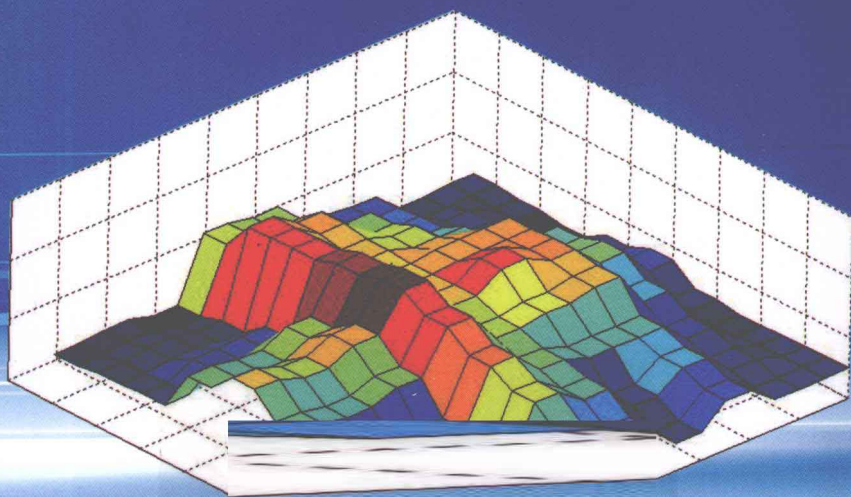


Static Detection  
Mechanism and  
Application

# 静电探测机理与应用



韩磊 编著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 静电探测机理与应用

韩 磊 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书共有9章。第1章介绍了静电探测技术的背景、发展情况和研究意义;第2章介绍了静电场理论基础;第3章分析了静电探测目标的起电机理;第4章着重介绍了人体静电的产生机理和特性;第5章介绍了非均匀电场中的介电电泳效应;第6章讨论了介电电泳在生物方面的应用;第7章主要介绍了目前国内外静电探测技术的研究成果、多种静电探测体制的机理和应用;第8章介绍了几种特殊电介质材料的制备原理和应用;第9章介绍了静电的其他应用。

本书可作为大专院校机械电子工程、电子信息工程等专业的研究生教材,也可作为在目标探测、生物医学、地震、信息技术等相关领域的科技工作者的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

静电探测机理与应用/韩磊编著. —北京:国防工业出版社,2012.6

ISBN 978-7-118-08195-4

I. ①静... II. ①韩... III. ①静电—研究 IV. ①  
0441.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 124538 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责任公司

新华书店经售

\*

开本 710×960 1/16 印张 15 字数 266 千字

2012 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 42.00 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

## 序

早在几千年前,人类对静电现象就有了观察和记录。但是,直到 20 世纪初,随着工业技术的发展,人们才开始对静电的应用与防护进行研究。静电探测是古老的静电学及现代电磁学、机械电子学、电动力学、材料学以及人体生理学等多种学科交叉融合产生的一个新型的应用技术研究领域。

静电探测具有隐蔽性好、抗隐身、抗电子干扰、无辐射、成本低、体积小、易实现便携等优点,20 世纪中期美国等发达国家对其开始研究和应用,其产品在军用和民用领域都取得了很好的效果,能有效地应用到街头巷战、安防反恐、安检、灾后救援等多个领域。

北京理工大学机电学院的课题组自 20 世纪末开始静电探测技术的研究,在静电探测原理分析和探测器的研制等方面做了大量工作,培养了多名硕士、博士研究生,发表了多篇学术论文。作者在博士期间即开始静电隔墙探人机理的研究,在国内首次把静电探测原理应用到人体目标探测领域,目前一直从事静电探人方向的研究,历时近十年时间,她对科研工作的执着和追求创新的精神值得肯定和赞赏。

作者通过在静电探测领域多年的积累和总结编撰此书,既是对以往工作成果的梳理和总结,使之更加系统,又对未来的研究方向提出了新的目标和展望。该书排序合理,层次清晰,重点突出。书中参阅了大量文献,融进了国内外最新研究成果。书中引用的例子和现实研究的课题内容有助于读者理解有关的基本概念和基本理论,以及本领域前沿性技术问题。从学术水平、技术内涵和应用方面来说,能适应静电技术研究工作者的需要。本书的出版将对我国静电技术的应用起到很好的推动作用,对从事电子技术、信息工程的研究者和工程技术人员也是一本有价值的读物。



