

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.11.005

高速铁路弓网分离电弧高频有源干扰仿真分析

曹海滨¹, 邹军², 向念文³, 王凌峰³

(1. 中国神华能源股份有限公司, 北京 100011; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 3. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽合肥 230009)

摘要:高速铁路弓网分离电弧是高速铁路产生的高频电磁干扰的重要来源之一, 文章采用高斯脉冲和负指数脉冲对弓网电弧的电流波形进行模拟。考虑到弓网电弧电流峰值难以确定, 采用归一化时域波形和归一化频谱进行分析, 从而确定高速铁路弓网分离电弧产生电磁干扰的影响范围。仿真研究表明, 不同形式电弧对应的电磁干扰的影响范围和电磁场衰减特性有很大不同。因此当需要确定弓网分离电弧电磁影响范围时, 合理的电弧模型至关重要。文中给出2个脉冲类波形的电磁影响范围, 对于其他类型的电弧模型, 可以利用文中计算结果, 采用卷积的方法获得相应的计算结果。

关键词:高速铁路; 弓网分离; 电弧模型; 电磁干扰

中图分类号:U264.34; U225.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)11-1467-05

Simulation of high-frequency active interference of pantograph-network separation arc of high-speed railway

CAO Hai bin¹, ZOU Jun², XIANG Nian wen³, WANG Ling feng³

(1. China Shenhua Energy Co., Ltd., Beijing 100011, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The pantograph-network separation arc is one of the important sources of the high-frequency electromagnetic interference generated by high-speed railway. This paper uses Gaussian pulse and negative exponential pulse to simulate the current waveform of the pantograph-network arc. Considering that the peak value of the pantograph-network arc current is difficult to determine, the normalized time-domain waveform and the normalized frequency spectrum are used to determine the range of electromagnetic interference generated by the pantograph-network separation arc of high-speed railway. Simulation results show that the range of electromagnetic interference and the electromagnetic field attenuation characteristics corresponding to different forms of arcs are very different. Therefore, when it is necessary to determine the electromagnetic interference range of the pantograph-network separation arc, a reasonable arc model is essential. This paper gives the electromagnetic interference range of two pulse waveforms. For other types of arc models with other arc current waveforms, the calculation results in this paper can be used, and the convolution method can be used to obtain the corresponding calculation results.

Key words: high-speed railway; pantograph-network separation; arc model; electromagnetic interference

高速电气化铁路的高频干扰主要有有源干扰和无源干扰。无源散射干扰是由于高速电气化铁

路的高架桥、高速运行的列车车体等的存在, 对无线电信号会产生遮挡、反射, 这会对各种无线电信

收稿日期: 2021-10-09; 修回日期: 2022-09-06

基金项目: 国家自然科学基金联合基金资助项目(U1834204)

作者简介: 曹海滨(1970—), 男, 北京市人, 中国神华能源股份有限公司高级工程师;

邹军(1971—), 男, 北京市人, 博士, 清华大学教授, 博士生导师;

向念文(1985—), 男, 湖北宜昌人, 博士, 合肥工业大学研究员, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: xiangnianwen@hfut.edu.cn.

号的传播产生不利影响。因为一般高速列车的外表都是金属,所以可以近似地将高速列车看成金属体。因此无源干扰问题就归结为金属体的散射问题。

电力机车在换相、受电弓与接触网断续接触、启动、升降弓等情况时,电网电流的瞬时突变会造成很强的脉冲干扰,特别是受电弓在接触网导线上的滑动离线,会产生弓网电火花,这是高速电气化铁路无线电干扰最严重的根源。

弓网电火花是一种气体放电现象,它是由于接触网导线的硬点、接触网导线的振动、受电弓弓头的振动等多种原因,致使受电弓与接触网导线在相对高速滑动中分离而产生。弓网电火花的危害主要表现在如下方面:①对接触网导线和受电弓滑板的侵蚀和磨耗;②产生过电压,威胁牵引供电网的绝缘,损坏电力机车内的电力电子设备;③产生高频噪声;④使供电质量下降。

