

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413278

基于温度反馈的高速开关阀变电压驱动控制方法研究*

田祖织, 凡榕瑞, 郭阳阳, 徐纯洁, 谢方伟

(中国矿业大学机电工程学院 徐州 221116)

摘要:良好的动态特性是高速开关阀流量精确控制的关键,然而现有的高速开关阀驱动控制策略忽略了变电压激励产生的温升对高速开关阀动态响应特性的影响。为了改善高速开关阀的动态响应特性并提高其工作可靠性,论文提出了一种基于温度反馈的高速开关阀变电压驱动控制方法。首先,基于 Maxwell 和 Thermal 建立了高速开关阀电磁热耦合仿真模型,分析了线圈匝数、驱动电压和环境温度对线圈温升的影响规律,结果表明增大驱动电压会引起线圈温升加剧;其次,进一步探究了温度变化对高速开关阀动态响应特性的影响规律,结果表明随着温度升高,开启滞后时间增加,关闭滞后时间减小,基于此提出了一种考虑温度反馈的变电压驱动控制策略,并在 Simpler 中搭建仿真模型,验证了控制策略的有效性;最后,搭建了高速开关阀性能测试台,对比分析了单电压控制和变电压控制策略的控制效果,实验验证了所提出的变电压控制方法的有效性。测试结果表明:相比于传统的单电压控制,基于温度反馈的变电压控制策略下,高速开关阀的关闭滞后时间缩短了 5.55 ms,线圈的稳态温度降低了 24.5℃,有效改善了高速开关阀的动态响应特性,并提高了工作可靠性。

关键词: 高速开关阀;电磁热耦合;温度反馈;变电压驱动控制;动态响应

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.45

Research on variable voltage drive control method for high-speed on/off valve considering temperature feedback

Tian Zuzhi, Fan Rongrui, Guo Yangyang, Xu Chunjie, Xie Fangwei

(School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Good dynamic characteristics are the key to accurate flow control of high speed on/off valve. However, the existing drive control strategy of high speed on/off valve ignores the influence of temperature rise generated by variable voltage excitation on the dynamic response characteristics of high speed on/off valve. In order to improve the dynamic response and improve operational reliability, a variable voltage drive control method based on temperature feedback is proposed in this paper. Firstly, the electromagnetic thermal coupling simulation model of high-speed on/off valve is established based on Maxwell and thermal, and the influence of coil turns, driving voltage and ambient temperature on coil temperature rise are analyzed. The results show that an increase in drive voltage exacerbates coil temperature rise. Secondly, the influence of temperature change on the dynamic response characteristics of high speed on/off valve is further explored. The results show that with the increase of temperature, the opening delay time increases, while the closing delay time decreases. Based on this, a variable voltage drive control strategy considering temperature feedback is proposed, and a simulation model is built in Simpler to verify the effectiveness of the control strategy. Finally, the performance test bench of high speed on/off valve is set up, and the control effect of single voltage control and variable voltage control strategy are compared through experimental analysis. The test results show that, compared to traditional single-voltage control, the proposed variable-voltage control strategy based on temperature feedback reduces the closing lag time of the high-speed on/off valve by 5.55 ms and lowers the steady-state coil temperature by 24.5℃. These improvements effectively improve the dynamic response characteristics and operational reliability of the high-speed on/off valve.

收稿日期: 2024-09-13 Received Date: 2024-09-13

* 基金项目: 国家自然科学基金(52375069)、国家重点研发计划(2022YFB3403005)项目资助

Keywords: high-speed on/off valve; electromagnetic thermal coupling; temperature feedback; variable voltage drive control; dynamic response

0 引言

电液系统在工业生产中起着至关重要的作用,液压阀是实现电液系统控制功能的关键元件,其性能直接影响设备的系统特性与工作效率^[1-3]。随着工业智能化发展,新型数字液压技术迅速发展,高速开关阀是数字液压系统的核心控制元件,相比于传统电液伺服阀和比例阀,其采用高频脉冲信号直接驱动阀芯的启闭,能有效避免零漂、泄露等问题,具有体积小、响应速度快、抗污染能力强等优点^[4-7]。目前,高速开关阀已被广泛运用于航空航天、国防军工等众多工业领域,是数字液压领域的研究热点^[8-11]。

良好的动态特性是高速开关阀流量精确控制的关键。为提高高速开关阀的动态响应,学者在其电-机械转换器、阀体结构设计与优化方面开展了大量研究工作。Wu等^[12]设计一种空心柱塞式螺线管结构,利用多目标粒子群算法对结构参数进行参数优化,提高了高速开关阀的响应速度,优化了尺寸参数;唐兵等^[13]提出了一种无弹簧复位式双电磁铁驱动先导式大流量高速开关阀,可显著降低高速开关阀开启和关闭的响应时间;Kong等^[14]采用并联线圈方式,大大降低了高速开关阀的响应时间;陈淑梅等^[15-16]建立了高速开关阀的电-磁-固耦合仿真模型,仿真分析了影响频响的关键因素,得到了激励电压、线圈匝数、衔铁长度以及弹簧刚度的优化方法;并设计了一种多狭缝衔铁结构,提高响应的同时降低了高速开关阀的涡流损耗;李雨铮等^[17]在对高速开关阀液动力进行了分析和补偿的基础上,通过优化阀口流道结构显著缩短了启闭时间。

高速开关阀的电-机械转换器和阀体结构优化与创新皆处于产品设计初期阶段,针对研制完毕的高速开关阀,优化控制器及驱动控制策略是改善其动态特性的最佳途径。Yang等^[18]提出了一种多级电压控制与双滑模控制结合的方法,提高了高速开关阀在变工况下的动态响应性能;刘钰栋^[19]在双电压驱动控制的基础上提出了电容储能变电压控制策略,高速开关阀的启闭响应时间缩短了57.7%;钟麒等^[20]提出了一种基于电流反馈的高速开关阀控制策略,能够确保电流始终处于能够维持高速开关阀快速启闭的最优化状态,开启和关闭时间缩短约30%;Zhong等^[21-22]考虑电压和温升特性提出了一种高速开关阀预激励控制算法,显著缩短了高速开关阀开启和关闭延迟时间、提高了其动态响应特性。

控制策略优化与创新为提高成熟高速开关阀产品响应时间、改善其动态特性提供了良好思路,然而,现有驱

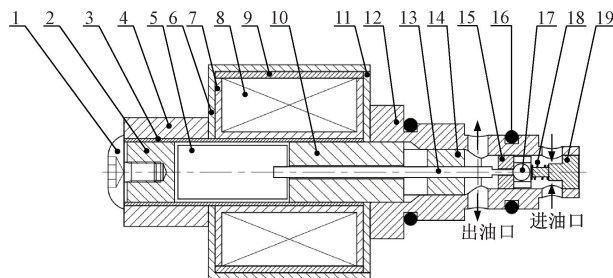
动控制策略更多关注如何进一步缩短高速开关阀启闭响应时间,一定程度上忽略了高电压激励产生的温升对高速开关阀流量输出稳定性和性能可靠性的影响。高电压激励导致线圈电流过大,快速温升,长时间高温运行,会影响工作线圈的阻值和导磁材料的性能,从而迟滞了高速开关阀的响应^[23-24];Zhao等^[25-26]研究发现驱动电压提高会显著增加线圈电流,迅速产生大量热量,导致开关阀温度升高,机械效率降低,进一步降低其使用寿命和工作可靠性。

为此,论文提出了一种基于温度反馈的高速开关阀变电压驱动控制方法,可根据温度反馈实时调整驱动电压,在有效改善高速开关阀的动态响应特性的基础上,兼顾温度效应、降低发热功耗,进一步提高高速开关阀的工作可靠性。

