

文章编号 1004-924X(2001)04-0311-04

直线电机在微电子领域中的应用

刘 伟

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要:直线电机是一种做直线运行的驱动电机。它的性能优劣直接影响到设备的精度、生产效率及产品的质量。文章介绍了如何用工业控制器和直线电机驱动器实现直线电机的超高速、高精度、无过冲、无振荡控制。直线电机的速度环由驱动器用PP算法闭合,位置环由工业控制器用带速度前馈的PID算法闭合。

关键词:直线电机;工业控制器;驱动器;微电子学

中图分类号:TN409; TM359.4 **文献标识码:**A

1 引言

超高速加工尤其是微电子领域里的超高速加工是近十年来发达国家发展十分迅速的一项先进技术,它不但极大地提高了设备的生产效率,而且显著地提高了被加工件的加工精度和表面质量,此外还能解决常规加工方法难以解决的一些特殊问题,是现代制造技术和微电子领域发展史上的一个重大突破。在我们研制的微电子设备中,为提高生产效率,就要尽量提高被加工件的移动速度。由工业控制器控制的直线电机可以带载以3.0m/s的速度,5g的加速度做直线运动,且定位精度达到 $\pm 1\mu\text{m}$ 。这就为提高设备的生产效率,实现现代化大规模生产提供了有利保障。

2 直线电机特点

在直线电机出现之前,直线运动是由旋转电机加上某种由旋转变成直线运动的机械转换机构来实现的。直线电机驱动的最大优点是取消了从电机到工作台之间的一切中间环节,把工作台进给传动链的长度缩短为零,即“零传动”或“直接传动”。我们以40600ILXR永磁同步直线电机为例。它结构简单,效率高,推力体积比大。与旋转电机相比,直线电机有如下优点:

(1) 在进行加速或减速时,具有大的加速度及减速度,直线电机的最大加速度可达 $1g \sim 8g$ (g 为重力加速度),同时轮子与轨道的摩擦小。而回转电机+滚珠丝杠传动方式的进给加速度只有 $0.1g \sim 0.3g$;

(2) 进给速度高。直线电机实际可用的最高速度可达 $150\text{m}/\text{min} \sim 180\text{m}/\text{min}$ 。回转电机+滚珠丝杠传动方式的进给速度只有 $20\text{m}/\text{min} \sim 30\text{m}/\text{min}$;

(3) 运行平稳。直线电机和工作台之间没有任何机械传动环节,靠磁力推动工作,因此运行平稳、快捷、噪声小、传动刚度大、定位精度高;

(4) 起动力大。目前直线电机的最大推力已达12000N,而且从理论上讲,直线电机不存在任何推力极限,故可获得很强的工作能力;

(5) 有机械和电器的保护,并具备经受恶劣环境的能力;

(6) 容易维修和更换;

(7) 行程长度不受限制。

直线电机主要存在的问题:

(1) 发热比较严重。直线电机安装在工作台下部,散热困难;对工作台的运动精度威胁很大,因此必须采取强有力的散热措施。

(2) 控制系统比较复杂。必须采用闭环系统,用光栅尺作测量反馈元件;

(3) 成本高。

3 直线电机的控制环

由于直线电机(初级或次级)与工作台合二为一,所以直线电机进给单元只能采用全闭环系统。此时,系统性能受机械性能影响较大。工作台的负荷及其变化对一个稳定的系统来说就是一种外界干扰。若自动调节不好,就会使系统失去稳定性而振荡。因此直线电机的伺服控制难度较大、要求较高。在我们研制的微电子设备中直线电机受到的扰动非常小,因此重点考虑跟随指标。系统对给定信号的动态响应性能,称为“跟随”性能,一般用最大超调量,调整时间及振荡次数三个指标来衡量。必须对以下各控制环的参数进行合理的设置和调整,以满足此三项指标。

直线电机的电流环、换向环和速度环由驱动器闭合,位置环由控制器闭合。我们选用GV-U6E型号驱动器,选用6K6控制器作控制,其控制系统框图如图1所示。

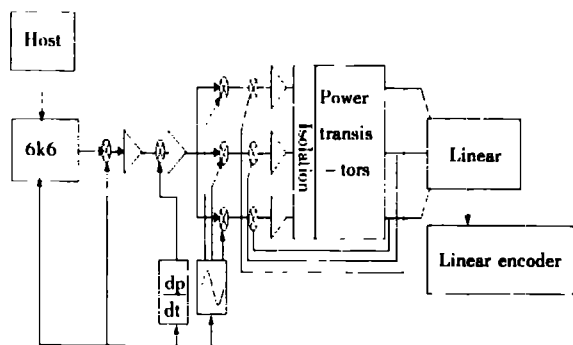


Fig.1 Control of the linear motor

3.1 电流环

GV-U6E拥有全数字电流环,采样频率高达16KHz。电流环的作用是根据电流命令信号调整电机电流。这个电流命令信号既可以来自用户的直接输入,也可以来自速度环的输出。共有三个电流环,对应电机的每一相,各自接受换向环的输入信号。

