



创新 改变世界 **服务** 开创未来





飞机静电综述及试验

2020年6月

方愔

飞机静电综述及试验

目 录

1 飞机静电环境

2 飞机静电试验

1. 飞机静电现象

1.1 沉积静电的产生

与大地绝缘的任何平台（如飞行或地面的固定翼/旋翼飞机、胶轮车辆）上都会出现沉积静电，其产生的主要原因是：

1) 摩擦起电，任何两个物体相互接触或分离时都会发生电荷迁移，次数越多电荷迁移量越大。因此微粒与平台外表面接触摩擦碰撞破裂等相对运动会生成静电荷，当平台没有向外界泄放导电通道时就沉积下来。如飘落/撞击/流过平台外表面的尘埃/砂砾/雨滴/雪花/冰粒等等，典型的对地绝缘平台外表面如飞行中固定翼飞机机身及机翼、飞行中旋翼机机身及旋翼、悬停直升机的旋翼、停机坪上的飞机、行驶的车辆等（下面基本仅讲飞机，车辆可类比）。

- 2) 发动机等机电设备喷射出的带电离子。
- 3) 接近穿越带电云层时的静电感应。

飞机金属蒙皮和架构上外来的沉积静电荷（多为正电荷）会在导体上四处迁移直至整个飞机金属构件为等电位体，且静电荷由于同性排斥而都位于表面以彼此保持可能最大间距。与之相对，飞机外表的绝缘构件上外来的沉积静电荷不能自由迁移，只有少数能量大的通过表面逃逸出去，多数只能滞留在生成部位更容易积累起来从而产生高静电电压。

因为无论什么方式产生的静电荷，其静电效应本质是一样的，所以后面不再强调沉积静电和区别对待。

凡带静电荷物体的电位足够高时（无论由哪种方式产生），会电离表面空气生成电晕甚至击穿气隙对附近其它较低电位物体放电以浪涌电流形式转移电荷。带静电物体电位 $U=Q/C$ 、电能 $E=CU^2/2=QU/2$ 。放电过程中，放电体和受电体的电位和静电能都会瞬间快变（小电容量物体电位变化更为显著），导致电磁效应。一般多关注转移电能大小（与幅度、脉宽成正比）会否造成物理损毁；而对低电平敏感数字电路，脉冲前沿陡度同样重要（与幅度及其时变率成正比），可能造成电子设备功能失效或性能降低。

1.2 静电的影响

- 1) 静电荷转移特征：2个电位不同物体接触或靠得足够近，其间就会类似短路放电以浪涌形式转移静电荷（即浪涌电流），瞬变放电浪涌电流必伴随有瞬变电磁场。静电放电前直至放电电流结束整个期间，放电体静电压由最高降至与受电体等电位（接触放电），电压快速瞬变同样必有伴随瞬变电磁场。
- 2) 导体表面带电特征：导体表面沉积电荷的密度因同性相斥与表面曲率形状有关。原因：导体内部电场为零，外部电力线垂直于表面，沿直线作用。平表面上一定间距的2电荷，表面变凹时间距变小而相互作用力变大；表面变凸时因电场力不能通过导体内部，空间距离反变大而相互作用力变小。所以，在凹的部位电荷密度最小可接近零，在平缓的部位电荷密度持中，在尖锐外凸部位电荷密度最大，伴随电场强度最大。

- 3) 空气电离：通常情况下空气是不导电的，但是外加强电场的作用下，空气分子中的正负电荷受到方向相反的强电场力作用反向移动直至被“撕”开，形成可自由移动的正、负离子，这种现象就是空气的电离。这样的等离子空气就导电了。
- 4) 尖端放电：随着静电荷的沉积，飞机与周围大气会产生很大的电势差，在外凸尖端处电场强度相对最大将首先电离、击穿空气，形成尖端放电。

5) 放电种类：主要有电晕放电和火花放电两种。

当导体带电量较小而端部较尖时电位较低, 多为 **电晕型**放电。这种放电只在尖端附近局部区域内进行（类似开路），使这部分区域的空气电离,并伴有微弱的荧光和嘶嘶声。因放电能量较小，这种放电一般不会成为易燃易爆物品的引火源,但可引起其它危害。

当导体带电量较大而端部较钝时电位较高，多为 **火花型**放电。这种放电伴有强烈的发光和声响,其电离区域由尖端扩展至接地体(或受电体),在两者之间形成闭合放电通道（类似短路）。由于这种放电的能量较大，其引燃引爆及引起人体电击的危险性较大。

6) ESD的效应:

主要有介质高压击穿、非放电点处间隙二次击穿、放电电流电阻压降 RI 、时变电流感应电压 Ldi/dt 、时变磁场感应电场 $E=d\Phi/dt$ 、时变电场感应磁场 $H=dD/dt$ 、电场感应电压等。

1.3 人体静电放电过程

按顺序发生下列事件

- 1) 带静电手指接近物体表面开始放电前，间隙空间存在电场，但不存在放电电流从而相关磁场。
- 2) 一旦间隙小到空间电场强到开始电离击穿空气形成放电，间隙电压在**50ps~5ns**内迅速跌落至**25~40V**，跌落时间与间隙电弧和电压相关。
- 3) 脉冲放电电流前沿小于**1ns**与间隙电压跌落时间正相关（同一数量级），其频谱中**GHz**量级微波分量因对外辐射衰减很快，使电流波形趋于平滑（较少高频分量）。随人体电荷减少间隙电压降低到一定程度电弧将熄灭，此刻人体静电荷并未释放完。
- 4) 若手指继续接近物体，会以较低间隙电压在较小间距发生二次放电，且因电弧较短电流前沿更陡。如此周而复始，人体剩余电荷逐渐减少，间隙电压次第降低，间距逐步减小，放电电流前沿越来越陡，峰值越来越小。直到与物体接触人体静电荷完全释放，二者电位相等。

5) 据电磁场/天线理论，瞬变电荷密度/电流对外辐射电磁波。其近区场强取决于电荷密度/电流大小，远区场强取决于电荷密度/电流时变率。一般在开始放电的**1ns**内，时变率最大，距离电弧通道**10cm**处已是远区。与之类似，时变电磁场中导体上感应的电压/电流取决于电磁场的时变率、正相关。

6) 结论：静电放电过程中电荷密度/电流时变率与间隙电压跌落时间负相关，而时变越快所产生的瞬变电磁场能量更多聚集于**GHz**微波频段。该瞬变电磁场也是电子设备功能失效性能降低的重要因素。尤其是即将放电前瞬间时变电荷密度产生的瞬变电磁场，目前的接触式**ESD**试验里没有考虑（瞬变电磁场主要存在于离放电点较远的静电枪内部放电开关间隙及受限腔体内，场时变率取决于开关切换速率，且因间隙较小比空气放电电弧电流上升沿快），空气式**ESD**试验里也没有量化规定，虽有一定程度模拟。

1.3 飞机静电量化模型

无论导体还是绝缘体，随着其上静电荷的累积增加，相对周围空气的电位差逐渐增大，尤其在物体外部尖锐突出处，由于源自静电荷的电力线受挤压密集汇聚形成很强的空间静电场。当场强足够大时（**400~3000kV/m**）将周期性电离击穿空气，进行持续快速冲击脉冲间歇放电。波形陡窄的瞬态脉冲电流具有类似白噪声的宽广干扰频谱，不加控制可使附近**HF/VHF/UHF**机载电台一片滋滋声不能正常工作。

典型飞机沉积静电电压一般最大为±**300kV**；总充电电流在数百**mA**量级，与飞机飞行速度、飞机前向表面积、等效面电流密度（<**400 μ A/m²**）成正比，还与气候干湿状况相关。由于最终静电放电效应与静电荷沉积汇聚过程的等效充电电流大小关系并不密切，以较小电流充电至同样最终沉积静电电压，可形成同样强度静电环境，只是充电时间更长；然而较小充电电流有利于精准控制需要的静电电压，便于试验中调控操作；并且所需试验设备容易制造成本较低。所以一般使用**5mA**充电电流。

1.4 静电的控制

常见控制方法有泄放和耗损两种，前者是把多余的沉积静电与异性电荷载体导通，使之泄放中和；后者是让静电荷流过一定电阻值（兆欧量级）的有损导电通道，使电能转换成热能耗散掉。

