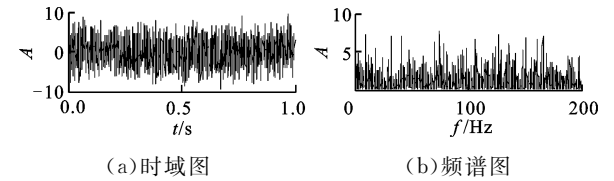


图 3 加噪后的信号时域图和频谱图

利用本文方法,设系统参数 $a=1, b=1, f_c=49.99\text{ Hz}$, 经过调制随机共振处理后的时域、频谱图如图 4 所示。由图 3 可以看出,由于输入信号自身的信噪比较低,因此微弱的周期信号被噪声淹没。经过调制随机共振后,输出频率应为 0.01 Hz , 图 4b

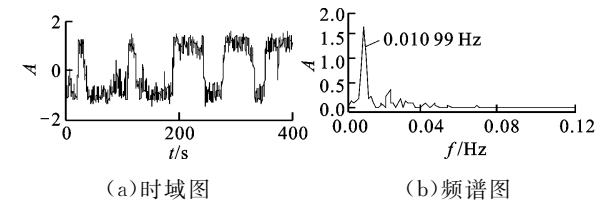


图 4 调制随机共振信号处理的效果图

中的输出信号频率为 0.01099 Hz , 可见调制随机共振对微弱周期信号的提取是有效的。

3.2 频域 D-J 阈值噪声估计在模拟信号中的验证

以模拟信号为例,对 D-J 阈值的收缩算法进行验证,考虑到定子电流信号自身的特点,设模拟信号

$$x(t) = 8\cos(2\pi 20t) + 3\cos(2\pi 50t) \cdot \cos(2\pi 5t) + N(t) \tag{9}$$

在式(9)的模拟信号中,信号与噪声之间存在明显差别,具体表现为图 5a 中阈值收缩前的频谱。

根据 D-J 阈值收缩算法可知,阈值收缩的迭代次数对计算结果有很大影响,针对 $x(t)$, 设定不同的迭代次数,观察容限 $r(\sigma_m)$ 随迭代次数的变化如图 6 所示。从图中可以看出,经过大约 10 次迭代后, σ 的变化率已经接近于 0。设迭代次数为 50 次,对模拟信号进行 D-J 阈值收缩后的处理结果如图 5b 所示,通过阈值收缩,该方法已经将正弦频率分量去掉,噪声频率分布在很宽的频带内,可以计算出噪声的方差为 0.9345 , 则 $D=0.9667$, 非常接近 $D=1$ 的原始输入。

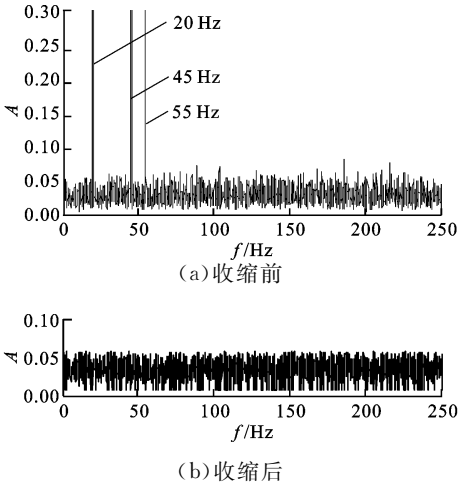


图 5 模拟信号阈值收缩前后的频谱图

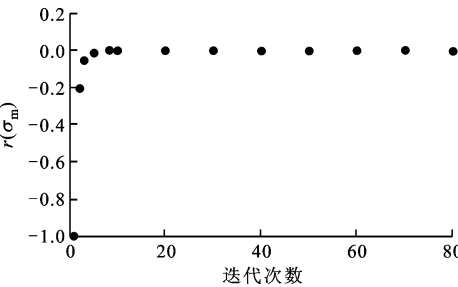


图 6 $r(\sigma_m)$ 随迭代次数的变化

固定噪声强度 $D=1$, 结合调制随机共振和 D-J 阈值噪声技术,由式(9)模拟信号输入,改变 A 的值,可以得到一组输入周期激励的估计值,如表 1 所

示。由表 1 可以看出,经过 D-J 阈值噪声估计后,大大提高了估计幅值的精度,并均在 10% 以内。

表 1 原始幅值与估计幅值的对比

原始幅值	估计幅值	误差/%
0.1	0.093	7.0
0.2	0.190	5.0
0.3	0.311	3.6
0.4	0.422	5.5
0.5	0.532	6.4

