

## 强生存条件下的飞行器变权重航迹规划研究

张淘沙, 鲁艺

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

**摘要:** 在防空系统日益完善的信息化战场, 利用常权代价函数进行航迹规划所得的可飞航迹已经逐渐不能满足飞行器的强生存力要求。运用变权综合理论改进了传统的常权代价函数, 在仿真中结合微分进化算法, 给出了常权航迹规划和变权航迹规划的结果并进行了分析, 得出基于变权理论的航迹规划可以改善飞行航迹的生存力, 提高飞行器战场生存性能的结论, 仿真结果也表明该方法的可行性。

**关键词:** 航迹规划; 航迹代价函数; 变权理论; 微分进化算法

**中图分类号:** V271.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2015)01-0054-05

## Variable Weight Theory Based Aircraft Path Planning for High Survival Capacity

ZHANG Tao-sha, LU Yi

(Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** With the continuous development of air defense system in information battlefield, the path obtained by constant-weight cost function has great deficiency in aircraft survivability. Thus we improved the traditional constant-weight cost function with variable weight theory. In simulation, the results of path planning based on the constant weight and variable weight cost function were analyzed with Differential Evolution Algorithm (DEA). The result proves the feasibility of the path planning method based on variable weight theory, and shows that it can greatly improve the aircraft battlefield survivability.

**Key words:** path planning; path cost function; variable weight theory; DEA

### 0 引言

多目标航迹规划问题的关键是在满足飞行器航迹各种约束条件的情况下, 建立科学合理的航迹性能指标, 并根据指标构建航迹代价函数进行航迹寻优<sup>[1-2]</sup>, 为飞行器规划出符合特定优化指标的最有航迹。然而, 目前广泛采用的代价函数的权重值均是固定的, 虽然计算简单但忽略了各个威胁指标的具体状态, 即威胁指标的权重是与其具体状态无关的固定常数, 称为常权向量<sup>[3-4]</sup>。一方面, 在威胁源分布密度不同或距离目标远近不同时, 飞行器的威胁代价和航程代价可能存在数量级的差别; 另一方面, 利用寻优算法规划出的最优航迹对指标权重不敏感, 即选取不同的常权向量对规划结果的影响不明显, 这些问题使代价函数权重选择和航迹规划变得困难, 性能指标会“失效”, 导

致得到的规划结果对指挥员而言并非是最优的, 从而不能客观体现任务的要求和决策者的意愿<sup>[5]</sup>。如今的防空系统已进入了高技术对抗的全新阶段, 对军用飞行器在执行危险任务时的强生存条件而言, 基于常权的航迹规划存在较大的局限性。

目前, 对于航迹规划的代价函数权值的相关研究很少, 文献[6]根据任务要求改变各个代价的权重设计出高效的侦察飞行任务航路, 提高了侦察飞机的侦察作战效能; 文献[7]通过对性能指标中的子目标函数进行模糊隶属化, 对多目标综合采用模糊优化策略, 改进了指标权重确定的不足, 但是方法较为复杂且没有结合战场实际。

针对以上问题, 本文创新性地引入变权综合理论对传统的常权代价函数进行改进, 将威胁状态转化为权重的函数, 结合该理论可以针对威胁态势的变化及时调整相应的指标权重, 使得规划过程更贴近战场实际, 最后在仿真中对两种方法进行了比较, 验证了该方法可以获得飞行器生存性能更优的航迹。

收稿日期: 2014-03-03

修回日期: 2014-09-30

作者简介: 张淘沙(1990—), 男, 江苏宿迁人, 硕士生, 研究方向为飞行器航迹规划。

## 1 变权理论基础知识

在效能评估理论中,权值固定属于一种均一评估,即对每个方案采用相同的权重分配,其不足就是会造成实际问题中出现不合理的综合结果,即出现“状态失衡”问题。变权思想是通过动态调整权向量,不但考虑各基本因素的相对重要次序,也考虑了指标对自身状态的均衡程度,从而在一定程度上解决了“状态失衡”问题,使指标的权重能更好地体现相应指标在决策中的作用<sup>[8]</sup>。汪培庄教授于1985年提出了变权思想和一组变权经验公式,李洪兴在变权思想的基础上,根据因素空间理论对变权原理进行了深入讨论,并且给出了变权的公理化定义<sup>[9]</sup>。

