

文章编号: 0253-2239(2006)05-0702-5

新型机器人红外传感皮肤信号处理方法的研究*

曹政才^{1,2} 付宜利² 王树国² 靳保² 李恒民² 王光国²

(¹ 同济大学 CIMS 研究中心, 上海 200092
² 哈尔滨工业大学机器人研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 机器人红外传感皮肤是一种新型的外部感知系统,它具有信息量大,实时性好,与环境无接触测量的特点,被广泛应用在多关节机器人实时避障系统中。但是皮肤上的微型红外传感器输出易受到可见光、工频电源、日光灯等噪声干扰,传统的模拟电路很难满足系统实时性和准确性的要求。为了提高系统的性能,给出了一种基于数字信号处理(DSP)的全数字信号处理技术,采用快速傅里叶变换(FFT)对传感器信号进行处理。分析了快速傅里叶变换误差产生原因,提出加汉宁(Hanning)窗进行误差补偿。仿真和实验结果表明,该技术能有效地减少噪声对系统的影响,使红外传感皮肤能够准确地实时地给出周围环境信息。

关键词: 红外传感皮肤; 信号处理; 快速傅里叶变换; 汉宁窗

中图分类号: TP24 文献标识码: A

Research on Signal Processing Method of the Infrared Sensor Skin of New Robot

Cao Zhengcai^{1,2} Fu Yili² Wang Shuguo² Jin Bao² Li Hengmin² Wang Guangguo²

(¹ CIMS Research Center, Tongji University, Shanghai 200092
² Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: The robotics infrared sensor skin is a new outward sensing system which has the characteristics of abundant information, high performance on real-time processing and non-contact measurement for its environment. The infrared sensor skin is widely used in the multi-joint robot system for real-time obstacle avoidance. However, the output of mini-type infrared sensors in sensor skin is subjected to noise disturbances caused by visible light, electrical source with its work frequency and fluorescent lamp etc. So, it is very difficult for the traditional analog circuit to meet the system's demand of real-time and veracity. In order to improve the systemic performance, a kind of all-digital signal processing technique based on the digital signal process (DSP) is presented. Signal processing is implemented by using fast Fourier transform (FFT) method. By analyzing the error caused by the FFT method, error compensation is realized by using Hanning window. The results of simulations and experiments show that this technique can reduce the effect of noises and provide accurate and real-time environmental information by using the infrared sensor skin.

Key words: infrared sensor skin; signal processing; fast Fourier transform; Hanning window

1 引 言

随着机器人技术发展和机器人日益广泛使用,对机器人智能化程度要求越来越高。机器人智能化需要获取自身及周围环境的大量信息,并根据这些信息采取相应决策,这是机器人在未知或时变环境下自主工作所必须解决的理论与技术^[1,2]。因此应用在机器人上来完成特殊任务的各种传感皮肤应运而生并迅速发展起来。目前这一领域研究十分活跃,并得到极大的发展。国内外研制机器人皮肤大

都是用来检测与外界物体相互作用时的接触力或感受外界温度,不能用来测距^[3]。本文所介绍的红外传感皮肤可以粘贴在机器人表面,依赖于皮肤上微型红外传感器阵列来感知外部环境,能够实时给出外界障碍物距离、位置信息。

由于实际机器人皮肤上的传感阵列分布范围很大,输出信号可以是大面积的分布信号或数十至上百个离散信号,且多数为非线性,因此计算与分析工作量很大。传统的信号处理方法大都是采用模拟

* 国家自然科学基金(50105002)和哈尔滨工业大学基金(HIT. 2001. 14)资助课题。

作者简介: 曹政才(1974~),男,同济大学 CIMS 研究中心博士后,主要从事机器人传感器技术、智能控制的研究。

E-mail: giftcze@163.com

收稿日期: 2005-06-09; 收到修改稿日期: 2005-10-16

方法^[4,5],其计算与分析很费时。硬件实现也比较复杂,参量调整和稳定性也受到一定限制,不能满足当今机器人系统所需要的实时性和准确性的要求。

针对上述问题,为了简单方便地获得理想的输出信号,采用一种基于数字信号处理的数字信号处理技术。该处理技术具有简单、灵活、误差小和可以消除采用模拟电路引起随机漂移弊端的特点。采用数字信号处理芯片,极大地提高了信号的实时处理速度。该技术首先对传感器输出的电信号经过相对简单地放大和滤波;其次对交变信号进行采样获得数字信号;最后采用快速傅里叶变换对信号进行处理。为了能达到工程上要求的精度,提出了加汉宁(Hanning)窗对误差进行补偿。实验表明,该技术可以提高测量精度,减少随机漂移(特别是温度漂移),改善系统的整体性能。

