

[控制系统]

数控机床驱动优化

文/沈阳市装备制造工程学校 张 茹

机床调试时系统给定的参数不能保证实际运行时系统的动态性。针对这一问题，在数控机床驱动优化原理的基础上，详细介绍了数控机床驱动优化的过程及其在SINUMERIK 840D系统上实现优化的方法，通过圆度测试证明了该优化过程的有效性。

数控系统的主要功能是把编制的NC程序转变成相应的轴的机械位移，在轴位移的过程中，好的动态特性和稳定性是驱动稳定高效运行的关键。特别在模具的高速加工中，要求系统有良好的动态和静态特性。一般在机床调试时系统会给定一组相应轴的默认参数，但这些参数一般是为了保证系统正常运行的比较保守参数，驱动优化的目的是在现有的基础上尽可能提高系统的动态性，使机床实现较好的加工效果。

阐述了驱动优化的原理、驱动优化的过程以及在SINUMERIK 840D系统上进行驱动优化的方法。

优化的原理

1. 机床轴的结构

图1是机床轴的传动示意图。根据图1上半部分的机械结构可以看出来，实际的机床运动链是电动机根据系统的运动指令位移相应的角度，电动机的旋转运动经过联轴节传递到丝杠，丝杠又通过和工作台连接在一起的螺母把旋转运动转变成工作台的直线运动。图1下半部分是轴的给定值和实际值的曲线图，可以看出来，给定值和实际值之间有一个差值，这个差值是因为系统的惯性和连接元件中的弹性变形引起的，这个差值就是系统的动态误差的主要组成部分。

影响系统的动态特性主要有以下几个方面。

1) 直线移动部分的质量，比如工作台和工件

的大小。

2) 旋转移动部分的惯性。

3) 摩擦力，主要有工作台导轨之间，丝杠和螺母之间的摩擦力。

4) 上述因素在机床设计完成以后就定下来了，所以大型机床的动态特性很难和中小型的机床比，同时机床的润滑情况也会影响系统的动态特性。

5) 除了这些外，连接元件中的弹性变形也是影响系统动态性能的关键因素，比如联轴节等，一般说来，系统的刚性越好，系统的动态特性就越好，所以在优化之前先尽量在机械方面提高系统的刚性，比如检查去联轴节的连接，丝杠的间隙等。

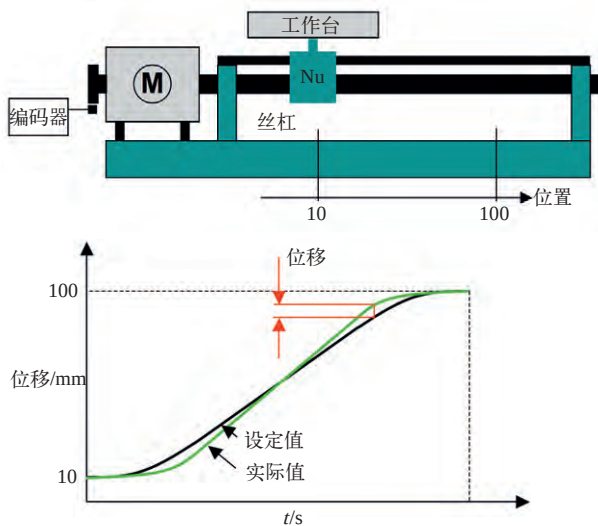


图1 机床结构图

图2是机床结构的简化图，电动机的输出传递到工作台也就是负载上时要经过中间一些传递环节，对应传递环节的输出和输入比就是传递函数。从理论上讲，一个理想的驱动传递函数是一个纯线性环节，只有这样，输出地会真实地跟随输入，但实际上在传递环节中存在好多的弹性环节，所以一个近似的传递环节可以简化为一个线性环节和一个弹性环节的组合，并且弹性环节部分的频率常常是很多频率组合起来的。这样在传递环节的输出部分，有的输入会被压抑，从而降低系统的动态特性，而有的输入则会被放大，也就是俗称的“共振”。这些共振是造成机床不稳定的致命因素，而驱动优化的大部分工作就是找出这些共振点，通过加电子滤波器的方法来抑制这些共振，增加系统的稳定性，这样就可以提高系统的增益来提高系统的动态特性。

