

文章编号: 1671-0576(2022)01-0023-06

# 微波雷达抗海杂波能力评估方法

江利中<sup>1,2</sup>, 谭姗姗<sup>1</sup>, 高林星<sup>1</sup>, 陈曦<sup>1</sup>, 史秀花<sup>1</sup>

(1. 上海无线电设备研究所, 上海 201109;

2. 华中科技大学人工智能与自动化学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 为满足微波雷达抗海杂波能力评估需求, 基于海杂波后向散射系数、雷达参数与海情之间的数学模型, 提出了一种利用信杂比与检测门限的相对关系来衡量微波雷达的抗海杂波能力的评估方法, 并对雷达抗海杂波能力进行了仿真与评估。仿真结果表明: 该方法有助于在设计前期优化雷达参数, 提升雷达抗海杂波性能。

**关键词:** 微波雷达; 海杂波; 后向散射系数; 抗海杂波能力评估方法

**中图分类号:** TN958.4

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1671-0576.2022.01.005

## Evaluation Method of Anti-sea-clutter Ability for Microwave Radar

JIANG Lizhong<sup>1,2</sup>, TAN Shanshan<sup>1</sup>, GAO Linxing<sup>1</sup>, CHEN Xi<sup>1</sup>, SHI Xiuhua<sup>1</sup>

(1. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China;

2. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

**Abstract:** In order to meet the demand of the anti-sea-clutter ability evaluation for microwave radar, the mathematic model based on the sea clutter backscattering coefficient, radar parameters and sea conditions is established. The evaluation method of anti-sea-clutter ability for microwave radar is proposed based on the relationship between signal-to-clutter ratio and detection threshold. The simulation and evaluation of anti-sea-clutter ability for microwave radar are carried out. The simulation results show that the proposed method is helpful to optimize the radar parameters, and to improve anti-sea-clutter performance in the early stage of design.

**Key words:** microwave radar; sea clutter; backscattering coefficient; anti-sea-clutter ability evaluation method

## 0 引言

当微波雷达工作在海洋环境中,雷达接收机将接收到大量的海杂波,目标回波信号往往淹没在海杂波中,对雷达的目标检测和跟踪性能产生相当程度的影响<sup>[1]</sup>。当前,用户对微波雷达抗海杂波能力越来越关注,对其提出了明确的量化指标要求。因此,为了提高微波雷达的工作性能,开展雷达抗海杂波能力的论证和评估显得尤为重要。根据雷达抗海杂波性能的评估结果,可以衡量雷达的参数设计是否达标,进而优化参数设计,提升雷达抗海杂波能力。

本文提出一种利用信杂比与检测门限的相对关系来衡量雷达抗海杂波能力的评估方法,建立海杂波后向散射系数与雷达参数、海情之间的数学模型,确定衡量雷达抗海杂波能力的指标,并利用该方法对现有雷达的抗海杂波能力进行仿真与评估。

## 1 海杂波后向散射系数

国内外研究表明,海杂波回波与雷达波长、极化、入射角、海情、风向、风速等因素密切相关<sup>[2-7]</sup>。常用的海杂波后向散射系数经验模型有佐治亚理工学院(Georgia Institute of Technology, GIT)模型、技术服务公司(technology service corporation, TSC)模型、混合(hybrid)模型以及 Morchin 模型。国内外研究机构对一系列海杂波模型进行了对比分析,发现 GIT 模型和 TSC 模型比较符合较小擦海角的情况。其中 GIT 模型是目前比较完善、也是应用最多的计算海杂波后向散射系数的模型<sup>[2]</sup>,它综合考虑了极化、风向、风速、浪高等因素。

### 1.1 擦海角与距离的关系

擦海角为微波雷达波束中心与海平面的夹角,几何关系如图 1 所示。图中, $\phi$  为擦海角, $h_a$  为雷达距海平面的高度, $R$  为雷达的斜视探测距离。

