

伺服系统的反馈控制设计研究综述

张磊, 苏为洲[†]

(华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640; 自主系统与网络控制教育部重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 伺服系统广泛应用于工业和国防的各个领域, 例如射电望远镜天线伺服系统、雷达伺服系统、动中通伺服系统、硬盘驱动伺服系统、金属切割系统和数控机床等. 为了满足伺服系统的高性能要求, 先进的控制算法设计越来越受到关注. 本文以天线伺服系统和硬盘驱动伺服系统为例, 阐述了伺服控制系统中普遍存在的高频谐振、带宽约束和外界扰动等共性问题, 从系统的干扰抑制、跟踪性能和鲁棒稳定性问题的角度, 归纳了伺服系统主要的控制器设计方法.

关键词: 伺服系统; 系统建模; 算法设计; 高频谐振; 带宽约束; 干扰抑制; 伺服误差; 鲁棒性

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Feedback control design of servo systems: a review

ZHANG Lei, SU Wei-zhou[†]

(School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China; Key Laboratory of Autonomous Systems and Networked Control of the Ministry of Education, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: Servo systems have been widely used in various fields of industry and defense, such as radio telescope antenna servo systems, radar servo systems, 'communication on the move' servo systems, hard disk drive servo systems, metal cutting systems, digital control machines and so on. To meet high demands on the performances of servo systems, many research efforts have been devoted to advanced control design for servo systems. This paper gives a brief review of the existing achievements in control design for servo systems, with antenna servo systems and hard disk drive servo systems taken as examples to explain several issues in this area; such as, the high-frequency resonance, the bandwidth constraint, the external disturbance and so on. Particularly the disturbance rejection, the optimal tracking control and the robust stabilization are discussed in more details.

Key words: servo systems; system modeling; algorithm design; high-frequency resonance; bandwidth constraint; disturbance rejection; servo error; robustness

1 引言(Introduction)

伺服系统广泛应用于工业和国防的各个领域, 例如射电望远镜天线伺服系统、雷达伺服系统、动中通伺服系统、硬盘驱动伺服系统、金属切割系统和数控机床等. 一个高性能伺服控制系统通常由电流环、速度环和位置环组成, 控制器设计需要满足伺服系统的干扰抑制性能和跟踪性能要求, 同时具有一定的鲁棒稳定性^[1-2]. 设计人员总是希望伺服系统的动态响应具有快速性, 同时整个系统具有鲁棒稳定性. 然而, 在实际工程中, 伺服系统的快速性和稳定性是难以同时兼得的. 实际工程中伺服控制系统普遍存在的共成问题是系统的高频谐振问题和扰动问题, 高频谐振不仅会阻碍系统伺服带宽的提高, 影响系统的伺服性能, 甚至会破坏系统的稳定性.

射电望远镜(radio telescope)主要应用于天文观测

和深空通信等方面. 为了提高数据的传输率, 射电望远镜天线要能在很高的频率下工作. 美国NASA深空网射电望远镜天线的工作频率从S频段(4 GHz)和X频段(8 GHz)发展到Ka频段(32 GHz), 且天线在S频段、X频段和Ka频段下工作时的指向精度要求分别为 0.028° , 0.008° 和 0.002° ^[3]. 这些高指向精度要求, 给天线控制工程师带来了前所未有的挑战. 射电望远镜天线伺服控制系统主要面临的问题是系统的高频谐振和外部扰动问题^[1,3]. 高频谐振会阻碍系统伺服带宽的提高, 影响系统的伺服性能. 天线伺服系统的外界扰动主要是风扰动^[4], 风作用在天线的面板上, 会影响天线伺服系统的跟踪性能和干扰抑制性能.

硬盘驱动(hard disk drives, HDDs)是另一类典型的伺服系统. 硬盘驱动伺服系统的磁头定位精度需要满足数据存储的高性能要求. 文献[5-6]阐述了硬盘

收稿日期: 2013-01-03; 录用日期: 2014-01-20.

[†]通信作者. E-mail: wzhsu@scut.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(60834003); 国家自然科学基金资助项目(61273109); 中国电子科技集团公司第五十四研究所新技术研究高校合作资助项目(K1128006, K1260005).

驱动控制的发展状况,文献[7]研究了硬盘驱动系统的建模和控制算法设计问题.由于硬盘记录密度越来越高,人们对硬盘驱动伺服系统的性能要求也随之不断提高.然而,硬盘驱动系统的伺服带宽受到执行器高频机械谐振的约束.同时,硬盘驱动伺服系统还会受到各种外部干扰的影响.文献[8-9]针对开环增益零分贝穿越频率附近的不可重复扰动,设计控制器进行抑制.文献[10-12]采用重复控制技术(repetitive control techniques)设计反馈控制器抑制伺服带宽范围之外的可重复扰动.文献[13]提出一种基于切换和扰动观测器的前馈控制,抑制系统的可重复扰动.文献[14-16]采用回路整形技术(loop shaping techniques)提高硬盘驱动系统的伺服带宽.

本文剩余的部分安排如下:第2部分主要给出伺服控制系统的概述;第3部分讨论伺服系统的建模问题;第4-6部分从系统的干扰抑制性能、跟踪性能和鲁棒稳定性等几个方面讨论伺服系统的控制算法设计;第7部分讨论其他先进的控制算法设计;最后给出了本文的结论,并讨论了伺服控制系统未来的研究方向.

下面对本文中将要出现的符号给出说明: $\text{Re}(\cdot)$ 和 $\text{Im}(\cdot)$ 分别表示复数的实部和虚部;符号 \rightarrow 表示趋向或接近; $\text{tr}\{\cdot\}$ 表示矩阵的迹; $(\cdot)^T$ 和 $(\cdot)^*$ 分别表示矩阵的转置和共轭转置; $E(\cdot)$ 表示向量或矩阵的期望;对称矩阵 $Q > 0 (Q \geq 0)$ 表示 Q 是正定的(半正定的);若传递函数 $G(s)$ 是稳定和真有理的,那么 $\|G(s)\|_2$ 表示传递函数 $G(s)$ 的 H_2 范数,且

$$\|G(s)\|_2^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{tr}\{G^*(j\omega)G(j\omega)\}d\omega,$$

$\|G(s)\|_{\infty}$ 表示传递函数 $G(s)$ 的 H_{∞} 范数,且 $\|G(s)\|_{\infty} = \sup_{\omega \in \mathbb{R}} |G(j\omega)|$.

2 伺服控制系统的概述(Overview of servo control systems)

典型的伺服控制系统如图1所示, r 表示给定信号, y 表示位置输出, e 表示系统的伺服误差, u 表示控制信号, d 表示外界扰动, $K(s)$ 表示控制器的传递函数.从扰动 d 到位置输出 y 的传递函数定义为 G_{dy} ,从控制信号 u 到位置输出 y 的传递函数定义为 G_{uy} ,在给定信号 r 和外界扰动 d 同时作用下的系统位置输出 y 表示为

$$y(s) = \frac{G_{uy}(s)K(s)r(s)}{1 + G_{uy}(s)K(s)} + \frac{G_{dy}(s)d(s)}{1 + G_{uy}(s)K(s)}. \quad (1)$$

伺服系统反馈控制器设计的目的是:设计可镇定控制器 $K(s)$ 使得系统的伺服误差 e 越小越好,而且存在外界扰动 d 作用时伺服系统的输出 y 能够快速平稳地跟踪给定信号 r .

伺服控制算法是决定伺服系统性能的关键技术,系统的伺服带宽、干扰抑制性能、跟踪性能和鲁棒稳定性都是控制算法设计需要考虑的问题.为了满足高

精度伺服控制系统的高性能要求,伺服控制算法从传统的控制算法(如PI/PID控制、超前滞后控制和前馈控制等),发展到先进的控制算法(如内模控制、扰动观测器方法、自抗扰控制、线性二次型高斯(LQG)控制、 H_2 控制、 H_{∞} 控制、混合 H_2/H_{∞} 控制、混合灵敏度 H_{∞} 控制、基于广义KYP(Kalman-Yakubovic-Popov)引理的设计方法等).各种控制算法都有其优点和缺点,本文将从伺服系统的干扰抑制性能、跟踪性能和鲁棒稳定性等几个方面讨论一些主要的伺服控制算法,为从事伺服系统控制算法设计的研究人员和工程师提供参考.

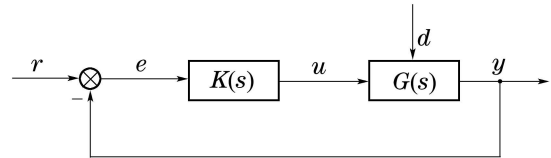


图1 典型的伺服控制系统

Fig. 1 Typical servo control system

3 系统建模(System modeling)

系统的数学模型是进行系统分析和算法设计的基础,特别是基于模型的控制算法设计需要得到精确的系统数学模型.伺服系统的数学模型主要是通过机理建模或者系统辨识方法得到.传统的线性系统控制算法设计要求系统的参数或非参数模型.例如,采用根轨迹方法或者鲁棒控制方法则需要得到被控对象的传递函数或者状态空间描述.对象模型一般由多项式系数或者状态空间矩阵元素描述,这些多项式系数或矩阵元素称为对象模型参数,此类模型称为对象的参数模型.采用Nyquist图、Bode图和Nichols图等方法需要知道从系统输入到系统输出传递函数的幅频和相频曲线.通过典型的频率响应测试得到的实验数据,可以绘出对象的函数曲线,这些曲线称为对象的非参数模型^[17].

对于一个给定的对象,机理建模主要是通过基本物理定律以及对象的结构数据建立系统的数学模型;系统辨识则为通过时域或者频域辨识方法得到系统输入和系统输出之间的数学模型.在实际的伺服系统建模中,机电部分通常采用机理建模,而高频谐振部分主要采用系统辨识方法建模.大量文献已经讨论了系统辨识的方法,如Sinha和Kuszta^[18]归纳了系统辨识的主要方法,包括经典的辨识方法(脉冲响应分析法、阶跃响应分析法和频率响应分析法)和模型调节方法(最小二乘估计、极大似然法和随机近似等)^[19-22].

天线伺服系统的模型主要包括电机模型、变速箱模型、放大器模型以及天线结构的高频谐振模型等.其中电机模型、变速箱模型和放大器模型等机电部分主要采用机理建模,天线结构的高频谐振模型采用系

统辨识方法建模. 文献[4, 23–24]研究了天线伺服系统的建模问题, 文献[3, 25–26]采用白噪声信号进行系统辨识, 通过记录系统的输入和输出信号, 可以得到系统的传递函数. 图2给出了文献[3]通过现场测试数据和系统辨识方法得到的天线伺服系统方位传递函数的频率响应, 实线表示通过系统辨识得到的传递函数模型, 主要由低频和高频两部分组成, 低频部分(频率小于1 Hz)表示系统的刚性部分, 高频部分(频率大于1 Hz)表示天线结构的高频谐振模型.

