

# 电网工程部送电电气专业技术培训专题

## 专题之四、五 导线、地线及 OPGW 选择

2011 年 12 月

批准:

审核:

校核:

编写: 施 芳

## 摘要

本报告根据国家电网公司集中招标《溪洛渡～浙西±800千伏特高压直流输电工程勘察设计招标文件》(招标编号：0711-110TL040)和澄清补遗文件，经过计算分析和技术经济比较，提出了溪洛渡～浙西±800千伏特高压直流输电线路导地线的推荐方案。本报告仅针对轻中冰区导地线的选择进行论述，重冰区导地线的选择见专题报告《重冰区线路设计研究》。

由于导地线选型应具有普遍的适用性和代表性，尤其是涉及到高海拔地区的电磁环境问题，因此在报告中没有仅局限于本标段的海拔高度和气象条件进行论述，而是参照了招标文件技术部分附件的相关文件提供的全线最高海拔和气象条件。

### 1 主要研究内容和研究方法

本报告以溪洛渡-浙西±800kV 特高压直流输电线路为例，通过对 4、5、6、7 四种分裂型式 16 种导线方案的电气性能进行计算，筛选出满足工程需要的 10 种导线方案进行机械性能、经济性能的比较，推荐出在技术和经济上最优的导线截面和分裂型式。

#### 1.1 导线选择考虑的主要因素

- (1) 导线最高允许温度和允许电流；
- (2) 地面合成电场强度；
- (3) 地面离子流密度；
- (4) 地面磁场强度；
- (5) 无线电干扰水平(RI)；
- (6) 电晕可听噪声(AN)；
- (7) 机械强度；
- (8) 年费用。

## 1.2 输入条件

系统标称电压：±800kV；

系统额定输送功率：7500MW；

系统长期过载输送功率：8000MW；

最大负荷利用小时数：4000 小时；

气象条件：大风 27m/s、覆冰 10mm、15mm。

## 2 导地线选择主要结论

(1) 4、5 分裂型式的极导线方案的地面合成场强、离子流密度、可听噪声、无线电干扰和电晕损失较大，在高海拔条件下不能满足限值要求。

(2) 6、7、8 分裂型式的极导线方案在高海拔条件下，其电气性能、电场效应、无线电干扰和可听噪声方面均有较大优势。

(3) 从机械方面看，所选的导线方案均能满足工程对导线机械性能的要求。相分裂数多的小子导线组合，其荷载较相分裂数少的大子导线组合的机械荷载要小。

(4) 从经济性能方面看，随着电价、年损耗小时数的增加，总铝截面越大，年费用越小。 $6\times\text{JL/G3A-900/40}$  导线方案的初期投资虽然大，但电能损失最小，其年费用最优。

(5) 通过对  $6\times\text{JL/G3A-900/40}$ 、 $6\times\text{JL/G2A-900/60}$ 、 $6\times\text{JL/G2A-900/75}$  三种不同钢芯导线方案的弧垂特性、覆冰过载特性、允许悬点应力、铝部应力以及对杆塔荷载影响的比较分析，并结合线路经过的地形条件，推荐在 10mm 覆冰地段的平丘地形和一般山地采用  $6\times\text{JL/G3A-900/40}$  导线；在 10mm 覆冰地段的高山大岭及 15mm 覆冰地段采用  $6\times\text{JL/G2A-900/75}$  导线。

(6) 导线推荐采用呈正六边形的布置、分裂间距为 450mm。

(7) 双地线均为普通地线。10mm、15mm 冰区普通地线采用 LBGJ-180-20AC 型铝包钢绞线，单丝型号 LB20A。

## 1 工程概况

溪洛渡—浙西±800kV特高压直流输电工程西起溪洛渡双龙换流站，东至浙西换流站，航空直线约1504km，初步设计阶段推荐方案输电距离1668.5km，曲折系数为1.109，其中一般线路1663.3km，两个大跨越（湘江大跨越和赣江大跨越）长度共约5.2km。途经四川、贵州、湖南、江西、浙江5省市。设计输送容量为7600MW。沿线地形比例为：高山大岭19.5%，一般山地45.2%，丘陵21.4%，平地8.2%，河网2.4%，泥沼3.3%。线路经过地区最高海拔1600m。

### 1.1 地形条件

表 1.1-1 地形条件

地形	长度(km)	百分数
丘陵	8.8	6%
山地	74.5	50%
高山	65.5	44%
合计	148.8	100%

### 1.2 气象条件

#### 1.2.1 设计气象条件

通过收集沿线气象资料及沿线已建电力线的设计资料、运行情况，及调查沿线的风、冰灾害情况，结合路径实际情况，本标段主要设计气象条件见表1.2-1。

表 1.2-1 主要设计气象条件

最低气温	-15℃
覆冰	15mm、20mm、30mm
最大风速	27m/s
平均温度	15℃

### 1.2.2 天气情况

用于导线电晕计算的天气情况见表 1.2-2。

表 1.2-2 沿线天气情况

天 气	晴天	雨天	雪天	雾天	全年
小时数	4092	4344	70	254	8760

### 1.3 电力系统条件

根据招标文件的要求：

系统标称电压：±800kV；

系统额定输送功率：7500MW

系统长期过载输送功率：8000MW

最大负荷利用小时数：4000 小时。

### 1.4 导地线布置

在本标段的各种计算中，导线采用双极水平排列，绝缘子串为 V 串布置，最小极间距为 22m，一般地区最小对地高度为 18m，极导线和地线布置尺寸详见图 1.4—1。

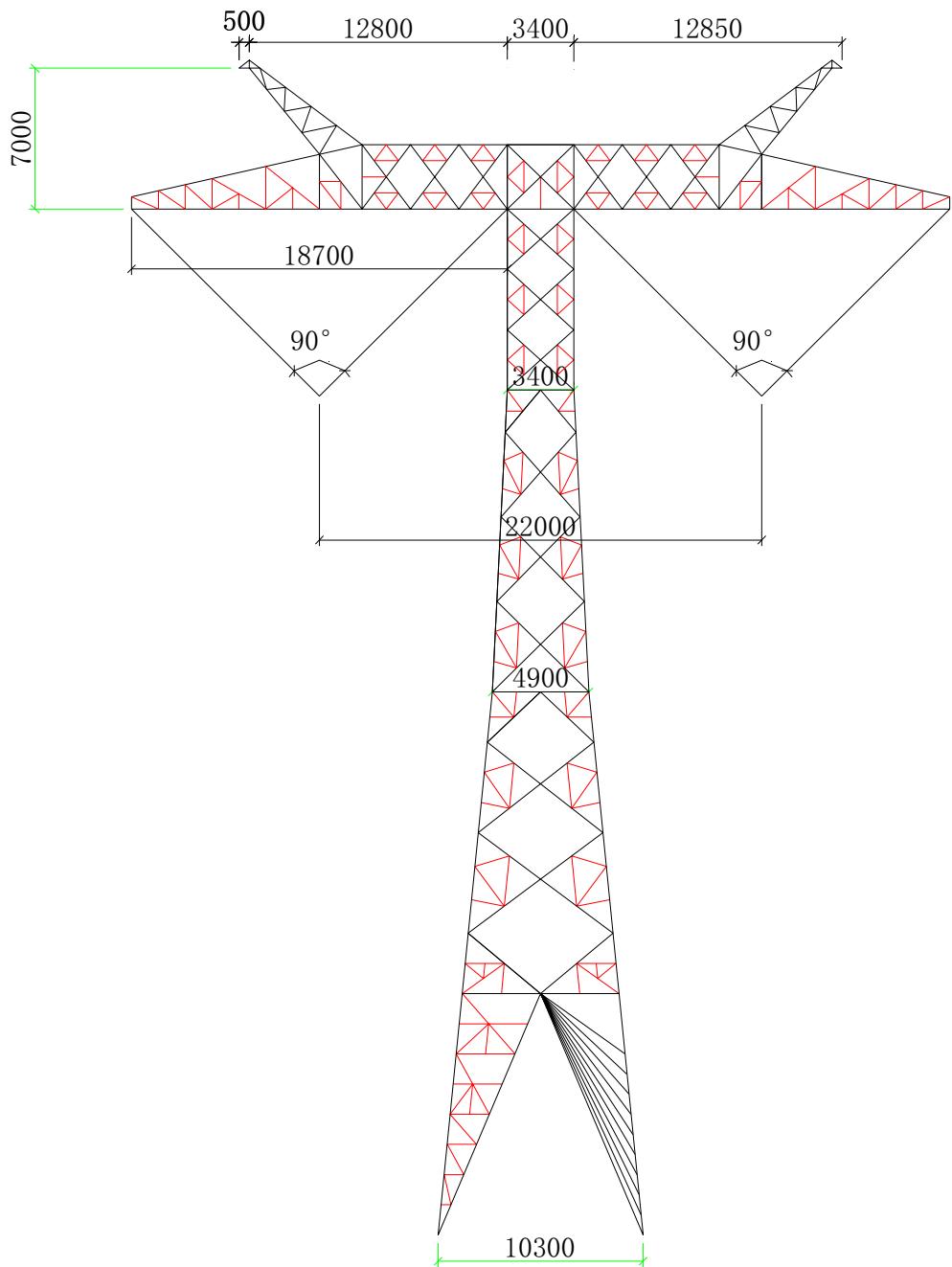


图 1.4—1 极导线和地线布置尺寸图

## 2 导线选择的主要原则

导线作为输电线路最主要的部件之一，首先需满足输送电能的要求，同时能保证安全可靠地运行，对特高压输电线路还要求满足环境保护的要求，而且在经济上是合理的，因此，对特高压线路导线在电气和机械两方面都提出了严格的要求。在特高压直流线路导线选择中，要充分考虑导线的电气和

机械特性，在电气特性方面，特高压线路由于电压的升高，导线电晕而引起的各种问题，特别是环境保护问题将比超高压线路本体问题更加突出，从国内外的实验研究和工程实践情况看，采用多分裂导线并合理选择导线直径和分裂形式是确保导线良好电气性能及满足环境保护要求的有效途径。对于导线的机械特性，要使特高压输电线路能安全可靠的运行，要求导线具有优良的机械性能和一定的安全度。

## 2.1 导线选择需考虑的主要因素

根据特高压直流输电线路的特点，导线选择时，在电气特性、机械性能、经济性等方面需综合考虑以下因素：

- (1) 导线最高允许温度和允许电流；
- (2) 地面合成电场强度；
- (3) 地面离子流密度；
- (4) 地面磁场强度；
- (5) 无线电干扰水平(RI)；
- (6) 电晕可听噪声(AN)；
- (7) 机械强度；
- (8) 其它方面(如导线的传输效率、电晕损失、对杆塔重量及绝缘子金具的影响及制造、施工条件等)；
- (9) 年费用。

## 2.2 导线标准

本报告采用《圆线同心绞架空导线》GB/T1179—2008 导线标准，参照了 GB/T1179—1999《圆线同心绞架空导线》和 GB20141—2006《型线同心绞架空导线》。

## 3 导线选择的主要控制参数

### 3.1 导线最高允许温度

导线最高允许温度是控制导线载流量的主要依据，导线允许最高温度主要由导线经过长期运行后的强度损失和连接金具的发热而定。当工作温度越高，运行时间越长，则导线的强度损失越大。但根据国外一些研究数据，从导线耐热的角度考虑，钢芯铝绞线可采用 150℃，主要应考虑导线接头的氧化和连接金具的发热情况。根据《±800kV 直流架空输电线路设计规范》（送审稿）中的规定，在验算导线允许载流量时，钢芯铝绞线和钢芯铝合金绞线的允许温度一般采用+ 70 °C（大跨越可采用+ 90 °C）。

根据以上规定，本工程导线最高允许温度取为 70℃。

### 3.2 地面合成场强和离子流密度

根据《±800kV 直流架空输电线路设计规范》（送审稿）中的规定，±800kV 直流线路线下地面合成场强不超过 30kV/m，线下地面离子电流密度不超过 100nA/m<sup>2</sup>；线路临近民房时，民房所在地的未畸变合成场强按湿导线条件计算，不超过 15kV/m，以满足测量时民房所在地的合成电场 80% 值不超过 15kV/m 和最大值不超过 25kV/m 的要求。

### 3.3 地面磁场强度

对交流工频磁场，我国环境行业标准 HJ/T24-1998《500kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范》规定：“推荐应用国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)关于对公众全天辐射的工频限值 0.1mT 作为磁感应强度的评价标准”。我国正在建设的 1000kV 交流特高压输电工程，即采用 ICNIRP 导则给出的限值 0.1mT 作为线路工频磁感应强度的限值。这与我国环境评价标准中对居民区工频磁场的限值相同。

对直流磁场，国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)导则给出一般公众的磁场暴露参考水平(1Hz 以下)为 40mT。这表明直流磁场对人的影响比交流磁场小的多。另外，正在编制的《高压直流输电工程电磁环境影响评价技术规范》取 ICNIRP 规定的磁场暴露参考水平的 1/4 作为磁场评价标准，即直流架

空输电线路电流产生的磁感应强度应不超过  $10\text{mT}$ 。实际计算值仅  $25\mu\text{T}$ , 故不必考虑磁场干扰影响问题。

### 3.4 无线电干扰限值

鉴于交流电晕产生的无线电干扰与直流电晕产生的无线电干扰具有相似的特性, 且直流线路的干扰危害比交流线路要小些, CIGRE 和其它研究表明对于一个相等的接受性能, 在交流旁  $22\text{dB}$  的信杂比和直流线路旁大约  $17\sim20\text{dB}$  的信杂比相当。事实上直流线路的 RI 生理干扰要小于交流, 故国外的直流线路允许无线电干扰电平(RI)较交流高  $2\text{dB}$ 。

我国土  $500\text{kV}$  直流线路的无线电干扰限值一直参照  $500\text{kV}$  交流线路的标准执行, 即  $20\text{m}$  处  $0.5\text{MHz}$  无线电干扰场强  $80\%//80\%$  值不超过  $55\text{ dB}(\mu\text{V/m})$ , 运行中尚未发生任何投诉, 说明取值是可行的。

根据《 $\pm 800\text{kV}$  直流架空输电线路设计规范》(送审稿)中的规定, 海拔  $1000\text{m}$  及以下地区, 距直流架空输电线路正极性导线对地投影外  $20\text{m}$  处  $0.5\text{MHz}$  无线电干扰场强  $80\%//80\%$  值(即在  $80\%$  时间, 具有  $80\%$  置信度不超过的值), 一般地区不超过  $58\text{dB}(\mu\text{V/m})$ 。

### 3.5 电晕可听噪声

根据国内外超高压和特高压线路的研究经验, 随着电压的升高, 输电线路的电晕可听噪声问题越显突出, 对于  $\pm 500\text{kV}$  以上线路, 电晕可听噪声已超越无线电干扰成为选择导线的控制条件。其限制标准将对导线截面和分裂方式的选取产生较大影响。

我国相应的环境噪声标准有 GB 3096-93《城市区域环境噪声标准》、GB 12348-90《工业企业厂界噪声标准》和 GB 12523-90《建筑施工场界噪声限值》等。城市区域环境噪声和工业企业厂界噪声这两个标准, 都划分了不同标准以适用于不同的区域, 详见表 3.6-1。

表 3.6-1 中国噪声标准(等效声级  $\text{Laeq: dB(A)}$ )

类 别	昼 间	夜 间
0	50	40
1	55	45
2	60	50
3	65	55
4	70	55

0类适用于疗养区、高级别墅区、高级宾馆区等特别需要安静的区域(工业企业厂界噪声无此类标准)。

1类适用于以居住、文教机关为主的区域。乡村居住环境可参照执行该类标准。

2类适用于居住、商业、工业混杂区。

3类适用于工业区。

4类适用于城市中的道路交通干线道路两侧区域，穿越城区的内河航道两侧区域。

根据《±800kV 直流架空输电线路设计规范》（送审稿）中的规定，海拔1000m 及以下地区，距直流架空输电线路正极性导线对地投影外20m 处由电晕产生的可听噪声（L50）不超过45dB(A)；海拔高度大于1000m 且线路经过人烟稀少地区时，控制在50dB(A)以下。

### 3.6 安全系数

根据招标文件提供的《±800kV 直流架空输电线路设计规范》（送审稿）中的规定，本工程导线设计安全系数取2.5，悬挂点的设计安全系数不小于2.25，平均运行应力不大于拉断应力的25%。稀有覆冰气象条件时，弧垂最低点的最大张力不超过导地线拉断力的60%，悬挂点的最大张力不超过导地线拉断力的66%。

## 4 各电磁环境参数的计算方法

## 4.2 导线起始电晕电场强度

电晕是高压线附近产生的微弱的辉光，当导线表面的电场强度超过了空气电气击穿强度时所产生局部放电就形成了电晕。

这种电气放电在空气中导致光、可听噪声、无线电干扰、导线舞动、臭氧的产生，还可以使空气电离，这些都会消耗系统的能量。因此高压直流输电线路必须将电晕限制在一定的范围内。光滑导线的表面很少产生电晕。但导线表面通常是不规则的，上面附着着污秽物、昆虫、水滴等，这些足以将导线表面场强增加到足够大而引起局部导线附近空气击穿(空气临界击穿场强 29.8kV / cm)。

往往由于导线表面的不规则和粗糙等因素，在比空气临界击穿强度低得多的情况下，导线表面即产生了电晕，这种现象通常用导线的表面粗糙系数  $m$  来表示对于直流线路而言，一般  $m$  的取值在 0.4—0.6 之间。

试验证明，导线的起始电晕电场强度与极性的关系较小，一般认为直流线路导线起晕场强和交流线路起晕场强的峰值相同，可以将皮克(peek)公式转换为直流形式。

$$E_0 = 30m\delta\left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{\delta r}}\right)$$

式中：

$m$ —导线表面粗糙系数，目前晴天和雨天条件下的导线表面粗糙系数  $m$  值分别为 0.49 和 0.38；

$\delta$ —相对空气密度；

$r$ —导线半径，cm；

## 4.2 导线表面最大电场强度

导线表面电场强度决定于运行电压、子导线直径、子导线分裂数、子导线分裂间距、极导线高度以及相间距离等因素。用于计算分裂导线表面场强的方法很多，下面介绍逐次镜像法和“EPRI”的经验公式两种计算方法。

