



创新 改变世界 **服务** 开创未来





GJB8848地面雷电试验探讨 (二)

2020年4月

方惜

GJB8848地面系统雷电试验探讨（二）

邻近雷电引起的间接效应

目 录	1	邻近雷电电磁环境
	1.1	邻近雷电定义
	1.2	邻近雷电模型
	2	脉冲磁场试验
	3	脉冲电场试验
	4	传导注入试验

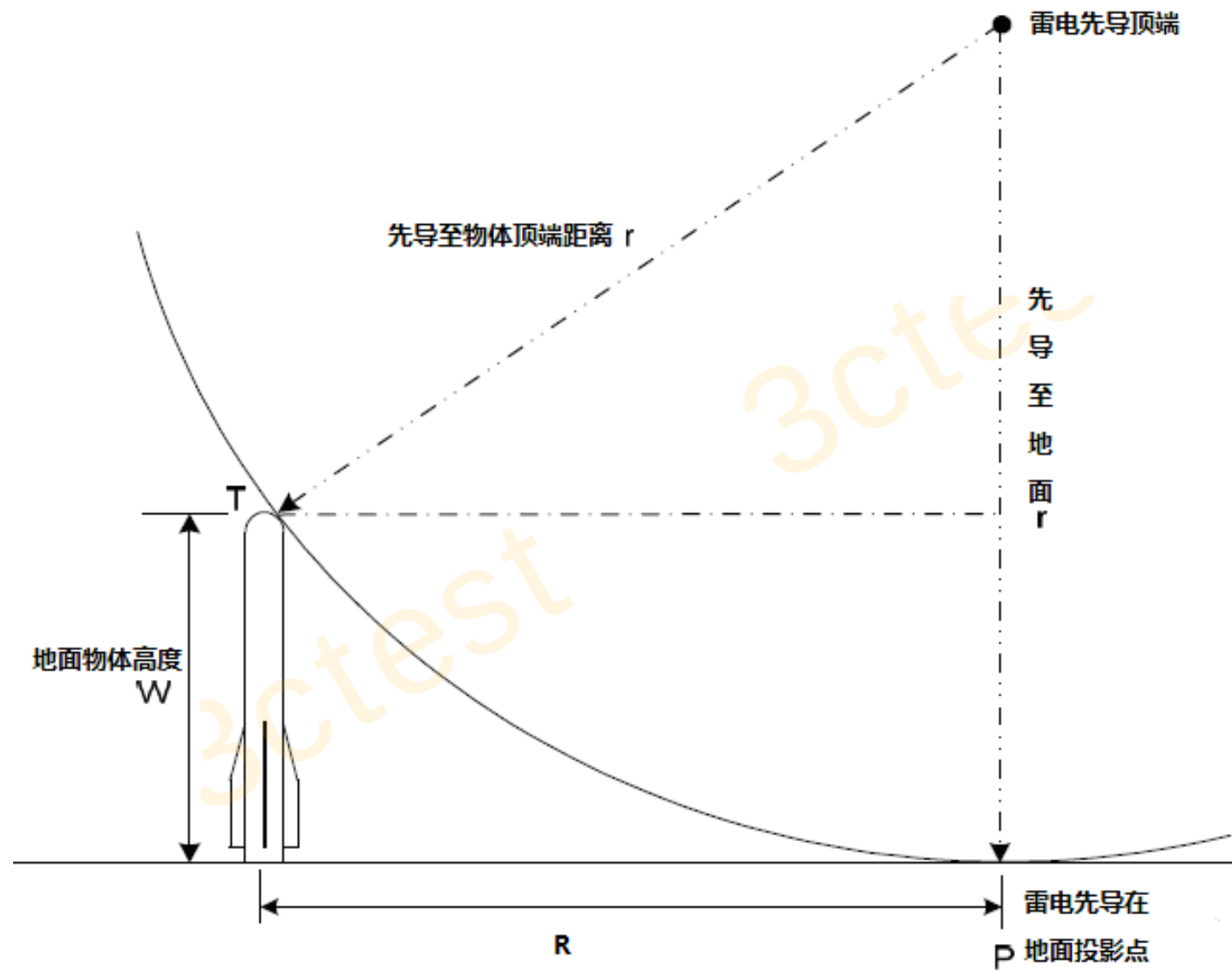
1. 邻近雷电电磁环境

对应GJB8848第13.5节雷电间接效应试验方法中13.5.2节和13.5.3节内容，与GJB1389A第5.4节“雷电”邻近雷电环境（表8）要求相呼应。

邻近雷电电磁环境指云对地直击雷电在距离地面附着点/雷电通道 ≥ 10 米区域里形成的电磁环境。临近雷电的间接效应显然比直击雷电引起的间接效应弱，因为受影响对象距离雷电通道/雷击附着点更远，而雷电伴随电磁波场强总是与场源至观察点距离负相关。

1.1 邻近雷电定义

所谓临近雷电指雷电通道/雷击附着点距离观察点**10米**以远的附近云对地闪电雷击。特点是没有击中附着观察点处平台。以**10米**为界的原因是：雷电先导向外沿伸发展实质上是为在两异性电荷中心之间建立闭合雷电通道而寻找阻抗最小之路径。平坦地面上物体（一般假设其高度小于**1米**）不被逼近的云对地雷电直接击中附着的必要条件是它与雷电通道的最小间距为**10米**，小于此间距就会被雷电直接附着，参见下图。因此一般与雷电通道间距小于**10米**时将按直击雷电的直接效应和间接效应来处理。



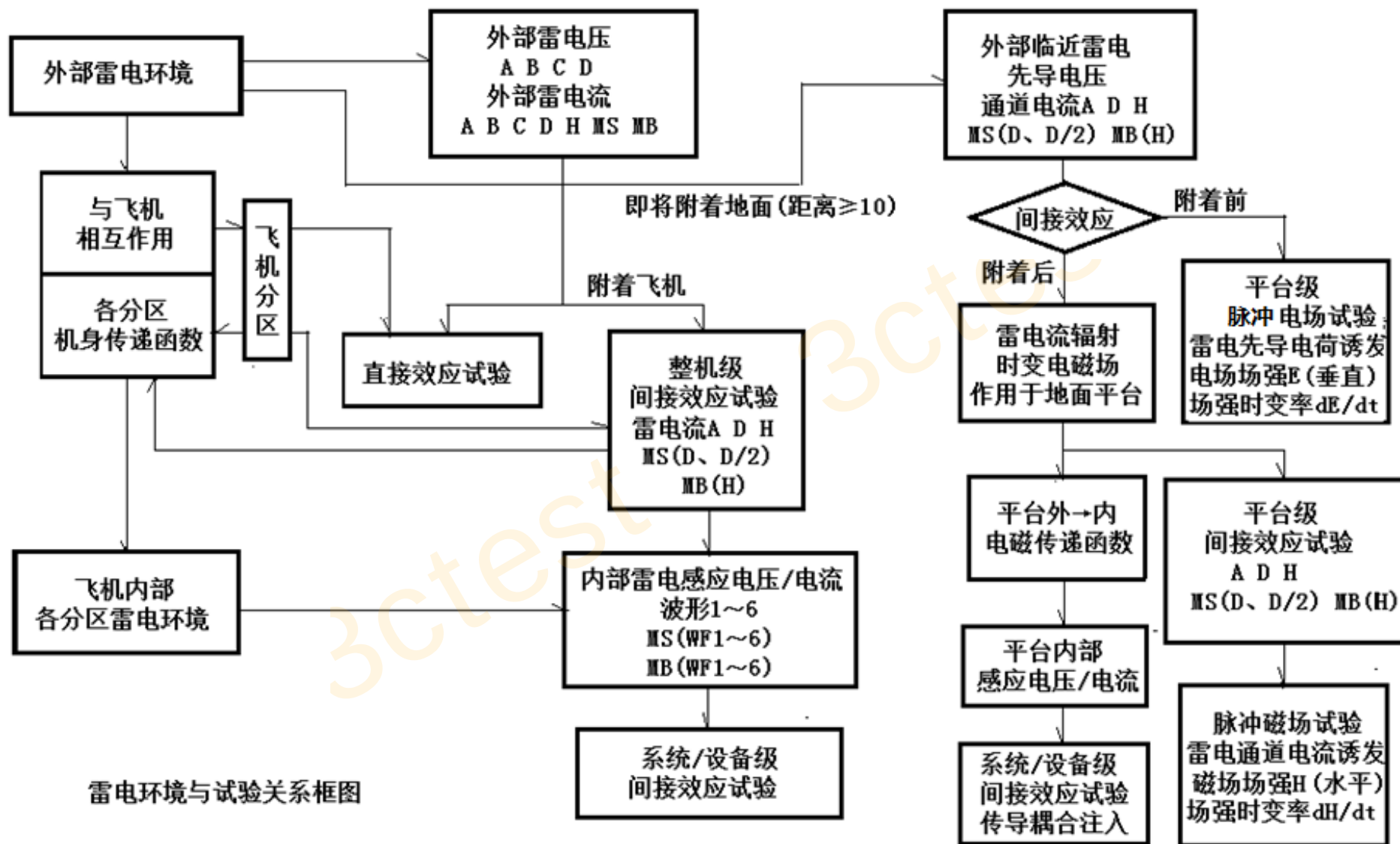
一般假设雷电先导顶端至地面投影点距离是**50米**，由图可算出不同高度地面物体至临近雷电通道/附着点的最小距离为

$$R = (50^2 - (50 - W)^2)^{1/2}$$

物体高度W（米）	1	2	3	4	5	10
最小距离R（米）	9.9	14.0	17.0	19.6	21.8	30.0
取整→	10	14	17	20	22	30

