

# 电网工程部送电电气专业技术培训专题

## 专题之八 杆塔规划

2011 年 12 月

批准:

审核:

校核:

编写: 孟华伟

## 1 概述

杆塔规划既是在工程前期（可研阶段）确定工程应用的杆塔型式，绝缘子串悬挂方式，杆塔的使用条件（包括水平档距、垂直档距、 $K_v$  值、呼高等）。利用规划的结果进行工程量估算，并且在后续的施工图阶段采用此规划或修正后的杆塔规划成果进行施工图设计。

在工程设计中，杆塔重量占到工程本体投资的 40%~50%，因此杆塔规划是保证工程经济性的重要环节，一个好的杆塔规划可以大大节约工程的投资。同时，杆塔规划还要保证其在工程中的适用性，规划出来的各项使用条件应能满足工程的要求，避免出现工程设计中出现无塔可用或呼高不够等情况。另一方面，在确定杆塔规划的数量时还要考虑到加工制造及铁塔设计的工作难度及工作量，不应片面追求杆塔数量的大而全，应兼顾各方面因素而最终确定合理的杆塔规划。

## 2 杆塔规划的原则

杆塔规划在满足经济性的同时还要具备合理性，兼顾加工制造、运行维护、设计成本等多方面。

### (1) 经济性

工程中的杆塔规划应把经济性作为重要原则。理论上对每基杆塔都规划不同的使用条件时塔材耗钢量最小，投资最为节省。随着规划塔型系列的减少，耗钢量也会相应增加，而杆塔规划的任务就是寻找系列塔型减少与投资增加的平衡点。

### (2) 适用性

杆塔规划应充分考虑线路沿线自然环境、社会发展等条件，使之更适用于工程实际。不同地区都有其独特的地形地貌、气象条件、社会环境等外部因素，例如承德地区的特点就是山高林密，山体较破碎，采矿区密集且较分散。而天津地区特点是滞洪区、鱼塘较多，乡间道路纵横交错，高压电力线路较多。这些特点都是杆塔规划中应该考虑的因素，

这样规划出来的杆塔系列才能在工程实际中得到更加充分的利用。

### (3) 通用性

杆塔规划在工程整体范围内应具有广泛性和通用性。特别是在联合设计的工程中，应从工程总体的角度考虑杆塔规划。

### (4) 对类似工程的借鉴

杆塔规划应充分借鉴以往类似工程相关经验，通过对已实施工程数据进行分析，并对外部条件进行比对，对规划成果进行校验、修正。

## 3 工程概况

### 3 主要杆塔型式

#### 3.1 国内情况

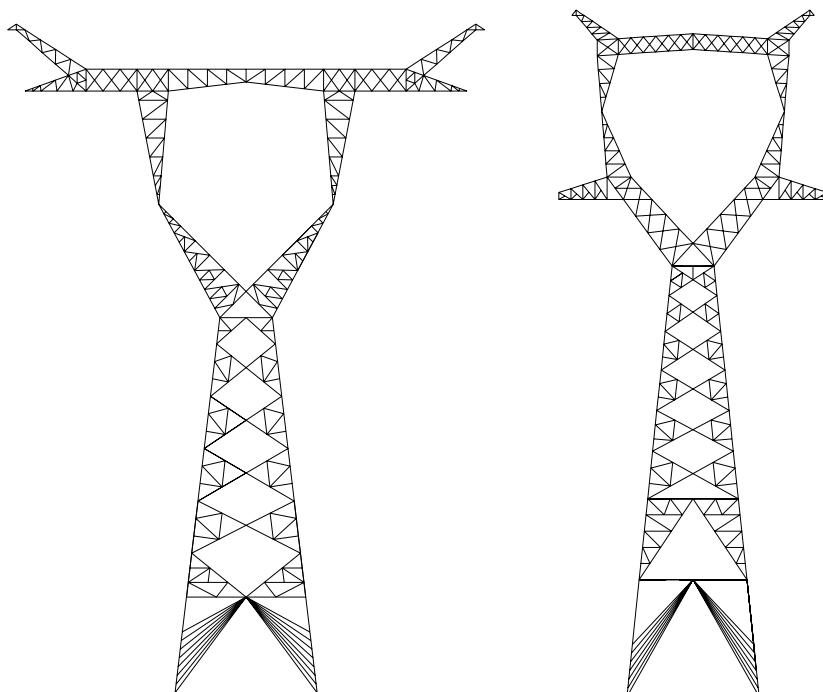
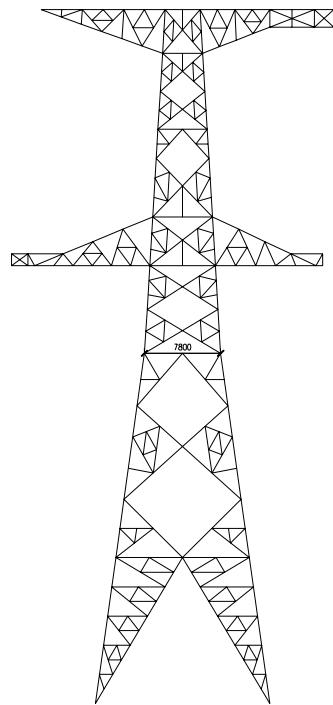


图 3.1-2 直线塔型式



耐张塔型式

图 3.1-4 酒杯型直线塔实景图



图 3.1-5 猫头型直线塔实景图

### 3.2 主要杆塔型式选择与分析

杆塔型式的选择应遵行安全可靠、经济合理的原则。同时还应贯彻全寿命周期管理理念，在考虑施工、运行、加工、社会效益等方面的基本原则。

础上，在工程全寿命周期中做到综合效益最优。

塔型选择应在考虑工程造价、房屋拆迁、林木砍伐、电磁环境、防雷性能等因素的基础上确定本工程杆塔型式。

在确定杆塔型式后还需对电磁环境指标进行校验，电磁环境限值取值如下：

(1) 在距线路边相导线投影外 20m 处，湿导线的可听噪声限值为 55dB(A)。

(2) 在距离边相导线地面投影外侧 20m，对地 2m 高度处，在好天气下频率为 0.5MHz 时无线电干扰限值不大于 55dB(uV/m)。

(3) 跨越农田距地面 1.5m 处场强不大于 10kV/m.

(4) 房屋所在位置离地 1.5m 处最大未畸变场强不大于 4kV/m。

### 3.2.1 同塔双回路

国内外同塔双回路铁塔，除大跨越塔为了降低塔高，采用双层横担三角排列布置外，一般线路多采用三层导线横担垂直排列的伞或鼓形塔型。三角排列铁塔线路导线横担较长，但因高度较低，有效的减少了上层导线的风荷载，因此塔重较轻，适用于铁塔较高、档距大，拆迁量少的地区。采用三相导线垂直排列的方式，可以有效地减少线路走廊宽度。

### 3.2.2 单回路

特高压单回直线塔导线布置形式一般分水平排列酒杯型和三角排列猫头型两种，导线悬垂串布置可分为 IVI 型和 3V 型，水平排列 IVI 和 3V 型塔型式详见图 2-1。

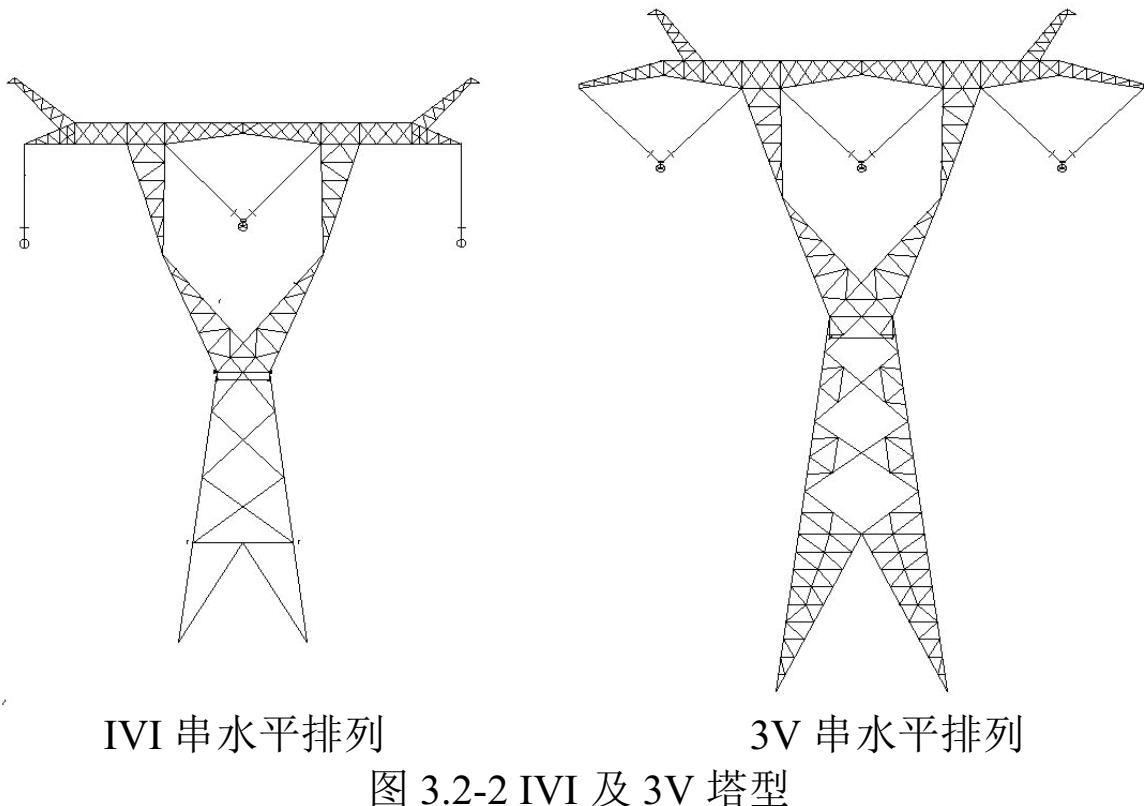


图 3.2-2 IVI 及 3V 塔型

## 4 杆塔规划方法及杆塔排位优化

### 4.1 杆塔规划方法

最初的 500kV 线路杆塔规划方法是对已有工程的杆塔使用情况进行统计分析，并在统计分析基础上进行系列规划，其结果必然与统计分析所采用的样本有关。

近些年来，国内 750kV 及以下电压等级的线路设计通常采用卫片、航片截取断面并采用动态规划的数学方法进行杆塔无约束条件的优化排位，继而进行杆塔系列规划的方法，取得了良好的使用效果，形成了成熟的杆塔规划设计方法。鉴于特高压线路电压等级高，国内外没有成熟的同塔双回路设计运行经验可以借鉴，单公里投资大，且杆塔费用所占工程总投资比例较高的特点。必须借鉴以往的设计方法，并针对特高压同塔双回输电线路铁塔的特点开展杆塔规划，确保工程建设的合理性和经济性。

本报告将根据本工程的现场勘查、卫片选线等情况，在所截取的断面上采用动态规划的数学方法进行杆塔无约束条件的优化排位，优化排位的目标为在满足技术要求的条件下使工程造价最低。然后在同样的目标条件下对优化排位结果利用黄金分割的数学方法进行杆塔的水平荷载、垂直荷载、塔高、线路转角及塔头间隙等的规划。该规划可根据要求来完成一塔、两塔、三塔、四塔、五塔、六塔系列等方案的规划，系列塔型方案越多，综合造价越低。但当塔型方案越多时，塔重及综合造价相差越来越少。由此可确定出规划塔型的方案数。再根据选取方案中与水平档距相对应的各塔的摇摆角系数、垂直档距、高差系数、转角角度等的使用情况确定出杆塔的使用条件。