弓网离线电弧是在列车运行过程中产生,受到电磁场、流场、温度场和速度场等多场联合作用,电弧的特性和多种因素关联。因此,考虑电弧某方面特性,其模型的形式是多样的,具体有两大类,也即主要有两类研究方向^[1-11]:一类是将电弧视为非线性电阻研究电弧外部特性的黑盒数学模型;另一类是通过数值模拟技术、磁流体动力学理论等研究内部物理特性的数学模型。尽管有上述模型,但是由于弓网离线电弧在模型、测量和仿真方面的困难,到目前为止,尚没有一种普适的弓网离线电弧模型。因此,实际的弓网电弧产生的高频电磁干扰,需要在相应区段经过大量的实测数据,从而确定弓网电火花的产生概率和干扰水平。

本文研究弓网离线电弧产生的高频电磁辐射及其对通信系统的干扰。本文的计算基于以下假设:①弓网已经分离,且产生弓网电火花;②弓网电火花的时域波形满足一定的函数,根据相关文献的结论,首先假设弓网电火花的时域波形为高斯脉冲和负指数脉冲,然后分别予以计算;③不考虑大地电导率的影响,假设大地为理想导体。

1 计算方法简述

1.1 空间任一观测点的电磁场计算

若弓网分离电弧的电流已知,则其在空间任意场点处产生的电磁场可以采用垂直电偶极子(vertical electric dipoles, VED)等效。VED的电磁场示意图如图1所示。

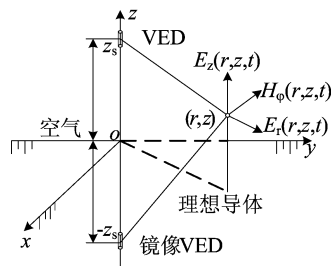


图1 VED的电磁场示意图

根据垂直偶极子电磁场理论和镜像法原理可知,空间任一观测点的电磁场^[12]为:

$$E_r(r, z, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{3r(z-z_s)}{cR^4} i\left(z_s, t - \frac{R}{c}\right) + \frac{3r(z-z_s)}{R^5} \int_0^t i\left(z_s, s - \frac{R}{c}\right) ds + \frac{r(z-z_s)}{c^2 R^3} \frac{\partial}{\partial t} i\left(z_s, t - \frac{R}{c}\right) \right] \quad (1)$$

$$E_z(r, z, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{2(z-z_s)^2 - r^2}{cR^4} i\left(z_s, t - \frac{R}{c}\right) + \frac{2(z-z_s)^2 - r^2}{R^5} \int_0^t i\left(z_s, s - \frac{R}{c}\right) ds - \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial}{\partial t} i\left(z_s, t - \frac{R}{c}\right) \right] \quad (2)$$

$$H_\phi(r, z, t) = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{r}{R^3} i\left(z_s, t - \frac{R}{c}\right) + \frac{r}{cR^2} \frac{\partial}{\partial t} i\left(z_s, t - \frac{R}{c}\right) \right] \quad (3)$$

其中: z_s 为垂直偶极子的高度,即弓网电火花的高度; r, z 为场点坐标; c 为光速;垂直偶极子与观测点的距离 $R = \sqrt{r^2 + (z - z_s)^2}$ 。

1.2 拟合电弧时域波形计算 VED 电磁场

为了提高计算速度,采用子域二次函数分段拟合电火花时域波形^[13],对电流进行近似,即

$$i(z_s, t) = \sum_{m=1}^M (a_m t^2 + b_m t + c_m) U(t - t_m) \quad (4)$$

其中: a_m, b_m, c_m 可以根据已知电弧波形计算,详细计算过程从略; $U(t - t_m)$ 为移位 t_m 的理想阶跃函数。

式(1)~式(3)中,有

$$\frac{\partial}{\partial t} i\left(z_s, t - \frac{R}{c}\right) = \sum_{m=1}^M \left[2a_m \left(t - \frac{R}{c}\right) + b_m \right] U\left(t - \frac{R}{c} - t_m\right) \quad (5)$$

$$\int_0^t i\left(z_s, s - \frac{R}{c}\right) ds = \int_0^t \left\{ \sum_{m=1}^M \left[a_m \left(s - \frac{R}{c}\right)^2 + b_m \left(s - \frac{R}{c}\right) + c_m \right] U\left(s - \frac{R}{c} - t_m\right) \right\} ds =$$

$$\int_{\frac{R}{c}+t_m}^t \left\{ \sum_{m=1}^M \left[a_m \left(s - \frac{R}{c} \right)^2 + b_m \left(s - \frac{R}{c} \right) + c_m \right] \right\} ds \quad (6)$$

