

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107865

基于电感式传感器的金属颗粒材质识别及粒径估计*

李业辉¹, 宁致远², 薛邴森², 张兴明^{2,3}, 张洪朋³

(1. 哈尔滨工业大学(威海)信息科学与工程学院 威海 264209; 2. 哈尔滨工业大学(威海)海洋工程学院 威海 264209;
3. 大连海事大学轮机工程学院 大连 116026)

摘要:传统的电感式颗粒传感器输出的是电感或电压幅值的脉冲信号,本质为标量信号。可通过脉冲信号的正负性区分金属颗粒是磁性或非磁性,且只能在已知颗粒材质的情况下估计颗粒的粒径。但在含有多种金属颗粒的油液中,基于标量信号的颗粒识别方法将失效。为此,本文采用了一种双锁相放大电路,将颗粒产生的复数域信号转化为一对直流信号。提出一种基于模糊隶属度函数的信号处理方法,实现了在噪音干扰下多种颗粒的材质识别和粒径估计。本文搭建了三线圈传感器实验系统。利用五种金属颗粒构建了隶属度函数,并进行系统标定。最后选取两种颗粒对标定后的系统进行了验证。结果表明系统对颗粒材质的识别准确,粒径估计误差小于2%。

关键词:金属颗粒;电感式传感器;隶属度函数;材质识别;粒径估计

中图分类号: TP212.1 TH73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Metal particle material identification and size estimation based on the inductive sensor

Li Yehui¹, Ning Zhiyuan², Xue Bingsen², Zhang Xingming^{2,3}, Zhang Hongpeng³

(1. School of Information Science and Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China;

2. School of Ocean Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China;

3. Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: The output of the traditional inductive particle sensor is pulse signal of inductance or voltage amplitude, which is scalar signal in nature. The metal particle can be distinguished into magnetic metal or non-magnetic particle by the positive and negative of pulse signal. The particle size can only be estimated under the condition of known particle material. However, for oil containing multiple metal particles, the particle identification method based on the scalar signal may be invalid. To solve this problem, a double lock-in amplifier circuit is utilized to convert the complex particle signal into a pair of DC signals. A signal processing method based on fuzzy membership function is proposed, which can realize the material identification and size estimation of various particles under noise interference. In this paper, an experimental system based on a three-coil sensor is established. The fuzzy membership function is formulated and the system is calibrated by using five kinds of metal particles. Finally, two kinds of particles are selected to evaluate the calibrated system. Results show that the particle material can be identified accurately by this system, and the error of particle size estimation is less than 2%.

Keywords: metal particles; inductive sensor; membership function; material identification; size estimation

0 引言

机械系统趋向于大型化、复杂化和连续化,这对轮机

设备的润滑以及液压系统的可靠性要求更高^[1]。统计数据显,超过75%的液压系统故障,约35%的柴油机运行故障、38.5%的齿轮失效以及40%的滚动轴承失效由工作油失效引起^[2-3]。在轮机设备的运行过程中,机械摩擦导

收稿日期:2021-04-29 Received Date: 2021-04-29

* 基金项目:国家重点研发计划(2019YFB1705302)、国家自然科学基金(51909047)、山东省自然科学基金(ZR2019PEE003)、山东省重点研发计划(2019GHZ011)项目资助

致磨损的金属颗粒流入油液,从而导致工作油失效。通过分析油液颗粒的材质和粒径信息,追溯磨损源,进而对机器的磨损状况和工作状态作出评价^[4-6]。油液颗粒检测对于预报潜在的隐患和避免灾难性故障具有重要意义^[7-9]。

在线油液分析方法主要包括超声波式^[10]、光学式^[11]、电容式^[12]和电感式^[13]。电感式油液颗粒检测方法因其成本低并且可实现铁磁金属颗粒和非铁磁金属颗粒的区分,目前是最有潜力发展的在线油液分析技术之一^[14-16]。现有电感式油液颗粒检测的研究都是基于传统的标量分析法,即针对未知颗粒的材质构建信号幅值与粒径的关系。在标量分析法中,电感式传感器信号是电感或电压幅值等单一的实数信号^[17-20]。该方法只有在已知颗粒材质的情况下才能对颗粒粒径进行分析,而且只能进行铁磁性金属和非铁磁性金属的粗略区分^[21-22]。

实际工作油中的金属颗粒材质有多种,这导致颗粒的粒径和材质的信息无法从一维信号得到^[3]。研究表明,金属颗粒在交变磁场中的磁化现象表现为复磁导率。即当传感器激励线圈在激励电流下产生交变磁场,颗粒通过传感器磁场时,会引起一个幅值和相位都在不断变化的复数域信号^[23]。相比于标量分析法,复数域分析法是基于颗粒磁导率和电导率两个参数展开研究。当 3 种及以上金属颗粒混杂检测时,该方法不仅可以区分颗粒的性质是铁磁性金属或非铁磁性金属两类,还可以同时分析颗粒的材质种类和粒径大小。

利用复数域信号分析颗粒材质和粒径时,信号的测量值容易受到外界电磁辐射、系统仪器误差及各种噪音的干扰导致数据不够精确,从而难以对其所属材质种类做出一致性的判断。于是我们提出基于模糊隶属度函数的复数域分析法实现金属颗粒材质识别。对于存在多种未知颗粒材质的环境,该方法将定性分析和定量分析相结合,探究未知颗粒属于某种材质的可信度等级,从而实现合理的识别。在颗粒信号测量误差难以避免的情况下,该方法模拟人脑处理模糊信息的思维方式,将材料的识别结果量化为模糊信息,使结论依据易于被接受^[24]。

据此本文提出了颗粒信号在复平面中的分析方法。首先建立了基于复数域信号相位的隶属度函数用来识别颗粒的材质,提出了金属颗粒粒径的估计方法,然后本文选择了两种铁磁性材质和 3 种非铁磁性材质的颗粒进行系统标定,最后利用两种颗粒对系统进行了验证,实验结果说明了本文方法的有效性。

1 金属颗粒复数域信号的检测原理

复数域颗粒信号检测的硬件系统由 3 部分组成:电感式金属颗粒传感器、双锁相放大电路和通用的信号采集系统。下面重点介绍前两者的原理。

1.1 传感器原理

传感器的基本原理为:当金属颗粒通过传感器产生的交变磁场时,局部的交变磁场将颗粒磁化,形成了一个散射磁场。散射磁场反作用在感应线圈上,导致线圈的阻抗发生变化或在线圈中形成交变信号^[25]。根据此交变信号幅值和相位的大小,可以判断颗粒的粒径和材质。

