

## 智能测量技术在闸门制造中的应用

周毓<sup>1</sup> 祝胜<sup>2</sup>

1 浙江江能建设有限公司, 浙江 杭州 310050

2 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430015

**[摘要]** 通过采用激光跟踪智能测量技术, 对每个单元体进行外形尺寸的测量和定位, 取得相应的三维尺寸, 并利用智能测量取得的数据进行计算机虚拟拼装, 复核单元体虚拟拼装成整体后的相关尺寸, 通过高精度大件三维测量能力提供了可靠和精确的测量数据, 解决了大跨度闸门分节拼装质量控制难题。

**[关键词]** 外形尺寸; 激光跟踪; 测量技术; 平面闸门

DOI: 10.33142/ec.v6i1.7674

中图分类号: TH1;TP3

文献标识码: A

### Application of Intelligent Measurement Technology in Gate Manufacturing

ZHOU Yu<sup>1</sup>, ZHU Sheng<sup>2</sup>

1 Zhejiang Jiangneng Construction Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310050, China

2 Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430015, China

**Abstract:** Through the use of laser tracking intelligent measurement technology, the overall dimensions of each unit are measured and positioned, and the corresponding three-dimensional dimensions are obtained. The data obtained from the intelligent measurement are used for computer virtual assembly, and the relevant dimensions after the virtual assembly of the unit are reviewed. The reliable and accurate measurement data are provided through the high-precision three-dimensional measurement capability of large parts, solved the problem of quality control of large-span gate segmental assembly.

**Keywords:** overall dimension; laser tracking; measurement technology; plane gate

### 引言

姚江上游余姚“西分”工程是浙江省省委省政府和宁波市政府决策部署的姚江流域防洪排涝工程“6+1”工程之一, 工程通过在姚江上游瑶街弄兴建调控工程, 新开姚江至“北排”的通道, 将上游部分洪水西导入“北排”, 减少姚江上游洪水东排水量, 减轻余姚城区及姚江干流的防洪压力。主要由瑶街弄调控枢纽、新开姚江至北排排涝通道等建筑物组成。

瑶街弄调控枢纽采用“三闸联建”方案进行布置, 挡洪闸位于姚江河道正中间, 南侧布置削峰调控闸, 北侧布置应急船闸。瑶街弄挡洪闸净宽为 45m, 削峰调控闸净宽为 15m, 应急船闸净宽为 12m。挡洪闸布置于姚江主河槽上, 上下游正对姚江Ⅲ级限制性航道(航道底宽 45m), 主要功能是在汛期下闸挡洪, 平时常开且具有通航功能。挡洪闸闸室净宽 45.00m, 考虑闸室钢护舷厚度, 孔口宽度 45.30m, 底槛高程-3.67m, 设置工作闸门 1 扇, 门型为提升式露顶平面滑动钢闸门(跨度 45.5m), 门宽 47.06m, 门高 8.3m, 门厚 3.814m, 重量约 340t。

瑶街弄调控枢纽挡洪闸采用的工作闸门跨度超过长江三峡水电站双向五级船闸事故检修闸门跨度 11m, 为国内目前的最大跨度平面闸门, 其运行工况特殊, 闸门的制造、安装难度大, 传统的尺寸控制为整体组拼, 测量后进行修正, 耗时费力, 另闸门尺寸大, 传统的测量方式在长

距离的测量中, 其准确性, 稳定性难以保证, 可操作性不强, 测量误差较大, 本文叙述了采用智能测量技术对大跨度闸门外形尺寸进行测量和定位方法, 保证检测精度的同时, 高效、快捷, 简便, 大大加快了制作及安装的效率, 保障了项目工期进度, 确保闸门安装质量符合标准要求。

### 1 激光跟踪智能测量技术的应用特点

激光跟踪仪的实质是一台能激光干涉测距和自动跟踪测角测距的全站仪, 区别之处在于它没有望远镜, 跟踪头的激光束、旋转镜和旋转轴构成了激光跟踪仪的三个轴, 三轴相交的中心是测量坐标系的原点。通过发射绝对激光(ADM 激光), 与标准靶球(SMR)配合实现对待测工件的精密测量。

