



输电线路舞动

郭应龙 李国兴 尤传永 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



输 电 线 路 舞 动

郭应龙 李国兴 尤传永 著

电力科技专著出版资金资助项目



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是我国第一部系统阐述输电导线舞动问题的专著。在较为系统、完整地讲述导线舞动机理的基础上,全面介绍了世界各国治理舞动的技术措施与经验,还特别讲述了我国在治理中山口大跨越舞动中所进行的科学研究与工程实践。本书共十章,前五章主要讲述舞动的机理和防舞的技术途径;第六至第八章分别重点介绍了三种典型防舞装置的设计与计算方法;第九章介绍计算机仿真技术及有关软件;第十章综述我国各地舞动治理的有关成果。

本书可供输电线路设计、运行、管理和研究方面的工程技术人员参考,也可作为高等院校相关专业的研究生与本科生的教材与参考书。

图书在版编目(CIP)数据

输电线路舞动/郭应龙,李国兴,尤传永著. —北京:
中国电力出版社,2002.9

ISBN 7-5083-1231-7

I. 输... II. ①郭... ②李... ③尤... III. 输电线路-导线舞动 IV. TM752

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第072176号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 http://www.cepp.com.cn)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2003年1月第一版 2003年1月北京第一次印刷

850毫米×1168毫米 32开本 8.5印张 224千字

印数0001—3000册 定价20.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前言

输电导线的舞动是一个国际上普遍关心的科技难题，这是一种柔性结构物的风振。关于风振，无论是涡振、驰振或颤振都曾给人类带来巨大的灾害。而属于驰振的导线舞动，就曾给世界各国的输电工程带来过重大的损失和危害。世界各国的学术界与工程界为此投入了巨大的精力与资金，从舞动机理、防舞措施及相关理论、模型与现场试验、计算方法与计算机仿真等方面进行了多方面的研究。

在我国东北、华北及安徽、湖北、湖南等地，先后发生过不同程度的导线舞动，最近，河南又发生了薄冰舞动。线路涉及大跨越、普通线档和变电所回线，地域涉及到山区、丘陵和平原，气象条件涉及到雨淞、雪淞区，覆冰厚度从几毫米到48mm。其涉及面之广、种类之繁多，几乎包括了世界各国所出现过的各种情况。在舞动治理方面，我国起步较晚。在东北、华北和湖南都进行过一些治理工作，也取得了一些成效，而治理规模最大、应用治理技术最多，所开展的研究与实验工作最为全面的舞动治理工程，当属湖北中山口大跨越舞动治理工程。可以说，该工程研究了包括舞动机理在内的目前应用较广的各种防舞技术，总结了我国舞动治理方面的经验与成果，创造了大跨越舞动治理方面的新技术和新经验，也取得了重大的社会与经济效益。该成果因而获得了1997年度国家科技进步一等奖。

我们衷心期望我国学术界与工程界继续携手在舞动领域跨进世界先进行列，这是撰写本书的宗旨，而通过中山口舞动治理工程所积累和总结出来的经验与资料，则是本书的基础。我们希望，在我们这个幅员辽阔，自然条件包罗万象的国家，能够尽早

推出世界瞩目的舞动研究成果。

基于上述考虑，本书在力求保证完整的理论性和系统性的同时，也尽可能多的介绍一些世界各国治理舞动的经验与办法，尽管这些办法也许还不很成熟，理论上也缺少论证，也有一些是正在进行的工作，或者是未曾反复论证的材料。目的在于为读者提供尽可能新的思路与材料，以推动工作，启迪思路。也正基于这个目的，我们还在附录中列出了尽可能多的参考资料，包括一些近期论文的摘要，供读者参阅。

本书由武汉水利电力大学郭应龙教授、湖北省超高压输变电局李国兴教授级高级工程师、国家电力公司电力建设研究所尤传永教授级高级工程师编著，并由郭应龙教授统稿，武汉水利电力大学常连方教授主审。其中，关于计算机程序与仿真软件部分由武汉水利电力大学郭菁、于俊清博士编写。书中错漏之处，诚盼读者指正。

