

磁锁式双稳态自锁阀响应特性理论研究

尤 罡^{1,2}, 王 莉^{1,2}

(1. 上海空间推进研究所, 上海 201112; 2. 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

摘 要:空间飞行器推进系统中大量使用磁锁式双稳态自锁阀,其响应特性是设计中的重要环节,直接影响推进系统的精确控制。由于自锁阀一般采用双线圈控制,两驱动线圈间存在互感现象,响应特性的设计计算与电磁阀有明显区别,有必要对自锁阀的响应特性进行理论分析研究。根据磁锁式双稳态自锁阀工作原理及特点,建立控制电路和磁路等效模型,基于电磁感应定律推导出模型对应的电压平衡方程和力平衡方程,求解得出了自锁阀响应特性简化理论计算公式。公式解释了自锁阀在控制释放回路中感应电流会延长响应时间、增加电流比的原理,明确了自锁阀的动作裕度不会因电流比变化而受到影响的特点。根据推导出的简化理论公式对阀门产品响应特性进行仿真计算,计算结果和产品实际测试数据基本吻合。由简化理论公式研究表明:如自锁阀控制线圈回路中有感应电流,感应电流越大则自锁阀响应时间越长、自锁阀开启或关闭电流比越大,但自锁阀克服外力动作的能力不会因为感应电流存在而受到影响。

关键词:磁锁式;自锁阀;响应特性;理论计算

中图分类号:V414 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2019)01-0042-06

Study on dynamic performance of magnetic self-locking valve

YOU Gang^{1,2}, WANG Li^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai 201112, China)

Abstract:In the space vehicle propulsion system, a large number of magnetic bistable self-locking valves are used. The response character is very important factor in the design, which directly affects the control accuracy of the propulsion system. The self-locking valve is generally controlled by a double coil and response characteristics of design calculation is different from the solenoid valve, so it is necessary to carry out response analysis of the self-locking valve. In this paper, based on the magnetic bistable self-locking valve working principle and characteristics, the control circuit and the equivalent magnetic circuit model were established. Based on the electromagnetic law mode, the self-locking valve response formula was obtained. The formula explains the self-locking valve in the control release induced current in the circuit will extend the response time and increase the current ratio, while the action of self-locking valve margin will not be affected by changes in current ratio characteristics. According to the simplified formula deduced, the valve response character was simulated and the results fit well with test data. The research results from simplified formula indicate that the response time and current ratio of valve unlocking and

收稿日期:2017-05-16;修回日期:2017-10-19

基金项目:航天系统装备部资助项目(30506070401);上海市科学技术委员会资助项目(17DZ2280800)

作者简介:尤 罡(1977—),男,高级工程师,研究领域为飞行器推进系统阀门设计

shutting off are larger with larger induced current when there is induced current in control circle of the self-locking valve. But the action ability of the self-locking valve to overcome outer force is not affected by the induced current.

Keywords: magnetic latched; self-locking valve; dynamic performance; theoretical calculation

0 引言

磁锁式双稳态自锁阀(简称自锁阀)大量应用于空间推进分系统中,将推进剂贮箱(或气瓶)与下游系统进行沟通和故障隔离,实现气、液路的工作管理。自锁阀的显著特点是具有位置自保持功能,其动作过程通常是给驱动线圈施加具有一定幅值和宽度的脉冲电流来改变阀门状态,激励电流消除后,阀门状态靠锁位机构保持不变。自锁阀要实现无源自保持特性,关键在于锁位机构,即通过永磁铁产生无源磁场将阀门保持在开启(或关闭)状态。

自锁阀的响应特性是系统的重要指标参数,直接影响推进系统的精确控制。由于自锁阀一般采用双线圈控制,两驱动线圈间存在互感现象,响应特性计算与单线圈控制电磁类阀门有明显区别。本文研究了自锁阀响应特性的理论计算方法及特点。

