DOI: 10.13382/j.jemi.2017.04.016

# 电磁相关法测量传感器励磁线圈轴向长度优化设计*

王月明　周　上　张瑶瑶
（内蒙古科技大学　信息工程学院　包头　014010）

**摘　要**:小管径电磁相关法流量测量传感器在石油生产测井领域有着广泛的应用前景,其中,励磁线圈的参数设计是实现该传感器关键技术问题之一。通过对传感器内部测量空间磁场进行理论与传感器测量原理分析,提出了新的磁场评价指标,并在不同流速、不同励磁线圈轴向长度的情况下进行数值仿真,应用新的磁场评价指标与传统的磁场评价指标对比分析,获得了电磁相关法流量测量传感器的励磁线圈轴向长度设计参数,并搭建实验平台进行初步实验验证,为该类传感器励磁线圈的优化设计提供了方案,加快该类测量仪器的开发进程。

**关键词**: 电磁相关法流量测量;励磁线圈;传感器设计
**中图分类号**: TN911.23;TH814$^{+}$.93　　文献标识码: A　　**国家标准学科分类代码**: 460.4020

# Optimization design of excitation coil axial length of flow measurement sensor based on electromagnetic correlation method

Wang Yueming　Zhou Shang　Zhang Yaoyao
(School of information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract**: The flow measurement sensor based on small diameter electromagnetic correlation method has a broad application prospect in the field of petroleum production logging, and the design of the axial length of the excitation coil is one of the key technologies to made the sensor. By analyzing the magnetic theoretic model of the sensor's excitation coil in measuring area and electromagnetic flowmeter measurement principle, a new magnetic field analysis index is proposed, and numerical simulation with different velocity and different excitation coil axial length is carried out. The axial length of excitation coil is analyzed and determined by comparative analysis new magnetic field analysis index and traditional magnetic field evaluation indexes. The experimental platform is established to carry out preliminary experimental verification, which provides a solution for the optimization design of this kind of sensor excitation coil. At the same time, it speeds up the development process of flow measuring instruments based on electromagnetic correlation method.

**Keywords**: correlation electromagnetic flow measurement; excitation coil; sensor design

## 1　引　　言

近年来,随着科学技术的向前发展,电磁法流量测量相关理论与应用范围不断扩大[1-5]。电磁相关法流量测量传感器是一种新型的用于石油生产测井的油气水多相流的测量装置。该流量测量传感器具有测量简单、测量范围更宽广、准确度更高等优点[6-7]。王月明等人[8-9]通过仿真完成了电磁相关法流量计两对检测电极距离参数设计,建立了电磁相关法流量测量传感器的励磁线圈磁场分布理论模型,提出了磁场评价指标,并通过评价指标给出励磁线圈的参数设计方法。

电磁流量测量传感器励磁线圈的结构决定了其感应磁场的分布特性,进而影响着检测电极获取的信号,因此励磁线圈参数设计是实现电磁相关法流量测量传感器的关键问题之一。在电磁法流量测量中励磁线圈优化设计

收稿日期:2016-11　　Received Date: 2016-11
* 基金项目:国家自然科学基金(61463042)、内蒙古自然基金(2016MS0611)资助项目

中,根据传感器不同的工艺与测量环境设计需求,研究人员给出不同的优化设计结果与分析[10-14]。本文分析了电磁相关法流量测量传感器测量原理与其励磁线圈的理论模型,提出了新的磁场的评价指标,在新的磁场评价指标下重新分析了电磁相关法流量测量传感器的励磁线圈设计参数。在不同流速下、对不同大小结构参数的励磁线圈进行数值仿真,分析不同励磁线圈在传感器测量区域的磁场分布情况,给出电磁相关法流量测量传感器的励磁线圈轴向长度设计参数,为电磁相关法流量测量传感器励磁线圈设计与传感器的实现提供新的方案,同时搭建实流实验平台对新设计的传感器模型进行了初步的实验验证,实验表明,通过本方法设计的电磁相关法励磁线圈是可行的。

