

谢凡, 滕云田, 徐学恭, 邢西淳, 胡星星. 2011. 天津轨道交通对地磁观测干扰的影响研究. 地震学报, 33(2): 252-261.

Xie Fan, Teng Yuntian, Xu Xuegong, Xing Xichun, Hu Xingxing. 2011. Magnetic perturbation to geomagnetic observation caused by Tianjin railway transit. *Acta Seismologica Sinica*, 33(2): 252-261.

天津轨道交通对地磁观测干扰的影响研究^{*}

谢 凡^{1),*} 滕云田¹⁾ 徐学恭²⁾ 邢西淳³⁾ 胡星星¹⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国天津 301600 天津市地震局静海地磁台

3) 中国陕西泾阳 713700 陕西省地震局泾阳地磁台

摘要 直流牵引城市轨道交通系统在运行过程中产生的磁场对我国大城市周边地磁台站的观测数据产生较为严重的干扰. 城市轨道交通运行过程中产生泄露电流是产生干扰的重要原因. 本文以真空中的线电流磁场计算模型为基础, 通过简化的远场磁场干扰模型对天津地铁轨道交通干扰进行理论建模. 该模型计算简洁高效. 通过对模型的数值模拟, 获得了干扰随距离衰减关系曲线和在线路终点的干扰幅值变化曲线. 同时, 在天津静海开展实地测量天津地铁干扰来验证该理论模型. 理论计算与实地测量结果表明, 如果该区域地表介质大致均匀的情况下, 天津轨道交通干扰磁场的衰减距离到 45 km 处仍然存在 0.3 nT 左右的干扰.

关键词 泄露电流 地磁观测 直流牵引轨道交通系统 人工干扰

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2011.02.012

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

Magnetic perturbation to geomagnetic observation caused by Tianjin railway transit

Xie Fan^{1),*} Teng Yuntian¹⁾ Xu Xuegong²⁾ Xing Xichun³⁾ Hu Xingxing¹⁾

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Jinghai Geomagnetic Observatory, Tianjin Earthquake Administration, Tianjin 301600, China

3) Jingyang Geomagnetic Observatory, Shannxi Earthquake Administration, Jingyang 713700, China

Abstract: Magnetic field created by DC traction power supply system has become a serious man-made perturbation to the operations of geomagnetic observatories near big cities in China. Leakage current produced by DC traction power supply system is the key factor. Based on vacuum line current magnetic field model in railway transit, this paper presents a more general and simple model for quantitative estimation of the magnetic perturbation. It is effective in fast estimating magnetic perturbation value. Using this model we obtained two numerical example results: distance decay of magnetic perturbation and the amplitude variation at the end of railway line caused by motion of locomotive. In order to verify this model, field measurement was carried out in the vicinity of

^{*} 基金项目 地震行业科研专项(20070817)资助. 中国地震局地球物理研究所论著 11AC1004.

收稿日期 2009-11-19 收到初稿, 2010-07-28 决定采用修改稿.

⁺ 通讯作者 e-mail: xiefan@cea-igp.ac.cn

Jinghai, Tianjin. The ground structure in this area is approximately layered. Theoretical calculation and field measurement show a good agreement, indicating that at the distance of 45 km, the perturbation caused by Tianjin subway can reach to 0.5 nT.

Key words: leakage current; geomagnetic observatory; DC traction power supply system; urban rail transit; man-made perturbation

引言

我国各大主要城市的直流牵引轨道交通系统运行时所产生的电磁干扰对周边的地磁台站观测数据产生强烈干扰. 预计未来几年, 受此类干扰的地磁监测台站将会越来越多. 这将影响地磁观测台站数据质量, 制约地磁观测工作发展(Lowes, 1987; Yamazaki *et al*, 2000; Yanagihara, 1977).

直流牵引城市轨道交通系统运行时, 钢结构轨道作为整个供电回路的一部分, 会产生杂散电流. 由于钢轨的绝缘性问题(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2005), 杂散电流流入大地形成泄露电流, 流入大地的泄露电流所产生的磁场是对周围地磁台站产生干扰的重要原因(Padua *et al*, 2002; 王猛, 2005; Iliceto, Santarato, 1999). 此外整个直流供电回路由于漏电产生的不平衡性, 也会在一定范围内产生少许干扰磁场(Pirjola *et al*, 2007).

