[输电线路]

重覆冰500 kV输电线路减少导线分裂根数研究

文/西南电力设计院　梁　明　王婷婷　许　泳

开展分裂导线扭转刚度有限元分析研究，获得了各种边界条件下导线扭转刚度影响规律。经电气特性、机械特性及年费用等方面的比较，提出了机械、电气性能优良和经济性较好的重覆冰线路少分裂导线方案，为重覆冰线路导线选型提供新思路。

我国的水能资源主要集中在西部地区，远离东部经济发达的负荷中心，随着我国“西电东送，北电南送”等输电工程项目的实施，线路途经重覆冰区段概率增多，覆冰已成为影响线路安全运行和工程造价的主要因素之一。

目前我国西部重覆冰区500 kV线路最大覆冰已达60 mm，严重的覆冰使杆塔承受的荷载和基础的作用力大大增加，加之恶劣的地形地质条件，致使重覆冰区杆塔、基础的设计和路径的选择愈加困难。

从荷载方面来看，分裂根数越少，导线截面越大，导线抗冰能力越强，杆塔荷载也随之显著减少。但电气性能包括导线表面场强、无线电干扰、可听噪声、输送功率等则变差，特别是重覆冰区多处于高海拔地区，电磁环境更加恶劣，需结合电磁环境限值要求选取适宜的分裂数。

从运行情况来看，分裂导线覆冰，尤其是在冻雾覆冰条件下，冰凌主要附着在导线的迎风侧，对导线束会产生一定的扭转力矩；而在某种条件下，如果前侧导线冰凌先行一起脱落时，又会产生导线束很大的翻转力矩。在这种情况下，少分裂导线方案抵抗上述两种力矩都不如多分裂导线方案有利。

近年来，随着导线制造技术的成熟，900 mm^2、1 000 mm^2、1 250 mm^2等大截面导线在工程中成功应用，有必要对少分裂大截面导线扭转刚度特性、电气及机械特性进行比较分析，对重覆冰区输电线路减少分裂根数的导线方案及应用进行研究。

分裂导线的扭转刚度及扭转失稳

1．扭转刚度及扭转失稳现象级

分裂导线在非均匀覆冰、风荷载、舞动或故障电流情况下，由于各子导线上所受载荷的不同，会通过间隔棒对分裂导线产生扭矩作用。当扭矩较大时，可能导致分裂导线翻转扭绞，即发生扭转失稳，对输电线路安全运行造成的危害不容忽视。要避免这一事故的发生必须研究分裂导线的扭转特性。

如图1所示为Nigol等人对二分裂导线进行扭转试验得到的扭矩和扭转角之间的代表性关系曲线。

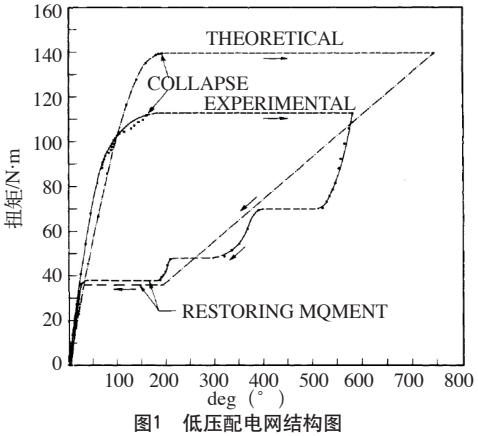

图1　低压配电网结构图

试验中，在一个间隔棒位置施加扭矩，同时测量该点的扭转角。图1中，在初始阶段，随着扭矩的逐渐增大，分裂导线的扭转角度逐渐增大，两者之间呈线性关系。当扭矩增大到一定程度时，发生扭转失稳，此时，微小的扭矩增加都会导致两个次档距内发生几个扭绞，直到达到新的平衡。在失稳点，扭矩主要由子导线的扭绞所平衡。之后，若逐渐减小扭矩，这些扭绞会逐个解开，当扭矩减小到回复力矩时，最后一个扭绞释放，导线回复到的分裂状态（无扭绞状态），当扭矩完全释放后，导线回到初始状态。

