

北京航空航天大学学报

Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics

ISSN 1001-5965, CN 11-2625/V

《北京航空航天大学学报》网络首发论文

题目: 高速电磁阀数字液压回路动态流量特性研究
作者: 陈晓明, 朱玉川, 秦成, 李杨民, 方园
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0332
收稿日期: 2025-05-28
网络首发日期: 2025-09-28
引用格式: 陈晓明, 朱玉川, 秦成, 李杨民, 方园. 高速电磁阀数字液压回路动态流量特性研究[J/OL]. 北京航空航天大学学报.
<https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0332>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

高速电磁阀数字液压回路动态流量特性研究

陈晓明^{1,2,3}, 朱玉川², 秦成¹, 李杨民³, 方园¹

(1. 中国航空工业集团公司西安飞机设计研究所, 西安 710089; 2. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016; 3. 香港理工大学 工程学院, 香港 999077)

*通信作者 E-mail: xiaominglut@163.com

摘要 高速电磁阀作为数字液压回路的核心控制元件, 其动态特性决定了该液压回路的流量特性表现, 为提高数字液压回路流量特性计算精度, 提出一种包含可控占空比修正特征的液压回路动态流量计算模型, 并通过线性占空比区内的实测流量结果验证了所提模型的准确性。实验结果表明: 与理想开关无延迟模型相比, 实际开关有延迟动态流量特性模型所求瞬时流量最大相对误差减小 20.3%、平均相对误差减小 9.3%, 平均输出流量最大误差减少 73%, 计算精度显著提升。当有效开启时间 t_{se} 介于 2ms~7.43ms 之间, 工作频率 $f=100\text{Hz}$ 相较于 $f=50\text{Hz}$, 液压回路平均输出流量普遍增加额定流量的 40%, 流体惯性效应对输出流量影响显著。

关键词 高速电磁阀; 数字液压回路; 流量特性; 有效占空比; 计算误差

中图分类号 TH137 文献标志码 A

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0332

Investigation on dynamic flow characteristics of digital hydraulic circuit based on high speed solenoid valve

CHEN Xiaoming^{1,2,3}, ZHU Yuchuan², QIN Cheng¹, LI Yangmin³, FANG Yuan¹

(1. Aviation Industry Corporation of China Xi'an Aircraft Design Institute, Xi'an 710089, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. Faculty of Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

*E-mail: xiaominglut@163.com

Abstract As the core control component of digital hydraulic circuits, the dynamic characteristics of high-speed solenoid valves directly determine the flow performance of the circuit. To improve the computational accuracy of the flow characteristics in digital hydraulic circuits, a flow calculation model incorporating a controllable duty cycle correction module is proposed in this article. The accuracy of the proposed model was validated using measured flow data within the linear duty cycle region. Experimental results demonstrate that, compared to the ideal switch model without delay, the dynamic flow characteristics model with actual switching delay enables the maximum and average relative error of the instantaneous flow decreased by 20.3%, 9.3% and the maximum average error of the steady-state flow decreased by 73%, significantly improving computational accuracy. When the effective opening time t_{se} is between 2 ms and 7.43 ms, the average output flow rate of the hydraulic circuit at the operating frequency of $f=100\text{ Hz}$ generally increases by 40% of the rated flow compared to that at $f=50\text{ Hz}$, the notable influence of fluid inertance effects on the delivery flow of digital hydraulic circuits is validated.

Key words high speed solenoid valve; digital hydraulic circuit; flow characteristic; effective duty cycle; calculation error

传统液压元件及系统依赖节流耗散实现流量控制, 容易造成严重的功率损耗, 系统效率低^[1]。当前, 数字电子技术成功极大地推动了数字开关技术在液压领域的应用, 以高速电磁阀为代表的数字液压元件及回路具有更高能效^[2]。在数字液压回路中, 通常认为高速电磁阀在数字激励信号下持续高

收稿日期: 2025-05-28

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB3206505)

Fund: National Key Research and Development Program of China (2022YFB3206505)

网络首发时间: 2025-09-28 08:04:07 网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20250926.1648.003>

频开关, 形成与数字信号相对应的离散流量输出特性^[3]。学者们常以 PWM (pulse width modulation) 控制信号下阀口平均流量与占空比大小之间的线性关系作为高速电磁阀输出性能的评价指标^[4]。刘志浩等^[5]研究了 PWM-PFM (pulse frequency modulation) 模式下的高速电磁阀流量特性, 结果发现, 在 0~100% 占空比范围内, 阀口流量线性增加; 吴进军等^[6]对不同压力、阀口开度下高速电磁阀的阀口流量进行了理论计算与实验验证; 杨树军等^[7]认为占空比在 20%~80% 范围内, 高速电磁阀工作频率对阀口流量及线性度几乎无影响; 李玉贵等^[4]提出一种占空比线性转换的 PWM 控制模型, 阀口压差一定时, 可实现高速电磁阀在 0~100% 占空比范围内对阀口平均流量进行线性控制。

为提升流量控制精度, 高速电磁阀的工作频率随之增加, 阀芯启闭过程使得线性占空比区间随之减小, 基于线性占空比模型的阀口流量计算误差随之增大。为此, 杨家斌等^[8]针对高速开关阀死区非线性所致流量建模难度大的问题, 提出平均开度比描述法并建立流量-频率-占空比关系, 通过设计分段线性化方法实现流量比例控制。为实现可控占空比准确分段, 依赖于瞬态压力^[9]、电感及其增量^[10]、电流及其导数^[11-12]等变量的阀芯启闭非线性运动状态识别成为有效的解决方案之一^[9-12]。值得注意的是, 高强等^[12]运用线圈电流导数曲线特征预测高速电磁阀阀芯临界启闭时间点与完全启闭时间点, 两者预测误差分别为 6% 和 2%, 并在基础上求得高速电磁阀 100Hz 时的阀口流量计算误差仅 0.12L/min^[13], 具有较高精度。由此可知, 基于阀芯启闭动态时间识别的可控占空比分段可以有效解决阀口流量解算精度不足的问题。

在数字液压回路中, 受压力脉动特性^[14]、寄生流体惯性效应^[15]等环境因素影响^[16], 上述高速电磁阀阀口流量解算难以准确表征液压回路的流量输出特性, 回路流量特性更为复杂。杜恒等^[17]基于压力波传播特性提出六压力传感器测试方法, 其可在 500Hz 内实现误差<2%的流量脉动测量; 借鉴数字开关电子回路电感特征建模方法^[18], 潘敏与 Victor 等^[19-20]提出一种集中、分布参数模型揭示了理想开关无延迟高速电磁阀数字液压回路动、静态流量特性, 反映了流体惯性效应对数字液压回路输出流量的影响作用。

