

测控装备运用效能评估

李 坤 侯兴明

航天工程大学 北京 101416

摘要：随着现代装备环境的复杂性增加，测控装备的运用效能评估显得尤为关键。本研究旨在开发一种基于博弈论的动态装备运用效能评估方法，并结合多层次指标分析，提升评估的适应性与精确度。采用非线性预处理与复合权重系统的方法，构建了一个包含装备性能、应急方案成熟度和操作人员素质等维度的综合评估模型，结果显示，此评估技术可有效应对在多种干扰策略影响下，测控装备的运用效能发挥与策略决策问题。研究表明，通过动态评估和多场景分析，能够为测控装备的技术改进和战术运用提供科学的决策支持，展示了在未来技术发展中的潜在价值。

关键词：测控装备；运用效能评估；博弈论；多层次指标分析

引言

随着现代装备日益复杂化，装备系统的运用效能评估变得尤为重要。目前，装备运用效能评估方法和模型多依赖传统的定性分析或简单的定量计算，缺乏动态适应性与高效评估机制。因此，如何精准评估装备运用效能，进而优化作战决策，成为军事领域亟待解决的核心问题。本研究旨在构建一个科学、系统的装备运用效能评估模型，提升评估结果的准确性与可靠性，为装备运用决策提供更加有力的支持。在现代航天领域，测控装备充当着航天器与地面站之间的关键枢纽，其主要职责包括跟踪测量航天器的轨道和姿态、监视其工作状态，并控制其操作。鉴于这些系统在太空信息对抗中的支撑地位，开发一种精确的装备运用效能评估方法显得尤为重要。该评估技术利用博弈论原理，通过动态模拟实验，针对测控装备在多变的干扰策略影响下进行运用效能与策略决策的评估^[1]。与传统依赖固有参数且忽略环境因素影响的静态分析方法如层次分析法、模糊灰色综合评估法不同，本研究考虑了实战中的动态对抗环境和非完全信息的实际情况。研究中从设备性能、方案成熟度和操作人员素质三方面建立评估指标，运用非线性指标预处理及多指标综合处理算法，以确保全面而客观的评估结果。通过分析纳什均衡解，能够全面掌握测控装备在不同策略下的适应能力及潜在的弱点，显著提升策略决策的质量和实用性。

随着现代军事冲突的地理和技术环境的变化，特定地点的装备部署显得尤为关键。例如，光学测量系统和雷达系统在西部地区的部署不仅基于这些地区的地理战

略位置，还考虑到了从这些位置能够提供对广阔空域和地面的有效覆盖，确保了对潜在威胁的早期预警和快速响应能力。本研究旨在解决当前（具体领域或系统）中存在的装备运用效能评估不精确、缺乏系统化分析的方法，以及如何利用先进技术提升装备运用效能评估的精准度和可靠性。

一、测控装备运用效能分析模型

（一）构建效能评估指标体系

在多变的战场环境中，装备的环境适应性成为评估其效能的重要指标。各类装备，特别是在极端气候条件下操作的光学测量系统和雷达系统，都经过了专门设计以保证在严苛环境下的稳定性和可靠性。例如，光学系统能在沙尘暴和低温条件下维持高精度的测量能力，而雷达系统则可以在电子干扰强烈的环境下维持其追踪精度。在特定作战环境中，测控装备运用效能评估模型通过分析装备的性能表现来判定其完成任务的能力。该模型基于目标导向、综合性、客观性和分层性的原则，全面融合了装备的固有性能 E_1 、应对方案的成熟度以及操作团队的专业素质三大关键因素。其中，装备固有性能涉及发射机的功率 E_{11} 、天线增益 E_{12} 、工作带宽 E_{13} 及整体可靠性 E_{14} ；应急方案的成熟度则反映了装备在遇到突发故障或环境变化时的持续作战能力，主要通过备用部件 E_{21} 和应急措施方案 E_{22} 体现；操作团队素质则着重于人员的操作熟练度 E_{31} 、应急反应 E_{32} 及排故能力 E_{33} ，这是确保测控任务顺利完成的关键^[2]。这一评估体系能够有效地反映测控装备在实际作战中的整体性能和任务适应能力。

