

串联控制在重大型机床上的应用

张秀印

沈阳机床（集团）有限责任公司 辽宁沈阳 110142

摘要：结合数控、驱动转矩串联控制技术和位置串联控制技术，介绍了一种机床主驱动双电动机机械结构，对相关参数和调试过程进行了叙述，对重大型机床的技术进步起到积极作用。

关键词：串联控制；重大型机床；预加载；转矩串联控制；位置串联控制

1 序言

近二十几年，在发电、冶金、航空航天和造船工业蓬勃发展的推动下，重大型工件加工数量及种类不断增多，加工质量也不断提高。数控、数显、可控硅、补偿、伺服驱动及串联控制等技术不断应用于重大型机床，使重大型机床的技术发展也得到了不断进步，增加了机床可靠性，提高了机床精度和无故障工作时间（MTBF），进而不断满足机械加工的新需求。

为了满足加工精度要求，提高加工效率，重大型机床既要保证主驱动低速大转矩、高速大功率，又要保证其进给驱动平滑稳定，串联控制技术在这些领域起到了关键作用。下面以沈阳机床一种车铣加工中心主驱动机械结构为例，结合发那科31i数控系统进行简单介绍。

2 串联控制主驱动机械结构

工作台主驱动的基本结构是采用两个主电动机、两套齿轮减速箱、一个大齿环驱动工作台旋转。通过数控系统串联控制功能实现工作台和车削同步控制、铣削负载分享和消隙功能。双电动机主驱动结构如图1所示，工作方式为：①车削时，两个电动机同步工作，实现工作台的转动。②铣削时，两个电动机工作采用负载分享和消隙方式，实现C轴高刚度和高精度。

旋转工作台位置反馈由安装在底座上的圆光栅对C轴进行检测。

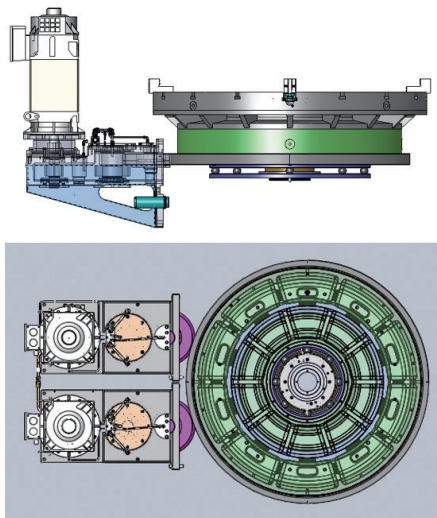


图1 双电动机主驱动结构

3 串联控制框图

串联控制包括转矩串联控制和同步控制中的位置串联控制，如图2所示：①主电动机给从电动机发出速度指令和速度积分项。②转矩指令是由处理比例项的从电动机速度环、通过比例缩放换算出的相当于主电动机预载量以及主电动机通过速度环发出的速度积分项综合得来的。

在进行机床设计时务必选择合适的控制方式。在机床双驱轴机械部分具备反向进给（BACK FEED）特性时，以下情形适用转矩串联控制：①单个电动机不能提供足够的转矩。②从惯量角度考虑使用两个较小的电动机比使用一个较大的电动机能更好地与机械惯量进行匹配。

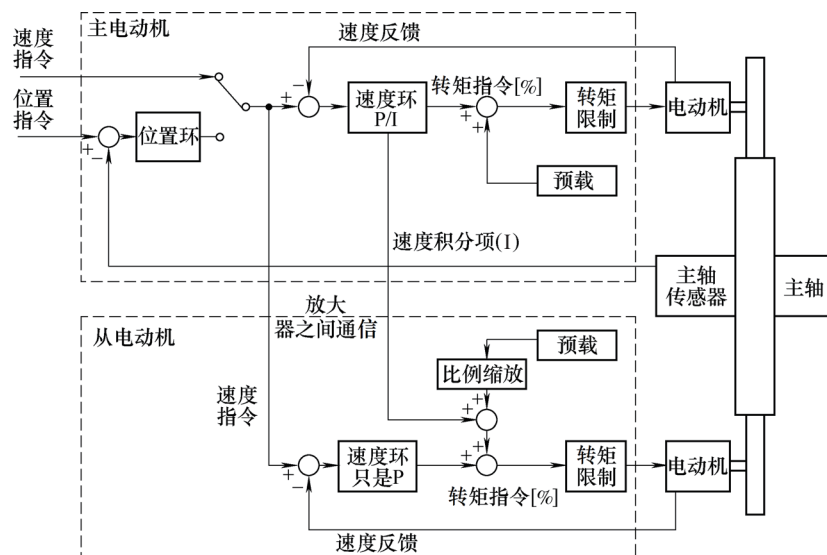


图2 串联控制框图

其他情形一般使用位置串联控制。位置串联控制同样也适用于为了改善机械部件或装配所引起的机械偏差而使用双电动机驱动的情形。

4 转矩串联控制

(1) 转矩串联控制 转矩串联控制使用两个电动机提供双倍的转矩去驱动一个轴。这两个电动机的规格是一样的。主电动机和副电动机通常有两种工作方式，一种是负载分享方式，一种是消除工作方式。

