



中国机械工程
China Mechanical Engineering(中国机械工程)
ISSN 1004-132X,CN 42-1294/TH

《中国机械工程》网络首发论文

题目: 基于均匀切换的并联数字阀控系统位置控制策略
作者: 高强, 朱玉川
收稿日期: 2019-05-15
网络首发日期: 2019-10-14
引用格式: 高强, 朱玉川. 基于均匀切换的并联数字阀控系统位置控制策略. 中国机械工程. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20191014.1049.012.html>



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。

基于均匀切换的并联数字阀控系统位置控制策略

高 强 朱玉川

南京航空航天大学机电学院，南京，210016

摘要：针对并联数字阀控系统在 PNM(Pulse Number Modulation)控制策略下易出现低速定位精度低的问题，提出一种复合控制策略，即低速工况采用差动 PWM(Pulse Width Modulation)控制器，其余工况采用基于模型的 PNM 控制器。在 PNM 控制信号下，由于受到跟踪轨迹和位置误差的影响，数字流量控制单元中各开关阀的切换次数差异性较大；而在差动 PWM 控制信号下，各开关阀的切换次数差距被进一步扩大，这会导致开关阀疲劳磨损程度和阀口结构特性不一致，进一步影响系统控制精度。因此，基于循环滑动法分别对 PNM 和 PWM 信号进行切换优化控制以降低开关阀切换次数的差异性。针对所提出的控制策略分别开展了仿真与实验验证等工作，实验结果表明，在跟踪五阶多项式曲线轨迹时，液压缸的平均定位误差和最小定位误差从 0.528 mm 和 0.221 mm 分别降低至 0.032 mm 和 0.003 mm 左右，并且开关阀切换次数的分布均匀性得到了显著提高。

关键词：数字液压；数字流量控制单元；均匀切换；差动脉宽调制

中图分类号：TH137

DOI：

Position Control Strategy of Parallel Digital Valve-Controlled System

Based on Uniform Switching Method

GAO Qiang ZHU Yuchuan

College of Mechanical and Electrical Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

Abstract: To solve the problems of large positioning error of the parallel digital valve-controlled system at low speed condition under PNM (Pulse Number Modulation) control strategy, a compound control strategy is proposed, in which a differential PWM (Pulse Width Modulation) controller is adopted at low speed and a model-based PNM controller is adopted at other conditions. Due to the influence of the tracking trajectory and the position error, the difference among number of switchings of valves in one DFCU (Digital Flow Control Unit) actually exists and is further enlarged by PWM signals. These issues cause that the fatigue wear degree of different valves and the structural characteristics of the valve port of different valves are different, which affect the system control accuracy. Therefore, a uniform switching optimization based on the circular sliding method is proposed to reduce the difference among number of switchings of valves. Finally, the comparative results conducted by simulation and experiments demonstrate that, when tracking the trajectory of a fifth-order polynomial curve, with the proposed control strategy, the average and minimum positioning error of the hydraulic cylinder are reduced from 0.528 mm and 0.221 mm to 0.032 mm and 0.003 mm, respectively, and the degree of equal distribution of switchings among the valves is significantly improved.

Key words: digital hydraulic; digital flow control unit; uniform switching; differential PWM

0 引言

电液伺服系统因具有高频响和高精度等优势，在航空航天、机器人以及冶金等领域具有广泛的应用^{[1][2]}。但由于受到比例/伺服阀结构特性

的约束，电液伺服系统存在效率低、成本高以及抗油污能力差等问题。而数字液压凭借其高效率和高可靠性的优势，被认为是未来可以替代电液伺服技术的一个潜在方案^{[3][4]}。数字液压系统通过

基金项目：国家自然科学基金（基金号 51575258）

收稿日期：2019-05-15

软件实现智能监测与故障诊断,具有“数字化”与“即插即用”的功能,符合工业 4.0 的需求^[5]。

目前数字液压系统主要分为两类,一类是以高频切换技术为基础的开关惯性液压系统^[6],另一类是以并联连接技术为基础的并联数字阀控系统^[7],其中后者相对于前者具有低冲击和高可靠性等优势,受到了国内外研究学者的广泛关注。

国外如坦佩雷理工大学的 Matti Linjama 在 2003 年首次提出了数字流量控制单元(Digital Flow Control Unit, DFCU)原理,并通过实验验证了 DFCU 的可行性^[8],在此基础上提出了基于模型的 PNM(Pulse Number Modulation)控制来实时计算执行器运动所需流量^[9]。Miika Paloniitty 等将 PWM(Pulse Width Modulation)和 PFM(Pulse Frequency Modulation)应用到等值编码 DFCU 中,通过提高驱动频率来实现微流量的调节,并提出一种循环缓冲策略以实现多个开关阀的均匀切换控制,但由于开关阀一直处于高频切换状态,压力冲击较大^{[10][11]}。国内如李文华等^[12]采用多个电磁阀并联控制液压缸,每个电磁阀采用 PWM 信号控制以实现液压缸的速度控制;汪首坤等^[13]针对 DFCU 控制系统,设计一种位置闭环控制器和基于代价函数的前馈控制器,有效提高了控制精度;康洪铭等^[14]采用 PCM(Pulse Code Modulation)数字阀和 PWM 数字阀来控制风洞供气系统,其中 PCM 数字阀用于流量量程调节, PWM 数字阀用于精细流量调节。

可以看出,现有研究通常将 PWM、PFM 信号与 PNM 信号相结合,并应用到 DFCU 上来提高其流量控制精度,但由于 PWM 和 PFM 的持续作用,易引起压力冲击和开关阀磨损等问题。开关阀在高频切换状态下极易磨损,一方面阀口结构特性受到破坏,造成流量模型精度降低,另一方面每个开关阀的切换次数相差较大且难以预测,造成不同开关阀的使用寿命差异性大,不利于后期维护。针对上述问题,本研究在文献^[11]的基础上,提出一种新型控制策略:在速度较大的工况下,采用与现有文献相同的控制方法,即基于模型的 PNM 控制策略;而在低速工况下,通过控制两个 DFCU 的差动流量来实现液压缸的微定位。针对等值编码 DFCU 中开关阀切换次数差异较大的问题,采用一种基于循环滑动法的均匀切换优化策略分别对 PNM 和差动 PWM 信号进行优化,以提高开关阀切换次数的分布均匀性。

