

# 基于实验测量的地铁站台电磁暴露安全评估

李瑾 逯迈 周文颖 张启

(兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室 兰州 730070)

**摘要** 为了评估地铁站台电磁环境下工作人员和乘客的安全性,选取某条正在运行的地铁线路中的高架和地下两个地铁站台的电磁暴露为研究对象,站台电磁暴露源的选取具有一定的代表性,通过场强仪和频谱仪现场测量获取信号强度,得到地铁站台候车区域典型位置电场强度分布。结果表明:地铁站台主要电磁辐射源现场测量峰值频率在 869~2 613 MHz 内,地下站台电场强度测量值为 0.010~0.044 V/m,高架站台电场强度为 0.009~0.098 V/m,均远低于国际非电离辐射防护委员会制定标准中的职业和公众电磁暴露导出限值,说明地铁站台电磁环境对工作人员和乘客不会构成健康风险。

**关键词** 地铁站台,电磁暴露,实验测量,安全评估

**中图分类号** TL75+1, U285.21+2

**DOI:** 10.11889/j.1000-3436.2019.rj.37.020602

## Safety evaluation on electromagnetic exposure on the subway platform based on experimental measurements

LI Jin LU Mai ZHOU Wenying ZHANG Qi

(Key Laboratory of Opt-Electronic Technology and Intelligent Control, Ministry of Education,  
Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**ABSTRACT** This study evaluates the electromagnetic exposure safety of staff and passengers on subway platforms. Specifically, to identify electromagnetic exposure at typical waiting areas on elevated and underground subway platforms in operation, this study employed electric field-strength and spectrum analyzers to measure the signal power and e-field strength at typical waiting areas on subway platforms, and representative sources of radiation were selected. The results revealed that the peak measuring frequency from the main electromagnetic radiation source of subway platforms was in the range of 869~2 613 MHz. In addition, the e-field strength of the underground and elevated platforms was 0.010~0.044 and 0.009~0.098 V/m, respectively, which were far less than the reference levels defined by the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection guidelines for occupational and general public exposure. Thus, this study shows that the electromagnetic environment of a subway platform is not harmful to the health of subway staff and passengers.

基金资助: 国家自然科学基金项目(51867014、51567015、61701208)和兰州交通大学青年科学基金项目(2015033)资助  
第一作者: 李瑾,女,1984年6月出生,2012年毕业于兰州交通大学,现为兰州交通大学在读博士研究生,研究方向为生物医学电磁学,讲师

通信作者: 逯迈,博士,教授,博导, E-mail: mai.lu@hotmail.com

收稿日期: 初稿 2018-09-25; 修回 2018-12-06

Supported by National Natural Science Foundation of China (51867014, 51567015, 61701208) and Lanzhou Jiaotong University Fund for Distinguished Young Scholars (2015033)

First author: LI Jin (female) was born in June 1984, and graduated from Lanzhou Jiaotong University in 2012. Now she is a doctoral candidate of Lanzhou Jiaotong University, focusing on biomedical electromagnetism, lecture

Corresponding author: Ph.D. LU Mai, professor, doctoral supervisor, E-mail: mai.lu@hotmail.com

Received 25 September 2018; accepted 06 December 2018

**KEYWORDS** Subway platform, Electromagnetic exposure, Experimental measurements, Safety evaluation

**CLC** TL75+1, U285.21+2

截至2015年底,我国已建成总长度3 618 km的地铁线路,到2020年还将再建成3 000 km<sup>[1]</sup>。随着我国城市轨道交通系统蓬勃发展,地铁站台客流量大,无线通信需求旺盛,在地铁站台内形成了复杂的电磁环境。地铁站台电磁环境的主要辐射源由无线通信系统的天线组成。列车运行控制系统(CBTC)工作频段为2.4~2.5 GHz,采用敷设在站台两端的八木天线实现列车与地铁的无线通信。数字集群通信系统(TETRA)工作频段为806~870 MHz,民用通信系统工作频段为806~960 MHz和1.7~2.8 GHz,在地铁站台均采用天线的室内分布系统以及敷设在站台桥架或广告牌后方的漏缆实现信号覆盖。地铁工作人员与乘客在此电磁暴露下的健康风险成为值得关注的问题。

