

文章编号: 2097-1974(2026)02-0052-12 DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20260207

航空阀用直流电磁铁吸力特性研究及多目标优化

郭蓓蕾¹, 张 帅²

(1. 河南城建学院, 平顶山, 467041; 2. 湖南科技大学, 湘潭, 411201)

摘要: 航空阀用直流电磁铁作为控制和动力系统的重要部件, 其吸力特性是电磁铁设计的关键因素。以航空阀用直流电磁铁中的隔磁环电磁铁作为研究对象, 在 ANSYS Maxwell 中建立二维有限元模型, 并给出磁场分布, 分析气隙、隔磁环参数、衔铁长度对电磁铁吸力特性的影响。在此基础上, 分别应用两种优化方法对电磁铁不同位置处的吸力进行多目标设计: 一是采用正交试验法, 对影响电磁铁吸力特性较为明显的因素进行主次分析; 二是采用优化软件 Optislang, 对各因素进行灵敏度分析和基于进化算法优化设计。最后对两种方法吸力特性的改善效果进行了对比分析, 结果表明, 采用 Optislang 优化更符合电磁铁吸力要求。

关键词: 航空电磁阀; 吸力特性; 多目标优化; 航空系统; 进化算法

中图分类号: TH137; TM57; V43 **文献标识码:** A

Characteristic and Multi-objective Optimization of Suction Force of DC Magnets for Aviation Valves

GUO Beilei¹, ZHANG Shuai²

(1. Henan University of Urban Construction, Pingdingshan, 467041;
2. Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, 411201)

Abstract: As an important component of aviation control and power systems, the suction characteristics of DC electromagnetic coils used in aviation valves are a key factor in the design of electromagnetic coils. Taking the magnetic-proof ring magnet in the DC magnets for aviation valves as the research object, the magnetic-proof ring magnetis modeled in ANSYS Maxwell and the magnetic field distribution is given. The effects of different air gap, different parameters and armature length of the magnetic-proof ringon the suction characteristics of the electromagnet are analyzed. On this basis, two optimization methods are applied to the multi-objective design of the suction force at different positions of the electromagnet. One is to use the orthogonal test method to carry out the primary and secondary analysis of the factors that affect the suction force characteristics of the electromagnet more obviously. The other is to use the optimization software optislang to carry out the sensitivity analysis of the factors and the optimization design based on the evolutionary algorithm. Finally, a comparative analysis of the improvement effect of the two pairs of methods on the suction characteristics is carried out. The results show that optislang optimization is more in line with the requirements of electromagnet suction.

Keywords: aviation solenoid valve; suction characteristics; multi-objective optimization; aviation system; evolutionary algorithm

0 引言

航空阀用直流电磁铁是一种电磁元器件, 能够将输入的直流电能转换成机械能输出, 在控制和动力系统中发挥着重要作用^[1-2]。在控制系统中, 航空阀用直流电磁铁是液压传动、气动控制以及应急制动等关键子系统的核心执行元件, 其吸力特性直接决定了系统的动态调控精度与运行稳定性, 不仅与控制系统整

体的可靠性相关联, 也是航空装备安全运行的重要保障。在动力系统中, 直流电磁铁是系统中的动力源, 将输入的直流电能转为机械能, 以驱动航空系统的正常运行, 而电磁铁的吸力特性对各个部件的响应速度与控制精度有重要影响, 如果吸合瞬间的冲击力过大, 可能会引发衔铁与铁心撞击, 加剧航空部件的磨损并缩短使用寿命, 影响动力系统的稳定性, 而工作

行程内吸力过小时,可能引起航空部件响应迟滞,无法实现动力系统在瞬态工况下的快速调节,影响动力系统的快速性。因此,对航空阀用直流电磁铁的吸力特性进行优化,实现吸合阶段低冲击、工作过程高输出,是提升动力系统性能的关键环节。

在设计时会选择带有隔磁环的阀用电磁铁,采用隔磁环结构的电磁铁可以增大在工作行程内的电磁吸力。对电磁铁进行设计时,往往在确定其一般尺寸参数之后,通过有限元的方法对其他重要设计参数进行优化。

有很多学者利用有限元软件 ANSYS 对航空阀用直流电磁铁进行建模仿真,分析影响吸力特性的不同因素,比如不同磁性材料、不同温度以及隔磁环的各种参数等,在制造时还需要考虑到加工工艺的影响。孙玉慧等^[3]就航空阀用电磁铁工作环境的特殊性造成的温升问题,提出一种电磁-热耦合场计算方法,并在 ANSYS Workbench 中建模仿真,验证了方法的可行性。王宗伟等^[4]利用 ANSYS、AMESim 等仿真软件对螺管电磁铁通电工作时的电磁场分布和吸力特性等进行仿真计算,仿真结果与试验实测值基本一致。李杰等^[5]对航空电磁阀的开关响应进行建模,设计一种基于自适应模拟退火算法的优化方法,对电磁阀的匝数、工作气隙的宽度等参数进行了优化,参数优化后的开关响应均有所提高。徐南岳等^[6]为研究环境温度对燃油电磁阀驱动性能的影响,利用 Ansoft-Maxwell 对由线圈和衔铁构成的电-机械转换器进行数值模拟,研究其静态和动态性能,试验表明环境温度升高最终会缩短电磁阀的启闭时间。韩永健等^[7]针对某些航空发动机燃油调节器常见的大幅跳变和平衡占空比失稳问题,对电磁阀等关键组件进行分析,提出一种基于多目标优化的参数匹配方法获得最佳参数匹配,仿真结果表明,经过优化后的参数匹配结果与专家经验的匹配结果相符。

由于电磁铁的不同结构对吸力特性有较大影响,很多学者对电磁铁的铁心与衔铁锥面形状和贴合面位置进行仿真,分析对吸力特性的影响,对电磁铁的优化有重要作用。还可以通过改变导套厚度、隔磁环不同参数以及衔铁不同参数,分析这些因素对电磁铁吸力特性的影响情况。由于阀用直流电磁铁最重要的是工作时电磁吸力的大小,因此可以通过改变磁芯结构

和研究驱动电流对电磁铁吸力特性进行优化,在工作时能够有较大的电磁力^[8-9]。

为了得到符合电磁吸力要求的电磁铁,以航空阀用直流电磁铁中隔磁环电磁铁为研究对象,在 ANSYS Maxwell 中建立二维模型,通过两种多目标优化方法,即正交试验法和 Optislang 中的进化算法 (Evolutionary Algorithm, EA) 对电磁铁参数进行优化,对航空阀用直流电磁铁的设计和优化具有指导意义。

本文采用的 Optislang 多目标优化方法在多个研究中得到验证。文献 [10] 在 ANSYS Workbench 的基础上,结合 Optislang 优化设计软件,对混流泵启动过程进行多目标优化,该方法能够有效提升混流泵的瞬态扬程和水利效率。文献 [11] 采用基于粒子群算法的 Maxwell、Workbench、Optislang 联合仿真方法对永磁同步电机进行多目标优化,最终使得转矩脉动下降了 31.8%,齿槽转矩下降 13.8%。文献 [12] 对关节机电传统系统进行多目标优化,经过 Optislang 优化后,机电系统的传动效率、安全性和输出扭矩均有提升。