1 并联数字阀控系统的数学模型

所研究的并联数字阀控系统如图 1 所示,采用两个等值编码 DFCU 控制液压缸,该等值编码 DFCU 由 8 个相同规格的开关阀组成,通过对 8 个开关阀编码可以实现不同离散流量的输出。

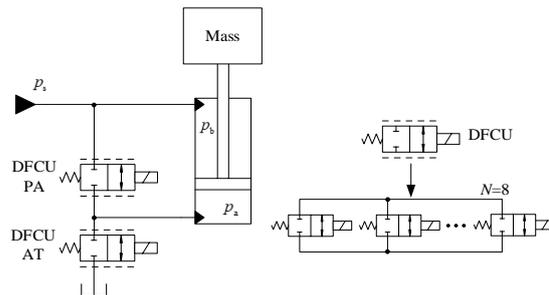


图 1 系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of the system

1.1 DFCU 流量模型

根据上述描述,可知系统的控制性能受到了 DFCU 特性的影响,包括动态和静态特性。DFCU 的动态特性指的是开关阀的启闭特性,该特性直接决定了 DFCU 的响应和控制系统的采样时间。开关阀的动态响应一般采用输入电压-阀芯位移关系曲线来表示,输出位移相对于电压存在滞后,这是由于受到电感和机械滞后的影响^[15],该特性不在本文的研究内。为了便于 DFCU 动态特性建模,人为设置打开延迟时间 t_1 , 打开运动时间 t_2 , 关闭延迟时间 t_3 和关闭运动时间 t_4 来描述其动态特性。

DFCU 的静态特性是指 DFCU 在不同编码组合下的输出流量特性,该特性决定了输出流量的范围和控制精度。由于所研究的 DFCU 为等值编码型,其开关组合可用如下矩阵表示,

$$u_{\text{int}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中“0”表示阀关闭,“1”表示阀打开。假设每个开关阀的流量系数一样,每个开关阀的静态流量可用下式表达

$$Q_1 = k_v \sqrt{\Delta p} \quad (2)$$

式中, k_v 为开关阀的流量增益, Δp 为开关阀的两端压差。

则等值编码 DFCU 的输出流量如图 2 所示。

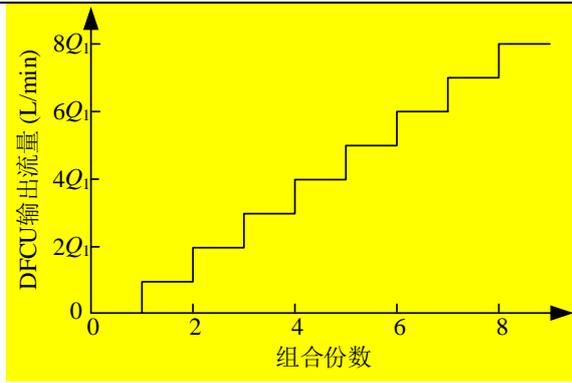


图2 DFCU 输出流量

Fig.2 Output flow rate of the DFCU

由图 2 可知，等值编码 DFCU 输出流量有如下特性：由于每个阀的流量系数相同，输出流量组合仅有 $N+1$ 份（与开关量一致），相对于二进制 DFCU 较小；由于同一输出流量可用不同的开关组合来实现，故具有较高的容错能力。

1.2 液压缸动力学模型

活塞杆在运动过程中，受到黏性阻尼力和外负载力等多种外力的影响。在不考虑液压缸泄漏的情况下，液压缸向上运动时，其动力学方程为

$$m\ddot{x} = p_a A_a - p_b A_b - F_s - mg \quad (3)$$

式中， m 为负载质量， x 为活塞杆位移， p_a 和 p_b 分别为液压缸无杆腔和有杆腔的压力， g 为重力加速度， A_a 和 A_b 分别为液压缸无杆腔和有杆腔的面积， F_s 为摩擦力。

其中摩擦力 F_s 由最大静摩擦力、库伦摩擦力、黏性摩擦力和 Stribeck 效应组成，其模型为^[16]

$$F_s = \left[F_C + (F_{ss} - F_C) e^{-\frac{\dot{x}}{\dot{x}_s}} \right] \text{sgn}(\dot{x}) + B_p \dot{x} \quad (4)$$

式中， F_C 为库伦摩擦力， F_{ss} 为最大静摩擦力， \dot{x}_s 为 Stribeck 速度， B_p 为液压缸的黏性摩擦系数。

液压缸向上运动过程中，其无杆腔的压力动态方程为^{[17][18]}

$$\dot{p}_a = \frac{\beta_e}{V_{01} + A_a x} (-A_a \dot{x} + Q_1) \quad (5)$$

液压缸向上运动过程中，其有杆腔的压力动态方程为

$$\dot{p}_b = \frac{\beta_e}{V_{02} - A_b x} (A_b \dot{x} - Q_2) \quad (6)$$

式中， β_e 为有效体积弹性模量， V_{01} 和 V_{02} 分别为液压缸无杆腔和有杆腔的初始容积， Q_1 和 Q_2 分别为流入液压缸无杆腔和从液压缸有杆腔流出的流量。