先重述邻近雷电环境及相关实验的关系，便于了解掌握全局概况，仍结合下图来说明。

1 邻近雷电电磁环境



1.2 邻近雷电模型

GJB8848的邻近雷电试验方法要求试验中施加电磁应力由附录的表**G1**规定。为说明其来由并推导出电场/磁场的表达式，进行以下分析。

1) 雷电附着地面过程模型：

云对地闪电雷击的雷电先导，携带准恒定电荷量（随先导伸展不断流入电荷迅速补充维持原密度不变），以 10^8m/s 速度垂直逼近地面。先导伴随电场在地面的场强随先导端距离减小而线性增加，在先导距离地面**50m**时，地表场强达 $3\times 10^6\text{V/m}$ ，空气被电离击穿从地面向上发出流光迎向先导，经过约 **$0.5\mu\text{s}$** ，先导与流光相遇雷电通道闭合。地面感应电荷迅速流经先导去中和先导及云端电荷中心异性电荷，地面电场快速减小消失。雷电通道闭合后又流有瞬态大电流。

● 磁场

由雷电通道闭合后的雷电流产生的，抽象模型为垂直地面无限长线电流，用安培环路定律计算，地面无限长垂直线电流在距离**R**米处的磁场强度为（水平方向）为

$$H=I/2\pi R \text{ (A/m)} \quad R>0$$

GJB8848表G1 $=3.18 \times 10^4 / R$, I =雷电流分量**A**最大峰值**200kA**时

$$=3.18 \times 10^3, \quad R=10\text{m}、I=200\text{kA} \text{时}$$

磁场时变率为 $dH/dt= (dI/dt) / 2\pi R \text{ (A/m/s)} \quad R>0$

GJB8848表G1 $=1.59 \times 10^{10} / R$, $dI/dt=10^{11} \text{A/s}$ 为典型值时

GJB1389A表8 $=2.23 \times 10^9$, $R=10\text{m}、dI/dt=1.4 \times 10^{11} \text{A/s}$ 为最大值时

● 电场

由雷电通道闭合前的雷电先导电荷产生，抽象模型为垂直地面的**50m**长线电荷（对应雷电先导的最后一次阶跃，每个阶跃约长**50m**）。但工程上并没有直接采用该模型推算的结果，因为推算假设地面足够平坦光滑，没有凸起尖锐会被未达最高场强前过早触发流光，从而得出地面场强高达 **$0.36 \times 10^8 \text{ V/m}$** 。这与实际情况差异过大。

而是计及地面尖端发出流光会大大降低该最高场强值这一重要因素，在同样认为地面电场（垂直方向）是雷电先导在其前端距离地面**50m**时产生的前题下，取对应电场强度最大值就是雷电先导在地面正投影点空气开始电离发出流光的典型值 **$3 \times 10^6 \text{V/m}$** ，并且取场强时变率为雷电先导到达地面瞬间**0**·（雷电通道刚闭合）所用时间 **$0.5 \mu\text{s}$** (= $50\text{m}/10^8\text{m/s}$)里场强从最大值 **$3 \times 10^6 \text{V/m}$** 快速降为最小值 **0V/m** 的平均时间变化率 **$3 \times 10^6 \text{V/m}/0.5 \mu\text{s} = 6 \times 10^{12} \text{V/m/s}$** （实际暂态过程是：随先导与流光间隙变小场强增大直至间隙刚闭合达最大，闭合后场强不能突变但迅速减小）。

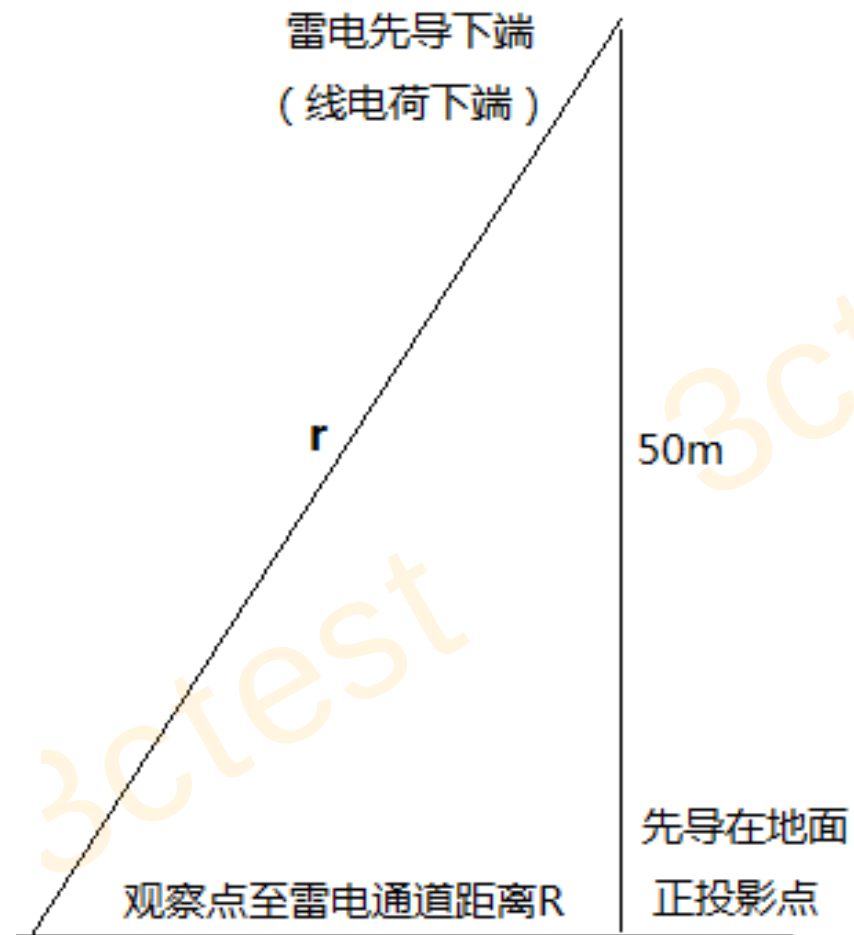
确定了雷电先导在地面上正投影点的电场强度及其时变率，参考有限长线电荷电场的各参量间比例关系：距离线电荷顶端 r 米处场强与 r 成反比，与线电荷密度（电荷总量/50m）成正比，结合下图可导出地面上距离投影点 R 米处的场量计算式如下，

观察点至线电荷顶端距离 $r = (50^2 + R^2)^{1/2} = 50 (1 + R^2/50^2)^{1/2}$

电场强度 $E = 3 \times 10^6 / (1 + R^2/50^2)^{1/2} \text{ (V/m)}$ （同GJB8848表G1）

场强时变率 $dE/dt = 6 \times 10^{12} / (1 + R^2/50^2)^{1/2} \text{ (V/m/s)}$ （同GJB8848表G1）
 $= 5.55 \times 10^{12} \text{ (R=10时，与GJB1389A表8的 } 6.8 \times 10^{11} \text{ 有差异)}$

1 邻近雷电电磁环境



更严谨推导：下图中地面下有镜像线电荷，考虑离地面 z 的两对称正负线元 dz ，线电荷密度 λ ，由点电荷电场强度公式 $dE^{\pm} = \pm \lambda dz / 4\pi\epsilon_0 (z^2 + R^2)$ ，它们在垂直地面的 z 向分量相加，合成场强为

$$dE = (dE^+ - dE^-) \cos\beta = \lambda z dz / 2\pi\epsilon_0 (z^2 + R^2)^{3/2}$$

沿线电荷从下端 H_b 到上端 H_t 积分得总场强为

$$E = \lambda / 2\pi\epsilon_0 (1 / (H_b^2 + R^2)^{1/2} - 1 / (H_t^2 + R^2)^{1/2})$$

