

电控增压泵高速电磁阀电磁力与能耗特性分析*

吴 昕, 杨 昆, 赵建华, 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:为深入研究电控增压泵电磁阀电磁力与能耗特性,采用有限元分析方法建立了电控增压泵高速电磁阀的三维静磁场仿真模型,并用试验数据验证了模型的准确性;通过数值仿真分析开展了驱动电流和结构参数(线圈匝数、磁极半径、工作气隙)对电控增压泵电磁阀电磁力与能耗的特性研究,得出各参数对电磁阀电磁力与能耗间的权重影响及量化分析。结果表明:主副磁极半径对电磁力影响占比最大,为38.15%;驱动电流次之,占比为31.08%;线圈匝数对电磁力影响占比为17.06%;工作气隙对电磁力影响占比为13.71%。从能耗角度分析了电控增压泵电磁阀驱动电流、线圈匝数、主副磁极半径和工作气隙的占比,其中线圈匝数能耗占比最大,为54.85%;驱动电流次之,为44.99%;主副磁极半径和工作气隙能耗占比最小,仅有0.16%。

关键词:电磁力;能耗;高速电磁阀;电控增压泵

中图分类号:TK421.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2023)01-185-08

Analysis of electromagnetic force and power loss characteristics on high-speed solenoid valve of electric-controlled booster pump

WU Xin, YANG Kun, ZHAO Jianhua, NIE Tao, ZHOU Lei, ZENG Fanming

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

Abstract: In order to further study the electromagnetic force and energy consumption characteristics of the solenoid valve of the electronic-controlled booster pump, a 3D static magnetic field simulation model of the high-speed solenoid valve of the electronic-controlled booster pump was established by using the finite element method, and the accuracy of the model was verified by the experimental data. Through numerical simulation analysis, the characteristics of the electromagnetic force and power loss of the solenoid valve of the electric-controlled booster pump were studied by driving current and structural parameters (the number of coil turns, magnetic pole's radius, working air gap), and the weight influence of each parameter on the electromagnetic force and power loss of the solenoid valve was obtained and the quantitative analysis was made. The results show that the influence of the radius of major and vice magnetic poles on electromagnetic force accounts for 38.15%, followed by the driving current which accounts for 31.08%, the number of coil turns which accounts for 17.06%, and the working air gap which accounts for 13.71%. From the perspective of power loss, the ratio of driving current, coil turns, radius of major and vice poles and working air gap of electric-controlled booster pump solenoid valve were analyzed. The ratio of coil turns(54.85%) is the highest, followed by the driving current(44.99%), and the minimum ratio of the radius of major and vice magnetic poles and working air gap is only 0.16%.

Keywords: electromagnetic force; power loss; high-speed solenoid valve; electric-controlled booster pump

超高压喷射作为改善柴油机经济性和排放性的有效途径之一,其性能特性及优化一直以来都是研究人员关注的焦点^[1-2]。电控增压泵作为实现超高压喷射的核心部件之一,其性能极大影响着超高压共轨系统的燃油喷射特性^[3-5]。如何提高超高压喷射系统增压性能和控制性能取决于其核心执行元件电磁阀的高动态响应特性,而电磁阀的电磁力决定了其动态响应性能。电磁阀电磁

力特性在不同使用环境下的影响因素研究和电磁转换能力提升是近些年的研究热点。

国内外学者在该领域做了大量研究分析:杨昆等^[3-5]开展了超高压共轨系统电控增压泵电磁阀性能研究及性能试验;范立云等^[6-7]通过建立高速电磁阀三维有限元模型,开展了共轨喷油器高速电磁阀结构参数对电磁力影响及相关性分析;刘鹏等^[8-9]通过建立有限元模型对一种新型

* 收稿日期:2021-02-25

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);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,河北廊坊人,副教授,博士,硕士生导师, E-mail:150006224@qq.com

永磁并联磁路高速电磁铁进行了电磁力和静态特性分析;Wang 等^[10]通过实验研究确定 Al-Fe 基软磁材料可以有效降低磁路磁阻,提高磁导率,进而提高电磁能量转换效率;Cheng 等^[11]研究了铁基软磁材料对电磁阀磁场分布的影响,结果表明材料磁性对电磁力影响显著;Sun 等^[12]采用三维有限元分析方法结合电磁能量转换研究了电磁阀结构参数对电磁力的影响规律;Wang 等^[13]通过数值仿真的方法,研究了电磁阀结构参数对静态电磁特性影响;Yun 等^[14]采用磁路法建立了高速电磁阀的静态模型,验证了其精度,并利用该模型对衔铁与铁芯结构参数进行了灵敏度分析,给出了各结构参数对电磁力的敏感程度。

