

“M”型中位机能电磁换向阀的设计-以高速开关阀为例

摘要：高速开关阀是数字液压技术的核心元件。高速开关阀的动态特性是决定数字液压技术响应速度和控制精度的关键。提出多电压复合驱动策略，通过预加载方法优化了高速开关阀启闭初始电流，并结合电流反馈和数字逻辑触发机制，实现了 5 个驱动电压的自适应切换，最大程度上确保了高速开关阀的快响应切换和低功耗驱动。理论分析探究了初始电流和驱动电压对高速开关阀动态特性的影响规律，并基于该规律得到了改善高速开关阀动态特性的方法。搭建了高速开关阀仿真模型，开展了动态性能试验，通过直接测试和间接测试两种方法对所提出的多电压复合驱动方法的有效性进行了验证。结果表明，相比较于双电压驱动方法，多电压复合驱动方法在不增大驱动电压的前提下，通过优化启闭初始电流，大幅提高了开关阀的响应速度，减少开启滞后时间 66.7%、缩短关闭滞后时间 87.5%，并能改善高速开关阀流量控制特性，将其流量线性范围扩大了 17.1%，同时还降低热功率损耗 64.8%，减小工作钢球压迫受力，延长高速开关阀使用寿命。

关键词：高速开关阀；多电压复合驱动；预加载；动态特性

1.前言

液压传动是大型装备运动控制的关键技术[1]。液压阀作为电液系统的核心控制元件，其性能直接决定着装备运动性能和系统效率。采用比例阀进行流量控制是目前应用最广泛的驱动技术。但是，比例阀频响较低，且存在中位死区，导致系统响应慢，控制效果不理想。此外，比例阀通过阀口节流控制流量的方式不可避免地造成了节流损失，增大了系统能耗。数字液压技术采用离散流体进行传动控制，具有响应快、效率高等优点。高速开关阀作为生成离散流体的核心元件，其产生的高频离散流体可通过脉宽调制技术模拟连续流体的驱动效果。并且离散流体的生成频率越高，其比拟连续流体控制的效果就越好。

为了提升高速开关阀的动态性能，国内外学者做了大量研究工作。RUAN 等[2]发明了二维(2D)液压阀，该结构可同时实现阀芯旋转和平移的双自由度运动，实现了 250Hz 频宽[3]。REN 等[4-5]设计了旋转式液压阀结构，此类转阀可通过加快阀芯旋转速度来提高阀口开关频率。CHENG 等[6]利用新型软磁材料设计了一种驱动器，将开关阀响应时间缩短了 14.2%。TAO 等[7]采用多种软磁材料优化电-机械转换器的磁场，以提升电磁阀动态特性。为了降低运动部件质量以加快电磁阀启闭过程，ZHANG 等[8-9]设计了微型电磁阀，STOCKNER 等[10]提出了中空式阀芯结构。

上述研究都集中在高速开关阀设计制造阶段,针对现有高速开关阀,优化控制算法是提升其动态性能的最佳途径。ZHAO 等[11]研究了高速开关阀在不同驱动电压下的动态响应性能,并给出了兼顾动态性能和能耗特性的最佳驱动电压。苏明[12]提出了双电压驱动方法,在高速开关阀关闭阶段采用反向电压进行快速卸荷,有效提高了高速开关阀的动态特性。LEE[13]在双电压驱动方法基础上优化得到了三电压驱动方法,在提高动态特性的同时,有效降低了电磁能耗。ZHONG 等[14-15]提出了智能 PWM 驱动方法和动态特性维持方法,不仅提高了高速开关阀的动态特性,还能降低供油压力对动态特性的影响。高强等[16]提出了一种复合 PWM 控制方法,并结合基于状态量的反馈算法,将电磁阀关闭时间缩短了 62.5%。高速开关阀的动态特性主要受启闭滞后时间和启闭运动时间的影响。目前大部分研究聚焦于整个动态时间,即启闭延迟时间和启闭运动时间之和,很少有学者仅针对启闭滞后时间进行研究。本文以缩短高速开关阀的启闭滞后时间,从而提升其动态性能为目的,结合上述研究,提出一种多电压复合驱动方法。该方法通过预加载技术,优化线圈初始电流状态,在不提高驱动电压的前提下加快高速开关阀响应速度。研究结果表明,与双电压驱动方法相比,多电压复合驱动方法可以优化高速开关阀启闭阶段的初始电流,有效降低启闭滞后时间,并进一步提升高速开关阀动态特性。而且,该方法还能改善高速开关阀流量控制特性,优化钢球受力状态,减少线圈热损耗。

