

## 改进型环形耦合结构的多缸比例同步控制

高 川, 黄叙辉, 芮 伟<sup>†</sup>, 蒋婧妍, 杜 宁

(中国空气动力研究与发展中心 高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 分析了多轴同步控制结构与算法的发展现状, 针对等状态耦合控制在实际应用中的不足, 提出一种基于归一化的同步比例系数分配方法, 使它适用于多运动轴的比例同步控制, 并在此基础上设计了改进型的环形耦合控制策略, 利用李雅普诺夫函数证明了该算法的收敛性和稳定性. 以某跨超声速风洞挠性壁喷管为控制对象, 对其终端执行机构电动缸和控制系统进行建模仿真, 结果表明: 该控制策略相较虚拟主轴控制方式, 具有更好的同步性能和抗干扰能力. 通过进行对比实验, 也证明该策略能很好地实现多轴比例同步控制, 且具有更高的跟踪精度和同步精度, 对相关领域具有一定的参考价值.

**关键词:** 环形耦合; 比例同步; 李雅普诺夫函数; 风洞; 挠性喷管; 电动缸

中图分类号: TP273 文献标识码: A

## Multiple electric cylinders proportion synchronization control based on improved cycle-coupling structure

GAO Chuan, HUANG Xu-hui, RUI Wei<sup>†</sup>, JIANG Jing-yan, DU Ning

(High Speed Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center,  
Mianyang Sichuan 621000, China)

**Abstract:** The development status of multi-axis synchronization control structure and algorithm was analyzed. To solve the problem that equal state coupling control in practical application, the proportion coefficient distribution method based on normalization is proposed for multi-axis proportional synchronization control, and an improved cycle-coupling control strategy was designed on this basis. The convergence and stability of which are proved by use of Lyapunov function. Take the flexible nozzle as control plant, its models of terminal actuator electric cylinder and contour control system are established. The simulation results show that the proposed strategy has better synchronized stability behavior and robustness than Virtual-Shaft control. The experiment results that through contour control system of trans-supersonic wind tunnel also show that the proposed strategy can effectively achieve multi-axis proportional synchronous control, has higher tracking precision and synchronous precision, and also has a certain reference value to related field.

**Key words:** cycle-coupling; proportion synchronization; Lyapunov function; wind tunnels; flexible nozzle; electric cylinder

### 1 引言(Introduction)

多轴同步控制是现代工业控制中一个非常重要的研究领域, 而控制结构与算法的创新和改进则一直是该领域的热点和难点问题<sup>[1]</sup>. 常见的多轴同步控制结构分为非耦合控制与等状态耦合控制两种, 非耦合结构主要包括同一给定控制与主从控制, 二者将参考信号或某一运动轴输出速度直接作为其余运动轴的速度给定, 调节过程中运动轴受到的扰动不会反馈给其它轴, 同步效果不够理想<sup>[2]</sup>; 等状态耦合结构, 如虚轴法、交叉耦合和偏差耦合等, 在一定程度上改善了同步性能<sup>[3-5]</sup>, 但一般为同等比例关系, 无法满足某些实

际生产和试验要求, 如薄膜拉伸收卷、风洞全挠性喷管壁板成型时, 为保证控制对象的安全运行, 运动轴之间的速度需要按一定比例调节<sup>[6-7]</sup>. 为提高系统同步控制精度、增强系统鲁棒性, 许多学者将现代控制方法与等状态耦合结构相结合, 进一步研究了同步控制算法, 文献[8]采用内模控制器, 将输出量反馈变为扰动量反馈, 保证系统良好抗扰性能的同时, 也成功解决了转速超饱和与超调问题, 但基于简化模型的仿真实验并不能满足实际应用中高精度同步控制的要求<sup>[9-10]</sup>; 文献[11]利用模糊推理的思想, 将模糊控制器与传统 PID 控制器相结合, 设计出参数模糊自整定

收稿日期: 2016-07-14; 录用日期: 2017-04-13.

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: rw827130@sohu.com; Tel.: +86 816-2462577.

本文责任编辑: 段志生.

国家重大科学仪器设备开发专项(2016YFF0104000)资助.

Supported by National Key Scientific Instrument and Equipment Development Project (2016YFF0104000).

PID控制器,提升了系统收敛速度,但过于依赖操作者经验,使其应用范围受到很大局限;文献[12]利用神经网络不依赖被控对象精确数学模型,具有良好的自适应和自学能力的特点,设计了神经网络PID控制器,有效地克服了系统中参数时变、非线性等问题,但计算量较大,没有在实际应用中表现出显著优势;文献[13]设计了基于滑模变结构的同步控制器,明显改善了系统动态和稳态性能,对相关研究的开展具有较强的参考价值.

在目前已有的各种多轴同步控制策略中,针对交叉耦合控制结构与偏差耦合控制结构的讨论较多,但在受控对象较多,且存在非等比同步关系时,基于这两种结构的控制算法则无法满足要求.因此,本文提出一种基于归一化的同步比例系数分配方法,并在此基础上设计了适用于多轴比例同步控制的改进型环形耦合控制策略<sup>[14-15]</sup>.采用Lyapunov函数证明了该算法的收敛性和稳定性,以某跨超声速风洞全挠性喷管为控制对象,进行终端执行机构和全系统建模仿真,并通过该风洞型面控制系统进行实验,结果证明了本文控制策略的有效性.

