

# Wind Turbines – Effective Lightning Protection

## 风力涡轮发电机-有效的雷电防护

Bruce Glushakow 葛豪龙  
MCG 电子公司代表、IEEE 成员  
电子信箱: bglushakow@ieee.org

### 1. 摘要

风力涡轮发电机时常被竖立在雷击威胁的环境中。由于这个原因，雷击导致的风力涡轮发电机的损坏致使设备的维修及更换费用高昂。雷击破坏是导致发电风车中非计划性停机时间的最大因素，停机时间导致了数以百万瓦计算的发电量的损失。目前，关于风力涡轮发电机的雷电保护，没有国际标准。本文将为有效的保护提供指南。

### 2. 风车的短暂历史

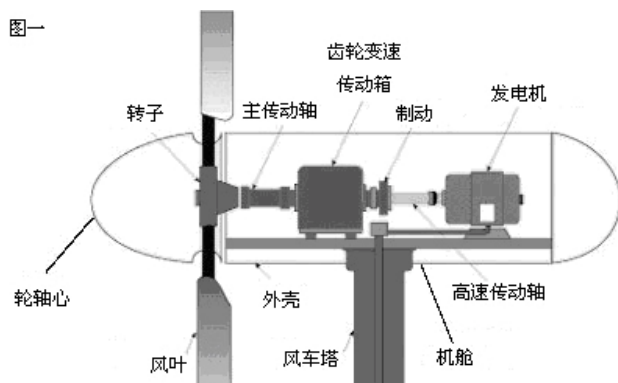
2000 多年前的汉朝时期，中国就发明了风车。在公元 1219 年，中国政治家 Yelu Chu Zai 准确地记载了中国风车的存在。<sup>1</sup>

那时，风车的主要作用是谷粒研磨和泵水。2000 多年来发生了巨大的变化，当今，在中国，风能却比以往任何时候更为重要。

矿物燃料的价格猛涨，对环境的负面影响，以及供给来源的不确定性，已经使许多国家，包括中国，去致力寻找替代的、可再生的能源。

中国，作为世界头 10 位风能生产国之一，将会在今后的几年内，投入数以十亿计的美元，来进一步发展这一工业。

### 3. 风力涡轮发电机的基本结构



现代的风力涡轮机，已经抹去了它们被发明时的原始功能-谷物碾磨或泵水。今天，能源饥渴的世界，风力涡轮机只提供一种功能：从风力中产生电力。

一个基本的风力涡轮发电机的设计 (图 1) 包含了一个通过一条中轴向发电机机传送能量的转子 (二条或多条的同轴心旋转的风力推进扇叶)。根据涡轮的大小和发电机的不同设计，现代的风力涡轮发电机能产生不同输出功率的交流或直流电流。发电机的转子的转动速度必须在每分钟 1200 到 1800 转之间，才能有效地产生电力。由于风力涡轮机不能安全地在此速度下旋转，因此在转子与发电机之间通常会加入一个变速齿轮箱传送系统，以增加发电机转子的转动速度。请参阅附录 A 之使用条款定义。

### 4. 风力涡轮发电机的防雷理论

风力涡轮发电机的最佳安装位置与雷暴的活动有着密切的关系。美国太空总署所公布的地图显示，在大多数风力密度高的地方，每年的雷暴天数在 30 多天。<sup>2</sup> 根据一项 2002 年完成的研究，美国国家可再生能源协会的统计显示，每年有 8% 的风力涡轮发电机会遭受一次直击雷击。<sup>3</sup> 在 1992 到 1995 年之间，仅德国就报告了 393 次风力涡轮发电机雷击损坏的事件 (124 直接击中风力涡轮发电机，其余的通过配电网入侵)。<sup>4</sup>

从电气的角度来分析，地球的表面为负极充电，其上面的大气层为正极充电。大部份时间里，大气是良好的绝缘体，保持了两者的距离。但是当雷暴逐渐生成并向大地表面靠近时，在云块里的电荷 (正极的或是负极的) 可以被传导到大地，这就是闪电。最常见的闪电，也是我们所感兴趣的-与风力涡轮发电机雷电防护有关的，是云-到-地或者 CG 的闪电，云地闪电所记录到的电流有高达 300 000 安培。(超过 100 米高的风力涡轮发电机也可能遭受到向上的雷击，但是这相对非常稀少。)

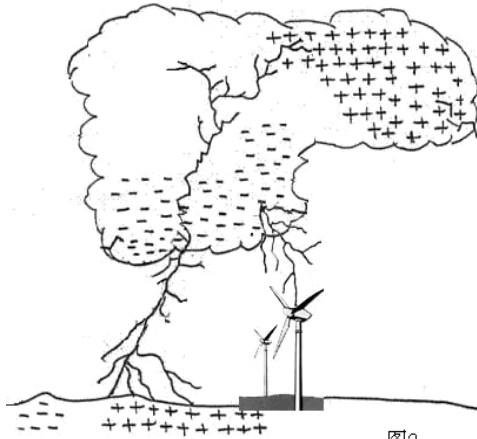


图2

本图显示了雷电产生的第一个步骤：风力涡轮发电机上空的雷云块，正极和负极充电区域分开。正电荷在云块的上端堆积，负电荷在下端堆积。数量巨大的负电荷堆积会对云块下方的大地产生两个影响：抵制负电荷的堆积及导致正电荷的堆积。当大气的绝缘被打破时，堆积的电荷将会通过雷击传导到大地。

相对于大气而言，大地通常是负极充电的。但是当雷暴经过大地时，云块下方原本负电荷充电的几公里的雷暴范围内的大地可以变为正极充电。这些正电荷会集中在垂直的物体上，如树和高建筑物，这些物体向上发射出正极的放电，并试图与从云块发出的向下的负极放电相会合。当来自云块的负电荷放电与来自地球表面的一个物体的正电荷放电相结合时，闪电就发生了。每当一个闪电向地面传导时，它必定有一个“附着点”，即为向上电荷的起点。因为风力涡轮发电机通常在暴露的位置上，并且明显地高于邻近的物体，所以是优良的附着点。目前风力涡轮发电机的叶片是附着点。然而，风力涡轮发电机上几乎任何地方都是直击雷击的附着点：接闪器（避雷针）、机舱（塔顶上发电机和控制器的舱房）、在设施顶部附近的突起，和塔本身。当风力涡轮发电机的任何部份被雷击击中时，风力涡轮发电机变成雷电流泄放的通路。从附着点到大地，雷电流将流过任何阻抗最低的路径。