#### 4. 1. 1 杆塔塔重指标评价

在杆塔无约束条件的优化排位过程中，随时需要调用杆塔费用指标（或杆塔塔重指标）及基础施工费用等。通常杆塔的塔重与其使用的水平荷载、垂直荷载、纵向荷载和杆塔高度有关，即可按下式表示：

$$Fc = f(f_h, f_v, f_t, h) \dots \dots \dots \dots \quad (4-1)$$

其中：

$f_c$  — 表示塔重指标；

$f_k$  — 表示水平荷载；

$f_v$  — 表示垂直荷载；

$f_t$  — 表示纵向荷载；

$h$  — 表示杆塔高度。

从上式的函数可确定任何一个参数变化对塔重的影响。

计算杆塔塔重有多种方法。比如塔重数据库法、统计分析法等。本章详细介绍塔重数据库法。

杆塔塔重数据库法，即是将不同外荷载的塔重分别计算出来，建立

相应的杆塔塔重数据库。利用该方法计算出杆塔的塔重比较准确。建立塔重数据库有两种方法，一种是采用内力分析软件计算，另一种采用公式计算。

采用内力分析软件计算比较准确，但输入数据量繁杂，计算时间长。采用公式计算输入数据量少，计算速度快，计算准确度也较高。本工程推荐采用公式计算法。

关于线路杆塔塔重的计算研究，国外曾做了大量工作，国外研究结果发现塔重梯度与铁塔高度和其上可能的作用荷载变化值有关，在大多数情况下力矩公式是最容易实现的一种方法，通过对 500kV 及 750kV 单双回路等多个施工图样本(涵盖 400/35、400/50、630/45、720/50 四种导线，4 分裂和 6 分裂两种分裂型式，30m/s、32m/s、35m/s 三种气象区，呼称高范围 30~60m)的统计分析，按照力矩计算方法对公式 3-1-2 式进行反复适配，综合考虑长短腿设计、OPGW 开断、起算高度、塔身风荷载、覆冰厚度、转角度数、主材角钢断面型式和导线分裂数的影响，得出设计荷载与塔重的关系式：

$$Fc_{\text{单}} = K_0 K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 K_8 \left(1.44 + \frac{L_a}{125}\right) H \left(T^{\frac{2}{3}} + V^{\frac{1}{2}} + L^{\frac{2}{3}}\right) \quad (4-2)$$

上式中：

T — 导、地线水平荷载水平风荷载总和， $T = \sum t$ ，轻冰区取大风工况，重冰区取覆冰工况；

V — 导、地线垂直荷载总和；

L — 导、地线不平衡张力总和，直线塔取 0，耐张转角塔取大风工况；

$La$  — 横担最大长度(以杆塔中心起算)；

H — 水平荷载影响高度， $H = \frac{\sum ht}{\sum t}$ ；

$t$  — 导线、地线水平荷载, 轻冰区取大风工况, 重冰区取覆冰工况;

$h$  — 导、地线水平荷载水平风荷载作用点高度(以地面起算);

$K_0$  — 比例系数,  $K_0 = e^{-0.8675}$ ;

$K_1$  — 长短腿设计影响系数;

$K_2$  — OPGW 开断影响系数;

$K_3$  — 起算高度影响系数,  $K_3 = \left( \frac{h_{\text{起算呼高}}}{h_{\text{呼称高}}} \right)^{0.1}$ ;

$K_4$  — 塔身风荷载影响系数, 当设计风速  $30 < V \leq 32 \text{m/s}$ ,  $K_4 = \left( \frac{30}{V} \right)^{0.8}$ ;

当设计风速  $V \leq 30 \text{m/s}$  或  $V > 32 \text{m/s}$ ,  $K_4 = \left( \frac{V}{30} \right)^{0.8}$ ;

$K_5$  — 覆冰厚度影响系数;

$K_6$  — 转角度数影响系数, 以  $20^\circ$  为基础转角度数影响系数

$K_6 = \left( \frac{\theta}{20} \right)^{0.2}$ ;

$K_7$  — 主材角钢断面型式影响系数, 主材角钢断面型式为双角钢时

$K_7 = 1.1$ ;

$K_8$  — 导线分裂数影响系数, 对单回路杆塔导线分裂数影响系数  $K_8$

可以 4 分裂为基准取  $\left( \frac{n}{4} \right)^{0.29}$ , 对双回路杆塔  $K_8 = 1.0$ 。

#### 4.1.2 沿线综合指标评价

为能准确地分析、评价线路的综合费用对杆塔规划的影响, 根据不同的地形、地质条件、塔位占地、土石方量、基础工程量等工程量进行综合分析, 按照不同的地形、地质及交通条件给出沿线每基塔的基础施工的综合费用。

### 4.2 杆塔的排位优化

杆塔排位优化采用动态规划的方法, 确定出给定路径上的最优排位

方案。基本数学公式如下：

$$C_{\min}(NB, HB_1 / NI, HI_1) = \text{Min}[C_{\min}(NI, HI_1 / NA, HA_1) + C(HB_1) + D(NB, HB_1)] \quad (4-3)$$

其中：

$C_{\min}(NB, HB_1 / NI, HI_1)$  — 从起点通过( $NI, HI_1$ )到达 $NB$ 点并在 $NB$ 点设立塔高为 $HB_1$ 塔的最小费用；

$C_{\min}(NI, HI_1 / NA, HA_1)$  — 从起点通过( $NA, HA_1$ )到达 $NI$ 点并在 $NI$ 点设立塔高为 $HI_1$ 的最小费用；

$$1 \leq \dots < a < i < b < \dots \leq n$$

$C(HB_1)$  — 杆塔 $HB_1$ 的费用；

$$C(HB) = FC \cdot CCOSTt \quad (4-4)$$

$FC$  — 杆塔重量；

$CCOSTt$  — 杆塔每吨价格；

$D(NB, HB_1)$  — 在 $Nb$ 点采用塔高为 $Hb_1$ 的杆塔时的绝缘子串及基础等的费用；

$$A=1, 2, 3 \dots n-1, a_i=1, 2, 3 \dots q$$

$$B=1, 2, 3 \dots n, b_i=1, 2, 3 \dots q$$

$$I=1, 2, 3 \dots p, i_i=1, 2, 3 \dots q$$

$n$  — 断面上可立塔点总数；

$q$  — 每个定位点可供选用的杆塔的数量(不同塔高视不同塔)；

$p$  —  $Nb$ 点所用的塔从其最小允许档距到最大允许档距间的立塔点的数量。

## 5 杆塔荷载、摇摆角系数及角度系列规划

### 5.1 杆塔荷载系列规划

杆塔系列规划包括直线杆塔系列规划及耐张转角塔系列规划。

在无约束条件下排位优化后得到该路径上的最佳排位方案，但这些塔是在无约束条件下得出的，各塔的水平档距、垂直档距、纵向张力是按各自的塔的使用情况得出的(相当于逐塔设计)，杆塔的设计、加工将极为复杂，也无太大意义，因此，在工程中必须进行杆塔的系列规划。

直线塔杆塔规划包括杆塔的水平荷载、垂直荷载和塔高等规划。如前所述，外负荷对塔重的影响中，水平荷载起主要作用。因此，对荷载的规划以水平荷载为主进行。

假设优化排位的结果中直线塔最小水平档距为  $LH_a$ ，最大水平档距为  $LH_b$ ，则

$$LH_a < LH_1 < LH_2 < \dots < LH_b$$

假设直线塔规划为  $m$  塔系列，则

$$P_{c\min} = \text{Min}[(N_m - N_{m-1})C_m + (N_{m-1} - N_{m-2})C_{m-1} + \dots + (N_1 - N_0)C_1] \quad (5-1)$$

即：

$$P_{c\min} = \text{Min} \left[ \sum_{k=1}^m (N_k - N_{k-1})C_k \right] \dots \dots \dots \quad (5-2)$$

$P_{c\min}$  — 最小综合造价；

$k=1, 2, 3, \dots, m$ ；

$N_k$  — 水平档距小于  $LH_k$  的杆塔的总基数；

$C_k$  — 水平档距为  $LH_k$  的一基杆塔造价。可由公式计算得出，或由杆塔造价数据库中查出；

$M$  — 规划系列塔的塔型数；

$LH_m=LH_b$ 。

$LH_1, \dots, LH_m$  为所规划的最优水平档距系列，再对相应分组的垂直档距较大或较小的部分杆塔进行调整，即得到最优直线塔的系列规划。所规划出的水平档距、垂直档距即为在该地形情况下，采用  $m$  塔系列时，

最为经济的杆塔使用条件(水平档距、垂直档距)，亦称经济档距。

耐张转角塔塔重主要取决于角度荷载，耐张转角塔系列可根据工程的具体转角情况结合水平档距、垂直档距及塔高等进行规划，从而得到最佳杆塔系列规划。

为提高杆塔规划计算速度，我们采取了黄金分割的数学方法。黄金分割的基本方法是：

1) 取  $t=0.618$ ，第一次在荷载区间  $[a_1, a_2]$  上取两个荷载试点  $a_3$  和  $a_4$ ，令：

$$a_3=a_2-t(a_2-a_1)$$

$$a_4=a_1+t(a_2-a_1)$$

2) 计算  $a_3$ ,  $a_4$  两个荷载试点杆塔总费用  $f(a_3)$ ,  $f(a_4)$ ，并令：

$$f_3=f(a_3); f_4=f(a_4);$$

如果  $f_3 \leq f_4$ ，令

$$a_2=a_4; a_4=a_3; f_4=f_3;$$

$$a_3=a_2-t(a_2-a_1); f_3=f(a_3);$$

否则令：

$$a_1=a_3; a_3=a_4; f_3=f_4;$$

$$a_4=a_1+t(a_2-a_1); f_4=f(a_4)。$$

3) 重复第二步骤，直到  $|f_3-f_4|$  与  $|a_3-a_4|$  满足精度要求。此时的  $f_3$ (或  $f_4$ ) 为最低的杆塔总费用， $a_3$ (或  $a_4$ ) 为最优荷载点。

## 5.2 摆摆角系数 kV 及揆摆角角度系列规划

杆塔塔头规划是杆塔规划的重要组成部分。为了确定各种塔型杆塔塔头尺寸，需要考虑在工作电压、操作过电压、带电作业等气象条件下的绝缘子串的揆摆角角度。根据杆塔规划的结果进行分析，选取合适的揆摆角系数  $kV$ ，然后由所选取的揆摆角系数  $kV$  计算不同工况下的揆摆角角度，把该揆摆角角度作为设计直线塔塔头尺寸的控制角度。设计采

用的摇摆角计算公式如下：

$$\phi = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{P_j / 2 + pLh}{G_j / 2 + WLv} \right) \dots \dots \dots \quad (5-3)$$

$$\phi = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{P_j / 2 + pLh}{G_j / 2 + WLh + \alpha T} \right) \dots \dots \dots \quad (5-4)$$

$$\phi = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{P_j / 2 + pLh}{G_j / 2 + WLhKv} \right) \dots \dots \dots \quad (5-5)$$

式中：

$P$  — 每相导线单位长度风荷载 (N/m)；

$Lh$  — 水平档距 (m)；

$Lv$  — 垂直档距 (m)；

$T$  — 每相导线张力 (N)；

$W$  — 每相导线单位自重 (N/m)；

$\alpha$  — 相邻两塔悬挂点高差系数；

$P_j$  — 绝缘子串的风压 (N)；

$G_j$  — 绝缘子串的重量 (N)；

$Kv$  — 摆摆角系数。

为了选择好  $\phi$  值，必须对  $Lv/Lh$ 、 $\alpha$ 、 $Lh$  及  $T$  等参数进行合理选择。

分析公式 (5-3)、(5-4) 和 (5-5) 可以看出， $P_j/2Lh$  与  $P$  值相比是很小的，而  $P$  值在气象条件一定的情况下是定值，因此  $\phi$  值的大小取决于分母。一般来讲， $Lv/Lh$  即揆摆角系数  $kV$  越小， $\phi$  值越大。

在工程设计中，揆摆角系数  $kV$  非常直观地反应了杆塔揆摆角情况，直线杆塔的揆摆角系数  $kV$  对塔头规划有直接的影响。因此在杆塔规划时，应确定揆摆角系数  $kV$ 。一般来讲，在山区和大山区揆摆角系数  $kV$  较小，而在丘陵和平地地区揆摆角系数  $kV$  较大。因此，在杆塔规划中应确定揆摆角系数  $kV$  系列方案。



表 6-1 塔高和档距与每公里工程总费用关系表

序号	档距	杆塔呼称高	单基塔估算	单基混凝土量	单基土方量	单基绝缘子串用量	铁塔基数	塔重(吨)	总混凝土土量	总铁塔费用(万元)	总土方费用(万元)	混凝土费用(万元)	附件费用(万元)	其它费用(万元)	总费用(万元)
		(m)	(吨)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(串)			(m <sup>3</sup> )	(万元)	(万元)	(万元)	(万元)	(万元)	
1	390	45	135	125	794	1×420	2.56	346.2	320.5	346.2	8.1	44.8	32.7	63.3	495.0
2	426	48	139.3	125	794	1×420	2.35	327.0	293.4	327.0	7.5	41.1	28.4	61.3	465.3
3	472	51	144.6	140	966	2×300	2.12	306.4	296.6	306.4	8.2	41.6	26.4	58.7	441.2
4	517	54	147.3	140	966	2×300	1.95	287.1	272.9	287.1	7.5	38.2	24.8	59.3	417.0
5	553	57	153.8	155	1120	2×300	1.81	278.1	280.3	278.1	8.1	39.3	28.7	63.1	417.3
6	588	60	161.3	165	1245	2×300	1.7	274.3	280.6	274.3	8.5	39.3	29.3	66.4	417.7
7	623	63	168.5	180	1436	2×420	1.61	264.9	288.9	264.9	9.2	40.6	33.6	69.8	418.0
8	660	66	175.9	180	1436	2×420	1.52	261.2	272.7	261.2	8.7	38.3	34.3	75.7	418.2

