

# 基于响应面法的瞬变电磁法聚焦线圈优化设计

张涛<sup>1</sup> 赵弘<sup>1</sup> 王维斌<sup>2</sup> 朱子东<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院 北京 102249;

2. 中国石油管道公司沈阳龙昌管道检测中心 沈阳 110168)

**摘要:** 针对瞬变电磁法激励线圈参数开展研究,根据磁感应强度矢量叠加原理,设计几种结构简单具有聚焦特性的激励线圈结构,通过比较聚焦效果、互感大小及制做难度等综合考虑择优选出(矩形面阵列),通过响应面法对具有磁聚焦特性的线圈进行参数优化,然后利用电磁仿真软件进行模拟仿真,与传统单线圈进行对比,该激励线圈使磁场的主要能量聚焦在半径小于0.3 m,且该目标区域内磁感应强度增强了33%,为下一步实际应用奠定基础,改变矩形阵列的重合面积实现不同埋深的磁聚焦,良好的聚焦效果提高瞬变电磁法的局部缺陷检出率,实现并行和重叠埋地金属管道剩余壁厚的精确检测。

**关键词:** 瞬变电磁法; 响应面法; 优化; 磁聚焦; 精确检测

**中图分类号:** TP212.13 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3030

## Response surface methodology based transient electromagnetic method focusing coil optimum design

Zhang Tao<sup>1</sup> Zhao Hong<sup>1</sup> Wang Weibin<sup>2</sup> Zhu Zidong<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. Shenyang Longchang Pipeline Survey Center Petro China Pipeline Company, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** To carry out major energy parameters research for the transient electromagnetic excitation coil, according to the magnetic induction vector superposition principle, the design of several simple structure having focusing properties of the excitation coil structure, focusing effect by comparison, mutual size and the difficulty of making merit considering the elect-Rectangle surface arrays, the response surface method focusing coil having a magnetic characteristic parameter optimization. Using electromagnetic simulation software simulation, comparing with the traditional single-coil, the excitation energy of the magnetic field coil so that the main focus in a radius of less than 0.3 m, and the magnetic flux density within the target area increased 33 percent, to lay the foundation for further practical application, change a rectangular array overlap area is magnetically different depths of focus, good focus to improve the transient electromagnetic method of partial defect detection rate, to achieve accurate detection of parallel and overlapping metal pipe buried the remaining wall thickness.

**Keywords:** transient electromagnetic; response surface methodology; optimization; magnetic induction; enhance

## 1 引言

20世纪90年代,瞬变电磁检测技术开始应用在我国埋地金属管道剩余壁厚检测。该技术具有非开挖、非接触及不影响管道正常运行等优点,但是在应用范围和检测精度方面存在局限性。传统的发射线圈为正方形单线圈,根据磁场扩散理论(烟圈效应)可知,每一个检测点覆盖的范围是发射线圈边长和2倍的管道埋深,所得到的剩余壁厚是整个覆盖范围内管段的平均剩余壁厚,进而不能检出小

区域金属腐蚀,严重影响了并行或重叠埋地金属管道剩余壁厚检测精度。目前研究应用在瞬变电磁检测检测技术上的磁聚焦线圈甚少,李景天等人主要是对单个矩形线圈的空间磁场分布大小进行的理论计算,南昌航天航空大学于润桥主要模拟仿真理地金属在通电单线圈下的磁场分布<sup>[1-2]</sup>。

设计一种具有磁聚焦特性的激励线圈结构,改变激励功率大小和线圈空间位置,增强磁聚焦效果和该目标区域磁感应强度,提高局部缺陷检测率,对并行和重叠埋地金

属管道缺陷实现准确评价。由于矩形载流线圈空间磁场解析式计算比较复杂,所以借助 Ansys maxwell 有限元电磁仿真软件代为计算,通过正交实验组给出的参数建立该聚焦线圈模型,分析距离线圈 1 m 处的磁感应强度分布得到所需要的目标量,最终的利用响应面法确模型参数。