上述文献主要集中在结构参数及材料等对电磁阀静态电磁力特性的影响,对电磁阀的设计与性能优化提供了相应的指导,但较少涉及各参数对电磁阀电磁力和能耗的综合影响分析,尤其是参数量化条件下高电磁力与低能耗的综合优化设计较少。为了进一步探究电控增压泵电磁阀电磁力与能耗特性,阐明各参数对电控增压泵电磁阀电磁力与能耗间的权重影响,本文基于三维有限元仿真模型,系统深入地研究了驱动电流、线圈匝数、主副磁极半径和工作气隙对电磁力和能耗的影响,建立各参数对电磁力和能耗影响的量化指标,为实现高电磁力与低能耗提供了参考,从而为后续实现高效设计电磁阀奠定了基础。

1 电控增压泵电磁阀工作原理

超高压共轨系统结构示意图如图 1 所示,它通过加装在共轨管和电控喷油器之间的电控增压泵实现二级增压,根据不同工况控制电控增压泵和喷油器时序实现变喷油速率调节^[4]。该系统电控增压泵原理图如图 2 所示。

2 计算模型和实验装置

2.1 数学模型

建立电磁阀有限元模型的基本理论是 Maxwell 方程组,由高斯电通、法拉第电磁感应、高斯磁通以及安培环路四个定律组成,其微分方程组为:

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

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

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

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

其中: D 为电通密度,单位 C/m^2 ; ρ_{e0} 为自由电荷体

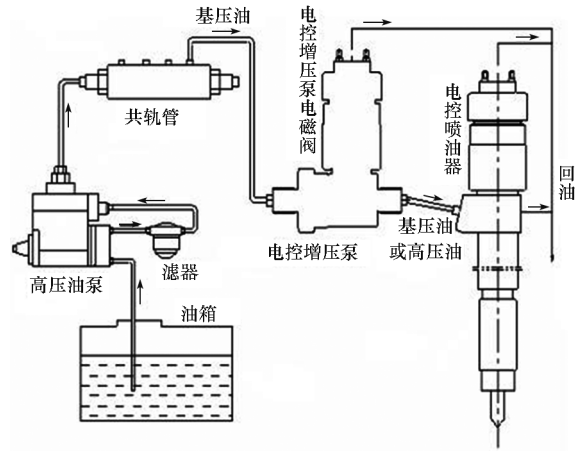


图 1 超高压共轨系统组成

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

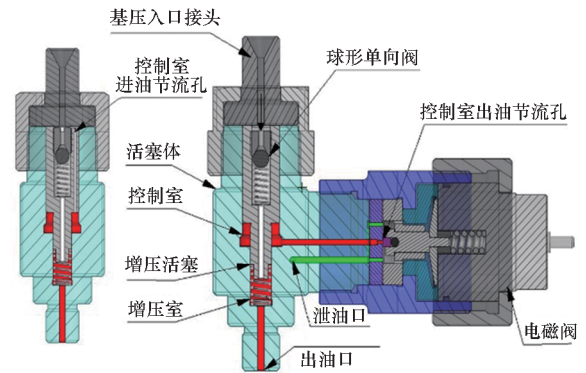


图 2 电控增压泵结构原理

Fig. 2 Structure principle of electric-controlled booster pump

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^[15]为:

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

又

$$\phi = \frac{NI}{R} \quad (6)$$

$$B = \frac{\mu_0 (NI)}{\delta} \quad (7)$$

则

$$F_m = \frac{(NI)^2}{2SR\mu_0} = \frac{\mu_0 (NI)^2 S}{2\delta^2} \quad (8)$$

其中: μ_0 为真空磁导率,单位 H/m ; δ 为工作气隙,单位 m ; S 为铁芯截面积,单位 m^2 ; ϕ 为总磁通量,单位 Wb ; R 为电磁阀总磁阻,单位 H ; 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

在 ANSYS Maxwell 电磁仿真环境中建立三维有限元仿真模型,表 1 为电控增压泵高速电磁阀有限元仿真模型的基本参数。建模过程见文献[3]。如图 3 所示为电磁阀电磁力三维有限元仿真模型。

2.3 模型验证

图 4 为电磁阀电磁力试验结果与仿真结果对比,两者最大误差为 5.3%,这是因为仿真采用材料初始磁化曲线近似替代实际磁化曲线,同时制造过程中的热处理等工艺和工作时高温使材料磁导率有所下降,从而导致仿真值略高于试验值。这种误差在可接受范围内,验证了仿真模型的准

确性^[3]。

表 1 参数取值范围

Tab.1 Reference value of parameters

| 参数 | 基准值 |
|------------|------|
| 主磁极外圆半径/mm | 9.4 |
| 副磁极内部半径/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 |

