

QFT 在高速线性电机直接驱动平面运动定位控制系统中的应用

孟祥忠^{1,2}, 刘作宗²

(1. 同济大学 计算机科学与工程系, 上海 200092; 2. 青岛科技大学 自动化学院, 山东 青岛 266042)

摘要: 研究定量反馈理论 (QFT) 在高速直线电机直接驱动平面运动定位系统控制中的应用问题. 该系统采用三闭环 (即电流, 速度, 位置) 串级反馈控制加前馈补偿结构. 基于 8 台不同机器上实际测得的频域特性, 所设计的 QFT 高阶鲁棒控制器可以大大降低该系统在大加速度运动状态下所呈现的谐振不确定性. 同时, 该控制器对传感器噪声和干扰也具有较好的抑制能力. 在最大加速度达到 6.8g 的给定运动轨迹条件下, 通过在批量生产的打线机 (用于半导体封装) 平面运动定位系统的实验结果证实了该方法的有效性.

关键词: 定量反馈理论; 鲁棒控制设计; 运动定位系统; 直线电机直接驱动

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Application of QFT to high speed linear motor direct-drive table positioning control system

MENG Xiang-zhong^{1,2}, LIU Zuo-zong²

(1. Department of Computer Science & Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Automation College, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266042, China)

Abstract: This paper investigates the application of quantitative feedback theory (QFT) to high speed linear motor direct-drive X-Y table positioning system. The system consists of a cascade feedback control structure plus an auto-tuning feedforward compensator. The robust high-order QFT controller, based on the measured frequency responses on 8 different mass-produced machines in the same batch, is specially designed to reduce resonance uncertainties. This controller also has the advantage in attenuating the external disturbances and noises in the sensor when the machines are operated at high acceleration. Implementation results of profile motion with a maximum acceleration of 6.8 g ($1g = 9.81 \text{ m/s}^2$) are carried out on mass-produced machines to confirm the effectiveness of the control strategy.

Key word: quantitative feedback theory; robust control design; positioning motion system; linear motor direct drive

1 前言 (Introduction)

直线电机直接驱动 (LMDD) 平面运动定位系统常见于半导体制造工业中. 该系统在大加速度运行状态下会呈现出很强的谐振特性^[1,2]. 这种特性还会随着机器与机器的差异 (由设计和安装的容许误差所致) 或同一台机器运行条件 (如温度) 的不同而有所变化. 这就给我们带来了非常困难的谐振不确定性控制问题. 应用传统的 PID 加带通滤波器设计很难有效地来解决这一问题. 于是, 近些年来许多学者开始探讨应用先进的控制技术, 如鲁棒控制^[3], 来解决这一问题的可能性.

本文研究打线机上的高速 LMDD 平面运动定位系统的鲁棒控制问题. 该系统采用三闭环 (即电

流, 速度, 位置) 串级反馈控制加前馈补偿控制结构. 其中的速度和位置环使用的是基于 QFT 设计的高阶鲁棒控制器^[4,5]. 系统谐振不确定性描述是由测量 8 台不同机器上的频率响应特性变化而得到的. 实验结果表明, 所设计的控制系统在最大加速度达到 6.8g 的给定运动轨迹条件下, 具有鲁棒性强, 精度高以及较好的抗噪声和干扰优点.

2 LMDD 平面运动定位机构 (LMDD X-Y table motion positioning mechanism)

图 1 给出了一种常见的用于半导体芯片封装打线机上的 LMDD 平面运动定位机构. 该机构有两个轴: 即 X 轴和 Y 轴. 其中 X 轴安装在 Y 轴的上面. 每个轴各有一套三相直线电机直接驱动的平台和无接

触线性编码器,两轴分别由软件控制沿各自的轴方向上作同步运动.由于两轴使用的是相同的控制方法,因此,本文只研究X轴的控制设计和执行问题.

