

文章编号: 1001-0920(2001)02-0195-05

基于改进混合遗传算法的二自由度 PID 控制器设计与应用

王 强, 麻 亮, 强文义, 傅佩琛
(哈尔滨工业大学 控制工程系, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对一般遗传算法存在的不足, 提出一种改进的混合遗传算法, 并将其应用于二自由度 PID 控制器参数寻优设计。仿真试验表明, 所设计的二自由度 PID 控制器具有优良的鲁棒特性和抑制外界干扰特性。在仿真转台控制系统设计中获得了良好的控制效果, 从而说明了该方法的有效性。

关键词: 混合遗传算法; 二自由度 PID; 仿真转台

中图分类号: TP 206 文献标识码: A

Design for 2-DOF PID Controller Based on Hybrid Genetic Algorithm and Its Application

WANG Qiang, MA Liang, QIANG Wen-yi, FU Pei-chen

(Department of Control Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at the deficiency and limitation of general genetic algorithm (GA), a new hybrid GA is proposed to design the parameter optimization of 2-degree-of-freedom PID controller. The simulation results show that the optimal 2-DOF PID controller has good robustness and good performance of anti-jamming. Applying it into the flight simulator control, a satisfying performance is obtained.

Key words: genetic algorithm; 2-DOF PID controller; flight simulator

1 引 言

在控制系统的设计过程中, 人们关心的两个主要问题是目标跟踪特性和干扰抑制特性。传统的 PID(单自由度 PID) 控制器只有一组 PID 参数可调整, 所以只能折衷地考虑两方面的要求, 往往难以得到最佳控制效果。为了解决这一矛盾, 人们提出二自由度 PID 控制器的设计思想, 它可独立地整定两组 PID 参数, 使目标值跟踪特性和干扰抑制特性同时达到最佳^[1]。

但是, PID 参数的整定是一个复杂的寻优过程,

通常采用以下两种方法: 1) 按照 Ziegler-Nichols 规则的间接整定方法; 2) 从瞬态响应特征向量一步映射到控制器参数修正量的直接整定方法。直接整定方法是直接基于响应曲线拟和来整定控制参数, 而不需要其它中间步骤。基于这一思想, 可将控制器参数的整定过程转化为优化过程。通过优化方法寻优可获得 PID 控制器的优化参数, 但传统的寻优策略是建立在寻优函数为连续、可微的假设基础上, 如果寻优函数不连续可微, 则传统方法便得不到全局最优解。

遗传算法具有很强的寻优能力, 能够解决各类

收稿日期: 2000-03-10; 修回日期: 2000-07-06

作者简介: 王强(1973—), 男, 山东平度人, 博士生, 从事智能控制和机器人控制研究; 强文义(1937—), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制和过程控制研究。

复杂的优化问题,且具有广泛的适应性和优良的鲁棒性,已引起广大学者的浓厚兴趣^[2~4]。根据遗传算法的特点,只要将控制器的参数构成基因型,将性能指标构成相应的适应度,便可利用遗传算法来整定控制器的最佳参数,并不要求系统是否为连续可微,能否以显式表示。

2 混合编码的遗传算法

为改进遗传算法的性能,我们采用混合编码的方法。在算法初期,采用二进制编码,选用编码长度短、数量大的群体,保持群体尽可能分散,使算法能快速找到具有优良特性的区域,以提高算法初期的工作效率;随着遗传代数的增加,增加编码串的长度,减小群体的规模。在算法后期,采用从二进制编码过渡到浮点数编码的策略。在找到优良区域的情况下,采用浮点数编码的遗传算法进行以后的迭代搜索,有利于提高遗传算法的搜索精度。这种综合二进制编码和浮点数编码优点的改进编码方法,在提高算法收敛速度的同时,可满足算法高精度的要求,解决了遗传算法计算速度与精度之间的矛盾。该算法充分利用了浮点数编码遗传算法的局部调优功能,具有更高的搜索效率和更大的全局收敛概率^[5]。

在初始群体的选择、复制、交叉等方面,也采取了相应的改进措施^[6,7]。具体策略如下:

