

升降舞台系统中多电动机智能同步控制的应用研究

分析了当今舞台工程中升降舞台常见的系统结构和控制要求, 以及在实际工程中造成升降舞台运行不同步的主要因素。在分析了多电动机同步控制理论的基础上提出了一种适用于升降舞台的混合同步控制方法, 并且该方法在实际工程得到了成功应用。最后分析了由多个小型升降台组成的舞台群以水平和波浪两种方式运行的控制要求, 基于模糊理论设计了两种易于在可编程序逻辑控制器 (PLC) 中实现的新型模糊同步控制方法。

王启业/华电电力科学研究院 曹城建/中国联合工程公司

0 引言

当今, 大多数新建的剧场都包含有升降舞台的设计与应用, 升降舞台可以让演员的出场更加灵活多变, 即使是群体性的大合唱也可以由升降阶梯一次性推上舞台。同时, 配合车台和旋转舞台的运用, 就可使整个舞台动起来, 给观众一种流畅且华丽的视觉感受。

升降舞台作为近几年剧场演出中常用的机械设备, 得到了深入的研究和改进。工程人员根据不同的剧场大小和演出需要设计出了不同类型的升降舞台, 按传动装置的不同分为剪刀撑、液压、丝杠、柔性尺顶升和链条拉动等几种类型; 按动力源数目分为由4台电动机或2台电动机拖动的大型和由单电动机拖动的中小型; 按升降方式不同分为直线升降式和螺旋升降式; 按安装位置不同分为固定式和活动式(镶嵌在转台和车台中)。

升降舞台的设计中分为机械和控制两部分, 控制系统中同步控制的设计一直都是重点。本来应该在同一水平面的

多个升降台由于运行不同步, 在定位后就会有一定高度差, 极易导致演员发生磕绊现象, 造成人身伤害。本文针对当今常见的升降舞台给出了相应的同步控制方法, 并重点分析了由多个小型升降台组成的舞台群以水平和波浪两种方式运行的控制要求, 设计了两种易于在可编程序逻辑控制器 (PLC) 中实现的基于模糊理论的新型模糊同步控制系统。

1 升降舞台系统结构

目前, 国内许多现代化的舞台系统普遍采用上位机+PLC+驱动单元的集散控制方式^[1], 一般中小型升降舞台的系统结构如图1所示。

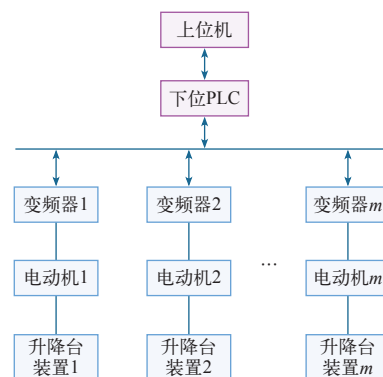


图1 中小型升降舞台群的系统结构图

对于大型升降舞台通常选择4台电动机或2台电动机拖动, 系统结构图如2所示。

升降舞台装置由减速机、传动机构、台面、钢丝绳和平衡重等设备组成。在升降舞台运行过程中, 4台电动机之间的负载电流会因为4个台面上承载的人和物的重量不同、传动机构中齿隙、



王启业/工程师

关键词/Keywords

升降舞台 ·
混合同步控制 ·
模糊理论 ·
PLC ·

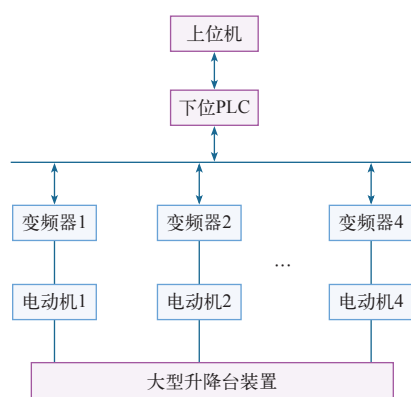


图2 大型升降舞台的系统结构图

钢丝绳的弹性形变和电动机参数的漂移等非线性因素而产生差异。

2 升降舞台系统的同步控制设计

多电动机拖动单个大型升降舞台和由多个单电动机拖动的中小型升降舞台组成的升降舞台群都存在同步控制的问题。本质上，这两大类升降舞台的同步控制可归结为多电动机的同步控制，拖动大型升降台的多个电动机运行不同步，升降平台则发生倾斜；升降舞台群中的电动机之间运行不同步，则舞台群之间的高度就会发生偏差。