2 速开关阀结构

本文采用两位三通球阀结构的高速开关阀作为研究对象,其结构如图 1 所示。当线圈通电时,电-机械转换器产生电磁力,衔铁推动左、右两个钢球向左运动,此时高速开关阀工作在开启状态,A 口和 P 口联通,并与 T 口断开,如图 2a 所示。当线圈断电时,电磁力逐渐减弱,作用在右钢球上的液压力克服剩余电磁力和摩擦力等阻力,推动左、右钢球往右运动,此时高速开关阀工作在关闭状态,A 口与 T 口联通,并与 P 口断开,如图 2b 所示。

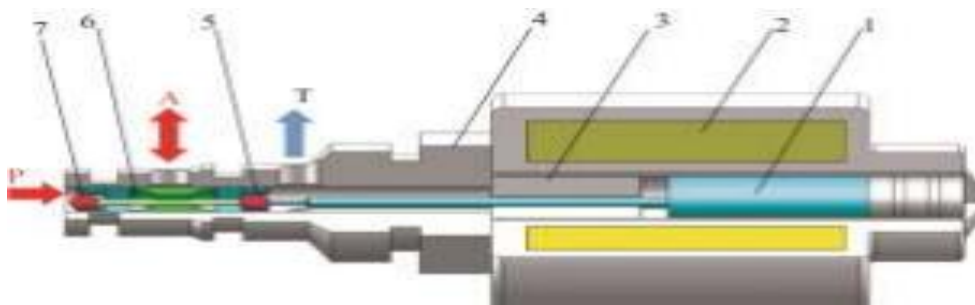


图 1 高速开关阀结构

1.衔铁 2.线圈 3.极靴 4.阀体 5.右钢球 6.分离销 7.左钢球

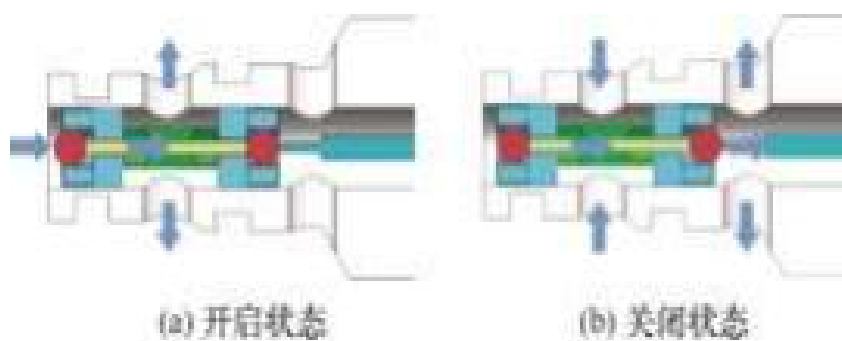


图 2 高速开关阀启闭状态

2 高速开关阀数学模型

高速开关阀工作过程涉及到电磁场、流场以及机械场等多场耦合作用，因此其数学模型也可从上述物理场进行展开。

2.1 电磁场特性

当高速开关阀受到电压激励后，线圈内生出电流，并产生电磁力 F_m 作用于衔铁。电磁力 F_m 可以通过建立等效磁路模型进行求得，如图 3 所示。其中 F 表示磁动势， R_i 表示磁阻， ϕ_i 表示磁路 i 的磁通量。

