

高压电器制造論文

(三)

支持和套管絕緣子金属附件尺寸的确定

A. M. 扎列斯基著

沈越昭譯

人民教育出版社

本书系根据苏联国立动力出版社(Госэнергоиздат) 1954年出版的 А. М. 扎列斯基(Залесский)教授主編“高压电器制造論文集”(Высоковольтное аппаратостроение, сборник статей) 中第八篇論文“支持和套管絕緣子金属附件尺寸的确定”(Определение размеров Арматуры опорных и проходных изоляторов) 譯出的。这篇論文的作者是 А. М. 扎列斯基本人。本文詳細分析了金属附件在外部和内部的支持絕緣子及套管絕緣子在运行中受力的情况, 然后根据作用力的分析結果确定絕緣子金属附件的要求尺寸。

本书可供高等工业学校“电机与电器”和“高压技术”专业师生閱讀, 同时对从事电器制造的工程技术人员也有参考价值。

高压电器制造論文(三) 支持和套管絕緣子金属附件尺寸的确定

А. М. 扎列斯基著

沈 越 昭 譯

人民教育出版社出版 高等學校教材編輯部
北京宣武門內承恩寺7號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第2號)

人民教育印刷厂印裝 新华书店发行

统一书号 15010·893 小32开本 787×1092 $\frac{1}{32}$ 印张 $\frac{1}{16}$

字数 9,000 印数 0001—7,000 定价(8) 0.07

1960年4月第1版 1960年4月北京第1次印刷

A. M. 扎列斯基主編“高压电器制造論文集”一书共包括九篇論文。第一篇为 Г. Б. 霍略夫斯基(Холяевский)所著“确定断路器合閘电流的計算方法”；第二篇为 Г. Б. 霍略夫斯基所著“具有电容式电屏的絕緣子的計算”；第三篇为 Г. Б. 霍略夫斯基所著“应用于电器制造个别計算中的几何方法”；第四篇即为本文；第五篇为 С. Н. 扎哈罗夫(Захаров)和 С. А. 齐尔佐夫(Чирцов)合著“交流电磁鉄操作机构”；第六篇为 Н. С. 阿龙諾維奇(Аронович)所著“电器制造中杠杆連接机构的应用”；第七篇为 Н. И. 巴楚林(Бачурин)所著“設計高压断路器的若干問題”；第八篇为 А. М. 扎列斯基所著“支持和套管絕緣子的金属附件尺寸的确定”；第九篇为 В. В. 阿范納斯也夫(Афанасьев)和 Н. А. 馬卡罗娃(Макарова)合著“用于空气断路器配电設備上的生产压缩空气的裝置”。其中第一篇科学技术出版社于 1958 年已經翻譯出版，以单行本发行；第二篇譯文也在 1955 年出版的“电器工业”杂志第五期中发表过；第五、六、七篇科学技术出版社亦已翻譯出版，收集在它 1957 年出版的“高压电器論文集”中。为了避免重复，已出版的各篇譯文我社就不再出版了。其余的第三、四、八、九各篇譯文我社以单行本出版。