通常，将曲线的斜率定义为扭转刚度（切线扭转刚度）。在初始阶段刚度为常数（直线），称为初始刚度，之后，斜率随转角变化，扭转刚度变为非线性，当斜率为零时，即刚度为零，失去抗扭能力，对应的扭矩成为失稳扭矩。

2．影响分裂导线扭转刚度的因素

影响分裂导线扭转刚度的因素包括导线、间隔棒以及分裂导线与耐张塔之间联板的连接方式等。

导线方面的影响因素有分裂线中的平均张力、弧垂与档距之比、分裂半径及其在扭转变形过程中沿次档距的变化、子导线根数及其物理扭转刚度等；间隔棒方面包括间隔棒的个数、安装位置、与导线之间的连接关系（夹紧和转动夹持）等；分裂导线与耐张塔之间联板的连接方式会影响分裂导线变形过程中不同子导线中张力的变化，这种变化会导致分裂导线扭转刚度明显增大，特别是档数较少时尤为明显（孤立档可能增大达50%多）。

扭转刚度有限元分析

忽略杆塔的影响，建立分裂导线有限元模型。模型中各子导线用2节点等参梁单元模拟；间隔棒用梁单元模拟，每个间隔棒与导线之间的位移和转动连接，转动连接关系计入了子导线自身刚度对分裂导线扭转刚度的贡献。

图2为建立的档距500 m双分裂导线的有限元模型，共安装6个间隔棒，间隔棒与导线之间定义Beam的连接关系。

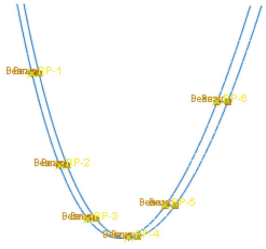

图2　安装间隔棒的双分裂导线有限元模型

为模拟分析分裂导线的扭转刚度，在间隔棒处施加扭矩，模拟导线扭转变形，通过扭矩施加处扭矩和分裂导线转角的变化曲线，可以计算得到分裂导线的扭转刚度和失稳扭矩。

图3为双分裂导线在重力及扭转载荷作用下有限元模型；图4为模拟计算得到的间隔棒2处施加的扭矩和该处扭转角的变化曲线。

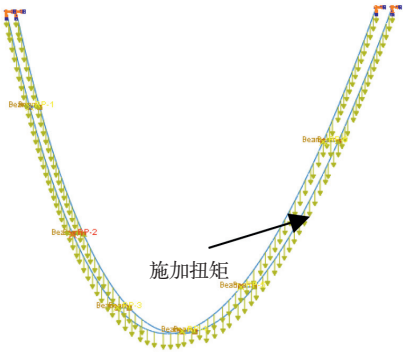

图3　施加重力及扭矩载荷的双分裂导线有限元模型

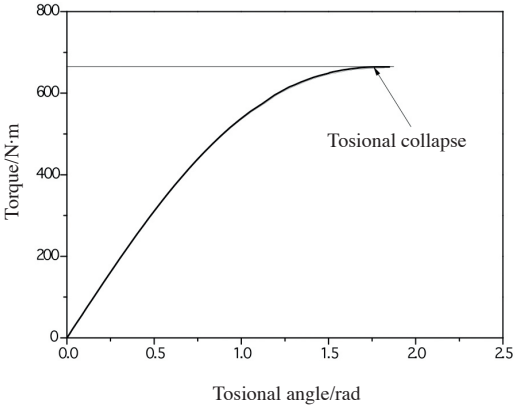

图4　扭矩和扭转角关系曲线

从图4中曲线可见，初始阶段为直线，扭矩与扭转角之间为线性关系，该直线段的斜率即定义为初始扭转刚度。当扭矩增大到一定大小时，发生扭转失稳，此时对应的扭矩即为失稳扭矩。

为确定不同导线型号对扭转刚度的影响，笔者对以下导线：JLHA1/G1A－1250/100、JLHA1/G1A－1000/80、JLHA1/G1A－800/55、JL/G1A－630/45、JL/G1A－500/45、JL/G1A－400/50，在各间隔棒处的扭转刚度情况进行了研究。