2 控制算法设计

2.1 基于模型的 PNM 控制

基于模型的 PNM 控制是目前等值编码 DFCU 最常用的控制策略，包括速度前馈控制器，

位置闭环控制器以及模型控制器，如图 3 所示。

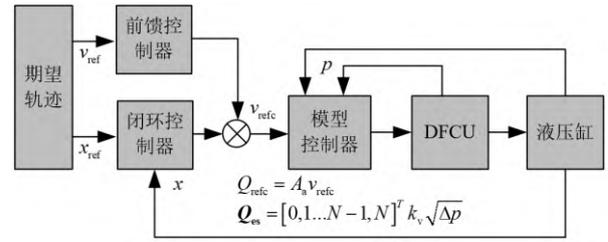


图3 基于模型的 PNM 控制系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of the model based PNM controller

由图 3 可知，该控制器的基本原理为：首先实时采集 DFCU 两端压力，通过流量公式得到估计流量组合 Q_{es} ，并与计算参考流量 Q_{refc} 作差，其中差值最小的组合即为 PNM 的最优组合。为了提高控制精度，一般融入位置闭环控制器，其中 v_{refc} 和 Q_{refc} 分别由公式 (7) 和公式 (8) 得到

$$v_{refc} = k_f v_{ref} + k_p (x_{ref} - x) \quad (7)$$

$$Q_{refc} = A_a v_{refc} \quad (8)$$

式中， v_{ref} 和 v_{refc} 分别为参考速度和计算参考速度， x_{ref} 为参考位移， Q_{refc} 为计算参考流量， k_f 为速度前馈控制器增益， k_p 为位置闭环控制器增益。

由上式可知，在低速工况下，若位置误差较小，则计算得到的 v_{refc} 和 Q_{refc} 同样较小，若 Q_{refc} 小于单个开关阀的流量，则对应的 PNM 输出有可能为 0，此时 DFCU 无流量输出，故难以实现液压缸的微定位，这也是数字液压系统中 PNM 控制策略的缺陷。

2.2 差动 PWM 控制

针对 PNM 控制策略难以实现微定位的缺陷，提出一种差动 PWM 控制策略，即在低速工况下，实时采集液压缸位置信号，反馈至差动 PWM 控制器，得到 DFCU-PA 和 DFCU-AT 的 PWM 信号占空比，通过调节两者的流量差来实现液压缸的微定位，控制信号如图 4 所示。

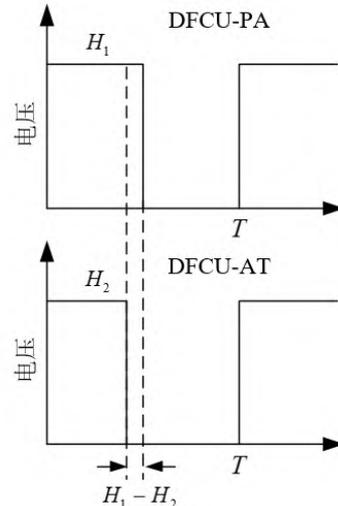


图4 差动 PWM 控制原理

Fig.4 Control principle of the differential PWM

由图 4 可知,DFCU-PA 和 DFCU-AT 的 PWM 控制信号占空比分别为

$$\begin{cases} \tau_1 = \frac{H_1}{T} \\ \tau_2 = \frac{H_2}{T} \end{cases} \quad (9)$$

考虑到开关阀在小占空比 PWM 激励下可能存在阀芯无法完全开启的问题,故两个 PWM 的高电平激励时间需要大于开关阀的打开延迟时间和打开运动时间之和,即

$$\begin{cases} H_1 \geq t_1 + t_2 \\ H_2 \geq t_1 + t_2 \end{cases} \quad (10)$$

在差动 PWM 控制策略下,DFCU-PA 和 DFCU-AT 的占空比由下式计算得到

$$\begin{cases} \tau_1 - \tau_2 = k_{p1} |x_{ref} - x|, |x_{ref} - x| \geq \Delta x_{min} \text{ 且 } x_{ref} \geq x \\ \tau_2 - \tau_1 = k_{p2} |x_{ref} - x|, |x_{ref} - x| \geq \Delta x_{min} \text{ 且 } x_{ref} \leq x \\ \tau_1 = \tau_2 = 0, |x_{ref} - x| < \Delta x_{min} \end{cases} \quad (11)$$

式中, Δx_{min} 为差动 PWM 控制的最小位置误差, k_{p1} 和 k_{p2} 分别为液压缸向上和向下运动时控制器的增益。

2.3 均匀切换优化控制策略

为了解决 DFCU 在 PNM 和差动 PWM 控制策略下存在开关阀切换次数差异性较大的问题,提出一种基于循环滑动的均匀切换优化策略,如图 5 所示(举例)。其中“绿色”代表阀为打开状态,“灰色”代表阀为关闭状态,“ u_{PNM} ”代表在 PNM 控制模式下需要打开 DFCU-PA 或 DFCU-AT

中的几个阀,“ u_{PWM} ”代表在差动 PWM 控制下需要同时打开 DFCU-PA 和 DFCU-A 的第几个阀。以 PNM 的均匀切换优化策略为例,由图 5(a)可知,假设不同采样时间内的 u_{PNM} 不同,则 DFCU 中开关阀的开启状态组合可表示为

$$i_{PNM} = \{i_L, i_{L+1} \dots i_{H-1}, i_H\} \quad (12)$$

其中 H 和 L 分别为开启状态组合的首尾指针。

当 u_{PNM} 增加时,则 L 保持不变, H 增加相应的数值,反之,当 u_{PNM} 减小时,则 H 保持不变, L 增加相应的数值^[11]。

以差动 PWM 的均匀切换优化策略为例,在 20Hz 的频率下,单个阀在 1s 内的切换次数为 40 次,如果开关阀持续切换,可能会造成其疲劳磨损加速和故障率提高等问题。因此本研究采用在不同时间段内控制不同开关阀的策略来提高开关阀切换次数分布的均匀性,控制示例见图 5(b),如在 $0 \sim \Delta t$ 内控制第一个开关阀,在 $\Delta t \sim 2\Delta t$ 内控制第二个开关阀,依次类推。

