

doi: 10.7690/bgzdh.2018.09.017

2 维弹道修正技术研究综述

谢浩怡, 杨国伟, 王全伟, 翟文军

(豫西工业集团研发中心, 河南 南阳 471000)

摘要: 为适应迅速发展世界军事变革, 满足信息化战争中精确打击的需要, 对 2 维弹道修正技术进行研究。介绍 2 维弹道修正弹药的工作原理, 针对气动布局、卫星定位、姿态测量和执行机构等关键技术, 分析弹道修正技术的国内外研究现状, 总结弹道修正技术的发展趋势。研究表明: 该技术研究有利于提高炮弹的落点精度, 可为从事弹道修正技术研究的工作人员提供参考。

关键词: 2 维弹道修正; 气动布局; 卫星定位; 姿态测量; 执行机构

中图分类号: TJ30 **文献标志码:** A

Summarize of Two-dimensional Trajectory Correction Technology

Xie Haoyi, Yan Guowei, Wang Quanwei, Zhai Wenjun

(R&D Center, Yuxi Industries Group Co., Ltd., Nanyang 471000, China)

Abstract: For adapt to the rapid development of world-military revolution and satisfy the need of precision strike in information warfare, this paper research on the technology of two-dimensional trajectory correction projectile. This paper introduce the principle of operation and the key technique about aerodynamic configuration, satellite positioning, attitude measurement, execution mechanism of two-dimensional trajectory correction projectile, analyze the research status of domestic and overseas, summary the development tendency. The results show this technology is beneficial to improve the accuracy of shot placement. This paper provides reference for the personnel engaged in the research of trajectory correction technology.

Keywords: two-dimensional trajectory correction; aerodynamic configuration; satellite positioning; attitude measurement; correction mechanism

0 引言

现代复杂战场环境和炮兵侦察校射技术的快速发展, 对火炮作战方式、生存能力等方面提出了更高要求, 现代新型火炮正向高精度、远射程、高射速、高毁伤和高机动的方向发展。智能弹药作为新型弹药发展趋势之一, 因其低成本、高精度等优势, 成为各国新型弹药发展的重点。智能化弹药的发展也成为战争模式与战争形态转变的重要推动力量。2 维弹道修正技术, 是在 1 维弹道修正技术的基础上发展而来, 和 1 维弹道修正弹同样有着低成本、高可靠性等特点, 各国正尝试利用弹道修正技术对常规炮弹进行改装, 将其应用到中大口径榴弹上, 能够有效提高火炮射击精度, 从而提高火炮战场生存能力和机动性。

总之, 2 维弹道修正技术的应用, 不仅可以大幅度减小现有制式弹药的散布, 提高火炮的火力打击精度, 以较低的成本实现常规弹药的精确化, 同时还可以减少弹药消耗, 减轻后勤负担, 符合精准

陆军武器装备的发展方向; 因此, 发展 2 维弹道修正技术, 可以弥补现役炮弹射击精度的不足, 促进我国常规兵器向远射程、高精度、大威力方向发展, 是提高我军炮兵装备水平和作战能力的必然需要。

1 工作原理

发射前, 通过感应装定器将卫星星历、气象参数、飞控参数、姿态参数及引信作用模式等参数装定至修正组件。

发射后, 弹上电子设备上电, 弹上系统启动, 卫星定位单元快速定位, 弹载计算机实时接收卫星定位单元提供的位置、速度信息, 进行弹道解算, 生成执行机构指令信号。姿态测量单元实时输出弹体及执行机构的滚转姿态角和角速度信息; 执行机构控制模块根据指令控制执行机构动作, 改变弹丸飞行姿态, 实现弹道修正。

