

Diànxianlìxuéjìsuan

邵天晓 著

架空送电线路的 电线力学计算

(第二版)



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

责任编辑：刘瑞玲 穆智勇
封面设计：勾 勾

CEFP



ISBN 7-5083-1647-9



9 787508 316475 >

ISBN 7-5083-1647-9
定价： 42.00 元

CHINA ELECTRIC POWER PRESS



架空送电线路的 电线力学计算

(第二版)

邵天晓 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

架空送电线路的电力计算
(第二版)

内 容 提 要

本书主要是为从事送变电专业设计、施工和运行人员便于掌握并灵活运用架空电线力学方面的计算方法和公式,提高业务水平而编写的专业知识读物。本书为第二版,是在第一版的基础上做了全面修订,并进行了大量补充而成的。书中以力学的基本知识和简单的数学方法为基础,力求实用和通俗易懂。全书共分九章,主要内容包括电线类型及力学性能、架空电线在均布和非均布荷载下对孤立档和连续档在正常、断线和安装情况时的电线应力、弧垂和线长以及应力变化的状态方程等计算方法进行较为系统地求证和论述,并对电线因风引起的振动、振荡和舞动问题作了简要介绍。

本书供送变电专业设计、施工、运行、电线和金具制造与测试的工程技术人员阅读,也可作为有关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

架空送电线路的电力计算/邵天晓著. -2版. 北京:中国电力出版社, 2003

ISBN 7-5083-1647-9

I. 架… II. 邵… III. 架空线路:输电线路-张力弧垂计算
IV. TM726.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 049000 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>)

北京市铁成印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1987 年 4 月第一版

2003 年 10 月第二版 2003 年 10 月北京第二次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 24.5 印张 556 千字

印数 6321—9320 册 定价 42.00 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)

第二版前言

本书第一版于1987年出版。该书系由我受原所在单位（东北电力设计院）的委托而编写的。主要目的是为该院已编写出版的《电力工程高压送电线路设计手册》（1991，水利电力出版社出版）中的电线力学计算部分作配套性解释。随着电子计算机的普及，该专业的很多计算都已程序化。然而编制的计算程序，又需要新一代的技术人员理解和改进，本书第二版就是为此目的。

本书第二版，新增加了电线的类型和力学性能，电线荷载计算，最大设计风速和覆冰厚度的统计取值，跳线计算，电线振动、振荡及舞动等内容；对第一版中的部分内容进行补充和修正。

本书第二版在内容上，重点是论述和求证架空电线在各种荷载和不同悬挂方式下设计和安装中常采用的弧垂、应力、线长及应力变化等计算方法，并考虑到工程上的实用性，特将复杂的悬链线方程根据容许的误差范围简化为近似的抛物线方程；在计算方法上，尽量归纳为便于编制计算程序的形式。

本书第二版，尚对一些不太成熟的课题，诸如钢芯铝线的应力分配、悬挂点不等高的电线最大使用应力的选择、悬挂点处的静态和动态弯曲应力、架线后的弧垂检验和装配架线的误差、双联悬垂绝缘子串的受力分配调整、V形绝缘子串的风偏位移等进行了初步的讨论，以供读者进一步研讨；至于电线因风引起的振动、振荡、舞动及其防护，这些动态问题比较复杂，我仅摘录以往国内外的一些较为实用的信息和资料，以起抛砖引玉的作用，提示有志读者继往开来，攻克这方面的诸多难题。