2.1 多电动机同步控制理论

对多电动机的同步控制研究，大致分为4种^[2]：

1) 基于同一给定电压的并联运行方法，各电动机的速度环采用同一给定电压，这种方法线路简单，实现容易，起动同步跟随性好，但抗负载扰动能力差。

2) 基于同一给定电压的串联运行方法，以前一台电动机的转速输出作为下一台电动机的速度给定，这种方法简单易行，但起动过程跟随性能不是很理想，抗负载扰动不十分理想。

3) 基于补偿原理的输出耦合控制方法，在各电动机采用同一给定电压或以前一台电动机的转速输出作为下一台电动机的速度给定的基础上，比较主从电动机的转速，其差值经补偿器加到从电动机或主电动机的控制输入端，这种方法使同步控制准确度和抗负载扰动能力都得到了很大的

提高。

4) 基于现代控制理论的控制方法，这种控制方法主要是在前三种方法的基础之上，将现代控制理论应用到控制器的设计和被控对象的模型辨识中。

基于补偿原理的输出耦合控制方法在实际应用中使用最广泛，补偿的方式方法不同，效果也有差异。交叉耦合是一种得到广泛研究与应用的控制方法，1980年Koren^[3]首先提出了并联交叉耦合控制结构，可是当同步电动机的数目 $n > 2$ 时，并联交叉耦合控制因补偿规律很难确定，因此不适用^[4]。Kulkarni和Srinivasan^[5-6]详细分析了交叉耦合补偿控制策略，并于1989年引进了最优控制方案^[7]。之后，许多学者围绕多机协调控制展开了进一步的研究。Tomizuka^[8]把自适应前馈控制策略应用到交叉耦合控制器中，提高瞬间响应和抗干扰能力。Doraiswami和Gullivert^[9]采用鲁棒控制设计位置环补偿器，确保静态误差达到设计标准。1991年Koren和Lo又提出变增益交叉耦合控制。2003年Perez-Pinal F^[10]等人提出了适用于同步电动机数目 $n > 2$ 的偏交叉耦合控制，其基本思想是将某一台电动机的速度反馈同其他电动机的速度反馈分别做差，然后将得到的偏差相加作为该电动机的速度补偿信号，用来补偿各个电动机之间的转动惯量的不同。但是当电动机的数目比较大的时候，控制结构比较复杂，耦合补偿规律难以确定。2002年Shih^[11]等人提出了相邻交叉耦合控制策略。2003年Dong Sun^[12]等人将相邻交叉耦合控制策略应用到机器人同步控制中，对每台电动机而言，只考虑相邻两台电动机转速的影响，因此控制结构简单，同步性能好。2007年张承惠等^[13]提出了一种基于相邻耦合误差的多电动机同步控制算法，仿真实验得到了很好的同步效果。2008年Seok和Sam^[14]提出了一种最大误差比较的耦合同步控制算法，使得同步误差值最大的电动机优先得到调节，各电动机抗扰性能得到加强，通过实验验证了这种算法的有效性。2009年兰天等^[15]将交叉耦合同步控制应用到多传感器、多自由度机器人灵巧手的关节控制中，取得了很好的效果。

