

# 缆索承重桥的缆索防雷技术研究

李良福<sup>1,2</sup> 覃彬全<sup>1,3</sup> 杨磊<sup>1,3</sup> 糜翔<sup>1,3</sup> 刘青松<sup>1,3</sup>

(1 重庆市雷电灾害鉴定与防御工程技术研究中心, 重庆 401147; 2 重庆市气象局, 重庆 401147;

3 重庆市防雷中心, 重庆 401147)

**摘要:** 随着经济社会发展, 缆索承重桥的应用越来越普遍, 缆索是缆索承重桥受力核心构件, 其特殊布置容易被雷击。然而根据现行防雷技术规范, 桥梁设计和施工中通常只着重考虑索塔、主缆的防雷设计与施工, 使斜拉索、吊索存在较大雷击风险, 从而危及桥梁结构安全。为了避免斜拉索、吊索遭受雷击而损坏, 确保缆索承重桥防雷安全, 首先应用滚球法分析计算缆索承重桥遭受雷击的可能性, 计算表明缆索易遭受天面和侧面的雷击; 然后通过国家标准推荐的短时雷击和长时间雷击两种雷击试验波形对三个桥梁缆索样品进行了多次冲击试验, 表明短时雷击对缆索使用寿命影响不显著, 长时间雷击是影响缆索使用寿命的主要因素, 甚至可能导致缆索断裂; 进而提出缆索承重桥缆索的防雷措施。

**关键词:** 缆索承重桥, 缆索, 防雷

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.02.005

## Research on Cable Lightning Protection Technology of Cable Supported Bridge

Li Liangfu<sup>1,2</sup>, Qin Binquan<sup>1,3</sup>, Yang Lei<sup>1,3</sup>, Mi Xiang<sup>1,3</sup>, Liu Qingsong<sup>1,4</sup>

(1 Chongqing Engineering Research Centre for Lightning Disaster Identification and Prevention, Chongqing 401147

2 Chongqing Meteorological Bureau, Chongqing 401147

3 Chongqing Lightning Protection Centre, Chongqing 401147)

**Abstract:** With the economic and social development, the application of cable supported bridges is becoming more and more common. Cables are the core loaded members of cable supported bridges, due to their special location and features. Cables are vulnerable to lightning strokes. However, under existing lightning protection technical specification, and in the design and construction of bridges attention is usually only paid to the lightning protection design and construction of cable bent tower and main cable which can sustain the lightning strokes and sling in a high risk of lightning strike, thus endangering the safety of bridge structures. In order to protect stay cable and sling from lightning strike and ensure the lightning protection of cable supported bridges, calculations of the possibilities of lightning stroke on the cable supported bridges should be calculated by using the analysis of the rolling sphere method. Results show that cables are vulnerable to roof and side lightning strokes. Through multiple shock tests on three bridge cable samples relying on short-time and long-time lightning stroke test waveforms recommended by the national standard, it is shown that short-time lightning strokes have an indistinctive influence on the service life of cables while long-time lightning strokes are major factors influencing the service life of cables and even result in the rupture of cables. Therefore, lightning protection measures are taken and suggested for the cables used for cable supported bridges.

**Keywords:** cable supported bridge, cable, lightning protection

### 0 引言

桥梁按其受力构件的力学特征可分为梁式桥、拱桥、钢架桥和缆索承重桥, 而缆索承重桥是现代大跨度桥梁的重要结构形式, 尤其在跨越峡谷、海湾、大江、大河等不易修筑桥墩处架设大跨径特大桥梁时, 往往都选择缆索承重桥型。缆索承重桥可分为斜拉桥和悬索桥两种, 斜拉桥受力特点为外荷载从梁传递到

斜拉索, 再到索塔; 悬索桥受力特点为外荷载从梁经过吊索传递到主缆, 再到两端锚锭。因此斜拉索及主缆和吊索分别是斜拉桥和悬索桥受力核心构件(图1), 所以缆索承重桥的缆索是指斜拉索及主缆和吊索。然而根据现行防雷技术规范, 桥梁设计和施工中通常只着重考虑索塔、主缆的防雷设计与施工<sup>[1]</sup>, 使斜拉索、吊索存在较大雷击风险, 从而危及桥梁结构安全<sup>[2-3]</sup>。为了避免斜拉索、吊索遭受雷击造成损坏, 确保缆索承重桥防雷安全, 有必要对缆索承重桥的缆索防雷措施进行研究。