2 模块化红外传感皮肤

图 1 为研制的传感皮肤示意图。选用美国杜邦公司生产的聚酰亚胺薄膜,双面覆上 35 μm 铜箔作为电路板的基材。聚酰亚胺薄膜是一种高温绝缘材料,具有极高的熔点、极高的电阻率和介电击穿强度以及良好的化学稳定性。铜箔为电解铜箔,其特点是:采用电镀的方式形成,其铜微粒结晶状态为垂直针状,易在蚀刻时形成垂直的线条。应用显微机械加工技术和标准集成电路安装技术制成机器人敏感皮肤。该皮肤体积为: $3.025 \times 10^5 \text{ mm}^2$,厚度为 0.15 mm,柔韧性、弹性非常好,可以粘贴在机器的表面,依赖皮肤上的红外传感器阵列来感知外部环境,实时给出外部环境信息,解决多关节机器人实时避障的首要问题。

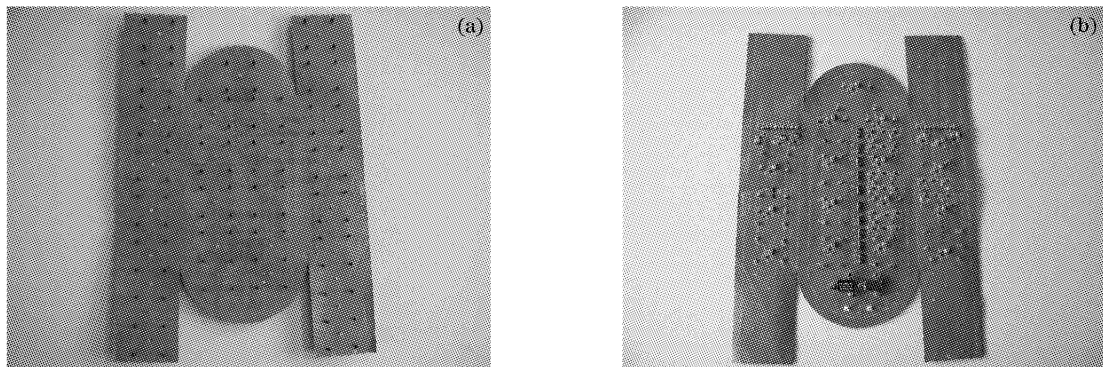


图 1 研制的传感皮肤示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensor skin

3 基于快速傅里叶变换加周期图法的传感皮肤信号处理方法

3.1 基于快速傅里叶变换的频谱分析方法

设离散时域采样信号为 $x_n(n)$, $n=0, 1, \dots, N-1$ 是时域采样点序号, N 是信号长度。在数字信号处理中,用加窗方法将信号分段(帧)。此时 $x(n)$ 表示成 $x_m(n)$, $n=0, 1, \dots, N-1$, m 是帧的符号, N 则是帧内的采样点数(帧长)。信号 $x_m(n)$ 的加窗离散时域傅里叶变换(DTFT)为

$$X[m, \exp(j\omega)] = \sum_{n=0}^{N-1} w_m(n) x_m(n) \exp(-j\omega n). \quad (1)$$



图 2 快速傅里叶变换谱分析流程示意图

Fig. 2 Flow chart of FFT spectrum analysis

为了便于离散计算,采用 $w_m(n) x_m(n)$ 的离散傅里叶变换(DFT)

$$X(m, k) = \sum_{n=0}^{N-1} w_m(n) x_m(n) \exp(-j2\pi nk/2N), \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (2)$$

$|X(m, k)|$ 便是 $x_m(n)$ 的幅度谱估计。当 m 当作时间变量, k 当作频率变量, 则 $|X(m, k)|$ 就是信号 $x(n)$ 的动态频谱。应用快速傅里叶变换方法进行传感皮肤多传感器输出信号处理的流程如图 2 所示。