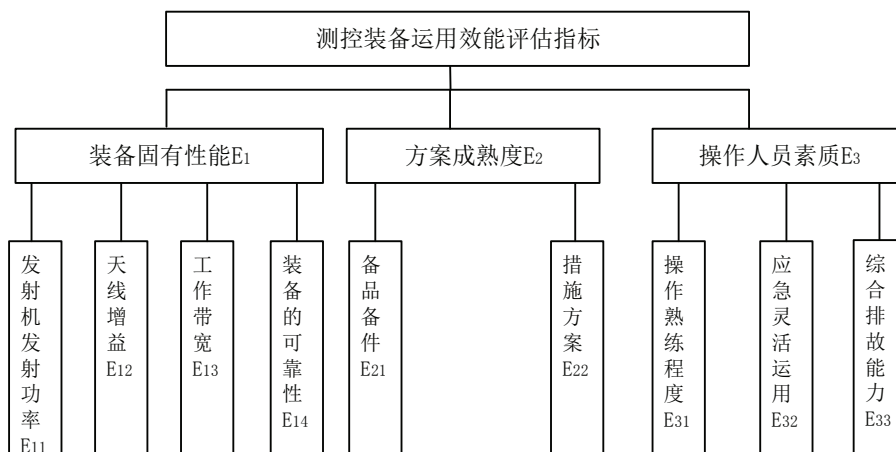


图1 测控装备运用效能评估指标体系的构成

(二) 数据标准化的预处理

在测控装备的作战效能评估过程中，由于各评估指标在单位、定义域和属性上存在差异，直接应用这些原始数据进行评估会面临诸多挑战，例如操作的复杂性增加和评估误差的扩大。为了有效应对这些问题，本研究采用了规范化方法对数据进行预处理，包括线性和非线性两种转换方式^[3]。如图2所示，为了克服传统线性规范化技术的局限性，采用了非线性的半正态转换技术对评估指标进行优化。这种技术在指标达到理想区间时将其值设定为1，并通过半正态变换函数对偏离理想区间的指标值进行调整，确保在指标值未达到最低标准时其规范化值为0^[4]。具体如公式(1)所示：

$$f(x) = \begin{cases} 1 & x \leq u_1 \\ e^{-\frac{(x-u)^2}{\sigma_u^2}} & u_1 \leq x < u_2 \\ 0 & x > u_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$g(x) = \begin{cases} 1 & x > u_1 \\ e^{-\frac{(x-u)^2}{\sigma_u^2}} & u_2 < x \leq u_1 \\ 0 & x \leq u_2 \end{cases}$$

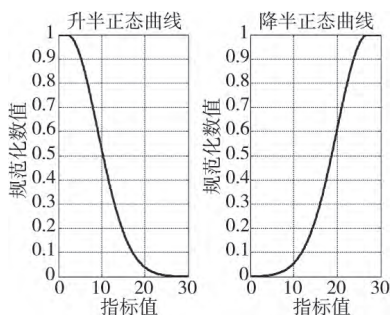


图2 升降半正态转换曲线

这里， u 表示系统整体的运用效能，而 u_1 和 u_2 分别代表系统在特定操作条件下的表现。其中， u_1 专指系统的基本能力， u_2 则涉及到系统在不同情境下的适应性和灵活性； σ_u^2 表示整体运用效能的变异性。

(三) 效能指标综合的数学模型

在测控装备运用效能评估中，采用一个数学模型通过函数映射把不同层次的评估指标转化为最终的效能结果。在该多层结构的评估体系中，上层能力的体现是通过下层的多个指标聚合而成，包括装备性能、方案成熟度及人员素质等。这些指标根据其对上层能力的影响程度被分类为三种：类型A的指标变动会显著降低上层指标，因此采用有序加权平均(OWA)方法进行处理；类型B的指标虽有波动，但不会引起上层指标的剧烈变动，使用加权几何平均(WGM)法来计算；类型C指标的改变不明显提升上层指标，这种指标相对较少见^[5]。如公式(2)所示：

$$OWA(\gamma(1), \gamma(2), \dots, \gamma(m), \gamma(m+1), \gamma(m+2), \dots) \quad (2)$$

$$\gamma(m+n) = \prod_{i=1}^m \gamma(i)^{w_i} + \prod_{i=m+1}^{m+n} \gamma(i)^{w_i}$$

其中权重向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 被用于代表各指标的相对重要性，并据此计算整体作战效能。每个权重 w_i 都是基于相应指标 $\gamma(i)$ 的重要程度设定的，用以确保各指标对最终评估结果的贡献得到适当的体现。

(四) 层次分析法的运用

在对测控装备运用效能进行综合评估时，采用了层次分析法(AHP)来处理和分析各级指标的相对重要性，并据此构建效能的评估模型。通过精细化地分析各级指标如装备固有性能的 w_1 和操作人员素质的 w_2 等，可以形成一个全面的综合评估框架。该方法不仅能有效地将层次分析与指标权重结合，还通过引入 ϕ 函数，进一步提升了

评估模型的精确性和实用性，具体如公式（3）所示：

$$w = (1 - \phi)w_1 + \phi w_2 \quad (3)$$

（五）应用博弈论于测控装备运用效能的动态评估

为验证所提出的装备运用效能评估模型的有效性，本研究通过仿真模拟实验和实际案例分析进行了验证。首先，在仿真环境中，我们基于某种装备运用效能模拟软件或仿真平台，如WARSIM等，对装备系统进行模拟测试。通过输入不同运用情境（如不同敌我力量对比、不同资源配置等），使用所提出的评估模型进行装备运用效能评估，验证模型在动态、复杂战场环境下的适用性。其次，通过对某军事演习、真实运用数据或历史数据的

