数控机床全闭环振动的分析与处理

祁百学，闫沛渊
兰州航空职业技术学院　甘肃兰州　730070

摘要：针对数控机床全闭环控制调试、维修时易发生振动的问题，提出了不同的解决办法，通过对机床振动原因的具体分析，有针对性地对伺服参数进行调整和优化，解决了机床的振动问题。

关键词：数控机床；全闭环控制；振动；消除

1　序言

精度要求较高的数控机床一般都采用全闭环控制，而全闭环机床调试或维修时易发生振动，如何有效解决机床的振动是机床调试人员和维修人员经常要面临的问题。

以CK6163A/8000数控卧式车床为分析对象，其Z轴的有效加工长度为8m，若采用滚珠丝杠传动，由于滚珠丝杠太长，其重力会使滚珠丝杠中间下垂，且滚珠丝杠旋转时极易引起机床的振动，因此采用精密齿轮齿条传动较好。其*X*轴采用滚珠丝杠传动，数控系统为FUNAC 0*i*-F Plus，光栅尺为海德汉的绝对光栅尺。

一般来说，在半闭环控制的机床中，参数设定较简单，只要将各轴的电动机代码和各功能位设定好，数控系统自动将数字控制单元、伺服系统等与机床合理匹配，机床就可平稳运行。但加入全闭环后问题就复杂了，机床结构不同，机械安装精度不同，以及各零配件加工精度的差异等，都会影响全闭环控制的平稳性和快速响应性。最直接的体现就是机床在停止时振动或在运行时某处或某段振动[1]，振动较轻时虽不易发觉，但工件的刀纹是紊乱的。

针对全闭环数控卧式车床的振动问题，对振动原因进行分析，调整相应的伺服参数，最终使整个机床达到理想的平稳性和加工精度。

2　全闭环机床振动的分析和应对措施

对于半闭环控制的机床，振动一般较容易解决，只要机械安装没有问题，数控系统参数及伺服参数可按标准参数设置，一般就不会发生机床振动。若发生机床振动，则大概率是机床的刚性较差，适当降低机床的伺服增益就可解决。

对于全闭环控制的机床，振动原因比较复杂，解决全闭环机床振动问题一般先要分清振动频率，大于等于10Hz的划归为中高频率振动，低于1Hz的划归为低频振动。没有仪器时也可通过听声判别，一般低频振动声响比较低沉，高频声响比较尖锐刺耳。根据振动的频率不同，系统提供不同的处理方式，下面针对停止中振动和移动中振动两种情况分别讨论。

2.1　机床在停止中振动

半闭环控制调试成功后，就可以接入光栅尺，设定参数P1815#1（OPTX）为1（使用分离型脉冲编码器），而后应用伺服系统设定界面重新设定传动比等相关参数，机床就从半闭环控制转化为全闭环控制。对于CK6163A/8000数控车床，Z轴行程较长，床身整体刚性较低，采用精密齿轮齿条传动时，齿条安装差异及消隙齿轮调节的松紧程度存在细微差别，从半闭环控制转为全闭环控制的调试时，基本上每台机床都会发生振动。设定参数后，解除急停，机床就会发生振动。

如果在机床停止时发生振动，可能是反向间隙内的负载惯量减少所引起，也可能是位置增益设定过高引起的。由于CKA6163/8000数控车床的Z轴用精密齿轮齿条传动，反向间隙由消隙齿轮排除，因此安装调整时操作人员不同，人为因素导致差别较

大。实际测试反向间隙大概在13～21μm，位置增益一般设定为标准值。除非万不得已，不建议降低该参数值，以免降低机床的刚性。

针对机床停止中的振动问题，一般采用以下几种处理方式。

1）由于CKA6163/8000数控车床的刚性较低，采用系统提供的加速度反馈功能，其本质是通过软微分电动机的速度反馈信号获取加速度，在该加速度上应用加速度反馈增益，对扭矩指令进行补偿，由此来抑制速度环路的振荡（原理见图1）。此功能对电动机和机床系统用弹性耦合、外部惯量比电动机惯量大的机床更适用，在产生50～150Hz的振动时，可使伺服系统保持稳定。设定参数P2066为负值，加速度反馈功能有效，设定范围为−20～−10。

