



湖北省学术著作出版专项资金资助项目
工程前沿学术研究著作丛书(第1期)

斜拉桥三维覆冰拉索 驰振特性研究

Study on Galloping Characteristics of 3D Stay Cables
with Iced Accretion of Large-Span Cable-Stayed Bridge

谭冬梅 杨万庆 等 编著



武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press



湖北省学术著作出版专项资金资助项目

土木工程前沿学术研究著作丛书(第1期)

斜拉桥三维覆冰拉索 弛振特性研究

谭冬梅 杨万庆 等 编著

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

内 容 简 介

本书共分13章。内容包括:绪论,CFD数值模拟基本理论,三维新月形覆冰直索数值模拟,三维新月形覆冰斜拉索数值模拟,三维扇形覆冰直索和斜拉索数值模拟,三维变截面新月形覆冰直索数值模拟,三维变截面新月形覆冰斜拉索数值模拟,三维变截面D形覆冰斜拉索数值模拟,三维扇形覆冰双索尾流驰振数值模拟,三维扇形覆冰双索对比模型尾流驰振数值模拟,索距为4倍索径三维新月形覆冰双索数值模拟,索距为16倍索径三维新月形覆冰双索数值模拟,索距为4倍索径三维D形覆冰双索数值模拟。

图书在版编目(CIP)数据

斜拉桥三维覆冰拉索驰振特性研究/谭冬梅,杨万庆等编著. —武汉:武汉理工大学出版社,2018.7

ISBN 978-7-5629-5833-8

I. ①斜… II. ①谭… ②杨… III. ①斜拉桥—研究 IV. ①U448.27

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第156178号

项目负责人:杨万庆

责任编辑:王一维

责任校对:余士龙

封面设计:许伶俐

出版发行:武汉理工大学出版社

地址:武汉市洪山区珞狮路122号

邮编:430070

网址:<http://www.wutp.com.cn>

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:荆州市鸿盛印务有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:10.125

字 数:166千字

版 次:2018年7月第1版

印 次:2018年7月第1次印刷

印 数:1~1000册

定 价:58.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87391631 87664138 87785758 87165708(传真)

• 版权所有,盗版必究 •

前 言

在本书中,简要介绍了斜拉桥覆冰拉索的研究现状、CFD 数值模拟基本理论以及三维典型覆冰类型拉索驰振特性研究(其中研究的典型覆冰类型有新月形、D 形及扇形;拉索分为直索、斜拉索及双索),为拉索的覆冰研究提供了大量的理论数据。

参与本书编写的有谭冬梅、杨万庆、王凯丽、邵强华、罗素珍、李晓敏、吴浩。由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,热忱期望读者批评指正。

编 者
2018 年 3 月

目 录

1	绪论	1
1.1	引言	1
1.2	斜拉索的风致振动形式	2
1.3	驰振机理研究发展概况	4
1.4	驰振研究方法	5
1.5	覆冰导线的驰振研究	7
1.6	覆冰斜拉索的驰振研究	11
	参考文献	14
2	CFD 数值模拟基本理论	17
2.1	CFD 概述	17
2.2	CFD 的优缺点	17
2.3	CFD 求解问题流程	17
2.4	CFD 控制方程	19
3	三维新月形覆冰直索数值模拟	21
3.1	概述	21
3.2	三维新月形覆冰直索模型建立与数值模拟方法	23
3.3	三维新月形覆冰直索数值模拟结果	26
	本章小结	31
	参考文献	32
4	三维新月形覆冰斜拉索数值模拟	33
4.1	概述	33
4.2	三维新月形覆冰斜拉索模型建立与数值模拟方法	34
4.3	三维新月形覆冰斜拉索数值模拟结果	36
	本章小结	47
5	三维扇形覆冰直索和斜拉索数值模拟	49
5.1	概述	49

