

365855

架空送电线路的弛度

(日本)竹下英世著

王伟兴译



中国工业出版社

841
148

架空送电线路的弛度

——弛度和拉力的理論及其計算——

(日本)竹下英世著

王 偉 兴 譯

中国工业出版社

本书介绍架空送电线路的弛度和拉力的理论及其计算方法，共分十一章，首先叙述弛度的基本理论，然后分别介绍各种计算方法，弛度设计，弛度的观测方法等。本书理论结合实用，有些章后附有例题，可供参考。

本书是送电线路的设计、施工技术人员的学习和参考用书，送电线路的运行人员也可阅读。

竹下英世

架空送電線の弛度

電力社 東京 1962年第四版

* * *

架空送电线路的弛度

弛度和拉力的理论及其计算

王伟兴译

*

水利电力部办公厅图书编辑部编辑(北京阜外月坛南街)

中国工业出版社出版(北京德胜门内大街10号)

北京市书刊出版业营业登记证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $6^{1/4}$ ·字数161,000

1965年3月北京第一版·1965年3月北京第一次印刷

印数0001—10,190·定价(科六)1.00元

*

统一书号: 15165·3650(本电-480)

目 录

第 1 章	弛度計算的重要性	1
第 2 章	弛度的基本理論	1
2-1	导线所形成曲线的特性	1
2-2	悬鏈方程式的推导	2
2-3	导线的实际长度、弛度和拉力	5
	摘要	6
第 3 章	按拋物綫的近似計算	6
3-1	級数展开計算法	7
3-2	用簡略法解微分方程式	8
3-3	根据力平衡原理的簡略算法	8
	摘要	9
	例題	9
第 4 章	悬挂点不等高时的弛度	12
4-1	水平弛度	12
4-2	斜弛度	14
4-3	决定斜弛度的簡便方法(異长法)	16
4-4	导线的实际长度	19
	摘要	20
	例題	20
第 5 章	弛度設計(其一)	24
5-1	概論	24
5-2	导线的拉断力和最大使用拉力	25
5-3	加在导线上的荷重	27
5-3-1	导线的自重	27
5-3-2	风压荷重	27
5-3-3	覆冰和积雪	37
5-4	气温	38
5-5	高温季节荷重和低温季节荷重	38
5-6	負荷系数	40

IV

5-7 弛度設計方程式	41
5-8 組合絞線的彈性系數和線膨脹系數	45
摘要	48
例題	49
第 6 章 弛度設計 (其二)	56
6-1 弛度的假定和弛度樣板	56
6-2 臨界檔距	58
6-3 臨界溫度及臨界拉力	59
6-4 弛度和拉力曲線圖	61
6-5 導線的半永久伸長	61
6-6 代表檔距	63
摘要	64
例題	65
第 7 章 弛度的簡捷圖表	68
7-1 布倫德爾圖表	68
7-2 正切圖表	70
7-2-1 原理	71
7-2-2 正切圖表的繪制方法	73
7-2-3 正切圖表的使用方法	73
7-2-4 用正切圖表解釋臨界檔距及臨界溫度	76
摘要	78
例題	78
第 8 章 架線設計	79
8-1 概論	79
8-2 加在絕緣子串懸掛點上的垂直荷重	80
8-3 加在懸垂絕緣子串上的最大荷重	81
8-4 風壓使懸垂絕緣子串產生的搖擺	83
8-5 水平角使懸垂絕緣子串產生的經常偏移	84
8-6 導線的懸鏈角 (直線杆塔)	85
8-7 絕緣子串的懸鏈角 (耐張杆塔)	86
8-8 架空避雷線的懸鏈角	87
8-9 導線在懸掛點上的拉力	87

