

基于 CDEGS 的金属构架雷击电磁分析

沈 寰¹, 冯民学^{1,2}, 李晓明³

(1. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044; 2. 江苏省防雷中心, 南京 210009;

3. 江西省电力科学研究院, 南昌 330096)

摘要: 为研究金属构架遭雷击时的电磁特点及其影响因素, 并应用于实际建构筑物的工程计算分析, 提出将 CDEGS 软件应用于这种计算, 并利用电路法、有限元法和实验数据的对比验证了其可行性。文中还对金属构架内雷击电磁特点和部分影响因素进行了分析, 得到离雷击点越远的垂直导体分流系数越小、各导体之间区域的磁场强度远小于导体附近等结论, 并给出了雷击建构筑物时室内电子设备电磁防护的一些注意点。最后对一通信塔进行了实例分析。综上, CDEGS 可应用于雷击室内电磁环境评估, 具有一定的科研和业务应用价值。

关键词: CDEGS; 有限元法; 直击雷; 分流系数; 磁场强度

中图分类号: TM865 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2014)02-0035-07

Lightning Electromagnetic Analysis of Metal Structures Based on CDEGS

SHEN Huan¹, FENG Minxue^{1,2}, LI Xiaoming³

(1. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. Lightning Protection Center of Jiangsu Province, Nanjing 210009, China; 3. Electric Power Research Institute of Jiangxi, Nanchang 330096, China)

Abstract: In order to research lightning electromagnetic distribution characteristics of metal structures and its influencing factors on one hand, and on the other hand to give engineering calculation on actual architectural structures, we put forward application of CDEGS software in the calculation and use the result of circuit method, FEM and corresponding experiment to verify its feasibility. This paper is also aimed at analyzing lightning electromagnetic distribution characteristics of metal structures and its influencing factors. It comes to the conclusion that the farther away from the lightning strike point the smaller shunting coefficient of vertical conductor it will be; magnetic strength in the area among conductors is far less than that near conductors, etc. Then some notes are given on electromagnetic protection of electronic equipment indoors when architectural structures are struck by lightning. Finally, a case analysis is given on a communication tower. In conclusion, CDEGS can be applied to evaluation of lightning electromagnetic environment indoors, with certain value of scientific research and business application.

Key words: CDEGS; finite element method; direct lightning; shunting coefficient; magnetic strength

0 引言

现代建筑常采用笼式钢筋柱作为防雷引下线, 当遭受直接雷击时, 强大的雷电流流经各导体, 产生强大的暂态电磁场, 可能危害敏感电子设备, 引起设

备误动作、失效, 甚至使其发生永久性损坏。早在 20 世纪 70 年代, 美国研究报告[AD-722675]就指出: 计算机的运行经验和试验结果表明, 当雷电产生的磁感应强度达 $0.000\ 007\ \text{T}$ 时, 无屏蔽的计算机会发生误动作; 当磁感应强度超过 $0.000\ 24\ \text{T}$ 时, 计算机将发生永久性损坏^[1]。随着电子元器件技术的发展, 电路集成化水平的不断提高, 微电子器件的电磁脉冲耐

收稿日期: 2013-09-09; 修回日期: 2013-10-13

基金项目: 江苏省社会发展项目(BE2009693)。

Project Supported by Social Development Projects in Jiangsu Province(BE2009693).

受能力不断降低,20 世纪 60 年代大量应用的电子管耐受能量为 $0.1 \sim 10 \text{ J}$, 而目前大量使用的大规模集成电路的耐受能量仅为 $10^{-8} \sim 10^{-6} \text{ J}$, 相差 7 个数量级。另外像微波 GaAsFET、低 NF 硅双级器件与部分 CMOS 器件的损伤能量阈值只有几个 μJ , 非常易受雷电电磁脉冲的影响而出现损伤或失效, 从而引起整个系统功能的失效。近几十年来, 电子设备电磁屏蔽技术发展很快, 传输通道抑制、空间分离、时间分隔、频率管理以及电器隔离等电磁防护理论得到广泛应用, 合理的电磁兼容设计可以大大提升电子设备的抗电磁干扰水平。由于电磁环境分析是进行电磁兼容设计的前提, 因此, 雷击建构物时电磁环境的评估具有重要意义。