国内外学者对轨道交通系统电磁环境的研究主要集中在系统抗电磁干扰,对外电磁骚扰<sup>[2-4]</sup>与无线信号传输特性<sup>[5-8]</sup>等方面,对地铁站台电磁环境现场测量尚未见报道。国内外学者在电磁暴露健康效应方面开展了大量极有意义的工作<sup>[9-13]</sup>,研究表明,电磁环境对人体健康可能造成健康风险<sup>[14-15]</sup>,目前尚缺少地铁站台工作人员及乘客在电磁暴露下的健康风险研究。

## 1 测量实施

### 1.1 测量原理

测量的地铁站台电磁环境是指在站台空旷候车区域,由无线通信系统电磁辐射源通过各种传播途径所形成的电磁辐射背景值。电磁辐射频谱宽,电场强度值相对较小,因而属于远区场。

电磁环境的测量方法如图1所示<sup>[16]</sup>。测量系统由接收机与接收天线组成,通过测量接收机的端口电压或功率来获取空间电场强度的大小。用天线在空间被测点处感应电信号的大小表征该点处的电场强度。电场强度单位是 $\mu\text{V}/\text{m}$ ,测量系统的结果用dB表示(0 dB=1  $\mu\text{V}/\text{m}$ )。场强仪用单位dBm显示仪器输入端口的信号电平,即信号功率。dBm用来表征功率的绝对值,即某功率值 $P$ 相对于1 mW的相对值。其转换公式见式(1)。测量系统

必须校准后使用。

$$P' = 10 \lg P \quad (1)$$

式中: $P'$ 为功率有效值(dBm), $P$ 为功率(mW)。

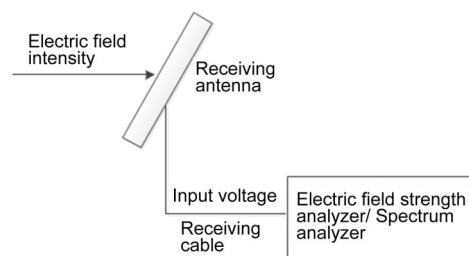


图1 电磁环境测量方法  
Fig.1 Measurement method of electromagnetic environment

对于输入阻抗为50  $\Omega$ 的测量系统,待测电场强度值 $E$ 的计算公式见式(2)<sup>[17]</sup>。

$$E = K + A + 107 + L \quad (2)$$

式中: $A$ 为场强仪或频谱仪的数字幅度读数(dBm);如果接收天线与场强仪之间有电缆连接, $L$ 为连接电缆的损耗值(dB),50  $\Omega$ 测量系统的测量电压转换为数字幅度读数的差值为107; $K$ 为天线系数(dB),是空间电场强度与接收机端口电压的比值,是天线作为接收天线的一个重要参数。工程上通常用天线增益 $G$ 计算天线系数AF<sup>[18]</sup>,见公式(3)。

$$AF = 20 \lg \left( \frac{9.76}{\lambda \sqrt{G}} \right) \quad (3)$$

式中: $\lambda$ 为波长(m),简化式(3)得式(4)。

$$AF = -29.75 + 20 \lg f - 10 \lg G \quad (4)$$

式中: $f$ 为频率(MHz)。

### 1.2 测量地点

选取某典型高架与地下两个地铁站台为测量点,其中,地下岛式站台选取站台中央空旷候车区域为测量点,高架测试站台如图2(a)所示,长度120 m,宽度6 m,站台天花板高度为7 m,其测量点示意图及4个测量点A、B、C、D位置如图2(b)所示,测量点距钢轨3 m。测量温度为18~20  $^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度范围55%~65%。