编著者

2002年7月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 舞动治理与研究的历史与现状	2
第二节 我国舞动的记载与研究状况	5
第三节 当前舞动研究的动向与存在的主要问题	15
第二章 导线舞动及影响舞动的因素	22
第一节 影响导线舞动的因素	22
第二节 输电导线覆冰研究	27
第三章 导线舞动的理论基础	35
第一节 概述	35
第二节 涡致振动原理与控制方法	37
第三节 横向驰振机理	41
第四节 扭转驰振机理	51
第五节 二自由度系统的驰振稳定性	53
第六节 应用于导线舞动研究的其他理论与方法	58
第四章 输电导线的舞动机理	71
第一节 概述	71
第二节 输电导线的动力学模型	71
第三节 集中参数系统的运动方程	75
第四节 导线舞动的激发模式	78

第五章 防舞技术概论	83
第一节 概述	83
第二节 防舞技术简介	84
第三节 扰流防舞器的原理与设计简介	89
第四节 抑制扭振型防舞器(简称抑扭环)	93
第五节 相间间隔棒的设计与计算	100
第六节 其他防舞技术与装置简介	107
第六章 失谐摆的防舞机理与设计计算	117
第一节 概述	117
第二节 失谐摆的防舞机理	118
第三节 单导线失谐摆的设计计算	120
第四节 分裂导线失谐摆的设计计算	133
第五节 失谐摆设计中的若干问题探讨	138
第六节 失谐摆设计的工程实例	148
第七章 双摆防舞器及整体式偏心重锤的防舞机理与设计	162
第一节 概述	162
第二节 双摆防舞器的防舞机理与设计	164
第三节 整体式偏心重锤的防舞机理与设计	173
第八章 压重防舞技术与节点分割布置原理	176
第一节 根据临界风速计算压重质量	176
第二节 中点托升原理及压重质量计算	179
第三节 多点压重原理	181
第四节 节点分割布置原理及应用	187
第五节 几个有关问题的探讨	188

第九章 输电导线舞动的计算机模拟	191
第一节 概述	191
第二节 导线舞动的数学模型	192
第三节 输电导线舞动的计算机模拟	195
第四节 输电导线舞动计算机仿真软件的设计	203
第十章 输电导线舞动治理工程实例	220
第一节 概述	220
第二节 湖北中山口大跨越舞动的研究与治理	220
第三节 湖南葛云岗 500kV 线路的舞动防治	231
第四节 天津 500kV 房津线的舞动治理	234
附录	236
附录 A 由尼戈尔等人完成的覆冰导线空气动力参数试验曲线	236
附录 B 中山口舞动治理工程空气动力试验资料	240
附录 C 1980~1999 年导线舞动参考文献摘要	243
附录 D 本书常用的英文专业词汇	261
参考文献	263

第一章

绪 论

冬季，当水平方向的风吹到因覆冰而变为非圆断面的输电导线时，将产生一定的空气动力，在一定的条件下，会诱发导线产生一种低频（约为 $0.1 \sim 3\text{Hz}$ ）、大振幅（约为导线直径的 $5 \sim 300$ 倍）的自激振动。就其性质而言，这种振动属于驰振（Galloping）。由于其形态上下翻飞，形如龙舞，也称舞动（Dancing）。

输电导线舞动通常发生在冬季导线覆冰而形成非圆断面的情况下，只有个别情况例外，如英国绥芬河大跨越绞制导线在斜向风作用下诱发舞动，为至今所少见。

由此不难看出，舞动的形成取决于三方面的因素，即覆冰、风激励和线路的结构与参数。由于这些参数的千变万化，因此在实际工程中所发生的舞动是非常复杂的。

最早有记载的舞动发生在美国，随后，在加拿大、日本、前苏联也相继有大量的舞动发生与治理的报道。从舞动治理的角度而言，各国皆有其独特的因地制宜的治理手段与技术措施，而就舞动的机理研究来说，则至今还只有美国的 Den Hartog（邓哈托）与加拿大的 O. Nigol（尼戈尔）分别提出了垂直激发机理和扭转激发机理。此后，一直未有较大影响的新的理论提出。许多舞动治理措施皆分别基于这两种机理。其详细内容将在后面有关章节介绍。