## 2　电磁相关法传感器与其励磁线圈理论

电磁相关法流量测量传感器测量含水率在一定范围高流速的流体时可进行直接测量,当测量流体为低流速且低含水率时,通过传感器两对检测电极获取信号进行互相关算法给出多相流流体流量[7]。如图 1 所示为电磁相关法流量测量传感器结构示意图,设定传感器测量管的半径为 $R$,其两对检测电极位于测量管同一轴向截面且相隔距离为 $4R$[8],其中 A1 与 B1 构成一对检测电极,A2 与 B2 构成另一对检测电极。设定过同侧检测电极轴向连线的中点的直线为 X 轴,测量管的中心轴线为 $Z$ 轴,过 $X$ 轴与 $Z$ 轴的焦点且垂直于 $XOZ$ 平面的直线为 $Y$ 轴,$X$ 轴、$Y$ 轴与 $Z$ 轴建立空间直角坐标系。该传感器的励磁线圈为两条直线段与两条圆弧线段连接而成,励磁线圈轴向较长,使得两对检测电极处于同一励磁结构所覆盖的磁场中。如图 1 所示 $L1$ 与 $L3$ 为励磁线圈中平行于管道中心轴线的直线段,$L2$ 与 $L4$ 为两段半圆弧线段。$L1$(或 $L3$)直线段与 $L2$(或 $L4$)半圆弧线段相连接点在 $z$ 轴的坐标分别为 $C$ 和-$C$,设定 $L2$ 与 $L4$ 两段圆弧线段半径为 $R$(也就是 $L1$ 到 $L3$ 的距离为 $2R$,设计满足生产测井中的小管径原则),则传感器励磁线圈的轴向长度为 $2C+2R$。

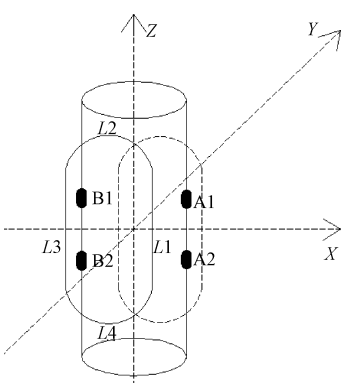



图 1　电磁相关法流量测量传感器结构

Fig. 1　Schematic diagram of flow measurement sensor based on electromagnetic correlation method

根据毕奥——萨伐尔定律求解励磁线圈在测量区域内部空间任意一点处所产生的磁感应强度。励磁线圈的两条直线段 $L1$ 和 $L3$ 产生的感应强度如式(1),两条圆弧线段 $L2$ 和 $L4$ 产生的感应强度如式(2)所示[9]。

$$\begin{cases} B_x = \dfrac{\mu_0 I(b-y)k_2}{2\pi((a-x)^2+(b-y)^2)} - \dfrac{\mu_0 I(b-y)k_4}{2\pi((-a-x)^2+(b-y)^2)} \\ B_y = -\dfrac{\mu_0 I(a-y)k_2}{2\pi((a-x)^2+(b-y)^2)} - \dfrac{\mu_0 I(-a-y)k_4}{2\pi((-a-x)^2+(b-y)^2)} \\ B_z = 0 \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} B_x = \dfrac{\mu_0 I}{4\pi}\displaystyle\int_0^{2\pi}\left(\frac{1}{\sqrt{r_1^3}}+\frac{1}{\sqrt{r_2^3}}\right)(ab-by\cos\theta-az\sin\theta)\,\mathrm{d}\theta \\ B_y = \dfrac{\mu_0 I}{4\pi}\displaystyle\int_0^{2\pi}\left(\frac{1}{\sqrt{r_1^3}}(x-a)b\cos\theta+\frac{1}{\sqrt{r_2^3}}(a+x)b\cos\theta\right)\mathrm{d}\theta \\ B_z = \dfrac{\mu_0 I}{4\pi}\displaystyle\int_0^{2\pi}\left(\frac{1}{\sqrt{r_1^3}}(a-x)b\cos\theta-\frac{1}{\sqrt{r_2^3}}(x+a)b\cos\theta\right)\mathrm{d}\theta \end{cases} \tag{2}$$