1949 年 Dupony 在法国通过实验验证了直流供电的铁路系统会对地磁观测台站产生干扰(Dupony, 1950). Yanagihara(1977)通过物理模型模拟地铁回路电流的流向, 在计算上采用物理方程来估算泄露电流大小, 其模型被广泛的研究、应用. 但其模型并没有注意到多台机车运行时的差异, 模型参数估计、方程计算上较为复杂. 所以 Inoue(1979)的干扰模型注意到了这样的差异, 模拟了在走行轨不同位置下的干扰磁场. 随后, Tokumoto 和 Tsunomura (1984)对 Yanagihara 的模型进行了改良, 减少了复杂的参数, 使得物理方程的解更符合实际情况. 尽管 Yanagihara 的模型得到简化, 但他们在做数值模拟受干扰台站 15 km 范围内干扰磁场工作时动用了日本气象厅的高性能计算机. 此外, Lowes(1987)和 Georgescu(2002)都对 Yanagihara 的干扰模型进行了优化和改良. 其中 Georgescu 等的简化模型在计算上相对物理方程的解来说更有优势, 并且其边界条件的设定更为简便. 国内孙枋友和王秀山(1984)、钱家栋(2004)均对北京受地铁干扰的情况进行了实地测量和分析, 积累了宝贵的数据. 其中钱家栋对干扰数据进行了傅里叶谱分析和干扰衰减拟合曲线等工作. 基于观测数据, 分别得出了北京地铁干扰的频率特征和距离衰减经验公式(钱家栋, 2004).

目前针对我国直流牵引城市轨道交通系统对地磁台站的干扰机理及干扰模型研究的工作开展较少. 不同于 20 年前, 近年来随着轨道交通动力技术及电子控制技术的发展和作用于动力系统的供电电流采用斩波控制电路后, 使得供电电流量在整个运行区间内趋于平均(Railtrack PLC, 2000; 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2005). 因此本文的远场干扰模型以 Yanagihara(1977)和 Georgescu 等(2002)的模型分析为基础, 放弃了他们所采用的电流的指数方程形式, 采用经典的真空中的线电流磁场计算模型, 并假设了单位轨道上泄露电流为常数, 使其更符合现代轨道供电技术的现

状. 同时以地面回路电流和地下回路电流两个分模型来计算远场的矢量叠加磁场. 模型参数选择了天津地铁实际运行参数指标, 简洁的计算公式使得在干扰理论计算值计算上更为合理.

1 轨道交通干扰模型

以天津城市轨道交通为例. 天津轨道交通一号线于 2006 年全线贯通运行, 一号线全长约 26 km, 设置 22 个运行车站. 天津轨道交通以接触轨, 又称第三轨供电. 额定供电电压 750 V, 供电电流 3 kA 左右, 电压允许在 500 V 与 900 V 之间波动(郑瞳炽, 张明锐, 2000; 马沂文, 白秀梅, 2003).

在早期的动力控制系统中, 机车在驶离车站时加速, 并在停靠下一站之前就无功率输出地滑行. 因此牵引功率是随时间变化的. 提升功率是通过在机车电机中插入一系列的电阻使得电压下降, 当机车速度提升后, 电阻慢慢减少到不再需要. 这样的功率输出方式使得供电电流在机车开行出站的很短时间内达到极值, 并在司机认为得到足够滑入下一站台的速度后, 减少或关闭动力系统输出. 虽然这样的模式简单, 但控制技术的实现有一定难度. 目前使用的现代轨道交通控制技术使用固态斩波电子技术, 通过平滑改变斩波电路的开关比例, 从而获得电机所需要的电压. 在加速过程中, 牵引电流会比较平滑地从零增加到最大, 因此在整个供电区间, 供电电流呈现较为均匀地分布. 但最大牵引电流仍由最大

牵引功率所决定(Railtrack PLC, 2000; 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2005).

如图 1 所示, 牵引所又称牵引变电所, 其作用是供给一定区段内直流牵引电能. 接触轨在钢轨一侧离地高约 0.4 m. 馈电线为牵引变电所向接触轨输送直流电. 当列车运行时, 直流电由牵引所供给, 流经接触轨中的馈电线, 向机车输送

电能驱动机车前进, 并经由钢轨中的一条流回牵引所. 其中一部分由钢轨流回变电站的电流, 由于钢轨本身特性以及轨-地绝缘技术、天气因素等原因, 在钢轨中的杂散电流对地漏电, 形成泄露电流.

机车电机以直流电源驱动, 电流从牵引所一端经由接触轨中的馈电线向机车的直流电机输电, 之后从钢轨中的一条流回供电站, 构成一个完整的回路. 在理想状态下这个回路接触轨中馈电线上的电流应该与钢轨上的流回变电站的电流量相等, 方向相反.