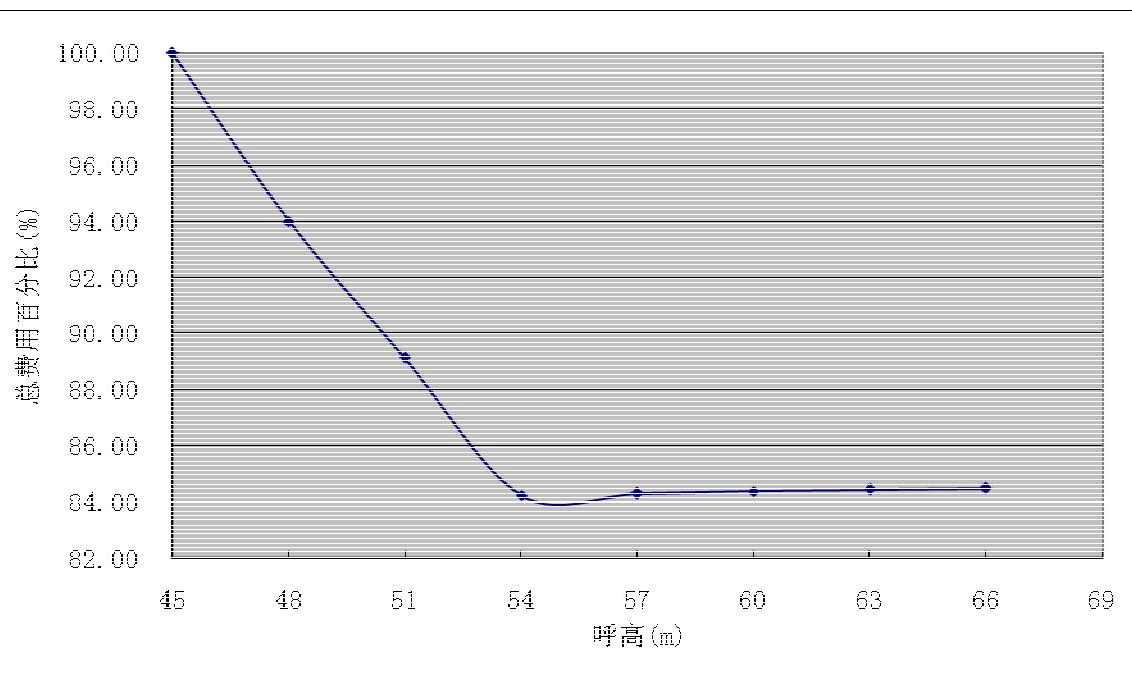


图 6-1 塔高与工程总费用关系图

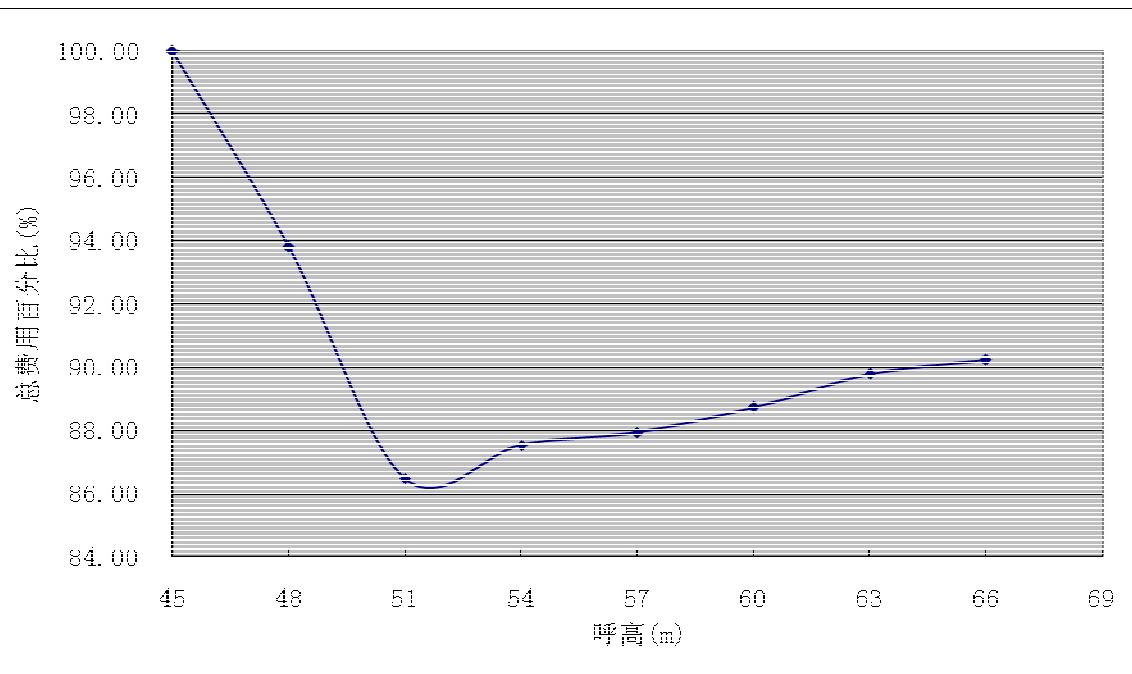


图 6-2 塔高与工程总费用关系图

## 7 杆塔规划过程

### 7.1 主要技术条件

影响杆塔规划的主要技术条件包括导线、地线、绝缘配合、对地距离

和交叉跨越要求，同时还应包括林木自然生长高度等。

## 7.2 杆塔规划

### 7.2.1 区段划分

区段划分的原则为：

1. 对杆塔使用及杆塔重量产生影响的因素均应进行考虑。包括塔型、地形、气象、海拔、污区划分（绝缘配置）。区段划分应给出不同区段的路径长度。
2. 在新制杆塔的工程中为减少杆塔计算的工作和加工制造的难度，对于对杆塔重量或对工程投资影响较小的区段或塔型可进行合并，如
  - a. 风速对耐张塔重影响较小，不同风区耐张塔可合并。
  - b. 某 27m/s 风区段长度很短，可采用 28m/s 风区段铁塔代用或折水平减档使用。
  - c. 27m/s 风区的 III 型塔采用 28m/s 风区的 II 型塔进行代用。

对于区段或杆塔合并使用的情况，必要时应进行技术经济比较。

表 7.2-1 区段情况

区段	地形	气象 (风速 m/s 覆冰 mm)	海拔 (m)	路径长度 (km)
一	平丘	30/10	1000–1500	18.8
二	山地	30/10	1500–1800	18
三	山地	29/10	1000–1500	54.5

### 6.2.2 规划分类及断面的选取

杆塔规划需在选取的断面上进行无约束排位，排位时根据经济性最优的原则选取杆塔位置，最后通过对排位数据的分析确定杆塔规划条件。在此过程中排位断面选择尤为重要，首先断面必须能反映出工程实际情况，具备一定的代表性，其次选取的断面应足够长，以减小数据分析过

程中的分散性。

从杆塔规划的角度来说，地形对其结果影响较大。一般情况下，平地段杆塔使用条件主要受转角数量、交叉跨越数量、林区分布等外部因素的影响。而山区受地形影响较大，塔位基本位于山顶部位或接近于山顶位置，因此档距与山体形状及走向有很大的关系。一般情况下山区直线塔的水平档距使用范围较大，因此系列杆塔多于平地。

杆塔规划使用条件包括水平档距、垂直档距、直线塔 Kv 值、转角度数、基准呼高等。

### 7.2.3 排位情况分析

#### 7.2.3.1 水平档距的规划

根据排位情况，水平档距分布及累积概率如图 6.2-1 所示：

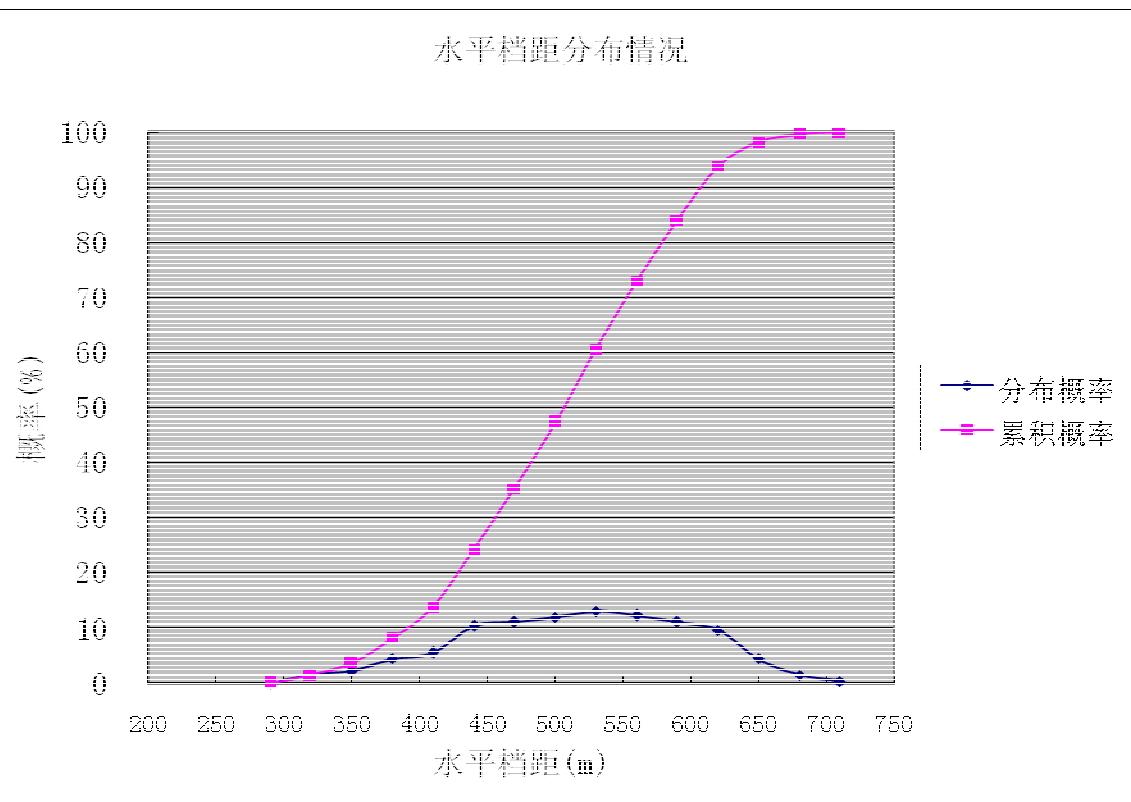


图 7.2-1

可以看出，水平档距集中在 450m-610m 之间且分布较均匀，其中经济档距 520m 左右处稍高。可考虑在档距密集区减少系列塔型水平档距级

差，使更多的塔型集中在使用频率较高的区段。

我们利用杆塔规划的方法对直线塔一塔、两塔、三塔、四塔、五塔、六、七塔系列方案的水平档距进行了规划，规划的结果列于表 7.2-3。同时列出了各系列方案的杆塔使用数量、水平档距利用系数、杆塔重量及综合费用比例情况。

表 7.2-3 各系列方案的水平档距值、杆塔使用数量、  
水平档距利用系数、杆塔重量及综合费用比例

塔型	水平档距 (m)	杆塔使用 数量比例 (%)	水平档距 利用系数 (%)	水平档距 综合利用系数 (%)	杆塔重量 (%)	综合费用 (%)
一塔方案	690	100	77.9	77.9	100	100
两塔方案	530	61.2	86.4	87.1	89.5	91.5
	690	38.8	88.2			
三塔方案	470	35.2	86.5	89.9	84.3	87.4
	560	36.8	90.1			
	690	30.0	87.8			
四塔方案	460	28.1	88.9	91.6	80.5	85.3
	540	39.2	93.3			
	600	24.1	93.1			
	690	8.6	88.6			
五塔方案	450	26.8	89.1	93.0	78.3	84.5
	510	21.9	95.6			
	560	22.4	95.9			
	610	22.3	93.6			
	690	6.6	88.2			
六塔方案	430	17.6	90.5	93.2	77.6	84.2
	470	18.7	92.2			
	520	19.6	96.3			
	580	23.1	95.4			

