

双工位自锁电磁铁的设计与仿真

张强¹, 周炜¹, 乔桂玉¹, 于长吉², 邓哲²

(1. 北京航天动力研究所, 北京 100076; 2. 首都航天机械有限公司, 北京 100076)

摘要:根据某型发动机系统要求,亟需研制一种具有双工位自锁功能的电磁阀以确保发动机断电时仍能正常工作。核心组件电磁铁作为自锁电磁阀最重要的部件,直接影响整个阀门的可靠性。以往型号发动机中双工位自锁电磁铁应用较少,在设计计算与仿真研究方面稍显不足,工程指导性有待加强。阐述了一种双工位自锁电磁铁工作原理,介绍了磁路设计与计算方法,使用有限元软件对电磁铁进行仿真计算,相关测试验证了设计的准确性。通过对电磁铁性能特性进行仿真研究,得到了外部参数对其影响规律。即衔铁工作气隙增大将导致吸力减小,驱动电压增大可使电磁铁动作响应时间减少、触发电流和电流储备系数增加,作动裕度有所提高。由此得到了一种具有工程指导意义的双工位自锁电磁铁设计方法。当前该方案电磁铁已用于某型液体火箭发动机中,并通过多次地面热试车考核。

关键词:双工位;自锁电磁铁;电磁阀;电磁仿真

中图分类号:V431 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2020)01-0083-06

Design and simulation of a double station self-locking electromagnet

ZHANG Qiang¹, ZHOU Wei¹, QIAO Guiyu¹, YU Changji², DENG Zhe²

(1. Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China;

2. Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076, China)

Abstract: According to requirement of the engine system, a solenoid valve which has self-locking function with double station was needed to be developed to ensure that the engine can still work without electricity. As core component the electromagnet is the most important part of the self-locking solenoid valve, which directly affects the reliability of the whole valve. Application of double station self-locking electromagnet in engine is seldom before, there are inadequacies in design and simulation, and guidance are needed to be strengthened. In this paper, the working principle of a double station self-locking electromagnet was described and its magnetic circuit design formula and the method of magnetic field calculation were introduced. The simulation calculation of the self-locking electromagnet was carried out with the finite element analysis software. The experimental test verified the accuracy of the design. The influence of external parameters on the performance characteristics was obtained by conducting magnetic field simulation on the performance characteristics of electromagnets. Increase in armature working gap causes decrease in suction, increase in excitation voltage leads to decrease in response time and increase in trigger current & current reserve coefficient, which can enhance actuation margin. A design method of double

收稿日期:2019-01-24;修回日期:2019-05-24

基金项目:国家装备预研航天科技联合基金(6141B0626040301)

作者简介:张强(1986—),男,硕士,高级工程师,研究领域为航空宇航推进理论与工程

station self-locking electromagnet which has engineering significance was obtained. This kind of electro-magnet has been used in a liquid rocket engine and examined by thermal test many times.

Keywords: double station; self-locking electromagnet; solenoid valve; electromagnetic simulation

0 引言

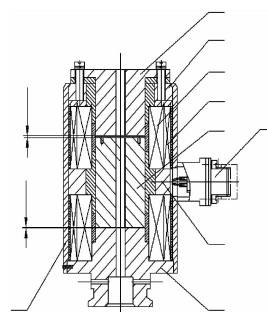
随着航天技术的不断发展,20 世纪 80 年代起,自锁电磁阀已广泛应用于国内外宇航型号中。这类阀门能在断电后自动保持断电前工作状态,从而满足系统对自动器组件的设计要求,特别是在长时间工作时,无源自保持功能避免了线圈的通电发热现象,提高了产品的可靠性和使用寿命。通常,电磁阀自锁形式分为三种:介质力自锁、机械自锁、磁性自锁^[1-2]。前两种自锁形式结构复杂、外形尺寸偏大、可靠性低,而永磁自锁恰好弥补了这些不足,因此,国内外宇航型号中广泛采用了磁性自锁电磁阀。

