

电气化铁道接触网

双链形接触悬挂的计算方法

刘 润 田

(电 气 工 程 系)

摘 要

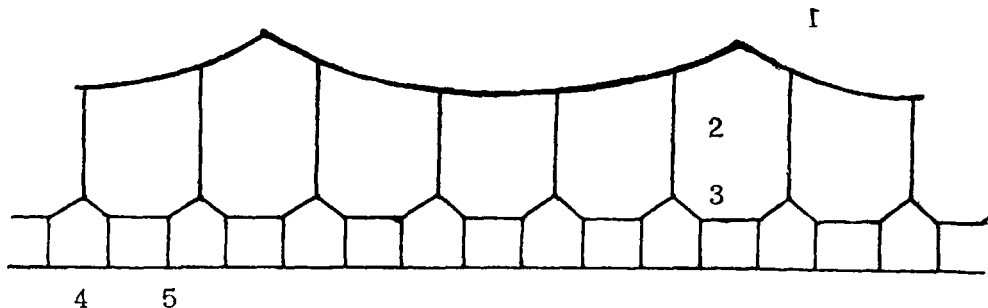
本文对双链形接触悬挂安装曲线等的计算方法作了系统的论述,特别是对已知状态的确定,承力索在接触导线无弛度状态下张力的计算以及辅助承力索的处理等提出了一些新的见解,对原有计算方法在理论上作了补充和完善。

接触悬挂如按索线的数目特征可分为简单悬挂和链形悬挂,如根据对张力的补偿方式可分为未补偿、半补偿和全补偿等悬挂。我国电气化铁道接触网主要采用半补偿和全补偿的单链形接触悬挂,在低净空隧道的个别区段也有采用弹性支点的简单悬挂。因为我国干线电气化铁道的电流制为25KV工频单相交流,电流不大,车速不高,所以目前尚未采用双链形悬挂的接触网区段。但随着电气化铁道的发展,在某些有特殊要求的区段,采用这种具有弹性均匀和高稳定性的双链形悬挂将是一个很现实的问题。如下对这种悬挂的计算方法作一些介绍。

一、双链形接触悬挂承力索的状态方程

图1为双链形接触悬挂的结构示意图。

图 1



本文于1986年11月19日收到

图中：1——承力索； 2——上吊弦； 3——辅助承力索； 4——下吊弦；
5、——接触导线。

承力索和接触导线所承受的负载分别按沿跨距均匀分布的形式计算，而辅助承力索的受力为集中负载，集中点在上、下吊弦固定的地方。

在气象条件变化时，索线的长度因张力和温度的变化而改变。根据这种关系可求出相应的计算公式，从而得到索线张力和弛度对温度的关系曲线，即所谓安装曲线，施工单位和运营单位可利用这些曲线对接触悬挂进行安装和调试。

承力索的状态方程如下所示

$$\frac{W_{c,x}^2 l_D^2}{24 Z_{c,x}^2} - \frac{W_{c,1}^2 l_D^2}{24 Z_{c,1}^2} = \alpha_c (t_x - t_1) + \frac{T_{c,x} - T_{c,1}}{E_c S_c} \quad (1)$$

或

$$t_x = \left(t_1 - \frac{W_{c,1}^2 l_D^2}{24 \alpha_c Z_{c,1}^2} + \frac{T_{c,1}}{\alpha_c E_c S_c} \right) + \frac{W_{c,x}^2 l_D^2}{24 \alpha_c Z_{c,x}^2} - \frac{T_{c,x}}{\alpha_c E_c S_c} \quad (1')$$

