500kV 线路杆塔引流板带电消缺安全校核

张华杰　朱　丹　曾　东　温　镇
（嘉兴电力局，浙江 嘉兴　314033）

摘要　针对嘉兴电力局省公司项目“输电线路引流板带电消缺技术研究及应用”，对收集到的500kV 线路杆塔资料进行分析后，根据实际塔型和尺寸，通过计算，得到开展引流板带电消缺作业时，作业人员的作业间隙及作业危险率，分析带电作业的安全性。

关键词：500kV 输电线路；引流板；带电消缺；安全性

The Security Checking For Live Eliminate Defects Working On Drainage Board On 500kV Transmission Line

Zhang Huajie　Zhu Dan　Zeng Dong　Wen Zhen
(Jiaxing Electric Power Bureau, Jiaxing, Zhejiang　314033)

Abstract　This paper is against on province project “The Study on Live Eliminate Defects Working On Drainage Board On Transmission Line and its’ application” by Jiaxing Electric Power Bureau. We analyzed the 500kV line tower’s data collected. By calculating the dates based on the actual tower type and size, we have got the working gap and hazard rate in order to analyze the security of the live eliminate defects working on drainage board on transmission line.

Key words：transmission line; drainage board; live working; security

随着我国电力事业的飞速发展，各电压等级输电线路和用电客户数量迅速增加，线路负荷也大幅增长。输电线路长期暴露在户外，运行环境复杂，使得线路设备易产生锈蚀、磨损和发热等缺陷，耐张线夹引流板发热是输电线路运行中经常发生的问题之一。在线路满负荷运行情况下，耐张线夹引流板发热问题尤其突出，如不及时消除，会影响线路正常负荷的输送，严重时会发生熔断引流线的事故。为生产实际需要，嘉兴电力局应浙江省电力公司要求，根据其所辖的 500kV 输电线路特点，采用理论分析、试验研究和现场应用试验相结合的研究方法，研制开发引流板带电消缺专用工器具[1-7]。

鉴于引流板带电消缺作业项目的特殊性，作业人员进入作业位置的过程可能与常规带电作业有所差异，因此有必要对典型杆塔上引流板带电消缺作业过程中可能面对安全距离和组合间隙进行校核，以保证作业人员的安全。

本文在对收集到的 500kV 线路杆塔资料进行分析之后，再根据实际塔型和尺寸，通过计算，得到开展引流板带电消缺作业时，作业人员的作业间隙及作业险率，分析带电作业的安全性。

1　校核方法及步骤

按照下列方法及步骤校核典型塔型的带电作业最小安全距离及各种进入方式的组合间隙。

1）确定各电压等级杆塔的典型带电作业位置及进入途径。

2）由于本次调研 500kV 杆塔各部位尺寸及杆塔宽度与以往带电作业研究的同等电压等级杆塔十分相近，以往带电作业研究的同等电压等级杆塔的试验研究结果已经拟合成典型的带电作业间隙操作冲击放电曲线。因此，根据这些曲线计算各电压等级杆塔间隙的操作冲击 50%放电电压值，并进行海拔校正。

3）根据各典型作业位置的操作冲击 50%放电电压及海拔校正结果，计算各典型作业位置的带电作业危险率，依据相应危险率的计算结果，对 500kV 线路杆塔的作业间隙及进入强电场的途径进行校核。

2 带电作业间隙操作冲击放电特性

IEC 60071-2-1996《Insulation Coordination Part 2 Application Guide》推荐的空气间隙缓波前过电压绝缘特性的经验公式如下[8]：

$$U_{50}=KU_{50\mathrm{RP}} \quad (1)$$

$$U_{50\mathrm{RP}}=500d0.6 \quad (2)$$

以上公式中，U_{50}为间隙的操作冲击 50%放电电压；d 为空气间隙距离；K 为间隙系数；$U_{50\mathrm{RP}}$为相应电压波形及间隙距离下棒-板间隙操作冲击 50%放电电压。