1 高速开关阀电磁热耦合模型

1.1 高速开关阀结构

高速开关阀结构如图1所示,主要包括底座、复位弹簧、球阀、球阀限位块、推杆、线圈等。当线圈无电流激励时,球阀受向左的弹簧推力和液压力作用与限位块紧密贴合,此时进、出油口回路断开,高速开关阀处于关闭状态;当线圈中有电流激励时,动铁芯受到向右的电磁力,当电磁力大于弹簧推力和液压力之和时,推杆推动球阀向右运动,此时进、出油口连通,高速开关阀处于开启状态。高速开关阀的输出流量近似与脉宽调制(pulse width modulation, PWM)信号高电平占比时间成正比,高电平占比越高,阀的流量输出越大,高电平所占比例越低,阀的流量输出越小。



1-锁紧螺钉;2-动铁芯盖板;3-套筒;4-压紧环;5-动铁芯;6-壳体;7-线圈骨架;8-线圈;9-导热环;10-静铁芯;11-下磁轭;12-阀座;13-推杆;14-推杆定位环;15-球阀限位块;16-密封圈;17-球阀;18-复位弹簧;19-底座

图1 高速开关阀结构

Fig. 1 Structure of high-speed on/off valve

1.2 电路模型

高速开关阀的电路模型通常可以用简单的电阻、电感电路表示,其电路原理图如图2所示。由于线圈本身的电感特性,线圈通电或者失电时,电流经过一定的滞后时间才能上升到开启电流,或者下降至关闭电流。因此,实际应用中高速开关阀线圈电路可能处于3种工作模式:零输入响应模式、零状态响应模式和全响应模式。

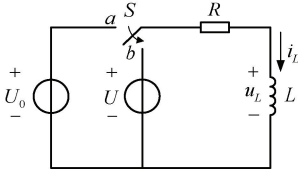


图2 高速开关阀电路原理

Fig. 2 Circuit principle of high-speed on/off valve

高速开关阀线圈的全响应电流公式可以表示为:

$$i_L(t) = \frac{U}{R} + \left(I_0 - \frac{U}{R} \right) e^{-\frac{R}{L}t} = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (1)$$

式中: I_0 为线圈的初始电流; $i_L(t)$ 为线圈的瞬态电流; U 为激励电压; L 为线圈的等效电感; R 为线圈的等效电阻。

零输入响应电流公式可以表示为:

$$i_{Ls}(t) = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} \quad (2)$$

零状态响应电流公式可以表示为:

$$i_{Ls}(t) = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (3)$$

1.3 磁路模型

高速开关阀的等效磁路模型如图3所示,遵循阻力最小原则,完整的主磁通路径为:外壳-上磁轭-上磁轭套筒间气隙-套筒-套筒动铁芯间气隙-动铁芯-工作气隙-静铁芯-静铁芯套筒间气隙-套筒-套筒下磁轭间气隙-下磁轭-下磁轭外壳间气隙-外壳;副磁通路径为:外壳-上磁轭-上磁轭套筒间气隙-套筒-套筒下磁轭间气隙-下磁轭-下磁轭外壳间气隙-外壳。

各磁路支路的等效磁阻如式(4)所示。

$$\begin{aligned} R'_{m1} &= R_{m1} + R_{m2} + R_{m9} + R_{g1} + R_{g5} + R_{g6} \approx R_{m1} + R_{m2} + R_{m9} \\ R'_{m2} &= R_{m3} \\ R'_{m3} &= 2R_{m4} + R_{m5} + R_{m6} + R_{m7} + R_{m8} + R_{g2} + R_{g3} + R_{g4} \approx R_{m5} + R_{m6} + R_{m7} + R_{m8} + R_{g3} + R_{g4} \end{aligned} \quad (4)$$

高速开关阀磁路总磁阻为:

$$R_m = R'_{m1} + \frac{R'_{m2} R'_{m3}}{R'_{m2} + R'_{m3}} \quad (5)$$

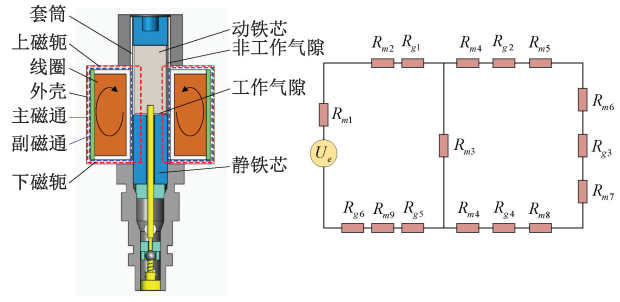


图3 高速开关阀磁路模型

Fig. 3 Magnetic circuit model of high-speed on/off valve

可得通电线圈的电感为:

$$L = \frac{N\phi_1}{I} \quad (6)$$

式中: ϕ_1 为磁路支路的磁通。

1.4 温度场模型

一般而言,温度升高,线圈电阻值增加。由于高速开关阀驱动电源为直流恒压源,在其他参数不变的情况下,随着线圈温度升高,其电流减小、动铁芯处电磁力削弱,最终影响高速开关阀的开关特性。

根据电阻的定义可知,当初始温度为 20°C 时,线圈电阻与温度之间的关系可表示为:

$$R_\theta = \rho_\theta \frac{l}{s} = \rho_{20} (1 + \alpha \cdot \Delta\theta) \frac{l}{s} = \rho_{20} (1 + \alpha(\theta - 20)) \frac{l}{s} \quad (7)$$

式中: R_θ 为 $\theta^\circ\text{C}$ 时的电阻; l 为导线长度; s 为导线横截面积; ρ_θ 为 $\theta^\circ\text{C}$ 时的电阻率; α 为电阻率温度系数。

电阻率温度系数 α 表示材料的电阻随温度变化的敏感度。它的定义为单位温度变化时,电阻变化的比例。温度系数如式(8)所示。

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{dT} \quad (8)$$

其中, R_0 是基准温度 T_0 下的电阻, dR/dT 是电阻随温度的变化率,对于金属材料,温度系数 α 是正值,通常在 $0.003 \sim 0.006$ 之间。

驱动电压与线圈匝数不变时,磁势与温度的关系可以表示为:

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

将式(9)代入式(7)可得电磁力与温度的关系为:

$$F_m = \frac{U^2 N^2 \mu_0 S_\delta s^2}{2\delta^2 \rho_{20}^2 (1 + \alpha(\theta - 20))^2 l^2} \quad (10)$$

式中: N 为线圈匝数; S_δ 为工作气隙截面积; s 为导线横截面积; δ 为动铁芯的工作行程; l 为导线长度。

1.5 电磁热耦合模型

1) 电磁热耦合仿真原理

研究采用 Ansys Workbench 下的 Thermal 模块进行温度场仿真分析,Maxwell 与 Thermal 的电磁热耦合仿真原理如图 4 所示。

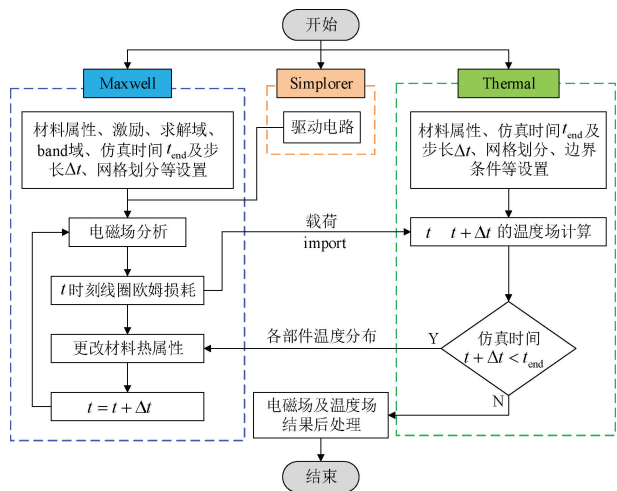


图 4 耦合仿真原理
Fig. 4 Schematic of coupling simulation

首先,设定材料属性、仿真时间 t_{end} 、时间步长 Δt 、网格划分、边界条件等;其次,电磁场分析得到 t 时刻线圈的欧姆损耗,将其作为温度场热源导入 Thermal;再次,温度场分析得到 $t+\Delta t$ 时刻高速开关阀各部件的温度分布情况,判断 $t+\Delta t$ 是否达到设定的最大仿真时间 t_{end} ,若未达到,则根据各部件的温度分布情况在 Maxwell 中更新材料属性,同时令仿真时间更新为 $t=t+\Delta t$,开展电磁场分析。循环上述过程直至 $t=t_{end}$,仿真结束,保存电磁场及温度场数据。

