

doi: 10.7690/bgzd.2020.09.005

反导预警体系雷达装备能力提升贡献率评估

李鑫¹, 付鑫², 吕怀武³

(1. 中国人民解放军 61623 部队 8 分队, 北京 100034; 2. 中国电子科学研究院战预所, 北京 100041;
3. 中国人民解放军 31511 部队, 北京 100037)

摘要: 为评估武器装备对作战效能提升的程度, 对某型雷达在反导预警体系作战的能力贡献进行研究。根据反导预警体系中雷达性能及任务对应关系, 给出装备能力提升贡献率的定义, 通过构建反导预警体系雷达装备能力提升贡献率评估指标体系, 提出装备单项指标能力提升贡献率计算和不同类型指标在体系中能力值的求解方法。最后通过仿真实例验证该求解方法的合理性。

关键词: 反导预警体系; 雷达装备; 指标体系; 贡献率

中图分类号: TJ01 **文献标志码:** A

Contribution Rate Evaluation of Radar Equipment Capability Enhancement of Anti-missile Early Warning System

Li Xin¹, Fu Xin², LYU Huaiwu³

(1. No. 8 Team, No. 61623 Unit of PLA, Beijing 100034, China; 2. Strategic Early Warning Institute of China Academy of Electronic & Information Technology, Beijing 100041; 3. No. 31511 Unit of PLA, Beijing 100037, China)

Abstract: In order to evaluate the degree of which weaponry improves combat effectiveness, researched the contribution of the certain type of radar in the anti-missile early warning system. According to the radar performance and the task correspondence relation in the anti-missile early warning system, the definition of equipment capacity improvement contribution rate was given. The contribution rate evaluation index system was improved by establishing the anti-missile early warning system. The article proposed the calculation method that equipment individual index capability improvement contribution rate and different types of index capability. Finally, the simulation result verified the rationality of the solution.

Keywords: anti-missile early warning system; radar equipment; index system; contribution rate

0 引言

为了研究和解决武器装备对作战带来的效益或提升作用, 借鉴经济领域“贡献率”^[1]的含义, 引入“装备体系贡献率”概念^[2]作为评价武器装备对体系效能提升效率的重要指标。深入研究装备体系贡献率问题对武器装备发展论证、需求分析、装备试验鉴定等具有重要的借鉴意义。

由于涉密程度高的原因, 难以获取国外有关装备体系贡献率研究的相关资料。文献[3]从“灰靶理论”角度, 结合定性、定量的方法计算装备体系贡献率; 文献[4]基于复杂适应系统 (complex adaptive system, CAS) 理论给出贡献率评估指标体系构建原则, 从如何获取评估数据角度提出 ADC (availability, dependability, capability)、探索性分析和 Agent 仿真建模方法, 为体系贡献度试验和评估提供借鉴和指导; 文献[5]引入 D-S 证据理论, 解决了不确定性

指标或不能量化指标的打分评估问题; 文献[6]考虑了装备间的关联关系, 提出一种基于 OODA (observe, orient, decide, act) 作战环的武器装备体系贡献率评估方法, 利用效用函数计算每种装备的效能, 虽然引入了作战环的内涵, 但不适用于雷达探测等单元型的武器装备。

笔者通过建立“雷达装备能力—完成作战任务—雷达装备性能提升”映射关系, 提出贡献率计算模型, 并验证了该方法的有效性和可行性。

1 雷达装备贡献率评估指标体系

根据反导预警体系对雷达装备的实际需求, 针对雷达装备和作战对象的特点, 从探测、跟踪和识别 3 方面进行任务分解, 根据“能力—任务—性能”映射关系, 构建如图 1 所示的反导预警体系雷达装备的贡献率评估指标体系, 按照顶层、中层、底层的层级关系构建反导预警体系雷达装备作战能力的

