

直动电磁阀参数设计与分析

刘潜峰, 薄涵亮, 秦本科

(清华大学核能与新能源技术研究院 先进反应堆工程与安全教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要:控制棒水压驱动技术是清华大学核能与新能源技术研究院具有自主知识产权的一项新型发明专利技术,组合阀属于该项技术的关键部件。组合阀由3个直动电磁阀组成,电磁阀的性能直接影响组合阀的性能,从而影响控制棒水压驱动技术的运行性能。本工作运用二次回归正交试验拟合方法和复合形优化方法,对直动电磁阀的参数进行了设计和分析,并进行了部分实验验证。分析结果表明:输入直动电磁阀的电流数值对电磁力大小影响最大;通过优化方法可以得出直动电磁阀的优化设计参数和最大电磁力。

关键词:控制棒水压驱动系统;电磁阀;电磁场;二次回归正交试验;复合形方法

中图分类号:TL362

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2010)06-0706-06

Design and Analysis of Direct Action Solenoid Valve

LIU Qian-feng, BO Han-liang, QIN Ben-ke

(Key Laboratory of Advanced Reactor Engineering and Safety of Ministry of Education, Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Hydraulic control rod drive technology (HCRDT) is a newly invented patent of Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University which owns HCRDT's independent intellectual property rights. The integrated valve which is made up of three direct action solenoid valves is the key part of this technology, so the performance of the solenoid valve directly affects the function of the integrated valve and the HCRDT. The parameters of the direct action solenoid valve were designed and analyzed using quadratic regression orthogonal experiment and complex method. The result shows that the current influences the electromagnetic force of the direct action solenoid valve most. Further more, the design parameters of the direct action solenoid valve can be optimized by complex method.

Key words: control rod hydraulic drive system; solenoid valve; electromagnetic field; quadratic regression orthogonal experiment; complex method

核反应堆控制棒驱动机构是反应堆关键的安全设备,担负着反应堆的启动、功率调节及停

堆等重要功能^[1]。控制棒水压驱动系统^[2]是一种新型的内置式控制棒驱动技术,它是在对水

力驱动控制棒系统深入研究的基础上,结合商用压水堆磁力提升器的优点发展而来的。组合阀是控制棒水压驱动系统的关键设备,驱动机构的运动通过组合阀发出的脉冲水流进行控制调节^[3]。直动电磁阀是组合阀的重要组成部分。电磁阀具有重量轻、尺寸小、动作时间极短、便于与计算机连接等特点,因此,在工农业、运输业、航天航空业等各个方面均获得了广泛运用^[4]。按电磁阀能量转换方式,可分为直动式电磁阀和先导式电磁阀两种。直动电磁阀是本工作研究的对象。

1 设计模型

控制棒水压驱动系统中的组合阀结构示于图 1。其中,动铁芯和定铁芯的材料均为 1J50,大推杆的材料为 1Cr18Ni9Ti,线圈上盖板和下盖板的材料为 DT4C,外壳的材料为 10 钢,导磁材料的材料为 4Cr13。线圈匝数为 13 205 匝。直动电磁阀的输入电流为直流电 0.05 ~ 0.35 A。

本工作研究设计直动铁芯阀的如下 5 种参数:定铁芯高度;铁芯吸合面高度;环形密封结构高度;导磁材料长度;电流大小,使电磁吸合力最大。在各个参数工况下的电磁吸合力可通过 ANSYS 软件^[5]求解。

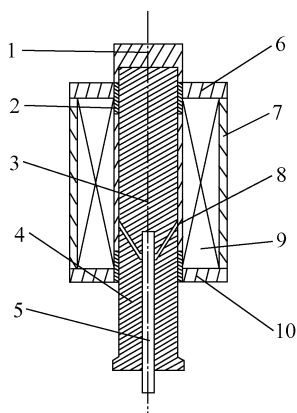


图 1 电磁阀几何模型

Fig. 1 Model of solenoid valve

- 1——顶盖;2——导磁材料;3——动铁芯;
- 4——定铁芯;5——大推杆;6——线圈上盖板;
- 7——外壳;8——环形密封结构;
- 9——线圈;10——线圈下盖板

