



创新 改变世界 **服务** 开创未来





GJB8848地面雷电试验探讨 (一)

2020年4月

方愔

GJB8848涉及雷电试验有2个章节：

第12章 “方法401 飞机雷电试验方法”，

第13章 “方法402 地面系统雷电试验方法”。

第12章节“飞机雷电试验方法”的表12（见下截图）的间接效应栏含机载设备雷电感应敏感度试验，且 § 12.3的试验方法明确按**GJB3567**进行，但**GJB3567**不适用于飞机内部电子电气设备的间接效应试验（见下页截图）。导致**GJB8848**实际没有规定机载设备雷电间接效应的试验方法，不好操作执行。建议参照**DO160-22**实施可基本解决问题。

GJB 8848—2016

表 12 (续)

试验类型	试验项目
直接效应试验	外部部件瞬态感应试验
间接效应试验	整机间接效应试验
	机载设备雷电感应瞬态敏感度试验
燃油系统试验	燃油系统电流试验
	燃油系统电压试验

12.3 试验方法

飞机雷电直接效应和雷电间接效应试验按 GJB 3567 规定的试验方法执行。

军用飞机雷电防护鉴定试验方法

CJB 3567-99

Lightning protection qualification
test techniques for military aircraft

1 范围

1.1 主题内容

本标准规定了军用飞机及其设备的雷电防护鉴定试验方法,给出了一组通用的雷电防护鉴定试验标准波形。

1.2 适用范围

本标准适用于军用飞机及其设备(包括结构、燃油、外部安装的电气电子部件、外挂物等)的雷电直接效应鉴定试验。本标准还适用于外部安装的电气电子部件的雷电间接效应鉴定试验。直升机、导弹及民用飞机等航空器可参照使用。

本标准不适用于飞机内部电气电子设备的雷电间接效应鉴定试验。

GJB8848地面系统雷电试验探讨（一）

雷电直接效应及其引起的间接效应

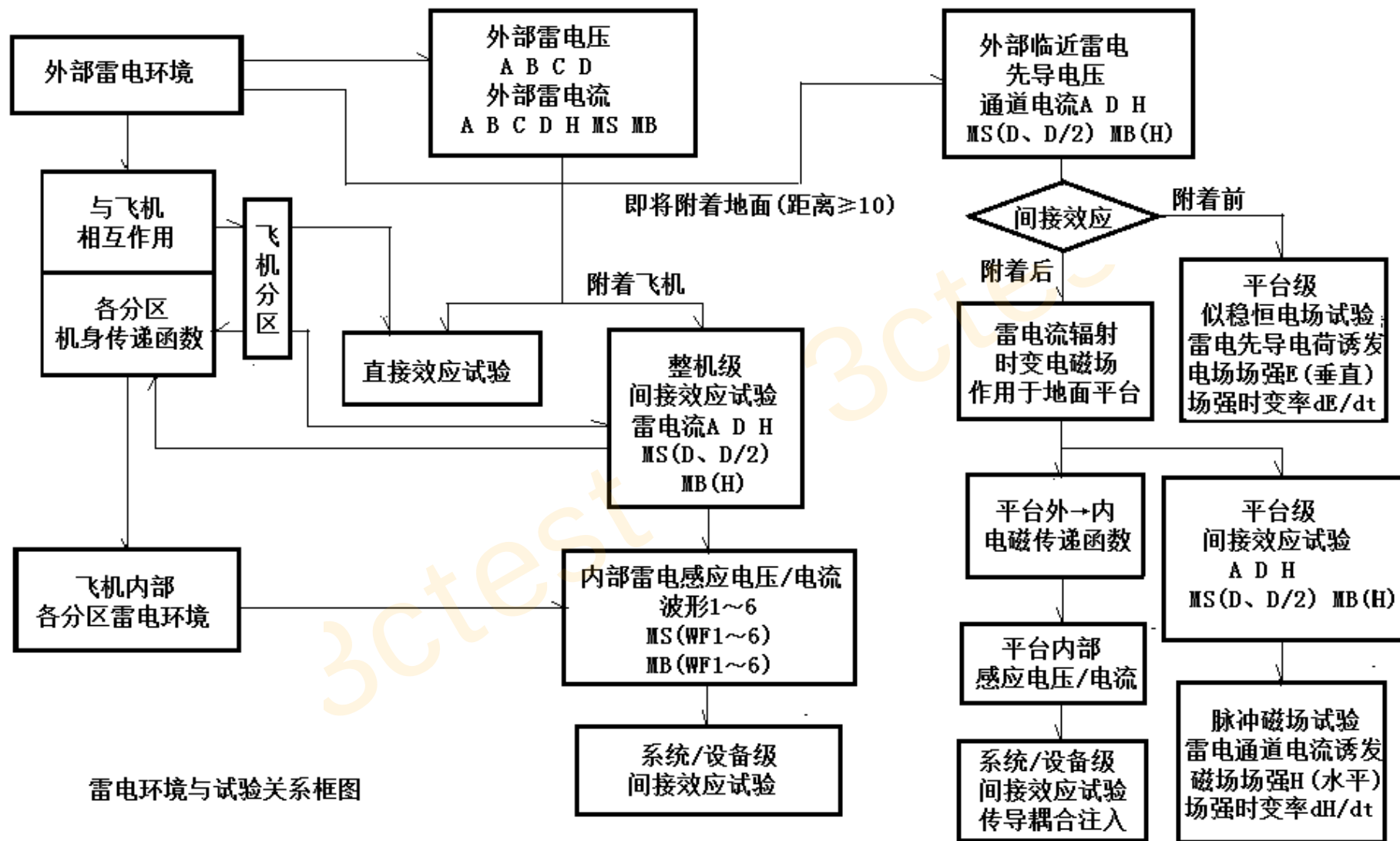
- 目录
 - 1 直接效应试验
 - 1.1 背景简介
 - 1.2 试验重点
 - 2 直接雷电引起的间接效应
 - 2.1 试验原理
 - 2.2 试验重点事项

对应**GJB8848**第**13.4**节雷电直接效应试验方法，与**GJB1389A**第**5.4**节“雷电”中直接效应雷电环境（图1）要求相呼应。其中部分与**DO160**第**23**部分的电弧引入大电流损毁试验类似。

1.1 背景简介

先大概介绍雷电环境及相关实验的关系，以便有一个全局的了解，结合下图来说明。其中含下节课谈到临近雷电及相关实验。

1 直接效应试验



雷电环境与试验关系框图

地面物体被雷电击中附着前，雷电先导逼近物体在其周围形成高强电场，它强力电离、击穿通往物体导电体路径上所有介质——空气、绝缘物。附着并经过导电体继续向前发展直至地面异性电荷中心，形成闭合雷电通道。作为雷电通道一部分的物体上将流过强大的瞬态雷电流。