为了实现稳定的转矩串联控制，相关的机械部分必须具备反向进给特性。所谓的反向进给是指双驱电动机在未连接动力电缆时，通过耦合的机械部分可以实现顺畅的联动，即盘动主电动机轴通过

机械传动带动副电动机随动，或盘动副电动机轴通过机械传动使主电动机随动。如果反向进给特性较差，就需要对机械部分进行适当的调整，可以用以下方法验证机床的反向进给特性。

1) 手动验证 在未连接主电动机和副电动机的动力电缆的情况下，分别用手盘动主电动机和副电动机的输出轴（机械部分已耦合），观察副电动机和主电动机是否相应随动，过程是否顺畅。

2) NC指令验证 在连接主电动机动力电缆、未连接副电动机动力电缆的情况下，系统上电，给主电动机发出移动指令，观察主电动机的负载是否低于其额定转矩的1/3。

(2) 速度环路积分器复制功能（见图3） 由于在转矩串联控制中对副电动机轴仅执行转矩（电

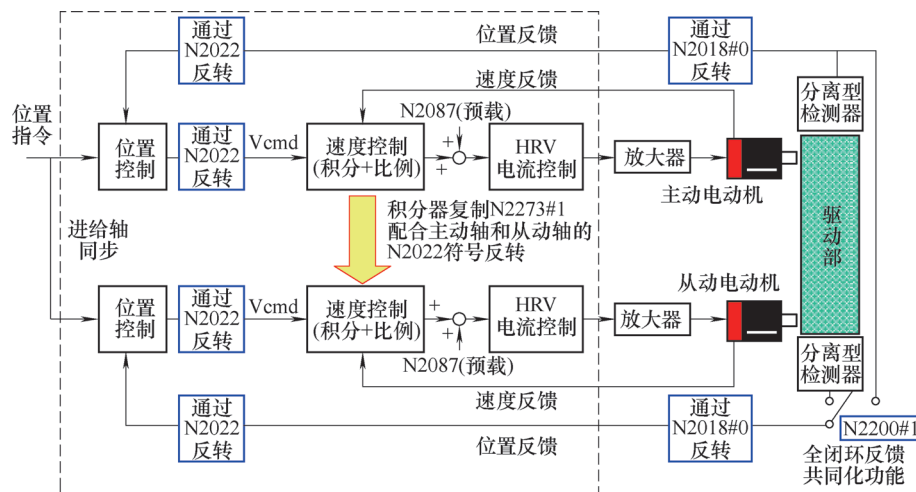


图3 速度环路积分器复制功能框图

循环)控制,不对其执行速度控制,对于具有较大间隙的机床副电动机轴可能会由于这些间隙的影响而产生振动,导致轴扭转,并发生OVC报警。

这种情况下,该功能将速度环路的积分器从主动轴复制到从动轴上,防止主动轴/从动轴之间的积分器的偏移。

(3) 预加载功能 对主电动机和副电动机施加极性相反的偏置转矩,可以始终维持双驱机械耦合部分的张力,减小这部分的间隙。在双驱轴加、减速时,副电动机提供和主电动机同极性的驱动转矩(负载分享方式),而在双驱轴静止时,施加给主电动机和副电动机的偏置转矩(预加载)维持双驱

机械耦合部分的张力(消隙工作方式)。

(4) 阻尼补偿功能 要实现平稳的转矩串联控制,如图4所示,可以只对副电动机轴或同时对主电动机轴和副电动机轴添加偏置转矩,以消除两者速度的偏差。该功能对驱动部分采用弹性连接或具有类似特性的低刚性机床可能出现的振动(频率从几赫兹到40Hz)非常有效。

(5) 伺服报警两轴同时监控功能 该功能同时监控处于位置串联控制或转矩串联控制的两个电动机轴的报警状态,如果其中一个电动机轴出现伺服报警,就立即切断未报警的另一个电动机轴的激励,以防止机床扭曲变形。

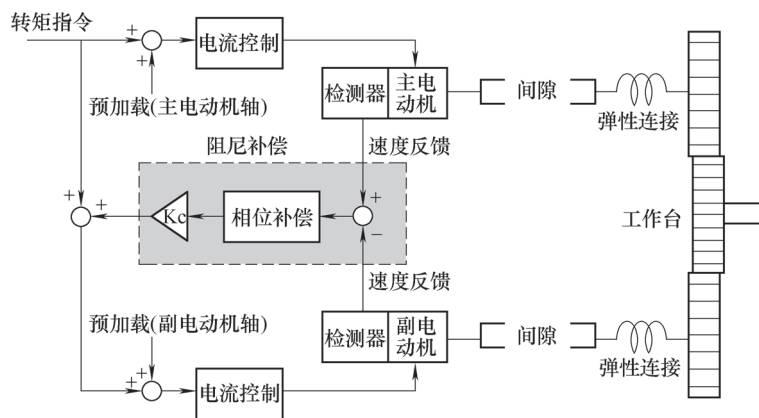


图4 阻尼补偿功能框图

5 位置串联控制

(1) 位置串联控制 在同步控制中,数控系统仅对主动电动机轴发出移动指令,从动电动机轴也按此移动指令与主动电动机轴同步移动。而当主动电动机轴和从动电动机轴是由一个DSP控制时,这种配置称为位置串联控制。

