

基于鱼群算法的机载光电平台误差分配方法

陈水忠,王 凯

(中航工业洛阳电光设备研究所,河南 洛阳 417009)

摘 要:由于传统误差分配方法效率低,依赖经验反复试凑,难以满足高精度分配的需要。根据机载光电平台目标测量的特点,构建了由大地地理坐标系到光电平台成像系统坐标系的目标测量数学模型,讨论了转换过程中影响精度的主要因素,确定了待分配的目标测量主要误差源,建立了基于蒙特卡罗统计方法的目标测量误差模型。通过将考虑方向性的目标测量误差分配问题转化为无约束的优化问题,运用鱼群算法对满足测量误差总要求的误差源分配方案进行寻优。计算结果表明,本文提出的误差分配方法有效可行,对机载光电平台误差分配具有一定的参考价值。

关键词:机载光电平台;误差分配;鱼群算法

中图分类号:V219;TP391.9 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.05.015

Error distribution method of airborne electro-optical platform based on artificial fish swarm algorithm

CHEN Shui-zhong, WANG Kai

(Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471009, China)

Abstract: Because the traditional error distribution methods have low efficiency, they are difficult to meet the requirement of high accuracy distribution. To solve this problem, the error distribution method based on artificial fish-swarm algorithm (ASFA) is proposed. Firstly, on the basis of the airborne electro-optical platform characteristics, a target detection model from geodetic coordinate system to the camera sensor axis coordinate system was established by using linear coordinate transformation. The main factors affecting accuracy were discussed, and the main error sources of distributed target detection were determined. The error model of target detection was established based on Mont Carlo method. Then, the error distribution problem was translated into an unconstrained optimization problem. ASFA was used to find the optimal distribution solution of error sources to meet the requirement of detection error. Finally, the simulation calculation was carried out. The results show that the proposed error distribution method has higher accuracy and efficiency than the traditional error distribution methods.

Key words: airborne electro-optical platform; error distribution; AFSA

1 引 言

机载光电平台完成对地面、空中目标的搜索、

捕获与跟踪,能够对目标进行高精度位置解算,作为机载火控系统的目标信息来源,如何保证其对

目标的高精度测量是实施精确打击的必要前提^[1-8]。而机载光电平台测量精度受到很多因素的影响,因而进行目标测量误差分析和误差分配,是机载火控系统设计面临的重要问题。

近年来,有关机载光电平台的目标探测技术在学术界和工程应用领域引起广泛关注。文献[2]为了解决光电平台的目标定位问题,提出了一种机载光电平台的自主定位方法。利用齐次坐标变换方法推导了机载光电平台目标定位转换方程,采用工程实例进行了机载光电平台的目标定位误差分析。文献[3]分析了各种测量参数对目标定位精度的影响,通过建立误差模型和仿真数据进行目标定位实验,采用蒙特卡罗方法统计目标定位误差。文献[4]针对飞机平台目标引导进行研究,利用蒙特卡罗统计方法分析自主引导测量方程中各个误差因素对最终引导精度的影响,并在某光电平台上进行飞行试验验证。文献[6]通过航行法下瞄准任务分析,建立了基于测距法的轰炸光电瞄准模型,分析了模型误差。文献[7]分析并给出了机载稳瞄系统稳定精度与作用距离之间的关系。

目前对于机载光电平台目标定位和引导的研究主要集中在误差分析,而对误差分配方面的研究较少。

本文结合机载光电平台特点,构建从大地地理坐标系到光电平台跟瞄成像系统坐标系的目标测量模型,在分析转换过程中主要影响参数的基础上,将目标测量误差分配问题转化为优化问题,优化变量为由主要误差源构成的误差分配方案,运用鱼群算法寻找满足测量误差总要求的误差分配方案。

2 目标测量模型

为建立机载光电平台的目标测量方程,首先定义相关坐标系,然后利用齐次坐标转换建立坐标系间的转换方程,综合各转换方程获得目标测量方程,进而获得影响测量精度的各误差源,根据任务要求选择不同误差源组成误差分配方案。目标测量转换过程用到的坐标系有地心大地坐标系、地心空间直角坐标系、载机地理坐标系(NED坐标系)、载机机体坐标系、跟瞄平台基座坐标系、跟瞄成像系统坐标