1 隔磁环电磁铁吸力特性分析

1.1 电磁铁概述

航空阀用隔磁环电磁铁是一种将直流电能高效转换为机械能的电磁执行元件,其核心功能是通过电磁感应产生可控吸力,驱动航空阀内部机械结构完成启闭动作,进而实现对燃油、液压油等流体介质的精准调控。

在隔磁环电磁铁中,衔铁上端面与隔磁环左侧倒角之间的气隙是主工作气隙,衔铁与导套之间的气隙是侧面气隙。如图 1 所示,隔磁环电磁铁由线圈、衔铁、铁心、外壳等构成。当线圈通电以后,由于电磁感应定律,衔铁与铁心之间将会产生电磁吸力^[13-14],主工作气隙、衔铁和外壳形成闭合回路,衔铁在磁场中被磁化,此时衔铁向铁心方向运动,这个过程为吸合过程。当电流增大时,电磁力也会逐渐增加。当线圈断电以后,闭合回路中不再有磁感线通过,此时衔铁与铁心之间的电磁力将逐渐减小,在外负载力和弹簧力的共同作用下,衔铁向铁心的反方向运动,最终回到初始位置,这个过程为释放过程^[15]。衔铁发生位移后以机械能的形式输出,从而牵动机械装置正常运行。

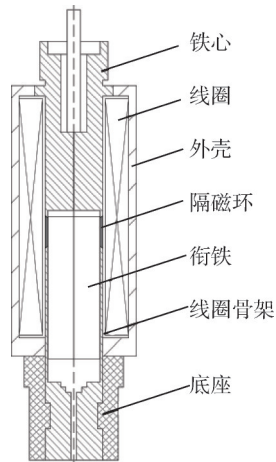


图1 隔磁环电磁铁结构

Fig.1 The structure of magnetic-proof ring magnet

隔磁环是电磁铁的一个关键部件，隔磁环电磁铁工作时，主工作气隙会发生变化，进而引起整个磁路的磁阻发生变化，如果没有隔磁环，会使电磁力不稳定，调节效果不佳^[16]。采用隔磁环后，可以使磁通通过隔磁环传递至衔铁，使磁通更易流动，通过优化隔磁环的各个参数，可以使电磁力满足工作行程中的要求，同时减少磁饱和现象。另外，与无隔磁环结构的电磁铁相比，隔磁环的设计通过抑制漏磁，使更多磁通集中于主工作气隙，从而在相同条件下可提升10%~30%的工作吸力，尤其能满足大行程、高驱动力的需求。同时，隔磁环的设计还能降低涡流损耗，减少能量浪费，提升电磁铁的工作效率。

线圈周围缠绕有塑料骨架，隔磁环是金属不导磁材料，常常选用铜。隔磁环焊接在导套中，将导套分成多段。隔磁环电磁铁由于焊接有隔磁环，电磁吸力较大，在运动过程中，即使在大行程的环境中也能正常工作。

1.2 电磁铁吸力要求

对于阀用直流电磁铁，驱动力就是电磁吸力，为保证电磁铁的性能，对于阀用直流电磁铁的选择有一定的要求，即高工作吸力和低吸合力。

a) 高工作吸力。

工作吸力是指电磁铁在正常工作时的电磁力，由于电磁力在衔铁运动的释放过程中逐渐减小，在大行程下衔铁受力太小则无法正常工作，具有高工作吸力的电磁铁即使是在大行程情况下也能正常工作。

b) 低吸合力。

吸合力是指衔铁和铁心在吸合过程中产生的电磁力，为防止衔铁和铁心在吸合时发生撞击，要求电

磁铁具有低吸合力，如果吸合力过大，在工程中可通过在铁心下端安装限位片的方式来防止撞击。

1.3 电磁铁吸力分析

阀用直流电磁铁的电磁吸力由式(1)计算^[17]：

$$F = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S} = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \quad (1)$$

式中 Φ 为主工作气隙磁通，Wb； B 为主工作气隙磁感应强度，T； μ_0 为真空磁导率，即 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m； S 为磁路截面积， m^2 。

忽略漏磁和侧面气隙时，阀用直流电磁铁气隙中的磁感应强度可由安培环路定理计算出：

$$B = \frac{N\mu_0 I}{\delta} \quad (2)$$

式中 N 为线圈匝数； I 为线圈电流； δ 为主工作气隙长度。

将式(2)代入式(1)可以得到：

$$F = \frac{(NI)^2 \mu_0 S}{2\delta^2} \quad (3)$$

从式(3)可以得知，要想提高直流电磁铁的电磁吸力，可以通过增加线圈匝数、增大通入线圈的电流，或减小主工作气隙长度来实现。

2 隔磁环电磁铁有限元仿真

本文对影响电磁铁电磁吸力的因素进行分析，其中主要研究的参数为主工作气隙 δ 、侧面气隙 s 、隔磁环厚度 d 、隔磁环上端角 α 、隔磁环下端角 β 、隔磁环长度 l 以及衔铁长度 b 。在进行理论分析时，磁通分布往往是均匀的，且不考虑漏磁影响，但实际中不可忽略这些因素对电磁铁吸力特性的影响，因此通过改变侧面气隙、衔铁长度以及隔磁环等参数对电磁铁吸力特性进行仿真很有必要。在有限元软件 ANSYS Maxwell 中进行仿真，得到不同参数下的吸力特性曲线，找出对吸力特性影响较大的结构参数并进行多目标正交试验。电磁铁的初始尺寸参数如表1所示，隔磁环的初始尺寸参数如表2所示，在进行参数化仿真时，按照初始尺寸参数进行仿真。

表1 电磁铁初始尺寸参数(单位:mm)

Tab.1 Initial size parameters of electromagnet

电磁铁参数	参数大小
电磁铁长度	241
电磁铁宽度	36
线圈长度	136
衔铁长度	82
衔铁直径	30
主工作气隙	1
侧面气隙	0.1

表2 隔磁环初始尺寸参数(单位:mm)

Tab.2 Initial size parameters of magnetic-proof ring

电磁铁参数	参数大小
电磁铁长度	241
电磁铁宽度	36
线圈长度	136
衔铁长度	82
衔铁直径	30
主工作气隙	1
侧面气隙	0.1

根据表1和表2中参数在ANSYS Maxwell中建立关于z轴对称的隔磁环电磁铁模型,定义线圈匝数为500匝,电流设置为1.5 A。磁性材料均设置为电工纯铁(DT4C),线圈骨架材料设置为塑料(Teflon),隔磁环材料设置为铜(Copper)。边界条件设置为气球边界条件^[18],电磁铁仿真模型见图2。

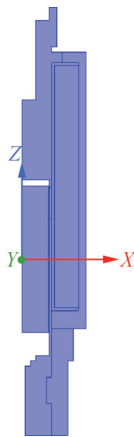


图2 电磁铁仿真模型

Fig.2 Electromagnet simulation model

2.1 气隙长度对电磁铁吸力特性的影响

2.1.1 主工作气隙

主工作气隙为衔铁上端面与隔磁环左侧倒角之间的距离^[19],即式(3)中的 δ (见图3)。

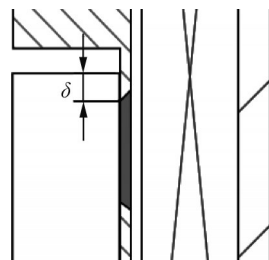


图3 电磁铁的主工作气隙

Fig.3 Main working air gap of electromagnet

衔铁运动时通过改变主工作气隙,仿真其对电磁铁吸力特性的影响,衔铁向下运动,在不同衔铁运动位移 x 下得到对应的电磁力 F ,主工作气隙对吸力特性的影响如图4所示。

