

ICS 27.180

F11

备案号: 37739-2012

NB

中华人民共和国能源行业标准

NB / T 31039 — 2012

风力发电机组雷电防护系统技术规范

Technical specification for lightning protection system of wind turbine

2012-10-29 发布

2013-03-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义、符号 2

4 防雷的一般要求 5

5 风力发电机组组件的雷电防护 8

6 接地装置 15

7 人身防雷 16

附录 A（资料性附录） 风力发电机组雷害风险评估方法 17

附录 B（资料性附录） 叶片和其他风力发电机组部件试验方法 30

附录 C（资料性附录） 风力发电机组的电涌保护器选择与安装 41

图 1 风力发电机组雷电防护区（LPZ）的示意 7

图 2 减少轴承雷电流措施的示意 12

图 3 风力发电机组接地装置的连接 15

表 1 每种 LPL 对应的雷电流参数最大值 5

表 2 每种 LPL 雷电参数最小值 6

表 3 叶片接闪器、接收器、引下线的材料，形状及最小截面积 8

表 4 金属框架条的形状及最小横截面厚度 10

前 言

本标准在编制过程中，主要参考了 IEC 61400-24: 2010《风力发电机组 第 24 部分 雷电防护》。本标准侧重对风力发电机组雷电防护系统检查，因此着重于规定其雷电防护系统的最终要求。为提高本标准的可操作性和可检查性，鉴于风力发电机组雷电防护的特点，本标准强调主要从工程图纸与文件要求、试验以及责任分担这三个方面加以规定，以求最大限度地保证风电机组防雷措施的有效。

本标准按 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构与编写》给出的规则起草。

本标准由中国电器工业协会提出。

本标准由能源行业风电标准化技术委员会（NEA/TC1）归口。

本标准负责起草单位：上海电器科学研究院、上海电科电器科技有限公司、机械工业北京电工技术经济研究所。

本标准参加起草单位：浙江运达风电股份有限公司、东方汽轮机有限公司、苏州电器科学研究所股份有限公司、德和盛电气（上海）有限公司、欧宝电气（深圳）有限公司、上海电气集团有限公司输配电分公司、湘潭电机股份有限公司、兰州兰电电机有限公司、永济新时速电机电器有限责任公司。

本标准主要起草人：尹天文、王碧云、方晓燕、叶蜚誉。

本标准参加起草人：许国东、杨娅曦、胡德霖、鲍建军、王爱华、缪勇、龙辛、曹立新、贺志学、梁利娟、唐晓峰、果岩。

本标准为首次发布。

风力发电机组雷电防护系统技术规范

1 范围

本标准规定了风力发电机组应有的雷电防护措施以及检测的相关要求。

本标准适用于陆上使用、额定功率在 600kW 及以上的水平轴风力发电机组的雷电防护系统。其他的风力发电机组可参照本标准。本标准主要是针对风力发电机组本身，包括其与风电场集电系统连接部件在机组侧的雷电防护。

2 规范性引用文件

下列文件对于本标准的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本标准。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本标准。

GB/T 2900—2008 电工术语

GB 11032—2010 交流无间隙金属氧化物避雷器（IEC 60099-4: 2006, MOD）

GB 16895.22—2004 建筑物电气装置 第 5-53 部分：电气设备的选择和安装—隔离开关和控制设备 第 534 节：过电压保护电器（IEC 60364-5-53: 2001, IDT）

GB/T 16927.1—2011 高电压试验技术 第 1 部分：一般试验要求（IEC 60060-1: 2006, MOD）

GB 18802.1—2011 低压电涌保护器（SPD）第 1 部分：低压配电系统的电涌保护器 性能要求和试验方法（IEC 61643-1: 2005, MOD）

GB/T 18802.21—2004 低压电涌保护器 第 21 部分：电信和信号网络的电涌保护器（SPD）——性能要求和试验方法（IEC 61643-21: 2000, IDT）

GB/T 18802.22—2008 低压电涌保护器 第 22 部分：电信和信号网络的电涌保护器（SPD）选择和使用导则（IEC 61643-22: 2004, IDT）

GB/T 21714.1—2008 雷电防护 第 1 部分：总则（IEC 62305-1: 2005, IDT）

GB/T 21714.2—2008 雷电防护 第 2 部分：风险管理（IEC 62305-2: 2005, IDT）

GB/T 21714.3—2008 雷电防护 第 3 部分：建筑物的物理损坏和生命危险（IEC 62305-3: 2006, IDT）

GB/T 21714.4—2008 雷电防护 第 4 部分：建筑物内电气和电子系统（IEC 62305-4: 2006, IDT）

GB/Z 25427—2010 风力发电机组 雷电防护（IEC/TR 61400-24: 2002, MOD）

GB 50057—2010 建筑物防雷设计规范

IEC/TS 61400-23 风力发电机转子叶片的全尺寸比例结构试验（Full-scale structural testing of rotor blades）

IEC 61400-24: 2010 风轮机 第 24 部分 雷电防护（Wind turbines-Part 24: Lightning protection）

IEC 62305-3 雷电防护 第 3 部分：对建筑物的物理损伤和寿命危害（Protection against lightning-Part 3: Physical damage to structure and life hazard）

EN 50164-1: 2008 雷电防护部件 第 1 部分：连接件要求（Lightning Protection Components (LPC) – Part 1: Requirements for connection components）

3 术语和定义、符号

3.1 术语和定义

GB/T 2900—2008、GB 18802.1—2011、GB/T 24714.3—2008、GB/Z 25427—2010、GB 50057—2010界定的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1.1

雷电防护系统 lightning protection system; LPS

用于减少雷电闪击于建（构）筑物上或建（构）筑物附近造成的实体损害和人身伤亡的整个系统。

注：雷电防护系统由接闪器、引下线和接地装置等部分构成，也包括由等电位连接和/或电气绝缘组成的防雷击危害措施，是综合雷电防护系统的基本部分。

3.1.2

雷电电磁脉冲 lightning electromagnetic impulse; LEMP

雷电流经电阻、电感、电容耦合产生的电磁效应，包含闪电电涌和辐射电磁场。

[GB 50057—2010，定义 2.0.25]

3.1.3

LEMP 防护措施系统 LEMP protection measures system; LPMS

用来防护 LEMP 对电子电气设备和生命体危害的系统性措施，它是综合雷电防护系统的组成部分。

3.1.4

雷电防护水平 lightning protection level; LPL

用来设计雷电防护措施的一组带概率性的雷电流参数值，超过其中最大值或低于其中最小值的自然雷电流是一个低概率事件。它反映了防雷系统的防护效率。

3.1.5

雷电防护区 lightning protection zone; LPZ

划分雷击电磁环境强度的区。防雷区的分界面不一定要有实物界面，如不一定要有墙壁、地板或天花板作为分界面。

注：LPZ 建立后，其空间的 LEMP 强度应与该空间内的内部系统的冲击耐受水平相匹配。

3.1.6

接闪器 air-termination system

雷电防护系统中用于拦截雷击的组成部分。

注：由拦截闪击的接闪杆、接闪带、接闪线、接闪网以及金属面、金属构件等组成。

3.1.7

电涌保护器 surge protective device; SPD

用于限制瞬态过电压和泄放电涌电流的电器，它至少包含一非线性的元件。

[GB 18802.1—2011，定义 3.1]

3.1.8

引下线 down-conductor system

用于将雷电流从接闪器传导至接地装置的导体。

[GB 50057—2010，定义 2.0.9]

3.1.9

接地体 earth electrode

埋入土壤或混凝土基础上作散流用的导体。

[GB 50057—2010，定义 2.0.11]

3.1.10

接地装置 earth-termination system

接地体和接地线的总合，用于传导雷电流并将其流散入大地。

3.1.11

基础接地极 foundation earth electrode

指地基混凝土钢筋或预埋在建筑物混凝土中用作接地体的其他导体。

[GB/T 2714.3—2008，定义 3.12]

3.1.12

雷电流 lightning current

流经雷击点的电流。

[GB/Z 25427—2010，定义 3.22]

3.1.13

雷电等电位连接 lightning equipotential bonding

为减少雷电流引起的电位差，直接用短直导体或通过 SPD 把分离的金属部件连接到 LPS 上的一种防雷措施。

3.1.14

雷击 lightning stroke

对地雷闪中的单次放电。

[GB/Z 25427—2010，定义 3.26]

3.1.15

LPS 的自然部件 natural component of LPS

虽不是为防雷专门安装的导体部件，但在某些情况下，可起到 LPS 的一个或多个部件的作用。例如：自然接闪器，自然引下线和自然接地极等。

3.1.16

用 I_{imp} 测试的 SPD SPD tested with I_{imp}

经受得起 10/350 μ s 典型波形的部分雷电流的电涌保护器，需要用 I_{imp} 电流做相应的冲击试验。

注：对电力线路，合适的测试电流 I_{imp} 由 GB 18802.1—2011 的 I 类试验测试程序定义。

3.1.17

用 I_n 测试的 SPD SPD tested with I_n

经受得起 8/20 μ s 典型波形的感应电涌电流的电涌保护器，需要用 I_n 电流做相应的冲击试验。

注：对电力线路，合适的测试电流 I_n 由 GB 18802.1—2011 的 II 类试验测试程序定义。

3.1.18

比能量 (W/R) specific energy

在整个雷击期间雷电流的二次方对时间的积分；它表示在单位电阻上雷电流能量的消散。

[GB/Z 25427—2010，定义 3.38]

3.1.19

电涌 surge

由 LEMP 引起的，以过电压和/或过电流形态出现的瞬时波。

注 1：由 LEMP 引起的电涌可来自于（局部的）雷电流、设施内环路的感应效应，以及下级 SPD 的残余威胁。

注 2：也可能是由其他原因如开关操作或熔断器熔断引起的。

3.1.20

协调配合的 SPD 防护 coordinated SPD protection

一组经过适当选择、配合和安装，用于减少因雷击造成电气和电子系统失效的 SPD 防护。

3.1.21

雷暴日 (T_d) thunderstorm days

一天中可听到一次以上的雷声则称一个雷暴日。可从等雷暴图获得的某地每年雷暴天数。

3.1.22

电压保护水平 (U_p) voltage protection level

表征 SPD 限制接线端子间电压的性能参数, 其值可从优先值的列表中选择。该值大于限制电压的最大值。

[GB 18802.1—2011, 定义 3.15]

3.1.23

低压电气系统 low voltage electrical system

在本标准中, 低压电气系统包括风力发电机组中的用于发生和传输风电电力能量的主电力电气系统(风力发电机, 变流器及相关器件)和提供电气和电子控制测量系统用的低压电源系统。

3.1.24

避雷器 surge arrester

用于保护电气设备免受高瞬态过电压危害并限制续流时间也常限制续流幅值的一种电器。本术语包含运行安装时对于该电器正常功能所必需的任何外部间隙, 而不论其是否作为整体的一个部件。

注 1: 避雷器通常连接在电网导线与地线之间, 然而有时也连接在电器绕组旁或导线之间。

注 2: 避雷器有时也称为过电压保护器, 过电压限制器。

[GB/T 2900—2008, 定义 2.1]

3.1.25

无间隙金属氧化物避雷器 metal-oxide surge arrester without gaps

由非线性金属氧化物电阻片串联和(或)并联组成且无并联或串联放电间隙的避雷器。

[GB 11032—2010 中的 3.1]

3.2 符号

下列符号适用于本标准。

- I_{imp} ——冲击电流;
- I_n ——标称放电电流;
- T_d ——雷暴日;
- U_p ——电压保护水平;
- R_x ——雷害风险分量;
- R_T ——可允许雷害风险;
- N_x ——年均危险事件次数;
- P_x ——一次雷击引起雷害的概率;
- L_x ——每一损害产生的损失率;
- C_L ——风力发电机组未增设防雷设施前平均年损失;
- C_{RL} ——风力发电机组增设防雷设施后残余平均年损失;
- C_{PM} ——风力发电机组防雷设施的年费用;
- C_S ——间接经济损失;
- C_p ——防护措施的成本;
- N_D ——年平均雷击风力发电机组的次数;
- N_g ——雷击大地密度;
- A_d ——孤立风力发电机组的截收面积;
- C_d ——风力发电机组的位置因子;

- N_M ——雷击风力发电机组附近的年平均危险事件次数；
 A_m ——雷击风力发电机组附近的截收面积；
 N_L ——雷直击于进入机组的线路的年平均危险事件次数；
 A_l ——雷击进入机组线路的截收面积；
 N_Z ——雷击进入机组的线路附近的年平均危险事件次数；
 A_i ——雷击进入机组线路附近大地的截收面积；
 P_A ——雷击风力发电机组导致人和动物伤害的概率；
 P_B ——雷击风力发电机组导致物理损害的概率；
 P_C ——雷击风力发电机组导致电气电子系统失效的概率；
 P_{SPD} ——有 SPD 保护时系统失效的概率；
 P_M ——雷击风力发电机组附近导致信号系统失效的概率；
 P_U ——雷击服务设施导致人和动物伤害的概率；
 P_V ——雷击服务设施导致物理损害的概率；
 P_W ——雷击进入机组线路导致电气电子系统失效的概率；
 P_Z ——雷击入户进入机组线路附近导致电气电子系统失效的概率；
 P_{LI} ——雷击相连的进入机组线路导致电气电子系统失效的概率；
 R_S ——电缆屏蔽层电阻；
 L_X ——损失系数；
 L_t ——触和跨步电压导致伤害的人员损失率；
 L_f ——物理损害导致的实体损失率；
 L_o ——雷击电磁脉冲导致电气电子系统失效导致的损失率；
 n_p ——可能受到危害的人员数量；
 n_t ——预期的总人数；
 t_p ——以小时计算的人员每年处于危险场所的时间；
 h_z ——损失相对量的增加因子；
 n_t ——供电对象数。

4 防雷的一般要求

4.1 雷电防护水平与雷电防护的评估

4.1.1 雷电防护水平（LPL）

风力发电机组雷电防护水平划分应按 GB/T 21714.1—2008 的规定，每种 LPL 所规定的雷电流参数的最大值和最小值应符合表 1 和表 2。

表 1 每种 LPL 对应的雷电流参数最大值

首次短时雷击			LPL			
电流参数	符号	单位	I	II	III	IV
峰值电流	I	kA	200	150	100	
短时间雷击电荷	Q_{short}	C	100	75	50	
单位能量	W/R	MJ/Ω	10	5.6	2.5	
时间参数	T_1/T_2	μs/μs	10/350			
后续短时间雷击			LPL			
电流参数	符号	单位	I	II	III	IV
峰值电流	I	kA	50	37.5	25	

表 1（续）

后续短时间雷击			LPL			
平均陡度	di/dt	kA/ μ s	200	150	100	
时间参数	T_1/T_2	μ s/ μ s	0.25/100			
长时间雷击			LPL			
电流参数	符号	单位	I	II	III	IV
长时间雷击电荷	Q_{long}	C	200	150	100	
时间参数	T_{long}	s	0.5			
雷闪			LPL			
电流参数	符号	单位	I	II	III	IV
雷闪电荷	Q_{flash}	C	300	225	150	

表 2 每种 LPL 雷电参数最小值

首次短时雷击			LPL			
电流参数	符号	单位	I	II	III	IV
最小峰值电流	I	kA	3	5	10	16

4.1.2 雷害风险评估

当因原始资料缺乏等条件不足或有相关标准规定不必进行雷害风险评估的情况，风力发电机组的防雷应按雷电防护水平 LPL I 设计。

当有条件进行雷害风险评估或无相关标准规定雷电防护水平，则可以经过评估对整个风力发电机组采取低于 LPL I 的防护级别，但对大型或重要机组仍不应低于 LPL II。

风力发电机组雷害风险评估可参照附录 A 的方法进行。

风力发电机组雷害风险评估可按风险值做结论，也可基于风险评估但从防雷成本效益的估算做结论。允许风险值可由主管部门或业主提出，也可参照附录 A 取值。防雷成本的数据应由行业协会或制造和运行部门提供。

4.2 雷电防护区（LPZ）

4.2.1 LPZ 的划分

LPZ0_A：受直接雷击和全部雷电电磁场威胁的区域。该区域的内部系统可能受到全部或部分雷电电涌电流的影响。这个区域实际上就是直击雷防护系统没有保护到的区域，也是电磁环境参数最高的区域。

LPZ0_B：直接雷击的防护区域，但该区域仍受到全部雷电电磁场的威胁，内部系统可能受到部分雷电电涌电流的影响。这个区域实际上就是直击雷已经得到防护，但没有受到电磁屏蔽或 SPD 保护的区域。