3.2 快速傅里叶变换谱分析方法的误差补偿

利用快速傅里叶变换方法进行谱分析时,经常

会受到频谱混叠、频谱泄漏和栅栏效应等因素的影响而产生误差。如果误差解决不好,会使计算结果和实际值出现较大差异。

3.2.1 频谱混叠补偿方法

频谱混叠通过在机器人敏感皮肤系统信号采集调理电路中加入 TLC14 抗混叠滤波器予以消除。这种芯片的外围电路很简单,截止频率只需通过调整电容和电阻数值即可实现。这里采用的截止频率 $\omega_p = 800$ Hz。经实验可知:该种滤波器性能非常好,能够有效地滤除光电信号中的高次谐波分量。

3.2.2 频谱泄漏补偿方法

频谱泄漏工程中改善能量泄漏的主要方法是选择不同的窗函数,可以减弱频谱泄漏现象。

关于窗函数的选择,应考虑被分析信号的性质和处理要求。其中,矩形窗函数主瓣最窄,具有最高的频率分辨率,但是旁瓣衰减慢,频谱泄漏大,适合于需要精确读出主瓣频率而不考虑幅值精度的应用场合。平顶窗函数的的主瓣最宽且平坦,适合于需要精确读出幅值的应用场合。另外,汉宁窗函数主瓣稍宽,但旁瓣较小且衰减很快,能够较好地兼顾频率分辨率和幅值精度两方面的性能,这种窗函数的

应用最为广泛。

系统采用了频谱校正算法,可以获得很高的幅值精度,因此选用了汉宁窗函数。这样一方面旁瓣得到有效抑制,可以较好地防止谱间干扰,谱分辨率也较高,同时通过频谱校正也获得了很高的幅值精度。

3.2.3 栅栏效应补偿方法

系统采用插值算法进行频谱的校正则可以有效降低栅栏效应的影响。

3.3 周期图法

功率谱密度 (Power spectral density, PSD) 表示随机信号在各频率上的能量分布及其幅值的大小。利用给定的 N 个样本数据估计一个平稳随机信号的功率谱密度称作谱估计。平稳随机信号序列 $x(n)$ 的功率谱密度估计值为^[6,7]

$$\hat{S}_x(k) = \frac{1}{N} |X(k)|^2 = \frac{X_R^2(k) + X_I^2(k)}{N}, \quad (3)$$

式中 $X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j2\pi nk/N)$, $k = 0, 1, \dots, N-1$ 即序列 $x(n)$ 的傅里叶变换。这种谱估计方法称为周期图法。基于周期图法频谱分析流程如图 3 所示。

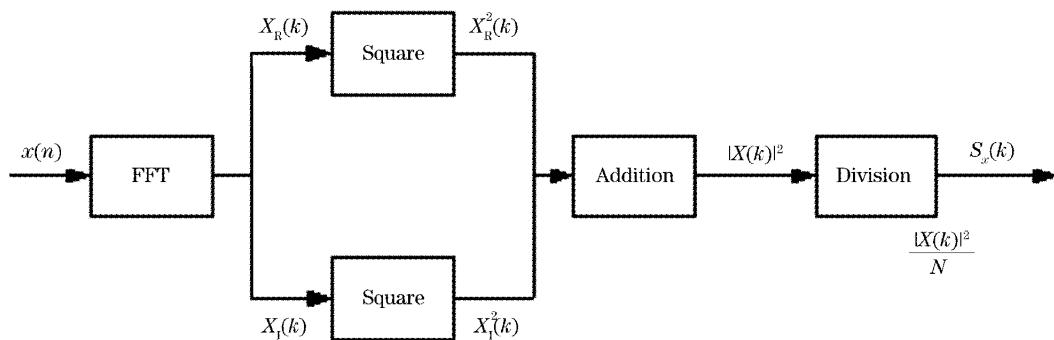


图 3 周期图法计算功率谱密度流程图

Fig. 3 Flow chart of computing power spectral density (PSD) with periodgram method

