

输电杆塔电气 及结构设计理论

祝 贺 著



科学出版社

输电杆塔电气及结构设计理论

祝 贺 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍输电杆塔电气及结构设计原理。全书共七章,主要包括杆塔的定义、分类及形式,输电杆塔绝缘配合设计原理,输电杆塔荷载计算条件及其计算原理,拉线式输电杆塔内力分析原理,自立式输电杆塔内力分析原理,钢结构构件截面选择及连接件设计,输电杆塔基础设计。本书内容理论性强,作者在多年的教学和科研工作中,不断征求相关工程单位的意见,注重理论联系实际,把重点放在基本概念、基本原理和基本方法上,尽量避开复杂的理论分析。

本书可作为电力系统及其自动化专业研究生的学习资料,也可供电气工程相关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

输电杆塔电气及结构设计理论/祝贺著. —北京:科学出版社,2016.10
ISBN 978-7-03-050231-5

I. ①输… II. ①祝… III. ①输电线路—线路杆塔—结构设计 IV. ①TM753
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 250051 号

责任编辑:耿建业 陈构洪 赵微微 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 伟 / 封面设计:铭轩堂

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 1 月第二次印刷 印张:11 1/4

字数:214 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着我国电力事业的蓬勃发展,各种优化型杆塔结构不断设计完成,铁塔结构形式朝着最优化方向发展。输电线路工程,尤其是超高压和特高压输电线路工程,是国家经济建设的生命线工程,而线路中的杆塔结构担负着架空电力线的重任,其作用极其重要。

本书介绍输电杆塔电气及结构设计原理,着重阐述了钢筋混凝土电杆、铁塔及其基础的构造特点和受力分析方法,对常用的杆塔和基础设计计算做了详细介绍。本书内容理论性强,作者在多年的教学中,不断征求相关工程单位的意见,注重理论联系实际,把重点放在基本概念、基本原理和基本方法上,尽量避开复杂的理论分析。

本书撰写时依据我国现行的 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》、GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》、GB 26859—2011《电业安全工作规程 电力线路部分》、GB 50061—2010《66kV 及以下架空电力线路设计规范》等新标准、新规范,参考了业内专家编撰的部分专业书籍,并融合了作者的教学经验及工程实践积累的经验。

由于作者水平有限,书中难免存在不足和疏漏之处,敬请广大读者批评指正。

祝 贺

2016 年 8 月于东北电力大学

目 录

前言

第一章 输电杆塔的定义、分类及形式	1
第一节 输电杆塔的定义	1
一、架空输电线路的概况	1
二、输电线路和配电线路的异同	1
三、架空输电线路与电缆线路相比优点	1
四、架空输电线路的构成	2
五、杆塔的定义	2
第二节 输电杆塔分类及结构形式	2
一、输电杆塔分类	2
二、杆塔结构形式	3
三、铁塔的基本结构	12
四、输电杆塔表示方法	13
第二章 输电杆塔绝缘配合设计原理	15
第一节 概述	15
一、输电杆塔绝缘配合设计具体内容	15
二、绝缘子串选择原则	15
三、塔头空气间隙及相应气象条件的选择原则	16
第二节 工频电压、操作过电压、雷电过电压作用下塔头绝缘配合设计 ..	17
一、悬式绝缘子的机电强度	17
二、悬式绝缘子串的可靠性	17
三、工频电压作用下绝缘子片数的选择	18
四、塔头工频空气间隙选取	20
五、操作过电压作用下绝缘子片数的选择	21
六、操作过电压作用下塔头空气间隙的选择	22
七、塔头带电作业间隙的确定	22
八、雷电过电压作用下绝缘子片数选取	23
九、雷电过电压作用下塔头空气间隙的确定	23
第三节 塔头间隙尺寸的确定	23
一、悬垂绝缘子串摇摆角计算	23

