

专题报告

论现代低空防空导弹武器系统的发展

钟山

(中国航天机电集团第二研究院, 北京 100854)

[摘要] 对现代近空防空导弹武器系统的特征参数进行了分析,并用这些参数描述主要战技指标;基于模糊函数加权线性变换的方法,对国外几种低空防空导弹武器系统进行了综合评估,并根据评估的量化分析讨论了今后武器系统的发展趋势。

[关键词] 防空导弹;武器系统;特征参数;战技指标;电子抗干扰;综合评估

1 科索沃战争的启示

1999年3月24日,以美国为首的北约集团对南联盟发动了大规模的空中打击,在历时78天战争中,共出动飞机1200架、38000架次,战舰55艘,发射各种类型炸弹、导弹23000多枚。这是一场高科技战争的演练。通过这场战争,可得到如下启示:

1) 必须高度警惕新的炮舰政策和强权政治;

2) 空袭与反空袭已是高科技战争的基本模式和重要模式;

3) 反空袭必须走天、空、海一体化,高、中、低多层次拦截,反飞机、反TBM(战术弹道式导弹)、反CM(巡航导弹)相结合,并符合我国国情和密切结合实际的道路;

4) 在高科技空袭战争中,从飞机、军舰上发射CM,已成为远距离、精确打击的重要手段,一般都是优先使用、重复使用和大量使用;

5) 低空防空导弹在高科技战争形势下面临的任务是: a. 既能拦截超低空入侵的飞机,也能拦截超低空隐蔽飞行的导弹; b. 具备大的机动过载能力和高精度,以拦截机动飞行的飞机和巡航导弹; c. 在复杂、恶劣的气象与地形条件下实施反

空袭任务; d. 对付多批次、多方向轮番攻击; e. 在复杂的电子战环境下实施反空袭。

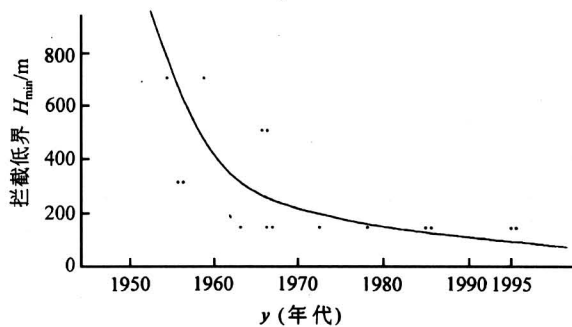
2 现代低空防空导弹武器系统的基本特征^[1]

统观欧、美以及俄罗斯等国家在近二三十年内研制、生产及不断改进的低空防空导弹武器系统^[2,3],结合20世纪90年代发生的海湾战争,对伊拉克发动的“沙漠之狐”空中打击以及科索沃战争等,对现代低空防空导弹作为武器系统的基本特征及表明其特征的参数,作进一步分析。

2.1 空域参数

2.1.1 拦截低界 H_{\min} 低空近程防空导弹用来对付低空、超低空突防的空中目标,这是与中、远程防空武器的重要区别,也是构成有效防御的重要一环。根据国外防空导弹武器的空域参数,应用回归分析法,可作出 H_{\min} 与年代的关系曲线(见图1),并从60年代开始呈指数曲线下降。

20世纪五六十年代装备的防空导弹均为第一代中远程武器,低界以千米计,如苏式SA-2、美式奈基-II、英国的警犬等,低界约为1~3 km。60年代末期至70年代中期,一方面由于局部战争出现低空突防手段引起的实战需要,另一方面由于



$$H_{\min} = 487.4e^{-0.14(Y-1955)}$$

图1 拦截低界 H_{\min} 随年代变化曲线

Fig.1 Changing curve of H_{\min} vs years

相参雷达技术的发展,使得国外装备的地空导弹拦截高度降到了50~150 m,如SA-8、小懈树、响尾蛇-1000型、响尾蛇-2000型等,70年代中期至90年代中期,由于光学、红外手段的广泛采用,使SA-9、SA-13、罗兰特-RM5、长剑-2000、响尾蛇NG/VT-1等,低界降到10 m。舰空导弹型号,如改进型海狼、海响尾蛇等,可以降到几米高度。

降低低界是为了满足战术要求,它主要取决于技术上实现的可能性,特别是探测、跟踪目标与制导技术上的现实性,如超低空发现目标、指示目标的能力将受严重影响,发射导弹后的导引精度、引信工作区域将受到限制。主要考虑因素有:

1) 雷达发现目标的能力受地面起伏遮蔽引起的平均视距限制。根据关系式 $R_0^2/16 + \alpha R_0 = H^{[4]}$,可作出图2,其中 R_0 为平均视距以千米计, α 为地面遮蔽角以毫弧度计, H 为目标高度以米计。在中等遮蔽角 $\alpha = 5$ mrad 情况下,目标如以100 m 高度潜入,雷达只可能在18 km 以内发现目标。

2) 低高度时,雷达波束在地面、海面产生严重杂波,使雷达作用距离减小,跟踪制导精度变坏,无线电引信也受到影响。

3) 低高度时,由于目标在地面与海面产生的多路径效应,将使跟踪制导精度严重变坏。

4) 低高度将使导弹制导产生触地、入海的可能性。

为了满足战术上降低 H_{\min} 的要求,现代近程防空导弹在武器系统上一般采用下列技术措施:

1) 探测低空目标和跟踪制导雷达采用相参雷

达体制,以抑制地物背景干扰,提取有用的动目标信息。国外已较多采用脉冲多卜勒雷达体制,亦有采用MTI(动目标显示)及MTD(动目标检测)技术,或采用FFT(快速傅里叶变换)处理技术。采用这些技术以后,可使SCV(干扰背景下的可见度)达到30~60 dB。同时采用高增益、窄波束、低副瓣天线以及频率分集、频率捷变等技术,以减小地(海)面杂波及多路径效应的影响。