1 自锁阀控制原理

1.1 自锁阀工作原理

典型的自锁阀结构如图1所示,由开、关驱动线圈、衔铁、永磁铁、吸合台座、阀座和阀芯组件等组件组成。

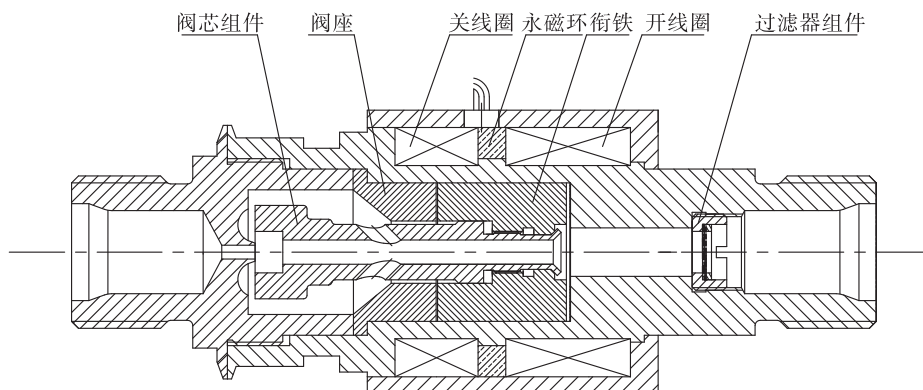


图1 典型自锁阀结构图

Fig.1 Schematic of a typical latch valve

工作原理如下:阀门为常闭状态,开线圈通电后,衔铁带动阀芯组件运动到开启位置,开线圈断电,在永磁铁永磁力的作用下,阀芯保持在开启位置;反之,关线圈通电,衔铁带动阀芯组件运动到关闭位置,关线圈断电,阀芯在永磁铁永磁力的作用下保持在关闭位置。

由自锁阀工作原理建立等效磁路模型如图2所示。图2中 S 为衔铁左右两吸合端面积; ϕ_{m1} 、 ϕ_{m2} 分别为永磁铁在衔铁两端产生的磁通; ϕ_e 为驱动线圈通电产生的磁通; ϕ_{ig} 为未通电线圈感应电流产生的磁通; I_w 为驱动线圈磁势; ϕ_{ig} 方向与 ϕ_e 相反,与未通电线圈所在吸合端面的 ϕ_{m1} 方向相同。由等效磁

路图可以看出,驱动线圈通电后,当衔铁驱动端面产生的总磁通大于另一端面总磁通时,衔铁开始运动。

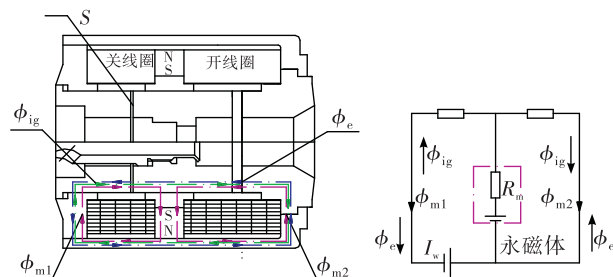


图2 等效磁路模型图

Fig.2 Equivalent magnetic circuit models

1.2 自锁阀控制电路

根据自锁阀工作原理和特点(通电时间短,工作电流大)在控制电路中一般采用释放回路(由释放电阻和二极管制成)用于保护控制电路,使自锁阀开、关线圈各自形成一个单向封闭回路。建立由控制电路和自锁阀驱动线圈组成的等效电路模型如图3所示。其中: U 为驱动电压; i 为驱动电压在

