

doi: 10.7690/bgzdh.2025.03.018

高炮弹药引信技术研究综述

刘立稳, 蔡灿伟, 闫小伟

(陆军炮兵防空兵学院军政基础系, 合肥 230000)

摘要: 针对单一模式引信的高炮弹药对目标的毁歼概率较低的问题, 采用 2 种以上不同作用原理(或作用方式)的复合引信。阐述引信的概念和作用、分析高炮弹药引信的发射环境、介绍高炮弹药引信的发展现状及特点、评述高炮弹药复合控制引信的研究现状, 并对高炮弹药引信的设计与性能验证方法进行归纳。结果表明, 该研究可为后续相关问题提供参考。

关键词: 高炮弹药引信; 发射环境; 发展现状; 毁歼概率; 关键技术; 性能验证方法

中图分类号: TJ4 文献标志码: A

Review of Research on Antiaircraft Gun Ammunition Fuze Technology

Liu Liwen, Cai Canwei, Yan Xiaowei

(Department of Military and Political Foundation, Army Academy of Artillery and Air Defense, Hefei 230000, China)

Abstract: In order to solve the problem of low target annihilation probability of antiaircraft gun ammunition with single mode fuze, more than two kinds of compound fuzes with different action principles (or action modes) are used. The concept and function of fuze are described, the launching environment of antiaircraft gun ammunition fuze is analyzed, the development status and characteristics of antiaircraft gun ammunition fuze are introduced, the research status of antiaircraft gun ammunition compound control fuze is reviewed, and the design and performance verification methods of antiaircraft gun ammunition fuze are summarized. The results show that the study can provide a reference for subsequent related issues.

Keywords: antiaircraft ammunition fuze; launch environment; development status; kill probability; key technology; performance verification method

0 引言

引信是高炮弹药武器系统的重要组成部分, 是高炮弹药武器系统发挥终端效应的最终执行装置, 直接决定了武器系统作战的效能, 一定程度上影响着战争的走势^[1]。性能完善、质量可靠的引信能保证战斗部对目标实施有效毁伤, 起到作战效能“倍增器”的作用; 反之会导致弹药在遇到目标时发生早炸、迟炸或者瞎火的现象, 不仅贻误战机, 还可能对己方造成损伤^[2]。

由于高炮弹药自身的特殊性能, 使得配用单一模式引信的高炮弹药对目标的毁歼概率不太高, 已无法满足现代战争对空防斗争的需要。为了使战斗部发挥其最大威力, 达到最佳的引战配合效果, 需要集成多学科、多领域的先进技术, 优化现有引信设计, 在此基础上, 研发出性能更优的新式引信。为了更好地提高高炮弹药对空中目标的毁歼概率, 复合控制引信的研究引起了世界各军事强国的重视。随着计算机等技术的运用, 由 2 种以上不同作用原理的复合引信在高炮弹药上得以广泛运用, 使得高炮弹药的作战效能得到大大提升。

1 高炮弹药引信发射环境分析

从前期的勤务处理到引爆战斗部完成使命, 引信的整个生命周期会经历各种环境的影响。其中, 在发射过程中, 引信主要经受理学环境和热环境, 同时还会受到静电和电磁等环境的影响。对此, 李世中^[1]、张合等^[3]、林琛^[4]、余建辉^[5]、王文豪^[6]就发射阶段引信所受到的主要环境进行了分析。

1.1 力学环境

高炮弹药的引信是固定在弹丸或者战斗部上的零件, 并随之做加速运动和旋转运动; 因此, 引信在发射的过程中, 主要经受理学环境包括后坐力、离心力和切线惯性力。

1.1.1 后坐力

火药气体产生的强大压力, 推动高炮弹药弹丸在膛内做加速运动, 弹丸在加速向前运动时, 引信受到与轴向加速度相反的力, 称为后坐力, 记为 F_s :

$$F_s = \frac{m_y \pi D^2}{4\Phi m_d} \cdot P \quad (1)$$

式中: m_y 为引信零件的质量, kg; m_d 为弹丸的质量,

收稿日期: 2024-07-05; 修回日期: 2024-08-09

第一作者: 刘立稳(1990—), 男, 安徽人, 硕士。

kg; D 为弹丸的直径, m; P 为膛压, Pa; Φ 为虚拟系数。

研究表明, 炮弹发射时, 中、大口径火炮弹药的引信所受到的后坐力是该引信零件重力的 1 000~30 000 倍, 小口径火炮可达 30 000~128 000 倍, 十分巨大^[1]。后坐力是引信解除保险的重要环境力之一, 同时后坐力也可能造成引信爆炸元件自炸, 破坏引信零件。