如对地面车辆，用一根连接车辆金属构架和大地的拖地铁链，形成对地泄放通道，使车辆上的多余沉积静电流向大地与异性电荷中和。

对空中飞机，在非导电表面涂覆导电材料并与结构地电搭接，使其路径电阻小于 10^9 欧从而允许静电荷流动耗损又不会形成高幅度窄脉冲，以飞机基本金属构架为主体将整个飞机所有部件电搭接成一导电整体，在远离接收天线的机体后缘安装针齿状放电刷，在预设的较低沉积静电电压就击穿空气对周围空气放电；静电迁移通道适当部位设置电阻值为兆欧量级中等导电性专用衰减耗损部件以耗散静电能量、甚至使用自身具备耗损功能的表面绝缘但体电阻率为兆欧量级的新型非金属材料等等。这些措施能在设定较弱静电环境下平缓泄放、耗损飞机沉积静电，使飞机沉积静电电压始终低于可能导致出现问题的阈值。

静电放电刷工作原理：沉积在飞机外表面的静电荷（无论是多余净量还是感应极化的）使飞机相对外部参考点（无限远、大地、或其它规定）有一定的电势差，从而在二者之间形成静电场，在外轮廓曲率最大的尖锐突出处的静电场最强。当静电场强到能使周围空气电离时，就发生所谓的电晕/流光，这时飞机的静电荷在电场力作用下从尖端逃逸出来，与空气中的异性电离子中和，或游离于空气中，得到泄放。随着静电荷泄放尖端电位逐渐降低，空间静电场强度下降到低于空气电离阈值，就停止放电。直至随静电荷积累静电场又增强到阈值，再次放电。周而复始。

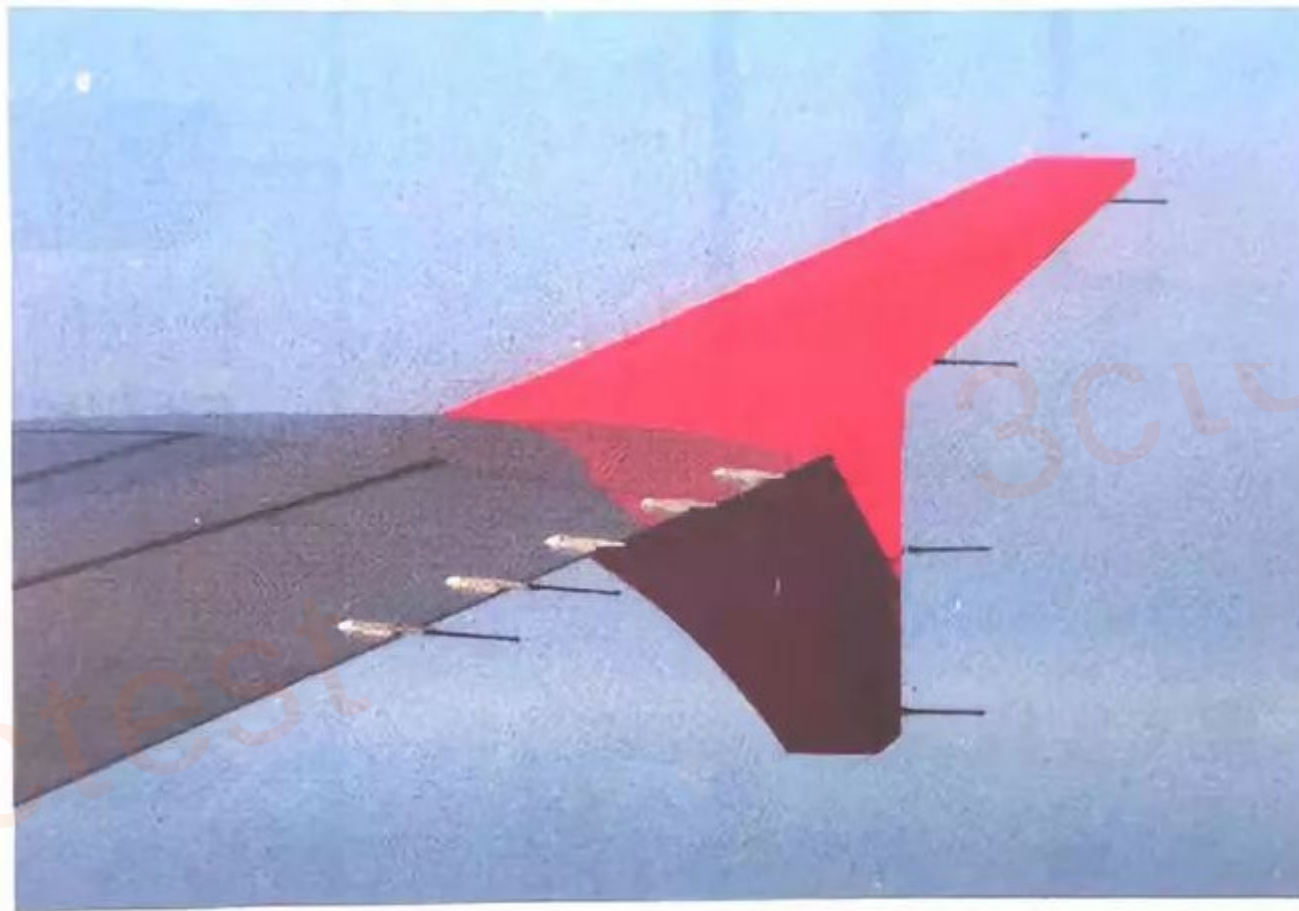


图1 机翼后沿及尖端安装的静电放电刷

2. 飞机静电放电试验

2.1 试验机理和目的

凡带静电荷物体的电位足够高时（无论由哪种方式产生），会电离表面空气生成电晕甚至击穿气隙对附近其它较低电位物体放电转移多余静电荷。放电体和浮地受电体常主要等效为储能电容，接地受电体则主要等效为损耗电阻（形成闭合回路）。在放电过程中，放电体电位降至气隙击穿门限（空气放电时）、静电能减少；浮地受电体电位上升（接触放电时二者最后等电位）、静电能增加；接地受电体将消耗按电阻值比例分摊的转移能量。当放电体和受电体携带的电荷量迅速变化时，它们的电位相应快速变化，且变化速率与变化电荷量相对原有电荷量占比正相关，故在物体电容量较小时尤其显著。伴随静电放电，物体（放电体或受电体）静电能的增减、电位的升降和快变，放电电流的突现和快变，都可能对其产生电磁甚至物理效应——损毁、失效、性能降低。

所关注物体是放电体还是受电体依具体场景确定，放电体电位相对受电体电位较高。例如：飞行中飞机尤其是旋翼飞机、垂直起吊/吊挂运输中/待卸货物、空中授油/受油飞机，因快速相对大气运动携带很多静电荷，静电位可高达**300kV**多为放电体；地面操作勤务人员静电位可高达**25kV**，相对地面物体也多为放电体，但相对**300kV**飞机则是受电体。**300kV**飞机内未电搭接结构地的设备和人员、正在被**300kV**飞机吊钩挂装的地面吊篮/货物、空中授油/受油飞机、**25kV**人体可能触摸/贴近的地面设备等一般是受电体。

设计试验就是按照**ESD**实际情况，确定受试件是放电体还是受电体，模拟实际放电方式，建立尽量仿真的**ESD**环境，设置合理的试验流程。

试验目的就是尽量逼真模拟实际场景，同时考察瞬变电压/电流、转移电能对放电体或受电体（都可是受试件）的影响程度。一般多关注转移电能大小（与脉幅脉宽成正比）会否造成物理损毁，但对低电平敏感数字电路，脉冲电流前沿陡度同样重要（与幅度及其时变率成正比），会造成电子设备功能失效或性能降低。所以试验用静电源的输出能量、电流波形及其校准都很重要。

注意，虽然常用静电电压描述静电环境严酷度，但是对物体转移的静电能量从而对应电磁效应不完全与放电前静电压成正比（数百kV高压时尤为明显），而更多取决于流经物体的放电脉冲电流。主要原因是静电压越高，放电电弧越长，形成电弧所耗电离能以及电弧通道阻性损耗越大，放电体残余电荷/电压/电能越多，实际转移至受电体的静电能越少。同时放电电流前沿也较缓、时变率较慢，电磁感应效应较弱。