2012 年 5 月

## 前 言

此书是我的第一本专著,亦是国内静电探测领域的第一本系统著述,我希望将这份收获和喜悦献给我的恩师崔占忠教授。

崔教授是我的博士导师,是他为我选定了静电探测的研究方向,自此我与静电探测结下不解之缘。从最初的懵懂无知,到后来的登堂入室,从开始的怀疑彷徨,到现在的矢志不渝,是崔教授一直在帮助我、支持我、激励我!他使我真正理解了导师的含义和分量。没有他在关键时刻的指点和鼓励,我不可能在静电探测研究的道路上走到今天,谢谢恩师!

崔教授是国内引信专业的学术权威,亦是国内静电探测领域的先行者。20世纪80年代,他从国外一些早期研究中,敏锐觉察到静电探测在未来军事应用中的重要意义,率先在国内开始了静电探测研究。在北京理工大学组建了静电探测团队,确立了静电探测的研究方向,进行了大量的基础研究。此书既是我对国内外静电探测研究成果的梳理,也是对崔教授为首的研究团队科研成果的总结。

崔教授审改了此书初稿,并欣然为此书作序。这既是崔教授对我的鼓励,更深含着他对静电探测研究的期望。

此外,北京理工大学的周兰庭教授对本书做了认真审核,我的同学李月琴博士、潘曦博士对本书的编撰提供了很多帮助,在此向他们表示深深的谢意。

静电探测是一个新兴的学术领域,至今仍有很多学者在质疑其可能性和可行性,希望本书能给有关研究提供一些参考。

作 者  
2012年5月

# 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b>         | 1  |
| 1.1 静电探测技术概述            | 1  |
| 1.1.1 静电探测的基本概念         | 2  |
| 1.1.2 静电探测的特点           | 2  |
| 1.1.3 静电探测技术涉及的研究领域     | 3  |
| 1.2 静电探测技术的原理及应用        | 3  |
| 1.2.1 信息化战争对现有探测系统提出的要求 | 3  |
| 1.2.2 静电引信基本原理          | 4  |
| 1.2.3 静电隔墙探入器           | 11 |
| 1.3 研究静电探测技术的意义         | 16 |
| <b>第 2 章 静电场基础理论</b>    | 17 |
| 2.1 库仑定律                | 17 |
| 2.2 电场强度                | 18 |
| 2.3 电通(量)和电通(量)密度       | 21 |
| 2.4 高斯定律                | 23 |
| 2.5 电位                  | 25 |
| 2.6 电偶极子                | 27 |
| 2.7 静电场中的物质             | 30 |
| 2.7.1 静电场中的导体           | 30 |
| 2.7.2 电场中的电介质           | 30 |
| 2.7.3 静电场中的半导体          | 34 |
| 2.8 静电场能量               | 34 |
| 2.8.1 概述                | 34 |
| 2.8.2 带电系统的总电能          | 35 |
| 2.8.3 电场能量密度            | 37 |
| 2.9 静电场的边界条件            | 37 |

|              |                 |           |
|--------------|-----------------|-----------|
| 2.9.1        | 法相场的边界条件        | 38        |
| 2.9.2        | 切向场的边界条件        | 39        |
| 2.9.3        | 分界面上电场的方向       | 41        |
| 2.10         | 导体的电容           | 41        |
| 2.11         | 静电场边值型问题的解法     | 44        |
| 2.11.1       | 泊松方程和拉普拉斯方程     | 44        |
| 2.11.2       | 镜像法             | 47        |
| 附录 A         | 电气镜像的基本例子       | 56        |
| A.1          | 无限导体平面和点电荷      | 56        |
| A.2          | 导体球壳和点电荷        | 56        |
| A.3          | 圆筒导体和直线状电荷      | 57        |
| A.4          | 介质边界面和点电荷       | 57        |
| A.5          | 导体表面诱导电荷的立体角法   | 58        |
| A.6          | 其他相关例题          | 60        |
| <b>第 3 章</b> | <b>物体静电起电机理</b> | <b>78</b> |
| 3.1          | 固体带电机理          | 78        |
| 3.1.1        | 固体表面的电性质        | 79        |
| 3.1.2        | 固体的带电机理         | 82        |
| 3.1.3        | 有助于带电的因素        | 86        |
| 3.1.4        | 电介质的极化类型        | 87        |
| 3.2          | 气体放电            | 87        |
| 3.2.1        | 气体放电的种类         | 87        |
| 3.2.2        | 带电粒子            | 88        |
| 3.2.3        | 放电机构            | 90        |
| 3.2.4        | 均匀电场放电形式        | 90        |
| <b>第 4 章</b> | <b>人体静电</b>     | <b>92</b> |
| 4.1          | 细胞的生物电现象        | 92        |
| 4.1.1        | 细胞的跨膜静息电位和动作电位  | 92        |
| 4.1.2        | 生物电产生的原理        | 93        |
| 4.2          | 心脏的电活动          | 96        |
| 4.2.1        | 心肌细胞的生物电现象      | 96        |
| 4.2.2        | 正常心电图形成原理       | 99        |