雷击建构物电磁分析目前主要基于电路理论^[2-14]和电磁场理论^[15-18], 配合适当的数值方法, 理论上可对任意大小和结构的建构物进行分析。但实际建构物分支导体数量极大且排列复杂, 建模十分困难且难以切合实际。为了简化, 适应实际工程计算, 一些学者将通用仿真软件应用于雷击电磁分析中。文[19]中采用基于有限元法的 Infolytica 软件, 计算了考虑地中散流情况时建筑物框架遭受雷击的室内磁场分布; 文[20]中采用基于边界元法的 IES-FARADAY 软件, 针对雷击带金属板结构建筑物的情况, 计算了典型频率下金属板电流密度及周围磁场。

CDEGS(current distribution, electromagnetic interference, grounding and soil structure analysis)是加拿大 SES 公司推出的集成工程软件包。该软件以电磁理论为基础, 不受频率限制, 具有接地系统设计分析、电磁干扰研究等一系列功能, 可用于大型复杂模型的计算。笔者将其应用于雷击电磁分析, 首先通过电路法、有限元计算结果和实验数据的对比进行可行性验证, 接着对规则金属构架内雷击电磁特点和雷击点等影响因素进行分析, 并给出电子设备电磁防护的一些布置建议, 最后针对通信杆塔实例进行雷击电磁分析。

1 文中方法的可行性验证

1.1 雷击电磁分析的有限元实现流程

在对文中方法进行可行性验证时, 采用了有限元方法。其实现流程见图 1。

1.2 方法验证

建立图 2 所示 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 、层高 0.75 m 的钢筋构架模型, 在顶角处施加 4 kA 电流, 分别采用有限元法和 CDEGS 计算导体分流系数并分析磁感应密度的分布情况, 并与文[7]中的实验数据和电路

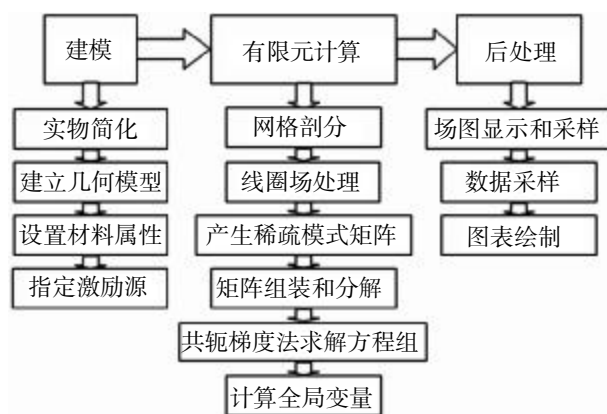


图 1 雷击电磁分析的有限元实现流程

Fig. 1 FEM implementation process of lightning electromagnetic analysis

法计算结果进行对比。

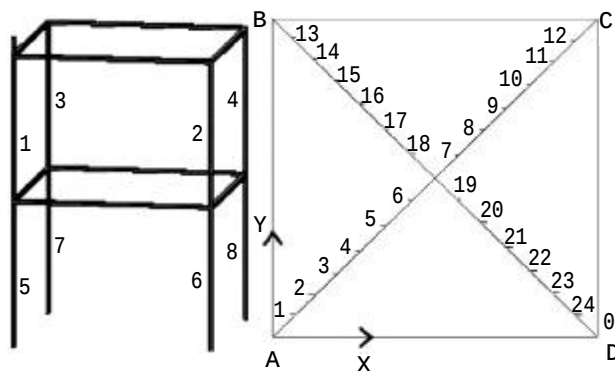


图 2 验证模型及其横截面

Fig. 2 Validation model and its cross section

图 3 给出了对以上模型采用有限元法、CDEGS、实验法和电路法得到的垂直导体分流系数, 可以看出 CDEGS 计算结果与另 3 种方法相比差别不大, 最大相对误差分别为 4.80%、9.57%、6.76%。

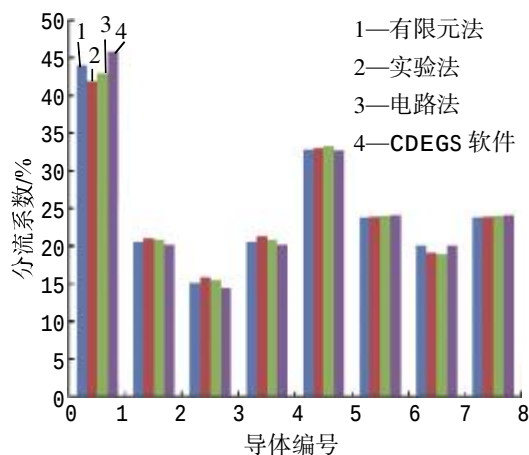


图 3 垂直导体分流系数的比较

Fig. 3 Shunt coefficient comparison of vertical conductors

采集 1 m 高度平面对角线(见图 2)上用 CDEGS、有限元法和电路法计算的 B_y , 并给出各测试点 B_y 的实验数据, 结果见图 4。很明显 4 种方法计算得到的