式中:$a$、$b$、$c$ 为励磁线圈的在 $x$ 轴、$y$ 轴、$z$ 轴的坐标范围,$\theta$ 为电流元 $I\vec{\mathrm{d}l}$ 在励磁线圈弧线段($L2$ 和 $L4$)所在位置角度,$\mu_0$ 为真空磁导率,$k_2$ 和 $k_4$ 分别为:

$$k_2 = \frac{c+z}{\sqrt{(a-x)^2+(b-y)^2+(c+z)^2}} + \frac{c-z}{\sqrt{(a-x)^2+(b-y)^2+(c-z)^2}}$$

$$k_4 = \frac{c-z}{\sqrt{(-a-x)^2+(b-y)^2+(c-z)^2}} + \frac{c+z}{\sqrt{(-a-x)^2+(b-y)^2+(-c-z)^2}}$$

如式(3)所示最后可根据磁感应强度叠加原理获得电磁相关法流量测量传感器励磁线圈所覆盖的空间中磁感应大小与分布情况。

$$B_x = \sum_{i=1}^{8} B_{ix};B_y = \sum_{i=1}^{8} B_{iy};B_z = \sum_{i=1}^{8} B_{iz} \tag{3}$$

## 3　传感器磁场参数设计评价指标

电磁法流量测量传感器励磁线圈所覆盖内部空间磁场的分布情况将直接影响检测电极的测量信号。因此本文以检测电极处产生的感应电动势信号值作为新的磁场评价指标,在传感器励磁线圈结构参数(轴向长度)变化,其它条件不变情况下,检测电极获得的感应电信号越大说明磁场的分布越好,则对应励磁线圈的参数设计是较优的。传感器检测电极获取的感应电势近似表达方程

如式(4)所示[15]。

$$U_{电极} = \frac{2}{\pi R}\iint \vec{V}(B_x W_y - B_y W_x)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{4}$$

式中:$U$ 是两电极的电势差,$R$ 是流量测量传感器管道半径,矢量 $\vec{V}$ 是导电流体的速度,$B$ 是磁感应强度,$W$ 是权重函数。

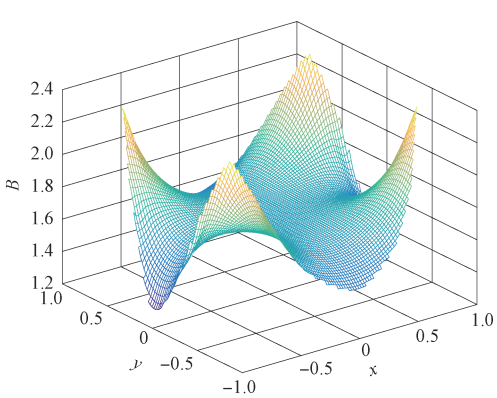
对比磁感应强度在 $X$ 轴与 $Y$ 轴的分布 $B_x$ 和 $B_y$ ,$B_x$ 比 $B_y$ 小的多,对流量测量传感器感应电势的计算中可以近似为 0,则得检测电极径向截面感应电势近似表达式如式(5)所示。

$$UP = U_{电极} = \frac{2}{\pi R}\iint \vec{V}B_y W_x\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{5}$$

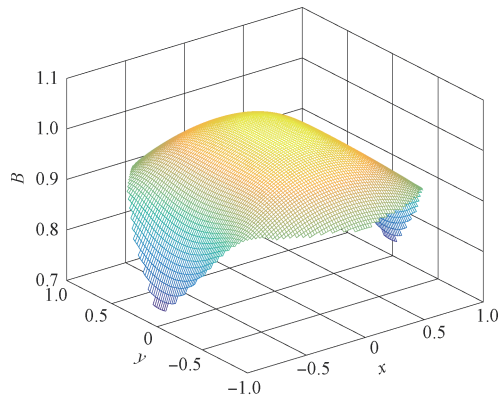
由式(5)可以得出检测电极获取的感应电信号的大小与流体的流速和传感器内部空间的磁感应强度有关,其它条件相同情况下,通过检测电极上获取的电势差来评价不同励磁结构参数变化在传感器内部产生的磁场分布的优劣。检测电极上的感应电信号强度越大,则传感器内部磁场分布越优,对应的励磁线圈轴向长度越好。考虑到电极截面对感应电势贡献最大,因此本文以式(5)近似作为励磁线圈的评价指标。式中 $UP$ 为评价指标。

