

基于阻容元件的电磁阀快响应技术

邹 嘉¹, 刘 飞², 朱建国², 周学锋²

(1. 海军装备部, 陕西 西安 710065; 2. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 为了寻求一种简单、便捷的驱动控制电路, 以实现电磁阀高电压开启、低电压维持的快响应工作模式, 充分利用电气元件电容的充放电功能和电阻的分压功能, 设计了“电磁阀线圈串联电阻和电容并联组”驱动电路。通过 AMESim 仿真软件建立电磁阀和驱动电路的仿真模型, 对比分析了电容和电阻参数对线圈电流和响应的影响规律, 并通过试验验证了该技术途径可以达到高电压开启、低电压维持的效果, 实现了电磁阀的快响应目标。根据参数对比试验数据, 启动电流峰值和上升率应通过选择电容参数来控制, 维持电流应通过选择分压电阻参数来调整。该驱动电路技术可以推广应用于快响应电磁阀设计中, 结构简易、操作简便。

关键词: 电磁阀; 快响应; 驱动电路; 阻容

中图分类号: V432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2019)04-0058-05

Fast-response solenoid valve based on resistance and capacitance

ZOU Jia¹, LIU Fei², ZHU Jianguo², ZHOU Xuefeng²

(1. Naval Equipment Department, Xi'an 710065, China;

2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: In order to find a simple and convenient driving circuit and realize the solenoid valve with high voltage starting and low voltage sustaining rapid responsive mode, which full use of the electrical components function that the capacitance can charge and discharge and the resistance can share voltage, the driving circuit principle that the solenoid valve coil connected with resistance and capacitance which were parallel connected was designed. Through the AMESim simulation software, the simulation model of solenoid valve and driving circuit was establish, and the influence of the resistance and capacitance on the coil current and response was analyzed. Also it was evaluated by test that the solenoid valve can start rapidly at high voltage and maitain at low voltage, which meets the rapid response requirement. In response to the contrast testing data, a parameter of the capacitance to control current peak and rate-of-climb when opening can be selected, and a parameter of the resistance to control maintenance current can be also selected. The driving circuit technology can be extended and applied in the design of fast solenoid valve, with simple structure and easy to operate.

Keywords: solenoid valve; fast-response; drive circuit; resistance-capacitance

收稿日期: 2018-01-14; 修回日期: 2018-05-08

作者简介: 邹喜(1971—), 男, 高级工程师, 研究领域为火箭发动机技术

0 引言

液体姿轨控发动机一般由推力室和控制阀组成,作为调整飞行器轨道或姿态的动力装置。控制阀一般采用直动式电磁阀,结构简单、功能可靠、性能稳定,而控制阀的响应速度直接决定了发动机的启动加速性和关机减速性^[1],影响飞行器的机动性、灵活性和精确性,因此控制阀的快响应特性^[2-4]已成为航天动力装置的主要技术攻关方向之一。

为了使电磁阀达到快响应目标,除了本身结构设计上采取措施外,还需要一个合理有效的驱动控制回路。在汽车领域,随着高速喷油电磁阀的发展,各种驱动控制电路应运而生,采用高电压开启、低电压维持的电路应用居多^[5];在航天领域,国外多型动力系统采用驱动电路实现电磁阀快响应技术^[6-8],国内西安航天动力研究所宋会玲^[9]等采用具有集成加速开启、时序控制和加速关闭功能的芯片控制双绕组高速电磁阀实现高电压开启、低电压维持,响应时间达到3 ms左右。以上驱动控制电路都需要单独研制复杂的驱动器,研制周期比较长,对于近阶段地面研究性使用场景,有必要寻求一种简单、便捷的快响应电磁阀驱动控制电路。

本文以某直动式电磁阀为研究对象,充分利用电容的充放电功能和电阻的分压功能,采用电阻和电容元器件组成的简易控制电路,实现电磁阀高电压开启、低电压维持的快响应工作模式。

1 结构和工作原理

电磁阀的线圈^[10]是一个带铁芯的线圈,具有一定的电感,因而当线圈加上电压后,线圈中的电流接近似指数规律上升,上升的速度快慢一般用线圈的电时间常数 $T = L_0/R$ 表征(L_0 为线圈电感; R 为线圈电阻)。为提高响应速度,对电磁线圈结构自身,一方面是提高吸合储备裕度,减小吸合触动时间及阀芯运动时间,另一方面是减少线圈匝数,降低电感,提高电流上升速度。因此,对于直动式电磁阀自身采取高储备吸合裕度(2.2倍)和低电阻(8 Ω)、低电感(0.08 H)线圈设计的快响应技术措施,结构简图如图1所示。

