



## 海上小型堆实物保护设计优化分析

刘 建, 张继伟, 李 恒, 张龙强, 陈华平

### Optimization Analysis of Physical Protection Design for Small Offshore Reactors

Liu Jian, Zhang Jiwei, Li Heng, Zhang Longqiang, and Chen Huaping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2023.06.0213>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 海上小型堆仪控系统的多样性评估方法及应用

Diversity Assessment Method and Its Application in I&C System of Offshore Small Modular Reactor

核动力工程. 2019, 40(2): 68–73

#### 核安全级DCS保护算法离线调试工具的设计与实现

An Offline Debugging Tool of Nuclear Security Protection Algorithm in the DCS

核动力工程. 2019, 40(5): 160–164

#### 西安脉冲反应堆半实物仿真系统设计研究

Study on Design of Semi-Physical Simulation System for Xi'an Pulsed Reactor

核动力工程. 2021, 42(2): 99–104

#### 自然循环冷却的钢制安全壳压力响应敏感性分析

Sensitivity Analysis of Pressure Response in Containment Cooled by Natural Circulation

核动力工程. 2019, 40(3): 66–69

#### 小型堆稳压器波动管双端破口试验研究

Experimental Study on Pressurizer Surge Line Double-Ended Break of Small Reactor

核动力工程. 2021, 42(6): 82–86

#### 核反应堆工业控制系统与企业信息系统互联安全防护体系研究

Research on Interconnection Security Protection System of Nuclear Reactor Industrial Control System and Enterprise Information System

核动力工程. 2020, 41(2): 173–177



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2023)06-0213-07; DOI:10.13832/j.jnpe.2023.06.0213

# 海上小型堆实物保护设计优化分析

刘 建, 张继伟, 李 恒, 张龙强, 陈华平

深圳中广核工程设计有限公司, 广东深圳, 518031

**摘要:** 较高的经济性是小型模块化反应堆(简称小型堆)的重要特征之一,按照当前核电站实物保护体系建设小型堆实物保护系统将对其经济性产生不利影响。本文以海上小型堆为分析对象,探索降低实物保护系统费用的优化方案,并对方案进行两轮优化及计算论证。通过分析,海上小型堆虽然取消了高成本的海面实体屏障及驻场武装响应力量,但通过增加舱室通道的延迟时间仍可保证系统的有效性。小型堆实物保护设计中,应根据堆型特点进行优化,在保证系统有效性的同时优先选择经济性更好的实物保护方案。

**关键词:** 小型堆; 核安保; 实物保护

中图分类号: TL334 文献标志码: A

开放科学(OSID)标识码:



## Optimization Analysis of Physical Protection Design for Small Offshore Reactors

Liu Jian, Zhang Jiwei, Li Heng, Zhang Longqiang, Chen Huaping

China Nuclear Power Design Co., Ltd., (Shenzhen), Shenzhen, Guangdong, 518031, China

**Abstract:** High economic efficiency is one of the important characteristics of small modular reactors (referred to as SMRs). Building a physical protection system for SMRs according to the current nuclear power plant physical protection system will have a negative impact on its economic efficiency. This article takes small offshore reactors as the analysis object, explores optimization schemes to reduce the cost of physical protection systems, and conducts two rounds of optimization and calculation demonstration for the schemes. Through analysis, although the physical barrier with high cost and on-site armed response forces have been eliminated for small offshore reactors, the effectiveness of the system can still be ensured by increasing the delay time of cabin passages. In the design of physical protection for SMRs, optimization should be carried out based on the characteristics of the reactor type, and a more cost-effective physical protection scheme should be selected while ensuring system effectiveness.