系^[1-9]。由目标点到跟瞄成像系统的方位角和高低角的坐标转换过程如图1所示。

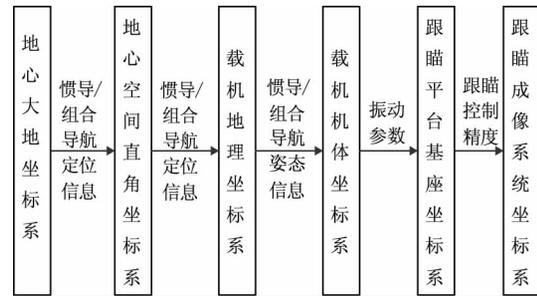


图1 目标测量转换过程

Fig. 1 Coordinate transformation of target detect

转换过程可表示为:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \lambda \end{bmatrix} = F(X) \quad (1)$$

式中, α, λ 为目标相对跟瞄成像系统光轴的方位角和高低角; F 表示坐标转换过程; X 表示转换过程中所涉及的参数。

根据上述转换过程,涉及的转换参数 X 及误差源 δX 包括:

1) 目标点的大地坐标纬度、经度、高度 (B_t, L_t, H_t), 由其他探测系统或数据链提供, 在目标引导时会存在三个误差源 $\delta B_t, \delta L_t, \delta H_t$;

2) 载机的大地坐标纬度、经度、高度 (B_p, L_p, H_p), 该参数由机载惯导/组合导航系统提供, 存在三个误差源 $\delta B_p, \delta L_p, \delta H_p$;

3) 载机的姿态航向角、俯仰角和滚转角 ($\phi_p, \theta_p, \gamma_p$), 该参数由机载惯导/组合导航系统提供, 存在三个误差源 $\delta\phi_p, \delta\theta_p, \delta\gamma_p$;

4) 由于载机存在振动, 光电平台基座与载机之间用减震器相连接, 由振动引起的跟瞄平台基座相对载机机体坐标系的三轴姿态角误差源 $\delta\phi_{pz}, \delta\theta_{pz}, \delta\gamma_{pz}$;

5) 由跟瞄控制引起的光轴稳定误差 $\delta\alpha_{ATP}, \delta\lambda_{ATP}$ 。

3 机载光电平台测量误差模型与误差分配

3.1 测量误差模型

由上述测量模型(1)及误差源,可以得到测量误差模型:

$$\begin{bmatrix} \delta\alpha \\ \delta\lambda \end{bmatrix} = F(X + \delta X) - F(X) \quad (2)$$

式中, $\delta\alpha, \delta\lambda$ 为由各误差源造成的方位角、高低角测

量误差; δX 为转换过程中的相关参数引起的误差源。

目标测量模型中存在多种误差源,由概率论可知,这些误差源可近似认为服从正态分布或均匀分布。因此,可使用蒙特卡罗方法计算和分析目标测量误差。机载光电平台测量误差分析基本步骤如下:

1) 选择参与误差分析的影响参数,确定该参数误差源的随机分布形式及特征 X_{σ_i} (均值 m_i 、方差 σ_i),所有影响参数的误差源随机分布特征构成一个误差源向量 X_{σ} ,作为一个误差源方案;

2) 根据各误差源随机分布及特征,生成载机位置、载机姿态、振动及光束控制等各误差源构成的若干组误差源随机向量;

3) 将产生的误差源随机向量代入式(2),获得目标测量误差 $\delta\alpha_i$ 、 $\delta\lambda_i$;

4) 最后,对若干组误差源随机向量的计算结果进行统计,获得目标测量总误差:

$$\varepsilon_{total} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\delta\alpha_i^2 + \delta\lambda_i^2)} \quad (3)$$