基于高速电磁阀理想开关无延迟的假设, 上述数字液压回路动态流量特性涵盖了流体惯性效应的影响, 忽略了可控占空比与 PWM 控制信号之间的迟滞环节, 难以准确反映数字液压回路输出流量特性。为此, 本文将可控占空比分段处理, 提出一种高速电磁阀实际开关有延迟的数字液压回路动态流量特性模型, 以获得更为准确的数字液压回路输出流量特性。

1 高速电磁阀液压回路构型

1.1 数字液压回路构型与工作原理

高速电磁阀数字流量控制液压回路与数字开关电路类似, 高速电磁阀的阀口可视为恒定液阻, 管路层流状态下同样具有线性液阻与液感。结合数字开关电路构型, 为系统解析高、低压供油压力下的高速电磁阀控回路动态流量特性, 建立等效液压回路 (见图 1(a)), 其中 p_{Hs} 、 p_{Ls} 分别为高、低压供油压力, R_v 为高速电磁阀阀口液阻, R_t 、 L_t 为传输管路的液阻与液感, p_d 为阀后等效负载压力。

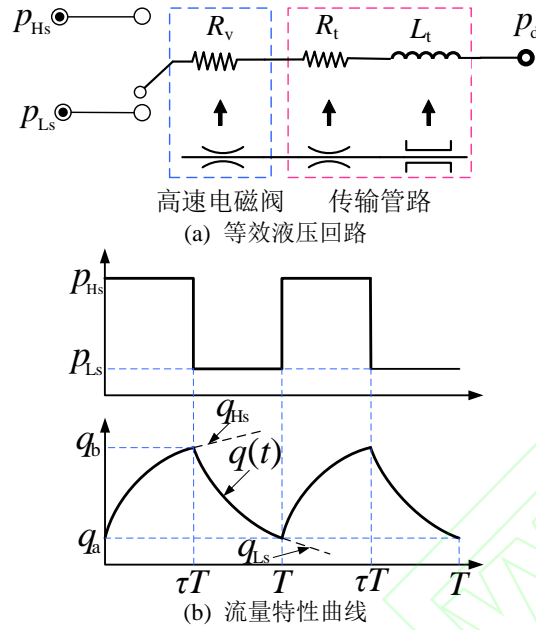


图 1 数字液压回路流量特性示意
Fig. 1 Schematic diagram of digital hydraulic circuit flow characteristics

结合图 1(a)所示等效液压回路, 可得液压回路供油压力与输出流量特性曲线^[9]如图 1(b)所示, 其中 τ 为 PWM 控制信号给定占空比, T 为切换周期。供油压力可表示为与高速电磁阀切换周期 T 一致的方波信号, 其瞬时值在 τT 时间段处于高压 p_{Hs} , 在 $(1-\tau T)$ 时间段处于低压 p_{Ls} , 对应动态流量特性曲线中, 流量上升段的可视为 $\tau=L/(R_v+R_t)$ 的指数函数, 流量下降段类似, 其中 q_a 为单一切换周期内流量特性曲线起点流量, q_b 为单一切换周期内流量特性曲线终点流量, q_{Hs} 、 q_{Ls} 分别为高、低压供油阶段液压回路输出流量, $q(t)$ 为流量特性曲线上的任意值。由图 1(b)可知, 在传输管路液阻 R_t 与液感 L_t 作用下, 在高压供油阶段, 输出流量沿指数函数曲线上升, 在低压供油阶段, 输出流量沿指数函数曲线下降。若高速电磁阀理想开关无延迟切换, 高、低压油液瞬间交替, 液压回路输出流量具有上述周期性变化特征。

1.2 高速电磁阀结构与工作原理

本文所述的两位两通高速电磁阀作为核心控制元件, 其性能优劣直接决定了液压回路的流量特性, 为便于理解, 以下给出其内部结构示意图如图 2 所示。

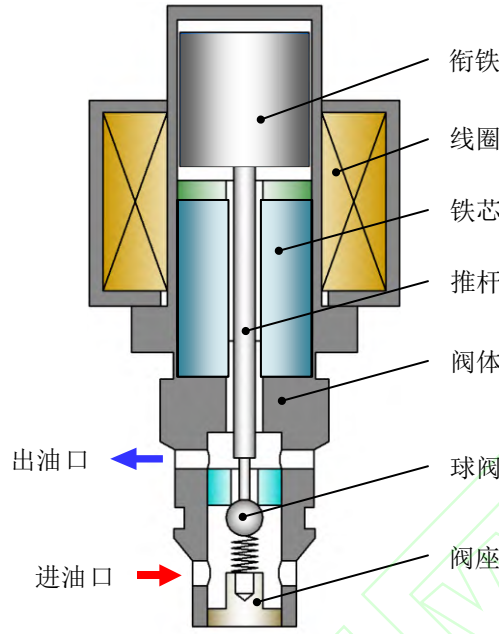


图 2 两位两通高速电磁阀结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of 2 way 2 port high speed solenoid valve

由图 2 可知，常闭式两位两通高速电磁阀主要由衔铁、铁芯、推杆、线圈、阀体、球阀、复位弹簧以及阀座等组成。无驱动电压时，电磁力为 0，衔铁、推杆无动作，球阀阀芯在复位弹簧与进油压力油液的共同作用下处于上止点，阀口可靠关闭，进油口与出油口断开，无油液流经阀口；有驱动电压时，电磁力开始增加并大于弹簧力与流体力的合力，衔铁、推杆与球阀阀芯在电磁力作用下一并向下的动作，使球阀阀芯运动至下止点，阀口完全开启，进油口与出油口连通，高压油液经阀口流入，满足系统流量需求。

2 高速电磁阀液压回路流量特性理论建模

2.1 理想开关模式下流量特性

在这一过程中液压回路压力损失 Δp 与输出流量 q_t 具有如下关系：

$$\Delta p = L_t \frac{dq_t}{dt} + R_e q_t \quad (1)$$

$$\Delta p = p_{Hs} - p_d \quad 0 \leq t \leq \tau T \quad (2)$$

$$\Delta p = p_{Ls} - p_d \quad \tau T \leq t \leq T \quad (3)$$

式中： Δp 为供油压力与等效负载压力之间的差值； R_e 为等效液阻， $R_e = R_v + R_t$ 。高速电磁阀阀口液阻 R_v 与传输管路液阻 R_t 可表示为

$$R_v = \frac{\Delta p}{q_t} = \frac{\rho_f \bar{q}_s^2}{2C_d^2 A_{jmax}^2} \quad (4)$$

$$R_t = \frac{128\mu_f l_t}{\pi d_t^4} \quad (5)$$

式中： \bar{q}_s 为高速电磁阀阀口平均流量； C_d 为阀口流量系数； A_{jmax} 为阀口通流面积； d_t 为管路直径。层流条件下，圆管流动中具有抛物线型速度分布，可得传输管路液感 L_t 为