如图 1 所示,三线圈电感式传感器的基本结构包含一个激励线圈 E_1 和两个感应线圈 E_2 、 E_3 。两个感应线圈的几何外形和匝数完全一致,仅绕线方向相反,以串联的方式连接。激励线圈和感应线圈采用的是同轴内外层的结构分布,外层为激励线圈,内层为两个对称分布的感应线圈。测量区域,即油管,在线圈内部沿着线圈轴线放置。

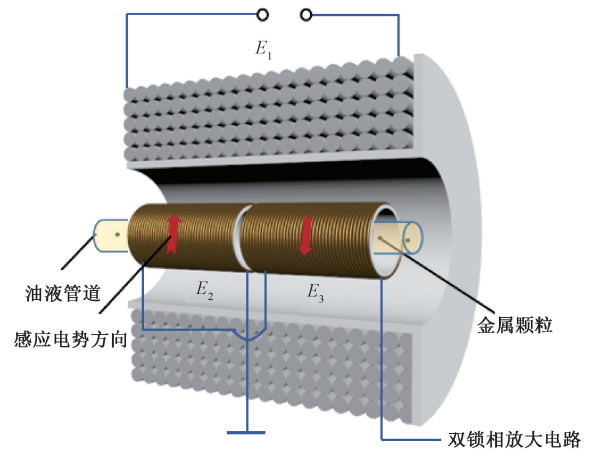


图 1 传感器结构

Fig. 1 Sensor structure

当三线圈颗粒传感器工作时,一定波形、频率的交变电流通入激励线圈,进而产生交变磁场。此交变磁场将作为感应线圈的激励磁场,使两个感应线圈产生大小相等、方向相反的感应电动势。两个线圈的串联结构使得等大反向的电动势互相抵消。因此,在没有颗粒经过时,该感应线圈总输出接近零,当有颗粒经过时,两个感应线圈产生新的电动势,即感应线圈将会有输出。根据文献^[23],在感应式传感器中,金属颗粒产生的复数域信号可表示为:

$$\dot{U}_g(\mathbf{r}_g, t) = jV\chi_a H(\mathbf{r}_g) \exp(-j\omega t) \quad (1)$$

复数域信号在时域上表现为:

$$U_g = \text{real}[\dot{U}_g(\mathbf{r}_g, t)] = |V\chi_a| H(\mathbf{r}_g) \sin(\omega t + \angle\chi_a + \pi/2) \quad (2)$$

式中: \mathbf{r}_g 为颗粒所在的位置,它取决于颗粒轨迹,是关于时间的函数; j 是虚数单位; V 是等效球形颗粒的体积; χ_a 为复数,是颗粒在交变磁场中的磁化因子,与金属颗粒的属性有关; ω 是激励电流的角频率。 $H(\mathbf{r}_g)$ 与传感器的

各个线圈的几何参数、激励电流以及颗粒所在的位置 r_g 有关。当传感器形式以及激励条件不变时,由式(2)可知,复数域信号的幅值与 $\sqrt{\chi_a}$ 的模量成正比,相位与 χ_a 的相位有关。因此,可以通过传感器输出的正弦信号的相位和幅值的检测,进而识别金属颗粒的材质和粒径。

1.2 双锁相放大电路原理

金属颗粒尺寸非常小,因此由颗粒引起的幅值和相位不断变化的信号 U_g 为微弱的 μV 级信号。根据式(1)待测信号为幅值和相位都在变化的正弦信号:

$$U_g = A_g(t) \sin[2\pi f_g t + \varphi_g(t)] \quad (3)$$

其中, $A_g(t)$ 为颗粒信号的幅值; f_g 为激励电流的频率; $\varphi_g(t)$ 为颗粒信号的相位。

传感器在工作中受到多种噪音影响,包括机械振动及系统固有噪音等。这就导致任何有源的预处理单元都可能会引入噪音 $n(t)$, 从而淹没颗粒信号。噪音与颗粒信号叠加下的形式为:

$$U_p = A_g(t) \sin[2\pi f_g t + \varphi_g(t)] + n(t) \quad (4)$$

双锁相放大电路原理如图2所示。前置放大电路和带通滤波电路对叠加信号 U_p 进行交流放大和降低噪音的预处理。通过调节电位器阻值,前置放大电路在增益为 $G_1 = 200 \sim 200\,000 \text{ V/V}$ 范围内将 U_p 放大到足以推动相敏检波模块工作的电压范围。中心频率设置为 40 kHz 的带通滤波电路可以滤除掉叠加信号中大部分高频及低频成分。 G_2 为带通滤波电路对噪音的衰减倍数。带通滤波电路的输出 U_s 为:

$$U_s = G_1 A_g(t) \sin[2\pi f_g t + \varphi_g(t)] + G_1 G_2 n(t) \quad (5)$$

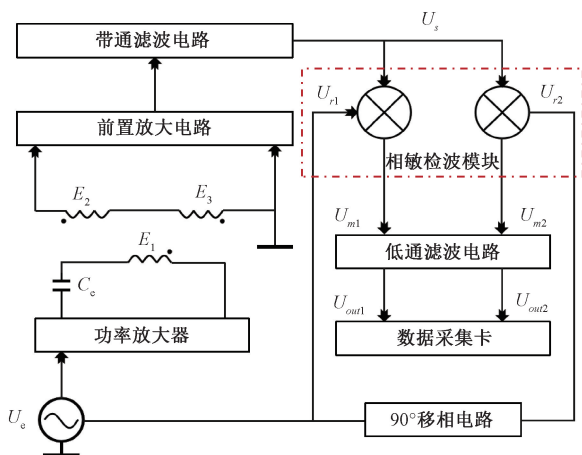


图2 双锁相放大电路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of dual phase lock-in amplifier circuit

