

## 电控增压泵高速电磁阀电磁力预测模型构建\*

吴 昕, 杨 昆, 刘金林, 聂 涛, 周 磊, 曾凡明  
(海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**为科学预测超高压共轨系统电控增压泵高速电磁阀的电磁力性能,采用响应面法构建电磁力预测模型,实现其性能的高效预测与优化。建立电控增压泵高速电磁阀的三维有限元仿真模型,并通过试验进行了验证。基于试验设计思想,选取驱动电流、工作气隙、衔铁厚度、线圈匝数、主磁极半径、阻尼孔半径这些关键因素,通过响应面法制定了54组样本点的电磁力数值试验研究方案,构建电磁力预测模型,经过 $R$ 检验,且仿真试验验证电磁力预测模型最大误差为1.3%,表明该模型能够准确预测电控增压泵高速电磁阀电磁力,为超高压共轨系统控制系统设计及优化提供理论依据。

**关键词:**预测模型;电磁力;响应面法;高速电磁阀;试验设计;电控增压泵

**中图分类号:**TK421.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2022)06-184-08

## Construction of prediction model for electromagnetic force on high-speed solenoid valve of electric-controlled booster pump

WU Xin, YANG Kun, LIU Jinlin, NIE Tao, ZHOU Lei, ZENG Fanning

(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** In order to scientifically predict the electromagnetic force performance of the electric-controlled booster pump high-speed solenoid valve for the ultra-high pressure common rail system, the response surface method was used to construct the electromagnetic force prediction model to achieve efficient prediction and optimization of its performance. A three-dimensional finite element simulation model of the high-speed solenoid valve for the electric-controlled booster pump was established and verified by experiments. Based on the idea of experimental design, key factors such as drive current, working air gap, armature thickness, number of coil turns, main magnetic pole radius, and orifice radius were selected. 54 sets of sample points of electromagnetic force numerical test research program were developed through the response surface method. The electromagnetic force prediction model was constructed. After  $R$  test, and the simulation test verifies that the electromagnetic force prediction model has a maximum error of 1.3%, indicating that the model can accurately predict the electromagnetic force of the electric-controlled booster pump high-speed solenoid valve and provide a theoretical basis for the design and optimization of the ultra-high pressure common rail system control system.

**Keywords:** prediction model; electromagnetic force; response surface methodology; high-speed solenoid valve; design of experiments; electric-controlled booster pump

随着能源紧缺和环境污染日益严重,当今世界对柴油机经济性和排放性能的改善日益迫切。超高压喷射和可调喷油规律作为改善柴油机经济性和排放性的有效途径,已成为柴油机领域的研究热点<sup>[1-2]</sup>。电控增压泵作为超高压共轨系统的关键部件,极大影响着超高压共轨系统的燃油喷射特性。电磁阀作为电控增压泵的核心控制元件,其动态响应性能不仅直接影响系统增压性能和控制的灵活性等关键特性,还直接影响系统的

燃油喷射稳定性<sup>[3-5]</sup>。电磁阀的动态响应性能主要是由其电磁力大小决定的,因此,电磁阀电磁力特性近年来受到了学者的广泛关注。

国内外在该领域做了大量研究,杨昆等<sup>[3-5]</sup>开展了超高压共轨系统增压装置电磁阀多参数优化设计,并进行了参数优化后电磁阀特性试验;范立云等<sup>[6]</sup>建立了高速电磁阀的三维有限元模型,以共轨喷油器高速电磁阀为研究对象,开展了电磁阀结构参数对电磁力影响及相关性分析,并给

\* 收稿日期:2020-12-29

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51379212);国家部委基金资助项目(3020401030301);国防科技基金资助项目(20172B0815,20191C080744);湖北省自然科学基金资助项目(2017CFB584);海军工程大学自主立项基金资助项目(425317S023,425317S022)

**作者简介:**吴昕(1986—),女,湖北襄阳人,讲师,博士研究生, E-mail:wuxin980@126.com;

杨昆(通信作者),男,副教授,博士,硕士生导师, E-mail:150006224@qq.com

出了分析结论;刘鹏等<sup>[7]</sup>采用近似模型方法建立了电磁阀多物理场零维近似耦合模型,进行了不同样本点、试验设计方法及近似方法下的模型精度分析,并给出了相关结论;Sun等<sup>[8]</sup>采用三维有限元分析方法,以电控单体泵上的E型高速电磁阀为研究对象,结合电磁能量转换分析了电磁阀结构参数对电磁力的影响规律;Wang等<sup>[9]</sup>通过数值仿真的方法,研究表明安匝数对静态电磁特性有极大影响。

