

# 高速电磁阀电磁力近似模型的构建与分析

刘 鹏, 范立云<sup>\*</sup>, 白 云, 马修真, 宋恩哲

(哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 为提高高速电磁阀动态响应速度, 采用近似模型方法, 以建立电磁阀多物理场零维近似耦合模型, 实现其性能高效预测及优化。首先创建了柴油机电控单体泵高速电磁阀电磁力有限元计算模型, 并通过与试验对比验证了模型的精度。结合面中心复合设计、嵌套中心复合设计、最优拉丁超立方设计与二次多项式响应面模型、Kriging 模型、径向基函数模型, 构建了 18 组电磁力近似模型。分析了不同样本点集大小、试验设计方法及近似方法对近似模型精度的影响。得出近似模型的精度随着样本点集的增大并非呈现单调递增的关系; 而最优拉丁超立方试验设计与 Kriging 模型、径向基函数模型具有良好的适应性。构建高速电磁阀工作气隙、驱动电流、线圈匝数、副磁极半径、衔铁厚度、衔铁半径等关键参数的电磁力近似模型最佳方案是最优拉丁方试验设计与 Kriging 模型的组合, 样本点集大小为二次多项式响应面模型所需最少样本点数的 1.5 倍, 模型复相关系数、平均绝对误差、均方根误差值分别为 0.97、0.06、0.09。该研究为高速电磁阀多物理场零维近似耦合模型的建立及其优化提供了参考。

**关键词:** 阀; 有限元法; 模型; 高速电磁阀; 电磁力; 试验设计

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.014

中图分类号: TH134

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-16-0096-06

刘 鹏, 范立云, 白 云, 马修真, 宋恩哲. 高速电磁阀电磁力近似模型的构建与分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 96—101. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.014 http://www.tcsae.org

Liu Peng, Fan Liyun, Bai Yun, Ma Xiuzhen, Song Enzhe. Modeling and analysis of electromagnetic force approximate model of high-speed solenoid valve[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(16): 96—101. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.014 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

随着电磁阀技术的迅速发展, 电磁阀在航空、航天、汽车、船舶等高科技核心领域得到了广泛的应用。本文研究的是应用于柴油机电控单体泵燃油系统的高速电磁阀, 其动态响应直接影响喷油的控制精度及灵活控制规律。提高高速电磁阀动态响应速度, 将能实现更精准的喷油精度及更灵活的喷油规律, 从而降低柴油机排放, 提高其经济性<sup>[1-4]</sup>。

国内外学者关于电磁阀的研究主要集中在模型的建立, 动静态关键参数的分析, 驱动电路的优化。陶润等<sup>[5]</sup>, Huber B 等<sup>[6]</sup>, Chung N 等<sup>[7]</sup>利用气隙、电流与静态电磁力的关系 MAP 建立了电磁阀的动态仿真模型; 李丕茂等<sup>[8]</sup>, Melgoza E 等<sup>[9]</sup>基于电磁阀静态气隙、电流分别与磁链和电磁力的关系构建了其动态仿真模型; Ertl M<sup>[10]</sup>等基于有限元方法构建了机械电磁耦合的电磁阀瞬态模型; 相关学者<sup>[11-13]</sup>将电磁软件 Ansoft Maxwell 计算得到的气隙、

电流与磁链、电磁力的数据以插值表格的形式导入系统仿真软件 AMESim 中, 实现了电磁阀电磁回路、机械部件和液压系统之间耦合, 提高了电磁阀仿真的精度; 郝守刚等<sup>[14]</sup>在恒压驱动下对电磁阀动态影响进行了分析; 范立云等<sup>[15-16]</sup>对影响电磁阀电磁力的关键因素及其参数间的交互作用进行了分析; Lu Haifeng 等<sup>[17]</sup>对不同的驱动电路形式进行了分析, 并应用预激励和反向激励的驱动形式加快电磁阀响应; 郭树满等<sup>[18]</sup>, 陈礼勇等<sup>[19]</sup>对电磁阀驱动方式及续流回路进行了分析, 并分别设计了基于自举电路的驱动电路和双电源双边驱动电路, 提高了其保持阶段电流的稳定性、关闭阶段的响应特性和控制精度。

