

标准雷电波形的频谱分析及其应用

陈绍东 王孝波 李 斌 杨少杰

(广东省防雷中心, 广州 510080)

提 要: 标准雷电波频谱分析可以获悉其电压、电流在不同频段的振幅、能量等分布, 为防雷器件和电子设备的标准波形冲击试验以及基层雷电防护工作提供技术参考。选取常用的 8/20 (μs)、10/350 (μs) 波形、后续雷击 0.25/100 (μs) 波形和国家标准推荐雷电试验波形 (10/200、4/300、1.2/50、10/700 (μs)), 通过连续傅立叶变换计算了不同波形的振幅、能量的频谱变化, 并与自然闪电辐射场的频谱进行了比较。结果表明雷电电流波形的振幅和能量主要集中在低频部分, 振幅频谱主要集中在 1MHz 以下, 能量主要集中在几 kHz 到几百 kHz; 半峰值时间 t_2 是雷电波振幅和能量频谱分布的主要因素, t_2 的大小决定了低频部分的谐波丰富程度。这些结论在雷电防护设计和应用中起到一定的参考作用。

关键词: 标准雷电波 频谱 振幅 能量

Frequency Spectrum of Standard Lightning Currents and Its Application

Chen Shaodong Wang Xiaobo Li Bin Yang Shaojie

(Lightning Protection Centre of Guangdong Province, Guangzhou 510080)

Abstract: The amplitude and energy distributions of the voltage and current in the different frequency bands can be obtained by analyzing the frequency spectrum of standard lightning currents. The general lightning currents of 8/20 (μs) and 10/350 (μs), return stroke of 0.25/100 (μs) and the testing currents recommended by national standardization (10/200 (μs), 4/300 (μs), 1.2/50 (μs), 10/700 (μs)) are selected to compute the frequency

资助项目: 科技部基础条件平台项目 (2004DEA71070) 资助

收稿日期: 2005年11月22日; 修定稿日期: 2006年8月24日

spectrum of amplitude and energy by the use of the continuous Fourier analysis, and they are compared with those of natural lightning radiation field. The results show that the amplitude and energy of lightning currents mainly appear in the range of low frequency, and amplitude frequency is less than 1MHz, but the frequency spectrum of the energy is from several kHz to several hundreds kHz. The half peak value time (t_2) of currents is a crucial factor in the frequency spectrum distribution of amplitude and energy, which determines the abundance of currents' wave in the parts of low frequency. The results should be an important reference in the application and design of lightning protection.

Key Words: standard lightning currents frequency spectrum amplitude energy

引言

人工引发雷电和雷电预警预报技术的不断发展和完善给人类探索闪电提供了更多的科学手段。近 30 年来我国的科研工作者多次在全国各地引雷成功,为雷电物理和大气电学的研究提供了宝贵的试验数据,同时雷电预警预报技术也在不断发展探索,特别是为服务 2008 年北京奥运会做了大量的前期研究工作^[1,2]。雷电流的光谱和频谱研究是雷电物理研究中的一个重要的新课题,但由于自然雷电发生具有很大的随机性,自然雷电流的测量非常困难,而随着人工引发雷电技术的成熟得到了较多的人工引发雷电流的直接测量结果^[3],同时研究结果也揭示出不同地区雷电特征也存在着较大的差异,这对雷电物理研究和雷电防护工作提出了更高的要求。

雷电波频谱特征是雷电防护技术的重要依据。当雷击于各种线路(电力、信号、天馈等线路)或线路附近时,会在线路上发生雷电流侵入,由于大电流或过电压的作用,从而损坏与之相连的各种电子设备。分析雷电波的频谱结构可以获悉雷电波振幅和能量等在各频段的分布,通过这些数据可以估算出通信系统以及电力系统频带范围内雷电冲击波的振幅和能量的大小,进而确定避雷措

施,同时在开发和研究高性能的电子避雷器方面也具有指导意义。在高压技术领域,有学者曾对雷电波的频谱和能量做了分析^[4],对雷电闪击中回击电流波的频谱做过分析^[5],也有建立雷电波数学模型,计算其频谱^[6],这些工作都从不同的角度丰富了雷电流波形的探索和研究。

