



带电作业

DAIDIAN ZUOYE
SHIYONG LIXUE

实用力学

李如虎 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

带电作业 DAIDIAN ZUOYE SHIYONG LIXUE 实用力学

李如虎 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

过去在带电作业中,由于对导线受力的大小估计不足,或对工具的受力状态不了解,所用工具不当而造成过事故。作者从事输电线路运行、检修及管理工作 40 余年,积累了丰富的实践经验和理论知识,多次到广西、云南、贵州等地培训一线员工,本书是在培训讲义的基础上编写而成。作者从工程实际出发,只侧重于介绍有关力学公式的应用,而不过多地进行公式的推导,在偏于保守的安全情况下对工具受力等进行简单的估算。全书共分四章,主要内容包括导线力学、工具的受力和强度计算、带电作业工具的机械试验、铝合金及其在带电作业上的应用。

本书可供输电线路运行、检修及管理人员使用,也可供相关人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

带电作业实用力学/李如虎编著. —北京:中国电力出版社, 2011. 7

ISBN 978 - 7 - 5123 - 1972 - 1

I. ①带… II. ①李… III. ①带电作业—力学 IV. ①TM72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 157026 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 [http: //www. cepp. sgcc. com. cn](http://www.cepp.sgcc.com.cn))

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 10 月第一版 2011 年 10 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 6.375 印张 141 千字

印数 0001—3000 册 定价 13.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

过去，由于从事带电作业的工程技术人员多来自电力专业，如配电、高电压专业等，所以对带电作业的电学知识如过电压、放电机理、安全距离、绝缘材料等比较熟悉并比较重视，而对带电作业力学方面的知识比较生疏且不够重视。因此，曾发生过对导线力（垂直的重力或水平的拉力）估算不足而使用的工具吨位偏小或偏大，对工具的受力状况不清楚致使工具的结构不合理、受力不均衡，或者对工具的使用不合理而造成事故等情况。带电作业的安全性要求很高，不但要求操作严谨，而且要求工具使用合理。在制定作业方案时不仅要考虑电气方面的安全，也要考虑受力方面的安全（特别是超高压线路，其导线的受力很大）。这就要求从事带电作业的人员不仅要熟悉电的知识，而且要熟悉力学方面的知识，如如何对带电作业时力的大小进行估算、如何分析工具的受力情况、如何进行强度计算等？作者从 20 世纪 80 年代开始陆续发表了十几篇这方面的文章，文章内容大致分两类：一类是导线力学问题，另一类是工具的受力和强度计算。后来又创造了土法进行带电作业工具的机械试验方法。现在把这些文章汇总并吸收他人的经验，进而编写成本书，仅供读者参考，并希望能引起有关人员对这

方面的重视。由于本人所学专业是电力系统及其自动化专业，力学知识有限，书中难免存在错漏之处，希望读者提出宝贵意见。

本书的部分插图由广西电力科学院黄捷帮助绘制，在此表示感谢！

编 者

2011年2月

目 录

CONTENTS

前言

第一章 导线力学	1
第一节 架空输电线路导线的状态方程式	1
第二节 在直线杆塔上作业时工具受力的详细计算和 简单估算	5
第三节 在耐张杆塔上作业时工具受力的详细计算和 简单估算	21
第四节 过牵引时导线应力变化的详细计算和简单估算 ..	32
第五节 架空线路悬重后导地线是否安全的验算和估计 ..	43
第二章 工具的受力分析和强度计算	59
第一节 力的基本知识	60
第二节 支拉吊线杆、保护绳的强度计算	76
第三节 紧线器的强度计算	79
第四节 卡具的受力分析和强度计算	82
第五节 托瓶架的受力分析和强度计算	87
第六节 立地扒杆的受力分析和强度计算	95
第七节 悬臂扒杆的受力分析和强度计算	103
第八节 绝缘立梯（独脚梯）的受力分析和强度计算 ..	107
第九节 绝缘横梯的受力分析和强度计算	117
第十节 绝缘盒式升降梯的受力分析和强度计算	120
第十一节 绝缘硬梯在制作和使用中的几个问题	134

第十二节 绝缘滑车组绳索的受力计算	139
第十三节 锚桩受力的计算	146
第十四节 工具的合理使用	153
第三章 带电作业工具的机械试验	159
第一节 常规试验	159
第二节 土法试验	165
第四章 铝合金及其在带电作业上的应用	169
第一节 YK-20 型铝合金带电作业工具	169
第二节 铝合金制造在带电作业上的应用	174
附录 常用绝缘材料的电气和机械性能	181
参考文献	198