通过对图 1 的模型进行简化, 得到轨道交通直流牵引系统的供电模型, 并建立直角坐标系. 如图 2 所示, 以直流驱动电源端为原点, xy 平面就相当于地表, 钢轨沿 x 轴从 $x=0$ 处到 $x=L$ 的机车直流电机端, z 轴垂直于 xy 轴所在的地表平面并指向里侧. di 为单位长度钢轨上的泄露电流量.

假设泄露电流集中在机车和牵引所之间的钢轨, 即 $x \in [0, L]$ 区间内. 假设大地导电率沿这段回路都是均匀的, 那么由某单位长度 di 流入地底的泄露电流可由放射状分布的

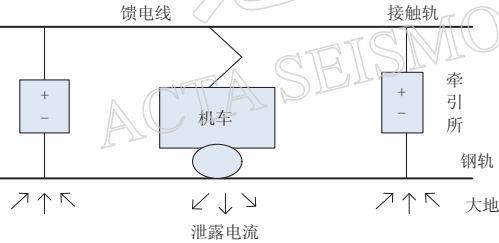


图 1 轨道交通直流牵引系统供电示意图
Fig. 1 Illustration of DC traction power supply system for urban rail transit

电流体系简化为一个半无限长的垂直导线，并最终流回原点 $x=0$ 处，如图 4 所示. 那么在上述直流电驱动机车的供电体系中存在两个回路系统：地面回路和地下回路，如图 3 和图 4 所示.

在图 3 中， B_1 ， B_2 ， B_3 和 B_4 分别代表地面回路中每侧回路电流所产生的磁场. 图 4 中的 di 代表单位钢轨上泄露电流.

考虑到轨道交通运行时由钢轨本身

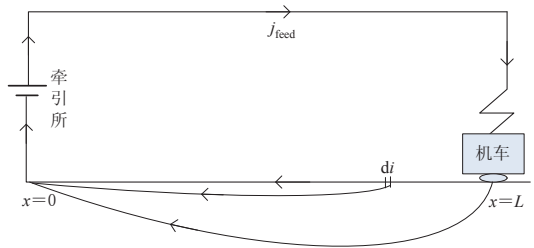


图 2 轨道交通直流牵引系统供电模型

Fig. 2 Model of DC traction power supply system for urban rail transit

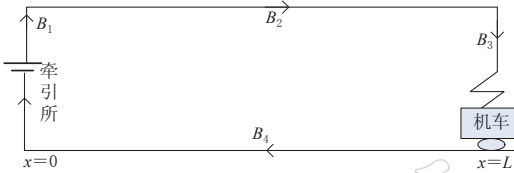


图 3 地面回路体系

Fig. 3 Model of ground circuit loop system of DC traction urban rail transit

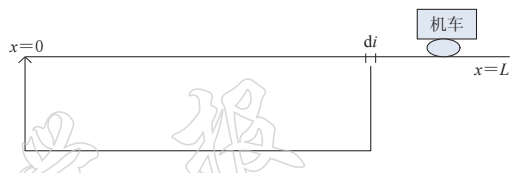


图 4 地下回路体系

Fig. 4 Model of underground circuit loop system of DC traction urban rail transit

特性所产生的杂散电流由于对地绝缘性等问题所产生的泄露电流的估算非常复杂，其中最重要的参数之一是钢轨对地阻抗. GB/T10441-2005(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会，2005)规定新建线路上钢轨对地阻抗每千米不小于 $15\ \Omega$. 但实际上很难达到这样的标准. 并且由于现代电子控制技术的成熟，能够较为均匀的获得供电电流. 因此假设在钢轨上每单位长度上的泄露电流是恒定的，即泄露率是常数. 钢轨上的某点的泄露电流可以非常方便的得出，即

$$I_{\text{leak}}(i) = \int_i^L j \cdot (L - i) di \quad (1)$$

由式(1)可以看出，当 $i=0$ 时， $I_{\text{leak}}(0)=jL$ ，即当位于 $x=0$ 处的牵引所时，总的泄露电流最大，并且 $j=I_{\text{leak}}/L$.

由于城市轨道交通运行时，在其 10 km 范围内的近场所产生的电磁干扰异常复杂，一般地磁台站对其的避让距离也在 20—30 km 之外. 因此我们考虑直流牵引城市轨道交通远场的影响，其模型可由线电流磁场的数学模型给出.

