

量子粒子群算法在地磁匹配航迹规划中的应用

李婷, 张金生, 王仕成, 吕志峰, 卢兆兴
(第二炮兵工程大学精确制导与仿真实验室, 西安 710025)

摘要: 针对基本粒子群算法在飞行器地磁匹配航迹规划中容易陷入局部收敛的问题, 借鉴粒子群算法和量子进化算法, 将量子粒子群算法应用在基于地磁匹配的航迹规划中。结合飞行器的性能约束和地磁匹配自身特点, 设计了一种适用于地磁匹配航迹规划的评价函数作为适应度函数。仿真结果表明, 量子粒子群算法具有较快的收敛速度且改善了最优解, 验证了量子粒子群算法应用于地磁匹配航迹规划的有效可行性。

关键词: 地磁匹配导航; 航迹规划; 量子粒子群算法

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)07-0043-05

Geomagnetic Navigation Path Planning Based on Quantum Particle Swarm Optimization Algorithm

LI Ting, ZHANG Jin-sheng, WANG Shi-cheng, LYU Zhi-feng, LU Zhao-xing
(Laboratory on Precision Guidance and Simulation, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: The basic Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm has the problem of easy to get into local optimum when used in geomagnetic navigation path planning. Based on PSO and Quantum Evolution (QE) algorithm, the Quantum Particle Swarm Optimization (QPSO) algorithm was applied to solve the problem. Combined with constraints of aircrafts and characteristics of geomagnetic matching navigation, an adaptive evaluation function was designed as fitness function. The simulation results show that QPSO has faster convergence speed and can avoid falling into local optimum effectively, which prove the availability and feasibility of QPSO for applying to path planning based on geomagnetic matching navigation.

Key words: geomagnetic matching navigation; path planning; Quantum Particle Swarm Optimization (QPSO) algorithm

0 引言

地磁场是矢量场且具有空间各异性, 利用地磁场进行导航具有无源、无辐射、全天时、全天候、全地域的显著特征, 通过地磁传感器测得实时地磁数据与存储在计算机中的地磁基准图进行匹配来定位^[1]。理论上只要确定空间中任一点的地磁矢量即可实现全球定位^[2]。

目前, 用于地磁匹配航迹规划的算法大多来自地形匹配, 主要可以分为确定型搜索算法和随机型搜索算法^[3]。确定型搜索算法可以得到最优解, 但其搜索空间和计算量都很庞大, 规划耗时较长; 随机型搜索算法具有较强的并行性, 适合处理大规模数据下的计算,

但是存在不能得到最优解的缺陷。

文献[4]对粒子收敛性的研究为基础, 从量子力学的观点提出了具有量子行为的量子粒子群算法(QPSO), 且已成功应用于很多领域, 但其在航迹规划中的应用少有分析。本文基于QPSO算法, 利用其优化功能寻找最小的航迹代价, 实现对飞行器的航迹规划, 并通过仿真分析对比验证QPSO相比于传统PSO在地磁匹配航迹规划中的有效可行性。

1 航迹规划建模

不考虑飞行器的起飞和降落过程, 飞行器在飞行过程中保持特定的高度, 因此, 飞行器的航迹可以简化为二维平面上的运动。飞行器的机动性能约束不必考虑飞行器的爬升/下滑角以及飞行高度, 只需考虑飞行器的最大拐弯角。

此外, 将连续的航迹简化为一系列离散的航迹点,

收稿日期: 2014-07-21 修回日期: 2014-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(61004128)

作者简介: 李婷(1989—), 女, 河南濮阳人, 硕士, 研究方向为地磁匹配航迹规划。

一方面可以通过调整航迹点个数控制航迹的精度,另一方面便于实现一系列航迹点的并行计算,大大提高运行速度,则转弯角可以用飞行航迹上相邻的3个航迹点 x_{i-1}, x_i, x_{i+1} 表示,如图1所示。

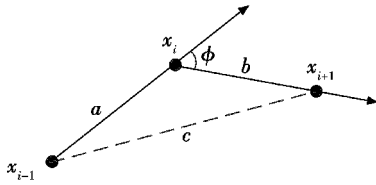


图1 转弯角示意图

Fig.1 Turning angle diagram

由图1和余弦定理可得转弯角 ϕ 大小为: $\phi = \arccos \frac{c^2 - a^2 - b^2}{2ab}$, s. t. $\phi \leq \phi_{\max}$ 。在满足最大转弯角的限制条件下对航迹进行编码。