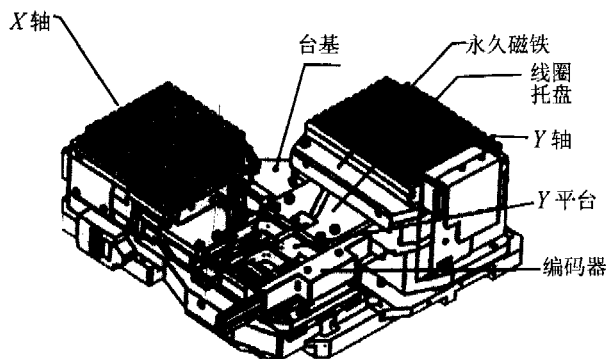


图1 LMDD平面运动定位机构

Fig. 1 LMDD X-Y table positioning mechanism

图2给出了控制系统的结构图.该系统包含了由电流环(在功率放大器内),速度环和位置环组成的串级反馈控制和一个前馈补偿控制.图中 G_{cp} , G_{cv}

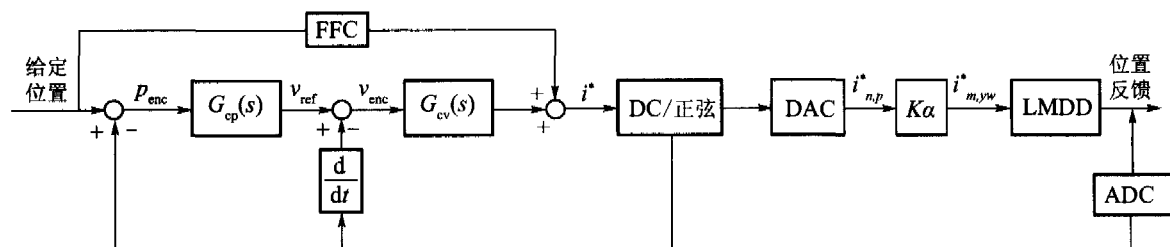


图2 控制系统

Fig. 2 Block diagram of control system

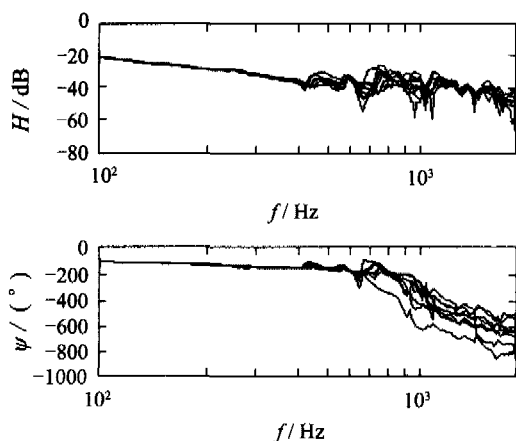


图3 实测的速度频率响应特性

Fig. 3 Measured velocity frequency response

3 QFT 反馈控制器设计 (QFT feedback controller design)

QFT 是以色列学者 Horowitz 于 20 世纪 70 年代初提出的一种基于 Nichols 的频域设计方法.该方法不需要被控对象的详细数学模型,不确定性描述可以在不同条件下或不同机器上由试验测得的动态

和 FFC 分别为将要设计的位置和速度控制器以及前馈补偿控制器. DAC, ADC 和 k_a 则分别为数字-模拟变换器,模拟-数字变换器以及功率放大器增益. p_{ref} 为位置的给定参考轨迹.该系统的位置反馈信号 p_{enc} 是线性编码器实测信号,而速度反馈信号由 p_{enc} 做一阶微分后得到.

图3给出了典型的速度频率响应特性测量曲线.该曲线是在8台批量生产机器上用 SigLab 仪器测得的.可以看出,在200Hz以下,系统的速度开环特性基本上是一阶线性的.随着频率的升高,其特性变化非常明显.在高频范围内,速度的频率特性呈现出多个谐振模态.其中起主导作用的一个发生在频率为800Hz附近.这一测量结果本身也包括了计算本身的延迟和由于DAC和ADC所产生的延迟.该延迟可以表示为

$$G_d(s) = e^{-Ls}$$

其中: $L = 2.5 * T_s$, T_s 为采样时间.

