

基于最大似然估计和DSP技术的相位补偿算法

铁维昊¹, 王文利², 路 灿¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049; 2. 郑州电力公司, 郑州 450000)

摘要: 针对低压电力线非线性信道特性及不同步因素对于载波信号相位的影响, 笔者提出了一种基于最大似然估计的相位补偿算法。首先分析了同步问题对于误码率的影响。其次, 介绍了相位补偿算法的原理及关键技术的分析。最后在DSP中实现了相位补偿算法的程序设计, 并在实际的低压信道中进行测试。测试结果表明: 该算法可以有效地解决数字通信中信道的非线性引起的信号失真问题。

关键词: 最大似然估计; 相位补偿算法; DSP处理器; 同步; 电力线载波通信

中图分类号: TM726.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2012)10-0042-05

Phase Compensation Algorithm Based on Maximum Likelihood Estimation and DSP Technology

TIE Wei-hao¹, WANG Wen-li², LU Can¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Henan Power Supply Company, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: To investigate the influence of nonlinearity and asynchronization of low-voltage power line channel on phase of carrier signal, a phase compensation algorithm based on maximum likelihood estimation is proposed. First the influence of synchronization on BER is analyzed, then the principle of the phase compensation algorithm and key technology are introduced. Finally, program of the phase compensation algorithm is implemented in DSP, and is tested in actual low-voltage channel. The result shows that the proposed algorithm can eliminate signal distortion caused by nonlinearity of channel in digital communication.

Key words: MLE; phase compensation; DSP; synchronization; PLC

0 引言

相移键控(phase shift keying, PSK)调制模式, 由于在频带利用率、误码率以及对信道的敏感程度方面, 其综合性能要好于振幅键控(ASK)和移频键控(FSK)模式^[1], 所以在信道特性较为复杂的低压电力线载波通信中得到了更为广泛的应用。实际情况中, 由于电力线信道中存在电容、电感、变压器等多种非线性元件以及收发时钟的不同步, 造成载波传输中出现相位、幅值、频率的失真^[2]。笔者通过理论分析得到: 目前数字通信中, 对于 PSK 模式, 影响通信误码率最大的因素就是相位的突变。针对此问题, 笔者提出了基于最大似然估计的相位补偿算法。该算法可以有效地解决在传输过程中发生的信号非

线性相位失真问题, 增强了通信系统的抗干扰性^[3]。

1 同步误差分析

同步是数字通信系统中一个重要的技术环节。当采用相干解调或相关检测时, 接收端需要提供一个与发射端调制载波同频同相的相干载波。这个相干载波的获取就称为载波提取, 或称为载波同步^[4]。

对模拟通信系统而言, 提取载波同步的方法一般分为两类: 一类叫插入导频法, 即在发送有用信号的同时, 在适当的频率位置上, 插入称为导频的正弦波, 接收端即可从导频信号中提取出载波; 另一类是在接收端直接从发送信号中提取载波, 这类方法称为直接法^[5]。而对于数字通信系统, 载波同步的实现就变得比较简单, 关键在于要保证发送与接收模块的时钟同频同相。由于载波同步是解调的先决条件, 下面简单地分析了载波同步误差对解调性

能的影响。

如果接收模块提供的相干载波出现了相位误差 ϕ , 设接收到的载波调制信号是:

提取出的相干载波为

$$s_c(t) = \sin(\omega t + \phi) \quad (1)$$

则解调时, 相乘器的输出经低通滤波器后为

$$x(t) = \frac{1}{2} A \cos \phi \quad (2)$$

若提取的相干载波没有相位差, 即 $\phi=0^\circ$ 时, 解调器输出的低频信号为 $A/2$, 可判决区域从 $-A/2 \sim A/2$ 。当 $\phi \neq 0^\circ$ 时, 则可判决区域的范围缩小了 $1/4A^2 \sin^2 \phi$, 判断区域图见图 1。