为了尽量真实模拟该过程，理想的试验是先用高压对受试件附着，随即对受试件注入大电流。但是目前工业界可承受经济成本及其相应工程技术水平，商用试验雷电瞬态源功率容量远小于自然雷电，达不到上述要求，难以接连瞬间提供这么高数量级的高电压和大电流。

不得已把雷电直接效应试验拆分成两步走：高电压雷击附着试验和大电流物理损毁试验。高压附着试验用于确定EUT上可能的雷电附着位置，发生电晕、流光、电弧的情况；当设备被电介质物体覆盖时，确定横跨或穿透电介质覆盖物的飞弧/闪络或击穿路径。大电流物理损毁试验用于确定在雷电通道附着于受试件期间直接注入的雷电电流对其形成的破坏。

对于附着、流光、击穿/闪络类高雷电压试验，受试件表面场强至少达空气电离门限才可能完成。除了场强/电压足够高，功率容量只须提供击穿介质/附着导体形成可观察到痕迹所需能量，而不必真实模拟自然雷电携带的实际能量要提供几百kA强大瞬态峰值电流。多少降低些试验瞬态高压源的技术难度和经济成本。

对于物理损毁的大电流试验，试验瞬态源则不必提供附着所需超高压，只要能输出几百**kA**瞬态电流即可，同样降低了试验瞬态电流源的技术难度和经济成本。但同样要注意瞬态源应具有足够大的功率容量，即其短路电流**I_{sc}**电平必须甚大于标准要求的电流分量的电平值，这样才能保证试验中流经**EUT**的电流达到标准电流分量电平。因为瞬态源必有内阻（等于其输出端的开路电压/短路电流），而**EUT**等效阻抗总大于零，使得有负载回路试验电流总小于瞬态源短路电流**I_{sc}**。又，**EUT**等效阻抗与源阻抗相差越大，向**EUT**转移的能量越小，只有**EUT**等效阻抗与源阻抗相等匹配时才转移最大能量，且仅为瞬态源功率容量的四分之一。

1.2 试验重点事项

● 试验目的

GJB8848第13.4 节雷电直接效应试验方法只涉及了上述1.1节里大电流损毁试验部分，其目的有两个：一是实测评估从受试件附着部位向其它导电构件传输扩散超强雷电流承受能力，主要考察内容有，

- 1) 电弧根部受试件表面热斑点形成。
- 2) 熔穿情况。
- 3) 防护层的充分性。
- 4) 构件连接部位情况（火花及烧蚀）。
- 5) 受试件上关注点处感应电压和电流电平。

二是关注受试件内部/军械中**EID** 的感应电流或电压，考察实测值是否在允许范围内。但是后者实际变成了直接雷击引起的间接效应，应该参照第**13.5**节的试验方法进行，也是下面第**2**节要讨论的。大电流试验主要关注直接效应的物理损毁。

试验是平台级的，试验对象是露天使用有可能被雷电直接击中附着的地面平台。也可以扩展到露天使用的地面大型系统/设备。

如果受试件为仿真件，则其外表层（如底漆、面漆、防静电涂层、电介质盖板等）与实际完全一致，且应安装在代表平台实际场景的试验工装上（工装一般导电并连接至大电流源回线端），受试件所有导电物（如防静电漆）与工装的电搭接与实际安装一致，保证电气连续性很重要，但搭接电阻值可超差不甚关键。

受试件的电流引入点至少是由高电压雷电附着试验所确定的那些附着点。

● 试验波形

直接效应关注能量——幅度和作用积分，间接效应除了能量更关注时变率，二种试验所用同一种电流分量也有不同波形。以雷电流分量**A**为例，尽管峰值电流相同，但时变率却差异很大，直接效应试验波形的前沿约**50 μ s**，间接效应试验波形的前沿约**3 μ s**，后者时变率快一个数量级。

试验采用雷电流分量A、B、C、D。

注意这里分量A、D的波形前沿允许长达50、25 μ s，如下图



图14B 雷电流分量A单向指数波形
(适用直接效应试验)

1 直接效应试验



图20A 雷电流分量D单向指数波形
(适用直接效应试验)

但第**13.4.2 c)** 条没明确这些分量是单独施加，还是组合连续施加。建议先分别独立施加，再施加部分组合波**A/D+B+C**，或全组合波**A+B+C+D**，见下图。