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-05-22

作者简介: 李鑫 (1982—), 女, 内蒙古人, 硕士, 工程师, 从事系统总体设计研究。E-mail: Lixin200691@126.com。

量化指标体系^[7]。

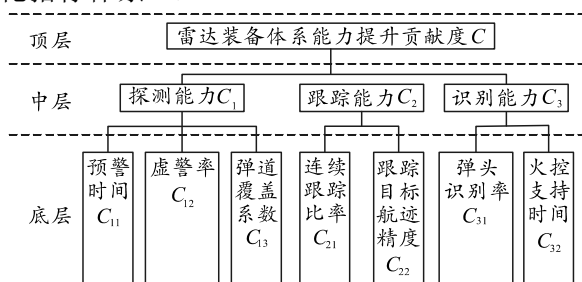


图1 反导预警体系雷达装备贡献率评估指标体系

1) 预警时间: 预警中心系统判断来袭目标为弹道导弹, 向反导指控中心发出来袭告警的首点时刻至导弹落地时刻的时间段;

2) 虚警率: 反导雷达在单位时间内将噪声或其他干扰信号误判为威胁目标的概率;

3) 弹道覆盖系数: 反导雷达装备对弹道探测达到一重或以上的覆盖数;

4) 持续跟踪比率: 反导雷达跟踪弹道导弹的总时间占导弹飞行总时间的比;

5) 跟踪目标航迹精度: 反导雷达发现目标后, 持续跟踪目标在距离、方位和俯仰的探测误差。探测误差越小越好;

6) 弹头识别率: 反导雷达探测导弹目标的 RCS 识别准确率;

7) 火控支持时间: 雷达探测信息引导拦截武器发射支持的时间段。

2 反导预警体系雷达装备贡献率评估计算

2.1 雷达装备能力提升贡献率模型

若反导预警体系中对某雷达装备进行技术改造或部署位置改变, 变化前后体系所能达到的作战效能值为 E_1 , E_2 , 则该雷达装备的能力提升贡献率可以表示为

$$P = [(E_2 - E_1) / E_1] \times 100\% \quad (1)$$

式中 P 的取值范围为 $[0, 1]$ 。

2.2 单项指标 $P(C_i)$ 的评估计算

2.2.1 探测能力 $P(C_1)$ 的计算

对于在反导预警体系中的雷达装备而言, 探测能力 C_1 由预警时间 C_{11} 、虚警率 C_{12} 和弹道覆盖系数 C_{13} 3 项技术指标聚合构成, 权值 w_{1i} 由专家打分法确定, $P(C_1)$ 可表示为

$$P(C_1) = \sum_{i=1}^3 w_{1i} A(C_{1i}) \quad (2)$$

1) 计算预警时间 C_{11} 的能力提升贡献率为:

$$A(C_{11}) = [(T_2(C_{11}) - T_1(C_{11})) / T_1(C_{11})] \times 100\% \quad (3)$$

其中 T_1 、 T_2 分别为雷达装备能力提升前后对反导预警体系的预警时间。

2) 计算虚警率 C_{12} 的能力提升贡献率为:

$$A(C_{12}) = [(F_1(C_{12}) - F_2(C_{12})) / F_2(C_{12})] \times 100\% \quad (4)$$

其中 F_1 、 F_2 分别为雷达装备能力提升前后对弹道导弹探测的虚警率。

3) 为了确保对重点威胁方向的来袭弹道尽早发现、早期告警, 往往部署多部预警雷达同时监视探测, 探测覆盖弹道重叠数越多越好, 计算弹道覆盖系数 C_{13} 的能力提升贡献率为:

$$A(C_{13}) = [(\sigma_2(C_{13}) - \sigma_1(C_{13})) / \sigma_1(C_{13})] \times 100\% \quad (5)$$

其中 σ_1 、 σ_2 分别为雷达装备能力提升前后对弹道的探测覆盖重叠系数。

2.2.2 跟踪能力 $P(C_2)$ 的计算

对于在反导预警体系中的雷达装备而言, 跟踪能力 C_2 由连续跟踪比率 C_{21} 和跟踪目标航迹精度 C_{22} 2 项技术指标聚合构成, 权值 w_{2i} 由专家打分法确定。 $P(C_2)$ 可表示为

$$P(C_2) = \sum_{i=1}^2 w_{2i} A(C_{2i}) \quad (6)$$

1) 计算连续跟踪比率 C_{21} 的能力提升贡献率为:

$$A(C_{21}) = [(\tau_2(C_{21}) - \tau_1(C_{21})) / \tau_1(C_{21})] \times 100\% \quad (7)$$