具体而言, 激光跟踪仪就是一款使用激光光束对大件(大型设备或元件)进行三维测量的移动测量系统。通过信号延时和激光跟踪仪的头部位置, 评估反射自测量球(靶标)上棱镜的激光光束, 从而计算测量点的三维空间坐标。技术人员可手动引导待测部件上的靶标, 激光跟踪仪, 也可自动跟踪靶标的运动。跟踪仪的视界决定其可以测量所有的结构、几何体以及表面, 工作范围高达 80m 以上。

激光跟踪仪的激光头安装在系统的水平轴上, 所有的元件包括位置传感装置和光学装置都集成在这个激光头内, 激光束的路径从这个装置中开始, 也在这个装置中结束, 光程是最短的, 从而避免了不必要的误差, 保障了其高精度度。此外, 激光跟踪仪可与 CAD 专业分析软

件配套使用，易于操作，只需两名技术人员即可完成测量任务。采用紧凑型设计，只有不到9公斤重，易于携带，且仅需三脚架支撑就可使用<sup>[1]</sup>。在许多对测量技术要求严苛的情况下，激光跟踪仪测量系统已逐步取代了传统的笨重的全套设备。本次测量采用的激光跟踪仪，其主要性能参数如下：

|   |       |   |
|---|-------|---|
|  | 仪器名称: | API Radian 激光跟踪仪                        |
|   | 型号:   | API RADIAN - Core                       |
|   | 测量半径: | 80 米                                    |
|   | 精度:   | 15 微米+5 微米/米, 跟距离成线性比例                  |
|   | 功能:   | 支持无线连接, 以太网标准靶球 (SMR) 测量, 集成式控制箱, 电池供电。 |

图1 激光跟踪仪

该仪器具有以下优势：

#### 1.1 杰出设计造就卓越表现

采用 API 的 UNIBODY 设计理念和标准进行设计，在最大限度地减小了阿贝误差的同时，将激光发射器、内置电机、编码器、镜组、电子元器件等部件以科学合理的方式集成在主机的中心部位。

#### 1.2 迅速预热，快速高效

由于采用了 UNIBODY 设计理念及标准，在预热或剧烈环境温度变化期间产生的热量可在整个机体快速分布，从而确保跟踪仪在整个过程中保持恒定的热量平衡，进一步缩短预热时间以及提高测量稳定性。

#### 1.3 AOC 激光跟踪仪冷却系统，实现热能管控，保障测量稳定性

采用 UNIBODY 设计理念，内置部件以合理的方式集中安置在主机的中心部位，可使热能快速在仪器中均匀分布，再辅以 AOC 激光跟踪仪冷却系统 (Air-Over Cooling) 的加持，使主机拥有更好的热稳定性、更快速的启动时间，进一步减小仪器误差、提升整体测量性能。

#### 1.4 真正实现完全无线连接精密测量

集成式内置供电系统使得主机在工作时无需连接外部电源，从而免受电源接口位置以及电缆长度等问题的困扰；而无线数据传输系统的使用，更使得跟踪仪主机可与笔记本电脑无缝连接，实现测量数据的快速传输与分享。

#### 1.5 Auto-lock 靶球自动锁定功能，实现自动断光续接，提升测量效率

Auto-lock 靶球自动锁定功能的应用，为操作者提供了极佳的人工智能功能的操作体验。在操作者误操作、或是由于工件遮挡情况下造成的靶球与激光跟踪仪暂时中断连接（断光），将通过位于前部的高速彩色摄像头及嵌

入式处理器主动观察、计算，并迅速自动找到目标靶球，实现激光的自动续接。从而大幅提升了操作的便捷性、保障了测量效率。

## 2 激光跟踪智能测量技术的实施

### 2.1 闸门概况

挡洪闸工作闸门为露顶式平面滑动闸门，共1扇，重约340吨，闸门挡水状态下总水压力2472.5kN。门叶采用桁架式结构，闸门由上、下游双面板、水平梁系结构及纵向联接系桁架结构、边梁、次梁、纵梁边柱、吊耳、水封系统和支承滑块、锁定支承座等结构为主组成，上游面板为复合不锈钢板、下游面板为Q345B低合金钢板，水平梁系结构及纵向联接系等桁架结构材质为Q345B，主支承滑块材质采用工程塑料合金，止水橡皮采用P型橡塑复合止水，橡皮基材SF6674，侧止水间距约为45.3m。

