

Steel Tubular Tower Structures  
of Overhead Transmission Line

架空输电线路

# 钢管塔结构

主 编 杨建平

副主编 李 正 程永锋 杨靖波



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

中国电力科学研究院专著出版基金资助

# 架空输电线路

# 钢管塔结构

常州大学图书馆  
藏书章  
杨建平  
副主编 李正 程永锋

杨靖波



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书系统总结了电力科学研究院近年来在输电线路钢管塔结构的可靠性、设计计算方法、构造连接、风振控制、真型试验等方面的最新科研成果,并介绍了钢管塔的标准化设计、加工以及典型工程应用情况,对促进钢管塔在我国输电线路中的应用具有重要价值。

本书共分13章。主要内容有钢管塔结构基本计算原则、钢管塔荷载、钢管塔选型、钢管塔构件、钢管塔节点、钢管塔有限元计算、钢管塔风振及抑制、钢管塔标准化设计、钢管塔加工、钢管塔真型试验、钢管塔基础以及钢管塔的工程应用。

本书可作为从事输电线路钢管塔结构研究和设计人员的教材,也可为输电线路钢管塔加工制造、施工建设、运行维护等技术人员提供参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

架空输电线路钢管塔结构/杨建平主编. —北京:中国电力出版社, 2011.1

ISBN 978-7-5123-1345-3

I. ①架… II. ①杨… III. ①架空线路:输电线路—线路杆塔—结构设计 IV. ①TM726.3②TM753

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 015034 号

中国电力出版社出版 发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2011年4月第一版 2011年4月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 19.5印张 272千字

印数 0001—3000册 定价 45.00元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 《架空输电线路钢管塔结构》

## 编 委 会

主 编 杨建平

副 主 编 李 正 程永锋 杨靖波

编写人员 邢海军 李茂华 李清华 韩军科

张子富 吴 静 杨风利 戴刚平

鲁先龙 吴国强 耿景都

# 前言

随着输电线路输送容量及电压等级的不断提高，杆塔的荷载与塔重不断增大。与角钢塔相比，在大荷载杆塔中合理应用钢管塔，具有相对的技术和经济优势，符合电网的发展趋势和建设“资源节约、环境友好”型社会的要求。

近年来，钢管塔在我国的一些大跨越工程以及同塔双（多）回线路中得到一定程度的应用。规划建设中的 1000kV 淮南—上海（皖电东送）输电工程全线采用钢管塔，总用量约 30 万 t，并应用了一些有别于以往的新技术。2008 年，国家电网公司启动了输电线路钢管塔的推广应用工作，有力地促进了钢管塔在我国输电线路中的大规模应用。

杆塔承受荷载不断增大，结构“安全可靠、经济环保”要求不断提高，已有的杆塔结构设计方法和经验，尤其是钢管塔的节点与细部构造方面，越来越不能满足要求。依托 750kV、特高压等重大工程项目，国家电网公司科技部、特高压建设部、基建部等部门，创新科研工作管理方式，立足系统解决钢管塔工程应用的关键技术问题，组织中国电力科学研究院以及钢管塔设计、加工、施工等单位，在钢管塔的结构设计技术、试验技术、加工技术等方面开展了大量研究工作，取得了一批创新性成果，并通过工程不断进行深化，为特高压等输电线路工程的钢管塔应用提供了强有力的技术保障。

本书较为系统地总结了架空输电线路钢管塔结构的主要最新研究成果，主要包括结构可靠度、荷载及取值、构件计算（整体稳定、局部稳定、“X”型交叉斜材）、节点连接（有加劲法兰、无加劲法兰、带颈法兰、插板）、设计计算模型（杆单元、梁杆混合单元）、风振及抑制、基础连接以及真型试验等，并介绍了钢管塔的标准化设计、加工和典型工程应用。

本书是我国第一部全面深入介绍架空输电线路钢管塔结构的书籍，可作为从事输电线路钢管塔结构研究和设计人员的教材，也可为输电线路钢管塔加工制造、施工建设、运行维护等技术人员提供参考。