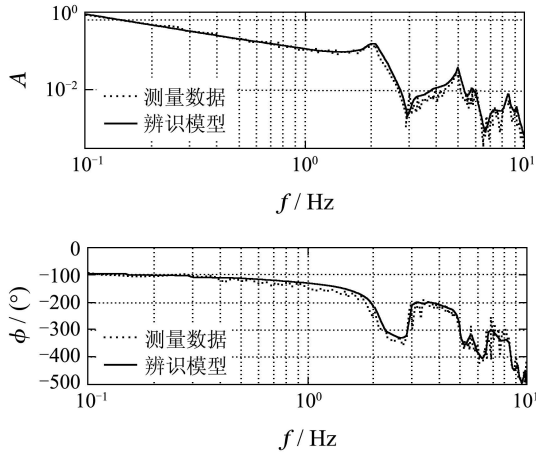


图 2 天线伺服系统的频率响应

Fig. 2 The frequency response of antenna servo system

硬盘驱动伺服系统的建模包括对象建模和干扰建模. Pang和Lewis^[27]采用最小二乘误差最优化辨识方法获得硬盘驱动伺服系统高频谐振模态的参数. 文献[28]建立了硬盘驱动伺服系统的对象模型和干扰模型. 在低频段, 主要干扰是可重复跳动振动; 在高频段, 主要干扰是空气湍流产生的悬架振动. 在实际的硬盘驱动伺服系统模型中, 一般包含由枢轴支撑摩擦产生的频率小于100 Hz的惯性部分和频率在4 kHz以上的许多高频机械谐振模态. 硬盘驱动伺服系统的数学模型一般表示为

$$G(s) = \frac{K}{ms^2 + bs + k} + \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{s^2 + 2\zeta_i\omega_i s + \omega_i^2}, \quad (2)$$

其中: m 表示质量, k 表示弹簧系数, b 表示阻尼系数, K 表示包括音圈电机转矩常数和功率放大器增益在内的增益系数, a_i 表示高频谐振模态的增益, ζ_i 和 ω_i 分别表示高频谐振模态的阻尼系数和谐振频率. 图3给出了文献[29]采用测量数据和系统辨识方法建立的硬盘驱动伺服系统的频率响应曲线.

通过比较图2和图3可知: 大口径天线伺服系统和硬盘驱动伺服系统存在的共性问题系统的高频谐振问题, 这些高频谐振不仅会阻碍系统伺服带宽的提高, 影响系统的伺服性能, 甚至会破坏系统的稳定性. 此外系统的外部扰动问题也是伺服系统普遍存在的一个共性问题.

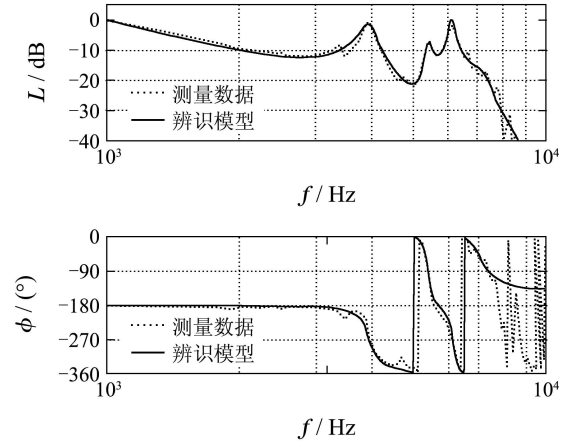


图 3 硬盘驱动伺服系统的频率响应

Fig. 3 The frequency response of hard disk drive servo system

4 干扰抑制性能(Disturbance rejection performance)

干扰抑制是伺服控制系统设计中一个非常重要的问题. 伺服系统通常都会受到扰动的影响, 例如天线伺服系统会受到低频风扰动和高频谐振的影响^[4, 30–32], 硬盘驱动伺服系统会受到噪声和执行器的高频谐振的影响^[2, 8–9]. 如果系统的扰动模型已知或者可以直接测量, 则可以采用前馈控制方法或者通过插入扰动的内部模型, 就能够实现对伺服系统中干扰的完美抑制^[33]. 然而, 实际工程中, 系统的扰动模型有时是未知的或不可测量的, 因此如何有效地抑制系统的已知或未知外界扰动, 提高伺服系统的干扰抑制性能是至关重要的. 本节将从内模控制、扰动观测器方法、自抗扰控制和 H_2 控制几个方面讨论伺服控制系统的干扰抑制问题.

4.1 内模控制(Internal model control)

内模控制(internal model control, IMC)是一种基于对象数学模型进行控制器设计的新型控制策略, 由学者Garcia和Morari最早提出^[34]. 内模控制的结构图如图4所示, $G(s)$ 表示对象的实际模型, $\tilde{G}(s)$ 表示对象的标称模型, $Q(s)$ 表示内模控制器, r 表示外部给定信号, u 表示控制信号, y 表示系统输出, e 表示误差信号, d 表示外界扰动, \tilde{d} 表示反馈信号. 反馈信号 \tilde{d} 为

$$\tilde{d} = (G(s) - \tilde{G}(s))u + d. \quad (3)$$

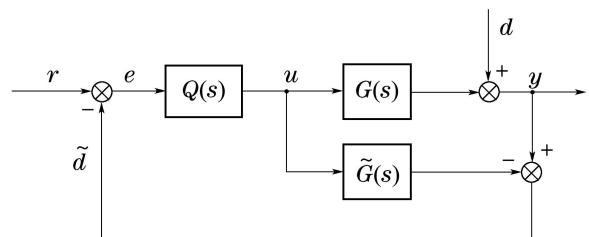


图 4 内模控制结构图

Fig. 4 The structure diagram of IMC

如果系统的模型精确且没有外界扰动 d 时,则反馈信号 \tilde{d} 为零,此时相当于开环系统.因此反馈信号 \tilde{d} 可以表示系统的不确定性和外界扰动.内模控制结构可以等效为如图5所示的经典反馈控制结构,经典反馈控制器 $K(s)$ 和内模控制器 $Q(s)$ 之间的关系为

$$K(s) = \frac{Q(s)}{1 - \tilde{G}(s)Q(s)}, \quad (4)$$

$$Q(s) = \frac{K(s)}{1 + \tilde{G}(s)K(s)}. \quad (5)$$

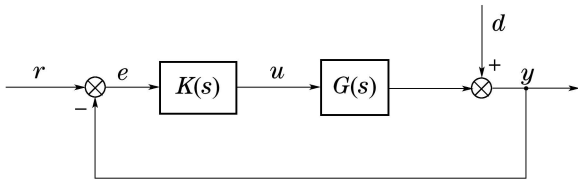


图5 经典反馈控制结构图

Fig. 5 The structure diagram of classical feedback control

假设系统是稳定的,内模控制反馈控制系统内稳定的充要条件是:内模控制器 $Q(s)$ 是稳定的.在给定信号 r 和外界扰动 d 作用下的系统输出 y 为

$$y = \frac{GQ}{1 + (G - \tilde{G})Q} r + \frac{1 - \tilde{G}Q}{1 + (G - \tilde{G})Q} d, \quad (6)$$

扰动 d 到系统输出 y 的传递函数 G_{dy} 可以表示为

$$G_{dy} = \frac{1 - \tilde{G}Q}{1 + (G - \tilde{G})Q}. \quad (7)$$

伺服控制系统的干扰抑制性能可以用扰动 d 到系统输出 y 的传递函数 G_{dy} 的 H_2 范数表示.当系统的模型精确时,即 $G(s) = \tilde{G}(s)$ 时,

$$G_{dy} = 1 - \tilde{G}Q. \quad (8)$$

此时,需要设计一个控制器 $Q(s) \in \mathbb{RH}_\infty$,使得 $\|G_{dy}\|_2$ 最小.因此干扰抑制问题的数学描述为

$$\min_{Q \in \mathbb{RH}_\infty} \|W(1 - \tilde{G}Q)\|_2, \quad (9)$$

其中 $W(s)$ 是一个最小相位、稳定的权重函数,能够使系统的输出灵敏度函数在扰动信号频段内(低频段)得到抑制.

IMC方法以其设计简单、干扰抑制效果好和鲁棒性强等优点得到广泛的应用. Li^[35]针对天线伺服系统,设计了一种基于IMC的PID控制算法,并通过实际模型验证了IMC-PID算法的可行性. Alcantara等^[36]提出了一种基于模型匹配(model matching)的内模控制设计方法. Lee等^[37]针对磁盘驱动伺服系统,提出了一种基于内模控制结构的控制算法.

4.2 扰动观测器方法 (Disturbance observer method)

扰动观测器(disturbance observer, DOB)方法在高

性能伺服系统中得到广泛的应用,主要原因在于扰动观测器的结构简单和鲁棒性好.通过采用标称模型的逆模型和设计一个低通滤波器 $Q(s)$,扰动观测器能够对外部干扰进行实时估计,然后在控制信号中引入补偿,抵消外部干扰对系统的影响.扰动观测器方法对外部干扰和系统的参数变化具有较强的鲁棒性.文献[38–43]验证了基于扰动观测器的控制器设计方法可以显著提高伺服系统的干扰抑制性能.

扰动观测器的结构如图6所示,其中: u_r 表示参考控制输入, d 表示外界扰动, n 表示测量噪声, u_f 表示反馈信号, $P(s)$ 表示系统的实际模型, $P_n(s)$ 表示系统的标称模型.

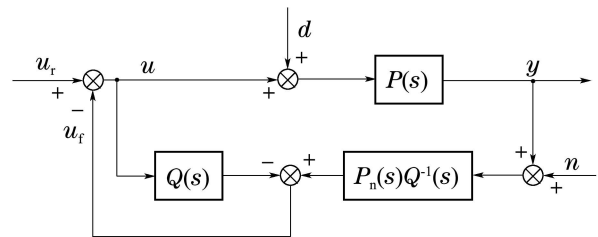


图6 扰动观测器的结构

Fig. 6 The structure of disturbance observer

在参考控制输入 u_r 、外界扰动 d 和测量噪声 n 同时作用下的系统输出 y 可以表示为

$$y = \frac{P(s)(P_n(s)u_r + P_n(s)[1 - Q(s)]d - Q(s)n)}{P_n(s) + [P(s) - P_n(s)]Q(s)}. \quad (10)$$

设计 $Q(s)$ 时,在 $Q(s)$ 的截止频率范围之内,如果满足 $|Q(j\omega)| \approx 1$,可以有效抑制系统的低频扰动,同时系统的实际模型 $P(s)$ 和标称模型 $P_n(s)$ 之间的差异可以得到补偿;在 $Q(s)$ 的截止频率范围之外,如果满足 $|Q(j\omega)| \approx 0$,则系统的高频测量噪声可以得到很好的抑制.对基于扰动观测器的控制器设计而言,最为关键的是设计低通滤波器 $Q(s)$. Ohnishi^[44]将 $Q(s)$ 设计为一阶滤波器. Umeno等^[45]提出了基于扰动观测器的二自由度控制器,其中滤波器 $Q(s)$ 设计为

$$Q(s) = \frac{1 + \sum_{i=1}^{m-r} a_i(\tau s)^i}{1 + \sum_{i=1}^m a_i(\tau s)^i}. \quad (11)$$

其中: m 表示 $Q(s)$ 的阶次, τ 表示 $Q(s)$ 的时间常数, r 表示 $Q(s)$ 的相对阶.

