



## 钢塔筒结构形式在港口导标工程中的应用

蔺雪峰, 张小安, 陶鹏

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 钢结构塔筒结构形式广泛用于风电行业, 作为风机的主要承重支撑构件—风机塔筒, 结构形式成熟, 施工简单, 建筑外形简洁、美观, 但目前现有港口导标工程中还没有工程采用钢塔筒结构方案。为了在港口导标工程中及内河类似工程中推广钢结构塔筒结构形式, 介绍了钢塔筒港口导标的塔筒连接方式、塔筒与基础的连接方式、基础的选型, 并用完成的工程实例说明了钢结构塔筒港口导标的设计及计算。

**关键词:** 钢塔筒结构; 港口导标; 厚型锻造法兰; 预应力锚栓; 基础

中图分类号: U 644

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)09-0110-04

### Application of steel tube structure in navigation power for port

LIN Xue-feng, ZHANG Xiao-an, TAO Peng

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** The steel tube tower structure is widely used in the wind power industry. The tower, as the main bracing member, is characterized by simple and beautiful architectural appearance, simple structural form, and convenient construction. However, the steel tube tower structure has not been applied to the existed navigation mark engineering. In order to promote the application of the steel tube tower structure in port's navigation mark engineering and similar inland river engineering, this paper presents the connecting method of steel tubes, jointing of the tube with the foundation, as well as the type selection of the foundation, and expounds the design and calculation of the navigation mark of steel tube tower structure based on the engineering examples which have been completed.

**Key words:** steel tube tower; navigation mark; thick forged flanges; prestressed bolts; foundation

港口导标工程为港口航道船舶通航的重要建筑物, 由导标上部标识牌和支撑标识牌的主体结构组成, 标识牌的尺寸及主体结构高度是根据导航需要最终确定。随着各港口通航能力的提高, 单向航道拓宽改为双向航道, 这要求建设标准更高、主体高度更高、标识牌尺寸更大的导标结构。这就给导标结构设计带来更大的挑战。钢塔筒结构形式广泛用于风电行业, 作为风机的主要承重构件—风机塔筒, 结构形式成熟, 建筑外形简洁、美观, 最大特点是安装非常便利, 施工周期短, 施工质量容易保证等优点。因此钢结构塔筒形式应用到港口导标工程, 可推进导标形式的多样化,

将此结构应用到导标工程, 在国内也是首次。

#### 1 混凝土导标和钢桁架导标结构形式特点

常见的港口导标主体结构的结构形式多采用混凝土结构(图1)或钢结构桁架结构(图2)。钢桁架结构又可分为钢管桁架和角钢桁架。

##### 1.1 混凝土结构导标

**优点:** 混凝土导标结构是导标较早采用的结构形式, 结构形式成熟, 结构为外封闭结构, 对导标结构的检修和维护比较有利, 在港口地区对结构的防腐也是有利的。

**缺点:** 外形如混凝土烟囱, 建筑外形不美

收稿日期: 2012-05-18

作者简介: 蔺雪峰(1979—), 男, 硕士, 工程师, 国家一级注册结构师, 从事建筑结构设计与研究。



图1 混凝土导标



图2 钢结构桁架导标

观。如采用图1形状的混凝土导标,外立面相对美观,但不方便施工、工期较长、造价高。

### 1.2 钢结构桁架导标

优点: 钢管桁架或角钢桁架结构都为空间桁架结构,钢管和角钢进行现场拼接,与电力行业的高低压输电塔类似,结构技术成熟,施工便利、造价低。

缺点: 钢结构桁架结构导标为开敞结构,不利于结构的检修和维护,攀爬存在安全隐患、对导标结构在港口防腐蚀也是不利的。对于较高的导标,底部尺寸占地面积大。如已完成的项目,导标结构主体高度为58 m,底部边长达13 m。

## 2 钢结构塔筒导标结构

钢塔筒结构形式作为风电行业风机塔筒结构,技术成熟,广泛用于风电行业,建筑外形简洁、美观。根据目前掌握的资料,在国内港口导标工程中是首次采用钢塔筒结构形式。该结构在工厂内加工成成品,现场进行拼装,施工周期短(根据目前施工的实际情况,主体结构现场安装仅需2 d时间)、结构形式为封闭结构,便于导标使用过程中的检修和维护。工程费用介于混凝土导标和钢结构桁架导标费用之间。

钢结构塔筒根据运输需要及生产加工条件,每段塔筒长度控制在15 m左右,最长不宜超过20 m,每段之间由法兰盘进行连接。钢塔筒与基

础之间通过锚栓进行连接。

### 2.1 导标钢塔筒间的连接方式

钢结构塔筒之间联系方式为法兰连接,且多为厚型锻造法兰,见图3。该法兰主要依靠进口,其加工周期长,成本高。锻造法兰的螺栓紧固采用扭矩法拧紧。在风荷载作用下,螺纹发生塑性变形导致应力松弛,进而导致螺栓预拉力衰减<sup>[1]</sup>。螺栓预拉力衰减到一定程度引起螺帽松动或螺栓预拉力减小,降低结构的承载能力,因此需定期对法兰螺栓进行预紧。反向平衡法兰是钢结构塔筒之间连接的一种新型的法兰,见图4<sup>[2]</sup>,与普通法兰不同,反向平衡法兰加劲板在前,法兰板在后,可以不增厚法兰板仅增高加劲板即可增加法兰刚度,节约钢材;同时,增高加劲板使螺栓增长有利于精确施加预拉力。该种法兰下加劲板突出并卡紧上端塔筒筒壁,有效地避免了法兰螺栓

