

基于模糊云模型的雷达抗干扰智能化水平评估方法研究

刘蕾, 吕永乐

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要: 雷达抗干扰智能化水平评估是推动智能抗干扰技术进步的重要环节, 过去聚焦于传统抗干扰效能指标的评估方法未充分考虑智能性特征, 不适用于智能水平评估; 在分析抗干扰智能特征的基础上, 针对雷达缺少智能性评估标准和指标的问题, 提出了能表征其智能水平的等级与指标体系, 并定义了指标的计算方法; 为克服因认知差异导致的评估结果偏差问题, 提出了基于模糊云模型的定量评估方法; 并综合指标赋权等内容建立了评估方案; 仿真结果表明, 该方案的评估结果与专家定性评价结果一致, 所提指标体系与评估方法更符合人的主观认知逻辑, 可为雷达抗干扰智能水平评估的研究提供一定的借鉴。

关键词: 云模型; 雷达抗干扰; 智能水平; 性能评估; 模糊综合评估法

Research on Intelligent Level Evaluation Method for Radar Anti-jamming Based on Fuzzy Cloud Model

LIU Lei, LÜ Yongle

(Nanjing Institute of Electronic Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: The evaluation of radar anti-jamming intelligent level is an important link to promote the progress of intelligent anti-jamming technology, and previous evaluation methods that focused on traditional anti-jamming performance indicators did not fully consider intelligent features, and were not suitable for evaluating intelligent level; On the basis of analyzing the characteristics of anti-interference intelligence, aiming at the problem of radar lacking intelligent evaluation standards and indexes, a grade and index system which could represent its intelligent level was put forward, and the calculation method of indexes was defined; To overcome the evaluation deviation caused by cognitive differences, a quantitative evaluation method based on the fuzzy cloud model was proposed; And an evaluation scheme was established by integrating index weighting and other contents; Simulation results show that the evaluation results of this scheme are consistent with the qualitative evaluation results of experts. The proposed index system and evaluation method are more in line with human subjective cognitive logic and can provide certain references for the evaluation of radar anti-jamming intelligence.

Keywords: cloud model; radar anti-jamming; intelligent level; performance evaluation; fuzzy comprehensive evaluation method

0 引言

随着智能电磁干扰技术的发展, 在未来战场对抗中, 雷达所面临的作战环境日益复杂。传统雷达难以应对新体制干扰, 灵巧干扰、多干扰机协同干扰等的出现, 使得单一被动式抗干扰技术无法应对智能多变的干扰信号。在此背景下, 智能化成为雷达抗干扰技术发展

的必然趋势, 对抗干扰智能化水平进行有效评估可以为抗干扰技术智能升级提供数据支撑, 是推进雷达智能化进程的重要一环。

对于装备而言, 智能性指通过采用人工智能等技术, 使其在感知、决策及行动等方面具备一定的自主、协同和学习能力, 从而达到减轻、替代甚至延拓人类作

收稿日期:2025-01-23; 修回日期:2025-02-13。

作者简介:刘蕾(2000-),女,硕士研究生。

通讯作者:吕永乐(1981-),男,博士,研究员级高级工程师。

引用格式:刘蕾,吕永乐. 基于模糊云模型的雷达抗干扰智能化水平评估方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(4): 313-321.

战活动的目的^[1]。综合文献 [2-6] 调研发现,传统的雷达抗干扰评估较少考虑智能性特征,无法满足当前评估需求。其中,文献 [2] 在针对雷达智能抗干扰评估时采用干扰类型识别概率和识别时间两个指标,从干扰信号感知能力与抗干扰性能改善程度进行评估验证。文献 [7] 采用最佳抗干扰措施选择成功率智能性指标,从自适应抗干扰能力等 5 个方面给出了雷达总体抗干扰评估的通用指标与适用范围。除此之外,对于雷达抗干扰智能化水平评估问题,合适的智能等级划分与评估方法可以直观体现抗干扰智能水平的差异,依据等级评估结果可以从综合角度为与作战需求相匹配雷达的选择提供一定的参考建议。但目前缺乏针对雷达智能化水平评估的研究,单从智能化水平评估方面来看,现有研究主要集中在无人车领域,文献 [8] 通过分析无人系统自主性评价的等级框架,从环境复杂度、执行任务复杂度、人工干预程度以及行驶质量 4 个方面实现无人驾驶车辆的智能水平等级划分。但由于雷达与无人车的工作特性差异,后者的等级标准与评估指标无法直接在雷达上进行使用。

针对上述问题,本文通过分析雷达智能抗干扰过程中的智能行为,构建了适用于抗干扰智能化水平评估的等级框架;提出包含感知能力、学习能力等 4 个准则层的评估指标及计算方法;并结合仿真实验给出基于模糊云模型的智能化水平评估方法,利用云模型对不确定性的表征优势减弱由认知差异引起的评估结果误差的影响。

1 雷达抗干扰智能特征分析

面对多样化的干扰形式,雷达需要具备主动感知干扰信息的能力,随着对抗环境的改变自主调整抗干扰策略。目前常见的雷达智能抗干扰系统功能结构^[9-10]如图 1 所示。

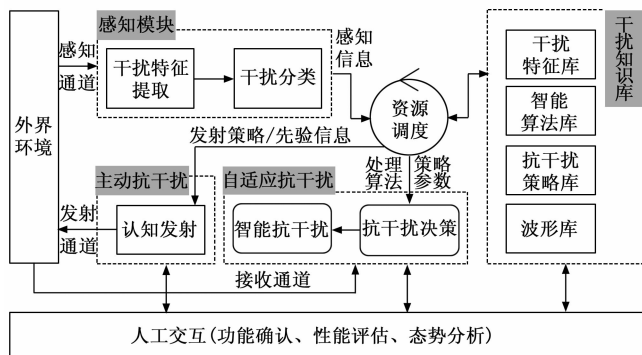


图 1 常见雷达智能抗干扰系统功能结构图

根据图 1 分析可知,雷达抗干扰过程中的智能行为主要体现在:

1) 干扰感知:利用神经网络的特征提取优势,通过分类器模型训练迭代实现干扰类型识别与相关参数估

计。与特征提取、分类器算法有关的智能特征属于该智能行为。

2) 认知波形发射:不再按照固定的发射波形进行工作,而是利用目标与干扰的感知信息与雷达回波的历史数据,自适应调整雷达捷变速度与波束指向,优化发射波形,减少雷达信号被截获的概率或使敌方干扰难以跟上我方频域变化,从而达到抗干扰的目的。与主动式抗干扰措施有关的智能特征属于该智能行为。