本研究根据各带电作业间隙结构的操作冲击放电试验数据，计算求取其间隙系数 K，得出该带电作业间隙结构的操作冲击放电电压公式及拟合曲线。

3 气象及海拔高度修正

本文中列出的所有试验数据，均已经按 GB/T 16927.1—1997《高电压试验技术第一部分：一般试验要求》修正为标准气象条件下的数据[9]。

在确定带电作业最小安全距离和最小组合间隙时，需考虑海拔高度的影响。海拔校正系数 K_a 采用 IEC 60071-2-1996 推荐公式：

$$K_a=e^{m(\frac{H}{8150})} \quad (3)$$

式中，H 为海拔高度（m）；m 为与最小放电路径及电压波形相关的系数。为满足工程实际需求，进行了海拔 1000m 的校正。

4 带电作业危险率计算

在带电作业中，通常将绝缘破坏的概率称为危险率。设系统操作过电压的概率分布和空气间隙击穿的概率分布都服从正态分布，带电作业的危险率（国家规定：$R_0<1.0\times10^{-5}$）可由下式计算求得：

$$R_0=\frac{1}{2}\int_0^{\infty}P_0(u)P_d(u)\mathrm{d}u \quad (4)$$

式中，$P_0(u)$为操作过电压幅值的概率密度函数，$P_{\mathrm{d}}(u)$为空气间隙在幅值为 u 的操作过电压下击穿的概率分布函数，分别为

$$P_0(u)=\frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\left(\frac{u-u_{\mathrm{m}}}{\sigma_0}\right)^2} \quad (5)$$

$$P_{\mathrm{d}}(u)=\int_0^{u}\frac{1}{\sigma_d\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\left(\frac{u-u_{50\%}}{\sigma_{\mathrm{d}}}\right)^2}\mathrm{d}u \quad (6)$$

式中，u_{m}为操作过电压平均值（kV）；σ_0为操作过电压的标准偏差（kV）；U_{50}为空气间隙 50%放电电压（kV）；σ_{d}为空气间隙放电电压的标准偏差（kV）。

运用上述数学模型可编制计算程序，根据试验结果计算相应的带电作业危险率，在计算中，系统相对地最大操作过电压 $U_{0.13}$取 2.18p.u.，相对标准偏差取为 12%，操作过电压平均值 U_{m} 可按下式计算：