2) 普遍采用光学、红外手段对低空、超低空目标进行探测和跟踪,因为光学、红外在低空武器中能充分发挥其优越性。

3) 改进导引规律。不是直接LOS(视线导引率)导引,而是使导弹保持在从目标的上半部逐步降低高度接近目标的动态前置制导,以避免导弹在攻击超低空目标(如巡航导弹)时与目标视线重合或触地与入水。

2.1.2 拦截远界 R_{\max} 在低空防空导弹的保卫面积内,拦截目标越远、防御的纵深越长,多次拦截的机会就越多,从而使防御更加有效。由于已有中、高空防空导弹作为第一层拦截武器,以及超低空高度受地球曲率的遮蔽影响,故低空防空导弹的远界一般在20 km 以内,图3为低空防空导弹的远界分布散点。

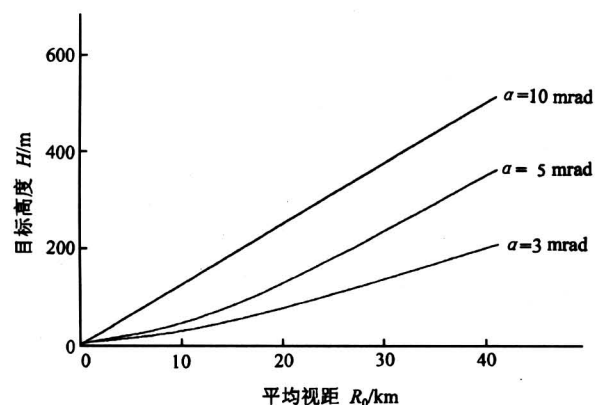


图2 地面雷达平均视距与目标高度关系曲线

Fig.2 Curve of average range of sight from ground radar vs target's height

在目标飞行高度 H 较低时,可认为发现目标距离 R_S 和发射导弹距离 R_F 均满足 $R_S, R_F \gg H$, 可得:

$$R_S = R_F + v_T t_0 \quad (1)$$

$$R_F = (R_{\max}/v_{MA})(v_{MA} + v_T) \quad (2)$$

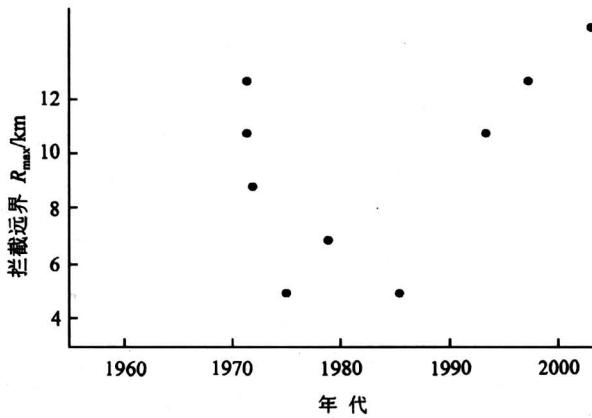


图 3 低空防空导弹远界 R_{max} 随年代变化
Fig.3 Change of R_{max} vs years from low altitude air-defence missiles

式中 v_T , v_{MA} 分别为目标和导弹的平均速度; t_0 为反应时间。如以 $v_T = 300$ m/s, $v_{MA} = 400$ m/s, $t_0 = 6$ s 代入式 (1) 和式 (2), 在 $R_{max} = 10$ km 时, 可得 $R_F = 17.5$ km, $R_S = 19.3$ km, 防御面积可达 300 km² 以上, 对于保卫要点诸如机场、桥梁、指控所等已可满足要求。

作为武器系统, 在增大 R_{max} 的同时必须考虑要点防空所必需的地面机动能力, 故要力求在 R_{max} 较大时对应的探测、跟踪、制导手段所用的雷达、光电设备, 其体积要小、质量要轻, 一般限制在几吨以内, 以便 1~2 辆车即可完成运载及作战任务。

2.1.3 拦截近界 R_{min} 近程防空导弹的近界 R_{min} 小于中、远程防空导弹, 这是重要区别之一。一般后者以千米计算, 前者以百米计算。已有近程防空导弹的 R_{min} 随年代变化的关系曲线见图 4。

近程武器缩短 R_{min} 的意义在于:

1) 在拦截远界 R_{max} 一定时, 减小 R_{min} 可以增大纵深, 增加拦截次数, 提高防御有效性。图 5 为拦截目标示意图。如武器系统反应时间 t_0 为 6 s, 火力转移时间 t_i 为 4 s, $R_{max} = 10$ km, 参考某型号导弹速度特性, 对 $v_T = 300$ m/s 的目标, 在 $R_{min} \leq 900$ m 时, 可以对同一目标或者不同来袭目标先后连续拦截 4 次。如发射架上备有 4 发导弹, 防御是有效的。

2) R_{min} 减小, 对保护自身的可能性增大, 用不着另外配备超近程武器作为补充。为了实现战术上缩短 R_{min} 的要求, 在技术上将面临一些复杂的

难题:

1) 由于目标距离缩短, 雷达测角引进的角闪烁噪声将急剧增加, 使制导跟踪精度变坏。

2) 近程目标机动将引起更大的动态滞后误差, 对导弹机动过载能力将提出更高要求。

3) 导弹从发射筒内自由射出后在零点几秒内将转入受控飞行, 然后转入正常制导。对近程目标处于近界范围时, 导弹正处于控制方式的转换过程, 为此, 必须解决控制快速性和稳定精度之间的矛盾。

4) 近界时, 导弹可能处于主动段攻击阶段, 导弹及其设备应在该力学环境下正常工作。

5) 制导方式、发射方式与近界有关。

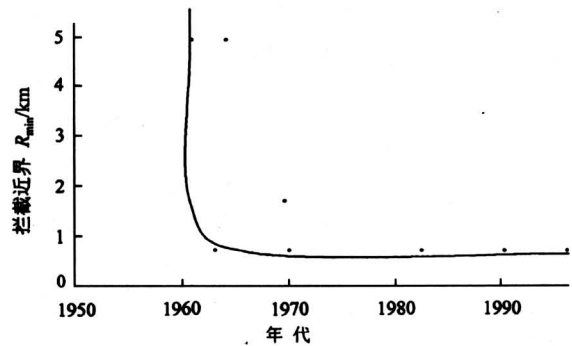


图 4 低空防空导弹 R_{min} 随年代变化关系曲线
Fig.4 Changing curve of R_{min} vs years from low altitude air-defence missiles

