

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.08.009

# 高铁高架桥箱梁雷击电磁瞬态建模及特性分析

胡 宾<sup>1</sup>, 向念文<sup>1</sup>, 李科杰<sup>1</sup>, 叶维平<sup>2</sup>, 王立天<sup>3</sup>, 阳 晋<sup>4</sup>

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 3. 中铁电气化勘测设计研究院有限公司, 天津 300250; 4. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100084)

**摘 要:** 高速铁路高架桥箱梁是雷击接触网时雷电流的主要泄流通道。由于箱梁是由成百上千根钢筋绑扎而成的复杂鼠笼结构, 准确建立其雷击宽频计算模型的难度较大, 因此文章基于传输线矩阵法(transmission-line matrix, TLM)建立不同纵向钢筋数量的箱梁模型, 分析其雷击电磁瞬态简化建模的可行性。研究发现: 箱梁泄流时, 雷电流主要分布在外层纵向钢筋, 符合趋肤效应规律; 箱梁横截面曲率较大处纵向钢筋为雷击瞬态计算中的关键钢筋, 保留该部分纵向钢筋, 适当减少曲率较小处的纵向钢筋, 可以简化箱梁雷击电磁瞬态模型。箱梁泄流时瞬态电流会在其周围产生瞬态电磁场, 威胁轨旁信号设备和线缆端接设备的正常运行, 为进一步研究简化纵向钢筋对箱梁周围瞬态电磁环境的影响, 基于上述简化建模方法, 计算不同纵向钢筋数量桥面电磁场分布及衰减特性, 发现箱梁对幅值为 100 kA 的雷电流泄流时, 雷电流注入点 30 m 范围内的磁场强度超出国家标准规定的电子设备磁场抗扰度, 该范围内的桥面电子设备受到严重威胁。

**关键词:** 箱梁; 简化建模; 桥面电磁场; 传输线矩阵法(TLM); 高速铁路

**中图分类号:** TM864 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2024)08-1062-07

## Modeling and characteristic analysis of lightning electromagnetic transient of high-speed railway viaduct box girder

HU Bin<sup>1</sup>, XIANG Nianwen<sup>1</sup>, LI Kejie<sup>1</sup>, YE Weiping<sup>2</sup>, WANG Litian<sup>3</sup>, YANG Jin<sup>4</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. China Railway Electrification Survey Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300250, China; 4. CRSC Research and Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 100084, China)

**Abstract:** The box girder of high-speed railway viaduct is the main leakage channel of lightning current when lightning strikes the catenary. Because the box girder is a complex squirrel-cage structure composed of hundreds of reinforcing bars, it is difficult to accurately establish its broadband calculation model of lightning strike. Therefore, this paper establishes box girder models with different numbers of longitudinal reinforcing bars based on transmission-line matrix(TLM), and analyzes the feasibility of simplified modeling of lightning electromagnetic transient. It is found that the lightning current is mainly distributed in the outer longitudinal reinforcement when the box girder is drained, which accords with the law of skin effect. Longitudinal reinforcement at the large curvature of box girder cross section is the key reinforcement in lightning transient calculation. Retaining this part of longitudinal reinforcement and appropriately reducing longitudinal reinforcement at the small curvature can simplify the electromagnetic transient model of box girder lightning. Transient current will produce transient electromagnetic field around box girder when it is drained, which threatens the normal operation of signal equipment and cable termination equipment beside the rail. In order to further study the in-

收稿日期:2021-11-10;修回日期:2022-03-03

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:胡 宾(1995—),男,河南商丘人,合肥工业大学硕士生;

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

fluence of simplified longitudinal reinforcement on transient electromagnetic environment around box girder, based on the simplified modeling method mentioned above, this paper calculates the electromagnetic field distribution and attenuation characteristics of bridge deck with different numbers of longitudinal reinforcing bars, and finds that when box girder drains lightning current with an amplitude of 100 kA, the magnetic field intensity within 30 m of lightning current injection point exceeds the magnetic field immunity of electronic equipment specified in the national standard. Bridge deck electronic equipment in this range is seriously threatened.

