

室外配电装置 架空綫的力学計算

陈 寄 炎著

8.36
39

水利电力出版社

序 言

室外配电装置架空綫的力学計算是变电所設計的一項重要內容，关于本課題的研究在世界各国已有一些論著（参考文献 1 至 6）。在这些論著中最值得一提是苏联学者秦修克 博士（И.Н.Денсюк）在 1933 年所著的“室外变电所导綫的力学計算”一書，迄至本書出版之前，該書是唯一的一本关于本課題的专著，但可惜国内尙无該書的中譯本。在我国，除黃眉教授的論文与本書外就很少有这方面的中文材料了。

本書的目的是拟向讀者介紹目前解决本課題的各種主要方法，特别是为了使初学者易于建立一个統一的概念起見，作者是从一个基本关系式出发說明采用那种假定条件便可得到那种計算方法，因此本書中所介紹的各种公式和推导方法都无意因襲現成的資料。例如在第二章中叙述索多边形原理的計算法时，前人都是把等高悬挂与不等高悬挂（实际上他們只討論了高度差甚小的不等高悬挂情形）、有集中荷載与无集中荷載等情形分別研究，因而导出数套独立的公式，而本書第二章中則仅推演出一套統一的公式，它既适用于等高悬挂的情形，也适用于不等高的情形（高度差可为任意值）；它既适合于无集中荷重的情形，又适用于具有任意个集中荷重的情形。不过由于用索多边形原理来解决本課題的做法是前人所創立的，因此仍应归功于前人。

第一章及第五章是为初学者而写的，不是本書的主要內容。

附录“古德曼函数表”是由慧月，赵慧蓮两位同志分別进行計算的，化費了他們一个多星期的時間。此外本書的全部謄写和制图都是由慧月同志担任的，特此志之，以表謝忱。

本書作者深知个人学識淺陋，又缺乏实际工作經驗，故誤謬之处在所难免，特請各位同志多多指教。

目 录

第一章	室外配电装置概說.....	3
第二章	第一种計算法.....	11
第三章	第二种計算法.....	25
第四章	第三种計算法.....	32
第五章	鋼芯鉛綫的力学計算.....	40
第六章	結束語.....	43
附 录	古德曼反函数表	46
参考文献		

第一章 室外配電裝置概說

第1節 引 言

配電裝置是用以接受和分配電能的，它是由開關設備、保護設備、計量設備、母綫等電氣設備及建築物所組成的。各電氣設備在位置上是互相隔離的，但彼此均以架空導綫或電纜連成一体。

配電裝置計分室外與室內式兩類，室內配電裝置是將各電氣設備布置於建築物之內，一般電壓在35千伏以下的變電所多採用之。室外配電裝置則將各電氣設備布置於露天坪地上，一般電壓在35千伏以上的變電所均採用之。但如配電裝置位於空氣污穢地區，或周圍有為害於絕緣及導綫的氣體的地區，則電壓雖高於35千伏以上但仍宜採用室內配電裝置。

室外配電裝置不需建造建築物，故可節省投資又可縮短施工期限，各電氣設備間及其對地間之距離均可放寬，而且便於擴建和改建。但其缺點是佔地面積較大，電氣設備易於污穢，並且維護操作較為不便。

室外配電裝置中每一回路的電氣設備所佔的場地稱為間隔，例如有送電綫間隔，變壓器間隔及避雷器間隔等。圖1-1為110千伏電壓的室外配電裝置的變壓器間隔，圖中除繪出變壓器、斷路器、隔離開關等電氣設備外還表示出架空懸挂的導綫和絕緣磚子串，導綫是經過兩端的絕緣磚子串固定於支柱上，並以引下綫與各電氣設備相連接。在本書中，為了便於敘述起見，將每根架空懸挂的金屬導綫及其兩端的絕緣磚子串視