式中

t_1 ——已知状态下的温度（℃）；

$T_{c,1}$ ——承力索在已知状态下的张力（公斤）；

$W_{c,1}$ ——承力索在已知状态下的归算负载，其表达式为

$$W_{c,1} = q_{c,1} + q_{c,0} \frac{\varphi T_{i,1}}{T_{c,0}}$$

$q_{c,1}$ ——承力索在已知状态下的负载（公斤/米）；

$q_{c,0}$ ——承力索在接触导线无弛度状态下的负载（公斤/米）；

$T_{i,1}$ ——接触导线和辅助承力索在已知状态下的总张力（公斤）；

φ ——结构系数，其表达式为

$$\varphi = \frac{F_{i,x}}{F_{i,x} - F_{c,0}} = \frac{(l_D - 2a)^2}{l_D^2}$$

$F_{c,0}$ ——承力索在接触导线无弛度状态下的弛度（米）；

a ——支柱点与其最近上吊弦之间的距离（米）；

$F_{c,x}$ ——承力索在待求状态下的弛度（米）；

$F_{i,x}$ ——接触导线在待求状态下的弛度（米）；

$Z_{c,1}$ ——承力索在已知状态下的归算张力，其表达式为

$$Z_{c,1} = T_{c,1} + \varphi_{i,1}$$

$W_{c,x}$ ——承力索在待求状态下的归算负载，其表达式为

$$W_{c,x} = q_{c,x} + q_{c,0} \frac{\varphi T_{i,x}}{T_{c,0}}$$

$q_{c,x}$ ——承力索在待求状态下的负载（公斤/米）；

$T_{i,x}$ ——接触导线和辅助承力索在待求状态下的总张力（公斤）；

$Z_{c,x}$ ——承力索在待求状态下的归算张力，其表达式为

$$Z_{ix} = T_{ix} + \varphi T_{ix}$$

T_{ix} ——承力索在待求状态下的张力（公斤）；

α_c ——承力索的线胀温度系数（1/℃）；

E_c ——承力索的弹性模量（公斤/毫米²）；

S_c ——承力索的计算横截面（毫米²）

t_x ——待求状态下的温度（℃）。

二、起始状态的确定

在利用(1)或(1')式进行张力计算时需要知道承力索在接触导线无弛度时的张力 T_{co} ，此值可通过如下三次方程式求解，即

$$T_{co}^3 + AT_{co}^2 + BT_{co} + C = 0 \quad (2)$$

式中

$$A = \alpha_c E_c S_c (t_0 - t_1) + \frac{q_1^2 l_D^2 E_c S_c}{24 (T_{cmax} + \varphi T_{if1})^2} - T_{cmax}$$

$$B = \frac{q_1 q_0 \varphi T_{if1} l_D^2 E_c S_c}{12 (T_{cmax} + \varphi T_{if1})^2}$$

$$C = \frac{q_0^2 l_D^2 E_c S_c}{24} \left[\frac{\varphi^2 T_{if1}^2}{(T_{cmax} + \varphi T_{if1})^2} - 1 \right]$$

式中

t_0 ——接触导线无弛度时的温度（℃）；

T_{cmax} ——承力索的最大许可张力（公斤）；

式中带下标“1”的各量为在计算承力索张力时所规定的已知状态，它不是最小温度时就是最大冰或风时。这里有一个矛盾，即求 T_{co} 时需要知道承力索出现最大许可张力 T_{cmax} 时的气象条件，也就是需先定出已知状态，但求已知状态时又需知道 T_{co} ，为了解决这个矛盾可对最小温度和最大负载（冰载和风载）分别定为已知状态，从而求出两种 T_{co} ，即从最大冰负载和最大风负载中找出最严重的状态作为最大负载状态，按此条件求出一个 T_{coqmax} ，再从最小温度的状态求出另一个 T_{coimin} ，然后分别代入临界负载的公式求出相应的 q_{kp} ，而

$$q_{kp} = -q_0 \frac{\varphi T_{ifqmax}}{T_{co}} + \frac{Z_{c,qmax}}{Z_{c,tmin}} \sqrt{\frac{24 \alpha_c Z_{c,tmin}^2 (t_{qmax} - t_{min})}{l_D^2} + W_{c,tmin}^2} \quad (3)$$

