

送电结构专业培训专题

# 架空送电线路杆塔选型及 优化设计

2011 年 12 月

# 目 录

1、概述.....	1
2、输电线路杆塔设计条件.....	1
3、杆塔选型.....	2
3.1 拉线塔.....	4
3.2 自立塔.....	6
3.2.1 悬垂塔选型.....	7
3.2.2 耐张塔选型.....	10
3.3 杆塔选型小节.....	12
4 铁塔选材.....	12
4.1 概述.....	12
4.2 杆件断面型式选择.....	13
4.2.1 主材断面选择.....	14
4.2.2 斜材及横材断面选择.....	15
4.3 大规格角钢.....	18
4.3.1 普通规格角钢与大截面角钢截面特性对比.....	19
4.3.2 角钢临界长度的计算.....	21
4.3.3 普通规格角钢与大截面角钢承载力分析.....	24
4.3.4 普通双肢角钢与大截面角钢的塔重分析.....	27
4.4 材质选择.....	28
4.4.1 材质选择概述.....	28
4.4.2 高强钢材料参数.....	28
4.4.3 高强钢设计计算.....	29
4.4.4 钢管构件径厚比.....	32
5 杆塔优化.....	33
5.1 塔头优化.....	34
5.1.1 上导线横担及地线支架形式优化.....	34
5.1.2 地线支架型式.....	35
5.1.3 导线横担型式.....	36
5.1.4 横担尺寸优化.....	37
5.1.5 导线横担上平面布置形式优化.....	37
5.2 塔身优化.....	38
5.2.1 塔身截面型式优化.....	38
5.2.2 塔身布置优化.....	38
5.2.3 横隔面设置的优化.....	40
5.2.4 塔身坡度优化.....	42
5.2.5 塔身主材节间长度优化.....	43
5.3 杆塔连接节点优化.....	45
5.3.1 角钢塔节点优化.....	45
5.3.2 钢管塔节点优化.....	47

# 1、概述

杆塔外形主要取决于电压等级、线路回路数、地形、地质情况及使用条件等，必要时结合施工、运行要求。在满足上述要求下根据综合技术经济比较，择优选用。

在 35kV-110kV 线路中，常采用钢筋混凝土单杆，荷载较大时，采用双杆或带拉线的单、双杆。

对于 220kV 及以上电压等级的线路，通常采用铁塔。铁塔是高压输电线路最常用的支持物。按结构形式和受力特点，铁塔分为拉线塔和自立塔两大类；按构件断面形式，分为角钢塔、钢管塔和钢管混凝土塔。国内外大多采用热轧等肢角钢，粗制螺栓连接而成的空间桁架结构，对大跨越塔或铁塔荷载、外形尺寸大的普通线路塔，通常采用钢管塔。

下文主要介绍 220kV 及以上电压等级线路的杆塔选型及优化。

## 2、输电线路杆塔设计条件

杆塔选型前需要明确设计条件，包括：电压等级，线路回路数，导、地线型号，设计风速和覆冰，线路地理位置，地形情况等，同时需与塔型规划相结合，明确使用条件。其中：

1) 电压等级、线路回路数，决定了铁塔基本外形和尺寸。随着电压等级增加，铁塔尺寸增大。

2) 地理位置和地形情况，决定了是否可以考虑拉线塔，自立塔是否需要高低腿等。

随着土地征地费用增加，拉线塔的使用受到限制，但在有条件的地区，因地制宜地采用拉线铁塔也应是工程比选的一个方面。

在线路经过采空区时，还需要结合基础荷载大小，判定是否需要分回路、分相进行铁塔选型。

3) 导、地线型号，设计风速和覆冰，塔型规划和使用条件，决定了铁塔荷

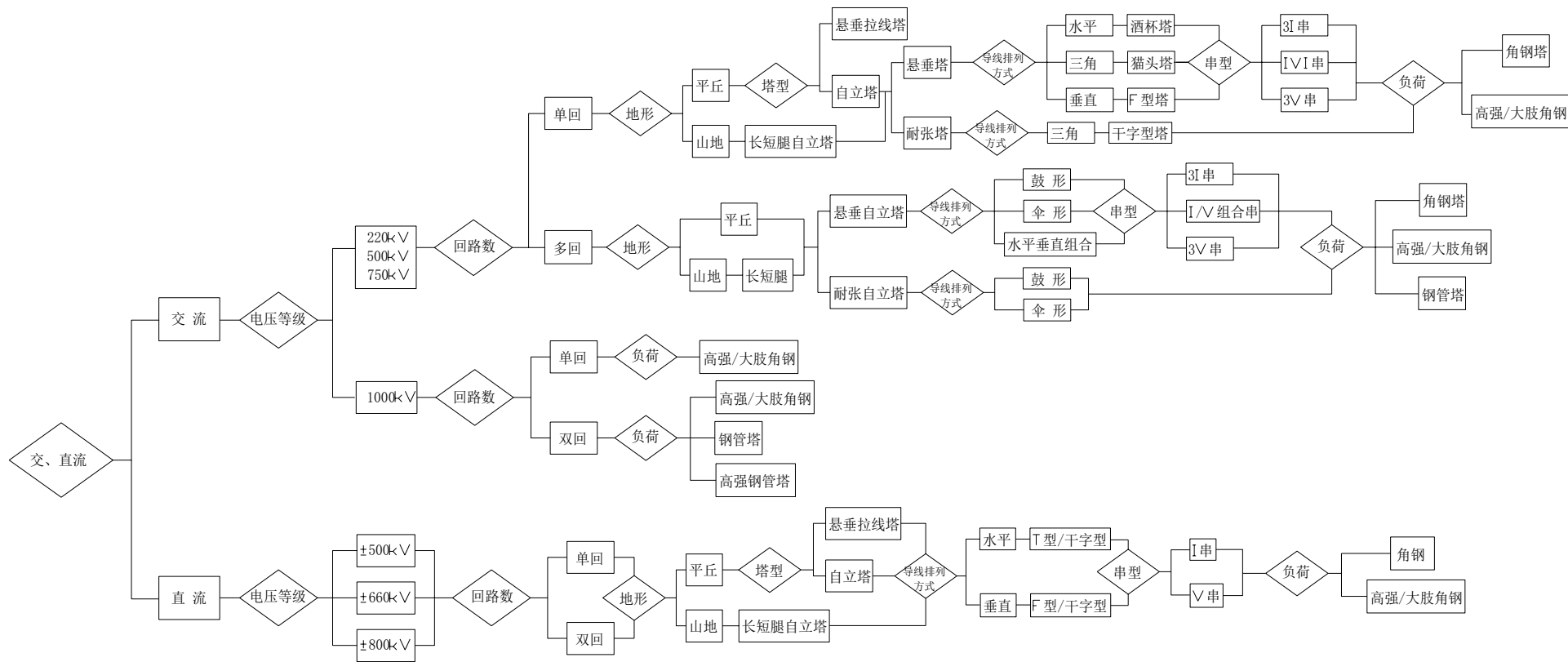
载的大小。

### 3、杆塔选型

一般工程中铁塔选型过程见图 3.1-1。

电压等级、回路数、地形条件及设计风速、覆冰为外部条件，随着电气专业导、地线选型和杆塔规划的确定，可以进入到杆塔选型阶段。

杆塔选型的基本原则是技术方案可行，经济指标最优。



3.1 拉线塔

拉线塔曾在 220kV~750kV 交流输变电和±500kV 直流输电线路工程中广泛使用。该塔型塔重较轻，具有显著经济性，由以往工程经验，拉线塔较自立式铁塔降低塔重 20%~30%，适宜用于地势起伏不大地区，在力学分析、加工制造、立塔架线等方面也都有成熟的技术经验。但拉线塔占地面积是自立塔的 4~30 倍；同时，运行维护较自立塔工作量大，因此在经济发达地区的使用受到限制。图 3.1-1~图 3.1-3 分别给出了常见拉线塔单线图，图 3.1-4~图 3.1-6 为工程照片。

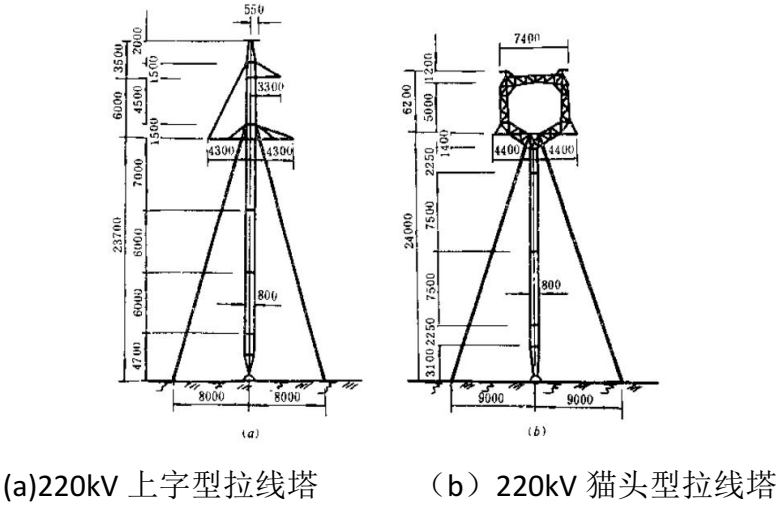
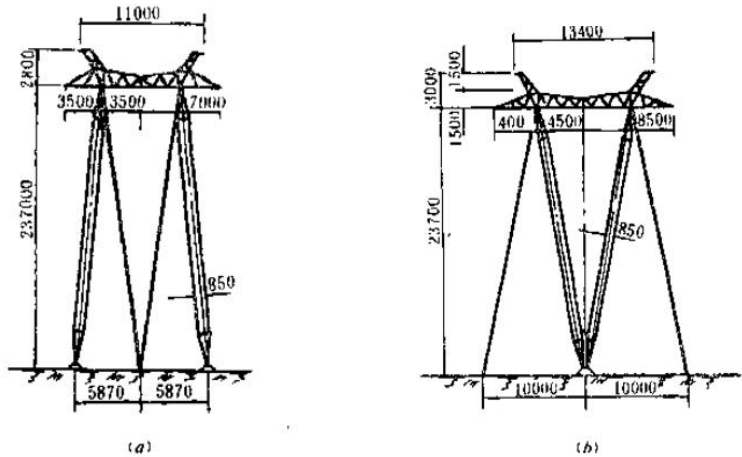
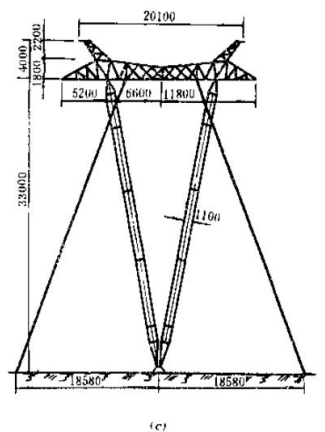


图 3.1-1





(a) 220kV 门型拉线塔    (b) 220kV 拉 V 塔    (c) 500kV 拉 V 塔

图 3.1-2

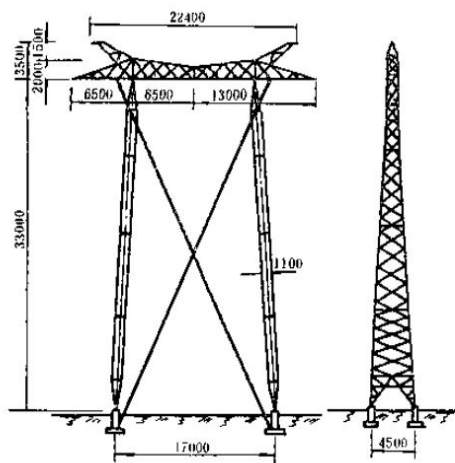


图 3.1-3 500kV 内拉线门型塔



图 3.1-4 500kV 拉 V 塔



图 3.1-5 ±500kV 单柱拉线塔



图 3.1-5 国外紧凑型双柱悬索拉线塔

拉线塔主要适用于地势起伏不大、征地费用较低的地区。在拉线塔与自立塔选型比较时，除比较本体造价外，还需进行征地费用的比较。拉线塔不适用于：

- (1) 山区和起伏较大的丘陵；
- (2) 重要交叉跨越地区；
- (3) 动植物自然保护区；
- (4) 路径受限地区；
- (5) 农田耕地地区；
- (6) 煤矿等采动影响区段；
- (7) 耐张塔和重冰区。

## 3.2 自立塔

对于电压等级较高的输电线路杆塔，自立塔采用最普遍的杆塔形式。

自立塔选型通常按悬垂塔和耐张塔分别进行。随着电压等级的增加，铁塔尺寸及荷载增加显著，但塔型基本维持原 220kV、500kV 塔型，没有特别大的变化，只是在材料选择、截面选择，以及局部构造处理上需考虑由于尺寸和荷载增大而带来的影响。



