

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2022.02.004

外串联间隙型避雷器对高架桥接触网的雷击防护

丁 俭, 文定都, 张 阳

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 雷电流在接触网上产生雷击过电压, 对牵引系统安全运行造成隐患。传统氧化锌避雷器 (metal oxide surge arrester, MOA) 存在耐冲击能力差、放电特性较差及内部漏电流等问题, 当高架接触网遭受雷击时, 会造成避雷器击穿及接触网绝缘子闪络。针对此问题, 提出了采用外串联间隙型避雷器 (external series gap arrester, ESGA) 防护措施。利用其间隙放电特性对接触网上的雷击过电压进行限制, 保证接触网正常运行。采用接地网建模方法对高架桥牵引系统接地冲击阻抗进行等效, 并建立高架区段接触网系统等值电路。通过对两种不同类型的避雷器以及接触网雷击跳闸率仿真, 结果表明, 采用间隙型避雷器的防护放电特性和耐雷击特性更强, 雷击跳闸率更低。

关键词: 高架桥; 接触网; 雷击过电压; 雷击跳闸率; 外串联间隙型避雷器; 接地网建模

中图分类号: TM865

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2022)02-0024-10

引文格式: 丁 俭, 文定都, 张 阳. 外串联间隙型避雷器对高架桥接触网的雷击防护 [J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(2): 24-33.

Lightning Protection of Viaduct Ocs by the External Series Gap Arrester

DING Jian, WEN Dingdou, ZHANG Yang

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Lightning current produces lightning overvoltage on the contact net, thus posing potential dangers to the safe operation of the traction system. Due to the fact that the traditional metal oxide surge arrester (MOA) is characterized with such flaws as poor impact resistance, low discharge efficiency and potential internal leakage current, lightning arrester breakdown and catenary insulator flashover will occur when the overhead catenary is struck by lightning. In view of this problem, by adopting external series gap arresters (ESGA) protection measures, the lightning overvoltage of OCS can be limited by its gap discharge characteristics, thus ensuring the normal operation of OCS. The grounding impulse impedance of viaduct traction system is equivalent by adopting grounding grid modeling method, thus establishing the equivalent circuit of overhead section catenary system. Based on a comparison of the lightning trip rate of two different types of arresters and catenary, the simulation results show that the gap arrester is characterized with an improved protective discharge characteristics and lightning resistance characteristics, as well as a lower lightning trip rate.

Keywords: viaduct; catenary; lightning overvoltage; lightning trip rate; external series gap arrester, ESGA; grounding network modeling

收稿日期: 2021-08-06

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2021JJ30217)

作者简介: 丁 俭 (1995-), 男, 湖南怀化人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力机车过电压防护及接地技术, E-mail: 493834679@qq.com

通信作者: 文定都 (1969-), 男, 湖南道县人, 湖南工业大学教授, 主要研究方向为电力电子与电力传动, 智能控制系统, E-mail: 125710811@qq.com

0 引言

为了保证电力机车途经高架桥时的安全性, 高架桥段需安装避雷器对牵引供电网进行保护^[1]。牵引供电系统的电压等级与电力系统 35 kV 相当, 但是牵引系统遭受雷击的概率超过了 110 kV 的架空线路, 因此, 牵引系统防雷击水平较差, 发生雷击跳闸率更高。高架桥区段遭受雷击概率较普通铺设方式高出两倍, 遭受直击雷的概率较高, 雷击强度也更大^[2]。

目前, 已有大量高架桥区段接触网防雷击过电压研究。文献 [3] 利用 ATP-EMPT (The Alternative Transient Program-Electromagnetic Transient Program) 平台建立接触网模型, 接触网遭受高强度雷击时, 产生的雷击过电压远超接触网绝缘子承受范围, 造成绝缘子闪络。文献 [4] 提出基于 MODELS 语言计算感应雷击过电压的方法, 通过 ATP-EMPT 平台建立雷电通道模型及架空线路电磁耦合模型, 提高了架空线路的耐雷击水平。文献 [5] 采用 PEEC 公式对外部入射场的全波进行计算, 通过有限差分域的方法验证解决了时间步长和段长度的问题。文献 [6] 通过建立三维时域有限差分模型, 计算复杂地形情况下的雷击电磁场, 验证了感应雷击过电压受地形坡度影响较大。文献 [7] 对 ± 600 kV 直流输电线路避雷器进行了计算和挂网运行试验, 结果表明, 在银川-山东直流输电线路路上能稳定运行, 为批量投入使用提供了依据。文献 [8] 提出一种实时定位误差补偿算法, 通过延长雷击传播路径改善山区雷击定位系统的定位误差。文献 [9] 将粒子群算法与矢量匹配法结合建立高架桥综合接地模型, 并与传统适量匹配法比较验证其合理性。文献 [10] 验证了高架桥高度、雷电流幅值以及下行先导起始位置对牵引系统雷击率的影响。

针对高架桥区段接触网装设传统避雷器存在的问题, 本研究提出在接触网装设带串联间隙型避雷器 (external series gap arrester, ESGA) 的方法抑制雷击过电压。通过接地网建模法对高架桥区段接触网建立系统模型, 采用 $20 \mu\text{s}/350 \mu\text{s}$ 的 Heidler 模型, 对直击雷进行模拟。当高架桥区段接触网遭受雷击时, ESGA 的放电特性优于传统氧化锌避雷器 (metal oxide surge arrester, MOA); 当接触网上的雷击过电压从 400 kV 降低至 30 kV 以下, 衰减时间更短。通过对比 MOA 与 ESGA 的防护措施, 说明 ESGA 对高架桥段接触网的防护等级更高。

1 牵引系统高架桥模型构建

高架桥段作为牵引系统最薄弱的环节, 遭受雷击

的概率和强度较大。高架桥采用钢筋混凝土结构, 钢筋结构与贯通地线相联接, 与大地形成雷电流泄放通道。对高架桥段分析时, 接触网采用传输线模型等效, 绝缘子采用闪络判据模型等效^[11-12]。高架桥没有统一的等效模型, 因此本文分析以常见的高架桥模型为基础, 其高架桥牵引系统结构如图 1 所示。

