

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905406

惯性稳定平台单神经元/PID自适应复合控制与参数优化*

周向阳^{1,2}, 时延君¹

(1. 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院 北京 100191; 2. 北京量子信息科学研究院 北京 100193)

摘要:针对成像载荷对惯性稳定平台高稳定精度控制的要求,提出一种基于改进型细菌觅食优化算法的单神经元/PID自适应复合控制方法。首先将单神经元与PID控制结合组成单神经元/PID自适应复合控制器,实现惯性稳定平台自适应控制,提高系统控制精度;其次,针对传统试凑法难以获得控制器最优控制参数的不足,采用改进型细菌觅食优化算法对复合控制器进行参数寻优,实现控制参数最优化;最后,对提出方法进行仿真分析和实验验证。实验结果表明:采用参数优化的单神经元/PID自适应复合控制后,稳定平台稳定精度和扰动抑制能力都得到明显提高,静基座和动基座条件下角位置误差分别为 0.0038° 和 0.2904° ,与传统PID控制相比分别提高19.1%和39.9%。

关键词:航空遥感;惯性稳定平台;单神经元/PID自适应复合控制;改进型细菌觅食优化算法;稳定精度

中图分类号: TP273.3 V243.5 TH761.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Single neuron/PID adaptive compound control and parameter optimization for the inertially stabilized platform

Zhou Xiangyang^{1,2}, Shi Yanjun¹

(1. School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Beijing Academy of Quantum Information Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: To meet the requirements of high stability precision control to an inertially stabilized platform (ISP), a single neuron/proportion integration differentiation (PID) adaptive compound control method based on the improved bacterial foraging optimization algorithm is proposed. Firstly, the single neuron and PID control are fused to formulate a single neuron/PID adaptive controller to realize the adaptive control of ISP. In this way, the control accuracy of the ISP is improved. Secondly, to solve the problem that the optimal parameters of the controller are hard to be achieved by the trial method, an improved bacterial foraging optimization algorithm is used to optimize the parameters of the compound controllers. Finally, simulations and experiments are carried out. Experimental results show that the proposed method can significantly improve the system performance such as stability accuracy and disturbance rejection ability. After utilizing the compound control with parameter optimization, the stabilization accuracy of the platform under the condition of static and dynamic base are 0.0038° and 0.2904° , which are 19.1% and 39.9% higher than the traditional PID control.

Keywords: aerial sensing; inertially stabilized platform; single neuron/PID (proportion integration differentiation) adaptive control; improved bacterial foraging optimization; stabilization precision

0 引言

航空遥感是对地观测体系的重要组成部分。在航空遥感系统工作过程中,飞机载体受到阵风、湍流等影响难

以保持稳定,继而难以维持成像载荷视轴的稳定,导致成像质量退化。惯性稳定平台(inertially stabilized platform, ISP)用于隔离飞机载体角运动、振动等对载荷视轴的影响,是高精度航空遥感成像的基础和保障。惯性稳定平台在多源扰动影响下呈现非线性、参数不确定、时变等特

收稿日期:2019-07-23 Received Date:2019-07-23

* 基金项目:国家自然科学基金(51775017)、北京市自然科学基金(3182021)、北京量子信息科学研究院课题(Y18G30)、机械制造系统工程国家重点实验室开放课题研究基金(sklms2018005)项目资助

点,因此需要研究复杂环境下高精度高稳定度控制方法^[1-3]。传统PID控制被广泛应用在控制领域当中,然而其对非线性、时变性系统或受外界干扰的系统难以达到高精度的控制要求。

神经网络是一种智能控制方法,具有可逼近任意非线性关系、鲁棒性和容错性强、自学习和自适应能力强、计算快速等优点。神经网络控制对于具有非线性、不确定性和时变等特点的系统具有独特的优越性。单神经元作为神经网络的最基本单位,不仅具备以上优点,而且结构简单、易于计算。将单神经元与PID控制结合,既能克服传统PID随动性差的缺点,又保留了其结构简单、易于实现、可靠性高等优点。文献[4]采用单神经元/PID实现红外测温中辐射源的温度控制,具有超调小、精度高、抗干扰能力强等优点;文献[5]采用单神经元自适应PID控制策略实现对超声马达运动的快速精确控制,提高了动静态性能;文献[6]利用单神经元自适应PID控制器取代转速PI控制器,提高了异步电动机矢量控制系统的性能。

