

轨道交通指挥中心的雷电电磁屏蔽设计

袁环宇

(北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037)

摘要: 在轨道交通指挥中心的防雷设计中, 雷电电磁屏蔽设计是一个非常重要而又容易被忽略的问题。从工程实际出发, 对产生雷电电磁脉冲的两种情况分别进行分析, 通过计算得出可供设计人员参考、使用的《屏蔽效能计算表》。同时进一步分析了“安全距离”对于屏蔽设计的影响, 进而提出轨道交通指挥中心电磁屏蔽设计的具体解决方案。

关键词: 轨道交通指挥中心; 磁场强度; 屏蔽网格; 分流系数; 安全距离

Design of lightning electromagnetic shielding of the rail transit command center

YUAN Huanyu

(Beijing Urban Construction and Development Group Co., Ltd., Beijing 100037, China)

Abstract: In the lightning protection design of the rail transit command center, the design of lightning electromagnetic shielding is an easily overlooked problem. Based on the engineering practice, two cases of generating lightning electromagnetic pulses are studied, and the “Shielding Effectiveness Calculation Table” which can be used by designers for reference is obtained. Meanwhile, the influence of “safe distance” on the shielding design is further analyzed, and a comprehensive solution for the electromagnetic shielding design of the rail transit command center is proposed.

Key words: rail transit command center; magnetic field intensity; shielding network; shunt coefficient; safe distance

0 引言

轨道交通指挥中心作为轨道交通的管理枢纽, 承担着全市地铁网络的列车运行、客运管理和设备监控等中心级职能, 是城市轨道交通线路名副其实的“龙头”。指挥中心内部含有大量的电子信息设备(例如: 综合监控系统、自动售检票系统、通信系统和信号系统等), 这些设备的特点是耐电压等级低、防干扰要求高, 一旦遭受雷电电磁脉冲影响而产生故障, 影响将是巨大的。因此对于轨道交通指挥中心建筑而言, 除常规的直击雷防护外, 还应进行雷电电磁脉冲的防

护设计。目前类似工程的防雷设计, 仅考虑了直击雷防护, 从防雷击电磁屏蔽的角度而言存在诸多安全隐患, 例如: 未考虑屏蔽网格的设计、设备机房位置不合理等。本文将针对上述问题, 结合具体工程进行相应分析, 提出合理的防护措施以及解决方案, 以利于指挥中心防雷设计的进一步完善。

1 分析计算

评价屏蔽效果的主要参数是建筑物内部的磁场强度, 雷电电磁脉冲在建筑物内部产生的磁场

强度主要分为两种情况：一种是雷击建筑物以外空间某点，雷电以电磁脉冲辐射的形式传导能量；另一种是雷电直接击中建筑物，雷电流沿建筑物表面导体流入大地，建筑物内部相应地产生感应电磁场^[1]。为减小内部电磁场强度，可应用法拉第笼原理，采用金属屏蔽网格对建筑物进行防护：针对第一种情况，电磁脉冲经过屏蔽网格后产生衰减；对第二种情况而言，幅值较大的雷电流经过屏蔽网格的分流、均流后入地，使内部的电磁场强度互相抵消、削弱^[2]。以下就上述两种情况分别进行分析、计算。

1.1 闪电击于建筑物以外空间某点

对于雷击建筑物以外空间某点的情况（可能的情况是雷击附近的构筑物以及旗杆、高大树木等），本建筑物内部的磁场强度主要与屏蔽网格的导体截面积以及网格宽度有关^[1]示意图如图1所示。以下将通过分析计算，得出不同雷击情况下建筑物内部的屏蔽效能计算表（为减小篇幅，图集表格中仅计算网格宽度为0.4 m、1 m、5 m和8 m四种典型尺寸以及导体半径为0.01 m的情况），以供设计技术人员根据工程具体情况参考、使用。