为一个整体，統称为架空綫。

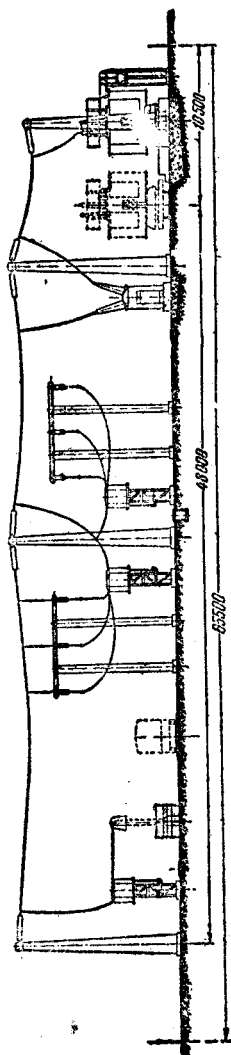


图 1-1

室外配电装置一般均布置在平坦的地方，架空綫的两端悬挂在同一水平綫上，这称为等高悬挂。但在山区建造水力发电站或在矿山企业中建設变电所时，有时找不到足够的平地来建造室外配电装置，为了减少土方和石方工程可将变电所布置成阶段式的。图 1-2 即示一阶段式变电所（我国东北已有此类变电所，估計今后在我国西南与西北地区也会出现）。在图中架空綫的两端悬挂在不同的水平綫上，具有一定的高度差，此为不等高悬挂的情形。

第 2 节 金属导綫

架空悬挂的金属导綫按其材料分有銅綫、鋁（或鋁合金）綫、銅綫及鋼心鋁綫四种。室外配电装置一般宜采用鋼心鋁綫。我国設計部門規定当电流大于 4 千安培时才采用銅綫（通常在母綫桥中遇見）。此外在对鋼心鋁綫腐蝕性强的地区（例如在海岸、碱湖或化学工厂附近）也采用銅綫。在进行設計时，若无詳細資料可供参考时，可認為在海岸、碱湖或化学工厂附近五公里以内地区为对鋼心鋁綫具有强烈腐蝕性的地区。

按照电气设备安装規程的要求，架

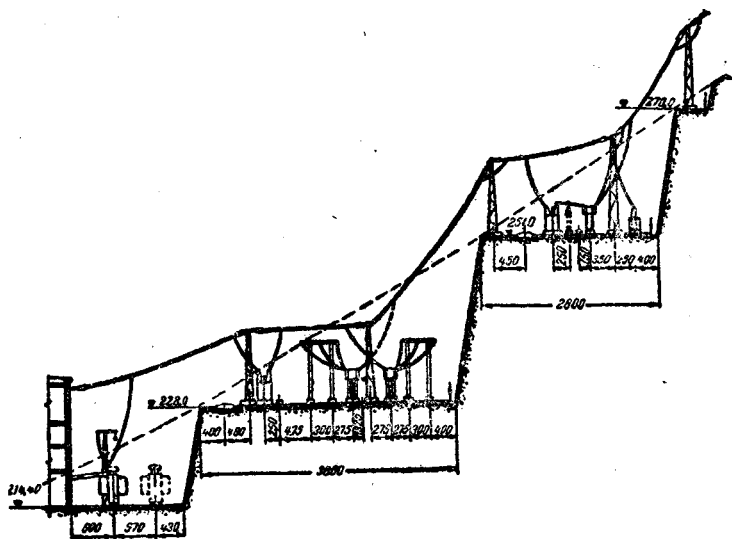


图 1-2

空导线不能采用单股金属线，必须采取多股绞线，不采用绝缘线而采用裸导线。

导线的连接方法采用螺丝连接或压接等办法，但不采用锡焊(或银焊)及绑扎。引下线则是用线夹与导线相联接，用以保证导线的完整性。

在同一水平面上各相导线间的最小距离按下式计算。

$$d = K \sqrt{f} + A.$$

式中 f ——导线的最大弛度(公分)；

$K = 7.5$ (铜线)、或 10 (铝线及钢心铝线)；

A ——最小接近距离(按表1-1之规定)。

导线截面的选择是根据经济电流密度决定的，并作机械强度的校验。当电压大于35千伏时还应作电量作用的校验。按照

表 1-1 室外配电装置各相导线的容许最小接近距离

距 离 (公分)	額 定 綫 間 電 压 (千伏)						
	10以下	20	35	110	154	220	400
A	20	30	40	100	140	200	375