同样也没明确电流极性，由于负极性大电流/高压对受试件损伤更严重，建议允许只采用负极性雷电流分量。

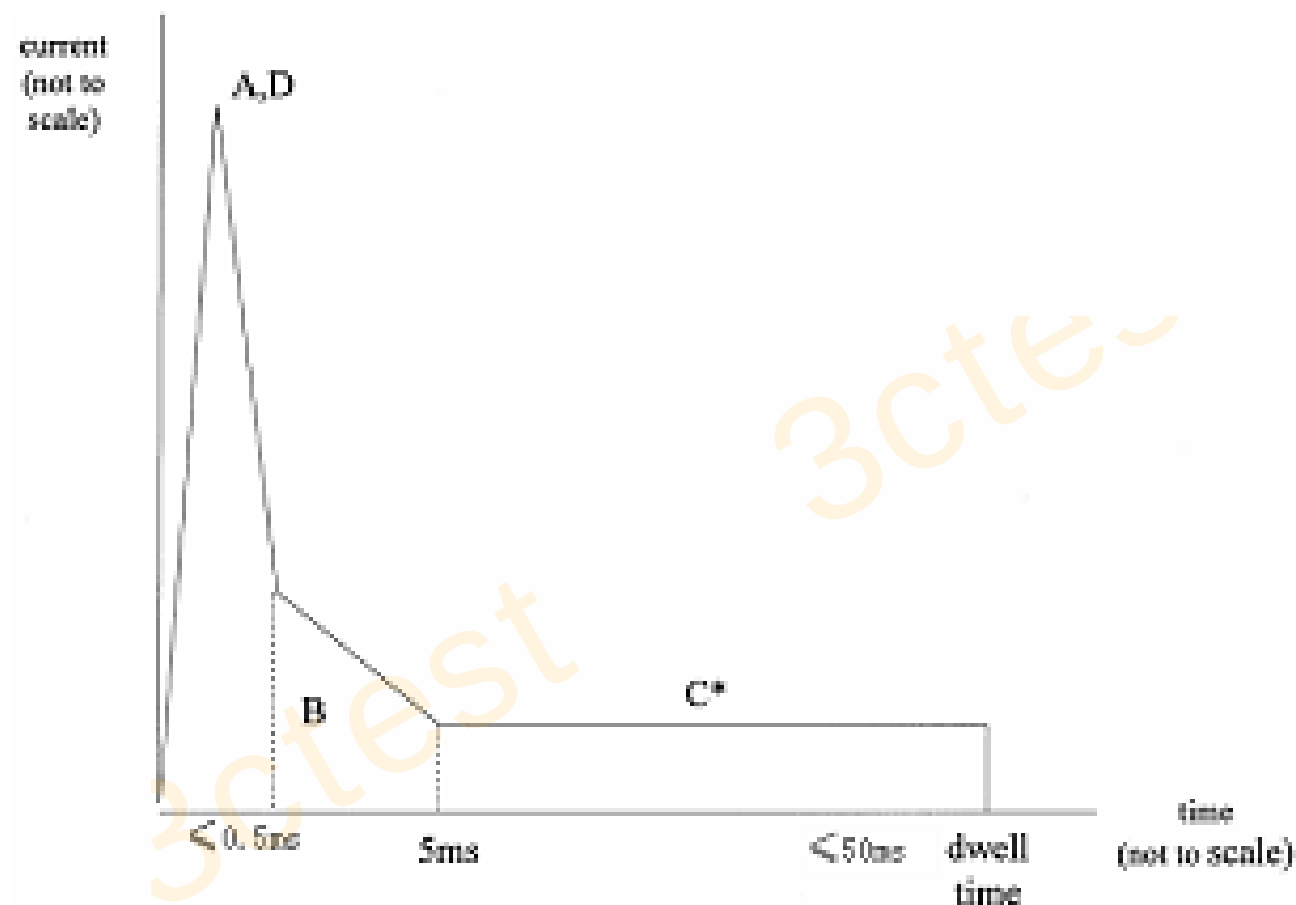


图19 雷电流分量A/D、B、C*组合波形
(适用直接效应试验)

1 直接效应试验

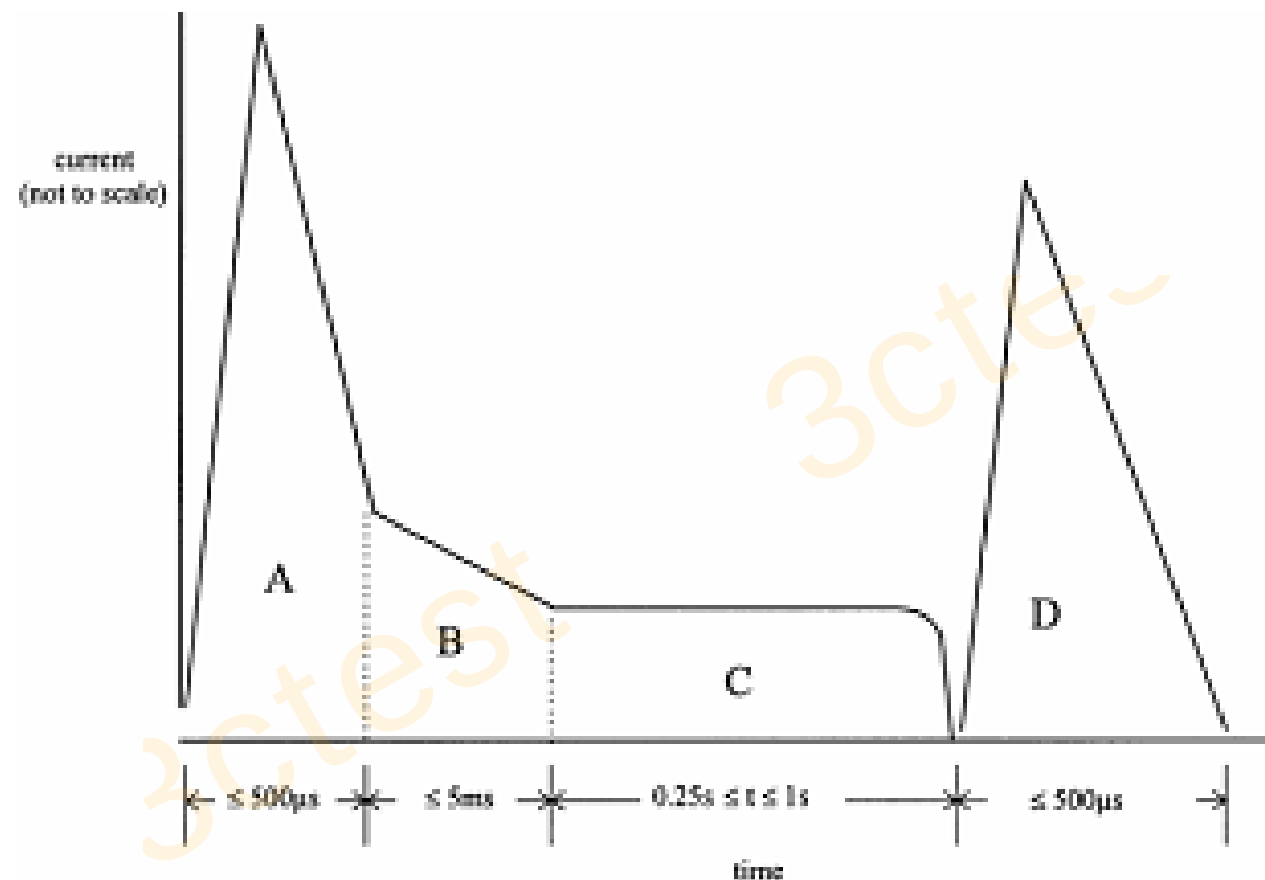


图10 雷电流分量（适用直接效应）

- 试验应力校准

GJB8848第13.4.3 c) 条在没有受试件情况下进行试验应力校准定标，显然负载阻抗与有受试件时不同，导致受试件遭受的应力有不确定性。所以建议在试验中实时监测调控流经**EUT**的电流波形，可归入应力实时监控类试验。

又因为电流源内阻（含调波组件）给定，故波形随**EUT**等效阻抗变化。所以电流源除了能输出较标准规定值大相当余量电流，其内阻抗需有足够调节范围，以适应不同负载仍可输出满足要求的波形。即流经**EUT**的电流幅度和波形（或作用积分）与标准规定电流分量的一致，保证**EUT**承受了规定的大电流产生的耗散能量。必要时还可微调电弧引入/放电间距。