2.2 一种适用于升降舞台的同步控制方法

将基于同一给定电压的并联运行方法与基于补偿原理的输出耦合控制方法相结合，在速度并联同步控制的基础上引入位置输出耦合补偿控制，可以使电动机转动位移和转动速度都达到同步效果，从而实现剧场中多个升降舞台位置和速度的同步控制。多电动机混合同步控制结构图如图3所示。

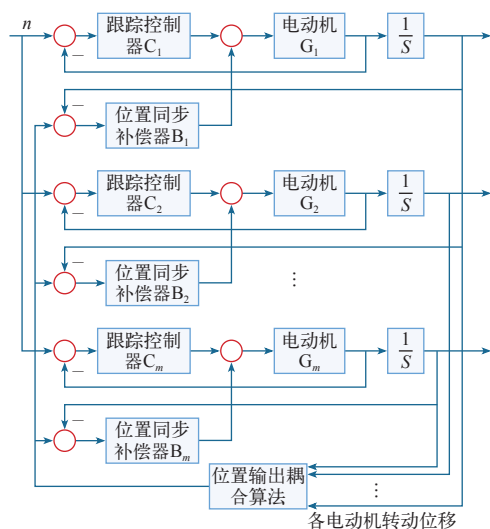


图3 多电动机混合同步控制结构图

本文给出一种易于在PLC中完成的位置输出全耦合算法：取各台电动机的转动位移平均值 $(S_1 + S_2 + \dots + S_m)/4$ 。各电动机的转动位移与各台电动机的转动位移平均值之差接近零时，它们的转动位移就相等。

2.3 工程应用

上面所提到的控制方案在泰州市会议中心舞台工程中得到了应用，很好地实现了由4台电动机分别拖动4个升降台的同步控制。文献[16]中介绍了传动装置中齿隙对伺服系统的非线性影响，就本文研究的升降台来说，在传动装置起动初期，齿轮之间还没有啮合上，齿隙比较大，对整个系统的影响也最大。如果一开始就加入位置同步补偿控制器，传动装置中的齿轮之间就会产生自激振荡，导致升降台发生颤抖。但当升降台的上升速度达到一定值时，齿隙的影响就可以忽略不

计。提升舞台上升的钢丝绳的弹性形变也类似于齿隙对伺服系统的影响。因此在实际工程中采用抛物曲线起动并设定4台电动机转速都超过同一值时，各个升降台进入了稳态运行，这时才加入位置同步补偿控制，以此来避免齿隙和钢丝绳弹性形变的非线性影响。

工程中选用带PI调节的矢量变频器，跟踪控制器直接在变频器上设置参数完成，而位置输出同步补偿器选用PID控制在下位PLC中编程实现，在升降台上挂接开度仪反馈位置信号到PLC。

3 智能型升降舞台的设计

通常升降舞台的载重相对于舞台自身的重量要小很多，演员的表演活动对整个台子的扰动相对很小，反映到舞台的同步误差上几乎可以忽略不计。因此，对于大中型升降舞台，上述控制方法中的位置同步补偿器采用常规的PID调节就可以满足控制要求。

小型升降舞台的重量相对大中型升降舞台要小很多，台面上演员的表演活动会以负载电流的形式对拖动电动机运行产生大的扰动，常规的PID调节就难以满足同步控制要求，应结合现代控制理论，设计出智能型的同步控制器。

3.1 工程背景

某剧场中一个大型旋转舞台的设计如图4所示。在整个旋转舞台的周边安装了6个小型的升降舞台，中间为1个可以旋转上升的中型升降台。在此，主要研究6个小型升降舞台的同步控

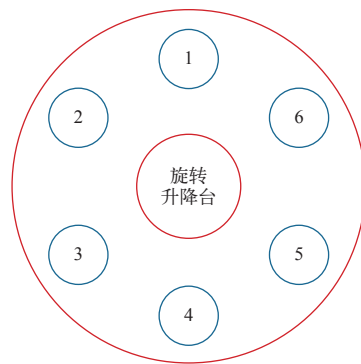


图4 某剧场大型旋转舞台的结构图

制方法。

本文选取6个升降舞台的水平式和波浪式两种典型运行方式来进行研究,水平式运行即6个升降舞台保持在同一水平面升降运行,波浪式即6个升降舞台在旋转舞台做旋转运行的同时形成波浪式的运行效果。

