

兵组架射导弹武器系统精度链计算方法研究

凌丽, 陈志, 刘郑州, 王俊
(上海机电工程研究所, 上海 201109)

摘要: 分析了兵组架射导弹武器系统组成与作战过程,在此基础上,给出了武器系统误差传递模型,并对各项误差源做简要介绍,然后给出了武器系统精度分析的数学模型,最后参照具体的作战使用需求和系统(设备)的技术水平进行实例计算。实例计算结果表明了精度分析数学模型及误差源数值分配的合理性、有效性,为武器系统目标捕获概率的设计论证提供了方法和支持。

关键词: 兵组架射导弹; 武器系统; 误差传递模型; 误差源; 精度分析; 计算实例

中图分类号: TJ768.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)11-0089-04

Accuracy Chain Calculation for Weapon System of Tripod-Launched Missile by Several Soldiers

LING Li, CHEN Zhi, LIU Zheng-zhou, WANG Jun
(Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: The paper introduces the composition and operational process of weapon system of the tripod-launched missile by several soldiers. The error propagation model is proposed, and each error source is introduced briefly. The mathematic model is presented for accuracy analysis to the weapon system. A computing example is given based on actual operational requirements and technological levels of the system/equipment. The calculation result proves the reasonability and effectiveness of accuracy analysis model and the error allocation scheme. The paper provides a support for design and demonstration of the weapon system's target acquisition probability.

Key words: tripod-launched missile by several soldiers; weapon system; error propagation model; error source; accuracy analysis; computing example

0 引言

传统的便携式旋转导弹武器系统肩扛式作战方式,射手体力消耗大、操作难度高、人身安全及作战隐患大而作战效能低。随着现代战争科技化、信息化程度的日益提高,对便携式旋转导弹的作战效能提出了更高的要求。兵组架射导弹武器系统,可装载多发便携式旋转导弹,与其他电子作战装备相结合,形成一套紧密、高效的武器系统进行作战。其机动性强、成本低、效能高、应用范围广,克服了便携式旋转导弹肩扛式作战方式的不足。

国内外现有的便携式旋转导弹大多采用红外制导体制,在发射前,导引头须先截获目标而红外导引头电

锁视场较小,一般仅 $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ 。因此,兵组架射导弹武器系统在设计过程中必须严格控制各环节精度链,确保武器系统最终有较高的目标捕获概率,使目标落入导引头视场内。

精度分析方法研究是对各影响因素提出误差要求的过程,即总体分解指标的过程。而由于系统包含的分系统、部件或元器件很多,影响系统总体的误差源很多。对于武器系统而言,目标捕获概率越高越好;而对于各分系统、部件而言,武器系统对其精度的要求越低越好。这就需要作战系统根据作战使用需求和系统(设备)的技术水平,对武器通道的精度进行科学、合理的分配来协调这个矛盾,并达到最优效费比^[1],同时使武器系统目标捕获概率满足系统要求。

1 武器系统方案描述

1.1 武器系统简介

兵组架射导弹武器系统由火控系统、发射系统、红

外跟踪设备、定位定向装置、装筒弹及油机组成。其中:发射系统包括发射架、发控设备、伺服控制系统;火控系统包括火控计算机主机与火控显控器。

该武器系统可装载多发便携式旋转导弹于发射架上,导弹采用红外制导体制,由火控系统远程控制发射架伺服控制系统,完成控制发射架调转、红外跟踪设备捕获目标、导引头上电、截获目标,最终控制导弹发射的工作流程。

1.2 武器系统作战过程

兵组架射导弹武器系统可接入上级空情信息,利用上级空情指示的目标信息,进行捕获、跟踪,最终发射导弹拦截目标。具体的作战流程分为两个阶段。

第一阶段:火控系统接收上级空情网指示的目标信息,经数据处理,控制发射架调转,使红外跟踪设备

捕获目标。

第二阶段:1) 操作手观察红外跟踪设备的视频信息、确认跟踪目标正确,火控系统转为采用锁定的目标信息控制发射架随动调转,并完成预置参数装订;2) 通过导弹加电按键,选择发射架上的一发导弹上电、制冷;3) 待发控设备向火控系统反馈导弹加电制冷好,火控系统自动向发控设备下达导引头允许跟踪指令;4) 导引头跟踪确认后,反馈火控系统,操作手按下发射按钮,导弹离筒。