|            |                            |            |
|------------|----------------------------|------------|
| 4.3        | 人体带电机理 .....               | 102        |
| 4.3.1      | 组成人体的物质成分 .....            | 102        |
| 4.3.2      | 人体内部存在四种静电形态 .....         | 102        |
| 4.3.3      | 人体表面产生静电的原因 .....          | 103        |
| 4.3.4      | 人体静电的定义 .....              | 106        |
| 4.3.5      | 影响人体表面静电的因素 .....          | 107        |
| 4.3.6      | 人体表面起电放电过程的理论分析 .....      | 107        |
| 4.3.7      | 影响人体表面静电积累的因素 .....        | 109        |
| 4.3.8      | 人体静电电位的极端值 .....           | 110        |
| 4.4        | 人体静电参量及其测试 .....           | 112        |
| 4.4.1      | 人体静电电位的测试 .....            | 113        |
| 4.4.2      | 人体电阻及其测量 .....             | 114        |
| 4.4.3      | 人体静电电容的测量 .....            | 118        |
| 4.4.4      | 电容系数法及其应用 .....            | 122        |
| 4.4.5      | 人体电感 .....                 | 126        |
| <b>第5章</b> | <b>非均匀电场中的介电电泳效应 .....</b> | <b>128</b> |
| 5.1        | 概述 .....                   | 128        |
| 5.2        | 介电电泳 .....                 | 130        |
| 5.2.1      | 介电电泳和电致伸缩 .....            | 131        |
| 5.2.2      | 理想电介质的介电电泳 .....           | 132        |
| 5.2.3      | 逆电和顺电效应 .....              | 132        |
| 5.2.4      | 逆电冷却 .....                 | 132        |
| 5.2.5      | 极化类型 .....                 | 133        |
| 5.2.6      | 双原子偶极子产生的极化 .....          | 134        |
| 5.2.7      | 非均匀场对小电介质球的力 .....         | 136        |
| 5.2.8      | 介电电泳和电泳的对比 .....           | 137        |
| 5.2.9      | “聚合”效应 .....               | 138        |
| 5.3        | 不同电场分布的介电电泳 .....          | 139        |
| 5.3.1      | 球形分布电场 .....               | 139        |
| 5.3.2      | 圆柱形分布电场 .....              | 139        |
| 5.3.3      | 等动力分布电场 .....              | 140        |
| 5.4        | 真实电介质的介电电泳 .....           | 142        |
| 5.5        | 电介质弛豫时间 .....              | 143        |