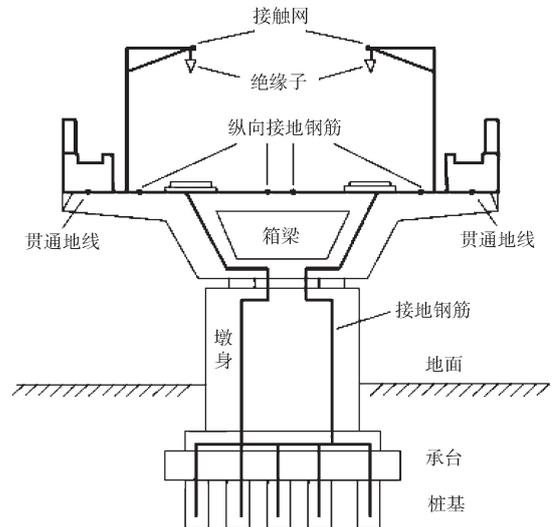


图 1 高架桥牵引系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of viaduct traction system structure

1.1 高架桥接触网参数计算和模型建立

接触网架设于高架桥上, 受雷击可能性较高, 且牵引系统故障大多来源于接触网^[13]。当接触网遭受雷击时, 会产生较大数值的雷击过电压。当过电压超过安全绝缘水平时, 造成绝缘子闪络和接触网跳闸^[14]。接触网结构与各项参数示意图见图 2。

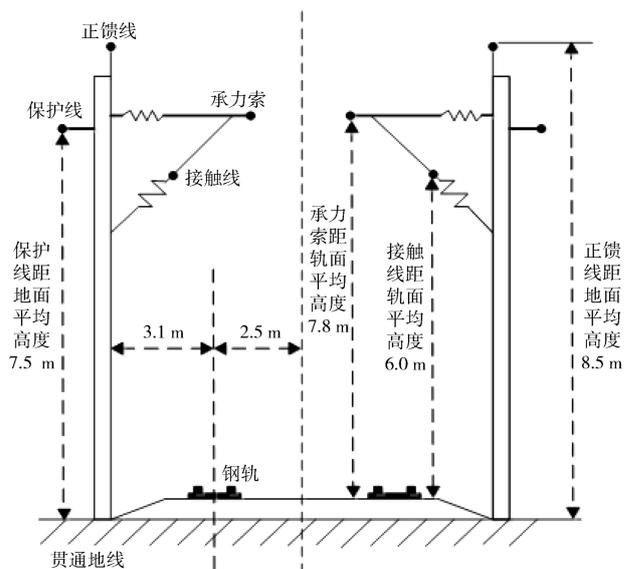


图 2 接触网结构与各项参数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of catenary structure with its various parameters

高架桥相邻桥墩的结构钢筋和贯通地线、大地形成闭合回路，与接触线供电回路形成电气耦合^[15]。相邻两个桥墩形成的回路产生大小相等、方向相反的感应电流，因此将其等效为一个回路 A 。假设存在 n 个相邻桥墩，即等效为一个大回路 N 。高架桥接触网回路结构示意图如图3。

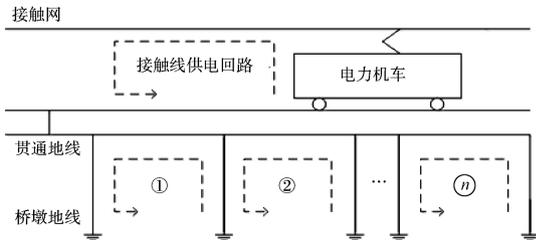


图3 高架桥接触网回路结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of viaduct catenary loop structure

根据能量守恒原则，可得：

$$n \frac{(j\omega MI)^2}{2R} = \frac{(j\omega nMI)^2}{2R'}, \quad (1)$$

式中： j 为虚数单位； ω 为角频率； I 为接触线供电回路电流； R 为桥墩的接地阻抗； R' 为大回路 N 的等值电阻，即 $R'=nR$ ； M 为接触网回路耦合系数； nM 为大回路 N 与接触线供电回路耦合系数。

牵引系统接触网在分析时视为无限长，因此接触线供电回路等效为无限长回路，在桥墩大回路 N 产生磁通量^[16]。取1 km桥墩长度进行分析，桥墩大回路 N 磁感线分布情况如图4所示。

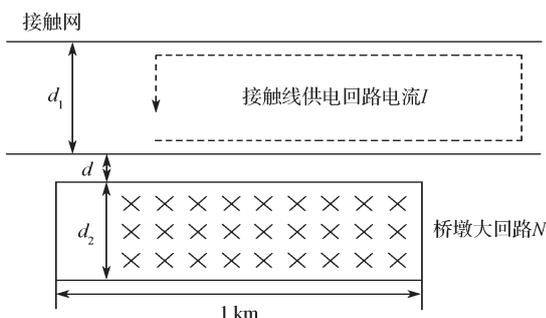


图4 桥墩大回路 N 磁感线分布情况

Fig. 4 Distribution of N magnetic induction line of bridge pier large circuit

各项基本参数如下：牵引网对地高度 d_1 为6.0 m；桥梁高度 d_2 为10 m；钢轨与贯通地线平均距离 d 为0.4 m；真空磁导率 μ_0 为 $4\pi \times 10^{-4}$ H/km。

根据电磁场理论，桥墩大回路 N 的磁通量为

$$\Phi = \Phi_0 - \Phi_i = \int_d^{d+d_2} \frac{\mu_0 I l}{2\pi r} dr - \int_{d_1+d}^{d_1+d+d_2} \frac{\mu_0 I l}{2\pi r} dr, \quad (2)$$

化简可得：

$$\Phi = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \left(\ln \frac{d+d_2}{d} - \ln \frac{d+d_1+d_2}{d+d_1} \right). \quad (3)$$

接触线供电回路与桥墩大回路 N 之间的互感耦合系数 M 为

$$M = \frac{\Phi}{I} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{d+d_2}{d} - \ln \frac{d+d_1+d_2}{d+d_1} \right), \quad (4)$$

可求得 $M=4.636 \times 10^{-4}$ H/km。

接触线供电回路与桥墩大回路 N 之间的互阻抗可表示为

$$Z_M = j\omega M = j0.145 \Omega. \quad (5)$$

接触线供电回路在桥墩大回路 N 上产生的感应电压为

$$U_M = Z_M I = 0.145 I. \quad (6)$$

牵引系统各导线空间分布位置如图2所示，各导线主要参数如表1所示^[17]。

表1 牵引系统各导线主要参数

Table 1 Main parameters of each wire of the traction system

导线名称	导线型号	单位长度电阻 / ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	计算半径 / mm
接触线 C	CHMT150	0.193	5.57
承力索 J	GJ-100	1.450	7.00
钢轨 R	UIC60	0.295	12.20
保护线 PW	LGJ-120	0.286	7.00
正馈线 F	2 × LGJ-185	0.082	9.51
贯通地线 G	TJ-95	0.250	12.40