## 2 基于归一化的同步比例系数分配方法 (Proportion coefficient distribution method based on normalization)

常见的多轴同步关系为 $\nu_1 = \nu_2 = \dots = \nu_n$ ,即各运动轴速度同步比例系数均为1,对于有比例同步要求的控制系统而言,其同步比例系数可能是任意的.因此,为了便于系统参考速度的给定与调节以及数据处理,设计一种基于归一化的同步比例系数分配方法,具体分为以下3步:

**步骤 1** 根据比例同步控制要求,计算原始比例系数关系: $\nu_1 : \nu_2 : \dots : \nu_n = \mu_1 : \mu_2 : \dots : \mu_n$ ;

**步骤 2** 选择控制性能最差的第 $k$ 个运动轴作为参考点,一般将比例系数最大( $\mu_k = \max(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$ )定义为“控制性能最差”;

**步骤 3** 其余轴的速度分别与第 $k$ 个运动轴的速度作比值,得到归一化的数据,即 $\nu_i^* = \mu_i/\mu_k = \nu_i/\nu_k$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),其中 $\nu_i^* \in [0, 1]$ .

## 3 基于环形耦合结构的多轴比例同步控制算法 (Multi-axis proportion synchronization control algorithm based on cycle-coupling structure)

### 3.1 环形耦合结构 (Cycle-coupling structure)

环形耦合控制是一种基于最小相关轴数目与等状态耦合补偿原理的控制思想,在考虑每一运动轴速度与参考速度差值的同时,还考虑该运动轴速度与两个相邻运动轴速度间的差值.例如,对于由 $n$ 台电机组成并采用归一化方法进行比例系数分配的同步控制系统,第 $i$ 台电机要考虑自身跟踪误差,以及与第 $i-1$ 台和第 $i+1$ 台电机的比例同步误差,其控制结构如图1所示.图中: $\omega_d$ 为系统参考输入转速, $\omega_i^* = \nu_i^* \omega_d$ 为第 $i$ 台电机的给定参考输入, $\omega_i$ 为第 $i$ 台电机的实际输出转速; $e_i = \omega_i^* - \omega_i$ 为第 $i$ 台电机的跟踪误差, $\delta_{i1} = \omega_i/\nu_i^* - \omega_{i-1}/\nu_{i-1}^*$ 为第 $i$ 台电机与第 $i-1$ 台电机的比例同步误差, $\delta_{i2} = \omega_i/\nu_i^* - \omega_{i+1}/\nu_{i+1}^*$ 为第 $i$ 台电机与第 $i+1$ 台电机的比例同步误差; $T_{di}, T_{mLi}$ 分别为第 $i$ 台电机的干扰力矩和输入转矩.

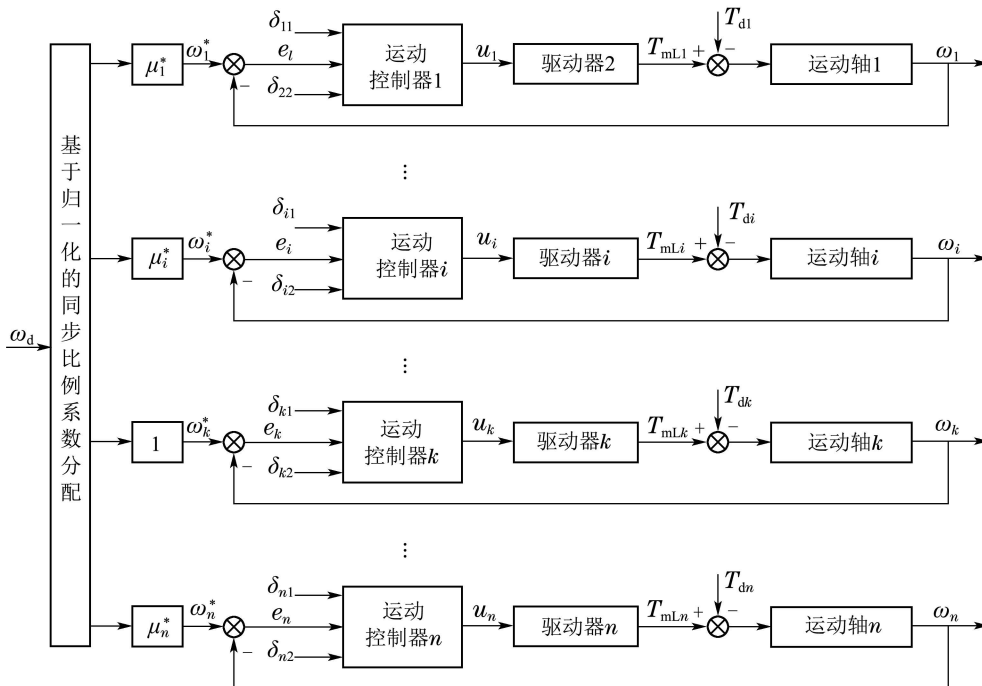


图 1 环形耦合控制结构图  
Fig. 1 Cycle-coupling control structure

### 3.2 比例同步控制算法 (Proportion synchronization control algorithm)

根据电机机学原理, 第*i*轴的动态特性可以描述为

$$J_i(\omega_i)\dot{\omega}_i + C_i(\omega_i, \dot{\omega}_i)\omega_i + T_{di} = T_{mLi}, \quad (1)$$

式中:  $J_i(\omega_i)$ 和 $C_i(\omega_i, \dot{\omega}_i)$ 分别为第*i*轴的转动惯量和非线性特性参数, 且 $\dot{J}_i(\omega_i)/2 - C_i(\omega_i, \dot{\omega}_i) = 0$ <sup>[16]</sup>.

令  $f_i = (T_{mLi} - T_{di})/J_i(\omega_i)$ ,  $b_i = C_i(\omega_i, \dot{\omega}_i)/J_i(\omega_i)$ , 当*i* = 1时, 有 $b_{i-1} = b_n$ ,  $f_{i-1} = f_n$ ; 当*i* = *n*时, 有 $b_{i+1} = b_1$ ,  $f_{i+1} = f_i$ , 则式(1)可记为

$$\dot{\omega}_i = f_i - b_i\omega_i. \quad (2)$$

第*i*台电机经过补偿模块修正后的环形耦合误差为

$$E_i(t) = e_i(t) - K_{i1}\delta_{i1}(t) - K_{i2}\delta_{i2}(t), \quad (3)$$

式中:  $K_{i1}$ ,  $K_{i2}$ 为第*i*轴的环形耦合系数,

$$K_{i1} = J_i(\omega_i)/J_{i-1}(\omega_{i-1}),$$

$$K_{i2} = J_i(\omega_i)/J_{i+1}(\omega_{i+1}).$$

控制算法的设计是使各运动轴的速度误差收敛并趋向于零, 即 $E_i \rightarrow 0$ . 根据式(3)建立滑模流形面

$$S_i(t) = q_i E_i(t), \quad (4)$$

式中 $q_i$ 为常数.