3.2 误差分配

上述误差分析模型描述了目标测量转换过程中由一个误差源方案 X_{σ} 与其导致的总误差 ε_{total} 之间的函数关系,即 $f(X_{\sigma}) \rightarrow \varepsilon_{total}$ 。在进行总体方案设计时,需要根据总误差设计要求对转换过程各误差源参数特征即 X_{σ} 进行分配,由于参数较多及传递过程的复杂性,导致平均分配、加权分配等方法分配效率低下,无法充分挖掘各系统的误差允许潜力。本文基于误差模型和蒙特卡洛方法所建立的映射关系,将误差分配问题转化为优化问题,将由各误差源随机特征构成的分配方案作为优化变量进行优化。优化的目标是找到一个优化变量(即由各误差源的随机分布特征构成的误差源分配方案)使得该分配方案所造成的总误差 $\varepsilon_{total} = f(X_{\sigma})$ 与期望分配的总误差要求 ε_{cmd} 之差 $\Delta\varepsilon$ 越小越好,同时希望优化过程能够尽量从待分配的总误差要求的左边(使优化后的总误差不大于总误差要求)逐渐接近优化目标,从右侧接近意味着当前最优变量产生的总误差超过了期望分配的总误差要求。为此基于 $\Delta\varepsilon$ 和罚函数来构造一个具有方向性的机载光电平台误差分配问题的目标函数 $J(X_{\sigma})$,使其能够对大于总误差要求

的分配方案,即处于右侧的情况进行惩罚,从而将机载光电平台的误差分配问题转化为求 X_{σ} 使得目标函数 $J(X_{\sigma})$ 最小的无约束优化问题,上述解决思路如图 2 所示。

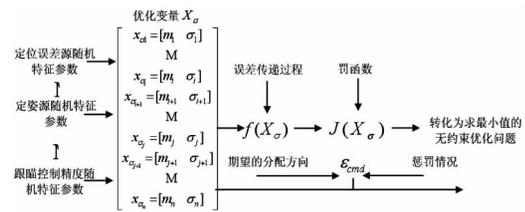


图 2 误差分配问题转换为优化问题

Fig. 2 Transforming the error distribution problem into the optimization problem

3.2.1 基于罚函数思想构造目标函数

罚函数法是通过给原目标函数加上一个由约束函数构造的惩罚项来生成一个新的目标函数,从而将一个约束优化问题转换成一个无约束的优化问题。对于求解约束最优化问题,其罚函数是基于原目标函数 $f(x)$ 和约束函数 $g(x) = (g_1(x), \dots, g_n(x))$ 所构造的具有惩罚性质的函数:

$$F(x) = \bar{F}(f(x), g(x)) \quad (4)$$

要求对约束优化问题的所有可行的点 $x \in S$, 均有 $F(x) = f(x)$ 。罚函数一般可以表示成:

$$F(x) = f(x) + h(g(x)) \quad (5)$$

式中, $h(x)$ 应满足 $h(0) = 0$, 且当 $g(x)$ 趋向于无穷大时, $h(x)$ 也趋向于无穷大。

设 ε_{cmd} 是待分配的总误差要求, ε 是由一组优化变量所代表的误差源随机特征参数通过误差计算得到的总误差。当进行高精度打击时,对测量误差的要求往往很高,例如机载激光武器命中数百公里外的弹道导弹所要求的总误差为微弧级,由于数值太小不利于优化,因此引入放大因子,对误差结果进行放大以便于算法寻优。令 $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{cmd} - \varepsilon = \varepsilon_{cmd} - f(X_{\sigma})$, 则当 $\Delta\varepsilon \geq 0$, 则认为此时的分配后误差满足要求,不进行惩罚;若 $\Delta\varepsilon < 0$, 则认为此时的 ε 不满足要求,需进行惩罚。根据以上描述构造的目标函数为:

$$J(X_{\sigma}) = c\sigma_{\Delta} + k\min(\sigma_{\Delta}, 0) \quad (6)$$

式中, c 为放大因子; k 为罚函数项放大因子。

3.2.2 基于鱼群算法的误差分配流程

鉴于机载光电平台误差分配所涉及到的参数较多

及转换过程的复杂性,这里选择使用全局搜索能力较强的鱼群算法进行优化分配。鱼群算法通过构造人工鱼来模仿鱼群的觅食、聚群及追尾行为,从而实现寻优的。该算法具有良好的克服局部极值、取得全局极值的能力,并且该算法还具有对初值、参数选择不敏感、鲁棒性强、易于实现等优点。