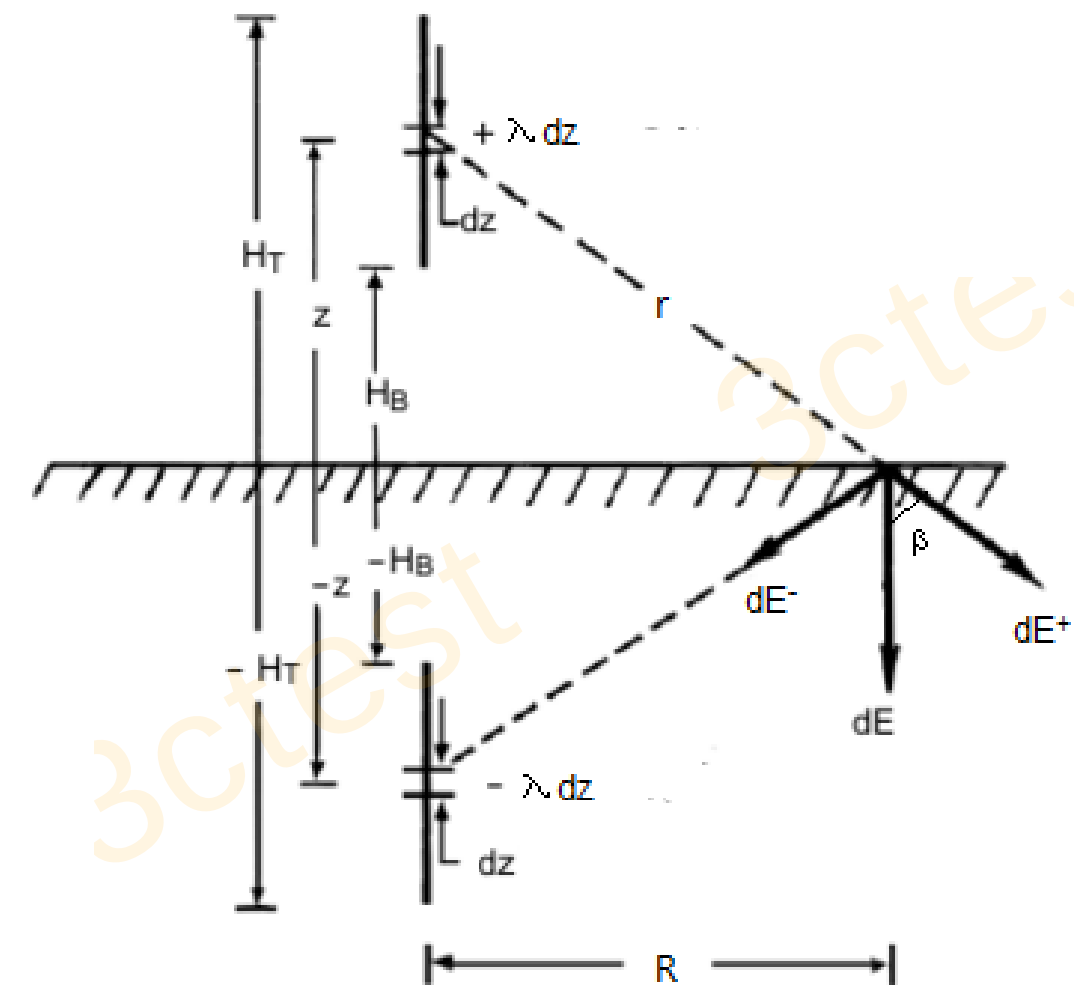
取 $H_b = 50\text{m}$ 、 $H_t \geq 100\text{m}$ ，上式括号里后一项相对前一项小很多可忽略（ $R = 10\text{m}$ 时），有近似式

$$E = \lambda / 2\pi\epsilon_0 (50^2 + R^2)^{1/2} = \lambda / 100\pi\epsilon_0 (1 + (R/50)^2)^{1/2}$$

不计常数系数，得到场强与距离成反比关系如下，与前面相同。

$$E \propto 1 / (1 + (R/50)^2)^{1/2}$$

1 邻近雷电电磁环境



● 讨论

1) 雷电通道闭合前场强时变率的机理：不是由于场源电荷量在时变。而是由时不变线电荷场源（雷电先导的电荷密度可认为相对稳定不变）相对地面运动减小观察距离，使得同一观察点场强随时间均匀线性增加，显现出的时变性。当雷电先导端距离地面等于**50m**时，地面上不同观察点至场源距离不同从而场强不同，但各点的场强都在相同短时间内快变为**0**，故不同观察点有不同场强时变率（与距离负相关）。都是高强电场在短时间里快速降为**0**的场强平均时变率。所以**GJB8848/GJB1389A**提及的临近雷电电场仅存在于雷电通道闭合前**0**·瞬间，不涉及雷电通道闭合后时变雷电流产生的时变电磁场中的电场分量。

另外，雷电先导逼近地面的运动是由云地异性电荷中心间似稳恒电场驱动的，运动线电荷在雷电通道闭合前实际构成了由稳恒电场产生的某种稳恒电流，但其传导速度是光速的三分之一 10^8m/s 。理应同时在其周围空间产生稳恒涡旋磁场，只是稳恒磁场不再产生涡旋电场。实际上似稳恒电场与似稳恒磁场总是相互伴随并存，但似稳恒磁场不会产生涡旋电场。所以先导可看成匀速运动分布不变电荷流（在随电荷运动坐标系观察），由稳恒电场驱动，总伴随稳恒磁场；但从固定于附着点坐标系观察，显然空间电荷分布在时变，原来附近没有电荷的地方现在有了。是时变电场，会产生时变磁场形成辐射电磁波。

2) 雷电通道闭合后的情况，首先雷电通道闭合后 0^+ 瞬间实际电场并未突变为零，因为雷电通道存在电阻和电感，雷电先导/电荷中心的电荷量不能突变只能逐渐被中和减少，地面电场也同样逐渐减弱至零，该所谓暂态过程与相关雷电流分量 A 及其伴随磁场的有约 90° 相位差。这才是真正的电荷量变化的时变驱动源，其时变率与雷电通道闭合后 0^+ 的雷电流分量 A 的直接相关类似且近似正交。若按雷电通道闭合前 0^- 瞬间方法推算：以电流分量 A 的 $69\mu\text{s}$ 脉宽为变化时长，电场平均时变率近似为 $3 \times 10^6 \text{V/m} / 69\mu\text{s} = 4.3 \times 10^{10} \text{V/m/s}$ 。较雷电通道闭合前的慢不少。必须强调无需这样重复考虑。因为已经考虑了这时的雷电伴随时变电磁场，是由前述便于测量计算的瞬变雷电流产生的，雷电流伴随的时变磁场与时变电场逐渐完全正交相互转换向外扩散传播。它对地面平台产生的间接效应类似飞机内部电磁环境的建立（通过孔缝、电阻、透射3大耦合机制），道理相同。

再次强调**GJB8848**的地面系统邻近雷电试验中，电场指雷电通道闭合前 0^- 瞬间的时变电场（虽伴随有似稳恒磁场和时变磁场，但没另外考虑其效应），磁场是雷电通道闭合后 0^+ 瞬间的时变磁场（从而伴随的时变电场分量）。这是真正实际的物理本质。

讨论：

雷电通道闭合前，先导可看成由稳恒电场驱动分布不变匀速运动的电荷流——稳恒电流，总伴随有稳恒磁场，二者不会相互转换，按理应同时也考虑稳恒磁场效应试验。不考虑的原因可能是：雷电通道闭合前雷电先导等效电流 $\leq 2000\text{A}$ ，它的稳恒磁场量值较雷电通道闭合后回击雷电流 $\leq 200\text{kA}$ 产生的瞬变磁场要小两个数量级，故忽略不计。

又，时变电场必产生时变磁场同时向外辐射电磁波，现观察点电场强度时变率高达 $6 \times 10^{12} \text{V/m/s}$ ，对应高频谱分量在数十MHz以下，峰值MV级的高压源理应是很强的辐射源。会对平台及其内部设备产生很强的电磁感应间接效应。但是目前业内并没有考虑雷电通道闭合前这些电磁效应。是否因为时变电场总伴随时变磁场，考虑其一即可都代表，不用重复考虑？如果如此，若可转换成磁场试验，是否有利于开展试验？