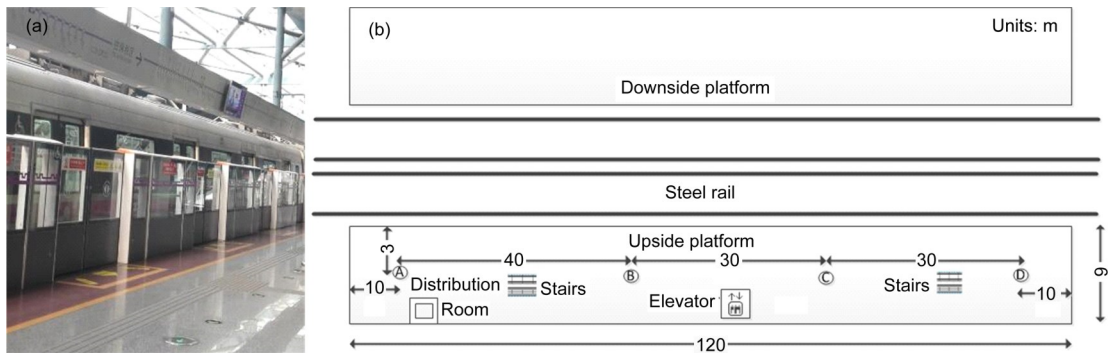


图2 测量站台(a)及站台测点布置图(b)  
Fig.2 Station platform (a) and arrangement plan of platform measurement points (b)

1.3 测量设备及方法

地铁站台无线通信系统具有多个辐射源，测量点距离辐射源的最小距离为3 m，可视为辐射远区场测量。在远区场，电场强度、磁场强度、功率密度可相互换算。当辐射体的工作频率大于300 MHz时，可以只测量电场强度。

测量系统接收机选取柯雷 E7X 电磁场强度分析仪，接收天线选用与其匹配的对数周期天线。对数周期天线具有宽频带、低驻波比、高增益等优点，适用于本文被测频段的电磁环境测量<sup>[19]</sup>。柯雷 E7X 电磁场强度分析仪测量误差小于 3 dB。接收天线为对数周期天线，频率范围 700 MHz~4 GHz，增益 5 dBi，标准阻抗 50 Ω。测量现场还配备 1 台 RIGOL DSA832E 频谱分析仪，频率范围为 9 kHz~3.2 GHz，测量误差小于 0.8 dB。两套测量系统相互独立，测量结果可相互验证。接收天线距离地面高度 1.5 m<sup>[20]</sup>。测量设备采用扫频测试方法，扫频范围为 800~2 800 MHz，扫描模式为连续扫描，时间为 3 s。

峰值检波对瞬变或重复频率很低的脉冲干扰源能有效检测，电磁环境评估标准的强制检波类型为均方根值检波模式<sup>[21]</sup>。测量根据地铁站

台电磁环境及限值标准，场强仪采用均方根值检波模式，对所测信号取均方根值，使得场强仪的读数为所测信号的有效值，频谱仪采用峰值检波模式。

2 测量结果

2.1 地下站台

采用频谱仪在地下站台测量数据如图 3 所示。在同一地点使用场强仪的测量数据如表 1 所示。

由图 3 可知，有 6 个明显的信号峰值频率，峰值频率与对应的辐射源无线系统依次为：1.869 0

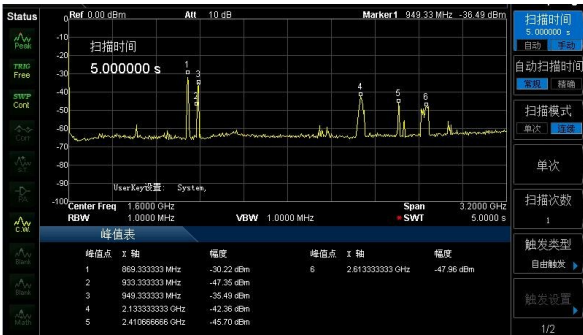


图3 地下站台频谱仪测量数据  
Fig.3 Measurement data of spectrum analyzer on the underground platform

表1 地下站台场强仪测量数据  
Table 1 Measurement data of electric field strength analyzer for the underground platform

| 频率 / MHz<br>Frequency | 信号强度 / dBm<br>Signal strength | 电场强度 / V·m <sup>-1</sup><br>Electric field intensity |
|-----------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------|
| 869                   | -41                           | 0.025                                                |
| 933                   | -50                           | 0.010                                                |
| 949                   | -37                           | 0.044                                                |
| 2 133                 | -45                           | 0.039                                                |
| 2 410                 | -47                           | 0.035                                                |
| 2 613                 | -52                           | 0.021                                                |

