

doi: 10.7690/bgzd.2015.10.024

一种基于虚拟总轴结构的多电机比例同步控制方法

高川^{1,2}, 蒋婧妍^{1,3}, 芮伟¹, 周波¹

(1. 中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000; 2. 四川大学电气信息学院, 成都 610041;
3. 重庆大学通信工程学院, 重庆 400044)

摘要: 针对现有基于虚轴原理的同步控制算法难以满足某些目标成型系统中比例同步控制要求的问题, 设计了一种基于虚拟总轴结构的多电机比例同步控制方法。介绍了多电机比例同步控制结构, 并针对系统结构特点, 以某跨超声速风洞全挠性喷管型面控制系统为应用背景, 设计了电机间比例同步系数分配算法, 建立了4台电动缸的同步控制仿真模型。仿真实验结果表明: 该控制方案收敛速度快, 稳定性高, 鲁棒性强, 能很好地实现多电机的比例同步控制。

关键词: 虚拟总轴; 伺服电机; 电动缸; 比例同步控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

A Multi-motor Proportional Synchronization Control Method Based on Virtual Shaft

Gao Chuan^{1,2}, Jiang Jingyan^{1,3}, Rui Wei¹, Zhou Bo¹

(1. High Speed Institute, China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China;
2. School of Electrical Engineering & Information, Sichuan University, Chengdu 610041, China;
3. School of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To solve the problem that the existed algorithms which based on the virtual shaft control principle are difficult to meet the requirements of the proportional synchronized control in some object contouring system, an improved virtual shaft structure was proposed, which can apply to completely synchronized and proportional synchronized of multi-motor control system. Introduce the construct of the improved virtual shaft, aiming at its characteristics and with the applying background of the full flexible nozzle contour control system in the trans-supersonic wind tunnel, coefficient of proportionality assignment algorithm was designed and the synchronized control simulation mode of four electric cylinders was set up. Simulation results show that the control scheme has a quick convergence rate, good stability behavior and strong robustness, which can effectively achieve multi-motor proportional synchronous control.

Keywords: virtual shaft; servo motor; electric cylinder; proportional synchronization control

0 引言

多电机同步控制一直广泛存在于如纺织、造纸、印染等传统制造行业^[1]。随着运动控制技术的创新, 以及电气设备性能的提高、功能的增强, 如高精度型材加工、硅材料多线切割等领域对此也有了新的应用^[2-3]。而常见的多电机同步关系中各电机的速度同步比例系数都为1, 即 $\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_n$, 这种最简单的同步关系在实际中不能满足某些特殊工况的要求, 如某跨超声速风洞喷管段全挠性壁板成型时, 为保证执行机构将挠性板的弹性曲面精确地与喷管理论气动型面相吻合并有高的重复精度, 使在试验段内获得所要求的试验马赫数和均匀流场^[4-5], 驱动电机之间的速度需要根据各自目标位置的不同, 按照一定比例调节, 即 $\omega_1 : \omega_2 : \dots : \omega_n = \mu_1 : \mu_2 : \dots : \mu_n$ 。

多电机同步控制的好坏直接影响系统的可靠性和控制精度^[6]。

传统的同步控制结构主要包括命令分配式、主从式、虚拟总轴式等, 其中命令分配式方案虽然对大多数简单的运动系统有较好效果, 但无法应对复杂的控制对象及存在负载扰动的同步控制系统^[7]; 主-从式方案因可使从轴运动精确跟踪主轴运动, 在工业上得到了广泛应用和相关改进, 如相邻耦合同步控制^[6]和偏差耦合同步控制^[8], 但该方式复杂且适应性较差, 尤其在重载不平衡的工况下更是如此; 虚拟总轴式方案相对其他耦合控制算法实现起来简单, 并且有明确的物理意义, 非常适合进行运动之间的同步控制, 但相关研究都是针对电机之间比例系数为1的同步控制展开, 对于需要以一定比例同步的问题, 该策略的应用缺乏研究。