$$L_t = \frac{16\rho_f l_t}{3\pi d_t^2} \quad (6)$$

值得注意的是，式（1）与基尔霍夫电压定律类似，可参考 Millmann 与 Taub 所提脉冲电压-电流

关系式^[18]，将液压回路输出流量 $q(t)$ 表示为

$$q_{Hs}(t) = q_{Hs} + [q(0) - q_{Hs}]e^{-t/\kappa_0} \quad (7)$$

$$q_{Hs} = \frac{p_{Hs} - p_d}{R_e} \quad 0 \leq t \leq \tau T \quad (8)$$

$$q_{Ls}(t) = q_{Ls} + [q(\tau T) - q_{Ls}]e^{-(t-\tau T)/\kappa_0} \quad (9)$$

$$q_{Ls} = \frac{p_{Ls} - p_d}{R_e} \quad \tau T \leq t \leq T \quad (10)$$

$$\kappa_0 = \frac{L_t}{R_e} \quad (11)$$

式中： κ_0 为时间常数； $q_{Hs}(t)$ 表示流量特性曲线 $q(t)$ 上升段； $q_{Ls}(t)$ 表示流量特性曲线 $q(t)$ 下降段； $q(0)$ 为高压供油阶段起点流量； $q(\tau T)$ 为低压供油阶段起点流量，又为高压供油阶段终点流量。两者具有以下关系：

$$q(\tau T) = q_{Hs} + [q(T) - q_{Hs}]e^{-\tau T/\kappa_0} \quad (12)$$

同样，低压阶段终点流量同为高压阶段起点流量，即 $q(0)=q(T)$ ，可表示为

$$q(T) = q(0) = q_{Ls} + [q(\tau T) - q_{Ls}]e^{-(T-\tau T)/\kappa_0} \quad (13)$$

结合式（12）、式（13）两者等效变换关系，可得高、低压工作模式下的该液压回路的平均输出流量 \bar{q}_m 如下：

$$\begin{aligned} \bar{q}_m &= \frac{V_{Hs} + V_{Ls}}{T} = \frac{\kappa_0(q_{Hs} - q(T))(e^{-\tau T/\kappa_0} - 1)}{T} \\ &+ \frac{\kappa_0(1 - e^{-(T-\tau T)/\kappa_0})(q(\tau T) - q_{Ls})}{T} \\ &+ \frac{q_{Hs}\tau T + q_{Ls}(T - \tau T)}{T} \end{aligned} \quad (14)$$

进一步，高、低压交替工作模式下的平均输出流量 \bar{q}_m 可简化为

$$\bar{q}_m = q_{Hs}\tau + q_{Ls}(1 - \tau) \quad (15)$$

将式（8）、式（10）均代入式（15）中，可得等效负载压力 p_d 为

$$p_d = p_{Hs}\tau + p_{Ls}(1 - \tau) - \bar{q}_m R_e \quad (16)$$

式（16）表明，高、低供油压力与等效负载压力呈线性关系，取决于等效液阻大小。

2.2 实际开关模式下流量特性

上述高速电磁阀控液压回路流量特性是基于高速电磁阀理想开关前提下开展的。实际上，高速电磁阀并非瞬间切换，而是具有一定开启、关闭延迟时间，为求解实际开关有延迟高速电磁阀情形下的高速电磁数字液压回路输出流量特性，通常运用有效占空比表征高速电磁阀实际开启时间与给定 PWM 占空比之间的映射关系。为此，通过高速电磁阀阀芯运动状态分析，开展有效占空比计算。

2.2.1 有效占空比计算

受制于电磁、机械惯性效应，高速电磁阀球阀阀芯运动轨迹包含了一系列特定的时间段，与 PWM 控制信号相比，存在临界开启时间 $0 \sim t_{con}$ 、开启运动时间 $t_{con} \sim t_{ton}$ 、开启保持时间 $t_{ton} \sim \tau T$ 、临界关闭时间 $\tau T \sim t_{coff}$ 、关闭运动时间 $t_{coff} \sim t_{toff}$ 、关闭保持时间 $t_{toff} \sim T$ （如图 3(a)所示）。为阐明高速电磁阀阀芯运动状态变化与 PWM 控制信号占空比之间的内在联系，结合图 3(a)所示的高速电磁阀 6 个启闭动态时间点，根据高速电磁阀阀芯运动轨迹特征，以下给出阀芯 5 种典型运动状态（见图 3(b)）。

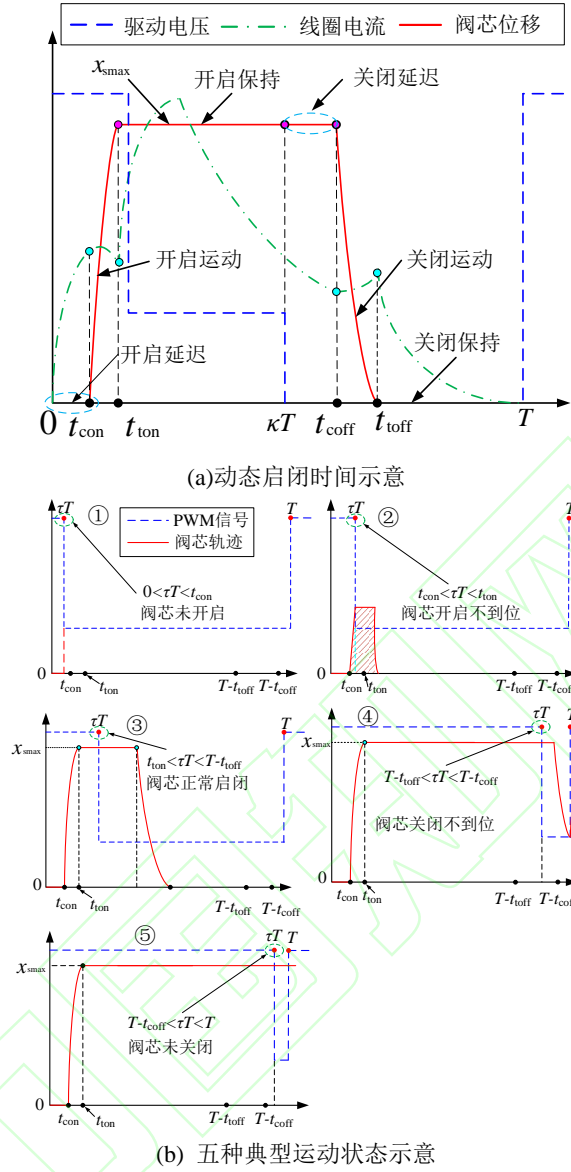


图 3 高速电磁阀动态启闭时间与典型运动状态示意

Fig. 3 Schematic diagram of dynamic opening and closing time and five typical motion states at high speed solenoid valve