LPZ1：该区域受到直接雷击的防护，空间屏蔽可以衰减雷电电磁场。由于分流和边界处 SPD 的作用使电涌电流受到限制。

LPZ2～n：该区域的附加空间屏蔽可以进一步衰减雷电电磁场。由于分流和边界处附加 SPD 的作用使电涌电流受到进一步限制的区域。作为防雷的一般规律，被保护的对象应置于电磁特性与该对象耐受能力相兼容的 LPZ 内，使损害（物理损害和过电压使电气和电子系统失效）减小。

注 1：一般地，防雷区域的系数越大，电磁环境参数越低。

注 2：电气、电子系统和设备耐压水平的资料应由制造商提供。

4.2.2 实施 LPZ 的措施

LPZ0_B 由接闪器实现。风力发电机组的 LPZ1 和更高的 LPZ 由安装 LPMS 来实现，如：

a) 接地和等电位连接。

- b) 屏蔽和布线。
- c) 协调配合的 SPD 防护。

4.2.3 风力发电机组空间的 LPZ 的划分

风力发电机组形成的防护区应符合图1的规定。

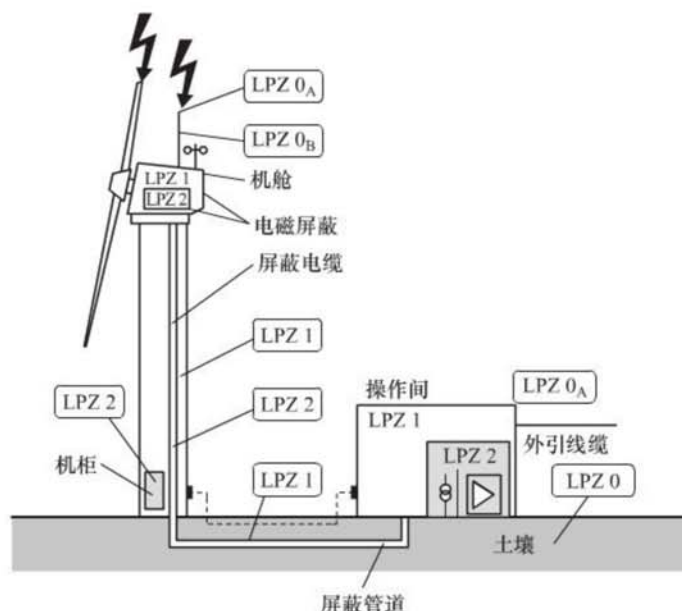


图1 风力发电机组雷电防护区(LPZ)的示意

- a) **LPZ0_A** 包括如下部位:
 - 1) 叶片、轮毂罩、机舱罩、塔架的外表面以及外部附加装置未受到雷击保护的部分。
 - 2) 不在塔架保护范围又没有防雷击措施的操作间和线路。
- b) **LPZ0_B** 包括如下部位:
 - 1) 叶片、轮毂罩、机舱罩、塔架的外表面和外部附加装置受到雷击保护的部分。
 - 2) 无金属屏蔽罩的轮毂罩、无金属屏蔽罩的机舱罩或金属网格不密集的非金属机舱罩内部的空间。
 - 3) 非金属塔架或没有按照标准配备钢筋连接件的混凝土塔架内部。
 - 4) 处于塔架雷击保护范围的操作间和线路。
- c) **LPZ1** 包括如下部位:
 - 1) 采取了有效的雷电流导引和屏蔽措施的叶片的内部, 以及轮毂内部 (传感器、调节器等)。
 - 2) 具有相应的雷电流导引措施的全金属覆盖或金属网格密集的非金属机舱罩的内部空间。
 - 3) 在无金属覆盖或金属网保护却具有金属包层并以适当方式连到一个等电位连接系统 (例如作为等电位基准的机器底座) 的设备的内部。
 - 4) 屏蔽电缆或处于金属管中的电缆, 其屏蔽层或金属管两端已做等电位连接。
 - 5) 金属塔架或钢筋混凝土塔架的内部 (混凝土塔架的钢筋按照适用的标准设计并连接到基础接地极)。
 - 6) 用钢板覆盖或具有屏蔽措施 (所有各侧具有与基础接地极或环形接地体相连的钢筋, 金属门和带金属丝网的窗) 的操作间的内部。
- d) **LPZ2** 是在防雷区 **LPZ1** 区域内采取进一步附加屏蔽措施和 **SPD** (如设备机壳或线路屏蔽) 而实现的。

e) LPZ_{n+1} 是在防雷区 LPZ_n 区域内采取进一步附加屏蔽措施和 SPD 而实现的。

5 风力发电机组组件的雷电防护

5.1 叶片

5.1.1 叶片防雷的要求

5.1.1.1 一般要求

叶片应通过装设接收器（属小型接闪器）、引下线及其连接元件组成雷电防护系统，它可为叶片结构本身的一部分、叶片的组件或集成在其内部。它应能在规定的 LPL 下承受相应的雷电流冲击后，确保叶片无结构性损坏，不妨碍叶片继续运行直至下一次维修；应能耐受因风、潮湿、颗粒物等引起的预期磨损以及振动，但不影响叶片的动力特性。应对包括雷击防护系统的叶片耐受机械应力的能力进行考核，并宜在进行 IEC/TS 61400-23 的试验以前就安装在叶片上。

叶片引下线中可安装雷电流记录装置。

5.1.1.2 叶片中的接收器

- a) 叶片接收器应位于叶片表面上，使其能截接绝大部分的雷击先导。叶片接收器应能进行维修和更换。
- b) 叶片接收器的保护范围不能用 GB/T 21714.3—2008 中的保护角法和滚球法来计算确定。叶片接收器系统的设计应根据 5.1.2 规定的试验来确定。其截接雷击先导的性能应由 5.1.2 规定的高压接闪试验来确定。
- c) 当叶片中接收器的数量达到或超过下列规定值，可不进行附录 B 中高压接闪试验中的初始先导接闪试验：
 - 1) 叶片长度 $L < 20\text{m}$ ：叶尖端接收器 1 个。
 - 2) 叶片长度 $20\text{m} \leq L < 30\text{m}$ ：叶尖端接收器 1 个，压力面接收器 1 个，吸力面接收器 1 个（与叶尖端有一定距离处）。
 - 3) 叶片长度 $30\text{m} \leq L < 45\text{m}$ ：叶尖端接收器 1 个，压力面接收器 2 个，吸力面接收器 2 个（分布在转动的叶片上）。
 - 4) 叶片长度 $L \geq 45\text{m}$ ：叶尖端接收器 1 个，压力面接收器 3 个，吸力面接收器 3 个（分布在转动的叶片上）。

5.1.1.3 叶片中的引下线

- a) 引下线应长期可靠连接，并能承受雷电流产生的电、热及电动力效应的联合冲击。引下线宜在进行 IEC/TS 61400-23 的试验以前就安装在叶片上，应与叶片一起进行耐受机械应力的能力考核。
- b) 引下线在雷电流导引期间不应超过叶片的温度允许值。

5.1.1.4 叶片接收器的形状和截面积要求

叶片接收器和引下线的材料、形状及最小横截面应符合表 3 的规定。

表 3 叶片接闪器、接收器、引下线的材料，形状及最小截面积

材 料	形 状	最小截面积 ^a mm ²	备 注
铜	实心带状	50	最小厚度为 2mm
	实心圆状 ^b	50	直径为 8mm
	绞线	50	绞线每股的最小直径为 1.7mm
	实心圆状 ^{c、d}	200	直径为 16mm

表 3（续）

材 料	形 状	最小截面积 ^a mm ²	备 注
镀锡铜	实心带状	50	最小厚度为 2mm
	实心圆状 ^b	50	直径为 8mm
	绞线	50	绞线每股的最小直径为 1.7mm
铝	实心带状	70	最小厚度为 3mm
	实心圆状	50	直径为 8mm
	绞线	50	绞线每股的最小直径为 1.7mm
铝合金	实心带状	50	最小厚度为 2.5mm
	实心圆状	50	直径为 8mm
	绞线	50	绞线每股的最小直径为 1.7mm
	实心圆状 ^c	200	直径为 16mm
热镀锌钢	实心带状 ^e	50	最小厚度为 2.5mm
	实心圆状 ^f	50	直径为 8mm
	绞线	50	绞线每股的最小直径为 1.7mm
	实心圆状 ^{c、d、f}	200	直径为 16mm
不锈钢	实心带状 ^e	50	最小厚度为 2.5mm
	实心圆状 ^e	50	直径为 8mm
	绞线	70	绞线每股的最小直径为 1.7mm
	实心圆状 ^{c、d}	200	直径为 16mm
注 1：热镀或电镀层厚度最小为 1μm。 注 2：镀层应光滑、连续，防锈层厚度至少为 50μm。			
铬含量不少于 16%，镍含量不少于 5%，碳含量不大于 0.07%。 ^a 对实心带状和实心圆状，在需重点考虑热应力和机械力的地方，截面积应分别增加到 60mm ² 和 78mm ² 。 ^b 在对机械强度不做要求的地方，截面积可由 50mm ² （直径 8mm）减少到 28mm ² （直径 6mm），在这种情况下，应考虑减小加固点的间隔。 ^c 仅适用于杆状接闪器。实际应用中，机械应力（例如：风力）不很严重的地方，采用一根带有固定装置、直径为 10mm，最长为 1m 的杆状接闪器即可。 ^d 仅适用于接地引入棒。 ^e 对预埋在混凝土内的不锈钢，和/或与易燃材料直接接触的不锈钢，如果为实心圆状，应将最小截面积增大到 78mm ² （直径 10mm），实心带状则增大到 75mm ² （最小厚度 3mm）。 ^f 当能量达 100MJ/Ω 时，为避免熔化，最小截面积分别为：铜 16mm ² ，铝 25mm ² ，钢 50mm ² ，不锈钢 50mm ² 。表中的厚度、宽度和直径允许偏差为 ±10%。			

5.1.2 检验和测试

叶片接收器和引下线截收并传导雷电流能力可通过以下方法之一进行验证：

- a) 原创性的叶片的雷击防护系统应参照本标准附录 B 给出的高压接闪试验和大电流试验进行性能检验。试验应按规定的试验设备、试品、试验布置和试验程序进行试验。叶片应在预期接闪位置接闪，叶片表面无破坏、无沿面闪络，未发生击破叶片表面损及内部情况，叶片层叠结构未破坏。试验合格判据的细节可由厂商和试验单位协商确定。
- b) 经对比能够证明其与已验证合格的叶片类型（设计）相似的叶片的雷击防护系统无须专门的型式检验。

注：叶片类型相似是指叶片整体设计（长度、材料）相似，防雷系统设计相似（接收器数量与布置，引下线材料、

结构、数量、尺寸和连接)。对比的原型有必要的试验验证报告。与原型相比,不能有未经证实的影响雷击易损性的改变。

- c) 使用可靠的分析软件(该软件已与有成功试验结果或者有成功运行经验的叶片防雷保护设计比较后确认可靠)进行验证。

5.1.3 技术文件或资料

5.1.3.1 应提供下列设计文件和图纸:

- a) 接收器结构、材料、参数和布置。
- b) 引下线结构、材料、参数和布置。
- c) 附加结构元件及其连接。
- d) 叶片防雷设计说明书。
- e) 防雷检测试验报告或者 5.1.2 中的 b)、c) 所需的证明材料。

5.1.3.2 应提供下列安装和维护说明:

- a) 接收器系统以及引下线系统的安装。
- b) 对接收器检查与维护的要求。
- c) 对引下线和连接元件检查与维护的要求。

5.2 机舱及其他结构组件(轮毂、轮毂罩、舱体、塔架)

5.2.1 机舱及其他结构组件防雷的要求

5.2.1.1 一般要求

风力发电机组的舱体及其他结构组件(轮毂、轮毂罩、舱体、塔架)的雷电防护应尽可能利用其本身的金属结构作为接闪器、引下线及等电位连接系统的一部分。对机舱外的气象仪器和航空警示灯应安装附加的接闪器。

5.2.1.2 轮毂

轮毂金属结构本身具有好的屏蔽,其雷电防护只需采取等电位连接。对外延到轮毂外部(去叶片根部或机舱)的电气和控制系统电路应采取过电压保护措施。

5.2.1.3 轮毂罩

金属轮毂罩自然成为雷电防护系统的一部分,应能承载所规定 LPL 的雷电流。金属轮毂罩的最小厚度应符合表 4 的规定。

当轮毂罩由非金属材料制成,并且有部分电气控制和执行部件处于其中时,轮毂罩应建立金属框架作为接闪器,并与轮毂金属相连接,应能承载所规定 LPL 的雷电流。金属框架条的形状及最小横截面厚度应符合表 4 的规定。

表 4 金属框架条的形状及最小横截面厚度

LPL 类型	材料	厚度 ^a t_1 mm	厚度 ^b t_2 mm
I ~ IV	铅	—	2.0
	钢(不锈钢,镀锌钢)	4	0.5
	钛	4	0.5
	铜	5	0.5
	铝	7	0.65
	锌	—	0.7
^a 防止击穿、热熔或燃烧。 ^b 仅适用于可不防击穿、热熔或燃烧的金属板。			

5.2.1.4 机舱

- a) 金属机舱。金属机舱结构自然成为雷电防护系统的一部分，应能承载所规定 LPL 的雷电流。金属舱体外罩和金属结构（如机舱底盘）应与引下线连接。
- b) 非金属舱体。非金属舱体外罩（如玻璃钢外罩）应增设金属接闪网格，网格尺寸应不大于 $5\text{m} \times 5\text{m}$ ，且至少在机舱水平方向的四条棱角上布有金属网格条。网格应能可靠接闪，承载所规定 LPL 的雷电流，并能在一定程度、一定空间内屏蔽雷电流产生的磁场、电场。金属网格应互连并在较大范围内用金属带与机器底座多点连接，金属网格条尺寸的选择应符合表 3 的规定。任何铰链应尽可能用宽的柔性铜带跨接。机舱内的设备和线路应采取良好的屏蔽和等电位连接措施。
- c) 舱体内应建立等电位连接网络，内部主要金属构件、金属管道以及线路屏蔽均应采用等电位连接。舱内宜设置环形等电位母排。
- d) 外延到舱体外部的电气和控制系统电路应布设在金属管道内，金属管道应与引下线系统相连，电气和控制系统电路应采取过电压保护措施。

5.2.1.5 塔架

金属塔架可视为完善的法拉第笼，其内部不需要特定的雷电防护措施，只需采取等电位连接，对进入舱体以及引出到塔架外部的电气和控制系统电路应采取过电压保护措施。

金属塔架各段落之间应有良好的电气连接。各段落之间除了自然的结构连接以外还应有多条直接的电气连接。金属塔架可作为良好的自然引下线，各段端部和底座环应引出接地端子。也可在塔架内设置附加的垂直接地干线，此接地干线应在各段端部和底座环处与塔架相连并引出接地端子。塔架内各金属构件应就近与塔架或接地干线作接地/等电位连接。

当塔架为主筋互相连接的钢筋网时，也可作为自然引下线。在钢筋混凝土塔身中，应确保 2~4 根并行的竖向连接钢筋，在底部、顶部以及水平每 20m 有足够连接。钢筋的截面积应符合 GB/T 21714.3—2008 中表 6 的要求。

桁架型塔架不是完善的法拉第笼，其内部为 LPZ0_B。

5.2.2 技术文件

应提供有关文件或图纸，其中应包含下列信息：

- a) 机舱外壳和轮毂罩中作为接闪器的金属部件结构、材料、参数和布置。
- b) 舱体外部的接闪器。
- c) 等电位连接网络。
- d) 机舱、轮毂及轮毂罩的防雷设计说明。

5.3 机械传动与偏航机构

5.3.1 机械传动与偏航机构防雷的要求

5.3.1.1 一般要求

机械传动与偏航机构应采用包括等电位连接、隔离和旁路等防雷措施，减少或避免雷电流通过轴承等重要机械设备，从而减少雷电过电压的危害。

5.3.1.2 轴承

轴承应证明能在整个服务期间耐受预期可能流过的多次雷电流，否则应采取降低或避免雷电流流过轴承的保护措施。对处于雷电流通道上的轴承齿轮、轴承与连轴节应采用旁路分流和/或阻断隔离相结合的方式。通向发电机的连轴节应采用绝缘隔离，以保护发电机免遭雷电流直接侵入发电机轴。

旁路分流是指在轴承前端设置一条或多条与其并行的低阻通道，并具有比被旁路的自然通路更小的阻抗值。可在叶片雷电流引下线根部、机舱前端外部即用旁路措施将雷电流导引下去，尽可能减少或避免雷电流进入主轴而流向轴承。低阻通道的形成可利用火花间隙和滑动触头，所选滑动触头所能承受的雷电流冲击电流应能满足机组所选的雷电防护水平。

