

电缆弯曲半径的现场简便测量

张洁民, 北京吉北供用电工程建设监理公司

摘要: 该文推导并确定了适用于不同现场条件下的电缆弯曲半径测量的理论公式, 利用实验验证了公式应用于工程实践的准确性, 进而编制出可供现场实际应用的速查表, 减小了现场工作量。

关键词: 电缆弯曲半径; 弦高法; 弦长法; 三点法; 偏差率; 速查表

中图分类号: TM621.5

文献标志码: B

文章编号: 1003-0867(2006)09-0017-03

随着经济的发展, 城市化的进程日益加速, 城市电网中电力电缆的使用不断增加。北京市三环路以内所有新建输电线路几乎全部使用电缆。此外, 城网架空线入地工程也在大范围内实施。

电缆安全运行的关键因素是其绝缘的良好程度和内部电场分布的均匀性。电缆弯曲半径是电缆敷施工及运行中保证其绝缘性能的主要指标。所谓弯曲半径, 是指工程上把弯曲的电缆近似看做一段圆弧, 圆弧所在圆的半径即为此弯曲电缆的弯曲半径。

如果电缆在敷施工或运行中弯曲半径小于规定值, 会直接导致其结构的破坏, 最终致使绝缘击穿, 酿成安全质量事故。因此, 工程实践中大量存在着对弯曲半径进行测量及判断的问题。

本文就是要寻求一种简便且准确测量电缆弯曲半径的方法, 以期正确判断其符合性, 并希望能对电缆敷施工做一些预防性的指导。由于电缆工程作业区狭窄, 要求测量方法有如下特点: 原理正确, 方法简便, 结果准确。

1 现状分析

目前工程实践中, 电缆的最小弯曲半径规定值一般有三个标准:

- 设计值, 规范的施工图设计, 都会明确给出施工时和运行时的最小弯曲半径值;
- 电缆生产厂家提供值;
- 《电气装置安装工程电缆线路施工及验收规范》(GB 50168-92) 中第 5.1.7 条的规定。

较大的电缆弯曲以目测就可以判定其合格, 即: 观察曲线形状, 假定其圆心点, 自假定的圆心至最近的电缆本体, 用直尺测量出其距离, 即为电缆弯曲半径。如果弯曲较小, 就必须经测量而得出具体的数值, 再与标准值进行比较。怎样才能简便、准确的进行测量? 首先要建立相应的数学模型。

2 区别不同现场情况, 分别建立数学模型

2.1 只可于曲线内测量取数值

如图 1, 理论公式为

$$R = b^2 / (8a) + a/2$$

应用此法量取 a 、 b 两数值, 即得 R 值。可称其为“弦高法”。

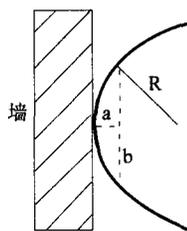


图1 内侧法



图2 外侧法

2.2 只可于曲线外测量取数值

如图 2, 理论公式为

$$L_{\text{弧}} = (\pi R / 90) \arcsin[L_{\text{弦}} / (2R)]$$

应用此法量取 AB 间弦长 $L_{\text{弦}}$ 和弧长 $L_{\text{弧}}$ 两数值, 即得 R 值。可称其为“弧长法”。

注意: 运用此公式已知 $L_{\text{弦}}$ 和 $L_{\text{弧}}$ 值, 不易得出 R 值 (若已知 $L_{\text{弦}}$ 和 R 值, 则容易得出 $L_{\text{弧}}$ 值)。可使用 EXCEL 电子表格的智能计算功能, 多次试选的 R 值以使 $L_{\text{弦}}$ 和 $L_{\text{弧}}$ 值相符。