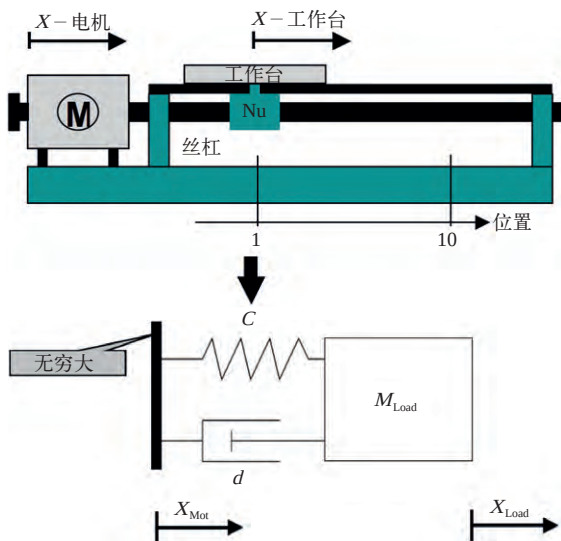


图2 机床结构的简化图

2. 驱动优化的原理

驱动轴由电流环、速度环和位置环组成，一般来说位置环是一个简单的比例调节器，因而调节起来比较简单，速度环和电流环由比例积分调节器组成，是驱动的核心部分，因而速度环又是驱动优化的调整重点。驱动优化的关键是提高速度环的动态特性，而提高动态特性的关键又在于提高速度环比例环节的增益，降低积分环节的时间常数。如前所述，找出驱动部分的共振频率是提高系统动态特性的首要条件，但怎样找出这些频率来呢？怎样评价驱动环节的动态特性呢？可以采用如下的方法。

让电动机端输出一个涵盖很宽频率的噪声信号，再检查输出端的应答信号，根据它们的关系绘制一个输入和输出的关系图。为了计算方便一般用波特图的方式来表示。如图3所示，上半部分是表示输出和输入的幅值的比，下半部分是输出和输入信号的相位差。理想的情况是输出的幅值等于输入信号的幅值，并且没有相位差，但实际中的图形都会有偏差，图3是一个实际的波特图。

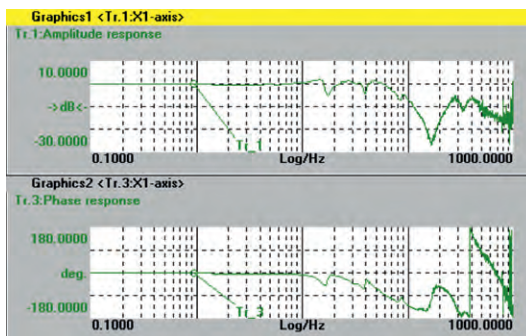


图3 波特图

从图3可以看出图形的低频部分输入和输出的幅值比在0 dB附近，大于0 dB表示输入的幅值小于输出的幅值，也就是有点超调，当达到3 dB时候，超调的值接近40%，系统有振荡的危险。小于0 dB表示输出被衰减，当为-10 dB时，衰减幅度达到70%，这时的输出基本被抑制。同时输入信号的相位也被滞后，当滞后的值接近180°时，这个频率的信号接近被完全抑制。驱动轴正常工作时，根据电动机的速度可以推算出输出到电动机的电源的频率，一般都较低，为几十到几百赫兹。但在系统加减速过程中，输出到电动机的电源频率会有很宽的范围，一般能到千赫左右。在波特图中，当幅值比从0 dB往下降且相位滞后接近180°时，这个频率称为拐点频率。这个频率越高，驱动的动态特性越好，反之越低。

驱动优化的过程就是尽量让拐点频率提高，让幅值比的线更接近于0 dB。增加速度环的增益会使波特图线往上翘，如图4所示，黑颜色的表示为速度环增益为1.3，而蓝颜色则表示为速度环增益为3.5。

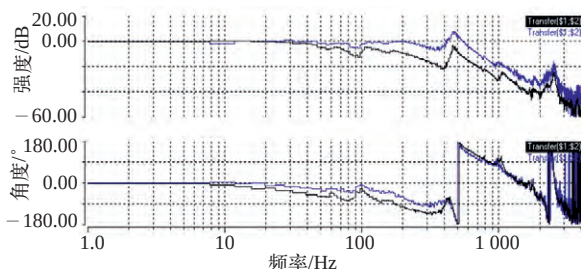


图4 参数调整后波特图

但同时原来在0 dB下面的小尖峰超过了3 dB,系统会震荡,电动机有时会发出啸叫的声音。这时如果能采取相应的办法把尖峰去掉,就能达到既增加速度环增益有不影响系统的稳定的目的。数控系统能通过添加相应的电子滤波器的方法来实现。