考虑到闪电发生时辐射场波形变化都源于电流波形的变化,在闪电发生过程中,由于电场、磁场等数据或波形比电流更加容易通过仪器测量获得,因此,关于电磁场、电场辐射的频谱研究相对较多。董万胜,刘欣生等对 25~100MHz 频段闪电脉冲辐射能量频谱特征进行了研究^[7],张其林,郗秀书等对高原雷暴地闪回击辐射场特征进行分析^[8],Sharma S. R 和 M. Fernando 等^[9]利用 23 次正闪回击的实测结果,通过离散傅氏变换,研究了 20MHz 以下的平均电磁场能量谱密度变化情况,Sonadara U 和 V. Cooray 等^[10]同样用傅氏变换,研究了 20kHz~20MHz 云内电场振幅频谱变化的情况,这些研究结果表明:雷电频谱较大部分集中在低频部分,也揭示了不同频段的不同变化规律,这些研究揭示了闪电发生后辐射场频谱的各种特征,对雷电流的频谱研究起到了很好的参考作用。

标准雷电波形在雷电防护设计中有重要的意义,特别是用冲击电流装置实现后,为

防雷器件和电子设备的测试提供了技术平台。为了更好的理解雷电灾害的形成机制，为基层雷电防护工作者提供一些参考依据，本文采用国家标准（GB 50057—94）中的雷电波形作分析。这是一种理想的单次脉冲的雷电波形，尽管与自然界中实际的雷电波形有一定差别，但主要特征是一致的。国内还没有固定的野外雷电试验基地，许多研究者在南方夏季不固定进行了人工引雷试验，陈成品、郟秀书^[2]等对地闪参量的特征进行统计分析中也对雷电流特征进行了分析，这些结果对研究我国实际雷电流的特征都有着重要的意义。

1 雷电波形及其表达式

1.1 雷电波的标准波形

根据国家标准，GB 50057—94《建筑物防雷设计规范》中对雷击参数的定义^[11]，选取相关波形作为文章中的雷电波标准波形。GB 50057—94 中对雷电波的波头时间 t_1 和半峰值时间 t_2 作了以下的规定。即电流峰值 0.9 倍处 E 与 0.1 倍峰值点 F 连一直线， EF 的延长线与电流峰值水平线相交于 P 点，与横坐标交于点 t_0 ，（如图 1 所示），

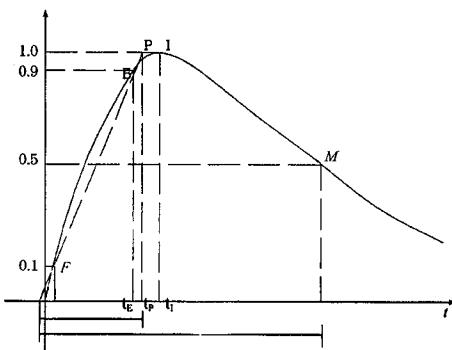


图 1 标准雷电波 t_1 、 t_2 的定义

图中时间间隔 $t_1 = t_p - t_0$ ，称为雷电波波头时间，从 t_0 到波尾一半峰值 M 点之间的时间间隔 $t_2 = t_M - t_0$ 为雷电波半峰值时间。平时我们所说的雷电波波形是用 t_1/t_2 (μs) 来表示。文章采用标准波形 8/20 (μs)、10/350 (μs)、后续雷击 0.25/100 (μs) 和国家标准推荐雷电试验的 4 种波形^[12] (10/200、4/300、1.2/50、10/700 (μs))，共 7 个波形作为研究对象。

1.2 雷电波的双指数函数曲线表达式

大量观测结果表明雷电流随时间近似指数规律上升至峰值，然后又近似指数规律下降，Bruce 和 Godle^[13] 在 1941 年提出了雷电流波形双指数函数，表达式如下：