2 设计方案

2.1 拟合方案

回归正交试验法^[6]一方面正交试验的正交性,可以有计划、合理地在正交表上安排较少的试验次数;另一方面,利用回归分析法中最小二乘原理,可以通过试验的数据,在变量间建立起经验公式。因此,本工作采用二次回归正交试验法拟合 5 种不同参数与电磁力间的关系。各因素取值范围列于表 1。在表 1 中, $z_1 \sim z_5$ 分别为:定铁芯高度,mm;铁芯吸合面高度,mm;环形密封结构高度,mm;导磁材料长度,mm;电流,A。由于经过单变量拟合分析可知,各变量与电磁力的拟合方程为一次或二次方程,故采用二次回归正交试验法。

表 1 因素表

Table 1 Table of factors

变化范围	因素				
	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5
下限	60.00	0.00	0.00	0.00	0.05
上限	120.00	30.00	4.00	50.00	0.35

本拟合方案中共有 5 个因素,10 个交互项,故可选用 $L_{16}(2^{15})$ 正交表。根据设计要求,把因素 $z_1 \sim z_5$ 分别安排在第 1、2、4、8、15 列,第 3、5、9、14、6、10、13、12、11、7 各列恰好分别安排 $z_1 z_2, z_1 z_3, z_1 z_4, z_1 z_5, z_2 z_3, z_2 z_4, z_2 z_5, z_3 z_4, z_3 z_5, z_4 z_5$ 交互项。因素水平编码列于表 2。表 2 中, x_j 为因素编码后的量。

表 2 因素水平编码表

Table 2 Coding of factors and levels

x_j	因素				
	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5
上星号臂($\gamma=1.54$)	120.00	30.00	4.00	50.00	0.35
上水平(1)	109.39	24.70	3.29	41.16	0.30
零水平	90.00	15.00	2.00	25.00	0.20
下水平(-1)	70.61	5.30	0.71	8.84	0.10
下星号臂($\gamma=1.54$)	60.00	0.00	0.00	0.00	0.05

2.2 优化方案

由于本优化问题属于非线性约束优化问题,故选用复合形法^[7]进行优化。复合形法^[8]

具有计算简单、编程方法简易、占计算机的内存小等优点。复合形法的优化步骤参见文献[7]。

2.3 实验验证方案

电磁阀定铁芯长度为 74 mm、铁芯吸合面为平角、环形密封结构高度为 3 mm、无分段导磁材料与电磁阀定铁芯长度为 74 mm、铁芯吸合面高度为 17.3 mm、无环形密封结构、无分段导磁材料,两种组合工况为现有电磁阀的实际工况。对两者进行了实验验证,实验系统由

组合阀上阀盖、电磁线圈、支撑立柱和 BK-2 型测力传感器等组成,实验获得组合阀电磁铁在不同线圈电流和气隙长度下的静态和动态电磁吸力特性。

3 计算结果与分析

3.1 计算结果

利用正交试验方法计算的电磁力结果列于表 3。

表 3 二次回归正交试验
Table 3 Quadratic regression orthogonal experiment

工况	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	电磁力/N
1	109.39	24.70	3.29	41.16	0.30	246.65
2	109.39	24.70	3.29	8.84	0.10	95.74
3	109.39	24.70	0.71	41.16	0.10	100.75
4	109.39	24.70	0.71	8.84	0.30	205.6
5	109.39	5.30	3.29	41.16	0.10	30.769
6	109.39	5.30	3.29	8.84	0.30	350.21
7	109.39	5.30	0.71	41.16	0.30	95.4
8	109.39	5.30	0.71	8.84	0.10	77.954
9	70.61	24.70	3.29	41.16	0.10	36.52
10	70.61	24.70	3.29	8.84	0.30	191.12
11	70.61	24.70	0.71	41.16	0.30	48.873
12	70.61	24.70	0.71	8.84	0.10	104.24
13	70.61	5.30	3.29	41.16	0.30	56.224
14	70.61	5.30	3.29	8.84	0.10	75.413
15	70.61	5.30	0.71	41.16	0.10	27.441
16	70.61	5.30	0.71	8.84	0.30	368.69
17	120.00	15.00	2.00	25.00	0.20	217.16
18	60.00	15.00	2.00	25.00	0.20	66.29
19	90.00	30.00	2.00	25.00	0.20	154.16
20	90.00	0.00	2.00	25.00	0.20	297.22
21	90.00	15.00	4.00	25.00	0.20	267.92
22	90.00	15.00	0.00	25.00	0.20	292.4
23	90.00	15.00	2.00	50.00	0.20	6.44
24	90.00	15.00	2.00	0.00	0.20	10.72
25	90.00	15.00	2.00	25.00	0.35	382.37
26	90.00	15.00	2.00	25.00	0.00	41.85
27	90.00	15.00	2.00	25.00	0.20	282.05