3.2.1 悬垂塔选型

3.2.1.1 按导线排列方式

交流悬垂塔按导线排列方式可以分为：水平排列、三角形排列和垂直排列。  
见图 3.2-1，3.2-2，3.2-3。

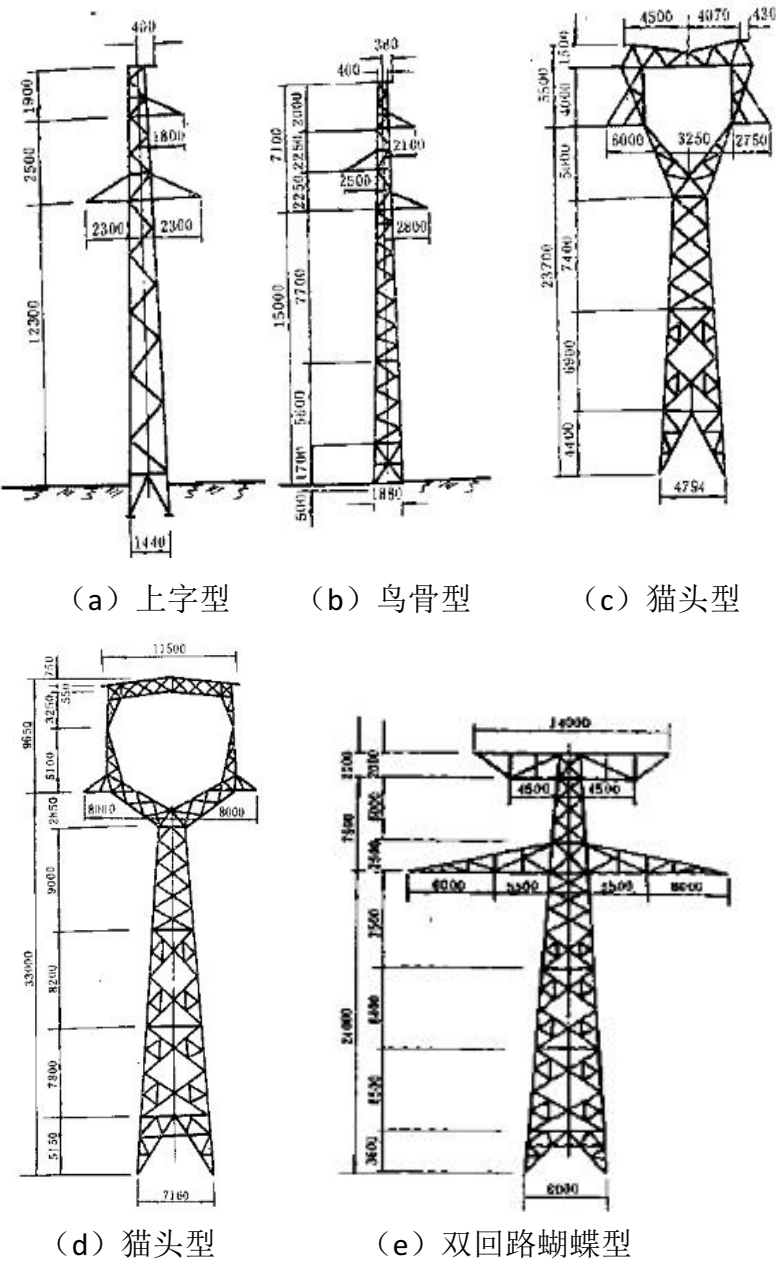


图 3.2-1 三角形排列塔型

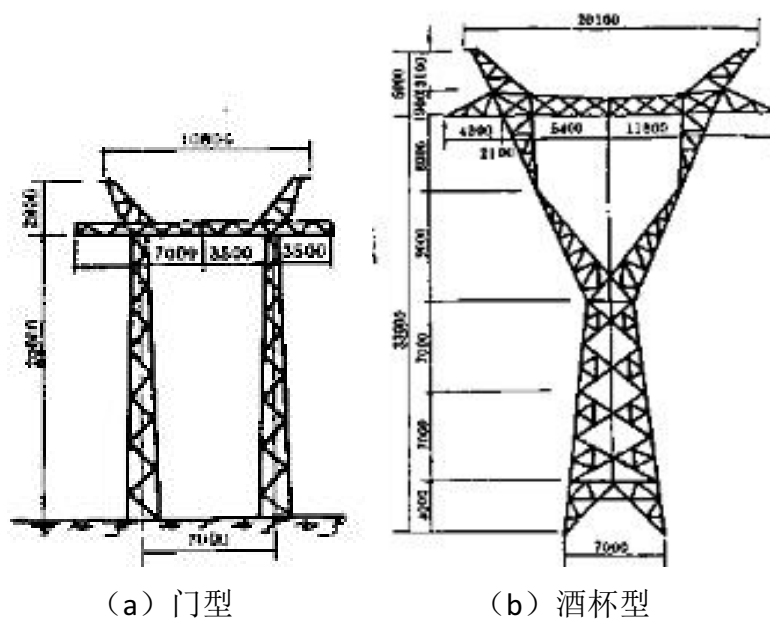


图 3.2-2 水平排列塔型

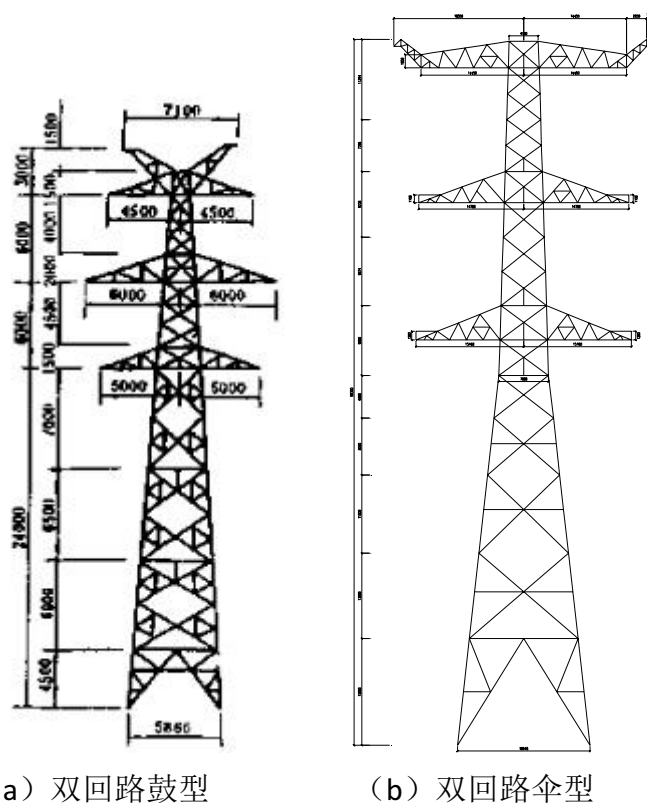


图 3.2-3 垂直排列塔型

上字型 and 鸟骨型塔多用于电压等级不高的输电线路塔，它受力清晰，构造简单，但由于其排列方式，同等设计条件下塔高高于猫头塔，经济指标较猫头塔差。门型塔和酒杯型塔是常见的导线水平排列塔，酒杯塔较门型塔能够更充分发挥塔

身材料的受力性能,但门型塔由于采用了两根塔身柱,有效地减小了基础作用力,适用于地基承载能力较低的地区使用。一般说来,单回路交流悬垂塔通常采用的是猫头塔或酒杯塔,在相同设计条件下,猫头塔全塔高高于酒杯塔,但走廊宽度较小。工程中铁塔选型时需根据具体使用情况进行比较,比较主要方面是单基塔重和走廊宽度,综合路径拆迁量合理选用塔型。

双回路塔型主要有三角形排列的蝴蝶形和垂直排列的鼓形或伞形塔。蝴蝶形塔能有效降低塔全高,减轻塔重,对于风荷载所占比例较大的大跨越,多采用这种方式。当电压等级较大时,蝴蝶形塔下横担水平布置两相导线,受间隙及相间距控制,下横担较长,设计时需考虑风荷载对较长横担的不利影响。受上下层相邻导、地线最小水平偏移的控制,垂直排列的鼓形塔,一直是 110kV~750kV 双回路工程常用的塔型。伞形塔的防雷性能优于鼓形塔。在满足各项技术指标前提下,鼓形和伞形比较是综合技术指标和经济指标的比较。

直流悬垂塔的排列方式有水平排列和垂直排列两种形式,如图 3.2-4、3.2-4 所示。对于双回的干字型塔,既可以是水平排列,也可以是垂直排列。水平排列的 T 型塔可以降低塔高,减小塔重;垂直排列的 F 型塔可以减小走廊宽度,减少拆迁,在塔型选择时需要结合路径情况进行综合的经济比较,确定最优方案。



图 3.2-4 水平排列的 T 型塔

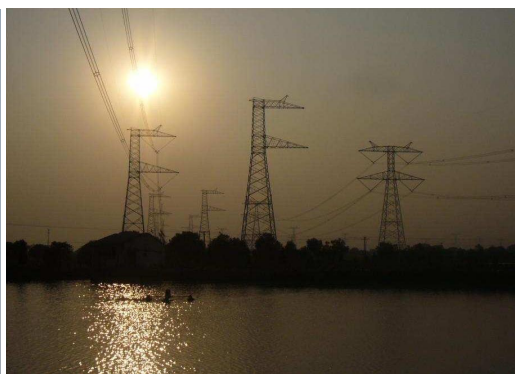


图 3.2-5 垂直排列的 F 型塔

### 3.2.1.2 按绝缘子串型

交流悬垂塔根据三相绝缘子串型可分为 3I、3V、IVI 或 VIV 等几种形式。图 3.2-6 为 1000kV 双回路铁塔 I 串和 V 串示意图。V 串悬挂方式由于风偏和摇摆角的原因，其相间距较 I 串挂线方式小，因此，能减少走廊宽度，在房屋密集地区减少拆迁；同时由于 I 串绝缘子串呈悬垂型式，在相同的线高下铁塔高度较 V 串方式要高。从结构受力上，由 V 串挂线方式，使铁塔横担长度增加，且由于在大风工况下只有外侧绝缘子受力，横担所承受的弯矩反而比 I 串挂线方式大；同时，V 串较 I 串多一串绝缘子，这些都是在 I 串和 V 串选型时需要考虑的因素。

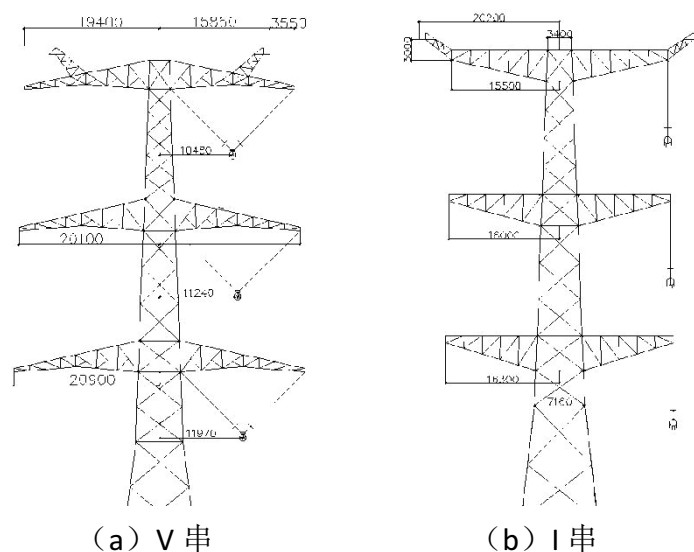


图 3.2-6

直流塔也可有 I 串和 V 串两种形式。选型时也需按上述因素综合比较。

### 3.2.2 耐张塔选型

交流单回路耐张塔通常采用三角形布置的干字型塔。这种塔型由于结构简单，受力清楚，占用线路走廊窄，而且施工安装和检修比较方便，因此，在国内外各电压等级线路中大量使用，积累了丰富的运行经验，如图 3.2-7。双回路耐张塔通常仍采用垂直排列的鼓形或伞形塔，如图 3.2-8。此外，也可以根据工程需要采用分体耐张塔，如图 3.2-9。

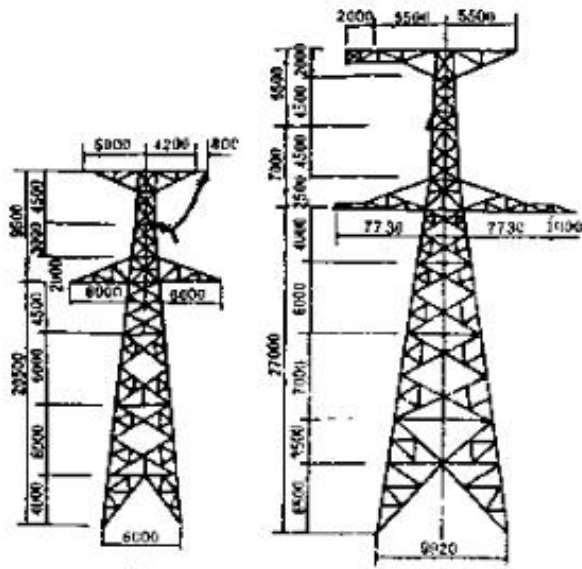


图 3.2-7

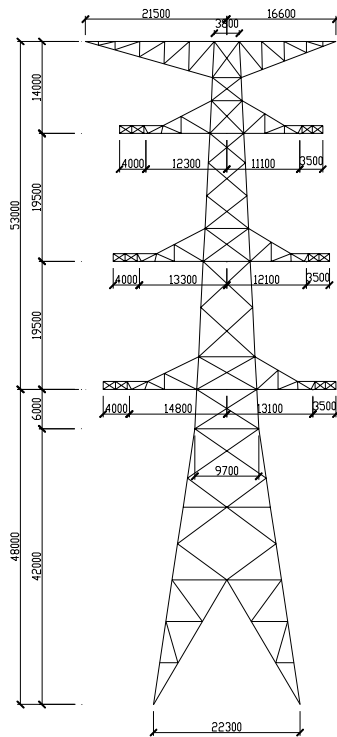


图 3.2-8

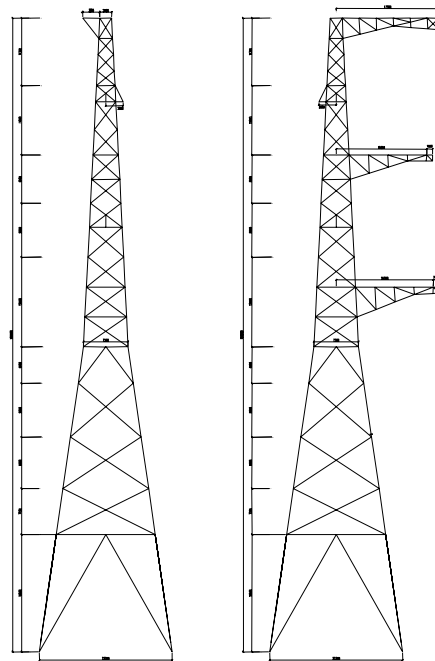


图 3.2-9

直流线路工程中，耐张塔型式普遍采用干字型铁塔，如图 3.2-10。此外，还有不设导线横担，两极导线一上一下分左右直接挂在塔身上的 F 型转角塔，其结构布置更加紧凑，传力路线直接明确，承力状态优于干字型转角塔，但整塔高要比干字型塔高很多。此外，直流线路也有分体耐张塔，如图 3.2-11。