2.2 试验放电模式

按放电电极与EUT相对位置/运动（都要求电极及其运动方向与EUT表面垂直），分空气放电和接触放电2大类。

空气放电，有几种不同方式

- 1) 电极匀速（0.3m/s或尽快）接近EUT受试点，开始对EUT放电后继续接近EUT直至接触。缺点：因电弧损耗转移电能减少；电弧长度不定，重复性差；附着点可控性差。优点：最仿真实际场景。一般会多次电弧放电，从初始空气放电最后转变成接触放电。GJB573/MIL-STD-331/GB17626.2/ IEC61000-4-2/AECTP-500（一般电子设备绝缘表面）采用，GJB151B备选。
- 2) 电极匀速接近EUT受试点，直至一旦开始对EUT放电随即刻停止运动。优缺点类似前条，且有残余电荷不能完全转移储存电能，使转移电能进一步减少。GJB573/MIL-STD -331/AECTP-500（军械）/D0160-25采用。

3) 固定间隙，先置电极顶端与EUT表面为可电离击穿气隙的确定距离，再接通静电发生器内部开关进行ESD放电。缺点：与实际场景差别较大，高静电压时开关有难度（常用固定气隙实现）。
优点：转移电荷能中等程度且可控，重复性好。GJB573/MIL-STD-331/AECTP-500（军械）采用。

接触放电：先把电极与EUT受试点接触连接，再接通静电发生器内部开关进行ESD放电。（首次放电实际也是空气放电，只是电弧/间隙很小且在远离受试点的源内部。）缺点：与实际场景有差别（电极与EUT间隙足够小时总能空气放电），较难确保放电附着点就是实际情况，高静电压时开关有难度。优点：转移电荷能最大且可控，重复性最好。GJB151B首选。GB17626.2/IEC61000-4-2/AECTP-500（一般电子设备导电表面）采用。

2.2 静电发生器

1) 模型

需模拟的带静电体按其等效电容量大小分2种：

飞机/车辆和人体（均浮地）

飞机采用**1000pF**电容通过小于 **$1\Omega/20\mu\text{H}@1\text{kHz}$** 放电电路阻抗放电的模型，最高静电电压**300kV**，电容储能**45J**。

人体模型又与受电体种类有关，**EUT**是军械类时（火工品、引信、燃料等）采用**500pF**电容通过**500（5000） $\Omega/5\mu\text{H}$** 放电电路阻抗放电的模型，最高静电电压**25kV**，电容储能**0.156J**；**EUT**是常规电气/电子设备时采用**150pF**电容通过 **$330\Omega/5\mu\text{H}$** 放电电路阻抗放电的模型，最高静电电压**15kV（空气放电）/8kV（接触放电）**，电容储能**0.017J /0.0048J**。

静电发生器（包括放电电极和连线）原理图

MIL-STD-331C
APPENDIX F

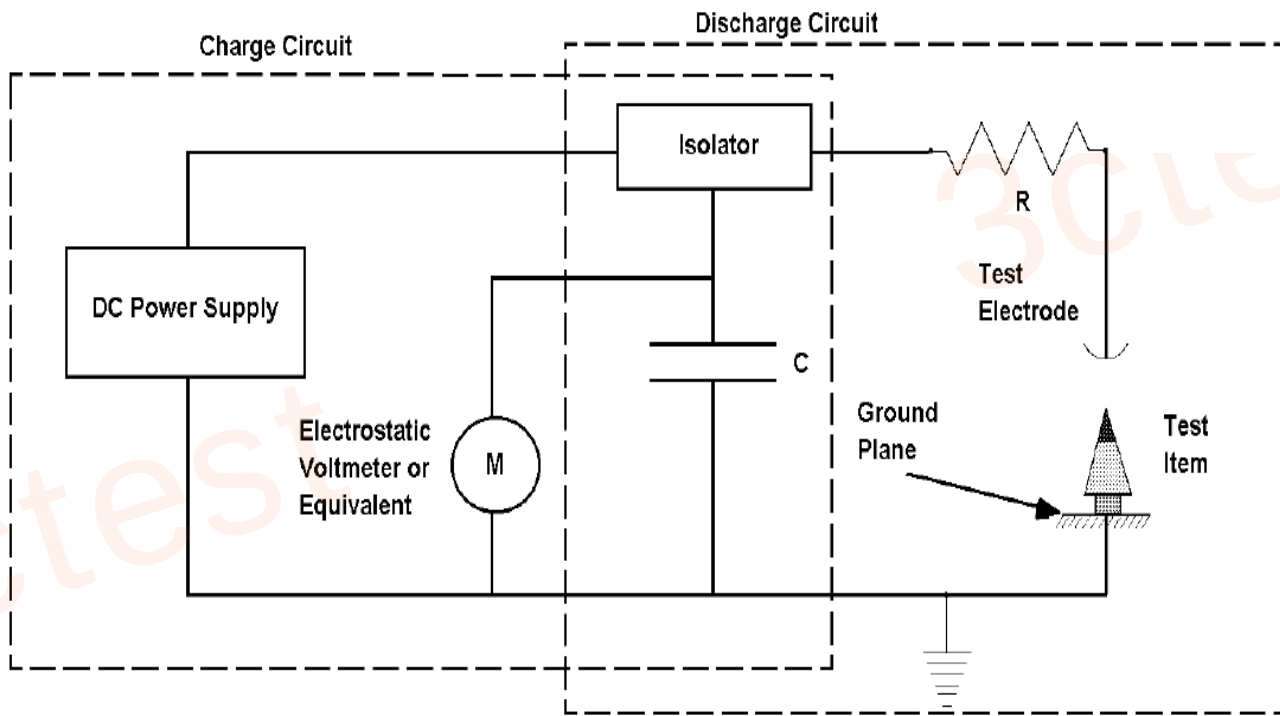


FIGURE F1-1. Functional electrical schematic for electrostatic discharge apparatus.

图2 静电发生器原理示意图

2) 校准

是对静电发生器（包含放电电极和所有连接导线）功能性能的确认，主要关注通过规定校准电阻的瞬态电流波形及其转移的能量。例如，按图3 所示配置和表1 所列各元器件参数，有如下要求（转移能量比=校准电阻/（放电电阻+校准电阻））

MIL-STD-331中人体对军械ESD转移能量**0.18~0.22%**（**500Ω/1Ω**）/ **0.018~0.022%**（**5000Ω/1Ω**），电流波形前沿**15ns**，半幅脉宽**170ns**（**500Ω**）。

GJB573A中人体对军械ESD转移能量**45~55%**（**500Ω/500Ω**或**5000Ω/5000Ω**），电流波形前沿**15ns**，后沿**150ns**。

飞机ESD转移能量**80~100%**（**1Ω/100Ω**），电流波形没规定。

可见几种场景校准转移能量比可相差百倍，但这不重要，因试验中静电源向EUT转移的能量主要取决于EUT等效电阻（源内阻也相对越小越好），越高越多。当然发生器内阻（除EUT外放电环路总电阻）越小内耗越小对外输出越大。