2) 电磁热耦合仿真模型建立

高速开关阀在空间上是轴对称结构,为方便后续施加载荷及边界条件,减少仿真计算量,对高速开关阀模型进行简化,建立 1/4 扇区圆柱模型。高速开关阀工作过程中热载荷主要为通电线圈产生的焦耳热,温度场中将其作为高速开关阀的内部热源,线圈的功率损耗主要以欧姆损耗的形式体现。高速开关阀 1/4 模型的网格划分与欧姆损耗如图 5 所示。

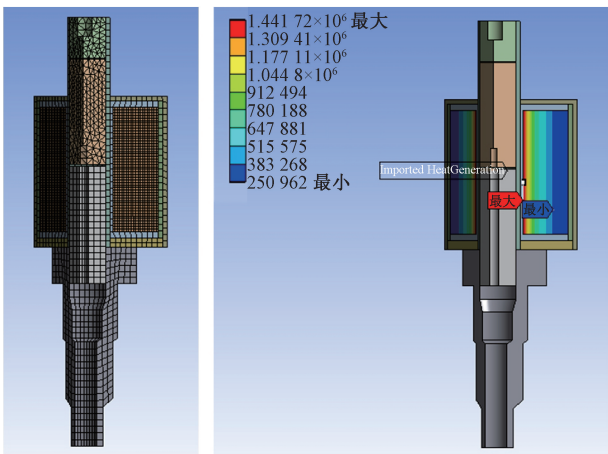


图 5 网格划分与欧姆损耗
Fig. 5 Temperature field meshing and Ohm loss

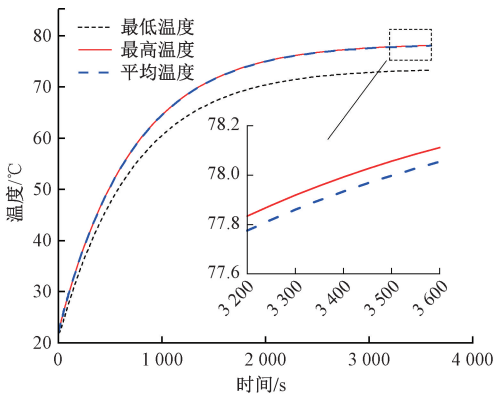


图 6 温度随时间变化曲线
Fig. 6 Temperature curve of with time

2 高速开关阀温度特性分析

2.1 高速开关阀温度场仿真

基于 1.5 节模型开展仿真分析,设定环境温度 22°C ,线圈匝数 1 400,驱动电压 24 V 单电压,占空比 50%,频率 10 Hz,仿真得到高速开关阀工作时间 1 h 的温度变化曲线和温度分布云图,分别如图 6、7 所示。

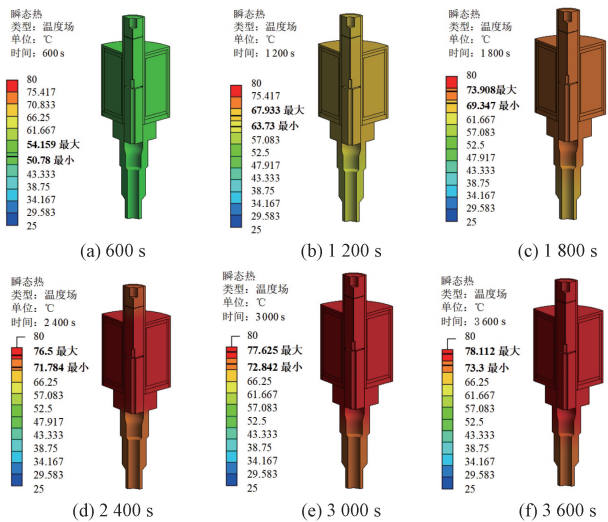


图 7 不同时刻温度云图
Fig. 7 Temperature cloud image of at different time

根据图 6 和 7 可以看出,0~1 000 s 期间内高速开关阀阀体温度快速升高了至 42.7℃,1 000~2 000 s 期间内阀体温度继续缓慢升高 10.5℃,1 h 后平均温度达到 78.3℃并逐步趋于稳定。由于高速开关阀尺寸较小内部结构紧密,除阀座外其他部件温度相差不大,因此平均温度曲线与最高温度曲线基本重合。由于阀座远离线圈且内表面与液压油接触,其对流散热系数高,故同一时刻阀座温度显著低于其他部件。通电线圈是高速开关阀的唯一内部热源,热量皆由其产生并向四周传递扩散,最高温度位置处于线圈内部,容易导致高速开关阀线圈处发生过热损坏。

图 8 为高速开关阀工作 1 h 后各部件的温度分布云图,各部件温升如表 1 所示。根据图 8 可知,高速开关阀温度分布较为均匀,总体温升在 56℃左右。阀体外表面与空气接触,阀座内表面与油液接触,散热能力优于前者,故阀座内表面温升显著低于外壳。线圈常温阻值为 30 Ω,温升 56℃后电阻增加至 37.39 Ω,阻值增加 24.6%,线圈电流由 0.8 A 降至 0.64 A,降低 20%,在一定程度上影响了高速开关阀动态响应特性。因此有必要进一步分析驱动电压、线圈匝数、环境温度等参数对温度分布的影响,为结构优化、控制策略研究提供理论基础。

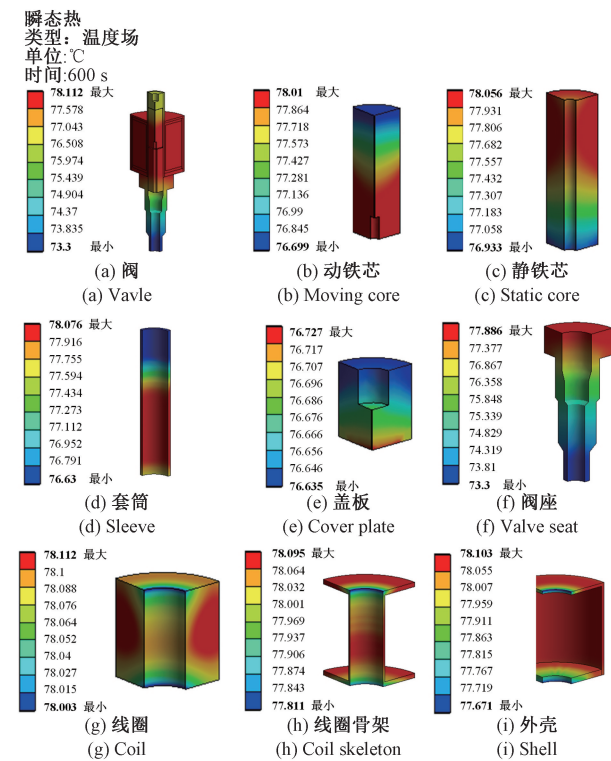


图 8 各部件温度分布云图

表 1 各部件温升分布
Table 1 Temperature rise distribution of each component (℃)

部件	最大温升	最小温升	平均温升
动铁芯	56.01	54.70	55.57
静铁芯	56.05	54.93	55.72
套筒	56.07	54.63	55.58
盖板	54.73	54.64	54.68
阀座	55.89	51.30	53.67
线圈	56.11	56.00	56.09
线圈骨架	56.10	55.81	56.01
外壳	56.10	55.67	56.03

2.2 高速开关阀温升关键影响因素分析

1) 线圈匝数对高速开关阀温升影响

图 9(a) 所示为不同线圈匝数高速开关阀平均温度变化曲线,随着线圈匝数增加,高速开关阀温度上升速度变慢,3 000~3 600 s 期间温度基本保持不变,可认为此温