导 线 力 学

导线力学就是计算导线在吊或拉时导线的重力或张力、过牵引时导线应力的变化、悬重作业时导线应力的变化等。

导线力学是一门复杂的柔索计算问题，悬挂的柔索可以近似地用抛物线计算，也可以用复杂的悬链线计算，但都十分复杂和费时。作为停电检修或带电作业，没有必要花费精力和时间去详细计算作业时工具所承受的垂直力或张力，在数百公斤甚至数千公斤的受力中精确计算到几公斤，在偏于保守的情况下将其受力粗算到十位数就已经足够了。所以，下面只介绍公式的应用，不过多地介绍公式的推导和来源，并在偏于保守的安全情况下对工具受力做出简单的估算。

第一节 架空输电线路导线的状态方程式

架空输电线路导线的张力 F 等于当时导线的应力 σ 乘上导线的全截面积 S ，即

$$F = \sigma S \quad (1-1)$$

导线的应力 σ 就是导线每平方毫米的平均受力，单位 kgf/mm^2 或 N/mm^2 ($1\text{kgf}/\text{mm}^2 = 9.8\text{N}/\text{mm}^2$ ，可近似取 $1\text{kgf}/\text{mm}^2 = 10\text{N}/\text{mm}^2$)。

导线的应力随温度和荷载（自重比载和风载）而变化，在不同气象条件下导线的应力可根据下面将要推导出的导线状态方程式进行计算。导线状态方程式是导线力学最基本的计算式，非常重要。

设在某一气象条件时，空气的温度为 t_m ，导线的比载为 g_m [导线的比载就是导线每平方毫米面积每米长度的重量，单位 $\text{kgf}/(\text{m} \cdot \text{mm}^2)$ 或 $\text{N}/(\text{m} \cdot \text{mm}^2)$]，此时导线的应力为 σ_m ，导线的长度为 l_m 。当改变到某一新的气象条件时，气温变为 t ，比载变为 g ，此时导线的应力变为 σ ，线长将变为 l ，即

$$l = l_m \{ [1 + \alpha(t - t_m)] [1 + \beta(\sigma - \sigma_m)] + \epsilon \} \quad (1-2)$$

其中 $\beta = \frac{1}{E}$

式中 α ——温度线膨胀系数 ($1/^\circ\text{C}$)；

E ——弹性模数 (N/mm^2)；

β ——弹性伸长系数 (mm^2/N)；

ϵ ——塑性相对变形，对金属而言因数值太小，故可忽略不计。

如果导线两端悬点等高，可用抛物线方程表述导线线长 l 与档距 L 的关系，即

$$l = L + \frac{l^3 g^2}{24\sigma^2}$$

$$l_m = L + \frac{l_m^3 g_m^2}{24\sigma_m^2}$$

将上两式代入式 (1-2) 得 (ϵ 忽略不计)

$$\begin{aligned} L + \frac{L^3 g^2}{24\sigma^2} &= \left(L + \frac{L^3 g_m^2}{24\sigma_m^2} \right) [1 + \alpha(t - t_m)] [1 + \beta(\sigma - \sigma_m)] \\ &= \left(L + \frac{L^3 g_m^2}{24\sigma_m^2} \right) [1 + \alpha(t - t_m) + \beta(\sigma - \sigma_m) \\ &\quad + \alpha\beta(t - t_m)(\sigma - \sigma_m)] \end{aligned}$$

上式中 α 、 β 均极小, $\frac{L^3 g_m^2}{24\sigma_m^2}$ 亦很小, 故方括号中最后一项可略去, 且将方括号中之第二、第三两项与 $\left(\frac{L^3 g_m^2}{24\sigma_m^2}\right)$ 的乘积也略去, 则上式可简化为

$$L + \frac{L^3 g^2}{24\sigma^2} = L + \frac{L^3 g_m^2}{24\sigma_m^2} + \alpha L(t - t_m) + \beta(\sigma - \sigma_m)$$

将两端各除以 βl 并将 $l = L + \frac{L^3 g^2}{24\sigma^2}$ 代入, 经整理即得导线的状态方程式

$$\sigma - \frac{L^2 g^2}{24\beta\sigma^2} = \sigma_m - \frac{L^2 g_m^2}{24\beta\sigma_m^2} - \frac{\alpha}{\beta}(t - t_m) \quad (1-3)$$