应读者要求，在本书第二版附录中列出国内外导线标准，以利工程中参考备查。

本书第一版曾由东北电力设计院汤伯兰等同事校核、华北电力设计院原总工刘普春及同仁审阅。第二版全书经秦体明高工校核，在此深表谢意！

由于作者的知识和业务水平所限，且离任多年，书中谬误之处，望读者批评指正。

河南省电力勘测设计院

邵天晓

2003年于郑州

HAZ/06/06



目录

第二版前言

第一章 电线类型及性能	1
第一节 电线材料及性能	1
第二节 电线结构类型	5
第三节 圆线同心绞线的结构及物理性能	7
第二章 电线荷载计算	33
第一节 电线单位荷载及比载计算	33
第二节 杆塔承受的电线荷载	38
第三节 线路最大设计基准风速的选择	44
第四节 电线覆冰厚度的分析和计算	52
第三章 均布荷载下电线弧垂、应力及线长的计算	59
第一节 电线弧垂、应力及线长的悬链线公式	59
第二节 电线弧垂、应力及线长的抛物线公式	81
第三节 有横向风荷载时电线弧垂、应力及线长的近似计算	92
第四节 考虑电线刚度影响时弧垂及弯曲应力的计算	99
第四章 均布荷载下电线应力变化状态方程式及各档应力、弧垂计算	112
第一节 电线应力变化的状态方程式	112
第二节 临界档距	126
第三节 导线力学特性曲线计算举例	129
第五章 非均布荷载下孤立档电线弧垂、张力及线长的计算	134
第一节 非均布荷载下的电线弧垂	134
第二节 耐张绝缘子串水平及垂直投影长度的计算	143
第三节 非均布荷载下电线线长的计算	146
第四节 有风时非均布荷载下电线弧垂与线长的计算	155
第五节 非均布荷载下电线张力变化状态方程及控制条件的判别	157
第六节 非均布荷载孤立档电线弧垂、张力的计算示例与比较	164
第六章 连续档正常运行情况下电线应力、弧垂的计算	180
第一节 连续档采用悬垂固定型线夹时电线应力、弧垂的计算	180

第二节	直线塔上绝缘子串的风偏角及双联悬垂绝缘子串的受力分配	190
第三节	连续档内架空地线应力的选配	201
第四节	连续档内采用滑轮线夹时电线应力、弧垂的计算	208
第七章	连续档内电线断线张力的计算	221
第一节	每相为单根导线时断线张力的计算	221
第二节	相分裂导线断线张力的计算	232
第八章	架线应力、弧垂及跳线的计算与弧垂观测方法	235
第一节	补偿电线初伸长时应力、弧垂的计算	235
第二节	连续倾斜档内观测弧垂及线长的调整计算	242
第三节	架线和竣工弧垂与线长的调整	255
第四节	电线弧垂的测量方法和装配架线	261
第五节	耐张塔上跳线施工弧垂与线长计算	273
第六节	针式绝缘子线路杆塔定位和架线中导线张力及弧垂的计算	302
第九章	电线的振动、振荡和舞动及其防护	312
第一节	电线的微风振动与防护	312
第二节	分裂导线的次档距振荡及其防护	354
第三节	电线的舞动及其防护	358
附录一	国产架空导线及镀锌钢绞线标准	365
附表 1	LGJ 钢芯铝绞线 (GB 1179—1983)	365
附表 2	GJ 镀锌钢绞线 (GB1200—1988)	367
附表 3	圆线同心绞架空导线 (GB/T 1179—1999eqv IEC 61089—1991) 摘录	368
附录二	国外钢芯铝绞线标准	378
附表 4	前苏联钢芯铝绞线 (ГОСТ839—1980)	378
附表 5	日本钢芯铝绞线 (JIS C3110—1978) 摘录	379
附表 6	英国钢芯铝绞线 (BS 215—2—1970) 摘录	380
附表 7	美国钢芯铝绞线 (ASTM B232—1981) 摘录	380
附表 8	德国钢芯铝绞线 (DIN 48204—1980) 摘录	382
参考文献		383



第一章

电线类型及性能



第一节 电线材料及性能

电线是指用作导电体的架空导线和屏蔽雷电用架空地线的通称。电线常采用多股绞线，其单股材料通常有铜线、铝线、铝合金线、铝包钢线、铜包钢线和钢线等。架空电力线路经常使用的多股绞线是用上述材料扭绞制成的绞线，如铜绞线、铝绞线、钢绞线、铝合金绞线、铝包钢绞线、铜包钢绞线及不同材料构成的复合绞线。如钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线、钢芯铝包钢绞线、钢芯铜包钢绞线及光纤复合钢铝混绞线等。本节对上述电线材料的单股性能和用途作一般性的介绍。

一、铜线、青铜线和铜包钢线

(一) 铜线

在各种导电金属中，铜是仅次于银的良好导体。软铜的电阻率在各种铜材中最低，在 20°C 时的直流电阻率为 $0.017241\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$ ；其导电率为 $58.0\text{ m}/(\Omega\cdot\text{mm}^2)$ ，常将此定为 100% IACS（软铜相对导电率），以此衡量其他线材的相对导电率。硬拉铜线导电率为 97% IACS，但比软铜的抗拉强度高，远比铝、钢线材的抗腐蚀性能好，早期广泛应用于架空电力线路上（如我国东北早期建设的线路）。随着工业的发展，使铜在其他方面有着不可代替的需求，促使其价格上升，从线路建设与传输的整体经济性考虑，现已广泛用铝线和钢芯铝绞线替代了纯铜绞线。仅在发电、变电设备的连接中采用抗拉强度较低的软铜绞线。