式中带下标“ q_{max} ”的量表示与最大负载相对应，下标“ t_{min} ”与最小温度相对应。

在求出两种状态即(3)式中的 T_{co} 分别代以 T_{coqmax} 和 T_{coimin} 的临界负载 q_{kpmax} 和 q_{kpmin} 后，进行比较来最后确定所应选取的已知状态，即

当 $q_{kpqmax} > q_{kpmin}$ 时，取 t_{min} 时为已知状态；

当 $q_{kpqmax} < q_{kpmin}$ 时，取 q_{max} 时为已知状态；

当 $q_{kpqmax} = q_{kpmin}$ 时，取 t_{min} 或 q_{max} 时均可。

这种确定已知状态的方法当然也适用于任何形式的链形悬挂。在实际工作中，一般不进行上述的严格计算，而是根据经验对承力索的张力 T_{co} 作如下取值，即令 $T_{co} = \eta T_{cmax}$ ，其中

η 系数为0.75~0.8。通过实例计算,两种方法所确定的已知状态基本相符合。

三、辅助承力索和接触导线的状态方程

辅助承力索的状态方程式按集中负载推导可得如下形式

$$\frac{P_x^2}{4T_{fx}^2} - \frac{P_1^2}{4T_{f1}^2} = \alpha_f(t_x - t_1) + \frac{T_{fx} - T_{f1}}{E_f S_f} \quad (4)$$

或

$$t_x = \left[t_1 - \frac{P_1^2}{4\alpha_f T_{f1}^2} + \frac{T_{f1}}{\alpha_f E_f S_f} \right] + \frac{P_x^2}{4\alpha_f T_{fx}^2} - \frac{T_{fx}}{\alpha_f E_f S_f} \quad (4')$$

式中符号的表示方法和承力索的表示基本相对应,即下标“1”表示已知状态,“X”表示待求状态,只是负载P的求法不同,这里将辅助承力索所承受的负载集中在上、下吊弦的固定点,如图2所示,P内的自重成分为接触导线、下吊弦和辅助承力索本身。

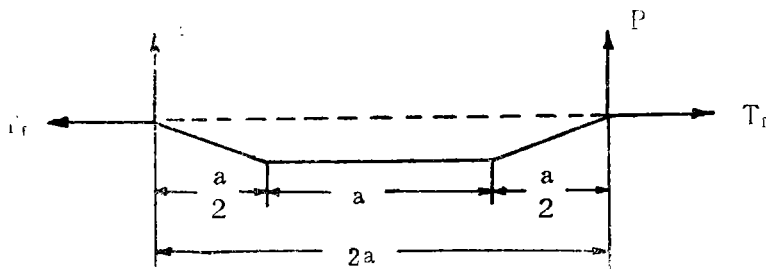


图 2

接触导线的状态方程系在吊弦数无穷多、无横向负载和未加纵向补偿等三个假设条件下推导出来的,可表示为

$$T_{fx} = T_{\max} - \alpha_j E_j S_j (t_x - t_{\min}) \quad (5)$$

这是一条直线,而且最大张力发生在最小温度的时刻。

四、当量跨距和索线弛度的计算

应当指出,电气化铁道接触网的悬挂部分是沿线路分成一个个锚段以便进行机械下锚和电气分段。在利用承力索状态方程计算张力时,因线路半径变化而使接触网的跨距不同,但在同一锚段各跨距内的张力却是相同的。公式中的当量跨距 l_D 就是一个代表锚段内张力变化规律的假想跨距,它反映了各实际跨距的状态, l_D 的计算公式为