图 3.2-10



图 3.2-11

### 3.3 杆塔选型小节

本部分给出了输电线路交、直流线路杆塔选型最基本形式，但输电线路铁塔形式决不仅限于此，随着铁塔计算分析能力的发展，大变形、非线性塔型的设计成为可能。同时，随着在经济发达区路径协议取得越来越困难，三回路、四回路线路随之出现。这些塔型可以通过以上基本塔型合理组合，综合比较进行选型。

根据工程实际情况设计出技术可行，经济合理，同时外形美观的铁塔形式，一直是铁塔设计孜孜以求的目标。

## 4 铁塔选材

### 4.1 概述

上世纪七八十年代，我国的输电线路多为单回路线路，随着电力需求的增加，线路走廊的限制，同塔双回及多回线路的建设越来越多。铁塔的受力也越来越大，铁塔杆件的形式越来越复杂。原来单回路塔，杆件受力较小，常采用单角钢形式。对同塔双回路及多回路塔，首先尽量采用单角钢、在单角钢不够的情况下采用双拼角钢、四拼角钢；对大跨越塔，由于铁塔较高，塔身风荷载效应显著因此，为了减小塔身风荷载，一般采用钢管塔，部分采用组合式角钢塔。

国际上，在日本线路中，对受力较小的塔，采用角钢断面；对受力大的杆塔，不论是特高压线路，还是其它电压等级的多回路线路，使用钢管塔。在欧美，输

电线路铁塔杆件基本上都采用角钢。欧美可以生产的角钢规格  $L250 \times 35$ ，面积为  $162.75\text{mm}^2$ ，如用高强度角钢单角钢最大承载力可达到  $5300\text{kN}$ ，单角钢就可以满足同塔双回路铁塔的主材要求。

随着我国大肢角钢和高强钢的研究和发展，设计人员在铁塔选材上的灵活性越来越高。

## 4.2 杆件断面型式选择

杆件断面形式主要有角钢（包括单角钢、双拼角钢和四拼角钢）断面、钢管断面和格构式组合断面几种形式。

在以往的工程中，对负荷大，外型尺寸大的杆塔，倾向于采用钢管结构。主要原因有如下 2 点：

(1) 结构受力合理。钢管构件本身的受力性能要优于角钢。钢管的回转半径较大，在截面积和计算长度基本相同的条件下，钢管的回转半径约是单根角钢的 2 倍。为了减小细长比，提高角钢构件的承载力，通常需要采用辅助构件进行适当支撑，因而在一定程度上增加了铁塔的材料耗量。

另外，钢管构件的风阻力系数比较小，可以较大幅度降低铁塔的风荷载。根据计算，铁塔塔身风荷载在铁塔荷载计算中所占的比重较大，一般均在  $40 \sim 50\%$  之间。在  $1000\text{kV}$  双回路铁塔中，塔身风荷载的比重约占  $50\%$  左右。因此，采用风阻力系数相对较小的钢管塔对减轻铁塔重量效果比较明显。

(2) 塔材耗量小。由于结构受力的特点，钢管塔的单基重量要轻于角钢塔。从相关研究可以得出结论，角钢塔计算重量比钢管塔的计算重量要重  $12\% \sim 14\%$ 。虽然钢管塔造价比角钢塔要贵  $25\% \sim 30\%$  左右，但是钢管塔基础作用力明显小于角钢塔，基础工程量可大幅度降低，所以当钢管塔高度较高时，其经济性方面将会优于角钢塔。

在相同设计条件下所作的计算分析表明，采用钢管塔能有效降低铁塔重量，减轻基础作用力，表 4.2-1 为各种电压等级采用钢管塔塔重及基础作用力减小比例：

表 4.2-1

电压等级	500kV 单	500kV 双	750kV 单	750kV 双	±800kV 单	1000kV 单	1000kV 双
塔重	8%/4%	12%/7%	12%/7%	15%/10%	12%/7%	15%/10%	19%/14%
基础作用力	5%/20%						

注：表中“/”上为耐张塔，下为直线塔

但是，在加工方面，钢管塔自动化程度偏低，焊接工作量大,加工难度大、要求高，生产工期长；在运输、安装方面，成品占用空间大，安装运输安全要求高，尤其在山区线路运输困难，同时法兰螺栓扭矩较难保证。相比之下，角钢塔自动化程度高，焊接工作量小，工期短，质量可靠性高；同时，单件重量较轻，运输比较方便，施工质量容易检测和保证。

然而在以往工程真型塔试验中，主材双拼角钢设计中考虑两根角钢均匀受力，但由于杆件连接方式，缀板、塔材布置方式，以及材料瑕疵、加工和安装误差等原因，往往没有达到设计负荷时，一根角钢率先失稳而导致杆塔整体破坏。因此，设计上对主材采用双拼、四拼角钢需考虑这一影响。

### 4.2.1 主材断面选择

主材断面的选择主要决定于主材受力的大小，与铁塔的设计优化紧密相关，铁塔优化将在第 5 部分论述。

由于受规格影响，角钢承载力有一定的局限。目前国内常用的角钢的最大规格为 200×24，考虑大肢高强角钢，最大规格角钢可到 L250×35，目前大肢角钢的材质为 Q420。

由于塔身主材为压杆稳定控制，通常角钢主材计算长度在 2m 左右，长细比约为 40。下表以长细比 40 考虑，对不同材质、不同截面的最大承载力比较如表

4.2- 2:

表 4.2-2

角钢规格	Q345 (KN)	Q420 (KN)	Q460 (KN)
L200×24	2425	2894	3115



角钢规格	Q345 (KN)	Q420 (KN)	Q460 (KN)
2L200×24	4851	5788	6231
4L200×24	9702	11576	12461
L250×35	4376	5221	5620
2L250×35	8751	10441	11240
4L250×35	17502	20883	22480

由上表可见，Q460 大肢角钢较 Q420 承载力提高 7%，但目前还没有工程使用。

相对于角钢，我国目前铁塔加工厂制管能力很强，管径最大直径可达 2400mm，壁厚达 25mm(Q345)，可满足目前一般送电工程杆塔主材受力的需要。

## 4.2.2 斜材及横材断面选择

目前铁塔设计中，当主材选用角钢构件后，为便于加工采购，斜材及横材都采用角钢构件。

当主材选用钢管构件，考虑目前钢管构件的加工能力及价格，以及连接的便利，斜材及横材的选择需在角钢和钢管构件之间进行优化比较。

塔身斜材和横材与主材不同，除了受强度或稳定控制外，还受长细比控制，其长细比通常在 80-220 之间。

### 4.2.2.1 强度和稳定控制斜材及横材断面选择

强度控制斜材计算公式为  $N/A_n \leq m \cdot f$ 。

对于钢管构件，无论受压或受拉构件，以偏心连接考虑， $A_n$  钢管面积， $m=0.85$ ；对于角钢构件， $A_n$  为角钢净面积，对受拉构件， $m=0.7/0.55$ ；受压构件， $m=0.85$ 。因此强度控制杆件，钢管受力性能优于角钢。

稳定控制斜材： $N/(\Phi \cdot A) \leq mN \cdot f$ 。

钢管的回转半径较大，在截面积和计算长度基本相同的条件下，钢管的回转半径约是单根角钢的 2 倍。见表 4.2-3。

表 4.2-3

型式	规格	断面积 (cm <sup>2</sup> )	单位重量 (kg/m)	回转半径 (cm)
钢管	D168×4	20.609	16.18	5.8
角钢	L125×8	19.750	15.504	2.50 (最小轴)

因此稳定控制杆件，钢管受力性能优于角钢。

但是，采用角钢斜材具有以下优越性：

(1) 减少钢管构件使用的种类和数量。在一定范围内使用角钢，尤其是小规格的角钢，可以减少钢管构件使用的数量和种类。

(2) 降低铁塔加工难度。对于钢管构件，无论是相贯连接、法兰连接或者是插板连接，都存在大量的焊接工作量，采用部分角钢，用螺栓连接代替了许多的焊接工作，而且角钢可以大批量的加工生产，提高了加工效率。

(3) 降低铁塔施工难度。由于塔头、横担及隔面等构造复杂部位部分采用了角钢和螺栓连接，大大降低了塔头加工和拼装的难度。

(4) 铁塔质量易于控制。钢管的连接需要大量的焊接工作，而焊接的质量直接影响到铁塔结构的安全可靠。采用角钢连接最大限度地减少了由于焊缝质量引起的质量问题。

因此，通常采用角钢规格大于等于 L140X10 后，采用角钢构件重量明显较钢管构件大，选用钢管构件。

#### 4.2.2.2 长细比控制斜材及横材断面选择

按《杆塔结构设计规定》(DL/T5154-2002)规定，对角钢塔受压杆件  $K \cdot L_0/r \leq 220$ ，对长细比控制杆件， $K=1$ ，则  $L_0/r \leq 220$ ；钢管杆件由于微风振动，在“皖电东送”工程中，对于水平放置的杆件长细比不大于 140，倾斜放置的杆件长细比不大于 160。由此可见，钢管构件由于受微风振动的限制，长细比控制严于角钢构件。但在相同截面积下，钢管构件的回转半径大于角钢构件，因此需要对钢管和角钢做出比较。

下表 4.2-4 为按照“皖电东送”标准化设计钢管表，以长细比控制的不同钢

管规格对应的最大杆件长度。表 4.2-5 为角钢杆件以长细比控制的长度。

表 4.2-4(单位: mm)

规格	$\Phi 89 \times 4$	$\Phi 114 \times 4$	$\Phi 140 \times 4$	$\Phi 159 \times 4$	$\Phi 159 \times 5$	$\Phi 168 \times 4$
每米重量 (kg/m)	<b>8.38</b>	10.85	13.42	15.29	18.99	16.18
水平放置 $\lambda=140$	4213	5449	6734	7675	7627	8120
倾斜放置 $\lambda=160$	4814	6227	7696	8771	8717	9280
规格	$\Phi 168 \times 5$	$\Phi 194 \times 5$	$\Phi 194 \times 6$	$\Phi 219 \times 5$	$\Phi 219 \times 6$	$\Phi 273 \times 6$
每米重量 (kg/m)	20.1	23.31	27.82	26.39	31.52	39.51
水平放置 $\lambda=140$	8072	9358	9310	10595	10548	13219
倾斜放置 $\lambda=160$	9226	10694	10640	12109	12054	15107

表 4.2-5(单位: mm)

规格	L90×6	L90×7	L90×8	L100×6	L100×7	L100×8
单位重量 kg/m	<b>8.35</b>	9.656	10.946	9.367	<b>10.83</b>	12.276
长度(mm) $\lambda=220$	3960	3916	3916	4400	4378	4356
规格	L100×10	L110×7	L110×8	L110×10	L125×8	L125×10
单位重量 kg/m	15.12	11.929	<b>13.532</b>	16.69	<b>15.504</b>	19.133
长度(mm) $\lambda=220$	4312	4840	4818	4774	5500	5456
规格	L125×12	L140×10	L140×12	L140×14	L160×10	L160×12
单位重量 kg/m	22.696	21.488	25.522	29.49	24.729	29.391
长度(mm) $\lambda=220$	5412	6116	6072	6050	7040	6996
规格	L160×14	L180×12	L180×14	L180×16	L180×18	L200×14
单位重量 kg/m	33.987	33.159	38.383	43.542	48.635	42.984
长度(mm) $\lambda=220$	6952	7876	7832	7810	7722	8756

对比表 4.2-4、表 4.2-5，由于目前市场钢管构件的截面种类的局限性，当斜材由长细比控制时，可以分为如下几个区间，见表 4.2-6：

表 4.2-6

杆件计算长度 L (mm)	$L \leq 3960$	$3960 < L \leq 4213$	$4213 < L \leq 4378$	$4378 < L$
水平斜材选用规格	角钢	$\Phi 89 \times 4$	角钢	钢管
杆件计算长度 L (mm)	$L \leq 3960$	$3960 < L$		
倾斜斜材选用规格	角钢	钢管		

简而言之，理论上钢管塔中，对于水平放置，长度大于 4400mm 的长细比控制的构件，选用钢管构件；对倾斜放置，长度大于 4000mm 的长细比控制的构件，选用钢管构件。

因此，受长细比控制的横隔面内水平隔材、塔腿 V 面辅助材、以及横担上、下水平面斜材，可以考虑采用角钢构件，减少塔重。

### 4.3 大规格角钢

以前我国输电线路铁塔所用规格肢宽均在 200mm 以下，因承载力有限，导致特高压及一些承载力大的塔型，塔身主材需采用双拼或多拼组合角钢。双拼或多拼组合角钢使铁塔构件的加工数量增加，角钢间填板的焊接质量构成铁塔安全控制因素之一。从设计角度来说，由于采用双拼或多拼组合角钢，使得铁塔钢耗指标偏高。从加工、施工的角度看，组合角钢的构件增加，螺栓数量增多，螺栓的通过厚度和通过层数增加，给输电线路铁塔的加工和施工造成很大难度。

采用大规格角钢，由于规格宽和规格厚均加大，大幅提高单构件的承载能力，可以实现单根大规格角钢代替组合角钢。采用单角钢后，消除了角钢间填板焊接质量构成的铁塔安全隐患，改变组合角钢不合理的截面形式，减少了螺栓使用数量，减低铁塔钢耗指标，有利于造价控制和节能减排，使铁塔组立的施工量和施工难度大大减轻。

为充分利用大规格角钢的特点，设计上要根据大规格角钢的截面特性，理论分析其受力特性、承载力和长细比的关系，计算出各规格角钢的最优计算长度及极限承载力，对工程应用大规格角钢提供技术保证与支持。