构造Lyapunov函数:

$$V_i(t) = \frac{1}{2} S_i^2(t), \quad (5)$$

则其导数为

$$\dot{V}_i(t) = S_i(t)\dot{S}_i(t) = S_i(t)[q_i\dot{E}_i(t)] =$$

$$\begin{aligned} & q_i S_i(t)(\dot{e}_i - K_{i1}\dot{\delta}_{i1} - K_{i2}\dot{\delta}_{i2}) = \\ & q_i S_i(t)[\mu_i^* \dot{\omega}_d - (1 + K_{i1}/\mu_i^* + K_{i2}/\mu_i^*)\dot{\omega}_i + \\ & K_{i1}\dot{\omega}_{i-1}/\mu_{i-1}^* + K_{i2}\dot{\omega}_{i+1}/\mu_{i+1}^*]. \end{aligned} \quad (6)$$

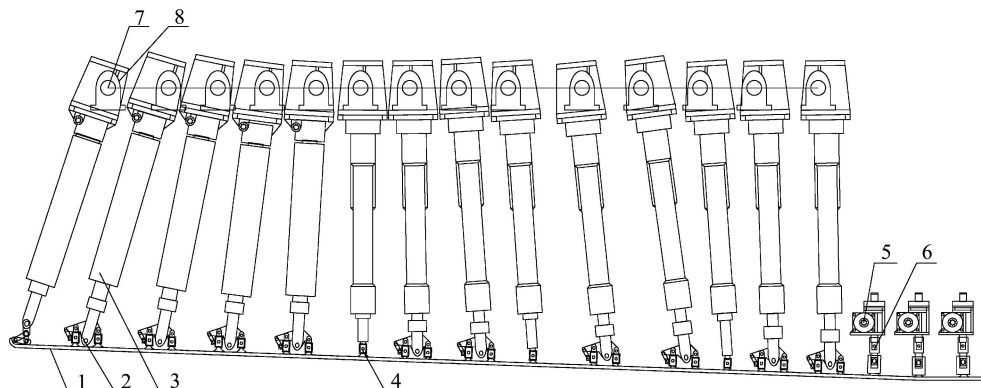
若使系统渐进稳定, 根据 Lyapunov 定理, 需满足  $V_i(t) > 0$ ,  $\dot{V}_i(t) < 0$ , 因此构造

$$\begin{aligned} u_i(t) = & S_i(t) - \mu_i^* \dot{\omega}_d - [(b_i - b_{i-1})K_{i1} + \\ & (b_i - b_{i-1})K_{i2} + \mu_i^* b_i]\omega_d - b_{i-1}K_{i1}\delta_{i1} - \\ & b_{i+1}K_{i2}\delta_{i2} + [(b_i - b_{i-1})K_{i1}/\mu_i^* + \\ & (b_i - b_{i+1})K_{i2}/\mu_i^* + b_i]e_i. \end{aligned} \quad (7)$$

此时系统的平衡原点处切换面 $S_i(t) = 0$ 为大范围渐进稳定平衡平面, 也即 $E_i$ 速度跟踪误差渐进收敛为零.

### 4 某跨超声速风洞全挠性喷管系统建模 (Modeling of the full flexible nozzle system in the trans-supersonic wind tunnel)

某跨超声速风洞全挠性喷管的上壁板机械结构如图2所示. 上壁板与下壁板单元类似, 每个控制单元系统含17个定位轴: 1<sup>th</sup>-14<sup>th</sup>定位轴采用电动缸作为执行机构, 与挠性板之间采用摆动式铰链和单点铰链连接, 所有电动缸均通过各自的悬挂梁支撑在横梁上. 挠性板弯曲时, 电动缸的悬挂梁轴颈可在位于横梁处的支座内转动以适应挠性板面斜率的变化; 15<sup>th</sup>-17<sup>th</sup>定位轴采用电动推杆(螺旋升降机)作为执行机构, 与挠性板直接相连, 在行程范围内沿螺杆方向运动.



1: 挠性板; 2: 摆动式铰链; 3: 电动缸; 4: 单点铰链; 5: 伺服电机; 6: 电动推杆; 7: 悬挂梁; 8: 支座

图 2 某跨超声速风洞全挠性喷管结构图

Fig. 2 Structure of the full flexible nozzle in the trans-supersonic wind tunnel

### 4.1 系统工作原理 (Work principle of the system)

不同马赫数的风洞试验对应着不同的喷管型面, 亚、跨声速时为收敛型, 超声速时为收敛-扩张

型<sup>[17]</sup>. 在试验前通过调整分布在喷管上、下壁板的执行机构行程, 将挠性壁板的弯曲形状折成符合理论气动型面所要求的不同曲面, 以满足试验要求.

工作流程如图3所示, 主要分为: 开始阶段, 系统根据试验要求马赫数对应型面数据, 计算各执行机构运动位移并通过基于归一化的同步比例系数分配方法确定各电动缸输出速度; 同步阶段, 电机启动并通过比例同步控制算法建立同步, 控制各电动缸向目标位置运动; 停止阶段, 所有执行机构均到达目标位置后, 系统同步解除并停止运行. 在挠性板成型过程中, 为保证成型精度及安全, 要求各电动缸同时启动、同时到达、匀速运行、加/减速时间相等(位于全挠性喷管出口处的3套电动推杆仅在小范围内作调整, 无同步要求). 若任意两个运动轴没有按照设定的比例关系精确同步, 则它们之间的同步关系会发生改变, 执行机构间的挠性板曲面也会变化.

