

改进粒子群优化在稳定平台多空间分析模型的应用

范新明^{1,2}, 曹剑中¹, 杨洪涛¹, 王华伟¹, 杨磊¹, 廖加文¹, 王华¹, 雷杨杰¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 常规伺服系统根据电机轴系转动进行模型分析, 以轴系所在的基座空间作为参照系。稳定平台的被控量以惯性空间作为参照系, 因此不适合用常规伺服系统模型来建模。针对稳定平台的多参照系问题, 文章采用以惯性空间作为电机轴系转动参照系的多空间分析模型, 并将改进粒子群算法应用于该模型。粒子群算法作为一种群智能算法, 广泛应用于参数优化。文中通过惯性权重改进和越界改进, 利用改进后的粒子群算法进行稳定平台 PID 参数的优化和整定。通过仿真和硬件实验平台验证, 结果表明: 在稳定平台多空间分析模型基础之上, 采用改进粒子群算法优化后的 PID 控制器可以使稳定平台有更高的稳定精度、更好的鲁棒性, 有效地隔离了外部的震动和干扰。

关键词: 稳定平台; 粒子群优化; 多空间分析模型; 光电吊舱

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2395-06

Application of improved particle-swarm-optimization in stabilized platform based on multiple reference frame model

Fan Xinming^{1,2}, Cao Jianzhong¹, Yang Hongtao¹, Wang Huawei¹, Yang Lei¹, Liao Jiawen¹,
Wang Hua¹, Lei Yangjie¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In the conventional servo system, model analysis according to motor axis and base space is used as a reference. However, when analyzing the stabilized platform, it is not compatible due to in which exists inertial space and base space. In order to solve this problem, the multiple reference frame model was proposed, where direct-current motor model was based on inertial space. On the basis of the multiple reference frame model, an improved Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm was also proposed. As a kind of swarm intelligence algorithm, PSO was widely used in parameters optimization. The traditional PSO on inertial weight and stopping-over borders were improved, and then, it was adopted in tuning and optimization of PID parameters. The simulation and experiments results indicate that the improved PSO (IPSO) PID controller can obviously enhance the static precision and effectively isolate the vibration and disturbance of carrier.

Key words: stabilized platform; particle swarm optimization; multiple reference frame; optoelectronic pod

收稿日期: 2014-12-09; 修订日期: 2015-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(61201376)

作者简介: 范新明(1989-), 男, 硕士生, 主要从事光电平台伺服系统控制方面的研究。Email: fxm0708@163.com

导师简介: 曹剑中(1969-), 男, 研究员, 主要从事航空相机成像系统方面的研究。Email: cjz@opt.ac.cn

0 引言

机载光电吊舱广泛应用于测绘、高空摄像等各个领域。光电吊舱由稳定平台及搭载于其上的光电载荷组成。稳定平台能够隔离载体扰动,保证视轴稳定,从而实现光电吊舱对地的观察、搜索和跟踪功能。

近年来国内外很多的研究机构在光电吊舱和稳定平台方面做了很多的探索,目前主要控制方法包括模糊控制、神经网络控制、滑膜变结构控制、自抗扰控制等。Ji Wei 等人^[1]延时切换 PID 控制器和模糊控制器,两者协同完成稳定平台的控制任务;刘富春等人^[2]中基于 H 无穷混合灵敏度理论,提出了仿真转台控制系统的非脆弱鲁棒控制器设计方法;沈柏桥等人^[3]中采用 BP 神经网络整定 PID 控制参数,对参数进行实时调整,以使系统达到最优。李贤涛等人^[4]采用基于扰动频率的自适应的自抗扰控制方法,提高光电稳定平台的抗干扰能力。周晓尧等人^[5]针对光电稳定平台中间伺服控制系统的模型不确定性等,提出基于多回路、双自由度内模控制的稳定环控制器设计方法,实现对各项误差因素的控制器的分层设计。

稳定平台控制系统用于隔离相对惯性空间的角速度扰动,平台的被控量以惯性空间作为参照系。但常规伺服系统主要根据电机轴系转动进行模型分析,把轴系所在的基座空间作为参照系。参照系的不同使得常规伺服系统模型在分析稳定平台时存在很多局限。文中采用新的多空间分析模型,把惯性空间作为电机转动的参照系,把基座运动作为扰动加入到电流环路,从而解决多参照系的问题。同时,在多参照系分析模型的基础上,利用改进的粒子群优化算法优化整定 PID 控制器,提升平台稳定精度。

