

消反峰电路对电磁阀性能的影响分析

范 宇,任志彬,陈 涛,张思远
(蓝箭航天空间科技股份有限公司,北京 100176)

摘 要:电磁阀在航天器中应用广泛。消反峰电路是电磁阀控制系统中重要的组成部分,且对电磁阀的性能有显著影响。为了获得消反峰电路对电磁阀性能的影响,基于 Maxwell 软件对某轴流直动式电磁阀及其消反峰电路进行研究。通过将电磁阀某工况下的静态和瞬态仿真结果与试验数据进行对比,验证了仿真模型的有效性。同时仿真对比了有、无消反峰电路及不同消峰电阻下的电磁阀性能,得到释放响应时间随消峰电阻的增大而减小,而感应电动势随消峰电阻的增大而增大的规律,同时发现消峰电阻对电磁阀性能的影响存在一个转折点,选择此点作为电磁阀控制系统的设计点可以得到更优的方案,进而提出从消反峰电路角度优化电磁阀控制系统的方案,为电磁阀控制系统的优化设计提供参考。

关键词:消反峰电路;电磁阀;Maxwell 软件;感应电动势;响应时间

中图分类号:V431

文献标志码:A

文章编号:1672-9374(2024)02-0113-09

Analysis of the influence of anti-peak circuit on the performance of solenoid valves

FAN Yu, REN Zhibin, CHEN Tao, ZHANG Siyuan
(LandSpace Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: The solenoid valves are widely used in spacecraft. The anti-peak circuit is the important component of control system within solenoid valves and has significant influences on performance of solenoid valves. In order to obtain the influence of anti-peak circuit on the performance of solenoid valves, a kind of axial direct acting solenoid valve and anti-peak circuit were studied based on simulation with Maxwell software. The reliability of simulation modeling was verified by comparison of experiment data and simulation results on static and transient conditions. Meanwhile, by simulating the solenoid valves at different anti-peak resistances with or without anti-peak circuit, the performance of solenoid valves was obtained. The release response time decreases with the increase of anti-peak resistance, while the induced voltage increases with the increase of anti-peak resistance. At the same time, it was found that there is a turning point of anti-peak resistance on the performance of the solenoid valve. A better plan can be obtained on this turning point. Furthermore, an optimized plan of solenoid valves was

收稿日期:2023-09-18 修回日期:2023-10-11

基金项目:浙江省重点科技项目(2020R02008)

作者简介:范宇(1993—),男,硕士,工程师,研究领域为航天电磁阀设计、流体仿真。

引用格式:范宇,任志彬,陈涛,等.消反峰电路对电磁阀性能的影响分析[J].火箭推进,2024,50(2):113-121.

FAN Y, REN Z B, CHEN T, et al. Analysis of the influence of anti-peak circuit on the performance of solenoid valves[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(2):113-121.

proposed from the viewpoint of anti-peak circuit, which provides reference for the design of solenoid valves system.

Keywords: anti-peak circuit; solenoid valves; Maxwell software; induced voltage; response time

0 引言

电磁阀作为控制流体快速通断的开关在航天领域应用十分广泛,电磁阀的性能优劣直接关系到动力系统是否工作正常,甚至关系到航天器飞行的成败,因此对电磁阀性能提升的研究十分必要,近年来很多学者对电磁阀开、关响应速度及电磁力进行了研究。

文献[1-5]利用 Maxwell 软件仿真研究了弹簧初始安装力、弹簧刚度、弹簧结构、隔磁垫片厚度、工作气隙、驱动电压等参数对电磁阀性能的影响,提出了电磁阀优化的方向。Zhang 等^[6]利用 Simulink 仿真和试验相结合的方法对一款两位三通电磁阀进行了研究,得出电磁阀的响应特性与动作频率无关,且打开响应时间随着进口压力增大而减小,关闭响应时间随着进口压力增大而增大的结论。

除了对机械结构的研究,部分专家还对电磁阀线圈和控制电路进行了研究。邹嘉等^[7]利用 AMESim 软件对比分析了电阻和电容对线圈电流和响应时间的影响,实现了电磁阀快速响应的目标。宋会玲等^[8]通过给直动电磁阀增加加速启动线圈,研制出打开响应时间为 2.8 ms、关闭时间小于 2 ms 的快速响应电磁阀。宋军等^[9]使用 MATLAB 软件对 PWM 驱动的高速电磁阀进行了仿真研究,得到了 PWM 驱动方式的特性,证明了利用 PWM 驱动可以在降低电磁阀打开响应时间的同时降低关闭响应时间,为优化电磁阀的响应特性提供了一个方案。文献[10-11]研究了在保护电路中增加稳压二极管后的感性元件性能,得出了稳压二极管相对于释放电阻来说同时具有降低反峰电压和加快电流释放的作用。