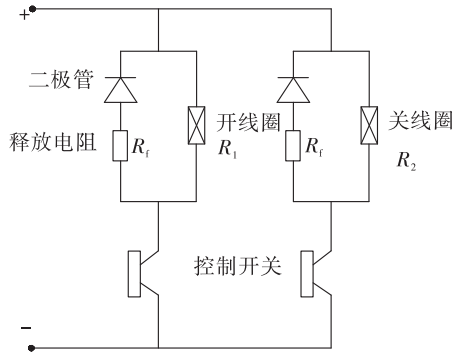


图3 控制电路及等效电路模型图

Fig.3 Electrical systems control circuit and equivalent circuit model

2 理论计算模型

自锁阀开启或关闭均为通电吸合作动,动作过程完全相同。响应时间快慢与电流通过线圈绕组变化快慢及绕组电感有关。自锁阀的响应时间电流曲线如图4所示。其中: I_w 为线圈通电稳态电流; i 为衔铁开始运动时的线圈电流。响应时间由触动时间 t_{cd} 和吸合时间 t_{yd} 组成,关系式为:

$$t = t_{cd} + t_{yd} \quad (1)$$

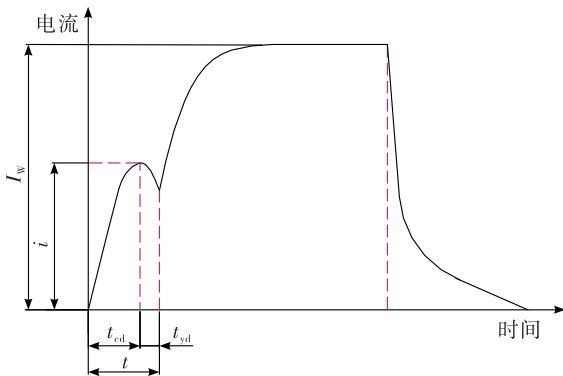
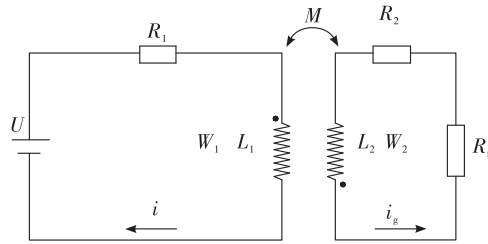


图4 自锁阀开启(或关闭)时间与电流曲线

Fig.4 Current curve of magnet latch valve when open or close

通电线圈回路中形成的驱动电流; R_1, L_1 和 W_1 为通电驱动线圈电阻、电感和匝数; i_g 为未通电线圈回路中产生的感应电流; R_2, L_2 和 W_2 为未通电线圈电阻、电感和匝数; R_f 为回路释放电阻; M 为两线圈间的互感。自锁阀两个线圈同极条件下一般绕向相反,在互感电路中互为异名端。当一个线圈通电后,另一个线圈产生的电压与原来的电流方向是相反的。



2.1 触动时间

当线圈通电时,线圈磁场的磁通与永磁铁磁场的磁通互相叠加或抵消,衔铁受力开始发生变化。直到两端面磁通产生的力相等时衔铁处于临界状态,若电流继续增加则衔铁开始运动。从线圈开始通电到衔铁开始运动这段时间为触动时间。合力相等衔铁开始运动时的线圈电流 i' 即为理论触动电流(假设无感应电流影响,稳态电流 $I_w = U/R_1, i'/I$ 则为触动电流比)。

以开线圈驱动为例,由等效电路模型可得出,当驱动线圈通电后磁通随时间变化过程的电压平衡方程为:

$$U = i \cdot R_1 + \frac{d\psi}{dt} \quad (2)$$

由于驱动线圈总磁链 ψ 除自身线圈产生的磁链 ψ_1 外,还受到另一个线圈感应电流产生的磁链 ψ_2 影响,因此 $\psi = \psi_1 + \psi_2$;式(2)可变为:

$$U = i \cdot R_1 + \frac{d\psi}{dt} = i \cdot R_1 + \frac{d(\psi_1 + \psi_2)}{dt} = i \cdot R_1 + \frac{d\psi_1}{dt} + \frac{d\psi_2}{dt} \quad (3)$$

