

燃油电磁阀电磁铁的环境温度影响特性仿真

徐南岳^{1,2}, 朱有坤^{1,2}, 王彬^{1,2}

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 2. 江苏省航空动力系统重点实验室: 南京 210016)

摘要: 为研究环境温度对燃油电磁阀电磁铁驱动性能的影响, 基于电磁阀工作原理和执行机构作动特性等关系, 建立了热环境下电磁阀的数学模型, 通过温度与磁场特性分析确定了对温度最敏感的关键功能部件为电磁线圈。利用有限元软件 Ansoft Maxwell 对由线圈和衔铁构成的电-机械转换器进行了数值模拟, 得到了不同环境温度下电磁铁磁感应强度分布及系统关键响应指标, 研究了阀启闭过程的静态和动态特性。分析了在额定工作状态下环境温度对电磁铁磁场分布和响应特性的影响, 获得了不同环境温度下的线圈电流、电磁力、衔铁速度及位移的变化和响应规律。结果表明: 环境温度升高引起线圈材料电阻变大, 进而导致线圈电流和电磁力减小, 最终缩短了电磁阀启闭时间, 也易导致在同样驱动电压下电磁阀无法开启。

关键词: 燃油电磁阀; 环境温度; 电磁力; 线圈电流; 电磁铁; 启闭时间; 航空发动机

中图分类号: V233.2

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2023.02.017

Simulation of Ambient Temperature Effects on Electromagnet of Fuel Solenoid Valves

XU Nan-yue^{1,2}, ZHU You-kun^{1,2}, WANG Bin^{1,2}

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to study the effects of ambient temperature on the driving performance of the electromagnet in a fuel solenoid valve, based on the relationship between the working principle of the solenoid valve and the actuating characteristics of the actuator, a mathematical model of the solenoid valve in the thermal environment was established. Through the analysis of the temperature and magnetic field characteristics, it was determined that the solenoid coil is identified as the most sensitive key functional component to temperature. Numerical simulation of the electro-mechanical converter including the coil and armature was conducted by finite element software Ansoft Maxwell, the distribution of electromagnetic induction intensity and the key response index of the system were obtained under different ambient temperatures, and the static and dynamic characteristics for the valve opening and closing actions were examined. Influences of ambient temperature on the magnetic field and the electromagnet response under the rated operation condition were analyzed. The coil current, electromagnetic force, the speed and displacement of the armature at different ambient temperatures were obtained by the simulation. The results show that the increase of ambient temperature causes the resistance of the coil material to increase, which leads to the decrease of coil current and electromagnetic force, and finally shortens the opening and closing time and even makes the valve unable to open under the same driving voltage.

Key words: fuel solenoid valve; ambient temperature; electromagnetic force; current; electromagnet; opening and closing time; aero-engine

0 引言

近年来,随着数字式电子控制器在航空发动机控制中的广泛使用,各类电磁阀越来越多地被用作燃油系统的放大元件,有时也被用作执行元件^[1]。航空发

动机特殊的工作环境对电磁阀可靠性提出了严苛的要求,航空发动机附件的环境适应性对发动机部件寿命有重要影响^[2-4]。由于航空发动机中燃油和执行机构常需靠近发动机安装,其热源主要来自环境而非自热。尤其在极端的环境温度下,燃油电磁阀的启闭特

收稿日期: 2020-09-10 基金项目: 中央高校基本业务费(NP2018453)、国家自然科学基金(51575257)资助

作者简介: 徐南岳(1995),男,硕士。

引用格式: 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.

性会直接影响燃油系统中燃油流量的控制^[5]。中国《航空发动机适航规定》第33.91条对航空发动机系统及部件在高温环境下的工作要求有着明确的规定^[6]。

国内外学者对电磁阀的研究大多侧重于常温下的动态响应及控制^[7],考虑磁热耦合时也只是研究其损耗和温度分布。吴萌等^[8-10]开展了工作气隙、线圈匝数和驱动电压等对电磁阀动态响应特性影响的研究;邱宇等^[11-13]分析了磁性材料、线圈位置和铁芯结构等对电磁力大小的影响;刘艳芳等^[7,14-15]建立了电磁阀多物理场耦合热力学模型,对电磁阀在不同环境下的热失效及温度分布进行了分析;王春民等^[16-17]考虑磁热耦合并研究了其损耗和温度分布;Sharma等^[18-20]基于有限元分析得到了电磁铁磁场分布和磁感应强度分布情况,确定了电磁力大小在磁场中的分布。但是,目前缺乏电磁阀在极端温度环境下输出特性的相关研究,难以满足航空飞行器在恶劣环境下运行时对电磁阀工作性能的要求。因此,研究环境温度改变对电磁阀响应特性的影响具有重要的工程意义。