二、直线杆塔间隙圆图的绘制	26
三、非直线杆塔的间隙设计及跳线计算	31
第四节 档距中央绝缘配合设计	42
一、导线相间最小距离确定	42
二、导线和地线间最小距离的确定	46
第三章 输电杆塔荷载计算条件及其计算原理	48
第一节 输电杆塔荷载计算条件	48
一、输电杆塔荷载分类	48
二、荷载计算条件	49
三、导线、地线的不平衡张力和断线张力	49
四、可变荷载组合系数	50
五、计算所需档距数据的确定	51
六、杆塔设计计算的基本规定	52
第二节 输电杆塔荷载计算	55
一、基本风压及其修正系数	55
二、风压荷载	56
三、角度荷载	57
四、杆塔安装荷载	58
五、地震荷载	62
第四章 拉线式输电杆塔内力分析原理	71
第一节 外拉线门形电杆拉线张力简化计算	71
一、带 V 形外拉线的门形杆在横向荷载下的计算	71
二、带 V 形拉线的门形杆在断边导线时的计算	72
三、带 V 形外拉线的门形杆在横向和纵向荷载联合作用下的计算	73
四、带八字拉线的门形双杆在横向荷载作用下的计算	74
五、带八字拉线的门形杆在纵向和横向荷载联合作用下的计算	74
第二节 拉线杆塔内力分析及变形计算	75
一、拉线状态方程式	75
二、作用在拉线上的荷载	76
三、拉线伸长量的计算	78
四、拉线方程式	79
五、拉线点平衡方程式	79
六、拉线计算的简化	79
七、拉线点位移计算	80
第三节 拉线门形和 V 形杆塔计算	81

一、拉线门形塔的受力计算	81
二、V形塔的受力计算	85
第五章 自立式输电杆塔内力分析原理	86
第一节 自立式单杆电杆的内力计算	86
一、正常情况的内力计算	86
二、事故断线情况的内力计算	87
三、安装情况的内力计算	89
第二节 自立式单杆电杆挠度计算	89
第三节 门形双杆的内力计算	91
一、无叉梁门形双杆的内力计算	91
二、有叉梁门形双杆的内力计算	92
第四节 组成塔架的杆系形式	103
第五节 静定平面桁架的内力分析	105
一、用节点法分析平面桁架的杆件内力	106
二、用截面法分析平面桁架杆件内力	108
第六节 平面桁架的变形计算	113
第七节 超静定平面桁架内力分析	114
第八节 塔架内力和变形计算	116
一、塔架在横向或纵向对称荷载作用下的计算	116
二、塔架受扭计算	117
三、塔架的线位移	119
四、塔架的扭转变形	119
第九节 常用横担、地线支架、横隔及塔头结构内力分析	120
一、角锥形横担	120
二、鸭嘴形横担	121
三、矩形横担	122
四、地线支架	124
五、横隔	125
六、酒杯塔塔头	125
七、猫头塔塔头内力分析	128
第六章 钢结构构件截面选择及连接件设计	131
第一节 钢结构构件截面选择	131
一、材料及其基本容许应力	131
二、构件的容许细长比	131
三、拉线截面选择	131

四、构件截面选择	132
五、组合构件截面选择	134
六、格构式组合柱	134
七、压弯构件计算	136
第二节 杆塔连接件设计	137
一、具有靴板的塔脚结构设计	137
二、无靴板有加劲板的塔脚结构设计	140
三、无靴板无加劲板的塔脚结构设计	140
四、有加劲板法兰盘计算	141
五、无加劲板法兰盘计算	143
六、叉梁抱箍计算	145
七、拉线抱箍计算	147
八、拉线板计算	148
九、避雷线眼圈螺栓计算	148
十、插入角钢连接计算	149
第七章 输电杆塔基础设计	151
第一节 基础分类	151
第二节 影响基础埋深的主要因素	154
第三节 地下水对基础工程的影响	156
一、对土的容重影响	156
二、地下水的侵蚀性影响	156
第四节 基础极限状态表达式	157
第五节 大开挖基础和掏挖扩底基础上拔稳定计算	158
一、剪切法	158
二、土重法	159
三、土重法计算抗拔稳定方法	161
第六节 地基压力计算	163
一、轴心荷载	163
二、单向偏心荷载	164
三、双向偏心荷载	164
四、地基承载力设计值	164
五、直线杆塔地基承载力设计值	164
参考文献	170

第一章 输电杆塔的定义、分类及形式

第一节 输电杆塔的定义

一、架空输电线路的概况

在我国,大部分动力资源的分布和电力负荷中心往往是不一致的,例如,水利资源集中在江河流域水位落差比较大的地区;热力资源集中在燃料和其他热源的产地;大的电力负荷中心则集中在工业原料产地、工农业生产基地、交通枢纽和战略基地,以及因为历史条件所形成的大城市等地区。因此,发电厂和电力负荷中心之间往往相距甚远,需要采用高压或超高压输电线路作为传输电能的通道。目前将 $35\sim 220\text{kV}$ 线路称为高压线路, $330\sim 500\text{kV}$ 线路称为超高压线路, 750kV 以上线路称为特高压线路。