● 试验电极

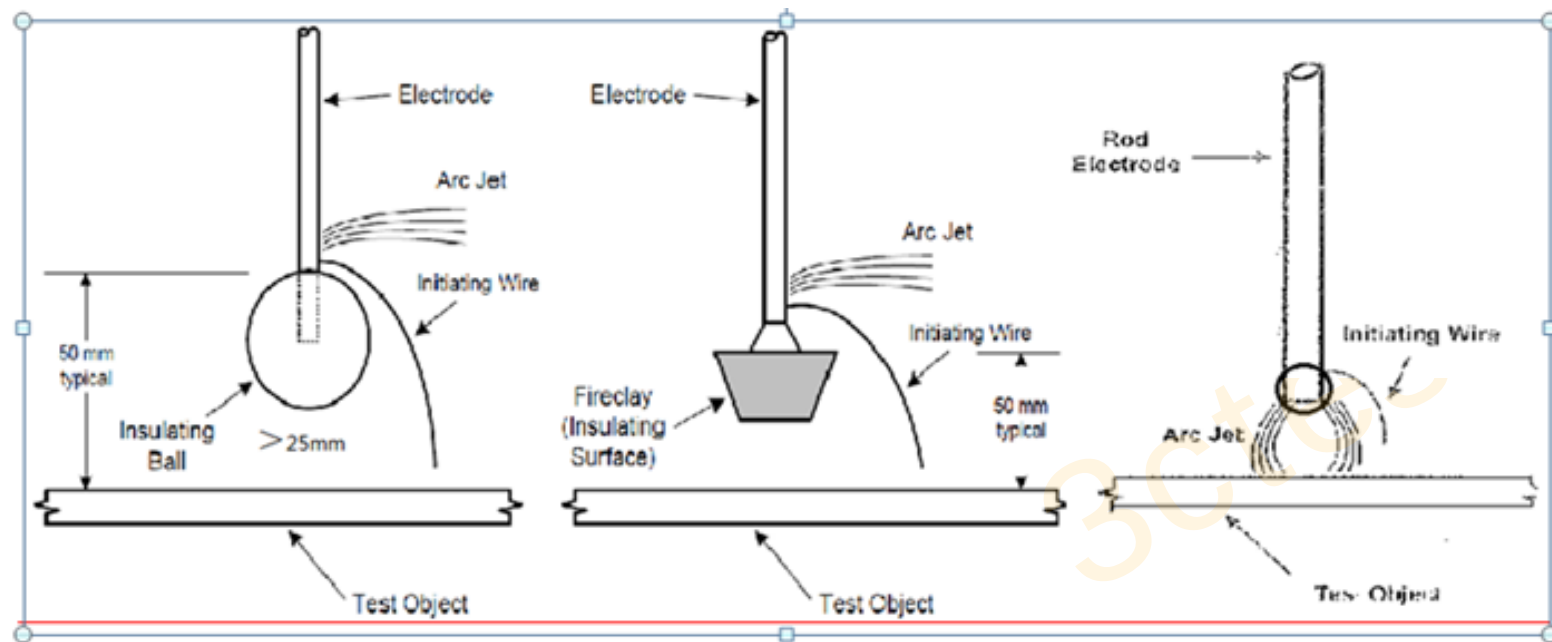
GJB8848第13.4节没有对试验电极提要求。

因为从电极发出的电弧呈喷射状并含有细微颗粒，距离小于**50mm**时会对受试件附着点表面形成爆炸/冲击波破坏，若不考虑这种效应，则要设法让喷射状电弧转向不**直接**射向受试件表面。用绝缘材料包裹覆盖棒状放电电极顶端，就可达到此目的。若需要计及爆炸/冲击波破坏效应，则使用普通棒状电极。建议如下，

1) 绝缘头转向喷射型电极，其正对受试件的电极顶端覆盖绝缘材料，以迫使电弧从不对着受试件的电极侧表面喷射转向发出（如后上图）。在去除雷电附着引起的爆炸/冲击波效应影响时使用。

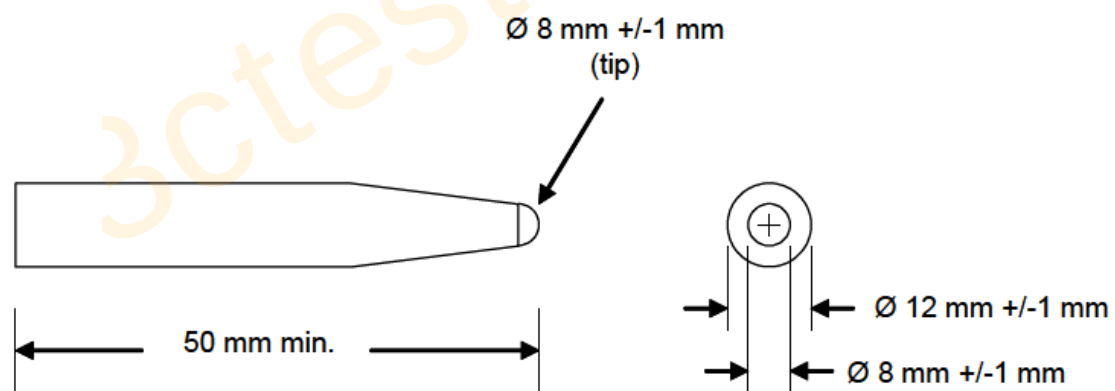
2) 导电球头棒状直喷电极： a) 同扫掠附着试验用电极，直径**12mm**长**50mm**棒状电极顶端是直径**8mm**半球体（如后下图）。 b) 同模型附着试验用电极，直径**12mm**长**50mm**棒状电极顶端是直径**50mm**球体。在包含雷电附着引起的爆炸/冲击波破坏效应时使用。