Yamada等^[46]提出设计高阶扰动观测器可以获得快速的动态响应和对扰动的低灵敏度,但高阶扰动观测器的大相角滞后会带来弱阻尼现象. Choi等^[47]提出了扰动观测器的设计准则,以提高系统的干扰抑制能力和对传感器噪声的抑制能力.

基于模型的鲁棒控制方法如扰动观测器方法和自

适应鲁棒控制方法等通常设计为二环路结构, 如图7所示, 由内环和外环组成. 内环主要设计为干扰补偿器, 称为内环补偿器(internal-loop compensator). 外环设计为控制器, 称为外环控制器(external-loop controller). 内环补偿器通过产生一个控制输入抵消由系统的建模误差、参数变化和外界扰动等带来的不确定性, 使系统的实际模型和标称模型之间的误差趋于零, 保证系统的鲁棒稳定性, 因此该方法称为鲁棒内环补偿器(robust internal-loop compensator, RIC)^[48-49]. 外环控制器的主要作用是保证系统的性能指标. 文献[50]提出了一种基于鲁棒内环补偿器的扰动观测器设计方法, 通过扰动观测器的参数化, 可以得到混合灵敏度最优化的解.

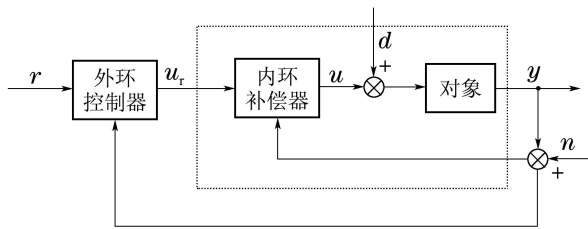


图 7 二环路鲁棒控制系统

Fig. 7 Robust control system with two-loop structure

鲁棒内环补偿器(RIC)的结构如图8所示^[50], 其中: u_r 表示参考控制输入, u 表示控制信号, d 表示外界扰动, y 表示系统输出, n 表示测量噪声, $P(s)$ 表示系统模型, $P_m(s)$ 表示参考模型, $K(s)$ 表示反馈控制器, y_r 表示参考模型输出, e_r 定义为参考模型的输出和实际模型的测量输出之间的模型误差, 控制信号 u 表示为

$$u = u_r + K(s)e_r + \tilde{u}, \quad (12)$$

其中: $K(s)e_r$ 表示采用Lyapunov redesign方法^[51-52]得到的系统反馈控制输入, \tilde{u} 的作用是补偿系统的非线性扰动^[53].

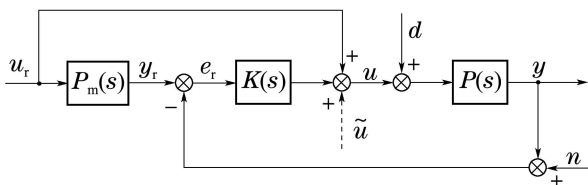


图 8 鲁棒内环补偿器结构

Fig. 8 Robust internal-loop compensator structure

传统的扰动观测器方法能够对外部扰动进行实时估计, 通过在控制信号中引入补偿抵消外部扰动对系统输出的影响, 不足之处在于要求精确的系统模型及其逆模型. Du等^[54]提出了一种广义扰动观测器设计方法, 该方法不需要系统的逆模型, 采用 H_∞ 控制方法

设计扰动观测器的滤波器 $Q(s)$, 并将这种广义扰动观测器设计方法应用于硬盘驱动伺服系统, 实验验证了系统的干扰抑制效果显著.

4.3 自抗扰控制(Active disturbance rejection control (ADRC))

自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)是由中国科学院韩京清研究员最早提出的一种新型的控制策略^[55], 它不依赖于被控对象精确的数学模型, 又具有较强的干扰抑制能力和鲁棒性, 在伺服系统中逐渐得到应用^[56]. 自抗扰控制主要由跟踪微分器(tracking differentiation, TD)、扩张状态观测器(extended state observer, ESO)和非线性比例微分控制律(nonlinear PD, NPD)3个部分组成. 二阶系统自抗扰控制的结构如图9所示. 跟踪微分器的作用是控制过渡过程, 以减少控制过程输出的超调量; 扩张状态观测器是自抗扰控制器的核心部分, 能够对被控系统中含有的非线性、模型不确定性以及外部扰动进行实时观测和动态补偿.

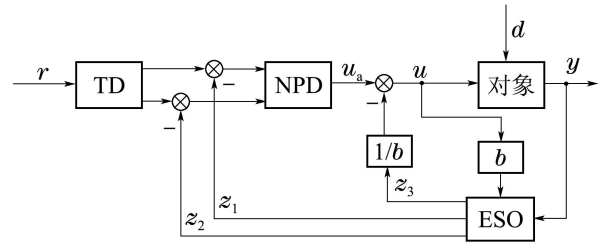


图 9 自抗扰控制的结构

Fig. 9 The structure of ADRC

考虑一个二阶伺服系统^[57], 可以用微分方程表示:

$$\ddot{y} + a_1\dot{y} + a_0y = b_0u. \quad (13)$$

假设系统存在外界扰动和不确定性, 上式可以进一步扩展为

$$\ddot{y} = d - a_1\dot{y} - a_0y + (b_0 - b)u + bu, \quad (14)$$

其中: d 表示外界扰动, $-a_1\dot{y} - a_0y + (b_0 - b)u$ 表示系统的已知或未知特性. 令

$$g(\dot{y}, y, d, u) = d - a_1\dot{y} - a_0y + (b_0 - b)u. \quad (15)$$

将 $g(\dot{y}, y, d, u)$ 简记为 g , 当作系统的未知动态特性, 则系统的动态方程可以表示为

$$\ddot{y} = g + bu. \quad (16)$$

记 $x_1 = y, x_2 = \dot{y}, x_3 = g$, 则式(14)可以表示为状态方程

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu, \\ \dot{x}_3 = \dot{g}. \end{cases} \quad (17)$$

自抗扰控制的核心思想是引入一种状态观测器,

实时估计出系统的未知扰动 g , 自抗扰控制中的扩张状态观测器的状态方程为

$$\begin{cases} e = x_1 - z_1, \\ \dot{z}_1 = z_2 + L_1(e), \\ \dot{z}_2 = z_3 + L_2(e) + bu, \\ \dot{z}_3 = L_3(e), \end{cases} \quad (18)$$

其中: $L_i(e) (i = 1, 2, 3)$ 是关于误差 e 的非线性函数, 选取适当的 $L_i(e)$, 使得 $z_1 \rightarrow x_1, z_2 \rightarrow x_2, z_3 \rightarrow x_3$, 此时若引入控制量

$$u = \frac{u_0 - z_3}{b}, \quad (19)$$

则式(16)转化为

$$\ddot{y} = (g - z_3) + u_0 \approx u_0. \quad (20)$$

扩张状态观测器可以将原系统转化为一个二阶积分系统, 进而可以通过极点配置设计反馈控制律, 使系统达到期望的伺服性能要求. 文献[57]通过仿真和实验验证了大型望远镜天线伺服系统的速度环自抗扰控制算法的有效性, 该算法能够显著提高天线伺服系统的干扰抑制性能.

4.4 H₂控制(H₂ control)

硬盘驱动伺服系统的磁道对准不良(track misregistration, TMR)定义为实际位置误差信号(position error signal, PES)方差的3倍, 即为 $3\sigma_{pes}$. $3\sigma_{pes}$ 误差源主要包括3类: 输入干扰、输出干扰和测量噪声. 输入干扰主要由谐振、振动和摩擦等机械扰动构成. 输出干扰主要由主轴旋转产生的扰动和介质噪声构成. 测量噪声主要由传感器产生. 硬盘驱动伺服控制系统的模型可以表示为如图10所示, 系统反馈控制器设计的目标是抑制外界干扰和测量噪声, 使得位置误差信号(PES)的方差 σ_{pes} 最小.

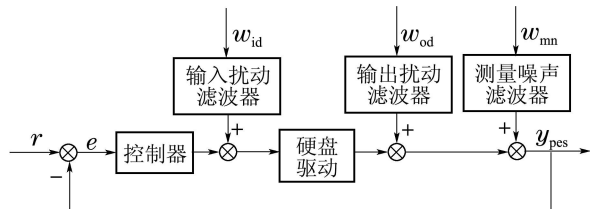


图10 硬盘驱动伺服控制系统

Fig. 10 Hard disk drive servo control system

H₂控制的噪声抑制效果显著, 被广泛应用于硬盘驱动伺服系统, Chang等^[58]提出了 σ_{pes} 的计算方法:

$$\sigma_{pes} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N y_{pes}^2(i)}, \quad (21)$$

其中 N 表示采样数. Li等^[59]将 σ_{pes} 的最小化问题转化为一个辅助系统的等价H₂最优控制问题; Lee^[60]通过设计最优控制器使得硬盘驱动伺服系统的位置误差最小化.

5 跟踪性能和稳定性(Tracking performance and stability)

5.1 PI/PID控制(Proportional integral/proportional integral derivative control)

PI/PID控制具有结构简单、实现容易等优点, 广泛应用于工业过程控制、电机驱动、汽车和飞行控制等方面^[61-63].

标准的PID控制器的时域表达式为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (22)$$

PID控制器的传递函数一般表示为

$$K_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s, \quad (23)$$

或者

$$K_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right), \quad (24)$$

其中: K_p 表示比例增益, K_i 表示积分增益, K_d 表示微分增益, T_i 和 T_d 分别表示积分时间常数和微分时间常数.

PID控制的结构图如图11所示, 比例项的作用是对误差信号 e 提供整体的控制作用, 积分项主要是通过低频积分补偿减小系统的稳态误差, 而微分项则通过高频微分补偿提高系统的暂态响应.

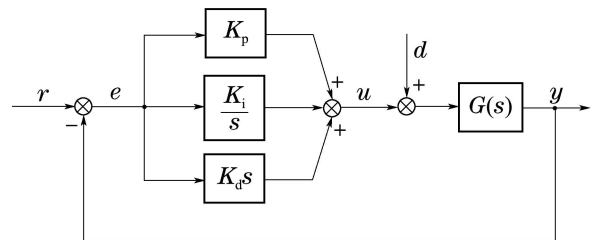


图11 PID控制的结构图

Fig. 11 The structure diagram of PID control

PI/PID控制器调节的常用方法有: Ziegler-Nichols方法^[64]、Cohen-Coon方法^[65]、Refined Ziegler-Nichols方法^[66]、内模控制(internal model control, IMC)方法^[35]、增益和相角裕量(gain and phase margin, GPM)方法^[67-68]等. IMC和GPM方法的调节参数与系统的性能和鲁棒性直接相关^[69]. Ang等^[61]研究了PID控制算法中的比例项P、积分项I和微分项D对闭环系统性能指标的影响, 如表1所示.