根据 Carson 理论，对高架桥牵引系统的阻抗矩阵及分布电容矩阵进行计算^[18]。贯通地线与接触线供电回路之间的互阻抗很小，因此可忽略不计，求得贯通地线的自阻抗为 $0.327+j0.768$ 。图2中接触线、保护线、正馈线、钢轨、贯通地线分别用 T 、 PW 、 F 、 R 、 G 表示，其中 T 为接触线 C 和承力索合并，钢轨 R 是两条钢轨合并^[19]。本文搭建的高架桥区段接触网电气模型如图5所示。

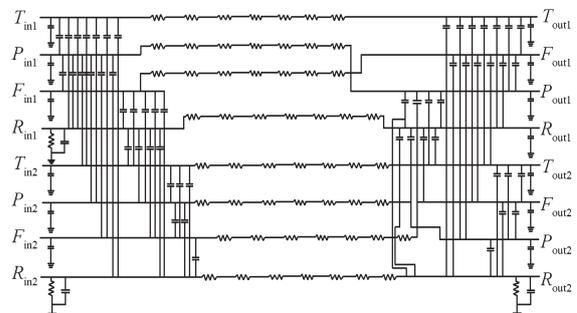


图5 高架桥区段接触网电气模型

Fig. 5 Electrical model of overhead contact system in viaduct section

由图5可知该模型采用链式网络结构，综合考虑了接触线的自阻抗、互阻抗及分布电容等因素。以5

km 为基本单元, 建立高架桥区段接触网电气模型。高架桥区段牵引网阻抗参数如表 2 所示, 分布电容参数如表 3 所示。

表 2 高架桥区段牵引网阻抗参数
Table 2 Traction network impedance parameters in viaduct section $10^{-1} \Omega \cdot \text{km}^{-1}$

参数	T_1	F_1	PW_1	R_1
T_1	1.346+j4.682	0.547+j1.902	0.534+j2.326	0.532+j1.843
F_1	0.547+j1.902	1.431+j5.879	0.545+j2.138	0.535+j1.421
PW_1	0.534+j2.326	0.545+j2.138	3.514+j6.081	0.528+j1.625
R_1	0.532+j1.843	0.535+j1.421	0.528+j1.625	1.274+j4.527
T_2	0.545+j1.871	0.576+j1.512	0.562+j1.526	0.565+j1.672
F_2	0.528+j1.617	0.551+j1.498	0.543+j1.423	0.518+j1.429
PW_2	0.531+j1.605	0.562+j1.417	0.535+j1.401	0.569+j1.518
R_2	0.533+j1.641	0.545+j1.386	0.539+j1.459	0.565+j1.972

表 3 高架桥区段牵引网分布电容参数
Table 3 Distributed capacitance parameters of traction network in viaduct section $\text{nF} \cdot \text{km}^{-1}$

参数	T_1	F_1	PW_1	R_1
T_1	3.410	-1.730	-2.130	-1.930
F_1	-1.730	3.120	-1.608	-0.382
PW_1	-2.130	-1.608	2.920	-0.697
R_1	-1.930	-0.382	-0.697	6.970
T_2	-2.040	-0.613	-0.578	-1.120
F_2	-0.635	-0.572	-0.241	-0.217
PW_2	-0.513	-0.241	-0.176	-0.246
R_2	-1.120	-0.217	-0.246	-2.813

1.2 高架桥综合接地参数计算和模型建立

高架桥接地系统由接触线部分接地结构和桥体接地结构组成。桥体接地结构由纵向接地钢筋、贯通地线及接地钢筋组成, 组成了过电流泄放网络^[20]。当接触网遭雷击时, 雷电流在接触网上产生雷击过电压^[21]。分析雷电流泄放时, 仅考虑接地钢筋泄流情况, 采用接地网建模法对高架桥接地系统进行建模。高架桥结构各项参数见表 4。

表 4 高架桥结构各项参数
Table 4 Various parameters of the viaduct structure

参 数	符号	参数值
接地钢筋半径 /mm	h	8
接地钢筋电阻率 $(\Omega \cdot \text{m}^{-1})$	a	0.909×10^{-7}
土壤电阻率 $(\Omega \cdot \text{m}^{-1})$	ρ	300
土壤磁导率 $(\text{H} \cdot \text{m}^{-1})$	ρ_0	4×10^{-7}
真空介电常数 $(\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$	μ	8.8×10^{-12}
土壤相对介电常数	ϵ_0	9.0
竖向钢筋长度 /m	ϵ_r	16.0
承台水平接地钢筋长度 /m	L_1	5.0
承台水平接地钢筋埋深 /m	L_2	3.1

以单根承台接地钢筋为基准, 等效电阻 R 、等值

电感 L 、等值对地电容 C 、等值对地电导 G 计算式如下:

$$R = l\rho / (2\pi a^2), \quad (7)$$

$$L = \frac{\mu l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{a} - 1 \right), \quad (8)$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \rho g, \quad (9)$$

$$G = \frac{\pi l}{\rho_0 \ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2ha}} - 1 \right)}. \quad (10)$$

式 (7) ~ (10) 中: l 为单根承台接地钢筋长度; g 为重力加速度。

可得 $R=0.212 \Omega$, $L=2.27 \mu\text{H}$, $C=0.331 \text{ nF}$, $G=0.014 \text{ S}$ 。

综上, 单根承台接地钢筋等效电路如图 6 所示。

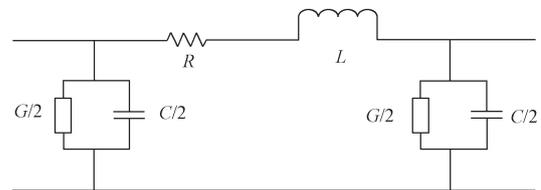


图 6 单根承台接地钢筋等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of a single-pedestal grounding steel bar

根据单根接地钢筋等效电路和高架桥实际分布, 得出高架桥综合接地等效电路如图 7 所示。为便于分析计算, 暂时只考虑接地钢筋对泄放雷电流的情况, 不考虑其他非预应力钢筋对泄放雷电流的情况。