## 2 瞬变电磁法

瞬变电磁法又称时域电磁法,其原理是给激励线圈输入阶跃信号,待空间区域形成稳定的一次磁场后,瞬间关断电流,地下导体介质将会产生涡流。由于涡流不会瞬间消失,将存在一个过渡阶段。在此阶段,地下导体介质产生二次磁场,伴随着欧姆消耗直至消失,通过采集地面上接收线圈感应电动势的变化判断腐蚀的位置<sup>[3]</sup>。

根据现场检测结果来看,瞬变电磁法对局部腐蚀、并行管道、重叠管道及埋深不一的检测存在偏差,主要由于磁场分布过大,磁场集中区域能量不高,这样就很容易造成局部腐蚀漏检,由于并行管道一般距离较近,也会对检测结果存在一定的干扰,而具有磁聚焦特性的线圈很好地解决了这一问题<sup>[4]</sup>。

## 3 确定磁聚焦线圈结构

磁聚焦主要是通过多个线圈通电后周围磁场的叠加原理,实现对空间带电粒子或者带电体的聚焦或者约束。可以是多个线圈阵列来实现磁聚焦,因为通电线圈周围会产生磁场,磁场又是一个矢量值,进而相互叠加,实现对整个空间区域磁场强度的聚焦。设计几种磁聚焦结构如图 1 所示。半球型阵列、圆环型阵列、上(下)塔型阵列及矩形面阵列。通过 Ansys maxwell 电磁学仿真软件进行模拟在线圈垂直向下 1 m 处的磁感应强度,同时根据线圈互感、制作难易程度及实际应用等因素综合考虑优选出一种线圈结构<sup>[5-6]</sup>,如表 1 所示。

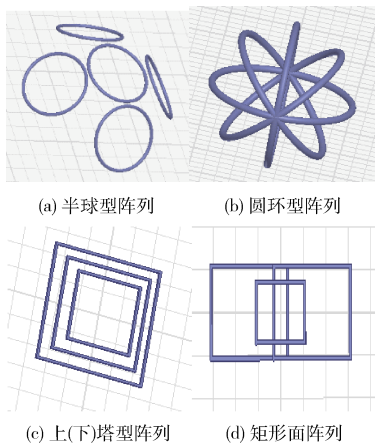


图 1 聚焦线圈结构

表 1 五种线圈阵列对比

模型	磁感应强度/T	效果	互感	制造难度
半球型	$1.6648 \times 10^{-5}$	一般	一般	较难
圆环	$1.9347 \times 10^{-5}$	最好	最大	最难
上塔型	$1.2684 \times 10^{-5}$	一般	较小	容易
下塔型	$1.3365 \times 10^{-5}$	较好	较小	容易
矩形面	$1.4498 \times 10^{-5}$	较好	一般	容易

通过以上对比可以看出:5种聚焦线圈都有很好的聚焦特性,圆环型阵列聚焦效果和集中区域磁场强度最好,但是一旦线圈半径确定,就只能针对某一特定的埋深,应用单一;半球型阵列分为两层结构,结构设计难度较大,而且容易受接收线圈的干扰<sup>[7-8]</sup>;上(下塔型)阵列存在的问题和圆环型一样;而矩形面阵列具有设计简单、便携及适应不同埋深等特点,基于这些优势最终选择该结构应用于瞬变电磁的激励线圈,提高检测精度以及在实际应用中调整两个线圈重合面积或改变激发功率来实现不同埋深的管道检测<sup>[9-10]</sup>。

## 4 磁聚焦线圈参数优化

为了探索线圈参数对磁聚焦特性的影响,利用响应面法优化出最佳的线圈参数组合从而方便后续工作。

### 4.1 响应面法原理

响应面法是一种统计方法,根据每个参数取值范围设计正交实验组,使随机实验转化为一定数量的确定性实验,通过实验结果模拟响应面来反应真实极限状态曲面。响应面的实质是用一个函数来实现曲线(面)的拟合,这个函数可以把基本变量和极限状态函数之间建立起输入与输出的关系,如果变量很多,会先对那些影响不显著的变量进行筛选进而形成更准确地输入和输出关系,最后通过设置想要的输出量来得到优化后的参数组合<sup>[11]</sup>。