根据以上分析可知,PNM 和差动 PWM 的均匀切换优化策略主要解决的是“开哪几个阀”和“开第几个阀”的问题,从而使得每个开关阀的切换次数误差较小,提高其均匀性。而在同一时间段内需要开启或关闭的高速开关阀均同时打开或关闭,不存在时序要求。

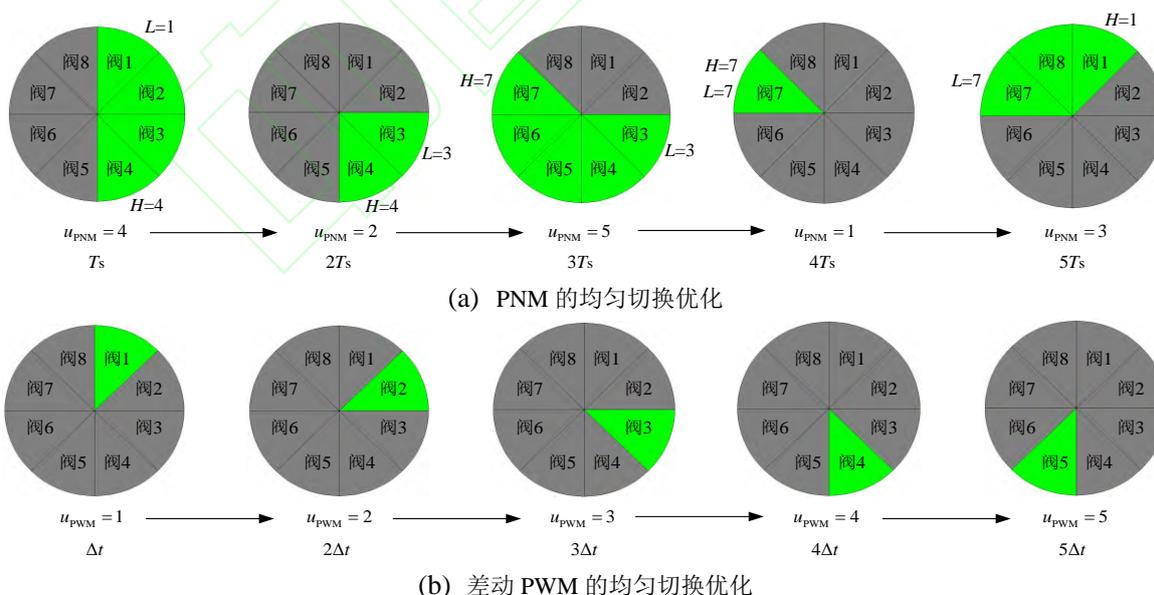


图 5 均匀切换优化策略

Fig.5 Uniform switching optimization strategy

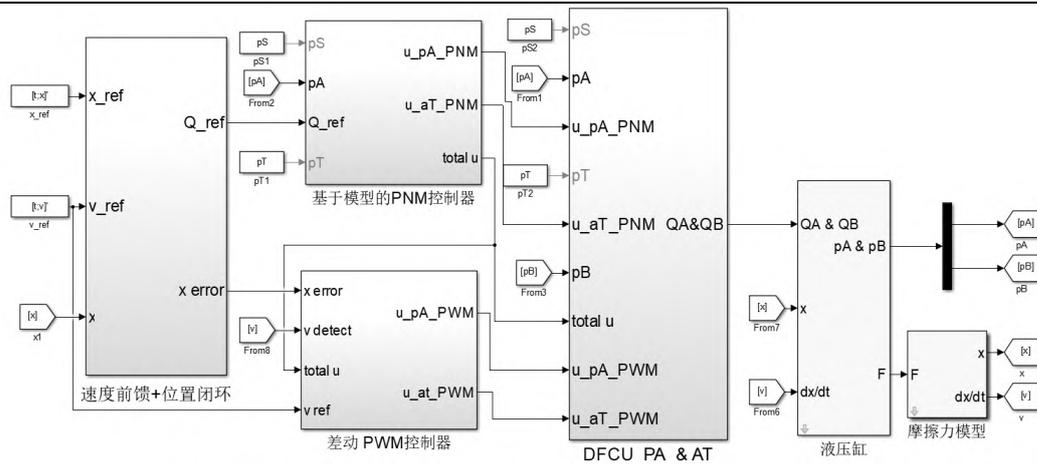


图 6 系统仿真模型

Fig.6 Simulation model of the system

3 仿真验证与对比

3.1 仿真模型与关键参数

在前述章节理论分析的基础上，利用 MATLAB/Simulink 建立并联数字阀控系统的数学模型，如图 6 所示。仿真用关键参数如表 1 所示，部分参数选自参考文献[10]和[11]。

为了验证所提出控制策略（位置控制和均匀切换控制策略）的准确性，对比以下四种控制器：

(1) 控制器 1：该控制器采用基于模型的 PNM 控制策略，包括位置闭环控制器和速度前馈控制器，其中 $k_p=15$, $k_f=1$ 。

(2) 控制器 2：该控制器是在控制器 1 的基础上，引入 PNM 均匀切换优化策略，其中 k_p 和 k_f 与控制器 1 一致。

(3) 控制器 3：该控制器由控制器 2 和差动 PWM 控制器组成，但差动 PWM 仅驱动开关阀 1，其中 k_p 和 k_f 与上述控制器一致，差动 PWM 控制器的参数 $k_{p1}=1500$, $k_{p2}=2000$ 。

(4) 控制器 4：该控制器在控制器 3 的基础上，引入差动 PWM 均匀切换优化策略，其中 k_p 和 k_f 与控制器 1 一致， k_{p1} 和 k_{p2} 与控制器 3 一致。