驱动控制电路由串联在线圈上的电阻、电容并联和在电源输入端并联的二极管组成,如图1所

示。电源供电启动时,电容尚未充电,电容两端电压为零,相当于将电阻短路,线圈两端电压约等于电源电压(28 V),电磁阀在高电压开启,有利于加快打开速度;一段时间后,电容充电完成,电容两端电压达到分配电压,相当于将电阻接入电路分压,使线圈工作在低电压状态;另外,断电后,释放小回路形成的瞬态感应电流又与电容的释放电能形成的反向电流抵消,消耗了一定能量,更有利于加速线圈电流的释放效果。

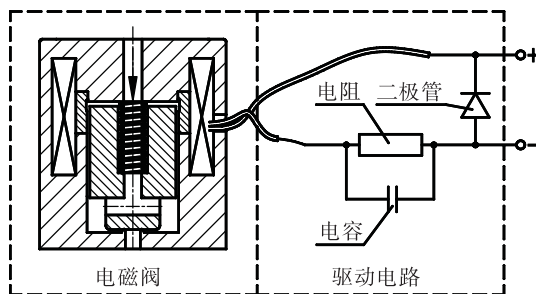


图1 电磁阀及简易驱动电路原理图

Fig.1 Schematic diagram of solenoid valve and simple drive circuit

另外,在电源输入端并联二极管,形成释放小回路,来释放瞬态反冲电压,减小反冲电压对上游电源或电路的干扰和破坏。当电磁阀正常通电时,二极管反向截止,分支中没有电流通过;当电磁阀关闭,瞬态反冲电压产生时二极管正向导通,线圈电感与二极管形成连通的回路,能够将电感上的瞬态反冲电压减小到很低,甚至接近于0。

2 仿真计算与分析

2.1 原理仿真

IMAGINE公司开发的AMESim系统仿真平台软件^[11]是一款高级建模和仿真软件,为流体动力、机械、热流体和控制系统提供一个完善、优越的仿真环境及灵活的解决方案,提供了丰富的图形化建模元件应用库,使工程技术人员可以从繁琐的数学建模中解放出来,从而专注于物理系统本身的设计和优化^[12]。

根据电磁阀及其驱动电路的结构原理建立整体电磁系统的AMESim仿真模型^[13-15],如图2所示,包括电磁、液压、机械运动3类子模型。将电磁阀的

实际物理参数赋予仿真模型,在未增加驱动电路的情况下,采用电磁阀部分的有载试验数据(打开 4.6 ms,关闭 8.7 ms)对模型进行了修正与验证,仿真结果(打开 4.5 ms,关闭 8.5 ms)精度达 2.3%,精度满足特性仿真研究需求。

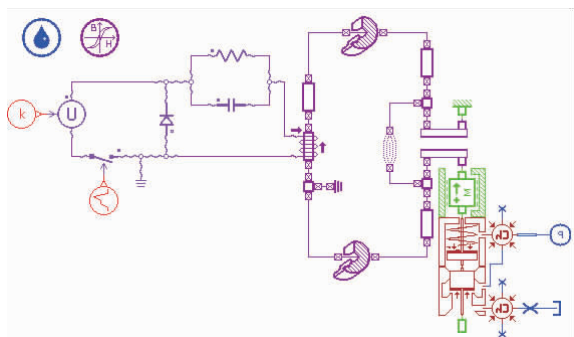


图 2 电磁阀及驱动电路仿真模型
Fig. 2 Simulation model of solenoid valve and drive circuit

在原理仿真模型中,取串接电阻 $20\ \Omega$ 、电容 $600\ \mu\text{F}$ 并联组,0 时刻开始给控制电路接通 28 V 直流电压,40 ms 时断电,仿真结果如图 3 和图 4 所示。启动时,电容尚未充电,电容两端电压为零,相当于将与之并联的电阻短路,线圈两端电压等于电源电压,电磁阀在 28 V 高电压下启动,有利于加快打开速度,打开约 3.4 ms;随着电磁阀的打开动作,电容开始充电,经过约 15 ms 电容完成充电,电容两端电流为零,相当于将与之并联的电阻断路,这样电阻串入线圈回路,达到分压效果,线圈两端电压降低至约 8 V,维持电流约 1 A,能够保证阀芯处于可靠吸合状态;断电后,阀芯仅在维持电流约 1 A 条件下释放,关闭达到 2.1 ms,另外,电阻和电容串接在释放小回路中同样对加速释放有较好的效果。