1960 年 3 月

支持和套管絕緣子金屬附件尺寸的确定

A. M. 扎列斯基

1. 金屬附件填封在外部的支持絕緣子
2. 金屬附件填封在內部的支持絕緣子
3. 針式支持絕緣子內針的填封
4. 套管絕緣子

1. 金屬附件填封在外部的支持絕緣子

图 1 表示支持絕緣子的縱剖視和平面圖。图中并給出了以后我們將要使用的一些符号。

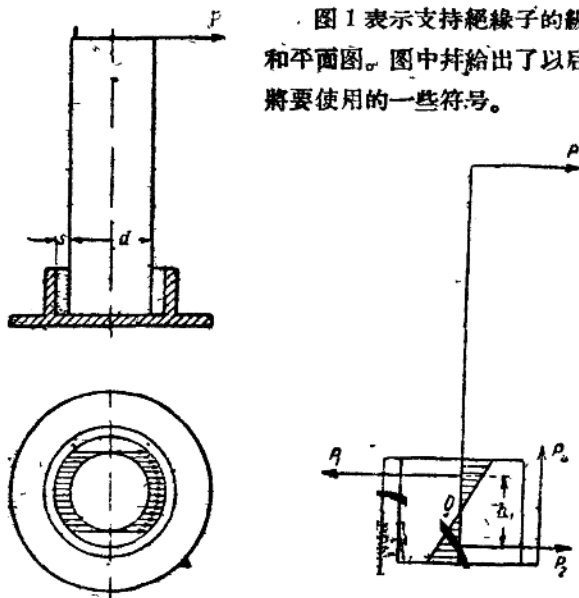


图 1. 受弯曲作用的支持絕緣子的示意图。
图中给出了作用在絕緣子上的力和力矩。

今有彎曲力 P 加在絕緣子的頭上由此力產生的彎曲力矩應當為由絕緣子的填封產生的反力矩所平衡。此反力矩係由兩個分量組成的：1) 由法蘭盤的反作用力產生的力矩，2) 由水

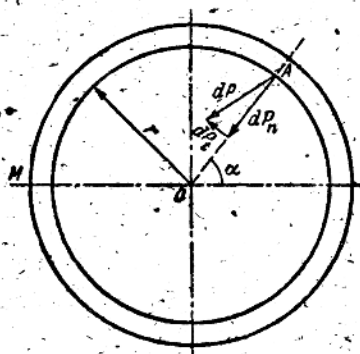


圖 3. 作用于金屬附件給定點的
單元力的分解。

泥內的應力產生的力矩。

圖 2 表示產生上述力矩的力： $P_1 - P_2$ 和 $P_3 - P_4$ 。 P_1 和 P_2 兩力使水泥壓縮。為了求得其第一次近似值，讓我們假定：水泥內的應力是如圖 2 所示按直綫定律分布的，這樣，我們就可以求出作用于法蘭盤圓周單元長度的力。為此我們來研究圖 3。

在 A 點作用在陶瓷元面積 $rdad\alpha$ 上的壓力為 dP ，式中 $r = \frac{d}{2}$ ， $d\alpha$ ——元角度和 dh ——法蘭盤的單元高度。 dP 可以設想為由兩個分量組成：法向分量 dP_n 和切綫方向分量 dP_t 。其中

$$dP_n = \sigma r d\alpha dh, \quad (1)$$

$$\text{而} \quad dP_t = \tau r d\alpha dh, \quad (2)$$

式中 σ ——給定面積上水泥內的法向應力和
 τ ——同一面積上的切應力。

這些力在所加力的作用方向綫上的投影為

$$dP = dP_n \cos \alpha + dP_t \sin \alpha = r d\alpha dh (\sigma \cos \alpha + \tau \sin \alpha). \quad (3)$$

如果我們知道，應力 σ 和 τ 是怎樣沿着陶瓷的圓周分布

的，我們就能够將方程式(3)积分出来，并能得到作用于整个陶瓷圓周，在陶瓷元高度 dh 上的总力的表示式。但是我們只知道，当 $\alpha=0$ 时只有力 dP 的法向分量作用着；因为沒有任何物理上的根据可以說明，在这样的条件下，是有任何切綫方向的力作用于水泥的表面的。同样，当 $\alpha=90^\circ$ 时，也只可能有切綫方向的力 dP_t 作用着。

要作进一步的計算就必须假定法向和切向应力沿着陶瓷的圓周是怎样分布的。我們作这样一种近于真实的假定，即假定当 α 角变化时 σ 和 τ 按正弦規律变化着，即：

$$\sigma = \sigma_m \cos \alpha, \quad (4)$$

$$\tau = \tau_m \sin \alpha. \quad (5)$$

于是 $dP = r d\alpha dh (\sigma_m \cos^2 \alpha + \tau_m \sin^2 \alpha)$ 。

我們所得到的由水泥內法向应力产生的沿絕緣子半周在法兰盘单元高度上的总力，將采取下列积分形式：

$$\begin{aligned} P_n &= 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma_m r \cos^2 \alpha d\alpha dh = \\ &= \frac{\pi}{2} r \sigma_m dh. \end{aligned} \quad (6)$$

同样

$$\begin{aligned} P_t &= 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \tau_m r \sin^2 \alpha d\alpha dh = \\ &= \frac{\pi}{2} r \tau_m dh. \end{aligned} \quad (7)$$