令 $\lambda = s - \frac{R}{c} - \frac{|z_s|}{v}$, 则有:

$$\begin{aligned} & \int_0^t i(z_s, s - \frac{R}{c}) ds = \\ & \sum_{m=1}^M \int_{t_m}^{t - \frac{R}{c}} (a_m \lambda^2 + b_m \lambda + c_m) d\lambda = \\ & \sum_{m=1}^M \left(\frac{a_m}{3} \lambda^3 + \frac{b_m}{2} \lambda^2 + c_m \lambda \right) \Big|_{t_m}^{t - \frac{R}{c}} U \left(t - \frac{R}{c} - t_m \right) \end{aligned} \quad (7)$$

将式(5)、式(6)分别代入式(1)、式(3), VED 在理想导电平面上方的电磁场为:

$$\begin{aligned} E_r(r, z, t) = & \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{3r(z-z_s)}{cR^4} \left[a_m \left(t - \frac{R}{c} \right)^2 + \right. \right. \\ & \left. \left. b_m \left(t - \frac{R}{c} \right) + c_m \right] + \frac{r(z-z_s)}{c^2 R^3} \left[2a_m \left(t - \frac{R}{c} \right) + b_m \right] + \right. \\ & \left. \frac{3r(z-z_s)}{R^5} \left(\frac{a_m \lambda^3}{3} + \frac{b_m \lambda^2}{2} + c_m \lambda \right) \Big|_{t_m}^{t - \frac{R}{c}} \right\} \times \\ & U \left(t - \frac{R}{c} - t_m \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} E_z(r, z, t) = & \\ & \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{2(z-z_s)^2 - r^2}{cR^4} \left[a_m \left(t - \frac{R}{c} \right)^2 + \right. \right. \\ & \left. \left. b_m \left(t - \frac{R}{c} \right) + c_m \right] - \frac{r^2}{c^2 R^3} \left[2a_m \left(t - \frac{R}{c} \right) + b_m \right] + \right. \\ & \left. \frac{2(z-z_s)^2 - r^2}{R^5} \left(\frac{a_m \lambda^3}{3} + \frac{b_m \lambda^2}{2} + c_m \lambda \right) \Big|_{t_m}^{t - \frac{R}{c}} \right\} \times \\ & U \left(t - \frac{R}{c} - t_m \right) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} H_\varphi(r, z, t) = & \frac{1}{4\pi} \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{r}{cR^2} \left[2a_m \left(t - \frac{R}{c} \right) + b_m \right] + \right. \\ & \left. \frac{r}{R^3} \left[a_m \left(t - \frac{R}{c} \right)^2 + b_m \left(t - \frac{R}{c} \right) + c_m \right] \right\} \times \\ & U \left(t - \frac{R}{c} - t_m \right) \end{aligned} \quad (10)$$

根据以上公式, 本文计算步骤如下:

1) 采用式(4)拟合弓网分离电弧的时域波形。

2) 采用式(8)、式(10)计算电弧在空间产生的时域电磁场。

3) 根据式(2)获得时域结果, 进行傅里叶变换获得空间任意场点的频域计算结果。

2 计算结果

2.1 高斯脉冲模型时的有源干扰

采用高斯脉冲去模拟弓网电火花, 即

$$i(t) = I_0 \exp \left[-4\pi \frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (11)$$

由于弓网电火花峰值电流较难测定, 本文采用其归一化特性, 相关参数取值为: $I=1$ A, $t=10$ ns, $0 \text{ ns} < t < 100 \text{ ns}$, $\sigma=10$ ns, 弓网电火花高度 $z_s=15$ m, 观测点高度 $z=2$ m, 抽样点数 $n=401$ 。根据计算步骤2), 采用高斯脉冲模型模拟弓网电火花时, 其时域解析波形和采用二次拟合技术的近似波形如图2所示, 其相应的频谱如图3所示。