$$l_D = \sqrt{\frac{\sum l^3}{\sum l}} \quad (6)$$

即等于锚段内各实际跨距的立方和被各实际跨距之和来除后求平方根。

承力索的弛度为

$$F_{cx} = \frac{W_{cx} l^2}{8Z_{cx}} \quad (7)$$

式中的 l 为锚段内某个实际跨距, 如一个锚段内有 n 种跨距时, 其弛度曲线应有 n 条。

接触导线的弛度为

$$F_{jx} = \varphi (F_{ix} - F_{co}) \quad (8)$$

即接触导线的弛度等于承力索的弛度差与悬挂结构系数的乘积。同样, 锚段内有几个不同跨距也相应有几条弛度曲线。

五、未补偿双链形接触悬挂安装曲线的计算步骤

- 1、计算悬挂所承受的负载, 包括自重、冰载和风载;
- 2、求出锚段内的当量跨距 l_D ;
- 3、分别求出严重气象条件下的 T_{co} , 即承力索在接触导线无弛度状态下的张力 T_{coqmax} 和 T_{coqmin} ;
- 4、根据两种条件下的 T_{coqmax} 和 T_{coqmin} 分别求出相应的临界负载 q_{kpqmax} 和 q_{kptmin} 并进行比较最后确定出已知状态;
- 5、求出接触导线的张力曲线 $T_{ix} = f(t_x)$ 和辅助承力索的张力曲线 $T_{ix} = f(t_x)$, 然后相加, 可得张力曲线 $T_{jix} = f(t_x)$ 。
- 6、利用承力索的状态方程求出张力曲线 $T_{ix} = f(t_x)$ 和弛度曲线 $F_{ix} = f(t_x)$ 。
- 7、求出接触导线的张力曲线 $T_{jix} = f(t_x)$ 和弛度曲线 $F_{jix} = f(t_x)$ 。

现以双链形接触悬挂 GJ-70+GJ-70+GLCA $\frac{100}{215}$ 为例来计算安装曲线, 具体步骤如上所述。气象条件为 $t_{min} = -20^\circ\text{C}$; $t_{max} = +40^\circ\text{C}$; 冰厚 $b = 10$ 毫米; $t_b = -5^\circ\text{C}$; 结冰时的风速 $V_b = 10$ 米/秒; 最大风速 $V_{max} = 25$ 米/秒; 最大风速时的温度 $t_{vmax} = +5^\circ\text{C}$; 锚段当量跨距为60米; 实际跨距的类型有50米、60米和65米三种。其详细的计算过程从略。安装曲线如下所示。

