

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.03

基于 USMN 的大型操纵性水池基础轨道空间位置测量方法研究

周闻青¹, 冷建兴², 叶欣¹, 卢歆¹

(1. 浙江省计量科学研究院, 浙江 杭州 310039; 2. 浙江大学海洋学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 在进行大型工程测量时, 单台、单站测量仪器通常不能完成全部的测量任务, 需要使用多站或多台仪器在不同的位置实施测量。本文介绍了一种基于统一空间测量网络 (Unified Spatial Metrology Network, USMN) 的测量方法, 该方法对多台多站的测量数据的处理, 相比传统的拟合拼接法不会引入较大的累积误差。基于 USMN 的测量方法通过重新分配拟合要素的权重, 来降低多次拼接引入的累积误差, 提高多站测量方法的精度, 为大型工程测量精度的提高提供了有效的方法。通过对两种方法的多站数据拼接并观测末站数据和首站数据的闭环性及拟合圆的径向跳动, 显著地观察到本文介绍的方法闭环性更好, 拟合的圆径向跳动更小, 相较传统方法更加接近测量的真实情况。

关键词: 大型操纵性水池; 统一空间测量网络; 测量方法; 偏差; 回转轨道预埋件

中图分类号: TB22; TB92; TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2016) 03-0010-04

A Measurement Method of Maneuvering Tank Rotary Bridge Based on USMN

ZHOU Wenqing¹, LENG Jianxing², YE Xin¹, LU Xin¹

(1. Zhejiang Province Institute of Metrology, Hangzhou 310039, China; 2. College of Ocean, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: This article introduces a measuring method based on Unified Spatial Metrology Network (USMN). In large-scale engineering measurement, one instrument in one position cannot fulfill the task. Moving instrument to different positions or more than one instrument is needed. Instead of accumulating error by Best-fit in traditional way, the USMN can reduce the cumulative error by redistributing the weights of fitting elements. Therefore it increases the accuracy of multi-station measurement method, and provides an effective means in large scale engineering measurement. By comparing and observing the close degree of end-to-end and changes in radial direction of two methods, the USMN has been found closer to real situation than the traditional one.

Key words: maneuverin tank; USMN; measurement method; error; embedded parts

0 引言

大型操纵性水池^[1]是用于测试水下航行器回转与控制性能的综合性能设施, 在船舶操纵性能的设计与研究方面, 为船舶和水下航行器提供全方位的操纵性能试验验证条件^[2], 具有不可替代的功能。作为操纵性水池回转测量桥运动过程中起固定与支撑作用的中央岛和回转桥承压回转轨道 (简称回转轨道), 担负着整个测量系统的固定支点和回转承压支撑, 中央岛与回转轨道的同轴度, 将对后续的回转测量系统的稳定性、

可靠性和灵敏度有极大影响, 是施工过程控制的关键。为确保操纵性水池中央岛与回转轨道的同心同轴, 在操纵性水池的基础结构设计及施工工艺设计过程中, 已经采取了各种定位措施, 以尽可能确保操纵性水池的中央岛和回转轨道具有较高的同轴度, 其中对中央岛和回转轨道的预埋件采用模板定位法加以初始定位, 使得中央岛和回转轨道部位的预埋件尽可能满足设计的初始定位要求。但由于整个操纵性水池总体建筑结构的庞大 (直径达 45 m), 施工过程受施工条件、环境温度等因素影响, 实际安装施工达到的定位精度与设计精度存在误差, 为尽可能在后续设备安装调试过程中修正、补偿前期施工的定位误差, 需要对操纵性水池基础完工状态进行精确测量, 确定中央岛和回转

收稿日期: 2016-03-29; 修回日期: 2016-04-12

作者简介: 周闻青 (1965-), 女, 高级工程师, 主要从事长度矢量测量方法研究。

轨道预埋件的形状位置误差,为后续安装施工修正、补偿提供信息。

面对如此庞大的测量对象,选择使用激光跟踪仪作为标准测量仪器^[3]。激光跟踪仪是一种高精度、便携式的大型空间三维坐标测量系统,测量速度快、范围大,测量精度高,被称为可移动的三坐标测量机,适用于大尺寸、高精度的工业测量。

本次测量对象的直径 45 m、深度 6 m,中央岛直径 3 m,需要测量基础轨道预埋件的空间位置度及轨道与中央岛的同心度。现场不易将仪器架设在中央岛上,只能放置在水池边,这样在一站上测量出所有的测量点会因为测量距离翻倍引入较大的测量不确定度,测量结果不便于后续的使用。因此考虑将仪器分别放置在水池均匀分布的四个不同位置对轨道预埋件空间位置进行多站测量,这种多站测量方法各测量点与仪器的距离带来的不确定度较小,但是需要将多站的测量数据进行拟合拼接。传统的最小二乘拟合算法^[4]经过多次拟合会引入较大的累积误差,本文采用 USMN 统一空间测量网络的方法,根据测量公共点的不确定度,分配各个公共点的拟合权重,将多次转站拟合所造成的累积误差降低。该方法既降低了由于测量距离引入的不确定度,又降低了多次拼接带来的累积误差。

