

郭应龙 著

输电导线舞动

SHUDIANDAOXIANWUDONG



武汉水利电力大学出版社

郭应龙 著

输电导线舞动

SHUDIANDAOXIANWUDONG



武汉水利电力大学出版社

输电导线舞动

郭应龙 著

武汉水利电力大学出版社

1998 · 武汉

(鄂)新登字 15 号

图书在版编目(CIP)数据

输电导线舞动/郭应龙等著. —武汉:武汉水利电力大学出版社,1998.12

ISBN 7-81063-015-6

I.输… II.郭… III.输电导线-导线跃动-研究 IV.TM24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 24703 号

责任编辑:瞿扬清 封面设计:涂 驰

武汉水利电力大学出版社出版发行

(武汉市武昌东湖南路 8 号 邮编 430072)

黄冈日报印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:4.375 字数:109千字

1998年12月第1版 1998年12月第1次印刷 印数:0 001-2 000册

ISBN 7-81063-015-6/TM·2 定价:9.80元

前 言

输电导线的舞动研究是一项国际上十分重视并广泛研究的重要课题，既有重要的学术价值，又有非常重大的社会经济意义。由于其学科涉及面较宽，影响因素复杂且随机因素较多，研究工作涉及理论研究、计算机仿真、空气动力参数试验、模拟试验和现场实施，因而耗资巨大，研究周期很长。正因为如此，尽管研究者众多，历时多年，重要的成果仍然很少，学术专著至今未见。

本书作者承担并完成了“220 ~ 500 kV 输电线路导线舞动的试验研究与治理”重大攻关课题。在湖北省中山口大跨越工程的舞动治理工作中取得了显著的成果和突破，具有显著的社会效益与经济效益，获得了 1997 年度国家科技进步一等奖。本书是根据这项课题的研究过程中所涉及的理论及工程技术问题写成的。

本书较系统、详尽地阐述了输电导线舞动的发生机理、防舞原理与技术、计算机仿真技术以及实际工程舞动分析与治理的经验与资料，并汇集了作者在该研究领域中所作的创新性的研究成果与技术开发，是一本有关输电导线舞动的专著，也是我国第一本导线舞动研究与治理工程的理论与技术总结。希望本书的出版能对提高我国导线舞动研究的水平起到推动与促进作用，也希望藉此能与更多的国际同行进一步的沟通与切磋。

本书由武汉水利电力大学郭应龙教授主笔、湖北省超高压输变电局李国兴教授级高工、北京电力建设研究所尤传永教授级高工参加编著。

书中错漏之处，还望读者指正。

编著者

1997 年 7 月

目 录

第一章 绪 论	1
第二章 导线舞动的理论基础	8
第一节 概 述	8
第二节 涡致振动原理与控制方法	10
第三节 横向驰振机理	13
第四节 扭转驰振机理	22
第五节 二自由度系统的驰振稳定性	25
第三章 输电导线的舞动机理	30
第一节 概 述	30
第二节 输电导线舞动的动力学模型	30
第三节 集中质量(或转动惯量)系统的运动方程	35
第四节 舞动模式	38
第四章 防舞技术综述	43
第一节 概 述	43
第二节 防舞技术简介	44
第五章 失谐摆的防舞机理与设计计算	46
第一节 概 述	46
第二节 失谐摆的防舞机理	47
第三节 失谐摆的设计计算	49
第四节 在设计中有关失谐摆的若干问题探讨	58
第六章 压重防舞计算	68
第一节 根据临界风速计算压重质量	68
第二节 根据中点托升原理计算压重质量	71
第三节 多点压重原理	72
第四节 压重的分布原理	78

第七章 其它防舞装置	79
第一节 扰流防舞器的原理及设计简介	79
第二节 双摆防舞器的设计原理与计算	83
第三节 偏心重锤的设计原理与计算	89
第八章 输电导线舞动的计算机模拟	92
第一节 概 述	92
第二节 导线舞动的数学模型	92
第三节 输电导线舞动的计算机模拟	95
第九章 湖北中山口大跨越舞动的研究与治理	103
第一节 中山口大跨越的主要技术参数	103
第二节 中山口大跨越的舞动情况	105
第三节 中山口大跨越的防舞措施	106
第四节 中山口大跨越舞动研究与治理的 主要成果与创新点	108
附录一 振动系统的稳定性	113
一、特征方程的根	114
二、代数稳定性判据	116
三、输电导线舞动的稳定性	117
四、中山口大跨越系统的舞动稳定性	121
附录二 Nigol 完成的覆冰导线空气动力 参数试验曲线	124
附录三 湖北中山口大跨越覆冰导线模型 空气动力参数试验曲线	128
一、试验条件	128
二、试验模型及其参数	128
三、试验曲线	129
参考文献	131