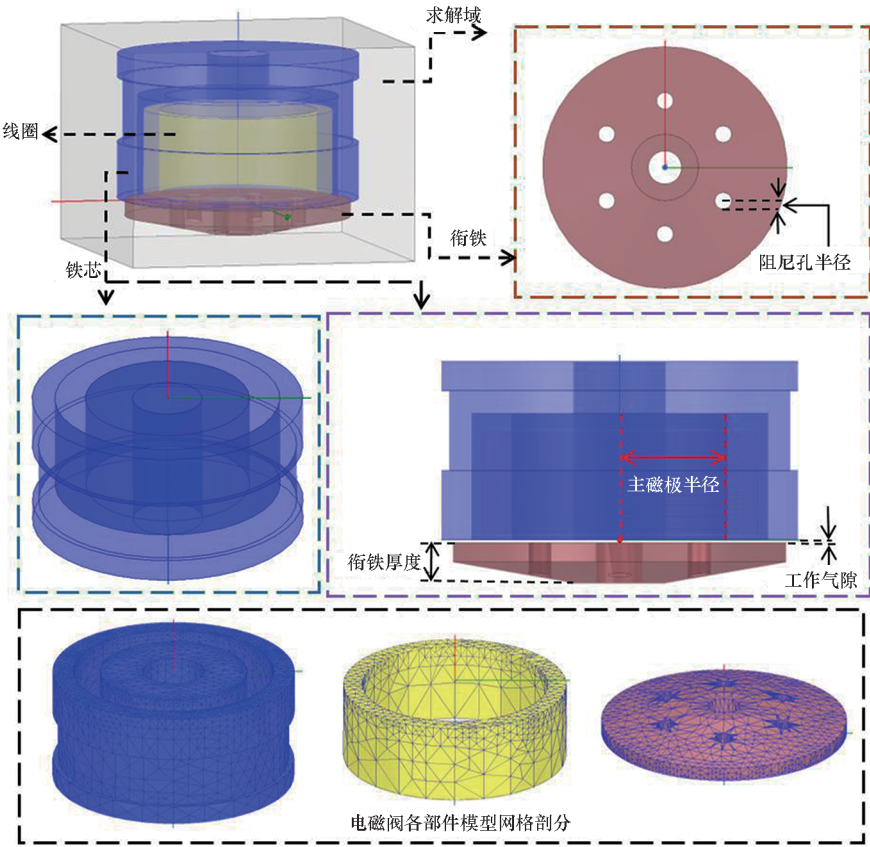


图 3 电磁阀电磁力三维有限元仿真模型

Fig.3 Three-dimensional finite element simulation model of electromagnetic force of solenoid valve

3 电磁力影响因素分析和讨论

电控增压泵电磁阀电磁力影响因素主要有驱动电流、线圈匝数、铁芯磁性材料、工作气隙、电磁铁主副磁极半径、衔铁厚度等。在这些因素中,其中分别表征驱动参数、线圈参数、结构参数、装配参数的驱动电流、线圈匝数、主副磁极半径和工作气隙对电磁阀电磁力影响较大,是关键参数。

3.1 驱动电流的影响

驱动电流影响着软磁材料的磁导率,进而决定电磁转换能力,因此驱动电流对于电磁力的影响至关重要。不同驱动电流对电磁力的影响见图 5(a),由图可知驱动电流 I 从 4 A 增加到 20 A 过程中,电磁力逐步增大,但增幅趋缓。 $I < 7$ A 时,电磁力增幅较为明显,随着电流的进一步升高,电磁力增幅大幅减小。产生这一现象的原因是,不同

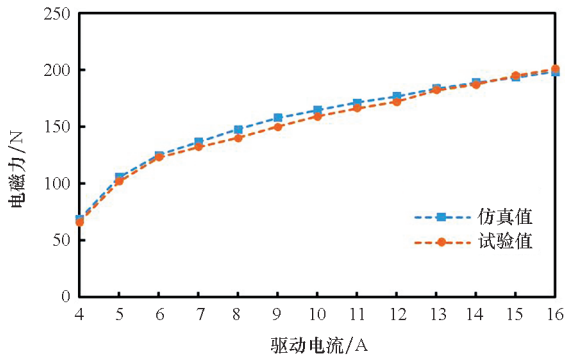
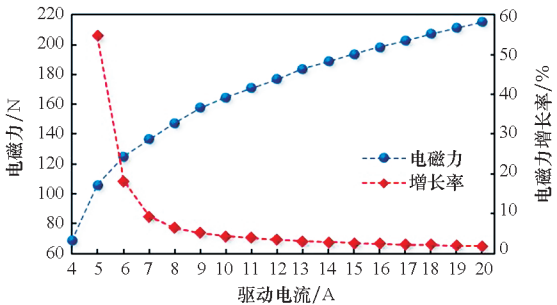


