低空系留气球防雷设计

Lighting Proof Study on Low-Altitude Tethered Balloon

彭平　张金华／中国特种飞行器研究所

摘　要：在分析外界雷电对系留气球的破坏和雷电放电对工作人员造成危害的基础上，提出在系留气球的设计过程中防雷系统设计的方法和相关的防护措施。

关键词：系留缆绳；防雷带；防雷编织网
Keywords：tether；lighting proof belt；light proof braid netting

0 引 言

雷电对系留气球的损伤是全方位的，从球体、球载设备、系留缆绳、地面设备和人员，都可能直接或间接地遭遇雷击损伤。所以气球在升空、定点系留、回收和地面系留时，需采取有效措施，防止雷电引起破坏系留气球结构的完整性，损坏或干扰电子设备的正常工作和危及工作人员生命安全。

1 雷电对系留气球及人员的危害

雷电对系留气球的危害主要表现在三方面：破坏系留气球结构的完整性，损坏或干扰电子设备，危及工作人员的生命安全。

1.1 直接破坏结构完整性

当系留气球的某一部分处于雷电放电通道中时，由雷电电弧的附着及伴随着雷电流的高压冲击波和磁力的作用，会造成结构的熔蚀、燃烧、爆炸以及畸变和破坏等严重的后果。

1.2 间接损坏或干扰电子设备

雷电放电对系留气球的间接影响可以归纳为两种。

a. 雷电放电通道通过系统结构部件虽未对结构造成直接的损坏，但放电在电子电气设备中引起的过电压和过电流将造成设备失效或暂时性的功能丧失；

b. 雷电电磁脉冲(LEMP)以及由雷电引起的一些电磁干扰信号，通过设备接口、传输线、空间辐射等途径耦合到系统，产生过压或电涌，使微电子电路击穿，烧毁或改变电路的逻辑状态，从而使控制或任务系统等暂时失效或永久失效。

1.3 危及工作人员生命安全

一般情况下，气球和系留缆绳构成了一个很好的“引雷体”，对大面积的地面建筑和设备来说，它是一个很好的防止直接雷击的“避雷针”。但对于在系留点附近工作的地面人员来说，雷电通道的强大电磁力及雷击产生强大人地电流引起跨步电压将直接危及工作人员的生命安全。

2 防雷系统的组成

防雷系统主要由球载防雷带、防雷支撑杆和系留缆绳防雷编织网等组成。球上防雷带与系留缆绳上端防雷编织网连接，缆绳下端防雷编制网通过地面接地，直接将雷电电流接入大地。

3 雷电的防护和防雷设计

3.1 静电积累及其防护

系留气球在使用过程中，由于气流的摩擦、带电微粒的撞击和沉积、雷暴云中电荷的感应等，会使安装于气囊表面的设备带上静电荷。当静电荷聚集到一定程度，在电场的作用下，这些区域附近沿电场方向的空气会发生击穿，造成短时间的局部放电。为了防止静电累积造成的危害，将安装在气囊表面的所有金属构件搭接成一体，通过防雷编织网将球上积累的静电释放到地面。

3.2 雷击间接效应的防护

为了避免间接雷击通过设备接口、传输线或空间辐射等途径耦合到系统，产生过压或电涌，击穿微电子电路，烧毁或改变电路的逻辑状态，使球载设备等暂时或永久失效，应在进行球体布线或设备选型及安装时考虑以下要求。