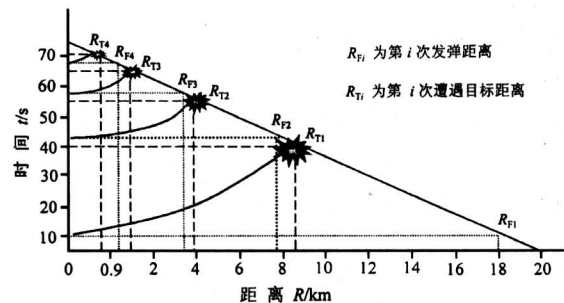


图 5 对不同目标拦截次数示意图
Fig.5 Scheme of interception times against different target

6) 制导设备的跟踪视线与发射导弹架的视差效应将限制 R_{min} 的缩小。

考虑到低空防空导弹是以低空、超低空防空为其主要任务, 特别是反超低空的 CM, 故在空域参

数中对高界不作为基本特征, 在空域的高度上只需与中低、中高空防空导弹的空域衔接即可。

2.2 时域参数

2.2.1 系统反应时间 t_0 地空导弹武器系统从第一次探测到目标起直到导弹发出这段时间为系统反应时间; 舰空导弹从接收到指定目标起到导弹发出这段时间为系统反应时间, 以 t_0 表示。要求 t_0 越小越好, 以增加拦截的有效性和对付多目标的能力。

1) 从式 (1) 可知, 搜索雷达距离一定时, 缩短 t_0 , 拦截远界就有可能增大; 反之, 在拦截远界一定时, 缩短 t_0 , 则可以降低对雷达探测距离的要求。

2) 在拦截近界一定时, t_0 越小, 最后发弹距离就越近, 拦截次数就有可能增加。

3) 减少目标搜索、指示的时间, 提高目标指示的精度和数据, 以使跟踪制导雷达在较短时间内完成天线调转和搜索、截获目标。目前近程搜索雷达目标指示精度在方位角度上为零点几度, 距离为几十米, 数据率由高转速 60 r/min、高重复频率几千赫兹来实现。数据平滑处理采用卡尔曼滤波或其它滤波技术, 以最短的时间, 达到足够的指示精度。

4) 缩短跟踪、制导时间, 要求天线转塔快速调转到目标指定的方位, 为此转塔要有较高的性能, 如方位上角速度、角加速度要足够大, 分别达到 1.5 rad/s 和 5 rad/s^2 。其随动系统的执行元件要具有调速范围宽、质量轻、惯性小等特点, 以满足快速调转的要求。

5) 缩短导弹发射准备时间, 具体内容有: 电池加温, 陀螺启动, 接通发射线, 进入不可逆程序即打开导弹筒前盖, 装定频率、编码及引信延时, 激活电池, 二次电源供电, 致冷器启动, 点燃发动机, 弹出筒等。在上述程序准备过程中费时间较长的是惯性器件从启动到稳定工作的时间。在第一代武器中, 陀螺启动要用几分钟。在现代防空导弹中, 一方面对惯性器件在结构可靠性上予以特殊考虑, 另一方面采用弹外电源高压启动, 弹内电源低压维持工作, 由于电机转矩和电压二次方成正比, 启动力矩大、惯量小、惯性运转时间长, 所以能在 4 s 以后工作; 如用光纤激光陀螺, 将缩短启动时间。

2.2.2 火力转移时间 t_t 从发射第一枚导弹攻击

目标之后, 按照另一目标指定时间算起, 到第二枚导弹发出止, 这段时间叫火力转移时间 t_t , 主要考虑目标指示、转塔调转、雷达截获所需时间以及决定发射后的不可逆程序所需时间。 t_t 比 t_0 缩短的是探测目标所需时间和发射前导弹准备与陀螺启动的时间。如果是对同一目标的第二次拦截, 则转塔不需调转, t_t 是 t_0 中的一部分, 二者是密切相关的。要在 t_t 或 t_0 规定时间内完成各项准备工作, 关键在于自动化程序操作, 要依靠计算机软件来实现复杂空情条件下高速、顺利地各项程序和指令。具体为:

1) 对多目标进行边搜索、边跟踪;

2) 对目标进行敌我识别;

3) 对来袭多架敌机进行分类、威胁判断, 选择威胁最大的目标, 判明属于紧急或一般情况, 紧急情况反应时间短, 一般情况反应时间可稍长, 然后进行目标指示;

4) 提取目标有用信息, 对数据进行平滑滤波处理;

5) 对来袭目标进行拦截区边界条件计算, 如允许拦截的远界、近界、高界, 而对低界在弹道特性上无限制, 但要考虑不同制导方式, 以避免导弹触地或入水, 目标在边界以内即可发射导弹;

6) 装定遥控线的频率、编码及根据目标位置、速度自动形成引信延迟时间。

2.3 导弹参数

2.3.1 推重比与远重比 导弹是武器系统中的重要组成部分, 导弹的部分技术参数与武器系统的战术指标直接关联。达到同样的战术指标, 导弹的体积越小、质量越轻, 技术性能就越好。要减小导弹的体积和质量, 一是提高固体发动机的能量比冲, 二是改进导弹及弹上设备的设计, 如改进导弹气动外形与机械结构设计, 以提高载荷强度, 减小阻力、体积和质量; 改进弹上设备的微型化、小型化设计; 改善制导精度、提高战斗部杀伤概率, 等等。用推重比表征导弹推力和质量的关系, 表 1 列出几种早期地空导弹的推重比, 可以看出, 推重比随新型号的出现而不断提高。推重比仅反映导弹的部分技术性能, 没有反映与战术性能直接有关的制导精度、导弹过载能力、引战配合效率等重要参数, 因此, 通常采用拦截远界与导弹质量之比 (即远重比) 作为衡量防空导弹战技性能好坏的参数之一。见表 1、表 2。