首先由 Biot-Savart 定律得出，在地表($z=0$)某点(x, y)处，电流元 Idl 在细导线上激发的元磁场是

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \times r}{r^3} \quad (2)$$

式中， μ_0 是真空中导电率， r 是从电流元到观测点的矢量. 当一个有限长或者半无限长的细导线上的电流产生的磁场可由上式推导出，即

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} (\cos\theta - \cos\varphi) \quad (3)$$

式中， R 是由细导线到观测点的垂直距离， θ 和 φ 分别是观测点到该导线的头尾两端的角

度. 当导线无限长时, 该公式简化为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (4)$$

由式(1)—(4), 可在给定的直角坐标系下计算出图 3 中所示的 B_1 — B_4 部分的电流产生的磁场.

$$B_1 = \frac{\mu_0 j}{4\pi y} \left(\frac{x}{\sqrt{y^2 + x^2}} + \frac{L-x}{\sqrt{y^2 + (L-x)^2}} \right) \quad (5)$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 j}{4\pi \sqrt{y^2 + h^2}} \left(\frac{x}{\sqrt{y^2 + x^2 + h^2}} + \frac{L-x}{\sqrt{y^2 + (L-x)^2 + h^2}} \right) \quad (6)$$

$$B_3 = \frac{\mu_0 j}{4\pi \sqrt{y^2 + (L-x)^2}} \cdot \frac{h}{\sqrt{y^2 + (L-x)^2 + h^2}} \quad (7)$$

$$B_4 = \frac{\mu_0 j}{4\pi \sqrt{y^2 + (L-x)^2}} \cdot \frac{h}{\sqrt{y^2 + (L-x)^2 + h^2}} \quad (8)$$

则在地面任意一点 $(x, y, z=0)$ 由地面回路产生的磁场在 3 个方向分量上分别是

$$B_x^g = B_1 \frac{y}{\sqrt{y^2 + x^2}} - B_3 \frac{y}{\sqrt{y^2 + (L-x)^2}} \quad (9)$$

$$B_y^g = - \left(B_1 \frac{x}{\sqrt{y^2 + x^2}} + B_2 \frac{h}{\sqrt{y^2 + h^2}} + B_3 \frac{L-x}{\sqrt{y^2 + (L-x)^2}} \right) \quad (10)$$

$$B_z^g = -B_4 + B_2 \frac{y}{\sqrt{y^2 + h^2}} \quad (11)$$

在地下回路模型中的只有垂直地下方向部分和地面钢轨部分对地面某点磁场产生的磁场, 而地下部分由于距离无限长, 因此对地面产生的磁场可以忽略不计. 由于假设每单位行走轨上的漏电电量恒定, 那么运用式(3), 在对单位长度钢轨上的泄露电流产生的磁场从 0 到 L 积分后可得地下回路模型对地面某点产生的磁场.

$$B_x^u = \frac{\mu_0 I_{\text{leak}}(0)}{4\pi L} \left[\frac{yL}{y^2 + x^2} - \arctan\left(\frac{x}{y}\right) + \arctan\left(\frac{L-x}{y}\right) \right] \quad (12)$$

$$B_y^u = \frac{\mu_0 I_{\text{leak}}(0)}{4\pi L} \left[\frac{xL}{y^2 + x^2} + \ln\left(\frac{\sqrt{y^2 + (L-x)^2}}{x^2 + y^2}\right) \right] \quad (13)$$

$$B_z^u = \frac{\mu_0 I_{\text{leak}}(0)}{4\pi L} \left(\frac{xL}{y^2 + x^2} - \sqrt{x^2 + y^2} + \sqrt{y^2 + (L-x)^2} \right) \quad (14)$$

通过式(9)—(14), 与城市直流轨道交通处于地面较远距离观测点受到的直流供电的轨道交通的总的磁场干扰(B^t)是地面回路模型(B^g)和地下回路模型(B^u)的矢量和:

$$B^t = B^g + B^u \quad (15)$$

干扰模型的直角坐标系是建立于沿钢轨方向上的针对单个机车的系统, 如果在运营线路上有若干个机车同时工作, 那么就会产生若干个 xyz 坐标系的干扰模型. 在远处某个地磁观测点上得到的干扰在数值上就应该是这若干个 xyz 坐标系下的干扰模型之和.

2 干扰模型数值模拟

通过数值模拟干扰模型定量分析和探讨接触轨供电模式下，在 10 km 以外的远场测点各分量干扰幅度差异、干扰的衰减特征。

由牵引所流出的电流在驱动机车在钢轨所在区间回路运行，而作为一个远场模型来说，我们所关心干扰幅值大小是由最大驱动电流所决定的，因此，在由接触轨供电的地面回路中(图 3)，假设驱动电流恒定为 3 kA，第三轨离地高约 0.4 m，而在地下回路中的泄露电流(图 4)，根据咨询北京及天津轨道交通供电方面的专业人员，泄露电流估计为 1 kA (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会，2004；马沂文，白秀梅，2003)。