阻断隔离是指在轴承和/或齿轮箱以及其他高速轴到机舱底板的电流通道中插入绝缘层。

注：当因机械应力等原因插入绝缘层有困难时，应加强其前端的旁路措施。

图 2 所示为减少轴承雷电流措施的示意。

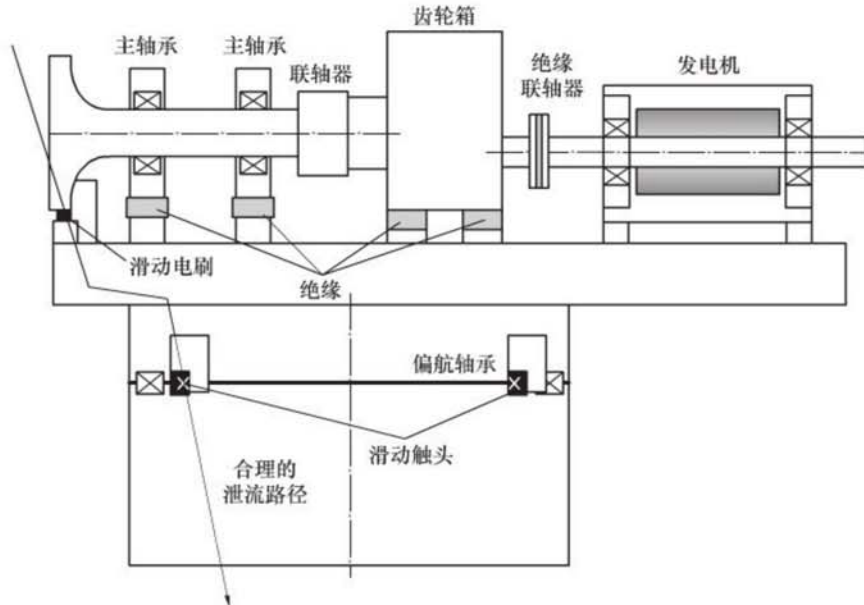


图 2 减少轴承雷电流措施的示意

5.3.1.3 液压系统

对于处于雷电流通路上的液压系统，应确保雷电流不会影响该系统，避免液体泄漏及因此引起的液压油起火。

对液压系统中的液压缸可采用滑动触头或等电位连接从而将雷电流旁路分流。

对暴露于雷电流中的液压管道应将其敷设在铠装或金属管道内，铠装和金属管道两端应连接至钢结构，做等电位连接。金属管道应有足够的截面积来泄放雷电流。

5.3.1.4 火花间隙与滑动触头

火花间隙及滑动触头应能安全导引在其使用处出现的雷电流；其应用性能应确保不受外界环境影响（如雨、冰、盐雾污染、尘土污染等）；火花间隙及滑动触头还应考虑其易损部件的服务周期及维护。

5.3.1.5 偏航系统

应采用旁路措施将偏航轮盘齿轮两端旁路。旁路系统应沿轮盘边缘均匀且多路布置。

5.3.1.6 齿轮箱

发电机和未采取阻断隔离的齿轮箱应通过机器底座的连接螺栓与接地装置保持良好的连接。如果齿轮箱和/或发电机用柔性阻尼元件与机器底座连接，则所有阻尼元件应采用有足够截面积的扁铜带跨接。

5.3.2 检验和测试

轴承与偏航机构的雷电防护系统（如火花间隙、滑动触头及其布置）应进行雷电流传导电流试验，试验方法参见附录 B 中的 B2.4，推荐能代表自然雷电流的冲击电流进行测试。具体要求如下：

- 系统重要部件可以用试验模型代替；可在缩尺模型上进行测试，但应进行计算，证明缩放比例因素和影响。
- 应证明保护系统能经受首次雷击及长时间雷击电流的作用。
- 滑动触头作为保护系统的部件时，应另外进行机械试验以证明其稳定性，特别是其触头磨损有无雷电侵蚀。其磨损应足够低，以允许计划服务期间内的应有操作。
- 对重要部位的火花间隙和滑动触头还应用局部模型测试其旁路性能。

5.3.3 技术文件

应提供有关文件或报告，其中应包含下列信息：

- a) 移动接触部位（包括火花间隙和滑动接触）传导雷电流能力的试验报告。
- b) 对轴承与液压系统免遭雷电流效应影响的保护措施应作说明。该说明应包含显示保护有效性的文件、证据和/或测试报告。
- c) 如果没有采取任何保护措施，则需要显示在预期的常规雷电冲击电流和次数作用下，轴承在设计寿命时间内仍可正常工作的测试报告。
- d) 火花间隙或滑动触头检查与维护的要求。

5.4 低压电气系统和电子控制系统

5.4.1 低压电气系统和电子控制系统防雷保护的要求

5.4.1.1 一般要求

低压电气系统和电子控制系统应采用等电位连接、屏蔽与合理布线、隔离和协调配合的 SPD 防护，将雷电磁场和电涌的威胁减少到最低水平，以减少或避免出现雷电电磁脉冲对设备的损害。

5.4.1.2 等电位连接

风力发电机组的电气和电子系统各组件的金属外壳（风力发电机及其部件的外壳，变流器及其部件的机柜金属外壳，开关柜、控制柜金属外壳，升/降压变压器金属外壳等）、各电气和电子线路的屏蔽和金属管道外壁应在本防雷分区就近与雷电流引下系统实行防雷等电位连接；各电气和电子线路的屏蔽和金属管道外壁的两端均应实行防雷等电位连接。金属轮毂、轮毂罩、机舱的金属底盘和机舱外壳的金属构架、全金属的塔架等均是良好的大型等电位连接母排。

等电位连接应尽可能走直线，连接线尽可能短。不同连接排之间的连接导线、连接排和接地装置之间连接导线的最小截面积应符合 GB/T 21714.3—2008 中表 8 的规定，金属装置和连接排之间连接导线的最小截面积应符合 GB/T 21714.3—2008 中表 9 的规定。

在不能通过金属构件的自然连接获得电气连续性的地方，可采用专门的等电位连接导线；在用导线进行直接连接不可行的地方（如电源芯线、信号芯线），可采用电涌保护器。

5.4.1.3 屏蔽和布线

5.4.1.3.1 一般要求

风力发电机组应通过采取空间屏蔽、内部线路屏蔽以及内部线路合理布线措施，加之必要的等电位连接，以减小雷击产生的电磁场和系统内感应电涌的幅值，确保感应电压不超过电缆和所连接设备的承受水平。动力线路和信号线路应独立布线，保持足够距离，交叉时宜保持直角。

5.4.1.3.2 空间屏蔽

风力发电机组中 LPZ 的空间屏蔽通常由风力发电机组的自然部件构成，如机舱罩、金属塔架。处于地面上的操作间的空间屏蔽应符合 GB/T 21714.4—2008 中 6.1 条的规定。

5.4.1.3.3 线路屏蔽

线路屏蔽局限于被保护系统的线路和设备，可采用双绞电缆、金属屏蔽电缆、带有电磁屏蔽功能的金属网格式桥架和金属设备壳体。此金属网格式桥架及屏蔽电缆和金属电缆管道应在首、末两端接地；金属设备壳体应接地。

5.4.1.4 合理布线

风力发电机组在内部布线时，应考虑最大程度地减小感应回路的面积。流过雷电流的引线应尽可能靠近金属构筑物并远离电子线路。

5.4.1.5 隔离

5.4.1.5.1 低压电源系统中的隔离

在低压电源系统中宜采用带屏蔽的隔离变压器隔离电源。

5.4.1.5.2 电子控制系统中的隔离

在电子控制系统中宜采用光电隔离。控制单元的信号线宜采用光纤（不含加强筋），同时应注意光电转换器的防雷保护。

5.4.1.6 协调配合的电涌保护

对电气和电子系统中重要、敏感或处于电磁环境恶劣的设备应安装电涌保护器，进行电涌防护。电涌保护器的基本要求是：

- a) 电涌保护器的电压保护水平应低于被保护设备冲击耐受水平并有一定裕度。
- b) 电涌保护器应能在配置点最大持续工作电压下长期接入而不劣化。
- c) 电涌保护器应能承受在配置点可能出现的雷电流而不损坏。
- d) 电涌保护器自身的损坏应不影响被保护设备和系统的安全和/或持续运行。
- e) 电涌保护选择的产品和配置方案应能使电力/电源系统和电子系统各处的 SPD 级间达到协调配合。

所用电涌保护器产品应符合相应国家标准。对工作于风力发电机组特殊条件下、尚无相应标准的 SPD，应慎重使用。对 SPD 的选择与应用更进一步的资料可参照附录 C。

5.4.2 技术文件

5.4.2.1 SPD 的技术文件

应提供有关文件或报告，其中应包含下列信息：

- a) SPD 测试报告。
- b) SPD 选型与配置方案及论证。
- c) 对应防护区中的设备冲击耐受水平。
- d) SPD 安装、维护计划。

5.4.2.2 等电位联结的技术文件

应提供有关文件或报告，其中应包含下列信息：

- a) 等电位连接系统布置的说明。
- b) 各连接件的质量控制说明。

5.5 风电场集电系统

5.5.1 与风力发电机组分开的操作间和变电站

为使操作间和/或变电站内达到 LPZ1，一般可用薄钢板建造这些设施，或选择无窗的钢筋混凝土建筑物。混凝土建筑物所有面（地板、天花板和墙壁）均应含有钢筋，以作为屏蔽措施。在其入口处应安装用诸如薄钢板、铝或细金属丝网做成的屏蔽门。

如操作间和变电站有可能受到直接雷击（根据雷电滚球法检查），应按照 GB 50057—2010 装设接闪杆和引下线，并连接到接地体。

基础接地体或环形接地体应进入室内，并接到等电位连接带。

为了保持一个连续的 LPZ1，在塔架和独立的操作间和变电站之间的电缆线路应采取屏蔽措施。可采用下列屏蔽方法：

- a) 屏蔽电缆，其两端接到等电位连接的屏蔽网。
- b) 两端接到等电位连接的金属管。
- c) 接到塔架和建筑物接地体的钢筋管道。

5.5.2 集电变压器和开关柜防雷要求

在集电变压器的高压侧应安装符合 GB 11032—2010 的无间隙金属氧化锌避雷器，该避雷器的选择应考虑高压线路的类型和高压系统的接地制式。在集电变压器的低压侧应安装符合 GB 18802.1—2011 的电涌保护器。

5.5.3 技术文件

应提供有关文件或报告，其中应包含下列信息：

- a) 应提供变压器接地情况和集电变压器与升压变电站的连接形式（地下电缆或架空线）。
- b) 避雷器和 SPD 选型说明。

6 接地装置

6.1 接地装置的要求

6.1.1 一般要求

风力发电机组接地装置应利用塔架的钢筋混凝土基础作为共用接地装置（防雷保护、电气系统和通信系统共用），除应满足四个基本要求以外，还要符合雷电防护的要求，能将高频和高能量的雷电流安全导入地。四个基本要求是：

- a) 确保接地故障出现时，跨步电压和接触电压下的人身安全。
- b) 防止接地故障引起设备的损坏。
- c) 接地故障时接地装置耐受热/电动力。
- d) 具有长期的机械强度和耐腐蚀性。

风力发电机组工频接地电阻宜小于 4Ω 。机组的接地装置宜与附近工频接地电阻相近的机组的接地装置相连。

在高土壤电阻率地区，应采取措施降低接地电阻。当接地装置要求做到规定的接地电阻值在技术、经济上极不合理，而附近多个机组的接地电阻相差不大时，接地电阻值可放宽到 10Ω （集电系统为有效接地和低电阻接地系统），并将接地装置与附近机组的接地装置相连成大型地网。

以钢筋混凝土基础做成的共用接地装置也能满足防雷冲击接地电阻要求。为减少雷电冲击接触电压、跨步电压和地电位升高，应注意减小接地装置的网格尺寸。

在风电场的条件下只能将塔架下的接地装置供所有接地之用（例如：防雷保护、电气系统和通信系统）。

图 3 所示为风力发电机组接地装置的连接。

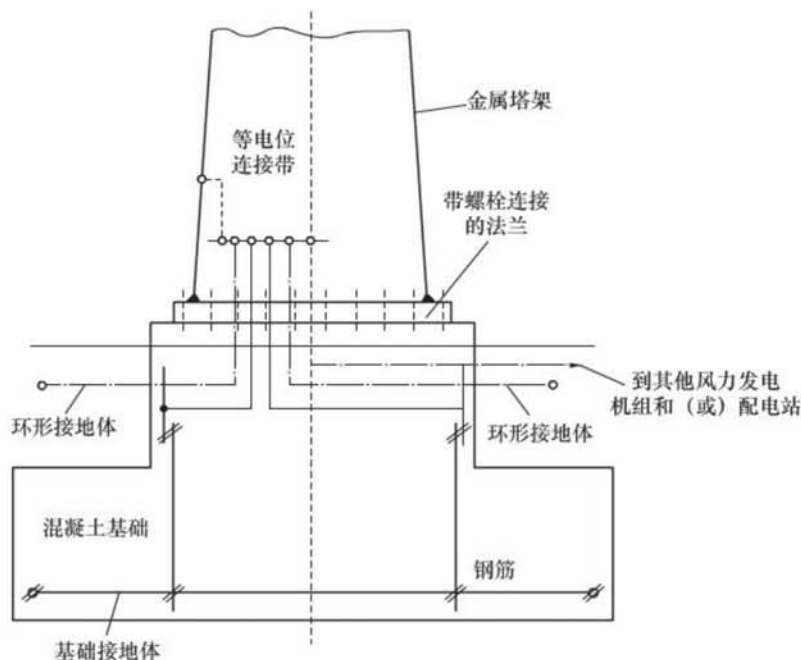


图 3 风力发电机组接地装置的连接

6.1.2 接地装置的形状尺寸

风力发电机组接地装置应为 B 型，应符合 GB/T 21714.3—2008 中 5.4.2.2 条的规定。

B 型接地装置是由基础接地极和外周的环形接地极组成，环形接地极插入土壤的部分至少占自身总长 80%以上，环形接地极与基础接地极多点可靠相连并连接到塔架。接地系统组件应能耐受雷电电流和电力系统故障电流。

6.1.3 接地装置的防腐

应确保接地装置在风力发电机组寿命内不发生腐蚀。接地极的埋深和类型应尽可能使腐蚀、土壤干燥和冰冻的影响减到最小，从而使接地阻值保持稳定。

6.2 技术文件

应提供有关文件或报告，其中应包含下列信息：

- a) 基础接地极和环形接地极的设计文件。
- b) 降低接地电阻和防腐蚀特别措施的说明。
- c) 实测的工频接地电阻值及计算的接触电压和跨步电压值。

7 人身防雷

7.1 防雷要求

风力发电机组的塔架外部、塔架内部、机舱外部和叶片上均应有对工作人员的防雷保护措施，保护措施包括技术措施和管理措施：

- a) 塔架外部地面上限制接触电压和跨步电压。
- b) 塔架内部和机舱内部的若干加强等电位连接的安全工作平台。
- c) 规定安全区域和安全距离。
- d) 雷电预警机制和报警信号。
- e) 急救培训。
- f) 防雷知识教育。
- g) 安全工作程序。

7.2 技术文件

应提供有关文件或报告，其中应包含下列信息：

- a) 接触电压、跨步电压、安全区域、安全距离、安全平台的技术说明。
- b) 风力发电机组安装手册及服务维护手册，应包括安全说明书、报警程序和安全工作程序。

附 录 A
(资料性附录)
风力发电机组雷害风险评估方法

A.1 总则

本附录雷害风险评估采用 GB/T 21714.2—2008 的方法进行，但在若干细节上考虑了风力发电机组的特殊情况加以改变。对于风力发电机组雷害风险评估是按风险值作结论的，各雷害风险分量可按下文条文的方法计算，对于允许风险值未由主管部门或业主提出，可允许雷害风险值按下文条文的方法计算。

A.2 风险评估基本方法

风力发电机组雷害风险评估的基本判据为：
如 $\sum R_x > R_T$ 需要加强防雷措施，直至 $\sum R_x < R_T$
其中 R_x 为各雷害风险分量， R_T 为可允许雷害风险。在雷害风险评估中风险分量的基本关系是：
$$R_x = N_x P_x L_x \tag{A.1}$$

式中：
 N_x ——从某一来源的年均危险事件次数；
 P_x ——一次雷击引起雷害的概率；
 L_x ——每一损害产生的损失率。下标“1”为人员损失，下标“2”为服务损失，下标“4”为经济损失。
与风力发电机组有关的风险分量见表 A.1。