5.2	三维扇形覆冰拉索模型建立与数值模拟方法	49
5.3	三维扇形覆冰拉索数值模拟结果	51
	本章小结	55
	参考文献	56
6	三维变截面新月形覆冰直索数值模拟	57
6.1	概述	57
6.2	三维变截面新月形覆冰直索模型建立与数值模拟方法	57
6.3	三维变截面新月形覆冰直索数值模拟结果	59
	本章小结	67
7	三维变截面新月形覆冰斜拉索数值模拟	69
7.1	概述	69
7.2	三维变截面新月形覆冰斜拉索模型建立与数值模拟方法	69
7.3	三维变截面新月形覆冰斜拉索数值模拟结果	71
	本章小结	86
	参考文献	87
8	三维变截面 D 形覆冰斜拉索数值模拟	88
8.1	概述	88
8.2	三维变截面 D 形覆冰斜拉索模型建立与数值模拟方法	88
8.3	三维变截面 D 形覆冰斜拉索数值模拟结果	90
	本章小结	105
9	三维扇形覆冰双索尾流驰振数值模拟	106
9.1	概述	106
9.2	双圆柱绕流研究现状	106
9.3	三维扇形覆冰双索模型建立与数值模拟方法	109
9.4	三维扇形覆冰双索数值模拟结果	110
	本章小结	116
	参考文献	117
10	三维扇形覆冰双索对比模型尾流驰振数值模拟	118
10.1	概述	118
10.2	三维扇形覆冰双索对比模型建立与数值模拟方法	118
10.3	三维扇形覆冰双索对比模型数值模拟结果	120
	本章小结	128

参考文献	129
11 索距为 4 倍索径三维新月形覆冰双索数值模拟	130
11.1 概述	130
11.2 索距为 4 倍索径三维新月形覆冰双索模型建立与数值模拟方法	130
11.3 索距为 4 倍索径三维新月形覆冰双索数值模拟结果	132
本章小结	137
12 索距为 16 倍索径三维新月形覆冰双索数值模拟	139
12.1 概述	139
12.2 索距为 16 倍索径三维新月形覆冰双索模型建立与数值模拟方法	139
12.3 索距为 16 倍索径三维新月形覆冰双索数值模拟结果	140
本章小结	145
参考文献	145
13 索距为 4 倍索径三维 D 形覆冰双索数值模拟	146
13.1 概述	146
13.2 索距为 4 倍索径三维 D 形覆冰双索模型建立与数值模拟方法	146
13.3 索距为 4 倍索径三维 D 形覆冰双索数值模拟结果	147
本章小结	152

1 绪 论

1.1 引言

随着社会和科技的进步,以及国民经济的发展,通过使用高强度材料、改进施工方法和应用有限元技术,世界各地兴建了一大批跨海跨江工程。悬索桥、斜拉桥和拱桥是常见的大跨度桥梁形式,其中斜拉桥具有梁体内弯矩小、桥体质量轻、外形美观等优点,采用最为广泛。在我国由于实际工程建设需要,对桥梁的跨度提出了越来越高的要求。在 20 世纪,分别建成了跨度 602 m 的斜拉桥——杨浦大桥、跨度超过 1000 m 的悬索桥——江阴长江大桥^[1]。21 世纪,大跨度桥梁设计技术越来越成熟,建成了上百座大跨度桥梁,其中包括主跨超过 1000 m 的斜拉桥——苏通大桥,以及主跨超过 1600 m 的悬索桥——西堠门大桥。而大跨度斜拉桥主要通过斜拉索传递荷载,斜拉索作为主要受力构件,其安全性直接影响到桥梁的整体安全性,因此,确保大跨度斜拉桥斜拉索的安全性是十分重要的。

因为自然中大气的热力、动力在时间和空间上的不均匀性,致使同一高度上两点之间产生压力差,从而产生风^[2]。风灾对桥梁的破坏不仅只发生在强风条件时,往往还发生在弱风的情况下,因为弱风引起桥梁产生长时间的风振动,使桥梁在反复振动作用下产生疲劳损伤,威胁其安全。1879 年到 1889 年这十年间,由于大跨桥梁接二连三地受到风毁以及高耸建筑物对抗风的要求,许多国外学者开始了对桥梁风压的研究,埃菲尔首次尝试利用风洞试验测试塔的风压大小,并于 1909 年成立风力研究所,测试结构物上由风压产生的静力作用^[3]。以前,在进行桥梁设计时,仅仅将自然风作为静力荷载施加在桥梁上。1940 年,Tacoma 大桥在 8 级风的作用下,主梁如同布条一般发生大幅度的横向振动,最终大桥坍塌(Tacoma 大桥遭受破坏的图片见图 1-1),人们开始重视桥梁的风致响应。从此认为,桥梁结构不仅受平均风作用,还受到脉动风作用,脉动风是一种随时间随机变化的风,以动荷载的形式作用在桥梁结构