收稿日期: 2015-05-26; 修回日期: 2015-07-04

作者简介: 高川(1987—), 男, 湖北人, 硕士, 工程师, 从事控制理论与控制工程, 风洞测控技术研究。

针对这一问题, 笔者基于虚轴原理对目前的虚拟总轴结构做出了改进, 设计了电机间比例系数分配方案, 使它适用于多电机的比例同步控制, 并以电动缸作为控制对象进行建模与仿真, 结果表明: 它能有效地控制多电机以一定比例进行同步, 并克服复杂系统中的耦合、干扰等问题, 消除稳态误差, 得到理想的同步控制性能。

1 多电机比例同步控制结构

1.1 虚拟总轴结构

虚拟总轴 (electronic virtual line-shafting, EVLS) 控制方案是在主从式同步的基础上, 将从轴的驱动力矩反馈至主轴控制器的前向通道中, 实现主轴与从轴之间参数的耦合反馈, 在各运动轴之间建立了联系^[7,9]。其基本工作原理如图 1 所示, 通过在系统中模拟出一根主轴提供驱动转矩, 带动与其联接的各个运动轴运动的同时, 运动轴所受负载也反馈回主轴以平衡驱动转矩。

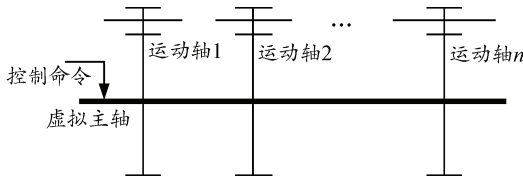


图 1 虚拟总轴控制方案

根据该思想, 对于包括 n 个运动轴的同步系统, 定义虚拟主轴提供的驱动转矩为:

$$T = k_m(\omega_r - \omega_m) \quad (1)$$

式中: T 是系统的输入力矩; k_m 为虚拟主轴的弹性系数; ω_r 为参考输入转动角速度; ω_m 为实际转动角速度。

当电机同步比例系数 $\mu_i = 1 (i = 1, 2, \dots, n)$ 时, 定义第 i 个运动轴的反馈力矩为:

$$T_i = b_r(\omega_i - \omega_m) + K_r(\theta_i - \theta_m) + K_{ir} \int (\theta_i - \theta_m) dt \quad (2)$$

式中: T_i 是各运动轴的反馈力矩; ω_i 为各运动轴转动角速度; b_r 为阻尼增益; K_r 为刚度增益; K_{ir} 为积分刚度增益; θ_i 为各运动轴转动角位移; θ_m 为实际转动角位移^[10]。

要使各运动轴同步运行, 应使所有从轴的反馈力矩与虚拟主轴提供力矩相等, 即要满足

$$T - \sum T_i = J_m \frac{d\omega_m}{dt} = J_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} \quad (3)$$

其中 J_m 是虚拟主轴的转动惯量。它适用于最简单的

同步控制, 当各运动轴需要以一定比例同步时, 相关应用策略缺乏研究; 因此, 笔者对该算法进行了改进。

1.2 改进型虚拟总轴结构

假定同步系统中 n 个运动轴之间的转速关系为: $\omega_1 : \omega_2 \cdots \omega_n = \mu_1 : \mu_2 \cdots \mu_n$ 。定义控制性能最差第 k 个运动轴 (比例系数最大, $\mu_k = \max(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$) 的转速与虚拟主轴输出转速相等, 则运动轴之间的转速关系转化为:

$$\begin{aligned} \omega_1 : \omega_2 \cdots \omega_k \cdots \omega_n &= \\ \mu_1 / \mu_k : \mu_2 / \mu_k \cdots \mu_k / \mu_k \cdots \mu_n / \mu_k &= \\ \mu_1^* : \mu_2^* \cdots 1 \cdots \mu_n^* & \end{aligned} \quad (4)$$

因此, 改进后的虚拟总轴结构如图 2 所示, 且运动轴的反馈力矩关系应满足

$$T_i^* = b_r(\omega_i - \mu_i^* \omega_m) + K_r(\theta_i - \mu_i^* \theta_m) + K_{ir} \int (\theta_i - \mu_i^* \theta_m) dt \quad (5)$$

