

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2017.10.013

# 基于双曲正割函数趋近律的多轴调平滑模控制研究\*

蔡文杰<sup>1</sup>, 陈淑梅<sup>1\*</sup>, 田述清<sup>2</sup>, 杜 恒<sup>1</sup>, 陈 晖<sup>1</sup>

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350116;

2. 福建海源自动化机械股份有限公司, 福建 福州 350101)

**摘要:** 为解决复合材料压机多轴调平系统的控制精度不高的问题, 将滑模变结构控制算法应用到多轴调平系统中。开展了多轴调平系统的不平衡机理、调平控制策略及算法的研究, 建立了多轴调平系统的数学模型。结合基于双曲正割函数改进的指数趋近律, 提出了一种多输入多输出滑模变结构控制算法, 给出了控制器的设计方法, 并将其应用到滑块的水平控制中。通过仿真分析和试验验证相结合的方式验证了算法的有效性。研究表明: 该控制器能削弱抖振, 使多轴调平的滑块系统快速准确地进行调平, 能较好地抑制干扰和未建模动态, 提高了系统的鲁棒性, 且控制器简单, 易于实现。

**关键词:** 多轴调平系统; 趋近律; 滑模变结构; 抖振; 鲁棒性

中图分类号: TH39; TG315.4; TP273+.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)10-1150-06

## Sliding mode control of multi-axis leveling system based on the reaching law of the hyperbolic secant function

CAI Wen-jie<sup>1</sup>, CHEN Shu-mei<sup>1</sup>, TIAN Shu-qing<sup>2</sup>, DU Heng<sup>1</sup>, CHEN Hui<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. Fujian Haiyuan Automation Equipments Co., Ltd., Fuzhou 350101, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the control precision is not high, the sliding mode variable structure control algorithm was applied to the multi-axis leveling system. After the analysis of the unbalance mechanism, the leveling control strategy and algorithm of the multi-axis leveling system, the mathematical model of the multi-axis leveling system was established. The sliding mode variable structure control algorithm was proposed with the improvement of the index reaching law which is based on the hyperbolic secant function. The controller design method was proposed and applied to the level control of the slider. The effectiveness of the algorithm was verified by simulation analysis and experiment. The results indicate that the proposed controller can reduce the chattering and restrain the disturbance and unmodeled dynamics to improve the robustness of the system. It is simple and easy to implement to make the multi-axis leveling system fast and accurate.

**Key words:** multi-axis leveling system; reaching law; sliding mode variable; buffeting; robustness

## 0 引 言

由于复合材料具有比强度高和比刚度好、力学性能可设计、抗疲劳性能好、减振性能好, 能耐高温以及安

全性能优等特点, 使其在各个行业备受关注<sup>[1-2]</sup>。而液压机是复合材料制品的核心成型装备, 其过程是通过固定在活动横梁(以下简称滑块)的上模对复合材料制品进行压制。复合材料在受到压力成型的过程中, 由于制

收稿日期: 2017-01-10

基金项目: 中央财政支持地方高校发展专项资金资助项目(闽财教函[2016]14号); 福州市科技局市校合作项目(2014G73, 2016G51)

作者简介: 蔡文杰(1990-), 男, 湖北鄂州人, 主要从事流体传动与控制方面的研究。E-mail: cwenjie66@163.com

通信联系人: 陈淑梅, 女, 教授, 博士生导师。E-mail: smchen@fzu.edu.cn

品的形状复杂、厚度不一致导致压机工作时的偏心载荷, 从而使滑块倾斜, 由此将影响压制件的质量甚至会损坏模具。为保持上模和下模的平行精度, 通过安装多轴调平系统来克服由于偏载特性造成的偏载力矩<sup>[3-4]</sup>, 以达到滑块的相对平行误差的控制, 从而提高制品质量及保护模具。