输电线路是电力系统的大动脉,它起着输送分配和交换功率的作用。输电电压越高,传输功率越大,输送距离越远。随着国民经济迅速发展和用电量大幅度增长,输送距离越来越远。输电电压越高,电能质量和经济性越好。现在全国各大地区已经建成 550kV 交流、直流超高压输电线路网架,今后还要大力发展超高压远距离送电。

二、输电线路和配电线路的异同

由发电厂向电力用户中心输送电能的线路称为输(送)电线路,由电力用户中心向电力用户分配电能的线路称为配电线路。

电力线路按结构不同,分为架空线路和电缆线路。架空线路把输送电能的导线和防避雷击的避雷线通过绝缘子和线路金具用电杆或铁塔(杆塔)架起来,悬挂于空中。架空线路加工制造简易,建设费用低,施工期短,容易发现线路运行中的故障点,容易修复,可节省有色金属。电缆线路敷设或埋设特殊加工制造的电力电缆,费用昂贵,技术要求高。目前我国电力系统除特殊情况外,广泛使用架空线路。

三、架空输电线路与电缆线路相比优点

- (1) 所用设备材料简单,容易加工制造,价格低廉,工程投资少。
- (2) 本身结构简单,便于施工安装,工程建设速度快。
- (3) 全部线路设置在露天,易发现缺陷和事故点,便于巡视、检查和维修。

(4) 事故处理时间短,可减少停电时间和电量损失,尽快恢复送电。

(5) 技术要求比较低,节省有色金属。

所以除了特殊情况(地形限制、污秽地区、大城市中心、过江跨海,以及特殊要求)外,应尽量先采用架空线路。

架空线路存在一些缺点,如下所示。

(1) 容易遭受雷击、自然灾害和外力破坏,发生事故的概率比较大。

(2) 导线裸露在空间,对地面和建筑物等设施均需要保持一定安全距离,因此占地空间比较大,影响土地的充分利用。

(3) 对附近的电台、电视、雷达、通信线、铁路信号线等弱电设施有干扰影响。但设计时,若能按有关规范进行设计,则干扰影响可控制在允许值内。

四、架空输电线路的构成

架空输电线路由导线、避雷线、杆塔、绝缘子和金具等主要元件组成。它们的作用分别如下。

(1) 导线:用于传导电流、输送电能,是传送电能的重要元件。

(2) 避雷线:把雷电流引入大地,以保护线路绝缘,免遭大气过电压(也称雷电电压)的破坏。

(3) 杆塔:用于支持导线和避雷线,使之悬挂在一定高度上,并使导线和导线之间,导线和避雷线之间,导线和杆塔之间,导线与大地之间保持一定的安全距离。

(4) 绝缘子:使导线和杆塔之间保持绝缘状态,并使各级电压的导线对地面和建筑物保持一定的安全距离。

(5) 金具:用于连接导线或避雷线,将导线固定在绝缘子上以及绝缘子固定在杆塔上的金属元件。

五、杆塔的定义

用于支持导线和避雷线,使之悬挂在一定高度上,并使导线和导线之间,导线和避雷线之间,导线和杆塔之间,导线与大地之间保持一定的安全距离的三维空间结构物。

第二节 输电杆塔分类及结构形式

一、输电杆塔分类

输电线路中使用的杆塔结构主要是电杆和铁塔,它们的结构形式是多种多样的。究竟采用哪种结构形式杆塔主要取决于线路的电压等级、回路数、地形地质条

件和使用条件,最后还要通过经济技术的比较择优选用。

杆塔按其受力性质,分为悬垂型、耐张型杆塔。悬垂型杆塔分为悬垂直线和悬垂转角杆塔;耐张型杆塔分为耐张直线、耐张转角和终端杆塔。杆塔按其回路数分为单回路、双回路、多回路杆塔。杆塔按材料分为木杆、钢筋混凝土电杆、钢管杆、铁塔、钢筋混凝土塔。

二、杆塔结构形式

1. 钢筋混凝土电杆

在输电线路上,目前我国大量采用环形钢筋混凝土杆。钢筋混凝土杆的主要材料是混凝土。按构造或受力要求培植一定数量的主筋(承受主弯矩)和箍筋(承受扭矩),由专业工厂制作,做成离心式中空等厚环形断面钢筋混凝土杆。

