

## 220/110 kV 混压四回路新型窄基四柱钢管塔优化设计

刘德标<sup>1</sup>, 钱统亚<sup>1</sup>, 张大长<sup>2</sup>

(1.盐城电力设计院, 盐城 江苏, 224002; 2. 南京工业大学土木工程学院, 南京 江苏, 210009)

**摘要:** 研究一种新型 220/110 kV 混压四回路 Q460 高强度钢管窄基四柱塔, 通过考察杆塔结构用钢量、顶点挠度及结构自振频率对铁塔根开、节间进行优化分析, 提出 220/110 kV 混压四回路窄基钢管塔合理根开、节间的选取方法及取值。

**关键词:** 混压四回路; Q460 高强度钢; 窄基四柱钢管塔; 优化设计

**中图分类号:** TM753

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2013)03-0042-04

随着输电线路输电容量及电压等级的不断提高, 同塔双回及多回线路在经济发达地区已经成为必然的趋势<sup>[1-3]</sup>。但对于荷载特别大的多回路转角塔, 采用单杆或者双杆型式的钢管塔, 由于杆件根部弯矩大, 导致主管直径较大, 材料利用率低, 甚至出现加工困难等问题, 故开发适用于城市地区多回路输电线路的新型杆塔结构形式十分必要。文中研究一种新型窄基四柱钢管塔, 该钢管塔的受力特点与单杆结构不尽相同, 因其是多层门式刚架结构, 整体受力更好, 四柱塔根部弯矩转化为一拉一压的轴力, 降低主管弯矩, 减小管径; 导地线横担设计成 A 字型或水平刚架, 线路方向荷载产生的内力转换为横担拉、压构件的轴力, 从而减小横担构件的规格。与角钢塔相比其根开更小, 缩短了线路走廊宽度, 从而减少了拆迁和植被破坏, 有利于资源节约和环境保护。新型钢管杆整体外形美观, 满足了城市输电线路的外观要求。文中主要研究四杆钢管杆的整体力学特性和最佳杆件布置形式, 通过理论分析及有限元模拟, 探讨四杆钢管杆的设计理论及方法, 并进行了杆塔结构优化设计分析。

## 1 杆塔设计依据及荷载工况

### 1.1 窄基四柱塔的设计依据

窄基四柱钢管塔主要参照 DL/T 5154—2002<sup>[4]</sup>、GB 50017—2003<sup>[5]</sup>、GB 50009—2001<sup>[6]</sup>以及国家电网公司输电线路钢管塔通用设计研究成果进行设计。220/110 kV 混压四回路窄基钢管塔, 220 kV 导线采用 2×LGJ-630/45 钢芯铝绞线, 安全系数为 3.5; 110 kV 导线采用 2×LGJ-300/25 钢芯铝绞线, 安全系数为 3.3; 地线为 JLB30-150, 安全系数小于等于 3.8。设计水平档距 350 m, 垂直档距 450 m; 导线覆冰 10 mm, 地线覆冰 15 mm; 导地线分别按照 20 mm 和 25 mm 验算冰。根据输电钢管塔的研究成果, 结构重要性系

数采用 1.1, 设计风速为 28.0 m/s, 地面粗糙度类别按 B 类。由于该新型钢管塔结构的构件设计是强度控制而非变形控制, 所以采用高强度钢更为经济合理, 故采用 Q460 高强度钢, Q460 高强度钢的强度指标如表 1 所示。

表 1 Q460 高强度钢强度设计值

| 厚度或直径/mm | 抗拉/MPa | 抗压和抗弯/MPa | 抗剪/MPa | 孔壁承压/MPa |
|----------|--------|-----------|--------|----------|
| 16       | 415    | 415       | 240    | 590      |
| 16~35    | 395    | 395       | 230    | 560      |
| 35~50    | 380    | 380       | 220    | 540      |

### 1.2 构件强度设计理论

#### 1.2.1 钢管构件承载力计算

文献[5]中压弯构件整体稳定承载力计算公式如下:

$$\frac{N}{\varphi_x A} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_{lx} (1 - 0.8 \frac{N}{N'_{Ex}})} \leq f \quad (1)$$