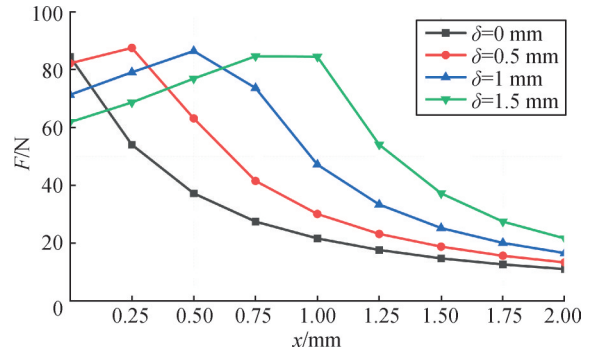


图4 主工作气隙对吸力特性的影响

Fig.4 Influence of main working air gap on suction characteristics

由图4仿真结果可知,当改变主工作气隙时,电磁铁的吸力特性会受到较大影响,当主工作气隙 $\delta=1.5\text{ mm}$ 、 1 mm 以及 0.5 mm 时,改变主工作气隙时,电磁吸力随铁心与衔铁距离变化的规律为先增大后减小,当 $\delta=0\text{ mm}$ 时,电磁吸力逐渐减小。

对于吸合力, $\delta=1.5\text{ mm}$ 时初始的吸合力较小,但当 $\delta=0\text{ mm}$ 时吸合力较大;对于工作吸力, $\delta=1.5\text{ mm}$ 时行程在 1 mm 和 2 mm 的电磁吸力要比其他主工作气隙下的大。

在行程 $x=0\text{ mm}$ 时,随着主工作气隙 δ 从 0.5 mm 增大至 1.5 mm ,电磁力从 82.18 N 降至 61.87 N ,降幅达 24.71% 。在行程 $x=0.25\text{ mm}$ 时,电磁力从 87.51 N 降至 68.72 N ,降幅达 21.47% ,与式(1)推导的“反比平方”趋势一致。

由于式(1)中忽略漏磁影响,随着行程的增大,漏磁占比也会上升,主气隙磁通随 δ 增大的下降速率小于理想情况,以至于在高行程处随着 δ 的增大,电磁力反而上升。

从磁场分布的角度分析造成这种现象的原因,如图5所示是不同主工作气隙下行程为 0 mm 时的磁场分布。

从图5中可以看出,随着主工作气隙 δ 的增大,衔铁中的磁场分布逐渐减小,由式(1)可知,电磁铁的电磁吸力也会减小,与图4中 0 mm 时各主工作气隙下的电磁吸力对应。

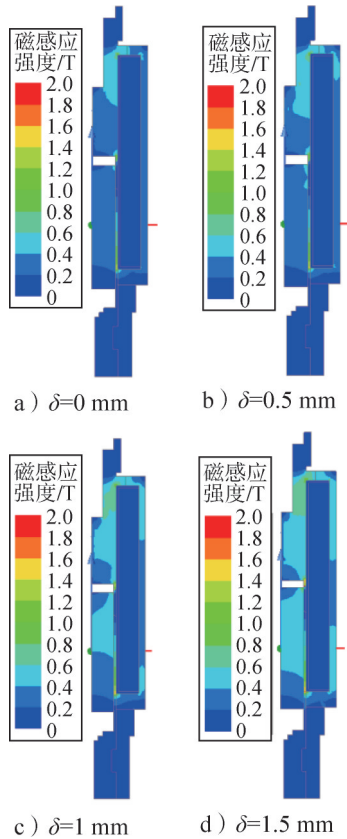


图5 不同主工作气隙下的磁场分布

Fig.5 Magnetic field distribution under different main working air gaps

2.1.2 侧面气隙

侧面气隙是指衔铁右端面与导套左侧之间的距离 s (见图6)。

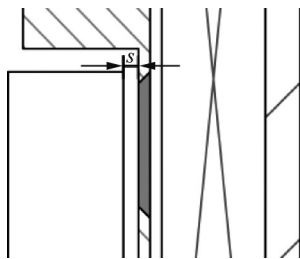


图6 电磁铁的侧面气隙

Fig.6 Side air gap of electromagnet

保持其他结构参数不变时, 仿真出电磁铁侧面气隙分别在 $s=0.05\text{ mm}$ 、 $s=0.1\text{ mm}$ 、 $s=0.15\text{ mm}$ 以及 $s=0.2\text{ mm}$ 时的吸力特性, 如图7所示。

从图7可以看出, 侧面气隙取不同值时, 电磁铁所受电磁吸力总是先增大后减小。随着侧面气隙的增大, 电磁铁在初始位置时吸合力逐渐减小, 但在 1 mm 和 2 mm 的行程时, 侧面气隙的改变对工作吸力没有明显影响。在行程 0.5 mm 处, 随着侧面气隙从

0.2 mm 减小至 0.05 mm , 电磁力从 72.53 N 增至 95.35 N , 增幅达 31.46% 。

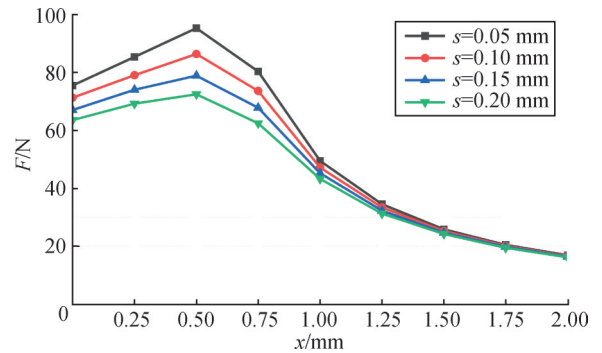


图7 侧面气隙对吸力特性的影响

Fig.7 Influence of side air gap on suction characteristics

2.2 隔磁环参数对电磁铁吸力特性的影响

在阀用直流电磁铁中, 带有隔磁环的电磁铁所受电磁吸力较大, 隔磁环参数有隔磁环厚度 d 、隔磁环上端角 α 、隔磁环下端角 β 以及隔磁环长度 l , 见图8。现分析不同隔磁环参数对电磁铁吸力特性的影响。

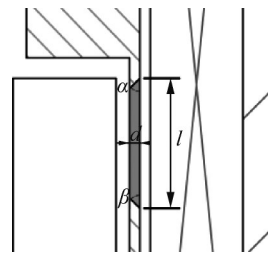


图8 隔磁环不同参数

Fig.8 Different parameters of magnetic-proof ring

2.2.1 隔磁环厚度

保持电磁铁其他结构参数不变, 仿真隔磁环厚度 $d=0.9\text{ mm}$ 、 $d=1.1\text{ mm}$ 、 $d=1.3\text{ mm}$ 以及 $d=1.5\text{ mm}$ 时的吸力特性。隔磁环厚度对吸力特性的影响见图9。

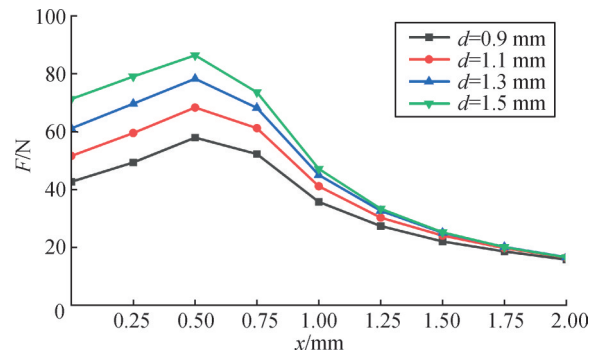


图9 隔磁环厚度对吸力特性的影响

Fig.9 Influence of the thickness of the magnetic separator ring on the suction characteristics