規程之規定導線的安全系数一般不应小于4，故銅導線的容許使用应力为5公斤/平方公厘，鋁綫和鋼心鋁綫为3公斤/平方公厘（我国电力建設总局設計处对鋁的容許应力采用4公斤/平方公厘）。

第3节 絕緣碍子串

絕緣碍子串是由数个絕緣碍子及金屬附件連成，其形状如图1-3所示。

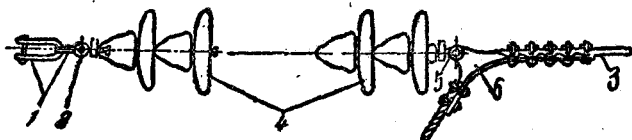


图 1-3 絕緣碍子串詳图

1—U形环；2—耳环；3—导綫；4—絕緣碍子；5—連絡板；6—耐拉綫夾。

每串中的碍子个数决定于配电装置的額定电压，一般規定如表1-2所示。

若室外配电装置位于空气污浊地区（如海岸或燃用劣質煤的发电厂附近时），为了增强其絕緣水平，常增加碍子使用个数或采用特种型式的碍子。

按照电气设备安装規程的要求，碍子串及其金屬附件的机械强度的安全系数，不得小于4。

表 1-2 碼子的使用个数表(用 IIL-45 型)

綫間电压(千伏)	220	154	110	110	35~20	35~20
支架情况	金屬支柱	金屬支柱	金屬支柱	木支柱	金屬支柱	木支柱
每串耐拉碼子串中碼子 的使用个数	16	12	8	7	4~5	3
每串耐拉碼子串的平均 长度(公分)	288	220	152	135	84~101	67
每串耐拉碼子串的平均 重量(公斤)	100	80	55	50	30~35	25

随着近代科学技术的发展,苏联已经建成了一条 400 千伏的超高压输电线路,以后还将建设 500 千伏以上的新输电线路,在这种超高压电网的配电装置中,绝缘码子串的长度可达 7 公尺,重量可达 0.5~1.2 公吨。这样绝缘码子串对于架空线的形状与机械应力的影响将日益显著,所以今后配电装置架空线的力学计算中必须更仔细地考虑绝缘码子串的影响。

第 4 节 架空线力学计算的概念

、配电装置架空线的力学计算的目的是:

- (1)求得在架空线安装时的应力与弛度;
- (2)求得架空线的最大弛度,用以确定支柱的高度;
- (3)有时为了校验室外配电装置的绝缘配合的要求,常须计算在发生大气过电压和操作过电压时架空线的弛度。

在计算架空线安装时的应力时,必须考虑到在最严重的气象条件下,架空线中的金属导线和绝缘码子串所承受的最大应力不超过其容许使用应力。

就导线的应力而言,最严重的气象条件可能在两种不同的情况下出现:第一种情形是在最低温度时架空线因收缩而产生较大应力;另一种情形是当架空线积有冰层并承受风力时,架

空綫因荷載的增加而产生較大的应力。欲确定此两种情况究以何者为最严重时，則可以計算架空綫的临界档距以判定之。

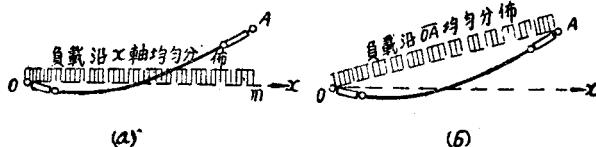
架空綫的最大弛度发生于气温最高或負有冰层的时节，按規程之規定，架空綫力学計算时采用的气象条件見表1-3。

表 1-3 架空綫的力学計算用的气象条件

計 算 条 件			各类地区的气象条件				备 注
			I	II	III	IV	
大 气 温 度	最高温度		+40°C				这是按照“电气装置安装规程”的规定而列出的。我国一般设计中最大温度目前采用+70°C。苏联古比雪夫至莫斯科的400千伏送电线和变电站的设计中最大温度亦已采用+70°C。
	最低温度		-40°C				
	架空线积有冰层时		+5°C				
	计算过电压的绝缘配合时		+15°C				
风	架空线在正常情况	架空线上无冰时	25公尺/秒				
		架空线上有冰时	10公尺/秒	15公尺/秒			
	架空线在事故情况，并有冰时 周围气温在±40°C		0				
			0				
速	计算操作过电压的绝缘配合时		15公尺/秒				
	计算大气过电压的绝缘配合时		10公尺/秒				
冰 层	厚度(公分)		0.5	1	1.5	2	
	比重		0.9				