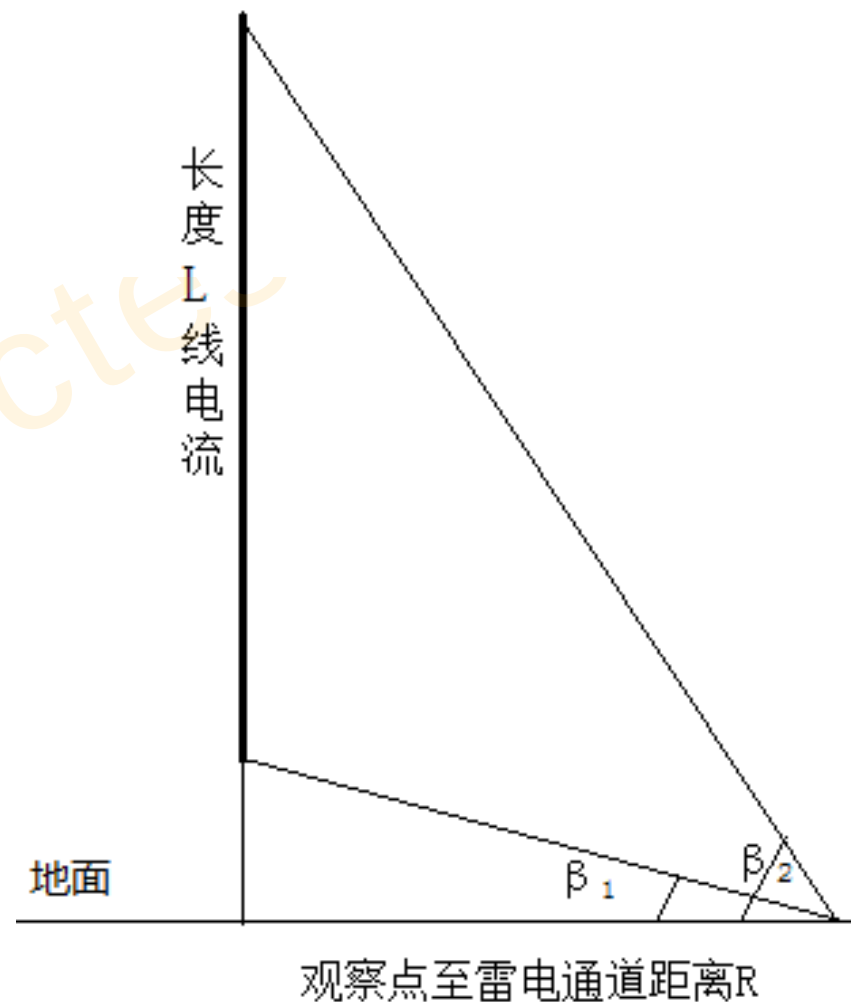
否。以10MHz频谱分量为例估算，其波长30m，10m远邻近雷电区域在电磁场的近区。近区中电场、磁场不对称相对独立，相位相差90度，电路定律成立，集总参数占优。场能量除了在电与磁两种形式之间来回转换，还与场源之间来回转换。当总场能量增加时由场源供给能量，当总场能量减少时由场源吸收能量，即束缚电磁场交出能量。依场源特性对外主要表现为电场或磁场，高压小电流的电偶极子是高阻电场源，其近区场又称为容性高阻电波场，以电场为主，电场分量能量密度远大于磁场分量能量密度。大电流低压的磁偶极子（小电流环）是低阻磁场源，其近区场又称为感性低阻磁波场，以磁场为主，磁场分量能量密度远大于电场分量能量密度。这里雷电先导属高压高阻电场源，其近区（即邻近雷电区域）电磁场主要是电场，工程上只需考虑电场分量。同理雷电通道闭合后在近区里只考虑雷电流的磁场分量。

3) 线电流长度对磁场的影响:

前面用安培环路定律计算距离地面垂直线电流R米处的磁场强度时,假设了场源线电流无限长,但实际线电流仅存在于地面以上半空间里,即使考虑了地面镜像作用,也应是关于地面对称的有限长线电流。下面先考察上半空间情况,用有限长线电流模型计算,

$$H=I(\sin\beta_2-\sin\beta_1)/4\pi R$$

其中 β_1 、 β_2 分别是线电流两端到观察点矢径与地面的夹角,参见右图。



现在线电流下端在地面， $\beta_1=0^\circ$ ， $\sin\beta_1=0$ ，

当线电流半无限长时， $\beta_2\rightarrow 90^\circ$ ， $\sin\beta_2\rightarrow 1$ ， $H=I/4\pi R$ ；

当线电流长50m， $R=10\text{m}$ 时，

$$\beta_2=\sin^{-1}\left(50/\left(50^2+10^2\right)^{1/2}\right)=\sin^{-1}(0.98)=78^\circ，$$

$$H=0.98I/4\pi R\rightarrow I/4\pi R；$$

当线电流长200m， $R=10\text{m}$ 时，

$$\beta_2=\sin^{-1}\left(200/\left(200^2+10^2\right)^{1/2}\right)=\sin^{-1}(0.998)=87^\circ，$$

$$H=0.998I/4\pi R\rightarrow I/4\pi R；$$

由此可见 $H=I/4\pi R$ 是很好的近似。

上下半空间两个线电流方向相同情况类似，合成总磁场为二者相加（方向一致）。与前面结论相同，以无限长代替有限长的近似在工程可接受范围内。

4) 对磁场时变率的疑惑:

现象: 按定义磁场时变率就是 dH/dt ，因给定观察点与线电流间距不随时间改变，故仅取决于 dI/dt 。为简单起见，设激励电流 $I(t) = I_0 e^{-\beta t}$ ，磁场 $H(R, t) = I_0 e^{-\beta t} / 2\pi R$ ，因距离 R 与时间 t 无关，所以 $dH/dt = -\beta I_0 e^{-\beta t} / 2\pi R$ ，确实与距离 R 有关成反比。

质疑: 磁场时变率应该只取决于激励源电流时变率，而与观察点距离无关。有基本概念——电磁场的时间特性/频率取决于激励它的场源，如最常见的正弦电磁波的频率一定与激励源频率一致，且远区电磁波场强幅度也同样与观察点距离成反比，为何电磁波的时变率不与距离也成反比呢（公式推算好像也与距离有关）？由此是否这里的磁场时变率也不应与观察点至场源的距离有关，这就与GJB8848表G1矛盾。

是否因为脉冲波的时间特性主要取决于前/后沿，而正弦波的前/后沿不重要，主要取决于频率？若是，那么任何脉冲波都可以分解成有限不同离散频率正弦波的线性叠加/付氏级数（周期），或无限连续频率正弦波的线性叠加/付氏积分（非周期），理应脉冲波与正弦波有相同的时间特性——频率和时变率，也解释不通。

2. 脉冲磁场试验

是**GJB8848**第**13.5.2**节脉冲电磁场效应试验方法中磁场内容部分。先重复一下前面的结论：这里磁场是雷电通道闭合后**0+**瞬间的时变磁场（虽伴随有时变电场分量，但在近场区主要能量由磁场携带）。为便于对**GJB8848**中试验方法的理解和执行，作以下说明和建议。

2.1 试验目的和受试对象

试验用云对地直接雷电的高幅值瞬变特性电流分量作为试验应力的驱动源，建立模拟临近雷电的磁场环境（水平方向）：以磁场强度及其时变率来代表，对距离雷电通道大于**10米**区域里直接完全暴露的地面外部安装受试对象，进行平台级/系统级/设备级与雷电间接效应相关试验。考察在该外部磁场应力下地面平台及其载荷、外部安装系统/设备的功能、性能、抗损毁能力。

也可用于临近雷电区域里室内（如钢筋混凝土建筑物、金属框板房/棚屋内）的平台/系统/设备，因非直接完全暴露，实验施加的磁场应力须降低，减去建筑物的磁屏蔽效能。当然一般非铁磁性材料几乎没什么磁屏蔽作用。

2.2 试验波形

标准没有规定试验应力激励源——脉冲发生器提供什么波形才可产生要求的磁场强度及其时变率。

雷电流的最大峰值、随时间变化速率直接决定间接效应的强弱，需考虑的有雷电流分量**A**、**D**、**H**、**MS**（由**D**组成）、**MB**（由**H**组成）。虽然前面推导磁场强度及时变率采用幅度最大的首次回击雷电流分量**A**，但分量**D**尤其是分量**H**具有更快的时变性从而耦合间接效应，所以具有高幅度快变特性的雷电流分量**D**、**H**、**MS**、**MB**都应该是试验应力的驱动源。考虑到分量**D**时变率与分量**A**类似，峰值减半，为简化可用波形**A**就顺带代表了波形**D**。

但是由前面推导磁场强度及时变率过程，可知**GJB8848**表**G.1**中磁场表达式只适用于单次回击，因为推导采用了雷电流分量**A**的峰值和时变率，从间接效应机理来说虽可近似替代分量**D**，但替代不了分量**H**（波形前沿快一个数量级），更替代不了多重回击**MS**和多重脉冲组**MB**。所以驱动源如果包括这些波形电流，很可能磁场表达式要变化而不同于标准给出的，这是个很实际、值得研究的课题。

2.3 直接法试验配置

为建立试验电磁环境，除了标准采用的间接方法，还可用直接法。以垂直地面的载流长导电棒作为场辐射器（为尽量逼近用于计算磁场的模型，导电棒应足够长，如 >4 米），在距离导电棒**10m**或尽可能近的棒中分平面上放置受试件，以**GJB1389A/8848**规定磁场应力值为基准对试验驱动电流大小进行校准定标。直接法更真实地模拟仿真实际临近雷电电磁环境，但可能较间接方法要求瞬态电流源输出更大电流。二者有如下数量关系：

