

文章编号: 1001-2486 (2002) 01-0081-04

超精密机床进给系统的 QFT 控制器的设计*

郑子文, 李圣怡

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 超精密机床进给机构中存在的不确定因素及非线性因素对进给系统跟踪控制精度有较大影响, 采用合适的控制器能够有效提高其跟踪控制精度。QFT 是在相频平面上的一种图形化的鲁棒控制系统设计方法。本文采用 QFT 理论设计了鲁棒跟踪控制器, 并应用了速度前馈和误差积分控制。仿真结果显示, 进给系统在被控对象参数发生较大变化时仍达到了数十纳米的跟踪控制精度, 满足了超精密加工的要求。

关键词: QFT; 跟踪控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

QFT Controller Design for Ultra-precision Machine Feeding Mechanism

ZHENG Zi-wen, LI Sheng-yi

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Some uncertainty and nonlinear factors of feeding mechanism have a powerful negative effect on tracking accuracy of ultra-precision machine. The quantitative feedback theory is a controller design method in frequency domain. It is aimed at designing a low order robust controller under plant uncertainty and disturbance. A robust QFT tracking controller with velocity feed forward & integral control is designed in the paper. The simulation result shows that 0.01 μ m tracking accuracy is achieved with the controller.

Key words: QFT; tracking control

以频域校正为基础的经典控制理论在单输入单输出 (SISO) 系统的控制器设计方面, 由于其具有直观简单的特点, 通过多次反复设计, 可以得到具有优良控制性能的控制器的, 而且结构简单, 易于实现。但由于各种原因, 控制系统在运行过程中, 其参数会发生一些变化, 而且生产环境的改变和外来扰动的影响给系统带来一定的不确定性, 这使得按照经典控制理论设计的控制器往往不能保证良好的控制性能。在此理论的基础上发展而来的定量反馈控制理论 (Quantitative Feedback Theory) 可以根据具体的时域、频域设计指标的要求, 以及被控对象的不确定性、非线性程度定量地设计控制器, 同时保证控制系统的稳定性, 具有很好的鲁棒性和可实现性, 称为传统控制理论发展的一个新亮点。

QFT 控制方法是在 20 世纪 60 年代由 H. W. Bode 和 Isaac Horowitz 提出, 并在 70 年代发展完善的。QFT 方法的一个主要目标是, 考虑到被控对象存在的不确定性 (包括被控对象的变化和存在外来干扰), 设计一个具有最小带宽的低阶、简单的反馈控制器, 满足所需要的性能指标。它基于以下两种理念: 一, 当一个被控对象存在一定的不确定性或者受到不确定的噪声的影响时, 为了保证控制系统的性能, 必须引入反馈; 二, 一个具有最小带宽的控制器能够有效减小控制系统中噪声、谐振, 以及被控对象具有的未建模的高频动态特性对控制系统性能的影响。QFT 设计方法被认为是经典频域设计方法的自然延伸。

1 控制系统结构的提出

机床进给系统通常是由伺服电机驱动, 由滚珠丝杠传动的直线运动平台。从本质上说进给系统是

* 收稿日期: 2001-10-08
基金项目: 国家部委预研基金项目 (18KD9703041)
作者简介: 郑子文 (1973-), 男, 博士生。

一个线性系统,即系统的控制量(电压)和输出(速度)成线性关系。但存在一些非线性因素和一些不确定性因素,如摩擦、反向间隙以及非线性的接触变形(意味着非线性接触刚度)等。随着对进给机构的精确度要求的提高,这些非线性特性对机构的性能的影响将相对增加。这些非线性因素是局部的,因此进给系统可以认为是一个具有一定参数不确定性的线性系统,我们的设计目标是设计一个鲁棒控制器,使进给系统在参数发生变化的情况下仍然具有良好的跟踪性能。