B_y 结果十分接近。可见 CDEGS 适合于雷击金属构

架时电磁分析。

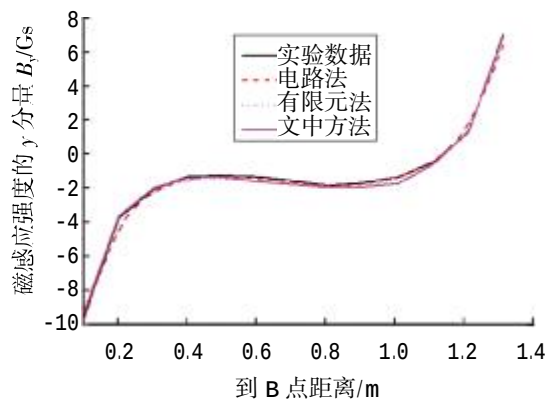
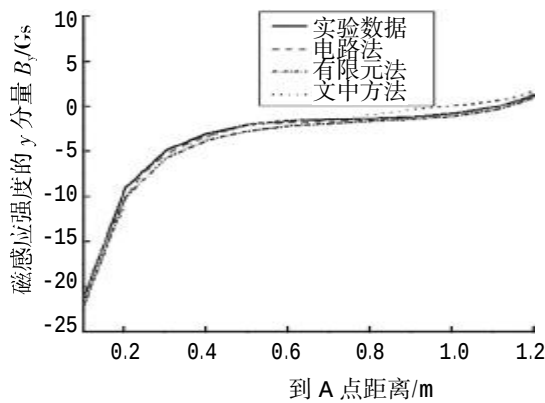


图 4 B_y 峰值沿两条对角线的分布情况

Fig. 4 Peak value distribution of B_y along two diagonals

2 雷击电磁特点及其影响因素分析

2.1 金属构架内的雷击电磁特点

为分析暂态磁场特点,建立图 5 所示的 $8\text{ m} \times 8\text{ m} \times 6\text{ m}$ 模型,各水平导体长 4 m ,各竖直导体长 3 m 。以下

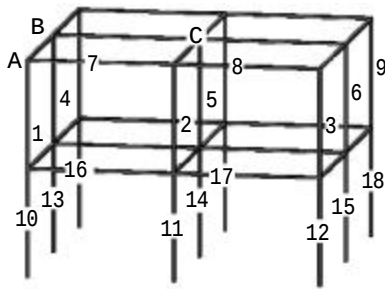


图 5 分析模型

Fig. 5 Model for analysis

分别分析雷击 A、B、C 点时 1-18 号导体的分流系数和磁场强度分布情况,结果见图 6、7(注入电流 4 kA)。由于在实际建筑物中,电子设备常置于离地面 1 m 左右的高度上,故选择 1 m 和 4 m 高度平面进行分析。以雷击 A 点为例,可以看出:

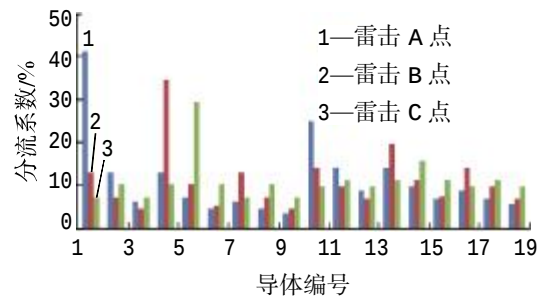
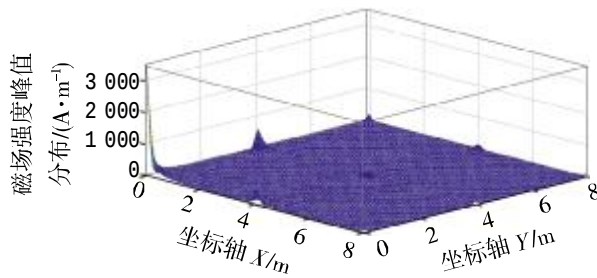
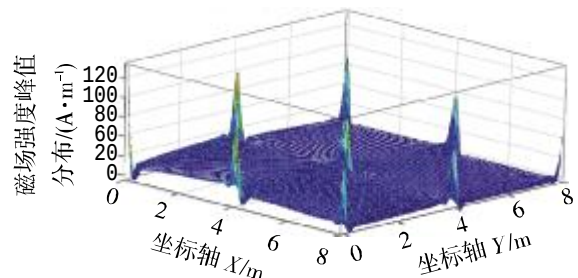