单神经元/PID自适应复合控制的参数选择通常采用传统参数试凑法。由于所要确定的参数较多,参数试凑过程中耗费时间较长,且不一定能获得实现最优控制的一组参数。为提高控制器性能,可以基于细菌觅食算法(bacterial foraging optimization, BFO)对控制器参数进行优化。细菌觅食算法具有构造直观、全局搜索等优点,但是优化精度较低,收敛速度缓慢,容易陷入局部极值。针对上述问题,各种自适应机制相应被提出,但都存在各自的不健全。文献[7]引入非线性递减游动步长、维度自适应学习改进趋化操作,使算法在优化精度和优化效率等方面表现更优,但改进的算法在优化初期有轻微陷入局部早熟的趋势;文献[8]设置动态趋化步长与动态迁徙概率实现算法改进,相对于传统细菌觅食算法能够提高图像分割的准确率和速度,但其优化速率仍逊于其他优化算法;文献[9]根据菌群信息调整算法趋化操作,集成种群多样性策略到复制操作中,提高算法的收敛性和全局收敛能力,但在衰减系数等方面仍需进一步改善。

综上所述,本文针对多源扰动影响下惯性稳定平台高精度稳定度控制要求,提出一种基于参数优化法的单神经元/PID自适应复合控制,采用改进型细菌觅食算法对单神经元/PID自适应复合控制器进行参数寻优,以使控制器达到更好的控制效果。针对细菌觅食算法中个体间信息交流较少的缺点,将个体间信息交流较好的粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法与其结合,增强个体间交流力度,从而提升算法的收敛速度和精度。

1 惯性稳定平台系统原理

1.1 惯性稳定平台控制系统组成

惯性稳定平台主要由平台基座、框架结构、陀螺仪、编码器、力矩电机以及位置姿态系统(position and orientation system, POS)等几部分组成,如图1所示。平台采用三自由度框架结构,当平台受到外力矩干扰时,框架将发生转动产生相对于惯性坐标系的角速度,速率陀螺检测到该角速度,经过校正放大后作用到力矩电机上形成闭环回路。当确定平台跟踪目标后,平台一旦受到干扰会迅速将扰动消除,保证跟踪过程中相机视轴的稳定,能够有效隔离扰动^[10-11]。

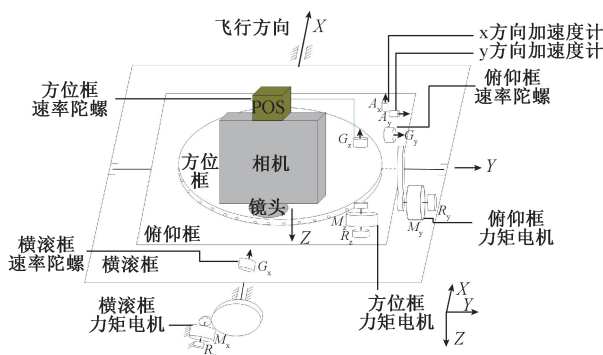


图1 航空遥感惯性稳定平台结构

Fig.1 The structure of inertially stabilized platform for aerial sensing application

1.2 传统PID三环复合控制方法

惯性稳定平台的控制系统通常采用三环复合控制,电流环、速率环以及位置环由内而外分布。三环均采用PID控制,电流环通过电流传感器测量电流并完成反馈,形成闭环回路,减小电源电压波动的影响;速率环通过速率陀螺提供的平台干扰角速度信息,经由PID控制器实现干扰补偿,提高系统的响应速度和稳定性;位置环通过加速度计或POS反馈平台位姿信息,使用PID控制实现惯性稳定平台的调平与跟踪功能^[4]。

2 单神经元/PID自适应复合控制器设计

本文中系统主反馈位置环采用单神经元/PID自适应复合控制方法,实现惯性稳定平台的自适应控制,提高系统的自适应能力及稳定精度。

2.1 神经网络模型

单神经元是人工神经网络(artificial neural network, ANN)的最基本单元,具有自学习和自适应能力强、结构简单、易于计算等优点。它是一种多输入单输出系统,其

模型如图 2 所示。其中, $x_1, x_2, \dots, x_n$ 代表神经元的输入, $w_1, w_2, \dots, w_n$ 代表各个输入的连接权系数, y 表示输出, $f(\cdot)$ 为激活函数。单神经元的输入输出关系采用线性加权求和的表达式, 其表达式如式(1)所示。

$$\begin{cases} net_j = \sum_{i=1}^n x_i w_i - \theta_j \\ y = f(net_j) \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ_j 为神经元 i 的阈值; net_j 是净输入, 该项是通过某种运算把输入信号作用起来的总效果^[5]。

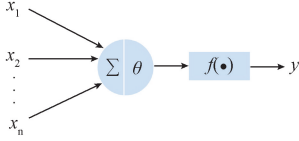


图 2 人工神经元模型

Fig.2 The model of an artificial neuron

2.2 单神经元/PID 自适应复合控制器算法

单神经元/PID 自适应复合控制算法是传统 PID 控制和单神经元控制的结合, 不仅能够弥补传统 PID 控制调节非线性、不确定性和时变系统时随动性差的不足, 还能保留其结构简单、易于实现、可靠性高等优点, 从而提高控制系统的鲁棒性^[6]。单神经元/PID 自适应复合控制器是通过调整加权系数来实现自适应的。根据反馈信息实时调整权系数, 使其更好地满足系统控制的要求, 从而实现控制性能的提高。