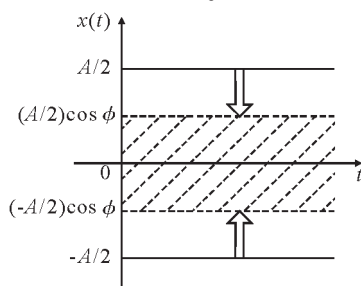


图 1 判决区域图

Fig. 1 Chart of judging region

在发生相位误差 ϕ 后, 系统的信噪比将下降 $\cos^2 \phi$ 倍, 故得系统此时的误码率为

$$P_{\text{e}\phi} = \frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{r} \cos \phi) \quad (3)$$

式(3)中: $P_{\text{e}\phi}$ 为系统的误码率; r 为信噪比。

同样如果载波同步出现频率上的误差 Δf , 按照上面相位误差的分析过程可得低通滤波器的输出信号为

$$x(t) = \frac{1}{2} A \cos 2\pi \Delta f t \quad (4)$$

对收、发时钟允许出现的频率差进行计算: 设每帧数据 200 位, 每位载波频率为 1 kHz。

$$\cos 2\pi \Delta f t \leq 1$$

$$\Rightarrow 2\pi \Delta f t \leq 90^\circ \Rightarrow \Delta f \leq \frac{90^\circ}{2\pi t} \approx 71 \text{ Hz} \quad (5)$$

式(5)中的 $t=200/1\ 000=0.2/\text{s}$ 即在一帧数据 0.2 s 的时间里可允许收、发时钟出现的频率误差为 71 Hz。对于目前数字电路中有源、无源晶振的时钟精度, 很容易满足此误差条件。所以解决相位带来的误码问题将对提高系统在 PSK 模式下的通信准确率具有重要的意义。

2 相位补偿算法

笔者提出的相位补偿算法是基于最大似然估计原理的, 即对每一位接收到的数据利用最大似然

估计法进行运算, 再根据计算的相位误差进行相应的补偿, 可以使整个数据帧的解调误差控制在一个最小的范围内, 实现对通信的闭环监控。

2.1 最大似然估计法

最大似然估计法(maximum likelihood estimation, MLE) 的原理是以一组对应于连续相位差的匹配滤波器作为检测器, 解调时将逐一检测各个滤波器的输出, 寻找输出值最大的检测器对应的相位作为最佳相位估计^[6]。式(6)利用最大似然估计法计算数组 x 、 y 的相似度的运算公式。

$$\begin{cases} r_0 = x[0]y[0] + x[1]y[1] + \cdots + x[31]y[31] \\ r_1 = x[0]y[1] + x[1]y[2] + \cdots + x[30]y[31] + x[31]y[0] \\ \vdots \\ r_{30} = x[0]y[30] + x[1]y[31] + \cdots + x[31]y[29] \\ r_{31} = x[0]y[31] + x[1]y[0] + \cdots + x[31]y[30] \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: r_i 为相关系数; $x[i]$ 为对载波的采样数组; $y[i]$ 为相干载波数组。

将两个数组进行 32 次错位相乘后的乘积和进行比较, 选择最大 r 值所对应数组 $y[i]$ 的相位, 即为采样的载波起始相位。文中采用的判决条件是:

- 1) 若 $0^\circ \leq \theta < 180^\circ$, 即 $0 \leq i < 16$, 则判定载波为数字量“1”;
- 2) 若 $180^\circ \leq \theta < 360^\circ$, 即 $16 \leq i < 32$, 则判定载波为数字量“0”。

2.2 相位补偿算法的原理

笔者在每帧数据的最前面加入一串导频信号, 在每次搜寻到导频信号后, 开始加入相位补偿算法。相位补偿算法分为两部分: 第 1 部分在接收完导频信号后, 进行相位补偿, 使得首个数据位的相位误差降为最低, 保证数据位解调的准确度; 第 2 部分是实时跟踪并记录下每个数据位的解调结果, 每次当达到补偿数据区域时, 开始判断是否达到相位补偿条件。当达到补偿条件后, 开始查询补偿数据区域的相位误差, 找到最小的相位误差值进行补偿。相位补偿算法程序流程图见图 2。