3) 认知接收抗干扰:利用自适应波束形成、多域联合滤波等技术,抑制干扰信号的同时尽可能实现目标回波能量积累。与被动式抗干扰措施有关的智能特征属于该智能行为。

4) 智能策略调度^[11-13]:基于干扰感知结果,利用 Q-Learning 等强化学习算法在知识库中选取或自适应生成抗干扰策略,借助先验知识与认知信息实现最佳抗干扰决策。该智能行为下不考虑抗干扰措施本身,仅考虑与决策算法相关的智能特征。

2 抗干扰智能化水平等级与评估指标研究

目前对于雷达抗干扰智能水平评估的研究还未成熟,等级与指标的构建缺乏对智能特征的考虑。针对此问题,根据装备智能等级和无人自主系统等级标准,结合抗干扰的智能特征构建抗干扰智能化水平等级;并通过分析影响智能化水平的关键因素,建立多层次评估指标体系。

2.1 抗干扰智能化水平等级

智能装备具有自主性、协同性、学习性 3 大特征。自主性主要指装备独立完成相关任务的能力;协同性主要指装备之间交互协作实现任务分配、组织协调的能力;学习性主要指利用历史数据与外部信息进行归纳、推理,从而实现自我完善的能力。依据 3 种能力的不同发展程度,可以将智能化水平划分为单体辅助智能、人机协作智能、多任务自主智能等 9 个智能等级^[1]。

结合雷达抗干扰的智能性特征进行分析,抗干扰自主性的优劣主要体现在人工操作在雷达抗干扰处理中的参与程度;单部雷达不具备组网雷达的体系协同能力,因而在交互协作概念下考虑更多的是雷达抗干扰策略调用的能力以及多类干扰场景下的抗干扰适应程度;考虑在抗干扰处理流程中人工智能算法的参与,抗干扰学习性的强弱主要体现在抗干扰智能算法的学习能力以及智能决策的形成能力。其中雷达抗干扰策略调用能力一般通过任务效能^[14]来反映。

参考美国无人自主系统等级框架 (ALFUS, autonomous levels for unmanned systems framework)^[15]的量化原则,综合上述 3 个方面划分抗干扰智能化水平等级。依据人工干预程度、环境复杂度、任务完成度、智

能学习能力的不同程度确定具体等级划分细则。人工干预程度从低到高可分为机器辅助、人机协作、机器智能^[1]共 3 个等级; 智能学习能力从低到高可分为离线学习、在线学习、自主学习^[1]共 3 个等级; 参考通用做法^[8,16], 将抗干扰效果分为差、较差、一般、较好、好共 5 个等级, 等级划分结果如表 1 所示。智能化的目的是提升抗干扰作战效能, 所以即使雷达抗干扰具有一定学习能力与自主性, 但若因智能模型训练效果不好等原因导致抗干扰效果较差, 其智能化水平等级也为 0。具体的雷达抗干扰智能化等级如表 1 所示。

表 1 雷达抗干扰智能化水平等级划分

智能等级	人工干预程度	环境复杂度	任务完成度	智能学习能力
0	简单干扰场景下抗干扰效果差/较差(抗干扰成功率 $<\alpha^{[17]}$)			
1	机器辅助	在中等难度干扰场景下抗干扰效果一般		无学习能力
2				
3	人机协作	在中等难度干扰场景下抗干扰效果较好		离线学习
4		在中等难度干扰场景下抗干扰效果好		
5		在高难度干扰场景下抗干扰效果一般		
6		在高难度干扰场景下抗干扰效果较好		
7		在高难度干扰场景下抗干扰效果好		在线学习
8	机器智能	在高难度干扰场景下抗干扰效果好		自主学习
9		在高难度干扰场景下抗干扰效果好		
10		在高难度干扰场景下抗干扰效果好		

2.2 抗干扰智能化水平评估指标

通过前文对抗干扰智能行为的分析, 从干扰感知、被动式抗干扰、算法模型学习能力、抗干扰普适能力 4 个角度提炼影响抗干扰智能化水平的关键因素。

1) 干扰感知: 不同算法以及算法训练程度所得到的分类效果与可识别干扰类型数有差异。若在多种作战场景下, 均能实现较高的干扰类型识别正确率, 且在复杂干扰场景下可识别出较多的干扰信号种类数, 在一定程度上说明该雷达干扰感知智能化水平较高。

2) 被动式抗干扰: 本质是通过滤波处理来实现干扰信号的抑制, 可以用干扰对消比、信干噪比增益等指标来表征被动式抗干扰效果。

3) 算法模型学习能力: 干扰分类器与抗干扰智能决策模型训练方式不同, 学习能力也会有区别。如在线学习模型在实时数据流中不断更新, 可以适应新的数据, 离线学习模型是在静态数据集上进行训练, 模型不会随时间自动更新。

4) 抗干扰普适能力: 某些抗干扰策略依赖人工赋予的先验知识, 算法参数自适应程度越大(人工干预程度越小), 则智能化水平越高; 在多类型干扰场景下均能实现较好的抗干扰效果以完成作战任务, 则多场景适应率越好。抗干扰普适能力一定程度上也可以反映出抗干扰智能化水平。

将上述指标归纳整理, 并按照易测性、可比性等原则筛选, 所得评估指标体系如图 2 所示。

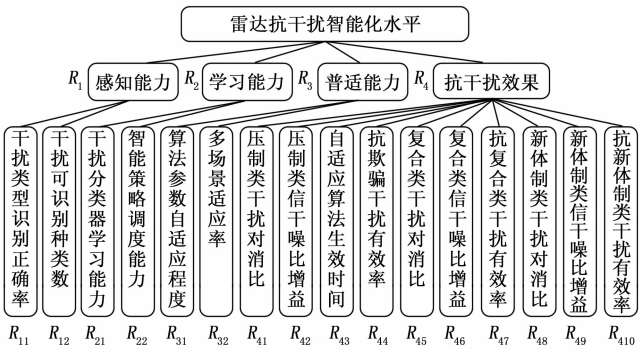


图 2 雷达抗干扰智能化水平评估指标体系

其中定性指标干扰分类器学习能力与智能策略调度能力可以根据专家经验在 $[0, 1]$ 区间内进行打分, 分值越接近于 1, 说明其学习能力越强。参考三等级制打分法, 若算法具备离线学习能力, 则在 $[0, 0.4]$ 之间进行打分, 若具备在线学习能力, 则在 $[0.4, 0.8]$ 之间打分, 若具备自主学习能力, 则在 $[0.8, 1]$ 之间打分。依据此打分范围, 以多位专家的打分数据均值作为最终的定性指标量化值。