上述二力之和为

$$P' = \frac{\pi}{2} r (\sigma_m + \tau_m) dh. \quad (8)$$

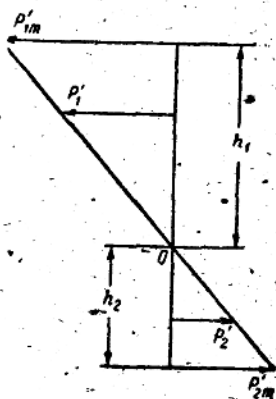


图 4. 沿絕緣子填封高度水泥內法向应力的分布。

为了求出产生力 P_1 (或 P_2 , 参看图 2) 的上述二力的合力, 让我们来研究图 4 由此图以及由图 2 可知。

$$h = h_1 + h_2, \quad (9)$$

$$P_1 = P + P_2 \quad (10)$$

式中 P_1 和 P_2 为按三角形规律分布的 P'_1 和 P'_2 的合力。其次, 我们还可写成等式:

$$\frac{P'_{1m}}{P'_{2m}} = \frac{h_1}{h_2}. \quad (11)$$

现在我们来确定力 P_1 。由图 4 可知:

$$\begin{aligned} P_1 &= \int_0^{h_1} \frac{\pi}{2} r (\sigma_m + \tau_m) \frac{h}{h_1} dh = \\ &= \frac{\pi r}{4} h_1 (\sigma_m + \tau_m) = \frac{\pi d}{8} h_1 (\sigma_m + \tau_m). \end{aligned} \quad (12)$$

同样, 我们求得力 P_2 :

$$P_2 = \frac{\pi d}{8} h_2 (\sigma'_m + \tau'_m). \quad (13)$$

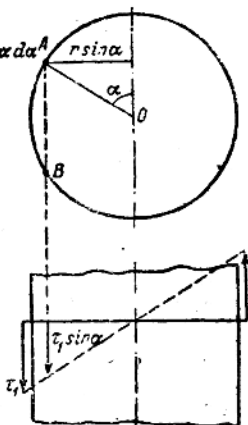
这里, σ'_m 和 τ'_m 是绝缘子下部最大应力。因为 $(\sigma'_m + \tau'_m)$ 与 P'_{1m} 成正比, 而 $(\sigma'_m + \tau'_m)$ 与 P_{2m} 成正比, 所以

$$\frac{\sigma'_m + \tau'_m}{\sigma_m + \tau_m} = \frac{P'_{2m}}{P_{1m}} = \frac{h_2}{h_1}; \quad (14)$$

$$P_2 = \frac{\pi d}{8} (\sigma_m + \tau_m) \frac{h_2^2}{h_1} \quad (15)$$

图 5. 填封内沿绝缘子直径和圆周的剪切应力的分布。

将方程(13)和(15)代入方程(10):



$$\frac{\pi d}{8} h_1 (\sigma_m + \tau_m) = P + \frac{\pi d}{8} (\sigma_m + \tau_m) \frac{h_2^2}{h_1} \quad (16)$$

为简化计，以后我们将把 σ_m 和 τ_m 的下角符号 m 省去。
将方程(16)变换为：

$$\begin{aligned} Ph_1 - \frac{\pi d}{8} (\sigma + \tau) (h_1^2 - h_2^2) &= 0, \\ Ph_1 - \frac{\pi d}{8} (\sigma + \tau) (h_1 - h_2) h &= Ph_1 - \frac{\pi d h}{8} \times \\ &\times (\sigma + \tau) (2h_1 - h) \end{aligned} \quad (17)$$

由此，

$$h_1 = \frac{\pi d h^2 (\sigma + \tau)}{2 \pi d h (\sigma + \tau) - 8P} \quad (18)$$