1) 采用随机分布和加入互补编码串的方法产生初始群体。初始群体的一部分以随机的方式产生,而另一部分则为前一部分码串群体互补的二进制码串,以避免群体的基因缺陷。

2) 采用定量化复制子代和加入互补二进制编码对的复制方法。以码串的适应值定量化复制子代的数量(如最优码串复制3个子代,10%的次优码串分别复制2个子代,40%的其它码串依概率分别复制1个子代)。这样既避免了两种极端情况,又不影响算法依概率操作的特性。加入互补的随机二进制码串对,可补足群体,解决由复制操作而导致基因缺失的问题。

3) 采用具有高端位突变功能的交叉操作。现有遗传算法的交叉操作不能解决算法早敛的根本原因,在于交叉操作的子代受到限制,即子代仍被限制在父代所在的区域。在此提出一种具有高位突变性质的改进交叉操作方法,即如果参与交叉的两个码串具有相同的最高位,则在交叉的同时,随机突变其中之一最高位。这样可基本保持“动态平衡”状

态,使群体充分离散,有利于解决具有孤立极值点的优化问题,提高计算效率和全局收敛的概率。

4) 增加最优爬山算子以加快算法搜索速度。遗传算法的高效率主要体现在算法的初始阶段,而后的搜索效率则明显降低。现有的遗传算法只能沿一定的概率,使搜索缓慢地向极大值方向移动。为使缓慢的被动进化转为快速的主动进化,本文采用最优爬山的突变操作,即按一定比例选出当前群体中最佳及次优个体,以大概率(如取概率为0.6)突变所选个体各段基因的低位,使搜索具有向多方向小步距爬行的功能,达到搜索主动爬向更优点的目的,提高算法后期的进化速度。

5) 采取最优保留策略,保证算法的全局收敛性。

3 基于改进的混合遗传算法的二自由度PID控制器

3.1 二自由度PID控制器

传统的PID(单自由度PID)控制器,只有一组可调的PID参数,若按干扰抑制特性整定PID参数,则目标跟踪特性变差;若按目标跟踪特性整定PID参数,则干扰抑制特性变差。在实际系统的设计过程中,常采用折衷的方法来整定PID参数,因此很难得到最佳的控制效果。为了解决这一矛盾,人们提出了二自由度PID控制器的设计思想,并在实际应用中获得了良好的效果。二自由度PID控制器并不是由两个独立的PID控制器组成的,但它能独立地设定两组PID参数,使目标值跟踪特性和干扰抑制特性同时达到最佳。

二自由度PID控制器的结构形式是多种多样的,常用的是一种设定值滤波型二自由度PID。其结构简图如图1所示,响应表达式为

$$\theta(s) = \frac{C(s)G(s)H(s)}{1 + (C(s) + F(s))G(s)}R(s) + \frac{G(s)}{1 + (C(s) + F(s))G(s)}D(s) \quad (1)$$

其中

$$C(s) = K_p(1 + 1/T_i s) \quad (2)$$

$$F(s) = K_p \frac{T_{ds}}{1 + 0.1T_{ds}s} \quad (3)$$

式(1)右边第1项为目标值 $R(s)$ 产生的分量,第2项为外界干扰 $D(s)$ 产生的分量。由式(2)和(3)知,对外扰的控制算法为

$$C(s) + F(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_{ds}}{1 + 0.1T_{ds}s} \right] \quad (4)$$

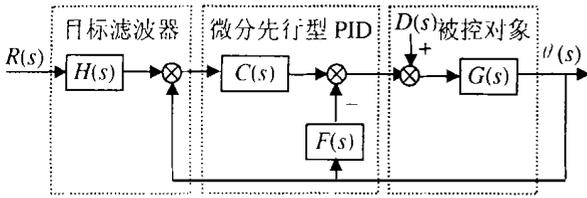


图 1 二自由度 PID 控制器

由式(1)知, $G(s)$, $C(s)$, $F(s)$ 和 $R(s)$ 为不可操作部分, $H(s)C(s)$ 为可操作部分。合理地设置 $H(s)C(s)$ 的参数, 可使系统对变化的目标值 $R(s)$ 具有最佳跟踪特性。

对目标值跟踪的控制算法为

$$H(s)C(s) = K_p \left[\alpha + \left(\frac{1}{T_{is}} - \frac{\beta}{1 + T_{is}} \right) + \frac{\gamma T_{ds}}{1 + 0.1T_{ds}} \right] \quad (5)$$