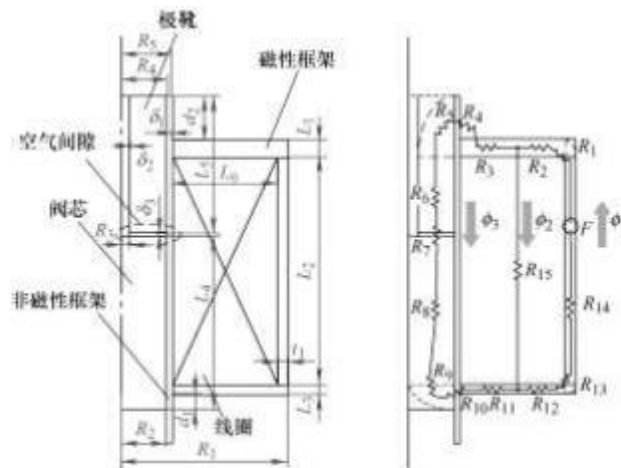


图 3 高速开关阀等效磁路

磁动势的计算公式为

$$F=IN$$

式中， I 表示线圈电流， N 代表线圈匝数。

磁阻的基础公式如下

$$R=\int (l/\mu S)$$

式中， l 表示磁通量路径的长度， μ 表示材料的导磁系数， S 表示磁通量路径的横截面积。

各支路等效磁阻可根据等效磁路模型得出

$$R_{m1}=R_1+R_2+R_{12}+R_{13}+R_{14}$$

$$R_{m2}=R_{15}$$

$$R_{m3}=R_i$$

$$R_m=R_{m1}+(R_{m2}*R_{m3})/(R_{m2}+R_{m3})$$

式中， R_{mi} 表示第 i 条磁路的等效磁阻， R_m 表示整个磁路的等效磁阻。

各支路磁通量分别为

$$\phi_1=F/R_m$$

$$\phi_2=\phi_1*(R_{m3}/(R_{m2}+R_{m3}))$$

$$\phi_3=\phi_1*(R_{m2}/(R_{m2}+R_{m3}))$$

电磁力的计算公式为

$$F_m=(\phi_3^2)/(2\mu_g S_g)$$

式中， μ_g 表示空气间隙的导磁系数， S_g 表示空气间隙的横截面积。

线圈电感 L 可由所得磁路等效磁阻求得

$$L=N^2/R_m$$

当衔铁静止时，线圈等效电阻和线圈等效电感为定值，等效类比为定值 RL 电路。因此，线圈电流的动态方程可进一步描述为

$$I=I_i+((U-I_i R)/R)*(1-\exp(-t/L))$$

式中， I_i 为线圈初始电流， U 为线圈激励电压， R 为线圈电阻， t 为时间。

2.2 流场特性

根据流量公式，流经高速开关阀的流量可表示为

$$Q=C_d A_o \sqrt{2 \Delta P / \rho}$$

式中， Q 表示流量， C_d 代表流量系数， A_o 为阀口过流面积， ΔP 表示阀口压差， ρ 代表油液密度。

由于油液流动方向和流速变化造成油液动量的改变，从而形成液动力。因此，作用在阀芯上的稳态液动力和瞬态液动力可分别表示为

$$F_s = 2C_v C_d A_o \Delta P \cos \theta$$

$$F_t = C_d w L_d$$

式中， F_s 为作用在阀芯上的稳态液动力， F_t 为作用在阀芯上的瞬态液动力， C_v 为流速系数， θ 为射流角， w 为阀口梯度， L_d 为油液阻尼长度。

2.3 机械场特性

根据图 1 描述的高速开关阀结构可得，运动部件受到电磁力、液压力、液动力以及阻尼力的作用。

因此，高速开关阀的动力学方程可表示为

$$m = F_m - (F_s + F_t) - kx - P_s A$$

式中， m 表示移动部件质量， x 代表移动部件位移， k 表示摩擦因数， P_s 代表进油口压力， A 为 P 口的有效横截面积。

2.4 能耗特性

高速开关阀工作时存在复杂的能量转换过程，且由于线圈电阻和电涡流的影响，其线圈热功率损耗较大，可表示为

$$P = (I_x^2 \cdot R) \cdot t_x$$

式中， P 为平均热功率， I_x 为采用时刻的线圈电流， t_x 为采样时长。

2.5 动态特性分析

结合上述电磁场、流场和机械场特性的分析可得，当高速开关阀处于临界启闭状态时，其运动部件仍然处于静止状态。因此， dx^2/dt^2 和 dx/dt 两项均为零。驱动衔铁运动的临界电磁力可表示为