**Key words:** SMR, Nuclear security, Physical protection

### 0 引言

根据国际原子能机构(IAEA)的定义,小型模块化反应堆(简称小型堆)的热功率一般不高于 300 MW,远低于百万千万级核电站。国家核安全局(NNSA)颁布的核安全导则(HAD导则)要求对热功率高于 100 MW 的反应堆实施一级实物保护。由于国内小型堆的堆芯热功率普遍

高于 100 MW,需按照 HAD 导则的要求实施与百万千万级核电站同等级别的保卫措施。因此在实物保护方面,小型堆的低功率将导致在实物保护方面需要承担更重的负担。

虽然小型堆的设计已经考虑了减轻地震、洪水等自然灾害的影响,但面临日趋复杂的安保形势,还必须能够抵御恐怖袭击,核安保是需要关

收稿日期: 2023-01-30; 修回日期: 2023-04-03

作者简介: 刘 建(1987—),男,高级工程师,现主要从事核电厂实物保护系统设计及研究工作, E-mail: cgnliujian@126.com

注的重点领域,也是小型堆大规模发展的基本要求。本文针对小型堆的特点,探索降低实物保护系统费用的优化方案,为降低小型堆实物保护成本提供参考。

## 1 小型堆实物保护现状与分析

### 1.1 国内小型堆实物保护现状

国内小型堆实物保护采用的是基于实施标准的设计与监管体系,对实物保护系统各构筑物的性能特征进行约束,NNSA先后颁布了《核设施实物保护》《核设施出入口控制》《核设施周界入侵报警系统》等核安全导则,国家国防科技工业局先后发布了《核材料与核设施核安保的实物保护要求》《核材料与核设施实物保护视频监控技术要求》《核材料与核设施实物保护有线对讲通信系统技术要求》等核安保导则。上述核安保法规导则在核材料与核设施的安保方面发挥了重要作用。

根据NNSA发布的《核设施实物保护》的要求,堆芯热功率在100 MW以上的反应堆需要实施一级实物保护。

根据导则及相关规范要求,小型堆需要配置如下主要安保措施:

- (1) 将厂区划分为控制区、保护区和要害区,实行分区保护与管理。
- (2) 设置3道完整封闭的实体屏障。
- (3) 保护区实体屏障设置多种类型的入侵探测器及视频监控。
- (4) 设置出入口控制设施,实现对穿过各区域的人员和车辆的有效控制。
- (5) 驻场武警部队进行守卫,建设武警营地、岗亭以及信息化系统。
- (6) 设置安保管理人员、值班警卫、保安等安保力量。

### 1.2 国内小型堆实物保护现状分析

现有的实物保护法规标准及依据适用于小型堆,但根据现有法规标准开展小型堆实物保护设计面临以下困境:

- (1) 实物保护投入高

以热功率为300 MW的小型堆进行说明,其热功率仅为百万千瓦级核电站热功率的1/10,其实物保护系统规模为百万千瓦级核电站的60%

左右,所以小型堆每单位热功率在实物保护的投入将是核电站的6倍。

- (2) 武装守卫力量将成为制约项

在当前国内逐步裁军的大环境下,小型堆如参照民用核电站配置驻场武装力量,将不利于小型堆的大规模、批量化建设。

### 1.3 国外小型堆实物保护现状

在美国,小型堆的实物保护也引起了广泛的关注,美国忧思科学家联盟(UCS)<sup>[1]</sup>发表的《小巧亦有不妥时—小型模块化反应堆的安全、安保和成本顾虑》中,提出了如下质疑:

(1) 小型堆的建造商在推动美国核管会(NRC)放宽对小型堆的监管要求,强调安保经济性不应建立在实物保护监管要求放松的基础上。

(2) 1个大型反应堆分散为多个小型堆,单个小型堆成本下降,但单位功率的安保成本及风险需要谨慎评估。

(3) 地下布置的小型堆将给武装响应人员的介入带来额外的障碍。

(4) 占地更小的小型堆厂址将缩短入侵事件的预警时间。

上述问题也是国内在开展小型堆实物保护设计面临的关键问题。

## 2 海上假想小型堆安保方案与分析

### 2.1 假想核设施及攻击场景说明

以布置于某海域的小型核设施作为分析案例,假设其堆芯热功率为260 MW,核反应堆的结构设计参考船舶工程技术,距离陆地25 km,如图1所示。

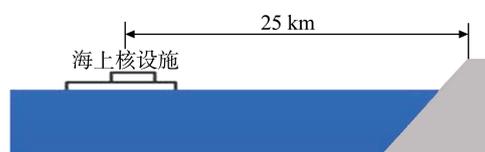


图1 海上小型堆布置示意图

Fig. 1 Layout Diagram of Small Offshore Reactor

实物保护特性如下:

- (1) 进入海上核设施的正常通道为登船口,人员在经过授权验证后进入。
- (2) 甲板层距离海面15 m高。
- (3) 安保关键区域(反应堆及冷却系统、核

燃料库、主控制室、安保控制中心)位于船体内部。

(4) 船只警卫为非武装人员, 执行巡逻、出入口控制等工作, 遇到装备优良或人数众多的敌手时须通过专用通信链路向武装响应力量通报。

(5) 武装响应任务由海警或者专属武装队伍执行, 收到信息后赶到现场拦截并击败入侵者。

(6) 假设攻击场景为入侵者乘坐快艇, 携带枪支, 意图对反应堆进行破坏(参考 NRC 已公开的设计基准威胁)。

## 2.2 安保方案规划

根据导则及相关规范要求, 本设施属于一级实物保护核设施, 按照常规做法, 实物保护方案如下:

(1) 在设施周围 500 m 海面设置 1 道拦截索作为控制区实体屏障, 采用人员巡逻作为入侵探测手段。

(2) 利用甲板边缘作为保护区实体屏障, 设置入侵探测器探测。

(3) 利用舱室墙壁作为要害区实体屏障, 设置入侵探测器探测。

(4) 设置驻场武装力量作为响应力量, 武装响应力量能在 7 min 内到达现场处置。

海上小型堆实物保护方案如图 2 所示。

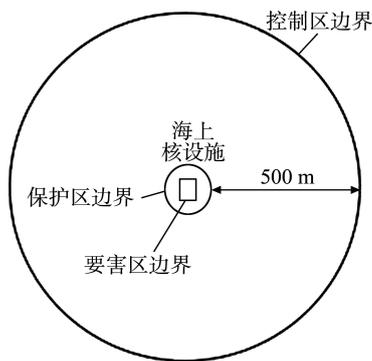


图 2 海上小型堆实物保护方案示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Physical Protection Scheme for Small Offshore Reactor

## 3 现有安保方案效果分析

实物保护系统的功能应满足探测、延时和响应 3 个基本要素, 以降低核设施受破坏和盗窃的可能性。实物保护系统必须能对入侵行为迅速进行反应, 并为响应力量提供足够的时间拦截并击

败敌手, 从而保护核设施的安全。

低安保等级设施的安防系统有效性计算可采用定性分析法; 但对于核设施安保, 有必要开展定量有效性计算工作以对风险进行强化管理。美国桑迪亚实验室<sup>[2]</sup>相关研究工作及成果是实物保护系统有效性计算领域的先行者, 该实验室已开发多种分析数学模型及计算软件, 其中入侵脆弱性的系统分析(SAVI)、敌手入侵序列拦截分析(EASI)等定量评估工具已经广泛用于实物保护系统有效性计算工作中。

### 3.1 理论分析基础

实物保护系统有效发挥其功能, 意味着在入侵事件发生时, 响应力量必须在敌手完成入侵任务前成功拦截并在与敌手交战中取胜<sup>[3]</sup>。实物保护系统有效性用有效拦截概率  $P$  表示,  $P$  由响应力量的拦截概率和取胜概率决定, 本文中武装响应力量的交战取胜概率定为 1。

实物保护系统设置  $n$  层防御组件, 每一层都对有效性有贡献, 所以对于设置多层防御的设施, 需要把每一层的拦截概率累加起来。根据《The Design and Evaluation of Physical Protection Systems》<sup>[3]</sup>所列计算方法, 实物保护系统有效性的计算公式为:

$$P = P(D_1) \times P(C) \times P(R|A_1) + \sum_{i=2}^n P(D_i) \times P(C) \times P(R|A_i) \times \prod_{j=1}^{i-1} [1 - P(D_j)]$$