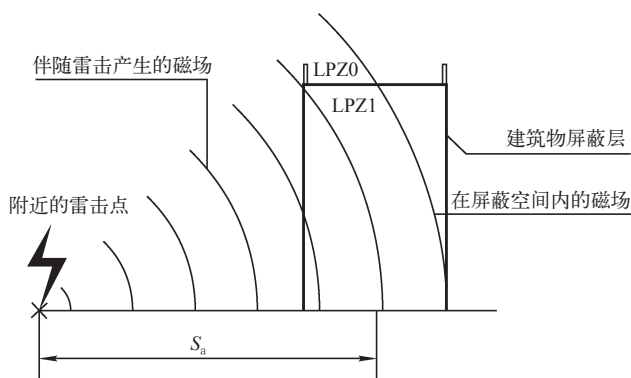


图1 雷击建筑物外部空间某点

Fig. 1 Lightning strikes a point in the exterior space of the building

屏蔽空间中心处无衰减磁场强度计算公式为

$$H_0 = i_0 / 2 \pi S_a \quad (1)$$

式中， H_0 为无屏蔽时产生的屏蔽空间中心处无衰减磁场强度，A/m； S_a 为从雷击点到屏蔽空间中心的距离，m； i_0 为最大雷电流，A。

i_0 的取值如表1所示。

表1 不同建筑物类别对应的最大雷电流

Tab. 1 Maximum lightning current corresponding to different types of building

建筑物防雷类别	最大雷电流 /A		
	正极性首次雷击	负极性首次雷击	负极性后续雷击
第一类	200	100	50
第二类	150	75	37.5
第三类	100	50	25

注：轨道交通地面建筑一般达不到一类防雷建筑物的等级，因此可不必进行一类防雷建筑物的计算，只根据其年预计雷击次数进行二、三类防雷建筑物的计算即可。

建筑物屏蔽层内的磁场强度计算公式为

$$H_1 = H_0 / 10^{SF/20} \quad (2)$$

式中， H_1 为建筑物屏蔽层内的磁场强度，A/m；SF为屏蔽系数，dB。

根据《建筑物防雷设计规范》，屏蔽系数取值如表2所示。

表2 格栅型空间屏蔽对平面磁场的衰减

Tab. 2 Attenuation of planar magnetic field by grille type space shield

材质	SF/dB	
	25 kHz ^①	1 MHz ^②
铜材或铝材	$20 \times \lg(8.5/w)$	$20 \times \lg(8.5/w)$
钢材 ^③	$20 \times \lg[(8.5/w) / \sqrt{1 + 18 \times 10^{-6} / r^2}]$	$20 \times \lg(8.5/w)$

注：①适用于首次雷击的磁场。

②适用于后续雷击的磁场。

③磁导率为200。

公式计算为负数时，SF=0；若建筑物安装有网状等电位连接网格时，SF增加6 dB。表2中， w 为格栅型空间屏蔽网格宽度，m，实际工程中可取^[3]： $w = (a \times b \times c)^{1/3}$ ， a 、 b 和 c 分别为屏蔽网格的立面宽度、立面高度和屋面最大宽度； r 为格栅型屏蔽杆的半径，m。

屏蔽效能公式中主要参数的含义如图2所示。

由于首次正极性雷击的电流幅值是首次负极性雷击的两倍^[4]，因此在实际应用中，可只计算首次正极性雷击以及负极性后续雷击即可。同时在实际应用中，考虑使用建筑物本身的结构钢筋以及玻璃幕墙等外装饰物的钢龙骨作为格栅形屏蔽网，因此从工程实际角度出发，本文中的相关计算参数均以指挥中心的钢筋作为基础材料。屏

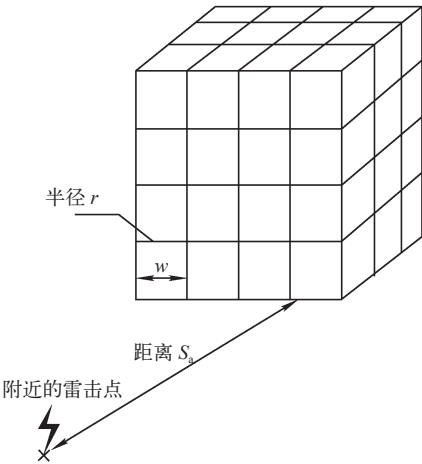


图2 屏蔽效能公式中主要参数的含义
Fig. 2 Meaning of the main parameters in the shielding effectiveness formula