(1) 35~110kV 单回路悬垂直线杆。

此类电杆由于其承受荷载较小,一般设计成单杆,导线呈三角形布置;主杆采用 $\Phi 150\text{mm} \sim \Phi 190\text{mm}$ 、全长 15~18m 的拔梢杆,当荷载较大时常用 $\Phi 300\text{mm}$ 等径双杆或带拉线单杆,如图 1-1 所示。

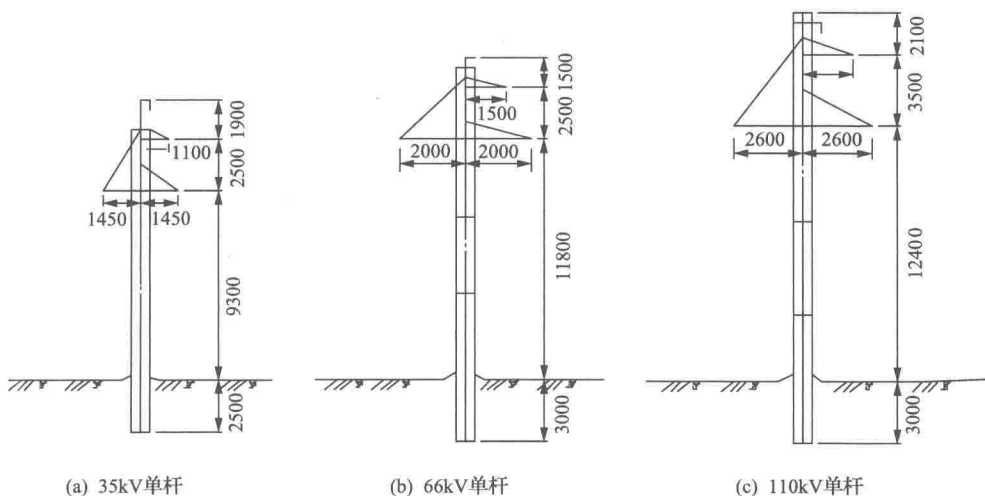


图 1-1 35~110kV 钢筋混凝土悬垂直线单杆(单位:mm)

(2) 220~330kV 单回路悬垂直线杆。

由于这一电压等级的杆塔荷载较大,目前大多采用带叉梁的双杆或带拉线的八字杆,少数荷载较小的线路也采用带拉线的单杆。

带叉梁的双杆,一般采用 $\Phi 190\text{mm} \sim \Phi 230\text{mm}$ 梢径、全长 27m 左右的锥形杆段或 $\Phi 400\text{mm}$ 等径杆段,在主杆平面内设一层或双层叉梁,用于减小主杆所受的

弯矩,为承受纵向荷载并增加电杆纵向稳定可以在电杆平面外设置 V 形拉线。带双层叉梁的直线双杆,由于根部弯矩较小,多应用于软弱地基的线路基础条件场合,如图 1-2、图 1-3 所示。

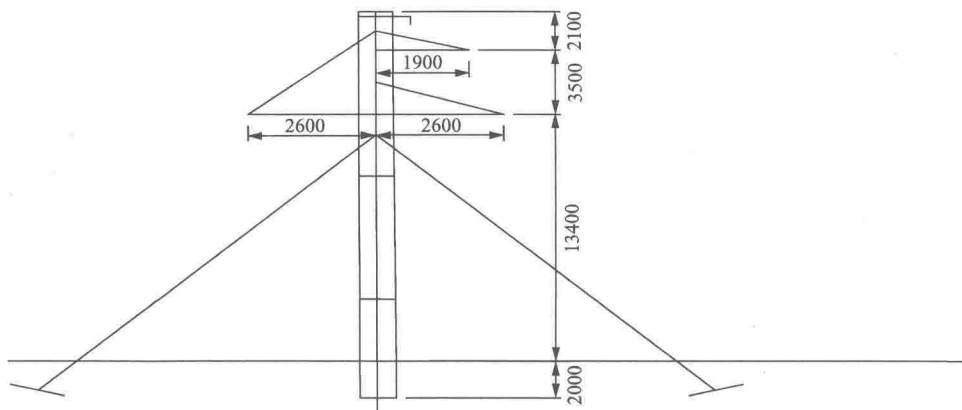


图 1-2 带拉线的钢筋混凝土直线单杆(单位:mm)