式中:  $N$  为轴向压力;  $M_x$  为截面弯矩;  $\varphi_x$  为受压构件稳定系数;  $A$  为截面面积;  $\beta_{mx}$  为等效弯矩系数;  $W_{lx}$  为截面模量;  $\gamma_x$  为截面塑性发展系数;  $N'_{Ex}$  为参数;  $f$  为材料设计值。文献[4]中复合受力强度计算公式如下:

$$\left( \frac{N_2}{A_g} + \frac{M_x C_y}{I_x} + \frac{M_y C_x}{I_y} \right)^2 + 3 \left( V \frac{Q}{I_t} + T \frac{C}{J} \right)^2 \leq f_a^2 (\text{多边形}) \text{ 或 } \leq f_b^2 (\text{环形}) \quad (2)$$

式中:  $N_2$  为轴向压力;  $A_g$  为截面面积;  $M_x, M_y$  分别为绕  $x, y$  轴截面弯矩;  $I_x, I_y$  分别为绕  $x, y$  轴截面惯性矩;  $C_x, C_y$  分别为计算点在  $x, y$  轴上的投影长度;  $V$  为剪力;  $T$  为扭矩;  $\frac{Q}{I_t}$  为最大弯曲剪应力系数;  $\frac{C}{J}$  为最大扭转剪应力系数。

#### 1.2.2 钢管节点承载力计算

根据日本有关标准<sup>[7]</sup>关于节点板节点的相关规定计算钢管节点承载力。

### 1.3 荷载工况

#### 1.3.1 导地线荷载

导地线荷载主要分为大风、覆冰、断线以及安装工

收稿日期: 2012-12-27; 修回日期: 2013-02-05

基金项目: 国家电网公司依托工程基建新技术研究项目(SGKJ[2011]10)

况 4 种,均以节点荷载的方式作用于结构挂点上;同时,根据架空输电线路规范进行荷载组合,得到窄基四柱钢管转角塔的杆塔结构设计荷载工况共 176 种。

### 1.3.2 塔身风荷载

输电塔属于高耸结构,风荷载对结构内力影响较大。窄基四柱钢管塔的杆件设计均根据文献[4]和[5]的相关规定选择各系数。由于四柱钢管塔的形式特殊,且没有相关体型系数的取值方法,故需特别注意风荷载计算的体型系数。因此,结合文献[6]及相关经验,考虑前后侧有遮挡的情况,选择体型系数为 1.0,即每个主管的体型系数均为 0.5,计算每个主管的塔身风荷载。再进行风荷载与导地线荷载组合,得到不同工况下窄基钢管塔各杆件的设计内力。

## 2 杆塔结构内力分析

### 2.1 分析模型

采用 SAP 2000 进行结杆塔结构建模和内力计算,四柱塔主管以及横隔全部采用 Q460 高强度钢管,横担采用 Q345 钢管,横隔设置交叉材用 Q345 等边角钢。杆塔构件形式及杆件规格根据内力试算得到,除横隔交叉材采用铰接外,其余杆件节点均采用刚接形式。

另外,根据窄基四管钢管塔的特点,对导线荷载的施加方法进行简化,A 字形横担端部的前后侧挂点导线荷载叠加后施加在同一点上,窄基四柱钢管塔的分析模型如图 1 所示。

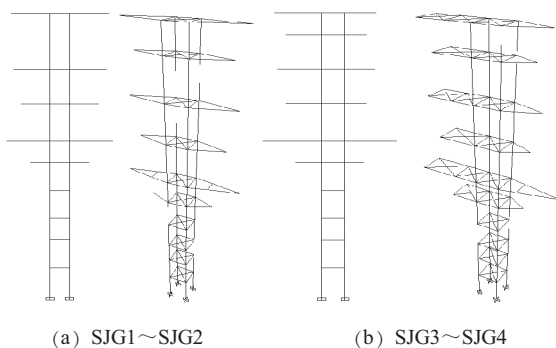


图 1 220/110 kV 四回路窄基四柱钢管塔塔型

### 2.2 杆塔结构内力

杆塔结构内力分析可知,转角塔 SJG1、SJG2 和 SGJ3 的横担下侧主管的控制工况为 90° 大风工况,转角塔 SJG4 横担以下主管的控制工况为覆冰工况(如表 2 所示);横担以上主管均为安装工况控制。控制工况下窄基四柱钢管塔二型转角塔 SJG2、四型转角塔 SJG4 的结构内力情况如图 2 和图 3 所示。

基于上述杆塔结构受力分析可知,主管主要承受轴力、弯矩和剪力;横隔主要承受弯矩和剪力,主要是弯矩控制,而轴力较小。从上到下横隔内力逐渐增大,杆塔结构的呼高范围内横隔受力最大,符合刚度分配