1) 阀芯未开启。当电压激励时间为 $0 \leq \tau T \leq t_{con}$ 时, PWM 控制信号占空比数值过小, 电磁力仍小于液压力与弹簧力之和, 阀芯未开启, 阀芯有效开启时间为 0, 其对应有效占空比 τ_{se} 为

$$\tau_{se} = 0 \quad (17)$$

2) 阀芯开启不到位。当电压激励时间为 $t_{con} \leq \tau T \leq t_{ton}$ 时, PWM 控制信号占空比数值仍小, 电磁力开始大于液压力与电磁力之和, 阀芯短暂开启运动后, 又因激励时间较短电磁力不足而在到达最大阀芯位移前停止运动并关闭。此时, 阀芯的有效开启时间包括开启运动时间, 关闭延迟以及关闭运动时间三部分, 其对应有效占空比 τ_{se} 可表示为

$$\begin{aligned} \tau_{se} = & \frac{(\tau - t_{on}f)}{2} + \frac{t_{doff}(\tau - t_{con}f)}{(t_{ton} - t_{con})} \\ & + \frac{(t_{toff} - t_{coff})(\tau - t_{con}f)}{2(t_{ton} - t_{con})} \end{aligned} \quad (18)$$

3) 阀芯正常启闭。当电压激励时间为 $t_{ton} \leq \tau T \leq T - t_{toff}$ 时, PWM 控制信号占空比数值适宜, 阀芯正常开启、关闭。此时阀芯有效开启时间包括开启运动时间、开启保持时间, 关闭延迟时间以及关闭运

动时间四部分，其对应有效占空比 τ_{se} 可表示为

$$\tau_{se} = \tau - t_{con}f - \frac{(t_{ton} - t_{con})}{2}f + t_{coff}f + \frac{t_{toff} - t_{coff}}{2}f \quad (19)$$

4) 阀芯关闭不到位。当电压激励时间为 $T - t_{toff} \leq \tau T \leq T - t_{coff}$ 时，PWM 控制信号占空比数值偏大，电压激励信号降至 0 时，电磁力逐渐减小，并小于液压力与弹簧力之和，阀芯开始关闭运动，在此期间，由于下一个 PWM 信号重新激励，导致电磁力重新增加，当电磁力大于液压力与弹簧力之和，阀芯再次开启。此时阀芯有效开启时间包括阀芯开启延迟时间、开启运动时间、完全开启保持时间，关闭延迟以及未完全关闭运动时间五部分，其对应的有效占空比 τ_{se} 可表示为

$$\tau_{se} = \tau - (t_{con} + \frac{t_{ton} - t_{con}}{2}) \frac{(1 - \tau - t_{coff}f)}{(t_{toff} - t_{coff})} + t_{coff}f + \frac{(1 - \tau - t_{coff}f)}{2} \quad (20)$$

5) 阀芯未关闭。当电压激励时间为 $T - t_{coff} \leq \tau T \leq T$ 时，PWM 控制信号占空比数值过大，电压激励信号降至 0 时，电磁力虽有所减小，但仍大于液压力与弹簧力之和，造成阀芯无法关闭，此时阀芯的有效开启时间为整个周期 T ，其对应有效占空比 τ_{se} 为

$$\tau_{se} = \frac{1}{f} \quad (21)$$

综合式 (17) ~ 式 (21)，可得高速电磁阀线性运动状态下的阀芯有效开启占空比 τ_{se} 为

$$\tau_{se} = \begin{cases} 0 & , 0 \leq \frac{\tau}{f} \leq t_{con} \\ \frac{(\tau - t_{con}f) + \frac{t_{coff}(\tau - t_{con}f)}{2}}{(t_{ton} - t_{con})} + \frac{(t_{toff} - t_{coff})(\tau - t_{con})}{2(t_{ton} - t_{con})} & , t_{con} \leq \frac{\tau}{f} \leq t_{ton} \\ \tau - t_{con}f - \frac{(t_{ton} - t_{con})}{2}f + t_{coff}f & \\ + \frac{t_{toff} - t_{coff}}{2}f & , t_{ton} \leq \frac{\tau}{f} \leq \frac{1}{f} - t_{coff} \\ \tau + t_{coff}f & \\ - (t_{con} + \frac{t_{ton} - t_{con}}{2}) \frac{(1 - \tau - t_{coff}f)}{(t_{toff} - t_{coff})} & \\ + \frac{(1 - \tau - t_{coff}f)}{2} & , \frac{1}{f} - t_{toff} \leq \frac{\tau}{f} \leq \frac{1}{f} - t_{coff} \\ 1 & , \frac{1}{f} - t_{coff} \leq \frac{\tau}{f} \leq \frac{1}{f} \end{cases} \quad (22)$$

式中： f 为给定 PWM 工作频率。式 (22) 表明，有效占空比的准确计算与高速电磁阀给定 PWM 占空比所处时间段密切相关，且有效占空比在每一时间段的变化速率并不相同，这就造成了高速电磁阀有效占空比分段函数的计算方法。式 (22) 归纳了高速电磁阀阀芯 5 种典型运动状态下的有效占空比 τ_{se} 计算方法，为较高工作频率下（阀芯运动状态时间占比增加）的高速电磁阀阀口平均流量准确计算提供了依据。基于式 (22) 可直观阐明 PWM 控制信号占空比 τ 与有效占空比 τ_{se} 以及阀口平均流量大小之间的内在联系。

结合几种典型状态下的有效占空比模型，可求得本文所述高速电磁阀的有效占空比变化规律。在测得高速电磁阀启、闭动态时间情况下，可利用理论模型求得高速电磁阀数字液压回路输出流量，并

与齿轮流量传感器实测结果对比分析。在基于线圈电流识别高速电磁阀四个动态时间（ $t_{\text{con}}=2\text{ms}$, $t_{\text{ton}}=3.9\text{ms}$, $t_{\text{coff}}=1.9\text{ms}$, $t_{\text{loff}}=3\text{ms}$ ）的基础上，结合式（22）可得两种工作频率下（ $f=50\text{Hz}$ 、 $f=100\text{Hz}$ ）有效占空比变化曲线如图4所示。