**Key words:** box girder; simplified modeling; bridge deck electromagnetic field; transmission-line matrix(TLM); high-speed railway

为了避免坡道、交叉路口等对高速铁路通行的影响,我国高速铁路在建设中广泛地使用高架桥<sup>[1-3]</sup>。由于铁路的牵引接触网、支柱等通过高架桥的桥基与大地相连,当雷击接触网时,雷电流通过“支柱-箱梁-桥墩”的路径流入大地<sup>[4-5]</sup>。作为雷电流的主要泄流通道,箱梁上的瞬态电流会在其周围激励出瞬态强电磁场,对轨旁信号设备和线缆端接设备造成威胁<sup>[6]</sup>。“7·23”甬温线特别重大铁路交通事故的直接原因就是短小时内数百次雷击损坏了信号设备导致通信故障,造成列车追尾<sup>[7]</sup>。箱梁泄流时,其周围瞬态电磁场通过电磁耦合入侵铁路轨道电路系统,是设备损坏的主要原因<sup>[8]</sup>。因此研究箱梁的雷击瞬态特性非常必要。然而箱梁内部钢筋数量众多、结构复杂,建立准确分析箱梁多导体结构的雷击宽频计算模型难度较大,现有的仿真和分析手段难以揭示其雷电流分布和内部电磁场转换的物理机理。

目前,国内外学者已经对高速铁路雷电防护开展了一些研究工作。文献[9]提出一种基于矢量匹配技术和网络综合理论的高架桥等值电路计算思路,建立整体高架桥暂态计算模型,并验证模型的准确性;文献[10]建立电气化铁路系统的直击雷模型评估系统中的浪涌电压的分布,发现接地损耗、导体间互连和绝缘闪络会影响系统中感应电压/电流的分布,接地损耗对感应电压/电流的贡献占主导地位;文献[11]运用时域有限元法仿真变电站综合接地模型,得出当雷击有高架桥结构区段时会导致变电所接地故障和设备损坏。现有研究大多避免直接针对高架桥内部的复杂钢筋结构,而是选择建立其等效电路模型,但等效电路模型也只是等效高架桥模型本身,无法准确反映箱梁钢筋网络内部的电流分布情况以及桥面瞬态电磁场的分布特性。

本文基于传输线矩阵法(transmission-line matrix, TLM)建立不同纵向钢筋数量高速铁路

高架桥箱梁的三维雷击电磁瞬态模型,研究泄流时箱梁内部钢筋网络的雷电流分布以及箱梁钢筋网络简化建模的可行性;此外,分析桥面电磁场的分布和衰减特性,得到纵向钢筋数量变化对高架桥桥面电磁场分布以及电磁场衰减程度的影响规律。本文研究工作可为高速铁路雷击电磁防护提供参考。

### 1 三维雷击电磁瞬态模型

#### 1.1 TLM 方法

TLM 方法是一种常用的电磁场数值计算方法<sup>[12]</sup>。TLM 不仅能够进行不均匀介质的电磁场计算,还能轻松处理具有不规则边界的复杂模型,应用于具有众多细长钢筋箱梁的电磁计算中可以方便地进行箱梁的雷击瞬态电磁计算<sup>[13]</sup>。在 TLM 法中,麦克斯韦方程组及其边界条件在空间和时间上离散,用并联或串联形成网格的传输线模拟所要求解的导波结构,传输线上的电压和电流可以等效为电场和磁场,因而可以获得导波结构内的场分布<sup>[14]</sup>。二维空间离散模型如图 1 所示,图 1 中,  $\Delta l$  为网格参数。

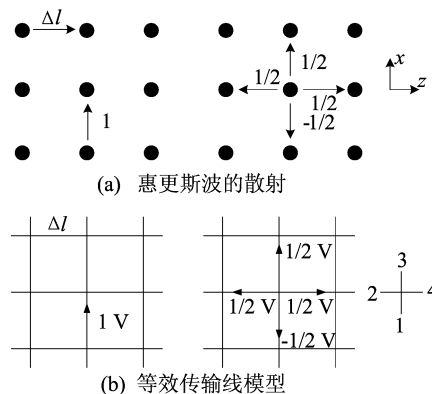


图 1 二维空间离散模型

假设一个脉冲能量为 1 的脉冲函数从负  $x$  轴

的一个节点上出发,能量朝 4 个方向相等地散射,每个辐射脉冲携带 1/4 原始能量,相应场量为 1/2,为了满足结点上场连续,反射回来的脉冲必须是负的(图 1)。

如果 4 个脉冲从 4 条分支入射到一个节点上,以这种方式散射再入射到相邻节点上,那么这一过程<sup>[15]</sup>可表示为:

$$\mathbf{V}_{k+1}^r = \mathbf{S}\mathbf{V}_k^i \quad (1)$$

$$\mathbf{V}_{k+1}^i = \mathbf{C}\mathbf{V}_k^r \quad (2)$$

其中: $\mathbf{S}$ 为节点的脉冲散射矩阵; $\mathbf{C}$ 为描述网络拓扑结构的连接矩阵; $\mathbf{V}$ 为 4 路脉冲源矩阵;下标  $k, k+1$  表示散射时间间隔;上标  $i, r$  分别表示入射、散射。