综合分析研究现状,当前大多数研究集中在通过建立电磁阀仿真模型或试验研究进行电磁阀性能分析,为电磁阀的设计与性能优化提供了相应的指导,但电磁阀是一个多物理场的瞬变耦合系统,有着复杂的场内和场间多参数交互作用,常规有限元仿真建模耦合困难,同时计算量大、耗时较多,试验研究又受成本等因素制约,且这些研究方法较难厘清各场多参数间交互作用对电磁阀性能的影响,因此亟须建立一种高效的含各场关键因素的高速电磁阀耦合模型。响应面法是解决此类问题的一种有效试验方法,它用于解决系统参数交互作用分析,能形象直观地显示多参数与系统响应之间的关系,尤其适用于分析电磁阀这种多参数交互影响的多场耦合系统;它可以使用较少的样本数建立预测模型,缩短建模时间,同时适量样本数避免样本数过少或过多所导致模型精度下降问题,真正实现高效快速高精度建模<sup>[10-11]</sup>。

为构建电控增压泵高速电磁阀电磁力模型,实现其性能的高效预测及优化,本文在此背景下开展相关研究,针对某型电控增压泵高速电磁阀,采用数值分析和试验相结合的方法,首先建立并验证了三维有限元仿真模型,然后通过试验设计BBD(Box-Behnken design)响应面法得出训练样本点,建立了电控增压泵高速电磁阀电磁力预测模型,并验证了其准确性,为超高压共轨系统控制系统设计及优化提供理论依据。

## 1 电控增压泵电磁阀工作原理

超高压共轨系统是根据柴油机运转工况的变化,通过加装在共轨腔和喷油器之间的电控增压泵,分别在基压和高压两种压力下向喷油器供油,同时,通过控制电控增压器和喷油器的电磁阀开启和关闭时刻,实现喷油速率从矩形变化到斜坡形直至靴形的柔性可调<sup>[3]</sup>。该系统主要技术参数见表1,结构示意如图1所示,电控增压泵原理如图2所示。

表1 超高压共轨系统主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of ultra-high pressure common rail system			
名称	型号	主要技术参数	数值
单缸柴油机电控增压泵	ZH1130	额定功率/kW	20.22
		额定转速/(r/min)	2 200
		缸径×行程/mm×mm	130×120
		燃油消耗率/[g/(kW·h)]	239.4
高压油泵	CB3E3300B	循环供油量/mm <sup>3</sup>	900
共轨管	G901-000	容积/mL	165
电控增压泵	自制	增压活塞大端直径/mm	14
		增压活塞小端直径/mm	8
		控制室进油节流孔直径/mm	0.2
		控制室出油节流孔直径/mm	1.1
电控喷油器	P093-357	喷孔/mm	8×∅0.192
		安装角度/(°)	24

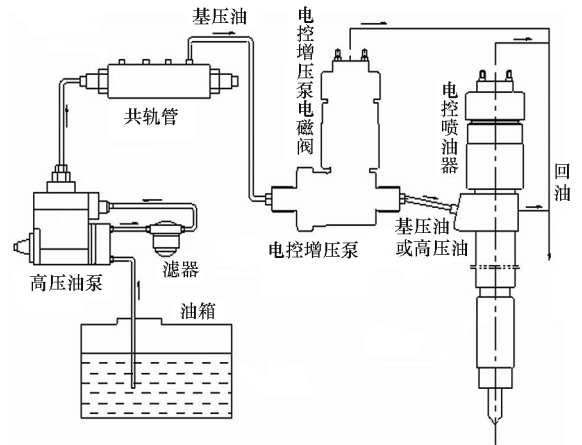


图1 超高压共轨系统组成

Fig. 1 Structure of ultra-high pressure common rail system

## 2 计算模型

### 2.1 数学模型

求解电磁场的基本理论是Maxwell微分方程组,包括高斯电通、法拉第电磁感应、高斯磁通以及安培环路四个定律,采用有限元离散形式,将工程中的电磁场计算转变为矩阵求解,进而直接或间接解得各物理量,分别由式(1)~(4)表示。