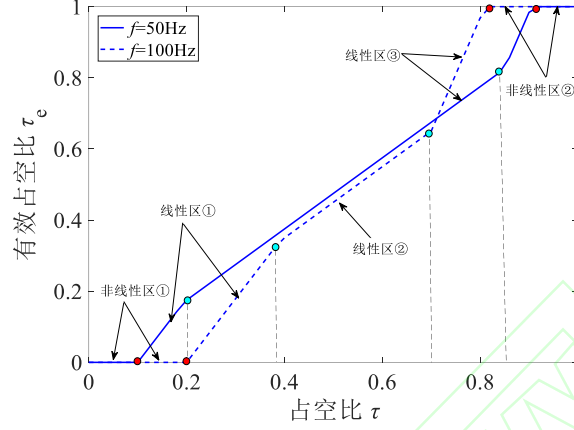


图4 不同给定占空比对应有有效占空比
Fig.4 Effective duty cycle at different given duty cycle

由图4可知，工作频率 $f=50\text{Hz}$ 时，有效占空比包含三个线性区，其中线性区①为 $[0.1 \sim 0.2]$ ，对应有有效占空比 τ_e $[0 \sim 0.175]$ 普遍低于给定占空比，线性区②为 $[0.2 \sim 0.84]$ ，对应有有效占空比 τ_e $[0.175 \sim 0.815]$ 较给定占空比 τ 稍低，线性区③为 $[0.84 \sim 0.88]$ ，对应有有效占空比 τ_e $[0.815 \sim 0.92]$ ，非线性区①与非线性区②分别为 $[0 \sim 0.1]$ 、 $[0.92 \sim 1]$ ，可得有效占空比 τ_e 线性区间为 $[0.1 \sim 0.88]$ ；工作频率 $f=100\text{Hz}$ 时，有效占空比线性区①为 $[0.2 \sim 0.38]$ ，对应有有效占空比 τ_e $[0 \sim 0.32]$ ，线性区②为 $[0.38 \sim 0.7]$ ，对应有有效占空比 τ_e $[0.32 \sim 0.65]$ ，线性区③为 $[0.7 \sim 0.78]$ ，对应有有效占空比 τ_e $[0.65 \sim 0.9]$ ，非线性区①与非线性区②分别为 $[0 \sim 0.2]$ 、 $[0.9 \sim 1]$ ，此时有效占空比 τ_e 线性区间为 $[0.2 \sim 0.78]$ ，相较于 $f=50\text{Hz}$ ，有效占空比 τ_e 线性区间缩短 25%。

2.2.2 回路流量特性计算

在有效占空比计算的基础上，利用给定 PWM 占空比与有效占空比的作用关系，借鉴理想开关高速电磁阀控液压回路流量特性模型，可将实际开关有延迟高速电磁阀控液压回路流量特性（高、低压供油压力模式下的流量特性曲线），即式（7）、式（9）变换为

$$q_{\text{Hs}}(t) = q_{\text{Hs}} + [q(0) - q_{\text{Hs}}]e^{-t/\kappa_0} \quad 0 \leq t \leq \tau_{\text{se}}T \quad (23)$$

$$q_{\text{Ls}}(t) = q_{\text{Ls}} + [q(\tau T) - q_{\text{Ls}}]e^{-(t-\tau_{\text{se}}T)/\kappa_0} \quad \tau_{\text{se}}T \leq t \leq T \quad (24)$$

式（23）、式（24）表明，实际开关有延迟高速电磁阀控液压回路中，输出流量特性曲线状态切换不再遵循给定占空比 τ 大小，而是受控于有效占空比 τ_{se} 大小。

为探究有效占空比 τ_{se} 与平均输出流量 \bar{q}_m 之间的内在联系，运用有效占空比 τ_{se} 代替 PWM 控制信号给定占空比 τ ，可将式（15）变换为

$$\begin{aligned} \bar{q}_m &= q_{\text{Hs}}\tau_{\text{se}} + q_{\text{Ls}}(1 - \tau_{\text{se}}) = \tau_{\text{se}} \frac{p_{\text{Hs}} - p_{\text{d}}}{R_{\text{e}}} \\ &+ (1 - \tau_{\text{se}}) \frac{p_{\text{Ls}} - p_{\text{d}}}{R_{\text{se}}} \end{aligned} \quad (25)$$

式（25）表明，在高、低压供油压力 p_{Hs} 、 p_{Ls} 恒定的情形下，平均输出流量 \bar{q}_m 与有效占空比 τ_{se} 正相关，因有效占空比 τ_{se} 存在死区、饱和区以及线性区，对应平均输出流量 \bar{q}_m 亦是如此。

为对比有效占空比 τ_{se} 与给定占空比 τ 下, 高速电磁阀控液压回路输出流量特性差异, 结合式 (22)、式 (23)~式 (25), 求得工作频率 100Hz 时, 实际开关有延迟高速电磁阀控液压回路流量特性曲线与平均输出流量如图 5 所示。

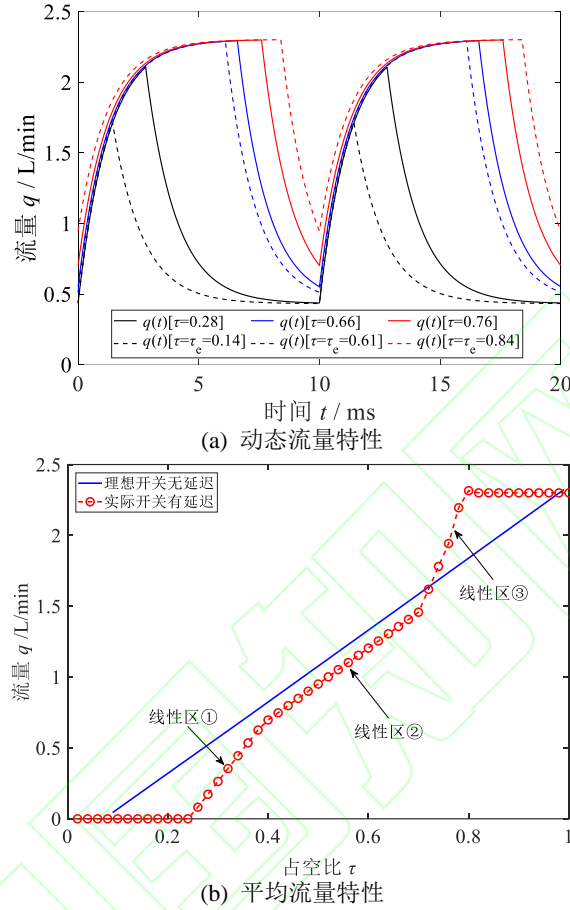


图 5 不同有效占空比下动态、平均流量特性
Fig. 5 Dynamic and steady-state flow characteristic at different duty cycle

由图 5(a)可知, 给定占空比 $\tau=0.28$ 时, 流量特性曲线上升段峰值为 2.1L/min (持续 2.8ms), 由式 (22) 所求有效占空比 $\tau_{se}=0.14$, 流量特性曲线上升段提早结束 (持续 1.4ms), 峰值流量为 1.7L/min, 两者最大瞬态流量相差 0.4L/min, 造成图 5(b)所示的液压回路平均流量相应给定占空比 ($\tau=0.28$) 降低 0.35L/min。

给定占空比 $\tau=0.66$ 时, 流量特性曲线上升段峰值为 2.3L/min (持续 6.6ms), 由式 (22) 所求有效占空比 $\tau_{se}=0.61$, 流量特性曲线上升段提早结束 (持续 6.1ms), 上升段流量差异很小, 可忽略不计, 流量特性曲线下落段两者最大瞬时流量相差 0.04L/min, 造成图 5(b)所示的液压回路平均流量相应给定占空比 ($\tau=0.66$) 降低 0.13L/min。