1 USMN 及模型匹配的基本原理

1.1 USMN 的原理

USMN 是一种先进的数据分析工具^[5],它可以通过多台仪器或一台仪器多个测量位置的公共点,将这些不同位置上的测量仪器统一在同一空间测量网络内。相对于其他的数据分析工具,它有以下几个方面的优势:

- 1) 同时解决了多站测量的网络;
- 2) 智能使用了测量信息;
- 3) 产生公共点的理想网络;
- 4) 为所有被测量提供不确定度;
- 5) 可以被用来表征测量系统的性能;
- 6) 同时通过数字化和图形化提供测量结果。

USMN 采用智能加权平差进行处理,为每个拟合元素分配权重,进行分配权重时,不确定度较大的公共点或要素分配到的权重较小,在拟合结果中,这些权重较小的点拟合效果会比较差,反之亦然。传统的最小二乘法是一种所有测量点权重相同的拟合方式,是加权平差法的一种特殊形式。

因此,确定各站之间各公共点转换方程的权重值

成为加权平差法的关键所在。

以两站激光跟踪仪为例,由于激光跟踪仪的测距精度高于测角精度,用不确定度点云来表示测量点的误差分布,则有如图 1 所示的针对一点不同站仪器测量结果存在的可能差异。

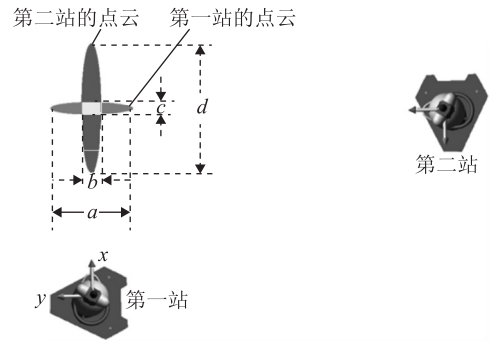


图 1 转站公共点示意图

如图 1 所示的两站跟踪仪对同一测量点 p 实施测量,距目标较近的第一站测量点形成一个较小的绿色点云,其长轴长度为 a ,短轴长度为 c ,距目标较远的第二站形成一个较大的红色点云,其长轴长度为 d ,短轴长度为 b 。设点 p 在第一站测得的点坐标为 $p_1(x_1, y_1, z_1)$,在第二站测得的点坐标为 $p_2(x_2, y_2, z_2)$ 。加权平差法通过云图赋予转站过程中每个转站方程不同的权重。一种典型的权重分配方式见公式 (1)。

$$\begin{cases} \frac{1}{\sqrt{(a^2+b^2)}} x_i = \frac{1}{\sqrt{(a^2+b^2)}} f_1(x_2, y_2, z_2, \alpha, \beta, \gamma, \Delta x, \Delta y, \Delta z) \\ \frac{1}{\sqrt{(c^2+d^2)}} y_i = \frac{1}{\sqrt{(c^2+d^2)}} f_2(x_2, y_2, z_2, \alpha, \beta, \gamma, \Delta x, \Delta y, \Delta z) \\ w_z z_i = w_z f_3(x_2, y_2, z_2, \alpha, \beta, \gamma, \Delta x, \Delta y, \Delta z) \end{cases} \quad (1)$$

式中: (α, β, γ) 为对应三轴的旋转角度; $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 为对应三轴的相对平移量; f_1, f_2, f_3 为对应三轴三个转站映射函数; w_z 为 z 方向上的权重。

多个点形成多个 (1) 式,对其进行拟合,完成拟合权重的重新分配。根据每个测量点坐标方向上的不确定度,在拟合结束时,可以给出一个新的 USMN 测量点 $p_{USMN} \circ p_{USMN}$ 根据各个拟合点空间位置以及其不确定度的比例接近真实位置。

这种 USMN 加权平差的拟合方式得到的结果相比最佳拟合法更加显著地接近真实情况。它与最佳拟合法的区别是最佳拟合法可能在经过多站转站时,因为 A 站中一些不确定度较大的点将误差累加到 B 站,同样 B 站也会将之前的累积误差都转移到 C 站,这样的

累加最直观的体现就是在测量较大的圆周时经过多次转站，末站和第一站的相同测量点之间闭环性较差，而 USMN 就能取得较好的闭环效果，更加接近真实的情况，这将在本文的后面通过数据验证。