式中 L 为代表档距, 它的物理意义是, 因为地形的影响, 每一耐张段内各直线档距的长度不一定相等。尤其线路经过山区时, 档距相差悬殊, 因此各档距中导线的张力和应力大小不等。这时各直线杆塔上的悬式绝缘子串, 将因两端张力不等而向张力大的一侧偏斜。偏斜的结果促使两侧张力获得平衡。整个耐张段中, 经过绝缘子串的逐档偏斜后, 使各档又获得了一个相等的应力, 与这一应力相对应的档距, 即为代表档距。据此概念推导出代表档距的计算公式

$$L = \sqrt{\frac{\sum L_i^3}{\sum L_i}} = \sqrt{\frac{L_1^3 + L_2^3 + \dots + L_n^3}{L_1 + L_2 + \dots + L_n}} \quad (1-4)$$

当导线两端悬挂点高差超过档距的 25% 时 (即 $\frac{h}{L} \leq 0.25$, h 是高差, L 是档距), 如用平抛物线法计算, 则其误差过大, 这时需要采用斜抛物线法计算。此时又分两种情况:

(1) 大高差档距包含在连续档中。这时仍可用式 (1-3) 的状态方程式计算, 不过式中的档距应代入用下式计算的含有大高差档距的代表档距, 即

$$L = \sqrt{\frac{\sum \frac{L_i^3}{\cos^3 \varphi_i}}{\sum \frac{L_i}{\cos \varphi_i}}} \quad (1-4)'$$

(2) 大高差为孤立档。这时高差角直接反映在导线的状态方程中, 即

$$\sigma - \frac{L^2 g^2 \cos^3 \varphi}{24\beta\sigma^2} = \sigma_m - \frac{L^2 g_m^2 \cos^3 \varphi}{24\beta\sigma_m^2} - \frac{\alpha}{\beta} (t - t_m) \cos \varphi \quad (1-3)'$$

式中 φ 为高差角, 即两悬挂点的连线与水平线的夹角, 其示意图见图 1-1。

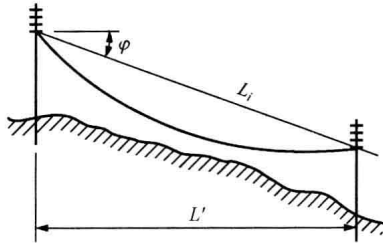


图 1-1 高差角示意图

当导线两端悬挂点高差超过档距的 25% 时 (即 $\frac{h}{L} > 0.25$), 即使用上述的斜抛物线方程式求解, 误差也仍很大, 这时要用悬链线公式计算 (此处略)。

应用导线状态方程式 (1-3) 或式 (1-3)', 当某一气象条件 (比载为 g_m 、温度为 t_m) 下的应力 σ_m 为已知时, 可求得另一气象条件, 也就是作业时的气象条件 (比载为 g 、温度为 t) 下的导线应力 σ 。问题是如何确定用什么气象条件作为已知条件? 下面将会说明, 停电检修或带电作业最接近的气象条件就是线路安装时的气象条件 (因为线路不会在最大风速, 也不会最低气温下放紧线, 更不会在导线有覆冰的情况下放紧线), 只是

作业时两者的温度不一样。

在某条线路的某档进行停电检修或带电作业时，线路导线规格是已知的，从而导线的比载（只有自重比载） g_m 也是已知的。知道作业时的温度就可以从安装曲线查出作业前导线的应力 σ_m ，而且作业档的档距 L_m 也是知道的，又因为作业时的档距 L 和作业前的档距 L_m 相同（ $L=L_m$ ），作业时的比载 g 和作业前的比载 g_m 相同（ $g=g_m=g_1$ ），作业前后的温度 t_m 、 t 相近或相同（可认为 $t_m=t$ ），材料的温度线膨胀系数 α 和弹性伸长系数 β 也是已知的，故可将这些已知的数值代入状态方程式（1-3）或式（1-3）'，简化后得到一个类似于 $\sigma^3+b\sigma^2=c$ 的一元三次方程，用试凑法解此方程就可求出作业时导线的应力 σ 。