多轴调平系统是一个典型的多输入多输出的强耦合系统, 针对其控制策略, 许多学者做了相应研究。章关灿<sup>[5]</sup>基于 Matlab/AMESim 的联合仿真, 提出了主从控制策略和平均值原理控制策略, 并通过实验验证了其算法, 但其 PID 控制器由于系统的强耦合性有一定的约束性, 导致解耦困难, 控制精度有一定的不足; 赵长财等人<sup>[6]</sup>提出了力偶调平, 位置控制平衡系统, 其系统反应时间短、调整精度高, 能克服传统的平衡系统的时滞现象及密封难题, 并对其平衡力控制提供了理论参考。由于在扰动估计器设计上存在一定的不足, 而滑模控制算法简单易于实现、响应速度快、对外界噪声干扰和参数扰动具有较强的鲁棒性等优点<sup>[7-9]</sup>, 将其应用于多轴调平系统中, 能够达到较好的控制效果。由于滑模控制的抖振问题尤为突出, 为了解决抖振问题, MOZAYAN S M<sup>[10]</sup>、SHARMA N K 等人<sup>[11]</sup>提出了改进的趋近律, 具有明显的削弱抖振的作用, 但其在趋近速度上, 略显不足。

本文围绕多轴调平系统的滑块水平控制问题, 对多轴调平系统进行数学建模, 将其转换为状态空间方程, 针对其多输入多输出的耦合系统特性及滑模控制器的抖振现象, 设计基于双曲正割函数的改进型趋近律的滑模控制器, 利用 Matlab/Simulink 模块对其模型进行仿真, 以验证改进的趋近律在多轴调平系统的滑块水平控制方面的有效性。

## 1 多轴调平系统

四角调平系统简图如图 1 所示。

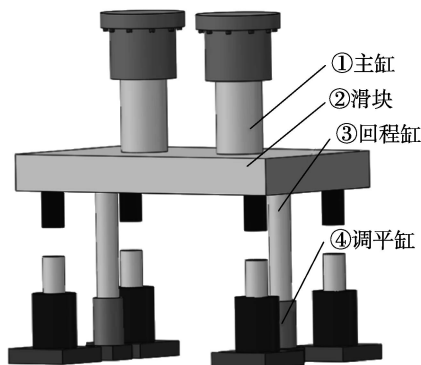


图 1 四角调平系统简图

由图 1 可知, 上模安装在滑块上, 下模安装在水平地面上。复合材料压机的运动过程为主缸和回程缸之间的配合实现模压成型。在复合材料液压机压制产品的过程中, 由于负载的偏载特性, 容易导致滑块受到偏载而使得滑块倾斜度过大, 导致压制产品的精度较低及损坏模具。为此, 本研究在滑块下端安装 4 个调平缸, 通过控制调平缸输出力的大小来削弱系统的偏载特性, 从而实现滑块的水平控制。

在实际的多轴调平的过程中, 由于工况复杂, 负载偏心力矩是未知的。在任意偏载工况下, 滑块的水平度难以测量, 通过实测的各轴的位移值来间接反映滑块的水平度, 并通过先进的控制算法确定所需的调平力, 成为设计研发中的一个关键技术和理论难题。本文以复合材料压机的四角调平系统为研究对象, 对其进行数学建模<sup>[12]</sup>。

### 1.1 多轴调平系统建模

以滑块为研究对象, 建立滑块的数学模型, 其受力情况如图 2 所示。

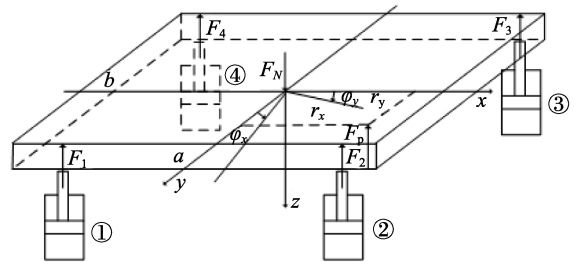


图 2 滑块受力模型

$F_1, F_2, F_3, F_4$ —4 个调平缸的输出力;  $F_N$ —主缸的加压力;  $F_p$ —未知偏载力;  $a$ —4 个调平缸之间的水平距离;  $b$ —4 个调平缸之间的垂直距离;  $r_x$ —偏载力到  $x$  轴的距离;  $r_y$ —偏载力到  $y$  轴的距离

为了简化模型, 对模型做如下假设:

- (1) 滑块作为均质刚体, 即质心位于滑块几何中心, 并忽略其弹性变形;
- (2) 在空间运动的过程中, 滑块只沿  $z$  轴方向做垂直运动, 忽略沿  $x$  轴和  $y$  轴方向的移动;
- (3) 在滑块发生偏载的过程中, 只考虑沿  $x$  轴和  $y$  轴方向的旋转运动, 忽略沿  $z$  轴方向的旋转运动;
- (4) 受力分析时, 绕  $x$  轴顺时针为正, 绕  $y$  轴顺时针为正。当滑块偏转时所在的平面与  $x$  轴之间的夹角为  $\phi_x$ , 与  $y$  轴之间的夹角为  $\phi_y$ ;
- (5) 忽略主缸、回程缸、摩擦等对滑块产生的偏转作用。