1 直接效应试验



(a) 不含附着时爆炸/冲击波效应

(b) 含附着时爆炸/冲击波效应



- 放电间距

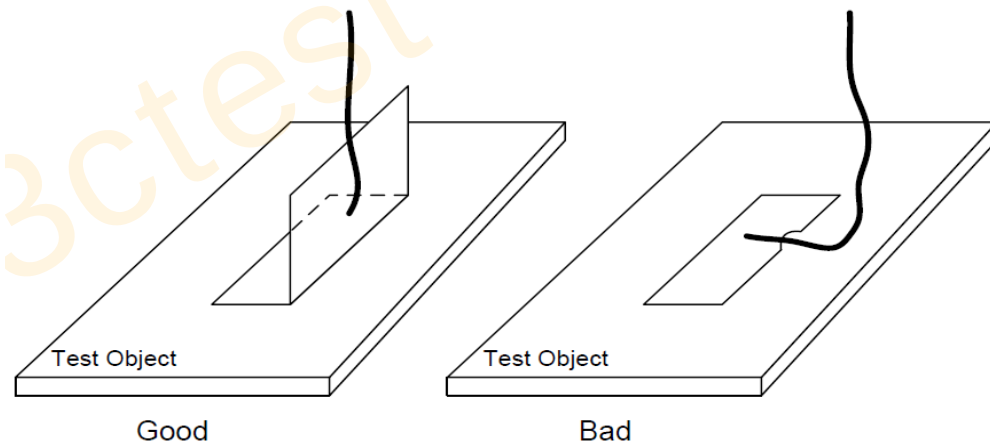
即电极端顶至受试件表面附着点之间距离。

对于导电球头棒状直喷电极一般 $\geq 50\text{mm}$ 。以避免爆炸/冲击波效应影响。

对于绝缘头转向喷射型电极电极暴露的导电表面与受试件表面附着点的间距不小于 50mm ，电极顶端绝缘材料与与受试件表面附着点的间距不小于 25mm 。

- 引弧金属丝:

因为试验考察的是大电流产生的损毁效应，驱动源必须提供大电流但不必输出高压，而一般大电流源恰好难以输出高电压。所以允许采用小放电间距降低击穿间隙空气引发电弧的难度，并且还可以使用导电细丝引弧进一步容易放电飞弧。为直径小于**0.1mm**细金属丝，用于把电弧引导至受试件上期望的附着点，丝顶端距离附着点约几毫米，不得与受试件表面直接接触。



讨论：目前相关标准资料都假设雷电附着前瞬间0-先导顶端距离附着点**50m**。但大电流试验要求试验电极与受试件间距约**50mm**，还可以使用引弧细丝进一步减小放电间隙。如此巨大差距的原因可以从试验目的——期望得到与实际场景等效的结果来解释。大电流损毁试验主要考察受试件上流通超强雷电流时，其结构（尤其是不连续构件连接/搭接处）有无物理损毁，不是寻找雷电附着点，这要求试验电极在电弧放电同时能输出强大电流。为使用输出电压较低的瞬态源，只能减小电极-受试件的放电间距来保持受试件处电场强度够大——恰为受试件导电表面处空气电离击穿门限值。这样瞬态源就不必提供附着所需超高压，只要能输出几百**kA**瞬态电流即可，降低了试验瞬态电流源的技术难度和经济成本。

2. 直接雷击引起的间接效应试验

必须说明间接效应都是雷电引起的，这里强调“直接雷击引起的间接效应试验”，是因为它相对DO160第22部分为代表的间接效应试验，虽目的类似却采用的方法很不同：前者用模拟受试件外部直接雷电环境作为激励，作用于受试件外壳引起，受试件是被雷电直接击中的地面平台（或被直接雷击的外部系统/设备），试验是平台级的；后者用模拟受试件内部感应雷电环境作为激励，作用于平台内部系统/设备引起，受试件是会不会被雷电直接击中的内部设备，试验是设备/系统级的。

对应**GJB8848第13.5.1** 直接雷击引起的间接效应试验方法，
与**GJB1389A第5.4节**“雷电”中由直接雷击引起的雷电间接
效应环境（图2和表7）要求相呼应。

2.1 试验原理

被击中的地面装备平台成为雷电通道的一部分，超强雷电流瞬间通过平台外壳/结构导电体后流出到地，一般雷电流有1个入点和一个出点（多在尖锐导体端顶）。雷电作用于平台外壳/结构先产生直接效应，然后雷电流及其伴随电磁场以孔缝/结构电阻/透射耦合方式穿过平台外壳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从而对驱动源的响应瞬态的大小，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。

试验是平台级的，试验对象是实际使用中可能被雷电直接击中附着的地面装备平台。试验时，把瞬态电流源产生的所要求电流幅度和波形，通过电弧引入或直接接触方式与平台连通（一般在突出尖锐端顶），使电流尽量模拟实际的雷电流分布通过平台，在此期间同时考察平台及其载荷的结构强度、功能、性能、抗损毁能力；还可在平台内部监测各关注点（如军械的电起爆装置敏感电路点）感应电压/电流，评估安全性；以及完成平台内各关注点的外→内电磁传递函数/屏蔽效能测量。