$$U_{\mathrm{m}}=\frac{U_{0.13\%}}{1+3[\sigma_0]} \quad (7)$$

式中，$[\sigma_0]$为过电压相对标准偏差。

5 500kV 杆塔带电消缺作业安全校核

5.1 STJ4 耐张杆塔带电消缺作业安全校核

1）引流线对侧面塔身地电位人员安全距离校核

调研浙江地区各 500kV 输电线路典型的耐张、转角杆塔，其常用塔型为 STJ 系列，图 1 为 500kV STJ4 耐张杆塔示意图。

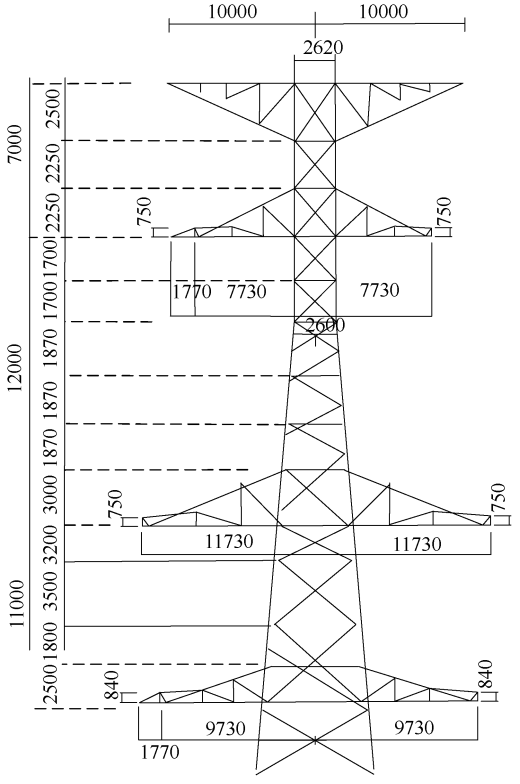


图 1 500kV STJ4 耐张杆塔示意图

考虑引流线对侧面塔身地电位人员放电，对500kV 线路各相引流线的带电作业安全距离进行校核。考虑带电作业时的人体占位 0.5m。具体的计算结果如表 1 中所示。

表 1　引流线对侧面塔身地电位人员安全距离校核结果

引流线位置	间隙距离/m	标准条件 U_{50}/kV	海拔 1000m U_{50}/kV	标准条件危险率	海拔 1000m 危险率
上相	5.9	1856	1772	3.30×10^{-23}	8.50×10^{-22}
中相	9.5	2471	2417	1.05×10^{-31}	4.45×10^{-31}
下相	7.5	2144	2079	1.43×10^{-27}	1.20×10^{-26}

根据 STJ 杆塔的塔型设计，在除去人体占位 0.5m 后，STJ4 塔中上相该位置的间隙距离为 5.9m，中相该位置的间隙距离为 9.5m，下相该位置的间隙距离为 7.5m。由表 1 的计算结果可知，此种作业位置，STJ4 杆塔的距离均满足带电作业的安全性要求。

2）引流线对其下方横担上地电位人员安全距离校核

考虑到作业人员在横担上移动时，可以采用俯身弯腰低头等姿势；在作业中，可以采用蹲姿作业，以降低人体占位高度。因此，在对作业人员与其上引流线安全距离校核时，按 1.0m 考虑人体活动范围即可。针对该作业位置的带电作业危险率的计算结果如表 2 和表 3 中所示。

表 2　引流线对其下方横担上地电位人员安全距离校核结果（引流线自然悬挂）

横担位置	间隙距离/m	标准条件 U_{50}/kV	海拔 1000m U_{50}/kV	标准条件危险率	海拔 1000m 危险率
第一层	/	/	/	/	/
第二层	5.5	1752	1660	1.88×10^{-21}	8.07×10^{-20}
第三层	4.5	1553	1457	7.86×10^{-18}	5.66×10^{-16}

表 3　引流线对其下方横担上地电位人员安全距离校核结果（引流线采用跳串悬挂）

横担位置	间隙距离/m	标准条件 U_{50}/kV	海拔 1000m U_{50}/kV	标准条件危险率	海拔 1000m 危险率
第一层	/	/	/	/	/
第二层	5.3	1714	1620	8.71×10^{-21}	4.36×10^{-19}
第三层	4.3	1512	1418	4.80×10^{-17}	3.35×10^{-15}

根据 STJ4 杆塔的塔型设计，在除去人体占位 1.0m 后，若引流线采用自然悬挂的架构方式，STJ4 塔中第二层横担该位置的间隙距离为 5.5m，第三层横担该位置的间隙距离为 4.5m；若引流线采用跳线悬挂的架构方式，STJ4 塔中第二层横担该位置的间隙距离为 5.3m，第三层横担该位置的间隙距离为 4.3m。

由表 2 的计算结果可知，STJ4 杆塔引流线采取自然悬挂方式时，此种作业位置的安全距离均满足带电作业的安全性要求（人体在海拔 1000m 时第二层横担上作业的危险率为 5.66×10^{-16}）。

由表 3 的计算结果可知，STJ4 杆塔引流线采取跳串悬挂方式时，此种作业位置的安全距离均满足带电作业的安全性要求（人体在海拔 1000m 时第二层横担上作业的危险率为 3.35×10^{-15}）。