根据几何关系可知,擦海角  $\phi$  的计算公式为

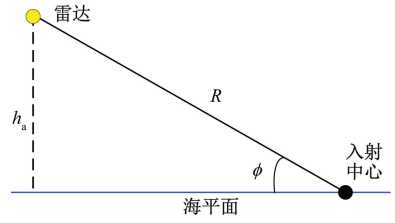
$$\phi = \arcsin(h_a/R) \quad (1)$$


图 1 擦海角几何关系示意图

### 1.2 海杂波后向散射 GIT 模型

海表面的情况可以用海态数、蒲福风级、本地表面风速、均方根高度偏差和平均波高来表示。不同海情的海表面参数见参考文献<sup>[2]</sup>。

GIT 模型是由佐治亚理工学院提出的针对单位面积的平均雷达散射截面确定参数模型<sup>[3]</sup>。该模型是擦海角、风向、风速、平均波高、雷达波长和极化的函数。

海杂波水平极化归一化后向散射系数

$$\sigma_0^H = 10 \ln(3.9 \times 10^{-6} \lambda \phi^{0.4} A_i A_u A_w) \quad (2)$$

式中: $\lambda$  为雷达波长; $A_i$  为干涉项,用于估计多径或干涉参数; $A_u$  为风向因子; $A_w$  为风速因子。

海杂波垂直极化归一化后向散射系数

$$\sigma_0^V = \begin{cases} \sigma_0^H - 1.05 \ln(h_{\text{avg}} + 0.02) + 1.09 \ln \lambda + \\ 1.27 \ln(\phi + 10^{-4}) + 9.70, f \leq 3 \text{ GHz} \\ \sigma_0^H - 1.73 \ln(h_{\text{avg}} + 0.02) + 3.76 \ln \lambda + \\ 2.46 \ln(\phi + 10^{-4}) + 22.20, f > 3 \text{ GHz} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $h_{\text{avg}}$  为平均波高。

设风速为  $w_s$ ,则平均波高

$$h_{\text{avg}} = \left( \frac{w_s}{8.67} \right)^{2.5} \quad (4)$$

风速因子  $A_w$  的计算公式为

$$A_w = \left( \frac{1.9425 w_s}{1 + w_s^{-1}} \right)^{1.1(\lambda + 0.02)^{-0.4}} \quad (5)$$

干涉项  $A_i$  的计算公式为

$$A_i = \frac{\sigma_\phi^4}{1 + \sigma_\phi^4} \quad (6)$$

其中

$$\sigma_\phi = \frac{(14.4\lambda + 5.5)\phi h_{\text{avg}}}{\lambda + 0.02} \quad (7)$$

式中: $\sigma_\phi$  为粗糙度。

风向因子  $A_u$  的计算公式为

$$A_u = \exp[0.2(1 - 1.28\phi)\cos\varphi \times (\lambda + 0.02)^{-0.4}] \quad (8)$$

式中： $\varphi$  为雷达天线轴线与逆风向之间的夹角，取值范围为  $0^\circ \sim 180^\circ$ 。顺风时  $\varphi = 180^\circ$ ，逆风时  $\varphi = 0^\circ$ 。

利用 GIT 海杂波模型，对海杂波后向散射系数进行仿真。设雷达工作在 X 波段，不同海情下海杂波垂直极化归一化后向散射系数  $\sigma_v^0$  的仿真结果如图 2 所示。其中图 2(a)和图 2(b)分别为逆风条件和顺风条件下的仿真结果。