上述研究为电磁阀的设计与优化提供了相应指导, 但高速电磁阀是一个多物理场耦合的复杂工作系统, 在场内及场间多参数交互作用现象。以上研究只针对单场或局部耦合场进行优化, 优化效果及效率较低, 缺乏高效的含各场关键优化参数的高速电磁阀耦合模型。近似模型为此提供了良好的解决方法, 它是通过近似方法对离散数据进行拟合或插值构造的零维数学模型, 计算效率高<sup>[20-21]</sup>。采用近似模型方法构建出高速电磁阀各场关键参数的近似模型, 若其精度满足要求, 则可替代各场的 CAE 分析或相应试验, 实现对各物理场的集成, 解决了常规 CAE (computer aided engineering, 计算机辅助工程) 场耦合困难及计算量大且繁琐问题。近似模型建立主要包括两部分内容: 1) 通过试验设计产生模型训练样本点; 2) 利用近似方法对训练样本点进行拟合或插值<sup>[22]</sup>。

为构建高速电磁阀含各场关键优化参数的零维近似

收稿日期: 2015-05-28 修订日期: 2015-07-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51379041, 51279037); 教育部科学技术研究资助项目 (113060A)

作者简介: 刘 鹏, 男, 博士生, 主要方向为柴油机电控喷油技术, 电磁执行器。哈尔滨 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 150001。

Email: hrbdlp@163.com

\*通信作者: 范立云, 男, 教授, 博士, 主要方向为柴油机电控喷油技术。哈尔滨 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 150001。

Email: fanly\_01@163.com

耦合模型, 实现其性能高效预测及优化, 本文从高速电磁阀关键的磁场子系统出发, 首先创建并验证了高速电磁阀电磁力有限元模型, 然后针对典型的试验设计方法及近似方法分别构造的电磁力近似模型进行了对比, 以期得到预测精度最高的电磁力近似模型, 为高速电磁阀多物理场零维近似耦合模型的建立及其优化提供参考。

## 1 高速电磁阀结构及原理

电控单体泵高速电磁阀的基本结构如图 1 所示, 其为一两位三通阀, 主要包括铁芯、线圈、衔铁、控制阀杆、衔铁复位弹簧、堵头、接线柱等零部件。通过对电磁阀线圈通断电的控制, 进而控制其电磁力的产生与消失, 实现高低压油路的切换, 控制喷油; 喷油量和喷油定时则通过电磁阀闭合时间和闭合时刻来调节<sup>[3,15-16]</sup>。

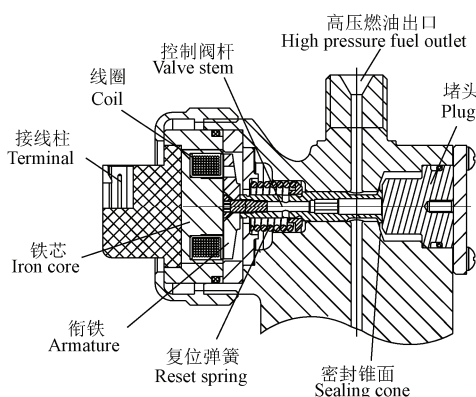


图 1 高速电磁阀结构示意图

Fig.1 Schematic of high-speed solenoid valve

## 2 电磁阀电磁力有限元计算模型

由于所研究电磁阀为非轴对称结构, 为了保证计算精度, 在 Ansoft Maxwell 专业电磁仿真环境中采取三维建模分析。同时对模型进行了相应简化, 忽略电磁阀中非软磁导磁结构, 只针对其衔铁、线圈、铁芯 3 个关键结构进行建模, 可提高其计算效率但又不会降低其计算精度。整个电磁阀电磁力有限元计算模型如图 2 所示, 采用自适应网格剖分进行求解。模型的精度在文献[10-11]已得到验证, 其不同工作气隙及驱动电流下电磁力最大误差为 9% (如图 3 所示)。