雷电防护是通过提供一个低阻抗的入地路径，将雷电电流从敏感元件外分流。

一个防雷系统包括雷击接闪器，下导体，接地系统和每个子系统的电涌保护器。

一个低阻抗的接地系统是所有防雷系统的首要条件。这包括了将所有的金属部件、系统和雷击附着点的等电位连接。如果未能实施，则一个数以百万伏计的电压差会建立在

独立的涡轮元件之间。同时也必须注意与雷击下导体向邻近的各种导体的配线配置，以避免巨大的感应电压(所导致的结果是产生电涌电流)入侵到塔和机舱里面的电力电路及控制电路中。

但是请注意：一个 10 欧姆的接地系统在严重的雷击时将会产生 2,000,000 伏的电涌，这意味着即使是最好的接地系统，也将有大幅的电压需要考虑，因此，设备的安全唯一答案是电涌防护器。

发电机及控制系统的元件对风力涡轮发电机所遭受的直击雷击以及与风力涡轮发电机相连接的输电线路的外部所引入的电流极其敏感。因此，除了良好的接地系统以外，还必须使用电涌防护器来保护这些部件。

## 5. 现有的雷电防护标准

现有的国际雷电防护标准已被应用于风力涡轮发电机保护的，包括：

IEC 61024 建筑物的雷电防护

IEC 61662 雷击危险性的评估

IEC 613121-5 雷电电磁脉冲的防护

根据以上三个标准来进行保护的风力涡轮发电机，仍然遭受着严重的雷击破坏。这些破坏已被曼彻斯特科学技术学院,<sup>5</sup> 丹麦电力研究院(DEFU),<sup>6</sup> 国际能源中介 (IEA) 及,<sup>7</sup> NREL的研究人员们整理归档。<sup>8</sup>

在全世界，目前没有针对风力涡轮发电机的雷电保护的标准。最接近的文件是 IEC/TR 61400-24 Ed.1 .0 en:2002，题为“风力涡轮机发电系统 - 第 24 部份：雷电防护”。在题目中“TR”代表“技术报告”，根据报告本身的说明：“本文纯粹是为了提供信息，不应被视为是一个国际的标准。”<sup>9</sup>

应该承认，IEC/TR 61400-24 打开了一扇非常重要的门。它把风力涡轮发电机的相关防雷问题作为主要的议题。

它的价值包括：

- ✓ 第 4 节，风力涡轮发电机的雷电损坏统计。
- ✓ 第 6 及 7 节，转子风叶、轴承及齿轮箱的雷击防护的全面分析。

- ✓ 一个防雷系统需要能够将一个 200 千安培的峰值电涌电流安全地分流，与其他国际标准及研究结果相一致。（第 5.3 段）
- ✓ 强调了适当的接地和等电位连接等程序的重要性。

它的不足之处收录在本文之附录 B 上，希望这些议题将会在文件的 2007 版中得以校正。

在此，本文将会对风力涡轮发电机的雷电防护提供一些可用的指导方针。

## 6. 雷击破坏统计

IEC/TR 61400-24 中的统计具有很高的信息价值。

文件记录了在欧洲（德国、瑞典和丹麦）北部雷击比较稀少的地方，4-8% 的风力涡轮发电机每年会遭受雷击而造成损坏。但是在雷击密度较高的地区，此数据明显地提高。一个欧洲的制造商认为在德国南部的数字为 14%。<sup>10</sup> 在日本，CRIEPI 报告的数字为 36%。<sup>11</sup>

文件更进一步报告了它的欧洲北部的研究，显示了 7% 到 10% 的风力涡轮发电机的损坏为转子风叶的损坏。因为转子风叶的费用占风力涡轮机发电及总体费用的 15-20%，所以风叶的损坏是雷电损坏中最为昂贵的损坏。应该注意的是大部份所报告的转子风叶的损坏均为旧式的非导体性复合纤维制造的风叶。几乎所有现代的风力涡轮发电机的风叶都以导体为材料，具有雷电防护的功能。这种改进的风叶设计已经明显地降低了风叶损坏的数量。<sup>12</sup>

来自报告的另一项北欧统计数据为，只有 1/3 雷击事故是直击雷击中风力涡轮发电机所引起的。另外的 2/3 则是由连接到风力涡轮发电机的电力网络及通信网络所引入的。一个来自美国的数据认为这个比率应为：2% 的损坏来自直击雷，98% 的损坏来自附近的交流供电线路及信号线路的雷击。<sup>13</sup>

在 IEC/TR 61400-24 文件的最重要的统计数字之一是 50% 到 70% 雷击事故是对控制系统和电气系统的破坏，而这种事故的“停机时间”至少是风叶的两倍。图 3 图示说明这一种情形。<sup>14</sup>

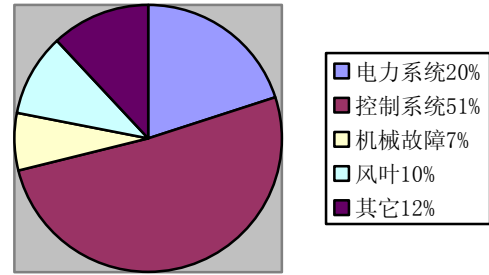


图 3

## 7. 值得注意的雷击危险因素

上述的统计数字成为由欧盟委任的、由曼彻斯特大学所实施的一项研究的主要结论的依据：“对风力涡轮发电机非直击雷保护的重要性，即便不比直击雷的防护重要，亦应与之相等。”<sup>15</sup>

三个应被处理的危险因素为：

- 直击雷引起的风叶损坏。这种损坏可以是由于击中风叶的顶端或侧面所引起的。几乎所有的风力涡轮发电机直击雷都会击中旋转中的风叶。
- 源自于直接击中风叶的雷击或击中与风力涡轮发电机相连接的电力线或数据线的雷击（非直击）的电涌电流的破坏。这些线路包括交流电力线以及电话线或者用于遥控风力涡轮发电机的 SCADA 线。
- 源自于与将雷电流泄放到“大地”所必需的下导体相邻近的电路（电力及控制线路）所感应到的高电压的破坏。

## 8. 所建议的雷电防护方针

8.1 IEC/TR 61400-24 第 3.5 节中陈述道“风力涡轮发电机的雷电防护所面临的问题并非其他建筑结构所通常遇到的问题”。事实上，至少有两种类型的建筑结构，面临着除了雷击击中旋转着的风叶以外的、与风力涡轮发电机所面临的雷电防护的所有都相同的问题。实践已经证明了这两种建筑结构的现存的防护系统是成功的。这些

成功的经验可以为保护风力涡轮发电机所借鉴。

**8.1.1 天线塔。**除了风叶之外，天线塔存在着与风力涡轮发电机的保护相同的其它基本问题。从图 4 和图 5 可以看出，两者在几何结构上极为相似，两者的建造均可超出地面达 150 多米。经过对所面临的问题多年的研究之后，联邦飞航管理局记录了保护它们的天线塔免遭雷击的成功原则，并使之成为所有天线塔的安装准则。而