闸门高度约为8.3m，整体启闭。闸门设置3榀水平桁架，水平桁架间距约3.2m，主要弦杆截面为焊接组合结构，节点间距约3.8m~4.0m。闸门宽度尺寸较大，分节运输安装困难，根据设计图纸及公路运输情况，按图分块制作，共分八块，分块制造后整体组装，检查验收后分节运输。

挡洪闸工作门参数见表1。

表1 挡洪闸工作门参数表

| 序号 | 名称      | 数值            |
|----|---------|---------------|
| 1  | 底槛高程    | -3.67m        |
| 2  | 上游校核洪水位 | 4.29m         |
| 3  | 下游校核洪水位 | 4.11m         |
| 4  | 上游设计高水位 | 3.70m         |
| 5  | 下游设计低水位 | 2.90m         |
| 6  | 最高通航水位  | 1.33m         |
| 7  | 通航净高    | 7.0m          |
| 8  | 孔口宽度    | 45.3m         |
| 9  | 闸门型式    | 平面桁架钢闸门       |
| 10 | 支承型式    | 工程塑料合金        |
| 11 | 总水压力    | 2472.5kN      |
| 12 | 闸门重量    | 340t          |
| 13 | 启闭机型式   | 固定卷扬机         |
| 14 | 吊点间距    | 45m           |
| 15 | 启闭机容量   | 2500kN        |
| 16 | 启闭机数量   | 2台            |
| 17 | 操作条件    | 静水启闭 (1m 水头差) |
| 18 | 提升速度    | 1.5 m/min     |
| 19 | 最大扬程    | 17.0m         |

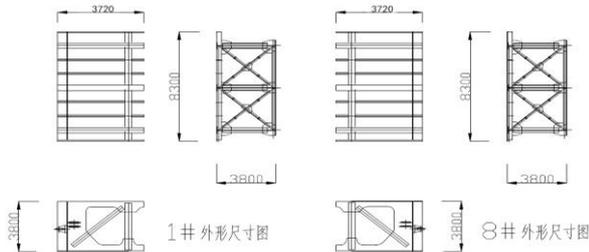
### 2.2 各单元体分节尺寸及说明

挡洪闸整体外形尺：门高\*门宽\*门厚为8300\*47600\*3824mm，整体制造完成后解体运输，共分8个单元体，具体分节尺寸、重量见下表：（上游视图）

**表 2 挡洪闸单元体外形尺寸、重量统计表**

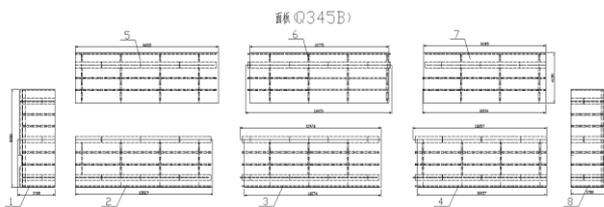
| 序号 | 项目名称 | 单位 | 数量 | 外形尺寸 mm<br>(长×宽×高) | 重量 (t)  | 备注 |
|----|------|----|----|--------------------|---------|----|
| 一  | 挡洪闸  | 扇  | 1  | 47600×3824×8300    | 340.35  |    |
| 1  | 1#   | 节  | 1  | 3720×3824×8300     | 41.87   |    |
| 2  | 2#   | 节  | 1  | 14224×3814×4345    | 48.76   |    |
| 3  | 3#   | 节  | 1  | 14551×3814×4345    | 47.50   |    |
| 4  | 4#   | 节  | 1  | 13257×3814×4345    | 44.00   |    |
| 5  | 5#   | 节  | 1  | 14185×3814×4200    | 36.98   |    |
| 6  | 6#   | 节  | 1  | 15810×3814×4200    | 36.44   |    |
| 7  | 7#   | 节  | 1  | 14046×3814×4200    | 34.25   |    |
| 8  | 8#   | 节  | 1  | 3720×3824×8300     | 41.87   |    |
| 9  | 配件等  | 套  | 1  | 橡胶、螺栓、滑块等          | 8.673   |    |
| 合计 |      |    |    |                    | 340.343 |    |

