

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107586

# 高压线对机场全向信标及测距仪的电磁干扰分析<sup>\*</sup>

程 擎 但诗芸 鲁合德

(中国民用航空飞行学院 广汉 618307)

**摘要:** 为了研究高压输电线对机场终端全向信标和 DME 测距仪信号的影响,选取某机场附近的高压输电线对其产生的电磁辐射进行了实际测试。通过控制和改变计算模型中参数的方法,研究了输电线路对 VOR/DME 信号的电磁干扰影响规律,得出飞机接收信号受高压线电磁干扰最大位置,依据电波传播的原理和国标有关规定,对在此位置的 VOR/DME 信号进行电磁干扰影响分析。结果表明,此处飞机能够接收到的 VOR 信号信噪比为 42.7 dB,符合国标规定的最低 20 dB 的要求;DME 信号的信噪比为 97.3 dB,符合国家标准。在此基础上计算出高压输电线对机场 VOR/DME 台站的防护距离,提出了高压输电线路与机场范围 VOR/DME 台站的有源干扰防护距离建议。本文研究成果能够为机场附近高压输电线和机场区域通信导航监视等无线电设备的电磁兼容性设计提供依据。

**关键词:** 高压输电线;有源电磁干扰;进近着陆;信噪比;防护距离

中图分类号: V219 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1025

## Analysis of electromagnetic interference of high voltage line to omnidirectional beacon and rangefinder in airport

Cheng Qing Dan Shiyun Lu Hede

(Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** In order to study the influence of the high voltage transmission lines near the airport on the reception of very high frequency omnidirectional range (VOR) and distance measuring equipment (DME) signal, test the electromagnetic radiation generated by the high voltage transmission lines near the airport. By controlling and changing the parameters in the calculation model, study the influence law of the transmission line on the electromagnetic interference of aircraft airborne signals, and obtain the maximum height of the aircraft subjected to high-voltage wire electromagnetic interference (EMI). According to the radio wave propagation theory and the relevant provisions of national standard, analyze the influence of electromagnetic interference on the airborne signals at this position. The signal to noise ratio (SNR) of the VOR signal received by the aircraft at the maximum height of EMI is 42.7 dB, comply with the requirements of the national standard minimum which is 20 dB. DME signal signal-to-noise ratio is 97.3 dB, in line with the national standard. On this basis, calculate the protective distance of the high voltage transmission line to the airport VOR/DME station, and propose the suggestion of active interference protection distance between the range of the high voltage transmission line and the airport VOR/DME station. The research results in this paper can provide a basis for the electromagnetic compatibility design of high voltage transmission lines and radio equipment such as airport communication, navigation and surveillance.

**Keywords:** high-voltage power lines; EMI; approach landing; SNR; protective distance

### 0 引 言

为了机场电力保障的需要,很多机场附近都会架设高压线。高压线绝缘子在高压作用下会发生闪络放电现象,发生闪络时会向空间辐射频谱很宽的电磁波,从而有可

能会影响飞机对导航信号的接收,对飞机进近着陆、起飞的安全产生威胁。甚高频全向信标系统(very high frequency omnidirectional range, VOR)和测距机(distance measuring equipment, DME)的电磁环境就是影响飞机进近着陆安全至关重要的因素。因此研究机场附近高压线对进近阶段飞

收稿日期:2021-08-15

<sup>\*</sup> 基金项目:中央高校建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项资金(D202103)项目资助

机接收信号的电磁干扰评估很有必要,对飞机安全性和电力设备与民航无线电系统的电磁兼容性具有重要意义。

国内外很多人就高压输电线路对无线电通信的有源干扰及防护间距进行研究,国外的研究主要集中在 20 世纪七八十年代,美欧日<sup>[1]</sup>多国都针对高压输电线路与无线电设备电磁兼容展开了大量研究,但近年来中国由于民用航空高速发展、机场高速建设和大量电力需求,出现了很多高压输电线路和机场无线电设备相接近的新问题。由此,这类问题近期的许多研究主要在国内:文献[2-4]通过实验控制影响因素,讨论了高压输电线路附近复杂电磁环境对 GNSS 信号接收效果的影响,得出高压输电对临近的 GNSS 信号没有显著规律性影响;文献[5-7]对高压输电线路对航空中、短波无线电设备的电磁干扰机理进行讨论,并通过实际测试和相关计算分析输电线路的有源干扰对中、短波无线电设备的影响;文献[8-10]讨论了机场附近高铁线路带来的复杂电磁环境对飞机进近着陆的干扰,为机场附近的无线电设备电磁干扰与电磁兼容等相关研究提供了依据和办法;卢莹等<sup>[11]</sup>通过对交流特高压输电线路对空情报雷达的距离探测性能影响,分析计算得出有源干扰防护距离建议;邹军等<sup>[12]</sup>采用空间谱方法计算电磁干扰并验证得出高压直流输电线路与短波无线电台站之间的防护间距远小于相关规定所对应的数值。