2.3 三点法测量

考虑到取直角和测量曲线的不方便, 在前两种情况下均采用三点法进行测量 (如图 3)。理论公式为

$$R = b^2 / [2(b^2 - a^2/4)^{1/2}]$$

实践中取 $AB = BC$, 分别量取 $AB = b$ 、 $AC = a$ 的长度, 即得 R 值。可称之为“三点法”。

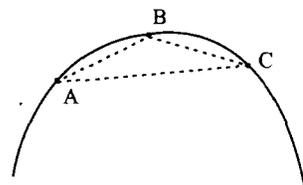


图3 三点法

表1 电缆弯曲数据表

电缆直径 $d=73$										
预设电缆半径 $R=1800$	方法一、二	测量部位	弦长	弦高	弧长	预设半径	计算半径	偏差值	偏差率	备注
		内	2000	306	2118	1800	1786.9	13.1	0.73%	方法一
							1816	16	0.89%	方法二
		中	2000	305	2117	1836.5	1791.8	44.7	2.43%	方法一
							1823	13.5	0.74%	方法二
		外	1901	—	2000	1873	1821	52	2.78%	方法二
	方法三	中	弦长1	弦长2	弦长3	1836.5	1855.3	18.8	1.02%	
			1000	1000	1926					
预设电缆半径 $R=1400$	方法一、二	测量部位	弦长	弦高	弧长	预设半径	计算半径	偏差值	偏差率	备注
		内	2000	420	2229	1400	1400.5	0.5	0.04%	方法一
							1397	3	0.21%	方法二
		中	2000	415	2222	1436.5	1412.3	24.2	1.68%	方法一
							1413	23.5	1.64%	方法二
		外	1840	--	2000	1473	1426	47	3.19%	方法二
	方法三	中	弦长1	弦长2	弦长3	1436.5	1415	21.5	1.5%	
			1100	1100	2027					
预设电缆半径 $R=1200$	方法一、二	测量部位	弦长	弦高	弧长	预设半径	计算半径	偏差值	偏差率	备注
		内	2000	528	2352	1200	1211	11	0.92%	方法一
							1212	12	1%	方法二
		中	1900	440	2155	1236.5	1245.6	9.1	0.74%	方法一
							1255.5	19	1.54%	方法二
		外	1800	--	2000	1273	1271	2	0.16%	方法二
	方法三	中	弦长1	弦长2	弦长3	1236.5	1235.5	1	0.08%	
			1100	1100	1970					
电缆直径 $d=85$										
预设电缆半径 $R=1800$	方法一、二	测量部位	弦长	弦高	弧长	预设半径	计算半径	偏差值	偏差率	备注
		内	2000	300	2125	1800	1816.7	16.7	0.93%	方法一
							1773	27	1.5%	方法二
		中	2000	299	2120	1842.5	1823	19.5	1.1%	方法一
							1805	37.5	2.04%	方法二
		外	1903	--	2000	1885	1840	45	2.39%	方法二
	方法三	中	弦长1	弦长2	弦长3	1842.5	1977.3	134.8	7.32%	
			1000	1000	1935					
预设电缆半径 $R=1400$	方法一、二	测量部位	弦长	弦高	弧长	预设半径	计算半径	偏差值	偏差率	备注
		内	2000	430	2230	1400	1377.8	22.2	1.59%	方法一
							1395	5	0.36%	方法二
		中	2000	412	2220	1442.5	1419.6	22.9	1.59%	方法一
							1468	25.5	1.77%	方法二
		外	1847	--	2000	1485	1460	25	1.68%	方法二
	方法三	中	弦长1	弦长2	弦长3	1442.5	1459.5	17	1.18%	
			1000	1000	1879					
预设电缆半径 $R=1200$	方法一、二	测量部位	弦长	弦高	弧长	预设半径	计算半径	偏差值	偏差率	备注
		内	2000	547	2385	1200	1187.6	12.4	1.03%	方法一
							1181	19	1.58%	方法二
		中	2000	509	2332	1242.5	1236.8	5.7	0.46%	方法一
							1234	8.5	0.68%	方法二
		外	1807	--	2000	1285	1295	10	0.78%	方法二
	方法三	中	弦长1	弦长2	弦长3	1242.5	1257.1	14.6	1.18%	
			1000	1000	1835					

3 准确性的检验

应用到工程实践中，准确性如何呢？还需要实验验证。

笔者在同事的帮助下，模拟实际工程情况作了一项实验：我们在地面上分别划出半径为 1.8 m、1.4 m、

这三个理论公式的选用无疑是正确的。但是将其

项实验：我们在地面上分别划出半径为 1.8 m、1.4 m、

1.2 m的一段弧。选取两段不同外径的电缆 ($D = 73 \text{ mm}$ 、 85 mm), 并将实验电缆弯成以上曲线, 安排人员测量。得出数据并计算, 其结果见表 1。

对数据表的说明:

- 测量部位内、中、外是指电缆弯成设定曲线后, 其内侧、中部、外侧;
- 弦长、弦高、弧长均为实测数据, 预设半径为已知数据 ($R + D/2$), 计算半径、偏差值、偏差率为计算结果 (偏差率 = 偏差值 / 预设半径);
- 方法一平均偏差率为 1.10%, 方法二平均偏差率为 1.39%, 方法三平均偏差率为 2.05%。