弹道修正系统工作原理流程见图 1。弹道修正弹工作流程见图 2。

收稿日期: 2018-05-24; 修回日期: 2018-07-05

作者简介: 谢浩怡(1990—), 男, 河南人, 硕士, 工程师, 从事飞行器动力学与控制研究。

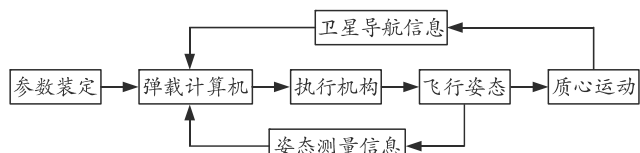


图1 弹道修正系统工作原理流程

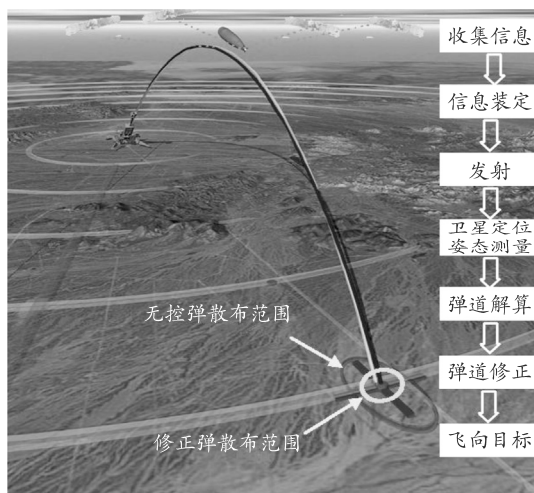


图2 弹道修正系统工作原理流程

2 关键技术

2.1 2维弹道修正组件总体设计技术

修正组件总体技术主要是根据2维弹道修正弹的作战使用要求，开展各主要弹上模块的结构、功能设计及小型化、模块化、一体化设计，完成总体方案论证和指标分配。

通过理论分析、数值模拟、地面仿真和飞行试验相结合的方法，提出定位单元、姿态测量单元、执行机构、引信、战斗部和感应装订等的总体技术方案，开展弹体结构与气动布局、系统误差及指标分配、修正策略、卫星天线、修正组件小型化与一体化设计等技术研究；结合数值仿真和风洞试验，验证气动布局方案；通过试验样弹的飞行试验，验证总体技术方案。

2.2 高动态卫星定位及高转速姿态测量技术^[1]

为适应2维弹道修正弹高动态飞行条件下弹道测量的要求，卫星定位单元必须在高转速、高加速度和高速度飞行条件下实现可靠定位导航，实时给出弹体位置和速度信息。

研究高动态条件下卫星信号的快速捕获与跟踪算法，应保证卫星定位单元在弹体旋转条件下，在升弧段和降弧段均能可靠接收卫星信号。

笔者采用高精度、大量程、无累计误差的姿态测量单元，设计合理的信号处理电路，并对信号通

道进行电磁兼容设计，降低各种干扰对信号的影响，提高信噪比，设计合理的解算算法，实现准确的角度、角速度解算。

2.3 执行机构及控制技术^[2]

弹道修正通过控制执行机构产生法相力，改变弹丸飞行姿态，控制弹丸飞行方向，完成弹道修正。实现法相控制效果的方式有2种：一种是气动力控制，即依靠空气动力来产生法向力；一种是直接力控制，即依靠在质心附近喷出的推进剂燃气的直接法相反作用来产生法向力。直接力控制主要有线性电动舵机、电磁式舵机和可控滚转舵等方式；直接力控制主要有固体脉冲发动机和射流元件等方式。

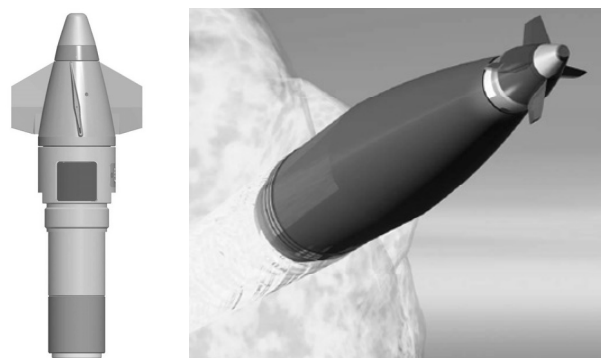
弹丸安装的执行机构及所采用的控制技术要保证弹体启控后的稳定性，即在提升弹道修正能力的前提下保证弹体的飞行稳定性不被破坏，同时，还应满足弹体对舵机带宽的要求，应保证其快速性，减小其延迟时间，提高切换频率，保证修正效率。

3 国内外研究现状

3.1 国外发展现状

3.1.1 美国 PGK 项目

2005年8月，美国作战弹药系统项目管理办公室启动“精确制导组件”项目，ATK公司、雷声公司和BAE公司同时开始进行PGK(precision guidance kit)项目研究。2007年5月，ATK公司竞标胜出，正式承担PGK研制任务，PGK及155mm 2维弹道修正弹如图3所示。



(a) PGK 修正组件

(b) 155 mm 修正弹

图3 PGK及155mm 2维弹道修正弹

2008年5月，ATK公司及美国陆军在尤马靶场对155mm榴弹用PGK成功进行了一系列飞行测试，射程14km，落点偏差17.5m。同年8月，ATK公司将原155mm炮弹用PGK安装到105mm M927炮弹上，在尤马靶场进行了试射。试验结果表明：

