

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. DOI: 10.13443/j.cjors.2016100301

LU H D, ZHU F, LI X, et al. Shielding effectiveness of reinforced concrete toward electric arcs in pantograph-catenary systems of metro [J]. Chinese journal of radio science, 2016, 31(6): 1209-1215. (in Chinese). DOI: 10.13443/j.cjors.2016100301

钢筋混凝土对地铁弓网离线电弧屏蔽效能的研究

鲁合德¹ 朱峰^{1,2} 李鑫² 唐毓涛²

(1. 西南交通大学物理科学与技术学院, 成都 610031;

2. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘要 为了研究地铁站钢筋混凝土层对地铁弓网离线电弧的屏蔽效能, 基于有限积分法(Finite Integration Technique, FIT)计算并分析了钢筋混凝土对平面波的屏蔽效能; 讨论了不同混凝土结构对屏蔽效能的影响因素; 实测得到了某地铁站的屏蔽效能. 研究表明: 素混凝土对电磁波的屏蔽效能具有一定的周期性, 增加厚度对高频段的屏蔽效能影响不大; 钢筋网的屏蔽效能能在 0.1~0.8 GHz 频带范围内大于 30 dB; 双层钢筋混凝土在 0.1~1.3 GHz 频带范围内的屏蔽效能大于 40 dB; 实测屏蔽效能整体上跟数值计算结果吻合得较好, 验证了本文方法计算钢筋混凝土对地铁弓网离线电弧屏蔽效能的正确性.

关键词 屏蔽效能; 钢筋混凝土; 弓网离线电弧; 有限积分法

中图分类号 U228.2

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2016)06-1209-07

DOI 10.13443/j.cjors.2016100301

Shielding effectiveness of reinforced concrete toward electric arcs in pantograph-catenary systems of metro

LU Hede¹ ZHU Feng^{1,2} LI Xin² TANG Yutao²

(1. School of Physics Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract This paper focuses on the shielding effectiveness(SE) of reinforced concrete against offline electric arcs in pantograph-catenary systems of metro under plane wave. Based on the finite integration technique(FIT), the SE of the reinforced concrete under the plane wave is calculated and analyzed. The influence factors of different concrete structures on the SE are discussed and the shielding effectiveness of a metro station is measured. Research results show that the SE of concrete against electromagnetic wave is periodic, and the increase of thickness has little effect on the SE in the high frequency band. The SE of the rebar is greater than 30 dB in the frequency range from 0.1GHz to 0.8GHz. The SE of double layer reinforced concrete in the 0.1—1.3 GHz is larger than 40 dB. The measured SE is in good agreement with the numerical results of the model, which verifies the correctness of this method in calculating the SE of the electric arcs in pantograph-catenary systems.

Keywords shielding effectiveness; reinforced concrete; electric arcs in pantograph-catenary; FIT

收稿日期: 2016-10-03

资助项目: 国家自然科学基金(U1434203)

联系人: 朱峰 E-mail: zhufeng@swjtu.cn

引 言

为了满足人们的换乘需要,越来越多的城市正在实现城市轨道交通电气化列车和机场航站楼之间的无缝对接,实现零换乘.城轨列车在启动或制动状态下,由于运动状态和牵引电流的剧烈变化,导致弓网接触点受流不规则,同时伴随着较大的电磁辐射,尤其是在接触线的一些特殊点,例如锚段关节^[1-2]等位置这种现象尤为突出.对于机场,由于飞机飞行过程中的空中管制和起降均需要地面信号进行引导,因此机场区域对电磁环境要求极为苛刻,《GB6364-86 航空无线电台导航台(站)电磁环境要求》对外来的电磁干扰场强有严格规定.地铁弓网离线电弧的电磁辐射,具有典型的脉冲波特性,频谱覆盖了机场仪表着陆系统(Instrument Landing System, ILS)以及部分甚高频(Very High Frequency, VHF)空管、监视等机场主要电磁波频段.城市轨道交通一般在地下负二层运行,尽管地面对离线电弧辐射具有一定的屏蔽效果,但由于地面是钢筋混凝土结构(电导率远小于金属导体),离线电弧的电磁波辐射还是会穿透屏蔽层到达地面,对地面敏感电子设备造成干扰.