$$i(t) = I_0 k (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

I_0 ：雷电流峰值（从数 kA 到数百 kA）； i ：雷电流瞬时值； α ：波前衰减系数， β 波尾衰减系数； k ：波形的校正系数。

令

$$I(t) = i(t)/I_0 = k(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2)$$

称式 (2) 为单位峰值雷电流方程。

雷电流双指数函数自从被提出以后，得到了广泛应用，特别是在理论计算和雷电模拟试验中更为常见^[13,14]。

1.3 双指数曲线参数的计算

给出标准波形的 t_1 和 t_2 值后，根据参数的定义及雷电波方程，式 (2) 可得下列方程：

$$k(e^{-\alpha t_F} - e^{-\beta t_F}) = 0.1 \quad (3)$$

$$k(e^{-\alpha t_E} - e^{-\beta t_E}) = 0.9 \quad (4)$$

$$k(e^{-\alpha t_M} - e^{-\beta t_M}) = 0.5 \quad (5)$$

$$t_F = 0.1t_1 - t_0 \quad (6)$$

$$t_E = 0.9t_1 - t_0 \quad (7)$$

$$t_M = t_2 - t_0 \quad (8)$$

方程式中 t_0 为正值，假设在坐标轴原点的左侧。设峰值雷电流所对应的时间为 t_1 ，则

方程式

$$k(e^{-\alpha t_1} - e^{-\beta t_1}) = 1.0 \quad (9)$$

成立，且电流最高点 I 点的斜率为 0，即可得方程：

$$\alpha e^{-\alpha t_1} - \beta e^{-\beta t_1} = 0 \quad (10)$$

把式 (6)、(7)、(8) 分别代入式 (3)、(4)、(5) 后联立式 (9) 和 (10)，可以求得不同的波形 (t_1/t_2 (μs)) 的参数 α 、 β 和 k 值，如下表 1 所示。

表 1 标准波形对应的参数值

雷电波形	α	β	k	$t_0/\mu\text{s}$
8/20(μs)	7.714×10^4	2.489×10^5	2.33	0.682
10/200(μs)	3.914×10^3	2.31×10^5	1.091	1.796
10/350(μs)	2.127×10^3	2.461×10^5	1.051	1.948
1.2/50(μs)	1.473×10^4	2.08×10^6	1.043	0.2397
10/700(μs)	1.028×10^3	2.579×10^5	1.026	2.151
4/300(μs)	2.394×10^3	6.47×10^5	1.025	0.8686
0.25/100(μs)	6.986×10^3	1.085×10^7	1.005	0.0677

从表 1 可以看出，波前系数 α 远小于波尾系数 β ，即波首时间 t_1 主要由衰减系数 β 的快速衰减决定的，而半峰值时间 t_2 主要由系数 α 决定。同样的道理， t_2/t_1 的值越大， β/α 的值越大。

2 雷电波振幅的频谱分析

雷电波可以看成是无穷多个频率连续变化的简谐振动的合成。对式 (2) 进行傅氏变换，得：

$$\begin{aligned} I(i\omega) &= k \int_0^{\infty} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) e^{-i\omega t} dt \\ &= k \left[\left(\frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\beta}{\beta^2 + \omega^2} \right) + i \left(\frac{-\omega}{\alpha^2 + \omega^2} + \frac{\omega}{\beta^2 + \omega^2} \right) \right] \quad (11) \end{aligned}$$

式 (11) 是雷电波频谱的复数形式，其模就是原雷电波函数 $I(t)$ 的振幅频谱。雷电波振幅计算如下：

$$I(\omega) = k(\sqrt{M^2 + N^2}) \quad (12)$$

式中 M 、 N 分别是式 (11) 中对应复函数的实部和虚部，分别表示如下：

$$M = \frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\beta}{\beta^2 + \omega^2}$$

$$N = \frac{-\omega}{\alpha^2 + \omega^2} + \frac{\omega}{\beta^2 + \omega^2}$$

根据式 (12)，选取频率，对应的单位峰值雷电波的振幅如表 2 所示，选取 8/20 (μs)、1.25/50 (μs)、0.25/100 (μs) 和 10/350 (μs) 四个波形，振幅频谱曲线如图 2 所示。由表 2 结合图 2 可以得出以下结论：