设计时自锁阀线圈位置结构尺寸均固定不变,

可认为线圈电感 L 为常数。则 $L_1 = \frac{\psi_1}{i}, L_2 = \frac{\psi_2}{i_g}$, 因此控制回路电压平衡方程可变为:

$$U = i \cdot R_1 + L_1 \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di_g}{dt} \quad (4)$$

由楞次定律可得,异名端感应线圈产生的感应电流与初始线圈电流方向相反,不考虑线圈自感,则释放回路中感应电流为:

$$i_g = -\frac{M}{R_F} \frac{di}{dt} \quad (5)$$

其中

$$R_F = R_f + R_2 \quad (\Omega)$$

$$M = k_M \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (\text{H})$$

式中: R_F 为未通电线圈回路中的总电阻; M 为开、关线圈的互感; k_M 为开、关线圈互感耦合系数,与线圈匝数、结构尺寸及相互距离位置有关,一般取 0.8~1.0。

将式(5)代入式(4)可推得最终平衡方程为:

$$U = i \cdot R_1 + L_1 \frac{di}{dt} - \frac{M \cdot L_2}{R_F} \frac{d^2 i}{dt^2} \quad (6)$$

转化为二阶微分方程:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} - \frac{R_F \cdot L_1}{M \cdot L_2} \frac{di}{dt} - \frac{R_F \cdot R_1}{M \cdot L_2} \cdot i + \frac{R_F \cdot U}{M \cdot L_2} = 0$$

解方程可求得吸合触动时间为:

$$t_{cd} = \frac{L_1}{2 \cdot R_1} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{4R_1 \cdot M \cdot L_2}{R_F \cdot L_1^2} \right)} \right) \ln \left(\frac{U}{U - i \cdot R_1} \right) \quad (7)$$

根据自锁阀结构(假设衔铁两端吸合面积相同,不考虑工作介质压力等其他阻力),衔铁在临界状态时受力状态可以建立力平衡方程:

$$F_{左} = F_{右} = \frac{(\phi_{m1} + \phi_e')^2}{2\mu \cdot S} = \frac{(\phi_{m2} - \phi_e')^2}{2\mu \cdot S} \quad (8)$$

而实际情况在有释放回路时需要加入另一线圈感应电流产生磁通的影响(与永磁铁磁通叠加,与驱动线圈磁通抵消),则力平衡方程调整为:

$$F_{左} = F_{右} = \frac{(\phi_{m1} + \phi_e - \phi_{ig})^2}{2\mu \cdot S} = \frac{(\phi_{m2} - \phi_e + \phi_{ig})^2}{2\mu \cdot S} \quad (9)$$

联立方程(8)~(9)可解得感应电流 i_g 、理论触动电流 i' 和实际开启电流 i 的关系为: $\phi_e = \phi_e' + \phi_{ig} = iW_1 = i' \cdot W_1 + i_g W_2$, 即:

$$i = i' + i_g \frac{W_2}{W_1} \quad (10)$$

同时由电压平衡方程可得双线圈对应的电压方程组为:

$$\begin{cases} U = i' \cdot R_1 + L_1 \frac{di'}{dt} \\ \frac{M di'}{dt} = i_g \cdot (R_2 + R_f) + L_2 \frac{di_g}{dt} \end{cases} \quad (11)$$

解方程组可得感应电流为:

$$i_g = \left[M \cdot \frac{U - i' \cdot R_1}{L_1 \cdot (R_2 + R_f)} \right] \left(1 - e^{-\frac{(R_2 + R_f)}{L_2} \cdot t} \right) \quad (12)$$

假设驱动线圈通电后最终稳态电流 $I_w = U/R_1$, 联立方程(7)、(10)和(12)可建立如下方程组:

$$\begin{cases} t_{cd} = \frac{L_1}{2R_1} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{4R_1 \cdot M \cdot L_2}{(R_2 + R_f) \cdot L_1^2} \right)} \right) \ln \left(\frac{I_w}{I_w - i} \right) \\ i = i' + i_g \frac{W_2}{W_1} \\ i_g = \left[M \cdot \frac{(U - i' \cdot R_1)}{L_1 \cdot (R_2 + R_f)} \right] \left(1 - e^{-\frac{(R_2 + R_f)}{L_2} \cdot t_{cd}} \right) \end{cases} \quad (13)$$