但目前,对于 VOR/DME 设备的电磁干扰研究,集中在对民航导航系统内部组成之间的电磁兼容进行研究<sup>[13-15]</sup>,而对于在机场附近高压线所产生的电磁干扰研究大多数集中在短波和中波段,对甚高频及特高频数据接收质量的研究相对较少,因此本文开展相关实验,通过实测,系统地研究机场附近高压线路对 VOR/DME 信号有源干扰的影响规律,并提出机场附近高压输电线路对飞机接收 VOR/DME 信号有源干扰防护距离建议值。为机场区域高压输电线路和机场通信导航监视等无线电设备的电磁兼容性设计提供依据。

## 1 高压线电磁干扰机理及防护标准

高压输电线路产生的无线电干扰包括两类:有源干扰和无源干扰。有源干扰是由线缆表面电晕放电和线缆之间火花放电引起的电磁干扰,其中电晕放电是主要干扰源,无源干扰是器件结构、铁塔等大尺寸金属对空中无线电信号的屏蔽与二次辐射。本文着重讨论由于电晕放电引起的有源干扰对机场附近 VOR、DME 信号的影响。

### 1.1 有源干扰机理概述

高压输电线路周围存在大量电场能和磁场能<sup>[16]</sup>,其表面导线或线路金属等引起空气电离引发放电现象,电流注入导线并沿导线向注入点两侧快速移动使得静电场分布发生变化继而引起电磁波辐射。电荷的移动也会同时引起脉冲电流,当其中的高频波长与导线横向尺寸相近时,会引起电磁波形式的直接辐射,造成高频干扰<sup>[17]</sup>。

当带电的输电线路表面场强刚好达到击穿临界值,就会产生电晕放电,此时电场强度可称为电晕起始电场强度。日前计算输电线路电晕起始场强最普遍的办法是 Peek 公式,其表达式为:

$$E_r = 30.3m\delta \left(1 + \frac{0.298}{\sqrt{\delta_r}}\right) \quad (1)$$

式中: $m$  为线路表面的粗糙系数; $r$  是导线半径; $\delta$  为空气的相对密度。

由 Peek 公式可知,当地空气密度、输电导线半径和导线表面光滑程度等都会对电晕放电产生直接影响。

### 1.2 干扰场强计算

高压输电线路的干扰场强是在基准无线电干扰场强的测试结果的基础上进行具体计算得出的,基准干扰场强则是通过电磁干扰测试系统在某个测试点处测得某频点上高压线辐射电磁干扰强度,再根据电磁波传播理论推导出飞机在进近阶段某位置处接收 VOR/DME 信号的电磁干扰强度。

根据电磁辐射传播规律<sup>[8]</sup>,利用下式可将电磁干扰发出点  $x$  处的实测数据即基准干扰场强转换为距离电磁辐射发出点  $d_n$  处的电磁干扰场强, $n$  为转换系数,当频率为 30~110 MHz 时, $n=1.2$ ;当频率为 110 MHz~1 GHz 时, $n=1.0$ 。 $E_x$  为在距离电磁辐射发出点  $x$  处的实测场强。

$$E_n = E_x + n \times 20 \lg \frac{x}{d_n} \quad (2)$$

### 1.3 无线电干扰限值

高压输电线路无线电干扰限值是指在一定测量条件下得到的无线电干扰电位的平均值,由于导线的干扰电平与当地气候、地理环境以及线路的结构、电压等条件息息相关,则要在固定的位置,适宜的天气条件下,使用指定的仪器对一定的频率进行测量。根据 GB 15707-1995《高压交流架空送电线无线电干扰限值》可知,在晴天 0.5 MHz 频率下,在与导线投影水平相距 20 m 处的干扰电平限值如表 1 所示。