式中,  $P(D_i)$  表示经过第  $i$  层防御组件的入侵探测概率;  $P(C)$  表示通信成功概率;  $P(R|A_i)$  表示被第  $i$  层防御组件探测到后能够及时赶到现场拦截的概率, 称为及时响应概率。

本文所使用的分析软件是基于上述计算公式。

### 3.2 定量分析结果

根据上述方案, 本海上假想核设施的敌手入侵序列图(ASD)<sup>[4]</sup>见图 3。

敌手入侵序列图表达的是敌手在破坏核设施中可以采取的路线。由于实物保护系统的纵深防御特点, 敌手必须从上到下逐层突破。每个实物保护构筑物包括 3 个属性(方框中从左到右):

(1) 探测概率: 敌手突破本构筑物被探测到的概率, 数值在 0~1 之间。

(2) 延迟时间: 敌手突破本构筑物需要花费

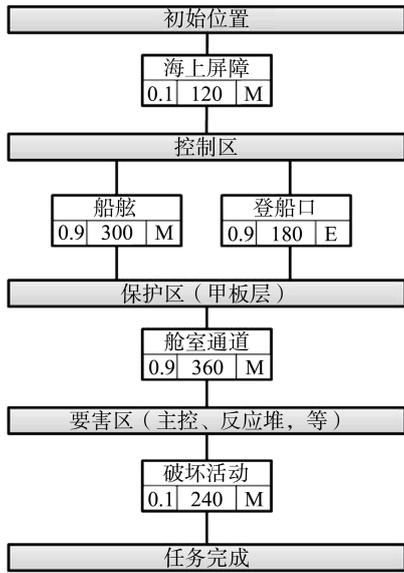


图3 海上假想核设施的敌手入侵序列图  
Fig. 3 Adversary Invasion Sequence Diagram of Offshore Hypothetical Nuclear Facility

的时间，单位为 s。

(3) 探测功能与延迟功能之间的先后关系：探测功能先于延迟功能，用 B (Before) 表示；探测功能与延迟功能同步，用 M (Middle) 表示；探测功能在延迟功能之后，用 E (End) 表示。本参数对实物保护系统有效性数值会有较大影响，例如在屏障外侧设置入侵探测器的方案优于在屏障内侧设置入侵探测器，因为敌手在破坏屏障前就被探测到，可以为响应力量提供更多的反应时间，从而提升系统有效性。

假设驻场武装响应力量到达所需花费的时间为 7 min，2 条路径的拦截概率见表 1。

表 1 拦截概率表 (优化前)

Tab. 1 Interception Probability (before optimization)

路径	路径途径点	拦截概率/%
路径1	海上屏障→船舷→舱室通道→破坏活动	91.91
路径2	海上屏障→登船口→舱室通道→破坏活动	81.97

选取路径 2 作为分析对象，进行参数敏感性分析。

3.2.1 武装响应时间 分析结果如图 4 所示，武装响应所需要的时间越长，系统有效性（即拦截概率）越低。本报告中实物保护系统有效定义为成功拦截概率达到 90%，要达到 90% 的拦