本文基于电磁力和动态响应分析某直动式2位2通燃油开关电磁阀在不同环境温度下的输出特性及内在机理,研究环境温度对电磁阀驱动装置的影响,为电磁阀的优化设计提供参考。

1 原理与数学模型

1.1 构成原理

某燃油开关电磁阀结构如图1所示。电磁阀主要由阀体、线圈、弹簧、衔铁和阀芯(图中连为一体)等组成。

当电磁阀通电时,磁路中产生电磁力使衔铁克服弹簧阻力、油液压力和摩擦力向上移动,阀开启使燃油介质流通;当电磁阀断电时,磁路中产生的电磁力消失,衔铁在弹簧复位力的作用下向下移动至阀关闭。

1.2 数学模型

电磁阀是电、磁、机、液的非线性耦合体,其工作过程就是四者相互作用的过程^[21]。

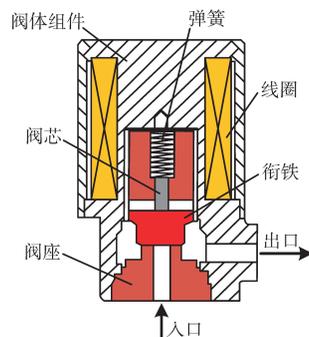


图1 电磁阀结构

1.2.1 电路方程

$$U = IR + \frac{d(LI)}{dt} \quad (1)$$

$$L = \frac{N^2}{R_\delta + R_f + R_0} \quad (2)$$

式中: U 为驱动电压; I 为线圈电流; R 为等效电阻; L 为线圈的等效电感; N 为线圈匝数; R_δ 为工作气隙磁阻; R_f 为非工作气隙磁阻; R_0 为磁性材料磁阻。

1.2.2 磁路方程

$$IN = \Phi(R_\delta + R_f + R_0) \quad (3)$$

$$R_\delta = \frac{\delta - x}{\mu_\delta S_\delta} \quad (4)$$

式中: Φ 为线圈磁通; δ 为电磁阀的工作行程; x 为阀芯在电磁力作用下产生的位移; μ_δ 为工作气隙处的磁导率; S_δ 为工作气隙的截面积。

1.2.3 运动方程

$$m \frac{d^2x}{dt} = F_m - F_k - F_f - F_y \quad (5)$$

式中: m 为阀芯质量; t 为时间; F_m 为电磁阀电磁力; F_k 为弹簧力; F_f 为运动过程所受摩擦力; F_y 为阀芯所受液动力。

若不考虑漏磁及其它部位存在的气隙,则认为主气隙即为电磁阀工作行程,此时电磁阀产生的电磁力为

$$F_m = \frac{\Phi^2}{2\mu_\delta S_\delta} = \frac{B^2}{2\mu_\delta} S_\delta = \frac{(H\mu_\delta)^2}{2\mu_\delta} S_\delta = \left(\frac{IN}{\delta} \mu_\delta\right)^2 \frac{S_\delta}{2\mu_\delta} = \frac{(IN)^2 \mu_\delta}{2\delta^2} S_\delta \quad (6)$$

式中: B 为工作气隙处磁感应强度; H 为工作气隙处磁场强度。

1.2.4 流量方程

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (7)$$

式中: Q 为燃油体积流量; C_d 为流量系数; A 为节流口面积; Δp 为电磁阀进出口压差; ρ 为燃油密度。

在一定的脉宽调制信号(Pulse Width Modulation, PWM)频率范围内,阀芯持续进行快速开、关动作,其出口流量也呈现相应的脉动,因此阀的流量等于脉动的平均流量,并且与占空比(阀的等效开度)成正比。但由于电磁阀线圈为感性元件,衔铁吸合与释放需要一定时间,如果占空比过大就会导致阀来不及关闭

又重新打开,过小会导致阀来不及打开而被重新关闭。

1.2.5 温度与线圈磁动势

忽略温度变化引起的导线形状改变,由电阻定义可知,线圈电阻与温度的关系为(本文默认初始环境温度温度为20℃)

$$R_{\theta} = \rho_{\theta} \frac{l}{s} = \rho_{20} (1 + \alpha \Delta\theta) \frac{l}{s} = \rho_{20} (1 + \alpha(\theta - 20)) \frac{l}{s} \quad (8)$$