已有文献主要是从电磁阀本身的结构、线圈、材料、使用工况等方面研究了提升电磁阀自身性能的方法^[12-19],但在某些情况下从自身角度很难再进一步提高电磁阀的性能,因此,亟需寻找一种从外部提高电磁阀性能的方法。

电磁阀是一种感性元器件,尤其在断电时会产

生一个较大的感应电动势,可能会对继电器等元器件造成损伤^[10,20],因此往往需要在整个电路中并联一个消反峰电路来消除电磁阀感应电动势的影响。而消反峰电路对电磁阀的关闭有阻碍的作用,会减缓阀门关闭速度,因此研究消反峰电路对电磁阀性能产生的影响非常必要。

本文基于 Maxwell 软件,对某型航天姿控电磁阀及其消反峰电路进行了仿真研究,同时对比实测结果,证明仿真模型的有效性,为电磁铁的辅助设计提供一种方法。更进一步地,通过模拟不同消峰电阻下电磁阀的响应时间以及感应电动势,得到更优化的电磁阀控制系统,为电磁阀控制系统的优化提供参考。

1 电磁阀结构

本文研究的电磁阀结构如图 1 所示,是一种典型的轴流直动式电磁阀,主要由阀体、电磁铁外壳、弹簧、线圈、阀芯和阀座等组成。此种构型的阀是常闭式菌阀,断电状态下弹簧将阀芯压在阀座上起到密封的作用,通电后依靠逐渐增大的电磁力克服弹簧力,将阀芯从阀座上吸起,阀门打开,入口和出口相连通。断电后,电磁力逐渐降低,弹簧力又大于电磁力,于是将阀芯压回阀座,从而实现阀门的关闭^[21]。

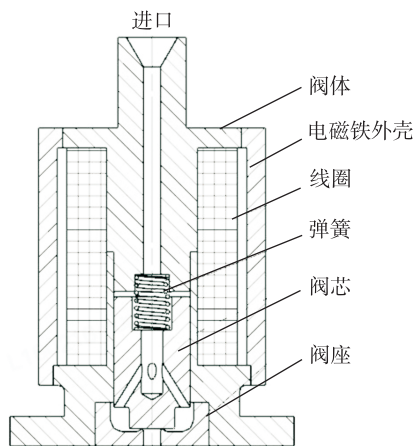


图 1 电磁阀结构

Fig. 1 The structure of a typical solenoid valve

2 仿真模型有效性验证

2.1 理论基础

本文采用 Maxwell 软件对电磁铁及电路进行仿真模拟, Maxwell 软件采用经典的麦克斯韦方程组^[22]作为控制方程,包括安培环路定理、法拉第电磁感应定律、高斯电通定理和高斯磁通定理,即

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

2.2 建立模型

由于二维模型占用资源少且能够较准确地模拟真实电磁场,因此本文采用二维结构来建立模型^[23-24]。同时由于电磁铁是轴对称的结构,在建模时仅建立半边模型,采用轴对称模型。在进行瞬态仿真时,需要额外建立一个空气域,用于包裹整个运动件和运动行程,如图 2 所示。

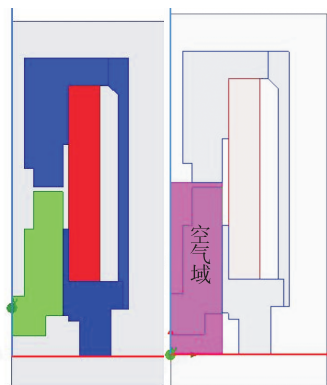


图 2 电磁阀二维结构图

Fig. 2 2D structural diagram of a solenoid valve

2.3 材料和边界条件设置

电磁铁部分所有的磁性材料都选用高饱和软磁合金 1J116,线圈材料选用铜,空气域和计算域都设置成真空。边界条件设置为气球边界条件。

2.4 运动和激励设置

将衔铁设置成运动件,行程为 0.75 mm,质量为 25 g,初始速度为 0,阻尼设置为 0,加载的力设置为

$(-26 - 40 - 5.54 \times \text{Position} \times 1\,000) \text{ N}$, 26 N 为弹簧初始安装力, 40 N 为推进剂介质力, 5.54 N/mm 为弹簧刚度,因为 Position 默认单位是 m,所以需要乘以 1 000 换算为 mm。