2.2 试验重要事项

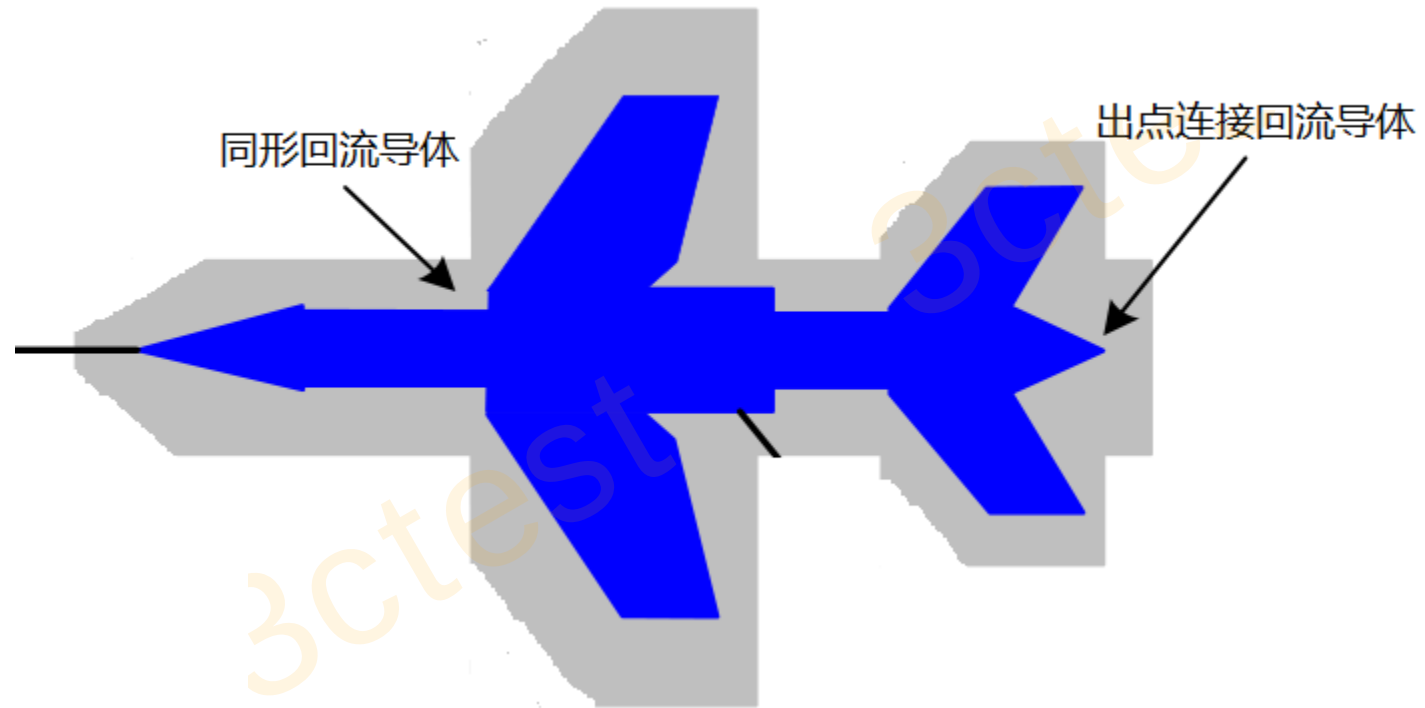
1) 回流导体

为注入流经平台的实验电流提供返回驱动源的受控路径，以期平台处于一种准同轴平面波电磁场环境中，尽量模拟实际雷击场景下平台表面雷电流的准均匀分布。要求回流导体等效阻抗尽量小，一般电阻小于 **1.0Ω** ，电感小于 **$20\mu\text{H}$** 。主要有以两种形式。

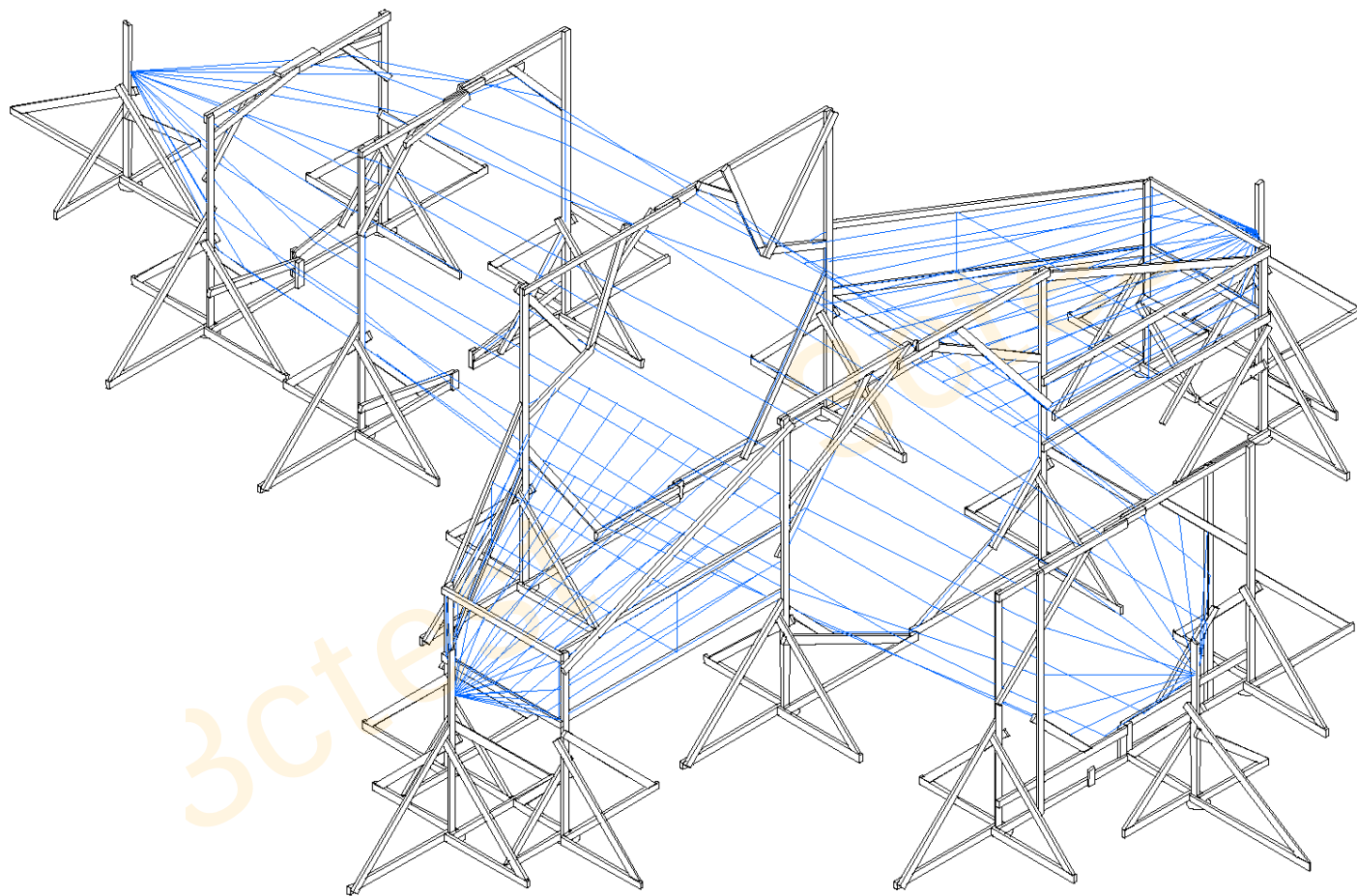
刚性大块导电平板适合大型平台，面积形状略大于平台地面正投影轮廓，置于平台下方且与大地绝缘。

刚性/半刚性/柔性栅格网笼适合小型平台，笼网由栅格条框（刚性/半刚性/柔性）和关节点连接而成。每根栅格条框两端连接关节点，每个关节点可连接4条以上栅格条框，按需可拼装组合成任意大小形状笼网。所有端接关节点的栅格条框之间相互电搭接（阻抗 ≤ 0.1 欧），关节点可按需安装在绝缘支撑架上，支撑架固定于平台外表面，支撑架高度可调。使得整个笼网罩在平台外，依平台外壳随形铺设，与平台表面等间距且可调。整个笼网连续导电，等效电感不大于 **$20\mu\text{H}$** 。

2 间接效应试验



2 间接效应试验



讨论：

目前实际被雷击中场景下平台表面雷电流分布究竟是怎样的，不是很清楚没有定量的分布图。而可确定的是，靠得近面积大的回流导体使平台表面流过更密集的注入电流，所以回流导体形状位置及其布置对试验结果影响很大。并且雷电附着点、材质、形状各异的不同平台表面雷电流分布必有差异。是一个很好的研究课题，值得深入探讨。