给定占空比 $\tau=0.76$ 时, 流量特性曲线上升段峰值为 2.3L/min (持续 7.6ms), 由式 (22) 所求有效占空比 $\tau_{se}=0.84$, 流量特性曲线上升段延迟结束 (持续 9.1ms), 上升段流量差异很小, 可忽略不计, 流量特性曲线下落段两者最大瞬时流量相差 0.25L/min, 图 5(b)所示的液压回路平均流量相应给定占空比 ($\tau=0.76$) 高出 0.2L/min。由图 5(b)可知, 不同给定占空比下的平均输出流量与有效占空比 τ_{se} 变化规律基本一致, 平均输出流量线性区间①、③分别为[0.24~0.4]、[0.7~0.8], 平均输出流量线性区间②为[0.4~0.7], 平均输出流量线性区①、③具备更大的流量增益, 受高速电磁阀开启延迟影响, 给定占空比 $\tau \leq 0.72$, 实际开关有延迟模式下所求平均输出流量始终低于理想开关无延迟模式, 给定占空比 $\tau > 0.72$ 则反之。

为阐明与工作频率相关的流体惯性效应（式（1）所表达）对数字液压回路输出流量大小的影响，基于有效开启时间 $t_{se}=\tau_{se}/f$ 表达式给出两种工作频率下（ $f=100\text{Hz}$ 、 $f=50\text{Hz}$ ）仿真计算输出流量结果如图 6 所示。

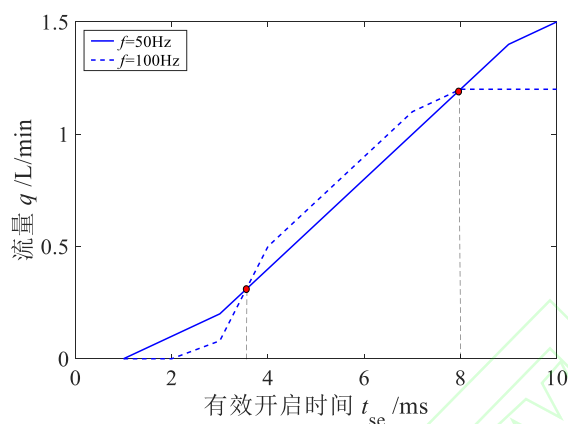


图 6 不同有效开启时间下的液压回路平均输出流量

Fig. 6 Measured mean delivery flow rate of hydraulic circuit at different effective opening time

由图 6 可知，在有效开启时间 $t_{se} \leq 3.8\text{ms}$ 时， $f=50\text{Hz}$ 下的平均流量低于 $f=100\text{Hz}$ ，两者最大差值为 0.12L/min ；在有效开启时间 $t_{se}=3.8\sim 8\text{ms}$ 之间， $f=100\text{Hz}$ 下的平均输出流量高于 $f=50\text{Hz}$ ，两者最大差值 0.1L/min ，当 $t_{se} \geq 8\text{ms}$ 后， $f=100\text{Hz}$ 下的平均输出流量已经饱和，即 1.2L/min 。

3 液压回路流量特性实验验证

3.1 流量特性测试系统

为实验验证所提实际开关有延迟高速电磁阀控液压回路流量特性模型，搭建了高速电磁阀控液压回路动态流量特性测试系统（见图 7）。

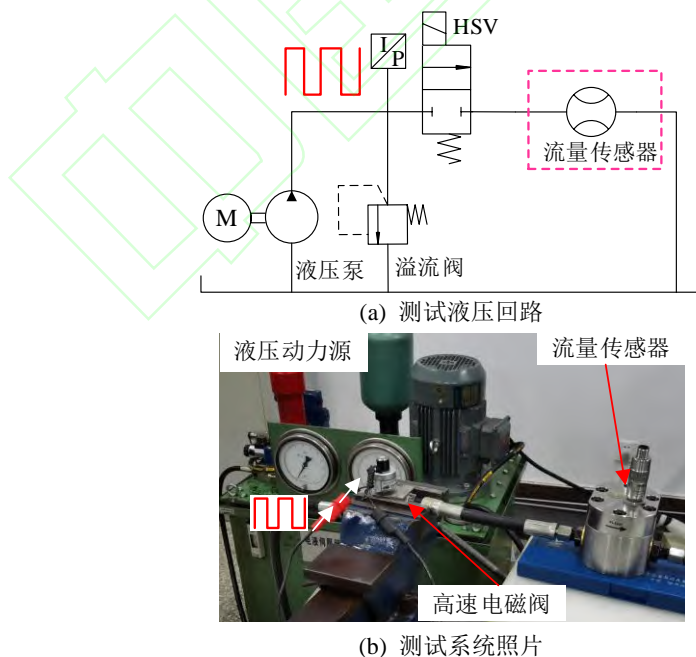


图 7 高速电磁阀动态流量特性测试系统

Fig. 7 Principle and photograph of measurement system

该测试系统包括液压动力源（额定压力： 10MPa ，额定流量： 10L/min ）、两位两通高速电磁阀

(贵州红林, HSV3103S1, 额定压力 10MPa, 额定流量: 8L/min)、Links-RT 半物理仿真控制平台(信号采样周期: 50 μ s, 内置 NI PCI-6259 采集卡, 其单通道模拟输入采样率: 1.25Ms/s, 数字 I/O 采样率: 10MHz)、电压功率放大器(南通隆仪, LYB-305D, 额定功率: 30W)、高动态压力传感器(昆山双桥, CYG401F, 精度: 0.5%, 额定压力: 10MPa、固有频率: 320kHz)、齿轮流量传感器(上海扬基, NCR3L, 精度: 0.1%, 流量范围: 0.02~3L/min, 固有频率 30Hz)。齿轮流量传感器用以采集高速电磁阀特定工作频率下回路动态流量, 高动态压力传感器用以采集当前供油压力。

3.2 试验结果分析

为验证所提实际开关有延迟高速电磁阀控液压回路流量特性模型, 以工作频率 1Hz、5Hz PWM 控制信号下, 测得液压回路瞬态输出流量为评价指标。压力条件: $p_{Hs}=2.8\text{MPa}$ 、 $p_{Ls}=0$, $p_d=0.2\text{MPa}$, 给定占空比 $\tau=0.7$ (根据式 (22) 可得有效占空比 $\tau_{se}=0.65$) 下, 实测瞬时供油压力、瞬时输出流量与本文所提模型所求对比结果如图 8 所示。