本文将增量式 PID 与单神经元相结合, 神经元的输入信号 $x_i(k)$ ($i = 1, 2, 3$) 如下:

$$\begin{cases} x_1(k) = e(k) - e(k-1) \\ x_2(k) = e(k) = \theta_{in}(k) - \theta_{out}(k) \\ x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases} \quad (2)$$

采用改进的 Hebb 学习规则调节 w_i , 控制器最终得到输出为:

$$\begin{cases} u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 w'_i(k) x_i(k) \\ w'_i(k) = w_i(k) / \sum_{i=1}^3 |w_i(k)| \\ w_i(k) = w_i(k-1) + \eta_i u(k) e(k) [e(k) + \Delta e(k)] \end{cases} \quad (3)$$

式中: K 为输出增益; η_i 为学习速率。在权值调整过程中对其进行了归一化处理, 既能保证了控制策略的收敛性, 又能在程序运行过程中起到加速收敛的作用^[12-13]。

3 参数优化

本文为提高控制器性能, 基于细菌觅食算法对控制器参数 K 、 η_i 和 $w_i(0)$ 进行寻优。

3.1 细菌觅食算法原理

细菌觅食算法是通过仿生大肠杆菌的觅食活动规律得到的类优化算法, 包含趋化、群聚、复制和迁徙 4 个操作过程^[14]。

1) 趋化

趋化过程通过翻转和游动来模拟大肠杆菌的运动。大肠杆菌从搜索空间中随机选择一个方向, 然后向该方向翻转。经过这个步骤, 细菌移动一个步长。若该方向上适应度优于之前方向上的适应度, 则细菌会沿着这个方向游动。假定第 i 个细菌经过 j 次趋化、 k 次复制和 l 次迁徙后到达位置 $\theta^i(j, k, l)$, 则第 i 个细菌的趋化过程可以表示为:

$$\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(j, k, l) + C(i) \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i) \Delta(i)}} \quad (4)$$

式中: $C(i)$ 代表每次游动步长; $\Delta(i)$ 为翻转的随机方向向量, 其取值范围为 $[-1, 1]$ 。

2) 群聚

群聚操作中大肠杆菌间的信号交流通过相互作用力进行模拟。杆菌释放引力向其他杆菌发出信号使杆菌聚集在一起, 或者释放斥力来排斥附近的杆菌。杆菌之间相互吸引和排斥的作用可以表述为:

$$\begin{aligned} Jcc(\theta, P(j, k, l)) &= \sum_{i=1}^S Jcc(\theta, \theta^i(j, k, l)) = \\ &= \sum_{i=1}^S \left[-d_{\text{attract}} \exp\left(-\omega_{\text{attract}} \sum_{m=1}^D (\theta_m - \theta_m^i)^2\right) \right] + \\ &= \sum_{i=1}^S \left[-d_{\text{repellent}} \exp\left(-\omega_{\text{repellent}} \sum_{m=1}^D (\theta_m - \theta_m^i)^2\right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $Jcc(\theta, P(j, k, l))$ 表示了细胞之间交流的值, 可以用来表示一个随时间变化的适应度函数; S 是杆菌总数; D 为待优化维数, $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_D]^T$ 是在 D 维搜索空间中的某一点; d_{attract} 、 $d_{\text{repellent}}$ 为细菌释放吸引和排斥物质的深度; ω_{attract} 、 $\omega_{\text{repellent}}$ 分别为细菌吸引和排斥物质的宽度量度。杆菌 i 的适应度值可以表示为:

$$J(i, j, k, l) = J(i, j, k, l) + Jcc(\theta, P(j, k, l)) \quad (6)$$

3) 复制

用 N_c 表示杆菌的生存时间, 经过 N_c 次趋化后, 细菌开始复制。细菌 i 的健康值 ($J_{i, \text{health}}$) 等于其一生的适应度之和。

$$J_{i, \text{health}} = \sum_{j=1}^{N_c} J(i, j, k, l) \quad (7)$$

将所有杆菌的健康值按降序排列。在复制阶段, S_r ($S_r = S/2$) 个更健康的细菌存活下来, 并且每一个杆菌在同一位置分裂成两个, 以此来保持杆菌的总个数不变; 剩下的 S_r 个细菌被淘汰。