1.1.2 离心力

发射时, 引信零件做高速旋转运动, 会受到与向心加速度方向相反的离心力, 记为 F_c , 其表达式为:

$$F_c = m_y r \omega^2 \quad (2)$$

式中: F_c 为引信受到的离心力, N; m_y 为引信零件的质量, kg; r 为引信零件质心距转轴的偏心距, m; ω 为载体旋转的角速度, rad/s。

通常用最大离心过载系数 K_1 来描述离心力。其含义为质心偏离载体转轴单位长度的引信零件受到的最大离心力与该零件重力的比值, 表达式为:

$$K_1 = \frac{F_{c\max}}{G_y \cdot r} \quad (3)$$

通常小口径炮弹的 K_1 值为 10 000~160 000, 中、大口径的旋转炮弹的 K_1 值为 2 000~10 000, 微旋弹的 K_1 值仅有几十^[1]。在引信设计中, 可利用离心力作为解除离心保险的原动力, 但也要考虑离心力所引起的摩擦力的影响。

1.1.3 切线惯性力

在发射过程中, 由于质心偏离载体转轴, 因此引信零件还会受到的与切线加速度方向相反的惯性力, 称为切线惯性力, 记为 F_t , 其表达式为:

$$F_t = m_y r \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

式中 $d\omega/dt$ 为载体旋转角加速度, rad/s²。

研究表明: 线膛炮弹发射时, 引信零件在膛内所受到的切线惯性力仅为后坐力的 10%~15%, 远小于后坐力; 因此, 通常不把切线惯性力当做解除保险的环境力使用^[1]。

1.2 热环境

引信热环境是指除正常气温热以外的环境热, 主要存在于 2 个阶段: 1) 炮弹发射时产生的膛内热; 2) 战斗部和外挂弹药在空中高速飞行时产生的

空气动力热^[3]。

高炮弹药弹丸之所以能做高速运动, 是因为火药气体燃烧时的高温(可以高达数千摄氏度)产生了强大压力, 作用于弹丸上。由于对流放热作用的存在, 高温的发射药气体, 会把一部分热量传递给炮管, 加上射击时炮弹与炮管的机械摩擦发热^[7], 最终导致炮管的温度不断升高。例如, 某型高炮单发射击后身管内壁温度在 0.000 149 s 内从 293.15 K 上升到近 631.54 K, 若在 600 rds/min 的情况下进行 12 发长点射, 则内壁温度可达近 900 K, 在连续快速射击 30 发炮弹后, 炮管的温度可达 300 °C 以上^[8]。

炮管温度一方面影响炮管的寿命^[9], 同时也会对炮弹引信的工作产生影响。通常情况下, 炮弹装填后不会在膛内停留太长时间, 一般装后即发; 因此, 膛内因发射产生的高温不会大量传递到引信的上, 引信温度的升高也就不会很明显, 这种情况下, 炮膛内部的热环境对引信零件的影响较小。有时也会遇到特殊情况, 比如, 炮弹装填到位后, 没有接到“发射”的命令, 这时若膛内温度很高, 就会对引信零件产生比较大的影响, 引信零件中的起爆元件可能就会达到起爆临界点而发火, 使弹丸发生早炸。也正因如此, 通常规定弹丸在膛内不能停留太长时间, 一般装填完毕后立即发射。

1.3 其他环境

除了上述力学环境和热环境之外, 高炮弹药的引信在发射的过程中, 还会受到其他环境因素的影响, 比如静电环境、电磁环境等。

静电无处不在, 日常生活中, 任何 2 种不同材质的物体接触后再分离, 即可产生静电。常见的管道输油, 在混合、泵送、过滤、搅拌或将其从一个容器浇注到另一个容器过程中, 就会产生静电荷^[10-11]。静电不光对人体有影响^[12], 还对航空航天、印刷、制药、微电子(特别是一些新型的集成电路和器件)等工业带来比较严重的危害; 在静电的作用下, 一些集成电路或器件可能会被击穿而不能正常工作, 比之更甚者是集成电路或器件不是彻底不能工作而是功能减弱, 这将引起整个产品组件的性能退化, 最终可能引起电子器件的误动作。对于高炮弹药的引信来说, 特别是某些无线电引信(既有电子元器件又有起爆药、电火工品), 静电带来的危害是非常大的; 在发射高炮弹药的过程中, 弹体与炮膛之间会有非常强烈的摩擦现象, 这种剧烈的摩擦会