式中: R_{θ} 为温度为 θ ℃时导线的电阻; l 为导线长度; s 为导线横截面积; ρ_{θ} 为 θ ℃时的电阻率; ρ_{20} 为20℃时的电阻率; α 为电阻率温度系数。

在额定电压和线圈匝数不变的情况下,电磁阀线圈磁动势与温度的关系为

$$IN = \frac{U}{R_{\theta}} N = \frac{U}{\rho_{20} (1 + \alpha(\theta - 20)) \frac{l}{s}} N \quad (9)$$

从式(6)、(9)中可见,电磁力大小与磁动势、气隙长度及磁路截面积有关,而磁动势受环境温度影响。上述方程虽能表达电磁力随环境温度变化的机理,但无法描述电磁铁结构对工作气隙及附近磁场的影响,难以获得准确的电磁力,因此有必要开展特定电磁铁结构下的电磁场建模与仿真,获得温度对磁场分布的影响,继而分析其对电磁力的影响机理,为电磁阀及其驱动电源设计提供必要的理论参考。

2 电磁场有限元仿真

2.1 电磁铁建模

电磁力由电磁铁组件产生,不考虑电磁阀壳体结构对磁场的影响,在Ansoft Maxwell中建立简化的电磁铁3维有限元模型(如图2所示)进行瞬态磁场仿真。静铁芯与外壳为

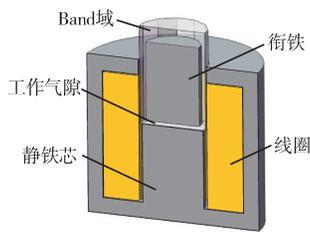


图2 电磁铁3维有限元模型

静止部件且材料相同,可视为是一体的,建立环形电磁线圈几何模型,在环的任意纵截面上添加激励源。因衔铁为运动部件,需在其外部建立Band域,其作用是将静止部件与运动部件分开,提高动态计算所需的网格质量。设置衔铁为直线运动,最大运动距离为电磁阀的工作行程, z 轴负方向为运动的正方向。考虑到电磁铁周围漏磁的影响,需设置1个较大尺寸的空

气域模拟电磁铁正常工作时的外部环境,最后建立1个求解域包围所有部件。

铁芯、衔铁和外壳通常采用电工纯铁DT4制造,因其磁导率高且易于磁化,剩磁也易消失。线圈采用铜材料,其它非软磁材料因导磁性能与空气相近,可视为空气。

电磁阀的主要参数见表1,对各部件进行网格划分,求解时间为210ms。

表1 电磁阀的主要参数

参数	数值
驱动电压/V	27
线圈匝数	1093
电阻/ Ω	28
工作行程/mm	0.65
弹簧刚度/(N/mm)	5
预紧力/N	10
阀芯质量/g	9.2
工作气隙磁导率/(H/m)	$4\pi \times 10^{-7}$
工作气隙截面积/ m^2	$3.6\pi \times 10^{-5}$