为了計算架空綫的应力和弛度，必須列出架空綫的曲綫方程式。室外配电装置的架空綫与輸电綫路的架空綫不同，輸电綫路的档距較长，絕緣碍子串的影响較小，故架空綫力学計算时不考慮絕緣碍子串，認為全部架空綫都由金屬导綫組成。但室外配电装置架空綫的力学計算时必須考慮絕緣碍子串对曲綫形状的影响，而且还要考慮一些引下綫所构成的集中荷重，因为这种引下綫所构成的集中荷重，在最严重的情况，其重量可达数十公斤或数百公斤。

对室外配电装置架空线的曲线方程式和其力学计算法的研究，已经有许多学者研究过，并获得一些成果，有些已应用于工程技术上。根据作者的意见，这些研究的成果可以分为三种类型。第一种类型（或称为第一种算法）的特点是把架空线的荷载近似地看成是沿水平线 Om 分布的（参看图1-4a）。



这一类型的研究成果很多，如苏联秦修克（ДЕНСЮК）博士 1933 年的著作）、铁尔-麦克尔特强（ТЕР-МКРТЧЯН）、刻雷然诺夫斯基、我国黄眉教授、相年德同志及一些欧美学

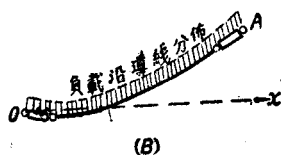


图 1-4

者等都各自推得一些公式，不过，这些研究成果，无论他们在公式的形式上或在推导的方法上有多少差别，因为他们基于同样的假设条件，所以各自的结果都可以经过一定的数学变换而变成同一的公式，因此本书第二章中将选择一种方法（索多边形原理）来说明这一类型的情况。

第二类算法是 1952 年苏联秦修克博士提出的，它的特点是把荷载看成沿直线 OA 分布的（参看图 1-4b）。显然这种假定对不等高悬挂的情形而言，较前者合理，因之，所导得的公式较为精确。

第三类算法是把荷载按其真实分布情况来处理（参看图 1-4c，导线的荷载实际上是沿曲线 OA 分布的），这类算法目前有本书作者所求得之公式，将在本书第四章中介绍。

第5节 架空綫的荷載

架空綫的荷載共有三項：

- (1) 金屬導綫和碍子串本身的重量；
- (2) 金屬導綫和碍子串所積的冰層的重量；
- (3) 金屬導綫和碍子串上所受的風力。

因為這些荷載都是均勻地分布在金屬導綫和碍子串的綫上，故以比荷載（即每單位長度，單位導綫截面上分布的荷載）表征最為方便。

（一）金屬導綫本身重量構成的比荷載可按下式計算：

$$g_1 = \frac{G}{q} \times 10^{-3} \text{ (公斤/公尺·平方公厘)}. \quad (1-1)$$

式中 G ——金屬導綫每一公里的重量(公斤)；

q ——金屬導綫的截面積(平方公厘)。

（二）冰層重量所構成的比荷載可按下式計算：

$$g_2 = 2.83 \frac{b(d+b)}{q} \times 10^{-3} \text{ (公斤/公尺·平方公厘)}. \quad (1-2)$$

式中 d ——金屬導綫的外徑(公厘)；

b ——冰層的厚度(公厘)。

（三）風壓所構成的比荷載可按下兩式計算：

$$g_4 = \frac{0.0636v^2 d}{q} \times 10^{-3} \text{ (公斤/公尺·平方公厘)}. \quad (1-3)$$

$$g_5 = \frac{0.0636v^2 (d+2b)}{q} \times 10^{-3} \text{ (公斤/公尺·平方公厘)}. \quad (1-4)$$