4) 迁徙

由于当地环境的不利因素影响或者意想不到的变

化,该区域的杆菌可能被杀死或分散到新的地方。算法通过迁徙对这一现象进行模拟。以很小的概率 P_{ed} 杀死细菌,同时在环境中随机产生一些新的细菌进行替换。

3.2 改进型的细菌觅食算法

粒子群优化是一种随机优化技术,它从一群鸟类的行为或一群个体能力有限的群居昆虫的集体智慧中获得启发。其速度和位置更新的方式如下:

$$v_i(t) = \omega \cdot v_i(t-1) + c_1 r_1 (x_{pbest} - x_{current}) + c_2 r_2 (x_{gbest} - x_{current}) \tag{8}$$

$$x_{current}(t) = x_{current}(t-1) + v_i(t) \tag{9}$$

式中: x_{pbest} 是局部最优位置; $x_{current}$ 是当前位置; x_{gbest} 是全局最优位置; c_1 和 c_2 为非负学习因子; r_1 和 r_2 为随机数; ω 为权重。

标准细菌觅食算法趋化操作中的翻转过程的随机方向会影响算法的全局搜索能力,本文利用粒子群算法对趋化操作进行改进,改进后趋化操作的更新公式为:

$$velocity(i+1) = \omega \cdot velocity(i) + c_1 r_1 (x_{pbest} - x_{current}) + c_2 r_2 (x_{gbest} - x_{current}) \tag{10}$$

$$\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(j+1, k, l) + C(i) \cdot velocity(i) \tag{11}$$

式中: $C(i)$ 代表每次游动的步长^[15]。

4 仿真分析

对本文提出的单神经元/PID 自适应复合控制算法的控制性能在 MATLAB/Simulink 中进行仿真分析。

4.1 基于参数试凑法

单神经元/PID 自适应复合控制 MATLAB/Simulink 仿真中,控制器的控制输出计算通过 Simulink 中的 S-function 完成,控制输出计算的流程如图 3 所示。

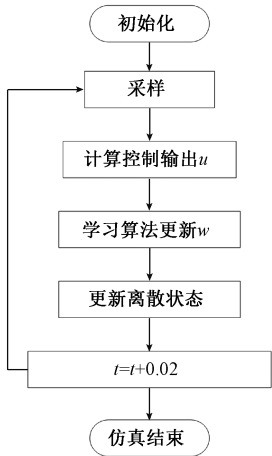


图 3 S-function 计算控制输出流程

Fig.3 Flow chart of control output calculation in S-function

给定输入角度指令 $\theta_{command} = 1^\circ$ 阶跃信号,仿真得到的响应输出如图 4 所示。由图 4 可知,采用参数试凑法的单神经元/PID 控制并没有取得令人满意的效果,仿真前期处于高频振荡的状态,超调量约为 1° ,超调较大;经过约 40 s 系统收敛,系统响应速度很慢;通过放大图可以发现,在收敛后,系统仍处于小幅振荡状态。在惯性稳定平台在经受如此高频率振荡时,对于电机的安全工作十分不利,严重时甚至会产生不可以逆转的损坏。

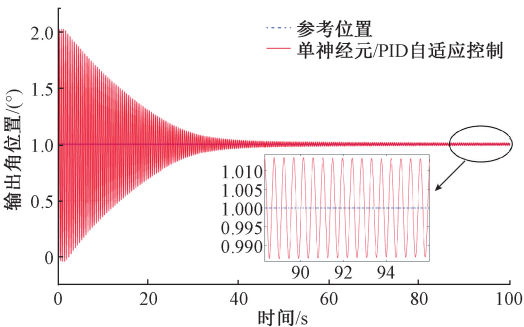


图 4 参数试凑法单神经元/PID 自适应复合控制阶跃响应

Fig.4 Step response of single neuron/PID adaptive control by the parameter trial method

4.2 基于改进型细菌觅食优化算法

控制器参数优化仿真的搭建通过 MATLAB/Simulink 仿真模块联合函数文件实现,其中在 MATLAB/Simulink 仿真模块中搭建惯性稳定平台控制系统,在函数文件中通过 MATLAB 语言实现优化算法编程。当改进型细菌觅食算法优化控制器参数仿真运行时,优化程序将获得参数通过语句输出到 MATLAB/Simulink 仿真模块中,仿真模块以此次输入参数运行控制器;控制器运行完毕后,仿真模块将时间乘以误差绝对值积分(integrated time absolute error, ITAE)输出到优化程序中,作为适应度函数,以评判在该组参数下控制器的控制性能。改进型细菌觅食算法优化单神经元/PID 自适应复合控制器仿真模块框图如图 5 所示。

1) 阶跃响应

图 6 所示为惯性稳定平台在摩擦力矩扰动下的单神经元/ PID 自适应控制阶跃响应结果曲线。与优化前的单神经元/PID 自适应复合控制响应曲线相比,可以发现响应的整个过程中系统的振荡消除,同时收敛速度有了很大幅度的提高。该结果表明采用改进型的细菌觅食算法对单神经元/PID 自适应复合控制器参数的优化是有效的。图 7 所示为 PID 控制与单神经元/PID 自适应复合控制的阶跃响应曲线对比,两种控制方法的比较结果总结如表 1 所示。