## 4　励磁线圈参数优化设计仿真实验

仿真实验中设定流体流速为定值,改变励磁线圈轴向长度参数,分析励磁结构内部空间径向截面的磁场分布情况。为了分析结果更具有全面性,仿真中截取了不同的径向截面进行对比分析,然后在不同流体流速下进行数值仿真。为避免赘述下面只列出了励磁线圈在轴向长度 $2C$ 不同时 $Z=2R$ 处截面磁感应强度分布图,如图 2 所示。图 2(a)与(b)分别为励磁线圈轴向长度为 $4R$ 与 $8R$(即 $C=2R$、$C=4R$)时径向截面 $Z=2R$ 处的磁感应强度分布图。




(a) $Z=2R$　$C=2R$




(b) $Z=2R$　$C=4R$

图 2　励磁线圈在轴向长度 $2C$ 不同时 $Z=2R$ 截面磁感应强度分布

Fig. 2　The magnetic induction intensity distribution of $Z=2R$ cross section with different axial length $2C$

## 5　仿真结果分析

由图 2 可以发现同一径向截面的磁感应强度分布因励磁线圈的轴向长度不同而不同,但是不能数值化的比较哪种磁场分布更好,因此通过式(5)的评价指标来分析励磁线圈的轴向长度参数设计问题。实验中设定流体流速分别为 3、7、12、15、22、37 m/s 进行数值仿真,线圈轴向长度与感应电势综合关系分布图如图 3 所示。

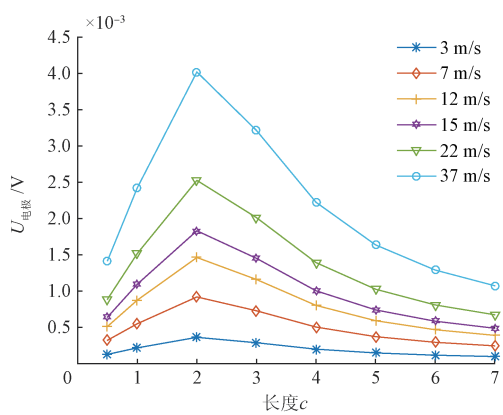


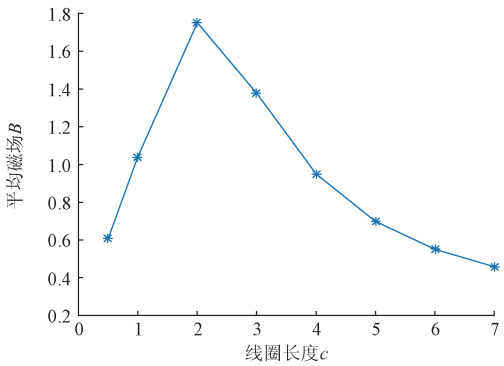

图 3　线圈轴向长度与感应电势综合关系分布

Fig. 3　The relationship distribution between the axial length of the coil and the induction potential

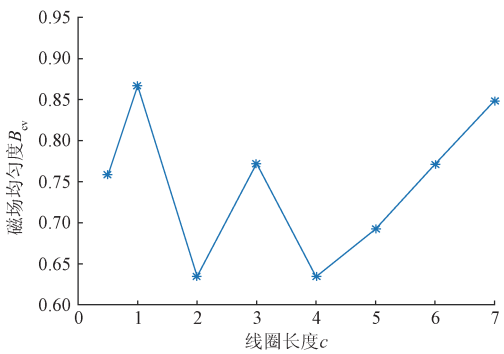
图 3 中横坐标为仿真模型(图 1)中 $C$ 的值的大小(即励磁线圈直线段一半的长度),纵坐标为检测电极径向截面感应电势差(即评价指标 $UP$)。可以看出在励磁线圈参数 $C$ 相同的情况下,流体速度越大检测电极处的感应电动势越大;在流速相同的情况下且励磁线圈参数 $C$ 的坐标大于检测电极截面时(即 $C>2R$ 时),随着励磁