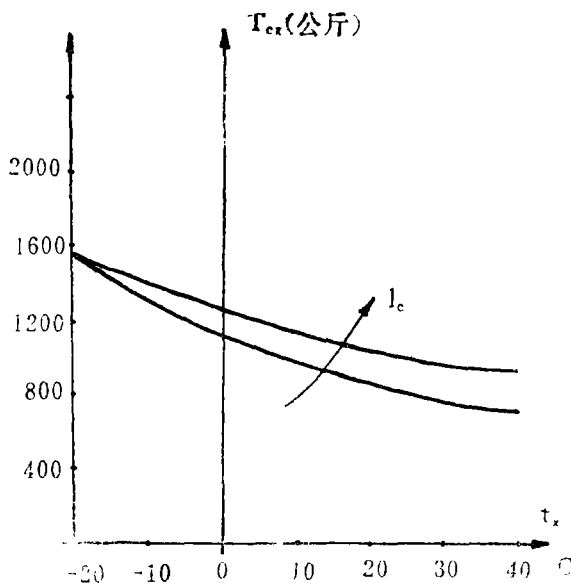


图3 $T_{ix} = f(t_x)$

为承力索的张力

安装曲线

图4 $F_{sx} = f(t_x)$

为承力索的弛度

安装曲线

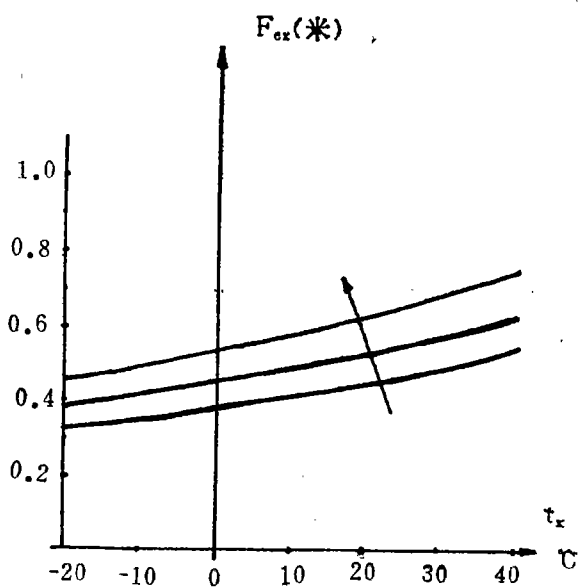
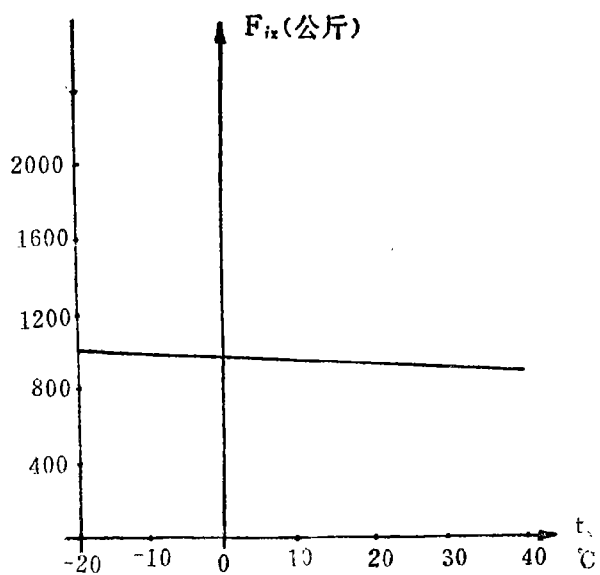