国内外对钢筋混凝土的屏蔽效能进行了一定的研究. J. P. Bruhin^[3] 和 A. Reineix^[4] 等人研究了无限大钢筋混凝土层对连续波的屏蔽效能,由于忽略诸多因素以及对模型进行简化,所以具有一定的局限性. Se-Young Hyun^[5] 研究了不同钢筋结构对屏蔽效能的影响因素. 周璧华教授采用时域有限差分(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)法计算了无限大钢筋网、钢筋混凝土层和素混凝土层对电磁脉冲屏蔽效能进行了时域全波分析,并研究了钢筋粗细、间隔、钢筋交叉点焊接还是绑扎,有否浇筑混凝土等因素对电磁脉冲时域屏蔽效能的研究^[6-7]. Elodie Richalot^[8] 使用有限元法对电磁波在钢筋混凝土墙中的传输特性进行了理论分析,得到了不同结构的钢筋混凝土对电磁波传输的影响. 文献[9]采用矩量法(Method of Moments, MOM)和 FDTD 方法分析了钢筋直径、钢筋网格尺寸以及混凝土特性等对屏蔽效能影响的基本因素. 文献[10]分析了电磁波在钢筋混凝土中的衰减、反射和散射影响以及其中的谐振现象. 文献[11-12]分析了钢筋混凝土层对高功率微波的衰减特性影响. Robert Paknys^[13] 使用 MOM 研究了钢筋混凝土的反射和传输特性. Giulio Antonini 和 Antonio Orlandi^[14] 研究了钢筋

混凝土对手机信号 GSM 和 UMTS 系统的屏蔽效能.

通过以上文献可以看出,前人对钢筋混凝土的屏蔽效能做过不少的研究,但钢筋混凝土对地铁弓网离线电弧屏蔽效能的研究还未见报道,因此从理论计算层面研究钢筋混凝土对弓网离线电弧电磁辐射的屏蔽效能很有必要. 本文首次研究了钢筋混凝土对地铁弓网离线电弧的屏蔽效能特性. 同时结合实地测试的钢筋混凝土对地铁弓网电弧电磁辐射的屏蔽效能数据,验证了数值计算结果的正确性,得到了一些有价值的规律,为铁路和空管安全具有一定的参考意义.

1 屏蔽效能理论分析

由于地铁弓网离线电弧产生的脉冲波具有很宽的带宽,所以为了获得比较宽的频谱范围,入射波选用高斯脉冲波. 通过求混凝土层对电磁脉冲的响应,计算出不同频段范围内钢筋混凝土对电磁脉冲的屏蔽效能. 假设照射到钢筋混凝土层上的脉冲电磁辐射为垂直入射的均匀平面波,传播方向与钢筋混凝土层垂直,具体布局如图 1 所示. 图中波的传播方向为 y 轴方向,与 y 轴垂直的两个面上设置完全匹配层(Perfectly Matched Layer, PML)吸收边界,与 x 、 z 轴垂直的两个面上加周期性边界条件(Periodic Boundary Conditions, PBC). 通过计算 A、B 两点的场强大小得到钢筋混凝土的屏蔽效能.

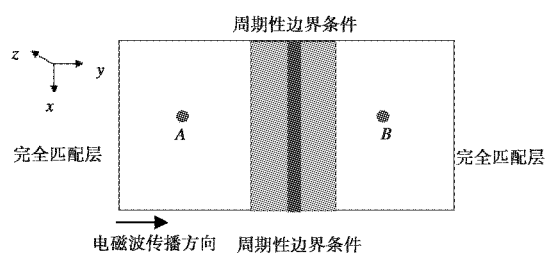


图 1 钢筋混凝土计算模型结构图

屏蔽效能计算公式^[15]为

$$E_s = 20 \lg \frac{E_0}{E_s} \quad (1)$$

式中: E_0 表示不存在屏蔽体时某处的电场强度; E_s 表示存在屏蔽体时与 E_0 同一处的电场强度.