3.2 换向环

该环将一个单相的电流命令信号转换成一个三相调幅的正弦信号传给电流环。GV-U6E内有一个特有的16kHz正弦发生器,可以通过一种称作力矩预测的技术使电机达到最佳性能。这将

在无论低速还是高速状态下提供高保真的正弦信号。

3.3 速度环

速度环的作用是调整电机速度。与电流环及换向环一样,速度环也是全数字式,频率高达4kHz,使用光栅尺反馈信号计算出电机实际速度。速度命令信号来自于控制器的直接输入。实际速度和期望速度之差经过一个算术补偿器滤波后传给换向环。GV-U6E为用户提供了三种速度补偿算法(调整速度的方法):PI(Proportional & Integral),PDFF(Pseudo Derivative Feedback + Feed Forward),PP(Pole-Placement)。

PI补偿器最适合于要求很高静态跟随精度的应用。它对输入的命令反应非常快,但是当它到达命令速度后,会有过冲,而且速度稳定困难。

PDFF补偿器在那种负载变化而又需要很好的速度调整和命令跟随精度的应用中表现非常出色。它对命令的加速度匹配的非常好,但是它的静态误差比PI要稍差一点。

PP补偿器在各方面表现都是最出色的。它的时间响应快,跟随精度高,只是没有工作中自动调整功能适合于负载变化的应用。

PP的参数是通过系统的惯量和期望的闭环带宽根据下面公式计算得来的:

$$\frac{V}{V_{ref}} =$$

$$\frac{G \times Rv \times B}{(1+A) \cdot (1+Dv) + G \times B \times Hv} = \frac{G \times B}{1+C}$$

式中 G (gain) 为增益, Rv 、 Dv 、 Hv 是控制多项式, $B/(1+C)$ 代表机器特性, B 与系统惯量成反比, $1+C$ 是通过系统闭环带宽建立起来的等式。其中也包括一些驱动器预先计算好的参数,以便使系统具有最大的抗扰动能力。通过指定系统的惯量和带宽,控制多项式的系数可以自动计算。与前两种控制器相比,PP控制器的一个很大特点是具有高阶多项式,如 Rv 、 Dv 、 Hv 。这意味着控制器可以利用先前的数据更好地弥补在离散系统中常常出现的延迟。此外,电机和负载用同样方式控制,即两者间无断开环节。控制器的此项特性使之较PI和PDFF有许多明显的优点:

(1) 因为控制器的多项式可以弥补系统的延迟,故可获得很高的带宽;

(2) 由于具有高阶 Dv 多项式,系统有更好的

稳定性和抗干扰能力;

(3) 无过冲设计,这在 PI 中是无法避免的。

PP 使用高阶多项式获得高带宽。而不是像 PI 和 PDFF 那样,通过提高增益来提高带宽。这就可以改善系统噪声,提高系统稳定性和抗干扰能力。

因为控制器参数是根据用户对带宽的要求计算得来,故调整简便直观,调整中无需实验也不会有错误。通过设定一个参数即负载惯量比例来调整,如果该参数设定过小,速度环时间响应会出现过冲;反之,时间响应会出现下冲和振荡。

3.4 位置环

位置环采用精密光栅尺作为工作台移动的位置反馈元件。位置控制的定位精度取决于光栅尺的分辨率,或者说系统的精度取决于光栅尺的制造精度和安装精度。位置闭环控制系统由于把工作台部分也包括在环内,所以,机械系统的误差可通过反馈得以消除。从而可获得较高的精度。通过接口电路,本系统可实现与 6K6 控制器的顺利连接。

控制器使用 PID 算法闭合。PID 控制算法是迄今为止最通用的控制策略,有许多不同的方法以确定合适的控制器参数。这些参数区分于复杂性、灵活性及使用的过程知识量。一个好的控制算法应考虑以下特性的折中:负载干扰衰减、测量噪声效果、过程变化的鲁棒性、所需模型、计算要求的时间等。

控制器计算电机命令输出值的实际 PID 算法如下:

$$\text{DACout}(n) = 2^{-19} \cdot K_p \cdot \left[a \cdot FE(n) + \frac{K_{\text{off}} \cdot CV(n)}{128} + \frac{K_i \cdot IE(n)}{2^{23}} \right]$$

其中: DACout(n) 为 16 位伺服周期输出命令值,

它被转换成 +10V 到 -10V 的电压输出;

a 为 6K6 控制器内部系数;

