

文章编号 1000-5013(2005)02-0134-04

多变量系统调节器参数的优化设计

梅小华 郑力新 周凯汀

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 对多变量有耦合控制器优化的问题, 遗传算法是一个强有力的求优算法. 文中基于遗传算法, 以温控系统的多通道 PI 调节器参数设计为例, 设计的 PI 调节器使系统性能指标有较大提高. 设计方法通用性强、工程性强. 能够较好地避免局部最优. 多变量系统的参数优化设计是有效的所设计的.
关键词 PI 调节器, 多变量控制系统, 遗传算法, 参数优化
中图分类号 TP 273+.3; TP 183 **文献标识码** A

PID 参数的整定, 直接影响系统动态和静态的控制精度及调节时间. 对单变量 PID 参数整定, 已推出许多先进的控制方法. 例如, 基于暂态响应技术的扩展 Z-N 阶跃响应方法^[1], 基于给定幅值及相角裕度的频域 PID 参数整定方法^[2], 以及基于遗传算法的 PID 参数整定方法^[3]等. Tantt^[4]给出用确定性自回归滑动平均模型, 来整定多变量 PID 参数. 这种方法在每个采样间隔内都要求矩阵的逆, 计算繁琐. Bristol^[5]给出用模式识别技术来整定 PID 参数. 这种方法要大量的人为主观的给定值或扰动来整定 PID 参数, 且要大量的整定规则和计算公式. 遗传算法作为求解优化问题的有效手段, 被引入控制系统的设计中. 它将目标函数转化为基因群, 以适应度函数为优化目标, 通过基因操作得到下一代优化基因组合. 如此反复迭代, 直到满足最优收敛目标为此. 本文提出了基于遗传算法的多变量 PID 参数设计法 (图 1), 它的收敛速度和全局优化能力大大提高, 充分利用了 Matlab 和 Simulink 的支持, 设计方法具有较强的直观性和适应性, 解决了确定参数搜索空间的问题, 克服了人为主观设定的盲目性.

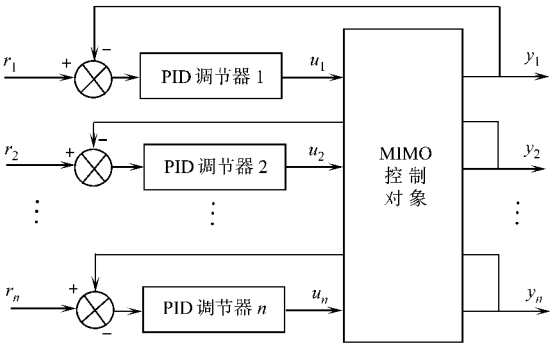


图 1 多变量控制系统

1 多变量控制系统(MIMO)

如图 1 所示, 系统每个通道都有一个 PID 调节器, 共有 n 个. 系统中 PID 调节器的标准形式为

$$D(s) = \begin{bmatrix} D_1(s) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & D_2(s) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & D_n(s) \end{bmatrix}.$$

其中 $D_j(s) = K_{p_j} + K_{i_j}s + K_{d_j}/s$, $j = 1, 2, 3, \dots, n$. $D_j(s)$ 为每一通道 PID 调节器的表达式. 系统中任一通道的输入, 都会在其它道参数耦合. 为此, 必须对系统的 PID 参数进行调节, 以减少耦合对系统的影响, 同时要保证系统响应的性能指标.

收稿日期 2004-09-15
作者简介 梅小华(1978-), 女, 硕士研究生, 主要从事计算机控制方面的研究. E-mail: forst999@sina.com
基金项目 福建省科技计划工业领域重点科研基金资助项目(2004H016)

2 遗传算法

遗传算法是一个强有力的求优算法, 它首先随机地产生一组潜在的解 X . 该解称为染色体, 的特定集合称为种群, 解中的变量称为基因. 然后, 采用生物进化的过程(如染色体交叉、变异、淘汰等) 不断提高解的品质, 最后获得最优解.

2.1 实数编码

实数编码^[6] 是连续参数优化问题直接的描述, 比二进制编码更高效. 在实数编码下, 将一个实数对应成一个基因. 实数编码清除了没有足够的精度, 使得搜索空间中具有较优适应值的可能解能够表示出来的隐患. 作用在实数编码基因上的遗传算法, 具备了利用具有连续变量的函数渐变性的能力. 二进制编码时, 整数 7 和 8 代表的实数在直线上是相邻的. 在缺少待优化的函数的先验知识时, 总存在选择了一个差的表示可能, 而实数编码就从根本上消除了这个问题.