磁性自锁电磁阀中的核心组件是自锁电磁铁,它的设计水平关乎着电磁阀的最终使用性能和可靠性,是整个电磁阀设计中的关键。本文以某型号实际产品为例,介绍了一种双工位自锁电磁铁的设计方法,并通过对电磁场的仿真分析与试验验证,阐述了双工位自锁电磁铁的性能特性。

1 自锁电磁铁工作原理

自锁电磁铁通常采用两个线圈分别控制开—关,在两线圈中间设置永磁体作为恒磁场源,形成

极化磁场和控制磁场的双磁路结构,线圈通电,双磁场共同作用,吸合衔铁往复作动,以实现阀门的启闭。线圈断电后,利用永磁体对衔铁产生的极化吸力,使衔铁保持在断电前的位置不动,从而实现自锁功能^[3]。自锁电磁铁结构图如图 1 所示。



1—壳体;2—线圈骨架;3—永磁体;4—衔铁;5—关线圈;
6—开线圈;7—上导磁体;8—上挡铁;9—密封插座;
 δ_1 —衔铁在下位时的下气隙; δ_2 —衔铁在下位时的上气隙。

图 1 自锁电磁铁结构图

Fig. 1 Self locking electromagnet structure diagram

该结构中,衔铁处于下位为阀门打开状态,衔铁处于上位为阀门关闭状态。其中衔铁、上挡铁、上导磁体、壳体、永磁体形成上永磁闭合磁路,衔铁、线圈骨架、壳体、永磁体形成下永磁闭合磁路。磁通分布情况如图 2 所示。

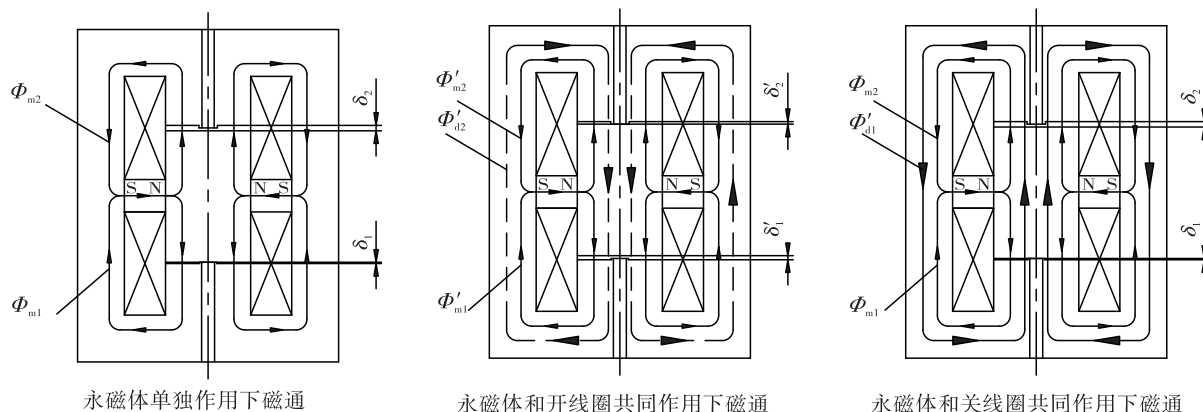


图 2 磁性自锁电磁铁磁通分布示意图

Fig. 2 A schematic diagram of magnetic flux distribution of a magnetic self locking electromagnet

当衔铁处于下位时($\delta_1 < \delta_2$),根据磁路欧姆定律

$$W = \Phi_m R_m \quad (1)$$

推导出

$$\frac{\Phi_{m1}}{\Phi_{m2}} = \frac{\Phi_{m2}}{\Phi_{m1}} = \frac{\delta_2}{\delta_1} \quad (2)$$