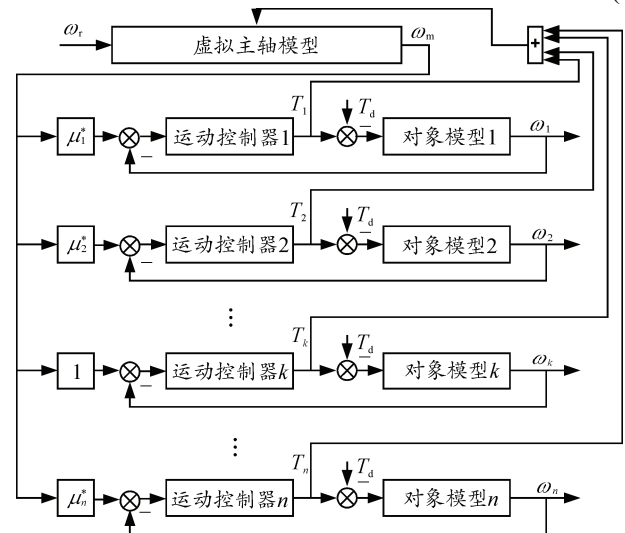


图 2 改进型虚拟总轴结构

2 仿真与实验

2.1 模型与参数

为了验证图 2 所示结构的可行性, 以及系统模型的收敛性和稳定性, 笔者在 Matlab 中建立了相应的仿真模型。选取伺服电机驱动的电动缸作为控制对象, 它由伺服电机带动螺杆, 通过丝杠副产生沿导轨的直线运动, 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^[11]。图 3 是经过改造后机构结构模型, 其中: I 为电机输出电枢电流; T_{mL} 为负载端输出转矩; T_d 为外扰转矩; θ_L 为丝杠螺母的转动角位移, 相关参数取值如表 1。

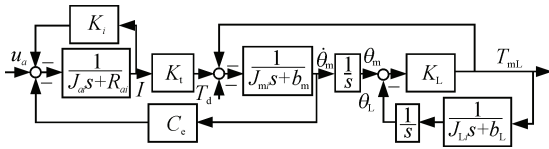


图 3 机构模型结构

可得执行机构从驱动电压到负载端输出转矩的传递函数：

$$G(s) = \frac{T_{mL}(s)}{U_a(s)} = \frac{K_t K_L (J_L s + b_L)}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (6)$$

$$\text{式中：} \begin{cases} a_4 = J_{mi} J_{Li} L_{ai} \\ a_3 = L_{ai} (J_L b_m + J_m b_L) + (R_{ai} + K_i) J_{mi} J_{Li} \\ \quad (J_{mi} K_L + b_m b_L) L_{ai} + (L_a K_L + K_i C_e) J_{Li} \\ a_1 = (R_{ai} + K_i) (K_L J_{Li} + J_{mi} K_L + b_m b_L) + \\ \quad (b_L + b_m) L_{ai} K_L + K_i C_e b_L \\ a_0 = K_t C_e K_L + (K_i + R_{ai}) (b_m + b_L) K_L \end{cases}$$

表 1 机构模型结构参数

参数描述	取值
电机电枢和转动轴的转动惯量 J_{mi}	
负载等效到丝杠的转动惯量 J_{Li}	见表 2
电枢电阻 R_{ai}	
电枢电感 L_{ai}	
丝杠的黏性阻尼系数 $b_L/(N \cdot s/rad)$	3.0×10^{-3}
电机电流反馈系数 K_i	0.02
电机轴的黏性阻尼系数 b_m/Ω	0.4
电机轴和同步传动带等效刚度 K_L/H	0.017 3
电机反电动势系数 $C_e/(V \cdot s/rad)$	0.5
电机力矩系数 $K_t/(N \cdot m/A)$	0.85

2.2 仿真与分析

笔者采用了由 4 台电动缸组成的同步控制系统来进行仿真实验，其主要参数设置如表 2 所示。

表 2 4 台电动缸参数设置

电动缸	$J_{mi}/(N \cdot m^2)$	$J_{Li}/(N \cdot m^2)$	R_{ai}/Ω	L_{ai}/H
1	4.4×10^{-4}	4.8×10^{-4}	0.41	0.017 5
2	3.2×10^{-4}	2.5×10^{-4}	0.63	0.027 5
3	4.4×10^{-4}	4.8×10^{-4}	0.41	0.017 5
4	3.2×10^{-4}	2.5×10^{-4}	0.63	0.027 5