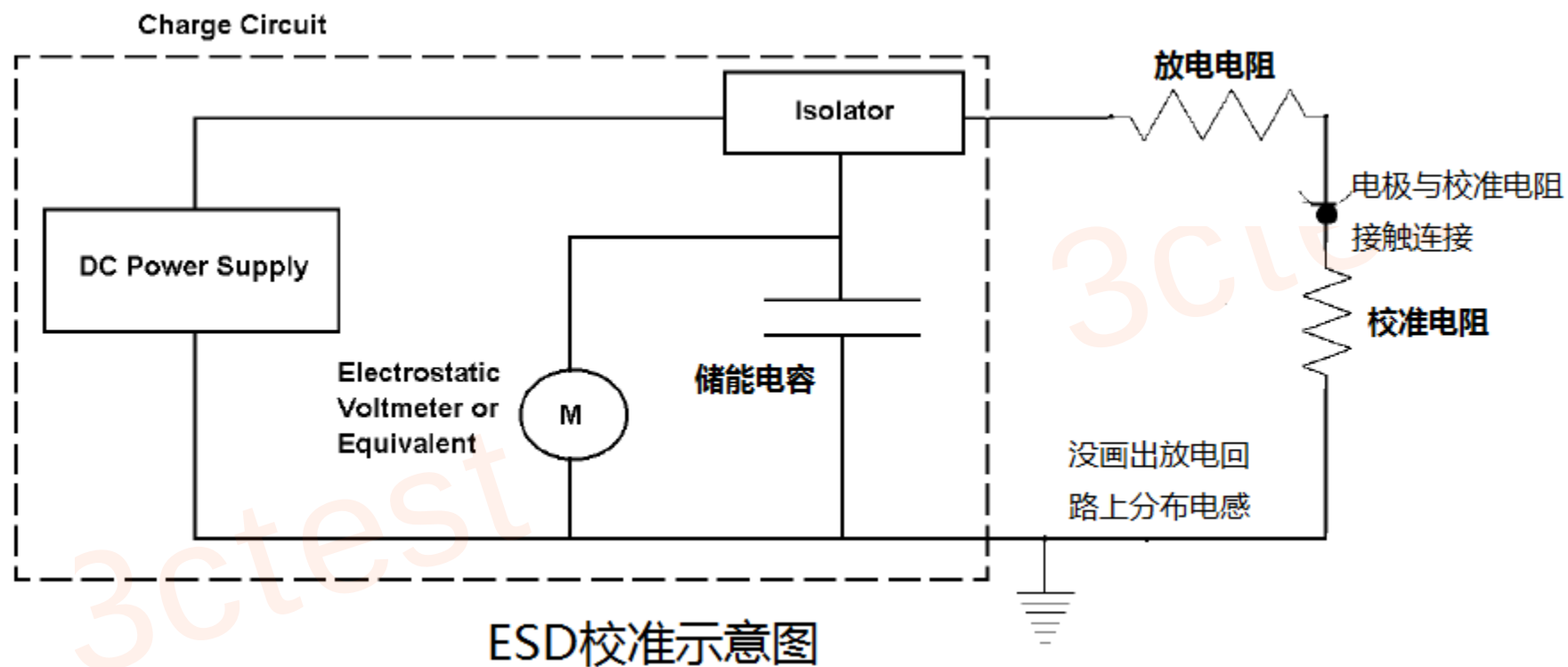


图3 静电发生器校准原理图

表1 ESD试验和校准各元器件参数

ESD场景	电容端电压 kV	储能电容 pF	放电电阻 Ω	放电电感 μH	校准电阻 Ω
人体-军械 (美军标331)	+25±5%	500±5%	500±5%	< 5	1±5%
	+25±5%	500±5%	5000±5%	< 5	1±5%
人体-军械 (GJB573)	+25±5%	500±5%	500±5%	< 5	500±5%
	+25±5%	500±5%	5000±5%	< 5	5000±5%
人体-电子/电气 设备 (GJB151B)	8 (接触放电)	150	330	< 5	< 2.1@DC
	15 (空气放电)	150	330	< 5	
飞机	+300±5%	1000±10%	1 max	< 20	100±5%
注：放电电阻和电感指分布于放电回路中的总量，但不含放电电弧，当然也不含校准电阻。					

注意校准时放电电极与校准电阻接触连接，不得用放电电弧（空气放电模式）方式连接，或不计入电弧损耗（如果做到准确补偿）。

因为空气放电时，要求放电电极匀速进近**EUT**，电极端与**EUT**表面之间形成电火花/电弧。电极进近速率、放电间隙从而电弧长短等因素会影响通过**EUT**的放电电流幅度和波形，以及转移至**EUT**的能量。不确定性很大。

放电电弧长度变化时，击穿空气形成电弧通道的电离能以及放电电流在电荷通道阻性耗散能量随之变化，通道较长时耗能很大，可达**40%**。

进近速率变化时，放电电流前沿变化范围**<1~>20ns**。

进近速率固定时，不同静电压、进近速率组合，放电电流前沿变化可大到**30%**。

另外维持电弧的电压虽小于建立电弧通道电压，但总有门限值。随着电荷不断转移，电弧端电压逐渐降低至门限值后，电弧消失停止放电，放电体仍带一定静电电荷伴随残余电压从而静电能，不能全部转移。静电压越高放电电弧越长，该问题越突出。这同样带来很大不确定性。使校准失去预期意义。

固定放电间隙时，有重复性好得多的放电电流前沿、幅度和转移能量。是较好的选择，但与实际场景差距较大。

注意**ESD**试验属预校准类试验，校准仅保证静电发生器放电前有规定的开路电压电平，放电时能对规定负载输出/转移规定波形放电电流/能量。可以预见到，在具体**ESD**试验时，因**EUT**等效对地负载阻抗（电阻）不同，流过**EUT**的放电电流强度及其波形、对**EUT**转移的静电能量一般都不相同。并且等效电阻相对静电发生器内阻越大，遭受的**ESD**应力越大，因总静电能量是按阻值比例分摊到源内阻和**EUT**等效电阻上的。如希望进一步规范实际转移至**EUT**的电能量，可要求试验中实时监测**EUT**端电压和流经电流的波形（类似雷电试验），再计算出实际施加至**EUT**的电能量。这样实际有效试验应力就与**EUT**阻抗无关，更具可比性了。

2.3 试验分类

接受试件层级分有飞机级和机载分系统级**2**类试验。

前者试验电平为**300kV**或预期飞机机体设计允许最大静电电压，后者试验电平为**25kV**或**300kV**。

1) 飞机级：试验对象是完整配置典型全功能实际使用状态整架飞机（包括正常工作的机载电磁敏感设备、燃油分系统、武器分系统、引信火工品以及机上人员）。

试验场地一般为室外开阔场。

2) 分系统级：试验对象主要是机载燃油系统、武器分系统、引信火工品、机外吊挂运输系统/货物，也可是带天线接收机类电磁敏感设备。试验目的为在模拟实际沉积静电环境下，考核在静电放电过程中及之后受试件的功能性能符合性以及安全余量。类似人体携带静电**ESD**放电试验，在常规静电实验室里即可完成（无需宿主平台飞机）。同样注意每一种试验电平和极性都要做，因低电平试验等级或极性的问题可能在较高电平或反极性试验中不出现。

2.3 试验设备

常见人体**ESD**用试验设备这里不赘述。

飞机**ESD**试验用基本设备主要有**300kV**静电发生及其测控系统、**300kV/DC**电阻分压器、专用静电荷注入环、**1Ω/100Ω**校准电阻、瞬态信号监测传感器及测量系统、球头放电电极、多针圆盘放电电极、残余静电泄放杆（串接**1MΩ**电阻）及其自带移动底盘气动支架、低电感高压电缆等。

2.4 安全事项

沉积静电试验具有危及人身安全的高压电平，必须标识围出防止静电压击穿空气对非受试件放电的足够大空间，试验中必须遵从相关安全操作程序，在确保静电携带体完全放电之前，不得触摸、接近试验设备、受试件表面。以免遭受静电电击伤害甚至发生人身安全事故。

2.5 飞机沉积静电试验

试验目的有三方面：在飞机上“静电荷沉积”而形成预期强度静电及持续间歇放电环境时，一是找出飞机上发生电晕、流光、浮地金属的薄弱处和未电搭接孤立导电/非导电构件，以及可能形成的机体或重要部位最大静电电压对设计指标/要求的符合程度；二是考核敏感机载设备的功能性能是否满足要求，尤其是带天线接收机；三是核查有无危及安全问题，如对人员静电电击伤害、甚至点燃燃料蒸汽或触发火工品，且有足够安全余量。对应**GJB1389A**第**5.7.3**节“沉积静电”、**GJB8848**第**18**章“机载分系统静电放电试验方法”要求方法。

试验过程大致为：把平台/飞机与地隔离绝缘，尽量以实际场景电荷沉积等效电流强度，通过专用电荷注入环对平台/飞机所选注入点直接接触充电直至静电电压限值，模拟建立静电环境后，考察在此环境下平台/飞机上最高静电电压及关注部位允许静电电压、发生静电放电/电晕/流光/飞弧及其部位、机载分系统（带天线接收机）受干扰情况、人员/燃料/火工品的安全性等。

如果注入点（如金属蒙皮上）与飞机主金属构件导通，则注入电荷就会在导体上四处迁移直至整个金属构件（飞机）为等电位体。这时可验证机上放电刷性能及测量机体实际最高静电电压；如果注入点选在非导电物体上（如座舱盖透明介质），注入电荷不能自由迁移快速泄放，就会快速累积达到相当高电位，在附近某些小间隙处形成高电位差，击穿空气对附近低电位物体放电。这时可检查可能产生电晕、流光、飞弧/闪络、火花的薄弱处等等。