2) 雷电流注入/流出方式

首先雷电流注入/流出点应至少包括受试件已确认的直接雷击附着点。通常是受试件尖锐突出、边缘部分等部位。

平台上雷电流入点和出点与瞬态电流源/回流导体的连通方式有**3**种：电弧引入、接触搭接、串接电阻。它们在闭合雷电流通道里呈现不同阻抗特性，会影响通道中电流幅度波形以及电流密度分布。

较理想的方式是完全模拟实际雷击场景，入点和出点都采用电弧引入方式，但这样对瞬态电流源性能提出较高要求，即要能通过大电流又要能输出高电压。所以目前多采用入点电弧引入，出点接触搭接或串接匹配电阻的方式，较好地平衡了仿真和高性能电流源的各自要求。实际这也是一个很好的研究课题。

雷电飞弧一般有千欧级阻抗，而平台导电外壳阻抗相对很小。因此对于注入/流出都是飞弧的连通方式，电流在注入/流出点类似开路形成波节，在平台中部类似波腹，沿注入/流出点连线电流分布呈二分之一波长振荡形态；对于注入用飞弧、流出短接的连通方式，电流在飞弧注入点类似开路形成波节，在短接流出点类似短路形成波腹，呈四分之一波长振荡形态。它们会导致不同的平台表面电流分布。

受试平台上雷电流注入/流出点的选取、雷电流注入/流出连接方式、回流导体结构形状布置，都直接影响着平台表面电流走向和密度分布，从而进一步影响平台内部电磁场分布及其产生的间接效应——导体/线缆上感应电压/电流。

本试验效果好坏的关键在于逼真模拟实际场景下受试件表面雷电流强度及分布。分布涉及两个方面，一是真实受试件表面雷电流分布，可依赖实测、经验、数值仿真计算得到；二是如何配置试验设施使注入试验电流尽可能逼近实际分布，这与雷电流注入/流出点的选取、雷电流注入/流出连接方式、回流导体结构形状及与受试件间距等都密切相关。值得深入研究。

3) 试验波形

雷电流的峰值电流、电流变化速率直接决定间接效应的强弱，所以注意试验波形不仅有第**13.5.1.3 c)**条明确的雷电流分量**A**、**D**、多重回击**MS**（由**D**组成），建议还应包括高幅度快变特性的雷电流分量**H**、多重脉冲组**MB**（由**H**组成）。它们都是试验应力的驱动源。

注意用于间接效应试验的直接雷电流分量**A**、**D**要选择快波头（ $\leq 3\mu\text{s}$ ）的波形。

4) 试验应力监控

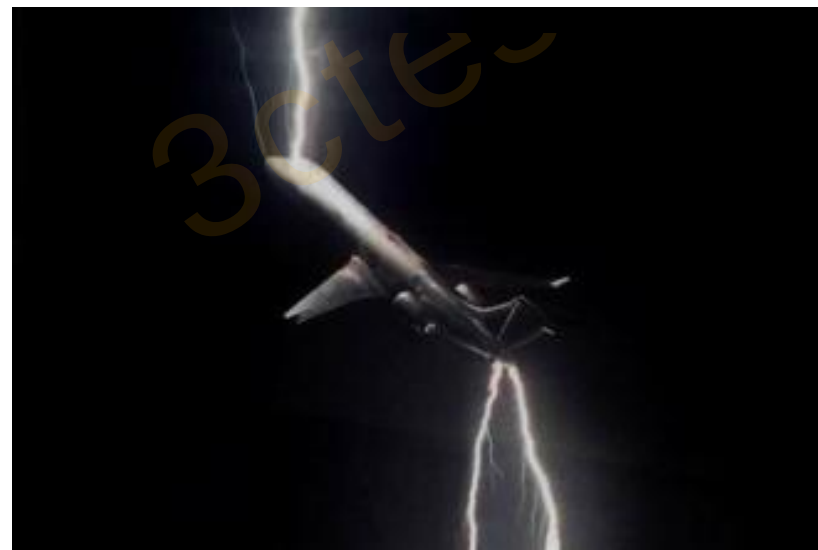
本试验属应力实时监控类试验，需在试验中实时监测调控流经受试平台注入点的电流幅度和波形。

因为瞬态电流源内阻（含调波组件）给定，故波形随受试平台+回流导体等效阻抗变化。所以电流源除了能输出较标准规定值大相当余量电流，其内阻抗需有足够调节范围，以适应不同负载（受试平台+回流导体）仍可输出满足要求的波形。即流经受试平台的电流幅度和波形（重点时变率）与标准规定电流分量的一致，保证受试平台在规定的大时变电流下产生电磁响应。凡是影响注入电流幅度和波形的因素都可作为调控参数。

一般地面装备配有“避雷针接闪-专有雷电流通道导流-接地桩泄流”系统防护措施，其导流通道可远离关键敏感设备（尤其是固定系统/设备），移动装备也可通过金属链条与地面接触导通，基本可以避免雷电直接效应的损坏和影响。所以主要关注雷电间接效应，更确切些是邻近（与雷电通道/附着点距离约**10米**）/附近雷电引起的间接效应。这正是下节课要讲的内容。