(TETRA)、2.933 0 (民用通信)、3.949 0 (民用通信)、4.213 3 (民用通信)、5.241 0 (CBTC)、6.261 3 MHz (民用通信)。信号强度换算为电场强度为0.014~0.055 V/m。

由表 1 可知，峰值频率依次为 869、933、949、2 133、2 410、2 613 MHz，换算为电场强度为 0.010~0.044 V/m，与图 3 的峰值频率相同。由图 3 和表 1 可知，频谱仪与场强仪测量得到的峰值频率相一致，其信号电场强度值在同一数量级，本测量系统能有效反映站台的电磁环境场强分布

2.2 高架站台

高架站台中央候车区域使用频谱仪的测量数据如图 4 所示。图 4 中有 7 个峰值频率，峰值频率与对应的辐射源无线系统依次为：1.816 0 (TETRA)、2.875 0 (民用通信)、3.939 0 (民用通信)、4.949 0 (民用通信)、5.189 3 (民用通信)、6.212 8 (民用通信)、7.244 8 MHz (CBTC)。信号强度换算为电场强度为0.004~0.044 V/m。



图 4 高架站台频谱仪测量数据  
Fig.4 Measurement data of spectrum analyzer on the elevated platform

电场强度较大值依次为0.044、0.032、0.025 V/m，对应的峰值频率依次为 2 128、875、1 893 MHz。在高架站台的 4 个测量点，以这 3 个峰值频率为中心频率进行现场测量，测量数据如表 2 所示。换算为电场强度为0.009~0.098 V/m。

由高架与地下两个典型站台测量数据可知，地铁站台电磁辐射源主要峰值频率为869~2 613 MHz，符合 CBTC 系统、民用通信系统、TETRA 系统的频率分布。

表 2 高架站台场强仪测量数据  
Table 2 Measurement data of electric field strength analyzer for the elevated platform

| 时刻<br>Time | 位置<br>Site | 频率 / MHz<br>Frequency | 信号强度 / dBm<br>Signal strength | 电场强度 / V·m <sup>-1</sup><br>Electric field intensity |
|------------|------------|-----------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------|
| 16:00      | Point A    | 879                   | -34                           | 0.057                                                |
| 16:02      |            | 1 891                 | -36                           | 0.098                                                |
| 16:04      |            | 2 128                 | -45                           | 0.039                                                |
| 16:15      | Point B    | 875                   | -38                           | 0.036                                                |
| 16:17      |            | 1 832                 | -39                           | 0.067                                                |
| 16:19      |            | 2 128                 | -47                           | 0.031                                                |
| 16:30      | Point C    | 875                   | -50                           | 0.009                                                |
| 16:32      |            | 1 832                 | -46                           | 0.030                                                |
| 16:34      |            | 2 128                 | -50                           | 0.022                                                |
| 16:45      | Point D    | 875                   | -33                           | 0.064                                                |
| 16:47      |            | 1 832                 | -43                           | 0.042                                                |
| 16:49      |            | 2 127                 | -48                           | 0.028                                                |

2.3 电磁暴露安全评估

国际非电离辐射防护委员会 (International Commission on Non-ionizing Radiation Protection, ICNIRP) 制定的导则是国际通用的电磁暴露限值标准 [22]。ICNIRP 限值分为职业与公众两类，职业人士暴露在已知条件的辐射环境中，能够通过培训以及预防措施降低相关风险，而普通人群中包

括不同健康状况和年龄段的个体，对辐射环境的认识与防护可能不足，因此，ICNIRP 导则中公众暴露限值比职业暴露限值更加严格。

ICNIRP 导则中的基本限值以确定的健康效应为基础而制定。导出限值根据相关的基本限值测量或计算得出，如电场强度值等。如果电磁环境测量值超过导出限值，并不表示基本限值一定被

超过, 但一旦超过导出限值, 则必须检验与基本限值的符合性, 并决定是否有必要采取额外保护措施。

针对地铁站台主要辐射源所在的频段, 列出 ICNIRP 导则中在时变电场下的职业暴露与公众暴露电场强度导出限值如表 3 所示。选取地下站台与高架站台所测量到的主要辐射源峰值频率, 列出

