

[变压器]

基于优化模型的变压器母线排平行顶弯方法

文/廊坊供电公司 王丙东 李贺桥 董旭
国网天津武清供电有限公司 蔡蕾

提出一种综合考虑费用和时间影响的变压器母线排平行顶弯方法，通过采用优化模型可以找到经济和速度的最佳结合点，最后通过实例验证所提出方法的有效性。

铜排主要应用于变电站10 kV与35 kV变压器母线排制作，有时接地网铺设也采用铜排。

由于变压器安装位置与开关室位置的不确定性，有时需要对变压器母线排进行顶弯处理。廊坊供电公司目前工作现场大都依据工作经验进行顶弯，顶弯角度主要通过实际观察，所耗时间基本没有考虑。基于此，本文提出一种综合考虑费用和时间影响的变压器母线排平行顶弯方法，通过采用优化模型可以找到经济和速度的最佳结合点，最终通过实际算例验证本文提出方法的有效性。

弯排机静态分析

在某一静止状态，弯排机顶弯模具的前进距离 h 、顶弯角度 D 与两根挡柱之间的距离 L 满足一定关系，以下为推导过程。

如图1所示为弯排机静态分析图， Q 为顶弯角度等效圆圆心， Q_1 为工作起始时顶弯模具着力点， Q_2 为工作结束时顶弯模具着力点， L 为两根挡柱之间的距离， $L=l_{Q_2Q_8}$ ， φ_1 和 φ_2 分别为左右两根挡柱的旋转角度， D 为顶弯角度， r 顶弯角度等效圆半径， h 为顶弯模具着力点前进距离， $h=l_{Q_1Q_2}$ 。

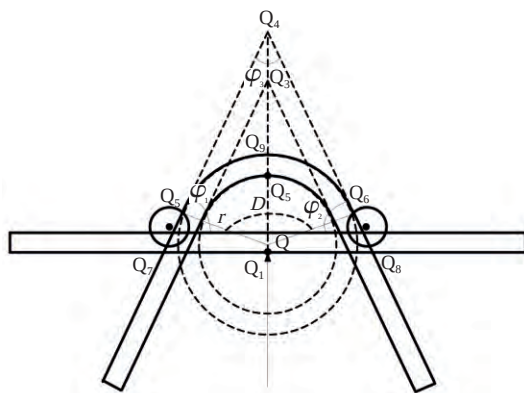


图1 弯排机静态分析图

在 $\triangle QQ_5Q_4$ 中，根据三角函数有

$$\cos\varphi_1 = \frac{r}{l_{Q_2Q_4} - \Delta x + r} \quad (1)$$

其中， Δx 为金属排的宽度。

在 $\triangle Q_1Q_7Q_4$ 中，根据三角函数有

$$\tan\varphi_1 = \frac{l_{Q_2Q_4} + h}{L/2} \quad (2)$$

根据切割线定理

$$(r \tan\varphi_1)^2 = (l_{Q_2Q_4} - \Delta x)(l_{Q_2Q_4} + 2r) \quad (3)$$

式(1)、式(2)和式(3)联立可得

$$h = \frac{h_1 + \Delta x(2\cos\varphi_1 - 1 - \cos^2\varphi_1)}{\cos^2\varphi_1 - 2\cos\varphi_1 + 1} \quad (4)$$

$$h_1 = L \sin\varphi_1 \left(0.5\cos\varphi_1 - 1 + \frac{0.5}{\cos\varphi_1} \right)$$

由于 $\varphi=\varphi_1=D/2$ ，式(4)可以写成

$$h = \frac{h_1 + \Delta x (2\cos \frac{D}{2} - 1 - \cos^2 \frac{D}{2})}{\cos^2 \frac{D}{2} - 2\cos \frac{D}{2} + 1}$$

$$h_1 = L \sin \frac{D}{2} \left(0.5 \cos \frac{D}{2} - 1 + \frac{0.5}{\cos \frac{D}{2}} \right) \quad (5)$$