但由于篇幅有限，以下仅给出二分裂1 250 mm^{2}截面导线的研究情况。

2×1 250 mm^{2}截面导线间隔棒布置方式、分裂间距、档数、档距和导线截面等对导线扭转刚度

和失稳扭矩影响，如图5～图9所示。

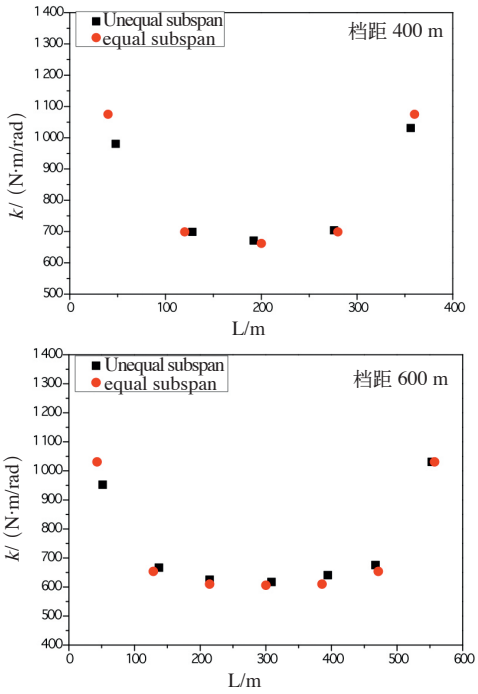

图5　不同档距下各间隔棒处的扭转刚度的变化规律

由图5可知，等次档距布置方式的抗扭性要优于不等次档距。

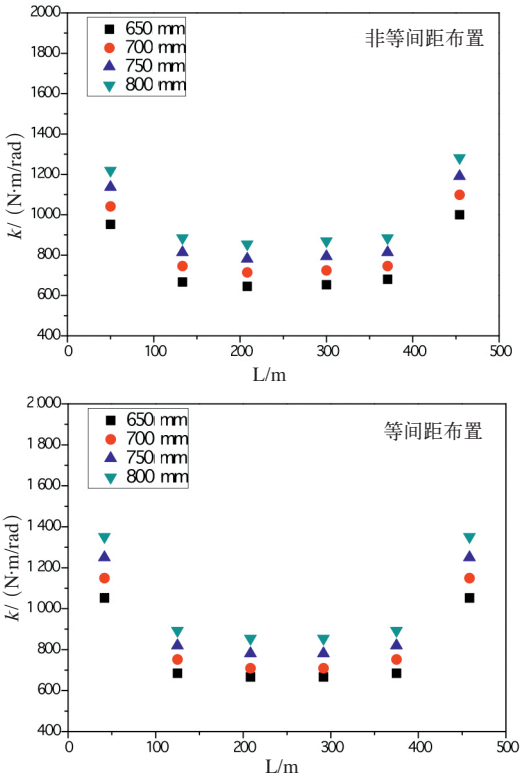

图6　不同分裂间距下各间隔棒处的扭转刚度变化规律

由图6可知，分裂导线同一间隔棒位置的扭转刚度及失稳扭矩均随分裂间距的增加而增大。

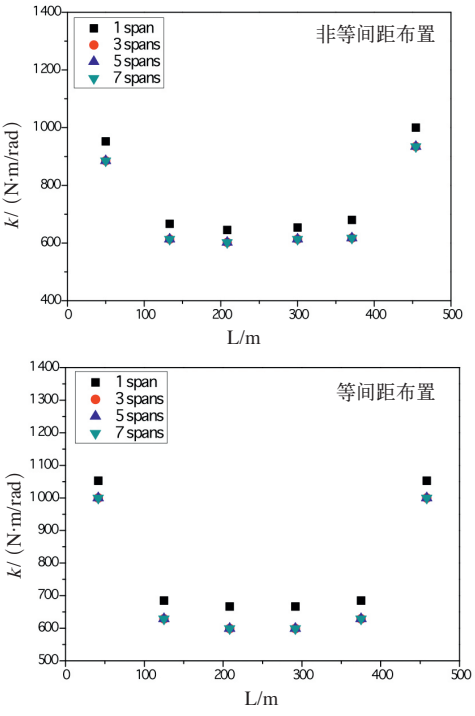

图7　不同档数下各间隔棒处的扭转刚度变化规律

由图7可知，除孤立档（1 span）外，连续档的扭转刚度和失稳扭矩随档数几乎没有变化。

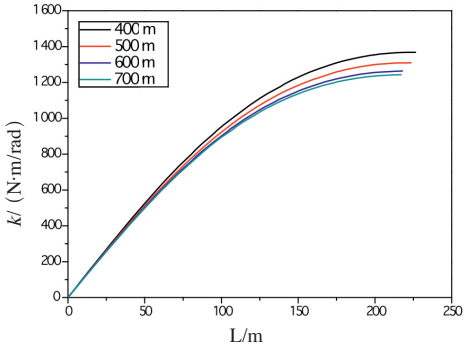

图8　不同档距扭转刚度最大间隔棒处扭矩–扭转角

由图8可知，各间隔棒处的扭转刚度以及失稳扭矩均随着档距的增大而略微减小。

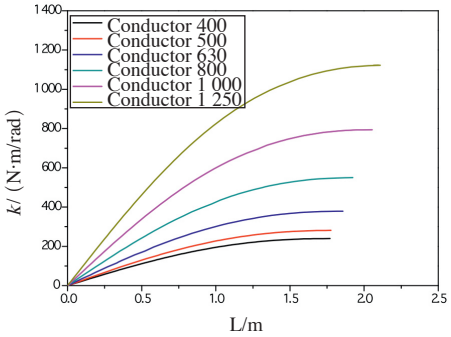

图9　不同导线间隔棒处作用扭矩时扭矩–扭转角曲线

由图9可知，在相同载荷作用下，随着导线截面面积增大，导线抗扭刚度及失稳扭矩均明显增大。

