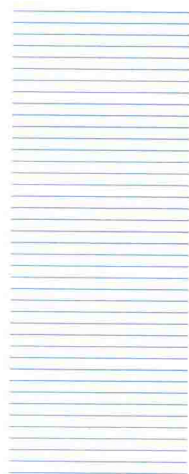


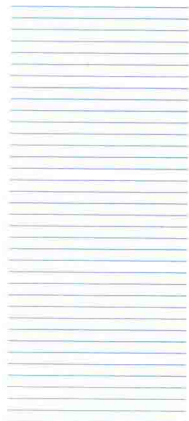
高效毁伤系统丛书



硬目标智能引信 理论与技术

Theory and Technology for
Hard Target Smart Fuze

汪德武 李晓峰 王亚斌 吴碧 编著



非外借



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

高效毁伤系统丛书



硬目标智能引信 理论与技术

Theory and Technology for
Hard Target Smart Fuze

汪德武 李晓峰 王亚斌 吴碧 编著



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

侵彻弹药是现代高科技战争中打击敌方高价值坚固目标的主用弹种, 日益成为现代装备体系中的重要组成部分, 硬目标智能引信对发挥侵彻弹药的毁伤威力具有关键作用。本书系统地分析了硬目标智能引信的主要技术要素, 涉及引信总体设计、传感器、侵彻过程评估、侵彻加速度分析、电子安全系统和试验验证等关键技术。

第1章介绍了侵彻弹药及其配用引信的基本情况, 通过本章可以基本了解侵彻弹药发展的主要过程与趋势。第2章专门分析了外军侵彻弹药引信的演化过程, 并着重对硬目标智能引信的技术特点进行了详细分析。第3章对硬目标智能引信的关键技术进行了分析, 提出了硬目标智能引信研发需要考虑的主要问题。第4章、第5章分别介绍了硬目标侵彻理论和侵彻历程的数值计算和仿真模拟方法, 可用于硬目标智能引信研究需要的侵彻过程参数评估。第6章介绍了侵彻弹药引信常用的传感器, 包括用于感受弹体与目标碰撞过程、感测侵彻加速度的两类传感器。第7章对侵彻弹药与引信研制过程中极为关心的侵彻加速度信号分析方法进行了简要介绍。第8章对侵彻引信中应用日益广泛的电子安全系统原理和实现途径进行了详细讨论。第9章对侵彻弹药引信研究中常用的各种试验验证手段进行了逐一介绍。

本书适合作为弹药专业、引信专业技术人员进行科研和设计的参考用书, 也可作为相关专业本科和研究生的教学参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

硬目标智能引信理论与技术 / 汪德武等编著. --北京: 北京理工大学出版社, 2021.3

(高效毁伤系统丛书)

国家出版基金项目

ISBN 978-7-5682-9583-3

I. ①硬… II. ①汪… III. ①触发引信-智能控制-研究 IV. ①TJ43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 040285 号

出版社 / 北京理工大学出版社有限责任公司
地址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号
邮编 / 100081
电话 / (010) 68914775 (总编室)
(010) 82562903 (教材售后服务热线)
(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>
经 销 / 全国各地新华书店
印 刷 / 北京捷迅佳彩印刷有限公司
开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16
印 张 / 19.5
字 数 / 337 千字
版 次 / 2021 年 3 月第 1 版 2021 年 3 月第 1 次印刷
定 价 / 88.00 元

责任编辑 / 张海丽
文案编辑 / 张海丽
责任校对 / 周瑞红
责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

《国之重器出版工程》 编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	高延敏	何 琼	刁石京	谢少锋
闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生	赵永红
韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波	卢 山
徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁	张 炜
聂 宏	付梦印	季仲华		



