管顶人孔井、测量塔的受力变形数值模拟及控制

丁宇诚，宁进进
（中交一航局第二工程有限公司，山东 青岛 266000）

摘要：某大型沉管工程的沉管艉端装有最高近 42.2 m 的人孔井和测量塔，其在浮运、安装过程中受到水流荷载、波浪荷载和风荷载的影响而存在受力变形。为了保证人孔井和测量塔的安全及测量塔的测量精度，对人孔井和测量塔的受力特性进行分析后，在人孔井和测量塔上添加抱箍结构，使其与测量塔呈刚性连接。

关键词：人孔井；测量塔；风荷载；水流荷载

中图分类号：U 655.4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2014)09-0170-03

Simulation and control of manholes and force and deformation of measurement tower

DING Yu-cheng, NING Jin-jin
(CCCC Second Engineering Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: At the end of every element of tunnel in a large tunnel engineering, there fit with nearly 42.2 m maximum height of manhole and measurement tower, which bear force by water load, wave load and wind load in transportation and placement. Adding a clamp structure to form a rigid connection with the measurement tower, we ensure the safety and accuracy.

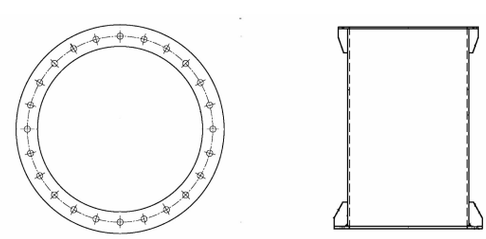
Keywords: manhole; measurement tower; wind load; water load

某大桥岛隧工程沉管隧道穿越珠江口广州、深圳西部港区出海主航道，沉管段长 5 664 m，共有沉管 33 根，是迄今世界上规模最大的海上沉管岛隧工程。

沉管浮运和安装是岛隧工程的关键点和难点，为了保证沉管艉端的安装精度和浮运安装安全，在沉管艉端设置了人孔井和测量塔，由于安装深度的增加，测量塔和人孔井的高度也随之增高，最高达到近 42.2 m。在 E6 管节浮运和安装过程中，发现人孔井、测量塔存在摆动的现象，通过倾斜仪观测到测量塔顶部最大位移分别为 174 mm 和 201 mm，为了保证二者的安全，在对其进行受力分析后，增加测量塔和人孔井的连接件——抱箍。

1　人孔井和测量塔介绍

测量塔位于沉管的非 GINA 端（沉管安装时的艉端），其位置见图 1。人孔井与测量塔均为钢结构，其中人孔为板厚 20 mm、内径 730 mm 的圆筒形式，测量塔为三角形的钢结构。



a) 俯视图　　b) 主视图

图 1　单节段人孔井

收稿日期：2014-02-18

作者简介：丁宇诚（1990—），男，助理工程师，从事水运工程施工工作。

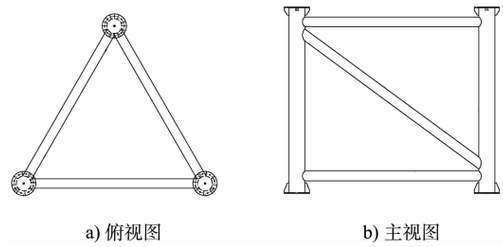


图 2　单节段测量塔

2　人孔井与测量塔的受力

浮运过程中沉管干舷为 150 ~ 300 mm，计算时取 150 mm，测量塔和人孔井在海面以上，目前国内外海洋移动式平台的稳性衡准都是采用所谓的“气象衡准”，即把平台在海上所受的荷载仅用风荷载表现出来，而将波浪对平台的影响以及其它因素考虑在稳性衡准数中[1]，故人孔井和测量塔在浮运、安装过程中所受波浪荷载可忽略不计。在计算风荷载时作了如下假设：