激励电压 U_e 经过移相电路为相敏检波模块提供频率为 f_g 且相位差为 90° 的正弦参考信号 U_{r1} 和 U_{r2} , 当参考信号的幅值为 A_r 和相位为 φ_r 时,两个参考信号分别为:

$$U_{r1} = A_r \sin(2\pi f_g t + \varphi_r) \quad (6)$$

$$U_{r2} = A_r \cos(2\pi f_g t + \varphi_r) \quad (7)$$

相敏检波模块是电路的核心部分。其原理是利用乘法器对输入进行调制,将调制信号 U_s 与参考信号 U_r 相乘,把 U_s 的频谱搬移到频率为 0 和二倍原频率处的位置。但整体信号形状没有发生改变,乘积产生的两个分量的幅值取决于 U_s 和 U_r 原始电压的大小。这样有利于放大信号,抑制与调制信号不同频率的噪音,相当于脱离一部分与之频率接近的噪音。以 1 通道为例,相敏检波模块的输出信号 U_{m1} 为:

$$U_{m1} = U_s U_{r1} \quad (8)$$

将式(6)和(7)代入式(8)得:

$$U_{m1} = (1/2) G_1 A_g(t) A_r \{ \cos[\varphi_g(t) - \varphi_r] + \cos[2\omega t + \varphi_g(t) + \varphi_r] \} + G_2 n(t) A_r \sin[\varphi_g(t) + \varphi_r] \quad (9)$$

式(9)中第1项为直流成分,第2项为和频分量且是高频信号,第3项为噪音与参考信号的乘积。低通滤波电路截止频率设置很低,可以过滤第2项高频信号和第3项交流信号。最终电路输出直流信号 U_{out1} 和 U_{out2} 连接至数据采集卡观察,两个信号分别为

$$U_{out1} = (1/2) G_1 A_g(t) A_r \cos[\varphi_g(t) - \varphi_r] \quad (10)$$

$$U_{out2} = (1/2) G_1 A_g(t) A_r \sin[\varphi_g(t) - \varphi_r] \quad (11)$$

式(10)和(11)联立计算可得 U_g 幅值和相位分别为:

$$A_g(t) = \frac{2\sqrt{U_{out1}^2 + U_{out2}^2}}{G_1 A_r} \quad (12)$$

$$\varphi_g(t) = \varphi_r - \arctan\left(\frac{U_{out2}}{U_{out1}}\right) \quad (13)$$

由于 φ_r 为可调节的参考相位, G_1 为设定的增益,根据式(2)、(12)和(13),可构建以颗粒信号 U_{out1} 为实轴,以 U_{out2} 为虚轴的复平面图。

2 金属颗粒材质的识别和粒径的估计

利用复数域信号对颗粒材质识别和粒径估计时首先系统标定然后对颗粒进行测量。在系统标定中,先大量的测量多种已知尺寸和材质的颗粒;然后根据该关系建立信号与颗粒材质的模糊隶属度关系。在颗粒测量时,使用标定好的系统对颗粒信号进行分析,首先根据相位判断其材质,再根据其材质和信号的幅值估测颗粒的粒径。

2.1 复平面中金属颗粒材质的识别模型

公式(13)表明,复数域信号的相位 $\varphi_g(t)$ 只与参考信号相位 φ_r 和 $\arctan(U_{out1}/U_{out2})$ 有关,其中 φ_r 为输入的已知量。故决定相位的变量只有 $\arctan(U_{out1}/U_{out2})$, 此变量可表示为复平面中某一点和原点的连线与 X 轴正半轴的夹角 φ 。未知颗粒直流值对应的复平面坐标 (U_{out1}, U_{out2}) , 称为“颗粒坐标”,过该坐标点与原点的直线称为“颗粒直线”。颗粒直线与 X 轴正半轴的夹角记为

φ_p , 称其为“颗粒角度”。实验表明, 当激励电流的频率较低且金属颗粒体积较小时, 相同材质的颗粒信号在复平面内分布近似围绕着一一条直线, 材质不同则直线斜率不同。可通过最小二乘法拟合材质直线 $y = k_i x$ 与 X 轴正半轴的夹角记为 φ_{si} (i 表示第 i 种颗粒的材质)。

当颗粒经过传感器通道时, 可根据式 (13) 通过电路两个通道的输出值 U_{out1} 和 U_{out2} 计算出颗粒角度 φ_p 。若 $\varphi_p = \varphi_{si}$, 即可识别出此颗粒属于第 i 种材质。

2.2 基于模糊识别的金属颗粒材质识别方法

小粒径的金属颗粒在传感器交变磁场中产生的是微弱的信号。信号本身非常容易受到各种叠加噪音和自身误差的干扰, 导致电路输出的直流值 U_{out1} 、 U_{out2} 的结果出现偏差。故大多数未知颗粒坐标并不能精确地落在某条材质直线上, 即未知颗粒的颗粒直线与所属材质直线存在角度差值。

此时, 若根据颗粒角度识别颗粒材质, 往往只能使用“此颗粒可能属于此材质”等模糊性语言描述。为将模糊概念量化, 方便准确地通过颗粒的直流脉冲值识别此颗粒所属的材质, 建立了一个基于复平面的模糊数学方法来描述未知颗粒属于某材质的“真实程度”。

若对于论域复平面 U 中的任一元素颗粒坐标点 x , 都有一个确定的数 $G(x) \in [0, 1]$ 与之对应, 则称 G 为论域 U 上的模糊集合, 其中 $G = \{\text{铁颗粒}, 403 \text{ 钢颗粒}, \text{黄铜颗粒}, \text{铝颗粒}, \text{紫铜颗粒}\}$ 。 $G(x)$ 称为此颗粒对模糊集合中元素的隶属度。当 x 在 U 中变动时, $G(x)$ 就是一个函数, 称为 G 的隶属度函数^[24]。通过隶属度函数将颗粒角度 φ_p 转化为 $0 \sim 1$ 的隶属度值, 由此便将未知颗粒属于模糊集合 G 中材质 i 的可信度等级量化为具体数值。选取评价集合 = {基本确定, 很可能, 有可能, 几乎不可能}。建立在实验数 M 据的结论上, 我们选择隶属度 0.1 、 0.5 、 0.8 这 3 个值作为划分可信度等级的标准值。对于模糊集合 G 中任一元素, 每个颗粒角度值对应一个确定的隶属度值大小。依据表 1 识别此金属颗粒属于该种材质的可信度等级。

表 1 可信度等级评价表

Table 1 Credibility grade evaluation table

隶属度	0~0.1	0.1~0.5	0.5~0.8	0.8~1.0
评价等级	几乎不可能	有可能	很可能	基本确定

通过模糊识别, 解决了噪音干扰下金属颗粒属于某种材质的概率难以量化的问题, 从而更客观地对未知颗粒材质进行有效的识别。基于隶属度函数的模糊识别根据隶属度函数值对应的评价集合 M 中某一评价标准, 对论域 U 中任一元素 x 对应的金属颗粒的材质进行评价和识别。