2 误差传递模型

根据 1.2 节所述的武器系统作战过程,分析武器系统作战过程中引入的各项误差源,建立武器系统误差传递模型,如图 1 所示。

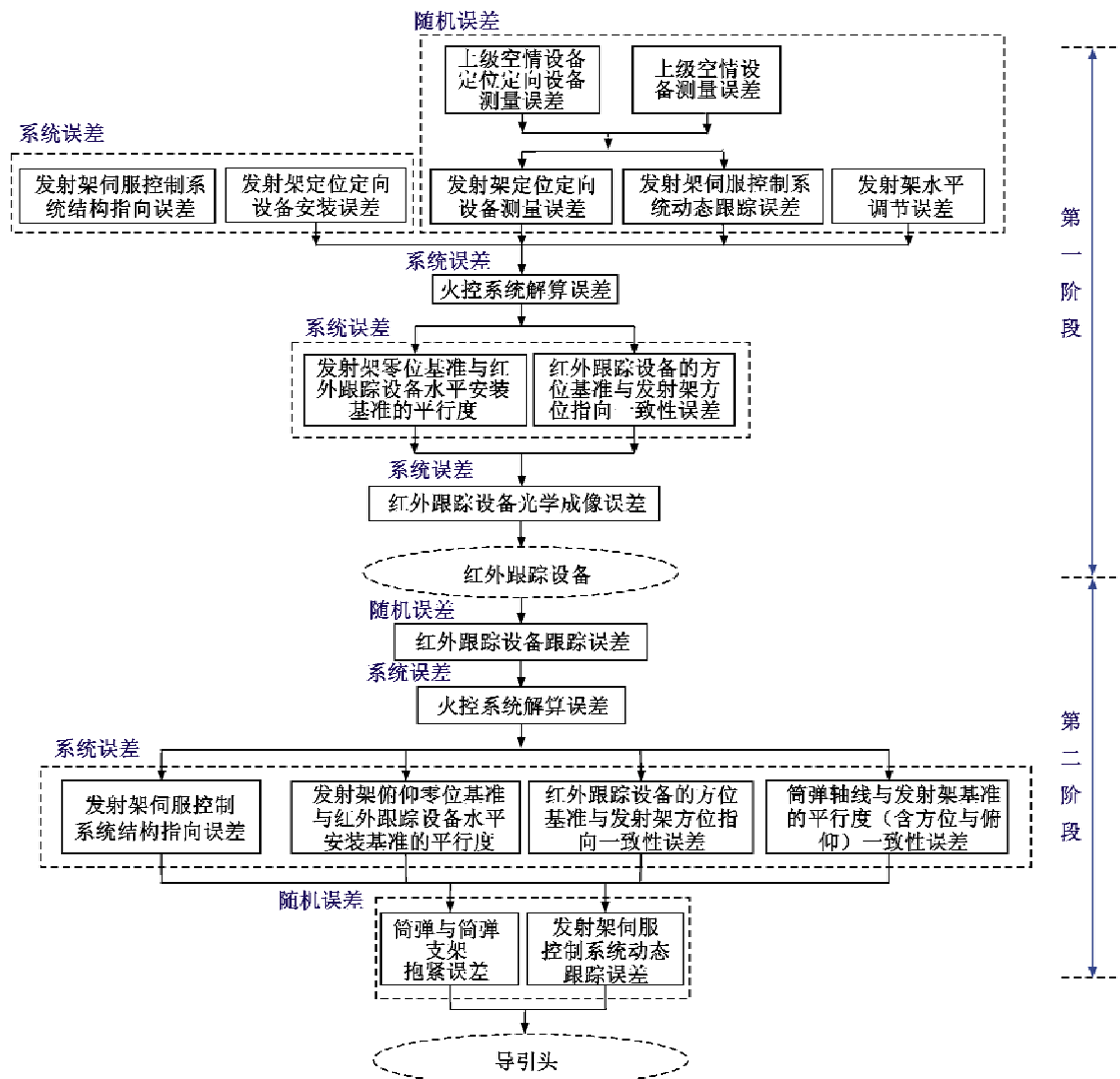


图 1 武器系统误差传递模型

Fig. 1 The error propagation model of weapon system

误差源根据其属性分为系统误差和随机误差。系统误差是在误差分析中可以认为不变的误差,如系统结

构装配误差、平行度误差等;随机误差是在误差分析中认为在一定范围内随机变化的误差,如搜索雷达和定位

定向等设备的测量误差、发射架的动态跟踪误差等。

2.1 误差源分析

本文对图 1 所示误差模型中的几项主要误差源展开分析。

2.1.1 系统误差

1) 发射架伺服控制系统结构指向误差,是指伺服控制系统经过零位校准后,电气零位与机械零位之间的误差。

2) 发射架俯仰零位基准与红外跟踪设备水平安装基准的平行度误差,是由于加工及装配工艺水平有限,造成红外跟踪设备安装后的零位基准与发射架零位基准在俯仰方向上的误差。

3) 红外跟踪设备的方位基准与发射架方位指向一致性误差,是由于加工及装配工艺水平有限,造成红外跟踪设备的方位基准与发射架方位指向零位之间的误差。

4) 筒弹轴线与发射架基准的平行度一致性误差,是由于加工及装配工艺水平有限,造成筒弹轴线在俯仰、方位两个方向与发射架零位基准的偏差。

2.1.2 随机误差

1) 上级空情设备测量误差,是由于设备自身的技术水平、检测算法能力有限等因素造成的测量误差。

2) 发射架伺服控制系统动态跟踪误差,是由于伺服控制系统跟踪算法的局限性造成的测量误差。

3) 红外跟踪设备跟踪误差,是由于目标跟踪算法水平的有限性,造成算法检测值与实际目标位置的偏差^[2]。