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- | | |
|-----|-----------------|
| 于全 | 中国工程院院士 |
| 王越 | 中国科学院院士、中国工程院院士 |
| 王小谟 | 中国工程院院士 |
| 王少萍 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 王建民 | 清华大学软件学院院长 |
| 王哲荣 | 中国工程院院士 |
| 尤肖虎 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 邓玉林 | 国际宇航科学院院士 |
| 邓宗全 | 中国工程院院士 |
| 甘晓华 | 中国工程院院士 |
| 叶培建 | 人民科学家、中国科学院院士 |
| 朱英富 | 中国工程院院士 |
| 朵英贤 | 中国工程院院士 |
| 邬贺铨 | 中国工程院院士 |
| 刘大响 | 中国工程院院士 |
| 刘辛军 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 刘怡昕 | 中国工程院院士 |
| 刘韵洁 | 中国工程院院士 |
| 孙逢春 | 中国工程院院士 |
| 苏东林 | 中国工程院院士 |
| 苏彦庆 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 苏哲子 | 中国工程院院士 |
| 李寿平 | 国际宇航科学院院士 |



- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李春明 中国兵器工业集团首席专家
- 李莹辉 国际宇航科学院院士
- 李得天 国际宇航科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨绍卿 中国工程院院士
- 杨德森 中国工程院院士
- 吴伟仁 中国工程院院士
- 宋爱国 国家杰出青年科学基金获得者
- 张彦 电气电子工程师学会会士、英国工程技术
学会会士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆军 中国工程院院士
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
原机械工业部副部长
- 陈谋 国家杰出青年科学基金获得者
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士
- 周立伟 中国工程院院士



- 郑纬民 中国工程院院士
- 郑建华 中国科学院院士
- 屈贤明 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐 中国工程院院士
- 赵沁平 中国工程院院士
- 郝 跃 中国科学院院士
- 柳百成 中国工程院院士
- 段海滨 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 侯增广 国家杰出青年科学基金获得者
- 闻雪友 中国工程院院士
- 姜会林 中国工程院院士
- 徐德民 中国工程院院士
- 唐长红 中国工程院院士
- 黄 维 中国科学院院士
- 黄卫东 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥 中国工程院院士
- 康 锐 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 董景辰 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 谭春林 航天系统开发总师

《高效毁伤系统丛书》

编 委 会

名誉主编：朵英贤 王泽山 王晓锋

主 编：陈鹏万

顾 问：焦清介 黄风雷

副 主 编：刘 彦 黄广炎

编 委 （按姓氏笔划排序）

王亚斌 牛少华 冯 跃 任 慧

李向东 李国平 吴 成 吴艳青

汪德武 张 奇 张锡祥 邵自强

罗运军 周遵宁 庞思平 娄文忠

聂建新 徐克虎 徐豫新 郭泽荣

隋 丽 谢 侃 薛 琨



丛书序

国防与国家的安全、民族的尊严和社会的发展息息相关。拥有前沿国防科技和尖端武器装备优势，是实现强军梦、强国梦、中国梦的基石。近年来，我国在国防科技和武器装备取得了跨越式发展，一批具有完全自主知识产权的原创性前沿国防科技成果，对我国乃至世界先进武器装备的研发产生了前所未有的战略性影响。

高效毁伤系统是以提高武器弹药对目标毁伤效能为宗旨的多学科综合性技术体系，是实施高效火力打击的关键技术。我国在含能材料、先进战斗部、智能探测、毁伤效应数值模拟与计算、毁伤效能评估技术等高效毁伤领域均取得了突破性进展。但目前国内该领域的理论体系相对薄弱，不利于高效毁伤技术的持续发展。因此，构建完整的理论体系逐渐成为开展国防学科建设、人才培养和武器装备研制和使用的共识。

《高效毁伤系统丛书》是一套服务于国防和军队现代化建设的大型科技出版工程，也是国内首套系统论述高效毁伤技术的学术丛书。本项目瞄准高效毁伤技术领域国家战略需求和学科发展方向，围绕武器系统智能化、高能火炸药、常规战斗部高效毁伤等领域的基础性、共性关键科学与技术问题进行学术成果转化。