考虑在稳定状态时, 目标值滤波器的输入输出必须相等, 即 $\lim_{s \rightarrow 0} H(s) = 1$ 。由式(5) 可求得目标值滤波器为

$$H(s) = \frac{1 + \alpha T_{is}}{1 + T_{is}} + \frac{T_{is}}{1 + T_{is}} \times \left[\frac{-\beta}{1 + T_{is}} + \frac{\gamma T_{ds}}{1 + 0.1T_{ds}} \right] \quad (6)$$

其中, α , β 和 γ 分别为比例增益、积分时间和微分时间的二自由度化系数。通过调整二自由度系数, 可实现目标值的跟踪特性达到最佳。

3.2 基于改进混合遗传算法的仿真转台二自由度 PID 控制器

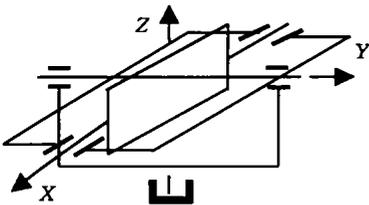


图 2 三轴飞行仿真转台框架结构

将基于混合遗传算法的二自由度 PID 控制器应用于 HIT-3T2 型三轴飞行仿真转台的控制系统设计, 转台的结构简图如图 2 所示。基于三轴仿真转台系统的机理建立其模型, 得到转台外框输出角与阀位移间的传递函数为^[8]

$$G(s) = \frac{0.1194}{s \left[\frac{s^2}{104.89^2} + \frac{2 \times 0.0346s}{104.89} + 1 \right] \left[\frac{1}{373.54^2 s^2 + 1} \right]} \quad (7)$$

实际上, 三轴仿真转台的数学模型是有严重非线性耦合特性的慢时变模型, 而上述模型则忽略了许多次要因素, 是系统在标称工作点处的线性定常标称模型。该模型存在以下不确定性:

- 1) 各个框架之间存在复杂的非线性耦合;
- 2) 液压系统本身是复杂的高阶非线性系统, 而实际采用的是近似的低阶线性模型, 因而导致系统的不确定性;
- 3) 转台的负载不定(要求能测试不同型号的导引头), 使得转台的外框转动惯量是一个时变的不确定量;
- 4) 液压油特性受油温特性的影响比较严重, 它对马达的影响非常大。

由于系统存在不确定性和外界环境的干扰, 所以要求所设计的控制系统不仅能满足跟踪性能指标, 而且应具有一定的鲁棒稳定性和抗干扰性。为此, 采用基于改进混合遗传算法的二自由度 PID 来设计飞行转台的外框控制系统, 使外框在有效抑制外扰的同时具有良好的动态跟踪性能。

基于改进混合遗传算法设计系统的二自由度 PID 控制器, 应首先确定遗传算法程序所需的参数如下:

- 1) 群体规模 $N = 100$, 交叉概率 $P_c = 0.8$, 突变概率 $P_m = 0.1$, 爬行概率 $P_{cl} = 0.5$;
- 2) 确定适应度函数: 算法的初期适应度函数采用 $f = J_{\max} - J_i$, 算法的后期适应度函数选用 $f = \frac{1}{J_i + 1}$, 其中用于整定 T_i , T_d 和 K_p 的指标函数为

$$J = \sum_{k=0}^{K_w} (k + 1) |\theta(k)| \quad (8)$$

用于整定 α , β 和 γ 的指标函数为

$$J = \sum_{k=0}^{K_w} k |1 - \theta(k)| \quad (9)$$

- 3) 根据转台控制器设计的经验, 待优化的参数取值范围和编码长度选取如下: $0 < T_i, T_d < 30$, 编码长度的变化范围为 $l = \{8, 16\}$, 参数表示精度为 $30 / (2^8 - 1) \sim 30 / (2^{16} - 1)$; $1 < K_p < 5001$, 编码长度的变化范围为 $l = \{8, 16\}$, 参数表示精度为 $5000 / (2^8 - 1) \sim 5000 / (2^{16} - 1)$; $0 < \alpha, \beta, \gamma < 2$, 编码长度的变化范围为 $l = \{4, 8\}$, 参数表示精度为 $2 / (2^4 - 1) \sim 2 / (2^8 - 1)$ 。