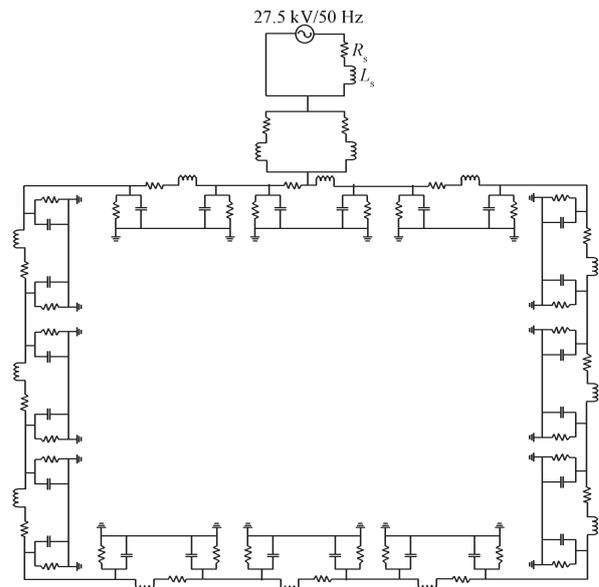


图 7 高架桥综合接地等效电路

Fig. 7 Viaduct integrated grounding equivalent circuit

2 雷击接触网特性分析

当高架桥接触网遭受直击雷时, 接触网瞬时雷击

过电压达到 400 kV 以上, 雷电流产生强大的机械效应和热效应, 有可能造成接触网绝缘子闪络和雷击跳闸, 引发接触网供电系统断电^[22]。直击雷对高架桥牵引系统冲击较大, 因此主要研究直击雷对高架桥接触网的影响。

2.1 直击雷计算模型

选用 20 μs/350 μs 双指数模型, 对直击雷进行模拟^[23]。雷电波阻抗与雷电流幅值有关, 直击雷电流的幅值较高, 因此波阻抗取值为 500 Ω。直击雷函数如下:

$$i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (11)$$

式中: I_0 取值为 50 kA; $\beta=1/\tau_1$, 其中 τ_1 为波头时间, 取值为 20 μs; $\alpha=1/\tau_2$, 其中 τ_2 波尾时间, 取值为 350 μs。

直击雷的放电电流大且放电时间极短, 放电瞬间幅值高达 50 kA。雷电流波头陡度高, 波头时间为 20 μs, 波尾时间为 350 μs, 属于高频冲击波。直击雷电流波形如图 8 所示。

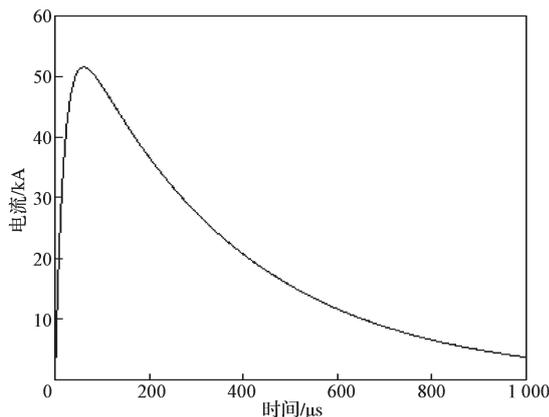


图 8 直击雷电流波形

Fig. 8 Direct lightning current waveform

2.2 雷击接触网计算模型

接触网遭受雷击的概率较高, 根据电力部门的测试数据, 每侧接触网的吸雷宽度取 $5h$ ^[24]。接触网遭受直击雷的次数 w 为

$$w=10\gamma TLh/1\ 000 \quad (12)$$

式中: γ 为落雷密度; T 为年平均雷暴日数; L 为接触网长度; h 为接触网承力索距轨面平均高度。

泄放雷电流时, 雷电流在接触网支柱产生的雷击过电压为

$$u = R_j i + L_j \frac{di}{dt} \quad (13)$$

式中: R_j 为支柱等效电阻和支柱接地电阻之和, 取值 10 Ω; L_j 为支柱等效电感, 取值 10 μH。

当接触网绝缘水平为 400 kV 时, 绝缘子闪络的雷电流幅值为

$$I_M = u / (R_j + L_j / \tau_1) \quad (14)$$

求得 $I_M=38$ kA。

雷击超过接触网支柱的绝缘水平时, 造成绝缘子闪络, 则绝缘子闪络的次数 n_1 为

$$n_1 = k \times w \times 10^{-\frac{I_M}{108}} \quad (15)$$

式中 k 取 0.5^[25]。

雷击绝缘子时产生的雷击过电压 $u(t)$ 为

$$u(t) = \frac{z_0 z}{2z_0 + z} i(t) \quad (16)$$

式中: z_0 为雷电流波阻抗, 取 500 Ω; z 为接触网的实际波阻抗, 取 432.8 Ω; 由于雷电流在接触网上双侧传播, 因此雷击点输入波阻抗 z 为 216.4 Ω。

雷击接触线绝缘子上产生的雷电流幅值为

$$I_N = u(2z_0 + z) / (z_0 z) \quad (17)$$

求得 $I_N=4.49$ kA。

雷击接触线时绝缘子闪络的次数 n_2 为

$$n_2 = k \times w \times 10^{-\frac{I_N}{108}} \quad (18)$$

综上, 直击雷计算模型如图 9。

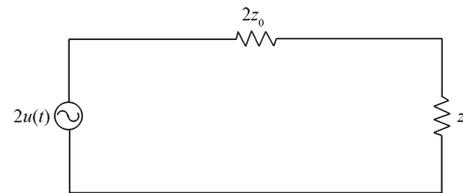


图 9 直击雷计算模型

Fig. 9 Direct lightning calculation model

2.3 接触网直击雷跳闸次数

当雷击过电压超过接触网的绝缘水平时, 造成绝缘子闪络, 引起牵引系统雷击跳闸。在工频电压下, 绝缘子冲击闪络在非过零点会发展成稳定的电弧, 引起牵引系统短路故障, 在过零点不产生电弧, 因此产生电弧具有随机性^[26]。绝缘子的平均运行电位梯度 E 为

$$E = U_s / L_1 \quad (19)$$

式中: U_s 为牵引系统额定电压, 取 27.5 kV; L_1 为绝缘子的爬电距离, 取 1.2 m。

可求得 $E=22.91$ kV/m。

冲击网络的建弧率 η 为

$$\eta = (4.5E^{0.75} - 14) \times 100\% \quad (20)$$

求得 $\eta=33.12\%$ 。

直击雷雷击跳闸次数 n 为

$$n = \eta(n_1 + n_2) \quad (21)$$

求得 $n=6.73\eta\gamma TLh$ 。

根据电力部门统计数据, 直击雷落雷密度 γ 取 0.018, 接触网承力索距轨面平均高度 h 为 7.8 m, 年平均雷暴日数 T 取 40 d, 接触网长度 L 取 100 km。求得每年 100 km 直击雷雷击跳闸次数为 $n=1.25$ 。通过雷击跳闸次数可以看出, 雷击跳闸主要由感应雷为主, 但是由于直击雷的强度更大, 因此对于直击雷的防护尤为重要。

