



★ ★ ★ ★  
“十三五”

国家重点出版物出版规划项目



国之重器出版工程

国防现代化建设

高效毁伤系统丛书·智能弹药理论与应用

## Geomagnetic Detection Theory and Application of Modern Fuze

# 现代引信地磁探测 理论与应用

丁立波 张合 著

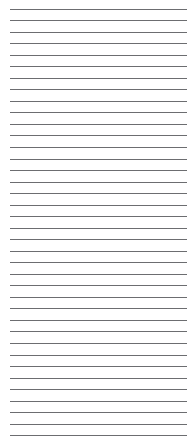


国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



国家重点出版物出版规划项目

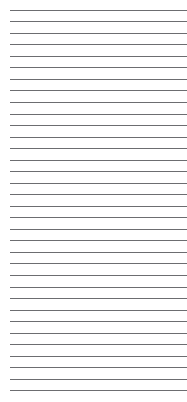
高效毁伤系统丛书·智能弹药理论与应用



# 现代引信地磁探测 理论与应用

Geomagnetic Detection Theory and  
Application of Modern Fuze

丁立波 张合 著



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

## 内 容 简 介

本书面向引信技术领域，从地磁场理论、地磁信息采集与处理、地磁信息应用三个方面阐述地磁探测的相关原理与技术。主要包括地磁探测概论、地磁场及其数学描述、铁磁材料与地磁畸变、引信地磁环境模拟技术、引信磁场测量技术，以及地磁探测在弹体姿态测量中的应用、地磁探测在引信炸点控制中的应用等内容。本书内容基于南京理工大学智能引信国防科技创新团队在地磁探测领域所开展的理论研究成果与型号研制经验，可作为引信相关行业科研与工程技术人员参考用书，也可作高等院校兵器科学与技术学科本科生和研究生的教材与参考用书。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目（C I P）数据

现代引信地磁探测理论与应用 / 丁立波，张合著

—北京：北京理工大学出版社，2021.6  
（高效毁伤系统丛书·智能弹药理论与应用）  
ISBN 978-7-5682-9951-0

I. ①现… II. ①丁… ②张… III. ①武器引信—研究 IV. ①TJ43

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2021）第 125601 号

---

出版 / 北京理工大学出版社有限责任公司  
社址 / 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）68944723（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 / 18.75  
字 数 / 326 千字  
版 次 / 2021 年 6 月第 1 版 2021 年 6 月第 1 次印刷  
定 价 / 89.00 元

责任编辑 / 王玲玲  
文案编辑 / 王玲玲  
责任校对 / 刘亚男  
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

# 《高效毁伤系统丛书·智能弹药理论与应用》

## 编写委员会

名誉主编：杨绍卿 朵英贤

主 编：张 合 何 勇 徐豫新 高 敏

编 委：（按姓氏笔画排序）

丁立波 马 虎 王传婷 王晓鸣 方 中

方 丹 任 杰 许进升 李长生 李文彬

李伟兵 李超旺 李豪杰 何 源 陈 雄

欧 渊 周晓东 郑 宇 赵晓旭 赵鹏铎

查冰婷 姚文进 夏 静 钱建平 郭 磊

焦俊杰 蔡文祥 潘绪超 薛海峰



## 丛书序

智能弹药被称为“有大脑的武器”，其以弹体为运载平台，采用精确制导系统精准毁伤目标，在武器装备进入信息发展时代的过程中发挥着最隐秘、最重要的作用，具有模块结构、远程作战、智能控制、精确打击、高效毁伤等突出特点，是武器装备现代化的直接体现。

智能弹药中的探测与目标方位识别、武器系统信息交联、多功能含能材料等内容作为武器终端毁伤的共性核心技术，起着引领尖端武器研发、推动装备升级换代的关键作用。近年来，我国逐步加快传统弹药向智能化、信息化、精确制导、高能毁伤等低成本智能化弹药领域的转型升级，从事武器装备和弹药战斗部研发的高等院校、科研院所迫切需要一系列兼具科学性、先进性，全面阐述智能弹药领域核心技术和最新前沿动态的学术著作。基于智能弹药技术前沿理论总结和发展、国防科研队伍与高层次高素质人才培养、高质量图书引领出版等方面的需求，《高效毁伤系统丛书·智能弹药理论与应用》应运而生。