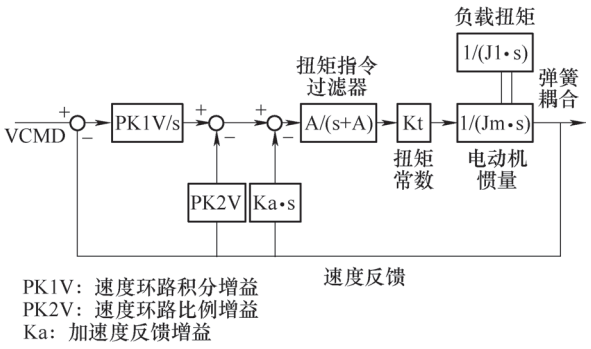
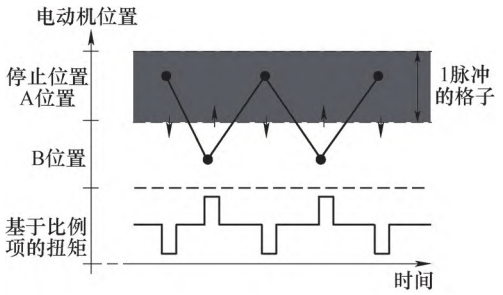


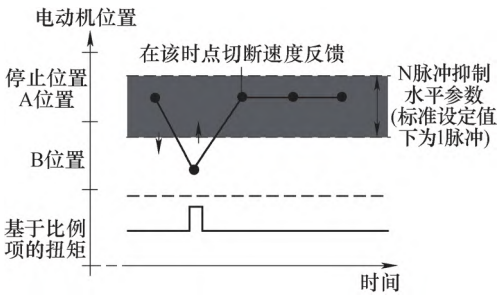
图1　加速度反馈原理

2）通常，如果电动机承受的负载惯性较大或者为了增强系统的反应能力，需要提升速度增益或负载变量比。然而，如果速度增益设定过高，电动机在停止时会产生高频振动。这种振动的产生是由于电动机在机床反冲过程中，反向间隙处于自由状态，因而导致速度环路比例增益（PK2V）过高。停止时，比例增益的可变功能就是通过降低速度环路比例增益PK2V的值来抑制停止时的振动。参数设定如下。P2016#3（PK2VDN）的1值代表停止时比例增益可变功能的有效性；P2119的值则是停止时比例增益可变功能的停止判断水平，当检测单位为1μm时，设定范围为2～10；当检测单位为0.1μm时，设定范围为20～100。P2207#3（PK2D50）的0值代表停止时速度环路的比例增益为75%，而1值则为50%；若希望在停止过程中任意调整比例增益，可以选择P2207#3（PK2D50）。除了确定停止时比例增益可变功能的功能位和停止判断水平，还需要设定P2324参数（即在停止时比例增益可变功能的任意倍率）。CK6163A/8000机床停止时振动就采用了该功能，效果良好。

3）N脉冲抑制振动的效果（见图2）在于去掉中止运作产生的振动，若伺服电动机处于静止状态而速度回馈出现微小偏差，则通过速度回路的扩大作用，会潜在地导致机械设备的颤动。



a）无N脉冲抑制功能的振动曲线



b）有N脉冲抑制功能的振动曲线

图2　N脉冲抑制振动的效果

如图2所示，在机床发生振动的情况下，位于B位置的速度信号反馈会产生一个升速的扭矩命令，并使其返回到A位置；而在A位置产生的降速扭矩命令，其影响力超过机床摩擦力，导致再次回归B位置，这样的循环往复导致了振动现象。一旦N脉冲的抑制功能启动，机器在从B位置往A位置过程中的速度反馈脉冲会从速率环路的比例部分中移除，进而机器保持稳定在A位置，就避免了振动的发生。此时A位置的宽度默认设置为1μm，可通过调整P2099参数（即N脉冲抑制水平参数）来更改这一宽度值，其可调节范围是0～32767，而标准设定值为400（此处400指的是以单个脉冲作为检测单位），并且当P2003#4（NPSP）的设定值是1时，意味着N脉冲抑制功能是激活状态。