导致弹体表面的电荷高速运动,进而产生大量的静电,当静电积累到一定量时,就可能对引信的电子器件带来危害,影响其正常工作,比如起爆元件可能受静电的影响出现提前发火的现象,最终可能导致早炸。

和静电环境一样,电磁环境在空间中也是到处存在的,对很多事物都会产生一定的影响^[13-16],包括高炮弹药的引信。众所周知,温度不同,物质可在固态、液态和气态之间进行转换,当温度足够高时,气体会被电离,变成另外一种物质形态——等离子态,因其呈现电中性(带正电荷的离子总数和带负电荷的电子总数相等),又称为等离子体,等离子体是电磁环境的主要产生源,大量的等离子体与电路之间的相互作用会对电路性能产生比较大的影响。随着科学技术的发展,现代高炮弹药引信大多都含有电子部件,因电磁环境的存在,这些电子部件的性能可能会受其影响,严重的可能会出现灾难性的事故,比如电起爆电子元件而引起发火。

2 高炮弹药引信发展现状与特性分析

为了追逐最佳的引战配合效果,最大限度地发挥弹药的威力,药盘时间引信、触发引信、钟表时间引信、基于声和光原理的近炸引信、无线电引信、压电引信、红外引信、电子时间引信及多选择引信等相继登上了历史舞台,对弹药武器系统产生了很大的影响。目前,高炮弹药所使用的引信主要有触发引信、近炸引信、电子时间引信和复合控制引信。

2.1 触发引信

触发引信是直接利用弹丸与目标接触的一瞬间,由目标给引信的反作用力或者由于弹丸减速引起引信运动状态发生急剧变化而使引信作用引爆弹丸,又称为“着发引信”或“碰炸引信”^[2],其主要特点是引信触碰到目标后立即起爆,一般没有延迟时间(或只有非常短暂的延迟时间),适用于那些碰后即爆的弹药。

高炮系统是一个复杂的集成系统,在射击的过程中,由于各种气象条件的测量存在偏差、跟踪系统测定目标坐标存在偏差、火控计算射击诸元存在偏差以及射击时火力系统本身的散布偏差等射击误差,使得高炮弹药直接命中目标的概率并不是很高,一旦没有命中目标,则触发引信就无法正常工作,从而导致高炮弹药的毁歼概率不高。对此,邓

辉咏等^[17]通过对射击误差分析和其中相关性误差抽样建模,设计了用解析法计算高炮单管单发毁歼概率进而求取一次点射毁歼概率的计算方法,并给出了 Matlab 仿真计算流程,通过 300 次仿真计算,在假定点射过程中目标位置不变的情况下,某 35 高炮对 800 m 航程的目标毁歼概率为 0.103,对 3 000 m 目标的毁歼概率仅为 0.009 4,800~3 000 m 目标的平均毁歼概率为 0.040 5。

除了上述分析的高炮弹药直接命中目标的概率不高之外,在设计和使用触发引信时,还需要考虑触发灵敏度的问题。对于高炮弹药来说,要求发火机构在碰到目标薄弱部位(比如飞机机翼和飞机蒙皮等)要能够可靠发火,因此要求灵敏度要高;但灵敏度又不能过高,因现代空中目标大多具有全时全域的作战能力^[18-20],特别是敌机雨雪天来袭时,如果使用的引信太过敏感,遇到空中的雨滴就有可能引燃战斗部,发生爆炸现象。要想达到最佳的发火状态,需要解决好触发引信的灵敏度阈值。

2.2 近炸引信

近炸引信是通过感应目标的自身特性或因其存在而形成的环境特性,在目标附近作用的引信^[2]。其主要特点是不需要直接接触目标,只需要感知和探测目标的一些信息(比如大小、形状、距离、方位、速度等),便能够起爆战斗部,以强大的破片杀伤效力达到毁伤目标的目的,效费比较高。