表1 PID控制作用下的闭环性能

Table 1 The closed system performances under PID control

闭环响应	上升时间	超调量	调节时间	稳态误差
增大 K_p	减小	增大	稍微增大	减小
增大 K_i	稍微减小	增大	增大	大幅减小
增大 K_d	稍微减小	减小	减小	变化很小

增益裕量和相角裕量是控制系统设计中频率响应常用的性能指标,反映了系统的性能和稳定性. 假设 $G(s)$ 和 $K(s)$ 分别表示对象和控制器的传递函数, A_m 和 ϕ_m 分别表示系统的增益裕量和相角裕量,则采用GPM方法设计的PI/PID控制器需要满足

$$\begin{cases} \arg[G(j\omega_p)K(j\omega_p)] = -\pi, \\ A_m = \frac{1}{|G(j\omega_p)K(j\omega_p)|}, \\ |G(j\omega_g)K(j\omega_g)| = 1, \\ \phi_m = \arg[G(j\omega_g)K(j\omega_g)] + \pi, \end{cases} \quad (25)$$

其中: ω_p 表示系统的相角穿越频率(phase crossover frequency), ω_g 表示系统的增益穿越频率(gain crossover frequency).

Fung等^[68]针对低阶系统提出了一种GPM-PI控制算法,该算法能够满足系统的增益和相角裕量指标要求. Hang等^[69]比较了IMC和GPM两种PI/PID设计方法的优劣,对于高阶系统模型而言,采用GPM-PI/PID方法难以获得式(25)的解析解.

此外,基于极点配置的PID设计方法^[70]在伺服系统中也被广泛应用.但是系统任意配置极点的要求比较苛刻,例如对于单输入单输出(single input single output, SISO)系统而言,要求其等价输出反馈控制器的阶次至少为 $n - 1$ 阶(n 为被控对象的阶次),因此在工程上难以实现.为了克服这个困难,Wang等^[71]提出了一种主导极点配置PID控制算法,设计一种容易实现的低阶控制器(PID控制器)进行主导极点配置,使得闭环系统的性能指标(如调节时间、超调量等)满足系统设计的要求.

考虑如图12所示的反馈控制系统,假设被控对象的传递函数为

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)}. \quad (26)$$

PID控制器的传递函数为

$$K(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s. \quad (27)$$

此时闭环特征方程为

$$1 + K(s)G(s) = 0. \quad (28)$$

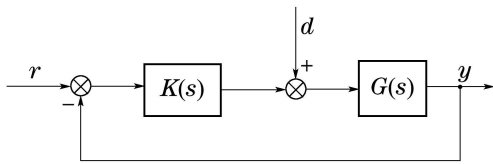


图 12 反馈控制系统

Fig. 12 Feedback control system

一般而言,闭环系统的性能指标如频域指标和时域指标都可以转化为对闭环系统主导极点的要求^[70].假设闭环系统的主导极点为 $\rho_{1,2} = -a \pm bj$,其他极

点与主导极点的实部之比大于或等于 ν (通常 ν 取3~5),将 $\rho_1 = -a + bj$ 代入式(28)可得

$$K_p + \frac{K_i}{-a + bj} + K_d(-a + bj) = -\frac{1}{G(\rho_1)}. \quad (29)$$

上述式(29)是一个复方程,将方程两边按照实部和虚部进行分解,同时把 K_p 作为已知量,可以得到

$$\begin{cases} K_i = \frac{a^2 + b^2}{2a} K_p - (a^2 + b^2) X_1, \\ K_d = \frac{1}{2a} K_p + X_2, \end{cases} \quad (30)$$

其中:

$$X_1 = \frac{1}{2a} \operatorname{Re}\left[\frac{-1}{G(\rho_1)}\right] + \frac{1}{2b} \operatorname{Im}\left[\frac{-1}{G(\rho_1)}\right], \quad (31)$$

$$X_2 = -\frac{1}{2a} \operatorname{Re}\left[\frac{-1}{G(\rho_1)}\right] + \frac{1}{2b} \operatorname{Im}\left[\frac{-1}{G(\rho_1)}\right]. \quad (32)$$

将式(31)和式(32)代入式(28)可得

$$1 + K_p \bar{G}(s) = 0, \quad (33)$$

其中

$$\bar{G}(s) = \frac{N(s)[s^2 + 2as + (a^2 + b^2)]}{2aD(s)s + 2aN(s)[X_2 s^2 - (a^2 + b^2)X_1]}. \quad (34)$$

文献[71]给出了主导极点配置PID控制算法的设计步骤:首先根据系统的性能指标确定闭环主导极点 $\rho_{1,2}$ 和参数 ν ;其次根据式(33)绘制以 K_p 为变量的根轨迹图;然后根据根轨迹图,确定使得闭环系统满足主导极点配置要求的 K_p 的取值范围;最后根据系统的其他性能指标要求,在满足主导极点配置要求的 K_p 的取值范围内选取一个 K_p ,由式(30)求得 K_i 和 K_d .文献[72]针对某微型天线伺服系统,设计了基于主导极点配置的PID控制算法,所设计的控制器具有良好的跟踪性能和鲁棒性.

尽管PI/PID控制在低阶线性系统或系统的伺服性能要求不高的情况下控制效果良好,但是对于高阶系统或带有不确定性和非线性的复杂系统会出现超调量过大、调节时间过长等现象,无法满足伺服系统的性能指标要求. PI/PID控制算法对大口径天线伺服系统和硬盘驱动伺服系统的作用效果欠佳,主要原因是此类伺服系统存在许多高频谐振模态,PI/PID控制算法在提高系统的伺服带宽时也会提高系统的高频增益,激励出系统的高频谐振不确定性,虽然系统的快速性得到显著提高,同时系统的高频振荡也会加剧,从而影响伺服系统的跟踪性能,甚至会破坏系统的稳定性.

5.2 前馈控制(Feed-forward control)

在高精度伺服定位系统中,PID控制等反馈控制方法难以同时满足伺服定位的高精度、快速性以及对立

置的无超调或超调很小,主要原因在于:反馈控制是在系统误差形成之后才起作用,当被控对象存在时延或外界扰动时,反馈控制的作用效果不佳.而前馈控制可以根据实际信号的变化进行调整,能够弥补反馈控制的不足.基于前馈和反馈的复合控制算法能够同时发挥前馈控制和反馈控制的优点,从而广泛应用于高速高精度伺服控制系统^[73].

前馈控制的框图如图13所示, $R(s)$ 表示给定信号, $M(s)$ 表示前馈信号, $H(s)$ 表示反馈信号, $D(s)$ 表示外界扰动信号, $Y(s)$ 表示输出信号.在不考虑外界扰动 $D(s)$ 的作用下,从系统给定信号 $R(s)$ 到系统输出 $Y(s)$ 的闭环传递函数为

$$G_{cl}(s) = \frac{(1 + F(s))G_2(s)G_1(s)}{1 + G_2(s)G_1(s)}. \quad (35)$$

显然,若选择前馈传递函数 $F(s) = \frac{1}{G_2(s)G_1(s)}$ 时,系统的闭环传递函数 $G_{cl}(s) = 1$,即此时系统的输出能够完全复现系统的输入,达到完美的跟踪性能.然而,在实际工程中,伺服系统的模型总会存在非线性、参数变化等不确定性,很难得到理想情况下的前馈模型,一般采用设计合理的控制算法来接近该理想模型.

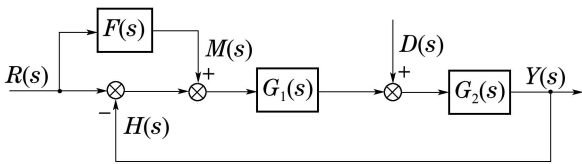


图 13 前馈控制框图

Fig. 13 Diagram of feed-forward control

文献[74]针对电机驱动系统采用基于PID控制和前馈控制,对外界干扰起到了很好的抑制作用;文献[75]指出前馈控制可以用来加速系统的跟踪速度;文献[76]针对位置伺服控制系统提出了一种带速度和加速度前馈控制的位置控制器,获得了很好的跟踪性能.

5.3 带内模的LQG控制(Linear quadratic Gaussian control with internal model)

线性二次型高斯(linear quadratic Gaussian, LQG)控制算法已经广泛应用于伺服系统的控制器设计之中^[25-26,77-79].线性二次型高斯控制问题可以分解成两个子问题:状态估计问题和线性二次最优状态反馈控制问题^[80].

假设被控对象模型的状态方程可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + w, \\ y = Cx + Du + v, \end{cases} \quad (36)$$

其中: w 表示强度为 W 的过程噪声, v 表示强度为 V 的测量噪声, w 和 v 不相关且满足: $E(w) = 0, E(wv^T) =$

$W, E(wv^T) = 0, E(v) = 0, E(vv^T) = V$. 首先需要求得使协方差阵 $E[(x - \hat{x}][x - \hat{x}]^T)$ 最小化的状态最优估计 \hat{x} , 然后用估计的状态 \hat{x} 取代原系统的状态 x , 则LQG控制问题可以简化为一般的线性二次最优控制问题.

估计器的状态方程可以表示为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K_f(y - \hat{y}), \\ \hat{y} = C\hat{x} + Du. \end{cases} \quad (37)$$

Kalman滤波器的增益 $K_f = P_f C^T V^{-1}$, 其中 P_f 满足代数Riccati方程

$$P_f A^T + A P_f - P_f C^T V^{-1} C P_f + W = 0. \quad (38)$$

获得系统的状态估计 \hat{x} 后, 得到最优控制 $u = -K_c \hat{x}$, 最优状态反馈增益 $K_c = R^{-1} B^T P_c$, 其中 P_c 满足代数Riccati方程

$$A^T P_c + P_c A - P_c B R^{-1} B^T P_c + Q = 0. \quad (39)$$

控制器(输入为 y , 输出为 u)的状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = (A - BK_c - K_f C + K_f DK_c)\hat{x} + K_f y, \\ u = -K_c \hat{x}. \end{cases} \quad (40)$$

因此伺服系统的LQG控制器的状态空间描述 $(A_{lqg}, B_{lqg}, C_{lqg})$ 为

$$\begin{cases} A_{lqg} = A - BK_c - K_f C + K_f DK_c, \\ B_{lqg} = K_f, \\ C_{lqg} = -K_c. \end{cases} \quad (41)$$

Xu等^[81]提出了一种鲁棒LQG控制算法, 该算法能够改善硬盘驱动伺服系统的振动补偿问题. Suh等^[82]针对硬盘驱动伺服系统的高带宽要求, 提出了一种新的线性二次型高斯/回路传输恢复(LQG/loop transfer recovery, LQG/LTR)设计方法, 能够同时满足系统的带宽要求和鲁棒稳定性. 在伺服系统的LQG控制算法设计中, 考虑跟踪问题时, 可以在前向通道中加入一个内模, 使得伺服系统实现零误差跟踪^[83]. 带内模的LQG控制系统如图14所示, 其中: r 为给定信号, u 为控制输入, y 表示系统的输出, \hat{x} 表示系统的估计状态, \hat{y} 表示估计输出, e 表示伺服误差.