(二) 青铜线

青铜线也称铜合金线，根据所含少量其他金属的成分不同又分锡青铜线、磷青铜线、铍青铜线等。其特点是抗拉强度高，主要用于重要大跨越档内。

(三) 铜包钢线

为了充分利用铜的良好导电性，同时又要增大其抗拉强度，可在钢丝的表面熔镀上一层铜导体，制成铜包钢线，其绞线常用于重要大跨越档内，我国东北跨越松花江的个别大跨越中就采用过这种导线。

(四) 铜类电线单股化学成分及性能

硬铜线、青铜线、铜包钢线单股化学成分及材料性能示于表 1-1 中。



表 1-1

铜类电线单股化学成分及材料性能

线材名称	化 学 成 分	20℃时的 直流电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	20℃时的 直流导电率 (% IACS)	密度 (g/cm^3)	抗拉强度 (N/mm^2)	弹性系数 (N/mm^2)	线膨胀系数 ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)
硬铜线	Cu-1 号铜, 含铜量 ≥ 0.995 , 杂质锡、铋、铁、锌等 ≤ 0.005	0.01777	97	8.94	390	128000	17.0
青铜线	Cu-1 号铜分别加入适量的锡、 磷、铍等	0.02~0.05	80~35	8.94	700~1000	128000	18.0
铜包钢线	优质碳素钢丝外包 Cu-1 号铜	0.028~0.046	60~40	8.1~8.5	600~900		

二、硬铝线、铝合金线及铝包钢线

(一) 硬铝线

铝也是良好的导体，软铝导电率约为软铜的 62%。由于铝的密度比铜小且价格低廉，从总的输电经济性看铝优于铜，从而得到广泛应用。架空电力线路上采用的均是硬拉铝丝，虽然其抗拉强度高于软铝丝，但纯铝绞线仍仅适用于小档距的低压配电线路，对于较大档距的高压线路，常使用抗拉强度较高的钢芯铝绞线。

另外，电线制造标准^[1]中规定硬铝线的电阻率不得大于 $0.028264\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ （即导电率不小于 61% IACS）。我国生产的铝材由于硅杂质较高，即使采用 AL00 特一级高纯度电工铝材，若不再进行纯化，其导电率也难以达到要求。目前广泛采用 AL00 或 AL0 铝加入少量稀土元素（Re），可以除去铝中的非金属杂质、细化晶粒、使其电阻率降至软铝的水平（ $0.028\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ），同时也改善了铝的机械和抗腐蚀性能。这种铝线常称稀土铝线，符合我国硬铝线标准。

(二) 铝合金线

为提高铝线的抗拉强度，在纯铝（如国产 AL00 或 AL0）中加入少量的镁、硅元素或镁、硅、稀土元素，经特殊热处理制成铝、镁、硅或铝、镁、硅、稀土合金线。用这种铝合金单丝可绞制成纯铝合金绞线、钢芯铝合金绞线和光纤复合架空地线（OPGW）等。

普通铝及铝合金线的长期容许线温规定为 70°C 。为了增加载流量、提高线温，同时又不使其抗拉强度下降，在铝中加入少量锆（Zr）和稀土元素，可将合金的再结晶温度提高到 300°C 以上，并能使晶粒细化，依此法生产出的耐热铝合金线，其导电率和抗拉强度与硬铝线相近，但线温可提高到 $150 \sim 230^\circ\text{C}$ 。目前国外广泛采用这种铝合金线绞成的耐热钢芯铝绞线，以增大输送容量。

(三) 铝包钢线

在钢丝表面包一层纯铝，在铝处于半熔状态时压铸冷拔形成不同铝层厚度的具有高抗拉强度、良导电性能的铝包钢丝。常用此法制成铝包钢绞线、铝包钢芯铝绞线或铝包钢芯铝合金绞线和 OPGW 线中加强机械强度的导体。