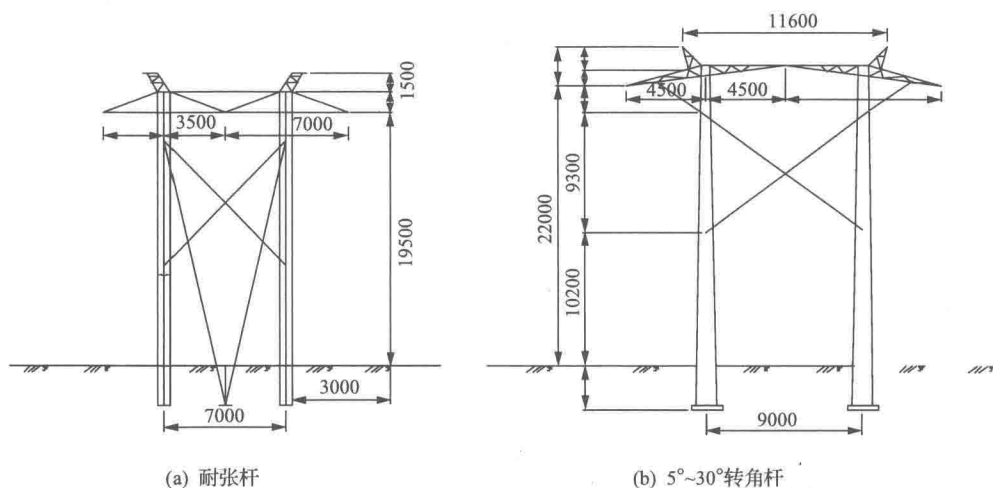


图 1-3 220kV 单回路承力杆(单位:mm)

(3) 35~110kV 单回路承力杆。

承力杆(耐张杆、转角杆、终端杆)所承受的荷载较大,当采用钢筋混凝土电杆时一般均需设置拉线,其外形有 A 形或门形,拉线布置方式在小转角时可用 V 形或交叉形;大转角时可用八字形,必要时设置反向拉线和分角拉线,如图 1-4 所示。

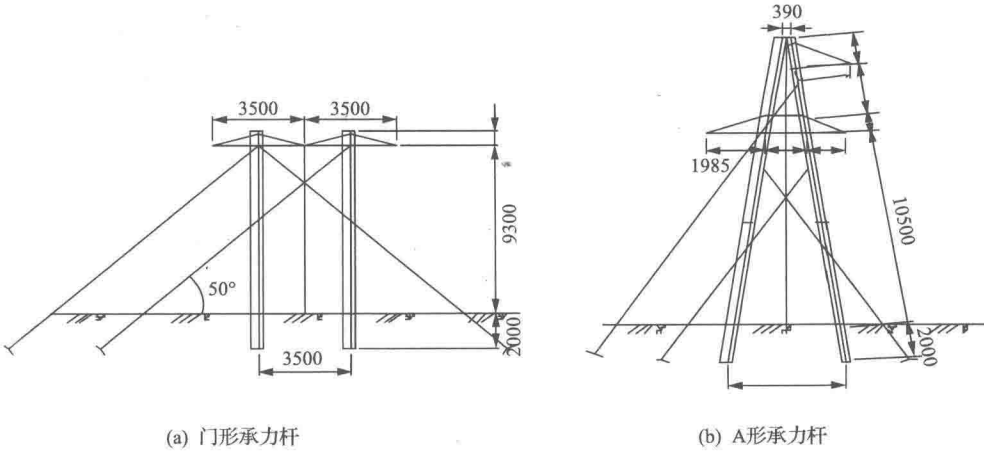


图 1-4 35~110kV 单回路承力杆(单位:mm)