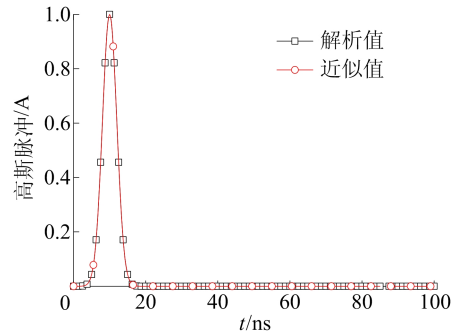


图2 高斯脉冲时域解析波形和近似波形

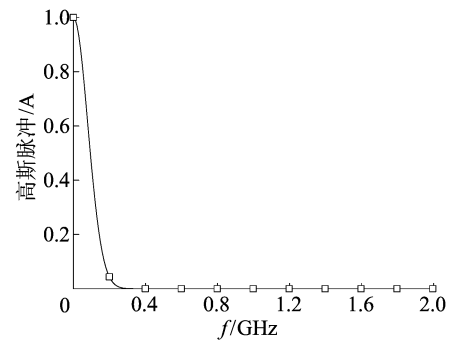
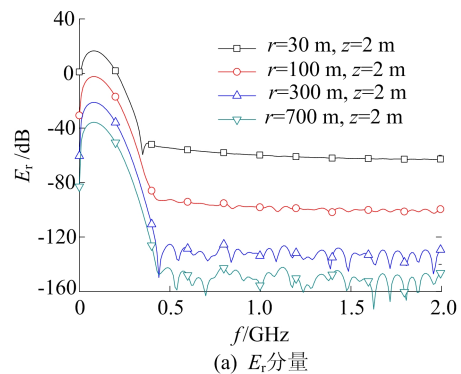


图3 高斯脉冲弓网电弧的频谱

根据计算步骤3), 将 E_r 、 E_z 、 H_φ 分量的时域波形进行傅里叶变换, 可得其频谱图。为了得到不同距离对有源干扰的影响, 分别计算 r 为 30、100、300、700 m 时的有源干扰的频谱, 结果如图4所示。



(a) E_r 分量

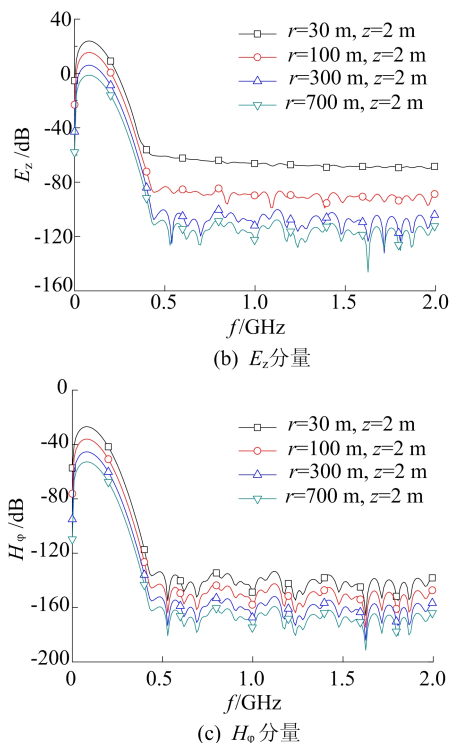


图 4 高斯脉冲不同场点处 E_r 、 E_z 、 H_ϕ 分量的频谱

2.2 负指数脉冲模型时的有源干扰

采用负指数脉冲去模拟弓网电火花,即

$$i(t) = I_0 \exp(-\alpha t) \tag{12}$$

由于弓网电火花峰值电流较难测定,本文采用其归一化特性,相关参数取值为: $I_0 = 1 \text{ A}$, $0 \text{ ns} < t < 100 \text{ ns}$, $\alpha = 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ 。采用负指数脉冲模型模拟弓网电火花时,其时域解析波形和采用二次拟合技术的近似波形如图 5 所示,其相应的频谱如图 6 所示。