北京理工大学出版社联合北京理工大学、南京理工大学和陆军工程大学等单位一线的科研和工程领域专家及其团队，依托爆炸科学与技术国家重点实验室、智能弹药国防重点学科实验室、机电动态控制国家级重点实验室、近程高速目标探测技术国防重点实验室以及高维信息智能感知与系统教育部重点实验室等多家单位，策划出版了本套反映我国智能弹药技术综合发展水平的高端学术著作。本套丛书以智能弹药的探测、毁伤、效能评估为主线，涵盖智能弹药目标近程智能探测技术、智能毁伤战斗部技术和智能弹药试验与效能评估等内容，凝聚了我国在这一前沿国防科技领域取得的原创性、引领性和颠覆性研究



成果，这些成果拥有高度自主知识产权，具有国际领先水平，充分践行了国家创新驱动发展战略。

经出版社与我国智能弹药研究领域领军科学家、教授学者们的多次研讨，《高效毁伤系统丛书·智能弹药理论与应用》最终确定为12册，具体分册名称如下：《智能弹药系统工程与相关技术》《灵巧引信设计基础理论与应用》《引信与武器系统信息交联理论与技术》《现代引信系统分析理论与方法》《现代引信地磁探测理论与应用》《新型破甲战斗部技术》《含能破片战斗部理论与应用》《智能弹药动力装置设计》《智能弹药动力装置实验系统设计与测试技术》《常规弹药智能化改造》《破片毁伤效应与防护技术》《毁伤效能精确评估技术》。

《高效毁伤系统丛书·智能弹药理论与应用》的内容依托多个国家重大专项，汇聚我国在弹药工程领域取得的卓越成果，入选“国家出版基金”项目、“‘十三五’国家重点出版物出版规划”项目和工业和信息化部“国之重器出版工程”项目。这套丛书承载着众多兵器科学技术工作者孜孜探索的累累硕果，相信本套丛书的出版，必定可以帮助读者更加系统、全面地了解我国智能弹药的发展现状和研究前沿，为推动我国国防和军队现代化、武器装备现代化做出贡献。

《高效毁伤系统丛书·智能弹药理论与应用》  
编写委员会



# 前 言

现代引信作为武器系统中弹药毁伤的关键子系统，不仅需要获取目标信息、环境信息，还要与武器系统平台、网络中心平台进行信息交联，在目标攻击的最佳时机输出最佳起爆控制信号，使武器系统对规定的目标造成最大程度的毁伤和破坏。

地磁探测是一种以地磁场为测量对象和参考基准的近程探测体制，具有探测器结构简单、工作可靠、隐蔽性好、抗冲击能力强等优点，是现代引信有效获取环境和目标信息的重要手段。

本书立足于引信技术领域，对地磁场理论基础、地磁场测量和模拟技术及工程应用实例进行详细的阐述。全书共分7章。第1章是概论，介绍了地磁探测的目的与意义，概述了地磁探测技术的发展现状，以及地磁探测在军事领域尤其是现代引信的目标探测与识别中的应用。

第2、3章是理论基础部分。介绍地磁场的数学描述方法及国际地磁参考场、世界磁场模型和中国地磁参考场三种地磁场模型。阐述了利用地磁场模型，根据地理位置和时间信息进行地磁场矢量查询的原理和算法，为引信提供地磁参考信息的数据来源。从物质的磁性与磁化特性入手，分析地磁畸变现象的产生机理，给出了地磁畸变的建模和分析方法，阐述利用地磁畸变进行目标探测、屏蔽干扰及畸变补偿的基本原理，为磁探测技术在现代引信上的应用奠定理论基础。