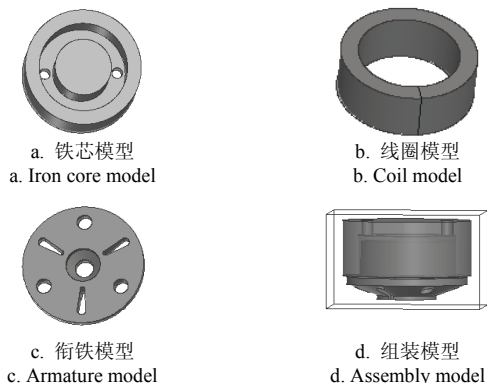


图 2 高速电磁阀电磁力有限元计算模型

Fig.2 Electromagnetic force finite element numeration model of high-speed solenoid valve

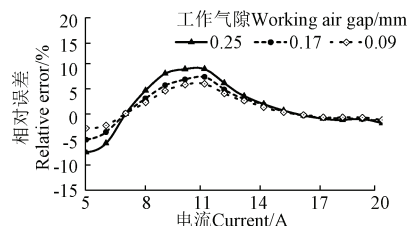


图 3 电磁力试验值与仿真值的相对误差

Fig.3 Relative errors of electromagnetic force's experimental and simulated results

## 3 试验设计

本文主要采用典型的中心复合设计和最优拉丁超立方设计 (optimal latin hypercube design, OLH), 对设计空间分别进行采样, 另外应用 sobol 随机试验设计产生测试样本点对构建的近似模型进行验证。

### 3.1 中心复合设计

中心复合设计一般由有  $n_f$  个试验的  $2n$  析因设计或分辨度为  $V$  的分式析因设计,  $2n$  个星点或轴向点以及  $n_c$  个中心点组成<sup>[23]</sup>。图 4a 是  $n$  为 2 的中心复合设计, 中心点到因子高低水平的距离为 1 (变量以规范化单位表示), 星点或轴向点到中心点的距离为  $\alpha$ 。它另有 2 种变异形式, 一种是  $\alpha$  为 1 时的面中心复合设计 (central composite faced-centered design, CCF, 图 4b), 它的星点或轴向点位于正方形边长中心; 另一种是除了星点或轴向点位于正方形边长中心外, 析因设计或分式析因设计点落在设计区域的内部, 叫做嵌套中心复合设计 (central composite inscribed design, CCI, 图 4c)。因本文只在参数范围内研究其预测模型, 故采用其变异形式进行试验设计。

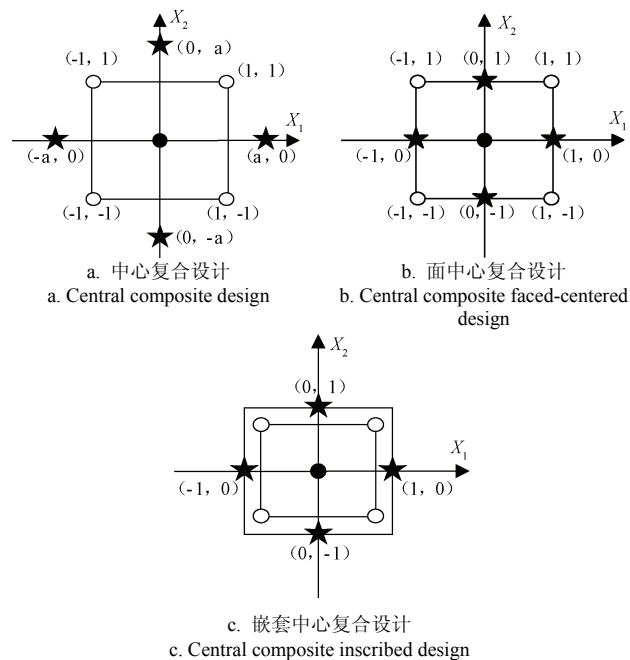


图 4 中心复合设计及其变异形式

Fig.4 Central composite design and its variant forms

### 3.2 最优拉丁超立方设计

最优拉丁超立方设计是在拉丁超立方设计的基础

上, 运用一定的优化算法使得样本点尽可能的均匀分布在整個设计空间中, 具有更好的空间填充性和均衡性, 本文采用的优化准则为极大极小距离准则 (maximin distance criterion) [24]。图 5a、图 5b 分别是普通拉丁超立方设计、最优拉丁超立方设计样本点的分布情况, 易知最优拉丁超立方设计样本点具有更好的均匀分布性。