3.2 智能同步控制器的设计

模糊理论作为一种拟人化的控制技术,近几年在工业控制中得到了广泛的应用。PLC作为一种通用控制装置,广泛应用于各类工业领域。随着PLC技术的不断发展,各PLC生产厂家推出适用于各类过程控制的智能专用模块,如FZ模糊推理模块、PID模块等。但是,这些专用模块价格昂贵,需使用专用编程设备,成本高,通用性差。本文选用一种应用于PLC的新的模糊控制算法来实现6个升降舞台的同步控制,该方法使用PLC附带的编程工具编程,大大降低了智能控制器的投入成本。

3.2.1 普通模糊控制器

模糊智能控制器设计的关键是模糊控制量表的整定。通常是现场工程师的设计经验和实际控制对象总结出模糊控制规则表,然后根据该控制规则表计算出总的模糊关系矩阵 R ,再计算出对应不同的模糊输入值(本文取偏差及偏差变化率两个输入量 E 、 C),其模糊输出量 U 的大小,从而制成一个总的模糊控制量表,即查询表,把它植入到PLC中。但是由于其查询表一旦整定完成后就不再改变,量化因子也不再变动,这样它的控制规则在对象参数随环境变化而发生漂移时难以进行有效的适应性调整,从而不能得到期望的控制效果。而且如果查询表整定得不合理或量化因子选择不当都有可能导致振荡。此外,当常规的模糊控制器将实际的连续模拟输入量进行量化变为模糊量时,会损失大量的信息量。这类控制器在将模糊控制量输出转化为实际模拟量输出时,由于前后两个模糊量之间是离散的,当从一个模糊量输出变为另一个模糊量输出时,输出的控制量必然会产生一个跃变,使得控制器的模拟

量输出也产生跃变。这种不断的跃变对控制对象可能会产生不良后果。而一些高性能的模糊控制算法,如有自组织、自学习功能的控制算法,却由于算法复杂,运算量大且占用存贮空间多,PLC的存贮容量和计算速度都无法满足实时控制的需要,因此也有局限性。

3.2.2 新型模糊控制器

文献[17]中提出了一种应用于PLC的新的模糊算法,它是在简单的查表法的基础上,结合自修正因子法的优势,再应用数学插值的方法来实现的。其算法简单明了,运算量小,完全能够在PLC上加以实现。

如上所述,简单的模糊查表法虽然方便易用,但由于其自适应能力较差,所以良好的性能得不到充分发挥。为了增强其自适应能力,模糊控制器就必须根据过程参数的变化自动在线修改控制规则,从而取得很好的控制效果。量化因子的选择直接影响着整个系统的品质,通过对它们的适当调整就能使系统的性能得到改善。通常可以很容易找到各个量化因子对系统各种特性所起的作用,并总结出其内在规律。按照这个总的规律,就能制定出量化因子随系统参数变化而进行修改的总规则,并可以用简单的数学公式体现出该规则的原理。这就是自修正因子法的基本思路。

为避免模糊量之间的跃变问题,可以借用数学的插值法,使量化后的模糊量具有连续性,这样就能尽量少地保存连续的模拟量信息,同时也能使模糊输出值连续地按线性变化,从而可以有效地改善系统的控制性能,并消除输出的跃变现象。

按照这种思路,实际控制过程就可以在模糊查询表的基础上,根据系统过程参数的变化来自动在线修改量化因子,从而改变控制规则以获得好的控制效果。同时,对模糊量的处理采用插值法,以便完善控制特性,并使控制器的输出连续变化。因为控制的最终目的是使得系统的输出偏差量趋向于0,所以系统过程参量中的偏差量最为

