

【文章编号】 1004-1540(2009)03-0240-06

基于经验模式分解的结肠压力信号 功率谱分析

雷 懿, 田社平, 颜国正

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200040)

【摘要】 结肠疾病是一种常见的疾病, 结肠测压技术作为研究和诊断结肠运动功能异常的工具得到广泛利用, 但是人体结肠压力信号具有明显的非平稳性, 传统的时域观察或者频域分析很难对测压结果进行准确的分析. 现采用经验模式分解(EMD)对临床采集的结肠压力信号进行分析. 先将人体结肠压力信号通过 EMD 方法分解为一系列自适应的固有模式函数(IMF), 然后判断并提取出其中主要的分量, 对其进行功率谱分析, 从而较为真实地反映出结肠压力信号蕴含的特征信息. 结果表明, 这种分析方法对于分析结肠压力信号有明显的作用.

【关键词】 结肠压力; 功率谱; 经验模式分解

【中图分类号】 R318.04; R574.62

【文献标识码】 A

Power spectral analysis of human colonic pressure signals based on EMD

LEI Yi, TIAN She-ping, YAN Guo-zheng

(School of Electronics and Electric Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200040, China)

Abstract: Colonic disease is a disease with high incident. Colon cavity manometry has been widely used to research and diagnose colonic motility dysfunction. However, human colonic pressure signals are essentially non-stationary. With traditional time-domain observation or frequency-domain analysis, it is difficult to give an accurate analysis of the results of manometry. Empirical Mode Decomposition (EMD) method used to analyse colonic pressure signals. In the first step every case of human colon pressure signals is decomposed into a series of different intrinsic mode functions (IMF), and then the major component judged and extracted. By using power spectral density (PSD), characteristic information contained in colonic pressure signals can be obtained. The result shows this method is effective for the analysis of colonic pressure signals.

Key words: colonic pressure; power spectral; EMD

结肠运动障碍疾病是一种常见的疾病, 但是在人体脏器中, 对结肠运动功能的认识还比较欠缺. 结肠运动功能的异常在人群中的发生率很高, 近 20%

的个体都受其影响^[1]. 对结肠运动功能的检测是诊断的一个重要手段, 测压得到的肠道压力信号被广泛用于评价消化道运动情况, 可以准确反应腔内压

【收稿日期】 2009-04-27

【基金项目】 国家自然科学基金资助项目(No. 60875061)

【作者简介】 雷 懿(1984-), 男, 陕西西安人, 硕士研究生. 主要研究方向为生物医学信号处理.

力变化的幅度、频率等,对运动障碍疾病的诊断有较高的价值.但是人体结肠的运动是相当复杂的,其压力信号是一种非稳态信号,采用传统的傅立叶分析方法提取压力信号特征往往比较困难,因此,应考虑采用适用于非稳态信号的分析方法进行研究.

经验模式分解(EMD)是由 Norden E. Huang 等人提出的一种新的时频分析法^[2].它是一种局域波分解方法,把复杂的原信号分解成有限个简单的分量,称之为固有模态函数(IMF)分量. IMF 具有很好的希尔伯特变换特性,使得瞬时频率可以计算,并使其具有实际物理意义.该分解法分解所得的内蕴模态函数是完备的、正交的、局域的,并且是自适应的,是一种高效的信号分解法.该方法在海洋研究、地震研究、遥感中的图象处理、旋转机械振动信号处理等许多领域^[2-7]得到广泛的应用.笔者将经验模式分解应用于结肠压力信号的分析,并结合功率谱分析和已知的肠动力理论,能够分析人体结肠的动力特性.

1 数据处理方法

传统上的时域和频域分析方法有其固有的缺陷,时域分析不能够提供信号的频率特征,而傅立叶变换又不能展现信号随时间而变化的频谱,而这一点在非稳态信号的分析中却极为关键.结肠压力信号是一种非平稳的信号,用传统方法处理很难看出其特征,因此使用经验模式分解这一新的时频分析方法是合适的.

1.1 EMD 及其边界效应消除

EMD 是一种基于固有模态函数(IMF)对信号分解方法,一个信号都可以包含许多固有模态函数,如果固有模态信号之间相互重叠,便形成复合信号. EMD 方法通过对信号的直接观察,在信号的时间幅度特性上凭经验来识别它的振荡模式,然后以此为依据分解信号.通过观察,可从连续交替的局部最大值与最小值直接识别信号的不同特性.在得到信号中的所有局部极值点后,其中所有的局部最大值用3次样条拟合成上包络,同理,所有的局部最小值用3次样条拟合成下包络,上下包络应将信号的所有数据包含于它们之间.