2.2 精度分析

目前,精度分析主要有两种方法,一种是解析方法,另一种是统计试验法(蒙特卡罗法)^[3-4]。国外还提出了协方差分析描述函数法(CADET)^[5-6]和统计线性化伴随法(SLAM)^[7]。

解析方法、蒙特卡罗法、CADET 法及 SLAM 法都是对武器单发射击精度进行分析的几种较为成熟的解析方法,国内外在武器设计中已普遍使用了这些方法。这 4 种方法都是基于导弹飞行仿真数学模型进行射击命中精度的分析。解析法求解繁杂,而且纯粹为理论分析,分析过程中往往要忽略很多因素,因此分析结果一般只能提供定性信息。蒙特卡罗法、CADET 法及 SLAM 法都是基于概率模型的建立和样本数量的选择,如果要使所得结果具有较高的置信度,则需要收集足够多的样本数。因此,这些方法都不适用于本文的精度分析。

在概率统计学中,系统误差是固有、不变的,而大多数情况的随机误差都是正态分布的^[1]。因此,本文所分

析的武器系统目标捕获概率可以被认为服从正态分布。

在图 1 所示的作战第一阶段期间,即上级空情设备交班给红外跟踪设备阶段的交班概率 P_1 ,认为近似服从二维正态分布概率密度函数^[8-9]

$$P_1 = \int_{-a/2}^{+a/2} \int_{-e/2}^{+e/2} \frac{1}{2\pi\sigma_A\sigma_E} e^{-\frac{(x-S_A)^2}{2\sigma_A^2} - \frac{(y-S_E)^2}{2\sigma_E^2}} dx dy \quad (1)$$

式中: a 为红外跟踪设备的方位视场角; e 为红外跟踪设备的俯仰视场角; S_A, S_E 分别为第一阶段期间,在方位与俯仰两个方向的总系统误差; σ_A, σ_E 分别为第一阶段期间,在方位与俯仰两个方向的总随机误差。

