

控制系统鲁棒性的计算机 辅助分析方法*

慕春棣 陈德刚 高龙

(清华大学)

摘 要

本文以强抗扰恒值系统^[1-2]为例,说明对控制系统鲁棒性的计算机辅助分析方法。该方法比较容易找出参数摄动对系统稳定性及其性能指标的影响,并且可以找出参数的稳定域来。计算机辅助分析方法可以克服理论分析上的困难,并且可以避免线性化所带来的误差,与辅助设计结合在一起,对工业控制系统的设计和实际调整具有一定的指导意义。

一、前 言

实际控制系统的建模误差和在运行过程中,由于工况的变化、非线性、元部件的老化以及故障等因素都会造成系统参数和结构发生变化。控制系统在上述情况下能否保持稳定和良好的性能指标,这在设计时必须充分予以考虑。这里所谓的鲁棒性^[3,5],就是指系统的性能指标对参数及结构摄动的不敏感性。鲁棒性强的系统,当系统参数与设计的标称值有差别或由于各种实际因素导致参数大范围变化时,其稳定性及主要性能指标变化不明显,这样的系统容易调整,运行也比较可靠。反之,鲁棒性差的系统既难调整,运行也不可靠。

分析参数摄动对系统鲁棒性的影响一般需要三个步骤:即寻找敏感参数,寻找参数摄动的稳定域及确定参数的调整中心。为了保证系统在各种可能的情况下都能稳定且性能较好,有时需要用离最优参数的预偏置来换取较强的鲁棒性。

上述三个步骤,对于稍微复杂的系统,用手工计算都是不可能的。而现有的理论分析方法要么只适用于参数的小摄动,要么非常繁琐^[5],而用计算机辅助分析则是一条捷径。虽然它是就事论事,只分析具体的系统,但它是通过计算机执行程序来完成,速度快并且不带有近似,所以是其它方法无法比的。

*此项研究系中国科学院科学基金会资助项目。

本文于1985年1月21日收到,1985年10月29日收到修改稿。

二、恒值系统强抗扰控制的基本原理^[1~2]

图1为一恒值控制系统，其中 $Y_r(s)$ 为常值参考输入， $Z(s)$ 为一类由多项式描述的不可测标量外扰。 $G_2(s)$ 为对象的传递函数， $G_1(s)$ 为串联控制器， $K(s)$ 为反馈控制器。由反馈控制的基本规律知，在闭环稳定的条件下，充分加强 $K(s)$ 和 $G_1(s)$ 的作用，就可以提高输出 $Y(s)$ 的守恒能力，从而增强系统的动态及静态抗扰能力。但由于实际存在的物理约束， $K(s)$ 和 $G_1(s)$ 不可能任意加强，即实际可能的抗扰能力是受控制器结构的限制的。为了提高静态抗扰性做到静态安全解耦，引入鲁棒调节器即^[4,7,8]伺服补偿器 $G_0(s)$ 。按照内模原理 $G_0(s)$ 中包含有特定外扰的数学模型。对阶跃型外扰， $G_0(s)$ 为简单的积分器。于是得到图2所示的结构。其中 $K_1(s)$ 为系统中增加了伺服补偿器所推广出来的状态反馈控制器。

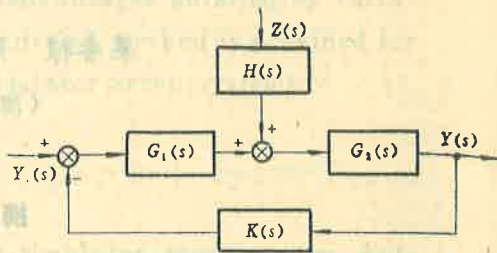


图1

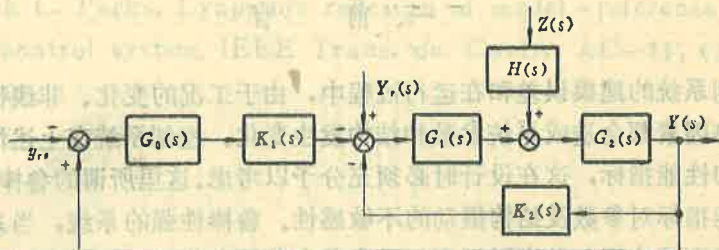


图2

解决动态抗扰性的办法是加强 $K_2(s)$ 、 $K_1(s)$ 和 $G_1(s)$ 。先将它们选为物理约束的上限，再给 $Z(s)$ 左右若干个主要反馈通道并接以某种隔直性网络，仅使动态过程中的交变信号畅通来增强（或削弱）这些反馈的强度，以达到增强图1中的 $K(s)$ 及 $G_1(s)$ 的目的。这些隔直网络可以加快系统的瞬态响应，故称之为“瞬态补偿器”^[1]。