4 实际工作中的推广

在以上实验中, 分别用三种方法对电缆弯曲半径进行了确定。通过对数据的分析, 可得出结论: 需要准确测量并计算电缆弯曲半径时, 此三种方法均可以应用于工程实践。即使存在人为的测量偏差 (任何工程测量都会存在, 但应尽量减小), 其平均偏差率在工程实践中是完全可以接受的。

降低偏差率也有方法: 视现场情况, 取弦长尽可能大, 则测量误差对最终结果的影响会更小。

依照上述公式, 测量出数据后手工计算会有些烦琐。可使用 EXCEL 电子表格的智能计算功能, 能够轻松解决 (因其使用现已相当普遍, 笔者无需赘述)。

需要说明的是, 三种方法适用于不同施工场地情况。如场地情况良好, 则第三种方法操作起来是最简单的。遇第二种情况, 工程上有专用的卡尺可测量弦长 (实际操作中, 用 $\phi 4.0$ 铁线也可完成)。在测量工具的使用上, 更可以简化为一把卷尺、几米小白线、几米铁线。

5 将对数值的计算转化为比较, 减少计算量

多数情况下, 对现场弯曲半径的测量要由一线施工人员或质检人员来完成, 要求每个施工人员都掌握这几个公式, 并能够正确熟练地进行计算是比较困难的。另外, 大多数情况下, 只要知道实际半径是否大于控制弯曲半径就可以了, 而无须计算准确的数值。由此, 笔者想到, 能否设计一张表格, 使施工人员和质检人员现场测量后无须计算, 而只将实测数据与表格数据相比较, 就能判断合格与否。

将公式转化, 弦高法为: $a = R - [R^2 - (b/2)^2]^{1/2}$; 弧长法为: $L_{\text{弧}} = (\pi R/90)\arcsin[L_{\text{弦}}/(2R)]$; 三点法为: $a = b(4 - b^2/R^2)^{1/2}$ 。

表 2 弦高法现场测量电缆弯曲半径对照表 (m)

R	b=1	b=1.2	b=1.5	b=2
2.2	$a_{\text{控}}=0.058$	$a_{\text{控}}=0.083$	$a_{\text{控}}=0.132$	$a_{\text{控}}=0.240$
2.1	0.060	0.088	0.138	0.253
2.0	0.064	0.092	0.146	0.268
1.9	0.067	0.097	0.154	0.284
1.8	0.071	0.103	0.164	0.303
1.7	0.075	0.109	0.174	0.325
1.6	0.080	0.117	0.187	0.351
1.5	0.086	0.125	0.201	0.382
1.4	0.092	0.135	0.218	0.420
1.3	0.100	0.147	0.238	0.469
1.2	0.109	0.161	0.263	0.537
1.1	0.120	0.178	0.295	0.642
1.0	0.134	0.200	0.339	1.000
0.9	0.152	0.229	0.403	--
0.8	0.176	0.271	0.522	--

具体到每一个工程, 其电缆的型号是确定的, 则其弯曲半径控制值 R 也已经确定。若再将三个公式中的 b 、 $L_{\text{弦}}$ 、 b 分别固定, 则可求得相应的 $a_{\text{控}}$ 、 $L_{\text{弧控}}$ 、 $a_{\text{控}}$ 值。取多组可能的数值, 即得一张现场可用来比较的速查表 (本文只给出了弦高法的速查表见表 2。其它两种方法的速查表, 读者可自行编制)。

应用微积分的知识可知: 将三个公式中的 b 、 $L_{\text{弦}}$ 、 b 分别固定后, 则相应的 a 、 $L_{\text{弧}}$ 、 a 与 R 成函数关系。在各自定义域内, 其增减关系: 方法一、方法二为单减; 方法三为单增。直观的图形分析也可得出这个结论。

由以上分析, 可得出速查表的用法:

- 方法一: 若 $a_{\text{测}}$ 大于 $a_{\text{控}}$, 则弯曲半径不合格, 反之则合格。
- 方法二: 若 $L_{\text{弧测}}$ 大于 $L_{\text{弧控}}$, 则弯曲半径不合格, 反之则合格。
- 方法三: 若 $a_{\text{测}}$ 大于 $a_{\text{控}}$, 则弯曲半径合格, 反之则不合格。

6 结束语

在理论分析的基础上, 笔者通过建立数学模型, 得到了计算弯曲半径的公式。通过实验, 验证了理论公式应用于工程实践的准确性 (体现为偏差率), 并得出了适用的结论。将公式转换后, 使“对数值的计算”转化为“对数值的判断”, 编制出了适用于现场施工人员及质检人员使用的速查表, 大大减少了现场工作量及工作难度。

经本公司质检人员现场使用后反映, 确实达到了“原理正确, 方法简便, 结果准确”的目的。