第一节 舞动治理与研究的历史与现状

舞动的观测与研究源于 20 世纪 30 年代，美、加、苏、英、日等国进行了较多的观测、研究与治理工作，其大致情况如下。

(1) 美国的邓哈托于 1932 年 12 月在 A.I.E.E 会议上发表了题为“输电导线覆冰舞动”一文，首次从理论上阐述了导线舞动的发生机理。他在文中提出，覆冰输电线在强风中的低频舞动可以解释为某种空气不稳定性所引起，这种现象与良好气象下发生的高频率的振动（注：指微风振动）二者毫无关系（本质不同）。并且证明了，当升力曲线的负斜率比阻力曲线的幅值大时出现不稳定性。

加拿大的尼戈尔自 1972 年开始按各种实际舞动的覆冰模型在风洞中进行静力与动力试验，对邓哈托激发原理进行了系统的试验与研究，得出了一系列空气动力曲线和邓哈托系数曲线（见附录 A），首次对横向激发起舞的过程与临界条件作了较为系统、严密的表述。

同时，他首次提出了扭振激发的概念，即尼戈尔原理，并进行了扭振自激的试验和完全自由（即同时允许扭转和横向运动）试验，从而证明，在达不到邓哈托舞动激发条件的情况下，系统也会因扭振失稳而激发扭转自激振动，并通过耦合而诱发横向舞动。这是对舞动理论的一个重要的补充与发展，也为防舞技术开辟了一个重要的途径。

(2) 加拿大 A.T. Edwards（爱德华兹）等人于 1953 年 1 月至 1954 年在安大略 Burlington（柏林顿）与 Dundas（丹达斯）地区和 Kenilworth（肯沃斯）地区先后进行了舞动的观测，记录下峰值高达 10ft 的舞动，并记录下产生舞动的冰风、气象与线路结构参数等有关资料。同时，在 Credit（克尼地特）港建成了与实际尺寸相同的共有 7 档的试验线路，并用 D 型覆冰模型在试验线路上形成人工起振，对系统的静态与动态参数进行了较为全面的

试验。其主要结论有：

1) 舞动中，垂直运动占主要地位，水平运动振幅仅为垂直振幅的 10%。

2) 水平运动的基本频率与垂直运动相同；其基本频率是线档的某一固有频率，通常是基频或低阶谐波。

3) 在大多数实例中，横向（包括水平与垂直方向）振动为自激振动，而扭振是由于冰形不对称所引起的惯性耦合形成的，属强迫振动。

4) 舞动通常是由线档的一阶或二阶驻波所组成；扭振与横向振动可能不是同一阶模态；它们的相位或者相同，或者相差 180° 。

(3) 日本在笠取山地区建立了试验线档，进行了长期的调研与观测。在四分裂导线上，进行了自然覆冰与 D 形人工覆冰的试验研究，观测到垂直振幅为 4m，扭振振幅为 100° 的舞动，并观测到舞动的各种模式以及舞动与风速、张力的关系，记录了舞动的频谱、轨迹、次档距振荡等现象与参数。他们在报告中认为，在自然条件下所发生的舞动，一定伴有扭转运动，且二者频率相同，并具有一定的相位关系。

