

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.10.013

精密伺服锻压机双电机同步控制方案分析*

陈 晶¹, 陈冰冰^{1*}, 黄伟权¹, 龙 静^{1,2}

(1. 佛山市顺德工业与信息技术研究中心有限公司, 广东 佛山 528300;

2. 广州大学 机械与电气工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 针对新型伺服锻压机存在电机精确同步的瓶颈问题, 引入了双电机交叉耦合同步控制方案。该方案将主、从电机的电流进行比较, 得到了一个差值作为从电机的附加反馈信号。从电机根据这一附加反馈信号对自身的速度进行了动态调整, 从而获得了较好的同步精度。先从理论角度对比分析了主令双电机同步控制方案和交叉耦合双电机同步控制方案两者的控制效果以及存在的问题。接着分别使用主令双电机同步控制方案和交叉耦合双电机同步控制方案控制锻压机执行相同的工艺曲线, 通过实验对比分析了两种同步方案下的耦合误差和两电机的扭矩曲线。研究结果表明, 在紧耦合的双电机系统中, 交叉耦合双电机同步控制方案能满足系统的位置和扭矩同步要求, 两电机的同步误差在0.35°以内。

关键词: 锻压机; 交叉耦合控制; 同步

中图分类号: TG315; TH39; TP27;

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2013)10-1222-04

Scheme analysis of high precision servo forging press with double motor synchronization control

CHEN Jing¹, CHEN Bing-bing¹, HUANG Wei-quan¹, LONG Jing^{1,2}

(1. Foshan ShunDe Industry and Information Technology Research Center Co., Ltd., Foshan 528300, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Aiming at the bottleneck problems of motor accurate synchronization existing in the new servo forging press machines, the scheme of dual motor cross coupling control was presented. The current of master-slave motor was compared in the scheme, and then a different value as an additional feedback signal of the motor was acquired. Based on the attached feedback signal, the motor dynamically adjusts the speed so that a better synchronization precision could be obtained. A comparison and analysis about control effect and existing problems between the scheme of the master-slave double motor synchronization control scheme and the scheme of cross coupling double motor synchronization control was firstly made from the perspective of theory. Then master-slave double motor synchronization control scheme and the cross coupling double motor synchronization control scheme were separately used to control forging machine so that the same process curve could be implemented, and then the comparison and analysis between synchronization errors and coupling torque curve was made under the experiments. The results indicate that the scheme of double motor differential current coupling synchronization control could meet the position and torque requirements of the system in a tightly coupled dual motor system, and two synchronous errors are within 0.35 degrees.

Key words: forging machine; cross coupling control; synchronization

收稿日期: 2013-01-25

基金项目: 广东省中国科学院全面战略合作资助项目(2010A090100007); 广东省教育部、科技部/中国科学院产学研科技创新平台资助项目(2011A091000017); 企业科技特派员工作站建设资助项目(2010B090500017); 2011年粤港关键领域重点突破资助项目(2011A080404007); 广东省战略新兴产业核心技术攻关计划资助项目(2012A09100015); 广东省中科院全面战略合作资助项目(2012B091100254); 顺德区第二批院市合作资助项目(2012YS03)

作者简介: 陈 晶(1986-), 男, 福建福州人, 主要从事自动控制方面的研究。E-mail: chenmaru@163.com

通信联系人: 陈冰冰, 男, 副研究员, 硕士生导师。E-mail: chenbingbing@ictsd.com.cn

0 引 言

国内外对于双电机同步控制的研究已经有很长的历史。目前,能控制双电机同步运动的方法大体有两种:一种是机械方式,另一种是电方式^[1-3]。

机械总轴多电机同步控制是典型的机械方式同步控制方案^[4],主要由机械部件实现,即用一台大功率电机拖动机械总轴运动,其余电机通过齿轮耦合到机械总轴上。机械总轴同步控制方式是最早形成的一种同步控制方式,控制策略相对其他方式而言较为简单。该同步方案存在系统性能受总轴的限制,且轴数较多时机械结构较复杂,功率受限,因此通常用于运动范围较小、系统功率不大的情况。