第二节 在直线杆塔上作业时工具受力的详细计算和简单估算

一、柔索的计算（导线弧垂和应力的关系）

柔索由细而长的索组成，只承受轴向拉力，如图1-2所示。

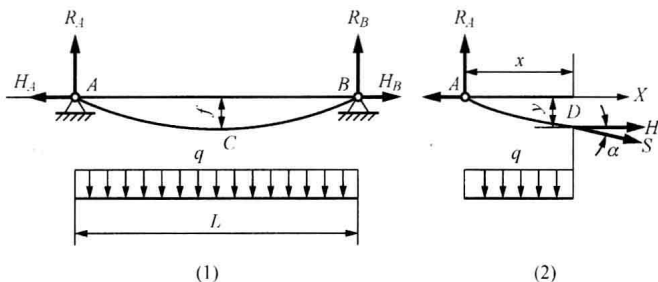


图 1-2 柔索的受力方式

柔索两端悬于定点，在载荷作用下中部下垂，呈悬链状。悬链线柔索的计算非常复杂，即使是专门计算导线应力和弧垂

的设计部门，一般也是用抛物线近似代替悬链线方法计算。

设柔索下垂成某一曲线 ACB ，两支座的水平投影距离称为跨度（在架空线路工程中称为档距），柔索中部下垂距离称为垂度（在架空线路工程中称为弧垂）。在曲线 ACB 与弦 AB 的长度相差不超过 10% 的情况下，柔索的重量可视为沿水平线均匀分布。我们用 q 表示均匀分布在跨度上单位长度的载荷，单位为 kN/m 。曲线的受力情况如图 1-2 (1) 所示，柔索 A 点的反力为 R_A 、 H_A ， B 点的反力为 R_B 、 H_B 。显然，由柔索的平衡条件，不能求出四个未知反力，但分别由 A 点和 B 点的平衡条件 $\sum M_A = 0$ 和 $\sum M_B = 0$ 可得

$$R_B L - \frac{1}{2} q L^2 = 0$$

$$R_A L - \frac{1}{2} q L^2 = 0$$

从而得到如下结果

$$R_A = R_B = \frac{1}{2} q L \quad (1-5)$$

可见，柔索的垂直反力 R_A 、 R_B 与柔索的形状无关。其物理意义是：悬挂点的垂直反力等于其线长重量的一半；反过来说，线长的一半重量是由悬挂点承重的。对连续的架空线路来说，杆塔两侧各线长的一半重量是由一个悬挂点承重，这个悬挂点就是直线绝缘子串所承受的重力。在线长与档距相差不大于 10% 的情况下，线长可以近似地取垂直档距的长度 [这就可得到后面的直线绝缘子串垂直荷重的计算公式 (1-18)]。

至于水平反力，可由力的平衡条件 $\sum P_x = 0$ 求得 $H_A = H_B$ ，其大小推导如下。

设在截面 D 处把柔索截开，见图 1-2 (2)。由于只受拉力，因此在 D 截面柔索的拉力 S 是沿曲线切线方向的力，它的水平

分力为 H 。因为是小垂度柔索，可认为 $S_{\max} = H$ ，由平衡条件得

$$S_{\max} = H = H_A = H_B$$

对 D 点写平衡条件得

$$\sum M_P = 0$$

$$R_A X - H_A Y - \frac{1}{2} q X \cdot X = 0$$

$$\therefore R_A = \frac{1}{2} q L$$

$$\therefore Y = \frac{\frac{1}{2} q L X - \frac{1}{2} q X^2}{H} \quad (1-6)$$

若垂度 f 已知，则将 $X = \frac{L}{2}$ ， $y = f$ 代入式 (1-6) 求得

$$f = \frac{qL^2}{8H} \quad (1-7)$$

$$\text{或} \quad H = \frac{qL^2}{8f} \quad (1-8)$$

将 H 值代入式 (1-6)，则

$$Y = \frac{4fX(L-X)}{L^2} \quad (1-9)$$

式 (1-9) 为柔索的曲线方程，在沿水平均匀分布载荷的作用下，柔索呈一抛物线（这当然是近似的）。

如果将柔索视为导线，在式 (1-7) 的右边分子、分母同除以导线的截面积 S ，则

$$f = \frac{qL^2}{8H} = \frac{\frac{q}{S}L^2}{8\frac{H}{S}} = \frac{gL^2}{8\sigma} \quad (1-10)$$

式中 H ——导线上某点（可以是任一点）的水平力，在公式推导中被消除；

- g ——导线的比载 ($\text{N}/\text{m} \cdot \text{mm}^2$);
 σ ——导线的应力 (N/mm^2);
 L ——档距, 连续档指代表档距 (m);
 f ——导线的弧垂 (m).

