

无线电引信原理

余叔涵 编著



国防工业出版社

前 言

无线电引信是利用电磁波获得目标信息的非触发引信。它被称为第二次世界大战中的三大发明之一，至今已有四十多年的历史了。现代科学技术发达国家已经把许多类型的无线电引信用于部队装备中，大大提高了弹药的杀伤效果。

在60年代以前，研制使用的主要是元件数少、结构简单、用多卜勒效应原理工作的无线电引信。在60年代以后，随着无线电技术、无线电元件和器件的迅速发展，无线电引信已向着小型化、集成化、高可靠性、抗干扰性强的方向发展。除米波多卜勒原理外，各国正在研究和发展其他体制的无线电引信。

这本《无线电引信原理》主要讨论无线电引信的基本概念，研究在非触发引信中应用无线电技术的基本原理和分析方法。本书在叙述方法上以物理概念为主，旨在通过一些不太复杂的数学运算来描述无线电引信的基本要求与线路参数之间的关系，从而为研究这一技术提供基础知识。

为了分析方便，书中的叙述主要是谈对付空中目标的弹种配用的无线电引信。

本书在写作过程中，一直受到叶英同志的鼓励和帮助。张松年、李玉清、刘俊生等同志参加了审阅工作，提出了许多宝贵意见，在此特向他们表示深切的谢意。

由于作者理论水平有限，实践经验不足，书中可能存在不少错误，诚恳地希望读者批评指正。

余叔涵

目 录

第一章 无线电引信的基本知识	1
§ 1-1 无线电引信的种类及其组成部分	1
1.1.1 无线电引信的种类	1
1.1.2 无线电引信的组成部分	3
§ 1-2 无线电引信的战术技术要求	4
1.2.1 可靠性	4
1.2.2 起爆面与杀伤面重合	9
1.2.3 无线电引信的正常作用概率	15
1.2.4 其他方面的要求	16
§ 1-3 干扰与抗干扰	19
1.3.1 消极干扰	20
1.3.2 积极干扰	25
§ 1-4 无线电引信的工作频段	30
第二章 靠幅度控制距离的无线电引信	36
§ 2-1 连续波多卜勒引信	36
2.1.1 工作原理	37
2.1.2 电路结构	41
2.1.3 提高引信作用距离的途径	48
2.1.4 抗干扰	50
§ 2-2 调频式引信	64
2.2.1 发射部分	65
2.2.2 接收部分	66
§ 2-3 脉冲多卜勒引信	67
2.3.1 工作原理	67
2.3.2 有关参数的选择	70
§ 2-4 脉冲编码引信	73

§ 2-5 靠幅度控制距离的无线电引信的特点	74
第三章 调频测距引信	76
§ 3-1 工作原理	76
§ 3-2 调频测距引信的发射机	82
3.2.1 调制器	82
3.2.2 调频振荡器	84
§ 3-3 调频测距引信的接收机	98
3.3.1 混频器	98
3.3.2 频率识别器	100
第四章 脉冲测距引信	105
第五章 相位测距引信	110
§ 5-1 主动式相位测距引信	110
5.1.1 工作原理	110
5.1.2 比相计	117
5.1.3 PIN 调制器	120
§ 5-2 被动式相位测距引信	123
第六章 噪声引信	129
§ 6-1 噪声信号的特性	130
§ 6-2 噪声引信的工作原理	138
6.2.1 自相关噪声引信的工作原理	139
6.2.2 反相关噪声引信的工作原理	142
第七章 无线电指令引信	146
§ 7-1 无线电指令引信的工作原理	146
§ 7-2 无线电指令时间引信的主要部件	150
7.2.1 振荡器	150
7.2.2 计数器	153
结束语	156

第一章 无线电引信的基本知识

§ 1-1 无线电引信的种类及其组成部分

1.1.1 无线电引信的种类

无线电引信的种类很多，随着科学的不断发展，还会出现更多型式的无线电引信。如果根据在确定起爆瞬间所使用的原级能源的来源，无线电引信可分为被动式、半主动式、主动式三种类型。