机床进给系统的控制系统结构框图如图1所示, $P(s)$ 表示进给机构的传递函数。 $d(s)$ 表示进给机构中的非线性干扰(如反向间隙、摩擦等), $G(s)$ 和 $F(s)$ 为将要设计的控制器。在超精密加工过程中,进给系统受到的外来作用力主要是切削力,由于切削用量小(通常为微米),所以切削

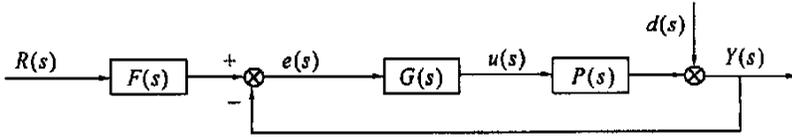


图1 进给机构控制系统框图

Fig. 1 Diagram of machine's servo control system

力可以忽略不计。通过系统辨识,进给机构传递函数可表示为

$$P(s) = \frac{25s + 1000}{s^3 + 39s^2 + 1250s} \quad (1)$$

考虑 $P(s)$ 的参数变化 $\pm 5\%$ 作为被控对象的不确定集进行控制器的设计。

2 QFT跟踪控制器设计

2.1 控制系统设计指标

控制系统的设计指标有很多种,选择与跟踪性能有关的抗干扰指标和跟踪性能指标进行设计。

(1) 抗干扰性能指标

因为被控对象是一个带宽非常有限的低通系统,因此对高频带要求高的抗干扰性能指标意义不大,而且会给控制器的设计造成大的困难,应当放宽对高频指标的要求,而对低频指标进行严格规定。所以选择确定抗干扰性能指标如式(2), $\delta(\omega)$ 的取值见表1。

$$\left| \frac{Y(j\omega)}{d(j\omega)} \right| = \left| \frac{1}{1 + GP(j\omega)} \right| \leq \delta(\omega) \quad (2)$$

表1 抗干扰性能指标 $\delta(\omega)$ 的取值

Tab. 1 Disturbance rejection specifications

ω (rad/s)	< 1.5	2	4	8	> 12
$\delta(\omega)$	0.1	0.56	0.8	1	1.5

(2) 跟踪性能指标

跟踪性能指标是指被控对象跟随指令输入变化的能力。指令信号是多种多样的,但在两个相邻采样时刻,指令信号的变化近似于一个阶跃信号,因此阶跃响应能够比较好地体现一个系统的跟踪性能。选择二阶系统作为跟踪性能指标的基本形式,如式(3)所示,

$$\left| \frac{\omega_n^2}{(j\omega)^2 + 2\xi\omega_n(j\omega) + \omega_n^2} \right| \leq \left| \frac{Y(j\omega)}{R(j\omega)} \right| \leq \left| \frac{\omega_H^2}{(j\omega)^2 + 2\xi_H\omega_H(j\omega) + \omega_H^2} \right| \quad (3)$$

其中 ω_n 是固有频率, ξ 是阻尼比。选择 $\omega_{nL} = 20\text{rad/s}$, $\omega_{nH} = 50\text{rad/s}$ 分别为其固有频率的上下界, $\xi_L = 0.9$, $\xi_H = 0.7$ 分别为其阻尼比的上下界。

考虑到系统的稳定性,还应当提出开环系统的稳定裕度。事实上在抗干扰性能指标中,已经提出

了系统的稳定裕度。根据式 (2)，可以计算出系统的幅值裕度为 9.5dB，相位裕度为 39°。

2.2 QFT 控制器设计

按照 QFT 设计理论，反馈控制器 G 的作用是减小被控对象参数的变化造成的对控制系统性能的影响，而前置滤波器 F 的作用是使控制系统的响应曲线的形状和设计要一致，因此二者可以相对独立设计。控制器 G 的设计方法是按照被控对象的分散范围和设计指标，在幅相平面画出限制区域(界)，通过改变增益，添加一些零、极点，即选择控制器 G ，使系统的开环幅相曲线位于这些限制区域之外，同时使设计曲线上各频率对应点尽量靠近限制区域的边界(这样可以使设计的控制器具有较低的阶)，得到如图 2 所示的界。图 2 中曲线 L_0 为从 $\{P\}$ 中选取的任意一个参考对象。Matlab™ 提供了一个图形化的设计工具，图 3 是设计结果，其中 GL_0 对应曲线 L_1 ，选择 G 作为设计结果如下