图 4 不同电流下电磁力试验值和仿真值对比

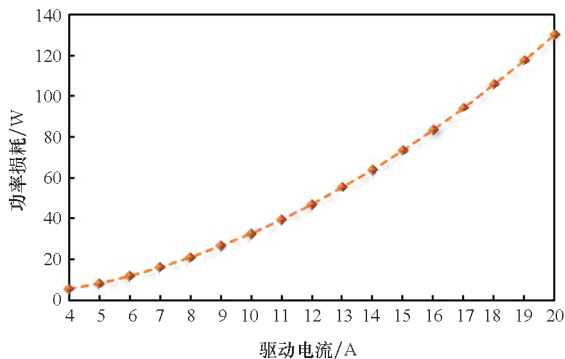
Fig. 4 Comparison on electromagnetic force between the simulation data and the experimental result under different current

的驱动电流和总磁阻对电磁力都有影响,前者增大促进电磁力增大,而后者增大导致电磁力的减小,且两者对电磁力的影响权重在不同条件下各不相同。通过式(6)~(8)进一步来说明:总磁阻随着电流的增大而增大,当 $I < 7$ A时,总磁阻对电磁力影响并不显著,此时驱动电流对电磁力的影响占主导;随着电流的进一步增大,总磁阻对电磁力的影响权重逐渐增大,磁感应强度逐渐趋近磁饱和区,表现为随着驱动电流增大,电磁力增幅趋缓。



(a) 电磁力随驱动电流变化

(a) Variations of electromagnetic force with driving current



(b) 功率损耗随驱动电流变化

(b) Variations of power loss with driving current

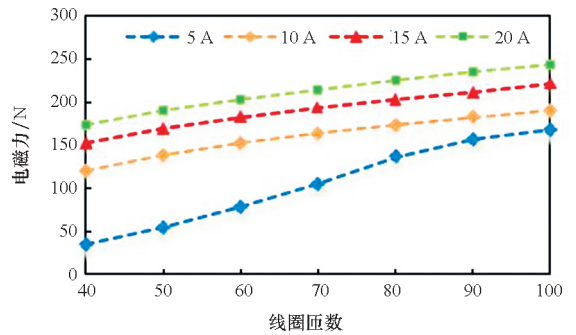
图 5 电磁力和功率损耗随驱动电流变化

Fig. 5 Variations of electromagnetic force and power loss with driving current

由图 5(b)可知,随着驱动电流的增大,增压泵电磁阀功率损耗一直增大,从 5 W 增大到 130 W,说明驱动电流对增压泵电磁阀能耗有显著影响,过高的驱动电流尽管可以产生较高的电磁力,但同时伴随着大量的焦耳热产生,导致增压泵电磁阀的功率损耗大幅增加,缩短其使用寿命。因此,在满足电磁阀工作所需电磁力的情况下,应该尽量采用较低的驱动电流,同时选择初始磁导率大且磁饱和强度大的软磁材料作为铁芯材料,以延缓磁饱和现象发生。

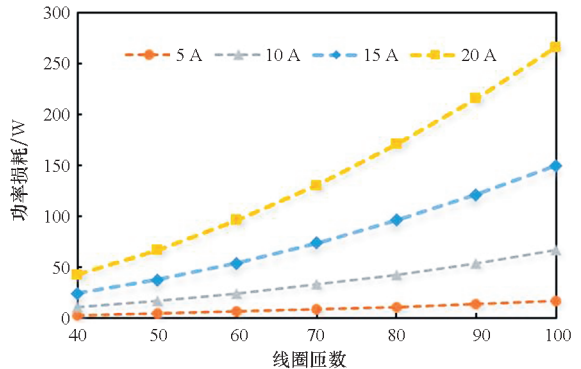
3.2 线圈匝数的影响

不同驱动电流下(5 A、10 A、15 A、20 A)线圈匝数对电磁力的影响如图 6(a)所示,线圈匝数 N 从 40 增加到 100 过程中,电磁力随之逐渐增大,同时电磁力增幅逐渐减小。当 $I = 5$ A时,电磁力增幅最为明显;当 $N \geq 80$ 时,四组电磁力增幅整体趋缓, $I = 5$ A时增幅下降较为明显。这种情况的产生是由于不同的线圈匝数和总磁阻对电磁力都有影响,前者增加促进电磁力增大,而后者增大