3）耐张绝缘子串安全距离校核

根据耐张串等电位操作冲击放电试验及不同海拔高度下的海拔校正系数，对 500kV STJ4 杆塔耐张串的安全距离进行校核，考虑人体占位范围为 0.5m，校核的结果如下表 4 中所示。由表 4 的计算结果可知，STJ4 杆塔的耐张串绝缘子配置均可以满足带电作业安全距离的要求。

表 4　耐张绝缘子串安全距离校核结果

绝缘子片数	绝缘子串长/m	标准条件 U_{50}/kV	海拔 1000m U_{50}/kV	标准条件危险率	海拔 1000m 危险率
24	4.18	1345	1252	9.78×10^{-14}	9.76×10^{-12}
26	4.57	1418	1323	3.35×10^{-15}	2.73×10^{-13}
29	5.16	1526	1431	2.58×10^{-17}	1.85×10^{-15}
30	5.35	1559	1466	6.05×10^{-18}	3.77×10^{-16}

4）耐张绝缘子串组合间隙校核

根据耐张串等电位操作冲击放电试验及不同海拔高度下的海拔校正系数，对 500kV STJ4 杆塔耐张串的组合间隙进行校核，考虑人体占位范围为 0.5m，校核的结果如表 5 中所示。

表 5　耐张绝缘子串组合间隙校核结果

绝缘子片数	绝缘子串长/m	标准条件 U_{50}/kV	海拔 1000m U_{50}/kV	标准条件危险率	海拔 1000m 危险率
24	4.18	1262	1171	4.77×10^{-12}	3.42×10^{-10}
26	4.57	1331	1238	1.88×10^{-13}	1.47×10^{-11}
29	5.16	1432	1339	1.76×10^{-15}	1.29×10^{-13}
30	5.35	1463	1370	4.31×10^{-16}	3.06×10^{-14}

由表 5 的计算结果可知，STJ4 杆塔的耐张串绝缘子配置可以满足带电作业安全距离的要求，即使在海拔 1000m 条件下，24 片绝缘子串带电作业组合间隙的带电作业危险率也仅为 3.42×10^{-10}。因此，使用沿耐张串进入等电位的方法是满足带电作业安

全性要求的。

根据上述 STJ4 杆塔安全距离和组合间隙的校核结果可知，在 STJ4 杆塔上进行带电消缺作业是安全的。

5.2 STJ2 转角杆塔带电消缺作业安全校核

1）引流线对侧面塔身地电位人员安全距离校核

考虑引流线对侧面塔身地电位人员放电，对 500kV 线路各相引流线的带电作业安全距离进行校核。考虑带电作业时的人体占位 0.5m。具体的计算结果如表 6 中所示。

根据 STJ2 杆塔的塔型设计，在除去人体占位 0.5m 后，STJ2 塔中上相该位置的间隙距离为 4.0m，中相该位置的间隙距离为 7.5m，下相该位置的间隙距离为 3.5m。由表 6 的计算结果可知，此种作业位置，STJ2 杆塔的距离均满足带电作业的安全性要求。

表 6 引流线对侧面塔身地电位人员安全距离校核结果

引流线位置	间隙距离/m	标准条件 U_{50}/kV	海拔 1000m U_{50}/kV	标准条件危险率	海拔 1000m 危险率
上相	4.0	1470	1378	3.15×10^{-16}	2.11×10^{-14}
中相	7.5	2144	2079	1.43×10^{-27}	1.20×10^{-26}
下相	3.5	1357	1265	5.59×10^{-14}	4.14×10^{-12}

2）引流线对其下方横担上地电位人员安全距离校核

考虑到作业人员在横担上移动时，可以采用俯身弯腰低头等姿势；在作业中，可以采用蹲姿作业，以降低人体占位高度。因此，在对作业人员与其上引流线安全距离校核时，按 1.0m 考虑人体活动范围即可。针对该作业位置的带电作业危险率的计算结果如表 7 和表 8 中所示。