一条人工鱼的当前位置为 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$,人工鱼当前位置的食物浓度为 $Y = f_s(X)$,即 $f_s(X)$ 代表目标函数。人工鱼之间的距离为 $d_{ij} = \|X_i - X_j\|$; Visual 表示人工鱼的视觉感知距离; Step 表示人工鱼移动的最大步长; δ 为拥挤度因子, try-number 为觅食行为尝试次数。人工鱼群算法首先初始化一群人工鱼,然后通过觅食、聚群、追尾等行为向着视野内食物浓度(目标函数值)较大的方向不断前进,同时允许一定的随机性从而摆脱局部最优,从而实现全局寻优^[11-13]。人工鱼的位置更新表达式可总结为:

$$X_{next} = X_i + \text{rand}() \cdot \text{Step} \cdot r \quad (7)$$

$r =$

$$\begin{cases} 1 & \text{觅食行为} \\ \frac{X_c - X}{\|X_c - X\|} & (X_c \text{ 为视野内鱼群的中心位置,聚群行为}) \\ \frac{X_{jmax} - X}{\|X_{jmax} - X\|} & (X_{jmax} \text{ 视野内食物浓度最大位置,追尾行为}) \end{cases}$$

鱼群算法步骤为:

1) 初始化人工鱼群,视野、步长、拥挤度、觅食最大尝试次数、最大迭代次数,在给定范围内随机产生的优化向量,构成人工鱼群。

2) 计算每个人工鱼所在位置的食物浓度,公告板上记录浓度最大的结果及人工鱼位置;

3) 依次分别进行聚群和追尾行为,由拥挤度决定聚群、追尾和觅食行为的发生;

4) 每条人工鱼更新自己的位置;

5) 检查结束条件(到达预定最大迭代次数或食物浓度满足要求),如满足结束条件,输出最优解(公告板上人工鱼位置和食物浓度值),结束;否则转入2),继续执行。

在误差分配中,一个误差源分配方案即代表一条人工鱼的位置,由误差源随机特征参数向量 X_{σ_i} 计算得到目标函数值 $J(X_{\sigma_i})$ 即为食物浓度,最优的人工鱼位置即为最终误差分配方案。

基于鱼群算法的机载光电平台目标测量误差分

配步骤为:

1) 确定总精度指标,参与分配的误差源,误差源随机分布形式、误差随机分布特征寻优范围,初始化相关参数。

2) 判断标志位 type,当 type = 1 时,说明上次分配结果不满足分配要求或首次进入;当 type = 2 时,说明上次分配结果满足分配要求。

3) 鱼群算法初始化。构造一个矩阵,矩阵的行数为鱼群规模,矩阵的列数为参与分配误差参数的个数。然后初始化鱼群。当 type = 1 时,随机初始化第一条人工鱼以外的所有人工鱼的位置,第一条人工鱼的位置为按平均分配法或加权分配法所得到的分配方案。当 type = 2 时,取上次分配结果,并使人工鱼视野随总循环次数增加而降低。

4) 使用鱼群算法对误差分配方案进行优化,存储每代的最优人工鱼位置 pbest 和最优目标函数值 gbest。本次迭代得到的最优人工鱼位置 pbest 和最优目标函数值 gbest 与前代最优值进行比较,两者之间更好的人工鱼位置记为全局最优位置 Pbest,其对应的全局最优目标函数值记为 Gbest。

5) 若前次的分配结果满足分配要求,设定 type = 2,使用前次的分配结果作为下一次分配的初值;若前次的分配结果不能满足分配要求,设定 type = 1,使用再之前一次的分配结果作为下次分配的初值。