$$F_{cm} = P_s A \pm F_s$$

式中， F_{cm} 表示驱动高速开关阀启闭所需的临界电磁力。

由于稳态液动力的方向始终指向阀口关闭的方向，因此，当高速开关阀从关闭状态向开启状态切换时所需的临界电磁力为

$$F_{cm} = P_s A - 2C_v C_d A_o \Delta P_{AT} \cos \theta$$

相同地，当高速开关阀从开启状态向关闭状态切换时所需的临界电磁力为

$$F_{cm} = P_s A + 2C_v C_d A_o \Delta P_{A} \cos \theta$$

式中， ΔP_{AT} 为 A 口和 T 口的压差， ΔP_A 为 P 口和 A 口的压差。

结合式(1)、(7)、(9)~(11)、(19)和(20)，可得到生成临界电磁力所需的临界电流为

$$I_{on} = \sqrt{F_{cm}/L_{on}}$$

$$I_{off} = \sqrt{F_{cm}/L_{off}}$$

式中， I_{on} 为临界开启电流， I_{off} 为临界关闭电流， L_{on} 和 L_{off} 分别表示高速开关阀在开启和关闭状态下的线圈等效电感。

结合式(12)、(21)和(22)，可得到电流变化至临界启闭电流所需的时间

$$t_{don} = L \ln((U - I_{on}R)/(U - I_i R))$$

$$t_{doff} = L \ln((U - I_{off}R)/(U - I_i R))$$

式中， t_{don} 和 t_{doff} 分别表示线圈电流变化至临界开启电流和临界关闭电流所需的时间，即高速开关阀开启滞后时间和关闭滞后时间。

根据式(17)、(23)和(24)，可以得到如下结论：

(1)线圈电流是影响热损耗的关键因素，降低线圈电流能有效减小线圈热损耗，并降低线圈温升。

(2)线圈初始电流是影响高速开关阀启闭滞后时间的重要因素。在开启过程中，初始电流越大，其开启滞后时间越小；在关闭过程中，初始电流越小，其关闭滞后时间越小。

(3)驱动电压的大小会影响高速开关阀动态特性。在高速开关阀开启阶段，驱动电压越大，其开启动态性能越好；在高速开关阀关闭阶段，驱动电压越小，其关闭动态性能越好。

(4)反向电压具有快速卸荷功能，在高速开关阀关闭阶段，能进一步加快电流下降，改善高速开关阀关闭阶段动态性能。

3 多电压复合驱动方法

根据理论分析得到的结论，结合基于电流反馈的电压切换机制[18]，本文提出了多电压复合驱动方法，其硬件框架如图 4 所示，主要包括控制器、外部控制信号、电流传感器以及五个外部电压源。该方法将高速开关阀单个启闭周期细分为五个阶段，并用相应的数字代码表示，如图 5 所示，分别为开启预加载阶段①、开启阶段②、关闭预加载阶段③、关闭阶段④和关闭保持阶段⑤。

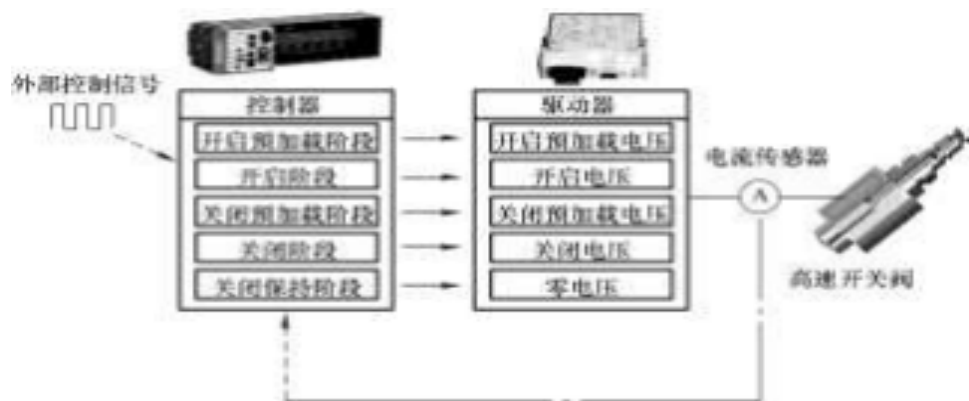


图 4 多电压复合驱动硬件框架

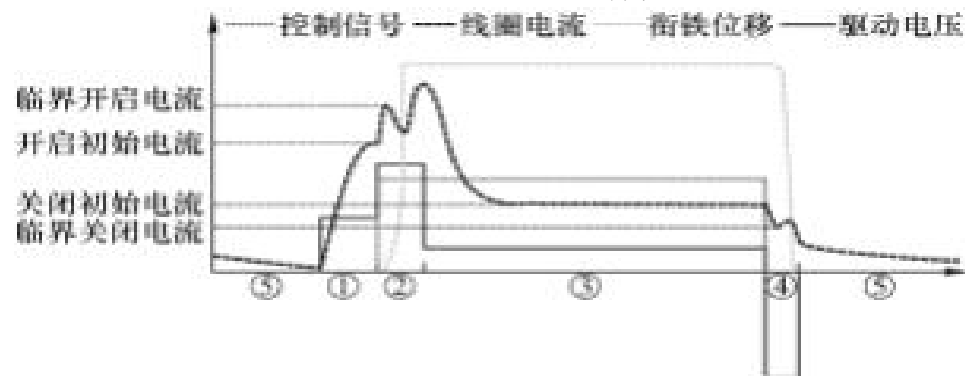


图 5 多电压复合控制的高速开关阀动态特性

高速开关阀单工作周期内的每个阶段采用不同的电压对线圈进行激励，其具体方法如下。

开启预加载阶段①采用图 4 中的开启预加载电压对高速开关阀进行激励。开启预加载电压的取值范围为等效电阻与临界开启电流乘积的 90%~95%，因此线圈电流最终将维持在一个略小于临界开启电流的数值，从而减小开启滞后时间。

