

现代引信技术丛书



Technology of Trajectory Correction Fuze

引信弹道修正技术

申强 李东光 纪秀玲 时景峰 © 等著

- 卫星定位、惯性弹道测量技术
- 弹道参数辨识与落点预测技术
- 修正执行机构气动分析与计算
- 一维、二维弹道修正引信设计



国防工业出版社

National Defense Industry Press

引信弹道修正技术

申强 李东光 纪秀玲 时景峰 等著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书对引信弹道修正技术的概念、弹道修正引信分类以及弹道修正引信技术的发展过程进行了介绍,对比分析了各种类型弹道修正引信的主要特点。介绍了常用坐标系及外弹道模型,分析了引信弹道修正技术对改善弹药射击精度的作用。分别对卫星定位和惯性传感器测量弹丸飞行弹道的方法进行了介绍,深入研究了弹丸飞行高动态条件下卫星定位接收机基带处理技术。研究了几种常用的弹道辨识和落点预估方法,比较分析了不同弹道模型用于落点预估的精度和特点。针对一维、二维弹道修正引信不同修正机构的特点进行了气动计算,比较研究了各种修正机构的气动特性,对一维弹道修正引信工作原理、修正策略、射程修正误差进行了研究和分析,对二维弹道修正引信工作原理、基于固定偏角舵修正执行机构的工作原理和特点进行了分析,研究了针对固定偏角舵的弹丸飞行稳定性及控制机理。

本书可作为武器系统设计专业本科生、兵器科学与技术研究生的参考教材,也可供引信技术、弹箭控制、灵巧弹药等相关领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

引信弹道修正技术/申强等著. —北京:国防工业出版社,2016.3
(现代引信技术丛书)

ISBN 978-7-118-10752-4

I. ①引… II. ①申… III. ①武器引信—弹道学 IV. ①TJ43

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第117009号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 13¼ 字数 270千字

2016年3月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 69.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 88540777

发行邮购:(010) 88540776

发行传真:(010) 88540755

发行业务:(010) 88540717

《现代引信技术丛书》

编委会

- 名誉主任 马宝华
执行主任 范宁军 娄文忠
编委会委员 (按姓氏拼音排序)
陈慧敏 邓宏彬 冯 跃 何光林 李世中
李晓峰 牛兰杰 申 强 宋荣昌 隋 丽
王军波 吴炎烜 熊永家 杨 喆 张 亚
丛书策划 王京涛
秘 书 吴炎烜 冯 晨

审委会

- 主 任 朵英贤
副 主 任 黄 峥 秦光泉 谭惠民 游 宁
审委会委员 (按姓氏拼音排序)
蔡瑞娇 陈科山 崔占忠 冯顺山 傅调平
高春清 韩子鹏 胡景林 李长福 李世义
刘明杰 刘小虎 牛少华 齐杏林 施坤林
石 坚 石庚辰 宋道志 徐立文 徐立新
伊福廷 袁 正 张菁华 邹金龙

引信是利用目标、环境或指令信息，在预定的条件下解除保险，并在有利的时机或位置上起爆或引燃弹药战斗部装药的控制系统（或装置）。弹药是武器系统的核心部分，是完成既定战斗任务的最终手段。引信作为弹药战斗部对目标产生毁伤作用或终点效应的控制系统（或装置），始终处于武器弹药战场终端对抗的最前沿。大量实战案例表明：性能完善、质量可靠的引信能保证弹药战斗部对目标实施有效毁伤，发挥武器弹药作战效能“倍增器”的作用；性能不完善的引信则会导致弹药在勤务处理时、发射过程中或发射平台附近过早炸，遇到目标时发生早炸、迟炸或瞎火，不仅贻误战机，还可能对己方和友邻造成严重危害。

从严格的学科分类意义上讲，“引信技术”并不是一个具有相对独立的知识体系的学科或专业，而是一个跨学科、专业的工程应用综合技术领域。因此，现代引信及其系统是一类涉及多学科、专业知识的军事工程科技产品。纵观历史，为了获取战争对抗中的优势，人们总是将自己的智慧和最新科技成果优先应用于武器装备的研制和发展。引信也不例外，现代引信技术的发展一方面受到武器弹药战场对抗的需求牵引，另一方面受到当代科学技术进步的发展推动。