最终, 基于改进遗传算法所获得的二自由度 PID 控制器参数整定结果如下

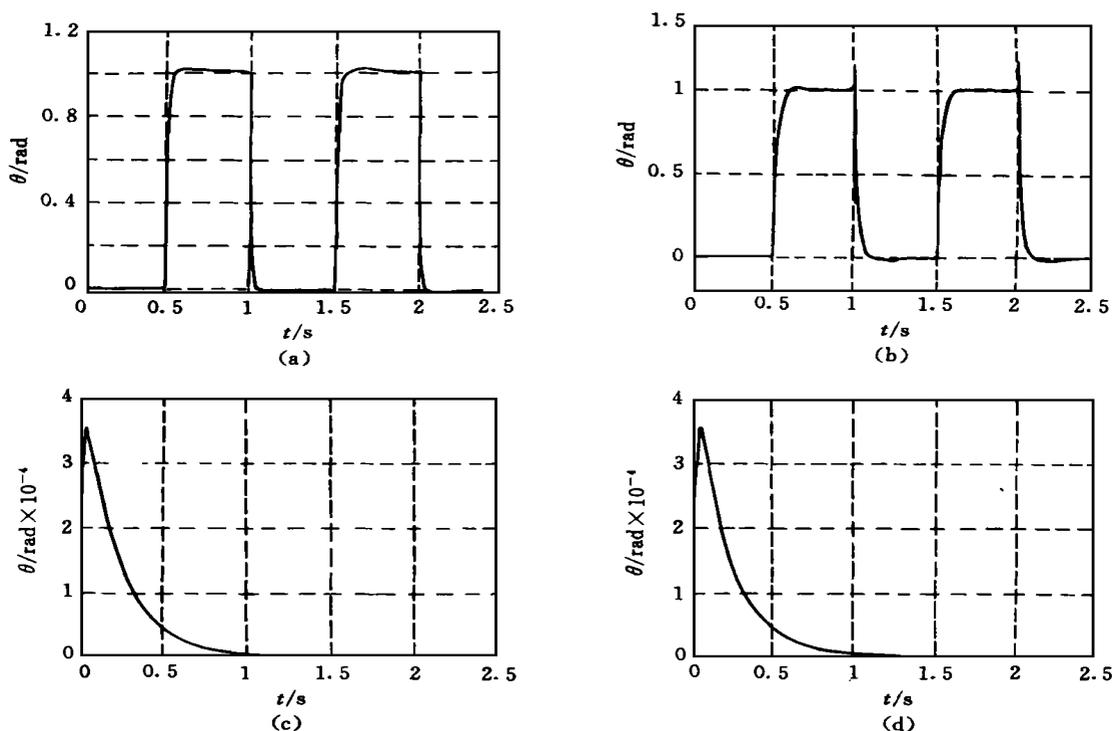


图3 仿真输出响应

- (a) 遗传寻优的二自由度PID方波响应 (b) 传统二自由度PID方波响应
(c) 遗传寻优的二自由度PID阶跃干扰响应 (d) 传统二自由度PID阶跃干扰响应

$$\alpha = 0.869, \quad \beta = 0.051, \quad \gamma = 0.005$$

而传统的二自由度PID控制器的设计方法,首先采用常规的PID参数整定方法来调节 T_i 、 T_d 和 K_p ,使干扰抑制最佳;然后根据经验值(见表1)选定二自由度化系数 α 、 β 和 γ ,以满足目标值跟踪特性的要求。

表1 二自由度化系数的经验值

综合控制算法	α	β	γ
P-I-PD(仅P为二自由度)	0.4	0	0
PI-PID(仅PI为二自由度)	0.4	0.15	0
PID-PID(完全二自由度)	0.4	0.15	0.48

将两种方法得到的二自由度PID控制器与系统的模型组成闭环系统,系统的仿真输出响应如图3所示。

从图3可以看出,依经验选取二自由度PID参数带有一定的局限性。按干扰抑制特性整定PID参数,然后由经验值选取 α 、 β 和 γ ,尽管可以得到满意的抗干扰性能,但跟踪特性并非最优。而基于遗传算法设计的二自由度PID控制器,系统不仅具有优

良的抗干扰性能,而且具有良好的跟踪特性。另外,基于改进的混合遗传算法设计的二自由度PID控制器还具有优良的鲁棒性能,当三轴转台系统的参数发生变化时,闭环系统仍具有良好的跟踪性能和抗干扰性能。