定量指标中 R_{11} 与 R_{12} 可在算法训练结果中直接获得, R_{43} 表示自适应波束形成算法迭代最优权值的收敛时间。其余指标计算方法按图 2 中的序号顺序排列依次为:

1) 算法参数自适应程度:

通过分析待评估雷达所具备的抗干扰策略中影响抗干扰效果的关键参数, 假设关键参数的数量为 N_{pm} , 其中可以由系统根据当前干扰环境改变进行自适应调节的参数数量记为 N_{ada} , 则依赖人为设置先验知识或人工调节的参数数量为 $N_{pm}-N_{ada}$, 定义算法参数自适应程度为:

$$PM_{ada} = \gamma \frac{N_{ada}}{N_{pm}} \tag{1}$$

其中: γ 表示专家经验调节因子, $\gamma \in [0, 1]$ 。因为该指标是一个比值, 不同待评估雷达所具备的抗干扰策略数不同时(即分母不同的情况下), 也有可能出现 N_{ada}/N_{pm} 数值一样的结果, 但从整体角度而言, 具备抗干扰策略数多的雷达在作战场景下的普适能力应略强于策略少的雷达。为了让该类情况下的算法参数自适应程度指标有区分性且能正确反映雷达的普适能力, 设置了 γ 调节因子, 具体的计算方法为: 根据专家经验总结在某一类任务背景下较为完备的抗干扰策略数有 N_{Tstra} 种, 当前待评估雷达所具备的策略数有 N_{Cstra} 种, 则 $\gamma = N_{Cstra}/N_{Tstra}$ 。在同一任务背景下对两部雷达进行评估, 此时 N_{Tstra} 相同, 若二者 N_{ada}/N_{pm} 数值一样时, PM_{ada} 的大小由 N_{Cstra} 决定, 这符合雷达普适能力的比较逻辑。

2) 多场景适应率:

根据雷达体制与任务应用场景的不同, 分析针对该体制雷达常见的干扰类型, 设干扰类型种类数为 $N_{J_{\text{type}}}$, 其中雷达能实现有效抗干扰并完成作战任务的干扰场景有 $N_{\text{anti}_{J_{\text{type}}}}$ 类, 定义多场景适应率为:

$$SR_{\text{ada}} = \frac{N_{\text{anti}_{J_{\text{type}}}}}{N_{J_{\text{type}}}} \quad (2)$$

3) 干扰对消比:

干扰对消比 JCR 表示旁瓣对消前干扰功率 J_{in} 与对消后干扰功率 J_{out} 的比值, 可用于衡量抗干扰措施对压制类干扰的抑制能力, 依据国家标准^[18]可得, 对多方向干扰进行多次实验测试时对消比的量化公式为:

$$JCR(\text{dB}) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10 \lg \left(\frac{J_{\text{in}_{ij}}}{J_{\text{out}_{ij}}} \right) \right] \quad (3)$$

其中: n 为测试次数, m 表示受到干扰的旁瓣数, $J_{\text{in}_{ij}}$ 和 $J_{\text{out}_{ij}}$ 分别为第 j 个旁瓣方向干扰下, 第 i 次实验测试旁瓣对消前后的干扰功率。

4) 信干噪比增益:

根据试验测试^[19]可知, 信干噪比增益可以直接反映雷达探测距离的改善情况, 在评价时更为全面, 其计算公式为:

$$G_{SJN} = P_{SJN_{\text{前}}} - P_{SJN_{\text{后}}} \quad (4)$$

其中: $P_{SJN_{\text{前}}}$ 和 $P_{SJN_{\text{后}}}$ 分别为采取抗干扰措施前后的信号与干扰和噪声功率比。

5) 抗干扰有效概率:

假设在某一类干扰场景下, 通过更改干扰功率等进行 N_{test} 次重复实验, 雷达能不受干扰影响有效完成目标检测等任务的次数为 N_c , 则抗干扰有效概率为:

$$R_{\text{eff}} = \frac{N_c}{N_{\text{test}}} \quad (5)$$

3 基于模糊云模型的智能化水平定量评估方法

雷达抗干扰智能水平评估的研究正处于发展阶段, 人们对此概念的认知还存在较大差异, 因此在评估过程中, 由认知差异引起的评估偏差不能被简单忽略。云模型理论^[20]用隶属云来代替传统的隶属度函数, 可以有效地刻画评估过程的随机性与模糊性, 将其与模糊综合评估法相结合, 可以实现对抗干扰智能化水平的合理评估, 更好地满足雷达评估需求。

3.1 正向云发生器与逆向云发生器

云模型理论主要利用 3 个参数: 期望 Ex , 熵 En , 超熵 He 来实现对定性概念的数学建模, 其中: Ex 表示最能代表定性概念的样本点值, En 表示定性概念样本值的波动范围, He 表示认知歧义的大小, 即波动范围的离散程度。

对某一定性概念, 若已知一组定量数据, 则可以根据逆向云发生器^[21-22]归纳统计得到对应定性概念的 3 个

参数值, 再利用正向云发生器^[21]扩展生成包含大量云滴的云模型, 作为该定性概念的隶属云, 其中每个云滴的横坐标 x 表示该定性概念的可能量化值, 纵坐标 y 表示量化值 x 属于该定性概念的隶属度。

3.2 基于模糊云模型的综合评估方法

将上述云模型理论与模糊综合评估法相结合, 利用第 2 节所构建的等级与指标数据, 得到抗干扰智能化水平的具体评估步骤如下:

1) 确定评语云模型:

首先利用所构建的智能化水平等级确定评价对象的评语集, C_{max} 和 C_{min} 分别表示各等级取值范围的最大边界和最小边界。评语云模型的期望 C_{Ex} 、熵 C_{En} 和超熵 C_{He} 的计算公式为:

$$C_{Ex} = (C_{\text{max}} + C_{\text{min}}) / 2 \quad (6)$$

$$C_{En} = (C_{\text{max}} - C_{\text{min}}) / 6 \quad (7)$$

$$C_{He} = k \quad (8)$$

其中: k 为常数, 可根据评估实际背景的模糊性和随机性进行调整。具体调整准则可根据云模型的雾化特性进行确定。

在云模型理论中将 $He = En/3$ 的点称为正态云的雾化点, 结合 C_{He} 的含义, 可将雾化特性理解为: 当 $C_{He} < C_{En}/3$ 时, 代表定性概念的点凝聚性越好, 对该定性概念认知的不确定度越小, 反之, 认知的不确定度越大。对于区间评语而言, $d = C_{\text{max}} - C_{\text{min}}$ 越长, 表明对该定性概念的认知不确定性越大, 据此建立 d 与 C_{He} 的对应关系^[23]:

$$C_{He} = k = \begin{cases} 0.1 C_{En}, & d \leq d_k \\ 0.3 C_{En}, & d > d_k \end{cases} \quad (9)$$

d_k 根据等级论域的长度 $[0, T]$ 而定, 一般选择 $d_k = 0.1T$ 。

2) 构建权重系数矩阵:

各指标组合权重系数为 $\mathbf{W} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]$, 通过调研与咨询专家意见, 对权重系数的合理性进行打分, 分值在 $[0, 1]$ 之间, 作为数据的隶属度信息。假设有 N_e 个专家打分数据, 可得到形式为 (ω_{ie}, S_{ie}) 的数据组, $e=1, 2, \dots, N_e$ 。根据逆向云发生器可得第 i 个指标的权重系数云模型 $W_i = (W_{Ex}, W_{En}, W_{He})$ 计算公式为:

$$W_{Ex} = \frac{1}{N_e} \sum_{e=1}^{N_e} \omega_{ie} \quad (10)$$

$$W_{En} = \frac{1}{N_e} \sum_{e=1}^{N_e} \frac{|\omega_{ie} - W_{Ex}|}{\sqrt{2 \ln S_{ie}}} = \frac{1}{N_e} \sum_{e=1}^{N_e} E_{nie} \quad (11)$$

$$W_{He} = \sqrt{\frac{1}{N_e - 1} \sum_{e=1}^{N_e} (E_{nie} - W_{En})^2} \quad (12)$$

3) 构建综合评估矩阵:

对实验场景 Sc_i , 在一段时间 t 内进行多次测试,

获得同一指标的多组测试数据, 将第 k 个待评估雷达标准化后的数据集记为 $Y_k = [y_{ki}]_{N_t \times n}$, 其中: N_t 表示测试次数, 定性指标通过打分的方式利用式 (12) ~ (14) 计算云模型参数, 定量指标计算方式如下:

$$Y_{Er} = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} y_{ri} \tag{13}$$

$$Y_{En} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} |y_{ri} - Y_{Er}| = \mu \sqrt{\frac{\pi}{2}} \tag{14}$$

$$Y_{He} = \sqrt{\left[\frac{1}{N_t - 1} \sum_{i=1}^{N_t} (y_{ri} - Y_{Er})^2 \right] - \frac{\pi \mu^2}{2}} \tag{15}$$

其中: μ 表示测试数据的一阶样本绝对中心矩。
4) 等级评估:

综合算子“ $\circ$ ”的计算规则如表 2 所示, 根据计算规则可得到评估结果的云模型参数为:

$$S = W \circ Y = (S_{Er}, S_{En}, S_{He})^T \tag{16}$$

其中: M 表示指标数量。

$$S_{Er} = \sum_{i=1}^M (W_{Er})_i \times (Y_{Er})_i \tag{17}$$
$$S_{En} = \sqrt{\sum_{i=1}^M [(W_{En})_i \times (Y_{En})_i]^2} \tag{18}$$

S_{He} 的计算方式与 S_{En} 一致, 将 W_{En} 和 Y_{En} 换为 W_{He} 和 Y_{He} 即可。

表 2 综合算子计算规则

参数	算符“ $\times$ ”
W_{Er}, Y_{Er}	$W_{Er} Y_{Er}$
W_{En}, Y_{En}	$ W_{Er} Y_{Er} \sqrt{\left(\frac{W_{En}}{W_{Er}}\right)^2 + \left(\frac{Y_{En}}{Y_{Er}}\right)^2}$
W_{He}, Y_{He}	$ W_{Er} Y_{Er} \sqrt{\left(\frac{W_{He}}{W_{Er}}\right)^2 + \left(\frac{Y_{He}}{Y_{Er}}\right)^2}$

分别计算评估结果云模型与各等级评语云模型的期望差值 $M_n = |S_{Er} - C_{Er}|$, 差值小说明两个云模型之间较为相似, 取 M_n 差值最小所代表的智能化水平等级作为待评估对象所属等级。

4 抗干扰智能化水平测试与评估方案

综合前文研究, 形成雷达抗干扰智能化水平测试与评估方案, 方案框图如图 3 所示。

1) 设计测试场景, 获取指标数据。雷达智能抗干扰应具有感知不同干扰环境, 选取合适抗干扰措施, 达到理想抗干扰效果的能力。为了评估智能性, 需要根据抗干扰难度设置多类型测试场景。

2) 确定指标权重。基于博弈论思想, 将 G1 序列主观赋权法与改进的基于指标相关性的权重确定 (CRITIC, criteria importance through inter-criteria correlation) 客观赋权法^[24]相结合, 得到底层指标的组合权重。

3) 进行智能化水平综合评估。利用模糊云模型的综合评估方法得到待评估雷达系统的评估结果云模型 $S = (S_{Er}, S_{En}, S_{He})$, 通过与评语云模型相比较, 可以确定待评估雷达抗干扰智能化水平的等级归属。

5 实验结果与分析

为了验证本文所提评估方案的有效性, 对 4 个具备不同抗干扰措施与智能抗干扰算法的数字阵列雷达信号处理系统进行评估。

5.1 仿真设置

5.1.1 待评估对象

利用 Matlab 仿真雷达 1 和雷达 2 的信号处理系统, 通过文献得到雷达 3 与雷达 4 抗干扰处理的相关资料^[25]。假设 4 个雷达在任务完成能力上均达到要求, 即满足抗干扰成功率 $> \alpha$, 分析各自所具备的抗干扰措施等信息, 邀请专家依据研究经验从任务完成度、算法学习能力等角度对其智能水平进行定性描述, 如表 3 所示。参考表 1 的等级划分, 根据专家定性分析可知, 4 个雷达的抗干扰智能化水平从小到大应为: 雷达 1 < 雷达 2 < 雷达 3 < 雷达 4。