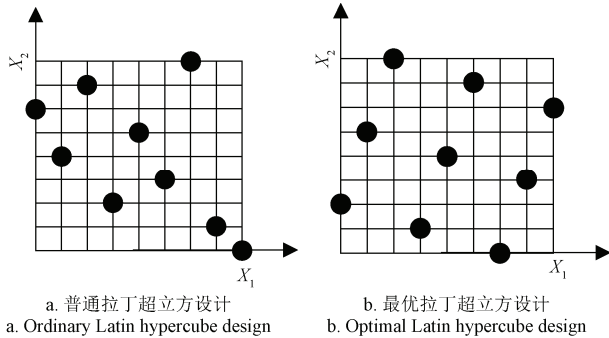


图 5 拉丁超立方设计  
Fig.5 Latin hypercube design

#### 4 近似方法

近似模型主要通过拟合或插值的方法来构造, 常见的且工程广泛应用的模型有多项式响应面模型 (polynomial response surface model, RSM)、Kriging 模型 (Kriging model, KR)、径向基函数模型 (radial basis function, RBF) 等。

##### 4.1 多项式响应面模型

响应面方法最早由统计学家 Box 和 Wilson 提出 [25], 主要采用多项式函数来近似真实的物理模型或函数, 其中二次多项式响应面模型应用最广, 其一般形式如下:

$$\hat{y}(x) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^n \alpha_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^n \alpha_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

$$= \sum_{i=0}^k \alpha_i \phi_i(x)$$

式中:  $x$  为设计变量;  $n$  为设计变量个数;  $\hat{y}$  为预测响应;  $x_i$ 、 $x_j$  为第  $i$ 、 $j$  个设计变量;  $\alpha_0$  为常数项;  $\alpha_i$  为第  $i$  项一次项系数;  $\alpha_{ii}$  为第  $i$  项纯二次项系数;  $\alpha_{ij}$  为混合二次项系数;  $\phi_i(x)$  为基函数;  $k$  为基函数个数, 大小为  $(n+1)(n+2)/2$ 。未知系数  $A = [\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_k]^T$  利用最小二乘法求取。

##### 4.2 Kriging 模型

Kriging 模型 [26] 是一种半参数化的无偏最优估计插值方法, 它由全局模型和局部偏差两部分构成, 其一般形式如下:

$$\hat{y}(x) = \beta f(x) + z(x) \quad (2)$$

式中:  $f(x)$  为确定的回归函数;  $\beta$  为回归系数;  $\beta f(x)$  代表设计空间的一个全局近似模型;  $z(x)$  为一均值为 0, 方差为  $\sigma^2$  的随机函数。

##### 4.3 径向基函数模型

径向基函数  $\hat{y}(x)$  [27] 通过引入欧氏距离, 把一个多维空间中的预测问题转化为以欧氏距离为自变量的一维问题, 一般形式如下:

$$\hat{y}(x) = \sum_{j=1}^m c_j \phi(\|x - x_j\|) \quad (3)$$

式中:  $m$  为总样本点数;  $\|x - x_j\|$  为未知点  $x$  与样本点  $x_j$  间的欧氏距离;  $\phi(r)$  为确定的基函数;  $c_j$  为权系数。

#### 5 电磁力近似模型的构建及分析

本文从电磁阀关键的磁场子系统出发, 综合选取了 6 个电磁阀关键参数, 分别是 2 个场耦合参数 (工作气隙和驱动电流), 4 个结构优化参数 (线圈匝数、副磁极半径、衔铁厚度和衔铁半径), 各参数取值范围如表 1 所示。分别采用面中心复合设计、嵌套中心复合设计以及最优拉丁超立方设计进行采样, 其中最优拉丁超立方设计又分别进行了样本点数为  $k$  ( $k$  为 28)、 $1.5k$ 、 $2k$ 、 $2.5k$  的采样, 样本点响应值电磁力由上述高速电磁阀有限元模型计算得出, 结合上述 3 种近似方法, 基于 modeFRONTIER, 构建了 18 组电磁力近似模型。