近30年来，随着人类社会进入以信息技术为主要特征的知识经济时代，作战方式发生了深刻的变化，目标环境也日趋复杂。为适应现代及未来作战需求，高新技术武器装备得到快速发展，弹药战斗部新原理、新技术层出不穷，促使现代引信技术在进一步提高使用安全性和作用可靠性的同时，朝着多功能、多选择，以及引爆-制导一体化、微型化、灵巧化、智能化和网络化的方向快速发展。

“现代引信技术丛书”共12册，较系统和客观地反映了近30年来现代引信技术部分领域的理论研究和技術发展的现状、水平及趋势。丛书包括：《激光引信技术》《中小型智能弹药舵机系统设计与应用技术》《引信安全系统分析与设计》《引信环境及其应用》《引信可靠性技术》《高动态微系统与MEMS引信技术》《现代引信装配工程》《引信弹道修正技术》《高价值弹药引信小子样可靠性评估与验收》《弹目姿轨复合交会精准起爆控制》《侵彻弹药引信技

术》《引信 MEMS 微弹性元件设计基础》。

这套丛书是以北京理工大学教师为主，联合中北大学及相关科研单位的教师 and 研究人员集体撰写的。这套丛书的特色可以概括为：内容厚今薄古；取材内外兼收；突出设计思想；强调普适方法；注重科技创新；适应发展需求。这套丛书已列为 2015 年度国家出版基金项目，既可作为从事兵器科学与技术，特别是从事弹药工程和引信技术的科技工程专业人员和管理人员的使用工具，也可作为高等学校相关学科专业师生的教学参考。

这套丛书的出版，对进一步推动我国现代引信技术的发展，进而促进武器弹药技术的进步具有重要意义。值此丛书付梓之际，衷心祝贺“现代引信技术丛书”的出版面世。



2016 年 1 月

引信弹道修正技术是指在引信常规安全与解除保险和发火控制功能的基础上,增加弹道参数测量、控制和执行装置,在原有射击操作过程基本不变,保证弹丸飞行稳定且按正常弹道飞行的前提下对弹道进行微小的调整,从而减小弹丸落点散布,提高弹丸射击精度的一门技术。

20世纪90年代,北京理工大学马宝华教授提出在引信上安装“鸭式舵”对弹道进行简易修正的弹道修正引信概念。国外弹道修正引信概念也是在这一时期提出的。弹道修正引信概念的提出是引信行业乃至弹药行业的一个重要创新,它把引信从传统的炸点高度维精确控制向射程纵向、横向两个维度进行了拓展,是引信功能的自然延伸。尤其是针对采用底排减阻增程、火箭增程或二者复合增程技术的增程类弹药,配用弹道修正引信,可在不需对弹丸进行任何改动,以及装药量不变的前提下获得精度的大幅度提高。因此,引信弹道修正技术已成为国内外引信技术的重要发展方向。目前国内相关高校、研究所、工厂正在竞相开展一维、二维弹道修正引信的研制和关键技术攻关工作。

对于引信弹道修正技术,国内外在理论、产品设计、试验等方面开展了大量研究工作,取得了较大进展,在研制过程中也积累了大量资料,发表了不少论文。但是,迄今为止还未见对相关研究成果较为系统的介绍,国内各科研院所、企业在从事有关引信弹道修正技术的研究和工程研制过程中,也没有较为系统、全面的论著可供借鉴。为此,著者以所在的北京理工大学引信弹道修正技术科研团队十多年科学研究成果为主,参阅部分国内外相关资料编写了本书。

引信弹道修正技术涉及技术领域宽泛,如引信技术、弹道学、控制理论、制导技术、测试技术、机械设计、气动力学、武器系统总体技术等多学科理论和技术,但引信弹道修正技术并不是这些知识的简单组合和应用,而是在这些知识的基础上形成了独特的技术规律。本书在总结著者所在团队多年的研究成果和研制经验、充分借鉴行业内相关研究成果的基础上,对引信弹道修正技术所涉及的关键技术问题进行了重点阐述,以一维、二维弹道修正引信为例对弹道修正引信设计过程与相关技术进行了总结和归纳。本书紧密联系工程设计实践,具有较强的实用性,是国内第一本对引信弹道修正技术进行较为全面总结