泰思特部分雷电试验设备

高电压试验设备和场景



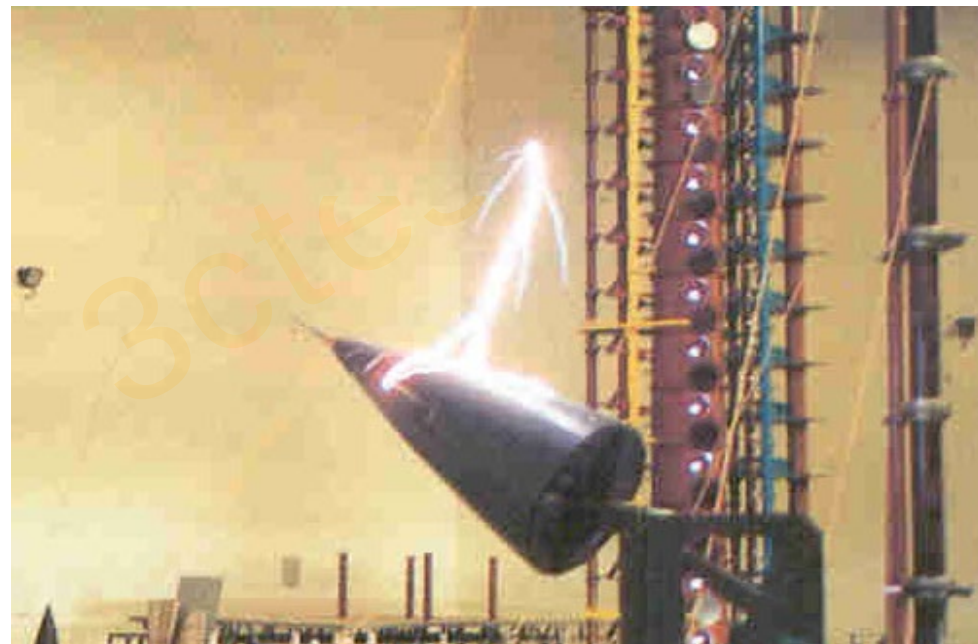
高电压试验设备



高电压试验场景



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

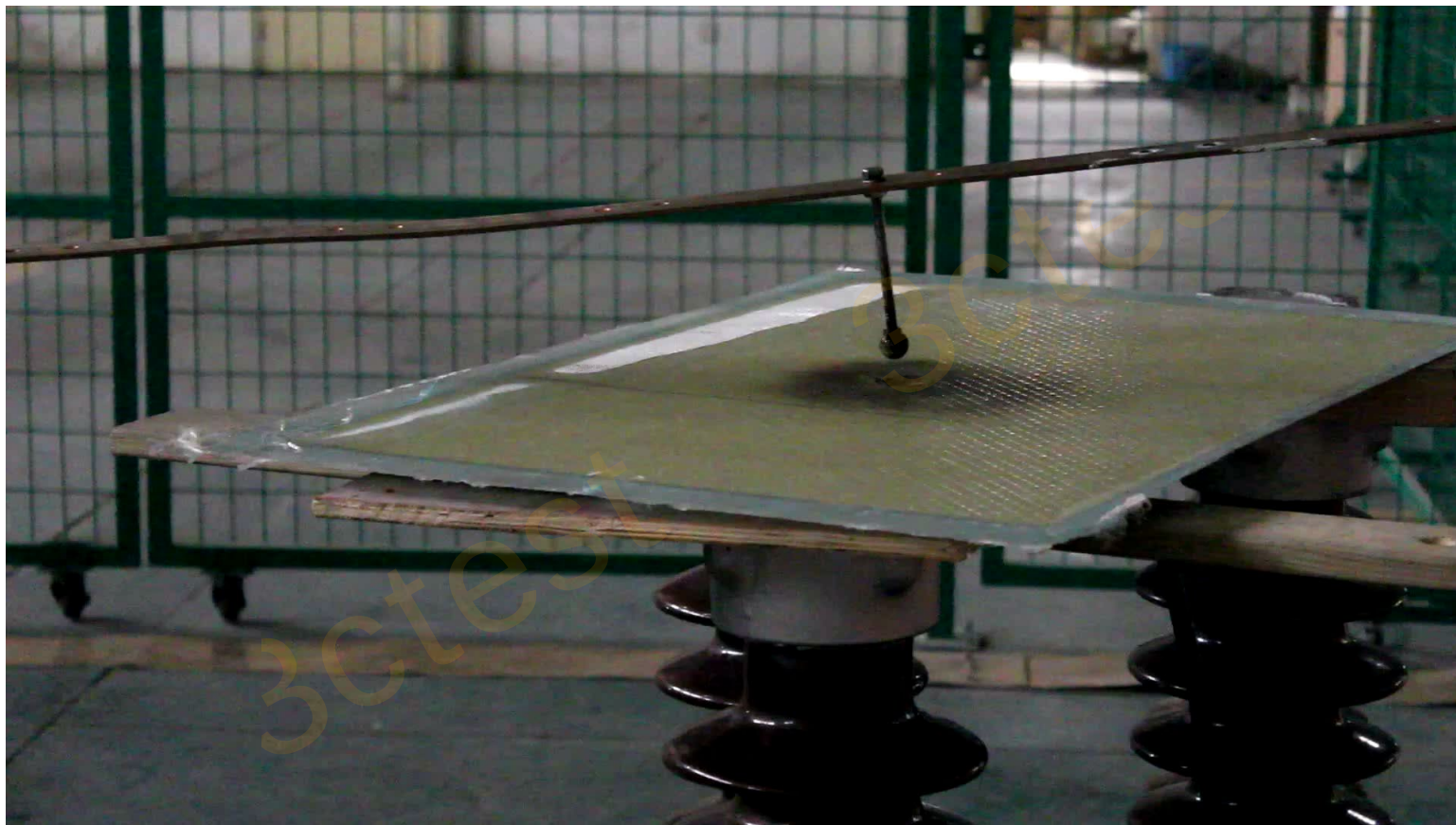
大电流试验设备



大电流试验场景



大电流试验场景



机载设备雷电感应效应 (DO 160 S22)

• 雷电感应效应试验（间接效应）

- 模拟雷电放电过程时，机载设备以及连接导线上形成的瞬态信号对机载设备造成的功能失效等
- 通过插脚注入、电缆线感应等方式模拟在机载设备中感应到的雷电效应



ETS 160MB



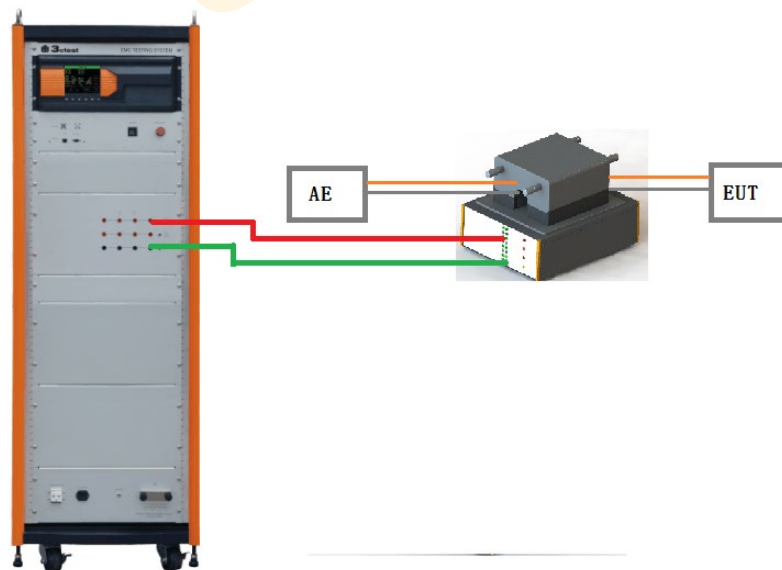
LSS 160



DO 160 S22

间接雷电试验

- PIN 测试
- Cable bundle测试



方愔 yin.fang@3ctest.cn
18939854887

错误在所难免!

请提宝贵意见!

谢谢!!