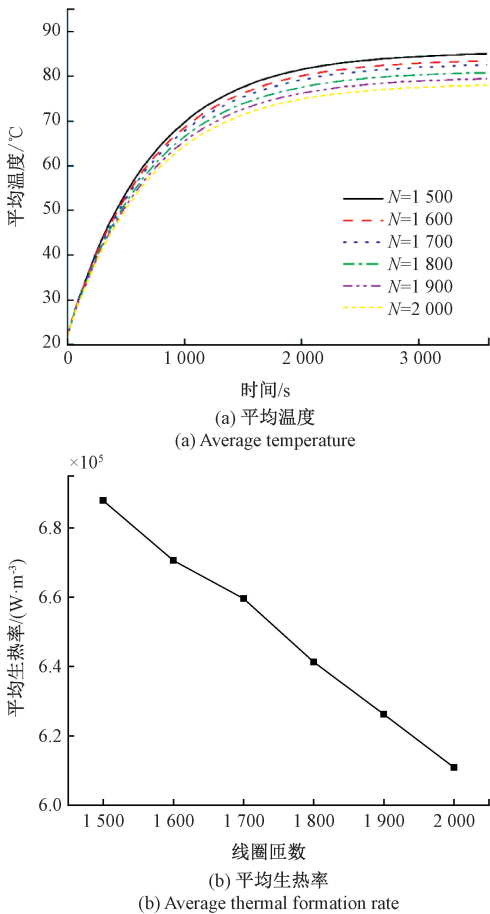


图 9 线圈匝数对温升和热生成率的影响

Fig. 9 Influence of coil turns on temperature rise and heat generation rate

Fig. 8 Temperature rise distribution of each component

度即对应工况的稳态温度。稳态平均温度随匝数增加而减小。当线圈匝数从 1 600 增至 1 700 时,稳态平均温度降低了 0.97℃;当线圈匝数从 1 700 增至 1 800 时,稳态平均温度降低了 1.69℃。表 2 为不同线圈匝数对应的稳态平均温度。

图 9(b)所示为线圈匝数对平均热生成率的影响曲线,即线圈单位体积的平均发热功率,平均热生成率随线圈匝数增大而降低,与高速开关阀稳态平均温度变化趋势基本一致。

表 2 线圈匝数-高速开关阀稳态平均温度

Table 2 Coil turns-Average steady-state temperature of high speed on-off valve

线圈匝数	稳态平均温度/℃
1 500	84.99
1 600	83.46
1 700	82.49
1 800	80.80
1 900	79.40
2 000	78.00

2) 驱动电压对高速开关阀温升影响

图 10(a)为不同驱动电压对高速开关阀温度的影响曲线,可以看出驱动电压增大,高速开关阀平均温度随之上升,且电压越大温升现象越明显。驱动电压由 18 V 增至 24 V 过程中,对应稳态平均温度从 51.03℃ 增至 78.05℃,增加了 27.02℃;当驱动电压由 42 V 增至 48 V 时,对应稳态平均温度从 212.66℃ 增至 278.58℃,增加了 65.92℃,为前者的 2.44 倍。具体温度变化如表 3 所示。由此可见,高速开关阀驱动电压对温升变化对影响较大。

图 10(b)为不同驱动电压下线圈平均热生成率变化曲线,电阻不变电压增大时,线圈的欧姆损耗急剧增加,导致高速开关阀稳态温度快速升高。虽然采用高电压驱

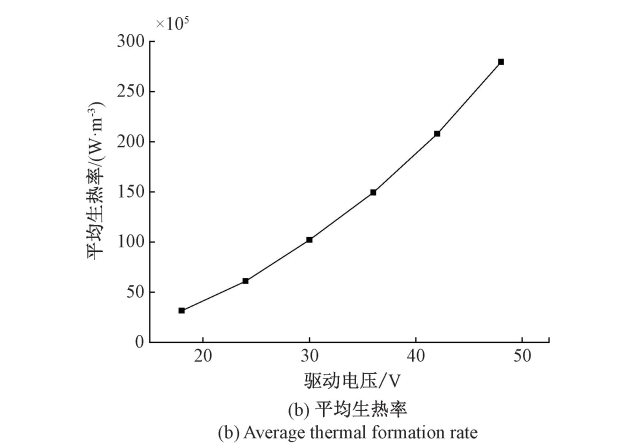


图 10 驱动电压对平均温度和生热率的影响
Fig. 10 Influence of driving voltage on average temperature and heat generation rate

表 3 驱动电压-高速开关阀稳态平均温度

Table 3 Driving voltage-average steady-state temperature of high speed on/off valve

驱动电压/V	稳态平均温度/℃
18	51.03
24	78.05
30	116.16
36	158.99
42	212.66
48	278.58

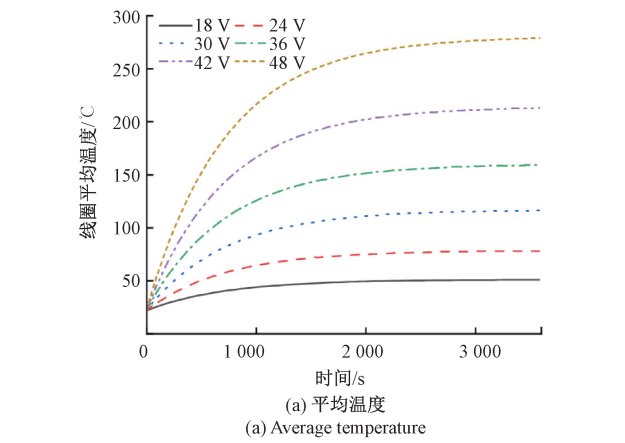
动可缩短阀芯开启滞后时间,但是加剧了线圈温升。当驱动电压为 36 V 时,线圈稳态平均温度已接近 150℃,超过大部分高速开关阀承受温度的极限,因此应尽量避免采用超过额定值的高电压驱动。

3) 环境温度对高速开关阀温升影响

假设线圈初始温度与环境温度相同,仿真得到不同环境温度下高速开关阀平均温度及生热率的变化曲线,如图 11 所示。

如图 11(a)所示,当环境温度升高时,开关阀稳态温度随之升高,且环境温度越高由通电线圈引起的温升效果越弱。环境温度为 22℃ 时,稳态平均温度为 78.3℃,平均温升 56.3℃;环境温度为 160℃ 时,稳态平均温度为 195.3℃,平均温升 35.3℃。具体温升变化如表 4 所示。

由图 11(b)可知,在不考虑漆包线的绝缘耐热极限温度的情况下,通电线圈的平均生热率随环境温度增加而减少。环境温度主要影响线圈的初始电导率和电阻值,环境温度越高,线圈初始阻值增大,回路电流减小,进而导致线圈功耗降低。



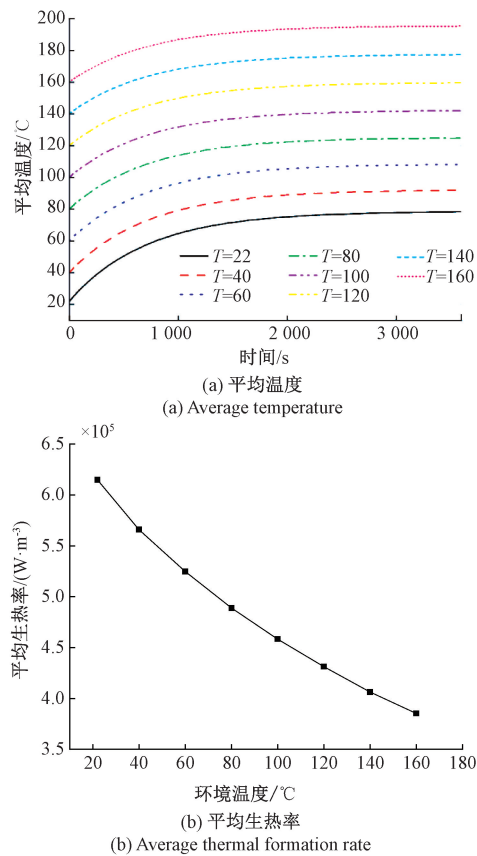


图 11 环境温度对平均温度和生热率的影响
Fig. 11 Influence of ambient temperature on mean temperature and heat generation rate