2.2 动态响应特性

电磁阀在一定频率PWM信号(占空比为0.5)下1.5个工作周期内的电磁铁输出动态响应如图3所示,图中 V 为衔铁的运动速度。

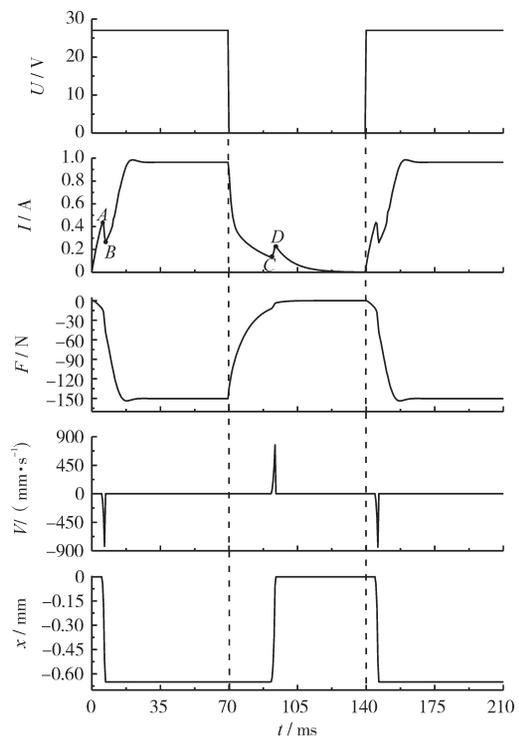


图3 电磁铁输出动态响应

从图中可见,由于电磁铁线圈存在感应电流,使得电磁阀的开启和关闭均滞后于 PWM 的控制信号^[22-24]。在激励电压作用下,线圈电流自 0 时刻起呈指数增大,到达 A 点时,由于衔铁开始运动,切割磁路中的磁力线产生反电势,使得电流开始减小。当电流减至 B 点时衔铁吸合静铁芯,阀完全打开,随后电流开始增大直至稳定。B 点对应的时刻为电磁阀完全开启所需时间。衔铁释放过程与吸合过程相似,在弹簧复位力作用下自 C 点对应时刻开始运动,直至 D 点对应时刻完全关闭。从电磁力曲线中可见,衔铁在运动过程中由于气隙变小,所受电磁力随之增大,负号表示电磁力与阻力方向相反;从速度和位移曲线中可见衔铁开始和停止运动的时间及对应时刻的速度。

3 温度对电磁阀特性的影响

本文的研究要求电磁阀可在环境温度最高为 260 °C 时正常工作,不考虑电磁阀线圈温升及绝缘材料受温度的影响,在仿真时设置温度为 20~420 °C 以研究电磁阀无法打开的极限温度,将线圈电导率定义为温度的函数,初始线圈磁动势为 1054 A。

3.1 磁动势和初始位置电磁力

将环境温度设置为变量,式(6)、(9)表明线圈磁动势和初始位置电磁力随环境温度升高而减小。线圈磁动势和电磁力随温度的变化曲线如图 4 所示。从图中可见,当温度由 20 °C 升至 420 °C 时,线圈磁动势由初始值 1054 A 减小至 403 A,减小幅度约为 61.8%,电磁力减小了约 81.4%,表明环境温度对磁动势和电磁力的影响较大。

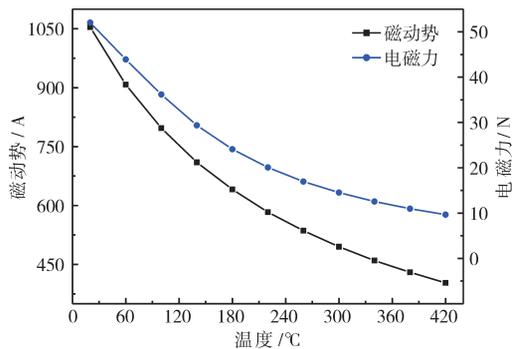


图 4 线圈磁动势和电磁力随温度的变化曲线

3.2 静态特性分析

在电磁铁磁路中,因软磁材料的相对磁导率远大于空气的,故磁路中的磁阻主要由气隙产生。在

20 °C 时电磁铁磁场强度分布如图 5 所示。从图中可见,磁场强度主要分布在气隙处,包括衔铁与静铁芯间的工作气隙、衔铁与外壳间的非工作气隙以及衔铁上端与 Band 域间的空气层。其中,在工作气隙处的磁场强度最大,在 20 °C 时可达 10⁶ A/m。

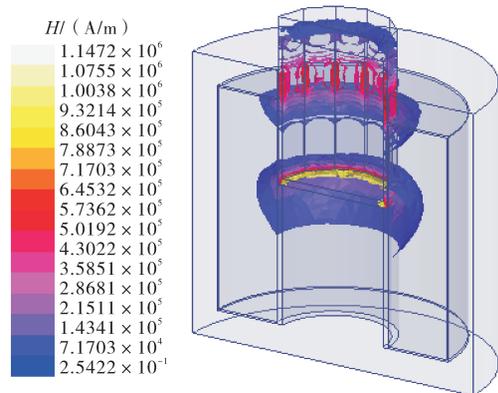
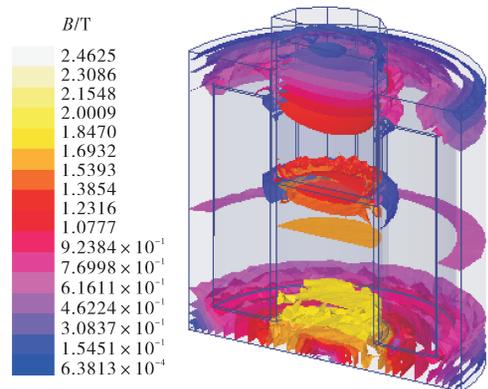
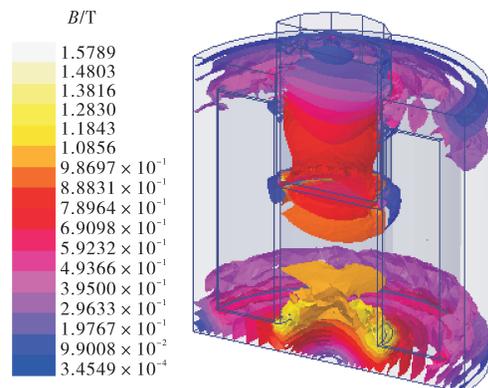