表 1 几个型号地空导弹的推重比与远重比

Table 1 Propellant to weight ratio and far limit to weight ratio for several air-defence missiles

型号名称	SA-2	SA-3	SA-6	SA-9	SA-13	靛青	罗兰特	响尾蛇
推重比	~23	~27	~25			~31	~30	~28
远重比 /m·kg ⁻¹	~14	~22	~41	~140	~180	~83	~100	~100

表 2 90 年代新型低空防空导弹的远重比

Table 2 Far limit to weight ratio for modern new air-defence missiles

型号名称	TOR	ADATS	长剑 -2000	响尾蛇 NG/VT-1	罗兰特 -RM5
远重比 /m·kg ⁻¹	96	156	117	160	200

2.3.2 单发杀伤概率 (SSKP) 此指标与武器系统效能密切相关, 需要尽量提高, 一般考虑下列因素:

1) 由于 SSKP 包含着导弹本身的可靠性, 故必须提高每一弹上设备的可靠性。实践表明, 要特别注意薄弱环节的可靠性, 如接插件、连接件、继电器等等。一般要求弹上各项设备的任务可靠性均在 0.96 以上, 全弹任务可靠性在 0.85 以上。

2) 筒装导弹发射可靠性。

3) 导弹应顺利完成无控飞行段转入受控飞行段, 提高交班概率。

4) 在规定的制导精度内, 导弹接近目标到一定距离时, 引信应可靠地启动电爆管。

5) 经过一定时延后战斗部应及时起爆, 并有效地摧毁目标。

当前, 要进一步提高导弹的 SSKP, 重点在于提高在各种扰动条件下初制导交班的成功率和自适应参数调整, 改善引战配合和杀伤效果。

2.3.3 导弹速度特性与过载特性 导弹的机动能力与其速度的二次方成正比。提高导弹机动能力一是采用主动段工作时攻击目标, 此时由于发动机推力使导弹速度保持不变, 在拦截区域内可提供相同的可用过载; 二是采用发动机熄火以后的被动段攻击目标, 其特点是导弹在开始一段速度比较高, 这有利于对近距离目标的攻击。导弹速度随着距离增大而下降, 机动过载能力也随之下降, 在远界时可用过载最低。改善导弹的速度特性取决于导弹外形、结构、质量、气动以及发动机的设计。采用主

动段攻击或被动段攻击, 将由防御的侧重点不同以及弹上设备能达到的技术水平决定。

2.4 对付多目标能力

1) 要对付多目标, 首先要能探测多目标, 其能力取决于雷达或光学设备对多个目标进行检测、鉴别和指示的数量。

2) 拦截空域越大, 反应时间越短, 可拦截目标的数目就可能越多, 对同一目标再次拦截的机会也会越多。

3) 在发射单元上待发导弹的数目 N 表征瞬间火力, 亦即一个发射单元在瞬时对付多目标的能力。增加发射单元的配置数量, 可以对付更多的目标。

现代低空防空导弹一般可以探测 30~40 个目标, 甚至更多, 对其中三分之一可以进行跟踪、指示; 在发射单元上待发导弹一般为 2~8 发。如按图 5 的参数, 架上备有 4 发导弹, 可以拦截两个批次不同方向来袭的目标, 每个批次为两架飞机, 批次间隔 15 s, 见图 6。

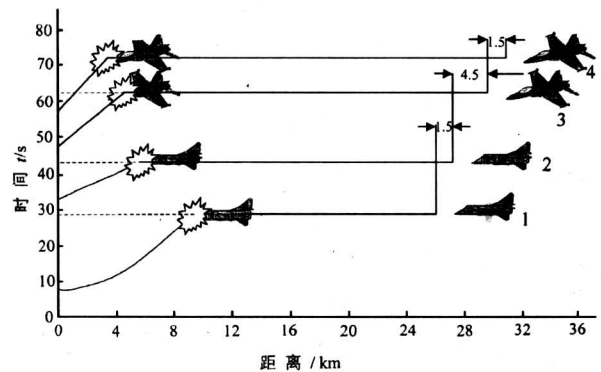


图 6 拦截多目标示意图

Fig.6 Scheme of intercepting multiple targets

2.5 抗干扰能力

在现代防空武器发展的同时, 光电干扰技术和对抗手段均有了迅猛的发展。干扰、破坏防空导弹有效拦截的焦点是制导系统, 这从近十年的几次局部战争中已充分显示出来。

90 年代的海湾战争以及 1998 年底对伊拉克“沙漠之狐”的空中打击, 由于优先大量使用巡航导弹, 摧毁了伊拉克的防空及指挥能力, 加之大量使用电子战飞机, 压制了伊拉克的电子设备, 伊方遭到惨重失败。在 1999 年的科索沃战争中, 美国和北约再次施用巡航导弹优先, 继之以同时实施电

子侦察、压制和干扰,电子战伴随空袭全过程,起到了主导作用。

由此看出,现在和今后,防空导弹将在严重电磁干扰环境下工作,防空导弹武器系统的抗干扰能力已经不只是雷达抗干扰的技术问题,而是武器系统必不可少的战术指标及战术应用问题。如果没有必要的抗干扰能力,防空导弹将无法使用。在防空导弹中,探测、制导手段主要依靠光电技术,命中目标主要靠准确制导,敌方施放干扰(欺骗型或功率型)目的就是掩护目标,使其不被防空武器探测、制导,干扰与反干扰的焦点是制导与反制导。必须高度重视武器系统的抗干扰能力,并要不断地改进提高。从以往战例中还可看出,干扰与反干扰、对抗与反对抗是一对矛盾,是符合对立统一发展规律的。一种新式防空导弹在初期发挥作用较大,一旦被对方认识,采取干扰措施后将减小或失去作用;一种新的干扰机在初期干扰效果显著,一旦对方采取反干扰对策,作用又下降。因此,没有长期有效的十全十美的防空导弹,也没有久用不衰的干扰手段。对低空防空导弹武器系统抗干扰能力的要求,要有相对的观点、发展的观点和时空概念。