由图9可知，隔磁环厚度取不同值时，电磁铁所受电磁吸力也是先增大后减小。对于吸合力，随着隔磁环厚度的增大，吸合力会相应增大，对于工作吸力，在行程为1 mm时，隔磁环厚度越大，电磁吸力越大，在行程为2 mm时对电磁吸力无明显影响。

2.2.2 隔磁环上端角

保持电磁铁其他结构参数不变，观察隔磁环上端角 α 分别取15°、30°、45°以及90°时电磁铁的吸力特性，如图10所示。

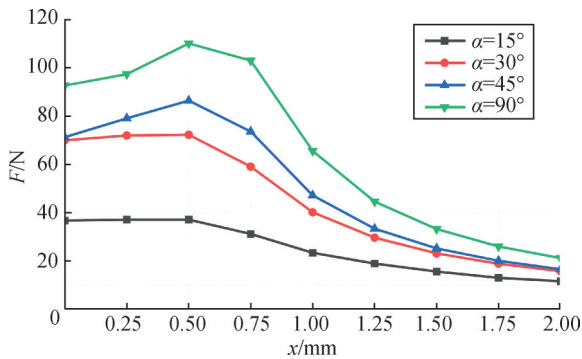


图10 隔磁环上端角对吸力特性的影响

Fig.10 Influence of the top angle of the magnetic-proof ring on the suction characteristics

从图10可以看出，隔磁环上端角对吸力特性具有较明显的影响。当上端角 α 为15°时，电磁铁受力较小，在该角度下无法满足正常吸力要求；当上端角 α 为30°和45°时，电磁铁受力较高，在初始位置时的吸合力大致相同；当上端角 α 为90°时，电磁铁在初始位置时的吸合力以及工作时的电磁吸力最高。

在行程0.5 mm处，变化最为明显，随着隔磁环上端角从15°增大到90°，电磁力从37.18 N增至110.15 N，增幅达196.26%。在小行程下隔磁环上端角对电磁力的影响较大，而大行程下随着漏磁的增加，电磁力的增幅影响变小。

图11给出了在不同隔磁环上端角下的磁场分布，从磁场分布来看，随着隔磁环上端角的增大，衔铁周围的磁感应强度逐渐增加，在上端角为15°时，衔铁周围的磁场在0.3 T以下，当上端角增大时，衔铁周围的磁场增大至0.6~0.9 T之间，且逐渐覆盖整个衔铁表面，同时上端角的变化也会改变主工作气隙，从而影响电磁力。这说明隔磁环上端角的变化会显著改变主工作气隙和衔铁周围的磁场分布，进而影响电磁力的大小。

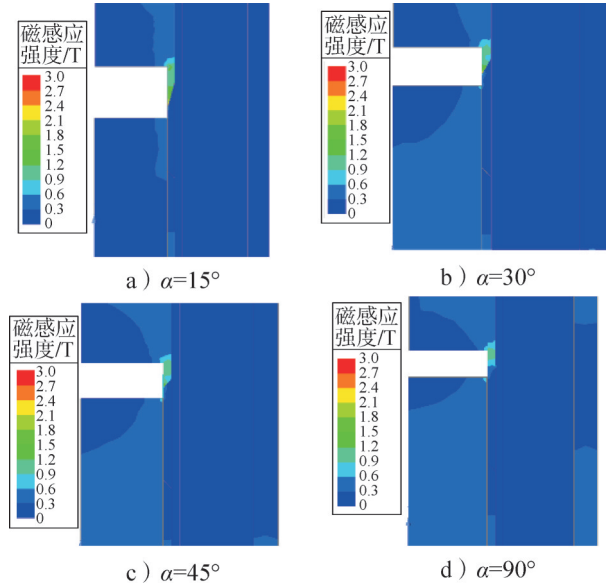


图11 不同隔磁环上端角下的磁场分布

Fig.11 Magnetic field distribution under different top angles of magnetic-proof ring

2.2.3 隔磁环下端角

保持电磁铁其他结构参数不变时，观察隔磁环下端角 β 为15°、30°、45°以及90°时电磁铁的吸力特性，如图12所示。

从表3中可看出改变隔磁环下端角时对电磁铁的吸力特性没有明显影响。这是因为从图12的磁场分布来看，改变隔磁环下端角对磁场分布没有显著影响，因此电磁吸力没有明显变化。

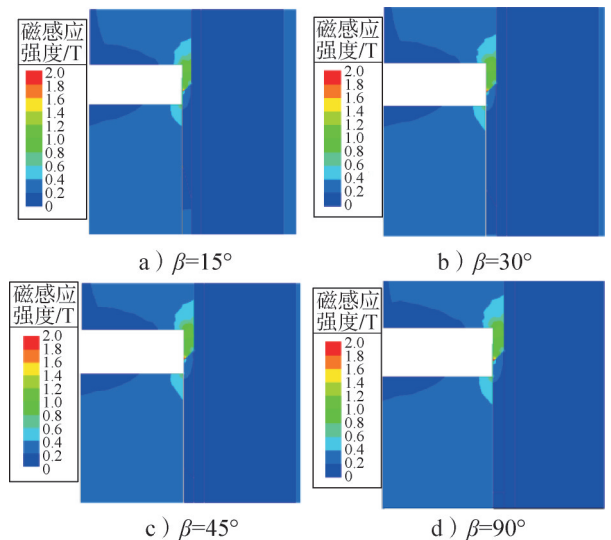


图12 不同隔磁环下端角下的磁场分布

Fig.12 Magnetic field distribution under different lower angles of magnetic-proof ring

表3 隔磁环下端角不同时的电磁吸力

Tab.3 Electromagnetic attraction force at different angles of the lower end of the magnetic-proof ring

行程/mm	$F_{15'}/N$	$F_{30'}/N$	$F_{45'}/N$	$F_{90'}/N$
0	71.12	71.21	71.34	71.06
0.25	79.46	79.46	79.12	79.66
0.5	86.50	86.94	86.45	86.86
0.75	73.78	73.61	73.66	73.58
1	47.26	47.23	47.22	47.39
1.25	33.38	33.24	33.43	33.38
1.5	25.26	25.25	25.28	25.19
1.75	20.24	20.29	20.14	20.16
2	16.58	16.62	16.63	16.61

2.2.4 隔磁环长度

隔磁环长度不同时的电磁吸力见表4, 同隔磁环下端角, 改变隔磁环长度对电磁铁的吸力特性无明显影响, 因为改变隔磁环长度对磁场分布无显著影响。

表4 隔磁环长度不同时的电磁吸力

Tab.4 Electromagnetic attraction force with different lengths of magnetic-proof rings

行程/mm	$F_{10'}/N$	$F_{15'}/N$	$F_{20'}/N$	$F_{25'}/N$
0	70.97	70.99	71.34	71.07
0.25	79.74	79.50	79.12	79.57
0.5	86.83	86.81	86.45	86.91
0.75	73.60	73.72	73.66	73.76
1	47.20	47.24	47.22	47.22
1.25	33.38	33.32	33.43	33.19
1.5	25.40	25.38	25.28	25.26
1.75	20.09	20.14	20.14	20.15
2	16.45	16.60	16.63	16.64