具体试验步骤如下

- 1) 按试验大纲、据经验或需要，在飞机外表面选择合适的电荷注入点。由于飞机的绝缘构件外表更容易滞留、沉积大量静电荷从而形成高静电电压，如果没有配置放电刷或静电耗散措施，应选为注入点。飞机迎风导电外表面选**1~2**点。
- 2) 试验设备性能确认：把连接静电发生器输出端的专用电荷注入环放在通过**1MΩ**电阻接地的体量较大导电体表面。置静电发生器输出电压从**0**逐步增加到**+300kV**，步长**25kV**，电流**5mA**（或更大以节省时间），随时监测充电电压和电流。记录设备操作设置，确认设备安全工作正常。待完全放电后同样进行**-300kV**性能确认。

3) 置飞机与大地及周围地面物体绝缘并保持1米以上间距，用地面电瓶车或机上辅助电源给飞机供电，所有机载受试设备上电处于实际典型工作状态，完成必要的试验前功/性能测试。

4) 以试验设备性能确认的设置和步骤，通过专用电荷注入环对平台/飞机所选注入点直接接触充电（也可把静电发生器输出直接连接飞机金属构架进行充电），经与飞机表面接触的专用电荷注入环，不断充入的大量静电荷自然分布于整个飞机，直至飞机上静电放电刷开始放电。继续缓慢充电以维持飞机持续间歇放电，在此模拟静电环境中进行以下检测：

- a) 测量飞机主构架的沉积静电电压是否符合预期（设计规定值且 $\leq 300\text{kV}$ ）；
- b) 测量驾驶舱内飞行员可能接触或接近操作台等设施表面相对飞机结构地静电电压是否超过可能引发对人员（与结构地等电位）不适ESD的阈值；
- c) 检查典型工作状态中的机载电磁敏感设备（如接收分系统、飞控计算机分系统、发动机操控计算机分系统等）是否正常，性能是否降低；
- d) 检查典型工作状态中的机载燃油分系统、武器分系统、引信火工品等是否正常，有无误触发启动，性能是否降低；

e) 如果a/b)有问题，检查放电刷的最小起始放电电压是否合适，放电脉冲串波形是否足够平缓从而频谱幅度和范围足够小。从放电刷设计指标及静电荷迁移途径上电阻耗散设计配置等方面着手改进。如果c/d)有问题，且飞机放电刷和接地电阻耗散配置正常，则检查机载分系统机上电搭接、接地、电缆走向等安装情况，设备本身抗干扰能力，甚至返回实验室重做设备级**ESD**试验，定位原因。

- 5) 在飞机充电至预期电压之前，如过程中飞机出现电晕/流光、闪络/飞弧、电火花、击穿等现象，则停止充电。确定问题构件具体部位，从其电搭接/绝缘体金属化导通性能等方面着手检查、改进，记录问题电压及相关数据。
- 6) 完成全部检测事项后关断试验设备，待所有试验设备、受试件完全放电后，重新类似进行负极性沉积静电试验。
- 7) 关断试验设备，待所有试验设备、受试件完全放电后，对机载受试设备再次进行试验后功性能测试，比较与试验前测试结果的一致性。
- 8) 对其它注入点重新进行同样试验。