8-10 跳线长度的計算	88
8-11 紧线弛度的計算	91
8-12 鉄塔裕度表	95
摘要	96
例題	97
第9章 弛度的各种观测方法	112
9-1 概論	112
9-2 等长法(直接法之一)	112
9-3 異长法(直接法之二)	113
9-4 水平弛度法(直接法之三)	114
9-5 角度法(直接法之四)	115
9-6 确定弛度时应该注意的問題	115
9-7 拉力表法(間接法之一)	117
9-8 測量导线摇摆的簡諧振动周期法(間接法之二)	118
9-9 使用机械的冲击波方法(間接法之三)	119
摘要	120
例題	121
第10章 弛度和送电线路的設計	122
10-1 概論	122
10-2 导线排列	122
10-3 导线和大地之間の間隔	123
10-4 导线相互之間の間隔	126
10-4-1 水平线間距离	127
10-4-2 垂直线間距离	129
10-4-3 横距	129
10-4-4 架空避雷线的位置	130
10-5 对于风力使导线产生摇摆的考虑	131
10-6 覆冰和积雪使导线下垂或覆冰脫落使导线跳跃	134
10-7 用李沙育图形法驗算线間距离	136
10-8 架空避雷线的弛度	138
10-9 标准档距和最大使用拉力的决定	139
10-10 由于外部条件的微小变化使弛度和拉力产生的微小变化	140

V

10-11	直线杆塔档距上的断线	142
10-12	导线的振动和弛度与拉力	143
10-13	机械上的强度配合	144
10-14	弛度对于线路参数的影响	145
	摘要	146
第11章	使用悬链方程式计算弛度	148
11-1	概論	148
11-2	使用弛度函数表的方法	148
11-3	托馬斯图表法	149
11-4	有高度差时	149
11-5	抛物线方程和悬链方程的比較	153
	摘要	153
附录1.	大档距的例子	154
附录2.	主要符号	158
附录3.	关于电阻应变仪式的架线用拉力表	159
附录4.	表明混线机会的公式	171
附录5.	新铝线规范 (JEC-130, 1954) 中的导线表	183
附录6.	常用对数表、三角函数表、指数函数表及双曲线函数表	186
附录7.	第二种完全椭圆积分表	194

第 1 章 弛度計算的重要性

为什么弛度計算非常重要呢？簡而言之，就是因为导綫长度的很小变化，会使弛度和拉力产生非常大的变化。导綫因温度变化而产生的伸縮，以及由于荷重变化而产生的弹性伸縮，虽然与导綫的实际长度相比其百分比很小，但是所引起的弛度和拉力的变化却是相当大的。这就是弛度計算所以成为送电綫路設計和施工的重要基础計算之一的理由。

弛度設計之所以必要，是因为：

1. 导綫的弛度越大它的拉力就越小，从而使安全系数变大；
2. 但如片面地加大弛度，則将使杆塔变高，这不仅不經濟，而且将增加导綫因风摆动和因覆冰下垂、跳跃等引起事故的机会。

因此，有必要考虑上述两方面，适当地設計导綫的弛度和拉力。而且还必須正确地掌握各种不同气象条件下的弛度和拉力的状态，以及在架綫时它們之間的关系。

近年随着超高压送电綫路的发展，越来越多地使用大截面的导綫或分裂导綫，而且跨越海峡的送电綫路已成为今天的議論中心，所以进一步討論弛度的理論，相信决不会是徒劳无益的。

第 2 章 弛度的基本理論

2-1 导綫所形成曲綫的特性

假定导綫是柔韌的，那么在悬挂状态的导綫上任意一点的拉力方向，應該和那一点的曲綫方向一致。我們来討論一下当导綫悬挂在如图 2-1 中等高的悬挂点 A ， B 上时，导綫上任意一点 P

的力平衡关系如何。

P 点的导线拉力 T_P 的方向和导线同一点的切线方向一致，

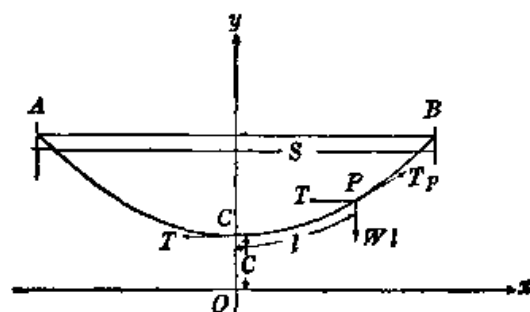


图 2-1

同时在 P 点还作用着一个垂直分力，它相当于从导线最低点 C 到 P 点之间 $\widehat{CP}$ 段的导线重量。假定均质导线单位长度的重量为 W ，并且如果忽略由于拉力而引起的导线伸长， l 为 $\widehat{CP}$