令赫姆霍兹线圈和导电棒产生相同磁场

$$H = 1.43 I_{\text{线圈}} / D = I_{\text{棒}} / 2\pi R$$

由此

$$I_{\text{线圈}} / I_{\text{棒}} = 0.11 D / R$$

一般情况线圈直径 $D=4\text{m}$ 、距离 $R=10\text{m}$ ，线圈激励电流小得多

$$I_{\text{线圈}} = 0.044 I_{\text{棒}}$$

如果试验中把EUT靠近导电棒，如 $R_{\text{实际}}=5、1\text{m}$ ，则产生前面磁场导电棒所需激励电流变小

$$I_{\text{线圈}} = 0.088 I_{\text{棒}}$$

$$I_{\text{线圈}} = 0.44 I_{\text{棒}}$$

可见导电棒的直接法值得尝试。

2.4 距离 R 的确定

第13.5.2.3 c) 条要求先确定受试件至临近雷电通道/附着点的距离 R ，但没给出具体方法。建议用“滚球法”确定：设想半径为50m的球体在平坦地面滚向受试件，直至球面触抵受试件，此时受试件与球面触点及球心各自在地面投影点之间的距离就是 R 。对受试件每个方位重复进行，取最小者。 $R < 10\text{m}$ 时用10米代替。

2.5 瞬态源校准

瞬态源输出的是脉冲电流，而试验应力是磁场强度及其时变率，因此需要事先校准定标，实测它们之间的数量关系供备用。电流源应至少具有产生直接雷电流分量**A**、**H**、**MS**、**MB**的能力。

另第**13.5.2** 节图**19**和图**21**中只表明了驱动源是脉冲发生器，应该明确指出是电流源，便于阅读使用标准。

3. 脉冲电场试验

对应第**13.5.2**节脉冲电磁场效应试验方法中电场内容部分。

再重复强调前面结论：这里电场是雷电通道闭合前**0**-瞬间的时变电场（虽伴随有似稳恒磁场和时变磁场，但在近场区主要能量由电场携带）。为便于对**GJB8848**中试验方法的理解和操作，补充一些说明和建议。

3.1 试验目的和受试对象

试验用云对地直接雷电的高电压作为试验应力的驱动源，建立模拟临近雷电的电场环境（垂直地面）：用电场强度及其时变率来度量，对距离雷电通道大于**10米**区域里直接完全暴露的地面受试对象，进行地面外部安装平台级/系统级/设备级与雷电间接效应相关试验。考察在该外部电场应力下地面平台及其载荷、外部安装系统/设备的功能、性能、抗损毁能力。

也可用于临近区域室内（如钢筋混凝土建筑物、金属框板房/棚屋内）的平台/系统/设备，因非直接完全暴露，实验施加的电场应力须降低，减去建筑物的电屏蔽效能。一般导电材料都有一定的电屏蔽作用。

3.2 试验机理

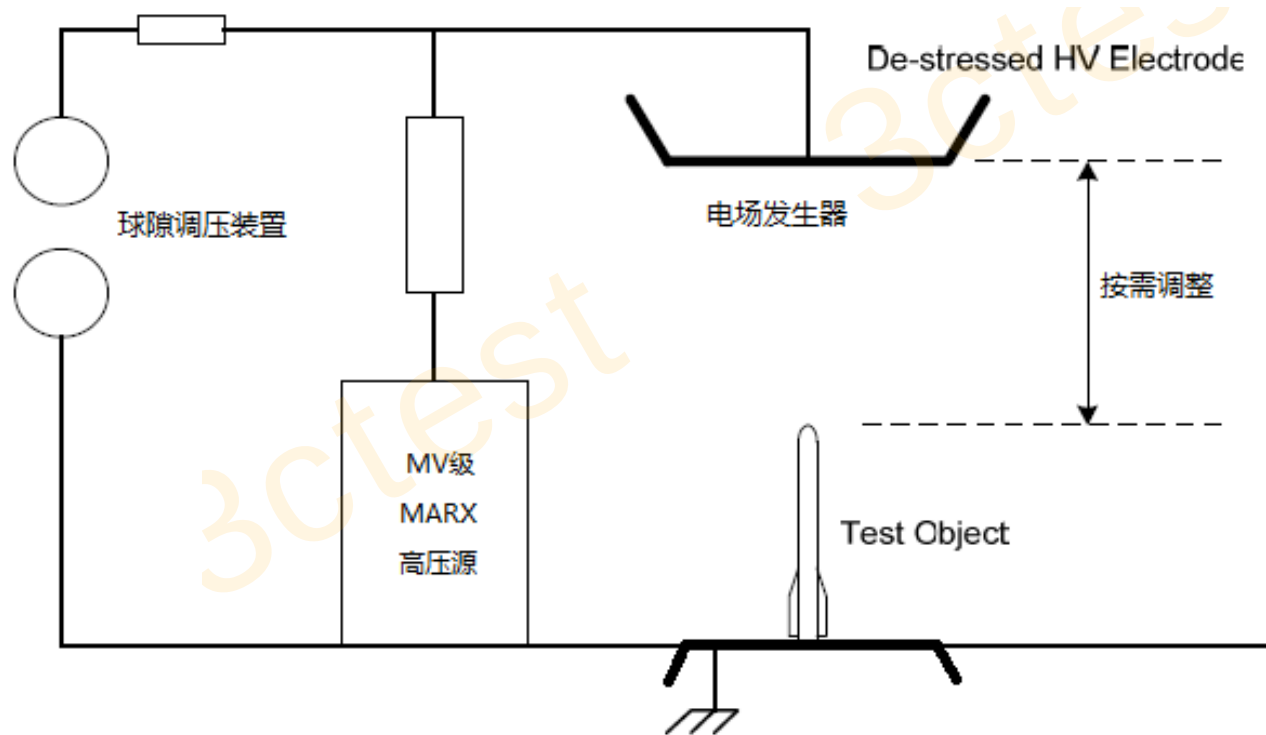
要建立电场强度及其时变率满足要求的试验电场环境，有两个关键难点。

第一个难点是：受试对象既需处于要求的高强电场中，但又不能发出流光导致高电压直接附着其上（因是临近雷电间接效应）。而要求的最大场强值恰是电离击穿空气的门限值，两要求相互矛盾。有二个解决途径，一是试验时设置最大场强略低于空气电离门限，为受试件不发出流光的可能最高场强值；二是用某种透波绝缘薄膜覆盖受试件，薄膜材料既能耐高压防止流光发生又基本不会改变所覆盖空间的电场强度和分布。

第二个难点是：试验区域高强电场要按规定的时变率快速消失，但仍不能发生高电压直接附着受试件甚至附近，以尽量减小直接效应对试验结果的影响干扰。解决思路是使试验平行板间高场强/电压在远离试验区域的地方电离击穿空气放电，于是就采用了分别与两平行板直接连接具有相同电位差的远处两个金属球体——间距可调的球隙调压装置。

试验原理用下图说明，**MARX**高压源输出**MV**级高电压至大型平行板电场发生器，平行板之间形成空间够大符合要求的均匀高强电场，受试件置于下平行板上，校准调压装置的球隙用来调整限定平行板间最大场强，设置两球间距使球隙间空气击穿电压恰对应上平行板与受试件最高点之间不发生击穿的可能最大场强。这样就在球隙击穿前瞬间在平行板间先建立起的电场，随高压源输出电压升高继续增强，球隙击穿短路，试验平行板间高压从而板间电场迅速消失。通过调整与球隙调压装置串联的限流调整阻抗，还可使球隙间飞弧持续时间受控，如约**0.5 μ s**。这样就模拟出要求的电场时变率，建立整个实验过程中的电场环境。

再次强调试验中上平行板电极与受试件之间一定不能发生击穿放电现象，否则就变成了直击雷电的直接效应试验。



3.2 试验峰值电压

地面物体在强电场作用下发出流光的场强范围是**400~3000kV/m**，表面越光滑越平坦需要场强越大。所以高压源输出幅度应在**3MV**以上，才可能在距离试验平行板极**1m**远处产生最大要求的 **$3 \times 10^6 \text{V/m}$** 场强。即高压源输出开路电压 **$> 3\text{MV}$** 。

试验施加的电场强度及其时变率与球隙调压装置的球隙大小及电压、配套限流调整阻抗有关。

3.3 试验波形

标准没有规定试验应力激励源——脉冲发生器提供什么波形才可产生要求的电场强度及其时变率。

高压源输出电压波形前沿应与前面第1.2节的论述及GJB8848附录表G.1要求的场强时变率相符，后沿无要求。可参考雷电压波形A，但这里要求最大时变率为 $6 \times 10^{12} \text{V/m/s}$ ，因此激励电压的前沿上升速率比电压波形A的 $1000 \text{kV/m}/\mu\text{s}$ 大6倍。

3.4 试验间距

建议试验上平行板电极与受试件的间距小于**1m**，而不是标准中的**4m**。否则高压源的输出电压最高要接近 **$12\text{MV} = 3 \times 10^6 \text{V/m} \times 4\text{m}$** ，工程上难以实现，或代价太大。