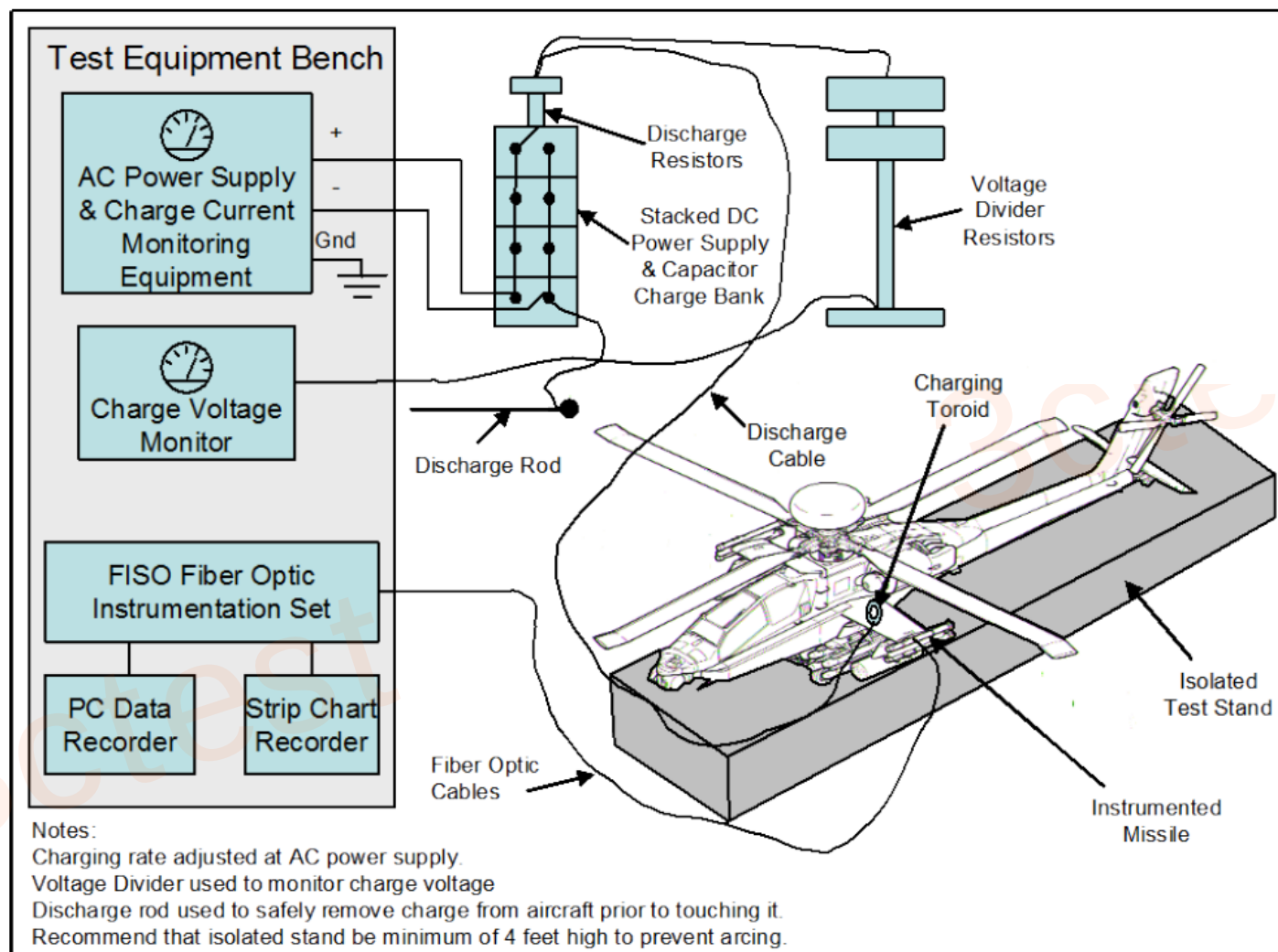


图4 典型沉积静电试验配置示意图



图5 飞机级沉积静电试验现场照片（通过专用注入环充电）

注：架起的直升机、置于短平翼根部上表面的注入环、存储静电荷的电容堆栈、监测静电压用电阻分压器

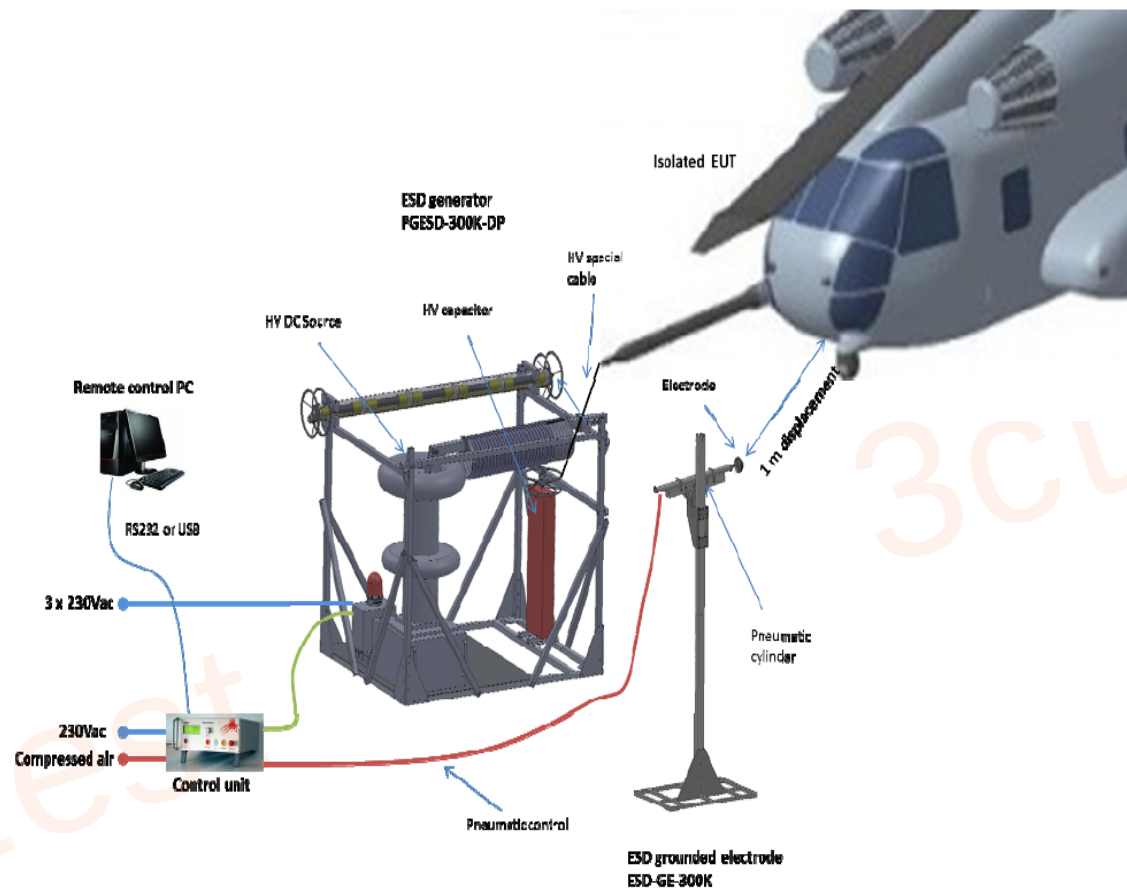


Figure 3 : Montena ESD 300kV test setup with grounded discharging electrode

In the above configuration the HV generator is directly connected to the EUT and charges it up to 300kV. The ESD electrode is connected to the ground and approached to the EUT to discharge it.

图6 飞机级沉积静电试验现场照片（直接连接充电）



图7 试验现场照片——泄放机体残余静电荷

2.6 飞机放/受电静电试验

属飞机级试验，模拟飞机对大地或其它物体放电或遭受其它物体放电场景。例如配置滑撬式起落架直升机降落触地过程，轮式起落架飞机落地后地勤人为将机体接地过程，授油机出油口与受油机进油口对接过程，垂直起吊/空中补给悬停直升机的吊钩装载货物（相当为飞机）时首次触碰外界过程，飞机是放电体。试验流程类似沉积静电：置飞机与地绝缘隔离，通过专用电荷注入环或直连方式对机体充电直至设计静电电压限值或**300kV**，再用接地放电棒对飞机最先可能与外界接触点进近放电直至接触，放电过程中和之后，考察飞机及其载荷功能性能是否正常。

对于空中加油场景，授油飞机和受油飞机相对电位不确定，其一是放电体则另一就是受电体。作为受电体飞机的试验流程为：置飞机与地绝缘隔离，通过专用电荷注入环或直连方式对机体充电直至设计静电电压限值（ $<300\text{kV}$ ，最严酷时不充电 $U=0\text{V}$ ），再用 300kV 试验电极对进油口或出油口进近放电。若为了考察需延长放电场景，可使电极端与油口保持必要间距以维持连续/间歇放电。放电过程中和之后，考察飞机及其载荷功能性能是否正常。**GJB8848**的第17章里“空中加油”就属此类试验。

2.7 垂直起吊/空中补给静电试验

属分系统级试验，模拟垂直起吊/空中补给过程中可能发生的**ESD**场景，试验对象是被/待吊装/运输吊篮/货物（含军械）。这里单独列出是因为与**GJB8848**的第17章内容相关。分两种情况

1) 卸载：从飞机卸载已吊装/运输与飞机等电位的吊篮/货物，过程中吊篮/货物表面最先触地/人点将对地/人放电。试验流程类似沉积静电（参见图8）：置**SUT**与地绝缘隔离，通过专用电荷注入环或直连方式对**SUT**充电（以**50kV**为步长，直至载机设计最大静电压或**300kV**），再用接地放电棒对**SUT**最先可能与外界接触点进近放电直至接触，在放电过程中及之后，考察**SUT**功能性能是否正常。

2) 装载：地面待吊装/运输的地电位吊篮/货物往悬停飞机装载过程中，与飞机同电位吊钩会对吊篮挂环/货物表面放电。试验流程大致为：**SUT**接地，逐次用放电电极（电压以**50kV**为步长，直至载机静电压或**300kV**）对挂环或**SUT**最先可能被吊钩碰触点进近放电直至接触，进行空气和接触放电。在放电过程中和之后，考察**SUT**功能性能是否正常。

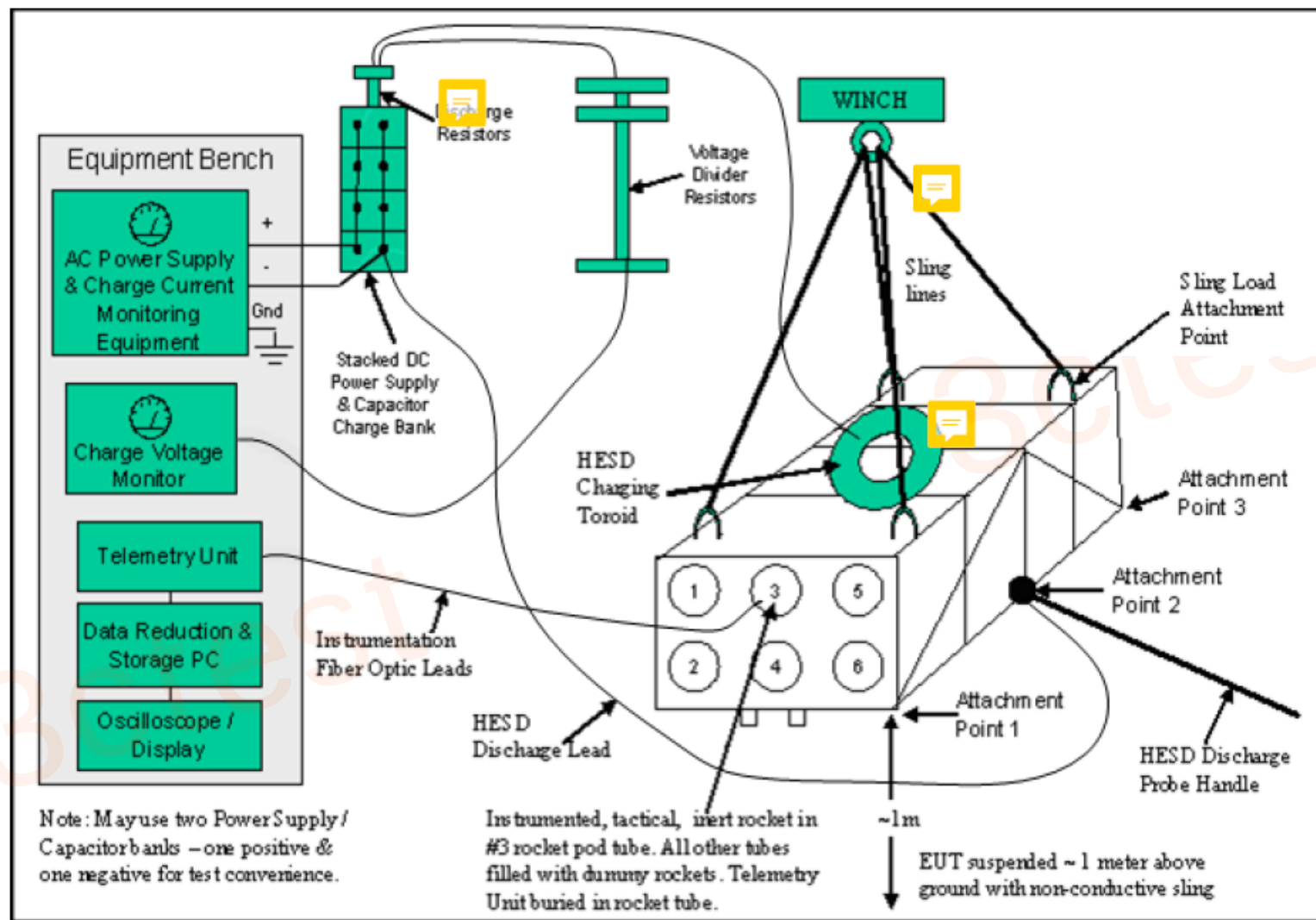


图8 垂直起吊/空中补给（卸载）ESD试验配置示意图



图9 垂直起吊/空中补给（卸载） ESD试验现场照片

2.8 分系统级ESD试验

常见人体静电放电试验这里不再赘述。

分系统级别直升机体静电放电试验。与人体**ESD**试验类似，只是静电电压升高为**300kV**，且对持续间歇放电脉冲串波形及时间分布没有规定。一般用充电至**300kV**的**1000pF**电容堆栈，通过**1Ω**总放电电阻（总放电电路电感<**20μH@1kHz**）对**100Ω**校准无感电阻放电来模拟（见下表），且要求校准时电容存储的能量至少有**80%**转移到校准电阻上去。可参见**MIL-STD-331C/ GJB 573A**相关章节内容。

MIL-STD-331C
APPENDIX F

TABLE F1-I. Test parameters.