上,致使桥梁结构发生动力响应^[4]。当结构刚度较大时,风以静风荷载作用在桥梁结构上,不会引起结构的位移与振动,当结构跨度较大时,尤其对于超千米的大跨度结构而言,结构的刚度相对较小,风对结构产生动力作用,从而引起结构的振动响应。

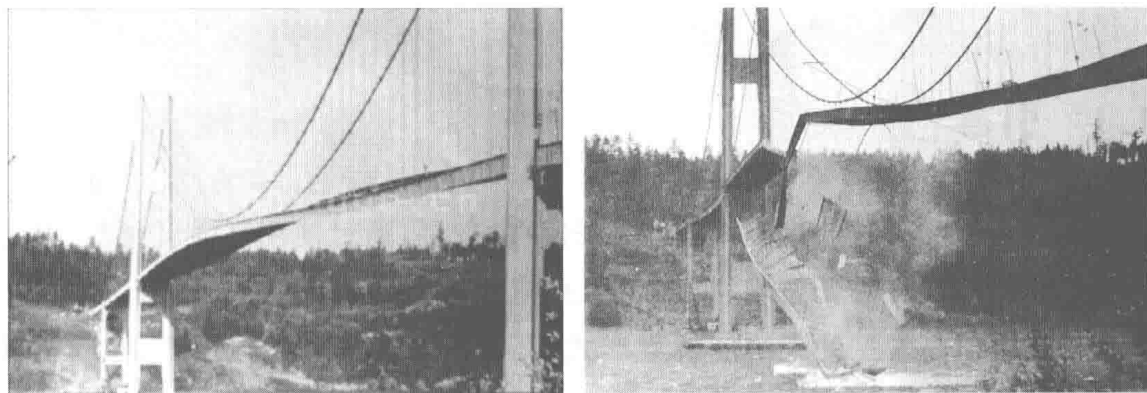


图 1-1 Tacoma 大桥遭受风毁

施工技术和现代材料的发展,促使斜拉桥的跨径越来越大,随之斜拉索越来越长,且越来越柔,并且斜拉索具有质量轻、阻尼小等特性,极易在风荷载的作用下产生振动,产生疲劳损伤破坏。比如德国的 Kohbrand 大桥就是由于斜拉索的振动产生了疲劳破坏;南京长江二桥因风雨激振,最大振幅超过 50 cm,最终造成斜拉索阻尼器的损坏。斜拉索是斜拉桥传递荷载的重要构件,关乎桥梁的整体安全,斜拉索造价几乎占到整个工程的 1/3,破坏会造成很大的经济损失,因此,有必要对斜拉索的风致振动进行深入的研究。

1.2 斜拉索的风致振动形式

因为桥梁斜拉索跨度大、直径小且固有频率较小等特点,在外部荷载作用下,斜拉索容易产生各种各样的振动形式。根据引起斜拉索振动的原因,可将斜拉索振动分为两类:一类是斜拉索气动性不稳定引起的风致振动,另一类是外部结构运动引起的非风致振动^[5]。风致振动包括:涡激振动、风雨激振、驰振(干索驰振、覆冰驰振、双索尾流驰振)、抖振。

1.2.1 涡激振动

斜拉索的涡激振动是一种共振现象,即斜拉索在风荷载作用下,在斜拉索

的后表面产生交替脱落的涡旋,此交替脱落的涡旋引起斜拉索的振动,当激励频率与斜拉索的某阶自振频率相等时,斜拉索产生共振现象。这种振动的起振风速较低,振幅不大,初期不会产生严重的后果,长时间的累积易使斜拉索产生疲劳破坏。