(4) 220kV 单回路承力杆。

220kV 承力杆一般采用双杆的结构形式,主杆常用 400mm 等径杆,横担采用钢结构,拉线大多布置成交叉拉线或八字形拉线,如图 1-5 所示。

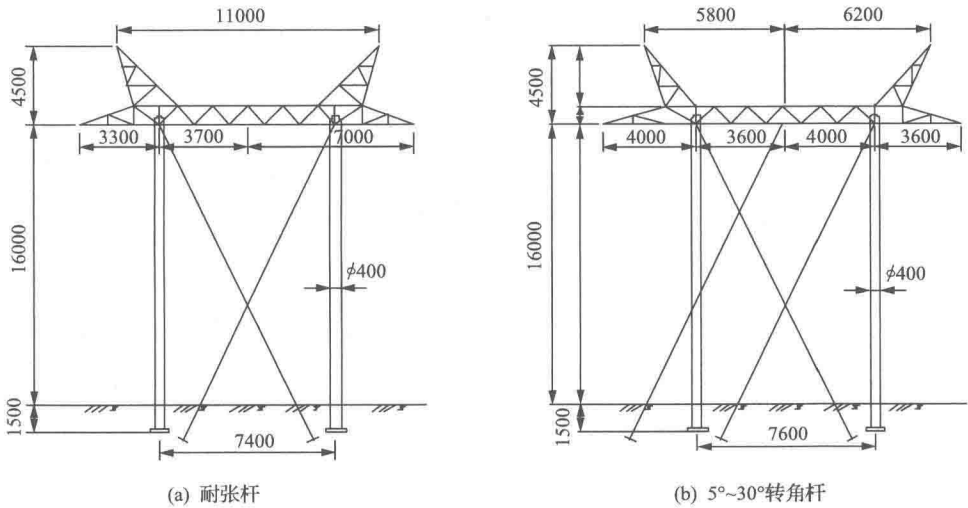


图 1-5 220kV 单回路承力杆(单位:mm)

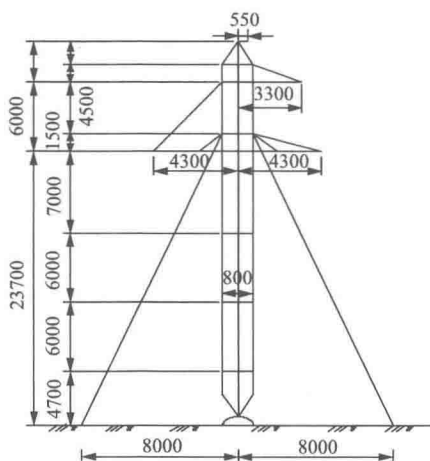
2. 铁塔

铁塔大多采用热轧等肢角钢制造、螺栓组装的空间桁架结构,也有少数国家采用冷弯型钢或钢管混凝土结构。根据结构形式和受力特点,铁塔可分为拉线塔和

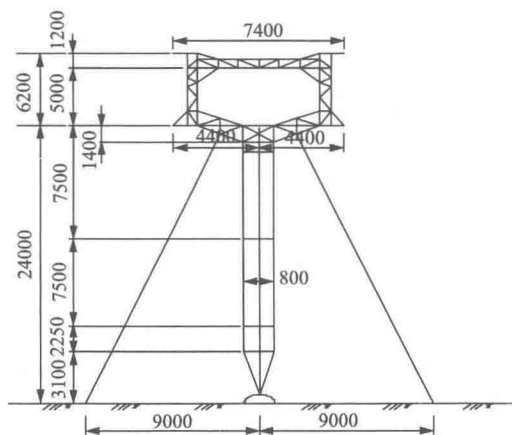
自立式铁塔两大类。

(1) 拉线塔。

拉线塔由塔头、主柱、拉线组成。塔头和主柱一般由角钢组成的空间桁架构成,拉线一般为高强钢绞丝。拉线塔的主要外形形式有鸟骨形、猫头形、门形、V形等,如图 1-6、图 1-7 所示。