2.2　机床在移动中振动

机床在移动中产生振动，其原因比较复杂，

要消除振动首先要弄清楚振动的原因和大概频率，在机械安装满足工艺要求的条件下调试。像CK6163A/8000这样用精密齿轮齿条传动的全闭环控制机床，无法完全消除振动，尤其在两根齿条结合处极易产生振动，安装时应特别注意。

针对机床在移动中的振动，一般可采用以下几种处理方式。

1）在全闭环控制时，伺服电动机的脉冲编码器进行速度控制，光栅尺进行位置控制。加减速时，由于伺服电动机与机床之间的扭力，该速度会出现差异，因此导致机床发生振动。为此采用系统提供的减振控制功能，它是将伺服电动机端和机床端的速度差反馈到扭矩指令，以减少机床端的晃动[2]，其控制原理如图3所示。

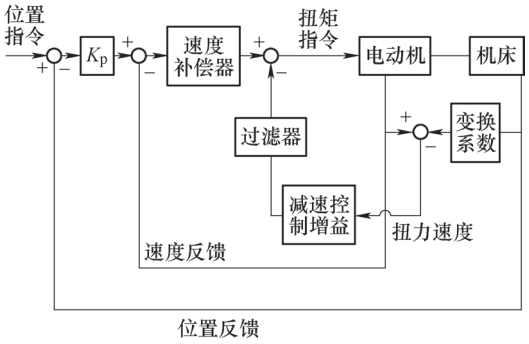


图3　全闭环控制原理

调整参数P2033（影响阻尼控制转换因子定位的反馈脉冲计数）的调整幅度为−32767～32767。该参数若设为零，则该项功能失效。设定为负值代表实际数值需乘以10，例如−1000代表实际数值为10000。而针对不同的应用场景，设定细则有以下分类：①在采用柔性进给装置（F.FG）且使用A/B相独立型感应器工况下，电动机转一周的参数值等于独立式感应器输出脉冲数除以8。②在采用柔性进给装置（F.FG）且同时使用串联式独立感应器工况下，电动机每转一圈的参数值为串联式感应器输出脉冲数（经F.FG调整后）除以8。例如，滚珠丝杠的螺旋距为10mm，独立感应器精度为0.5μm/脉冲，测量单位设置为1μm，F.FG比率设为1∶2，在此情况下，若用A/B相独立型感应器，则设定值为20000÷8＝2500；若采用串联式独立感应器，则设定值为20000÷2÷8＝1250，若结果有小数则按四舍五入处理。参数P2034（阻尼控制增益）的调节范围同样是−32767～32767，预设值为500，通常根据实际振动状况调整，调整时以100为步进单位。

2）机床半闭环控制运行良好，全闭环控制时发生振动也可采用系统的双重位置反馈功能，其控制原理如图4所示。图4中ER1为半闭环的误差计数器，ER2为全闭环误差计数器。双重位置反馈功能主要是调整一阶时间常数，使机床在过渡过程中位置误差按半闭环控制，定位用全闭环来控制，设定参数P2019#7为1，双重位置反馈有效，P2078和P2079分别为双重位置反馈变换系数的分子和分母，变换系数（分子/分母）＝伺服电动机转动一圈位置反馈脉冲数/100万。P2080为双重位置反馈一次延迟时间常数，设定范围10～300ms，通常设定为100ms左右，若加减速出现振荡，则可每次增加50ms；若趋于稳定，则可在该值的基础上减小20ms；若设定为0，则轴的运行与全闭环相同；若设定为32767，则轴的运行与半闭环相同。需要注意的是联动轴也要设定同样的数值。P2081为双重位置反馈零点幅度，单位为μm，通常设定为0，如果停止过程中出现忽快忽慢的现象，那么此值可适当增加。P2118为双重位置反馈时半−全误差值，设定值＝误差最大值/全闭环端的最小检查单位，单位为μm/脉冲，一般设定为反向间隙的2～3倍。当伺服电动机的脉冲编码器和分离式检测器之间产生大于等于设定值的反馈时，系统就会报警。