(四) 铝线类单丝化学成分及材料性能

铝线类单丝的化学成分及材料性能如表 1-2 中所示。

表 1-2 硬铝线、铝合金线和铝包钢线单丝化学成分及材料性能

线材名称	化 学 成 分	20℃时的 直流电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	20℃时的 直流导电率 (% IACS)	密度 (g/cm^3)	抗拉强度 (N/mm^2)	破断时的 延伸率 (%)	弹性系数 (N/mm^2)	线膨胀 系数 ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)
硬铝线	AL ₀₀ 或 AL ₀ 号铝再净化, 使杂质含量: 铁 $\leq 0.2\%$ 、硅 $\leq 0.08\%$ 、铜 $\leq 0.01\%$	0.028264	61	2.7	160~190	1.5~2.0	61800	23.0
铝镁硅 高强度 铝合金线	AL ₀₀ 或 AL ₀ 加镁约 0.6%、 硅约 0.6% 或另加稀土约 0.1%	0.0328	52.5	2.7	294	4.0	63700	23.0
铝包钢线	优质碳素钢丝表面包 8%~ 25% 铝包钢线标称半径厚的纯 铝层	0.085~0.043	20~40	6.6~4.5	1340~680	1.5 (铝层)		

三、钢线

钢线的导电性能很差且随交流电流的增大而下降, 抗腐蚀性能也较差, 但其抗拉强度很高且价格低廉。用低碳钢制成的镀锌低强度软钢线(常称镀锌铁线)可用于农村小负荷线路上作为导线, 导电率为 13% IACS。硬拉高碳钢线抗拉强度很高, 导电率更低, 其镀锌钢丝可制成镀锌钢绞线用作架空地线, 也曾用双绞结构大截面的镀锌钢绞线作为大跨越导线。钢线的化学成分及材料性能列于表 1-3 中。

表 1-3 钢线的化学成分和材料性能

线材名称	化 学 成 分	20℃时的 直流电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	20℃时的 直流导电率 (% IACS)	密度 (g/cm^3)	抗拉强度 (N/mm^2)	破断时的 延伸率 (%)	弹性系数 (N/mm^2)	线膨胀 系数 ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)
软钢线	低碳素钢	0.133	13.0	7.80	600~700	$\gg 4$	196000	12.0
硬钢线	高碳素钢	0.1916	9.0	7.80	1200~1600	2~4	196000	12.0

四、影响线材性能的因素

(一) 线材纯度

线材的纯度对其性能影响很大, 纯度低会使其导电率下降。铝线材的纯度低时, 其杂质又会破坏表面的氧化膜而加速电化和化学腐蚀。钢最易受腐蚀, 故钢线必须表面镀锌防腐, 而钢线中若含硫、磷、铬等杂质多时会使材料变脆、硬且难以牢固镀锌。

(二) 线材的电阻率

当线材构成的绞线流过交流电、且线温高于 20℃ 时, 其平均电阻率要比表 1-1~3 中所列的直流电阻率增大。当通过交流电流时, 由于集肤作用使电流密度不均, 相当于有效截面减少而电阻增大, 特别是钢线磁性材料, 集肤效应中涉及的导磁率 μ 又是电流的函

数，因此钢线的电阻又与交流电流有关。当用线材单丝构成绞线时，因其层股长度比绞合后的轴向长度增大，也使平均电阻率（或电阻）变大。冷拔后的硬线材比软线材电阻率增大。

（三）抗拉强度

经过退火的软金属，其抗拉强度较低，如铜约为 220N/mm^2 、铝约为 80N/mm^2 、钢约为 280N/mm^2 。若要提高抗拉强度，除加入其他适量元素进行特殊热处理外，更重要是进行冷拔丝加工。冷加工所提高的抗拉强度随材料的变形程度而变，线材丝径冷拔得越细其抗拉强度越高，但冷加工后的硬度和电阻率也变大且破断延伸率变小。

冷拔后的抗拉强度与使用中的温度有关（热效应），当铝线和铜线的线温高于通常抗拉试验温度（如 20°C ）时，其抗拉强度、疲劳极限和弹性系数会有所降低，如表 1-4 中所示硬铝、铜线抗拉强度与温度间的关系。表中的相对抗拉强度是在相应的线温下测得的。

表 1-4 硬铝、铜线抗拉强度与温度的关系

线材名称	20℃ 时的抗拉强度 (N/mm^2)	在不同温度 ($^\circ\text{C}$) 下的相对抗拉强度					
		50	100	150	200	250	300
硬铝线	150	0.95	0.9	0.73	0.57	0.41	0.20
硬铜线	400	0.96	0.91	—	0.78	—	0.36