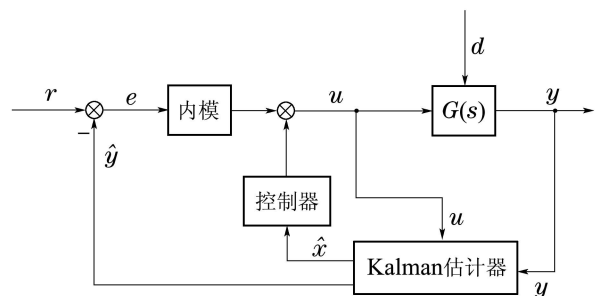


图 14 带内模的LQG控制系统

Fig. 14 LQG control system with internal model

6 基于性能和鲁棒稳定性的综合设计(Integrated design based on performance and robust stability)

6.1 混合灵敏度 H_∞ 控制(Mixed-sensitivity H_∞ control)

伺服系统的控制器设计主要考虑的问题包括系统的干扰抑制性能、跟踪性能和鲁棒稳定性. 在大多数情况下, 干扰的频带范围是未知的或者不确定的, 此时需要通过提高系统的伺服带宽来增强对干扰的抑制能力. 文献[84]提出在性能指标中的某频率范围内加入控制输入的权重函数, 使得给定信号激励的机械谐振模式更弱, 提高系统的跟踪性能. 文献[85-89]研究了 H_∞ 控制和混合灵敏度 H_∞ 等鲁棒控制设计方法, 提高系统的伺服性能, 同时保证系统的鲁棒稳定性.

考虑一个 SISO 线性时不变伺服系统, 系统的输入和输出之间的关系可以用传递函数 $G(s)$ 表示, 或者用状态空间模型

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu, \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (42)$$

表示, 其中: $x \in \mathbb{R}^n$ 表示系统的状态, $u \in \mathbb{R}$ 表示控制信号, $y \in \mathbb{R}$ 表示系统的输出, 系统矩阵 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $C \in \mathbb{R}^{1 \times n}$, $D \in \mathbb{R}$.

伺服系统的混合灵敏度设计框图如图 15 所示, $W_1(s)$, $W_2(s)$ 和 $W_3(s)$ 表示权重函数, z_1 , z_2 和 z_3 表示权重输出.

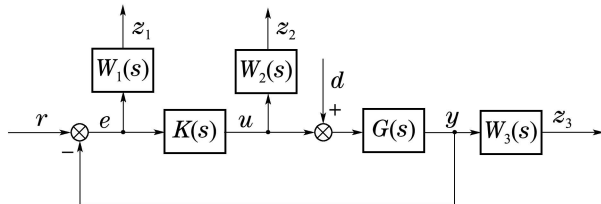


图 15 混合灵敏度设计

Fig. 15 Mixed-sensitivity design

定义系统的灵敏度函数为

$$S(s) = (1 + G(s)K(s))^{-1}. \quad (43)$$

定义系统的补灵敏度函数为

$$T(s) = G(s)K(s)(1 + G(s)K(s))^{-1}. \quad (44)$$

系统控制器设计的目标是: 设计一个可镇定控制器 $K(s) \in \mathbb{RH}_\infty$, 使得闭环系统混合灵敏度函数的 H_∞ 范数最小, 数学描述为

$$\min_{K(s) \in \mathbb{RH}_\infty} \left\| \begin{matrix} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)K(s)S(s) \\ W_3(s)T(s) \end{matrix} \right\|_\infty. \quad (45)$$

实际设计过程中一般采用迭代法寻找一个次优的控制器 $K(s) \in \mathbb{RH}_\infty$, 使得对于一个给定的任意小的参

数 γ , 系统混合灵敏度函数的 H_∞ 范数满足

$$\left\| \begin{matrix} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)K(s)S(s) \\ W_3(s)T(s) \end{matrix} \right\|_\infty < \gamma. \quad (46)$$

$W_1(s)$, $W_2(s)$ 和 $W_3(s)$ 为可以选择的权重函数, 在混合灵敏度设计中起到十分重要的作用. 文献[90-91]研究了混合灵敏度 H_∞ 设计中权重函数的选择问题. 权重函数的选择会影响伺服系统的跟踪性能、干扰抑制性能和鲁棒稳定性. $W_1(s)$ 表示对系统跟踪误差的惩罚函数, 同时可以抑制系统的低频扰动. $W_2(s)$ 反映系统控制信号的大小和带宽, 系统的穿越频率越大, 会使得控制器的增益越高, 因此选择合适的权重函数 $W_2(s)$ 可以对控制信号加以约束. $W_3(s)$ 决定系统高频特性的衰减程度, 选择合适的权重函数 $W_3(s)$ 可以约束系统的高频不确定性对系统性能的影响, 保证系统的鲁棒稳定性. 混合灵敏度函数的整形可以反映闭环系统的伺服性能. 伺服系统混合灵敏度函数的 H_∞ 范数越小, 意味着闭环系统的伺服误差越小, 控制信号越小, 且稳定裕量越大^[92-93].

设计控制器 $K(s)$ 使得伺服系统混合灵敏度函数的 H_∞ 范数最小的目的是尽可能提高系统的伺服带宽. 闭环系统的带宽越高, 系统的高频特性衰减越快. 然而, 系统的伺服带宽受到一些内在因素的约束. 假设系统的传递函数 $G(s)$ 和控制器 $K(s)$ 都是稳定的和严真的, 灵敏度函数 $S(s)$ 需要满足 Bode 灵敏度积分公式

$$\int_0^\infty \ln |S(j\omega)| d\omega = 0. \quad (47)$$

Bode 灵敏度积分公式表明: 若系统的灵敏度函数 $S(s)$ 的幅值在一段频率范围内小于 1, 必然存在另外一段频率范围使得其幅值大于 1, 此即为鲁棒控制领域著名的水床效应^[94], 如图 16 所示. 在实际工程中, 一般考虑采用有限频率范围的灵敏度积分公式, 例如在天线伺服系统的混合灵敏度 H_∞ 控制算法设计中, 如图 17 所示, 系统的伺服带宽 ω_b 受到天线结构的第一个高频谐振频率 ω_1 的约束. Erm 等^[95]给出了工程应用中的灵敏度积分公式

$$\int_0^{\omega_1} \ln |S(j\omega)| d\omega = 0 + \eta, \quad (48)$$

其中 η 是系统伺服带宽 ω_b 的函数^[95].

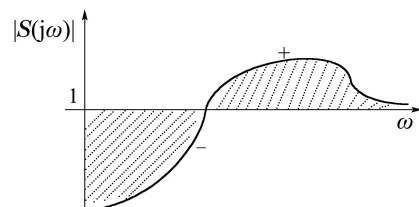
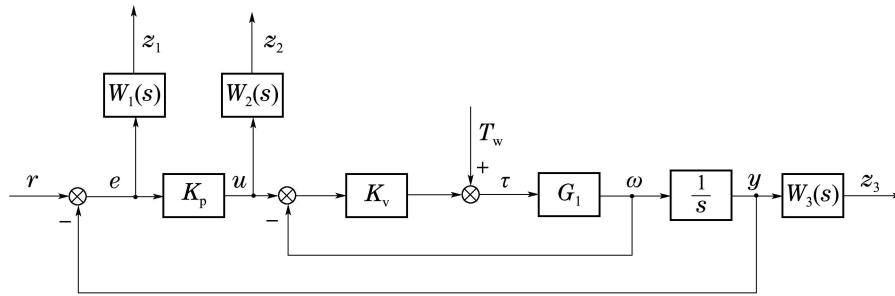


图 16 水床效应

Fig. 16 Water bed effect

图 17 天线伺服系统的混合灵敏度 H_∞ 控制算法设计Fig. 17 Mixed-sensitivity H_∞ control algorithm design of antenna servo system

灵敏度函数 $S(s)$ 在低频段的特性反映了伺服系统的干扰抑制性能和跟踪性能,而补灵敏度函数 $T(s)$ 在高频段的特性反映了系统的高频振荡和鲁棒稳定性. 灵敏度函数 $S(s)$ 和补灵敏度函数 $T(s)$ 之和满足

$$S(s) + T(s) = 1. \quad (49)$$

因此无法做到使两者都最小,为了满足伺服系统的性能指标要求,控制工程师需要在系统的性能和稳定性之间折衷处理.

6.2 基于广义KYP引理的设计方法(Generalized KYP lemma-based design method)

在给定系统的性能指标要求的情况下,机械控制系统设计主要包括对象设计和控制器设计两个步骤. 传统的设计方法首先设计满足刚度和强度等要求的对象,然后针对该对象设计控制器,这样设计得到的机械控制系统通常不是最优的. 文献[96–97]提出了一种对象和控制器参数的同步优化算法;文献[98]提出了一种新的对象/控制器综合设计方法,不同于以往的对象/控制器参数同步最优化方法,该方法设计的对象能够保证满足闭环系统性能要求的最优控制器的存在,因此,一旦设计出这种对象,就可以将标准的最优控制方法应用于整个设计过程. 文献[98]从最小相位(minimum phase)、同相(in phase)性质和正实(positive real)性质等方面研究了伺服控制系统的性能极限问题.

定义 1 若系统的传递函数 $G(s)$ 的最小实现 $C(sI - A)^{-1}B + D$ 没有开右半平面的极点或不变零点,则系统是最小相位的.

注 1 最小相位性质是反馈控制领域一个非常重要的性质,系统的右半平面零点(非最小相位零点)会对系统的性能产生约束^[99–101].

定义 2 若系统的矩阵传递函数 $G(s)$ 满足

$$G(s) + G(s)^* \geq 0, \forall s \in \mathbb{C}_+ \setminus P_G \quad (50)$$

成立,则系统是正实的. \mathbb{C}_+ 表示复平面上的闭右半平面, P_G 表示由 $G(s)$ 的极点构成的集合.

定义 3 若单输入单输出系统

$$G(s) = \frac{k_0}{s} + \sum_{i=1}^m \frac{k_i}{s^2 + 2\zeta_i\omega_i s + \omega_i^2} \quad (51)$$

的系数 $k_0 > 0$,且对于所有的 $i, 0 \leq \zeta_i < 1, 0 \leq \omega_i < \omega_{i+1}$;若谐振模态系数 k_i 与 k_0 符号相同,即 $k_i > 0$,则系统是同相的.

文献[102–103]指出伺服系统具有同相性质时,系统的伺服性能更好,稳定裕量更大,干扰抑制能力更强.

引理 1 传递函数 $G(s)$ 是正实的,当且仅当满足以下条件^[104]:

- 1) $G(s)$ 没有开右半平面的极点;
- 2) $G(s)$ 若含有 $j\mathbb{R}$ 轴上的极点,则该极点是单根,且对应的留数矩阵是Hermitian半正定的;
- 3) $G(j\omega) + G(j\omega)^* \geq 0, \forall j\omega \in j\mathbb{R} \setminus P_G$.

在实际工程中,执行器和传感器的缺陷会给系统的伺服带宽带来约束. 因此,在整个频率范围内要求正实性质和同相性质难以做到. 文献[98]将引理1的全频率范围的正实性推广到有限频率范围的正实性(finite frequency positive realness).