重要, 可根据偏差量的大小来改变各量化因子的值。

3.3 仿真研究

3.3.1 新型模糊算法的各个组成部分

(1) 根据极大极小合成原理离线计算出查询表

1) 先由实际控制对象和操作人员经验得出模糊控制规则表。

2) 然后根据该控制规则表计算出总的模糊关系矩阵 R 。

3) 再计算出对应不同的模糊输入值(本文取偏差及偏差变化率两个输入量 E 、 C)，其模糊输出量 U 的大小，从而制成一个总的模糊控制量表，查询表如表1所示。

表1 模糊控制量表

	C_1	C_2	$\cdots$	C_j	$\cdots$	C_n
E_1	U_{11}	U_{12}	$\cdots$	U_{1j}	$\cdots$	U_{1n}
E_2	U_{21}	U_{22}	$\cdots$	U_{2j}	$\cdots$	U_{2n}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
E_i	U_{i1}	U_{i2}	$\cdots$	U_{ij}	$\cdots$	U_{in}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
E_m	U_{m1}	U_{m2}	$\cdots$	U_{mj}	$\cdots$	U_{mn}

(2) 量化因子的自修正原则

实际的输入采样值 $e(t)$ 、 $de(t)/dt$ 是连续变化的准确量, 要将它们模糊化变为模糊量 E 、 C 就需要先乘以一定的量化因子 K_e 、 K_c , 得到 $E(t)$ 、 $C(t)$, 如式(1)和式(2)所示, 然后再对 $E(t)$ 、 $C(t)$ 取整即可得 E 、 C , 即

$$E(t) = K_e e(t) \quad (1)$$

$$C(t) = K_c \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

同样, 要将模糊输出值 U 转化为实际的控制量 $u(t)$ 输出, 也需乘以一定的量化因子 K_u , 计算公式为

$$u(t) = K_u U \quad (3)$$

因而, 量化因子的大小直接决定了控制系统的性能指标, 其总的规律如下:

1) K_e 越大, 稳态误差就越小, 系统的响应也就越快, 然而超调量也会随之增加, 甚至可能产

生振荡; 而 K_e 越小, 其效果相反。

2) K_c 越大, 系统快速性将降低, 而超调量则会减小, 对偏差变化率的灵敏度就会加大; 反之, 若 K_c 越小, 其效果相反。

3) K_u 越大, 系统响应越快, 超调量也会加大, 收敛性也就随之降低; 如果 K_u 越小, 其效果相反。

根据以上规律, 为了改善系统性能, 使得控制系统既有快速的动态响应, 又有良好的稳态准确度, 同时还能自适应系统过程参数的变化, 就需要使控制器能根据被控系统偏差绝对值 $|e(t)|$ 的大小, 按以下规则自动在线修改和调整量化因子。

1) $|e(t)|$ 大时, 为了能尽快减小偏差, 加快系统的响应, 让 K_e 和 K_u 取大一些, 而 K_c 取小一些。

2) $|e(t)|$ 为中等时, K_e 和 K_u 应相应减小一些, 而 K_c 则要适当增大一些。各个量都取中等值, 以避免系统响应速度过快而出现大的超调。

3) $|e(t)|$ 较小时, K_e 应当取大一点, 以减小稳态误差, 而 K_c 取中等值, K_u 取减小一点, 以便系统收敛性更好。

(3) 插值法

由于进行极大极小合成运算时, 在对连续的准确量进行模糊化的过程中信息量严重损失, 为了进一步改善系统性能, 需要想办法增加系统的信息量, 为此引入数学中的线性插值法。插值法在仿真过程相当于将采样时间取得更小。