根据刚体的定轴转动定律可得:

$$\begin{aligned} J_x \ddot{\phi}_x &= (-F_1 - F_2 + F_3 + F_4)l_x - F_p r_y \\ J_y \ddot{\phi}_y &= (F_1 - F_2 - F_3 + F_4)l_y - F_p r_x \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $l_x, l_y$ —调平缸到  $x$  轴和  $y$  轴距离;  $J_x, J_y$ —绕  $x$

轴和  $y$  轴的转动惯量。

在调平阶段，由于 4 个调平缸跟滑块接触，根据几何关系可得：

$$\begin{cases} y_1 = y_0 - l_x \cdot \varphi_x + l_y \cdot \varphi_y \\ y_2 = y_0 - l_x \cdot \varphi_x - l_y \cdot \varphi_y \\ y_3 = y_0 + l_x \cdot \varphi_x - l_y \cdot \varphi_y \\ y_4 = y_0 + l_x \cdot \varphi_x + l_y \cdot \varphi_y \end{cases} \quad (2)$$

式中： $y_0$ —主缸的位移值； $y_1, y_2, y_3, y_4$ —4 个调平缸的位移值。

在调平过程中，认为滑块做匀速运动，由式 (2) 二次求导可得：

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = -l_x \cdot \ddot{\varphi}_x + l_y \cdot \ddot{\varphi}_y \\ \dot{v}_2 = -l_x \cdot \ddot{\varphi}_x - l_y \cdot \ddot{\varphi}_y \\ \dot{v}_3 = l_x \cdot \ddot{\varphi}_x - l_y \cdot \ddot{\varphi}_y \\ \dot{v}_4 = l_x \cdot \ddot{\varphi}_x + l_y \cdot \ddot{\varphi}_y \end{cases} \quad (3)$$

式中： $v_1, v_2, v_3, v_4$ —4 个调平缸的速度值。

根据运动学关系可得：

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = v_1 \\ \dot{y}_2 = v_2 \\ \dot{y}_3 = v_3 \\ \dot{y}_4 = v_4 \end{cases} \quad (4)$$

上述的调平输出力是由液压缸的输出力控制，根据液压缸的力的平衡定理可得：

$$F_i = A_i p_{Li} \quad (5)$$

若定义负载压力为：

$$p_L = p_1 - \varepsilon p_2 \quad (6)$$

式中： $p_1, p_2$ —调平缸的大小腔的压力； $\varepsilon$ —两腔的面积比。

由式 (1~5) 联立可得：

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \tilde{x}_3; \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \tilde{x}_4; \\ \dot{\tilde{x}}_3 = 2a_1 u_1 + 2a_2 u_2 + 2b_1 d_x - 2b_2 d_y; \\ \dot{\tilde{x}}_4 = 2a_2 u_1 + 2a_1 u_2 + 2b_1 d_x + 2b_2 d_y; \end{cases} \quad (7)$$

其中：

$$\begin{aligned} u_1 &= p_{L1} - p_{L3}; \\ u_2 &= p_{L2} - p_{L4}; \\ \tilde{x}_1 &= y_1 - y_3; \\ \tilde{x}_2 &= y_2 - y_4; \\ \tilde{x}_3 &= v_1 - v_3; \\ \tilde{x}_4 &= v_2 - v_4; \\ d_x &= F_p \cdot r_y; \\ d_y &= F_p \cdot r_x; \\ l_x &= \frac{b}{2}, l_y = \frac{a}{2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_1 &= \left( \frac{l_x^2}{J_x} + \frac{l_y^2}{J_y} \right) A_1; \\ a_2 &= \left( \frac{l_x^2}{J_x} - \frac{l_y^2}{J_y} \right) A_1, b_1 = \frac{l_x}{J_x}, b_2 = \frac{l_y}{J_y}. \end{aligned}$$