本文采用与文献[11]相同的五次多项式曲线作为参考轨迹，如图 7 所示。

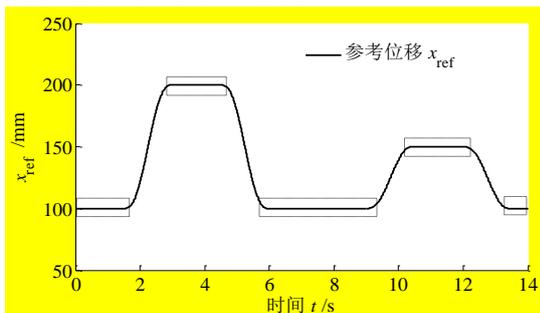


图 7 跟踪轨迹

Fig.7 Reference trajectory

图 7 中虚线框所在时间区域为液压缸的低速定位阶段，液压缸需要维持在指定位置，但是由于 PNM 控制输出最小流量的限制，无法实现微流量调控，本研究采用差动 PWM 对液压缸进行微定位控制，下文提出的定位误差是指在虚线框时间区域内的跟踪误差，即定位误差。

表 1 仿真模型参数

Tab.1 Parameters of the simulation model

序号	名称	量值
1	阀芯打开延迟时间 t_1 (ms)	1
2	阀芯打开运动时间 t_2 (ms)	0.5
3	阀芯关闭延迟时间 t_3 (ms)	3
4	阀芯关闭运动时间 t_4 (ms)	0.5
5	DFCU-PA 的流量系数 k_{v1} ($m^3/s\sqrt{Pa}$)	1.35e-8
6	DFCU-AT 的流量系数 k_{v2} ($m^3/s\sqrt{Pa}$)	1.08e-8
7	控制器采样时间 T_s (ms)	5
8	PNM 控制的最小速度 v_{min} (m/s)	0.012
9	差动 PWM 的作用时间 Δt (s)	1
10	最小位置误差 Δx_{min} (mm)	0.03
11	负载质量 m_p (Kg)	50
12	液压缸无杆腔面积 A_a (mm^2)	803.84
13	液压缸有杆腔面积 A_b (mm^2)	549.5
14	液压缸库伦摩擦力 F_C (N)	300
15	液压缸最大静摩擦力 F_{ss} (N)	600
16	液压缸黏性摩擦系数 B_p (Ns/m)	1500
17	Stribeck 速度 \dot{x}_s (m/s)	0.005

3.2 控制精度仿真对比

四种控制器的位置跟踪误差如图 8 所示，图中虚线框所在区域内的误差为定位误差，此时液压缸需要维持在指定位置，且液压缸速度 v 低于 v_{min} ，其中 v_{min} 为 PNM 控制的最小速度。

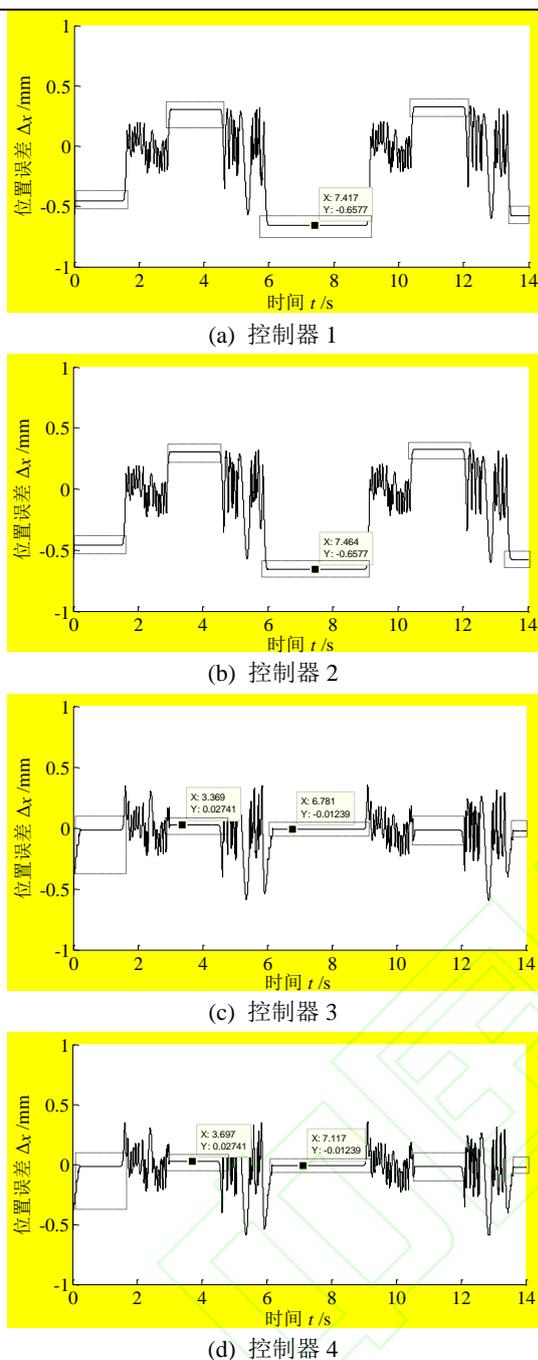


图 8 位置跟踪误差仿真对比

Fig.8 Simulation comparison of position tracking error

由图 8(a)可知，控制器 1 作用下的最大定位位置误差（在 $v < v_{min}$ 工况下）达到 0.658 mm，这是由于此时速度和位置误差较小导致求解得到的 PNM 开关量为 0，故液压缸位置无法进行精细调节；通过对比图 8(a)和图 8(b)，可知 PNM 均匀切换优化策略对位置误差几乎没有影响；由图 8(c)和图 8(d)可知，在引入差动 PWM 控制器后，通过控制差动流量可以实现液压缸位移的微调控，控制器 3 和控制器 4 作用下的最大定位位置误差仅为 0.027 mm，减小约 96%；同时通过对比图 8(c)和图 8(d)可知，差动 PWM 均匀切换优化策略同样对位置误差没有影响。