屏蔽效能计算如表3所示。

从表3中可以看出，雷击建筑物以外空间某点时，首次正极性雷击的磁场强度远大于后续负极性雷击的磁场强度；建筑物内的屏蔽效果随着网格宽度的增大而减弱，同时与建筑物距雷击点距离成反比例关系。为了能够进一步直观地说明问题，有利于工程设计的实施，将磁场强度与距离的关系表示于图3中(图3中示出了1 m、5 m和8 m三种网格对应于首次正极性雷击的情况)。

由图3可以得出以下初步结论。

1) 相对于无屏蔽的情况，设置宽度为8 m、5 m和1 m的屏蔽网格对于建筑物内部雷电电磁场均有显著的削弱作用，且削弱效果随着网格宽度的减

表3 屏蔽效能计算（雷击建筑物附近）

Tab. 3 Shielding effectiveness calculation table (near lightning strike buildings)

S_0/m	屏蔽尺寸		首次雷击 ($f=25\text{ kHz}$, $I=150\text{ kA}$)			后续雷击 ($f=1\text{ MHz}$, $I=37.5\text{ kA}$)		
	网格宽度 w/m	导体半径 r/m	无屏蔽 $H_0/(\text{A/m})$	有屏蔽 $H_1/(\text{A/m})$	SF/dB	无屏蔽 $H_0/(\text{A/m})$	有屏蔽 $H_1/(\text{A/m})$	SF/dB
10	0.4	0.01	2 388.5	61.4	31.8	597.1	14.2	32.5
	1	0.01		152.4	23.9		35.2	24.6
	5	0.01		764.9	9.8		176.2	10.6
	8	0.01		1 197.1	6		282.5	6.5
20	0.4	0.01	1 194.3	30.7	31.8	298.6	7.1	32.5
	1	0.01		76.2	23.9		17.6	24.6
	5	0.01		382.5	9.8		88.1	10.6
	8	0.01		598.6	6		141.3	6.5
30	0.4	0.01	796.2	20.5	31.8	199.1	4.7	32.5
	1	0.01		50.8	23.9		11.7	24.6
	5	0.01		255.0	9.8		58.7	10.6
	8	0.01		399.0	6		94.2	6.5
40	0.4	0.01	597.1	15.4	31.8	149.3	3.6	32.5
	1	0.01		38.1	23.9		8.8	24.6
	5	0.01		191.2	9.8		44.1	10.6
	8	0.01		299.3	6		70.6	6.5
50	0.4	0.01	477.7	12.3	31.8	119.5	2.8	32.5
	1	0.01		30.5	23.9		7.1	24.6
	5	0.01		153.0	9.8		35.3	10.6
	8	0.01		239.4	6		56.5	6.5
60	0.4	0.01	398.1	10.2	31.8	99.5	2.4	32.5
	1	0.01		25.4	23.9		5.9	24.6
	5	0.01		127.5	9.8		29.4	10.6
	8	0.01		199.5	6		47.1	6.5
70	0.4	0.01	341.2	8.8	31.8	85.3	2.0	32.5
	1	0.01		21.8	23.9		5.0	24.6
	5	0.01		109.3	9.8		25.2	10.6
	8	0.01		171.0	6		40.4	6.5
80	0.4	0.01	298.6	7.7	31.8	74.6	1.8	32.5
	1	0.01		19.1	23.9		4.4	24.6
	5	0.01		95.6	9.8		22.0	10.6
	8	0.01		149.6	6		35.3	6.5

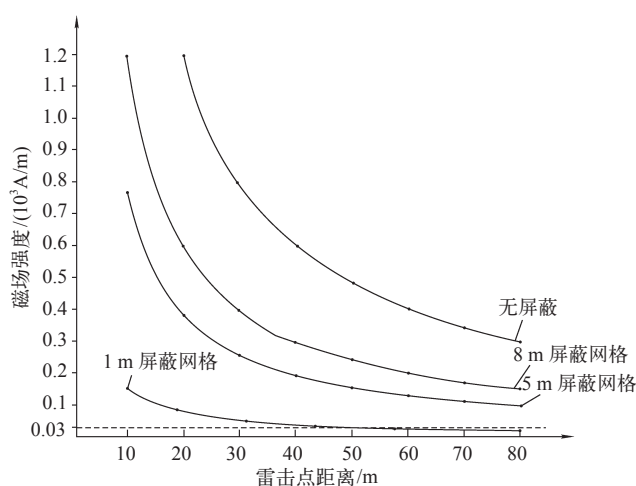


图3 磁场强度与雷击点距离关系图

Fig. 3 Relationship between magnetic field intensity and lightning strike distance