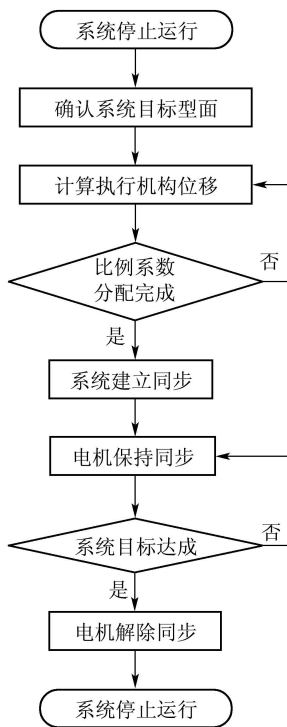


图3 系统工作流程图

Fig. 3 Work flow chart of the system

### 4.2 电动缸模型(Electric cylinder model)

电动缸作为全挠性喷管系统的最终执行机构, 由永磁同步电机带动螺杆, 通过丝杠副进行沿导轨的直线运动, 可视为由电机、负载和连接二者的等效传动部件所组成的二质量系统<sup>[18]</sup>. 机构模型结构

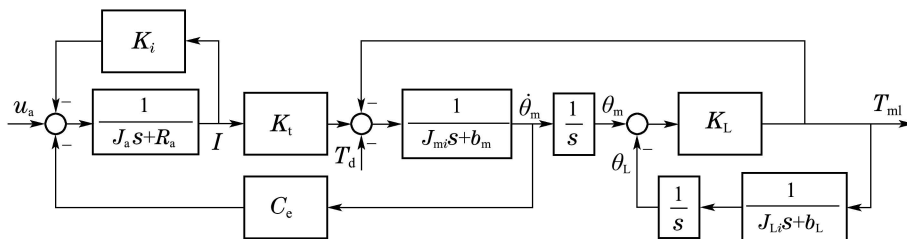


图4 电动缸模型结构图

Fig. 4 Structure of the electric cylinder

如图4所示, 电动缸从驱动电压到负载端输出转矩的传递函数:

$$G(s) = \frac{T_{ml}(s)}{U_a(s)} = \frac{K_t K_L (J_{Li} s + b_L)}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}, \quad (8)$$

式中:

$$\begin{cases} a_4 = J_{mi} J_{Li} L_a, \\ a_3 = L_a (J_L b_m + J_m b_L) + (R_a + K_i) J_{mi} J_{Li}, \\ a_2 = (R_a + K_i) (J_{Li} b_m + J_{mi} b_L) + (J_{mi} K_L + b_m b_L) L_a + (L_a K_L + K_t C_\epsilon) J_{Li}, \\ a_1 = (R_a + K_i) (K_L J_{Li} + J_{mi} K_L + b_m b_L) + (b_m + b_L) L_a K_L + K_t C_\epsilon b_L, \\ a_0 = K_t C_\epsilon K_L + (K_i + R_a) (b_m + b_L) K_L, \end{cases} \quad (9)$$

其中:  $R_a, L_a, K_L, K_i, K_t$  分别表示电枢电阻、电枢电感、电机轴和同步传动带等效刚度、电机电流反馈系数和电机力矩系数;  $b_m, b_L$  分别为电机轴与丝杠的粘性阻尼系数;  $I, T_{ml}, T_d, \theta_L$  分别为电机输出电枢电流、负载端输出力矩、干扰力矩和丝杠螺母的转动角位移;  $J_{mi}$  为各执行机构电机电枢和转动轴的转动惯量、 $J_{Li}$  为各执行机构负载等效到丝杠的转动惯量 ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

基于单个电动缸模型设计的控制子系统结构如图5所示, 将电动缸模型封装为一个子模块, 驱动电压控制采用传统的PID控制, 并在驱动电压前引入电流调节器环节以适应模拟不同型号驱动电机的工作.

### 4.3 系统模型(System model)

挠性喷管单边壁板的前14个定位轴中,  $1^{th}-5^{th}$  双电动缸定位轴的驱动形式为1台电机驱动2台电动缸(并列);  $6^{th}-14^{th}$  单电动缸定位轴的驱动形式为1台电机驱动1台电动缸. 以单个电动缸控制子系统模型及环形耦合控制结构为基础, 构建由14组电动缸组成的比例同步控制系统如图6所示.