5.1.2 测试场景

雷达常规目标检测任务中, 常见的有压制式干扰、欺骗式干扰、复合类干扰以及新体制类干扰 5 类场景。

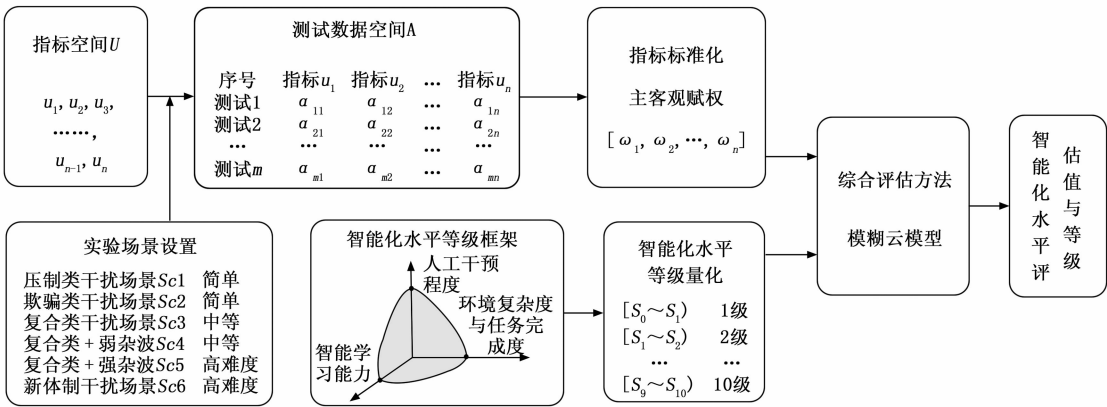


图 3 抗干扰智能化水平测试与评估方案主要包含 3 部分内容

4 种单干扰信号仿真结果如图 4 所示。通过改变干噪比对每个测试场景进行多次重复实验,获取抗干扰效能指标数据。具体的场景设置参数如表 4~6 所示。

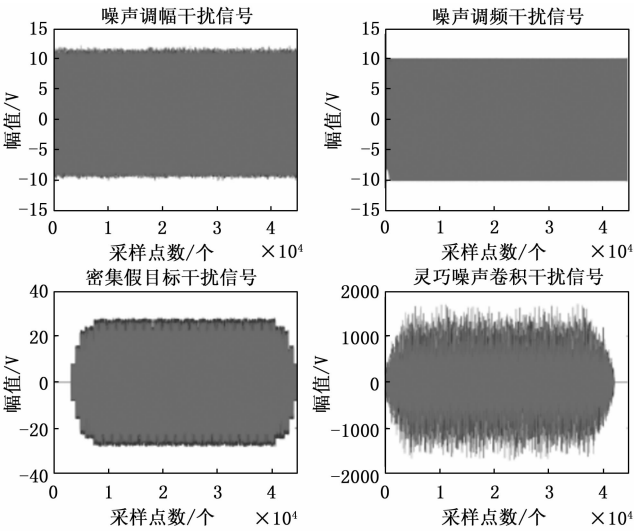


图 4 4 种单干扰信号图

表 3 待评估雷达信号处理系统抗干扰智能水平定性描述

雷达序号	所具备的抗干扰措施	智能水平定性描述
1	SLC、传统 SLB、传统的固定抗干扰处理流程	能应对少数中等难度干扰场景,不具有学习能力
2	SLC、三门限 SLB、SVM 干扰分类器、预存抗压制和欺骗以及二者复合干扰的最佳处理流程	能应对中等难度干扰场景,智能算法模型均为预先训练所得,无法根据新数据进行更新
3	SLC、三门限 SLB 等、基于 BP 的干扰识别、预存抗多种有源干扰的最佳处理流程	能应对新体制干扰外的高难度干扰场景,智能算法模型均为预先训练所得,当前训练效果优于 2
4	SLC、三门限 SLB 等、基于 BP 的干扰识别、复合干扰感知、基于 Q-learning 的智能抗干扰在线决策	能应对大部分高难度干扰场景,分类器模型为预先训练所得,可以根据感知信息进行实时决策

表 4 目标仿真参数设置

参数名称	距离/km	速度/(m/s)	来波方向/(°)	信噪比/dB	RCS/m ²
数值	80	70	0	-10	1

表 5 单干扰场景仿真参数设置

干扰场景	JNR/dB	仿真次数
噪声调幅/调频干扰	10	100
	30	100
	60	100
密集假目标干扰 (真假目标重叠/不重叠)	20~60	100(每 10 dB 各 20 次)
灵巧噪声卷积干扰	10	100
	30	100
	60	100

表 6 复合干扰场景仿真参数设置

复合干扰场景	JNR _{AM} /dB	JNR _{cheat} /dB	仿真次数
噪声调幅+密集假目标复合干扰 复合干扰+杂波	10	10	100
	11~60	10	50
	20	15~44	30
	40	20	100
	40	30	100

5.2 评估结果及分析

在上述 6 种干扰场景下多次实验整理得到每个雷达 16 个指标的 50 组有效数据。首先利用式 (6)~(9) 计算云模型的 3 个参数,替代等级的固定分值,构建 10 个等级的评语云模型如表 7 所示。

表 7 各等级评语云模型

等级	分值	云模型
1	[0,2.5)	(1.25,0.4167,0.1)
2	[2.5,3.35)	(2.925,0.1417,0.01)
3	[3.35,4.2)	(3.775,0.1417,0.01)
4	[4.2,5.05)	(4.625,0.1417,0.01)
5	[5.05,5.9)	(5.475,0.1417,0.01)
6	[5.9,6.75)	(6.325,0.1417,0.01)
7	[6.75,7.6)	(7.175,0.1417,0.01)
8	[7.6,8.45)	(8.025,0.1417,0.01)
9	[8.45,9.3)	(8.875,0.1417,0.01)
10	[9.3,10]	(9.65,0.1417,0.01)