系统运行流程如图 4 所示，开始阶段，系统根据给定电动缸位移目标 s_1, s_2, \dots, s_n ，确认位移变化量最大 ($s_k = \max(s_1, s_2, \dots, s_n)$) 的运动轴，将其同步比例系数赋值为 1，其余定位轴按照与其位移比进行赋值： $s_1/s_k, s_2/s_k, \dots, s_n/s_k$ ；运动轴启动并与虚

拟主轴建立同步；所有电动缸到达目标位置后，系统解除同步并停止运行。运行过程中对反馈力矩进行监测，若超出设定值，则直接解除同步，根据当前位置计算新的同步比例系数后继续运行。

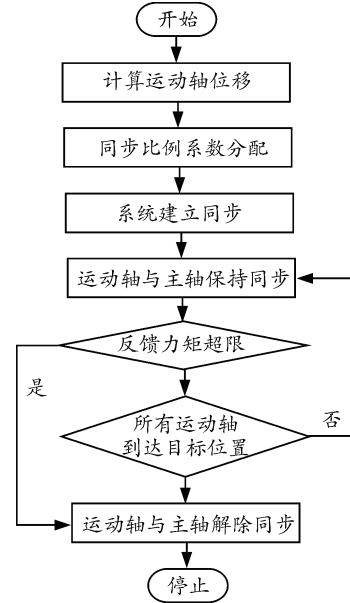
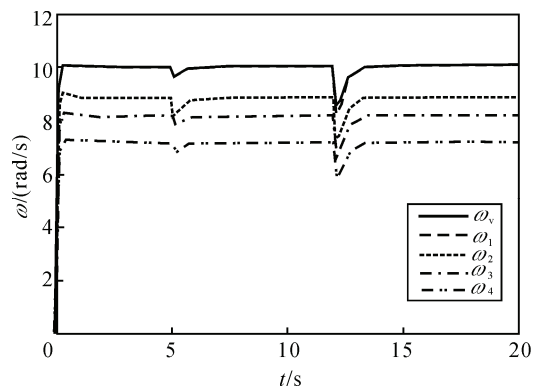


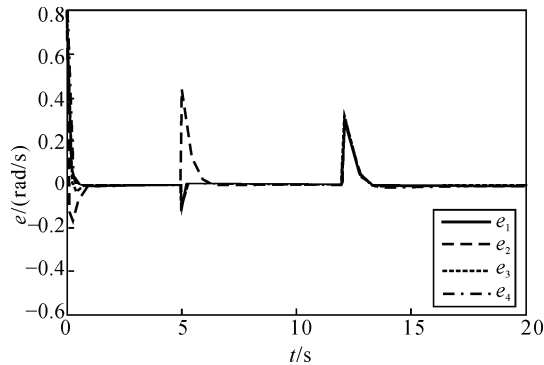
图 4 系统运行流程

仿真的控制结构如图 2 所示，设定系统中 4 台电动缸目标输出位移之比为： $s_1 : s_2 : s_3 : s_4 = 60 : 53 : 49 : 43$ ，则同步比例关系可转化为 $\mu_1^* : \mu_2^* : \mu_3^* : \mu_4^* = 1 : \frac{53}{60} : \frac{49}{60} : \frac{43}{60}$ 。虚拟主轴参考输入

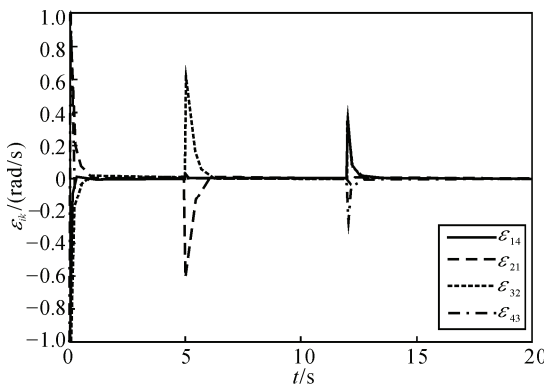
转动速度给定定为 10 rad/s，其他 4 台电动缸根据比例同步变化，在 5 s 时，单独给电动缸 2 一个扰动；在 12 s 时，同时给 4 台电动缸施加等幅值扰动。仿真结果如图 5 所示。