表 1 电磁阀关键参数取值范围

Table 1 Value range of solenoid valve key parameters

参数名称 Parameters' name	取值范围 Value range
工作气隙 Working air gap/mm	0.05~0.3
驱动电流 Drive current/A	6~18
线圈匝数 Coil turns	40~70
副磁极半径 Side pole radius/mm	8~9.5
衔铁厚度 Armature thickness/mm	2~3.5
衔铁半径 Armature radius/mm	9~10.5

##### 5.1 近似模型的评价指标

常用的近似模型精度评价指标有复相关系数  $R^2$ 、平均绝对误差 (mean absolute error, MAE)、均方根误差 (root mean square error, RMSE)。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^q (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^q (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^q (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|^2} \quad (6)$$

式中:  $R^2$  为复相关系数; MAE 为平均绝对误差; RMSE 为均方根误差;  $\hat{y}_i$  为预测值;  $y_i$  为真实值;  $\bar{y}_i$  为平均真实值;  $q$  为测试样本点总数。

3 种评价指标取值范围均为 0~1, 其中  $R^2$  值越接近 1, 平均绝对误差 MAE、均方根误差 RMSE 值越接近 0, 表明模型效果越好, 近似精度越高。本文采用 Sobol 随机试验设计产生 50 个测试样本点对构建的近似模型进行验证。

##### 5.2 近似模型精度分析

###### 5.2.1 样本点集大小的影响

表 2 是应用最优拉丁超立方 OLH, 设计 28、42、56、

70 等大小样本点集，与不同近似方法组合构建的近似模型的精度。由表 2 可知，随着样本点集的增大，近似模型精度并不是一直增大，样本点集为 56、70 的近似模型精度并没有比 42 的得到明显提高，反而 56 的近似模型精度有所下降。对于样本点集 28，3 种近似方法近似效果均不理想，因为样本点集 28 的试验设计，样本点过少，提供的系统信息过少，因此近似精度低。对于大小为 42，即 1.5k 大小的样本点集，3 种近似方法均有较好的效果，说明此大小的样本点集能够满足构建近似模型的精度要求，无需进行更大量的样本设计。因此，本文下面的分析，最优拉丁超立方设计样本点集大小均为 42。

5.2.2 试验设计的影响

由表 2 可知，比较 CCF 和 CCI，对于 Kriging 模型、径向基函数模型，采用 CCF 试验设计方法比 CCI 表现出的近似效果明显好，而对于二次多项式响应面模型却相反。由图 4 可知，CCF 试验设计其设计区域边界分布点多，内部样本点少，而 CCI 恰好相反，设计区域边界分布点少，而内部样本点多，另外 CCF 是一个三水平试验设计，CCI 是五水平的试验设计。因此对于设计区域边界样本点分布相对较多而内部分布较少的样本点集，同时参数水平不宜改变的设计，Kriging 模型、径向基函数模型适应性更好，更具有优势。而对于二次多项式响应面

模型，参数水平越多，越有利于参数非线性的拟合，因此对于 CCI 相对于 CCF 精度更高。OLH 与 3 种近似方法组合构建的近似模型精度均较好，同时相比 CCF、CCI，其样本点明显减少。因为 OLH 是一种多水平的试验设计方法，各参数水平数等于设计样本点数，同时样本点均匀的分布于设计空间，能以较少的样本点数提供设计空间更多的信息，因此 OLH 模型具有较高的精度，是构建近似模型良好的选择。

5.2.3 近似方法的影响

由表 2 可知，Kriging 模型和径向基函数模型总体的精度和适应性要高于二次多项式响应面模型。因为二次多项式响应面模型对参数水平及样本大小要求比较高，构建二次多项式响应面模型参数水平至少为三水平，且有最低样本点数要求，并且随着变量数的增多，样本点数成二次方的关系增加，所以其在小样本时精度表现的较其他 2 种模型差，使得其总体精度下降。而 Kriging 模型和径向基函数模型对样本大小无要求，同时模型本身具有局部估计的优点，因而使得其具有良好的适应性和高精度。

整体对比 3 种试验设计方法与 3 种近似方法构建的不同电磁力近似模型，OLH 42 与 Kriging 模型组合其精度最高，近似效果最好。

表 2 样本点集大小和试验设计对近似模型精度影响  
Table 2 Influences of sample points size and design of experiment on accuracy of approximate models