图 6 不同雷击点下的各垂直导体分流系数

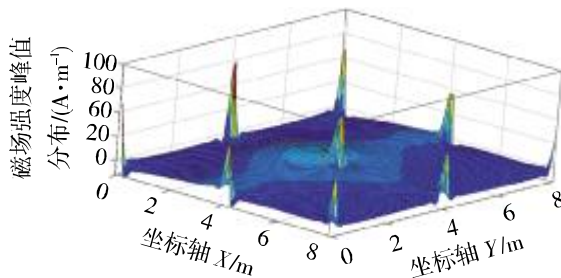
Fig. 6 Shunt coefficient of vertical conductors under different conditions of lightning strike points



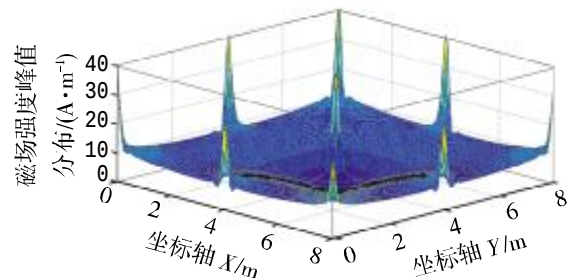
(a) 雷击 A 点时 4 m 平面磁场分布



(b) 雷击 A 点时 1 m 平面磁场分布



(c) 雷击 B 点 1 m 平面磁场分布



(d) 雷击 C 点 1 m 平面磁场分布

图 7 雷击不同点时构架内 $|H|$ 峰值分布

Fig. 7 Peak value of $|H|$ distribution within architecture under different conditions of lightning strike points

1) 雷击点下方垂直导体分流系数最大, 离雷击点越远的垂直导体分流系数越小。上层垂直导体分流系数最大值出现在导体 1 上(41.18%), 而导体 9 的分流系数最小, 仅为 3.625%。

2) 下层垂直导体分流系数较上层均匀。最大值由 41.18% 降到 24.86%, 最小值由 3.625% 上升到 5.671%, 除雷击点下方的导体 10 外, 其余垂直导体分流系数均不同程度增大。

3) 垂直导体附近的磁场强度较大, 且雷击点下方垂直导体附近的磁场强度远大于其他垂直导体, 其他区域则相对较小; 存在较明显的高低场值区域, 且导体附近磁场强度的变化梯度远大于其他区域。

4) 下层磁场强度的分布较上层平均。除雷击点下方的垂直导体, 其他下层垂直导体附近的磁场强度均较上层略为增强。

根据以上雷击磁场分布特点, 可对建构筑物内微电子设备的布置提出以下建议:

1) 设备应尽可能置于较低的楼层并尽量布置在室内中央。如条件不允许, 应尽量远离附近墙体和承重柱(内部带有钢筋)。

2) 由于水平钢筋导体中也有雷电流流过, 因此设备应尽量远离室内天花板和地面。

2.2 金属构架雷击电磁暂态影响因素分析

影响雷击金属构架电磁分布的因素有很多, 一些学者已对雷电流波头陡度^[8,24]、接地电阻^[9]等因素进行了分析。笔者主要针对规则构架, 就雷击点位

置、构架密度的影响进行探讨。

2.2.1 雷击点位置

雷击点不同时, 导体电流分布和暂态磁场分布是有很大的差异的。根据图 6、7, 比较雷击 A、B、C 3 点的结果, 可得到以下结论:

1) 雷击点不同时, 导体电流分布存在差异。雷击顶角时电流分布最不均匀, 雷击点越靠近中部电流分布越均匀。雷击 A、B、C 点时下层导体分流系数最大差值分别为 19.19%、12.65% 和 1.636%, 分别出现在 10 号与 18 号导体、13 号与 12 号导体、14 号与 16 号导体之间。

2) 雷击顶角(A 点)时, 磁场强度分布最不均匀, 雷击点越靠近中心(C 点), 磁场强度分布越均匀。但总体来说, 雷击顶角时除了雷击点下方垂直导体的附近区域, 其他区域的磁场强度大多较雷击 B 点和 C 点时略小。

2.2.2 构架密度

遭受直接雷击时, 不同结构和复杂程度的建构筑物内部的磁场强度分布特点是千差万别的。为研究构架密度对磁场强度分布的影响, 建立如图 8 所示的 8 m×8 m×6 m 模型。模型 B 较模型 A 构架密度更大。以下分别分析雷击模型顶角时垂直导体分流系数和磁场强度分布情况(注入电流 4 kA)。