图5 $T_x = f(t_x)$

为接触导线的张

力安装曲线



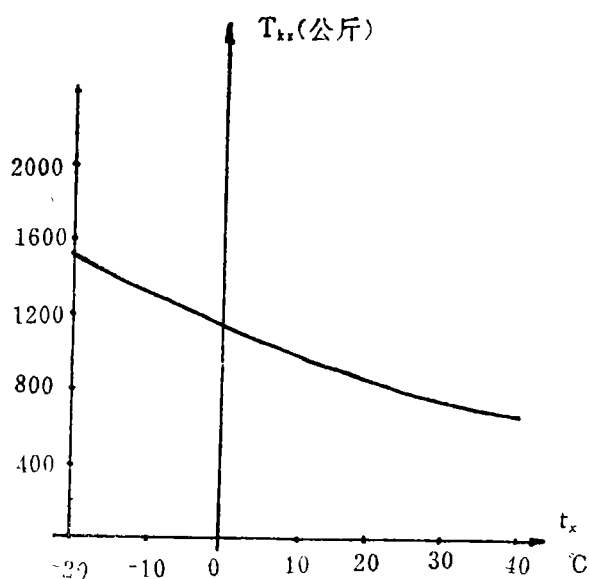


图6 $T_{ix} = f(t_x)$

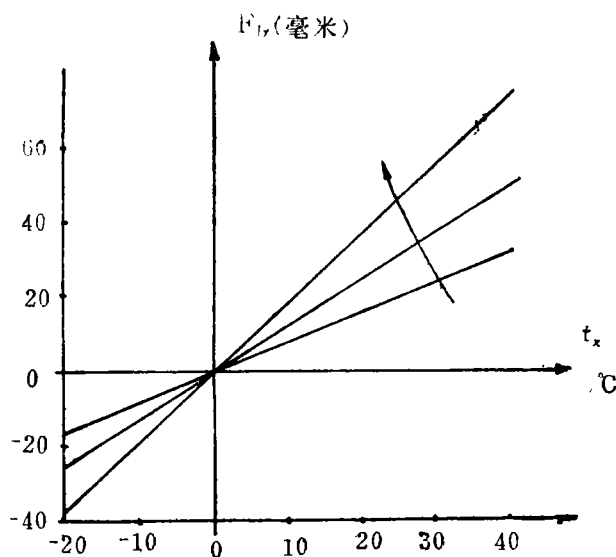
为辅助承力索的

张力安装曲线

图7 $F_{ix} = f(t_x)$

为接触导线的弛

度安装曲线



六、无荷承力索安装曲线的计算

以上的计算没有考虑索线的安装次序，即承力索的安装曲线是适用于一次性的。如根据线路运量等条件要求承力索和辅助承力索的安装为一次性的，而接触导线的数目是分期安装的，但接触导线的最终数目为 n 条。这样一来，在第一次安装承力索时就应当考虑以后接触导线数目变化时的情况。从理论上讲，应当计算出 $n+1$ 种安装曲线，即不包括接触导线时，或称为无荷时承力索的安装曲线，另外为接触导线数目从 $1-n$ 变化时的 n 种安装曲线。

首先求出无荷承力索的张力计算公式,过程如下所述。

因为在接触导线无弛度状态下,承力索的受载情况相当于一个简单悬挂,所以可利用简单悬挂的公式,现令安装好n个接触导线时的无弛度状态为已知状态,未挂接触导线时为待求状态,然后把两套参数代入简单悬挂的状态方程

$$\frac{q_{cx}^2 l_D^2}{24 T_{cx}^2} - \frac{q_{cl}^2 l_D^2}{24 T_{cl}^2} = \alpha_c (t_x - t_l) + \frac{T_{cx} - T_{cl}}{E_c S_c} \quad (9)$$

可得

$$T_{coo} - \frac{q_{coo}^2 l_D^2 E_c S_c}{24 T_{coo}^2} = T_{con} - \frac{q_{con}^2 l_D^2 E_c S_c}{24 T_{con}^2} \quad (10)$$

式中

T_{coo} 和 q_{coo} ——在接触导线无弛度温度 t_0 下,尚未安装接触导线时,承力索的张力和所承受的负载;

T_{con} 和 q_{con} ——在上述温度下且接触导线数目为n时,承力索的张力和负载。

由(10)式可求出无荷承力索在 t_0 时的张力 T_{coo} ,再以此张力和相应的 t_0 和 q_{coo} 作为已知状态,代入简单悬挂的状态方程(9),可求出无荷承力索的张力计算式为

$$\frac{q_{cox}^2 l_D^2}{24 T_{cox}^2} - \frac{q_{coo}^2 l_D^2}{24 T_{coo}^2} = \alpha_c (t_x - t_0) + \frac{T_{cox} - T_{coo}}{E_c S_c} \quad (11)$$

或为

$$t_x = \left[t_0 - \frac{q_{coo}^2 l_D^2}{24 \alpha_c T_{coo}^2} + \frac{T_{coo}}{\alpha_c E_c S_c} \right] + \frac{q_{cox}^2 l_D^2}{24 \alpha_c T_{cox}^2} - \frac{T_{cox}}{\alpha_c E_c S_c} \quad (12)$$

式中

T_{cox} 和 q_{cox} ——无荷承力索在待求状态下的张力和负载。

其次,为了求出承力索在具有任意数目(1~n)接触导线时张力的普遍计算公式,可设如下符号:

T_{coi} ——承力索在 t_0 下且接触导线数目为i时的张力,此值可用简单悬挂的状态方程求出,如无荷时所采用的办法;

q_{oi} ——承力索在 t_0 下且有i根接触导线时所承受的自重负载。

$$W_{coi} = q_{coi} + q_{oi} \frac{\varphi T_{ifo}}{T_{coi}} \quad \text{归算负载}$$

$$Z_{coi} = T_{coi} + \varphi \cdot T_{ifo} \quad \text{归算张力}$$

将以上各量作为已知状态($t_l = t_0$)代入链形接触悬挂的状态方程,可得如下张力的计算公式

$$\frac{W_{cix}^2 l_D^2}{24 Z_{cix}^2} - \frac{W_{coi}^2 l_D^2}{24 Z_{coi}^2} = \alpha_c (t_x - t_0) + \frac{T_{cix} - T_{coi}}{E_c S_c} \quad (13)$$