式(5)可以写成如下形式

$$f(D, h, L) = 0 \quad (6)$$

式(6)表明通过调节 L 和 h 可以控制顶弯角度 D 的大小。考虑到式(5)为非线性函数，为了清楚 L 、 D 和 h 之间的关系，假定 $\Delta x = 0.08$ m，画出式(5)的函数图，如图2所示。

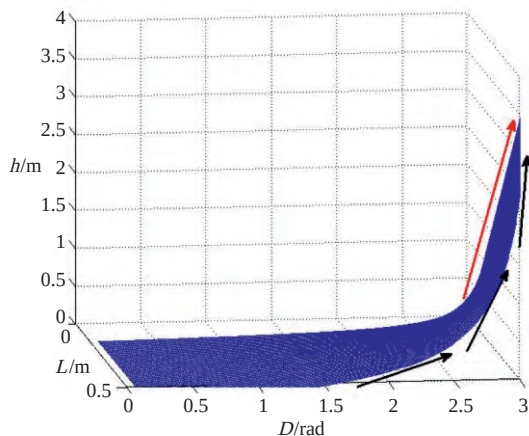


图2 D 、 h 和 L 之间函数关系图

如图2所示，当 D 一定时， L 与 h 呈线性关系，如图中红色箭头所示，这一点从式(5)中很容易得出。当 L 一定时， h 和 D 呈非线性关系，如图中黑色箭头所示。当 $D < 2.5$ rad时， h 随着 D 的增大平缓增大，当 $D > 2.5$ rad时， h 随着 D 的增大急剧增大。

金属排平行连接原理分析

在实际生产中，互感器、避雷器以及变压器套管的接头都是矩形导体，所以本文假设需要利用金属排将两根平行矩形导体 J_1 和 J_2 连接起来，其示意图如图3所示。

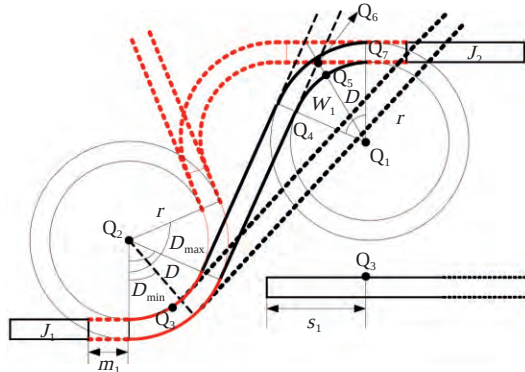


图3 金属排平行连接原理图

1. 金属排顶弯顶点分析

1) 金属排 J_1 侧顶弯顶点

假定先从矩形 J_1 侧顶弯，金属排 J_1 侧的顶弯顶点确定比较简单，如图3所示， Q_3 为金属排 J_1 侧顶弯顶点，满足如下关系

$$s_1 \geq m_1 + Dr + \delta_1 \quad (7)$$

其中， δ_1 为金属排与矩形 J_1 的接头部分长度。

根据式(3)、式(4)和式(6)可有

$$r = \frac{\cos \frac{D}{2} \left(\frac{L}{2} \tan \frac{D}{2} - h - \Delta x \right)}{1 - \cos \frac{D}{2}} \quad (8)$$

所以式(7)可以变形为

$$s_1 \geq m_1 + D \frac{\cos \frac{D}{2} \left(\frac{L}{2} \tan \frac{D}{2} - h - \Delta x \right)}{1 - \cos \frac{D}{2}} + \delta_1 \quad (9)$$

2) 金属排 J_2 侧顶弯顶点

延长矩形 J_2 与金属排交于 Q_6 点，但该点不是金属排 J_2 侧顶弯顶点。如图3所示，金属排 J_2 侧顶弯顶点应该是 Q_4WQ_7 的中点 Q_5 ，如下给出根据 Q_6 找出 Q_5 具体方法。