3.3 切换次数仿真对比

DFCU-PA 中 8 个开关阀在四种控制器下的切换次数对比如图 9 所示，为了更直观的对比不同控制策略下切换次数分布的均匀性，采标准差来量化对比不同开关阀切换次数的离散程度。

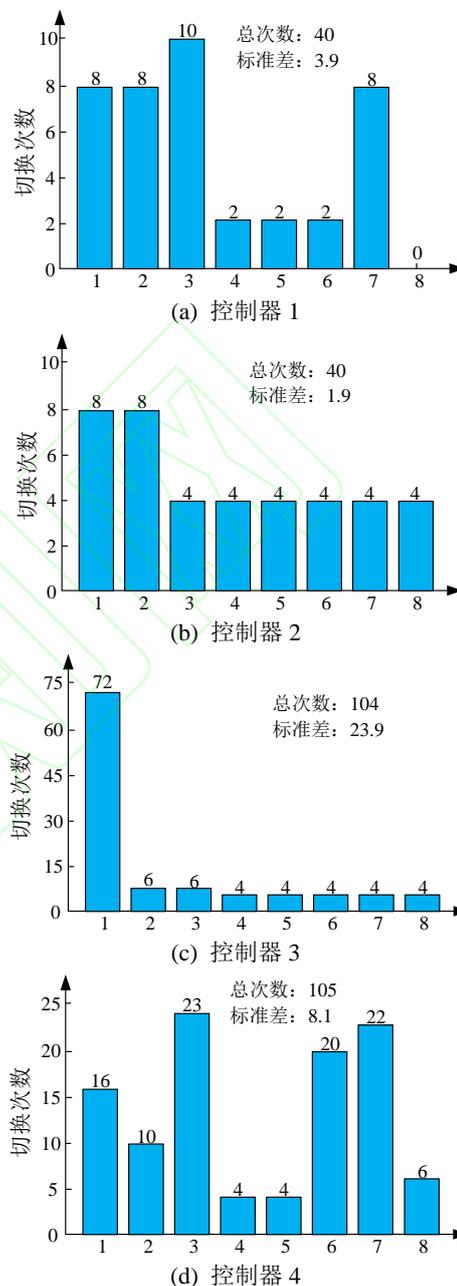


图 9 开关阀切换次数仿真对比

Fig.9 Simulation comparison of on/off valves' switching numbers

由图 9 可知，在控制器 1 作用下，开关阀 3 切换 10 次，开关阀 8 切换 0 次，差距较大，标准差达到 3.9，但在引入了 PNM 均匀切换优化策略后（控制器 2），总切换次数仍保持不变，但最高切换和最低切换分别为 8 次和 4 次，标准差降低至 1.9，切换次数的分布均匀性提高约 51%；在控制器 3 的作用下，由于差动 PWM 的影响，开关

阀 1 的切换次数达到 72 次，是最低切换次数近 18 倍，这会造成开关阀 1 的快速磨损和失效，更会引起其流量系数变化，导致流量控制精度降低；而在引入差动 PWM 均匀切换优化策略后（控制器 4），最高切换次数降低至 23 次，标准差从 23.9 降低至 8.1，切换次数的分布均匀性提高约 66.1%。

4 实验验证

为了进一步验证所提出控制算法的准确性，搭建了等值编码 DFCU 的半实物仿真测试平台，如图 10 所示。该测试平台由控制采集系统与垂直液压实验台架组成。垂直液压实验台架由 DFCU，液压缸，负载，位移传感器和压力传感器组成，其中液压缸和 DFCU 相关参数与仿真一致，见表 1。控制采集系统由 dSPACE 1202 平台，信号转换模块以及直流电源以及上位机组成，其中直流电源用于给 DFCU 中的开关阀供电，位移传感器型号为海德汉 LS477，分辨率为 0.5 μm 。

实验过程中，由于无法直接对开关阀阀芯的动作进行监测，本文通过程序自动计算硬件 I/O 口输入信号幅值（0 或 1）的改变次数来模拟每个开关阀的切换次数。

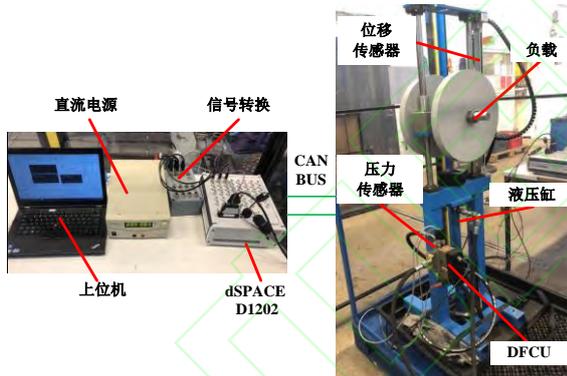
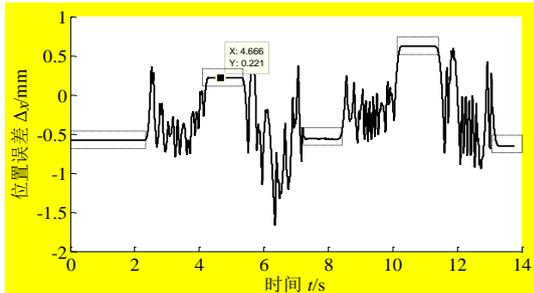


图 10 等值编码 DFCU 实验台

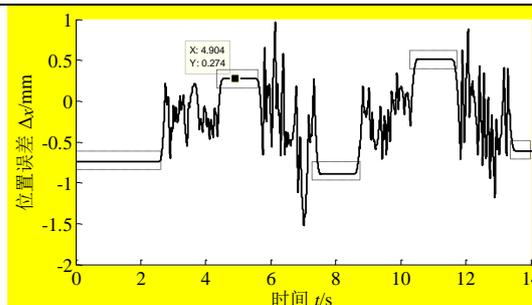
Fig.10 Test bench of the equal coded DFCU