4 实验结果

4.1 仿真结果

根据对红外传感器输出信号的实际波形进行多次观测,观测输出信号的构成主要是:50 Hz 工频干扰、100 Hz 日光灯灯光干扰、500 Hz 传感器工作频率信号和白噪声信号,它们是线性叠加的。据此给各种信号成分适当加权,模拟这一输出信号的函数可以表示为

$$y(t) = 0.03\sin(2\pi \times 50t) + 0.1\sin(2\pi \times 100t) + \sin(2\pi \times 500t) + 0.05\text{randn}(t), \quad (4)$$

其中 $\text{randn}(t)$ 表示均值为 0、方差为 1 的高斯随机噪声即白噪声。根据系统设计要求采样频率为 3072 Hz,采样点数为 512 点。图 4 为仿真信号的波形图。

图 5(a)是 Matlab 中对仿真波形采用周期图法得到的功率谱图;图 5(b)是 Matlab 中显示的是仿真数据经过数字信号处理处理之后的功率谱图。对比图 5(a)和图 5(b)可知快速傅里叶变换程序是正确的,它实现了信号由时域到频域的变换功能。由功率谱图可见,三个峰值对应的频率依次为 50 Hz、

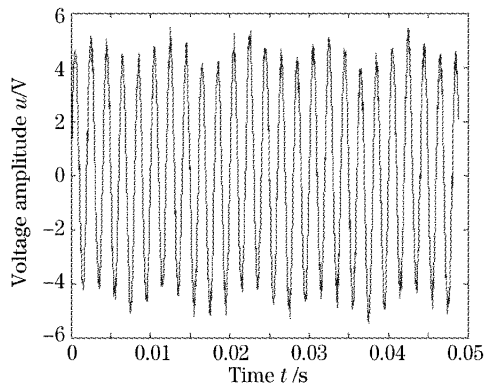


图 4 仿真信号的波形

Fig. 4 Waveform of simulation signal

100 Hz、500 Hz,从功率谱图上可以看出频谱分辨率满足要求,能够明显地将它们区分开来。

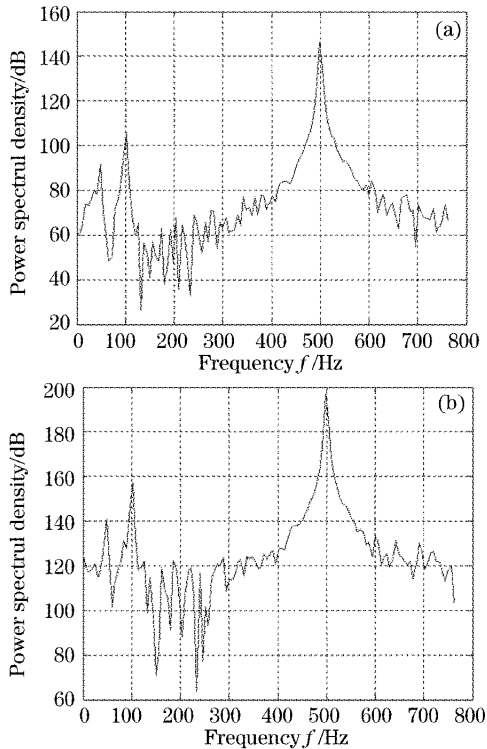


图 5 (a)由 Matlab 得到的仿真信号功率谱图,
(b)由数字信号处理处理的仿真信号功率谱图

Fig. 5 PSD diagram of simulation signal processed
by Matlab (a), DSP (b)

从图 5(b)可以看出,对时域截断的信号直接进行处理(相当于加矩形窗函数)出现了明显的功率谱主瓣内的能量泄漏到旁瓣的现象,即频谱泄漏,借助对采样数据进行加窗处理的方法能够得到改善。图 6 是对信号加汉宁窗函数时得到的功率谱图。加这种窗函数之后旁瓣的衰减比矩形窗时的快了很多,谱间干扰明显减小,提高了幅值精度。