为提高速度环的特性,需要优化速度环内的性能,通过增加速度环内电流环给定滤波器,就能达到这个目的。如果采用速度环给定滤波器,只能对提高位置环性能有效果,而对速度环本身没有影响。因而驱动优化时使用最多的就是电流环滤波器。

电子滤波器按性能分为两种:低通和带阻滤波器,低通滤波器是对低于某一频率的波形予以通过,而对高于这个频率的波形则阻断。带阻滤波器是只对某一固定频率附近的波形予以阻断,而对其它频率的波形则予以通行。在驱动优化时用的最多的就是采用一些带阻滤波器来平抑一些尖峰信号。

优化的过程和在840D系统上优化的方法

1. 优化的过程

驱动优化的目的是增加比例增益,降低时间常数,而优化过程是通过波特图的形式找到驱动的一些共振点,通过增加电子滤波器的方法来消除这些共振点,最终为增加增益和降低时间常数创造条件。在优化之前确认系统的性能对驱动的优化很有用。由于现在的数控系统都是数字控制系统,因而这些数字控制元件的性能好坏直接影响到驱动性能的好坏。对于840D系统而言,下面几个参数直接影响到驱动性能的好坏。

MD10050:系统周期,也即是系统的主频,系统的的所有的工作都在这个频率下工作。

MD10070:系统插补周期,系统在插补运行时的时间周期。

这两个参数直接影响到位置环响应的快慢,越快对系统性能的提高有好处,但同时会增加系统的负担,当调整上面参数以后,要到诊断画面下选择系统资源,确认下系统负荷的大小,一般情况下系统的负载在静止状态下不宜超过40%。否则系统会容易死机。

MD 1000:电流环时间常数。

MD 1001:速度环时间常数。

当这些参数确定下来以后,就可以开始速度环优化了,驱动优化需要相应的软件(如果系

统配置了PCU50,驱动优化软件已经集成在HMI ADVANCED里;如果系统配置的是PCU20,需要在计算机上安装运行专门的驱动调试软件)。

尝试增加驱动环的增益值,当增加到一定程度时,电动机会发出啸叫声,在启动画面里选择速度环测量。

在测量的时候要输入测量参数,比如测量时外加信号的幅值、测量时间、测量的平均次数及测量时信号的频率范围,一般情况下选用标准参数即可,如有必要可以对测量的幅值进行调整,测量时以电动机的噪声为参考,噪声不要太大,太大会损伤机械,而太小又影响测量的精度。

当测出来速度环的波特图时,尽可能增加速度环的增益值(MD1407),如果在低频段(小于200 Hz)的波形就不好,可以适当调整速度环的时间常数(MD1409),一般情况下,1409采用系统的默认值即可。增加1407的值到一定程度时,波特图上会出现超过3 dB的尖峰,移动光标能测得尖峰最高点的频率、尖峰的宽度,记下数据后,找到驱动参数,设置电子滤波器。840D系统测量页面如图5所示。

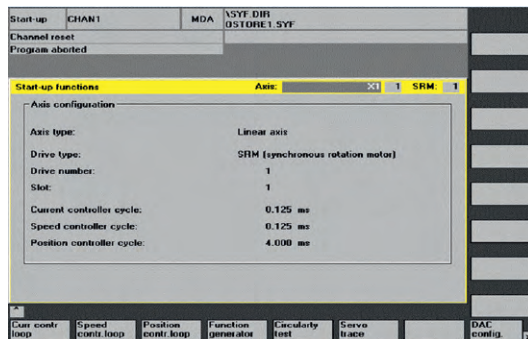


图5 840D系统测量页面

MD1200:电流环滤波器生效个数,系统最多能提供四个滤波器,第一个滤波器被系统默认设置为低通滤波器,一般是从第二个滤波器以后开始使用。

MD1201:电流环滤波器的特性,第0位对应第一个滤波器的特性,为0表示为低通滤波器,为1则表示为带阻滤波器,依次类推,第3位对应第四个滤波器的特性。

MD1202:滤波器1的拐点频率(该参数仅对低通型滤波器有效)。

MD1210:滤波器1的阻断频率(该参数仅对带阻型滤波器有效)。

MD1211:滤波器1的带阻宽度(该参数仅对带阻型滤波器有效)。

MD1204, MD1213, MD1214 分别为滤波器2的拐点频率, 阻断频率和带阻宽度。

MD1206, MD1216, MD1217 分别为滤波器3的拐点频率, 阻断频率和带阻宽度。

MD1208, MD1219, MD1220 分别为滤波器4的拐点频率, 阻断频率和带阻宽度。

由于受测量精度的影响, 有时需要反复测量, 再反复调整增益值和滤波器的参数设置, 直到波特图的特性满意为止。

用波特图的方法设置1407和1409合适的值以后, 需要用另外的测量方法来验证它们的值的合理性, 用阶跃响应来验证1407的值是否合适, 用扰动响应来验证1409的值。

