

二自由度控制系统的干扰估计型结构

郑载满 曲延滨 游林儒

(哈尔滨工业大学电气工程系, 150001)

摘要: 本文从干扰特性的设计要求出发, 提出了一种二自由度控制系统的干扰估计型结构. 这种结构的干扰特性和设计参数之间, 存在很明显的关系, 为系统设计提供了简易可行的方法. 分析和仿真表明, 按这种结构设计的系统, 具有很好的干扰特性, 同时对控制对象的模型化误差也有良好的鲁棒特性.

关键词: 二自由度控制; 干扰估计; 既约分解; 鲁棒特性

1 引言

在二自由度控制系统中, 可将给定响应特性和反馈特性分解开来分别独立进行设计, 因而可以同时获得最佳的上述两种特性, 而这在通常的一自由度控制系统中是做不到的. Youla 参数表示法将上述二自由度控制系统特性与以稳定有理函数表示的参数联系起来, 给出可实现的稳定补偿器集合^[1]. 但是, 这种参数与设计中所要求的诸特性(如干扰特性)之间的关系还不够明确, 而控制系统的设计希望找到一个更直接明显的关系.

本文从干扰特性的设计要求出发, 提出了一种二自由度控制系统的干扰估计型结构. 在这种结构中, 设计参数和干扰特性之间的关系表现得更加直接、明确, 因而为实际设计创造了更为简易方便的条件. 分析表明, 这种结构对控制对象的模型化误差也具有有良好的鲁棒特性.

本文的讨论只限于标量系统, 并以 RH_{∞} 表示真的稳定有理函数域.

2 二自由度控制系统的基本结构

二自由度控制系统, 如图 1 所示.

图中 r 为给定输入, u 为控制输入, y 为被控制量, d 为未知外界干扰.

现设控制对象 P 为严格真的传递函数, 在 RH_{∞} 上既约分解为^[1]

$$P = ND^{-1}, \quad N, D \in RH_{\infty}, \quad (1)$$

相应的 Bezout 等式为

$$XN + YD = 1, \quad X, Y \in RH_{\infty}. \quad (2)$$

将稳定补偿器 C 表示为如下形式

$$v = C \begin{bmatrix} r \\ y \end{bmatrix} = [C_1 \quad -C_2] \begin{bmatrix} r \\ y \end{bmatrix}, \quad (3)$$

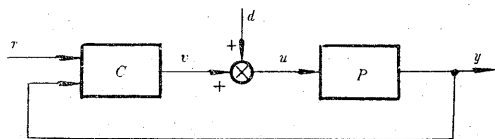


图 1 二自由度控制系统

这时保证内部稳定的稳定补偿器 $C=[C_1 \ -C_2]$ 的集合,可由下式给出^[2]

$$C_1 = K(Y - RN)^{-1}, \quad K, R \in \text{RH}_{\infty}, \quad (4)$$

$$C_2 = (X + RD)(Y - RN)^{-1}, \quad R \in \text{RH}_{\infty}. \quad (5)$$

自给定输入 r 至被控制量 y 的传递函数 G_{yr} 为

$$G_{yr} = NK, \quad K \in \text{RH}_{\infty}.$$

式(4)也可表示为下式

$$C_1 = K(D + C_2N). \quad (6)$$

注意到式(6)正是自 r 至 v 的开环传递函数,图1系统可变换为图2所示的二自由度控制系统的基本结构形式。

由图2可知,若外界干扰 $d=0$,控制对象 P 也没有模型化误差时,

$$G_{y_0r} = G_{yr} = NK.$$

r 至 $e=y_0-y$ 的传递函数 G_{er} 为

$$G_{er} = G_{y_0r} - G_{yr} = 0. \quad (7)$$

上式说明, C_2 对 y 的给定响应不起任何作用,只对由外界干扰、控制对象的模型化误差等原因引起的误差 $e=y_0-y \neq 0$ 起补偿作用。换言之, C_2 的作用在于稳定系统的同时,给系统赋予反馈特性,而参数 K 可用来设计给定响应特性。但是,反馈特性包含多种特性,如稳定性、鲁棒伺服特性、干扰特性等,因此,就反馈特性的诸特性而言,与 C_2 的关系(归结为与 R 的关系)是不够明确的。