项目 Items		多项式响应面模型 Polynomial response surface model RSM			Kriging 模型 Kriging model KR			径向基函数模型 Radial basis function RBF		
		复相关系数	平均绝对误差 MAE	均方根误差 RMSE	复相关系数	平均绝对误差 MAE	均方根误差 RMSE	复相关系数	平均绝对误差 MAE	均方根误差 RMSE
		$R^2$	误差 MAE	RMSE	$R^2$	误差 MAE	RMSE	$R^2$	差 MAE	RMSE
应用最优拉丁超立方 OLH 设计样本点集 Design sample points size using optimal latin hypercube design	OLH 28	0.5	3.28	4.65	0.89	0.13	0.18	0.91	0.11	0.16
	OLH 42	0.95	0.09	0.12	0.97	0.06	0.09	0.92	0.11	0.15
	OLH 56	0.9	0.11	0.15	0.87	0.13	0.2	0.85	0.13	0.2
	OLH 70	0.95	0.08	0.13	0.94	0.08	0.11	0.93	0.09	0.13
试验设计 Design of experiment	面中心复合设计 Central composite faced-centered design CCF 77	0.75	0.18	0.28	0.96	0.08	0.12	0.95	0.08	0.12
	嵌套中心复合设计 Central composite inscribed design CCI 77	0.95	0.1	0.17	0.54	0.23	0.36	0.64	0.17	0.25
	平均值 Average	0.833	0.64	0.917	0.862	0.118	0.177	0.867	0.115	0.168
	方差 Variance	0.033	1.674	3.348	0.026	0.004	0.01	0.013	0.001	0.002

注：OLH 28 为应用最优拉丁超立方设计 28 个样本点集，下同。  
Note: OLH 28 defines that using optimal latin hypercube designs 28 sample point set, the same as below.

6 结 论

1) 近似模型的精度随着样本点集的增大并非呈现单调递增的关系，过多的样本点可能导致近似模型精度的下降；最优拉丁超立方试验设计与 Kriging 模型、径向基函数模型具有良好的适应性，构建近似模型可优先考虑。  
2) 构建高速电磁阀工作气隙、驱动电流、线圈匝数、副磁极半径、衔铁厚度、衔铁半径等关键参数的电磁力近似模型最佳方案是最优拉丁方试验设计与 Kriging 模型的组合，其中样本点集大小为二次多项式响应面模型所

需最少样本点数的 1.5 倍，模型复相关系数、平均绝对误差、均方根误差值分别为 0.97、0.06、0.09。

[参 考 文 献]

[1] Luo Fuqiang, Cui Huifeng, Dong Shaofeng. Transient measuring method for injection rate of each nozzle hole based on spray momentum flux[J]. Fuel, 2014, 125: 20—29.  
[2] Manyala J, Atashbar M. Electromagnetic actuator dynamic response prediction for an automated mechanical transmission[J]. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2013, 6(1): 1—9.