### 1.2 多轴调平系统的控制策略

控制策略简图如图 3 所示。

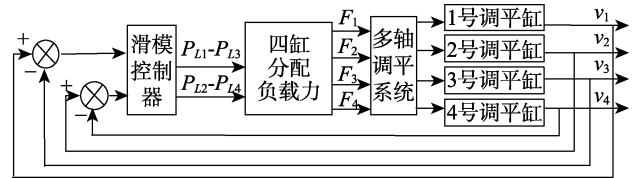


图 3 控制策略简图

本研究通过调节 4 个调平缸的输出力来实现滑块的水平控制。根据以上的多轴调平建模的状态空间可得，其是能控能观的二输入二输出耦合系统，通过采集 4 个缸的速度信号，将其 1、3 号缸的速度差与 2、4 号缸的速度差作为输入，通过滑模控制器设计出相应的输出信号，输出信号为 1、3 号缸的压力差与 2、4 号缸的压力差，通过分配原理将其分配到 4 个调平缸，利用调平缸输出力进行调平。

## 2 滑模控制器设计

考虑多输入多输出的线性时不变系统：

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}(t) = \mathbf{A}\tilde{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \\ \dot{y}(t) = \mathbf{C}\tilde{x}(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中： $x(t)$ —系统状态变量， $x(t) \in \mathbf{R}^n$ ； $u(t)$ —控制输入， $u(t) \in \mathbf{R}^m$ 。

由于  $\mathbf{B}$  为满秩矩阵，存在非奇异线性变换：

$$x = \mathbf{M}\tilde{x}, \mathbf{M} = \begin{bmatrix} I_{n-m} & -\mathbf{B}_1\mathbf{B}_2^{-1} \\ 0 & I_m \end{bmatrix} \quad (9)$$

使得式 (8) 化为以下形式：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{B}_2 \end{bmatrix} u \quad (10)$$

$$\dot{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{M}x(t)$$

其中：

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{A}} &= \mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{M} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}; \\ \bar{\mathbf{B}} &= \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{B}_2 \end{bmatrix}; \\ \bar{\mathbf{C}} &= \mathbf{C}\mathbf{M}; \\ x_1 &\in \mathbf{R}^{n-m}, x_2 \in \mathbf{R}^m; \end{aligned}$$

$\mathbf{B}_2$ — $m \times m$  可逆矩阵。

滑模控制器的设计包括确定切换函数  $s(t)$  的设计和

控制律的设计<sup>[13]</sup>。第一项将系统的状态在某一控制规律下, 运动到切换面上, 使它所确定的滑动模态渐进稳定且具有良好的动态品质; 第二项针对带有不确定性和外加干扰的系统, 一般采用的控制律为等效控制加变结构控制项, 其中变结构控制项为克服不确定性和外加干扰的鲁棒控制。

### 2.1 滑模面的设计

对于多输入多输出系统, 取设计的滑模面为:

$$s(t) = Lx(t) = [-M_1 \quad I] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中:  $M$ —待求矩阵。

将  $x_2(t)$  看成是式 (11) 的虚拟控制输入, 设计其状态反馈为:

$$x_2(t) = M_1 x_1(t) \quad (12)$$

将式 (12) 代入式 (10) 可得:

$$\dot{x}_1 = (A_{11} + M_1 A_{12}) x_1 \quad (13)$$

可以通过通常的线性反馈设计方法进行设计, 如极点配置方法、最优控制法、特征向量配置法以及几何方法等确认反馈矩阵, 本文采用极点配置的方法来求得反馈矩阵, 保证式 (13) 的稳定, 从而得出滑模面。

### 2.2 滑模控制器设计

滑模变结构控制的运动过程由两个阶段的运动组成的<sup>[14-15]</sup>, 第一阶段是正常运动段, 即从任一初始状态于有限时间内到达切换面的运动; 第二阶段为滑动模态段, 其位于切换面上的滑动模态区之内, 其品质对整个运动过程的品质起着重要的作用, 可以对滑动模态进行极点配置、最优控制等, 本文采用极点配置方法设计其切换函数  $s(t)$ 。传统的指数趋近律中, 不仅缩短了趋近时间, 而且使运动点到切换面时的速度很小, 但是其有抖振现象。为了削弱抖振, 结合双曲正割函数的特点, 本文提出基于双曲正割函数的指数趋近律, 其数学表达式为:

$$\dot{s}(t) = -k_1 s(t) - k_2 s^2(t)(1 - \operatorname{sech}(s(t))) \operatorname{sgn}(s(t)) \quad (14)$$