将 E_r 、 E_z 、 H_ϕ 分量的时域波形进行傅里叶变换,可得其频谱图。为了得到不同距离对有源干扰的影响,分别计算 r 为 30、100、300、700 m 时有源干扰的频谱,如图 7 所示。

本文计算的是最严重的情况,即假设弓网电火花已经产生。

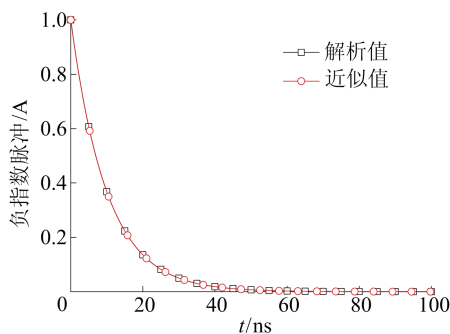


图 5 负指数脉冲的时域解析波形和近似波形

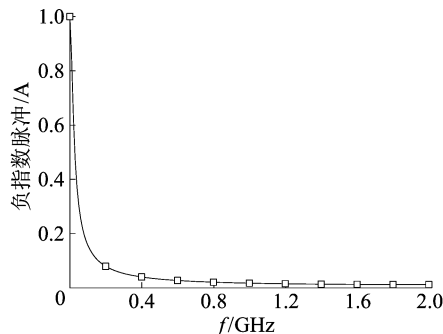
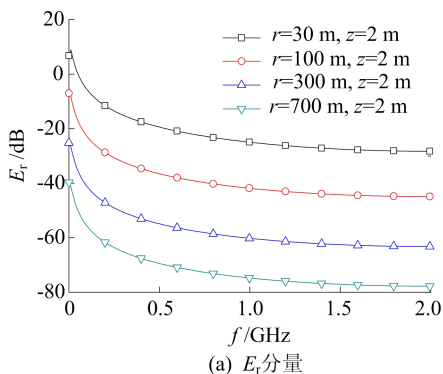
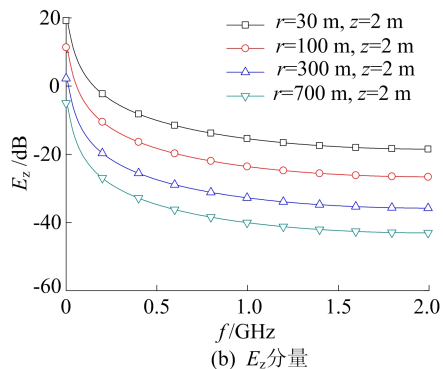


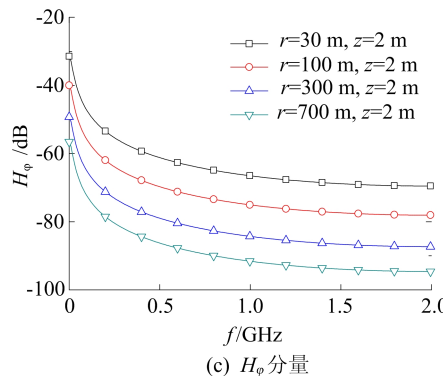
图 6 负指数脉冲的频谱



(a) E_r 分量



(b) E_z 分量



(c) H_ϕ 分量

图 7 负指数脉冲不同场点处 E_r 、 E_z 、 H_ϕ 分量的频谱

根据文献[14]和上述计算结果可知:

- 1) 采用高斯脉冲时,在 400 MHz 以外,且距离为 700 m 时,有源干扰下降为 120 dB。因此,当距离超过 700 m 时,在 400 MHz 以外,有源干扰可以忽略。

2) 采用高斯脉冲时,当距离超过 700 m,对于 400 MHz 以内的有源干扰,需要根据实测数据进行分析。对于在实测中没有造成干扰的线路,可以忽略有源干扰;对于在实测中打火概率较高且造成干扰的区段,应考虑将防护距离扩大或者将沿线架空通信、广播线路的接收天线高度提高。