3.5 瞬态源校准

瞬态源输出的是高电压，而试验应力是电场强度及其时变率，因此需要事先就完整试验配置（含瞬态源、球隙调压限流装置、平行板电极、连接导电铜条等）校准定标，实测出它们之间的数量对应关系供试验中使用。

另第13.5.2节图20和图22中只标明驱动源是脉冲发生器，应该明确指出是电压源，便于阅读使用标准。

4. 传导注入试验

对应第**13.5.3** 雷电传导耦合注入试验方法。

4.1 试验原理和适用范围

地面附着的云对地临近雷电伴随电磁场向四周扩散传播，作用于附近装备平台，部分被外壳反射回外部，部分以孔缝/透射耦合方式穿过平台外壳/结构形成内部瞬态电磁场，并产生间接效应——平台内部浮地导体将感应瞬态对地电压，接地设备机箱/互联电缆上将流过感应瞬态电流并进入参考地。穿透外壳的能量多少决定平台内部响应瞬态的大小，除了取决于雷电流及其伴随电磁场的幅度和时变率，还与平台外壳的电磁屏蔽性能有关。

试验是平台内部设备/系统级的：适用单台设备EUT或用电缆相互连接的多台设备组成的系统SUT。试验时，按需选择受试件的一台机箱（尽量与其它机箱直接互联）与地绝缘，把符合要求的间接效应电压施加（直接搭接）于该机箱和参考地之间，试验电流注入该机箱，迫使试验电流流经受试件所有互联电缆并通过其它各机箱进入参考地，这样就模拟了临近雷电的间接效应电磁环境下受试件机箱及其互联电缆上的感应电流及它们与参考地之间的感应电压，而在此电磁应力下考察受试件的功能、性能、抗损毁能力。

4.2 一些问题和建议

1) **GJB8848**附录G. 2规定了雷电传导耦合注入试验用波形和幅度等级。该实验与D0160第22章中“对地注入试验”类似，前者试验波形由附录G. 2的表G. 3给出，后者试验波形由Table22-3给出（见下页截图）。比较波形图可知前者的中宽脉冲IP与后者的电压波4/电流波1对应；长脉冲LP与电压/电流波5A或5B对应；唯独短脉冲SP只有电压波2对应而没有对应的电流波。实际上众多行业雷电试验标准都引用的权威基础标准“SAE ARP5412A雷电环境试验波形”里也没有波形与短脉冲SP一致的电流波而只有“中”电流波1与“短”电压波2对应成对。

4 传导注入试验

表 G.3 脉冲注入等级

EUT 类别	电压或电流 ($V \pm 10\%$ 或 $A \pm 10\%$)		
	短脉冲 (SP)	中等宽度脉冲 (IP)	长脉冲 (LP)
A	125/250	125/250	不适用
B	300/600	300/600	2000/1000
C	750/1500	750/1500	2000/3000
D	1600/3200	1600/3200	2000/10000
E	不适用	不适用	不适用

注：A 类指设备、电缆良好屏蔽，B 类指设备、电缆部分暴露，C 类指设备、电缆搭接在结构同一部位并完全暴露，D 类指设备、电缆搭接在结构不同部位并完全暴露，E 类指设备工作不受雷电间接效应影响。

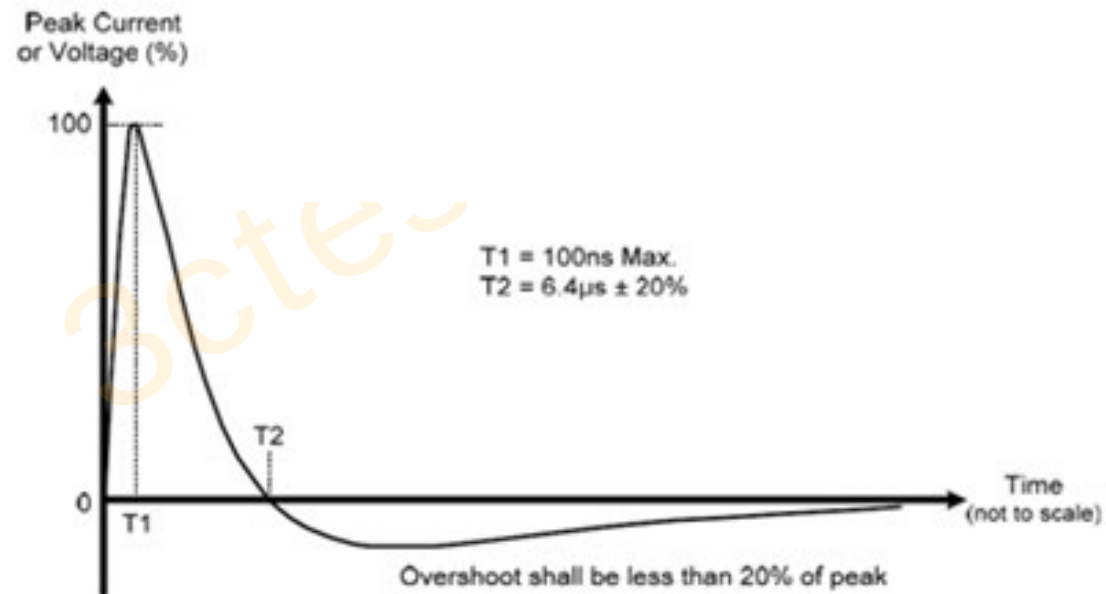
Table 22-3 Test and Limit Levels for Cable Bundles Single Stroke Tests

Level	Waveforms				
	2/1	2/1	3/3	4/1 ^{Note 3}	4/5A
	V_L/I_T	V_T/I_L	V_T/I_L	V_T/I_L	V_L/I_T
1	50/100	50/100	100/20	50/100	50/150
2	125/250	125/250	250/50	125/250	125/400
3	300/600	300/600	600/120	300/600	300/1000
4	750/1500	750/1500	1500/300	750/1500	750/2000
5	1600/3200	1600/3200	3200/640	1600/3200	1600/5000

再者，DO160里与“短”电压波2成对的是“中”电流波1,它们对应孔缝耦合机制成对出现。虽然英军标DEF STAN 59-411 Part 3的Table 27里给出了与短脉冲SP、中宽脉冲IP、长脉冲LP类似波形，但脉冲源内阻却很不同。同时Figure 117 Typical Type 3 Waveform (DCS09.B) (a) 明确是孔缝耦合，但电压和电流相同波形是结构电阻耦合机制特征，所以短脉冲SP波的提法值得商榷。

Table 27 Pulse Waveform and Output Characteristics

Pulse Duration	Short	Intermediate	Long
Rise time to pk (μ s)	0.1 (see Note 1)	6.4	50
Fall time to zero from start (μ s)	6.4 (see Note 2)	-	-
Fall time to 50 % pk from start (μ s)	-	70	500
Max short circuit current (kA)	0.32	1.0	10
Max open circuit voltage (kV)	1.6	5.0	2.0
Generator Source Impedance (Ω)	5.0	5.0	0.2
NOTE 1 This is the maximum time allowed to reach peak amplitude. All other times have a tolerance of $\pm 20\%$.			
NOTE 2 After the zero crossing the pulse amplitude is permitted to undershoot but by no more than 20% of peak amplitude.			



(a) Short Pulse (SP) Waveform Simulating Aperture coupling
Figure 117 Typical Type3 Waveform (DCS09.B)

2) 表G2只给出脉冲电流的表达式，不知是否适用于脉冲电压？若是，则因短脉冲对应孔缝耦合，感应电流波形应与驱动源直击雷电流分量A一致（中脉冲波形），而不是和对偶电压（电流的时间倒数——短脉冲波形）波形相同。原理上说不通，与SAE ARP5412、DO160不一致。建议采纳DO160第22部分的波形。

3) 表G3给出脉冲注入等级，规律应是注入应力随系统/设备安装位置的屏蔽效能减小而增加，但长脉冲电压则所有场景相同，如何解释。建议参照DO160第22部分的等级。