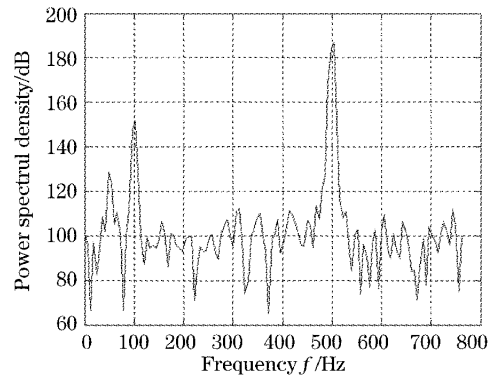


图 6 加汉宁窗函数的功率谱图

Fig. 6 PSD diagram with Hanning window function

4.2 实验验证

在对连续信号进行谱分析时,主要关心谱分析范围和频率分辨率两个问题。谱分析范围受采样频率 f_{sample} 的限制,根据奈奎斯特采样定理,为了防止混叠现象的发生,要求 $f_{\text{sample}} \geq 2f_c$, f_c 为模拟信号最高频率;否则超过 $f_{\text{sample}}/2$ 的频谱会折叠回来形成混叠现象。频率混叠产生在 $f_{\text{sample}}/2$ 附近, $f_{\text{sample}}/2$ 称为折叠频率。通常取 f_{sample} 为 $(3 \sim 5) \cdot f_c$ 即可以满足要求。一般情况下要在采样前对模拟信号进行抗混叠滤波,实际上就是一个低通滤波器,滤除模拟信号中频率高于折叠频率 $f_{\text{sample}}/2$ 的信号成分。频率分辨率用频率采样间隔 F 来描述, $F = f_{\text{sample}}/N$, F 越小表示频率分辨率越高。

由以上分析可见,在采样点数 $N=512$ 为定值时,在保证不发生混叠现象的情况下,降低采样频率有助于提高频率分辨率。但过分降低采样频率又要对抗混叠滤波提出更高的要求。

折衷考虑,系统将模-数(A/D)采样频率选为 3.072 kHz。这样快速傅里叶变换运算结果的谱线间隔 $\Delta f = 3.072 \times 1000/512 = 6$ Hz。由于实信号的谱对 $N/2=256$ 是共轭对称的,所以实际只有 0~256 号谱线(相应于 0~1536 Hz)是单独取值的。根据传感器信号工作的频率 550 Hz,设工作频率的频偏为 ± 25 Hz,即 525~575 Hz,则本系统只需选用快速傅里叶变换之后的第 87~97 号谱线即可。

根据信号采样频率的选择,考虑到信号混叠均以 $f_{\text{sample}}/2=1536$ Hz 对称折叠混叠,如果要保证低于 575 Hz 的信号不受干扰,那么必须保证另一侧高于 2547 Hz 的信号衰减到 30% 以下,即 -10.5 dB,工程上即认为不会对提取信号造成干扰。

TMS320VC33 的一个指令周期内可完成一次乘法和一次加法,当主频为 60 MHz 时,指令执行周

期为 16.7 ns。进行 N 点实数快速傅里叶变换需做 $N \lg N$ 次实数乘法运算和 $(3N/2) \lg N$ 次实数加法运算。当采集 $N=512$ 点数据, 不计内存访问和其它时间, 则进行一次快速傅里叶变换所需时间为

$$(3N/2 + N) \times \lg N \times 16.7 \text{ ns} = 0.192 \text{ ms.}$$

按照 3.072 kHz 的采样频率计算, 对 4 路输入信号进行 512 点数据的采样所需要的时间为

$$512 \times \frac{1}{4 \times 3072} = 41.7 \text{ ms.}$$

可见该数字信号处理的速度足以满足实时处理的要求。

数字信号处理程序调试通过之后, 接上传感器信号(传感器工作频率为 560 Hz)进行实际的传感数据采集。图 7 是对采集的传感信号加矩形窗进行处理得到的功率谱图。从图中可见所得功率谱是离散的, 在非整周期采样时(严格的整周期采样在技术上实现起来有困难)传感信号的谱线和谱峰的位置是不重合的。