丛书共分三辑，其中，第二辑共 26 分册，涉及武器系统设计与应用、高能火炸药与火工烟火、智能感知与控制、毁伤技术与弹药工程、爆炸冲击与安全防护等兵器学科方向。武器系统设计与应用方向主要涉及武器系统设计理论与方法，武器系统总体设计与技术集成，武器系统分析、仿真、试验与评估等；高能火炸药与火工烟火方向主要涉及高能化合物设计方法与合成化学、高能固



体推进剂技术、火炸药安全性等；智能感知与控制方向主要涉及环境、目标信息感知与目标识别，武器的精确定位、导引与控制，瞬态信息处理与信息对抗，新原理、新体制探测与控制技术；毁伤技术与弹药工程方向主要涉及毁伤理论与方法，弹道理论与技术，弹药及战斗部技术，灵巧与智能弹药技术，新型毁伤理论与技术，毁伤效应及评估，毁伤威力仿真与试验；爆炸冲击与安全防护方向主要涉及爆轰理论，炸药能量输出结构，武器系统安全性评估与测试技术，安全事故数值模拟与仿真技术等。

本项目是高效毁伤领域的重要知识载体，代表了我国国防科技自主创新能力的水平，对促进我国乃至全世界的国防科技工业应用、提升科技创新能力、建设“两个强国”战略具有重要意义；愿丛书出版能为我国高效毁伤技术的发展提供有力的理论支撑和技术支持，进一步推动高效毁伤技术领域科技协同创新，为促进高效毁伤技术的探索、推动尖端技术的驱动创新、推进高效毁伤技术的发展起到引领和指导作用。

《高效毁伤系统丛书》

编委会



前 言

现代战争中的打击对象包括大量结构坚固的硬目标，普通杀伤爆破型弹药对此难以有效摧毁。在冷战背景下，美军在核钻地弹和常规侵彻弹药方面都开展了大量的研究工作，其中常规侵彻弹药的发展和运用已经成为美军打击体系中的重要部分。

自 20 世纪 80 年代起，美军开始研制专门的常规侵彻战斗部，先后发展了 5 000 磅级的 BLU-113、BLU-122 侵彻战斗部，2 000 磅级的 BLU-109/B、BLU-116/B 侵彻战斗部，以及 1 000 磅级的基于 MK83 的 BLU-110 侵彻战斗部。这些战斗部与不同的制导弹药平台配装后，对战场高价值硬目标具备了比较完备的打击能力。此外，为提高载机单次出动的对地精确打击能力，美军还发展了 500 磅级的小直径制导炸弹，达到了与 2 000 磅级 BLU-109/B 战斗部相当的侵彻能力，目前已经成为第四代战斗机 F-22 的标准挂载弹药。为了实现硬目标内部人员、装备的高效杀伤，美军先后研制了 FMU-143 系列、FMU-152A/B、FMU-159、FMU-167/B 等多型可以配装侵彻战斗部的专用硬目标引信，以满足战斗部侵入目标后进行起爆的控制要求。

截至目前，美、英、法、德、俄等西方国家在研、装备的侵彻弹药已有多种型号，并配备了专门的引信。近年来，通过国际军贸途径，其中一些侵彻弹药在其他国家也得到了装备，如韩国已经购买了美国的 GBU-39 小直径制导炸弹和德国的 TAURUS 巡航导弹，具备了打击飞机堡等典型硬目标的能力。能否独立研制高性能的侵彻弹药与引信，是对一个国家军事科技能力和工业水平的考验，涉及力学、物理化学、传感与控制、信号处理等多个学科，需要冶金、火炸药、机械加工、微电子、软件等多技术领域的支持与配合，其研制费用十分高昂，在常规弹药领域，侵彻弹药及其配套系统的技术密集度是最高的。