(a) 电磁力随线圈匝数变化

(a) Variations of electromagnetic force with the number of coil turns



(b) 功率损耗随线圈匝数变化

(b) Variations of power loss with the number of coil turns

图 6 电磁力和功率损耗随线圈匝数变化

Fig. 6 Variations of electromagnetic force and power loss with the number of coil turns

导致电磁力的减小。由式(6)可知,总磁阻随着电流的增大而增大, $I=5\text{ A}$ 时磁场处于不饱和态,总磁阻对电磁力影响并不显著,此时线圈匝数对电磁力的影响占主导;随着驱动电流的增大,磁场趋于饱和,线圈匝数对电磁力的促进作用逐渐削弱,总磁阻对电磁力的影响权重逐渐增大,电磁转化能力随之下降。与此同时,由图 6(b)可知, $I=5\text{ A}$ 时电磁阀的功率损耗也相应偏低,从 2.6 W 增大到 16.7 W;随着驱动电流的增大,线圈匝数增大带来的功率损耗也随之增大, $I=20\text{ A}$ 时功率损耗从 42.6 W 增大到 265.8 W。

从图 7 的线圈欧姆损耗密度云图可以进一步

说明,当线圈匝数从 50 增大到 80 的过程中,欧姆损耗密度从 $3.35 \times 10^7\text{ W/m}^3$ 逐渐增大到 $8 \times 10^7\text{ W/m}^3$,呈现明显的增大趋势。可见,随着线圈匝数增多,线圈焦耳热逐步增多,造成能量和材料的浪费,影响其使用寿命;同时,增加的匝数导致线圈电感增加,使电磁阀工作在开启阶段时电流上升缓慢,难以在规定时间内产生足够大的电磁力,不利于电控增压泵快速响应增压,且电磁阀断电关闭时电流衰减速度变慢,引起关闭时间延长,影响增压泵控制室高压燃油的快速泄放。因此,在满足电磁力要求的前提下,同一规格下应尽量选择较少的线圈匝数。

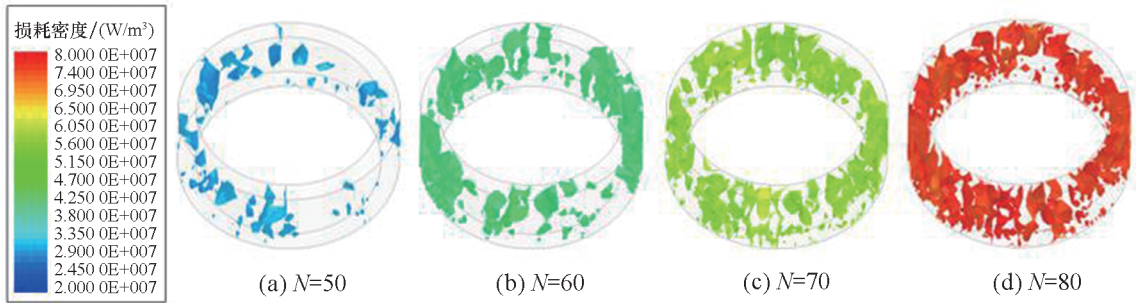


图 7 线圈欧姆损耗密度云图($I=15\text{ A}$)

Fig. 7 Distributions of ohmic-loss within the coils($I=15\text{ A}$)

3.3 主副磁极半径的影响

主副磁极半径对电磁阀性能同样有着重要影响,它们通过改变气隙的有效截面积进而影响电磁力的大小。如图 8 所示为铁芯横截面结构,电磁铁主磁极内孔半径为 4 mm,副磁极外圆半径为 15.5 mm,其中主磁极外圆半径用 R_1 表示,副磁极内孔半径用 R_2 表示,主磁极截面积用 S_m 表示,副磁极截面积用 S_v 表示,表达式见式(9)和式(10)。

$$S_m = \pi(R_1^2 - 4^2) \quad (9)$$

$$S_v = \pi(15.5^2 - R_2^2) \quad (10)$$

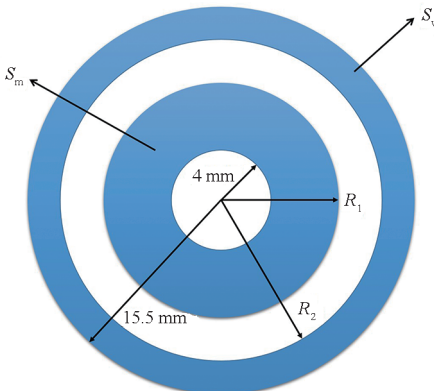
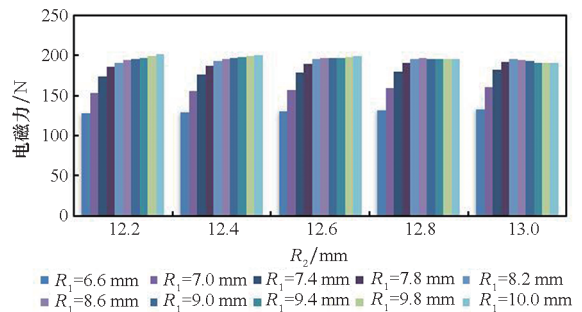