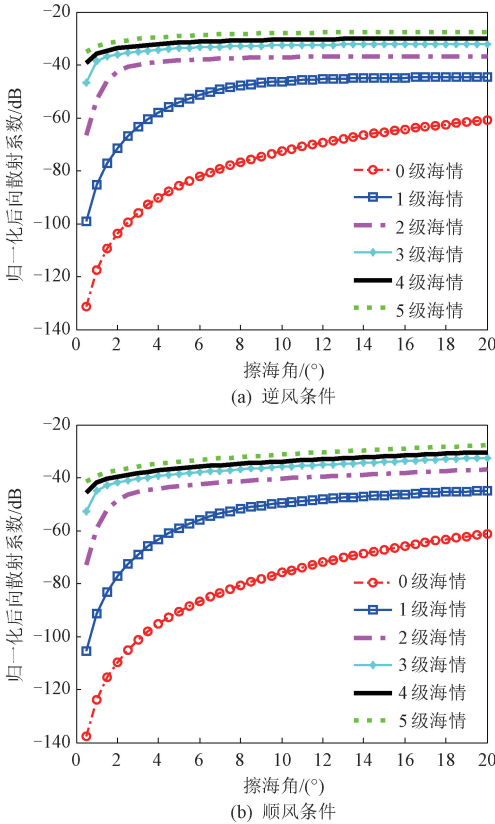


图 2 不同海情下海杂波垂直极化归一化后向散射系数

可见，在其他参数相同的情况下，顺风与逆风对  $\sigma_v^0$  的影响较大，顺风情况下的  $\sigma_v^0$  较之逆风情况小(4~6)dB。因此，顺风情况下雷达回波信杂比将优于逆风情况。从这个角度来说，雷达天线轴线与逆风向之间夹角的选取对提高雷达抗海杂波性能较为重要。垂直极化条件下，擦海角为  $10^\circ$  时，利用 GIT 海杂波模型仿真得到的 3 级海情所对应的归一化后向散射系数约为  $-33.8$  dB。《雷达手册》所给出的海杂波后向散射系数曲线中，擦海角为  $10^\circ$  时，3 级海情所对应的后向散射系数约

为  $-31.5$  dB<sup>[4]</sup>。二者十分接近，这说明了利用 GIT 模型仿真得到的海杂波后向散射系数的准确性。

## 2 海杂波雷达散射截面计算

雷达单位距离分辨单元内的海杂波雷达散射截面(RCS)主要由两个因素决定：一是海杂波的后向散射系数  $\sigma_0$ ，二是单位距离分辨单元内的海杂波等效面积  $A_e$ <sup>[5]</sup>。在小擦海角的情况下，一个距离分辨单元内的海杂波雷达散射截面

$$\sigma_c = \sigma_0 A_e \quad (10)$$

后向散射系数  $\sigma_0$  的水平及垂直极化分量的计算方法见式(2)和式(3)。

雷达在单脉冲跟踪阶段的海杂波对抗主要采用距离分割方式，减小海杂波截面积，从而有效地抑制单位距离分辨单元内的海杂波。雷达照射区域海杂波分割示意图如图 3 所示。

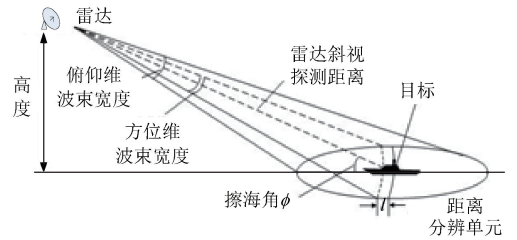


图 3 雷达照射区域海杂波分割示意图

雷达单位距离分辨单元内海杂波的等效面积

$$A_e = R\theta_{3dB}\Delta R / \cos\phi \quad (11)$$

式中： $\theta_{3dB}$  为雷达天线的 3 dB 波束宽度； $\Delta R$  为雷达的距离分辨率。

综合上述分析，计算海杂波 RCS 的步骤如图 4 所示。

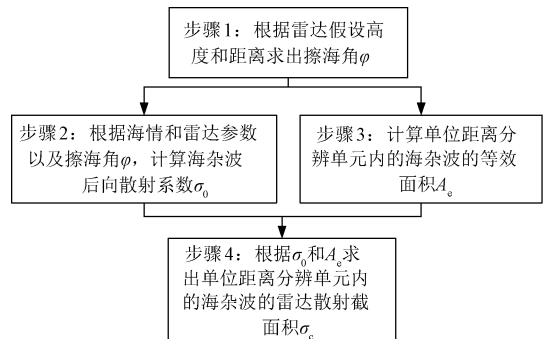


图 4 海杂波 RCS 计算步骤示意图

设雷达高度为 400 m, 天线 3 dB 波束宽度为  $8^\circ$ , 雷达距离分辨率为 3.75 m, 采用垂直极化。对不同海情和不同风向条件下的海杂波 RCS 进行仿真, 结果如图 5 所示。可知, 顺风条件下的海杂波 RCS 比逆风条件下小。