表 2 控制工况下的底部主管内力

| 塔形   | 控制工况   | 规格       | 应力 /MPa |
|------|--------|----------|---------|
| SJG1 | 90° 大风 | D 660×16 | 399.67  |
| SJG2 | 90° 大风 | D 711×16 | 409.28  |
| SJG3 | 90° 大风 | D 813×18 | 381.50  |
| SJG4 | 覆冰     | D 914×20 | 363.22  |

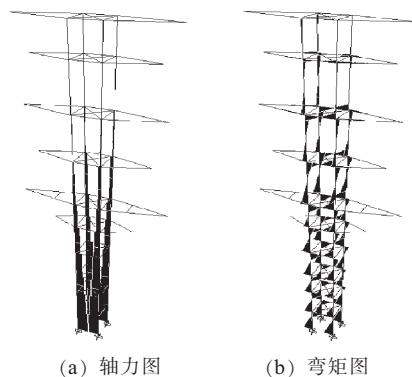


图 2 90°大风转角塔 SJG2 的内力

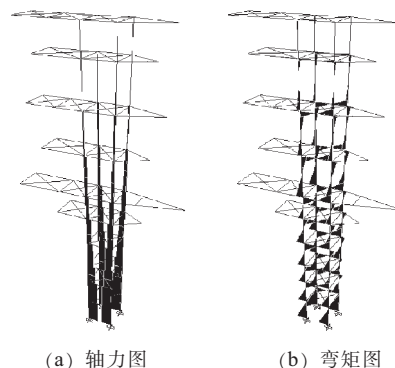


图 3 覆冰时转角塔 SJG4 的内力

原则;同时,考虑呼高范围内弯矩相差较小并方便加工,呼高范围内设置相同规格横隔,分析得到各塔型 27 m 呼高范围内横隔的内力如表 3 所示,横隔内力较大。另外,与主管、横隔内力相比,横担内力要小得多,设计比较容易。

表 3 控制工况下横隔内力

| 塔形   | 控制工况   | 规格       | 应力 /MPa |
|------|--------|----------|---------|
| SJG1 | 90° 大风 | D 457×18 | 367.36  |
| SJG2 | 90° 大风 | D 529×20 | 394.19  |
| SJG3 | 90° 大风 | D 610×20 | 378.17  |
| SJG4 | 覆冰     | D 711×20 | 366.88  |

### 2.3 杆塔加工顶点位移

基于内力分析和构件设计,在满足构件强度的条件下,杆塔结构的顶点水平位移如表 4 所示,可知 90° 大风工况的顶点水平位移最大。窄基四柱钢管塔的顶点位移均能满足规范的要求,说明四柱钢管塔具有良好的刚度和整体性能。

表 4 风荷载下顶点水平位移

| 塔形   | 控制工况   | 顶点位移 /m |
|------|--------|---------|
| SJG1 | 90° 大风 | 0.81    |
| SJG2 | 90° 大风 | 0.93    |
| SJG3 | 90° 大风 | 0.86    |
| SJG4 | 覆冰     | 0.80    |

### 3 杆塔结构优化

窄基四柱钢管塔的根开对塔重、节点及基础设计均有很大的影响,而节间大小可能影响结构弯矩分配,主管以及横隔受弯矩影响较大,因此,有必要研究根开和节间对杆塔力学性能的影响规律。文中对呼高为 27 m、总高为 54 m 的 1~4 型转角塔进行结构优化分析。

#### 3.1 根开对杆塔结构性能的影响

转角塔 SJG1 选用 1.8 m, 2.3 m, 2.8 m, 3.3 m, 3.8 m 5 种根开, 转角塔 SJG2 选用 2 m, 2.5 m, 3 m, 3.5 m, 4 m 5 种根开, 转角塔 SJG3 选用 2.2 m, 2.7 m, 3.2 m, 3.7 m, 4.2 m 5 种根开, 转角塔 SJG4 选用 2.5 m, 3 m, 3.5 m, 4 m, 4.5 m 5 种根开, 4 种塔型节间初定为 7 m, 分析得到不同根开所对应的塔重及顶点位移变化规律如图 4、图 5 和图 6 所示。