线圈参数 $C$ 的增大，传感器检测电极产生的感应电动势将会变小，说明电磁相关法流量测量传感器励磁线圈的轴向长度并非越大越好；在两对检测电极相距 $4R$ 时，当 $C=2R$ 时，也就是励磁线圈轴向长度 $2C+2R=6R$ 时（$C$ 为励磁线圈直线段的长度，$2R$ 为跑道型励磁线圈两个弯线段线圈在轴向的距离）感应电势取得最大值，即励磁线圈轴向总长度参数设计为 $6R$ 较优。

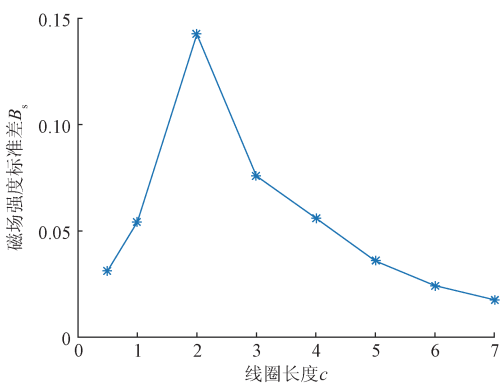
运用王月明等人[7,9]提出的磁场的样本平均值、样本标准差、变异系数、磁场均匀度等传统磁场评价指标对本文小管径电磁相关法流量测量传感器励磁线圈不同轴向长度时测量区域内部的磁场分布进行分析。图 4 所示为磁场传统评价指标分析图。图 4（a）～（d）分别为磁场的磁场平均值、磁场均匀度、磁场标准差、变异系数。



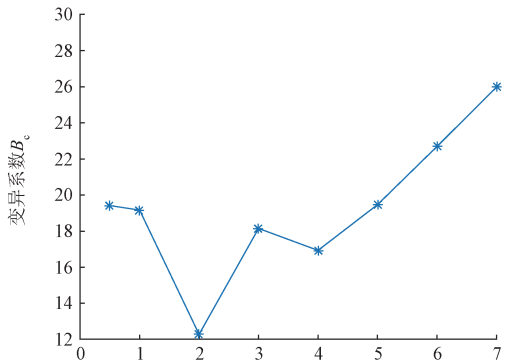

(a) 磁场平均值
(a) Mean value of magnetic field




(b) 磁场均匀度
(b) Uniformity of magnetic field




(c) 磁场标准差
(c) Standard deviation of magnetic field




(d) 变异系数
(d) Coefficient of variation

图 4　磁场传统评价指标分析

Fig. 4　The analysis of traditional evaluation index of magnetic field

从仿真图中可以发现，在两对检测电极相距 $4R$ 时，当 $C=2R$ 时，也就是励磁线圈轴向长度 $2C+2R=6R$ 时，传感器中的磁场较佳。实验证明：两种磁场评价指标分析显示，本文研究的小管径励磁线圈长度参数设计为 $6R$ 较佳。这一结果也验证了本文提出的评价指标是合理可行的。

## 6　传感器制作与实流实验

如图 5 所示为本文优化设计后的小管径电磁相关传感器实物图。在实际中传感器的设计还要考虑其应用在狭小空间环境中以及实际工况（压力、电磁屏蔽、功耗等因素）要求，需要在以上实验结果的指导下完成对电磁相关法流量测量传感器各参数的最终设计。

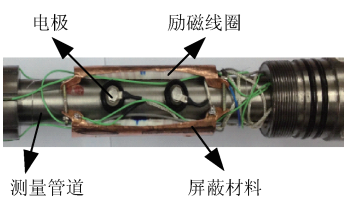



图 5　小管径电磁相关传感器实物

Fig. 5　Photo of small diameter electromagnetic correlation sensor

最后搭建了模拟油水两相流动态测试的实验平台。实验的主要硬件包括电磁相关法流量计、直流电源、示波器、数据采集设备、计算机等。搭建的测试实验系统如图 6 所示[16]。实验中配给总流量调节范围为 0～150 $m^3/d$，调节流量的间隔为 10 $m^3/d$，在各个流量点含水率调节范围为 50%～100%，含水率以 10% 间隔增加。