合力 P_2 的作用点，位于距离绝缘子下端 $\frac{h_2}{3}$ 处。此点力矩之和等于零，由此

$$P \left(H - \frac{h_2}{3} \right) = \frac{2}{3} P_1 h + M_2 (P_2) \quad (19)$$

我们将指出：方程(19)内的力矩 $M_2(P_2)$ 是不同值的剪力在不同长度的力臂上作用的结果。我们将求出这一剪力的力矩。我们将假定：剪力是按直线定律沿着绝缘子的直径分布的(图5)。于是，由在 A 点作用于法兰盘单元高度上的单元力 $\tau r \sin \alpha da$ 所产生的力矩，等于

$$dM'_2 = \tau_1 r \sin \alpha da r \sin \alpha = \tau_1 r^2 \sin^2 \alpha da \quad (20)$$

考虑到点 B 处的对称力，绝缘子右半边的两对称力，而求得法兰盘总高度上的力矩，得：

$$dM_2 = 4 \tau_1 r^2 h \sin^2 \alpha da = \tau_1 d^2 h \sin^2 \alpha da$$

积分后，得：

$$M_2 = \tau_1 d^2 h \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \alpha da = \frac{\pi \tau_1 d^2 h}{4} \quad (21)$$

將方程(12)和(21)代入(19), 並且在式內用 $h-h_1$ 代替 h_2 , 得:

$$\begin{aligned} P\left(H - \frac{h}{3}\right) &= \frac{2}{3} h \frac{\pi d h_1}{8} (\sigma + \tau) - \frac{P h_1}{3} + \frac{\pi \tau_1 d^2 h}{4} = \\ &= \frac{h_1}{12} [\pi d h (\sigma + \tau) - 4P] + \frac{\pi \tau_1 d^2 h}{4}. \end{aligned} \quad (22)$$

將方程(18)之 h_1 代入, 得:

$$P\left(H - \frac{h}{3}\right) = \frac{\pi d h^2 (\sigma + \tau)}{24} + \frac{\pi \tau_1 d^2 h}{4}. \quad (23)$$

由此

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{24}{\pi d h^2} \left[P\left(H - \frac{h}{3}\right) - \frac{\pi \tau_1 d^2 h}{4} \right] - \tau = \\ &= \frac{24 P\left(H - \frac{h}{3}\right)}{\pi d h^2} - \tau \left(1 + \frac{6 d \tau_1}{\tau h}\right). \end{aligned} \quad (24)$$

在此方程內我們有三個未知數: σ , τ 和 τ_1 。因而此式為未定式。我們將試圖除去一未知數。通常有這樣的關係: $\frac{d}{h} > 1$ 。可以想象到, 在這些條件下, $\frac{\tau_1}{\tau} > 1$ 。如果我們假定: $\tau_1 \approx \tau$, 則將減少反作用力矩, 因而, 我們將求得具有若干余量的應力 σ 和 τ 。計算證明: 量 τ 幾乎常常是比容許的數值小很多。因此, 可以不必耽心 τ_1 會超過容許限度。因而, 我們將假定 $\tau_1 \approx \tau$, 而

$$\sigma = \frac{24 P\left(H - \frac{h}{3}\right)}{\pi d h^2} - \tau \left(1 + \frac{6d}{h}\right) = \alpha - b\tau. \quad (25)$$

必須注意: 當法向應力和剪切應力同時作用時, 強度的限值將降低。因此, 求出 σ 和 τ 後, 還應當求出由下列公式所規定的折合應力:

$$\sigma_t = \frac{1-\mu}{2}\sigma + \frac{1+\mu}{2}\sqrt{\sigma^2 + (2\alpha_0\tau)^2} \quad (26)$$

式中

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_{np}}{\tau_{np}(1+\mu)} \quad (27)$$

和 μ ——泊松(poisson)系数。

如为水泥,可取 $\mu=0.18$ 和 $\frac{\sigma_{np}}{\tau_{np}}=5$ 。因此

$$\sigma_t = 0.41\sigma + 0.59\sqrt{\sigma^2 + (2\alpha_0\tau)^2}, \quad (28)$$

$$\alpha_0 = \frac{5}{1.18} = 4.23.$$

如果假定,由剪切应力所产生的力矩 M_t 等于零,则方程(24)变换成下列方程:

$$\sigma = \frac{24P\left(H - \frac{h}{3}\right)}{\pi dh^2} - \tau. \quad (29)$$

由此方程所求得之各种支持绝缘子的 σ , 远远超出了水泥的极限强度(700—1000 公斤/厘米²或更大)。这就证明: 不能把剪切应力所产生的力矩的影响略而不计。因此, 我们应根据方程(25)来求得法向应力和剪切应力。