和触发引信相比,配备近炸引信的高炮弹药对目标的毁歼概率较高,但同样也存在一些影响其毁歼概率的因素,比如炮弹和目标的位置关系(决定了引信炸点)、破片的数质量、破片的速度等,其中影响最大的是弹目位置。因为弹目姿态和位置的不同,引信探测器接收到的回波信号就会不同,引信炸点的位置就会不同,最终体现的是毁歼概率不同。对此,田博等^[21]提出了基于引信实时炸点的弹药毁伤评估算法,分析了引信 3 维炸点散布对弹药毁伤效果的影响,得出当引信炸点距离最佳起爆点偏差 5~10 m 时,对空中、地面目标的毁伤效果下降约 10%~30%;当引信炸点距离最佳起爆点偏差 20 m 以上时,对目标的毁伤效果下降约 20%~50%,最差时毁伤概率甚至不足 35%,很难有效毁伤目标;而如果影响因素过大,则近炸引信无法进行工作,即此时只配备近炸引信的弹药将无法正常起爆。

2.3 电子时间引信

电子时间引信是采用电子计时装置计时的时间引信，相较于其他时间引信，电子时间引信具有作用时间长、计时部分无运动零件、信息不易丢失、易高精度装定、可进行战前和战时无损检测、易与火控系统联动、可编程、抗电磁干扰能力强、电子计时装置的通用化程度高等优点，被广泛应用于各种弹药^[1]。

使用电子时间引信的高炮弹药，影响其毁歼概率的因素主要有：1) 由于初速测定线圈测定弹丸初速时存在一定的误差^[22]；2) 火炮计算机接收到的目标诸元存在误差；3) 时间分划、装定和定时器启动等存在误差；4) 非标准气象条件、地理条件等修正误差(主要原因是，弹丸外弹道计算模型是建立在一定的假设条件下的，在实际发射过程中，解算出的弹道诸元会与实际情况下的真实弹道诸元不一致，这就要对以假设为基础的解算弹道诸元进行修正，而修正过程中采用的修正方法或修正模型必然存在误差^[23])。以上误差的存在，对引信的实际作用时间带来影响。除了上述 4 种因素影响毁歼概率外，弹目的姿态和弹丸的航程也是其影响因素，对此，施兵等^[24]通过建立可编程电子引信时间弹对空中目标毁伤概率的计算模型，得出弹丸正面攻击目标时的毁伤概率大于侧面攻击时的毁伤概率，可编程电子时间引信弹对 ARM 导弹的毁伤概率与航程存在最优组合，当射程在 1~2 km 时对 ARM 导弹的毁伤概率可达到 0.4 以上。

2.4 复合控制引信

随着技术的进步和军事斗争的加速演变，战场

环境变得越来越复杂，干扰越来越多，在有各种干扰的复杂战场环境下，仅配备触发、近炸或者时间其中之一模式的引信将很难达到预定的作战效果，为了提高弹药对复杂环境下目标的毁歼概率，越来越多的复合引信用在了高炮弹药上。

复合引信即采用 2 种以上探测原理的引信，其探测方式可以是同一种物理场(如电磁波的 2 个不同方向或不同频率)，也可以是不同的物理场(如红外、激光、电磁、无线电、电容等不同物理场的组合)。近些年，随着世界军事力量的加速发展变革，复合引信技术引起了越来越多科研工作人员的重视。刘东芳等^[25]提出了毫米波与静电复合定向探测与目标识别的引信技术；陈遵田等^[26]利用云雾与目标在光谱反射特性方面的差异，提出在激光引信中选择 0.85 和 3.2 μm 两个特征波长进行复合探测；郭甲崇等^[27]提出了一种基于关联的多元线阵激光与红外扫描的复合引信；冯苗苗^[28]通过目标激光与毫米波散射特性仿真计算，建立了激光与毫米波复合引信虚拟样机；陈凯等^[29]根据现有微机电系统传感器的特殊性能及静电探测技术在该领域独特的抗干扰性能，研制了一种能适应战场快速决定碰炸或近炸的新型复合引信；段亚博^[30]以提高引信抗干扰能力和对目标作用可靠性为研究目标，提出 FMCW 体制激光与无线电复合引信；邢博等^[31]根据无线电和声的特点，提出了采用无线电与声复合的引信技术来反制无人机；刘跃龙等^[32]通过分析单模引信的特点，结合电子战系统、光电对抗系统、无源干扰系统的普遍运用，对比了几种常见复合引信的抗干扰性能相关结果如表 1 所示。