阶跃响应是给速度环突然外加一个给定, 看速度环是否马上能响应这个给定。响应时间越短说明系统的动态特性越好, 速度环允许有不超过20%的超调, 好的速度环响应时间短, 超调不超过给定的20%, 并且超调后马上就趋于稳定(注意超调虽然对提高动态特性有帮助, 但同时会对加工工件的表面光洁度有负面影响)。没有超调可能会降低系统的动态特性, 说明增益值过低, 而超调过多或者是超调后需要几个振荡后才能趋于稳定, 这说明增益值有点高, 有时为了观察方便可以把速度环地积分失效, 即让MD1409为0, 这种方式不能用在垂直轴上, 因为这时轴容易掉下来, 但这时候观察阶跃响应图时, 超调要适当降低, 不能超过10%, 同时会发现当速度趋于稳定后, 速度的实际值和设定值有一个不能消除的固定的误差, 这就是积分环节没有生效的效果。

扰动响应是突然给速度环外加一个扰动力矩, 这时速度的实际值应该会偏离原来的设定值, 但速度环在经过一段时间的调整后, 实际值又会和原来的设定值一致, 调整时间的长短直接与 T_n 值的大小有关。 T_n 太小, 速度的实际值会在设定值附近振荡, 太大时调整的时间过长。如图6所示, 这时的 T_n 值正合适。

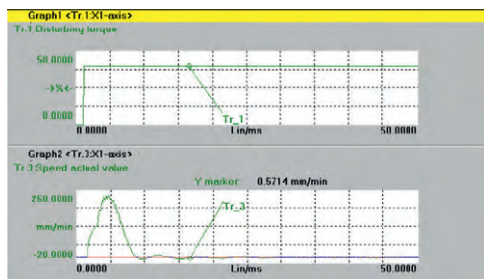


图6 阶跃响应图

2. 位置环的优化

当速度环和电流环优化以后, 位置环的特性就会显著改善, 位置环由于只有比例调节器, 所以优化时只要看位置的频率响应图调整合适的位置环增益就可以了。

MD32200: 位置环增益。

MD32300: 轴的加速度。

但有时为了获得更好的加速效果和轮廓精度还可以采用冲量限制、前馈等方法。

冲量限制: 在提高轴的加速度时, 轴起动和停止时会对机床有一个冲击, 这个冲击不仅会对机床有损害, 同时会限制加速度的提高, 采用冲量限制时, 加速度会渐进增加和减少, 这样在刚加速和减速时柔和不少, 减少了对机床的冲击。设置完后可以用在程序中用指令选择是否生效。“SOFT”是冲量限制生效, “BRISK”是冲量限制不生效, 平常是否生效可以由参数20150[20]来设定, 图7为冲量限制后加速度和速度的特性。

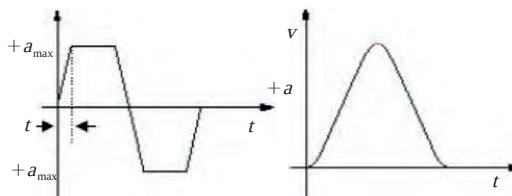


图7 冲量限制生效后加速度和速度的曲线

常用参数如下。

MD32431: 轴的最大冲量限制。

MD32430: 轴手动时最大冲量限制。

MD32420: 轴手动时冲量限制是否生效。

MD32402: 冲量限制方式。

冲量限制的值以定位时稳定为准, 一般可以设置为快移的2倍左右。

前馈控制: 当因为各种原因不能提高位置环的增益值时, 这时在高速加工会有一个大的跟踪误差, 这种误差会影响到加工工件的精度, 采用前馈控制能在不增加位置环的增益的情况下大幅减少跟踪误差, 达到与提高位置环增益同样的效果。前馈控制有两种, 一种是扭矩前馈控制, 一种是速度前馈控制, 大部份是采用速度前馈控制。常用参数如下。

MD32620: 前馈控制方式, 一般设为3为速度前馈。

MD32630: 前馈控制生效方式, 可以设为前馈控制总是有效还是通过程序指令选择有效, 为0表示前馈控制总是生效, 为1则需要在程序中用指令来选择, “FFWON”表示前馈控制生效, “FFWOFF”表示前馈控制不生效, 平常是否生效也是由参数20150[20]来设定。