3.3.2 仿真设计与结果分析

实际工程中都是用交流电动机来拖动设备, 而交流电动机采用矢量控制^[18]即转化为直流电动机的模型, 因此本文中直接选取直流电动机作为模型。电动机参数为: 额定数据为10 kW, 220 V, 55 A, 1 000 r/min, 电枢电阻 $R_a = 0.5 \Omega$; 通过计算得出电动机的电动势系数 $C_e = 0.192 \text{ V} \cdot \text{min/r}$, 取电枢回路总电阻 $R = 1 \Omega$, 飞轮惯量 $GD^2 = 10 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, 通过计算, 得出电磁时间常数 $T_1 = 0.017 \text{ s}$, 机电时间常数 $T_m = 0.075 \text{ s}$ 。

实际中同一型号电动机的参数通常都是略有差别, 取另外5台电动机的电磁时间常数和机电时间常数如表2所示。

表2 各电动机电磁时间常数和机电时间常数

	电动机2	电动机3	电动机4	电动机5	电动机6
T_i/s	0.02	0.021	0.015	0.018	0.019
T_m/s	0.1	0.095	0.1	0.082	0.090

本文以6台电动机拖动6个小型升降台做水平式运行仿真对象,同步控制结构图如图3所示,给定输入为1 000 r/min。在5 s的时刻,给电动机1施加+5 A的阶跃负载电流,给电动机2施加-5 A的阶跃负载电流,在此给出一个6台电动机之间转动位移差最严格的评价函数为

$$e_s = \max(|S_1 - S_2|, |S_1 - S_3|, \dots, |S_5 - S_6|) \quad (4)$$

式中, $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ 分别为6台电动机的转动位移。即取任意2台电动机之间的转动位移差的最大值作为位移同步误差。按照式(4)给出的评价函数绘制出位移同步误差曲线如图5所示。

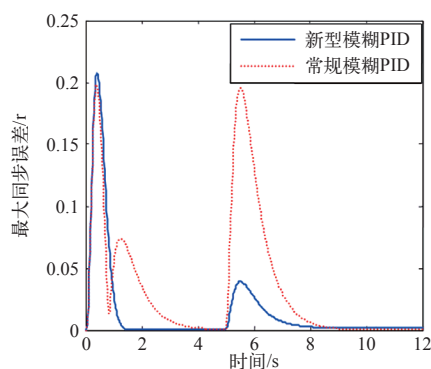


图5 载重突变下6台电动机转动位移同步误差曲线

从图5中可以看出由新型模糊控制器完成的同步控制的起动性和抗扰性均比常规模糊控制器的要好。

3.4 两种不同运行方式的设计

通过给定不同的速度曲线可以实现水平和波浪两种运行方式。

3.4.1 水平式

水平运行方式中单个升降台的控制结构图如图6所示。

速度给定采用分段式,先加速再匀速后减速(或先加速后减速)的速度曲线,6个升降台装置同时给定相同的速度曲线。同步控制方案选用同图3的位置输出全耦合同步控制,各台电动机的速

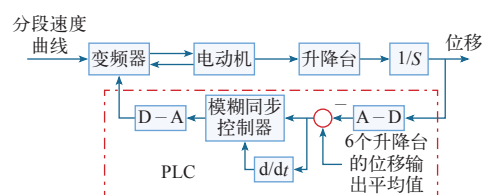


图6 水平运行方式中单个升降台的控制结构图

度跟踪控制由带PID调节的变频器来完成。

3.4.2 波浪式

波浪运行方式中单个升降台的控制结构图如图7所示。

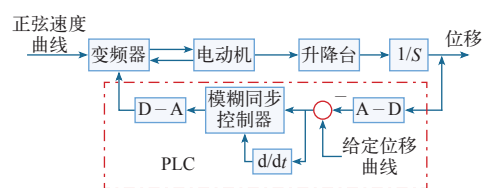


图7 波浪运行方式中单个升降台的控制结构图

速度给定为正弦曲线,各个升降台装置的速度给定依次相差半个正弦曲线周期。同步控制方案采用路径跟踪位置同步控制,即图中的给定位移为由速度正弦曲线积分后乘以一个比例系数(升降台上升位移与电动机转动位移的比值)形成的位移曲线,各个升降台装置中的给定位移曲线同样依次相差半个周期。