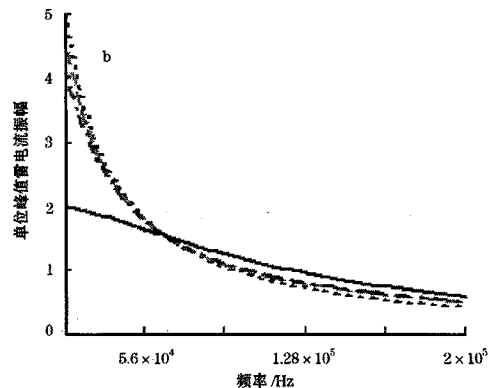
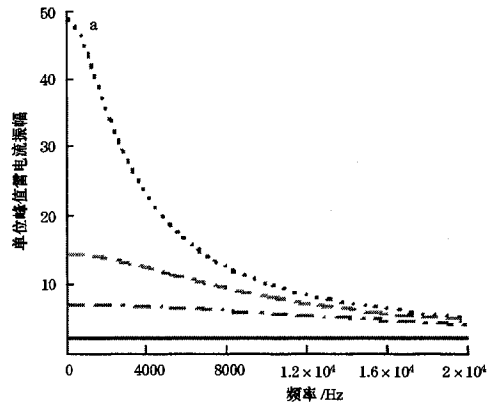


图 2 雷电波振幅的频谱分析图

- a, 低频部分 (频率 0~2kHz);
- b, 高频部分 (2kHz~200kHz)

(8/20-实线、10/350-点线、1.2/50-点划线、0.25/100-虚线，纵坐标为振幅 $\times 10^5$)

(1) 雷电流的振幅随着频率的增加而减小，雷电流的振幅主要集中在低频部分，0~1kHz 的振幅相对较大，且衰减幅度相对较小。

(2) 雷电波的半峰值时间 t_2 越长，低频端的相对振幅越大， t_2 是雷电波振幅频谱

分布的主要因素，如图 2 低频端频谱图所示，10/350 (μs) 在低频端频谱相当丰富。在波前相同的情况下，波尾越长，低频部分越丰富（可以比较 10/200 (μs)、10/350 (μs)、10/700 (μs)）。

表 2 单位峰值雷电波的振幅频谱

频率/Hz	8/20(μs)	10/200(μs)	10/350(μs)	1.2/50(μs)	10/700(μs)	4/300(μs)	0.25/100(μs)
0、1、10	2.084×10^{-5}	2.740×10^{-4}	4.898×10^{-4}	7.030×10^{-5}	9.940×10^{-4}	4.265×10^{-4}	1.427×10^{-4}
100	2.084×10^{-5}	2.739×10^{-4}	4.893×10^{-4}	7.030×10^{-5}	9.894×10^{-4}	4.261×10^{-4}	1.427×10^{-4}
1k	2.084×10^{-5}	2.654×10^{-4}	4.432×10^{-4}	7.014×10^{-5}	7.125×10^{-4}	3.936×10^{-4}	1.423×10^{-4}
10k	2.065×10^{-5}	9.978×10^{-5}	1.018×10^{-4}	5.816×10^{-5}	1.015×10^{-4}	9.930×10^{-5}	8.233×10^{-5}
100k	1.181×10^{-5}	9.834×10^{-6}	9.650×10^{-6}	1.023×10^{-5}	9.527×10^{-6}	1.008×10^{-4}	1.001×10^{-5}
1M	3.872×10^{-7}	2.413×10^{-7}	2.489×10^{-7}	9.332×10^{-7}	2.552×10^{-7}	5.547×10^{-7}	1.000×10^{-6}
10M	4.000×10^{-9}	2.476×10^{-9}	2.563×10^{-9}	2.108×10^{-8}	2.634×10^{-9}	6.593×10^{-9}	7.385×10^{-8}

(3) 雷电波的半峰值时间 t_2 越长，振幅的衰减速度越快，反之则变缓。

(4) 雷电波的波头时间 t_1 越小，高频端（如频率大于 1M 时）振幅就越大（除 8/20 (μs) 外），经计算（数据略）在波尾相同的情况下，波前越陡，高次谐波越丰富。

3 雷电波振幅的累积频谱分析

对雷电波频谱函数式 (11) 从 0 到指定频率 ω 进行积分，可得：

$$\begin{aligned}
 H(i\omega) &= \int_0^\omega I(i\omega) d\omega \\
 &= \int_0^\omega k \left[\left(\frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\beta}{\beta^2 + \omega^2} \right) + \right. \\
 &\quad \left. i \left(\frac{-\omega}{\alpha^2 + \omega^2} + \frac{\omega}{\beta^2 + \omega^2} \right) \right] d\omega \\
 &= k \left(-\arctg \frac{\omega}{\alpha} - \arctg \frac{\omega}{\beta} \right) + \\
 &\quad i \frac{k}{2} [\ln(\beta^2 + \omega^2) - \ln(\alpha^2 + \omega^2) + \\
 &\quad \ln \alpha^2 + \ln \beta^2] \quad (13)
 \end{aligned}$$