在图 1 所示的作战第二阶段期间,即红外跟踪设备交班给导引头阶段的交班概率 P_2 ,可认为近似服从正态分布概率密度函数^[9-10]

$$P_2 = \int_{-w/2}^{w/2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-\frac{(\beta-S_2)^2}{2\sigma_2^2}} d\beta \quad (2)$$

式中: w 为导引头电锁视场范围; S_2, σ_2 分别为第二阶段期间的总系统误差和总随机误差。

假设武器系统中各误差源互不相关,则式(1)和式(2)中总系统误差、总随机误差分别满足式(3)和式(4)。

总系统误差

$$S_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n S_i^2} \quad (3)$$

总随机误差

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} \quad (4)$$

式中: S_i, σ_i 指每个作战阶段期间的各项系统误差、各项随机误差。

最终,武器系统的目标捕获概率 P_t 为

$$P_t = P_1 \times P_2 \quad (5)$$

3 算例

基于实际作战使用需求、系统(设备)的技术水平、设备的加工工艺能力、人员对设备的操作能力等客观条件,对武器系统各项误差源分配合理的误差值如表 1、表 2 所示。

假定红外跟踪设备的方位视场角 $a = 12^\circ$ 、俯仰视场角 $e = 9^\circ$ 。以某便携式旋转导弹为例,导引头电锁视场取 $w = 1.5^\circ$ 。

利用式(1)及表 1、表 2,根据不同目标的运动特性、红外跟踪设备的作用距离以及武器系统的有效作战空域合理选择几个特征点计算交班概率。

上级空情设备导引发射架上红外跟踪设备捕获直升机、固定翼飞机一类目标,其过程的交班位置、运动特性及误差、交班概率 P_1 如表 3 所示。

利用式(2)及表 1、表 2,计算红外跟踪设备交班至

导引头的交班概率公式 P_2 , 结果: 系统误差为 $10.88'$, 随机误差为 $19.21'$, 交班概率 P_2 为 96.07% 。

表 1 随机误差分配表

Table 1 The error allocation table of random error

| 误差源 | 名 称 | 误差值 |
|----------------------|---------------------|-----|
| 上级空情设备测量误差 | 测距误差(1σ)/m | 60 |
| | 测角 方位/($'$) | 60 |
| | 误差 俯仰/($'$) | 60 |
| 定位定向设备测量误差 | 定位误差(1σ)/m | 1.5 |
| | 高程误差(1σ)/m | 10 |
| | 寻北误差/($'$) | 9 |
| 红外跟踪设备跟踪误差/($'$) | 方位 | 10 |
| | 俯仰 | 10 |
| 伺服控制系统动态跟踪误差/($'$) | 方位 | 9 |
| | 俯仰 | 7.2 |
| 发射架水平调节误差/($'$) | | 12 |
| 筒弹与筒弹支架抱紧误差/($'$) | | 6 |

表 2 系统误差分配表

Table 2 The error allocation table of systematic error

| 误差源 | 名 称 | 误差值 |
|------------------------------|--------|-----|
| 发射架定位定向设备安装误差 | | 5 |
| 筒弹轴线与发射架基准的平行度— 致性误差 | 方位(极差) | 6 |
| | 俯仰(极差) | 6 |
| 发射架俯仰零位基准与红外跟踪设备水平安装基准的平行度误差 | 极差 | 3 |
| 发射架伺服控制系统结构指向误差 | 方位 | 3 |
| | 俯仰 | 3 |
| 红外跟踪设备与发射架的方位指向一致性误差 | | 5 |
| 红外跟踪设备光学成像误差 | 方位 | 10 |
| | 俯仰 | 10 |
| 火控系统解算误差 | | 6 |

表 3 导引直升机、固定翼飞机类目标误差及交班概率

Table 3 The error and dropping probability of targets of helicopters and airplanes

| 交班位置/m | 系统误差/($'$) | | 随机误差/($'$) | | 交班概率 $P_1/\%$ |
|--------------------|--------------|------|--------------|-------|------------------|
| | 方位 | 俯仰 | 方位 | 俯仰 | |
| $R=10000$ $H=5000$ | 7.70 | 9.19 | 66.28 | 67.15 | 99.99 |
| $R=5000$ $H=4000$ | 7.70 | 9.19 | 75.79 | 76.55 | 99.95 |