式中: W 为磁势,A; Φ_m 为磁通,Wb; R_m 为磁阻,H。

当衔铁处于下位时永磁吸力向下,衔铁保持下位不动。同理,当衔铁处在上位时,永磁吸力向上,衔铁保持上位不动。因此电磁铁具备双工位自锁功能。

当衔铁处于下位(开位),关线圈通电,线圈电流产生的磁势方向与永磁体在气隙 δ_1 处所产生的磁势方向相反,与永磁体在气隙 δ_2 处所产生的磁势方向相同,故下气隙 δ_1 处磁密抵消减小,上气隙 δ_2 处磁密叠加增大,电磁/永磁合力方向向上,衔铁向上位运动。当衔铁处于上位(关位),给开线圈通电,开线圈电流产生的磁势方向与永磁体在气隙 δ_2' 处所产生的磁势方向相反,与永磁体在气隙 δ_1' 处所产生的磁势方向相同,上气隙 δ_2' 处磁密抵消减小,下气隙 δ_1' 处磁密叠加增大,电磁/永磁合力方向向下,衔铁向下位运动^[45]。

2 参数设计

我国新一代运载火箭XX-77发动机自锁阀即采用该种电磁铁结构,并通过多次发动机地面试车考核。以其为例,电磁铁参数设计从吸力入手,吸力设计值如下:衔铁在下位时永磁吸力 $F_{dp} = 230$ N,衔铁在上位时永磁吸力 $F_{up} = 145$ N,关线圈通电时(此时衔铁在下位)电磁永磁合力 $F_{ue} = 180$ N,开线圈通电时(此时衔铁在上位)电磁永磁合力 $F_{de} = 287$ N。基于上述要求,电磁铁各参数取值计算如下:

衔铁在下位时的下气隙 δ_1 取值0.2 mm,衔铁在下位时的上气隙 δ_2 取值1 mm,衔铁行程 h 取值0.7 mm。永磁体单独作用时 δ_1 处的磁感应强度 B_{m1} 取值1.2 T,永磁体单独作用时 δ_2 处的磁感应强度 B_{m2} 可由式(2)计算。衔铁半径

$$R = \sqrt{\frac{2\mu_0 F_{dp}}{\pi B_{m1}^2 \left(1 - \left(\frac{\delta_1}{\delta_2}\right)^2\right)}} \quad (3)$$

永磁体工作点磁势

$$F_M = f \frac{B_{m1} \delta_1}{\mu_0} \quad (4)$$

永磁体单独作用 δ_2' 处磁感应强度

$$B_{m2}' = \frac{\mu_0 F_M}{\delta_2' f} \quad (5)$$

式中磁阻系数 f 取值1.4(无量纲)。

永磁体单独作用 δ_1' 处磁感应强度 B_{m1}' 可由公式(2)计算,衔铁在上位时永磁吸力 F_{up} 可由公式(3)计算,关线圈电磁磁感应强度

$$B_{d1} = \sqrt{\frac{2\mu_0 F_{ue}}{\pi R^2} + B_{m1}^2 - B_{m2}^2} \quad (6)$$