### 4.2 实验方法

该聚焦线圈总共由 3 个线圈组成如图 2 所示。为了让聚焦区域规则化线圈 1 和线圈 2 同等大小,每两线圈间隔距离为 30 mm。由于矩形载流线圈空间磁场解析式计算比较复杂,所以借助 Ansys maxwell 有限元电磁仿真软件代

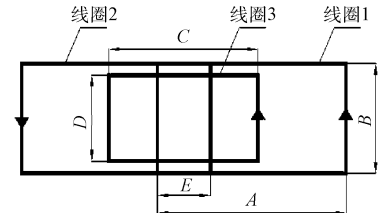


图 2 线圈结构

注:A:线圈 1 和线圈 2 长;B:线圈 1 和线圈 2 的宽;

C:线圈 3 的长;D:线圈 3 宽;

E:线圈 1 和线圈 2 的重合距离

为计算,首先利用建立具有参数化特性的三维磁聚焦线圈结构,以便后续方便改变每个线圈尺寸,线圈材料均为铜,线圈匝数 100,选择每个线圈的横截面施加激励电流 1 A,方向相同,如果相反则不会实现聚焦,计算区域为  $6\text{ m} \times 6\text{ m} \times 6\text{ m}$  的空气介质 ( $x \in (-3, 3)$ ,  $y \in (-3, 3)$ ,  $z \in (-3, 3)$ ),自由划分网格数量 50 000,然后在线圈垂直向下 1 m ( $z = -1$ )处建立平面,网格数量 20 000,最后导出该平面的磁感应分布情况,并测量磁场集中区域半径和磁场分布半径。

4.3 结果与讨论

通过正交实验法设计五因子三水平进行参数优化,A 和 B 取值范围为 600~800 mm,C 和 D 取值范围为 300~500 mm,E 取值范围为 100~300 mm,分析因子及水平对照如表 2 所示。

根据响应面分析进行模拟实验,共有 45 个实验组,其中 40 个为分析实验,5 个为中心实验,用以估计误差,通过 Ansys maxwell 电磁仿真软件得到 3 个响应量分布图如图 3 所示。磁场集中区域半径 ( $R_1$ )、集中区域磁感应强度 ( $R_2$ )和磁场分布半径 ( $R_3$ ),响应面实验结果如表 3 所示。

表 2 响应面分析因子及水平表

因子	水平		
	-1	0	1
A/mm	600	700	800
B/mm	600	700	800
C/mm	300	400	500
D/mm	300	400	500
E/mm	100	200	300

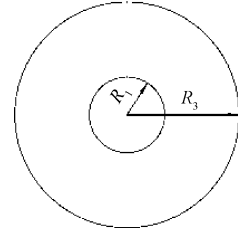


图 3 响应量分布

注:  $R_1$ : 磁场集中区域半径;  
 $R_2$ : 磁场集中区域磁感应强度;  
 $R_3$ : 磁场分布半径

表 3 响应面实验结果

序号	A/mm	B/mm	C/mm	D/mm	E/mm	$R_1$ /mm	$R_2$ /T	$R_3$ /mm
1	800	700	300	400	200	317	$1.992 \times 10^{-5}$	1 535
2	700	700	500	500	200	315	$2.111 \times 10^{-5}$	1 500
3	700	700	400	400	200	310	$1.675 \times 10^{-5}$	1 510
4	600	800	400	400	200	316	$1.858 \times 10^{-5}$	1 500
...	...	...	...	...	...	...	...	...
45	700	600	500	400	200	320	$1.825 \times 10^{-5}$	1 490

注:由于实验组太多,这里只列出几组

4.3.1 对磁场集中区域半径 ( $R_1$ ) 做响应面分析

对于 5 个自变量模型,单独存在,相互作用及平方的方差分析结果如表 4 所示。通过对模拟实验结果进行响应面分析,经过二次拟合后,得到影响因子与响应量  $R_1$  之间的模拟方程为:

$$R_1 = 309.91 + 5.25C - 4.97D - 1.5AC - 1.50AD - 1.50BC + 2.25CD + 0.84C^2$$

该回归模型 F 检验为极显著 ( $P < 0.01$ ),其失拟项在  $\alpha = 0.05$  水平上为极显著 ( $P < 0.01$ ),纯误差不显著,其决定系  $R^2 = 0.967 1$ ,说明该拟合方程和实际情况相符,且误差较小,能充分地反映出个因子与响应值之间的关系。通过该方程发现 5 个因子这件存在一定的交互作用,其中 C、D、BD、CD 均呈现极显著影响 ( $P < 0.01$ ),AC、AD、BC、 $C^2$  呈现显著影响 ( $P < 0.05$ ),A、B、E、AB、AE、BE、CE、DE、 $A^2$ 、 $B^2$ 、 $D^2$ 、 $E^2$  均呈现不显著。

从单因子水平观察,可以得出其影响顺序为 C(线圈 3

长) $>D$ (线圈 3 宽) $>B$ (线圈 1/2 宽) $>A$ (线圈 1/2 长) $>E$ (线圈 1/2 重合长度),在交互作用存在下,对磁场集中区域半径的影响顺序为:BD $>CD > AC > AD > BC > AE > BE > CE > DE > AB$ 。

从分析得到的响应面来看图 4,当线圈 3 长宽同时减小时,该响应值随之减小;当改变线圈 1、2 尺寸(A、B)时对响应值影响很小;当改变重合距离(E)时对响应值没有影响。

4.3.2 对其他响应量 ( $R_2$ 、 $R_3$ ) 做响应面分析

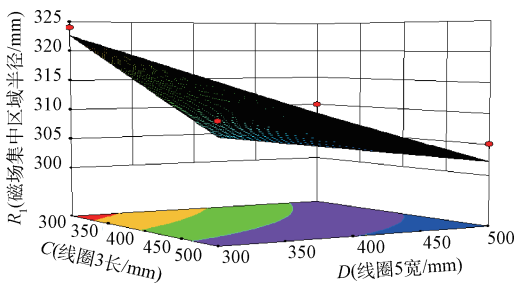
基于提高磁聚焦特性,所以选择另外两个响应值来进一步优化,该响应量均为辅助量,鉴于分析方法同上,这里只对模型显著性进行分析和给出响应量的拟合公式。

1) 通过对模拟实验结果进行响应面软件分析,经过二次拟合后,得到影响因子与响应量  $R_2$  之间的关系为:

表 4 响应面模拟实验方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
A	0.14	1	0.14	0.15	0.701 3	
B	2.25	1	2.25	2.41	0.133 6	
C	441.00	1	441.00	472.59	<0.000 1	**
D	395.02	1	395.02	423.31	<0.000 1	**
E	0.063	1	0.063	0.067	0.798 0	
AB	0.000	1	0.000	0.000	1.000 0	
AC	9.00	1	9.64	9.64	0.004 8	*
AD	9.00	1	9.64	9.64	0.004 8	*
AE	0.56	1	0.60	0.60	0.445 1	
BC	9.00	1	9.64	9.64	0.004 8	*
BD	27.56	1	29.54	29.54	<0.000 1	**
BE	0.56	1	0.56	0.60	0.4451	
CD	20.25	1	20.25	21.70	<0.000 1	**
CE	0.25	1	0.25	0.27	0.605 9	
DE	0.25	1	0.25	0.27	0.605 9	
A <sup>2</sup>	0.043	1	0.043	0.046	0.831 4	
B <sup>2</sup>	1.63	1	1.63	1.75	0.198 4	
C <sup>2</sup>	5.23	1	5.23	5.61	0.026 3	*
D <sup>2</sup>	1.48	1	1.48	1.56	0.219 4	
E <sup>2</sup>	0.11	1	0.11	0.11	0.738 1	
模型	926.85	20	46.34	49.66	<0.000 1	**
残差	22.40	24	0.93			
失拟项	22.40	20	1.12	21.32	0.003 7	**
纯误差	0.000	4	0.000			
总和	949.24	44				