2.6 机动性(不考虑舰空导弹)

低空防空导弹既要用于要点防空,又要用于野战防空,保卫前进中的部队和战场转移,因此,必须具备机动能力。衡量此性能的主要特征是:

- 1) 武器系统质量越小、车辆数目越少越好;
- 2) 进入阵地展开工作准备时间和撤收时间越短越好;
- 3) 在公路上的最大速度,以及越沟、涉水能力;
- 4) 运输转移能力,如铁路运输的通过性,空运、舰运的可能性。

现代低空防空导弹武器组成作战火力单元的最少车辆为1~2辆,展开、撤收时间以几分钟计;缩短展开、撤收时间有利于机动转移,有效地防御要点,减小巡航导弹等精确制导武器攻击的可能性。

2.7 有效性和可靠性

防空导弹武器系统可用系统效能 E 来表征此系统在规定时间内、在特定战场条件下拦截来袭空中目标、完成要点防御任务的量度,采用美国工业界武器系统效能咨询委员会建立的分析模型^[5]:

$$E = a \times D \times c$$

式中: a 为有效性,通常为向量; D 为可依赖性,为一矩阵,通常用可靠性概念代替; c 为系统完成任务的能力,亦即主要功能,为向量。

2.7.1 有效性 用统计有效度表征一个系统在一瞬间开始工作时处于良好工作状态的概率。定义为^[5~7]:

$$a = 1/[1 + (MTTR/MTBF)],$$

式中 a 为未计算定期维修(预防性维修)或后勤保障占用的非工作状态时间工作的有效度。MTBF为平均无故障间隔时间(未计算非工作状态时间),MTTR为平均维修时间;提高统计有效度就必须增大MTBF和减小MTTR。现代低空导弹武器加强了维修性设计,采用联机检测系统(BITE),可以自动检测故障,定位到印制板和元件,达到 $MTTR < 30 \text{ min}$,有效度 a 达到0.98~0.99。早期防空导弹的MTTR为2h以上,有效度为0.8~0.85。

2.7.2 可靠性 现代武器的可靠性比早期武器有了大幅度提高。以防空导弹地面制导站为例,MTBF大约提高两个数量级,从几至十几小时提高到几十至几百小时。普遍采取的有效措施有:

- 1) 采用高可靠的大规模、超大规模集成电路,组件模块化,改进接插件、连接件、紧固件的可靠性,加强结构电气组件对恶劣环境的适应能力,防腐、防潮、防霉菌、防振动冲击,等等。
- 2) 改进装配、焊接工艺,如采用波峰焊、压接工艺;改善多层印制板金属化孔的牢固性。
- 3) 组织专门的可靠性设计师队伍,对武器系统进行可靠性设计,建立模型与可靠性分配、预估,在失效分析后必须坚持改正措施,不断提高可靠性。

4) 对元器件严格验收筛选,装配出组合、整机后再进行高效应力筛选。一般常用快速变温的温度循环与短时、高幅、宽谱的随机振动两种方法,可以有效地激发元件与工艺缺陷,剔除早期失效元件。实践表明,经过强应力筛选后,整机可靠性明显提高。

5) 建立严格的全面质量管理,贯彻质量控制规章制度,使设计、生产、装调、试验的每一个环节、过程均处于受控状态。对发现的质量问题必须经过反馈—研究—措施—效果的循环,从循环中提高质量可靠性。

以上 2.1~2.7 节阐明了现代低空防空导弹武器系统的基本特征，这些表明特征的参数也正是对武器系统主要战术指标的要求。

3 对国外低空防空导弹武器系统的综合评判

3.1 综合评判的基本方法

应用武器系统效能 E 及费效比的定量模型，可以对实现同一武器系统战术要求的几种方案进行比较选择。但对国外现有的多种不同战术指标的低空防空导弹如何综合评判，是值得研究的问题。以量化比较好坏，以量化看发展趋势，应用模糊数学

中的隶属度和综合评判是适宜的^[8]。即对每一种武器按照 2.1~2.7 节所确定的特征参数，逐一进行横向相对比较，建立隶属度，由特征参数近期内发展变化的快慢及其在武器系统功能中的重要程度确定加权系数。对不同武器系统的主要特征参数隶属度建立起来的模糊关系矩阵 R 与归一化加权模糊向量 x 进行线性变换，即可得出综合评判结果。

3.2 各项特征参数的相对比较

3.2.1 空域参数 现代低空防空导弹以 90 年代生产的响尾蛇 - NG/VT - 1、罗兰特 - RM5 及长剑 - 2000 为较好，见表 3。近期研制生产的武器系统，其空域参数不断得到改进提高。

表 3 国外主要低空防空导弹空域参数的相对比较^①

Table 3 Comparison of parameters from space zone of foreign main low altitude air-defence missiles

型号名称	(1) 长剑-2000	(2) 小懈树	(3) 罗兰特-RM5	沙伊纳	(4) 响尾蛇-2000型	(5) 响尾蛇 NG/VT-1	靛青	SA-8	SA-9	SA-13
低界 H_{\min}/m	10	150	15	15	50	10	50	45	15	15
相对隶属度 μ_1	1	0.06	0.66	0.06	0.2	1	0.2	0.22	0.66	0.66
远界 R_{\max}/km	8	5	12	10	8.5	12	10	10	6.4	10
保卫面积 $/km^2$	200	78	452	314	225	452	314	314	128	314
对 R_{\max} 隶属度 μ_2	0.67	0.42	1	0.83	0.7	1	0.83	0.83	0.53	0.83
近界 R_{\min}/km	0.4	0.5	1.5	0.5	0.5	0.5	1	1.5	0.6	0.7
对 R_{\min} 隶属度 μ_3	1	0.8	0.27	0.8	0.8	0.8	0.4	0.27	0.67	0.57
$\mu_1 + \mu_2 + \mu_3$ ^②	2.67	1.36	1.93	2.29	1.17	2.8	1.43	1.32	1.86	2.06