表 1 几种复合引信抗干扰性能对比

复合引信的模式	抗无线电干扰性能	抗光学干扰性能	抗自然环境干扰性能	抗箔条干扰性能	抗红外诱饵干扰性能	抗无线电、自然环境即箔条综合干扰性能
主动无线电/激光	好	好	一般	一般	较好	不好
毫米波主/被动	好	好	较好	好	较好	较好
主动无线电/静电	好	好	好	好	好	较好
激光/静电	好	好	较好	好	好	较好
主动无线电/被动红外	较好	好	较好	好	较好	较好
主动无线电/被动红外/静电	好	好	好	好	好	好

随着战争理念和战争形态的不断变化，结合比较先进和成熟的计算机技术、目标探测与识别技术及信息处理技术等，加之现代精湛的机械制造工艺，高炮弹药引信的复合模式将会越来越多，复合引信控制技术也会越来越成熟，引信的性能将会变得越来越强大。

3 高炮弹药引信设计技术和性能验证方法

引信作为高炮武器系统的重要组成部分，是高炮武器发挥终端威力的关键子系统^[33]。由于引信决定了高炮武器系统最终的毁伤效果，因此，世界各国军事强国都十分重视高炮弹药引信的相关工作，而由于高炮弹药的特殊性，在进行高炮弹药引信设计

时,除遵循一定的设计程序,还需要解决一些关键的技术,同时还要采用一定的方法对其性能进行验证。

3.1 关键技术

和导弹引信技术不同,高炮弹药引信要想在有限的空间里实现特定的功能,并展现出一定的性价比,应充分考虑小型化和模块化、通用化和系列化、抗高过载与高旋转以及多模复合设计等关键技术。

3.1.1 小型化和模块化

为了适配小口径高炮弹药,引信通常采用小型化和模块化处理,主要为结构小型化和功能模块化,即将各个功能模块进行拆分,再将各模块重新整合,减少重复模块,缩小各模块尺寸^[34]。

结构小型化主要体现在整体紧凑布置、元器件和电路小型化。引信整体在满足强度要求的前提下,应采用紧凑的布置,只留出必要的空间,提高空间的利用率。元器件和电路小型化,主要是使用高效的集成处理芯片,用尽量少的芯片完成尽量多的功能,减少元器件数量,并选用小型封装的小尺寸器件,采用紧凑的电路布局,实现探测器的小型化。功能模块化主要体现在将引信的功能进行模块化和集成处理,从而减少占用空间。

3.1.2 通用化和系列化

武器装备的通用化程度越高,其可靠性和可维护性就越高,整个系统作战效能就越强^[35]。高炮弹药引信在进行设计生产时,应充分借鉴其他引信型号及相关产品的经验,借助国内外先进、成熟的技术,贯彻通用化、系列化的设计思想。在产品各组件、零部件设计过程中,开展产品的通用化、系列化设计工作,使得产品性能在满足主要战术技术指标和使用要求的同时达到合理的成本消耗,并兼顾未来发展需求。

为保证引信的设计符合通用化、系列化设计要求,进行电路设计时,应采用成熟的通用技术方案,原材料和元器件应采用已经定型且成熟的型号产品;机械结构设计应按照严格的标准执行,程序应

当固定;组装生产时,应满足系列化的要求,提高生产的效率;同时,原材料的选择应使用国产化的元器件。

3.1.3 抗高过载与高旋转

信息化炮弹结构较一般常规弹药复杂得多,且弹载器件通常含有精密电子元器件和各类光电传感器,其承受过载的能力相对较弱^[36]。高炮弹药引信作为信息化炮弹重要组成部分,其需要在弹道环境中工作。由于炮弹体积小、过载大、转速高等固有属性,对引信的设计研发提出了严苛挑战,而解决引信抗高过载问题是实现其功能的基础^[37]。对于引信中的探测模块和装定模块而言尤为严苛,高过载和高旋转会直接影响到元器件的稳定性和完整性,甚至发射初期就造成元器件破坏而无法实现相关功能;因此,需要采取可靠的技术措施来增强引信的抗高过载和高旋转能力。