2.3 相位补偿算法的关键技术分析

接收信号的相位发生非线性失真波形见图 3。解调中最大的误差区域出现在相位突变处^[7]。从图 3 中可以看到: 最后一个数据“1”在 AO 段的波形有向后延迟的趋势, 而与之相连的第一个数据“0”在 OB 段的波形则有向前拉伸趋势。当采用最大似然估计进行解调时, 其判决结果受载波初始相位的影响较大。当每个相位突变处产生相位超前、滞后的误差值累积超过误差阈值后就会产生误码, 在图 3 中将“0”判决为“1”。

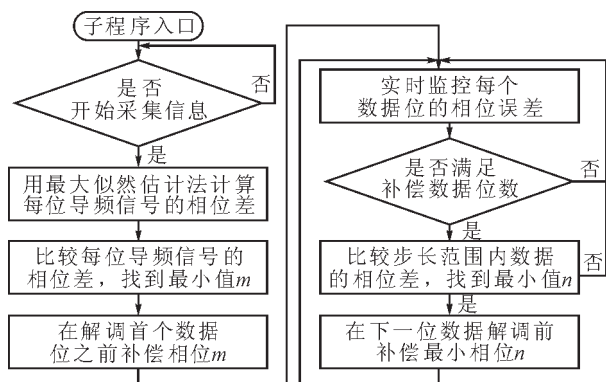


图2 相位补偿算法程序流程图

Fig. 2 Flow chart of phase compensation algorithm

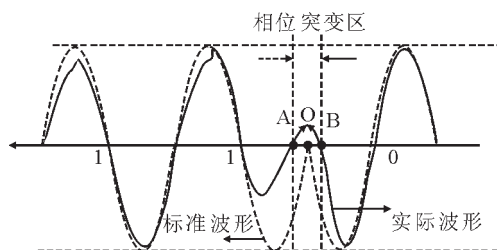


图3 波形分析图

Fig. 3 Chart of analysis wave

2.3.1 起始采样时间

起始采样时间的确定是要保证解调出来的前几位导频信号(111100001111B)是准确的。在满足这个首要的条件后,才能够对后续数据位进行准确的解调。通过观测接收导频信号在两次相位突变处(“1”→“0”,“0”→“1”)的最大相位误差 $\Delta\theta$,可确定整帧数据的最小起始采样相位即为 θ ,则对应的起始采样点数为 N 。

$$\theta = N \times \frac{360^\circ}{M} \geq \Delta\theta \quad (7)$$

式(7)中: N 为起始采样点; M 为单周期采样点数(文中采样率为32个/周期)。

2.3.2 补偿数据区域

相位补偿算法的补偿区域的数据位数是可变的。程序会一直搜索和记录所有数据的解调相位误差,当被检测数据列满足:发生两次相位突变时,程序会自动调出这中间所有数据位的相位误差,并根据补偿条件进行补偿。补偿数据区域的示意图见图4。

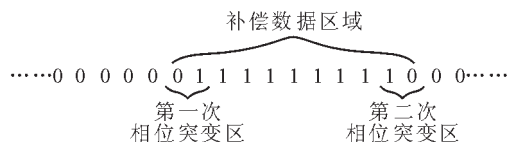


图4 补偿数据区域图

Fig. 4 Chart of compensated data region

2.3.3 补偿条件

相位补偿算法会检测在补偿数据区域内所有

数据的解调相位差,通过比较各个数据位的相位差,找出最小的相位差值,并在对下一位数据的解调前,补偿该最小相位误差。例如 θ_i 为第 i 位数据的相位, $\Delta\theta_i$ 为解调的相位差,相位补偿条件为:如果 $0 \leq \theta_i < 180^\circ$,则相位差 $\Delta\theta_i = |\theta_i - 0^\circ|$;如果 $180^\circ \leq \theta_i < 360^\circ$,则相位差 $\Delta\theta_i = |\theta_i - 180^\circ|$ 。

则补偿的相位差 $\Delta\theta = \min\{\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \dots, \Delta\theta_i\}$,之所以选择最小的相位差是为了避免由于补偿的相位过大而引起后面数据序列的解调误差。