EMD 的核心是一个经验筛选过程.筛选过程主要有2个目的:一是去除叠加波;二是使波的外形更加对称.为了达到这个目的,筛选过程可以被重复多次^[2].

在 EMD 方法中,信号两端边界不确定,其均

值只能近似得到,而边界处均值的精度,对信号分解效果很有影响.若边界均值误差比较大,会使信号的各 IMF 分量的2个端点产生大的波动.三次样条插值在边界处的大波动会产生严重的飞翼.并且,随着筛选的过程,这一边界波动会渐向内部传播,使信号分解失效.经常使用的边界效应的消除方法有极值点延拓,镜像闭合延拓^[5],支持向量机等^[6].极值点延拓是直接将近信号原有的极值点向外延拓出去,这种方法较为简单.镜像闭合延拓在信号波形具有较强的不对称性时,会人为引入端点影响.支持向量机效果较好,但是较复杂,时间开销较大.而正交多项式方法在各方面都比较合适,因此本文采取正交多项式拟合的方法来消除端点效应^[8,9].

对于离散数据点,可以用一个近似函数去反映出这些离散数据点的变化趋势,而不是经过所有的数据点,这样的方法称为数据拟合.数据拟合最常用的近似标准是最小二乘法,即给定数据点 (x_i, y_i) ,要求选择拟合函数 $\varphi(x)$,使 $\sum_{i=0}^n [y_i - \varphi(x_i)]^2$ 达到最小.当 $\varphi(x)$ 选择为正交多项式时,称为正交多项式拟合^[9].

取出由 EMD 得到的极值点序列(例如极大值点序列)最左端的若干个极值点,对所取的极值点求出拟合多项式,计算出多项式对应数据序列左端点处的函数值,把此函数值作为极值点序列在该端点处的近似取值;同理求出极值点序列在右端点处的近似取值.最后利用三次样条函数对新极值点序列进行插值得到上包络线,同理可以求出下包络线.三次样条函数在端点处有值可依,避免了上下包络线的摆动.

以左边界极大值为例,其具体算法如下:

1) 取左侧极大值序列的 N 个点 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)$;

2) 取左侧极大值序列三个正交多项式为:

$$\begin{cases} T_0(x) = 1 \\ T_1(x) = x - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \\ T_2(x) = x^2 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 T_1(x_i)}{\sum_{i=1}^N T_1^2(x_i)} \right] T_1(x) \end{cases} \quad (1)$$

则左侧极大值序列点的变化规律为

$$y(x) = a_0 T_0(x) + a_1 T_1(x) + a_2 T_2(x) \quad (2)$$

式(2)中: a_0 、 a_1 、 a_2 为拟合系数。

3) 计算左侧极大值序列正交多项式拟合的系数为:

$$\begin{cases} a_0 = \frac{\sum_{i=1}^N T_0(x_i) y_i}{\sum_{i=1}^N T_0^2(x_i)} \\ a_1 = \frac{\sum_{i=1}^N T_1(x_i) y_i}{\sum_{i=1}^N T_1^2(x_i)} \\ a_2 = \frac{\sum_{i=1}^N T_2(x_i) y_i}{\sum_{i=1}^N T_2^2(x_i)} \end{cases} \quad (3)$$

4) 将左侧极大值序列向左延拓的第 i 个值为:

$$y_i(x) = a_0 T_0(x_i) + a_1 T_1(x_i) + a_2 T_2(x_i) \quad (4)$$

经过试验,一般 N 取 3 到 5 个点较为合适,本文 N 取 3,在包络时延拓 5 个点。选择测试信号 $x(t) = 2\cos(8\pi t) + 0.5\cos(4\pi t) + 0.5\cos(\pi t)$, 分别在不进行端点效应消除和应用正交多项式进行端点效应消除的情况下进行包络曲线的拟合,图 1 和图 2 结果。图中圆圈是极值点和延拓点。