定义 4 若系统的传递函数 $G(s)$ 满足引理1的条件1)–3),且 $j\mathbb{R}$ 由 $j\bar{\Omega}$ 替代,其中

$$\bar{\Omega} = \{\omega \in \mathbb{R} : |\omega| \leq \omega_b\}, \quad (52)$$

则称 $G(s)$ 在带宽范围 ω_b 内是有限频率正实的.

文献[105–106]以伺服系统为例,指出系统的最大控制带宽与传递函数 $G(s)$ 的正实性有关, $G(s)$ 在有限频率范围 $\omega \leq \omega_b$ 内的正实性意味着系统在有限控制作用下能够获得带宽 ω_b .

KYP引理是系统分析、反馈控制系统设计和信号处理领域的一个重要结论,KYP引理建立了系统传递函数的频域不等式(frequency domain inequa-

lity, FDI)和系统状态空间实现上的线性矩阵不等式 (linear matrix inequality, LMI)之间的等价关系.

引理 2 KYP引理^[107]. 给定矩阵 A 和 B , 以及 Hermitian 矩阵 Θ , 频域不等式

$$\begin{bmatrix} (j\omega I - A)^{-1}B \\ I \end{bmatrix}^* \Theta \begin{bmatrix} (j\omega I - A)^{-1}B \\ I \end{bmatrix} < 0. \quad (53)$$

对于所有的 $\omega \in \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ 都成立, 当且仅当线性矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} A & B \\ I & 0 \end{bmatrix}^* \begin{bmatrix} 0 & P \\ P & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ I & 0 \end{bmatrix} + \Theta < 0 \quad (54)$$

存在一个 Hermitian 解 P .

注 2 KYP引理将式(53)表示的关于参数 ω 的无限维不等式转化为式(54)表示的有限维凸优化可行性解的问题, 其中矩阵 Θ 与系统的正实性质和有界实性质有关^[108-109].

在实际工程应用中, 伺服系统的设计指标一般针对某个频率范围. 例如, 要求灵敏度函数 $S(s)$ 在低频范围内越小越好, 要求补灵敏度函数 $T(s)$ 在高频范围内越小越好, 即整个设计指标在不同频率范围内有不同的要求. 标准的 KYP 引理中的频域不等式针对的是整个频率范围, 文献[108]将标准的 KYP 引理推广到有限频率范围内的 KYP 引理.

引理 3 给定复数矩阵 $A \in \mathbb{C}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{C}^{n \times m}$, Hermitian 矩阵 $\Theta \in \mathbb{C}^{(n+m) \times (n+m)}$, 以及正数标量 ϖ . 假设 (A, B) 是可控制的, 则以下结论是等价的^[108]:

1) 有限频率不等式

$$\begin{bmatrix} (j\omega I - A)^{-1}B \\ I_m \end{bmatrix}^* \Theta \begin{bmatrix} (j\omega I - A)^{-1}B \\ I_m \end{bmatrix} \leq 0, \quad (55)$$

$\forall \omega \in \Omega$ 都成立, 其中

$$\Omega = \{\omega \in \mathbb{R} : \det(j\omega I - A) \neq 0, |\omega| \leq \varpi\}. \quad (56)$$

2) 存在 $n \times n$ 维 Hermitian 矩阵 P 和 Q 满足 $Q \geq 0$, 且

$$\begin{bmatrix} A & B \\ I_n & 0 \end{bmatrix}^* \begin{bmatrix} -Q & P \\ P & \varpi^2 Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ I_n & 0 \end{bmatrix} + \Theta \leq 0. \quad (57)$$

引理 4 假设伺服系统的灵敏度函数 $S(s) = \tilde{C}(sI - \tilde{A})^{-1}\tilde{B} + \tilde{D}$, 且 \tilde{A} 是稳定的. 对于一个给定的标量 $r > 0$, 若在有限频率范围内 $|S(s)| \leq r$, 则当且仅当存在 Hermitian 矩阵 P 和 $Q \geq 0$ 满足^[110-111]

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{A} & \tilde{B} \\ I & 0 \end{bmatrix}^* \\ \begin{bmatrix} \tilde{C} & \tilde{D} \\ -I \end{bmatrix} \end{bmatrix} \Sigma \begin{bmatrix} \tilde{A} & \tilde{B} \\ I & 0 \end{bmatrix} + V \begin{bmatrix} \tilde{C} & \tilde{D} \\ -I \end{bmatrix}^* \leq 0, \quad (58)$$

其中

$$V = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -r^2 \end{bmatrix}, \quad (59)$$

且

1) 低频范围 $|\omega| \leq \omega_1$ 内,

$$\Sigma = \begin{bmatrix} -Q & P \\ P & \omega_1^2 Q \end{bmatrix}. \quad (60)$$

2) 中频范围 $\omega_1 \leq |\omega| \leq \omega_2$ 内,

$$\Sigma = \begin{bmatrix} -Q & P + j\omega_c Q \\ P - j\omega_c Q & -\omega_1 \omega_2 Q \end{bmatrix}. \quad (61)$$

此处 $\omega_c = (\omega_1 + \omega_2)/2$.

3) 高频范围 $|\omega| \geq \omega_h$ 内,

$$\Sigma = \begin{bmatrix} Q & P \\ P & -\omega_h^2 Q \end{bmatrix}. \quad (62)$$

假设伺服系统对象的状态空间模型为 $P(s) = (A_p, B_p, C_p, D_p)$, 控制器的状态空间模型为 $C(s) = (A_c, B_c, C_c, D_c)$, 系统灵敏度函数的状态空间模型 $S(s) = (\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}, \tilde{D})$. 对于一个给定的控制器, 有限频率范围内的性能指标要求 $|S(s)| \leq r$ 可以通过引理4转化为线性矩阵不等式. 然而, 在实际的伺服控制系统设计中, $C(s)$ 为待设计的控制器, 且系统的灵敏度函数 $S(s)$ 中的 \tilde{A} 和 \tilde{B} 含有未知参数 A_c, B_c, C_c 和 D_c , 因此式(58)通常不是线性矩阵不等式. 针对此种情况, 文献[111]采用 Youla 参数化方法设计控制器 $C(s)$, 并给出了基于广义 KYP 引理和 Youla 参数化的控制器设计步骤, 通过 Youla 参数化方法设计的动态反馈控制器, 能够同时满足系统的稳定性和伺服性能要求.

7 其他先进控制算法(Other advanced control algorithms)

随着对伺服系统的性能要求越来越高, 双极驱动控制(dual-stage drive control)算法得到了广泛应用^[112-117]. 双极驱动控制中的初调驱动器主要控制低频范围的大位移运动, 精调驱动器则控制高频范围内的小位移运动. 相比单级驱动控制, 双极驱动控制对提高系统的伺服带宽作用效果更加显著.

在伺服系统的控制算法设计中, 有时需要考虑特定频段的干扰抑制问题, 即干扰的频率范围是已知的或者能观测的, 例如指向误差中的轨迹变形产生的干扰等, 迭代学习控制(iterative learning control)^[118]和相位调节谐振补偿器(phase adjustable resonant compensators)^[119]等控制算法可用于此类干扰抑制问题. 传统的窄带干扰(narrowband disturbance)主要采用峰值滤波器(peak filter)进行抑

制,文献[120]提出了一种混合控制技术(blending control technique),能够同时抑制硬盘驱动伺服系统的多个窄带扰动。

文献[121]提出了基于陷波器的线性反馈控制设计问题。文献[122]针对硬盘驱动系统采用遗传算法(genetic algorithm)设计了一种二自由度鲁棒控制器。文献[123]提出一种自适应算法,能够辨识系统的不确定性和时变谐振模态,并通过设计峰值滤波器达到自适应扰动抑制效果。文献[124–125]提出了一种基于等价输入干扰(equivalent input disturbance, EID)的扰动估计方法,有效提高了伺服系统的干扰抑制性能。

8 结论与展望(Conclusions and prospects)

综上所述,本文以天线伺服系统和硬盘驱动伺服系统为例,阐述了伺服控制系统中普遍存在的高频谐振、带宽约束和外界扰动等共性问题,并从系统的干扰抑制、跟踪性能和鲁棒稳定性等问题的角度,归纳了伺服控制系统主要的控制器设计方法。众所周知,如果伺服系统的外界扰动完全已知或者能够直接测量,可以采用前馈控制或者加入扰动信号对应的内模能够很好地抑制系统的外界扰动^[33,126],保证系统的跟踪性能和鲁棒稳定性。然而,在大多数情况下,无法获得伺服系统精确的外界扰动信号的特征,因此难以采用一种有效的控制算法达到完美的扰动抑制效果。例如在车载动中通天线伺服系统中,道路的颠簸会给天线伺服系统带来随机干扰,且难以直接获得由道路颠簸产生的外界扰动的频率特征,此时需要采用先进的扰动估计方法和伺服控制算法才能有效抑制外界扰动,满足车载天线伺服系统的高精度指向要求。因此,如何设计先进的控制算法提高伺服系统的带宽,从而有效地抑制这些扰动,提高伺服系统的稳态和动态性能指标将成为伺服控制系统设计研究人员和工程师需要面临的挑战。与此同时,伺服系统的高频谐振会限制系统带宽的提高和影响系统的稳定性,如何折衷处理伺服系统的性能和鲁棒稳定性也是研究重点。

伺服控制算法是决定伺服系统性能的关键技术,各种控制算法都有其优点和缺点。例如PI/PID控制主要适用于低阶系统和伺服性能要求不高的情况;前馈控制对伺服系统的参数依赖性较大;自适应控制对非线性系统控制效果欠佳,鲁棒性受到限制; H_∞ 控制的计算量大,不利于在线实时控制等。因此单一的控制算法难以达到理想的控制效果,将各种控制算法取长补短,形成复合控制,才能有效

地提高整个伺服系统的性能,复合控制将成为未来伺服系统控制算法设计发展的趋势。

参考文献(References):