主要峰值频率对应的 ICNIRP 电磁暴露导出限值, 如表 4、表 5 所示。由表 4 可知, 频率在 869~2 613 MHz 范围内, ICNIRP 电场强度职业暴露导出限值范围为 88.436~137.000 V/m, 公众暴露导出限值范围为 40.533~61.000 V/m。表 5 选取了表 2 中的峰值频率, 其对应的职业暴露导出限值为 85.697~137.000 V/m, 公众暴露导出限值为 39.278~61.000 V/m。

表3 ICNIRP电磁暴露导出限值  
Table 3 ICNIRP reference levels for exposure

| 频率<br>Frequency | 电场强度 Electric field intensity / V·m <sup>-1</sup> |                              |
|-----------------|---------------------------------------------------|------------------------------|
|                 | 职业暴露 Occupational exposure                        | 公众暴露 General public exposure |
| 400~2 000 MHz   | 3f <sup>1/2</sup>                                 | 1.375f <sup>1/2</sup>        |
| 2~300 GHz       | 137                                               | 61                           |

表4 地下站台主要峰值频率对应ICNIRP职业暴露与公众暴露导出限值  
Table 4 ICNIRP reference levels for occupational and general public exposure of mainly peak frequencies on the underground platform

| 频率 / MHz<br>Frequency | 电场强度 Electric field intensity / V·m <sup>-1</sup> |                              |
|-----------------------|---------------------------------------------------|------------------------------|
|                       | 职业暴露 Occupational exposure                        | 公众暴露 General public exposure |
| 869                   | 88.436                                            | 40.533                       |
| 933                   | 91.635                                            | 41.999                       |
| 949                   | 92.418                                            | 42.358                       |
| 2 133                 | 137.000                                           | 61.000                       |
| 2 410                 | 137.000                                           | 61.000                       |
| 2 613                 | 137.000                                           | 61.000                       |

表5 高架站台主要峰值频率对应ICNIRP职业暴露与公众暴露导出限值  
Table 5 ICNIRP reference levels for occupational and general public exposure of mainly peak frequencies on the elevated platform

| 频率 / MHz<br>Frequency | 电场强度 Electric field intensity / V·m <sup>-1</sup> |                              |
|-----------------------|---------------------------------------------------|------------------------------|
|                       | 职业暴露 Occupational exposure                        | 公众暴露 General public exposure |
| 875                   | 88.741                                            | 40.673                       |
| 879                   | 88.944                                            | 40.766                       |
| 1 832                 | 128.406                                           | 58.853                       |
| 1 891                 | 130.457                                           | 59.793                       |
| 2 127                 | 137.000                                           | 61.000                       |
| 2 128                 | 137.000                                           | 61.000                       |

选取场强仪的测量结果与 ICNIRP 限值作对比, 地下站台对比结果如表 6 所示。高架站台对比结果如表 7 所示。由表 6 可知, 地下站台频率为 933 MHz 时, 得到最小电场强度测量值为 0.010 V/m, 是 ICNIRP 职业限值的 0.010%, 是公众限值的 0.023%; 电场强度最大测量值出现在频率 949 MHz 时, 为 0.044 V/m, 是 ICNIRP 职业限值的 0.047%, 是

公众限值的 0.103%。由表 7 可知, 高架站台电场强度测量最小值出现在站台中央测量点 C 的 875 MHz 时, 对应电场强度为 0.009 V/m, 是 ICNIRP 职业限值的 0.010%, 是公众限值的 0.022%。电场强度测量最大值出现在站台一端测量点 A 的 1 891 MHz 时, 为 0.098 V/m, 是 ICNIRP 职业限值的 0.075%, 是公众限值的 0.163%。