由于在数值计算中使用的是平面波,所以自由空间中各处的电场强度大小相同,故 E_0 和 E_s 的位置可以任意选择. 假设高斯信号激励场强大小为 1 V/m 时,则上述屏蔽效能公式变为

$$E_s = -20 \lg E_s, \quad (2)$$

所以只需计算高斯脉冲波经过钢筋混凝土后某处的场强就可以得到该钢筋混凝土的屏蔽效能。

对于素混凝土和钢筋网的屏蔽效能计算可以使用平面波在多层介质中的传输理论^[16]进行计算。由于钢筋混凝土的复杂性,其屏蔽效能只能通过数值计算得到,本文使用有限积分法(Finite Integration Technique, FIT)对钢筋混凝土的屏蔽效能进行数值计算。

混凝土的电磁参数为^[7]:相对介电常数 $\epsilon_r = 8$, 电导率 $\sigma = 0.001 \text{ s/m}$ 。图2所示为实际钢筋网的结构尺寸,单根钢筋的直径 $t = 25 \text{ mm}$,钢筋网的周期 $P = 100 \text{ mm}$ 。

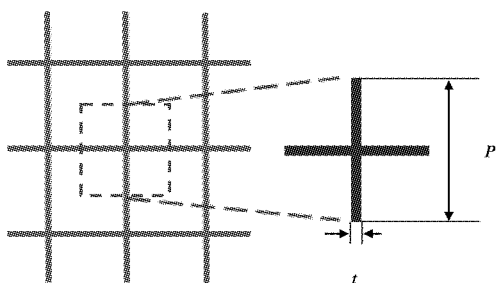


图2 钢筋网结构尺寸

2 计算结果及分析

FIT是最早由 Weiland^[17]在1977年根据麦克斯韦方程组的积分形式推导出来的计算方法,目前发展较为完善,可用于解决多种电磁场问题^[18-20]。FIT的基本思想^[19]是对Maxwell方程组的积分形式进行离散处理。首先将一个有限计算区域分割为许多小的网格单元,然后将Maxwell方程组在每个网格面上离散,得到离散化的Maxwell网格方程组,然后加上特定的边界条件及介质参数进行数值求解。

FIT与其他算法相比,算法复杂度比较低,它不会随目标的外形结构、几何尺寸和材料参数等的复杂化而变得复杂;存储量比较小;采用循环迭代的“蛙跳算法”,避开了大型线性方程组的求解(即矩阵求逆)^[20]。由于算法比较简单在计算钢筋混凝土屏蔽效能时该方法能够节省计算时间和内存。

本文针对 $0 \sim 1.5 \text{ GHz}$ (覆盖主要机场敏感频段) 频谱范围内电磁波,研究素混凝土、钢筋网及钢筋混凝土对弓网电弧的屏蔽效能。

2.1 素混凝土的屏蔽效能

首先计算厚度为 400 mm 的素混凝土的屏蔽效能,结果如图3所示。通过图3可以看出:在 $0.1 \sim$

1.5 GHz 频带范围内,除个别谐振点外,屏蔽效能在 10 dB 左右。

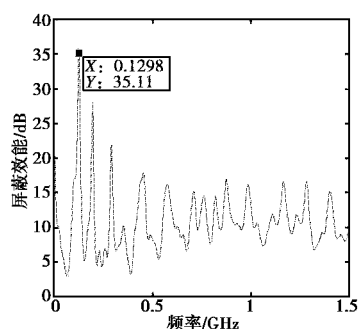


图3 素混凝土的屏蔽效能

同时素混凝土的屏蔽效能具有一定的谐振性。由于素混凝土两个方向上加PBC,所以可以将素混凝土看作两个方向无限长而一个方向有限宽的矩形谐振腔。矩形谐振腔的谐振频率理论公式^[16]为

$$f_{mnl} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{d}\right)^2}. \quad (3)$$