1 稳定平台的多参照系分析模型

1.1 稳定平台的系统结构

稳定平台^[6]的稳定作用有两部分,分别为被动式隔离和主动式隔离。被动式隔离依靠减振弹簧和阻尼器来消除高频扰动;主动式隔离利用惯性陀螺仪和伺服控制系统来消除低频扰动。对于稳定平台来说,惯性陀螺仪是其关键器件,其安装位置不同时,控制方法截然不同。为了达到较高的控制精度,文中把惯性陀螺仪安装在负载平台上,结构如图 1(a)所示,

系统组成如图 1(b)所示。

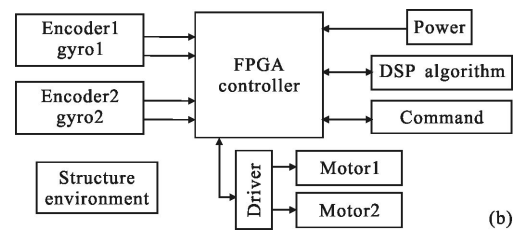
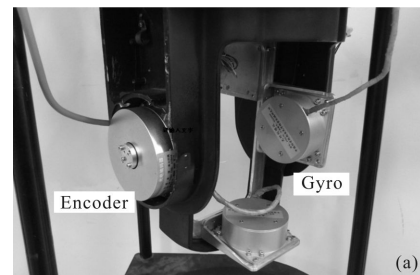


图 1 稳定平台

Fig.1 Stabilized platform

如图所示,稳定平台采用方位-俯仰两轴两框架结构,俯仰框架为平台内框架,方位框架为平台外框架,直流力矩电机和光电编码器分别同轴安装在两个轴系上。两只光纤陀螺仪都安装在内框架俯仰框架上,负责敏感光电负载视轴相对惯性空间的角速度。概括起来,稳定平台控制系统主要实现两个功能,一是隔离外部扰动引起的视轴抖动;一是通过摄像机获取的视频信息,实现目标的搜索和跟踪。

1.2 多参照系分析模型

稳定平台的反馈和输入都以惯性空间作为参照系,而电机的轴系转动通常以基座空间为参照系,这使得常规伺服系统建模方法不适合研究和分析稳定平台。文中采用喻智等人^[7]提出的多空间分析模型进行分析,其具体表述如下:

为了便于区分坐标系,用 ω 表示相对于惯性空间的角速度,用 Ω 表示相对于基座空间的角速度。

图 2 所示为传统的伺服系统模型。在传统模型中,电机转速的参照系是基座空间,反电动势与电机转速的关系如公式(1)所示;负载受到电机输出力矩作用后,输出相对于基座空间的角速度,如公式(2)所示;平台相对于惯性空间的角速度是平台相对于基座空间的角速度与基座相对于惯性空间的角速度之和,如公式(3)所示。在公式(3)中,基座相对惯性空间的角速度是作为扰动加入到速度回路中。

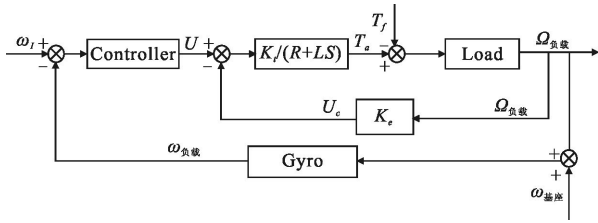


图 2 稳定平台传统模型

Fig.2 Stabilized platform model

$$U_c = K_e \Omega_{负载} \quad (1)$$

$$\Omega_{负载} = \int \frac{T_a - T_f}{J} dt \quad (2)$$

$$\omega_{负载} = \Omega_{负载} + \omega_{基座} \quad (3)$$

假定平台初始状态 $\Omega_{负载}$ 、 $\omega_{基座}$ 、 $\omega_{负载}$ 为 0, 轴系接触面绝对光滑, 平台受到的摩擦力矩及其他扰动力矩都为 0。当基座相对于惯性空间转动时, 按照传统模型分析如下: $\omega_{基座} = \omega_0$ 作为速度扰动输入于系统中, 由于 $\Omega_{负载} = 0$, 由公式(3)可知, 速度反馈 $\omega_{负载} = \omega_0$ 不为 0, 电机将开始工作, 使得转子和负载平台相对基座空间转动, 最后达到平衡状态 $\omega_{负载} = 0$, 实现视轴稳定控制。但实际情况是: 当基座相对惯性空间转动时, 因为轴系接触面绝对光滑, 平台没有受到扰动力矩, 根据力学原理可知, 平台保持静止状态, 即 $\omega_{负载} = 0$, 控制器偏差输入为零, 电机不工作。传统模型的分析结果与实际情况矛盾。