根据上述方法，按运行电压 800kV，极间距离 22m、对地高度 18m 为计算条件进行对比计算，计算结果如下。

表 4. 2-1

序号	导线方案	子导线直径 (mm)	导线表面最大场强(kV/cm)		
			逐步镜像法	EPRI	差值
1	4×900	40.69	26.59	26.52	0.07
2	6×630	34.32	23.41	23.66	-0.25
3	6×720	36.23	22.42	22.28	0.14
4	7×500	30.00	23.58	23.17	0.41
5	7×630	34.32	21.17	21.24	-0.07
6	7×720	36.23	20.28	20.14	0.14

从上表可以看出，两种结算方法的计算结果十分接近，因此，上述两种方法均可使用，鉴于逐次镜像法在工程中应用比较广泛，本文推荐采用逐次镜像法计算导线表面电场强度。

### 4. 3 合成场强和离子流密度计算

本工程合成场强和离子流密度的计算采用以模拟试验结果为基础、具有一定可信度的 EPRI EL-2257 法。

#### 4. 3. 1 合成场强 $E(x)$ (kV/m)

$$E(\pm x) = E_s(\pm x) \left[ 1 - \left( f\left(\frac{V}{V_i}\right) * \frac{V}{V_i} \left( 1 - \frac{K_e(\pm x) * H}{F(\pm x)} \right) \right) \right] \quad \dots \quad (4. 3-1)$$

其中， $f\left(\frac{V}{V_i}\right)$ 、 $F(x)$  均由查曲线获得。

#### 4. 3. 2 离子流密度 $J(x)$ (nA/m<sup>2</sup>)

$$J(x) = \frac{x^2}{H^2} * C(x) \left[ 1 - \gamma\left(\frac{V}{V_i}\right) * \frac{V_i}{V} \left( 1 - \left( 1 - \frac{V_i}{V} \right)^2 \right) \right] \quad \dots \quad (4. 3-2)$$

其中， $\gamma\left(\frac{V}{V_i}\right)$  由查曲线获得。

## 4.4 电能损失计算

### 4.4.1 电阻电能损耗

电阻电能损耗为：

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \tau \times 10^{-7}$$

最大电阻功率损耗为

$$W = I^2 R \times 10^{-6}$$

式中： W—最大功率损耗(MW);

Q—电阻损耗能量(万度);

I—最大负荷电流(A);

τ—最大负荷损失小时数(小时);

$$R = \frac{2}{N} \cdot r \cdot L$$

R—线路总电阻( $\Omega$ );

N—极导线分裂根数;

r—导线 20℃时的直流电阻( $\Omega / \text{km}$ );

L—线路总长度(km)。

### 4.4.2 电晕损耗计算

影响导线电晕损失的可变因素很多，无论在理论上或经验总结方面均缺乏共识。电晕损耗的估算方法很多，有对比法、前苏联的半经验公式、安乃堡公式、巴布科夫公式、直流导则中的修正皮克公式等计算方法。这些计算方法中安乃堡计算值最大，前苏联半经验公式次之，皮克公式计算最小，计算结果差异较大。根据中国电力科学研究院对葛上±500kV 直流试验线路的计算和实测结果比较证实，安乃堡公式计算结果与实测差异最小，但其测试仅限于±500kV 及以下运行电压下。经对±800kV 线路按安乃堡公式计算比较，

电晕损耗占到总损耗的 25% 左右，此结果与大多直流研究的结论不一致，直流线路的电晕占电阻损耗的比例较小，直流线路的电晕损耗一般占总损耗的比例在 20% 以下。因此，通过计算比较分析，本工程采用 EPRI 推荐的前苏联电晕损耗半经验公式进行电晕损耗计算。

$$W = 2VI_0 \quad (4.4-1)$$

式中：

$W$  为电晕损耗， $\text{kW/km}$

$V$  为线路运行电压。 $I_0$  为电晕电流。按下式计算：

$$I_0 = \alpha V_0^2 \left( \frac{1-\beta}{\left(\frac{P}{2}\right)^2} + \frac{\beta}{H^2} \right) \quad (4.4-2)$$

$$\beta = \frac{\alpha}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{P}{2H} \right)$$

$$V_0 = V \frac{g}{g_0}$$

$$g_0 = 20.1 \delta \left( 1 + \frac{0.613}{(\delta r)^{0.4}} \right)$$

式中：

$\alpha = f(V/V_0)$  为损失系数，由试验求得如图 4.4-1；

$P$ —极间距， $\text{m}$ ；

$H$ —极导线高， $\text{m}$ ；

$g$ —导线最大表面电场强度， $\text{kV/cm}$ ；

$g_0$ —导线起始电晕电场强度， $\text{kV/cm}$ ；

$r$ —导线直径， $\text{cm}$ ；

$\delta$ —相对空气密度。

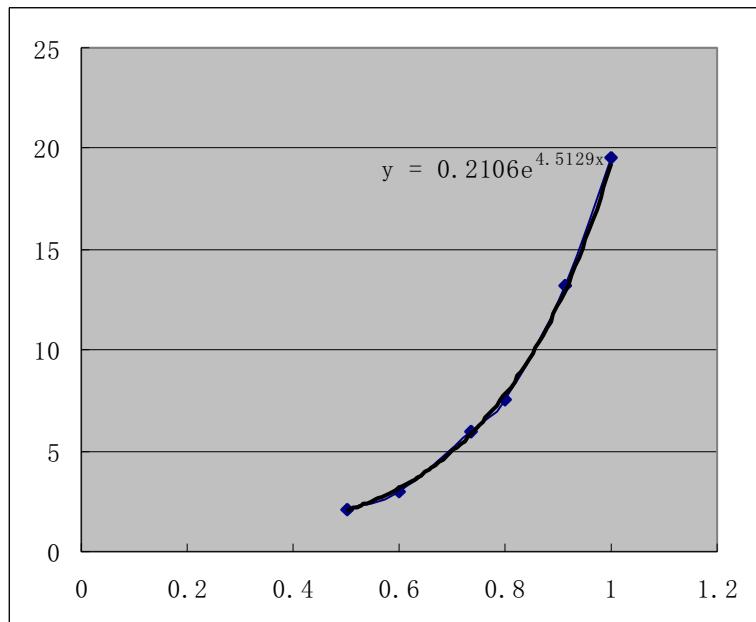


图 4.4-1  $\alpha$ 损失系数曲线

#### 4.5 导线无线电干扰计算

对于无线电干扰水平的预估，目前主要有三种方法，其一为半理论分析法，目前各国使用的较少；其二为比较法，即从已知线路的无线电干扰水平，通过线路参数比较，预估新线路的无线电干扰水平；其三为激发函数法，即利用在实验笼内的导线在“大雨”状态下求得的激发函数，用以预估新线路的无线电干扰水平。除第一种方法使用较少外，其余两种方法均有采用。

比较法简单易行，各国线路工程设计中都采用。该方法利用已建运行线路的测试数据，通过考虑校正因素后求得新建线路的无线电干扰水平。

$$F = F_0 + F_g + F_d + F_n + F_p + F_f + F_w$$

式中：

$F$ —待求输电线路的无线电干扰电平；

$F_0$ —参照输电线路的无线电干扰电平；

$F_g$ —考虑导线表面电场强度  $g$  的修正系数；

$F_d$ —考虑导线直径  $d$  的修正系数；

$F_n$ —考虑子导线分裂数  $n$  的修正系数；

$F_p$ —考虑测试位置的距离  $D_r$  的修正系数；

$F_f$ —考虑测试频率 f 的修正系数;

$F_w$ —考虑气象条件 W 的修正系数。

比较法计算结果的精确度主要取决于参照线路无线电干扰数据的准确性，国家电网公司企业标准《±800kV 直流架空输电线路电磁环境控制值》Q/GDW145-2006 推荐的无线电干扰场强的经验公式和国际无线电干扰特别委员会 CISPR 的公式是一致的，试验结果表明，CISPR 计算方法具有较高的准确度，本工程采用 CISPR 公式进行无线电干扰场强的预估计算。

$$E = 38 + 1.6(g_{\max} - 24) + 46 \log r + 5 \log n + 33 \log \frac{20}{D} \quad (4.5-1)$$

式中： RI — 输电线路的无线电干扰水平值 (dB)；

$g_{\max}$ — 导线表面最大电位梯度(kV/cm);

r — 子导线的半径(cm);

D — 距正极性导线的距离(适应小于 100m)(m);

n — 分裂导线根数;

以导线电晕为主的送电线路无线电干扰频谱，可由下式计算

$$\Delta E_f = 5[1 - 2(\log 10 f)^2]$$

其中 f 为测量频率(MHz)，频率适应范围为 0.15~3.0MHz。

上式适用于 0~500m 海拔，其后海拔每升高 300m，无线电干扰增加 1dB。

#### 4.6 电晕可听噪声计算

关于导线电晕引起的可听噪声的计算方法，国际上有许多研究机构进行过深入的研究，提出了各自的预测公式，但由于各自的实验环境和条件不同，其预测公式的计算结果也存在差异。国家电网公司企业标准《±800kV 直流架空输电线路电磁环境控制值》Q/GDW145-2006 推荐采用 BPA 及 EPRI 的计算公式。

经实测对比，美国 BPA 计算公式误差最小，因此，本工程可听噪声采用该公式进行计算。

美国 BPA 计算  $L_{50}$  噪声公式如下：

$$AN = -133.4 + 86 \log g_{\max} + 40 \log d_{eq} - 11.4 \log D \quad (4.6-1)$$

式中：

$g_{\max}$  为导线表面最大电场强度， $\text{kV/cm}$ ；

$d_{eq} = 0.66n^{0.64}d$  ( $n > 2$ )； $d$  为子导线直径， $\text{mm}$ ；

$n$  为子导线根数；

$D$  为离正极导线的距离， $\text{m}$ 。

以上公式为适用于春秋季节好天气的  $L_{50}$  值，对夏、冬季节相应增加或减少 2 分贝；对坏天气可减少 6–11 dB(A)。且该公式适用于 0~500m 海拔，500m 以上地区海拔每升高 330m，噪声增加 1dB(A)。

## 5 导线选择

### 5.1 国内外超高压输电线路的导线应用情况

国外应用直流输电已经有 51 年的历史。自从 1954 年瑞典由哥特兰岛至本土的第一条工业性直流输电线路投入运行以来，直流技术有了很大的发展。目前世界上实际运行的直流工程的最高电压等级是  $\pm 600\text{kV}$ ，即巴西的伊泰普直流工程。

我国直流线路自 80 年代葛上直流线路设计以来，只有一个电压等级，即  $\pm 500\text{kV}$ 。导线的最初在加拿大泰西蒙咨询公司推荐下设计采用了 4 分裂的  $300\text{mm}^2$  导线。为了发挥直流线路长距离大输送容量的优点，因此研制生产了  $720\text{mm}^2$  铝截面钢芯铝绞线，在后续工程设计时均采用了导线 4 分裂的  $720\text{mm}^2$  铝截面钢芯铝绞线。在直流线路经过重冰区地段，也研制生产了  $720\text{mm}^2$  铝截面钢芯铝合金绞线。

国外直流线路的导线选择由于受地域条件、电压等级、输送容量、设计标准、导线生产和设计等因素大多采用少分裂大截面的导线型式，分裂根数为 2~4，导线截面为  $400$ – $1400\text{mm}^2$ 。

部分国内外直流线路采用的导线见表 5.1-1。

表 5.1-1 国内外部分直流线路使用的导线型式

工程名称	国家	电压	分裂数	导线直径	导线截面	投运年
		kV		mm	mm <sup>2</sup>	
葛南线	中国	±500	4	27.4	300	1986
龙政、三广、贵广、蔡白	中国	±500	4	36.2	720	2005
云广	中国	±800	6	33.6	LGJ-630/45	2008
向上	中国	±800	6	36.2	ACSR-720/50	2009
锦苏	中国	±800	6	39.9	JL/G3A-900/40	在建
宁东-山东	中国	±600	4	42.08	LGJ-1000/45	2009
benmore-haywards	日本	±250	2	38.4	800	1965
arnott-vancouver island terminal HVDC	英国	-280～+260	2	28.1	400	1976
coal creek-dickison	美国	±400	2	38.2	800	1979
radisson-dorsey	加拿大	±450	2	40.7	900	1972
quebec-new england HVDC interconnection	加拿大	±450	3	50.4	1400	1986
inga-shaba EHVDC intertie	加拿大	±500	3	30.8	500	1983
pacific NW-SW HVDC intertie	美国	±500	2	45.7	1170	1969
pacific NW-SW HVDC intertie	美国	±500	2	45.7	1170	1969
ITAIPU bipole1 and bipole2	巴西	±600	4	34.1	650	1984

## 5.2 导线截面和分裂方式的选取

根据系统条件，系统额定输送功率 7500MW，系统长期过载输送功率 8000MW，由此算得额定输送功率时每极导线电流为 4687.5A；长期过载时每极导线电流为 5000A。

根据我国的导线制造标准，参考国际上常用的导线标准(主要是美国标准)，初步选定满足上述载流量要求的 8 种导线型号、16 种导线方案作为比较用。详见表 5.2-1。

**表 5.2-1 比选用的导线型号及特性一览表**

序号	导线型号	铝、钢股数	总截面	直径	铝/钢 截面比	单线重 (kg/m)	分裂数
1	JL/G1A-1120/90	84×4.12/19×2.47	1211.2	45.3	12.3	3.8115	4、5
2	JL/G3A-1000/45	72×4.21/7×2.80	1043.2	42.1	23.1	3.1003	4、5、6
3	JL/G3A-900/40	72×3.99/7×2.66	939.16	39.9	23.1	2.7902	5、6
4	LGJ-800/55	45×4.80/7×3.20	870.6	38.4	14.5	2.6900	6、7
5	ACSR-720/50	45×4.53/7×3.02	775.41	36.2	14.5	2.3977	6、7、8
6	LGJ-630/45	45×4.20/7×2.80	666.55	33.6	14.5	2.0600	7、8
7	JL/G1A-560/40	45×3.98/7×2.65	598.7	31.8	14.5	1.8482	8
8	JL/G2A-500/35	45×3.76/7×2.51	534.6	30.1	14.5	1.6502	8

导线分裂间距按表 5.2-2 取。

**表 5.2-2 导线分裂间距及 S/d 值一览表**

分裂根数	分裂间距 S(mm)	分裂导线圆直径 d(mm)	S/d
4	500	707	11.04~11.88
5	500	851	11.04~12.53
6	450	900	10.69~12.43
7	450	1037	11.72~13.39
8	400	1045	11.05~13.29

### 5.3 导线电气性能计算

导线电气性能的计算主要包括导线电流密度、过负荷温度、传输功率及功率损耗、表面电场强度、电晕损耗、无线电干扰、电晕可听噪声及地面标称场强、地面合成场强、地面离子流密度等内容。

#### 5.3.1 导线电流密度

**表 5.3-1 导线组合方案、总铝截面及电流密度**

序号	分裂数	导线型号分裂型式	总铝截面 (mm <sup>2</sup> )	电流密度 (A/mm <sup>2</sup> )
1	4	JL/G1A-1120/90	4480.00	1.036
2	4	JL/G3A-1000/45	4000.00	1.166
3	5	JL/G1A-1120/90	5600.00	0.796
4	5	JL/G3A-1000/45	5000.00	0.895
5	5	JL/G3A-900/40	4501.30	0.995
6	6	JL/G3A-1000/45	6000.00	0.746
7	6	JL/G3A-900/40	5401.56	0.829
8	6	LGJ-800/55	4885.80	0.913
9	6	ACSR-720/50	4351.61	1.026
10	7	LGJ-800/55	5700.11	0.783
11	7	ACSR-720/50	5076.88	0.879
12	7	LGJ-630/45	4364.15	1.023
13	8	ACSR-720/50	5802.15	0.769
14	8	LGJ-630/45	4987.59	0.895
15	8	JL/G1A-560/40	4480.00	0.996
16	8	JL/G2A-500/35	4000.00	1.116

### 5.3.2 导线过负荷温度计算

各种导线方案中每极导线在 70℃下的最大允许电流和导线过负荷温度见表 5.3-2。

**表 5.3-2 导线过负荷温度计算结果**

序号	导线型号	允许电流(A)			过负荷温度 (℃) (输送容量 8000MW)
		70℃时	80℃时	90℃时	
1	4×JL/G1A-1120/90	4400	5724	6772	74.0
2	4×JL/G3A-1000/45	4104	5310	6267	76.9
3	5×JL/G1A-1120/90	5500	7155	8465	67.5

4	5×JL/G3A-1000/45	5130	6637	7833	69.2
5	5×JL/G3A-900/40	4821	6212	7319	71.0
6	6×JL/G3A-1000/45	6156	7964	9400	65.1
7	6×JL/G3A-900/40	5785	7455	8783	66.2
8	6×LGJ-800/55	5466	7025	8267	67.5
9	6×ACSR-720/50	5103	6531	7672	69.3
10	7×LGJ-800/55	6377	8196	9645	64.2
11	7×ACSR-720/50	5953	7620	8951	65.5
12	7×LGJ-630/45	5445	6935	8128	67.5
13	8×ACSR-720/50	6803	8708	10229	63.0
14	8×LGJ-630/45	6223	7926	9290	64.4
15	8×JL/G1A-560/40	5836	7408	8668	65.7
16	8×JL/G2A-500/35	5457	6904	8066	67.3

计算中环境气温应采用最高气温月的最高平均气温，在此取环境温度为40℃。风速应采用0.5m/s，太阳辐射功率密度应用1000W/m<sup>2</sup>。

从表5.3-2中可以看出，所选极导线方案除4分裂导线外其余均满足系统输送功率7500MW允许载流量的要求；长期过载输送功率8000MW时，4分裂及5×JL/G3A-900/40极导线方案温度超过70℃，其它导线均满足过负荷温度不超过70℃的要求；输送1.1倍的额定电流时，4分裂及5×JL/G3A-1000/45、5×JL/G3A-900/40、6×ACSR-720/50极导线方案温度超过70℃，其它导线均满足过负荷温度不超过70℃的要求。