首先,各模块的 PCB 板应选用强度较高的材料,且尺寸应尽量小,按照体积大小,功能配合,合理地均匀分布在 PCB 板上,减小承受过载时形成的应力集中,装配时,在除天线板以外的元器件上涂抹硅橡胶,形成缓冲垫;其次,在结构上采取有效的止转措施,固定 PCB 板,限制其由于惯性而产生移动;最后,选择性能良好的灌封材料(如工厂中多种产品上使用的环氧树脂胶),将各个模块整体灌封,进一步提高高炮弹药引信的抗高过载和高旋转能力。

3.1.4 多模复合设计技术

在进行高炮弹药复合控制引信的设计,除上述关键技术外,要想顺利实现复合引信的各项功能、提高引战配合的性能,还应利用一定的技术手段,精密设计组成复合引信各模块之间的组装方式、链接方式和配合方式。比如张树云等^[38]为了降低弹药的未爆弹率,提出了采用冗余技术实现引信的多模式复合化的方法,并设计了 A、B 两种复合引信的技术路线,建立了两者的可靠性模型并应用蒙特卡洛法进行综合作用率仿真,如图 1-2 所示。

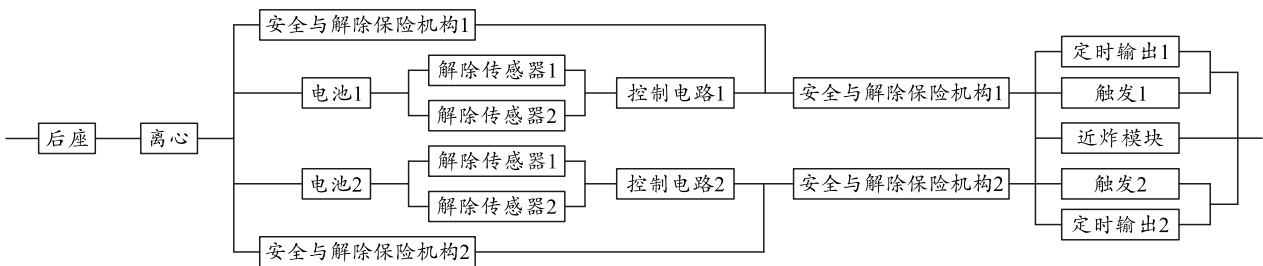


图 1 技术路线 A

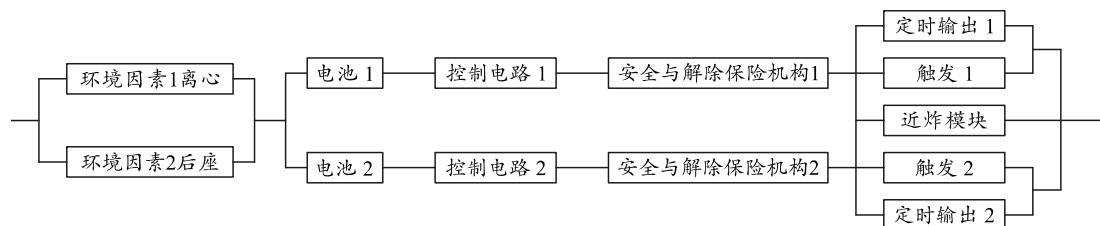


图 2 技术路线 B

当复合引信各模块的可靠度一样时，技术路线 B(综合作业率 99.1%)显著优于技术路线 A(综合作业率 94%)；因此，在进行技术路线设计时，应该选择性能更优的技术路线 B 的模式。

3.2 性能仿真与验证方法

经过总体设计、战术技术指标可行性分析、方案论证、方案设计、方案样机的研制、技术设计和性能样机的试制等环节生产出来的引信样机，在进行生产定型前，需要依据既定的标准、采取一定的方法，对样机进行一系列的试验，包括性能仿真、

实验室试验和外场试验等，而后根据试验结果，进一步修改完善，满足要求后方可进行生产定型。

3.2.1 性能仿真

随着计算机等技术的高速发展，引信性能仿真的研究手段越来越多^[39-42]。结合高炮发射弹药时的高过载、高旋转特性，在进行高炮弹药引信性能仿真试验时，主要是进行强度方面的仿真。可使用 SolidWorks、SpaceClaim、Hypermesh、LS-PrePos、LS-DYNA、HyperView 等软件进行仿真，具体方法和流程如图 3 所示。

