地下电磁信号对民航机场导航台站的干扰机理 分析与仿真计算

杨起涛¹, 雷文太²

(1.南部战区空军勘察设计院,广州 510052; 2.中南大学,长沙 410083)

摘要:目的研究地下电磁信号对机场导航台站的干扰机理,并进行仿真计算。方法建立导航台天线的电流分布模型,研究外部电磁干扰对导航台天线上电流分布形式的影响。基于导航台的工作原理,研究外部电磁干扰对导航台辐射方向图的影响,并进行仿真计算。计算航线下滑线空间点上的场强值受外部电磁信号干扰的影响。结果地下电磁信号传播至导航台天线所在区域,造成T型天线的左右顶负载的电流不再满足镜像反对称的状态,导致T型天线覆盖区域中的场强值变化,水平面的无方向性方向图产生波瓣分裂, 进而导致航线下滑线上空间点接收到的场强值幅度产生波动,仿真结果显示波动值高达 32.7%。结论 地下电磁信号对无方向性信标台造成干扰,导致原来的无方向性方向图产生波瓣分裂,航线下滑线上的场强值 产生波动,影响了飞行安全,需要加以抑制屏蔽。 关键词:电磁干扰;导航台;干扰机理 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.04.011 中图分类号: TJ01; TN965 文献标识码: A

Interference Mechanism Analysis and Simulation Calculation of Underground Electromagnetic Signal to Civil Airport Navigation Station

*YANG Qi-tao*¹, *LEI Wen-tai*² (1.Southern War-Zone Air Force Survey and Design Institute, Guangzhou 510052, China; 2.Central South University, Changsha 410083, China)

ABSTRACT: Objective To study interference mechanism of underground electromagnetic signal to airport navigation station and carry out simulation calculation. **Methods** Distributed current model on antenna of navigation station was established. Influences of external electromagnetic interference on distributed current form were analyzed. Based on radiation principle of airport navigation station, influences of external electromagnetic interference on navigation station radiation pattern were studied and simulated, and influence of external electromagnetic interference on E-filed amplitude at route glide line were calculated. **Results** Underground electromagnetic signal propagated to the area of the airport navigation station station antenna and caused that top load currents on both sides of the T-type antenna no longer satisfy the mirror-antisymmetric state. Field intensity in the field covered by T-antenna also changed. Radiation lobe splitting appeared in the non-directional diagram at horizontal plane and field intensity range received at the spatial point of air line glide

文章编号: 1672-9242(2017)04-0051-05

收稿日期: 2016-11-14;修订日期: 2016-12-14

作者简介:杨起涛(1979—),男,河南人,硕士,工程师,主要从事机场设计方面的研究。

通讯作者: 雷文太 (1979—),男,博士,副教授,主要从事电磁信号传播和电磁兼容方面的研究。

also fluctuated. The fluctuating value shown in the simulation result reached up to 32.7%. **Conclusion** Underground electromagnetic signals cause interferences to non-directional beacon, resulting in radiation lobe splitting at horizontal plane and E-filed fluctuations on route glide line. Underground electromagnetic interference affects flight safety and needs to be suppressed by shielding.

KEY WORDS: electromagnetic interference; navigation station; interference mechanism

近年来,随着城市建设的发展,越来越多的轨道 交通和市政道路向城外延拓。这些轨道交通和市政道 路在施工和运营过程中会产生电磁辐射,对周边的敏 感电子设备存在潜在影响^[1-3],尤其是当延拓至机场 附近时,这种潜在的影响更为严重。

机场为保障正常的飞行训练和飞行任务,通常配 备有远/近距导航台、指点信标、航管雷达、气象雷 达等电子设备^[4-5]。导航台向外辐射定频电磁信号, 与飞机上的电子罗盘配合,指引飞行员沿着预设的下 滑线实施降落。指点信标对空辐射固定格式的电磁信 号,当上空有飞机经过时,飞机接收该信号,起到提 示和定位的目的[6-8]。航管雷达和气象雷达通过对指 定空域的探测,获得该空域的飞行器参数信号和气象 信息。随着城市建设的加快,原来位于开阔和偏远地 带的机场逐渐被轨道交通和市政道路所围绕,机场的 敏感电子设备也被大量的电磁辐射源所围绕。这些辐 射源所辐射的信号以波动和扩散的形式向外传播,部 分能量传递至机场电子设备,对机场电子设备存在潜 在的影响。机场电子设备受扰后,将会造成导航偏差、 雷达探测误差增大等问题,严重时甚至会造成飞机无 法返航^[9-13]。