更值得注意的是，加工硬化过的金属在达到再结晶的温度时，即使恢复到常温下也会完全丧失其因加工硬化而增高了的抗拉强度。实际运行经验表明，当电线长期发热处于高温时就可能再结晶，在很大程度上就如同退火一样。表 1-5 示出铝线、铝合金线及铜线在不同温度下发热 1 年以后，在 20°C 时测得的抗拉强度损失率。

表 1-5 不同线材在不同发热温度下、1 年后抗拉强度损失率（ 20°C 时测验值）

线材名称	直径 (mm)	初始抗拉强度 (N/mm^2)	不同发热温度后抗拉强度损失率 (%)			
			50°C	75°C	100°C	160°C
硬铝线	2.4	160	2	5	9	32
铝合金线	2.4	320	2	8	18	62
硬铜线	2.0	450	4	25	37	44

表 1-4、5 中强度损失率与参考文献 [2] 中 7.0.2 条文解释中表 4 和表 5 所列值相比要大很多，其中表 4 内所列 54/7 股钢芯铝绞线，当工作温度在 100°C 运行 1000h，强度仅降低 2%；10000h、降低 3%。表 5 中介绍钢芯铝绞线在 $90\sim 150^\circ\text{C}$ 下，1000h 内强度并未降低，并认为从耐热角度可采用 150°C 。

电线在正常运行情况下容许的长期发热温度是由电线连接处的发热程度和电线因发热抗拉强度的降低程度控制的。为避免连接点表面由于氧化而造成接触电阻升高，一般电器连接点的允许温度规定为 70°C ；导线在长期电流作用下抗拉强度的损失率不应超过 5% ~

10%。我国线路设计规程^[2]中规定，导线允许的温度：对钢芯铝（或铝合金）绞线取 70~90℃；对铝包钢（或钢芯铝包钢）绞线取 80~100℃；对镀锌钢绞线取 125℃。

当短路时，极大的短路电流流过电线而使其在很短时间内发热升温，也会使抗拉强度降低，因此，通常控制的短路温度：对钢芯铝（或铝合金）绞线为 220℃；对钢绞线为 400℃。

然而目前正在兴起的耐热钢芯铝线和耐热钢芯铝合金绞线，允许温度可达 150~230℃，而抗拉强度并无明显降低，是因铝或铝合金线经特殊退火处理，使温度对强度的影响降低，从而可增大输送容量。

（四）材料的蠕变伸长

在常温下金属受到持续地张拉负荷下，引起材料内部分子结构随时间而增加其本身的永久变形，这种现象称为蠕变伸长。当施加很大的恒定张力时（如达到屈服极限左右），经过较短的时间就可能产生很大的蠕变伸长，而使材料截面变细、应力增大以致被拉断。当施加较低的张力时，金属开始时快速产生蠕变，随着时间的延长蠕变逐渐变慢直至终止。

电线的蠕变量及蠕变速度与张力、时间和温度成比例。在通常的使用张力下，钢线的蠕变量很小，而铜、铝线的蠕变量较大，如铝线在应力为 80N/mm^2 时，其永久变形率约为 6×10^{-4} ，其中大部分为蠕变伸长，少部分为非弹性塑性伸长。钢芯铝绞线的蠕变特性将在本章第三节及第八章第一节中详细讨论。

第二节 电线结构类型

电线从结构上分为单股线和多股线，而多股线又分多股实芯绞线、扩径绞线、自阻尼绞线和紧缩型绞线等，下面分述其特点。

一、多股实芯绞线

这种绞线广泛应用于电力线路上，如铝（或铝合金）绞线、钢绞线和钢芯铝绞线等。多股绞线与同截面的单股线相比，柔性好、易弯曲，从而可减轻因曲折或振动所产生的弯曲应力，各股强度上的缺陷点不会集中于同一断面，使整体强度保持均匀。

绞线的扭绞方式通常用同心分层扭绞（单绞），相邻层间扭绞方向相反，如图 1-1 (a) 所示。当股丝数目特别多时，为提高结构的稳定性和电线柔性，有时将电线做成双绞，即由许多按单绞构成的线束，再按单绞制成整条电线，如图 1-1 (b) 所示，著名的意大利 Messina 海峡 3650m 的大跨越导线就是采用这种双绞结构。