3 高架桥区段接触网雷击过电压抑制措施

3.1 外串联间隙型避雷器

3.1.1 ESGA 结构

外串联间隙型避雷器 (ESGA) 由避雷器本体 (series variistor unit, SVU) 与避雷器放电间隙 (arrester discharge gap, ADG) 串联组成。ADG 根据结构不同分为环形放电间隙和穿刺型放电间隙。环形放电间隙一端与避雷器本体高压侧连接, 另一侧与高压电缆连接, 共同构成环形放电结构^[27]。本文采用环形 ESGA, 其结构如图 10。

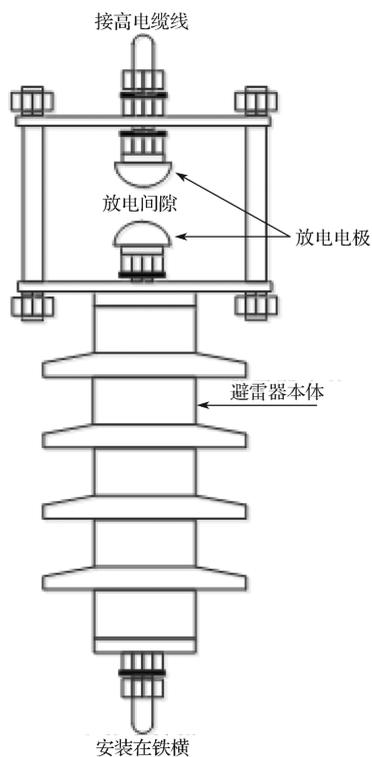


图 10 环形 ESGA 结构图

Fig. 10 Annular ESGA structure diagram

3.1.2 ESGA 工作原理

牵引系统正常工作时, 系统的工频电压由 ADG 承担, SVU 不承受工频电压, 此时避雷器处于不动作状态。当遭受雷击时, 避雷器进行动作, 保证接触网绝缘子不发生闪络及避免发生雷击跳闸^[28]。当过电

压降低至安全电压以下时, 放电间隙恢复断开状态。

3.1.3 ESGA 参数选型

ESGA 的参数选择包括 SVU 和 ADG 两部分参数。SVU 参数选择要满足与 ADG 以及绝缘子的配合度, 保证对雷击过电压有良好的放电特性。ADG 参数选择要保证放电间隙距离小于绝缘子的干弧距离, 同时满足在工频电压及操作过电压时不被击穿放电。牵引系统遭受雷击时, ADG 能迅速被击穿, 与 SVU 配合将雷击过电压降低至安全范围以下^[29]。ESGA 的主要电气参数如表 5 所示。

表 5 ESGA 主要电气参数

Table 5 Main electrical parameters of ESGA

电 气 参 数	取 值
适用系统标称电压 /kV	35
SVU 额定电压 /kV	42
SVU 标称放电电流 /kA	5
20 μ s/350 μ s 大电流冲击耐受电流 /kA	100
工频放电电压 /kV	70
公称爬电比距 / (cm·kV ⁻¹)	3.1
串联间隙距离 /mm	220 \pm 5
雷电冲击放电电压 /kV	\leq 525
2 ms 方波冲击耐受电流 /kA	400
SVU 直流 1 mA 参考电压 /kV	\leq 30
雷电冲击电流残压 /kV	\leq 30
陡坡冲击电流残压 /kV	\leq 50

3.2 ESGA 雷电冲击放电性能及耐雷击水平

当接触网遭受直击雷时, MOA 内阀板老化现象严重, 有可能造成击穿损坏。由于 ESGA 存在放电间隙, 避雷器本体在接触网正常工作时不承受工频电压, 因此 ESGA 不存在因工频电压作用提前老化的问题^[30]。通过 Matlab 平台建立高架桥区段接触网遭受直击雷的仿真电路, 对 ESGA 和 MOA 的放电特性进行仿真试验。雷电冲击仿真电路如图 11。

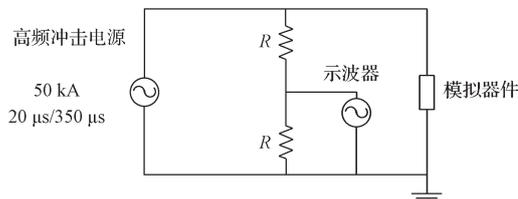


图 11 雷电冲击仿真电路

Fig. 11 Lightning impact simulation circuit

当接触网遭受直击雷时, ESGA 的放电间隙被击穿, 所有的雷电冲击放电路径都集中在串联间隙上, 而 MOA 的雷电冲击放电路径都在避雷器本体上, 雷电冲击放电特性曲线如图 12 所示。通过图 12 可以看出, MOA 的放电电压峰值为 480 kV, ESGA 的放电电压峰值为 400 kV, ESGA 比 MOA 的放电电压峰值低 16.7%。ESGA 从峰值 400 kV 降低至 30 kV 以下

的放电时间为 7 μs ，而 MOA 的放电时间为 18 μs 。通过对比 ESGA 和 MOA 的放电电压峰值和放电时间，说明 ESGA 的放电特性比 MOA 更强。

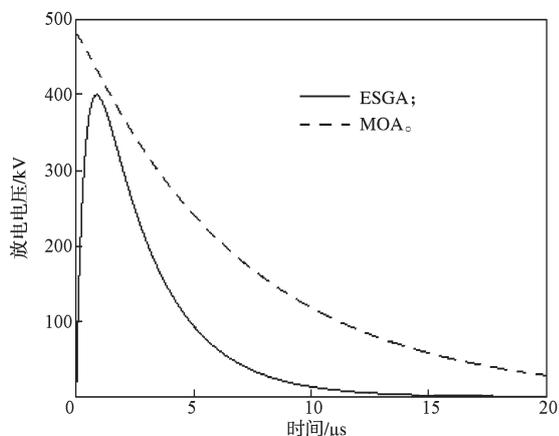


图 12 雷电冲击放电特性曲线

Fig. 12 Lightning impulse discharge characteristic curves

分析直击雷过电压时，一般考虑雷击接触线和支架这两种情况，得出接触网整体的耐雷水平。针对此问题，提出了 4 种配置方案进行对比，配置方案及接触网的耐雷水平分别如表 6 和表 7 所示。