大, 则目标检测概率越高, 雷达的抗海杂波性能越好。设雷达的信号检测门限为  $D$ , 则可通过  $R_{sc}$  与  $D$  之间的关系, 来衡量雷达抗海杂波的能力。若  $R_{sc} \geq D$ , 则检测判决目标存在, 表明目标未被海杂波淹没, 雷达能够对抗海杂波干扰; 若  $R_{sc} < D$ , 则检测判决目标不存在, 表明目标被海杂波淹没, 雷达不能对抗海杂波干扰。

在雷达设计的前期, 通过本方法可评估雷达的抗海杂波能力是否满足指标要求, 进而完善雷达设计参数。通过提高雷达距离分辨率、减小擦海角、去除海杂波相关性、优化雷达高度等技术手段进行参数优化, 可以使微波雷达的抗海杂波能力满足指标需求。

#### 4 微波雷达抗海杂波能力评估验证

设雷达工作频段为 X 波段, 天线垂直极化, 波束宽度为  $7^\circ$ , 雷达距海平面高度为 400 m, 距离分辨率为 3.75 m, 目标 RCS 为  $20 \text{ m}^2$ , 目标检测门限为 14 dB, 信号处理增益为 2 dB。验证逆风条件和顺风条件下该雷达的抗海杂波能力。

##### (1) 逆风条件

在逆风条件下, 对不同海情下该雷达的信杂比与检测门限关系进行仿真, 如图 6 所示。

由图 6(a) 可知, (0~3) 级海情下, (2~40) km 的距离范围内, 信杂比均高于检测门限, 说明该雷达可全程对抗海杂波。由图 6(b) 可知, 3 级海情下, 近距离区间内, 由于距离  $R$  的增加导致单位距离分辨单元内的海杂波等效面积  $A_e$  增加, 信杂比随着距离的增加而降低; 而在 (20~40) km 的距离范围内, 由于擦海角的减小, 海杂波后向散射系数急剧下降, 使得信杂比逐渐增大。

4 级海情下, 仅在 (2.0~5.4) km 的距离范围内, 信杂比大于检测门限; 在 (5.4~40.0) km 的距离范围内, 信杂比小于检测门限, 无法探测到目标。说明在逆风 4 级海情的条件下, 该雷达抗海杂波能力较弱, 仅能对抗 5.4 km 以内的海杂波。而 5 级海情下, 在所有距离范围内信杂比均小于检测门限, 雷达无法对抗海杂波。

##### (2) 顺风条件

在顺风条件下, 对不同海情下该雷达的信杂比与检测门限关系进行仿真, 如图 7 所示。

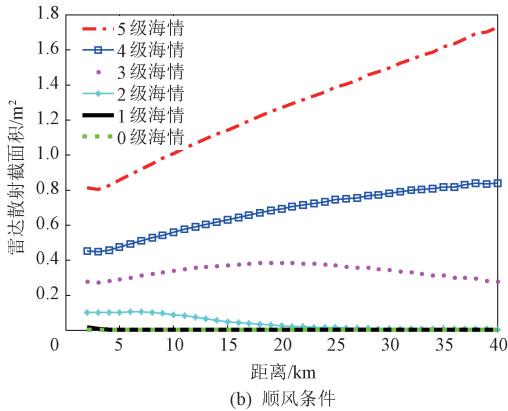
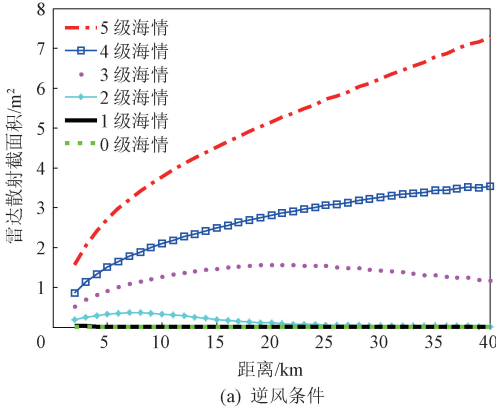