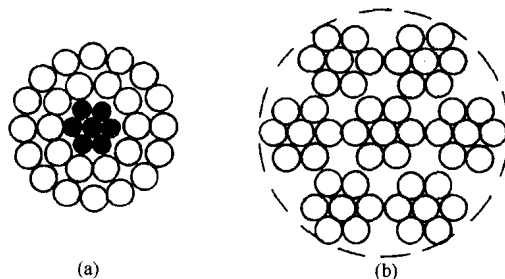


图 1-1 单绞和双绞导线截面图

(a) 单绞；(b) 双绞

二、扩径绞线

所谓扩径绞线，就是在相同的导电截面下所构成的绞线外径比实芯绞线的外径增大。这种绞线又分空芯型、支撑芯型、填充型和层间支撑型等多种。其用途主要为增大导线外径以减少高压线路和变电所母线的电晕和无线电干扰。在美国 20 世纪初、中期的高压线路上常采用扩径导线，我国在 330kV 高海拔地区线路上和变电母线上也采用过扩径导线。

（一）空芯型导线

这种空芯型导线的外形如图 1-2 所示。它的每股导体制成带扣的拱型断面，各股相扣连而成圆管形并扭绞制成，为保证扣连的强度和抗拉要求，该导线需用铜材加工，其加工工艺复杂，使其难以广泛应用。

（二）支撑芯型导线

该种导线的截面外形如图 1-3 所示。支撑芯架通常用“工”形或“U”形铜或铝材料拧成螺旋管作为非受力绕线支架，其上的内层绕钢线股，外层依次绕铝线股。国内生产厂也有用镀锌金属软管作支撑的扩径绞线，用于电厂或变电所的母线上。

（三）填充型导线

该种线芯为钢绞线，外面绕两层浸渍过、不水溶的细纸绳或塑料绳，其中每层混入两股铝线以保证横断面的稳定性，较外层或表面层缠绕铝股。其截面外形如同实芯导线图 1-1 (a) 一样。

（四）层间支撑型导线

该种导线与填充型相似，只是不加填充料，而是在钢芯与铝股层间缠绕 1~2 层每层 4 根（或更多）的拱形或圆形铝线股作支撑层，外面再密布铝股，其截面外形如图 1-4 所示。国内高海拔地区、部分 330kV 线路上曾采用过这种单层拱形支撑的扩径导线。

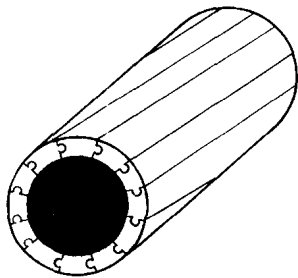


图 1-2 空芯型导线图

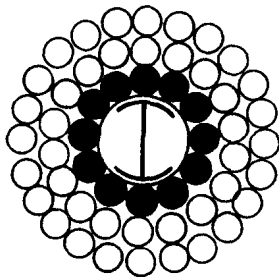


图 1-3 工形支撑芯导线截面图

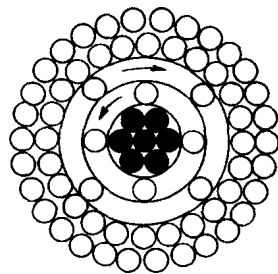


图 1-4 层间支撑型导线截面图

三、自阻尼型导线

从防振的目的出发，专门制造的一种对微风振动有很大阻尼作用的导线，称自阻尼导线。其阻尼作用为一般绞线的 3~15 倍，因此可以不必采取其他防振措施，并可提高导线的平均运行应力，常用于线路大跨越段。

自阻尼导线的结构有多种,常用的结构型式(国内生产的)是在铝线层之间及铝线层与钢芯之间保持 0.3~3mm 的间隙,铝线股呈拱形断面以保持层体和间隙的稳定性。其截面外形如图 1-5 所示。它是利用各层的固有频率不同,振动时产生动态干扰和层间的摩擦、碰击耗能,起到消振作用。

其他型式的自阻尼导线多是在股层间介入软金属或高滞后作用的非金属材料,以提高自阻尼作用。

另外,国内外新兴一种小弧垂钢芯铝绞线,其中钢芯采用高强度钢丝,铝股采用软态或半硬态铝线,架线时预加较大张力拉出铝股塑性伸长,使铝股松弛,架线后铝股基本不受张力。因此,能消耗较多振动能量,并提高铝股的耐振性能。同时可提高线温,增加传输容量。