其中 τ_1 、 τ_2 分别为能力提升前后的持续跟踪比率。

2) 由于航迹精度属于成本型指标, 包括距离、方位和俯仰精度, 计算跟踪目标航迹精度 C_{22} 的能力提升贡献率为:

$$A(C_{22}) = [(v_1(C_{22}) - v_2(C_{22})) / v_2(C_{22})] \times 100\% \quad (8)$$

其中 v_1 、 v_2 分别为能力提升前后的航迹跟踪精度。

2.2.3 识别能力 $P(C_3)$ 的计算

对在反导预警体系中的雷达装备而言, 识别能力 C_3 由弹头识别率 C_{31} 、火控支持时间 C_{32} 2 项技术指标聚合构成, 权值 w_{3i} 由专家打分法确定。 $P(C_3)$ 可表示为

$$P(C_3) = \sum_{i=1}^2 w_{3i} A(C_{3i}) \quad (9)$$

1) 计算弹头识别率 C_{31} 的能力提升贡献率为:

$$A(C_{31}) = [(\beta_1(C_{31}) - \beta_2(C_{31})) / \beta_2(C_{31})] \times 100\% \quad (10)$$

其中 $\beta_1(C_{31})$ 、 $\beta_2(C_{31})$ 分别为弹头识别率变化前后的效益型指标能力值。

2) 计算火控支持时间 C_{32} 的能力提升贡献率为:

$$A(C_{32})=[\varphi_2(C_{32})-\varphi_1(C_{32})/\varphi_1(C_{32})]\times 100\% \quad (11)$$

其中 $\varphi_1(C_{32})$ 、 $\varphi_2(C_{32})$ 分别为火控支持时间变化前后的效益型指标能力值。

2.3 体系能力值计算

单指标的体系能力值计算，分为效益型指标和成本型指标 2 种方式。

1) 效益型指标体系能力值计算。

效益型指标包括预警时间、弹道覆盖系数、目标连续跟踪比率、弹头识别率、火控支持时间等。

若反导预警体系有 m 部雷达，最多有 m 个预警时间，能力值分别为 $T_{Ri}(C_{11})(i=1,2,\dots,m)$ ，则预警时间的体系能力值可表示为：

$$T(C_{11})=\max\{T_{R1}(C_{11}),T_{R2}(C_{11}),\dots,T_{Ri}(C_{11})\}。 \quad (12)$$

而对于目标连续跟踪比率的效益型指标的体系能力值均采用式(13)进行计算。

若每部雷达的目标连续跟踪比率能力值为 $S_{Ri}(C_{13})(i=1,2,\dots,m)$ ，有 n 个重叠跟踪的弧段，则目标连续跟踪比率的体系能力值为：

$$S(C_{13})=\sum_{i=1}^m S_{Ri}(C_{13})-\sum_{j=1}^n S_{Rj}(C_{13})。 \quad (13)$$

2) 成本型指标体系能力值计算。

成本型指标包括虚警率、跟踪目标航迹精度等。

若反导预警体系中有 m 部雷达，虚警率的能力值分别为 $F_{Ri}(C_{11})(i=1,2,\dots,m)$ ，则虚警率的体系能力值为：

$$F(C_{11})=\max\{F_{R1}(C_{11}),F_{R2}(C_{11}),\dots,F_{Ri}(C_{11})\}。 \quad (14)$$