$$\nabla \cdot D = \rho_{\text{e0}} \quad (1)$$

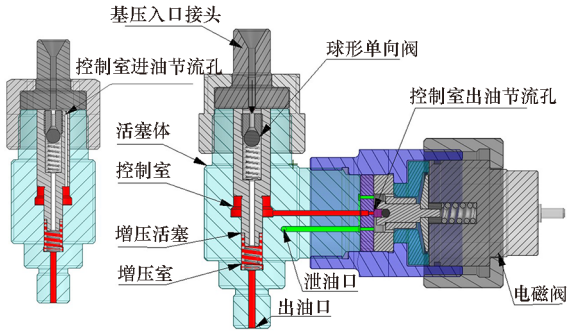


图 2 电控增压泵结构原理

Fig. 2 Structure principle of electric-controlled booster pump

$$\nabla \times E = -\partial B / \partial t \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times H = j_0 + \partial D / \partial t \quad (4)$$

其中： $D$  为电通密度，单位  $C/m^2$ ； $\rho_{e0}$  为自由电荷体密度，单位  $C/m^3$ ； $E$  为电场强度，单位  $N/C$ ； $B$  为磁感应强度，单位  $T$ ； $t$  为时间，单位  $s$ ； $H$  为磁场强度，单位  $A/m$ ； $j_0$  为传导电流密度，单位  $A/m^2$ 。

根据虚功原理，计算衔铁受到的电磁力<sup>[12]</sup>为：

$$F_m = \frac{B^2 S}{2\mu_0} = \frac{\phi^2}{2S\mu_0} = \frac{\mu_0 (NI)^2 S}{2\delta^2} \quad (5)$$

其中： $\mu_0$  为真空磁导率，单位  $H/m$ ； $\delta$  为工作气隙，单位  $m$ ； $S$  为铁芯截面积，单位  $m^2$ ； $\phi$  为总磁通量，

单位  $Wb$ ； $B$  为气隙磁感应强度，单位  $T$ ； $NI$  为安匝数。

## 2.2 仿真模型建立

针对超高压共轨系统电控增压泵高速电磁阀，表 2 列出了该仿真模型参数的基准值。在 ANSYS Maxwell 软件中建立以铁芯、衔铁、激励线圈为主要部件的电磁阀三维有限元仿真模型，以缩短计算周期，同时，将铁芯处理成一个单一块的叠层硅钢片，激励线圈等效为一个线圈环，将纵截面设置为激励输入端子，建立以空气环境围绕的求解域，并添加模型各部件材料，采用自适应网格剖分进行计算求解。如图 3 所示为电磁阀电磁力仿真模型。

表 2 参数取值

Tab. 2 Parameter selection

参数	基准值
主磁极外径/mm	9.4
副磁极内径/mm	12.9
线圈匝数	70
衔铁厚度/mm	3
阻尼孔位置/mm	9.65
阻尼孔半径/mm	2.5
工作气隙/mm	0.25
驱动电流/A	15

