

doi: 10.7690/bgzd.2025.12.003

基于弹道导弹速度约束的突防效果研究

李冠辰¹, 吕仲², 洪亮¹, 吴一乔¹, 杨根庆¹

(1. 海军航空大学, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 972578 部队 北京 100161)

摘要: 针对弹道导弹面对预警雷达探测时的低空突防问题, 基于弹道导弹被预警雷达捕捉时间衡量突防效果并展开研究。通过分析影响突防的特征参数, 明确弹道导弹突防被捕捉时间的影响因素和低空突防的全过程, 从弹道导弹速度、威胁角及自身雷达反射截面积 (radar cross-section, RCS) 值的攻防对抗计算模型。仿真分析被捕捉时间对弹道导弹突防的影响。结果表明, 面对预警雷达, 不同弹道导弹在被捕捉时间随来袭导弹的 RCS 变大而变大, 随其速度增大而减小。

关键词: 弹道导弹; 预警雷达; 低空突防; 建模仿真

中图分类号: TJ410 **文献标志码:** A

Research on Penetration Effectiveness Based on Ballistic Missile Speed Constraints

Li Guanchen¹, LYU Zhong², Hong Liang¹, Wu Yiqiao¹, Yang Genqing¹

(1. Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 2. No. 972578 Unit of PLA, Beijing 100161, China)

Abstract: In response to the low altitude breakthrough problem of ballistic missiles facing early warning radar detection, this study measures the breakthrough effect based on the time of ballistic missiles being captured by early warning radar and conducts research. By analyzing the characteristic parameters that affect breakthrough, the influencing factors of the capture time of ballistic missile breakthrough and the entire process of low altitude breakthrough were clarified. A calculation model for offensive and defensive confrontation was developed based on the velocity, threat angle, and radar cross section (RCS) value of the ballistic missile. Simulation analysis of the impact of capture time on ballistic missile penetration. The result shows that when facing warning radar, the capture time of different ballistic missiles increases with the increase of RCS of the incoming missile, and decreases with the increase of velocity.

Keywords: ballistic missile; early warning radar; low-altitude penetration; modeling and simulation

0 引言

近年来, 弹道导弹低空突防逐渐成为打击目标的优先选择, 不仅可以避开天基预警卫星侦测, 而且可有效避开敌反导防御系统中高空的射程, 通过缩短打击时间增加了生存能力和突防概率。当前, 弹道导弹低空突防所面临的威胁主要来自于预警探测系统, 实施打击的最优效果是低空突防过程中, 尽可能较晚被敌探测发现。

随着预警系统的不断进步, 其侦察能力和空间态势感知能力也有明显提高, 对弹道导弹的发现跟踪能力也在进一步增强, 使得突防作战的难度加剧。当前, 针对弹道导弹低空突防在作战模式、作战能力以及突防技术等方面都取得了一定的研究成果, 但面对预警雷达的低空突防测试研究还有待完善, 尤其是使用不同弹道导弹低空打击时, 对预警平台阵位配置与打击目标距离缺少定量分析; 因此, 结合预警雷达的性能参数及作战特点, 探索和分析不

同型号的弹道导弹低空突防的方案配置, 为反探测拦截提供策略与措施参考。

1 典型弹道导弹特征分析及定义

弹道导弹是指利用陆基、海基、天基等平台发射, 在火箭发动机推力作用下按照预定程序飞行, 关机后按自由抛物体轨迹飞行的导弹^[1]。低空突防是利用地球曲率和地形起伏等造成反导防御系统的盲区, 充分发挥导弹机动能力, 虽然速度相比高空飞行有所下降, 但隐蔽性大幅提升有效提高突防概率的一种新型打击手段。

弹道导弹的特征主要体现在: 1) 预警雷达中的雷达反射截面积 (RCS) 相较于战术导弹偏大, 虽具有一定隐身性, 但因各波段探测系统较多, 很难实现全过程的隐蔽突防; 2) 弹道导弹机动性能较强, 但关机后运动轨迹规律, 呈现出易预测的特点; 3) 弹道导弹低空飞行速度较快, 但径向速度却很难超过反导防御系统的预警雷达探测值^[2]。