a. 布置在囊体上的所有导线均采用双绞屏蔽线，且屏蔽线采取多点接地。

b. 在进行设备选型时，对一些重要的设备要求有防雷击设计。

c. 所有设备的安装都必须进行良好的电搭接。

d. 由于系留气球遭受雷击后，引下

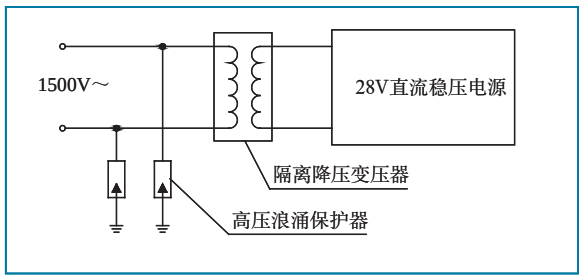

图1 间接效应防护示意图

线(防雷编织网)产生的高压会在球上降压变压器的输入端引起高压浪涌,为此需加装高压浪涌保护器,见图1。

除了在降压变压器的输入端加装初级浪涌保护器外,在28伏直流稳压电源的输入端还需加装次级浪涌保护器(电源内部),以便更好地保护28伏用电设备。

3.3 球体防雷设计

对处于低空(1000米)的系留气球,一般只承受云地闪电,而受侧击的可能性很小,所以只在球体的头部、顶部安装一根防雷带即可防止直接雷击。

1) 防雷支撑竿的高度计算

如图2所示,单点(P)传导所形成的雷电防护区为以P点为顶点,顶角为120度的圆锥体。导线(L)传导所形成的雷电防护区可以看成是圆锥顶点从a平移到b所形成的区域。

根据以上原则及气囊的总体尺寸和

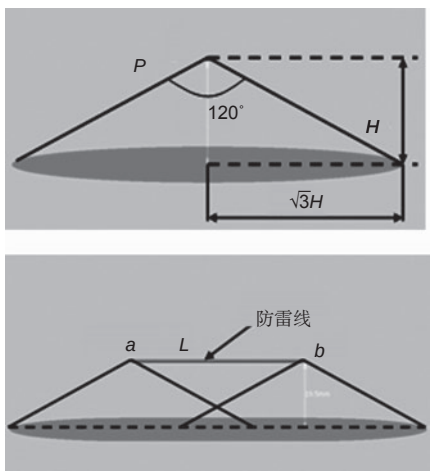

图2 导体的雷击保护区示意图

设备在球上的布置情况,要求防雷带应能保护囊体上的所有设备,如阀门、风机、测控系统等,由此可以确定防雷带支撑杆的设计高度。

a. 最大截面处支撑点高度H_0计算

由于气囊的各处截面积不同,各单点所要求的高度也不同。根据气囊的总体外形可知,气囊最大截面处的支撑点高度值最大,只需保证球体处于其形成的雷电防护区内(见图3),计算如下:

$$H_0 = (\frac{2\sqrt{3}}{3} - 1) \times R_0$$

其中:R_0——气囊最大半径。

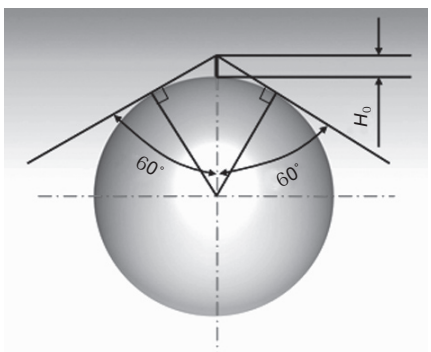

图3 最大截面处单点形成的雷电防护区

实际使用中支撑竿不能和设备同时安装在最大截面处,考虑避雷线有一定程度的下垂,H_0取值应该大于计算的值。

b. 垂直尾翼处支撑点高度H_1计算

垂直尾翼处支撑点高度只需保证垂直尾翼处于该点所形成的雷电防护区内,则水平尾翼、球体及其他设备自然处于其形成的雷电防护区内(见图4 (a)),计算如下:

$$H_1 == \frac{\sqrt{3}}{6} L$$

其中:

L——垂直尾翼最大截面宽度。

由于雷电流通过防雷导线时发热对气囊材料的影响,H_1取值应该大于计算的值。

c. 其他单点处支撑点高度取最大截面处支撑点高度值(见图4(b))。

2) 防雷线导体材料的选择及截面积的计算

防雷带导体遭受雷击时,因为雷电流在导体上通过的时间极短。事实证明,此时导体处于绝热温升状态。假设雷电电流通过导体发出的热量为$Q_{发}=I^2Rt=\rho I2Lt/S$。导体吸收的热量为$Q_{吸}=cm\Delta T=cdLS\Delta T$。$Q_{发}=Q_{吸}$,化简后得:

$$S^2 = \frac{\rho I^2 t}{cd\Delta T}$$

其中:S——导体截面积;

I——雷电电流;

ρ——导体电阻率;

t——雷击电流通过的时间;

c——导体的质量热容;

d——导体的质量密度;

ΔT——导体温升。

考虑电阻温度系数对电阻的影响,上式中的ρ用$\rho'=\rho[1+\alpha(T-t)]$代替,得到

$$S^2 = \frac{\rho' I^2 t}{cd\Delta T}$$

其中 T为熔点,$\alpha = 11354s - 1$,t为电阻温度系数的初始温度。ΔT是导体的

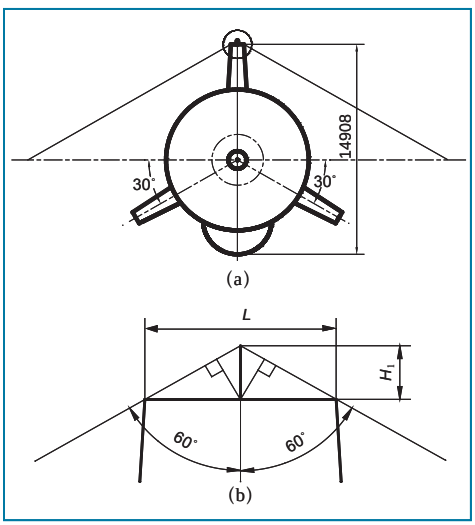

图4 垂直尾翼处单点形成的雷电防护区

表1　三种不同金属防护雷电时所需截面

	电阻率×10^{-6} (Ω•m)	质量热容 (J/kg•℃)	质量密度 ×10^{3}(kg/m^{3})	熔点 (℃)	电阻温度系数 ×10^{-3}(/℃)	截面积 (mm^{2})	单位重量 (kg/km)
铝	0.029	879.23	2.7	658	4.26(20℃)	4.0	10.80
铜	0.017	389.37	8.9	1083	4.30(18℃)	2.4	21.36
铁	0.100	460.55	7.8	1535	6.20(45℃)	6.6	51.48