根据文献 [24] 计算指标的组合权重,调研得到 8 位专家对权重合理性的打分数据,利用式 (10)~(12) 得到指标权系数矩阵云模型 W 如表 8 所示。判断矩阵均满足 CR<0.1,一致性检验通过。

表 8 指标权系数矩阵云模型

指标	W _{Er}	W _{En}	W _{He}
R ₁₁	0.130403	0.0162741	0.014468
R ₁₂	0.112979	0.0115179	0.003947
R ₂₁	0.140815	0.0189429	0.011989
R ₂₂	0.120402	0.0133895	0.010228
R ₃₁	0.096299	0.0027294	0.002889
R ₃₂	0.116408	0.0051393	0.003665
R ₄₁	0.016756	0.0018005	0.001621
R ₄₂	0.01769	0.0012055	0.001001
R ₄₃	0.025611	0.0041387	0.001881
R ₄₄	0.017857	0.0026776	0.001882
R ₄₅	0.032038	0.0061414	0.004946
R ₄₆	0.026885	0.0035358	0.001899
R ₄₇	0.024942	0.0062042	0.0039
R ₄₈	0.026797	0.0051308	0.003214
R ₄₉	0.029897	0.001739	0.001074
R ₄₁₀	0.06422	0.0034368	0.001575

利用式 (13) ~ (15) 可得单个雷达信号处理系统抗干扰智能化水平的综合评估矩阵 $\mathbf{Y}$, 其中雷达 1 的综合评估矩阵云模型如表 9 所示。

表 9 雷达 1 的综合评估矩阵云模型

指标	Y_{Er}	Y_{En}	Y_{He}
R_{11}	8.933	1.487 935	0.600 562
R_{12}	2.142 857	1.00×10^{-9}	1.00×10^{-9}
R_{21}	2	1.00×10^{-9}	1.00×10^{-9}
R_{22}	1	1.00×10^{-9}	1.00×10^{-9}
R_{31}	3.535 44	1.67×10^{-15}	9.03×10^{-16}
R_{32}	4.286	1.11×10^{-15}	6.02×10^{-16}
R_{41}	2.584 515	0.012 501	0.001 393
R_{42}	1.634 885	0.172 926	0.061 087
R_{43}	9.906 635	0.033 224	0.010 247
R_{44}	7.2	0.250 663	0.154 385
R_{45}	0.600 315	0.008 777	0.003 215
R_{46}	0.977 427	0.008 952	0.005 038
R_{47}	6.314 7	0.264 424	0.154 001
R_{48}	0.026 797	0.005 130 8	0.003 214
R_{49}	0.029 897	0.001 739	0.001 074
R_{410}	0.064 22	0.003 436 8	0.001 575

由式 (16) ~ (18) 得到 4 个雷达的评估结果云模型如表 10 所示。已知云模型的 3 个参数特征, 利用正向云发生器生成 $n=1\,500$ 个云滴, 直观地反映评估结果的分布情况。通过 Matlab 仿真各等级与综合评估结果的云图如图 5 所示。

其中每个小图中有 10 条形似正态分布的较细曲线, 从左到右依次表示智能等级 1~10。将 4 个云模型的期望分别与 10 个等级评语云模型进行比较, 得到各等级比较值如表 11 所示。

表 10 评估结果云模型

雷达序号	评估结果云模型		
	S_{Er}	S_{En}	S_{He}
1	1.245	0.060	0.034
2	3.355	0.256	0.159
3	5.105	0.219	0.164
4	6.651	0.238	0.175

表 11 评估等级比较值

等级序号	期望差值 M_n			
	雷达 1	雷达 2	雷达 3	雷达 4
1	0.005	2.105	3.855	5.401
2	1.68	0.43	2.18	3.726
3	2.53	0.42	1.33	2.876
4	3.38	1.27	0.48	2.026
5	4.23	2.12	0.37	1.176
6	5.08	2.97	1.22	0.326
7	5.93	3.82	2.07	0.524
8	6.78	4.67	2.92	1.374
9	7.63	5.52	3.77	2.224
10	8.405	6.295	4.545	2.999