表 4 环境温度-高速开关阀稳态平均温度
Table 4 Ambient temperature-Average steady-state temperature of high speed on/off valve (°C)

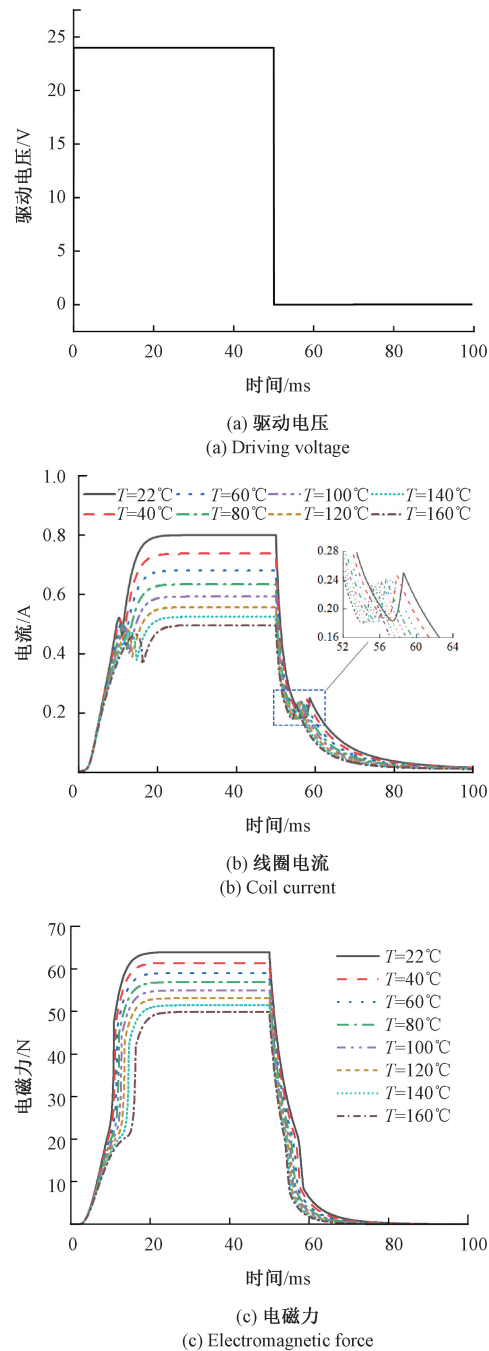
环境温度	稳态平均温度	温升
22	78.3	56.3
40	91.9	51.9
60	105.3	45.3
80	123.1	43.1
100	140.9	40.9
120	159.5	39.5
140	178.4	38.4
160	195.3	35.3

2.3 工作温度对高速开关阀动态特性影响分析

由于不同环境温度下高速开关阀的温度分布及变化基本在秒级别,而高速开关阀工作周期通常在毫秒级别,

因此在进行分析动态特性时可认为一个信号周期内温度工作为定值。图 12 所示为幅值 24 V,频率 10 Hz,占空比 50% 的驱动电压作用下,不同工作温度对应的线圈电流、电磁力、动铁芯位移变化曲线。

由图 12 可知,当工作温度升高,线圈电流上升速度变慢,到达稳态电流需要更长的时间,稳态电流随工作温度增加而减小,且工作温度越高,单位温度变化引起的电流减小效果越弱。当工作温度为 22℃ 时,线圈稳态电流为 0.8 A;当工作温度为 160℃ 时,线圈稳态电流降为 0.5 A。



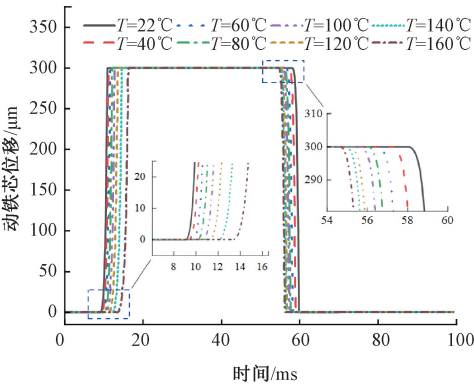


图 12 工作温度对动态特性的影响曲线
Fig. 12 Influence curve of operating temperature on dynamic characteristics

动铁芯所受电磁力大小与线圈电流密切相关,所以电磁力变化趋势与电流基本一致,工作温度由 22℃ 增至 160℃ 导致稳态电磁力由 63.9 N 降至 49.8 N。由动铁芯位移曲线可以看出,当工作温度在 22~160℃ 范围内升高变化时,阀芯开启滞后时间随之延长,关闭滞后时间随之降低,具体变化趋势如图 13 所示。从图 13 可以看出:工作温度同时影响开启和关闭滞后时间,且开启滞后时间呈增加趋势,关闭滞后时间呈减小趋势,工作温度对高速开关阀动态特性有着重要影响。

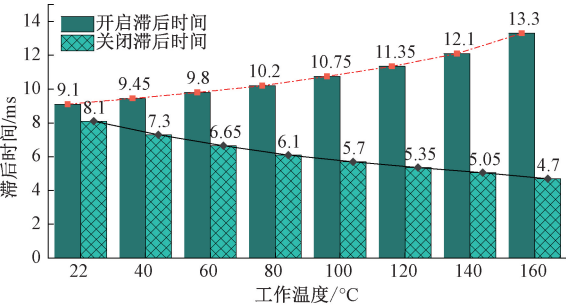


图 13 动态特性随工作温度变化
Fig. 13 Dynamic characteristics vary with operating temperature

3 基于温度反馈的变电压驱动控制策略

3.1 控制原理

传统双电压控制策略激励电压及维持电压通常为定值,未考虑温度对高速开关阀动态特性的影响。由 2.4 节分析可知,较高的驱动电压会引起线圈温度急剧升高,增加线圈烧毁风险,降低其可靠性与安全性。

为进一步改善高速开关阀动态特性,论文结合高频 PWM 技术从软件控制层面提出一种基于温度反馈的高速开关阀变电压驱动控制策略,其控制流程如图 14 所示。

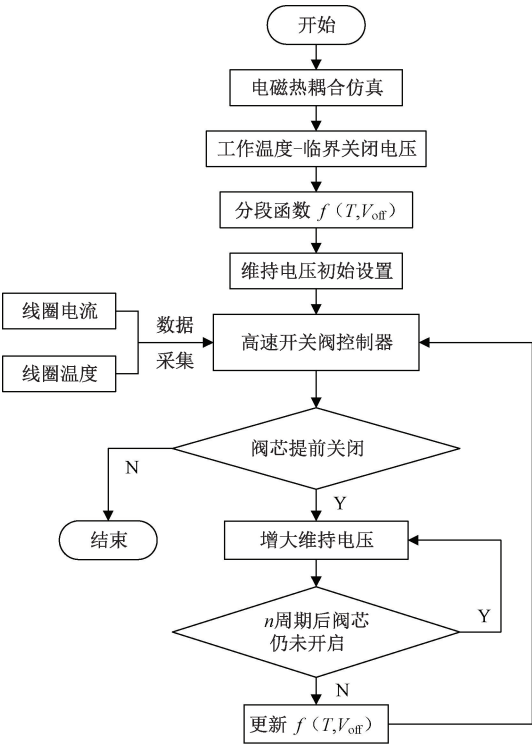


图 14 基于温度反馈的变电压驱动流程
Fig. 14 Variable voltage drive process based on temperature feedback

在控制策略中,控制器首先将仿真结果作为初始参数设置,同时设有数据采集模块实时采集线圈温度与电流,控制器高频率采样获取传感器数据。如果阀芯出现了提前关闭现象,则表示维持电压过低需要增加维持电压输出,等待 n 个周期再次检测阀芯是否正常关闭;如果阀芯正常关闭,那么更新工作温度-临界关闭电压函数,获取最佳维持电压。