### 5.3.3 电能损失计算

#### (1) 电阻电能损失

按U=±800 kV, τ=3000~4500小时, S=7500MW。各种导线方案的电流密度、电阻功率损耗及年电能损耗计算结果列于表5.3-3。

表5.3-3

电阻功率损耗、电能损耗

序号	导线结构	极导线 直流电阻 (Ω/km)	电阻功率 损耗 (kW/km)	全年电能损耗(万度/km)			
				τ =3000 小时	τ =3500 小时	τ =4000 小时	τ =4500 小时
1	4×JL/G1A-1120/90	0.00645	304.99	91.5	106.7	122	137.25
2	4×JL/G3A-1000/45	0.00723	341.87	102.6	119.7	136.7	153.84
3	5×JL/G1A-1120/90	0.00516	243.99	73.2	85.4	97.6	109.8
4	5×JL/G3A-1000/45	0.00578	273.50	82.05	95.72	109.4	123.07
5	5×JL/G3A-900/40	0.00642	303.57	91.07	106.2	121.4	136.61
6	6×JL/G3A-1000/45	0.00482	227.91	68.37	79.77	91.17	102.56
7	6×JL/G3A-900/40	0.00535	252.98	75.89	88.54	101.19	113.84
8	6×LGJ-800/55	0.00591	279.46	83.84	97.81	111.8	125.75
9	6×ACSR-720/50	0.00664	313.97	94.19	109.9	125.6	141.29
10	7×LGJ-800/55	0.00507	239.53	71.86	83.84	95.81	107.79
11	7×ACSR-720/50	0.00569	269.12	80.74	94.19	107.6	121.1
12	7×LGJ-630/45	0.00662	313.03	93.91	109.6	125.2	140.86
13	8×ACSR-720/50	0.00498	235.48	70.64	82.42	94.19	105.97
14	8×LGJ-630/45	0.00579	273.90	82.17	95.86	109.6	123.25
15	8×JL/G1A-560/40	0.00645	304.99	91.5	106.7	122	137.25
16	8×JL/G2A-500/35	0.00723	341.87	102.6	119.7	136.7	153.84

从表 5.3-3 可以看出，随着输送功率的变化电阻电能损耗随之变化，极导线直流电阻越大，造成电阻电能损耗较大，采用高导电率钢芯铝绞线、增加导线铝截面及分裂数，对于降低线路损耗，提高能源利用率十分有利，但是过分的增加对投资的要求增加也是十分可观的，因此必须合理的选择。

## (2) 电晕电能损失

各种导线组合方案的电晕损失计算结果见表 5.3-4。

**表 5.3-4 导线电晕损失计算结果**

序	导线型号及分裂数	子导线直径	电晕损失(kW/km)
---	----------	-------	-------------

号		(mm)	海拔 0m	海拔 1000m	海拔 2000m
1	4×JL/G1A-1120/90	45.30	8.631	10.203	12.101
2	4×JL/G3A-1000/45	42.10	9.546	11.280	13.372
3	5×JL/G1A-1120/90	45.30	6.515	7.703	9.135
4	5×JL/G3A-1000/45	42.10	7.201	8.509	10.086
5	5×JL/G3A-900/40	39.90	7.762	9.168	10.864
6	6×JL/G3A-1000/45	42.10	5.681	6.713	7.958
7	6×JL/G3A-900/40	39.90	6.112	7.220	8.555
8	6×LGJ-800/55	38.40	6.450	7.616	9.023
9	6×ACSR-720/50	36.20	6.996	8.258	9.779
10	7×LGJ-800/55	38.40	5.298	6.256	7.412
11	7×ACSR-720/50	36.20	5.746	6.782	8.031
12	7×LGJ-630/45	33.60	6.366	7.511	8.890
13	8×ACSR-720/50	36.20	4.797	5.663	6.706
14	8×LGJ-630/45	33.60	5.302	6.256	7.404
15	8×JL/G1A-560/40	31.80	5.719	6.745	7.980
16	8×JL/G2A-500/35	30.10	6.171	7.276	8.604

从表 5.3-4 表可以看出，相同的分裂型式下，随着子导线直径的增加，电晕损耗随之减小。16 种极导线方案的电晕损耗占电阻损耗的百分比在 7.0%~12.0% 之间。

#### 5.3.4 导线表面电场强度计算

导线表面电场强度是导线选择计算中的最基本条件，导线表面电场强度过高将会引起导线全面电晕，不但电晕损耗急剧增加，而且环境影响问题也更严重，所以在特高压线路设计中必须选择合理的导线表面电场强度。

计算各种导线的起始电晕电场强度见下表。

表 5.3-5 导线起始电晕电场强度  $E_0(kV/cm)$  计算结果

序号	导线型号	直径 (mm)	起晕场强 $E_0$ (kV/cm)(晴天)				
			0m	1000m	2000m	3000m	3650m
1	JL/G1A-1120/90	45.3	17.64	16.16	14.78	13.50	12.72
2	JL/G3A-1000/45	42.1	17.75	16.29	14.88	13.60	12.81
3	JL/G3A-900/40	39.9	17.83	16.35	14.96	13.67	12.88
4	LGJ-800/55	38.4	17.89	16.40	15.01	13.72	12.93
5	ACSR-720/50	36.2	17.99	16.50	15.10	13.80	13.01
6	LGJ-630/45	33.6	18.11	16.62	15.22	13.91	13.11
7	JL/G1A-560/40	31.8	18.21	16.71	15.30	13.99	13.19
8	JL/G2A-500/35	30.1	18.31	16.80	15.39	14.08	13.27

表 5.3-6 导线起始电晕电场强度  $E_0$ (kV/cm)计算结果

序号	导线型号	直径 (mm)	起晕场强 $E_0$ (kV/cm)(雨天)		
			0m	1000m	2000m
1	JL/G1A-1120/90	45.3	13.68	12.54	11.47
2	JL/G3A-1000/45	42.1	13.77	12.62	11.54
3	JL/G3A-900/40	39.9	13.83	12.68	11.60
4	LGJ-800/55	38.4	13.88	12.72	11.64
5	ACSR-720/50	36.2	13.95	12.79	11.71
6	LGJ-630/45	33.6	14.05	12.89	11.80
7	JL/G1A-560/40	31.8	14.12	12.96	11.87
8	JL/G2A-500/35	30.1	14.20	13.03	11.94

从表 5.3-5 和 5.3-6 可见直流线路导线的起晕场强较交流低得多。

各种导线组合方案的表面平均最大电场强度见表 5.3-7。

表 5.3-7 导线表面平均最大电场强度

序号	导线型号及分裂数	分裂间距 (cm)	子导线直径 (mm)	导线表面最大电场强度(kV/cm)	
				导线高度 18m	导线高度 23m
1	4×JL/G1A-1120/90	50	45.30	24.411	24.100

2	4×JL/G3A-1000/45	50	42.10	25.857	25.529
3	5×JL/G1A-1120/90	50	45.30	21.147	20.861
4	5×JL/G3A-1000/45	50	42.10	22.391	22.089
5	5×JL/G3A-900/40	50	39.90	23.360	23.046
6	6×JL/G3A-1000/45	45	42.10	19.823	19.547
7	6×JL/G3A-900/40	45	39.90	20.662	20.375
8	6×LGJ-800/55	45	38.40	21.288	20.993
9	6×ACSR-720/50	45	36.20	22.299	21.991
10	7×LGJ-800/55	45	38.40	19.235	18.956
11	7×ACSR-720/50	45	36.20	20.147	19.855
12	7×LGJ-630/45	45	33.60	21.376	21.067
13	8×ACSR-720/50	40	36.20	18.345	18.076
14	8×LGJ-630/45	40	33.60	19.439	19.155
15	8×JL/G1A-560/40	40	31.80	20.300	20.004
16	8×JL/G2A-500/35	40	30.10	21.207	20.898

从表 6-3 可见，所有极导线方案的表面最大电场强度均大于起始电晕电场强度  $E_0$ ，即在大部分时间内，导线均处于电晕状态(这完全不同于交流大部分时间没有电晕的情况)。对导线表面场强影响较大的是子导线分裂根数和子导线直径，极间距离、极导线高度和子导线分裂间距对导线表面场强的影响很小。

### 5.3.5 合成场强和离子流密度计算

一般非居民地区(如跨越农田)导线最小对地距离取 18m，在此条件下，地面合成场强和离子流密度的计算结果见表 5.3-8~5.3-10。

表 5.3-8 地面合成场强和离子流密度计算结果(海拔 0m, 晴天)

序号	导线型号	导线表面最大电场强度 (kV/cm)	地面最大合成场强		地面最大离子流密度	
			正极性 (kV/m)	负极性 (kV/m)	正极性 (nA/m <sup>2</sup> )	负极性 (nA/m <sup>2</sup> )

1	4×JL/G1A-1120/90	24.411	26.83	-27.31	57.60	-80.07
2	4×JL/G3A-1000/45	25.857	28.53	-29.07	66.19	-92.01
3	5×JL/G1A-1120/90	21.147	22.01	-22.31	35.15	-48.86
4	5×JL/G3A-1000/45	22.391	24.30	-24.68	44.64	-62.05
5	5×JL/G3A-900/40	23.360	25.89	-26.32	51.40	-71.44
6	6×JL/G3A-1000/45	19.823	19.44	-19.63	23.89	-33.21
7	6×JL/G3A-900/40	20.662	21.27	-21.53	31.23	-43.41
8	6×LGJ-800/55	21.288	22.55	-22.85	36.51	-50.74
9	6×ACSR-720/50	22.299	24.39	-24.76	44.17	-61.40
10	7×LGJ-800/55	19.235	18.42	-18.55	16.72	-23.24
11	7×ACSR-720/50	20.147	20.65	-20.87	27.00	-37.53
12	7×LGJ-630/45	21.376	23.16	-23.47	37.50	-52.12
13	8×ACSR-720/50	18.345	16.05	-16.09	4.82	-6.70
14	8×LGJ-630/45	19.439	19.07	-19.23	19.39	-26.95
15	8×JL/G1A-560/40	20.300	21.09	-21.32	28.39	-39.47
16	8×JL/G2A-500/35	21.207	22.94	-23.24	36.15	-50.24

注：导线高度按照对地距离 18m 计算。

表 5.3-9 地面合成场强和离子流密度计算结果(海拔 0m, 雨天)

序号	导线型号	导线表面最大电场强度 (kV/cm)	地面最大合成场强		地面最大离子流密度	
			正极性 (kV/m)	负极性 (kV/m)	正极性 (nA/m <sup>2</sup> )	负极性 (nA/m <sup>2</sup> )
1	4×JL/G1A-1120/90	24.411	33.25	-33.97	93.26	-129.63
2	4×JL/G3A-1000/45	25.857	34.36	-35.11	100.58	-139.81
3	5×JL/G1A-1120/90	21.147	30.40	-31.00	74.02	-102.89
4	5×JL/G3A-1000/45	22.391	31.75	-32.40	81.99	-113.96
5	5×JL/G3A-900/40	23.360	32.69	-33.38	87.72	-121.94
6	6×JL/G3A-1000/45	19.823	28.91	-29.45	64.84	-90.13
7	6×JL/G3A-900/40	20.662	30.00	-30.58	70.85	-98.48

8	6×LGJ-800/55	21.288	30.74	-31.35	75.10	-104.39
9	6×ACSR-720/50	22.299	31.83	-32.48	81.55	-113.35
10	7×LGJ-800/55	19.235	28.39	-28.90	60.60	-84.24
11	7×ACSR-720/50	20.147	29.67	-30.23	67.43	-93.73
12	7×LGJ-630/45	21.376	31.15	-31.76	75.88	-105.47
13	8×ACSR-720/50	18.345	27.02	-27.47	53.46	-74.32
14	8×LGJ-630/45	19.439	28.78	-29.30	62.24	-86.51
15	8×JL/G1A-560/40	20.300	29.94	-30.51	68.57	-95.31
16	8×JL/G2A-500/35	21.207	31.04	-31.64	74.81	-103.99

注：导线高度按照对地距离 18m 计算。

表 5.3-10 地面合成场强和离子流密度计算结果(海拔 1000m, 晴天)

序号	导线型号	导线表面最大电场强度 (kV/cm)	地面最大合成场强		地面最大离子流密度	
			正极性 (kV/m)	负极性 (kV/m)	正极性 (nA/m <sup>2</sup> )	负极性 (nA/m <sup>2</sup> )
1	4×JL/G1A-1120/90	24.411	29.91	-30.51	73.52	-102.20
2	4×JL/G3A-1000/45	25.857	31.15	-31.79	80.70	-112.17
3	5×JL/G1A-1120/90	21.147	26.22	-26.67	52.70	-73.26
4	5×JL/G3A-1000/45	22.391	27.81	-28.31	60.40	-83.96
5	5×JL/G3A-900/40	23.360	28.88	-29.43	65.96	-91.68
6	6×JL/G3A-1000/45	19.823	23.81	-24.16	41.57	-57.78
7	6×JL/G3A-900/40	20.662	25.20	-25.60	47.42	-65.92
8	6×LGJ-800/55	21.288	26.16	-26.60	51.62	-71.75
9	6×ACSR-720/50	22.299	27.46	-27.95	57.84	-80.40
10	7×LGJ-800/55	19.235	22.69	-22.98	35.28	-49.04
11	7×ACSR-720/50	20.147	24.31	-24.67	42.19	-58.65
12	7×LGJ-630/45	21.376	26.24	-26.66	50.51	-70.21
13	8×ACSR-720/50	18.345	20.53	-20.73	25.92	-36.03
14	8×LGJ-630/45	19.439	22.69	-22.98	34.94	-48.56

15	8×JL/G1A-560/40	20.300	24.21	-24.56	41.43	-57.59
16	8×JL/G2A-500/35	21.207	25.63	-26.03	47.53	-66.07

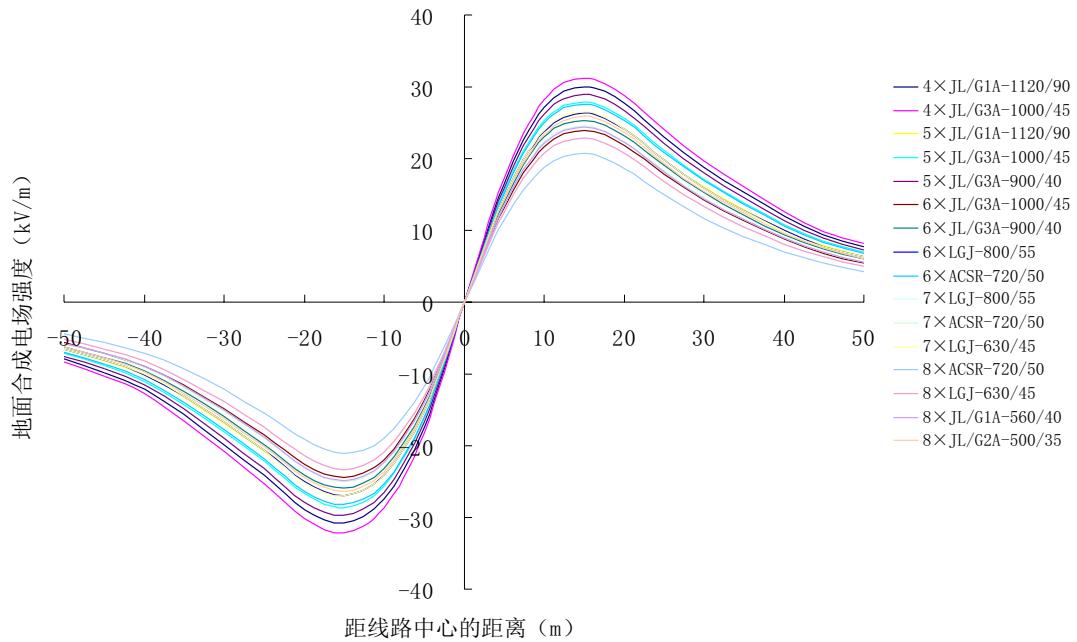


图 5.3-1 海拔 1000m 时各种极导线地面合成电场强度横向分布(线高 18m)

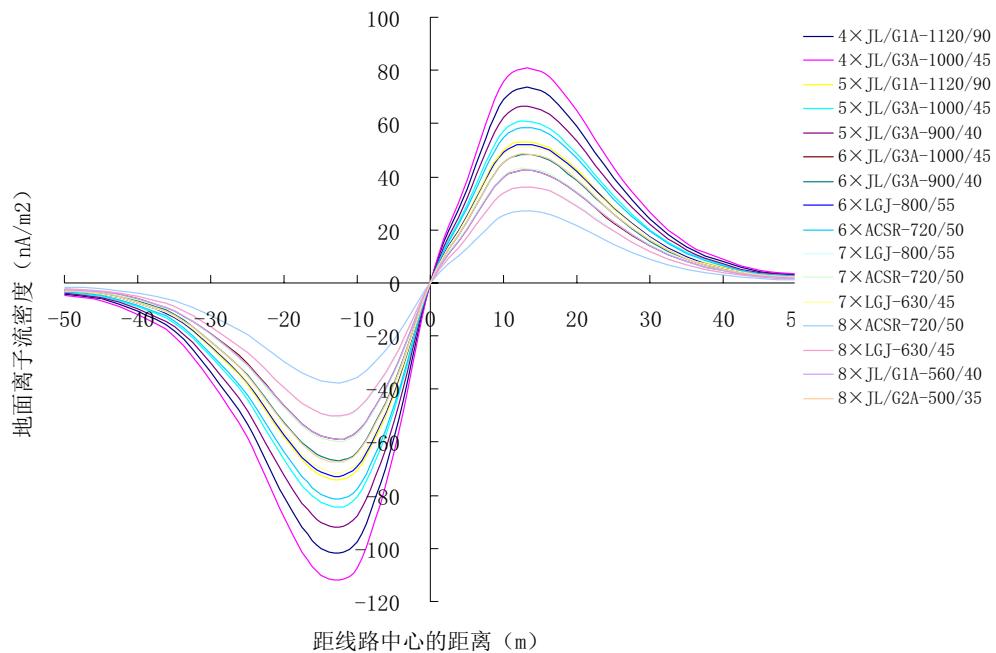


图 5.3-2 海拔 1000m 时各种极导线地面离子流密度横向分布(线高 18m)

在海拔高度 1000m 时，地面合成功强除极导线采用 4 分裂导线方案外其余均

满足晴天  $30\text{kV/m}$  的限值要求；离子流密度除极导线采用 4 分裂导线方案外，其余极导线组合均满足晴天  $100 \text{nA/m}^2$  的限值要求。