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 0.1~3 Hz）、大振幅（约为导线直径的 5~300 倍）的自激振动。就其性质而言，这种振动属于驰振。由于其形态上下翻飞，形如龙舞，俗称舞动。

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 Severn 河大跨越绞制导线在斜向风作用下诱发舞动，为至今所仅见。

由此可见，舞动的形成取决于三方面的因素：覆冰、风激励和线路结构与参数。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、前苏联也相继有大规模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，除美国的 D. Hartog 与加拿大的 O. Nigol 分别提出了垂直激发机理和扭转激发机理，至今尚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。详细内容将在后面有关章节介绍。

舞动的观测与研究源于本世纪 30 年代，美国、加拿大、苏联、英国、日本等国进行了较多的研究与治理工作。

(一) 加拿大 A. T. Edwards 等人于 1953 年 1 月至 1954 年在安大略 Burlington 与 Dundas 地区和 Kenilworth 地区先后进行了舞动的观测, 记录峰值高达 10 英尺的舞动。并记录产生舞动的有关冰风、气象与线路结构参数等影响舞动的条件。同时, 在 Credit 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, 通常是基频或一阶谐波;

(3) 在大多数实例中, 横向为白激振动, 而扭转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模态; 它们的相位或者相同, 或者相差 180° 。

(二) 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 4 m, 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, 并记录了舞动的频谱、轨迹、次档距振荡等现象与参数。其报告认为, 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。

(三) 加拿大 O. Nigol 自 1972 年开始按各种实际舞动的覆冰模型在风洞进行静力与动力试验。对 Dun Hatog 激发原理与扭振激发原理 (即 O. Nigol 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 Dun Hartog 系数曲线。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。

O. Nigol 首次提出了扭振激发的概念, 并进行了扭振白激的

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 Dun Hartog 舞动激发条件的情况下, 系统也会因扭转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主要的补充与发展, 也为防舞技术开辟了一个主要的途径。

(四) 日本曾对其国内的舞动状况进行了全面的观测与归纳, 探索出了一些规律。

(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, 显然具有重要的意义。

(2) 档距大的线路发生舞动的情况较多。尤其是高压线路舞动较多。

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

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

(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 15 m/s 。其中, 最小值为 4 m/s , 最大值为 25 m/s 。

关于防舞技术方面, 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做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, 则对压重防舞理论与技术做了较多的研究与试验, 并在实际工程上取得了满意的效果。美国在扰流防舞器的研究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

在该地区应用较好，而在另一地区却基本上不采用，甚至采取否定的态度。这也充分说明了对舞动与防舞理论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，作了较多工作的有加拿大、美国、英国和日本。加拿大鉴于其地域寒冷，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。从 Edwards 到 Havard 与 Nigol 等人，他们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，所做的工作还是比较连续、系统和完整的。尤其是 Nigol 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，采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 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 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。Nigol 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，并较为系统地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-Hurwitz 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. Poppolewell 教授领导的研究室在建立非线性模型和随机模型方面做了许多工作。我国在采用有限元软件进行导线舞动仿真方面也做了不少工作,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。

(五) 我国有关舞动的记载始于 50 年代,而真正进行大规模治理与研究还是在 80 年代末,是从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 至 1990 年的 33 年中有 18 年发生舞动,共计 25 次,波及线路 86 条。其次是湖北省的荆州、武汉、宜昌、荆门地区,近 7 年共发生舞动 12 次,波及线路 37 条。

现将国内几次重大的舞动情况介绍如下^[1]:

(1) 1969 年 11 月 14 日,鞍钢红一变出口地段,导线为 LGJ-240。上午气温 2.4℃,小雨,下午气温降至 -6℃,雨转雪,导线覆冰。至 17 时,气温约 -1.5℃,风速约 11 m/s,线路开始舞动,舞幅达 2~3 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℃,风速为 10 m/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。夜降小雨,5 时气温降至 -3℃,风速 6~10 m/s,雨转雪,

* 参阅:黄经亚. 电力线路舞动及防护,湖北省电力工业局,1993.6.