对控制结构做了上述改进后，再将对象、伺服补偿器和瞬态补偿器等所有状态一起构成反馈控制器，并按二次型最优控制逆问题的方法设计反馈增益阵；同时采用频域判优的方法使闭环系统具有足够的稳定裕量^[2]。需要指出，这种调节器的存在是有条件的，其证明见参考文献[2]，这些条件实际系统很容易满足。

三、计算机辅助分析方法研究单参数 扰动下系统的鲁棒性

按照上述强抗扰要求设计的直流调速系统框图如图3。

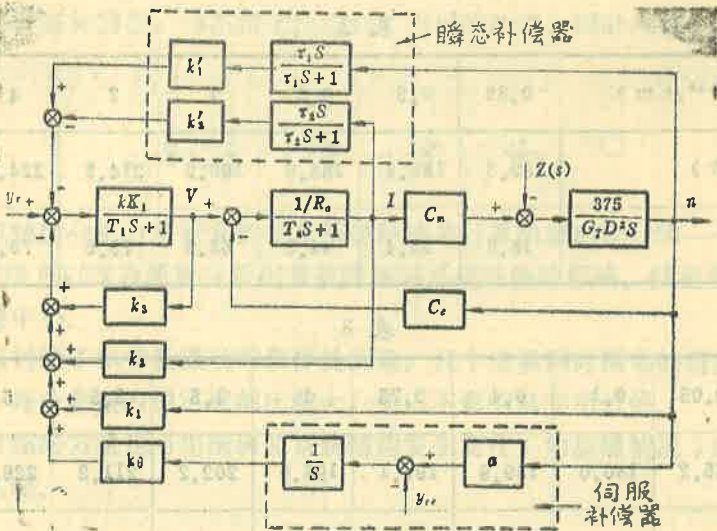


图 3

其中

$$K = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_0 \ k'_1 \ k'_2]$$

是一组满足一定性能指标的反馈增益阵。这里采用的是频域指标。即把系统等效成单位反馈的闭环系统，用其开环频率特性的剪切频率 ω_c 和相位裕量 γ 作为性能指标。程序将不同输入形式的系统化成标准的形式，得到状态方程为 $\dot{x} = Ax + Bu$ ，输出方程为 $y = Cx + Du$ 。由此可求出传递关系为

$$y(s) = [C(sI - A)^{-1}B + D]u(s).$$

指定系统中任意输入—输出点，就可以求出其传递函数来。笔者这里计算的是图 3 中的 $f(s)/u(s)$ 。其中 $f(s)$ 表示所有反馈之和。至于所采用的计算方法就不叙述了^[6]。

对系统中可能摄动的参数进行初步定性分析后可知，应该主要分析电机的 L_a ， R_a ， GD^2/C_m 以及整流器的放大系数 K_1 等参数的摄动情况。

我们以二次型最优作为标准。这一组参数是 $K^* = [0.01 \ 0.32 \ 0.002 \ 80 \ 0.034 \ -0.24]$ 。表 1、2、3、4 分别表示 K_1 、 GD^2/C_m 、 R_a 、 L_a 与标称参数的不同比值下系

表 1

K_1/K^*_1 (最优)	0.25	0.5	1	2	4	8	16
ω_c (1/秒)	93.9	120.3	196.9	368.1	792.4	1596	3198
γ (度)	27.2	45.9	63.9	79.4	85.4	87.8	88.9

表 2

$GD^2/Cm/(GD^{2*}/Cm)$	0.36	0.5	0.6	1	2	4	12
ω_c (1/秒)	189.3	189.8	188.6	196.9	214.2	224.2	230.8
γ (度)	18.9	35.4	44.3	63.9	75.6	79.6	81.7