文中研究地下电磁信号对机场导航台站的干扰 机理,以地铁施工和运营时向外辐射的电磁信号对机 场无方向信标台的干扰问题为研究对象,分析无方向 信标台的工作原理,建立地下电磁信号传播至信标台 天线的信号模型。仿真计算了地下电磁信号对无方向 信标台辐射方向图的影响,给出了干扰前后辐射方向 图的变化情况。仿真计算了下滑线上某点的信号强度 受地下电磁信号影响的变化程度,为后续的干扰抑制 方案提供了定量参考。

1 无方向信标台的辐射特性分析

NDB(No Directional Beacon)即无方向信标机,是 为飞机提供测向信号的地面导航设备,其发射的是垂 直极化的无方向性导航信号^[7-8]。其工作频率范围为 150~700 kHz,采用宽"T"型天线,宽"T"部分由多根 铜线组成,天线结构如图 1 所示。

为提高天线效率,减小接地电阻,在地下铺设地 网。地网采用多根铜线组成,以垂直于天线的投影点 为中心向四周辐射埋设。地网中心埋一块铜板作为汇 集板,汇集铜板与地网的连接采用铜焊条焊接^[7—9], 地网形式如图 2 所示。



图 1 导航台站天线地网

NDB 向外辐射无方向性的垂直极化波,其主要 辐射单元为直立振子,即图 1 中的 BD 段。该导航台 工作在中波波段,主要靠地波传播。为使地表面波达 到最大辐射强度,一般采用半波天线,即高度为 1/4 波长的天线。由于 NDB 采用中波波段,波长为 375~2000 m,即便是 1/4 波长也有 93.75~500 m,如 此高的直立天线是难以实现的。为了保证天线的有效 辐射,通常采用的方法是在振子顶端加载"顶负载", 提高天线的有效高度^[14]。加"顶负载"前后的天线电流 分布如图 3 所示。

设直立天线上的电流分布为:

$$I(z) = \frac{I_0}{\sin kh} \sin k \left(h - z\right) \tag{1}$$

式中: *I*₀表示天线输入端电流; *h*表示直立天线 高度。根据有效高度的定义,得:

$$h_{\rm e} = \frac{1}{I_0} \int_0^h I(z) dz = \frac{1}{k} \cdot \frac{1 - \cos kh}{\sin kh} = \frac{1}{k} \tan \frac{kh}{2}$$
(2)

与分析自由空间对称振子的方法相同,可得直立 天线在上半空间的辐射场强值为:

$$E_{\theta}(\theta) = j \frac{60I_{\rm m}}{r} \cdot \frac{\cos(kl\cos\theta) - \cos(kl)}{\sin\theta} \cdot e^{-jkr} \qquad (3)$$

• 52 ·



图 3 直立天线顶加载前后的有效高度

式中: *θ* 表示在垂直平面内坐标原点(直立天线 和地面接触的端点)到空间某点的矢量与直立天线间 的夹角; *I*_m表示直立天线上的电流峰值; *r* 表示空间 某点矢量的长度; *k* 表示波数, *k=ω/c*; *c* 表示自由空 间的光速。

在垂直于地表的平面内,直立天线的辐射特性与 θ 角有关;在平行于地表的平面内,直立天线的辐射 特性与 φ 角无关。即在水平方向上呈现出全向辐射特 性,其沿水平方向和竖直方向的 H 面方向图和 E 面 方向图分别如图 4 所示。



图 4 直立振子的 H 面和 E 面方向图

为减少地面损耗,需要改善地面的电特性,通常 采用埋设地网的方式。直立天线上的电流经直立天线 末端(馈源端)沿线向上传播,到达顶端后沿顶加载 继续向外传播,经过天线顶部的对地分布电容传向大 地,构成电流回路,如图5所示。



当直立天线所在空间存在辐射场或地表表面波时,将对原直立天线(含顶负载)上的电流分布产生 干扰,在直立天线两端以及顶负载两端和地网区域中 产生次生电动势,进而影响到直立天线辐射特性,造 成直立天线辐射特性的变化。