对于静态电磁仿真,需要把绕组的类型设置成电流绞线圈类型。而对于瞬态电磁仿真,为了添加外部电路,在激励的设置上需要把绕组设置成外部绞线圈类型^[25],线圈的安匝数设置成 1 200。

典型的电磁阀外部电路结构如图 3 所示^[8],主体电路由直流电源、继电器、电磁阀组成,其中电磁阀等效成一个纯电感和一个电阻。继电器由一个单独的电路控制,控制信号采用脉冲电压源。消反峰电路主要由二极管、消峰电阻、电压表等组成,与电磁铁并联连接。本文电磁铁的电阻设置为 25 Ω ,消峰电阻根据工况不同而调整,直流电源电压设置为 27 V,脉冲电压源的脉宽设置为 0.1 s,占空比设置为 0.5,保证电磁阀经过一个完整的开、关周期。

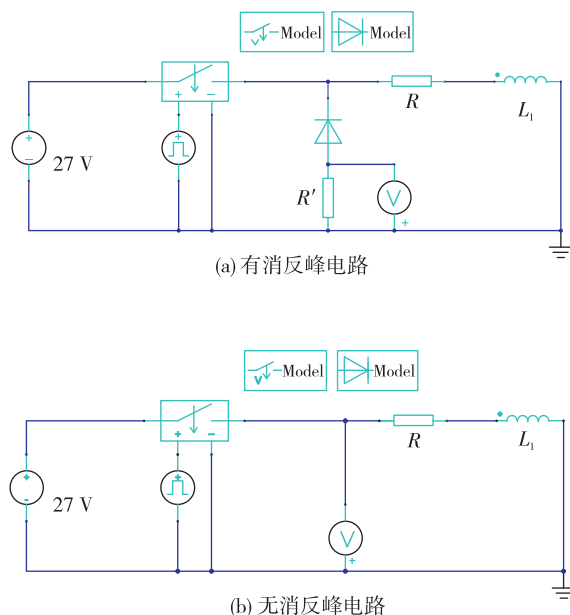


图 3 电磁阀外部电路

Fig. 3 External circuit of solenoid valves

2.5 网格和求解器设置

模型建完后, Maxwell 软件会自动划分一套网格,可以采用默认网格,也可根据实际情况调整局部网格的疏密。

求解器设置时,停止时间设置为 0.2 s,时间步长设置为 0.001 s,这样设置是为了保证采样频率至少达到 1 kHz 同时又能尽量减少计算的时长。

2.6 仿真结果分析

2.6.1 静磁场

为了验证仿真模型的准确性,首先在 0.75 mm 工作气隙下对电磁阀的静磁场进行仿真。计算完成后得到 0.75 mm 工作气隙下电磁力是 137 N,实测值是 128 N 左右,仿真用的软磁合金 $B-H$ 曲线和实际有些差异,导致电磁力仿真有些差异。仿真得到的磁力线和磁感应强度如图 4 所示,符合电磁学基本规律。

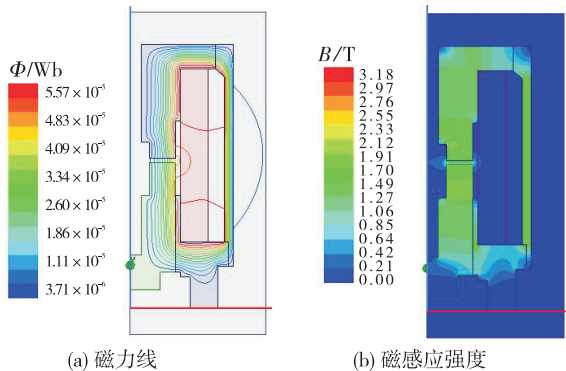


图 4 仿真的磁场

Fig.4 Simulated magnetic field

2.6.2 瞬态磁场

在消峰电阻为 20 Ω 的状态下,对电磁阀进行了瞬态仿真计算,其他条件的设置如 2.4 节所述。通过瞬态仿真,得到电磁铁的动态特性,瞬态的电流曲线和阀芯位置曲线见图 5,电磁铁产生的反电动势与感应电压(电压表测得)见图 6。感应电压测的是消峰电阻两端的电压,反电动势是电磁铁纯电感产生的电动势,如图 3(a)所示。对比实测和仿真数据见表 1 和表 2,可以看出仿真的吸合响应时间为 18 ms,释放触动时间为 41 ms,释放响应时间为 44 ms;实测的吸合响应时间为 19.6 ms,释放触动时间为 32 ~ 40 ms,释放响应时间为 36 ~ 45 ms。电磁阀关闭后仿真得到的最大感应电压是 16.7 V,实测值是 16 V。由此可以看出仿真结果和实测数据吻合较好,可以证明仿真模型的合理性。