2.3 衔铁长度对电磁铁吸力特性的影响

现观察不同衔铁长度对电磁铁吸力特性的影响, 分别取衔铁长度 b 为 62 mm、72 mm、82 mm 以及 92 mm, 仿真结果如图 13 所示。

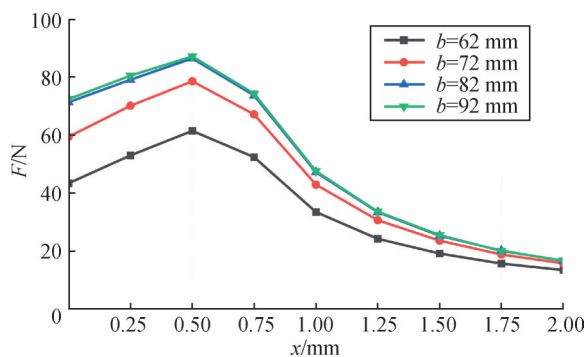


图13 衔铁长度对吸力特性的影响

Fig.13 Influence of armature length on suction characteristics

由图 13 可知, 当衔铁长度 b 在 82 mm 以下时, 增大衔铁长度可以提高电磁铁的吸合力和工作吸力, 当衔铁长度 b 在 82 mm 以上时, 增大衔铁长度对电磁铁的吸力特性没有明显影响。

当衔铁长度 b 从 62 mm 增至 82 mm 时, 行程 0 mm 处的电磁力从 43.40 N 增加至 71.34 N, 增幅达 64.38%。但当 b 超过 82 mm 时, 电磁力仅从 71.34 N 增至 72.42 N, 增幅只有 1.51%, 这是因为衔铁长度已覆盖线圈的有效磁场范围, 继续增长衔铁长度无法提升磁路的有效面积, 因而无法大幅增加电磁力, 同时可能引起衔铁自身质量增加, 导致动态响应的延迟。

3 参数优化

从上述分析中可以看出, 影响电磁铁吸力特性的因素有很多, 而隔磁环下端角和隔磁环长度对吸力特性没有明显影响。根据初始数据对电磁铁进行仿真, 得到吸力特性如图 14 所示。

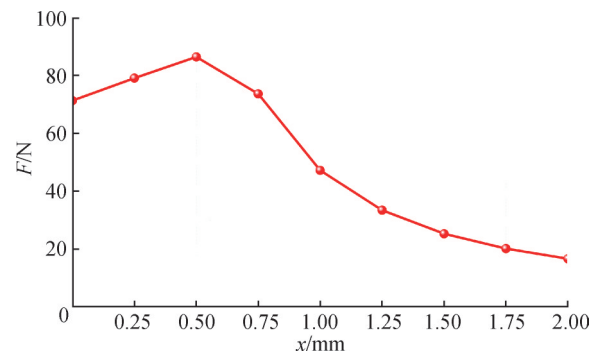


图14 初始数据下电磁铁吸力特性

Fig.14 Electromagnet suction characteristics under initial data

在初始数据下, 电磁铁在工作区间内的吸力较小, 无法满足工作时的吸力要求, 由于电磁铁在工作时需要满足高工作吸力和低吸合力, 在衔铁运动时, 取行程为 0 mm 处所受电磁力 F_0 为吸合力, 要求该力较小, 取行程为 1 mm 和 2 mm 时所受到的电磁力 F_1 和 F_2 来代表工作吸力, 要求这两个力较大。

现设计多目标正交试验对电磁铁的参数进行多目标优化, 优化目标为

$$\begin{cases} F_0 \leq 90N \\ F_1 \geq 90N \\ F_2 \geq 60N \end{cases} \quad (4)$$

3.1 多目标正交试验优化

对主工作气隙、侧面气隙、隔磁环厚度、隔磁环上端角以及衔铁长度进行多目标正交试验优化, 可以得到影响电磁铁吸力特性的主次因素, 并为阀用直流

电磁铁的设计提供相关依据^[20]。

a) 确定因素与水平。

由于隔磁环下端角和隔磁环长度对电磁铁吸力特性没有明显影响,因此正交试验共有5个因素,每个因素均设有4个水平,见表5。

表5 因素-水平表

Tab.5 Factor level table

水平/因素	A/mm	B/mm	C/mm	D/(°)	E/mm
1	0	0.05	0.9	15	62
2	0.5	0.1	1.1	30	72
3	1	0.15	1.3	45	82
4	1.5	0.2	1.5	90	92

注:A为主气工作隙 δ ;B为侧面气隙 s ;C为隔磁环厚度 d ;D为隔磁环上端角 α ;E为衔铁长度 b 。

b) 选择正交表。

由于正交试验为5因素4水平,故选择的正交表为 $L_{16}(4^5)$ 。

c) 确定试验方案。

本次试验的目标为 F_0 、 F_1 和 F_2 ,试验方案如表6所示。

表6 试验方案

Tab.6 Test scheme

A/mm	B/mm	C/mm	D/(°)	E/mm	F_0/N	F_1/N	F_2/N
1	2	3	4	5			
1	1	1	1	1	23.69	9.38	6.22
1	2	2	2	2	52.77	17.63	9.92
1	3	3	3	3	69.52	20.99	11.08
1	4	4	4	4	93.86	27.24	13.54
2	1	2	3	4	68.32	29.15	13.93
2	2	1	4	3	60.68	31.13	15.71
2	3	4	1	2	34.83	17.02	9.60
2	4	3	2	1	37.03	17.61	9.53
3	1	3	4	2	39.81	46.64	17.41
3	2	4	3	1	43.40	33.49	13.37
3	3	1	2	4	38.82	30.43	14.48
3	4	2	1	3	30.34	21.29	11.55
4	1	4	2	3	57.76	72.13	19.26
4	2	3	1	4	34.46	33.93	13.99
4	3	2	4	1	17.18	40.42	13.44
4	4	1	3	2	14.64	29.94	11.13

根据表6中的方案,分别计算出每个序号下的 F_0 、 F_1 和 F_2 ,求出5个水平的4次偏差和的平均值以及各自的极差,如表7所示,其中极差大的是主要因素,该因素对电磁铁吸力特性影响较大,极差小的是次要因素,该因素对电磁铁吸力特性影响较小,而不同水平

的平均值可以得到每个参数下的最优参数,从而组成最佳水平组合。

表7 平均值和极差

Tab.7 Average and range

目标	平均值	A/mm	B/mm	C/mm	D/(°)	E/mm
F_0/N	K_1	59.96	47.40	34.46	30.83	30.33
	K_2	50.22	47.83	42.15	46.60	35.51
	K_3	38.09	40.09	45.21	48.97	54.58
	K_4	31.01	43.97	57.46	52.88	58.87
	极差	28.95	7.74	23.01	22.05	28.54
F_1/N	K_1	18.81	39.33	25.22	20.41	25.23
	K_2	23.73	29.05	27.12	34.45	27.81
	K_3	32.96	27.22	29.79	28.39	36.39
	K_4	44.11	24.02	37.47	44.29	30.19
	极差	25.30	15.31	12.25	23.88	11.16
F_2/N	K_1	10.19	14.21	11.89	10.34	10.64
	K_2	12.19	13.25	12.21	13.30	12.02
	K_3	14.20	12.15	13.00	12.38	9.59
	K_4	14.46	11.44	13.94	16.48	13.99
	极差	4.27	2.77	2.06	6.14	4.40