第4、5章是技术方法部分。结合现代引信科研与生产对地磁环境激励的需求，详细阐述了空间磁场产生技术、交变磁场模拟方法、空间磁场的动态控制方法，并对空间磁场测量系统进行了介绍。基于现代引信对地磁信息的需求，从地磁测量传感器选择、地磁信号调理电路设计、地磁信号采集与处理、测量



误差补偿等方面详细介绍地磁场标量测量、矢量测量及场量测量所涉及的硬件与软件技术。

第 6、7 章是应用实例部分。介绍了以地磁场矢量为参考基准，根据弹体坐标下的地磁分量信息解算姿态角的原理与方法，详细阐述了直线弹道滚转角测量、卫星定位辅助的姿态测量和陀螺辅助的姿态测量应用系统的硬件组成与软件处理流程。结合地磁探测技术在引信炸点控制中的应用，介绍了引信计地磁计转数电路的组成，阐述了地磁信号处理中的抗干扰和地磁测量盲区补偿技术，给出了引信地磁探测电路的静态和动态测试方法。

本书内容是南京理工大学智能引信国防科技创新团队多年研究成果和实践经验的总结。本书由张合教授策划并主笔第 1~3 章，第 4~7 章由丁立波副教授主笔，全书由丁立波统稿。感谢课题组研究生对本书内容的贡献，他们是陈勇巍博士、刘建敬博士、龙礼博士、高峰博士、李朝晖博士、胡彬硕士、陈丽硕士，感谢王琛博士、张舒然博士、王一卓硕士、张祎硕士在书稿编辑方面所做的工作，感谢任雪佳、方乾、谭紫曦硕士在书稿校对方面的工作。

因时间和作者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者



# 目 录

第 1 章 地磁探测概论 .....	001
1.1 地磁探测的目的与意义 .....	002
1.2 地磁探测技术的发展 .....	004
1.2.1 国外地磁探测技术的发展现状 .....	004
1.2.2 国内地磁探测技术的发展现状 .....	005
1.3 地磁探测在军事上的应用 .....	007
1.3.1 地磁计转数炸点控制技术的应用 .....	007
1.3.2 地磁探测姿态测量技术的应用 .....	008
1.3.3 目标地磁探测技术的应用 .....	009
参考文献 .....	012
第 2 章 地磁场及其数学描述 .....	013
2.1 地磁场概述 .....	014
2.1.1 地磁场的起源 .....	014
2.1.2 地磁场的组成 .....	015
2.1.3 地磁矢量要素 .....	016
2.2 地磁场的建模方法 .....	017
2.2.1 球谐分析法 .....	017
2.2.2 矩谐分析法 .....	018
2.2.3 球冠谐分析法 .....	019
2.2.4 泰勒多项式拟合法 .....	019



2.3	常用地磁场模型	020
2.3.1	国际地磁参考场 (IGRF)	020
2.3.2	世界磁场模型 (WMM)	021
2.3.3	中国地磁参考场 (ChinaGRF)	022
2.3.4	其他地磁模型	025
2.4	地磁场查询技术	027
2.4.1	全球地磁场查询	027
2.4.2	区域地磁场查询	034
	参考文献	045
第3章	铁磁性材料与地磁场畸变	047
3.1	物质的磁性及磁化特性分析	048
3.1.1	物质的磁性分类	048
3.1.2	铁磁材料磁化特性分析	051
3.2	地磁场畸变	052
3.2.1	地磁畸变机理	052
3.2.2	铁磁性物体的磁偶极子模型	053
3.3	基于地磁畸变的目标探测技术	055
3.3.1	磁异常 (MAD) 探测技术	055
3.3.2	标准正交基函数 (OBF) 分解算法	056
3.3.3	改进的 OBF 分解算法	063
3.4	地磁畸变的补偿	070
3.4.1	环境干扰误差分析	070
3.4.2	地磁畸变的补偿原理	071
3.5	铁磁材料对低频磁场的屏蔽	076
3.5.1	舵机磁干扰屏蔽技术	076
3.5.2	弹体对地磁场屏蔽效能的近似计算	078
	参考文献	082
第4章	引信地磁环境模拟技术	083
4.1	亥姆霍兹线圈基本原理	084
4.1.1	毕奥-萨伐尔定律	084
4.1.2	磁场叠加原理	085
4.1.3	圆形亥姆霍兹线圈磁场分布	085