式 (1-10) 就是计算导线弧垂的公式。

二、导线的比载

在进行导线机械计算时, 把单位长度和单位截面上所承受的荷载称作比载, 用符号 g 来表示。由于导线在不同气象条件下 (例如覆冰或风压) 有不同的载荷, 所以导线的比载也有下列几种。

(一) 自重比载 g_1

由导线本身自重所计算出的比载叫自重比载, 记为 g_1 。各种规格导线在出厂时均给出每公里的重量 q_1 , 所以比载可按下式求得

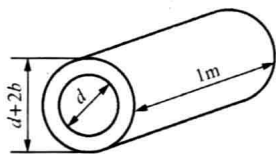
$$g_1 = \frac{q_1}{S} \times 10^{-3} [\text{N}/(\text{m} \cdot \text{mm}^2)] \quad (1-11)$$

式中 S ——导线的实际全截面积 (包括铝股和钢芯的总面积, mm^2)。

(二) 冰重比载 g_2

当导线上覆有冰层时, 其导线外面形成冰筒的体积 (取 1m 长计算, 见图 1-3) 为

$$V = \frac{\pi}{4} [(d+2b)^2 - d^2] = \pi b(d+b) \times 10^3 (\text{mm}^2)$$



式中 b ——冰层厚度 (mm);

d ——导线外径 (mm)。

1m 长冰筒的重量为

$$q_2 = Vr_0 = \pi b(d+b)r_0 \times 10^3 (\text{N})$$

式中 r_0 ——冰的比重。

图 1-3 冰筒的体积

取 $r_0=0.9$ ，则

$$g_2 = \frac{q_2}{S} = 2.38 \times \frac{b(d+b)}{S} \times 10^{-3} [\text{N}/(\text{m} \cdot \text{mm}^2)] \quad (1-12)$$

(三) 垂直比载 g_3

自重比载与冰重比载之代数和为垂直比载 g_3 ，即

$$g_3 = g_1 + g_2 [\text{N}/(\text{m} \cdot \text{mm}^2)] \quad (1-13)$$

(四) 风压比载 g_4

由水平作用在导线上的风压所计算出的比载叫风压比载，记为 g_4 ，可按下式计算

$$g_4 = \frac{\alpha_F F K d V^2}{16S} \times 10^{-3} [\text{N}/(\text{m} \cdot \text{mm}^2)] \quad (1-14)$$

$$F = 1 \times d \times 10^{-3} = d \times 10^{-3} (\text{mm}^2)$$

式中 V ——风速 (m/s)；

α_F ——风速不均匀系数；

F ——受风面的投影面积；

d ——导线直径 (mm)；

S ——导线实际的全截面积 (mm^2)；

K ——体型系数。

α_F 和 K 两个系数列于表 1-1 和表 1-2 中。

表 1-1 α_F 系数

风速范围 (m/s)	α_F
$V < 20$	1.00
$20 \leq V < 30$	0.85
$30 \leq V < 35$	0.75
$V \geq 35$	0.70

表 1-2 K 系数

导线 (避雷线) 的计算直径 (mm)	K
$d < 17$	1.2
$d \geq 17$	1.1
覆冰时，不论直径大小	1.2

(五) 覆冰时的综合比载 g_5

导线覆冰时的综合比载 g_5 是导线的垂直比载 g_3 和风压比载 g_4 的几何和

$$g_5 = \sqrt{g_3^2 + g_4^2} = \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + g_4^2} \quad [\text{N}/(\text{m} \cdot \text{mm}^2)] \quad (1-15)$$

(六) 无冰时的综合比载 g_6

导线无冰时的综合比载 g_6 是导线的自重比载 g_1 和风压比载 g_4 的几何和

$$g_6 = \sqrt{g_1^2 + g_4^2} \quad [\text{N}/(\text{m} \cdot \text{mm}^2)] \quad (1-16)$$

在计算导线各种比载时,其风速大小及覆冰厚度都应按线路所在的气象区的各种组合条件确定。例如带电作业不允许在导线覆冰时进行,这时冰重比载 $g_2=0$,垂直比载 g_3 就只有导线的自重比载 g_1 ,综合比载就只有无冰时的综合比载 g_6 。所以在带电作业机械计算中,经常使用到的比载是 g_1 、 g_4 、 g_6 。

(七) 带电作业的气象条件组合

导线比载计算涉及典型气象组合条件的选定。按照《电业安全工作规程(电力线路部分)》(简称《安规》)的规定,在覆冰时不得进行带电作业,因此考虑的比载只有 g_1 、 g_4 、 g_6 。《安规》还规定风力大于5级时,一般不宜进行带电作业。5级风的风速是10m/s,也就是说风压比载 g_4 按10m/s的风速用式(1-14)计算。至于最低作业温度,《安规》没有作出具体规定,各地可以根据当地的具体情况作出规定。例如,东北地区规定最低作业温度不得低于 -15°C ,广西规定不得低于 -5°C 。

在不作精确验算时,有时也采用线路设计中安装条件的气象组合(各地有所不同,要查该地区或该线路设计所使用的安装气象条件,例如东北地区的安装气象条件是风速10m/s、气温 -15°C)来代替带电作业或停电检修作业的气象条件。因为