1) 变权对应着以下公式中描述的  $m$  个映射  $w_j (j = 1, 2, \dots, m)$ , 即  $w_j: [0, 1]^m \rightarrow [0, 1], (x_1, \dots, x_m) \mapsto w_j(x_1, \dots, x_m)$ 。

2) 变权的类型有多种,即激励型变权、惩罚型变权、混合型变权等,这里给出的是激励型变权,它满足下面3条公理:

① 归一性,  $\sum_{j=1}^m w_j(x_1, \dots, x_m) = 1$ ;

② 连续性,  $w_j(x_1, \dots, x_m) (j = 1, 2, \dots, m)$  关于每个变元连续;

③ 惩罚性,  $w_j(x_1, \dots, x_m) (j = 1, 2, \dots, m)$  关于变元  $x_j$  单调不增。

通过分析变权的原理,可以得到以下结论:变权向量  $\mathbf{W}(X) = (W_1(X), \dots, W_m(X))$  可以表示为因素常权向量  $\mathbf{W}^0$  和状态变权向量  $\mathbf{S}_X$  的归一化的乘积,即

$$\mathbf{W}(X) = \frac{\mathbf{W}^0 \cdot \mathbf{S}_X}{\sum_{i=1}^m (w_i S_i(X))} = \frac{(w_1 S_1(X), \dots, w_m S_m(X))}{\sum_{i=1}^m (w_i S_i(X))} \quad (1)$$

状态变权向量  $\mathbf{S}_X$  是某个  $m$  维实函数(该函数称为均衡函数)的梯向量,它反映了各因素状态的一阶变化情况<sup>[10]</sup>,即

$$\mathbf{S}_X = \mathbf{grad} F(x_1, \dots, x_m) = \left( \frac{\partial F}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial F}{\partial x_m} \right) \quad (2)$$

式中,  $F$  在变权理论中称为综合函数。

## 2 变权航迹规划

航迹规划的不同时间阶段对各指标的敏感度要求是不同的,为体现决策者的经验和偏好以及不同规划阶段下各指数重要程度的变化,需要对代价函数的加权系数进行调节,根据因素状态之间的均衡水平调整各因素在综合决策中的作用。强生存条件就是在规划前期设定飞行器的基本生存原则,如飞行器执行任务

中可接受的最大杀伤概率  $P_{\max}$ 。其思想是通过代价函数各权重值进一步细化,构建出以威胁指标具体状态为变量的权重时变函数,使规划过程更贴近战场实际的同时达到回避杀伤概率较高的航路点、提高战场生存力的目的。

### 2.1 航迹代价函数的改进

本文主要考虑航程、威胁代价两项指标。航程是飞行速度对时间的积分,根据规划实时性要求和变权思想,对飞行航程的权重采用比较简单的一阶线性函数,表达式为

$$F_1 = x_1 \quad (3)$$

结合规划的实际可知,当飞行器越来越接近威胁区域时,  $F_2$  取值基本上是线性增加,当飞行器很接近威胁源时,即  $r$  的值相对较小时,  $r$  值的微小变化都会对航路点的威胁代价值产生显著影响,从而对飞行器的整体生存力影响很大。所以,本文主要以距离  $r$  作为威胁指标状态的主要因素,对  $r$  的变权函数选择了线性函数加上对数函数的形式<sup>[11]</sup>,具体表示为

$$F_2 = r + \alpha \ln r \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  为调整因子,可根据实际战场情况确定;  $r$  为空间距离,在变权航迹规划中表示航迹点到最近威胁源  $(x_i, y_i)$  的距离。

$$r = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (5)$$

令  $x_1 = l, x_2 = r$ , 综合以上各式得到变权综合函数为

$$F(x_1, x_2) = F_1 + F_2 = l + r + \alpha \ln r \quad (6)$$

结合式(5)可求得状态变权向量为

$$S_i(r, l) = \frac{\partial F}{\partial x_i} = \begin{cases} 1 & i = 1 \\ 1 + \frac{\alpha}{r} & i = 2 \end{cases} \quad (7)$$