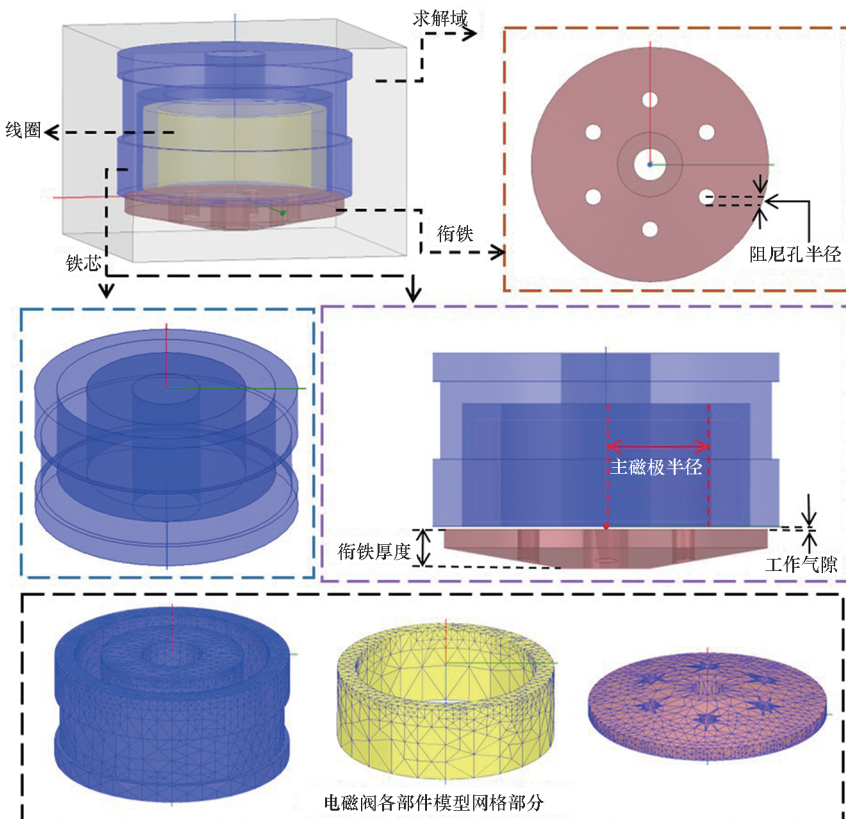


图 3 电磁阀电磁力仿真模型

Fig. 3 Electromagnetic force simulation model of solenoid valve

## 2.3 模型验证

验证所用电磁力测试台架主要由电磁铁、衔铁、S型拉压力传感器、放大器、电磁阀驱动模块等组成,如图4所示。电磁铁通过调节螺钉固定在测试台架的一端,S型拉压力传感器通过连接螺栓与衔铁(芯轴)相连,一同固定在台架的另一端,通过调节上、下、左、右四个方向的调节螺钉确保与电磁铁同轴,进而确保电磁铁和衔铁同轴。当使用塞尺测量确保衔铁与电磁铁达到所需工作气隙后,将电磁铁固定。台架调节装配好后,通过驱动电路给电磁铁线圈施加脉宽信号,电磁铁产生电磁力吸引衔铁,在S型拉压力传感器中产生微弱的电压信号,该信号经过高精度放大器放大后传输到计算机,即得到所测电磁力。试验时可通过改变驱动电流或工作气隙来实现不同测试条件下试验数据的测量。

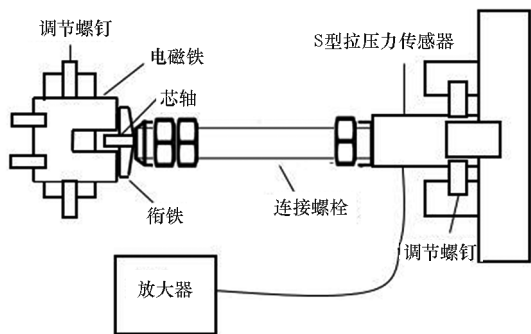


图4 电磁阀电磁力测试台架结构

Fig.4 Structure diagram of solenoid valve electromagnetic force test bench

图5为电磁阀电磁力仿真结果与试验结果对比图,最大误差为5.3%,这是由于仿真采用材料初始磁化曲线近似替代实际磁化曲线,且制造过程中的热处理等工艺和工作时高温导致材料磁导率有所下降,因而仿真值略高于试验值,这种误差在可接受范围内,证明了仿真模型的准确性。

## 3 电磁力预测模型构建

### 3.1 设计变量选取

根据所建电磁力计算模型,驱动电流、工作气隙、衔铁厚度、线圈匝数、阻尼孔半径、主磁极半径会对电磁力产生较大影响,因此本文重点结合上述参数进行电磁力预测模型构建。

### 3.2 响应面法原理及建模

响应面法最开始是通过 Box 与 Wilson 在

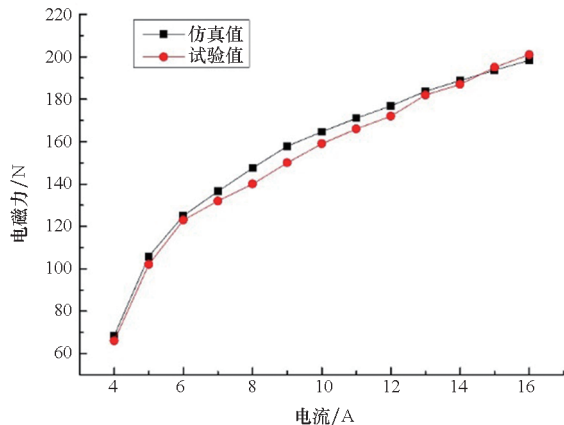


图5 电磁力仿真值和试验值随电流变化的对比曲线

Fig.5 Comparison curve of electromagnetic force simulation value and test value with current variation