3) 采用负指数脉冲时,在距离超过 700 m 时,有源干扰需要根据实测数据进行分析。对于在实测中没有造成干扰的线路,可以忽略有源干扰;对于在实测中打火概率较高且造成干扰的区段,应考虑将防护距离扩大或者将沿线架空通信、广播线路接收天线的高度提高。

克服有源干扰的措施如下:

1) 改进供电方式。如研究出比 AT 方式更优异的供电方式,降低弓网离线率,即降低弓网电火花产生的概率,从而降低有源干扰。

2) 改进弓和网性能。开发高质量的新型受电弓,以改善受流质量,降低离线率,即降低弓网电火花产生的概率,从而降低有源干扰。

3) 建设高质量的铁路。弓网电火花绝大多数产生于定位点处。因为定位点是集中负荷点,所以该点在一个跨距内弹性最低。质量较差的接触网的每个定位点都会产生电火花,而质量较好的接触网的定位点处发生离线的概率会明显下降。在接触网架设的施工中,定位点处应尽量采用弹性定位器,而且要尽量消除接触网硬点。

3 结 论

有源干扰是由弓网电火花产生的,弓网电火花的电流峰值、电流波形和产生概率难以确定。本文采用高斯脉冲和负指数脉冲对弓网电火花的电流波形进行模拟,采用归一化时域波形和归一化频谱进行分析。弓网电火花的产生具有很强的随机性,与接触网导线的硬点、接触网导线的振动、受电弓弓头的振动、列车运动速度、天气情况等诸多因素有关。因此,实际的弓网电火花干扰,需要在相应区段经过大量的实测数据,以确定弓网电火花的产生概率和干扰水平。

[参 考 文 献]

[1] 王英,刘志刚,范福强,等. 弓网电弧模型及其电气特性的研

究进展[J]. 铁道学报,2013,35(8):35-43.

- [2] CASSIE A M. Theorienouvelle des arc derupture etdela ririgidite des circuits[C]//CIGRE, Vol 102. [S. l. : s. n.], 1939:588-608.
- [3] MAYR O. Contribution to the theory of static and dynamic arcs[J]. Arch Elec,1943,37(1):589-608.
- [4] HABEDANK U. On the mathematical description of arc behaviour in the vicinity of current zero[J]. etazArchiv,1988,10(11):339-343.
- [5] SCHWARZ J. Dynamisches verhalten eines gasbe-blasenen, turbulenzbestimmten schaltlichtbogens[J]. ETZ-A, 1971, 92(3):389-391.
- [6] 刘艳丽,郭凤仪,李磊,等. 一种串联型故障电弧数学模型[J]. 电工技术学报,2019,34(14):2901-2912.
- [7] 刘艳丽. 矿井供电系统串联型故障电弧数学模型及诊断方法研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2017.
- [8] SCHAVEMAKER P H, VAN D S L. An improved Mayr-type arc model basedoncurrent-zero measurements[circuit breakers][J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2000,15(2):580-584.
- [9] GUARDADO J L, MAXIMOV S G, MELGOZA E, et al. An improved arc model before current zero based on the combined mayr and cassie arc models[J]. IEEE Transactionson Power Delivery,2005,20(1):138-142.
- [10] SMEETS R P P, KERTESZ V. Evaluation of high-voltage circuit breaker performance with a validated arc model[J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution,2000,147(2):121-125.
- [11] OHTAKA T, KERTESZ V, SMEETS R P P. Novel black-box arc model validated by high-voltage circuit breaker testing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2018,33(4):1835-1844.
- [12] ZOU J, LI J J, LEE J B, et al. Fast and highly accurate algorithm for calculating the earth-return impedance of underground conductors[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,2011,53(1):237-240.
- [13] ZOU J, JIN T B, LI W W, et al. Fast numerical evaluation of the horizontal electric field radiated by a lightning channel using the moment technique[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,2012,54(6):1244-1251.
- [14] 国家技术监督局. 对空情报雷达站电磁环境保护要求: GB 13618—1992 [S]. 北京:中国标准出版社,1992:1-12.

(责任编辑 张 镛)