若  $k\Delta t$  时刻所有脉冲大小、位置和方向已知,则可以求出  $(k+1)\Delta t$  时刻网络中各个节点的值。通过在散射矩阵中计算并环节点的电压和串环节点的电流可以得到电场和磁场的大小。

## 1.2 箱梁三维雷击电磁瞬态模型

相比于其他形式的高架桥,简支梁型高架桥技术成熟且成本较低,因此中国高速铁路普遍采用简支梁形式的高架桥<sup>[16]</sup>。

简支梁型高架桥的箱梁为空心状且呈倒梯形,架设在桥墩之上。箱梁内部钢筋众多且绑扎成鼠笼状,结构复杂<sup>[17]</sup>。简支梁箱梁的钢筋结构如图 2 所示。

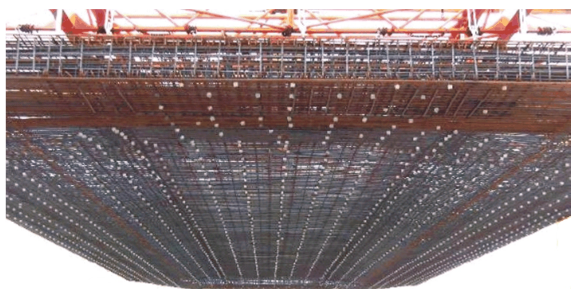


图 2 简支梁箱梁的钢筋结构

本文选取杭州—富阳城际铁路高架桥跨距内 30 m 的简支梁箱梁,依据该桥梁建造时的钢筋布置情况,基于传输线矩阵法分别建立了具有 27、58、98 根 3 种纵向钢筋数量的三维箱梁电磁瞬态仿真模型。3 种纵向钢筋数量箱梁钢筋网络的示意图如图 3 所示。

为了模拟雷电直击牵引接触网后通过箱梁泄流的实际情况,雷电流激励采用直接注入箱梁钢筋网络的方式。因为双指数函数对各种雷电流波形的模拟都较为准确且容易进行微积分运

算<sup>[18-19]</sup>,所以选取雷电流波形为幅值 100 kA 的  $2.6/50 \mu\text{s}$  双指数函数模型,如图 4 所示。箱梁钢筋材料半径为 1.5 cm,电导率和相对磁导率分别设置为  $4.032 \times 10^6 \text{ S/m}$ 、5 000。