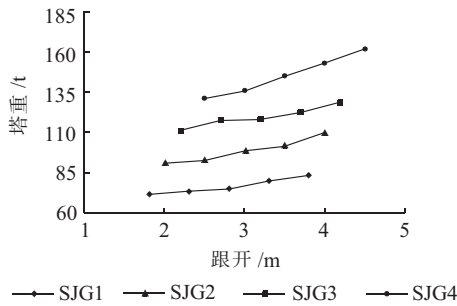


图 4 根开-塔重变化特点

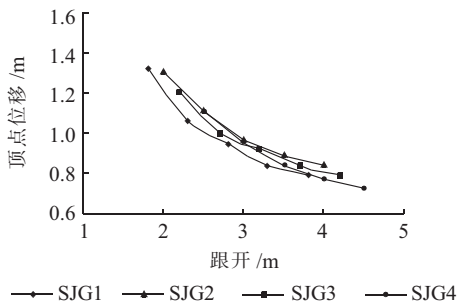


图 5 根开-顶点位移变化特点

由图 4 可知,塔重随根开减小而降低,220/110 kV 混压四回路 1 型、2 型、3 型、4 型转角塔当根开分别为 1.8 m, 2 m, 2.2 m, 2.5 m 时用量最小。

由图 5 杆塔顶点位移变化特点可知, 顶点位移随根开减小而明显增大,220/110 kV 混压四回路 1 型、2 型、3 型、4 型转角塔当根开分别为 3.8 m, 4 m, 4.2 m,

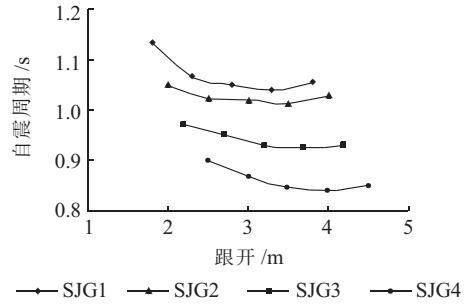


图 6 根开-自振周期变化特点

4.5 m 时顶点位移最小。

由图 6 杆塔结构自振频率特点可知, 自震周期随根开减小而增大,但变化不显著,220/110 kV 混压四回路 1 型、2 型、3 型、4 型转角塔当根开分别为 3.8 m, 4 m, 4.2 m, 4.5 m 时自震周期最小。

基于上述杆塔结构优化分析可知, 当满足规范规定时,根开越小、杆塔经济性越高,但是根开过小将出现杆件节点、铁塔基础设计、制作加工困难以及顶点位移偏大等问题。因此, 综合考虑选择转角塔 SJG1、SJG2、SJG3 和 SJG4 的根开分别取为 2.8 m, 3.0 m, 3.2 m 和 3.5 m。

#### 3.2 横隔节间对杆塔结构性能的影响

采用上述优化分析得到的窄基塔根开,1~4 型转角塔的节间分别取 5.0 m, 6.0 m, 7.0 m, 8.0 m, 9.0 m, 分析钢管塔的结构性能,分析结果如图 7、图 8 和图 9 所示。