经过计算,得到影响电磁铁吸力因素的主次因素和最优方案如表8所示。从表8可以得到:

1) 对于主工作气隙 δ , F_0 、 F_1 和 F_2 均是在1.5 mm时取得最佳水平,故选择主工作气隙 δ 为1.5 mm;

2) 对于侧面气隙 s , F_1 和 F_2 均在 $s=0.05$ mm处取得最佳水平,故选择侧面气隙 s 为0.05 mm;

3) 对于隔磁环厚度 d , F_1 和 F_2 均在 $d=1.5$ mm处取得最佳水平,故选择隔磁环厚度 d 为1.5 mm;

4) 对于隔磁环上端角 α , F_1 和 F_2 均在 $\alpha=90^\circ$ 时取得最佳水平,故选择隔磁环上端角 α 为 90° ;

5) 对于衔铁长度 b , F_0 、 F_1 和 F_2 均在不同衔铁长度处取得最佳水平,可根据工程需要选择衔铁长度,如果工程需要 F_0 较小时,可以选择衔铁长度 $b=62$ mm,但如果工程要求电磁铁的工作吸力较大时,在 F_1 和 F_2 中可以优先选择让 F_2 最大,此时衔铁长度 $b=92$ mm。

表8 主次因素和最优方案

Tab.8 Primary and secondary factors and optimal scheme

目标	因素主次	最佳组合
F_0	AECDB	$A_4-E_1-C_1-D_1-B_3$
F_1	ADBCE	$A_4-D_4-B_1-C_4-E_3$
F_2	DEABC	$D_4-E_4-A_4-B_1-C_4$

结合上述分析可知,隔磁环电磁铁要想得到较好的吸力特性,且考虑电磁铁的工作吸力较大时,其最佳水平组应为 $A_4B_1C_4D_4E_4$,优化后具体参数如表9所示。

表9 多目标正交试验优化后的电磁铁参数

Tab.9 Electromagnet parameters optimized by multi-objective orthogonal test

优化参数	参数大小
δ/mm	1.5
s/mm	0.05
d/mm	1.5
$\alpha/(\text{^\circ})$	90
b/mm	92

$$\text{s.t.} \begin{cases} 1.5 \text{ mm} \leq \delta \leq 2.5 \text{ mm} \\ 0 \text{ mm} < s \leq 0.1 \text{ mm} \\ 1 \text{ mm} \leq d \leq 1.5 \text{ mm} \\ 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \\ 82 \text{ mm} \leq b \leq 92 \text{ mm} \end{cases} \quad (5)$$

3.2 Optislang 优化

虽然正交试验能够找到影响电磁力的主次因素，且优化后电磁铁在工作区间的电磁力得到明显提升，但 F_0 也增大了很多，没有满足优化目标的要求，且正交试验只能在有限的样本中进行寻优，只是通过部分试验推断全局最优，因此结果往往是“较优解”而非“最优解”，同时电磁吸力受多方面因素的影响，正交试验在解决这种非线性的复杂交互作用时可能会遗漏真正的最优组合。本节利用参数优化软件Optislang对电磁铁参数进行优化，能够避免上述问题。Optislang优化流程如图15所示。

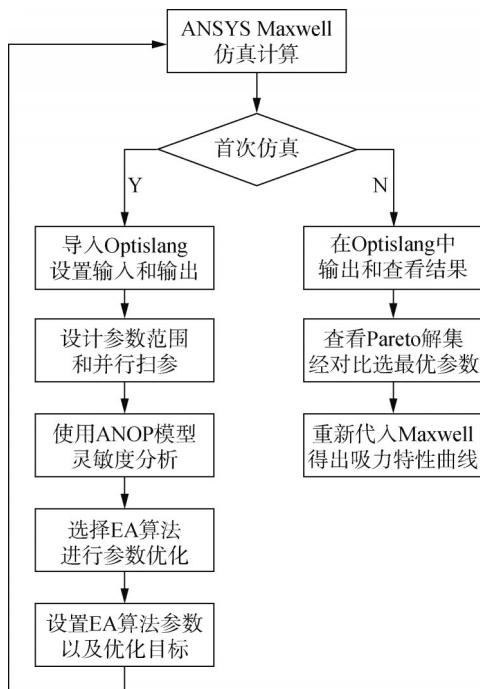


图15 Optislang 优化流程

Fig.15 Optislang optimization process

设定参数范围:

首先对输入的参数进行灵敏度分析，通过改变输入参数的值，观察电磁铁输出的变化来评估参数的影响，从而确定哪些因素对输出影响更大^[21]。使用软件中自带的自适应元模型（AMOP）可以生成试验设计（DoE），即有限个离散参数数据的组合，根据参数范围，选择拉丁超立方体采样，生成300个关于输入参数的样本点^[11]。

利用灵敏度分析能够对设计空间进行探索，避免局部最优，从而关注全局最优，能够在满足优化参数范围、目标函数和约束条件的情况下获取相对最优解。

灵敏度分析完成后，可以显示模型的预后系数（Coefficient of Prognosis, CoP），以确定模型的可靠性。CoP是Optislang中用于评估模型可靠性的指标，用于衡量输入参数与输出目标之间的关联度及模型结果的可信程度，评估模型对实际仿真数据的预测精度。Cop反映了模型与原始仿真数据之间的拟合优度，对于工程优化问题，当 $Cop \geq 80\%$ 时认为模型可靠，当 $Cop \geq 90\%$ 时说明模型预测精度非常高。由图16可知，经过3次迭代后，样本数量达到300个，此时 F_0 、 F_1 和 F_2 的CoP系数分别达到了98.9%、96.8%和91.7%，均高于90%，可完全替代原始仿真模型进行数据预测和优化。从CoP中可以看出哪些输入参数对输出的影响较大，从图16的结果显示来看，影响较大的参数依次是隔磁环上端角 α 、主工作气隙 δ 、隔磁环厚度 d 和侧面气隙 s ，而衔铁长度 b 影响最小，结果不再显示该参数对CoP的贡献程度。

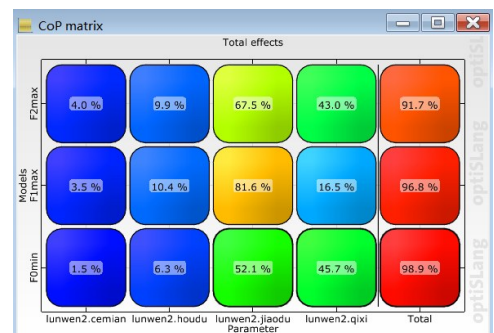


图16 CoP系数矩阵

Fig.16 Cop coefficient matrix

选择软件推荐算法EA算法进行参数优化，由于灵敏度分析中衔铁长度 b 对输出影响较小，故在优化时不再考虑 b 的变化，参数范围中默认 $b=92\text{ mm}$ 。确定算法参数设置如表10所示。

表10 进化算法参数设置

Tab.10 Evolutionary algorithm parameter setting

选项	参数设置
初始种群规模	1 000
限定存档大小	20
最小代数	5
最大代数	90
交叉方法	Multipoint
交叉率	50%

软件求解完毕后，共有9 900组样本参数数据和结果，得到多目标优化后的三维Pareto前沿，即优化算法得出的可行解^[22]，如图17所示。在最优解集中选择出最优参数如表11所示。