自 20 世纪 90 年代以来,在多次局部战争西方国家均大量运用了侵彻弹药。1991 年 1 月 17 日,以美国为首的多国部队对伊拉克实施了“沙漠风暴”军事行动,美军的 F-117A 隐身轰炸机对伊拉克境内的多个重要目标投掷了大量的具有硬目标打击能力的 GBU-27/B 激光制导炸弹,据统计,配备 BLU-109/B 专用侵彻战斗部的 GBU-27 打击的目标中有 70% 得到了有效摧毁。1999 年 3 月 24 日,科索沃战争爆发,以美国为首的北约部队对南联盟发动了大规模的空袭作战,侵彻弹药被大量用于打击南联盟的机库、桥梁和重要民用设施。尤为恶劣的是,5 月 8 日,美军利用 B-2 隐身轰炸机投下 5 枚联合直接攻击弹药(JDAM),悍然轰炸了中国驻南联盟大使馆,新华社记者邵云环、《光明日报》记者许杏虎和朱颖当场牺牲,数十人受伤,大使馆建筑严重损毁。2011 年爆发的利比亚战争中,以美国为首的北约部队进行武装干涉,英、法等国部队在空袭中使用了 Storm Shadow 巡航导弹对利比亚地面坚固目标进行了打击。这些战例表明,侵彻弹药已经成为霸权主义在世界各地维护其政治、军事利益的重要手段。

深入了解侵彻弹药,掌握关键技术,发展相应的攻防对抗能力,是我国装备领域科研人员不容推卸的责任和使命,对于提升我军装备水平、加强我国国防建设具有重要意义。“他山之石,可以攻玉”,外军侵彻弹药引信的发展历程和技术发展思路可以起到启发、借鉴的作用。本书结合外军侵彻弹药与引信的发展历程,对硬目标智能引信涉及的引信总体设计、传感器、侵彻过程评估、侵彻加速度分析、电子安全系统和试验验证等关键技术分别进行了系统分析。

本书第 1 章回顾了专用侵彻弹药出现和发展的详细历程,以侵彻弹药的发展目的、应用平台为线索对侵彻弹药发展的技术分支进行了梳理。通过本章介绍,读者可以系统地了解各国发展的多种侵彻弹药在工作原理、系统组成等方面的不同,以及其技术途径多样化的根本原因,可以了解到动能侵彻战斗部发展中面临的问题是如何解决的,各型侵彻弹药最终都达到了怎样的毁伤能力,从而理解侵彻弹药引信需要为弹药起爆控制提供怎样的功能;在 1.8 节,概括介绍了侵彻弹药最新的发展趋势。

第 2 章基本按侵彻弹药的技术演进过程介绍了外军多型侵彻弹药引信,并重点关注了硬目标智能引信的情况,基本覆盖了目前主要军事强国装备的侵彻弹药引信,力图使读者能够系统地了解一型硬目标引信的研发背景是怎样的,该引信采用了什么方案来满足武器系统总体要求,最终达到了怎样的技术水平,从而为读者勾勒出这些引信产品的技术全貌。

第 3 章对硬目标智能引信的关键技术进行了分析,提出了硬目标智能引信研发需要考虑的主要问题。对引信总体设计、安全系统选择、结构加固与防护、



起爆控制系统实现等主要技术分支进行了概况性介绍,简要介绍了典型硬目标智能引信设计思路与一般过程。

第4章、第5章着重讨论了侵彻战斗部和硬目标智能引信设计中关注的侵彻过程评估方法,对解析计算方法和模拟仿真方法分别进行了较为详细的介绍,给出了计算和仿真的实例,可以通过计算为设计阶段提供弹体侵彻深度、侵彻时间、承受加速度峰值等基本参数,也可通过有限元方法对侵彻过程中战斗部和引信的加速度瞬态历程进行详细的预测。