4.2	正方形亥姆霍兹线圈磁场分析 .....	086
4.2.1	线圈磁场计算方法 .....	087
4.2.2	线圈在其轴线上的磁场分布 .....	088
4.2.3	线圈在空间的磁场分布 .....	091
4.2.4	三维线圈的磁场与线圈电流的对应关系 .....	093
4.2.5	线圈磁场均匀性分析 .....	095
4.3	交变磁场模拟技术 .....	098
4.3.1	轴向交变磁场模拟 .....	098
4.3.2	平面旋转磁场模拟 .....	099
4.4	空间磁场模拟技术 .....	099
4.4.1	空间磁场模拟系统组成 .....	099
4.4.2	磁场模拟系统控制软件设计 .....	103
4.4.3	磁场模拟系统的误差校正 .....	108
4.5	空间磁场测量技术 .....	121
4.5.1	F-40 多维磁场测试系统 .....	121
4.5.2	高精度位移系统 .....	123
4.5.3	CH-330F 三维磁通门计 .....	123
4.5.4	自动控制软件 .....	125
	参考文献 .....	126
<b>第 5 章</b>	<b>引信磁场测量技术 .....</b>	<b>127</b>
5.1	地磁测量传感器 .....	128
5.1.1	电磁感应线圈 .....	128
5.1.2	各向异性磁阻传感器 .....	129
5.1.3	隧道磁阻传感器 .....	132
5.1.4	其他磁传感器 .....	134
5.2	地磁信号调理电路 .....	137
5.2.1	前端放大电路 .....	137
5.2.2	程控增益放大电路 .....	139
5.2.3	滤波电路 .....	141
5.2.4	脉冲整形电路 .....	145
5.3	地磁测量系统的组成 .....	149
5.3.1	标量测量系统 .....	149
5.3.2	矢量测量系统 .....	149



5.3.3	场量测量系统 .....	150
5.4	地磁测量误差分析与建模 .....	150
5.4.1	地磁测量误差源分析 .....	150
5.4.2	误差模型建立 .....	153
5.5	地磁测量误差的静态校正 .....	154
5.5.1	有外部参考基准的测量误差校正 .....	154
5.5.2	无外部参考基准的测量误差校正 .....	155
5.6	地磁测量误差的在线组合校正 .....	160
5.6.1	基于递推最小二乘法的椭球拟合 .....	160
5.6.2	椭球系数对误差补偿系数的转化方法 .....	161
5.6.3	地磁检测组件测量误差在线组合校正流程 .....	162
	参考文献 .....	163
第 6 章	地磁探测在弹体姿态测量中的应用 .....	165
6.1	姿态角解算模型 .....	166
6.1.1	坐标系与坐标变换 .....	166
6.1.2	姿态角解算模型 .....	168
6.2	姿态角二值解分析 .....	170
6.2.1	俯仰角二值解分析 .....	172
6.2.2	滚转角二值解分析 .....	176
6.2.3	二值解的判别方法 .....	180
6.3	直线弹道滚转测量 .....	181
6.3.1	直线弹道下的滚转角解算模型 .....	181
6.3.2	滚转角辨识系统总体设计 .....	183
6.4	卫星定位辅助姿态测量 .....	191
6.4.1	地磁信息感应装定系统 .....	192
6.4.2	地磁信息感应装定系统结构 .....	192
6.4.3	地磁信息感应装定系统工作流程 .....	193
6.4.4	弹丸姿态角检测系统结构 .....	194
6.4.5	弹丸姿态角检测系统软件流程 .....	202
6.5	陀螺辅助姿态测量 .....	206
6.5.1	陀螺姿态检测模型 .....	206
6.5.2	地磁组件测量误差静态校正试验 .....	208
6.5.3	地磁组件测量误差在线组合校正试验 .....	211