图 5 在 20 °C 时电磁铁磁场强度分布

在全温度范围内的 3 个典型工况(即温度 $\theta=20$ 、220、420 °C)下的磁感应强度分布如图 6 所示。在衔铁与静铁芯之间的工作气隙处磁感应强度分别约为 1.5、0.8 和 0.5 T。对于以 DT4 为代表的软磁材料,在



(a) $\theta=20$ °C



(b) $\theta=220$ °C

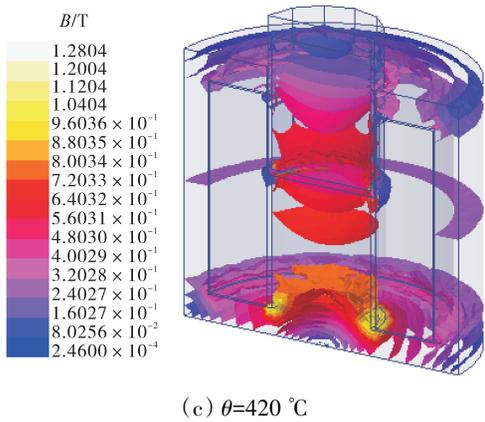


图6 不同环境温度下电磁铁磁感应强度分布

电磁铁静铁芯底部磁感应强度达到最大,在20℃时最大磁感应强度可达到2.15 T,而在220、420℃时最大磁感应强度分别为1.38、1.12 T,远小于其饱和磁感应强度。由此可见,在20~420℃时,磁感应强度随环境温度升高而降低。

3.3 动态特性分析

为了掌握温度对电磁阀启闭过程的动态影响,研究了电磁铁在不同环境温度下的线圈电流、电磁阀电磁力、衔铁(阀芯)速度和位移的响应特性,各曲线分别如图7~10所示。从图7、8中可见,随着环境温度

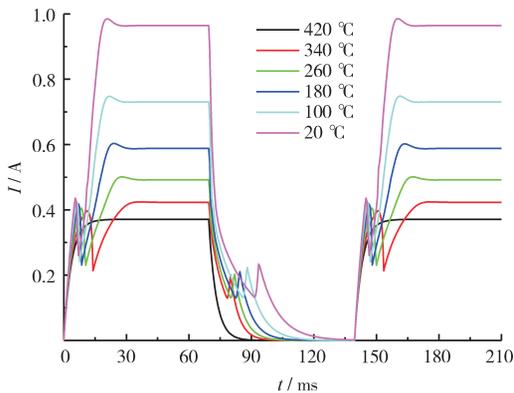


图7 不同环境温度下电磁阀动态电流曲线

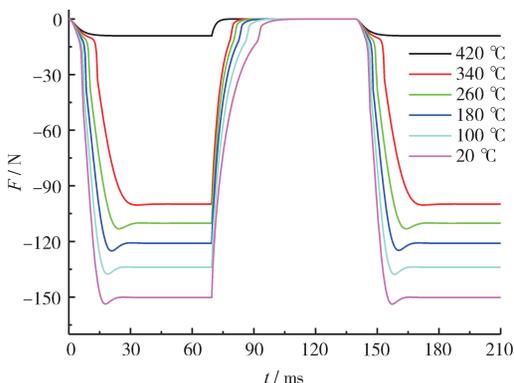


图8 不同环境温度下电磁阀动态电磁力曲线

的升高,线圈电流和电磁力减小。在20~340℃时,线圈电流和电磁力随温度的升高而减小,且温度越高,减小的幅值也越小;在420℃时,电流变化规律与其它温度下的截然不同,且电磁力骤降。从图9、10中可见,此时衔铁的运动速度和位移均为0,表明电磁阀在温度为420℃时未正常开启。