1.2.2 风雨激振

在 Meiko-Nishi 大桥上研究人员第一次观测到风雨激振现象^[6]。风雨交加的天气,雨水在斜拉索表面形成雨线,改变了斜拉索的气动外形,斜拉索在风的作用下发生大幅度、低频率振动,即风雨激振^[7]。在风雨激振的情况下,斜拉索发生的振幅是所有振动形式中最大的,极易引起斜拉索的疲劳破坏。风雨激振发生条件:风速一般为 $6\sim 18\text{ m/s}$;雨量大小不会影响振动的发生,但对振幅有较大影响;斜拉索的空间位置、包裹斜拉索的材质和斜拉索表面的灰尘对风雨激振的发生也有一定影响。这种振动一旦发生,振幅增加迅速,甚至会出现相邻斜拉索碰撞的糟糕状况。

1.2.3 驰振

驰振是指非圆截面细长结构,在风荷载作用下,产生一个顺风向的阻力作用及一个垂直于阻力方向的升力作用。当风速超过临界值时,空气产生气动负阻尼,使结构不断从外界吸收能量,促使振动不断增大增强,使结构产生极大振幅而丧失稳定,产生失稳破坏。驰振是一种不稳定的发散振动,这种振动最初发现于覆冰输电线,其振幅高达 10 倍输电线直径,对于斜拉桥结构中的细长结构,例如主梁、桥塔、斜拉索等都有可能发生驰振现象。根据引起驰振的原因,驰振分为干索驰振、覆冰驰振和双索尾流驰振。

(1) 干索驰振

在风荷载作用下,当斜拉索处于无水露及无覆冰的干燥情况,且风攻角处于特定范围内时,风速超过临界风速,斜拉索发生持续振动,此振动为发散性强迫振动,定义为干索驰振。温晓光等对干燥斜拉索进行了风洞试验,并利用三维数值模拟技术对试验进行验证和拟合,研究了干索发生驰振的原理及驰振影响因素^[8]。

(2) 覆冰驰振

冬季,雨淞、雾淞等在斜拉索表面形成不同形状的覆冰层,导致斜拉索的横

截面形状改变,斜拉索重心位置发生偏移,在风荷载作用下,出现风载与扭转的耦合作用,斜拉索出现两个方向的振动。当风速超过临界风速时,空气中出现气动负阻尼,斜拉索不断从外界吸收能量,加大自身的振动,此为斜拉索的覆冰驰振。

(3) 双索尾流驰振

双索尾流驰振是指串列放置的两根索,在风荷载作用下,下游索会受到上游索尾流的激发,而加大自身的振动,下游索的振动振幅不断加大,最终会在某一个大振幅下达到稳定振动,振幅不再加大。尾流驰振发生的原因是,在风荷载作用下,上游索的尾部会形成交替脱落的涡旋,如果下游索正好处于此尾流域内,会受到上游索尾流的影响,所以,斜拉索的间距对下游索尾流驰振影响明显。根据以往研究表明,当两索距离较近或较远时,均有可能发生下游索的尾流驰振现象,所以,尾流驰振根据斜拉索之间的距离远近分为近距失稳和远距失稳。

1.2.4 抖振

自然风可以分为平均风和脉动风^[4],斜拉索在脉动风作用下产生的振动,称为抖振。抖振不同于上述的几种风致振动,它是一种顺风向振动,风速越大,振幅越大,但有一定的幅度限制,不具有发散性。其起振风速低、振动频率高,斜拉索锚具随之产生疲劳破坏,安装阻尼器可以起到防范作用。

1.3 驰振机理研究发展概况

在1932年,Den Hartog给出了基于单自由度驰振模型的横风向驰振理论^[9-10],他认为受到风的作用后,模型在横风向上运动产生位移变量,在这种情况下,驰振模型与风速方向的相对风向角发生改变,进而引起模型气动力的变化。此理论第一次提出了驰振是一种极不稳定的自激振动,这个理论是预测驰振发生、估算驰振响应的主要依据。

在1981年,Nigol概括出扭转驰振理论^[11-12],此理论同样是由单自由度的驰振模型获得的,但是Nigol认为斜拉索自身的扭转是导致斜拉索与风速方向的相对风攻角有所变化的原因,随着相对风攻角的改变,如果斜拉索负气动阻尼的绝对值大于斜拉索的正气动阻尼,振动就会变得发散。