3 实验测试

为了测试相位补偿算法对于非线性信道特性引起的信号失真问题的作用效果,笔者进行了算法性能测试。通信装置以TI公司的TMS320F2812PGFA为核心,附加少量的外围电路(功放电路^[8]、滤波电路^[9]、自动增益调整电路^[10]等)组成^[11-13],见图5。整个试验平台的搭建见图6^[8]。

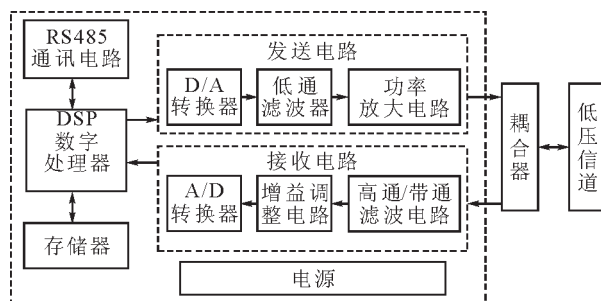


图5 系统的总体结构图

Fig. 5 Schematic diagram of overall system

试验的测试条件为:线路总长800 m,负载为80盏灯,最小解调相位误差 $360^\circ/32=11.25^\circ$,载波频率1 kHz。总通信系统的实测波形见图7。

数据帧格式见图8。

表1、2分别为加入相位补偿算法前后的测试数据。通过比较可以看到,加入相位补偿算法后,解调的准确度有了明显的提升。当发送数据为“1”或“0”时,一帧数据累积的相位误差较小,当数据为“01”时,由于相位突变处最为密集,此时解调的准确度最低,而相位补偿算法的作用最为明显,而随着码元重复次数的增加,解调准确性有所增加,当重复次数大于等于3时,解调精度趋于稳定。

4 结语

笔者提出的基于最大似然估计的相位补偿算法,实时跟踪并记录下信道对信号相位的影响,以可变的步长补偿数据位的相位差,提高了通信的抗干扰性。由于时间有限,笔者没有做更为深入的研

