

电磁相关法流量测量传感器励磁线圈轴向长度设计研究

王月明^{1,2}, 孔令富², 李英伟²

(1. 内蒙古科技大学数理生学院, 内蒙古包头 014010; 2. 燕山大学信息工程学院, 河北秦皇岛 066004)

摘要: 电磁相关法流量测量传感器以其独特的结构在两相流或多相流流量测量领域有着广泛的应用前景. 通过建立该传感器励磁线圈在测量区域的磁场理论模型, 并对不同轴向长度的励磁线圈的磁场进行数值仿真, 运用磁场评价指标分析确定励磁线圈的轴向长度, 为该传感器的励磁线圈轴向长度的设计提供参考依据并为之实现奠定基础.

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: TH86 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2014)05-0978-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.05.022

Design study on Excitation Coil Axial Length of Electromagnetic Correlation Method Flow Measurement Sensor

WANG Yue-ming^{1,2}, KONG Ling-fu², LI Ying-wei²

(1. School of MPB, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China;

2. College of Information Science & Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: Electromagnetic correlation method flow measurement sensor has wide application prospect for its unique structure in flow measurement field of two-phase or multiphase flow. By establishing the magnetic theoretic model of the sensor's excitation coil in measuring area, and numerical simulating to the magnetic field of excitation coil which axial length is different, analyze and determine the axial length of excitation coil by using magnetic field analysis index, provide a reference basis for the design of axis length of sensor's excitation coil and lay the foundation for its implementation.

Key words: correlation electromagnetic flow measurement; excitation coil; sensor design

1 引言

电磁相关法流量测量传感器是一种新型的应用于石油生产测井的油气水多相流流量测量装置. 与传统的电磁流量测量传感器和相关法流量测量传感器相比, 电磁相关法流量测量传感器具有测量工艺简单、连续测量、测量范围宽、测量准确等优点^[1], 在生产测井方面的油气水多相流测量方面有着广阔的应用前景. 电磁相关法流量测量传感器在管道轴向位置安置有两对检测电极, 两对检测电极位于同一励磁线圈产生的磁场中, 两对检测电极利用法拉第电磁感应定理分别获取测量信号. 在传感器测量含一定比率的非导电物质两相流(如油水两相流)或多相流流体流量的过程中, 当流体为高含水时, 两对检测电极获取的测量信号波动较小, 可根

据电磁流量测量法获取流体流量信息; 当流体为非高含水时, 两对检测电极获取的测量信号存在一定波动性, 对两对检测电极的测量信号进行互相关运算进而获得流体流经两对检测电极距离的渡越时间, 然后计算出两相流或多相流的流体速度, 从而获得相应的流体流量. 由于该流量测量传感器设计有两对检测电极, 需要较长的轴向长度的励磁线圈来确保两对检测电极处于同一磁场中. 电磁相关法流量测量传感器励磁线圈轴向长度的设计是实现该传感器的关键技术问题之一, 当传感器的励磁线圈轴向长度较小时, 使两对检测电极不在同一磁场中, 在检测电极附近会产生电涡流^[2,3], 增大流量参数测量误差^[4,5]. 当传感器的励磁线圈的轴向长度较大的时, 会造成功耗较大与材料的浪费, 且会增大传感器使用空间, 对井下传感器的电路设计和压力等设计指

标也提出了挑战^[6]。本文首先建立电磁相关法流量传感器励磁线圈在测量区域磁场分布的理论模型,并对不同轴向长度的励磁线圈在测量区域内部产生的磁场进行数值仿真,依据磁场评价指标分析不同励磁线圈轴向长度时传感器测量区域的磁场分布情况,给出电磁相关法传感器的励磁线圈结构轴向长度参数设计参考意见,为电磁相关法流量测量传感器设计实现奠定了基础。