分析伺服系统模型可知, 从本质上来讲, 电机输出的是电枢力矩, 通过电枢力矩的作用, 才最终改变负载的角速度。根据力学原理可知, 分析物体在力矩作用下的运动状态时, 必须选择不变的惯性参照系, 所以电机转子的角速度必须选择惯性参照系。在稳定平台中, 基座空间不是惯性参照系, 传统模型选择基座空间作为电机转子角速度的参照系是不合适的。

根据稳定平台的特点, 多参照系分析模型选择惯性空间作为电机转子角速度的参照系, 如图 3 所示。在多空间分析模型中, 反电动势与电机转速的关系仍然如公式(1); 负载受到电机输出力矩作用后, 输出相对于惯性空间的角速度, 如公式(4); 平台相对于基座空间的角速度是平台相对于惯性空间的角速度与基座相对于惯性空间的角速度之差, 如公式(5)。在公式(5)中, 基座相对惯性空间的角速度是作为反电动势扰动加入到电机模型中。

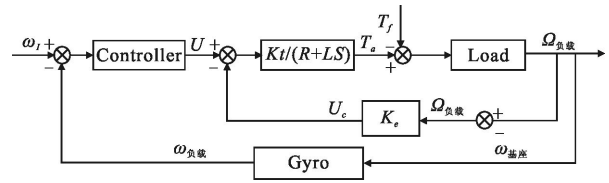


图 3 多空间分析模型

Fig.3 Multiple reference frame model

$$\omega_{负载} = \int \frac{T_a - T_f}{J} dt \quad (4)$$

$$\Omega_{负载} = \omega_{负载} - \omega_{基座} \quad (5)$$

由传统模型和多参照系分析模型的框图可知, 在传统模型中, 电机转速的参照系为基座空间, 基座扰动 $\omega_{基座}$ 直接加入到速度回路中, 是影响系统最重要的因素。在多空间分析模型中, 电机转速的参照系为惯性空间, 基座扰动 $\omega_{基座}$ 只能通过电机反电动势来扰动系统, 力矩扰动 T_f 才是影响系统最重要的因素。当然在实际系统中, 仍然用对速度扰动的隔离程度来评价系统性能。这是因为对于实际系统, 输入速度扰动的同时也必然会输入力矩扰动, 由于力矩无法测量, 不可能用力矩扰动的隔离程度来作为衡量系统性能的指标。

2 粒子群优化

2.1 标准粒子群算法 PSO

人们在对动物社会和昆虫社会的研究中归纳总结了群集智能 (swarm intelligence)。粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 和蚁群算法属于两大群智能算法。粒子群算法由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出, 通过模仿简单的社会模型如鸟类捕食与鱼群跟随的特点来描述动态进化系统^[8]。标准粒子群表述算法如下: 首先初始化一个随机粒子群体, 每个粒子每一维上都赋予一个初始随机位置和初始随机速度, 然后通过不断迭代更新粒子的位置使其更接近优化目标, 直到达到最大寻优次数或设置精度时迭代停止, 输出最优解^[9]。粒子群算法的迭代公式如下所示:

$$v_i^{k+1} = w(k) \cdot v_i^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (x_i^p - x_i^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (x_i^g - x_i^k) \quad (6)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (7)$$

式中: x_i^k 和 v_i^k 分别代表第 i 个粒子在第 k 时刻的位置分量和速度分量; $c_1 > 0$ 和 $c_2 > 0$ 分别是认知因子和社

会因子; r_1 和 r_2 是两个 $[0, 1]$ 区间的随机因子; x_i^p 和 x_i^g 分别是第 i 个粒子和全局粒子当前所经过的最好位置分量; ω 为惯性因子, 通常采用随迭代次数线性下降的方法, 即

$$w(k) = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{\text{iter}_{\max}} \times k \quad (8)$$

式中: iter_{\max} 为算法设置的最大迭代次数。一般情况下, ω 在 $[0.4, 0.9]$ 这个区间内取值。

2.2 改进的粒子群算法

标准的粒子群算法可以解决一些问题, 但也存在一定的问题。为了改善标准粒子群算法的收敛速度和提高种群多样性, 文中在两方面对标准粒子群进行了改进, 形成了改进的粒子群算法 (Improved Particle Swarm Optimization, IPSO)。