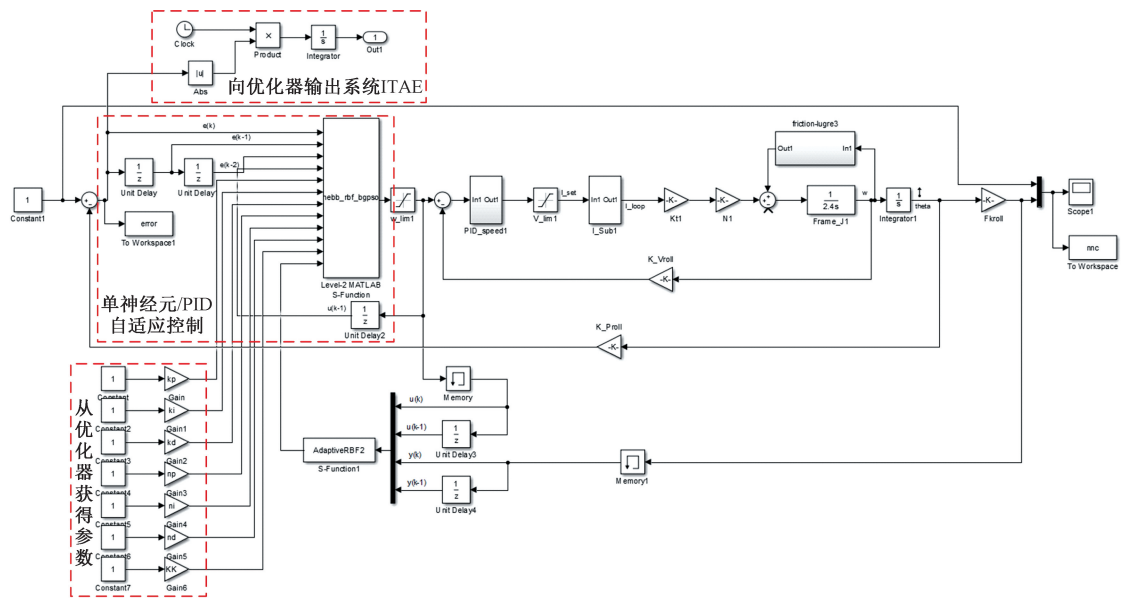


图 5 改进型细菌觅食算法优化自适应控制器参数仿真

Fig.5 Simulation diagram of single neuron/PID adaptive control optimized by the improved BFO

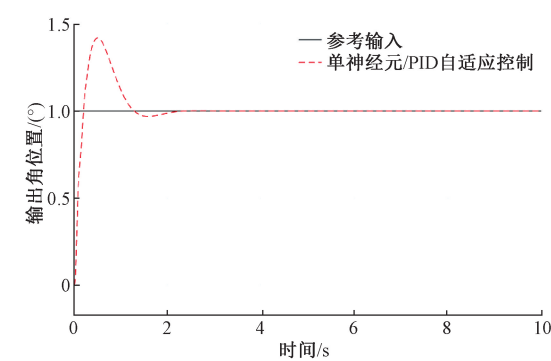


图 6 参数优化法单神经元/PID 自适应复合控制阶跃响应

Fig.6 Step response of single neuron/PID adaptive control by the parameter optimization method

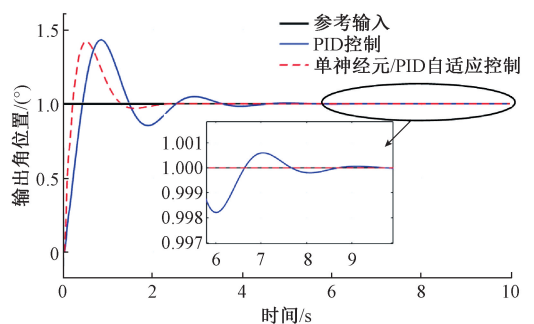


图 7 PID 控制和参数优化法单神经元/PID 自适应复合控制阶跃响应对比

Fig.7 Step response comparison between PID control and parameter-optimized single neuron/PID adaptive control

表 1 PID 控制和参数优化法单神经元/PID 自适应复合控制的阶跃响应仿真结果对比

Table 1 Simulink results comparison for step response between PID control and parameter-optimized single neuron/PID adaptive control

方法	调整时间/s	RMS/(°)
PID 控制	3.33	0.095 7
单神经元/PID 自适应复合控制	1.86	0.075 9
较 PID 降低/%	44.1	20.7