小而增强。

2) 按电子设备机房内部空间电磁场强度不应大于 $30 \text{ A/m}^{[5]}$ 计算,需同时满足两个条件:一是雷击点距离建筑物大于 50 m ;二是屏蔽网格宽度不大于 1 m 。

3) 在具体设计时,应对轨道交通指挥中心附近构筑物的雷击情况进行分析,如 50 m 以内的构筑物存在直击雷风险,则需进一步减小屏蔽网格的宽度。

1.2 闪电直接击在位于LPZ0区的格栅屏蔽时

对于雷击本建筑物的情况(可能情况是雷电击中建筑物顶部的接闪器、接闪带等避雷装置),屏蔽网格对雷电流具有分流、均流作用^[2],因此磁场强度主要与防雷引下线的数量以及电子信息设备所在楼层有关,应根据工程具体情况,通过图表以及计算后予以确定。闪电直接击中建筑物的接闪器的情况如图4所示。

屏蔽空间内某点的磁场强度的计算公式为

$$H_1 = k_H i_0 \omega / (d_w \sqrt{d_r}) \quad (3)$$

式中, H_1 为屏蔽空间内某点的磁场强度; d_r 为所确定的点距LPZ1区顶部的最短距离; d_w 为所确定的点距LPZ1区侧壁的最短距离; k_H 为形状系数,根据相关规范,可取 0.01 ; i_0 的取值见表1。

同样,在实际应用中,由于首次正极性雷击的电流幅值是首次负极性雷击的两倍,因此

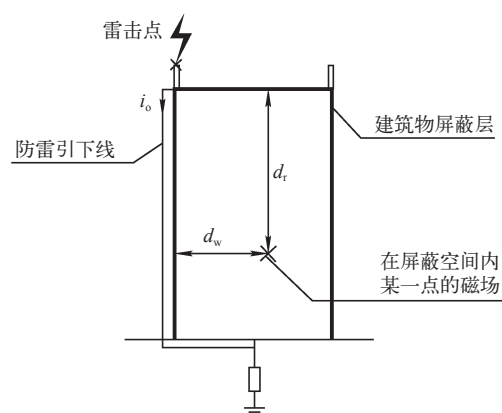


图4 闪电直接击中建筑物的接闪器

Fig. 4 Lightning directly strikes the building's lightning arrester

对于雷击建筑物的情况,可只计算首次正极性雷击即可。

实际工程应用中在采用式(3)时注意还应考虑分流系数的影响,对于单层或多层建筑物,分流系数可取 0.44 ,对于高层建筑物,需要进行屏蔽的空间位于不同层时,分流系数需按图5确定^[7]。

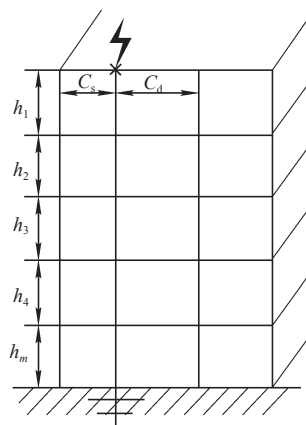
图5 分流系数的计算(换为 $n=10$ 的图形)Fig. 5 Calculation of the shunt coefficient (changed to the graph of $n=10$)

图5中, $h_1 \sim h_m$ 为连接引下线各环形导体或各层地面金属体之间的距离; C_s 、 C_d 为建筑物顶部雷击点至两侧最近引下线之间的距离,计算式中的 c 取二者较小值, n 为建筑物周边和内部引下线的根数且不小于4根。 c 与 h_1 的取值范围为 $3 \sim 20 \text{ m}$ 。

由上至下各层分流系数依次为

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{c1} = \frac{1}{2n} + 0.1 + 0.2 \times \sqrt[3]{\frac{c}{h_1}} \\ k_{c2} = \frac{1}{n} + 0.1 \\ k_{c3} = \frac{1}{n} + 0.01 \\ k_{c4} = \frac{1}{n} \\ k_{cm} = k_{c4} = \frac{1}{n} \end{array} \right. \quad (4)$$