2.2 目标函数的建立

采用的系统是多输入, 多输出系统. 它的最终目的是, 实现输出对输入有较快的响应速度和较小的超调量, 以及尽量把通道之间的耦合后果削弱到某一允许的程度. 因此, PID 设计应把反馈偏差和耦合偏差很好的联系起来. 在算法中, 所采用的目标函数为

$$\begin{aligned} \min J = & \left\{ \int_0^T \left[|r_1 - y_{11}| + \beta(|y_{12}| + |y_{13}| + \dots) \right] dt + \right. \\ & \int_0^T \left[|r_2 - y_{22}| + \beta(|y_{21}| + |y_{23}| + |y_{24}| + \dots) \right] dt + \dots + \\ & \left. \int_0^T \left[|r_i - y_{ii}| + \beta(|y_{i1}| + |y_{i2}| + \dots + |y_{i,i-1}| + |y_{i,i+1}| + \dots) \right] dt \right\}. \end{aligned}$$

在上式中, y_{ij} 表示第 j 输出对第 i 单独输入的耦合; y_{ii} 表示第 i 输出对第 i 单独输入的响应; β 为加权系数, $\beta \in (0, 1)$.

2.3 遗传算法与调节器的结合

在 n 维调节器中, 有 $3n$ 个参数, 它们以一定方式连接构成. 即 $K_{p_j}, K_{i_j}, K_{d_j}, j = 1, 2, \dots$, 所形成的一组染色体中包含有 $3n$ 个基因. 采用如下以基因为单位进化的自适应遗传算法, 可以加快进化, 避免陷入局部最小点. (1) 全局变量设定. 给出种群数 M 、系数 λ, λ_m , 最大世代数 MAXGEN 的大小. 选择 $M = 20, N = 3n$. 即种群的染色体个数为 20, 每个染色体由 $3n$ 个基因组成. (2) 种群的产生及初始化. 设世代计数器 GEN = 1. 以调节器参数为基因组成染色体 X , 即 $X = [K_{p_j}, K_{i_j}, K_{d_j}], j = 1, 2, \dots$. 种群由 20 个染色体构成. 初始染色体中的基因(设计参数) 在各自的取值范围内随机产生, 但必须满足所有约束条件. 取值范围是在 Z-N 法^[7] 得到的参数基础上, 左右两边扩展空间后确定. 即

$$\begin{aligned} (1 - \alpha) K_{p^*} &\leq K_p \leq (1 + \alpha) K_{p^*}, \\ (1 - \alpha) K_{i^*} &\leq K_i \leq (1 + \alpha) K_{i^*}, \\ (1 - \alpha) K_{d^*} &\leq K_d \leq (1 + \alpha) K_{d^*}. \end{aligned}$$

在上面 3 个式子中, 调节 $K_{p^*}, K_{i^*}, K_{d^*}$ 是 Z-N 法对本通道闭环控制时所整定的参数. (3) 基因交叉率与变异率计算. 在 $X(M, N)$ 矩阵中逐列选中基因, 按式(1) 计算对应平均欧氏距离. 然后, 按式(2) 求出对应的交叉率和变异率. 第 n 种基因之间的平均欧氏距离为

$$d_n = \frac{2 \sum_{i,j=1}^{M,M} (x_{in} - x_{jn})^2}{M(M-1)(x_{nmax} - x_{nmin})^2} \quad (1)$$

在式(1) 中, x_{nmax}, x_{nmin} 为第 n 种基因的最大值与最小值. 而该基因对应的交叉率和变异率分别为

$$P_c(n) = \lambda d_n, \quad P_m(n) = \lambda_m (1 - d_n), \quad (2)$$

式中 λ, λ_m 为设定常数. (4) 进化操作. 先复制种群. 在复制的种群中, 按各列基因对应的交叉率和变异率, 逐列进行基因的交叉和变异(在其规定的取值范围内随机地产生一个数来取代原有值), 形成 M' 个子代染色体. 然后, 进行 Elitist 选择. 选择过程是, 先将子种群和原种群中每个染色体的基因(PID 参数) 传递给 Simulink 下系统仿真框图进行仿真实验, 获得 J . 按下式计算评价函数 $\text{Eval}(X_k) (k = 1, 2, \dots, M' + M)$. 即

$$\text{Eval}(x_k) = \begin{cases} J, & \text{当 } X_k \text{ 满足约束条件;} \\ G, & \text{当 } X \text{ 不满足约束条件}(G \text{ 为一大正数}). \end{cases}$$

(5) 过程结束判定. 如果 $\text{GEN} < \text{MAXGEN}$, 回到 (3) 重复进行; 而如果 $\text{GEN} \geq \text{MAXGEN}$, 则输出 v^* (即最优染色体) 及 MINEVAL , 判别 v^* 是否十分靠近在参数搜索空间的边界上. 如果是, 用 v^* 替代 Z-N 法的解, 重新回 (2) 开始设计; 否则, 结束求解过程.