式中 g_4 ——金屬導綫無冰時承受的风压；

g_5 ——金屬導綫有冰時承受的风压；

v ——風速(公尺/秒)。

習慣上以 g 表示金屬導綫的本身重量和冰重的總比荷載，

以 g_0 表示导綫无冰时因本身重量与风压所构成的总比荷載，而以 g_1 表示导綫由于冰、风压及其本身重量所构成的总比荷載，則

$$g_3 = g_1 + g_2. \quad (1-5)$$

$$g_0 = \sqrt{g_1^2 + g_2^2}. \quad (1-6)$$

$$g_1 = \sqrt{g_3^2 + g_0^2}. \quad (1-7)$$

(四)絕緣碍子串的比荷載可按下式計算：

$$g_r = \frac{G}{qL_r}. \quad (\text{公斤/公尺} \cdot \text{平方公厘}) \quad (1-8)$$

式中 G ——絕緣碍子串的重量(公斤)；

L_r ——絕緣碍子串的长度(公尺)。

(1-8)式的物理意义就是用一段导綫去代替絕緣碍子串，这段导綫的长度仍等于絕緣碍子串的长度，其重量也等于絕緣碍子串的重量，而其截面則等于悬挂在該絕緣碍子串上的金屬导綫的截面。

第二章 第一种計算法

第1节 架空綫的基本关系式

在第一章第4节中已經提到本書的叙述方法是拟从一个基本方程式出发，說明采用那种假定則可得那种計算法，所以我們在未具体研究各种計算法之前，应先推出架空綫的基本方程式，并且暫時我們只研究由单一金屬导綫与絕緣碍子串所組成的架空綫，而对鋼心鋁綫所組成的架空綫則留待最后去討論。

如图2-1所示，設有一架空綫固定悬挂于 O, A 两点，因为

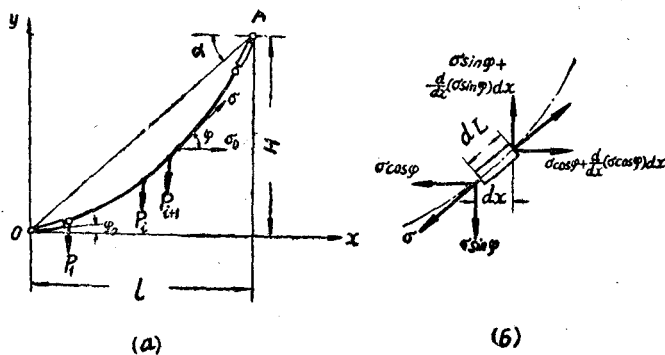


图 2-1

架空綫是由金屬導綫，及絕緣磚子串等不同材料所組成，並且在一些固定点上懸有集中荷重，故沿架空綫各点的比荷載不为恆值。

設 g ——架空綫上任意一点的比荷載；

σ ——架空綫上任意一点的切綫方向的应力；

σ_0 ——架空綫上任意一点的水平方向的应力；

L ——架空綫的长度；

l —— O, A 两点的水平距离(架空綫的跨距)；

H —— O, A 两点的高度差；

φ ——架空綫任意一点的切綫对 x 軸的偏角；

α —— OA 綫对 x 軸的偏角。

若从架空綫中切出一小段 dL ，那么作用在这一段 dL 上的各方向的力应当平衡，所以

$$\sigma \cos \varphi = \sigma \cos \varphi + \frac{d}{dx}(\sigma \cos \varphi) dx, \text{ 即 } \frac{d}{dx}(\sigma \cos \varphi) = 0. \quad (2-1)$$

$$\sigma \sin \varphi + g dL = \sigma \sin \varphi + \frac{d}{dx}(\sigma \sin \varphi) dx,$$