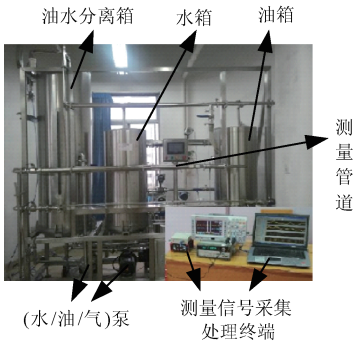



图 6　测试实验系统

Fig. 6　The experiment system of test

实验表明,使用本文设计励磁线圈的电磁相关法流量测量实验样机,其单对检测电极检测的信号对于全水(含水率为 100%)情况,检测电极的频率(传感器最终输出信号)响应变化基本上为一个常量;含水率越低电磁流量计的频率响应信号的波动幅度越大。如图 7 所示流量为 70 $m^3/d$ 含水率分别为 90%、50% 时,电磁相关法流量测量样机某一对检测电极的频率响应情况。

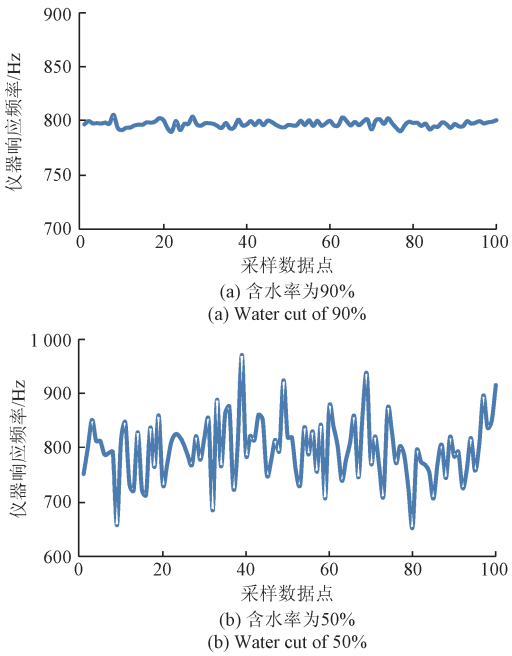



图 7　流量 70 $m^3/d$ 时检测电极的响应频率

Fig. 7　The response frequency of the electrode in flow rate 70 $m^3/d$

实验中发现当流体中的流动速度较低且流体含水量较低时,测量信号波动较大。在流体为低流速且低含水时,检测电极获取的测量信号波动较大,此种情况下采用相关法计算可给出流量较准确的测量值,这是下一步重点研究工作内容。

## 7　结　论

电磁相关法流量测量传感器是一种新型的可应用于石油生产测井中的狭小空间环境下进行两相或多相流检测的测量装置。该传感器的设计关键问题之一是励磁线圈轴向长度的设计。在对该传感器测量理论与传感器内部空间磁场分布理论进行分析,提出了检测电极产生的感应电信号作为磁场新的评价指标,同时建立仿真模型,设定多个不同的励磁线圈轴向长度参数,并在不同流体流速下进行数值仿真,最后在新的磁场评价指标下对仿真结果进行了分析,给出了电磁相关法流量测量传感器励磁线圈轴向长度的优化设计参数,最后搭建实验平台,对其进行了实验验证,实验表明,通过本方法设计的电磁相关法励磁线圈是可行的。为此类传感器励磁线圈轴向长度的优化设计提供了方案,也加快了电磁相关法流量测量仪器的开发进程。

## 参考文献

[1]　梁利平,徐科军,许伟. 基于静态 Haar 小波变换的电磁流量传感器非平稳浆液流量信号分离方法[J]. 仪器仪表学报, 2013,34(11):2026-2033.
LIANG L P,XU K J,XU W. Signal separation method for non-stationary slurry flow signal of electromagnetic flow sensor based on stationary haar wavelet transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(11): 2026 -2033.

[2]　王月明,孔令富,刘兴斌. 高流速两相流下电磁流量计测量机理研究[J]. 测井技术,2015,39(1):11-14.
WANG Y M, KONG L F, LIU X B. The research of electromagnetic flowmeter measurement mechanism with two-phase flow under high flow speed[J]. Well Logging Technology,2015,39(1):11-14.

[3]　姜玉林,丁文斌. 改进的电磁流量计感生电势计算方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12): 1883-1889.
JIANG Y L, DING W B. Improved induced potential calculation method of electromagnetic flowmeter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(12):1883-1889.