表 1 我国交流高压输电线路无线电干扰限值

电压等级/kV	110	220~330	550
无线电干扰限值/dB $\mu$ V	45	53	55

对于电压等级更高的输电线路的干扰限值,由于各国国情不一致,故也没有统一的国际标准,输电线路有关参数和意义也不一样。根据我国交流特高压基地的测试数据,对于 1 000 kV 特高压线路,无线电干扰水平一般不超过 58 dB( $\mu$ V/m)。

### 1.4 VOR/DME 防护标准

VOR 导航台<sup>[18]</sup>是一种能够在 360°范围内给飞机提供电台方位引导飞机沿航路飞行、进近和离场的甚高频无线电导航系统,工作频率为 108.00~118.00 MHz。DME 测

距机是高精度的脉冲测距导航系统,它同时也可以看成是一个二次雷达系统,通过询问—应答脉冲测量出电台方位和飞机到导航台的斜距。其工作频率为 962~1 213 MHz。在无线电导航系统的发展过程中,DME 和 VOR 两者可配合应用成一个组合导航系统,利用该系统可进行飞机的定位。而导航系统对于飞机进近着陆时的引导非常关键,不允许有任何微小的干扰影响导航信号的接收,影响飞机飞行轨迹,否则在飞机进近极快的飞行速度下,极有可能造成严重事故。

根据 GB 6364-2013《航空无线电导航台(站)电磁环境要求》,针对各种有源干扰源都给出了各导航设备相应的防护率要求,其中针对高压线此类有源干扰的防护率要求如表 2 所示。

表 2 VOR/DME 相关参数

导航系统	VOR	DME
工作频率/MHz	108~118	960~1 213
防护率要求/dB	20	8

为确保导航系统能够正常运行,正常地完成对飞机进近、着陆和离场的引导,导航设备的防护率  $R$  应满足:

$$E_s - E_n \geq R \quad (3)$$

式中:  $E_s$  为在工作频段内飞机接收到的导航信号的电场强度;  $E_n$  为飞机接收到同频率的干扰场强。

## 2 电磁干扰测试及分析

### 2.1 测试环境

实验地点选择某机场航空电磁净空区域内,选取地势较为开阔平坦的地点,选取点架设正常带电 1 000 kV 的高压线。实验使用仪器为电磁干扰接收机、电磁干扰标准天线(环天线、对数周期天线、双锥天线)、测距仪、各种标准电缆传输线及转换接头等。利用接收设备分别对 VOR 和 DME 工作频段进行频谱测试,选取距离边导线 18 m 处。如图 1 所示,该电磁辐射点距离跑道中心处直线距离 4 172 m,与跑道延长线夹角约为  $30^\circ$ 。

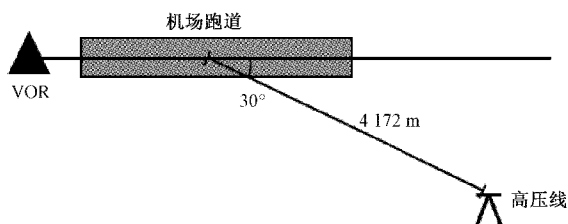


图 1 测试点与机场跑道布置图

### 2.2 参数设置

全向信标的工作频率为 108.10~111.95 MHz,DME 工作频率为 962~1 213 MHz。测试方案分别以 108.96~111.95 MHz、962~1 213 MHz 为测试区间,以 0.05 MHz

为间隔共 40 个频道,使用移动监测车上的无线电监测设备,在某机场航空电磁环境净空区域内固定位置开展无线电监测工作,采用点频测试,使用接收机对单个频点进行实际测试。天线采用水平极化。测试检波方式采用峰值检波(peak detector, PK)和平均值检波(average detector, AV)<sup>[24]</sup>。通过网络分析仪可得 5 m 同轴电缆的衰减损耗为 0.81 dB,不计入接头损耗。测试仪器型号如表 3 所示。

表 3 测试仪器型号及其技术指标

设备名称	型号	技术指标
电磁干扰接收机	ESCI-3	9 kHz~3 GHz
天线	双锥天线 HK116	20~300 MHz
	对数周期天线 HL223	300 MHz~2 GHz
同轴电缆	RG214	线长 5 m