表 A.1 与风力发电机组雷害有关的风险分量

损害源	参 数			
	R_x	N_x	P_x	L_x
S1 雷击叶片机舱或风力发 电机组其他部分	$R_A = N_D P_A L_A$	N_D	P_A	L_{A1}
	$R_B = N_D P_B L_B$	N_D	P_B	$L_{B1} L_{B2} L_{B4}$
	$R_C = N_D P_C L_C$	N_D	P_C	$L_{C2} L_{C4}$
S2 雷击风力发电机组附近	$R_M = N_M P_M L_M$	N_M	P_M	$L_{M2} L_{M4}$
S3 雷击风力发电机组进线	$R_U = N_L P_U L_U$	N_L	P_U	L_{U1}
	$R_V = N_L P_V L_V$	N_L	P_V	$L_{V1} L_{V2} L_{V4}$
	$R_W = N_L P_W L_W$	N_L	P_W	$L_{W2} L_{W4}$

表 A.1 (续)

损害源	参 数			
	R_x	N_x	P_x	L_x
S4 雷击风力发电机组进线 附近	$R_Z=N_ZP_ZL_Z$	N_Z	P_Z	$L_{Z2} L_{Z4}$
注：R_A——由于雷电直接击于风力发电机组造成人员损失的风险分量； R_B——由于雷电直接击于风力发电机组造成机组实体（叶片、机舱、塔架及直接导体连接的齿轮、轴承、联轴节）损失的风险分量； R_C——由于雷电直接击于风力发电机组造成人员和电气电子系统（含发电机系统等）损失的风险分量； R_M——由于雷电击于风力发电机组附近造成人员和电气电子系统损失的风险分量，由于风力发电机组很高，实际上雷击很难击到风力发电机组附近； R_U——由于雷电直接击于进入风力发电机组的管线造成人员损失的风险分量； R_V——由于雷电直接击于进入风力发电机组的管线造成机组实体损失的风险分量； R_W——由于雷电直接击于进入风力发电机组的管线造成内部人员和电气电子系统损失（实际上是风力发电机组的供电损失）的风险分量； R_Z——由于雷电击于进入风力发电机组的管线附近造成内部人员和电气电子系统损失的风险分量； N_x、P_x、L_x的具体计算分别见 A.5～A.7。				

当各风险分量之和大于允许风险值 ($\sum R_x \geq R_T$)，应增设适当防雷措施。当各风险分量之和小于允许风险值 ($\sum R_x < R_T$)，不必增设防雷措施。

A.3 允许风险值

风力发电机组整机雷害风险允许值的基本值为 RJZ，计及风力发电机组容量、重要性和联网情况时应加以修正。容量大于 1.5 MW 的为 RJZ/2，重要性高的为 RJZ/2；联网并对电网有影响的为 RJZ/2。

各部件的雷害风险允许值：叶片、机舱、塔架为 10^{-4} ；齿轮、轴承、联轴节为 10^{-4} ；电气电子系统为 10^{-4} ；人员伤亡为 10^{-5} 。整机风险 RJZ 为各部件风险之和。

计算公式与参数见 A.5～A.7。

A.4 基于风险评估的防雷成本效益估算

基于风险评估的防雷成本效益估算的基本判据为：

$$C_{PM} + C_{RL} < C_L \tag{A.2}$$

$$C_L = C_S \sum R_x \tag{A.3}$$

$$C_{RL} = C_S \sum R_x' \tag{A.4}$$

$$C_{PM} = C_P (i + a + m) \tag{A.5}$$

式中：

C_L ——风力发电机组未增设防雷设施前平均年损失；

C_{RL} ——风力发电机组增设防雷设施后残余平均年损失；

C_{PM} ——风力发电机组防雷设施的年费用；

C_S ——风力发电机组建筑物经济价值，在雷害情况应加上间接经济损失；

$\sum R_x$ 、 $\sum R_x'$ ——风力发电机组建筑物增设防雷设施前和设置电涌保护后残余的风险总和；

C_P ——防护措施的成本；

i ——投资利率；

a ——折旧率；

m ——维护费率。

当 $C_L > C_{PM} + C_{RL}$ ，应在已有各种防雷措施之外增设适当防雷设施。当 $C_L \leq C_{PM} + C_{RL}$ ，不必在已有各种防雷措施之外增设防雷设施。各部件雷害经济损失构成见表 A.2。

表 A.2 风力发电机组各部件雷害经济损失构成

损失种类		主要是叶片损坏（机舱、塔架很难损坏）	齿轮轴承联轴节等	电气电子系统
直接年损失		$CLS=CS\times R_B$	$CLC=CC\times R_B$	$CLB=CB\times (R_C+R_V+R_W+R_Z)$
间接年损失	电费年损失	$CLSJ=$ $MW\times DAYS\times DJ\times DS\times$ $1000\times 24\times 0.0001$	$CLCJ=MW\times DAYC\times DJ\times$ $DC\times 1000\times 24\times 0.0001$	$CLBJ=MW\times DAYB\times DJ\times$ $DB\times 1000\times 24\times 0.0001$
	维修年费用	$MTSN\times DS=DAYS\times$ $MTS\times DS$	$MTCN\times DC=DAYC\times$ $MTC\times DC$	$MTBN\times DB=DAYB\times$ $MTB\times DB$
各部件合计年损失		$CLST=CLS+CLSJ+$ $MTSN\times DS$	$CLCT=CLC+CLCJ+$ $MTCN\times DC$	$CLBT=CLB+CLBJ+$ $MTBN\times DB$
机组年总损失		$CLST+CLCT+CLBT$		
注：CS—叶片价值； CC—齿轮轴承联轴节等价值； CB—电气电子系统价值； CLS—叶片年直接损失； CLC—齿轮轴承联轴节等年直接损失； CLB—电气电子系统年直接损失； CLSJ—因叶片雷害停电维修年间接电费损失； CLCJ—因齿轮轴承联轴节等雷害停电维修年间接电费损失； CLBJ—因电气电子系统雷害停电维修年间接电费损失； MW—机组容量（kW）； DJ—电价（元/kW·h）； DAYS—因叶片雷害停电维修天数； DAYC—因齿轮轴承联轴节等雷害停电维修天数； DAYB—因电气电子系统雷害停电维修天数； DS—叶片雷害概率（ND×PB）； DC—齿轮轴承联轴节等雷害概率（ND×PB）； DB—电气电子系统雷害概率（ND×PC）； MTSN—叶片因雷害维修年费用（此处及以下费用均按万元计）； MTCN—齿轮轴承联轴节等因雷害维修年费用； MTBN—电气电子系统因雷害维修年费用； MTS—叶片每天维修费用； MTC—齿轮轴承联轴节等每天维修费用； MTB—电气电子系统每天维修费用； CLST—叶片直接、间接损失合计； CLCT—齿轮轴承联轴节等直接、间接损失合计； CLBT—电气电子系统直接、间接损失合计。				

A.5 雷击危险事件次数估算

A.5.1 雷击危险事件次数估算概况

需保护对象的平均年雷击危险事件次数 N 取决于需保护对象所处区域雷暴活动的情况以及需保护对象的物理特性。 N 的计算方法是：将雷击大地密度 N_g 乘以需保护对象的等效截收面积，再乘以需保护对象物理特性所对应的修正因子。

对于需保护的风力发电机组，要考虑的雷击危险事件有：

- a) 雷直击风力发电机组，相应雷击危险事件为 N_D 。
- b) 雷击风力发电机组附近，相应雷击危险事件为 N_M ，由于风力发电机组很高，实际上雷击很难击到风力发电机组附近。
- c) 雷击进入风力发电机组的线路，相应雷击危险事件为 N_W 。
- d) 雷击进入风力发电机组的线路附近，相应雷击危险事件为 N_Z 。

A.5.2 年平均雷击风力发电机组的次数 N_D 的估算

A.5.2.1 年平均雷击风力发电机组的次数 N_D 的估算概况

N_D 可以计算为：

$$N_D = N_g \times A_d \times C_d \times 10^{-6} \quad (\text{A.6})$$

式中：

N_g ——雷击大地密度，次/ ($\text{km}^2 \cdot \text{a}$)；

A_d ——孤立风力发电机组的截收面积（见图 A.1）， m^2 ；

C_d ——风力发电机组的位置因子（见表 A.3）。

A.5.2.2 雷击大地密度 N_g 的确定

雷击大地密度 N_g 是每年每平方千米雷击大地的次数。在世界上的许多地区，这个数值可以根据雷电定位网络系统得到。如果没有 N_g 的分布图，在温带地区，可以按式 (A.7) 估算：

$$N_g \approx 0.1 T_d \quad (\text{A.7})$$

式中：

T_d ——年平均雷暴日。

A.5.2.3 风力发电机组截收面积 A_d 的确定

对于地面上的孤立风力发电机组，截收面积 A_d 是与风力发电机组上沿接触的斜率为 1/3 的直线沿风力发电机组旋转一周在地面上划出的面积。

对于塔架高度为 H_{tower} ，叶片半径为 R_{blade} ，高度为 H 的平面上的孤立风力发电机组，截收面积等于：

$$A_d = 9\pi(H_{\text{tower}} + R_{\text{blade}})^2 \quad (\text{A.8})$$

式中：

H_{tower} ——塔架高度，m；

R_{blade} ——叶片半径，m（见图 A.1）。

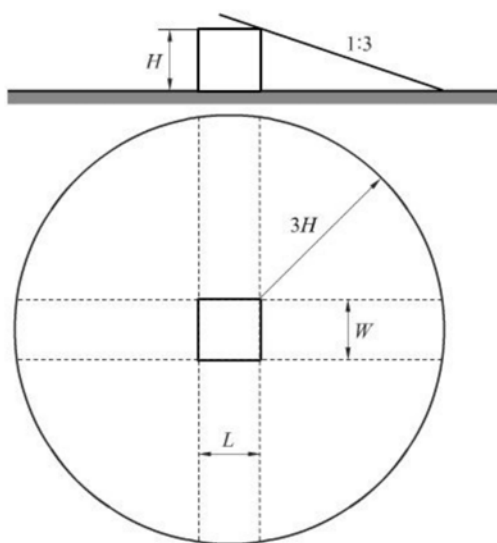


图 A.1 孤立风力发电机组的截收面积 A_d

注：考虑离风力发电机组对四周 $3(H_{\text{tower}}+R_{\text{blade}})$ 距离内的物体或土壤的相对高度后可以得到更精确的计算结果。

对于不规则形状风力发电机组可以通过作图法或计算法来确定 A_d 的值。

A.5.2.4 风力发电机组的位置因子 C_d 的确定

通过位置因子 C_d 考虑风力发电机组相对位置的影响，例如处在暴露场所等（见表 A.3）。

表 A.3 风力发电机组位置因子 C_d

相对位置	C_d
平地	1
小山顶或山丘上的孤立对象	2

A.5.3 雷击风力发电机组附近的年平均危险事件次数 N_M 的估算

N_M 可以计算如下：

$$N_M = N_g \times (A_m - A_C \times C_d) \times 10^{-6} \quad (\text{A.9})$$

式中：

N_g ——雷击大地密度，次/（ $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ）；

A_m ——雷击风力发电机组附近的截收面积， m^2 。

截收面积 A_m 延伸到距离风力发电机组周边 250m 远的地方（见图 A.2）。

如果 $N_M < 0$ ，则假定 $N_M = 0$ 。对大型风力发电机组很可能就是如此。

A.5.4 雷直击于进入机组的线路的年平均危险事件次数 N_L 的估算

对于一段进入机组线路， N_L 可以计算如下：

$$N_L = N_g \times A_1 \times C_d \times C_t \times 10^{-6} \quad (\text{A.10})$$

式中：

N_g ——雷击大地密度，次/（ $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ）；

A_1 ——雷击进入机组线路的截收面积（见表 A.4 和图 A.2）， m^2 ；

C_d ——进入机组线路的位置因子（见表 A.3）；

C_t ——如线路与机组间无变压器，为 1；如有变压器，为 0.2。

表 A.4 取决于进入机组线路特性的截收面积 A_1 和 A_i

	架 空	埋 地
A_1	$[L_c - 3(H_a + H_b)] 6H_c$	$[L_c - 3(H_a + H_b)] \sqrt{\rho}$
A_i	$1000L_c$	$25L_c \sqrt{\rho}$

注： A_1 ——雷击进入机组线路的截收面积， m^2 ；
 A_i ——雷击进入机组线路附近大地的截收面积， m^2 ；
 H_c ——进入机组线路导线的离地高度，m；
 L_c ——从机组到第一个节点之间的进入机组线路路段长度，m，最大值应取为 1000m；
 H_b ——连接到进入机组线路“b”端的风力发电机组的高度，本标准中为塔架高度 H_{tower} 加叶片半径 R_{blade} ，m；
 H_a ——连接到进入机组的线路另一端“a”端的建筑物（如集电场主控制楼）高度，m；
 ρ ——线路埋设处的土壤电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ，最大值应取为 $500\Omega \cdot \text{m}$ 。
 为了进行计算，当不知道 L_c 的值时，假定 $L_c = 1000\text{m}$ ；当不知道土壤电阻率的值时，假定 $\rho = 500\Omega \cdot \text{m}$ ；对于全部穿行在高密度网格形接地装置中的埋地电缆，假定等效截收面积 $A_i = A_1 = 0$ 。

A.5.5 雷击进入机组的线路附近的年平均危险事件次数 N_Z 的估算

对于只有一段线路（架空、埋地、屏蔽、非屏蔽等）的进入机组线路， N_L 的值可以计算为

$$N_1 = N_g \times A_i \times C_e \times C_t \times 10^{-6}$$

(A.11)

式中：

- N_g ——大地雷击密度，次/（ $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ）；
- A_i ——雷击进入机组线路附近大地的截收面积（见表 A.4 和图 A.2）， m^2 ；
- C_e ——环境因子，在农村取 1。

注：进机组线路的截收面积 A_i 由其长度 L_c 和横向距离 D_i 来确定（见图 A.2），雷击和进机组线路之间距离不小于横向距离 D_i 时会产生不小于 1.5 kV 的感应过电压。

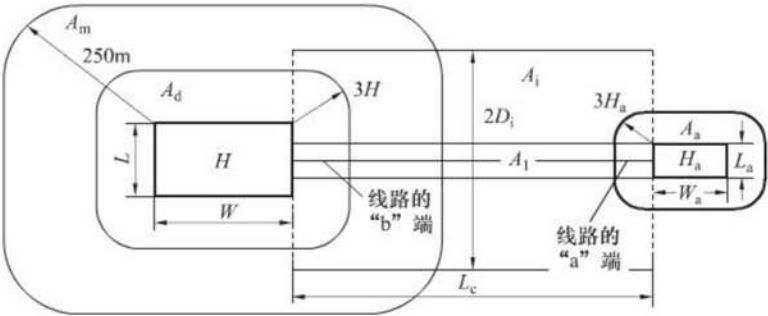


图 A.2 截收面积 (A_d 、 A_m 、 A_L 、 A_i)

A.6 雷击导致机组部件失效的概率

A.6.1 雷击风力发电机组导致人和动物伤害的概率 P_A

作为典型保护措施的功能，表 A.5 中给出了雷击风力发电机组导致人员因接触和跨步电压触电的概率值 P_A 。

表 A.5 雷击风力发电机组产生的接触和跨步电压导致人和动物触电的概率 P_A

保护措施	P_A
无保护措施	1
暴露的引下线有电气绝缘（例如，最少用 3mm 厚的交链聚乙烯）*	10^{-2}
有效的土壤等电位连接	10^{-2}
警示牌	10^{-1}
* 与用塔架金属结构作为引下线无关	

如果采取了一项以上的措施， P_A 的值是各个相应 P_A 值的乘积。

注 1：更多的资料请参见 GB/T 21714.3—2008 的 8.1 和 8.2 。

注 2：当利用了风力发电机组的钢筋构件或框架作为引下线时，或者安装了遮拦物时，概率 P_A 的数值可以忽略不计。

A.6.2 雷击风力发电机组导致物理损害的概率 P_B

雷击风力发电机组导致物理损害的概率 P_B 的数值与防雷级别（LPL）的对应关系在表 A.6 中给出。

表 A.6 取决于减少物理损害的保护措施的 P_B 的数值

风力发电机组特性	LPS 的级别	P_B
没有 LPS 保护的风力发电机组	—	1
受到 LPS 保护的风力发电机组	IV	0.2
	III	0.1

表 A.6（续）

风力发电机组特性	LPS 的级别	P_B
受到 LPS 保护的风力发电机组	II	0.05
	I	0.02
具有符合 LPS I 要求的叶片和机舱以及以塔架作为连续的自然引下线的风力发电机组		0.01
具有符合 LPS I 要求的叶片，金属屋顶或金属网机舱，对舱内以及以塔架作为连续的自然引下线的风力发电机组		0.001
注：在详细调查的基础上，并考虑了 GB/T 21714.1—2008 中规定的尺寸要求以及拦截标准， P_B 也可以取表 A.6 以外的值。		