基因的编码方式决定了所求解在进化计算中的表现形式,任何进化算法必须首先确定基因编码方式以表达所要解决的问题,编码方式确定之后,考虑影响航迹的综合因素对航迹进行评价,以满足要求。

1.1 航迹编码

粒子群算法解决航迹规划问题的常用编码方式是用航迹点的位置信息编码,一个粒子对应一个优化问题的解,即一条航迹。假设种群大小为 m ,要求航迹点个数为 n ,则维数为 $2n$,每一代种群的粒子表示为 $P = (P_1, P_2, \dots, P_m)$,第 i 个粒子可以表示为 $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{i2n})$,粒子中的基因一半表示横坐标,另一半表示纵坐标。每一条航迹具有相同的起点和终点,因此编码时不将其考虑在内。

1.2 基于地磁匹配的航迹评价模型

航迹评价是航迹规划中的重要组成部分,在航迹评价中要综合考虑影响航迹的各种因素,对各项指标进行量化和计算,确定影响航迹的指标权重,完成综合指标的计算等工作。飞行器的航迹规划一方面希望航迹长度最小以保证燃油消耗最少,另一方面希望尽可能最大化地避开威胁,以减少被敌方雷达监测的概率和被敌方火力攻击的危险。常用的方法是设置一个权重系数平衡各个因素之间的关系。航迹生成之后对不满足约束条件的航迹段进行平滑处理。

1.2.1 靠近目标程度^[5]

满足飞行器最大航程约束及其他约束条件下,所选取的航迹点离目标点越近越好,即

$$\min f_{\text{close}}(x_i) = l(x_i)/l \quad (1)$$

式中: $l(x_i)$ 为航迹点 x_i 到目标点的距离; l 为飞行器起点到目标点的距离。当 $l(x_i)$ 小于搜索步长 S_{step} 时,搜索终止。

1.2.2 威胁规避程度

地磁匹配的应用环境为平原、海域等难以实现景象匹配的区域,假设不存在雷达探测的盲区,雷达信号强度和飞行器到威胁距离的4次方成正比,探测概率可以表示为

$$T_j = \begin{cases} k_j^{\text{detect}}/D_j^4 & 0 \leq D_j \leq R_{\max} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: k_j^{detect} 为威胁 j 的威胁度; D_j 为当前位置到威胁 j 的距离; R_{\max} 为威胁源的最大探测半径。除了探测威胁外,还有来自敌方的火力攻击威胁,其大小由火力自身性能决定。飞行器在战场中所受威胁 T 为

$$T = b_j T_j^{\text{detect}} = \max_{j=1}^n \frac{b_j k_j^{\text{detect}}}{D_j^4} = \max_{j=1}^n \frac{k_j}{D_j^4} \quad (3)$$

式中: b_j 为攻击概率; n 为威胁数目; k_j 为威胁 j 的综合威胁系数,不同威胁的 k_j 也不相同。由于概率不能叠加,航迹点 x_i 的威胁规避度可以表示为

$$\min f_{\text{threat}} = \max_{j=1}^n \frac{1}{d_j^4(x_i)} \quad (4)$$

1.2.3 地磁特征变化率

地磁匹配航迹规划中,飞行航迹相邻节点间的地磁场变化率尽可能显著,以便提高匹配准确度和精度^[6]。以地磁场总磁场强度 F 作为地磁匹配特征量,以地磁总场变化率作为地磁特征变化的度量,即

$$\max f_{\text{geo-match}} = \frac{|F(x_{i+1}) - F(x_i)|}{F(x_i)} \quad (5)$$

式中: $F(i, j)$ 表示基准图中坐标为 (i, j) 的地磁场值; $f_{\text{geo-match}}$ 越大,越有利于地磁匹配,航迹越理想。

根据上述因素的影响,采用如下适应度函数计算方法,即

$$\min f_{\text{fitness}} = \lambda_1 f_{\text{close}} + \lambda_2 f_{\text{threat}} - \lambda_3 f_{\text{geo-match}} \quad (6)$$

式中,权系数 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \in [0, 1]$ 。反映靠近目标程度、威胁规避度、地磁特征变化率对航迹综合性能的影响程度。适应度函数值越小,求得航迹越优。