式中: m, n, l 为 $1, 2, 3 \dots$; a, b, d 分别为矩形谐振腔的长宽高。在这里,由于素混凝土的横向边界无限大,所以式(3)简化为

$$f_{mnl} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \frac{l}{d}. \quad (4)$$

将素混凝土的厚度 $d = 400 \text{ mm}$, $\epsilon_r = 8$ 代入式(4)可得 $f = 132 \text{ MHz}$ ($l = 1$),该理论计算结果与数值计算得到的结果非常相近(129.8 MHz),相对误差为 1.67% 。

为了研究素混凝土厚度对屏蔽效能的影响,对不同厚度的素混凝土进行数值计算,得到了不同厚度的素混凝土对电磁波屏蔽效能的曲线,结果如图4所示。从图中可以看出:增加素混凝土的厚度对低频谐振点有一定影响,而在高频段增加厚度对屏蔽效能的提高影响不大。

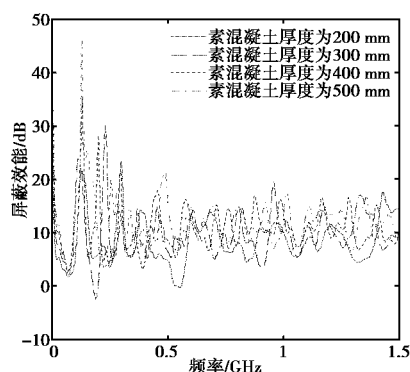


图4 不同厚度素混凝土的屏蔽效能

2.2 钢筋网的屏蔽效能

选择钢筋的尺寸为直径 $t=25$ mm, 钢筋网的周期 $P=100$ mm, 对单层钢筋网的屏蔽效能进行数值计算, 得到了单层钢筋网对电磁波的屏蔽效能, 结果如图 5 所示. 通过屏蔽效能曲线可以看出单层钢筋网在 $0.1\sim 0.8$ GHz 频率范围内屏蔽效能大于 30 dB, 在中低频存在较强的谐振现象.

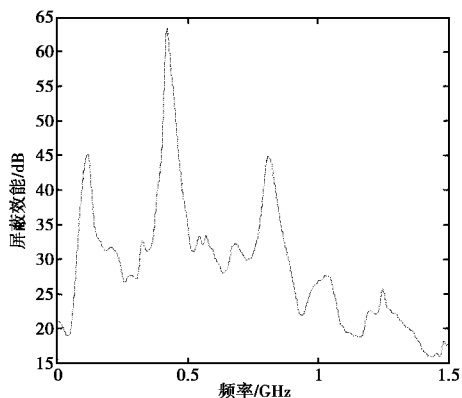


图5 单层钢筋网的屏蔽效能

为了研究钢筋网的周期对屏蔽效能的影响, 计算不同周期钢筋网的屏蔽效能, 结果如图 6 所示. 通过图 6 可以看出: 随着钢筋网周期的增大, 屏蔽效能逐渐降低, 这是显而易见的; 同时随着钢筋周期的增大, 谐振频点向低频方向移动, 这是由于随着钢筋周期的增大, 相应的谐振波长必然变大, 频点下降.