### 4.3.1 普通规格角钢与大截面角钢截面特性对比

为了更好地分析普通规格角钢与大截面角钢的受力特点，表 0-1、表 0-2 分别给出了两者的截面参数。

表 0-1 普通规格双组合角钢与大截面单角钢参数表

角钢规格	截面面积 (cm <sup>2</sup> )	重量 (kg/m)	+布置最小轴/ 最小轴回转半径 (cm)	T 布置最小轴/ 平行轴回转半径 (cm)
2L160×10	63.004	49.46	6.27	4.98
2L160×12	74.882	58.78	6.24	4.95
2L160×14	86.6	67.98	6.2	4.92
2L160×16	98.14	77.04	6.17	4.89
2L180×12	84.482	66.32	7.05	5.59
2L180×14	97.792	76.77	7.02	5.57
2L180×16	110.934	87.08	6.98	5.54
2L200×14	109.284	85.79	7.82	6.2
2L200×16	124.02	97.36	7.79	6.18
2L200×20	153	120.11	7.72	6.12
2L200×24	181.32	142.34	7.64	6.07
L220×16	68.664	53.90	4.37	6.81
L220×18	76.752	60.25	4.35	6.79
L220×20	84.756	66.53	4.34	6.76
L220×22	92.676	72.75	4.32	6.73
L220×24	100.512	78.90	4.31	6.7
L220×26	108.264	84.99	4.3	6.68
L250×18	87.842	68.96	4.97	7.74
L250×20	97.045	76.18	4.95	7.72
L250×24	115.201	90.43	4.92	7.66
L250×26	124.154	97.46	4.9	7.63

角钢规格	截面面积 (cm <sup>2</sup> )	重量 (kg/m)	+布置最小轴/ 最小轴回转半径 (cm)	T 布置最小轴/ 平行轴回转半径 (cm)
L250×28	133.022	104.42	4.89	7.61
L250×30	141.807	111.32	4.88	7.58
L250×32	150.508	118.15	4.87	7.56
L250×35	163.402	128.27	4.86	7.52

由表 0-1 可知, 普通规格双组合十字角钢(2L160X10~2L200X24)的截面面积范围为 63~181cm<sup>2</sup>, 最小轴回转半径范围为 6.27~7.64cm; 大规格单角钢 (L220X16~ L250X35)截面面积范围为 69~164cm<sup>2</sup>, 最小轴回转半径范围为 4.37~4.86cm。因此从杆件的强度来看, 大规格单角钢除 2L200X24 外均能够替代普通规格的双组合十字角钢。但大规格单角钢最小轴回转半径较双组合十字角钢小很多(为双组合角钢的 65%~70%), 因此在相同计算长度情况下, 大规格单角钢受压稳定相对较差。为了充分发挥大规格单角钢强度承载力, 在杆件布置上需减小节间长度或增加辅助材减少其计算长度。

表 0-2 普通规格四组合角钢与大截面双组合角钢参数表

角钢规格	截面面积 (cm <sup>2</sup> )	重量 (kg/m)	绕最小轴回转半径 (cm)
4L160×14	173.184	135.95	6.62
4L160×16	196.268	154.07	6.69
4L180×12	168.964	132.64	7.44
4L180×14	195.584	153.53	7.45
4L180×16	221.868	174.17	7.49
4L200×14	218.568	171.58	8.28
4L200×16	248.052	194.72	8.29
4L200×18	277.204	217.61	8.33
4L200×20	306	240.21	8.37
4L200×24	362.64	284.67	8.41

2L220×16	137.328	107.80	8.59
2L220×18	153.504	120.50	8.55
2L220×20	169.512	133.07	8.52
2L220×22	185.352	145.50	8.48
2L220×24	201.024	157.80	8.45
2L220×26	216.528	169.97	8.41
2L250×18	175.684	137.91	9.76
2L250×20	194.09	152.36	9.73
2L250×24	230.402	180.87	9.66
2L250×26	248.308	194.92	9.62
2L250×28	266.044	208.84	9.58
2L250×30	283.614	222.64	9.55
2L250×32	301.016	236.30	9.51
2L250×35	326.804	256.54	9.46

由表 0-2 可知，普通规格四组合十字角钢(4L160X14~4L200X24)的截面面积范围为 173~363cm<sup>2</sup>，最小轴回转半径范围为 6.62~8.41cm；大规格双组合角钢(2L220X16~ 2L250X35)截面面积范围为 137.328~326.804cm<sup>2</sup>，最小轴回转半径范围为 8.52~9.55cm。因此从杆件的强度来看，大规格双组合角钢截面面积比普通规格四组合角钢小，但四组合角钢减孔数比双组合角钢大，两者净面积相当，即双组合大规格角钢代替四组合角钢可以满足强度要求。另外，双组合大规格角钢比普通规格四组合角钢的回转半径大 12%~28%，因此大规格双组合角钢较普通规格四组合角钢有更大的计算长度。

### 4.3.2 角钢临界长度的计算

铁塔构件的承载能力与构件的长度、截面面积、连接方式及材料屈服强度有关。当构件由强度控制时，构件需要选取的截面面积与其所承担的内力成正比，内力愈大，所需截面面积愈大；当构件由稳定控制时，构件规格的选取则不仅仅

与其所承担的内力有关外，还与构件本身的长度有关。内力不变时，构件的长度越长，所需规格越大；而长度不变时，内力越大，所需规格也越大。因此，构件计算长度确定合适与否将直接影响其规格的选择，构件的最佳计算长度为强度与稳定相当时的计算长度即是临界长度。

表 0-1 普通规格双组合角钢与大截面单角钢临界长细比及临界长度

规 格	临界压曲系数 $\mu$	临界长细比 $\lambda_{cr}$		临界长度 $L_{c0}(\text{cm})$	
		Q345	Q420	Q345	Q420
2L160×12	0.838	44.5	40.3	277.7	251.5
2L160×14	0.817	48.0	43.5	297.6	269.7
2L160×16	0.816	48.2	43.6	297.4	269.0
2L180×14	0.827	46.3	42.0	325.0	294.8
2L180×16	0.823	47.0	42.6	328.1	297.3
2L200×16	0.839	44.4	40.2	345.9	313.2
2L200×20	0.830	47.2	42.6	364.4	328.9
2L200×24	0.828	47.5	42.9	362.9	327.8
L220×18	0.846	44.5	40.0	193.6	174.0
L220×20	0.845	44.6	40.2	193.6	174.5
L220×22	0.845	44.6	40.2	192.7	173.7
L220×24	0.844	44.7	40.4	192.7	174.1
L220×26	0.843	44.9	40.6	193.1	174.6
L250×20	0.863	41.2	37.2	203.9	184.1
L250×24	0.861	41.7	37.5	205.2	184.5
L250×26	0.861	41.7	37.5	204.3	183.8
L250×28	0.860	41.8	37.7	204.4	184.4
L250×30	0.860	41.8	37.7	204.0	184.0
L250×32	0.859	42.0	37.9	204.5	184.6
L250×35	0.858	42.2	38.0	205.1	184.7



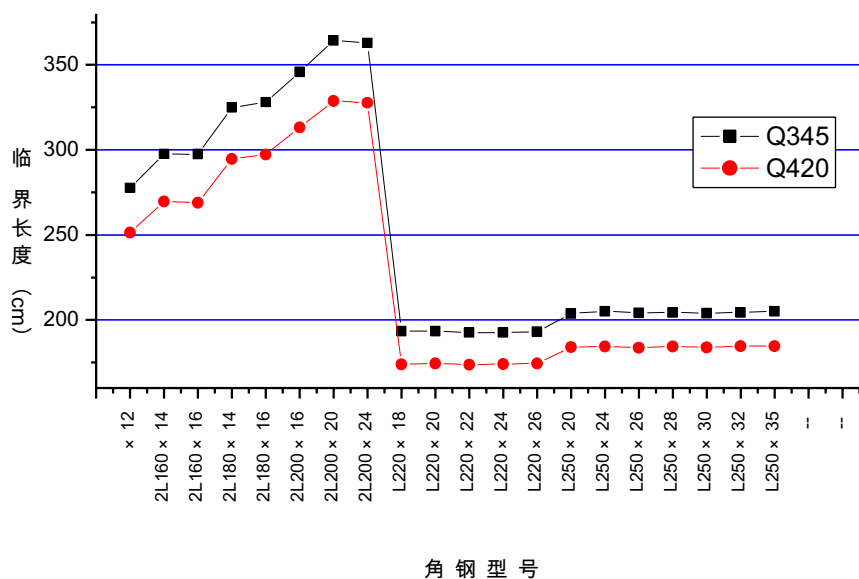


图 0-1 普通规格双角钢与大截面单角钢临界长度对比

图 0-1 直观体现了普通规格双角钢与大肢单角钢临界计算长度的差异，不难看出，普通规格双角钢的临界计算长度比大肢单角钢的临界计算长度明显要大许多，普通规格双角钢可以设置较大的节间，而强度没有削弱，所用辅助材较少，相反大肢单角钢的节间布置较小，所用辅助材必定很多。

下面列表计算出大肢规格的双十字组合角钢与四组合普通单角钢的临界长度。

表 0-4 普通规格四组合角钢与大截面双十字角钢临界长细比及临界长度

规格	临界压曲系数 $f_{cr}$	临界长细比 $l_{cr}$		临界长度 $L_{c0}$ (cm)	
		Q345	Q420	Q345	Q420
4L160×14	0.817	48	43.5	321.1	291
4L160×16	0.816	48.2	43.6	319.1	288.6
4L180×14	0.827	46.4	42	345.7	312.9
4L180×16	0.823	47	42.6	352	319.1
4L200×16	0.839	44.4	40.2	368.1	333.3
4L200×18	0.838	45.8	41.3	381.5	344
4L200×20	0.83	47.2	42.6	395.1	356.6
4L200×24	0.828	47.5	42.9	399.5	360.8
2L220×18	0.846	44.5	40	380.5	342

规格	临界压曲系数 $f_{cr}$	临界长细比 $\lambda_{cr}$		临界长度 $L_{c0}$ (cm)	
2L220×20	0.845	44.6	40.2	380	342.5
2L220×22	0.845	44.6	40.2	378.2	340.9
2L220×24	0.844	44.7	40.4	377.7	341.4
2L220×26	0.843	44.9	40.6	377.6	341.4
2L250×20	0.863	41.2	37.2	400.9	362
2L250×24	0.861	41.7	37.5	402.8	362.3
2L250×26	0.861	41.7	37.5	401.2	360.8
2L250×28	0.86	41.8	37.7	400.4	361.2
2L250×30	0.86	41.8	37.7	399.2	360
2L250×32	0.859	42	37.9	399.4	360.4
2L250×35	0.858	42.2	38	399.2	359.5

由上表可以看出，普通规格四组合角钢临界计算长度(2.8m~3.5m)比大规格双组合角钢的临界计算长度(3.4m~3.6m)要小。因此，在铁塔节间布置时，大规格的双组合角钢较普通规格的四组合角钢可取更大的计算长度。

### 4.3.3 普通规格角钢与大截面角钢承载力分析

铁塔构件的承载能力主要受强度与稳定两个方面因素的影响，当构件的规格由强度控制时，其承载能力与构件截面面积有关；当构件由稳定控制时，其承载力主要与构件的长细比有关，下面我们计算出 Q420 钢材，普通规格双组合角钢及大规格角钢在不同长细比条件下的构件承载力见下表：

表 0-1 普通规格双组合角钢与大截面单角钢承载力对比表(Q420)

规格/材质	强度承载力(kN)	不同长细比对应的受压稳定承载力(kN)									
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	120
Q420											
2L160×10	1965	1871	1774	1659	1520	1356	1179	1010	859	733	543
2L160×12	2330	2635	2499	2337	2140	1909	1661	1422	1210	1032	764
2L160×14	2690	3118	2956	2765	2532	2259	1965	1682	1432	1221	904
2L160×16	3042	3533	3350	3133	2869	2560	2227	1906	1623	1383	1025

规格/材质	强度承载力 (kN)	不同长细比对应的受压稳定承载力 (kN)									
Q420		20	30	40	50	60	70	80	90	100	120
2L180×12	2648	2651	2513	2351	2153	1920	1671	1430	1217	1038	769
2L180×14	3062	3505	3324	3108	2847	2540	2210	1891	1610	1373	1017
2L180×16	3469	3994	3787	3541	3244	2893	2517	2155	1834	1564	1158
2L200×14	3486	3595	3409	3188	2920	2605	2266	1940	1651	1408	1043
2L200×16	3952	4465	4233	3959	3626	3235	2814	2409	2051	1748	1295
2L200×20	4571	5218	4948	4627	4238	3780	3289	2816	2397	2043	1513
2L200×24	5407	6184	5863	5484	5022	4480	3898	3337	2840	2422	1793
L220×16	2209	2347	2226	2082	1907	1701	1480	1267	1078	919	681
L220×18	2338	2618	2482	2321	2126	1896	1650	1412	1202	1025	759
L220×20	2579	2891	2741	2563	2348	2094	1822	1560	1328	1132	838
L220×22	2818	3161	2997	2803	2567	2290	1992	1706	1452	1238	917
L220×24	3054	3428	3250	3040	2784	2484	2161	1850	1574	1342	994
L220×26	3286	3692	3501	3274	2999	2675	2327	1992	1696	1446	1071
L250×18	2730	2823	2676	2503	2292	2045	1779	1523	1296	1105	819
L250×20	3013	3310	3138	2935	2688	2398	2086	1786	1520	1296	960
L250×24	3572	3929	3725	3484	3191	2847	2477	2120	1804	1539	1139
L250×26	3847	4234	4015	3755	3439	3068	2669	2285	1945	1658	1228
L250×28	4119	4537	4302	4023	3685	3287	2860	2448	2084	1777	1316
L250×30	4388	4836	4586	4289	3928	3504	3049	2610	2221	1894	1403
L250×32	4654	5133	4867	4552	4169	3719	3236	2770	2358	2010	1489
L250×35	5048	5573	5284	4942	4526	4038	3513	3007	2560	2182	1616

表 0-2 普通规格四组合角钢与双组合大规格角钢承载力对比表(Q420)