2 电磁相关法流量传感器的励磁结构与理论建模

电磁相关法流量传感器的两对检测电极位于同一励磁线圈产生的同一磁场中,且设计的仪器适用于生产测井狭小空间环境下,电磁相关法传感器的励磁线圈一般采用轴向长度较长的马鞍形励磁线圈。马鞍形励磁线圈可以看成两条直线段与两条圆弧线段连接而成,如图 1 所示为马鞍形励磁线圈电磁相关法流量测量传感器结构示意图,图 1(a)为电磁相关法流量测量模型图,电磁相关法流量由励磁结构产生磁场,两对检测电极不是在测量管同一径向截面,而是在测量管同一轴向截面上。电磁相关法流量测量传感器检测电极剖切平面如图 1(b)所示,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,两对检测电极处于同一励磁线圈产生的较均匀磁场中且相距适当距离,多相流流量可通过两对检测电极的测量信号进行运算获取。

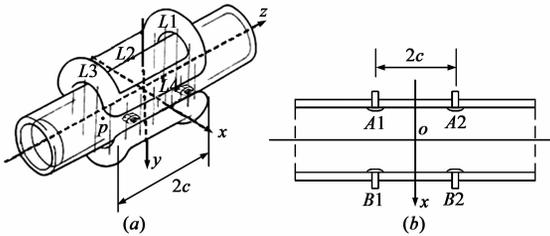


图1 马鞍形励磁线圈的结构图

如图中所示, z 轴为流量管中心轴线, x 轴为过两对检测电极轴向连线的中点且与 z 轴垂直相交, y 轴与 xoz 平面垂直且与 x 轴和 z 轴构成三维直角坐标系, 该励磁线圈 $L2$ 和 $L4$ 是平行于 z 轴的直线段, $L1$ 和 $L3$ 是励磁线圈的两段圆弧线段(本文设定为圆弧线段), 圆弧段 $L1$ 和 $L3$ 在 z 轴上的位置分别是 c 和 $-c$, 因此励磁线圈的轴向长度为 $2c$ 。在本文的仿真实验中, 电磁相关法流量测量传感器流量管的半径为 R , 设定电磁相关法流量测量传感器的两对检测电极是在测量管同一轴向截面且相隔距离为 $4R$, 也就是两对检测电极分别安装在 $z = +2R$ 和 $z = -2R$ 所在的径向截面位置。

设励磁线圈在 x, y, z 轴上的坐标位置为 (ζ, η, ξ)

的一小段电流源 Idl , 马鞍形励磁线圈所覆盖的测量区域内部空间任意一点 $P(x_1, y_1, z_1)$, 则 P 点到励磁线圈各边上的电流源 Idl 的距离为式(1)所示。

$$r = \sqrt{(x_1 - \zeta)^2 + (y_1 - \eta)^2 + (z_1 - \xi)^2} \quad (1)$$

根据毕奥——萨伐尔分别求解磁力线圈为直线段和圆弧线段时在 P 点的磁感应强度, 式(2)为励磁线圈两段直线段($L2$ 和 $L4$) 在测量区域空间点 P 产生的磁感应强度, 式(3)为励磁线圈两端圆弧线段($L1$ 和 $L3$) 在测量区域空间点 P 所产生的磁感应强度。

$$\begin{cases} B_x = \frac{\mu_0 I (b - y_1) k_2}{2\pi((a - x_1)^2 + (b - y_1)^2)} - \frac{\mu_0 I (b - y_1) k_4}{2\pi((-a - x_1)^2 + (b - y_1)^2)} \\ B_y = -\frac{\mu_0 I (a - x_1) k_2}{2\pi((a - x_1)^2 + (b - y_1)^2)} - \frac{\mu_0 I (-a - x_1) k_4}{2\pi((-a - x_1)^2 + (b - y_1)^2)} \\ B_z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} B_x = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(\frac{1}{\sqrt{r_1^3}} (z_1 - c) + \frac{1}{\sqrt{r_2^3}} (z_1 + c) \right) R_1 \cos\theta d\theta \\ B_y = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(\frac{1}{\sqrt{r_1^3}} (z_1 - c) + \frac{1}{\sqrt{r_2^3}} (z_1 + c) \right) R_1 \sin\theta d\theta \\ B_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(\frac{1}{\sqrt{r_1^3}} + \frac{1}{\sqrt{r_2^3}} \right) (R_1 - x_1 \cos\theta - y_1 \sin\theta) R_1 d\theta \end{cases} \quad (3)$$