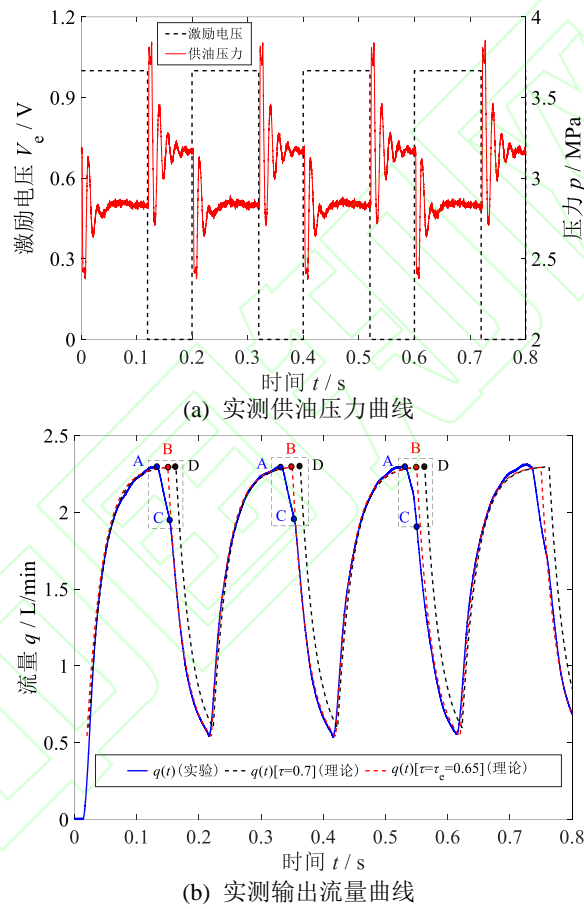


图 8 液压回路动态流量测试结果对比
Fig. 8 Comparison between measured and theoretical delivery flow rate

由图 8(a)可知, 高速电磁阀开启时, 供油压力依次经历一个反向压力波(峰值逼近 2.43MPa)、正向压力波(峰值逼近 3.11MPa), 经历两个周期的压力振动衰减, 压力稳定在 2.8MPa; 高速电磁阀关闭时, 供油压力依次经历正向压力波(峰值逼近 3.72MPa)、反向压力波(峰值逼近 2.7MPa), 经历六个周期的压力幅值振荡衰减过程, 压力稳定在 3.17MPa, 上述分析表明, 在高速电磁阀开启时, 忽略小范围的压力幅值振荡影响, 可提供基本稳定 2.8MPa 高压供油压力。

由图 8(b)可知, A、B、D 分别为实测、实际开关有延迟的理论模型、理想开关无延迟的理论模型的峰值流量点, C 点为实测流量曲线的转折点。因流量传感器测试效果不佳, 造成实测动态流量曲线缺失 $\triangle ABC$ 区域, 实测动态流量曲线由 l_{AB} 到 l_{BC} 的变成了 l_{AC} (前三个周期均是)。具体表现

为：在 $0 \sim T$ 范围内,实测瞬时流量缓慢升至 2.3L/min （上升段持续 13ms ），实测瞬时流量缓慢降至 0.54L/min （下降段持续 7ms ）；理想开关无延迟时，在 $0 \sim 0.7T$ 范围内，模型所求流量特性曲线上升段与实测瞬时流量曲线基本吻合，峰值流量为 2.3L/min ，在大于 $0.7T$ 时，理想开关无延迟时，模型所求流量特性曲线与实测流量曲线差异较大，且所求流量特性曲线下降段峰值降至 0.62L/min ，与实测结果相比瞬时流量最大误差为 0.755L/min ，最大相对误差 33% ，平均、均方根误差分别为 0.257L/min 、 0.377L/min ，平均相对误差为 11.2% ；实际开关有延迟时，在 $0 \sim 0.65T$ 范围内，模型所求流量特性曲线上升段与实测瞬时流量曲线基本吻合，在大于 $0.65T$ 时，模型所求流量特性曲线下降段与实测瞬时流量曲线基本重合，上升段、下降段峰值流量分别为 2.29L/min 、 0.55L/min ，与实测结果相比瞬时流量最大误差为 0.29L/min ，最大相对误差 12.7% ，平均、均方根误差分别为 0.044L/min 、 0.076L/min ，平均相对误差为 1.9% 。与理想开关无延迟模型所求相比，消除了模型所求动态流量与实测动态流量曲线的相位差（ $0.05T$ ），最大相对误差减小 20.3% ，平均相对误差减小 9.3% ，计算精度得以提升，验证了本文考虑高速电磁阀实际开关有延迟、对有效占空比的修正具有重要意义。

因高频控制下的动态流量测试条件不足，以下给出工作频率 $f=100\text{Hz}$ 时不同给定占空比下液压回路平均输出流量（见图 9(a)）以验证高频工况下的本文所提模型计算准确性，并通过两种高频工况下（ $f=50\text{Hz}$ 、 $f=100\text{Hz}$ ）在不同有效开启时间下的实测平均输出流量对比分析验证流体惯性效应对输出流量的影响（见图 9(b)）。

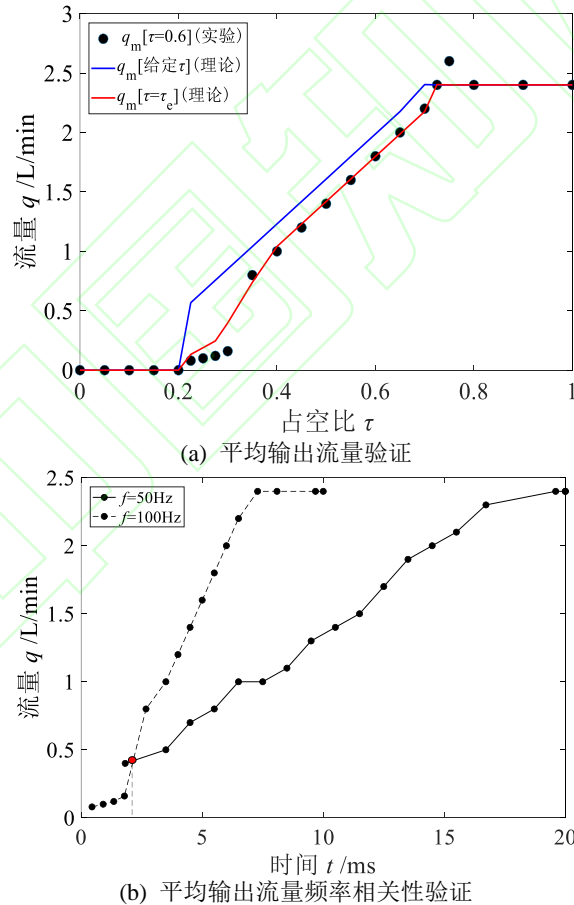


图 9 液压回路平均输出流量测试结果对比

Fig. 9 Comparison between measured and theoretical mean delivery flow rate of hydraulic circuit

由图 9(a)可知，与实测平均输出流量结果相比，理想开关无延迟时，流量特性模型所求线性区①、②分别为 $[0.2 \sim 0.25]$ 、 $[0.25 \sim 0.65]$ ，平均输出流量线性区①最大、平均、均方根误差分别为 0.69 、 0.59 、 0.6 ；平均输出流量线性区②最大、平均、均方根误差分别为 0.23 、 0.21 、 0.21 。实际开关有延