规格/材质	强度承载力	不同长细比对应的受压稳定承载力 (kN)									
Q420	(kN)	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120
4L160×14	5379	6234	5911	5529	5064	4517	3930	3364	2863	2441	1808
4L160×16	6084	7065	6699	6266	5739	5119	4454	3813	3245	2767	2049
4L180×12	5296	5301	5026	4701	4306	3841	3342	2861	2435	2076	1537
4L180×14	6123	7010	6647	6217	5694	5079	4419	3783	3220	2745	2033
4L180×16	6938	7987	7573	7083	6487	5787	5035	4310	3668	3128	2316
4L200×14	6972	7191	6818	6377	5840	5210	4533	3880	3303	2816	2085
4L200×16	7905	8930	8467	7919	7253	6470	5629	4819	4101	3497	2590
4L200×18	8361	9454	8964	8384	7678	6849	5959	5101	4342	3702	2742
4L200×20	9142	10436	9895	9255	8476	7561	6578	5631	4793	4087	3026
4L200×24	10814	12368	11727	10968	10045	8960	7796	6674	5680	4843	3587
2L220×16	4419	4695	4452	4164	3813	3402	2959	2533	2156	1839	1362
2L220×18	4675	5235	4964	4643	4252	3793	3300	2825	2404	2050	1518
2L220×20	5158	5781	5482	5127	4695	4188	3644	3120	2655	2264	1677
2L220×22	5635	6321	5994	5606	5134	4580	3985	3411	2903	2475	1833
2L220×24	6107	6856	6501	6080	5568	4967	4322	3699	3149	2685	1988
2L220×26	6573	7385	7002	6549	5998	5350	4655	3985	3392	2892	2142
2L250×18	5459	5645	5353	5006	4585	4090	3558	3046	2593	2211	1637
2L250×20	6027	6619	6276	5870	5376	4796	4172	3572	3040	2592	1920
2L250×24	7144	7858	7451	6968	6382	5693	4953	4240	3609	3077	2279
2L250×26	7694	8468	8030	7510	6878	6135	5338	4570	3889	3316	2456
2L250×28	8238	9073	8603	8046	7369	6574	5719	4896	4167	3553	2631
2L250×30	8776	9672	9171	8578	7856	7008	6097	5219	4442	3788	2805
2L250×32	9309	10266	9734	9104	8338	7438	6471	5540	4715	4020	2977
2L250×35	10097	11145	10568	9884	9052	8075	7026	6014	5119	4364	3232

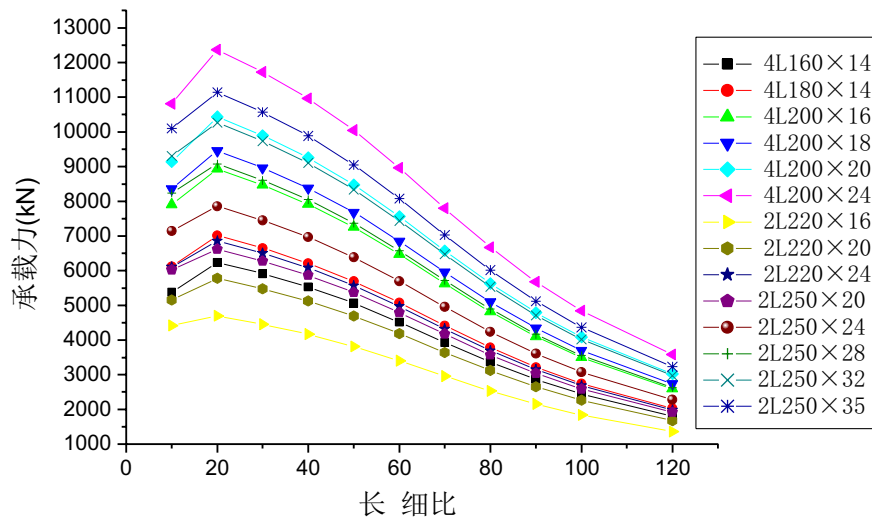


图 0-1 普通规格四组合角钢与大截面双组合角钢承载力对比图 (Q420)

从上表中可以看出长细比 30-40 左右时，角钢的稳定承载力与强度承载力基本相当，从对比图中可以看出角钢承载力越大，随着长细比的增大，其衰减的越快，这与构件临界长度分析的结果是相同的。

从上表中承载力的数值可以看出，采用大规格角钢可以代替大多数双组合角钢(除 2L200×24 外)，采用双组合大规格角钢可以代替四组合的普通四组合角钢，组合角钢的数量越多，组成铁塔的构件就越多，铁塔重量就相对越重，加工、施工的难度就越大。因此采用大规格角钢的优越性就越明显。

#### 4.3.4 普通双肢角钢与大截面角钢的塔重分析

一般说来，采用大肢角钢计算塔重较双拼或四拼角钢计算塔重相当或略重，但考虑上实际工程中缀板重量，以及双肢角钢的接头及变坡处节点构造（图 4.3-3），采用大肢角钢的塔重量轻于主材拼接的塔重。

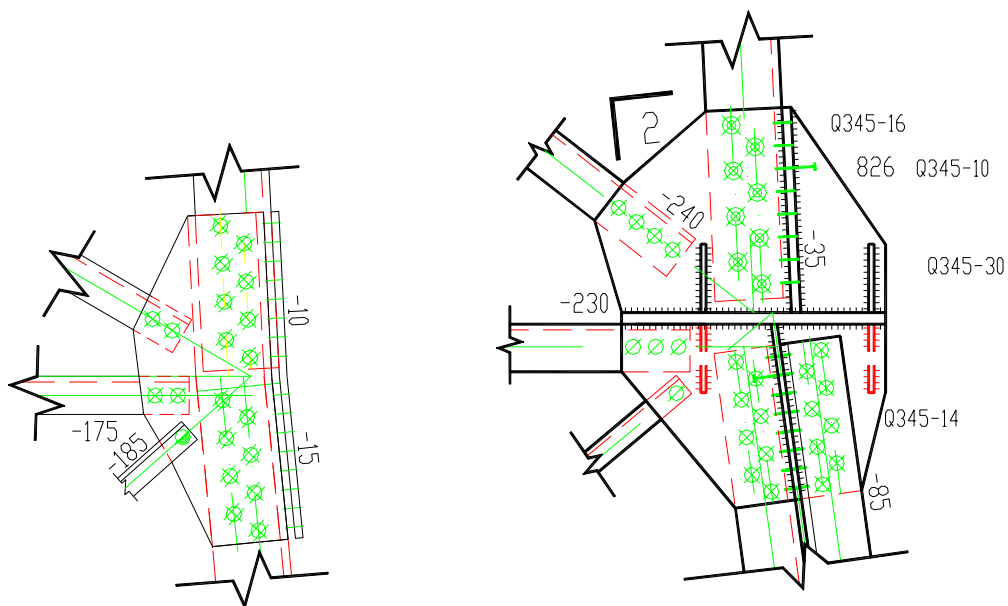


图 0-3 变坡节点构造图

## 4.4 材质选择

### 4.4.1 材质选择概述

目前国内输电线路杆塔用钢材一般采用 Q235、Q345 和 Q420。Q235 钢一般用在斜材、辅助材、非受力材等受力相对较小的部位；Q345 钢一般用在主材、挂点材等受力相对较大的部位；对荷载较大的双回路、多回路或特高压工程，主材也考虑采用 Q420。

自 2007 年以来，Q460 钢开始用于国内输电线路铁塔中。其中直线塔塔重减轻约 5%-6%，转角塔塔重减轻约 6-9%，具有明显的经济效益和社会效益。但由于目前 Q460 的使用还没有形成规模，在材料采购上存在一定困难。

### 4.4.2 高强钢材料参数

依据 GB50017-2003《钢结构设计规范》和 DL/T5092-1999《110-500kV 架空送电线路设计技术规程》，在对构件试验研究的基础上给出高强度钢的强度设计值如下表 4.4-1：

表 4.4-1

材 料 类 别		厚度或直径 mm	抗 拉 f	抗压和抗弯 f	抗剪 $f_v$	孔壁承压 $f_c$
钢 材	Q390	16	350	350	205	530
		16-35	335	335	190	510
		35-50	315	315	180	480
	Q420	16	380	380	220	560
		16-35	360	360	210	530
		35-50	340	340	195	510
	Q460	16	415	415	240	590
		16-35	395	395	230	560
		35-50	380	380	220	540

### 4.4.3 高强钢设计计算

杆塔结构设计是在满足线路电气性能要求的基础上,通过荷载计算、结构体系选择、结构内力与变形分析,强度、稳定和刚度等计算,得出最优的杆塔型式的过程。采用以概率理论为基础的极限状态设计方法,用可靠度指标度量结构构件的可靠度,在规定的各种荷载组合作用下或各种变形的限值条件下,满足线路安全运行的临界状态。

以下将以铁塔的不同受力杆件进行论述,着重对受拉强度、受压杆件的稳定计算方法进行分析,以此来说明高强钢的受力特性。

#### 4.4.3.1 轴心受力强度控制杆件的计算

铁塔构件的选取主要是取决于其受力状态,对于铁塔受力材,其主要由轴心受力的强度及轴心受压稳定控制来确定。对于轴心受力构件的强度计算公式如下:

$$N/A_n \leq m \cdot f$$

式中：

$N$ —轴心拉力或压力设计值；

$m$ —构件强度折减系数；

$A_n$ —构件净截面面积；

$f$ —钢材的强度设计值。

上式中， $A_n$  和  $m$  均与材料的强度等级无关，对于轴心受力强度的控制构件，其选材主要是由材料本身的强度来决定，下表 4.4-2 列出各钢种的强度比值：

表 4.4-2 各强度等级钢材的强度承载力比值(厚度 $<16\text{mm}$ )

钢材品种	抗拉或压设计值 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	与 Q235 的承载力比值	与 Q345 的承载力比值
Q235	215	1	/
Q345	310	1.44	1
Q390	350	1.63	1.13
Q420	380	1.77	1.23
Q460	415	1.93	1.34

由上表可知，采用高强度钢材，对于由轴心受力强度控制的单根杆件，其强度和承载能力都有较大幅度提高，Q460 钢分别为 Q235 钢和 Q345 钢的 1.93 和 1.34 倍。

因此，在杆塔设计中，由轴心受力强度控制的构件采用高强钢有明显的优势，如受拉的横担上平面主材、大荷载下轴心受压的主材等，采用高强钢降低耗钢量指标效果明显。

#### 4.4.3.2 轴心受压稳定控制杆件的计算

铁塔结构大部分的杆件由受压稳定控制，如横担下平面主材塔身主材斜材等根据《架空送电线路杆塔结构设计技术规定》(DL/T 5154-2002) 对于由轴心受压稳定控制的受力杆件，其计算公式如下：

$$N/(\phi \cdot A) \leq m N \cdot f$$



式中：

$N$ —轴心受压稳定的压力设计值；

$\phi$ —铁塔轴心受压构件稳定系数；

$A$ —构件毛截面面积；

$mN$ —压杆稳定强度折减系数，（参看规定 8.1.2 条）

$f$ —钢材的强度设计值。

对截面确定的钢管塔轴心受压稳定控制杆件承载力决定于杆件的强度和稳定系数。高强钢在强度上提高很多，但其稳定系数折减也比 Q345 钢材快。

受压稳定系数的主要影响因素就是构件的长细比，构件强度在压稳系数的计算时也有一定影响。随着钢材强度的增加，其稳定系数是减小的，也就是说杆件的承载能力并没有随其钢材强度增加而相应的成正比增长。

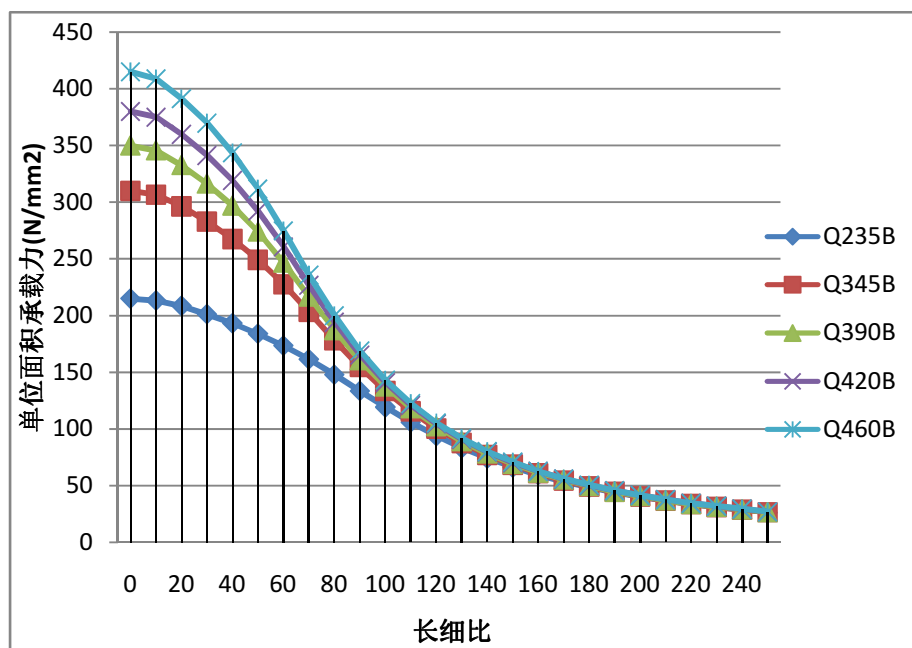


图 4.4-1 单位面积承载力与长细比的关系

如上图 4.4-1 可以看出：随着杆件长细比的增加，其单位面积的承载力迅速的下降，在长细比  $\lambda = 120$  左右曲线变化趋于平缓，三条曲线逐渐接近。对压杆来说，当  $\lambda > 120$  时，Q460、Q420、Q345 与 Q235 钢相比几乎无优势，此时就没必要选用高强度的钢材。

