

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.03.021

基于有限元的金属构架结构建筑物雷击效应仿真分析

陈华晖¹, 朱泽伟²

(1. 上海市防雷中心, 上海 201615; 2. 上海西岱尔电子有限公司, 上海 201210)

摘要: 金属构架结构建筑物遭受雷击时电流传输及电磁分布特性受建筑物本体材料、结构和接地电阻等因素综合影响, 往往较难对其进行准确的雷击效应定性及定量分析, 而基于时域有限差分法仿真雷击瞬间金属构架结构建筑物电流传输特性和附近及内部空间电磁变化特性, 可实现动态显示及定性分析雷电流在金属构架上的瞬态变化特征, 同时利用探针和选取参考截面可定量分析空间不同位置电磁场变化特性, 进而提出针对雷击金属构架结构建筑物的具体保护措施。

关键词: 金属构架; 雷电流; 电磁仿真; 散流; 谐波振荡

Analysis of Electromagnetic Field and Leakage Current by Lightning Discharge on Metallic Structure Based on Finite Element

CHEN Huahui¹, ZHU Zewei²

(1. Shanghai Lightning Protection Centre, Shanghai 201615, China; 2. Shanghai Citel Electronics Co., Ltd., Shanghai 201210, China)

Abstract: When metal frame structure buildings suffer lightning stroke, the transmission of lightning current and the distribution of the electromagnetic characteristic always affected by the building materials, structures and integrated grounding resistance and other factors, so the lightning effect is often more difficult to make accurate qualitative and quantitative analysis. Based on finite difference time domain method simulation, the instantaneous current transmission characteristics and internal space electromagnetic change features of metal frame structure building, which can be dynamic display and the qualitative analysis on the metal frame, then using the probe and select reference section can quantitative analysis of electromagnetic field at different position at the same time, at last, some valuable conclusions and protection measures were proposed from the study of characteristics of fields.

Key words: metallic structure; lightning current; electromagnetic simulation; leakage current; harmonic oscillation

0 引言

金属构架结构雷击效应研究目前大多集中缩小比例的雷击试验^[1], 以及利用计算机建立模型进行仿真试验^[2-3], 两种方法均从不同角度分析了雷击可能对建筑物内部电磁辐射造成的影响。实际模拟雷击试验主要进行雷电流传输特性的分析, 很难进行电磁场传输效果的研究, 本研究从建立金属构架模型并利用仿真雷电流传输特性, 考虑实际位置地闪特征条件下(雷电流特定波形)电流源传输特性并仿真雷击电磁场分布特性, 目前较少有此方面的

具体仿真研究。

建筑物在雷暴静电场中会诱导形成电荷使其更易产生上行先导, 更易吸引下行先导发展过程中的连接, 这种现象在孤立和空旷地方更为明显^[4-7]。框架结构的瞬态电流传输和电磁场分布及其变化特征是影响人员和电气设施的两个关键因素^[8-9]。布达拉宫珍宝馆是典型的金属构架多层建筑, 且具有该地区 3 km 范围内近年来探测详细地闪数据, 具备开展电磁场和散流特性仿真分析雷电流源特征要求的前提条件, 开展此项研究对金属构架建筑物雷击效应防护具有重要工程应用意义。

收稿日期: 2018-10-13; 修回日期: 2018-12-15

基金项目: 上海市气象局“启明星”计划课题研究项目(QM201612)。

Project Supported by Research Project of “Starlight” Program of Shanghai Meteorological Bureau (QM201612).