4 应用实例

本文结合某镗铣床对数控机床进行研究和论证。设定机床主轴转速为 300 r/min,其电机电流供电频率为 85 Hz,采集机床主传动系统的驱动电机电流信号,采样频率为 2 kHz。对信号进行频谱分析,如图 7 所示,几个主要传动轴的特征频率在图中均有体现,而其他功能部件的特征频率由于产生的扭矩波动较小,在频谱图中表现不明显,因此被淹没在噪声信号中。

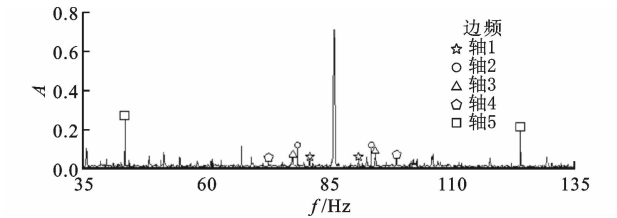


图 7 主传动系统电流信号的频谱图

某传动轴频率为 17 Hz,表现在电流信号频谱图中的谱线应为 85 ± 17 Hz,即为 68 Hz 和 102 Hz,但在频谱图中无法找到对应的频率。利用本文方法,选取调制频率为 101.995 Hz,双稳态系统的 $a=1, b=1$,经过随机共振后得到的结果如图 8 所示。当共振频率为 0.004 89 Hz、幅值 A 为 0.065 32 时,可以识别出的特征频率约为 102 Hz。

应用 D-J 阈值收缩方法对所测得的电流信号频谱进行噪声估计,经过 50 次阈值迭代算法处理后得到如图 9 所示的结果。图 10 为原始电流信号,经过本文方法分离出来的有用信号得到的结果如图 11 所示。通过式(7)估计噪声的标准差 $\sigma \approx 0.01$,即 $D=0.01$ 。由 $a=1, b=1$,计算得到 $r_k=0.032\ 7, x_m=1$ 。由图 8b 可知, $\Delta=0.004\ 89$ Hz, $A=0.065\ 32$ 。将以上参数代入式(8),得到特征频率(102 Hz)的估计幅值为 0.02。

