



深水滑道工程倒垂测量系统设计方法

郭劲^{1,2}, 陈少林^{1,2}, 李宗哲³

(1. 中交第二航务工程局有限公司技术中心 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040; 2. 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司, 北京 100088; 3. 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要: 提出了深水滑道工程施工中的倒垂测量系统的设计方法。以倒垂测量精度为控制目标, 通过考虑测量时的风荷载及水流力的影响确定钢丝绳所需浮力, 同时考虑浮子浮游稳定确定浮子形状及基本尺寸, 在此基础上分析工装偏差可能引起的测量偏差, 给定工装控制指标。工程算例及应用表明, 该方法有效实用, 与工程实际符合较好, 对类似工程具有一定参考意义。

关键词: 滑道工程; 倒垂测量; 设计方法

中图分类号: U 673.32

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)05-0216-05

Design method for inverted pendulum system applied to measurement on slipway engineering

GUO Jin^{1,2}; CHEN Shao-lin^{1,2}; LI Zong-zhe³

(1. Key Lab for Large-Span Bridge Construction Technology, Technology Centre of CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China; 2. CCCC Highway Bridges National Engineering Research Centre Co., Ltd., Beijing 100088, China; 3. CCCC Wuhan Harbor Engineering Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: This paper proposes a design method for the inverted pendulum measurement system in slipway engineering construction considering the measurement accuracy, which has been realized by taking account of the floating stability of the inverted pendulum system, the influence of the wind load and current force on measurement, and the wire rope anchoring deviation. The application example shows that the method is effective and practical, and it has some referencial significance to similar engineering.

Keywords: slipway engineering; inverted pendulum measurement; design method

倒垂测量法最早应用于大中型水电站大坝的位移变形监测, 我国 20 世纪 70 年代首次将倒锤法引入滑道井字梁的水下施工测量中^[1], 但滑道工程中的倒垂测量与大坝监测中的倒锤法在使用上有极大区别: 1) 滑道工程中的倒垂测量在江河中进行, 受风速和水流影响; 2) 滑道工程中的倒垂测量在一段时期内针对多榀井字梁水下的安装施工要多次反复使用; 3) 倒垂测量受水下井字梁

调位的影响; 4) 倒垂测量系统需适应导管中心与井字梁钢轨中心线的偏差。这些特点和差异决定了滑道井字梁中的倒垂测量系统与大坝监测的倒垂系统的不同。

过去滑道井字梁施工测量用倒垂系统均是参考大坝的一些设计要求再结合自身的工程特点依据经验来进行设计制造, 测量系统的设计、加工和制造没有具体的设计方法和相应的指标要求。

收稿日期: 2014-09-16

作者简介: 郭劲 (1964—), 女, 高级工程师, 从事钢结构设计和科研工作。

对于深水滑道施工测量的倒垂系统没有相应的具有针对性的设计方法, 本文从滑道工程中倒垂测量自身的特点出发, 提出与深水滑道工程相适应的倒垂测量系统设计方法, 该方法以力学平衡原理、浮游稳定理论、重心和浮心移动原理为理论基础, 通过建立倒垂测量系统设计计算模型, 分析确定钢丝所需浮力, 依据浮力需求确定浮子基本尺寸, 在此基础上分析工装偏差对测量结果的影响并给出工装控制指标。

1 滑道工程倒垂测量系统模型

1.1 倒垂测量基本原理

倒垂测量应用浮体在静水压力作用下其水平合力等于零、垂直力即浮力始终铅直向上的原理, 使水下测量目标通过倒垂线反映到水面棱镜, 再通过测量棱镜平面位置达到确定水下测量目标平面位置的目的。

1.2 滑道工程倒垂测量系统基本组成

深水滑道工程倒垂测量系统主要由水上部分和水下部分组成 (图 1), 水上部分包括测量棱镜、浮子、钢丝锚固装置、水箱及钢导管, 棱镜固定在浮子上, 水箱安装于倒垂架上; 水下部分包括水下锚具、钢轨等; 钢丝绳穿过钢导管连接浮子与钢轨 (图 2)。