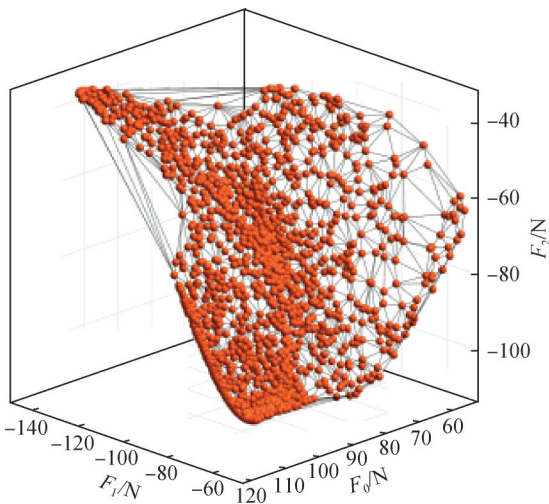


图17 3D Pareto 解集

Fig.17 3D Pareto solution set

表11 Optislang 优化后的电磁铁参数

Tab.11 Optislang optimized electromagnet parameters

优化参数	参数大小
δ/mm	1.57
s/mm	0.017
d/mm	1.46
$\alpha/(\text{^\circ})$	66.46
b/mm	92

3.3 电磁铁优化对比与分析

将初始数据与两种优化方法的优化目标进行对比，如表12所示，吸力特性曲线如图18所示。现从目标满足度、性能冗余度、优化结果可信度3个角度

对结果进行分析。

从目标满足度来看，经过正交试验优化后，吸合力 F_0 达到111.31 N，超出目标值23.68%，衔铁与铁心存在撞击风险，需要额外增加限位片以防止影响航空阀用电磁铁的使用寿命，虽然 F_1 、 F_2 超出优化目标21.83%、17.6%，但因 F_0 较大，整体方案不满足优化要求；经过Optislang算法优化后，吸合力 F_0 下降11.66%，能有效防止衔铁与铁心的撞击带来的影响， F_1 、 F_2 达到99.25 N、67.13 N，分别增幅10.28%、11.88%，能够满足航空阀用电磁铁高行程的吸力要求。

从性能冗余度来看，航空阀用电磁铁需要考虑性能与轻量化之间的平衡，对比两种方案的超目标值占比发现，正交试验优化的 F_1 超额率达21.83%，虽满足优化目标，但可能导致磁路设计冗余，如增大隔磁环尺寸等，额外增加无效成本；而Optislang优化中 F_1 、 F_2 超额率控制在10%~12%之间，既满足高吸力的目标，又满足轻量化要求，能够降低一定的材料成本和结构质量。

从优化结果可信度来看，正交试验的优化结果往往是“较优解”而非“最优解”，可能并未达到最优效果，而Optislang中的EA算法通过多目标进化寻优，优化中 F_0 、 F_1 、 F_2 的Cop系数分别达到98.9%、96.8%和91.7%，保障了优化结果对目标达成的可信度，确保对电磁铁参数进行调整时能够稳定复现目标性能。

表12 优化前后的目标大小

Tab.12 Target size before and after optimization

优化方法/目标	F_0/N	F_1/N	F_2/N
初始数据	71.34	47.22	16.63
正交试验	111.31	109.65	70.56
Optislang	79.51	99.25	67.13

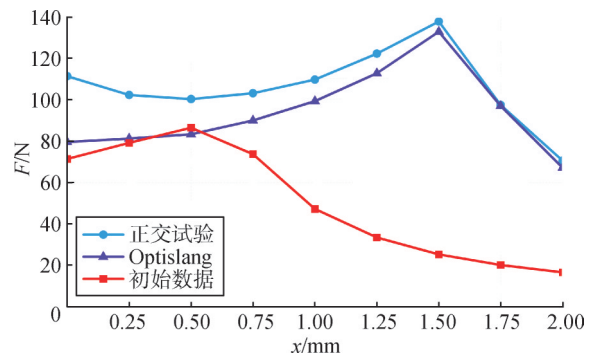


图18 优化前后吸力特性对比

Fig.18 Comparison of suction characteristics before and after optimization

4 结论

本文利用 ANSYS Maxwell 有限元软件, 对阀用直流电磁铁中的隔磁环电磁铁进行仿真, 结合给出的磁场分布, 探究影响电磁吸力的影响因素, 利用正交试验和 Optislang 优化软件对电磁铁参数进行优化, 具体结论如下:

a) 电磁铁的吸力特性整体呈现出先增大后减小的趋势, 气隙参数、隔磁环参数以及衔铁参数对电磁铁的吸力特性影响各不相同, 其中主工作气隙、侧面气隙、隔磁环厚度、隔磁环上端角以及衔铁长度对吸力特性有较大影响。

b) 给出 3 个位置处的吸力要求作为优化目标, 正交试验法找到了满足部分目标的设计。这是由于正交试验法只能在已有参数中寻优, 具有一定局限性。虽然通过正交试验法得到的设计结果不能同时满足所有目标要求, 但该方法改善了原有设计, 且得到了影响电磁力的主次因素。

c) 采用 Optislang 中的 EA 算法优化目标, 从满足度来看, F_0 、 F_1 和 F_2 三个优化目标均能得到满足, 实现了低吸合力和高工作吸力; 从性能冗余度来看, Optislang 优化中 F_1 、 F_2 超额率控制在 10%~12% 之间, 相较于正交试验来说满足轻量化要求; 从优化结果可信度来看, F_0 、 F_1 、 F_2 的 Cop 系数都大于 90%, 保障了模型的准确性, 综合比较之后, Optislang 优化更符合电磁铁的吸力要求。