通常情况下，主材的长细比在 0~70 之间，杆件主要受压杆稳定强度控制。由图可知，在此区间 Q460、Q420 钢比 Q345 及 Q235 钢具有明显的优势，这时

采用高强度钢对减小主材的规格，降低杆塔重量及基础作用力都是非常有利的。

对塔身交叉腹杆，其长细比一般在 80~220 之间，材质选用时根据具体的长细比情况确定；长细比在 120 以上时，选用 Q235 钢，对长细比在 80~110 之间的腹杆可根据具体的受力情况选用合适钢材材质。

#### 4.4.4 钢管构件径厚比

我国钢结构规范规定，钢管的径厚比取值应符合下式：

$$\frac{D}{t} \leq \frac{23500}{f_y}$$

式中， $f_y$  为材料屈服应力(N/mm<sup>2</sup>)，对于 Q460 径厚比为 51。

《欧洲钢结构设计规范》EC3 按构件截面的宽厚比的不同将其分为四类，其定义如下：

第 1 类截面(塑性截面)：可形成塑性铰，该塑性铰的转动能力满足塑性铰要求；

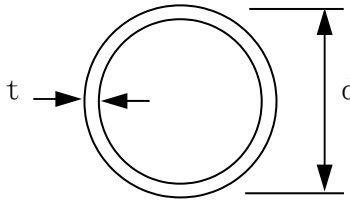
第 2 类截面(紧凑截面)：可形成塑性弯矩抗力，仅具有有限的转动能力；

第 3 类截面(半紧凑截面)：钢构件的最外受压边缘纤维计算应力可以达到其屈服强度，但易于产生局部屈曲，从而阻止了塑性弯矩承载力的形成。

第 4 类截面(细长截面)：断面的某个或多个部位达到屈服应力之前就产生局部屈曲。

表 4.3-3 列出了欧洲规范钢管对其规定的前三类截面的最大径厚比限值：

表 4.3-3 欧洲规范钢管最大径厚比限值

管状截面						
						
受弯及/或受压截面						
截面类型	$f_y$	235	275	355	420	460
1	$d/t \leq 50\epsilon^2$	50.0	42.5	33.0	28.0	25.5
2	$d/t \leq 70\epsilon^2$	70.0	59.5	46.2	39.2	35.7
3	$d/t \leq 90\epsilon^2$	90.0	76.5	59.4	50.4	45.9
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	$\epsilon$	1.00	0.92	0.81	0.75	0.71
	$\epsilon^2$	1.00	0.85	0.66	0.56	0.51

根据工程实践及节点试验，钢管塔设计中，一般对 Q345 主材径厚比取 55，Q420 主材径厚比取 50，Q460 主材径厚比取 45。

## 5 杆塔优化

杆塔在保证铁塔的强度、可靠度、稳定性和必要的刚度、满足变形要求的前提下，通过铁塔结构优化设计，力求满足以下要求：

- 1、结构形式简洁，杆件受力明确，结构传力路线清晰；
- 2、结构构造简单，节点处理合理，利于加工安装和安全运行；
- 3、结构布置紧凑，尽量减少线路走廊宽度，节约有限的土地资源；
- 4、结构节间划分和构件布置合理，充分发挥构件的承载能力；
- 5、结构选材合理，降低铁塔钢材耗量，使铁塔造价经济合理。
- 6、方便加工和施工。

塔型结构优化设计按照从宏观到微观、从整体到局部的顺序进行，即从铁塔型式到铁塔外形、再到结构的细部构造的顺序开展工作。铁塔结构设计优化的步

骤如图 5-1:

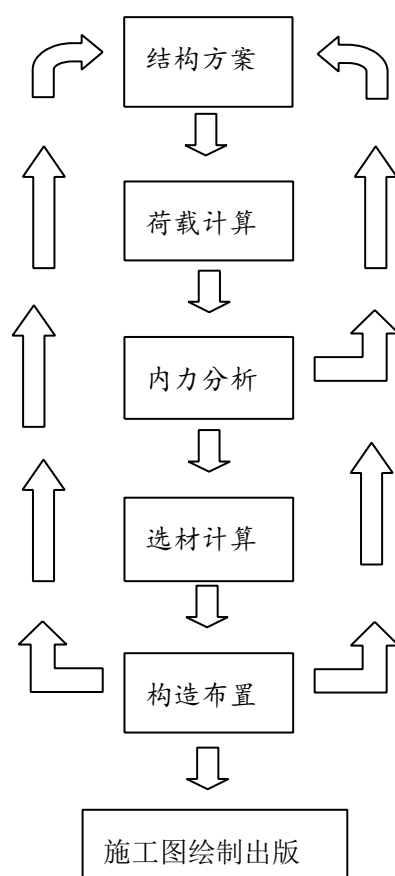


图 5-1 优化设计步骤

以下具体由塔头、塔身等分别给出优化内容和方法。

## 5.1 塔头优化

塔头的形式直接影响到杆塔的塔高、受力性能和经济性。因此如何在满足电气尺寸的条件下,结合塔头受力特点选择适当的塔头形式和尺寸,将对铁塔起到重要的影响。

在塔型确定的前提下，塔头优化包括：

### 5.1.1 上导线横担及地线支架形式优化

上导线横担与地线横担通常有共架和不共架两种形式，见图 5.1-1，通常决定于地线挂点与导线挂点的高度差，对于悬垂塔常采用共架形式，而耐张塔，采

用地线横担单独架设的形式。

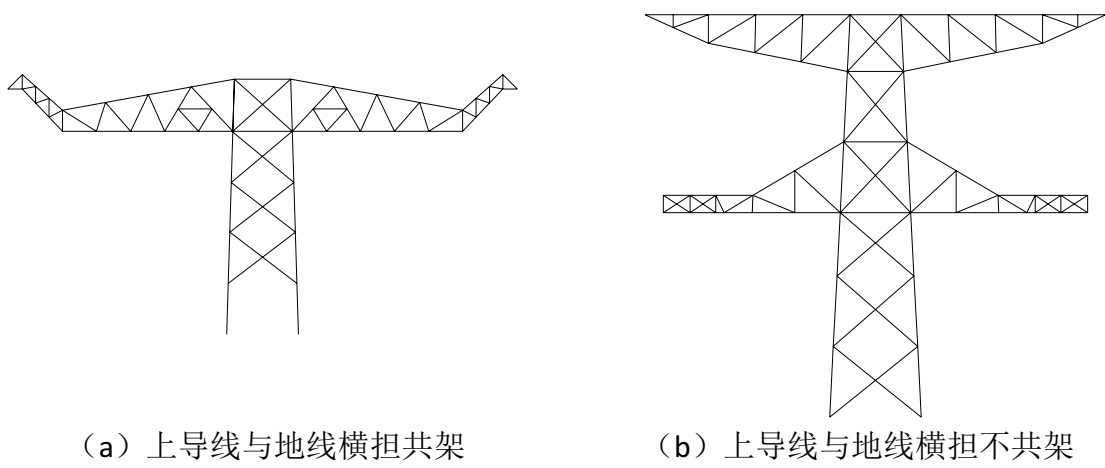


图 5.1-1

上导线与地线横担不共架，塔身高度比较大，塔身上部主材强度利用不充分。优点是导、地线传力途径独立、清晰，地线不对上导线横担增加附加荷重。适合于导地线挂点间距较大的塔型。

上导线与地线横担共架按支架形式又分为表 5.1-1 几种形式：

表 5.1-1

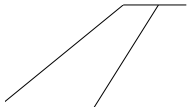
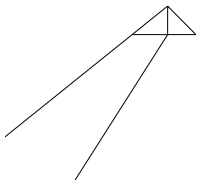
上导线与地线共架	方案一	方案二	方案三
图示			
特点	塔头形式简练，传力路径清晰，塔身高度小；但横担下主材与塔身主材连接处考虑节点构造需控制夹角度数；导线挂架较长。塔重轻。	传力路径清晰，塔身高度小；横担下主材与塔身主材连接处考虑节点构造需控制夹角度数；地线支架与导线横担存在变坡。塔重较轻。	传力路径清晰，塔身高度较前两种方案大；横担主材与塔身主材连接节点构造便利；塔重较重。

从构造便利角度，方案一盒方案三比较常用。

### 5.1.2 地线支架型式

常用的地线支架型式有两种，如下表 5.1-2。

表 5.1-2

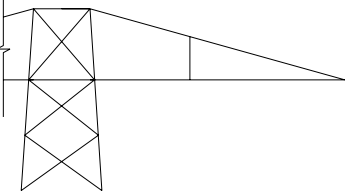
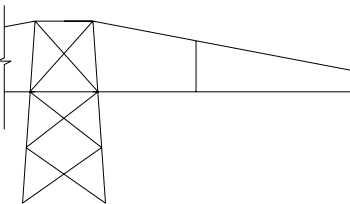
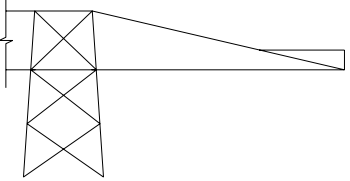
地线支架型式		特 点
型式一		该型式挂线杆件直接受弯，导致挂线杆件规格较大，挂线节点构造困难，一般用于荷载较小的角钢塔。
型式二		该型式避免了挂线杆件直接受弯的问题，结构受力合理，便于节点构造。

根据上表中两方案的比较，结合地线头受力的特点，对地线支架进行优化选择。

### 5.1.3 导线横担型式

杆塔横担普遍采用的是三角型横担或梯形横担(如下表 5.1-3 中的方案一、方案二和方案三)。

表 5.1-3

横担型式		特 点
型式一		传力直接。在横担与塔身连接部位高度确定情况下，降低由间隙圆控制的上下横担垂直高度，从而降低塔高，但横担端部竖向位移大于方案二的情况；但横担端部夹角过小，钢管塔节点构造和加工制造困难；同时导线挂点处杆件受弯。塔重略轻。
型式二		避免了横担端部夹角过小，便于端部节点的构造和加工制造；横担刚度大于方案一，横担端部竖向位移小；解决了导线挂点处杆件受弯得文体；但塔高略高于方案一；横担正面斜材受力较大。塔重较方案一略重。
型式三		在型式一得基础上解决了导线挂点处杆件受弯的问题，但塔高较型式一略高，塔重略大。

从上表三种型式比较看出，型式一可以减小导线横担间得层间距，降低塔高。但对于荷载较大的杆塔，为减小横担端部竖向位移，横担与塔身端部连接段高度需要增加；同时由于横担拉、压主材夹角小，不利于构造，且导线挂点处杆件受弯。

型式二和型式三适用于荷载较大的杆塔。型式三解决了导线挂点处杆件受弯的问题，但塔高增加，且横担拉、压主材夹角小，不利于构造。型式二进一步加强了横担刚度，构造便利，但塔重较重。

因此横担选型需根据铁塔荷载情况加以具体分析判定。

### 5.1.4 横担尺寸优化

横担外伸长度及横担层间距主要由间隙圆及导线间水平距离控制。

横担根部高度取值，需考虑横担刚度、节点构造等因素，及经济性加以选择。根部高度增加，横担刚度提高，如采用 5.1.3 形式一或形式三，横担拉压主材夹角大，便于构造；但同时整塔高度增加，斜材变长，材料利用不充分，塔重增加。

一般来说，上、中、下横担根部高度增加，塔全高及斜材长度随之有缓步增高，在某一取值时，横担主材受力最合理，塔重最轻，随着根部高度进一步增加，塔重增加。总体上说，塔计算重量变化不大，在 1%范围内。但横担根部高度变化对横担竖向变形影响较显著，关系到横担预拱取值的合理性。

### 5.1.5 导线横担上平面布置形式优化

铁塔设计中横担上平面一般并不完全封闭，通常两种做法：最靠近塔身的一副交叉材不设置，或横担端部的一副交叉材不设置，如下图，横担上平面交叉材以长细比控制，理论计算应为零杆。

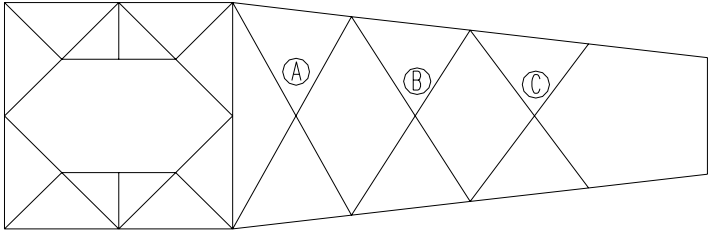


图 5.1-2 传统横担上平面斜材布置方式

在晋东南-南阳 1000kV 线路工程交流试验示范工程中 JTS1、“皖电东送”

1000kV 双回路工程中 SZC302 和 SJC302 铁塔试验过程中临近不封闭段的交叉斜采压杆产生局部屈曲,经分析主要原因为:由于特高压采用大截面 8 分裂导线,杆塔承受的荷载约为 500KV 工程的两倍以上,横担上平面主材规格较大且承受较大拉力(由导线垂直荷重引起),在受力上能够为横担上平面交叉辅助材提供较强的平面内支撑。故当横担同时承受较大纵向不平衡张力时使得部分剪力事实上向上平面发生了传递,导致理论上为零杆的上平面交叉辅助材局部发生屈曲。

因此,对荷载比较大的杆塔,需考虑横担上平面封闭布置,考虑到实际构造,端部杆件负端距较大,不可如假定计算模型的传力顺畅,实际工程计算中再按不传力对下平面主、斜材进行验算。

## 5.2 塔身优化

### 5.2.1 塔身截面型式优化

通常情况下,对于荷载较小的悬垂塔,塔身断面采用矩形以使正侧面主材得到充分利用。对于耐张塔及荷载较大的悬垂塔,为保证杆塔纵向刚度,采用正方形截面塔身的结构形式。对于山区地形,为便于立塔,减少铁塔根开,可因地制宜地采用矩形塔。

### 5.2.2 塔身布置优化

塔身布置优化主要是将主材和腹杆(斜材和横材)布置成最佳形式,使主斜材受力合力,塔重最轻。

横材和斜材的布置方式,可分为“十”字交叉形(图 5.2-1a),“米”字形(图 5.2-1b),“K”形(图 5.2-1c),再分式腹杆形(图 5.2-1d)等。