1）任一受风构件所受的风力与风向一致；

2）风力作用在受风构件的风向投影面积的形心上；

3）在受风时，不考虑测量塔与人孔之间的相互遮蔽作用；

4）沉管、测量塔、人孔井在浮运、安装过程中受到的荷载产生的力偶矩只使其倾侧而不计使其绕 Z 轴旋转的影响。

2.1　浮运过程中的风荷载

据 GD 008—1997《中国船级社海上拖航指南》[2] 估算拖航过程中风阻力：

$$R_a = 0.5\rho v^2 \sum C_s A_i \times 10^{-3} \qquad (1)$$

式中：ρ 为空气密度，取 1.22 kg/m^3；v 为风速（m/s）；A_i 为受风面积（m^2）；C_s 为受风面积 A_i 的形状系数。

由于风压与风速的平方成正比，故风速的取值就显得特别重要，而风速具有极大的脉动性，高耸的构筑物在不稳定的脉动风作用下，结构将出现一定的动力响应，特别是风速较大时，动力响应将更为显著[3]。计算时考虑逆风浮运，航速 2 kn，风速取阵风风速最大值，风向 0°，即风向与管节纵向一致。根据《海洋平台强度分析》和美国 API 规范，不同时距的风速之间有一定的关系，时距短的风速比时距长的风速要大[4]，国家海洋预报中心提供的风速资料中只有时距为 6 s、1 min、10 min、1 h 的平均风速，没有时距 3 s、5 s 的平均风速，在模拟计算中，以 1 min 平均风速作为基本资料，将风速换算为时距 3 s 的平均风速。不同时距风速与 1 h 平均风速关系见表 1。

表 1　不同时距平均风速与 1 h 平均风速的比例系数

时距	1 h	10 min	1 min	15 s	5 s	3 s
系数值	1.00	1.04	1.16	1.26	1.32	1.35

国家海洋预报中心给出的风速为海面上 10 m 高处风值，而对于本文中计算所涉及的高空构筑物，需换算不同高度的风速，由《海洋平台强度分析》知其他高度的风值可用下式换算：

$$v_z = \left(\frac{Z}{10}\right)^{\frac{2}{n}} v_{10} \qquad (2)$$

式中：v_z 为离海面高度为 z（m）的风速；v_{10} 为离海面高度为 10 m 的风速；n 值与测量风速的时距以及离岸的距离有关，一般在 1 ~ 13 之间变化，美国 API 规范建议在开放的海域，对于持续风风速 $n = 8$，对于阵风风速 $n = 13$，由于计算中风速取 3 s 时距，为阵风风速，n 在这里取 13；$\left(\frac{Z}{10}\right)^{\frac{2}{n}}$ 可用高度系数 C_H 代替，海平面以上 0 ~ 15.3 m 取 1.00，海平面以上 15.3 ~ 30.3 m 取 1.10，海平面以上 30.3 ~ 46.0 m 取 1.20。

由式（2）可得出测量塔与人孔井上离沉管表面不同高度下的风速（表 2）。

表 2　测量塔、人孔井上不同高度下的风速

高度/m	0 ~ 15.15	15.15 ~ 30.15	30.15 ~ 42.2
风速/(m·s^{-1})	10.25	11.28	12.30

注：高度均已扣除 15 cm 沉管浮运干舷，故比规范中小 15 cm。

忽略人孔井和测量塔之间的遮蔽作用，将两者作为独立的受力单元考虑。测量塔作为桁架结构，其受力面积取迎风面轮廓的 60%，为 113.9 m^2。

由式（1）计算出人孔井和测量塔上的风荷载沿高程分布情况（表 3）。

表 3　测量塔、人孔井上不同高度的风荷载

高度/m	人孔井风荷载/kN	测量塔风荷载/kN
0 ~ 15. 15	1. 178	4. 525
15. 15 ~ 30. 15	1. 391	4. 453
30. 15 ~ 42. 2	1. 298	4. 984

注：高度均已扣除 15 cm 沉管浮运干舷，故比规范中小 15 cm。

在不考虑风荷载的遮蔽效应、升力效应、脉动性、边界效应等情况时，应用 Ansys 软件模拟出人孔井、测量塔的挠度分别为 75 mm 和 171 mm。

2.2　浮运过程中的极限风荷载

沉管浮运作业气象窗口的风级限制为 6 级，其风速约为 10. 8 ~ 13. 8 m/s。极限条件下，风速取 13. 8 m/s，则根据式（1）可计算出人孔井、测量塔上极限风荷载沿高程分布（表 4）。