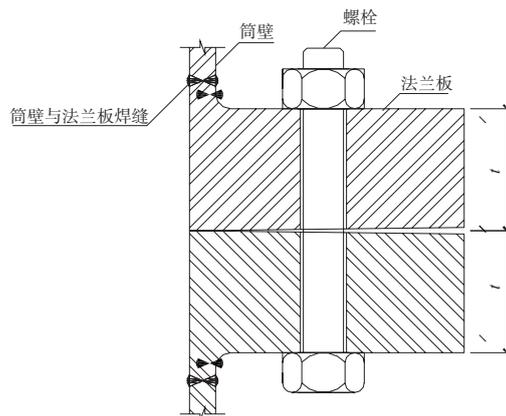


图3 锻造法兰

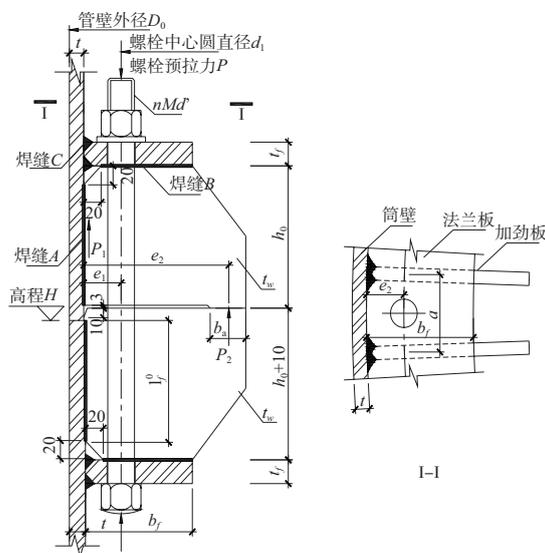


图4 反向平衡法兰

的松动，可有效减少在使用阶段法兰螺栓的检修次数，进而减少后期维护的费用。根据导标的受力特点和方便后期检修和使用，导标塔筒之间的连接采用反向平衡法兰。

### 2.2 导标钢塔筒与基础的连接方式

1) 普通螺栓连接，此连接方式仅适用于导标所在地区风荷载不大，导标高度和标牌尺寸不大的情况下，否则计算所需螺栓直径太大，无法正常布置开。

2) 法兰盘连接，此连接方式和普通螺栓连接方式类似，适用范围与普通螺栓相同。

3) 基础环连接，此连接方式是上钢塔筒与埋入基础内一定深度的钢塔筒（基础环）通过与上部结构相同的内法兰进行连接，基础环连接方式是目前在风电行业钢塔筒与基础连接常采用的一种连接方式（图5），适用于各种形式导标钢塔筒与基础的连接。但缺点是基础环以下、基础底板以上区段内竖向钢筋要承受全部外力，此区段与有基础环部分不同，因此是薄弱部位。该区域在长期荷载作用下容易发生裂缝，使钢筋易于锈蚀，在港口地区是不利的，因为在很多港口地区的地下水或土质对混凝土或者混凝土中的钢筋具有腐蚀性，严重影响基础的耐久性能。此外基础环连接方式，对于基础上部穿入基础环内钢筋不方便施工，在基础环内钢筋重复布置，费用高。

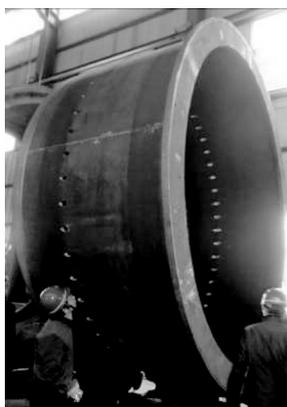


图5 基础环

4) 预应力锚栓连接方式，该连接方式是采用预应力锚栓连接导标钢塔筒和基础（图6），是近几年创新的一种连接方式<sup>[3]</sup>。适用于各种形式导标钢塔筒与基础的连接。预应力锚栓贯穿基础整个

高度，并在基础顶部及底部设置上下锚板，使基础整体好；此锚栓为预应力锚栓，使上、下锚板间混凝土在受力状态下处于受压状态，混凝土不产生拉力，因此基础混凝土不会产生裂缝，耐久性好；预应力锚栓间的间距可以方便基础钢筋的正常设置，不影响钢筋穿插，方便施工。