A.6.3 雷击风力发电机组导致电气电子系统失效的概率 P_C

雷击风力发电机组导致信号系统失效的概率 P_C 取决于所采用的配合好的 SPD 组的保护：

$$P_C = P_{SPD} \tag{A.12}$$

表 A.7 给出了各个雷电防护水平对应的 P_{SPD} 值，SPD 系统是按照防雷等级设计。

表 A.7 各 LPL 对应的概率 P_{SPD} 的数值，SPD 系统按照 LPL 设计

LPL	P_{SPD}
没有已配合的 SPD 保护	1
III~IV	0.03
II	0.02
LPL	P_{SPD}
I	0.01
见注 3	0.005~0.001
注 1：只有配合好的 SPD 系统才适合作为减少 P_C 的保护措施。只有受 LPS 保护或有连续金属框架或钢筋混凝土框架作自然 LPS 的，并且满足 GB/T 21714.3—2008 对于等电位连接和接地要求的风力发电机组内，已配合好的 SPD 系统才能使 P_C 有效地减少。	
注 2：连接到由防雷电缆或布设在防雷管道、金属管道中的电缆组成的外来线路的已屏蔽的信号系统，可以不需要配合好的 SPD 保护。	
注 3：当在相应位置上安装的 SPD 的保护特性比 LPL-I 的要求更好时（更高的电流耐受能力，更低的电压保护水平等）， P_{SPD} 的值可能会更小。	

A.6.4 雷击风力发电机组附近导致信号系统失效的概率 P_M

雷击风力发电机组附近引起信号系统失效，其概率 P_M 随因子 K_{MS} 而与所采用的防雷措施（LPM）有关。如果没有提供符合 GB/T 21714.4—2008 要求的已配合的 SPD 保护时， P_M 值等于 P_{MS} 值。表 A.8 中给出了概率 P_{MS} 与因子 K_{MS} 的关系， K_{MS} 是考虑了所采用的保护措施的因素。

表 A.8 概率 P_{MS} 与因子 K_{MS} 的关系

K_{MS}	P_{MS}	K_{MS}	P_{MS}
≥ 0.4	1	0.016	0.005
0.15	0.9	0.015	0.003
0.07	0.5	0.014	0.001
0.035	0.1	≤ 0.013	0.000 1
0.021	0.01		

如果提供了符合 GB/T 21714.4—2008 要求的配合的 SPD, P_M 的值应当是 P_{SPD} 和 P_{MS} 两值中的较小者。

对于设备不符合相关产品标准对电压耐受水平要求的信号系统, 应当假定 $P_{MS}=1$ 。

因子 K_{MS} 的值计算如下:

$$K_{MS} = K_{S1} \times K_{S2} \times K_{S3} \times K_{S4} \quad (A.13)$$

式中:

K_{S1} ——考虑了在 LPZ0/1 的交界处风力发电机组、LPS 和其他屏蔽物的屏蔽效能的因子;

K_{S2} ——考虑在风力发电机组内部 LPZ X/Y ($X>0$, $Y>1$) 交界处的屏蔽物的屏蔽效能的因子;

K_{S3} ——考虑了内部布线的特性的因子 (见表 A.9);

K_{S4} ——考虑了受保护系统的冲击耐受电压的因子。

在 LPZ 内部, 当与屏蔽物边界之间的距离不小于网格宽度 w 时, LPS 或空间格栅形屏蔽体的因子。

K_{S1} 和 K_{S2} 可以计算如下:

$$K_{S1} = K_{S2} = 0.12w \quad (A.14)$$

式中:

w ——格栅形空间屏蔽或者网格状 LPS 引下线系统的网格宽度, 或是作为自然 LPS 的风力发电机组金属柱子的间距或钢筋混凝土框架的间距, m。

对于完全连续的金属护套的屏蔽, 当屏蔽体厚度 s 为 0.1mm~0.5mm 时, 应有:

$$K_{S1} = K_{S2} = 10^{-4} \sim 10^{-5} \quad (A.15)$$

注: a) 如果提供了符合 GB/T 21714.4—2008 要求的网格形等电位连接网络时, K_{S1} 和 K_{S2} 的值可以缩小一半。

b) 如果感应环路靠近 LPZ 边界屏蔽体, 并离屏蔽体距离小于安全距离处布设, K_{S1} 和 K_{S2} 的值会更高。例如, 当与屏蔽体之间的距离在 $0.1w \sim 0.2w$ 的范围内时, K_{S1} 和 K_{S2} 的值要增加 1 倍。

c) 对于逐级相套的 LPZ, 最后一级 LPZ 的 K_{S2} 是各级 LPZ 的 K_{S2} 的乘积。

d) K_{S1} 的最大值不能超过 1。

表 A.9 因子 K_{S3} 的值与内部布线的关系

内部布线的类型	K_{S3}
非屏蔽电缆——没有为了避免形成环路而合理布线 ^a	1
非屏蔽电缆——为了避免形成大的回路而合理布线 ^b	0.2
非屏蔽电缆——为了避免形成回路而合理布线 ^c	0.02
屏蔽电缆, 屏蔽层单位长度的电阻 ^d $5 < R_S \leq 20$ (每千米)	0.001
屏蔽电缆, 屏蔽层单位长度的电阻 ^d $1 < R_S \leq 5$ (每千米)	0.000 2
屏蔽电缆, 屏蔽层单位长度的电阻 ^d $R_S \leq 1$ (每千米)	0.000 1

^a 风力发电机组中不同布线形成的环路 (环路面积大约为 50m²)。
^b 导线布设在同一电缆导管中或导线在较小风力发电机组中分开布设 (环路面积大约为 10m²)。
^c 导线布设在同一电缆形成的环路中 (环路面积大约为 0.5m²)。
^d 屏蔽层单位长度 (每千米) 的电阻为 R_S (Ω), 其两端接到等电位母排上的电缆, 设备也连在同一等电位母排上。

对于布设在两端都连接到等电位连接排的连续金属导管中的电线, K_{S3} 的值应当乘以 0.1。

因子 K_{S4} 应当计算如下:

$$K_{S4} = 1.5/U_w \quad (A.16)$$

式中：

U_w ——受保护系统的额定冲击耐受电压，kV。

如果在信号系统中，存在冲击耐受电压不同的设备，因子 K_{S4} 应按最低的冲击耐受电压计算。

A.6.5 雷击服务设施导致人和动物伤害的概率 P_U

雷击入户服务设施导致人和动物因接触电压受到伤害的概率取决于服务设施屏蔽物的特性、连接到服务设施的内部系统的冲击耐受电压、典型的保护措施（如人员活动范围限制、警示牌等，见表 A.5）以及在服务设施入户处所安装的 SPD。

当没有按照 IEC 62305-3 的要求为了进行等电位连接而安装 SPD 时， P_U 的值等于 P_{LD} 的值，这里 P_{LD} 是雷击相连服务设施导致内部系统失效的概率。表 A.10 中给出了 P_{LD} 的值。

当按照 GB/T 21714.3—2008 的要求为了进行等电位连接而安装 SPD 时， P_U 的值取 P_{SPD} （表 A.7）与 P_{LD} 的较小值。

注：为了减小 P_U ，按照 IEC 62305-4 要求配合的 SPD 保护是不必要的。这种情况下，按照 IEC 62305-3 要求安装 SPD 就足够了。

表 A.10 概率 P_{LD} 与电缆屏蔽层电阻 R_s 以及设备冲击耐受电压 U_w 的关系

设备冲击耐压 U_w kV	P_{LD}		
	$5 < R_s \leq 20$	$1 < R_s \leq 5$	$R_s \leq 1$
1.5	1	0.8	0.4
2.5	0.95	0.6	0.2
4	0.9	0.3	0.04
6	0.8	0.1	0.02

注： R_s ——电缆屏蔽层单位长度的电阻， Ω 。

对于非屏蔽的服务设施，应当取 $P_{LD}=1$ 。

当采取了遮拦物、警示牌等保护措施时，概率 P_U 的值与表 A.5 中给出的概率 P_A 的值相乘将进一步减少。

A.6.6 雷击服务设施导致物理损害的概率 P_V

雷击入户服务设施导致物理损害的概率的值取决于服务设施屏蔽体的特性、连接到服务设施的内部系统的冲击耐受电压以及所安装的 SPD。

当没有按照 GB/T 21714.3—2008 的要求用 SPD 进行等电位连接时， P_V 的值等于 P_{LD} 的值，这里 P_{LD} 是雷击相连服务设施导致内部系统失效的概率。表 A.10 给出了 P_{LD} 的值。

当按照 GB/T 21714.3—2008 的要求用 SPD 进行等电位连接时， P_V 的值取 P_{SPD} （见表 A.7）和 P_{LD} 值的较小者。

注：为了减小 P_U ，按照 GB/T 21714.4—2008 要求安装配合好的 SPD 保护是不必要的。在这种情况下，按照 GB/T 21714.3—2008 要求安装 SPD 就足够了。

A.6.7 雷击进入机组线路导致电气电子系统失效的概率 P_W

雷击进入机组线路导致电气电子系统失效的概率 P_W 的数值取决于进入机组线路屏蔽的特性、连接到进入机组线路的信号系统的冲击耐受电压以及所安装的 SPD。

如果没有安装符合 GB/T 21714.4—2008 要求的已配合好的 SPD， P_W 的值等于 P_{LD} 的值， P_{LD} 是雷击相连的进入机组线路导致信号系统失效的概率。表 A.10 给出了 P_{LD} 的数值。

当安装了符合 GB/T 21714.4—2008 要求的已配合好的 SPD 时， P_W 的值取 P_{SPD} （见表 A.5）和 P_{LD} 两值中的较小者。

A.6.8 雷击入户进入机组线路附近导致电气电子系统失效的概率 P_Z

雷击入户进入机组线路附近导致电气电子系统失效的概率取决于进入机组线路屏蔽层的特性、连接到进入机组线路的信号系统的冲击耐受电压以及所采取的保护设施。

当没有安装符合 GB/T 21714.4—2008 要求的已配合好的 SPD 时, P_Z 的值等于 P_{Li} 的值, 此处 P_{Li} 是雷击相连的进入机组线路导致电气电子系统失效的概率。表 A.11 给出了 P_{Li} 的数值。

当安装了符合 GB/T 21714.4—2008 要求的已配合好的 SPD 时, P_Z 的值取 P_{SPD} (见表 A.7) 和 P_{Li} 两值中的较小者。

表 A.11 概率 P_{Li} 与电缆屏蔽层电阻 R_S 以及设备冲击耐受电压 U_w 的关系

设备冲击耐压 U_w kV	P_{Li}				
	无屏蔽	屏蔽层没有连接到与设备相连的同一等电位连接排上	屏蔽层连接到与设备相连的同一等电位连接排上		
			$5 < R_S \leq 20$	$1 < R_S \leq 5$	$R_S \leq 1$
1.5	1	0.5	0.15	0.04	0.02
2.5	0.4	0.2	0.06	0.02	0.008
4	0.2	0.1	0.03	0.008	0.004
6	0.1	0.05	0.02	0.004	0.002

注 1: R_S ——电缆屏蔽层单位长度 (每千米) 的电阻, Ω 。
注 2: 在 ITUK.46 建议中可以找到屏蔽和非屏蔽导线段 K_S 的更精确的计算方法。

A.7 雷害损失系数

A.7.1 损失系数 L_X

损失系数 L_X 的数值应当由防雷设计人员 (或业主) 进行计算和确定。本附录中给出的数值仅仅是 IEC 建议采用的数值。防雷权威或主管部门可以指定不同的值。

L_X 值因其引起损失的机理而区别为:

- L_t 是接触和跨步电压导致伤害的人员损失率;
- L_f 是物理损害导致的实体损失率;
- L_o 是雷击电磁脉冲导致电气电子系统失效导致的损失率。

L_X 值因其引起损失的对象又可区别为:

- L_1 人员伤亡;
- L_2 服务损失;
- L_4 经济损失。

A.7.2 人员生命损失

可以按照以下近似关系式, 用受害者的相对量来确定 L_t 、 L_f 和 L_o 的数值:

$$L_X = (n_p / n_t) \times (t_p / 8760) \quad (A.17)$$

式中:

- n_p ——可能受到危害的人员数量 (受害者);
- n_t ——预期的总人数 (风力发电机组内);
- t_p ——以小时计算的人员每年处于危险场所的时间, 危险场所包括风力发电机组外 (只有损失 L_t) 和风力发电机组内 (L_t 、 L_f 和 L_o 都存在)。

当无法或很难确定 n_p 、 n_t 和 t_p 时, 表 A.12 中给出了 L_t 、 L_f 和 L_o 的典型平均值。

表 A.12 L_t 、 L_f 和 L_o 的典型平均值

所处位置	L_t	L_f	L_o
人员处于风力发电机组内	10^{-4}	10^{-1}	10^{-4}
人员处于风力发电机组外	10^{-2}	10^{-1}	10^{-4}

人员生命损失受风力发电机组特性的影响，通过引入增长因子（ h_z ）和缩减因子（ r_f 、 r_p 、 r_a 、 r_u ）对风力发电机组特性加以考虑：

$$L_A = r_a \times L_t \tag{A.18}$$

$$L_U = r_u \times L_t \tag{A.19}$$

$$L_B = L_V = r_p \times h_z \times r_f \times L_f \tag{A.20}$$

$$L_C = L_M = L_W = L_Z = L_o \tag{A.21}$$

式中：

- r_a ——减少人员生命损失的因子，取决于土壤类型（见表 A.13）；
- r_u ——减少人员生命损失的因子，取决于地板类型（见表 A.13）；
- r_p ——减少物理损害导致损失的因子，取决于所采取的减小火灾后果的措施（见表 A.14）；
- r_f ——减少物理损害导致损失的因子，取决于风力发电机组的火灾危险（见表 A.15）；
- h_z ——在具有特殊伤害的时候由于物理损害导致的损失的增加因子（见表 A.16）。

表 A.13 减少人员生命损失的因子 r_a 和 r_u 的数值与土壤或地板表面类型的关系

地表土壤类型	接触电阻 $k\Omega^a$	r_a 和 r_u
耕地、混凝土	≤ 1	10^{-2}
大理石、陶瓷	1~10	10^{-3}
沙砾、厚毛毯、一般地毯	10~100	10^{-4}
地表土壤类型	接触电阻 $k\Omega$	r_a 和 r_u
沥青、油毯、木头	≥ 100	10^{-5}

^a 用 400cm² 电极在加 500N 压力与无穷远点之间测量到的数值。

表 A.14 减少物理损害导致的损失的因子 r_p 的数值与减小火灾后果所采取的措施的关系

措 施	r_p
无措施	1
以下措施之一：灭火器、固定的人工灭火装置，人工报警装置，消防栓，防火隔间，有保护的逃生通道	0.5
以下措施之一：固定的自动灭火装置、自动报警装置*	0.2

* 仅当具有过电压和其他损害的防护并且消防员能够在 10min 之内赶到时。

如果采取了一项以上措施， r_p 的数值应当取各相应数值中的最小值。

表 A.15 减少物理损害导致损失的因子 r_f 的数值与风力发电机组火灾危险的关系

火 灾 危 险	r_f
高	10^{-1}
一般	10^{-2}
低	10^{-3}
无	0

注 1: 对风力发电机组未考虑具有爆炸危险。
注 2: 由易燃材料建造的风力发电机组叶片和机舱室顶由易燃材料建造的风力发电机组或者单位面积燃料荷载大于 800MJ/m^2 的可以看作具有高火灾风险的风力发电机组。
注 3: 叶片和机舱室顶的单位面积燃料荷载在 $400\text{MJ/m}^2 \sim 800\text{MJ/m}^2$ 的风力发电机组应当看作具有一般火灾风险的风力发电机组。
注 4: 单位面积燃料荷载小于 400MJ/m^2 的风力发电机组看作具有低火灾风险的风力发电机组。
注 5: 单位面积燃料荷载是风力发电机组内全部易燃物质的能量与风力发电机组总的表面积之比。

表 A.16 在具有特殊伤害时, 损失相对量的增加因子 h_z 的数值

特殊伤害的种类	h_z
无特殊伤害	1
低度惊慌 (人很少, 或是均为专业人员)	2
难以逃逸	5

A.7.3 不可接受的公众服务中断 (实际上是风力发电机组向外供电损失)