综上，所研究的少分裂大截面导线其扭转刚度及失稳扭矩明显优于小截面导线。

大截面少分裂导线间隔棒安装方案

如前所述，分裂间距对少分裂导线的抗扭性影响最大。模拟分析在安装数量及位置相同的间隔棒情况下，将少分裂导线的最大和最小扭转刚度与传统四分裂导线进行对比，当前者的扭转刚度及失稳扭矩大于并接近于后者时，其对应的分裂间距即为少分裂导线分裂间距的最优结果。

以4×630 mm^{2}截面导线（分裂间距取值为450 mm）做为比对参照，2×1 250 mm^{2}截面导线分裂间距最优值如图10、图11所示。

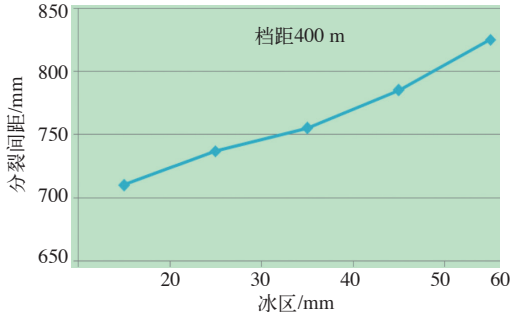

图10　不同冰区双分裂导线分裂间距最优值

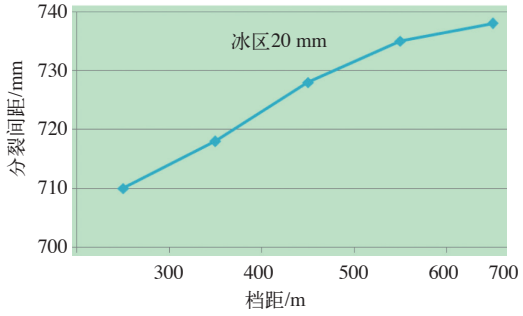

图11　不同档距双分裂导线分裂间距最优值

采用与四分裂导线相同的间隔棒布置方案，随着冰区和档距的增加，少分裂导线最优分裂间距应相应增加。

导线机械特性

1．弧垂特性

由图12可知，在总铝导线截面相当情况下，随着导线分裂根数的减少，导线的弧垂特性变好，在不同冰区下，3×800 mm^{2}截面导线比4×500 mm^{2}截面导线弧垂减少2～4 m，2×1 250 mm^{2}截面导线比4×500 mm^{2}截面导线弧垂减少4~8 m，由此可知，采用少分裂大截面导线可有效降低杆塔的高度，节约塔材。