图6 预应力锚栓

### 2.3 钢塔筒导标基础形式

基础形式由上部结构在基础底部产生的竖向力 $F$ ，水平力 $V$ ，弯矩 $M$ 及地质条件综合确定，并满足《高耸结构设计规范》<sup>[4]</sup>中相关章节的规定。基础可采用梁板式基础或者（筏板+桩）基础。考虑到导标工程在航道中的重要性，基础设计时基础底面对应正常使用极限状态下荷载效应的标准值不建议脱开地基土。即对应天然地基基础底面不出现零应力区；对桩基础桩不出现拉应力。

### 3 钢结构塔筒导标实例

图7为已经施工完成的58 m钢结构塔筒导标，该项目位于黄骅港港区，导标标牌为正方形，尺



图7 钢结构塔筒导标

寸为12 m × 12 m, 设置于导标的顶部。导标塔筒底部最大外直径为4.0 m, 考虑到导标内部检修上人的需要, 塔筒顶部为2.4 m, 中间部分截面尺寸呈线性变化。

### 3.1 计算取值参数

本工程上部塔筒结构采用Sap2000计算分析。钢塔筒采用Q345钢, 钢材的抗拉、抗压、抗弯强度设计值为:  $f = 295 \text{ N/mm}^2$  (壁厚 > 16 mm),  $f = 310 \text{ N/mm}^2$  (壁厚 ≤ 16 mm); 弹性模量  $E = 206 \text{ kN/mm}^2$ , 泊松比取值为0.3。塔筒截面见表1。

表1 钢塔筒导标截面尺寸

截面位置/m	0~10	10~20	20~36	36~56
壁厚/mm	25	20	16	14

### 3.2 荷载

1) 荷载及活载。

2) 风载。本工程基本风压取值为 $0.50 \text{ kN/m}^2$ , 钢塔筒塔身为圆形光滑结构, 高宽比 > 7, 根据《高耸结构设计规范》和《建筑结构荷载规范》综合考虑风载体型系数为0.6, 标牌的体型系数取值为1.7, 地面粗糙度为A类。在此基础上根据《高耸结构设计规范》说明4.2.9条中公式计算风振系数。

3) 温度作用。考虑 ± 28° 的温差。

4) 地震作用。黄骅地震设防烈度为6度, 设计基本加速度为 $0.05 \text{ g}$ , 地震分组为第3组, 建筑场地类别为IV类。计算时考虑X,Y两个方向水平地震作用。

### 3.3 计算结果分析

结构分析时, 考虑了恒载、活载、温度与风载或者地震荷载的组合。通过组合计算分析, 得出钢塔筒结构在风载参与的组合为最不利组合(表2)。

表2 风荷载作用下塔筒的作用(水平力和弯矩)

标牌	作用	水平力/kN	结构底部弯矩/(kN·m)
非镂空	标牌对塔筒作用	420.5	22 288.1
	塔筒的总作用	560.8	26 692.8
1/3镂空	标牌对塔筒作用	280.3	14 858.7
	塔筒的总作用	421.3	19 262.8

1) 由表2可以得出标牌本身在风载作用下

对钢塔筒产生的水平力及钢塔筒底部弯矩是结构的主要作用。其中导标牌的受风面积的大小对结构底部的水平力及弯矩影响非常明显。标牌不镂空情况下, 在结构底部产生的水平力和弯矩分别为 $420.5 \text{ kN}$ 和 $22 288.14 \text{ kN/m}^2$ ; 而标牌面积镂空1/3时, 在结构底部产生的水平力和弯矩分别为 $280.3 \text{ kN}$ 和 $14 858.7 \text{ kN/m}^2$ 。

2) 由表2也可以得出标牌在风载作用下在结构底部产生的水平力和弯矩与标牌的迎风面积呈线性变化。因此设计标牌时, 在不影响导航安全的情况下, 尽可能减小标牌面积并在标牌平面内增加镂空面积, 进而减小风载的作用。在设计本工程标牌时, 经与导航专业沟通, 允许标牌面积有1/3面积可以镂空。如再增加标牌镂空面积, 将影响到导航通航安全。

3) 图8为钢塔筒导标结构的应力。由图可以看出, 结构最大应力为 $154 \text{ N/mm}^2$ 。小于规范钢材抗拉(压)强度设计值 $295 \text{ N/mm}^2$ 。

4) 图9为导标结构的变形, 图中最大线性位移为 $445 \text{ mm}$ , 非线性位移为 $625 \text{ mm}$ (非线性), 位移值都小于《高耸结构设计规范》中表3.0.10高耸结构水平位移限值(线性位移 $773 \text{ mm}$ , 非线性位移为 $1 160 \text{ mm}$ )的要求。

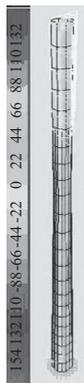


图8 导标应力



图9 导标变形

## 4 结语

1) 根据目前已经完成的导标工程可知, 钢结构塔筒导标是采用工厂加工成成品, 现场进行拼装施工, 施工简单, 施工质量容易保证, 大大缩短了施工工期。在导标工程方案选择上有很强的竞争力。

(下转第121页)