**表 5.3-11 地面合成场强和离子流密度计算结果(海拔 2000m, 晴天)**

序号	导线型号	导线表面最大电场强度 (kV/cm)	地面最大合成场强		地面最大离子流密度	
			正极性 (kV/m)	负极性 (kV/m)	正极性 (nA/m <sup>2</sup> )	负极性 (nA/m <sup>2</sup> )
1	4×JL/G1A-1120/90	24.411	32.06	-32.73	85.97	-119.50
2	4×JL/G3A-1000/45	25.857	33.15	-33.86	92.75	-128.93
3	5×JL/G1A-1120/90	21.147	28.96	-29.50	66.13	-91.93
4	5×JL/G3A-1000/45	22.391	30.27	-30.86	73.42	-102.05
5	5×JL/G3A-900/40	23.360	31.16	-31.79	78.64	-109.32
6	6×JL/G3A-1000/45	19.823	27.04	-27.51	55.61	-77.30
7	6×JL/G3A-900/40	20.662	28.16	-28.67	61.13	-84.97
8	6×LGJ-800/55	21.288	28.91	-29.45	65.01	-90.37
9	6×ACSR-720/50	22.299	29.98	-30.56	70.90	-98.55
10	7×LGJ-800/55	19.235	26.13	-26.55	49.85	-69.30
11	7×ACSR-720/50	20.147	27.46	-27.93	56.12	-78.01
12	7×LGJ-630/45	21.376	29.01	-29.54	63.92	-88.85
13	8×ACSR-720/50	18.345	24.24	-24.59	41.40	-57.55
14	8×LGJ-630/45	19.439	26.11	-26.53	49.47	-68.77
15	8×JL/G1A-560/40	20.300	27.37	-27.83	55.33	-76.90
16	8×JL/G2A-500/35	21.207	28.52	-29.03	61.06	-84.88

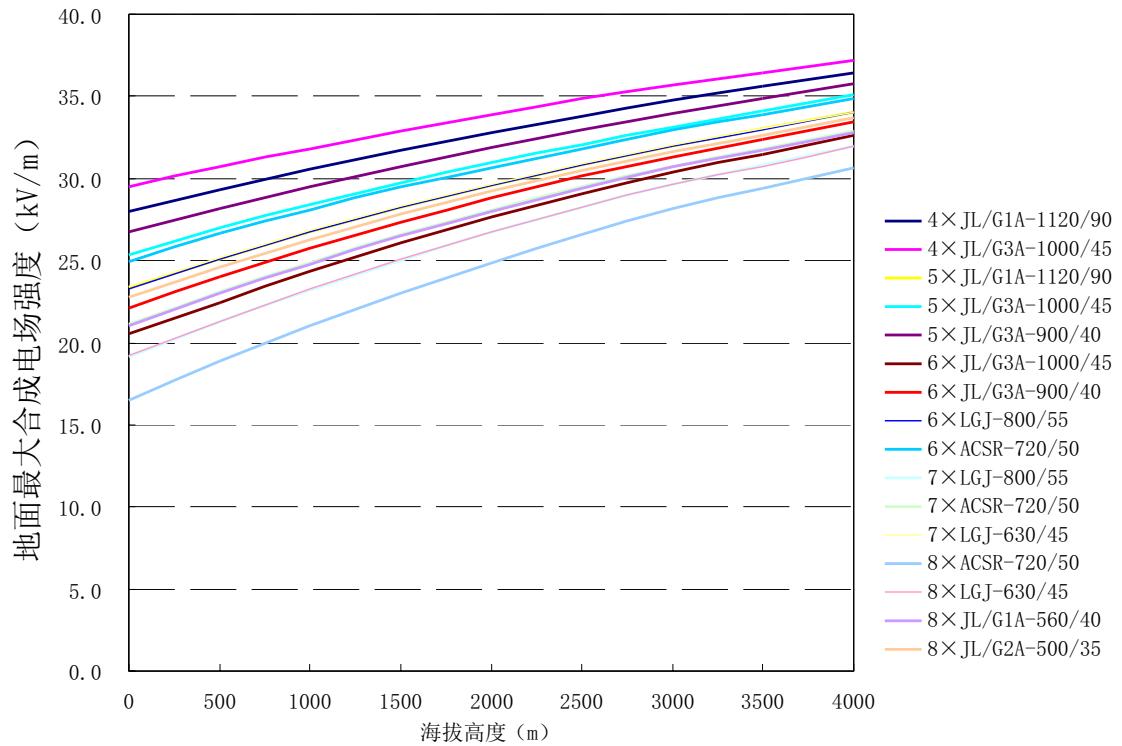


图 5.3-3 不同海拔高度下地面最大合成电场强度(线高 18m)

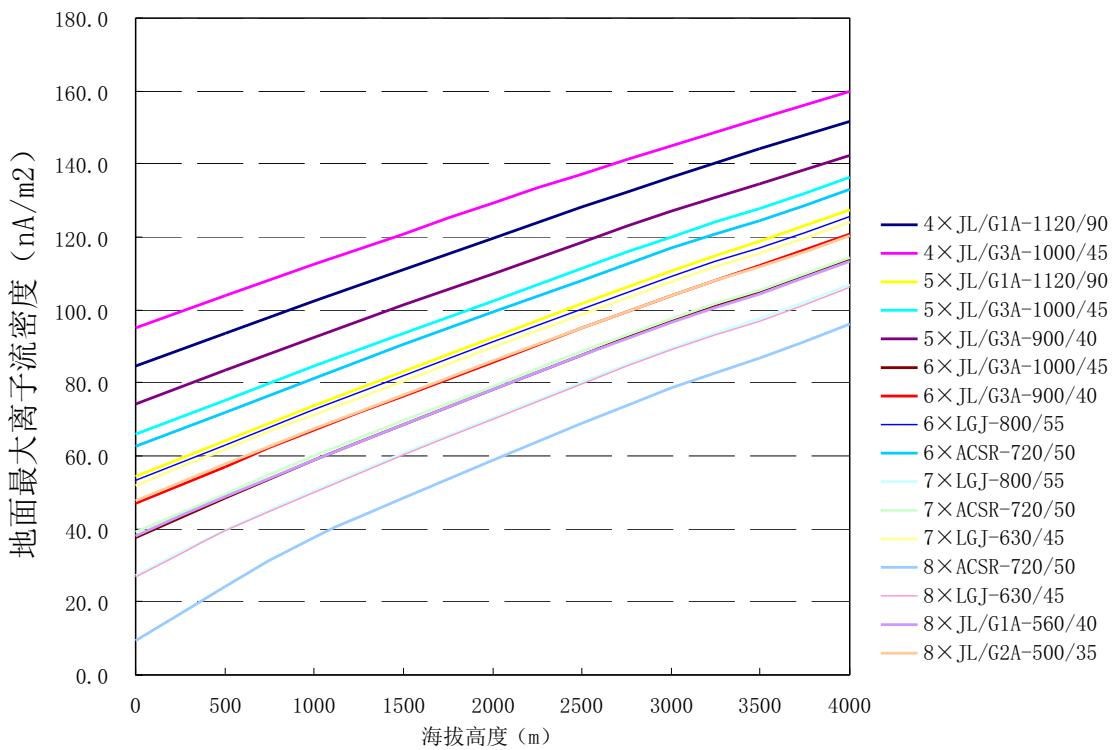


图 5.3-4 不同海拔高度下地面最大离子流密度(线高 18m)

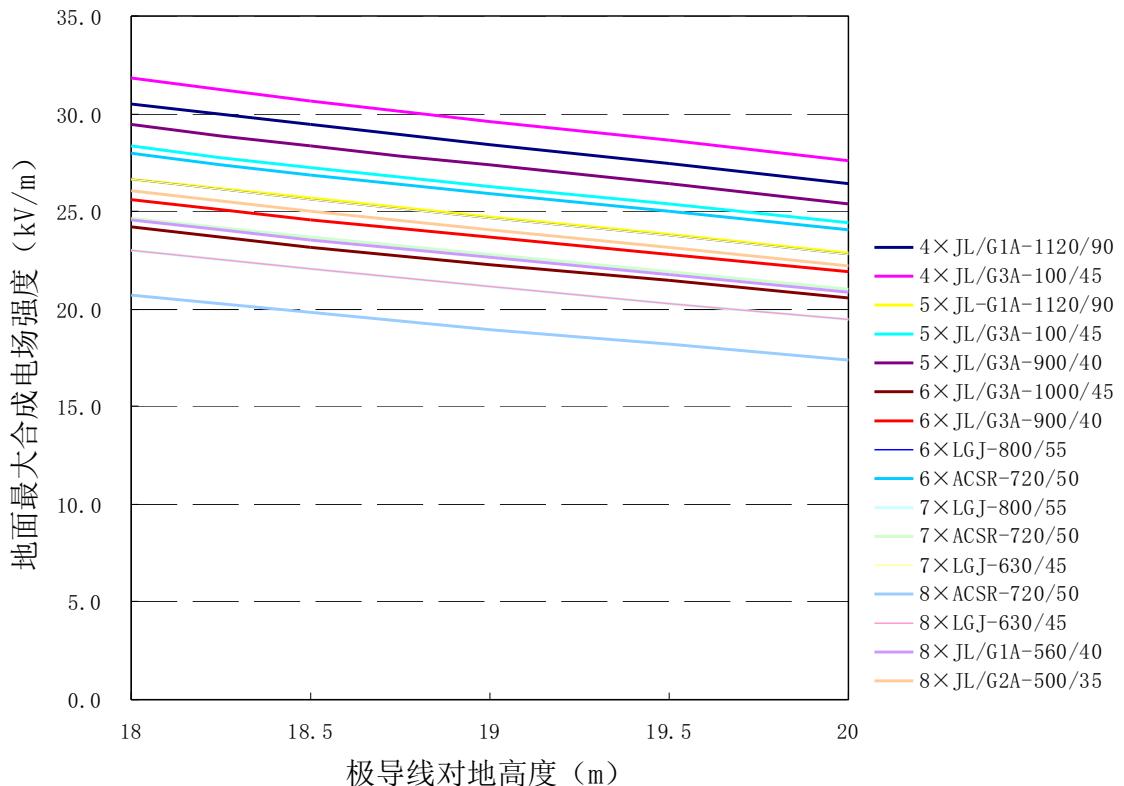


图 5.3-5 不同极导线高度下地面最大合成电场强度

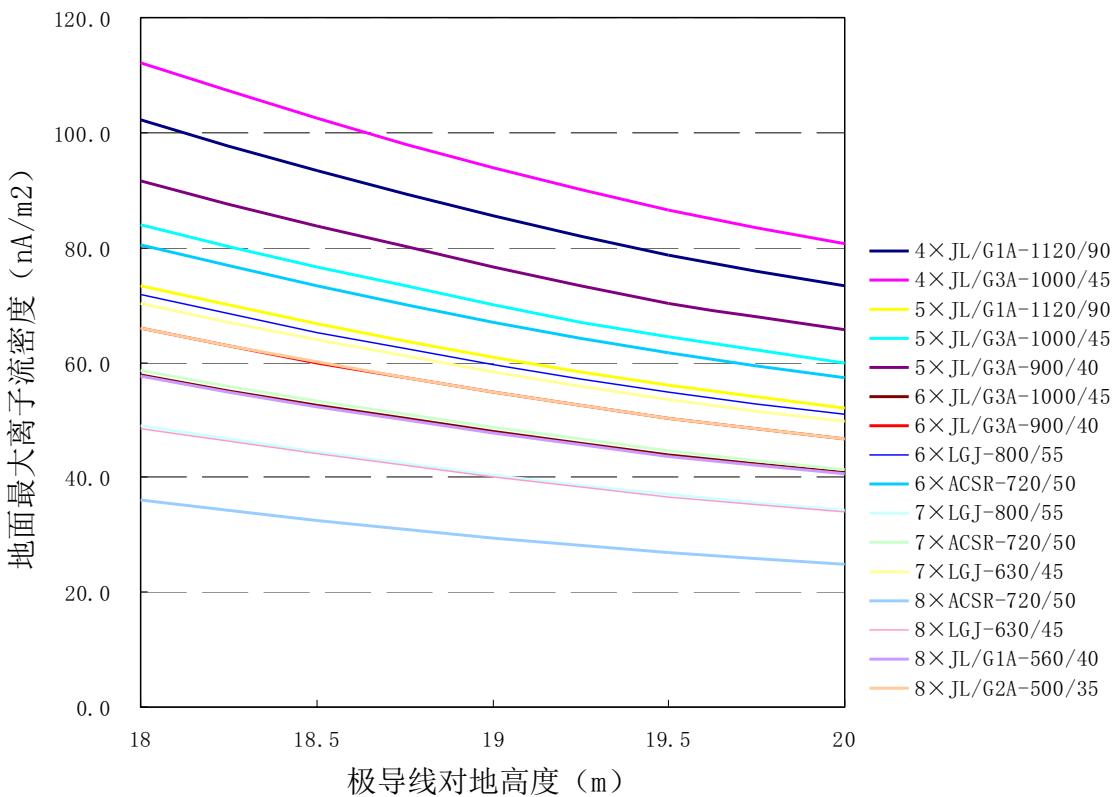


图 5.3-6 不同极导线高度下地面最大离子流密度

由图 5.3-3~5.3-6 可以看出，海拔高度和极导线高度对地面合成电场强度、离子流密度的影响较大。地面合成电场强度随海拔高度每升高 1000m 最大增加约 1~3kV/m，离子流密度随海拔高度每升高 1000m 最大增加约 10~18 nA/m<sup>2</sup>；地面合成电场强度随极导线高度的增加约 -2kV/m，离子流密度随极导线高度的增加约 -10~-18 nA/m<sup>2</sup>。因此，在满足地面合成电场强度、离子流密度限值要求条件下，极导线对地高度每增加 1m；导线可适用的海拔高度增加约 1000m。

随着海拔的增加，导线起始电晕电场强度降低，合成场强、离子流密度增大；在海拔高度 2000m 时，导线高度按照对地距离 18m 计算，除 4×JL/G1A-1120/90、4×JL/G3A-1000/45、5×JL/G1A-1120/90、5×JL/G3A-1000/45、5×JL/G3A-900/40 其余均满足一般地区的地面合成电场强度、离子流密度限值要求。

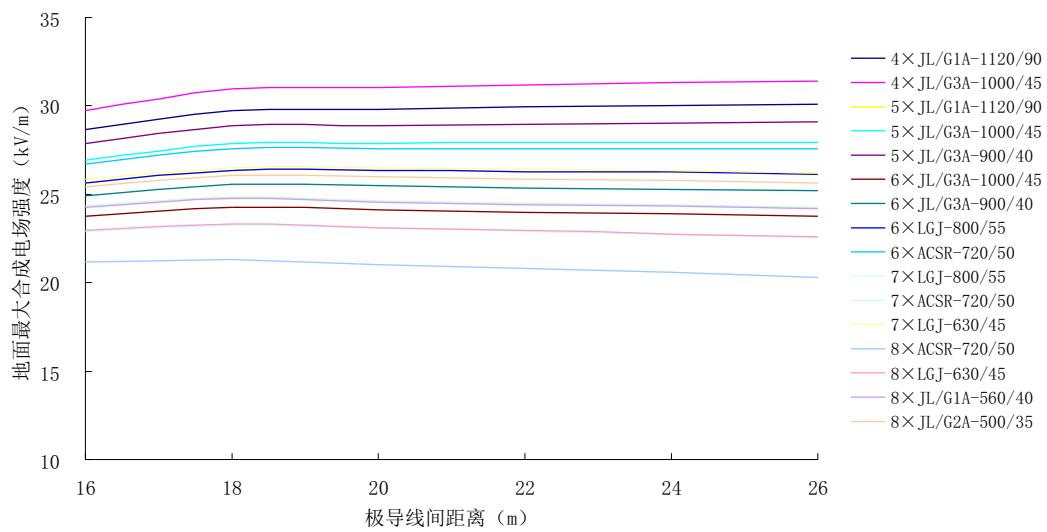


图 5.3-7 海拔 1000m 时极间距对地面合成电场强度的影响(线高 18m, 正极性)

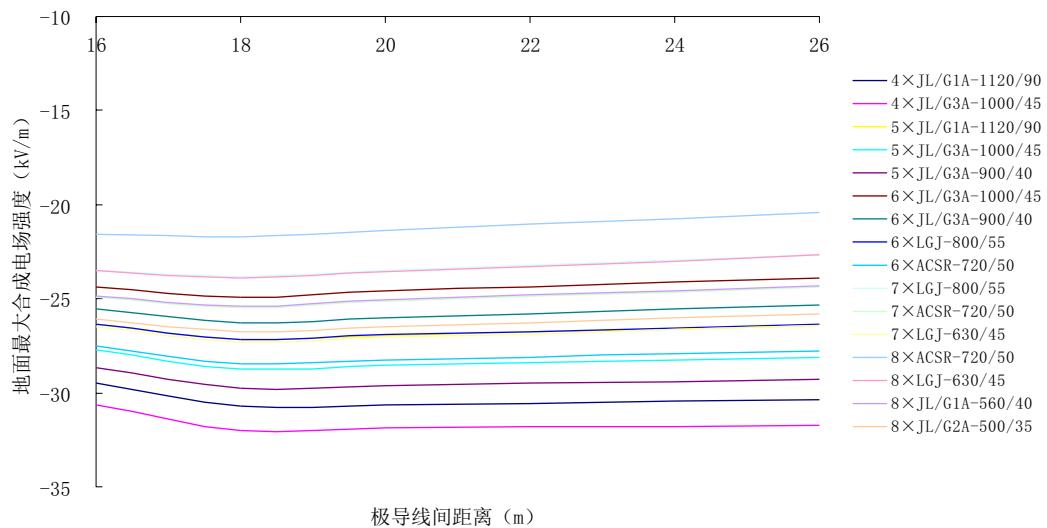


图 5.3-8 海拔 1000m 时极间距对地面合成电场强度的影响(线高 18m, 负极性)

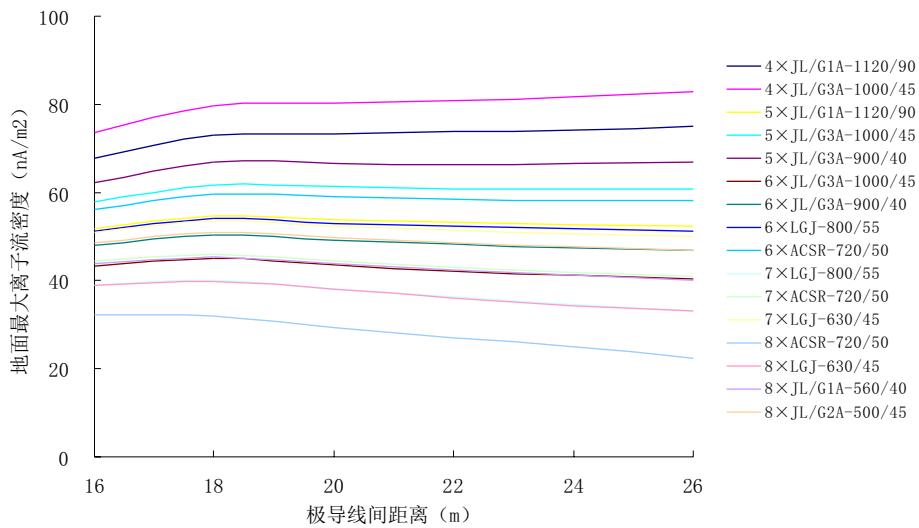


图 5.3-9 海拔 1000m 时极间距对地面离子流密度的影响(线高 18m, 正极性)