截概率，武装力量必须在接到报警的 340 s 内到达。

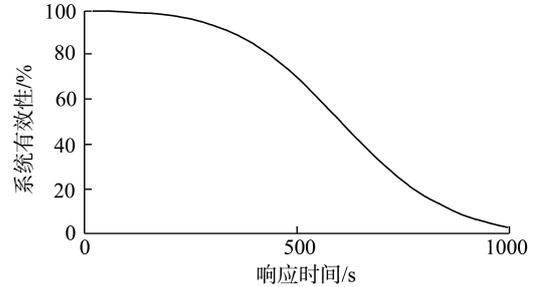


图 4 武装响应时间敏感性分析  
Fig. 4 Sensitivity Analysis of Armed Response Time

3.2.2 延迟时间 分析结果如图 5 所示，曲线越陡峭表示该构筑物所能提供的延迟时间对整体有效性的影响越明显。

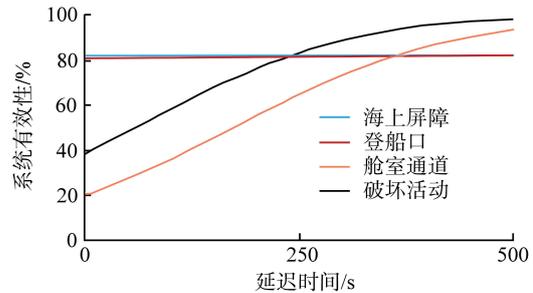


图 5 延迟时间敏感性分析  
Fig. 5 Sensitivity Analysis of Delay Time

由图 5 可得出：①延迟时间越大，系统有效性越高；②海上屏障和登船口所能提供的延迟时间对整体有效性的影响基本可以忽略；③舱室通道所能提供的延迟时间对整体有效性的影响非常显著；④破坏活动所需时间的多少对整体有效性的影响最大。

从上述结论可以得出，提升靠近保卫目标的延迟能力，可以更加有效地提升系统有效性。

3.2.3 探测概率 分析结果如图 6 所示，曲线越陡峭表示该构筑物所能提供的探测概率对整体有效性的影响越明显。

由图 6 可得出：①探测概率越高，系统有效性越高；②对破坏活动和舱室通道提供的探测概率提升对整体有效性基本没有影响；③对登船口提供的探测概率提升对整体有效性的影响非常显著；④对海上屏障提供的探测概率提升对整体有效性的影响最大。

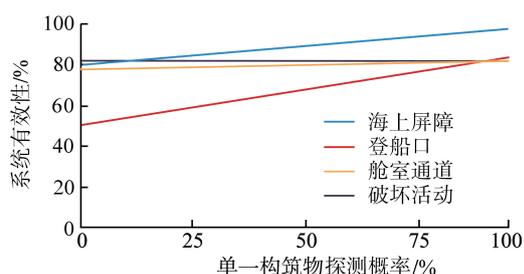


图6 探测概率敏感性分析

Fig. 6 Sensitivity Analysis of Detection Probability

从上述结论可以得出，提升外围构筑物的探测概率，可以更加有效地提升系统有效性。

### 3.3 现有方案实施难度分析

虽然上述方案在将武装响应时间从 7 min 缩短到 340 s 后能满足拦截概率达到 90% 的要求，但在实施中存在如下难度：

(1) 在控制区实体屏障方面，利用浮标等构筑物作为实体屏障，实施难度大、建设及维护成本高。

(2) 要害区边界采用舱室壁作为实体屏障，受实施空间及视场限制，无法有效地部署入侵探测器及监控摄像机。

(3) 在入侵探测方面，现有陆地核电站所采用的入侵探测器在海上浮动核电站上使用可能存在不适应环境的风险，雨、雾、风、摇摆、振动、含盐、高湿度等自然环境都可能会给入侵探测器造成影响而无法满足导则的要求，船体大量采用的金属材质也会使得微波入侵探测器、多普勒入侵探测器、静电场入侵探测器等受到严重干扰。同时，移动船只也会对入侵探测概率、误报率等造成不利影响。

(4) 涉及海警、海军等部门，在民用船只设置专职驻场武装响应力量的难度非常大。

## 4 海上小型堆实物保护优化建议

### 4.1 优化措施

根据上述各项实物保护参数敏感性分析结果，优化方向主要有 3 个方面：①将探测能力前置到外围，提前对入侵者进行入侵探测；②将延迟能力收缩到核设施内部，在入侵者进入到设施后开展延迟；③驻场武装响应改由非驻场武装响应力量实施，但在船体结构设计中考虑武装相应力量