特性变化来直接给出.其设计过程非常透明,可以通过改变零点和极点的位置来满足所给定的有关设计指标,如带宽(BW),稳定裕度等.基于这一原理的控制设计软件包已于1994年投放市场^[5].近些年来,QFT已在飞行控制系统,光盘数据存取控制系统以及电力系统稳定器控制设计中得到了广泛的应用.本节中将介绍基于QFT的鲁棒反馈控制器设计在线性运动定位系统中的应用.

3.1 速度控制器 (Velocity controller)

图4给出了速度环的控制结构图.其中 d 和 n 分别为输出扰动和传感器噪声.这里速度控制器的设计主要是为了降低位置环的不确定性水平以及通过给定的带宽设计指标来达到所期望的输出响应稳定时间.此外,控制器阶数的高低也必须考虑到实际运行系统的硬件(如所使用的ADSP2189)要求.

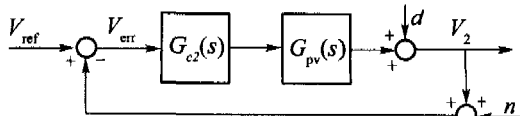


图4 速度环控制结构图

Fig. 4 Block diagram of velocity closed loop

定义 S 和 T 分别为敏感度和补足敏感度函数,即

$$S = \frac{1}{1 + G_{pv}(s)G_{c2}(s)}$$

和 $T = G_{pv}(s)G_{c2}(s)S(s)$.

另外,频域设计指标给定如下:

· 鲁棒增益-相位裕度

$$|T(j\omega)| \leq 1.8, \omega \geq 0;$$

· $BW \geq 300\text{Hz}$,

$$|S(j\omega)| \leq 0.707, \omega \geq 300 \times 2\pi\text{rad/s};$$

· 输出扰动抑制:

$$|S(j\omega)| \leq 0.5, \omega \leq 100 \times 2\pi\text{rad/s}.$$

考虑系统的不确定性描述定义为由 8 台不同机器上测得的开环速度频率响应,即

$$\delta = \{p_1, \dots, p_n\}, n = 8.$$

在给定频率点 $\omega = 2\pi\{100, 255, 450, 810, 1053\}$ 下,其增益和相位变化曲线如图 5 所示. 其中“+”表示所选择的标称系统,其他的符号则分别表示在前面给定的不同频率点下测得的增益-相位特相. 基于上面给出的设计指标和要求,可以借助 MATLAB QFT 控制设计软件包应用回路成型方法得到一个 10 阶的速度控制器,而包含该控制器在内的开环频率特性如图 6(a) 所示. 可以看出,所得到的控制器考虑了实际系统在 255Hz, 450Hz 以及 810Hz 附近的 3 个谐振特性(这一点在该控制器的设计中是至关重要的). 对于 QFT 控制器设计的更详细步骤,这里不再涉及. 感兴趣的读者可以参阅文献[5]. 所得到的闭环控制系统敏感度频率特性如图 6(b) 所示. 很显然该系统的 BW 在 300Hz 以上,这保证了系统的阶跃速度响应上升时间大约在 2.5ms 左右. 同时保证了该系统对 100Hz 以下的扰动信号和高频噪声具有很好的抑制作用.