收稿日期: 2013年7月31日; 修回日期: 2013年12月13日

第一作者: 李良福(1963—), Email: lilf@cma.gov.cn

资助信息: 重庆市科技平台与基地建设项目(cstc2013pt-gc00001)

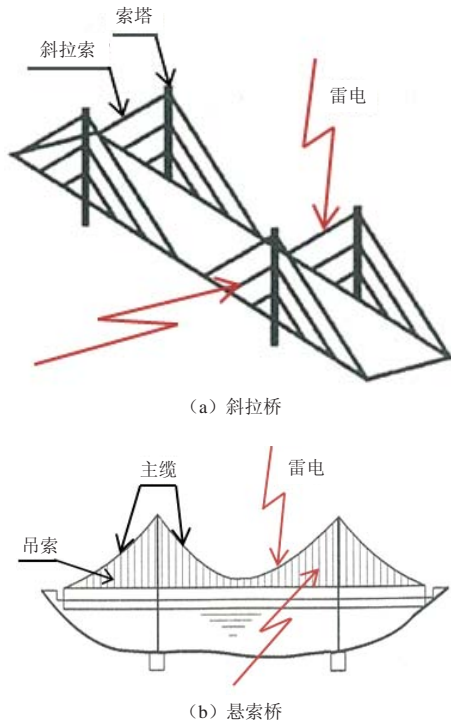


图1 缆索承重桥受力构件示意图

## 1 缆索遭受雷击可能性分析

由于目前缆索承重桥梁设计和施工中通常只重点考虑索塔和主缆的防雷，因此不时有缆索承重桥梁的缆索遭受雷击的报道。例如，2009年检修人员在对广东省番禺某大桥的斜拉索进行检修时，发现大桥顶部一根斜拉索因雷击导致斜拉索的钢拉丝及高密度聚乙烯保护层损坏的现象；2005年世界上最长斜拉桥之一的希腊跨海大桥发生了因雷击导致一根斜拉索断裂事故。缆索承重桥梁按照《建筑物防雷设计规范》（GB5007—2010）规定属于第二类防雷建筑物<sup>[4]</sup>，应采用45m滚球确定其索塔接闪器的保护范围。因此，悬索桥的主缆和斜拉桥的斜拉索容易遭受从桥梁上空方向而来的雷电的直击雷击；同时悬索桥的吊索和斜拉桥的斜拉索也易遭受从桥梁侧面方向而来的雷电的侧击雷击，其易遭侧击雷击的高度（ $H$ ，单位：m）可根据以下两种情况计算。

### 1.1 索面垂直于桥面的计算公式

垂直于桥面的斜拉索面或吊索面防侧击雷击保护范围如图2，其防侧击雷击保护范围通过式（1）确定：

$$H = \sqrt{h_r^2 - (h_r - b)^2} + h \quad (1)$$

式中， $H$ 为雷电侧击高度（单位：m）。 $A$ 、 $B$ 点分别为滚球（半径为45m）与桥面灯杆（或栏杆）和索面的切点。 $h_r$ 为桥梁滚球半径（45m）。 $b$ 为索面距桥面

外侧灯杆或栏杆 $C$ 、 $D$ 点之间的宽度（单位：m），悬索桥的吊索面的 $b$ 一般为0；而斜拉桥的斜拉索面的 $b$ 可为0，也可不为0。 $h$ 为桥面外侧灯杆或栏杆 $B$ 、 $C$ 点之间的高度（单位：m）。