选取期望值之差最小对应的评语等级作为待评估系统的智能化水平评估等级, 在表 11 中将对应数值加粗

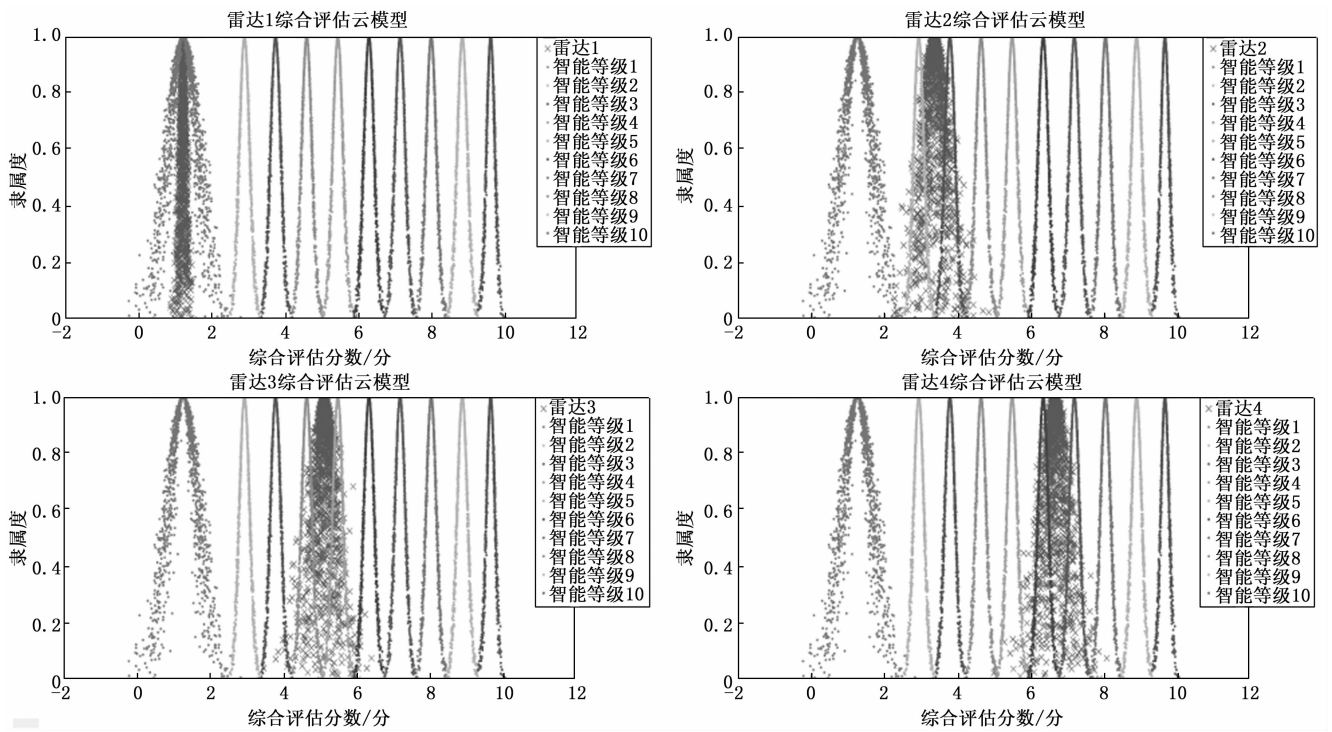


图 5 4 个雷达抗干扰智能化水平与等级云模型比较

表示。由图 5 和表 11 可知, 雷达 1 的抗干扰智能化水平等级为 1, 雷达 2 的等级为 3, 雷达 3 的等级为 5, 雷达 4 的等级为 6, 即抗干扰智能化水平雷达 1 < 雷达 2 < 雷达 3 < 雷达 4。对评估结果进行分析可知:

1) 该评估结果与定性分析结果一致, 符合主观认知。

结合表 1、表 3 进行分析, 雷达 1 可以有效应对噪声类干扰和密集假目标干扰以及二者复合干扰, 但其处理流程固定, 当面对强干扰场景时需要依赖人工操作, 自主性差且不具备学习能力, 符合智能等级 1。

雷达 2 预存的最佳抗干扰措施优于雷达 1, 因此其抗中等难度干扰的效果也优于雷达 1, 并且可通过感知信息调用预存抗干扰处理流程, 有较低的自主性, 但面对新的数据无法自主更新算法模型, 仅具备离线学习能力, 符合智能等级 3。

雷达 3 在噪声类、密集假目标、复合干扰下抗干扰效果较好, 但灵巧噪声卷积干扰下处理效果较差; 其抗干扰策略库更丰富, 自主性优于雷达 2, 但仅具备离线学习能力, 符合智能等级 5。

雷达 4 可以识别复合干扰, 在 5 类场景下的抗干扰效果均较好, 其分类器无法在线学习, 但决策模块的智能算法可以实时决策, 具备一定的在线学习能力, 符合智能等级 6。

2) 综合评估云模型的结果除了可以给出具体定量等级外, 还可以反映评估过程中的模糊性与随机性, 更符合雷达系统的评估特点。

云模型 3 个数字特征 (Ex , En , He) 表示不同人对雷达抗干扰智能化水平等级的评定一般在 $[Ex - 3En, Ex + 3En]$ 范围内, 用 Ex 表征待评估雷达的抗干扰智能化水平是最具有代表性, 认同度最高的, 而 He 反映了 En 的不确定性, 代表不同人对评估结果取值范围的认知差异, 利用该参数可以对主观评定的随机性进行量化表示。

6 结束语

雷达智能化的发展推动着相应评估技术不断完善, 目前对于抗干扰智能化水平评估的研究还比较缺乏。本文首先针对现有等级与指标未充分考虑智能特征的问题, 提出根据人工干预程度、环境复杂度、任务完成度和智能学习能力的不同水平来构建雷达抗干扰智能化水平等级的思路; 并在效能评估指标的基础上, 定义了关于学习能力、普适能力等衡量抗干扰智能化水平的新指标, 给出了指标的计算方法; 然后综合上述研究, 提出了基于模糊云模型的抗干扰智能化水平评估方案, 可减少信息的不确定性和主观认知差异对评估结果的影响; 最后对 4 个雷达进行仿真实验, 实

验结果表明, 本文所提方案可以对雷达抗干扰智能化水平进行有效评估, 基于模糊云模型的综合评估方法能反映雷达评估过程的不确定性, 更符合现实逻辑。本文研究可为雷达智能化水平评估相关研究提供一定的思路参考, 下一步我们将结合更多类型、频段、用途的雷达进行分析与测试, 提高实验结果的普适性, 更好地迭代完善所提评估方法。

参考文献:

- [1] 潘安君, 杨占才, 靳小波. 智能装备测试技术发展设想 [C] // 第二届中国航空测控技术年会论文集, 2023: 5.
- [2] 彭志刚, 李宝鹏, 李大龙, 等. 一种雷达智能抗干扰评估仿真系统 [J]. 雷达科学与技术, 2021, 19 (3): 258 - 264.
- [3] 李波涛, 李明, 吴顺君. 雷达抗干扰效能评估方法探讨 [J]. 现代雷达, 2006 (11): 16 - 19.
- [4] 葛子珺. 末制导雷达抗主瓣干扰效能评估方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- [5] 肖振民, 代培龙, 沈伟, 等. 基于 AHP 的分布式雷达抗干扰效能评估方法 [J]. 现代雷达, 2017, 39 (1): 77 - 83.
- [6] 李亚南, 韩壮志, 曹文浩. 雷达抗干扰性能测试与评估方法研究 [J]. 现代雷达, 2022, 44 (9): 79 - 84.
- [7] 胡进, 李建勋, 刘笑. 地面情报雷达抗有源干扰能力的定量描述 [J]. 现代雷达, 2015, 37 (10): 5 - 10.
- [8] 孙扬. 无人驾驶车辆智能水平的定量评价 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- [9] 金林. 智能化认知雷达综述 [J]. 现代雷达, 2013, 35 (11): 6 - 11.
- [10] 崔国龙, 余显祥, 魏文强, 等. 认知智能雷达抗干扰技术综述与展望 [J]. 雷达学报, 2022, 11 (6): 974 - 1002.
- [11] 赵家琛, 张劲东, 李梓瑜. 基于深度强化学习的雷达智能决策生成算法 [J]. 现代雷达, 2022, 44 (12): 25 - 33.
- [12] 李康, 纠博, 赵宇, 等. 雷达智能博弈抗干扰技术综述与展望 [J]. 现代雷达, 2023, 45 (5): 15 - 26.
- [13] 师沙沙, 周青松, 钱佳龙, 等. 基于 Dyna-Q 的智能雷达组合抗干扰路径选择 [J/OL]. 现代雷达, 1 - 9 [2025-01-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1353.TN.20231227.0930.002.html>.
- [14] 吴少鹏. 雷达资源调度技术体系及评估指标探讨 [J]. 雷达与对抗, 2019, 39 (2): 1 - 4.
- [15] HUANG H M, MESSINA E. Autonomy levels for unmanned systems (ALFUS) frame work volume II: frame-work models initial version [C] // Gaithersburg, MD: US Department of Commerce, NIST, 2005.
- [16] 周纭加, 赵民, 付继伟. 基于改进模糊综合法的雷达

抗干扰效能评估 [J]. 遥测遥控, 2023, 44 (1): 120 - 125.