由式(5)、表 3 及上述结果得到武器系统对直升机、固定翼飞机类目标, 在不同的交班位置的目标捕获概率, 见表 4。

表 4 武器系统目标捕获概率

Table 4 The target acquisition probability of weapon system

| 交班位置/m | 目标捕获概率 $P_1/\%$ |
|--------------------|-----------------|
| $R=10000$ $H=5000$ | 96.06 |
| $R=5000$ $H=4000$ | 96.02 |

由表 4 可知, 根据表 1 及表 2 所示的武器系统误差分配值, 武器系统对目标的捕获概率能够满足武器系统最终截获目标的要求。

4 结束语

武器系统开展精度分析的研究是为了实现目标捕获概率等指标要求, 目标捕获概率是影响系统作战效能的一个重要因素, 也是系统论证设计的主要依据之一^[10], 因此本文对兵组架射导弹武器系统精度链计算方法的研究具有重要意义。当然, 本文所选取的精度链计算模型被认为近似服从正态分布, 是理想化模型, 实际系统则相对复杂些; 另一方面, 本文在分析误差源时主要考虑了一些误差系数比较大的误差源, 忽略了权重较小的量。由于上述两个原因, 采用本文所描述的精度链计算方法得到的理论计算值与实际情况存在微小的偏差, 但对于武器系统设计、论证工作仍具有重要的指导意义, 能够有效约束武器系统的分系统、设备的设计、加工与生产, 为武器系统开展地面试验提供有力的理论支撑。

参考文献

- [1] 李蕾, 冯浩. 作战系统武器通道精度分配方法[J]. 中国舰船研究, 2007, 2(4): 37-40. (LI L, FENG H. Method of precision distribution over weapon channel in combat systems [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2007, 2(4): 37-40.)
- [2] 赵建军, 姚刚, 桑德一. 弹炮结合武器系统精度分析[J]. 战术导弹技术, 2013(2): 56-65. (ZHAO J J, YAO G, SANG D Y. The accuracy analysis of missile-gun weapon system [J]. Tactical Missile Technology, 2013(2): 56-65.)
- [3] 张启信, 王辉, 陈永江, 等. 基于计算机仿真技术的导弹精度分析方法研究[J]. 战术导弹技术, 2001(2): 35-46. (ZHANG Q X, WANG H, CHEN Y J, et al. Research on precision analysis method based on computer simulation [J]. Tactical Missile Technology, 2001(2): 35-46.)
- [4] 卢燕, 舒传模. 蒙特卡洛法在导弹末制导雷达对目标的位置捕获概率估计中的应用[J]. 战术导弹技术, 2005(1): 55-58. (LU Y, SHU C M. The application of Monte Carlo method to estimation of position acquisition probability of terminal guidance radar [J]. Tactical Missile Technology, 2005(1): 55-58.)
- [5] TAYLOR J H. Handbook for the direct statistical analysis of missile guidance system via CADET [R]. Massachusetts: Analytic Sciences Corporation, 1975.
- [6] 花寅东, 赵利强, 邹士新. 导弹遥控过程的 CADET 算法精度分析[J]. 电光与控制, 2011, 18(11): 27-30. (HUA Y D, ZHAO L Q, ZOU S X. Precision analysis of missile's remote control process based on CADET algorithm [J]. Elec-