2 外部干扰源的影响分析

建立如图 6 所示的物理模型,直立天线及对称顶 负载位于地表。地下辐射源向外辐射信号,透射波场 传播至直立天线所在空域。



图 6 空间辐射场对直立天线影响的物理建模

受扰前,左右顶负载上的电流成负镜像形式,即 *AB* 段的电流和 *CB* 段的电流大小相等,方向相反, 顶负载上电流最大值位于 *B* 点。受扰时,由于外部干 扰源在 *AB* 段和 *CB* 段产生不对等的电动势,造成了 顶负载上电流最大值的偏移和左右顶负载的不对称。 采用电流元叠加的方法,将左右顶负载沿 *x* 方向分割 为电流元的形式,如图 7 所示。

在顶负载上距中心点 *x*=0 处取电流元段 dx,它 对远区场的贡献为^[15]:



图 7 导航台天线受扰后的辐射特性分析

$$dE(\theta,\varphi) = j \frac{60\pi I(x)dx}{r'\lambda} \sin \theta' e^{-jkr'}$$
(4)

式中: *I*(*x*)表示顶负载在 *x* 处电流元的电流值, 与电流元所处的横向位置有关; *r*'表示电流元与远场 某点 *r* 之间的传播矢量; *θ*'表示 *r*' 矢量与水平方向(+*x* 方向矢量)的夹角。

在远区场, 矢量 \bar{r} 和 \bar{r}' 可以视作平行, 因而以从 坐标原点到观察点的路径 \bar{r} 作为参考时, $|\bar{r}|$ 和 $|\bar{r}'|$ 的 关系可表示为:

$$r = r' + \operatorname{sgn}(x)\sqrt{x^2 + h^2} = r' + \frac{x}{\sin\theta}$$
(5)

由于

$$r - r' = \operatorname{sgn}(x)\sqrt{x^2 + h^2} \ll r \tag{6}$$

因此,在式(4)中可以忽略r'和r的差异对辐射场大小带来的影响,可以令 $\frac{1}{r'} \approx \frac{1}{r}$,但是这种差异 对辐射场相位带来的影响却不能忽略不计。即指数项 $e^{-ir'}$ 中的r'必须按照式(5)中的表达式进行计算。 进一步地,在远区场, θ 和 θ 的关系可表示为:

$$\theta' = \frac{\pi}{2} - \theta$$
 (7)
将式(4)沿整个顶负载全长做线积分,有如下形式:

$$E_{\rm top}\left(\theta,\varphi\right) = j \frac{60\pi}{\lambda} \frac{e^{-jkr}}{r} \int_{-l}^{l} I(x) \cos\theta e^{\frac{jkx}{\sin\theta}} dx \qquad (8)$$

该积分表达式中有 *l*(*x*)这一项,即左右顶负载上的电流值。总的天线辐射方向图可由上述计算得到的顶负载辐射方向图与直立天线辐射方向图相加得到。 当左右顶负载成镜像反对称时,左右顶负载的辐射在 水平方向上相互抵消,仅保留直立天线的辐射特性,此时整个导航台天线的辐射特性在水平面上是圆形。 当顶负载上电流分布不满足镜像反对称时,左右顶负 载的辐射场在水平方向上不能抵消。此时整个导航台 天线的辐射特性在水平面上不再是圆形,所计算得到 的辐射场和方位角 *q* 有关。按照式(8)进行一维积 分运算,可以获得不同电流分布情况下的空间辐射方 向图和 E/H 面方向图。此处给出了其水平平面的方向 图,如图 8 所示。

330°

210°

330°

210°

300°

270°

240°

300°

270°

240°



图 8 与图 4 对应的水平方向图

从图 8 中可见,顶负载上的电流受扰后,造成了 水平平面方向图的形变,理想的无干扰的水平平面方 向图为如图 3a 所示的形式。这就造成了这样一种现象:地下电磁信号的部分能量传播至地表,造成导航

台天线上电流的受扰,导致导航台天线辐射特性的变化,引起空间场强的受扰变化。根据式(8),可对空域任一点的场强值进行计算。下面分别对机场跑道中心延长线上某点及延长线左右一定角度处的点的场强值进行仿真计算,如图9所示。