式 (13) $H(i\omega)$ 是复函数，同样取其模

表示雷电波振幅的累积频谱，即按下式：

$$H(\omega) = k(S^2 + T^2)^{\frac{1}{2}}$$

S 和 T 分别是式 (13) 中的实部和虚部：

$$S = \arctg \frac{\omega}{\alpha} - \arctg \frac{\omega}{\beta} \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{1}{2} [\ln(\beta^2 + \omega^2) - \ln(\alpha^2 + \omega^2) + \\
 &\quad \ln \alpha^2 + \ln \beta^2] \quad (15)
 \end{aligned}$$

当式 (13) 从 0 至 ∞ 积分时，即为振幅累积频谱的最大值，记为

$$H = \frac{k}{2} (\ln \beta^2 - \ln \alpha^2)$$

故雷电波的相对振幅累积频谱可以表示为

$$H(\omega) = H(\omega)/H \quad (16)$$

其结果如表 3 所示。

从表 3 中可以得到以下结论：

(1) 振幅分量主要集中在低频部分，1MHz 时，除后续雷击 0.25/100 (μs) 和 1.2/50 (μs) 波形外，其它振幅累积达到 97% 以上。

(2) 由于振幅频谱中的主要分量集中在低频端，雷电波的振幅累积频谱 $H(\omega)$ 在低频端增值迅速，高频端则缓慢，当 $\omega \rightarrow \infty$

时, $H(\omega) \rightarrow 1$ 。

(3) 当频率累积到 1kHz 时, 视在半峰
值时间 t_2 越长, 则累积值越大, 10kHz 时,
波形 10/200 比 4/300 的累积值稍大, 这是
由于波前时间 t_1 较大的缘故, 在高频端,

波尾相同的情况下, t_1 越大, 累积值 $H(\omega)$
越大。从表中也可看出, 累积频谱 $H(\omega)$ 低
频端 t_2 是其变化的主要因素, 而高频端 t_1
是主要的因素。

表 3 雷电波相对振幅累积频谱

频率/Hz	8/20(μ s)	10/200(μ s)	10/350(μ s)	1.2/50(μ s)	10/700(μ s)	4/300(μ s)	0.25/100(μ s)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	7.636×10^{-6}	6.159×10^{-5}	9.810×10^{-5}	1.361×10^{-5}	1.753×10^{-4}	7.432×10^{-5}	1.946×10^{-5}
10	7.636×10^{-5}	6.159×10^{-4}	9.810×10^{-4}	1.361×10^{-4}	1.753×10^{-3}	7.432×10^{-4}	1.946×10^{-4}
100	7.636×10^{-4}	6.158×10^{-3}	9.805×10^{-3}	1.361×10^{-3}	0.0175	7.429×10^{-3}	1.946×10^{-3}
1k	7.636×10^{-3}	0.0607	0.0940	0.0136	0.1514	0.0718	0.0193
10k	0.0760	0.3758	0.4316	0.1255	0.4870	0.3512	0.1510
100k	0.5774	0.8213	0.8313	0.4780	0.8438	0.7095	0.4154
156.1k	—	—	—	—	0.9000	—	—
164.9k	—	—	0.9000	—	—	—	—
169.9k	—	0.9000	—	—	—	—	—
323.0k	0.9000	—	—	—	—	—	—
387.9k	—	—	—	—	—	0.9000	—
1M	0.9872	0.9951	0.9950	0.8606	0.9952	0.9741	0.7040
1.357M	—	—	—	0.9000	—	—	—
5.26M	—	—	—	—	—	—	0.9000
10M	0.9998	0.9999	0.9999	0.9965	0.9999	0.9996	0.9536

(4) 波形 8/20 (μ s)、10/200 (μ s)、
10/350 (μ s)、1.2/50 (μ s)、10/700 (μ s)、
4/300 (μ s)、0.25/100 (μ s) 对应 $H(\omega)$ 值
为 90% 时, 对应的频率分别为 323.0kHz、
169.9 kHz、164.9 kHz、1.357MHz、
156.1 kHz、387.9 kHz、5.26MHz。