1#和 8#单元体为闸门两边垂直单元体，1#段和 8#件单元体是挡洪闸门结构的刚性区块，左右对称制作，由厚度 36、50mm 钢板为主构成。主要构件承受闸门在起吊，挡水、锁定三种主工况的全部荷载，钢性和稳定性最好。


**图 2 单元体分节外形图 1**

2#、3#、4#单元体为下节门叶单元体，含二樞水平主桁架，钢性和稳定性较好；

5#、6#、7#单元体为上节门叶单元体，含一樞水平主桁架，钢性和稳定性较差；容易产生弯曲和扭曲变形，对预拼装、总拼装和吊装运输带困难，制造时需采取设置临时加固构件措施解决。

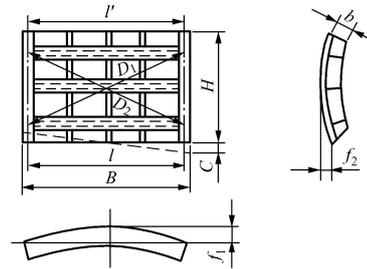

**图 3 单元体分节外形图 2**

### 2.3 公差要求

《水利水电工程钢闸门制造、安装及验收规范》(GB/T14173-2008)中规定了平面闸门制造、组装的公差或极限偏差要求如表 3 和图 4:

说明:外形尺寸控制标准对于跨度不超过 20m 平面闸门,从跨度 5m 开始每增加 5m,允许偏差同步增加 1-3mm。而对

于跨度超过 20m 的平面闸门,不论跨度多大,仅在 20m 允许偏差基础上增加 1-3mm。将跨度达 45m 的挡洪闸门允许偏差规定在跨度相当于 25m 的允许偏差上,即跨度增加了 5 档,允许偏差仅增加一档;这样的规定是将挡洪闸门这种类似焊接毛坯构件尺寸的允许偏差提高到用机械精加工的标准要求。此外对门叶横向直线度、竖向直线度、底缘的直线度、底缘倾斜度及节间止水板平面度、止水座面平面度等允许偏差的要求,是不论跨度的大小,仅规定了一个限制数,这就给挡洪闸门制作及拼装提出了严苛的质量标准。


**图 4 简图**

### 2.4 检测工艺实施

激光跟踪仪是一种便携式的 CMM 测量设备,能够轻松实现大尺寸工件的精密测量,通过 ADM(绝对激光)激光跟踪,可实现单点精准测量以及全动态扫描,在闸门单元体制作完成后,先测量、记录每个单元体的几何尺寸,然后借助专业软件,技术人员对几何测量值进行进一步计算并将其与设计尺寸作比较;确定闸门尺寸和标准规定尺寸之间的偏差,并将该偏差和规定偏差值相比较,以实现闸门制作过程的严格控制,最后通过测量来检查闸门整体拼装尺寸是否合格。

具体操作步骤如下:

首先,进行取仪器安放位置的选址,原则上考虑将三脚架放置在闸门的正中间,距离闸门 3-5m 左右的位置,以保证闸门的所有或者大部分待测部位均处于激光跟踪仪测量的有效范围内,三脚架安装位置首选水泥坚硬地面,使三脚架可稳定,牢靠的支撑激光跟踪仪,保障精准测量。(注意:设备稳定是精准测量的基础,如果激光仪安置不稳定,则无法保证测量数据的可靠性)。在闸门的侧面等无法一次完成测量的位置,可进行转站操作。

确定好安放位置后,将三脚架取出放稳,并调节旋钮进行调平,将激光跟踪仪的激光头安装至三脚架上,激光跟踪仪拥有 640° 的超大水平转角范围,带有放置靶球的基座(即“鸟巢”)的一面为正面,放置时,将激光头的正面对准闸门,这样,可保证在测量时候,激光头运动的角度幅度最小,从而可最大程度的保障测量精度。