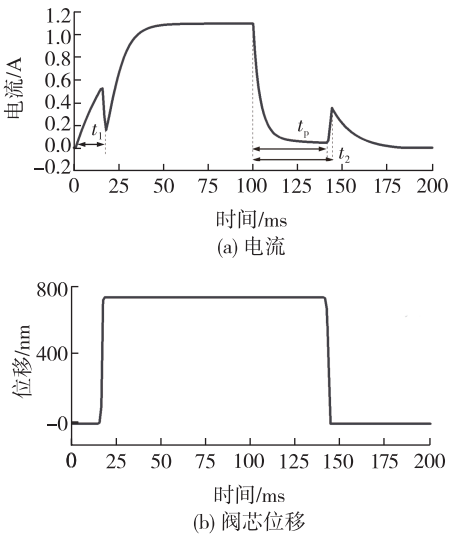


图 5 电磁铁瞬态响应曲线

Fig.5 Transient response curves of solenoid valves

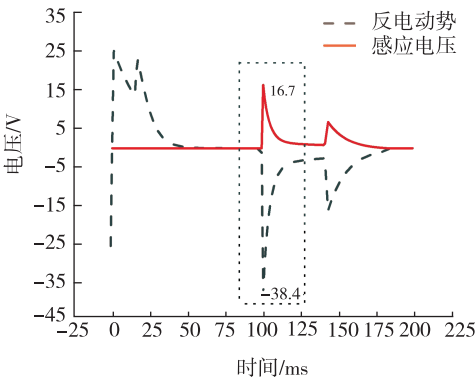


图 6 20 Ω 消峰电阻下仿真的电动势

Fig.6 Simulated induced electromotance at 20 Ω anti-peak resistance

表 1 20 Ω 响应时间数据

Tab.1 Response time data at 20 Ω

类型	消峰	电源	吸合响应	释放触动	释放响应
	电阻/Ω	电压/V	时间/ms	时间/ms	时间/ms
实测	20	27	19.6	32 ~ 40	36 ~ 45
仿真	20	27	18.0	41	44

表 2 20 Ω 感应电动势数据

Tab.2 Induced electromotance at 20 Ω

类型	消峰	磁势/kA	最大感应	最大反电
	电阻/Ω		电压/V	动势/V
实测	20	1.2	16.0	-
仿真	20	1.2	16.7	-38.4

3 消反峰电路影响分析

3.1 消反峰电路原理

本文采用的消反峰电路如图 3(a)所示,主要由一个消峰电阻和一个二极管组成,与电磁阀并联连接。通电状态下,由于二极管的单向导通性能,电流只会通过电磁阀一路。断电后,由于电磁阀电感的存在,电磁阀两端会产生感应电动势来抵抗磁通量的减少,于是在由电磁阀、二极管和消峰电阻组成的回路中就会产生感应电流。由于电感元件电流不能发生突变,因此在断电瞬间前后电流是相等的。基于电流不变原理和电磁感应定律可以得到^[7,9-10]

$$L \frac{di_1}{dt} + i_1 (R' + R) = 0 \tag{2}$$

式中: L 为电磁铁电感; i_1 为断电前电流; R' 为消峰电阻; R 为线圈电阻。

式(2)忽略二极管的电阻,则此方程主要由前后两项组成,前一项是电感产生的电动势,后一项是电路中电阻的分压,两项相加为 0。式(2)用于后续分析消反峰电路对电磁阀的影响。

3.2 消反峰电路对响应时间的影响

3.2.1 消峰电阻对电磁阀响应时间的影响

为了获得消峰电阻对电磁阀响应时间的影响,利用 Maxwell 软件对不同消峰电阻(0、20、30、40、50、60、70、100 Ω)下的电磁阀系统进行仿真,得到在不同消峰电阻下电磁阀的电流曲线如图 7 所示,对应的吸合响应时间、释放触动时间和释放响应时间见表 3。