登船处置的便利性。具体在海上假想核设施上，优化实施路径见图 7。

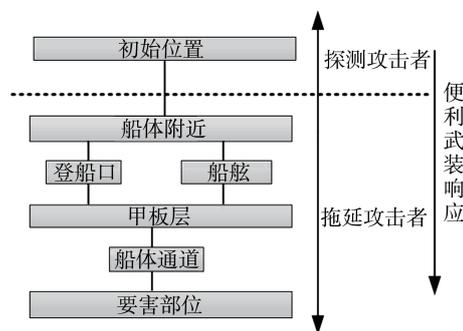


图7 优化方向示意图

Fig. 7 Optimization Direction Diagram

具体优化措施包括如下方面：

#### (1) 海面屏障

取消海面设置的实体屏障，充分发挥海面作为天然实体屏障的作用，将雷达、光电探测、红外成像复核的范围扩展到方圆 5 km 范围内。

#### (2) 登船口

在船体设计中，优化登船路线规划，预留足够空间用于安保设施布置。如设置无接触式通行验证方式，在人员查验未完成之前，采用隔离装置对进场人员继续隔离，防止未经授权验证的人员强行闯入或者胁迫警卫。

#### (3) 船舷

船体设计中在视野优良的位置设置安保执勤点，并设置红外成像观测设备，提高安保人员对异常状况的感知能力；船舷设计中充分考虑入侵防护需求，去除或者隐藏有利于攀爬的构筑物，提高船舷的整洁度，以防止入侵者攀爬和藏匿。

#### (4) 舱室通道

在舱室关键通道内设置远程激活式延迟设备，例如紧急封闭栅栏，以及烟雾、刺激气体、油污等能拖延入侵进程的设备，可由安保人员手动开启。相对于陆地核电站，海上小型堆因封闭的舱室通道空间，可以达到更理想的效果。

#### (5) 安保管理及响应

设置岸基保卫控制室，对往来人员进行前置审查，并将信息传递至登船口警卫室进行二次复核，降低船体警卫工作量及安保风险。设置巡逻艇，用于附近海域的巡逻、报警确认。

采用非驻场武装响应力量，接到信号后，由

岸基或者海警执行安保事件响应。在船体设计中,在不同位置设置安保响应紧急出入口,授权开启后为武装响应力量的快速介入提供条件。

#### 4.2 优化结果分析

优化后,本海上假想核设施的敌手入侵序列图如图8所示。

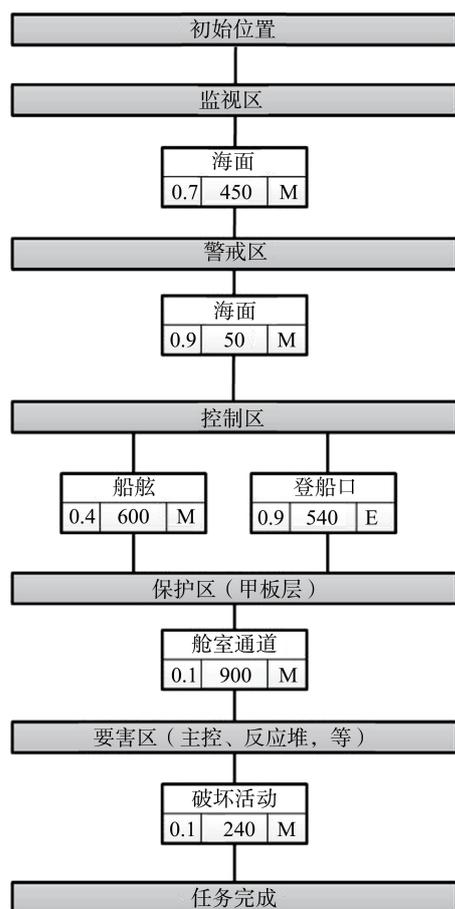


图8 优化后海上假想核设施的敌手入侵序列图  
Fig. 8 Adversary Invasion Sequence Diagram of Offshore Hypothetical Nuclear Facility after Optimization

在假设武装响应时间为25 min的情况下,2条路径的有效拦截概率见表2。

从分析结果评估,由于武装响应时间从7

表2 拦截概率表(第一次优化后)

Tab. 2 Interception Probability (after the first optimization)