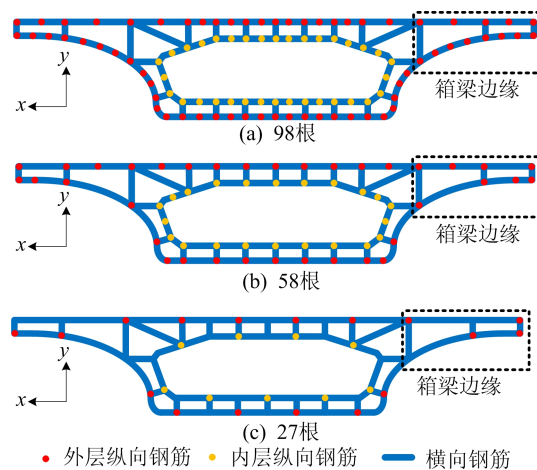


图 3 3 种纵向钢筋数量箱梁纵向钢筋布置示意图

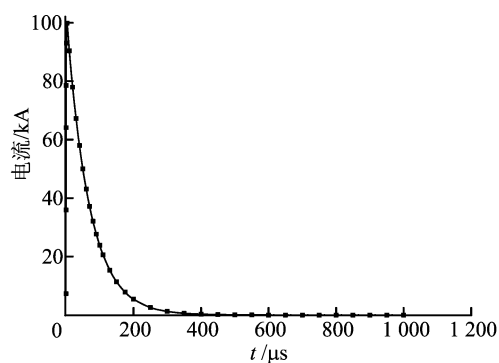


图 4 雷电流波形

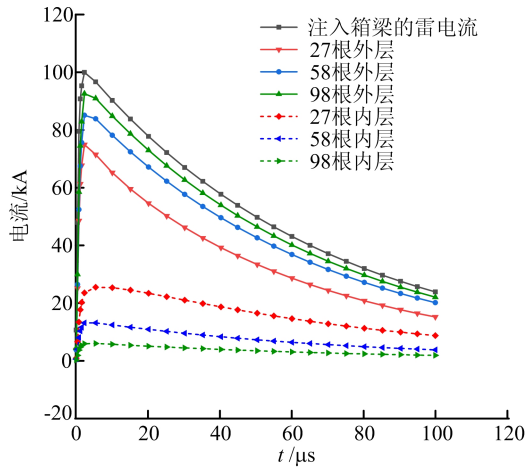
## 2 箱梁雷击电磁瞬态简化建模分析

雷电流在箱梁各层纵向钢筋中分布以及箱梁边缘处纵向钢筋中电流总和的仿真结果如图 5 所示。

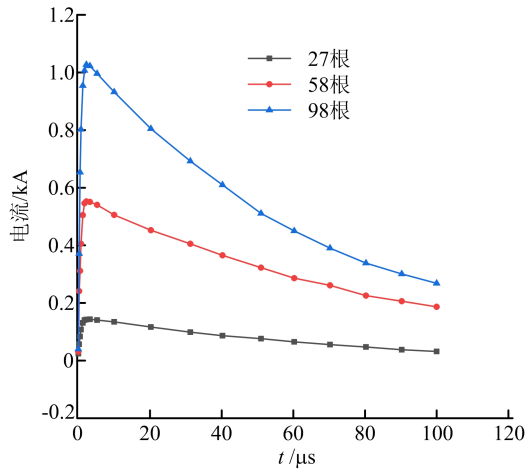
图 5a 所示为图 3 中 3 种纵向钢筋数量箱梁内外层纵向钢筋中的电流分布情况,图 5b 所示为箱梁边缘区域纵向钢筋中的电流总和,该区域纵向钢筋全部为外层纵向钢筋。

从图 5a 可以看出:箱梁钢筋网络在泄流时,电流集中分布在外层纵向钢筋中,相比于外层纵向钢筋,内层纵向钢筋电流占比较小;随着箱梁纵向钢筋数量的增加,外层纵向钢筋中的电流分量增大,内层纵向钢筋中的电流分量减小,趋肤效应现象更加明显。从图 5b 可以看出,随着箱梁边缘处纵向钢筋数量的减少,箱梁边缘处纵向钢筋中

的电流分量也随之减少。



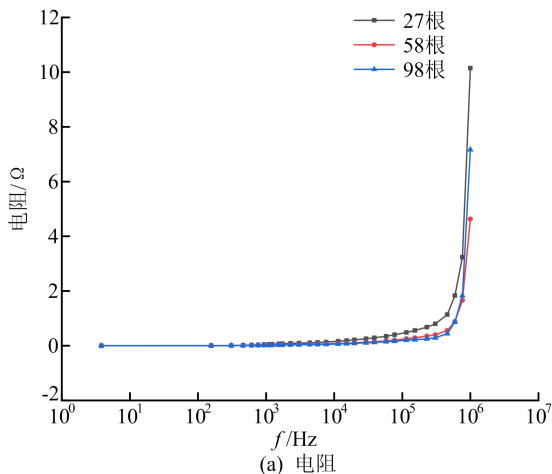
(a) 箱梁内外层纵向钢筋中的电流



(b) 箱梁边缘处纵向钢筋中的电流

图 5 箱梁钢筋网络结构中雷电流分布

雷电流在箱梁钢筋网络中传播时,满足趋肤效应规律,频率变化时,箱梁会表现出不同的阻抗特性<sup>[20]</sup>。因此,本文仿真计算不同频率下箱梁钢筋网络的电阻和电感,如图 6 所示。



(a) 电阻

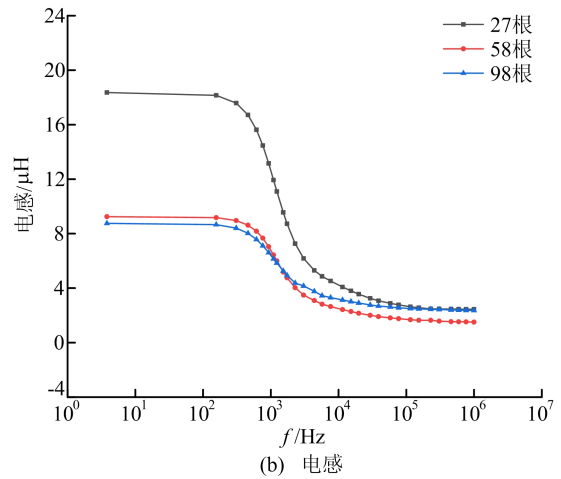


图 6 3 种纵向钢筋数量的箱梁电阻和电感计算结果

针对箱梁钢筋网络电阻和电感的仿真结果,计算 3 种纵向钢筋数量箱梁钢筋网络的雷电冲击阻抗  $Z(f)$ 。以图 4 所示波形作为激励,箱梁钢筋网络的雷电冲击电压响应<sup>[21]</sup>计算公式为:

$$V(f) = I(f)Z(f) \quad (3)$$

其中:  $f$  为频率;  $V(f)$  为箱梁雷电冲击电压响应;  $I(f)$  为注入箱梁的雷电流激励。

计算得到的 100 kA 雷电冲击电流注入产生的电压响应峰值见表 1 所列。

表 1 电压响应峰值数据

纵向钢筋数量/根	外层纵向钢筋数量/根	内层纵向钢筋数量/根	电压响应峰值/MV
98	64	34	1.53
58	36	22	1.47
27	18	9	1.91

由于箱梁泄流时电流主要分布在外层纵向钢筋,内层纵向钢筋数量对箱梁雷击瞬态特性的影响可忽略。对于 98 根纵向钢筋箱梁模型,外层纵向钢筋减少 28 根时,电压响应峰值误差为 3.9%;外层纵向钢筋减少 47 根时,电压响应峰值误差为 24.8%。

对于箱梁边缘处 13 根纵向钢筋,当钢筋数量减少到 8 根时,电流幅值减少了 50%;而当钢筋数量减少到 4 根时,电流幅值减少了 86%,即箱梁泄流过程中,边缘处纵向钢筋数量较少时,此区域内纵向钢筋中的电流会急剧减小。由此可见,箱梁边缘处纵向钢筋的数量对箱梁钢筋网络内部整体的电流分布会产生很大影响,该区域纵向钢筋是影响箱梁整体结构雷电冲击电压响应计算精度的关键要素,也是建立箱梁钢筋网络三维雷击瞬态模型的

关键钢筋。因此可得出如下结论:保留箱梁钢筋网络中边缘曲率较大处的纵向钢筋,适当减少曲率较小处纵向钢筋的数量,能够完成对箱梁雷击电磁瞬态模型的简化,降低建模复杂度。

### 3 箱梁周围瞬态电磁环境分析

高速铁路轨道电路系统的关键设备一般沿高架桥桥面进行铺设<sup>[22]</sup>,而箱梁进行雷电流泄流时,在其周围会产生复杂的瞬变电磁场,威胁设备的安全运行,因此有必要针对高架桥桥面电磁场分布进行研究。鉴于轨道电路系统设备沿铁路线敷设于箱梁之上,本文建立如下直角坐标系: $X$ 轴沿箱梁短边; $Z$ 轴沿箱梁长边; $Y$ 轴垂直于桥面;坐标原点为桥面短边中点,即雷电流注入点。平行桥面距离 20 cm 处设置瞬态电磁场观测面,如图 7 所示。整个桥面 10.4 m $\times$ 30.0 m 范围内的电场和磁场分布情况如图 8、图 9 所示。