发生舞动。共波及线路 27 条，引起跳闸 57 次，有的线路在 24 min 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 $-3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，导线覆冰，迎风侧冰厚 10 ~ 25 mm，背风侧冰厚 3 ~ 5 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 ~ 500 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，覆冰厚，冰层重量大，舞动愈严重，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 550 kV 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。当时，气温为 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，风速 4 ~ 18 m/s，风向西北，基本上与导线垂直走向，有雨淞与冻雨，覆冰厚度约 15 mm。舞动时，跨越塔身摇晃，横担顺线摆动，金具产生很大的撞击声。6 相导线全部舞动，最大舞幅峰值达 10 m。舞动造成大量金具与护线损坏，上相子导线有 3 根受到碾压磨损。

(5) 1987 年 3 月 29 ~ 30 日，沈阳、鞍山、辽阳地区共有 12 条 66 ~ 220 kV 线路发生舞动。当时气温为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，风速 4.4 ~ 6.7 m/s，风向与线路成 600° 角，覆冰厚度 10 mm，最大舞幅 1 ~ 2.8 m。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，舞动峰值 10 m，持续舞动 16 h 后，1 根子导线因严重磨损，断落江中，两根子导线重伤，金具与护线条大量损坏。

此次舞动事故发生后，电力部、湖北省开始组织舞动研究，采取了一系列的措施。使舞动得到了有效地治理。

(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35~500 kV线路发生舞动。湖北中山口大跨越经过较好治理的线路,舞幅被压低至0.5 m,未经治理的线路舞幅仍然达到6~7 m。这次舞动的情况证明,集中防振锤的防舞效果显著,改进的抗舞线夹能起到保塔保线的作用。

(8) 1993年11月18~19日,中山口大跨越所在地区出现特大冰风,覆冰厚度达到其它年份的2.6倍,超过了设防线,致使原本已经被完全控制的舞动,再度小规模产生,发生了峰值为2.5 m的小舞动。一旦风速减小,舞动即停止。

鉴于受到导线对线路安全运行所造成的危害十分巨大,诸如线路频繁跳闸与停电、导线的磨损、烧伤与断线,金具及有关部件的损坏等等,都会造成巨大的经济损失与社会影响。仅以湖北中山口大跨越为例,该线路1988年因舞动断线,造成停电5 d,抢更换线耗资300万元,少送电3 600万 kW,直接经济损失1 260万元,社会经济损失27 250万元。所以,世界各国都投入了大量的人力、物力,进行了大量的试验与研究,也取得了一些行之有效、可供借鉴的经验。在本书后面的有关章节将简要予以介绍。

导线舞动的研究是一个既十分紧迫,又相当复杂,既具有十分重要的社会经济意义,又难于迅速地拿出彻底解决办法的世界性攻关课题。它的大振幅,导致问题的强非线性;风雨冰雪的随机性,使得采用确定性模型常常无法全面模拟舞动过程;舞动现场的千变万化,使得某些局部的经验无法适应各方面的实际情况,难以得到全面的推广;有关试验耗资巨大,周期很长,给这方面的研究工作带来一系列的困难。凡此种种,使得导线舞动的研究工作至今还不能满足工程实际的需要。要从理论上和实践上彻底解决舞动问题,还需要进行大量的工作,包括机理研究、基本参数试验与测定、工程实践、相应的实验室与现场试验等。这项具有重大学术与工程价值的研究值得我们锲而不舍地进行下去。

第二章 导线舞动的理论基础

第一节 概 述

当流体从结构物的外表面流过时，它将作用于结构物一个激励。激励的大小和性质与结构物的断面形状、流体的性质、流动方向与流速等因素有关。这个激励将激发结构物产生不同性质的振动。同时，结构物的振动又会反过来影响流体的运动及其激励力，从而形成流体与结构物之间的耦合振动。这种复杂的流固耦合振动，是输电导线各种振动的共同的理论基础。