### 2.3 测试结果

表 4 给出了在 VOR/DME 工作频段内不同频点处测试得到的峰值检波和平均值检波场强值,为了给飞机安全留有足够安全裕度,采用峰值数据作为计算参考。

表 4 基准干扰场强测试结果

频率/ MHz	电平/dB		场强/dB	
	AV	PK	AV	PK
108.9	20.78	25.89	47.62	52.53
109.7	16.00	25.02	42.84	51.66
109.9	18.23	25.90	45.07	52.54
112.1	31.47	32.58	57.71	58.82
115	18.25	41.93	44.15	50.83
120	27.02	32.10	53.26	58.34
128	24.45	32.01	50.69	57.44
136	18.85	24.83	45.09	49.63
330	20.95	21.43	25.95	26.43
333.2	21.02	21.72	26.91	27.61
335	21.17	37.29	27.57	43.69
962	17.32	25.60	22.12	30.60
1 025	19.10	23.87	24.00	28.87
1 088	19.35	24.76	24.25	29.76

由表 4 可知,在 VOR 工作频段,受电磁干扰的平均场强范围为 42.84~57.71 dB;在 DME 工作频段,受电磁干扰的平均场强范围为 22.12~24.25 dB。其中,全频段范围内,在测试频点为 112.1 MHz 时,监测到最大干扰场强为 58.82 dB。

## 3 高压输电线干扰影响分析

### 3.1 高压线对飞机最大干扰点判断

某机场跑道与周边高压输电线的布局如图 2 所示,

图 2 中,  $\varphi$  为跑道上下滑信标和高压线电磁辐射发射点连线与跑道中心线的夹角;  $\theta$  为飞机下滑线与跑道中心延长线的夹角;  $d_n$  为飞机与高压输电线电磁辐射发射点之间的距离;  $d_s$  为导航台与飞机之间的距离。飞机高度为  $h$ , 飞机位置垂线和跑道交点与电磁辐射发射点的距离为  $d$ 。

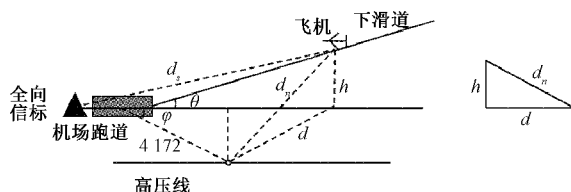


图 2 测试点与导航台和飞机位置关系

已知导航台距离跑道远端的长度为 300 m, 机场跑道长度为 3 600 m。通过几何关系可得到飞机在某一位置与导航台的距离  $d_s$  和高压线辐射点的距离  $d_n$  :

$$d_s = \sqrt{(h \cot\theta + 300 + 3\,600)^2 + h^2} \quad (4)$$

$$d_n = \sqrt{h^2 + d^2} \quad (5)$$

设导航台信号发射功率为  $P$ , 天线增益为  $G$ , 则在与导航台相距  $d_s$  米处某点的功率谱面密度  $S$  为:

$$S = \frac{P10^{\frac{G}{10}}}{4\pi d_s^2} \quad (6)$$

飞机接收到的工作频段导航信号的电场强度与功率谱密度之间的转换关系为:

$$S = \frac{E_s^2}{120\pi} \quad (7)$$

单位转换后取对数可与得到全向信标距离  $d_s$  处的电场强度  $E_s$  为:

$$E_s = 134.77 + 10\lg P + G - 20\lg d_s \quad (8)$$

根据表 3 实测结果可知, 在距离高压线电磁辐射发射点 18 m 的固定点处所测得当测试频点为 112.1 MHz 时所受电磁干扰最大, 该频点处干扰场强为 58.82 dB· $\mu$ V/m, 通过电磁传播的基本原理可以得到飞机在进近时所接收到的最大干扰场强为:

$$E_n = 58.82 + 20\lg \frac{18}{d_n} \quad (9)$$

由式(8)和(9)可得:

$$E_s - E_n = 50.95 + 10\lg P + G + 20\lg \left(\frac{d_n}{d_s}\right) \quad (10)$$

式中:  $E_n$  为距离高压线电磁辐射发射点  $d_n$  处的干扰场强, 即飞机接收到的同频干扰信号的电场强度;  $E_s$  是飞机接收到的航向信标信号强度。由式(3)可知, 当  $E_s - E_n$  取最小值时, 高压输电线对导航台的电磁干扰最强烈, 此刻  $\frac{d_n}{d_s}$  应取该取最小值。由式(4)和(5)可得:

$$\frac{d_n}{d_s} = \frac{\sqrt{h^2 + d^2}}{\sqrt{h^2 + (3\,600 + 300 + h \cot\theta)^2}} \quad (11)$$