2.2.1 惯性权重的改进

由参考文献[10]可知, 惯性权重 ω 对粒子群算法有比较大的影响。若 ω 较大, 则有利于跳出局部最优, 进行全局搜索; 若 ω 较小, 则有利于局部搜索, 加强算法的收敛。参考文献[11]给出了粒子群算法收敛需要满足的条件, 在此基础上, 文中提出一种惯性权重余弦调整的策略, 其 ω 的具体迭代公式如下:

$$w(k) = 0.4 + 0.5 \times \cos\left(\frac{k \times \pi}{\text{iter}_{\max}} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (9)$$

文中提出的惯性权重余弦调整策略, 不同于惯性权重线性减小, 惯性权重 ω 采用非线性变化。在算法初期, ω 取值较小, 让粒子在其自身附近做一定的局部搜索, 在迭代到一定程度时, ω 取值较大, 加强粒子之间的协同合作进行全局搜索, 在迭代快结束时, ω 取值又减小, 粒子再一次进行局部搜索, 在最优解附近进行精细搜索, 加快收敛速度。

2.2.2 越界改进

粒子群算法都是限制粒子的速度和位置在一定范围内搜索, 若粒子的速度或是位置超出所给定的范围时, 标准的粒子群算法都是采用“一刀切”的方式, 即强制其速度或是位置为其给定的边界值, 这样的做法显然会降低种群多样性, 影响算法的搜索速度和收敛程度。为了改善上述存在的问题, 文中在速度越界和位置越界两方面进行了粒子越界的改进。

2.2.2.1 速度越界

当粒子速度绝对值大于速度分量的设定阈值时, 文中采取给粒子速度随机赋值的方法, 其公式如下:

$$v_i^k = \text{rand}(v_{\min}, v_{\max}) \quad |v_i^k| > v_{\max} \quad (10)$$

式中: v_{\min} 和 v_{\max} 分别表示设定的速度最小值与最大值, 公式(10)表示速度在最大速度与最小速度之间随机取值。速度随机赋值不同于边界赋值的“一刀切”策略, 可使大速度粒子的速度随机平均分布, 可以增强种群的多样性, 充分发挥粒子的寻优能力。

2.2.2.2 位置越界

当粒子的位置飞越边界时, 文中采取的策略如下式所示:

$$x_i^k = Lb * \left[\left(\frac{|v_i^k|}{v_{\max}} \right) + 1 \right] \quad x_i^k < Lb \quad (11)$$

$$x_i^k = Ub * \frac{|v_i^k|}{v_{\max}} \quad x_i^k > Ub \quad (12)$$

式中: Lb 和 Ub 分别为粒子寻优范围的下限和上限。由以上两式可知, 文中对于位置越界的粒子的处理, 与他们越界时的速度相关, 不再是单一的强制为边界值。这样做的目的是考虑到粒子运动的规律性、目的性, 通过基于速度的越界处理能够在一定程度上保留粒子运动的有利趋势, 增强种群多样性。

粒子群算法的初值选取对于算法的收敛至关重要, 理想的初值可以使算法较快收敛到最优解, 甚至可以避免一些局部极值点的影响。一般情况下, 人们随机产生初始种群, 这样做的好处是可以增加种群的多样性, 在初期保证搜索的宽度。但另一方面, 这样会加大算法搜索的时间, 降低搜索速度, 有时甚至只能收敛到局部极值上。为了避免上述问题, 初值的选取可以先采用常规 PID 进行调试, 确定三个参数的大致范围, 然后在参数范围内选取初值, 这样就可以保证算法的收敛。

每个粒子的优劣好坏通过适应度函数来评价, 在这里采取的适应度函数为:

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} [e^2(k) + \rho u^2(k)] \quad (13)$$

式中: $e(k)$ 为系统的偏差; $u(k)$ 为控制系统的输入; ρ 取值在 $[0, 1]$ 之间。

PID 参数的优劣直接决定控制系统的性能。适应度函数作为评价系统性能的函数, 也就决定了 PID 参数的优劣。所以, 适应度函数保证了 PID 参数学习的准确性与可靠性。对于文中选取的适应度函数, 总是选取 J 值小的粒子作为优秀粒子, J 值大的粒子对应的 PID 参数不合理, 在搜索的过程中被淘汰。