收稿日期: 2024-10-10; 修回日期: 2024-11-20

第一作者: 李冠辰(1992—), 男, 吉林人。

1.1 预警探测系统对弹道导弹低空突防影响因素

弹道导弹低空突防受预警雷达影响的主要因素包括弹道导弹 RCS、低空突防速度及威胁角。

1.1.1 弹道导弹 RCS

弹道导弹 RCS 表示了弹道导弹对雷达信号吸收、反射和散射的能力，是度量预警雷达扇区内照射电磁波对到弹道导弹散射能力的物理量，同时也是评估其隐身效能的重要指标，定义为单位立体角内目标朝接收方向散射功率与从给定方向入射该目标的平面波功率密度之比^[3-5]。

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \quad (1)$$

影响弹道导弹 RCS 因素包括自身的外形、表面特性、雷达波入射角与频率、目标导弹极化特性和运动状态等。

1.1.2 弹道导弹威胁角

弹道导弹威胁角是指导弹攻击角度与打击目标之间的夹角，是指指挥控制、制导和导引等作战行动的重要参数。通过建立弹道导弹坐标系(如图 1 所示)，方位角 α 是雷达视线在 $O_r X_r Y_r$ 面上投影与 $O_r X_r$ 的夹角， $\alpha \in [0^\circ, 360^\circ]$ ，表示从前方飞向打击目标的方向值到背对目标的方向值。实际飞行中弹道导弹的姿态一般是径向飞行，威胁角在突防全过程中是不断变化的^[6-7]。

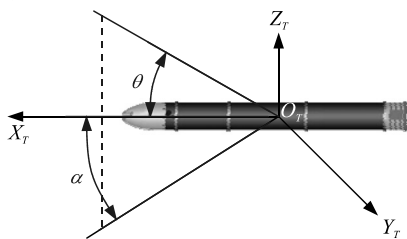


图 1 弹道导弹坐标系

1.1.3 弹道导弹低空突防速度

作为影响预警雷达探测的重要因素，弹道导弹低空突防下受阻力影响大，为维持稳定飞行状态，低空突防速度相比正常突防速度下降一倍以上。弹道导弹低空突防 3 个阶段的飞行速度不尽相同。助推段时处于开机加速状态，由于飞行高度与发动机尾焰等因素影响，预警探测任务主要天基红外预警卫星完成；因此，中段与末段才属于真正意义上的低空突防过程，飞行速度也作为笔者研究的重点内容。预警雷达对目标稳定追踪需要一段最小捕捉时间，即弹道导弹在雷达扇区的飞行时间；因此，预

警雷达阵位部署的改变也会对低空突防速度产生影响。

1.2 弹道导弹分类及突防特征

按照弹道导弹飞行轨迹可分为高度与射程呈正比曲线的高抛轨道弹道导弹和近水平飞行轨迹的低空弹道导弹。基于对后者打击目标的反预警探测过程，通过查询到的弹道导弹 RCS 变化范围，利用低空突防所具备的隐蔽性和精确制导等特性，根据不同型号导弹、打击目标、特征参数及影响因素，对雷达探测追踪进行单个因素控制变量量化分析^[8]。

2 预警雷达对弹道导弹探测分析

为成功打击目标，在探明预警雷达实际探测半径的基础上，对预警机或可移动海基平台，如宙斯盾系统雷达的前出距离和阵位部署情况进行研判，尽可能减少预警时间及发现概率。虽然弹道导弹低空突防复杂多变的运动轨迹会改变原有固定飞行弹道，但由于自主制导的转弯数值小于预警雷达实际探测半径，对其前出距离和阵位部署的影响可忽略不计；因此，可将弹道导弹的机动制导飞行航迹默认为匀速直线，预警雷达探测弹道导弹的原理参考雷达原理和视距公式^[9-10]。

2.1 预警雷达对弹道导弹低空突防预警探测原理

在弹道导弹低空突防打击目标的作战过程中，预警探测雷达通过对空域进行不间断扫描，利用电子扫描天线对电磁脉冲反射的射频信号接收，后经数字化处理、信号分析与识别等步骤，区分和识别弹道导弹与空间背景干扰信号，实现对弹道导弹方位距离信息的探测。如图 2 所示，当弹道导弹经过预警雷达的雷达扇区且达到的探测速度区间时，突防反探测距离为弹道导弹进入雷达扇区的方位距离至离开探测扇区位置的全过程^[11]。