本书的编写得到了国家电网公司科技部、特高压建设部、基建部等部门的大力支持和帮助。钢管塔加工一章内容由浙江盛达铁塔有限公司戴刚平完成。中国电力工程顾问集团公司梁政平、李喜来、段松涛，华东电力设计院廖宗高、董建尧，西北电力设计院王虎长，中南电力设计院包永忠，华北电力设计院有限公司秦庆芝以及参与钢管塔结构研究的浙江、福建、江苏、甘肃等省电力设计院的有关专家，也为本书的编写提供了悉心的指导和有力的帮助。浙江省电力设计院叶尹、华北电力设计院有限公司马申两位专家对本书内容进行了审定，在此一并表示诚挚的感谢。

限于编者水平，书中不足之处，敬请读者指正。

编 者

2011年1月

# 目 录



## 前言

<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 钢管塔的主要特点 .....	1
第二节 钢管塔应用现状 .....	4
第三节 钢管塔结构需重点研究解决的问题 .....	14
<b>第二章 钢管塔结构基本计算原则</b> .....	19
第一节 极限状态 .....	19
第二节 概率极限状态设计方法 .....	20
第三节 设计表达式 .....	22
第四节 杆塔结构构件可靠度 .....	23
<b>第三章 钢管塔荷载</b> .....	26
第一节 荷载分类及荷载组合 .....	26
第二节 荷载取值 .....	31
<b>第四章 钢管塔选型</b> .....	50
第一节 概述 .....	50
第二节 塔型选择 .....	52
第三节 结构布置及优化 .....	60
<b>第五章 钢管塔构件</b> .....	78
第一节 概述 .....	78
第二节 材料选择 .....	78
第三节 构件计算 .....	80
第四节 参数取值 .....	82
<b>第六章 钢管塔节点</b> .....	98

第一节	有加劲法兰 .....	98
第二节	无加劲法兰 .....	109
第三节	带颈法兰 .....	117
第四节	相贯连接 .....	126
第五节	插板连接 .....	131
第六节	典型节点连接 .....	136
<b>第七章</b>	<b>钢管塔有限元计算 .....</b>	<b>144</b>
第一节	概述 .....	144
第二节	整塔有限元计算 .....	145
第三节	典型节点有限元计算 .....	160
<b>第八章</b>	<b>钢管塔风振及抑制 .....</b>	<b>173</b>
第一节	概述 .....	173
第二节	钢管塔的顺风向振动 .....	174
第三节	钢管塔的顺风向振动控制 .....	193
第四节	钢管塔圆截面构件的涡激风振及抑制 .....	204
<b>第九章</b>	<b>钢管塔标准化设计 .....</b>	<b>225</b>
第一节	钢管规格库的标准化 .....	225
第二节	插板节点的系列化 .....	231
第三节	法兰的系列化 .....	234
<b>第十章</b>	<b>钢管塔加工 .....</b>	<b>246</b>
第一节	概述 .....	246
第二节	技术准备 .....	247
第三节	加工过程 .....	248
第四节	试组装 .....	261
第五节	镀锌包装及储存 .....	263
<b>第十一章</b>	<b>钢管塔真型试验 .....</b>	<b>265</b>
第一节	概述 .....	265
第二节	输电杆塔真型试验能力 .....	265



第三节	输电杆塔真型试验一般过程及要求 .....	269
第四节	典型钢管塔真型试验 .....	272
<b>第十二章</b>	<b>钢管塔基础 .....</b>	<b>281</b>
第一节	地脚螺栓连接式基础 .....	281
第二节	斜柱基础主材插入式连接基础 .....	283
<b>第十三章</b>	<b>钢管塔的工程应用 .....</b>	<b>291</b>
第一节	概述 .....	291
第二节	500kV 输电线路工程应用 .....	292
第三节	750kV 输电线路工程应用 .....	294
第四节	1000kV 特高压工程应用 .....	294
<b>参考文献</b>	.....	<b>297</b>
<b>后记</b>	.....	<b>300</b>