3. 圆度测试

当驱动优化完成后, 需要对优化的效果进行验证, 比较常用的方法是圆度测试, 因为在模具加工时大部分机床运动轨迹是一个空间的曲线, 可以近似认为是由一个个圆弧段组成的, 圆度测试就是让机床以一定的速度走一个相应半径的圆, 看机床实际走的圆的效果, 通过圆度测试可以看出机床在拐点处的动态特性。圆度测试时要根据机床的快移速度和加速度选择圆度测试时的半径和速度, 一般来说只要半径小和速度快的圆的圆度测试效果不错的话, 其他大半径的圆就不会有问题。

在圆度测试前, 先在手动状态下检测圆度测试中涉及的两个轴对应相同的速度的跟踪误差, 必须保证一致, 否则就会走出一个椭圆来。跟踪误差的大小主要和位置环增益和加速度有关, 调整MD32200和MD32300使两轴跟踪误差相匹配。当系统采用全闭环控制时, 要注意轴的螺距和传动比设置是否正确, 错误的螺距和传动比并不会导致定位错误, 因为系统在全闭环环节有补偿功能, 但会导致系统的动态特性严重下降, 也会使圆弧成为椭圆。

然后在MDA下编一个加工圆的程序:

G17G91

G02 I0 K-20 F2000

M02

运行程序, 在驱动伺服画面里面选择圆度测试, 选择插补圆的两个轴, 输入圆的半径, 进给速度和测量次数后, 然后选择开始测量, 系统就开始记录跟踪插补的两个轴的实际位置, 结束后选择显示就会在屏幕上显示跟踪的圆的状态。SINUMERIK 840D系统圆度测试页面如图8所示。

当圆的形状调整好以后, 有时会在圆弧的4个象限点附近出现4个小包, 这是因为在过象限点时其中有一个轴需要换向, 由于摩擦力的影响会造成该轴在换向点有滞后的现象。一般如果机床的动态特性好的话, 这些滞后现象不会太明显,

如果误差太大的话, 可以用过象限误差补偿来弥补, 补偿的原理就是在轴换向时提前加一个速度信号来弥补这种滞后, 但这个提前预加的速度信号的幅值和预加时间必须和实际的误差匹配, 否则会出现补偿不足或者是补偿过度的现象, 下面是调整摩擦补偿时常用到的一些参数:

MD32500: 摩擦补偿是否生效。

MD32520: 摩擦补偿的幅值。

MD32540: 摩擦补偿的时间常数。

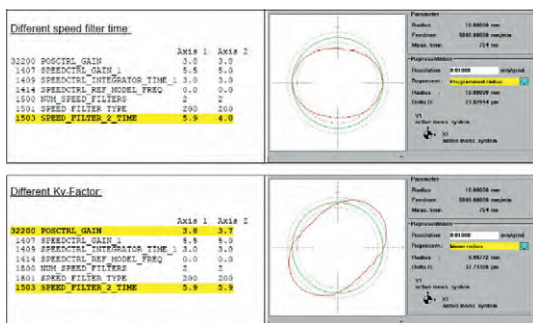


图8 840D系统圆弧测试页面

图9是根据图形调整相应参数的示意图。

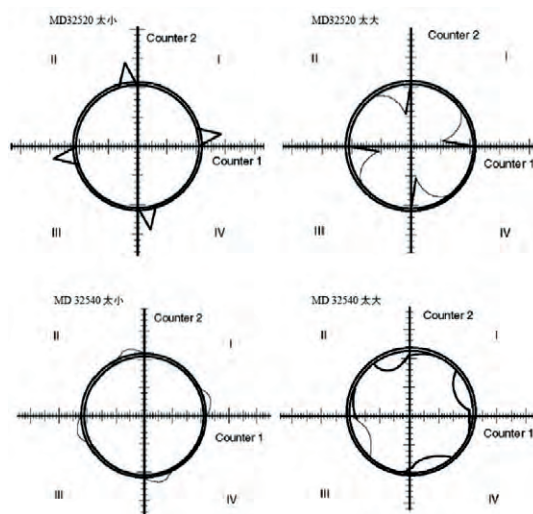


图9 不同的参数值下圆弧的效果

当机床的圆度测试合格后, 优化的过程就基本完成了, 但是在具体加工的时候可能还是达不到要求, 这时需要根据具体的情况具体处理, 总之优化需要有丰富的实践经验, 有时甚至还需要有切削加工等方面的知识, 只有这样才能最终得到好的加工效果。EA

(收稿日期: 2015.09.11)

(编辑: 白文亭)