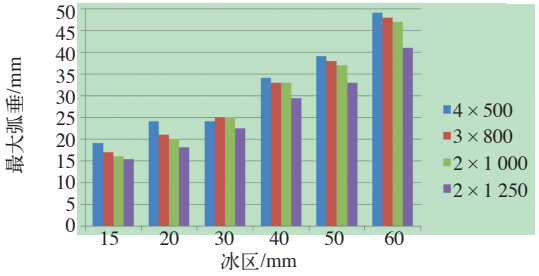

图12　不同冰区导线的弧垂特性

2．覆冰过载能力

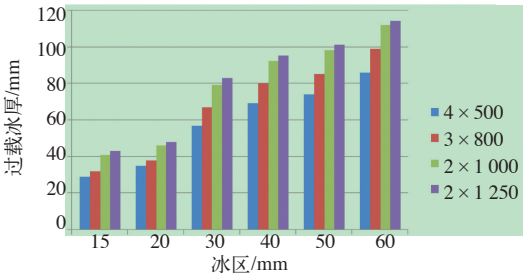

图13　不同冰区导线的过载冰厚

由图13可知，各种导线形式的覆冰过载能力均符合要求，在总铝导线截面相当的情况下，导线的过载能力随着导线分裂根数的减少而增强，这对抗冰有利。

3．杆塔荷重

不同冰区导线垂直荷重、线条风荷重情况如图14和图15所示。

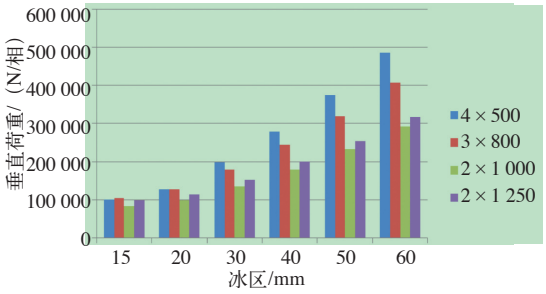

图14　不同冰区导线的覆冰垂直荷重

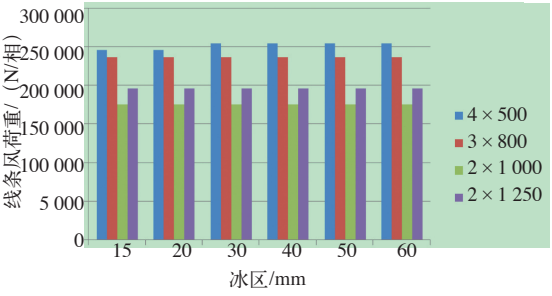

图15　不同冰区导线大风时线条风荷重

由图14和图15可知，4×500 mm^{2}截面导线垂直荷重和大风时线条风荷重均最大，其次为3×800 mm^{2}截面导线，2×1 000 mm^{2}截面导线垂直荷重和大风时线条风荷重最小，原因是在等总截面

比较中，少分裂大截面导线的冰荷载会比常规4×500 mm²截面导线荷载轻，这对减少导线的垂直荷载有利；少分裂大截面导线的总直径要小于4×500 mm²截面导线，这对减少风荷载有利。

由此可得出，在总铝截面相当情况下，随着导线分裂根数的减少和截面的增大，导线的垂直荷重和大风风荷重均随之减小。

不同冰区导线纵向最大张力如图16所示。

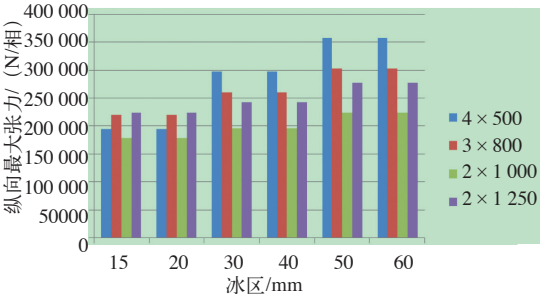

图16　不同冰区导线纵向最大张力

由图16可知，20 mm及以下覆冰地区，2×1 250 mm²截面导线总铝截面最大，故其纵向张力最大；30 mm及以上覆冰地区，在总铝截面相当情况下，随着导线分裂根数减少、截面的增大，纵向张力随之减小。由此可见，在20 mm以上重覆冰区采用少分裂大截面导线有利于减小纵向最大张力。