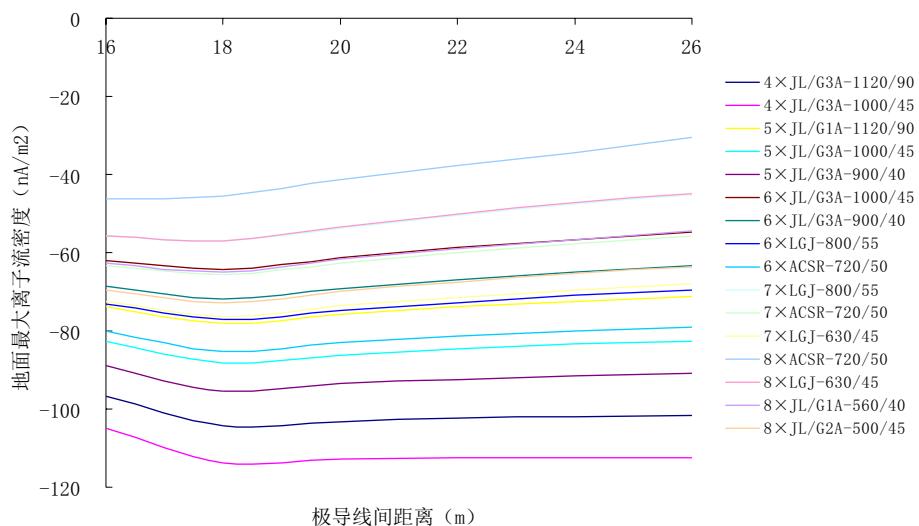


图 5.3-10 海拔 1000m 时极间距对地面离子流密度的影响(线高 18m, 负极性)

由图 5.3-7~5.3-10 可以看出, 当极间距大于 18m 时, 其变化对地面合成电场强度、离子流密度的影响很小。

按前述计算条件, 计算比较±500kV 葛南线、天广线、龙政线、三沪线及±800kV 特高压直流导线表面最大电位梯度、静电场、合成功强及离子流密度情况, 计算结果见表 5.3-12。

葛南线导线表面最大电位梯度、静电场、合成功强及离子流密度最大, ±800kV

特高压直流对地距离取 18m 时，导线表面最大电位梯度、静电场、合成场强及离子流密度与天广线相当并略优于天广线，比龙政线、三沪线合成场强大。

表 5.3-12 导线表面最大电位梯度、静电场、合成场强及离子流密度结果

项目	极间距	分裂间距	离地高	电压 V	起晕梯度	子导线直径	分裂数	分裂导线直径	等效直径	Gmax	静场强 Ee	合成场 E(X)	离子流 J(X)	备注	导线
单位	m	cm	m	kV	kV/cm	cm		cm	cm	kV/cm	kV/m	kV/m	nA/m <sup>2</sup>		
锦屏—苏南特高压 800kV	22	45.0	18.5	800.0	14.00	3.99	6.0	90.0	71.027	20.62	-13.56	-29.47	-89.87	雨天	900/40
	22	45.0	18.0	800.0	14.00	3.99	6.0	90.0	71.027	20.66	-14.21	-30.58	-98.48	雨天	900/40
	22	45.0	18.5	800.0	18.00	3.99	6.0	90.0	71.027	20.62	-13.56	-20.62	-39.31	晴天	900/40
	22	45.0	18.0	800.0	18.00	3.99	6.0	90.0	71.027	20.66	-14.21	-21.53	-43.41	晴天	900/40
云广特高压 800kV	22	45.0	18.5	800.0	14.00	3.36	6.0	90.0	70.1375	24.3616	-13.46	-34.36	-107.65	雨天	630/45
	22	45.0	18.0	800.0	14.00	3.36	6.0	90.0	70.1375	24.4063	-14.104	-35.48	-116.68	雨天	630/45
	22	45.0	18.5	800.0	18.00	3.36	6.0	90.0	70.1375	24.3616	-13.46	-27.33	-75.15	晴天	630/45
	22	45.0	18.0	800.0	18.00	3.36	6.0	90.0	70.1375	24.4603	-14.104	-28.33	-81.84	晴天	630/45
龙政线 三沪线 天广线	17	50.0	11.5	500.0	18.00	3.624	4.0	70.7	47.580	20.52	-15.12	-22.77	-70.98	晴天	720/50
	17	50.0	11.5	500.0	14.00	3.624	4.0	70.7	47.580	20.52	-15.12	-31.70	-147.92	雨天	720/50
	17	45.0	12.5	500.0	18.00	2.763	4.0	63.6	41.082	25.13	-12.73	-26.80	-101.91	晴天	400/50
	17	45.0	12.5	500.0	14.00	2.763	4.0	63.6	41.082	25.13	-12.73	-32.92	-141.16	雨天	400/50
葛南线 天广线	17	45.0	12.5	500.0	18.00	2.376	4.0	63.6	39.561	28.36	-12.62	-29.87	-122.51	晴天	300/25
	17	45.0	12.5	500.0	14.00	2.376	4.0	63.6	39.561	28.36	-12.62	-34.85	-152.37	雨天	300/25
	15	45.0	12.5	500.0	18.00	2.763	4.0	63.640	41.082	25.67	-12.06	-26.71	-103.83	晴天	400/50
	15	45.0	12.5	500.0	14.00	2.763	4.0	63.640	41.082	25.67	-12.06	-32.51	-140.67	雨天	400/50
葛南线	15	45.0	12.5	500.0	18.00	2.376	4.0	63.640	39.561	28.97	-11.95	-29.63	-123.62	晴天	300/25
	15	45.0	12.5	500.0	14.00	2.376	4.0	63.640	39.561	28.97	-11.95	-34.45	-151.31	雨天	300/25

注：计算结果均为最大值。

### 5.3.6 无线电干扰

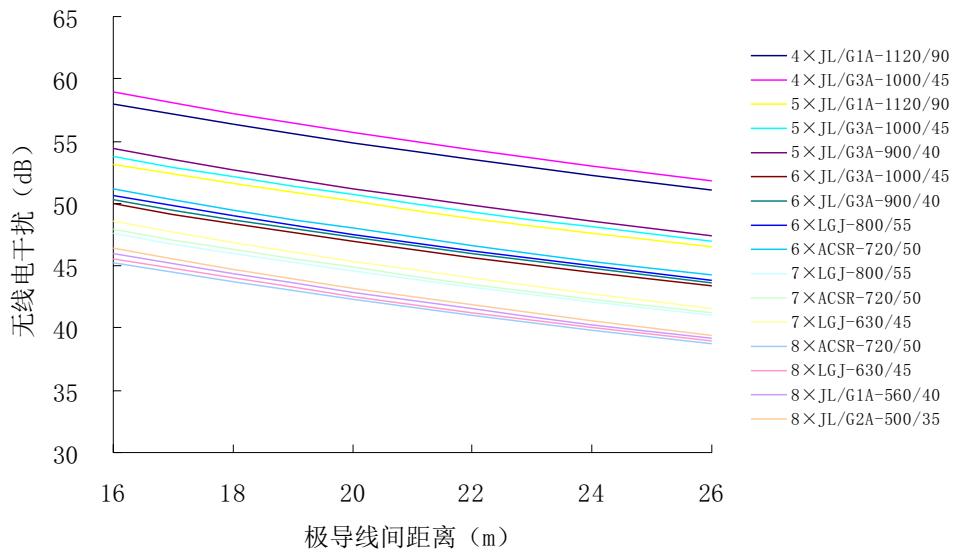


图 5.3-11 海拔 1000m 时极间距对无线电干扰的影响(线高 23m)

经计算分析，无线电干扰随极间距离的增大逐渐减小，平均变化陡度约  $-0.7 \text{dB/m}$ 。

各种极导线组合方案的无线电干扰计算结果见表 5.3-13。

表 5.3-13 无线电干扰计算结果 dB( $1\mu\text{V}/\text{m}$ )

序号	导线型号	导线表面最大场强(kV/cm)	无线电干扰 dB		
			海拔 0m	海拔 1000m	海拔 2000m
1	4×JL/G1A-1120/90	24.100	50.63	53.96	57.29
2	4×JL/G3A-1000/45	25.529	51.45	54.78	58.12
3	5×JL/G1A-1120/90	20.861	45.93	49.26	52.59
4	5×JL/G3A-1000/45	22.089	46.43	49.76	53.10
5	5×JL/G3A-900/40	23.046	46.89	50.22	53.55
6	6×JL/G3A-1000/45	19.547	42.76	46.09	49.43
7	6×JL/G3A-900/40	20.375	43.01	46.34	49.68
8	6×LGJ-800/55	20.993	43.23	46.57	49.90
9	6×ACSR-720/50	21.991	43.65	46.99	50.32
10	7×LGJ-800/55	18.956	40.31	43.64	46.98

11	7×ACSR-720/50	19.855	40.57	43.90	47.24
12	7×LGJ-630/45	21.067	41.02	44.35	47.69
13	8×ACSR-720/50	18.076	38.01	41.35	44.68
14	8×LGJ-630/45	19.155	38.25	41.58	44.92
15	8×JL/G1A-560/40	20.004	38.51	41.84	45.18
16	8×JL/G2A-500/35	20.898	38.84	42.17	45.51

注：上表为好天气，50%概率，0.5MHz，距正极性导线20m处无线电干扰电平。导线平均高度23m，极间距22m。

直流送电线路无线电干扰双80%值与50%值的差3—4dB之间，由计算结果可以得出，距直流架空输电线路正极性导线对地投影外20m处晴天时0.5MHz无线电干扰场强80%//80%值，4分裂极导线方案在海拔1000m以上地区不满足58dB的限值；其余的导线方案均满足一般地区不超过58dB的限值。

### 5.3.7 可听噪声

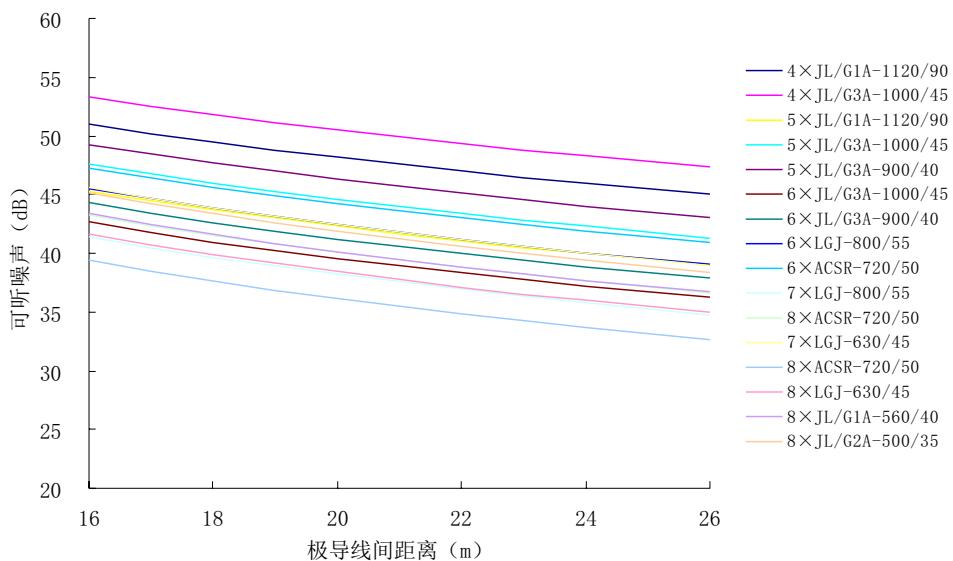


图 5.3-12 海拔1000m时极间距对可听噪声的影响(线高23m)

经计算分析，可听噪声随极间距离的增大逐渐减小，平均变化陡度约-0.60dB/m。可听噪声随导线平均高度增加而降低，平均变化陡度约-0.2dB/m。因

此，为降低可听噪音，可采取加大极间距离、提高导线平均高度等措施。

各种极导线组合方案和不同海拔下的可听噪声值见表 5.3-14。

**表 5.3-14 可听噪声计算结果 dB(A)**

序号	导线型号	导线表面最大场强(kV/cm)	电晕可听噪声 dB(A)		
			海拔 0m	海拔 1000m	海拔 2000m
1	4×JL/G1A-1120/90	24.100	43.60	46.94	50.27
2	4×JL/G3A-1000/45	25.529	45.91	49.25	52.58
3	5×JL/G1A-1120/90	20.861	37.58	40.91	44.24
4	5×JL/G3A-1000/45	22.089	39.86	43.20	46.53
5	5×JL/G3A-900/40	23.046	41.56	44.90	48.23
6	6×JL/G3A-1000/45	19.547	34.70	38.04	41.37
7	6×JL/G3A-900/40	20.375	36.36	39.69	43.02
8	6×LGJ-800/55	20.993	37.55	40.88	44.22
9	6×ACSR-720/50	21.991	39.41	42.74	46.07
10	7×LGJ-800/55	18.956	33.26	36.59	39.92
11	7×ACSR-720/50	19.855	35.11	38.45	41.78
12	7×LGJ-630/45	21.067	37.49	40.83	44.16
13	8×ACSR-720/50	18.076	31.10	34.43	37.77
14	8×LGJ-630/45	19.155	33.41	36.75	40.08
15	8×JL/G1A-560/40	20.004	35.15	38.48	41.82
16	8×JL/G2A-500/35	20.898	36.91	40.24	43.57

注：导线平均高度 23m，极间距 22m。

各导线组合方案在 45dB(A)和 50dB(A)限值下的海拔高程见表 5.3-15。

**表 5.3-15 各导线组合方案在不同噪声限值下的海拔高程(m)**

序号	导线型号	45dB 控制的海拔	50dB 控制的海拔
1	4×JL/G1A-1120/90	415	1917
2	4×JL/G3A-1000/45	-278	1224

3	5×JL/G1A-1120/90	2225	3727
4	5×JL/G3A-1000/45	1539	3040
5	5×JL/G3A-900/40	1028	2530
6	6×JL/G3A-1000/45	3088	4589
7	6×JL/G3A-900/40	2592	4094
8	6×LGJ-800/55	2234	3735
9	6×ACSR-720/50	1675	3177
10	7×LGJ-800/55	3522	5024
11	7×ACSR-720/50	2965	4467
12	7×LGJ-630/45	2250	3752
13	8×ACSR-720/50	4170	5671
14	8×LGJ-630/45	3476	4977
15	8×JL/G1A-560/40	2954	4455
16	8×JL/G2A-500/35	2426	3927

从表 5.3-15 可以看出, 对一般地区, 除 5×JL/G1A-1120/90、6×JL/G3A-1000/45、6×JL/G3A-900/40、6×LGJ-800/55、7×LGJ-800/55、7×ACSR-720/50、7×LGJ-630/45、8×ACSR-720/50、8×LGJ-630/45、8×JL/G1A-560/40、8×JL/G2A-500/35 极导线方案外, 其它极导线方案在海拔超过 2000m 均不能满足人口稠密地区 45dB(A)的可听噪声限值要求。

## 5.4 综合比较

### 5.4.1 导线电气性能比较

通过以上计算分析可知, 极导线分裂根数越多, 导线直径越大, 其电气性能就越好, 但导线总截面也不能太大, 电流密度不能太低, 以避免投资过大, 另外还应考虑生产、施工、运行经验。

4 分裂极导线方案在相同导线布置方式下的地面合成场强、离子流密度、可听噪声、无线电干扰和电晕损失较大, 在高海拔条件下不能满足限值要求, 因此, 4 分裂导线方案不再参与后面的比选。

---

5 分裂极导线方案在高海拔条件下不能满足地面合成长场强、离子流密度、45dB(A)的可听噪声要求，因此，5 分裂导线方案不再参与后面的比选。

6 分裂及以上极导线方案在高海拔条件下，其电气性能、电场效应、无线电干扰和可听噪声方面均有较大优势。参与后面机械性能和经济性比选的 10 种导线组合方案的电气特性列入表 5.4-1。

表 5.4-1

导线电气特性一览表

导线型号	过负荷导线 温度 (°C)	导线表面 最大电场 强度 (kV/cm)	地面合成 场强 (kV/m) 负极性	地面 离子流 (nA/m <sup>2</sup> ) 负极性	功率 损耗 (kW/km)	电晕 损耗 (kW/km)	无线电 干扰 (dB)	可听噪声 (dB)
6×JL/G3A-900/40	66.2	19.823	-24.16	-57.78	252.98	7.22	46.09	38.04
6×LGJ-800/55	67.5	20.662	-25.60	-65.92	279.46	7.62	46.34	39.69
6×ACSR-720/50	69.3	21.288	-26.60	-71.75	313.97	8.26	46.57	40.88
7×LGJ-800/55	64.2	22.299	-27.95	-80.40	239.53	6.26	46.99	42.74
7×ACSR-720/50	65.5	19.235	-22.98	-49.04	269.12	6.78	43.64	36.59
7×LGJ-630/45	67.5	20.147	-24.67	-58.65	313.03	7.51	43.90	38.45
8×ACSR-720/50	63.0	21.376	-26.66	-70.21	235.48	5.66	44.35	40.83
8×LGJ-630/45	64.2	18.345	-20.73	-36.03	273.90	6.26	41.35	34.43
8×JL/G1A-560/40	65.7	19.439	-22.98	-48.56	304.99	6.75	41.58	36.75
8×JL/G2A-500/35	67.3	20.300	-24.56	-57.59	341.87	7.28	41.84	38.48