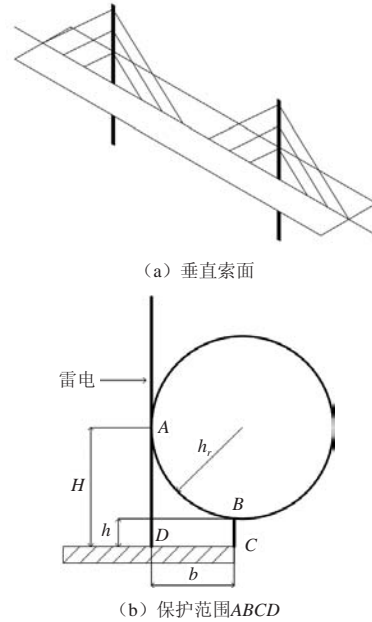


图2 垂直于桥面防侧击雷保护范围示意图

### 1.2 索面不垂直于桥面的计算公式

不垂直于桥面的斜拉索面或吊索面防侧击雷击保护范围如图3，其防侧击雷击保护范围根据式（2）确定：

$$H = \sqrt{h_r^2 - [h_r - \sin(\pi - \theta - \arctg \frac{h}{b}) \sqrt{b^2 + h^2}]^2} + \cos(\pi - \theta - \arctg \frac{h}{b}) \sqrt{b^2 + h^2} \quad (2)$$

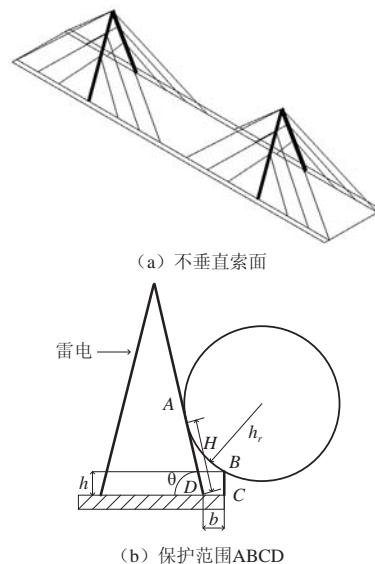


图3 不垂直于桥面防侧击雷保护范围示意图

式中,  $H$ 为闪电侧击高度(单位: m),  $A$ 、 $B$ 点分别为滚球(半径为45m)与桥面灯杆(或栏杆)和索面的切点;  $h_r$ 为桥梁滚球半径(45m);  $\theta$ 为桥面与索面夹角(单位:  $^\circ$ );  $h$ 为桥面外侧灯杆或栏杆 $B$ 、 $C$ 点之间的高度(单位: m);  $b$ 为索面外侧灯杆或栏杆 $C$ 、 $D$ 点之间的宽度(单位: m)。

上述分析表明缆索承重桥的斜拉索和主缆、吊索容易遭受天面和侧面的雷击, 须采取相应的防直击和侧击措施。

## 2 缆索遭受雷击危害性分析

根据有关技术标准的规定<sup>[5-8]</sup>, 斜拉桥的斜拉索由若干根 $\Phi 5$ 或 $\Phi 7$ 的桥梁缆索用热镀锌钢丝平行集束构成, 斜拉索钢丝束外包高密度聚乙烯为防腐保护层(图4)。悬索桥的主缆和吊索有两种方式构成索体, 一是采用若干根 $\Phi 5$ 或 $\Phi 7$ 的桥梁缆索用热镀锌钢丝平行集束为索体; 二是吊索采用优质钢芯钢丝绳为索体, 而主缆采用钢绞线为索体。索体防腐保护层是依据委托方要求, 可采用环氧树脂、聚氨酯、沥青、橡胶、聚乙烯或高密度聚乙烯等为防腐保护层(图5)。