- infrared camera using curve matching framework[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2012(1): 99-106.
- [7] LIU R M, LU Y H. Infrared target tracking in multiple feature pseudo-color image with kernel density estimation[J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55(6): 505-512.
- [8] YAN J B, LI X J, XIN Y, et al. Compressive sensing by learning a Gaussian mixture model from measurements [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 24(1): 106-119.
- [9] PEKKA P, JONI K K, JARMO I. Feature representation and discrimination based on Gaussian mixture model probability densities—practices and algorithms[J]. Pattern Recognition, 2006, 39(7): 1346-1358.
- [10] DALAL N, TRIGGS B. Histograms of oriented gradients for human detection[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), San Diego, 2005: 886-893.
- [11] WU B F, KAO C C, JEN C L, et al. A relative-discriminative-histogram-of-oriented-gradients-based particle filter approach to vehicle occlusion handling and tracking [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(3): 4228-4237.
- [12] MASATAKA O, KEI K, MASAFUMI H. Laser-based pedestrian tracking in outdoor environments by multiple mobile robots[J]. Sensors, 2012, 12(11): 14489-14507.
- [13] MOSHOU D, PANTAZI X E, KATERIS D, et al. Water stress detection based on optical multisensor fusion with a least squares support vector machine classifier [J]. Biosystems Engineering, 2014, 117(2): 15-22.

(上接第 26 页)

- ear systems with a periodic event-triggering communication scheme[J]. IET Signal Processing, 2013, 7(8): 754-765.
- [10] JIANG Z P, WANG Y. Input-to-state stability for discrete-time nonlinear systems [J]. Automatica, 2001, 37(1): 857-869.
- [11] 吴晨, 许哲, 何婧, 等. 网络控制系统建模与控制[J]. 电光与控制, 2009, 16(9): 37-39, 43. (WU C, XU Z, HE J, et al. Modeling and control of the networked control systems[J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(9): 37-39, 43.)
- [12] 吴晨, 方国华, 许化龙. 弹载 1553B 总线网络控制系统 Petri 网建模与性能分析[J]. 电光与控制, 2010, 17(2): 48-51, 62. (WU C, FANG G H, XU H L. Petri net based modeling and performance analysis of missile networked control system base on MIL-STD-1553B[J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(2): 48-51, 62.)

(上接第 88 页)

- quantification via boundary identification of flight performance margin[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(4): 977-985.
- [9] SAFONOV M G, TSAO T C. The unfalsified control concept and learning[J]. Transactions on Automatic Control, 1997, 42(6): 843-847.
- [10] CHEN K X, LI S Y. Unfalsified adaptive PID control with a fading memory cost function[C]//The 33rd Chinese Control Conference, Nanjing, 2014: 28-30.
- [11] 任涛, 高振华, 祖国旗, 等. 去伪控制方法的研究与应用[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2009, 30(12): 1678-1681. (REN T, GAO Z H, ZU G Q, et al. Research and application of unfalsified control [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2009, 30(12): 1678-1681.)
- [12] ZIPFEL P H. Modeling and simulation of aerospace vehicle dynamics[M]. Reston: AIAA, 2000: 367-481.

(上接第 92 页)

- tronics Optics & Control, 2011, 18(11): 27-30.)
- [7] ZARCHAN P. Complete statistical analysis of nonlinear missile guidance systems-slam [J]. Journal of Guidance and Control, 1979, 2(1): 71-78.
- [8] 付海峰, 刘华伟, 张宗麟. 中距主动制导空空导弹目标截获概率仿真计算 [J]. 电光与控制, 2007, 14(3): 55-58. (FU H F, LIU H W, ZHANG Z L. Simulated computation of target-acquisition probability of medium-range active-guided AAM[J]. Electronics Optics & Control, 2007, 14(3): 55-58.)
- [9] 付昭旺, 于雷, 寇英信, 等. 导弹协同制导中未交接班目标截获概率研究[J]. 弹道学报, 2012, 24(4): 31-36. (FU Z W, YU L, KOU Y X, et al. Target acquisition probability in midcourse and terminal guidance handing-off for cooperative guidance of missile [J]. Journal of Ballistics, 2012, 24(4): 31-36.)
- [10] 谢希权, 易华. 多目标攻击空空导弹的目标截获概率分析 [J]. 电光与控制, 2001, 8(2): 33-36. (XIE X Q, YI H. Analysis of AAM acquisition probability in multi-target attacking [J]. Electronics Optics & Control, 2001, 8(2): 33-36.)