1 金属构架和电流源模型建立

金属构架仿真模型为珍宝馆,其位于布达拉宫正前方,模型根据珍宝馆设计图纸按 1:1 比例建立,其长宽高分别为 30.6 m, 20.2 m 及 12.3 m,框架主体材料为钢,材料电阻和电感特性取实际数值。

根据尖端放电^[10-13]及大气电场畸变特性,此模型雷击风险位置最高位置为四周顶部拐角处,因此可将雷电流注入点位置设置为在珍宝馆东南角处见图 1。

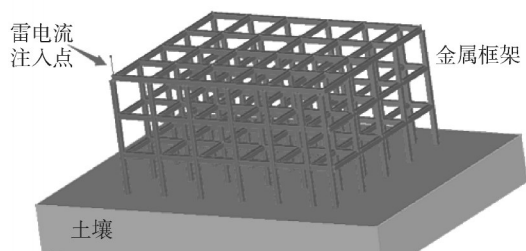


图1 构建金属构架(布达拉宫珍宝馆)仿真模型

Fig. 1 The model of the treasure hall of Potala Palace

仿真雷电流源采用双指数数学表达式^[14]描述其波形,雷电流幅值为-75.0 kA,雷电流波形为 10/350 μs (首次回击波形^[15])。近年来学者采用 FDTD 法(时域有限差分法)来解决大空间范围内(数十至数百米)雷击空间电磁场的数值计算方法,因此本仿真通过时域有限差分法(FDTD)实现^[16-19],仿真和动态图形显示时间步长均约 7 μs ,符合 4/5 网格维度的要求。考虑到计算收敛性和计算内存的要求,本研究基于全波分析法^[20]进行仿真计算。

2 金属构架雷击电流分布

时域中框架上传输雷击电流可通过动态显示的方式分析其瞬态变化特征,选取本仿真 4 个典型时间点(7、70、140、210 μs)区分分析不同时刻框架电流的变化特征见图 2。

由图 2 可得以下结论:

1) 电流扩散以雷击点为中心向外围钢结构传输,且位置随与雷击点距离增加雷电流强度降低。

2) 雷击电流向结构柱三维方向(x, y, z)分流效果不同,在竖直方向金属构架泄流效果更好,主要原因与接地系统中雷击电流沿最短路径时其承受雷电冲击等高频电流(10 MHz 以内)作用时暂态响应特性效果最佳原理一致^[20],与垂直导体设置数量影响较大也有一定影响^[21]。

图 2(c)和(d)所示,同一时刻流经金属构架连接点位置雷电流强度相较于其他位置更高,电流变化趋

势更快,主要原因是电流在雷击点的汇聚效应,而影响连接点汇聚效应主要有连接方式和相对雷击位置两个因素。

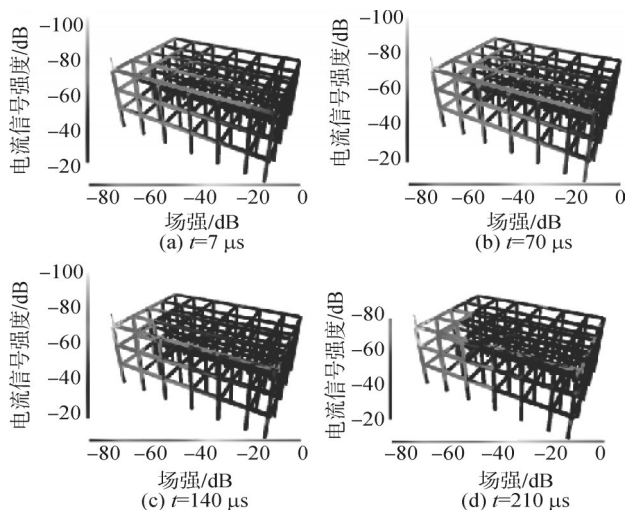


图2 4个选取时刻雷击瞬态电流在金属构架上传输变化特征

Fig. 2 The transmission characteristics of lightning transient current along the metallic structures at four representative time-points

雷击电流在金属构架中传输会激励附近空间产生瞬变电磁场,以下将基于 FDTD 方法实现空间电磁场计算研究。

3 框架附近空间雷击电磁场变化

雷击空间电磁场定性和定量仿真分析是两种常用研究方法^[22],定性方法主要通过对比不同参考截面电磁场变化分布规律以探寻合理的雷击电磁场防护措施,定量方法主要是通过特定位置设置参考探针以探寻该位置电磁场随时间的线性变化关系,同时通过对比分析不同位置探针电磁场变化情况可归纳金属构架结构空间电磁场的定量变化规律。