L_f 和 L_o 的数值可以从下列近似关系式得到的可能损失的相对量来确定:

$$L_x = (n_p / n_t) \times \left(\frac{t}{8760} \right) \tag{A.22}$$

式中:

n_p ——可能遭受危害的供电对象的平均数量 (失去服务的用户);

n_t ——总供电对象数 (原接受服务的用户);

t ——用小时表示的年平均服务中断时间。

当无法或很难确定 n_p 、 n_t 和 t 时, 表 A.17 中给出了 L_f 和 L_o 的典型平均值。

表 A.17 L_f 和 L_o 的典型平均值

服务类型	L_f	L_o
供电	10^{-2}	10^{-3}
通信线	10^{-2}	10^{-3}

公众服务中断受到风力发电机组的特性以及以下若干缩减因子的影响:

$$L_B = L_V = r_p \times r_f \times L_f \tag{A.23}$$

$$L_C = L_M = L_W = L_Z = L_o \tag{A.24}$$

表 A.14 和 A.15 中分别给出减少物理损害导致的损失的因子 r_p 和 r_f 的数值。

A.7.4 经济损失

可以按照下列近似关系式, 用可能损失的相对量来确定 L_t 、 L_f 和 L_o 的数值:

$$L_x = \frac{c}{c_t}$$

(A.25)

式中：

c ——用货币表示的风力发电机组可能损失的平均数值（包括其存储物的损失、相应活动的中断及其间接后果）；

c_t ——用货币表示的风力发电机组的总价值（包括其存储物以及有关活动的价值）。

当无法或很难确定 c 、 c_t 时，表 A.18 中给出了所有类型风力发电机组的 L_t 、 L_f 和 L_o 应取的典型平均值。

表 A.18 L_t 、 L_f 和 L_o 的典型平均值

风力发电机组的类型	L_t	L_f	L_o
所有类型—风力发电机组内部	10^{-4}	$L_f = 10^{-1}$	$L_o = 10^{-4}$
所有类型—风力发电机组外部	10^{-2}	$L_f = 10^{-1}$	$L_o = 10^{-4}$

经济方面的损失通过以下增长因子（ h_z ）和缩减因子（ r_p 、 r_a 、 r_f 、 r_u ）受到风力发电机组特性的影响：

$$L_A = r_a \times L_t$$

(A.26)

$$L_U = r_u \times L_t$$

(A.27)

$$L_B = L_V = r_p \times r_f \times h_z \times L_f$$

(A.28)

$$L_C = L_M = L_W = L_Z = L_o$$

(A.29)

因子 r_a 和 r_u 的数值在表 A.13 中给出；因子 r_p 的数值在表 A.14 中给出；因子 r_f 的数值在表 A.15 中给出；因子 h_z 在表 A.16 中给出。

附录 B
(资料性附录)

叶片和其他风力发电机组部件试验方法

本附录主要是针对叶片和其他风力发电机组部件的雷电性能测试的试验方法。本附录试验方法摘录于 IEC 61400-24 中的附录 D。

B.1 高压接闪试验

B.1.1 概述

高压接闪试验是为了确定雷击接闪点和爬过或穿过非导电性材料表面的雷击通道。

B.1.2 初始先导接闪试验

B.1.2.1 试验目的

本试验适用于叶片及由玻璃纤维或其他非导电材料制成的机舱。它是用来评估：

- a) 确定先导接闪点和在叶片及其他非导电结构上的闪络或者是击穿通道。
- b) 优化防护设备（接闪器，接收器）（安装）的位置。
- c) 绝缘表面的闪络或击穿通道。
- d) 防护设备的性能。

B.1.2.2 试验样品

试验样品可以是整个叶片或叶片片段。对于进行试验的叶片片段应根据叶片的具体结构及防雷设计要求进行选择。叶片试品的选择原则是将叶片的各个方面和防雷设计暴露于雷击先导来临前的电场之下。具体选择的原则是：

如果叶片的大部分都是同种材质及同样厚度，则可以对叶片的外面部分进行试验。

- a) 如果只有 1 个或 2 个分开的接收器安装在叶片顶端（用来对叶片进行雷电防护），则可以选择叶片的外面部分进行试验；但是如果雷电流引下线位于叶片内部，那么试验部分必须足够长以便能证明击穿不会在从顶端通过内部到引下线的内侧发生。
- b) 如果安装在叶片顶端、用来对叶片进行雷电防护的接收器有多对（所谓“对”指叶片两对面都安装接收器），且两对之间相距 x 米。为了确定两对接闪器之间最大的距离，试品至少需要包含两对接收器再加上和邻近接收器距离一半的长度。能得到类似运行经验的试品的长度为 $6\text{m} \sim 20\text{m}$ 。
- c) 如果叶片是用其他接收器和引下线设计进行雷电防护时，样品大小应能拥有一切与试验有关的细节。如果导体安装在外面，其试验样品的端部处应尽可能用圆环导体包圆，以避免在端部的电场不必要的加强。
- d) 如果试验目的是为了研究和优化一个设计细节，并且只涉及一小部分叶片（如叶片顶端或叶片中间部分），那么只需选择小的样品即可。然而，必须说明，这一小段试验样品和对面电极之间的电场和具有整个叶片时是不同的。正是由于这些不同，根据实际的几何位置，可能需要采用均压圆环或把对面电极弄圆用来防止在这些试验样品端部处产生不切实际的闪络。
- e) 为了优化叶片顶端设计，有类似运行效果的样品长度，应为 $3\text{m} \sim 6\text{m}$ 。
- f) 为了使试验结果更接近实际情况，试验时应将叶片表面的所有抛光剂和油漆包括在内。
- g) 一般安装在试验样品的表面或内部（单个叶片、叶片顶端或者是叶片的中间部分）的电气导电部件，如灯具、传感器和雷电流引下导体，在试验样品中应予表现出来。

这些试验样品都应安装在原来在叶片或机舱上的位置。如果导电样品有若干位置，那么试验时应反映最坏的情况。通常这些样品的（放置）位置应是离非导电部分最近或朝外表面方向电场强度最强的地

方。那些新的试验样品或经过了机械老化的样品，只要其在机械老化期间没有损坏，都可以用来进行试验。

B.1.2.3 试验装置

B.1.2.3.1 试验装置的分类

有三种试验装置分别为 A、B 和 C，都可以用来进行试验。试验装置 A 和 B 多数情况下适用于对整个叶片进行试验及验证。而试验装置 C 则多数情况下用来进行开发试验，以便能评估其面壳板的结构和引流带的设计。

每个试验装置都意图在样品上（而不是在外电极上）产生初始的电活动，如电晕、流光和先导，正如在风电机叶片在接闪前会发生的。一旦试验样品（周围的）空气电离了，那么流注将会朝对面几何尺寸大的电极伸展，以代表距离叶片端部某个距离的等电位面。这种情况下能将外部测试电极的影响降至最低。图 B.1、B.3、B.4 和 B.5 分别是试验 A、B 和 C 的试验装置图，这里面包括高压发生器、试验样品以及外部电极。

试验装置 A 是最合适的装置，因为通常它能提供更大的外部电极（即在试验室地坪的导电平面）以及叶片样品周围更实际的电场环境。

试验装置 B 则意图模拟与试验样品附近与试验装置 A 最接近的电场环境，而且能允许更大或更重的试验样品和支撑物体放置在实验室中。在这个装置中，需要悬挂一个大直径的电极在试验样品上方。这个大直径的电极实际上是为了避免由于悬挂电极的边缘效应而产生不符合实际的电场。

试验装置 C 更适合进行开发试验，以便评估或比较候选的表面材料的电介质强度和/或局部的防雷设计。然而，不应以板状试验样品表面的测试来验证整个防护设计，因为板状试验样品的表面并不能代表整个非导电部分的重要特征。

B.1.2.3.2 试验装置 A

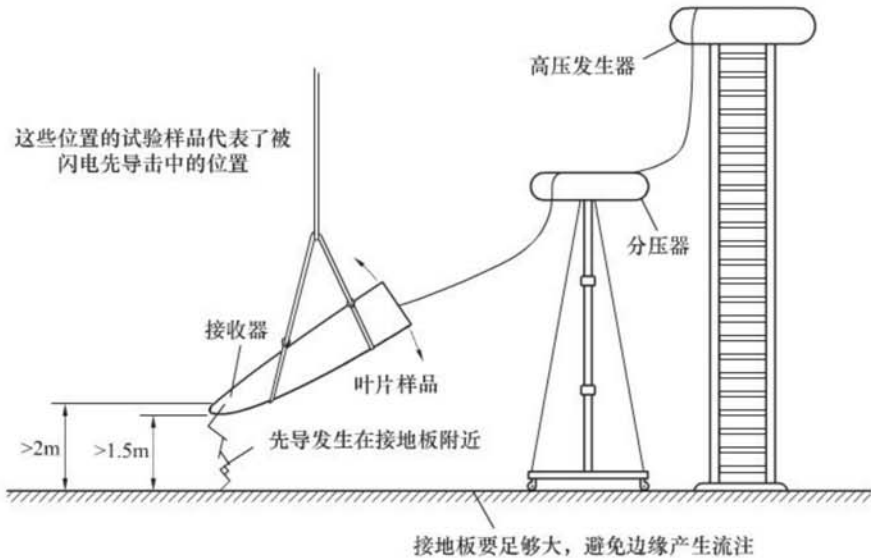


图 B.1 初始先导接闪试验装置 A（应在代表接近先导不同方向的几个位置对样品进行试验）

将试验样品的雷电防护系统连至冲击电压发生器输出端，整个试验样品悬挂在外部电极的上方，这个外部电极是一块大的接地板。接地板必须足够大以避免产生边缘效应，即避免在接地板的边缘产生边缘效应，即避免右接地板的边缘产生闪络。通常应在试验样品的若干方向上进行试验，以代表该试验样品在风力发电机组运行中可能经历的电场方向。

图 B.2 所示为在不同方向进行试验的示意。从图中我们可以看出，叶片相对于水平面分别成三个不同角度（相对于水平面 90° 、 60° 、 30° ），并有 4 个不同变桨角度。应给每个极性每个方向上的试验样

品施加 3 次放电。

对于比较长的叶片试验样品，当叶片处于水平位置测试时，应将其放置与水平面成 5° 和 10° ，这是表示当叶片刚好位于水平位置时，雷电先导击距正好在叶尖内侧某个位置的可能性比较大。

由于垂直空间和架空起重机的实际限制， 60° 和 90° 的测试位置适用于比较短的叶片试验样品，如 $2\text{m}\sim 4\text{m}$ 长的叶片。

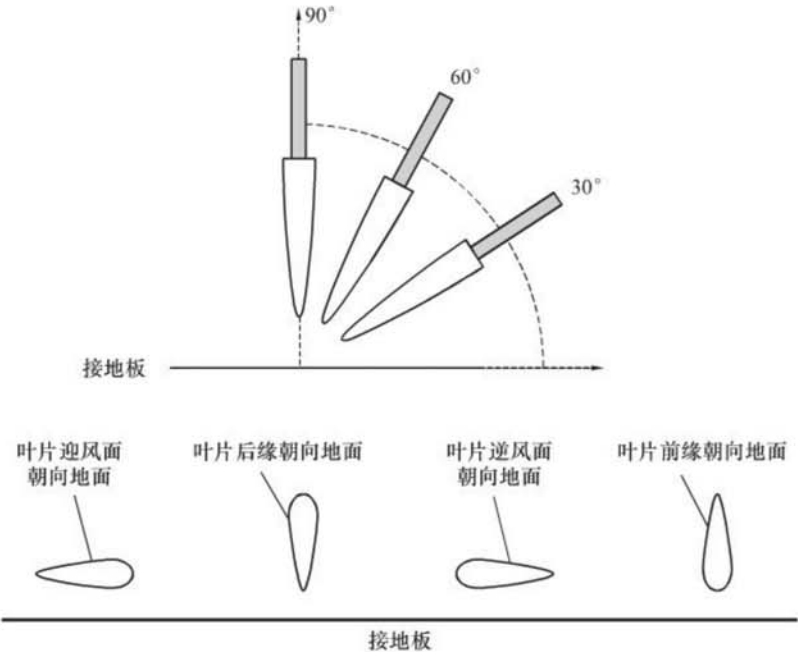


图 B.2 初始先导接闪试验装置 A 方案可能方向

当用试验装置 A 进行试验时，应满足两个条件：

- a) 流注连接应是在带电的叶片和接地板之间的火花间隙较低部分发生，其距离大于试品闪络距离的一半。可从闪络照片上确认。图 B.3 所示为先导连接点示意。这些要求通常是通过保持下列要求的距离来满足：
 - 1) 接地板离最近的导电器件（试验样品内部或外部）最少 2m 。
 - 2) 接地板离最近的试验样品表面最少 1.5m ，但是条件 a) 仍应保持。
- b) 接地板上的流注不能由接地板的边缘引起。如发生这种情况，必须增大接地板的尺寸。

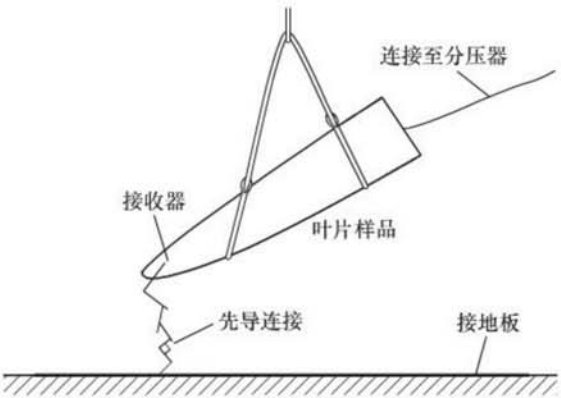


图 B.3 先导连接点应与试验样品分离

试验计划中应确定具体尺寸及试验样品方向。

B.1.2.3.3 试验装置 B

图 B.4 所示为试验装置 B 的示意。

应将样品在几个能反映先导从不同方向逼近的位置上进行测试。

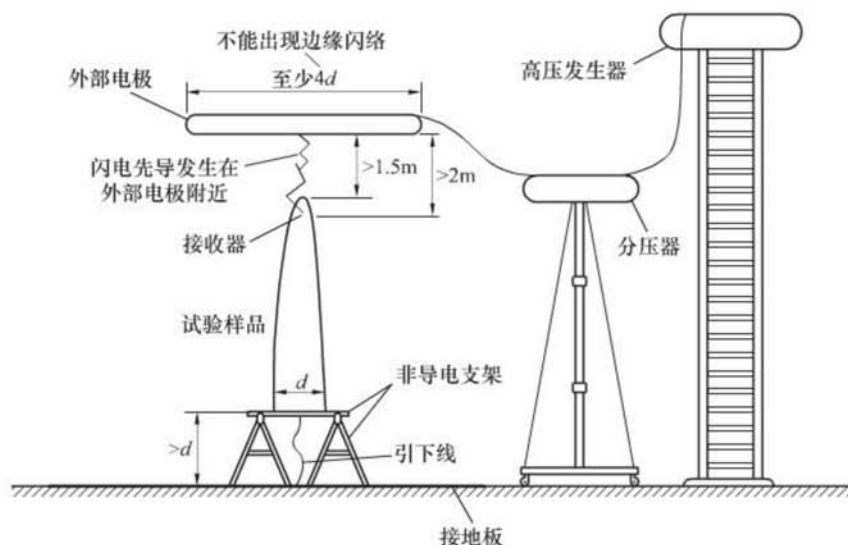


图 B.4 初始先导接闪试验装置 B

试验装置 B 适合于试验样品太大以至于不能在测试设施中提升，如气象仪器吊杆、轮毂、机头罩等。这个装置有一个缺点，即测试设施地坪上的接地板可能会引起试品附近电场畸变。GB/T 16927.1—2011 中规定的外部结构的最小距离应为两个试验电极之间闪络距离的 1.5 倍。为了使间隙间的电场畸变降至最小，接地板和其他导电结构必须至少在间隙长度的 1.5 倍距离之外，例如图 B.4 中间隙距离 2m 长，就应在 3m 之外。

将试验样品提升到接地板上方的支架，离接地板之间的距离应大于试验样品和外部电极之间距离的 1.5 倍，以便最低程度地减小接地板对试验结果的影响。当进行试验时，将外部电极悬挂在试验样品上方并施加高电位。为避免边缘效应，即外部电极边缘产生闪络，外部电极的尺寸必须足够大。应对试验样品从两个或多个方向上进行试验，以代表叶片或其他部件在运行中可能经历的电场方向。

当用试验装置 B 进行试验时，有三个条件需满足：

- 流注连接应发生在带电的叶片和接地板之间的火花间隙的上部，其距离大于试品闪络距离的一半。可从闪络图上看。图 B.4 所示为先导连接点示意。这些要求通常是通过保持下列要求的距离来满足：
 - 1) 接地板离最近的导电器件（试验样品内部或外部）最少 2m。
 - 2) 接地板离最近的试验样品表面最少 1.5m，但是要求 1) 仍需保持。
- 外电极上的流注不得从其边缘产生。
- 试验样品内部的雷电防护器件或其他导电器件的末端必须悬挂在接地板的上方，离接地板之间的距离应大于试验样品和外部电极之间距离的 1.5 倍。