2.3 复平面中金属颗粒粒径大小的估计方法

式 (2) 表明, 当 $H(r_p)$ 不变且颗粒材质相同时, 金属颗粒信号的幅值与粒径成正相关。而式 (11) 表明, 当参考信号幅值 A_r 和电路增益 G_1 为常数时, 金属颗粒信号的幅值表示为复平面中颗粒坐标到原点的距离 $d = \sqrt{U_{out1}^2 + U_{out2}^2}$ 。故当金属颗粒的材质已知且实验条件不变时, 粒径越大, 颗粒坐标到原点的距离越远。

采用插值的方式测量颗粒的尺寸, 当颗粒信号距离原点的距离 d 落在实验颗粒之间时, 即 $d_1 \leq d \leq d_2$, 则 $r_1 \leq r \leq r_2$, 其中, r 为待测颗粒的粒径。 r_1 和 r_2 分别为两个与未知颗粒材质相同, 大小不同的实验颗粒的粒径, d_1 和 d_2 分别为这两个实验颗粒坐标到原点的距离。根据线性插值方法^[26], 未知颗粒粒径 r 表示为:

$$r = \frac{d - d_1}{d_2 - d_1} r_2 + \frac{d - d_2}{d_1 - d_2} r_1 = F(U_{out1}, U_{out2}) \quad (14)$$

考虑测量误差存在, U_{out1} 的不确定度记为 $\sigma_{U_{out1}}$, U_{out2} 的不确定度记为 $\sigma_{U_{out2}}$ 。则根据间接测量误差分析方法, 未知颗粒粒径 r 的标准误差 σ_r 可以表示为^[27]:

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_{U_{out1}}^2 (\partial F / \partial U_{out1})^2 + \sigma_{U_{out2}}^2 (\partial F / \partial U_{out2})^2} \quad (15)$$

故颗粒的粒径估计值可以表示为:

$$r' = r \pm \sigma_r \quad (16)$$

3 实验及讨论分析

3.1 实验装置

搭建了整个颗粒检测系统的实验平台, 实验仪器包括信号发生器 (Anitek ATG3090)、功率放大器 (Anitek AFG3022)、电流探头 (Cybertek CP8030B)、数据采集卡 (研华 PCI-1714U) 以及本文所使用的三线圈电感式传感器和双锁相放大电路。

在线圈参数的选取方面, 若激励线圈匝数过多, 则激励线圈的阻抗提高, 需要更高的功率进行磁场驱动; 匝数过少, 则产生的激励磁场强度较小, 不利于磁化颗粒产生颗粒信号。若感应线圈匝数过多, 则其阻抗太大, 需要对检测电路进行额外的阻抗匹配; 匝数过少, 则颗粒信号较小, 不利于小颗粒的检测。

在本文的电感式传感器中, 激励线圈采用利兹线绕制而成, 感应线圈采用铜制漆包线绕制而成。激励线圈的匝数为 800 匝, 内径为 280 mm, 轴向长度为 400 mm。两个感应线圈具有相反的绕线规格和完全相同的尺寸, 匝数均为 142 匝, 内径为 24 mm, 轴向长度为 45 mm。油液管道的内径为 7 mm。实验平台的示意图如图 3 所示。

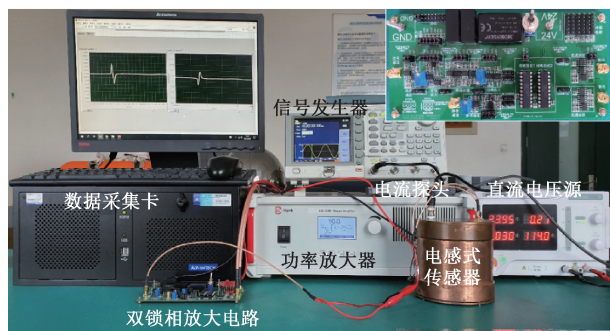


图3 实验平台

Fig. 3 Experimental platform

3.2 金属颗粒复数域信号的检测实验

三线圈传感器置于金属罩内以屏蔽外界电磁干扰。信号发生器输出 41.3 kHz、1 V 的正弦电压作为激励电压。功率放大器的参数设定为 10 倍。通过电流探头检测激励电流大小,选择串联 1 500 pF 的瓷片电容以实现输入端的谐振阻抗接近于纯阻性,此时传感器可以输入最大激励电流从而使励磁线圈产生最强交变磁场。交变磁场中感应线圈产生的信号通过 SMA 接头输入双锁相

放大电路。设置总电压增益约为 10 000 V/V。

实验选取 5 种材质的球形颗粒作为实验颗粒,颗粒粒径如表 2 所示。

表 2 5 种实验颗粒的粒径

Table 2 Particle size of five experiments

颗粒材质	颗粒粒径/ μm
铁	70, 110
403 钢	800, 1 000, 1 300, 1 500
黄铜	400, 800
铝	180, 350
紫铜	120, 150, 200

图 4(a) 表明,当没有颗粒经过传感器通道时,此系统的背景噪音约为 0.5 mV。故脉冲信号值小于 0.5 mV 的颗粒超出了系统的检测精度范围。图 4(b)~(e) 分别为 200 μm 的紫铜颗粒和 70 μm 的铁颗粒通过传感器通道时,数据采集卡显示的两通道的脉冲信号。非铁磁性颗粒的两个通道的脉冲方向相同,而铁磁性颗粒的两个通道的脉冲方向一上一下。