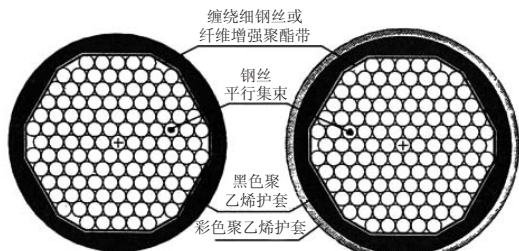


图4 斜拉桥的斜拉索断面结构示意图

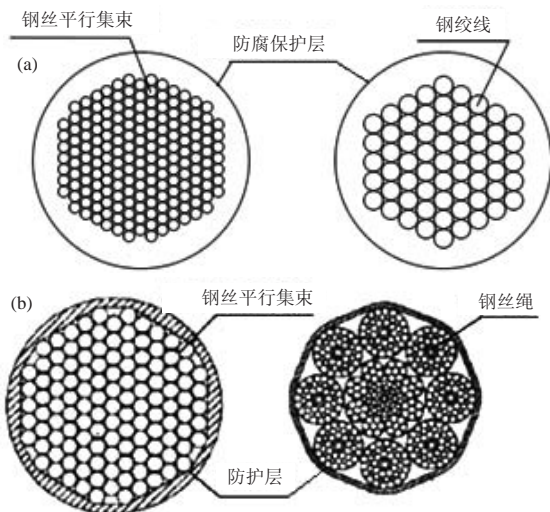


图5 悬索桥的主缆(a)和吊索(b)断面结构示意图

由于自然界可能出现的雷击有短时首次雷击、首次以后短时后续雷击、长时间雷击三种方式, 其雷击参数的定义应符合图6的规定<sup>[4]</sup>, 因此分析缆索遭受雷

击危害性, 主要是分析短时雷击和长时间雷击的雷击参数对缆索的影响。

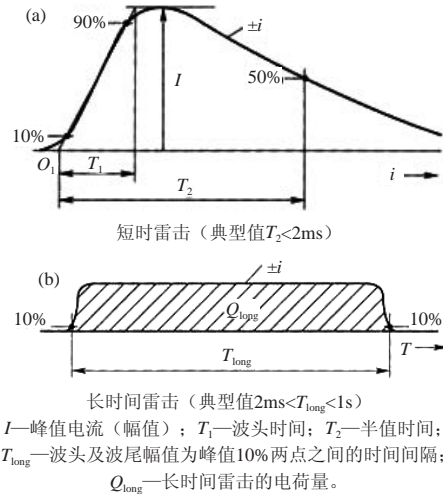


图6 短时雷击(a)和长时间雷击(b)的参数定义

根据图6规定的雷电流波形, 对桥梁用的高强度钢丝进行了模拟雷击试验分析(图7)。试验对象为: (1)桥梁用高强度钢丝样品A( $\Phi=5.1\text{mm}$ ), (2)包裹2mm厚高密度聚乙烯保护层的斜拉索样品B(内部7股高强度钢丝, 每股 $\Phi=5.1\text{mm}$ ), (3)包裹7mm厚高密度聚乙烯保护层的斜拉索样品C(内部55股高强度钢丝, 每股 $\Phi=5.1\text{mm}$ )。采用重庆市雷电灾害鉴定与防御工程技术研究中心的冲击电流发生系统作为实验装置, 其最大可产生幅值为200kA的8/20 $\mu\text{s}$ 波形短时雷电流以及电荷量200C左右的长时间雷电流。试验方案为: 分别对试验样品施加短时及长时间雷电流。短时雷电流雷击试验时, 分别对样品施加1次、连续5次、连续10次、连续18次等短时雷电流,