和系统分析的学术著作，对弹道修正引信及弹道修正弹药研制具有一定参考价值。由于引信弹道修正技术研究还在继续深入及不断发展中，本书所列相关内容在广度和深度上存在一些不足，有些问题还只是阶段性的成果，因而内容上还需不断充实和发展。

本书是著者与课题组成员多年的研究成果总结。首先感谢马宝华教授，从引信弹道修正概念到某些具体关键技术，从课题组成员的研究方向确定到科研项目的立项都凝聚了马宝华教授的大量心血。申强编写了第1、3、5、7、8章；纪秀玲编写了第6章；李东光、时景峰编写了第2、4章。本书由申强统稿。闫刚、曾广裕、刘旭东、龚如、王瑞石、万林、王少飞、李淼等同学，以及“引信动态特性国防科技重点实验室”，在本书编写过程中给予了大力的支持与帮助，在此表示感谢。

此外，本书部分内容还参考了国内外同行专家、学者的最新研究成果，在此一并表示诚挚的谢意！

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

著 者

2016年2月于北京理工大学

第1章 绪论	1
1.1 引信弹道修正技术概念	1
1.1.1 引信弹道修正技术基础知识	1
1.1.2 弹道修正引信的分类	2
1.2 引信弹道修正技术发展过程	2
1.2.1 弹道修正功能是引信炸点控制功能的扩展	2
1.2.2 弹道修正引信技术的发展过程	3
1.2.3 国外典型弹道修正引信技术	5
1.2.4 国内弹道修正引信发展过程	9
第2章 常用坐标系及外弹道模型	11
2.1 常用坐标系	11
2.1.1 坐标系定义	11
2.1.2 各坐标系之间的关系	13
2.2 引信弹道修正技术常用外弹道模型	16
2.2.1 3D 质点弹道模型	17
2.2.2 3D 修正质点弹道模型	18
2.2.3 刚体弹道模型	19
2.3 引信弹道修正技术对改善弹药射击精度的作用	20
2.3.1 射击准确度与射击密集度	20
2.3.2 引信弹道修正技术对精度的改善作用	23
第3章 卫星定位接收机弹道测量技术	24
3.1 卫星定位系统概述	24
3.1.1 主要卫星定位系统发展历程	24
3.1.2 卫星定位系统组成	25
3.1.3 卫星定位基本原理	26
3.1.4 卫星定位接收机启动方式及典型技术指标	27
3.2 卫星定位技术在弹道修正引信中的应用	28
3.2.1 国外小型化弹载卫星定位接收机发展现状	28

3.2.2	国内小型化弹载卫星定位接收机发展状况	32
3.3	弹载高动态卫星定位接收机特性分析	33
3.3.1	高动态环境的特点及对接收机定位的影响	33
3.3.2	接收机动态性能分析	35
3.3.3	弹丸飞行动态分析及对接收机性能的影响	39
3.3.4	天线旋转对接收信号的影响分析	43
3.4	高动态卫星信号矢量跟踪技术	48
3.4.1	常规标量跟踪原理及特点	48
3.4.2	自适应矢量跟踪原理及特点	50
3.4.3	自适应矢量跟踪模型	52
3.4.4	自适应矢量跟踪方法试验验证及性能分析	59
第4章	惯性传感器弹道测量技术	62
4.1	旋转弹外弹道加速度测量	62
4.1.1	基于加速度传感器旋转弹加速度测量原理	62
4.1.2	基于加速度传感器旋转弹加速度测试系统设计	63
4.2	火箭弹基于惯性测量组合的外弹道测量	70
4.2.1	捷联惯性测量系统概述	70
4.2.2	捷联式惯性测量系统工作原理	70
4.2.3	用于二维弹道修正引信的捷联惯性测量系统数学模型	73
4.2.4	仿真及结果	79
第5章	弹道辨识及落点预测技术	83
5.1	利用弹体轴向加速度测量值的弹道辨识方法	83
5.1.1	数学模型	83
5.1.2	靶场飞行试验验证	85
5.1.3	传感器误差对解算精度影响	87
5.2	基于卫星定位测量的卡尔曼滤波弹道辨识方法	87
5.2.1	扩展卡尔曼滤波算法原理	88
5.2.2	基于2D质点弹道模型的卡尔曼滤波弹道辨识方法	90
5.3	基于修正质点模型误差补偿的轨迹预估方法	93
5.3.1	轨迹预估方法	94
5.3.2	扩展卡尔曼滤波器设计	96
5.3.3	半实物仿真与验证	98
5.4	各种落点预测方法的比较分析	100
5.4.1	主要参数说明和坐标系定义	101
5.4.2	各弹道模型数学描述	102