图 8 铁芯横截面结构

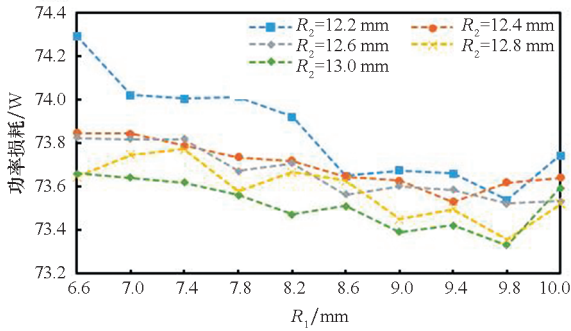
Fig. 8 Cross-sectional structure diagram of iron core

图 9(a) 所示为在 R_2 分别取 12.2 mm、12.4 mm、12.6 mm、12.8 mm、13.0 mm 时,电磁力随着 R_1 的变化规律。由图可知,电磁力随 R_1 增大而逐步增大,且增幅逐渐趋缓。对比五组不同 R_2 值,电磁力最大值所对应的 R_1 各不相同,说明不同的主副磁极半径促使磁通发生变化,提早出现磁饱和,限制了电磁力的进一步提升。当 $R_1 = 10\text{ mm}$ 、 $R_2 = 12.2\text{ mm}$ 时,出现五组数据中的最大电磁力,此时 $S_m = 263.89\text{ mm}^2$, $S_v = 287.17\text{ mm}^2$,主副磁极截面积相近,两个磁极截面的磁感应强度也近似相等,有效抑制了磁饱和现象。由图 9(b) 可以看出,随着 R_1 在 6.6 ~



(a) 电磁力随磁极半径变化

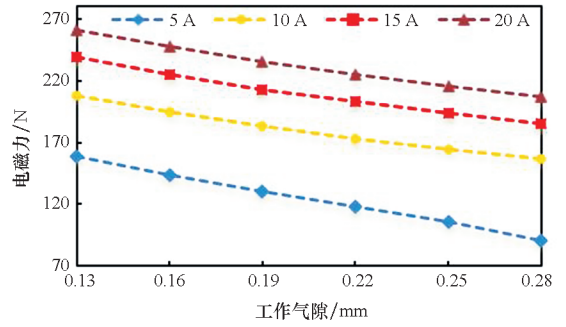
(a) Variations of electromagnetic force with main and vice pole's radius



(b) 功率损耗随磁极半径变化

(b) Variations of power loss with main and vice pole's radius

室高压燃油快速泄放。



(a) 电磁力随工作气隙变化

(a) Variations of electromagnetic force with working air-gap

图 9 电磁力和功率损耗随主副磁极半径的变化曲线

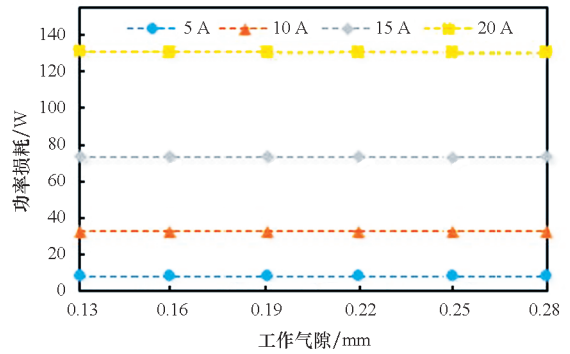
Fig. 9 Variations of electromagnetic force and power loss with main and vice pole's radius

10 mm范围内逐步增大过程中,电磁阀功率损耗整体呈现先减小后增大趋势,在 $R_1 = 9.8 \text{ mm}$ 附近出现功耗最小值。因此,为提高铁芯材料利用率,主副磁极截面积应该近似相等,以避免在磁极中提早产生磁饱和现象而限制电磁力的提升。