|            |                                 |            |
|------------|---------------------------------|------------|
| 5.6        | 介电电泳力 .....                     | 144        |
| <b>第6章</b> | <b>介电电泳在生物学方面的应用 .....</b>      | <b>147</b> |
| 6.1        | 概述 .....                        | 147        |
| 6.2        | 在生物学方面的应用 .....                 | 147        |
| 6.3        | 基础理论分析 .....                    | 151        |
| 6.4        | 介电电泳力表达式 .....                  | 152        |
| 6.5        | 介电电泳在生物领域的应用前景 .....            | 153        |
| <b>第7章</b> | <b>静电探测技术 .....</b>             | <b>154</b> |
| 7.1        | 一种静电被动式近炸引信系统 .....             | 154        |
| 7.1.1      | 静电被动式近炸引信系统构成 .....             | 154        |
| 7.1.2      | 静电被动式近炸引信系统工作原理 .....           | 155        |
| 7.2        | “短路轴向电极式”被动静电探测器 .....          | 157        |
| 7.2.1      | “短路轴向电极式”被动静电探测器的探测方程 .....     | 157        |
| 7.2.2      | “短路轴向电极式”被动静电探测器的检测系统 .....     | 158        |
| 7.3        | 静电场矢量探测系统 .....                 | 159        |
| 7.3.1      | 二维空间点电荷方位计算方法 .....             | 159        |
| 7.3.2      | 二维空间点电荷距离计算方法 .....             | 160        |
| 7.3.3      | 三维空间点电荷方位计算方法 .....             | 161        |
| 7.3.4      | 三维空间点电荷距离计算方法 .....             | 162        |
| 7.3.5      | 静电矢量探测系统分析 .....                | 163        |
| 7.3.6      | 静电矢量探测系统对航模飞机的目标特性试验 .....      | 164        |
| 7.4        | “电极扫描式”被动静电探测系统 .....           | 165        |
| 7.4.1      | “电极扫描式”被动静电探测器的探测方程 .....       | 165        |
| 7.4.2      | “电极扫描式”被动静电探测系统对空中目标定位的原理 ..... | 168        |
| 7.4.3      | “电极扫描式”探测器对民航客机的目标特性试验 .....    | 168        |
| 7.5        | 被动式球形电极地面静电探测系统 .....           | 169        |
| 7.5.1      | 被动式地面静电探测系统的探测原理 .....          | 170        |
| 7.5.2      | 被动式球形电极地面静电探测系统的模型 .....        | 170        |
| 7.5.3      | 被动式球形电极地面静电探测系统的定位方法 .....      | 172        |
| 7.5.4      | 被动式地面静电探测器对航模飞机的目标特性试验 .....    | 174        |

|       |                                        |     |
|-------|----------------------------------------|-----|
| 7.5.5 | 基于平面圆阵的被动式静电探测系统阵列优化 .....             | 174 |
| 7.6   | 静电隔物探测技术 .....                         | 175 |
| 7.6.1 | 带电极位于在同一介质中的两平面导体内的<br>静电电位测量 .....    | 175 |
| 7.6.2 | 带电极位于在同一介质中的两平面导体外的<br>静电电位测量 .....    | 176 |
| 7.6.3 | 带电极位于平面分层多介质中的静电电位(场强)<br>测量 .....     | 177 |
| 7.6.4 | 考虑了地面介质后带电极位于平面分层多介质中的<br>静电场强测量 ..... | 181 |
| 7.7   | 静电成像探测系统 .....                         | 182 |
| 7.7.1 | 静电成像系统的有向性探测单元 .....                   | 182 |
| 7.7.2 | 静电成像系统的探测原理 .....                      | 184 |
| 7.7.3 | 静电成像探测系统构成 .....                       | 186 |
| 7.7.4 | 静电成像系统的探测试验 .....                      | 186 |
| 7.8   | 晴天下对荷电直升机的静电测量 .....                   | 187 |
| 7.8.1 | 晴天下荷电直升机的“路模型” .....                   | 188 |
| 7.8.2 | 晴天下荷电直升机的等效电路 .....                    | 188 |
| 7.8.3 | 晴天下荷电直升机的“场模型” .....                   | 190 |
| 7.8.4 | 晴天下对荷电直升机静电测量的意义 .....                 | 192 |
| 7.9   | 应用介电电泳效应实现的静电探测 .....                  | 192 |
| 7.9.1 | 介电电泳现象 .....                           | 192 |
| 7.9.2 | 介电电泳力 .....                            | 193 |
| 7.9.3 | 应用介电电泳原理实现对特殊材料的探测 .....               | 194 |
| 7.9.4 | 应用介电电泳原理实现对人体目标的探测 .....               | 197 |
| 第8章   | 电介质材料的特殊效应 .....                       | 201 |
| 8.1   | 驻极体 .....                              | 201 |
| 8.1.1 | 驻极体的性质 .....                           | 201 |
| 8.1.2 | 驻极体的制备 .....                           | 205 |
| 8.1.3 | 驻极体在静电探测方面的应用 .....                    | 210 |
| 8.2   | 铁电体 .....                              | 211 |
| 8.3   | 压电体 .....                              | 213 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| <b>第9章 静电的其他应用 .....</b>   | <b>215</b> |
| <b>9.1 生活方面 .....</b>      | <b>215</b> |
| 9.1.1 电子窗帘 .....           | 215        |
| 9.1.2 静电喷涂 .....           | 215        |
| 9.1.3 静电纺纱 .....           | 217        |
| 9.1.4 静电植绒 .....           | 218        |
| 9.1.5 静电复印 .....           | 218        |
| <b>9.2 工业方面 .....</b>      | <b>219</b> |
| 9.2.1 静电除尘与分选 .....        | 219        |
| 9.2.2 静电悬浮式微电机 .....       | 221        |
| 9.2.3 静电印刷 .....           | 222        |
| <b>9.3 自然界 .....</b>       | <b>223</b> |
| 9.3.1 电子和离子束 .....         | 223        |
| 9.3.2 静电除雾 .....           | 224        |
| <b>9.4 在高技术领域的应用 .....</b> | <b>226</b> |
| 9.4.1 静电火箭发动机 .....        | 226        |
| 9.4.2 静电轴承 .....           | 226        |
| 9.4.3 静电陀螺仪 .....          | 226        |
| 9.4.4 静电透镜 .....           | 227        |
| <b>参考文献 .....</b>          | <b>229</b> |