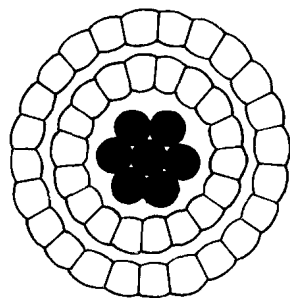


图 1-5 自阻尼型导线截面图

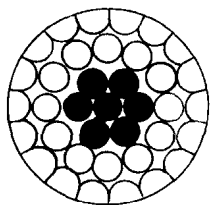


图 1-6 紧缩型导线截面图

四、紧缩型导线

该种导线是将圆线同心绞线通过特殊的模压,使外层线股挤成为扇状,使整根导线有一光滑的圆柱形表面。经压缩减小了空隙和外径,不仅使风、冰荷载减少,还有利于阻止导线的舞动,但易产生微风振动。其截面外形如图 1-6 所示。



第三节 圆线同心绞线的结构及物理性能

一、圆线同心绞线的扭绞理论

常用的电线都是单绞式的圆线股同心分层绞成,即整根电线的所有各层圆线股都围绕着一根芯线扭绞而成,即所谓圆线同心绞线。

(一) 绞线的股数与外径

单绞型绞线的线芯可以用 1~5 股的圆线股扭成,而以中心为一股者最好(现行线标中均为一股),这时的外径最小。各层的股数 Z_x 随该层股径 d_x (mm) 和相邻内层外径 D_i (mm) 而变,其近似关系式可写为

$$Z_x \approx \frac{\pi(D_i + d_x)}{d_x} \approx \frac{3(D_i + d_x)}{d_x} \quad (1-1)$$

式(1-1)中考虑了层中线股因具有扭绞斜角而在电线的垂直截面内线股呈椭圆、长径稍大于股径的因素。实际股数应取算出数值相接近的整数。如果相邻内、外层的股径相同均为 d 时,则内外层股数 Z_1 、 Z_2 为

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &\approx \frac{3(D_1 - d)}{d} \\ Z_2 &\approx \frac{3(D_2 + d)}{d} \\ Z_2 - Z_1 &= 6 \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

即相邻两层总是相差 6 股。如果电线的全部股径相同, 则由内向外各层的股数为 6 的等差级数即 6、12、18、24、30、…… $6n$ (n 为不计芯线的层数)。当钢芯股径与铝层股径不同时, 靠近钢芯第一层铝线股数可按式 (1-1) 计算, 其余层内的股数仍以每层增 6 股递增。随着层数的增加, 层内线股间的空隙加大, 为不使裸露内层线, 靠逐层减小节径比使线股绕得紧密无缝。

当整根电线股径相同时, 具有 n 层的电线, 其总股数 Z 由等差级数首项及公差为 6 时求得

$$Z = 3n(n+1) + 1 \quad (1-3)$$

当芯线外径 (如钢芯外径) 为 d_0 (mm), 其余 n 层股径均为 d (mm) 的电线外径 D 为

$$D = d_0 + 2nd \quad (1-4)$$

(二) 电线密实系数

电线的密实系数 q 为电线各股圆截面总和与外径圆面积之比值。当股径均相同为 d 时, 具有 n 层的电线密实系数 q 由上式 (1-3、4) 写为

$$q = \frac{(3n^2 + 3n + 1)d^2}{[(2n + 1)d]^2} = \frac{3\left(n^2 + n + \frac{1}{3}\right)}{4\left(n^2 + n + \frac{1}{4}\right)} \quad (1-5)$$

由式 (1-5) 可知 q 总是大于 0.75, 当考虑扭绞斜度和层数 n 很多时, q 接近 0.75。该系数也可用作防腐涂料的计算参数。

对于扩径导线则 q 值小于 0.75, 越小则表示扩径率越大。

(三) 绞线的扭角和节径比

线股沿内层芯线轴缠绕与轴线方向所成的夹角称为扭角 (或捻角), 以 β ($^\circ$) 表示。当线股以扭角 β 沿芯线外表缠绕一圈时, 其顺轴线方向所爬行的高度 l (mm) 称为扭绞节距。设该层线股的丝径为 d (mm)、绕后该层外径为 D_n (mm), 其展开平面图如图

1-7 所示, 其扭角的计算式为

$$\tan \beta = \frac{\pi(D_n - d)}{l} \quad (1-6)$$

该层节径比 m 为该层节距与该层外径 D_n 之比值, 由上式可写为

$$m = \frac{l}{D_n} = \frac{\pi(D_n - d)}{D_n \tan \beta} \quad (1-7)$$

绞线一般节径比在 10~26 之间^[1], 外层比内层较小。节径比 m 越小表示扭角越大 (在 D_n 和 d 不变下)。一般扭角在 10° 左右, 外层比内层扭角大。扭角越大表示单位轴向长度内扭绞的线股螺旋圈数 (或匝数) 越多、绕得越密实、可挠性越好, 但轴向抗拉强度则降低。