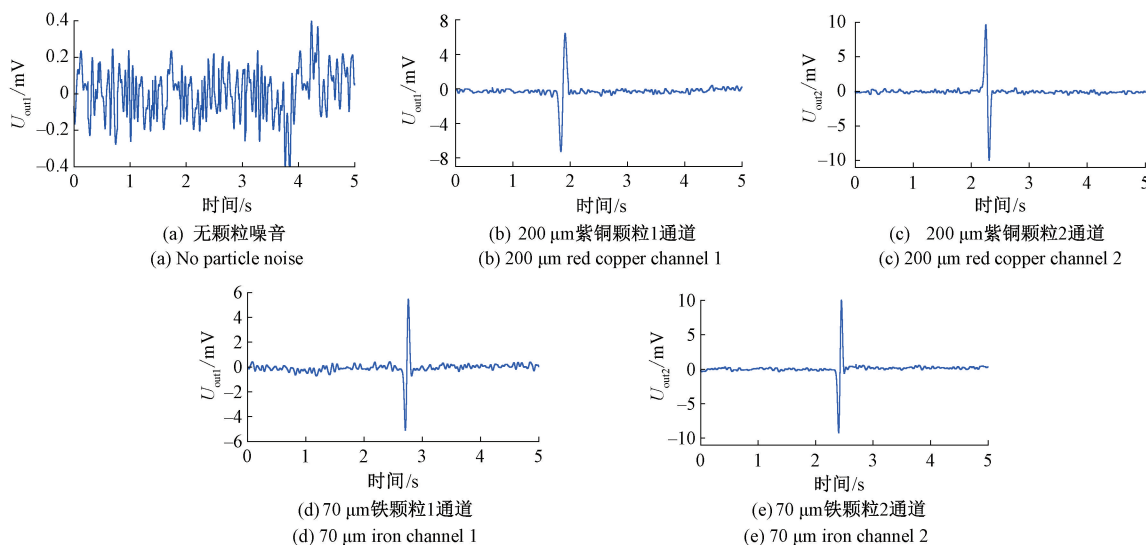


图4 有及无颗粒通过时两个通道的数据采集

Fig. 4 Data acquisition of two channels with or without particles passing through

金属颗粒对应的电路输出 U_{out1} 、 U_{out2} 的峰峰值大小的记为 U_{o1} 、 U_{o2} , 称为颗粒脉冲值。实际油液中的金属颗粒材质有多种,这导致粒径和材质无法从一维信号得到,如同一幅值信号可由导电率大且粒径小或导电率小但粒径大的颗粒形成。于是根据实验数据建立如图 5 所示的复平面图。由于系统背景噪音和本身测量误差的存在,同一颗粒的多次测量存在一定的误差。拟合相同材质颗粒坐标的结果表明,当激励电流的频率较低且颗粒粒径

较小时,相同材质不同粒径的颗粒在复平面中的分布近似一条直线,且直线必定经过原点。通过最小二乘法,计算出 5 种材质的金属颗粒坐标过原点直线的斜率 K 及其与 X 轴正半轴的夹角,标定结果如表 3 所示。

3.3 高斯型模糊隶属度函数的建立

隶属度函数是模糊识别的基础,是否正确地构造隶属度函数是模糊识别结果准确性的关键之一^[28]。目前构造隶属度函数的主要方法包括:模糊统计法、二元对

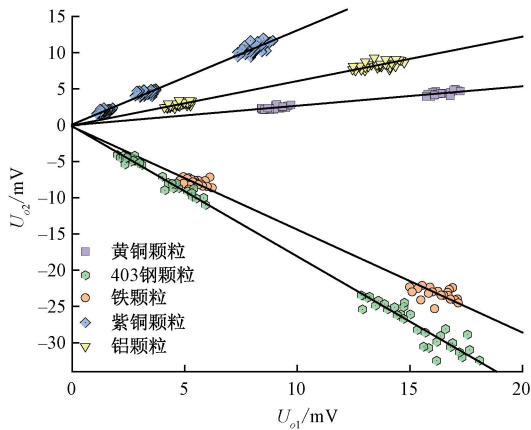


图 5 5 种颗粒脉冲值的复平面图

Fig. 5 Complex plane diagram of pulse values of five kinds of particles

表 3 5 种颗粒拟合直线的斜率及角度

Table 3 Slope and angle of fitting line for five kinds of particles

颗粒材质	铁	403 钢	黄铜	铝	紫铜
斜率 K	-1.438 3	-1.836 4	0.274 1	0.593 5	1.332 8
角度/ $^\circ$	-55.79	-61.43	15.33	30.69	53.12

比排序法、专家调查法等。由于有大量的实验数据支持, 本文根据模糊统计法选择最理想的隶属度函数。模糊统计法可以直观反映出隶属频率和隶属程度的大小, 从而可以确定隶属度函数的整体结构。以下为模糊统计法中隶属度函数标定过程的 4 个步骤^[29]:

步骤 1: 确定论域 U 为:

$$U = \sum_{n=0}^m \varphi_{pn} \quad (17)$$

其中, m 表示第 m 个坐标点。

步骤 2: 该步骤示意图如图 6 所示。定义一个以原点为圆心的半径足够长的扇形区域 A^* , 且其圆心角为 1° 。该区域绕原点作间隔 1° 的逆时针旋转运动, 且其运动起点为 Y 轴负半轴。则区域 A^* 在运动过程中所在位置包括 $(-90^\circ \sim -89^\circ), (-89^\circ \sim -88^\circ), \dots, (89^\circ \sim 90^\circ)$ 。

表 4 不同位置的区间 A^* 内 u_n 的个数

Table 4 Number of u_n in different positions of interval A^*

区间 A^* 的位置	46~47	47~48	48~49	49~50	50~51	51~52	52~53	53~54	54~55	55~56	56~57	57~58	58~59	59~60
A^* 中 u_n 个数	1	1	3	3	7	14	18	19	16	8	4	3	2	1

步骤 4: 在使用模糊统计法获得隶属频率函数的大致图线形状后, 根据图线形状选取恰当的函数表达式。常用的函数表达式有矩形分布, 梯形分布, 正态分布等几种常见规律分布。依据图 7 的隶属频率函数图线形状,

U 中的每一个元素 φ_{pn} 对应复平面中的一个元素点 u_n 。任取一元素点 u_n (元素 u_n 为在运动区域 A^* 内的坐标点), 则 A^* 的位置一旦确定, 区域 A^* 内包含的元素 u_n 的个数也相应确定。