4) 对于互联电缆多余一根的受试系统，各电缆上的试验电流一般大小不同，应以哪个为准？建议以各电缆中最小值为准。

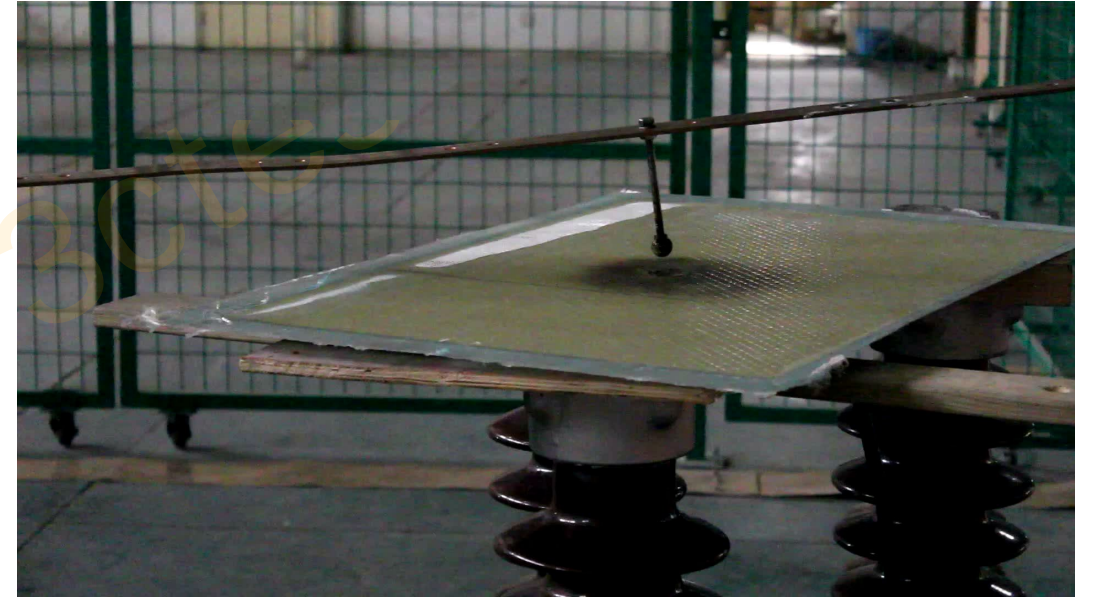
4) GJB8848第13.5.3.3节g) 要求“对于每个脉冲类型进行正负极性测试”，是指短、中、长（2种）共4种波形都做吗？但应该是“短脉冲是孔缝耦合机制产物，用于全部平台；中脉冲属孔缝+电阻耦合，用于外壳局部使用复材平台；长脉冲属电阻耦合展宽波形，用于外壳大部使用复材平台，且金属越少波形越宽，5A→5B。所以建议全金属外壳平台内设备/系统只选短脉冲；使用大部金属+局部复材的平台选短、中脉冲；使用大部复材+局部金属的平台选短、长脉冲。”

5) GJB8848第13.5.3.3节h) 条是何理由，用中脉冲1600/3200替代各等级甚至低等级长脉冲？

6) “对地注入法”名称容易误解为通过对试验接地平板注入干扰进行，实则是把干扰通过受试件的外部接地线注入，施加于受试件接地系统与参考地之间。因为传导类EMS试验都是把干扰施加于注入点与参考地之间，所以不如明确注入点，叫做“对系统参考地注入法”。又现在一般设备机箱就是系统参考地，干脆称为“机箱注入法”，与“PIN注入、电缆束注入”类似。

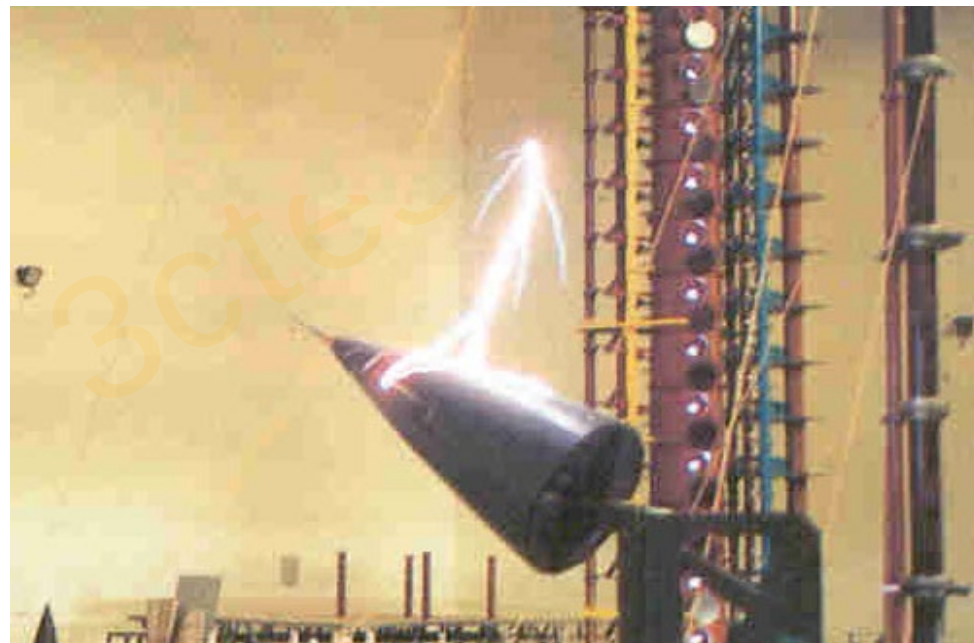
7) 本试验方法最适用于空中平台被雷电直接击中附着场景，模拟平台外壳/结构流经大直击雷电流（无其它路径可走），以结构电阻强耦合导致的内部设备间接效应。而对于地面平台的临近雷电的间接效应，主要机理是直接流入大地的雷电流产生电磁场入射到平台外壳/结构，主要以孔缝耦合和透射方式进入平台内部，再进而在内部设备机箱/电缆产生感应瞬态电压/电流。相对而言流经平台外壳/结构的临近雷电流很小，从而结构电阻耦合很弱，是次要因素。又，D0160里推荐长波形4、5用于对地注入法的原因之一是长脉冲频谱分量更聚集于低频段，感应注入法对电流钳低频频响要求较高。而与结构电阻耦合相关的长脉冲却恰是这里不重要的。

泰思特复杂电磁环境效应产品介绍



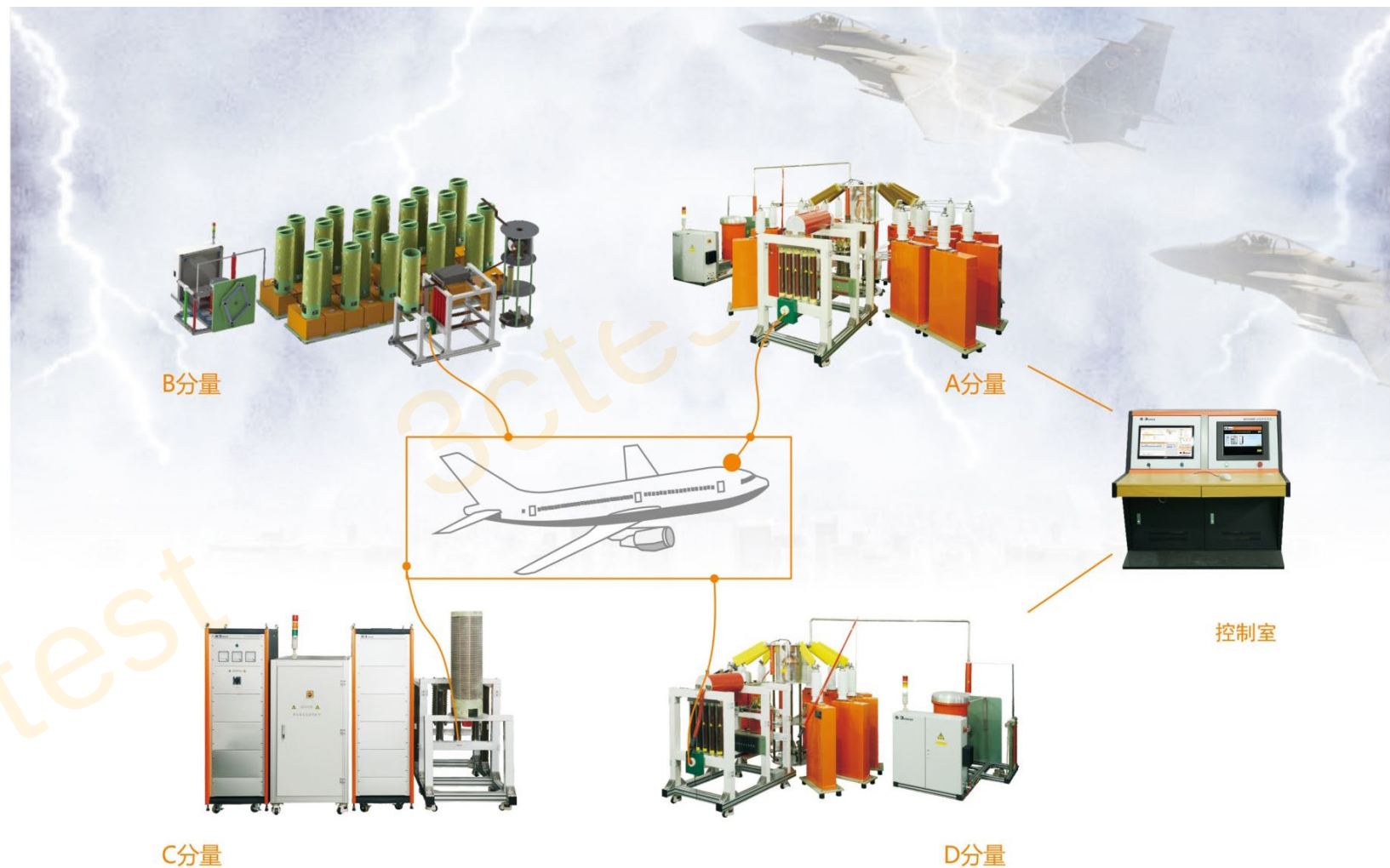
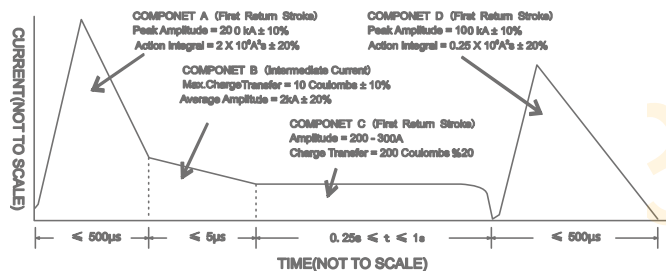