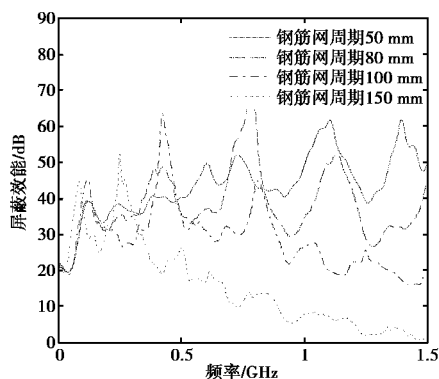


图6 不同周期钢筋网的屏蔽效能

2.3 钢筋混凝土的屏蔽效能

首先数值计算单层钢筋混凝土的屏蔽效能, 由于在实际的地铁楼层之间使用的是双层钢筋混凝土, 所以同时对双层钢筋混凝土进行数值计算. 数值计算中, 混凝土层厚度仍为 400 mm, 钢筋直径 $t=25$ mm, 钢筋网周期 $P=100$ mm; 双层钢筋混凝土中两层钢筋之间的间距为 100 mm. 图 7 所示为单、

双层钢筋混凝土的屏蔽效能.

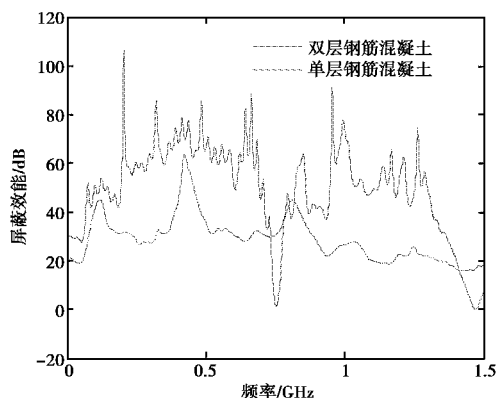


图7 单、双层钢筋混凝土的屏蔽效能

从图 7 可以看出: 单层钢筋混凝土结构的屏蔽效能在整个计算频带范围内(个别谐振点除外)都大于 20 dB; 双层钢筋混凝土结构的屏蔽效能大于 40 dB, 双层钢筋混凝土屏蔽效能比单层钢筋混凝土有明显提高.

从图 7 还可以看出双层钢筋混凝土屏蔽效能曲线在 750 MHz 频点处几乎为零. 该频点对应的波长为 400 mm, 而两层钢筋网之间的间距为 100 mm, 刚好为四分之一波长. 这是由于垂直入射的平面波在第一层钢筋网的反射与在第二层钢筋网上反射的相位刚好相差 π , 相位相反, 两者相互抵消, 因此平面波几乎无反射地经过两层钢筋网, 故在 750 MHz 存在一个屏蔽效能几乎为零的频点.

3 钢筋混凝土屏蔽效能的实测分析

机场电子设备对电磁干扰非常敏感, 为了测试地铁弓网离线电弧产生的电磁脉冲能否对地面上的机场设备产生影响, 针对机场导航台主要敏感设备的工作频点对地铁站进行了电磁波的屏蔽效能测试. 表 1 是机场导航台主要设备的工作频率及极化方式.

表1 机场主要设备工作频率及极化方式

机场导航台主要设备	工作频率/MHz	极化方式
指点信标台	75	水平
塔台甚高频通信系统	118~136.975	垂直
航向信标台	108.1~111.95	水平
下滑信标台	328.6~335.4	水平
测距仪台	962~1213	垂直
全向信标台	108~117.975	水平

如图 8 所示本文使用对比测试方法对地铁站的屏蔽效能进行测试:首先,发射天线和接收天线均位于地下负二层,二者相距 5 m,发射天线连接信号源(模拟弓网离线电弧产生的电磁波),信号源的发射功率定为 0.1 W,接收天线连接频谱仪;然后将接收天线放置于负一层和发射天线相对应的位置,信号源的发射功率仍然为 0.1 W.采用单频点逐点测试的方法,每次只得到一个频点的辐射波形图,然后通过两者相减得到单点的屏蔽效能,由于实测单点测试图数量较大,图 9 仅给出 180 MHz 频点的频谱仪实测波形,其它点的实测波形图在此不再一一给出,其中屏蔽效能的实测结果如表 2 所示.

