

基于稳定参数空间的 PID 调节器遗传优化设计*

何福忠 孙优贤

(浙江大学工业控制技术研究所 工业控制技术国家重点实验室 杭州 310027)

摘要 提出一种满足平方误差积分(ISE)最小的闭环反馈稳定 PID 调节器遗传优化设计方法。运用增广 Hermite-Biehler 定理,解析地给出了使任意给定(稳定或不稳定)被控对象闭环稳定的调节器参数取值范围。在该取值范围内运用遗传优化算法得到了满足指定性能指标(ISE)最小的最佳调节器参数值。仿真例子验证了该方法的有效性。

关键词 PID 调节器, Hermite-Biehler 定理, 遗传算法, 优化

分类号 TP 273

Stabilizing PID Regulator's Parameter Design via Genetic Algorithms

He Fuzhong, Sun Youxian

(Zhejiang University)

Abstract A genetic optimization method of closed-loop feedback stabilizing PID regulator with minimal ISE is proposed. With the generalization of Hermite-Biehler theorem, the stabilizing domain of PID controller parameters for any given plant (stable or unstable) is given analytically. In this stabilizing domain, the optimal set of controller parameters that minimize the closed-loop ISE criterion is selected by using of genetic algorithms. The simulation result shows the effectiveness of the proposed procedure.

Key words PID regulator, Hermite-Biehler theorem, genetic algorithms, optimization

1 引言

传统的 PID 调节器参数是采用试验加试凑的方法由人工整定。动态特性参数法(如 Ziegler-Nichols 法)和稳定边界法给出了稳定参数的初步估计值。以上方法均假定被控对象是稳定的。如果被控对象不稳定或不允许进行稳定边界试验,则上述常用的参数整定方法便失去了效用^[1]。

本文首先利用增广 Hermite-Biehler 定理,解析地给出了适用于任意给定(稳定或不稳定)被控对象的 PID 稳定参数域^[2];然后在稳定参数域范围内运用遗传优化算法,得出满足系统闭环性能指标(即从参考输入到被控输出误差之间传递函数的 H_2 范数)最小的调节器参数最佳整定值^[3]。实例和仿真结果表明了所采用算法的有效性。

2 系统描述与定义

考虑图 1 所示闭环反馈系统。其中, $G(s)$ 为被控对象的标称传递函数, $C(s)$ 为 PID 调节器, 取其理想型结构

$$C(s) = K_p + K_i/s + K_d s \quad (1)$$

r 为参考输入, e 为控制误差信号, u 为控制输入, y 为系统输出信号。

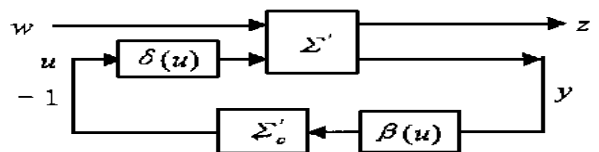


图 1 闭环单位反馈系统

对于输入 $r(s)$, 控制误差信号

$$e(s) = \frac{r(s)}{1 + G(s)C(s)}$$

则闭环系统对于给定输入 r 的跟踪性能指标定义为

$$J = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$

因此, 本文的工作可归纳为: 设计一个 PID 调节器 $C(s)$, 使得图 1 所示闭环系统稳定, 同时具有对于给定参考输入 r 的最优跟踪性能 J_{\min} 。

3 参数稳定域的解析表示

运用遗传算法对 PID 调节器进行优化设计时, 需要预先确定使得闭环系统稳定的 PID 调节器参数容许取值范围。利用增广的 Hermite-Biehler 定理及其相关结论^[2] 确定 PID 调节器参数稳定域时, 一般可分为两个步骤:

Step1: 假定 $C(s) = K_p$, 求得使闭环系统稳定的 K_p 取值范围 $(K_{p\min}, K_{p\max})$;

Step2: 适当选取若干个 $(K_{p\min}, K_{p\max})$ 内的 K_p 值, 求出与之相对应的使系统闭环稳定的 K_i, K_d 取值范围, 这个取值范围可能是无解、凸多边形或半平面。