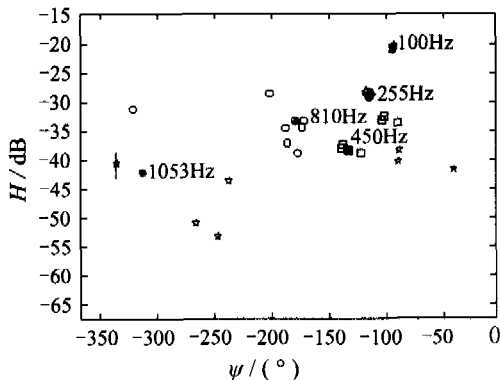


图 5 标称系统

Fig. 5 Nominal plant

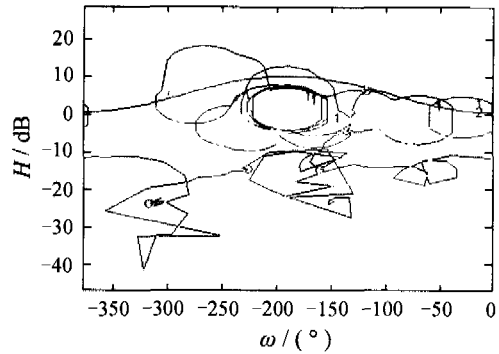


图 6(a) QFT 速度控制器设计

Fig. 6(a) QFT velocity controller design

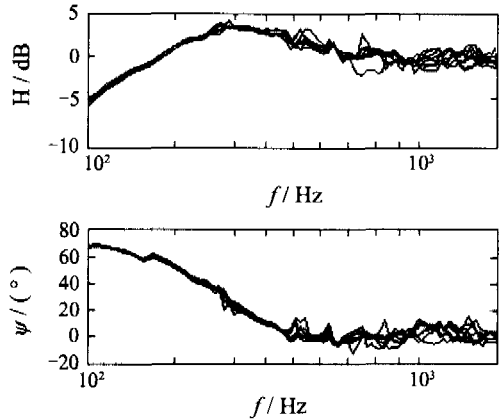


图 6(b) 敏感度频率特性

Fig. 6(b) $S(j\omega)$ characteristic

3.2 位置控制器(Position controller)

位置控制器采用切换模式控制方案,即该方案从一个简单的增益控制器 P 在给定的参考结束时切换到比例积分控制器 PI,最终得到的是一个带宽为 200Hz 位置环频率特性.

4 前馈补偿器设计(Feedforward controller)

由于仅仅使用反馈控制不足以减小系统的跟踪误差,因而该控制方案中引进了 FFC,和先前设计的鲁棒反馈控制器共同使用以达到更好的跟踪效果. FFC 的结构如图 7 所示,其中的前馈增益 K_{vel} , K_{acc} , K_{jerk} 可以在闭环状态下用自动调节技术确定. 一旦确定后将不再随正常运行工况的变化而改变. 但当发生如直线电机驱动机构因故障而更换,导致机械机构的拆卸和安装时,这些增益的大小将发生较大变化,必须重新确定.

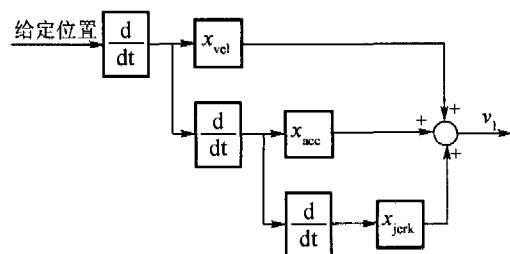


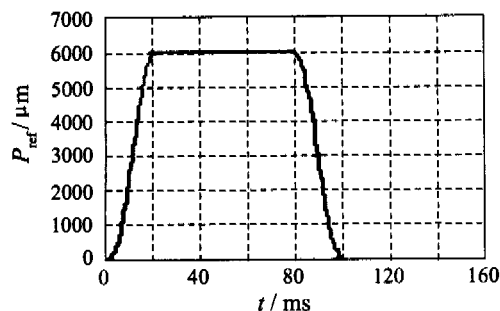
图 7 前馈补偿器

Fig. 7 FFC structure

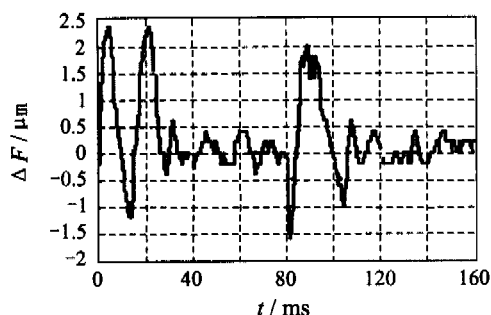
5 执行结果(Implementation results)