4 结束语

本文介绍了当今舞台工程中升降舞台常见的系统结构和控制要求,以及在实际工程中造成升降舞台运行不同步的主要因素,针对不同类型的升降舞台给出了相应的同步控制方法。文中提出的基于均值的全耦合混合同步控制成功运用到了泰州市会议中心舞台工程中。给出了由多个小型升降台组成的舞台群以水平和波浪两种方式运行的控制要求,设计了两种易于在PLC中实现的基于模糊理论的新型模糊同步控制系统。仿真结果表明由新型模糊控制器完成的同步控制,起动性和抗扰性均好于常规模糊控制器。该控制系统还有待于在实际舞台工程中得以验证其可行性。在剧场里,本文中所提到的控制方法同样可以被应

用到吊杆群或多电动机拖动的大型转台的同步控制中。

参考文献

- [1] 徐奇. 国内外舞台机械的发展状况 [J]. 艺术科技, 2001 (1): 8-21.
- [2] 刘福才, 张学莲, 刘立伟. 多级电机传动系统同步控制理论与应用研究 [J]. 控制工程, 2002, 9 (4): 87-89.
- [3] Koren Y. Cross-coupled biaxial computer controls for manufacturing systems [J]. ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1980, 102 (12): 256-272.
- [4] Franciscoj, Ciron, Ricardo, et al. Comparison of multi-motor synchronization techniques [C]. Busan: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, The 30th Annual Conference of the IEEE industrial Electronics Socie-ty, NJ: IEEE, 2004: 1670-1675.
- [5] Kulkarni P, Srinivasaa K. Cross-coupled compensators for contouring control of multi-axial machine tools [C]. Proceedings of the 13th North American Manufacturing Research Conference, 1985: 558-566.
- [6] Kulkarni P, Srinivasaa K. Cross-coupled compensators for multi-axial feed drive servomechanisms [C]. Proceedings of Japan-USA Symposium of Flexible Automation, 1986: 585-594.
- [7] Kulkarni P, Srinivasaa K. Optimal contouring control of multi-axial feed drive servomechanisms [J]. ASME Journal of Engineering for Industry, 1989, 11 (1): 140-148.
- [8] Tomizuka M, Hu J, Chiu T, et al. Synchronization of two motion control axes under adaptive feedforward control [J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1992, 114 (6): 196-203.
- [9] Doraiswami R, Gulliver A. A control strategy for computer numerical control machine exhibiting precision and rapidity [J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1984, 106: 56-62.
- [10] Perrez-Pinal F J, Nunez C, Alvarez R, et al. Comparison of multi-motor synchronization techniques [C]. Busan: Proceedings of the 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2004: 1670-1675.
- [11] Shih Y T, Chen C S, Lee A C. A novel cross-coupling control design for bi-axismotion [J]. International Journal of Machine Tool & Manufacture, 2002, 42 (14): 1539-1548.
- [12] Sun D. Position synchronization of multiple motion axes with adaption coupling control [J]. Automatica, 2003, 39 (6): 997-1005.
- [13] 张承慧, 石庆升, 程金. 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, 20 (5): 26-28.
- [14] Seok-Kwon Jeong, Sam-Sang You. Precise position synchronous control of multi-axis servo system [J]. Science Direct, 2008 (18): 129-140.
- [15] 兰天, 刘伊威, 金明河, 等. DLR/HIT II灵巧手控制系统及基关节同步控制 [J]. 电机与控制学报, 2009 (4): 51-53.
- [16] 李丹. 传动装置齿隙位置对伺服系统的影响 [J]. 重型机械科技, 2004 (2): 26-31.
- [17] 周孚宏. 应用于PLC的一种新的模糊控制算法 [J]. 自动化仪表, 2005, 26 (10): 17-20.
- [18] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

(收稿日期: 2016-01-04) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告