日本在对其国内的舞动状况进行了全面的观测与归纳之后，找出了如下一些规律：

1) 舞动具有地区性和特殊气象条件的特点，在同样的地理与气象条件下，多条线路会同时发生舞动，这对于研究舞动的诱发因素和条件，具有重要的意义。

2) 档距大的线路发生舞动的事例较多，高压线路舞动较多。

3) 舞动所造成的事故包括线间短路和接地短路，所造成的损失包括电弧烧伤、断股、断线、杆塔损坏、倒塔、防振锤或间隔棒损坏等。

4) 地形、地物的影响。当线路前方有树木、森林屏蔽，使气流受到扰动时，舞动发生较少。线路与风向的交叉角在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 时易发生舞动。

5) 风速与气温的影响。舞动发生的频度与风速成正态分布, 其中心风速为 15m/s , 其中, 最小风速为 4m/s , 最大风速为 25m/s 。

在防舞技术方面, 各国都进行过多种尝试。如加拿大在失谐摆、相间间隔棒和各种阻尼器方面作了较多的研究与工程实践。前苏联在空气动力稳定器方面有较多研究和实践经验。日本在偏心重锤方面研究较多。而我国在湖北省中山口大跨越的舞动治理中, 对压重防舞理论与技术作了较多的研究与试验, 并在工程上取得了满意的效果。美国在扰流防舞器方面取得了较大进展, 并已形成定型产品向国内外出售。所有这些防舞技术, 都在各自的国家和地区取得了一定的防舞效果, 但不少技术虽然在一地应用较好, 而在另一处却基本上不采用, 甚至采取否定的态度。这也充分说明了对舞动的认识在世界范围内还远没有取得一致的认识, 还缺少公认的理论基础, 还很少有放之全球各种气象、地形地貌和线路结构条件下皆适用的防舞技术和方法。

在导线舞动的理论研究方面, 作了较多工作的是加拿大、美国、英国和日本。加拿大鉴于其所处地域寒冷, 具有较为典型的形成导线舞动的气象条件, 出现舞动现象较多, 研究也较为深入。爱德华滋、哈瓦德与尼戈尔等人从舞动观测到试验研究, 进而理论研究, 提出了扭转激发机理及失谐摆防舞理论与技术, 他们的工作是比较连续、系统和完整的。尤其是尼戈尔在建立导线系统的运动方程, 并在方程中引入影响导线舞动的诸多因素, 阐明导线舞动的发生机理等方面作出了较为突出的贡献。

许多人试图考虑更多的因素, 采用更精确的力学与数学模型, 运用更新颖的数学解法来描述导线舞动的状况, 并从中找到治理舞动的途径, 也确实取得了一些有价值的局部和阶段性的成果。美国的 McDaniel (麦克丹尼尔) 将惯性与粘滞阻尼引入运动方程, 按张紧弦模型建立了垂直、水平、扭转三维运动方程, 并按照负阻尼的原则, 得出了判断系统失稳, 即产生自激振动的条件。美国 Ratkovski (纳德科夫斯基) 提出了按能量平衡的原理来

计算导线舞动的振幅。日本的大月晃采用控制理论，引入传递函数的概念，作出反馈回路图，可以较为清晰地阐明导线舞动发生的机理，并把导线舞动的发生作为控制系统稳定性问题来讨论，采用控制理论来进行分析和求解。尼戈尔首先较为完整地列出了导线系统的三维运动方程，并用负阻尼作为系统是产生横向还是扭转激发模式的判断准则。日本的送电常设专门委员会在自己的报告中，考虑了更多的影响因素，列出了系统的三维运动方程，并较为系统的论述了导线舞动的非线性性质。在治理湖北省中山口大跨越导线舞动工程中，我国学者进一步采用 Routh-Hurwith (劳斯-胡尔威茨) 判据判断导线系统在采用防舞装置前后的系统稳定性。这种方法的不断完善，将有助于利用同一套判别式来判断某一线路是否会发生舞动以及采用某种防舞装置后的防舞效果。

在计算机模拟方面，各个国家已开展了大量的工作，但发表的文献还不太多。加拿大 N. Popplewell (坡坡威尔) 教授领导的研究室在建立非线性模型和随机模型方面作了许多前瞻性的工作。我国在采用有限元软件进行导线舞动仿真方面也作了不少工作，目前，在单导线的仿真方面已取得满意的结果，在分裂导线的刚度研究与计算建模方面还有不少需要进一步研究的课题。