5.4.3	各弹道模型精度仿真对比	106
5.4.4	小结	109
第6章	引信弹道修正机构及气动特性	110
6.1	一维弹道修正引信阻力片弹道修正弹药气动特性	110
6.1.1	配一维弹道修正引信弹丸的气动布局	110
6.1.2	修正弹的气动计算方法	112
6.1.3	一维弹道修正弹的气动特性	115
6.2	二维弹道修正弹的气动特性	119
6.2.1	二维弹道修正弹的气动布局	119
6.2.2	二维高速旋转弹道修正弹的气动特性	121
6.2.3	二维低速旋转弹道修正弹的气动特性	135
第7章	引信一维弹道修正技术	141
7.1	一维弹道修正引信组成及原理	141
7.2	一维弹道修正引信修正策略	142
7.2.1	弹道修正策略分析	143
7.2.2	最佳提前瞄准量和所需最大射程修正量确定	144
7.2.3	蒙特卡罗仿真	146
7.2.4	结论	147
7.3	射程修正量与阻力修正机构启动时刻关系分析	147
7.3.1	阻力片展开前后的阻力系数	147
7.3.2	射程修正量与阻力机构启动时刻的关系分析	147
7.4	配一维弹道修正引信弹丸精度分析及仿真	148
7.4.1	配一维弹道修正引信弹丸精度分析	148
7.4.2	配一维弹道修正引信(基于卫星定位弹道测量)弹丸 射程精度仿真	150
7.4.3	结论	154
7.5	一维弹道修正引信系统集成及试验验证	155
7.5.1	一维弹道修正引信系统集成设计思想	155
7.5.2	一维弹道修正引信总体结构设计	155
7.5.3	试验情况	156
第8章	引信二维弹道修正技术	158
8.1	二维弹道修正引信组成和原理	158
8.1.1	二维弹道修正引信工作原理	158
8.1.2	旋转弹固定偏角舵执行系统工作原理	159
8.2	带固定偏角舵的高旋弹运动特性及稳定性分析	160

8.2.1	刚体弹道方程仿真	161
8.2.2	高旋弹丸稳定性分析	165
8.2.3	弹道模型线性化分析	170
8.3	固定偏角舵滚转姿态与修正量之间的关系	174
8.3.1	弹丸在操纵力下弹道修正能力	175
8.3.2	操纵力对弹丸修正方向的影响	181
8.4	基于固定偏角舵的二维弹道修正控制方法	187
8.4.1	修正控制方法	187
8.4.2	修正控制方法的仿真	189
8.5	其他修正控制方法简介	192
参考文献	195

1.1 引信弹道修正技术概念

1.1.1 引信弹道修正技术基础知识

引信弹道修正技术是指在引信常规安全与解除保险和发火控制功能的基础上,增加弹道参数测量、控制和执行装置,在遵循弹药原有射击操作过程且保证弹丸稳定飞行前提下对其飞行弹道进行适当调整,从而减小弹丸落点散布,提高弹丸射击精度的一项技术。通过引信实现弹道修正进而实现弹丸命中点控制,是引信功能的自然延伸,即把引信从以前的命中点高度维(触发、近炸)控制向其他两个维度(射击纵向、横向)进行有效的拓展。

弹道修正弹药特点是以较低的技术复杂度和较低的成本获得较高的射击精度从而实现对目标的精确度压制。其主要作战效能体现在弹药消耗量大幅降低、后勤补给负担减轻、附带毁伤降低,从而缩短了战斗任务完成时间,在有效压制杀伤敌方的同时有利于己方生存。火炮弹药采用底排、火箭或二者复合的增程技术后,弹药在射程上实现了“远程打击”;但射击散布大幅增加,无法实现“精确命中”。采用弹道修正技术能很好地解决“远程打击”和“精确命中”二者兼顾的问题。