表6 地下站台电场强度测量值与ICNIRP导出限值的比较  
Table 6 Comparison between measurement data of electric field strength and ICNIRP reference levels for the underground platform

| 频率 / MHz<br>Frequency | 测量值 / $V \cdot m^{-1}$<br>Measurement data | 比值1(测量值/职业限值)<br>Ratio 1 (Measurement data/<br>Occupational limits) | 比值2(测量值/公众限值)<br>Ratio 2 (Measurement data/<br>General public limits) |
|-----------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 869                   | 0.025                                      | 0.000 29                                                            | 0.000 62                                                              |
| 933                   | 0.010                                      | 0.000 10                                                            | 0.000 23                                                              |
| 949                   | 0.044                                      | 0.000 47                                                            | 0.001 03                                                              |
| 2 133                 | 0.039                                      | 0.000 29                                                            | 0.000 64                                                              |
| 2 410                 | 0.035                                      | 0.000 26                                                            | 0.000 58                                                              |
| 2 613                 | 0.021                                      | 0.000 16                                                            | 0.000 35                                                              |

表7 高架站台电场强度测量值与ICNIRP导出限值的比较  
Table 7 Comparison between measurement data of electric field strength and ICNIRP reference levels for the elevated platform

| 位置<br>Site | 频率 / MHz<br>Frequency | 测量值 / $V \cdot m^{-1}$<br>Measurement data | 比值1(测量值/职业限值)<br>Ratio 1 (Measurement data/<br>Occupational limits) | 比值2(测量值/公众限值)<br>Ratio 2 (Measurement data/<br>General public limits) |
|------------|-----------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Point A    | 879                   | 0.057                                      | 0.000 64                                                            | 0.001 40                                                              |
|            | 1 891                 | 0.098                                      | 0.000 75                                                            | 0.001 63                                                              |
|            | 2 128                 | 0.039                                      | 0.000 28                                                            | 0.000 64                                                              |
| Point B    | 875                   | 0.036                                      | 0.000 40                                                            | 0.000 88                                                              |
|            | 1 832                 | 0.067                                      | 0.000 52                                                            | 0.001 14                                                              |
|            | 2 128                 | 0.031                                      | 0.000 23                                                            | 0.000 51                                                              |
| Point C    | 875                   | 0.009                                      | 0.000 10                                                            | 0.000 22                                                              |
|            | 1 832                 | 0.030                                      | 0.000 23                                                            | 0.000 51                                                              |
|            | 2 128                 | 0.022                                      | 0.000 16                                                            | 0.000 36                                                              |
| Point D    | 875                   | 0.064                                      | 0.000 72                                                            | 0.001 57                                                              |
|            | 1 832                 | 0.042                                      | 0.000 33                                                            | 0.000 72                                                              |
|            | 2 127                 | 0.028                                      | 0.000 20                                                            | 0.000 45                                                              |

### 3 讨论

地铁无线通信系统主要有铁路专有系统和民用系统。轨道交通复杂的电磁环境对人体的健康风险研究具有重要意义。文献[23]研究了司机室内电磁环境对司机的健康影响；文献[24]通过理论计算研究了接触网下铁路站台的电场分布；文献[9]主要针对弓网离线电弧研究了高铁电磁暴露。对于工作人员及乘客在地铁站台电磁暴露下的健康风险研究尚未见报道，本文选取典型地铁站台进行现场测量，得到电磁辐射源信号峰值频率与电场强度分布，并将其与ICNIRP中的职业与公众限值进行对比。

地下站台实际测量所得峰值频率为869、933、949、2 133、2 410、2 613 MHz，高架站台实际测

量所得3个峰值频率为2 128、875、1 893 MHz，实际测量与地铁站台电磁辐射源CBTC、TETRA和民用通信系统的频段<sup>[25]</sup>相一致。

对于地铁站台主要电磁辐射源，地下站台电场强度测量值为0.010~0.044 V/m，高架站台电场强度测量值为0.009~0.098 V/m，地下与高架站台测量值均远小于ICNIRP职业与公众电磁暴露限值。

本文对地铁站台主要辐射源下的电磁环境进行现场测量，并与国际电磁暴露标准作对比，结果表明地铁站台工作人员及乘客在工作和候车时不会有电磁暴露的潜在健康风险。本文的研究结果对提高地铁工作人员的电磁暴露防范意识，消除公众的电磁暴露恐惧具有积极作用，可以为地铁电磁环境安全评估提供依据。下一步工作的重