本节给出了前面所给出的鲁棒反馈控制策略加自调节FFC在一台批量生产机器上的执行结果. 系统的主要参数如下:

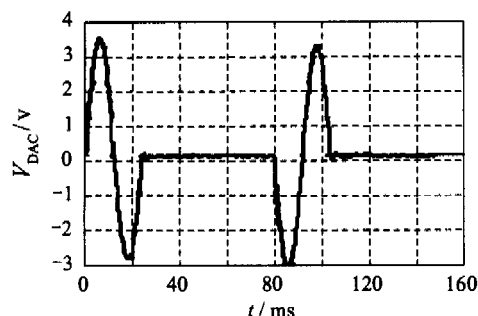
放大器增益为 2.0 A/V ; 编码器分辨率为 $0.2 \mu\text{m}$; 电动机推力常量为 43 N/A ; ADC 比例系数为 $\pm 1024/10 \text{ V}$; 采样频率为 8 kHz .



(a) 给定的参考运动轨迹



(b) 跟踪误差



(c) DAC 输出

图 8 执行结果

Fig. 8 Implementation results of profile motion

图 8(a) 给出了长度为 6 mm 范围的给定参考运动轨迹, 图中 P_{ref} 为给定位置, t 为运行时间; 图 8(b) 为位置跟踪误差曲线, 图中 ΔF 为位置误差; 图

8(c) 为 DAC 输出轨迹, 图中 V_{DAC} 为 DAC 输出的输出电压. 工作台首先从原点运动到 6 mm 的位置, 停留 60 ms 后, 又回到了原始的位置, 总共费时 100 ms . 该运动的最大加速度超过了 6.8 g . 从所得到的结果可以看出, 该系统的最大的动态误差不超过 $2.4 \mu\text{m}$, 进入误差 $1 \mu\text{m}$ 的稳定时间小于 1.5 ms . 并且, 由 DAC 输出到 PWM 功放的最大控制量仅为 3.2 V , 远远低于 DAC 的最大输出限制值 10 V .

6 结论(Conclusion)

本文实现了基于串级结构的 QFT 鲁棒反馈控制策略. 所设计的高阶速度控制器能够对付由于机械谐振特性变化所引起的比较大范围的不确定性. 在高速直线电机直接驱动平面运动定位系统的执行结果表明, 该策略的优点是可以确保同一批机器的运动系统具有一致和良好的跟踪控制效果.

参考文献(References):

- [1] KEMPF C J, KOBAYASHI S. Disturbance observer and feed-forward design for a high-speed direct-drive positioning table [J]. *IEEE Tran on Control Systems Technology*, 1999, 7(5): 513-526.
- [2] LIU Z, LUO F L. Design and implementation of precision motion controller for linear motor direct-drive X-Y table mechanism [C]// *Proc of IEE Int Conf International Power Electronics Conference*, Singapore, 2003. [s. l.]: [s. n.], 2003: 1039-1044.
- [3] LEE H S, TOMIZUKA M. Robust motion controller design for high-Accuracy positioning systems [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 1996, 43(1): 48-55.
- [4] HOROWITZ I. Survey of quantitative feedback theory (QFT) [J]. *Int J Control*, 1991, 53(2): 255-291.
- [5] BORGHESE C, CHAIT Y, YANIV O. *The QFT Toolbox for MATLAB* [M]. San Diego: The MathWorks, 1994.

作者简介:

孟祥忠 (1964—), 男, 同济大学博士生, 青岛科技大学教授, 主要研究方向为智能控制系统理论及应用、混杂 Petri 网理论及应用等, E-mail: mengxz@beelink.com;

刘作宗 (1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密运动控制、电动机控制、电力电子、FACTS 理论及应用等, E-mail: lzz@jn.gov.cn.