路径	路径途径点	拦截概率/%
路径1	外部海域→监视区海域→警戒区海域→船舷→舱室通道→破坏活动	81.11
路径2	外部海域→监视区海域→警戒区海域→登船口→舱室通道→破坏活动	78.07

min增加到25 min带来的负面影响,拦截概率无法达到90%,但可以通过进一步提升舱室通道的延迟时间以满足90%的拦截概率要求。

对路径2中舱室通道延迟时间敏感性分析的结果见图9,当舱室通道的延迟时间从900 s提升到1160 s时,拦截概率可重新满足90%的有效性要求,见表3。

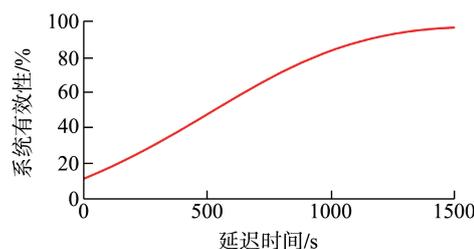


图9 舱室通道延迟时间敏感性分析

Fig. 9 Sensitivity Analysis of Cabin Passage Delay Time

表3 拦截概率表(第二次优化后)

Tab. 3 Interception Probability (after the second optimization)

路径	路径途径点	拦截概率/%
路径1	外部海域→监视区海域→警戒区海域→船舷→舱室通道→破坏活动	91.52
路径2	外部海域→监视区海域→警戒区海域→登船口→舱室通道→破坏活动	90.37

提升舱室通道的延迟时间可采用多种多样、成本相对低廉的措施。典型做法是充分引入实物保护系统中使用的纵深防御概念,敌人为达到其目的必须逐一突破多重防护措施。在海上小型堆舱室通道纵深防御设计中,主要措施有:

(1) 在甲板层到要害目标之间的必经之路设置多重不同类型的延迟屏障,以增加破坏行动所花费的时间,为响应力量争取更多时间。

(2) 不同材质的实体屏障:例如栅栏屏障可分别由抗锯断材料(钢材或合金材料)和抗热熔材料(金刚砂、耐高温合金、陶瓷材料)制作,迫使敌人在入侵前进行更多的准备工作(携带更多工具、掌握更多技能)。

(3) 不同机理的实体屏障:通过在关键区域部署由安保人员手动激活的延迟系统,如在关键通道设置致盲剂(烟雾)、失能剂(粘黏物)等非杀伤性响应装置,为响应力量提供更多的时间,同时也使得入侵者需要精心准备,更容易出差错而导致行动失败。

## 5 结 论

本文从降低海上小型堆实物保护系统费用投入角度出发，对方案进行优化和计算论证。在第一次优化中，取消了高成本的海面实体屏障及驻场武装响应力量，导致了实物保护系统有效性的降低；在第二次优化中，通过增加舱室通道的延迟时间使得系统有效性增加至 90%。

通过对实物保护优化方案的论证计算，论证了对实物保护措施进行等效替代的可行性，可为海上小型堆实物保护方案设计提供参考。设计中应对探测、延迟、响应三要素进行综合考虑以提升整体的有效性，在有效性不满足要求时需进行迭代设计，直至得到满足要求的实物保护方案。结合本文的优化案例，取消海面实体屏障及驻场武装响应力量、增强舱室通道的延迟时间，可以保证系统的有效性满足要求。

虽然本论文所阐述的优化方案满足系统有效

性要求，但应由监管部门最终确认其可行性。另外，本文提出的建议措施难免存在考虑不周之处，需行业内人员进一步地探讨与论证。

### 参考文献：

- [1] LYMAN E. Small modular reactors: safety, security and cost concerns[EB/OL]. (2013-09-23)[2023-10-15]. <https://www.ucsusa.org/resources/small-modular-reactors>.
- [2] GARCIA M L. Design and evaluation of physical protection systems[M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2008: 274-320.
- [3] ZHANG J W, JIANG S L, LIU J, et al. Optimization of communication probability in effectiveness evaluation of physical protection system[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 228199-228205.
- [4] GARCIA M L. Vulnerability assessment of physical protection systems[M]. England: Butterworth-Heinemann, 2005: 267-273.

(责任编辑：刘 君)