1951年提出的,是数学方法和统计方法结合的产物,用于对响应受多个变量影响的问题进行建模和分析。其实质是使用科学合理的试验设计因素水平并获取响应值,应用多元回归运算方程来模拟因素和响应值之间的近似函数关系,进而达到优化或预测响应变量的目的<sup>[13]</sup>。基于电磁阀多物理场内多参数交互影响的考虑,同时兼顾拟合精度和计算效率,本文选取二次多项式响应面模型来构造近似模型,其数学表达式为:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (6)$$

式中: $y$ 为响应值; $\beta_0$ 为常数项; $\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ 为回归系数; $x_i, x_j$ 为因素水平值; $\varepsilon$ 为误差; $k$ 为因素数,本文中 $k=6$ 。

### 3.3 Box-Benhnken 试验设计

基于电控增压泵高速电磁阀电磁力受多物理场内多参数交互影响,各参数之间存在典型的非线性关系<sup>[14]</sup>,本文采用 BBD 进行试验设计。BBD 试验设计是一种评价响应值和因素间非线性关系的试验设计方法,常用于对因素的非线性影响进行研究时的试验<sup>[15]</sup>,示意图如图6所示。本次试验中,采取 BBD 响应面设计方法,只需要 54 组就能对 6 个自变量(见表3)以及它们各自交互作用进行分析,提高了运算效率。

根据 BBD 中心组合试验设计理念,将驱动电流、工作气隙、衔铁厚度、线圈匝数、主磁极半径、阻尼孔半径这 6 个电磁力影响因素作为试验的自变量,分别记为  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$  和

$X_6$ 。将电磁力  $F$  作为本次试验的因变量,6 个自变量各自取三水平,分别以  $-1, 0, +1$  作为每个因素的低、中、高三个水平进行编码,制定试验方案。

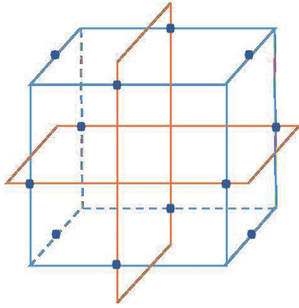


图 6 3 因素的 BBD 设计  
Fig. 6 BBD of three factors

表 3 试验因素和水平

Tab. 3 Factors and levels of test

自变量因素	符号	水平
驱动电流/A	$X_1$	5, 12.5, 20
工作气隙/mm	$X_2$	0.1, 0.2, 0.3
衔铁厚度/mm	$X_3$	2, 2.75, 3.5
线圈匝数	$X_4$	40, 70, 100
主磁极半径/mm	$X_5$	6.6, 8, 9.4
阻尼孔半径/mm	$X_6$	0.5, 1.25, 2

### 3.4 响应面模型建立

采用最小二乘法拟合得到电磁力的多元二次回归预测模型,表达式见式(7):

$$\begin{aligned}
 F(X) = & 185.04 + 48.90X_1 - 35.44X_2 + 31.09X_3 + \\
 & 34.49X_4 + 23.37X_5 - 28.21X_6 + 3.18X_1X_2 + \\
 & 11.88X_1X_3 - 4.72X_1X_4 + 6.04X_1X_5 - \\
 & 10.22X_1X_6 - 6.10X_2X_3 + 6.35X_2X_4 - \\
 & 0.7024X_2X_5 + 3.92X_2X_6 + 6.46X_3X_4 + \\
 & 16.15X_3X_5 + 1.24X_3X_6 + 4.43X_4X_5 - \\
 & 3.20X_4X_6 - 13.81X_5X_6 - 16.03X_1^2 + \\
 & 8.57X_2^2 - 3.10X_3^2 - 7.99X_4^2 - \\
 & 27.21X_5^2 - 5.01X_6^2 \quad (7)
 \end{aligned}$$