式中, a, b, c 为励磁线圈的在 x 轴、 y 轴、 z 轴的坐标范围, r_1 和 r_2 分别是励磁线圈圆弧段 $L1$ 和 $L3$ 上电流元 Idl 到点 P 的距离, θ 为电流元 Idl 在励磁线圈圆弧段($L1$ 和 $L3$) 所在位置角度, μ_0 为真空磁导率, k_2 和 k_4 分别为:

$$\begin{aligned} k_2 &= \frac{c + z_1}{\sqrt{(a - x_1)^2 + (b - y_1)^2 + (c + z_1)^2}} \\ &+ \frac{c - z_1}{\sqrt{(a - x_1)^2 + (b - y_1)^2 + (c - z_1)^2}}, \\ k_4 &= \frac{c - z_1}{\sqrt{(-a - x_1)^2 + (b - y_1)^2 + (c - z_1)^2}} \\ &+ \frac{c + z_1}{\sqrt{(-a - x_1)^2 + (b - y_1)^2 + (-c - z_1)^2}} \end{aligned}$$

如式(4)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。

$$B_x = \sum_{i=1}^8 B_{ix}; B_y = \sum_{i=1}^8 B_{iy}; B_z = \sum_{i=1}^8 B_{iz} \quad (4)$$

3 励磁结构磁场分布仿真与评价指标

仿真实验通过理论建模并对其进行数值仿真, 获得电磁相关法流量测量传感器不同轴向长度的励磁线圈在传感器测量区域磁场强度分布的影响情况。检测电极截面相关物理量的变化对检测电极获取的信号影

响较大(检测电极所在径向截面的磁场分布将直接影响电极的测量信号),因此我们重点分析不同轴向长度的励磁线圈在检测电极截面($z=2R$ 径向截面)磁场分布情况.当然,为了对比分析不同径向截面的磁场分布情况,仿真实验中对 $z=0, z=R$ 两个不同径向截面的磁场分布也进行了仿真分析.为节省篇幅本文只列出

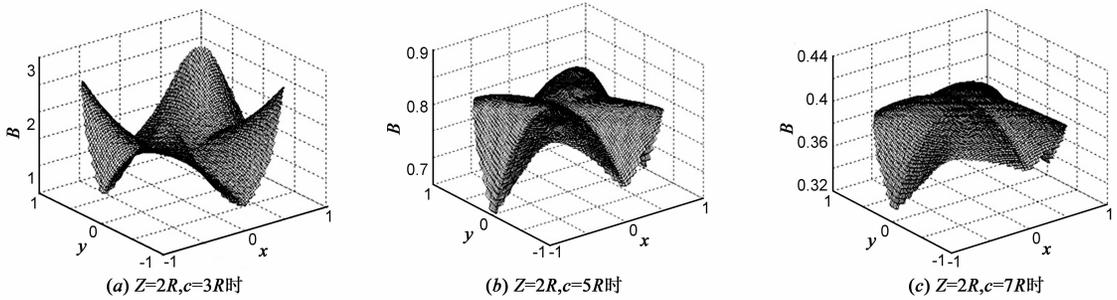


图2 马鞍形励磁线圈在轴向长度 $2c$ 不同时 $z=2R$ 截面磁感应强度分布图

由仿真图可以看出励磁线圈在轴向长度 $2c$ 不同时,电磁相关法流量测量传感器检测电极径向截面内部磁场分布有所不同,但是不能数值化的比较那种励磁线圈长度传感器内部检测电极截面磁场分布较好,因此引入样本平均值、样本标准差、变异系数、磁场均匀度等磁场评价指标分析传感器励磁线圈不同轴向长度时测量区域内部磁场分布情况,如式(5)所示,式中 \bar{B} 为样本平均值、 B_s 为样本标准差、 B_{cv} 为样本磁场均匀度、 B_c 为样本变异系数.在以上磁场评价指标中,样本平均值越大越好,样本标准差越小越好,磁场均匀度越大越好,变异系数越小越好^[7].

$$\begin{cases} \bar{B} = \frac{1}{n} \sum_{x^2+y^2 \leq R^2} B_{xy} \\ B_s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{x^2+y^2 \leq R^2} (B_{xy} - \bar{B})^2} \\ B_{cv} = S_{\text{均匀}} / S_{\text{测量区域}} \\ B_c = \text{样本标准差} / \text{样本平均值} = B_s / \bar{B} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $S_{\text{均匀}}$ 为测量区域任意一点磁感应强度与 \bar{B} 之比在95%至105%的面积和, $S_{\text{测量区域}}$ 为测量区域的总面积.