其对接地系统及等电位的连接的要求几乎与对风力涡轮发电机的要求完全相同。除此之外，联邦飞航管理局所规定的电涌保护器至少要能承受 1500 个 10 kA 8/20 $\mu$ s 电涌的冲击和 1 个 180 kA 到 240 kA 的电涌的冲击。<sup>16</sup>



**8.1.2 灯塔。**灯塔为高建筑结构，通常的建筑地理位置既高且暴露，极易遭受到直击雷的袭击。在中国的灯塔结构的顶端通常安装有成熟的 D/GPS 设备及海事安全通信设备。在对数以百计的灯塔成功与失败的保护方案的多年的研究之后，在 2005 年年底中国交通部发表了一份雷电防护指南，可作为保护风力涡轮发电机的应用借

鉴。灯塔接地及等电位连接的成功操作几乎与风力涡轮发电机一致。除此之外，交通部还指定应该使用至少 180 kA (8/20) 的、并具有备用保护路径的电涌防护器。<sup>17</sup> 请参阅下面第 8.8.2 节。图 6 展示了一个典型的中国灯塔和一个风力涡轮发电机建筑结构和几何结构的相似性。



## 8.2 接地系统

**8.2.1** 风力涡轮发电机的接地系统的建造应该按照 IEC/TR 61400-24 第 9 节的建议实施。

**8.2.2** IEC 61024-1 及 IEC/TR 61400-24 的表 11 中列出了下导体的最小尺寸。

**8.2.3** 应该建造一个围绕风力涡轮发电机的、与风车塔相连接的环形地网。风车塔的加强钢筋应该与风力涡轮发电机的接地系统进行焊接连接。

**8.2.4** 接地系统地网应该与所有接地电极、任何的地下金属物件（储存罐、管道等等）以及建筑物原有的接地系统互相连接。在一个风力发电场中，所有风力涡轮发电机的接地系统应互相连接。

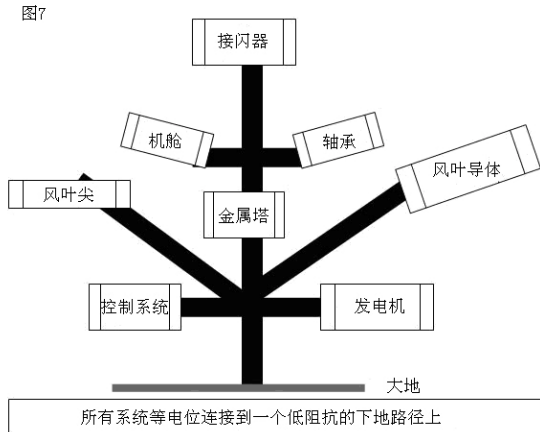
**8.2.5** 接地系统一定要紧凑。研究表明接地系统中的任何超出雷击电流注入点 30 米距离的部份将无助于降低雷击的峰值电压。<sup>18</sup>

**8.2.6** 设计的目标为接地系统的接地电阻小于等于 10 个欧姆。<sup>19, 20</sup>

**8.2.7** 接地系统必须每年进行一次检查，以确定是否有断裂、连接松动、锈蚀及/或接地阻抗的改变的发生。<sup>21</sup>

**8.2.8** 接地系统必须在任何时候保持在良好状态。

**8.3 等电位连接及屏蔽。** 根据 IEC/TR 61400-24 第 8.5 节的建议，所有的系统和金属部件必须被连接在一起并连接到一个低阻抗的接地路径上。



**8.4 风叶。**

**8.4.1 导电部件。** 风叶中应该含有导电的部分，能将雷击电流引导到轴心，以防止风叶内部产生弧光放电。此导电的部件可以为风叶的外框或叶面。在美国的一项广泛的 NREL 研究表明，带有内置导体的风叶，其严重损坏的可能性，要远低于没有安装内置导体的风叶。<sup>22</sup>

**8.4.2 多接闪器。** 研究显示安装有内置防雷系统的长条形风叶容易受到雷击的袭击，附着点远离安装在尖部的接闪器。因此需要安装多个接闪器，使之比单个顶端式接闪器的风叶提供更优良的保护。<sup>23</sup> 短于 30 米的风叶在每一片外壳上应至少安装一个接闪器。长于 30 米的风叶，应安装多个接闪器。

**8.5 轴承。** 仅次于风叶的损坏，轴承是风力涡轮发电机遭到直击雷击时最易受到破坏的部件。统计数字表明，在服务期间节距轴承不会遭到雷击的损坏。而主轴及其驱动部件的轴承常遭破坏，因为它们比较小，而且转动速

度快。所以它们易受损坏。当转子正在转动的时候如果遭受雷击，这些部件更可能遭受损坏。为了避免损坏发生，在雷击可能发生时可以暂时关闭风力涡轮发电机。<sup>24</sup> 正如风力涡轮发电机在强风期间被关闭以保护它们免受损伤一样，在雷暴期间可以短时间关闭风车以保护轴承。（参阅下面第 9.3 节）

**8.6 控制系统：来自 3000 个风力涡轮发电机的雷击破坏，14000 多个风车年，极具价值的信息显示，风力涡轮发电机控制系统是在一个风力涡轮发电机内最易损坏的部件。<sup>25</sup> 显然，一个风力涡轮发电机的被雷击，可通过连接的金属数据缆线导致与其相联的风力涡轮发电机的损坏。<sup>26</sup> 风力涡轮发电机的电子设备包括控制和测量感应器，分布在风力涡轮发电机内的各处。风车内通常安装有两个微处理器，一个在机舱中，另外一个在塔基里。两个处理器一定被某种线缆连接。风车内也会有 SCADA（监视控制和数据提取）连接线来进行远端的数据监测和控制。**

**8.6.1** 电话或 SCADA 应尽可能使用光纤线，因为光纤线是非导体。外部 SCADA 网络、机舱控制器之间的连接以及机舱控制器与中央控制器之间的连接应使用光纤。因为光纤为非导体，所以过电压在光纤信号线上不能传播。（确定不要使用为了增加机械强度而殖有金属线的光纤缆线。）

**8.6.2** 如果电话或 SCADA 系统一定要使用双绞铜线，走线时穿金属管焊接到一个良好的接地系统将有助于降低电涌过电压。除此之外：应使用串联型重型数据线保护器（20kA 8/20 μs 峰值电流）保护每一个 I/O 端口，并直接通过被保护的设备的机壳接地，接地导线不长于 15 厘米。（这包括 SCADA 系统的接合器和控制器介面。）