衔铁上吸所需关线圈磁势

$$W_g = \frac{B_{d1} \delta_h}{\mu_0} K_\Sigma \quad (7)$$

式中:总气隙 $\delta_h = \delta_1 + \delta_2 = 1.2$ mm;磁势降系数 K_Σ 取值1.1(无量纲)。

由此关线圈电流与匝数可得,同理设计开线圈即可。

3 仿真模型

根据参数设计结果利用Ansoft Maxwell软件建立电磁铁模型(二维轴对称),采用自适应网格剖分工具对模型进行网格划分,如图3所示。

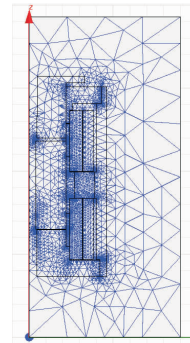


图3 网格模型

Fig. 3 Grid mode

材料属性:按表1所列电磁铁材料,分别对模型

进行材料属性定义,其中衔铁、导磁体等材料选为电磁纯铁 DT4E。

表 1 材料模型属性

Tab. 1 Material model attributes

模型	材料	属性
空气模型	空气	相对磁导率: 1
衔铁、导磁体等	DT4E	—
线圈	铜	相对磁导率: 1

边界条件:自然边界条件规定两物体交界面磁场强度 H 的切向分量和磁通密度 B 的法向分量保持连续;诺依曼边界条件规定外表面只有切向磁场强度,法向磁场强度为零;气球边界条件将求解区域外边界设置为气球边界^[6-7]。

4 计算结果分析

使用 Ansoft 软件进行二维静态电磁场仿真:励磁源设置为开线圈 1 283 A、关线圈 945 A(开线圈安匝数设为满足产品设计要求所需的最小值)、永磁体导磁系数 1.06,磁矫顽力 $-750\ 000\text{ A/m}$,设置衔铁所受电磁吸力为求解量。

计算结果如下:永磁吸力 F_{up} 为 159 N,永磁吸力 $F_{\text{dp}} = 252\text{ N}$,关线圈通电瞬间电磁永磁合力 $F_{\text{ue}} = 193\text{ N}$,开线圈通电瞬间电磁永磁合力 $F_{\text{de}} = 301\text{ N}$ 。有限元仿真得到的计算结果与设计值误差均不超过 10%,图 4 为仿真得到的以上 4 个状态磁场分布情况。磁力线越密,磁感应强度越大,4 个状态下磁感应强度及分布情况展示了磁路工作原理。在线圈断电状态,永磁体作为唯一的励磁源为衔铁提供自锁力,磁力线能够很好地被约束在闭合磁路内,磁场较为稳定;在打开/关闭瞬间,开/关线圈通电,线圈形成的电磁场与永磁体形成的永磁场在衔铁所在位置一侧相互抵制,电磁场克服永磁场做功,驱动衔铁,因此整个磁场受到扰动而变得不稳定,部分磁力线逸出闭合磁路,产生一定漏磁^[8-9]。

选取 20 台样本进行吸力试验,线圈通电 27 V。测试结果: $F_{\text{de}} = 291 \sim 315.5\text{ N}$; $F_{\text{ue}} = 187.6 \sim 202.6\text{ N}$ 。吸力仿真值、试验值对比情况如图 5 所示。图 5 中衔铁吸力试验值围绕仿真值窄幅波动,主要是由于永磁体/导磁材料个体磁性能差异、装配误差等原

因造成,波动范围在 7% 以内,说明电磁铁参数设计较为合理,仿真计算较为准确。可见,在精度要求范围内,采用公式法设计电磁铁的途径简单可行,具有一定工程意义^[10]。完成电磁铁设计后,有必要对电磁铁性能特性进行仿真研究,从而获得更多的设计指导信息。结合实际使用情况,主要考虑以下两方面仿真研究。