当飞机处于固定高度  $h$  时, 要使  $\frac{d_n}{d_s}$  最小,  $d$  应取最小值, 即当电磁辐射发射点与飞机垂线和跑道交点的连线与跑道垂直时, 高压线对飞机产生的干扰最大。根据实测可知, 与高压线电磁辐射发射点的距离为 4 172 m,  $\varphi$  为  $30^\circ$ , 飞机下滑道角度为  $3^\circ$  通过计算可知高压线与机场跑道中心延长线的水平距离为 2 086 m; 由几何关系  $1\,800 + h \cot\theta = 4\,172 \sin 30^\circ$  可得出此刻飞机高度  $h$  为 95 m, 飞机与电磁辐射发出点的距离  $d_n$  约为 2 088 m, 飞机与导航台的距离  $d_s$  约为 5 714 m。

对于 VOR 和 DME 导航台信号, 当飞机进近高度为 95 m 时所受干扰最大, 故可知若飞机在此高度时不受高压输电线干扰, 则飞机在整个进近过程中都不会受到高压线的电磁干扰影响。

对于 VOR 和 DME 导航台信号, 当飞机进近高度为 95 m 时所受干扰最大, 故可知若飞机在此高度时不受高压输电线干扰, 则飞机在整个进近过程中都不会受到高压线的电磁干扰影响。

### 3.2 高压输电线对 VOR 信号的影响

根据 GB 6364-2013《航空无线电台(站)电磁环境要求》规定, 全向信标的最近覆盖半径为 65 km, 在全向信标信号覆盖区内, 最低信号场强为  $E_{\min} = 90 \mu\text{V/m}$ 。

考虑最差的电磁环境影响, 只需分析图上最大干扰点接收到的导航信号场强与干扰场强之比, 再与 20 dB 的防护率相比较。由测量数据可知, 当频率为 112.1 MHz 时, 所受高压输电线干扰场强峰值为最大, 为了给飞机飞行留有足够安全裕度, 因此选取该频点的测量峰值进行计算。该点接收到的导航信号场强和干扰场强由式(2)可知为:

$$E_s = 20\lg E_{\min} + 20\lg \frac{65\,000}{d_s} \quad (12)$$

$$E_n = 58.82 + 20\lg \frac{18}{d_n} \quad (13)$$

信噪比公式为:

$$\text{SNR} = E_s - E_n \quad (14)$$

为了保障飞机接受信号不受干扰, 应满足:

$$\text{SNR} \geq 20 \quad (15)$$

根据式(14)可以得到, 当飞机位于最大干扰点时, 信噪比为:

$$\text{SNR} = 42.7 \text{ dB} \quad (16)$$

大于最低 20 dB 的防护率, 符合防护要求。VOR 频段受高压线干扰信噪比如图 3 所示, 均满足大于 20 dB 的要求。

### 3.3 高压输电线对 DME 信号的影响

该机场 DME 与 GP 下滑台合装, 位于距离跑道中线西 120 m, 跑道入口内 300 m。DME 最近覆盖范围为 65 km, 最低信号场强为 689  $\mu\text{V/m}$ 。

根据图 4 可以计算得到测距仪距离飞机的距离为

$$d_s = \sqrt{h^2 + 120^2 + (h \cot\theta + 300)^2} \quad (17)$$

当  $h$  为 95 m 时,  $d_s$  为 2 118 m, 利用电磁波传播原理可以得到飞机在进近着陆高度 95 m 处的测距仪信号强度为:

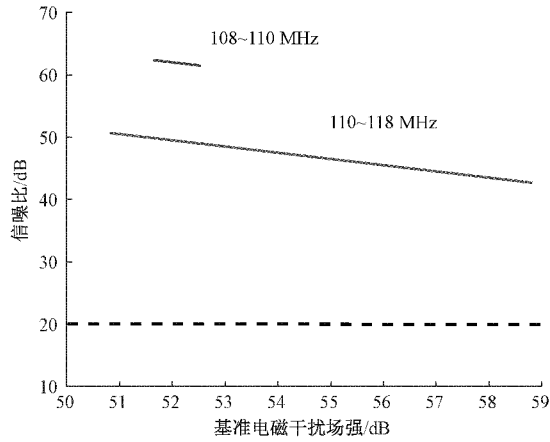


图 3 VOR 频段机载接收信号受高压线电磁干扰情况

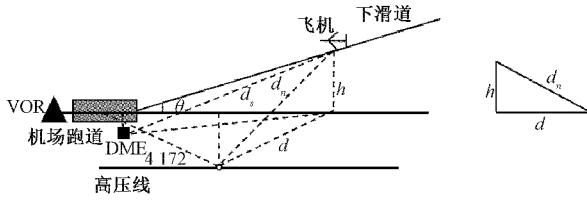


图 4 测试点与 DME 和飞机位置关系

$$E_s = 20 \lg E_{\min} + 20 \lg \frac{65\ 000}{d_s} \quad (18)$$

此时所受电磁干扰场强为:

$$E_n = 30.6 + 20 \lg \frac{18}{d_n} \quad (19)$$

将式(18)减去式(19)可以得到当飞机进近高度为 95 m 时,所接收到的 DME 信号的信噪比为 97.3 dB,远大于 8 dB,符合防护率要求。DME 频段飞机所受高压线干扰信噪比如图 5 所示。

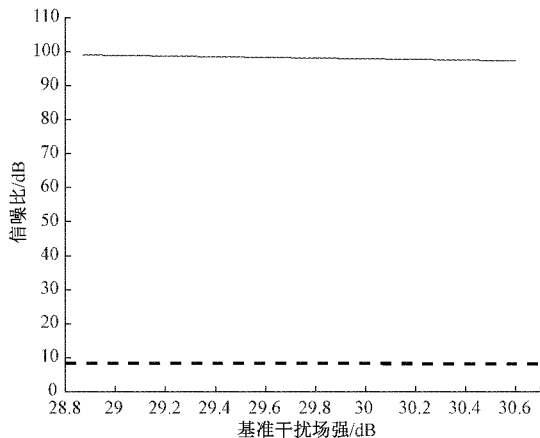


图 5 DME 频段机载接收信号受高压线电磁干扰情况

### 3.4 防护距离确定

由前文讨论可知,飞机机载信号信噪比  $R$  与飞机同高压输电线电磁辐射发射点之间的距离  $d_n$  和导航台与飞机之间的距离  $d_s$  之比相关,设当飞机高度  $h$  为 95 m 时,可以

得到防护率  $R$  随着高压线与跑道水平距离即防护间距的变化规律,如图 6 所示。由图 6 可知,随着高压线与跑道水平距离的增加,信噪比增大,当  $d$  为 120.1 m 时,此时信噪比为 20 dB,因此,只要高压线与跑道防护距离大于 120.1 m,就能满足防护率大于 20 dB 的要求。

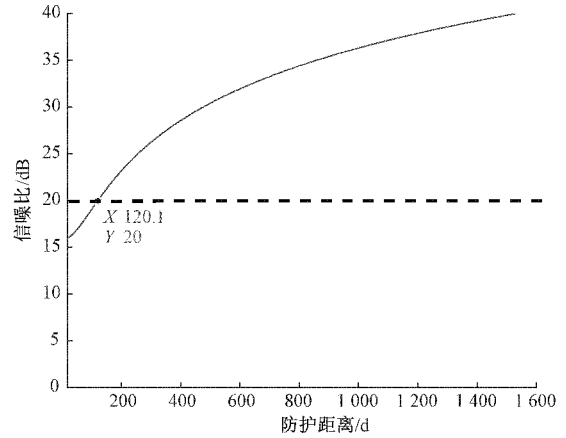


图 6 高压线水平防护间距与信噪比的关系

由前文计算结果可知,机场附近高压线对 DME 导航台的电磁干扰微乎其微,其信噪比远远大于防护标准,满足其防护标准的防护间距也较短,与上文讨论的 VOR 导航台防护标准对比不具备参考价值,在此不做具体讨论,沿用 VOR 防护间距即可。