塔型	水平档距 (m)	杆塔使用 数量比例 (%)	水平档距 利用系数 (%)	水平档距 综合利用系数 (%)	杆塔重量 (%)	综合费用 (%)
	640	18.9	90.7			
	690	2.1	86.2			

从综合费用来看，两塔方案较一塔方案的综合费用低 8.5%，三塔方案较两塔方案的综合费用低 4.1%，四塔方案较三塔方案的综合费用低 2.1%，五塔方案较四塔方案的综合费用低 0.8%，六塔方案较五塔方案的综合费用低 0.3%。由此可见，规划的杆塔方案数越多，综合费用越低。但规划的杆塔方案数越多，相邻两方案综合费用相差得越少。经过比较，推荐采用五塔方案。

为降低工程造价，满足工程需要，根据现场实测跨越物断面进行排位设计一种跨越塔，确定跨越塔水平档距如表 7.2-4 所示。

表 7.2-4 规划水平档距使用范围

塔型	水平档距 (m)
I	450
II	510
III	560
IV	610
V	690
跨越塔	500

### 7.2.3.2 垂直档距的分析规划

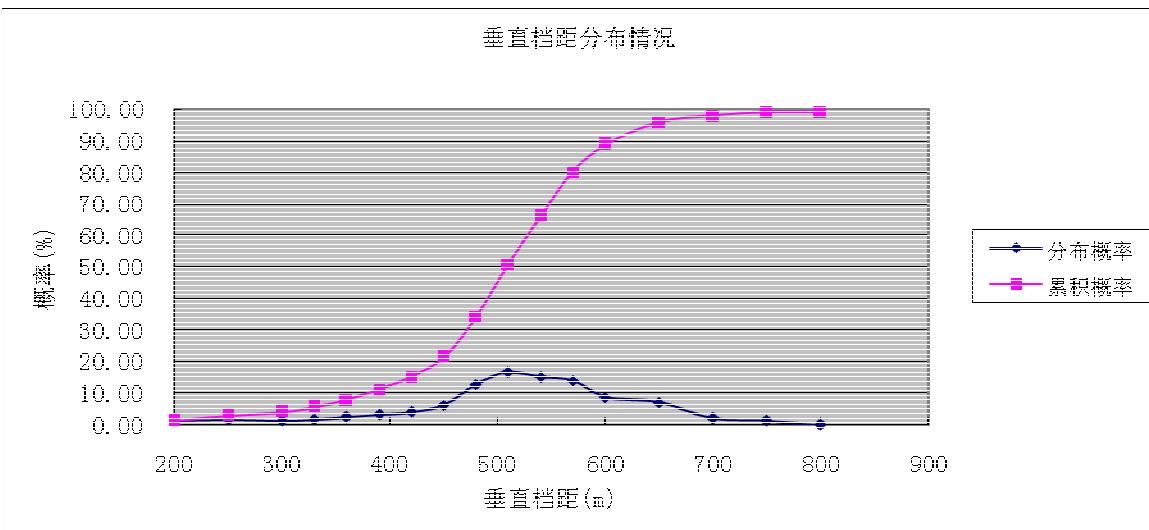


图 7.2-2 垂直档距分布情况

本段垂直档距分布如上图所示。与水平档距分布规律相似，垂直档距也主要集中在一区段，范围是 500m~670m 左右。这也与工程经验基本相附，即平地段垂直档距为水平档距的 1.1~1.25 倍左右。根据排位结果及与水平档距的对应关系，规划直线塔方案所对应的垂直档距见表 7.2-5。

表 7.2-5 规划的垂直档距使用范围

塔型	垂直档距 (m)
I	500
II	590
III	670
IV	750
V	860
跨越塔	700

### 7.2.3.3 塔高的分析规划

直线塔塔高分布概率见图 7.2-3：

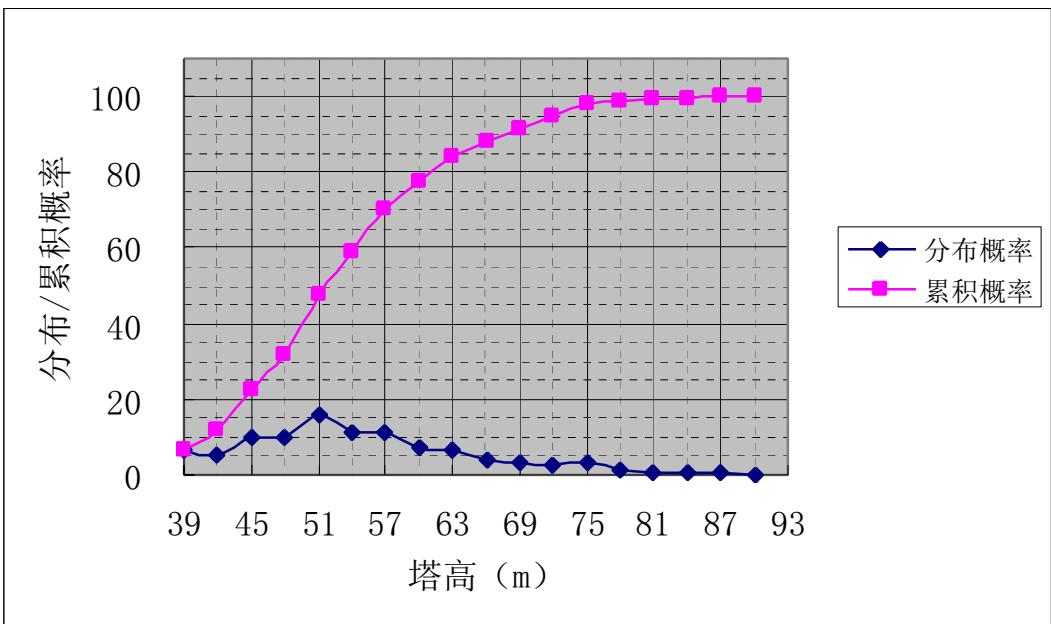


图 7.2-3 直线塔塔高分布概率

可以看出，塔高主要集中在 48m~63m 之间。根据塔高的分布规律考虑与水平档距对应关系，可以归纳本段工程直线塔塔高见表 7.2-7。根据工程技术条件对其中 I、II 型塔及跨越塔呼高进行校验，I 型塔按档距 450m 计算，对地距离（及裕度）+高温弧垂+悬垂串长为  $22+15.86+12=49.86\text{m}$ 。II 型塔按档距 510m 计算，对地距离（及裕度）+高温弧垂+悬垂串长为  $22+20.03+12=54.03\text{m}$ 。跨越塔按档距 500m 计算，杨树高+跨树间距+高温弧垂+悬垂串长为  $28+13+19.3+12=72.3\text{m}$

表 7.2-6 直线塔塔高情况

塔型	塔 高(m)	使用范围
I	42~63(51)	一般平地段，塔位受限
II	45~69(54)	对地距离控制，主力塔型
III	48~72(57)	档距稍大对地距离控制，一般跨越
IV	51~75(63)	路径开阔，档距大，较高跨越
V	54~78(69)	跨越河流、池塘等大档距跨越
跨越塔	63~84(75)	跨越 500kV、双回 220kV 线等跨越范围较小但跨越高度较高地区，跨越杨树

注：括号内为基准呼高。

#### 7.2.3.4 杆塔摇摆角系数 kV 分析规划

平地段无约束排位断面主要位天津地区，地形条件主要为平地及泥沼。因此，摇摆角系数 Kv 较大。图 7.2-4 为摇摆角系数 kV 值分布情况。

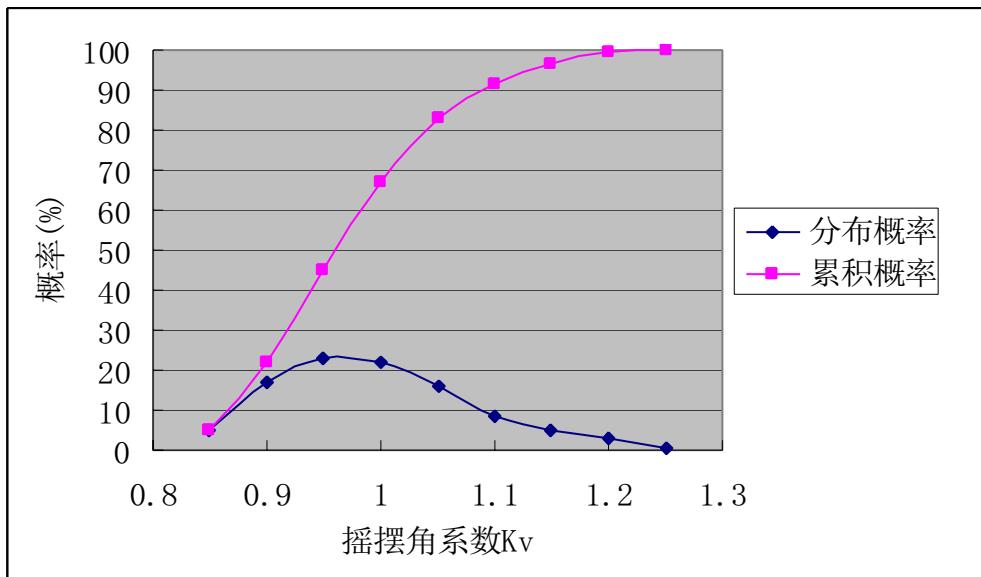


图 7.2-4 直线塔杆塔数量与摇摆角系数 kV 关系曲线

杆塔规划中的 Kv 值为杆塔使用中的最小 Kv 值，将决定塔头尺寸的大小。根据与水平档距相对应 kV 值的分布规律，推荐采用如表 7.2-7 所示杆塔摇摆角系数 kV 值。同时根据各塔型单侧垂直档距的使用情况确定杆塔瓶口处的导线小弧垂。

表 7.2-7 摆摆角系数 Kv 值

塔型	揆摆角系数 KV 值
I	0.85
II	0.85
III	0.9
IV	0.9
V	0.9

跨越塔	0.95
-----	------

### 7.2.3.5 档距的分析

下图列出了本区段直线塔杆塔数量与档距的关系曲线。

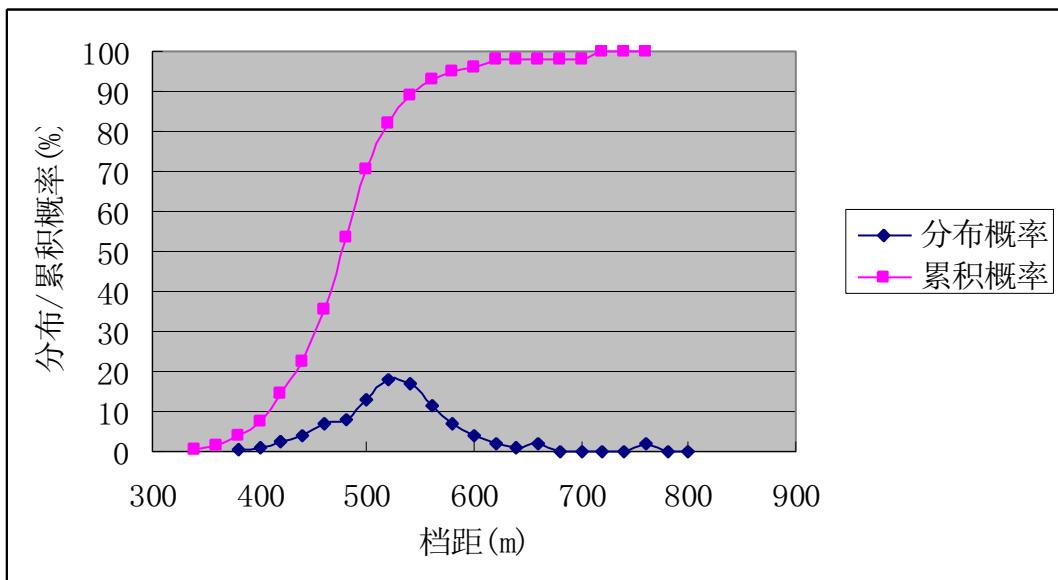


图 7.2-5 档距分布概率

根据上档距的分布概率，规划杆塔时档距推荐采用表 7.2-8 所示数据。

表 7.2-8 档距使用范围

塔型	档距范围 (m)
I	200~600
II	200~650
III	200~700
IV	250~750
V	250~800
跨越塔	200~700

### 7.2.3.6 直线转角塔的分析规划

根据对北京东～天津段路径转角度数的分析及无约束排位成果，平

地段杆塔规划一种直线转角塔，转角范围即  $3\sim 10^\circ$ ，塔高  $42m\sim 63m$ ，基准呼高为  $51m$ 。水平档距  $450m$ ，垂直档距  $500m$ ，超水平档距杆塔可采用减小角度力来进行验算。直线转角塔使用条件见表 7.2-9 和表 7.2-10 所示。