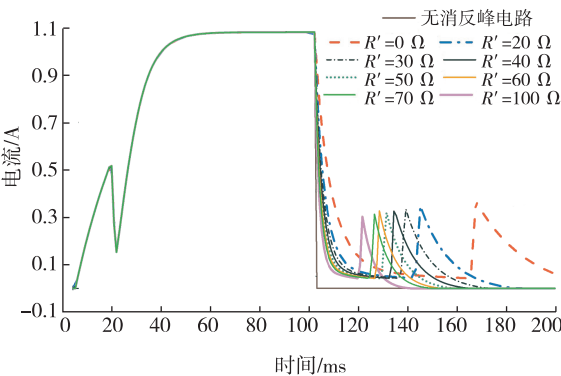


图 7 不同消反峰电路下的电流曲线
Fig. 7 Current curves at different anti-peak circuits

表 3 不同消反峰电路下响应时间统计

Tab. 3 Response time at different anti-peak circuits			
消峰 电阻/ Ω	吸合响应 时间/ms	释放触动 时间/ms	释放响应 时间/ms
0	18	64	67
20	18	41	44
30	18	35	38
40	18	31	33
50	18	27	29
60	18	25	27
70	18	23	25
100	18	18	20
-	18	-	2

从图 7 中可以看出,消反峰电路对于电磁阀的吸合响应时间无影响。而随着消峰电阻变大,释放触动时间和释放响应时间变小,而对释放运动时间(释放响应时间减去释放触动时间)几乎无影响。从仿真数据可以得出,消峰电阻和释放触动时间及释放响应时间成反比关系。

由式(2)可知,在稳态电流不变的情况下,随着消峰电阻 R' 增大,右端项 $i_1 (R' + R)$,即负载分压越大,左端项 $L \frac{di_1}{dt}$,即感应电动势的绝对值越大,而电感 L 不变,因此电流随时间的变化越快,即释放响应时间和释放触动时间越小。

3.2.2 无消反峰电路

将消反峰电路去掉,对电磁阀进行仿真,得到无消反峰电路下的电流曲线,如图 7 所示。可以看出,断电后无消反峰电路的电流曲线形貌与有消反峰电路时完全不同。在无消反峰电路的条件下,断电后电流曲线呈现出负阶跃形貌,释放响应时间极短,大约为 2 ms,并且无明显的释放触动点。

3.3 消反峰电路对感应电动势的影响

3.3.1 消峰电阻对感应电动势的影响

消反峰电路的主要作用是对感应电动势峰值的抑制,因此,为了研究影响感应电动势峰值的因素,对不同消峰电阻下电磁阀关闭时产生的感应电动势进行了仿真,如图 8 所示。图 8(a)是电磁铁线圈纯电感产生的反电动势,图 8(b)是消峰电阻两端

的感应电压,也是对外部电路产生最直接影响的电压。数据统计见表 4。

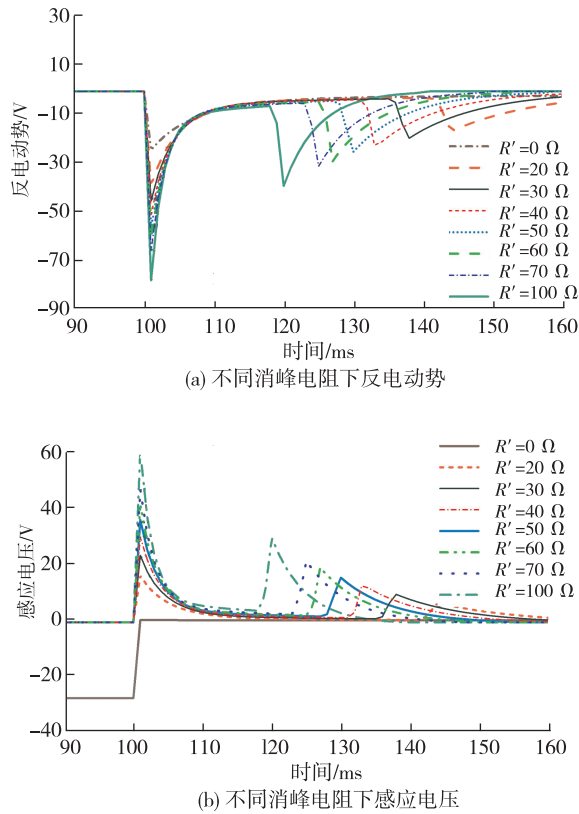


图 8 不同消峰电阻下的感应电动势
Fig. 8 Induced electromotance at different anti-peak resistances