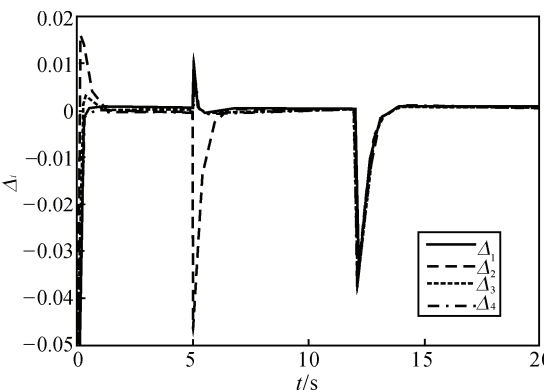
(a) 输出转速



(b) 跟踪误差



(c) 比例同步误差



(d) 同步比例系数误差

图 5 改进型虚拟总轴结构仿真曲线

图 5(a)为虚拟主轴及各电动缸的输出转速 ω_i ；图 5(b)为各电动缸的跟踪误差 e_i ， $e_i(t) = \omega_i(t) - \omega_i^*(t)$ ；图 5(c)为各电动缸之间的比例同步误差 ϵ_{ik} ， $\epsilon_{ik}(t) = \omega_i(t)/\mu_i^* - \omega_k(t)/\mu_k^*$ ，分别为电动缸 1、4，电动缸 2、1，电动缸 3、2，电动缸 4、3 之间的比例同步误差。图 5(d)为各电动缸的同步比例系数误差 Δ_i ， $\Delta_i = \mu_i^* - \hat{\mu}_i$ ，这里令 $\hat{\mu}_i = \omega_i/\omega_m$ 。

由图中可见：电动缸的跟踪误差均能在系统启动 1 s 内收敛于零，在受到单独或整体等幅值扰动时，误差曲线虽然产生不同程度的波动，但均小于 5%且能较快的收敛并稳定，表明系统具有较好的收

敛性和自适应性；电动缸间的比例同步误差在出现等幅值同时扰动时，最大误差不超过 4%，并迅速收敛至稳定，而在电动缸 2 受到单独扰动时，其余电动缸间的同步几乎不受影响(最大误差在 3‰左右)，体现了基于虚轴总轴结构的同步控制系统良好的鲁棒性能和较高的同步稳定性；电动缸的同步比例系数误差，不论是在稳定运行，还是在出现扰动时均不超过 0.05，体现了系统较高的同步精度。

3 结论

笔者针对现有基于虚拟总轴结构的多电动机同步控制策略仅应用于等比例同步问题进行研究并进行了改进，使它能适用于多电机之间能以一定比例进行同步的系统，同时结合工程应用背景，进行了以电动缸为执行机构的建模。仿真实验结果表明：该改进型的虚拟总轴结构控制算法具有较高的同步控制精度和较快的收敛速度，能很好地实现多电机的比例同步控制，具有较高的实际应用价值。

参考文献：

- [1] 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(15): 59-63.
- [2] 蒋近, 戴瑜兴, 郜克存, 等. 多线切割机的速度同步控制[J]. 控制理论与应用, 2011(2): 279-283.
- [3] 李素玲, 刘广飞, 崔振华. 基于虚轴原理的液压折弯机同步控制研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(10): 87-89.
- [4] 高川, 刘烽, 周波, 等. 某超声速风洞测控系统[J]. 兵工自动化, 2013(2): 63-66.
- [5] 虞择斌, 刘政崇, 陈振华, 等. 2 m 超声速风洞结构设计与研究[J]. 航空学报, 2013(2): 197-207.
- [6] 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(6): 1254-1260.
- [7] 李晓明, 李鹏翔. 基于虚轴法的高速液压同步控制策略研究[J]. 液压与气动, 2008(11): 32-36.
- [8] 彭晓燕, 刘威, 张强. 基于改进型偏差耦合结构的多电机同步控制[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013(11): 77-83.
- [9] 季明逸, 游有鹏. 基于虚拟主轴法的同步控制策略研究[J]. 机电一体化, 2012(8): 36-41.
- [10] K. Payette. The virtual shaft control algorithm for synchronized motion control[R]. Proceedings of the American Control conference. 1998. Philadelphia, Pennsylvania.
- [11] 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(4): 895-900.