4 雷电波能量的累积频谱分析

设负载为一纯电阻 R , 在时间相同的情
况下, R 上的能量与电流 I 的平方成正比。
雷电波能量频谱与振幅频谱趋势相似, 但分
布更为分散, 文章主要分析累积能量频谱,
令 $W(\omega)$ 为雷电波的能量累积频谱:

$$W(\omega) = \int_0^{\omega} \frac{R}{\pi} |I(\omega)|^2 d\omega \quad (17)$$

把式 (12) 代入式 (17) 得:

$$W(\omega) = \frac{k^2 R}{\pi} \cdot \frac{\beta - \alpha}{\beta + \alpha} \left[\frac{1}{\alpha} \arctg \frac{\omega}{\alpha} - \frac{1}{\beta} \arctg \frac{\omega}{\beta} \right]_0^{\omega} = \frac{k^2 R}{\pi} \cdot$$

$$\frac{\beta - \alpha}{(\beta + \alpha)\alpha \cdot \beta} \left[\beta \arctg \frac{\omega}{\alpha} - \alpha \arctg \frac{\omega}{\beta} \right]$$

把整个雷电波的能量规定为 W_0 , 计算仍用
式 (17), 积分从 0 到 ∞ , 可得

$$W_0 = \int_0^{\infty} \frac{R}{\pi} |I(\omega)|^2 d\omega =$$

$$\frac{Rk^2}{\pi} \cdot \frac{\beta - \alpha}{\beta + \alpha} \left[\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\pi}{2} - \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\pi}{2} \right]$$

$$= \frac{Rk^2(\beta - \alpha)^2}{2(\beta + \alpha)\alpha\beta} \quad (18)$$

则可求得雷电波相对能量累积频谱

$$W(\omega) = W(\omega) / W_0 =$$

$$\frac{2}{\pi(\beta-\alpha)} \left[\beta \arctg \frac{\omega}{\alpha} - \alpha \arctg \frac{\omega}{\beta} \right]$$

显然 $W(\omega)$ 是相对值，其值小于或等于 1。

计算出不同波形的雷电波相对能量的累积频谱 $W(\omega)$ 列于表 4。

表 4 雷电波相对能量累积频谱 $W(\omega)$

频率/Hz	8/20 (μs)	10/200 (μs)	10/350 (μs)	1.2/50 (μs)	10/700 (μs)	4/300 (μs)	0.25/100 (μs)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1.081×10^{-5}	1.654×10^{-4}	3.019×10^{-4}	4.352×10^{-5}	6.217×10^{-4}	2.669×10^{-4}	9.118×10^{-5}
10	1.081×10^{-4}	1.654×10^{-3}	3.019×10^{-3}	4.352×10^{-4}	6.217×10^{-3}	2.669×10^{-3}	9.118×10^{-4}
100	1.081×10^{-3}	0.0165	0.0301	4.352×10^{-3}	0.0619	0.0266	9.118×10^{-3}
1k	0.0108	0.1619	0.2882	0.0434	0.4391	0.2706	0.0905
6.27k	—	—	—	—	0.9000	—	—
10k	0.1074	0.7751	0.8739	0.3823	0.9964	0.8535	0.6122
12.48k	—	—	0.9000	—	—	—	—
14.63k	—	—	—	—	—	0.9000	—
21.58k	—	0.9000	—	—	—	—	—
43.88	—	—	—	—	—	—	0.9000
87.5k	—	—	—	0.9000	—	—	—
100k	0.7337	0.9874	0.9929	0.9131	0.9964	0.9880	0.9562
183.17k	0.9000	—	—	—	—	—	—
1M	0.9987	0.9999	0.9999	0.9956	0.9999	0.9998	0.9961
100M	1.0000	1.0000	1.0000	0.9999	1.0000	1.0000	0.9998

图 3 给出了 4 个波形 (8/20 (μs)、1.25/50 (μs)、0.25/100 (μs) 和 10/350 (μs)) 的能量累积频谱图，图 4 对 10/200 (μs)、10/350 (μs) 和 100/700 (μs) 波形的能量频谱作做对比分析，结合表 4 可以看出：