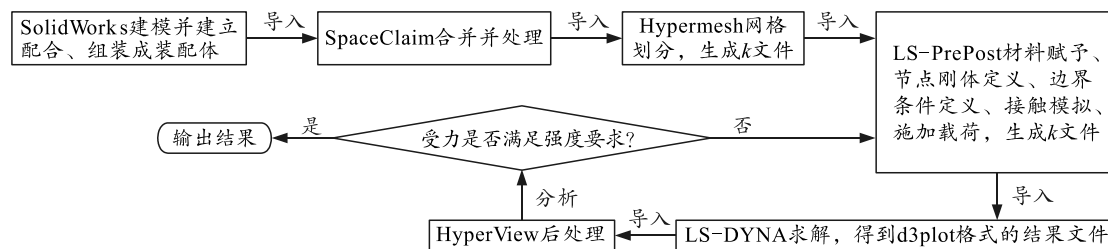


图 3 强度仿真流程

3.2.2 实验室试验

引信的实验室试验也叫静止试验，是指在实验室条件下，用非射击方法对引信或其零部件的某些性能进行检查或测试的各种试验^[1]。依据 GJB 165.5A-2004《引信实验室试验》、GJB 573B-2020《引信及引信零部件环境与性能试验方法》、GJB2178.1A-2178.9A-2005《传爆药的安全性试验方法》以及 GJB4087-2000《引信安全性检验方法》，对引信样机进行静止试验，模拟引信在整个生命周期中可能经历的力学、电磁等环境条件。主要有震动试验、磕碰试验、12 m 跌落试验、1.5 m 跌落试验、运输振动试验、温度与湿度试验、高低温贮存试验、热冲击试验、锤击试验、旋转试验、离心试验、隔爆安全性试验、爆炸完全性试验、吊弹试验以及反射板试验等；如果是复合控制引信，还要进行复合性能的试验(比如近炸/时间/触发引信的复合，测试其是否分别具备近炸、时间和触发的功能以及各自的性能)。按规定，引信样机只有经过一系列静态试验，在满足指标要求后，方能转入靶场试

验环节，否则应进行相应的调整。

3.2.3 外场试验

引信的外场试验是相对于实验室试验而言的，是指野外试验，其中在相对固定的场地进行的试验又称为靶场试验^[1]。依据 GJB349.15-88《常规兵器定型试验方法-炮弹引信》、GJB573A-98《引信环境与性能试验方法》、GJB2179-94《炮用发射药与装药内弹道试验方法》、GJB4087-2000《引信安全性检验方法》，对高炮弹药引信样机进行靶场试验。主要包括：炮弹引信解除保险距离试验、解除保险可靠性试验、空炸时间试验、发射安全性试验、灵敏度与钝感度试验、瞬发度试验、发火性试验、甲弹引信对钢板发火性试验、自毁时间试验、对地近炸性能试验、对空目标近炸性能试验、最小攻击距离试验和抗干扰试验等^[1]；同样，如果是复合引信，还应测试复合的功能和性能是否满足要求。

4 结束语

综合国内外对高炮弹药复合控制引信的研究工

作可以发现：引信复合的模式比较多，但因客观条件的限制，基于各种复合理论制造出的样机较少，大多数还都停留在理论研究阶段。部分学者运用了仿真软件进行了相关研究论证，但整体研究的深度还不够，研究结论也缺乏实践论证；因此，基于理论和实践基础上的高炮弹药复合控制引信的研究工作还有很大的空间，还需要广大研究人员进行不断的探索和努力。