式中:当  $i = 1$  时,  $S_i$  为常数,表示其威胁代价对应的权值不随  $x_i$  的变化而变化;当  $i = 2$  时,  $S_i$  为一个单调递减函数,其权值随着时间的减小而增大,表示威胁源对飞行器的威胁度变大,符合实际战场情况。

当  $S_2$  变大时,根据归一化性质可知,航程对应的权值应相应变小。通过归一化 Hadamard 乘积公式<sup>[12]</sup>求得实际作战过程中,航程和威胁代价的实时权重值为

$$w_i^e = \begin{cases} w_1 / \left[ w_1 + w_2 \left( 1 + \frac{\alpha}{r} \right) \right] & i = 1 \\ w_2 \left( 1 + \frac{\alpha}{r} \right) / \left[ w_1 + w_2 \left( 1 + \frac{\alpha}{r} \right) \right] & i = 2 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $w_i = (w_1, w_2)$ , 为初始常权向量,可以通过 AHP 法或模糊推理法得到<sup>[13]</sup>;  $w_i^e = (w_1^e, w_2^e)$ , 为根据规划进展实时变化的权重向量,只考虑了威胁代价与  $r$  的变化关系,因此,  $w_1^e$  随  $w_2^e$  的变化而变化,但总和恒为 1。

结合变权理论构建的适应度函数为<sup>[14]</sup>

$$Fitness(x_i) = w_1 * f\_length(x_i) + w_2(r) * f\_threat(x_i) \quad (9)$$

式中:  $f\_length(x_i)$  为飞行航程代价函数;  $f\_threat(x_i)$  为威胁代价函数, 并且都进行了归一化处理。

## 2.2 航迹规划算法 - 微分进化算法

微分进化算法(Differential Evolution Algorithm, DEA)是一种基于群体进化的仿生智能计算方法, 具有记忆个体最优解和种群内部信息共享、收敛速度快以及鲁棒性优的特点, 作为进化算法家族的成员, DEA 还具有稳定性好、控制参数少、易于实现及对待求解问题的高度适应性等优点, 相比遗传算法而言, DEA 保留了基于种群的全局搜索策略。DEA 的基本操作包括变异、交叉和选择3种操作<sup>[15]</sup>。

运用 DEA 进行飞行器航迹规划问题最优航迹问题时, 首先要利用坐标变换将规划问题转换成一个  $D$  维函数优化问题, 即将原坐标系转换为以规划起始点和目标点连线为横轴的新的坐标系, 并将起始点与目标点之间的距离  $D$  等分, 然后结合算法进行求解, 具体流程如下<sup>[16]</sup>:

1) 根据初始坐标系建立新的旋转坐标系, 将规划环境中的威胁源的坐标信息转化到旋转坐标系中, 并将坐标系的横轴  $D$  等分, 每一个可行的航路点的坐标解将由  $D$  个由浮点数表示的坐标组成的数列表示, 记为  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_D\}$ ;

2) 利用式(7)求解出关于航程和威胁的指标权重, 得到的航迹代价函数作为 DEA 的适应度函数, 用来计算航迹总代价;

3) 在战场范围允许的条件下, 随机产生  $M$  条初始路径, 根据战场上各个威胁源的信息及态势分布, 运用如式(8)所示基于变权理论的改进后的代价函数, 计算每一条可行航迹的总代价值;

4) 执行迭代计算;

5) 对由  $M$  个可行航迹组成的种群进行变异操作;

6) 根据 DEA 交叉公式进行交叉操作;

7) 计算交叉产生个体的航迹总代价值, 根据总代价值最小原则进行 DEA 的选择操作;

8) 根据设定的最大迭代次数, 若迭代次数大于最大迭代次数, 则退出循环, 否则转 4) 进入下一次的迭代计算;