① 对远界目标为 $Ma=2$ 的飞机；② 为等权时

3.2.2 时域参数 见表 4。

表 4 国外主要低空防空导弹武器的反应时间相对比较

Table 4 Comparison of reaction time of foreign main low altitude air-defence missiles

型号名称	(1) 长剑-2000	(2) 小懈树	(3) 罗兰特-RM5	沙伊纳	(4) 响尾蛇-2000	(5) 响尾蛇 NG/VT-1	靛青	TAN-SAM
反应时间 t_0/s	6	8	7	6	6	6	9	8
相对隶属度 μ_4	1	0.75	0.86	1	1	1	0.67	0.75

3.2.3 导弹参数 由于拦截远界这一战术指标包含了对导弹过载特性、速度特性的要求，导弹的重量反映在地面机动性指标上，故在主要战术指标综合比较时，不再对导弹远重比、过载特性等参数作比较，着重比较 SSKP（单发杀伤概率），见表 5。

3.2.4 对付多目标能力 见表 6。

3.2.5 抗干扰能力 如 2.5 节所述，至今尚没有对武器系统抗干扰能力的统一量度。作者选用相对好坏的模糊概念确定其相对隶属度，遵循下列判断准则：

表5 国外主要低空防空导弹武器的导弹参数相对比较

Table 5 Comparison of missiles parameters for foreign main low altitude air-defence missiles

型号名称	(1) 长剑-2000	(2) 小懈树	(3) 罗兰特-RM5	沙伊纳	(4) 响尾蛇-2000	(5) 响尾蛇 NG/VT-1	靛青	TAN-SAM
SSKP	0.7	0.8	0.85	0.85	0.8	0.85	0.8	0.75
相对隶属度 μ_5	0.7	0.8	0.85	0.85	0.8	0.85	0.8	0.75

表6 国外主要低空防空导弹武器对付多目标能力相对比较

Table 6 Comparison of capability against multiple targets for foreign main low altitude air-defence missiles

型号名称	(1) 长剑-2000	(2) 小懈树	(3) 罗兰特-RM5	沙伊纳	(4) 响尾蛇-2000	(5) 响尾蛇 NG/VT-1	靛青	TAN-SAM
探测目标数				40	30	40		6
指定目标数				16	12	16		2
待发导弹数 N	4	4	2 (贮存 8)	6	4	8	4	4
相对隶属度 $\mu_6^{\text{①}}$	0.5	0.5	1	0.75	0.5	1	0.5	0.5

① 其他数据不全, 故隶属度主要指待发导弹数目 N 而言, 以 8 发为较好

1) 从目前正在采取的抗干扰措施看出, 制导手段(指雷达、红外、电视、光学)多种比单一的抗干扰能力好; 多比少好; 变化的比固定的好; 多种手段中可以相互兼容的比不能转换的好。

2) 对制导方式可按目标探测、目标跟踪、导弹制导三段的抗干扰能力分别处理后再进行综合评定。每一段均按多种手段及不同手段中多种措施来确定其好坏的隶属度。三段中目标跟踪与导弹制导同时发生可以等权处理, 与探测阶段不等权。

3) 不同制导手段必有不同干扰手段对付, 但在时间上可能有差异。目前, 激光比红外、电视、雷达的抗干扰能力强一些, 后三者差不多。

4) 在一种制导手段中, 特别是雷达, 目前已经采取了多种(包含潜在的和附加的)抗干扰措施; 实践证明, 有效措施应用多一些比少一些的抗干扰能力要好, 因此, 用已采用有效措施总数之比可表示其好坏隶属度。

表7为国外几种地空导弹制导系统的制导手段抗干扰能力比较, 表8为几种型号所用跟踪制导雷达的抗干扰措施及其能力的相对比较。表7和表8所列序号(1)~(7)代表七种型号。 $\mu_7 = [\mu_{71}, \mu_{72}, \mu_{73}, \mu_{74}, \mu_{75}, \mu_{76}, \mu_{77}]$ 表示型号综合抗干扰能力的隶属度。设 G 为权向量, 令:

$$G = [G_1 \ G_2 \ G_3] = [0.2 \ 0.4 \ 0.4]$$

式中 G_1 为目标探测阶段型号制导手段抗干扰能力

的权数; G_2 为跟踪制导阶段型号制导手段抗干扰能力的权数; G_3 为跟踪制导阶段型号中雷达抗干扰能力的权数。

从表7和表8可得出目标探测、跟踪制导及雷达抗干扰措施三个方面的抗干扰能力隶属度的关系矩阵 F 。表示型号综合抗干扰能力的相对隶属度为 μ_7 , 可由 F 线性加权变换而得。

$$\mu_7 = G \cdot F = [0.2 \ 0.4 \ 0.4] \times \begin{bmatrix} 0.86 & 0.63 & 0.86 & 0.57 & 0.57 & 0.57 & 0.86 \\ 0.79 & 0.59 & 0.79 & 0.32 & 0.37 & 0.37 & 0.79 \\ 0.75 & 0.75 & 0.63 & 0.38 & 0.50 & 0.50 & 0.75 \\ 0.79 & 0.62 & 0.74 & 0.39 & 0.46 & 0.46 & 0.79 \end{bmatrix} =$$

从上面列表及计算可看出, 所有型号从基本型到改进型, 不断改进的重点内容是制导系统, 由单一制导发展为复合制导, 且可以兼容转换, 不断提高抗干扰能力。在90年代以后研制的改进型号如海狼-轻型、海响尾蛇模块型、长剑-2000型、响尾蛇-NG/VT-1、罗兰特-RM5型等, 在光电复合制导手段与雷达抗干扰主要措施上均趋于更加完善。如NG/VT-1与70年代的2000型相比, 抗干扰能力加强了近1倍。小懈树改进型以及海狼-轻型由于采用了毫米波DN-181并双波段应用, 提高了综合抗干扰能力。在寻的制导的导弹上, 普遍发展为采用双波段寻的器, 多模双色, 如尾刺、小懈树、法国的SATCP、苏式SA-13等。