(2) 串联扰动消除功能 该功能可以消除位置串联控制时主动电动机轴和从动电动机轴之间的干扰。

(3) 同步自动补偿功能(见图5) 在行程较长的同步轴中,有时会发生由于直线尺的绝对精度和机械的热膨胀而引起的机械性扭力。在这种情况下,同步轴的主动电动机和从动电动机会产生相互

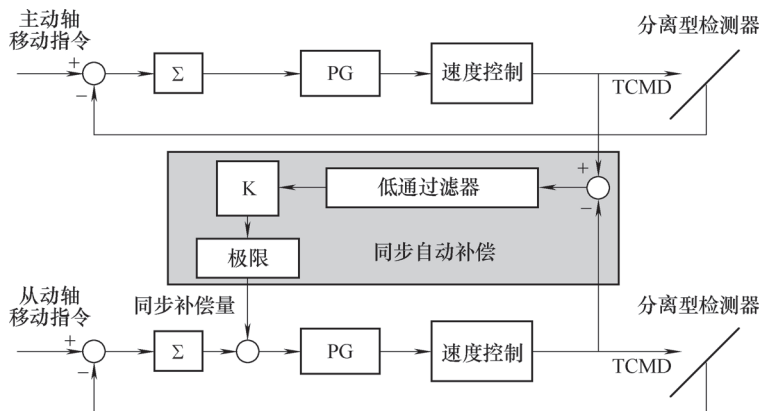


图5 同步自动补偿功能构成

拉伸的现象，当相互拉伸的电流值较大时，就会出现发热和OVC报警等问题。

发生这种现象的根本原因在于测量位置中存在误差，但是，在螺距误差补偿中，即使可以覆盖直线尺的误差，但是尚不能对应由于温度变化而引起的热膨胀。

该功能在这种情况下有效。同步自动补偿功能监视主动轴和从动轴之间的转矩误差，以使转矩误差逐渐变小的方式慢慢地补偿从动侧的位置，减小转矩误差。

6 功能调试

(1) 相关参数 见表1。

表1 功能调试相关参数

功能	参数号	参数说明	附注
一般设定	1817#6 TANDEM	串联控制功能位	主动轴和从动轴同时设定
	1010	CNC控制轴数	从动轴不计入控制轴数
	1023	伺服轴连接顺序	主动轴和从动轴按奇偶顺序排列
	2021	负载惯量比	按串联控制工作方式设定数值
预加载功能	2087	预加载转矩	由于预加载转矩始终作用于主动轴和从动轴，因此在不影响消除功能的前提下尽可能设定较小的数值
速度反馈平均功能	2008#2 VFBAVE	速度反馈平均功能位	为了改善从动轴的控制特性，推荐设定为1
阻尼补偿功能	2008#7 LAXDMP	阻尼补偿功能位	当传动机构刚性不足时，使用该功能可以有效消除移动时的振动现象。仅在主动轴侧设定
	2036	衰减补偿增益（主动轴）	设定值较大，振动改善效果更明显。仅在主动轴侧设定
	2036	衰减补偿相位系数（从动轴）	仅在从动轴侧设定

根据电动机额定转矩适当设定预加载转矩值，可以通过测量反向间隙值来修正参数2087的设定值，尽量不要超过额定值的30%，设定值过大，电动机可能会出现过热现象。

调试过程中，如果轴在移动时振动，可使用阻尼补偿功能，参数2008#7=1，参数2036调整合适数值，使机床轴在移动过程中平稳正常。

7 结束语

串联控制不仅可以应用在主轴驱动部分，还可以应用在伺服轴的进给驱动部分，不仅可以产生大功率、大转矩，提高加工效率，还可以有效地提高

(2) 调试过程 在激活串联控制功能前，首先进行单个电动机的调试，测试运转速度、方向等，然后根据现场机械安装情况，决定是否激活串联控制功能位，即1817#6 TANDEM，注意主动轴和从动轴要同时设定。

当机械处于脱开状态时，务必确认预加载转矩参数2087设定为0，否则从动轴电动机可能高速旋转。这是由于从动轴电动机仅处于电流环控制，速度环和位置环完全开环，因此，此时主动轴侧的负载状态决定从动轴的状态。

当机械侧啮合后，进行正反转、高低速测试，运行均平稳正常，负载完全一致时，进行预加载设定，使机床处于预载消除工作方式。

机床定位精度和重复定位精度，从而提高工件加工精度。

参考文献：

- [1] 夏燕兰，李颖．数控机床电气控制[M]．3版．北京：机械工业出版社，2017.
- [2] 刘沂．数控机床控制技术基础[M]．北京：机械工业出版社，2017.
- [3] 黄永红．电气控制与PLC应用技术 [M]．北京：机械工业出版社，2011.
- [4] 发那科公司．发那科 αi 伺服电动机参数说明书 [Z]．2019.

MW 20210325