表 4 不同消峰电路下感应电动势统计
Tab. 4 Data of induced electromotance at different anti-peak circuits

电源电压/V	消峰电阻/ Ω	反电动势/V	感应电压/V
27	0	-24.0	0.0
27	20	-38.4	16.7
27	30	-44.6	23.9
27	40	-50.4	30.5
27	50	-55.6	36.6
27	60	-60.5	42.2
27	70	-65.1	47.4
27	100	-77.0	61.0

从表 4 可以看出,反电动势的绝对值和感应电压都是随着消峰电阻的增大而增大,呈现出线性正相关特性。

从消反峰电路的控制方程式(2)中可以解释这个现象,同样地,电流 i_1 不变,随着消峰电阻 R' 的增大,整个负载的分压 $i_1(R' + R)$ 就会增大,即感应电压增大,反电动势的绝对值增大。

3.3.2 无消反峰电路

图 9 是无消反峰电路下对电磁阀进行仿真得到的反电动势和感应电压,对应的峰值分别为 -504 V 和 504 V,由此可以看出消反峰电路对消除感应电动势峰值有着十分显著的作用。当没有消反峰电路时,由电磁阀产生的巨大感应电动势对继电器、电源及其他电器元件都会有潜在危害。

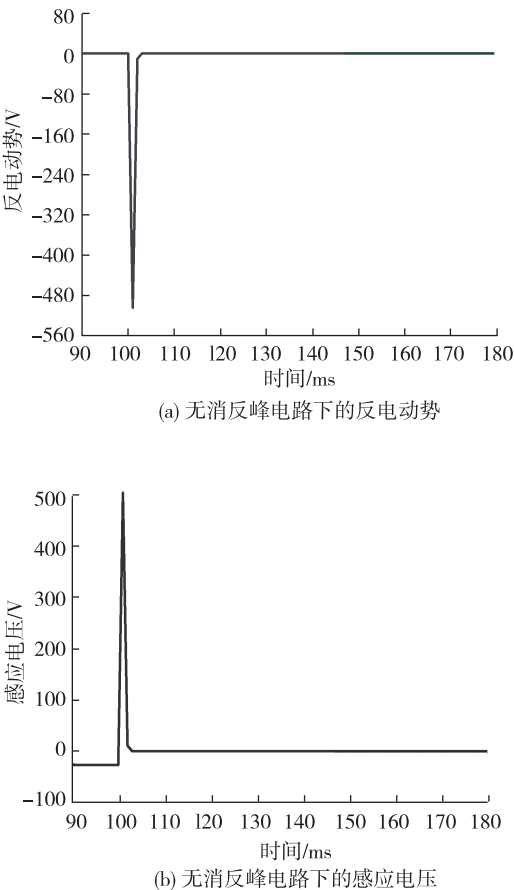


图 9 无消反峰电路下的感应电动势
Fig. 9 Induced electromotance without anti-peak circuit

3.4 优化设计与试验验证

在本文所述的案例中,经过仿真得到图 10 所示的感应电压和释放响应时间的关系。从图 10 中可以看出:感应电压与消峰电阻呈现出线性正相关特

征,而释放响应时间与消峰电阻成反比。当消峰电阻大于 $50\ \Omega$ 时,随着消峰电阻的增加释放响应时间降低的幅度较小,同时感应电压基本保持原幅度增长,因此 $50\ \Omega$ 对于本电磁阀来说是一个转折点,综合考虑,最终选择 $50\ \Omega$ 的消峰电阻做为本电磁阀系统的设计状态。

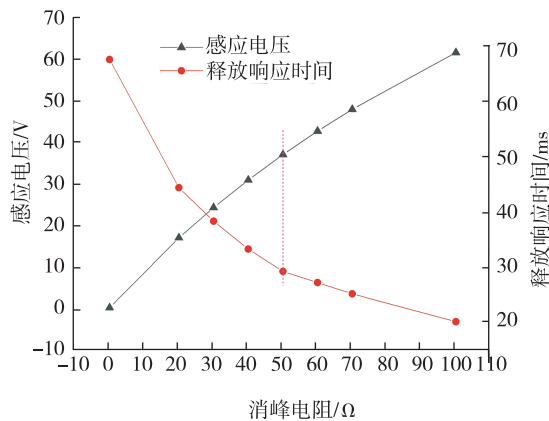


图 10 感应电压和释放响应时间对比
Fig. 10 Comparison of induced voltage and release response time