**8.6.3** 在有其它的传感器传输信息给涡轮控制设备的地方（如风速

仪、风向仪、轴速传感器、温度测量仪，等）这些与控制器相连的 I/O 口必须采取保护措施。

- 8.6.4 将风力涡轮发电机之间运行的任何电力电缆的金属护套稳固地连接到风力涡轮发电机的接地系统上。
- 8.6.5 在风力涡轮发电机之间的 SCADA 缆线壕沟内安装已接地的裸铜缆线。
- 8.6.6 将所有 SCADA 缆线的金属护套的两端连接到接地系统上。

**8.7 电气系统。**通常，一个风力涡轮发电机的输出电压不会超过 690 V。这一输出电压被一个变压器逐步提升到 66kV 或更高，然后供应到输电线路路上。

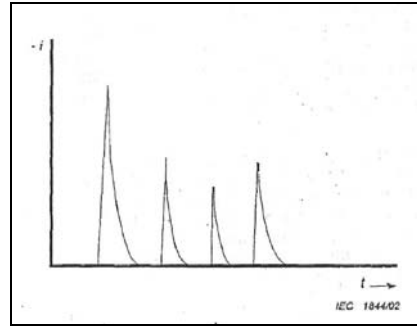
**8.7.1 变压器。**风能发电的雷电电涌问题发生在变压器的初级端（低压端）而非次级端（高压端），与传统的配电变压器不同。

**8.7.2 发电机。**击中高压电栅极的雷击会在变压器的低压端 (400/690 V) 上显现（耦合进入）。由于这个原因，连接发电机到变压器的 400/690 V 输电线一定要安装电涌保护器。电涌保护器特别为 400/690 V 系统而设计，保护风力涡轮发电机的电气系统的电涌防护器的峰值电流处理能力最小应为 180 kA (8/20 μs)。

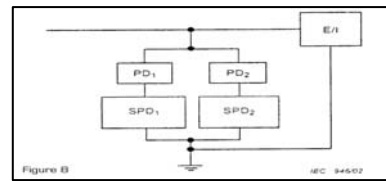
**8.8 确定电涌保护器。**

**8.8.1 峰值电流。**一个风力涡轮发电机的主保护器一定能够处理最小应为 180 kA 的电涌电流，并且每相具有多条、带独立熔断器的后备保护路径，如此风力涡轮发电机不会暴露在没有保护的状态下。

**8.8.2 后备保护路径。** IEC/TR 61400-24 中收录 12 张与下图类似的图表（从第 16 页开始），用于显示可能击中风力涡轮发电机的雷击的构成。



上图表现了对风力涡轮发电机的一次单个雷击。雷击对一个物体的“闪电”包含有不止一个的“冲击”。虽然图中所显示的闪电由 4 个独立的冲击所组成，但一次单个雷击闪电包含 10 个或更多的冲击是常见的。一个电涌防护器需要具有多条带独立熔断器的冗余（后备）保护路径，以保证即使在首次冲击时，其中一条路径遭到牺牲，风力涡轮发电机仍然处于保护之中。这种方式在 IEC 60364-5-53 中被提倡，特别是风力涡轮发电机的电涌保护，图 8 是从 IEC 60364-5-53 中复制的，以显示设计要求。



PD = 熔断器  
SPD = MOV 阵列

如上面第 8.1.2 节中所讨论的，这已经成为中国灯塔所必需的功能。<sup>27</sup>

**8.9 机舱外部的附件。**机舱的后部的顶端安装有风速计和风向标，并将相关的信息输送给控制器，需要安装接闪器延伸到高于风速计一米的高度，理想情况下，风速计应安装在其自身的金属支架，线穿金属管，此外，需要在此安装电涌保护器以防止过电压破坏控制器的部件。风向标和用于警告飞机的外部障碍灯也需要类似的保护。

**8.10 反相器。**绝大部分中国的（和世界的其它地区的）风力涡轮发电机所采用的是异步发电机，可直接连接到输电网。这类型发电机不使用反相器。如果使用反相器，则需要安装电涌防护器。

**8.11 雷击附着点。**必须关注所有可能的雷击附着点。不应仅依靠“滚球法”因为该方法从未在风力涡轮发电

机上被评估或测试过。（详情请参阅以下之附录 B.2）。雷击可以击中风力涡轮发电机的任何地方。通常最被关注的区域是机舱后部的气象设备。

**8.12 人员安全。**一项风力涡轮发电机雷击期间人员危害的深度研究发现了三种主要的风险类别：电击、线缆爆炸效应及风叶材料的喷射。

**8.12.1** 第一项，电击，适用于任何处于风力涡轮发电机内的人员及风力发电场接地地网附近的人员。虽然电击可能不致命，但它可产生危险，如致使正在爬梯的人员失手等。线缆爆炸效应的威胁仅与风力发电场的人员有关。风力涡轮发电机所使用的所有线缆的尺寸应该能够安全地承载雷击所产生的电涌电流。最后，来自风叶材料的威胁可以通过使用风叶雷电防护系统的方式来避免。<sup>28</sup>

**8.12.2** 风力涡轮发电机周边人员的第一项原则是：“如果风力发电场区域已预测了雷暴的发生，或在雷暴恶劣天气的路径上，所有人员应立即撤离”。

**8.12.3** 雷电的警告应该显著地显示在风力涡轮发电机场地内，工作人员应演习雷击时的紧急应对。

**8.12.4** 风力发电场应建造避难设施使人员能安全地等待雷暴结束。

**8.12.5** 预测雷暴的发生是实现此策略的关键。仪器可以提前 2 小时预测雷暴的来临。

**8.12.6** 当雷电流流进风力发电场的接地系统时，接地系统的电位会上升，而这将会提升土壤表面的电位。土壤表面存在的电位倾斜会使正在风力发电场内行走的人员产生跨步电压，从而危及人员的安全。<sup>29</sup>如果在雷暴期间有紧急事件发生需要人员在场，应确定该人员穿戴特制的、能隔绝雷电流

及跨步电压的手套和鞋。在工作区的地板上使用厚橡皮垫也可以起到很好的作用，最理想的做法是在雷暴时，工作人员离风机的距离不应小于 30 米。

## 9.需要进一步的研究

有些方面还需要进一步的深入研究:

**9.1 风叶的保护：**所有主要的风力涡轮发电机制造商现在将雷电防护作为风叶设计的一部份。这一改进已经明显地减少了直击雷对风叶灾难性损坏事故的发生，但问题仍然没有解决。由于风叶越来越长，必须开发出更简便、有效地制造风叶接闪器的方法。<sup>30</sup>