对比传统 PID 控制发现,虽然两者对于阶跃响应的超调量大致相同,但单神经元/PID 自适应复合控制的调整时间为 1.865 s,较 PID 控制提高了 44.1%,稳定后计

算单神经元/PID 自适应复合控制的均方根误差 (root mean square,RMS) 为 0.075 9°,较 PID 控制的 0.095 7°降低了 20.7%。结果表明在单神经元/PID 自适应复合控制器作用下,稳定平台的响应速度有所加快,稳定精度有所提高。

2) 正弦响应

为验证在不同控制器作用下惯性稳定平台的跟踪能力,本文还进行了不同控制方法对于正弦响应的仿真。给定幅值为 1°的正弦输入角指令,仿真结果如图 8 所示,两种控制方法的正弦响应对比结果总结如表 2 所示。通过图 8 可以看出,单神经元/PID 自适应复合控制比 PID 控制更早进入平稳跟踪状态,从局部放大图可以看出,PID 控制出现超调和跟踪延迟现象,单神经元/PID 自适应复合控制角位置跟踪误差比 PID 控制更小。综上,单

神经元/PID 自适应复合控制在响应快速性、准确性和稳定精度方面的表现都明显优于 PID 控制。

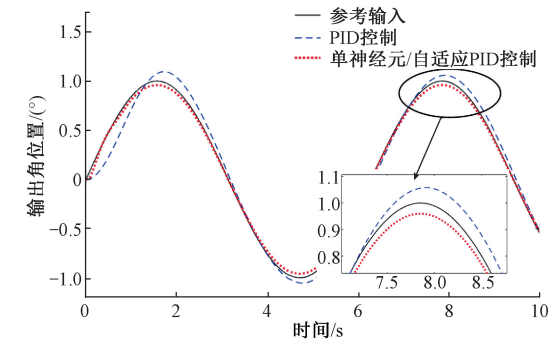


图 8 PID 控制和参数优化法单神经元/PID 自适应复合控制的正弦响应曲线对比

Fig.8 Sine response comparison between PID control and parameter-optimized single neuron/PID adaptive control

表 2 PID 控制和参数优化法单神经元/PID 自适应复合控制正弦响应对比总结

Table 2 Simulink results comparison for sine response between PID control and parameter-optimized single neuron/PID adaptive control

方法	角位置跟踪 误差/(°)	跟踪延 迟/s	RMS/ (°)
PID 控制	0.058	0.077	0.094 9
单神经元/PID 自适应控制	0.040	0	0.031 5
较 PID 降低/%	31	100	66.8

通过以上仿真可以发现,单神经元/PID 自适应复合控制比常规 PID 控制具有更快的响应速度、更高的稳定精度和更准确的跟踪性能。

5 实验验证

根据惯性稳定平台的工作环境,本文分别开展静/动基座下控制算法性能实验验证。单神经元/PID 自适应复合控制与 PID 控制算法分别控制惯性稳定平台进行调平实验,将获得的实验结果进行对比。

5.1 静基座实验

静基座实验系统如图 9 所示。实验给定 0°调平信号,获取惯性稳定平台调平过程以及调平后的输出角位置数据。图 10 所示为静基座下调平实验结果。计算得到 PID 控制的 RMS 为 0.004 7°,单神经元/PID 自适应复合控制的 RMS 为 0.003 8°,应用单神经元/PID 自适应复合控制获得的惯性稳定平台稳定精度较 PID 提高了 19.1%,实验对比结果如表 3 所示。实验结果

证明了单神经元/PID 自适应复合控制的控制准确性和稳定性更好。

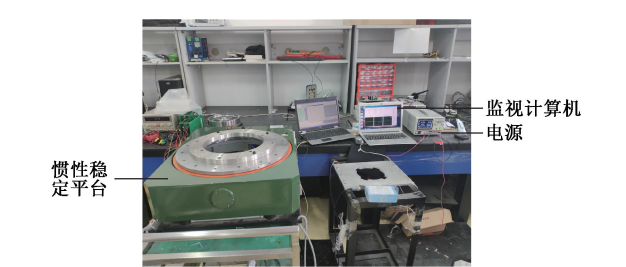


图 9 惯性稳定平台静基座实验系统

Fig.9 Experimental system diagram of inertially stabilized platform under static base