2 量子粒子群算法

2.1 算法基本原理

粒子群算法的求解过程中,粒子的速度受到特定范围的限制,粒子的收敛是以轨道的形式实现的^[7],因而容易陷入局部最优。

将量子机制引入粒子群算法,粒子的状态不再由位置和速度决定,而是由波函数决定,粒子能以一定的概率搜索整个解空间^[7]。采用 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 表示量子比特的两种基本状态,在 QPSO 中,可以用叠加态表示量子比特的任意状态,即

$$|\varphi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad \text{s. t. } |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \quad (7)$$

粒子的编码由概率幅 $|\varphi\rangle = [\alpha, \beta]^T$ 表示, 一条染色体可以表示多个量子态的叠加, 即可以表示一个问题的多个解, 使种群具有更好的多样性, 即使一个小种群也不影响算法的性能和结果。借鉴酉变换实现逻辑变换功能的原理, 采用量子门实现一定时间间隔的逻辑变换, 本文采用量子旋转门更新量子位, 实现进化操作, 即

$$|\varphi'\rangle = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} |\varphi\rangle \quad (8)$$

这种搜索机制能提升全局搜索能力, 从而增加获得全局最优解的概率。

2.2 量子粒子群算法步骤^[8-9]

2.2.1 初始种群的生成

初始种群中的编码带有随机性, 粒子 P_i 用一组量子概率幅表示, 编码如下

$$P_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_{i1} & \cos \theta_{i2} & \cdots & \cos \theta_{iD} \\ \sin \theta_{i1} & \sin \theta_{i2} & \cdots & \sin \theta_{iD} \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中: $\theta_{ij} = 2\pi \times R_{rand}$, R_{rand} 为 $(0, 1)$ 之间的随机数; $i = 1, 2, \dots, N$, $j = 1, 2, \dots, D$, N 为种群规模, D 为空间维数。每个粒子遍历空间的两个位置, 分别对应量子态 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 的概率幅的余弦位置 P_{ic} 和正弦位置 P_{is} 为

$$P_{ic} = (\cos \theta_{i1}, \cos \theta_{i2}, \dots, \cos \theta_{iD}) \quad (10)$$

$$P_{is} = (\sin \theta_{i1}, \sin \theta_{i2}, \dots, \sin \theta_{iD}) \quad (11)$$

2.2.2 解空间变换

为了计算每个粒子的适应度函数值, 需要将概率幅映射到位置坐标系中, 若粒子 P_i 中的第 j 个量子位为 $(\alpha_j^i, \beta_j^i)^T$, 则相应的位置为

$$X_{ic}^j = \frac{1}{2}(b_j(1 + \alpha_j^i) + a_j(1 - \alpha_j^i)) \quad (12)$$

$$X_{is}^j = \frac{1}{2}(b_j(1 + \beta_j^i) + a_j(1 - \beta_j^i)) \quad (13)$$

式中: $\alpha_j^i = \cos \theta_{ij}$; $\beta_j^i = \sin \theta_{ij}$; (a_j, b_j) 为变量 X_j 的定义域, 每个粒子对应一组优化问题的余弦位置解和正弦位置解。

2.2.3 粒子状态更新

基本粒子群算法中粒子位置的更新转变为量子进化中量子概率幅的更新, 粒子速度的更新转变为量子位旋转角的更新。假设粒子 P_i 当前搜索到的最优位置为余弦位置, 即

$$P_{id} = (\cos \theta_{i1}, \cos \theta_{i2}, \dots, \cos \theta_{iD}) \quad (14)$$

整个种群目前搜索到的最优位置为

$$P_g = (\cos \theta_{g1}, \cos \theta_{g2}, \dots, \cos \theta_{gD}) \quad (15)$$

量子位旋转角的更新为

$$\Delta\theta_{ij}(t+1) = \omega\Delta\theta_{ij}(t) + c_1r_1(\Delta\theta_{i1}) + c_2r_2(\Delta\theta_{i2}) \quad (16)$$

$$\text{式中: } \Delta\theta_{ij} = \begin{cases} 2\pi + \theta_{ij} - \theta_{ij} & \theta_{ij} - \theta_{ij} < -\pi \\ \theta_{ij} - \theta_{ij} & -\pi \leq \theta_{ij} - \theta_{ij} \leq \pi \\ \theta_{ij} - \theta_{ij} - 2\pi & \theta_{ij} - \theta_{ij} > \pi \end{cases}; \Delta\theta_{ig} =$$

$$\begin{cases} 2\pi + \theta_{ij} - \theta_{ij} & \theta_{ij} - \theta_{ij} < -\pi \\ \theta_{ij} - \theta_{ij} & -\pi \leq \theta_{ij} - \theta_{ij} \leq \pi \\ \theta_{ij} - \theta_{ij} - 2\pi & \theta_{ij} - \theta_{ij} > \pi \end{cases} \text{。基于量子旋转门}$$