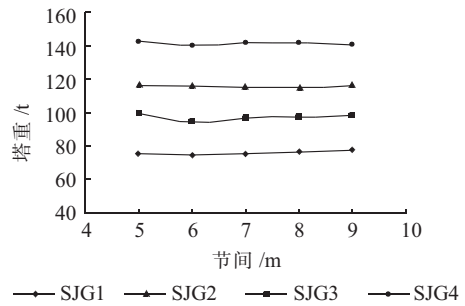


图 7 横隔节间-塔重变化特点

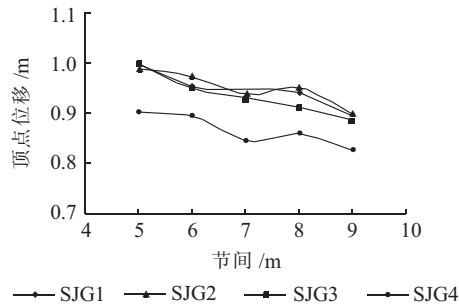


图 8 横隔节间-顶点位移变化特点

可见横隔节间变化对塔重影响较小,塔重基本保持不变;顶点位移随着横隔节间变大有下降趋势,但变化较缓,4 种转角塔的顶点位移在 0.8~1.0 m 之间;节

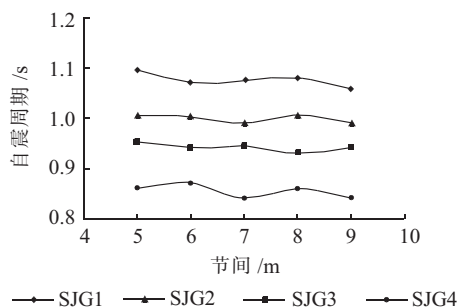


图9 横隔节间-自震周期特点

间对自振周期影响不明显,4种转角塔的自振周期在0.8~1.1 s之间。

综上所述,节间对整塔的影响不大,因此选择任意一个节间都可以,但是节间小可降低主管以及横隔的规格,所以文中选择5 m节间作为最终结果。

#### 4 结束语

研究开发了220/110 kV混压四回路的新型Q460高强窄基四柱钢管塔,并通过模拟分析以及真型塔试验2种方法研究其结构性能,得到如下主要结论:采用Q460有利于降低杆塔结构的用钢量,同时符合结构设计采用高强材料的趋势;转角塔SJG1、SJG2、SJG3

的主管以及横隔的控制工况都为90°大风,4型转角塔则为覆冰工况,同时影响各杆件应力水平的主要因素均为构件的弯矩,主管为压弯受力,横隔为弯剪受力;窄基四柱钢管塔的塔重随根开减小而降低,顶点位移以及自振周期则随根开减小而增大;节间的变化对四柱钢管塔的塔重以及自振周期影响较小,但随着节间的增大,顶点位移会缓慢降低。

#### 参考文献:

- [1] 孙竹森,程永锋,张强,等. 输电线路钢管塔的推广与应用[J]. 电网技术,2010,34(6):186-192.
- [2] 杨靖波,李茂华,杨风利,等. 我国输电线路杆塔结构研究新进展[J]. 电网技术,2008,32(22):77-83.
- [3] 韩军科,杨靖波,杨风利,等. 特高压钢管塔主材长细比及壁厚比的取值[J]. 电网技术,2009,33(19):17-20.
- [4] DL/T 5154—2002, 架空送电线路杆塔结构设计规定[S].
- [5] GB 50017—2003, 钢结构设计规范[S].
- [6] GB 50009—2001, 建筑结构荷载规范[S].
- [7] 日本铁塔协会, 输电钢管铁塔制作标准[S]. 1995.

#### 作者简介:

刘德标(1961),男,江苏盐城人,工程师,从事线路设计工作;  
钱统亚(1967),男,江苏盐城人,工程师,从事线路设计工作;  
张大长(1971),男,江苏南京人,教授,从事特种钢结构研究工作。

## Optimization Design of a New Type Narrow-base Four-column Steel Pipe Tower for 220/110 kV Mixed Voltage 4-circuit Transmission Line

LIU De-biao<sup>1</sup>, QIAN Tong-ya<sup>1</sup>, ZHANG Da-chang<sup>2</sup>

(1. Yancheng Electric Power Design Institute, Yancheng 224002, China;

2. College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** This paper studied a new type of Q460 high-strength narrow-base four-column steel pipe tower for 220/110 kV mixed voltage 4-circuit Transmission line. Examining the steel consumption, vertex deflection and natural frequency of structure, the structural optimization and analysis on leg spans and beam intervals are carried out. The reasonable values and selection method of the leg spans and beam intervals of 220/110 kV mixed voltage 4-circuit narrow-base steel pipe tower are proposed.

**Key words:** mixed voltage 4-circuit; Q460 high-strength steel; narrow-base four-column steel pipe tower; optimization design

(上接第41页)

## Capacity Planning of Combined Cooling, Heating, and Power Micro-grids

CUI Heng-zhi<sup>1</sup>, HUANG Qi-feng<sup>1</sup>, YANG Shi-hai<sup>1</sup>, ZHAN Li-ping<sup>2</sup>, ZHOU Gan<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** With the advantage of high energy efficiency, variety using types and solving energy demand on the spot, combined cooling, heating and power (CCHP) micro-grids can satisfy the demand of integral energy users compare to normal energy utilization types. However, CCHP projects in operation or under construction currently are often unreasonable allocated, the energy utilization efficiency of the systems are far lower than the expected, and the production efficiency of the devices is low. The optimal model of capacity planning for CCHP micro-grid is proposed in this paper. Firstly, several typical types of cogeneration micro-grid systems are introduced. Then, the optimal model for capacity planning of CCHP micro-grid is built. Finally, the model is realized in CPLEX language and the effectiveness of the model is verified by example analysis.

**Key words:** CCHP; micro-grid; capacity planning; optimal