激光头安装完成后,将连接卡环锁紧,将环境误差补偿装置(气象站)与激光跟踪仪进行连接,将相应尺寸的靶球(SMR)放置于与其对应的基座(鸟巢)上,并将靶

表 3 平面闸门门叶的公差或极限偏差

| 序号 | 项目                   | 门叶尺寸         | 公差或极限偏差                    | 备注            |
|----|----------------------|--------------|----------------------------|---------------|
| 1  | 门叶厚度 b               | ≤1000        | ±3                         |               |
|    |                      | >1000~3000   | ±4                         |               |
|    |                      | >3000        | ±5                         |               |
| 2  | 门叶外形高度 H<br>门叶外形宽度 B | ≤5000        | ±5                         |               |
|    |                      | >5000~10000  | ±8                         |               |
|    |                      | >10000~15000 | ±10                        |               |
|    |                      | >15000~20000 | ±12                        |               |
|    |                      | >20000       | ±15                        |               |
| 3  | 门叶宽度 B 和高度 H 的对应边之差  | ≤5000        | ±5                         |               |
|    |                      | >5000~10000  | ±8                         |               |
|    |                      | >10000~15000 | ±10                        |               |
|    |                      | >15000~20000 | ±12                        |               |
|    |                      | >20000       | ±15                        |               |
| 4  | 对角线相对差 $ D_1 - D_2 $ | ≤5000        | 3                          | 门叶尺寸取门高和门宽较大者 |
|    |                      | >5000~10000  | 4                          |               |
|    |                      | >10000~15000 | 5                          |               |
|    |                      | >15000~20000 | 6                          |               |
|    |                      | >20000       | 7                          |               |
| 5  | 扭曲                   | ≤10000       | 3                          |               |
|    |                      | >10000       | 4                          |               |
| 5  | 门叶横向直线度 f1           |              | B/1500, 且不大于 6 (凸向背水面时为 3) | 通过各横梁中心线测量    |
| 6  | 门叶竖向直线度 f2           |              | H/1500, 且不大于 4             | 通过各边梁中心线测量    |
| 7  | 两边梁中心距               | ≤10000       | ±3                         |               |
|    |                      | >10000~15000 | ±4                         |               |
|    |                      | >15000~20000 | ±5                         |               |
|    |                      | >20000       | ±6                         |               |
| 8  | 两边梁平行度 $ l' - l $    | ≤10000       | 3                          |               |
|    |                      | >10000~15000 | 4                          |               |
|    |                      | >15000~20000 | 5                          |               |
|    |                      | >20000       | 6                          |               |
| 9  | 纵向隔板错位               |              | 3                          |               |
| 10 | 面板与梁组合面的局部间隙         |              | 1                          |               |
| 11 | 面板局部平面度              | 面板厚度 :       | 每米范围内不大于                   |               |
|    |                      | ≤10          | 5                          |               |
|    |                      | >10~16       | 4                          |               |
|    |                      | ≥16          | 3                          |               |
| 12 | 门叶底缘直线度              |              | 2                          |               |
| 13 | 门叶底缘倾斜值 2C           |              | 3                          |               |
| 14 | 两边梁底缘平面(或承压板)平面度     |              | 2                          |               |
| 15 | 止水座面平面度              |              | 2                          |               |
| 16 | 节间止水板平面度             |              | 2                          |               |
| 17 | 止水座板至支承座面的距离         |              | ±1                         |               |
| 18 | 侧止水螺孔中心至门叶中心距离       |              | ±1.5                       |               |
| 19 | 顶止水螺孔中心至门叶底缘距离       |              | ±3                         |               |
| 20 | 底水封座板高度              |              | ±2                         |               |
| 简图 |                      |              |                            |               |

球开口处正对激光跟踪仪出光口, 使用外接电源时, 将电缆与跟踪仪连接, 并插入插座内, 再接通电源, 打开仪器,

使用电池则可直接打开仪器开关。

仪器启动后, 位于出光口上方两侧的红绿指示灯会同时

闪烁,之后绿色指示灯会停止闪烁,红色指示灯则以固定的频率闪烁,下一步,进行激光跟踪仪与电脑的连接,可选用网线或者WiFi的方式与电脑连接,使用网线时,将网线插入端口,WIFI连接则安装好wifi天线后进行连接,与电脑连接好后,闪烁的红色指示灯变为常亮,这时,可进行仪器使用前的快速校准工作,打开电脑上的校准软件,连接激光跟踪仪,进入QVC(快速空间补偿)校准流程,首先使用激光跟踪仪获取4个不同位置的点的数据来执行QVC流程,跟踪仪在这4个位置中的每1个位置进行双面测量,并获取数据,然后进行下一步操作,软件中则有箭头,绿色靶标等标志提示放置靶球的位置,第1个点位于跟踪仪出光口1m范围内的0°位置,第2个点位于跟踪仪出光口5m范围内的0°位置,第3、4个点分别位于跟踪仪前方约+55°和-55°的位置。校准流程完毕后,出具相应的校准数据报告<sup>[2]</sup>。