假设存在一个地理坐标系下东西走向的直流电机驱动的轨道交通供电体系，轨道线路长为 3 km 且只有一处牵引站在线路起首端，其供电电流为 3 kA，假设泄露电流为 300 A，接触轨高 0.4 m，则通过式(9)—(11)及式(12)—(14)得到地面回路和地下回路磁场在轨道

终点垂直距离 10 km 处的幅值大小(表 1)。

从表 1 看出，作为泄露电流所在的地下回路所产生的干扰在 10 km 处产生的磁场干扰占据主导地位，可见泄露电流产生的磁场是城市直流牵引轨道交通系统对远场的地磁观测台站产生干扰的主要原因。从表 1 还看出，一个东西走向的城市轨道交通系统对地磁观测数据产生干扰幅度最大的是垂直分量，其次是北向分量，而东

表 1 地面及地下回路在距离轨道交通线路 10 km 处产生的干扰幅度数值

Table 1 Magnetic perturbation caused by ground and underground circuit of DC powered lines at the distance of 10 km

观测分量	地面回路 干扰幅度/nT	地下回路 干扰幅度/nT
东向分量	0	0.16
北向分量	0	0.35
垂直分量	0	0.49

向分量的干扰幅度最小。

下面应用该模型，通过两个数值模拟实验模拟真实的轨道交通干扰：

模拟试验一。假设某一南北向城市轨道交通系统全长 30 km，每站之间长约 2 km，采用接触轨供电方式，并由供电站独立供电，供电电流为 3 kA，漏电流设定为 300 A。图 5 给出一列机车匀速通过，观测点选定在线路的末端终点，垂直线路 15 km 处的干扰数值随距离变化的曲线。在线路终点的垂直分量 B_z 干扰幅度达到 1.7 nT 以上，轨道线路前半段，东西分量 B_x 和南北分量 B_y 上受到的干扰曲线相对平缓，幅度较小，随时间变化的趋势变化不大；轨道线路后半段，垂直分量 B_z 干扰的幅度提升显著。

模拟试验二。假设一条南北向的城市轨道交通线路长 30 km，并假设在线路上同一时

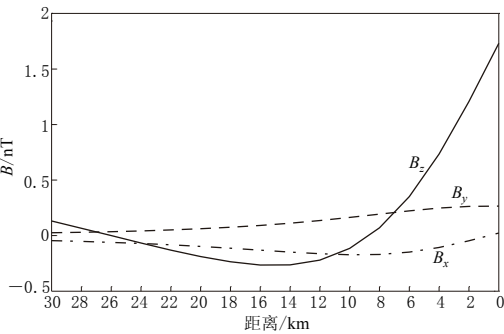


图 5 单台机车通过某一轨道线路所产生的磁场干扰在线路终点站产生的干扰幅度

Fig. 5 Magnetic perturbation calculated at end stop by train passing the line

刻有 20 辆机车在运行,采用接触轨供电,每个机车供电电流为 3 kA,泄露电流大约为 300 A,每台机车相隔大约 1.5 km,以匀速前进.在线路中段 15 km 处,垂直此线路从 5—60 km 的距离内,干扰衰减曲线如图 6 所示.从图中可以看出,在距离城市轨道交通线路大约 60 km 处, B_z 分量干扰幅度仍然在 0.16 nT,而东西向 B_x 的磁场受到的干扰幅度则接近于 0 nT.

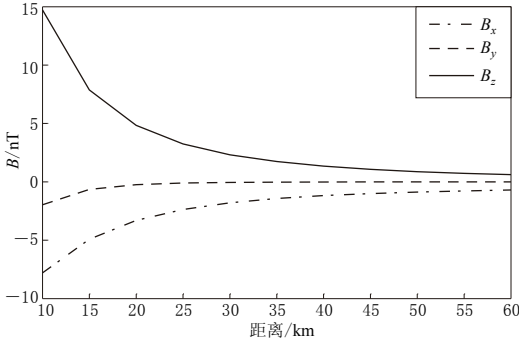


图 6 同一线路上 20 辆机车运行产生的干扰在垂直线路方向上的衰减曲线
Fig. 6 Magnetic perturbation along the line perpendicular to railway track when 20 trains running