第6章结合引信在安全与解除保险控制方面对环境感知的需要,对用于感受冲击与侵彻环境所需的各种传感器与装置逐一进行了分析。在引信与目标发生碰撞时,传统的碰合开关、万向触发开关目前仍在许多侵彻弹药引信中使用,以其输出信号作为高级起爆控制功能的启动条件, MEMS 技术的发展,则为这类开关的微型化、低成本化开辟了新的技术方向。在感测侵彻硬目标过程的动态加速度时,需要使用加速度传感器,压电式传感器、压阻式传感器均可用于加速度的感测,由于压阻式传感器的固有优点,较前者更为适合在侵彻弹药引信中应用,但在更广泛的意义上,如侵彻领域的动态标定试验、实验室动态加载测试等场合,压电式加速度传感器仍然发挥着重要作用。结合两种传感器的自身特点,对其典型应用方式和需要注意的问题进行了讨论。

第7章对侵彻加速度信号组成进行了讨论,分析了侵彻加速度信号成分的成因,介绍了对侵彻加速度信号进行分析、评估的一般方法,包括刚体加速度的滤波方法、弹引系统响应评估方法和侵彻加速度信号时频分析方法。由于侵彻加速度信号和侵彻条件、弹引系统固有频率特性存在紧密的联系,本章对这种关系也进行了初步的论述,以期引起同行的讨论。

第8章对侵彻引信中应用日益广泛的电子安全系统原理和实现途径进行了详细讨论,介绍了以电子安全系统工作原理为核心的直列式引信是如何实现引信所需功能的。对电子安全系统所需的冲击片雷管、直流高压变换、高压触发放电等关键技术均有所覆盖,有助于读者了解该领域技术的一般性原理,把握直列式引信未来的发展脉络与趋势及其在侵彻弹药中的应用前景。

第9章较为全面地呈现了侵彻弹药引信研制、测试中各种动态试验方法。在这些动态试验方法中,有的已经在引信行业中运用多年,如马歇特锤试验、火炮试验,有的则很少在侵彻弹药领域之外发挥作用,如火箭橇试验、平衡炮试验、VHG 试验等,这也是侵彻弹药引信技术的独特性所致。囿于部分技术参数的敏感性和公开技术资料的匮乏,部分内容仅能概括地介绍试验基本原理和实施办法,读者在工作中遇到相关问题时,可与相关单位进行深入交流。

火箭军研究院的汪德武研究员对本书的主要内容进行了全面的统筹,并编



写了本书第 3、4、5 章，北京理工大学的王亚斌教授编写了本书的第 2、9 章，北京理工大学的李晓峰副研究员编写了本书第 7、8 章，空军装备研究院的吴碧高级工程师编写了本书的第 1、6 章，全书由李晓峰统稿。在本书完成过程中，刘明杰教授、范宁军教授对本书的内容提出了许多宝贵建议，本书中大部分插图来自英文原始资料，王晨博士以及王曦煜、田小川、姚发、童欣、栾栋林、姜冕、张帆、关敬文、王高原、成佳乐、郭放、张瑞宇等同学对主要的图表进行了翻译整理。本书的出版得到了北京理工大学研究生院的大力支持，同时北京理工大学出版社也为本书的出版给予了帮助，在此一并表示衷心的感谢。