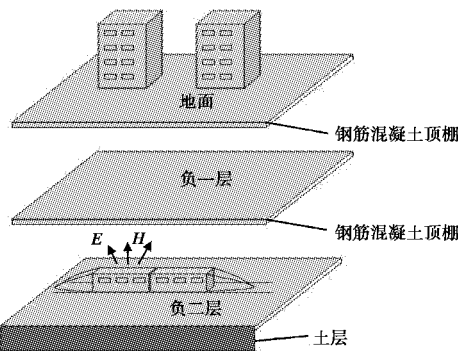
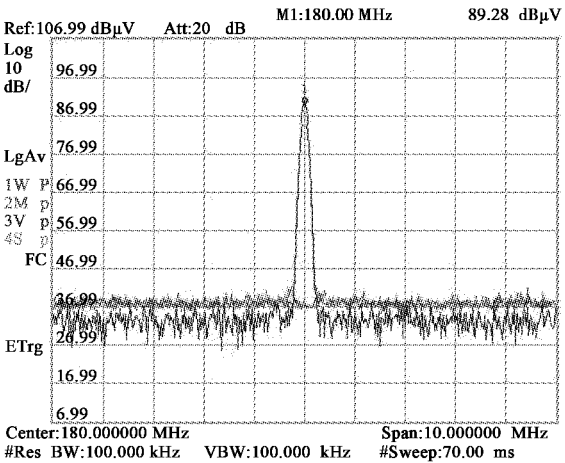


图 8 屏蔽效能实测示意图

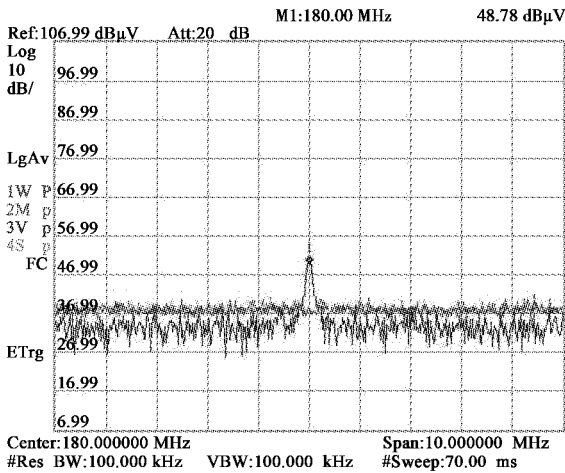
表 2 屏蔽效能实测结果

频率/MHz	屏蔽效能/dB	频率/MHz	屏蔽效能/dB
0.1	31.63	350	61.9
75	48.82	400	64.4
108	45.13	500	65.7
119.75	51.22	700	49.3
120	54.7	750	5.4
150	50.03	960	63.4
180	40.5	1 000	68.7
225	53.9	1 030	55.3
250	55.27	1 090	48.62
275	54.14	1 215	60.3
300	59.1	1 400	25.3

图 10 给出了钢筋混凝土屏蔽效能的数值计算结果与实测结果的对比,通过对比可以看出:在整个频段内,除特殊点外,数值计算和实测的屏蔽效能均大于 40 dB,实测与数值计算得到的屏蔽效能结果吻合得很好;数值计算的结果略大于实测结果,这是显而易见的,负二层发射的电磁波会从地铁出站口等地方绕射到上面楼层,使得实测的屏蔽效能略低于理论计算值.