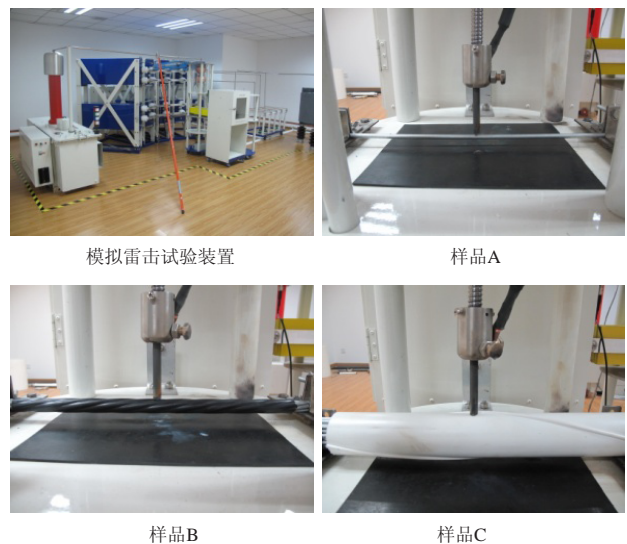


图7 桥梁拉索模拟雷电冲击试验



经过红外测温仪测量，每次冲击试验后试样冷却到常温大概在10min左右，为使试样在每次试验后能冷却到常温以便进行下一次试验，两次连续施加短时雷电流试验的时间间隔为30min；长时间雷电流雷击试验时，通过改变试验电荷量对样品分别进行试验，试验电荷量由小到大依次增加，观察记录试验样品表面受损情况，并对试验后受损的样品进行抗拉强度试验，与试验前完好样品的抗拉强度进行对比分析，以判定长时间雷电流对高强度钢丝抗拉强度的影响情况。

模拟雷击试验结果：一是对比不同峰值短时雷电

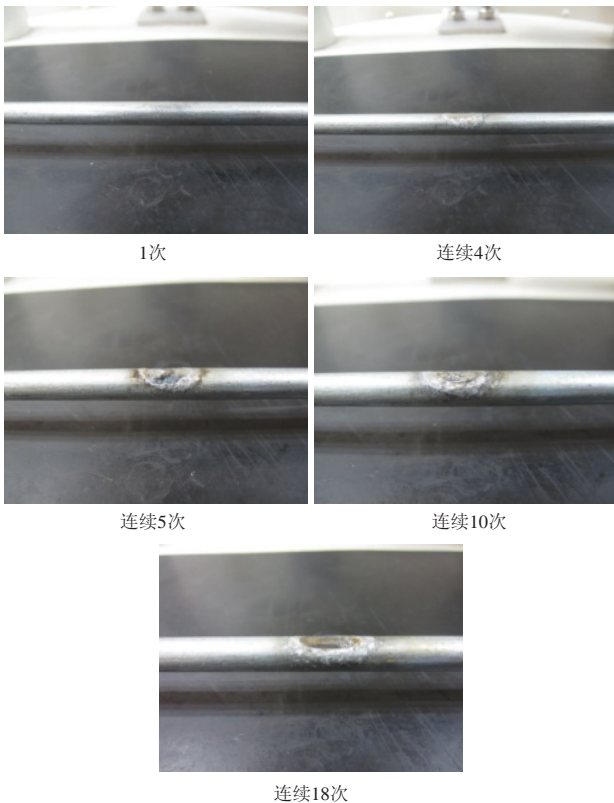


图8 不同次数峰值40kA雷电流短时雷击试验痕迹图片

保护层对高强度钢丝起到了保护作用。

同时也对严重烧蚀的样品A进行抗拉强度试验和微观分析（图10），其试验结果证实了长时间雷击使

流雷击样品A、B、C时，样品B、C无任何变化，而样品A仅仅出现雷击的痕迹，即使是连续18次对同一样品A的同一位置进行模拟雷击试验，其直接损害仅限于样品A的镀锌层（已熔化）内，对样品A的钢材部分无任何影响（图8）；二是对比不同峰值长时间雷电流雷击样品A、B、C时，当长时间雷击电荷量达到39.84C时，样品A出现雷击痕迹，并随着长时间雷击转移电荷量的增加，样品A出现严重烧蚀现象，其镀锌层熔化并且样品A的钢材部分损毁严重，而样品B、C无任何变化（图9），即包裹着的高密度聚乙烯