第二节 我国舞动的记载与研究状况

我国有关舞动的记载始于 20 世纪 50 年代，而真正进行大规模治理与研究还是在 1987 年湖北省中山口大跨越发生舞动而导致断线之后才开始进行的。

根据现有资料，自 1957 年至 1992 年初，我国共发生了 44 次导线舞动，波及到的线路 161 条，致伤导线 66 根，引起线路跳闸 119 次以上。发生舞动最多的是沈阳、鞍山、丹东、锦州一带，自 1957 ~ 1990 年的 33 年中有 18 年发生舞动，共计 25 次，波及线路 86 条次。其次是湖北省的荆州、武汉、宜昌、荆门地

区，近七年共发生舞动 12 次，波及线路 37 条次。

现将国内几次重大的舞动情况介绍如下：

(1) 1969 年 11 月 14 日，鞍钢某线路导线为 LGJ-240 型。上午气温 2.4°C ，小雨，下午气温降至 -6°C ，雨转雪，导线覆冰。至 17 时，气温约 -1.5°C ，风速约 11m/s ，线路开始舞动，舞幅达 $2\sim 3\text{m}$ ，一直持续到次日凌晨 4 时左右。舞动停止时的气温为 -6.8°C ，风速为 10m/s ，变化并不大，只是风向由北东向转为北西向。这次舞动波及 8 条线路，先后跳闸 11 次。

(2) 1985 年 11 月 22 日，鞍山、辽阳地区，导线为 LGJ-120-400 型。夜降小雨，5 时气温降至 -3°C ，风速 $6\sim 10\text{m/s}$ ，雨转雪，发生舞动。共波及线路 27 条，引起跳闸 57 次，有的线路在 24min 内跳闸 5 次而被迫退出运行。因弧闪烧伤导线 24 根。

(3) 1987 年 2 月 16 日，天津塘沽地区，凌晨小雨，气温降至 -3.9°C ，导线覆冰，迎风侧冰厚 $10\sim 25\text{mm}$ ，背风侧冰厚 $3\sim 5\text{mm}$ ，冰型呈椭圆断面，椭圆长轴接近水平，冰质接近透明，不易脱落。上午 9 时许，导线陆续舞动，共波及 $10\sim 500\text{kV}$ 线路 18 条。

通过实地观察发现一个共同的特点，即线路电压等级高、档距大、导线粗，则覆冰厚，冰层重量大，舞动愈益严重，相应地舞动幅度也愈大。

(4) 1987 年 2 月 19~21 日，湖北省钟祥县境内 500kV 姚双与双凤线中山口大跨越（由西向东跨越汉江）发生强烈舞动，其时，气温为 $-1\sim -3^{\circ}\text{C}$ ，风速 $4\sim 18\text{m/s}$ ，风向西北偏北，基本上垂直与导线走向，有雨淞与冻雨，覆冰厚度约 15mm 。舞动时，跨越塔塔身摇晃，横担顺线摆动，金具产生很大的撞击声。6 相导线全部舞动，最大舞幅峰一峰值达 10m 。舞动造成大量金具与护线条损坏，上相子导线有 3 根受到严重磨损。

(5) 1987 年 3 月 29 至 30 日，沈阳、鞍山、辽阳地区共有 12 条 $66\sim 220\text{kV}$ 线路发生舞动。当时气温为 $-5\sim -7^{\circ}\text{C}$ ，风速 $4.4\sim 6.7\text{m/s}$ ，风向与线路成 60° 夹角，覆冰厚度 10mm ，最大舞幅 1

~2.8m。舞动引起各线闪络短路、跳闸9次以上，以致烧伤导线11根、地线1根、断线1根。

(6) 1988年12月25~26日，湖北省中山口大跨越发生第二次舞动，情况与第一次相近，舞动峰-峰值10m，持续舞动16h后，1根子导线因严重磨损、断落江中，2根子导线重伤，金具与护线条大量损坏。