在 1992 年, Yu 给出了惯性耦合的失稳理论^[13-14], 在承认横风向驰振理论和扭转驰振理论是有可能发生的基础上, 他认为扭转向和垂直方向的联合作用可能导致斜拉索在某个方向上占主导的不稳定性振动。马文勇推导出覆冰输电线在任一风向下沿任一方向发生振动的单自由度驰振振动判别公式, 在理论方面证明了输电线具有产生顺风向驰振的可能^[15]。

1.4 驰振研究方法

目前, 对于大跨度桥梁抗风研究分析, 主要有 4 种方法, 即理论分析、现场实测、风洞试验和数值风洞研究。最先采用的分析方法是理论分析和现场实测, 由于这两种方法准确度较低且无法对驰振现象进行细致的分析, 所以, 后来随着科技的发展及设计的需要, 发展了风洞试验和数值风洞研究, 数值分析也从二维分析发展到三维数值分析。

1.4.1 理论分析

对于一个新的数值方法, 人们常采用理论分析方法计算解析解, 然后再与分析解进行比较, 为数值方法研究提供了理论基础, 但是对于风荷载, 由于其流场流动的复杂性, 往往很难获得解析解。

1.4.2 现场实测

现场实测是指在结构物上安装测试仪器, 在一定的时间段内采集自然风作用下结构的响应数据, 分析数据得到风致响应结论。现场实测是最初期的风工程研究方法, 也最为直接, 测得的数据与实际相符, 能进行风洞中无法开展的风致振动测试。实测数据为风洞试验、数值模拟提供初始条件的参考, 且能对两者的结果进行科学的验证。但现场实测耗费的人力、物力和时间较多, 受环境因素影响大, 且不能随时改变试验参数, 结果单一。

1.4.3 风洞试验

风洞试验是指在一个特制的管道系统内, 利用动力装置产生气流, 其风速、风向、紊流度等可以加以控制改变, 使其接近于真实的自然风环境, 用等比例缩小的模型模拟结构物, 测试结构物在风作用下的响应。在忽略一些不必要的因

素影响的情况下,风洞试验能够比较准确地模拟出实际大气的流动和对结构物的作用。并且,试验参数比较容易改变,可以方便学者们得出某个参数对试验的影响程度。风洞试验帮助人们积累了大量的数据,发展了风工程理论,解决了众多的实际工程问题。但风洞试验存在一定的缺点:由于风洞试验需要尽可能相似地模拟实际模型及实际气流环境,需要一定的成本;由于在风洞试验整个过程中,需要长期观察并记录相关数据,需要一定的时间;由于风洞试验将实际模型进行了一定比例的缩小,试验结果受到缩尺效应的影响。

1.4.4 数值风洞研究

(1) 数值模拟

数值模拟是指首先利用计算机技术建立虚拟模型,结合有限元原理,对模型进行处理,经过数值计算方法,得出相关的数据及图形,最后对数据及图形进行处理分析并得出相关结论,为实际工程及各类问题提供参考。随着计算机技术的发展,数值模拟技术日渐成熟,近年来,越来越多的人利用理论上可以达到理想试验条件的 CFD 数值仿真方法结合风洞试验进行结构气动特性分析。CFD 离散涡方法是一种二维无网格算法,可用于二维数值模拟,由于无法使用湍流模型,不宜用于三维数值模拟^[16]。Sun 等提出一种基于分块迭代耦合的 CFD 方法,该方法成功用于圆柱体的三维绕流分析以及钝体的二维湍流数值模拟^[17]。FLUENT 数值模拟软件被广泛应用到流体力学模型计算中,只是该方法在处理结构气动特性仿真中涉及的流体-固体耦合问题的准确性时稍有欠缺。CFD 数值模拟技术存在一定的缺点,如在计算上收敛性和精度有待改进,以及其他一些因素导致数值模拟结果与试验结果存在一定的差异,但数值模拟只对实际工程进行虚拟模拟,节省了一定的物力财力,且整个模拟过程周期较短。

(2) 数值风洞

数值风洞是将风洞试验与数值模拟结合起来,利用计算机模拟技术进行虚拟的风洞试验,首先,对比实际工程模型,建立相似的数值模型,设置相关的空气流动系数,结合 CFD 计算流体力学原理,选择合适的数值算法,对模型进行风洞的模拟,获得相关的空气动力系数及相关图像,能让我们更加直观地观测到模型的风洞结构。与传统的风洞试验相比,数值风洞由于不需要利用相关材料制作实体模型并模拟实际空气流环境,因此,数值模拟成本较低,数值风洞计