[4]　李波,张涛,张皎丹. 多场耦合的电磁流量计传感器感生电势计算方法[J]. 化工自动化及仪表,2015, 42(1):47- 50.
LI B, ZHANG T, ZHANG J D. Method to caculate induced voltage of electromagnetic flow sensor based on multi-physics coupling[J] Control and Instruments in Chemical Industry,2015,42(1):47- 50.

[5]　孔令富,杜胜雪,李英伟. 多电极电磁流量计权重函数

的仿真研究[J]. 计量学报,2015,36(1):58-62.
KONG L F, DU SH X, LI Y W. The weight function simulation of multi electrode electromagnetic flowmeter[J]. Acta Metrologica Sinica,2015,36(1):58-62.

[6] 孔令富,刘兴斌,王月明. 电磁相关法流量计传感器[P]. 中国专利:201210012146, 2012-10-17.
KONG L F, LIU X B, WANG Y M. Electromagnetic correlation method flow measurement sensor[P]. China Patent: 201210012146, 2012-10-17.

[7] 王月明. 油气水多相流流量电磁相关测量方法研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2013,12:19-62.
WANG Y M. Research on measuring methods with electromagntic correlation for the flow of oil-gas-water multiphase flow[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013,12:19-62.

[8] 王月明,孔令富,刘兴斌. 电磁相关法流量测量传感器检测电极距离研究[J]. 传感器与微系统,2014,33(7):49-52.
WANG Y M, KONG L F, LIU X B. Detection electrode distance study of electromagnetic correlation method flow measurement sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies,2014,33(7):49-52.

[9] 王月明,孔令富,李英伟. 电磁相关法流量测量传感器励磁线圈轴向长度设计研究[J]. 电子学报,2014,42(5):978-981.
WANG Y M, KONG L F, LI Y W. Design study on Excitation coil axial length of Electromagnetic correlation method flow measurement sensor[J]. Acta Electronica Sinica,2014, 42(5):978-981.

[10] 杜胜雪,孔令富,李英伟. 电磁流量计矩形与鞍状线圈磁场的数值仿真[J]. 计量学报,2016,37(1):37-42.
DU SH X, KONG L F, LI Y W. Numerical simulation of rectangular and saddle coil magnetic field of electromagnetic flowmeter[J]. Acta Metrologica Sinica, 2015,36(1):58-62.

[11] WANG Y M, KONG L F. Magnetic properties study of electromagnetic flow meter based on ANSYS[J]. Journal of Computational Information Systems,2011,8(7):2779-2786.

[12] 张昊,岳士弘,张玉静. 电磁流量计励磁线圈优化[J]. 中南大学学报:自然科学版,2016,47(6):1953-1958.
ZHANG H, YUE SH H, ZHANG Y J. Optimization of electromagnetic flowmeter excitation coil[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2016, 47(6):1953-1958.

[13] 乔旭彤,徐立军,董峰. 多电极电磁流量计励磁线圈的优化与设计[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(z2): 867-869.
QIAO X T, XU L J, DONG F. Design of exciting coils for multi-electrode electromagnetic flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2002,23(z2):867-869.

[14] 张小章, 孙向东. 电磁流量计磁场的设计[J]. 计量技术,2010(8): 6-9.
ZHANG X ZH, SUN X D. The design of magnetic field of electromagnetic flow meter[J]. Journal of Measurement Technology, 2010(8): 6-9.

[15] 蔡武昌,马中元,瞿国芳. 电磁流量计[M]. 北京:中国石化出版社,2004:1-127.
CAI W CH, MA ZH Y, JI G F. Electromagnetic Flowmeter[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2004:1-127.

[16] 杜胜雪. 井下油气水三相流阵列电磁相关流量测量方法研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2016:103-111.
DU SH X. Research on an array-type electromagntic correlation flowrate measuring method for oil-gas-water three-phase flow in oil well[D]. Qinhuangdao: Yanshan University,2016:103-111.

## 作者简介

**王月明**,2014 年于燕山大学获得博士学位,现为内蒙古科技大学副教授,主要研究领域为智能信息处理。
E-mail:wym_20017@126.com

**Wang yueming** received Ph. D. from Yanshan University in 2014. Now he is associate professor in Inner Mongolia University of Science and Technology. His main research interest includes processing of intelligence information.