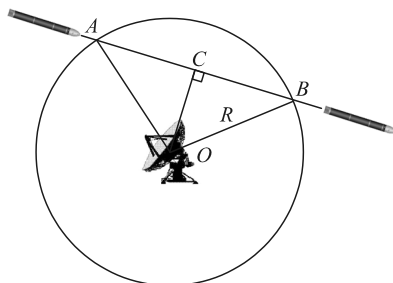


图 2 弹道导弹通过预警雷达扇区运动

2.2 低空突防预警探测系统过程中的难点问题

当前关于低空突防过程中弹道导弹面对预警雷达威胁的反预警探测、突防方案选择主要存在以下

难点: 1) 预警雷达部署位置与最大探测半径不定, 对选择不同 RCS 值的弹道导弹的影响; 2) 导弹防御系统所属预警雷达数量多、探测范围广, 对突防方向与方位角有一定限制; 3) 低空突防速度降幅较大, 大功率预警雷达对弹道导弹运动点迹的追踪探测成功率较高。

弹道导弹低空突防方案选择面临最关键的问题是被预警雷达捕捉的时间。除预警探测系统自身续航、工作模式、执行任务时间、巡逻航线等影响外, 还有选用的弹道导弹类型和低空突防速度等因素。不同型号弹道导弹的 RCS 数值存在差异, 面对同一型号预警雷达实际探测距离不定; 突防速度不同使得在雷达扇区内飞行距离一定, 所用时间也存在差异。不同因素对弹道导弹被捕捉时间的影响, 需通过建立模型计算分析^[12]。

3 弹道导弹低空攻防对抗模型

3.1 弹道导弹低空反探测突防过程

弹道导弹在应对探测追踪威胁的低空突防过程中, 预警雷达探测工作通常包括搜索发现、监视追踪及发出警报阶段^[13]。如图 3 所示: 在助推段, 预警雷达利用连续波雷达或超视距搜索模式对导弹突防区域大面积扫描, 并提供相关防御、技术情报和战场态势感知等支持; 在突防中段及末段, 会受多种波段雷达不间断监视、跟踪, 其利用持续性信息回波获取弹道导弹真实位置、速度、高度和轨迹等数据, 并将数据信息回传至指挥控制系统进行威胁评估; 在对产生威胁的弹道导弹做出拦截决策后, 预警雷达会提供相应目标的实时导引, 引导武器系统进行拦截^[14-16]。

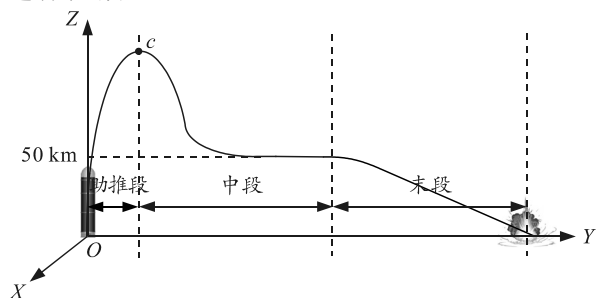


图 3 弹道导弹低空突防

3.2 弹道导弹低空攻防对抗模型建立

弹道导弹低空突防时应对预警雷达探测应该需要考虑的主要原则是先避开或减少雷达扇区内飞行时间及距离, 减少被发现跟踪的概率。弹道导弹低空突防受预警雷达的阵位部署、探测距离、巡逻时

间及自身的速度、RCS 值, 威胁角等因素影响^[17-18]。

如图 4 所示, 假设被打击目标基准点为 O 、预警雷达部署基准点为 O' , OO' 长度即预警雷达与打击目标的部署距离 D 已知, 以 O 为顶点、方位角 α 的延长线与预警雷达实际探测半径相交于点 A 、 B , AB 的长度为 d , d 为弹道导弹在以预警雷达实际探测距离为半径的探测圆中的距离, $d_{\min}$ 长度由弹道导弹低空突防速度和在预警雷达范围内最小捕捉时间决定, v_1 为弹道导弹突防速度, t_1 为雷达最小捕捉时间。