根据上述结果投产电磁阀零部件和控制系统,装配完成后进行响应试验,如图 11 所示。进口介质压力取 $2\ \text{MPa}$,电源电压取 $27\ \text{V}$,消峰电阻取 $50\ \Omega$,得到的电磁阀响应时间数据和感应电压如表 5 所示。实测的吸合响应时间和感应电压与仿真的结果吻合较好,释放响应时间和释放触动时间比仿真结果偏小,这是由于仿真用的软磁合金 $B-H$ 曲线与热处理后实际软磁合金 $B-H$ 曲线有一些差异。

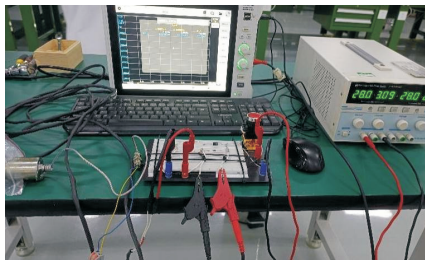


图 11 试验装置
Fig. 11 Test setup

表 5 优化设计后电磁阀数据

Tab. 5 Data of solenoid valves after optimization

序号	电源 电压/V	消峰电 阻/ Ω	吸合响应 时间/ms	释放触动 时间/ms	释放响应 时间/ms	感应电 压/V
1			19.1	21.5	25.9	39.0
2			17.0	21.0	25.0	39.0
3			17.0	23.1	26.4	39.0
4	27	50	17.6	21.5	25.6	40.0
5			19.1	19.8	23.9	42.0
6			19.1	20.0	24.1	40.0
7			16.9	22.0	25.9	40.0
仿真	27	50	18.0	27.0	29.0	36.6

4 结论

本文通过 Maxwell 软件对电磁阀及消反峰电路进行了仿真,研究了消反峰电路对电磁阀性能的影响,为进一步优化电磁阀系统提供了方案。通过分析,本文得出以下结论。

1) 通过对比电磁阀仿真和试验的结果,可以得出利用 Maxwell 软件对电磁阀及消反峰电路的仿真具有较强的可行性,仿真结果可用于辅助电磁阀的设计。

2) 消反峰电路对电磁阀释放响应时间有显著影响。消峰电阻与释放响应时间成反比,而对吸合响应时间无影响。

3) 消反峰电路对电磁阀感应电动势有显著影响。相对于无消反峰电路时产生的较大的感应电动势,消反峰电路的存在可以显著降低感应电动势的峰值,并且消峰电阻与感应电动势成正相关。

4) 当电磁阀本身设计受限时,可以通过合理设计消反峰电路来优化电磁阀系统,随着消峰电阻增加,释放响应时间曲线和感应电压曲线会出现一个拐点,电阻大于该值后释放响应时间降低的幅度减小,而此时的感应电压仍保持原幅度增长。因此在满足系统要求的前提下可以考虑采用该点的电阻值作为设计点,以期得到最大的收益。