图1-1~图1-4为因舞动引起的线路损坏的情形。

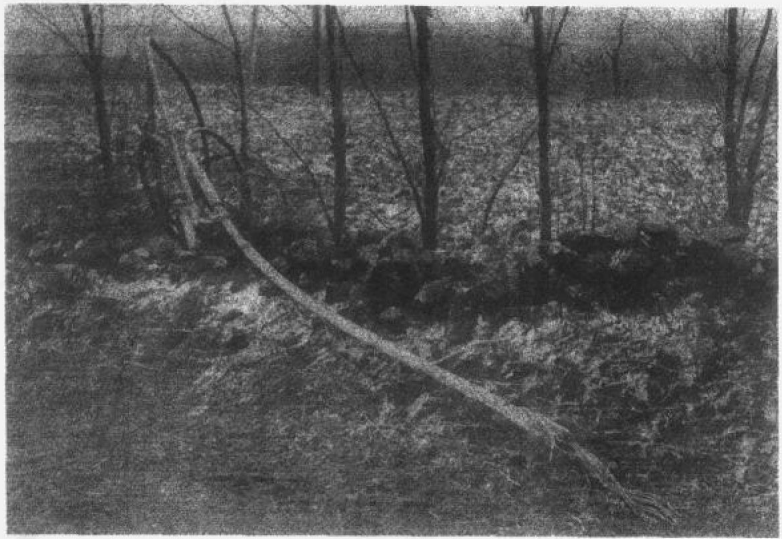


图1-1 中山口舞动引起的导线破断情况

此次舞动事故发生后，原电力部、湖北省电力局开始组织舞动研究，采取了一系列的防范措施。使舞动得到了有效地防治。

(7) 1990年1月29~30日，出现一场遍及湖北、湖南及安徽等省的大范围的雨淞、雪淞天气，三省共有13条35~500kV线路发生舞动。在湖北中山口大跨越，经过较好治理的相线舞幅被压低至0.5m，而未经治理的相线舞幅仍然达到6~7m，其详细情况可参阅第十章。