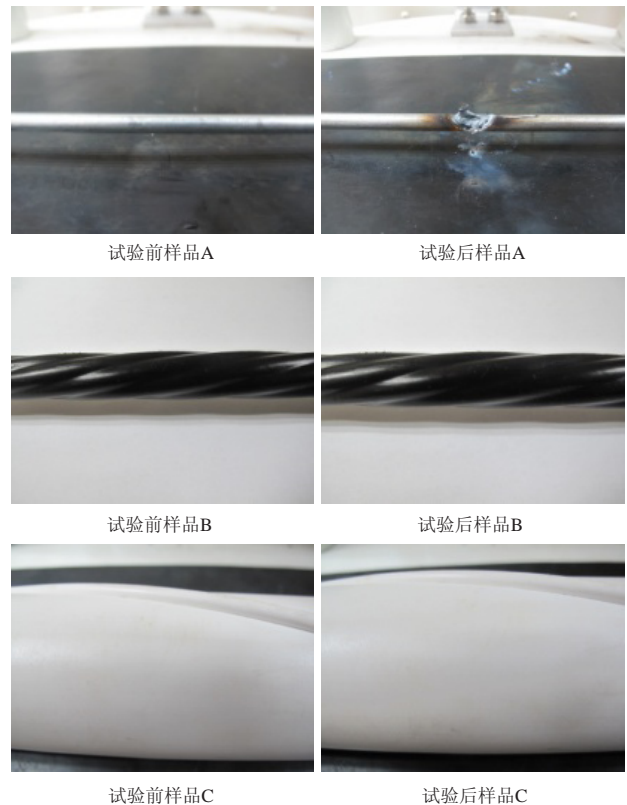


图9 不同样品在电流336A转移电荷176.7C持续526ms的长时间雷击下的试验痕迹图片

得样品A在雷击点形成电弧坑的金属熔化后的凝固区存在电弧气孔、电弧裂纹，并且由于电弧坑、气孔、裂纹等三种电弧侵蚀的耦合效应导致实验后样品A

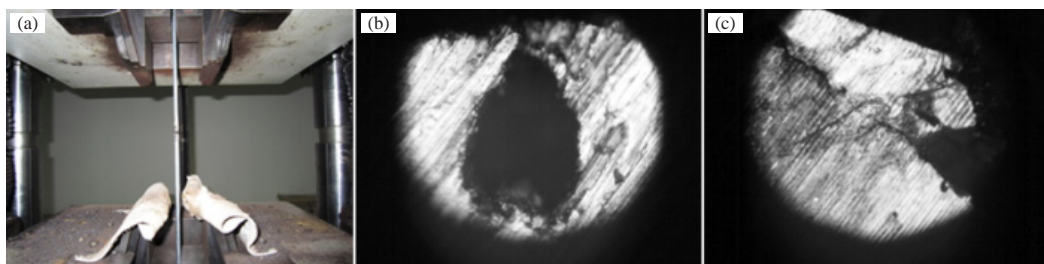


图10 对实验后的样品A进行抗拉强度实验（a）及电弧坑凝固区中的电弧气孔（b）、电弧裂纹（c）

的抗拉强度仅为试验前的44.4%，使其抗拉强度不合格。上述试验结论与Sales等<sup>[9]</sup>的研究“短时雷击不会对光缆造成损坏，长时间雷击对光缆造成损害最大，转移电荷量越大，对光缆的损害也越大，并且当167C转移电荷量时，OPGW（88A26z）光缆抗拉强度仅为试验前40%”的结论完全一致；并且还和胡毅等<sup>[10]</sup>的研究客观事实一致——对OPGW光缆雷击断股事现场取回的OPGW雷击断股样品进行了微观检测，在研究其机理时发现的OPGW雷击断股样品断口处有大量气孔、熔坑和熔渣。因此长时间雷击对高强度钢丝的抗拉强度的影响显著。根据Rousseau等<sup>[3]</sup>在多国实验室

对桥梁缆索样品进行的长时间雷击试验表明：只有长时间持续电流转移电荷大于500C的雷击，才有可能使缆索样品的高密度聚乙烯保护层被引燃（图11）。一旦保护层的火花大到足够自燃，热量就会传递给桥梁缆索保护层内的钢丝平行集束，将导致钢丝平行集束在接连不断的高温和张力的双重效应下发生断裂。另有关研究<sup>[11-12]</sup>表明，雷电长时间雷击转移电荷量大于40C的地闪累积概率在20%~30%，大于350C地闪累积概率小于5%，而2005年希腊跨海大桥雷击事件表明自然界的确存在长时间雷击转移电荷大于500C的雷击事件。