由以上分析可知,应用本文提出的方法可以对

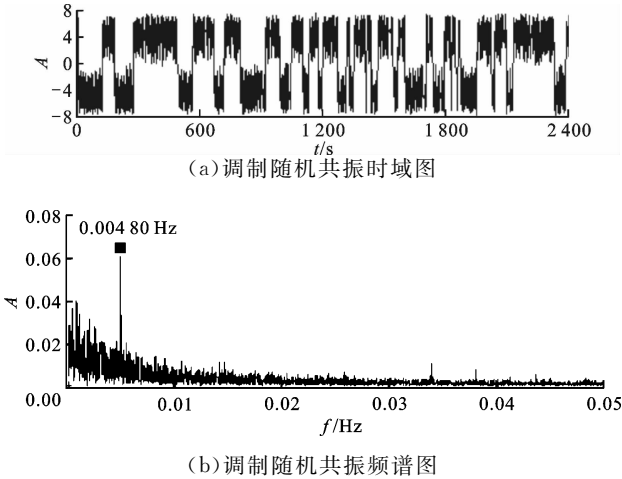


图 8 电流信号的调制随机共振结果

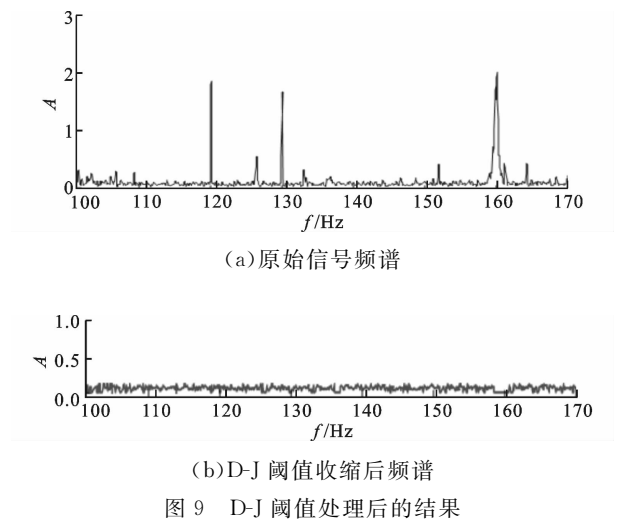


图 9 D-J 阈值处理后的结果

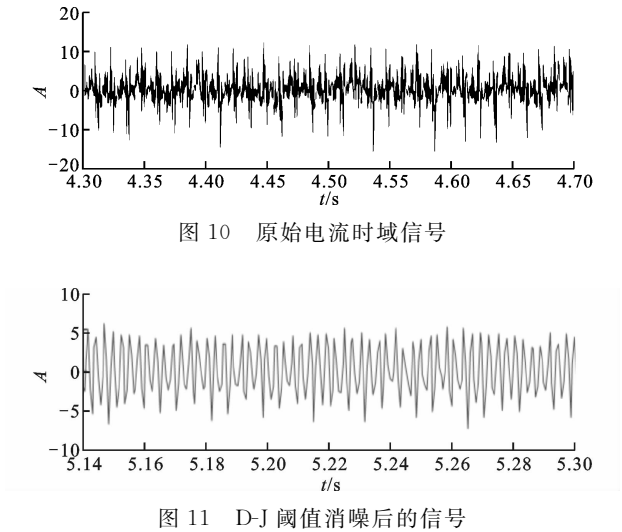


图 11 D-J 阈值消噪后的信号

数控机床中的微弱特征信号进行频率识别和幅值估计,经过长时间的数据积累,当幅值有较大的变化时,说明该部件可能或已经出现对应特征频率处的故障。

5 结 论

本文提出了一种将调制随机共振和 D-J 阈值噪声估计技术应用于电流弱信号处理中的方法。利用调制随机共振对原始电流信号的微弱特征进行放大,根据 D-J 阈值理论进行噪声估计,从而分离出有用的信号。本文方法克服了传统电机电流分析方法无法识别微弱信号的缺点,能够有效地对微弱电流特征信号进行频率识别和幅值估计,因此具有较强的工程实用价值。

参考文献:

- [1] SCHOEN R R, HABETLER T G. Effects of time-varying loads on rotor fault detection in induction machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31(4): 900-906.
- [2] YACAMINI R, SMITH K S, RAN L. Monitoring torsional vibrations of electro-mechanical systems using stator currents [J]. ASME Journal of Vibration and Acoustics, 1998, 120(1): 72-79.
- [3] KENNEDY K, LIGHTBODY G, YACAMINI R. Power system harmonic analysis using the Kalman filter [J]. Power Engineering Society General Meeting, 2003(2): 13-17.
- [4] KIA S H, HENAO H, CAPOLINO G A. Mechanical transmission and torsional vibration effects on induction machine stator current and torque in railway traction systems [C]//Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Piscataway, NJ, USA: IEEE Computer Society, 2009: 3182-3187.
- [5] 万年红, 马天伟, 王永强, 等. 应用循环平稳方法提取高炉布料装置的状态特征 [C]//第九届全国振动理论及应用学术会议论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 2007: 157-162.
- [6] 梁霖, 徐光华, 刘飞, 等. 一种免疫随机共振的机床传动系统电流特征频率提取方法: 中国, 201010594627.6 [P]. 2011-09-07.
- [7] BENZI R, SUTERA A, VULPIANI A. The mechanism of stochastic resonance [J]. Journal of Physics: A Mathematical and General, 1981, 14(11): 453-457.
- [8] DONOHO D L, JOHNSTON I M. Projection-based approximation and a duality with Kernel methods [J]. The Annals of Statistics, 1989, 17(1): 145-152.