4．不平衡张力

杆塔计算结果表明，纵向不平衡张力主要控制杆塔塔身侧面斜材和塔身横隔面的部分杆件。

计算不平衡张力的模型按等7档，前四档覆100%冰，后三档取相关规定覆冰率冰，在第4档和第5档取15%的档距差，计算不平衡张力。如图17所示。

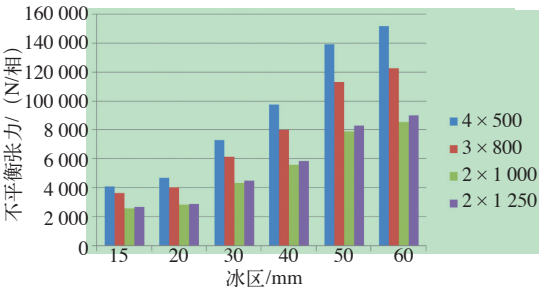

图17　不同冰区悬垂型杆塔不平衡张力

由图17可知，在总截面面大致相当情况下，杆塔承受的不平衡张力随着导线分裂根数减少而减小。采用少分裂大截面导线可以有效减少塔重，节省投资。

电气特性

1．导线允许载流量

导线选择首先要满足载流量的要求。计算不同温度范围下的各种导线截面方案允许载流量如表1所示。

表1　导线允许载流量

导线型号	分裂数	每相允许电流/A		极限输送功率/MW	
		30/80℃	40/80℃	30/80℃	40/80℃
JL/G1A－500/45	4	4×980	4×844	322	278
JLHA1/G1A－800/55	3	3×1255	3×1075	310	265
JLHA1/G2A－1000/80	2	2×1429	2×1222	235	201
JLHA1/G1A－1250/100	2	2×1648	2×1406	271	231

由表1可知，在总铝导线截面相当情况下，随着导线分裂数的减少，相导线载流量逐渐降低，考虑到高海拔重覆冰地区环境温度一般较低，因此在总铝截面增加不多情况下，少分裂导线也可满足相导线载流量的要求。

2．电磁环境影响

（1）最大场强与临界场强的比值（E_m/E_o）

导线表面电场强度是导线选择的最基本条件，导线表面电场强度过高将会引起导线全面电晕，电晕损耗将急剧增加，所以在线路设计中必须限制导线表面电场强度。对于导线表面电场强度一般按照导线表面最大电场强度和导线临界电场强度的比值E_m/E_o（<0.85）来控制。

计算500 kV各种导线中相的E_m/E_o值，得知导线全面电晕表面电场强度与导线粗糙程度有关。当导线表面粗糙度$m=0.82$时，4×500 mm²截面导线和3×800 mm²截面导线满足在海拔4 000 m以下的电晕要求，2×1 250 mm²截面导线满足在海拔3 000 m以下电晕要求；2×1 000 mm²截面导线满足在海拔2 000 m以下电晕要求；当$m=0.9$时，2×1 000 mm²截面导线满足在海拔3 000 m以下电晕要求，其他三种导线均满足在海拔4 000 m以下电晕要求。

由此可知，在等截面条件下，随着导线分裂根数的减少，导线表面电场强度增大，通过控制导线表面粗糙度m，可使大截面少分裂导线满足电晕要求。

（2）无线电干扰

对于高压输电线路，当导线表面场强超过临界水平时，都会辐射出频率分量包含调幅广播频率的电磁能量。

表2　导线允许载流量

导线型号	分裂数	好天气无线电干扰/dB			
		1 000 m	2 000 m	3 000 m	4 000 m
JL/G1A－500/45	4	37.93	41.23	44.53	47.83
JLHA1/G1A－800/55	3	42.24	45.54	48.84	52.14
JLHA1/G2A－1000/80	2	52.59	55.89	59.19	62.49
JLHA1/G1A－1250/100	2	51.09	54.39	57.69	60.99

由表2可知，大截面少分裂导线的无线电干扰值略大于常规四分裂导线方案。

需要说明的是，近年来，中、短波频段的无线电广播收听已不再成为公众获取信息的主要渠道，输电线路无线电干扰指标的好坏也基本不影响公众的生活质量。在多年的环境监测过程中已发现，即使偶尔出现线路附近无线电干扰超过限值的情况，也没有对百姓的无线电广播收听造成实际影响。而对于无线电导航台、测向台等对无线电干扰敏感程度较高的设备，国家有专门的控制标准，目前，在输变电工程的环境影响评价中已不纳入无线电干扰因子。