## 绪 论

## 第一节 钢管塔的主要特点

输电杆塔是输电线路的直接支撑结构，是电网的重要组成部分。杆塔多采用钢结构或钢筋混凝土结构，少量采用木结构。通常将木结构、钢筋混凝土结构或钢柱式结构的杆形结构称为杆，钢的塔形结构称为塔。目前，我国 330kV 及以上输电线路的铁塔主要采用热轧角钢型材，圆形截面杆件的钢管铁塔在大跨越工程和少量 500kV 双回（四回）线路中有所应用。

角钢铁塔主要由螺栓连接而成，结构较为简单，运输方便，在我国超高压输电线路中有广泛应用，在其设计、加工、组立等方面积累了丰富的经验，技术较为成熟。但随着同塔双（多）回线路、紧凑型线路、多分裂大截面导线等输电新技术的应用以及特高压电网的建设，对铁塔结构大荷载、大型化的要求越来越高。对于承受大荷载的铁塔，如果采用角钢结构，直线塔的主材基本要求采用双组合或四组合结构才能满足承载力要求；而转角塔的主材即使采用四组合结构有时也难以满足承载力要求，需采用格构式角钢柱结构。这些主材结构的构造复杂，加大了铁塔设计、加工、安装的难度，并增加了影响结构安全的不确定性因素。

与角钢塔相比，钢管塔结构具有相对技术和经济优势，适合应用于承受大荷载的输电铁塔。

### 一、荷载特性

钢管塔杆件承受风压小、截面抗弯刚度大、结构简洁、传力清晰，能

够充分发挥材料的承载性能，一方面可降低铁塔重量，减小基础作用力；另一方面有利于增强极端条件下抵抗自然灾害的能力。

输电铁塔的塔身风荷载在铁塔计算荷载中所占的比重较大，一般为40%~50%。圆截面钢管的空气动力学性能好，风压体型系数仅为角钢的1/2左右。所以，在满足强度和稳定性计算要求的情况下，采用风压体型系数相对较小的钢管塔，可显著减小塔身风荷载作用。

## 二、截面特性

钢管构件截面中心对称，截面特性各向同性；材料均匀分布在周边，截面抗弯刚度大。表1-1为截面积相当的钢管与角钢构件截面特性参数的比较。对于输电铁塔的受拉杆件，当钢管与角钢的截面积相当时，钢管塔杆件不显现其优势。而对于输电铁塔的压弯构件，采用较小截面积且有较大回转半径的钢管可以充分均衡地发挥材料的力学性能，达到结构刚度和稳定要求，尤其对于结构几何尺寸较大、杆件较长的大荷载铁塔，钢管塔杆件稳定性能好的优势很明显。

表1-1 截面积相当的钢管与角钢构件截面特性参数比较

型式	规格	截面积 (cm <sup>2</sup> )	回转半径 (cm)	
			强轴	弱轴
钢管	φ89×3.5	9.40	3.03	
角钢 (单肢)	∠80×6	9.40	3.11	1.59
钢管	φ350×8	82.60	12.13	
角钢 (单肢)	∠200×24	90.66	7.64	3.90
钢管	φ356×8	87.46	12.30	
角钢 (十字双拼)	2∠160×14	86.59	8.10	6.20

## 三、构造连接

在构造连接方面，钢管塔的主材采用法兰连接（常用有加劲法兰和带颈法兰）或相贯连接，斜材与主材之间采用插板连接或相贯连接，如图1-1所示；角钢塔的主材采用内、外包连接，其他杆件之间主要通过连接板（必要时）和螺栓连接，如图1-2所示。钢管塔的法兰和插板连接构造相对较为简洁，虽然增加了焊接工作量，但减少了角钢构件的偏心等对结构承载性能的