9) 将最终迭代出的最优航迹的航路点坐标进行坐标反变换运算, 然后输出航路点的坐标信息并在数字地图上显示。

## 3 仿真分析

以某无人机执行突防任务为例, 设任务规划区域

为  $200 \text{ km} \times 200 \text{ km}$  的山地区域, 任务的起点坐标为  $(36 \text{ km}, 10 \text{ km})$ , 目标点坐标为  $(200 \text{ km}, 200 \text{ km})$ , 巡航高度  $H = 5 \text{ km}$ , 地面的威胁信息如表 1 所示(将火力威胁等同为探测威胁处理), 可接受的最大杀伤概率为  $P_{\max} = 0.6$ 。微分进化算法的初始参数设定<sup>[17]</sup>: 种群规模  $N_p = 20$ , 最大迭代次数  $N_{\max} = 200$ , 变异因子  $F = 0.5$ , 交叉因子  $\beta_{CR} = 0.9$ 。

表 1 地面威胁信息表

Table 1 Ground threat information

威胁序号	1	2	3	4	5	6
X/km	138	159	90	127	192	156
Y/km	94	144	146	148	169	181
半径/km	17	17	19	12	9	15

仿真中选取常权向量  $w_i$  为  $(0.5, 0.5)$ , 首先结合式(8)求出变权向量  $w_i^r$ , 其中,  $\alpha = 0.5$ 。图 1 所示为根据变权理论计算出的指标权重值变化曲线。不难看出, 当  $r$  远大于威胁源的初始探测半径时, 各权重值趋向于初始常权值, 且无人机越靠近威胁源, 威胁代价的权重值越大, 权重的变化率也越大, 意味着无人机遭受攻击的可能性变大。

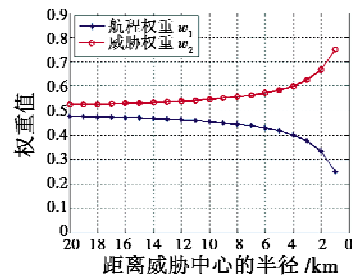


图 1 权重随  $r$  变化的显示图

Fig. 1 Weight variation based on radius

再进行基于常权代价函数的航迹规划, 设初始权重  $w_i = (0.5, 0.5)$ 。在 Matlab 编程环境下, 利用 DEA 算法求解最优航路点序列, 求解到的航路点与目标之间的距离小于步长, 则程序结束, 规划也结束, 并输出离散航路点, 把这一系列的离散航路点依次连接, 并进行局部平滑得到的连续航迹如图 2 中红色曲线所示。需要说明的是, 该图叠加了实际的地形和威胁态势, 是在一定高程  $5 \text{ km}$  的地形二维显示, 蓝色的区域表示考虑到实际地形遮蔽作用的雷达初始威胁范围, 起始点和目标点用黄色五角星标记。

在此基础上, 进行基于变权理论的航迹规划仿真, 同样采用 DEA 算法求解, 起点和目标点也相同。不同的是, 其适应度值的计算所依据的函数不是固定的, 其权重向量的取值根据图 1 中的曲线得出, 实际求解是根据规划步长采样得到一组离散值进行计算, 得到的规划结果如图 3 所示。

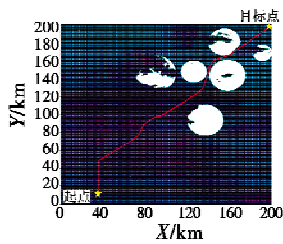


图 2  $H=5\text{ km}$  的常权航迹规划二维显示  
Fig. 2 2-D display based on constant weights when  $H=5\text{ km}$

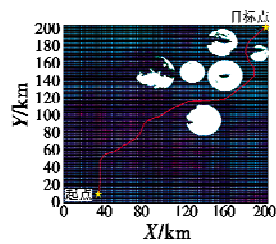


图 3  $H=5\text{ km}$  的变权航迹规划二维显示  
Fig. 3 2-D display based on variable weights when  $H=5\text{ km}$

下文分析两种规划方法对于飞行器生存力的影响,图 4 所示为两种方法下航路点的威胁代价对比曲线。从图中可以看出,基于常权代价函数所得的航路点中,威胁代价最大值接近 0.9,其在该点附近区域被杀伤的危险很大,已不能满足突防任务的强生存条件。在基于变权的航迹规划所得的航路点中,威胁代价最大值不超过设定的值 0.6。规划初期航路点的代价相差不大,并呈现相同的趋势,随着规划的深入,距离威胁区域越来越近,航路点的代价有较明显的差异。随着威胁分布自适应变化,较好地改善了飞行器的生存性能。