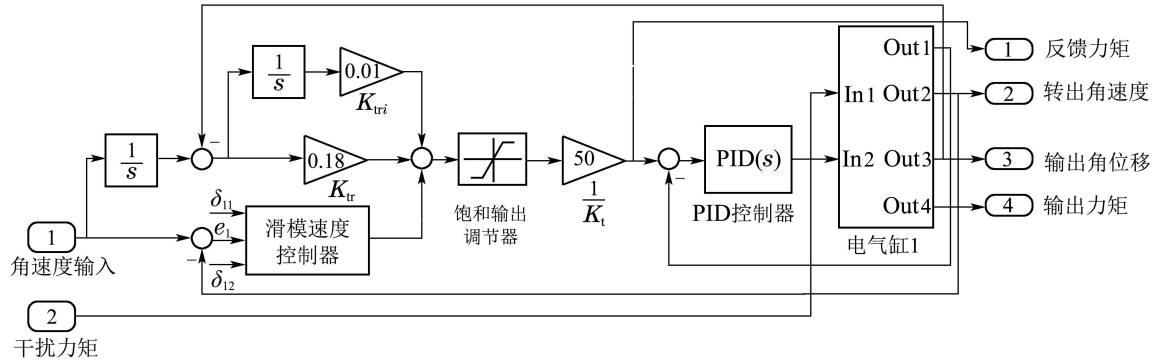


图 5 控制子系统结构图

Fig. 5 Structure of the control subsystem

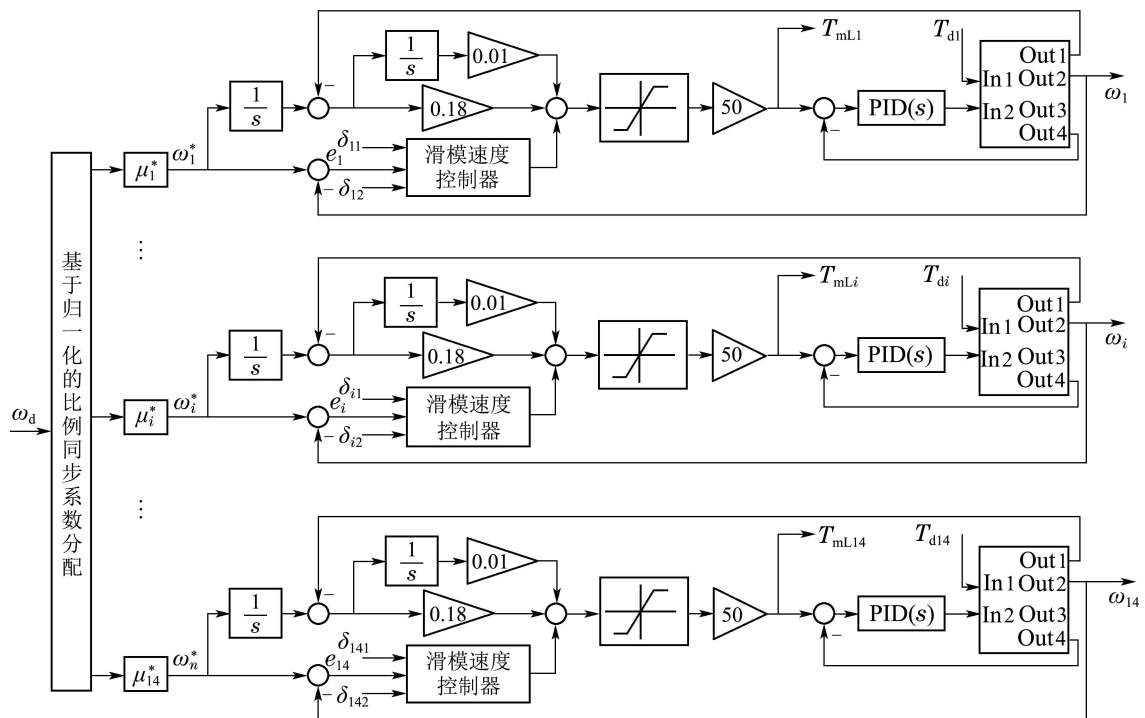


图 6 全挠性喷管控制系统模型

Fig. 6 Model of the full flexible nozzle control system

### 5 仿真和实验(Simulation and experiment)

以全挠性喷管由马赫数 $\alpha$ 型面向马赫数 $\beta$ 型面变化作为示例, 则14台电动缸目标输出位移(差值)、归一化同步比例系数如表1所示, 可知: 4<sup>th</sup>电动缸为位移最长轴, 而13<sup>th</sup>电动缸和14<sup>th</sup>电动缸位移较小, 同步比例系数几乎为0. 为便于系统性能的直观反映, 选取位移最长轴4<sup>th</sup>及其相邻的3<sup>th</sup>电动缸、5<sup>th</sup>电动缸和6<sup>th</sup>电动缸进行具体分析.

#### 5.1 仿真分析(Simulation analysis)

系统参考输入转动速度给定为10 rad/s, 仿真时间设置为 300 s. 为验证仿真系统的鲁棒性, 在第 100 s 时, 单独给4<sup>th</sup>电动缸一个小幅扰动; 在第200 s 时, 同时给14台电动缸施加等幅值扰动. 3<sup>th</sup>–6<sup>th</sup>电

动缸相关参数如表 2 所示(1<sup>th</sup>–5<sup>th</sup>电动缸参数相同, 6<sup>th</sup>–14<sup>th</sup>电动缸参数相同).

表 1 电动缸目标输出位移

Table 1 The displacement demand of the electric cylinders

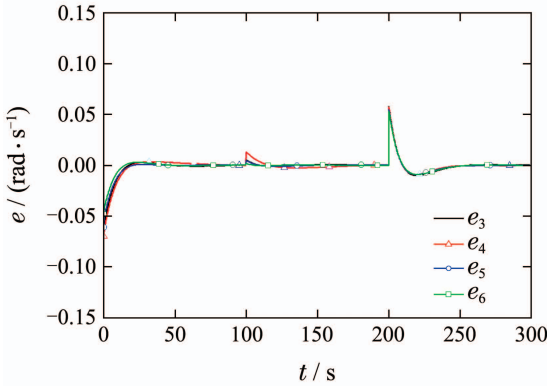
编号	s/mm	$\mu_i^*$	编号	s/mm	$\mu_i^*$
1	38.34	0.28	8	71.93	0.53
2	85.27	0.63	9	56.69	0.42
3	125.01	0.93	10	42.49	0.32
4	134.84	1.00	11	27.81	0.21
5	123.97	0.92	12	13.47	0.10
6	109.02	0.81	13	2.78	0.02
7	93.69	0.69	14	-0.16	0