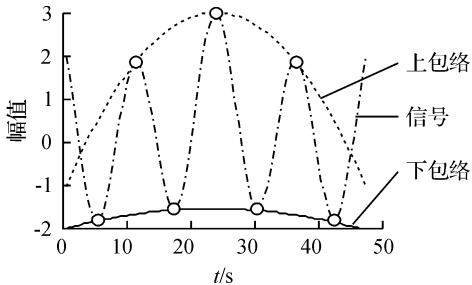


图 1 没有消除端点效应的包络

Figure 1 Envelop without end effects restrained

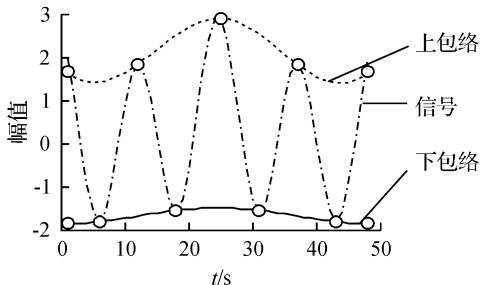


图 2 经过消除端点效应的包络

Figure 2 Envelop with end effects restrained

可以看出,在图 1 中没有经过消除端点效应的情况下信号两侧会有较大的误差,而在图 2 中,包络两端基本与信号相符。

1.2 固有模态函数的功率谱分析

功率谱密度函数是频域特性的一个重要统计参数。由于随机信号积分不收敛,所以其本身的傅立叶变换是不存在的,因此只能用统计的方法来进行表示。自相关函数能完整反映信号的特定统计平均量值,而功率谱密度则就是自相关函数的傅立叶变换。它所展现的正是信号各频率处功率的分布情况,一般采用周期图法来计算功率谱。为了提高周期图法的估计效果,可对采样数据分段使用非矩形窗,这就是修正周期图法,亦即 Welch 方法。Welch 方法允许分段的数据有部分重叠,其实质即在分段段数和各段重叠率之间加以平衡,同时使用汉宁或哈密窗代替矩形窗,以减小由于矩形窗边瓣引起的谱失真^[10]。

使用上面的例子来验证经验模式分解结合功率谱分析的效果。对信号 $x(t) = 2\cos(4 \times 2\pi t) + 0.5\cos(2 \times 2\pi t) + 0.5\cos(0.5 \times 2\pi t) + \text{noise}$, 噪声为高斯分布的随机噪声,进行分解并对其分量进行功率谱分析,结果如图 3 和图 4。

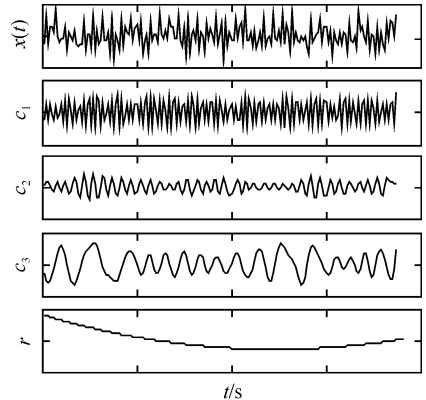


图 3 EMD 分解后的内禀模态函数

Figure 3 IMFs after empirical mode decomposition

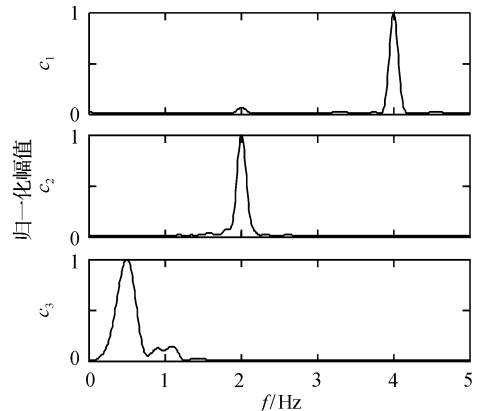


图 4 三个模态的功率谱

Figure 4 Power spectral density of three IMFs

可以明显从图4中看出,分解后的信号分解出来了原始信号的三个分量,在功率谱图中可以看出它们的频率,分别为4 Hz,2 Hz和0.5 Hz.

2 结肠压力数据处理结果及讨论

先对结肠压力信号的一个样本进行经验模式分解,并对其分量进行功率谱分析,根据现有的医学原理,得到了主要表征结肠压力信号特征的分量.之后,对38例结肠压力信号样本进行处理,限于篇幅,本文仅选取典型的4例进行说明.