点是利用仿真研究人体内的比吸收率分布, 进行更有效的地铁站台电磁暴露安全性评估。

## 参考文献

- 1 宁滨, 刘朝英. 中国轨道交通列车运行控制技术及应用[J]. 铁道学报, 2017, **39**(2): 1-9. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2017.02.001.  
NING Bin, LIU Chaoying. Technology and application of train operation control system for China rail transit system[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, **39**(2): 1-9. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2017.02.001.
- 2 闻映红. 高速铁路信号系统的抗电磁干扰技术[J]. 北京交通大学学报, 2016, **40**(4): 70-74. DOI: 10.11860/j.issn.1673-0291.2016.04.011.  
WEN Yinghong. Anti-electromagnetic interference technology for high-speed railway signaling system[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2016, **40**(4): 70-74. DOI: 10.11860/j.issn.1673-0291.2016.04.011.
- 3 余俊, 陆阳, 陈波, 等. 350 km·h<sup>-1</sup>中国标准动车组整车对外电磁骚扰试验及抑制措施[J]. 中国铁道科学, 2016, **37**(6): 135-140. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2016.06.18.  
YU Jun, LU Yang, CHEN Bo, *et al.* External electromagnetic disturbance test and suppression measures for 350 km·h<sup>-1</sup> standardized EMU in China[J]. China Railway Science, 2016, **37**(6): 135-140. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2016.06.18.
- 4 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(1): 116-121. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2018.01.16.  
ZHU Feng, GAO Chenxuan, TANG Yutao. Influence of pantograph-catenary arc on electromagnetic disturbance of airport terminal omnidirectional beacon[J]. China Railway Science, 2018(1): 116-121. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2018.01.16.
- 5 Guan K, Zhong Z, Alonso J I, *et al.* Measurement of distributed antenna systems at 2.4 GHz in a realistic subway tunnel environment[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, **61**(2): 834-837. DOI: 10.1109/TVT.2011.2178623.
- 6 王洪伟, 宁滨, 蒋海林, 等. 2.4 GHz CBTC车地通信系统在隧道中的传播特性研究[J]. 铁道学报, 2013, **35**(10): 52-58. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2013.10.008.  
WANG Hongwei, NING Bin, JIANG Hailin, *et al.* Research on propagation characteristics of 2.4 GHz WLAN in tunnels for CBTC train ground communication systems[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, **35**(10): 52-58. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2013.10.008.
- 7 Zhang L, Briso C, Fernandez J R O, *et al.* Delay spread and electromagnetic reverberation in subway tunnels and stations[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2016, **15**(4): 585-588. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2462022.
- 8 蒋海林, 赵红礼, 朱力, 等. 基于 5.9 GHz 的 TD-LTE 的城市轨道交通通信系统测试研究[J]. 铁道学报, 2016, **38**(5): 53-59. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2016.05.009.  
JIANG Hailin, ZHAO Hongli, ZHU Li, *et al.* Field test of urban rail transit train-wayside communication based on 5.9 GHz TD-LTE[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, **38**(5): 53-59. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2016.05.009.
- 9 牛大鹏, 朱峰, 邱日强, 等. 武广高铁电磁暴露及对人体健康的影响[J]. 高电压技术, 2016, **42**(8): 2511-2520. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20160812020.  
NIU Dapeng, ZHU Feng, QIU Riqiang, *et al.* Electromagnetic exposure of Wuhan - Guangzhou high speed rail train and its influence on human health[J]. High Voltage Engineering, 2016, **42**(8). DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20160812020.
- 10 Mild K H, Alanko T, Decat G, *et al.* Exposure of workers to electromagnetic fields. A review of open questions on exposure assessment techniques[J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 2009, **15**(1): 3-33. DOI: 10.1080/10803548.2009.11076785.
- 11 Lu M, Ueno S. Dosimetry of exposure of patients to pulsed gradient magnetic fields in MRI[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, **47**(10): 3841-3844. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2157086.
- 12 Ticaud N, Kohler S, Jarrige P, *et al.* Specific absorption rate assessment using simultaneous electric field and temperature measurements[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2012, **11**(1): 252-255. DOI: 10.1109/LAWP.2012.2189748.
- 13 周兢程, 林艳云, 陈克亮, 等. 射频电磁辐射对大鼠脑组织胆碱能标志物的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2017, **35**(1): 9-14. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2017.rrj.35.010202.  
ZHOU Jingcheng, LIN Yanyun, CHEN Keliang, *et al.* Effects of radiation-frequency electromagnetic radiation on cholinergic neuronal markers of SD rat brain[J].

- Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2017, **35**(1): 9-14. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2017. rrj.35.010202.
- 14 Lin J C. Human exposure to RF, microwave, and millimeter-wave electromagnetic radiation [health effects] [J]. IEEE Microwave Magazine, 2016, **17**(6): 32-36. DOI: 10.1109/MMM.2016.2538540.
- 15 包家立, 胡亚楠. 射频电磁场的健康效应[J]. 高电压技术, 2016, **42**(8):2465-2478. DOI: 10.13336/j.1003-6520. hve.20160812001.  
BAO Jiali, HU Yanan. Health effects of radio-frequency electromagnetic fields[J]. High Voltage Engineering, 2016, **42**(8): 2465-2478. DOI: 10.13336/j. 1003-6520. hve.20160812001.
- 16 杨维耿, 翟国庆. 环境电磁监测与评价[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2011: 73-82.  
YANG Weigeng, ZHAI Guoqing. Electromagnetic environment monitoring and evaluation[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2011: 73-82.
- 17 何金良. 电磁兼容概论[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
HE Jinliang. Electromagnetic compatibility[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- 18 吕洪国. 现代网络频谱测量技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 23-36.  
LYU Hongguo. Network spectrum measurement technique[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 23-36.
- 19 中国国家标准化管理委员会. 无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范, 第2-3部分: 无线电骚扰和抗扰度测量方法, 辐射骚扰测量: GB/T 6113.203—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.  
China National Standardization Management Committee. Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods, part 2-3: radio disturbance and immunity measuring method, radiation disturbance measurement: GB/T 6113.203—2016[S]. Beijing: China Standards Press, 2016.
- 20 中国国家标准化管理委员会. 轨道交通电磁兼容: GB/T 24338—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.  
China National Standardization Management Committee. Rail transit electromagnetic compatibility: GB/T 24338—2009[S]. Beijing: China Standards Press, 2010.
- 21 中华人民共和国环境保护部. 电磁环境控制限值: GB 8702—2014[S]. 北京: 中国环境出版社, 2014.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Electromagnetic environment control limit: GB 8702—2014[S]. Beijing: China Environment Press, 2014.
- 22 Herbertz J. Comment on the International Commission on Non-ionizing Radiation Protection guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz) [J]. Health Physics, 1998, **74**(4): 494-522. DOI: 10.1097/00004032-200408000-00008.
- 23 周文颖, 逯迈, 陈博栋. 地铁列车司机室高频电磁暴露安全性评估[J]. 中国铁道科学, 2015, **36**(5): 116-121. DOI:10.3969/j.issn.1001-4632.2015.05.17.  
ZHOU Wenying, LU Mai, CHEN Bodong. Safety evaluation on high frequency electromagnetic exposure in driver's cab of subway train[J]. China Railway Science, 2015, **36**(5): 116-121. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2015.05.17.
- 24 周宏威, 岳琪, 邱孜, 等. 电气化铁路接触网引起的电场空间分布计算[J]. 电机与控制学报, 2014, **18**(8): 81-86. DOI: 10.3969/j.issn.1007-449X.2014.08.013.  
ZHOU Hongwei, YUE Qi, QIU Zi, *et al.* Calculation of electric field distribution caused by electrified railway catenary[J]. Electric Machines and Control, 2014, **18**(8): 81-86. DOI: 10.3969/j.issn.1007-449X.2014.08.013.
- 25 陈杰. 地铁无线通信系统电磁干扰分析及解决方案研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2014.  
CHEN Jie. The subway wireless communication system electromagnetic interference analysis and solution research[D]. Suzhou: Soochow University, 2014.