3 实验结果与分析

实验结果分为两个部分,第一部分是通

Simulink 进行仿真测试,第二部分是硬件系统实测。

图 4 为仿真结构图,图 5 为仿真结果图。

在仿真测试中,根据工程指标,给基座输入相对

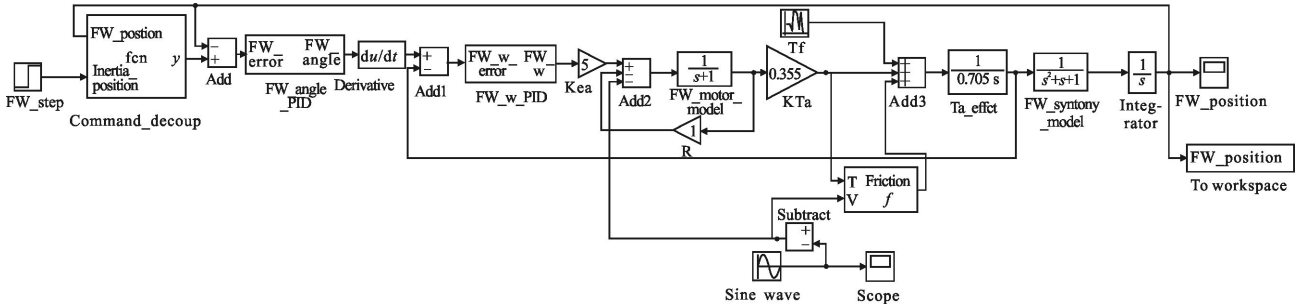


图 4 仿真结构图
Fig.4 Simulation graph

惯性空间的扰动速度 $\omega_x=0.4\sin(2t)\text{rad/s}$,并且采用 LuGre 模型,加入非线性摩擦力矩,同时加入电流环路,抑制反动电动势的扰动。图 5 表示的是分别采用常规 PID 控制器和 IPSOPID 控制器的仿真输出,实验输出表明:电流环路对反动电动势的扰动已经有相当好的抑制效果,但是对于非线性摩擦力矩的隔离效果较差,有明显的突起。IPSOPID 控制器隔离扰动效果明显好于 PID 控制器。

制器,使用相同的实验方法,得到方位轴隔离扰动结

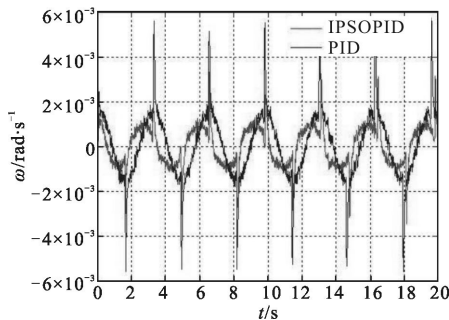
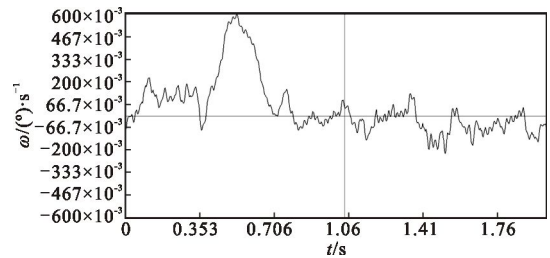


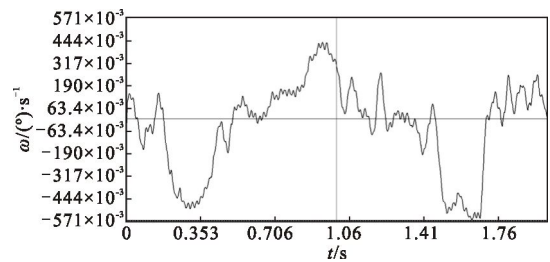
图 5 方位轴仿真结果
Fig.5 Simulation result of azimuth axis

在硬件实验平台中,首先通过编写代码,实现 IPSOPID 优化控制算法,再通过摇摆台输入 $2(^{\circ})/\text{s}$ 的扰动,然后记录平台隔离后光纤陀螺仪的测量数据。对测量数据进行量化和处理,得到方位轴隔离扰动结果如图 6(a),图 6(b)所示。在实验过程中,因为连接线束、扰动输入方式、质量配平、负载安放、起始状态以及其他方面都会给系统带来不可预测的扰动,所以笔者发现两次实验结果存在差异。总体来说,经过隔离后,最大偏差速度约为 $0.5(^{\circ})/\text{s}$ 。对于常规 PID 控