完成校准流程后,退出校准软件,使用第三方软件继续进行测量作业,使用激光跟踪仪进行测量时,一人手持靶球,放置在闸门待测位置,一人在软件界面上进行点选,完成相应数据的采集,靶球在闸门前后两侧的面板移动确定检测点,通过激光跟踪仪确定靶球坐标,将每个单元体面板的点拟合合成平面,进而测量出平面度偏差。



图5 检测过程图片

其平面公差测量结果如下图所示。

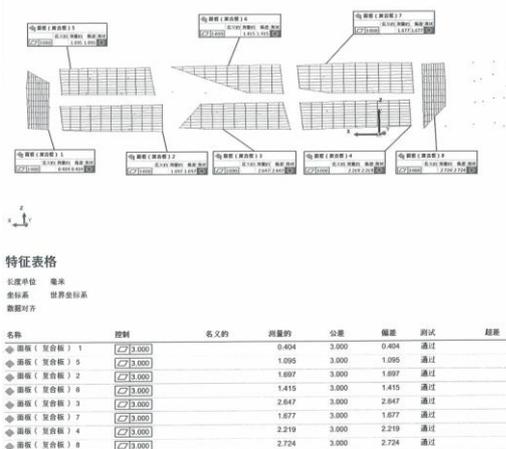


图6 单元体外形尺寸测量图1

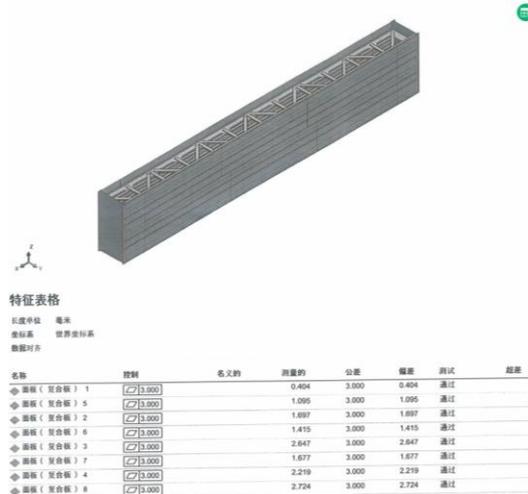


图7 单元体外形尺寸测量图2

经现场检测,瑶街弄调控枢纽挡洪闸工作闸门的外形尺寸偏差均小于3mm,符合设计要求。为或许闸门总装提供了有力支持数据,保证了安装施工顺利进行。

### 3 结语

传统的检测方法是使用水平仪,全站仪以及钢尺,线锤等普通测量工具进行,效率低,精度低,尤其在大型闸门的形位公差控制上,误差较大,很难保证闸门制作及安装精度。通过采用激光跟踪智能测量技术,对每个单元体进行外形尺寸的测量和定位,取得相应的三维尺寸,并利用智能测量取得的数据进行计算机虚拟拼装,复核单元体虚拟拼装成整体后的相关尺寸,通过高精度大件三维测量能力提供了可靠和精确的测量数据,解决了大跨度闸门分节拼装质量控制难题,并确保了闸门安装质量。该测量技术快捷,方便,省力,安全,经济和社会效益显著。

#### [参考文献]

- [1]徐星.基于激光跟踪仪的测量机坐标系原点拟合方法研究[J].机电信息,2022(3):80-82.
  - [2]刘硕,刘光博,刘尚国,李华智.激光跟踪仪的测量误差解析与精度仿真[J].测绘工程,2021,30(6):21-26.
- 作者简介:周毓(1976.2-),男,籍贯:浙江临安,高级工程师,从事水利工程施工管理,擅长专业:水工金属结构,所在单位:浙江江能建设有限公司。