从上述电磁阀及其驱动电路的原理仿真可知,电磁阀部分采用的 2.2 倍高储备吸合裕度和 $8\ \Omega$ 低电阻、0.08 H 低电感线圈设计使得自身具有电磁触动快的特点,简易的驱动电路可以使线圈达到高电压开启、低电压维持的效果,实现了电磁阀的快响应技术特点。

2.2 参数选择分析

对于电磁阀部分设计参数已经确定,主要变化驱动电路部分的电容和电阻参数,比较分析对线圈

电流和响应特性的影响。

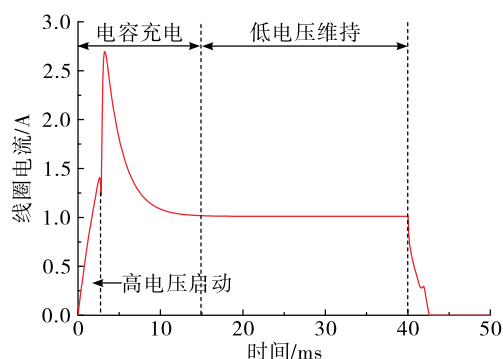


图 3 仿真线圈电流曲线
Fig. 3 Simulation curves of valve coil current

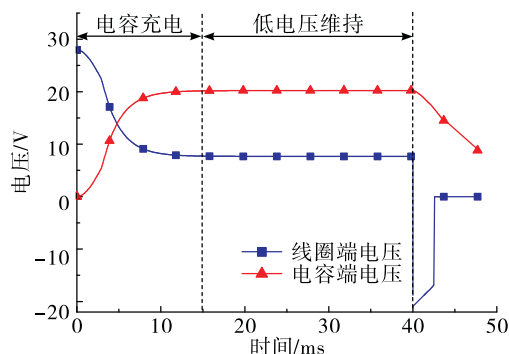


图 4 仿真线圈和电容电压曲线
Fig. 4 Simulation curves of valve coil and capacitane voltage

2.2.1 电容参数的影响

变化电容值分别为 $150\ \mu\text{F}$ 、 $600\ \mu\text{F}$ 和 $800\ \mu\text{F}$,其他参数不变(电阻 $20\ \Omega$),仿真对比结果如图 5 所示。电阻值不变情况下,随着电容值的增大,启动时电磁阀线圈电流上升速度越快,打开响应时间越短,并且启动电流峰值越大,但是充电时间也越长,趋于低电压维持的时间也越长。由图 5 中 $150\ \mu\text{F}$ 电容值的电流曲线可知,电容值过小,充电能量较弱、充电时间较短,使电阻短路的能力较弱,阀芯还没动作完成,电阻就串入回路分压,导致电磁线圈吸合能力变弱,故电容值的大小要根据系统对峰值电流的限制和线圈的吸合能力合理选择。

另外,对比释放关闭时间,电容值越大,充电量越大,由于电容将释放电能与线圈感应电能反方向抵消,消耗能量,线圈电流的释放越快,阀芯关闭也越快。

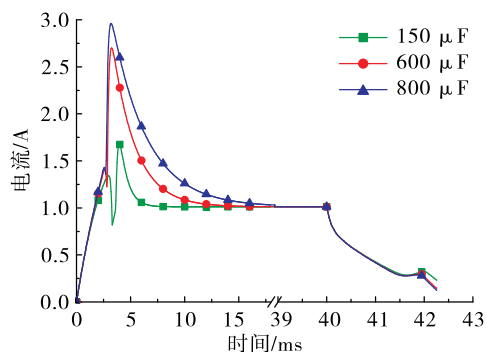


图5 电容值对线圈电流的影响

Fig. 5 Influence of capacitance value on coil current

2.2.2 电阻参数的影响

将变化电阻值分别为 $10\ \Omega$ 、 $20\ \Omega$ 和 $30\ \Omega$, 其他参数不变(电容 $600\ \mu\text{F}$), 仿真对比结果如图6所示。电容值不变情况下, 随着电阻值的增大, 分压能力越强, 线圈维持电流越低, 线圈释放、阀芯关闭时就越快, 而对启动电流影响很小。正因为电阻的分压变大, 电容两端电压也越大, 完成充电的时间也略变长。故电阻值的大小要根据设计时的线圈必须维持电流合理选择, 保证低电压维持阶段阀芯处于可靠开启状态。