表 7.2-9 悬垂转角塔使用情况

序号	塔高 (m)	水平档距 (m)	垂直档距 (m)	线路转角 (度)	摇摆角系数 kV
1	54	515	466	6.6	0.90
2	45	423	405	8.4	0.95
3	51	472	361	4.3	0.76
4	54	489	377	9	0.77

表 7.2-10 直线转角塔使用条件表(一)

塔型	转角度数	Kv 值	基准呼高 (m)	塔高 (m)	水平档距 (m)	垂直档距 (m)
直线转角塔	$3^\circ \sim 10^\circ$	0.75	51	$42\sim 63$	450	500

根据以上综合分析，直线塔及直线转角塔规划成果归纳如下：

表 7.2-11 直线塔及直线转角塔规划成果

塔型	转角度数	塔高 (m)	水平档距 (m)	垂直档距 (m)	kV 值
I		$45\sim 60$	450	500	0.85
II		$48\sim 66$	510	590	0.85
III		$51\sim 69$	560	670	0.9
IV	$0\sim 3^\circ$	$63\sim 75$	610	750	0.9
V		$63\sim 84$	690	860	0.9
跨越塔	$3\sim 10^\circ$	$48\sim 60$	500	700	0.95
悬垂转角		$42\sim 63$	450	500	0.75

### 7.2.3.7 耐张塔的分析规划

#### (1) 转角角度规划

根据对北京东-津冀省界段线路转角的分布如图 7.2-6 所示。

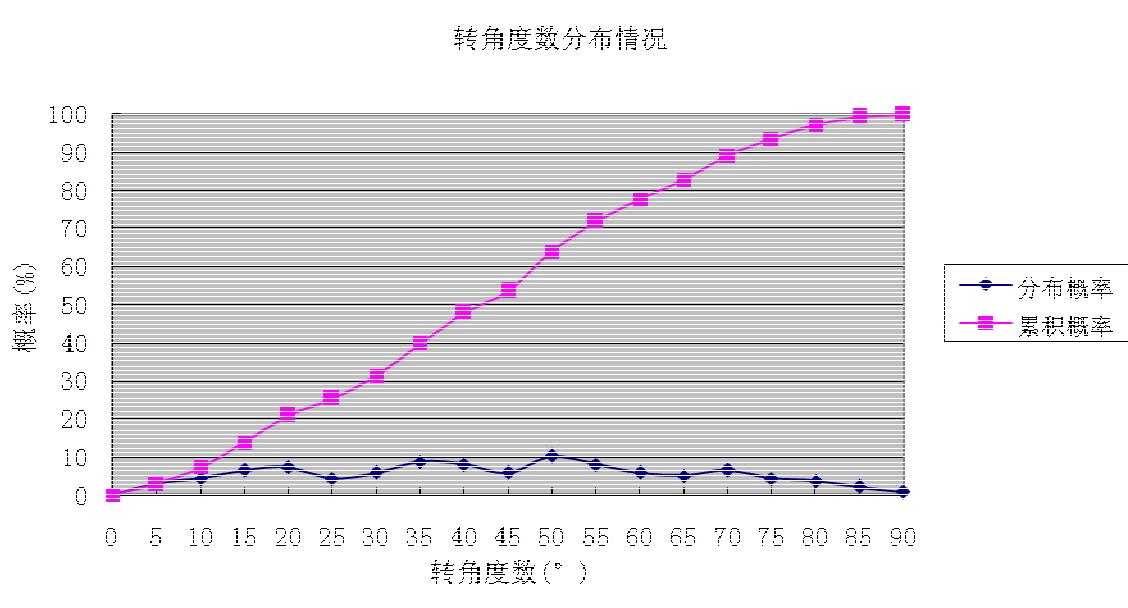


图 7.2-6 本工程线路转角角度概率分布图

我们利用杆塔规划的方法对耐张塔一塔、两塔、三塔、四塔、五塔、六塔系列方案的线路转角角度进行了规划(不包括终端塔)，规划的结果列于表 7.2-11。同时列出了各系列方案的杆塔使用数量及杆塔重量比例情况。

表 7.2-11 各系列方案的规划转角角度、杆塔使用数量及杆塔重量比例

塔型	规划转角角度 (°)	杆塔使用数量比例 (%)	杆塔重量比例 (%)
一塔方案	90	100	100.00
两塔方案	50	63.8	83.2
	90	36.2	
三塔方案	35	39.9	79.5
	70	49.2	
	90	19.9	
四塔方案	20	21.0	76.1

塔型	规划转角角度(°)	杆塔使用数量比例(%)	杆塔重量比例(%)
五塔方案	40	26.8	74.9
	60	29.7	
	90	22.5	
六塔方案	20	21.0	74.2
	35	18.8	
	50	24.0	
	70	25.3	
	90	10.9	
七塔方案	15	13.8	74.1
	35	26.0	
	50	24.0	
	65	18.8	
	80	14.5	
	90	2.9	

规划的杆塔方案数越多，塔重指标越低。但规划的杆塔方案数越多，相邻两方案塔重相差得越少，根据经济性优先的原则，同时考虑到杆塔的加工制造及运行维护的方便，本工程按招标路径规划耐张塔推荐采用五塔方案。推荐各塔型规划转角角度如表 7.2-12 所示。

表 7.2-12 五塔系列方案的规划转角角度

塔型	规划转角角度(°)
I	0~20
II	20~35
III	35~50
IV	50~70
V	70~90

## (2) 水平档距、垂直档距、塔高的分析规划

### 1) 水平档距的使用情况。

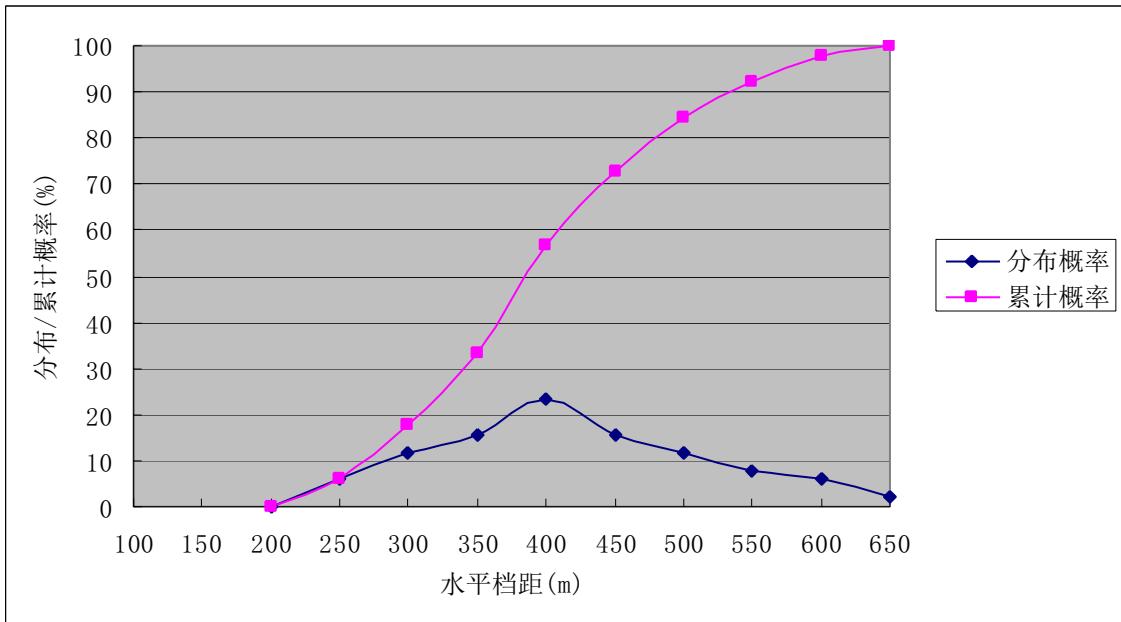


图 7.2-7 耐张塔水平档距的分布概率及累积概率

根据水平档距分布规律，规划的耐张塔的水平档距可为 450m。大于 450m 的可根据转角度数的使用情况适当调整或验算水平档距。

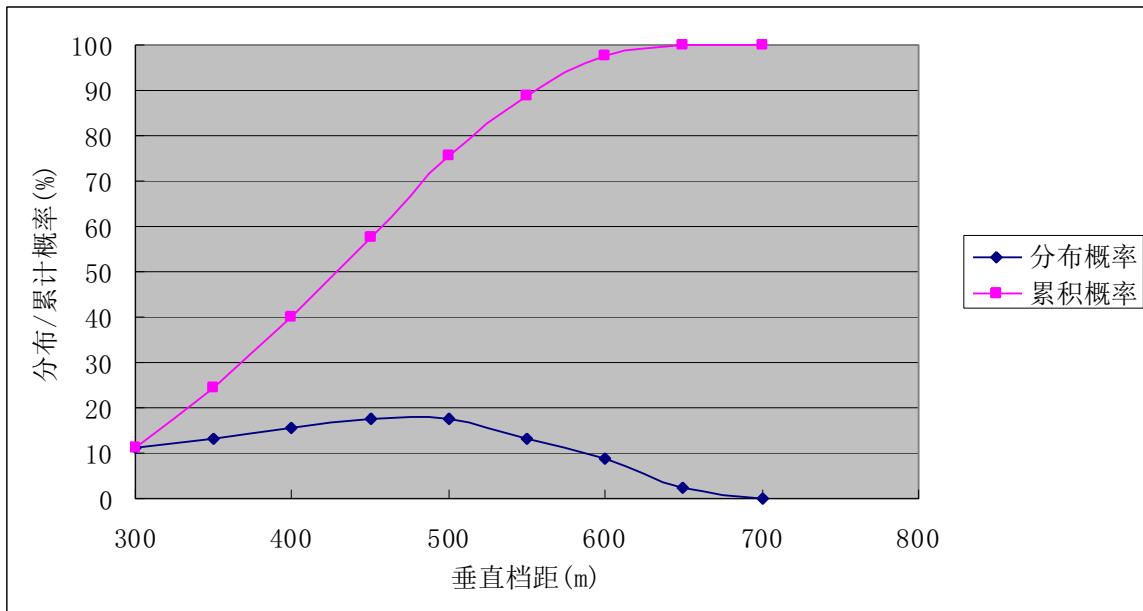


图 7.2-8 耐张塔垂直档距的分布概率及累积概率

根据垂直档距分布情况，考虑一定的裕度，耐张塔垂直档距可确定为 600m。

## 2) 塔高的使用情况。

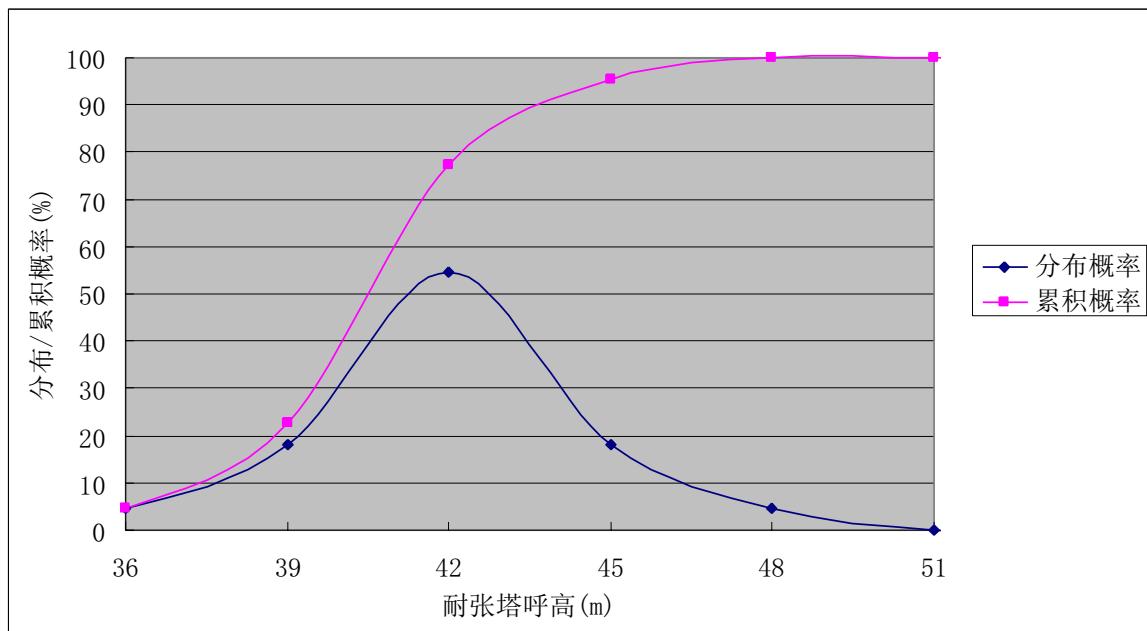


图 7.2-9 耐张塔塔高的分布概率及累积概率

根据上图分析,耐张塔的塔高均在36~45m范围内。基准呼高取36m。

### 3) 代表档距的分析规划

排位段耐张塔前后侧代表档距有2基耐张塔代表档距差大于250m,但张力差并不大。经综合分析,前后侧代表档距为310和605m时张力差最大,故耐张塔前后侧代表档距取300m和600m。