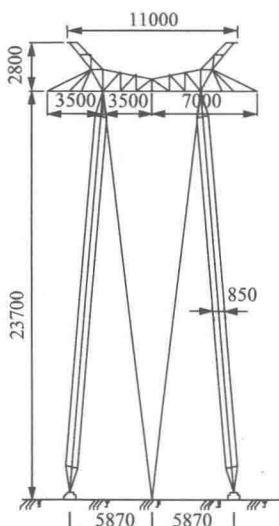


(a) 220kV 上字形拉线塔

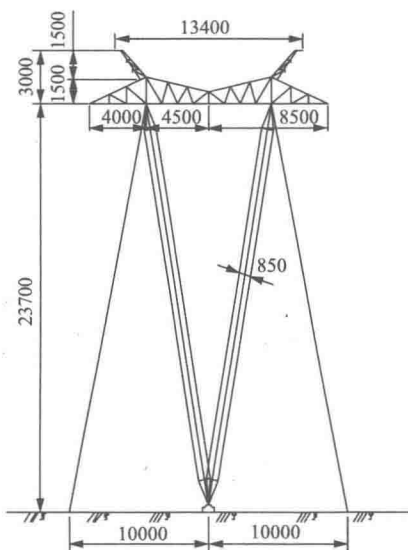


(b) 220kV 猫头形拉线塔

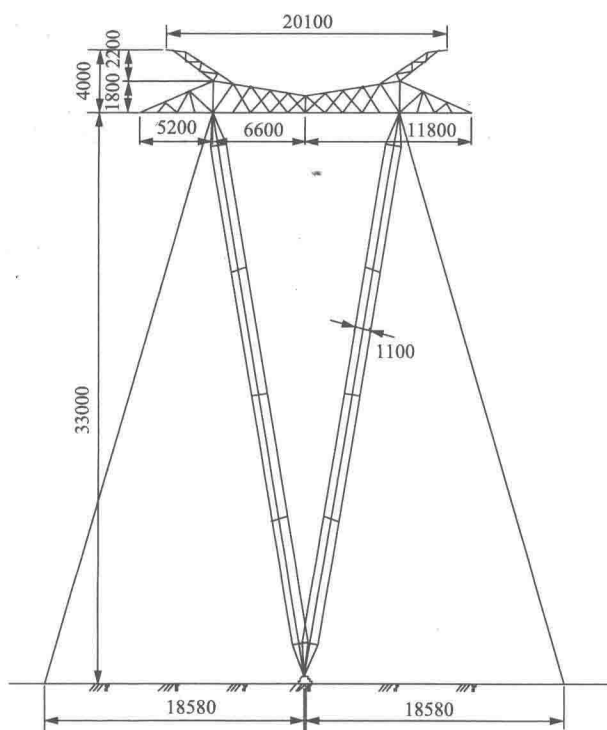
图 1-6 导线呈三角形排列的拉线铁塔(单位:mm)



(a) 220kV 门形拉线塔



(b) 220kV V形拉线塔



(c) 500kV V形拉线塔

图 1-7 导线呈水平排列的拉线铁塔(单位:mm)

(2) 自立式铁塔。

单回路自立式铁塔分为三相导线呈三角形排列的鸟骨形、猫头形、上字形、干字形以及三相导线呈水平排列的酒杯形、门形两大类,如图 1-8、图 1-9 所示。双回或多回路自立式铁塔形式为干字形或鼓形塔,如图 1-10 所示。

自立式承力塔主要有酒杯形、干字形、桥形等。干字形塔由于中相导线直接挂在塔身上,下横担的长度短于酒杯形塔,结构相对简单,是目前 220kV 以上电压等级输电线路常用的承力塔,如图 1-11 所示。