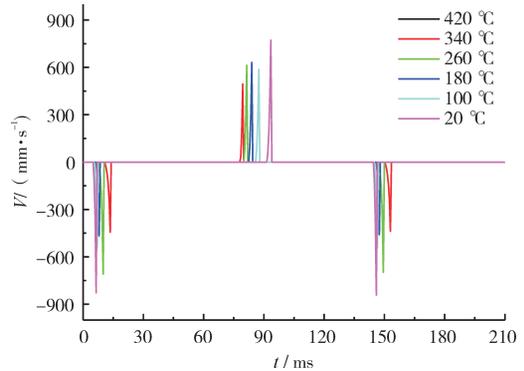


图9 不同环境温度下电磁阀的速度响应

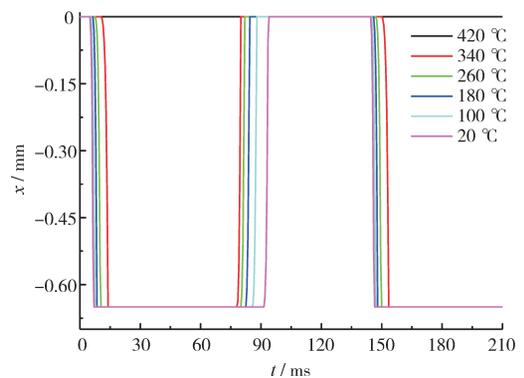


图10 不同环境温度下电磁阀的位移响应

另外,在不同环境温度下衔铁的运动时间也不同,环境温度越高,其开启过程用时越短,关闭过程用时越长。在开启过程中,当电磁阀通电时,电磁铁迅速达到磁饱和,从而使电磁力达到最大,衔铁在电磁力作用下迅速向上运动推动阀芯使阀开启;当电磁阀断电后,由于软磁材料的磁滞特性,电磁铁存在剩磁,电磁力减小缓慢,当弹簧复位力大于电磁力时,衔铁向下运动带动阀芯使阀口关闭^[25]。

当额定电压不变时,环境温度为20~340℃时所对应的电磁阀开启与闭合时间见表2。在环境温度

表2 不同环境温度下电磁阀的启闭时间

温度/℃	20	100	180	260	340
开启时间/ms	7.0	7.5	8.5	10.5	14.0
关闭时间/ms	24.0	18.0	14.5	11.5	10.0

初始为 20 °C 时,电磁阀关闭用时大于开启用时。当环境温度升高时,线圈磁动势随之减小,工作气隙处的磁场强度也相应减小。由于磁路的磁滞效应,电磁阀的关闭时间会缩短。可见在环境温度从 20 °C 升至 260 °C 的过程中,每升高 80 °C,电磁阀开启时间延长幅度为 0.5、1.0、2.0 ms,小于关闭时间缩短幅度 6.0、3.5、3.0 ms,当温度从 260 °C 升至 340 °C 时,电磁阀关闭时间缩短了 1.5 ms,开启时间延长了 3.5 ms。由此可见,温度变化对电磁阀启闭时间的影响规律不同。在某一温度范围内电磁阀关闭时间受温度变化影响较大,但当温度高于某一值时,开启时间较关闭时间所受影响更大。

在不同环境温度下电磁阀启闭时间随驱动电压变化的曲线分别如图 11、12 所示。从图中可见,随着驱动电压的升高,电磁阀的开启时间变短、闭合时间变长。在驱动电压由 18 V 升高至 36 V 的过程中,开启时间受电压的影响更大。分析可知,在环境温度为 260、340、420 °C 时,电磁阀最低启动电压分别为 24、27、30 V。