试验计划中应确定具体尺寸及试验样品方向。

B.1.2.3.4 试验装置 C

图 B.5 所示为试验装置 C 的示意。

这个装置主要针对，在建立一个防护设计并将其安装在更大更完整的试验样品之前，对非导电性外壳试验样品表面上备用防护器件及器件的位置进行评估。

比较典型的外壳板表面积可为 $1\text{m}^2 \sim 2\text{m}^2$ ，尽管其他尺寸和形状也可接受，但是应能足够放置一个全尺寸的防护设备。应使用产品化外壳材料、油漆及抛光剂。试验的典型用途的是用来确定安装在叶片

或机舱表面的引流带间距，如图 B.5 中的 D 。

任何位于防护表面背后的导电模型都应放置在外壳背后合适的位置，如图 B.5 中的 d 。防护设备通常在位于测试设备的地电位处，而电极则处于高电位处。为了能应用一个实际的试验环境，经验证明，电极应放在引流带的中间，如图 B.5 所示，以防止在试验样品边缘接闪而产生不符合实际的结果。电极应悬挂于面板表面上方，二者之间的距离，如果是正方形，应等于面板的尺寸；如果是矩形，应等于其短边的尺寸。为了能优化设计及防止击穿，也可将引流带间的距离增大或减小。

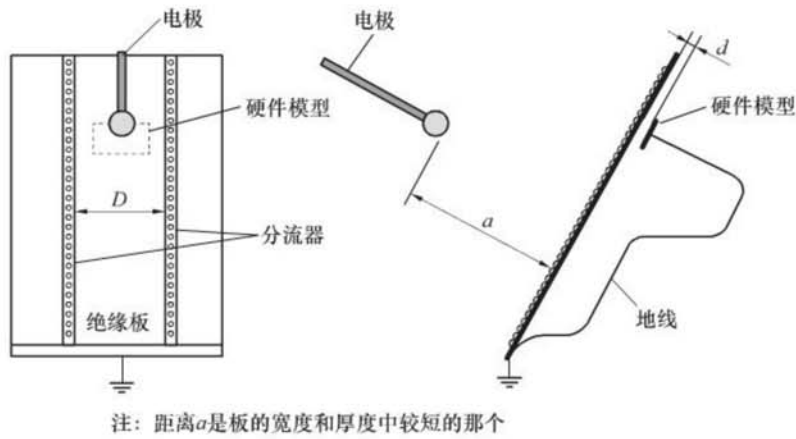


图 B.5 局部保护设备（如引流带）布置——评估试验装置 C

图 B.5 所示的试验装置并不等效于试验装置 A 和试验装置 B 的验证装置，但是经验表明，由图 B.5 所示试验确定的引流带间距尺寸在接下来进行的局部防护布置的验证试验中是成功的（例如，作为叶片表面上接闪系统延伸的引流带，可采用类似的引流带间距）。验证试验还是应用试验装置 A 或 B 进行。

B.1.2.4 试验电压波形

试验电压波形是一个双指数函数操作冲击电压波形，其波前时间为 $250\mu\text{s} \pm 20\%$ ，半峰时间为 $2500\mu\text{s} \pm 60\%$ 。选择这种电压波形，是因为在先导刚开始接触的过程中最有代表性。在初始先导接闪试验过程中，施加电压的波形可在电压到达峰值以前的上升部分引起闪络。从刚出现电压波形至闪络的这段时间至少为 $50\mu\text{s}$ 。

也可以用 GB/T 16927.1—2011 中的操作冲击电压。由于闪络出现在上升部分，电压下降部分的半峰时间长短就不重要了。图 B.6 所示为比较典型的测试电压波形。

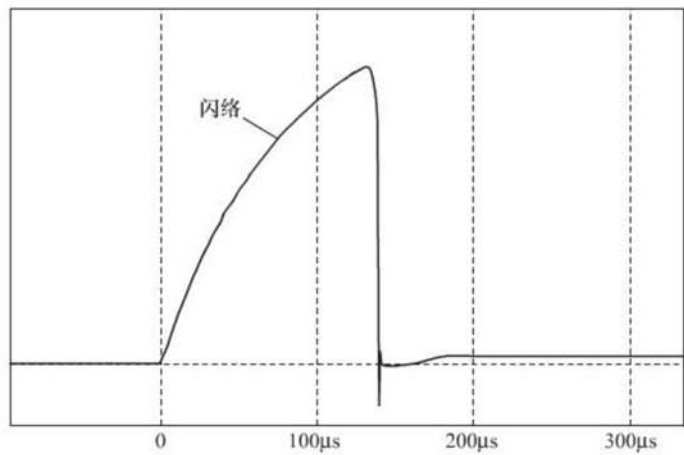


图 B.6 典型的操作波电压波，电压上升至闪络

给试验装置的两电极间施加电压，对试品的每个极性及每个方向上至少有 3 次放电。在试品相对电

极的不同方向上进行试验，以发现因设计不当而造成的故障。

如果试验过程中叶片表面发生击穿，其毁坏的部分可以清除并用聚合树脂进行修复。然而经验表明，经过一系列的冲击后，修复后的试品电气性能会有所劣化；而且不仅会影响修复击穿孔，还会明显起层。因此，制造厂商必须意识到每个试品的冲击次数最多不能超过 100 次，以避免试品的电气特性劣化。

高压发生器的放电电流一般小于 2000A，这个值只包括了大多数的先导电流，但不包括和先导路径相同的更加巨大的雷击电流和持续电流。

B.1.3 扫掠通道接闪试验

B.1.3.1 试验目的

这个试验通常针对当叶片旋转时，风力发电机组叶片表面暴露在初始先导接闪之下，而在第一次雷击到达之前先导可能会沿着表面“扫掠”一小段距离。这个试验是用来评估：

- 非导电表面（如介质）上可能被击穿的位置。
- 非导电表面的闪络路径。
- 防护设备的性能，如引流带。

B.1.3.2 试验样品

试验样品应是全尺寸叶片的一部分，如叶尖或包含雷电接收器或其他防护设备的表面。应提供表面上的任何油漆、抛光剂和表面填料等，以确保其真实的表面闪络特性。如果叶片防护设计包含叶片内的雷电导体，那么试验样品应包含这种导体。

B.1.3.3 试验装置要求

- 图 B.7 所示为试品和测试电极放置位置的典型剖面，应从几个能代表先导扫掠方向的电极位置进行测试。
- GB/T 16927.1—2011 规定试品的支撑体离接地板的距离至少为 1.5 倍最小闪络距离。
- 接收器以及任何有关的防雷导体都应与地电位连接。
- 将高压发生器的输出端与高压电极连接。高压电极应是半径为 25mm~50mm 的球体。高压电极的表面离试品表面 50mm，以代表雷电通道扫掠试品表面时施加的电压。
- 用仪器测量和记录施加的测试电压。

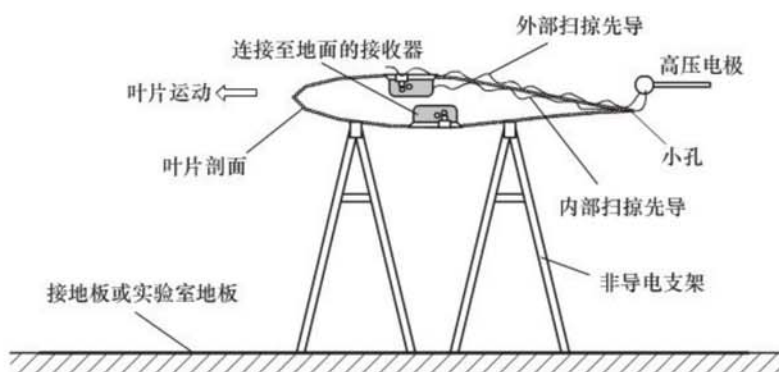


图 B.7 扫掠通道试验布置

B.1.3.4 测试电压波形

扫掠通道接闪的电场主要取决于流经先导通道的电荷脉冲。这些电荷能快速地增强电场，这种迅速增强的电场更适合用 GB/T 16927.1—2011 中定义的“雷电冲击”电压波形。GB/T 16927.1—2011 中定义整个雷电冲击波形是波前时间为 1.2μs，半峰值时间为 50μs 的冲击电压波形，如图 B.8 所示。

此波形实际上施加了一个峰值电压，该电压比测试电极和试验样品表面之间所需的电离空气间隙电压高，从而使击穿发生在波前，波形如图 B.9 所示。

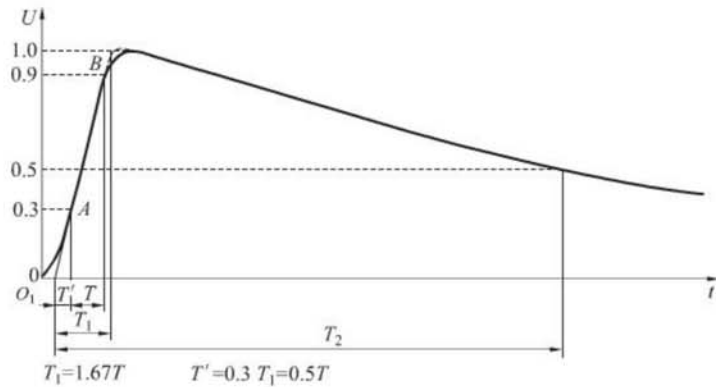


图 B.8 雷电冲击电压波形

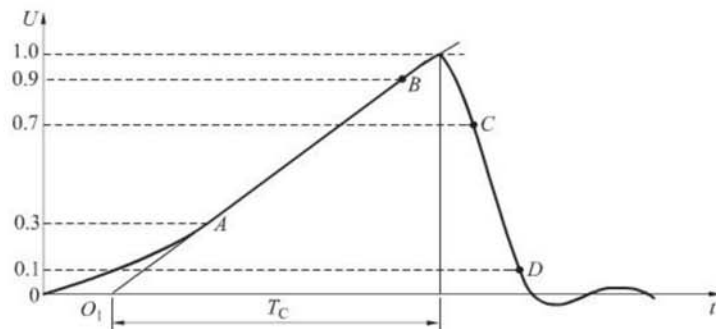


图 B.9 雷电冲击电压波头

B.2 大电流试验

B.2.1 概述

本试验是用来确定雷击以及雷击产生的雷电流对叶片或机舱表面的影响。这些影响可用雷击点和流经雷击路径的电流进行评估。

B.2.2 电弧侵入试验

B.2.2.1 试验目的

本试验适合于那些暴露在直击雷或传导雷击电流的结构件，如风力机叶片和机舱。

本试验是用来确定由雷击击中叶片某个位置后或者是被雷击中后流过大电流、大能量引起的直接（物理损害）影响。例如雷电流流经的叶片接闪器及附属导体、金属箔、引流带及连接器。

试验能用来评估：

- 电弧损害。
- 热斑形成。
- 接闪器的金属腐蚀。
- 防护材料及设备的合理性。
- 磁场的机械力效应。
- 爆炸与振动波。
- 连接件和金属器具的特性。
- 雷电防护系统各重要位置处的电压和电流特性。

B.2.2.2 试验样品

可以对整个叶片或有代表性的叶片原型进行本试验。这些试验也可以在叶片的板面、样片、片段或其他风力发电机组构件上进行。板面、样片或片段应通过合适的制造过程，包括使用油漆、抛光剂、连接件等。对于需要有一定电压来电离的防护器件（如片段的引流带），在进行大电流试验时，需将其分

割成尽可能短以便能够产生电离，因为大电流发生器通常不能提供超过 100kV 的电压。

B.2.2.3 试验装置要求

- a) 用夹具可靠地固定试验样品。
- b) 将所有金属器具与通常已经接地的试品结构连接。
- c) 将发生器的回流线与试验样品相连，使雷电流流过试验样品能代表雷击叶片或机舱时的情况。确保磁场力和其他电流流动时的相互作用力对装置的影响能加以控制，以反映实际的情况，而且对试验结果不会产生不应有的影响。
- d) 将试验电极放在试验样品上方 50mm 的地方。如图 B.10 所示，对于大多数电弧侵入试验而言，电极应是“喷射引流”型。这种形式的电极也是最能代表自然雷电的振动波效应的，而且也能够尽可能地减小沉积在试品表面的电极材料的数量。
- e) 将大电流发生器极性设置为负极性，以便能产生最大的物理损害，因为电弧弧根更多是集中在阳极。
- f) 用直径不超过 0.1mm 的细导线将电弧引导到试验样品预期点上。这有利于低电压发生器产生电弧；细线对试验结果不会造成不利的影响，因为在电流开始流过时它就汽化掉了。
- g) 放好传感器和记录设备。

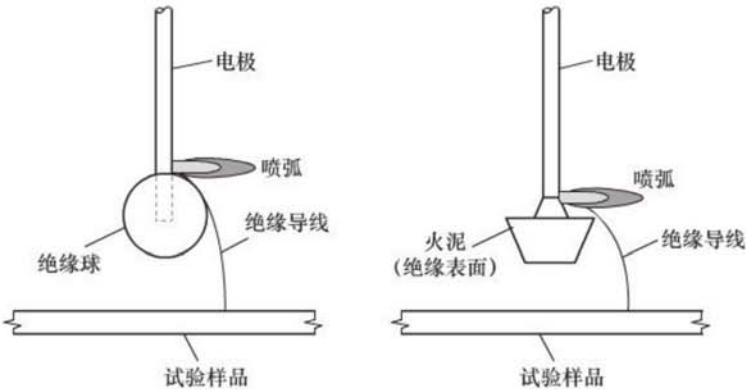


图 B.10 典型的喷气引流试验电极

B.2.2.4 测试电流波形

施加 GB/T 21714.1—2008 第 8 章中的试验电流。试验电流中包括雷击首次短冲击和长冲击。通常这些都施加在一次放电中。表 B.1 中列出了这些雷电流的重要参数。

表 B.1 试验电流重要参数

参数	相应的 LPL I 数值	数值			闪击类型
		95%	50%	5%	
I kA	50 200	4 (98%)	20 (80)	90	首次负极性短时间雷击
		4.9	11.8	28.6	后续负极性短时间雷击
		4.6	35	250	首次正极性短时间雷击 (单个)
Q_{flash} C	300	1.3	7.5	40	负极性雷闪
		20	80	350	正极性雷闪
Q_{short} C	100	1.1	4.5	20	首次负极性短时间雷击
		0.22	0.95	4	后续负极性短时间雷击
		2	16	150	首次正极性短时间雷击 (单个)

表 B.1 (续)

参数	相应的 LPL I 数值	数值			闪击类型
		95%	50%	5%	
W/R kJ/Ω	10 000	6	55	550	首次负极性短时间雷击
		0.55	6	52	后续负极性短时间雷击
		25	650	15	首次正极性短时间雷击
di/dt _{max} kA/μs	20	9.1	24.3	65	首次负极性短时间雷击
		9.9	39.9	161.5	后续负极性短时间雷击
		0.2	2.4	32	首次正极性短时间雷击
di/dt _{30 90%} kA/μs	200	4.1	20.1	98.5	后续负极性短时间闪击
Q_{long} C	200				长时间雷击
T_{long} C	0.5				长时间雷击
波头持续时间 μs		1.8	5.5	18	首次负极性短时间雷击
		0.22	1.1	4.5	后续负极性短时间雷击
		3.5	22	200	首次正极性短时间雷击（单个）
雷击持续时间 μs		30	75	200	首次负极性短时间雷击
		6.5	32	140	后续负极性短时间雷击
		25	230	2000	首次正极性短时间雷击（单个）
时间间隔 ms		7	33	150	多重负极性雷击
总雷闪持续时间 ms		0.15	13	1100	负极性雷闪（全部）
		31	180	900	负极性雷闪（无单个）
		14	85	500	正极性雷闪
注：I = 4kA 和 I = 20kA 值分别对应的概率为 98%和 80%。					

可从同一脉冲波形中获得 I 、 W/R 和 Q_{flash} 值及其允许偏差。这些可通过一个近似指数衰减波形的电流来实现, 该波形的 T_2 为 $350\mu\text{s}$, 在 T_2 范围内伴随着一个提供剩余电荷的持续电流。

具体的电流由所定的 LPL 级别决定。

B.2.3 非导电表面试验

B.2.3.1 试验目的

本试验是对非导电表面 (如风力发电机组叶片表面) 进行的测试。本试验用来确定在接闪器接闪后, 雷电通道扫掠对非导电表面的影响。

对于非导电部分, 如果发生击穿一个洞并且随之击到在其表面下的导电部分 (接闪器的固定件、引下线系统等), 则还应进行 B.1.2 中规定的扫掠通道接闪试验。如果非导电表面在扫掠通道接闪试验中被击穿了, 则必须对设计加以改进, 以避免在今后的试验中再发生类似的击穿。本试验用来评估:

- a) 非导电表面的振动波和热效应。
- b) 电弧对嵌在叶片表面或埋在叶片表面下方的导电结构 [用作引下线的金属网格, 表面下方的碳纤维复合材料 (CFC) 等] 的作用。