算周期较短且可以获得许多相关的图像信息及数据。对于需要模拟的各种实际工况,只需要在计算机中输入不同的相关系数,数值风洞更加方便便捷。随着计算机技术的发展,数值模拟将会慢慢克服自身理论缺陷趋于成熟,数值风洞将成为今后研究分析风工程的重要手段。

1.5 覆冰导线的驰振研究

1.5.1 覆冰机理

在寒冷冬天,暖湿空气与寒冷空气汇合,寒冷气流向向下流动,暖湿空气向上流动,因为较高处空气的气温较低,其含有的水分开始不断凝结,当暖湿气流中的水汽上升到凝结高度或 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 气温线以上的位置时,就会产生雪花或者形成覆冰的过冷却水滴。过冷却水滴与结构外表面碰触时容易在其上凝结,进而生成裹冰层,所以若空气中有许多过冷却水滴,就会出现雨淞、覆冰导线或者覆冰斜拉索等现象。如果空气中还具有尘埃颗粒,以此为媒介,比较大的过冷却水滴在下落的过程中就有可能变为冰粒落到地面上,而不会附着在输电线或者斜拉索上,因此不会对输电线路和斜拉索形成大的危害。而那些比较小的过冷却水滴,一方面因为其比较小的直径和外表面积,难以捕捉到大气中的尘埃颗粒,另一方面也由于其较大的曲率和表面张力,构成很难有所变化,因此,即使其温度很低,落到地面上仍能保持其原有的形态,也就是所说的“冻雨”。当过冷却水滴碰触到比较寒冷的结构时,因为其自身的不稳定性,又由于能量的加入,致使冰核形成,最终形成固态冰。另外,当过冷却水滴与输电线或者斜拉索碰撞以后,过冷却水滴发生了形状改变,其自身特性发生改变,便形成了覆冰输电线或者覆冰斜拉索^[18]。研究表明,覆冰是在低温条件下,保证空气的相对湿度达到 80% 以上,且风速达到 1 m/s ,由冷暖空气对流附着在表面温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 物体上形成的一种物理现象。由于冬季华中地区空气湿度大,极可能会出现雨雪边降边冻的现象,导线极易受覆冰灾害的影响,输电线、通信电缆和列车电缆严重结冰情况见图 1-2。

覆冰一般可分为雨淞和雾淞两大类,雨淞和雾淞的形成条件及性质存在较大的差异。雨淞是一种坚硬且黏结力极强的覆冰,是由冷暖空气对流形成的过冷却水滴,在风的作用下,与表面温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的导线接触形成的覆冰现象。