的量子位概率幅的更新为

$$\begin{pmatrix} \cos(\theta_{ij}(t+1)) \\ \sin(\theta_{ij}(t+1)) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\Delta\theta_{ij}(t+1)) - \sin(\Delta\theta_{ij}(t+1)) \\ \sin(\Delta\theta_{ij}(t+1)) \cos(\Delta\theta_{ij}(t+1)) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\theta_{ij}(t)) \\ \sin(\theta_{ij}(t)) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_{ij}(t) + \Delta\theta_{ij}(t+1)) \\ \sin(\theta_{ij}(t) + \Delta\theta_{ij}(t+1)) \end{pmatrix} \quad (17)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, N$; $j = 1, 2, \dots, D$ 。 P_i 更新后的余弦位置和正弦位置分别为

$$\tilde{P}_{ic} = (\cos(\theta_{i1}(t) + \Delta\theta_{i1}(t+1)), \dots, \cos(\theta_{iD}(t) + \Delta\theta_{iD}(t+1))) \quad (18)$$

$$\tilde{P}_{is} = (\sin(\theta_{i1}(t) + \Delta\theta_{i1}(t+1)), \dots, \sin(\theta_{iD}(t) + \Delta\theta_{iD}(t+1))) \quad (19)$$

2.2.4 变异处理

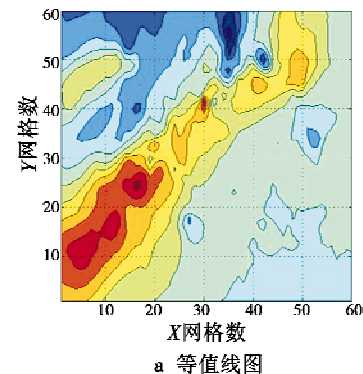
量子粒子群算法中变异操作由量子非门实现, 即

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{ij} \\ \sin \theta_{ij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta_{ij} \\ \cos \theta_{ij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_{ij} + \pi/2) \\ \sin(\theta_{ij} + \pi/2) \end{pmatrix} \quad (20)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, N$; $j = 1, 2, \dots, D$ 。上述变异是一种角度旋转, 第 j 个量子位旋转角大小为 $\Delta\theta_{ij} = \pi/2 - 2\theta_{ij}$ 。假设变异概率为 P_m , 在 $(0, 1)$ 间生成一个随机数 R_{rand} , 若 $R_{rand} \leq P_m$, 则随机选择一定数量的量子位用量子非门进行变异, 由上述可知, 量子位旋转角与当前或历史最优值无关, 而与初始生成角大小有关, 可以有效地避免被局部最优值吸引从而增加种群的多样性。

3 仿真结果及分析

选取东亚沿海的一块地磁数据, 间隔 200 m 绘制成 60×60 网格基准图, 基准图的等值线图及三维图如图 2 所示。



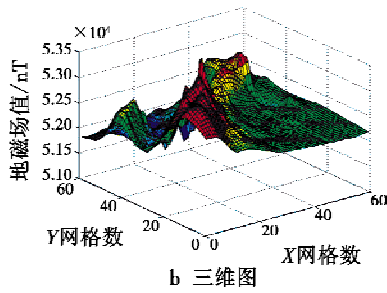


图2 基准图的等值线图及三维图
Fig.2 Contour map and three-dimensional diagram of reference map

威胁作用范围用平面圆表示。参数设定如下(单位为单元网格):飞行器起点为(5,10);终点为(55,47);威胁1(7.5,16);威胁2(15,28);威胁3(23,38);威胁4(26,25);威胁5(38,33);作用半径分别为2,3,5,3.5,4,3单元网格。种群大小为10,搜索步长为4,最大迭代次数为100,权重 $\omega = 0.8$,学习因子 $c_1 = c_2 = 2$,变异概率 $P_m = 0.05$ 。

采用逐点搜索的方式,执行一次算法得到一个航迹点的坐标值,编码维数为2,设种群大小 $P_{population} = m$,则第 t 代种群可以表示为 $P^t = (P_1^t, P_2^t, \dots, P_m^t)$,第 t 代中第 i 个粒子可以表示为 $P_i^t = (p_{i1}^t, p_{i2}^t)$ 。仿真结果如图3~图5所示。