由图 2 和图 3 也可以看出,基于变权的规划有效地考虑到威胁对自身生存力的影响,选择了距离威胁较远的路径和杀伤概率较大的航路点,提高了生存力和任务的成功率。

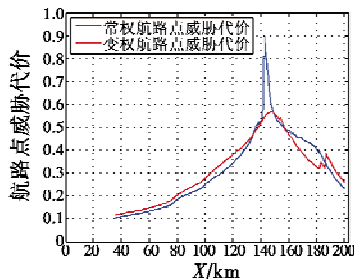


图 4 航路点代价对比图  
Fig. 4 Comparison of threat cost of waypoints

#### 4 结论

目前的防空系统已进入到高技术对抗的全新阶段,对于强生存性的条件而言,基于常权的航迹规划存在较大的局限性。本文利用变权理论,针对航程和地面威胁两个指标,改进了传统的航迹代价函数。在仿真中结合航迹规划 DEA 算法,给出了基于常权和变权的两种航迹规划结果的比较分析,得出结论:引入变权理论所得的航迹能够让飞行器更好地规避威胁,具有一定的自适应调整能力,虽然会增加一定的航程代价,

但可以较好地提高生存性能,更好地满足任务的强生存条件。本文为飞行器更好地实现突防或执行危险任务提供了一种新的思路,同时仿真也验证了该方法的可行性。

#### 参考文献

- [1] 熊丹君,蔡满意,刘宇坤,等. 多约束条件下飞行器航路规划[J]. 弹箭与制导学报,2009,29(2):289-292. (XIONG D J, CAI M Y, LIU Y K, et al. Air vehicle route planning for multi-constraints [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(2):289-292.)
- [2] 李士波,孙秀霞,李海军. 多约束条件下的飞行器航迹规划算法[J]. 电光与控制,2007,14(2):34-37. (LI S B, SUN X X, LI H J. Realization of 2D grid-based route planning algorithm [J]. Electronics Optics & Control, 2007, 14(2):34-37.)
- [3] 李季,孙秀霞. 基于改进 A-star 算法的无人机航迹规划方法研究[J]. 兵工学报,2008,29(7):788-792. (LI J, SUN X X. A route planning's method for unmanned aerial vehicles based on improved A-star algorithm [J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(7):788-792.)
- [4] CHAKRABARTY A, LANGELAAN J W. Flight path planning for UAV atmospheric energy harvesting using heuristic search [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Toronto, Ontario Canada, 2010:1-18.
- [5] 刘蜀,李登峰. 舰艇对抗反舰导弹威胁判断变权评估方法[J]. 现代防御技术,2009,37(5):1-4. (LIU S, LI D F. A variable weight assessment method of threat judgment for warship vs antiship missiles [J]. Modern Defence Technology, 2009, 37(5):1-4.)
- [6] 周燕,范鹏,林艳红. 战术航空侦察航线规划评价模型[J]. 战术导弹控制技术,2007,56(1):65-67. (ZHOU Y, FAN P, LIN Y H. Evaluation model of tactical aeronautical scout route planning [J]. Control Technology of Tactical Missile, 2007, 56(1):65-67.)
- [7] 乔侨,史长久. 飞行器航迹规划的多目标优化方法[J]. 微计算机信息,2010(31):172-174. (QIAO Q, SHI C J. Multi-objective optimization method for aircraft path planning [J]. Microcomputer Information, 2010(31):172-174.)
- [8] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架(VIII)—变权综合原理[J]. 模糊系统与数学,1995,9(3):1-9. (LI H X. Factor spaces and mathematical frame of knowledge representation (VIII)-variable weights analysis [J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 1995, 9(3):1-9.)