3 干扰估计型结构

为导出系统干扰特性和参数之间的关系,利用式(1)~(6),可有

$$v = -RDY^{-1}(y - Pv) + (KY^{-1}r - XY^{-1}y). \quad (8)$$

若令

$$C_a = KY^{-1}, \quad C_b = RDY^{-1}, \quad C_e = XY^{-1}.$$

则式(8)可改写为

$$v = -C_b(y - Pv) + (C_ar - C_e y). \quad (9)$$

根据上式,可得到如图3的干扰估计型结构。

图中 P 为控制对象的标称传递函数, P' 为实际控制对象传递函数。若控制对象无模型化误差,即 $P' = P$, 则 $w = Pd$, 得到

$$\hat{d} = C_b w = RNY^{-1}d \quad (10)$$

自 r, d 至 y 的传递函数分别为

$$G_{yr} = C_a N Y, \quad (11)$$

$$C_{yd} = NY(1 - C_b D^{-1}N). \quad (12)$$

由图3可知,当不存在控制对象的模型化误差和外界干扰时, $w=0$, C_b 不起作用, C_e 成为 P 的稳定补偿器。 C_b 的作用在于生成干扰估计值 $\hat{d}$ 的同时,专门用来抑制外界干扰(参看(12)式)。只要在外界干扰信号的频带内,适当选择 C_b , 使 $C_b D^{-1}N$ 的增益趋近于1, 外界干扰将得到抑制,而 C_b 的选择可通过自由参数 R 进行。

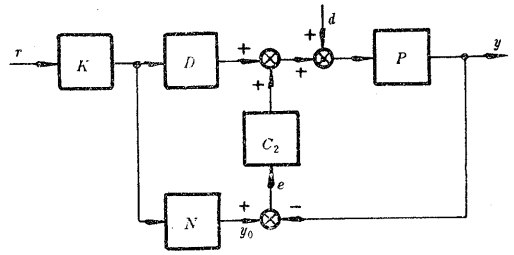


图2 二自由度控制系统的基本结构

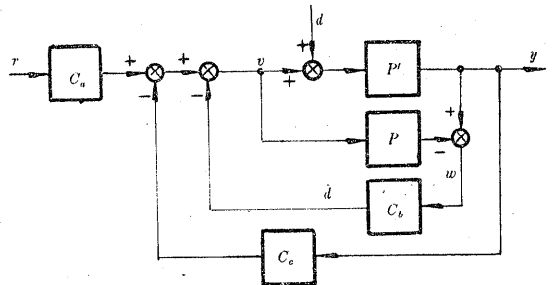


图3 干扰估计型结构

式(11)说明,给定值响应特性取决于 C_a . 欲使系统达到完全跟踪,应有 $G_{yr}=1$,得 $C_a = N^{-1}Y^{-1}$,而这一点实际上很难做到,因为 $N^{-1}Y^{-1}$ 一般为非真函数. 实选 C_a 时可考虑在给定信号的频带内,尽可能使 $C_aNY=KN$ 的增益趋近于 1. 当 r 为阶跃信号时,应满足 $K(0)N(0)=1$.

在选取上述 C_b 和 C_a 过程中,均需用 Bezout 等式参数 X, Y . 这些参数并非唯一,选择时必须考虑满足稳定补偿器 $C_a=XY^{-1}$ 的要求.

4 干扰估计型结构的鲁棒性

设实际控制对象为 $P' = P + \Delta P$.

式中 ΔP 为模型化误差.

为考查 ΔP 对系统的影响,考虑假想的外界干扰 $\Delta d^{[3]}$

$$\Delta d = P^{-1}\Delta P v = P^{-1}\Delta P K D r. \quad (13)$$

上述假想干扰 Δd , 可视为控制对象的模型化误差 ΔP 所产生的影响,其信号入口处与干扰 d 的入口处相同,因此, Δd 对给定值响应的影响可表示为

$$y = NKr + N(Y - RN)\Delta d = NKr + N(Y - RN)P^{-1}\Delta P K D r. \quad (14)$$

上式说明,只要适当选择设计参数 $R(s)$, 满足 $Y(s) - R(s)N(s) \Rightarrow 0$, 可将控制对象模型化误差的影响减小到最低限度,以提高系统的鲁棒特性.