2.1 结肠压力信号的经验模式分解及功率谱

对结肠压力信号进行重采样,以降低数据处理量.结肠压力信号的采样频率为16 Hz,重采样频率为1 Hz.由于分析的重点是结肠的节律性收缩,而24 h人体结肠节律性收缩频率主要分布在2~8 c/min之间^[1],因此,此采样频率不会影响到接下来对于结肠数据样本的分析.本文以1 Hz的频率取测压孔测得的1000点数据进行处理,相当于大约17 min的测量数据,数据量上足以对结肠数据样本进行判别.

以下是结肠压力信号的一个样本,在经过预处理后,对它进行了经验模式分解,并应用正交多项式进行端点效应消除.根据EMD的原理,将固有模式函数显示如图5(仅显示第 $c_1 \sim c_5$ 分量,忽略其它分量).

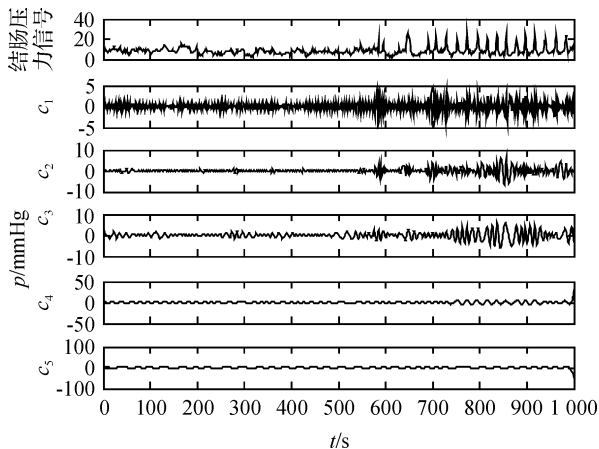


图5 结肠压力信号的EMD分解

Figure 5 Empirical mode decomposition of colonic pressure signals

对图5中的各个分量进行功率谱分析,得到如图6的结果.根据现有人体结肠动力特性,我们主要对结肠的节律性收缩情况进行分析.已知在乙状结肠和直肠乙状结肠连接处,24 h人体结肠收缩频率中80%为3 c/min的收缩频率.由此可以得到,频率分布在3 c/min左右的IMF分量代表信号的主要特性.因此,在图6中可以看出, c_4 分量代表了主要的结肠压力信号特征,其他的信号要么频率太高,要么太低,分布不规律.在以后的分析中,都对每个结肠压力信号样本的 c_4 分量进行功率谱分析.

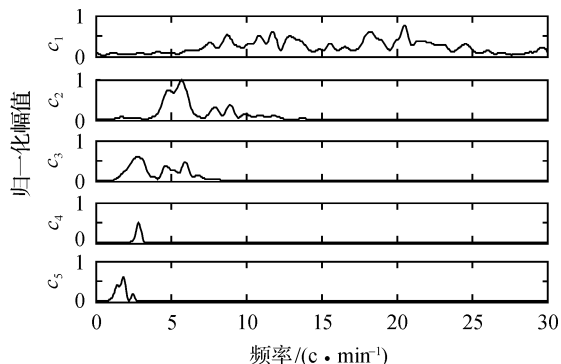


图6 结肠压力信号 c_1 到 c_5 分量的功率谱

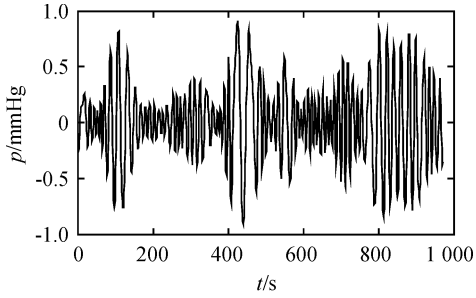
Figure 6 Power spectral density from c_1 to c_5 of colonic pressure signals

2.2 人体结肠压力信号的分析结果

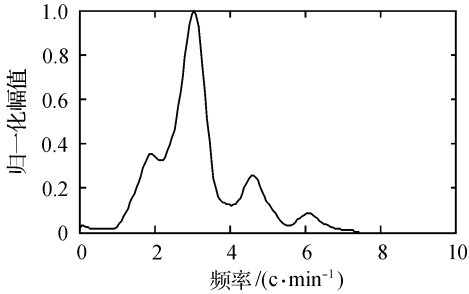
本文一共对38例结肠压力信号的样本进行了处理,并对其 c_4 分量进行了功率谱分析,得到了14例正常样本和24例异常样本,限于篇幅,选取其中2例正常样本和2例异常样本进行说明如下.