电方式的同步控制方案几乎不受硬件限制,灵活性强。在对多电机之间的同步运动要求高的过程控制领域,研究电方式的同步控制,有着更为重大的意义。电方式的多电机同步控制有以下几种常用的方法:电子虚拟总轴多电机同步控制^[5]、主令多电机同步控制^[6]、主从多电机同步控制^[7]、交叉耦合多电机同步控制^[8]。电子虚拟总轴多电机同步控制使用虚拟总轴模拟机械总轴的物理特性,具有与机械总轴近乎相等的固有特性。系统输入经过虚拟总轴的作用后,得到其余各轴的输入信号。电子虚拟总轴同步控制方式突破了总轴功率的限制,并且提高了整个系统的同步性能。但虚拟总轴控制系统中总轴与分轴之间存在不同步的现象,总轴输入值与各分轴之间存在一个恒定的偏差。在主令多电机同步控制中,各电机接收同一个输入信号。电机之间没有耦合的关系,因此各电机的输入信号仅由参考信号影响而不受系统其余电机的影响,但一旦某一电机出现扰动,各电机的同步则得不到保证。因此该同步方案适用于电机功率大且不会出现较大扰动的场合。主、从多电机同步控制把多电机划分为主、从电机,主电机接受系统的输入信号,从电机的输入信号是主电机的输出信号。该控制方案的主、从电机可以选用不同的控制策略,适用于同步驱动系统中多个单独的控制目标基本一致的情况。交叉耦合同步控制策略是将多台电机的位置、速度或者电流进行比较,从而得到一个差值作为附加的反馈信号。根据这一反馈信号,控制系统能根据任何一台电机的负载变化而动态地进行调整,从而获得较好的同步精度。但该方法通常只用于主、从两个电机的同步场合。

锻压机为了达到预期的3 000 kN压力输出,使用同步带轮和齿轮把两个51 kW的伺服电机刚性连接在一起,当两个电机速度和扭矩都同步时,将产生最

大的合力^[9]。由于机构结构已定,设计人员只能使用电方式来实现两伺服电机的同步。此外,两电机要实现严格的速度同步和扭矩同步,因此电子虚拟总轴多电机同步控制不予以考虑。主令多电机同步方案和主从多电机同步方案都属于非耦合的同步控制方式,且主令多电机同步方案较主从多电机同步方案更加贴近所述锻压机的应用实际。

为了找出实现锻压机两伺服电机同步的最佳方案,本研究将从理论和实验两方面对比主令多电机同步方案和交叉耦合多电机同步方案的控制效果。

1 精密伺服锻压机结构及工作原理

伺服锻压机如图1所示。由机身、两台低速大扭矩交流伺服电机、同步带轮、同步齿轮、滚珠丝杠、驱动滑块、小连杆、可变连杆、曲轴、平衡气缸、荷重传感器、滑块调整机构以及滑块体等组成。机器工作时,控制器根据工艺曲线的要求分别向两伺服驱动器发送位置指令,电机带动同步带轮,通过滚珠丝杠及增力机构带动末端滑块体在垂直方向上运动,从而带动模具上下运动^[10]。

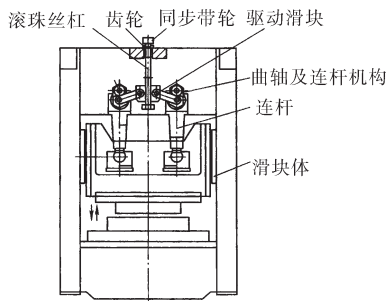


图1 双伺服精密锻压机机构结构简图

2 系统硬件设计

锻压机采用beckhoff公司的CX1020作为整个系统的控制核心。CX1020是一款基于PC架构的控制器,集逻辑控制、运动控制、可视化以及安全于一身,并具有以下的特点:开放式兼容的计算机硬件,支持所有的通用总线接口,支持通过OPC、OCX、DLL与用户接口和其他程序进行数据通信。动力单元采用Baumuller公司的bm4400系列伺服驱动器和DS160M23R10-5交流伺服电机。各种开关量输入输出、压力信号输入、光栅尺输入等通过beckhoff公司I/O模块间接接入到控制器。两个伺服驱动器和I/O模块均通过EtherCAT总线与控制器相连。EtherCAT是开放的实时以太网网络通讯协议,最初由德国倍福自动化有限公司研发。EtherCAT为系统的实时性能和拓扑的灵活性树立了新的标准,同时,它还降低了现场总

线的使用成本,提供高精度设备同步,可选线缆冗余和功能性安全协议(SIL3)。

3 双电机同步控制方案理论比较

3.1 主令双电机同步控制方案

主令双电机同步控制方案简图如图2所示,两个伺服电机同时接收来自控制器相同的位置指令,然后各自进行闭环控制。两个电机之间不存在控制上的耦合。理想情况下,锻压机两个伺服电机以及两边机械结构的动态参数是对称的,即两电机同时接收相同的指令,则会产生相同的位置。但在实际工程中,两电机的动态参数不一致或者现场的电磁干扰会使两电机产生不同的位置输出。特别是受制造以及安装工艺的影响,锻压机两边机械结构的动态参数难以保证对称,因此,即使两电机的速度同步了,也会出现两电机扭矩不同步的情况。