表 6 安装避雷器的配置方案

Table 6 Four configuration schemes for installing lightning arresters

方案	避雷器安装方式
方案 1	全线安装 MOA
方案 2	全线安装 ESGA
方案 3	每 2 个支架安装 1 组 ESGA
方案 4	每 4 个支架安装 1 组 ESGA

表 7 4 种配置方案下接触网的耐雷水平

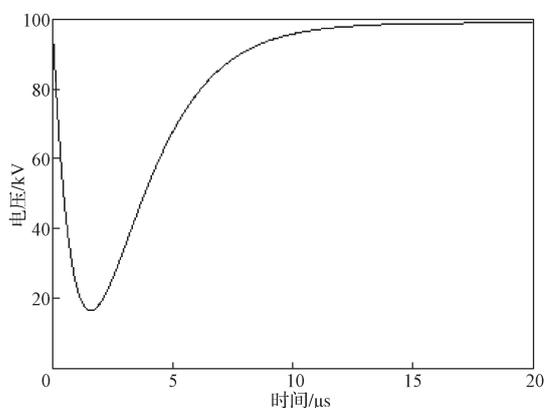
Table 7 Lightning resistance level of OCS under four configuration schemes

方案	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
接触网的耐雷水平 /kA	97.8	148.0	102.4	85.3

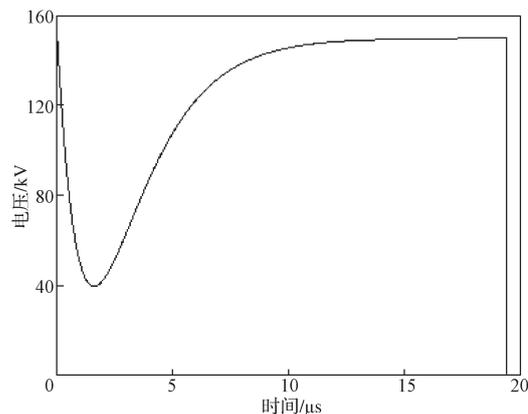
通过表 7 的数据可以看出，全线安装 ESGA 比 MOA 的耐雷水平要高，并且随着 ESGA 安装密度的减少，接触网的耐雷水平将大幅度下降。

图 13 为雷电流未达到耐雷水平和超过耐雷水平时 ESGA 两端的电压变化曲线。由图 13a 可知，雷电流幅值低于接触网的耐雷水平时，雷电流被泄放至大地，绝缘子不会发生闪络。通过图 13b 可以看出，当雷电流超过耐雷水平时，避雷器本体被击穿，引发绝缘子闪络，接触网电压瞬间降至 0。方案 4 中，由于相邻支架都未安装避雷器，雷电流可能由此进入牵引系统，引发绝缘子闪络，导致安全事故。所以方案

4 在实际应用中不可取。全线安装 ESGA 的耐雷水平为 148.0 kA，而全线安装 MOA 的耐雷水平为 97.8 kA，因此在选择避雷器的配置方案时选择全线安装 ESGA 的方式。全线安装 ESGA 与全线安装 MOA 的耐雷水平如图 14 所示。



a) 雷电流未达到耐雷水平



b) 雷电流超过耐雷水平

图 13 不同雷电流 FESGA 两端的电压变化曲线

Fig. 13 Voltage variation curves at both ends of FESGA with different lightning current

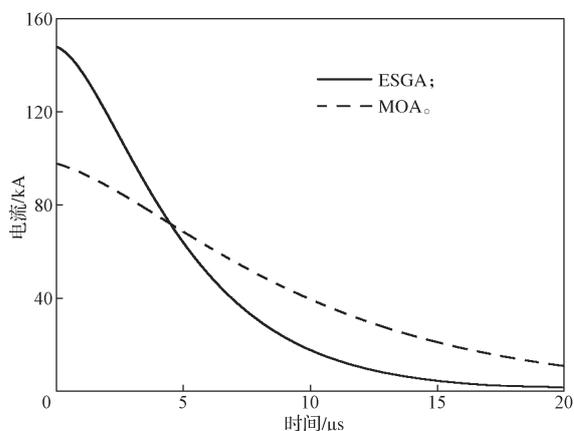


图 14 MOA 和 ESGA 的耐雷水平曲线

Fig. 14 MOA and ESGA lightning resistance level curves

3.3 ESGA 雷击跳闸率

雷击跳闸率与避雷器的装配距离有关，通过

式(21)的计算结果可以得出, ESGA 装配距离为 50 m 时雷击跳闸率为 1.25 次/(100 km·a), 而 MOA 的雷击跳闸率为 3.84 次/(100 km·a), 雷击跳闸率降低了 67.45%。装配距离越大, 雷击跳闸率随之增加。实际应用中, 应根据当地的雷击水平选择合适的装配距离。不同配置距离的雷击跳闸率见表 8, MOA 和 ESGA 雷击跳闸率变化曲线如图 15 所示。

表 8 不同配置距离的雷击跳闸率

Table 8 Lightning trip rate of different configuration distances
次/(100 km·a)

配置距离/m	MOA	ESGA	配置距离/m	MOA	ESGA
50	3.84	1.25	300	6.92	3.62
100	4.52	1.61	350	7.58	4.07
150	5.13	2.03	400	8.17	4.53
200	5.76	2.54	450	9.07	5.10
250	6.31	3.05	500	9.89	5.52

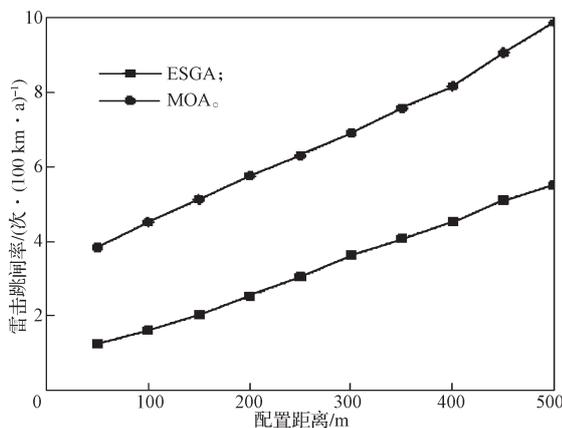


图 15 MOA 和 ESGA 雷击跳闸率变化曲线

Fig. 15 Change curves of MOA and ESGA lightning trip rate

4 结论

本文主要完成了高架桥区段接触网遭受直击雷的仿真, 通过对比分析 MOA 和 ESGA 的放电特性和耐雷水平及雷击跳闸率, 得出以下结论:

1) 高架桥区段接触网上产生的雷击过电压的幅值高达 400 kV, ESGA 将过电压的值降低至 30 kV 以下耗时 7 μ s, 而传统氧化锌避雷器耗时 18 μ s, 说明 ESGA 的放电特性更强。

2) 当接触网全线安装 ESGA 时, 接触网的耐雷水平达到 148 kA, 而 MOA 的耐雷水平为 97.8 kA, 说明全线安装 ESGA 耐雷水平更高。

3) 采用 ESGA 时雷击跳闸率为 1.25 次/(100 km·a), 而 MOA 的雷击跳闸率高达 3.84 次/(100 km·a), ESGA 的雷击跳闸率约减少了 67.45%, 说明 ESGA 雷击跳闸率更低。

参考文献:

- [1] 宋阳阳. 京广高铁许昌东—武汉段接触网系统防雷优化措施探讨 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2017.
SONG Yangyang. The Discussion About the Lightning Protection Measures About Catenary System of the Beijing-Guangzhou High-Speed from Xuchang Dong to Wuhan Section[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2017.
- [2] 王思华, 杨 玉, 赵 峰. 高速铁路牵引网的直击雷跳闸率计算 [J]. 铁道学报, 2017, 39(10): 68-75.
WANG Sihua, YANG Yu, ZHAO Feng. Calculation of Trip Rate of High-Speed Railway Traction Network Caused by Direct Lightning[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(10): 68-75.
- [3] 郑学贤. 高速铁路接触网 ATP 建模及防雷保护研究 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2013.
ZHENG Xuexian. The High-Speed Railway Catenary ATP Model and Lightning Protection[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2013.
- [4] 祁沛晗, 蔡汉生, 廖民传, 等. 计及架空地线的配电网雷电感过电压模型及应用 [J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2413-2419.
QI Ruihan, CAI Hansheng, LIAO Minchuan, et al. Lightning Induced Over-Voltage Model and Application in Distribution Lines with Overhead Ground Wires[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2413-2419.
- [5] QI R H, DU Y P, CHEN M L. Time-Domain PEEC Transient Analysis for a Wire Structure Above the Perfectly Conducting Ground with the Incident Field from a Distant Lightning Channel[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(5): 1787-1795.
- [6] 张金波, 彭晓宇, 王 磊, 等. 复杂地形下架空线雷电感过电压特性仿真研究 [J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3708-3714.
ZHANG Jinbo, PENG Xiaoyu, WANG Lei, et al. Simulation Study of Lightning Induced Voltages Characteristics on Overhead Lines over Complex Mountainous Terrain[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3708-3714.
- [7] 万 帅, 曹 伟, 陈家宏, 等. 银东线雷电防护线路避雷器开发与应用 [J]. 高电压技术, 2018, 44(5): 1612-1618.
WAN Shuai, CAO Wei, CHEN Jiahong, et al. Development and Application of Lightning Protection Line Arrester for Yindong Line[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1612-1618.
- [8] LI D S, RUBINSTEIN M, RACHIDI F, et al. Location Accuracy Evaluation of ToA-Based Lightning Location Systems over Mountainous Terrain[J]. Journal of

- Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(21): 11760–11775.
- [9] 苏冬冬, 刘志刚, 黄可. 高架桥区段牵引网综合接地系统的建模研究[J]. 电气化铁道, 2020, 31(5): 15–21.
SU Dongdong, LIU Zhigang, HUANG Ke. Research on Modeling Scheme for Integrated Earthing of Traction Network in Viaduct Sections[J]. Electric Railway, 2020, 31(5): 15–21.
- [10] 曹保江, 陈力生, 李瑞芳, 等. 基于分形理论的高速铁路高架桥接触网系统雷击率分布研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(1): 77–84.
CAO Baojiang, CHEN Lisheng, LI Ruifang, et al. Study on Distribution of Lightning Stroke Rate for Lightning Striking to Catenary System with Viaduct of High-Speed Railway Based on Fractal Theory[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(1): 77–84.
- [11] 张桂南, 刘志刚, 郭晓旭, 等. 高速铁路隧道及高架桥路段牵引网建模与分析[J]. 铁道学报, 2015, 37(11): 16–24.
ZHANG Guinan, LIU Zhigang, GUO Xiaoxu, et al. Modeling and Analysis of Traction Network of High-Speed Railway Tunnel/Viaduct Sections[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(11): 16–24.
- [12] 林卫. 淮朔铁路接触网耐雷水平分析及加装避雷线方案研究[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(4): 90–93.
LIN Wei. Analysis of Lightning Resisting Level and the Research on Installation of Lightning Conductor for Zhungeer-Shuozhou Railway OCS[J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(4): 90–93.
- [13] 孙晓东, 曹晓斌, 李瑞芳. 地铁高架桥段接触轨线路雷击闪络特性研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 135–141.
SUN Xiaodong, CAO Xiaobin, LI Ruifang. Research on Lightning Flashover Characteristics of Metro Contact Rail Line along Viaduct Section[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 135–141.
- [14] 尧新亮, 柯坚. 基于YOLOv3和ECO算法的电气化铁路接触网绝缘子的检测与跟踪[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(9): 154–160.
YAO Xinliang, KE Jian. Detection and Tracking of Insulators of Electrified Railway Catenary Based on YOLOv3 and ECO Algorithm[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(9): 154–160.
- [15] 孙晓东, 李瑞芳, 曹晓斌, 等. 金属氧化物避雷器对地铁高架桥段接触轨线路防雷的影响[J]. 高压电器, 2019, 55(3): 127–133.
SUN Xiaodong, LI Ruifang, CAO Xiaobin, et al. Influence of MOA on Lightning Protection of Contact Rail of Metro Viaduct Section[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3): 127–133.
- [16] 杨雪. 高架桥对接触网系统及其附近地面雷击特性的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
YANG Xue. Research on Influence of Viaduct on Lightning Strike Characteristics of Catenary System and Its Near-Ground[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [17] 邓云川. 综合接地系统钢轨电位及电流分布的分析[J]. 铁道标准设计, 2009, 53(S1): 153–156.
DENG Yunchuan. Analysis of Rail Potential and Current Distribution in Comprehensive Grounding System[J]. Railway Standard Design, 2009, 53(S1): 153–156.
- [18] 李群湛, 贺建闽. 牵引供电系统分析[M]. 2版. 成都: 西南交通大学出版社, 2010: 50–58.
LI Qunzhan, HE Jianmin. Analysis of Traction Power Supply System[M]. 2nd ed. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2010: 50–58.
- [19] WEI X K, MENG H F, HE J H, et al. Wear Analysis and Prediction of Rigid Catenary Contact Wire and Pantograph Strip for Railway System[J]. Wear, 2020, 442/443: 203118.
- [20] 边凯, 陈维江, 沈海滨, 等. 高速铁路牵引供电接触网用带间隙避雷器的研制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 200–209.
BIAN Kai, CHEN Weijiang, SHEN Haibin, et al. Development of Metal Oxide Surge Arrester with Series Gap for Traction Power Supply System Catenary of High-Speed Electrified Railway[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 200–209.
- [21] 李佳枫. 牵引变电所接地网仿真计算及性能分析研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
LI Jiafeng. Research on Simulation Calculation and Performance Analysis of Grounding Network of Traction Substation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [22] 侯显洪. 牵引供电系统雷击过电压分析及防护措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
HOU Xianhong. Analysis of Lightning Overvoltage of Traction Power System and Studying of Insulation Coordination[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [23] TANAKA H, BABA Y, BARBOSA C F, et al. Protective Effect of Shield Wires Against Direct Lightning Flashes to Buried Cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(4): 1628–1635.
- [24] 曹晓斌, 田明明, 李瑞芳, 等. 高速铁路接触网避雷线高度设计方法研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(6): 50–55.
CAO Xiaobin, TIAN Mingming, LI Ruifang, et al. Study on Design Method of Height of Lightning Conductor for High-Speed Railway Catenary[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(6): 50–55.