关于垂直导体分流系数, 比较图 8(a)、(c) 得知, 随着构架密度的增大, 参与分流的垂直导体数量增多, 分流系数均趋于减小, 最大值由 55.98% 降到

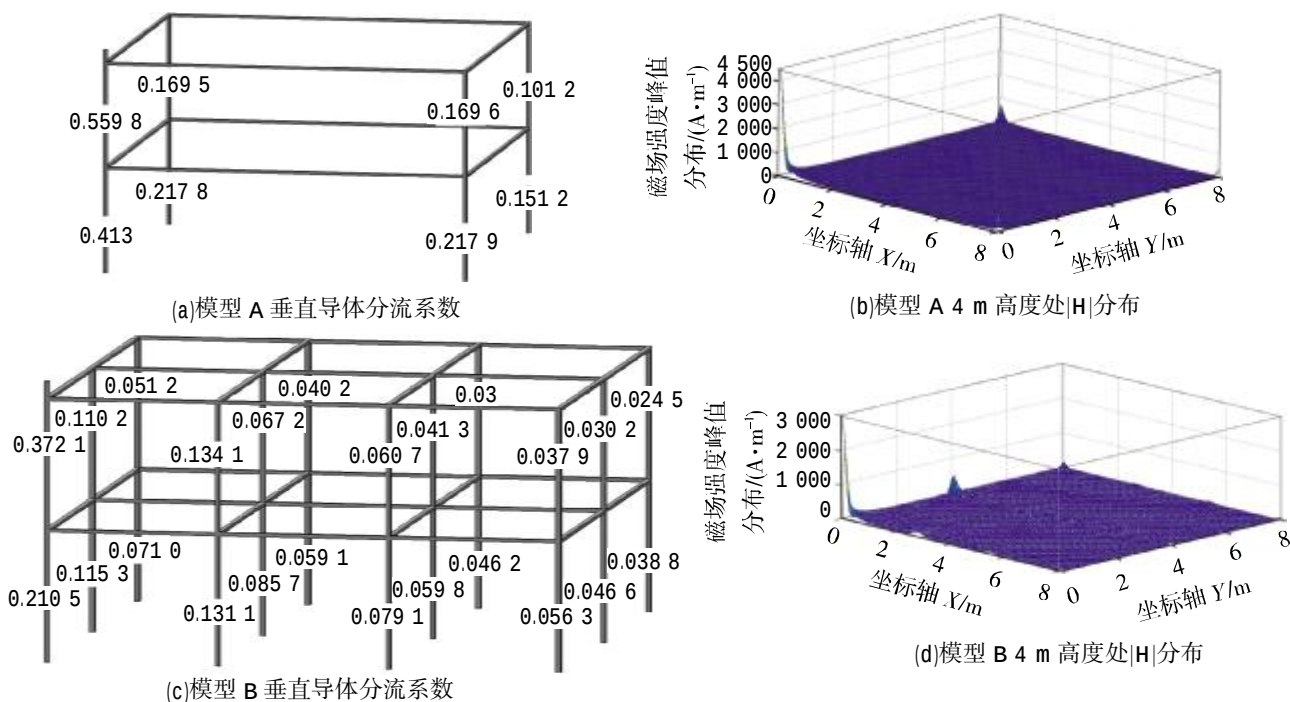


图 8 各模型垂直导体分流系数及 4 m 处的 $|H|$ 分布

Fig. 8 Shunt coefficient of vertical conductors and distribution of $|H|$ at 4 m in each model

37.21%, 最小值由 10.12% 降到 3.00%; 由于水平导体数量的增加有利于均流, 因此分流系数更加均匀, 下层垂直导体分流系数的最大差值由 26.18% 降到 17.17%。可以推断的是, 当楼板为金属板时(近似为水平导体密度足够大的情况), 各垂直导体分流系数将进一步趋于均匀。

关于磁场强度的分布情况, 比较图 8(b)、(d) 得知, 垂直导体数量增加后, 磁场强度总体来说有所降低且分布更加均匀, 且改善了四角的垂直导体尤其是雷击点下方垂直导体附近的磁场环境。但是增加的垂直导体附近的磁场强度反而有所增大。