5 仿真实例

控制对象 $P = \frac{1}{s(s+1)}$, 既约分解 $P = ND^{-1}$ 为

$$N = \frac{1}{s^2 + 10s + 50}, \quad D = \frac{s(s+1)}{s^2 + 10s + 50}.$$

相应的 Bezout 等式参数为

$$X = \frac{29.75s + 50}{s + 1}, \quad Y = \frac{(s + 5.5)^2}{(s + 1)^2}.$$

根据式(11),取 $K=50$. 对于阶跃型干扰信号,取 R 为

$$R = \frac{30.25(s^2 + 10s + 50)}{(s + 1)^2},$$

此参数满足 $Y(0)=R(0)N(0)$. 利用上述参数,得到

$$C_a = \frac{50(s+1)^2}{(s+5.5)^2}, \quad C_b = \frac{30.25s(s+1)}{(s+5.5)^2}, \quad C_c = \frac{(s+1)(29.75s+50)}{(s+5.5)^2},$$

$$G_{yr} = \frac{50}{s^2 + 10s + 50}, \quad G_{pd} = \frac{s(s+11)}{(s+1)^2(s^2 + 10s + 50)}.$$

该系统在 $P'=P$ 时,单位阶跃干扰信号的估计值和响应曲线分别示于图 4 和图 5 中. 可以看出,干扰特性的设计是成功的.

在图 6 中,曲线①为 $P'=P$ 时的单位阶跃

给定响应曲线,曲线②为 $P' = \frac{1}{s(s+2)}$ 时的

单位阶跃给定响应曲线. 图 6 说明,该系统

对于控制对象的模型化误差,具有良好的

鲁棒特性.

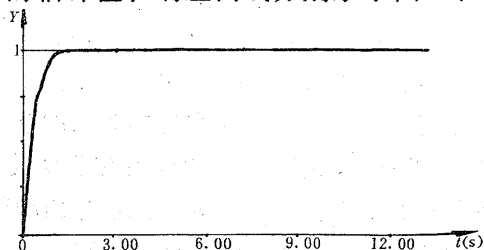


图 4 干扰信号的估计值

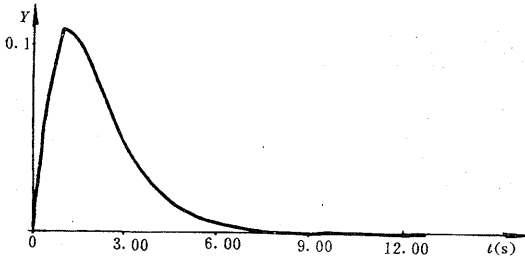


图 5 单位阶跃干扰响应曲线

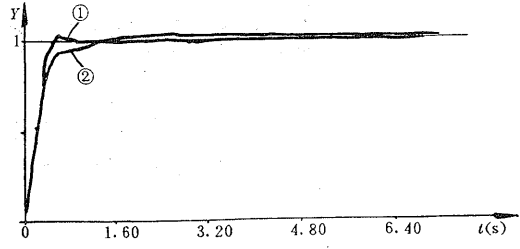


图 6 单位阶跃给定响应曲线

6 结束语

本文提出的二自由度控制系统的干扰估计型结构,在干扰特性和设计参数之间具有明确的关系,为系统设计提供了简易可行的方法.这种结构,对控制对象的模型化误差也具有良好的鲁棒特性.

参 考 文 献

- [1] 前田肇,杉江俊治. アドバンスド制御のためのシステム制御理論. 日本朝仓书店出版, 1990
- [2] 梅野孝治, 堀洋一. 2 自由度制御のパラメトリゼーションに基づくロバストサーボ系の設計. 日本: 电气学会全国大会论文集, 1990, 13-19
- [3] 郑载满, 游林儒, 曲延滨. H_∞ 控制的鲁棒伺服系统. 第六届全国电气自动化与电控系统学术年会论文集, 杭州, 1992

A Disturbance Observer Structure in Two-Degree-of-Freedom Control System

ZHENG Zaiman, QU Yanbin and YOU Linru

(Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology • Harbin, 150001, PRC)

Abstract: Based on design requirements of system disturbance performance, a new disturbance observer structure in two-degree-of-freedom control system is proposed. In the structure, there exist explicit relations between disturbance performance and design parameters, this provides a convenient design method. Theoretical analysis and simulation demonstrate that the resulting system has perfect disturbance performance and robustness in modeling plant uncertainty.

Key words: two-degree-of-freedom control; disturbance observer; coprime factorization; robustness

本文作者简介

郑载满 1938 年生. 1962 年毕业于哈尔滨工业大学, 现任哈尔滨工业大学教授. 主要从事线性多变量系统理论, 二自由度控制和鲁棒控制的研究.

曲延滨 1961 年生. 1984 年毕业于哈尔滨工业大学, 工学硕士, 现任哈尔滨工业大学讲师. 主要从事自动控制理论, 鲁棒控制和计算机控制系统研究.

游林儒 1956 年生. 1978 年毕业于东北重型机械学院, 现任哈尔滨工业大学高级工程师, 主要从事自动控制理论, 伺服系统和计算机控制系统的研究.