表2 电动缸相关参数

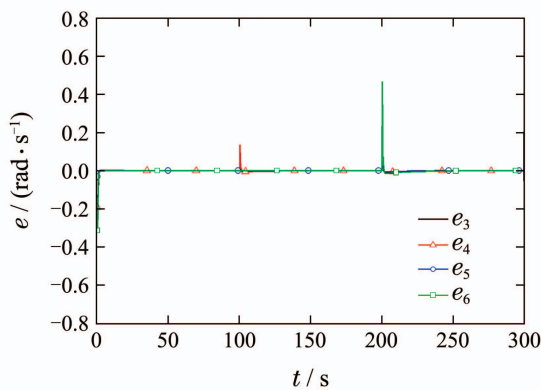
Table 2 Parameters of the electric cylinders

编号	$R_a/\Omega$	$L_a/H$	$K_L/((N \cdot m) \cdot \text{rad}^{-1})$	$K_I$	$K_t/((N \cdot m) \cdot \text{A}^{-1})$	$J_m/(N \cdot \text{m}^2)$	$J_L/(N \cdot \text{m}^2)$
3	0.8	$3.46 \times 10^{-2}$	$5.86 \times 10^2$	0.04	1.71	$4.40 \times 10^{-4}$	$4.80 \times 10^{-4}$
4	0.8	$3.46 \times 10^{-2}$	$5.86 \times 10^2$	0.04	1.71	$3.20 \times 10^{-4}$	$4.80 \times 10^{-4}$
5	0.8	$3.46 \times 10^{-2}$	$5.86 \times 10^2$	0.04	1.71	$4.40 \times 10^{-4}$	$4.80 \times 10^{-4}$
6	0.4	$1.73 \times 10^{-2}$	$2.93 \times 10^2$	0.02	0.85	$2.50 \times 10^{-4}$	$3.20 \times 10^{-4}$

在保持其他条件均相同的情况下,分别采用环形耦合控制方式和虚拟主轴控制方式进行比较,3<sup>th</sup>–6<sup>th</sup>电动缸的输出跟踪误差和比例同步误差仿真结果如图7和图8所示.可以看出,系统在启动时,采用环形耦合控制方式的跟踪误差收敛速度看似较虚拟主轴控制方式略慢,但实际仅在目标转速的0.5%范围内进行调节,几乎没有超调;当系统某一电动缸受到扰动或整体受到等幅值扰动时,采用虚拟主轴控制方式的受扰电动缸与其余电动缸间的比例同步误差( $\delta_{ik}$ 表示第*i*台电动缸和第*k*台电动缸的比例同步误差)瞬时波动较大,而采用环形耦合控制方式的比例同步误差瞬时波动则小得多,且能较快的恢复稳定状态.



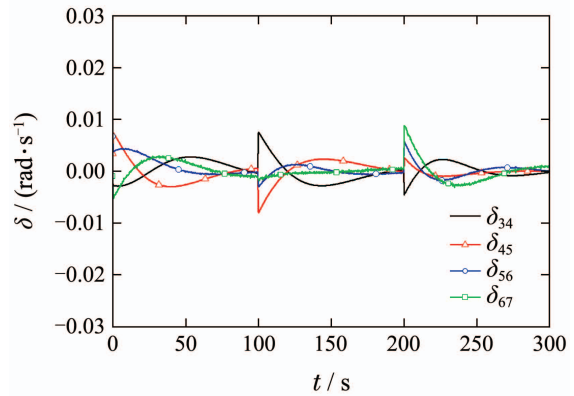
(a) 环形耦合控制跟踪误差



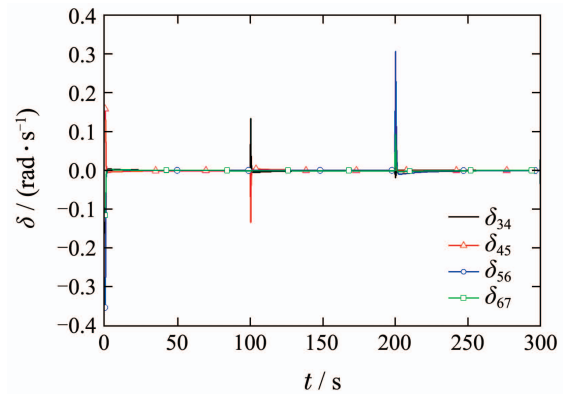
(b) 虚拟主轴控制跟踪误差

图7 仿真跟踪误差曲线

Fig. 7 Simulation tracking error curves



(a) 环形耦合控制比例同步误差



(b) 虚拟主轴控制比例同步误差

图8 仿真比例同步误差曲线

Fig. 8 Simulation proportion synchronization error curves

综上,无论是系统启动还是受扰状态下,环形耦合控制方式可使各电动缸快速达到指定目标值,能很好地实现多运动轴的比例同步控制,体现了较高的控制精度、较好的同步性及较强的鲁棒性且优于虚拟主轴方式.

### 5.2 实验分析(Experiment analysis)

实验平台采用西门子公司SIMOTION D445-2作为控制系统的主运动控制器,通过电机内置绝对编码器及外置直线位移传感器对电动缸输出速度、位置等进行测量,上位机采用LabVIEW开发平台(如图9所示),下位机软件采用SCOUT软件开发平台,使用ST语言进行程序编写.

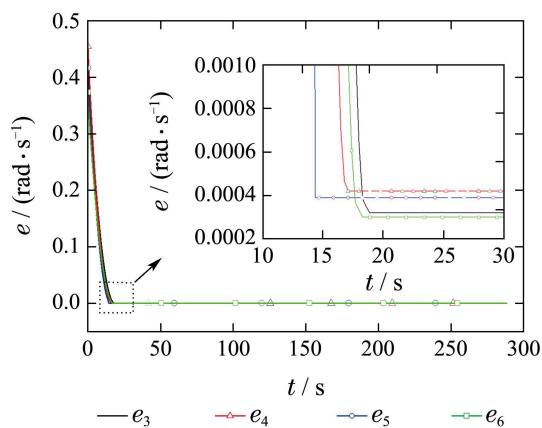


图 9 全挠性喷管控制系统操作界面

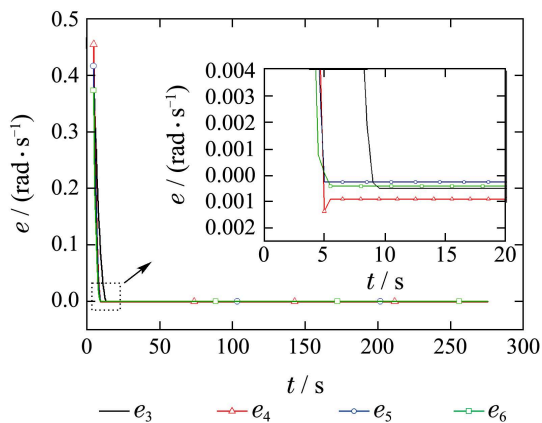
Fig. 9 Full flexible nozzle control system operating interface