3. 钢管杆

由于近年来受到城市环境、线路通道、线路荷载增大等因素影响,钢筋混凝土电杆已不能满足城市发展需求,而在城区线路中广泛采用钢管杆,如图 1-12 所示。

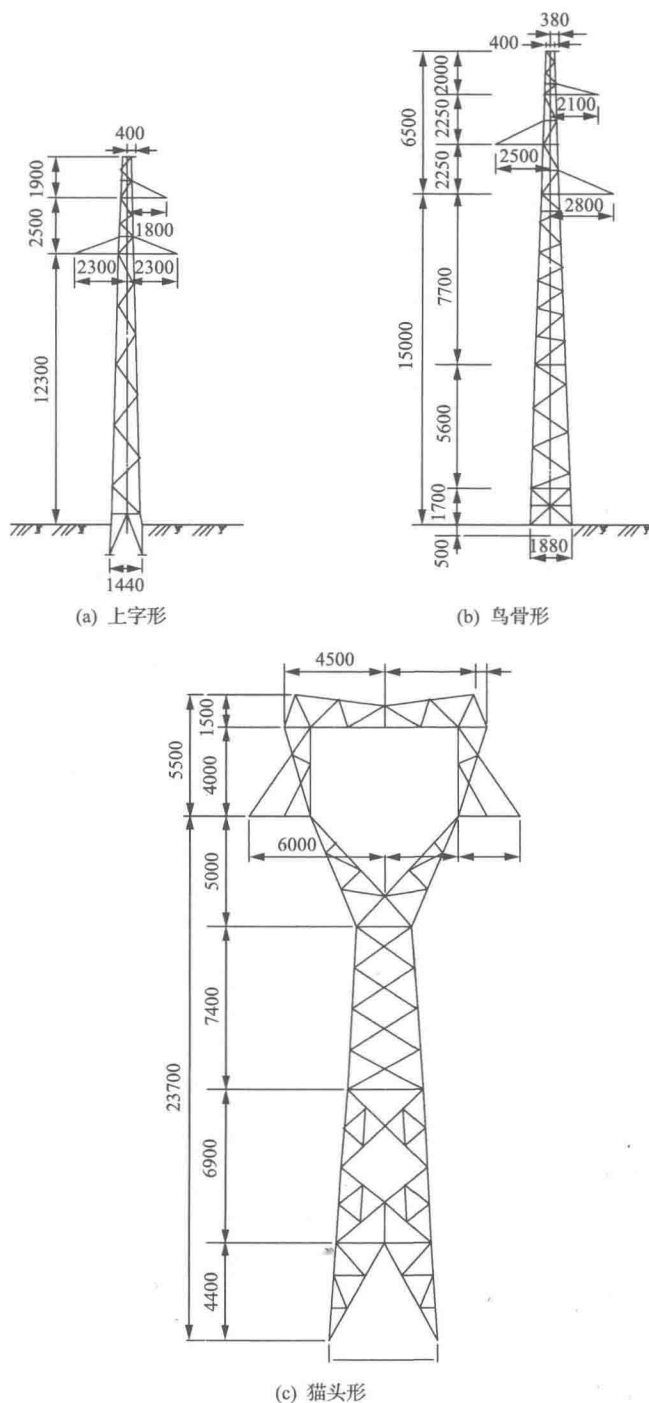


图 1-8 导线呈三角形排列的自立式铁塔(单位:mm)

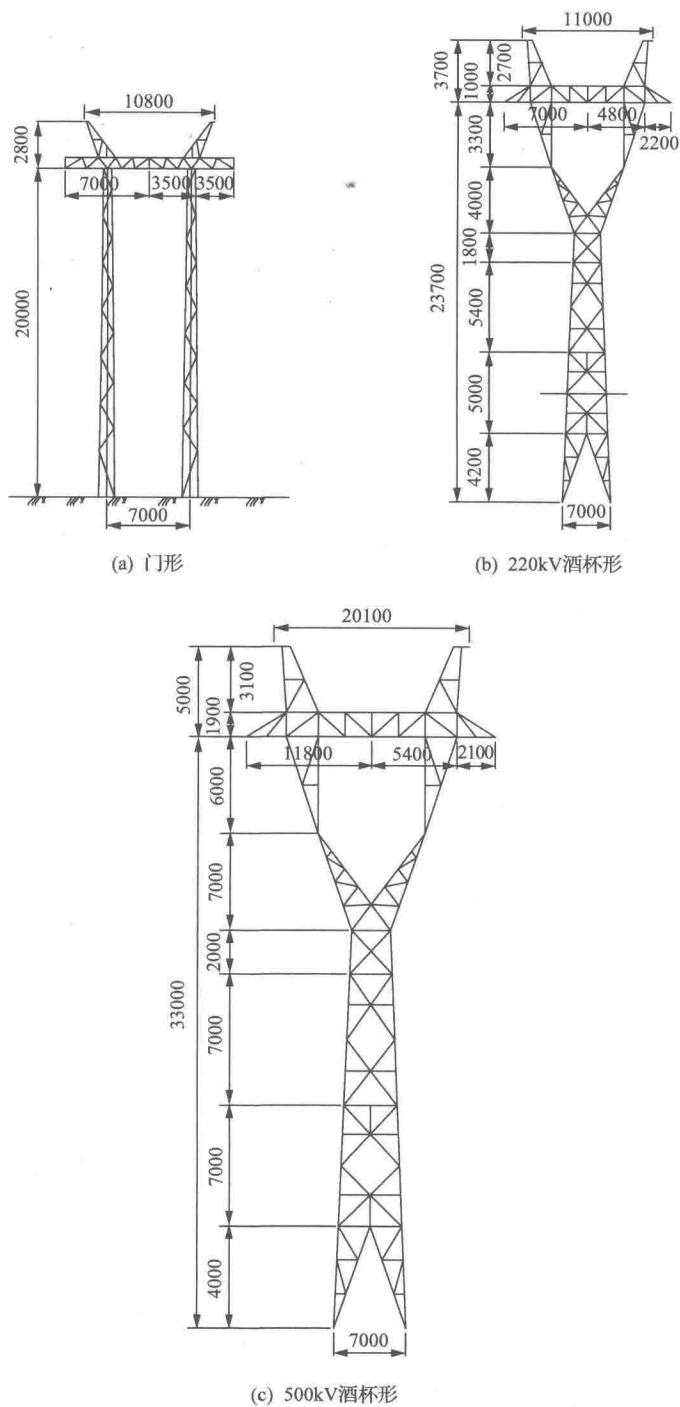


图 1-9 导线呈水平排列的自立式铁塔(单位:mm)