跟踪目标航迹精度的指标体系能力值均利用式(14)进行计算。

2.4 雷达装备能力提升的体系贡献率聚合计算

通过上面的模型可得出反导预警体系各分指标能力提升贡献率，而整个反导预警体系作战效能的提升应为所有能力的聚合，即对每项指标计算能力提升贡献率，然后通过加权合成的方法，将指标体系中各能力值聚合为体系作战效能值，利用专家打分法确定每一指标的权重，通过加权法将各个指标的能力提升贡献率聚合得到雷达装备能力提升的体系贡献率^[8]。即

$$P=\sum_{j=1}^m \sigma_j P(C_j)。 \quad (15)$$

其中： σ_j 为各能力提升贡献率 $P(C_j)$ 的权重系数，满足 $\sum_{j=1}^m \sigma_j=1$ ； m 为该体系中能力指标总数；指标 C_j 的能力提升贡献率为 $P(C_j)$ 。

假设来袭弹道数量为 N ，根据弹道威胁等级确定每条弹道的威胁权重为 α_k ，预警体系雷达装备能力提升对每条弹道的体系贡献率为 P_k ，则对整个作战体系的贡献率为：

$$P=\sum_{k=1}^N \alpha_k \cdot P_k。 \quad (16)$$

3 仿真实例

根据已知的反导预警作战装备体系各项能力，求解反导预警体系中添加 1 部雷达 X 后的能力提升贡献率。如图 2 所示，假设某地区部署反导预警体系在以该地区为圆心的 1 000 km 探测区域内部署雷达装备，受到来自 4 个方向的弹道导弹威胁，每个方向的导弹威胁权重相等，均为 0.25，计算该预警体系增加一部雷达装备 X 的能力提升贡献率。

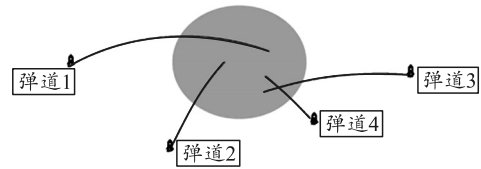


图 2 攻击场景

受仿真数据的局限，在已建立的指标体系下，仿真计算选取预警时间、连续跟踪比率、火控支持时间 3 个技术指标，指标权重分别为 0.4、0.3、0.3。分别计算该反导预警体系技术调整前后的雷达装备体系能力值。

对于 4 条弹道，根据单指标体系能力值计算方法得到表 1 结果数据。

表 1 预警体系调整前各指标的体系能力值

| 弹道序号 | 预警时间/s | 连续跟踪比率 | 火控支持时间/s |
|------|--------|-----------|----------|
| 1 | 748 | 0.301 457 | 199 |
| 2 | 982 | 0.650 000 | 331 |
| 3 | 760 | 0.651 825 | 278 |
| 4 | 632 | 0.683 070 | 381 |

在保证其他雷达装备技术指标不变的情况下，添加 1 部雷达装备 X，计算预警体系调整后各指标的体系能力值如表 2。

表 2 预警体系调整后各指标的体系能力值

| 弹道序号 | 预警时间/s | 连续跟踪比率 | 火控支持时间/s |
|------|--------|-----------|----------|
| 1 | 969 | 0.477 374 | 298 |
| 2 | 1 075 | 0.818 673 | 400 |
| 3 | 844 | 0.737 311 | 444 |
| 4 | 658 | 0.785 459 | 450 |

由表 1、表 2 可知：预警体系技术调整后，对每条弹道的预警能力均有所变化。由表 1、表 2 数据计算每个指标的贡献率见表 3。

当液压缸匀速跟踪轨迹时，目标位置与当前位置总是存在一个波动较小的差值。从图中可以看出：传统 PID 控制器开始运动后，相对于模糊 PID 的滞后导致其差值总是大于模糊 PID 控制器，影响轨迹跟踪的精度。

当负载逐渐减小后，模糊 PID 控制器与传统 PID 控制器的结果相近，但模糊 PID 的控制效果仍优于传统 PID，因为模糊律在加速度绝对值较大时，PID 参数修正量也较大，缩短了加速与减速的时间。

4 结论

液压缸应用广泛，实现其自动控制具有长远的意义与价值。笔者在应用中构建模糊 PID 控制器，通过实验制定了一套模糊规律表，在一定程度上抑制了负载的降速效应。实验结果表明，该方法相对于传统 PID 控制器具有更好的控制效果。