3 仿真实例

以二维 PI 调节器为例, 控制对象为二输入、二输出系统, 其传递函数为

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12.8e^{-s}}{16.7s+1} & \frac{18.9e^{-3s}}{21s+1} \\ \frac{6.6e^{-7s}}{10.9s+1} & \frac{19.4e^{-3s}}{14.4s+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix}.$$

由传递函数可以看出, 通道间的耦合作用非常明显, 而且系统的延迟时间为 1~7 s. MIMO 的温控系统, 如图 2 所示. 要求的性能参数为: 超调量 $\leq 25\%$; 稳定时间 ≤ 50 s, 最大误差为 5%; 耦合度 $\leq 50\%$, $0 \leq t \leq 25$ s; 耦合度 $\leq 5\%$, $25 \text{ s} \leq t \leq 100$ s.

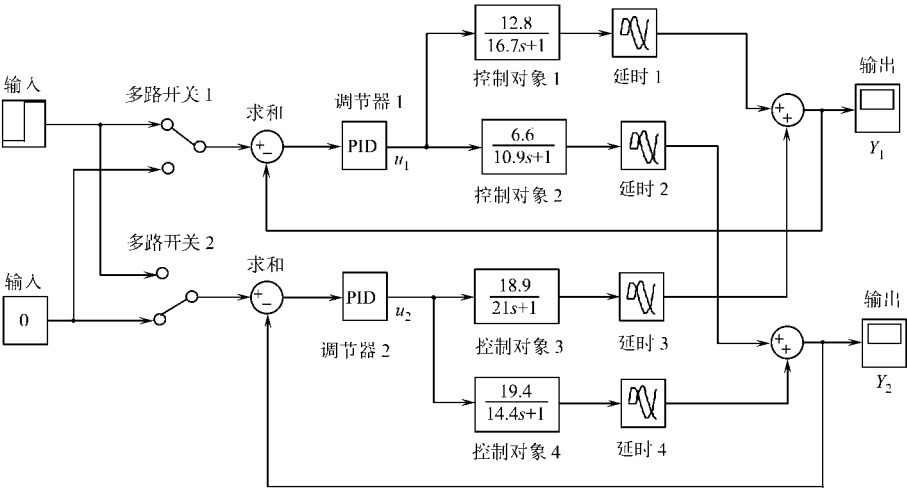


图 2 MIMO 温控系统图

仿真时以 J 为目标函数, 取 $\alpha = 0.5$, $M = 20$, $\text{MAXGEN} = 480$, $\lambda_c = 4$, $\lambda_m = 0.5$, 程序语言采用为 Matlab. 在计算机 (奔腾) 上完成本方法的设计, 时间为 5 min, 重复进行了 5 次, 结果基本一致. 所得仿真结果如下述. (1) Z-N 方法^[7]. 输入 $[r_1, r_2] = [2, 2]$, 其值分别为 $K_{p1}^* = 0.2026$, $K_{i1}^* = 0.0293$, $K_{p2}^* = 0.0932$, $K_{i2}^* = 0.0149$. 系统响应, 如图 3 所示. (2) 进行遗传算法整定操作. 输入 $[r_1, r_2] = [2, 2]$, 其

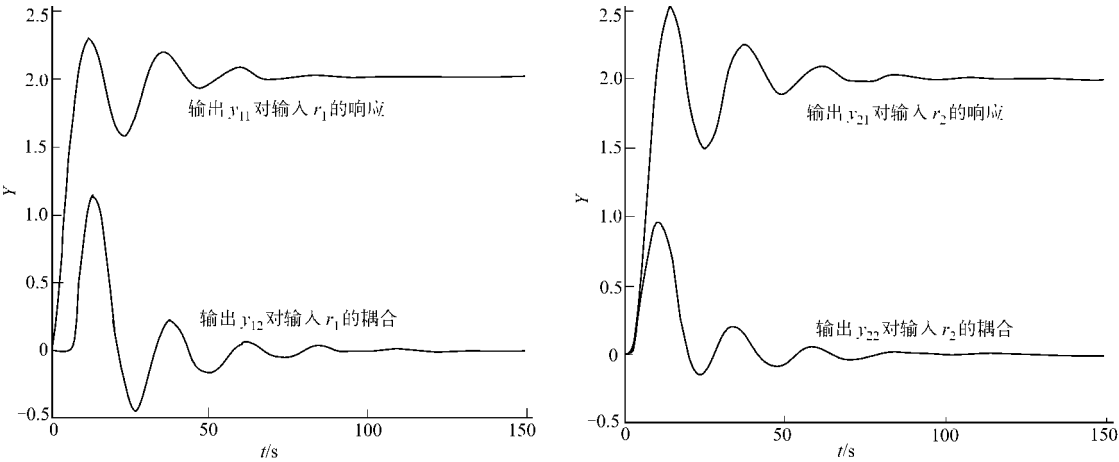


图 3 Z-N 法所得系统的响应曲线

值分别为 $K_{p1} = 0.233\ 2$, $K_{i1} = 0.027\ 6$, $K_{p2} = 0.108\ 2$, $K_{i2} = 0.011\ 8$. 系统响应, 如图 4 所示. (3) 仿真结