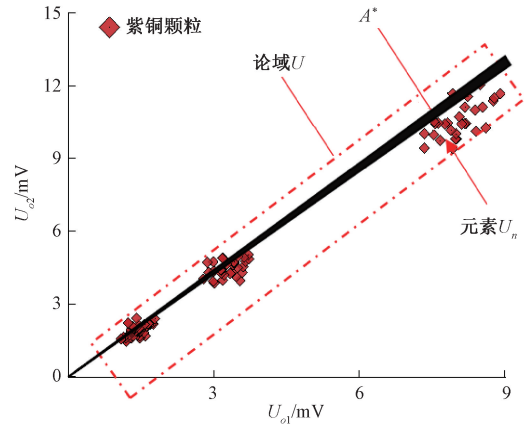


图 6 步骤 2 对应的流程图

Fig. 6 Flow chart of step 2

步骤 3: 每次实验, 要对 u_n 属于 A^* 的程度做一个确切的判断, 于是我们引入隶属频率的概念, 在 n 次实验 (一个坐标点作为一次实验) 中

$$u_n \text{ 对 } A^* \text{ 的隶属频率} = \frac{u_n \in A^* \text{ 的个数}}{\text{实验总次数 } n} \quad (18)$$

u_n 对 A^* 的隶属频率随着 n 的增大而趋于稳定。当 n 足够大时, u_n 对 A^* 的隶属频率表征为隶属度值大小。同时, A^* 联系着定义为“隶属程度”这一概念的评价集合 M , A^* 的位置一旦确定, 则区域 A^* 内包含的元素 u_n 的个数相应确定, u_n 对 A^* 的隶属频率即是确定的, 隶属度也确定^[28]。根据隶属度值确定 M 中的一个评价等级, 该等级对模糊集合 $G = \{\text{铁颗粒}, 403 \text{ 钢颗粒}, \text{黄铜颗粒}, \text{铝颗粒}, \text{紫铜颗粒}\}$ 便有确定的划分。

表 4 列出 100 次紫铜颗粒实验中 u_n 在区间 A^* 内的个数, 图 7 为不同区间 A^* 中 u_n 个数的柱状图。根据概率密度函数得出隶属频率的图线, 从而基于隶属频率的图线计算研究隶属度函数的大致形状^[29]。

紫铜颗粒的隶属度函数满足正态分布。因此, 该隶属度函数符合高斯型隶属度函数:

$$G(x) = e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^2} \quad (19)$$

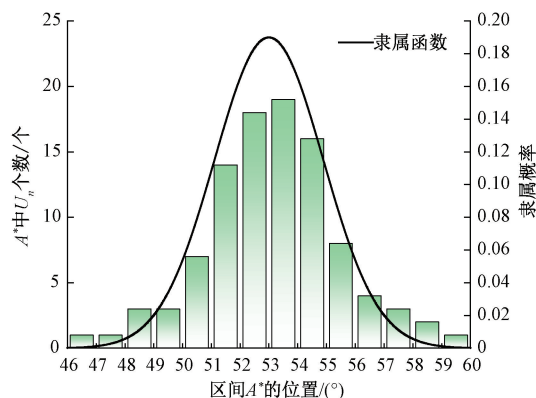


图7 隶属频率的柱状图

Fig. 7 Histogram of membership frequency

其中 a 为表 2 中 5 种颗粒直线的角度值 φ_{s_i} 。 b 根据实验数据计算取值。故紫铜颗粒的隶属度函数为:

$$G_{rc}(x) = e^{-\left(\frac{x-53.12}{4.132}\right)^2} \quad (-90 \leq x \leq 90) \quad (20)$$

同上述步骤对铝颗粒、黄铜颗粒、铁颗粒、403 钢颗粒进行相同的分析,其隶属度函数分别为:

$$\begin{cases} G_{Al}(x) = e^{-\left(\frac{x-30.69}{3.158}\right)^2} \\ G_{Br}(x) = e^{-\left(\frac{x-15.33}{2.019}\right)^2} \\ G_{Fe}(x) = e^{-\left(\frac{x+55.19}{3.427}\right)^2} \\ G_{St}(x) = e^{-\left(\frac{x+61.43}{4.535}\right)^2} \end{cases} \quad (-90 \leq x \leq 90) \quad (21)$$

图 8 为 5 种颗粒的隶属度函数图。角度对于某一材质对应唯一隶属度。于是当未知颗粒角度确定后,代入式(20)或(21)中即可求出其对于 5 种材质的隶属度。根据表 1 作出未知颗粒属于某种材质可信度的评价,从而基于隶属度函数实现未知颗粒材质的识别。

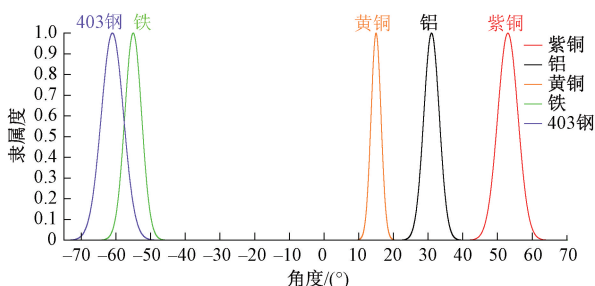


图8 5种颗粒的隶属度函数图

Fig. 8 Membership function of five kinds of particles

通常情况下,颗粒角度对于 5 种材质均存在不同大小的隶属度值。如未知颗粒角度 $x = -55^\circ$ 时,此颗粒对于铁和 403 钢均有较高的隶属程度。然而,由于本文实

中验颗粒种类有限,对于某些颗粒角度,无法识别其颗粒材质。如未知颗粒角度 $x = -20^\circ$ 时,此颗粒对于 5 种材质均有较低隶属程度,故无法识别此金属颗粒的材质。

3.4 金属颗粒粒径大小的确定

图 5 可以看出,由于颗粒坐标存在误差,同一颗粒在多次实验出现多个测量值。故我们取复平面坐标系中误差范围内的所有坐标点的重心点 (\bar{x}, \bar{y}) 作为此粒径下颗粒坐标到原点的距离 d 。前文已给出本实验选用的 5 种金属颗粒的粒径大小,表 5 为不同材质不同粒径的颗粒对应的 d 。

表5 不同材质不同粒径 r 的颗粒对应的 d Table 5 d of metal particles with different materials and sizes r

颗粒材质	颗粒粒径 $r/\mu\text{m}$	颗粒坐标与原点的距离 d
铁	70	9.59
	110	28.38
403 钢	800	5.44
	1 000	10.18
	1 400	28.65
黄铜	1 600	34.53
	400	9.36
铝	800	16.99
	180	5.53
紫铜	350	15.97
	120	2.39
	150	5.55
	200	13.28

如果未知颗粒的材质的模糊识别结果为铁,且未知颗粒坐标到原点的距离 $9.59 \leq d \leq 28.38$,则未知颗粒的粒径 r 的大小区间确定为 $70 \mu\text{m} \leq r \leq 110 \mu\text{m}$ 。根据式(14)、(15)和(16)可计算出未知颗粒的粒径的估计值 r' 。