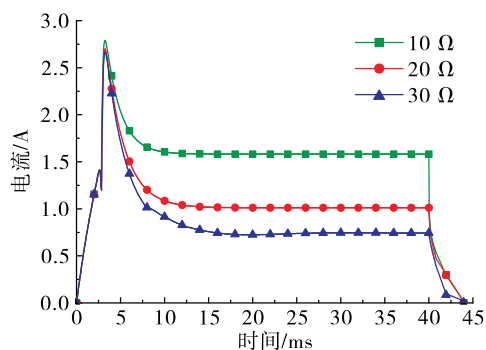


图6 电阻值对线圈电流的影响

Fig. 6 Influence of resistance value on coil current

3 试验验证与应用

根据图1所示电磁阀及简易驱动电路原理图, 采用如图7所示的产品进行了验证试验^[16], 电子元器件采用工业级电阻、电容。在入口压力 $8\ \text{MPa}$, 电压 $28\ \text{V}$, 流量 $50\ \text{g/s}$ 条件下驱动并测试电磁阀打开、关闭电流曲线, 结果如图8所示。试验结果表明, 采用串接电阻和电容并联组的方式驱动电磁

阀, 线圈两端具有“高电压开启、低电压维持”的特点, 打开 $3.8\ \text{ms}$, 关闭 $2.0\ \text{ms}$, 达到了快响应技术目标。同时, 与图3仿真结果对比表明, 两者特征和趋势一致, 理论计算与试验结果吻合度较好。

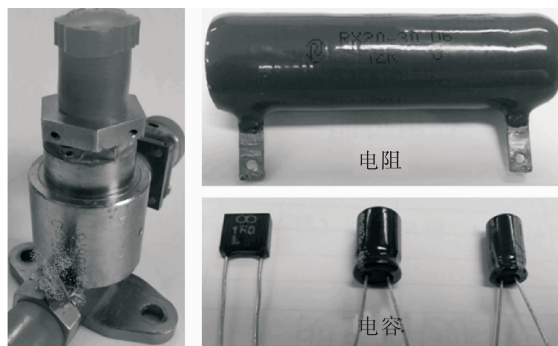


图7 电磁阀及电子元器件试验件

Fig. 7 Solenoid valve and electron element

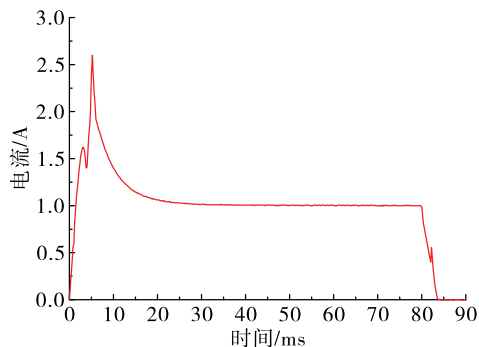


图8 电磁阀及驱动电路验证电流曲线

Fig. 8 Verification test coil current of solenoid valve and drive circuit

采用不同的电阻和电容进行比较试验, 试验结果如表1所示。对比表中结果可以得出如下结论:

1) 电阻值主要影响维持电流和关闭响应时间。电阻值越大, 分压能力越强, 线圈维持电流越低, 线圈释放、阀芯关闭就越快, 而对启动电流影响很小。但电阻值的选取应保证低电压维持阶段阀芯处于可靠开启状态。

2) 电容值主要影响启动时电流上升率和峰值。电容值越大, 电容充电能力越强, 充电时间越长, 启动时的电流上升快、峰值也就越大, 打开响应时间短; 另外, 电容值越大, 电容充电量越大, 对关闭时的反向电动势消除越快, 关闭也就越快。

3)串接 20 Ω 电阻和 100 μF 电容并联组时电磁阀打不开,而串接 20 Ω 电阻和 600 μF 电容并联组时电磁阀可靠打开,说明电容值过小时,充电能量较弱、充电时间较短,失去了对电阻的短路作用,电阻过早串入回路分压,导致电磁线圈吸合能力不够。