图 5 不同海情不同风向条件下的海杂波 RCS

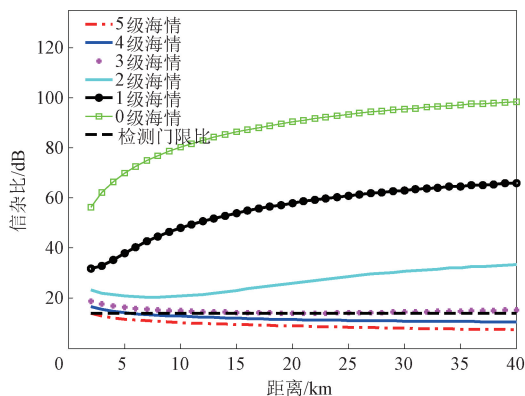
### 3 微波雷达抗海杂波能力评估方法

当海杂波和目标回波信号同时进入雷达的接收通道, 能否将目标信号从杂波中检测出来, 取决于信杂比是否能够达到雷达的检测门限, 而信杂比主要取决于目标 RCS 和海杂波 RCS 的相对比值。若雷达采用捷变频或者其他海杂波去相关信号处理方法, 则能够进一步提高目标 RCS 和海杂波 RCS 相对比值, 提升雷达的抗海杂波能力。

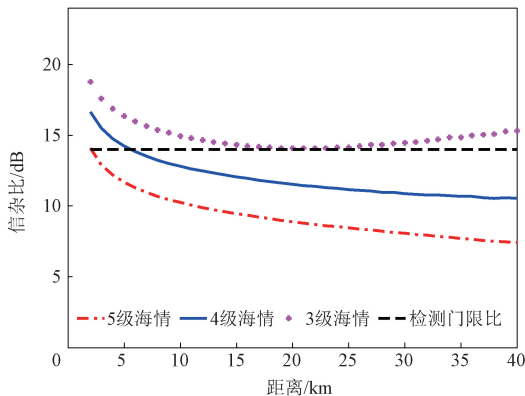
假设雷达单位距离分辨单元内的海杂波 RCS 为  $\sigma_c$ , 目标 RCS 为  $\sigma_T$ , 由于信号处理而带来的信杂比增益为  $G$ , 则信杂比

$$R_{sc} = 10 \lg(\sigma_T / \sigma_c) + G \quad (12)$$

根据信号检测理论, 在海杂波环境中, 信杂比  $R_{sc}$  是衡量雷达抗海杂波能力的关键指标。  $R_{sc}$  越



(a) (0~5)级海情



(b) (3~5)级海情

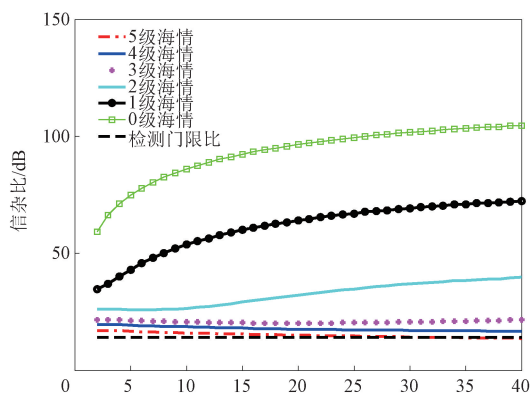
图 6 逆风条件下不同海情雷达信杂比与检测门限的关系

由图 7 (a)可知,(0~4)级海情下,(2~40)km 的距离范围内,信杂比均高于检测门限,说明该雷达可全程对抗海杂波。由图 7(b)可知,5 级海情下,(2~33)km 距离范围内,信杂比大于检测门限,该雷达能够对抗海杂波;当距离大于 33 km 后,信杂比小于检测门限,目标被海杂波淹没,该雷达不能对抗海杂波。

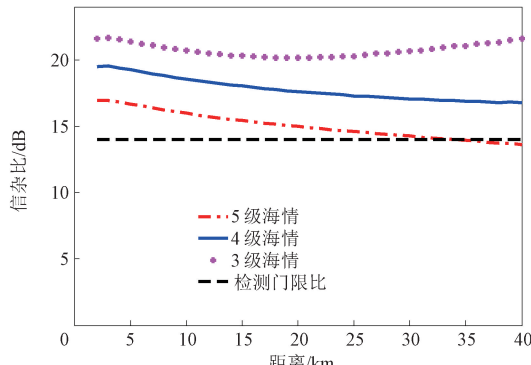
综上所述,雷达在逆风条件下,可全程对抗(0~3)级海情下的海杂波,仅能对抗 4 级海情下距离在 5.4 km 以内的海杂波,无法对抗 5 级海情下的海杂波。在顺风条件下,该雷达可全程对抗(0~4)级海情下的海杂波和 5 级海情下距离在 33 km 以内的海杂波。