为了能够较为直观地说明问题, 后续对计算数据进行简化。具体工程数据可根据式(3), 同时考虑分流系数进行计算, 取 $n=10$ 、 20 两种情况, c 分别取为 10 m 、 5 m , 上述两种情况中 h_1 均取为 4.8 m , 计算数据如表4、表5所示。

表4 分流系数的取值(第一种情况 $n=10$, $c=10\text{ m}$)Tab. 4 Values of the shunt coefficient (in the first case, $n=10$, $c=10\text{ m}$)

k_{c1}	k_{c2}	k_{c3}	k_{c4}	k_{cm1}
0.42	0.2	0.11	0.1	0.1

表5 分流系数的取值(第二种情况 $n=20$, $c=5\text{ m}$)Tab. 5 Values of the shunt coefficient (in the second case, $n=20$, $c=5\text{ m}$)

k_{c11}	k_{c22}	k_{c33}	k_{c44}	k_{cm2}
0.33	0.13	0.04	0.03	0.03

本文下述将针对上述两种情况分别计算建筑物内部的磁场强度, 如表6~表8所示。当系数不同时, 可按插入法进行计算。

表6 雷击建筑物屏蔽效能计算(不考虑分流系数, d_w 与 d_r 均为 2.5)Tab. 6 Calculation table for shielding effectiveness of lightning strike buildings (regardless of the shunt coefficient, both d_w and d_r are 2.5)

网格宽度 /m	导体半径 r /m	SF/dB	首次雷击 ($f=25\text{ kHz}$, $I=150\text{ kA}$) 有屏蔽 H_1 /(A/m)
0.4	0.01	31.8	152
1	0.01	23.9	379
5	0.01	9.89	1 897
8	0.01	6	3 036

表7 雷击建筑物屏蔽效能计算表(第一种情况 $n=10$, $c=10\text{ m}$; d_w 与 d_r 均为 2.5)Tab. 7 Calculation table for shielding effectiveness of lightning strike buildings (in the first case, $n=10$, $c=10\text{ m}$; both d_w and d_r are 2.5)

分流系数	网格宽度 /m	导体半径 /m	有屏蔽 H_1 /(A/m)	分流系数	网格宽度 /m	导体半径 /m	有屏蔽 H_1 /(A/m)
0.1	0.4	0.01	15.2	0.11	0.4	0.01	16.7
	1	0.01	37.9		1	0.01	41.7
	5	0.01	189.7		5	0.01	208.7
	8	0.01	303.6		8	0.01	333.9
0.2	0.4	0.01	30.4	0.42	0.4	0.01	63.7
	1	0.01	75.8		1	0.01	159.4
	5	0.01	379.4		5	0.01	796.8
	8	0.01	607.1		8	0.01	1275

注: 本表计算数据针对首次雷击($f=25\text{ kHz}$, $I=150\text{ kA}$)。

表8 雷击建筑物屏蔽效能计算表(第二种情况 $n=20$, $c=5\text{ m}$; d_w 与 d_r 均为 2.5)Tab. 8 Calculation table for shielding effectiveness of lightning strike buildings (in the second case, $n=20$, $c=5\text{ m}$; both d_w and d_r are 2.5)

分流系数	网格宽度 /m	导体半径 /m	有屏蔽 H_1 /(A/m)	分流系数	网格宽度 /m	导体半径 /m	有屏蔽 H_1 /(A/m)
0.03	0.4	0.01	4.5	0.04	0.4	0.01	6
	1	0.01	11.4		1	0.01	15.2
	5	0.01	56.9		5	0.01	75.9
	8	0.01	91.1		8	0.01	121.4
0.13	0.4	0.01	19.7	0.33	0.4	0.01	50.1
	1	0.01	49.3		1	0.01	125.2
	5	0.01	246.6		5	0.01	626.1
	8	0.01	394.6		8	0.01	1001.8

注: 本表计算数据针对首次雷击($f=25\text{ kHz}$, $I=150\text{ kA}$)。

由于篇幅有限, 对应于其他规格导体半径的计算数据不再列出。从表6~表8中可以看出, 屏蔽效果随着网格宽度的减小而增强。为了将建筑物内部的磁场强度减小到 800 A/m 以下, 不大于 5 m 的屏蔽网格是适用的。为了能够更加直观地说明问题, 将雷击电磁场强度与层数的关系表示于图6中(以网格宽度 1 m 为例)。