式中: $F(X)$  为电控增压泵高速电磁阀电磁力,单位为 N。

## 4 结果与分析

### 4.1 模型方差分析

对所建模型进行方差分析和模型、回归系数

显著性检验,见表 4。

由表 4 的方差分析可以看出,电控增压泵电磁阀电磁力模型  $P < 0.0001$ ,表明该回归预测模型具有显著性;失拟项  $P = 0.9999 > 0.05$ ,不具有显著性,即该模型拟合效果好,可以用于分析各因素对电控增压泵高速电磁阀电磁力的影响。

### 4.2 模型评价

#### 4.2.1 决定系数 $R^2$

决定系数  $R^2$  是针对回归预测模型展开评价判定的主要标准,其代表由回归模型所解释的试验结果的误差百分比,表示回归模型与回归模型试验结果之间的一致程度大小。调整决定系数  $R_{adj}^2$  是一个用于描述多个自变量对因变量的联合影响程度的统计量,克服了  $R^2$  随自变量的增加而增大的缺陷。预测决定系数  $R_{pred}^2$  用于验证模型的预测能力。 $R^2, R_{adj}^2$  及  $R_{pred}^2$  表达式分别见式(8)~(10)。

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (8)$$

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SS_E/d_E}{SS_T/d_T} = 1 - \frac{d_T}{d_E}(1 - R^2) \quad (9)$$

$$R_{pred}^2 = 1 - \frac{P_{press}}{SS_T} \quad (10)$$

式中: $SS_E$  表示残差平方和; $SS_T = SS_E + SS_M$  表示模型的总平方和,其中  $SS_M$  表示模型平方和; $d_E$  表示残差平方和的自由度; $d_T$  表示模型总平方和的自由度; $P_{press}$  表示预测残差平方和。

3 种评价指标取值有效分布范围在 0~1 之间,其中  $R^2, R_{adj}^2, R_{pred}^2$  越接近 1,表示模型拟合效果越好。

响应面精度检验见表 5,由表可知,本次回归中  $R^2 = 0.9844$ ,说明因变量和自变量之间的非线性关系较明显; $R_{adj}^2 = 0.9683$ ,表明所构造的响应面模型能解释说明 96.83% 反应数值的改变,且  $R^2$  与  $R_{adj}^2$  差值只有 0.0161,表明模型拟合效果好; $R_{pred}^2 = 0.9187, R_{adj}^2$  与  $R_{pred}^2$  之差为 0.0496,表明模型具有良好的预测能力。因此,本次试验所构造的响应面模型显著度较高,可以较好地对比试验数值展开预测、分析。

#### 4.2.2 残差正态分布图

使用残差正态分布图能够评价判定残差的正态性。如图 7 所示,大部分试验点都在回归线上,只有少数试验点偏离回归线,说明模型准确性良好。



表 4 回归模型系数的显著性检验  
Tab.4 Significance test of regression coefficient

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	$1.895 \times 10^5$	27	7 019. 71	60. 95	< 0. 000 1	***
$X_1$	57 379. 71	1	57 379. 71	498. 20	< 0. 000 1	***
$X_2$	30 144. 05	1	30 144. 05	261. 72	< 0. 000 1	***
$X_3$	23 200. 31	1	23 200. 31	201. 44	< 0. 000 1	***
$X_4$	28 544. 12	1	28 544. 12	247. 83	< 0. 000 1	***
$X_5$	13 112. 66	1	13 112. 66	113. 85	< 0. 000 1	***
$X_6$	19 093. 41	1	19 093. 41	165. 78	< 0. 000 1	***
$X_1X_2$	80. 99	1	80. 99	0. 703 2	0. 409 3	*
$X_1X_3$	1 129. 35	1	1 129. 35	9. 81	0. 004 3	**
$X_1X_4$	356. 74	1	356. 74	3. 10	0. 090 2	*
$X_1X_5$	291. 53	1	291. 53	2. 53	0. 123 7	*
$X_1X_6$	836. 20	1	836. 20	7. 26	0. 012 2	**
$X_2X_3$	297. 76	1	297. 76	2. 59	0. 119 9	*
$X_2X_4$	322. 75	1	322. 75	2. 80	0. 106 1	*
$X_2X_5$	7. 89	1	7. 89	0. 068 5	0. 795 6	*
$X_2X_6$	123. 07	1	123. 07	1. 07	0. 310 8	*
$X_3X_4$	333. 94	1	333. 94	2. 90	0. 100 5	*
$X_3X_5$	2 087. 06	1	2 087. 06	18. 12	0. 000 2	***
$X_3X_6$	24. 57	1	24. 57	0. 213 3	0. 648 0	*
$X_4X_5$	156. 68	1	156. 68	1. 36	0. 254 1	*
$X_4X_6$	81. 78	1	81. 78	0. 710 0	0. 407 1	*
$X_5X_6$	1 525. 87	1	1 525. 87	13. 25	0. 001 2	**
$X_1^2$	2 642. 20	1	2 642. 20	22. 94	< 0. 000 1	***
$X_2^2$	755. 56	1	755. 56	6. 56	0. 016 6	**
$X_3^2$	98. 95	1	98. 95	0. 859 1	0. 362 5	*
$X_4^2$	656. 79	1	656. 79	5. 70	0. 024 5	**
$X_5^2$	7 615. 00	1	7 615. 00	66. 12	< 0. 000 1	***
$X_6^2$	257. 93	1	257. 93	2. 24	0. 146 6	*
残差	2 994. 54	26	115. 17			
失拟项	2 994. 54	21	142. 60	0. 126 1	0. 999 9	
纯误差	17 994. 68	17	1 058. 51			
总和	$1.925 \times 10^5$	53				