方程式组(25)和(28)不难解出, σ 和 τ 亦不难由此求出。用分析法来解此组方程十分烦杂, 我们将不予介绍。如果根据方程(28)作成曲线, 并且求得与由方程(25)所提供之直线相交的一点, 就可以得到简单得多的图解法。假定 $\sigma_t = \sigma_{np}$, 可以根据方程(28)作出水泥的给定压缩强度限值的曲线, 并且根据方程(25)作出直线后, 我们将求得任意绝缘子的解; 为了作出上述直线, 只须计算两点即可。我们假定: $\sigma_{np} = 400$ 公斤/厘米², (代表着通常应用在电器制造内的荷兰水泥的数

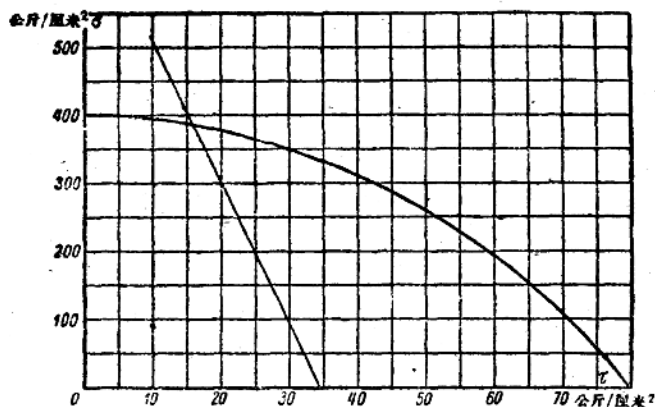


图6. 图解决定填封内的法向应力与剪切应力。

值)。于是根据方程(28)所作出的曲线将采取图6所示之形式。这里也表明根据方程(25)所示之OA-6型绝缘子的直线方程式 $\sigma = a - b\tau$, 曲线与直线之交点即为该题之解: $\sigma = 385$ 公斤/厘米², $\tau = 16$ 公斤/厘米²。

利用上述方法, 我们将求出苏联制造的标准支持绝缘子之 σ 和 τ 值。此项绝缘子之主要数据和计算结果引如表1

表 1.

型号	P 公斤	H 厘米	h 厘米	d 厘米	a	b	σ 公斤/厘米 ²	τ 公斤/厘米 ²
OA-6	375	15.5	2.6	8.6	720	20.83	385	16.0
OA-10	375	18	2.6	8.6	844	20.83	371	22.8
OA-35	375	36.8	3.4	12	737	22.2	386	15.8
OB-6	750	17.3	3.4	10.5	764	19.5	377	19.9
OB-10	750	20.3	3.4	10.8	880	20.05	363	25.7
OB-35	750	33.2	4.2	15	797	22.4	380	18.6
OB-10	1250	21.3	3.8	13	1019	21.5	345	31.5
OD-10	2000	21.7	4.4	15	1063	21.45	337	33.8
O-100	1000	98.4	8.4	26	398	19.6	400	0

由表 1 可知: 所有表內引述的絕緣子金屬附件的填封都未及剪切的全負載, 这就是說: 金屬附件的高度是選擇得有些余量的。不难算出, 例如, 当將 O-100 型絕緣子的金屬附件的高度減至一半(至 4.2 厘米)时, 水泥內之应力將为:

$$\sigma = 337 \text{ 公斤/厘米}^2; \tau = 33.8 \text{ 公斤/厘米}^2.$$

所以, 当高度为 4.2 厘米时, 金屬附件將可靠地工作。

2. 金屬附件填封在內部的支持絕緣子

当計算具有埋入式金屬附件的絕緣子时, 应当对上下部金屬附件分別考慮其計算方法。上部金屬附件的計算, 可以按 § 1 所說明的方法进行, 因为它的工作条件和金屬附件在外面的相同。在这种情形下, 很清楚, 在方程(25)內的 H 必須用 h 来代替。