飞机雷电分区试验（等比例缩放）



飞机雷达罩进行附着点试验照片

- MIL - STD - 461GCS117
- DO - 160F/G Section22、 23
- GJB 1389A
- GJB 8848
- GJB 151 、 181
- 、 、 、 、



国内首套雷电直接效应测试系统

- MIL - STD -461GCS117
- DO-160F/G Section22、 23
- GJB1389A
- GJB8848
- GJB151 、 181
- 、 、 、 、



国内首套雷电间接效应测试系统

静电测试系统布局图

- MIL-STD-331C
- MIL-STD-464C
- GJB1389A
- GJB8848
- 、 、 、 、

充电电源

最高输出电压350kV
最大输出电流10mA
带过流、过载保护。

EDS发生器

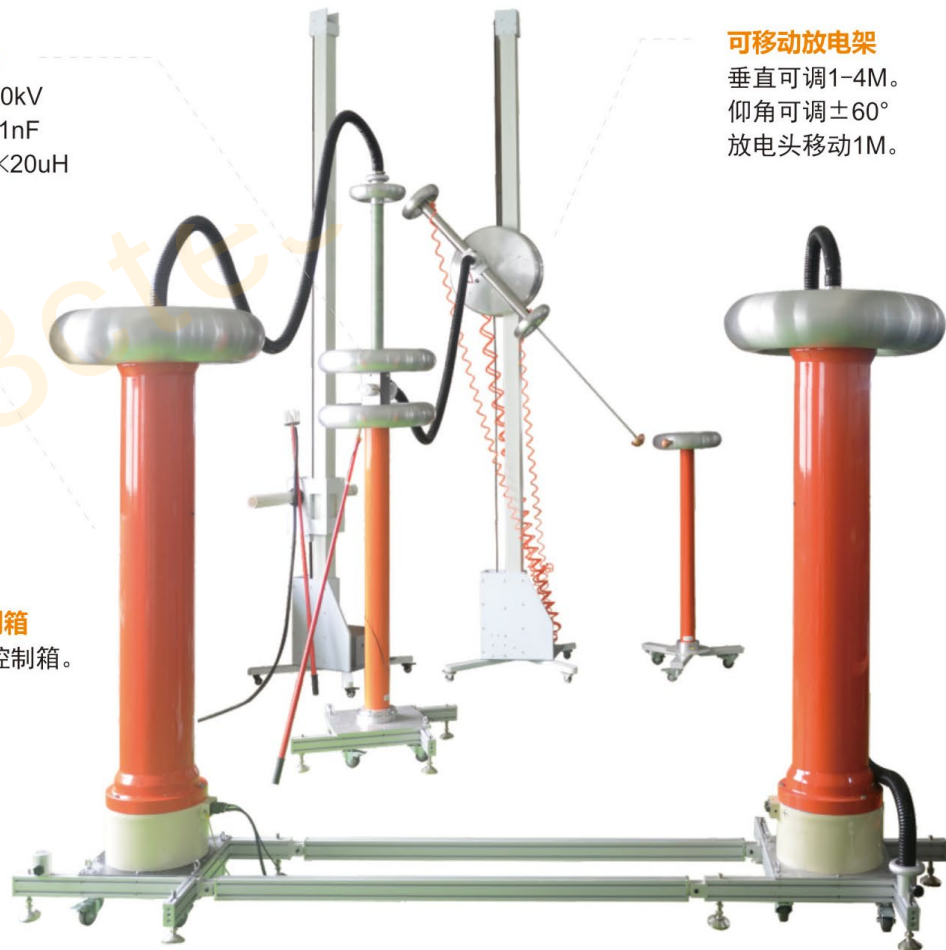
最大充电300kV
储能电容：1nF
回路电感：<20uH

可移动放电架

垂直可调1-4M。
仰角可调 $\pm 60^\circ$
放电头移动1M。

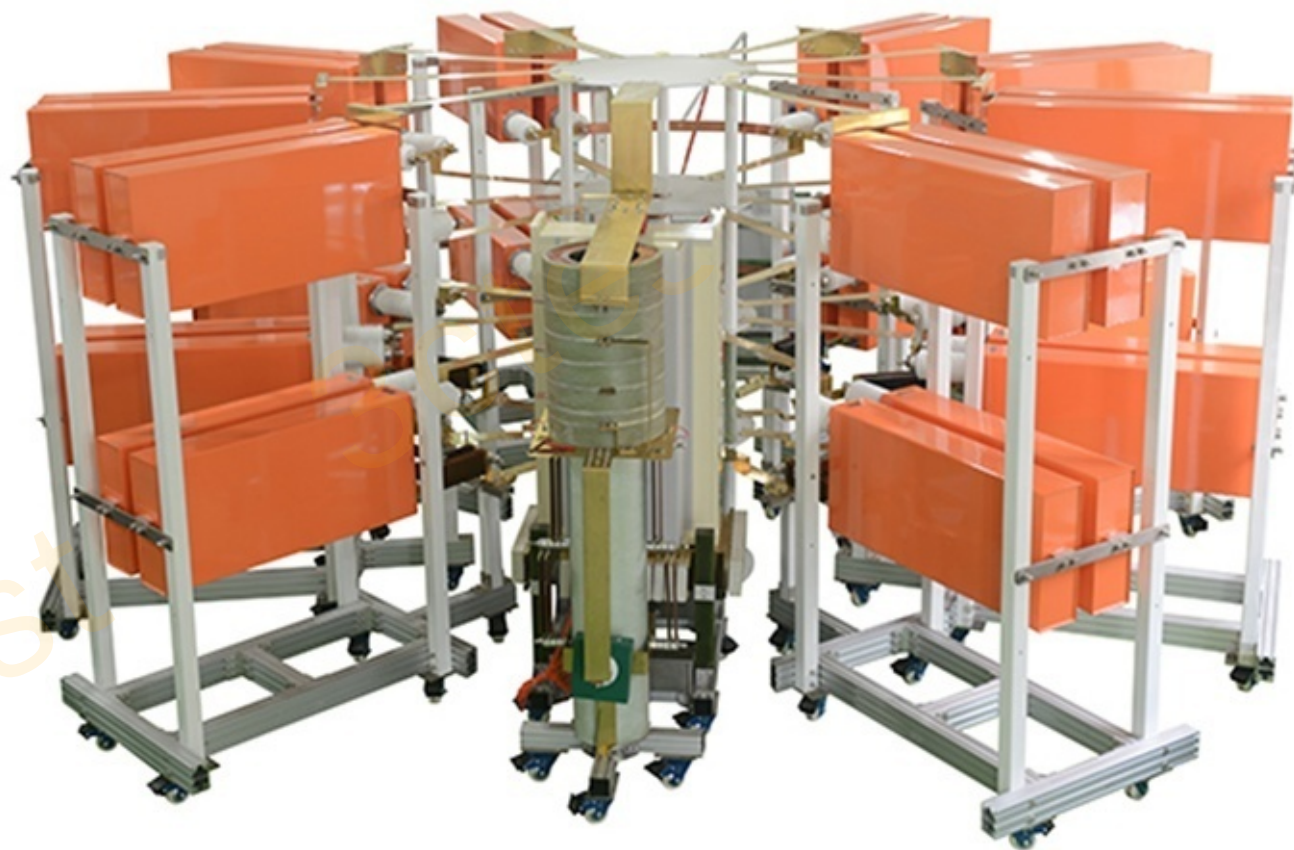
控制箱

8U控制箱。



10/350us 200kA (10MJ)
雷电电流试验系统

- MIL-STD-464C
- MIL-STD-464C
- SAE ARP5412
- RTCA/DO-160F/G
- IEC61400-24
- IEC 61643
- 、 、 、 、



全球最大的Ⅰ类雷电电流波试验系统，填补了国内空白！

方愔 yin.fang@3ctest.cn
18939854887

错误在所难免!

请提宝贵意见!

谢谢!!