被动式无线电引信本身不带辐射源，是利用目标的发射机所发射的电磁波在弹目空间随距离不同而发生变化，根据这种变化规律而使弹丸在一定的位罝爆炸，如图1-1。

由于被动式无线电引信本身不带辐射源，故这种引信的结构简单，并且它的工作体制对方很难破获进而进行干扰。但是，它的工作信息完全依赖于目标的辐射源，所以若当弹丸接

近目标时，目标的辐射消失，引信就将失去作用。另外，大部分目标的电磁波特性是不可能预先知道的，这也给使用被动式无线电引信带来障碍。尽管它存在这些缺点，但用来对付能够发射电磁波的目标，被动式无线电引信还是一种比较好的引信。

主动式无线电引信是应用引信自己的辐射能量作为原级能源。这一能量产生于无线电发射机。无线电发射机通过天线向空间发射电磁波，这些电磁波碰上目标后返回，由引信接收天线接



图 1-1

收，形成目标的信息，如图 1-2。

由于主动式无线电引信利用自己携带的能源发射电磁波，摆脱了引信对目标的依赖性，可对任何目标发生作用；由于引信是靠近目标才动作的，故辐射功率并不大，一般在一瓦以内，有的可少至 20 毫瓦。但是，它的设备是比较复杂的。这种引信发出的无线电波被敌方截获后，可对引信组织人工干扰，所以抗干扰是主动式无线电引信必须考虑的问题。由于有对任何目标发生作用的特点，所以它是目前运用最多的一种无线电引信型式。

主动式无线电引信又可根据电磁波的特性和确定弹目距离的方法分成许多型式，如图 1-3 所示。



图 1-2

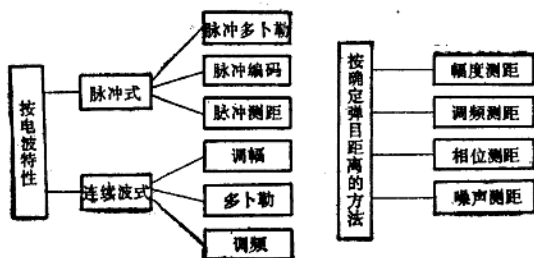


图 1-3

半主动式无线电引信利用的是设在我方阵地（飞机、舰艇、地面等）的原级能源向空间发射电磁波，通过接收辐射源直接发出的电磁波和目标反射的电磁波来确定动作瞬时，或者通过辐射源直接给出动作信号而作用的，如图 1-4 所示。

半主动式无线电引信本身没有辐射源，故同被动式引信一样，结构比较简单。但是，要求有一个只能处于我方战区的、功率强大的、设备复杂而且昂贵的辐射源，如果这个辐射源被摧毁，引

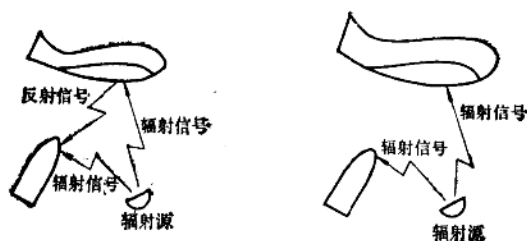


图 1-4

信就将失去作用。

1.1.2 无线电引信的组成部分

一个完整的无线电引信和其他引信一样，是由保险机构、远距离解除保险机构、自炸机构（它通常只用于对空引信）、觉察装置、隔离装置、发火机构等几部分组成。除了觉察装置外，其他部分在有关书籍中已有详尽研究，因而我们只讨论觉察装置部分。