4.1 控制精度实验对比

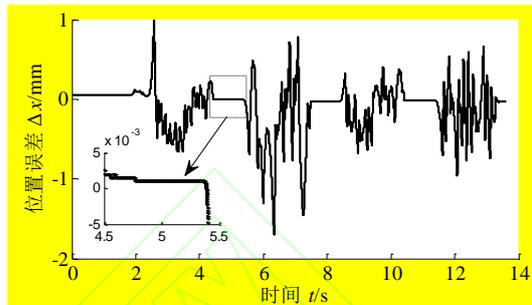
实验过程中控制器参数与仿真一致，并且同一实验重复三次以上，以确保实验数据的可靠性，四种控制器的位置误差实验对比如图 10 所示。



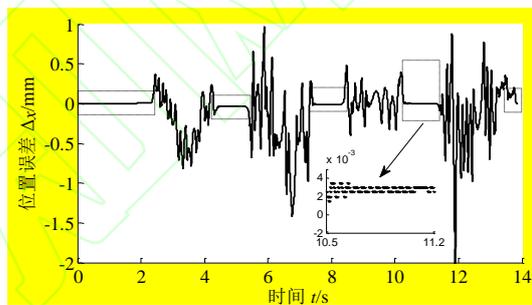
(a) 控制器 1



(b) 控制器 2



(c) 控制器 3



(d) 控制器 4

图 11 位置跟踪误差实验对比

Fig.11 Experimental comparison of position error

由图 11(a)和图 11(b)可知，控制器 1 作用下的平均定位误差和最小定位误差分别达到 0.528 mm 和 0.221 mm 左右，这是由于 PNM 编码在速度和位置误差较小的工况下输出开关量为 0，且实验结果与仿真结果基本一致；通过对比图 11(a)和图 11(b)，可知在控制器 1 的基础上引入 PNM 均匀切换优化策略对位置控制精度几乎没有影响；如图 11(c)和图 11(d)所示，在引入差动 PWM 控制策略后，由于对流量进行了精细调节，平均定位误差和最小定位误差仅为 0.032 mm 和 0.003 mm 左右，与控制器 1 相比分别降低约 94% 和 98.6%，实验结果优于仿真结果；此外通过对比图 11(c)和图 11(d)，可知差动 PWM 的均匀切换优化策略对位置控制精度影响较小。

4.2 切换次数实验对比

DFCU-PA 中每个开关阀在四种控制策略下的切换次数实验结果对比如图 12 所示。

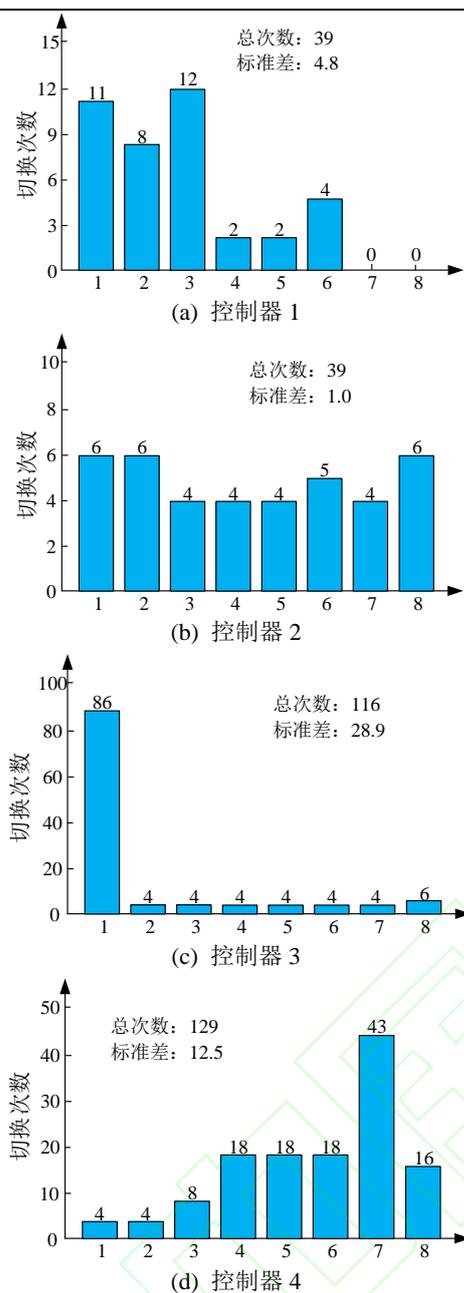


图 12 开关阀切换次数实验对比

Fig.12 Experimental comparison of on/off valves' switching numbers

由图 12(a)可知,在控制器 1 的作用下,开关阀 3 的切换次数为 12 次,而开关阀 7 和 8 均为 0,标准差为 4.8,此时开关阀的切换次数的分布均匀性较差;而在引入 PNM 的均匀切换优化策略后,总切换次数不变,最高切换次数和最低切换次数之差为 2,标准差仅为 1.0,降低约 79%,见图 12(b),显著提高了开关阀切换次数分布均匀性。

但是,为了提高定位精度,差动 PWM 信号驱动下的开关阀 1 切换次数达到 86 次(控制器 3),极易造成其疲劳磨损和结构尺寸特性破坏等问题,并且标准差达到了 28.9;为了进一步提高开关阀切换次数的分布均匀性,引入所提出的差动

PWM 均匀切换优化策略后,标准差降低约 57%,有效提高了切换次数的均匀性,实验结果与仿真基本一致,同时验证了模型的准确性。

5 结论

(1) 针对并联数字阀控系统在 PNM 控制下存在低速定位精度低的问题,提出了一种基于速度分段的位置控制策略,即在速度较大的工况下 (>0.012 m/s),采用基于模型的 PNM 控制策略分别控制 DFCU-PA 和 DFCU-AT 以实现液压缸的位置控制;而在低速工况 (≤ 0.012 m/s),设计了一种差动 PWM 控制策略来调节 DFCU-PA 和 DFCU-AT 的流量差以实现液压缸的微定位,在跟踪五阶多项式曲线轨迹下,实验结果与仿真结果基本一致,液压缸的平均定位误差和最小定位误差从 0.528 mm 和 0.221 mm 分别降低至 0.032 mm 和 0.003 mm 左右。