实现弹道修正功能,既可对全弹进行改造和整体设计,也可仅对引信进行改造,利用引信实现弹道修正功能。在引信中实现弹道修正功能具有如下主要优点:

- (1) 仅需更换一个“引信”,无需对弹丸进行改动,即可将无控弹药激活为灵巧弹药,非常适合于大量库存、新研无控弹药尤其是增程类弹药的改造。
- (2) 与引信进行一体化设计可有效缩小体积,保证战斗部最大毁伤效能。
- (3) 便于引信安全与解除保险模块充分利用弹道信息,提高引信的安

全性。

主要缺点如下：

(1) 引信系统集成设计难度加大，对各个模块的小型化设计、电磁兼容性设计等要求高。

(2) 弹道修正能力有限，需要设计高效执行机构。

引信弹道修正技术主要涉及弹道参数动态测量技术、基于飞行稳定的低成本弹道控制技术、高效气动执行器技术、系统集成技术等关键技术。

1.1.2 弹道修正引信的分类

根据安装了弹道修正引信的弹丸在发射后是否需要地面火控、人员等参与修正过程或是否与地面火控系统产生信息交联，可分为指令式弹道修正引信和非指令式弹道修正引信。法国的 SPACIDO 一维弹道修正引信是指令式弹道修正引信的典型，该引信采用雷达测量弹丸飞行的外弹道，利用火控计算机对弹道进行辨识和预测，解算增阻机构启动最佳时间，并通过无限数据链路将此时间指令传给引信，引信按此接收的时间启动增阻机构实施修正。

非指令式弹道修正引信也称为自主式弹道修正引信，能够实现弹丸发射后“不管”，其的弹道测量、弹道辨识和解算、弹道控制等在引信上完成。美国的 PGK 二维弹道修正引信、欧洲的 ECF 一维弹道修正引信都是非指令（自主）式弹道修正引信的典型。目前，自主式弹道修正引信已成为引信弹道修正技术的主要发展趋势。

另外，从射击精度的角度可分为一维弹道修正引信和二维弹道修正引信。一般而言，一维弹道修正引信仅指能够降低弹丸射击纵向散布的弹道修正引信，二维弹道修正引信则指既能降低射击纵向散布，又能降低射击横向散布的弹道修正引信。

1.2 引信弹道修正技术发展过程

1.2.1 弹道修正功能是引信炸点控制功能的扩展

引信弹道修正技术是引信技术发展的必然结果，是引信由高度炸点控制向水平和高度炸点控制的演进。美国引信年会给出了 20 世纪 50 年代到 21 世纪初引信的技术发展趋势，如图 1-1 所示。由图可以看出，引信发展的高级阶段是带有近炸功能的弹道修正引信，以解决水平维和高度维的炸点控制问题。