不利影响，同时增强了连接节点的刚度与致密性，有助于提高结构的整体刚度和稳定性以及抵抗风振动力荷载的能力。

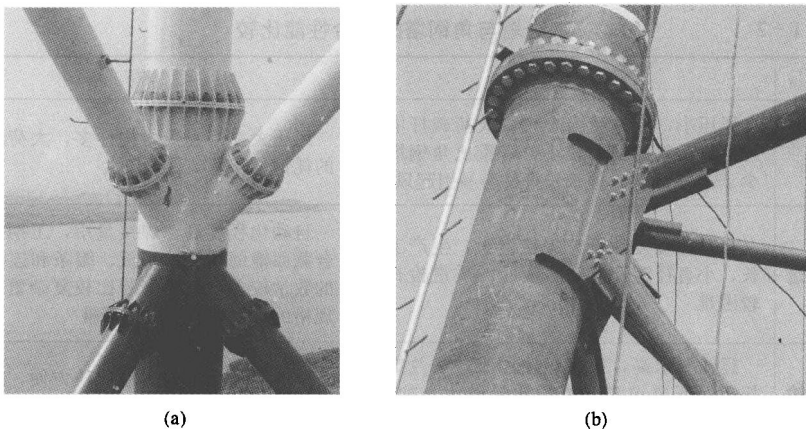


图 1-1 钢管塔典型构造及连接  
(a) 有加劲法兰及相贯连接；(b) 带颈法兰及插板连接

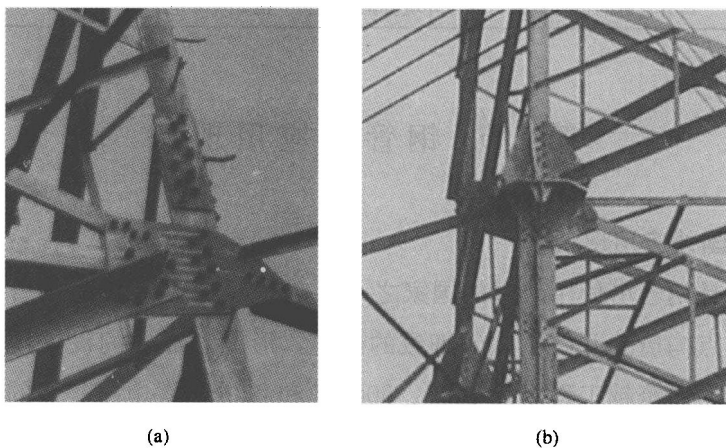


图 1-2 角钢塔典型构造及连接  
(a) 连接板及主材外包；(b) 十字双拼角钢

#### 四、综合效益

与角钢塔相比，采用钢管作为主要受力构件，可减轻单基塔重 15%~20%；可有效降低杆塔的基础作用力，节省基础混凝土量 20%左右；还可减小占地面积，压缩线路走廊宽度，减少拆迁和对植被的破坏、林木的砍伐，

有利于节约资源和环境保护。如果采用高强度钢管，则效益会更为显著。

钢管塔与角钢塔的综合性能比较见表 1-2。

表 1-2 钢管塔与角钢塔的综合性能比较

项 目	钢 管 塔	角 钢 塔
受力性能及塔重	风压小，构件受力合理。大荷载杆塔的耗钢量及基础受力较小，塔重比角钢塔减少 15%~20%，但细长杆件容易引起风振	风压大，偏心受力构件多，大荷载杆塔的耗钢量和基础受力较大
加工制造	自动化程度偏低，焊接量大，生产工期长，小直径钢管内部隐蔽面的质量检查比较困难	自动化程度高，焊接量小，工期短，组合截面辅助杆件、缀板、缀条和连接螺栓的数量较多，加工安装比较复杂繁琐；大规格的角钢规格备料较困难
安装运输	运输要求高，山区运输困难，法兰螺栓扭矩保证要求高，单件质量较大，加工、运输和施工的设备要求较高	单件重量较轻，运输比较方便，施工质量容易检测和保证
结构变形	刚度好，变形较小	转角塔变形较大
采购单价	单价高，比角钢塔高 25%左右	单价低
外 观	具有较好的视觉效果、易与环境协调	视觉效果差

## 第二节 钢管塔应用现状

### 一、国外应用现状

日本是钢管塔使用最多的国家之一。在 20 多年前，就对钢管塔的连接方式、节点构造等开展了深入细致的研究，形成了成熟的设计规范。钢管塔在日本的大跨越工程以及 1000、500kV 和 220kV 等电压等级的输电线路中都得到广泛使用。日本不同电压等级线路的典型钢管塔分别见图 1-3~图 1-5。20 世纪 80~90 年代，日本建成总长 427km 的 1000kV 同塔双回输电线路，杆塔采用钢管塔结构，共 624 基，平均高度 120m，平均塔重 400t。日本在特高压钢管塔中还应用了高强度钢材，主材采用 STK55 钢管，屈服强度达到 390MPa。日本还专门为特高压钢管塔开发了屈服强度为 440MPa 的 STKT590 钢材，并纳入 JEAC 6001—2000《架空送电规程》中。