迟时, 流量特性模型所求流量特性模型所求线性区①、②分别为[0.2~0.3]、[0.3~0.7], 平均输出流量线性区①最大、平均、均方根误差分别为 0.23、0.13、0.14; 平均输出流量线性区②最大、平均、均方根误差分别为 0.062、0.025、0.03。与前者相比, 实际开关有延迟时, 模型所求平均输出流量线性区①、②最大计算误差分别减少 67%、73%, 计算精度显著提升。由图 9(b)可知, 在高速电磁阀有效开启时间 $t_{se}=2\text{ms}$ 时, 两种工作频率 ($f=50\text{Hz}$ 、 $f=100\text{Hz}$) 下的液压回路平均输出流量相等 (输出流量约为 0.42L/min), 当有效开启时间 t_{se} 介于 $2\text{ms}\sim 7.43\text{ms}$ 之间, 工作频率 $f=100\text{Hz}$ 下的液压回路平均输出流量始终高于 $f=50\text{Hz}$, 最大流量差值为 1.4L/min ($t_{se}=7.3\text{ms}$), 平均流量差值约为 0.96L/min , 约占高速电磁阀最大输出流量的 40%, 这就表明与工作频率有关的流体惯性效应对数字液压回路平均输出流量影响显著。

4 结 论

为提升高速电磁阀数字液压回路流量特性计算精度, 提出一种考虑高速电磁阀有效占空比的数字液压回路流量特性模型, 揭示了高速电磁阀高频开关模式下的数字流量特性规律, 所得主要结论如下:

1) 实验结果表明, 工作频率 5Hz , 实际开关有延迟 (有效占空比 $\tau_{se}=0.65$), 本文所提流量特性理论模型所求与实测瞬时流量曲线相比, 最大误差为 0.29L/min , 相对误差 12.7%, 平均误差约为 0.044L/min , 均方根误差约为 0.076L/min , 与理想开关无延迟相比, 最大相对误差减小 20.3%, 平均相对误差减小 9.3%, 计算精度得以提升。

2) 实验结果表明, 工作频率 100Hz , 实际开关有延迟时, 流量特性模型所求平均输出流量线性区①最大、平均、均方根误差分别为 0.23、0.13、0.14; 平均输出流量线性区②最大、平均、均方根误差分别为 0.062、0.025、0.03, 与理想开关无延迟模型相比, 平均输出流量线性区①、②最大误差分别减少 67%、73%, 计算精度显著提升。

3) 实验结果表明, 当有效开启时间 t_{se} 介于 $2\text{ms}\sim 7.43\text{ms}$ 之间, 工作频率 $f=100\text{Hz}$ 下的液压回路平均输出流量始终高于工作频率 $f=50\text{Hz}$, 最大流量差值为 1.4L/min ($t_{se}=7.3\text{ms}$), 平均流量差值约为 0.96L/min , 约占高速电磁阀额定输出流量的 40%, 这就表明与工作频率有关的流体惯性效应对数字液压回路平均输出流量影响显著。

参考文献

- [1] RANNO M. Achieving efficient control of hydraulic systems using on/off valves[J]. Doctoral dissertation, University of Minnesota, 2016.
- [2] YANG H Y, PAN M. Engineering research in fluid power: a review[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science) 2015, 16(6): 427-442.
- [3] DONKOV V H, ANDERSEN T, LINJAMA M, et al. Digital hydraulic technology for linear actuation: A state of the art review[J]. International Journal of Fluid Power, 2020, 21(2): 263-304.
- [4] 李玉贵, 张辽, 申竹茂, 等. 基于占空比线性转换的高速开关阀流量控制[J]. 机床与液压, 2016, 44(11): 104-108.
LI Y G, ZHANG L, SHEN Z M, et al. Flow control of high-speed on-off valve based on linear transformation of the duty ratio[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(11): 104-108(in Chinese).
- [5] LIU Z H, GAO Q H, YU C Q, et al. Collaborative synchronization digital control for double hydraulic cylinders[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6: 371403.
- [6] 吴进军, 焦宗夏, 李晨风, 等. 基于高速开关阀理论模型的阀体流量估算方法研究[J]. 液压与气动, 2017(3): 61-66.
WU J J, JIAO Z X, LI C F, et al. The research of the estimation method for the valve flux based on the theoretical model of the high speed switch valve[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2017(3): 61-66(in Chinese).
- [7] 杨树军, 王楠, 王青. 高速开关阀流量特性的试验研究[J]. 机床与液压, 2015, 43(23): 1-3.
YANG S J, WANG N, WANG Q. Experimental study of the static characteristics of the high-speed switch valve[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(23): 1-3(in Chinese).
- [8] YANG J B, LI X N. Study on flow characteristics and linearization of pneumatic high-speed on-off valve[J]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020, 1654(1): 012063.
- [9] MAHRENHOLZ J, LUMKES J. Analytical coupled modeling and model validation of hydraulic on/off valves[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2010, 132(1): 011005.
- [10] TIAN H, ZHAO Y R. Coil inductance model based solenoid on-off valve spool displacement sensing via laser calibration[J]. Sensors, 2018, 18: 4492.
- [11] ABOROBAA A N, GHAMRY K A, SALEH A, et al. Sensorless position estimating and transition time identifying for the spool of a high speed on/off solenoid valve[J]. FME Transactions, 2022, 50(1): 99-108.
- [12] GAO Q, ZHU Y C, WU C W, et al. Identification of critical moving characteristics in high speed on/off valve based on time derivative of the coil current[J]. Proc IMechE, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2021, 235(7): 1084-1099.
- [13] GAO Q, ZHU Y C, WANG Y W. Rapid flow measurement for high speed on/off valve based on coil current derivative[J]. Journal of

- Mechanical Science and Technology, 2022, 36: 2957-2967.
- [14] XU L, WEI L, WANG L, et al. Research and analysis of high speed on-off valve based on pressure pulsation of valve port[C]//2019 IEEE 8th International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM), Wuhan, China, April 10-13, 2019: 526-532.
- [15] 陈晓明, 朱玉川, 高强, 等. 数字开关液压系统中流体惯性效应分析与实验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 70-76.
- CHEN X M, ZHU Y C, GAO Q, et al. Analysis and experiment of fluid inertia in digital switched hydraulic system[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2020, 48(6): 70-76(in Chinese).
- [16] ZHANG J H, WANG D, XU B, et al. Flow control of a proportional directional valve without the flow meter[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2019, 67: 131-141.
- [17] CHEN F L, HUANG H, LI Y Z, et al. Measurement and experimental study of flow pulsation in high-speed on-off valve based on six pressure sensors[J]. Measurement, 2025: 118547.
- [18] MILLMANN J, TAUB H. Pulse, digital, and switching waveforms[M]. New York: McGraw-Hill, 1965.
- [19] PAN M, JOHNSTON N, PLUMMER A, et al. Theoretical and experimental studies of a switched inertance hydraulic system[J]. Proc IMechE, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2014, 228(1): 12-25.
- [20] DE NEGRI V J, NOSTRANI M P, WANG P, et al. Modelling and analysis of hydraulic step-down switching converters[J]. International Journal of Fluid Power, 2015, 16(2): 111-121.