注: \* 表示显著, \*\* 表示极显著

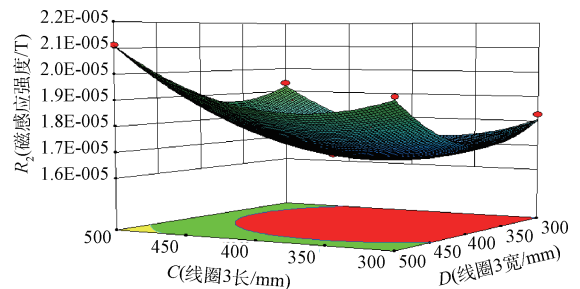
图 4  $R_1$  响应面

$$R_2 = 1.65 \times 10^{-5} + 1.67 \times 10^{-6}A + 1.46 \times 10^{-6}B + 7.57 \times 10^{-7}C + 7.53 \times 10^{-7}D + 9.38 \times 10^{-7}E + 4.98 \times 10^{-7}AB + 2.92 \times 10^{-7}AE + 2.98 \times 10^{-7}BE + 1.68 \times 10^{-7}CD + 1.09 \times 10^{-6}A^2 + 1.06 \times 10^{-6}B^2 + 1.32 \times 10^{-6}C^2 + 1.33 \times 10^{-6}D^2 + 1.46 \times 10^{-6}E^2.$$

该回归方程模型  $F$  检验极显著, ( $P < 0.01$ ), 其失拟项在  $\alpha = 0.05$  水平上为极显著 ( $P < 0.01$ ), 纯误差并不显著, 决定系数  $R^2 = 0.984 1$ , 说明该拟合方程与实际情况符合度

良好, 误差很小, 其中单因子和均方因子均为影响极显著, 交互因子为影响显著。

从分析得到的响应面来看图 5, 目标量是指数式增加, 为了实现目标量  $R_2$  增强, 需要增加线圈 1、2 的尺寸、缩减线圈 3 的尺寸, 以及增加重合距离。

图 5  $R_2$  响应面

2) 通过对模拟实验结果进行响应面软件分析, 经过二次拟合后, 得到影响因子与响应量  $R_3$  (磁场分布半径) 之间

的关系为： $R_3 = 1509.82 + 20.56A + 19.31B - 263D - 14.13E - 8AB - 5.75AE - 5.75BE$ 。

该回归方程模型  $F$  检验极显著, ( $P < 0.01$ ), 其失拟项  $\alpha = 0.05$  水平上为极显著 ( $P < 0.01$ ), 纯误差不显著, 决定系数  $R^2 = 0.9646$  说明该拟合方程与实际情况符合度良好, 误差很小, 其中  $A$ 、 $B$ 、 $E$  为影响极显著,  $D$ 、 $AB$ 、 $AE$ 、 $BE$  均为影响显著, 其他为不显著。

从分析得到的响应面来看图 6, 为了使磁场分布半径变小, 主要是通过减小线圈 1、2 的长度 ( $B$ ), 其他因子对其几乎没有影响。

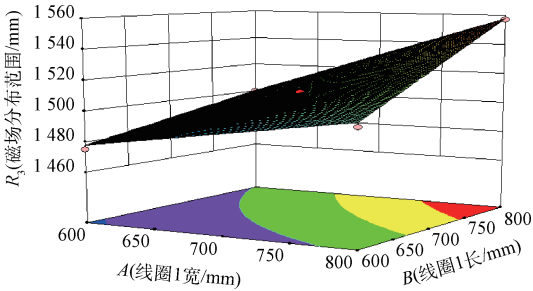


图 6  $R_3$  响应面

### 5 优化结果

通过响应面法进行系统分析, 给出预定的响应值  $R_1 = 300$  mm, 要求  $R_2$  尽可能大,  $R_3$  尽可能小, 得出优化线圈的具体参数及响应值如下:

参数:  $A = 600.00$  mm,  $B = 745.57$  mm,  $C = 499.94$  mm,  $D = 500.00$  mm,  $E = 300.00$  mm;