3.1 定性分析

定性分析主要在同一时刻从竖直(z)方向和水平(x)方向(与 y 方向类似)选取典型位置处不同仿真截面进行电场分布,首先在 z 方向选取 $t=140 \mu\text{s}$ 时刻 4 个不同高度处($h=0.1, 9.1, 12.1, 12.5 \text{ m}$),得出其仿真电场分布见图 3。

由图 3 可得如下结论:

1) 对比图 3 可发现参考面离雷电流注入点越近,该高度处空间电场强度越强。在高度 0.1 m 处电场较为微弱,9.1 m 处电场强度逐渐增加至一定强度,在 12.1 ~ 12.5 m 电场强度迅速上升至较高强度。

2) 从图 3(c)和(d)可看出,由于电流沿金属构架

结构的规则流动,其在参考表面形成辐射状的电场网格效应尤为明显。在0.1 m高度处由于电流源位置和侧面框架结构距离的影响,参考面上映射出较为规则的紧密网状方格;而在12.5 m高度处主要辐射源为顶部框架金属,且距离辐射源及辐射结构均较近,因此参考面辐射网格主要反映框架顶部网格形状且强度较为明显。

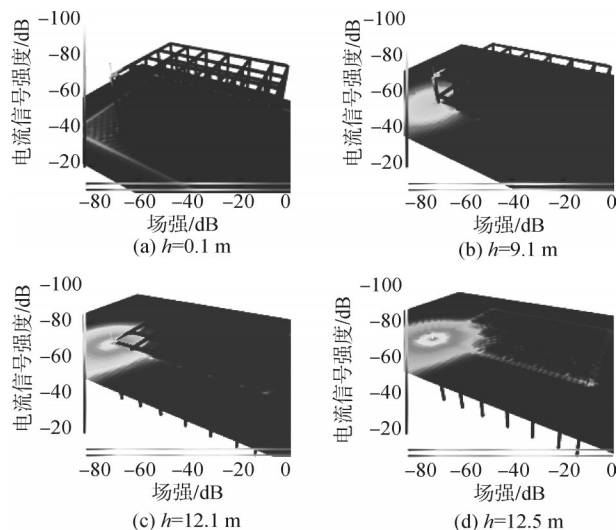


图3 $t=140\ \mu\text{s}$ 时四不同高度处电场分布

Fig. 3 The distribution of electric fields at four different heights when $t=140\ \mu\text{s}$

水平方向上距离框架不同位置的参考面的电场分布见图4。

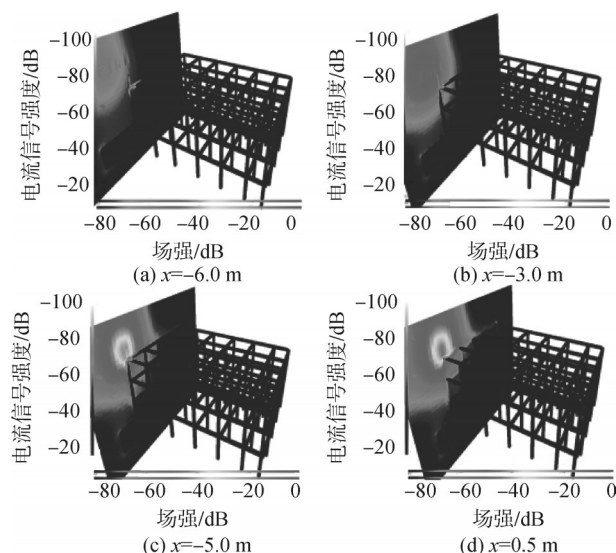


图4 $t=140\ \mu\text{s}$ 时4个不同水平位置处电场分布

Fig. 4 The distribution of electric fields at four different horizontal positions when $t=140\ \mu\text{s}$

分析图4有如下结论:

1)空间雷击电磁场分布影响最主要因素为雷击点位置,从图4可看出空间辐射电场呈现以雷击点为中心向外空间辐射状,强度随距离增加而减弱。

2)图4中下方出现矩形实体部分是说明土壤部

分相对于空气对电场具有更强的屏蔽作用。

3)对比图3、4可印证前述关于雷击分流在三维方向(x, y, z)传输的差异性。

3.2 定量分析

根据定量仿真的要求,设置了3种类型探测电磁场时域变化特性的探针,第一种类型是定义了3个离侧面中心位置距离分别为3.0、6.0、9.0 m的探针;第2种探针类型是定义在金属构架内部对角不同结构中心位置处的探针,距离西南角框架立柱距离分别为11.1、8.1、2.7 m;最后一种探针类型是基于第2种类型中心位置探针为基准,上行分别间距4.1 m设置一根探针。3种类型探针位置见图5。

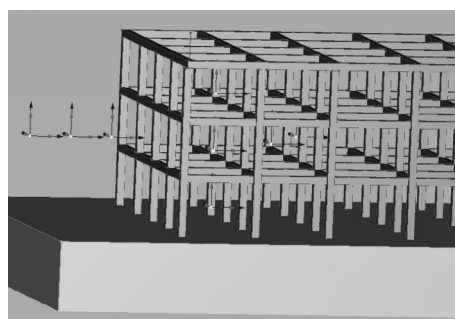


图5 定义的3种类型探针位置

Fig. 5 The position of the probe as defined

布置在侧面水平距离呈等差分布的第一种类型探针探测的磁场见图6,对比3处磁场变化规律可有以下结论:

1)磁场强度随距离增加逐渐减弱,在波头时间(0~10 μs)3探针位置磁场强度变化趋势较为一致,在波尾时间(10~150 μs)变化趋势出现明显差异,磁场强度随距离增加磁场减弱趋势渐趋缓慢。

2)仿真探测磁场波峰出现时间与雷电流波峰时间基本一致(延迟约10 μs),而磁场衰减速率相对于10/350 μs 电流源波形变化趋势逐渐趋缓的主要原因是因金属构架上在波尾出现的电磁谐振振荡作用相关。

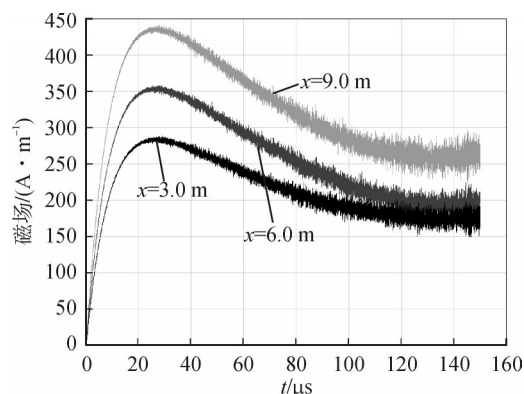


图6 3处不同水平位置的磁场变化特性

Fig. 6 The changing characteristics of the magnetic fields at three different horizontal positions

第2种在金属构架内部不同结构中心处探针探测的磁场变化见图7。

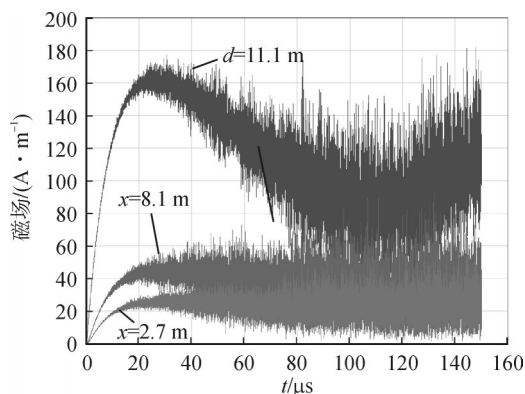


图7 3处不同内部位置处的磁场变化特性

Fig. 7 The changing characteristics of the magnetic fields at three different internal positions

由图7可有以下结论:

1)越靠近金属构架内部中心位置,谐波振荡(尤其在波尾时间)相对于外部空间越强。主要原因由于越靠近内部空间,辐射磁场在内部空间产生共振的谐波频率范围越大,产生谐波振荡的频率也越高。

2)越靠近金属构架内部结构磁场强度整体越强,此变化特性与第一种水平位置磁场变化规律相反;同时,随磁场强度趋缓,可见在波尾时间较为平缓,而在最靠近内部位置处内部磁场由于电磁振荡出现了一定的反峰趋势。

第3种在不同高度处探针探测的磁场变化见图8。

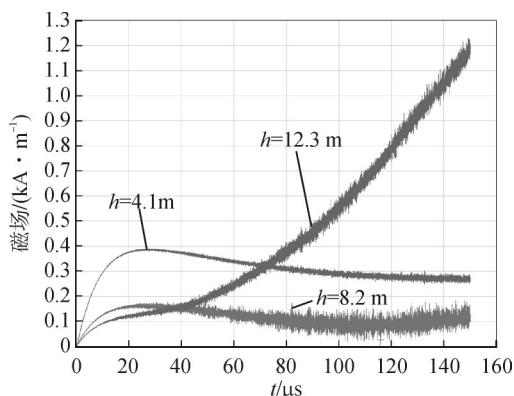


图8 3处框架内部不同高度的磁场变化特性

Fig. 8 The changing characteristics of the magnetic fields at three different vertical positions

从图8中可以发现两个明显的差异性结论:

1)在波前时间,在接地点附近高度处波头时间磁场峰值较高,随高度增加磁场上升幅度逐渐减弱,主要原因暂态电流通过垂直框架结构注入大地过程中会产生较强的瞬态电磁场,与沈寰等利用CDEGS仿真建构筑物内部磁场环境研究结论较为一致^[21-22]。

2)在接近暂态电流注入点位置磁场强度在波尾时间出现较大幅度上升趋势的非规律性变化,这主要是因为注入电流源与流经框架暂态电流形成叠加电磁场影响作用有关。

4 结论

1)合理增加金属构架连接点和垂直立柱能有效增加雷电暂态电流分流效果,降低流经金属构架的雷电流强度。

2)雷击点位置是影响空间电磁场分布的最主要因素,距离雷击点较近位置立柱其辐射电磁场强度越强,在工程防雷应用防护方面可考虑将微电子设备及抗电磁辐射能力较弱设备和线缆远离此区域。

3)建筑物外部区域电磁场衰减变化基本与距离成反比关系,而在框架结构建筑物内部区域磁场强度变化较为复杂,越靠近建筑物内部区域谐波振荡越剧烈,同时越靠近雷击点位置磁场强度可能会出现非规律性变化现象。

参考文献:

- [1] 傅正财,吴 斌,徐 霖. 金属构架对近区雷击的磁场屏蔽效果[J]. 建筑电气, 2005, (24)1:19-21.
FU Zhengcai, WU Bin, XU Lin. Shielding effect of the building metal cage against magnetic fields excited by near lightning strokes[J]. Building Electric, 2005, (24)1:19-21.
- [2] 周歧斌. 使用EMTP计算建筑物金属框架上的暂态电流分布[J]. 低压电器, 2008, (24)2:45-48.
ZHOU Qibin. Using EMTP to calculate transient current distribution in metal frame[J]. Low Voltage Apparatus, 2008, (24)2:45-48.
- [3] 周晓燕. 直击雷对建筑物金属构架电磁效应的分析[M]. 天津: 河北工业大学, 2014.
ZHOU Xiaoyan. Analysis of electromagnetic effects on building metstructure under directlighting[M]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.
- [4] VIEIRA M S, JANISZEWSKI J M. Propagation of lightning electromagnetic fields in the presence of buildings[J]. Electric Power Systems Research, 2015(118):101-109.
- [5] BAKAR A H A, TAN C K, ABIDIN A Z, et al. Comparative study on substation shielding due to direct lightning strokes[J]. Journal of Power and Energy Engineering, 2014, 2(4):600-611.
- [6] VIEIRA M S, JANISZEWSKI J M. Propagation of lightning electromagnetic fields in the presence of buildings[J]. Electric Power Systems Research, 2015(118):101-109.
- [7] 陈维江,余 辉,贺恒鑫,等. 雷电先导下行过程近地电场时空分布与模拟方法研究[J]. 中国电机工程学报,