段导线的实际长度，则作用于 P 点的垂直分力为 Wl 。为了使 P 点的力的平衡关系成立，还必须存在着水平分力 T ；根据力的平衡原理，

$$T_P^2 = T^2 + (Wl)^2. \quad (2-1)$$

因为 P 是导线上的任意一点，所以我们知道导线上任何一点都存在着 2-1 式的关系。当 $l=0$ 时， $T_P=T$ ，即 T 为导线最低点 C 的拉力。

不管 P 点在那里，导线重量 Wl 为 P 点的拉力 T_P 的垂直分力平衡着，这是很重要的问题。明确地认识这个问题是掌握弛度的第一步。如果认识到了这个问题，就知道只要导线有重量，那么要使导线的弛度等于 0，把导线水平地悬挂在两个悬挂点之间，是不可能的。为什么呢？因为那样 T_P 就无限地接近于水平方向，而且为了获得能够承担 Wl 的垂直分力，在理论上 T_P 必须是无穷大，因而在达到这种情况前，导线将被拉断或者杆塔被拉倒。

2-2 悬链方程式的推导

在 P 点附近取一段很短的导线 Δl ，则可得到力的平衡关系如下：

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\Delta l}{\Delta x} &= \frac{T_P}{T} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\Delta l}{\Delta y} = \frac{T_p}{Wl} \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

微分方程式 2-2 表明了導線所形成曲綫的特性，解此方程式就可以得到架空導綫在悬挂时所形成曲綫的方程式。下面求解 2-2 式。

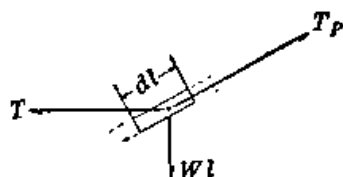


图 2-2

根据 2-2 式

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{W}{T'} \cdot l, \quad (2-3)$$

如令
$$\frac{T}{W} = c,$$

則
$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{l}{c}, \quad (2-4)$$

令 $\Delta x \rightarrow 0,$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{l}{c},$$

再将上式微分

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{c} \frac{dl}{dx} = \frac{1}{c} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2}. \quad (2-5)$$

令
$$\frac{dy}{dx} = p, \quad (2-6)$$

根据 2-5 式

$$\frac{dp}{dx} = \frac{1}{c} \sqrt{1 + p^2},$$

$$\frac{dp}{\sqrt{1 + p^2}} = \frac{dx}{c},$$

$$\int \frac{dp}{\sqrt{1 + p^2}} = \int \frac{dx}{c},$$

所以
$$\log_e(\sqrt{1 + p^2} + p) = \frac{x}{c} + K_1,$$

式中 K_1 是积分常数。因为在导线最低点 C 处, $x=0$, $\frac{dy}{dx}=p=0$, 代入上式, 则得:

$$\begin{aligned}\log_e 1 &= 0 + K_1, & K_1 &= 0; \\ \log_e (\sqrt{1+p^2} + p) &= \frac{x}{c},\end{aligned}\quad (2-7)$$

所以 $\sqrt{1+p^2} + p = e^{\frac{x}{c}}.$ (2-8)

或 $\frac{1}{\sqrt{1+p^2} + p} = e^{-\frac{x}{c}}.$ (2-9)

将方程式2-9的分母和分子都乘上 $(\sqrt{1+p^2} - p)$, 则得:

$$\sqrt{1+p^2} - p = e^{-\frac{x}{c}}. \quad (2-10)$$

从2-8式减2-10式, 得:

$$2p = e^{\frac{x}{c}} - e^{-\frac{x}{c}},$$

因此 $p = \frac{e^{\frac{x}{c}} - e^{-\frac{x}{c}}}{2} = \sinh \frac{x}{c},$ (2-11)