式中:  $k_1 > 0, k_2 > 0$ 。

由 Lyapunov 函数得:

$$L = \frac{1}{2} s^2 \quad (15)$$

则:

$$\begin{aligned} \dot{L} &= s\dot{s} = s(-k_1 s(t) - k_2 s^2(t)(1 - \operatorname{sech}(s(t))) \operatorname{sgn}(s(t))) = \\ &= -k_1 s^2 - k_2 s^3(1 - \operatorname{sech}(s(t))) \operatorname{sgn}(s(t)) = \\ &= -k_1 s^2 - k_2 s^2 |s| (1 - \operatorname{sech}(s(t))) \end{aligned}$$

所以:

$$\dot{L} = -k_1 s^2 - k_2 s^2 |s| (1 - \operatorname{sech}(s(t))) \leq 0 \quad (16)$$

由 Lyapunov 直接法可得, 系统稳定。

由式 (10)、式 (11)、式 (14) 可得滑模控制规律:

$$u = -(LB)^{-1}[L\bar{A}x(t) + k_1 s(t) +$$

$$k_2 s^2(t)(1 - \operatorname{sech}(s(t))) \operatorname{sgn}(s(t))] \quad (17)$$

## 3 仿真研究

为验证所设计改进的滑模变结构算法的有效性, 首先需要得到系统参数, 通过参数计算上述建立的数学模型, 得到所设计的控制器控制规律, 进而进行仿真研究。复合材料液压机相关参数的取值如表 1 所示。

表 1 复合材料液压机相关参数

参数	取值
缸径 $D/m$	0.2
杆径 $d/m$	0.14
调平缸左右长度 $a/m$	4.2
调平缸前后长度 $b/m$	2.4
滑块质量 $M/kg$	30 000
滑块转动惯量 $J_x/kg \cdot m^2$	22 500
滑块转动惯量 $J_y/kg \cdot m^2$	57 600

代入上述数据, 根据式 (10) 可得到其状态空间为: (其中压力单位为 MPa, 干扰力单位为 kN):

$$\dot{x} = \bar{A}x + \bar{B}u + \bar{D}d \quad (18)$$

其中:

$$\begin{aligned} x &= [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4]^T; \bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \\ \bar{B} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 8.828 & -0.7888 \\ -0.7888 & 8.828 \end{bmatrix}; \bar{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0.106 & -0.0729 \\ 0.106 & 0.0729 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

滑模控制器通过配置极点  $-100, -100$  得到, 由于在整个调平的过程中, 由几何关系可得:

$$y_1 + y_3 = y_2 + y_4 \quad (19)$$

如果 4 个缸的位移值与 4 个缸和的平均值之差的平方和最小, 则认为其四缸同步, 即滑块水平。通过式 (19) 可得:

$$\begin{aligned} e &= (y_1 - \bar{y})^2 + (y_2 - \bar{y})^2 + (y_3 - \bar{y})^2 + \\ &= (y_4 - \bar{y})^2 = \frac{1}{2} [(y_1 - y_3)^2 + (y_2 - y_4)^2] \end{aligned} \quad (20)$$

由式 (20) 可得, 如果 1、3 号缸和 2、4 号缸的位移差最小, 可得到四缸同步, 实现了滑块水平的目的。

本研究基于上述所建立的数学模型以及所设计的滑模控制器, 使用 Matlab/Simulink 进行仿真分析, 模型采用其状态空间方程, 控制器采用基于双曲正割函数改进指数趋近律的滑模控制算法, 其仿真程序都采用 S 函数进行编写。首先针对于滑模变结构控制方法的抖振

现象,分别对传统的指数趋近律和改进的指数趋近律的方法进行对比分析,然后结合干扰特性进行分析。

传统指数趋近律下的两对对角缸位置差的仿真曲线如图 4 所示。

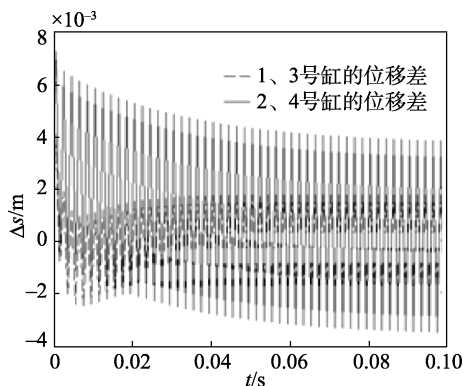


图 4 对角缸的位移差 (传统指数趋近律)