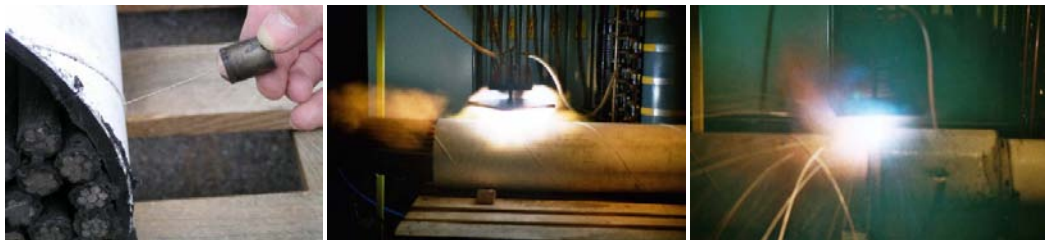


图11 Rousseau等<sup>[3]</sup>对桥梁缆索样品进行的长时间雷击试验

上述试验结果分析表明：1) 雷电短时雷击的能量不足以击穿桥梁缆索高密度聚乙烯管道保护层，即使雷击到无高密度聚乙烯管道保护层的桥梁高强度钢丝，由于雷电脉冲能量通过接地被转移，不会对桥梁高强度钢丝性能造成严重影响；2) 雷电长时间雷击的能量对无保护层的裸体桥梁高强度钢丝有20%~30%概率产生严重烧蚀的电弧放电现象，导致桥梁高强度钢丝受到严重损坏，但可以通过绝缘阻燃的高密度聚乙烯管道保护层进行防护；3) 当出现概率小于5%的长时间且转移电荷量大于500C的雷击时，会导致桥梁缆索的高密度聚乙烯管道保护层被引燃，使得桥梁缆索在接连不断的高温和张力的双重效应下发生断裂，因此需在悬索桥主缆和斜拉桥外缘斜拉索明敷接闪带，并在桥面横向外侧面沿斜拉索、吊索平行或垂直方向明敷接闪带，以减少桥梁缆索雷击概率。综上所述：长时间雷击是影响缆索承重桥的缆索使用寿命的主要因素，有时甚至导致缆索承重桥的缆索断裂。

### 3 缆索防雷措施

1) 缆索承重桥的斜拉索、主缆与吊索的高强度钢丝应防雷接地并设置阻燃、绝缘的高密度聚乙烯护套保护层（厚度应符合GB/T 18365—2001<sup>[5]</sup>的要求），以防止20%~30%雷电直接击到斜拉索、主缆与吊索的高强度钢丝，使其抗拉强度降低，影响桥梁防雷安全。

2) 悬索桥主缆和斜拉桥外缘斜拉索应明敷接闪带，以防范从桥梁上空方向而来的直击雷击。接闪带安装方法：斜拉桥外缘斜拉索应每间隔2m设置抱箍形式接闪带支持架，接闪带两端应分别与索塔和桥面防雷装置可靠电气连接，同时应考虑接闪带与斜拉索之间膨胀系数差异的影响；悬索桥可利用通过螺栓或焊接连接形成电气连通的主缆检修通道两侧金属护栏作为接闪带。

3) 在缆索承重桥的桥面横向外侧面沿斜拉索、吊索平行或垂直方向明敷接闪带，以防范从桥梁侧面而来的侧击雷击。接闪带间距不应大于10m，并应考虑接闪带与主缆、斜拉索之间膨胀系数差异的影响；其安装方法同斜拉桥外缘斜拉索接闪带安装方法。