即
$$\frac{d}{dx}(\sigma \sin \varphi) dx = g dL. \quad (2-2)$$

由(2-1)式知

$$\sigma \cos \varphi = \text{常数} = \sigma_0. \quad (2-3)$$

此式說明沿架空綫上各点的水平方向的应力均相同, 將(2-3)式代入(2-1)式, 則

$$\sigma_0 d(\operatorname{tg} \varphi) = g dL. \quad (2-4)$$

此式即为所求的基本方程式。

第2节 第一种計算法

在第一章第4节中已經提到1933年苏联秦修克博士提出的計算方法, 和苏联学者鉄尔-麦克尔特强、工程师刻雷然諾夫斯基、我国黄眉教授以及一些欧美学者所提出的一些計算公式都属于同一种类型的, 他們各自推出的公式都可以經過一些变换而变成同样的公式, 所以在这里我們把它归納成一种方法来研究。这种方法的特点是将架空綫的荷載近似地看成是沿 x 軸分布的, 即将(2-4)基本方程式中的 $g dL = g dx$ 。故

$$\sigma_0 d(\operatorname{tg} \varphi) = g dx \quad (2-5)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\sigma_0} \int_0^x g dx + \operatorname{tg} \varphi_0 \quad (2-6)$$

因为 $\operatorname{tg} \varphi = \frac{dy}{dx}$, 故

$$y = \frac{1}{\sigma_0} \int_0^x d\eta \int_0^\eta g d\eta + x \operatorname{tg} \varphi_0 \quad (2-7)$$

根据分部积分原理

$$\int_0^x d\eta \int_0^\eta g d\eta = \int_0^x x g d\eta - \int_0^x \eta g d\eta = \int_0^x (x - \eta) g d\eta. \quad (2-8)$$

故

$$y = \frac{1}{\sigma_0} \int_0^x (x-\eta) g d\eta + x \operatorname{tg} \varphi_0 \quad (2-9)$$

或写成

$$\sigma_0 y = \int_0^x (x-\eta) g d\eta + x \sigma_0 \operatorname{tg} \varphi_0 \quad (2-10)$$

参看图 2-2, 可知(2-10)式中各项的物理意义为:

$\sigma_0 y$ ——悬挂点 O 的水平方向应力 σ_0 对 $p(x, y)$ 点的力矩;

$x \sigma_0 \operatorname{tg} \varphi_0$ ——悬挂点 O 的垂直方向应力 $\sigma_0 \operatorname{tg} \varphi_0$ 对 $p(x, y)$ 点的力矩;

$\int_0^x (x-\eta) g d\eta$ ——架空线从 O 到 $p(x, y)$ 点区段内的荷重对 $p(x, y)$ 点的力矩。

从(2-10)式可得出下列结论: 即对架空线上的任意一点的总力矩恒等于零。此结论称为索多边形原理, 根据此原理不难导出架空线各点的弛度计算公式。兹举两例以说明之。

如图 2-3 所示, 架空线等高悬挂于 O 、 A 两点, 其 $O-1$ 、 $2-A$

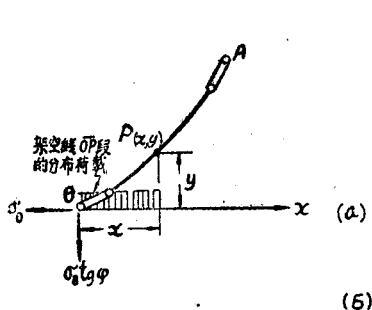


图 2-2

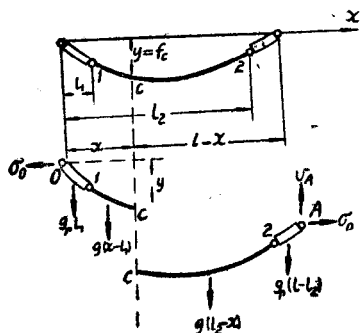


图 2-3

两区段为絕緣碍子串, 其比荷載为 g_r , 而1-C-2区段为金屬导綫, 其比荷載为 g , 試求任意一点C的弛度。

将架空綫自C点切开, 分为两段来研究, 如图2-3(a), O-1段絕緣碍子串的重量为 $g_r l_1$, 作用在离O点 $\frac{l_1}{2}$ 距离之处。1-C段金屬导綫的重量为 $g(x-l_1)$, 作用在离C点 $\frac{x-l_1}{2}$ 距离之处。 σ_0 、 v_0 各为悬挂点O处的水平方向应力和垂直方向应力, 根据索多边形原理可得

$$\sigma_0 f = v_0 x - g_r l_1 \left(x - \frac{l_1}{2} \right) - g(x-l_1) \frac{(x-l_1)}{2}. \quad (2-11)$$