(2) 针对等值编码 DFCU 在 PNM 和差动 PWM 控制信号下均存在开关阀切换次数差异性较大的问题,提出了一种基于循环滑动法的均匀切换优化策略,分别对 PNM 和差动 PWM 两种控制信号进行优化,实验结果表明,在基于模型的 PNM 控制器基础上引入 PNM 均匀切换优化策略,开关阀切换次数分布均匀性提高约 79%;而在差动 PWM 控制器的基础上引入差动 PWM 均匀切换优化策略后,开关阀切换次数分布均匀性提高约 57%。

参考文献:

- [1] WU Shuai, ZHAO Xiangyu, LI ChunFang, et al. Multi-objective optimization of a hollow plunger type solenoid for high speed on/off valve[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(4): 3115-3124.
- [2] YANG Huayong, PAN Ming. Engineering research in fluid power: a review[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2015, 16(6): 427-442.
- [3] PAN Ming, PLUMMER A. Digital switched hydraulics[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2018, 13(2):225-231.
- [4] LINJAMA M, LAAMANEN A, VILENIUS M. Is it time for digital hydraulics[C]//The Eighth Scandinavian International Conference on Fluid Power. 2003.
- [5] BRANDSTETTE R, DEUBEL T, SCHEIDL R, et al. Digital hydraulics and "Industrie 4.0" [J]. Proceedings

- of the Institution of Mechanical Engineers Part I Journal of Systems & Control Engineering, 2017, 231(2): 82-93.
- [6] 杨华勇, 王双, 张斌,等. 数字液压阀及其阀控系统发展和展望[J]. 吉林大学学报(工), 2016, 46(5):1494-1505.
- YANG Huayong, WANG Shuang, ZHANG Bin, et al. Development and prospect of digital hydraulic valve and valve control system[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(5):1494-1505.
- [7] LINJAMA M. Digital fluid power: State of the art[C]//12th Scandinavian International Conference on Fluid Power, Tampere, Finland, May. 2011: 18-20.
- [8] LAAMANEN A, LINJAMA M, VILENIUS M. Characteristics of a digital flow control unit with pcm control[C]//7th Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, Sorrento, Italy, August 25-28.2003.
- [9] LAAMANEN A, SIIVONEN L, LINJAMA M, et al. Digital flow control unit-an alternative for a proportional valve[C]//Bath Workshop On Power Transmission and Motion Control. Professional Engineering Publishing, 2004, 2004: 297.
- [10] PALONIITTY M, LINJAMA M, HUHTALA K. Equal coded digital hydraulic valve system-improving tracking control with pulse frequency modulation[J]. Procedia engineering, 2015, 106: 83-91.
- [11] PALONIITTY M, LINJAMA M. High-linear digital hydraulic valve control by an equal coded valve system and novel switching schemes[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I Journal of Systems & Control Engineering, 2018, 232(3): 258-269.
- [12] 李文华, 韩健, 任兰柱. 数字液压缸的新型控制理论和方法[J]. 机械设计与研究, 2013, 29(1):91-93.
- LI Wenhua, HAN Jian, REN Lanzhu. New control theory and method of the digital hydraulic cylinder[J]. Machine Design and Research, 2013, 29(1):91-93.
- [13] WU Jian, WANG Shoukun, WANG Junzhen, et al. A compound control strategy for the digital valve based hydraulic position tracking system[C]//Control Conference (CCC), 2014 33rd Chinese. IEEE, 2014: 7869-7873.
- [14] 康洪铭, 霍国, 陈辅政等. 风洞供气控制系统数字阀的设计与应用[J]. 实验流体力学, 2017(5).
- KANG Hongming, HUO Guo, CHEN Fuzheng, et al. Design and application of digital valve in gas supply control system for wind tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2017(5).
- [15] 赵劲松, 张传笔, 赵子宁, 等. 高速开关数字阀的静态特性[J]. 中国机械工程, 2018, 29(02): 145-150,157.
- ZHAO Jinsong, ZHANG Chuanbi, ZHAO Zining, et al. Static and Dynamic Characteristics of High-speed On-off Digital Valves. China Mechanical Engineering, 2018, 29(02): 145-150,157.
- [16] 高强, 朱玉川, 王睿,等. 高速开关阀控电液位置伺服系统自适应鲁棒控制[J]. 航空动力学报, 2019, 34(2):503-512.
- GAO Qiang, ZHU Yuchuan, WANG Rui, et al. Adaptive robust control of electro-hydraulic position servo system using high speed on/off valve[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(2):503-512.
- [17] 高钦和, 宋海洲, 刘志浩, 等. 高速开关阀在液压缸起动与到位过程中的速度控制研究[J]. 中国机械工程, 2013, 4(1):47-51.
- GAO Qinhe, SONG Haizhou, LIU Zhihao, et al. Research on Speed Control in Starting and Stopping Processes of Hydraulic Cylinder with HSV[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(1): 47-51.
- [18] 高钦和, 刘志浩, 牛海龙, 等. 高速开关阀控液压缸的位置控制[J]. 中国机械工程, 2014, 25(20):2775-2781.
- GAO Qinhe, LIU Zhihao, NIU Hailong, et al. Position Control of Hydraulic Cylinder Controlled by High-speed On-off Valve[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(20):2775 - 2781.

作者简介:

高 强, 男, 1990 年生, 博士研究生。主要研究方向为数字液压元件及其控制技术, E-mail: gaoqiang116@nuaa.edu.cn。

朱玉川 (通信作者), 男, 1974 年生, 教授、博士研究生导师, 主要研究方向为数字液压元件及其控制技术, E-mail: meeyczhu@nuaa.edu.cn。