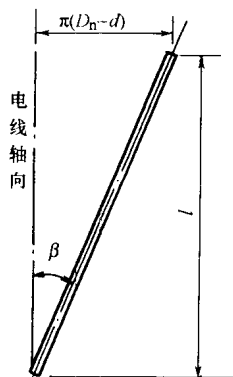


图 1-7 单股绞线展开平面图

(四) 电线的扭转力矩^[3]

图 1-8 中所示为单股绞线的受力图, 图中当该股线受轴向力 t 时, 将企图使线股向松绞方向转动, 其水平旋转力为 q 。若不使线股向松绞方向转动, 必须加外力 $-q$ 阻止旋转, 该外力与轴向力 t 合成为沿线股的股向力 p 。

图 1-8 中线股所在层内的股数为 z 、扭角为 β ($^\circ$)、股径为 d (mm)、轴向应力为 σ (N/mm²)、该层外径为 D_n (mm)、节径比为 m , 则该层企图松绞的总旋转力矩为

$$\begin{aligned} M &= \frac{(D_n - d)}{2} zq = \frac{1}{2} (D_n - d) zt \tan \beta \\ &= \frac{1}{8} (D_n - d) z \pi d^2 \sigma \tan \beta \\ &= \frac{z \sigma [\pi d (D_n - d)]^2}{8 m D_n} \quad (\text{N} \cdot \text{mm}) \end{aligned} \quad (1-8)$$

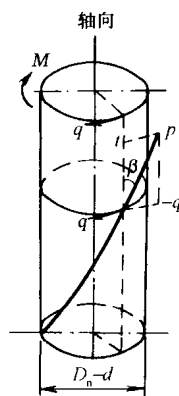


图 1-8 单股绞线受力图

为防止电线受拉力后产生松绞的旋转, 在制造电线时使相邻层扭绞方向相反, 以相互抵消一部分转矩。自式 (1-8) 可以看出, 要想将转矩全部抵消不太可能, 因为外层的线股数 z 较多且节径比 m 较小, 转矩较大。交叉扭绞的电线受拉力后整根的转矩并不大, 两端悬挂点处将会阻止其旋转。但在施工牵引时需防止其旋转松绞, 通常在牵引端悬挂平衡旋转的重物 (防转器) 即可抑制转动松股。

另外, 各导电层间交叉扭绞的另一有利因素是将电流的安培匝数大部相互抵消, 使其对钢芯的磁通减少而降低导线的阻抗。

(五) 电线的向心压力

如图 1-9 所示, 当单股线受轴向拉力 t 时, 其股向拉力 $p = t / \cos \beta$ 。因线股绕成螺旋状呈弧形, 股向力 p 将对内层线产生向心压力。图中示出半个节距的股线, 它对内层线产生的向心压力在 y 方向的合力为 $2p \sin \beta$, 是沿弧线各点压力的总和。

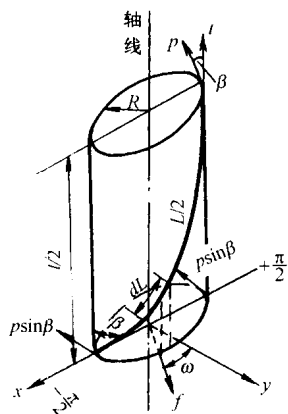


图 1-9 单股线向心压力图

设弧线单位长度上的向心压力的反力为 f , 弧长为 dL 段上的压力为 $f dL$, 该 dL 在 $x-y$ 断面圆弧上的投影长度为 $R d\omega$, 微量向心压力在 y 方向的分量为 $f dL \cos \omega$, 将其沿线股的弧线 $L/2$ 积分, 便可写出如下平衡方程:

$$\begin{aligned} 2p \sin \beta &= \int_{L/2} f \cos \omega dL = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{f(R d\omega)}{\sin \beta} \cos \omega \\ &= \frac{fR}{\sin \beta} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \omega d\omega = \frac{2fR}{\sin \beta} \end{aligned}$$

即

$$f = \frac{p \sin^2 \beta}{R} \quad (\text{N/mm}) \quad (1-9)$$