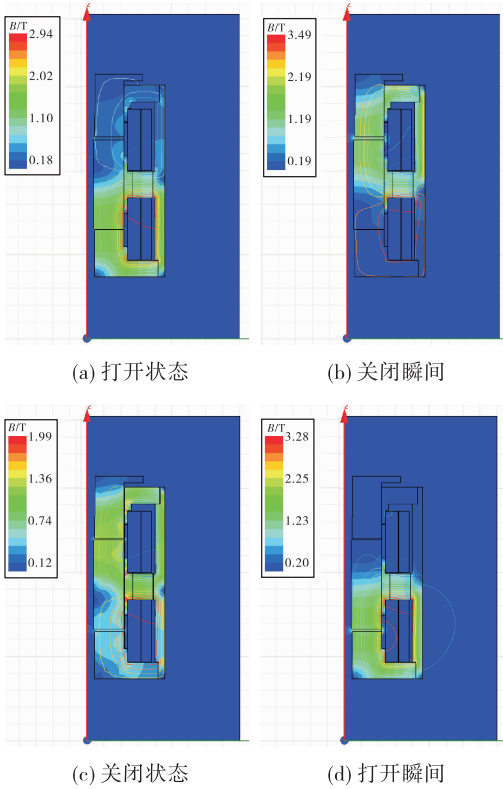


图 4 静态电磁场仿真计算结果

Fig. 4 Simulation results of static electromagnetic field simulation

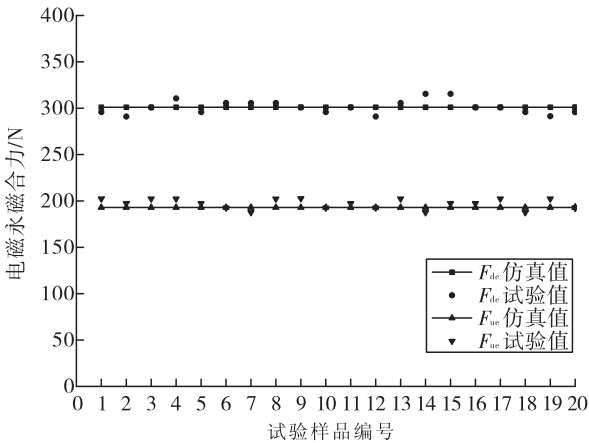


图 5 电磁吸力对比

Fig. 5 Comparison of electromagnetic suction

4.1 衔铁工作气隙对永磁吸力的影响

调整下气隙 δ_1 , 范围 0.1 ~ 1.1 mm, 其他参数不变, 对永磁吸力仿真计算。图 6 为永磁吸力 F_p 随气隙 δ_1 变化曲线。

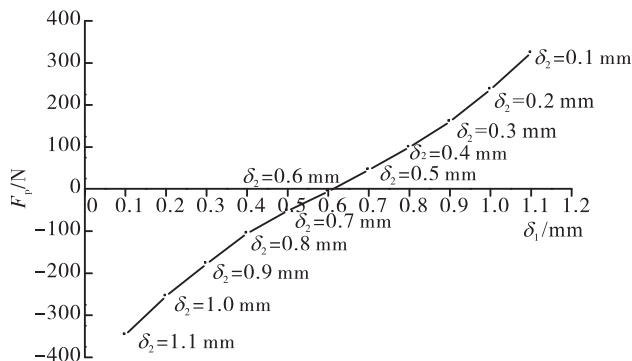


图 6 不同气隙下的永磁吸力

Fig. 6 Permanent magnetic suction under different air gaps

图 6 中, δ_1 从 0 增至 0.6 mm 过程中, 永磁吸力 F_p 方向向下, 数值从 346 N 减至 0; 当 δ_1 为 0.6 mm 时, 上下气隙一致, 两方向永磁吸力相互抵消, 值为 0; δ_1 从 0.6 mm 增至 1.2 mm 过程中, 永磁吸力方向向上, 数值从 0 增至 324 N。下气隙调整过程中, 永磁吸力曲线变化近似线性, 基于此工程上可近似采用线性计算得到吸力^[11-13]。图 7 为不同气隙下磁路磁力线分布图。磁力线越密, 磁感应强度越大, δ_1 从 0 增至 0.6 mm 过程中, 下磁路磁感应强度逐渐减小, 上磁路逐渐增加, 漏磁效应逐渐增强; δ_1 达到 0.6 mm 左右时, 漏磁效应最强, 部分磁力线不被约束在闭合磁路内, 出现外逸; δ_1 从 0.6 mm 增至 1.2 mm 过程中, 下磁路磁感应强度逐渐增加, 上磁路逐渐减小, 漏磁效应逐渐减弱。