6.5.4	地磁陀螺姿态检测系统设计及试验 .....	213
	参考文献 .....	232
<b>第 7 章</b>	<b>地磁探测在引信炸点控制中的应用 .....</b>	<b>233</b>
7.1	地磁计转数的原理及其实现方法 .....	234
7.2	地磁计转数盲区分析 .....	236
7.3	炮口区域抗干扰技术 .....	239
7.4	地磁计转数模块设计 .....	242
7.4.1	计转数传感器设计 .....	242
7.4.2	信号调理电路设计 .....	242
7.4.3	传感器信号调理电路测试 .....	244
7.5	计转数引信软件设计 .....	246
7.5.1	起始段计数方法 .....	247
7.5.2	周期补偿算法 .....	248
7.5.3	异常处理 .....	249
7.6	计转数定距引信试验研究 .....	249
7.6.1	试验系统简介 .....	250
7.6.2	电子头计转数功能试验 .....	251
7.6.3	炸点散布试验 .....	252
7.7	计转数自测速炸点修正技术 .....	253
7.7.1	自测速炸点修正原理 .....	253
7.7.2	引信作用时间修正方法 .....	254
7.7.3	炮口初速计算方法 .....	261
7.7.4	计转数自测速误差分析 .....	264
7.7.5	计转数自测速性能测试 .....	270
7.7.6	自测速炸点修正效果验证 .....	273
	索引 .....	276



第 1 章

地磁探测概论





## | 1.1 地磁探测的目的与意义 |

人类很早就发现了天然磁石，我国古代利用天然磁石发明了世界上最早的指南器具司南，后来又通过人工磁化方法制造了指向更为精确的指南针。但是人类对指南器具能够指示地球南北方向原因的认识却经历了相当长的过程，经过长期、大量的研究，才认识到地球本身就是一个巨大的磁体，产生的磁场称为地磁场。

地球磁场是一个随经纬度不同而变化，但在局部区域近似恒定的天然弱磁场。地磁探测技术主要是指基于噪声特性的磁异信号检测技术，主要是根据铁磁性金属的存在引起地磁场的局部变化现象，利用磁传感器采集处理变化的磁异信号实现对铁磁性目标的检测、识别、跟踪与定位等。以地磁场为背景的磁异信号检测技术具有抗干扰能力强、能够识别目标铁磁特性、无源被动探测、隐秘性好等优点，因此，世界各国非常重视地磁探测技术在军事领域的研究及应用。

地磁探测技术以地磁模型或者地磁图为应用基准，具有结构简单、工作可靠、成本低廉、隐蔽性好、抗冲击能力强、能实现自主定姿定位等优点，此外，还可与其他制导系统结合使用，提高了测量精度，增加了系统灵活性，适用于复杂工作环境下的应用。磁场测量或者探测是以磁学量为中间量进行测量的，



其突出特点是非接触，因此其检测信号几乎不受被检测物体的影响，故具有抗干扰能力强、隐蔽性能好等优点。

地磁探测技术对地面装甲目标的识别与修正弹药的姿态控制有着重大的应用价值。比如针对含有铁磁性物质的地面装甲目标对地磁场产生的磁场畸变特征的地磁信息探测。根据目标周围磁场畸变特征，探测到铁磁性金属目标的存在以及其相对于弹丸的具体方位，实现对地面装甲目标的精确探测与毁伤，提高引信对目标探测的可靠性。将地磁传感器安装在弹体头部，实时监测地磁场矢量的变化，可以探测到铁磁性金属目标的存在。根据畸变信号特征，结合目标类型、攻击方向等先验信息，可以识别出载体飞行轨迹与目标的相对位置关系，从而弹丸可以结合自身位置、姿态、速度等信息，选择最佳的起爆方式对目标进行有效毁伤；除此之外，还可以利用地磁探测技术测量弹丸地磁场的各个信号分量，通过计算可以获得弹丸的实时空间姿态，作为组合导航系统的导航信息，可以提高系统的整体导航精度及导航性能等。通过以上所举例来看，地磁探测技术对研究人员在科研方面的工作有着重大意义。