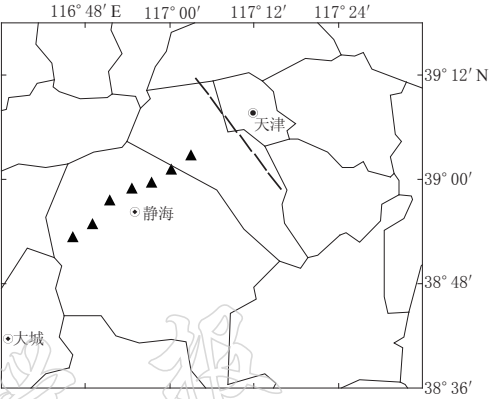


图 7 天津地铁观测点分布图
Fig. 7 Locations of observatories near Tianjin subway

3 野外试验

为了验证模型有效性,在 2008 年年末对天津一号线开展了野外实地干扰测量工作.测量路线如图 7 黑色虚线所示.天津地铁一号线是南北偏东约 45°走向的地铁,全长大约 25 km,设 22 个车站.采用 750 V 接触轨供电.观测点在垂直地铁线路的中部一端布设.图 7 中黑色三角形为观测点位置,按照与地铁距离依次为 1—7 号测点.1 号点距离地铁为 15 km,2—7 号测点之间相距 5 km,7 号点距离地铁为 45 km.测点为了避免其它人为干扰源对数据的影响,在 4 号和 5 号点采取了避让措施.观测仪器采用适用于流动观测的国产 GM-4 磁通门磁力仪.

图 8 给出 1 号测点在 2008 年 11 月 28 日 5 时 30 分—6 时 30 分观测的轨道交通开行前后的数据图.可以清楚地看到,轨道交通在早晨 6:00 左右开行后产生干扰,干扰呈现脉冲状并有多脉冲混叠的现象.

为了较为准确地提取轨道交通产生的干扰的幅度大小,避免非轨道交通干扰等其它人为干扰源影响,本文选取了 7 个测点(早晨 6:00—6:30)共 30 分钟的数据计算干扰幅度以及标准差(图 9).

本文采用实践中常用的峰-峰值统计方法.选取的滑动窗口为 60,步长为 1.测点 1—7 的干扰幅度大小和标准差如表 4 所示.根据表 4 数据绘制了天津地铁干扰 Z 分量理论计算与测量值(图 10).

在天津地铁模型参数的选择上,地铁采用双线路运行,线路简化为与地理北呈 135°夹角(逆时针),长度为 25 km.根据天津运行时刻表,列车发车间距在 4 min 左右,在同一时

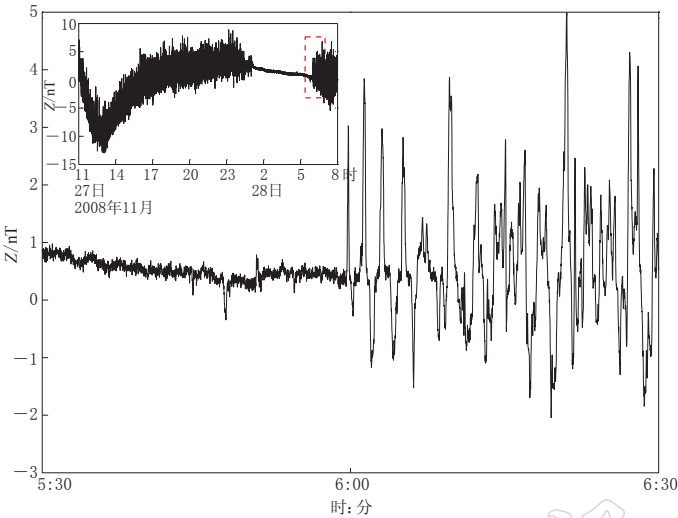


图 8 1 号点 Z 分量原始观测数据(BTC 2008-11-28)

Fig. 8 Z component of original geomagnetic data at site 1 (BTC 2008-11-28)

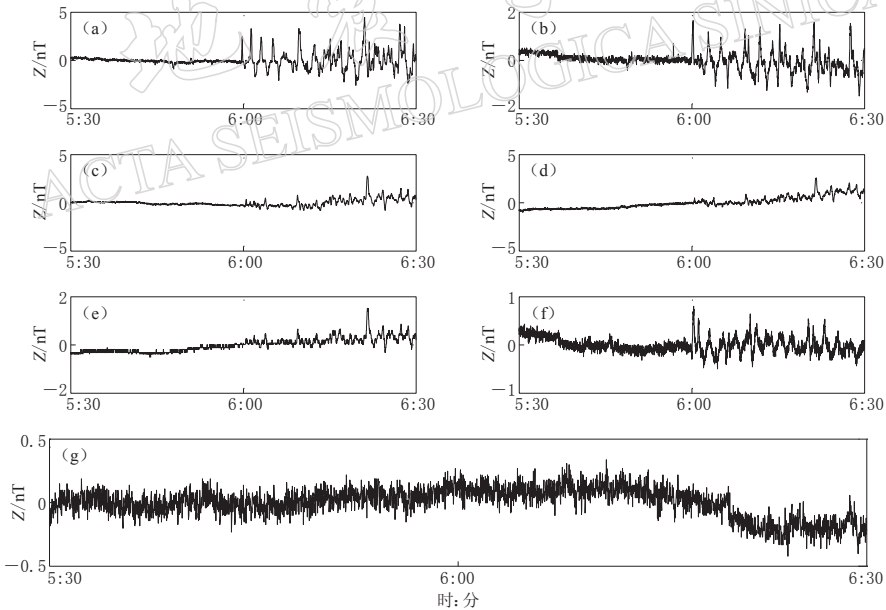


图 9 1—7 号观测点 Z 分量观测数据(BTC 2008-11-27)