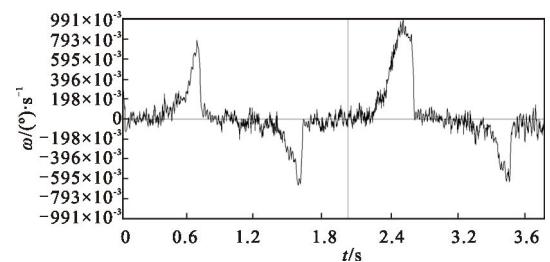
(a) IPSOPID 控制方法的测试结果 1

(a) Experimental results I of IPSOPID control method



(b) IPSOPID 控制方法的测试结果 2

(b) Experimental results II of IPSOPID control method



(c) 常规 PID 控制方法的测试结果

(c) Experimental results of conventional PID control method

图 6 方位轴实验平台测试结果

Fig.6 Experimental results of azimuth axis

果如图 6(c),最大偏差速度约为 $1(^{\circ})/s$ 。比较发现,IPSOPID 控制器算法控制精度更高,鲁棒性更好,可以达到更好的控制效果。

4 结 论

文中在稳定平台多空间分析模型的基础上采用改进的粒子群优化算法进行 PID 参数的优化整定。首先对于平台,建立多空间分析模型,解决平台系统中存在的多参照系问题,然后采用惯性权重改进和越界改进的粒子群算法对 PID 控制器进行改进,形成 IPSOPID 控制器,进而用其对系统进行控制。在硬件平台的最后测试中,使用传统的 PID 控制器时,平台的稳定精度为 $190.9 \mu rad$,使用 IPSOPID 控制器时,平台的稳定精度为 $107.3 \mu rad$ 。实验结果表明 IPSOPID 控制器具有精度高和鲁棒性好的特点。未来,可以将粒子群算法与其他智能控制算法相结合,进一步优化 PID 参数,提升平台的稳定精度。

参考文献:

- [1] Ji Wei, Li Qi. Adaptive fuzzy PID composite control with hysteresis-band switching for line of sight stabilization servo system [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2011, 15 (1): 25-32.
- [2] Liu Fuchun, Yao Yu, Fu Shaowen. Non-fragile robust controller design for simulation table systems [J]. *Electric Machines and Control*, 2006, 10(5): 517-521. (in Chinese)
刘富春,姚郁,傅绍文. 仿真转台系统非脆弱鲁棒控制器设计[J]. 电机与控制学报, 2006, 10(5): 517-521.
- [3] Shen Boqiao, Pan Haipeng. Research and application of intelligent PID algorithm based on BP network [J]. *Electric Machines and Control*, 2007, 11(4): 412-416. (in Chinese)
沈柏桥,潘海鹏. BP 网络智能 PID 控制算法在交流调速系统中的应用[J]. 电机与控制学报, 2007, 11(4): 412-416.
- [4] Li Xiantao, Zhang Bao, Sun Jinghui, et al. ADRC based on disturbance frequency adaptive of aerial photoelectrical stabilized platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1574-1581. (in Chinese)
李贤涛,张葆,孙敬辉,等. 航空光电稳定平台扰动频率自适应的自抗扰设计 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1574-1581.
- [5] Zhou Xiaoyao, Fan Dapeng, Zhang Zhiyong, et al. Analysis and design of multi-loop IMC controller for electro-optical serve control systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 2020-2027. (in Chinese)
周晓尧,范大鹏,张智永,等. 光电伺服控制系统多回路内模控制器分析与设计 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 2020-2027.
- [6] Wang Hanching, Grant Williams, Thomas C. Strategic inertial navigation systems: High trategic inertial navigation systems high-accuracy inertially stabilized platforms for hostile environments[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008, 28 (1): 65-85.
- [7] Yu Zhi. A study on control algorithm of stablized platform system and implementation of DSP [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
喻智. 机载吊舱稳定平台的控制方法研究及 DSP 实现[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2013.
- [8] Kennedy J F, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, 1995: 1942-1948.
- [9] Yang Zhi, Chen Zhitang, Fan Zhengping, et al. Tuning of PID controller based on improved particle-swarm-optimization [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27 (10): 1345-1352. (in Chinese)
杨智,陈志堂,范正平,等. 基于改进粒子群优化算法的 PID 控制器整定 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27 (10): 1345-1352.
- [10] Liu Jianhua. The Research of Basic Theory and Improvement on Particle Swarm Optimization[D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese)
刘建华. 粒子群算法的基本理论及其改进研究 [D] 长沙: 中南大学, 2009.
- [11] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6 (1): 58-73.