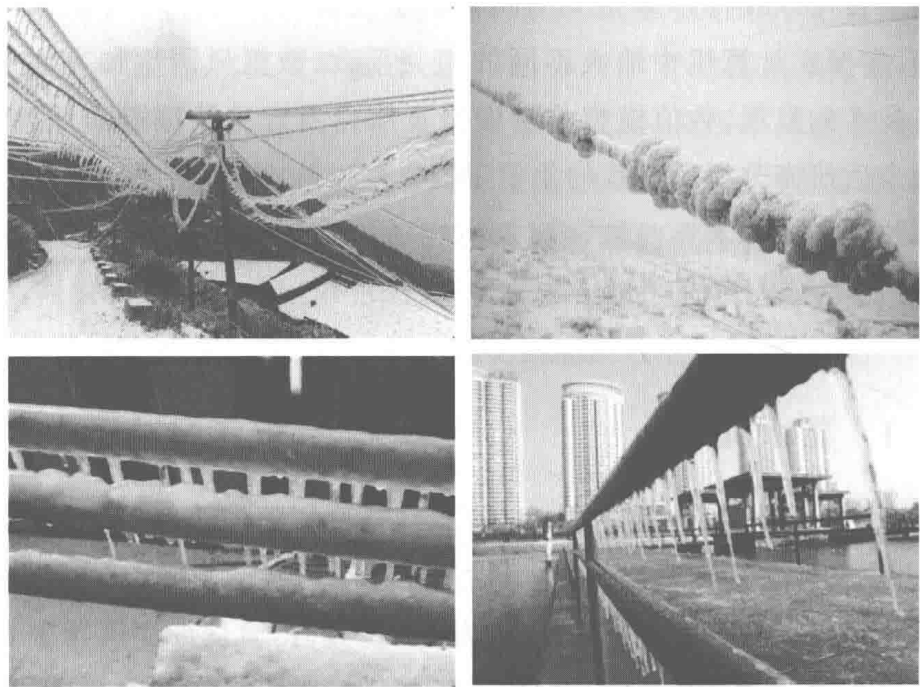


图 1-2 输电线、通信电缆和列车电缆严重结冰

雾凇又分为软雾凇和硬雾凇，软雾凇是指大气中的过饱和水滴与导线相碰，产生的一种升华或结晶的现象，软雾凇黏结力不强。硬雾凇是一种黏结力很强的覆冰，由多种物质混合而成，由空气和物体之间的温差形成，硬雾凇是指当空气骤然变暖时，空气中大而重的物质无法一下子变暖，当温度处于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时，会附着在物体表面，形成覆冰。

导线覆冰机理^[19]通常分为三类，分别为热力学平衡机理，流体力学机理，电流、电场耦合作用机理。①导线覆冰的热力学平衡机理，认为导线覆冰过程是一个热量传递与交换的过程，与导线表面的热平衡状态有关。经过冰晶层、暖气层与冷气层的过冷却水滴与表面温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的导线接触，释放内部热量固结成冰。覆冰的厚度、密度等物理性质都与导线表面的热平衡状态有关。②导线覆冰的流体力学机理，从流体力学方面考虑，认为覆冰过程是一个摩擦碰撞过程，空气中的过冷却水滴碰撞导线表面，摩擦产生覆冰，此机理认为覆冰取决于过冷却水滴直径大小、空气温湿度、导线直径、表面状态和风速风向等。③环境因素与电流、电场耦合作用机理，此机理认为覆冰不仅与环境因素有关，还应考虑导线产生的电流与电场强度的影响，因为电流及电场强度均会对导线表面的热平衡状态产生影响，间接影响导线表面覆冰的状态。

1.5.2 覆冰分类

覆冰与地形存在极大的关系,众所周知,海拔越高温度越低,也越容易形成覆冰。高海拔地区形成的覆冰一般为雾凇覆冰,覆冰较厚,丘陵、迎风山坡、山腰、山顶等处,较易形成雾凇覆冰;而对于低海拔地区,一般为雨凇及硬雾凇,覆冰量较少。但无论是高海拔地区覆冰还是低海拔地区覆冰,都需要满足空气水分充足、环境温度较低和一定的风速风向等条件。

由导线覆冰机理可知,导线覆冰受到多种因素的影响,覆冰在导线的迎风面形成,最终形状与当地的气候条件、地形,导线本身刚度、直径等特性有关。由于导线覆冰受多种因素的影响导致导线覆冰冰型多种多样,国内外研究归纳得出,导线覆冰冰型大致可分为新月形、薄膜形、扇形、D形和椭圆形等^[20],见图 1-3。输电线产生圆形或者椭圆形覆冰层需要的条件是:风与输电线相互平行或者因为输电线的大幅度扭转,致使输电线的各个面的覆冰层厚度相差不大,整个输电线被附上冰层;而产生翼型覆冰所需的条件是:当风和输电线轴向之间的夹角比较大,或者风与输电线轴向差不多垂直时,覆冰层在输电线的迎风面上逐渐累积,生成翼型覆冰形状。