通过二次回归正交试验法可拟合出电磁力于 5 个因素的二次方程, 方程为:

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = 152.97 + 25.40x_1 - 13.18x_2 + 0.76x_3 - 40.07x_4 + 74.12x_5 + 15.09x_1x_2 + 27.10x_1x_3 + 19.65x_1x_4 + 10.71x_1x_5 + 10.46x_2x_3 + 31.16x_2x_4 - 19.00x_2x_5 + 8.86x_3x_4 +$$

$$12.35x_3x_5 - 31.91x_4x_5 - 34.22(x_1^2 - 0.77) + 0.89(x_2^2 - 0.77) + 23.67(x_3^2 - 0.77) - 89.90(x_4^2 - 0.77) - 4.79(x_5^2 - 0.77)$$

总的自由度 $F = 3.31 > F_{0.10}(20, 5)$, 说明回归方程在 $\alpha = 0.10$ 水平上显著。

表 4 列出通过复合形法优化的参数。最后可以得出, 电磁力最大值为 526.18 N。

表 4 优化的设计参数

Table 4 Optimized design parameters

因素	定铁芯高度/mm	铁芯吸合面高度/mm	环形密封结构高度/mm	导磁材料长度/mm	电流/A
x_i	0.71	-1.547	1.547	0.61	1.547
z_i	103.75	0	4	15.11	0.35

3.2 结果分析

在电磁阀铁芯吸合面为平角、无环形密封结构、导磁材料长度为 8.84 mm、电流为 0.2 A 工况下, 图 2 示出定铁芯高度分别为 60.00 和 103.75 mm 的磁力线分布。由图 2 可知, 当定铁芯高度为 103.75 mm 时, 由于动铁芯位于磁力线密集处, 导致动铁芯所受电磁力增加, 故电磁力由 201.33 N 变化为 235.54 N。因此, 当取定铁芯高度为 103.75 mm 时, 电磁力值

最佳。

在电磁阀定铁芯高度为 70.61 mm、环形密封结构高度为 3.29 mm、导磁材料长度为 15.11 mm、电流为 0.3 A 工况下, 图 3 示出铁芯吸合面高度分别为 0.00 和 30.00 mm 的磁力线分布。由图 3 可知, 当铁芯吸合面高度为 0.00 mm 时, 由于铁芯吸合面与磁力线垂直, 导致动铁芯所受电磁力增加, 故电磁力由 156.06 N 变化为 377.47 N, 变化剧烈。因此,