(a) 1 号点观测数据; (b) 2 号点观测数据; (c) 3 号点观测数据; (d) 4 号点观测数据;
(e) 5 号点观测数据; (f) 6 号点预处理数据; (g) 7 号点观测数据

Fig. 9 Z component of original data from site 1—7(2008-11-27)

(a) Data of site 1; (b) data of site 2; (c) data of site 3; (d) data of site 4;
(e) data of site 5; (f) data of site 6; (g) data of site 7

刻线路上约有 10 对机车, 并且相互不重叠. 线路供电电流为双向 6 kA, 漏电电流依据实际线路开通时间长短, 估算漏电电流为供电电流的 10%, 即 600 A. 假设测线周围地表介质大致均匀, 观测点与地铁都处在同一水平面上, 则通过观测点实测的数据和通过模型理

表 4 天津地铁干扰 Z 分量理论计算与测量值及误差

Table 4 Calculated and measured magnetic perturbation and errors caused by Tianjin subway

测点	垂直距离/km	实测噪声幅度/nT	标准差/nT	理论干扰幅度/nT
1	15	2.93	1.09	2.80
2	20	1.38	0.48	1.52
3	25	0.97	0.50	1.01
4	30	0.83	0.54	0.76
5	35	0.51	0.22	0.61
6	40	0.55	0.17	0.47
7	45	0.30	0.14	0.35

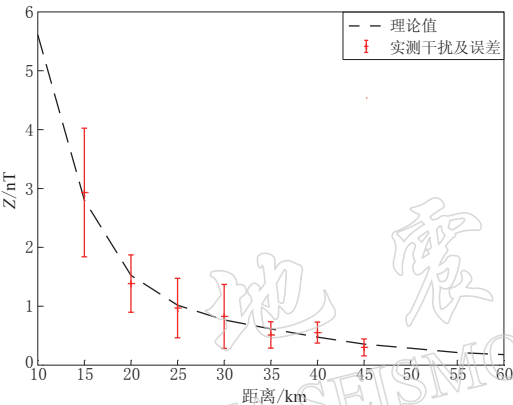


图 10 天津地铁干扰 Z 分量理论计算与测量值

Fig. 10 Calculated and measured magnetic perturbation of Z component caused by Tianjin subway

论计算的数据如表 4 所示.

4 讨论与结论

本文放弃了 Yanagihara(1977)所采用的指数方程解的形式,采用经典的真空中的线电流磁场计算模型,通过简洁的代数表达式来对轨道交通干扰的远场干扰模型进行建模.在该模型中,为了更符合现代轨道交通控制技术,假设了单位轨道上泄露电流为常数,在模型计算上更为方便快捷.

本文对该模型的地面回路系统和地下回路系统进行定量的模拟,验证了泄露电流是产生对地磁观测干扰的主要原因.通

过该模型可计算远场任意一点受到的干扰的数值大小.模拟了随时间变化的干扰变化曲线和随垂直距离变化的干扰衰减曲线.通过模拟,对直流输电轨道交通产生的电磁干扰在各分量上的衰减和变化关系都有了定量的认识,特别是通过理论计算和比较表明,东西走向的轨道交通的干扰,垂直分量上受干扰的幅度最大;在随距离衰减关系上,干扰模型在 60 km 处的干扰幅度在 0.13 nT 左右.

最后通过对天津地铁的野外实地观测数据,验证了本模型的有效性.通过理论计算和实地观测数据的比较,该模型理论计算结果较为理想.对于天津地铁的干扰,其垂直方向 45 km 处仍有 0.3 nT 左右干扰.因此该模型可为今后对我国直流输电轨道交通系统电磁干扰进行估算,这将为今后地磁台站的选址、建设和现有地磁台站的干扰估算提供理论计算值.

Yanagihara(1977)的模型是目前最为人所熟知、也是最有影响力的关于地铁干扰的理论模型,但该模型问世后很长一段时间内的应用并不广泛,可见由于该模型在数学建模上的复杂性,导致其应用受到局限.如何建立更加合理有效的远场干扰模型一直是国内外学者所探讨的话题.