Discharge Procedure	Voltage on C (kilovolts)	Capacitor C (picofarads)	Resistance R (ohms)	Discharge Inductance (microhenries)	Calibration Test Load (ohms)
Personnel	+25±5%	500±5%	5000±5%	< 5	1±5%
Personnel	-25±5%	500±5%	5000±5%	< 5	1±5%
Personnel	+25±5%	500±5%	500±5%	< 5	1±5%
Personnel	-25±5%	500±5%	500±5%	< 5	1±5%
Helicopter	+300±5%	1000±10%	1 max *	< 20	100±5%
Helicopter	-300±5%	1000±10%	1 max *	< 20	100±5%

* Total distributed discharge circuit resistance.

对于机载燃油分系统、武器分系统、引信火工品，可参照**GJB 573A**中方法**601**静电放电试验等相关标准规定执行，这里不再展开。对于带天线接收机类电磁敏感设备，需要建立持续间歇放电的模拟静电环境，建议流程如下。

- 1) 校准，没有波形要求，但需确认转移至**100欧**校准电阻上的能量为电容堆栈存储的**80%**以上。注意校准时放电电极与校准电阻接触连接，不是电弧连接方式。
- 2) 置放电电极与接地受电导体合适距离，使持续间歇脉冲放电能够维持下去。（如使用实际飞机静电放电刷更好，静电发生器输出至放电刷并维持对空气持续间歇放电，更接近实际场景。）

- 3) 置受试件（主要指天线）与放电处距离与飞机上安装（接收天线与静电放电刷）最小实际间距相同。
- 4) 置**300kV**静电发生及其测控系统为校准设置（电压与飞机实际静电电平相等）。
- 5) 置受试件正常典型工作。
- 6) 启动并维持持续间歇冲击脉冲静电放电。
- 7) 监测受试件预期功/能性能的符合性，或确定降低程度。

注：除非试验方法或受试件**SUT**产品规范另有规定，试验应在**SUT**处于典型全功能工作状态下进行，因此**SUT**的所有接口都必须端接实际或模拟配套接口设备——负载和激励，这些辅助陪试设备的电气/电子/机电特性应与装机状态一致（如线-线/线-地阻抗、分布电容、非线性器件），不会改变**SUT**的敏感性/抗扰性。且这些配套接口设备对静电放电有足够抗扰能力，不会因自身被干扰而影响对**SUT**敏感与否的判断。

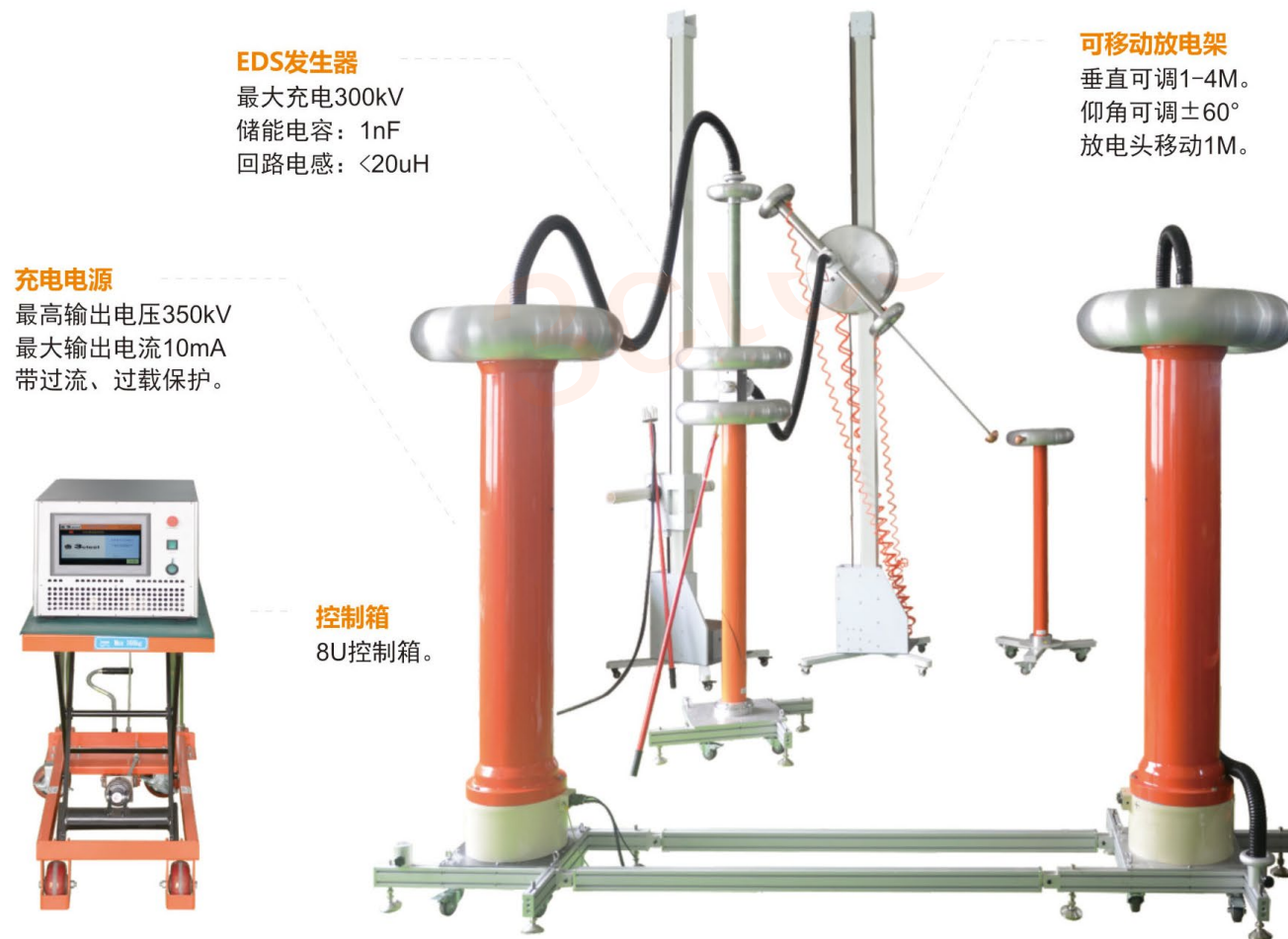
2.4 试验数据

试验报告应至少包括以下试验配置和数据

- 1) 试验中**EUT**的全部工作模式。
- 2) 分系统试验中所有负载/激励的描述，无论是实际的还是模拟的。模拟负载注重线-线/线-地阻抗模拟程度。
- 3) 各注入点充电电压/电流幅度、极性，至少记录典型值/图各1个。
- 4) 试验前后机载分系统主要功性能测试数据及其比较结果。
- 5) 合格/不合格判据的描述。
- 6) 试验结论、不符合性描述、改进建议，尽可能定量。