(a) 负二层频谱仪实测辐射波形图



(b) 负一层频谱仪实测辐射波形图

注:图中蓝色为最大值保持;红色为背景值;粉色线为实时刷新值。

图 9 180 MHz 频谱仪实测辐射波形图

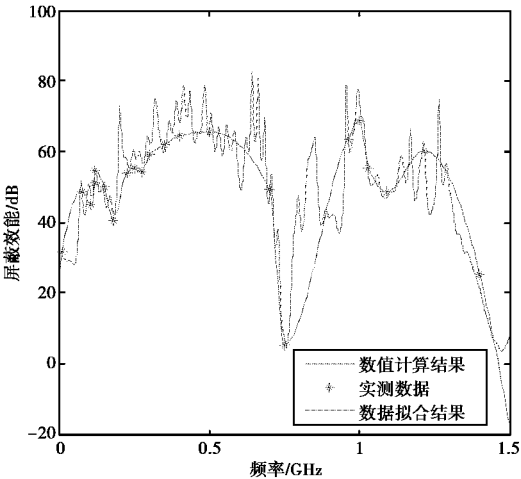


图 10 钢筋混凝土数值计算与实测的屏蔽效能

负二层与负一层之间的钢筋混凝土顶棚的屏蔽效能 $40\sim 50$ dB,再加上负一层到地面之间的钢筋混凝土层的屏蔽效能,最终到达地面的电磁波基本接近或等于背景噪声,不会对地面上机场的敏感电子设备产生影响.

4 结 论

本文采用有限积分法数值计算了素混凝土、钢筋网、单层钢筋混凝土和双层钢筋混凝土的屏蔽效能.得到如下结论:素混凝土对电磁波的屏蔽效能具有一定的周期谐振性,增加素混凝土厚度对高频段屏蔽效能的影响不大;在钢筋混凝土中钢筋网的屏蔽效能起主要作用,单层钢筋网对电磁波的屏蔽效能 $0.1\sim 0.8$ GHz 频带范围内大于 30 dB;双层钢筋混凝土的屏蔽效能除几个谐振点外的整个频带内大于 50 dB.最后通过实测得到了某地铁站的屏蔽效能,实测屏蔽效能的结果跟数值计算结果吻合得很好,从而验证了数值计算的正确性.对实际具有一定的指导意义,同时为铁路安全运行提供了理论和数据支持.

致谢 感谢邱日强博士在作者论文写作过程中给予的指导和帮助.

参考文献

- [1] 孟令倩. 柔性悬挂系统的参数化建模及锚段关节的受流分析[D]. 天津:天津大学, 2010.
MENG L Q. Parametric modeling of the flexible suspension system and current collection analysis of overlapping section[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [2] 王晖, 张忠林, 毕继红. 双弓作用下锚段关节处弓网耦合系统受流分析[J]. 铁道标准设计, 2011, 15(3): 251-259.
WANG H, ZHANG Z L, BI J H Current collection analysis of double-pantograph-catenaries coupling system at overlapping section[J]. Railway standard design, 2011, 15(3): 251-259. (in Chinese)
- [3] BRUHIN J P. Shielding effectiveness of reinforced concrete against electromagnetic waves[C]//Seventh International Wroclaw Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1984, Part-2: 597-605.
- [4] REINEIX A, BOUAND A, JECKO B. Electromagnetic pulse penetration into reinforced-concrete buildings[J]. IEEE transactions on EMC, 1987, 29(1): 72-78.
- [5] HYUN S Y, DU J K. Analysis of shielding effectiveness of reinforced concrete against high-altitude electromagnetic pulse[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2014, 56(6): 1488-1496.
- [6] 周璧华, 陈彬, 高成, 等. 钢筋网及钢筋混凝土电磁脉冲屏蔽效能研究[J]. 电波科学学报, 2000, 15(3): 251-259.
ZHOU B H, CHEN B, GAO C, et al. Study on EMP shielding effectiveness of wire-mesh reinforcement and reinforced-concrete[J]. Chinese journal of radio science, 2000, 15(3): 251-259. (in Chinese)
- [7] 易韵, 陈彬, 高成, 等. 钢筋混凝土层对高功率电磁环境的屏蔽效能研究[J]. 微波学报, 2002, 18(3): 52-58.
YI Y, CHEN B, GAO C, et al. Study on shielding effectiveness of reinforced concrete in high power electromagnetic environment[J]. Journal of microwaves, 2002, 18(3): 52-58. (in Chinese)
- [8] RICHALOT E, BONILLA M, WONG M F, et al. Electromagnetic propagation into reinforced concrete walls[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2000, 48(3): 357-366.
- [9] 高长征, 李琳, 崔翔, 等. 钢筋网和钢筋混凝土屏蔽效能研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(6): 35-40.
GAO C Z, LI L, CUI X, et al. Study of shielding effectiveness of reinforcing bar mesh and reinforced-concrete[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2005, 20(6): 35-40. (in Chinese)
- [10] 张恒伟, 张亦希, 傅君眉, 等. 钢筋混凝土墙对电磁脉冲屏蔽的 FDTD 分析[J]. 微波学报, 2007, 23(S): 189-193.
ZHANG H W, ZHANG Y X, FU J M, et al. Analysis of the shielding effects on electromagnetic pulses of reinforce concrete walls by using FDTD method[J]. Journal of microwaves, 2007, 23(S): 189-193. (in Chinese)
- [11] 刘峰, 吕昕, 李跃波, 等. 钢筋混凝土层对高功率微波的衰减特性研究[J]. 电波科学学报, 2014, 29(1): 35-46.
LIU F, LÜ X, LI Y B, et al. Attenuation characteristics on high power microwave penetrating through reinforced-concrete[J]. Chinese journal of radio science, 2014, 29(1): 35-46. (in Chinese)
- [12] 刘峰, 吕昕, 李跃波, 等. 钢筋网对高功率微波的衰减特性[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(11): 2713-2717.
LIU F, LÜ X, LI Y B, et al. Attenuation characteristics of high power microwave penetrating through reinforcement nets[J]. High power laser and particle