注：表中场强和离子流密度计算用导线高度为 18m，其余各性能导线高度取 23m，极间距离取 22m，海拔高度为 1000m。

## 5.4.2 导线机械性能比较

### (1) 导线主要机械特性参数

参与比选的各导线机械特性参数见表 5.4-2。

表 5.4-2

导线机械特性参数一览表

导线型号	导线结构铝股/ 钢丝	铝截面 $\text{mm}^2$	总截面 $\text{mm}^2$	直 径 mm	单位重量 $\text{kg/km}$	保证拉断 力 kN	弹性模量 MPa	热膨胀系数 $\times 10^{-6} \text{ } 1/\text{ } ^\circ\text{C}$	直流电阻 $(20^\circ\text{C}) \Omega/\text{km}$
JL/G3A-900/40	72×3.99/7×2.66	900.26	939.16	39.90	2790.20	193.22	60800	21.5	0.0321
LGJ-800/55	45×4.80/7×3.20	814.30	870.60	38.40	2690.00	181.925	63000	20.9	0.03547
ACSR-720/50	45×4.53/7×3.02	725.27	775.41	36.24	2397.70	162.070	63700	20.8	0.03984
LGJ-630/45	45×4.20/7×2.80	623.45	666.55	33.60	2060.00	141.265	63000	20.9	0.04633
JL/G1A-560/40	45×3.98/7×2.65	560.00	598.70	31.80	1848.20	132.202	63000	20.9	0.05160
JL/G2A-500/35	45×3.76/7×2.51	500.00	534.60	30.10	1650.20	118.038	63000	20.9	0.05780

注：保证拉断力按照计算拉断力的 95% 考虑。

## (2) 导线机械性能和荷载比较

参与比选的各导线机械性能见表 5.4-3 计算条件为 27m/s 风速、15mm 覆冰。

表 5.4-3

导线机械性能一览表

导线型号		JL/G3A-900/40	LGJ-800/55	ACSR-720/50	LGJ-630/45	JL/G1A-560/40	JL/G2A-500/35
导线结构	铝股	72×3.99	48×4.80	48×4.53	45×4.2	45×3.98	45×3.76
	钢丝	7×2.66	7×3.20	7×3.02	7×2.80	7×2.65	7×2.51
计算截面积 mm <sup>2</sup>	铝	900.26	814.30	725.27	623.45	560.00	500.00
	钢	38.90	56.30	50.14	43.10	38.70	34.60
	总	939.16	870.60	775.41	666.55	598.70	534.60
铝钢截面比	m	23.14	14.464	14.465	14.465	14.470	14.451
保证拉断力	kN	193.22	181.93	162.07	141.27	132.202	113.44
设计安全系数		2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
最大使用张力	kN	77.29	72.77	64.83	56.51	52.88	45.38
平均运行张力	kN	48.31	45.48	40.52	35.32	33.05	28.36
过载能力 (覆冰厚度 mm)	Lp=400	29	28.42	27.22	25.99	25.45	24.49
	Lp=500	27.9	27.44	26.4	25.29	24.75	23.92
	Lp=600	27.3	26.91	25.97	24.93	24.38	23.63
40℃时最大 弧垂 m	Lp=400	13.77	14.09	14.52	14.91	14.73	15.27
	Lp=500	21.17	21.69	22.39	23.06	22.83	23.71
	Lp=600	30.21	30.99	32.03	33.03	32.75	34.04

参与比选的各导线荷载情况见表 5.4-4。

表 5.4-4

导线荷载一览表

导线型号		6×JI/G3A-900/40	6×LGJ-800/55	6×ACSR-720/50	7×LGJ-800/55	7×ACSR-720/50	备注	
每千米 导线耗量	(t/km)	33.4824	32.2800	28.7724	37.6600	33.5678	两极	
	%	116.37%	112.19%	100.00%	130.89%	116.67%		
铁塔 荷载	垂 直 荷 重	无冰(单极),N	98438	94903	84591	110720	98690	
		%	116.37%	112.19%	100.00%	130.89%	116.67%	
		有冰(单极),N	180584	174804	161260	203939	188137	
		%	111.98%	108.40%	100.00%	126.47%	116.67%	
	大风时线条风荷重 (单极),N		44976	43285	40850	50500	47659	
		%	110.10%	105.96%	100.00%	123.62%	116.67%	
		纵向最大张力 (单极),N	463728	436620	388968	509390	453796	
配合耐张串导线最大张力 kN		1377	1297	1155	1513	1348		
配合耐张串		3×550kN	3×550kN	3×420kN	3×550kN	3×550kN		
		4×420kN	4×420kN	4×300kN	4×420kN	4×420kN		

续上表 5.4-4

导线荷载一览表

导线型号	7×LGJ-630/45	8×ACSR-720/50	8×LGJ-630/45	8×JL/G1A-560/40	8×JL/G2A-500/35	备注
------	--------------	---------------	--------------	-----------------	-----------------	----

每千米 导线耗量	(t/km)	28.84	38.3632	32.9600	29.5712	26.4032	两极
	%	100.23%	133.33%	114.55%	102.78	91.77%	
铁塔 荷载	无冰(单极),N	84790	112788	96902	86940	77626	$L_V = 600$
	%	100.24%	133.33%	114.55%	102.78%	91.77%	
	有冰(单极),N	169628	215013	193861	180307	167602	
	%	105.19%	133.33%	120.22%	111.81%	103.93%	
	大风时线条风荷重 (单极),N	44187	54467	50499	47794	45239	$L_H = 450$
	%	108.17%	133.33%	123.62%	117.00%	110.74%	
配合耐张串导线最大张力 kN	纵向最大张力 (单极),N	395542	518624	452048	423048	377720	
	%	101.69%	133.33%	116.22%	108.76%	97.11%	
配合耐张串	3×420kN	3×550kN	3×550kN	3×550kN	3×420kN		
	4×300kN	4×420kN	4×420kN	4×420kN	4×300kN		

---

由表 5.4-4 看出，随子导线截面的加大，其覆冰过载能力也相应增大，6 种导线均满足 15mm 及以下冰区抗过载要求；导线的弧垂特性也与导线的结构有关，当铝钢截面比加大时，其弧垂特性变差，铝钢截面比一样时，弧垂特性相差不多，JL/G3A-900/40 较优，JL/G2A-500/35 较差。总体来说，所选的 10 种导线方案均能满足工程对导线机械性能的要求。

从垂直荷重来看， $8 \times \text{ACSR}-720/50$  最大， $6 \times \text{ACSR}-720/50$  最小。

从水平荷重来看， $8 \times \text{ACSR}-720/50$  最大， $6 \times \text{ACSR}-720/50$  最小。

从纵向最大张力来看， $8 \times \text{ACSR}-720/50$  最大， $8 \times \text{JL/G2A}-500/35$  最小。

相分裂数多的小子导线组合，其荷载较相分裂数少的大子导线组合的机械荷载要小；不同极导线方案对绝缘子串强度的选择有一定影响。

最大设计张力：以  $6 \times \text{ACSR}-720/50$  为 100%，7~8 分裂小子导线方案的张力与其基本相当，而大子导线组合的为 120~136% 之间，对杆塔重量影响较大，约为 5~8%。

垂直荷载：7~8 分裂小子导线方案为大子导线的 70~92% 之间，对杆塔重量影响较大，约为 2~3%。

水平风荷载：各种子导线方案相差较大，最大达到 33%，对杆塔重量影响较大，约为 10%，对工程投资影响很大。

### 5.4.3 导线经济性比较

年费用法为财务评价方法之一，能反映工程投资的合理性、经济性。年费用比较法是将参加比较的诸多方案在计算期内的全部支出费用折算成等额年费用比较，年费用低的方案在经济上最优。年费用包含初投资年费用、年运行维护费用、电能损耗费用及资金的时间价值(即利息)。为了进一步分析各种导线的经济性，我们采用最小年费用法对 10 种导线的年费用进行了计算。

#### (1) 年费用最小法计算方法

按电力工业部(82)电计字第 44 号文《颁发“电力工程经济分析暂行条例”的通知》第 15 条经济计算—年费行最小法，计算公式为：

$$NF = Z \left[ \frac{r_0 (1 + r_0)^n}{(1 + r_0)^n - 1} \right] + u$$

式中： NF—年费用(平均分布在  $m+1$  到  $m+n$  期间的  $n$  年内)

Z—折算到第  $m$  年的总投资

$$Z = \sum_{t=1}^m Z_t (1 + r_0)^{m+1-t}$$

u—折算年运行费用

$$u = \frac{r_0 (1 + r_0)^n}{(1 + r_0)^n - 1} \left[ \sum_{t=t'}^{m+n} u_t (1 + r_0)^{m-t} + \sum_{t=m+1}^{m+n} u_t \frac{1}{(1 + r_0)^{t-m}} \right]$$

$m$ —施工年数

$n$ —经济使用年数

$t$ —从工程开工这一年起的年份

$t'$ —工程部分投产的年份

$r_0$ —电力工程投资的回收率

计算采用的边界条件为：

- 1) 经济使用年限为 25 年，施工期按两年计，前一年投资为 60%，后一年投资为 40%。
- 2) 最大负荷利用小时数小于 3000~4500 小时，故电能损失按 3000~4500 小时计算。
- 3) 设备运行维护费率为 1.4%。
- 4) 电力工程回收率按工程投资的 8%、10% 两种计。
- 5) 电价按 0.20~0.60 元/kW·h(上网电价)计。

## (2) 导线经济比较

根据以上导线本体造价、能耗等数据，参与比选的各导线组合的年费用见表 5.4-5~5.4-7。

表 5.4-5

## 本体投资、损耗、补充千瓦投资

导线结构	6×900/40	6×800/55	6×720/50	7×800/55	7×720/50	7×630/45	8×720/50	8×630/45	8×560/40	8×500/35	
本体投资(万元/km)	320	303.47	279.98	340.90	314.84	286.93	348.82	315.84	296.70	277.89	
本体投资差(万元/km)	0.00	-16.53	-40.02	20.90	-5.16	-33.07	28.82	-4.16	-23.30	-42.11	
总损耗(kW/km)	252.98	279.46	313.97	239.53	269.12	313.03	235.48	273.9	304.99	341.87	
补充千瓦投资(万元/km)	126.49	139.73	156.985	119.765	134.56	156.515	117.74	136.95	152.495	170.935	
年电能损耗 (万度/km)	3000 小时	75.89	83.84	94.19	71.86	80.74	93.91	70.64	82.17	91.5	102.6
	3500 小时	88.54	97.81	109.9	83.84	94.19	109.6	82.42	95.86	106.7	119.7
	4000 小时	101.19	111.8	125.6	95.81	107.6	125.2	94.19	109.6	122	136.7
	4500 小时	113.84	125.75	141.29	107.79	121.1	140.86	105.97	123.25	137.25	153.84

注：上表中本体投资为估算值，仅供导线选择比较参考用。

表 5.4-6 导线年费用(万元/km·年)回收率: 10%, 经济使用年限 25 年

年损耗 小时	售电价(元/度)	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
3000h	6×JL/G3A-900/40	71.10	78.42	85.74	93.07	100.39
	6×LGJ-800/55	70.73	78.78	86.83	94.88	102.92
	6×ACSR-720/50	68.15	77.16	86.17	95.18	104.18
	7×LGJ-800/55	75.85	82.72	89.59	96.45	103.32
	7×ACSR-720/50	71.50	79.19	86.87	94.56	102.25
	7×LGJ-630/45	68.41	77.30	86.20	95.10	103.99
	8×ACSR-720/50	77.00	83.69	90.39	97.08	103.78
	8×LGJ-630/45	70.87	78.62	86.37	94.12	101.87
	8×JL/G1A-560/40	69.55	78.15	86.76	95.36	103.96
	8×JL/G2A-500/35	68.90	78.51	88.11	97.72	107.33
3500h	6×JL/G3A-900/40	73.26	81.67	90.08	98.49	106.89
	6×LGJ-800/55	73.12	82.37	91.61	100.86	110.11
	6×ACSR-720/50	70.84	81.19	91.55	101.90	112.25
	7×LGJ-800/55	77.90	85.80	93.69	101.58	109.48
	7×ACSR-720/50	73.80	82.64	91.48	100.32	109.16
	7×LGJ-630/45	71.09	81.33	91.56	101.80	112.04
	8×ACSR-720/50	79.02	86.72	94.42	102.13	109.83
	8×LGJ-630/45	73.22	82.14	91.06	99.98	108.90
	8×JL/G1A-560/40	72.16	82.07	91.98	101.89	111.80
	8×JL/G2A-500/35	71.83	82.90	93.97	105.04	116.11
4000h	6×JL/G3A-900/40	75.43	84.92	94.41	103.90	113.40
	6×LGJ-800/55	75.52	85.96	96.40	106.85	117.29
	6×ACSR-720/50	73.53	85.23	96.92	108.62	120.32
	7×LGJ-800/55	79.95	88.87	97.79	106.72	115.64
	7×ACSR-720/50	76.11	86.10	96.09	106.08	116.08
	7×LGJ-630/45	73.77	85.35	96.92	108.50	120.08

年损耗 小时	售电价(元/度)	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
4500h	8×ACSR-720/50	81.03	89.74	98.46	107.17	115.88
	8×LGJ-630/45	75.56	85.66	95.75	105.84	115.94
	8×JL/G1A-560/40	74.77	85.99	97.20	108.42	119.64
	8×JL/G2A-500/35	74.75	87.29	99.82	112.35	124.88
	6×JL/G3A-900/40	77.60	88.17	98.75	109.32	119.90
	6×LGJ-800/55	77.91	89.55	101.19	112.83	124.47
	6×ACSR-720/50	76.22	89.26	102.30	115.34	128.39
	7×LGJ-800/55	82.01	91.95	101.90	111.85	121.79
	7×ACSR-720/50	78.41	89.56	100.70	111.85	122.99
	7×LGJ-630/45	76.45	89.37	102.28	115.20	128.12
	8×ACSR-720/50	83.05	92.77	102.49	112.21	121.93
	8×LGJ-630/45	77.91	89.18	100.44	111.71	122.98
	8×JL/G1A-560/40	77.38	89.91	102.43	114.95	127.47
	8×JL/G2A-500/35	77.68	91.68	105.67	119.67	133.66

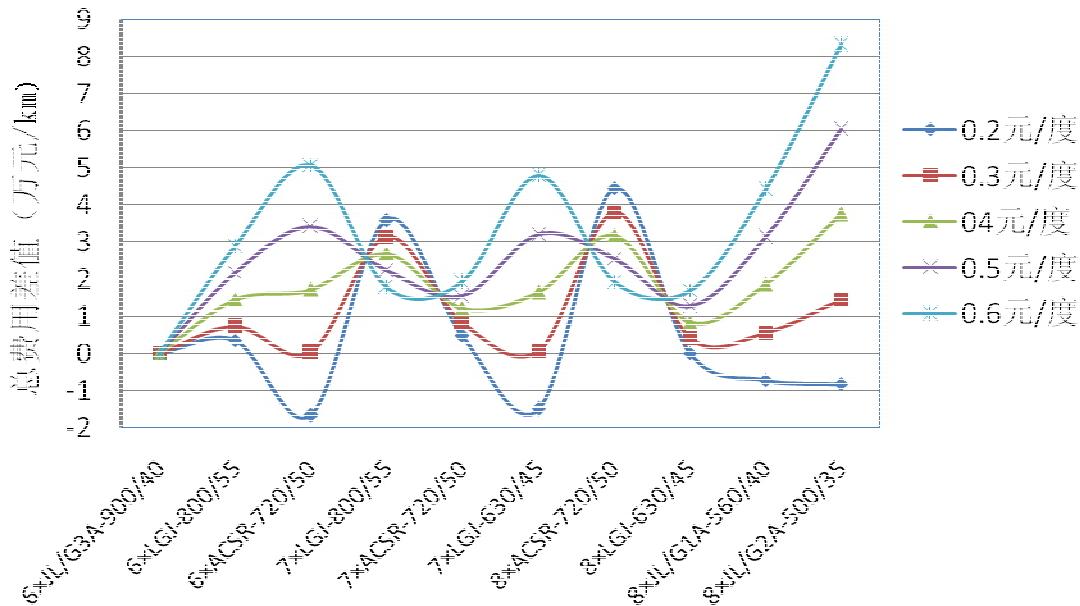
表 5.4-7 导线年费用(万元/km·年) 回收率: 8%, 经济使用年限 25 年

年损耗 小时	售电价(元/度)	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
3000h	6×JL/G3A-900/40	59.61	66.94	74.26	81.58	88.91
	6×LGJ-800/55	59.61	67.66	75.71	83.76	91.81
	6×ACSR-720/50	57.95	66.96	75.97	84.98	93.98
	7×LGJ-800/55	63.21	70.08	76.95	83.82	90.69
	7×ACSR-720/50	60.08	67.77	75.46	83.14	90.83
	7×LGJ-630/45	58.11	67.01	75.90	84.80	93.70
	8×ACSR-720/50	64.06	70.75	77.45	84.14	90.84
	8×LGJ-630/45	59.61	67.36	75.10	82.85	90.60
	8×JL/G1A-560/40	58.90	67.50	76.11	84.71	93.32