因此，无线电干扰不应是导线选择的控制因素。

（3）可听噪声

当超高压架空送电线路的运行电压在500 kV及以上时，可听噪声必须加以考虑，并且在许多情况下它对导线选择起着更为重要的作用。

线路的可听噪声海拔修正的研究工作是一个系统的工作，到目前为止，我国在750 kV输电工程电磁环境研究中针对不同海拔的330 kV线路（海拔400～3 330 m）做了大量的测试工作，并提出了适用于工程上的可听噪声海拔修正量，即海拔以1 000 m为基准，每增加1 000 m线路可听噪声增加约1.5～2.0 dB。

经计算，在总铝截面相当的情况下，随着导线分裂根数的减少，可听噪声有所增大，但均满足可听噪声限值要求。

建议海拔每增加1 000 m线路可听噪声增加约2.0 dB。

3．电能损耗

对于超高压送电线路来说，电能损失主要由两部分组成，即电阻损耗与电晕损耗。但电晕损耗在线路损耗中所占比重远小于电阻损耗，500 kV送电线路的电晕损失一般不超过电阻损失的20%，线路的电能损失主要取决于电阻损耗。在总铝截面相当的情况下，各导线电阻损耗相当，但电晕损耗随着导线分裂根数的减少而增加，二分裂导线方案电晕损耗是四分裂导线方案电晕损耗的1.55～1.75倍，三分裂导线方案电晕损耗是四分裂导线方案电晕损耗的1.3～1.5倍。

因此，少分裂导线方案会比四分裂导线方案输送电能损失略大，但也在标准控制之内，而抗覆冰能力会得到有效改善。

经济性比较

4×500 mm^{2}截面导线、3×800 mm^{2}截面、2×1 000 mm^{2}截面和2×1 250 mm^{2}截面导线的年费用比较如下（输送容量1 900 MW，年损耗小时数3 000 h）。

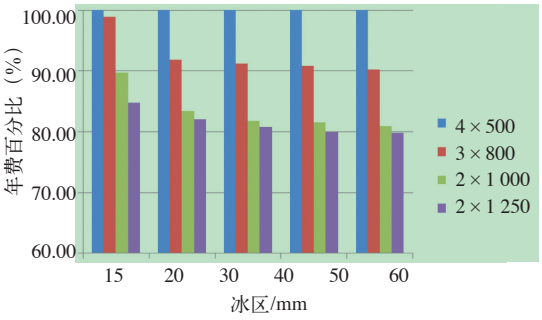

图18　导线的年费用比较

由图18可知，以4×500 mm^{2}截面导线年费用为基准进行比较，2×1 250 mm^{2}截面导线的年费用最低，2×1 000 mm^{2}截面导线次之。在总铝导线截面相当的情况下，随着导线分裂根数的减少，杆塔耗钢量和混凝土耗量在各冰区均有一定程度的降低，故年费用随之降低，且设计覆冰越重，采用大截面少分裂导线后的经济效益越明显。

结束语

少分裂大截面导线扭转刚度及失稳扭矩明显优于小截面导线。随着冰区和档距的增加，少分裂导线最优分裂间距应相应增加。

在总铝截面相当情况下，随着导线分裂根数的减少，大截面导线的弧垂特性变好，覆冰过载能力增强，杆塔荷重减小，杆塔承受的不平衡张力减小。

对于500 kV交流输电线路，所选导线方案基本满足电磁环境要求。

在满足现有规程规范的条件下，采用大截面少分裂导线方案可以减少杆塔耗钢量、基础混凝土耗量，降低导线年费用，具有良好的经济效益和社会效益。EA

（收稿日期：2015.09.29）

（编辑：刘群点）

更　正

本刊2015年第12期“产品与技术”栏目刊登的“基于省、地、县一体化的多级母线负荷预测系统在金华地区的应用研究”一文其中一位作者“陈辛翰”应为“陈梓翰”，特此更正。

《电气时代》编辑部