2.2.1 结肠压力信号正常样本 图7和图8是正常的人体结肠压力数据样本在经验模式分解后 c_4 分量的时域图和功率谱图.从功率谱图中可以看出,它明显的显示出了人体结肠信号的节律性特性,其能量在3 c/min左右的时候最高,与24 h人体结肠收缩频率中80%为3 c/min的收缩频率这一特性相符合.

2.2.2 结肠压力信号异常样本 从图9中可以看出这个异常样本的功率谱频率偏慢,低于正常的3 c/min,而且表现出一定的紊乱状况.可将这个样本看作是结肠动力不足,节奏偏缓的情况.



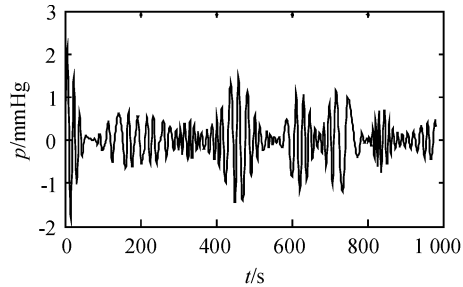
(a) 样本9的 C_4 分量时域图



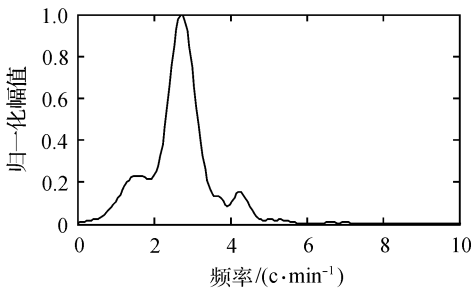
(b) 样本9的 C_4 分量功率谱图

图 7 样本 9 的 c_4 分量分析图

Figure 7 Analysis for c_4 component of sample



(a) 样本23的 C_4 分量时域图

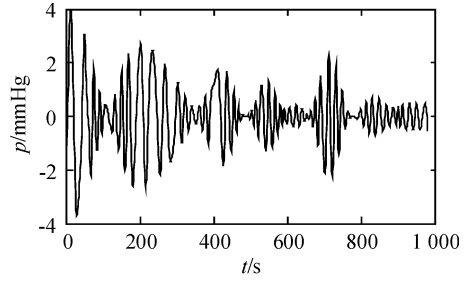


(b) 样本23的 C_4 分量功率谱图

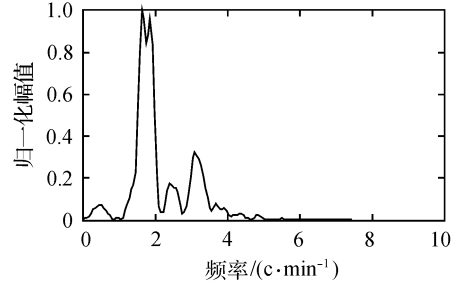
图 8 样本 23 的 c_4 分量分析图

Figure 8 Analysis for c_4 component of sample 23

从图 10 中可以看出,此样本频率分布不规律,不符合人体结肠压力特性.这些图都与正常样本的谱图有明显差异,表现为频率分布的散乱,功



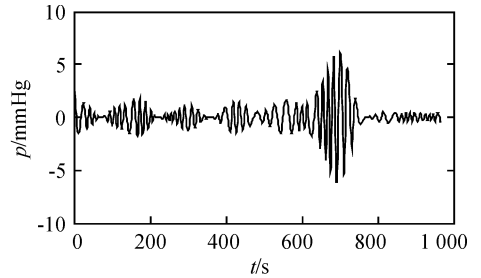
(a) 样本15的 C_4 分量时域图



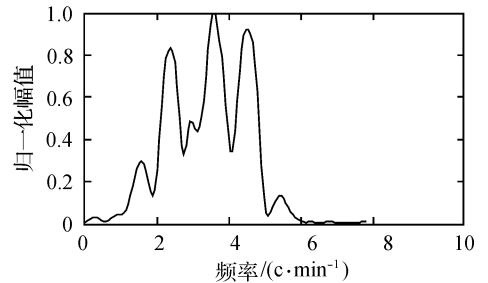
(b) 样本15的 C_4 分量功率谱图

图 9 样本 15 的 c_4 分量分析图

Figure 9 Analysis for c_4 component of sample 15



(a) 样本33的 C_4 分量时域图



(b) 样本33的 C_4 分量功率谱图

图 10 样本 33 的 c_4 分量分析图

Figure 10 Analysis for c_4 component of sample 33

率谱图中的频率有多个波峰,显示出其能量分布的不规律,可以称其为结肠动力的紊乱.