- [3] 范立云, 高明春, 马修真, 等. 电控单体泵高速电磁阀电磁力的影响参数量化分析[J]. 内燃机工程, 2013, 34(1): 33—39, 45.  
Fan Liyun, Gao Mingchun, Ma Xiuzhen, et al. Quantitative analysis of electromagnetic force of high-speed solenoid valve for electron-controlled unit pump[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2013, 34(1): 33—39, 45. (in Chinese with English abstract)
- [4] 陈林, 刘磊, 杨福源, 等. 柴油机燃油系统电磁阀闭合始点及反馈控制策略[J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 108—114, 120.  
Chen Lin, Liu Lei, Yang Fuyuan, et al. Diesel Fuel system solenoid closure start-point and feedback control strategy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18): 108—114, 120. (in Chinese with English abstract)
- [5] 陶润, 张红, 付德春, 等. ABS 液压系统仿真与电磁阀优化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 135—139.  
Tao Run, Zhang Hong, Fu Dechun, et al. Simulation of ABS hydraulic system and optimization of solenoid valve[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(3): 135—139. (in Chinese with English abstract)
- [6] Huber B, Ulbrich H. Modeling and experimental validation of the solenoid valve of a common rail diesel injector[C]// SAE Technical Paper, 2014-01-0195.
- [7] Chung N, Oh B, Sunwoo M. Modelling and injection rate estimation of common-rail injectors for direct-injection diesel engines[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2008, 222(6): 1089—1001.
- [8] 李丕茂, 张幽彤, 倪成群, 等. 共轨喷油电磁阀动态特性仿真与实验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 7—12.  
Li Pimao, Zhang Youtong, Ni Chengqun, et al. Simulation and experiment of dynamic characteristics of common-rail injector solenoid valve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 7—12. (in Chinese with English abstract)
- [9] Melgoza E, Rodger D. Comparison of table models of electromagnetic actuators[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2): 953—956.
- [10] Ertl M, Kaltenbacher M. Investigation of the dynamics of electromagnetic valves by a coupled magneto-mechanical algorithm including contact mechanics[J]. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2011, 30(2): 603—621.
- [11] 张廷羽, 张国贤. 高速开关电磁阀的性能分析及优化研究[J]. 机床与液压, 2006(9): 139—142.  
Zhang Tingyu, Zhang Guoxian. Performance analysis and investigation to high speed digital valve[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2006(9): 139—142. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王扬彬, 徐兵, 刘英杰. 基于 Ansoft 及 AMESim 的电磁铁动态特性仿真分析[J]. 机床与液压, 2008, 36(9): 104—105, 108.  
Wang Yangbin, Xu Bing, Liu Yingjie. Simulation analysis of the dynamic characteristics of the solenoid based on Ansoft and AMESim[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(9): 104—105, 108. (in Chinese with English abstract)
- [13] 孙建彬, 岑豫皖, 王刚. 考虑电磁特性的电磁开关阀动态性能仿真研究[J]. 机电工程, 2011, 28(10): 1180—1184.  
Sun Jianbin, Cen Yuwan, Wang Gang. Simulation research on dynamic and static performance of solenoid valve consider electromagnetic characteristics[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011, 28(10): 1180—1184. (in Chinese with English abstract)
- [14] 郝守刚, 周明, 夏胜枝, 等. 电控单体泵电磁阀动态响应特性数值仿真[J]. 内燃机工程, 2003, 24(2): 10—13.  
Hao Shougang, Zhou Ming, Xia Shengzhi, et al. Numerical simulation of dynamic response characteristics of solenoid valve for electronically controlled unit-injection-pump[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2003, 24(2): 10—13. (in Chinese with English abstract)
- [15] 范立云, 高明春, 马修真, 等. 电控单体泵高速电磁阀电磁力关键影响因素[J]. 内燃机学报, 2012, 30(4): 359—364.  
Fan Liyun, Gao Mingchun, Ma Xiuzhen, 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 with English abstract)
- [16] 范立云, 许德, 费红姿, 等. 高速电磁阀电磁力全工况关键参数相关性分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 89—96.  
Fan Liyun, Xu De, Fei Hongzi, et al. Key parameters' correlation analysis on high-speed solenoid valve electromagnetic force under overall operating conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(6): 89—96. (in Chinese with English abstract)
- [17] Lu Haifeng, Deng Jun, Hu Zongjie, et al. Impact of control methods on dynamic characteristic of high speed solenoid injectors[J]. SAE International Journal of Engines, 2014, 7(3): 1155—1164.
- [18] 郭树满, 苏万华, 刘二喜, 等. 基于自举电路的共轨喷油器驱动电路优化设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 11—15.  
Guo Shuman, Su Wanhua, Liu Erxi, et al. Optimization design of common-rail injector driving circuit based on bootstrap circuit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 11—15. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈礼勇, 刘二喜, 郭树满, 等. 基于 PSPICE 喷油器电磁阀双电源双边驱动电路的设计与优化研究[J]. 内燃机工程, 2015, 36(1): 81—86.  
Chen Liyong, Liu Erxi, Guo Shuman, et al. Research on design and optimization of solenoid valve double power bilateral drive circuit based on PSPICE[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2015, 36(1): 81—86. (in Chinese with English abstract)
- [20] Chen Shikui, Xiong Ying, Chen Wei. Multiresponse and multistage metamodeling approach for design optimization[J]. AIAA Journal, 2009, 47(1): 206—218.