参考文献

[1] 庞末红, 冯相霖. 基于 Ansoft Maxwell 的电磁阀响应

- 性能优化设计[J]. 导弹与航天运载技术, 2021(4): 76-80.
- PANG M H, FENG X L. The optimal design of the solenoid valve's response based on ansoft Maxwell[J]. Missiles and Space Vehicles, 2021(4): 76-80.
- [2] 张功晖, 黎志航, 周志鸿. 基于 Maxwell 方程的电磁阀开启过程动态特性仿真研究[J]. 液压气动与密封, 2010, 30(11): 22-25.
- ZHANG G H, LI Z H, ZHOU Z H. Simulation research of dynamic character of solenoid valve's opening process based on Maxwell equation[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2010, 30(11): 22-25.
- [3] 李京骏, 郭世永, 王翔宇. 基于 Maxwell 电磁阀的开关动态响应研究[J]. 液压与气动, 2021, 45(4): 123-129.
- LI J J, GUO S Y, WANG X Y. Dynamic switching response of solenoid valve based on Maxwell[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2021, 45(4): 123-129.
- [4] 官长斌, 毛晓芳, 王平, 等. 基于能量回收原理的高速电磁阀仿真与试验研究[J]. 推进技术, 2020, 41(3): 668-674.
- GUAN C B, MAO X F, WANG P, et al. Simulation and experiment on high-speed solenoid valve based on energy recovery principle[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(3): 668-674.
- [5] VAUGHAN N D, GAMBLE J B. The modeling and simulation of a proportional solenoid valve[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1996, 118(1): 120-125.
- [6] ZHANG X, LU Y H, LI Y, et al. Numerical calculation and experimental study on response characteristics of pneumatic solenoid valves [J]. Measurement and Control, 2019, 52(9/10): 1382-1393.
- [7] 邹嘉, 刘飞, 朱建国, 等. 基于阻容元件的电磁阀快响应技术[J]. 火箭推进, 2019, 45(4): 58-62.
- ZOU J, LIU F, ZHU J G, et al. Fast-response solenoid valve based on resistance and capacitance[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2019, 45(4): 58-62.
- [8] 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.
- [9] 宋军, 黄建平, 李孝禄, 等. 柴油机高速电磁阀驱动特性仿真分析[J]. 车用发动机, 2005(5): 48-51.
- SONG J, HUANG J P, LI X L, et al. Simulative analysis for drive properties of high-speed solenoid valve in diesel engines[J]. Vehicle Engine, 2005(5): 48-51.
- [10] 沈公槐. 改进电磁阀动态特性的一种方法[J]. 航天控制, 2001, 19(3): 75-80.
- SHEN G H. A method improving the dynamic characteristic of solenoid valve [J]. Aerospace Control, 2001, 19(3): 75-80.
- [11] 余力凡, 马红梅. 运载火箭控制系统电磁继电器消反峰电路分析与 MULTISIM 仿真[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(11): 55-57.
- YU L F, MA H M. Analysis and MULTISIM simulation of electromagnetic relay anti-PIV circuit in launch vehicle control system [J]. Computer Measurement & Control, 2017, 25(11): 55-57.
- [12] 辛瑞昊, 熊庆辉, 王浚哲, 等. 基于 Maxwell 的电磁阀仿真与分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2015, 38(2): 113-116.
- XIN R H, XIONG Q H, WANG J Z, et al. Simulation and analysis of solenoid valves based on Maxwell [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 38(2): 113-116.
- [13] ZHANG J Y, LIU P, FAN L Y, et al. Analysis on dynamic response characteristics of high-speed solenoid valve for electronic control fuel injection system [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 2803545.
- [14] LIU P, FAN L Y, HAYAT Q, et al. Research on key factors and their interaction effects of electromagnetic force of high-speed solenoid valve [J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 567242.
- [15] 吴祥伟, 王龙飞, 申慧敏. 超洁净电磁阀动态特性仿真与优化[J]. 液压与气动, 2022, 46(5): 46-52.
- WU X W, WANG L F, SHEN H M. Simulation and optimization of dynamic characteristics of ultra-clean solenoid valve [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2022, 46(5): 46-52.
- [16] 周小伟, 蔡斌, 陈建军, 等. 基于 ANSYS-Maxwell 的电磁阀电磁力特性影响因素分析[J]. 机电工程技术,

- 2016, 45(8): 55-58.
- ZHOU X W, CAI B, CHEN J J, et al. Electromagnetic force effect on the valve characteristic factor based on ANSYS-Maxwell[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2016, 45(8): 55-58.
- [17] 李英梅. 快速响应电磁阀的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- LI Y M. Development of fast response solenoid valve[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [18] 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 M H, YANG L K, CHEN C F. Simulation research of solenoid valve's characteristic based on Maxwell equation [J]. Missiles and Space Vehicles, 2015(6): 78-83.
- [19] 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.
- [20] 华兴潮. 消除电感性器件反峰压电路探析[J]. 聊城师院学报(自然科学版), 1998, 11(1): 47-49.
- [21] 徐登伟, 张萍, 沙超, 等. 电磁阀阀体断裂故障分析及结构改进[J]. 火箭推进, 2023, 49(3): 90-95.
- XU D W, ZHANG P, SHA C, et al. Failure analysis and structure improvement of valve body fracture for solenoid valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2023, 49(3): 90-95.
- [22] ZHENG Y H, ZHOU Z J, DAI R S. Simulation and optimisation design of the solenoid valve[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(23): 8701-8705.
- [23] 刘国强, 赵凌云, 蒋继娅. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [24] 田捍卫, 胡兆华, 李志鹏, 等. 基于 Maxwell 的微型低功耗电磁铁仿真分析[J]. 液压气动与密封, 2023, 43(3): 74-75.
- TIAN H W, HU Z H, LI Z P, et al. Simulation analysis of micro low power consumption electromagnet based on Maxwell[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2023, 43(3): 74-75.
- [25] 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.