[本刊相关文献链接]

刁瑞朋, 孟庆丰. 一种衰减信号加窗频域插值算法. 2013, 47

(7): 85-90. [doi: 10. 7652/xjtuxb201307016]

董帆, 陈启明, 于跃平. 旋转声源延迟时间方程求解的数值研究. 2013, 47(7): 120-123. [doi: 10. 7652/xjtuxb201307022]

黄进, 金炜东, 秦娜, 周艳, 刘景波. 消除阴影和高亮噪声的双梯柱体码本前景检测模型. 2013, 47(4): 28-34. [doi: 10. 7652/xjtuxb201304006]

陈国强, 王宇平. 采用离散粒子群算法的复杂网络重叠社团检测. 2013, 47(1): 107-113. [doi: 10. 7652/xjtuxb201301021]

陈景龙, 訾艳阳, 何正嘉, 袁静. 自适应冗余多小波及其在故障诊断中的应用. 2012, 46(7): 44-49. [doi: 10. 7652/xjtuxb201207009]

徐宇亮, 孙际哲, 陈西宏, 曾昭博, 张金哲. 采用多目标粒子群算法的模拟电路故障诊断研究. 2012, 46(6): 92-97. [doi: 10. 7652/xjtuxb201206016]

栗茂林, 梁霖, 王孙安, 刘弹. 结合交叠区异点统计和相关分析的免疫克隆特征选择方法. 2012, 46(5): 50-56. [doi: 10. 7652/xjtuxb201205009]

薛士明, 曹军义, 林京, 陈阳泉. 分数阶阻尼裂纹转子的非线性动力学特性分析. 2012, 46(1): 76-80. [doi: 10. 7652/xjtuxb201201014]

杨攀, 桂小林, 田丰, 王刚. 一种高效的用于话题检测的关键词元聚类方法. 2012, 46(10): 24-28. [doi: 10. 7652/xjtuxb201210005]

邵必林, 边根庆, 张维琪, 闫瑾. 采用 k-均值聚类算法的资源搜索模型研究. 2012, 46(10): 55-59. [doi: 10. 7652/xjtuxb201210010]

杨清宇, 孙凤伟, 张墨, 张迪, 庄健. 利用测地线距离的改进谱聚类算法. 2012, 46(8): 1-7. [doi: 10. 7652/xjtuxb201208001]

高昂, 李增智, 赵季中. 用于无线自组织网络的属性加密算法. 2012, 46(8): 33-36. [doi: 10. 7652/xjtuxb201208006]

杜文超, 陈庶樵, 胡宇翔. 向网络流的自适应正则表达式分组匹配算法. 2012, 46(8): 49-53. [doi: 10. 7652/xjtuxb201208009]

任向隆, 安建峰, 高德远, 等. 低功耗片上网络映射的遗传及蚂蚁融合算法. 2012, 46(8): 65-70. [doi: 10. 7652/xjtuxb201208012]

李彬, 王文杰, 殷勤业, 等. 无线传感器网络节点协作的节能路由传输. 2012, 46(6): 1-6. [doi: 10. 7652/xjtuxb201206001]

代亮, 许宏科, 陈婷. 无线传感器网络可分负载调度算法. 2012, 46(6): 23-28. [doi: 10. 7652/xjtuxb201206005]

戴力, 庄奕琪, 景鑫, 等. 一种新型高性能 CMOS 电流模式的动态规划电路. 2012, 46(6): 29-35. [doi: 10. 7652/xjtuxb201206006]

梁庆伟, 姚道远, 巩思亮. 一种保障时延能量高效的无线传感器网络路由协议. 2012, 46(6): 48-52. [doi: 10. 7652/xjtuxb201206009]

(编辑 管咏梅)