综上所述,平地段耐张塔杆塔规划情况见表7.2-13。

表 7.2-13 耐张塔规划成果

塔型	转角度数	塔高(m)	计算呼高(m)	水平档距(m)	垂直档距(m)	代表档距(m)
0度耐张	0°	36~45	36	450	600	300~600
I	0~20°	36~45	36	450	600	300~600
II	20° ~35°	36~45	36	450	600	300~600
III	35° ~50°	36~45	36	450	600	300~600
IV	50° ~70°	36~45	36	450	600	300~600
V	70° ~90°	36~45	36	450	600	300~600

### 7.2.3.8 结论

杆塔规划的成果见表7.2-14所示。

表 7.2-14 杆塔使用条件

塔型	系列	使用条件						
		水平 档距	垂直 档距	转角 度数	kV 值	计算 呼高	呼高 范围	规律档距
直线	I	450	500		0.85	51	42~63	
	II	510	590		0.85	54	45~69	
	III	560	670		0.9	57	48~72	
	IV	610	750	0~3	0.9	63	51~75	
	V	690	860		0.9	69	54~78	
	跨越塔	500	700		0.95	78	69~90	
	悬垂转角塔	450	500	3~10	0.75	51	42~63	
耐张	0 度耐张	450	600	0		36	36~45	300~600
	I	450	600	0~20		36	36~45	300~600
	II	450	600	20~35		36	36~45	300~600
	III	450	600	35~50		36	36~45	300~600
	IV	450	600	50~70		36	36~45	300~600
	V	450	600	70~90		36	36~45	300~600

## 7.2.4 山区段杆塔规划

### 7.2.4.1 水平档距的规划

根据排位情况，水平档距分布及累积概率如图 7.2-10 所示：

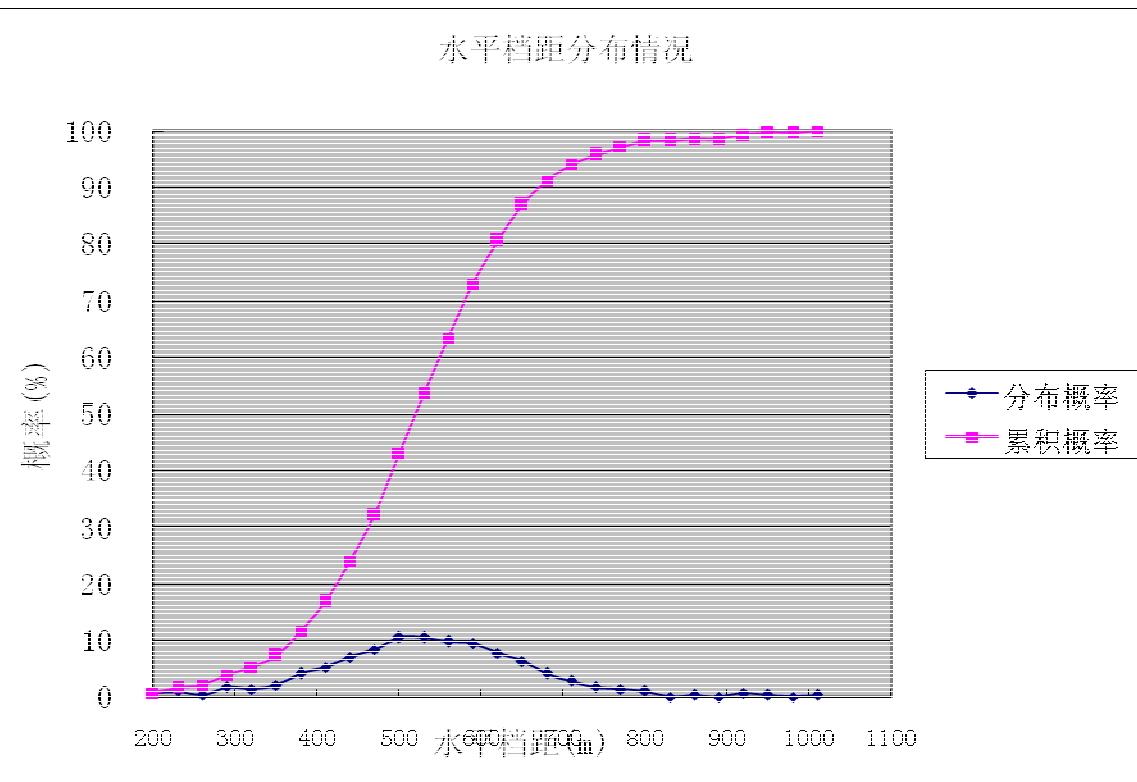


图 7.2-10

可以看出,与平地段相比,山区段水平档距分布范围更广,从 200m~1000m 之间均有分布。水平档距集中区段在 400m~680m 之间,其中 480m~600m 段分布最多且较均匀。可考虑在档距密集区减少系列塔型水平档距级差,使更多的塔型集中在使用频率较高的区段。

利用杆塔规划的方法对直线塔一塔、两塔、三塔、四塔、五塔、六、七塔系列方案的水平档距进行了规划,规划的结果列于表 7.2-15。同时列出了各系列方案的杆塔使用数量、水平档距利用系数、杆塔重量及综合费用比例情况。

表 7.2-15 各系列方案的水平档距值、杆塔使用数量、  
水平档距利用系数、杆塔重量及综合费用比例

塔型	水平档距 (m)	杆塔使用数量比例 (%)	水平档距利用系数 (%)	水平档距综合利用系数 (%)	杆塔重量 (%)	综合费用 (%)
一塔方案	1000	100	72.3	72.3	100	100

塔型	水平档距 (m)	杆塔使用 数量比例 (%)	水平档距 利用系数 (%)	水平档距 综合利用系数 (%)	杆塔重量 (%)	综合费用 (%)
两塔方案	600	73.5	86.2	85.6965	87.5	90.6
	1000	26.5	84.3			
三塔方案	470	32.4	87.9	87.338	81.6	85.4
	560	31.0	91.4			
	1000	36.6	83.4			
四塔方案	450	22.2	88.2	89.1918	77.8	81.2
	550	25.6	91.9			
	700	44.3	88.8			
	1000	7.9	85.4			
五塔方案	410	16.9	89.8	90.9923	74.9	79.3
	480	15.5	90.5			
	620	48.2	92.4			
	800	17.6	89.4			
	1000	1.8	84.3			
六塔方案	410	16.9	88.4	92.2493	72.5	78.6
	480	15.5	92.3			
	570	34.2	95.6			
	680	24.6	94.3			
	800	7	90.7			
	1000	8.8	84.4			
七塔方案	380	11.6	88.5	92.3623	71.9	78.3
	450	14.7	90.6			
	540	29.9	93.2			
	600	19.2	95.4			
	700	18.2	93.2			
	850	4.7	88.4			
	1000	1.7	86.9			

从综合费用来看，两塔方案较一塔方案的综合费用低 9.4%，三塔方案较两塔方案的综合费用低 5.2%，四塔方案较三塔方案的综合费用低 4.2%，五塔方案较四塔方案的综合费用低 1.9%，六塔方案较五塔方案的综合费用低 0.7%，七塔方案较六塔方案的综合费用低 0.3%。由此可见，规划的杆塔方案数越多，综合费用越低。但规划的杆塔方案数越多，相邻两方案综合费用相差得越少。经过比较，推荐采用六塔方案。

山区段跨越塔可利用系列塔型中高呼高塔代替，根据对实际交叉跨越情况分析，系列塔型中Ⅳ型、Ⅴ型塔呼高均可满足工程中跨越档的需要，不需要单独增加跨越塔型。根据对无约束排束结果分析，确定山区塔水平档距如表 7.2-17 所示。

表 7.2-16 规划水平档距使用范围

塔型	水平档距 (m)
I	410
II	480
III	570
IV	680
V	800
VI	1000

#### 7.2.4.2 垂直档距的分析规划

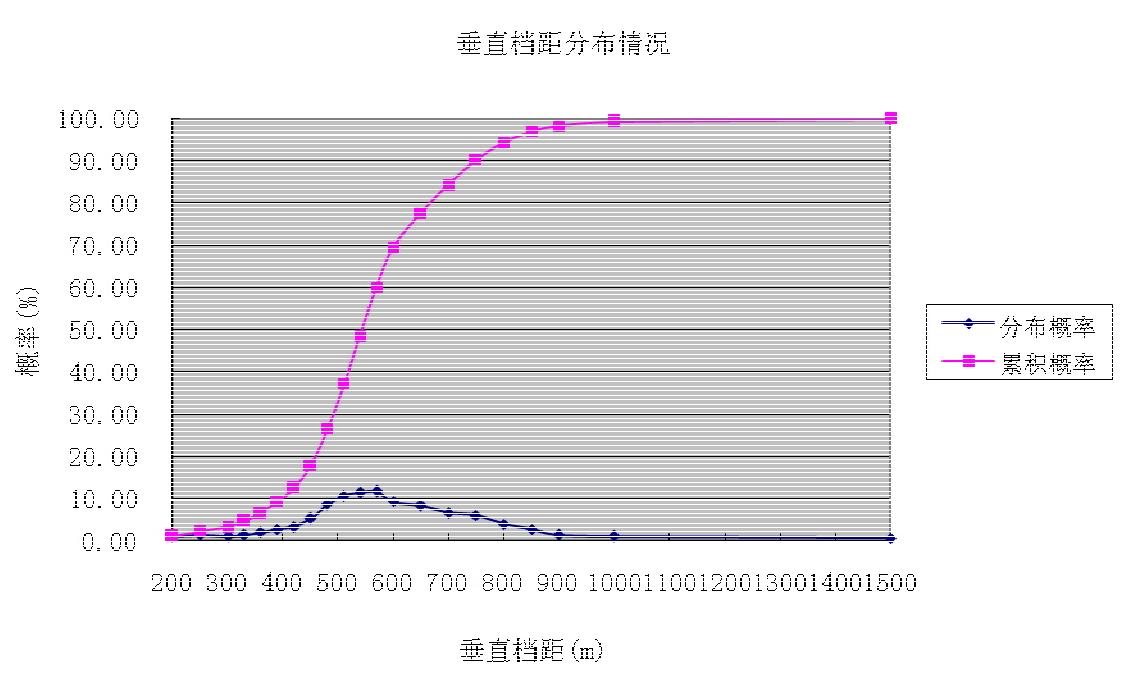


图 7.2-11 垂直档距分布情况

本段垂直档距分布如上图所示。与水平档距分布规律相似，垂直档距的集中区域也比平地塔范围更广，在 200m~1500m 均有分布。集中区域在 500~750m，这也与工程经验基本相附，即平地段垂直档距为水平档距的 1.4~1.6 倍左右。根据排位结果及与水平档距的对应关系，规划直线塔方案所对应的垂直档距见表 7.2-17。