分析，验证了本研究模型的预测能力。通过与传统评估方法（如专家评估法、历史数据回顾等）进行对比，模型表现出了更高的准确性和更强的适应性，尤其在面对实时数据和复杂环境时，能够提供更加可靠的评估结果。

本研究将测控装备中的技术操作和战术应用视为策略元素，并通过二人零和博弈框架对运用效能进行动态评估。在此框架下，干扰方与被干扰方的每一次互动都被视作一场对抗游戏，其中一方的盈利恰好等于另一方的损失，确保总和为零。如图3所示，通过构建一个盈利函数来反映双方在博弈中的得失，进而形成了一个用于动态评估测控装备作战效能的模型。

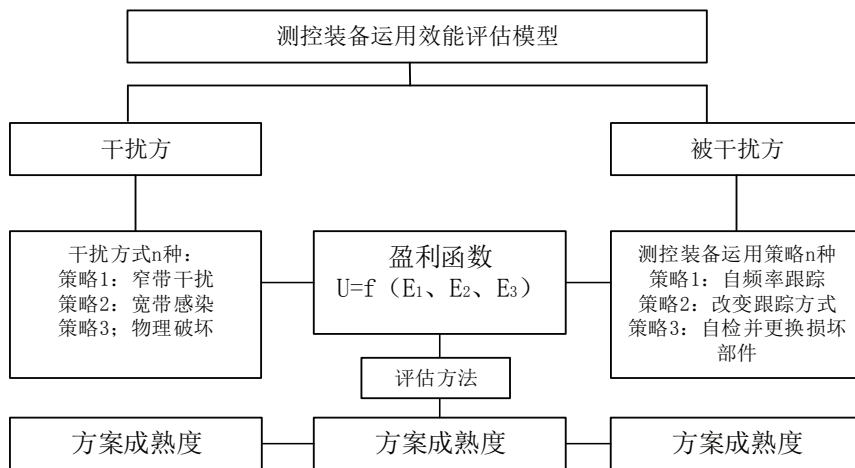


图3 测控装备运用效能评估模型

在测控装备运用效能评估中，将干扰方和被干扰方的对抗行为建模为一种二人零和博弈，其中被干扰方尝试通过选择最优的测控装备运用策略来最小化干扰方的影响，而干扰方则寻求通过其策略最大化干扰效果。在这种模型中，干扰方和被干扰方的策略集合分别表示 $SA_j = \{AJ_1, AJ_2, \dots, AJ_m\}$ 和 $S_j = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ ，策略的选择导致的盈利和损失互为相反，总和为零。

在此框架下，若被干扰方采用第 i 种测控装备运用策略对抗干扰方的第 j 种策略，该对抗情况下的盈利可以表示为 $U(i, j)$ ，构成了具体的博弈情景 $(AJ_i, J_j, U(i, j))$ 。系统的指标聚合权重转换为运用效能 E ，设为被干扰方的盈利，即 $E=U$ 。装备的固有性能指标 E_1 和方案成熟度指标 E_2 合计 $a+b$ 个指标中， a 个属于关键的A类指标， b 个为B类指标，而操作人员素质 E_3 用 ε_i 表示。利用这些指标，为每种作战与干扰策略组合构建了一个具体的盈利函数模型，更加准确地反映每种策略组合的盈亏状态。

通过构建一个 $m \times n$ 的博弈矩阵 $U = (U(i, j))$ 来分析

干扰方和被干扰方在多种策略组合下的相互作用，其中 $U(i, j)$ 表示在特定防干扰策略 i 和干扰策略 j 的组合下被干扰方的预期盈利。在这个框架中，被干扰方寻求策略组合以最大化其最小可能盈利，称为最大化最小盈利策略，表达为（4）：

$$V_{A_j} = \max_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq j \leq n} U(i, j) \quad (4)$$