这次舞动的情况证明了，集中防振锤的防舞效果显著，经过改进的抗舞线夹则起到了保塔保线的作用。

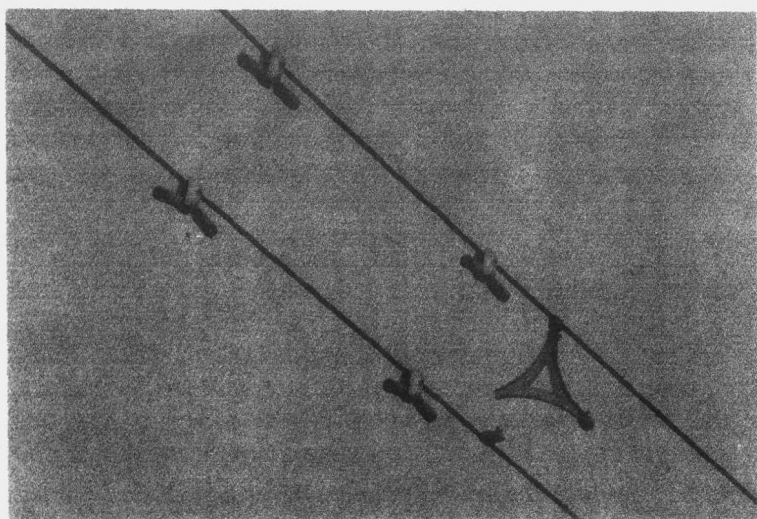


图 1-2 中山口舞动引起的间隔棒断裂情况

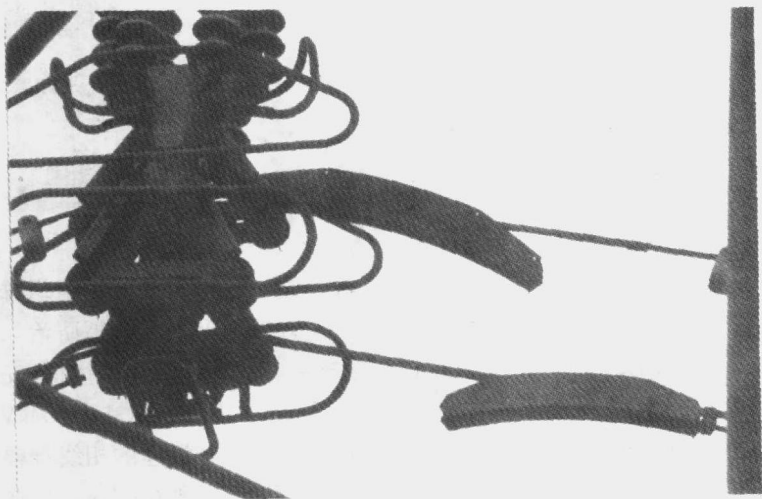


图 1-3 中山口舞动引起的线夹船体破断情况

(8) 1993 年 11 月 18 ~ 19 日, 中山口大跨越所在地区, 出现

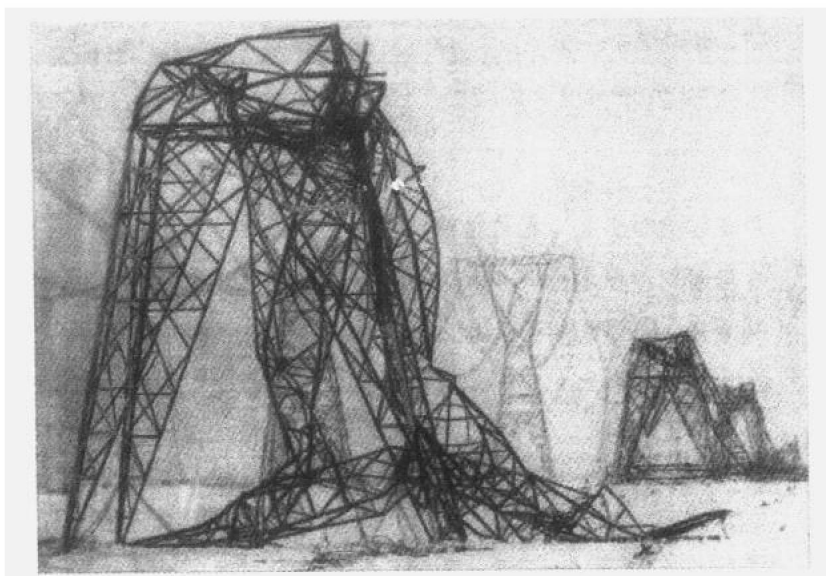


图 1-4 国外某输电线路塔倒塌的情况

特大冰、风，覆冰厚度达到其他年份的 2.6 倍，超过了设防线，致使原本已经被控制的舞动再度小规模产生，发生了峰-峰值为 2.5m 的小舞动。一旦风速减小，舞动即停。

其他有关我国近年来发生的舞动情况，可见表 1-1。

表 1-1 我国近年来发生的舞动情况一览表

次序	舞动发生年月日	舞动发生地区	舞动线路电压等级、线路名称及条数	舞动时的气候状况	跳闸次数	伤线(根)	断线(根)
1	1957年 5月	辽宁锦州	66kV 山川线 1 条	大风，导线覆冰			
2	1961年 4月	辽宁锦州	66kV 锦西线 1 条	大风，导线覆冰			
3	1962年 4月2日	辽宁丹东	66kV 丹窑线 1 条	雨转雪，气温 0~3℃，风速 8~10m/s，导线覆冰 5mm	≥3	2	1
4	1966年 4月15日	辽宁沈阳	44kV 虎新线 1 条	风雪			