# 第1章 绪 论

## 1.1 静电探测技术概述

人类很早就认识到静电现象的存在,几千年前的古希腊人就发现了琥珀经毛皮摩擦后可以吸附羽毛等轻小物体。在中国古代,人们对静电现象也有记载,西晋张华《博物志》中有“今人梳头,解著衣,有随梳解结,有光者,亦有咤声”的论述。20世纪后,人们开始研究静电技术的应用,尝试在工业和生活中利用静电,如静电除尘、静电复印、静电喷绘、静电分离等。另一方面,静电也给人们带来了灾难,如引起炸药和电火工品发生意外爆炸,使火箭和导弹发射失败,损坏电子器件等危害。由此,静电学逐渐发展出了静电工程学和静电防护工程学两个学科方向。静电探测技术属于静电工程学范畴,是通过探测目标周围空间的静电场得到与目标相关的信息。静电探测的理论基础是静电场原理。

探测器的工作原理是充分利用目标及其环境的信息对目标进行探测。研制完全不受电子对抗和隐身威胁的新体制探测系统是反干扰、反隐身的有效途径。目标运动中产生的静电场正是这样一种可利用的信息源。任何使用电源或移动的物体都有可能因不同的带电过程而带上静电,这种静电对空中目标尤其明显。飞机制造商进行了很大的努力来降低这种静电,但飞机的静电量仍相当巨大。据测量,喷气式飞机的带电量可达  $10^{-3}\text{C}$ ,直升机的带电量可达  $10^{-6}\text{C} \sim 10^{-4}\text{C}$ ,飞行弹丸带电量可达  $10^{-12}\text{C} \sim 10^{-6}\text{C}$ 。飞机的电位一般为几十千伏,最大可达500kV。空中目标在飞行过程中所产生的静电,在其周围空间几百米甚至上千米的较大范围内形成探测的静电场。

被动式静电探测器不通过发射信号的方法来实现对目标的探测,因此被动式静电探测器具有良好的自身隐蔽性,这样就大大提高了战场的生存率。由于采用被动式工作体制,武器系统的功耗小,可以满足该武器布设后长期工作的要求。现有的干扰设备主要针对无线电探测体制,对静电探测器基本无效。因此静电探测有很好的抗人工干扰能力。空中飞行目标由于摩擦、静电感应等原因产生的静电场是无法去除的,因此无法如同现有的隐身飞机对无线电波探测系统隐身一样对静电探测系统隐身。

### 1.1.1 静电探测的基本概念

静电探测就是通过检测目标的静电场而获得目标信息的探测方法。任何使用电源或移动的物体都有可能因不同的带电过程而带上静电。通过探测目标产生的静电场而获取目标信息就是静电探测的核心。静电探测技术逐渐被人们所重视,在军事和民用领域都将成为有实际意义的探测手段。静电探测可分为被动式探测(Passive Electrostatic Detector)和主动式探测(Active Electrostatic Detector):凡利用目标产生的静电场探测目标的,为被动式静电探测;若静电场由探测器本身产生,利用目标对这一静电场产生扰动而获取目标信息的,称为主动式静电探测。