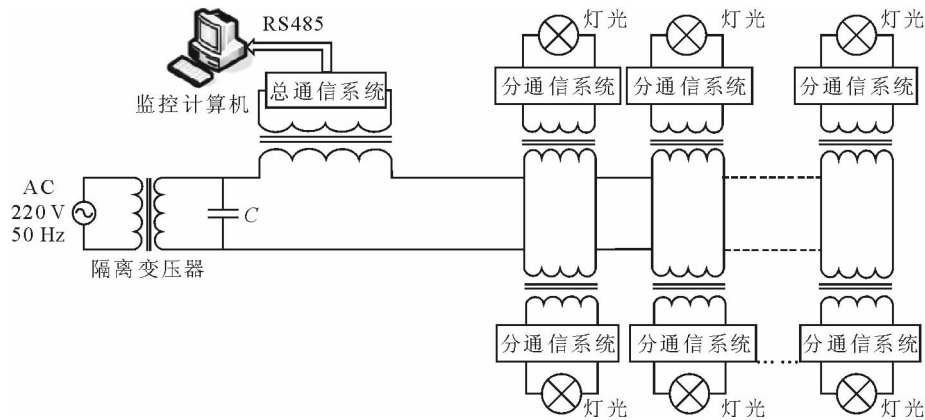


图 6 实验原理图

Fig. 6 Experimental schematic diagram

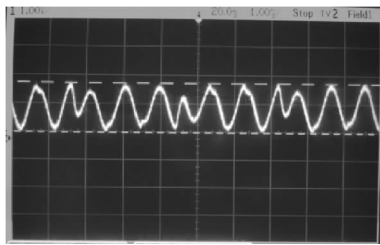


图 7 滤波后的载波信号

Fig. 7 Filtered carrier signal

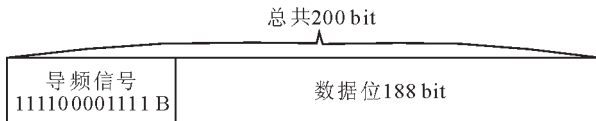


图 8 数据帧格式

Fig. 8 Frame format

表 1 实验测试数据

Tab. 1 Test data of experiment

数据类型	首个数据 位相位(δ_0)	错误码元 数(bit)	最大相位 差($\delta_{\max}$)	数据位累积 相位差($\Delta\delta_0$)
111...111B	78.75°	0	146.25°	67.50°
0101...01B	78.75°	69	>180°	—
1010...10B	90.00°	48	>180°	—
1100...11B	78.75°	14	>180°	—
0011...00B	78.75°	10	>180°	—
111000... 000B	67.50°	0	157.50°	90.00°
11110000... 0000B	78.75°	0	168.75°	90.00°
1111100000 ...11B	78.75°	0	168.75°	78.75°

注: δ_0 为第1个数据位(第13位)的载波起始相位与标准的相干载波的相位差; $\delta_{\max}$ 为一帧数据中产生的最大相位误差值; $\Delta\delta_0$ 为一帧数据中总共188个数据位累积的总相位误差; $\Delta\delta_0$ =(最后一位数据的相位)-(首个数据位的相位)。

究,下一步可以将相位补偿算法结合某些均衡方法,通过实验观测载波通信的质量。

表 2 实验测试数据

Tab. 2 Test data of experiment

数据类型	导频信号相 位相位补偿 值(m)	首个数 据位的 相位(δ_0)	错误码 元数 (bit)	最大相 位差 ($\delta_{\max}$)	数据位 累积相 位差($\Delta\delta_0$)
111...111B	78.75°	0°	0	45°	33.75°
0101...01B	22.50°	56.25°	0	112.5°	67.50°
1010...10B	33.75°	56.25°	0	112.5°	56.25°
1100...11B	33.75°	45.00°	0	112.5°	11.25°
0011...00B	33.75°	45.00°	0	90.00°	33.75°
111000... 000B	56.25°	11.25°	0	67.50°	33.75°
11110000... 0000B	67.50°	11.25°	0	56.25°	45.00°
1111100000 0...11B	78.75°	11.25°	0	56.25°	33.75°

参考文献:

- [1] 樊昌信, 张甫翊, 徐炳祥. 通信原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
FAN Chang-xin, ZHANG Fu-yi, XU Bing-xiang. Communication theory[M]. Beijing: China Defense Industry Press, 2001.
- [2] 翟明岳, 徐志强, 王九金. 宽带电力线通信系统中的资源分配综述[J]. 电网技术, 2010(5): 179-185.
ZHAI Ming-yue, XU Zhi-qiang, WANG Jiu-jin. A survey on resource allocation in broadband power line communication system[J]. Power System Technology, 2010(5): 179-185.
- [3] PROAKIS J G, SALEHI M. Communication theory(second edition)[M]. Beijing: China Electronic Industry Press, 2006.
- [4] 鄢志平, 聂一雄, 邓忠华. 基于 IEC 61850 的合并单元与二次设备通信研究[J]. 高压电器, 2008, 45(2): 27-30.
YAN Zhi-ping, NIE Yi-xiong, DENG Zhong-hua. Research on communication between merging unit and secondary devices based on standard IEC 61850[J]. High Voltage