[17] 中央军委装备发展部. 雷达有源干扰效果评定准则: GJB 2944A-2019 [S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2019.

[18] 中央军委装备发展部. 雷达干扰效果评估系统通用规范: GJB 6732-2009 [S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2009.

[19] 王晓莉, 张新生, 刘建辉, 等. 雷达副瓣对消关键技术分析与验证 [J]. 现代雷达, 2018, 40 (7): 19 - 22.

[20] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器 [J]. 计算机研究与发展, 1995 (6): 15 - 20.

[21] 吕辉军, 王 晔, 李德毅, 等. 逆向云在定性评价中的应用 [J]. 计算机学报, 2003 (8): 1009 - 1014.

[22] 刘常显, 冯 芒, 戴晓军, 等. 基于云 X 信息的逆向云新算法 [J]. 系统仿真学报, 2004 (11): 2417 - 2420.

[23] 岳 勇, 杨宏伟, 白 勇, 等. 一种基于云模型和惩罚函数的多属性评价方法 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2012, 26 (1): 92 - 98.

[24] 陈秋琼, 戴 耀, 徐华志. 毕达哥拉斯模糊集和优劣解距离法融合的舰载雷达侦察系统效能评估 [J]. 探测与控制学报, 2023, 45 (3): 69 - 73.

[25] 韩 旭. 基于干扰感知的数字阵列雷达智能抗干扰建模与仿真 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.

设计的测温系统在通道数、可扩展性和冷端补偿方面提出了创新性的方案。实践证明, 本设计可以达到预期精度去监测不同环境下的温度变化, 具有良好的使用价值, 已按时交付并投入使用中。

设计的测温系统在通道数、可扩展性和冷端补偿方面提出了创新性的方案。实践证明, 本设计可以达到预期精度去监测不同环境下的温度变化, 具有良好的使用价值, 已按时交付并投入使用中。

参考文献:

[1] 阮 勇, 肖 倩, 韩玉宁, 等. 高精度 NiCr/NiSi 薄膜热电偶高温测试系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2024 (2): 1 - 5.

[2] 凤建刚, 李 文, 王发科. 高温加热炉柔性热电偶稳定性分析与研究 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2023 (5): 89 - 92.

[3] 任勇峰, 赵逢锦, 张凯华, 等. 基于 FPGA 的多通道温度采集装置设计 [J]. 国外电子测量技术, 2024, 43 (1): 70 - 76.

[4] 秦 豪. 高精度热电偶采集系统硬件设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2023.

[5] 崔海佟, 陈 炜, 杨新圆, 等. 多路热电偶测温电路设计 [J]. 中阿科技论坛 (中英文), 2021 (3): 100 - 102.

[6] 王志超, 张志杰, 张秋宁. 一种基于 FPGA 的瞬态温度采集系统设计 [J]. 电子测量技术, 2023, 46 (19): 49 - 55.

[7] WEBSTER E. A critical review of the common thermocouple reference functions [J]. Metrologia, 2021, 58 (2): 025004.

[8] CHA H W. Design of cold-junction compensation and disconnection detection circuits of various thermocouples and implementation of multi-channel interfaces using them-a secondary publication [J]. Journal of Electronic Research and Application, 2024, 8 (1): 93 - 105.

[9] LUO L, WANG Y, PAN M, et al. Research on the influence of cold end junction compensation on the measurement accuracy of temperature calibrators [M] //Mechanics, Electronics, Automation and Automatic Control, IOS Press,

2024: 9 - 15.

[10] WANG G, WANG W, LI K, et al. A digital thermometer with fast response and high precision [C] //2014 7th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics, IEEE, 2014: 504 - 510.

[11] 韩味华, 王 芳, 桑红燕, 等. 一种基于分段拟合的热电偶测温控制方法 [J]. 聊城大学学报 (自然科学版), 2023, 36 (5): 24 - 28.

[12] 陈清清. K 型热电偶高温测温特性的研究 [D]. 杭州: 中国计量大学, 2021.

[13] WEBSTER S E. Drift in type K bare-wire thermocouples from different manufacturers [J]. International Journal of Thermophysics, 2017, 38 (5): 1 - 14.

[14] 寇志海, 王清印, 李广超, 等. 航空发动机高温壁面热电偶测温技术应用 [J]. 热能动力工程, 2023, 38 (1): 202 - 210.

[15] 周广兴. 多通道热电偶测温系统设计与实现 [D]. 太原: 中北大学, 2023.

[16] MUKHERJEE A, SARKAR D, SEN A, et al. An analog signal conditioning circuit for thermocouple temperature sensor employing thermistor for cold junction compensation [C] //2013 International Conference on Control, Automation, Robotics and Embedded Systems (CARE). IEEE, 2013: 1 - 5.

[17] 邹 轶. T 型热电偶测量中冷端补偿温度的研究 [J]. 计量与测试技术, 2020, 47 (9): 5 - 7.

[18] 马伟东, 吴胜华, 吴 科. 火力发电厂大型热电偶测量板卡冷端补偿改进方案 [J]. 仪器仪表用户, 2020, 27 (6): 88 - 90.

[19] 张修太, 胡雪惠, 翟亚芳, 等. 基于 PT100 的高精度温度采集系统设计与实验研究 [J]. 传感技术学报, 2010, 23 (6): 812 - 815.

[20] DUFF M, TOWEY J. Two ways to measure temperature using thermocouples feature simplicity, accuracy, and flexibility [J]. Analog Dialogue, 2010, 44 (10): 1 - 6.