静电探测器在军事上有广泛的应用前景。例如,对于空中飞行的目标,由于摩擦、静电感应等原因产生的静电场是无法去除的,因此无法如同现有的隐身飞机对无线电波探测系统隐身一样对静电探测系统隐身。静电探测可以对抗现有任何形式的电子干扰,且自然干扰(包括雨、雪、云、太阳等和地面目标如建筑物、树丛、水波等)以及多台探测器相互之间的干扰对它的影响也不明显。同时,被动式静电探测器不通过发射信号的方法来实现对目标的探测,因此具有良好的自身隐蔽性,大大提高了战场的生存率。民用领域,静电隔墙探人或探物,利用静电场实现对人体、物体的探测(发现,定向),隔墙对目标进行扫描探测,并对目标进行定位显示,机动性强,操作简单。此类探测器可广泛应用于地震、火灾、建筑物坍塌等灾害发生时的生命搜救工作,也可用于公安和武警的反恐防暴、追捕罪犯、特种监视、边检等任务中。

### 1.1.2 静电探测的特点

利用目标带电体的静电场进行探测的体制有如下特点:

(1) 应用的广泛性。任何使用发动机或移动的物体都必定会因为各种不同的带电过程而带上静电。带电现象对于运动速度较高的物体尤其明显。例如,直升飞机的飞行速度虽然不大,但其高速旋转的旋翼仍会使其带上大量的静电。喷气式飞机上一般设置有专用的放电装置消除大量聚集的静电电荷对飞机的不良影响,但飞机的静电量依然相当大。人体或物体的运动产生的静电场都可以利用静电探测技术探测。

(2) 良好的抗隐身功能。对于目标特别是运动中的目标(如飞行中的飞机或导弹)来说,由于因摩擦、静电感应等原因产生的静电场始终存在,无法去除,因此现有的隐身技术对静电探测方法是无效的。在利用静电探测器阵列布设的方法综合利用信息融合技术的前提下,可利用的信息更加丰富,因此具有良好的

抗隐身能力。

(3) 良好的隐蔽性。由于静电探测器多采用被动探测的方式,不通过发射信号的方法实现对目标的探测,因此它就具有良好的自身隐蔽性,这样就大大提高了战场的生存能力。

(4) 良好的抗人工干扰性。现有的针对无线电探测体制的干扰设备对静电目标探测器无效,并且由于运动目标带电量巨大,产生电磁场复杂,很难模拟,因此静电目标探测器具有很好的抗干扰能力。

(5) 工作时间全天候。静电探测器不受白天和黑夜的影响,且不需要对外界放射能量,功率小,可以长时间全天候工作。

(6) 运行和维护简单。静电探测器相对于雷达等探测设备,造价低廉、运行简单、可靠性强、维护方便。可用于战场侦察和民用探测,性能价格比高。

### 1.1.3 静电探测技术涉及的研究领域

静电探测技术涉及电磁学、电动力学、材料学、高分子物理学、人体生理学、工程力学、机械电子工程、信号处理等多个研究领域,只有通过多学科的交叉和融合,才能在基础理论研究和技术创新方面有重大的突破。

## 1.2 静电探测技术的原理及应用

### 1.2.1 信息化战争对现有探测系统提出的要求

军用探测技术是高技术战争中制胜的重要因素之一,是航天技术与信息技术相结合的产物。目前,已发展和投入使用的军用探测技术有:

(1) 雷达探测技术。它是利用物体对无线电波的反射特性来发现和测定目标位置的“无线电定位技术”。它广泛地应用于战场侦察、防卫、引导、火控等现代战争的各个方面。

(2) 光学探测技术。它主要应用各种光学摄影机进行战场照相侦察。

(3) 地面信号探测技术。这是一种通过地面目标所引起的电、声、磁、地面振动和红外辐射等物理变化来确定目标的探测技术。

(4) 夜视技术。这是用于在夜暗环境中帮助人眼增强视觉的一种专门技术。在现代战场上广泛使用的夜视装置主要有红外夜视仪、微光夜视仪、微光电视及热成像仪四种。

总之,信息化战争对现有探测系统提出的要求同时也是未来军用探测技术的发展趋势是:空间上的立体化;速度上的实时化;手段上的综合化;侦察、监视

与打击上的一体化。

根据以上的要求,静电探测技术具有探测距离远、抗干扰能力强、无辐射、便携性好、易与其他探测方式复合、成本低等优点,是一种新型的极具前景的探测方式。

### 1.2.2 静电引信基本原理

静电目标探测器最早被用于静电引信,是静电探测技术的一种特殊应用。这里所说的静电引信包括静电复合引信。静电引信(Electrostatic Fuze)是通过探测目标产生的静电场或目标与探测器之间的静电场的变化而获得目标信息的近感引信。

以被动式地面静电探测系统为例,说明静电探测的基本工作过程。该系统由两三个子系统组成,即地面探测器、中继器和监控装置,如图 1.1 所示,其中,探测器和监控装置是各类地面传感侦察监视系统所共有的。被动式地面静电探测系统的基本工作程序是:首先以人工布设方式,将探测器按计划设置在军事上需要防御的地区或低空飞行武器的来袭方向沿线,当探测器获得目标活动的信息后,便自动或根据指令以无线电发射或有线电传递的方式,将信息传送至监控装置,从而使得侦察单位可以迅速及时地获取敌方情报。

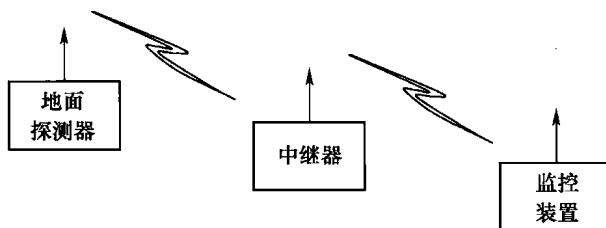


图 1.1 被动式地面静电探测系统组成

监控装置实际上就是一个信息接收、显示系统。它可以接收、显示由多个探测器传来的信息。当需要进行远距离侦察与监控,或战场地形复杂时,监控站无法直接接收探测器发射的信息时,还需要加设地面或空中中继器,中继器的放置位置恰当,可扩大监控距离。

地面探测器是系统中的关键部分,其技术性能直接影响着战术使用。地面探测器由传感器、信号处理电路、发射机和电源四部分组成,如图 1.2 所示。

传感器是将测得的某一物理量变换成便于传递的另一物理量(通常是电量,如电压、电流、电阻等)的器件。地面探测器正是通过探测这些物理量的变化,来发现与识别运动目标。被动式地面静电探测系统作为一种辅助性战场侦

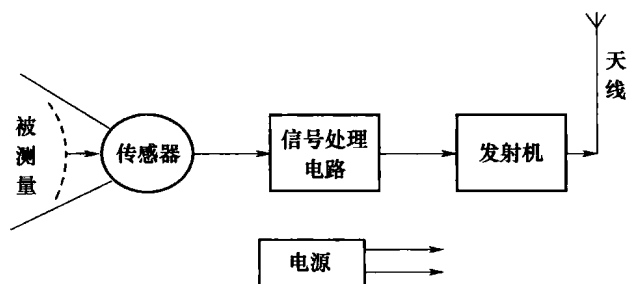


图 1.2 被动式地面探测器的组成

察监视手段,弥补了雷达、红外和光学侦察器材容易受到干扰,以及低空飞行武器常常在雷达盲区的不足。在对抗现代空中威胁,尤其是针对超低空飞行的隐身飞机、武装直升机、巡航导弹等突防能力较强的武器系统的威胁时,可以将被动式地面静电探测系统在需要军事防御要地的外部,并在敌方可能的空袭武器来袭方向沿线,布设一周或几周,实现对该区域超低空入侵目标(敌方武装直升机、巡航导弹和隐身飞机)的预警。因此研究具有较远探测距离的地面静电探测器用于防空预警具有重大意义。并且,由于静电探测器造价低廉,需要时可大量布设,用于国土及重要地面设施的预警防御体系。

### 1. 主动式静电引信

20 世纪 50 年代美国哈里戴蒙德军械引信实验室(HDL)研究了为非旋转弹配用的主动式静电引信,并在 CWS-5“毒刺”炸弹和 81mm 口径 T202 迫击炮弹上进行了实弹研究。