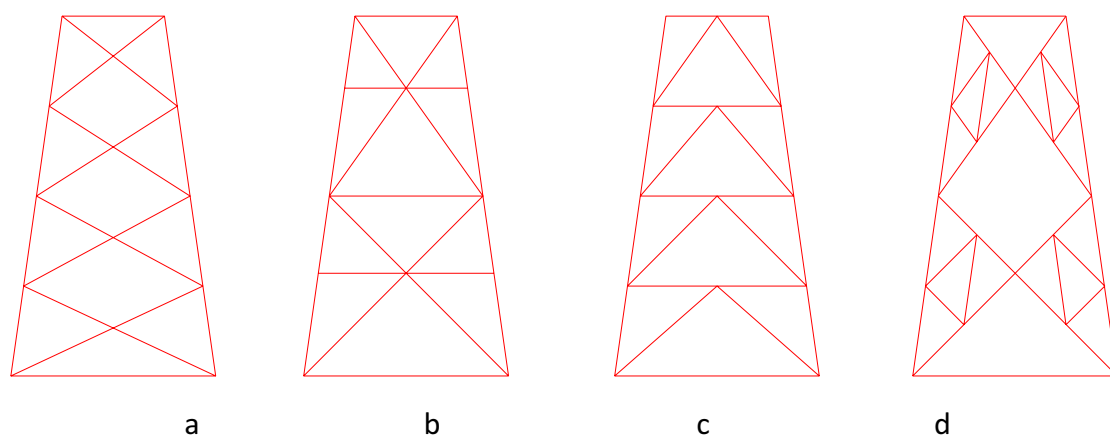


图 5.2-1

“十”字交叉腹杆体系常用于杆件长度较短处，具有构造简单、焊接量小的优点。在交叉斜腹杆的中点做连接后能靠受拉斜杆减少受压斜杆的长细比。但与其它腹杆体系相比，减少杆件长细比不够明显，故在塔身几何尺寸较大时往往因长细比控制而限制杆件截面，造成材料量增多。

“米”字形腹杆体系对减小主材、横材及斜材的长细比很有益。其弱点是节点数量多，横隔杆件多，节点多。

“K”形腹杆体系各种优缺点都介于“十”字交叉形和“米”字形之间。在使用方面，横杆中点受两斜材支撑，便于布置集中荷载作用点。

再分式腹杆体系，可以进一步减少杆件长细比，发挥材料有效作用。但同时辅助材的增加又造成了经济上的损失。

一般铁塔主材的长细比最佳值为 20~60，以同样  $\lambda$  值将塔身斜材布置(见图 5.2-2)后将计算重进行比较，结果如 5.2-1 表：

表 5.2-1

	单节间	双节间	三节间	四节间
直线塔	1.08	1.0	1.025	1.054

说明：上表中比例数值仅针对斜材耗量而言。

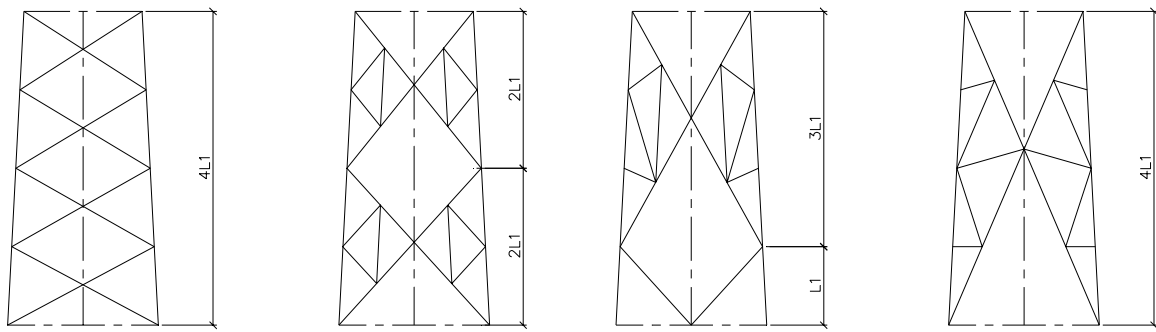


图 5.2-2

从上表中可以看出，在不计入辅助材重量前提下，斜材采用双节间或三节间较宜。但考虑到辅助材对挡风面积、附加荷重的影响，这一优势被明显削弱。

从国内外科研成果以及工程设计实践经验看，塔身斜材和水平面的夹角取  $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$  为宜。以往单一的交叉布置型式容易使同时受压成为斜材选材的控制条件。我们在以往工程经过对不同的斜材布置形式的计算比较可以得出：对下横担下平面下的第一付斜材或塔身变坡处第一付斜材使用倒 K 斜材对避免塔身斜材同时受压成为选材控制条件有一定的作用。

### 5.2.3 横隔面设置的优化

根据构造要求：在铁塔塔身变坡处、直接受扭力的截面处和塔顶及塔腿顶部截面处必须设置横隔面；在塔身坡度不变段内，横隔面设置的间距一般不大于平均宽度的 5 倍，也不宜大于 4 个主材分段。合理设置横隔面可加强铁塔整体刚度，对向下传递结构上部因外荷载产生的扭力、减小塔重、均衡塔身构件内力具有明显的作用。

为了平衡结构上部外荷产生的扭力、均匀塔身构件内力，在铁塔塔身坡度变更的截面处、直接受扭力的截面处和塔顶及塔腿顶部截面处设置横隔面。

对于塔身不变坡段内横隔面的设置位置一般有以下三种方式(如下图 5.2-3)，若采用方式三的横隔面，对于一般线路角钢塔，会使塔身交叉斜材同时受压工况的应力起控制作用，从而引起塔重增加。而方式一和方式二的布置方式则避免了方式三的缺点，充分利用了其对应铁塔杆件内力分配的调整作用，消除了塔身交叉斜材的同时受压情况，优化了斜材受力，降低了钢材耗量，同时还加强了铁塔的

整体刚度，提高了杆塔运行的可靠度。因此对于角钢塔而言，塔身不变段内的隔面设置采取方式一和二型式明显优于方式三。

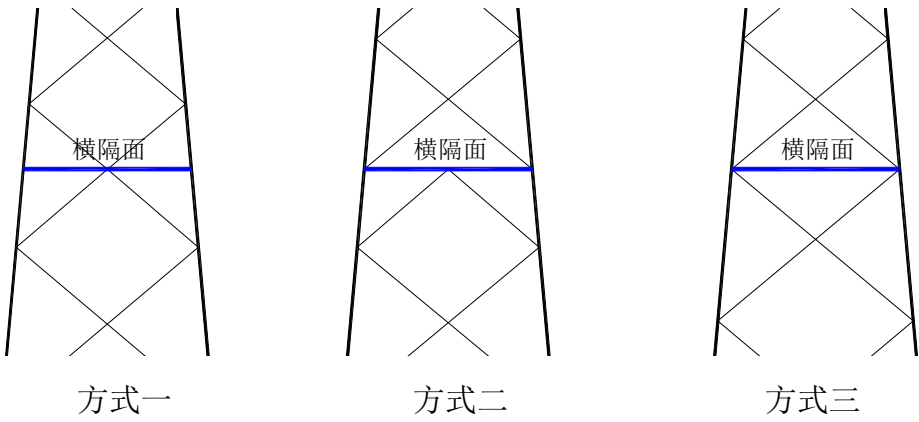


图 5.2-3 横隔面设置位置

在工程中一般采用如图所示的截面形式(如图 5.2-4)。(a)、(b)主要用于塔头部或塔身截面较小的部位，(c)、(d)则主要用于塔身截面较大的部位,以减小横材杆件计算长度，但对于钢管塔，由于不存在最小轴与平行轴的差别，选用 (c)、(d)隔面意义不大，通常采用(e)、(f)。

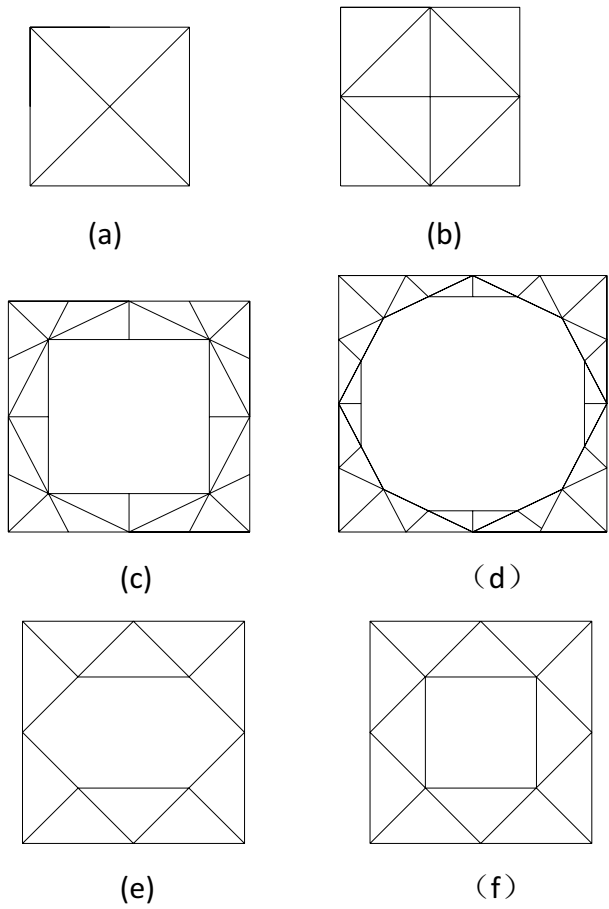


图 5.2-4

### 5.2.4 塔身坡度优化

塔身坡度确定也即塔身尺寸的确定，主要是塔顶宽度、变截面宽度、铁塔根开的确定。

一般铁塔塔身采取两次变坡，即塔头一个坡度，横担以下塔身一个坡度。横担以下变坡位置受下横担间隙影响，一般设置在横担以下一到二个节间下。

塔身坡度的变化影响到塔身主斜材的内力。在塔身变坡处宽度一定的情况下,塔身坡度的大小应和荷载的大小相对应。无论何种塔型,一般情况塔身各截面的抗弯能力和外负荷的弯距值之比应有一最佳的比值。

当铁塔的荷载一定时，铁塔塔身内力分析简图如下：

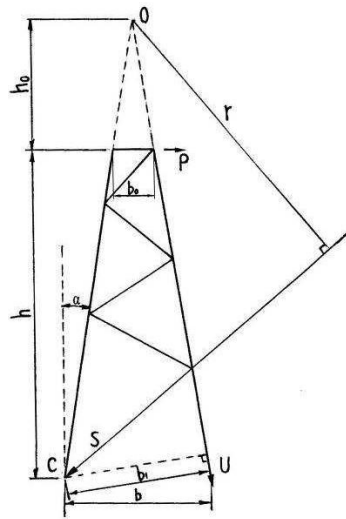


图 5.2-5 铁塔内力分析简图

不难看出，对于同一种腹杆布置的塔身，不同的塔身坡度( $\tan \alpha$ )直接影响到主材和斜材规格的变化：主材受力随着坡度的加大而减小，反之受力则加大；坡度的改变还会使斜材的倾角和长度发生变化，倾角将导致腹杆受力发生改变、加上腹杆长度的变化都将使腹杆的整体重量有所改变。

为了确保上下主材匹配及刚度要求,规划时需要采取合适的坡度。对于头部塔身的规划,除了上述因素外,尚需考虑头部塔身主材与横担主材和下段塔身主材的协调、头部连接等问题。

此外，塔身坡度的改变使根开变化，铁塔根开越大，基础作用力越小。基础作用力的改变，又直接影响到基础的造价。

以往的设计经验表明,在给定的荷载条件下,塔身坡度过大或过小,都将使

铁塔的重量趋于增加。而合理的塔身坡度和平均宽度不仅能使铁塔的钢材指标降低、刚度和强度稳定可靠，而且外观也显得非常协调。因此，塔身平均宽度和主材坡度的确定对于铁塔重量有明显的影响，其优化的意义是比较明显的。

### 5.2.5 塔身主材节间长度优化

铁塔构件的承载能力与构件的长度、截面面积及材料屈服点有关。当构件的规格由强度控制时，构件需要选取的截面面积(规格)与其所承担的内力成正比，内力愈大，所需截面面积愈大。当构件的规格由稳定控制时，构件规格的选取则不仅仅与其所承担的内力有关，还与构件本身的长度有关，内力不变时，构件的长度越长，所需规格越大；而长度不变时，内力越大，所需规格也越大。因此，当内力一定时，构件计算长度确定的合适与否会严重影响其截面的选择，从而直接影响塔重。

最佳的构件计算长度就是构件的强度与稳定相当时的计算长度(即临界长度)，要实现该目标，对于轴心受压的主材容易实现，但对于偏心受力的斜材一般很难达到，由于斜材往往较长，要实现其强度与稳定相当，势必增加许多辅助支撑材，反而导致塔重增加，且铁塔构件布置密集，增加了挡风面积，从而导致外荷载增加，而影响塔重。

一般来讲，铁塔主材重量要占铁塔总重量的 40%左右，塔身交叉斜材约占铁塔总重量的 25%左右，其它为辅助材、板钉及螺栓重量。很明显，影响铁塔重量的主要因素就是铁塔主材。

下面来分析主材的临界长度。主材规格普遍在 L140 以上，其相关的临界参数见下表：

表 5.2-2 主材临界长细比与临界长度

规 格	临界压曲系数	临界长细比 $\lambda_{cr}$		临界长度 $\lambda_{c0}$ (cm)	
	$\phi_{cr}$	Q345	Q420	Q345	Q420
L140×12	0.823	47.0	42.6	130.2	118.0
L140×14	0.821	47.3	42.9	130.1	118.0
L160×12	0.846	43.1	39.0	137.1	124.0