3.5 实例分析

复平面中基于模糊隶属度函数的金属颗粒材质识别和粒径大小估计方法如下:

步骤 1:金属颗粒流过传感器通道,在三线圈的交流磁场中产生正弦信号。经双锁相放大电路的处理,此复数域信号的幅值与相位被表征为电路输出的两个脉冲信号的峰峰值 U_{o1} 、 U_{o2} 。

步骤 2:在复平面坐标系中确定未知颗粒坐标 $P(U_{o1}, U_{o2})$,计算过 P 与原点的直线与 X 轴正半轴的夹角 φ_p 。将 φ_p 代入上述隶属度函数,依次求得对于各种材质的隶属度值。

步骤 3:根据隶属度值大小对应的表 1 中可信度等级,作出此颗粒属于某种材质的可信度评价,模糊识别为“基本确定,很可能,有可能,几乎不可能”四种结果。

步骤 4:当识别出未知颗粒的材质后,计算 P 到原点的距离 d 。根据表 5 中不同粒径下与原点的距离。对所属可能性较高的材质,估计未知颗粒属于这种材质时粒径 r 大小的估计值 r' 。

为验证基于模糊隶属度函数的颗粒材质识别方法和金属颗粒粒径大小估计的准确性,选取紫铜颗粒和铁颗粒作为试验颗粒进行验证。经过显微镜测定,紫铜颗粒粒径为 $180\ \mu\text{m}$,铁颗粒粒径为 $90\ \mu\text{m}$ 。使用本文提出方法对颗粒进行测量及分析的结果如表 6 所示。

表 6 未知颗粒的实例结果

Table 6 Example results of unknown particles

试验颗粒	U_{o1} 和 U_{o2}	颗粒材质	识别评价	粒径估值/ μm
试验 颗粒 1	6.323	403 钢	几乎不可能	-
		铁	几乎不可能	-
		黄铜	几乎不可能	-
		铝	几乎不可能	-
		紫铜	很可能	180 ± 3
试验 颗粒 2	10.193	403 钢	有可能	$1\ 184\pm 11$
		铁	基本确定	89 ± 1
		黄铜	几乎不可能	-
		铝	几乎不可能	-
		紫铜	几乎不可能	-

如表 6 中结果所示,我们得到以下结论:试验颗粒 1 很可能是粒径为 $180\ \mu\text{m}$ 左右的紫铜颗粒,几乎不可能是铝颗粒或其他颗粒。试验颗粒 2 基本确定是粒径为 $89\ \mu\text{m}$ 左右的铁颗粒,有可能是粒径为 $1\ 184\ \mu\text{m}$ 左右的 403 钢颗粒,几乎不可能是其他颗粒。该结论与实际颗粒属性基本相同,粒径估计误差小于 2%。证明该方法对于多种未知颗粒的材质识别和粒径估计的有效性。

4 结 论

金属颗粒在交变磁场中产生的复数域信号与其材质和粒径有密不可分的关系。本文基于电感式传感器及其双锁相放大电路展开研究。提出了根据金属颗粒的复数域信号逆向实现识别金属颗粒材质和粒径的理论方法。引入基于隶属度函数模糊数学来解决颗粒所属材质识别的问题。构建检测系统的实验平台,根据实验数据建立了铁、403 钢、黄铜、铝以及紫铜 5 种颗粒

的隶属度函数,计算了 5 种颗粒粒径大小的边界值,并给出了粒径估计值的计算方法。选取了两种已知材质和粒径的颗粒进行实验,验证了该方法的有效性。更多材质的未知颗粒,可以经过标准颗粒标定后,建立相应的隶属度函数,从而实现基于隶属度函数的颗粒材质识别。本文提出的方法是在较小粒径和较低激励频率下时展开研究,此时同种颗粒信号在复平面内的分布规律近似为直线。但该方法同样适用于分布规律为曲线的情况,此时以信号坐标到曲线的距离作为隶属度函数的自变量重新建立隶属度函数,这将作为下一步工作的重点研究。

本文为油液中多种金属颗粒存在时,颗粒的材质识别和粒径估计提供了一种可行性方案。这拓展了电感式传感器的检测范围,提高了传感器对于金属颗粒的检测精度。相比现有油液在线检测领域的研究,本文解决在线检测结果单一,无法为故障定位的问题。这对于实际情况下机械设备的实时状态监控、故障诊断以及故障预测具有重要意义,为油液系统在冶金工业、工程机械、汽车工业、农业机械及航空航天等多个领域的发展提供重要依据。

参考文献

- [1] 杨正强,杜随更. 现代机械设备液压系统状态评估及故障诊断综述[J]. 西安航空学院学报, 2015, 33(5): 47-53.
YANG ZH Q, DU S G. Review of state evaluation and fault diagnosis technology in hydraulic system of modern mechanical equipment[J]. Journal of Xi'an Aeronautical University, 2015, 33(5): 47-53.
- [2] 张洪朋,张兴明,郭力,等. 微流体油液检测芯片设计[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(4): 762-767.
ZHANG H P, ZHANG X M, GUO L, et al. Design of the oil detection microfluidic chip[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(4): 762-767.
- [3] 张兴明. 时谐磁场金属颗粒磁化特性及微流体油液检测机理研究[D]. 大连:大连海事大学, 2014.
ZHANG X M. Study on metal particle magnetization in harmonic field and mechanism of microfluidic oil detection[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014.
- [4] CAO W, DONG G N, XIE Y B, et al. Prediction of wear trend of engines via on-line wear debris monitoring[J]. Tribology International, 2018, 120: 510-519.