根据 STJ2 杆塔的塔型设计，在除去人体占位 1.0m 后，若引流线采用自然悬挂的架构方式，STJ2 塔中第二层横担该位置的间隙距离为 6.0m，第三层横担该位置的间隙距离为 5.0m；若引流线采用跳线

表 7 引流线对其下方横担上地电位人员安全距离校核结果（引流线自然悬挂）

横担位置	间隙距离/m	标准条件 U_{50}/kV	海拔 1000m U_{50}/kV	标准条件危险率	海拔 1000m 危险率
第一层	/	/	/	/	/
第二层	6.0	1846	1758	4.83×10^{-23}	1.48×10^{-21}
第三层	5.0	1655	1560	9.95×10^{-20}	5.79×10^{-18}

表 8 引流线对其下方横担上地电位人员安全距离校核结果（引流线采用跳串悬挂）

横担位置	间隙距离/m	标准条件 U_{50}/kV	海拔 1000m U_{50}/kV	标准条件危险率	海拔 1000m 危险率
第一层	/	/	/	/	/
第二层	5.8	1809	1718	2.00×10^{-22}	7.40×10^{-21}
第三层	4.8	1615	1560	5.39×10^{-19}	5.78×10^{-18}

悬挂的架构方式，STJ2 塔中第二层横担该位置的间隙距离为 5.8m，第三层横担该位置的间隙距离为 4.8m。

由表 7 的计算结果可知，STJ2 杆塔引流线采取自然悬挂方式时，此种作业位置的安全距离均满足带电作业的安全性要求（人体在海拔 1000m 时第三层横担上作业的危险率为 5.79×10^{-18}）。

由表 8 的计算结果可知，STJ2 杆塔引流线采取跳串悬挂方式时，此种作业位置的安全距离均满足带电作业的安全性要求（人体在在海拔 1000m 时第三层横担上作业的危险率为 5.78×10^{-18}）。

3）耐张绝缘子串安全距离校核

500kV 输电线路单片耐张绝缘子结构高度常用值为 195cm 和 205cm，因此在校核中取单片耐张绝缘子结构高度为 195cm。

根据耐张串等电位操作冲击放电试验及不同海拔高度下的海拔校正系数，对 500kV STJ2 杆塔耐张串的安全距离进行校核，考虑人体占位范围为 0.5m，校核的结果如表 9 中所示。

表 9 耐张绝缘子串安全距离校核结果

绝缘子片数	绝缘子串长/m	标准条件 U_{50}/kV	海拔 1000m U_{50}/kV	标准条件危险率	海拔 1000m 危险率
24	4.18	1345	1252	9.78×10^{-14}	9.76×10^{-12}
26	4.57	1418	1323	3.35×10^{-15}	2.73×10^{-13}
29	5.16	1526	1431	2.58×10^{-17}	1.85×10^{-15}
30	5.35	1559	1466	6.05×10^{-18}	3.77×10^{-16}

由表 9 的计算结果可知，STJ2 杆塔的耐张串绝缘子配置可以满足带电作业安全距离的要求。

4）耐张绝缘子串组合间隙校核

根据耐张串等电位操作冲击放电试验及不同海拔高度下的海拔校正系数，对 500kV STJ2 杆塔耐张串的组合间隙进行校核，考虑人体占位范围为 0.5m，校核的结果如表 10 中所示。

由表 10 的计算结果可知，STJ2 杆塔的耐张串绝缘子配置可以满足带电作业安全距离的要求，即

使在海拔 1000m 条件下，24 片绝缘子串带电作业组合间隙的带电作业危险率为 3.42×10^{-10}。因此，使用沿耐张串进入等电位的方法是满足带电作业安全性要求的。