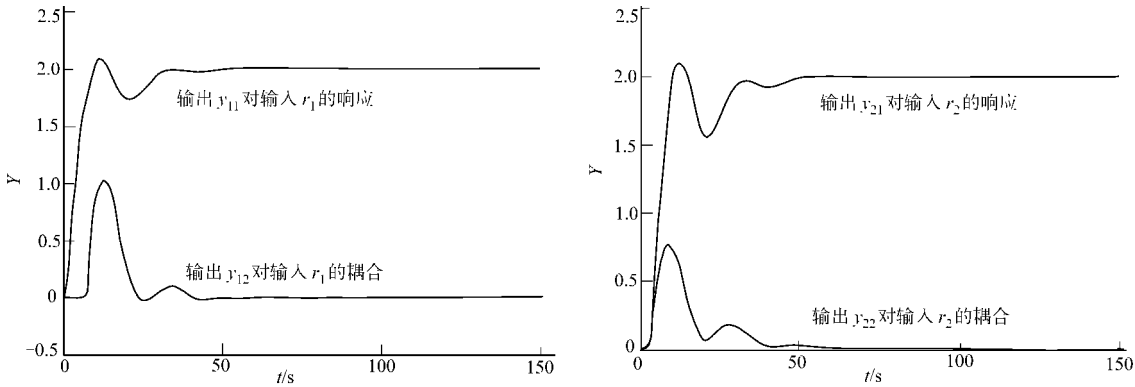


图 4 遗传算法整定后系统响应曲线

果比较, 如表 1 所示. 表中超调量为 σ^* , 调节时间为 t_s^* . 通过比较可见, 通过遗传算法对 PI 调节器的参数进行整定后, 系统的性能指标获得较大的提高.

表 1 仿真结果比较

指标	Z N 法		GA ISE 法	
	y_{11} 曲线	y_{22} 曲线	y_{11} 曲线	y_{22} 曲线
$\sigma^* / (\%)$	16	25	5	8
t_s^* / s	75	75	40	45

4 结束语

仿真结果表明, 利用遗传算法对温控系统的多通道 PI 调节器的参数进行整定, 很好地避免局部最小点, 系统性能指标提高较大. 设计过程中, GA 自动完成, 避开复杂理论公式推倒的过程, 可根据性能指标的侧重调节加权. 该方法对多变量控制系统参数整定具有可行性和优越性, 可运用到其它参数优化的场合. 既使是对复杂系统的调节器设计, 也不会带来方法上的困难.

参 考 文 献

1 Nishikawa Y, Sannomiya N, Ohta T, et al. A method for auto tuning of PID control parameters[J]. Automatica, 1984, 20: 321~ 332

2 柴天佑, 张贵军. 基于给定的相角裕度和幅值裕度 PID 参数自整定新方法[J]. 自动化学报, 1977, 23(2): 167~ 172

3 郑力新, 周凯汀, 王永初. PID 进化设计法[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(4): 340~ 343

4 Tannttu J T, Koivo H N. An expert system for multivariable controller design[J]. Automatica, 1993, 29: 953~ 968

5 Bristol E H. The design of industrially useful adaptive controllers[J]. ISA Transaction, 1983, 22(3): 17~ 25

6 Fan Huiyuan, Wang Shangjin, Xi Guang. Directional evolution operator applied to genetic algorithm[J]. J. Xian Jian tong University, 1999, 33(5): 45~ 48

7 Ziegler J G, Nichols N B. Optimum settings for automatic controllers[J]. Trans. ASME, 1942, 64: 759~ 768

Parameter Optimization of the Regulator
Designing for a Multivariable System
Mei Xiaohua Zheng Lixin Zhou Kaiting

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

Abstract Based on genetic algorithm as a powerful algorithm of optimizing, the authors deal with the complicated issue of the optimization of multivariable and coupled controller which exemplifies by designing parameters of the multichannel PI regulator for a temperature control system. The designed PI regulator made the performance index of the system to be fairly greatly improved. The method is versatile and practical for engineering. It is able to avoid falling in to local optimization. It is an effective design method for the parameter optimization of multivariable system.

Keywords PI regulator, multivariable control system, genetic algorithm, parameter optimization