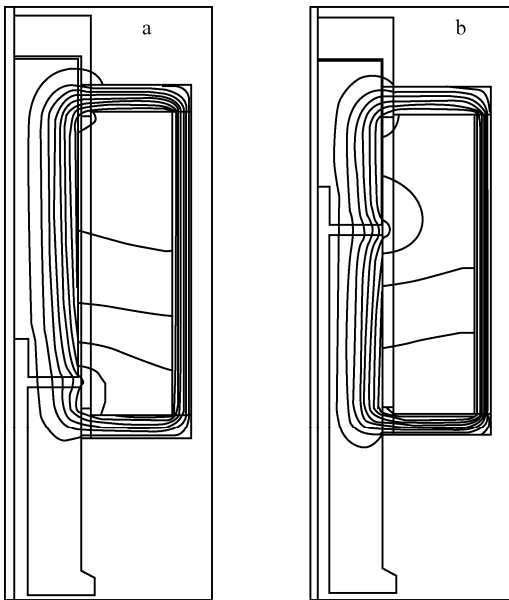


图 2 不同定铁芯高度下电磁阀磁力线分布

Fig. 2 Diagram of magnetic flux line

of solenoid valve with different heights of fixed spool

a—60.00 mm; b—103.75 mm

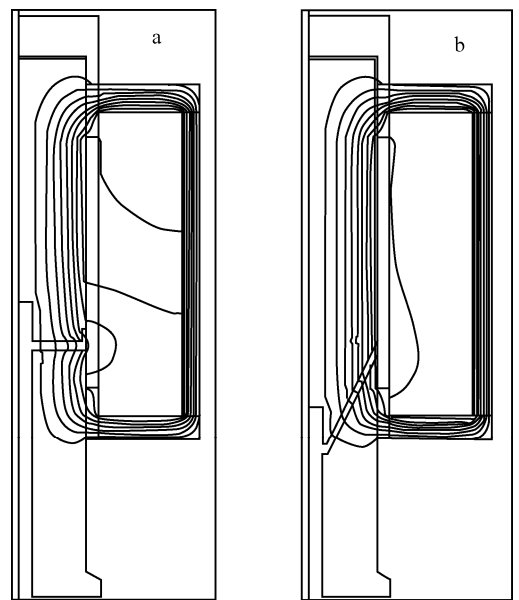


图 3 不同铁芯吸合面高度下电磁阀磁力线分布

Fig. 3 Diagram of magnetic flux line

of solenoid valve with different heights of contact face

a—0.00 mm; b—30.00 mm

当取铁芯吸合面高度为 0.00 mm 时,电磁力值最佳。

当有环形密封结构时,由于部分磁力线被束缚到密封结构周围,减少了漏磁,导致动铁芯周围分布的磁通密度增加,故电磁力增大。因此,当取环形密封结构高度为 4 mm 时,电磁力值最佳。

在电磁阀定铁芯高度为 90.00 mm、铁芯吸合面高度为 24.70 mm、无环形密封结构、电流为 0.25 A 工况下,图 4 示出分段导磁材料长度分别为 0 和 15.11 mm 的磁力线分布。由图 4 可知,当有分段导磁材料结构时,磁力线被较强地束缚在线圈周围,导致动铁芯分布的磁通密度明显增加,因此,电磁力由 120.23 N 变为 204.98 N。当导磁材料继续增加时,由于导磁材料过于将磁力线束缚在线圈周围,导致动铁芯所处位置磁场的磁通密度下降,动铁芯所受电磁力降低。因此,当取导磁材料长度为 15.11 mm 时,电磁力值最佳。

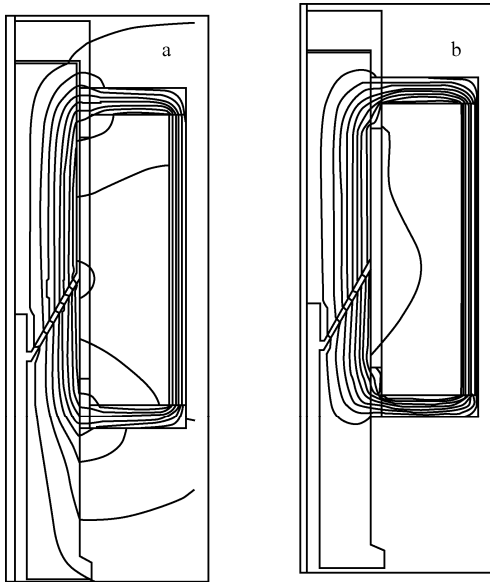


图 4 不同分段导磁材料长度下电磁阀磁力线分布
Fig. 4 Diagram of magnetic flux line of solenoid valve with different lengths of magnetic segment
a—0.00 mm;b—15.11 mm

在电磁阀定铁芯高度为 70.61 mm、铁芯吸合面为平角、环形密封结构高度为 3.29 mm、导磁材料长度为 15.11 mm 工况下,图 5 示出

输入电流分别为 0.05 和 0.35 A 条件下的磁通密度云图。由图 5 可知,电磁阀输入电流由 0.05 A 变为 0.35 A 时,磁通密度变大,从而导致电磁力由 25.06 N 变为 428.6 N,变化十分剧烈。因此,当电流强度为 0.35 A 时,电磁力值最佳。

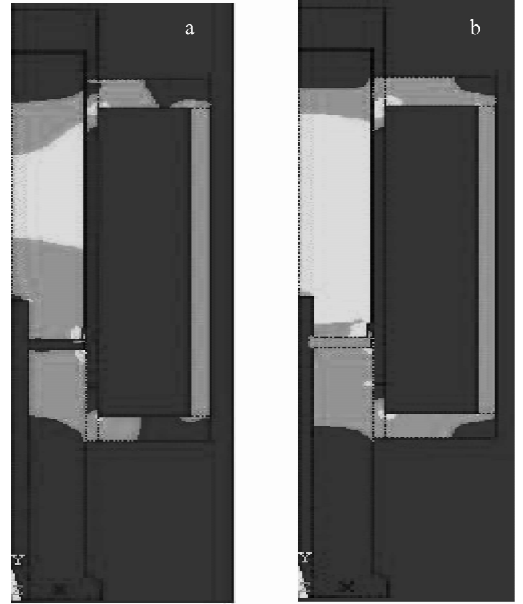


图 5 不同电流工况下电磁阀磁通密度云图
Fig. 5 Diagram of magnetic flux density of solenoid valve under different currents
a—0.05 A;b—0.35 A