**9.2 Air Terminals. 接闪器：**一段时间以来，非传统型的离子发射式避雷针成为争论的焦点，而越演越烈。2003 年在经过对可得数据的全面检讨之后，Uman 和 Rakov 得出的结论是，没有数据支持关于“雷电消除及提前放电”技术优于传统的防雷系统，然而，该结论却继续受到“消雷器”和“提前放电式避雷针”支持者们的反驳。<sup>31</sup>如果它们确实有效，或可以实现的话，风力涡轮发电机将会是这些产品的理想的应用场所。感兴趣的机构应该要求这些“消雷器”和“提前放电式避雷针”的制造商参与由管理部门监控的试验以验证这些产品对风力涡轮发电机保护的有效性。选择参加的制造商应该保证：被测试的风力涡轮发电机的安全。他们应该愿意参与此类的测试试验，因为该示范能显示产品的优越性将并为他们带来巨大的市场潜力。

**9.3 主轴承的保护 - 等电位连接装置的必要性：**保护风力涡轮发电机主轴承免遭风叶直击雷的破坏仍是一个未解决的难题。研究显示，80% 的风叶直击雷的雷电流从风叶的导体通过最靠近转轴的轴承流入机舱的底盘。<sup>32</sup>由于证据显示此过程可能严重地影响任何高速转动中的轴承，因此减少流经轴承的电流成为设计的目标。由于流

经轴承到大地的路径其阻抗非常低，因此雷电流对此十分迷恋。迄今为止，为雷电流搭建一条绕开轴承的分流路径的努力均未能获得成功。任何类型的防雷装置一定由两个有效部份组成：一个由过电压所触发的开关或转换电路，以及一个用于泄放电涌能量的良好接地路径。火花间隙防雷器为其中一种开关，有 75 年历史的专利技术，其原始的也是最佳的用途为抵挡建筑物的直击雷。火花间隙防雷器从来不是被设计来保护电子设备的，而且他们也不能胜任。它们的反应迟钝，它们的特性决定了它们的残压很高（4 kV或更高）足以损坏电子设备。而且，不存在特别为风力涡轮

发电机 400/690 V系统而设计的火花间隙防雷器。由于火花间隙防雷器没有能力将过电压钳制到安全水平之下，它们不被推荐为风机控制及电气系统的保护器。法国防雷协会以最强硬的态度来禁止它们的使用。<sup>33</sup>

**9.4 附着点：** 在缺乏任何其它方法的情况下，IEC/TR 61400-24 凭借“滚球法”来预测风力涡轮发电机的雷击附着点。由于此方法从未在高建筑物及风力涡轮发电机上被验证过，所以应该发明一个更为精确的方法。请参阅下面附录 B.2 关于滚球法的更多资料。

## 附录 A – 风力涡轮机相关词汇

<b>Ampere (A) 安培 (A)</b>	电流的单位（例如：10A）
<b>Anemometer 风速计</b>	一个装在机舱内的测量风速的装置。
<b>Blade 风叶</b>	通常为连接到中轴的平板式的物体，作用是将风的推力转换成一个圆周形的运动，成为风力涡轮发电机的能源。
<b>Controller 控制器</b>	一个用来连续地监控并控制风力涡轮发电机的电子装置。在发生故障的情况下它自动地停止涡轮机并向中央控制室发出警告。
<b>Current 电流</b>	一个电荷的流动
<b>Gear Box (transmission) 变速箱 (传动箱)</b>	风叶被连接到一个转速大约为每分钟 30 转的低速中轴上。变速箱将低转速转换成发电机产生电力所需的高转速（每分钟 1500 转）。
<b>Generator 发电机</b>	在机舱内的一个设备，与旋转的风叶相连接，并将机械能量转换成电能。
<b>Hub 轮轴心</b>	风力涡轮发电机的中央部份，用于在外部支撑风叶及连接机舱内的转子传动轴。
<b>Kilo (k) 仟 (k)</b>	1000；仟伏=1000 伏特；仟安培=1000 安培；仟瓦=1000 瓦特
<b>Mega (M) 百万 (M)</b>	1000000；一个百万瓦 =1000000 瓦特
<b>Nacelle 机舱</b>	风力涡轮发电机塔顶的仓房（在风叶的后面）用于安放风力涡轮发电机的关键部件，如齿轮箱、发电机及控制器。
<b>Overvoltage 过电压</b>	超过设备设计的所能承受的电压。
<b>Rotor 转子</b>	风力涡轮机的转动部分，包括风叶及轮轴心。
<b>Receptor 接闪器</b>	风叶的雷击保护系统的一部分，承担雷电的冲击。接闪器位于风叶的表面并与风叶内部的导线相连接。
<b>RPM 转/每分</b>	每分钟的转动次数。
<b>SCADA</b>	为“监视控制和数据采集”的缩写-由所获得的数据所组成，然后被传送到控制中心进行分析及控制处理。SCADA 用于监控风力涡轮发电机。
<b>Tower 风车塔</b>	支撑及升高风力涡轮发电机转子及机舱的基本结构。典型的现代涡轮塔是锥形钢结构。
<b>Transformer 变压器</b>	将电压或电流的数值增加或减少的电器装置。在变压器中没有可移动的部件。电能两个绕组之间通过电磁感应而转移。
<b>Turbine 涡轮</b>	任何能够用运动的能量（如水、风、热气或蒸汽）产生旋转的机械动力的机器
<b>Volt (V) 伏特 (V)</b>	电压力的单位
<b>Watt (W) 瓦特 (W)</b>	风力涡轮发电机所产生电能基本单位；伏-安；仟瓦和百万瓦是通常用于描述风力涡轮发电机所能产生的电能能量的通用词语。
<b>Wind 风</b>	运动中的空气
<b>Wind speed 风速</b>	空气粒子在大气中以动的速度。风速使用风速计来测量。
<b>Wind Turbine</b>	把风力转换成电能的一个装置。



风力涡轮发电机	
Wind vane 风向标	安装在机舱上测量风向的装置。
WTG	为风力涡轮发电机的缩写

## 附录 B - 所建议的改进措施

以下是对 IEC/TR 61400-24 Ed.1.0 en:2002 风力涡轮发电机 -第 24 部份：雷电防护的五项改进的建议。

为减少由于雷击导致的风力涡轮发电机严重损坏和人员伤亡，希望在 2007 年进行回顾时，将讨论以下议题：

### B.1. 雷击参数

第 3.3.2 节解释了 IEC/TR 61400-24 将正极云到地雷击放在参数制定的特别重要位置的原因归结为 1970 年代发表于 *Electra* 杂志第 41 期及第 69 期的两篇相关的研究结果。事实上 IEC/TR 61400-24 文件的表 1 所引用的正极云到地雷击数据是直接来自以上所提到的第一篇 *Electra* 文章中引用过来的。<sup>34</sup> 然而 IEC/TR 61400-24 没有意识到第二篇文章 (*Electra* 69) 否认了 *Electra* 41 所公布的正极云到地雷击的调查结果。<sup>35</sup> 这篇文章是 IEC “等级 I 测试参数” 由始至终的唯一依据，因此显得十分重要。<sup>36</sup> 这些雷击参数没有科学的事实基础，在世界范围内一直被评击。<sup>37</sup> <sup>38</sup> 中国的科学家们计算出如果等级 I 所制定的测试参数在自然界中确实存在的话，那么它们出现的几率是每二百万年一次。<sup>39</sup>