或为

$$t_x = \left[t_0 - \frac{W_{coi}^2 l_D^2}{24 \alpha_c Z_{coi}^2} + \frac{T_{coi}}{\alpha_c E_c S_c} \right] + \frac{W_{cix}^2 l_D^2}{24 \alpha_c Z_{cix}^2} - \frac{T_{cix}}{\alpha_c E_c S_c} \quad (13')$$

在利用(13)式或(13')式时,其中的已知状态也可取 t_0 温度下的无荷状态,即无接触导线的状态,所以对此式中的 i 可理解为 $i=0\sim n$ 的范围,它与前边对 i 值取 $1\sim n$ 的含意有所不同,因为这里是指取已知状态,以前是指接触导线的数目。通过实际数值的计算可以看出,无荷承力索的张力安装曲线比有荷时低,这是合理的,因为少了一部分由于接触导线负载而引起的附加张力,同理可知,只要承力索是一次安装就应当考虑到以后的发展,所以承力索的张力安装曲线必然会随接触导线数目的增多而向上移动,如图8所示。此图为一个锚段即在一个当量跨距下的张力曲线。

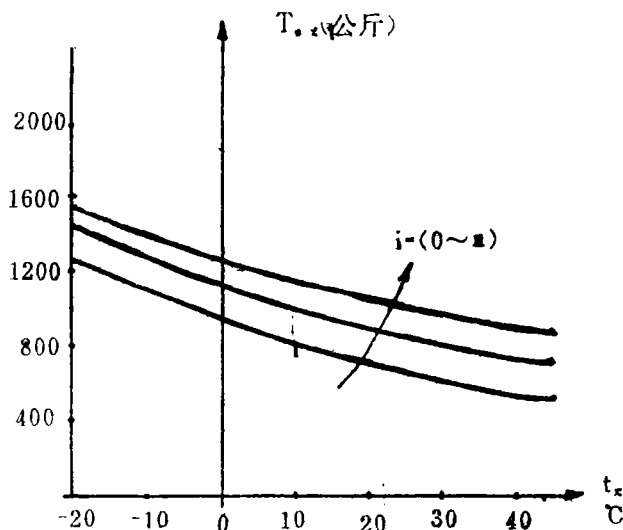


图8 $T_{cx} = f(t_x)$

为接触导线数目变化时
承力索的张力安装曲线

以上对双链形接触悬挂的计算方法作了比较系统的介绍,特别是对已知状态的确定、承力索在接触导线无弛度温度下张力的计算以及无荷承力索和辅助承力索在安装曲线计算中的处理等,提出了一些新的见解,使计算方法在理论方面能够更加完善。所述论点是否合适,望从事接触网工作的同志们给予指正。

参 考 资 料

- [1] И. И. ВЛАСОВ, КОНТАКТНАЯ СЕТЬ, 1951
- [2] 铁道部教材编辑组, 接触网, 上、下册, 唐山铁道学院, 1961
- [3] И. И. ВЛАСОВ, К. Г. МАРКВАРДТ, КОНТАКТНАЯ СЕТЬ 1961.
- [4] И. И. ВЛАСОВ, Б. Г. ПОРШНЕВ, А. В. ФРАЙФЕЛЬД,
ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ СЕТИ
ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ. 1964.
- [5] 于万聚, 交流电气化铁道接触网设计基础, 人民铁道出版社, 1980.
- [6] 阎跃宣, 接触网, 人民铁道出版社, 1981
- [7] 袁则富、白山, 接触网, 人民铁道出版社, 1986
- [8] 刘润田, 接触网的力学计算方法。人民铁道出版社, 1958.