觉察装置的组成如图

1-5 所示，主要由天线、输入电路和信息处理电路、执行级、辐射源（被动式和半主动式无线电引信没有这一部分）、电源等几部分组成。

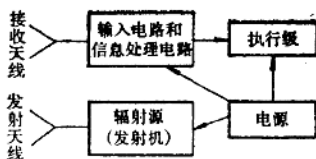


图 1-5

1. 天线 用来将高频电流的能量变换为向预定空间发射电磁波能量的设备，或用来将某方向发来的电磁波能量变换为高频电流能量的设备统称为天线。天线的性能对引信的工作状态和弹丸的杀伤效果都有着很大的影响。

2. 输入电路和信息处理电路 识别从天线输入的信号中与目标有关的信号，并将目标信息经过适当的处理后送入执行级。

它是解决无线电引信抗干扰,使引信正常工作的关键部件之一。

3. 执行级 执行级是将信息处理电路送来的信号给予足够能量,以便引爆电雷管的装置。

4. 辐射源(发射机) 辐射源是产生一定功率、频率和某种调制方式的振荡器。它是主动式无线电引信的心脏。

5. 电源 电源是供给引信各电器部分能量,保证它们正常工作的设备。

§ 1-2 无线电引信的战术技术要求

无线电引信不但要有安全性、长期贮存性、制造的工艺性和经济性等一般引信所具有的要求,而且还应有起爆面与杀伤面重合、抗干扰、可靠性、正常作用概率等特殊要求。本节主要讨论除抗干扰外的无线电引信的一些特殊战术技术要求,抗干扰放在下一节专门研究。

1.2.1 可靠性

引信的可靠性可以用可靠性概率 P_R 来衡量,所谓引信的可靠性在一般情况下可以理解为在给定的使用条件下,在确定的时间间隔内,引信不失效的工作概率。

所谓不失效的工作,是指引信正常地按照要求完成全部预定的作用。如引信在弹丸飞行一定时间后可靠解除保险;在引信接近目标时可靠作用、不瞎火。引信从正常状态向不正常状态的转变过程称为失效。如果这时不消除故障,引信就不可能继续完成预定的作用。

失效可以分为部分失效和完全失效二种形式。部分失效时,引信某一部分特性变坏而超出允许值范围。此时引信仍然工作,但不能满足所要求的数量指标。如由于接触不良,引起无线电电路放大系数的明显波动所造成的引信失效,可作为部分失效的典型例子。此时引信仍然工作,但对信号的放大可能低到不允许的

程度。完全失效时，引信完全停止工作。如电源因某种原因与电路没有接通，是引起引信完全失效的典型原因。

还可把失效分为突然的（随机的）和逐渐的（陈旧的）二种。逐渐失效的过程通常是引信的某些特性逐渐的、比较缓慢的变化（如引信的放大系数减小，发射功率降低，电源电压下降，等等）。逐渐失效主要决定于引信的贮存时间，是可以防止的。逐渐失效，在大多数情况下是部分失效。在大多数情况下，随机失效是全部的、彻底的，按时间的随机分布是这种失效的基本特性。

如果引信中的一个部件或一个元件发生故障（失效），整个引信的正常工作就遭到破坏（复合引信和多路并联引信除外）。一般说来，某一元件发生失效会引起其他元件也发生失效。但假如不考虑这类派生性失效，我们就可以认为，发生故障的事件是相互独立的。根据概率论关于独立事件同时发生的定理，引信的可靠性概率可以用乘积表示如下：

$$P_H = \prod_{i=1}^n P_{H_i}$$

式中 P_{H_i} ——第 i 个元件（或部件）的可靠性概率，

n ——引信内的元件或部件的数量。

若把无线电引信分成机械和电路两部分组成，那么

$$P_H = P_G P_B$$

式中 P_G ——引信机械部分的可靠性概率，

P_B ——引信电路部分的可靠性概率。

通常电路部分的失效是失效的基本原因，即在一般情况下 $P_B \gg P_G$ ，所以下面我们只讨论电路部分的可靠性概率。

为了获得引信可靠性概率计算公式，我们引入失效强度的概念。失效强度等于在单位时间内（例如 1 小时），发生失效的引信（指电路部分）数同这段时间开始时正常工作的引信（指电路）数之比，即