表 3

R_a/R_a^*	0.05	0.1	0.4	0.75	1	1.5	2.5	5	10
ω (1/秒)	185.2	186.0	189.9	194.1	196.9	202.2	211.2	226.2	236.6
γ (度)	57.3	57.7	59.9	62.3	63.9	66.7	71.5	80.3	92.2

表 4

L_a/L_a^*	0.25	0.33	0.5	1	2	4	8	16
ω_c (1/秒)	418.3	360.7	291.4	196.9	121.5	67.4	41.8	27.9
γ (度)	43.5	46.7	52.3	63.9	71.6	56.4	33.7	12.7

统的开环剪切频率 ω_c 和相位裕量 γ 。

从以上四个表的数据可以看出, 该系统对参数摄动的鲁棒性比较好, 允许参数摄动的范围比较大。

电流瞬态补偿器是一个正反馈回路。动态时用来抵消电流硬反馈的强度, 以达提高 $G_1(s)$ 的目的。表 5 给出了电流软(正)反馈系数 k'_2 与硬(负)反馈系数 k_2 在不同比值下系统的主要性能指标。可以看出软反馈系数有一定的调节范围, 因而具有实用价值。笔者在以 SCR 整流器直接供电的 1.0 千瓦直流它激电动机为受控对象的传动系统

表 5

$ k'_2/k_2 $	0	6/32	12/32	16/32	24/32 设计值	28/32	30/32	32/32
ω_c (1/秒)	420.1	379.3	332.8	296.8	196.9	128.5	112.1	106.6
γ (度)	45.7	49.3	54.0	57.7	63.9	39.9	12.0	-17.2

上采用了这样的瞬态补偿器,动态抗扰性得到了明显的改进,同时系统也比较容易调整。

四、几点讨论

1. 计算机辅助分析方法研究控制系统鲁棒性是计算机辅助设计的一个重要方面。借助于 CAD 程序可以很方便地分析出参数摄动对系统性能的影响。找出参数的稳定域及确定参数调整中心。

2. 本文只讨论了单参数摄动的鲁棒性问题。几个参数同时摄动的情况还有待于进一步研究。由于每个参数的稳定域都比较大,所以不影响其实用价值。

3. 本文介绍的方法也可用来研究系统结构发生变化(如故障情况)时的鲁棒性,因篇幅所限,从略。

参考文献

- [1] 高龙、王幼毅,强抗扰恒值系统的 LQ 设计,信息与控制,1,(1985), 22—27.
- [2] 高龙、王幼毅,强抗扰恒值系统的逆 LQ 设计,自动化学报,12.2, (1986), 120—127.
- [3] Doyle, J.C., Stein, G., Robustness with Observers, IEEE. Trans. on Automatic Control, AC—24, 4,(1979), 607—611.
- [4] Davison, E.J., Goldenberg, A., Robust Control of a General Servomechanism Problem: The Servo Compensator, Automatica, 11, (1975), 461—471.
- [5] 高龙、熊光楞,带外扰观测器补偿装置的双通道 LQSF 调速系统的鲁棒性,自动化学报,7, 4, (1981), 247—256.
- [6] 吴麒、慕春棣、高黛陵,中国控制系统计算机辅助教学包 CCSCAT, 控制系统频域法计算机辅助教学子包 CSFCAT 技术手册.
- [7] 涂葦生,鲁棒(Robust)调节器,信息与控制,4 (1979), 367—373.
- [8] 齐寅峰,鲁棒调节器的一种设计方法,信息与控制,4, (1974), 374—380.

COMPUTER-AIDED ANALYSIS FOR ROBUSTNESS OF CONTROL SYSTEMS

Mu Chundi, Chen Degang, Gao Long

(Tsinghua University)

Abstract

This paper presents a computer-aided analysis for robustness of control systems through an illustrative control system with high resistibility to disturbances. The proposed analysis method can easily determine the effect of system parameter perturbations on its stability and dynamic behaviour, and find out the stable parameter regions. It can also overcome certain difficulties in theoretical analysis and avoid the error caused by the linearization approximation. This method, together with CAD, will be useful for the design and adjustment of industrial control systems.