注:\*\*\*表示显著性在 0.001 水平( $P \leq 0.001$ );\*\*表示显著性在 0.05 水平( $0.001 < P \leq 0.05$ );\*表示不显著( $P > 0.05$ )。

表 5 响应面精度检验

Tab. 5 Response surface accuracy test

评价指标	$F(X)$
$R^2$	0.984 4
$R^2_{adj}$	0.968 3
$R^2_{pred}$	0.918 7

### 4.3 模型验证

随机选取各参数取值范围内 5 组数据对所建模型进行验证,表 6 即为回归预测模型所得电磁力与数值仿真计算结果对比,误差最大为 1.3%,说明了预测模型的准确性。

表 6 预测与仿真计算结果对比

Tab. 6 Comparison of predicted and simulation results

$X_1/A$	$X_2/mm$	$X_3/mm$	$X_4$	$X_5/mm$	$X_6/mm$	预测/N	仿真/N	相对误差/%
15	0.25	2.5	60	9.2	1.0	166.34	168.60	1.3
15	0.25	3.0	65	9.0	1.5	172.87	174.92	1.2
15	0.25	2.5	60	9.2	1.5	145.52	144.22	0.9
18	0.22	3.0	65	9.0	1.5	198.84	197.66	0.6
18	0.22	2.5	60	9.2	1.0	186.95	188.77	1.0
18	0.22	3.0	65	9.0	1.0	228.21	226.48	0.8

## 5 结论

1) 构建了电控增压泵高速电磁阀的三维有限元仿真模型,并通过电磁力试验平台验证了仿真模型的准确性,为电控增压泵高速电磁阀特性研究构建了较高精度的仿真平台。

2) 选取驱动电流、工作气隙、衔铁厚度、线圈匝数、阻尼孔半径、主磁极半径为因素,采用 BBD 响应面法建立了电控增压泵高速电磁阀电磁力预测模型,该方法选取适量的样本点避免大量试验耗时过多及建模精度下降问题,提高了运算效率。

3) 电控增压泵高速电磁阀电磁力预测模型的  $R^2$ 、 $R^2_{adj}$ 、 $R^2_{pred}$  分别为 0.984 4、0.968 3、0.918 7,且通过数值试验验证电磁力预测模型最大误差为 1.3%,表明模型具有良好的准确性和预测能力,为实现电控增压泵高速电磁阀高效参数设计和性能分析预测奠定了基础。