3 CDEGS 在通信塔雷击电磁分析中的应用

分析了金属构架雷击电磁特点和雷击点等影响因素后, 对图 9 中的一通信塔进行实例分析。塔身为 75 m×75 m×6 m 角钢, 高 50 m; 垂直接地体为半径 1 cm 的铜导体, 埋深 3 m; 水平接地体为 40 m×4 m 扁钢, 埋深 1 m; 各垂直接地体均在地下 0.5 m 与外层水平接地体两点相连。在塔顶施加 10/350 ms 峰值 100 kA 的雷电流, 考虑到基站房内电子设备常置于离地面 1 m 左右的高度上, 故分析 1 m 高度平面上

电磁场分布情况。

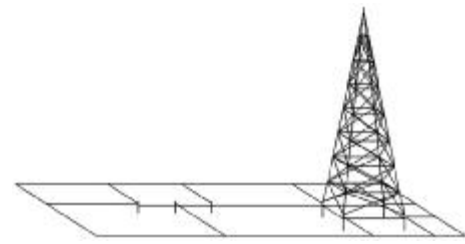
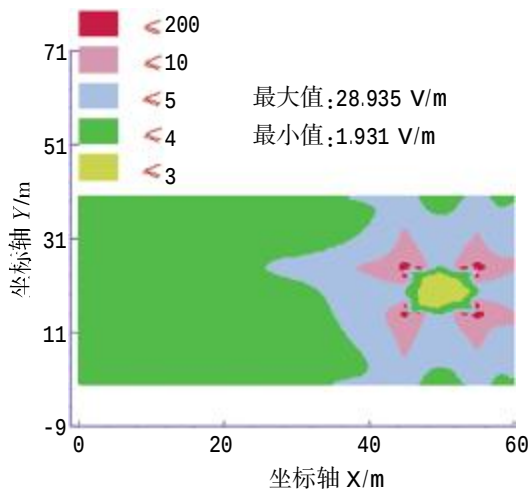


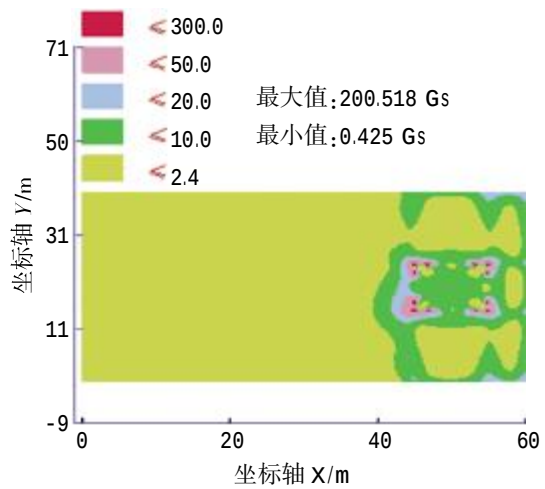
图 9 通信塔构架及其接地系统

Fig. 9 Truss of a communication tower and its earth system

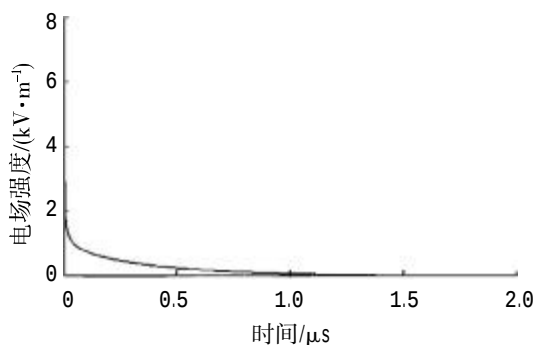
雷击塔顶时 1 m 高度处电场和磁感强度分布见图 10。从图 10(a) 中可以看出, 暂态电场分布梯度较大, 高值区集中在构架附近而其他区域场值很小, 塔身对暂态电场有较好的屏蔽效果, 加之基站房墙体对电场有一定的屏蔽作用, 因此电子设备所处环境的暂态电场可以被限制在较低的水平上。相较于电场来说, 磁感强度分布梯度则较小, 其随到塔身距离的增加衰减较慢, 但在塔内大部分区域中磁感强度在 2.4 Gs 以下, 可见塔身对磁场有明显的屏蔽作用。图 10(c)、(d) 是点 (40, 20, 1) 暂态电场和磁场的波形图, 可以读出该点出现的电场强度和磁场强度峰