## 5 结束语

本文详细论述了海杂波 RCS 与雷达参数、海情、风向、极化之间的关系,并给出了海杂波 RCS 的详细计算方法。同时,综合考虑信号处理算法



(a) (0~5)级海情



(b) (3~5)级海情

图 7 顺风条件下不同海情下雷达信杂比与检测门限的关系

带来的信杂比增益等相关因素,提出了利用信杂比与检测门限之间的相对关系来衡量微波雷达的抗海杂波性能的评估方法,并基于具体的雷达参数设计,对该雷达的抗海杂波能力进行了仿真与评估。仿真结果表明,本文提出的抗海杂波性能评估方法能够衡量雷达在海洋环境中的工作性能,有助于在雷达设计前期优化系统参数,提升雷达的整体性能。

## 参考文献

- [1] 赵传辉,曲付勇,安江华.基于实测数据的海杂波特性分析[J].舰船电子工程,2010,30(2):100-102.
- [2] 焦培南,张忠治.雷达环境与电波传播特性[M].北京:电子工业出版社.2007:140-143.
- [3] 鞠增彪,王继光,孙鹤泉,等.海杂波对舰载雷达探测效能影响评估[J].舰船电子工程,2013,33(9):71-74.
- [4] SKOLNIK M I.雷达手册:第2版[M].王军,林强,米慈中,等,译.1版.北京:电子工业出版社,

2003: 508-518.

- [5] 吕世芳. 地、海雷达杂波的模拟技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012.
- [6] 王勇. 频率捷变雷达抗海杂波性能分析[J]. 战术

导弹技术, 2016(4): 98-103.

- [7] 杨超, 陈竞, 王一旨, 等. 雷达海杂波反演大气波导的改进回溯搜索算法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(8): 1743-1749.

(上接第 4 页)

## 4 结束语

提出了一种基于多种群的 PSO 算法, 解决了雷达长时间回波积累过程中, 目标机动导致回波数据跨距离和频率单元走动, 造成积累检测性能下降的问题, 可提高对隐身目标微弱回波信号的长时间相参积累增益。本文算法首先将回波数据进行分段 FFT, 使得每段内目标信号能相参积累, 再根据两个种群中粒子的适应度大小, 交换粒子个体值和最优值, 可以有效避免算法陷入局部收敛。多种群 PSO 算法本质上是一种高效、快速的搜索方法, 可以在预装的距离、速度和加速度集合范围内高效地寻找到目标真实距离、速度和加速度的匹配组合。

## 参考文献

- [1] 陈小龙, 关键, 何友, 等. 雷达动目标 Radon-分数阶傅里叶变换长时间相参积累检测方法:

201310053874. 9[P]. 2013-06-26.

- [2] 张程. 船载雷达探测空间目标长时间信号积累技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [3] 王亚军, 陈文, 宋沈煜. 基于粒子群优化算法的 PRT 位置搜索方法: 201110440267. 9[P]. 2012-07-04.
- [4] 刘逸. 粒子群优化算法的改进及应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [5] 张利彪. 基于多种群的粒子群算法模型[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- [6] 蒋晓岫. 粒子群算法在多维优化问题中的改进研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2016.
- [7] 那日苏, 李强, 乌力吉. 基于仿生学改进的粒子群算法[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(6): 61-63.
- [8] 钟文亮, 王惠森, 张军, 等. 带启发性变异的粒子群优化算法[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(13): 3402-3406.
- [9] 张建科, 刘三阳, 张晓清. 改进的粒子群算法[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(17): 4215-4219.
- [10] 齐欣, 靳雁霞, 张晋瑞, 等. 大数据环境中简化粒子群算法的改进研究[J]. 微电子学与计算机, 2020, 37(2): 25-29.

欢迎订阅《制导与引信》期刊