如图3所示，在在 $\triangle Q_1Q_4Q_6$ 中，根据三角函数可有

$$l_{Q_4Q_6} = r \tan \frac{D}{2} \quad (10)$$

根据弧长公式可有，

$$l_{Q_4WQ_5} = r \frac{D}{2} \quad (11)$$

所以有

$$\Delta l = l_{Q_4Q_6} - l_{Q_4WQ_5}$$

$$= \frac{\cos \frac{D}{2} \left(\frac{L}{2} \tan \frac{D}{2} - h - \Delta x \right)}{1 - \cos \frac{D}{2}} \left(\tan \frac{D}{2} - \frac{D}{2} \right) \quad (12)$$

所以根据 Q_6 的位置，需要向 J_1 侧移动距离 Δl 即可确定 Q_5 。注意，当 Δl 为负数时，需要向 J_2 侧移动距离 $|\Delta l|$ 。

2. 金属排顶弯角度 D 范围

1) 金属排顶弯角度最小值 $D_{\min}$

如图3中黑色粗虚线所示，当金属排顶弯角度 D 过小时，金属排会无法连接矩形 J_2 。如图3中红色粗虚线所示，当金属排顶弯角度 D 过大时，金属排可能消耗过长，从而造成金属排长度不足无法连接矩形 J_1 和 J_2 。为了详细推导出 D 的上下限，在图4中，将金属排等效为一条直线($\Delta x = 0$)。

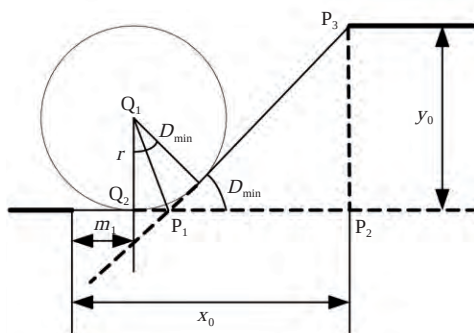


图4 金属排顶弯角度最小值 $D_{\min}$

在 $\triangle Q_1Q_2P_1$ 中, 根据三角函数可有

$$l_{Q_2P_1} = r \tan \frac{D_{\min}}{2} \quad (13)$$

在 $\triangle P_1P_2P_3$ 中, 根据三角函数可有

$$\tan D_{\min} = \frac{y_0}{x_0 - m_1 - r \tan \frac{D_{\min}}{2}} \quad (14)$$

结合式(1)、式(2)和式(14)可以用数值方法求解得出 $D_{\min}$ 。

2) 金属排顶弯角度最大值 $D_{\max}$ ($D_{\max} < 90^\circ$)

假定金属排总长度为 Z_0 , 如图5所示。

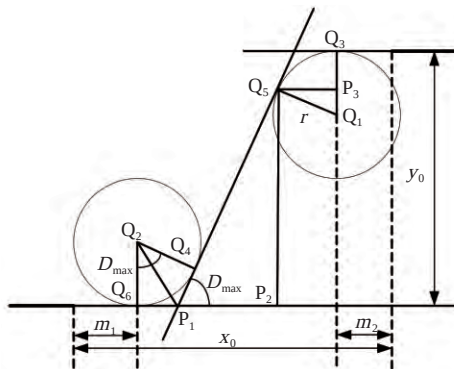


图5 金属排顶弯角度最大值 $D_{\max}$ ($D_{\max} < 90^\circ$)

在 $\triangle P_1Q_2Q_6$ 中, 根据三角函数可有

$$l_{Q_6P_1} = r \tan \frac{D_{\max}}{2} \quad (15)$$

在 $\triangle Q_1Q_5P_3$ 中, 根据三角函数可有

$$\begin{aligned} l_{Q_5P_3} &= r \cos D_{\max} \\ l_{Q_5P_3} &= r \sin D_{\max} \end{aligned} \quad (16)$$

所以有

$$l_{Q_5P_3} = y_0 - r + r \cos D_{\max} \quad (17)$$

在 $\triangle P_1P_2Q_5$ 中, 根据三角函数可得

$$\begin{aligned} l_{P_1P_2} &= \frac{y_0 - r + r \cos D_{\max}}{\tan D_{\max}} \\ l_{P_1Q_5} &= \frac{y_0 - r + r \cos D_{\max}}{\sin D_{\max}} \end{aligned} \quad (18)$$