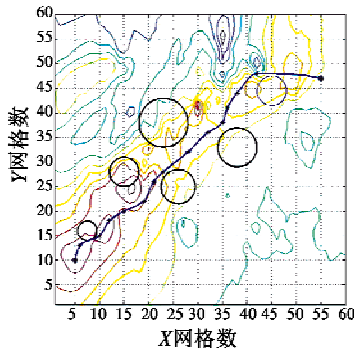


图3 基于QPSO的地磁匹配航迹规划
Fig.3 Geomagnetic matching path planning based on QPSO

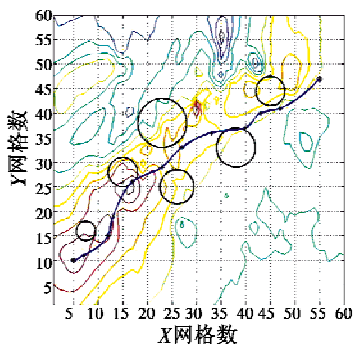


图4 基于PSO的地磁匹配航迹规划
Fig.4 Geomagnetic matching path planning based on PSO

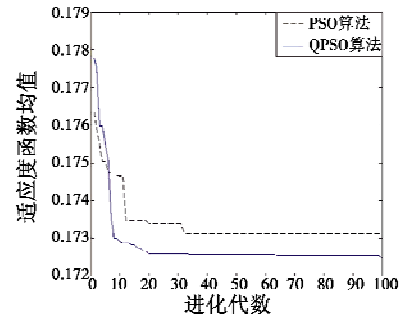


图5 适应度函数均值曲线
Fig.5 Mean value curve of fitness function

由图3可知,传统PSO适应值收敛到0.1734,收敛代数为32;QPSO适应值收敛到0.1725,收敛代数为20。在相同的条件下,QPSO比PSO有较快的收敛速度和较优的航迹解,原因如下。

1) 从编码方式看:PSO算法中,染色体的每一个基因表示航迹点的一个确定位置,一条染色体只表示优化问题的一个解,因此对种群规模有一定的要求。QPSO算法中,染色体的基因用概率幅表示,相应的位置可以遍历整个搜索空间,单个染色体包含多个量子位状态信息^[10],可以同时表示优化问题的多个解,有优秀种群多样性的特征。

2) 从进化的本质看:PSO算法中,进化过程是由个体适应值引起的选择压力和种群多样性的竞争,求得最优解时种群失去多样性汇聚在一起;QPSO算法中,进化过程是量子熵和能量的竞争,最终求得最优解时量子熵降低,自由能量达到最小,是一种由不平衡到平衡的转变^[11]。

4 结束语

基于地磁匹配航迹规划,本文通过仿真实验将QPSO和传统PSO进行对比,仿真结果表明QPSO能够取得较优的航迹解和较快的收敛速度,从而验证了量子粒子群算法应用于地磁匹配航迹规划的有效可行性。

参考文献

[1] 郭才发,胡正东,张士峰,等.地磁导航综述[J].宇航学报,2009,30(4):1314-1318. (GUO C F, HU Z D, ZHANG S F, et al. A survey of geomagnetic navigation[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(4):1314-1318.)
 [2] 杨功流,李士心,姜朝宇.地磁辅助惯性导航系统的数据融合算法[J].中国惯性技术学报,2007,5(1):46-49. (YANG G L, LI S X, JIANG C Y. Data fusing algorithm in geomagnetic aided INS[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 5(1):46-49.)
 [3] 王维平,刘娟.无人飞行器航迹规划方法综述[J].飞行力学,2010,28(2):6-10. (WANG W P, LIU J. Intro-