参考文献：

- [1] 李世中. 引信概论[M]. 北京：北京理工大学出版社, 2017.
- [2] 王树山, 马峰, 郭勋成, 等. 武器弹药终点毁伤评估[M]. 北京：北京理工大学出版社, 2021.
- [3] 张合, 李豪杰. 引信机构学[M]. 北京：北京理工大学出版社, 2019: 18-38.
- [4] 林琛. 基于电磁驱动的引信发射后坐与旋转双环境模拟技术研究[D]. 太原：中北大学, 2017: 2-3.
- [5] 余建辉. 大口径炮弹引信发射环境模拟试验系统设计与仿真[D]. 南京：南京理工大学, 2018: 16-19.
- [6] 王文豪. 基于电磁直线驱动的引信发射环境动态模拟技术研究[D]. 北京：北京理工大学, 2017: 29-33.
- [7] LI S, WANG L, XU F, et al. Numerical simulations for artillery barrel temperature variation considering mechanical friction heat under continuous shots[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2023, 142: 106663.
- [8] 赵耀, 郑海文, 刘胜超, 等. 自行高炮自动机身管热特性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(10): 114-119.
- [9] SHAN Y H, NIE Z G, SHAN S Q, et al. Correlations between Gun-Barrels Temperature Rising and Shooting Specifications[C]//The 2nd International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Automation (AMMA 2015), 2015.
- [10] MIHAELA P, EMILIAN G, NICULINA V, et al. The risk of static electricity at handling diesel fuel[J]. MATEC Web of Conferences, 2021, 343: 10013.
- [11] ZHAO X G, ZHOU Y, ZHAO J Y, et al. Analysis of Static Electricity Generated in Petroleum Pipeline Transportation Based on the Generalized Gray Incidence Model[J]. Chemical Engineering Transactions, 2016, 55: 223-227.
- [12] YOHANAN A. STATIC ELECTRICITY FIELD AND ITS EFFECT ON THE HUMAN BODY[J]. Harefuah, 2019, 158(4): 268.
- [13] BENNAGEH I, MAHMOUDI H, LABBADI M. Impact of the Electromagnetic Environment on UAV's Datalink[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 785(1): 25-27.
- [14] YE G, LU Y F, YANG G R, et al. Study on electromagnetic environment analysis and lightning protection in building[J]. E3S Web of Conferences, 2021, 233: 03054.
- [15] WANG J, MU S K, HAI Z. Research on the Influence of Electromagnetic Radiation in the Automobile on the SAR Value of Human Body[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1684(1): 012153.
- [16] LIU G C, ZHAO P, QIN Y, et al. Electromagnetic Immunity Performance of Intelligent Electronic Equipment in Smart Substation's Electromagnetic Environment[J]. Energies, 2020, 13(5): 1130.
- [17] 邓辉咏, 何循来, 殷军辉, 等. 小口径高炮对高速目标毁伤概率研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2019, 40(3): 20-23, 49.
- [18] 马征. 国外下一代战斗机和高超声速飞机结构技术发展综述[J]. 强度与环境, 2021, 48(5): 15-21.
- [19] 李新华, 王浩, 邵彩婧. 第六代战斗机发展方向探究[J]. 飞航导弹, 2021(10): 15-19.
- [20] 杨伟. 关于未来战斗机发展的若干讨论[J]. 航空学报, 2020, 41(6): 8-19.
- [21] 田博, 施坤林, 邹金龙, 等. 近炸引信炸点对弹药毁伤评估的影响[J]. 探测与控制学报, 2020, 42(6): 1-7, 12.
- [22] 黄学功. 炮口感应装定引信技术及试验研究[D]. 南京：南京理工大学, 2005: 15-16.
- [23] 何振才. 引信空炸炸点精确控制技术研究[D]. 南京：南京理工大学, 2006: 21-23.
- [24] 施兵, 智小琦, 王文甲, 等. 某可编程电子时间引信弹毁伤概率计算[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(5): 103-106.
- [25] 刘东芳, 陈若飞. 毫米波与静电复合定向探测与目标识别技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(3): 365-371.
- [26] 陈遵田, 马君. 双波长复合激光引信[J]. 探测与控制学报, 2008(5): 1-3, 10.
- [27] 郭甲崇, 刘星, 袁俊, 等. 激光/红外复合扫描引信目标识别算法[J]. 激光与红外, 2020, 50(2): 184-191.
- [28] 冯苗苗. 激光/毫米波复合引信虚拟样机技术研究[D]. 南京：南京理工大学, 2021: 23-36.
- [29] 陈凯, 房立清, 张磊. 基于 MEMS 和静电探测技术的新型复合引信[J]. 兵工自动化, 2012, 31(8): 1-2, 9.
- [30] 段亚博. 调频连续波体制激光与无线电复合引信探测技术研究[D]. 北京：北京理工大学, 2017: 1-10.
- [31] 邢博, 刘星, 苟晔鹏. 无线电/声复合探测引信目标识别算法[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(10): 33-39.
- [32] 刘跃龙, 李心洁, 陆长平, 等. 复合引信抗干扰性能比较[J]. 制导与引信, 2019, 40(1): 6-9, 46.
- [33] 魏维伟, 刘俊豪. 对空导弹近炸引信发展思考[J]. 制导与引信, 2022, 43(4): 41-44.