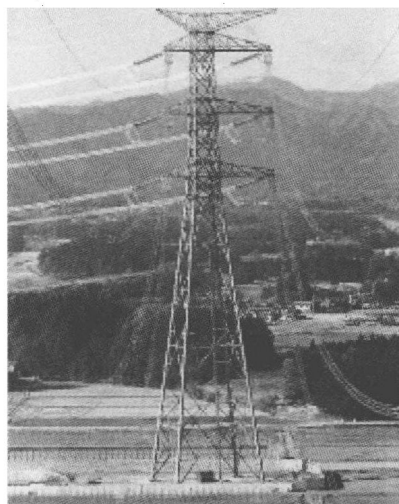
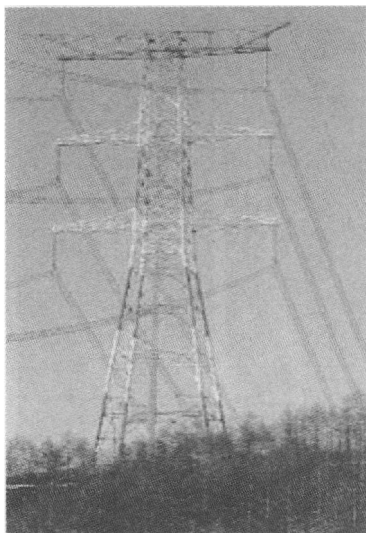