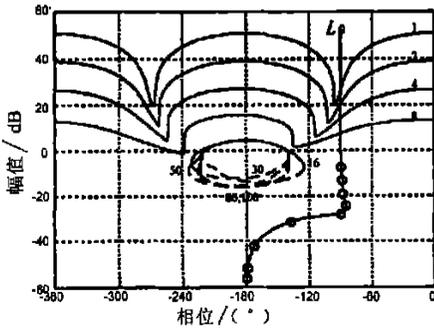


图 2 界的组合及被控对象的 Nichols 图
Fig 2 The bands of plant on Nichols plot

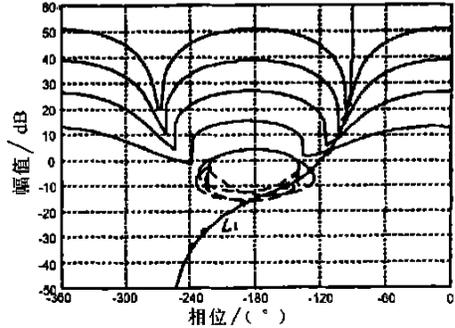


图 3 设计结果的 Nichols 图
Fig. 3 The controller design result on Nichols plot

$$G = \frac{7(0.04s + 1)(0.14s + 1)(0.017s + 1)(0.00087s^2 + 0.026s + 1)}{(0.067s + 1)(0.2s + 1)(0.004s + 1)(0.0016s^2 + 0.04s + 1)}$$

前置滤波器 F 的作用是使闭环控制系统的幅频响应曲线具有预期的形式，即满足跟踪性能指标。

其设计方法是在幅频平面上对曲线 $|P_C(j\omega)| = \left| \frac{PG(j\omega)}{1 + PG(j\omega)} \right|$ 添加一系列的零点、极点(即为 F 的零点、极点)，使 $FP_C(j\omega)$ 满足式(3)。对应于 G 的滤波器 F 设计结果如下

$$F(s) = \frac{(0.0625s + 1)(0.0039s^2 + 0.0884s + 1)}{(0.1s + 1)(0.05s + 1)(0.000434s^2 + 0.0295s + 1)}$$

图 4 是在幅频平面上的设计结果，图中位于上界和下界之间的曲线对应于被控对象的不确定性。结果显示，控制系统正好位于式(3)规定的区域。

2.3 稳定性分析

在控制器 G 的设计过程中，针对的是一个参考被控对象，从图 3 所示的设计结果中，可以看到系统的设计是满足 Nyquist 稳定性准则的，而且还满足一定的稳定裕度：幅值裕度为 16dB，相位裕度为 60°左右。但对于被控对象集 $\{P\}$ ，控制系统的稳定性由如下准则确定。

鲁棒稳定性准则^[2]：假设不确定被控对象集 $\{L\}$ 满足如下两组条件中的一组，

- (1) (a) $L(s) \in \{L\}$ 严格正则。(b) $\{L\}$ 中参数的不确定集是一个单连域。(c) $L(s)$ 的分子和分母多项式的系数在参数不确定集中是连续的。(d) $L(s)$ 的分子和分母的阶数在不确定集中是固定不变的。

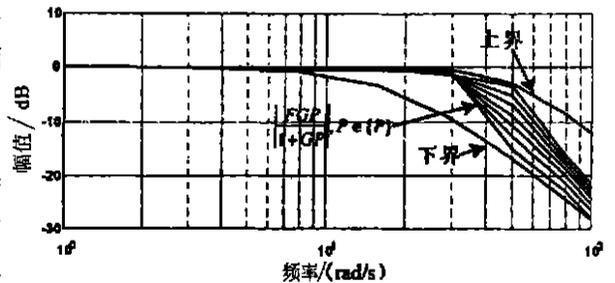


图 4 前置滤波器 F 的设计结果
Fig. 4 The filter F design result

(2) (a) 在每一固定频率点, $L(j\omega) \in \{L\}$ 在复平面上的响应形成一个凸集。(b) $L(s)$ 中不确定极点的个数是固定的。