- [25] 唐静宜, 唐 波, 金广厚, 等. 试验回路参数对污染条件下绝缘子电气特性的影响研究 [J]. 高压电器, 2021, 57(5): 93-100.
TANG Jingyi, TANG Bo, JIN Guanghou, et al. Influence of Test Circuit Parameters on Electrical Characteristic of Insulators at Contamination Condition[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(5): 93-100.
- [26] 刘 靖. 牵引网雷击跳闸研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
LIU Jing. Research on the Lightning Outage Rate of Catenary[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [27] 邵 全, 李 军, 江龙华, 等. 配电线路带外串联间隙避雷器的防雷效果分析 [J]. 电瓷避雷器, 2019(4): 155-160.
SHAO Quan, LI Jun, JIANG Longhua, et al. Analysis on Lightning Protection of Arrester with Series Gap in Distribution Line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(4): 155-160.
- [28] 李华鹏, 张泰玮, 张 英, 等. 一种配电线路串联间隙避雷器应用 [J]. 集成电路应用, 2021, 38(1): 166-167.
LI Huapeng, ZHANG Taiwei, ZHANG Ying, et al. Application of Series Gap Arrester in Distribution Line[J]. Application of IC, 2021, 38(1): 166-167.
- [29] 刘素芳, 亓兆全, 陈 康. 穿刺电极式避雷器在 10 kV 配电线路中的应用研究 [J]. 电瓷避雷器, 2020(3): 140-145.
LIU Sufang, QI Zhaoquan, CHEN Kang. Study on the Application of Puncture Electrode Arrester in 10 kV Distribution Line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(3): 140-145.
- [30] 单翀峰. 城轨用带串联间隙球头避雷器寿命分析 [J]. 电气化铁道, 2016, 27(2): 37-39.
SHAN Chonghao. Analysis of Service Life of Ball End Lightning Arresters with Gaps Connected in Series for Urban Rail Transit[J]. Electric Railway, 2016, 27(2): 37-39.

(责任编辑: 姜利民)



(上接第 14 页)

- 混凝土核心筒结构振动台试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(1): 1-14.
ZHOU Jing, FANG Xiaodan, ZENG Fanliang. Shaking Table Test of Super-High-Rise Concrete-Filled Steel Tube Gravity Column-Concrete Core Tube Structure[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(1): 1-14.
- [5] 马肖彤, 包 超, 张立新, 等. 近场地震下竖向刚度不同的混合结构动力性能分析 [J]. 地震工程学报, 2019, 41(4): 860-865.
MA Xiaotong, BAO Chao, ZHANG Lixin, et al. Dynamic Performance Analysis of Hybrid Structures with Different Vertical Stiffnesses Under Near-Field Earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4): 860-865.
- [6] 补国斌, 周 靖, 王菁菁. 速度脉冲地震和结构偏心耦合效应对结构影响系数的修正 [J]. 工程力学, 2019, 36(8): 217-225.
BU Guobin, ZHOU Jing, WANG Jingjing. Modification of Structural Influence Factors for the Coupling Effect of Pulse-Like Ground Motion and Structural Eccentricity[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(8): 217-225.
- [7] ZENG F L, HUANG Y S, ZHOU J. Shaking Table Test of a Supertall Building with Hinged Connections Connecting a Gravity Load Resisting System to a Lateral Force Resisting System[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2021. DOI: 10.1080/13467581.2021.1908898.
- [8] 雷 阳, 赵 楠, 魏利金, 等. CANNY 软件在非线性动力弹塑性分析中的应用简介 [J]. 建筑结构, 2012, 42(增刊 2): 224-227.
LEI Yang, ZHAO Nan, WEI Lijin, et al. Application of CANNY Software in the Nonlinear Dynamic Elastoplastic Analysis[J]. Building Structure, 2012, 42(S2): 224-227.
- [9] BRADLEY B A, PETTINGA D, BAKER J W, et al. Guidance on the Utilization of Earthquake-Induced Ground Motion Simulations in Engineering Practice[J]. Earthquake Spectra, 2017, 33(3): 809-835.
- [10] 韩 军, 潘 毅, 杨伯韬, 等. 多层不均匀偏心框架结构扭转地震反应规律 [J]. 土木工程学报, 2013, 46(增刊 1): 69-74.
HAN Jun, PAN Yi, YANG Botao, et al. Rule of Torsional Response of the Multi-Storey Asymmetrical Eccentric Frame Structure Under Earthquake Action[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(S1): 69-74.

(责任编辑: 廖友媛)