3.2 基于温度反馈的变电压驱动策略研究

温度影响高速开关阀动态特性主要是通过改变线圈电阻值实现,因此将线圈电阻值设置为与温度相关的变量,模拟实际工况中线圈阻值受温度的变化。图 15 所示为本研究所提变电压驱动控制策略的具体执行流程,基于图 15 所述流程,在 Simplorer 软件中搭建变电压驱动控制模型,开展单电压、双电压和变电压驱动 3 种控制策略下的高速开关阀性能对比研究。

图 16 所示为 3 种不同控制方式下线圈电流、电磁力、动铁芯位移对比。由图 16 可知,在阀芯开启阶段 3 种电压驱动效果基本一致,随着温度升高,线圈电流最

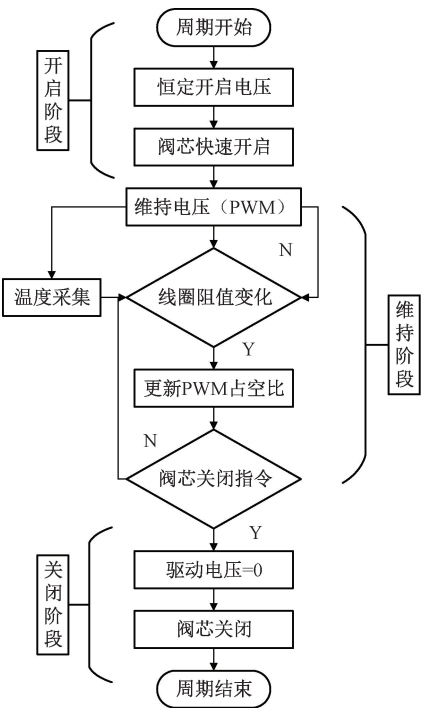


图 15 基于温度反馈的变电压驱动控制模型
Fig. 15 Temperature feedback based control model
for variable voltage drive

大值随之减小。在维持阀芯开启阶段,单电压驱动下线圈电流时刻处于较高值,双电压驱动下的线圈电流小于前者,在变化趋势上两者有一个相同点,即随着温度升高,维持阀芯开启阶段的电流值明显下降,单电压的维持电流由 0.77 A 降至 0.46 A,降低了 40.3%;双电压的维持电流由 0.26 A 降至 0.16 A,降低了 38.5%。

由图 16(b)和(c)可知,在 0.6~1 s 期间,由于未考虑温度因素,双电压控制下阀芯出现提前关闭的异常现象,且温度越高阀芯越提前关闭。采用基于温度反馈的变电压控制时,不同温度工况下其维持电流基本保持一致,略大于临界关闭电流,表明该控制策略可实现在不同温度工况下自适应调整维持电压,输出稳定的电流,确保维持阀芯正常的开启。

从图 16 的 3 种不同控制方式下动态特性对比可知,基于温度反馈的变电压控制输出最为稳定,阀芯工作正常;双电压控制下出现了阀芯提前关闭的情况;单电压控制下的阀芯运动虽然未出现异常,但是其维持阀芯开启阶段的电流明显过大,不利于缩短关闭滞后时间,阀芯关闭滞后时间如图 17 所示,负值表示阀芯提前关闭时间。

由于单电压、双电压控制策略未考虑温升影响,维持阀芯开启阶段电流随温度增加而降低,导致电流下降到临界关闭电流的所需时间减少,关闭滞后时间呈下降趋

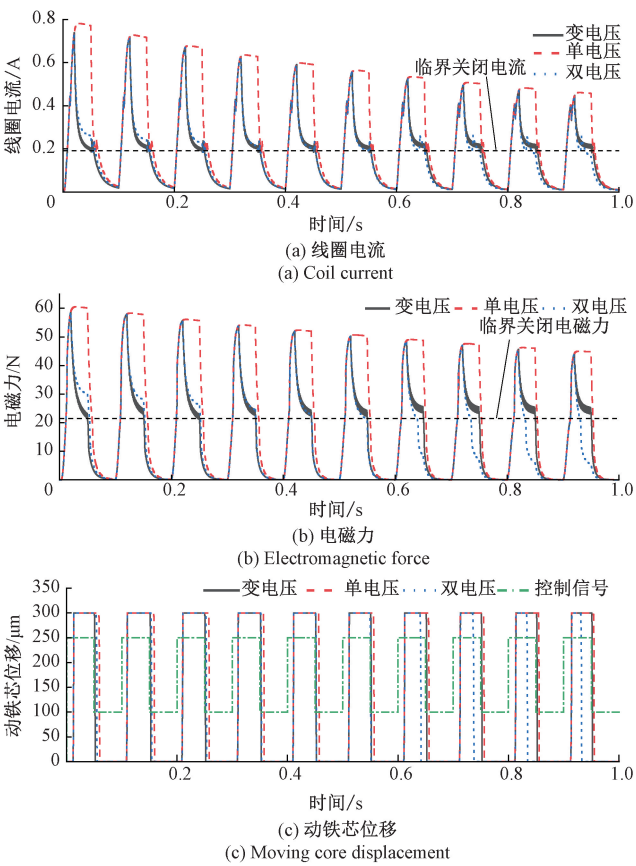


图 16 不同电压控制下动态特性对比
Fig. 16 Comparison of dynamic characteristics under
different voltage control

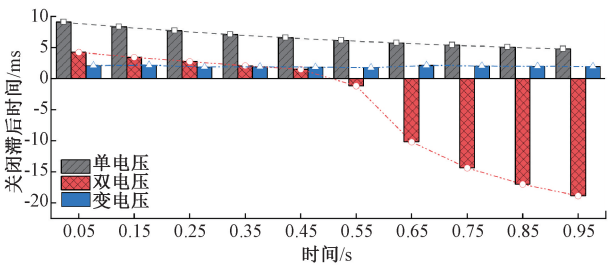


图 17 关闭滞后时间对比
Fig. 17 Comparison of turn off lag time

势。单电压控制的关闭滞后时间由 9.08 ms 降低至 4.74 ms;双电压控制时,在 0.5~1 s 期间发生了阀芯提前关闭的现象,当温度达到 200℃时,阀芯提前 18.88 ms 关闭;基于温度反馈的变电压控制下,由于电流处于小幅震荡状态,关闭滞后时间有所波动,但总体维持在 2 ms 附近。

论文提出的变电压控制策略充分考虑到了温度变化带来的影响,通过改变阀芯维持阶段的 PWM 占空比,对线圈电流进行自适应补偿,使得线圈电流稳定输出,既能

够保证阀芯正常启闭,还大幅降低了关闭滞后时间,改善高速开关阀的动态特性。

4 实验与分析

4.1 高速开关阀性能测试台

为了进一步验证论文所提出的基于温度反馈的变电压控制策略的控制效果,搭建了高速开关阀性能测试台开展实验验证,如图 18 所示。

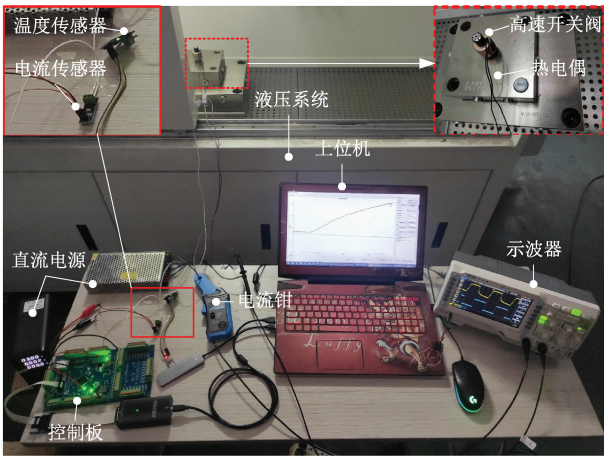


图 18 高速开关阀性能测试台

Fig. 18 High speed on/off valve performance test bench

测试台主要由液压系统、控制板、上位机、传感器和电源等组成。高速开关阀安装在阀块上与液压系统相连,进出口压差设置为 20 MPa;电流钳一端钳住高速开关阀控制线,另一端接示波器实时观察回路中电流变化;热电偶测温端紧贴高速开关阀线圈外表面,输出端接温度传感器并将数据发送至上位机,在上位机中实时查看温度变化;电流传感器串联进控制回路中,输出信号连接控制器的模拟输入捕获端子,控制器实时获取线圈的电流值。主要部件性能参数如表 5 所示。