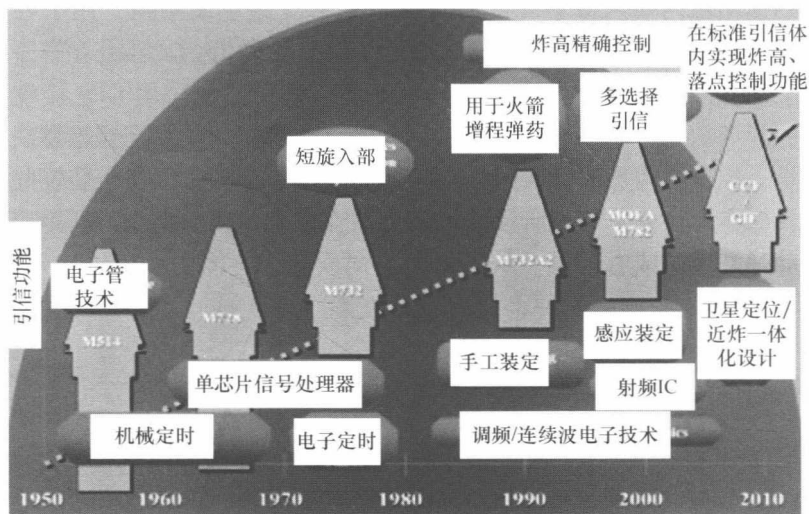


图 1-1 引信的技术发展趋势

1.2.2 弹道修正引信技术的发展过程

美国的 Sanders Associates 虽于 20 世纪 70 年代中期就提出了弹道修正引信概念，但见诸报道则在 90 年代中期，当时称作“末端修正的旋转稳定弹” (TCSP)。它是一种旋转高射炮弹，其预想的结构和工作过程：修正组件完全安装在原弹的引信室中，末端红外探测目标，确定修正量，指令鸭舵偏转，实现弹道修正。此系统概念是弹道修正引信的理想方案，具有的优点：① 弹道修正引信完全装在原有弹药的引信室中，无需对原库存炮弹进行改动；② 射击后不用管，具有极大的战术优越性；③ 既保留了原弹的高速旋转，又实现了鸭舵控制，这对于高速旋转稳定炮弹实现弹道修正是十分重要的。但是，这种方案技术难度很大，特别是探测器件的探测距离较近和鸭舵修正能力不足，使该计划于 80 年代后期终止。80 年代末，美国陆军研究实验室 (ARL) 开始探索研究全球定位系统 (GPS) 试射弹和 2D (距离和方向) 修正系统。该实验室和美国陆军研究发展和工程中心 (ARDEC) 合作进行低成本特种技能弹药 (LCCM) 研究。LCCM 项目是一种新颖的武器概念，是弹道修正引信系统的典型应用。它的目的是采用低成本的北约制式引信，通过调整炮弹弹道来提高现有和未来炮弹的作用效果，使命中精度提高 50%。其关键技术是 GPS 接收机、宽动态范围的惯性测量装置和小型化增阻机构。LCCM 的 GPS 制导引信按北约标准制造，可用于几乎所有火炮和迫击炮弹药中。

LCCM 计划分三个阶段研制：第一阶段是 LCCM “自动试射” 弹药，在标

准尺寸的引信腔内装入微型化的 GPS 接收机和无线电发射机，用于收集弹丸飞行中的弹道数据并把数据发回地面装置；第二阶段的 LCCM 是在第一阶段设计结构上加装阻力器的阻力型射距修正弹药，该引信也采用 GPS 接收机收集飞行中的弹道数据，但不再把数据发回地面，而是据此数据在修正模块中计算出修正量，控制阻力器启动时间，由于是增阻型修正，所以初始装定的弹着点应远于目标实际位置；第三阶段是把阻力器变成可偏转的鸭舵，利用鸭舵的旋转来驱动弹丸或左或右运动，从而修正方向误差。美国的 LCCM 计划在 20 世纪 90 年代末期派生出了几种不同的技术方案，最终通过方案优选确定采用阿联特技术系统（ATK）公司的精确制导组件（PGK）二维弹道修正引信方案。美国的引信弹道修正技术发展过程如图 1-2 所示。