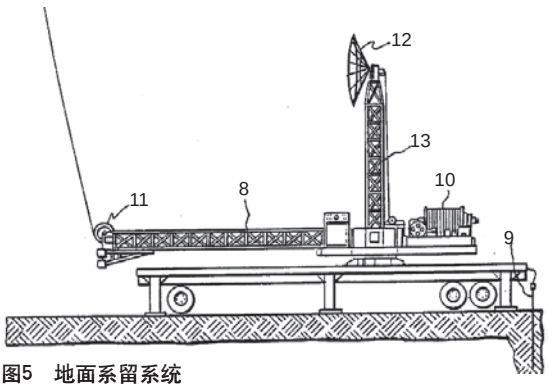

图5　地面系留系统

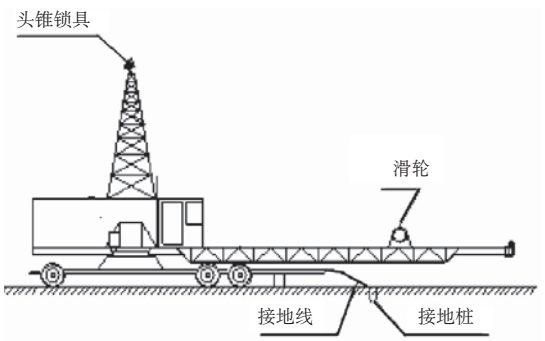

图6　半挂车的接地

熔点温度减去电阻温度系数的初始温度。表1给出三种不同金属进行雷电防护时的导体截面及单位重量。

在相同电阻值条件下，铝的比热比铜大一倍多，而其比重不及铜的三分之一（见表1），铝的防腐性能也优于铜。因此，综合导体强度、单位重量及防腐性能几方面的因素，防雷线选用铝线。在实际使用中，不允许ΔT达到防雷线熔点温度，所以泄放雷电电流的导体截面应适当选大一些。根据

$$\Delta T = \frac{\rho I^2 t}{cdS^2}$$

可以计算出该防雷线在通过最大雷电流时的温升，进而选择防雷线的截面。

3.4 系留缆绳的防雷设计

系留气球上的雷电电流通过系留缆绳的雷电防护编织网泄放到大地。图5为系留系统，它连接到接地棒(9)上，从而成为电力接地系统的一部分。尽管通常会避免在雷暴天气中部署工作，但在雷暴期间，系留气球会处于设计高度或预定操作高度这样一种工作状态。如果雷电袭击了系留气球的防雷系统，随之会产生数千安培的雷电电流，这一电流沿着系缆的防雷编织网流动。在许多情况下，这一电流会经由导向滑轮(11)找到一条路径导入地面。这样金属织物内部由雷击电流越过外护套时会使其以及部分织物完全蒸发及损坏。系缆的这种设计（即没有加固的系缆），将导致损坏的横截面无法修理，需要切除掉从损坏的横截面到其终端的电缆。另外，由于系留缆绳无论是地面系留、空中系留，还是升空与回收过程都会在绞盘和张力释放装置上缠绕几圈，此时雷电电流不可能短时间内通过雷电防护编织网泄放到地面，因此，系留缆绳在进入张力释放装置之前，必须将大部分雷电电流泄放到旋转平台上。

基于以上原因，在进行系留缆绳设计时，系留缆绳的外护套采用半导体材料，这样能够将防雷编织网的雷电电流有效地传导到锚泊车导向滑轮上，通过锚泊车接地装置有效地将雷电电流释放到大地。

3.5 地面系留系统的防雷设计

系留气球良好的接地是防雷系统顺利运行的重要保障，在系留缆绳进入张力释放装置之前必须将雷电电流泄放到锚泊车上，通过锚泊车的接地装置将雷电电流引入大地（图6）。在地面防雷设计时，应在整个系统运行的阵地范围内掩埋金属接地网，并进行人工换土、加入降阻剂，使接地电阻降低，雷电电流泄流越快，被雷击物体高电位保持时间就越短，危险性就越小。

在锚泊车主车架上等间隔的设置数根接地线，配电箱也要设置一根接地线，作为电源接地线，所有的接地线要保持足够的安全距离，并使用接地钉接入大地，可以充分保证雷电电流或设备舱积累静电的有效泄放。为了防止跨步电压对人员的伤害，半挂车的悬梯须采用非导电材料制造。

4 结论

系留气球的雷电防护措施是基于雷电理论、相关的试验数据及国外系留气球正在采用的、可以接受的雷电防护措施等，但这些措施还有待于进一步的验证。 AST

参考文献

[1] HB 6129-1987.飞机雷电防护要求及试验方法.

[2]GJB/Z 25-1991.电子设备和设施的接地、搭接和屏蔽设计指南.

[3]光缆的强电和雷电防护.

[4]虞昊.现代防雷技术基础.清华大学物理系，2005年.

作者简介：彭平，工程师，研究方向：飞行器电气设计。

张金华，研究员，研究方向：飞行器通信导航。