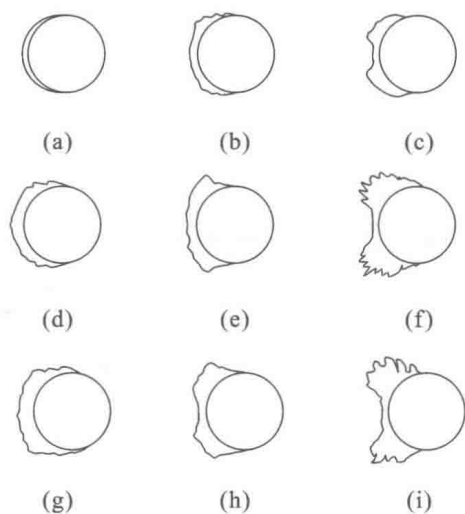


图 1-3 导线的各种覆冰冰型

当然,造成输电线结冰的原因有很多,致使输电线覆冰层形成较多不同的覆冰形态。

由于覆冰层的不规则性,很多形态的覆冰输电线会在特定风攻角下发生驰振。研究者的观点有:①若输电线不发生扭转,覆冰一般都在输电线的上部或者迎风面;②在某些暴风雪中,若风的方向发生倒转,根据 Den Hartog 驰振条件,各种类型的覆冰形态均有发生驰振的可能性,在一项调查中,发现大约有 20% 的驰振振动产生在背风侧覆冰处^[21]。以下是几种覆冰冰型现有的研究状况。

(1) 薄膜形覆冰

在海拔较低的区域,导线形成的覆冰较薄,薄膜形覆冰的覆冰厚度一般在 6 mm 及 6 mm 以下,且研究表明,许多导线覆冰驰振事故,导线覆冰厚度在

1~2 mm之间。经过试验研究发现,薄膜覆冰导线与其他覆冰类型导线表现的气动力特性存在较大差异,薄膜覆冰导线在 0° 风向角区域,与其他类型覆冰导线相比,升力系数负斜率绝对值较大,更易于发生驰振现象,但薄膜覆冰导线只在较小的风向角区域内发生驰振^[21]。

(2) 新月形覆冰(湿雪三角棱形覆冰)

一般而言,新月形覆冰分为两类,圆滑的新月形与带冰凌的新月形。一般在气温较低($-13\sim-5^{\circ}\text{C}$)、雨量较小且风速较低的情况下,形成圆滑的新月形。当气温较高($-3\sim-1^{\circ}\text{C}$)、雨量较大且风速也较大的情况下,在新月形覆冰的下侧易形成悬挂的冰凌,称为带冰凌的新月形^[22-23]。新月形覆冰厚度一般为导线直径的0.5~1.0倍,且驰振不稳定区域在 40° 、 60° 附近及 180° 左右。

(3) D形覆冰

新月形覆冰属于过冷却水滴与导线一接触就凝固的情况,当在气温较高,雨量较大且风速也较大的情况下,过冷却水滴与导线并不能一接触就凝固,由于水滴的流动及风的作用,使得在原来覆冰的基础上产生角状覆冰,称为D形覆冰。根据覆冰厚度及冰角特点将D形覆冰分为两类:一类是冰厚较小,中心区域有光滑段且冰角形状不明显的D形覆冰;另一类是覆冰较厚,无明显的光滑区,冰角形状明显的D形覆冰。由于D形覆冰形状容易满足Den Hartog的驰振不稳定条件,在很宽的风攻角范围内均有可能产生驰振振动,因此D形覆冰形状通常是风洞试验中较多选用的覆冰形态。图1-4是Holger Koss在风洞试验中进行的圆柱覆冰试验照片,测试试验时间为30 min时89 mm圆柱的覆冰状况^[24]。

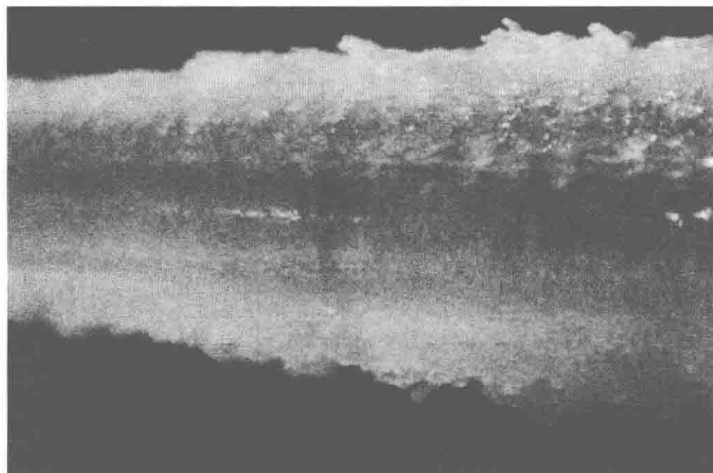


图 1-4 Holger Koss 进行的圆柱覆冰试验情况