参考文献

- [1] 赵靖英, 姚帅亮, 赵纪新, 等. 一种螺管式电磁铁的设计及静态特性研究[J]. 电器与能效管理技术, 2017(16): 22-27.
ZHAO Jingying, YAO Shuailiang, ZHAO Jixin, et al. Structure design and static characteristics analysis of a kind of solenoid electromagnet[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(16): 22-27.
- [2] 庞末红, 杨伦奎, 陈成峰. 基于 Maxwell 方程的电磁阀特性仿真研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2015(6): 78-83.
PANG Mohong, YANG Lunkui, CHEN Chengfeng. Simulation research of solenoid valve's characteristic based on Maxwell equation[J]. Missiles and Space Vehicles, 2015(6): 78-83.
- [3] 孙玉慧, 蔡志远. 航空阀用电磁铁的温升研究[J]. 电器与能效管理技术, 2019(7): 12-16.
SUN Yuhui, CAI Zhiyuan. Temperature rise research of electromagnet for air valve[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(7): 12-16.
- [4] 王宗伟, 任志彬, 常志鹏, 等. 基于 ANSYS 和 AMESim 的螺管电磁铁吸力仿真研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2017(6): 93-97.
WANG Zongwei, REN Zhibin, CHANG Zhipeng, et al. Simulation of the solenoid force based on ANSYS and AMESim[J]. Missiles and Space Vehicles, 2017(6): 93-97.
- [5] 李杰, 牛惠萌, 赵世明, 等. 基于自适应模拟退火算法的航空电磁阀优化研究[J]. 推进技术, 2022, 43(6): 329-336.
LI Jie, NIU Huimeng, ZHAO Shiming, et al. Aviation solenoid valve optimization based on adaptive simulated annealing algorithm[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(6): 329-336.
- [6] 徐南岳, 朱有坤, 王彬. 燃油电磁阀电磁铁的环境温度影响特性仿真[J]. 航空发动机, 2023, 49(2): 136-142.
XU Nanyue, ZHU Youkun, WANG Bin. Simulation of ambient temperature effects on electromagnet of fuel solenoid valves[J]. Aeroengine, 2023, 49(2): 136-142.
- [7] 韩永健, 蒋安常, 蒋发敏, 等. 某型航空发动机燃油调节器参数匹配多目标优化[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(7): 293-300.
HAN Yongjian, JIANG Anchang, JIANG Famin, et al. Multi-objective optimization based parameter-matching approach for the fuel regulator of a type of aeroengine[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(7): 293-300.
- [8] KAWASE Y. Dynamic analysis of automotive solenoid valve using finite element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1991, 27(5): 3939-3942.
- [9] AL-JABER S M. Energy and momentum considerations in an ideal solenoid[J]. Journal of Electromagnetic Analysis & Applications, 2010, 2(3): 169-173.
- [10] 李伟, 杨毅, 李硕, 等. 基于准稳态过程的混流泵启动性能优化[J]. 排灌机械工程学报, 2025, 43(1): 31-37+52.
LI Wei, YANG Yi, LI Shuo, et al. Optimization of start-up performance of mixed-flow pump based on quasi-steady state process[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2025, 43(1): 31-37+52.
- [11] 王超, 于光临, 甘新海, 等. 直流式旋风分离器参数优化仿真与试验[J]. 液压与气动, 2022, 46(12): 129-134.
WANG Chao, YU Guanglin, GAN Xinhai, et al. Parameter optimization simulation and test on uniflow cyclone separator[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2022, 46(12): 129-134.
- [12] 胡明珠, 刘怀举, 张秀华, 等. 空间机械臂关节双电机-行星齿轮传动系统的多目标优化[J]. 宇航学报, 2024, 45(12): 2009-2023.
HU Mingzhu, LIU Huaiju, ZHANG Xiuhua, et al. Multi-objective optimization of dual motor planetary gear transmission system for space manipulator joint[J]. Journal of Astronautics, 2024, 45(12): 2009-2023.
- [13] 吴倩, 李建, 苏秀苹. 一种螺管式电磁铁的静态特性及其影响因素分析[J]. 电器与能效管理技术, 2017(1): 8-12.
WU Qian, LI Jian, SU Xiuping. Static characteristics and influencing factors of a solenoid magnet[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(1): 8-12.
- [14] 高岩, 李强, 张勇, 等. 电磁阀节流孔板与过滤网的间隙对推力器室压的影响[J]. 导弹与航天运载技术(中英文), 2023(4): 31-37.
GAO Yan, LI Qiang, ZHANG Yong, et al. The influence of the gap between the orifice plate of the solenoid valve and the filter screen

- on the chamber pressure of the thruster[J]. Missiles and Space Vehicles, 2023(4): 31-37.
- [15] 王树胜, 周如林, 彭泽钦, 等. 矿用开关电磁铁性能分析及优化[J]. 液压与气动, 2024, 48(9): 155-162.
WANG Shusheng, ZHOU Rulin, PENG Zeqin, et al. Performance analysis and optimization of switching electromagnet for mining[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2024, 48(9): 155-162.
- [16] 张伟, 张彪, 王旭光, 等. 先导式比例电磁阀电磁力水平特性分析及优化[J]. 液压与气动, 2024, 48(7): 101-110.
ZHANG Wei, ZHANG Biao, WANG Xuguang, et al. Analysis and optimization of electromagnetic force horizontal characteristic of pilot-operated proportional solenoid valve[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2024, 48(7): 101-110.
- [17] 姜路亮, 王海洲. 电磁阀设计中电磁力的工程计算方法[J]. 导弹与航天运载技术, 2007(1): 40-45.
LOU Luliang, WANG Haizhou. Methods of electrom-agnetic force calculation for engineering application[J]. Missiles and Space Vehicles, 2007(1): 40-45.
- [18] 柴玮锋, 廖瑶瑶, 廉自生, 等. 矿用电磁阀动静态特性分析[J]. 液压与气动, 2020(8): 42-48.
CHAI Weifeng, LIAO Yaoyao, LIAN Zisheng, et al. Analysis of dynamic and static characteristics of mine-used electromagnetic valve[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020(8): 42-48.
- [19] 龚斌. 比例电磁铁静态特性的研究[J]. 流体传动与控制, 2017(2): 25-32+35.
GONG Bin. Research on proportional solenoid's static characteristics[J]. Fluid Power Transmission & Control, 2017(2): 25-32+35.
- [20] 曹文斌, 房瑞清, 杨国来, 等. 隔爆型电磁铁力-行程特性的优化分析及验证[J]. 液压与气动, 2024, 48(7): 12-21.
CAO Wenbin, FANG Ruiqing, YANG Guolai, et al. Optimisation analysis and validation of force-stroke characteristics of explosion-proof electromagnets[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2024, 48(7): 12-21.
- [21] 白学森. 电动汽车驱动用分数槽永磁同步电机电磁噪声优化[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(6): 60-65.
BAI Xuesen. Electromagnetic noise optimization of fractional-slot permanent magnet synchronous motor for electric vehicle[J]. Electric Machines and Control Application, 2022, 49(6): 60-65.
- [22] 曾红, 祁瑞, 张志华. CVVL 电机的结构优化研究[J]. 制造业自动化, 2022, 44(5): 8-11.
ZENG Hong, QI Rui, ZHANG Zhihua. The research on structure optimization of CVVL motor[J]. Manufacturing Automation, 2022, 44(5): 8-11.

作者简介

郭蓓蕾 (1984—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为电磁铁性能优化。

张帅 (2002—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电磁铁优化设计。

(上接第44页)

- [13] 张峥岳, 康乃全. 轨姿控液体火箭发动机水击仿真模拟[J]. 火箭推进, 2012, 38(3): 12-16.
ZHANG Zhengyue, KANG Naiquan. Simulation of water hammer in liquid rocket engine of orbit and attitude control system[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2012, 38(3): 12-16.
- [14] 杨林涛. 姿轨控动力系统响应特性仿真研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
YANG Lintao. Numerical analysis on response characteristic of space propulsion system for attitude and orbit control[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.
- [15] 许少聪. 液液甲烷姿轨控动力系统动态特性仿真研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
XU Shaocong. Numerical analysis on dynamic characteristics of LO_x/LCH₄ space propulsion system for attitude and orbit control[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.
- [16] 杨林涛, 沈赤兵. 基于AMESim的姿控发动机压力振荡传递特性研究[J]. 火箭推进, 2019, 45(3): 26-32.
YANG Lintao, SHEN Chibing. Research on pressure oscillation transmission characteristics of attitude control engine based on AMESim[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2019, 45(3): 26-32.

作者简介

祖毅真 (1998—), 男, 助理工程师, 主要研究方向为液体火箭发动机系统动态特性。

王延涛 (1984—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为液体火箭发动机总体技术。

孙翊 (1977—), 男, 工程师, 主要研究方向为液体火箭发动机总体技术。

张方 (1990—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为液体动力系统。

向伟彬 (1995—), 男, 工程师, 主要研究方向为液体动力系统。