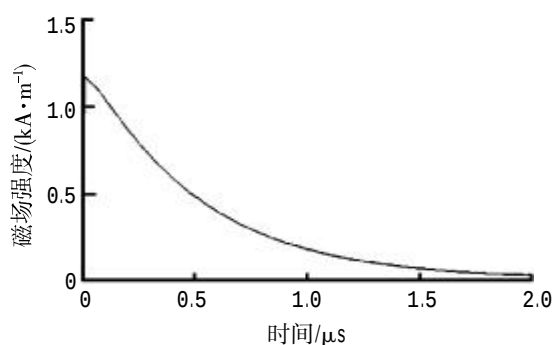
(a) 雷击时 1 m 平面 $|E|$ 峰值分布



(b) 雷击时 1 m 平面 $|B|$ 峰值分布



(c) 雷击时点 (40, 20, 1) 上电场波形



(d) 雷击时点 (40, 20, 1) 上磁场波形

图 10 雷击时电磁分布情况

Fig. 10 Distribution of electromagnetic when struck by lightning

值分别约为 8 200 V/m 和 1 170 A/m, 波形均类似于雷电流 10/350 μ s 波形, 不同的是电场波形更陡且波头上叠加了较强的高频振荡, 半波时间也明显短于磁场波形。

4 结论

基于精度高、建模方便、通用性强等优点, 笔者将 CDEGS 应用于金属构架雷击电磁分析。首先利用有限元法、电路法计算结果和实验数据的对比进行可行性验证, 此后分析电磁暂态特点并对雷击点等影响因素进行分析, 给出室内设备摆放位置的一些建议, 最后对一通信杆塔实例进行雷击电磁分析。得到如下结论:

1) CDEGS 分流系数和磁感应密度计算结果与有限元法、相关文献中电路法计算结果和实验数据基本吻合, 认为 CDEGS 适用于雷击金属构架电磁分析。

2) 雷击时垂直导体分流系数随离雷击点距离的增大而减小, 下层垂直导体分流系数较上层趋于平均; 雷击点越接近顶部中心垂直导体电流分布越趋向均匀。若增加构架密度或将分支导体换成金属板, 垂直导体分流系数则趋于减小和均匀。

3) 垂直导体附近磁场强度较大, 其他区域则相对较小, 导体附近磁场强度的变化梯度远大于其他区域; 下层磁场强度分布较上层更加均匀。雷击点越靠近顶部中心磁场强度分布越趋于平均。若增大构架密度, 则磁场环境将总体得到改善, 但增加的垂直导体附近的磁场强度反而有所增大。

4) 电子设备应尽量放置在较低的楼层并尽量远离承重墙柱(内含钢筋), 并远离天花板和地面放置; 为满足电子设备的电磁兼容要求, 必要时还需采取相应的屏蔽措施。

5) 对于一些重要建构筑物, 应预先对其进行精确的雷击电磁计算从而指导其雷电电磁防护设计。

参考文献:

- [1] HILL R D. Note on vulnerability of computers to lightning [EB/OL]. <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=AD0722675>, 1971-04-18/2013-08-11.
- [2] ORLANDI A, SCHIETROMA F. Attenuation by a lightning protection system of induced voltages due to direct strikes to a building[J]. IEEE Trans. on EMC, 1996, 38(1): 43-50.
- [3] ORLANDI A, MAZZETTI C, FLISOWSKI Z, et al. Systematic approach for the analysis of the electromagnetic environment inside a building during a lightning strike[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40(4): 521-535.
- [4] SARTORI C F, CARDOSO J R, ORLANDI A. Transient induced voltage computation in a high building struck by lightning[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1998, 34(5): 2815-2818.
- [5] KATO J, KAWANO H. Investigation of lightning surge current induced in reinforced concrete buildings by direct strikes[J]. IEEE Int. Symp. on EMC, 2001(2): 1009-1014.
- [6] DU Y, CHEN Shuiming, BURNETT J. Experimental and numerical evaluation of surge current distribution in building during a direct lightning stroke[J]. Transaction Hong Kong Institution of Engineers, 2001, 8(1): 1-6.
- [7] 戴传友. 雷击金属结构物时近区磁场分布的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 1998.
- DAI Chuanyou. When lightning strikes metal structures near magnetic field of research[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 1998.
- [8] 张小青, 陈水明. 直接雷击时高层建筑内暂态磁场的计算[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 40-43.
- ZHANG Xiaoqing, CHEN Shuiming. Calculation of transient magnetic field inside the high buildings struck by lightning[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2001, 21(1): 40-43.
- [9] 林福昌, 姚宗干, 蒋政龙. 雷击建筑物时电流分布的计算[J]. 高电压技术, 1998, 24(1): 56-58.
- LIN Fuchang, YAO Zonggan, JIANG Zhenglong. Calculation of current distribution in a building under direct lightning stroke[J]. High Voltage Engineering, 1998, 24(1): 56-58.
- [10] 巩学海, 何金良, 李雨. 变电所的瞬态电磁环境分析[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 39-43.
- GONG Xuehai, HE Jinliang, LI Yu. Analysis on transient electromagnetic environment of substations[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 39-43.
- [11] 汲亚飞, 赵科, 杨宇, 等. 建筑物雷电保护系统内部最大磁场强度的计算[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 914-918.
- JI Yafei, ZHAO Ke, YANG Yu, et al. Calculation of the maximum magnetic field inside the lightning protection system of a building[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 914-918.
- [12] ZHOU Q B, DU Y. Using EMTP for evaluation of surge current distribution in metallic gridlike structures[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(4): 1113-1117.
- [13] 傅正财, 徐霖. 有独立引下线建筑物遭雷击时室内的磁场分布[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(S1): 18-21.
- FU Zhengcai, XU Lin. The magnetic field distribution in buildings with separate lightning down conductors during a direct lightning stroke[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2005, 39(S1): 18-21.