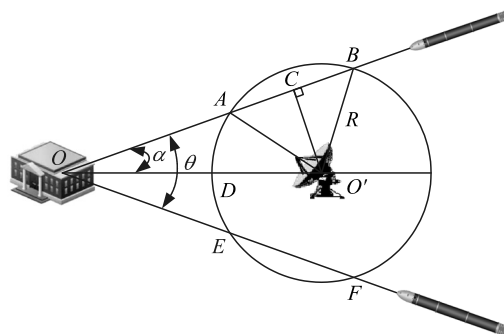


图 4 弹道导弹低空攻防对抗

$$O'B=O'A=R; AB=v_1 t_1=d. \quad (2)$$

在以 O 为圆心的预警雷达探测圆中, $O'B=O'A=R$, 过点 O' 作垂直于线段 AB 的垂线 $O'C$, 由于预警雷达与打击目标的部署距离已知, 弹道导弹低空突防方位角 α 与 $O'C$ 的关系式为:

$$O'C=D \sin \alpha. \quad (3)$$

根据雷达测距方程可知预警雷达搜索追踪最大作用距离为 $R_{\max}$, 在日常雷达预警探测研究中, 研究者们通常将预警雷达的最大探测距离作为探测半径, 即 $R_{\max}=R$ 。

$$R_{\max} = \left[P_t G^2 \lambda^2 \delta / (4\pi)^3 P_{r_{\min}} \right]^{1/4}. \quad (4)$$

式中: $P_{r_{\min}}$ 为雷达最小接收功率; P_t 为雷达发射功率; G 为雷达天线增益; λ 为雷达工作波长; δ 为目标的雷达散射截面^[19]。

由式(4)可得弹道导弹在探测圆中可探测的最短飞行时间即最小捕捉时间 t_1 为:

$$t_1 = \sqrt{\left[\left(P_t G^2 \lambda^2 \delta / (4\pi)^3 P_{r_{\min}} \right)^{1/4} \right]^2 - D^2 \sin^2 \alpha} / v_1. \quad (5)$$

4 仿真计算

对上述提出的关于弹道导弹低空突防的反探测攻防对抗模型进行仿真计算, 首先给出作战想定: 我弹道导弹对敌重要目标实施打击, 根据情报, 在低空突防过程中, 敌方导弹防御系统的预警雷达会

在我导弹必经飞行路径中实施跟踪探测，我方弹道导弹立即通过信息数据融合进行威胁评估并做出最优飞行路径决策，展开低空突防作战，目的是以最大限度减少敌预警雷达探测时间。

假设预警雷达与打击目标的部署距离为 800 km，想定的红蓝对抗双方武器系统有关参数数值如表 1 所示。

表 1 预警雷达相关数据

雷达体制	作用距离/km	峰值功率/kW	天线增益/dB	扇面威胁角/(°)
PD	680	1 000	36	60
δ_1/m^2	δ_2/m^2	δ_3/m^2	δ_4/m^2	δ_5/m^2
0.1	0.2	0.3	0.4	0.5