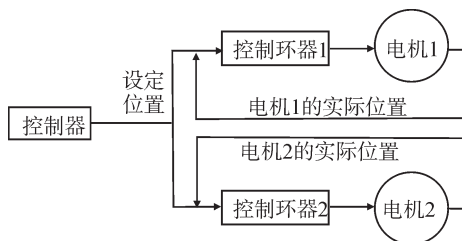


图2 主令双电机同步控制方案简图

3.2 交叉耦合双电机同步控制方案

交叉耦合双电机同步控制方案简图如图3所示。该方案在主令双电机同步控制方案的基础上进一步把两电机划分为主、从电机。两伺服驱动除了接收来自控制器相同的位置指令外,从伺服驱动额外读取主伺服驱动的电流值,并与自身的电流值做差,乘以常系数后作为从伺服驱动速度环的速度补偿输入。也就是说,从电机速度环的输入值是3个信号的叠加:目标位置经过差分前馈后的速度输出;从电机自身的实际速度反馈值;主、从电机电流差计算得到的速度补偿输入。假设控制器的运动控制周期是2 ms,则控制器每隔2 ms向两伺服驱动器发送目标位置指令。从驱动器计算速度补偿输入的周期是125 μs,这意味着在控制器2 ms的控制周期内,从伺服驱动器可以进行16次扭矩补偿控制,起到了电流(扭矩)同步的作用。但该同步方案着眼于扭矩的同步,即使两电机通过同步带紧耦合连接,也有可能出现两电机位置不同步的情况。

4 双电机同步控制方案实验比较

两电机的同步包含位置同步和扭转同步两个方面。为了描述位置同步性能,本研究引入了耦合误差

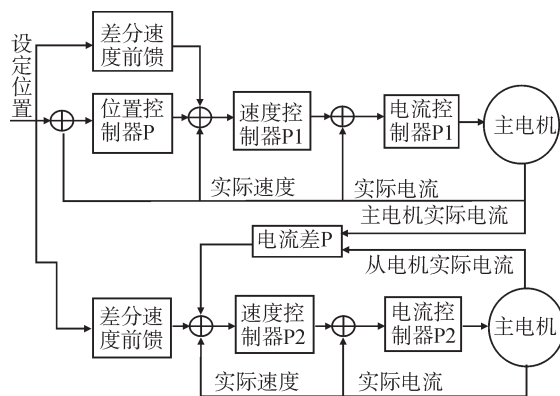


图3 交叉耦合双电机同步控制方案

这一参数,其计算公式为:耦合误差=(主轴实际位置-主轴设定位置)-(从轴实际位置-从轴设定位置)。位置同步反映了两电机的位置跟随性能。扭矩同步性通过分析两电机的实际扭矩得到。以下将从实验方面对比主令双电机同步控制方案以及交叉耦合双电机同步控制方案应用于锻压机上的性能。

4.1 主令双电机同步控制方案

控制锻压机执行行程为250 mm的工艺曲线,每隔2 ms记录两电机的实际位置、设定位置和实际扭矩。本研究以记录的点数为横坐标,分别画出的耦合误差曲线和两电机实际扭矩曲线如图4所示。耦合曲线表明:在整个工艺曲线的执行过程中,耦合误差一直保持在 $\pm 0.15^\circ$ 以内,位置同步性能较好。但由两电机扭矩曲线可以看出,两电机的扭矩同步性能很差。行程开始阶段主电机扭矩大于从电机扭矩,且差值较大;回程阶段两个电机扭矩方向不一致,出现一个电机拖着另一个电机的情况。经分析,出现扭矩不同步的原因是锻压机机械部分两边的动态性能存在差

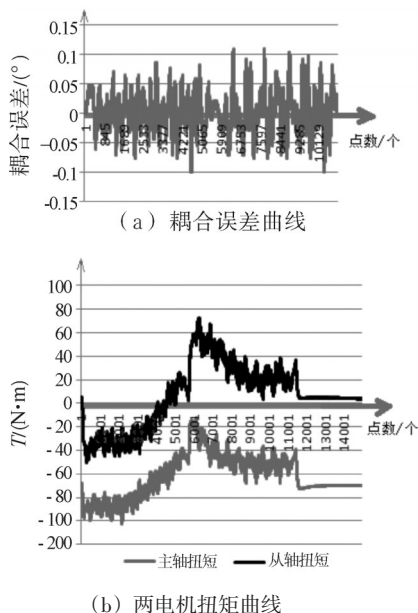


图4 耦合误差和两电机扭矩曲线

异。即使两电机实现了位置同步,但由于机械部分的动态参数不同,扭矩出现很大的差异。

这种扭矩上的不同步对整机的性能影响表现为:压力达不到机器的标称值、加工效率降低。锻压机设计时规定,当两伺服电机同时输出额定扭矩时,锻压机输出额定的3 000 kN压力。因此两电机扭矩不同步时,无法保证3 000 kN的最大压力输出。此外,扭矩不同步后,一个电机拖着另一个电机运动,出力大的电机容易发生驱动器过流。为了避免过流,则需降低电机的运行速率,从而降低了加工效率。