- Apparatus, 2008, 45(2): 27-30.
- [5] 盛 骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- SHENG Zhou, XIE Shi-qian, PAN Cheng-yi. Probability and mathematical statistics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [6] 张 辉, 曹丽娜. 通信原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- ZHANG Hui, CAO Li-na. Communication theory[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [7] 吕贵洲, 张 弛, 谭业双. 相移键控(PSK) 信号软件检测的实现[J]. 计算机应用, 2001(11): 35-37.
- LÜ Gui-zhou, ZHANG Chi, TAN Ye-shuang. The realization of PSK signal software detection[J]. Computer Applications, 2001(11): 35-37.
- [8] 刘云鹏, 丁玉剑, 律方成, 等. 变压器有载分接开关检测系统的设计[J]. 高压电器, 2007, 43(1): 25-28.
- LIU Yun-pen, DING Yu-jian, LÜ Fang-cheng, et al. The program development of OLTC detecting system[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(1): 25-28.
- [9] 程汉湘, 田新良, 荆怀成. 有源滤波器实用化保护电路与方法的研究[J]. 高压电器, 2008, 45(6): 52-55.
- CHENG Han-xiang, TIAN Xin-liang, JING Huai-cheng. Research on protection circuit & method of APF application[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 45(6): 52-55.
- [10] 张 渡, 江秀臣, 曾 奕, 等. 基于 C8051F330 和 RTX51Tiny 的绝缘子串分布电压测量仪的设计[J]. 高压电器, 2007, 43(5): 380-383.
- ZHANG Du, JIANG Xiu-chen, ZENG Yi, et al. Design of measuring apparatus for high voltage insulator's distributed voltage based on C8051F330 and RTX51Tiny[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(5): 380-383.
- [11] 郭以贺, 谢志远, 徐智坚. 基于 ARM 的馈线自动化系统设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 105-108.
- GUO Yi-he, XIE Zhi-yuan, XU Zhi-jian. A design scheme of feeder automation system based on ARM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 105-108.
- [12] 张琪祁, 郝全睿, 黄 莹, 等. 直流输电系统 PLC 噪声滤波器的设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(9): 2299-2305.
- ZHANG Qi-qi, HAO Quan-rui, HUANG Ying, et al. Design of PLC noise filter in HVDC systems[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 2299-2305.
- [13] 郑 乐, 李东江, 陈 晟. 基于 FPGA 嵌入式处理器设计和实现合并单元的一种方法[J]. 高压电器, 2008, 44(2): 178-184.
- ZHENG Le, LI Dong-jiang, CHEN Sheng. Method for designing and implementing merging unit based on embedded processor on FPGA[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(2): 178-184.
- 铁维昊(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事脉冲功率技术研究。
- ~~~~~
- (上接第 41 页)
- 华中理工大学出版社, 1992.
- [10] 陆文骏. 精密电流互感器、电流比较仪、互感器校验仪理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [11] JJE 1021—2007. 电力互感器检定规程[S].
- [12] DL/T 866—2004. 电流互感器和电压互感器选择计算导则[S].
- [13] 徐 燕, 朱明钧, 郭晓华, 等. 空心线圈作为保护用电流互感器的理论分析和试验[J]. 电子系统自动化, 2002, 26(16): 52-55.
- XU Yan, ZHU Min-jun, GUO Xiao-hua, et al. A study on the air-core coil current transform error protective relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(16): 52-55.
- [14] 张可畏, 陈力新. Rogowski 电流互感器中测量线圈的互换性研究[J]. 高压电器, 2005, 41(4): 265-267.
- ZHANG Ke-wei, CHEN Li-xin. Study on interchangeability of measuring coils in Rogowski current transducers[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(4): 265-267.
- [15] 杨 楠, 段雄英. 一种新型的 Rogowski 线圈—PCB 罗氏线圈[J]. 高压电器, 2005, 41(3): 209-211.
- YANG Nan, DUAN Xiong-ying. A novel PCB Rogowski coil[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(3): 209-211.
- [16] 戴建华, 李开成. 基于 Rogowski 线圈的大电流测量[J]. 高电压技术, 2002, 28(1): 6-10.
- DAI Jian-hua, LI Kai-chang. Heavy current measurement based on Rogowski coil[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(1): 6-10.
- [17] 陈 鹏, 陆俭国, 杨彦杰, 等. 基于 Rogowski 线圈和数字信号处理的交流电流测量[J]. 继电器, 2005, 33(18): 23-26.
- CHEN Peng, LU Jian-guo, YANG Yan-jie, et al. AC current measurement based on Rogowski coil and digital signal processing[J]. Relay, 2005, 33(18): 23-26.
- [18] 王乐仁. 电容式工频高压比例标准器的原理与应用 [J]. 高电压技术, 2002, 28(4): 14-15.
- WANG Le-ren. Principle and application of capacitive voltage ratio standard[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(4): 14-15.
- 杨育京(1967—), 男, 工程师, 长期从事互感器设计开发工作。
- 龚东军(1981—), 男, 工程师, 工学硕士, 主要研究方向为传感与检测技术。