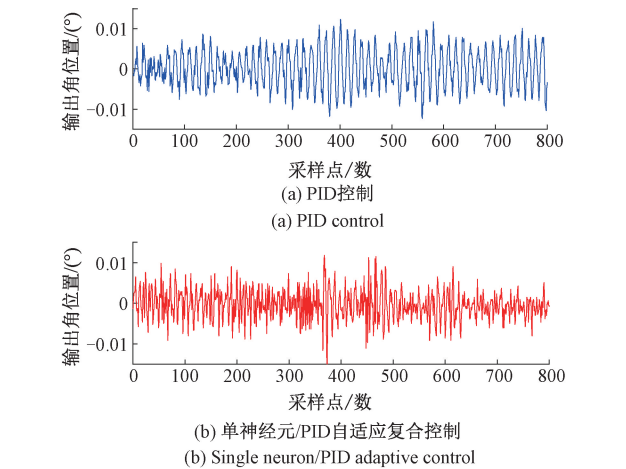


图 10 PID 与单神经元/PID 自适应复合控制静基座调平实验结果

Fig.10 Results of level experiment under static base between PID control and parameter-optimized single neuron/PID adaptive control

表 3 PID 与单神经元/PID 自适应复合控制静基座调平对比

Table 3 Level experiment results comparison under static base between PID control and parameter-optimized single neuron/PID adaptive control

方法	RMS/(°)	较 PID 降低/%
PID 控制	0.004 7	-
单神经元/ PID 自适应控制	0.003 8	19.1

5.2 动基座实验

动基座实验系统如图 11 所示。将平台置于推车上,由实验人员拉动推车在不平整路面上前进,进行动基座实验。

实验设定同静基座实验。图 12 所示为动基座下调平实验结果。经过计算得到 PID 和单神经元/PID 自适

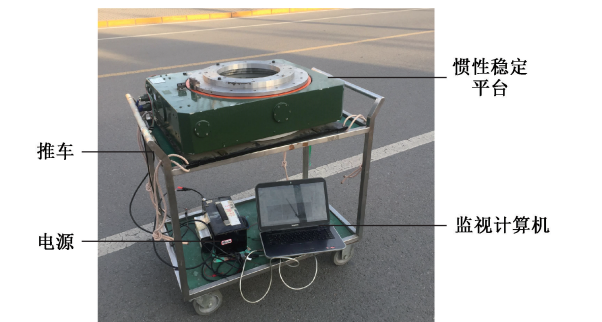


图 11 惯性稳定平台动基座实验系统

Fig.11 Experimental system diagram of inertially stabilized platform under moveable base

应复合控制的 RMS 分别为 $0.482\ 8^{\circ}$ 和 $0.290\ 4^{\circ}$, 单神经元/PID 自适应复合控制控制精度在动基座下较 PID 提高了 39.9%, 实验对比结果如表 4 所示。实验结果证明所提出的单神经元/PID 自适应复合控制扰动抑制能力更强, 获得的稳定精度更高。

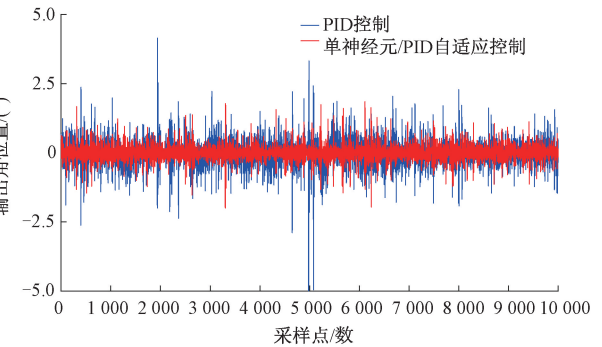


图 12 PID 与单神经元/PID 自适应复合控制动基座调平实验结果

Fig.12 Experimental results of level experiment under moveable base between PID control and parameter-optimized single neuron/PID adaptive control

表 4 PID 与单神经元/PID 自适应复合控制动基座调平对比

Table 4 Level experiment results comparison under moveable base between PID control and parameter-optimized single neuron/PID adaptive control

方法	RMS/ $^{\circ}$	较 PID 降低/%
PID 控制	0.482 8	—
单神经元/ PID 自适应控制	0.290 4	39. 9

6 结 论

针对航空遥感惯性稳定平台的高精度控制要求, 本文提出一种基于改进型细菌觅食算法优化的单神经元/

PID 自适应复合控制算法代替传统 PID 控制, 以提高稳定平台系统的控制准确性和稳定精度, 并通过仿真和实验, 对所提出的方法进行实验验证。实验结果表明: 1) 提出的基于改进型细菌觅食算法参数优化的单神经元/PID 自适应复合控制算法与参数试凑法相比, 能通过优化算法一次性获得令人较为满意的控制效果, 省去参数试凑法繁琐的试凑环节, 节省人力和时间成本; 2) 单神经元/PID 自适应控制获得的惯性稳定平台稳定精度在静基座和动基座下较 PID 分别提高了 19.1% 和 39.9%。相比于传统 PID 控制, 单神经元/PID 自适应复合控制能够提高系统的稳定精度。

参考文献

[1] ZHOU X Y, GAO H, ZHAO B L, et al. A GA-based parameters tuning method for an ADRC controller of ISP for aerial remote sensing applications [J]. ISA Transactions, 2018, 81(8) : 318-328.