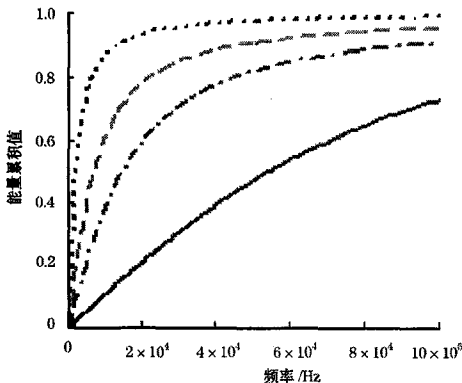


图 3 不同雷电波的相对能量累积频谱图

8/20-实线、10/350-点线、1.2/50-点划线、0.25/100-虚线

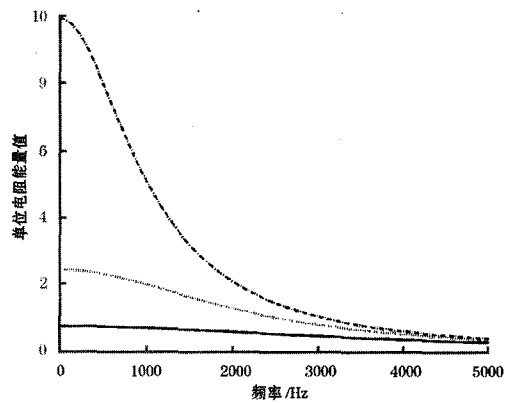


图 4 不同雷电波的单位电阻能量频谱图

10/200-实线、10/350-点线、100/700-点划线，纵坐标 $\times 10^6$

(1) 各种标准雷电波模型能量主要集中在几百 kHz 以下。当 1kHz 时， t_2 大的 10/700 (μs)、10/350 (μs) 和 4/300 (μs) 累积能量分别达到 43.91%、28.82%、27.06%，其它波形就很小，与自然界雷电

波的能量频谱主要集中在几 kHz 到几百 kHz 基本相符。

(2) 雷电波的相对能量集中在低频部分。半峰值时间 t_2 越大, 雷电波的能量就越集中在低频部分 (见图 3、4), 能量的分布受波前时间 t_1 的影响很小。

(3) 比较发现在波尾时间相同的情况下, 波前时间 t_1 较小者, 其能量在低频端略为集中些, 即能量达到 0.9 的频率较小, 而随着频率的不断增加, 波前越陡, 能量的收敛速度反而稍慢, 但比起 t_2 对雷电波的影响, 几乎可以忽略。

(4) 波形 8/20 (μs)、10/200 (μs)、10/350 (μs)、1.2/50 (μs)、10/700 (μs)、4/300 (μs)、0.25/100 (μs) 对应 $W(\omega)$ 值为 90% 时, 对应的频率分别为 183.17kHz、21.58kHz、12.48kHz、87.5kHz、6.27kHz、14.63kHz、43.88kHz。

5 雷电波频谱及在雷电防护领域中的避雷应用

智能建筑的兴起, 是建筑弱电技术发展的集中体现, 智能建筑由三大系统组成, 这三大系统是通信自动化系统 (CAS)、楼宇自动化系统 (BAS)、和办公自动化系统 (OAS)。三大系统中的电子设备对过电压所表现出的敏感性和脆弱性, 使得雷害成日益上升的趋势。CAS 中的有线电视系统与卫星电视接收、电话通信系统、公共广播系统传输的各种信号, 加上 BAS 和 OAS 中接收和传输的防盗报警、雷达、导航等各种信号的能量大都处于几百 kHz 以上的频段。无线电波中除了远洋导航、通信 (用到长波) 外, 其频段划分为中波、短波和微波, 对应频段为 300kHz~300GHz。从上面的分析可知, 大部分雷电波主要能量处于几百 kHz 以下, 可以让雷电波通过低通滤波器

进入大地, 而让有用的信号通过高通滤波器进入电子信息设备。传统的传输线分流型避雷器就是利用这种原理。如图 5 所示, 在传输线电缆的芯线串联两个电容器, 在电容器输入端并联一个线圈。由于信号是高频, 很容易通过电容器 C 进入用电器, 而雷电波的频率分布在较低频段上, 通过较小电容的电容器会产生很大的压降; 相反, 信号在电感上 L 的压降大, 不易通过, 而雷电波便从电感器流入大地, 保护了通信设备。只要 L 和 C 的数值选得合理, 一定范围内这种方法是可取的。现在波道分流型电子避雷器也是选用了这个原理, 克服了传统避雷器的一些体制弱点, 从而具有工作频率高、工作频带宽、通流量大等显著优点, 并且得到了广泛的应用。随着科技的不断进步, 雷电波频谱在避雷领域的应用会越来越显得重要。另外, 了解了雷电波、电磁场、电场等各种波形的频谱后, 对雷电专用的频谱仪的生产和应用提供了重要的依据。