表 7.2-17 规划的垂直档距使用范围

塔型	垂直档距(m)
I	570
II	670
III	820
IV	950
V	1200
VI	1500

#### 7.2.4.3 塔高的分析规划

直线塔塔高分布概率见图 7.2-12：

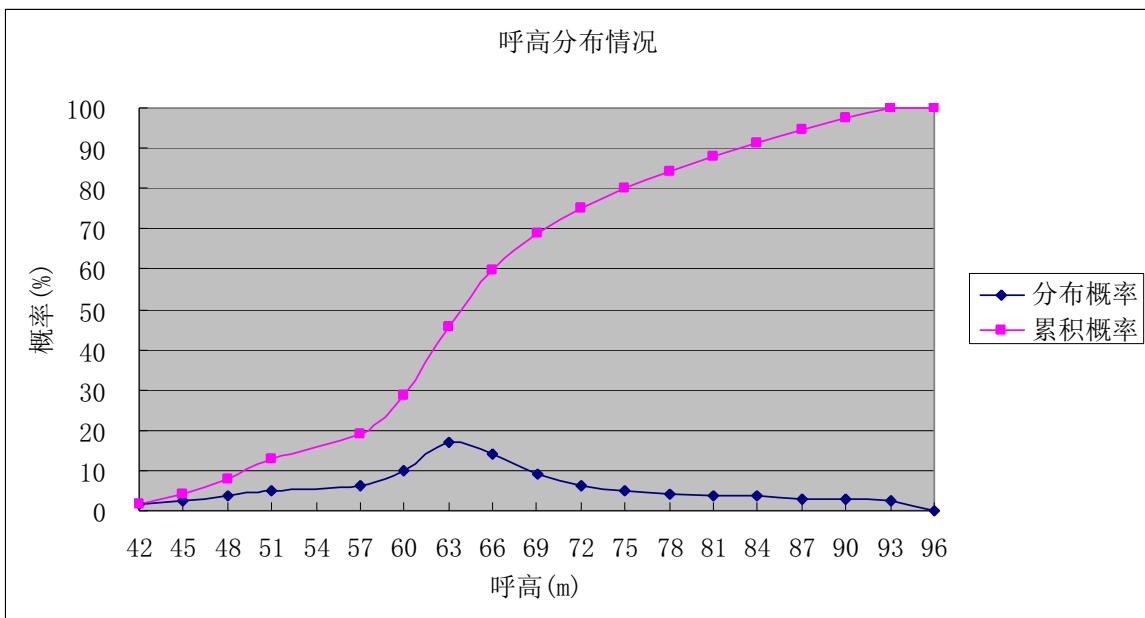


图 7.2-12 直线塔塔高分布概率

可以看出，山区塔高高于平地塔，主要集中在 57m~69m 之间。根据塔高的分布规律考虑与水平档距对应关系，可以归纳本段工程直线塔塔高见表 7.2-7。根据本标包路径专题，本段线程需要在山地跨越上都～承德和承德西～承德 500kV 线路，其中跨越上承线需要采用 84m 呼高，承德西～承德需采用 90m 呼高，根据水平档距折算，可采用 IV 型塔。因此，IV 型塔可作为山区跨越塔使用，呼高增加为 93m。

表 7.2-18 直线塔塔高情况

塔型	塔 高(m)	使用范围
I	45~63(54)	山区小档距
II	45~66(57)	一般档距，无林区跨越
III	45~72(63)	稍大档距，低矮林区跨越
IV	45~93(66)	较大档距，桦树等较高林区跨越，较高电力线跨越，兼跨越塔
V	45~75(66)	大档距
VI	45~78(69)	跨越山谷，关门塔型

注：括号内为基准呼高。

#### 7.2.4.4 杆塔摇摆角系数 kV 分析规划

山区段无约束排位断面主要位于承德、唐山地区，地形条件主要为山区，且大部分为高山大岭，相对高差较大。因此，摇摆角系数  $K_v$  较小。图 7.2-13 为摇摆角系数  $k_v$  值分布情况。

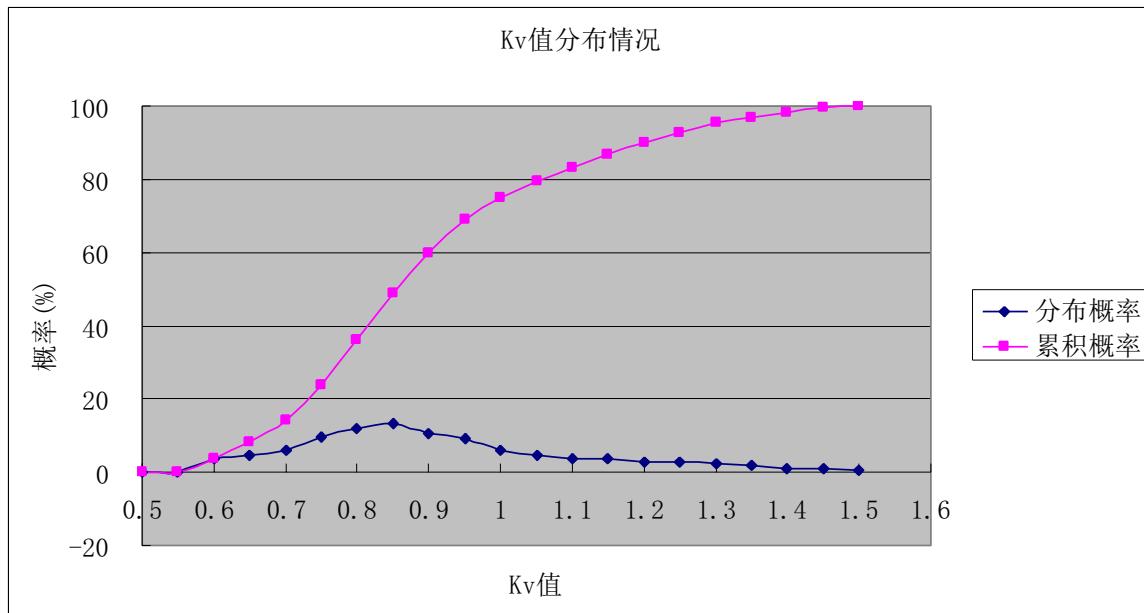


图 7.2-13 直线塔杆塔数量与摇摆角系数  $k_v$  关系曲线

杆塔规划中的  $K_v$  值为杆塔使用中的最小  $K_v$  值，将决定塔头尺寸的大小。根据与水平档距相对应  $k_v$  值的分布规律，推荐采用如表 7.2-19 所示杆塔摇摆角系数  $k_v$  值。同时根据各塔型单侧垂直档距的使用情况确定杆塔瓶口处的导线小弧垂。

表 7.2-19 摆摆角及小弧垂

塔型	摇摆角系数 $K_v$
I	0.75
II	0.75
III	0.7
IV	0.65
V	0.6
VI	0.7

#### 7.2.4.5 档距的分析

下图列出了本区段直线塔杆塔数量与档距的关系曲线。

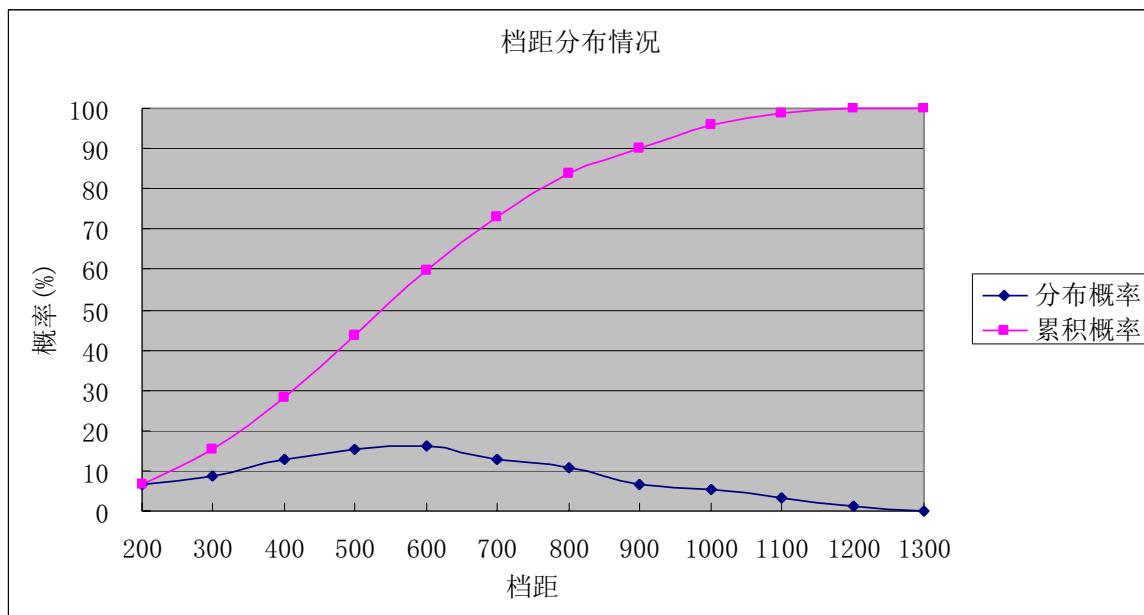


图 7.2-14 档距分布概率

根据上档距的分布概率，规划杆塔时档距推荐采用表 7.2-20 所示数据。

表 7.2-20 档距使用范围

塔型	档距范围 (m)
I	200~750
II	200~850
III	200~950
IV	250~1000
V	250~1100
VI	250~1300

#### 7.2.4.6 直线转角塔的分析规划

根据对路径转角度数的分析及无约束排位成果，平地段杆塔规划一种直线转角塔，转角范围即  $3\sim10^\circ$ ，塔高 45m~63m，基准呼高为 57m。水平档距 500m，垂直档距 750m，超水平档距杆塔可采用减小角度力来进

行验算。直线转角塔使用条件见表 7.2-21 和表 7.2-22 所示。

表 7.2-21 悬垂转角塔使用情况

序号	塔高(m)	水平档距(m)	垂直档距(m)	线路转角(度)	摇摆角系数kV
1	48	523	408	6.4	0.78
2	51	584	479	4.9	0.82
3	57	422	380	9.3	0.9
4	63	487	370	6.5	0.76
5	57	515	540	8.4	1.05

表 7.2-22 直线转角塔使用条件表(一)

塔型	转角度数	Kv 值	基准呼高(m)	塔高(m)	水平档距(m)	垂直档距(m)
直线转角塔	3° ~10°	0.75	57	45~63	500	750

根据以上综合分析，直线塔及直线转角塔规划成果归纳如下：

表 7.2-23 直线塔及直线转角塔规划成果

塔型	转角度数	塔高(m)	水平档距(m)	垂直档距(m)	kV 值
I		45~63	410	570	0.75
II		45~66	480	670	0.75
III		45~72	570	820	0.7
IV	0~3°	45~84	680	950	0.65
V		45~75	800	1200	0.6
VI		45~78	1000	1500	0.7
悬垂转角	3~10°	45~63	500	750	0.6

#### 7.2.4.7 耐张塔的分析规划

##### (1) 转角角度规划

根据对线路转角的分布如图 7.2-15 所示。

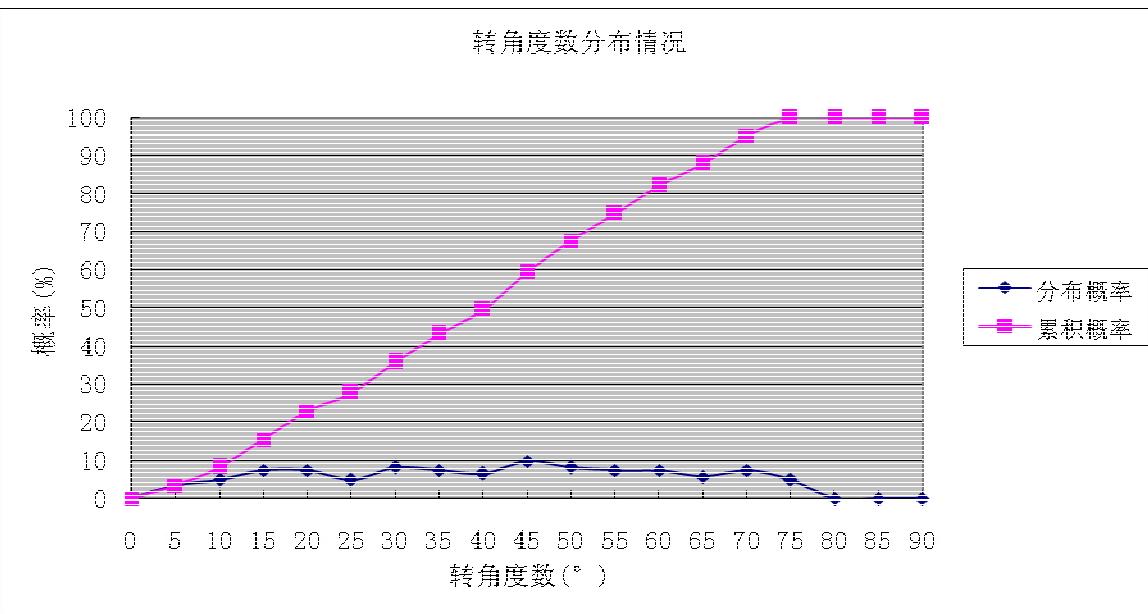


图 7.2-15 本工程线路转角角度概率分布图

利用杆塔规划的方法对耐张塔一塔、两塔、三塔、四塔、五塔、六塔系列方案的线路转角角度进行了规划，规划的结果列于表 7.2-24。同时列出了各系列方案的杆塔使用数量及杆塔重量比例情况。