在电磁阀定铁芯长度为 74 mm、铁芯吸合面为平角、环形密封结构高度为 3 mm、无分段导磁材料与电磁阀铁芯长度为 74 mm、铁芯吸合面高度为 17.3 mm、无环形密封结构、无分段导磁材料两种工况下,图 6 示出输入电流由 0.05 变为 0.33 A 时的电磁力计算结果和实验结果。由图 6 可知,电流由 0.05 变化到 0.2 A 时,计算结果与实验结果较为接近;当电流由 0.2 变到 0.33 A 时,计算结果较实验结果稍偏大些,这归因于其他材料的非线性、实验温度及实验操作误差等的影响。

4 结论

1) 通过设计和分析可知,输入直动电磁阀的电流取值对电磁力影响最大。

2) 通过优化设计计算结果的综合分析与

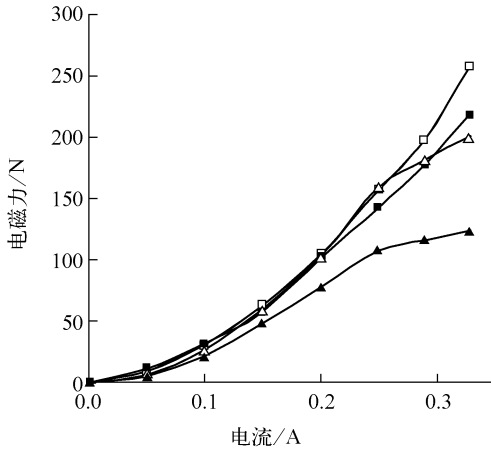


图6 不同电流工况下电磁力计算结果与实验结果的比较

Fig. 6 Comparison of calculated and experimental magnetic forces at different currents

- 铁芯吸合面高度 0.00 mm, 有密封结构, 计算结果;
- 铁芯吸合面高度 0.00 mm, 有密封结构, 实验结果;
- △——铁芯吸合面高度 17.3 mm, 无密封结构, 计算结果;
- ▲——铁芯吸合面高度 17.3 mm, 无密封结构, 实验结果

对比,当取定铁芯高度为 103.75 mm、铁芯吸合面高度为 0.00 mm、密封环形结构高度为 4 mm、导磁材料长度为 15.11 mm、电流为 0.35 A时,电磁力达到最佳,为 526.18 N。

3) 电磁阀实验与数值计算结果的对比表明,在考虑实验误差情况下,计算结果有一定的准确性。

参考文献:

[1] 杜圣华. 核电站[M]. 北京:原子能出版社, 1992:112.

[2] 薄涵亮,郑文祥,王大中,等. 核反应堆控制棒水压驱动技术[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2005,45(3):424-427.
BO Hanliang, ZHENG Wenxiang, WANG Dazhong, et al. Hydraulic control rod drive technology for nuclear reactors[J]. J Tsinghua Univ: Sci & Tech, 2005, 45(3): 424-427(in Chinese).

[3] 薄涵亮,郑文祥,董铎,等. 水力驱动控制棒步进动态过程的研究[J]. 核科学与工程,2000,20(4):322-328.
BO Hanliang, ZHENG Wenxiang, DONG Duo, et al. Analysis on step action of hydraulic control rod driving[J]. Nuclear Science and Engineering, 2000, 20(4): 322-328(in Chinese).

[4] 蒋庆华,李子. 电磁阀的特长和应用[J]. 自动化仪表,1996,17(4):41-44.
JIANG Qinghua, LI Zi. Characteristic and application of solenoid valve[J]. Process Automation Instrumentation, 1996, 17(4): 41-44(in Chinese).

[5] 刘潜峰,薄涵亮,秦本科. 直动电磁阀结构变化对电磁场特性的敏感性分析[J]. 原子能科学技术,2008,42(增刊):689-693.
LIU Qianfeng, BO Hanliang, QIN Benke. Analysis of electromagnetic field of direct action solenoid valve with structure changing[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(Suppl.): 689-693(in Chinese).

[6] 高允彦. 正交及回归试验设计方法[M]. 北京:冶金工业出版社,1988:17-20.

[7] 任耀先. 电磁铁优化设计[M]. 北京:机械工业出版社,1990:168-174.

[8] 雷欧 S S. 工程优化原理及应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,1989:250-252.