表 4　人孔井、测量塔上不同高度的极限风荷载

高度/m	人孔井风荷载/kN	测量塔风荷载/kN
0 ~ 15. 15	1. 524	5. 852
15. 15 ~ 30. 15	1. 803	5. 769
30. 15 ~ 42. 2	1. 684	6. 467

注：高度均已扣除 15 cm 干舷，故比规范中小 15 cm。

在不考虑风荷载的遮蔽效应、升力效应、脉动性、边界效应等情况时，应用 Ansys 软件模拟出人孔井、测量塔的挠度分别为 97 mm 和 172 mm。

2.3　安装作业中的荷载计算

沉管安装过程中，沉管下沉近 44 m，人孔井和测量塔有近 32. 3 m 在水面以下受水流荷载，还有近 9. 9 m 在海面以上受风荷载、波浪荷载作用。

海洋中的水流一般包括两个部分，一是潮流，二是风海流。潮流是由于太阳、月球对地球的引力使海水涌起后而引起的水平方向的水流运动。潮流有季节性的变化，但大致以一定的方向流动。风海流是由于信风形成的大气环流吹成的水流，它还受到由于地球的转动、大陆架海水密度差异等等的动力作用的影响。它的流向几乎是不变的，在北半球为顺时针，在南半球为逆时针。

海（潮）流力对结构的作用通常在波浪力计算中是以海流流速与水质点速度矢量叠加的形式加以考虑的。影响海（潮）流力大小的因素主要有：海（潮）流流速及其沿深度方向的分布规律、海（潮）流流向、结构构件的形状与尺寸。

通过《港口工程荷载规范》[5] 水阻力公式可计算出构筑物在水下所受阻力：

$$R = \frac{1}{2} C_w \rho A v^2 \tag{5}$$

式中：R 为拖航阻力（kN）；C_w 为水阻力系数，由模型试验得出为 2. 8；ρ 为海水的密度，1. 025 t/m^3；A 为迎流面积（m^2）；v 为流速（m/s），取对应 z 范围内的平均流速[5]，暂无伶仃洋垂线流速分布规律资料，根据沉管安装资料，以其现场实测流速代替，取 0. 65 m/s。

在安装过程中，人孔井和测量塔均露出海平面，则应考虑构件淹没深度和水深对水流力的影响，水流阻力系数 C_w 应乘以相应的淹没深度影响系数 n_1 和水深影响系数 n_2，根据《港口工程荷载规范》[5] 表 13. 0. 3-3 和表 13. 0. 3-4，n_1 和 n_2 分别为 0. 628 和 1. 0；测量塔 3 个支座也为圆柱形，则应考虑其与人孔井之间的横向影响，根据《港口工程荷载规范》[5] 表 13. 0. 3-5，水流阻力系数 C_w 应再乘以横向影响系数 m_2（1. 5）。

沉管在安装时，可将其看作一个海洋平台，根据文献[2]，作用在海洋平台结构上的风荷载可根据下式计算：

$$F = pA \tag{3}$$

$$P = 0.613 C_H C_v v^2 \tag{4}$$

式中：F 为作用在构件上的风力（N）；p 为受风构件表面上的风压（N/m^2）；A 为构件垂直于风向的轮廓投影面积（m^2）；C_H 为考虑风压沿高度变化高度系数，0 ~ 15. 3 m 取 1. 00，15. 3 ~ 30. 3 m 取 1. 10，30. 3 ~ 46. 0 m 取 1. 20；C_v 为考虑受风构件形状影响的形状系数，此处人孔井受力面为圆柱形，取 0. 5；测量塔为桁架结构，取 0. 6；v 为设计风速，取最不利情况，13. 8 m/s；则计算出加载在人孔井上的水流荷载、风荷载分别为 13. 835 kN和 0. 774 kN，测量塔上的水流荷载、风荷载分别为 3. 128 kN 和 2. 971 kN。

（下转第 176 页）