3.4 工作气隙的影响

不同驱动电流下(5 A、10 A、15 A、20 A)气隙变化对电磁力的影响如图 10(a)所示,气隙从 0.13 mm 增加到 0.28 mm 过程中,电磁力随着工作气隙的增大,电磁力逐渐下降。这是由于空气的磁导率远远低于铁芯和衔铁材料的磁导率(工作磁路主要由电磁阀铁芯、工作气隙和衔铁组成),因此磁阻主要集中在工作气隙处,总磁阻随工作气隙的增大而逐渐增大,导致电磁力下降。不同电流下,电磁力下降呈现差异性。当 $I = 5 \text{ A}$ 时,电磁力从 159 N 下降到 90 N,下降幅度最大,为 43.4%。当 $I > 5 \text{ A}$ 时,随着电流逐步增大,电磁力下降幅度逐步减小。这是由于不同驱动电流下工作气隙对电磁力影响各不相同:当驱动电流较小时,工作气隙对电磁力削弱影响较大,电磁转换能力下降较为明显;随着电流的进一步增大,磁场逐渐增强,气隙磁阻增长对电磁力的影响逐渐削弱。由图 10(b)可知,不同工作气隙对电磁阀的功率损耗影响较小,但不同驱动电流下功率损耗差异明显,驱动电流越高,功率损耗越大。

可见,工作气隙的减小有利于电磁能量转换,提升电磁力,同时工作气隙决定了增压泵循环泄油量,过小的气隙阻碍高压燃油从增压泵控制室的泄放。为保证电磁阀的快速响应特性,在确保规定流量的设计基础上应尽量减少工作气隙,确保电磁阀泄流时的流通面积,以实现增压泵控制



(b) 功率损耗随工作气隙变化

(b) Variations of power loss with working air-gap

图 10 电磁力和功率损耗随工作气隙的变化曲线

Fig. 10 Variations of electromagnetic force and power loss with working air-gap

4 不同参数下电磁阀电磁力及能耗量化分析

电磁阀是一个多物理场的瞬变耦合系统,各参数对电磁力影响程度不同,优化设计中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^[3]。研究电磁阀主要影响因素,建立各参数对电磁力和能耗影响的量化指标,可为实现电磁阀高电磁力与低能耗提供参考,为今后高效优化设计电磁阀奠定基础。

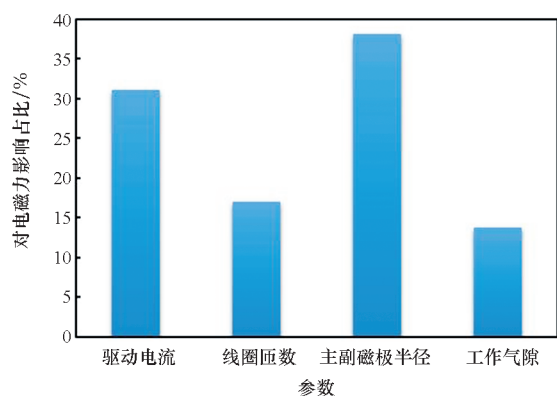
量化分析是将不同参数对目标值的影响进行百分比量化,用来评价各参数的影响显著程度^[16]。由于各参数对电磁阀性能影响不同,且参数的选取范围也不尽相同,各参数的量化因子公式为:

$$K_x = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\Delta y_i / \bar{y}}{(x_{i+1} - x_i) / \bar{x}} \quad (11)$$

式中: K_x 为参数 x 对目标值的量化因子; Δy_i 为 x_i 变化时目标值 y 的变化值; \bar{y} 为参数 x 取平均值时所对应的目标值; x_i 为参数 x 的第 i 个取值, \bar{x} 为参数 x 的平均值; n 为参数 x 在取值范围内的

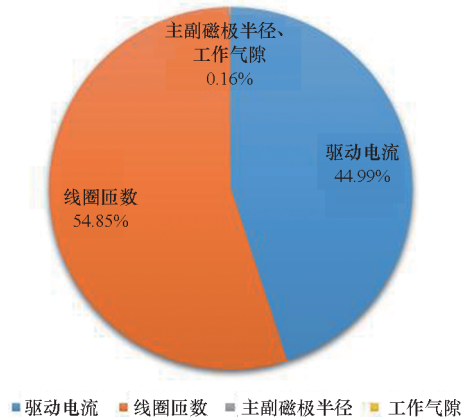
变量个数。

图 11 为驱动电流、线圈匝数、主副磁极半径和工作气隙变化对电磁力和能耗的影响量化结果。由图 11(a)可知,主副磁极半径对电磁力影响占比最大(为 38.15%),驱动电流次之(占比为 31.08%),线圈匝数对电磁力影响占比为 17.06%,工作气隙对电磁力影响占比为 13.71%,说明主磁极半径、驱动电流和线圈匝数对电磁力影响较大,工作气隙对电磁力影响次之。图 11(b)表明,线圈匝数能耗占比最大,为 54.85%;驱动电流次之,能耗占比为 44.99%;主副磁极半径和工作气隙能耗占比最小,仅有 0.16%。主副磁极半径有着较高的电磁力占比和极低的能耗占比,对电磁力有较大的影响,且能耗权重影响低,可见选择相等的主副磁极截面积是进行电磁阀优化设计的一个重要环节;同时,驱动电流和线圈匝数对电磁力有着较大影响,且两者