静电测试系统布局图

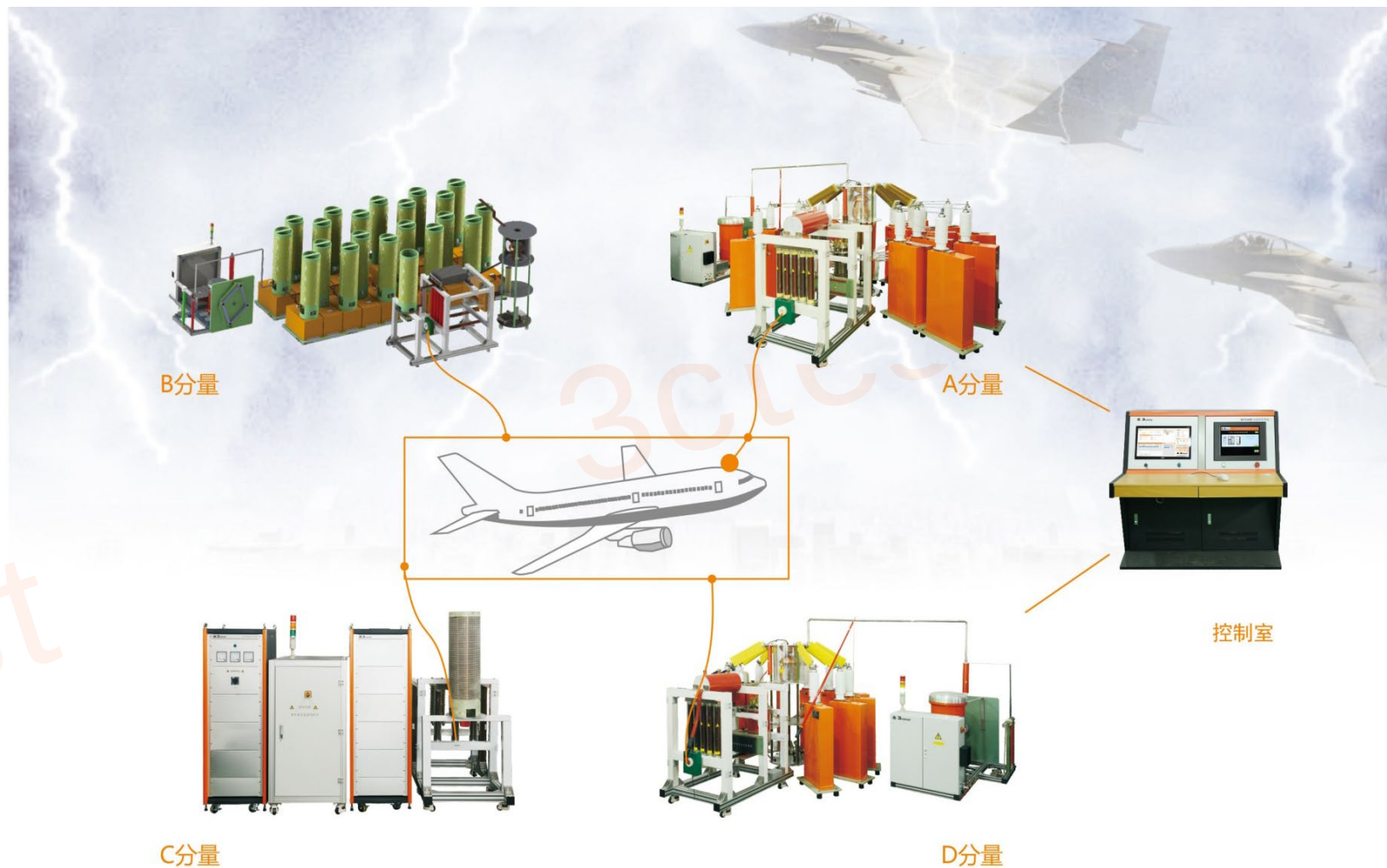
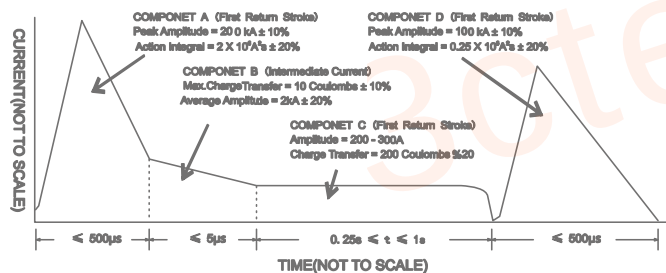
- MIL-STD-331C
- MIL-STD-464C
- GJB1389A
- GJB8848
- GJB573A



- IEC 61000-4-2
- IEC/ EN 61000-6-2
- IEC/EN 61000-6-1
- IEC/EN 61326
- GB/T 17626.2
- ISO 14304
- GJB151B



- 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大电流测试系统

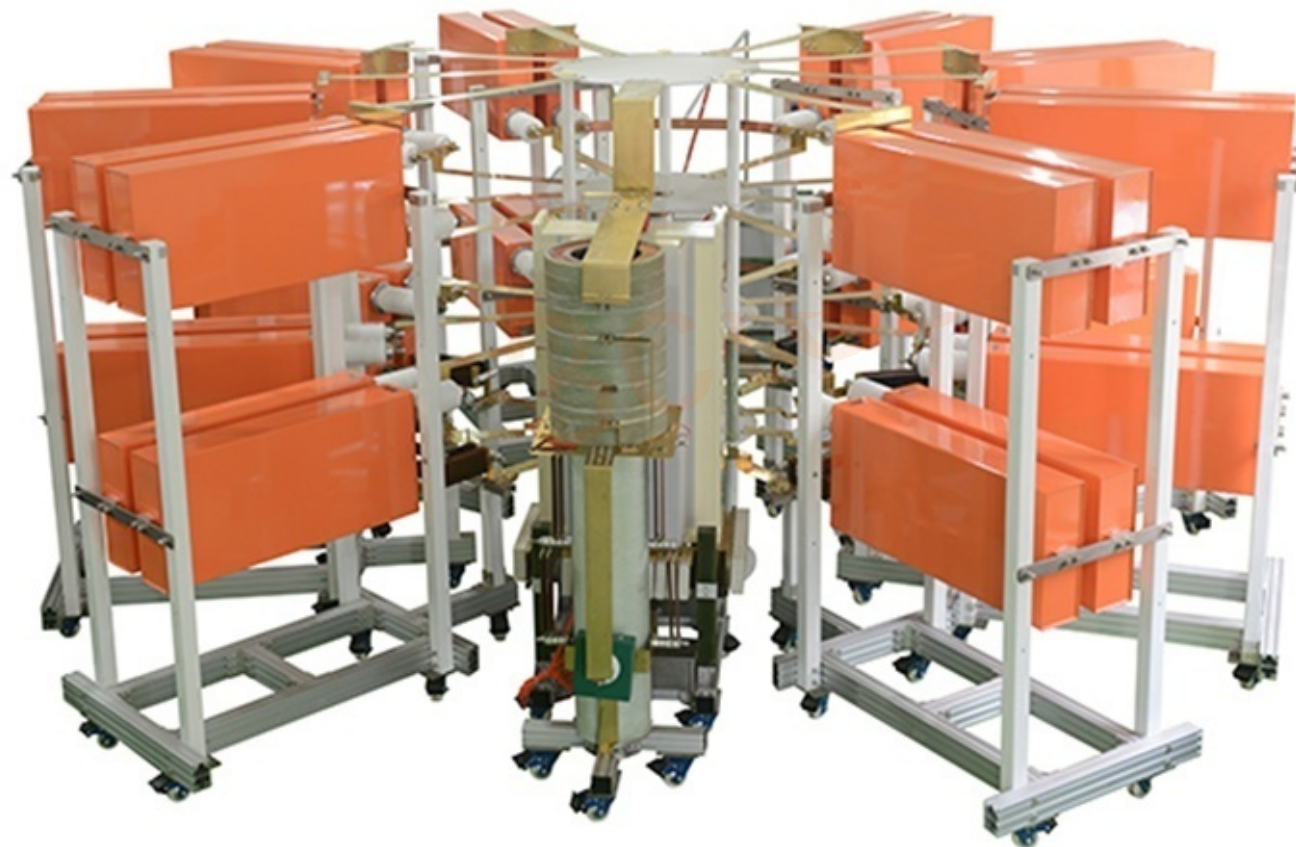
- MIL - STD -461GCS117
- DO-160F/G Section22、 23
- GJB1389A
- GJB8848
- GJB151 、 181
- 、 、 、 、



国内首套雷电间接效应测试系统

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！

- GJB151
- GJB181
- MIL - STD -461GCS117
- 、 、 、 、



➤ **TPS-CS115**
快速矩形脉冲发生器



➤ **DOS-CS116**
高频阻尼正弦波发生器



➤ **TPS-CS106**
电源线尖峰脉冲发生器

方愔 yin.fang@3ctest.cn
18939854887

错误在所难免!

请提宝贵意见!

谢 谢!!