- [1] GAWRONSKI W. *Modeling and Control of Antennas and Telescopes* [M]. New York, USA: Springer, 2008.
- [2] CHEN B M, LEE T H, PENG K M, et al. *Hard Disk Drive Servo Systems* [M]. Berlin, Germany: Springer, 2006.
- [3] GAWRONSKI W. Control and pointing challenges of large antennas and telescopes [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(2): 276 – 289.
- [4] GAWRONSKI W. Modeling wind-gusts disturbances for the analysis of antenna pointing accuracy [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2004, 46(1): 50 – 58.
- [5] ABRAMOVITCH D, FRANKLIN G. A brief history of disk drive control [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2002, 22(3): 28 – 42.
- [6] MESSNER W, EHRLICH R. A tutorial on controls for disk drives [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. Arlington, USA: IEEE, 2001, 6: 408 – 420.
- [7] MAMUN A A, GUO G X, BI C. *Hard Disk Drive Mechatronics and Control* [M]. New Jersey, America: CRC Press, 2007.
- [8] EHRLICH R, ADLER J, HINDI H. Rejecting oscillatory, non-synchronous mechanical disturbances in hard disk drives [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2001, 37(2): 646 – 650.
- [9] KIM C, KANG C, TOMIZUKA M. Adaptive and optimal rejection of non-repeatable disturbance in hard disk drives [C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Monterey, USA: IEEE, 2005, 7: 1 – 6.
- [10] HARA S, YAMAMOTO Y, OMATO T, et al. Repetitive control system: a new type servo system for periodic exogenous signals [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1988, 33(7): 659 – 668.
- [11] SACKS A H, BODSON M, MESSNER W. Advanced methods for repeatable runout compensation [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1995, 31(2): 1031 – 1036.
- [12] STEINBUCH M. Repeative control for systems with uncertain period-time [J]. *Automatica*, 2002, 38(12): 2103 – 2109.
- [13] FUJIMOTO H, KAWAKAMI F, KONDO S. Repetitive control of hard disk drives based on switching scheme: experimental verification for multiple mode disturbance [C] // *Proceedings of the IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*. Kawasaki, Japan: IEEE, 2004, 3: 323 – 328.
- [14] KOBAYASHI M, NAKAGAWA S, ATSUMI T, et al. High-bandwidth servo control designs for magnetic disk drives [C] // *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Como, Italy: IEEE, 2001, 7: 1124 – 1129.
- [15] MESSNER W. Some advances in loop shaping controller design with applications to disk drives [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2001, 37(2): 651 – 656.
- [16] BEGHI A, OBOE R, CAPRETTA P, et al. Loop shaping issues in hard disk drive servo system design [C] // *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Como, Italy: IEEE, 2001, 7: 828 – 832.
- [17] FRANKLIN G F, POWELL J D, WORKMAN M L. *Digital Control of Dynamic Systems* [M]. Boston, USA: Addison-Wesley, 1998.
- [18] SINHA N K, KUSZTA B. *Modeling and Identification of Dynamic Systems* [M]. New York, USA: Van Nostrand Reinhold Company, 1983.
- [19] LJUNG L. *System Identification: Theory for the User* [M]. Englewood Cliffs, USA: Prentice Hall, 1987.
- [20] EYKHOFF P. *System Identification: Parameter and State Estimation* [M]. New York, USA: John Wiley, 1981.

- [21] HSIA T C. *System Identification* [M]. Lexington, USA: Lexington Books, 1977.
- [22] KOLLAR I. On frequency-domain identification of linear systems [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1993, 42(1): 2 – 6.
- [23] GAWRONSKI W, SOUCCAR K. Control systems of the large millimeter telescope [C] // *SPIE Semiconductor Lasers and Laser Dynamics*. Strasbourg, France: SPIE, 2004, 4: 104 – 115.
- [24] JIMENEZ-GARCIA S, MAGANA M E, BENITEZ-READ J S, et al. Modelling, simulation, and gain scheduling control of large radiotelescopes [J]. *Simulation Practice and Theory*, 2000, 8(3/4): 141 – 160.
- [25] GAWRONSKI W. *Advanced Structural Dynamics, and Active Control of Structures* [M]. New York, USA: Springer, 2004.
- [26] GAWRONSKI W, RACHO C, MELLSTROM J. Application of the LQG and feedforward controllers to the deep space network antennas [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1995, 3(4): 417 – 421.
- [27] PANG C K, LEWIS F. System identification of modal parameters in dual-stage hard disk drives [C] // *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Control and Automation*. Christchurch, New Zealand: IEEE, 2009, 12: 603 – 608.
- [28] YAMAGUCHI T. Modelling and control of a disk file head-positioning system [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2001, 215(6): 549 – 568.
- [29] ATSUMI T, ARISAKA T, SHIMIZU T, et al. Head-positioning control using resonant modes in hard disk drives [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2005, 10(4): 378 – 384.
- [30] GAWRONSKI W, BIENKIEWICZ B, HILL R E. Wind-induced dynamics of a deep space network antenna [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1994, 178(1): 67 – 77.
- [31] GAWRONSKI W, MELLSTROM J, BIENKIEWICZ B. Antenna mean wind torques: a comparison of field and wind-tunnel data [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2005, 47(5): 55 – 59.
- [32] ANGELI G Z, CHO M K, SHEEHAN M, et al. Characterization of wind loading of telescope [C] // *Proceedings of SPIE, Workshop on Integrated Modeling of Telescopes*. Lund, Sweden: SPIE, 2002, 2: 72 – 83.
- [33] DORATO P, ABDALLAH C T, CERONE V. *Linear Quadratic Control: an Introduction* [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1995.
- [34] GARCIA C E, MORARI M. Internal model control. 1. A unifying review and some new results [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1982, 21(2): 308 – 323.
- [35] LI H W. Study on the servo system of large telescope based on the internal model PID control strategy [C] // *Proceedings of the 10th International Conference on Electronic Measurement and Instruments*. Chengdu, China: IEEE, 2011, 8: 68 – 72.
- [36] ALCANTARA S, PEDRET C, VILANOVA R. On the model matching approach to PID design: analytical perspective for robust servo/regulator tradeoff tuning [J]. *Journal of Process Control*, 2010, 20(5): 596 – 608.
- [37] LEE T H, LOW T S, AL-MAMUN A, et al. Internal model control (IMC) approach for designing disk drive servo-controller [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1995, 42(3): 248 – 256.
- [38] WHITE M T, TOMIZUKA M, SMITH C. Improved track following in magnetic disk drives using a disturbance observer [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2000, 5(1): 3 – 11.
- [39] TEFAYE A, LEE H S, TOMIZUKA M. A sensitivity optimization approach to design of a disturbance observer in digital motion control systems [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2000, 5(1): 32 – 38.
- [40] OHNISHI K, SHIBATA M, MURAKAMI T. Motion control for advanced mechatronics [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1996, 1(1): 56 – 67.
- [41] KEMPF C J, KOBAYASHI S. Disturbance observer and feedback design for a high-speed direct-drive positioning table [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1999, 7(5): 513 – 526.
- [42] CHOI H T, KIM B K, SUH I H, et al. Design of robust high-speed motion controller for a plant with actuator saturation [J]. *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 2000, 122(3): 535 – 541.
- [43] LEE K B, BLAABJERG F. Robust and stable disturbance observer of servo system for low-speed operation [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2007, 43(3): 627 – 635.
- [44] OHNISHI K. A new servo method in mechatronics [J]. *Transactions of the Japanese Society of Electrical Engineering*, 1987, 107-D(1): 83 – 86.
- [45] UMENO T, KANEKO T, HORI Y. Robust servo system design with two degrees of freedom and its application to novel motion control of robot manipulators [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1993, 40(5): 473 – 485.
- [46] YAMADA K, KOMADA S, ISHIDA M, et al. Analysis and classical control design of servo system using high order disturbance observer [C] // *Proceedings of the 23th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*. New Orleans, USA: IEEE, 1997, 11: 4 – 9.
- [47] CHOI Y, YANG K, CHUNG W K, et al. On the robustness and performance of disturbance observers for second-order systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(2): 315 – 320.
- [48] KIM B K, CHUNG W K, CHOI H T, et al. Robust internal loop compensator design for motion control of precision linear motor [C] // *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Bled, Slovenia: IEEE, 1999, 7: 1045 – 1050.
- [49] KIM B K, CHUNG W K, LEE H S, et al. Robust time optimal controller design for hard disk drives [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1999, 35(5): 3598 – 3600.
- [50] KIM B K, CHUNG W K. Advanced disturbance observer design for mechanical positioning systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2003, 50(6): 1207 – 1216.
- [51] KHALIL H K. *Nonlinear Systems* [M]. New York: Macmillan, 1992.
- [52] KIM B K, CHUNG W K. Performance predictable design of robust motion controllers for high-precision servo systems [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. Arlington, USA: IEEE, 2001, 6: 2249 – 2254.
- [53] KIM B K, CHUNG W K, SUH I H. Performance tuning of sliding mode controllers: structural analysis approach [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. Arlington, USA: IEEE, 2001, 6: 1513 – 1518.
- [54] DU C L, LI H, THUM C K, et al. A novel disturbance observer design and application in HDDs for disturbance compensation [C] // *Proceedings of the IEEE Region 10 Annual International Conference*. Singapore: IEEE, 2009, 11: 1 – 6.
- [55] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用 [J]. *控制与决策*, 1998, 13(1): 19 – 23.
(HAN Jingqing. Auto-disturbances-rejection controller and its applications [J]. *Control and Decision*, 1998, 13(1): 19 – 23.)
- [56] TIAN G, GAO Z Q. Frequency response analysis of active disturbance rejection based control system [C] // *116th IEEE International Conference on Control Applications, Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control*. Singapore: IEEE, 2007, 10: 1595 – 1599.
- [57] 王帅, 李洪文, 孟浩然, 等. 光电望远镜伺服系统速度环的自抗扰控制 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2442 – 2449.