同理, 参看图2-3(b)可得

$$\sigma_0 f = v_A (l-x) - g_r (l-l_2) \left(\frac{l+l_2}{2} - x \right) - g(l_2-x) \frac{(l_2-x)}{2}. \quad (2-12)$$

此外根据力的平衡关系得

$$v_0 + v_A = g_r (l+l_1-l_2) + g(l_2-l_1). \quad (2-13)$$

将以上三式联立求解可得弛度計算式

$$f = -\frac{g_r}{2\sigma_0} x(x-l) + \frac{g_r - g}{2\sigma_0} [(xl - l_1^2)(x-l) + x(l-l_2)^2]. \quad (2-14)$$

如图2-4所示, 架空綫不等高悬挂于O、A两点, O-1段与n-A段各为絕緣碍子串, 其比荷載为 g_r , 1-n段为金屬导綫, 其分布荷載为 g , 又在1、2、...n各点悬有各集中荷重 $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$, 試求任意点C(x, y)的弛度。

設任意点C(x, y)在1-2区段內, 即 $l_1 < x < l_2$, 参看图2-4

(b)知O-1段絕緣碍子串的重量为 $g_r l_1$, 作用于离O点为 $\frac{l_1}{2}$ 距离

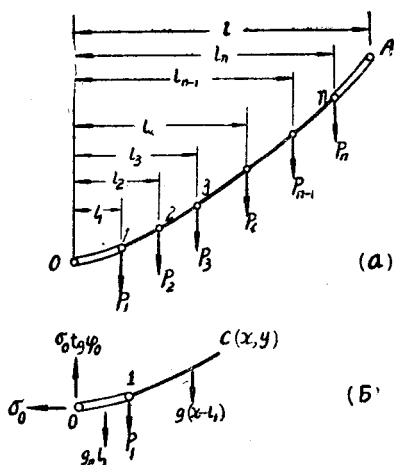


图 2-4

之处, 集中荷重 p_1 作用于离 O 点为 l_1 距离之处, 金属导线 $1-x$ 段的重量为 $g(x-l_1)$, 作用于离 C 点 $\frac{x-l_1}{2}$ 距离之处。在 O 点有水平方向应力 σ_0 及垂直方向应力 $\sigma_0 \operatorname{tg} \varphi_0$ 。根据索多边形原理知

$$\begin{aligned} \sigma_0 y &= x \sigma_0 \operatorname{tg} \varphi_0 \\ &+ p_1(x-l_1) \\ &+ g(x-l_1) \frac{(x-l_1)}{2} \end{aligned} \quad (1_1 < x < 1_2)$$

$$\begin{aligned} &+ g l_1 \left(x - \frac{l_1}{2} \right). \\ \text{故 } y &= x \operatorname{tg} \varphi_0 + \frac{p_1(x-l_1)}{\sigma_0} + \frac{g l_1}{2 \sigma_0} x^2 - \frac{g l_1 - g}{2 \sigma_0} (x-l_1)^2. \end{aligned} \quad (1_1 < x < 1_2)$$

同理可以推得 $C(x, y)$ 在任何区段内 y 的计算式为

$$y = \begin{cases} x \operatorname{tg} \varphi_0 + \frac{g l_1}{2 \sigma_0} x^2; & (0 < x < l_1) \\ x \operatorname{tg} \varphi_0 + \frac{g l_1}{2 \sigma_0} x^2 - \frac{g l_1 - g}{2 \sigma_0} (x-l_1)^2 + \frac{p_1(x-l_1)}{\sigma_0}; & (l_1 < x < l_2) \\ \dots\dots\dots \\ x \operatorname{tg} \varphi_0 + \frac{g l_1}{2 \sigma_0} x^2 - \frac{g l_1 - g}{2 \sigma_0} (x-l_1)^2 \\ \quad + \frac{\sum_{i=1}^{i-1} P_i(x-l_i)}{\sigma_0}; & (l_{i-1} < x < l_i) \end{cases} \quad (2-15)$$