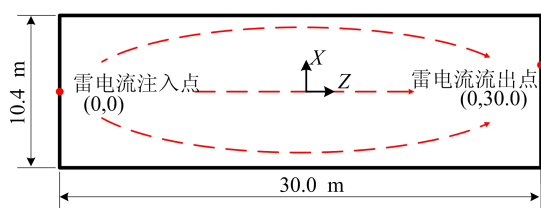


图 7 高架桥简支箱梁俯视图

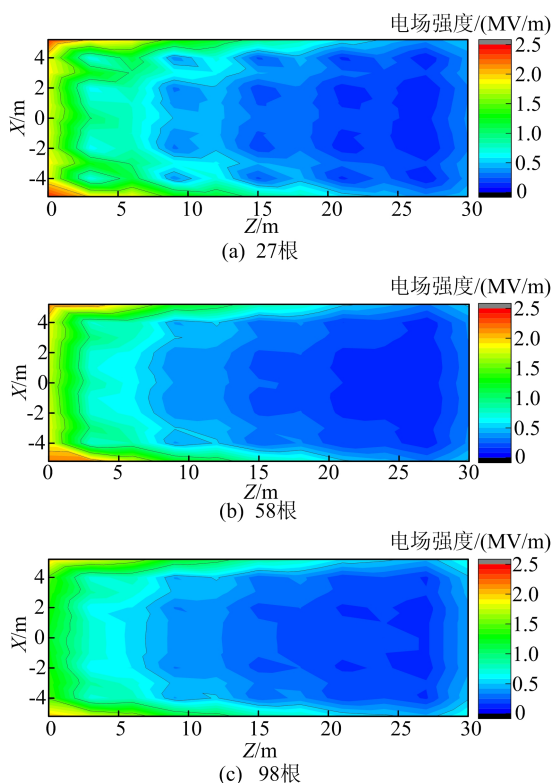


图 8 3 种纵向钢筋数量箱梁的桥面电场分布图

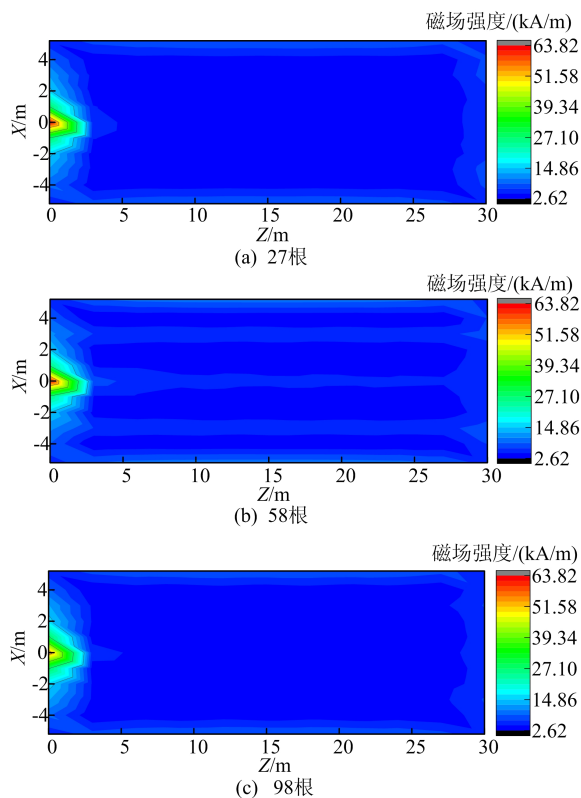


图 9 3 种纵向钢筋数量箱梁的桥面磁场分布图

从图 8 可以看出,箱梁泄流时,高架桥桥面中部的电场较小,桥面边缘部分的电场较大,随着纵向钢筋数量的增多,此现象更加明显。从图 9 可以看出,箱梁泄流时,雷电流注入点附近的磁场较大,桥面其余部分的磁场较小。从雷电流注入点起,远离雷电流注入点方向,电场和磁场均有明显衰减。因此,本节后续对桥面电场和磁场的衰减规律开展了研究。

以雷电流注入点为起点,0.2 m 为空间步长,设置电场和磁场监测点,监测数据如图 10 所示。

从图 10 可以看出,3 种不同纵向钢筋数量箱梁桥面电磁场均以指数形式衰减,纵向钢筋数量的变化对电场和磁场的衰减影响微弱,可忽略不计。相比于箱梁复杂钢筋网络,通过减少纵向钢筋数量的方式对其进行简化建模,不影响箱梁周围电磁场的衰减特性。

尽管桥面电磁场均以较快速率衰减,但雷电流注入点周围区域的电场强度和磁场强度仍然很大。雷电脉冲磁场能够在轨道电路系统内的闭合回路中产生很高的电动势,该电动势是影响系统正常工作、损坏信号设备的主要原因<sup>[23]</sup>。从图 10b 可以看出,箱梁对幅值为 100 kA 的雷电流进行泄流时,距离雷电流注入点 30 m 范围内 3 种模型的磁场强度超过 GB/T 19727.1.2—2005 规