表 10　耐张绝缘子串组合间隙校核结果

绝缘子片数	绝缘子串长/m	标准条件 U_{50}/kV	海拔 1000m U_{50}/kV	标准条件危险率	海拔 1000m 危险率
24	4.18	1262	1171	4.77×10^{-12}	3.42×10^{-10}
26	4.57	1331	1238	1.88×10^{-13}	1.47×10^{-11}
29	5.16	1432	1339	1.76×10^{-15}	1.29×10^{-13}
30	5.35	1463	1370	4.31×10^{-16}	3.06×10^{-14}

根据上述 STJ2 杆塔安全距离和组合间隙的校核结果可知，在 STJ2 杆塔上进行带电消缺作业是安全的。

5.3　500kV 输电线路带电消缺最小安全距离与组合间隙

计算在 500kV 输电线路上进行引流板带电消缺作业时最小安全距离与最小组合间隙，如表 11 所示，为 500kV 线路进行带电消缺作业提供理论依据。

表 11　500kV 输电线路最小安全距离与组合间隙

间隙名称	海拔高度/m	最小距离/m	U_{50}/kV	危险率
引流线对侧面塔身地电位人员安全距离	0	1.9	941	6.0×10^{-6}
	1000	2.2	942	5.7×10^{-6}
引流线对其下方横担上地电位人员安全距离	0	2.0	955	3.3×10^{-6}
	1000	2.3	953	3.6×10^{-6}
耐张绝缘子串安全距离	0	2.3（12 片）	940	6.2×10^{-6}
	1000	2.7（14 片）	949	4.3×10^{-6}
耐张绝缘子串组合间隙	0	2.6（14 片）	949	4.3×10^{-6}
	1000	2.9（15 片）	930	9.5×10^{-6}

注：1.上述最小安全距离和最小组合间隙均没有考虑作业人员身体站位，以及作业人员以“跨二短三”方式站立于绝缘子上所短接的 3 片绝缘子；2.绝缘子片数计算中取单片耐张绝缘子结构高度为 195mm。

6　结论

本文针对引流板带电消缺作业的安全性，运用带电作业间隙操作冲击放电特性公式、气象及海拔高度修正公式、带电作业危险率计算公式进行了校核，得出了 500kV 杆塔引流板带电消缺作业安全校核结果，为 500kV 输电线路引流板带电消缺工具的研制以及带电作业提供了理论依据，对作业人员的安全提供了保证。

参考文献

[1] 胡建勋,刘凯,刘庭,肖宾,吴田. 500kV 高海拔紧凑型输电线路带电作业试验研究[J].高压电器, 2010, 46(4): 35-39.

[2] 尹洪,吴启进,周玎. 500kV 紧凑型输电线路进入等电位方式探讨[J].湖北电力, 2009, 33(4): 53-54.

[3] 胡毅,王力农,舒印彪,带电作业保护间隙的放电特性研究[J].高电压技术, 2002, 28(11): 17-18.

[4] 郝旭东,朱芸,李雪彦,王武装,刑继国. 220kV 紧凑型线路带电作业的研究与工具开发[J].电力设备, 2007 (8): 17-18.

[5] 输电线路引流板带电消缺技术研究及应用研究报告. 武汉.武汉高压研究所, 2012.

[6] KIM D S, ELECTR K. C ASSOC., Seoul, SOUTH K. Analysis of electrical safety level test for barehand work at 765kV vertical double circuit six bundle conductors T/L in Korea, Vol.6(3): 1-5, IEEE, 2009.

[7] XU Y, YE Z, GAO X, DENG W. The Live Line Inspection Method of Poor Insulators on ±500kV DC Transmission Lines[J]. 750-753, IEEE, 2012.

[8] IEC 60071-2-1996, Insulation Coordination Part 2 Application Guide[s], 1996.

[9] GB/T 16927.1—1997,高电压试验技术第一部分:一般试验要求[s], 1997.

[10] 国家电网公司电力安全工作规程(线路部分)[s]. 2009.

作者简介

张华杰（1983-），男，硕士研究生，助理工程师，主要从事输电线路研究。