地磁场定姿具有无辐射、全天时、全天候、全地域等一系列优良特征。但由于过去磁探测器件的精度和尺寸得不到满足，一直未被制导方案采用。现代磁探测技术的发展和高精度磁阻传感器的广泛使用，为设计和使用低成本弹道修正系统提供了技术手段和关键器件。另外，高速信号处理芯片和可编程逻辑器件具有功能强大、运算速度快、性能可靠等优点，在国防和工业领域得到了广泛的使用。利用它们作为磁探测系统中信息处理和动作控制的部件，也可满足低成本弹道修正系统的需求。随着国外利用地磁探测进行制导的武器的出现，地磁探测定姿技术逐渐引起许多武器装备科研工作者的关注。目前多个国家正在开展把地磁探测技术作为一种新制导方式的研究，它同其他技术的复合将成为一种新的制导方法。

随着 21 世纪新形势下战场环境的变化，对各种火炮作战效率要求的不断提高，实现火力精确打击已经成为现在炮兵的重要任务。常规弹药往往无法对目标的具体方位精确探测，从而命中率较低，不能适应复杂的作战环境。而智能弹药不同于以往的常规弹药，精确制导弹药安装了新型传感器与电子信息处理设备，利用地磁探测以及图像识别等技术手段，获取自身的位置和目标方位的准确信息，通过中央信息处理单元控制弹道飞行轨迹，实现对目标的精确毁伤。精确制导弹药由于其命中精度高、毁伤效力强，已经成为各国的研究热点，而地磁探测作为一种新型探测方式，在军事领域中的研究与应用越来越广泛。



## | 1.2 地磁探测技术的发展 |

### 1.2.1 国外地磁探测技术的发展现状

国外最早对地磁探测展开了相应的研究工作，部分反坦克导弹型号已应用激光与地磁复合探测技术，如图 1.1 所示。英国索恩埃电子公司研制的激光多普勒与磁相结合的双模探测系统已应用于改进型陶-2B (BGM-71F) 反坦克导弹，其通过掠地飞行在一定的高度上实施对顶攻击。美国掠夺者 (PREDATOR) 近程反坦克导弹采用激光/地磁复合探测体制，实现对战场铁磁性目标的攻顶毁伤。瑞典博福斯公司 1990 年左右研制的第三代攻顶式反坦克导弹 MBT LAW 应用了激光/地磁复合近炸双模探测技术，弹目交会过程中通过近炸方式实现对目标的精确打击。



图 1.1 国外典型激光/地磁复合探测导弹

(a) “掠夺者”反坦克导弹；(b) 比尔 (BILL) 反坦克导弹

美国海军 ONR 成功研制了针对水下隐蔽性目标探测与识别的磁异信号导航系统。美国海岸系统局针对目标磁探测技术展开深入的研究，基于水雷引起的磁信号异常设计了一套目标探测、定位、识别与跟踪的磁异信号检测方法。加拿大海军对各水雷型号进行电磁模型构建，并成功研发了相应的磁探测与定位装置。美国昆腾科技公司研制了基于磁通门传感技术的战场远程控制及监视装置，进行了基于 AMR 磁阻传感器的相关装置研究工作。

俄罗斯的 SS-19 远程导弹采用地磁制导系统，可在大气层内沿地磁等高线飞行，具有极高的隐蔽性与机动性，增加了敌方拦截难度，主要用于应对美国的新型反弹道导弹系列。

美国阿连特技术系统公司设计出一套测量弹体在本地坐标系中滚转姿态