即 $\frac{dy}{dx} = \sinh \frac{x}{c},$ (2-12)

所以 $y = \int \sinh \frac{x}{c} dx = c \cosh \frac{x}{c} + K_2,$

式中 K_2 是积分常数。

在导线的最低点 $x=0$, 所以 $y=c+K_2$ 。因此若在选择导线最低点 C 的坐标时, 恰好使 $y=c$, 则 $K_2=0$; 这样在计算时是非常方便的。此时导线所形成的曲线可用下式表示:

$$y = c \cosh \frac{x}{c}. \quad (2-13)$$

这就是说导线在悬挂时所形成的曲线只决定于2-4式的 $c = \frac{T}{W}$ (水平拉力和单位长度导线重量的比值), 当导线单位长度的重量 W 为一定时, 判明水平拉力 T 越大导线就越紧, T 越小导线就越松弛。

2-3 导线的实际长度、弛度和拉力

从导线最低点 C 到任意一点 P 的导线的实际长度 $\widehat{CP} = l$, 则

$$l = \int_0^x dl = \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx,$$

将2-12式代入上式得:

$$l = \int_0^x \sqrt{1 + \sinh^2 \frac{x}{c}} dx = \int_0^x \cosh \frac{x}{c} dx = c \sinh \frac{x}{c},$$

$$\text{即} \quad l = c \sinh \frac{x}{c}. \quad (2-14)$$

假定图2-1中悬挂点 AB 间的水平距离 (称为档距) 为 S , AB 间的导线实际长度为 L_0 则

$$L_0 = 2l_{(x=\frac{S}{2})} = 2c \sinh \frac{S}{2c}, \quad (2-14')$$

P 点和 C 点的高度差为

$$y - c = c \left(\cosh \frac{x}{c} - 1 \right). \quad (2-15)$$

2-15式的 $(y - c)$ 是从 P 点开始计算的弛度, 但是普通所说的弛度, 是指导线的悬挂点和最低点的高度差, 因此

$$\text{弛度} = d = y_{(x=\frac{S}{2})} - c = c \left(\cosh \frac{S}{2c} - 1 \right), \quad (2-15')$$

根据2-2式 P 点的导线拉力

$$T_P = T \frac{dl}{dx},$$

又根据 2-14 式, $l = c \sinh \frac{x}{c}$, 所以 $\frac{dl}{dx} = \cosh \frac{x}{c}$, 因此

$$T_P = T \cosh \frac{x}{c} = W \cdot c \cosh \frac{x}{c} = Wy. \quad (2-16)$$

悬挂点的拉力

$$\begin{aligned} T_B &= Wy_{(x=\frac{S}{2})} = W \left\{ y_{(x=\frac{S}{2})} - c + c \right\} \\ &= W(d + c) = cW + Wd = T + Wd. \end{aligned} \quad (2-16')$$

这就是說，悬挂点的拉力等于水平拉力加上导线单位长度的重量乘弛度之积。

摘 要

1. 导线所形成的曲线方程式: $y = c \cosh \frac{x}{c}$ 。

2. 导线的实际长度:

从导线最低点到任意一点的长度 $l = c \sinh \frac{x}{c}$;

悬挂点之间的导线长度 (悬挂点等高时) $L_0 = 2 c \sinh \frac{S}{2c}$ 。

3. 弛度:

从任意一点计算的弛度 $y - c = c \left(\cosh \frac{x}{c} - 1 \right)$;

从悬挂点计算的弛度 $d = c \left(\cosh \frac{S}{2c} - 1 \right)$ 。

4. 拉力:

水平拉力 $T = cW$;

任意一点的拉力 $T_P = Wy$;