(a) 电磁力特性参数量化结果

(a) Quantitative results of parameters on the electromagnetic force



(b) 能耗参数量化结果

(b) Quantitative results of parameters on the power loss

图 11 电磁力和功率损耗参数量化结果

Fig. 11 Quantitative results of parameters on the electromagnetic force and power loss

能耗占比较大,需要兼顾电磁力与能耗综合考量,在满足电磁力要求下,尽可能选择较低的驱动电流和线圈匝数。

5 结论

采用数值分析的方法,研究了驱动电流、线圈匝数、主副磁极半径和工作气隙对电控增压泵电磁阀电磁力和能耗特性的影响,主要结论如下:

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,仿真模型的最大误差为 5.3%,为电磁阀特性研究提供了较高精度的仿真平台。

2) 通过对电控增压泵电磁阀驱动电流、线圈匝数、主副磁极半径和工作气隙对其电磁力特性的影响分析,发现各参数对电磁力影响权重不尽相同,主副磁极半径对电磁力影响占比最大,驱动电流次之,线圈匝数对电磁力影响较小,工作气隙对电磁力影响最小。

3) 从能耗角度分析了电控增压泵电磁阀驱动电流、线圈匝数、主副磁极半径和工作气隙的能耗占比,其中线圈匝数能耗占比最大,驱动电流次之,主副磁极半径和工作气隙能耗占比最小。

因此,主副磁极半径对电磁阀电磁力有较大的影响,且能耗权重影响低,应尽可能设计相等的主副磁极半径以抑制磁饱和现象;驱动电流和线圈匝数对电磁阀电磁力有着较大影响,且两者能耗占比较大,在满足电磁阀工作所需电磁力的情况下,应该尽量采用较低的驱动电流和线圈匝数,同时选择初始磁导率大且磁饱和强度大的软磁材料作为铁芯材料,以延缓磁饱和现象发生。

参考文献 (References)

- [1] ZHAI C, JIN Y, NISHIDA K, et al. Diesel spray and combustion of multi-hole injectors with micro-hole under ultra-high injection pressure-non-evaporating spray characteristics[J]. Fuel, 2021, 283: 119322.
- [2] ZHAO J H, GREKHOV L, MA X Z, et al. Specific features of diesel fuel supply under ultra-high pressure[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 179: 115699.
- [3] 吴昕, 杨昆, 刘金林, 等. 电控增压泵高速电磁阀电磁力预测模型构建[J]. 国防科技大学学报, 2022, 44(6): 184-191.
WU X, YANG K, LIU J L, et al. Construction of prediction model for electromagnetic force on high-speed solenoid valve of electric-controlled booster pump[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2022, 44(6): 184-191. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 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)
- [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] 范立云, 许德, 费红姿, 等. 高速电磁阀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 L Y, XU D, FEI H Z, 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*, 2015, 31(6): 89–96. (in Chinese)
- [8] 刘鹏, 范立云, 周伟, 等. 永磁并联磁路高速电磁铁的静态特性[J]. *内燃机学报*, 2016, 34(5): 449–455.
- LIU P, FAN L Y, ZHOU W, et al. Static performance of high-speed electromagnet with permanent magnet based on parallel magnetic circuit [J]. *Transactions of CSICE*, 2016, 34(5): 449–455. (in Chinese)
- [9] 刘鹏, 邓家福, 范立云, 等. 串并联永磁对共轨高速电磁阀电磁力的影响[J]. *汽车工程*, 2021, 43(8): 1136–1142.
- LIU P, DENG J F, FAN L Y, et al. Influences of series and parallel permanent magnet on electromagnetic force of common rail high-speed solenoid valve [J]. *Automotive Engineering*, 2021, 43(8): 1136–1142. (in Chinese)
- [10] WANG Q L, YANG F Y, YANG Q, et al. Experimental analysis of new high-speed powerful digital solenoid valves [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(5): 2309–2313.
- [11] CHENG Q, ZHANG Z D, GUO H, et al. Improved processing and performance of GDI injector based on metal injection molding technology [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2014, 44(1): 99–114.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] YUN S N, HAM Y B, PARK J H, et al. Characteristics analysis of a high-pressure relief valve for the common rail system [C]//*Proceedings of International Conference on Fluid Power and Mechatronics*, 2011.
- [15] 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.
- [16] FAN L Y, BAI Y, MA X Z, et al. Analysis upon fuel injection quantity variation of common rail system for diesel engines [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(7): 3365–3377.