### 4 结论

1) 缆索承重桥的斜拉索和主缆、吊索容易遭受天面和侧面的雷击，须采取相应的防直击和侧击措施。

2) 雷电短时雷击能量对缆索承重桥缆索使用寿命影响不显著；而长时间雷击能量是影响缆索承重桥的缆索使用寿命的主要因素，有时甚至导致缆索承重桥的缆索断裂。

3) 缆索承重桥的斜拉索、主缆与吊索的高强度钢丝必须防雷接地并设置绝缘阻燃的高密度聚乙烯护套保护层，确保桥梁安全。

4) 缆索承重桥的斜拉索、主缆与吊索应采取防范措施从桥梁上空方向而来的雷电直击和从桥梁侧面

而来的雷电侧击，以防概率小于5%的长时间且转移电荷量大于500C的雷击危害。

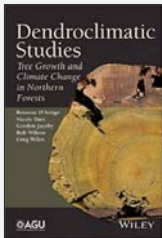
**参考文献**

[1] 徐鑫,周红. 东海大桥综合防雷工程的设计. 低压电器, 2006(10): 28-30, 38.  
 [2] 彭锦荣,郭志勇,张健波,等. 斜拉索桥梁中拉索的防雷设计要点. 气象研究与应用, 2010, 31(S2): 161-175.  
 [3] Rousseau A, Boutillon L, Huynh A. Lightning protection of a cable-stayed bridge. 28th International Conference on Lightning Protection, 2006.  
 [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB50057—2010 建筑物防雷设计规范. 北京: 中国计划出版社, 2011.  
 [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18365—

2001斜拉桥热挤聚乙烯高强度钢丝拉索技术条件. 北京: 中国标准出版社, 2001.  
 [6] 中华人民共和国交通部. JT/T395—1999悬索桥预制主缆丝胶技术条件. 北京: 人民交通出版社, 2000.  
 [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国标准化化管理委员会. GB/T17101—2008桥梁缆索用热镀锌钢丝. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
 [8] 中华人民共和国交通部. JT/T 449—2001公路悬索桥吊索. 北京: 人民交通出版社, 2000.  
 [9] Sales L R, Martin J, Ginocchio A. 光纤复合架空地线(OPGW)雷击试验及分析. 电力系统通信, 2004, (5): 1-5.  
 [10] 胡毅, 叶廷路, 汪峰, 等. OPGW断股的微观检测及机理分析. 高电压技术, 2005, 31(10): 6-8, 26.  
 [11] 孙景群. 大气电学基础. 北京: 气象出版社, 1987.  
 [12] Golge R H. 雷电(上卷). 周诗健, 孙景群, 译. 北京: 电力工业出版社, 1982.

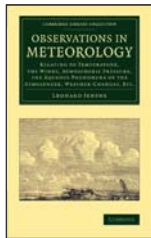
**新书架**  
**NEW BOOK**

感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



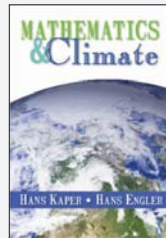
**Dendroclimatic Studies: Tree Growth and Climate Change in Northern Forests**  
《年轻气候学研究：北方森林树木生长与气候变化》

编著者: Rosanne D'Arrigo等  
 出版者: American Geophysical Union  
 出版年: 2014



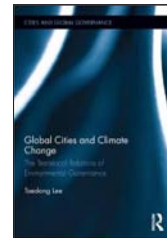
**Observations in Meteorology: Relating to Temperature, the Winds, Atmospheric Pressure, the Aqueous Phenomena of the Atmosphere, Weather-Changes, etc.**  
《气象学观测：关于温度、风、气压、水汽和天气变化等》

编著者: Leonard Jenyns  
 出版者: Cambridge University Press  
 出版年: 2014



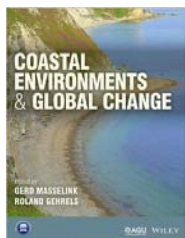
**Mathematics and Climate**  
《数学与气候》

编著者: Hans Kaper等  
 出版者: Society for Industrial & Applied Mathematics, U.S  
 出版年: 2013



**Global Cities and Climate Change: The Translocal Relations of Environmental Governance**  
《全球城市与气候变化：环境治理跨地域关系》

编著者: Taedong Lee  
 出版者: Routledge  
 出版年: 2014



**Coastal Environments and Global Change**  
《沿海环境与全球变化》

编著者: Gerd Masselink等  
 出版者: Wiley-Blackwell  
 出版年: 2014



**《大气组成变化及其影响与对策研究》**

编著者: 石广玉等  
 出版者: 气象出版社  
 出版年: 2014



**《低频天气图延伸期过程预报方法》**

编著者: 孙国武等  
 出版者: 中国环境出版社  
 出版年: 2014



**《地面气象观测》**

编著者: 闫瑛等  
 出版者: 气象出版社  
 出版年: 2014