6) 是否达到总循环次数,否则返回步骤 2 继续计算,直到完成总循环次数。

根据上面的描述,基于鱼群算法的误差分配流程如图 3 所示。

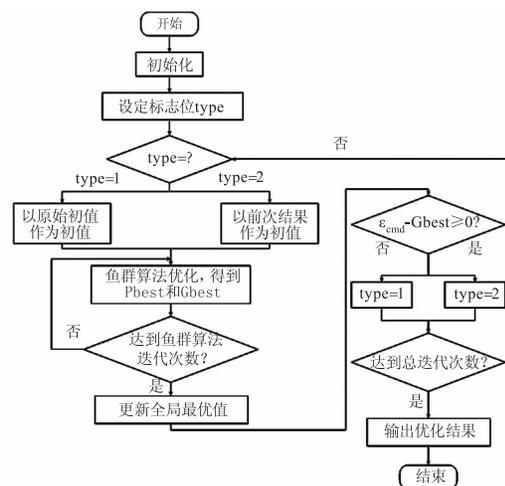


图 3 基于鱼群算法的误差分配流程

Fig. 3 Error distribution workflow based on ASFA

4 仿真结果及分析

选取机载激光武器打击巡航导弹任务为例,对其光电跟踪平台进行误差分配。选择误差分配项为:载机俯仰角、载机偏航角、载机横滚角、载机俯仰角振动、载机偏航角振动、载机横滚角振动、视线高低角以及视线方位角,前六个误差项服从正态分布,后两个服从均匀分布,假设随机分布均值均为 0,对误差源的方差特征进行分配寻优。传统误差分配常采用平均分配法和加权分配法。

1) 平均分配法是将给定的总误差值平均分配给每一个误差项,即:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \dots = \sigma_n = \frac{\sigma_{total}}{n} \quad (8)$$

2) 加权分配法通过权重进行分配,权重代表各个误差项对系统总误差影响程度,即:

$$\sigma_i = \frac{k_i}{\sum_{i=1}^n k_i} \sigma_{total} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

使用上述三种误差分配方法对机载激光武器光电平台测量误差进行分配。表 1 给出了本文提出方法所需各参数的值,包括鱼群参数和系统精度要求。

表 1 误差分配参数

Tab. 1 Error distribution parameters

Description	数值
总循环次数	8
鱼群规模	40
单次鱼群算法迭代次数	30
鱼群视野、拥挤度	3,5000
待分配总误差要求	4.16 μrad

平均分配法,比例分配法和本文提出的方法对系统误差分配结果如表 2 所示。

表 2 误差分配后总误差结果对比

Tab. 2 Total error of using three distribution method

	平均分配	加权分配	本文方法
总误差/ μrad	1.82	3.15	4.116

由表 2 可看出,加权分配比平均分配的结果要好。虽然两种方法的分配结果均在精度要求的范围之内,但是传统方法分配结果没有充分挖掘光电平台各分系统的最大允许误差潜力。想要使用平均分配法和加权分配法达到期望的指标要求难度很大,需要通过反复试凑,且非常依赖设计人员

的经验。在使用加权分配法进行分配时,权重的确定由于缺乏理论指导极大导致其具有较大局限性。从表 2 中可知,使用本文提出的方法进行误差分配,系统总误差为 4.116 μrad ,与系统的精度要求相差 0.054 μrad ,如图 4 所示。

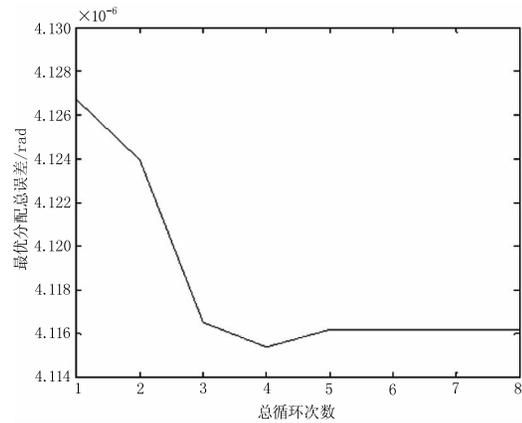


图 4 误差分配过程

Fig. 4 Error distribution process

各误差源的方差分配结果如表 3 所示。

表 3 各误差项分配结果

Tab. 3 Distribution result of each error factor

Description	数值/ μrad
载机俯仰角	1.8195
载机偏航角	2.8984
载机横滚角	0.48748
载机俯仰角振动	0.40784
载机偏航角振动	2.5692
载机横滚角振动	2.5026
纵向跟瞄精度	2.0315
横向跟瞄精度	1.3551

上述结果表明,经过鱼群优化算法对误差分配方案不断进行优化,最优分配方案对应的系统误差与待分配的误差要求十分接近,而且能够实现从左趋近要求。

5 结论

通过综合机载光电平台测量误差模型和罚函数,将机载光电平台测量误差分配问题转换为一个无约束的优化问题,进而设计了基于鱼群算法的误差分配方法。结合具体任务需求对该方法的可行性进行了验证,并与传统误差分配方法相比,本文提出的误差分配方法具有参数灵活可调、自动分配化,精度高等优点。