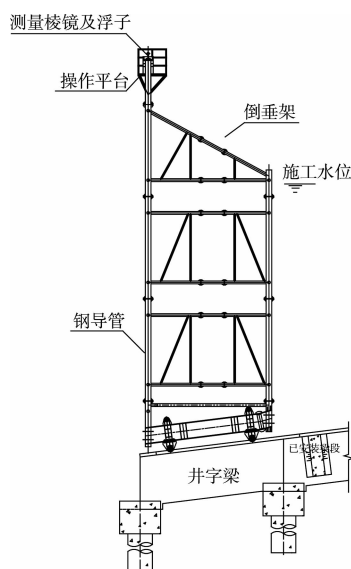


图 1 滑道工程倒垂测量总体布置

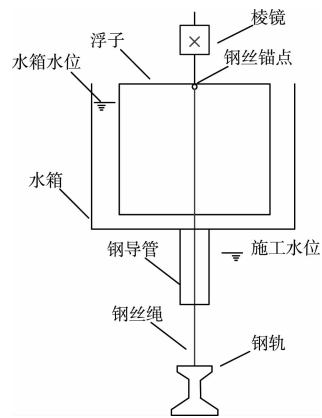


图 2 倒垂测量系统组成

1.3 深水滑道工程倒垂测量系统计算模型

倒垂系统在测量过程中, 除竖向的浮力 $\rho g V$ 、浮子与棱镜总重力 G 及钢丝拉力 T 外, 还受到水平风向的阵风荷载 W_k 和水流荷载 F_w , 其简化模型见图 3。本文对倒垂测量系统分析模型作如下假定:

- 1) 假定钢丝绳为完全柔性索结构, 不承担弯矩作用;
- 2) 忽略风荷载对浮子静水压力分布的影响。

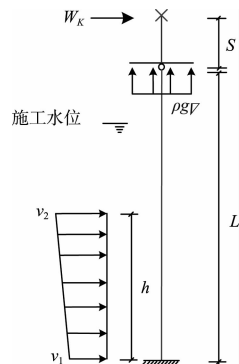


图 3 倒垂测量系统计算模型

2 考虑测量偏差的钢丝绳索力表达式

2.1 风荷载对测量偏差的影响

浮子受到自身重力、浮力及钢丝绳的拉力作用, 在有风条件下, 钢丝绳产生一定偏角 φ , 以水平分力 $T \sin \varphi$ 抵抗横向风荷载 (图 4)。

由力学平衡可得:

$$\delta_1 = \frac{W_k L}{T} \quad (1)$$

式中: δ_1 为风荷载引起的测量偏差; W_k 为棱镜所受风荷载; T 为钢丝绳拉力; L 为钢丝绳长度。

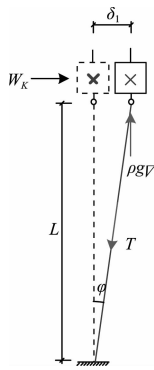


图 4 风荷载对测量系统影响

2.2 水流力对测量偏差的影响

浮子受到自身重力、浮力及钢丝绳的拉力作用，在水流作用下，钢丝绳产生一定相对位移以抵抗水流力（图 5）。

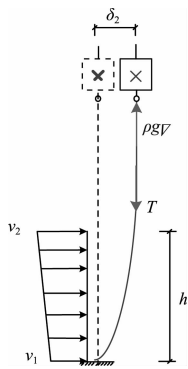


图 5 水流力对测量偏差的影响

由力学平衡可知：

$$\delta_2 = \frac{M}{T} \quad (2)$$

式中： δ_2 为水流力引起的测量偏差； M 为水流力作用于钢丝绳对钢丝绳下端锚固点的力矩作用； T 为钢丝绳拉力。

2.3 考虑测量偏差的钢丝绳索力表达式

由外荷载可能引起的测量偏差为：

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \quad (3)$$

考虑测量精度，测量系统需满足可能测量偏差小于允许偏差：

$$\delta \leq \delta_0 \quad (4)$$

可得：

$$\frac{W_k L}{T} + \frac{M}{T} \leq \delta_0 \quad (5)$$

由上式可得考虑测量偏差的钢丝绳拉力需

求为：

$$T \geq \frac{W_k L}{\delta_0} + \frac{M}{\delta_0} \quad (6)$$

3 满足浮游稳定的浮子计算方法

水箱水中浮子需确保在钢丝绳拉力作用下自身的稳定，浮子稳定力学模型见图 6，因此必须满足^[2]：

$$\overline{MB} - \overline{BC} > 0 \quad (7)$$

式中： B 为竖直状态浮子浮心所在位置； C 为浮子自重、棱镜自重及钢丝绳拉力的竖向合力的等效质心位置； M 为稳心位置。

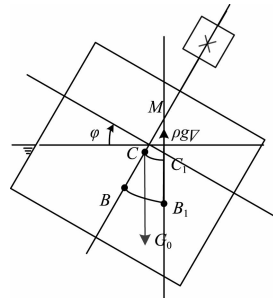


图 6 浮游稳定计算模型

由浮游稳定理论可知^[2]：

$$\overline{MB} = \overline{MB}_1 = \frac{I_T}{V} \quad (8)$$

同时有静力平衡方程：

$$\rho g V = T + G \quad (9)$$

\overline{MB} 可表示为：

$$\overline{MB} = \frac{\rho g I_T}{T + G} \quad (10)$$

式中： I_T 为浮子横向惯性矩； V 为排开水的体积； ρ 为水的密度； T 为钢丝绳拉力； G 为浮子和棱镜自重。

拟定浮子结构尺寸后，可依据式(7)判断浮子结构是否满足浮游稳定。

4 考虑安装偏差的倒垂系统设计流程

4.1 钢丝绳锚固偏差分析

钢丝绳拉力相对于浮子重力较大，因此，当钢丝绳锚固点与浮子重心不在一条铅直线上时，偏心距将会使浮子产生偏转（图 7）。

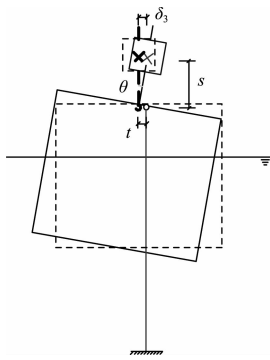


图 7 钢丝绳锚固偏差

将钢丝绳拉力 T 等效为重力为 T 的质点, 由重心移动原理和浮心移动原理^[2] 可推导得如下公式:

$$\theta = \frac{Tt}{(T + G)MB} \quad (11)$$

因此, 由钢丝绳锚固偏差引起的测量偏差为:

$$\delta_3 = s\theta = \frac{sTt}{\rho g I_T} \quad (12)$$

式中: s 为棱镜到钢丝绳锚固点直接的距离; t 为钢丝绳在水平方向上的锚固偏差。

于是, 钢丝绳在水平面内的锚固偏差 t 应控制在如下范围内:

$$t \leq \frac{\rho g I_T}{sT} \cdot \Delta \quad (13)$$

式中: Δ 为因钢丝绳锚固偏差引起的测量偏差的最大允许值。

4.2 考虑钢丝绳锚固偏差的倒垂系统设计流程

考虑钢丝绳锚固偏差的倒垂系统设计流程见图 8。

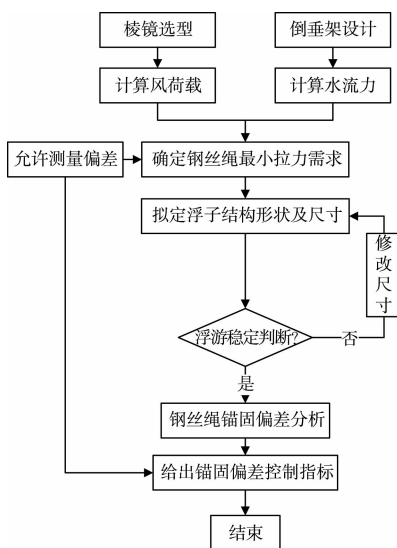


图 8 考虑钢丝绳锚固偏差的倒垂系统设计流程

5 工程算例

以武汉阳逻双柳基地武船滑道工程^[3]井字梁水下施工测量系统为例, 采用 360° 圆棱镜测量, 直径 60 mm, 高 36 mm, 棱镜测量点到钢丝绳锚固点间距离 $s = 150$ mm。钢丝绳直径 D 为 2 mm, 裸露在外面尺寸长 h 为 220 ~ 300 mm, 最大施工水深 15.6 m, 浮子采用不锈钢双圆桶结构, 圆桶中心间距为 0.732 m, 横梁截面为 50 mm × 25 mm × 1.5 mm, 圆桶直径 400 mm, 高 300 mm, 顶板厚 2 mm, 底板厚 14 mm, 侧壁厚 1 mm, 见图 9。最大测量风速条件为微风 (风速 3.4 ~ 5.4 m/s), 施工水域最大流速为 2.7 m/s。



图 9 武船滑道工程实例

5.1 风荷载及水流量

参考《公路桥梁抗风设计规范》^[4], 计算风荷载大小为 $W_k = \frac{1}{2} \rho V_g^2 C_H A = 0.0459$ N。参考《港口工程荷载规范》^[5], 钢丝绳受到的水流量作用为 $F_w = \frac{1}{2} \rho V_w^2 C_w D = 5.3217$ N/m。相应水流量对钢丝绳底端锚固点弯矩为 $M = \frac{1}{2} F_w h^2 = 0.239$ N·m。