$$\lambda_B = \frac{\Delta N}{N - N_t \Delta t}$$

式中 λ_B ——失效强度；

ΔN ——在 t 到 $t + \Delta t$ 的时间间隔内发生失效的引信数；

N ——受试引信的总数；

N_t ——在时刻 t 时已经失效的引信总数。

图 1-6 所示的曲线是典型的失效强度曲线，它表明引信电路存在着三个工作阶段，在图中用 I、II、III 来表示三个阶段。



图 1-6

在 I 阶段时间内，由于电路的老化，失效强度很高，并且随着时间而剧烈地改变。I 阶段的存在及其特性揭示了最薄弱元件的失效强度，以及由于生产上的原因所引起的电路故障。因此，为了提高可靠性，使电路能在 III 阶段时间内使用，必须对电路进行预先老化。所以对器件或整个引信电路进行预先老化是无线电引信必须进行的。在 II 阶段时间内，失效强度减小了，并且基本是恒定的。这时失效基本上带有随机性质。这一阶段是电路使用的工作阶段。在 III 阶段时间内，由于电路中各种元件的陈旧，失效强度又增加了，此时电路也不适于应用。

因此，我们只须考虑 II 阶段时间内电路的可靠性。在此阶段时间内，可靠性概率为指数分布，由下式来确定：

$$P_B = e^{-\lambda_B T_B} \quad (1-1)$$

式中 T_B ——无线电电路部分的工作时间。

一般认为，电路由 N 个串联连接的不同元件组成，每一类元件的失效强度也不同，并分别等于 $\lambda_{B_1}, \lambda_{B_2}, \dots, \lambda_{B_n}$ 。其次，取电路中的总元件数目等于 $N (=N_1 + N_2 + \dots + N_n)$ ，此处 $N_1, N_2, \dots, N_n$ 为每一类元件的数目，分别以 $P_{B_1}, P_{B_2}, \dots, P_{B_n}$ 表示每一类元件的可靠性。由这些元件所组成的电路的可靠性，可以表示为：

$$P_B = P_{B_1}^{N_1} P_{B_2}^{N_2} \cdots P_{B_n}^{N_n} \quad (1-2)$$

假定每一类元件的可靠性都服从于指数律，则得：

$$P_B = e^{-N_1 \lambda_{B_1} T_B} e^{-N_2 \lambda_{B_2} T_B} \cdots e^{-N_n \lambda_{B_n} T_B} \quad (1-3)$$

或

$$P_B = e^{-T_B \sum_{i=1}^n N_i \lambda_{B_i}} = e^{-T_B \Lambda} \quad (1-3')$$

Λ 是电路的失效强度

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n N_i \lambda_{B_i}$$

因此，电路的失效强度可以根据电路各组成元件的失效强度之和求出。

通常，引信电路的可靠性接近于 1 ($\Lambda T_B \ll 1$)，那么式 (1-3') 还可简化。利用下式

$$e^x \approx 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \cdots$$

并取展开式的前二项，式 (1-3') 就变成

$$P_B \approx 1 - T_B \sum_{i=1}^n N_i \lambda_{B_i} = 1 - T_B \Lambda \quad (1-3'')$$

上式给出的误差不超过 $(T_B \Lambda)^2 / 2$ 。

现在我们用具体例子来估算引信电路部分可靠概率的量值。

已知（根据统计数据）电路部分的一个管子平均需要 8 个其他元件，这 8 个元件大约包括 4 个电阻、3 个电容和 1 个其他零件（转换开关、变压器等）。单个元件在 1 小时工作的失效强度可能值列于表 I-1 中。