根据分析计算可得如图 5 所示的不同 RCS 下弹道导弹捕捉时间随威胁导弹飞行速度的变化。

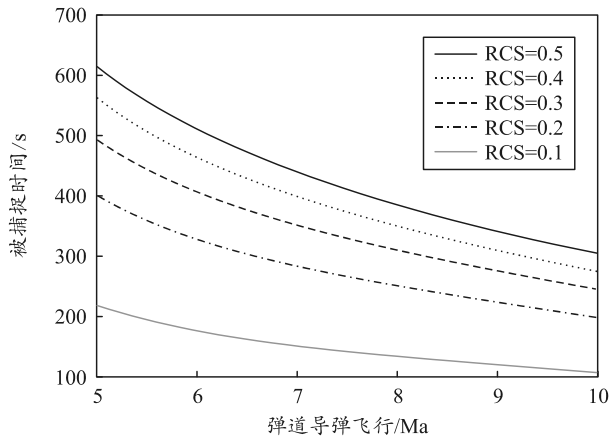


图 5 弹道导弹被捕捉时间随突防速度变化

在威胁角度不变的情况下，弹道导弹不同 RCS 值对预警雷达实际探测半径影响变化和弹道导弹被捕捉时间随突防速度变化的模型计算结果如表 2 所示。

表 2 不同条件下实际探测半径和被捕捉时间的变化情况

RCS/ m ²	实际探测 半径 R _{max} / km	不同突防速度 v _i 下的被捕捉时间 t _i /s					
		5 Ma	6 Ma	7 Ma	8 Ma	9 Ma	10 Ma
0.1	441.38	220	183	157	137	122	110
0.2	524.89	400	333	286	250	222	200
0.3	580.88	496	413	354	310	275	248
0.4	624.19	564	470	403	352	313	282
0.5	660.01	618	515	441	386	343	309

通过模型数据及图像的综合分析，计算结果显示，面对预警雷达探测，不同弹道导弹的被捕捉时间随其自身 RCS 值变化，假设某型可用于低空突防打击的弹道导弹的 RCS 数值范围在 0.1~0.5，则其被捕捉时间根据计算具体数值在 109~618 s 变化。

具体变化体现在弹道导弹的 RCS 数值越大，被捕捉时间越大；相反 RCS 数值越小，被捕捉时间也越小。通过简要分析原因如下，弹道导弹的 RCS 数

值越大，预警雷达所需的发射功率越小，被捕捉时间就越大，之所以被捕捉时间增加，是因为雷达实际探测半径的增大。相反，弹道导弹的 RCS 数值越小，预警雷达所需的发射功率就越大，难以对弹道导弹形成稳定跟踪点迹，使得预警探测实际距离变小，弹道导弹在预警雷达扇形探测区域飞行距离减少，被捕捉时间也随之减少。根据模型数据及图像的综合分析还可以发现：从量级上分析来看，5 个弹道导弹的 RCS 值对被捕捉时间的影响权重占比最大。在整个分析过程中，通过不同型号弹道导弹的 RCS 值和突防速度 v_i 对被捕捉时间 t_i 进行计算分析可得，被捕捉时间会随突防速度增大而减小。

5 结束语

笔者提供了一种在弹道导弹突防作战中面对预警雷达探测时，确定被捕捉时间的方式，对于弹道导弹低空突防作战具有重大意义。笔者对适用于低空突防的不同类型弹道导弹的定义、分类和特性进行了阐述，分析了低空突防作战全过程，在给出被捕捉时间的影响因素的基础上，建立弹道导弹低空攻防对抗数学模型，分析影响弹道导弹被捕捉时间的主要因素包括弹道导弹的 RCS、突防速度以及威胁角等要素。通过仿真计算，给出弹道导弹被捕捉时间与 RCS、突防速度及威胁角之间的相互制约关系，为弹道导弹更好应对追踪探测提供理论依据和参考。

参考文献：

[1] 吴定刚, 黄坤, 张剑. 弹道导弹防御战略及技术发展的研究[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(12): 1-4, 24.

[2] 兰竹, 郑坤, 常晋聘. 弹道中段雷达目标特征仿真[J]. 电子信息对抗技术, 2014(3): 51-57.

[3] 资文茂, 毕义明, 康璞. 弹道导弹中段 RCS 控制研究[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(7): 82-84.

[4] 童俊, 单甘霖, 周云锋, 等. 基于姿态角变化的目标体坐标系下雷达视线研究[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(9): 38-40.

[5] 张海峰, 苏东林, 曾国奇. 复杂雷达动目标建模及动态 RCS 分析[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(5): 687-688, 698.

[6] 盛川, 张永顺, 张小宽. 弹道导弹再入段动态 RCS 特性分析[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(6): 93-95.

[7] 周超, 张小宽, 赵辉, 等. 弹道导弹再入弹头动态 RCS 时间序列分析[C]//2013 年全国微波毫米波会议论文集. 北京: 电子工业出版社, 2013: 143-147.