图 1-3 日本 1000kV 同塔双回线路钢管塔

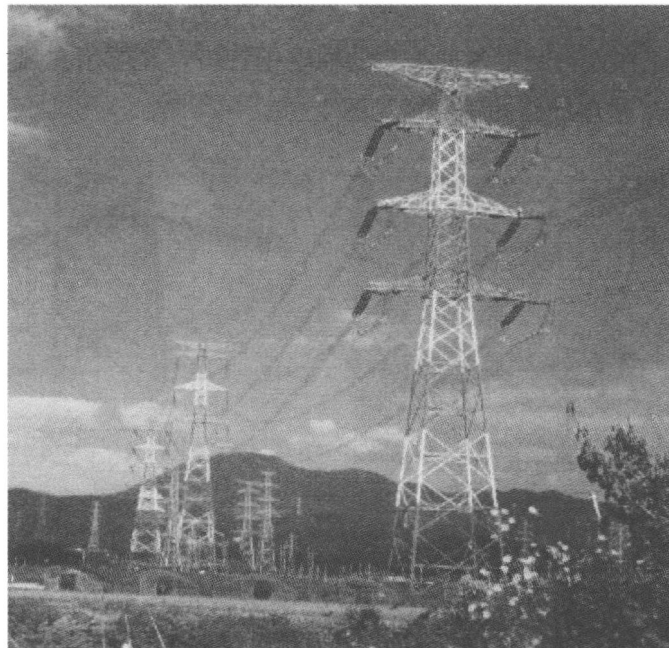


图 1-4 日本 500kV 同塔双回线路钢管塔

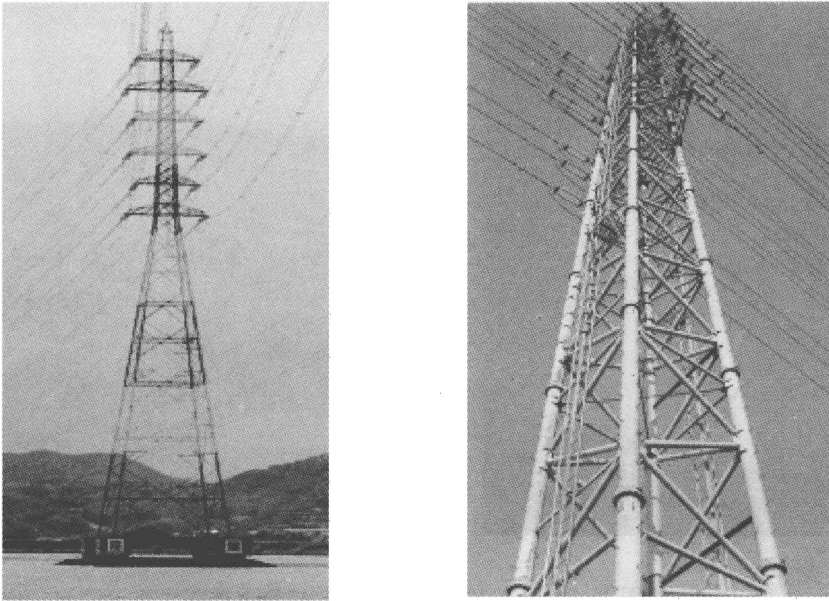


图 1-5 日本 220kV 同塔多回线路钢管塔

韩国也正在大力开发各种类型的输电钢管塔，并应用在风力发电单管上。其 765kV 输电线路的钢管塔见图 1-6。

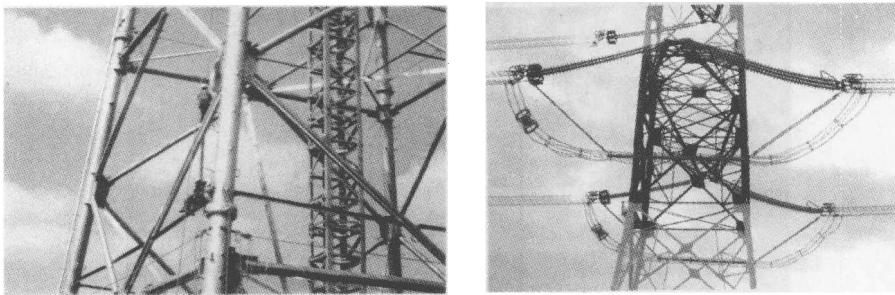


图 1-6 韩国 765kV 线路钢管塔

在欧美，广播通信用的拉线桅杆广泛采用钢管结构，如丹麦设计了 350m 高的电视通信塔。但钢管塔在欧美输电线路中目前应用较少，主要是由于欧美的大容量、特高压等线路较少，对大荷载杆塔的需求少。另外，



由于其生产供应的 $\angle 250 \times 35$ 高强度角钢,单肢角钢最大承载力可达到5000kN以上(约为我国最大规格 $\angle 200 \times 24$ 角钢的2倍),能够基本满足同塔双回线路铁塔主材的承载要求。

国外(尤其是日本)钢管塔(转角塔)的应用情况是,220kV线路钢管塔塔身主材、塔身斜材用钢管,导线横担、地线顶架以及塔身格面用角钢(见图1-7);500kV线路钢管塔塔身主材、塔身斜材用钢管,而导线横担、地线顶架根据受力情况,有的用钢管,有的用角钢,塔身格面用角钢(见图1-8);1000kV线路钢管塔塔身主材、塔身斜材、横担、地线顶架用钢管,而塔身格面用角钢(见图1-9)。