由设计的理论触动电流即可解得实际触动时间、实际触动电流和对应开、关电流比。

2.2 吸合时间

从衔铁开始动作到运动到设计位置的这段时间为衔铁吸合时间,吸合时间计算相对复杂,因为衔铁运动过程中,随着气隙减小而使电感发生变化,且作用在衔铁上反作用力和电磁吸力都在变化。考虑到衔铁行程较小,为使问题简化,假设电磁驱动力在衔铁运动中不变,则可近似按式(14)计算^[1]:

$$t_{yd} = \sqrt[3]{\frac{6(K_{cb})^2 \cdot m \cdot h^2}{P_w(K_{cb} - 1)}} \quad (14)$$

式中: m 为衔铁(或运动件)质量, kg; P_w 为线圈瞬时功率, $P_w = I^2 R$; W ; h 为自锁阀开度, mm; K_{cb} 为理论触动电流比 i'/I_w ^[2-3]。

2.3 响应特性分析

由理论公式可以得出,当自锁阀控制驱动中接入释放回路后,未通电线圈闭合回路产生的感应电流会延长吸合触动时间(如图5中曲线所示);由式(10)可得自锁阀实际开启(或关闭)电流比 i/I_w 恒大于理论触动电流比 i'/I_w ;当自锁阀驱动回路中没有释放回路时,两线圈间不产生互感电流,理论触动电流比与实际电流比相等;由式(7)与式(12)可得线圈结构参数不变的前提下,电路中的感应电流

大小由回路中的释放电阻值决定。释放电阻越小,感应电流越大,吸合触动时间越长,实际开启(或关闭)电流比值相对理论电流比值越大。

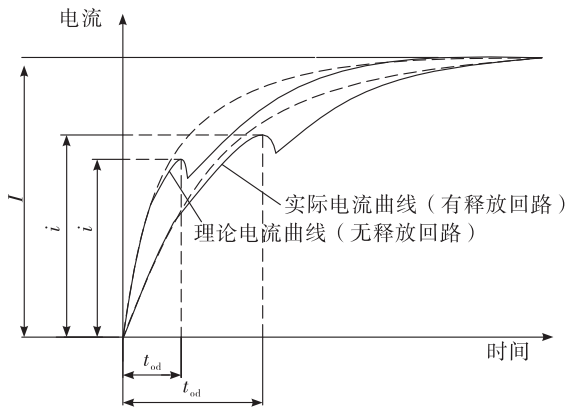


图 5 电流曲线对比图
Fig. 5 Comparison of current curves

也就是说,由于未通电异名端线圈感应电流的影响,自锁阀的开、关动作裕度不再与开启或关闭电流比有直接关联。即使线圈感应电流显著提高了衔铁运动所需要的触动电流值,延长了衔铁的触

动时间,但感应电流是随着驱动电流变化而产生,当驱动电流稳定后,感应电流逐渐变小最终趋向于零。理论触动电流比不会随感应电流变化而发生变化,导致自锁阀的动作裕度不会因电流比的变化而受到影响。同理,如果非驱动线圈无闭合回路时(即感应电流为零时),开启(关闭)电流比就是理论触动电流比。

3 产品测试数据试验验证

以 3 种成熟型号用典型双稳态磁锁式自锁阀(见图 1)为子样,进行理论公式计算和产品测试数据比对。理论计算上,最大程度考虑消除外界影响因素,降低试验误差对计算结果的影响。即确定阀门为空载状态,释放回路电阻值为 $10\ \Omega$,输入产品设计参数使用 MathCAD 软件按理论公式进行求解计算;试验数据上,统计了 3 种与飞行状态相同的所有批次产品(共 95 台)的测试数据,并选用其中 1 种自锁阀补充了释放回路电阻 $50\ \Omega$ 条件下的响应特性测试。自锁阀响应特性理论计算值与实测试验数据对比情况,如表 1 所示^[4-7]。