[2] 钟麦英, 矫成斌, 李树胜, 等. 基于 PMI 的三轴惯性稳定平台干扰力矩补偿方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(4) : 781-787.

ZHONG M Y, JIAO CH B, LI SH SH, et al. Study on the compensation method for disturbance torque of three-axis inertially stabilized platform based on PMI [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(4) : 781-787.

[3] WANG H G, WILLIAMS T C. Strategic inertial navigation systems: High-accuracy inertially stabilized platforms for hostile environments [J]. IEEE Control System Magazine, 2008, 28(1) : 65-85.

[4] 周向阳, 贾媛, 岳海潇, 等. 惯性稳定平台变置信度优化平滑 CMAC 复合控制 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4) : 764-771.

ZHOU X Y, JIA Y, YUE H X, et al. MC & OS-based CMAC compound control of inertially stabilized platform for aerial remote sensing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4) : 764-771.

[5] 荣志刚, 张硕, 杨丽娜, 等. 基于单神经元 PID 的并联机构稳定控制研究 [J]. 信息技术, 2019(2) : 98-101.

RONG ZH G, ZHANG SH, YANG L N, et al. Research on stability control of parallel mechanism based on single neuron PID [J]. Information Technology, 2019 (2) : 98-101.

[6] LIU G Q, LI L. Quantification factor self-tuning fuzzy PID controller research for a permanent magnet synchronous motor feeding system [C]. IEEE Control and Decision Conference, 2012: 2510-2514.

[7] 姜建国, 周佳薇, 郑迎春, 等. 一种自适应细菌觅食优化算法 [J]. 西安电子科技大学学报 (自然科学版),

- 2015, 42(1): 75-81.
- JIANG J G, ZHOU J W, ZHENG Y CH, et al. Adaptive bacterial foraging optimization algorithm [J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2015, 42 (1): 75-81.
- [8] 关良华, 曾志高, 鲍海兴, 等. 改进细菌觅食算法在图像分割中的应用 [J]. 湖南工业大学学报, 2016, 30(6): 34-38.
- GUAN L H, ZENG ZH G, BAO H X, et al. Application of an improved bacterial foraging algorithm to image segmentation [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2016, 30(6): 34-38.
- [9] ZHAO W G, WANG L Y. An effective bacterial foraging optimizer for global optimization [J]. Information Sciences, 2016, 329(2): 719-735.
- [10] 周向阳, 李玲玲, 赵立波. 基于扩张状态观测器的稳定平台非奇异终端滑模控制 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(5): 161-169.
- ZHOU X Y, LI L L, ZHAO L B. Nonsingular terminal sliding mode control for the ESO-based stabilized platform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(5): 161-169.
- [11] 赵蓓蕾, 周向阳. 航空遥感惯性稳定平台建模与控制系统设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(10): 1543-1550.
- ZHAO B L, ZHOU X Y. Control system modeling and design of aerial remote inertial stabilized platform [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(10): 1543-1550.
- [12] 黄亚南. 变增益的单神经元 PID 控制在制浆造纸过程的研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2017.
- HUANG Y N. The study of paper and pulp making based on single neuron PID control with variable gain [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2017.
- [13] 黄帆. 基于 RBFNN 辨识的超声波电机单神经元 PID 控制研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
- HUANG F. Single neuron PID control for ultrasonic motor based on RBFNN identification [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [14] PANG B, SONG Y, ZHANG CH J, et al. Bacterial foraging optimization based on improved chemotaxis process and novel swarming strategy [J]. Applied Intelligence, 2019, 49(4): 1283-1305.
- [15] 李晓含. 基于细菌觅食算法的 PID 参数整定 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- LI X H. PID parameter tuning based on bacteria foraging algorithm [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018.

作者简介



周向阳 (通信作者), 1992 年于合肥工业大学获得学士学位, 分别在 2002 年和 2008 年于西安交通大学获得硕士学位和博士学位, 现为北京航空航天大学教授, 主要研究方向为机电一体化、伺服控制技术和 MEMS 传感器。

E-mail: xyzhou@buaa.edu.cn

Zhou Xiangyang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1992, and his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Xi'an Jiaotong University in 2002 and 2008, respectively. He is currently a professor at Beihang University. His main research interests include the mechatronics, control technology and MEMS sensors.



时延君, 2017 年于北京工业大学获得学士学位, 现为北京航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向为惯性稳定平台设计与控制。

E-mail: shiyanjun@buaa.edu.cn

Shi Yanjun received her B. Sc. degree from Beijing University of Technology in 2017. She is currently a M. Sc. candidate at Beihang University. Her main research interests include design and control of the inertially stabilized platform.