相对地，干扰方则试图最小化被干扰方可能获得的最大盈利，即最小化最大盈利策略，公式（5）：

$$V_{A_j} = \min_{1 \leq j \leq n} \max_{1 \leq i \leq m} U(i, j) \quad (5)$$

此外，通过引入变量 x_i 和 y_j ，可以构建混合策略，其中 x_i 和 y_j 分别表示干扰方和被干扰方选择各自策略的概率。确保所有概率之和为1，即公式（6）：

$$\sum_{i=1}^m x_i = 1, \quad \sum_{j=1}^n y_j = 1 \quad (6)$$

通过这种方法，可以在保持公平的前提下，通过概率的调整来优化被干扰方在各种干扰条件下的最佳响应策略，从而动态调整装备运用策略以应对复杂多变的战

术环境。

二、测控装备运用效能的结果分析

在测控装备运用效能的分析过程中，首先识别和评估影响装备性能的关键指标，并依据这些指标建立一个量化的分析模型。具体步骤如下：

(一) 指标权重的确定与优化

对于测控装备的关键性能指标，如装备固有性能指标 E_1, E_2 ，以及操作人员素质指标 E_3 ，通过分析这些指标对作战效能的贡献，按重要性赋予不同的权重。例如，将重点指标 E_{11}, E_{12}, E_{13} 与 E_{14}, E_{21}, E_{22} 进行比较，确立每个指标在整体装备运用效能中的作用，并据此进行权重优化。这些权重将帮助确定哪些指标对于整体装备运用效能至关重要。

(二) 定量模型的构建与评估

利用构建的权重系统，通过一个定量模型来综合评估测控装备运用效能。这涉及到使用标准化和归一化方法来处理不同指标，确保不同数据之间的可比性。例如，可以将指标值分配到不同的分数区间，如表1：0.0-0.01, 0.01-0.25, 0.25-0.5, 0.5-0.75, 0.75-1.0，每个区间代表不同程度的影响力。

表1 测控装备关键性能指标数据

指标编号	总体性能 u	性能场景 $1u_1$	性能场景 $2u_2$	变异系数 σ_u^2
$E_{11}(W)$	7	2	12	0.01
$E_{12}(dB)$	39	37	41	0.02
$E_{13}(MHz)$	2, 250.5	2, 000	2, 500	0.04

归一化后，测绘装备的不同性能指标如表2所示：

表2 测控装备的性能指标的评估和分类

指标编号	分类	标准性能评分/权重	增强性能评分/权重	极限性能评分/权重
$E_{11}(W)$	B	6/0.81	6/0.81	6/0.81
$E_{12}(dB)$	B	37/0.77	37/0.77	37/0.77
$E_{13}(MHz)$	B	2, 300/0.88	2, 300/0.88	2, 300/0.88
E_{14}	A	0.80	0.70	0.60
E_{21}	A	0.70	0.65	0.65
E_{22}	A	0.80	0.74	0.75

(三) 动态权重分配

通过分析不同的运用场景，为每个关键性能指标分配权重。考虑的权重向量为 $w_A = [0.490, 0.227, 0.281]$ ，针对特定场景设定相应的权重 $w_B = [0.221, 0.350, 0.428]$ 。这些权重反映了不同指标在各自场景下的重要性和作用。

(四) 综合运用效能评估

如表3所示，基于设定的权重和不同运用场景的数据，计算各个场景下的运用效能。通过对比不同场景下运用效能的最大值和最小值，识别出最优和最差的运用策略。这些数据帮助识别出测控装备在特定条件下的表现，确保运用策略的优化和调整。

表3 不同场景下的运用效能评估

运用策略	场景 J_1	场景 J_2	场景 J_3
A_1	0.457	0.445	0.441
A_2	0.345	0.333	0.324
A_3	0.234	0.215	0.201

这种方法通过对每个场景下的运用效能进行分析，评估并比较各策略的表现。最优策略 A_1 在三个场景中始终表现最佳，与次优策略 A_2 和 A_3 的差距明显。该分析帮助决策者选择在特定条件下最有利的运用策略，同时提供了策略调整和资源分配的数据支持。

结语

本研究通过构建基于多因素决策分析法、模糊综合评价法和机器学习算法的装备运用效能评估模型，解决了装备运用效能评估中的实时性、精确性和动态适应性问题。实验结果表明，所提出的评估模型在复杂环境下应对干扰表现优越，能够为测控装备运用的优化提供科学依据。通过与传统方法的对比，本研究所提出的模型在装备运用效能评估的准确性和适用性方面具有显著优势。

参考文献

- [1] 常会振, 秦大国, 孙盛智, 等. 基于ADC模型优化的海上无人机作战效能评估[J]. 军械装备工程学报, 2023, 44(9).
- [2] 孔放, 朱连军, 胡锦涛. 基于OODA环的合成旅装备保障效能评估[J]. 舰船电子工程, 2024, 44(3): 124-129.
- [3] 邵明军, 刘树光, 严惊涛. 基于ADC-BP模型的对地攻击无人机自主作战效能评估[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(6): 112-120.
- [4] 杨建, 董岩, 边月奎, 等. 联合作战背景下的体系效能评估方法[J]. 科技导报, 2022, 40(4): 106-117.
- [5] 任正瀚, 周林, 顾金玲, 等. 基于模糊综合评价的退役活动测控装备再利用价值评估[J]. 信息工程大学学报, 2021, 22(4).