PGK 可以很好地控制 105 mm 炮弹, 满足性能要求。美国陆军于 2010 年 5 月对 PGK 进行测试, 安装了 PGK 的 M549A1 式火箭助推 155 mm 榴弹, 其中 90% 达到了圆概率误差低于 17 m 的水平, 多数炮弹的脱靶半径为 3~7 m。

2010 年, ATK 公司对 PGK 进行了厂商引信鉴定试验, 包括运输/振动试验(冷/热气温条件下)、温度/湿度试验、极冷/极热温度条件下的存储试验、热冲击试验松散包装及战术振动试验(冷/热气温条件)以及 2.1 m 高处跌落试验(冷/热气温条件)。鉴定试验结果为: 安全性为 100%; 可靠性为 100%。

XM1156 式精确制导组件于 2013 年春季装备部队。2012 年 10 月, 美国德克萨斯州布利斯堡第 27 野战炮兵团第 4 营的士兵在尤马靶场发射了 24 发配装 XM1156 式 PGK 的 155 mm 炮弹, 成为首支发射该 2 维弹道修正炮弹的部队。

3.1.2 以色列“Top Gun”项目

21 世纪初, 以色列飞机工业公司 (IAI) 开始进行 2 维弹道修正组件技术研究。2010 年 6 月, IAI 公司推出了 Top Gun 2 维弹道修正组件。Top Gun 配有 155 mm 炮弹, 可由 39 倍口径和 52 倍口径 155 mm 榴弹炮发射, 采用 GPS/INS 制导, 安装有 4 片控制舵, 圆概率误差可达 20 m, 且不受射程影响。Top Gun 外部为一个带滑动弹环或轴承的整流罩, 4 片控制舵呈十字形排列, 发射前处于收缩状态, 位于壳体内, 发射后打开, GPS 接收机和引信编程信息通过壳体传入的方式实现装定。目前, Top Gun 已完成了轴承、作动器等部件抗高过载技术研究, 下一步工作是演示控制舵的修正能力, 然后与 GPS 制导系统一起进行全面试验, “Top Gun”弹道修正组件如图 4。



图 4 “Top Gun”弹道修正组件

3.2 国内发展现状

国内近年来针对 2 维弹道修正弹的各项关键技

术开展了系列研究, 并取得较大进展, 在总体技术、修正策略、气动布局、弹道解算、电机及控制、姿态解算、卫星定位等方面取得了系列性成果。

针对 2 维修正弹总体布局及其气动特性, 张通等^[3]建立 3 种不同尾翼设计形式的弹体模型, 仿真其阻力系数、升力系数、俯仰力矩系数变化规律, 得到满足全弹道飞行稳定性的弹体模型方案, 为尾翼稳定迫击炮弹的研究提供参考; 郝永平等^[4]建立固定翼 2 维修正弹 3 维模型, 采用滑移网格计算技术计算分析得到修正部旋转舵力矩及控制力随马赫数的变化规律; 胡金波等^[5]通过仿真一对 NACA 翼型固定鸭舵式布局 2 维修正迫弹在不同攻角和不同马赫数时的力和力矩系数变化规律, 并仿真弹体表面的压力分布和来流速度分布, 所得气动参数符合修正弹外弹道学规律; 吴萍等^[6]通过风洞实验对固定鸭舵 2 维弹道修正弹的气动特性随马赫数、攻角以及舵偏角的变化规律进行研究。实验结果表明: 在一定范围内增大舵偏角将增大阻力系数、升力系数、俯仰力矩系数以及滚转力矩系数。

针对 2 维修正弹修正策略。曾耀华等^[7]基于非线性逆系统原理, 采取三时标分离方法, 设计 3 个子系统控制器。基于 Lyapunov 函数法设计线性化系统控制器。该系统能有效地实现解耦控制, 并具有较好的动态性能; 谢克峰等^[8]提出一种伸缩式鸭舵修正方案, 分析最佳起始点和启动角度, 仿真得到气动力系数和修正力, 并通过风洞实验验证其仿真结果。

针对 2 维修正弹执行机构气动特性及控制方法。张冬旭等^[2]介绍了国内外对 2 维弹道修正弹修正机构的研究状况, 列举了应用在 2 维弹道修正弹上不同类型的修正机构, 阐述了不同类型修正机构的工作原理、特点以及各自的局限性, 最后, 对不同类型修正机构特性进行了比较, 给出了相关技术指标, 对比了各自的优缺点; 郝永平等^[9]建立采用不同气动布局鸭舵修正机构的舵机模型, 通过仿真各舵机模型验证其修正能力在鸭舵靠前时较大, 结果表明: 在满足飞行稳定的情况下, 修正机构应靠近导引头端面布置; 张嘉易等^[10]通过建立不同形状、不同面积鸭舵的气动模型, 分析不同形状的舵片的修正能力, 确定大展弦比的舵翼能提供更大的升力和偏航力; 胡付超等^[11]通过分析永磁电机电磁转矩和机械特性, 建立应用串接电阻调速方法的模拟样机。试验结果表明: 该方法控制效果较好, 并且相应速度较快。