改进型趋近律下两对对角缸位置差的仿真曲线如图 5 所示。

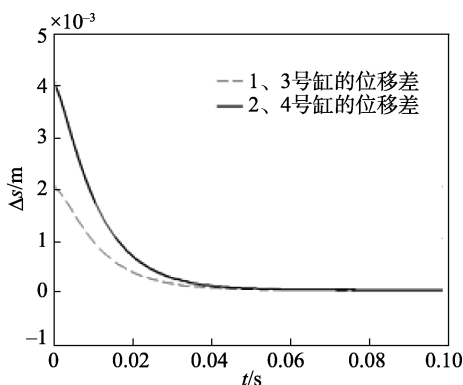


图 5 无干扰下, 对角缸的位移差 (改进的趋近律)

对比分析可得,在相同的滑模控制参数下,本文提出的基于双曲正割函数的改进型趋近律具有明显削弱抖振的效果;本文采用的控制算法是通过控制其速度收敛,进而使得其位置误差收敛的控制思想,从而实现多轴的调平控制。

有干扰情况下,两对对角缸位置差的仿真曲线如图 6 所示。

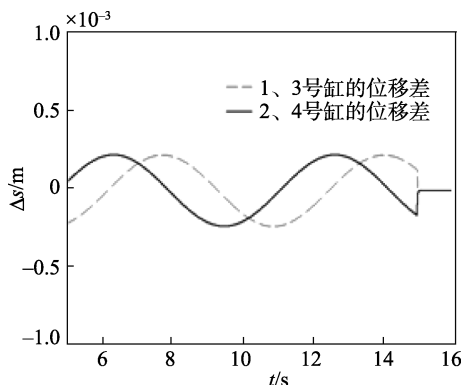


图 6 有干扰下, 对角缸的位移差 (改进的趋近律)

由图 6 可以看出,在 5 s~15 s 的时候,分别加上一个干扰信号  $y_1=10\sin(t)$ 和  $y_2=10\cos(t)$ ,能够将对角缸的位移差控制在 0.2 mm 的误差范围之内,对于未知干扰有很强的抑制作用,提高了系统的鲁棒性。

### 4 试验验证

为验证所设计的控制算法的有效性,本文以海源某型复合材料压机为被控对象,对其进行实验验证,通过将上述所设计的算法编入 PLC 中,在空模的情况下,验证算法的可行性。

被控设备及采集设备如图 7 所示。

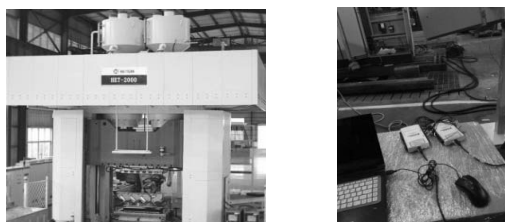


图 7 现场测试画面

空模测试条件下,调平缸的最高缸与 4 个调平缸的位置差曲线如图 8 所示。

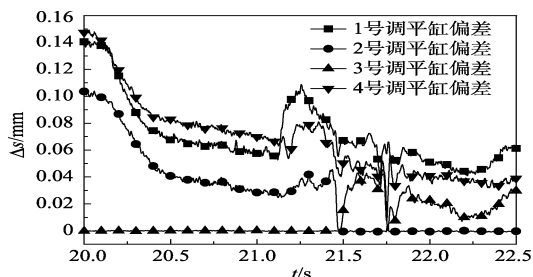


图 8 4 个缸的位置偏差

调平过程为 21.3 s~22.5 s。当时间在 21.3 s 时,滑块与调平缸接触,此时最高缸和最低缸之间的位移差为 0.11 mm。进入调平阶段后,最高缸和最低缸可以稳定在 0.05 mm,能达到较好的精度要求。

### 5 结束语

(1) 通过建立多轴调平系统的数学模型,本研究针对其系统的多输入多输出,强耦合以及干扰敏感等特性,设计了基于双曲正割函数趋近律的滑模控制算法,根据 Lyapunov 直接法,并给出了稳定性证明;

(2) 利用 Matlab/Simulink 模块仿真分析,结果表明所设计的改进型趋近律相比于传统的指数趋近律具有明显的削弱抖振的作用,而且趋近速度快,且算法简单,易于软件实现;