开启阶段②采用图 4 中的开启电压对高速开关阀进行激励。开启电压为数值较大的正向电压，可将电流迅速增大并超过临界开启电流，使高速开关阀开启。

关闭预加载阶段③采用图 4 中的关闭预加载电压对高速开关阀进行激励。关闭预加载电压的取值范围为等效电阻与临界关闭电流乘积的 105%~110%，因此线圈电流最终将维持在一个略大于临界关闭电流的数值，从而减小关闭滞后时间。

关闭阶段④采用图 4 中的关闭电压对高速开关阀进行激励。关闭电压为数值较大的反向电压，可加快电流卸荷，确保电流快速下降至临界关闭电流，使高速开关阀关闭。

关闭保持阶段⑤采用图 4 中的零电压对高速开关阀进行激励，使电流在无电压激励的状态下自然下降，并维持高速开关阀关闭的状态，直到下一个开启预加载阶段①到来。

由于各电压源的切换时机直接影响线圈电流状态，从而改变电磁力大小，并进一步影响高速开关阀动态特性。因此，优化各电压源的切换时机是多电压复合控制的关键。为此，本文基于数字触发和电流反馈机制设计了电压源切换算法，其工作原理如图 6 所示。图 6 中 I_{ton} 表示开启触发电流，用于开启电压和关闭预加载电压之间切换的逻辑判断； I_{toff} 表示关闭触发电流，用于关闭电压和零电压之间切换的逻辑判断。为确保高速开关阀完全启闭，开启触发电流 I_{ton} 的取值应略大于临界开启电流 I_{on} 的 5%~10%，关闭触发电流 I_{toff} 的取值应略小于临界关闭电流 I_{off} 的 5%~10%。

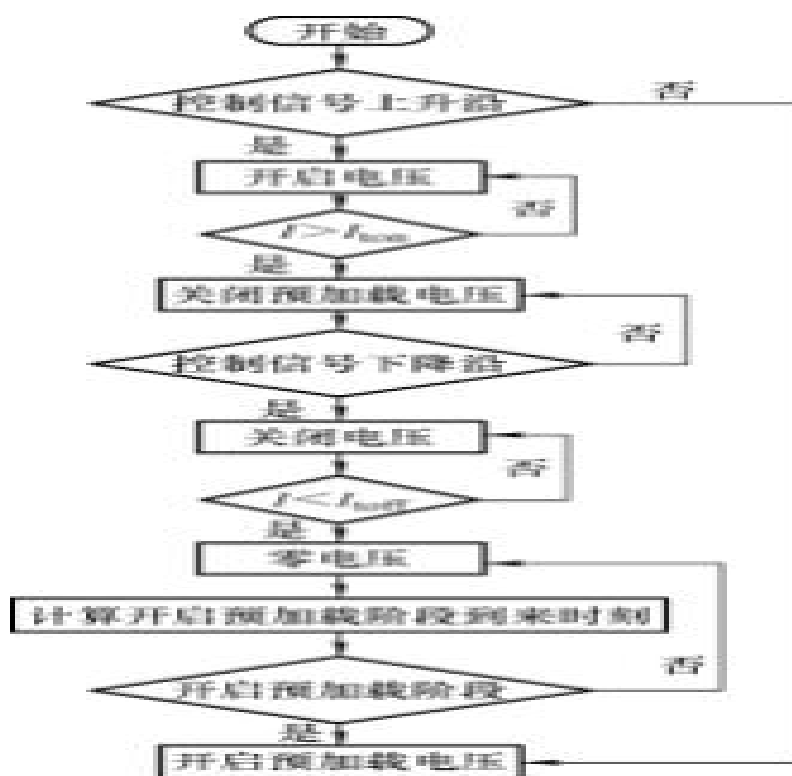


图 6 多电压复合控制的电压切换机制

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。

如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/217055053060006061>