规 格	临界压曲系数	临界长细比 $\lambda_{cr}$		临界长度 $\lambda_{c0}$ (cm)	
	$\phi_{cr}$	Q345	Q420	Q345	Q420
L160×14	0.845	43.2	39.2	136.5	123.9
L180×14	0.837	44.6	40.5	159.2	144.6
L180×16	0.836	44.8	40.6	159.0	144.1
L200×14	0.854	41.6	37.7	165.6	150.0
L200×16	0.853	41.8	37.9	165.5	150.1
L200×18	0.852	42.0	38.1	165.5	150.1
L200×20	0.851	42.2	38.2	165.8	150.1
L200×24	0.849	42.5	38.6	165.8	150.5

注：表中 L180 以上角钢按 M24 的螺栓考虑，其余按 M20 的螺栓考虑减孔。

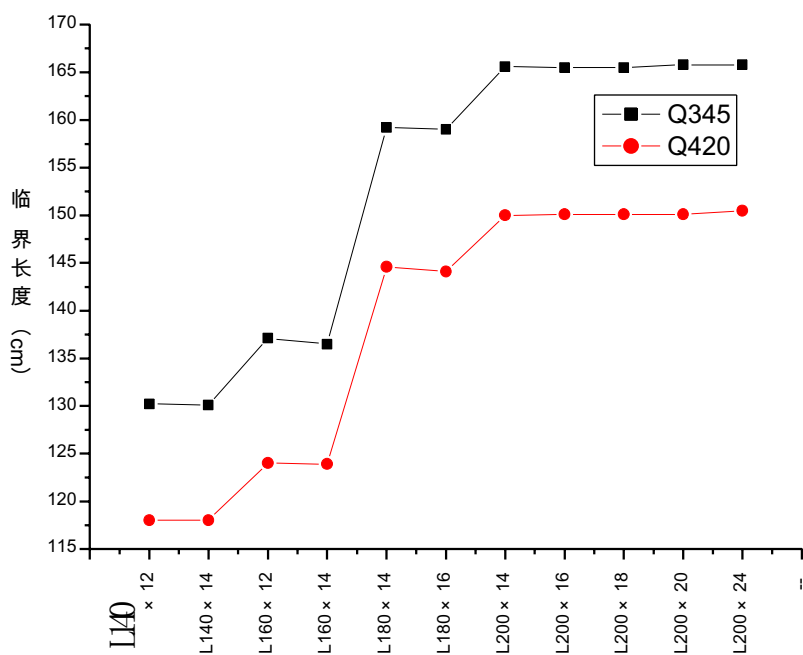


图 5.2-6 主材临界长度

由上表可得出，钢材的设计强度越大则临界长度越小，即 Q420 钢种比 Q345 钢种的临界长度要小。角钢肢宽在 140~160 的主材，采用 Q345 和 Q420 时，最小轴布置的计算长度分别取 1.3~1.4m 与 1.2~1.25m 最合适；对于角钢肢宽在 180~200 的主材，采用 Q345 和 Q420 时，最小轴布置的计算长度分别取 1.6~

1.65m 与 1.45~1.50m 最合适。

当然，节间长度的确定还受塔身的分段、接腿及外形尺寸等因素的制约，同时考虑到节间长度对斜材、辅助材的影响以及腹杆布置形式对主材的内力影响，往往很难理想地使主材长度达到按稳定计算的承载力等于按强度计算的承载力，但利用此长度作为设置节间长度的参考值，对杆件布置形式、节间长度的进一步优化，降低塔重具有重要作用。

## 5.3 杆塔连接节点优化

在连接设计中，为便于现场铁塔组立，对于输电塔结构型式优先选用螺栓连接，其次考虑焊接(插板焊接或相贯焊接)，螺栓通常采用的规格是 6.8 级和 8.8 级的普通螺栓。

在节点构造优化中，主要遵循以下几方面原则：

- 1) 在杆塔结构的节点上，要使各构件轴线汇交于一点，以符合计算假定，保证节点具有足够的强度和刚度。同时节点各部分强度宜均衡。
- 2) 构件和节点的构造要求受力明确、传力直接、路线简洁。作为传递轴向力的构件，其传力线对构件形心轴不宜有偏心情况。
- 3) 构件和节点的构造应力求外形紧凑、制造简单，安装方便。节间和构件的类型应尽量统一，减少不同类型的数量。
- 4) 要求节点强度不得低于通过该节点的所有构件的强度，构件连接的焊接节点应避免焊接应力集中。
- 5) 各种构件除满足使用阶段的强度、稳定和构造要求外，还应考虑制造、安装、运输过程中的各种影响。

### 5.3.1 角钢塔节点优化

除上面节点优化原则外，角钢塔还需注意：

- 1) 尽量减小杆件偏心连接，减小偏心弯矩对杆件承载力的不利影响；对单面连接的杆件在满足角钢连接的前提下，为了减小偏心的影响，应尽可能地将钉线定在靠近角钢肢背一端。

- 2) 双面连接的杆件避免对孔布置，减小杆件截面损失；
- 3) 设计中合理确定杆件长度，减少包铁连接数量。

### 5.3.1.1 横担连接节点

横担连接节点，该节点受力大，结构复杂，处理不好很容易引起实际的构造和计算模式不相吻合，产生较大的节点次内力。

角钢塔以往常规的做法往往是将横担根部主材按照单面连接进行内力分析和选材计算，由于偏心的存在，一方面使得横担主材规格较大，另一方面也不利于横担的传力。采用双面连接，既和塔身主材正面连接，又和塔身主材侧面连接，可以有效地减小横担规格，同时也改善了节点的受力特性。如下图所示。

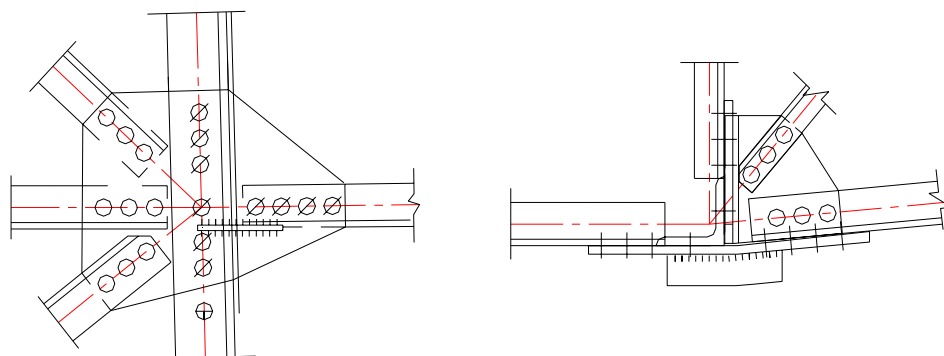
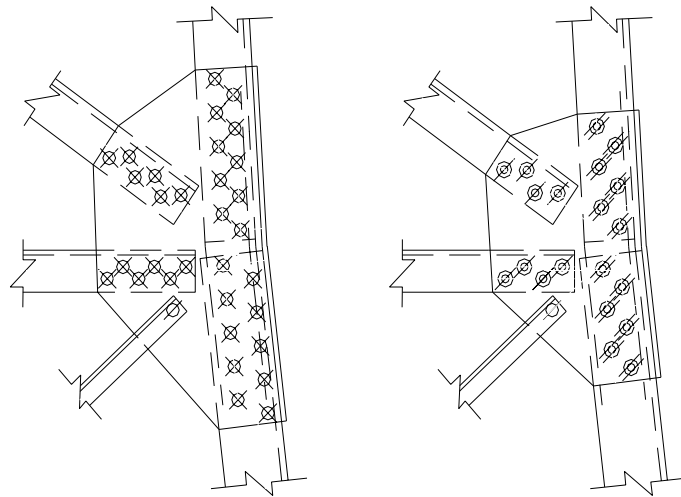


图 0-1 角钢塔横担根部和主材的连接节点构造

### 5.3.1.2 变坡处节点

由于存在变坡，节点处需要火曲，这样会降低火曲构件的强度，因此，对于此类节点需要加强。一般采用外贴板，内包角钢，且正侧面板件相互焊接的处理方式，这样处理节点在强度上能够满足要求，并且刚度也是比较大的，由于构件内力大，连接处螺栓较多。通过采用高强度螺栓，就能有效的减小连接构件尺寸。通过优化，该节点板钉重量可减轻 30%左右。





采用普通螺栓的节点

采用高强螺栓的节点

图 0-2 变坡处节点优化

### 5.3.1.3 塔身斜材与主材的连接

塔身斜材与主材的连接，当采用 2~3 个螺栓，通常采用连板连接，这既使传力复杂，增加了构件的偏心，又增加了钢板的消耗。如采用多心线法，螺栓在构件上不是处于一条心线上，而是处于准线两边的二条心线上(大规格角钢三条心线)，斜材偏心力没有增加，螺栓却大部分都能布置在主材角钢上，由此能够节省和减小了塔身主材与斜材的连接钢板。

### 5.3.2 钢管塔节点优化

如一般角钢塔设计，钢管塔一般也是按空间桁架进行整体计算，节点均为铰接。但实际设计中并非完全如此。一般来说，节点处主材连接是连续的，而其它杆件与主材的连接可以是铰接，也可以是部分刚接。这样既可以提高塔的整体刚度和稳定性，又不止于造成太大的计算误差。

钢管塔的连接方式入图 5.3-3，主要有管管相贯线焊接(a)、法兰连接(b)、插板连接(c)和 (d)等。

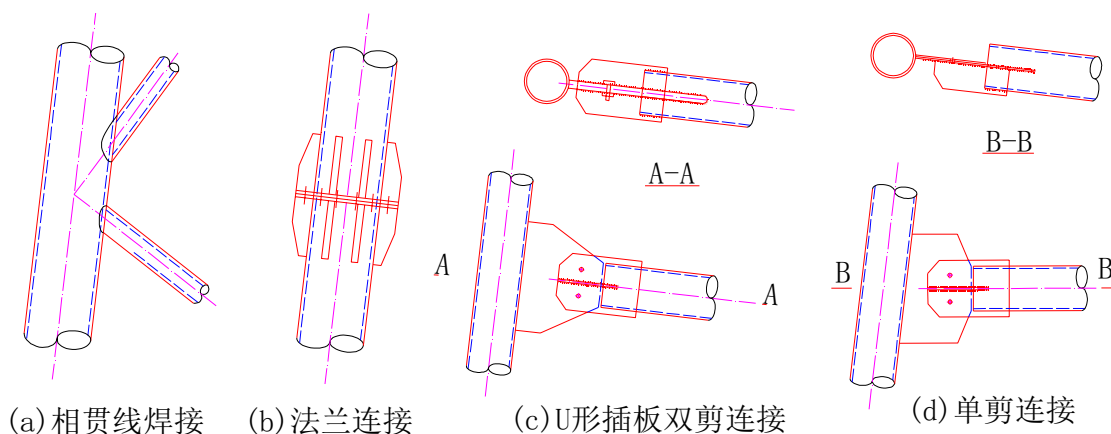


图 5.3-3 钢管塔节点构造

几种连接方式优缺点比较如下表 5.3-1:

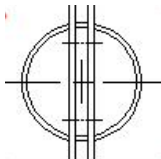
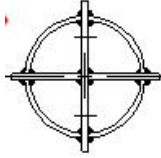
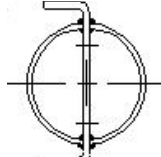
表 5.3-1

焊接类型	相贯线焊接(图 a)	法兰连接(图 b)	U 形插板双剪连接	单剪连接
优点	1、连接刚度大 2、不用辅助材料 3、连接强度较高	1、连接强度、刚度大 2、可在现场高空作业	1、用材省 2、便于现场高空作业	1、用材省 2、便于现场高空作业
缺点	1、对设备要求高 2、焊接工作较复杂，特别对锐角相交的焊接，较难达到对焊接的要求， 3、在较大反复荷载作用下易产生裂缝 4、宜在工厂进行，现场、尤其是高空焊接不宜保证质量 5、相贯线焊接除对焊缝进行验算外还需注意主管壁受力后的侧向稳定和强度问题	1、材料用量大 2、焊接量大 3、易产生焊接变形，而导致法兰板之间密合度差	1、侧向刚度小 2、U 型板插入时对原有钢管净截面对原有钢管净截面损害大，当次杆钢管截面小时，不适用于 U 形插板连接。	1、侧向刚度小 2、一般存在偏心，连接与杆件连接计算均要按规范打折取值
适用范围	以刚接设计的节点可以在工厂加工的节点、杆件组的连接	介于刚接和铰接之间，更偏向于刚接设计的节点。适用于刚度要求高的塔柱、斜材及横杆连接，一般用在直线段	以铰接设计的节点适用于主体结构中较次要的斜杆及横隔连接	用于横隔及再分式腹杆等次要小钢管的连接

由于插板的标准化设计的推行，使斜材与主材的连接约来越多采用便于现场安装的插板连接。主要采用插板形式有：槽型插板、U 型插板和十字插板几种。

主要适用部位见表 5.3-2:

表 5.3-2

插板型式	特点	使用部位
	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 中心受力，螺栓双剪；</li> <li>2. 板长较短，节点紧凑；</li> <li>3. 板厚方向刚度较弱；</li> <li>4. 加工和施工要求较高；</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 横担上平面主材（吊杆）；</li> <li>2. 横担上平面所在位置对应的塔身横隔材（受拉）；</li> <li>3. 塔身斜材与主材的连接</li> <li>4. 其他合适的部位；</li> </ol>
	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 中心受力，螺栓双剪；</li> <li>2. 节点强度较高，稳定较好；</li> <li>3. 断面刚度较好；</li> <li>4. 加工和施工较方便；</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 受（压）力较大的塔身斜材、横材和主材的连接；</li> <li>2. 横担下平面主材和塔身主材的连接；</li> <li>3. 塔身交叉斜材交叉节点；</li> </ol>
	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 插板有小偏心，螺栓单剪，插板较长，节点较大；</li> <li>2. 板厚方向刚度较好；</li> <li>3. 加工和施工方便；</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 适用性较好，可用于主材和斜材、辅助材的连接；</li> </ol>