一个以现实为基础的防雷系统一定要建立在一个正确的雷击参数的雷击模型上。以正极云到地为依据的雷击参数应从标准中剔除，取而代之的为更加切合实际的参数组。

**B.2. 滚球法：** IEC/TR 61400-24 的第 8.3.1 段使用了“滚球法”作为决定雷击附着点的方法。滚球法通常被作为建筑物避雷针的定位方法。然而，它使用一个固定的闪击距离(典型值为 45 米)，不考虑建筑物的高度或几何结构。它从未在高建筑物上被测试或评估过，更不用提用于风力涡轮发电机上。IEC 委员会主席 C. Bouquegneau 博士，IEC 62305 雷电防护标准最新版本的作者，称滚球法为“一个隐藏了我们对雷击附着过程不尽理解的粗糙方法。”<sup>40</sup>

“滚球法”可以应用于计算避雷针的安装位置及高度，但是不能仰赖它来保证风力涡轮发电机的哪一点会成为雷击附着点而哪一点不会。直到它成功地在风力涡轮发电机上得到验证以前，所有相关的引证应该从 IEC 61400-24 标准中剔除出去。

(参阅下面 B-4)

**B.3. 防雷分区制：** IEC/TR 61400-24 之第 8.3 段将“防雷分区制” (LPZ) 应用于风力涡轮发电机上。LPZ “防雷分区” 是上一段“滚球法分区保护模式”所得出的直击雷附着点为基础的、被认为“统计上安全”的区域。

LPZ 系统在风力涡轮发电机上的应用难以得到判定，因为从未做过相关的评估。进一步的数据是：它基于使用 10/350 微秒波形作为雷击模型的旧的 IEC 61312-1 标准。<sup>41, 42</sup> 在日本，两项独立的风力涡轮发电机雷击持续时间的直接测量的科学研究发现，持续时间为 25-30 微秒（与 IEC 61312-1 的 350 微秒差之千里）。10/350 微秒的测试波形已经受到而且会继续受到来自世界范围的诸多评击。<sup>43, 44</sup> 将如此的一个系统用作有如风力涡轮发电机这样重要的设施的保护基础的做法相当冒险。使用这一个系统的危害性可见于以下之 B.4 节。

**B.4. 人员保护：** 对于所有风力发电场内的人员来说，雷电是致命的威胁，因此必须为他们提供清晰明了的指示，没有解释的余地，没有误解的可能。IEC/TR 61400-24 文件的第 10 节之题目

为**人员保护**，就缺乏如此的指示。虽然该段由以下的句子开始：“在雷暴期间不应在风力涡轮发电机上进行任何工作”，其后却努力地评价在雷暴期间被困在风力涡轮发电机不同位置上的人员的相对安全率。在第 10.1.1 节中建议：“强烈建议将所有人员预先掩蔽到危险性最小的 LPZ O<sub>B</sub>区” - 文件关于此议题的参考是条款 8.3.1，其中陈述道：… LPZ O<sub>B</sub>依靠如图 22 所显示的滚球模型所决定…，灰色部分为 LPZ O<sub>B</sub>”。以下为图 22。

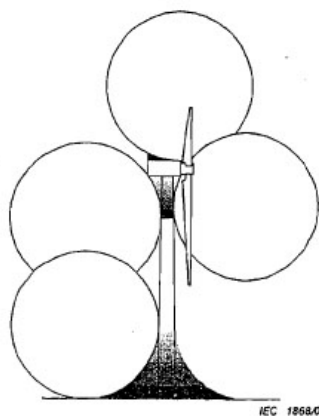


Figure 22 – Rolling sphere model

对于粗心的读者，图 22 似乎显示了机舱下的风车塔内等待的人员相当安全，甚至机舱顶后部风速计上的人员也相当安全。而事实上，一点也不安全。

**A**一个更加现实和可靠的指示是：英国风能协会的指南，关于健康及安全所提出的：“如果预测风力发电场将有雷暴发生，或在恶劣天气的路径上观察到雷击现象，所有的职员应立刻疏散”。<sup>45</sup> 或者美国航空太空总署提出的“暴风期间风力涡轮发电机附近的人员会有严重的麻烦，最安全的程序是让人员撤离该区域”。<sup>46</sup>

**B.5. 防雷系统的成本分析：** IEC/TR 61400-24 文件的第 5.5 和 5.6 节为雷电防护成本的分析。几页的公式得出的结论是：在年雷暴次数低的地区（每年每平方公里 0.2 次闪电），建议投入风力涡轮发电机建造费用的 1.7% 的费用建造风叶直击雷防护系统。对于保护更为频繁地被损坏的控制器及电气系统，作者们表示他们不能使用 IEC 61662 的模型提出一个可行的保护方案。该章节应被重新编写以便为风力涡轮发电机的拥有者提供更多有用的数据。IEC TR 61000-5-2<sup>47</sup> 为地网的建造及根据地网的结构如何布置电力及控制线路（路由）方面提供了有用的指南。

**B.5.1 直击雷防护成本：**几乎所有的直击雷都击中的是风力涡轮发电机的风叶。当雷击击中没有受到保护的风叶时，结果通常是灾难性的，维修的代价高昂。正是这些直击雷，IEC/TR 61400-24 给与了高度的重视。然而，如上所述，著名的风叶生产厂家们现在已经将雷击防护包括在他们的风力涡轮发电机风叶设计之中。现代的风力涡轮发电机不包含风叶防雷的做法是非常罕见的。由于新建的风力涡轮发电机的风叶均已包含内置的雷击保护，这部分的费用可以包含在风力涡轮发电机的基础费用内。虽然风力涡轮发电机的直击雷仍然产生许多问题，但对于第 5.5 节的结论：花费总费用之 1.7% 用于风力涡轮发电机的直击雷防护是合理的结论，此时看起来极为过度，需要重新分析。

**B.5.2 非直击雷的防护成本。**一个风力涡轮发电机所遭受非直击雷破坏的几率是遭受直击雷破坏的几率的 3 倍。这种类型的破坏所导致的停机时间是直击雷击中风叶所导致的停机时间的 2 倍多。雷电所引起的电气和控制器系统的修理费用仍然低于风叶维修的最低费用（\$1900），但请不要忘记发电机更换的费用（\$50000）要远高于风叶的更换费用。因此，建议使用以下的计算作为设施中电涌防护系统合理预算的一个决定方法，