表 7.2-24 各系列方案的规划转角角度、杆塔使用数量及杆塔重量比例

塔型	规划转角角度(°)	杆塔使用数量比例(%)	杆塔重量比例(%)
一塔方案	75	100	100.00
两塔方案	30	35.8	81.2
	75	64.2	
三塔方案	25	27.6	76.4
	45	31.8	
	75	40.6	
四塔方案	20	22.8	73.1
	40	26.8	
	60	32.5	
	75	17.9	
五塔方案	15	15.5	71.8
	30	20.2	
	45	23.7	

塔型	规划转角角度(°)	杆塔使用数量比例(%)	杆塔重量比例(%)
	60	22.8	71.4
	75	17.8	
六塔方案	10	8.1	71.4
	20	14.7	
	30	13	
	45	23.6	
	60	22.8	
	75	17.9	

规划的杆塔方案数越多，塔重指标越低。但规划的杆塔方案数越多，相邻两方案塔重相差得越少，根据经济性优先的原则，同时考虑到杆塔的加工制造及运行维护的方便，本工程按招标路径规划耐张塔推荐采用五塔方案。推荐各塔型规划转角角度如表 7.2-25 所示。

表 7.2-25 五塔系列方案的规划转角角度

塔型	规划转角角度(°)
I	15
II	30
III	45
IV	60
V	75

## (2) 水平档距、垂直档距、塔高的分析规划

### 1) 水平档距的使用情况。

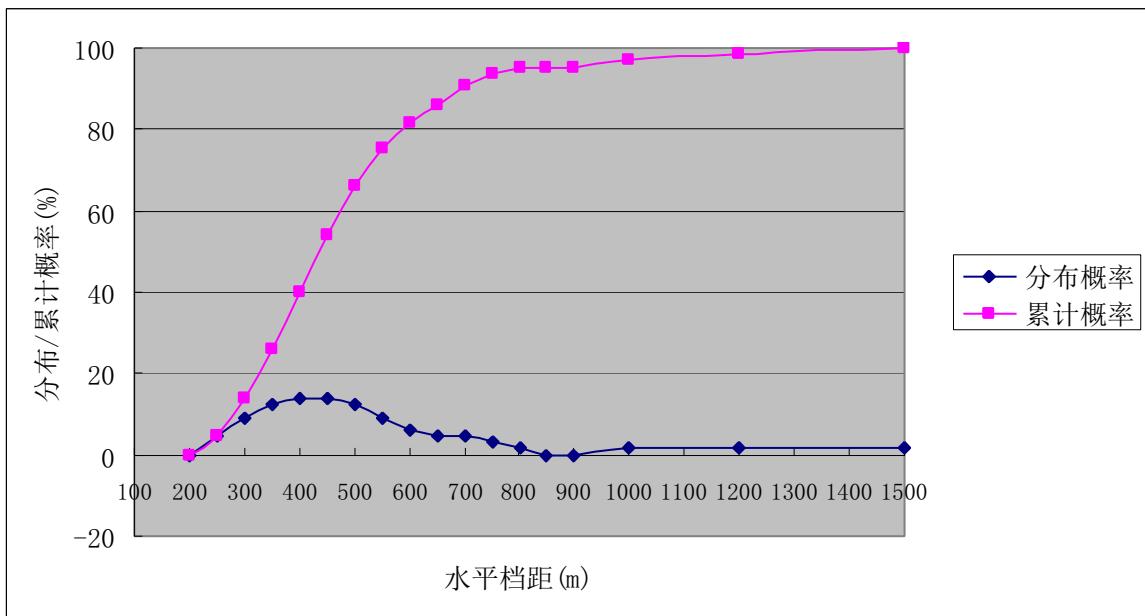


图 7.2-16 耐张塔水平档距的分布概率及累积概率

根据水平档距分布规律，规划的耐张塔的水平档距可为 450m。大于 450m 的可根据转角度数的使用情况适当调整或验算水平档距。

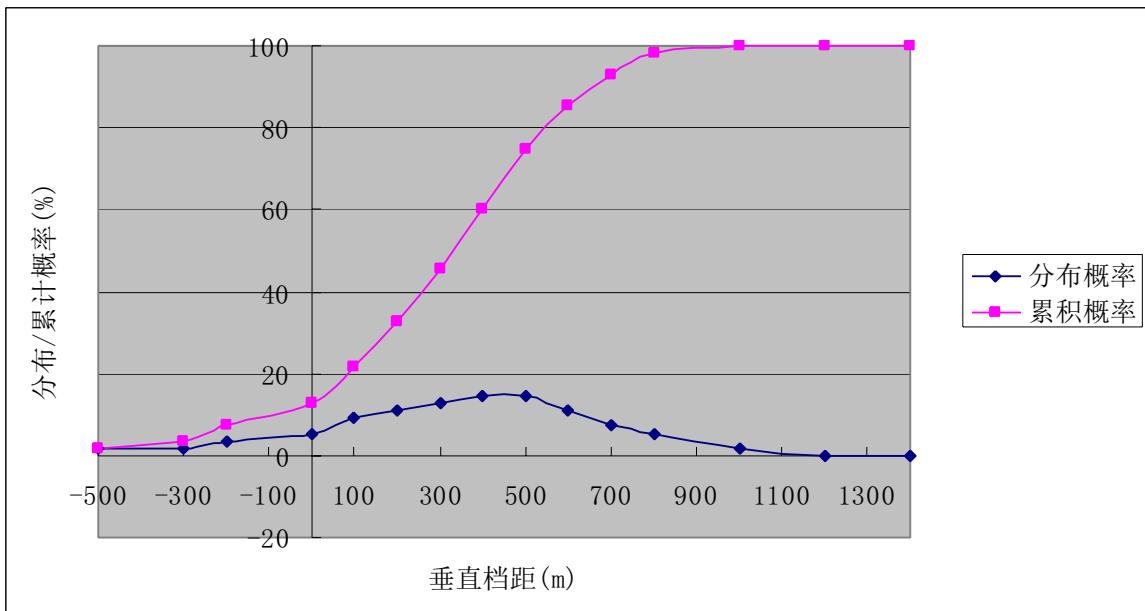


图 7.2-17 耐张塔垂直档距的分布概率及累积概率

耐张塔垂直档距范围为  $-200\text{m} \sim 1000\text{m}$  之间，集中区段位于  $100\text{m} \sim 700\text{m}$  之间。根据垂直档距分布情况，考虑一定的裕度，耐张塔垂直档距可确定为  $-500\text{m} \sim 800\text{m}$ ，垂直档距超过  $800\text{m}$  的个别塔位进行补强设计。

## 2) 塔高的使用情况。

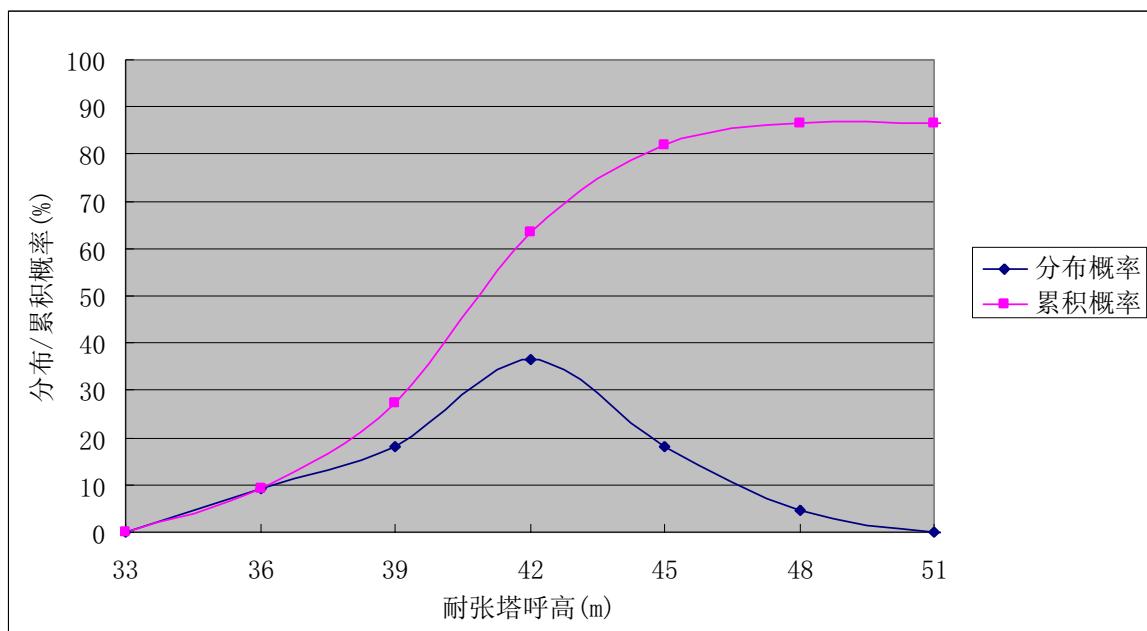


图 7.2-18 耐张塔塔高的分布概率及累积概率

根据跳线串长度及对地距离计算，耐张塔最低呼高可定为 36m。因线路所经地区林木覆盖较广，考虑跳线需要满足对树木净空距离，基准呼高确定为 42m。根据排位情况，最高呼高为 48m。综合考虑，根据排位情况分析并结合当地线路设计经验，耐张塔的塔高范围为 36~48m，基准呼高为 42m。

### 3) 代表档距的分析规划

排位段耐张塔前后侧代表档距有 5 基耐张塔代表档距差大于 300m。经综合分析，前后侧代表档距为 418 和 785m 时张力差最大，故耐张塔前后侧代表档距取 400m 和 800m。

综上所述，山区段耐张塔杆塔规划情况见表 7.2-29。

表 7.2-29 耐张塔规划成果

塔型	转角度数	塔高(m)	计算呼高	水平档距(m)	垂直档距(m)	代表档距(m)
0 度耐张	0°	36~48	42	500	-200~800	400~800
I	0~15°	36~48	42	500	-200~800	400~800
II	15° ~30°	36~48	42	500	-200~800	400~800
III	30° ~45°	36~45	42	500	-200~800	400~800

IV	$45^\circ \sim 60^\circ$	36~45	42	500	-200~800	400~800
V	$60^\circ \sim 75^\circ$	36~45	42	500	-200~800	400~800

#### 7.2.4.8 小结

山区段杆塔规划使用条件的成果见表 7.2-30 所示。

表 7.2-30 山区段杆塔使用条件

塔型	系列	使用条件						
		水平档距	垂直档距	转角度数	kV 值	计算呼高	呼高范围	规律档距
直线	I	410	570		0.75	54	45~63	
	II	480	670		0.75	57	45~66	
	III	570	820		0.7	63	45~72	
	IV	680	950	0~3	0.65	66	45~84	
	V	800	1200		0.6	66	45~75	
	VI	1000	1500		0.7	69	45~78	
	悬垂转角塔	500	750	3~10	0.7	57	45~63	
耐张	0 度耐张	500	-200~800	0		42	36~48	400~800
	I	500	-200~800	0~15		42	36~48	400~800
	II	500	-200~800	15~30		42	36~48	400~800
	III	500	-200~800	30~45		42	36~48	400~800
	IV	500	-200~800	45~60		42	36~48	400~800
	V	500	-200~800	60~75		42	36~48	400~800

#### 6.2.5 特殊塔型的规划

特殊塔型包括终端塔、换位塔、限高塔、分体塔等。一般情况下，特殊塔型的使用数量较小，因此可以根据实际情况单独规划，原则是满足工程需要即可。

### 7. 杆塔规划的校验

杆塔系列规划是在具有代表性的断面上进行无约束排位，根据排位

成果分析确定杆塔规划条件。为确保规划成果的准确性及适用于工程实际，可选取沿线附近已有线路的定位成果与本报告推荐的杆塔规划结论进行对比，对水平档距、垂直档距、呼高等主要规划条件进行校核。校验的方法与规划方法相同。