所以有

$$\begin{aligned} m_2 &= x_0 - (\delta_1 + \delta_2) - m_1 - r \tan \frac{D_{\max}}{2} - \\ &\quad r \sin D_{\max} - \frac{y_0 - r + r \cos D_{\max}}{\tan D_{\max}} \\ l_{Q_5Q_6} &= \frac{y_0 - r + r \cos D_{\max}}{\tan D_{\max}} - r \tan \frac{D_{\max}}{2} \end{aligned} \quad (19)$$

所以可知消耗金属排总长度 z 为 z_0 时

$$\begin{aligned} z = z_0 &= x_0 + r(2D_{\max} - \cos D_{\max}) + (y_0 - r + r \sin D_{\max}) \\ &\quad \left(\frac{1}{\sin D_{\max}} - \frac{1}{\tan D_{\max}} \right) - 2r \tan \frac{D_{\max}}{2} \end{aligned} \quad (20)$$

结合式(1)、式(2)和式(20)可以用数值方法求解得出 $D_{\max}$ 。

3) 金属排顶弯角度最大值 $D_{\max}$ ($D_{\max} > 90^\circ$)

如图6所示。

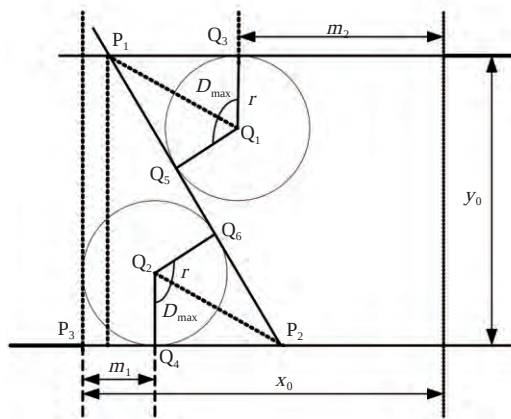


图6 金属排顶弯角度最大值 $D_{\max}$ ($D_{\max} > 90^\circ$)

在 $\triangle P_2Q_2Q_4$ 中, 根据三角函数可有

$$l_{Q_4P_2} = r \tan \frac{D_{\max}}{2} \quad (21)$$

在 $\triangle P_1P_2P_4$ 中, 根据三角函数可有

$$\begin{aligned} l_{P_2P_4} &= \frac{y_0}{\tan(180 - D_{\max})} \\ l_{P_2P_1} &= \frac{y_0}{\sin(180 - D_{\max})} \end{aligned} \quad (22)$$

所以有

$$l_{P_2Q_4} = \frac{y_0}{\tan(180 - D_{\max})} - 2r \tan \frac{D_{\max}}{2} \quad (23)$$

所以有

$$l_{P_2P_4} = m_1 - \frac{y_0}{\tan(180 - D_{\max})} + 2r \tan \frac{D_{\max}}{2} \quad (24)$$

所以有

$$\begin{aligned} m_2 &= x_0 - (\delta_1 + \delta_2) - r \tan \frac{D_{\max}}{2} - \\ &\quad m_1 + \frac{y_0}{\tan(180 - D_{\max})} - 2r \tan \frac{D_{\max}}{2} \end{aligned} \quad (25)$$

$$l_{Q_5Q_6} = \frac{y_0}{\sin(180 - D_{\max})} - 2r \tan \frac{D_{\max}}{2} \quad (26)$$

所以当金属排消耗总长度 z 为 Z_0 时

$$z = z_0 = x_0 + 2D_{\max}r + \left(\frac{y_0}{\sin(180 - D_{\max})} - 2r \tan \frac{D_{\max}}{2} \right) \quad (27)$$