近距导航台距机场跑道一端的距离为1050 m,分 别计算 A, B, C 三点处的场强值。A, B, C 三点都 位于航线上,距地表一定的高度。A 点的方位向在机 场跑道的延长线上, B 点和 C 点的方位向分别是向左 右偏移 15°,三点距机场跑道的水平距离都为3 km。 在该次仿真中,进行了长时段的观测,在整个观测 时段,前面一段时间和后面一段时间内都没有外部 电磁干扰信号,此时导航台站天线未受干扰,空间 某点的接收场强值保持不变。在观测时段的中间某 个时间段,有外部电磁干扰信号存在。外部电磁辐 射信号穿透地表透射入空中,在空中架设的导航台 站 T 型天线的左右顶负载上产生感应电动势,破坏 了原有的镜像反对称关系,造成空间场强值的变化。 A, B, C 三点的场强值在整个观测时段的变化情况 如图 10 所示。



图 10 长时段观测导航台天线受扰时的空域场强值 变化情况

从图 10 可以看出,未受干扰时,空域某点的场

强值保持恒定值不变。有外部电磁干扰信号时,造成 了导航台天线顶负载上电流的变化,进而改变了原来 的空间辐射特性。在导航台天线覆盖区域的同一空间 位置,就导致了场强值的抖动。当飞机经过近距导航 台覆盖区域时,将会造成机载无线电罗盘接收到的信 号忽大忽小,引起无线电罗盘的指针抖动。

3 结论

通过上述理论分析和仿真计算,得到如下结论。

1)地下电磁信号传播至 NDB 的天线,会对天线 上原有的电流分布产生影响,造成 NDB 辐射方向图 的变化。

2)NDB 辐射方向图受外部电磁干扰的影响,偏 离了原来的无方向性辐射特性,进而造成在航线下滑 线上电场强度的波动。

3) NDB 辐射电场强度的波动,将会导致机载罗 盘的抖动,对飞行安全造成潜在威胁。

4)为保障飞行安全,有必要采取屏蔽措施,抑 制外部电磁信号对机场导航台的干扰影响。

参考文献:

- [1] 刘兴发,张小武,张广洲,等.UHV 输电线路对中波
 导航台无线电信号的干扰[J].电网技术,2010,34(6):
 27—30.
- ZHANG Xiao-wu, LIU Xing-fa, WU Xiong-wan, et al. Calculation of Radio Interference from HV AC Transmission Line to Aeronautical Radionavigation Stations[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 1830—1835.
- [3] HONDA J, OTSUYAMA T. Rapid Computation Algorithm for Radio Wave Propagation Characteristics on Airport Surface[C]// Proceedings of 2014 International Conference on Complex. Intelligent and Software Intensive Systems (CISIS), 2014: 302–306.
- [4] 李程, 王琴剑, 刘又铭. 高压输电线路对中波导航台无 源干扰的研究[J]. 现代电子技术, 2016, 39(7): 79-82.
- [5] 孙先锋. 航空无线电导航台站电磁干扰的特点及测量 方法[J]. 空中交通管理, 2001(2): 39—40.
- [6] 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(7): 42-44.
- [7] 李娜. 机场电磁环境保护区的划定[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [8] 赵国群. 基于电气化铁路干扰下机场 ILS 导航台电磁 环境的分析与研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [9] 刘兴发, 干喆渊, 张小武, 等. 交流特高压输电线路对

航空无线电导航台站的有源干扰计算[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 6—8.

- [10] 李紫丹. 基于回波模型多径效应对航向信标系统的影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [11] 熊万洲,黄欲成,李健,等.飞机着陆下滑道与输电线
 路垂直防护间距分析[J].电力建设,2013,34(12):32—36.
- [12] 熊万洲, 徐大成, 张小武, 等. 向一上±800 kV 输电工 程与舟白机场及信标台间距分析[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(3): 9—11.
- [13] JOFFE E B, GAVAN J. RFI Effects Analysis of an Airport-installed HF Transmitter on Aircraft COMM/NAV

Receivers[C]// Proceedings of IEEE 1991 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. EMC Society. Radiating Compatibility from New Jersey, 1991: 212—213.

- [14] SHA Fei, JIANG Zhong-yong, JIANG Shou-ning. Case Study: Prediction of RFI Effects of Electrified Railways on Aeronautical Radio Navigation Stations[C]// Proceedings of International Symposium on Electromagnetic Compatibility Proceedings, 1997: 167–170.
- [15] JOHN D K, RONALD J M. Antennas: For All Applications[M]. Third Edition. Newyork: McGraw-Hill Companies Inc, 2011.