- duction to unmanned air vehicle route planning methods [J]. *Flight Dynamics*, 2010, 28(2):6-10.)
- [4] CLERC M, KENNEDY J. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multi-dimensional complex space [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(1):58-73.
- [5] 焦巍,刘光斌,张金生,等. 基于粒子群算法的地磁匹配航迹规划[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(11):2106-2111. (JIAO W, LIU G B, ZHANG J S, et al. Geomagnetic matching path planning based on PSO algorithm [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2010, 30(11):2106-2111.)
- [6] 焦巍,刘光斌,张金生,等. 基于免疫粒子群算法的地磁特征区域选择[J]. *宇航学报*, 2010, 31(6):1547-1551. (JIAO W, LIU G B, ZHANG J S, et al. Immune PSO algorithm-based geomagnetic characteristic area selection [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(6):1547-1551.)
- [7] 傅阳光,周成平,丁明跃. 基于混合量子粒子群优化算法的三维航迹规划[J]. *宇航学报*, 2010, 31(12):2657-2664. (FU Y G, ZHOU C P, DING M Y. 3-D route planning based on hybrid quantum-behaved particle swarm optimization [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(12):2657-2664.)
- [8] 李士勇,李盼池. 量子搜索及量子智能优化研究进展[J]. *计算机测量与控制*, 2009, 17(7):1239-1242. (LI S Y, LI P C. Progress of quantum search and quantum intelligent optimization [J]. *Computer Measurement & Control*, 2009, 17(7):1239-1242.)
- [9] 李士勇,李盼池. 求解连续空间优化问题的量子粒子群算法[J]. *量子电子学报*, 2007, 24(5):569-574. (LI S Y, LI P C. Quantum particle swarms algorithm for continuous space optimization [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2007, 24(5):569-574.)
- [10] 王凌. 量子进化算法研究进展[J]. *控制与决策*, 2008, 23(12):1321-1326. (WANG L. Advances in quantum-inspired evolutionary algorithms [J]. *Control and Decision*, 2008, 23(12):1321-1326.)
- [11] 钱洁,郑建国,张超群,等. 量子进化算法研究现状综述[J]. *控制与决策*, 2011, 26(3):321-331. (QIAN J, ZHENG J G, ZHANG C Q, et al. Reviews of current studying progress on quantum evolutionary computation [J]. *Control and Decision*, 2011, 26(3):321-331.)

(上接第37页)

参考文献

- [1] 董尤心. 效能评估方法研究[M]. 北京:国防工业出版社, 2009. (DONG Y X. Research on effectiveness evaluation methods [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.)
- [2] 朱宝鏊,朱荣昌,熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 北京:航空工业出版社, 2006. (ZHU B L, ZHU R C, XIONG X F. Fighter plane effectiveness assessment [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2006.)
- [3] 黄炎焱,杨峰,王维平,等. 一种武器装备作战效能稳健评估方法研究[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(20):4629-4633. (HUANG Y Y, YANG F, WANG W P, et al. Research on robust evaluation methodology of weapon equipment operational effectiveness [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(20):4629-4633.)
- [4] 石福丽,朱一凡,李超,等. 军事通信网络效能评估中的多数据源融合方法[J]. *火力与指挥控制*, 2012, 37(7):18-23. (SHI F L, ZHU Y F, LI C, et al. Multiple data sources fusion method for effectiveness evaluation of military communication network [J]. *Fire Control & Command Control*, 2012, 37(7):18-23.)
- [5] CHIANG T A, CHE Z H. A fuzzy robust evaluation model for selecting and ranking NPD projects using Bayesian belief network and weight-restricted DEA [J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(11):7408-7418.
- [6] SUEN C Y, NADAL C, MAI T A, et al. Recognition of totally uncons-trained handwriting numerals based on the concept of multiple experts [C]//Proceeding of 1st International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition, Montreal, 1990:131-143.
- [7] HUANG Y S, SUEN C Y. A method of combining multiple experts for the recognition of unconstrained handwritten numerals [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 7(1):90-94.
- [8] 杜栋,庞庆华,吴炎. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京:清华大学出版社, 2008. (DU D, PANG Q H, WU Y. Modern comprehensive assessment method and case selection [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.)
- [9] 张吉军. 模糊层次分析法[J]. *模糊系统与数学*, 2000, 14(2):80-88. (ZHANG J J. Fuzzy analytical hierarchy process [J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2000, 14(2):80-88.)
- [10] 白炜,鞠儒生,邱晓刚. 基于RBF神经网络的作战效能评估方法[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(23):6391-6394. (BAI W, JU R S, QIU X G. Evaluation method of combat effectiveness based on RBF neural network [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(23):6391-6394.)
- [11] 李弼程,王波,魏俊,等. 一种有效的证据理论合成公式[J]. *数据采集与处理*, 2002, 17(1):33-36. (LI B C, WANG B, WEI J, et al. An efficient combination rule of evidence theory [J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2002, 17(1):33-36.)
- [12] CATHERINE K M. Combining belief functions when evidence conflicts [J]. *Decision Support Systems*, 2000, 29(1):1-9.