表 7 国外主要低空防空导弹的制导手段抗干扰能力

Table 7 Comparison of capability of ECCM in guiding measure for foreign main low altitude air-defence missiles

型号名称	长 剑		小懈树		罗兰特		响尾蛇				制导手段加权分数	
	(1) 2000	II 型	激光型	基本型	(2) 改进	(3) RM5	II 型	(4) 2000	(5) 3000	(6) 4000		(7) NG/VT-1
目标探测阶段	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
目视				1	1							1
光瞄	1	1	1			1	1	1	1	1	1	1
电视						1	1		1	1	1	1
红外	2					2						2
总分	6	3	3	3	3	6	4	3	4	4	6	7
相对隶属度 f_1	0.86	0.43	0.43	0.43	0.43	0.86	0.57	0.57	0.57	0.57	0.86	
目标跟踪	2	2		1	2	2	2	2	2	2	2	2
光瞄	1	1	1	1	1	1	1					1
激光			4									4
红外	2				2							2
电视手动/自动	2		2			2		1	2	2	2	1/2
红外、指令	2					2	1	1	1	1	2	2
电视、指令	2	2	2			2					2	2
雷达、指令	2	2				2	2	2	2	2	2	2
红外寻的				3	3							3 ^①
被动光寻的					3							3 ^①
制导可转换	2				2	2	2				2	2
跟踪、制导阶段总分	15	7	9	4	11	15	8	6	7	7	15	19
相对隶属度 f_2	0.79	0.37	0.47	0.21	0.58	0.79	0.42	0.32	0.37	0.37	0.79	

① 指令制导与寻的制导各为 6 分

表 8 国外主要低空防空导弹武器上雷达采用的抗干扰措施及其相对比较

Table 8 Comparison of ECCM measures of radar for foreign main low altitude air-defence missiles

型号名称	(1)	(2)	(3)	响 尾 蛇				抗干扰效果加权分数
	长剑-2000	小懈树改进型	罗兰特-RM5	(4) 2000	(5) 3000	(6) 4000	(7) NG/VT-1	
单脉冲跟踪	1	1	1	1	1	1	1	1
动目标显示	2	2	2	2	2	2	2	2
可变圆极化	1	1	1	1	1	1	1	1
改变重复频率	1	1	1				1	1
频率分集				2	2	2		2
频率捷变	3	3	3				3	3
脉冲压缩							2	2
恒虚警接收	2	2	2		2	2	2	2
毫米波技术	2	2						2
总计分数	12	12	10	6	8	8	12	16
雷达抗干扰隶属度 f_3	0.75	0.75	0.63	0.38	0.5	0.5	0.75	

3.3 武器系统特征参数综合评判

表示低空防空导弹武器系统的主要战术性能以 H_{min} , R_{max} , R_{min} , t_0 , SSKP, N , 抗干扰能力, 机动性, 可靠性和有效性来表征。考虑到现有型号的可靠性和有效性要由实际统计数据作比较, 而在这方面数据收集不全, 在机动性方面发展结果差别也

不明显, 故下面选择几个型号仅以前 7 项指标进行综合比较。该 7 项指标中, 认为 R_{max} , SSKP 和抗干扰能力在重要性上应加权, 而 H_{min} 和抗干扰能力在近二十多年发展变化较快, 也应加权, 按上述 7 项指标的顺序, 权向量为 X ,

$$X = [2 \ 2 \ 1 \ 1 \ 2 \ 1 \ 3]$$

归一化 $X = [0.17 \ 0.17 \ 0.083 \ 0.083 \ 0.17 \ 0.083 \ 0.25]$

综合评比的型号为表7和表8(1)~(4)和(7)5种型号。利用3.2.1~3.2.5各节计算结果所得的 μ_1, \dots, μ_7 , 可得出要比较的5种型号的7种参数隶属度组成的模糊关系矩阵。

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.06 & 0.66 & 0.20 & 1 \\ 0.67 & 0.42 & 1 & 0.70 & 1 \\ 1 & 0.80 & 0.27 & 0.80 & 0.80 \\ 1 & 0.75 & 0.86 & 1 & 1 \\ 0.70 & 0.80 & 0.85 & 0.80 & 0.85 \\ 0.50 & 0.50 & 0.85 & 0.50 & 1 \\ 0.79 & 0.62 & 0.74 & 0.39 & 0.79 \end{bmatrix}$$

对 R 线性加权变换, 可得综合评判结果:

$$Y = X \cdot R = [0.80 \ 0.54 \ 0.79 \ 0.57 \ 0.91]$$

长剑-2000、小懈树(改进型)、罗兰特-RM5、响尾蛇-2000和NG/VT-1地空导弹武器系统综合评判结果为: 响尾蛇 NG/VT-1 较好, 小懈树和2000型较差。小懈树较差是由于空域参数中 R_{\max} 小、 H_{\min} 偏大所致。据有关资料报道, 小懈树正在改进为增大射程型。2000型的弱点在于未充分发挥光电制导的作用, 因而 H_{\min} 及抗干扰能力两项指标偏低, 影响综合性能。NG/VT-1 由于采用了红外电视自动跟踪及制导, 改善了雷达抗干扰能力, 从而提高了综合抗干扰能力, 导弹速度提高, 增大了射程。NG/VT-1 指标处于领先。从数据可看出, 90年代发展的 NG/VT-1、长剑-2000型和罗兰特-RM5的综合指标均比70~80年代的同类武器改进较多, 特别是在射程(远界)、制导手段、抗干扰能力方面, 不断日新月异。

4 21世纪低空防空导弹发展的特征^[9~11]

通过以上综合评判的量化分析, 结合科索沃高科技战争的实际牵引, 可以预测21世纪低空防空导弹武器系统发展的特征。

4.1 以反导弹、反飞机相结合为主要目标

1) 考虑到隐形飞机、TBM、CM、JDAM(联合直接攻击武器)、JASSM(空对地防区发射导弹)的大量使用, 对地空导弹的作战空域要求增大, 特别是提高拦截小目标的能力, 将牵引一系列高新技术的发展。