- (WANG Shuai, LI Hongwen, MENG Haoran, et al. Active disturbance rejection controller for speed-loop in telescope servo system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10): 2442 – 2449.)
- [58] CHANG J K, WEERASOORIYA S, HO H T. Improved TMR budget through a frequency shaped servo design [C] // *Proceedings of the 23rd International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*. New Orleans, USA: IEEE, 1997, 11: 47 – 51.
- [59] LI Z, GUO G, CHEN B M, et al. Optimal track-following design for the highest tracks per inch in hard disk drives [J]. *Journal of Information Storage and Processing Systems*, 2001, 3(1/2): 27 – 41.
- [60] LEE H S. Controller optimization for minimum position error signals of hard disk drives [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2001, 48(5): 945 – 950.
- [61] ANG K H, CHONG G, LI Y. PID control system analysis, design, and technology [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005, 13(4): 559 – 576.
- [62] ASTROM K J, HAGGLUND T. The future of PID control [J]. *Control Engineering Practice*, 2001, 9(11): 1163 – 1175.
- [63] ASTROM K J, HAGGLUND T. *Advanced PID Control* [M]. North Carolina, USA: ISA-Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2005.
- [64] ZIEGLER J G, NICHOLS N B. Optimum settings for automatic controllers [J]. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 1942, 64(6): 759 – 768.
- [65] COHEN G H, COON G A. Theoretical consideration of retarded control [J]. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 1953, 75(3): 827 – 834.
- [66] HANG C C, ASTROM K J, HO W K. Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula [J]. *Control Theory and Applications, IEE Proceedings D*, 1991, 138(2): 111 – 118.
- [67] HO W K, HANG C C, CAO L S. Tuning of PID controllers based on gain and phase margin specifications [J]. *Automatica*, 1995, 31(3): 497 – 502.
- [68] FUNG H W, WANG Q G, LEE T H. PI tuning in terms of gain and phase margins [J]. *Automatica*, 1998, 34(9): 1145 – 1149.
- [69] HANG C C, HO W K, CAO L S. A comparison of two design methods for PID controllers [J]. *ISA Transactions*, 1994, 33(2): 147 – 151.
- [70] ASTROM K J, HAGGLUND T. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning* [M]. North Carolina, USA: ISA-Instrumentation, Systems, and Automation Society, 1995.
- [71] WANG Q G, ZHANG Z P, ASTROM K J, et al. Guaranteed dominant pole placement with PID controllers [J]. *Journal of Process Control*, 2009, 19(2): 349 – 352.
- [72] 刘艳, 李银伢, 戚国庆. 微型天线伺服系统保主导极点配置控制器设计 [J]. *电光与控制*, 2011, 18(6): 79 – 84.
(LIU Yan, LI Yinya, QI Guoqing. Design of controllers with guaranteed dominant pole placement for miniaturized antenna servo system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2011, 18(6): 79 – 84.)
- [73] WANG Y, XIONG Z H, DING H. Robust internal model control with feedforward controller for a high-speed motion platform [C] // *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Edmonton, Canada: IEEE, 2005, 8: 2035 – 2040.
- [74] HOSSAIN S A, HUSAIN I. Outer loop controller design of a switched reluctance motor driven system [C] // *2003 IEEE Industry Applications Conference*. Salt Lake City, USA: IEEE, 2003, 10: 486 – 491.
- [75] LEE H S, TOMIZUKA M. Robust motion controller design for high-accuracy positioning systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1996, 43(1): 48 – 55.
- [76] 胡庆波, 吕征宇. 全数字伺服系统中位置前馈控制器的设计 [J]. *电气传动*, 2005, 35(5): 24 – 27.
(HU Qingbo, LÜ Zhengyu. Feed-forward position controller design of full-digitalized servo system [J]. *Electric Drive*, 2005, 35(5): 24 – 27.)
- [77] GAWRONSKI W. Linear quadratic controller design for the deep space network antennas [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1994, 17(4): 655 – 660.
- [78] MANERI E, GAWRONSKI W. LQG controller design using GUI: application to antennas and radio-telescopes [J]. *ISA Transactions*, 2000, 39(2): 243 – 264.
- [79] GAWRONSKI W. Antenna control systems: from PI to H_∞ [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2001, 43(1): 52 – 60.
- [80] ANDERSON B D O, MOORE J B. *Optimal Control: Linear Quadratic Methods* [M]. Englewood Cliffs, USA: Prentice Hall, 1989.
- [81] XU J X, HUANG D Q, VENKATARAMANAN V, et al. LQG optimal compensation of contact-induced vibration in high density HDD servo systems [C] // *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Hangzhou, China: IEEE, 2012, 5: 920 – 925.
- [82] SUH S M, CHUNG C C, LEE S H. Servo controller design for high-bandwidth HDDs [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2002, 38(5): 2177 – 2179.
- [83] GAWRONSKI W. Antenna LQG controllers: properties, limits of performance, and tuning procedure [C] // *Proceeding of the 16th IFAC World Congress*. Prague, Czech Republic: IFAC, 2005, 7: 223 – 228.
- [84] HIRATA M, HASEGAWA T, NONAMI K. Seek control of hard disk drives based on final-state control taking account of the frequency components and the magnitude of control input [C] // *Proceedings of the IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*. Maribor, Slovenia: IEEE, 2002, 7: 40 – 45.
- [85] MEDRANO-CERDA G A, LETT R D, REES P. H-infinity motion control system for 2 m telescope [C] // *Proceedings of SPIE, Survey and Other Telescope Technologies and Discoveries*. Waikoloa, USA: SPIE, 2002, 8: 88 – 97.
- [86] CHO C H, LEE S H, KWON T Y, et al. Antenna control system using step tracking algorithm with H_∞ controller [J]. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2003, 1(1): 83 – 92.
- [87] LIU X, HUANG Q, CHEN Y. Robust adaptive controller with disturbance observer for vehicular radar servo system [J]. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2011, 9(1): 169 – 175.
- [88] KAWAFUKU M, NONOYAMA K, HIRAI H, et al. Disturbance rejection control of a HDD using mixed sensitivity approach [C] // *The 7th International Workshop on Advanced Motion Control*. Maribor, Slovenia: IEEE, 2002, 7: 381 – 384.
- [89] 李果, 胡剑飞, 余达太. 移动卫星天线的自适应鲁棒控制系统 [J]. *控制理论与应用*, 2007, 24(2): 307 – 311.
(LI Guo, HU Jianfei, YU Datai. Adaptive robust controller of mobile satellite antenna systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(2): 307 – 311.)
- [90] BEAVEN R W, WRIGHT M T, SEAWARD D R. Weighting function selection in the H_∞ design process [J]. *Control Engineering Practice*, 1996, 4(5): 625 – 633.
- [91] ORTEGA M G, RUBIO F R. Systematic design of weighting matrices from the H_∞ mixed sensitivity problem [J]. *Journal of Process Control*, 2004, 14(1): 89 – 98.
- [92] SKOGESTAD S, POSTLETHWAITE I. *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design* [M]. England: John Wiley & Sons, 2006.
- [93] DOYLE J C, FRANCIS B A, TANNENBAUM A R. *Feedback Control Theory* [M]. New York: Dover Publication, 2009.

- [94] ZHOU K M, DOYLE J C. *Essentials of Robust Control* [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- [95] ERM T, HURAK Z, BAUVIR B. Time go to H_∞ [C] // *Proceedings of SPIE, Advanced Software, Control, Andcommunication Systems for Astronomy*. Glasgow, United Kingdom: SPIE, 2004, 6: 68 – 78.
- [96] GRIGORIADIS K M, ZHU G, SKELTON R E. Optimal redesign of linear systems [J]. *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1996, 118(3): 598 – 605.
- [97] ONODA J, HAFTKA R T. An approach to structure/control simultaneous optimization for large flexible spacecraft [J]. *AIAA Journal*, 1987, 25(8): 1133 – 1138.
- [98] IWASAKI T, HARA S, YAMAUCHI H. Dynamical system design from a control perspective: finite frequency positive-realness approach [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(8): 1337 – 1354.
- [99] FREUDENBERG J S, LOOZE D P. Right half plane poles and zeros and design tradeoffs in feedback systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1985, 30(6): 555 – 565.
- [100] SHAKED U. The effect of system zeros on the achievable H_∞ estimation level [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, 42(10): 1469 – 1472.
- [101] CHEN J, QIU L, TOKER O. Limitations on maximal tracking accuracy [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(2): 326 – 331.
- [102] BHUSHAN B. *Advances in Information Storage Systems: Volume 4* [M]. New York: ASME Press, 1992.
- [103] DU C L, GAO T T, XIE L H. Analysis of actuator in-phase property in terms of control performance and integrated plant/controller design using a novel model matching method [C] // *Proceedings of the 12th International Conference on Control, Automation, Robotics & Vision*. Guangzhou, China: IEEE, 2012, 12: 300 – 305.
- [104] ANDERSON B D O, VONGPANITLERD S. *Network Analysis and Synthesis: a Modern Systems Theory Approach* [M]. Upper Saddle River, USA: Prentice Hall, 1973.
- [105] IWASAKI T. Integrated system design by separation [C] // *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications*. Kohala Coast, USA: IEEE, 1999, 8: 97 – 102.
- [106] IWASAKI T, HARA S, YAMAUCHI H. Structure/control design integration with finite frequency positive real property [C] // *Proceedings of the 2000 American Control Conference*. Chicago, USA: IEEE, 2000, 6: 549 – 553.
- [107] RANTZER A. On the Kalman-Yakubovich-Popov lemma [J]. *Systems & Control Letters*, 1996, 28(1): 7 – 10.
- [108] IWASAKI T, HARA S. Generalized KYP lemma: unified frequency domain inequalities with design applications [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(1): 41 – 59.
- [109] GRAHAM M R, OLIVEIRA M C, CALLAFON R A. An alternative Kalman-Yakubovich-Popov lemma and some extensions [J]. *Automatica*, 2009, 45(6): 1489 – 1496.
- [110] IWASAKI T, MEINSMA G, FU M Y. Generalized S-procedure and finite frequency KYP lemma [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2000, 6(2/3): 305 – 320.
- [111] DU C L, XIE L H, GUO G X, et al. A generalized KYP lemma based approach for disturbance rejection in data storage systems [J]. *Automatica*, 2007, 43(12): 2112 – 2118.
- [112] DING J G, TOMIZUKA M, NUMASATO H. Design and robustness analysis of dual stage servo system [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. Chicago, USA: IEEE, 2000, 6: 2605 – 2609.
- [113] ROTUNNO M, CALLAFON R A, TALKE F E. Comparison and design of servo controllers for dual-stage actuators in hard disk drives [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2003, 39(5): 2597 – 2599.
- [114] HUANG X H, HOROWITZ R. Robust controller design of a dual-stage disk drive servo system with an instrumented suspension [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, 41(8): 2406 – 2413.
- [115] AL MAMUN A, MAREELS I, LEE T, et al. Dual stage actuator control in hard disk drive – a review [C] // *The 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Roanoke, USA: IEEE, 2003, 11: 2132 – 2137.
- [116] WHITE M, HIRANO T, YANG H, et al. High-bandwidth hard disk drive tracking using a moving-slider MEMS microactuator [C] // *Proceedings of the IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*. Kawasaki, Japan: IEEE, 2004, 3: 299 – 304.
- [117] ZHENG J C, SU W Z, FU M Y. Dual-stage actuator control design using a doubly coprime factorization approach [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2010, 15(3): 339 – 348.
- [118] CHEW K K, TOMIZUKA M. Digital control of repetitive errors in disk drive systems [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1990, 10(1): 16 – 20.
- [119] MESSNER W C. Classical control revisited: variations on a theme [C] // *Proceedings of the IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*. Trento, Italy: IEEE, 2008, 3: 15 – 20.
- [120] DU C L, XIE L H, LEWIS F L, et al. Multi-frequency disturbance rejection via blending control technique for hard disk drives [J]. *Automatica*, 2009, 45(10): 2244 – 2249.
- [121] JIN L H, KIM Y C, BARRA B A. Issues in linear feedback control design with notch filters [C] // *Proceedings of the 25th Chinese Control Conference*. Harbin, China: IEEE, 2006, 8: 102 – 107.
- [122] KAITWANIDVILAI S, NATH A. Design and implementation of a high performance hard disk drive servo controller using GA based 2DOF robust controller [J]. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2012, 8(2): 1025 – 1036.
- [123] HONG F, DU C L, TEE K P, et al. Adaptive disturbance rejection in the presence of uncertain resonance mode in hard disk drives [C] // *Proceedings of the 2009 American Control Conference*. St. Louis, USA: IEEE, 2009, 6: 3244 – 3249.
- [124] SHE J H, FANG M X, OHYAMA Y, et al. Improving disturbance-rejection performance based on an equivalent-input-disturbance approach [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(1): 380 – 389.
- [125] SHE J H, XIN X, PAN Y D. Equivalent-input-disturbance approach—analysis and application to disturbance rejection in dual-stage feed drive control system [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, 16(2): 330 – 340.
- [126] SHE J H, OHYAMA Y, NAKANO M. A new approach to the estimation and rejection of disturbances in servo systems [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005, 13(3): 378 – 385.

作者简介:

张磊 (1987–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为天线伺服系统的控制算法设计、高精度运动控制系统设计和鲁棒控制, E-mail: zhangleicash@163.com;

苏为洲 (1962–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为伺服控制系统的设计、反馈系统的性能极限、网络反馈系统的分析与设计、最优和鲁棒控制、网络系统分布式估计与信号处理, E-mail: wzhsu@scut.edu.cn.