- 2014,(34)29:5221-5233.
- CHEN Weijiang, YU Hui, HE Hengxin, et al. Spatial-temporal characteristics and simulation method of the electric field near ground[J]. Proceedings of The CSEE, 2014, 34(29):5221-5233.
- [8] DIAZ E M, ARESTÉ J E V. Field failure analysis on transmission data equipment due to lightning discharges[J]. Microelectronics Reliability, 1998, 38(6): 1165-1169.
- [9] ZORO R. Induction and conduction electromagnetic waves caused by lightning strike on the low voltage network[J]. Makara Seri Teknologi, 2009, 13(1): 25.
- [10] RAKOV V A, UMAN M A. Lightning physics and effects [M]. Macmillan: Cambridge University Press, 2003: 42-45.
- [11] QIE Xiushu, ZHANG Qilin, ZHOU Yunjun, et al. Artificially triggered lightning and its characteristic discharge parameters in two severe thunderstorms[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 50(8): 1241-1250.
- [12] 谭永波, 朱俊儒, 李祥超, 等. 孤立金属尖端的电晕触发阈值[J]. 应用气象学报, 2014, 25(3): 339-346.
- TANG Yongbo, ZHU Junru, LI Xiangchao, et al. On set field based on isolated metal tip[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2014, 25(3): 339-346.
- [13] 郭秀峰, 谭永波, 郭凤霞, 等. 建筑物尖端对大气电场畸变影响的数值计算[J]. 应用气象学报, 2013, 24(2): 189-196.
- GUO Xiufeng, TANG Yongbo, GUO Fengxia, et al. Numerical simulation of effects of buildings tip on atmospheric electric field distortion[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2013, 24(2): 189-196.
- [14] TURNER N E, KOSTANIC I N, EARLES S K, et al. The magnetic field induced by a lightning strike's indirect effect double exponential current waveform[J]. Journal of Mathematics & Statistics, 2010, 6(3): 221-225.
- [15] KOLMAŠOVÁ I, SANTOLÍKO, FARGES T, et al. Properties of the unusually short pulse sequences occurring prior to the first strokes of negative cloud-to-ground lightning flashes[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 41(14): 5316-5324.
- [16] SARTORI C A F, CARDOSO J R. An analytical-FDTD method for near LEMP calculation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(4): 1631-1634.
- [17] SARTORI C A F, CARDOSO J R. An analytical-FDTD method for near LEMP calculation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(4): 1631-1634.
- [18] SULLIVAN D M. Electromagnetic simulation using the FDTD method[M]. New York: IEEE Press, 2000.
- [19] THOTTAPPILLIL R, RAKOV V. On the computation of electric field from lightning discharge in time domain-Electromagnetic compatibility[C]//EMC. [S.l.]: IEEE, 2001: 1030-1035.
- [20] 端木林楠, 赵习近, 周小明, 等. 基于CDEGS的接地网分流系数仿真与实测分析[J]. 高压电器, 2016, 52(1): 154-161.
- DUANMU Linnan, ZHAO Xijin, ZHOU Xiaoming, et al. Analysis of the experiment and simulation based on CDEGS of the shunt current coefficient of the grounding grid[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 154-161.
- [21] 杨琳. 接地系统暂态特性数值计算, 试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- YANG Lin. Research on numerical analysis and field test of transient characteristics of grounding system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [22] 沈寰. 雷击条件下建构筑物内部电磁场研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- SHEN Huan. Research on lightning electromagnetic environment inside architectural structures[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (NUIST), 2014.
- 陈华晖(1985—), 男, 工程师, 主要从事雷击高压试验管理与雷击风险评估研究工作。
- 朱泽伟(1986—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事雷击电磁场仿真方面研究(通信作者)。