定的电子设备磁场抗扰度(800 A/m)<sup>[24]</sup>,因此极易对高速铁路轨道电路系统中大规模的集成电路接口和模块造成威胁。

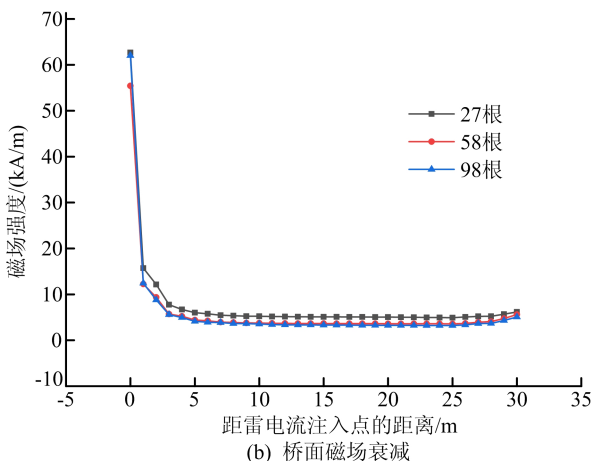
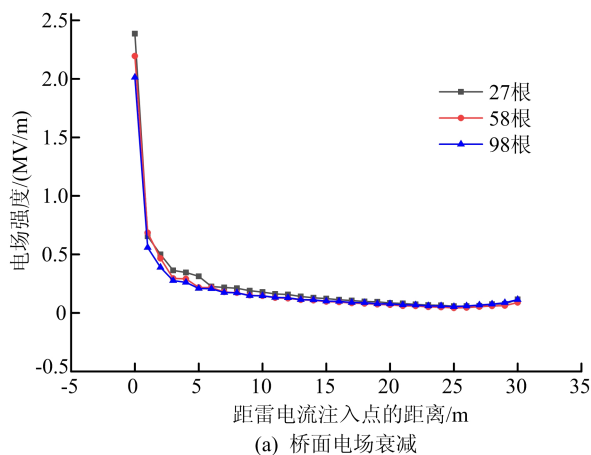


图 10 3 种纵向钢筋数量箱梁的桥面电磁场衰减

## 4 结 论

本文基于传输线矩阵法建立不同纵向钢筋数量的高速铁路高架桥箱梁的三维模型,研究雷电作用下瞬态电磁响应简化建模方法和电磁环境特性。通过仿真得出以下结论。

1) 箱梁钢筋网络在泄流时,外层纵向钢筋中的电流分量较大,内层纵向钢筋中的电流分量小,符合趋肤效应规律。纵向钢筋数量越多,电流集中分布在外层纵向钢筋的现象越明显。

2) 基于箱梁钢筋网络内部电流分布情况,可以通过保留箱梁钢筋网络中边缘曲率较大处的纵向钢筋,适当减少曲率较小处纵向钢筋的数量,进行箱梁雷击电磁暂态模型的简化。

3) 桥面电磁场以指数形式衰减,纵向钢筋数量的变化对电磁场衰减程度的影响较小,可以忽略不计。

4) 箱梁对幅值为 100 kA 的雷电流泄流时,高架桥桥面边缘部分电场和磁场较大,桥面中部较小。在雷电流注入点 30 m 范围内 3 种模型的磁场强度超过 GB/T 197271. 2—2005 规定的电子设备磁场抗扰度(800 A/m),强磁场对沿本段及相邻段箱梁铺设的轨道电路系统设备所造成的威胁不容忽视,有必要对铁路信号设备采取抗电磁干扰措施,保障高速铁路安全运行。

## 【参 考 文 献】

- [1] XIANG N W, CHEN W J, BIAN K, et al. The electromagnetic transient model for high-speed railway viaducts struck by lightning based on the decoupling method[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 58(5): 1541-1548.
- [2] 肖能立. 高速铁路简支箱梁预制拼装施工设计[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [3] 程凌云, 向念文, 徐宗奇, 等. 高速铁路牵引变电站接地网安全性能评价[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(8): 1064-1069.
- [4] 吴文江, 李响. 高速铁路接触网吊弦断裂电气因素研究[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(2): 164-172.
- [5] 谷山强, 冯万兴, 赵淳, 等. 高速铁路牵引网雷害风险评估方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1526-1535.
- [6] MIDYA S, THOTTAPPILLIL R. An overview of electromagnetics compatibility challenges in European Rail Traffic Management System[J]. Transportation Research Part C(Emerging Technologies), 2008, 16(5): 514-534.
- [7] 国务院“7·23”甬温线特别重大铁路交通事故调查组. “7·23”甬温线特别重大铁路交通事故调查报告[R/OL]. (2011-12-29) [2021-09-20]. [https://www.gov.cn/gzdt/2011-12/29/content\\_2032986.htm](https://www.gov.cn/gzdt/2011-12/29/content_2032986.htm).
- [8] 边凯. 高速铁路牵引供电接触网雷电防护研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [9] 边凯, 陈伟江, 王立天, 等. 高速铁路牵引供电接触网雷电防护研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 42(2): 164-172.
- [10] THEETHAYI N. Electromagnetic interference in distributed outdoor electrical systems, with an emphasis on lightning interaction with railway network[D]. Uppsala: Uppsala University, 2005.
- [11] HITOSHI H, KEIICHIRO H, KAZUMI N, et al. Cause investigation of diode rectifier trouble by lightning in traction substation[C]//International Conference on Lightning Protection. [S. l. : s. n. ], 2016: 1-6.
- [12] HOEFER W. The transmission-line matrix method-theory and applications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1985, 33(10): 882-893.
- [13] 陈晨. 基于雷电 EMP 的无人机表面电流和电磁场研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2019.
- [14] 张云华, 陈抗生. 传输线矩阵方法的研究及其应用进展[J]. 电子学报, 1995, 23(6): 95-101.