本书既可以作为一本技术参考书，为行业内科研人员提供必要的参考，也可以作为弹药、引信专业的本科生、研究生学习引信学科知识的辅助教材。

由于时间紧迫，编者水平有限，书中疏漏和不当之处在所难免，热忱欢迎读者批评指正。

著者



目 录

第 1 章 侵彻弹药的发展与演化	001
1.1 概述	002
1.2 专用侵彻弹药的出现	004
1.3 美军 5 000 磅级侵彻战斗部的发展	012
1.4 坐标攻击型侵彻弹药	017
1.5 美军 2 000 磅级侵彻战斗部的发展	023
1.6 打击硬目标的巡航导弹战斗部	026
1.7 巨型侵彻弹药	030
1.8 高速、超高速侵彻弹药的发展	034
第 2 章 侵彻弹药引信的发展	037
2.1 概述	038
2.2 专用侵彻弹药引信的出现——FMU-143/B	039
2.3 硬目标智能引信的发端——HTSF 及其后继产品	044
2.4 先于 HTSF 形成装备的硬目标智能引信 PIMPF	049
2.5 美、英合作的 MEHTF 项目及其发展产品	054
2.6 可装定延期起爆式硬目标智能引信	060
2.6.1 Strom Shadow 巡航导弹配用的 MAFIS 引信	060
2.6.2 法军装备的 FMB21 模块化航弹-引信	063
2.6.3 美军联合可编程引信——FMU-152A/B	067



第3章 硬目标智能引信关键技术分析	071
3.1 概述	072
3.2 硬目标智能引信总体设计	074
3.3 硬目标智能引信防护技术	077
3.4 硬目标智能引信起爆控制技术	082
3.5 硬目标智能引信设计的一般方法	086
第4章 硬目标侵彻过程的数值计算评估方法	089
4.1 概述	090
4.2 硬目标侵彻理论发展概况	091
4.2.1 硬目标侵彻研究的进展	091
4.2.2 硬目标侵彻的基本现象与机理	092
4.3 侵彻经验公式	095
4.4 解析理论分析法	100
4.4.1 动态空腔膨胀理论模型与 Forrestal 半经验公式	101
4.4.2 刚性弹体侵彻混凝土目标机理分析	103
4.4.3 刚性弹体侵彻过程的运动分析	106
4.4.4 不同弹头形状和初速的弹体侵彻混凝土计算实例	109
4.4.5 应用侵彻混凝土运动学方程对刚体加速度进行预估	111
第5章 硬目标侵彻过程的仿真模拟评估方法	113
5.1 概述	114
5.2 有限元方法简介	115
5.3 显式非线性有限元分析原理	117
5.4 应用有限元方法进行硬目标侵彻过程 模拟需考虑的基本问题	121
5.5 硬目标侵彻过程有限元仿真的一般流程	123
5.6 硬目标侵彻过程有限元仿真实例	126
5.6.1 试验情况简介	126
5.6.2 有限元模型的建立	127
5.6.3 材料本构模型	129
5.6.4 仿真算法选择、接触控制与材料失效准则	131
5.6.5 侵彻过程与现象	131



5.7	硬目标侵彻过程有限元仿真的其他问题	134
第 6 章	硬目标智能引信中的传感器技术	137
6.1	概述	138
6.2	碰炸开关、惯性开关和惯性触发传感器	139
6.3	压电加速度传感器	145
6.3.1	压电加速度传感器基本原理	146
6.3.2	电荷放大器的灵敏度	149
6.3.3	电荷放大器的下限截止频率	152
6.3.4	压电加速度传感器的应用问题	154
6.4	压阻加速度传感器	155
6.4.1	压阻加速度传感器基本原理	155
6.4.2	典型压阻加速度传感器产品	156
第 7 章	侵彻加速度信号分析	165
7.1	概述	166
7.2	侵彻加速度信号的组成简析	167
7.2.1	刚体加速度	169
7.2.2	弹-引系统响应	173
7.2.3	加速度感测单元的振动问题	174
7.2.4	弹-引连接结构的碰撞问题	175
7.3	弹-引系统的振动模态	179
7.3.1	模态分析的基本概念和方法	180
7.3.2	单自由度系统自由振动	182
7.3.3	侵彻试验弹系统模态分析实例	184
7.4	硬目标智能引信的简化动力学分析	186
7.5	侵彻加速度信号时频分析方法	193
7.5.1	短时傅里叶变换	194
7.5.2	小波变换	195
7.5.3	Hilbert-Huang 变换	196
7.5.4	Wigner-Ville 分布	200
第 8 章	用于侵彻弹药直列式引信	207
8.1	概述	208