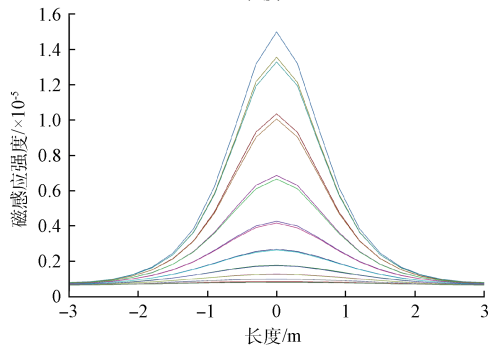
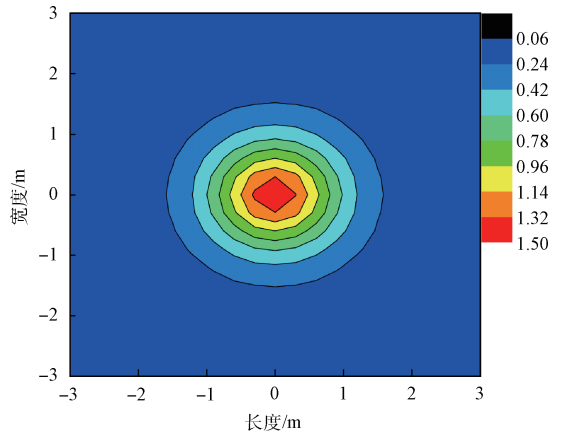
响应值:  $R_1 = 295.86$  mm,  $R_2 = 1.3911 \times 10^{-5}$  T,  $R_3 = 1479.51$  mm。

为了便于以后制作, 对优化后的各个参数进行取整得:  $A = 600$  mm,  $B = 750$  mm,  $C = 500$  mm,  $D = 500$  mm,  $E = 300$  mm。

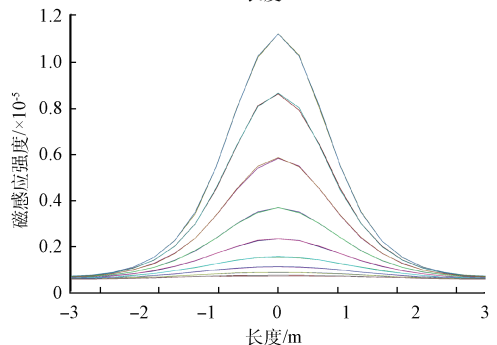
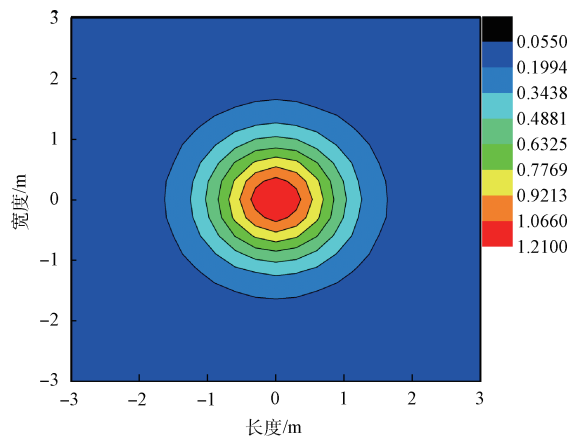
用 Ansys maxwell 软件仿真计算该聚焦线圈和单线圈的磁场分布图和二维梯形, 如图 7 所示。从图中可看出该聚焦线圈比单线圈有明显优势, 聚焦范围小及磁感应强度大等特点, 然后分别得聚焦线圈 3 个响应值的数据为:  $R_1 = 300$  mm,  $R_2 = 1.4998 \times 10^{-5}$  T,  $R_3 = 1460$  mm, 计算各个目标量的相对误差  $\eta_{R1} = 1.4\%$ ,  $\eta_{R2} = 7.8\%$ ,  $\eta_{R3} = 1.3\%$ , 可以看出模拟值和预测值误差非常小, 说明该线圈结构合理可行。

### 6 结论

1) 磁聚焦线圈的优化参数为:  $A = 600$  mm,  $B = 750$  mm,  $C = 500$  mm,  $D = 500$  mm,  $E = 300$  mm, 该线圈结构使得磁场聚焦区域半径由原来的 500 mm 变成 300 mm, 聚焦区域磁场能量比单线圈提高 33%。



(a) 聚焦线圈磁场分布及梯形图



(b) 单线圈磁场分布及梯形图

图 7 磁感应强度和梯度分布