随着我国国民经济及城市化进程的发展,城市轨道交通作为方便快捷的公共交通工具将越来越多地出现在人们的日常生活中.这给我国原有前兆地磁观测台站带来的影响将不言而喻.作为地震前兆观测的手段之一,全国地磁台站的观测数据不仅在预测预报地震,

而且在支撑国民经济发展, 监测空间天气等方面都发挥重大作用. 但诸如城市直流轨道交通等人造电磁干扰, 使得在相当大范围内的地磁观测仪器都会受到干扰. 对于地磁观测台站来说, 用来记录和标定地磁场微小变化的高灵敏度磁力计所能承受的最大外界干扰在 0.1 nT 左右. 而大功率的直流输电轨道交通对地磁观测环境的破坏是显而易见的. 如果这样的轨道交通系统的漏电问题没有能获得重视, 在技术上采取减少或者隔离的措施, 我国城市周边的地磁观测台站在不久的将来都会受其影响. 高昂的建造和搬迁费用都会制约地磁观测工作的展开, 因此重视和保护地磁台站周边电磁环境, 是最根本的方法.

参 考 文 献

- 马沂文, 白秀梅. 2003. 城市轨道交通供电接触网类型的比较[J]. 城市轨道交通研究, **6**(1): 20–24.
- 钱家栋. 2004. 地震台站观测技术要求, 第 2 部分: 电磁观测[S]// 杜玮(主编). GB/T19531《地震台站观测环境技术要求》宣贯教材. 北京: 地震出版社: 13–24.
- 孙枋友, 王秀山. 1984. 北京市地下铁路电磁场地面分布的测绘结果[J]. 地震地磁观测与研究, **5**(1): 57–63.
- 王猛. 2005. 直流牵引供电系统钢轨电位与杂散电流分析[J]. 城市轨道交通研究, **8**(3): 24–26.
- 郑瞳炽, 张明锐. 2000. 城市轨道交通牵引供电系统[M]. 北京: 中国铁道出版社: 20–30.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2005. GB/T10411-2005 城市轨道交通直流牵引供电系统[S]. 北京: 中国标准出版社: 2–4.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2005. GB/T19531.2-2004 地震台站观测环境技术要求第 2 部分: 电磁观测[S]. 北京: 中国标准出版社: 1–4.
- Dupouy G. 1950. Perturbation du champ magnetique terrestre et des courants telluriques par les chemins de fer electrifies[J]. *Annales de Geophysique*, **6**(1): 18–50.
- Georgescu P J, Le Mouel L, Manda M. 2002. Electric and magnetic perturbations generated by DC electric railway[J]. *St. cere. Geofizică*, **40**: 69–82.
- Inoue H. 1979. Effects of DC electric railways on the observation of magnetic field disturbances[J]. *Materials Concerning Railway Engineering*, **37**(7): 26–27.
- Lowes F J. 1987. Magnetic monitoring of dc electric railways[J]. *Phys Technol*, **18**: 209–214.
- Padua M B, Padilha A L, Vitorello I. 2002. Disturbances on magnetotelluric data due to DC electrified railway: A case study from southeastern Brazil [J]. *Earth Planets Space*, **54**(5): 591–596.
- Pirjola R, Newitt L, Boteler D, Trichtchenko L, Fernberg P, Mckee L, Danskin D, Van Beek G J. 2007. Modelling the disturbance caused by a dc-electrified railway to geomagnetic measurements[J]. *Earth Planets Space*, **59**(8): 943–949.
- Railtrack PLC. 2000. *Railway Group Standard GL/RT1254, Electrified Lines Traction Bonding*[S]. London: Safety and Standards Railtrack PLC: 2–5.
- Tokumoto T, Sunomura S. 1984. Calculation of magnetic field disturbance produced by electric railway[J]. *Translated from Memoirs of the Kakioka Magnetic Observatory*, **20**(2): 33–44.
- Iliceto V, Santarato G. 1999. On the interference of man-made EM fields in the Magnetotelluric ‘dead band’ [J]. *Geophys Prosp*, **47**(5): 707–719.
- Yamazaki A, Tsunomura S, Mochizuki. 2000. Experiments on the magnetic disturbance by DC electric field railway[C] // IX-th IAGA workshop, *Geomagnetic Observatory Instruments Data Acquisition and Processing*. Hurbanovo, Slovakia.
- Yanagihara K. 1977. Magnetic field disturbance produced by electric rail-way, memoirs of the Kakioka magnetic observatory[J]. *Suppl 7, Geophys Mag*, **38**(1): 17–35.