- [8] 李陆军, 丁建江, 吕金建, 等. 弹道导弹目标特性研究[J]. 飞航导弹, 2015(6): 34-39.
- [9] MELVIN W, WICKS M, ANTONIK P, et al. Knowledge-based space-time adaptive processing for airborne early warning radar[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1998, 13(4): 37-42.
- [10] 吕金建, 丁建江, 任超西. 弹道导弹雷达目标识别问题的新思考[J]. 空军雷达学院学报, 2011, 25(2): 109-112.
- [11] 张璐. 中程弹道导弹动力学分析与时间约束末制导律设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [12] 汪民乐. 弹道导弹突防对策综述[J]. 飞航导弹, 2012(10): 45-51.
- [13] 黄盼盼. 弹道导弹中段雷达目标识别方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [14] 李瑜, 杨志红, 崔乃刚. 助推-滑翔导弹弹道优化研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(1): 66-71.
- [15] 吴启星, 张为华. 弹道导弹中段机动突防研究[J]. 宇航学报, 2006, 27(6): 1243-1247.
- [16] 魏鹏鑫. 弹道导弹机动突防分析及其制导与控制问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [17] 李亭, 刘宇. 雷达目标动静态多极化回波仿真分析[J]. 现代防御技术, 2016, 44(2): 222-228.
- [18] 李涛, 薛维民, 李树. 弹道导弹目标特性建模分析[J]. 现代雷达, 2010, 32(12): 20-24.
- [19] 陈明辉, 李永祯, 王雪松, 等. 海基相控阵雷达系统的反导防御模式研究[J]. 航天电子对抗, 2004(1): 10-14.

(上接第 9 页)

4 结束语

1) 改造技术方案应切实听取基层军代表意见。在役装备升级改造要坚持战斗力标准, 坚持有所为有所不为, 少花钱、多办事、办好事, 着力提升核心性能, 提高部队运用手中装备打胜仗的能力, 重点把握“增量”和“赋能”, 着力提高装备建设质量效益。基层一线军代表特别是主管军代表, 对装备研管用修类综合信息的把握能力比较全面、客观。改造技术方案切实听取基层军代表意见, 可降低“搭便车、塞私货”“锦上添花”的风险, 有效提高升级改造的质效。例如, 基层军代表提出了提升某雷达电子硬盘的容量及处理速度, 以匹配升级改造后的数据处理存储要求的意见, 小投入大收益, 但未被采用, 导致最终成为升级改造后的某雷达短板。

2) 整装返厂改造方式可有效提高改造质效。前期已经完成的在役装备升级改造, 采取使用部队现地(演训地)改造方式, 对于现地不具备改造条件的部组件等则返厂改造。这对于改造方案和内容比较复杂、批量比较大的大型复杂雷达类电子装备, 进度和质量影响较大。实际工作中也发现, 现地拆解后的整装在改造完成最终交付部队以前, 部队也没办法使用。与其这样, 不如整装返厂拆解改造, 对部队演训的影响并不更大。可考虑整装返厂改造、轮换循环的改造方式, 这样既不会扩大对部队演训的整体影响, 又可以最大限度地保证升级改造的质效。

3) 组建工作专班可有效推进任务落地。在役装备升级改造工作, 对外要与拟改装备所在的各部队各层级协调确定改造时间窗口、改造地点、部队必要资源配置、非改造件修复及相关的器材供应保障以及后勤保障等工作; 对内要协调设计、工艺、质量等各部门编审拟改造件检验验收规程/细则、整装拆解工艺、现地装调工艺, 以及现地改造专用工装设计制造鉴定等工作。这些要在相对较短时间内高质量完成的复杂工作, 依常规按部就班地推进满足不了升级改造要求。针对在役装备升级改造任务组建工作专班, 明确责任分工和时间节点, 打破常规条块壁垒, 才能集中资源攻坚克难, 快速响应复杂问题。

参考文献:

- [1] 中央军委装备发展部. 武器装备质量管理体系要求: GJB9001C-2017[S]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [2] 国防科学技术工业委员会. 军用地面雷达通用规范: GJB74A-98[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1998.
- [3] 中国人民解放军总装备部. 电子产品环境应力筛选方法: GJB1032A-2020[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2020.
- [4] 国防科学技术工业委员会. 首件鉴定: GJB908A-2008[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2008.
- [5] 中国人民解放军总装备部. 技术状态管理: GJB3206A-2010[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2010.
- [6] 国防科学技术工业委员会. 产品质量评审: GJB907A-2006[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2006.