故电阻和电容参数应根据系统要求和电磁阀自身设计参数合理选择。

表 1 不同参数对电流和响应的影响
Tab.1 Influence of variant parameter on current and response

电阻/Ω	电容/μF	打开/ms	关闭/ms	电流峰值/A	维持电流/A
10	100	6.8	5.2	1.73	1.56
10	600	3.8	2.8	2.61	1.56
20	100	—	—	—	—
20	600	3.8	2.0	2.60	1.02

设计的电磁阀及其简易驱动电路(线圈串接电阻和电容并联组),结构简易,操作简便。驱动电路采用的电阻和电容均为工业级电子元器件,花费成本低,技术成果验证效果好,经验证可以转化并推广至普通电磁阀中。

4 结论

以电磁阀高电压开启、低电压维持的快响应工作模式为需求,充分利用电容的充放电功能和电阻的分压功能,设计了“电磁阀线圈串接电阻和电容并联组”的驱动线路,通过仿真和试验验证了该技术途径可以达到高电压开启、低电压维持的效果,实现了设计电磁阀的快响应目标。根据参数对比试验数据,启动电流峰值和上升率应通过选择电容参数来控制,维持电流应通过选择分压电阻参数来调整。

设计验证技术可以转化并推广至快响应电磁阀设计中,采用启动线圈和维持线圈串联绕制并在维持线圈上并联电容的方式,实现电磁阀高电压开启、低电压维持的功能。

参考文献:

[1] 周汉申.单组元液体火箭发动机设计与研究[M].北京:

中国宇航出版社,2009.

[2] HODGEK F, ALLEN K A, HEMMINGS B. Development and test of the ASAT bipropellant attitude control system (ACS) engine; AIAA1993-2587[R]. USA: AIAA, 1993.

[3] EDWAR D, BUSHWAY I, ELMER N. Design and development of lightweight integrated valve/injectors for the THAAD program; AIAA1994-3383[R]. USA: AIAA, 1994.

[4] HUFTALEN R L, PLATT A L, PARKER J M, et al. Minimum impulse thruster valve design and development; AIAA2003-4930[R]. USA: AIAA, 2003.

[5] 宋军,李书泽,李孝禄,等. 高速电磁阀驱动电路设计及试验分析[J]. 汽车工程, 2005, 27(5): 546-549.

[6] CORY J, FARRELL W. Internally vented bipropellant valves for divert and ACS missile control; AIAA 1996-3267[R]. USA: AIAA, 1996.

[7] WICHMANM H. High performance miniature flightweight pilot operated valves; AIAA1995-3100[R]. USA: AIAA, 1995.

[8] COCHRAN M. Modular injection systems for miniature engines; AIAA1992-3253[R]. USA: AIAA, 1992.

[9] 宋会玲,王春民,王云岩,等. 集成控制双绕组高速电磁阀的设计与仿真分析[J]. 火箭推进, 2012, 38(6): 16-19.

SONG H L, WANG C M, WANG Y Y, et al. Design and simulation analysis of bi-coil high-speed solenoid valve with integrated control[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2012, 38(6): 16-19.

[10] 王宝龄. 电磁电器设计基础(修订本)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.

[11] 付永领,祁晓野. LMS Imagine. Lab AMESim 系统建模和仿真参考手册[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.

[12] 朱建国,魏学峰,孙亮. 某减压阀高压冲击超调问题仿真分析与试验研究[J]. 火箭推进, 2015, 41(5): 72-76.

ZHU J G, WEI X F, SUN L. Simulation and experiment research on high-pressure shock overshoot phenomenon of pressure reducing valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(5): 72-76.

[13] 刘忠,刘卫萍,何谦. 高速开关电磁阀动态响应建模与仿真[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2009, 32(3): 53-57.

[14] 杨玉涛,张小栋. 高速电磁阀模型建立及响应特性研究[J]. 测控技术, 2008, 27(6): 86-89.

[15] 汪志刚,张敬国,陈勤学. 电控柴油机用高速电磁阀的仿真研究[J]. 机电设备, 2003, 20(4): 22-26.

[16] 阮晓芳,孔晓武,尹学松. 高速开关阀驱动电路的仿真与试验研究[J]. 机电工程, 2011, 28(2): 209-211.

(编辑:马 杰)