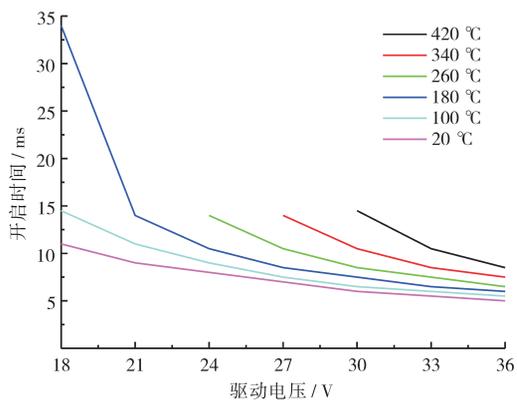


图 11 不同环境温度下电磁阀开启时间随电压的变化曲线

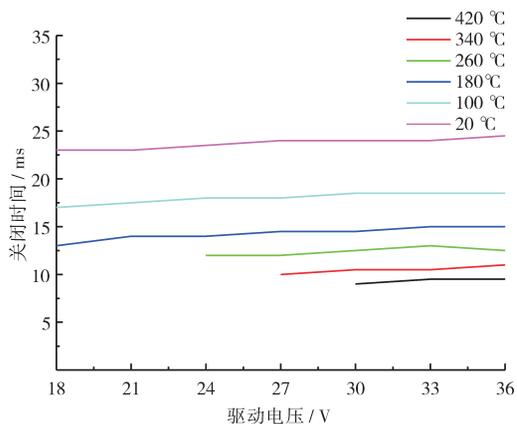


图 12 不同环境温度下电磁阀闭合时间随电压的变化曲线

4 结论

(1) 不考虑线圈发热及绝缘材料受温度的影响,在额定工作电压下环境温度的变化使线圈导线的电阻率改变,电流和线圈磁动势随温度的升高而减小。

(2) 环境温度升高会使磁路中工作气隙处的磁场强度和磁感应强度变弱,电磁阀电磁力减小,当初始位置电磁力小于预紧力时,阀无法开启。

(3) 电磁阀启闭的时长与电磁力、磁场强度密切相关,环境温度升高会使电磁阀开启时间延长、关闭时间缩短。

(4) 在某一临界温度范围内,环境温度对电磁阀关闭时长的影响大于对开启时长的影响;在达到临界温度之后,环境温度对电磁阀开启时长的影响大于对关闭时长的影响,直至电磁阀无法正常工作。

综上所述,电磁阀启闭时长受到影响的温度范围不一。特别是对于高速开关电磁阀,其平均流量受脉宽调制信号占空比大小的影响,故电磁阀的控制应考虑环境温度变化因素。

参考文献:

- [1] 孙健国. 现代航空动力装置控制[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009: 89-92.
SUN Jianguo. Modern aeronautical power plant control[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009: 89-92. (in Chinese)
- [2] 马会宁. 舰载发动机起飞增推技术和附件环境适应性研究[J]. 航空发动机, 2011, 37(4): 40-42.
MA Huining. Study of extra take-off thrust technology and accessory environmental adaptability on carrier aircraft engine[J]. Aeroengine, 2011, 37(4): 40-42. (in Chinese)
- [3] 薛利强, 于真. 基于总线功能模型的全系统 FPGA 验证环境设计[J]. 航空发动机, 2017, 43(1): 13-16.
XUE Liqiang, YU Zhen. Design of FPGA full-system verification environment based on bus functional model[J]. Aeroengine, 2017, 43(1): 13-16. (in Chinese)
- [4] 陈小磊, 郭迎清, 闫星辉, 等. 不确定运行环境下航空发动机部件寿命计算[J]. 航空发动机, 2015, 41(3): 30-35.
CHEN Xiaolei, GUO Yingqing, YAN Xinghui, et al. Aeroengine component life calculation on uncertainty operating environment[J]. Aeroengine, 2015, 41(3): 30-35. (in Chinese)
- [5] Watson J, Castro G. A review of high-temperature electronics technology and applications[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2015, 26(12): 9226-9235.
- [6] 李家祥. 航空发动机适航规定: CCAR-33-R2[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011: 40-43.