4.2 基于温度反馈的变电压驱动控制实验

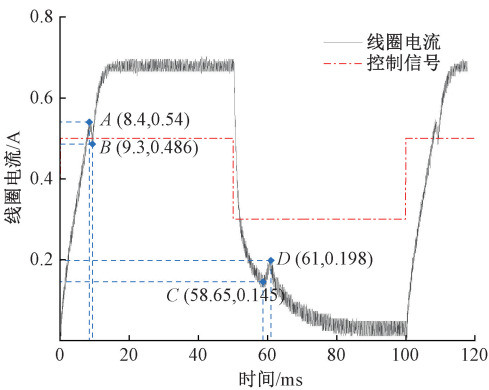
在 20 MPa 压差下,采用占空比 50%,频率 10 Hz,幅值 24 V 的单电压信号控制高速开关阀动作,获取其临界开启电流、临界关闭电流、稳态温度等重要参数,并初步得到电-机械转换器的开启滞后时间及关闭滞后时间,线圈电流和温升曲线如图 19 所示。

由于高速开关阀尺寸小,结构紧凑,阀芯行程短,仅 0.3 mm,直接测量阀芯位移变化难度较大,本试验中采用电流拐点法间接测量阀芯动作时间。由仿真得到的电-机械转换器动态特性曲线和理论分析可知,当阀芯开始动作时,线圈中产生反向电流阻碍其变化,在电流曲线中出现拐点。

表 5 主要部件性能参数

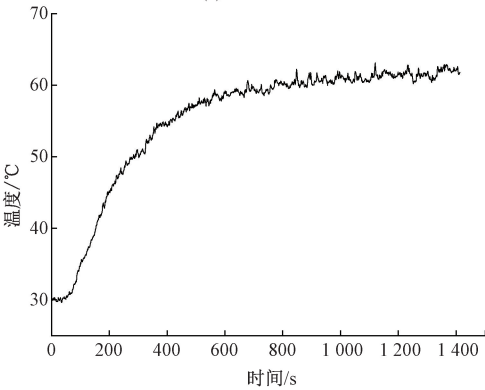
Table 5 Main component parameters

部件	性能参数
示波器 DS1202Z-E	带宽 200 MHz;采样率 1 Gsa/s;存储深度 24 Mpts;波形捕获率 30 000 wfms/s
超细 K 型热电偶测温线	丝径 0.1 mm;测温范围-20℃~200℃
温度传感器 LZ_TD110	模拟输出 0~4.8 V;精度±0.5;测温范围-50℃~400℃;采样频率 1 次/s
液压系统	最大压力 35 MPa
电流钳 CC65	直流范围 10 mA~65 A; 精度±(1.5%±5 mA);
直流电源 WPS305B	电压 0~30 V/电流 0~5 A 连续可调; 功率 150 W;电流稳定度 0.5%±3 mA; 电流/电压稳定度 0.5%±3 mV
电流传感器	电流量程 0~5 A;模拟输出 185 mV/A



(a) 线圈电流

(a) Coil current



(b) 线圈温升

(b) Coil temperature rise

图 19 线圈电流和温升曲线

Fig. 19 Coil current and temperature rise curve

如图 19(a) 所示,在电流持续上升过程中,电流出现了突然下降的现象,拐点 A 表示阀芯刚开启;短暂下降后电流恢复上升状态,拐点 B 表示阀芯打开并维持该开启

状态。在电流持续下降过程中, 电流出现突然上升的现象, 拐点 C 表示阀芯刚开始关闭动作; 短暂上升后电流恢复下降状态, 拐点 D 表示阀芯关闭。

基于此方法, 测得该高速开关阀临界开启电流约 0.54 A, 临界关闭电流约 0.145 A, 在单电压控制下开启滞后时间约 8.4 ms, 关闭滞后时间约 8.65 ms。温升方面, 持续运行 20 min 后温度达到稳态, 约 61.5℃。

为验证本研究提出的控制策略的有效性, 在压差 20 MPa, 控制信号频率 10 Hz, 高电平 50% 占空比的相同条件下, 分别采用传统的单电压和基于温度反馈的变电压控制高速开关阀动作, 线圈温度达到稳态时的电流动态曲线如图 20 所示。

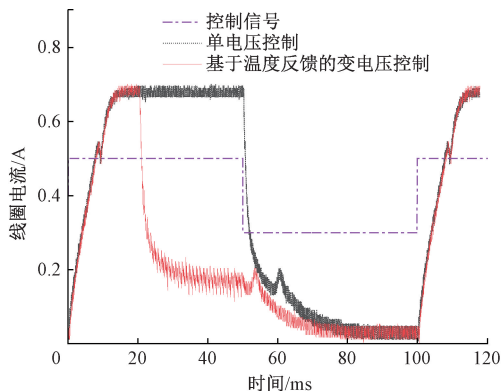


图 20 不同控制策略下的线圈电流对比

Fig. 20 Coil current comparison under different control strategies

根据图 20 可知, 两者间的差异主要集中在维持电流大小和关闭滞后时间。在维持电流方面, 单电压控制下的线圈电流在维持阀芯开启阶段一直处于较高水平, 约 0.68 A; 变电压控制下的线圈电流则迅速下降至约 0.18 A, 与单电压控制相比下降了 73.5%。在关闭滞后时间方面, 单电压控制约为 8.65 ms, 变电压控制下约为 3.1 ms, 与前者相比缩短了 64.2%。

基于温度反馈的变电压控制策略不仅在降低关闭滞后时间上有着优异的表现, 在降低温升方面同样有着显著效果。图 21 中展示了 2 种控制策略下的线圈温升曲线, 持续工作 20 min 温度基本达到稳态, 单电压控制下线圈稳态温度约 61.5℃, 变电压控制下线圈稳态温度约 47℃, 稳态温度降低了 23.6%。

以上实验结果表明, 与传统的单电压控制相比, 论文所提出的基于温度反馈的变电压控制策略考虑到温度影响, 在保证维持阀芯正常开启状态的前提下, 降低维持电流大小, 不仅有效缩短了阀芯的关闭滞后时间, 改善了高速开关阀的动态特性, 还降低了线圈的温升速度及稳态温度。

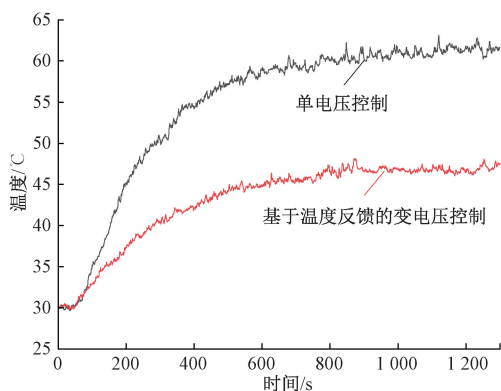


图 21 不同控制策略下的线圈温升曲线

Fig. 21 Coil temperature rise curves under different control strategies

5 结 论

针对现有高速开关阀驱动控制策略研究过程中忽略温升对其动态特性影响的问题, 论文在构建电磁热耦合模型分析温升对高速开关阀动态特性影响的基础上, 提出了一种基于温度反馈的高速开关阀变电压驱动控制方法, 主要结论为:

1) 基于高速开关阀结构和工作原理, 建立了高速开关阀的电路、磁路和温度场数学模型, 理论分析了线圈匝数、电流、磁路磁阻和温度等关键因素对输出特性的影响。

2) 基于 Maxwell 和 Thermal 联合建立了高速开关阀电磁热耦合仿真模型, 分析了线圈匝数、驱动电压和环境温度对线圈温升的影响规律, 以及温度对高速开关阀动态特性的影响, 分析结果表明: 驱动电压对线圈温升影响最大; 随着温度升高, 高速开关阀开启滞后时间增加、关闭滞后时间减小。

3) 提出了一种基于温度反馈的变电压驱动控制策略, 搭建了高速开关阀性能测试台, 开展仿真和实验研究。研究结果表明: 基于温度反馈的变电压控制下高速开关阀关闭滞后时间为 3.1 ms, 相比单电压控制缩短了 64.2%; 线圈稳态温度约 47℃, 相比单电压控制降低了 23.6%。基于温度反馈的变电压控制策略不仅改善了高速开关阀的动态特性, 还有效降低了线圈的温升、提高了工作可靠性。

参考文献

- [1] 陈佳, 袁朝辉, 郭强, 等. 射流管伺服阀前置级的动态流场分析[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1731-1737.
CHEN J, YUAN ZH H, GUO Q, et al. Dynamic flow field analysis of the prestage of jet pipe servo valve[J].

- Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1731-1737.
- [2] 姜伟, 陈品超, 裘信国, 等. 新型旋转比例电-机械转换器静态特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 107-114.
- JIANG W, CHEN P CH, QIU X G, et al. Research on static characteristics of a novel rotating proportional electro-mechanical converter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 107-114.
- [3] 熊治敏, 林娜, 池荣虎, 等. 含有未知扰动的阀控液压回转系统 MFA-SM 控制[J]. 电子测量技术, 2022, 45(14): 15-22.
- XIONG ZH M, LIN N, CHI R H, et al. MFA-SM control for valve-controlled electro-hydraulic rotation system with unknown disturbances[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(14): 15-22.
- [4] 季恩泽, 郭斌, 胡晓峰, 等. 线控制动电磁阀响应特性仿真及测试方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(9): 95-102.
- JI EN Z, GUO B, HU X F, et al. Research on response characteristics simulation and test method of solenoid valve in brake by wire system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2022, 36(9): 95-102.
- [5] XU EN G, ZHONG Q, HE X J, et al. A novel current-based identification method for dynamic performance of high-speed on/off valve[J]. Measurement, 2024, 232: 114719.
- [6] DAI J, YANG CH H, XIONG SH P. Design and performance analysis of high-speed on/off valve based on energy-coupled actuator[J]. Smart Materials and Structures, 2024, 33(6): 065029.
- [7] JIAO Z X, LI ZH H, SHANG Y X, et al. Active load sensitive electro-hydrostatic actuator on more electric aircraft: Concept, design, and control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(5): 5030-5040.
- [8] ZHONG Q, XU EN G, JIA T W, et al. Dynamic performance and control accuracy of a novel proportional valve with a switching technology-controlled pilot stage[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2022, 23(4): 272-285.
- [9] GAO Q, ZHANG SH D, ZHU Y. Investigation of the Dynamic characteristics of a two-stage high-speed on/off valve with adjustable maximum opening[J]. Aerospace, 2023, 10(2): 109.
- [10] 徐纯洁, 谢方伟, 凡镭瑞, 等. 考虑电磁铁线圈构型的高速开关阀动态特性分析[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(4): 211-220.
- XU CH J, XIE F W, FAN R R, et al. Dynamic characteristics of the high-speed on/off valve considering electromagnet coil configurations [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(4): 211-220.
- [11] MENG L K, WU D F, GAO H, et al. Multi-objective optimization of a wet electromagnet-driven water hydraulic high-speed on/off valve for underwater manipulator in deep sea[J]. Measurement, 2025, 239: 115443.
- [12] WU SH, ZHAO X Y, LI CH F, et al. Multiobjective optimization of a hollow plunger type solenoid for high speed on/off valve[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(4): 3115-3124.
- [13] 唐兵, 刘宇辉, 司国雷, 等. 先导式大流量高速开关阀的关键技术研究[J]. 液压与气动, 2018(6): 76-83.
- TANG B, LIU Y H, SI G L, et al. Key technologies of piloted large flow rate high speed on/off valve [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2018(6): 76-83.
- [14] KONG X W, LI SH ZH. Dynamic performance of high speed solenoid valve with parallel coils [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(4): 816-821.
- [15] 陈淑梅, 柯旭锟, 吴荣钰, 等. 耦合磁滞的电-机械转换器多场建模及参数优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(11): 4271-4281.
- CHEN SH M, KE X K, WU R Y, et al. Multi-field modeling with hysteresis and optimization for electro-mechanical converter [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(11): 4271-4281.
- [16] 陈淑梅, 陈绍荣, 李启正, 等. 多狭缝高速开关阀的电-机械转换器动态特性[J/OL]. 北京航空航天大学学报, 1-17[2025-03-18].
- CHEN SH M, CHEN SH R, LI Q ZH, et al. Dynamic characteristics of electro-mechanical transducer with slits of high speed on/off valve [J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1-17[2025-03-18].
- [17] 李雨铮, 王年生, 包振坤, 等. 三通球阀式高速开关阀稳态液动力分析与结构改进[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(2): 298-306.
- LI Y ZH, WANG N SH, BAO ZH K, et al. Steady-state flow force analysis and structure improvement of three-way ball valve high-speed on-off valve [J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(2): 298-306.
- [18] YANG X, HU X G, XU F W, et al. Large-range dynamic characteristic adjustment of high-speed on-off valve for water hydraulic manipulators based on multistage

- voltage and double sliding mode control[J]. *Measurement*, 2025, 242: 116094.
- [19] 刘钰栋. 车用亚毫秒级高速开关阀电磁铁及驱动技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- LIU Y D. Research on electromagnet and drive technology of sub-millisecond high speed switch valve for vehicles[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [20] 钟麒, 张斌, 洪昊岑, 等. 基于电流反馈的高速开关阀3电压激励控制策略[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52(1): 8-15, 58.
- ZHONG Q, ZHANG B, HONG H C, et al. Current feedback-based control strategy for 3-voltage excitation of high-speed switching valves [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2018, 52(1): 8-15, 58.
- [21] ZHONG Q, XU EN G, XIE G, et al. Dynamic performance and temperature rising characteristic of a high-speed on/off valve based on pre-excitation control algorithm[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(10): 445-458.
- [22] ZHONG Q, LI X T, MAO Y X, et al. Switching frequency improvement of a high speed on/off valve based on pre-excitation control algorithm[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 37(1): 88.
- [23] YE N, SCAVARDA S, BETEMPS M, et al. Models of a pneumatic PWM solenoid valve for engineering applications[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 1992, 114(4): 680-688.
- [24] 钟麒, 徐恩光, 贾体伟, 等. 高速开关阀驱动控制方法研究现状与展望[J]. *机械工程学报*, 2025, 61(4): 290-301.
- ZHONG Q, XU EN G, JIA T W, et al. Research status and prospect on the control method of high speed on/off valve [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2025, 61(4): 290-301.
- [25] ZHAO J H, WANG M L, WANG ZH J, et al. Different boost voltage effects on the dynamic response and energy losses of high-speed solenoid valves [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 123: 1494-1503.
- [26] ZHAO J H, YUE P F, GREKHOV L, et al. Hold current effects on the power losses of high-speed solenoid valve for common-rail injector [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 128: 1579-1587.

作者简介



田祖织, 2007年于中国矿业大学获得学士学位, 2012年于中国矿业大学获得博士学位, 现为中国矿业大学副教授, 主要研究方向为机电控制、智能监测与故障诊断、智能磁流变材料及器件。

E-mail: tianzuzhi@163.com

Tian Zuzhi received his B.Sc. degree from China University of Mining and Technology in 2007 and Ph.D. degree from China University of Mining and Technology in 2012. Now he is an associate professor at China University of Mining and Technology. His main research interests include electromechanical control, intelligent monitoring and fault diagnosis, and intelligent magnetorheological material and device.



凡镭瑞(通信作者), 2021年于南京工程学院获得学士学位, 现为中国矿业大学硕士研究生, 主要研究方向高速开关阀及其控制技术。

E-mail: ts20050016a31@cumt.edu.cn

Fan Rongrui (Corresponding author) received the B.Sc. degree from Nanjing University of Engineering in 2021, and is currently a master's student at China University of Mining and Technology. His main research interests include high-speed on/off valve and its control technology.