若整个电路部分一共有 10 个电子管 ($N_1=10$)，那么：

$$\text{电阻数 } N_2 = 4N_1$$

$$\text{电容数 } N_3 = 3N_1$$

表 1-1

元 件 类 型	单个元件一小时内的失效强度
超小型电子管	3×10^{-4}
电 阻	0.15×10^{-4}
电 容	0.25×10^{-4}
其 他 元 件	1×10^{-4}

其 他 $N_4 = 1N_1$

则引信的无线电部分在 1 小时内失效强度的可能值为:

$$\begin{aligned}
 \Lambda &= N_1 \lambda_{B_1} + N_2 \lambda_{B_2} + N_3 \lambda_{B_3} + N_4 \lambda_{B_4} \\
 &= 10 \times 3 \times 10^{-4} + 4 \times 10 \times 0.15 \times 10^{-4} \\
 &\quad + 3 \times 10 \times 0.25 \times 10^{-4} + 10 \times 10^{-4} \\
 &= 53.5 \times 10^{-4} \text{ 失效/小时}
 \end{aligned}$$

假定引信作用时间为 2 分钟 ($T_B = 0.033$ 小时), 则引信电路部分的可靠性为:

$$P_B = e^{-T_B \Lambda} = e^{-0.00018} = 0.99982$$

必须指出, 上面并未考虑生产中引入的特殊故障 (如虚焊, 装配不合理使元件在飞行中损坏等)、检测设备的质量、贮存和运输条件等等因素。为了获得引信的高可靠性, 除了正确设计, 合理的工艺和对元器件提出严格要求外, 最好使用多路引信 (特别是价值昂贵的引信更应如此), 将几个引信或其中几个关键部分采用几套电路合成一个复合电路。设用 n 套电路组成的复合电路, 只要有一套电路不出故障, 引信就能可靠工作, 复合电路的可靠性概率为:

$$P_x = 1 - T_B^n \prod_{i=1}^n \Lambda_i \quad (1-4)$$

式中 Λ_i ——每套电路的失效强度。

● 参阅 В. А. Луцкий “无线电电子设备的可靠性与有效性的计算” 王泰楚译, 国防工业出版社, 1966。

若 n 套电路完全相同, 它们的失效强度都为 Λ_0 , 那么

$$P_x = 1 - (T_B \Lambda_0)^n \quad (1-4')$$

与式 (1-3'') 相比, 由于采用复合电路, 引信的可靠性提高了。

1.2.2 起爆面与杀伤面重合

弹丸的有效摧毁区域称为杀伤面。对于各种弹目交会情况, 不同的相对运动速度, 及不同的弹种, 弹丸的杀伤面是不相同的, 最佳炸点也随之而改变。现在以杀伤弹对付空中目标射击的情况为例, 研究弹丸接近目标临近区域的情况。并且假设弹丸与目标在同一平面内运动。所谓临近区域, 是以目标为中心, 弹丸的杀伤半径的 1~3 倍为半径的球面所限制的空间。在此空间, 弹丸的运动时间很短, 目标和弹丸的运动速度矢量可以认为是一常量。

设目标为 A , 弹丸为 B , 弹目间的交会情况如图 1-7 所示。由图可知,

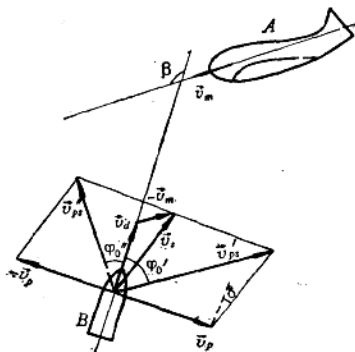


图 1-7

$\vec{v}_m$ —目标的速度矢量; $\vec{v}_d$ —弹丸的速度矢量; $\vec{v}_r$ —弹丸相对于目标的速度矢量; $\vec{v}_p$ —静止爆炸时破片的速度矢量; $\vec{v}_{ps}$ —相对于目标的破片速度矢量, 是由静止爆炸时的破片速度 $\vec{v}_p$ 和弹目相对速度 $\vec{v}_r$ 的合成矢量; $\vec{v}_{ps}'$ —相对于目标反方向的破片速度; β —弹丸速度与目标速度之间的夹角。