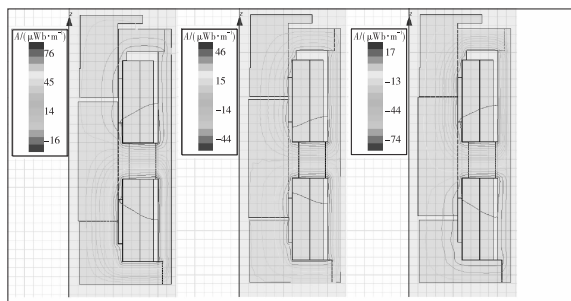


图 7 不同气隙下的磁力线分布图

Fig. 7 Distribution diagram of magnetic line of force under different air gaps

4.2 励磁电压对动态响应特性的影响

电磁铁完成设计后, 结构参数均已确定, 而驱动电压作为唯一的外部励磁源直接影响着响应特性^[14], 考察励磁电压对响应特性的影响规律需进行瞬态电磁场仿真。本文仅考察电磁铁打开过程中线圈驱动电压对响应特性的影响, 关闭过程规律相同, 在静磁场分析模型基础上进行瞬态电磁场仿真。材料属性和边界条件设置同静态磁场分析。激励源由外部提供, 脉冲电压各参数设置: $V_1 = 0$, $V_2 = 27$ V, $T_d = 0$, $T_r = 0.001$ s, $T_f = 0.001$ s, $P_w = 0.1$ s, 脉冲周期 0.15 s^[15-18]。运动类型选择平动, 初始位置为 0, 衔铁运动行程朝 Z 轴负方向 0.7 mm, 初始速度为 0, 衔铁质量 0.1 kg, 阻尼 0.01 N · s/m。

经求解计算, 得到电磁铁开线圈电流 - 时间曲线, 如图 8 所示。

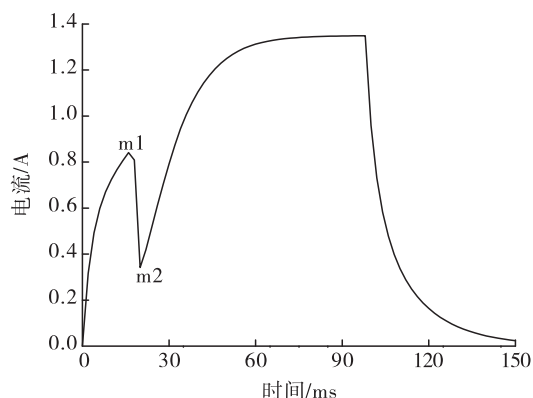


图 8 励磁线圈电流曲线

Fig. 8 Excitation coil current curve

线圈通电时, 电流曲线同典型螺管式电磁铁相似, 电流值升高到触发电流 (m1 点) 时, 衔铁开始运动, 此时对应的时间为触发时间, 衔铁作动切割磁感线, 线圈中产生反向电动势, 电流有所减小, 运动结束后电流逐步攀升直至稳态电流, 衔铁运动结束时所对应的时间 (m2 点) 即响应时间, 稳态电流与触发电流的比值即为电流储备系数^[19-22]。断电后, 双工位自锁电磁铁电流曲线中不存在释放段, 衔铁在电磁吸力撤去后依然能依靠永磁吸力保持在原位不动。将外部驱动电压设成不同值, 分别求解可得到不同驱动电压下响应时间 - 电压曲线、触发电流/电流储备系数 - 电压曲线, 如图 9 ~ 图 10 所示。