- [14] 李 佳, 谭向宇, 张 斌, 等. 雷直击建筑物时内部磁场分布[J]. 电瓷避雷器, 2009, 277(1): 36-38.
LI Jia, TAN Xiangyu, ZHANG Bin, et al. Distribution of magnetic field inside the buildings directly struck by lightning [J]. Insulators and Surge Arresters, 2009, 277(1): 36-38.
- [15] BUCCELLA C, CRISTINA S, ORLANDI A. Frequency analysis of the induced effects due to the lightning stroke radiated electromagnetic field [J]. IEEE Trans. on EMC, 1992, 34(3): 338-344.
- [16] ALA G, BUCCHERI P. Transient electromagnetic hazard inside a lightning protection system [J]. High Voltage Engineering, 1999(1): 275-278.
- [17] ALA G, SILVETRE M D. A simulation model for electromagnetic transients in lightning protection system[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2002, 44(4): 539-554.
- [18] ALA G, SILVETRE M D, FRANCOMANO E, et al. Wavelet-based efficient simulation of electromagnetic transients in a lightning protection system[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(3): 1257-1260.
- [19] 任晓明, 傅正财, 黄晓虹. 基于 FEM 的雷击室内电磁场计算[J]. 低压电器, 2010(7): 6-9.
REN Xiaoming, FU Zhengcai, HUANG Xiaohong. Calculation of indoor electromagnetic field induced by lightning strike based on finite element method[J]. Low Voltage Apparatus, 2010(7): 6-9.
- [20] 黄晓虹, 周歧斌, 杜亚平. 分析带金属板结构的建筑物内部雷电磁脉冲磁场分布的等效电路法[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(7): 1112-1116.
HUANG Xiaohong, ZHOU Qibin, DU Yaping. An equivalent circuit method for computing Lightning-Induced magnetic fields in structures with metallic plates[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2012, 46(7): 1112-1116.
- [21] 王 庆, 傅正财, 周歧斌, 等. 雷电流波形对雷击建筑物时室内磁场分布的影响[J]. 高电压技术, 2001, 27(1): 7-9.
WANG Qing, FU Zhengcai, ZHOU Qibin, et al. Influence of lightning current waveform on magnetic fields in a building struck by lightning[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(1): 7-9.

沈 寰(1989—), 男, 硕士, 主要研究方向为防雷工程技术。

(上接第 34 页)

- [18] CHOW Y L, YANK J J, SRIVASTAVA K P. Complex image of grounding electrode in layered soils[J]. Journal of Applied Physics, 1992, 15(1): 1120-1125.
- [19] 李中新, 袁建生, 张丽萍. 变电站接地网模拟计算[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(5): 76-79.
LI Zhongxin, YUAN Jiansheng, ZHANG Liping. Numerical calculation of substation grounding systems[J]. Proceeding of the CSEE, 1999, 19(5): 76-79.
- [20] 全余生, 卢亚军, 刘 赫, 等. 考虑大地分层结构时避雷线电能损耗的计算方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 178-183.
QUAN Yusheng, LU Yajun, LIU He, et al. Power loss calculation in lightning shield line with layered soil structure [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 178-183.
- [21] 曾庆禹. 特高压输电线路地面最大工频电场强度和导线最大弧垂特性[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 1-7.
ZENG Qingyu. Study on characteristics of maximum power frequency electric field gradient on ground and maximum sag of bundle conductor for UHVAC transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 1-7.
- [22] 曹晓斌. 大电流及复杂地质结构下接地系统散流规律及参数计算[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- 朱 军(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统过电压与电磁暂态研究。
- 吴广宁(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高电压与绝缘技术方面的教学与研究工作。