4.2 交叉耦合双电机同步控制方案

本研究采用与主令双电机同步控制方案相同的方法画出的耦合误差曲线和两电机实际扭矩曲线如图5所示。耦合误差曲线表明:在整个工艺曲线的执行过程中,耦合误差一直保持在 $\pm 0.35^\circ$ 以内。经分析,耦合误差的波动较大是由同步带的弹性及齿轮的间隔引起的。由如图3所示的控制框图可知,从电机的一部分速度指令值是通过两电机的电流差(扭矩差)计算得到的。由于同步带存在弹性以及齿轮间存在的间隔,两电机产生扭矩差时,两电机的位置差(耦合误差)已经较大。虽然耦合误差的波动比使用主令双电机同步控制方案时耦合误差波动大,但仍然在机械的可承受范围内,满足设计的要求。两电机扭矩曲线表明两电机的实际扭矩走向一致,且相差不大,扭矩同步性能较好。经测定,使用该方案时,锻压机最大可实现3 500 kN的输出,加工效率达30次/分(250 mm的行程)。

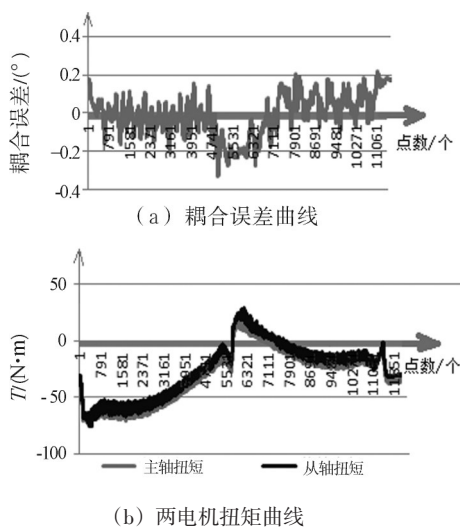


图5 耦合误差和两电机扭矩曲线

由主令双电机同步控制方案和交叉耦合双电机

同步控制方案的实验对比可见,前者的位置同步性能较好,扭矩同步性能很差;后者的位置同步性能达到设计要求,且扭矩同步性能较好。因此本研究所的锻压机最终采用了交叉耦合双电机同步控制方案。

5 结束语

本研究从理论和实验两方面对比了主令双电机同步控制方案和交叉耦合双电机同步控制方案在所述锻压机上的应用效果。

实验结果表明,主令双电机同步控制方案的位置同步性能较好,扭矩同步性能很差,导致了锻压机能提供的压力值不足,加工效率下降。交叉耦合双电机同步控制方案的位置同步性能达到了设计要求,且扭矩同步性能较好,锻压机压力、加工效率等指标达到了设计要求。因此,将交叉耦合双电机同步控制方案用于所述的锻压机上是可行的。

参考文献(References):

- [1] 李 芃. 基于CAN总线的电机群控制系统研究[D]. 长沙:长沙理工大学物理与电子科学学院,2012.
- [2] 彭景春. 多步进电机的同步精确运动控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学智能机械研究所,2009.
- [3] 张丹红,刘 波. 基于RS-485总线的多电机同步控制系统研究[J]. 计算机技术与发展,2009,19(9):228-231.
- [4] 卢金泽,刘锦波. 双电机传动机械系统的同步控制[J]. 控制工程,2005,12(4):398-400.
- [5] ANDERSON R.G, LORENZ IL. Web machine coordinated motion control via electronic line-shafting[J]. **IEEE, Transactions on Industry Applications**, 2002,37(1):247-254.
- [6] 刘福才,刘学莲,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):87-90.
- [7] 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):3234-3245.
- [8] KOREN Y. Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing system[J]. **ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control**, 1980,102(12):1324-1330.
- [9] 陈 晶. 基于网络化数控系统的双电机非线性伺服压力机控制研究与实现[D]. 北京:中国科学院研究生院,2012.
- [10] 王红军,陈佳鑫,邹湘军,等. Simulation X及硬件在环仿真在伺服压力机设计和研究中的应用[J]. 机械工程学报,2012,48(6):51-56.

[编辑:李 辉]