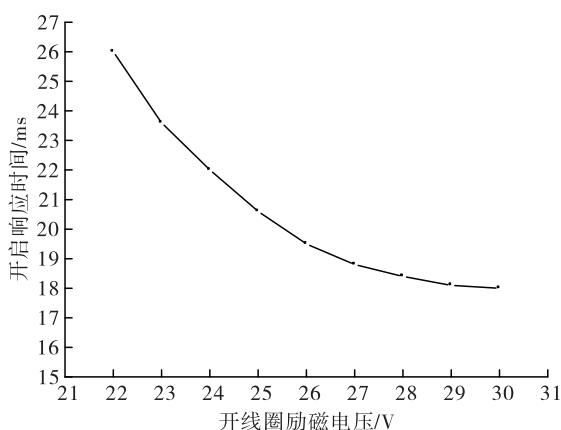


图 9 不同驱动电压的响应时间曲线

Fig. 9 Response time curves of different driving voltages

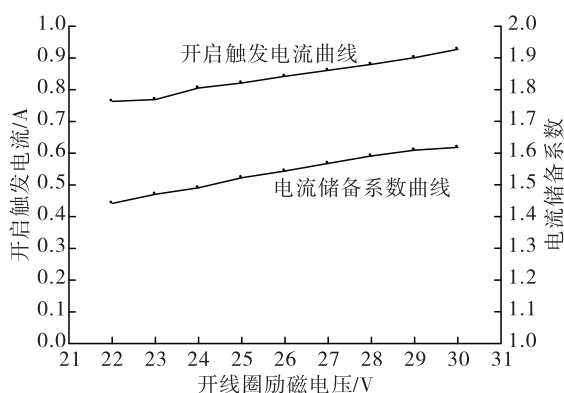


图 10 不同驱动电压的触发电流/电流储备系数曲线

Fig. 10 Trigger current/current reserve coefficient curves with different driving voltages

图 9 中,随着驱动电压逐渐增大,电磁铁动作响应时间逐渐减少,但电压增大到一定程度后,响应时间变化很小,因此不能一味依靠增大驱动电压而减少响应时间。图 10 中,随着驱动电压逐渐增大,受线圈电感作用,其触发电流有一定增加,同时电流储备系数也逐渐增大,提高了电磁铁的作动裕度^[23-24]。

5 结论

本文介绍了一种双工位自锁电磁铁的公式设计方法,通过仿真计算和试验测试考核了设计的准

确性,表明该方法具有一定工程意义。后对电磁铁性能特性进行仿真研究得出:随着衔铁工作气隙增大,永磁吸力逐渐减小,当衔铁位于永磁体中间位置时,永磁吸力为 0,越过中间位置后,永磁吸力反方向逐渐增大;随着驱动电压逐渐增大,电磁铁动作响应时间逐渐减少,但电压增大到一定程度后,响应时间变化很小;驱动电压增大,触发电流和电流储备系数增加,电磁铁的作动裕度有所提高。

参考文献:

- [1] 王宝龄. 电磁电器设计基础[M]. 北京:国防工业出版社, 1989.
- [2] 李泉凤. 电磁场数值计算与电磁铁设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- [3] 张榛, 汪旭东, 汪凤山. 基于永磁体偏置磁场的高速响应电磁阀设计[J]. 空间控制技术与应用, 2013, 39(4):59-62.
- [4] 张榛. 电磁阀动态响应特性的有限元仿真与优化设计[J]. 空间控制技术与应用, 2008, 34(5):53-56.
- [5] 赵博, 张洪亮. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010.
- [6] 魏青, 韩云霞. 用于微小卫星的微型双稳态电磁阀[J]. 上海航天, 2005(2):55-58.
- [7] 袁洪滨, 张民庆, 孙彦堂. 基于 AMESim 的直动式电磁阀动态仿真研究[J]. 火箭推进, 2011, 37(5):30-35.
- [8] YUAN H B, ZHANG M Q, SUN Y T. AMESim-based simulation analysis of dynamic characteristics of direct-acting solenoid valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2011, 37(5):30-35.
- [9] 戴佳, 黄敏超, 余勇, 等. 电磁阀动态响应特性仿真研究[J]. 火箭推进, 2007, 33(1):40-48.
- [10] DAI J, HUANG M C, YU Y, et al. Simulation on the dynamic response characteristics of solenoid valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2007, 33(1):40-48.
- [11] 程帆, 张波. 高压气动电磁阀可靠性改进设计[J]. 火箭推进, 2017, 43(1):50-54.