由图6可以得出以下初步结论。

1) 第二种情况(引下线数量 $n=20$)的屏蔽效果优于第一种情况($n=10$)。由此可见在实际工程中, 为了取得较好的屏蔽效果, 应尽可能地缩小防雷引下线间距, 增加引下线数量。

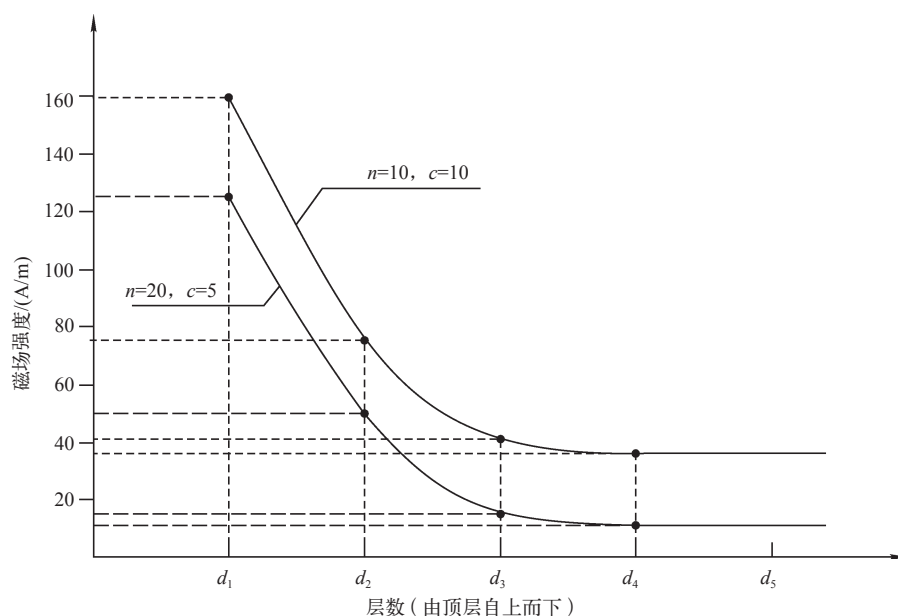


图6 磁场强度与所属楼层关系

Fig. 6 Relationship between magnetic field intensity and the floor

2) 从建筑物的顶层开始, 自上而下的第二层、第三层, 其屏蔽效果逐层明显增强; 而第四层与第三层相比, 其效果不十分明显; 而其余层的屏蔽效果与第四层相同, 不再变化。

1.3 电子信息设备与屏蔽层的距离

根据相关文献, 在建筑物内部, 距离屏蔽网格过近的范围, 其雷击电磁环境较内部一般空间更加恶化^[6]。因此在利用上述表格时需注意, 实际工程中存在着“安全距离”的概念: 即屏蔽效果仅对距离屏蔽层有一定距离的空间内才有效, 在设计中应根据工程实际情况, 使需要保护的电子设备与建筑物的外层屏蔽网格保持一定距离。

当雷击建筑物附近时, 安全距离的计算公式如式(5)、式(6)所示(分别对应 $SF \geq 10$ 与 $SF < 10$ 两种情况)。

当 $SF \geq 10$ 时

$$d_{s11} = w^{SF/10} \quad (5)$$

当 $SF < 10$ 时

$$d_{s12} = w \quad (6)$$

式中, d_{s*} 为安全距离, m; w 为屏蔽网格的宽度, m; SF 为屏蔽系数, dB。

根据式(5)和式(6), 雷击建筑物附近时安全距离的计算数值如表9所示。

表9 安全距离计算(雷击建筑物附近)

Tab. 9 Safety distance calculation table(near lighting strike buildings)

屏蔽尺寸		首次雷击 ($f=25$ kHz, $I=150$ kA)		后续雷击 ($f=1$ MHz, $I=37.5$ kA)	
网格宽度 w/m	导体半径 r/m	SF/dB	安全距离/m	SF/dB	安全距离/m
0.4	0.01	31.8	0.05	32.5	0.23
1	0.01	23.9	1	24.6	1
5	0.01	9.8	5	10.6	2.35
8	0.01	6	8	6.5	8