$$\vec{v}_r = \vec{v}_d - \vec{v}_m$$

$$\vec{v}'_{pr} = \vec{v}_p + \vec{v}_r$$

v'_{pr} , v''_{pr} 的值可由三角关系求出:

$$v_r = \sqrt{v_d^2 + v_m^2 - 2v_d v_m \cos \beta}$$

$$v'_{pr} = \sqrt{v_r^2 + v_p^2 - 2v_r v_p \cos (90^\circ + \delta)}$$

由于

$$\frac{v_m}{\sin \delta} = \frac{v_r}{\sin \beta}$$

所以

$$\sin \delta = \frac{v_m}{v_r} \sin \beta$$

因为

$$\cos(90^\circ + \delta) = -\sin \delta = -\frac{v_m}{v_r} \sin \beta$$

故最后得:

$$v'_{pr} = \sqrt{v_d^2 + v_m^2 + v_p^2 - 2v_d v_m \cos \beta + 2v_p v_m \sin \beta} \quad (1-5)$$

$$v''_{pr} = \sqrt{v_d^2 + v_m^2 + v_p^2 - 2v_d v_m \cos \beta - 2v_p v_m \sin \beta} \quad (1-5')$$

最大破片密度飞散的方向角 φ'_0 , φ''_0 为:

$$\varphi'_0 = \arctg \frac{v_p + v_m \sin \beta}{v_d - v_m \cos \beta} \quad (1-6)$$

$$\varphi''_0 = \arctg \frac{v_p - v_m \sin \beta}{v_d - v_m \cos \beta} \quad (1-6')$$

由于破片杀伤间隔 R 的大小决定于破片的速度:

$$R = 290 G^{1/3} \ln \left(\frac{v_{pr}}{v_b} \right) \text{ 米}$$

式中 G ——破片重量, 公斤;

v_{pr} ——破片的初速度;

v_b ——杀伤目标所必需的破片速度。

由此可见, 在 φ'_0 方向上的杀伤间隔值大于 φ''_0 方向上的杀伤间隔值, 因为 $v'_{pr} > v''_{pr}$ 。

上面的分析仅为破片密度最大的子午断面上的破片合成速度，弹丸上其他地方的破片飞散速度各不相同，因而其杀伤间隔（半径）也各不相同。

如果将弹丸沿各不同方向的杀伤半径的端点连起来构成一曲面，如图 1-8，这就是弹丸的杀伤面。

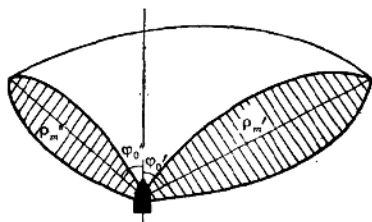


图 1-8

弹丸的杀伤面是扭偏了的截锥形，在射击平面上的轨迹是与弹丸不对称的两个瓣。杀伤半径 ρ_m' 的值决定于 $v_{p,r}$ 的大小； ρ_m'' 的值决定于 $v_{p,r}$ 的大小。但是， ρ_m' (ρ_m'') 不一定等于 R ，还需考虑瞄准误差（若是制导武器，就考虑脱靶量）及弹道散布。

若弹丸从目标前飞过，则非触发引信在弹轴与弹丸到目标的连线夹角 $\phi \approx \phi_0'$ 、弹目距离 $r \leq \rho_m'$ 时起爆，为最佳起爆点。如果弹丸从目标后通过，最佳起爆瞬时在 $\phi \approx \phi_0''$ 和 $r \leq \rho_m''$ 处，如图 1-9 所示。