将本文设计的环形耦合结构的多电机比例同步控制策略应用于实验平台的运动控制, 令参考输入速度为 $0.5 \text{ mm/s}$ , 各电动缸根据同步比例关系运行, 以运动轴跟踪误差及比例同步误差来衡量控制策略的控制效果, 并与虚拟主轴控制方式进行比较。

实验过程中机构运行稳定,  $3^{\text{th}}$ – $6^{\text{th}}$ 电动缸的输出跟踪误差及比例同步误差如图10和图11所示。



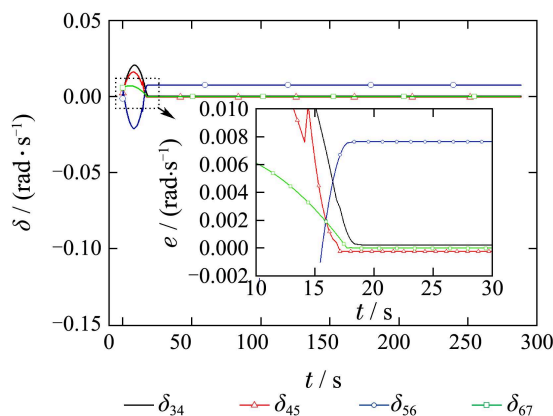
(a) 环形耦合控制跟踪误差



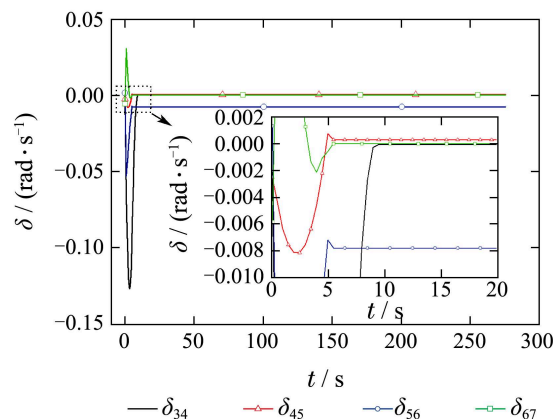
(b) 虚拟主轴控制跟踪误差

图 10 实验跟踪误差曲线

Fig. 10 Experiment tracking error curves



(a) 环形耦合控制比例同步误差



(b) 虚拟主轴控制比例同步误差

图 11 实验比例同步误差曲线

Fig. 11 Experiment proportion synchronization error curves

各电动缸输出速度均能快速达到目标速度, 并在一定范围内保持稳定和比例同步; 在喷管成型过程中, 挠性板弯折应力持续增大的情况下, 虚拟主轴控制方式虽然能够持续保证机构运行速度的稳定输出, 但对跟踪误差的调节作用有限, 而环形耦合方式则可以根据设置的误差带对运动轴参考输出速度和实际运行速度进行有效调节; 虽然环形耦合控制方式下的比例同步误差在速度调节过程中有短暂的小幅波动, 但能快速收敛并稳定, 效果优于虚拟主轴控制方式。

上述实验结论与仿真结果基本一致, 电动缸输出速度能按一定比例同步稳定运行, 跟踪误差可根据设定值快速调节, 比例同步误差能在较短时间内收敛并稳定. 验证了模型有效性的同时, 也体现了多电机环形耦合比例同步控制算法的优势和实际应用价值。

## 6 结论(Conclusions)

1) 提出了基于归一化的多运动轴同步比例系数分配方法, 阐述了基本原理和步骤, 解决了传统控制结构仅能应用于等比例同步的问题;

2) 设计了改进型环形耦合结构的多缸比例同步控制策略, 构造 Lyapunov 函数证明了系统的收敛性和稳定性;

3) 以某跨超声速风洞全挠性喷管为控制对象, 构建电动缸和14轴比例同步控制系统模型, 仿真验证和对比了环形耦合控制方式与虚拟轴主轴控制方式, 结果表明本文设计方法不仅具有较快的响应速度, 较小的跟踪误差和同步误差, 而且能够更为有效的应对负载突变和干扰影响, 表现出了更好的鲁棒性;

4) 将改进型环形耦合结构的多轴比例同步控制策略应用于该风洞喷管型面控制系统, 进行实验研究, 实现了机构的高精度同步定位, 相对虚拟主轴控制方法, 具有更高的跟踪精度和同步精度, 对伺服平台、机器人等涉及多轴同步控制的工业领域, 具有一定的参考价值。