$FE(n)$ 是伺服周期 n 内的跟随误差,即为该周期内命令位置与实际位置的差值;

$CV(n)$ 是伺服周期 n 内的指令速度,即为每个伺服周期最后两个指令位置的差值;

$IE(n)$ 是伺服周期 n 内的跟随误差的积分,

$$\text{大小为: } \sum_{j=0}^{n-1} [FE(j)]$$

由控制器控制的位置环,使用了 K_p 、 K_i 、 K_{off}

三个参数。 P 提供了足够的刚度, I 提供静态稳定性。因为驱动器闭合速度环,为系统提供 K_d 。所以,只要将放大器性能调整好,6K6 无需提供 K_d 数字滤波。 K_i 只在运动停止时起作用,这样可提高电机到位后的抗干扰能力,且不会影响电机的动态轨迹,也不会运动停止后引起过冲。只使用 K_p 和 K_i ,直线电机运动时,指令位置与跟随位置间,往往会有与速度和加速度成比例的跟随误差。注意 K_i 值较无速度前馈时一定要小,否则会延长电机的调整时间。参数调整第一步是用阶跃响应确定 K_p 。使 K_i 、 K_{off} 为零,调整 K_p 使电机在无明显超调的情况下尽量加快响应速度。阶跃响应并不能提供准确的 K_p 值,对同样的 K_p 值,阶跃幅度越大,会发现过冲(超调量)越大。所以如果电机实际的运动速度超过阶跃测试时的速度,那么此时 K_p 值应比阶跃测试所得的 K_p 值小。

K_p 基本确定后,使电机做速度变化为抛物线的运动。逐渐增大 K_{off} ,使最大跟随误差减小,此时跟随误差和速度的相关度以及两者比例的均值会随之减小。当均值降到接近零时,此时 K_{off} 为最佳值。从数据采样看,如果速度和跟随误差的相关度越大,两者的曲线越相似;增大 K_{off} ,两者曲线相似度会越来越小,最大跟随误差也会随之减小。如图 2 所示。

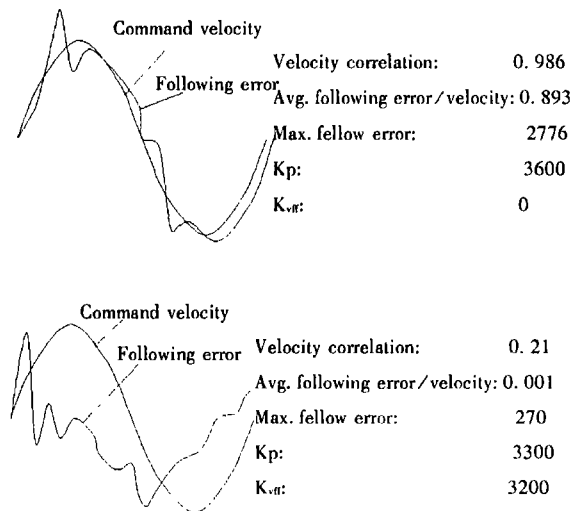


Fig. 2 Graphs of command velocity and following error

4 结 论

直线电机经常处于一个启动、制动、反转、调

速的过程中,因此就必须研究有关电机的动态指标,如稳定性、快速性、动态误差等。由控制器控制的直线电机在高速运动时,可达到无超调量,无振荡次数,调整时间一般小于 20ms。在我们调试使用当中直线电机以 15m/s^2 加速度, 1.06m/s 最

大速度做加减速运动时,最大跟随误差小于 9mm,定位精度 $\pm 3\mu\text{m}$,且启动及停止时无过冲及振荡。做 2mm 无过冲短程运动,从启动到停止只需 0.05s。

参考文献:

- [1] 王伟. PID 参数先进整定方法综述[J]. 自动化学报. 2000, 26(3): 347 - 356.
- [2] 李庆雷. 永磁同步直线电机推力波分析及改善措施[J]. 清华大学学报. 2000, 40(5): 33 - 36.
- [3] 叶斌. 电力电子应用技术及装置[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.

Linear motor's control in laser resistance trimmer

LIU Wei

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: Linear motor is a key part of the laser resistance trimmer. Its performance directly affects the quality and efficiency of trimming resistance. How to control the linear motor's speed, precision, non-shock, non-surge by PMAC controller and speed-mode amplifier is introduced. Driver closes the speed-loop with PP arithmetic, and the speed - feedforward PID arithmetic closes the position-loop.

Key words: linear motors; industrial controller; PMAC; laser resistance trimmers; microelectronics

作者简介: 刘 伟(1953 -), 男, 山东沂水人, 多年来一直从事工程控制及精密仪器设备方面的研究开发工作。