以确保控制系统及电气系统 99% 的保护。任何防雷系统的年度费用， $C_{am}$ ，不应该超过雷击破坏的年损失（雷击破坏发生的频率， $F_{total}$ ，乘以它的费用， $C_{losses}$ ）加上由雷击引起的修理等所导致的电能生产的损失， $C_{LE}$ 。

$$C_{am} < (F_{total} \times C_{losses}) + (C_{LE})$$

其中：

$C_{am}$ 为防雷系统的年度费用 [总费用（安装费用、产品费...）÷ 保质年数]。

$F_{total}$  为控制器和电气系统的雷击损坏频率

$C_{losses}$  对控制器或电气系统的损坏的平均费用

$C_{LE}$  为风力涡轮发电机停机时所损失的电能生产的价值，可按以下方式计算：

$$C_{LE} = (F_{LED} + F_{LEN}) \times C_E$$

其中：

$F_{LED}$ 为雷击事故所引起的停机频率（以小时计算）

$F_{LEN}$ 为非雷击事故所引起的停机频率（以小时计算）<sup>48</sup>

$C_E$  为风力涡轮发电机每小时生产的电能的价值 (为风力涡轮发电机每小时所产生的可卖电能的价值，调整后作为由于机械故障及其它非雷电因素所引起的生产损失的百分比)

采用美元计数，预计平均每次损坏的维修费用为\$1,000，每小时风力涡轮发电机的电能输出为 1 兆瓦特，则 $C_E$ 值为 0.996，我们得到：

$$C_{am} \times 10 < (3 \times \$ 1000) + (266 + 71) \times \$ 0.78$$

$$C_{am} \times 10 < 3000 + 208$$

$$C_{am} \times 10 < 3208$$

则 $C_{am} < \$ 3208$  为一个 1 年保质期的雷电防护系统的投入。

（对于一个 10 年保质期的防雷系统, 业主的预算为 \$32080）

这些预算只是资金上的费用预算。对于一项依赖于公众的接受程度的新技术，其它非资金方面的因素，如风力发电场“破坏了”景观或公众对其可靠性的印象，由雷电破坏所引起的明显的服务停顿，将会使此项新技术成为攻击的目标。必须承认，只要风力涡轮发电机的发电量只是总发电量的一小部分，缺少这一部分不至于成为影响公共关系的主要因素。然而，无形的但现实存在的与雷击相关的破坏必须成为危险评估中考虑的因素。

参考:

- <sup>1</sup> Yelu Chu Zai, 《西方行程中加以注释的记录》, 1219。
- <sup>2</sup> Dodd, C., McCalla, T., 及Smith, J.G, 如何保护风力涡轮发电机免遭雷击, 国家航空及空间管理, (DOE/NASA 0007-1) (NASA-CR-168229) 1983年9月。图1和图2。
- <sup>3</sup> McNiff B. “风力涡轮发电机的雷电防护项目 1999-2001” 国家可再生能源实验室 (一个美国能源部的实验室) 提供。地址 1617 Cole Blvd, Golden, Colorado, 80401, 第18页。
- <sup>4</sup> Durstewitz, M., Ensslin, C., Hoppe-Kilpper, M. Rohrig, K. 风力涡轮发电机运行的外部条件 - 德国 '250 MW 风' 计划的结果 - , 发表于1996年5月之欧盟风能会议。
- <sup>5</sup> Cotton, I., et al. 风力涡轮发电机的雷电防护 - 一个最优的设计者实践指南。曼彻斯特, 英国: UMIST, 1999。
- <sup>6</sup> DEFU. 推荐号 25, 风力涡轮发电机的雷电防护。Lyngby, 丹麦: 丹麦电力公司研究学会, 1999。
- <sup>7</sup> IEA “风力涡轮发电机系统的雷电防护及相关控制系统的EMC问题”, 附录XI, 第26届专家会议; Milano, 意大利, 1994年3月。法国巴黎: 国际能源中介, 附录XI, 1994。
- <sup>8</sup> McNiff B. “风力涡轮发电机的雷电防护项目 1999-2001” 国家可再生能源实验室 (一个美国能源部的实验室) 提供。地址 1617 Cole Blvd, Golden, Colorado, 80401, 第20页。
- <sup>9</sup> IEC/TR 61400-24 第5页
- <sup>10</sup> LM Glasfiber A/S 丹麦 www.lm.dk
- <sup>11</sup> Wada, A., Yokoyama, S., Numata, T., Ishibashi, Y., Hirose, T. 日本冬季风力涡轮发电机风叶的雷电损坏。发表于2004年法国Avignon之雷电保护国际会议中。
- <sup>12</sup> McNiff B. “风力涡轮发电机的雷电防护项目 1999-2001” 国家可再生能源实验室 (一个美国能源部的实验室) 提供。地址 1617 Cole Blvd, Golden, Colorado, 80401。
- <sup>13</sup> Sullivan, D., 筒仓里的风, 发表于2004年6月10日之“新农场杂志”。
- <sup>14</sup> Cotton, I., McNiff, B., Soerenson, T., Zischank, W., Christiansen, P., Hoppe-Kilpper, M., Ramakers, S., Petterson, P., Muljadi. E., 风力涡轮发电机的雷电防护, ICLP, 2000。图表制作来源于丹麦的数据库, 该数据库的基准为IEC/TR 611400-24。
- <sup>15</sup> Cotton, I., Jenkins, N., Pandiaraj, K., 风力涡轮发电机的风叶及轴承的雷电保护。欧盟委员会委派, 合同 JOR3-CT95-0052。
- <sup>16</sup> 运输部, 联邦航空管理局标准FAA-STD-019d, 发表于2002年8月9日, 第11页表1。
- <sup>17</sup> RBN-DGPS基站、VTS中心、灯塔及AIS基站的雷电防护指南, 由中国交通部公布于2005年10月20日, 文件号为(2005)411。
- <sup>18</sup> Surtees, A.J., Martzloff, F.D., 及 Rousseau, A., “电涌防护设备的接地”会议记录, PES 2006大会, 蒙特利尔, 2006年7月。参考: “30米定则”。
- <sup>19</sup> IBID
- <sup>20</sup> Dodd, C., McCalla, T., 及Smith, J.G, 如何保护风力涡轮发电机免遭雷击, 国家航空及空间管理, (DOE/NASA 0007-1) (NASA-CR-168229) 1983年9月。
- <sup>21</sup> Surtees, A.J., Martzloff, F.D., 及 Rousseau, A., “电涌防护设备的接地”会议记录, PES 2006大会, 蒙特利尔, 2006年7月。参考: “30米定则”。
- <sup>22</sup> McNiff B. “风力涡轮发电机的雷电防护项目 1999-2001” 国家可再生能源实验室 (一个美国能源部的实验室) 提供。地址 1617 Cole Blvd, Golden, Colorado, 80401。
- <sup>23</sup> Jenkins, N, Cotton, I., 风力涡轮发电机的雷电防护: 进一步研究, 可出版的终结报告, 1998年9月1日到1999年10月31日, 欧盟委员会委派, 合同JOR3-CT95-0241, 第6页。
- <sup>24</sup> Cotton, I., Jenkins, N., Pandiaraj, K., 风力涡轮发电机的风叶及轴承的雷电保护。欧盟委员会委派, 合同JOR3-CT95-0052。
- <sup>25</sup> IBID
- <sup>26</sup> IBID
- <sup>27</sup> IBID
- <sup>28</sup> Cotton, I., Jenkins, N., Pandiaraj, K., 风力涡轮发电机的风叶及轴承的雷电保护。欧盟委员会委派, 合同 JOR3-CT95-0052。
- <sup>29</sup> Dodd, C., McCalla, T., 及Smith, J.G, 如何保护风力涡轮发电机免遭雷击, 国家航空及空间管理, (DOE/NASA 0007-1) (NASA-CR-168229) 1983年9月。在人员安全的章节上对触电及跨步电压陈述如下: “风力涡轮发电机附近的人员和家畜在暴风雨期间会有严重的麻烦。最安全的程序是让人离开现场。现场应该使用围栏阻挡家畜。在雷击期间一个人触碰设施中的任何导体部件将会在他的脚底和接触点之间产生一个电压差 (叫做接触电位)。如果他的脚和地之间的绝缘性能不足以避免形成放电, 则从