2) 制导站采用相控阵元数增多, 扫描范围扩

大, 低噪声系数和高发射功率的收发组件或大功率发射机器件进一步完善, 车载可机动的相控阵搜索与截获、制导雷达将广泛使用。

3) 导弹采用高比冲复合药或改型双基药的固体推进剂, 向无烟或少烟方向发展。轻型高可靠快速启动的惯性器件组成平台与微机的结合, 以及自适应控制舵系统, 将使导弹更加精确地导向小目标。多种类型的近炸引信和战斗部针对不同的目标(飞机或导弹)和交会角, 将以更有效方式起爆并摧毁目标。高速、高过载的固体化、小型化防空导弹将以0.8以上的单发杀伤概率拦截机动飞行的导弹类目标和机型目标。

4) 由于微型化集成电路和计算机技术、仿真技术的迅猛发展, 多种适应高机动、快速小目标的变参数、变前置角、变比例导航系数的优化控制系统将从软件转化到导弹和制导站的硬件上, 应用于多种制导方式之中。

4.2 以光、电多种制导方式有机结合为主要手段

1) 由于电子战、抗干扰以及全天候作战的需求, 结合现代光学、红外技术发展的可能性, 单一的以电子、雷达作为制导设备(弹上及地面)的时代已经过去, 光学、电视、红外与雷达兼容的复合制导将应运而生。

2) 雷达、电视、红外均可独立完成跟踪、制导; 各种敏感头共装一部转塔上, 结构模块化、数据兼容, 可以及时转换。

3) 在导弹上多模寻的导引头正在推广应用, 既有宽频带被动式寻的导引头和毫米波主动式雷达导引头组成的双模导引头, 又有多波段红外多模导引头等。

4) 视线指令制导与寻的制导组成复合制导; 也可用两种不同制导方式的导弹对付不同的多目标。

4.3 适应电子战, 光电对抗能力将成为主攻方向

1) 必须能经受类似于科索沃战争中的防空压制实施的软杀伤和硬杀伤。

2) 采取多种抗干扰措施和战术对策, 多比少好; 快速兼容可变的措施比固定的、不能瞬时兼容的措施更加有效。

3) 充分发挥计算机的自适应、智能化功能: 根据敏感头获取的数据判断干扰环境; 根据干扰环境选择反干扰措施和制导手段; 战术与技术相结合, 采取相应对策。

4.4 提高可靠性与维修性是不变的主题

1) 适应实战需要, 具有高可靠性的机动作战能力。

2) 制导站及弹上设备的 MTBF 将随集成化、模块化而成倍延长。

3) 光电设备都在完善机内检测 (BITE) 的设计而使 MTTR 缩短。

4) 导弹筒装后改善了运输、储存、装卸环境条件, 做到生产出厂后在规定时间内不做专门测试便可使用。

4.5 以 C³I 系统为中心, 高低结合, 点面结合, 综合应用, 充分发挥防空导弹系统的效能

1) 防空 C³I (通讯控制指挥显示系统) 根据来袭目标的分类、识别、测量和预估, 充分发挥各类防空导弹的作用, 确保拦截空中目标的连续性和有效性。

2) 充分利用防空 C³I 信息, 判断空中入侵飞机和 CM 的航向、航迹, 及时地机动部署低空防空导弹从海面、途径要道和保卫要点上拦截入侵者。

3) 以低空防空导弹为中心, 构成弹炮结合的密集型末端点防御, 主要对付 CM、空地导弹和炸弹。

简言之, 21 世纪防空导弹面临的目标特点是小、快、精、多 (指类型、手段、数量等), 赋予防空导弹的任务必然是以其人之道还治其人之身, 也需走“小、快、精、多” (指制导方式、光电复合方式、光电对抗措施, 以及高低结合、综合利

用、取长补短之意) 的发展道路。

参考文献

- [1] 钟山. 低空近程防空导弹武器系统综合评论[J]. 系统工程与电子技术, 1987, (12): 1~12
- [2] 世界导弹大全[M]. 修订本. 北京: 军事科学出版社, 1998
- [3] Jane's Land-Based Air Defense[J], 1998—1999
- [4] 地空导弹武器系统方法论[J]. 国外战术导弹, 1980, (11)
- [5] 美国陆军武器装备司令部. 陆军武器系统分析 第二十四章 工业界武器系统效能咨询委员会的评价模型 [M]. 北京: 兵器工业部兵器系统工程研究所. 404~405
- [6] 美国陆军武器装备司令部. 系统分析与费用效能分析[M]. 北京: 兵器工业部兵器系统工程研究所. 33
- [7] 美国陆军武器装备司令部. 可靠性设计指南[M]. 兵器工业部兵器系统工程研究所. 13
- [8] 贺仲雄. 模糊数学及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社. 230
- [9] Fulghum D A. BMDO links ballistic, cruise missile defense [J]. Aviation Week & Space Technology, 1997, 147(2): 51~54
- [10] Fulghum D A. Army eyes development of small cruise missile [J]. Aviation Week & Space Technology, 1996, 145(12): 28
- [11] McDavid A M Jr, Bosworth B. Cruise missile: tomorrow's threat on sale today[J]. Air Defense Artillery, 1996, (5-6): 2~8

Development of Modern Low Altitude Air-defence Missile Weapon System

Zhong Shan

(Second Academy of Astronautics Mech. & Elec. Group, Beijing 100854, China)

[Abstract] The analyses of characteristic parameters of modern low altitude air-defence missile weapon system are shown in this paper. These parameters can be used to represent the main specification of tactics and technicality. The synthetical evaluation of several foreign low altitude air-defence missile weapon systems is made, based on the measure of fuzzy function with weighted linear transformation. At the end of this paper the development tendency of weapon system in future is discussed in accordance with the quantitative analysis of the evaluation.

[Key words] air-defence missile; weapon system; characteristic parameters; specification of the tactics and technicality; ECCM; synthetical evaluation