由图 7 可知, 有一个力 P_1 在下部將金屬附件自陶瓷內拉出, 这一个力可由下列方程式来决定:

$$P_1 = \frac{2PH}{D}. \quad (30)$$

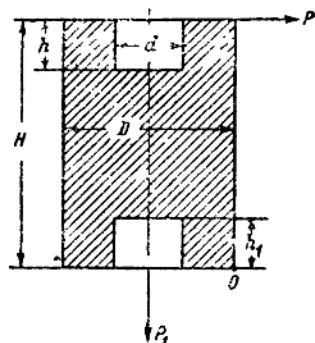


图 7. 金屬附件填封在內部时絕緣子作用力示意图。

这一力与作用在水泥內的剪切应力相平衡, 并由下列方程来决定

$$P_1 = \pi d h_1 \tau. \quad (31)$$

由方程(30)和(31)可知:

$$\tau = \frac{2PH}{\pi dh_1 D} \quad (32)$$

我們可以根据 OMA-6 和 OMA-10 型絕緣子的实验数据来檢查已得的公式，絕緣子的設計数据和水泥內的計算应力列于表 2 內。

表 2.

型 号	P 公斤	H 厘米	h=h ₁ 厘米	d 厘米	D 厘米	σ 公斤/厘米 ²	τ 公斤/厘米 ²
OMA-6, 下部	375	9.0	5.3	2.8	7.0	—	24.4
OMA-6, 上部	375	9.0	3.3	2.8	7.0	215	—
OMA-10, 下部	375	12.0	3.3	2.8	7.4	—	41.9
OMA-10, 上部	375	12.0	3.3	2.8	7.4	215	—

由表 2 可知 OMA 型絕緣子金属附件的載荷是微小的。可是,在这种情形下,金属附件的尺寸是采用得过的,其目的在于利用应用在其他型号的絕緣子(拉紧絕緣子)內的金属附件。

这一批絕緣子經過弯曲試驗,并且若干絕緣子在超出計算荷載一倍的載荷下破裂了。水泥填封在这种載荷下沒有被损坏。

3. 針式支持絕緣子內針的填封

看起来,在这种情形下,剪切应力所产生的力矩的影响应当是很小的,并且实际上可以將它略而不計。

可是計算証明,不是这么一回事,并且在这种情形下进行針的填封时,必須如 § 1 所指出的一样,应当考虑到剪切应力所产生的力矩。

为了檢查起見,我們可以利用 IIIH-10 型絕緣子的实验数据。他們的参数是: $H=8.2$ 厘米; $h=4.2$ 厘米; $d=3.0$ 厘

米; $P=500$ 公斤。由这些参数我們將求得:

$$\sigma = \frac{24P\left(H - \frac{h}{3}\right)}{\pi dh^2} = \frac{24 \times 500 \left(8.2 - \frac{4.2}{3}\right)}{\pi \cdot 3 \times 4.2^2} = 491 \text{ 公斤/厘米}^2, \quad (33)$$

$$b = 1 + \frac{6d}{h} = 1 + \frac{6 \cdot 3}{4.2} = 5.28.$$

借助图 6, 我們求得, $\tau = 23$ 公斤/厘米² 和 $\sigma = 370$ 公斤/厘米²。必須指出: 在这种情形下, 直綫 $\sigma = a - b\tau$ 傾斜得厉害。因此, 在載荷提高到 $P = 445$ 公斤时, 此直綫不再与曲綫 σ 相交, 因而, 如果用牌号为 400 的水泥时, 膩子可能被破坏。

机械試驗的結果說明六种 IIIH-10 型絕緣子的破坏应力是在 550-900 公斤的范围内 (平均 737 公斤)。在这种条件下, 一次也沒有发现水泥损坏的情形。所以, 水泥的应力是位于 407 至 590 公斤/厘米² 以上的范围内的。

計算 IIIH-6 型絕緣子的应力給我們同样的数值: $\tau = 23$ 公斤/厘米²; $\sigma = 370$ 公斤/厘米 (IIIH-6 的各项参数为: $H = 7.8$ 厘米; $h = 3.8$ 厘米; $d = 2.8$ 厘米; $P = 400$ 公斤)。这种絕緣子的試驗結果也說明其破坏載荷或多或少的远远超过其計算值。