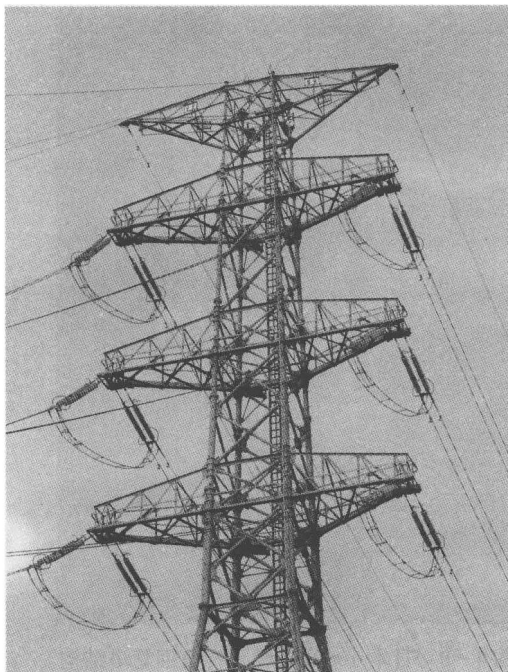


图1-7 日本220kV线路转角钢管塔结构

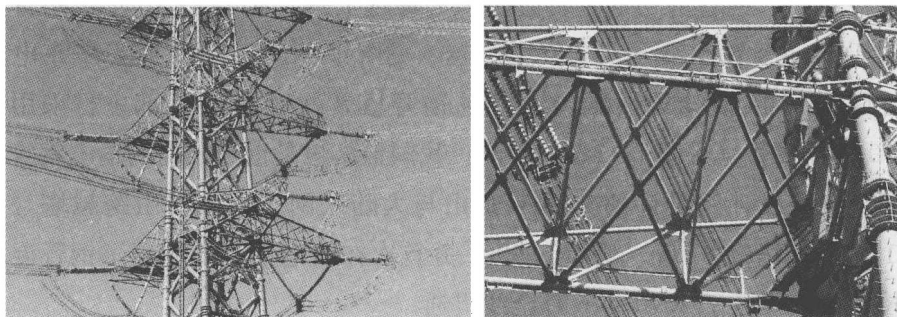


图1-8 日本500kV线路转角钢管塔结构



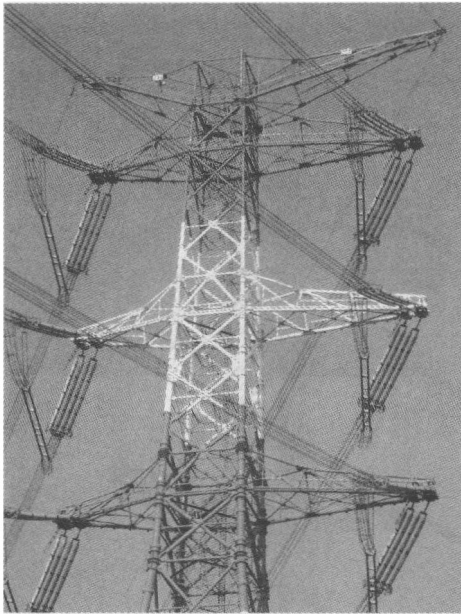


图 1-9 日本 1000kV 线路转角钢管塔结构

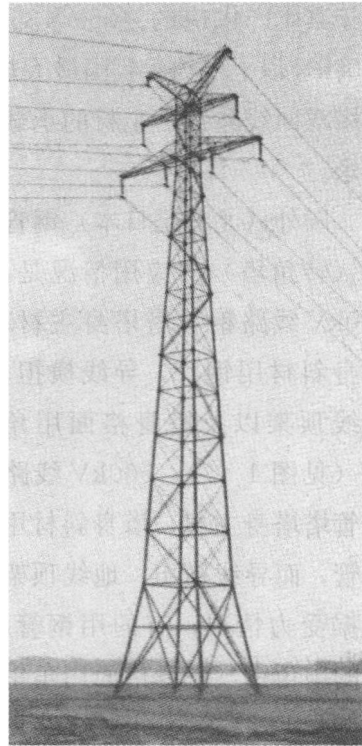


图 1-10 220kV 南京燕子矶大跨越钢管塔 (高 195.5m)

## 二、国内应用现状

在我国，钢管塔初期主要应用于大跨越工程，20 世纪 70 年代初首次应用于 220kV 南京燕子矶长江大跨越（见图 1-10）。2002 年，华东电力设计院设计的 500kV 吴淞口大跨越钢管塔首次在塔身下部主材采用了 Q390 高强钢管（见图 1-11）。目前，我国最高也是世界最高的输电钢管塔为浙江电力设计院设计的 220kV 舟山与大陆联网工程大猫山跨越塔（见图 1-12），塔高 370m，塔重 5999t，并首次在输电钢管塔应用了钢管混凝土技术，工程已于 2010 年 6 月全线贯通。

近几年来，钢管塔结构由于其断面刚度较大，截面受力特性较好，受力简洁、外形美观等突出优点，在不同电压等级的线路中得到了很好的发展。尤其是在大跨越结构、城市电网杆塔结构中应用较多。