(3) 针对于上述所设计的控制器,本研究在无扰动和有扰动的情况下,对比分析所设计控制器的控制效

果, 仿真结果表明: 所设计的控制器对系统模型要求较低, 能有效的抑制干扰和内部参数变化, 具有较强的鲁棒性。并在无扰动的情况下, 进行了实验验证, 实验精度能达到生产要求。有效地解决了压制过程中, 由于滑块不水平导致的压制品精度不高以及损坏模具的现象。

### 参考文献(References)

- [1] 杨蕊, 程博闻, 康卫民, 等. 碳纳米管的功能化及其在复合材料中的应用[J]. 材料导报, 2015, 29(7): 47-51.
- [2] 罗卫兵. 微小型无人机一体成形复合材料应用[J]. 飞航导弹, 2015(7): 17-20.
- [3] 陈庆华. 大型液压设备四角调平控制系统的研究与应用[J]. 机械设计, 2011, 28(6): 81-84.
- [4] 李潘伟, 简珣. 基于 PLC 的复合模糊控制在液压伺服同步控制系统中的应用[J]. 机床与液压, 2008, 36(8): 277-279.
- [5] 章光灿. 玻璃钢制品压机四角调平控制系统的研究与设计[D]. 杭州: 浙江大学机械工程学院, 2014.
- [6] 赵长财, 杨盛福, 刘培培, 等. 大型模锻压机平衡系统原理及其理论研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(10): 82-89.
- [7] CHAKRABARTY S, BANDYOPADHYAY B. A generalized reaching law for discrete time sliding mode control[J]. *Automatica*, 2015(52): 83-86.
- [8] KOMSTA J, OIJEN N V, ANTOSZKIEWICZ P. Integral sliding mode compensator for load pressure control of die-cushion cylinder drive[J]. *Control Engineering Practice*, 2013, 21(5): 708-718.
- [9] 张庆丰, 高峰, 王燕, 等. 机器人关节滑模变结构的位置控制[J]. 机电工程, 2010, 27(10): 11-15.
- [10] MOZAYAN S M, SAAD M, VAHEDI H, et al. Sliding mode control of PMSG wind turbine based on enhanced exponential reaching law[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(10): 6148-6159.
- [11] SHARMA N K, JANARDHANAN S. A novel second-order recursive reaching law based discrete-time sliding mode control[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, 49(1): 225-229.
- [12] 杨硕, 吴爱国, 李长滨, 等. 模锻液压机力偶调平系统建模和最优控制[J]. 锻压技术, 2014, 39(3): 76-82.
- [13] 贺昱曜. 非线性控制理论及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.
- [14] 于驰, 宫明龙. 多输入多输出系统的滑模控制器设计及其应用[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2012, 33(4): 473-475.
- [15] 汪海波, 周波, 方斯琛. 永磁同步电机调速系统的滑模控制[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 71-77.

[编辑: 李辉]

### 本文引用格式:

蔡文杰, 陈淑梅, 田述清, 等. 基于双曲正割函数趋近律的多轴调平滑模控制研究[J]. 机电工程, 2017, 34(10): 1150-1155.

CAI Wen-jie, CHEN Shu-mei, TIAN Shu-qing, et al. Sliding mode control of multi-axis leveling system based on the reaching law of the hyperbolic secant function[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(10): 1150-1155. 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

中国轻工机械协会 中国联合装备集团公司  
轻工业杭州机电设计研究院 主办

# 轻工机械

LIGHT INDUSTRY MACHINERY MAGAZINE  
全国轻工装备行业杂志



www.qgjxzz.com

欢迎投稿、订阅、刊登广告

全国邮局订阅全年6期60元

邮发代号32-39

广告经营许可证: 3300004000067

《轻工机械》为中国科技核心期刊、中国核心学术期刊、中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊。

《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、《中国学术期刊综合评价数据库》、《万方数据-数字化期刊群》、《中文科技期刊数据库》全文收录。

英国《科学文摘》(SA, INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、美国《乌利希期刊指南》(Ulrich)、波兰《哥白尼索引》(IC) 收录期刊。

杂志社地址: 杭州市高教路 970 号西溪联合科技广场 4 号楼 711

电话: (0571) 85186130 - 85187520

联系人: 郑国渊 高蓝 王晓彬 夏红玲

E-mail: qgjxzz@126.com (投稿) 或 qgjxzz@163.com (广告)

邮政编码: 311121

传真: (0571) 85187520

网站: <http://www.qgjxzz.com>