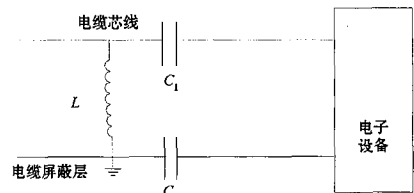


图 5 LC 雷电流分流避雷示意

6 结 语

通过以上的分析可以看出, 雷电波的频谱很宽, 但其振幅和能量主要集中在低频部分。各种雷电波形, 从 0 到 1kHz 的振幅较大, 并且大致相同, 之后随着频率的增加而减小, 1MHz 时, 除后续雷击 0.25/100 (μs) 和 1.2/50 (μs) 波形外, 其它振幅累积值达 97% 以上, 说明雷电波振幅分量主要集中在 1MHz 以下。雷电波的能量频谱

主要集中在几 kHz 到几百 kHz。

对于不同的雷电波形, 雷电波的半峰值时间 t_2 越长, 低频端的相对振幅越大, 也即雷电波的能量就越集中在低频部分, t_2 是雷电波振幅和能量频谱分布的主要因素, 在波前相同的情况下, 波尾越长, 低频部分越丰富, 在波尾相同的情况下, 波前越陡, 高次谐波越丰富。前人做了大量关于闪电发生时电场和磁场等变化的频谱分析, 结果也表明电场、磁场的能量和振幅主要集中在低频部分, 随着频率的增加在不同的频域表现出不同的递减方式。雷电波频谱特征是雷电防护技术的重要依据, 传统的传输线分流型避雷器就是利用这一原理, 在未来的雷电防护领域将会越来越显得重要。

参考文献

- 1 蔡晓云, 宛霞, 郭虎等. 北京对流云天气闪电特征及短时预报 [J]. 气象, 2003, 29 (8): 16-21.
- 2 薛亦芳, 孟青. 北京地区活动及其与强对流天气的关系 [J]. 气象, 1999, 25 (11): 15-19.
- 3 张义军, 刘欣生. 南方人工引发雷电试验及电流特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19 (4): 59-62.
- 4 罗仕乾. 雷电波的频谱及能量分布 [J]. 高电压技术, 1995, 21 (1): 85-86.
- 5 徐峰. 雷电闪击中回击电流波频谱的初步分析 [J]. 广西气象, 1999, 20, (2): 59-60.
- 6 丁美新, 李慧峰, 朱子述等. 雷电流波形的数学模型及频谱仿真 [J]. 高电压技术, 2002, 28, (6): 8-10.
- 7 董万胜, 刘欣生, 张义军等. 25~100MHz 频段闪电脉冲辐射能量频谱特征 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (3): 104-107.
- 8 张其林, 鄢秀书, 王怀斌等. 高原雷暴地闪回击辐射场特征分析 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 9 (23): 94-98.
- 9 Sharma S. R, M. Fernando, Vernon Cooray. Frequency Spectrum of the Electromagnetic Fields of Positive Return Strokes [J]. ICLP, 2004, 80-84.
- 10 Upul Sonnadara, Vernon Cooray, and Mahendra Fernando. Lightning radiation field spectra of cloud flashes [J]. ICLP, 2004, 85-90.
- 11 建筑物防雷设计规范 GB50057-94 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2001, 64-65.
- 12 苏邦礼, 崔秉球, 吴望平等. 雷电与避雷工程 [M]. 广州: 中山大学出版社, 1996, 466-467.
- 13 C. F. Wagner and G. D. McCann. Induced voltages on transmission lines [J]. Trans. Amer. Inst. Elec. Engrs., 1942, 61: 916-930.
- 14 CCITT, The Protection of Telecommunication Lines and Equipment against Lightning Discharge. 1975.
- 15 C. A. Nucci, F. Rachidi, M. Ianoz, C. Mazzetti. Lightning-induced voltage on overhead lines [J]. IEEE Trans. Electromag. Compat., 1993, 35: 75-86.