(下转第 1079 页)

- tology, 1976, 58: 63-81.
- [34] MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101: 635-643.
- [35] SUM S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society of London, 1989, 42: 313-345.
- [36] 章森桂, 张允白, 严惠君. “国际地层表”(2008)简介[J]. 地层学杂志, 2009, 33(1): 1-10.
- [37] 周忠和, 贺怀宇, 汪筱林. 侏罗系-白垩系界线和我国东北地区下白垩统陆相地层相关问题的探讨[J]. 古生物学报, 2009, 48(3): 541-555.
- [38] 吴星星, 闫峻, 唐裕禄, 等. 安徽铜陵沙滩脚岩体年代学及地球化学特征[J]. 矿物岩石, 2011, 31(1): 75-82.
- [39] 殷延端, 洪天求, 贾志海, 等. 铜陵姚家岭锌金多金属矿的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及成矿物质来源[J]. 地质论评, 2016, 62(1): 248-256.
- [40] 刘政. 安徽铜陵姚家岭锌金多金属矿床成岩成矿作用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [41] 黄文明, 吴才来, 高栋, 等. 安徽铜陵沙滩脚矿田中酸性侵入岩成因及构造意义[J]. 中国地质, 2019, 46(4): 861-877.
- [42] JAHN B M, WU F Y, LO C H, et al. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China[J]. Chemical Geology, 1999, 157: 119-146.
- [43] 朱炳泉. 地球科学中同位素体系理论与运用: 兼论中国大陆地壳演化[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1-65.
- [44] SUN W D, LING M X, YANG X Y, et al. Ridge subduction and porphyry copper-gold mineralization: an overview[J]. Science China Earth Sciences, 2010, 53(4): 475-484.
- [45] 张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造: 成矿意义[J]. 岩石学报, 2001, 17(2): 236-244.
- [46] 王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 等. 铜陵地区小铜官山石英闪长岩锆石 SHRIMP 的 U-Pb 年龄及其成因指示[J]. 岩石矿物学杂志, 2004, 23(4): 298-304.
- [47] 王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 等. 安徽铜陵地区幔源岩浆底侵作用的年代: 朝山辉石闪长岩锆石 SHRIMP 定年[J]. 地球学报, 2004, 78(4): 423-427.
- [48] 王彦斌, 刘敦一, 蒙义峰, 等. 安徽铜陵新桥铜-硫-铁-金矿床中石英闪长岩和辉绿岩锆石 SHRIMP 年代学及其意义[J]. 中国地质, 2004, 31(2): 169-173.
- [49] 钟国雄. 安徽铜陵姚家岭锌金多金属矿床成矿机制与找矿方向研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [50] 董树文, 马立成, 刘刚, 等. 论长江中下游成矿动力学[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 612-625.
- [51] 吕庆田, 董树文, 汤井田, 等. 多尺度综合地球物理探测: 揭示成矿系统、助力深部找矿: 长江中下游深部探测(Sino-Probe-03)进展[J]. 地球物理学报, 2015, 58(12): 4319-4343.

(责任编辑 吴亮)

## (上接第 1067 页)

- [15] 刘光斌, 滕向如, 余志勇, 等. 基于雷电流注入的圆柱表面电流分布仿真研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 94-99.
- [16] 彭永忠. 高速铁路简支箱梁施工组织设计研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [17] 中华人民共和国铁道部. 客运专线综合接地技术实施办法(暂行): 铁集成[2006]220号[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2006: 1-16.
- [18] 焦耀锋. 雷电流模型及其瞬态电磁效应研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2021.
- [19] 朱德贵. 航天发射场雷击电磁瞬态特性分析及防护研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [20] GIACCOLETTO L J. Frequency-and time-domain analysis of skin effects[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 1996, 32(1): 220-229.
- [21] SARGENT M, DARVENIZA M. Tower surge impedance[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 2007, 88(5): 680-687.
- [22] 黄渤. 高速铁路弱电设备接地雷电冲击响应特性[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [23] 史秀红. 雷击对铁路信号系统的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [24] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 雷电电磁脉冲防护: GB/T 19727.1-2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 1-28.

(责任编辑 张镛)