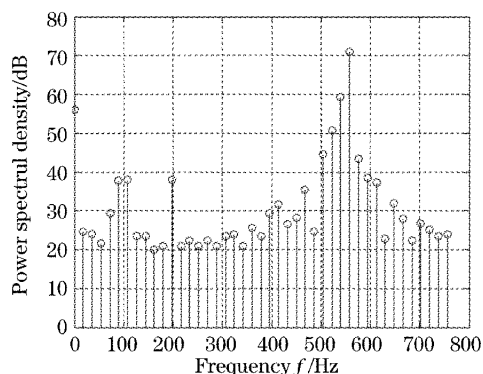


图 7 传感信号的离散功率谱图

Fig. 7 The discrete PSD diagram of sensor

对传感器信号加汉宁窗时, 得到的功率谱图如图 8 所示。由图可见该传感器的工作频率为 560 Hz, 与实际红外传感器工作频率相一致。在

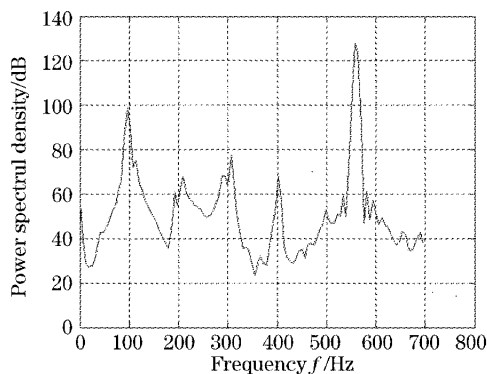


图 8 传感信号的功率谱图

Fig. 8 PSD diagram of sensor

100 Hz、200 Hz、300 Hz、400 Hz、500 Hz 处的五个谱峰是由于 50 Hz 工频电源、日光灯 100 Hz 的闪烁及其它高次谐波所造成的。它们的强度已经可以和传感器的信号相比拟了, 如果采用模拟信号处理方法是很难把它们区分开的, 而在此处借助于对信号在频域内的展开处理起来要容易得多。提取传感器信号对应的谱线的幅值作为输出, 该信号就反映了传感器与障碍物之间的距离。

5 结 论

本文是实验室中的阶段成果。从分析、仿真和实验结果可见, 基于数字信号处理的数字信号处理技术的特点是: 1) 快速性。快速傅里叶变换进行信号处理的主要优点就是运算速度快, 不占有很多系统时间, 满足系统的实时性的要求。2) 测量精度较高, 功能较多, 使用方便。快速傅里叶变换算法采集有用频率信号, 排除其它频率干扰信号。避免了因采用模拟电路产生参量不匹配带来的误差, 从而极大地提高了测量精度。3) 针对机器人传感皮肤信号处理系统, 采用该算法实现红外传感器信号处理, 不需要外加复杂硬件电路, 实现简单方便。

该技术应用于红外传感皮肤的信号处理, 可以有效地滤除噪声, 提高测量的精度, 保证处理的实时性, 是一种新型、实用的传感皮肤多红外传感器信号处理的方法。

参 考 文 献

- Vladimir J. Lumelsky, Michael S. Shur, Sigurd Wagner. Sensitive skin[J]. *IEEE. Sensors J.*, 2001, 1(1): 41~51
- Tu Mengfu, Yu Gang. A method of trace generation for 5-axis robotic laser manufacturing system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, 30(4): 364~368(in Chinese)
涂孟夫, 虞 钢. 五轴框架式机器人激光加工系统轨迹算法研究[J]. *中国激光*, 2004, 30(4): 364~368
- Cao Zhengcai. Research on the system of robotics sensitive skin based-on infrared sensors[D]. Dissertation for the Doctoral Degree in Engineering of Harbin Institute of Technology, 2005 (in Chinese)
曹政才. 基于红外传感器的机器人敏感皮肤系统的研究[D]. 哈尔滨工业大学工学博士论文, 2005
- Xiaofang Zhang, Xin Yu, Chengzhi Jiang et al.. A theoretical and experimental study on no-guide light pen type 3D-coordinate measurement system[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, 1(4): 214~216
- Edward Cheung, Vladimir J. Lumelsky. Proximity sensing in robot manipulator motion planning: system and implementation issues[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1989, 5(6): 740~751
- Ning Wang, Peng Shi, Yutian Lu. The intensity distribution and thermal stability of InnoSlab laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, 3(4): 215~218
- Sun Hongjun, Zhang Tao, Ling Qing. Study on relaxing notch periodogram applied to vortex flowmeter signal processing[J]. *Chin. J. Scientific Instrument*, 2004, 25(5): 577~586 (in Chinese)
孙宏军, 张 涛, 凌 菁. 基于松弛陷波周期图法的涡街流量计信号处理技术的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(5): 577~586