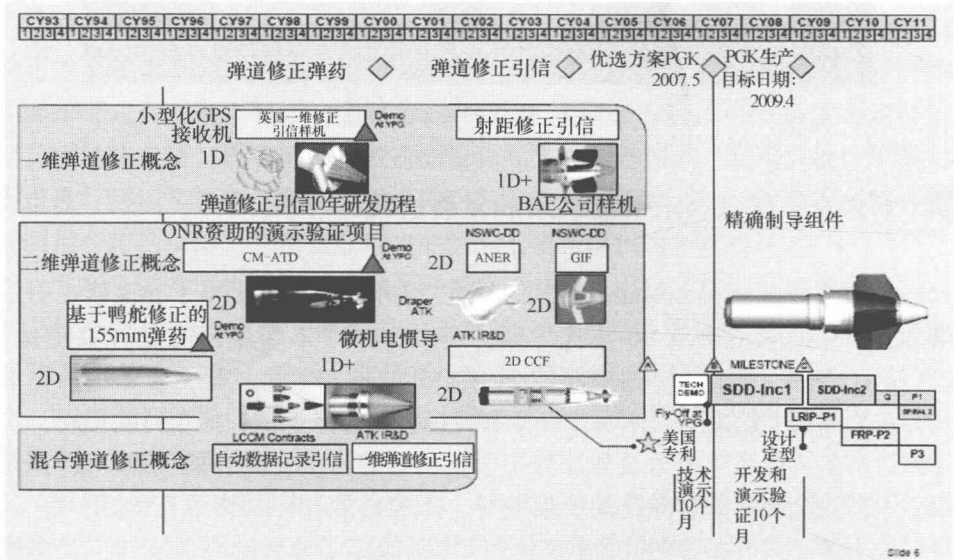


图 1-2 引信弹道修正技术发展过程

从图 1-2 可以看出，一维弹道修正引信执行器最典型的是增阻式修正执行器。而 1D+ 修正引信主要是针对旋转稳定弹进行射击纵向、横向两个方向修正，在射击纵向上采用增阻式修正模式，在射击横向上采用旋转阻力器以降低弹丸的转速，利用陀螺效应改变弹丸的动力平衡角从而减少旋转弹本来存在的偏流。作战使用时，射击纵向上需要“瞄远打近”，比目标瞄得更远一些；对于右旋弹（从弹尾看顺时针旋转），在射击横向上需要“瞄右打左”，比目标瞄得更右一些。

二维弹道修正引信在发展过程中，执行机构出现了可调舵偏角鸭舵执行机构、固定舵偏角鸭舵执行机构、乒乓舵执行机构、栅格舵执行机构等类型。

1.2.3 国外典型弹道修正引信技术

1. 欧洲修正引信

欧洲修正引信 (ECF) 是基于 GPS 的一维弹道 (射程) 修正引信, 其工作过程如图 1-3 所示。

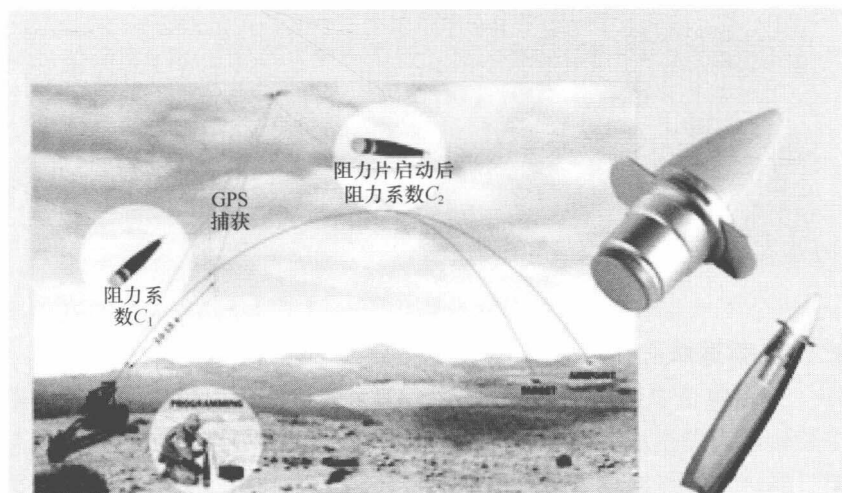


图 1-3 ECF 及其工作过程

ECF 主要特点如下:

- (1) 采用短旋入引信室, 兼容于所有炮兵弹药和平台, 外形与制式引信外形及其装定器接口匹配。
- (2) 采用 C/A 码 GPS 接收机进行弹道测量, 修正后纵向散布误差小于 40m。
- (3) 采用多选择引信作用方式, 包括近炸、触发、延期和定时。
- (4) 采用感应装定方式, 符合北约 STANAGS 标准。

2. 法国 SPACIDO 弹道修正引信

SPACIDO 是基于炮位雷达测速的一维弹道修正引信, 具有近炸、时间、触发和延期四种作用方式。利用炮位多普勒测速雷达跟踪弹丸飞行 7~8km 以确定实际弹道并由火控计算机确定阻力修正机构启动时间, 通过遥测发射机将此时间发射至引信。SPACIDO 及其工作过程如图 1-4 所示。SPACIDO 以炮口初速雷达测量弹道参数, 以三片式增阻机构作为修正执行机构, 使用这种引信后弹药消耗量可减少 75%。