表 1 响应特性理论计算与实测数据
Tab. 1 Calculation value and dynamic performance test data

产品 代号	理论计算值		产品实测值			备注	
	理论计算 时间/ms	电流 比值	响应时间 /ms	电流 比值	触动 电流比	释放电阻 / Ω	开、关 状态
A	11.8	0.43	9.0 ~ 11.0	0.38 ~ 0.49	0.23	10	开
	8.2	0.31	8.0	0.31		50	开
	18.0	0.78	13.0 ~ 17.0	0.76 ~ 0.8	0.53	10	关
	12.2	0.62	11.8	0.63		50	关
B	13.0	0.66	11.0 ~ 15.0	0.60 ~ 0.70	0.42	10	开
	17.2	0.90	17.0 ~ 22.0	0.85 ~ 0.91	0.67	10	关
C	27.1	0.65	21.0 ~ 28.0	0.61 ~ 0.72	0.54	10	开
	36.5	0.92	28.0 ~ 39.0	0.88 ~ 0.92	0.70	10	关

对比表明,自锁阀响应时间的理论计算值与实测值非常接近;电流比的理论计算值均处于实测中值范围内。同时,考虑到产品的大小不同、试验条件差异等外部因素的影响,可判定理论计算结果与产品实际性能测试情况基本吻合,验证了理论公式的可行性,可在类似结构阀门工程设计分析中

应用^[8-13]。

4 结论

通过对磁锁式双稳态自锁阀控制方式进行分析,建立电路及磁路等效模型,推导出了自锁阀响应特性计算的简化理论公式。经对子样响应特性

的理论计算值和实测数据进行对比,理论公式计算结果与产品实际测试性能基本吻合,验证了简化理论公式的合理性及可行性,可应用于自锁阀设计瞬态特性初步分析工作。另外,通过对自锁阀瞬态特性理论研究及公式推导可以得出:

1)自锁阀控制线圈中,非驱动线圈若形成回路将产生感应电流,对阀门响应特性影响明显,感应电流越大则自锁阀响应时间越长。

2)感应电流会使自锁阀开启或关闭电流比明显增大,但不会影响自锁阀的动作裕度,即当前电流比不再作为自锁阀动作能力的表征属性。

参考文献:

- [1] 廖湘恩. 航空电器[M]. 北京:国防工业出版社,1981.
- [2] 荣西林. 电工与电子技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2001.
- [3] 秦永涛,沈继彬,李建军,等. 低温气动阀动态响应特性的非线性分析方法[J]. 火箭推进,2013,39(6):23-28.
QIN Y T, SHEN J B, LI J J, et al. Nonlinear analysis method for dynamic responding characteristics of cryogenic pneumatic valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013, 39(6):23-28.
- [4] 赵博. Ansoft12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- [5] 刘国强. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [6] 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.
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.
- [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.
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.
- [8] 许闯,尤昱. 电磁阀磁路结构对动作寿命的影响[J]. 火箭推进,2013,39(5):70-74.
XU C, YOU G. Influence of structure of solenoid valve on its motion life[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013,39(5):70-74.
- [9] 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.
- [10] 李庆扬,关治,白峰杉. 数值计算原理[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [11] 杨亦婷,李进贤,张博斌. 轨姿控推进系统用电磁阀性能仿真研究[J]. 火箭推进,2016,42(2):19-24.
YANG Y T, LI J X, ZHANG B B. Simulation research on performance of solenoid valve for orbit and attitude control propulsion system [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2016,42(2):19-24.
- [12] 马晓琛,李国强,苏静静,等. 磁性双位自锁阀的电磁特性分析及验证[C]// 第九届全国流体传动与控制学术会议. 杭州:中国机械工程学会流体传动与控制分会,2016.
- [13] 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.

(编辑:马 杰)