悬挂点的拉力 $T_R = T + Wd$ 。

5. 切記弛度計算中的符 号 $c = \frac{T}{W}$ 是很重要的。

第 3 章 按拋物綫的近似計算

如前所述，导线所形成的曲线为一悬链线方程式，由于双曲线函数的计算非常繁杂，所以在许多情况下只取2-13和2-14式按级数展开的前两项，把悬链线近似地当作抛物线进行计算。这样，正如本章的例题所指出：当弛度不大于档距的10%时，按抛物线考虑的近似算法所引起的誤差是很小的。

3-1 級数展开計算法

根据2-13和2-14式,

$$y=c \cosh \frac{x}{c}=c \left\{ 1 + \frac{1}{2!} \left(\frac{x}{c} \right)^2 + \frac{1}{4!} \left(\frac{x}{c} \right)^4 + \frac{1}{6!} \left(\frac{x}{c} \right)^6 + \dots \right\},$$

$$l=c \sinh \frac{x}{c}=c \left\{ \left(\frac{x}{c} \right) + \frac{1}{3!} \left(\frac{x}{c} \right)^3 + \frac{1}{5!} \left(\frac{x}{c} \right)^5 + \dots \right\},$$

取上述两式右边的前两项:

$$y=c + \frac{x^2}{2c}, \quad (3-1)$$

$$l=x + \frac{x^3}{6c^2}. \quad (3-2)$$

在通常情况下都使用近似式3-1和3-2来计算。3-1式是表示拋物綫方程式, 而用来表示导綫实际长度的3-2式不能看作是“拋物綫的长度”, 应该认为是“双曲綫函数展开式的前两项”。使用3-1和3-2式来计算时, 弛度 d 可根据2-15'式

$$\begin{aligned} d &= y\left(x - \frac{s}{2}\right) - c \\ &= c + \frac{1}{2c} \left(\frac{S}{2}\right)^2 - c = \frac{S^2}{8c}. \end{aligned} \quad (3-3)$$

将 $c = \frac{T}{W}$ 代入上式:

$$d = \frac{WS^2}{8T}. \quad (3-3')$$

两个悬挂点之間的导綫实际长度:

$$\begin{aligned} L_0 &= 2l\left(s - \frac{s}{2}\right) \\ &= 2 \left\{ \frac{S}{2} + \frac{1}{6c^2} \left(\frac{S}{2}\right)^3 \right\} \end{aligned}$$

$$= S + \frac{S^3}{24c^2}.$$

將 $c = \frac{T}{W}$ 代入上式:

$$L_0 = S + \frac{W^2 S^3}{24T^2}. \quad (3-4)$$

上式可以改写成:

$$\begin{aligned} L_0 &= S \left\{ 1 + \frac{8}{3} \left(\frac{WS}{8T} \right)^2 \right\} \\ &= S \left\{ 1 + \frac{8}{3} \left(\frac{d}{S} \right)^2 \right\}. \end{aligned} \quad (3-4')$$

3-2 用簡略法解微分方程式

因为弛度对于档距来讲是很小的, 所以通常在計算弛度时, 把导綫长度和档距看作等长, 并不会引起很大的誤差。因此假定 2-3 式的 $l \approx x$,

$$\frac{dy}{dx} = \frac{W}{T}x = \frac{x}{c} \quad \text{①}$$

$$\therefore y = \frac{x^2}{2c} + K$$

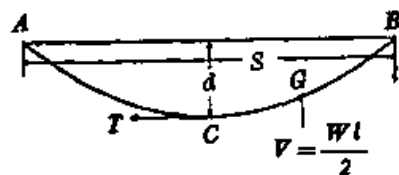


图 3-1

式中 K 是积分常数。

如果在选择座标时, 使 $x=0$, 則 $y=c$, 所以 $y=c + \frac{x^2}{2c}$ ② 也就是 3-1 式。

3-3 根据力平衡原理的簡略算法

在图 3-1 中, 作用于半档导綫 $\widehat{CGB}$ 上的力为:

● 原书誤为 $\frac{dy}{dx} = \frac{W}{T}x = cx$ 。——譯者

● 原书誤为 $K = c + \frac{x^2}{2c}$ 。——譯者

1. 导線最低点 C 的水平拉力 T ;