## 参考文献(References):

- [1] WANG Xuanyin, CHENG Jia. Robust control of parallel four-axis electric servo platform based on relative coupling error [J]. *Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering*, 2009, 29(6): 117 – 121.  
(王宣银, 程佳. 基于相关耦合的并联四轴电动伺服平台鲁棒控制 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(6): 117 – 121.)
- [2] JIANG Xiaopin, ZHU Yi, SAN Ye. Synchronization control of multiple permanent magnet synchronous motors in high-power servo test stands [J]. *Electric Machines and Control*, 2014, 18(4): 88 – 95.  
(姜晓平, 朱奕, 伞冶. 大功率随动试验台多永磁同步电机同步控制 [J]. 电机与控制学报, 2014, 18(4): 88 – 95.)
- [3] DENG W, LOW K S. Cross-coupled contouring control of a rotary based biaxial motion system [C] // *The 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*. Singapore: IEEE, 2006: 1 – 6.
- [4] XIAO Y, ZHU K Y. Optimal synchronization control of high-precision motion systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, 53(4): 1160 – 1169.
- [5] ZHANG Chenghui, SHI Qingsheng, CHENG Jin. Synchronization control strategy in multi-motor systems based on the adjacent coupling error [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 25(15): 59 – 63.  
(张承慧, 石庆升, 程金. 一种基于相邻耦合误差的多电机同步控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 25(15): 59 – 63.)
- [6] ZHAO Dongya, ZHAO Yongrui, CUI Baohua, et al. Synchronized control for mechanical systems [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 32(3): 1 – 6.  
(赵东亚, 赵永瑞, 崔宝华, 等. 机械系统同步控制方法研究进展 [J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2013, 32(3): 1 – 6.)
- [7] GAO C, RUI W, HUANG X H, et al. Contour control of the full flexible nozzle in the wind tunnel based on virtual shaft [C] // *Chinese Control and Decision Conference*. Qingdao: IEEE, 2014: 3433 – 3437.
- [8] LI Pengfei, WANG Weitao, WAN Yabin. Multi-motor fuzzy PID synchronous control based on the adjacent deviation coupling strategy [J]. *Machine Design and Research*, 2013, 29(5): 45 – 48, 58.  
(李鹏飞, 王伟涛, 万亚斌. 基于相邻偏差耦合的多电机模糊PID同步控制 [J]. 机械设计与研究, 2013, 29(5): 45 – 48, 58.)
- [9] LI S H, GU H. Fuzzy adaptive internal model control schemes for PMSM speed-regulation system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2012, 8(4): 767 – 779.
- [10] CAO Lingzhi, LI Chunwen, NIU Chao, et al. Synchronized sliding-mode control for multi-induction motors based on adjacent cross-coupling [J]. *Electric Machines and Control*, 2008, 12(5): 586 – 592.  
(曹玲芝, 李春文, 牛超, 等. 基于相邻交叉耦合的多感应电机滑模同步控制 [J]. 电机与控制学报, 2008, 12(5): 586 – 592.)
- [11] LIU Xiaofeng, LIU Xinhui, WANG Longshan, et al. Speed synchronization control of dual-motor in large crawler crane based on fuzzy PID control [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2011, 41(3): 659 – 664.  
(刘晓峰, 刘昕晖, 王龙山, 等. 基于模糊PID控制的大型履带起重机双马达速度同步控制 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(3): 659 – 664.)
- [12] CAO Chunping, WANG Bo, XU Xiaoyong, et al. Research on relative coupling control for multi-motor synchronization based on neural network [J]. *Control Engineering of China*, 2013, 20(3): 415 – 418.  
(曹春平, 王波, 胥小勇, 等. 基于神经网络多电机偏差耦合同步控制研究 [J]. 控制工程, 2013, 20(3): 415 – 418.)
- [13] LIU Ran, SUN Jianzhong, LUO Yaqin, et al. Research on multi-motor sliding-mode synchronization control based on ring coupling strategy [J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(22): 2662 – 2665.  
(刘然, 孙建忠, 罗亚琴, 等. 多电机滑模环形耦合同步控制策略研究 [J]. 中国机械工程, 2010, 21(22): 2662 – 2665.)
- [14] LIU Ran, SUN Jianzhong, LUO Yaqin, et al. Research on multi-drive synchronization control based on ring coupling strategy [J]. *Control and Decision*, 2011, 26(6): 957 – 960.  
(刘然, 孙建忠, 罗亚琴, 等. 基于环形耦合策略的多电机同步控制研究 [J]. 控制与决策, 2011, 26(6): 957 – 960.)
- [15] XU Xiaoyong, SUN Yu, JIANG Qinghai. Improved adjacent cross-coupling control structure for multi-motor proportional synchronization control [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 31(6): 1254 – 1260.  
(胥小勇, 孙宇, 蒋清海. 改进型相邻耦合结构的多电机比例同步控制 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 31(6): 1254 – 1260.)
- [16] XU Xiaoyong, SUN Yu, JIANG Qinghai. Modeling and design of a film tension control system [J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(18): 2452 – 2457.  
(胥小勇, 孙宇, 蒋清海. 薄膜张力控制系统的建模与设计 [J]. 中国机械工程, 2013, 24(18): 2452 – 2457.)
- [17] LIU Zhengchong. *Wind Tunnel Structure Design* [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2005.  
(刘政崇. 风洞结构设计 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005)
- [18] DUAN Xuechao, QIU Yuanying, DUAN Baoyan. Dynamical modeling and trajectory following control of the flexible supporting Stewart platform [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(4): 895 – 900.  
(段学超, 仇原鹰, 段宝岩. 柔性支撑 Stewart 平台动力学建模与轨迹跟踪控制 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(4): 895 – 900.)

## 作者简介:

高川 (1987–), 男, 工程师, 目前研究方向为控制理论与控制工程、高速风洞控制系统设计, E-mail: gaochuan@cardc.cn;

黄叙辉 (1965–), 男, 研究员, 目前研究方向为风洞测控技术, E-mail: huangxuhui\_cardc@163.com;

芮伟 (1975–), 男, 高级工程师, 目前研究方向为自动控制技术, E-mail: rw827130@sohu.com;

蒋婧妍 (1989–), 女, 助理工程师, 目前研究方向为风洞数据采集与测量系统设计, E-mail: 550655873@qq.com;

杜宁 (1980–), 男, 工程师, 目前研究方向为风洞自动控制, E-mail: duning@cardc.cn.