- [5] 张洪朋,白晨朝,孙广涛,等. 高通量微型多参数油液污染物检测传感器[J]. 光学精密工程, 2018, 26(9): 2237-2245.
ZHANG H P, BAI CH ZH, SUN G T, et al. High-throughput miniature multi-parameter oil contamination detection sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(9): 2237-2245.
- [6] 孙广涛,张洪朋,顾长智,等. 高精度微流体多参数液压油检测芯片设计[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 59-66.
SUN G T, ZHANG H P, GU CH ZH, et al. Highprecision microfluidic multi-parameter hydraulic oil detection chip design[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 59-66.
- [7] HONG W, CAI W J, WANG S P, et al. Mechanical wear debris feature, detection, and diagnosis: A review[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(5): 867-882.
- [8] VASQUEZ S, KINNAERT M, PINTELON R. Active fault diagnosis on a hydraulic pitch system based on frequency-domain identification[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27(2): 663-678.
- [9] FAN B, LI B, FENG S, et al. Modeling and experimental investigations on the relationship between wear debris concentration and wear rate in lubrication systems [J]. Tribology International, 2017, 109: 114-123.
- [10] 徐超,张培林,任国全,等. 新型超声磨粒传感器输出特性研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(1): 90-95.
XU CH, ZHANG P L, REN G Q, et al. Output characteristic of a novel online ultrasonic wear debris sensor[J]. Tribology, 2015, 35(1): 90-95.
- [11] MABE J, ZUBIA J, GORRITXATEGI E. Photonic low cost micro-sensor for in-line wear particle detection in flowing lube oils[J]. Sensors, 2017, 17(3): 586.
- [12] HAN Z B, WANG Y S, QING X L. Characteristics study of in-situ capacitive sensor for monitoring lubrication oil debris[J]. Sensors, 2017, 17(12): 2851.
- [13] REN Y J, ZHAO G F, QIAN M, et al. A highly sensitive triple-coil inductive debris sensor based on an effective unbalance compensation circuit [J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30 (1): 015108.
- [14] 吴瑜,张洪朋,王满,等. 金属颗粒形态对电感式传感器输出特性影响的研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10): 2283-2289.
WU Y, ZHANG H P, WANG M, et al. Research on the influence of metal particle morphology on the output characteristic of micro solenoid inductive sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(10): 2283-2289.
- [15] DU L, ZHU X L, HAN Y, et al. High throughput wear debris detection in lubricants using a resonance frequency division multiplexed sensor [J]. Tribology Letters, 2013, 51(3): 453-460.
- [16] HONG W, LI T Y, WANG S P, et al. A general framework for aliasing corrections of inductive oil debris detection based on artificial neural networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(18): 10724-10732.
- [17] XUE B S, ZHANG X M, XU Y Z, et al. Sparse signal recovery based on adaptive algorithms for debris detector[J]. AIP Advances, 2021, 11(6): 065131.
- [18] 吴超,郑长松,马彪,等. 电感式磨粒传感器中铁磁质磨粒特性仿真研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(12): 2774-2780.
WU CH, ZHENG CH S, MA B, et al. Simulation study on the characteristic of ferromagnetic wear debris in inductive wear debris sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(12): 2774-2780.
- [19] REN Y J, ZHAO G F, QIAN M, et al. A highly sensitive triple-coil inductive debris sensor based on an effective unbalance compensation circuit [J]. Measurement Science&Technology, 2019, 30 (1): 015108-015115.
- [20] ZHU X L, ZHONG C H, ZHE J. A high sensitivity wear debris sensor using ferrite cores for online oil condition monitoring [J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(7): 075102.
- [21] ZENG L, YU Z, HANG H, et al. A high sensitive multi-parameter micro sensor for the detection of multicontamination in hydraulic oil [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 282: 197-205.
- [22] REN Y J, LI W, ZHAO G F, et al. Inductive debris sensor using one energizing coil with multiple sensing coils for sensitivity improvement and high throughput [J]. Tribology International, 2018, 128: 96-103.
- [23] ZHANG X M, ZENG L, ZHANG H P, et al. Magnetization model and detection mechanism of a

- microparticle in a harmonic magnetic field [J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(4): 1882-1892.
- [24] 刘小艳,刘欣宇,王梅. 隶属函数的确定及应用[J]. 电脑知识与技术,2010, 6(31): 8831-8832.
LIU X Y, LIU X Y, WANG M. The Determination of membership function and use [J]. Computer Knowledge and Technology, 2010, 6(31): 8831-8832.
- [25] 张兴明,张洪朋,孙玉清,等. 微流体芯片对油液金属颗粒的区分检测[J]. 大连海事大学学报, 2014, 40(3): 103-107.
ZHANG X M, ZHANG H P, SUN Y Q, et al. Distinction detection for metal particles in oil by using microfluidic chip [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2014, 40(3): 103-107.
- [26] 陈良,高成敏. 快速离散化双线性插值算法[J]. 计算机工程与设计, 2007(15): 3787-3790.
CHEN L, GAO CH M. Fast discrete bilinear interpolation algorithm [J]. Computer Engineering and Design, 2007(15): 3787-3790.
- [27] 潘光斌,陈光. 间接测量系统模型的不确定度分析[J]. 计量学报, 2006(4): 397-399.
PAN G B, CHEN G. Uncertainty analysis of indirect measuring system models [J]. Acta Metrologica Sinica, 2006(4): 397-399.
- [28] 王季方,卢正鼎. 模糊控制中隶属度函数的确定方法[J]. 河南科学, 2000, 18(4): 348-351.
WANG J F, LU ZH D. The determine method of membership function in fuzzy control [J]. Henan Science, 2000, 18(4): 348-351.
- [29] 马万元,耿秀丽. 基于概率统计的模糊隶属函数计算研究[J]. 数学理论与应用, 2016, 36(3): 93-100.
MA W Y, GENG X L. Research on fuzzy membership function determination based on probability statistics [J]. Mathematical Theory and Application, 2016, 36(3): 93-100.

作者简介



李业辉,现为哈尔滨工业大学(威海)信息科学与工程学院本科生。主要研究方向为前端模拟电路和信号处理理论。

E-mail: liyehui2000@163.com

Li Yehui is an undergraduate in the School of Information Science and Engineering at Harbin Institute of Technology (Weihai). His main research interests include front-end analog circuit and signal processing theory.



张兴明(通信作者),分别在 2008 年、2010 年和 2014 年于大连海事大学获得学士学位、硕士学位和博士学位,现为哈尔滨工业大学(威海)海洋工程学院副教授、硕士生导师,主要研究方向为磁性颗粒成像、基于

MPI 的纳米机器人控制和微粒传感器。

E-mail: z_xm01@163.com

Zhang Xingming (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Dalian Maritime University in 2008, 2010 and 2014, respectively. He is currently an associate professor and a master advisor in the School of Ocean Engineering at Harbin Institute of Technology (Weihai). His main research interests include magnetic particle imaging, MPI-based nanorobot control and microparticle sensors.