结合式(1)、式(2)和式(27)可以用数值方法求解得出 $D_{\max}$ 。

金属排平行顶弯优化方法

假定金属排单位长度价格为 k_1 ，在金属排顶弯过程中，顶弯速度系数为 k_2 ，注意 k_2 不单是工作油缸的前进速度，而是综合考虑到了油缸前进速度与相关杂散时间（例如观察时间），顶弯开始时将 L 设定为 L_{set} ，为了为书写方便，将 z 表达式写成

$$z = g(D, h, L_{\text{set}}) \quad (28)$$

金属排顶弯方法的优化模型如下

$$\text{obj} F = \min(x_c k_1 z + x_t \frac{h}{k_2}) \quad (29)$$

$$\text{st} \begin{cases} h_{\min} < h < h_0 & (1) \\ D_{\min} \leq D < D_{\max} & (2) \\ f(D, h, L_{\text{set}}) = 0 & (3) \\ z = g(D, h, L_{\text{set}}) & (4) \end{cases} \quad (30)$$

上述优化模型可应用matlab优化包求解。其目标函数为费用和消耗时间之和最小， x_c 、 x_t 分别为费用和时间的比重系数，可以根据实际情况进行调整，满足 $x_c + x_t = 1.0$ 。约束条件之中包含两个等式约束和两个不等式约束。 $D_{\min}$ 和 $D_{\max}$ 可根据3.2节计算得出， $h_{\min}$ 为根据式(5)结合 $D_{\min}$ 得到。注意， h_0 一般由设备本身确定，如果根据3.2节计算出 $D_{\max}$ 所对应的 $h_{\max}$ 大于 h_0 ，此时 $D_{\max}$ 需要调整，需要根据式(5)求解出 D_0 ，此时式(30-2)变为，

$$D_{\min} \leq D < D_0 \quad (31)$$

实例分析

考虑到工作成本和工作时限，变电站实际生产工作无法验证本文所提出方法的有效性，特选单位试验区，应用可利用废旧设备来验证本方法的有效性。



图7 实例图

如图7所示，需要应用铝排连接避雷器和电流互感器（只为试验测试用，实际生产中两种设备不可能连接），示意图如图7中红色实线所示。由于避雷器与铝排的接点处没有摆放在同一直线上，铝排需要进行平行弯制作，考虑到竖直连接部分铝排长度相同，本文只考虑水平连接部分铝排长度。实际测量， $x_0 = 1.35 \text{ m}$ ， $y_0 = 0.41 \text{ m}$ 。

分别应用传统经验方法和本文提出的优化方法对铝排进行平行弯制作。设定 $x_c = 1.0$ ， $x_t = 0$ ， $k_1 = 1.0 \text{ C/m}$ （C为某货币单位）， $L_{\text{set}} = 0.4 \text{ m}$ ， $\Delta x = 0.1 \text{ m}$ ，制作结果如图8所示。

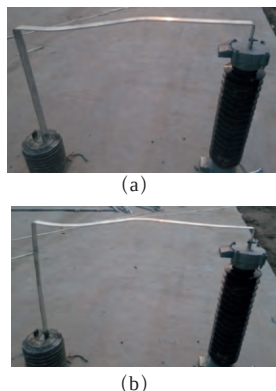


图8 结果对比图

传统经验方法与本文提出方法结果参数对比如表1所示。

表1 两种方法结果参数

方法	D/rad	h/m	水平耗材 z/m	成本/C
本文提出方法	1.62	0.11	1.87	3.07
传统经验方法	1.78	0.15	1.96	3.16

通过表1可知，本文提出方法比传统方法节省成本0.09C，从而可以证明本文提出的方法具有一定的实际可行性。

结束语

考虑到廊坊供电公司目前变压器母线排平行弯制作时，大都依据工作经验进行顶弯，顶弯角度主要通过观察，所耗时间基本没有考虑。基于此本文提出一种综合考虑费用和时间影响的金属排平行顶弯方法，可以通过改变比重系数来调整重点考虑项，并通过实际算例验证本文提出方法可以提高母线排制作的经济性。考虑到本文所利用算例不是实际变电站变压器母线排制作的具体应用，把本文方法应用到实际变电站变压器母线排的制作之中是以后工作的重点。EA

（收稿日期：2015.01.09）

（编辑：白文亭）