参考文献:

- [1] AI Hongshan, LIU Pan. Research on target positioning of airborne electro-optical system [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2011, 9(2): 77-80. (in Chinese)
艾宏山, 刘攀. 机载光电系统的目标定位研究 [J]. 光学与光电技术, 2011, 9(2): 77-80.
- [2] SUN Hui. Target localization and error analysis of airborne electro-optical platform [J]. Chinese Optics, 2013, 6(6): 912-918. (in Chinese)
孙辉. 机载光电平台目标定位与误差分析 [J]. 中国光学, 2013, 6(6): 912-918.
- [3] MA Jianguang, TANG Tao. Review of compound axis servo-mechanism tracking control technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1): 218-226. (in Chinese)
马佳光, 唐涛. 复合轴精密跟踪技术的应用与发展 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 218-226.
- [4] WANG Zengfa, SUN Lina, LI Gang, et al. Accuracy analysis on autonomous guiding of airborne opto-electronic platform [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(11): 3585-3591. (in Chinese)
王增发, 孙丽娜, 李刚, 等. 机载光电平台自主引导精度分析 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(11): 3585-3591.
- [5] KANG Wenyun, SONG Xiaoquan, HOU Junyan, et al. Study on measuring and evaluating method of laser pointing error for space target [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(12): 1381-1383. (in Chinese)
康文运, 宋小全, 侯军燕, 等. 空间目标激光瞄准偏差的测量评估方法研究 [J]. 激光与红外, 2013, 43(12): 1381-1383.
- [6] WANG Haopeng, LIU Zeqian, ZHANG Huiyong, et al. Study of electro-optical bombing targeting model [J]. Laser & Infrared, 2015, 43(4): 406-411. (in Chinese)
王昊鹏, 刘泽乾, 张会勇, 等. 轰炸光电瞄准模型建立 [J]. 激光与红外, 2015, 43(4): 406-411.
- [7] WANG Jing, JI Ming, ZHANG Chong, et al. TIAN Li. Study on relation between stabilization precision and sight range of airborne stabilized sighting system [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(9): 1030-1035. (in Chinese)
王晶, 纪明, 张冲, 等. 机载稳瞄系统稳定精度与视距关系的研究 [J]. 激光与红外, 2013, 43(9): 1030-1035.
- [8] GUAN Zuonian, WANG Naixiang, XU Ning. Analysis of angle accuracy of airborne photoelectric platform based on Monte Carlo simulation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2015, 29(3): 447-453. (in Chinese)
管坐攀, 王乃祥, 徐宁. 基于蒙特卡洛模拟的机载光电平台测角精度分析 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(3): 447-453.
- [9] Redding J, Mclain T, Beard R, et al. Vision-based target localization from a fixed-wing miniature air vehicle [C]. Proceedings of the 2006 American Control Conference Minneapolis, June 14-16, 2006, Minnesota, USA, 2006: 2862-2867.
- [10] GONG Chun, et al. Proficient in MATLAB optimization [M]. 2nd. ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 175-206. (in Chinese)
龚纯, 等. 精通 MATLAB 最优化计算 [M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2011: 175-206.
- [11] JIANG Mingyan, YUAN Dongfeng. Artificial Fish-Swarm algorithm and application [M]. Beijing: Science Press, 2012: 25-66. (in Chinese)
江铭炎, 袁东风. 人工鱼群算法及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 25-66.
- [12] FEI Teng, ZHANG Liyi, BAI Yu, et al. Improved artificial fish swarm algorithm based on DNA [J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2016, 49(6): 581-588. (in Chinese)
费腾, 张立毅, 白煜, 等. 基于 dna 的改进人工鱼群算法 [J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2016, 49(6): 581-588.
- [13] SHI Feng, WANG Hui, HU Fei, et al. 30 case analysis of Intelligent algorithm MATLAB [M]. Beijing: Beihang University Press, 2011: 162-176. (in Chinese)
史峰, 王辉, 胡斐, 等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 162-176.