- L1 Jiexiang. Provisions on airworthiness of aircraft engines: CCAR-33-R2[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2011: 40-43. (in Chinese)
- [7] 刘艳芳, 毛鸣翀, 徐向阳, 等. 液压电磁阀多物理场耦合热力学分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 139-145.
LIU Yanfang, MAO Mingchong, XU Xiangyang, et al. Thermodynamic analysis of multiphysics coupling of hydraulic solenoid valve[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(2): 139-145. (in Chinese)
- [8] 吴萌, 熊庆辉, 王浚哲, 等. 电磁阀开启过程动态响应特性有限元仿真研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2015, 38(2): 117-120.
WU Meng, XIONG Qinghui, WANG Junzhe, et al. Finite element simulation study on dynamic response characteristics of solenoid valve opening process[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 38(2): 117-120. (in Chinese)
- [9] Liu Q, Bo H, Qin B. Experimental study and numerical analysis on electromagnetic force of direct action solenoid valve[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240(12): 4031-4036.
- [10] Zhao L M, Wu H C, Zhao L, et al. Optimization of the high-speed on-off valve of an automatic transmission[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 339(1): 012035-1-6.
- [11] 邱宇, 何毅斌, 张成, 等. 高速电磁阀电磁铁研究与开发[J]. 机电工程, 2014, 31(8): 1040-1044.
QIU Yu, HE Yibin, ZHANG Cheng, et al. Research and development of high speed solenoid valve electromagnet[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(8): 1040-1044. (in Chinese)
- [12] 焦禹, 刘京, 庞宝麟, 等. 基于Ansoft的喷油电磁阀磁路结构优化设计[J]. 机床与液压, 2013, 41(23): 112-114.
JIAO Yu, LIU Jing, PANG Baolin, et al. Optimization design of magnetic circuit structure of fuel injection solenoid valve based on ansoft[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(23): 112-114. (in Chinese)
- [13] Mutschler K, Dwivedi S, Kartmann S, et al. Multi-physics network simulation of a solenoid dispensing valve[J]. Mechatronics, 2014, 24(3): 209-221.
- [14] Angadi S V, Jackson R L, Choe S Y, et al. Reliability and life study of hydraulic solenoid valve. Part 1: a multi-physics finite element model[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(3): 874-887.
- [15] Angadi S V, Jackson R L, Choe S Y, et al. Reliability and life study of hydraulic solenoid valve. Part 2: experimental study[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(3): 944-963.
- [16] Liu Q F, Bo H L. Design and analysis of operation performance of parameters of the integrated valve under the high temperature condition[J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, 71: 237-244.
- [17] 王春民, 沙超, 孙磊, 等. 基于ANSYS的直流电磁铁温度场仿真分析[J]. 液压与气动, 2015(12): 83-86.
WANG Chunmin, SHA Chao, SUN Lei, et al. Simulation analysis of temperature field of DC electromagnet based on ANSYS[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015(12): 83-86. (in Chinese)
- [18] Sharma S V, Hemalatha G, Ramadevi K. Analysis of magnetic field-strength of multiple coiled MR-damper using comsol multiphysics[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 66: 1789-1795.
- [19] Cai Z, Ren L, Li Z, et al. Parameter matching and structural optimization design of H-SFCL in MMC ship MVDC system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, 32(6): 1-6.
- [20] 崔禹, 楼雨涵, 王刚, 等. 基于COMSOL直流电磁阀电磁仿真计算[J]. 机械工程与自动化, 2022(4): 93-94, 97.
CUI Yu, LOU Yuhuan, WANG Gang, et al. Electromagnetic simulation calculation of DC solenoid valve based on COMSOL [J]. Mechanical Engineering and Automation, 2022(4): 93-94, 97.
- [21] 王春民, 沙超, 魏学峰, 等. 基于AMESim和Ansoft的直动式电磁阀动态特性仿真分析[J]. 机床与液压, 2017, 45(21): 160-163.
WANG Chunmin, SHA Chao, WEI Xuefeng, et al. Simulation analysis of dynamic characteristics of direct acting solenoid valve based on AMESim and Ansoft[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(21): 160-163. (in Chinese)
- [22] 孙建彬, 岑豫皖, 王刚. 考虑电磁特性的电磁开关阀静态性能仿真研究[J]. 机电工程, 2011, 28(10): 1180-1184.
SUN Jianbin, CEN Yuwan, WANG Gang. Simulation of dynamic and static performance of electromagnetic on-off valve considering electromagnetic characteristics[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011, 28(10): 1180-1184. (in Chinese)
- [23] 康健, 尚沙沙, 焦文学, 等. 比例电磁阀变频率PWM驱动方法[J]. 中国机械工程, 2015, 26(8): 1024-1028.
KANG Jian, SHANG Shasha, JIAO Wenxue, et al. Variable frequency PWM driving method for proportional solenoid valve[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(8): 1024-1028. (in Chinese)
- [24] 夏晶晶. 离合起步用高速开关阀工作特性与驱动方法研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(16): 2010-2014.
XIA Jingjing. Research on working characteristics and driving method of high speed on-off valve for clutch start-up[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(16): 2010-2014. (in Chinese)
- [25] 陈亮, 梁国柱. 基于AMESim的电磁阀工作过程动态特性建模与仿真[J]. 导弹与航天运载技术, 2014(3): 49-54.
CHEN Liang, LIANG Guozhu. Modeling and simulation of dynamic characteristics of solenoid valve working process based on AMESim [J]. Missiles and Space Vehicles, 2014(3): 49-54. (in Chinese)

(编辑: 刘 静)