设 $L_0(s)$ 是 $\{L\}$ 中任一参考对象, 如果以 $L_0(s)$ 为参考对象设计的控制系统是稳定的, 并且其 Nichols 曲线和幅相频面的点 $[0, (2k+1) \times 180]$ (dB, degree) 不相交, 则所设计的控制系统是鲁棒稳定的。

所谓鲁棒稳定性是指当被控对象在预期的不确定性范围内变化时, 所设计的控制器能够保证闭环控制系统的稳定。该准则保证了所设计的控制系统是鲁棒稳定的。

2.4 控制系统跟踪性能分析与改进

在控制系统设计完成后应当验证其跟踪性能, 事实上不可能对被控对象集 $\{P\}$ 中每一个对象进行验证, 所以选取 $\{P\}$ 中分散度最大的两个被控对象 P_1 、 P_2 进行跟踪性能验证:

$$P_1 = \frac{21.6s + 769}{s^3 + 34s^2 + 1114s}, \quad P_2 = \frac{28.8s + 1371}{s^3 + 45.4s^2 + 1427s}$$

用相同的控制器 G 、 F 分别进行控制, 控制系统框图如图 5 所示。用一幅值为 $\pm 2\mu\text{m}$ 的白噪声作为干扰信号 $d(s)$, 选择一幅值为 3mm 的正弦波作为输入信号, 仿真结果显示有较大的跟踪误差, 这是由于控制系统存在较大的相位滞后所致。为了进一步减小跟踪误差, 考虑在控制系统中加一速度前馈 $F_v(s) = k_v(s)$ (参见图 5), 取 $k_v = 0.5\text{mm/s}$, 控制结果见图 6。可见采用速度前馈可以大幅度提高控制系统的跟踪精度, 跟踪误差达到了 $1\mu\text{m}$ 和 $2.5\mu\text{m}$ 。但对于超精密加工机床的进给系统而言, 该跟踪精度还明显不够。从图 6 的误差曲线可以看出, 对应于 P_{M1} 的误差曲线是因为相位滞后的结果, 而对应于 P_{M2} 的误差曲线是因为速度前馈的调节作用过强而导致相位超前的结果, 所以单纯采用速度前馈的方法不可能进一步提高进给系统的跟踪精度。考虑在进给系统反馈控制器上并联一个误差积分环节 $I(s)$, 新的控制系统结构见图 5。取误差积分环节 $I(s) = 25/s$, 跟踪结果如图 7 所示, 跟踪误差分别为 $0.02\mu\text{m}$ 和 $0.04\mu\text{m}$ (不包括噪声信号), 且从控制输出中没有看到明显的不稳定迹象。可以说, 整个控制效果是理想的, 而且在被控对象发生比较大的变化时, 控制系统的跟踪精度是保证的。

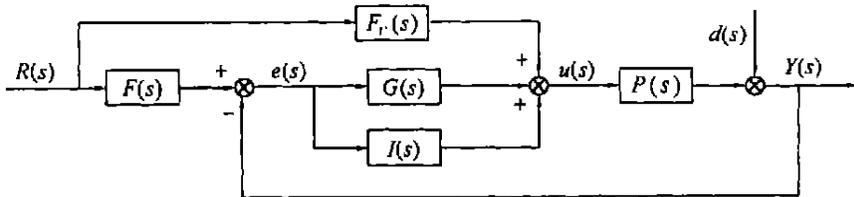


图 5 QFT+ 速度前馈+ 积分控制系统框图

Fig. 5 The diagram of QFT controller with velocity feed forward & integration control