例 1 某三阶逆不稳定调速系统^[4]

$$G(s) = \frac{1 - 2s}{(1 + 10s)(1 + 15s)(1 + 40s)} \quad (2)$$

运用上述确定参数稳定域的方法, 可以确定 K_p 的取值范围 $K_p \in (-1, 8.2747)$ 。对应于 $K_p = 1, 2, \dots, 8$ 的 (K_i, K_d) 取值范围为图 2 中 K_d 轴与相应直线所围成的三角区。这样, 通过观察图形就可大致得出使系统闭环稳定的 (K_i, K_d) 取值范围。假设选取 $K_p = 5$, 可得以下关于 (K_i, K_d) 的不等式方程组

$$\begin{cases} K_i > 0 \\ -0.1275 + (K_i - K_d * 0.005) * 1.02 < 0 \\ 76.272 + (K_i - K_d * 0.100) * 1.3999 > 0 \end{cases} \quad (3)$$

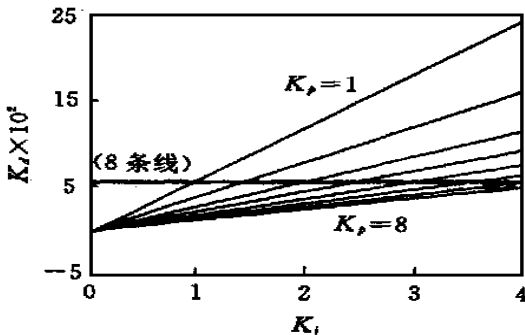


图 2 $K_p = 1, 2, \dots, 8$ 时 (K_i, K_d) 的取值范围

4 运用遗传算法的 PID 调节器参数优化

遗传算法的特点是模拟基于种群的生物进化过程, 达到能用计算机实现的随机优化技术。另外, 遗传算法并不需要知道优化问题本身的任何信息, 适合于编制成一个通用的优化程序模块^[3]。

对于图 1 中标称对象模型 $G(s)$, 跟踪误差信号

$$e(s) = \frac{r(s)}{1 + G(s)C(s)}$$

则对应于跟踪性能指标的适应值计算式为 $J = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$ 。根据 Parseval 定理, 有

$$J = \int_0^{\infty} e^2(t) dt = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j}^j e(s)e(-s) ds \quad (4)$$

运用遗传优化算法程序^[3], 在参数稳定域内搜索一组 (K_p, K_i, K_d) 值使得 J 为极小, 即

$$J_{\min} = \min_{K_p, K_i, K_d} \frac{1}{2\pi j} \int_{-j}^j e(s)e(-s) ds \quad (5)$$

J 值可表示为^[5]: 假设 $e(s) = B(s)/A(s)$, 其中

$$B(s) = \sum_{i=0}^{n-1} b_i s^i, \quad A(s) = \sum_{i=0}^n a_i s^i$$

$a_0 = 0, \quad a_n > 0$

$$J = \frac{(-1)^{n-1} |\Omega|}{2a_n |\Omega|}$$

式中

$$|\Omega| = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots \\ 0 & a_{n-1} & \dots & 0 & \vdots \\ \dots & a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & a_2 & a_0 \end{vmatrix}$$

$$|\Omega_i| = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & d_0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & d_1 \\ 0 & a_{n-1} & \dots & 0 & \vdots \\ \dots & a_3 & a_1 & d_{n-2} \\ 0 & 0 & \dots & a_2 & d_{n-1} \end{vmatrix}$$

$$d_m = \sum_{i,j=0}^{n-1} (-1)^i b_i b_j, \quad i + j = 2m$$

在例 1 中, 考虑阶跃输入 $r(s) = 1/s$, 则

$$\begin{aligned} & \{ a_0 b_2^2 (a_1 a_2 - a_0 a_3) + \\ & a_0 a_4 (a_1 b_2^2 - 2a_1 b_1 b_3 - 2a_3 b_0 b_2 + \\ & a_3 b_1^2) + a_4 b_0^2 (a_2 a_3 - a_1 a_4) \} \\ J = & \frac{\quad}{2a_0 a_4 (a_1 a_2 a_3 - a_0 a_3^2 - a_1^2 a_4)} \end{aligned}$$

式中

$$a_0 = K_i, \quad a_1 = 1 - 2K_i + K_p$$

$$a_2 = 65 - 2K_p + K_d, \quad a_3 = 1150 - 2K_d$$

$$a_4 = 6\ 000, \quad b_0 = 1, \quad b_1 = 65$$

$$b_2 = 1\ 150, \quad b_3 = 6\ 000$$

经 20 代进化后, 输出调节器最佳参数集: $K_p =$

4. 747, $K_i = 0. 081$, $K_d = 79. 984$ 。单位阶跃输入情况下系统输出响应曲线如图 3 所示。参照文献[4]的结果, 可知本文所采用的设计方法是合适的。