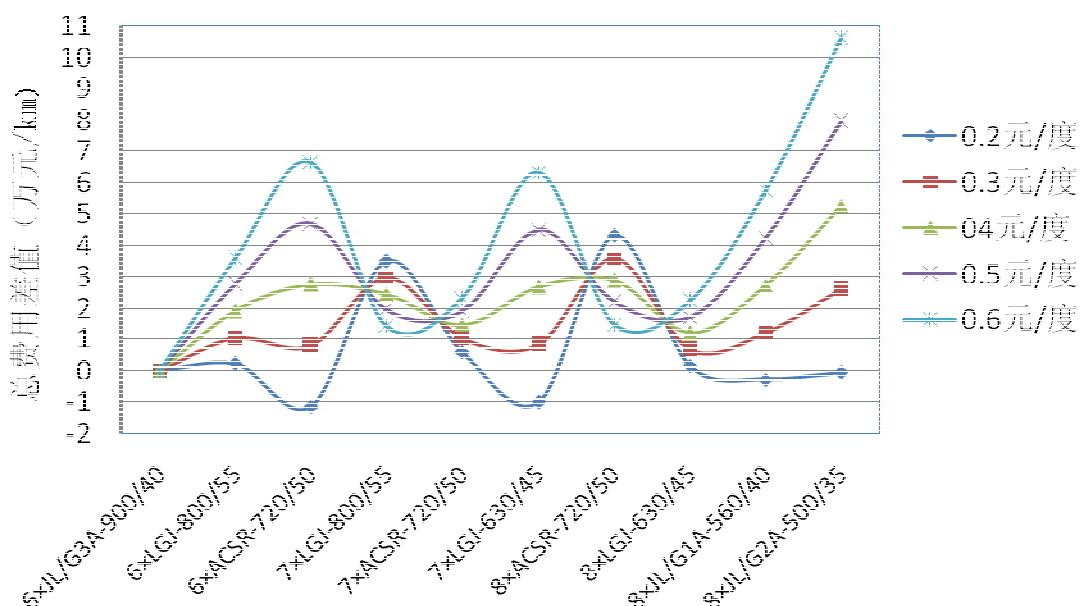
年损耗 小时	售电价(元/度)	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
3500h	8×JL/G2A-500/35	58.79	68.40	78.01	87.61	97.22
	6×JL/G3A-900/40	61.78	70.19	78.60	87.00	95.41
	6×LGJ-800/55	62.01	71.25	80.50	89.75	98.99
	6×ACSR-720/50	60.64	70.99	81.35	91.70	102.05
	7×LGJ-800/55	65.27	73.16	81.05	88.95	96.84
	7×ACSR-720/50	62.39	71.23	80.07	88.90	97.74
	7×LGJ-630/45	60.79	71.03	81.27	91.50	101.74
	8×ACSR-720/50	66.08	73.78	81.48	89.19	96.89
	8×LGJ-630/45	61.95	70.87	79.80	88.72	97.64
	8×JL/G1A-560/40	61.51	71.42	81.33	91.24	101.15
	8×JL/G2A-500/35	61.72	72.79	83.86	94.93	106.00
4000h	6×JL/G3A-900/40	63.95	73.44	82.93	92.42	101.91
	6×LGJ-800/55	64.40	74.85	85.29	95.73	106.18
	6×ACSR-720/50	63.33	75.03	86.73	98.42	110.12
	7×LGJ-800/55	67.32	76.24	85.16	94.08	103.00
	7×ACSR-720/50	64.69	74.68	84.68	94.67	104.66
	7×LGJ-630/45	63.47	75.05	86.63	98.20	109.78
	8×ACSR-720/50	68.09	76.80	85.52	94.23	102.94
	8×LGJ-630/45	64.30	74.39	84.49	94.58	104.67
	8×JL/G1A-560/40	64.12	75.34	86.56	97.77	108.99
	8×JL/G2A-500/35	64.65	77.18	89.71	102.24	114.78
4500h	6×JL/G3A-900/40	66.12	76.69	87.27	97.84	108.42
	6×LGJ-800/55	66.80	78.44	90.08	101.72	113.36
	6×ACSR-720/50	66.02	79.06	92.10	105.14	118.19
	7×LGJ-800/55	69.37	79.32	89.26	99.21	109.16
	7×ACSR-720/50	67.00	78.14	89.29	100.43	111.57
	7×LGJ-630/45	66.15	79.07	91.99	104.90	117.82

年损耗 小时	售电价(元/度)	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
8×ACSR-720/50	8×ACSR-720/50	70.11	79.83	89.55	99.27	108.99
	8×LGJ-630/45	66.64	77.91	89.18	100.44	111.71
	8×JL/G1A-560/40	66.74	79.26	91.78	104.30	116.83
	8×JL/G2A-500/35	67.57	81.57	95.56	109.56	123.55

导线方案经济比较  
年损耗小时3000h 折现率8%



导线方案经济比较  
年损耗小时3500h 折现率8%



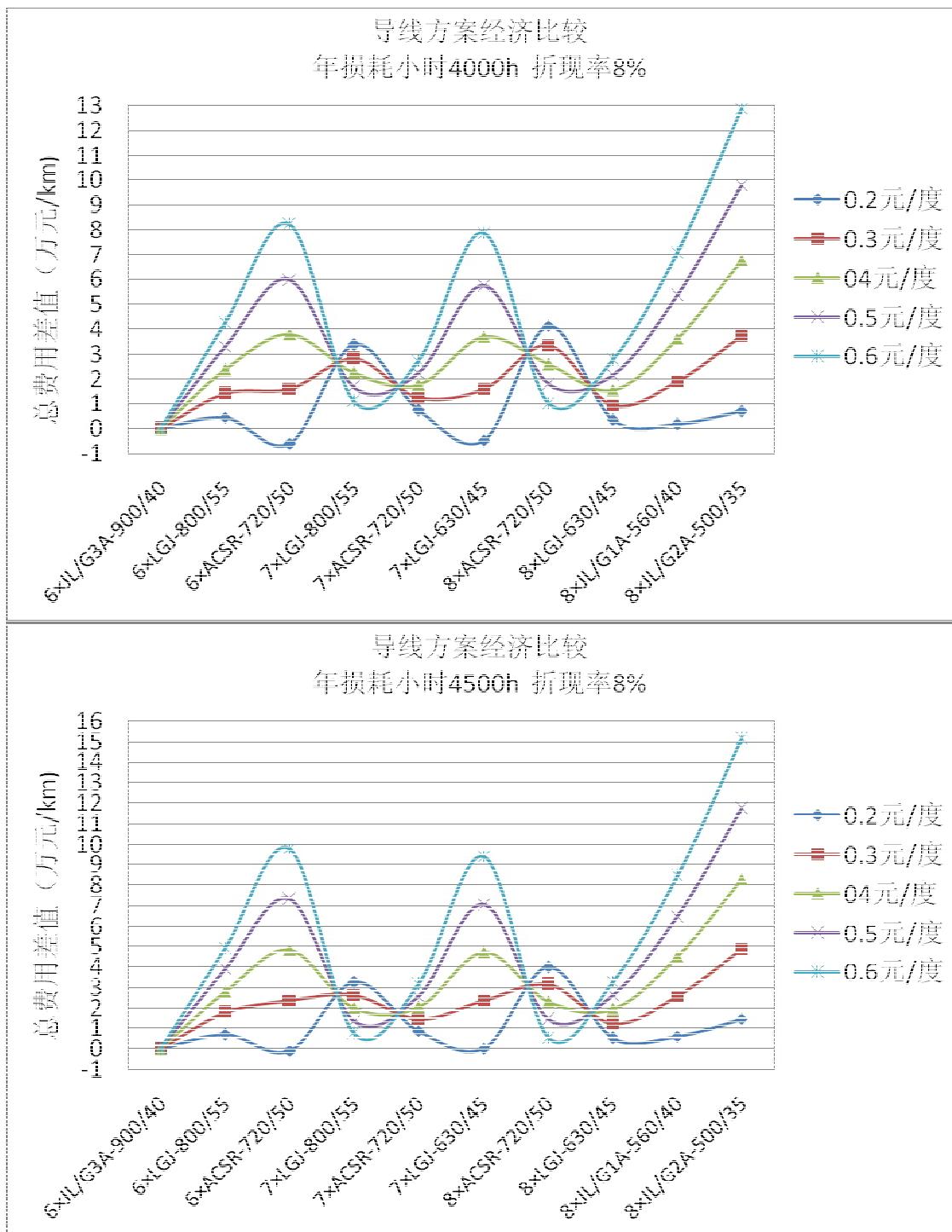
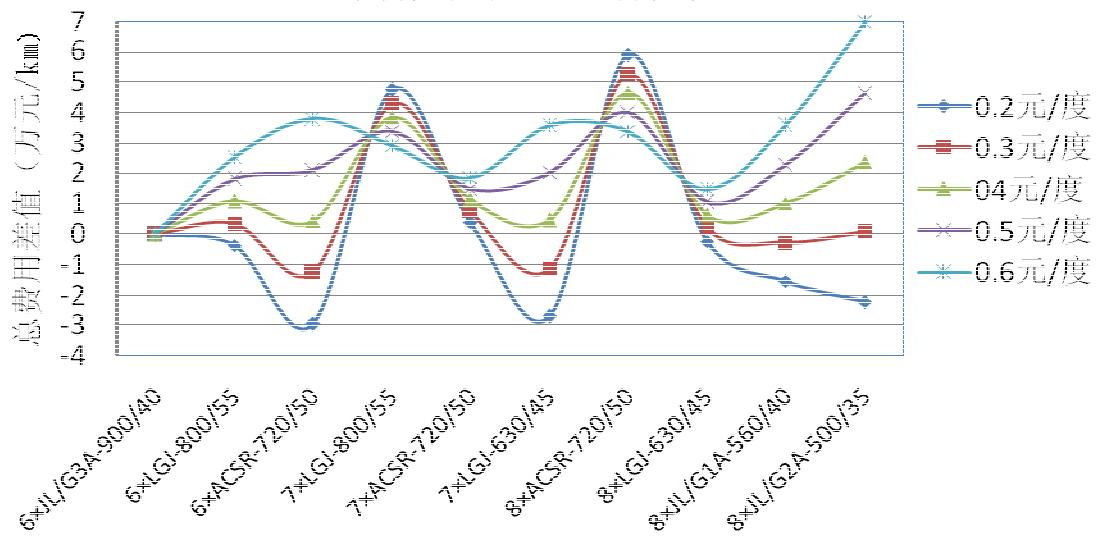
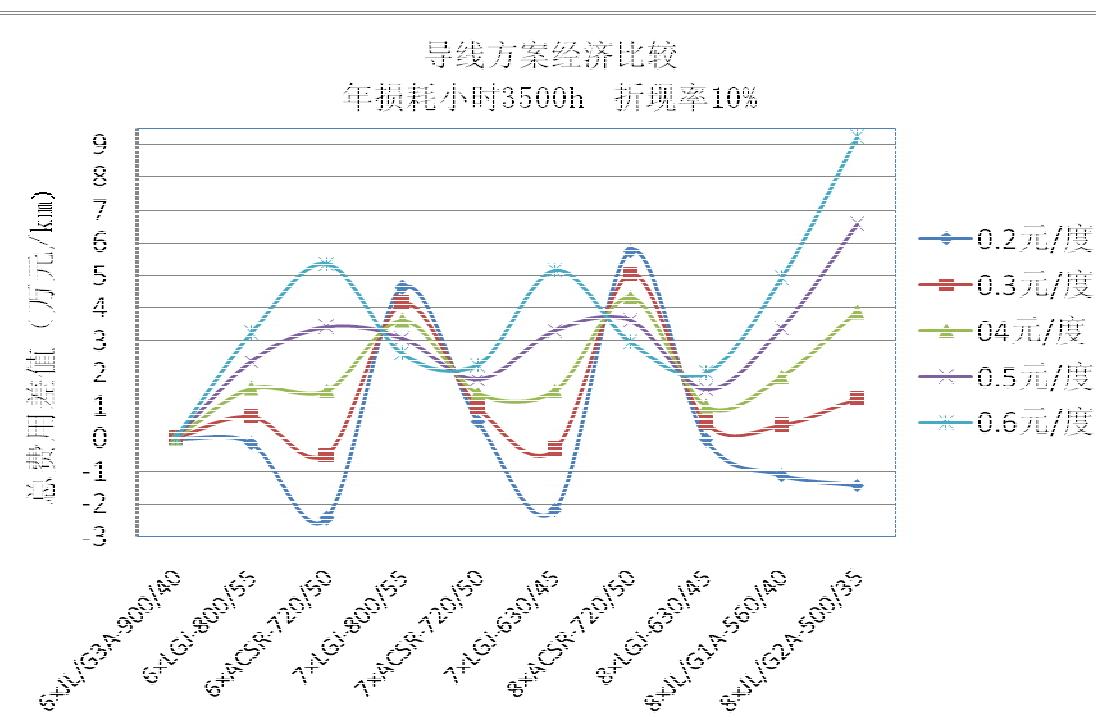


图 5.4-1 经济使用年限为 25 年不同导线方案的年运行费用差值(回收率 8%)

导线方案经济比较  
年损耗小时3000h 折现率10%



导线方案经济比较  
年损耗小时3500h 折现率10%



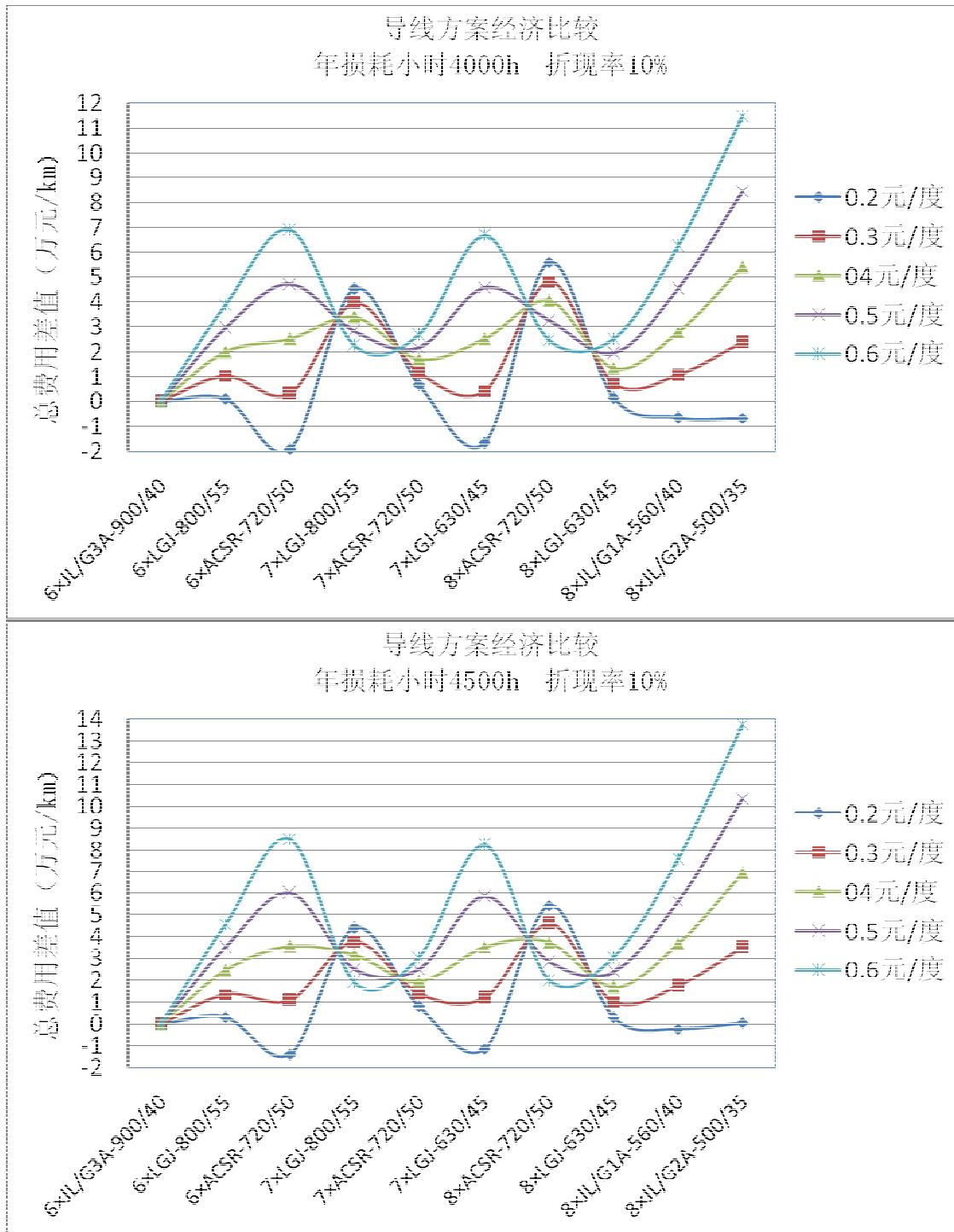


图 5.4-2 经济使用年限为 25 年不同导线方案的年运行费用差值(回收率 10%)

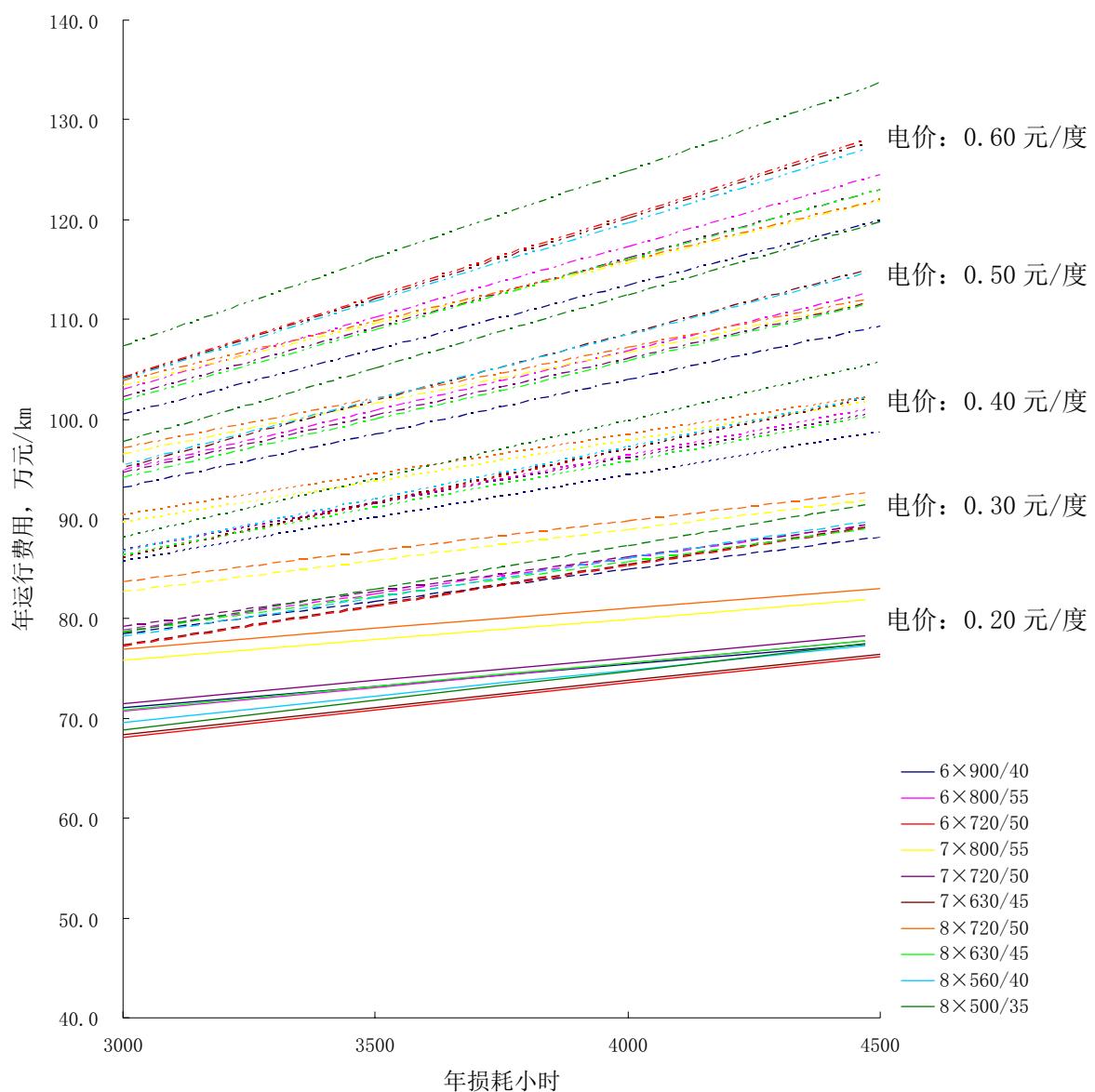


图 5.4-3 经济使用年限为 25 年不同导线方案的年运行费用(回收率 10%)