- c) 评估非导电表面与结构的整体性（当该结构件是叶片壳体的支撑时）。

B.2.3.2 试验样品

根据试验目的，试验样品应是整个叶片、叶片模型或叶片片段。用来进行试验的一部分叶片应是靠近闪器的那部分（如顶端和侧面接收器），以及在 CFC 和/或导电金属上面的绝缘材料。该装置应是完整的，以便能用来评估可能会发生的但不会影响试验结果的损坏。如果试验的目的是为了对比不同的设计产品，所有试验样品的尺寸应相同。

B.2.3.3 试验装置要求

- 将试品固定并悬挂在离其他导电表面足够远的地方以便不会影响到试验结果，如图 B.11 所示。
- 将所有金属器具与通常已经接地的试验样品结构连接。
- 发生器的回流线与试验样品相连，使雷电流流过试验样品能代表雷击叶片时的情况。确保磁场力和其他电流流动时的相互作用力对装置的影响能加以控制，以反映实际的情况。
- 将“喷射引流”型电极（如图 B.11 所示）放在试验样品上方 50mm 或更远的地方。
- 将电流发生器的输出端与电极相连。
- 试验过程中，既要施加正极性的电流也要施加负极性的电流。
- 用直径不超过 0.1mm 的细导线将电弧引导到试验样品的预期点上。细线的路径应从电极开始沿着扫掠先导方向直接跨过非导电表面。细线应在试验样品上面约 20mm 的地方。
- 放好传感器和记录设备。

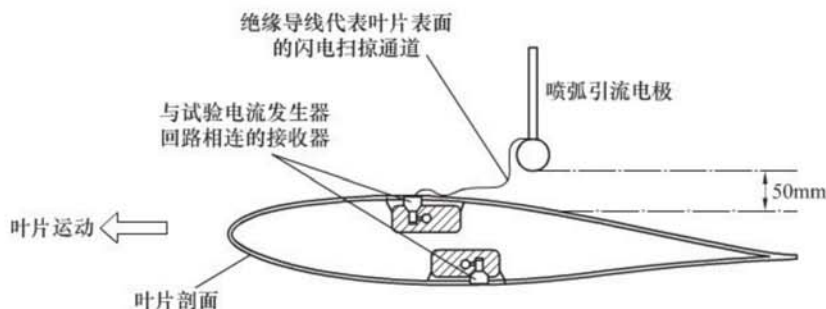


图 B.11 非导电表面大电流试验

B.2.3.4 试验电流波形

试验电流波形应符合 GB/T 21714.1—2008 中第 8 章的要求，试验电流参数见表 B.1。

B.2.4 传导电流试验

B.2.4.1 试验目的

本试验适用于安装在接闪器和风力发电机组接地系统之间雷电流路径上的引下线、连接部件和其他机械固定部件或柔性部件。本试验与 EN 50164-1 中的试验方法相比，不采取老化锻炼措施。如果采取 EN 50164-1 对风力发电机中的雷电连接器件进行验证的话，那么其电流测试水平应根据所选择的 LPL 中的首次短时间雷击电流来选择。

本试验是为了评估：

- 雷电流传导能力。
- 传导器件和连接器上的温升。
- 轴承、滑动接触、电刷以及一般的连接器件的电弧和火花（效应）。
- 磁力效应。
- 碳纤维复合材料及界面处的导电能力。

B.2.4.2 试验样品

试验样品应是全尺寸的产品，如雷电流导体、导电结构的段落或片段，包括结构件或组件的界面如黏结捆绑连接、紧固连接、轴承和电刷。这种结构的试验样品应足够大以使雷电流的分布有代表性。

B.2.4.3 试验装置要求

- a) 图 B.12 所示为安装了试验样品的典型装置。
- b) 将所有金具与试验样品中应接地的部分连接好。
- c) 将试验样品和发生器的输出端和电流回线连接，使雷电流流过试验样品能代表雷击叶片或其他结构时的情况。发生器的极性不作要求。确保磁场力和其他电流流动时的相互作用力对装置的影响能得以控制，以反映实际的情况。
- d) 放好传感和记录设备。

注 1：为了使导体中来回的电流间的磁力作用最小，所以导体和试验样品之间的连接线选择半同轴型电缆。

注 2：图 B.12 所示为风力发电机叶片的一部分进行本试验的典型试验装置。

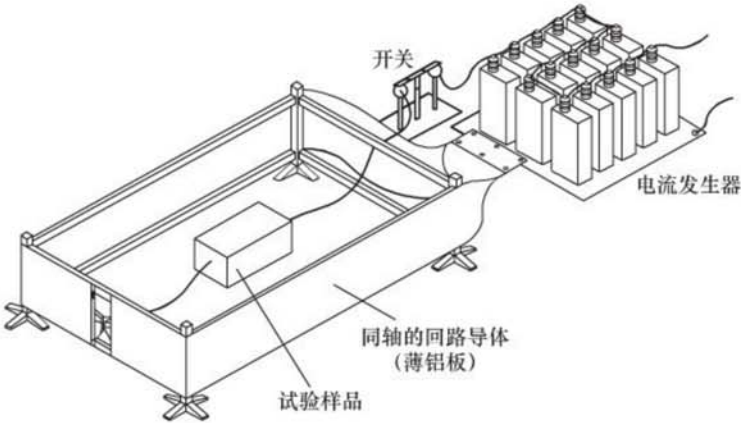


图 B.12 传导电流试验装置

B.2.4.4 试验电流波形

应符合 GB/T 21714.1—2008 中第 8 章的要求，试验电流参数见表 B.1。

具体的试验电流应按已确定的风力发电机组结构试验的雷电防护水平 LPL 进行。流过试验样品的电流幅值应按试验样品截面积占整个结构截面积的比例计算出（假定结构截面积上电流分布均匀），这些试验样品代表了导体的结构截面积。通常将试验电流再增加 50%，以便考虑可能的（电流）不均匀分布。

附录 C
(资料性附录)

风力发电机组的电涌保护器选择与安装

C.1 风力发电机组中电涌保护器的类型

风力发电机组内部系统采用的电涌保护器产品的类型：

- a) 低压电源系统用 SPD：用于对低压电源系统中的电气部件的保护，产品应符合 GB 18802.1—2011 的规定。
- b) 控制与信息系统用 SPD：用于对控制和测量、信号回路的保护，产品应符合 GB/T 18802.21—2004 的规定。
- c) 风力发电机系统用 SPD：用于对风力发电机、变流器及有关部件的保护。由于该系统的构成与公共电网不同，额定电压值、电压波形、频率不同，过电压成因和波形不同、工作环境不同，对 SPD 有特殊要求。这类 SPD 产品目前尚无相应国家标准和 IEC 标准，应与制造商协商，选择适用于风力发电机系统并能安全运行的 SPD。

C.2 风力发电机组电涌保护器的安装位置

根据风力发电机组电气电子系统框图和 LPZ 划分原则，应在如下位置安装 SPD：

- a) 在每个 LPZ 的线路入口处安装 SPD：
 - 1) 在 LPZ0 进入 LPZ1 区处：应选用用 I_{imp} 测试的 SPD（I 类试验），安装在离 LPZ1 边界尽可能近的地方。
 - 2) 在 LPZ1 进入 LPZ2 区或更高区处：应选用用 I_n 测试的 SPD（II 类试验），安装在离 LPZ2 边界或更高区尽可能近的地方。
- b) 在部分电气设备端部安装 SPD：
 - 1) 非常敏感的设备。
 - 2) 与 LPZ 入口处 SPD 距离太远的设备。
 - 3) 内部干扰源产生的电磁场有威胁的设备。

图 C.1 所示为风力发电机组塔基与机舱之间用长电缆连接情况下 SPD 的安装位置示意。

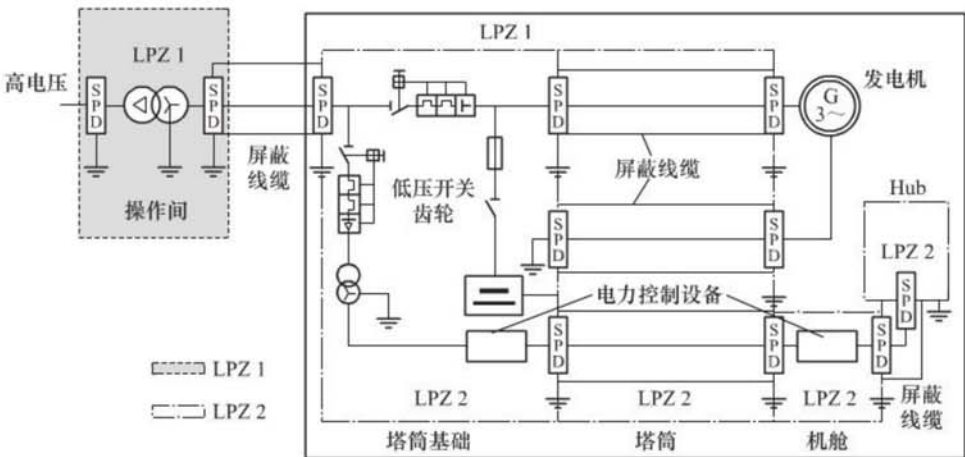


图 C.1 风力发电机组塔基与机舱之间用长电缆连接情况下 SPD 的安装位置示意

图 C.2 显示了双馈式风力发电机主电气回路中电涌保护器安装位置。

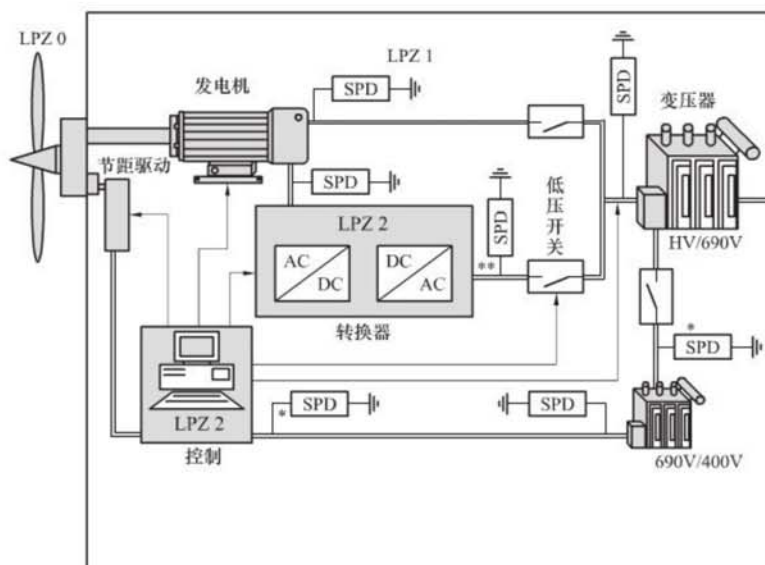


图 C.2 双馈式风力发电机主电气回路中电涌保护器安装位置

C.3 风力发电机组内低压电源电涌保护器参数选择

C.3.1 电压保护水平的选择

SPD 电压保护水平的确定应以电气、电子设备的冲击耐受水平（以绝缘冲击耐受电压和电涌抗扰度表示）为依据，其电压保护水平 U_p 加上连接导线的压降应低于其保护范围内被保护设备的冲击耐受水平。

被保护设备的冲击耐受水平应由设备制造厂提供，如果无法获得，可参照 GB/T 21714.4—2008 中 D.1.1。

C.3.2 标称放电电流（ I_n ）的选择

考虑风力发电机组安装环境以及其高度使雷击概率增大，可增大电涌保护器的标称放电电流（ I_n ）来提高其使用寿命。

C.3.3 最大持续工作电压（ U_c ）的选择

最大持续工作电压的确定应考虑风力发电机组内电气系统的具体情况，选取足够高的最大持续工作电压。

C.3.4 暂时过电压（TOV）性能的选择

对用于低压电源线保护、辅助回路（如安全灯）保护的 SPD，其 TOV 特性应符合 GB 18802.1—2011 中 TN 或 TT 系统的要求。

C.3.5 耐受的预期短路电流的选择

SPD 和与之相连接的过电流保护器（设置于内部或外部）一起耐受的短路电流（当 SPD 失效时）应等于或大于安装处预期产生的最大短路电流，选择过电流保护器时，其额定电流不能大于 SPD 制造厂给出的最大过电流保护器。

C.4 风力发电机组内控制与信息系统 SPD 参数选择

控制与信息系统用 SPD 选择与配置要求应符合 GB/T 18802.22—2008 的规定。

C.5 风力发电机系统 SPD 参数选择

风力发电机系统用 SPD 选择与配置要求尚在考虑中。

C.6 风力发电机组用电涌保护器特殊环境要求

风力发电机组用电涌保护器在产品的环境要求中可能高于 GB 18802.1—2011 中的规定，应特别关注特殊安装点的环境条件（如机舱、轮毂），主要包括温度、湿度、腐蚀性、机械振动。

如风力发电机组中电涌保护器的实际使用环境超过了 GB 18802.1—2011 的规定值,可参照 GB/T 2423 系列标准的规定对其进行考核。

C.7 SPD 故障的监测要求

宜建立对风力发电机组的电气系统中关键部件防护的 SPD 的监测。如必要,可提供:

- a) 监测 SPD 的系统。
- b) SPD 内就即将发生的 SPD 故障提供警告的信号和控制机制。
- c) 包括远程信号的风力发电机全监控系统。

C.8 电涌保护器协调配合

风力发电机组中电涌保护器的协调配合应符合 GB/T 21714.4—2008 中附录 C 的要求。

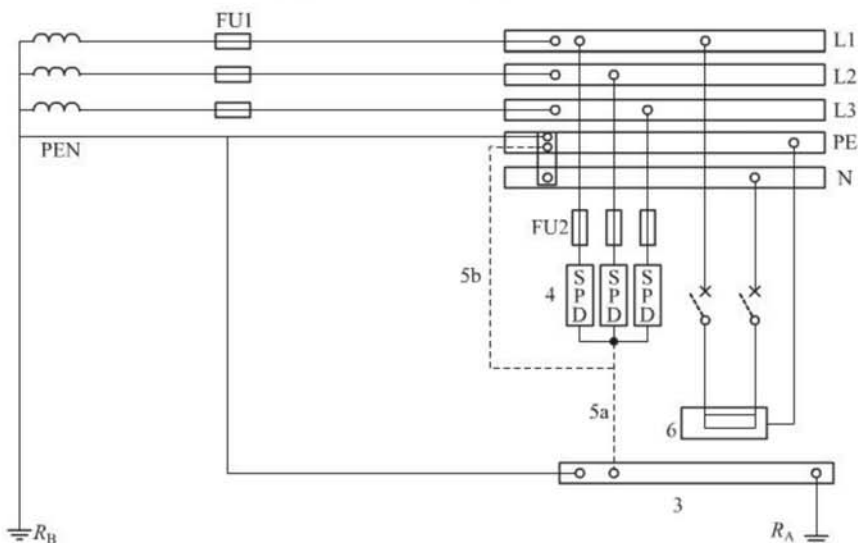
C.9 过电流保护和 SPD 失效后的保护

风力发电机组中电涌保护器的过电流保护和失效后的保护应符合 GB 16895.22—2004 中的 534.2.4 的要求。

C.10 SPD 的安装

SPD 连接导线长度应尽可能短, 建议总连接导线长度不超过 0.5m, 各 SPD 接地端应就近接地或等电位母线。

SPD 安装在（或靠近）电气装置电源进线端的示例如图 C.3 所示。



说明:

- 3——总接地端子的母线;
4——保护水平为Ⅱ类耐冲击过电压的电涌保护器 (SPD);
5——电涌保护器 (SPD) 的接地, 5a 或 5b;
6——被电涌保护器 (SPD) 保护的设备;
FU1——安装在电气装置电源进线端的保护电器;
FU2——电涌保护器 (SPD) 制造厂要求装设的过电流保护器;
 R_A ——电气装置的接地极 (接地电阻);
 R_B ——电源系统的接地极 (接地电阻)。

图 C.3 SPD 安装在（或靠近）电气装置电源进线端的示例

中 华 人 民 共 和 国
能 源 行 业 标 准
风力发电机组雷电防护系统技术规范
NB/T 31039—2012

*

中国电力出版社出版、发行
(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)
北京九天众诚印刷有限公司印刷

*

2013年7月第一版 2013年7月北京第一次印刷
880毫米×1230毫米 16开本 3印张 86千字
印数 0001—3000册

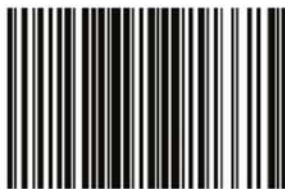
*

统一书号 155123·1471 定价 25.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



155123.1471

上架建议：规程规范/
电力工程/新能源发电