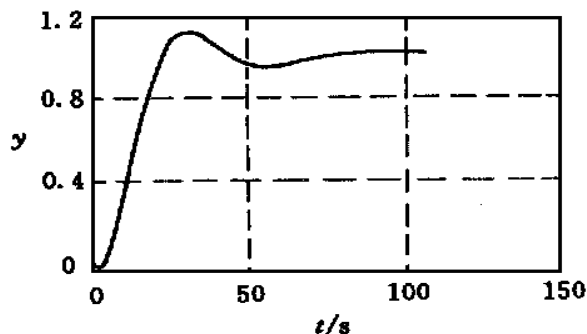


图 3 单位阶跃输入响应曲线

5 结 论

本文针对被控对象的标称模型, 运用增广的 Hermite-Biehler 定理解析地给出了使闭环系统稳定的 PID 调节器参数取值范围。其求解过程规范, 结果一目了然。遗传算法作为一种通用的优化工具, 为解决调节器参数全局最优设计问题提供了一种有

效的方法。仿真实例表明了本文设计方法的有效性。

参 考 文 献

- 1 金以慧. 过程控制. 北京: 清华大学出版社, 1993
- 2 Ho Ming-Tzu, Aniruddha Datta, S P Bhattacharyya. A linear programming characterization of all stabilizing PID controllers. In: Proc of the American Control Conference. New Mexico, 1997. 3922~3928
- 3 何福忠, 孙优贤. 基于遗传算法的鲁棒 PID 控制器参数优化方法及计算程序. 信息与控制, 1999, 28(S): 293~296
- 4 李清泉, 郭莉. 智能 PID 调节器. 自动化学报, 1993, 19(3): 336~339
- 5 E I Jury, A G Dewey. A general formulation of total square integrals for continuous systems. IEEE Trans on Autom Contr, 1965, 10: 119~120
- 6 Chen Bor-Sen, Yu-Min Cheng, Ching-Hsiang Lee. A genetic approach to mixed H_2/H_∞ optimal PID control. IEEE Control System Magazine, 1995, Oct: 51~60

作 者 简 介

何福忠 男, 1969 年生。浙江大学工业控制技术研究所博士生。研究方向为鲁棒控制, 机电一体化和科学计算。

孙优贤 男, 1940 年生。浙江大学工业控制技术研究所教授, 中国工程院院士。研究领域为造纸过程的模型化及计算机控制, 鲁棒控制, 容错控制及工厂综合自动化。

2000 中国控制与决策学术年会圆满召开

本刊讯 2000 中国控制与决策学术年会(12th CDC), 于 5 月 15 日至 18 日在昆明召开。来自国内部分高等院校、科研院所及企事业单位的 70 多位代表参加了本届年会。

5 月 15 日上午举行了大会开幕式。云南省科协副主席李益甫、云南省自动化学会理事长廖伯瑜、昆明理工大学党委书记杨思忠、校长何天淳、副校长叶燎原、高峰等同志参加了会议。CDC 组织委员会主任委员张云生主持会议, 昆明理工大学校长何天淳致欢迎辞, CDC 组织委员会主任委员王福利致贺辞。CDC 程序委员会主任委员张嗣瀛院士代表程序委员会和主办单位发来贺信。

开幕式后举行了学术报告会, 有 6 位专家学者应邀在大会上做了专题学术报告。报告人及报告题目分别是: 昆明船舶公司副总经理张正义: 中国物流自动化技术跨越式的发展; 华南理工大学博士生导师刘永清: 科学思维与基础性研究创新的设计; 黑龙江大学

博士生导师韩志刚: 多层递阶方法理论与应用的进展; 厦门大学博士生导师曾昭磐: 关于信息建设的几个问题; 昆明理工大学教授张云生: 基于网络系统实现递阶智能控制; 大连理工大学博士生导师冯恩民: 系统辨识及其在工程中的应用。

在分组交流中, 代表们分别介绍了各自的研究情况, 并就共同关心的学术问题进行了深入探讨。大家一致反映, 本届年会大会报告精彩, 分组交流学术气氛浓厚, 使人深受启发, 收获很大, 因此是一次成功的会议。

会议期间, 代表们还饶有兴趣地参观了举世瞩目的昆明世博园。

本届年会由《控制与决策》编委会, 中国航空学会自动控制分会, 中国自动化学会应用专业委员会, 中国运筹学会决策理论及应用专业委员会, 中国兵工学会自动控制专业委员会联合主办; 昆明理工大学和云南省自动化学会共同承办。