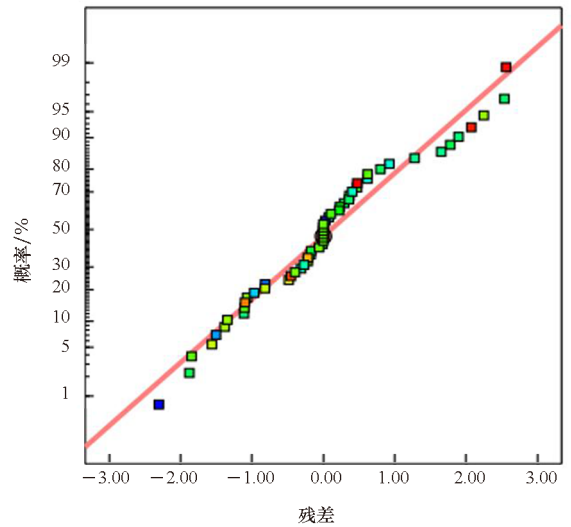


图 7 残差正态分布图

Fig. 7 Normal residual plot

## 参考文献 (References)

[1] SALVADOR F J, DE LA MORENA J, MARTÍNEZ-LÓPEZ J, et al. Assessment of compressibility effects on internal nozzle flow in diesel injectors at very high injection pressures [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 132: 221–230.

[2] YU S H, YIN B F, JIA H K, et al. Numerical research on micro diesel spray characteristics under ultra-high injection pressure by large eddy simulation (LES) [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2017, 64: 129–136.

[3] 杨昆, 刘振明, 周磊, 等. 采用遗传算法的电控增压器电磁阀优化设计 [J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(3): 56–62.  
YANG K, LIU Z M, ZHOU L, et al. Optimization design of solenoid valve for electric-controlled pressure amplifier using genetic algorithm [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(3): 56–62. (in Chinese)

[4] 吴昕, 杨昆, 刘金林, 等. 电控增压泵高速电磁阀关键参数交互作用分析 [J]. 海军工程大学学报, 2022, 34(3): 26–31.  
WU X, YANG K, LIU J L, et al. Analysis on key parameters

- interaction effects of electric-controlled booster pump high-speed solenoid valve [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2022, 34(3): 26–31. (in Chinese)
- [5] 杨昆,周磊,王刚,等. 超高压共轨系统性能试验研究[J]. *西北工业大学学报*, 2021, 39(4): 883–890.  
YANG K, ZHOU L, WANG G, et al. Experimental study on the performance of ultra high pressure common rail system[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2021, 39(4): 883–890. (in Chinese)
- [6] 范立云,高明春,马修真,等. 电控单体泵高速电磁阀磁力关键影响因素[J]. *内燃机学报*, 2012, 30(4): 359–364.  
FAN L Y, GAO M C, MA X Z, et al. Investigation on key influencing factors of electromagnetic force of high-speed solenoid valve for electronic unit pump[J]. *Transactions of CSICE*, 2012, 30(4): 359–364. (in Chinese)
- [7] 刘鹏,范立云,白云,等. 高速电磁阀磁力近似模型的构建与分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 96–101.  
LIU P, FAN L Y, BAI Y, et al. Modeling and analysis of electromagnetic force approximate model of high-speed solenoid valve[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(16): 96–101. (in Chinese)
- [8] SUN Z Y, LI G X, WANG L, et al. Effects of structure parameters on the static electromagnetic characteristics of solenoid valve for an electronic unit pump [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 113: 119–130.
- [9] WANG L, LI G X, XU C L, et al. Effect of characteristic parameters on the magnetic properties of solenoid valve for high-pressure common rail diesel engine [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 127: 656–666.
- [10] BEZERRA M A, SANTELLI R E, OLIVEIRA E P, et al. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry [J]. *Talanta*, 2008, 76(5): 965–977.
- [11] HOSEINI S S, SOBATI M A. Performance and emission characteristics of a diesel engine operating on different water in diesel emulsion fuels; optimization using response surface methodology (RSM) [J]. *Frontiers in Energy*, 2019, 13: 636–657.
- [12] PATIL K R, THIPSE S S. Experimental investigation of CI engine combustion, performance and emissions in DEE-kerosene-diesel blends of high DEE concentration[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 89: 396–408.
- [13] NIJU S, RABIA R, DEVI K S, et al. Modified Malleus malleus shells for biodiesel production from waste cooking oil: an optimization study using Box-Behnken design [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2020, 11: 793–806.
- [14] NASERADINMOUSAVI P, NATARAJ C. Nonlinear mathematical modeling of butterfly valves driven by solenoid actuators [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, 35(5): 2324–2335.
- [15] ERIKSSON L, JOHANSSON E, KETTANEH-WOLD N, et al. Multi-and megavariable data analysis: part I: basic principles and applications[M]. Umea: Umetrics Academy, 2006.