主动式静电引信的工作原理如图 1.3 所示。图 1.3 中,弹体被分为两部分:探测电极 N 和弹体 B,其间用绝缘材料隔离。在弹丸遇到目标以前,弹体主动地给自身带上电荷。由于两电极间的绝缘材料有轻微的导电能力,允许两电极的电荷因电势的高低不等而流动。相对于飞行时间而言,探测电极 N 和弹体 B 间的时间常量  $RC$  远小于弹丸的飞行时间。所以在接近目标前,可以认为两者间电荷分布达到平衡,不再有电荷的流动,即两电极间电压差为零。当目标 T 在引信的作用距离内时,由于探测电极 N 和弹体 B 间的时间常量  $RC$  远大于引信和目标相遇所需的时间,所以可以认为弹目接近过程中两电极上的电荷保持不变。然而,随着弹目的接近,电极 N 和弹体 B 间均引入对目标 T 的电容,且距离越近其间的电容越大。根据电容和电荷的关系,当电容增大时,电极对目标 T 的电势降低,且距离越近电势越低。由于电极 N 比弹体 B 更靠近目标,所以电极 N 的电容增加比弹体 B 大,其电势的下降比弹体更快,从而在两电极间产生一负压  $\Delta U$ 。这一电压经阴极射线放大器放大,至闸流管,最后起爆雷管。

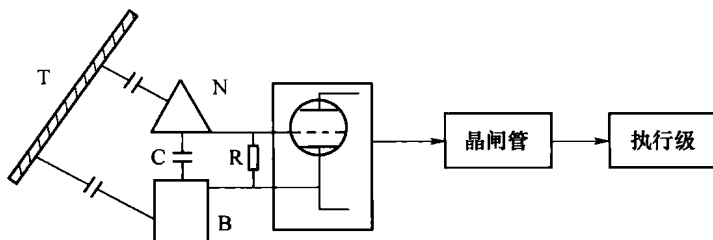


图 1.3 主动式静电引信工作原理图

弹丸主动给自身带电的方法有两种：一种是弹丸携带带电微粒状物质，当弹丸脱离炮口以后在空中自由飞行时，带电微粒从容器中高速喷向探测电极和弹体，给两电极带上电荷；另一种是接触起电，即弹丸在脱离炮口的瞬间，接触带有很高电压的金属电极，从而带上上万伏的电压。实验证明两种方法都是可行的。

然而这种引信的缺点是作用距离太近，其平均作用距离不超过 3 英尺<sup>①</sup>。此外，不同气候条件下，电荷在空中飞行时电荷泄放的数量不一致，使作用距离散布较大，在雨天的情况下不能正常作用。因此，这种引信没有见到装备部队的资料，在其后的年代中也不再有相关的研究报道。

此外，在 20 世纪 60 年代中期，美国还研究了另外一种 DC 型主动式静电引信。它与上述主动静电引信的区别是电极电荷的产生方式，即它通过在两探测电极间施加一恒定的直流电压来获得电荷，并保持这两电极上的电荷始终恒定。这种引信的优点是受气象条件影响小。其原理如图 1.4 所示。

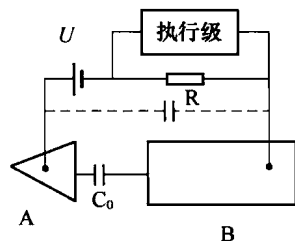


图 1.4 DC 型主动式静电引信

图中 A 电极为探测电极，B 电极为弹体，两电极间用绝缘介质隔离。当弹丸脱离炮口以后，在探测电极与弹体间预先加一直流电压  $U$ ，从而在探测电极 A 和弹体电极 B 形成一静电场，并分别给两电极带上等量异号的电荷，这一电荷在引信的作用过程中始终保持不变。如果令探测电极和弹体电极间的电容为  $C_0$ ，两电极间的电荷为  $Q$ ，则有关系：

$$Q = UC_0 \quad (1.1)$$

当接近目标时，目标对探测电极 A、B 间建立的电场的边缘场产生扰动，从而使两电极间有电容增加  $\Delta C$ ，因此电荷增量为

<sup>①</sup> 1 英尺 = 0.3048m。