针对2维修正弹弹道解算。徐劲祥^[12]建立了脉冲控制弹道修正弹的六自由度弹道模型,通过分析末端修正典型弹道以及脉冲作用点对脱靶量的影响,得到在质点附近施加直接脉冲控制力能取得较好控制效果的结论;Jun Yao等^[13]针对已知目标点坐标基于最优控制理论预测理论弹道,根据预测弹道落点偏差设计的弹道修正控制方法,能保证较小的脱靶量和较少的控制能量消耗。

针对2维修正弹卫星定位及姿态解算,雷芳等^[14]采用四元数法验证基于磁探测技术和微机械陀螺技术的姿态解算方案,通过对比三角函数法解算结果,验证了四元数法的可行性和有效性;高峰等^[15]分析磁场高度、磁场异常、弹体磁场干扰和系统噪声对地磁信号的干扰,提出相应的抗干扰措施,通过滚转角辨识系统静态试验和动态试验,验证了采取抗干扰措施所采集的地磁信号稳定可靠;李元等^[16]分析了国外基于GPS定位的弹道修正弹的发展情况,介绍了卫星定位的特点和1维、2维弹道修正弹的控制参数结算策略和控制方法,弹道修正效果明显。

4 结束语

全方位、自主性、智能化的弹道修正弹药是修正弹药发展的理想目标。弹道修正弹药的研制应考虑多种方式和线路,可以应用多种先进的技术和方法。弹道修正弹药正随着惯性导航、卫星定位和机电系统等相关应用技术的发展而不断成熟;深化弹道修正技术的理论研究,着力推进试验研究进程,研制出高精度、高可靠性的弹道修正弹药对提高武器装备水平具有重要的现实意义和广阔的应用前景。目前,国内以理论研究为主,还有待于进行工程应用。

参考文献:

- [1] 岳明凯, 曲家惠. 弹道修正弹药的关键技术和发展趋势[J]. 飞航导弹, 2009, 39(9): 25-28, 34.
- [2] 张冬旭, 姚晓先, 郭致远. 弹道修正执行机构综述[J]. 导航定位与授时, 2014, 1(2): 39-45.
- [3] 张通, 刘秋生, 赵晓利. 二维弹道修正弹气动特性与稳定性仿真[J]. 指挥控制与仿真, 2015, 37(2): 107-110, 115.
- [4] 郝永平, 孟庆宇, 张嘉易. 固定翼二维弹道修正弹气动特性分析[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 33(3): 171-173, 177.
- [5] 胡金波, 杨新民, 何颖. 二维弹道修正迫弹气动特性仿真[J]. 四川兵工学报, 2015, 7(12): 43-47.
- [6] 吴萍, 陈少松, 杨晋伟. 旋转控制固定鸭舵二维弹道修正弹气动特性[J]. 弹道学报, 2014, 26(3): 6-10.
- [7] 曾耀华, 王华, 韩晶. 基于非线性动态逆的弹道修正控制设计研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 31(3): 131-134.
- [8] 谢克峰, 张合, 唐玉发. 伸缩式鸭舵二维修正策略和修正能力[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 27(4): 477-482.
- [9] 郝永平, 郭煜洋, 张嘉易. 二维弹道修正弹修正机构气动布局研究[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 34(6): 121-124.
- [10] 张嘉易, 王广, 郝永平. 二维弹道修正弹鸭舵修正机构气动特性研究[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 34(2): 88-91.
- [11] 胡付超, 杨明海, 郝永平. 弹道修正弹永磁电机的控制方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2014, 35(1): 73-75, 82.
- [12] 徐劲祥. 弹道修正弹六自由度弹道仿真研究[J]. 兵工学报, 2007, 29(4): 411-413.
- [13] YAO J, W X, W X. Solution for trajectory correction optimization based on generalized work principle[C]// Industrial Electronics and Applications. IEEE, 2010: 797-801.
- [14] 雷芳, 王华, 焦国太. 弹道修正弹药的姿态测量技术研究[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 30(4): 123-125, 132.
- [15] 高峰, 张合, 程翔. 弹道修正引信中的地磁信号及其抗干扰研究[J]. 弹道学报, 2008, 30(4): 45-48.
- [16] 李元, 王海川. 基于卫星定位的弹道修正弹控制参数解算方法[J]. 指挥控制与仿真, 2015, 37(3): 8-12, 24.