通常遇到的由外流(流体从结构物的外表面流过)诱发的结构物振动包括卡门涡振动(Vortex shedding)、颤振(Flutter)和驰振(Galloping)三类。这三者有着不同的形成条件与振动形态。

一、卡门涡(或称漩涡脱落)振动

由于流体绕流过结构物的表面，在结构物的后方形成漩涡。当漩涡从结构物的两侧交替脱落时，便作用于结构物一个交变的周期激励力，引起结构物的周期性振动。这种振动称为卡门涡振动。输电导线的微风振动即属此类。

漩涡脱落的主导频率可按下式计算：

$$f = S \frac{U}{D} \quad (2-1)$$

式中 f ——主导频率, Hz;

U ——自由流速度, m/s;

D ——结构物垂直于流速方向的宽度, 对于输电导线, D 为导线直径。

S ——斯特劳哈尔 (Strouhal) 数, 对圆柱体, $S = 0.2$; 对其它断面; $S = 0.10 \sim 0.17$ 。

漩涡脱落所引起的结构振动, 一般称为涡致振动。其振动频率等于漩涡脱落的主导频率。所以, 涡致振动实际上是一种受迫振动 (这里暂未计及结构物振动对流体运动的影响)。

二、失速颤振

这是经常发生于飞机机翼上的一种白激振动。它是由于气流高速流过翼面时, 机翼的扭振与横向振动相互耦合而产生的。在失速颤振中, 空气动力已经大到可以与结构振动的恢复力相比拟, 因此, 它所激发的结构振动的频率不是结构的固有频率, 而是有明显的差别。这种频率飘移现象是失速颤振的特点, 也是它与后面即将讲到的驰振的主要区别。

三、驰 振

驰振也是由于流体以较高速度流过非圆断面的结构物表面所引起的一种白激振动。但是, 由于流体的流速比失速颤振低得多, 因而空气动力与结构振动的恢复力相比要弱得多, 所以结构物振动的频率与结构物的固有频率接近, 而很少频率飘移。

由于空气相对流速的范围所限, 在输电导线中, 主要存在卡门涡振动和驰振两种振动。前者发生于低风速、无冰雪 (即导线呈圆截面) 的条件下, 故称为微风振动。后者发生于较高风速、覆冰雪 (导线呈非圆断面) 的条件下, 称为驰振, 俗称舞动 (Dancing)。

在研究流体与固体 (结构物) 的耦合振动时, 将要涉及到流体与

固体各自的数学模型。一般来说，工程结构的振动模型通常是线性的，而流体模型则通常是非线性的。所以，流固耦合振动的模型也是非线性的。因此，输电导线舞动研究也将涉及非线性振动问题。

第二节 涡致振动原理与控制方法

一、运动方程

如图 2-1 所示

设圆柱体质量与其周围的流体的附加质量之总和为 m ，圆柱体直径为 D ，长度为 l ，流体相对于圆柱体的流速为 U ，圆柱体的支承总刚度为 k ，阻尼为 C ，流体作用于圆柱体的升力为 L ，则可分别写出圆柱体及流体的运动方程

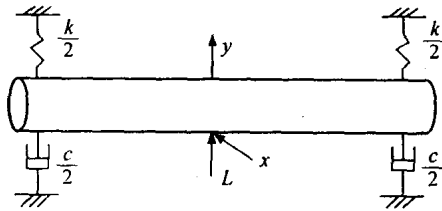


图 2-1

$$m\ddot{y} + C\dot{y} + ky = L = \frac{1}{2}\rho U^2 DC_L \quad (2-2)$$

$$\ddot{C}_L - \omega_s c_1 \left[c_{L0}^2 - \frac{4}{3} \left(\frac{\dot{C}_L}{\omega_s} \right)^2 \right] \dot{C}_L + \omega_s^2 \left(1 - \frac{4}{3} c_2 C_L^2 \right) = c_4 \omega_s \dot{y} \quad (2-3)$$

式中 c_1, c_{L0}, c_2, c_4 ——实验常数；

C_L ——升力系数；

ω_s ——漩涡脱落频率， $\omega_s = \frac{2\pi sU}{D}$ ；