2. 和作用于导線重心 G 的垂直力 V 对 B 点的力矩相平衡。根据力矩的平衡原理可得出:

$$T \cdot d = V \cdot \frac{S}{4} = \frac{WS}{2} \cdot \frac{S}{4} = \frac{WS^2}{8},$$

$$d = \frac{WS^2}{8T}.$$

上式和 3-3 式相吻合。在上述簡略計算中, 也近似的将档距和导線的实际长度看作相等, 并且假定半档导線的重心位于半档的中間。

摘 要

1. 近似的把悬鏈线当作抛物线, 則:

$$y = c + \frac{x^2}{2c}, \quad l = x + \frac{x^3}{6c^2}.$$

2. 弛度

$$d = \frac{WS^2}{8T}.$$

3. 导线的实际长度

$$L_0 = S + \frac{W^2 S^3}{24T^2}$$

$$= S \left\{ 1 + \frac{8}{3} \left(\frac{d}{S} \right)^2 \right\}.$$

例 題

例題3-1 以1000公斤的水平拉力架設每米重量为1公斤的 导线 时, 分別用悬鏈方程式和抛物线方程式求档距为 100~1000 米 的导线实际长度和弛度, 并且进行比较。

解: 已知 $W=1$ 公斤/米, $T=1000$ 公斤, 根据 2-4 式 $c = \frac{T}{W} = 1000$ 米, 按照悬鏈方程式 2-15', 导线的弛度

$$d = c \left(\cosh \frac{S}{2c} - 1 \right) = 1000 \left(\cosh \frac{S}{2000} - 1 \right), \quad (1)$$

根据抛物线方程式 3-3,

$$d = \frac{WS^2}{8T} = \frac{S^2}{8c} = \frac{S^2}{8000} \quad (2)$$

导线的实际长度，如根据悬链方程式2-14'，

$$L_0 = 2c \sinh \frac{S}{2c} = 2000 \sinh \frac{S}{2000}, \quad (3)$$

如根据抛物线方程式3-4，

$$L_0 = S + \frac{W^2 S^3}{24T^2} = S + \frac{S^3}{24c^2} = S + \frac{S^3}{24 \times 10^6} \quad (4)$$

表3-1是根据1、2、3、4式计算档距为100~1000米的导线弛度和实际长度的结果

表 3-1 以水平拉力1000公斤架设每米重量为1公斤的
导线时的弛度和实际长度

档 距 (米)	弛 度 (米)			实 际 长 度 (米)		
	悬链方程 的计算值	抛物线方程 的计算值	误差(%)	悬链方程 的计算值	抛物线方程 的计算值	误差(%)
100	1.25	1.25	—	100.04	100.04	—
200	5.00	5.00	—	200.33	200.33	—
300	11.27	11.25	0.18	301.13	301.13	—
400	20.07	20.00	0.35	402.67	402.67	—
500	31.41	31.25	0.51	505.22	505.21	0.002
600	45.34	45.00	0.76	609.04	609.00	0.007
700	61.88	61.25	1.02	714.38	714.29	0.015
800	81.07	80.00	1.34	821.50	821.33	0.033
900	102.97	101.25	1.67	930.68	930.38	0.040
1000	127.62	125.00	2.05	1042.19	1041.67	0.050

从表3-1可以看出，在档距小于200米时，这两种计算方法所产生的弛度误差小于0.01米；档距小于400米时，导线实际长度的误差也小于0.01米。在档距为800米时弛度大约为80米左右，此时弛度误差为1.34%，而导线长度的误差只有0.033%。在档距再增大时，误差就急剧增长，这一点可从档距为900和1000米的计算结果得到证明。因此，大体上可以说：当弛度小于档距的10%时，使用抛物线方程式进行计算是没有问题的。

(注意)在实际计算中，弛度几乎都小于档距的10%。因此可以认为，在计算弛度时，使用抛物线方程式是足够正确的。

例题3-2 试求导线实际长度的微小变化对弛度变化的关系，并且说