5.2 最小拉力需求

参考《水运工程质量检验标准》^[6] 可知, 滑道井字梁轨道施工偏差验收控制标准陆上为 ±5 mm, 水下为 ±10 mm, 取 $\delta_0 = 5$ mm; $\Delta = 5$ mm 取钢丝绳锚固长度 $L = 20$ m。则, 浮子最小拉力需求为: $T \geq 231.5$ N。

5.3 浮游稳定验算

浮子、横梁和棱镜自重 $G = 388.6$ N, $I_T = 2.513274 \times 10^9$ mm⁴, 则 $\overline{MB} = 40.5$ mm。

在拉力 $T=231.5\text{ N}$ 作用下, 浮心 B 到圆桶底面的距离为 125.5 mm ; 浮子自重、横梁自重、棱镜自重与钢丝绳拉力竖向合力的等效质心 C 到圆桶底面的距离为 139.6 mm , 则 $\overline{BC}=14.1\text{ mm}$, 于是, $\overline{MB}-\overline{BC}=26.4\text{ mm}>0$, 浮子满足浮游稳定。

5.4 钢丝绳锚固偏差控制

由 4.1 节可知, 钢丝绳在水平面内的锚固偏差 t 应控制在如下范围内: $t\leq 3.6\text{ mm}$ 。因此, 钢丝绳水面面内的锚固偏差控制在 3.6 mm 以内可满足测量要求。

6 结语

- 1) 明确了钢丝绳拉力需求关于外荷载、测量控制精度及钢丝绳长的表达式。
- 2) 依据浮游稳定理论给出了判断浮子稳定的计算方法和表达式。
- 3) 依据重心移动原理和浮心移动原理, 结合测量精度控制要求, 给出了在相应测量精度要求下钢丝绳锚固偏差控制值。

4) 归纳总结了倒垂测量系统设计方法的操作流程。

5) 依据此方法设计了倒垂测量装置, 该装置在武船滑道工程的井字梁水下安装施工中成功应用, 有效验证了该设计方法的可行性, 对类似工程有参考意义。

参考文献:

- [1] 浙江省交通局航道勘测设计室. 倒锤法在深水滑道测量中的应用[J]. 测绘通报, 1978(1): 30.
- [2] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
- [3] 中船第九设计研究院工程有限公司. 武船双柳基地造船区水工设施滑道工程水工结构施工图设计说明书[R]. 上海: 中船第九设计研究院工程有限公司, 2012.
- [4] JTG/T D60-01—2004 公路桥梁抗风设计规范[S].
- [5] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].
- [6] JTS 257—2008 水运工程质量检验标准[S].

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 201 页)

5 结论

- 1) 在计算圆筒外壁土压力时, 引入了土拱效应的概念, 考虑了筒土摩擦角对小主应力轨迹线的影响, 得到了圆筒结构的侧土压力系数。
- 2) 通过对筒间微分土条的受力分析, 得到求解土压力的基本微分方程, 并求出解析解, 得到了大圆筒外壁土压力平面分布, 可为圆筒结构的设计提供参考。
- 3) 分析了土体内摩擦角与筒土摩擦角对土压力分布的影响, 结果显示土体内摩擦角对圆筒外壁上的径向力影响不大, 筒土摩擦角对其影响较为规律, 即径向力随筒土摩擦角的增大而减小。

参考文献:

- [1] 交通部第三航务工程勘察设计院. 码头新型结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [2] 列瓦切夫. 薄壳在水工建筑物中的应用[M]. 赵翎, 向可钦, 王德林, 译. 北京: 人民交通出版社, 1982.
- [3] 刘建起. 沉入式大直径圆筒结构变形计算的试验研

- 究[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 64-72.
- [4] 吴子树, 张利民, 胡定. 土拱的形成机理及存在条件的探讨[J]. 四川联合大学学报, 1995(2): 15-19.
- [5] Terzaghi K. Stress distribution in dry and saturated sand above a yielding trap-door [C]. Cambridge, Mass: Proc Int Conf Soil Mechanics, 1936: 307-311.
- [6] Handy R L. The arch in soil arching [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115: 415-419.
- [7] Williams K H. Arch in soil arching [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985(3): 302-318.
- [8] 蒋波. 挡土结构土拱效应及土压力理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [9] Paik K H, Salgado R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effect[J]. Geotechnique, 2003, 53(7): 643 -653.
- [10] 王元战. 大型连续圆筒上土压力计算的新公式[J]. 中国港湾建设, 1998(1): 1-5.
- [11] 竺存宏. 沉入式大圆筒外壁静止土压力计算方法的研究[J]. 港工技术, 2003(4): 20-23.

(本文编辑 武亚庆)