## 4 结 论

本文介绍了机场附近高压输电线对于全向信标和 DME 测距机的有源干扰机理及其防护标准,并在某机场附近对高压线电磁干扰进行实际测量。根据实测数据,通过控制和改变计算模型中参数的方法分析了高压线电磁辐射对飞机接收导航台信号的电磁干扰影响:对于该机场,当飞机在高度为 95 m 时,接收到的来自高压线电磁干扰最大;通过计算可知在该位置处,飞机接收到的 VOR 导航台信号与 DME 信号的信噪比都高于国际规定的最小防护率要求,由此可知,该机场附近的高压线电磁辐射不会对 VOR/DME 信号产生有源干扰。在此基础上本文对高压线与机场跑道的防护间距进行讨论,机场附近的高压线与跑道水平距离至少为 120.1 m,则能满足防护标准,该保护间距比国标规定的保护间距小很多,本文研究成果能够为机场附近高压输电线和机场区域通信导航监视等无线电设备的电磁兼容性设计提供依据。但本文仅讨论了高压输电线路对全向信标和测距仪的有源干扰状况,有待进一步研究高压输电线路对全向信标及测距仪信号的无源干扰情况,结合有源干扰和无源干扰对防护间距进行综合讨论。

### 参考文献

- [1] 卢莹. 输电线路对雷达台站的无源干扰[D]. 北京:华北电力大学(北京),2019.

- [2] 刘兴发,尹晖,邬雄,等. 高压输电线路无线电干扰和电磁散射对 GPS 卫星信号影响测试及分析[J]. 高电压技术,2011,37(12):2937-2944.
- [3] 聂兆生,管啸. 高压线路对 GPS 接收机性能及观测数据质量影响的测试与分析[J]. 大地测量与地球动力学,2015,35(5):775-779.
- [4] 马硕. 电磁环境下 GNSS 信号特性及对定位结果影响研究[J]. 铁道勘察,2020,46(6):82-89.
- [5] 杨露,吴楷. 高压交流架空输电线路对航空无线电中波导航台站有源干扰的评估[J]. 中国无线电,2011,4(7):42-44,65.
- [6] 迟兴和,魏德军,张坤,等. 多回输电线路对短波无线电测向台无源干扰防护距离计算分析[J]. 中国电力,2018,51(7):49-53,107.
- [7] 赵鹏,朱锦生,韩燕明,等. 输电线路对短波无线电测向台(站)无源干扰的保护间距[J]. 电网技术,2012,36(5):22-28.
- [8] 鲁合德,张强. 高铁弓网电弧对飞机进近着陆的电磁干扰影响[J]. 航空学报,2020,41(10):339-347.
- [9] 鲁合德,朱峰,李鑫,等. 钢筋混凝土对地铁弓网离线电弧屏蔽效能的研究[J]. 电波科学学报,2016,31(6):1209-1215.
- [10] 朱峰,高晨轩,唐毓涛. 弓网电弧对机场终端全向信标台电磁骚扰的影响[J]. 中国铁道科学,2018,39(1):116-121.
- [11] 卢莹,张建功,干喆渊,等. 交流特高压输电线路对雷达台站的无源干扰研究[J]. 电力科学与工程,2018,34(7):1-6.
- [12] 邹军,吴桂芳,蒋陶宁,等. 空间谱估计测向算法计算高压直流输电线路对短波无线电测向台站无源干扰影响的研究[J]. 电网技术,2020,44(4):1582-1589.
- [13] 孙国强. 雷达电磁兼容设计与测试[J]. 国外电子测量技术,2011,30(6):58-61.
- [14] 薛梦麟,薛晨. 飞行器无线系统电磁兼容试验技术研究[J]. 电子测量技术,2018,41(9):50-55.
- [15] 郭淑霞,胡占涛,高颖. 窄带干扰对导航信号等效载噪比影响分析[J]. 国外电子测量技术,2013,32(7):10-14,20.
- [16] 江茹,田瑾,吴飞,等. 一种基于有限元法的超高压输电线路三维电场计算方法[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(4):103-110.
- [17] 许嵩. 特高压交流输电线路电晕放电电磁干扰研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2013.
- [18] 程擎,江波,张雪华. 通信导航监视设施[M]. 第 2 版,成都:西南交通大学出版社,2016:127-136.

#### 作者简介

程擎,教授,主要研究方向为通信导航监视等。

E-mail: degleqh@163.com

但诗芸,工学研究生,主要研究方向为通信导航监视,电磁兼容理论等。

E-mail: danshiyyy@qq.com

鲁合德,工学博士,主要研究方向为电磁场与微波技术,电磁兼容理论与技术,电磁环境评估等。

E-mail: hdllu@cafuc.edu.cn