此人的手经过身体到脚将会流过一个电流。流经身体的雷电流会导致心脏停止跳动及/或将人击晕。一个站立在地面或地板上的人将会在他的两脚之间产生一个电位差。同样地，如果绝缘性能不足以避免形成放电，则会形成一个危险的情形。最危险的跨步电压位置为设施的地基外但接近地基的地方。如果风车塔没有进行有效的接地，在发生直击雷击时，离其几米距离内的人员将会遭受侧面放电而受伤或夺命。

- <sup>30</sup> Cotton, I., Jenkins, N., Pandiaraj, K., 风力涡轮发电机的风叶及轴承的雷电保护。欧盟委员会委派，合同 JOR3-CT95-0052。
- <sup>31</sup> Uman, M A., Rakov V.A, 雷电防护非传统方法的检讨。美国气象学社会日记，2002 年 12 月。第 1809 页。
- <sup>32</sup> Cotton, I., McNiff, B., Soerenson, T., Zischank, W., Christiansen, P., Hoppe-Kilpper, M., Ramakers, S., Petterson, P., Muljadi. E., 风力涡轮发电机的雷电防护，ICLP，2000。
- <sup>33</sup> 法国防雷协会发行的数据表第 1-2000 年 12 月号。
- <sup>34</sup> Berger K., Anderson R.B., Kröninger H., 雷击的参数。CIGRE Electra 第 41 号 (1975)
- <sup>35</sup> 在 K Berger (一个瑞士的研究员) 写这两篇文章的时候所记录到的唯一的正极云到地雷击，该结果发表在 *Electra* 杂志第 41 期上。原文的协作者之一 (R.B. Anderson 先生) 也是 *Electra* 69 文章的作家。他揭开了 Berger 所报告的那些“正极云 - 到 - 地”数据的历史。Elektra 69 的第 81 页解释道：“Berger 最近已经指出，来自这一个观察站的所有的正极记录，事实上，应该被归类为向上的放电。”而且在第 84 页他作了以下强调：“注意：Berger 以及其他人在 1975 年 (*Electra* 41) 对正极闪电的参数进行了原始的分析 - 但是基于这些是向下的闪电的假设。在他的新的分析中，他延伸了正极闪电的数据样本而且将这些记录分类为向上闪电。结果，脉冲特性为正极向下的闪电显然地没有全面的数据来源。”
- <sup>36</sup> Glushakow, B 和 Neri, D, 关于电涌防护设备的测试波形标准化的呼吁，发表于 2004 年法国 Avignon 的法国电防雷护国际会议 (ICLP) 上。
- <sup>37</sup> C62.41.2<sup>TM</sup>-2002 低压交流电源电路的电涌 (防护) 实践建议第 32 页。
- <sup>38</sup> 法国防雷协会发行的数据表第 1-2000 年 9 月号。
- <sup>39</sup> Liu Ji, Ma Hongda, Hu Changxin, Wang Yili, Liu Yuanyuan, Zhang Jianping, 技术：高速列车的雷电防护研究，*中国防雷杂志* 2005 年第 6 期。第 16 页。
- <sup>40</sup> Bouquegneau, C, IEC 技术委员会 TC 81 主席，国际雷电防护标准的检讨，2005。
- <sup>41</sup> Wada, A., Yokoyama, S., Numata, T., Ishibashi, Y., Hirose, T. 日本冬季风力涡轮发电机风叶的雷电损坏。发表于 2004 年法国 Avignon 之雷电保护国际会议中。
- <sup>42</sup> Yasuhiro Shiraishi, Y., Otsuka, T., Matsuura, H., 风力涡轮发电机系统直击雷击电流的观察，发表于 2004 年第 27 届国际防雷会议。
- <sup>43</sup> Glushakow 和 Neri, 关于电涌防护设备的测试波形标准化的呼吁，发表于 2004 年法国 Avignon 的法国电防雷护国际会议 (ICLP) 上。
- <sup>44</sup> 电涌防护器等效测试波形之 8/20 与 10/350 波形的真实性检验比较，由电涌防护器协会第 3.6.4 工作组所赞助的一个特别工作小组编写，并在 2006 年 6 月 18 日在加拿蒙特利尔召开的电器和电子工程师协会 PES 一般会议上被发表。
- <sup>45</sup> 英国风能协会，*健康和利用风能的最佳实践指南*，2005 年 4 月，第 52 页。
- <sup>46</sup> Dodd, C., McCalla, T., 及 Smith, J.G, *如何保护风力涡轮发电机免遭雷击*，国家航空及空间管理，(DOE/NASA 0007-1) (NASA-CR-168229) 1983 年 9 月。
- <sup>47</sup> IEC TR 61000-5-2: 1997: 电磁兼容性 (EMC)- 第 5 部份：安装及缓解指南 - 第 2 节：接地及线缆连接。
- <sup>48</sup> NREL 2002 报告：除了记录损坏的事故外，还存在着经常性的非硬件损坏的故障报告的事实。这被归因于在夜晚引起的控制器问题的间接的雷击。没有发现损坏，但是风力涡轮发电机停机，而且控制器必须在早晨被重置。这造成了数以百小时计的涡轮发电时数的损失。