- [21] Zhu Ping, Zhang Siliang, Chen Wei. Multi-point objective-oriented sequential sampling strategy for constrained robust design[J]. *Engineering Optimization*, 2015, 47(3): 287—307.
- [22] 杨华, 姚卫星. 基于径向基函数的机翼二维气动代理模型设计[J]. *计算力学学报*, 2008, 25(6): 797—802.  
Yang Hua, Yao Weixing. 2D surrogate model of wing lift distribution based on radial basis function[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2008, 25(6): 797—802. (in Chinese with English abstract)
- [23] Box G, Hunter J. Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces[J]. *Annals of Mathematical Statistics*, 1957, 28: 195—241.
- [24] Jin Ruichen, Chen Wei, Sudjianto A. An efficient algorithm for constructing optimal design of computer experiments[J]. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2005, 134(1): 268—287.
- [25] Box G, Wilson K. On the experimental attainment of optimum conditions[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1951, 13(1): 1—45.
- [26] Simpson T, Mauery T, Korte J, et al. Kriging models for global approximation in simulation-based multidisciplinary design optimization[J]. *AIAA Journal*, 2001, 39(12): 2233—2241.
- [27] Buhmann M. Radial basis functions[J]. *Acta Numerica*, 2000, 9: 1—38.

## Modeling and analysis of electromagnetic force approximate model of high-speed solenoid valve

Liu Peng, Fan Liyun<sup>\*</sup>, Bai Yun, Ma Xiuzhen, Song Enzhe

(College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** High-speed solenoid valve (HSV) is the key component of electronic control fuel injection system for diesel engine. Improving the dynamic response speed of HSV will be able to achieve higher injection precision and more flexible fuel injection law, thus reducing gas emissions of diesel engine and improving its fuel economy. However, HSV is the complex coupling system of electric field, magnetic field, mechanical movement and flow field, and the interactions of multiple parameters exist between the fields for HSV. To improve the dynamic response speed of HSV is a complex optimization problem of multiple physical field and multiple parameters. A zero-dimensional approximation coupling model of HSV can be developed instead of the CAE (computer aided engineering) models or physical experiments, which conduces to achieve the efficient prediction and global optimization of performances. So the approximation model method was employed in this paper. First, the structure and principle of HSV for electronic unit pump of diesel engine were presented. Second, the three-dimensional (3D) finite element model of HSV was developed to calculate the electromagnetic force, and its accuracy was verified by means of the comparison with experimental data. Third, 3 major methods of experimental design, i.e. central composite faced-centered design (CCF), central composite inscribed design (CCI) and optimal latin hypercube design (OLH), and 3 typical approximation methods, i.e. quadratic polynomial response surface model (RSM), Kriging model (KR) and radial basis function model (RBF) were introduced. Fourth, 6 key parameters including 2 field coupling parameters, i.e. working air gap and drive current, and 4 structure parameters, i.e. coil turns, side pole radius, thickness and radius of armature were determined for establishing the approximate models. Next, 6 groups of sample points were designed, whose response values of electromagnetic forces were obtained by the 3D finite element model of HSV. Four of the groups were designed with different sizes by the OLH, and the other 2 groups were designed by the CCF and CCI. Then, 18 groups of electromagnetic force approximation models were developed by combining the 6 groups of experimental design with the 3 typical approximation methods introduced. To compare the accuracy of approximation models, 3 kinds of evaluation indices were introduced. They were multiple correlation coefficient, average absolute error and root mean square error respectively. In the end, the effects of different sample point sizes, experimental design methods and approximate methods on the accuracy of electromagnetic force approximation models were analyzed in detail. It is concluded that the accuracy of approximate model doesn't increase monotonically with the increase of the set size of sample points, and too many sample points maybe leads to the decrease of the accuracy of approximate model; the OLH has good adaptability with the KR and RBF, and can be given priority for developing approximation models. In addition, the best solution for establishing electromagnetic force approximation model of HSV is the combination of the KR and OLH, whose size of sample points is 1.5 times of the minimum sample points required by the quadratic polynomial response surface model. Its multiple correlation coefficient, average absolute error and root mean square error are 0.97, 0.06 and 0.09 respectively. It provides a theoretical guidance for the establishment of the zero-dimensional approximation coupling model and the optimization of HSV.

**Key words:** valves; finite element method; models; high-speed solenoid valve; electromagnetic force; design of experiment