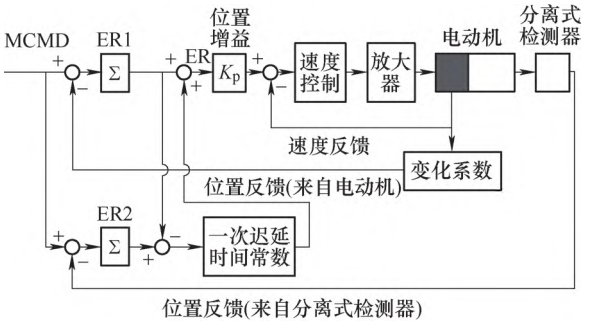


图4　双重位置反馈功能控制原理

3）该机床具备速度回馈机制。此功能采用全闭环系统将机床的实际速度融入速度调控之中，以此实现整体定位环路的稳定性，相应的控制架构如图5所示。

在实现全封闭环路控制时，应用光栅尺及其他类型的独立式感应元件来追踪机械设备的具体方位，并以此数据来执行定位调整；电动机的转速则是通过其脉冲编码器来获取并据以实施调速。这种

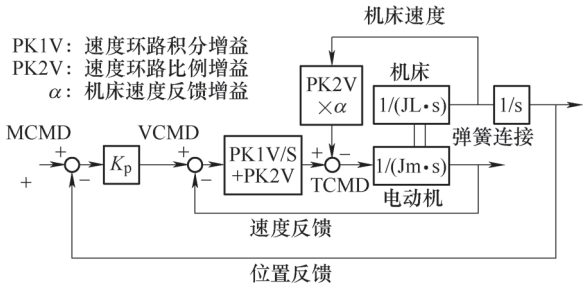


图5　机床速度反馈功能控制架构

方式导致电动机与机床间产生较强的扭矩效应，并且在加速或减速过程中，机床与电动机的速度会出现显著不同，也因此难以保证较高的定位精度。对于机床的速度反馈机制，其工作原理是将速度反馈增益α施加于机床速度上，进而对扭矩命令进行调节，当α值设为1时，电动机的速度与机床的速度便能对扭矩命令作出等量的补偿，有效地解决了机床速度滞后的问题。将P2012#1（MSFE）设置为1便启动了机床速度的反馈功能，而P2088（机床速度反馈增益）的设定值则介于30～100。

4）加入过滤器功能。机床振动时根据振动频率加入合适的滤波器，也可达到消除振荡的目的，系统提供扭矩指令过滤器（中频振动排除过滤器）、减振过滤器（高频振动排除过滤器）和外力干扰排除过滤器（低频振动排除过滤器），结合SERVO GUIDE软件，一般的振动都可排除。当用过滤器也无法排除时，可以加入观测器功能，观测器主要用来排除高频振动[3]。

3　结束语

全闭环控制机床，尤其与CK6163A/8000卧式车床类似的机床，由于其床身细长、刚性较弱，因此安装现场发生细微的变化都可能引起机床的振动，调试或维修时一定要多观察、勤思考，做到有的放矢。笔者通过上述方法对多台类似的长条形卧式车床的振动进行了调试和维修，最终都解决了机床的振动问题。此外还应加强机床的维护和保养工作，如擦拭、润滑和紧固等，使机床始终处于良好的状态。在排除振动的基础上，要尽量提高机床的精度和刚性。平台所具备的减振与增强加工精细度的特性间可能会出现冲突，需按照实际状况细致考量，解决主要问题，并灵活应对，切莫墨守成规，生搬硬套。

参考文献：

[1] 郑凯. ADAMS2005机械设计高级应用实例[M]. 北京：机械工业出版社，2006.
[2] 张普礼. 定位误差分析计算方法的研究[J]. 机电工程技术，2013，42（11）：70-72.
[3] 孙彦旭，刘春联，孙希. 车削复合机床的设计制造[J]. 制造技术与机床，2013（3）：76-78.

MW 20240810

《金属加工（冷加工）》“刀具”栏目征稿

《金属加工（冷加工）》杂志设有多个常规栏目，现“刀具”栏目面向广大的制造业业内人士征集稿件，欢迎各位踊跃投稿。

“刀具”栏目征稿内容：

1. 国内外数控切削刀具的发展变化，刀具材料、刀具形状及切削技术等的革新与升级。

2. 某难加工工件或者材料的切削加工方案设计以及实施过程。

详细征稿内容及投稿规范请扫码查看。

投稿网址：http://www.mw1950.com/manuscript

投稿规范