(下转第 101 页)

- [9] 孙百红,周云端.静力试验位移测量异常原因分析及推算方法研究[J].火箭推进,2010,36(5):59-62.
SUN B H, ZHOU Y D. Cause analysis and computative method of displacement measurement abnormality in static test[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2010,36(5):59-62.
- [10] 刘捷.风洞试验模型弹性变形视频测量系统设计与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
- [11] 阮晓东,李世伦,诸葛良,等.用立体视觉测量多自由度机械装置姿态的研究[J].中国机械工程,2000,11(5):571-573.
- [12] 刘兆惠,王超,吕文红,等.基于非线性动力学分析的车辆运行状态参数数据特征辨识[J].吉林大学学报(工学版),2018,48(5):1405-1410.
- [13] 刘铁良,杜冬梅,章郁泱,等.基于Matlab_GUI的双泵喷水推进船舶仿真平台设计[J].实验室研究与探索,2018,37(11):74-76.
- [14] 苏关东,顾勋,张鹏,等.基于Matlab GUI的渗流力学虚拟仿真实验平台开发[J].实验室研究与探索,2018,37(6):129-134.
- [15] 王锴.基于MATLAB与VeriStand的自适应振动主动控制仿真及LabVIEW界面设计[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.
- (上接第88页)
- CHENG F, ZHANG B. Design for reliability improvement of high-pressure pneumatic solenoid valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2017, 43(1):50-54.
- [10] 潘英朋,高汉平,刘刚.磁性双位自锁电磁阀磁路设计与分析[J].液压气动与密封,2010,30(1):29-34.
- [11] 任志彬,王宗伟,常志鹏,等.电磁阀用自锁电磁铁吸力与电压关系研究[J].推进技术,2016,37(7):1372-1379.
- [12] 汪兴明,张剑秋,王强.井下双位自锁式电磁铁参数优化及性能分析[J].磁性材料及器件,2017,48(3):26-31.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 蔡伟,张硕,戴民强,等.基于AMESim的电磁阀仿真与试验验证[J].科学技术与工程,2016,16(28):80-84.
- [16] 左全璋,胡双,左才科.双稳态永磁操动机构结构设计和性能计算(I)[J].华通技术,2002(2):13-17.
- [17] 王新亮,张洪信,赵清海,等.长行程直流电磁铁电磁力仿真分析与实验研究[J].青岛大学学报(工程技术版),2018,33(2):75-79.
- [18] 张伦威,许益民.比例电磁铁的有限元磁力分析[J].机床与液压,2013,41(17):169-170.
- [19] 付文智,李明哲,邓玉山.直流电磁铁磁场和牵引力的数值模拟[J].农业机械学报,2005,36(2):100-103.
- [20] 梅亮,刘景林,付朝阳.电磁铁吸力计算及仿真分析研究[J].微电机,2012,45(6):6-9.
- [21] 王晓罡,陈文曲,唐妹芳,等.比例电磁阀的特性分析与试验研究[J].火箭推进,2011,37(2):52-59.
WANG X G, CHEN W Q, TANG M F, et al. Testing and characteristics analysis of proportional solenoid valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2011, 37(2):52-59.
- [22] 卢新波,谢宪旺,张中明.电磁铁相关技术参数分析[J].液压气动与密封,2010,30(11):36-38.
- [23] 张齐.基于Ansoft的比例电磁铁电磁力的有限元分析[J].沈阳师范大学学报(自然科学版),2009,27(3):306-309.
- [24] 鲁立中,孟彬,阮健.低惯量耐高压直动式电磁铁的静态特性仿真分析[J].浙江工业大学学报,2011,39(4):448-451.