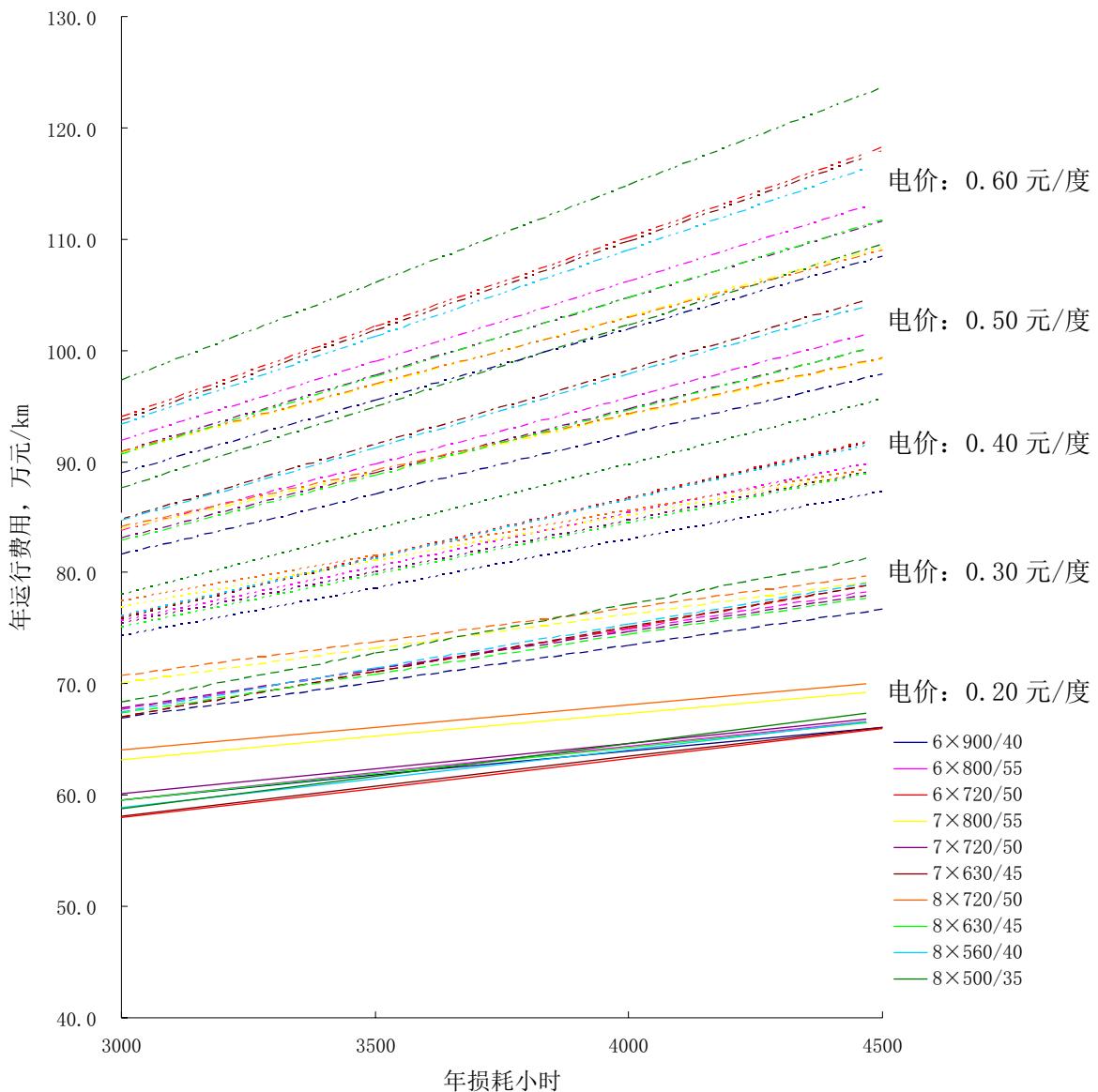


图 5.4-4 经济使用年限为 25 年不同导线方案的年运行费用(回收率 8%)

本体投资增加 10%，年运行费用增加 6%；投资的回收率由 8% 增加到 10%，年运行费用增加 8~13%；线路经济使用年限每增加 5 年，年运行费用减少 2~5%。

### (3) 各导线方案的经济性能分析

通过前述分析计算，在 16 种导线组合方案中，首先通过电气特性比较，提出可参与机械性能和经济性比较的 10 种组合方案。

从电气性能方面看，10 种比选导线均满足无线电干扰、可听噪声、地面

---

场强、离子流密度、电晕损失及可听噪声等电气限值要求，且地面合成场强、地面离子流密度、可听噪声均满足人口密集地区的限值要求。

从机械方面看，所选的导线方案均能满足工程对导线机械性能的要求。

相分裂数多的小子导线组合，其荷载较相分裂数少的大子导线组合的机械荷载要小。

电价为 0.20 元/度时， $6\times\text{ACSR}-720/50$  导线方案的年费用最优；

电价为 0.30 元/度时，年损耗小时数低于 3500， $6\times\text{ACSR}-720/50$  导线方案的年费用最优；年损耗小时数高于 3500， $6\times\text{JL/G3A-900/40}$  导线方案的年费用最优；

电价为 0.20~0.30 元/度时， $6\times\text{JL/G3A-900/40}$ 、 $8\times\text{LGJ-630/45}$  导线方案的年费用基本相等，且较优；

电价高于 0.30 元/度时，随着电价、年损耗小时数的增加，总铝截面越大，年费用渐优， $6\times\text{JL/G3A-900/40}$  导线方案的年费用最优。

在上述几种导线中， $6\times\text{JL/G3A-900/40}$  的初期投资虽然大，但年费用显出较大经济优势。主要因为几种导线的投资较为接近，而  $6\times\text{JL/G3A-900/40}$  的电能损失最小。

从以上的分析可以看出，溪洛渡-浙西特高压直流线路采用  $6\times900\text{mm}^2$  导线，技术上是可行的，经济上是合理的。

综上所述，在 15mm 及以下冰区，输送功率为 7500MW，推荐采用铝截面为  $900\text{mm}^2$  的六分裂导线。

## 5.5 钢芯的选取

目前铝截面为  $900\text{mm}^2$  且拉重比差异不大的导线主要有三种型号，分别是  $\text{JL/G3A-900/40}$ 、 $\text{JL/G2A-900/60}$  和  $\text{JL/G2A-900/75}$ ，具体参数见下表。

表 5.5-1  $\text{JL/G3A-900/40}$ 、 $\text{JL/G2A-900/60}$  和  $\text{JL/G2A-900/75}$  导线参数对比表

导线型号		$\text{JL/G3A-900/40}$	$\text{JL/G2A-900/60}$	$\text{JL/G2A-900/75}$
结 构 (根数/直径)	铝	72/3.99	45/5.05	84/3.69
	钢	7/2.66	7/3.70	7/3.69

计算截面积 (mm <sup>2</sup> )	铝	900.26	901.33	898.30
	钢	38.9	62.44	74.86
	总	939.16	963.70	973.16
外径(mm)		39.9	40.41	40.6
单位重量(kg/m)		2.7902	2.978	3.0742
导线计算拉断力(kN)		203.39	221.60	235.8
弹性模量(N/mm <sup>2</sup> )		60800	63800	65800
线膨胀系数(1/°C)		21.5E-06	20.9E-06	20.5E-06
铝钢比		23.14	14.44	12.00
拉重比(m)		7.44	7.59	7.83
20°C 直流电阻(Ω/km)		0.0321	0.03206	0.0322

900/40 结构导线铝钢比为 23.14，为特轻型导线，为满足工程使用要求，钢芯需选用特高强度镀锌钢线，900/60 和 900/75 钢芯考虑选用高强度镀锌钢线。同时从表 5.5-1 中所列三种导线参数可以看出，JL/G3A-900/40、JL/G2A-900/60 和 JL/G2A-900/75 三种导线的电气结构参数非常接近。各导线方案均满足无线电干扰、可听噪声、地面场强、离子流密度等电气限值要求。

下面对三种结构型式的导线方案在轻中冰区条件下的机械特性和杆塔荷载进行分析比较，并与 8\*LGJ-630/45 导线进行对比。

表 5.5-2 弧垂特性

导线型号		40°C 时最大弧垂 m			
		LGJ-630/45	JL/G3A-900/40	JL/G2A-900/60	JL/G2A-900/75
10mm 冰区	L <sub>p</sub> =400m	12.57	12.49	12.24	11.91
	L <sub>p</sub> =500m	19.09	18.96	18.58	18.06
	L <sub>p</sub> =600m	27.04	26.83	26.29	25.54
15mm 冰区	L <sub>p</sub> =400m	14.91	13.77	13.17	12.62
	L <sub>p</sub> =500m	23.06	21.17	20.24	19.39
	L <sub>p</sub> =600m	33.03	30.21	28.87	27.66

表 5.5-3 覆冰过载能力

导线型号		覆冰过载能力 mm			
		LGJ-630/45	JL/G3A-900/40	JL/G2A-900/60	JL/G2A-900/75
10mm 冰区	Lp=400m	21.47	26	27.75	29.06
	Lp=500m	20.48	24.7	26.26	27.36
	Lp=600m	19.85	23.9	25.34	26.3
15mm 冰区	Lp=400m	25.99	29	30.07	30.93
	Lp=500m	25.29	27.9	28.78	29.45
	Lp=600m	24.93	27.3	28.07	28.62

表 5.5-4 15mm 中冰区满足悬挂点应力条件下的最大允许高差

导线型号		LGJ-630/45	JL/G3A-900/40	JL/G2A-900/60	JL/G2A-900/75
满足悬挂点 应力条件下 的最大允许 高差 (m)	L=400m	126	125	130	135
	L=500m	140	136	147	150
	L=600m	145	138	159	162
	L=700m	144	132	165	169
	L=800m	137	118	165	170

表 5.5-5 最大覆冰情况下的导线铝部应力

导线型号		LGJ-630/45	JL/G3A-900/40	JL/G2A-900/60	JL/G2A-900/75
导线结构	铝股	45×4.2	72×3.99	45×5.05	84×3.69
	钢丝	7×2.80	7×2.66	7×3.70	7×3.69
计算截面 积 mm <sup>2</sup>	铝	623.45	900.26	901.33	898.3
	钢	43.1	38.9	62.44	74.86
	总	666.55	939.16	963.77	973.16
铝钢截面比		14.465	23.14	14.44	12
计算拉断力 kN		148.7	203.39	221.6	235.8
最大使用应力 MPa		84.77	82.30	87.37	92.08
最大覆冰 情况下的	铝部应力 (MPa)	66.79	68.37	68.76	68.43

铝部受力情况	铝部安全系数	2.39	2.34	2.33	2.34
--------	--------	------	------	------	------

表 5.5-6 15mm 中冰区杆塔荷载

导线型号		LGJ-630/45	JL/G3A-900/40	JL/G2A-900/60	JL/G2A-900/75
导线分裂数		8	6	6	6
铁塔荷载 (Lh=500m Lv=750m)	无冰垂荷 (N.相)	121210.2 100.0%	123131.3 101.6%	131418.9 108.4%	135664.2 111.9%
	有冰垂荷 (N.相)	242491.2 100.0%	225882.9 93.2%	235125.0 97.0%	239726.3 98.9%
	大风线条荷 载(N.相)	140088.7 100.0%	138109.2 98.6%	145891.8 104.1%	149853.6 107.0%
	有冰线条荷 载(N.相)	245733.6 100.0%	228251.7 92.9%	237434.9 96.6%	242004.2 98.5%
	纵向荷载 (N.相)	452048.0 100.0%	453330.0 100.3%	505248.0 111.8%	528390.0 116.9%

### (1) 弧垂特性比较

由表 5.5-2 可知，轻冰区各导线的弧垂特性比较接近。中冰区采用 900 截面导线弧垂减小的优势比较明显，均小于 LGJ-630 导线，三种结构的 900 mm<sup>2</sup> 导线弧垂特性接近，其中 JL/G2A-900/75 最优，JL/G2A-900/60 次之。

对于 15mm 中冰区，400m 档距时，采用 JL/G2A-900/75 导线铁塔高度可以比采用 LGJ-630/45 降低 2m；500m 档距时，采用 JL/G2A-900/75 导线铁塔高度可以比采用 LGJ-630/45 降低 3m；600m 档距可以降低约 5m。

### (2) 覆冰过载特性比较

由表 5.5-3 可知，900mm<sup>2</sup> 截面导线的过载能力显著强于 630 mm<sup>2</sup> 导线，三种结构的 900mm<sup>2</sup> 截面导线覆冰过载能力接近，相差 1mm 左右。

### (3) 导线允许悬点应力比较

---

由表 5.5-4 可知, JL/G2A-900/75、JL/G2A-900/60 导线在满足悬挂点允许应力情况下, 允许使用的相对高差要强于 LGJ-630/45 导线。JL/G3A-900/40 导线的适用范围将受一定限制, 特别是相对高差较大的山地不建议采用。

#### (4) 最大覆冰情况下的导线铝部应力

由表 5.5-5 可知, 三种结构的 900 导线在最大覆冰情况下, 达到最大使用张力时(安全系数 2.5), 导线铝部应力基本接近, 铝部安全系数在 2.33~2.34 之间, 满足设计使用要求。尽管 JL/G3A-900/40 铝钢截面比较大(超过 20), 但由于采用特高强度钢芯, 使得铝部分配应力增加, 与 JL/G2A-900/60 和 JL/G2A-900/75 相当。

#### (5) 对杆塔荷载的影响

由表 5.5-6 可知, 6×JL/G3A-900/40 导线的各项荷载在三种 900 截面的导线结构中均最小, 与 8×LGJ-630/45 导线相比, 垂直荷载较减小约 10%, 水平荷载减小约 2%, 纵向荷载相当。

对于 15mm 中冰区, 采用 6×JL/G3A-900/40 导线不同呼高的塔重为 8×LGJ-630/45 导线塔重的 98.75%~99.15%, 综合塔重减轻 1~2%。

## 5.6 小结

(1) 通过综合分析可以看出, 六分裂 900  $\text{mm}^2$  铝截面导线初投资较八分裂 630 $\text{mm}^2$  截面导线增加不多, 且长期运行经济性较佳, 可做为输送功率 7500MW 的首选导线方案。六分裂 900  $\text{mm}^2$  截面导线具有最小的压降和电能损耗, 八分裂 630 $\text{mm}^2$  截面导线具有更优的电场、电磁环境指标。

(2) 900 $\text{mm}^2$  铝截面导线主要可供选择的方案包括 900/40、900/60 和 900/75 三种, 从技术及经济比较看三者差异不大, 钢芯较小者适用于地形较好、荷载较轻的场合, 钢芯较大者适用于地形较差、荷载较重的场合。

(4) 综合设计、杆塔规划、导线制造、架线施工、运行维护及经济性等多方面因素, 并结合工程自然条件的实际情况, 考虑到轻冰区基本以平丘地形为主, 地形相对平缓; 中冰区及以上冰区则以山地为主, 地形起伏, 相对高差

---

大。推荐在 10mm 覆冰地段的平丘地形和一般山地采用 6×JL/G3A-900/40 导线；在 10mm 覆冰地段的高山大岭及 15mm 覆冰地段采用 6×JL/G2A-900/75 导线。这两种钢芯铝绞线已经在锦屏-苏南±800kV 特高压直流输电线路中应用，相关科研单位针对该种大截面导线及金具的生产制造和施工方法已经进行了一系列的研究，并取得了一定的成果。

---

## 参 考 文 献

- 【1】 Ministry of Water Resources and Electric Power People's Republic of China, 《GEZHOUBA - SHANGHAI ±500kV HVDC TRANSMISSION SYSTEM》, report on transmission line studies, 1984. 3
- 【2】 日本“架空送电规程”2000年
- 【3】 EPRI “Transmission Line Reference Book 345kV and Above” 1982
- 【4】 EPRI “HVDC Transmission Line Reference Book” September 1993
- 【5】 V. L Chartier 等 “Effect of High Altitude on High Voltage AC Transmission Lines Corona Phenomena” IEEE Trans. Power Delivery, Vol. PWED-2, January 1987
- 【6】 EPRI “High-Voltage Direct Current-Handbook” First/Edition
- 【7】 IEEE Corona and Field Subcommittee Report Radio Noise Working Group “A Survey of Methods for Calculating Transmission Line Conductor Surface Voltage Gradients” IEEE Trans. PAS-98 No. 6 Nov/Dec 1979.
- 【8】 Environmental Characteristics of HVDC Overhead Transmission Lines, Prof. HV electric field effects, Aleksandar R. Katancevic, Finland, 09, 2001L. A. Koshcheev, Russia, October 3, 2003
- 【9】 ±600kV 高压直流输电线路设计参考手册, 中国电力科学研究院翻译, 1983. 12
- 【10】 高压直流架空送电线路技术导则, DL/T 436-2005
- 【11】 城市区域环境噪声标准, GB3096-93
- 【12】 高压架空送电线路无线电干扰计算方法, DL/T 691-1999

- 
- 【13】 我国更高一级电压等级输电的电磁环境研究, 吴桂芳, 陆家榆, 邵方殷, 中国电力科学研究院, 2004
  - 【14】 超高压直流架空线路电晕放电与电场效应, 浙江大学, 1985. 07
  - 【15】 高压直流输电工程技术, 赵畹君, 中国电力科学研究院
  - 【16】 国家电网公司企业标准《±800kV 直流架空输电线路电磁环境控制值》Q/QLWD 001-2006