3 结 语

通过经验模式分解的方法将复杂的非平稳的结肠压力信号分解为不同特征尺度的平稳数据序

列,并根据医学上已有的人体结肠压力信号特性分析出能代表主要的结肠动力特征的分量,对其进行功率谱分析.其主要创新点在于证明了经验模式分解方法在结肠压力信号处理中的有效性,并指出 c_1 分量基本代表了主要的结肠节律性收缩情况,但其他分量也可能代表了一定的结肠动力信息.

正常样本的谱图表现形式都基本相似,符合人体结肠动力特性.在 3 c/min 处频率的能量最大,符合 24 h 人体结肠收缩频率范围.而非正常样本信号的谱图表现形式与正常样本的谱图有明显区别,表现为频率分布紊乱,且能量波动较大,时域上大小不均.还有一些则是频率或能量较小,可能是结肠动力不足的一种表现.表明正常样本与非正常样本信号特征有明显的区别.

尚需做进一步的研究,包括对固有模态函数中其他分量所包含信息的分析.

【参 考 文 献】

[1] 舒斯特,马文,许斌,等.胃肠动力学[M].上海:上海科

学技术文献出版社,2003:231-240.

- [2] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proc Royal Society of London Series A, 1998, 454: 9032995.
- [3] 宋平舰,张杰.二维经验分解在海洋遥感图象信息分离中的应用[J].高技术通报,2001(9):62-67.
- [4] 韩春明,郭华东,王长林.利用经验模态分解方法抑制 SAR 斑点噪声[J].遥感学报,2002,6(4):266-271.
- [5] 黄大吉,赵进平,苏纪兰.希尔伯特-黄变换的端点延拓[J].海洋学报,2003,25(1):1-11.
- [6] 于德介,程军圣,杨宇.机械故障诊断的 Hilbert-Huang 变换方法[M].北京:科学出版社,2007:54-68.
- [7] 褚敏,田社平,韦红雨,等.经验模态分解的人体结肠压力信号分析[J].中国计量学院学报,2007,12,18(4):296-300.
- [8] 孔超,方勇华,兰天鸽,等.小波变换中基于正交多项式拟合的边界延拓[J].量子电子学报,2008,25(1):25-18.
- [9] 刘慧婷,张旻,程家兴.基于多项式拟合算法的 EMD 端点问题的处理[J].计算机工程与应用,2004,16:84-86.
- [10] 迟冬祥,颜国正,王文兴,等.结肠压力信号的功率谱分析[J].北京生物医学工程,2003,22(2):95-98.

(上接第 226 页)

统很好地实现了对双稳态四通阀的多种驱动与控制,各项测量参数技术指标均达到要求,从而可作为四通阀的设计和驱动模块的参数设计的依据.本测试系统对其他阀和制冷器件等有一定的移植性,可以根据不同功能进一步研究开发.

【参 考 文 献】

- [1] 陈颖,邓先和,丁小江,等.空调用四通换向阀的工作特性和换向性能分析[J].制冷,2002,9(80):56-59.
- [2] 黄松炎,尹斌,金荣昌,等.双稳态四通电磁换向阀.中

国专利:03255338.2[P].2004-08-18.

- [3] 段辉,姜宏辉,康国权.铂热电阻测温电路实用性的探讨[J].鸡西大学学报,2005,5(2):60-61.
- [4] 龚瑞昆,李静源,张冰.高精度铂电阻测温系统的实现[J].仪表技术,2008(7):9-10.
- [5] 李殊骁,郝赤,龚兰芳,等.高精度三线制热电阻检测方法研究[J].仪器仪表学报,2008,29(1):135-138.
- [6] 黄震威,梁国伟,赵伟国,等.组合热膜探头热式气体流量计的研制[J].中国计量学院学报,2009,20(1):29-30.
- [7] 彭晓利,毛谦敏,梁国伟,等.基于电涡流的新型靶式流量计[J].中国计量学院学报,2009,20(2):114-116.