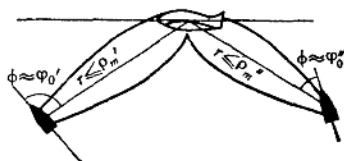


图 1-9

弹丸的最佳起爆时间可由图 1-10 求出。弹目之间相距最近时，弹丸所在点 d 的瞬间作为时间基点，在此以前的时间用 t 表示，则弹丸到 d 点的距离为：

$$L = v_r t$$

再设弹目在运动中的最小距离（脱靶量）为 P ，那么

$$\begin{cases} v_{p,r} t \sin \varphi = P \\ v_{p,r} t \cos \varphi = v_r t \end{cases} \quad (1-7)$$

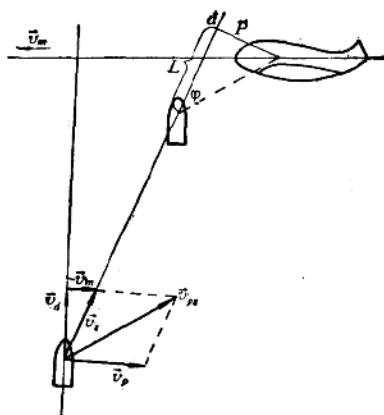


图 1-10

式 (1-7) 经过适当变换得到弹丸的最佳起爆时间

$$t = \frac{P}{v_{pr}} \frac{1}{\sin\left(\cos^{-1} \frac{v_r}{v_{pr}}\right)} \quad (1-8)$$

由式 (1-8) 可清楚看出, 弹丸的最佳起爆时间是随着脱靶量、破片的初始速度、弹目的交会姿态、弹丸和目标的运动速度等参量的变化而改变。

目标进入某一区域时, 引信将使弹丸爆炸, 此区域称为起爆面。无线电引信的起爆面由下列因素确定:

1. 无线电引信本身参数方面

a. 无线电引信的工作体制。如多卜勒无线电引信的作用距离与目标特性有关, 而调频测距引信可以克服目标特性对作用距离的影响;

b. 天线参数。如天线的增益、波瓣宽度和旁瓣电平、弹轴与天线辐射能力最大方向之间的夹角等。天线参数既影响起爆面的大小, 又影响起爆面的形状;

c. 低频放大器的放大系数和执行级的起动电压。放大系数

既是输入信号幅度的函数，又是输入信号频率的函数，因此它对起爆面的大小和形状都有影响（对多卜勒引信而言）；

d. 无线电引信的动作延迟时间。若采用惯性电路，惯性时间的长短将改变起爆面的大小；

e. 无线电引信的发射功率。通常，它只影响主动式无线电引信的起爆面的大小。

2. 目标与弹丸的特性方面

a. 目标的形状、大小和反射性质。它们主要对靠幅度控制炸点距离的无线电引信有较大影响，对其他形式的无线电引信影响较小，甚至无影响；

b. 目标与弹丸接近时可能出现的各种交会条件的电遭遇角。电遭遇角不但影响多卜勒频率的大小，还影响回波信号的强弱。因此，电遭遇角的改变使起爆面的形状和大小均受影响；

c. 目标与弹丸接近速度的变化范围。它主要影响多卜勒无线电引信的起爆面。

下面具体推算对空射击时靠幅度控制距离的连续波无线电引信的起爆面方程，我们就能更清楚地看出上述诸因素对起爆面的影响了。

若引信的发射功率为 P_{e1} ，由天线做无方向性辐射时，到达目标处的功率密度为：

$$W = \frac{P_{e1}}{4\pi r^2}$$

式中 r ——引信至目标的距离。

实际上，天线向不同方向的辐射并不是均匀的，而有一定的方向性，因此目标处的功率密度为：

$$W = \frac{P_{e1}}{4\pi r^2} D_1 F^2(\varphi) \quad (1-9)$$

式中 D_1 ——天线的方向性系数；

$F(\varphi)$ ——天线的方向性函数。

当电波到达目标时，在目标表面感应电流。此电流又产生辐