4 结 论

本文针对二自由度PID控制器参数整定难的问题,提出一种利用遗传算法来整定其参数的方法。针对基本遗传算法在实际应用中存在的缺陷,提出了一些改进措施。利用二进制编码与浮点数编码相结合的混合编码方法来提高算法的寻优精度,并将其应用于飞行仿真转台控制系统,设计了一个优化二自由度PID控制器。仿真试验表明,基于改进的混合遗传算法设计的二自由度PID控制器,不仅具有满意的跟踪性能,能很好地抑制外界干扰,而且整个系统鲁棒稳定性能也有很大提高,这说明本文提出的设计方法是可行而有效的。

(下转第202页)

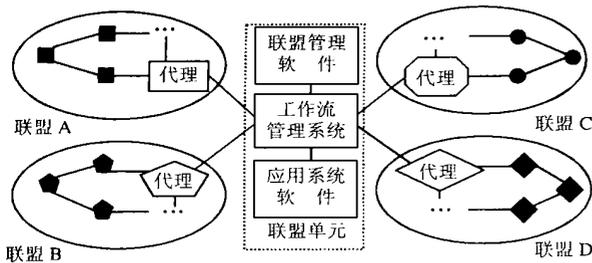


图4 联盟单元多代理系统

3) 代理对外部数据访问请求进行联盟属性识别。代理接口增加联盟属性识别层,可用不同的数字签名或其它方式来区别不同的联盟对话。

4) 单元内部数据的更新由应用系统统一操作,代理只进行数据的转发,以保证单元内部数据的一致性。

5) 单元内部的工作流程增加联盟标识属性,并将联盟标识属性映射给相应代理。

6) 代理内部设置局部工作流机,对代理所属联盟内单元工作流程进行管理和控制。

7) 单元内设置全局工作流管理系统,对单元内部所有联盟的工作流程进行管理和控制,完成总体工作协调。

5 结 语

为了迅速响应已经或即将出现的市场机遇,不同企业之间需要迅速结盟或解体。传统的信息系统

已不能满足这一要求。动态联盟是未来企业实现敏捷制造的基本组织方式。为从联盟中获取最大利益,满足企业的生产需求,参与多个联盟是未来企业的发展趋势。

本文在分析联盟环境下企业信息系统需求和联盟管理需求的基础上,提出用具有多代理结构的AMIS单元构成动态联盟信息系统。具有不同功能的AMIS单元通过不同的智能代理系统相互连接,参与不同的AMIS系统,从而实现企业参与多个联盟的构想。这种结构既能完成单个联盟的生产任务,又能对单元内所有联盟任务进行综合管理,解决联盟之间的冲突。该系统满足了动态联盟信息系统管理的需求,是实现未来企业动态联盟的有效途径之一。

参考文献:

- [1] 蒋新松. 21世纪企业的主要模式——动态联盟[J]. 计算机集成制造系统, 1996, 2(4): 3-8.
- [2] Extended enterprise collaboration. The NGM advanced enterprise concepts thrust team[R], 1997.
- [3] WFM C. The workflow reference model[R]. Brussels: WFM C, 1994.
- [4] 许青松, 陶丹, 熊锐. 基于工作流技术的面向对象的车间框架模型[A]. 第五届中国计算机集成制造系统(CIMS)学术会议[C]. 成都, 1998. 5: 100-104.
- [5] Tao Dan, Fan Yushun, Wu Cheng *et al.* Research of a virtual information system supporting dynamic collaboration[A]. ETFA'99[C]. Spain, 1999.

(上接第198页)

参考文献:

- [1] 廖春根. 二自由度PID控制方式的构成、特性和应用[J]. 黑龙江省自动化技术与应用, 1987, 6(4): 61-66.
- [2] J H Holland. Genetic algorithms[J]. Scientific American, 1992, 4(7): 44-50.
- [3] 绕晓缙, 戴冠中, 徐乃平. 一种新的优化搜索算法——遗传算法[J]. 控制理论与应用, 1995, 12(3): 256-273.
- [4] 周金荣, 黄道, 蒋慰孙. 遗传算法的改进及其应用研究[J]. 控制与决策, 1995, 10(3): 261-264.
- [5] Z Michalewicz. A modified genetic algorithm for optimal control problems[J]. Comp Math Appl, 1992, 23(12): 83-94.
- [6] 孟庆春. 关于遗传算法的研究及应用现状[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1995, 35(5): 44-48.
- [7] 恽为民, 席裕庚. 遗传算法的运行机理分析[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(3): 297-304.
- [8] 陈兴林. 三轴飞行仿真转台控制系统设计与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1995.