经实际测试，使用该控制方法的液压缸控制应用于无人自主挖掘机时，挖掘机的挖掘精度、时延、跨越死区等指标均有极大提高。该方法对无人化自主挖掘领域的无人工程机械发展有一定贡献。

(上接第 24 页)

表 3 预警体系雷达装备能力提升贡献率

| 弹道序号 | 预警时间/s | 连续跟踪比率 | 火控支持时间/s | 贡献率 |
|------|--------|--------|----------|-------|
| 1 | 0.23 | 0.37 | 0.33 | 0.302 |
| 2 | 0.09 | 0.21 | 0.17 | 0.150 |
| 3 | 0.10 | 0.12 | 0.37 | 0.187 |
| 4 | 0.04 | 0.13 | 0.15 | 0.100 |

由于预警体系技术调整后只是增加了 1 部雷达装备，根据式(16)计算出装备 X 对整个作战体系的贡献率为 0.185。从表 3 可知：装备 X 对于每条弹道而言，对体系的贡献率不同，考虑到装备受实际部署位置、阵面的朝向等因素的影响。另外，从表中的纵向来看，4 条弹道对每个指标的贡献率聚合值分别为 0.115、0.207 5、0.255，说明装备对于后 2 个指标的贡献较大，这与装备本身的作战能力有关。实验结果可为装备的优化部署和作战体系结构设计研究提供有利的参考。

4 结束语

笔者构建反导预警体系雷达装备的贡献率评估指标体系，通过计算每项指标的能力提升贡献率加权合成得到雷达装备对整个作战体系的能力提升贡献率，选择预警时间、连续跟踪比率、火控支持时

参考文献：

- [1] 曾乐, 谭建平, 杨俊, 等. 电液比例阀控非对称缸系统的负载流量特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(7): 2281-2286.
- [2] 王进军. 电液比例负载敏感控制变量柱塞泵技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 132-138.
- [3] 马纪明, 付永领, 王岩. 最优控制理论在液压喷漆机器人伺服系统中的应用研究[J]. 液压与气动, 2003(6): 4-6.
- [4] 何禹锬, 高强, 侯远龙. 某定深电液伺服系统的粒子群优化神经网络 PID 控制[J]. 兵工自动化, 2019, 38(11): 24-28.
- [5] 张大庆, 赵喻明, 刘心昊, 等. 液压挖掘机四自由度自适应控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(z1): 455-458, 470.
- [6] 刘辉, 吴云洁, 刘旺开, 等. 基于模糊神经网络 PID 的串级温度控制系统研究[J]. 兵工自动化, 2018, 37(8): 37-40.
- [7] 张大庆, 何清华, 郝鹏, 等. 液压挖掘机铲斗的轨迹跟踪控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2005, 35(5): 490-494.

间 3 个技术指标，通过仿真实例验证了该算法的有效性和合理性，可为进一步研究武器装备体系贡献率提供支撑。

参考文献：

- [1] 徐瑛, 陈秀山, 刘凤良. 经济研究 [M/OL]. (2006-08-009). <https://baike.so.com/doc/5336982-5572421.html>.
- [2] 管清波, 于小红. 新型武器装备体系贡献度评估问题探析[J]. 装备学院学报, 2015, 26(3): 1-5.
- [3] 常雷雷. 基于灰靶理论的武器装备体系技术贡献度评估研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [4] 罗小明, 朱延雷. 基于复杂适应系统的装备作战试验体系贡献度评估[J]. 装甲兵工程学院学报, 2015, 29(2): 1-6.
- [5] 杨风暴, 王肖霞. D-S 证据推理的冲突证据合成方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 1-34.
- [6] 金从镇, 黄炎炎, 周少平, 等. 基于效用函数的装备技术对作战系统贡献度评估方法[C]. 第四届中国指挥控制大会论文集, 2016: 419-424.
- [7] 马彦恒, 侯建强. 机动合成孔径雷达成像研究现状与发展趋势[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(11): 111-115.
- [8] 钟辉. 雷达装备融合保障机制探讨与实践[J]. 兵工自动化, 2019, 38(11): 19-23.