我們还要介紹若干种現有絕緣子結構的計算結果 (表 3)。

表 3

型 号	P 公斤	H 厘米	h 厘米	d 厘米	σ 公斤/厘米 ²	τ 公斤/厘米 ²	σ_t 公斤/厘米 ²
ИШД-10	2000	9.7	5.6	6.4	345	31.7	400
ШТ-30	900	19.6	12.4	4.0	174	0	400
ШТ-35	1200	18.4	10	5.6	247	0	400
ИШД-35	2000	19.3	9.4	8.0	350	0	400
3 ШТ-30	300	99.5	12.4	4.0	172	62.7	400
3 ШТ-35	400	98.8	10	5.6	376	35	437
5 ИШД-35	400	179.2	9.4	8.0	440	53	551

表 3 指出: 將絕緣子不是成柱的使用時, ИИТ-30, ИИТ-35 和 ИИД-35 型絕緣子的載荷不重。在將它們成柱的使用時, ИИТ-30 型絕緣子的載荷很大, ИИТ-35 和 ИИД-35 型的絕緣子則過載。由三個元件所組成的 ИИТ-35 型絕緣子柱的載荷最好不應超過 330 公斤, 由五個元件所組成的 ИИД-35 型絕緣子柱的載荷不應超過 280 公斤。

4. 套管絕緣子

圖 8 概要地代表套管絕緣子。在個別場合下, 高度 H_1 和 H_2 可以相等。

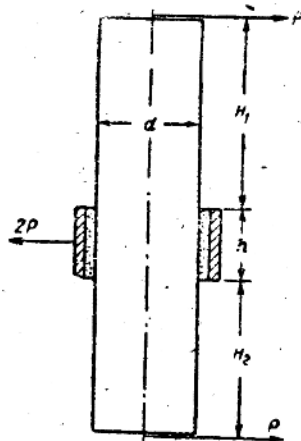


圖 8. 套管式絕緣子中力的作用示意圖。

首先我們將討論不對稱絕緣子的情形 ($H_1 \neq H_2$)。在這種場合下, 在絕緣子填封內的應力分布將決定於由上部和下部的力所產生的力矩之差。計算上與 § 1 所介紹的不同之處只在於: 在方程 (24) 或 (25) 內的 H , 必需用差數 $H_1 - H_2$ 來代替。

如為對稱絕緣子, 此差數變為零, 此時只有等於 $2P$ 的壓力作用在填封上。利用方程

(8), 並且在式內用 dh 來代替 h , 得

$$2P = \frac{\pi}{4} dh (\sigma + \tau). \quad (34)$$

由此,

$$\sigma = \frac{8P}{\pi dh} - \tau. \quad (35)$$

当实际需要的陶瓷直径为 d 时，在结构上所可能的金属附件的最小高度 h 的条件下，所得出的量 σ 是很少的。因为 $\tau \ll \sigma$ ，所以我们可以将 τ 值略而不计，使不致因不需确定 σ ，而将计算复杂化。

计算指出，在采用标准绝缘子的金属附件现有的尺寸时，水泥应力是微不足道的——约为数十公斤/厘米。在金属附件是这种尺寸时，绝缘子甚至可以受到单面施加的力 P 的影响。但是，在通常使用压电器和配电装置内的套管绝缘子中，发生单面负载的情况是不能想象的。这样的载荷只有用于波状隔离开关上的绝缘子才能碰到。

在这种情况下，能发生图 9 所表示的情形，那时短路电流通过隔离开关的刀闸，而通过套管绝缘子的电流等

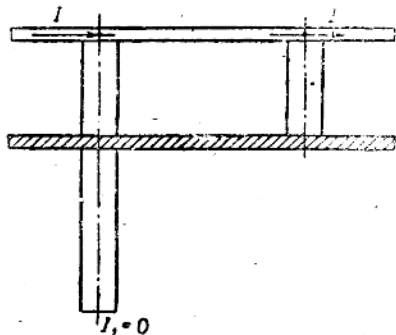


图 9. 通过波状隔离开关的电流图。

于零或很小。因此，波状隔离开关套管绝缘子金属附件的填封，应当根据一面力矩的作用进行计算。此项计算的进行如 § 1 所示。