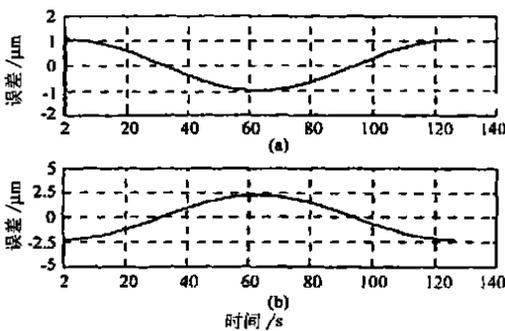


图 6 QFT+ 速度前馈控制

(a) P_{M1} 的跟踪误差; (b) P_{M2} 的跟踪误差

Fig. 6 Tracking control error by QFT with velocity feed forward controller (a) tracking error of P_{M1} , (b) tracking error of P_{M2}

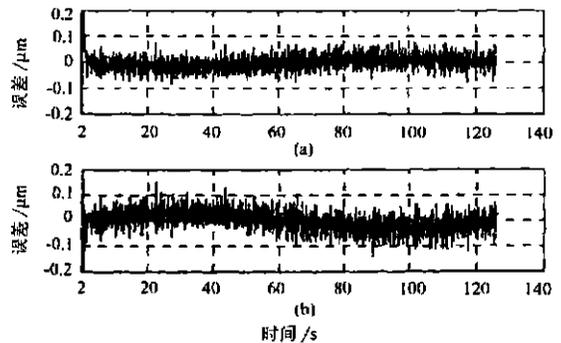


图 7 QFT+ 速度前馈+ 积分控制

(a) P_{M1} 的跟踪误差; (b) P_{M2} 的跟踪误差;

Fig. 7 Tracking control error by QFT with velocity Feed forward controller (a) tracking error of P_{M1} , (b) tracking error of P_{M2}

的作用, 我们得到的随机样本不能表示为白数, 而是以具有上、下确界的灰数表示更符合实际。本文研究了灰色概率密度函数与灰色可靠性模型, 建立了应力-强度干涉灰色可靠度计算模型, 是基于概率理论的可靠性设计的进一步的推广, 但其计算量大而研究其白化求解方法, 给出了工程应用实例, 研究了相应的 matlab5.3 程序。灰色可靠性设计包括传统的可靠性, 应用所建立的模型不仅可用于设计参数变动对可靠度的灵敏度分析, 而且可以运用该模型进行稳健性可靠性设计, 有效地控制设计参数。

参考文献:

- [1] 罗荣高. 灰色概率与统计问题及其应用[J]. 华中理工大学学报, 1988, 16 (4): 135-140.
- [2] 牟致忠. 机械可靠性设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [3] 罗佑新, 张龙庭. 灰色系统理论及其在机械工程中的应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2001.
- [4] 华罗庚. 统筹方法和补充[M]. 北京: 中国工业出版社, 1965.

(上接第 84 页)

3 结 论

在采用 QFT 控制系统的设计方法设计的控制器的基础上, 引入了速度前馈和积分环节, 使控制系统在被控对象存在较大的变化时达到了数十纳米的跟踪精度, 达到了超精密加工的要求。之所以在引入速度前馈和积分环节之后能够达到如此高的控制精度, 在于 QFT 方法提供了良好的鲁棒性能。

参考文献:

- [1] Oded Yaniv. Quantitative Feedback Design of Linear and Non-linear Control system [M]. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [2] Craig Borghesani, Yossi Chait, Oded Yaniv. The QFT Frequency Domain Control Design Toolbox user guide [M]. The MathWorks, Inc., USA, 1994.
- [3] Myoung Soo Park, Yossi Chait, Maarten Steinbuch. Inversion-free Design Algorithms for Multivariable Quantitative Feedback theory: An Application to Robust control of a CD-ROM [J]. Submitted to Automatica, 1996.
- [4] Jiro Otsuka. Nanometer Level Positioning Using three Kinds of Lead Screws [J]. Nanotechnology, N.3, 1992.