- beams, 2012, 24(11): 2713-2717. (in Chinese)
- [13] PAKNYS R. Reflection and transmission by reinforced concrete-numerical and asymptotic analysis[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2003, 51(10): 2852-2861.
- [14] ANTONINI G, ORLANDI A. Shielding effects of reinforced concrete structures to electromagnetic fields due to GSM and UMTS systems[J]. IEEE transactions on magnetics, 2003, 39(3): 1582-1585.
- [15] 路宏敏. 工程电磁兼容[M]. 2版. 西安:西安电子科技大学出版社, 2010:109.
- [16] 杨儒贵. 电磁场与电磁波[M]. 2版. 北京:高等教育出版社, 2007:219-223.
- [17] WEILAND T. A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields[J]. Electronics and communication, 1977, 31:116-120.
- [18] 李明智,熊章强,张大洲. 有限积分法与有限差分法在弹性波数值模拟中的对比分析[J]. 中国科技论文, 2015, 10(5): 538-541.
- LI M Z, XIONG Z Q, ZHANG D Z. Comparison of elastodynamic finite integration technique and finite difference method in numerical simulation of elastic wave[J]. China science paper, 2015, 10(5): 538-541. (in Chinese)
- [19] 鞠文静,周忠元,蒋全兴,等. 基于有限积分法的电磁兼容吸波材料反射率的建模仿真[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(3): 474-477.
- JU W J, ZHOU Z Y, JIANG Q X, et al. FIT-based simulation of reflectivity of absorbing materials for electromagnetic compatibility[J]. Journal of Southeast University(natural science edition), 2015, 45(3): 474-477. (in Chinese)
- [20] 罗宏伟. 基于有限积分法的抛物面天线间隔度的仿真研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- LUO H W. The simulation studies of parabolic antennas' isolation based on finite integration technique [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)

作者简介

鲁合德 (1988—),男,山东人,西南交通大学物理科学与技术学院在读博士研究生,研究方向为电磁场与微波技术电磁兼容.

朱峰 (1963—),男,安徽人,西南交通大学电气工程学院教授,博士生导师,研究方向为电磁理论及电磁场数值分析、电磁兼容分析与设计、电磁测量与系统集成、微波技术和与天线综合.

李鑫 (1989—),男,山东人,西南交通大学电气工程学院在读博士研究生,研究方向为电磁兼容.