当雷电直接击在建筑物上, 安全距离的计算公式如式(7)、式(8)所示(分别对应 $SF \geq 10$ 与 $SF < 10$ 两种情况)。

当 $SF \geq 10$ 时

$$d_{s21} = w(SF/10) \quad (7)$$

当 $SF < 10$ 时

$$d_{s22} = w \quad (8)$$

根据式(7)和式(8), 雷击建筑物时安全距离的计算数值如表10所示。

根据表9、表10可以看出, 安全距离随着屏蔽网格宽度的减小而缩短, 当网格宽度达到1 m时, 安全距离(可近似认为是电子设备与建筑物外墙的间距)不小于2.39 m。如通信、信号和自动售检票系统等设备机房在地面以上靠外墙设置, 则

表10 安全距离计算(雷击建筑物)

Tab. 10 Safety distance calculation table(lightning strike buildings)

屏蔽尺寸		首次雷击 ($f=25\text{ kHz}$, 后续雷击 ($f=1\text{ MHz}$, $I=150\text{ kA}$) $I=37.5\text{ kA}$)			
网格宽度 w/m	导体半径 r/m	SF/dB	安全距离 /m	SF/dB	安全距离 /m
0.4	0.01	31.8	1.27	32.5	1.3
1	0.01	23.9	2.39	24.6	2.46
5	0.01	9.8	5	10.6	5.3
8	0.01	6	8	6.5	8

设备距离外墙不宜小于上述数值,而这也将意味着建筑面积的部分浪费。因此对于此类机房,合理的布局方案是将其置于远离外墙的区域,以确保上述安全距离的要求。

2 结束语

通过上述的分析可知,在实际工程中,对于轨道交通指挥中心建筑,应在常规防雷设计的基础上,增加电磁屏蔽设计内容。

在建筑空间布局上,对于电子设备房间(例如:各条地铁线路的通信、信号系统机房、自动售检票系统机房和综合控制大厅等),不宜将其设于建筑物的顶层,较为理想的部位应位于自上而下的第三层及以下各层;同时从安全距离的角度考虑,上述机房宜位于建筑物核心筒周边区域(此时恰好将建筑物周围带外窗的房间作为办公用房)。

在满足关于“建筑空间布局”要求的前提下,“安全距离”不再是问题。如部分房间无法满足“建筑空间布局”的要求(例如控制大厅由于跨距大等原因往往设于顶层),则需要参考前述计算表中所列数据,确定合理的屏蔽网格宽度。根据前述,此网格宽度不宜大于1 m。

引下线数量越多,建筑物内的磁场分布越均匀,电磁屏蔽效果越好。轨道交通指挥中心一般均为高层建筑物,按二类防雷建筑物设防。设计中应在满足规范基本要求的前提下,适当增加引下线数量,且沿四周均匀设置。

参考文献

- [1] 中国机械工业联合会. 建筑物防雷设计规范: GB 50057—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [2] 王洪泽, 杨丹. 论法拉第笼的防雷作用及其局限性[J]. 建筑电气, 2005, 24(6): 23-25.
WANG Hongze, YANG Dan. On the lightning protection of Faraday cage and its limitation[J]. Building Electricity, 2005, 24(6): 23-25.
- [3] 问楠臻, 魏映华. 雷电灾害风险评估中两个参数的简单计算方法[J]. 建筑电气, 2013, 32(9): 11-13.
WEN Nanzhen, WEI Yinghua. A simple method for calculating two parameters in lightning disaster risk assessment[J]. Building Electricity, 2013, 32(9): 11-13.
- [4] 张小青. 建筑物内电子设备的防雷保护[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998.
- [5] 中华人民共和国工业和信息化部. 数据中心设计规范: GB50174-2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [5] 沈寰. 雷击条件下建构筑物内部电磁环境的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
SHEN Huan. Research on the electromagnetic environment inside the building under the condition of lightning strike[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2014.

作者简介



袁环宇

袁环宇(1972—),男,高级工程师,主要研究方向为供电系统及防雷接地。

(收稿日期: 2019-02-25) **EA**