- [9] 张宇卓,李宇成,李洪兴. 模糊推理的变权综合算法及其构造的模糊系统响应能力分析[J]. 模糊系统与数学,2006,20(6):66-71. (ZHANG Y Z, LI Y C, LI H X. Variable weighted synthesis method for fuzzy inference and analysis of response ability of the constructed fuzzy systems [J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2006, 20(6):66-71.)
- [10] 李德清,李洪兴. 状态变权向量的性质与构造[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2002,38(4):455-461. (LI D Q, LI H X. The properties and construction of state variable weight vectors [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2002, 38(4):455-461.)
- [11] 曹可劲,江汉,赵宗贵. 一种基于变权理论的空中目标威胁估计方法[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版,2006,7(1):32-35. (CAO K J, JIANG H, ZHAO Z G. Air threat assessment based on variable weight theory [J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2006, 7(1):32-35.)
- [12] 孙一杰,曾静,杨先德. 基于变权重的多因子来袭导弹威胁评估[J]. 舰船电子工程,2010,30(7):45-48. (SUN Y J, ZENG J, YANG X D. Multi-factors evaluation of threat for striking missile based on variable weight [J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(7):45-48.)
- [13] 郑昌文,严平,丁明跃,等. 飞行器航迹规划[M]. 北京:国防工业出版社,2008. (ZHENG C W, YAN P, DING M Y, et al. Route planning for air vehicles [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.)
- [14] 胡中华,赵敏,姚敏. 无人机三维航路规划技术研究及发展趋势[J]. 计测技术,2009,29(6):6-9. (HU Z H, ZHAO M, YAO M. Research and development trend of 3-D route planning for UAV [J]. Metrology & Measurement Technology, 2009, 29(6):6-9.)
- [15] DUAN H B, YU Y X, ZHANG X Y, et al. Three-dimension path planning for UCAV using hybrid meta-heuristic ACO-DE algorithm [J]. Simulation Modeling Practice and Theory, 2010, 18(8):1104-1115.
- [16] 苏海军,杨煜普,王宇嘉. 微分进化算法的研究综述[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(9):1793-1797. (SU H J, YANG Y P, WANG Y J. Research on differential evolution algorithm: a survey [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(9):1793-1797.)
- [17] STORN R. System design by constraint adaptation and differential evolution [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999, 3(1):22-34.

(上接第 47 页)

- tems with interval time-varying delay [J]. Automatica, 2008, 44(10):2680-2685.
- [7] ZHANG T, LI Y C, LIU G J. Robust stabilization of uncertain systems with interval time-varying state and input delays [J]. International Journal of Systems Science, 2009, 40(1):11-20.
- [8] 王新梅,裴海龙. 一类区间时变输入时滞与状态时滞线性系统的稳定性研究[J]. 控制与决策,2009,24(10):1549-1554. (WANG X M, PEI H L. Stabilization analysis of interval time-varying state and input delays systems [J]. Control and Decision, 2009, 24(10):1549-1554.)
- [9] SHAO H Y. New delay-dependent stability criterion for systems with interval delay [J]. Automatica, 2009, 45(3):744-749.
- [10] CHEN P, DONG Y, TIAN Y C. New approach on robust delay-dependent  $H^\infty$  control for uncertain T-S fuzzy systems with interval time-varying delay [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2009, 17(4):890-900.
- [11] 李涛,张合新,孙鹏. 含区间时变时滞的线性不确定系统鲁棒稳定性新判据[J]. 控制与决策,2010,25(6):953-957. (LI T, ZHANG H X, SUN P. New robust stability criteria for uncertain linear systems with interval time-varying delay [J]. Control and Decision, 2010, 25(6):953-957.)
- [12] PARK P G, KO J W, JEONG C K. Reciprocally convex approach to stability of systems with time-varying delays [J]. Automatica, 2011, 47(1):235-238.

(上接第 53 页)

- International Conference on Information Science and Engineering (ICISE), 2009:4708-4711.
- [13] 王小漠,张光义. 雷达与探测[M]. 2版. 北京:国防工业出版社,2008. (WANG X M, ZHANG G Y. Radar and detection [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.)
- [14] 高烽. 雷达导引头概论[M]. 北京:电子工业出版社,2010. (GAO F. Conspectus of radar seeker [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.)
- [15] 夏福梯. 防空导弹制导雷达伺服系统[M]. 北京:宇航出版社,1996. (XIA F T. Guidance radar servosystem of air defence missile [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1996.)
- [16] SIOURIS G M. Missile guidance and control systems [M]. Berlin: Springer, 2004.
- [17] KATSUHIKO O. Modern control engineering [M]. 5th ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2009.