4 励磁线圈的磁场分布性能分析

下面通过磁场评价指标来分析励磁线圈不同轴向长度时测量区域磁场分布情况.如图3为励磁线圈在不同的轴向长度时的各个磁场评价指标的分析图,图例中, $z=2R$ 为某一对检测电极径向截面磁场性能评价指标数据,为对比分析其它径向截面磁场分布情况,图例中也给出了 $z=0$ 和 $z=R$ 径向截面磁场性能评价指标的参考数据.图中横坐标为仿真实验设定的不同的励磁线圈的轴向长度($2c$)的一半(即为 c),纵坐标分别

了部分仿真实验图,如图2所示为马鞍形励磁线圈在轴向长度 $2c$ 不同时 $z=2R$ 截面磁感应强度分布图,图2子图(a),(b),(c)分别为励磁线圈在轴向长度 $2c$ 为 $6R, 10R, 14R$ (即 $c=3R, c=5R, c=7R$)时检测电极截面 $z=2R$ 的磁感应强度分布图.

为不同径向截面内磁感应强度各项评价指标(即 \bar{B} 、 B_s 、 B_{cv} 、 B_c).

图3子图(a)为三种径向截面($z=0, z=R, z=2R$ 时)不同轴向长度时磁感应强度的平均值分析图,该值随着励磁线圈轴向长度的增加越来越小且变化趋于平缓.图3子图(b)为三种径向截面($z=0, z=R, z=2R$ 时)不同轴向长度时磁感应强度的标准差分析图,磁感应强度的标准差同样随着励磁线圈轴向长度的增加越来越小且变化趋于平缓.图3子图(c)为三种径向截面($z=0, z=R, z=2R$ 时)不同轴向长度时磁场均匀度分析图,在检测电极所在的径向截面($z=2R$ 时)当励磁线圈轴向长度 $2c \leq 9R$ (即图中 $c \leq 4.5R$)时,磁场均匀度随励磁线圈轴向长度的增加迅速增大;当励磁线圈轴向长度 $2c \geq 9R$ (即图中 $c \geq 4.5R$)时,磁场均匀度基本上变化不大,也就是说当励磁线圈轴向长度 $2c \geq 9R$ (即 $c \geq 4.5R$)后,随着励磁线圈轴向长度的增加,测量区域中的磁场均匀度变化较小.图3子图(d)为三种径向截面($z=0, z=R, z=2R$ 时)不同轴向长度时磁感应强度的变异系数分析图,从图中可知,不同径向截面的变异系数都随励磁线圈轴向长度的增加而减小,检测电极所在的径向截面($z=2R$ 径向截面)的磁感应强度的变异系数在励磁线圈轴向长度 $2c$ 为 $7R$ 到 $10R$ 之间(即 $3.5R \leq c \leq 5R$)下降较快,当励磁线圈轴向长度 $2c \geq 9R$ (即 $c \geq 4.5R$)时检测电极所在径向截面($z=2R$ 时)的磁场变异系数小于 $z=R$ 所在的径向截面.

电磁相关法传感器的两对检测电极分别设在 $z=-2R$ 和 $z=+2R$ 所在径向截面,仿真实验中我们着重分析了 $z=2R$ 时径向截面的磁场分布情况.通过各项磁场评价指标对磁场分布分析可得:在电磁相关法传感器的两对检测电极距离为 $4R$ 时,励磁线圈的轴向长度

参数设计中应选择 c 为 $4.5R$ 附近的一段范围内(即励磁线圈轴向长度 $2c$ 为 $9R$ 附近一段范围),此时检测电极所在的径向截面磁场分布相对较佳;当然电磁相关法传感器主要应用于井下狭小空间下油气水多相流测

量中,也需要在以上仿真实验结果的指导下,结合实际工况要求(功耗、压力等因素)对电磁相关法传感器的励磁线圈的轴向长度参数进行最后的设计。

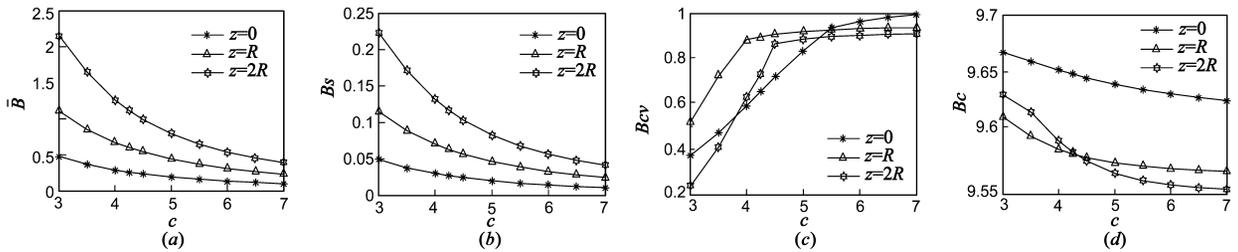


图3 励磁线圈不同轴向长度不同径向截面磁场分析图

5 结论

电磁相关法流量测量传感器是融合了电磁流量计和相关法流量计的测量原理的新型的流量测量传感器,可以应用于狭小空间下的生产测井的两相流或多相流流量测量.本文针对传感器励磁线圈轴向较长的特点对其测量区域的磁场进行理论建模,并对不同轴向长度的励磁线圈在测量区域的磁场分布进行了数值仿真,通过磁场性能评价指标讨论了励磁线圈轴向长度参数设计问题,从而获得励磁线圈轴向长度的参数设计的指导方法.为该类传感器励磁线圈的轴向长度的设计提供了参考依据,为实现电磁相关法流量测量传感器奠定基础。

参考文献

- [1] 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 Lingfu, Liu Xingbing, Wang Yueming. Electromagnetic correlation method flow measurement sensor [P]. Chinese patent:201210012146,2012-10-17. (in Chinese)
- [2] 张卫平,施立亭,赵徐森.长距离双线圈电涡流传感器的原理与设计[J].电子学报,1998,26(12):61-65.
Zhang Weiping, Shi Liting, Zhao Xushen. The principle and design for long distance electric eddy current sensor with double coils[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(12): 61-65. (in Chinese)
- [3] 方蜀州,王泽毅.三维涡流计算中最少变量数边界积分方程的一个注记[J].电子学报,2002,30(8):1114-1116.
Fang Shu-zhou, Wang Ze-yi. A note of boundary integral equations of minimum order for the calculation of 3-D eddy current problem[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(8): 1114-1116. (in Chinese)
- [4] 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(3):867-869.
Qiao Xutong, Xu Lijun, Dong Feng. Design of exciting coils fo

- r multi-electrode electromagnetic flowmeter[J]. Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(3): 867-869. (in Chinese)
- [5] 徐立军,王亚,董峰,等.基于多电极电磁流量计的流速场重建[J].自然科学进展,2002,12(5):524-527.
Xu Lijun, wangya, Dong Feng. The velocity field reconstruction study based on multi-electrode electromagnetic flowmeter[J]. Progress in Natural Science, 2002, 12(5): 524-527. (in Chinese)
- [6] 蔡武昌,应启夏.新型流量检测仪表[M].北京:化学工业出版社,2006.212-235.
Cai Wuchang, Ying Qiga. The New Flow Instrumentation[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. 212-235. (in Chinese)
- [7] Yueming Wang, Lingfu Kong, Magnetic properties study of electromagnetic flow meter based on ANSYS[J]. Journal of Computational Information Systems, 2011, 8(7): 2779-2786.

作者简介



王月明 男,内蒙古科技大学副教授,2014年获燕山大学计算机应用技术博士学位,研究方向为智能信息处理。

E-mail: wym_20017@126.com



孔令富 男,燕山大学教授,博士生导师。1995年获哈尔滨工业大学博士学位.主要研究方向为智能信息处理、并联机器人及自动控制、家庭服务机器人。

E-mail: lkong@ysu.edu.cn