2 USMN 实验分析

本次测量的操纵性水池模型如图 2 所示。

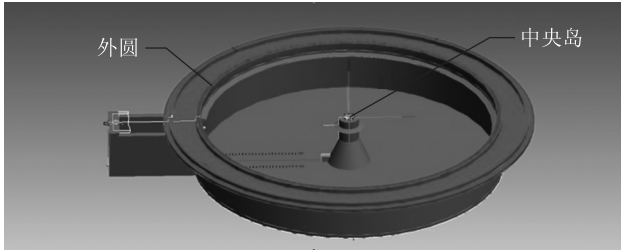


图 2 测量模型

由于现场测量条件的限制，只能将仪器架设在水池外围，通过四站测量，如图 3 所示四种颜色为 SA 软件中的四站测得的未做拼接外圆的测量结果，测量结果的分散程度表示测量点的不确定度，可以清晰地看到，距离仪器近的部位不确定度较小，距离仪器远的点不确定度较大。

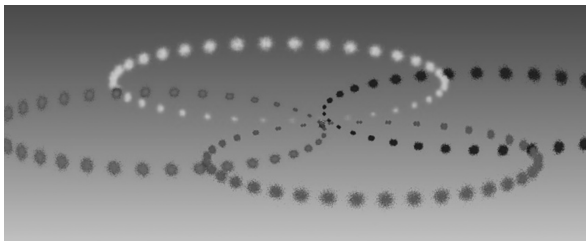


图 3 未拟合的点云图

分别对四站数据进行处理，剔除距离仪器较远的点，将处理后的四站数据，分别使用传统的最小二乘法（最佳拟合转化）和 USMN 算法进行拟合。拟合结果的公共点偏差及均方根 RMS 如表 1 所示。

表 1 拟合公共点偏差及 RMS

操作方式	参与站	参数值/mm	
		最大偏差	RMS
最小二乘拟合	1, 2	0.073	0.042
	2, 3	0.088	0.041
	3, 4	0.098	0.056
USMN	1, 2, 3, 4	0.094	0.017

定的误差，而对于最小二乘拟合而言，USMN 算法全局拟合变量的 RMS 只有 0.017 mm，最大拟合偏差为 0.094 mm，从拟合的公共点偏差量来看 USMN 取得了较好的效果。

通过第一站与第四站的公共点差值可分析闭环性。如表 2 所示，其中最佳拟合差值代表最小二乘拟合处理后第四站和第一站公共点的差值；USMN 差值代表 USMN 处理后第四站和第一站公共点的差值；USMN 权重点的差值代表 USMN 处理后按照权重重新分配的点与第一站点的差值。

表 2 多站转站不同分析结果比较 mm

点序号	最佳拟合差值	USMN 差值	USMN 权重点的差值
120	-0.041	0.014	0.000
121	-0.091	0.064	0.001
130	-0.023	-0.009	-0.001
131	0.028	-0.059	-0.001
140	-0.050	0.014	0.002
141	-0.021	-0.015	-0.001
150	-0.020	-0.020	-0.008
151	-0.035	-0.005	-0.007
160	-0.080	0.037	0.017
161	-0.077	0.034	0.015
170	-0.041	-0.006	-0.001
171	-0.054	0.008	0.007
180	-0.027	-0.023	-0.018
181	-0.057	0.008	0.006
190	-0.102	0.050	0.046
191	-0.058	0.006	0.006
200	-0.018	-0.036	-0.035
201	-0.086	0.032	0.031
210	-0.059	0.004	0.004
211	-0.046	-0.009	-0.008
120	-0.041	0.014	0.000
RMS	0.057	0.029	0.017

从拟合结果闭环性来看：因为末站和首站的公共点距离末站仪器和首站仪器距离相近而且较小，因而这些公共点在不同的站位下距离越近，说明这种拟合方式越接近真实情况，显然最小二乘拟合在经过多次

转站之后有可能造成转站误差的累加, 导致经过一圈的拟合之后初始站和末尾站中相同的点产生较大偏差, 而 USMN 可以较好地解决了这个问题。从而降低多次转站造成的拼接误差。

为了更加充分地验证 USMN 更加能体现被测件位置的真实情况, 通过以下操作方式来证明这一点。

1) 使用测量模型中的基础预埋件坐标作为被测件的“真值”, 测量模型作为被测件。

2) 将坐标系(等效于仪器)分别移动到 0° , 90° , 180° , 270° 四个位置, 分别对近处的预埋件点进行“模拟测量”, 作为“四个站”的数据。

3) 根据跟踪仪的测距测角精度, 模拟计算每个测量点在当前坐标系下的坐标和不确定度, 构造不确定点云, 并且在点云中, 按照正态分布的概率随机取出一个“测量点”, 分别对“四个站”的数据模拟测量, 得到 4 个站的“模拟测量的结果”。

4) 将这“四个站”的数据按照上文的方式, 分别使用最小二乘拟合和 USMN 方式处理, 将“模拟测量的结果”与“真值比较”分析。

模拟测量的结果如表 3 所示。

表 3 模拟测量结果

操作方式		项目	值/mm
最小二乘拟合转站	实验 A: 转站后所有点拟合圆	半径的平均偏差	0.061
		偏差的 RMS	0.079
	实验 B: 去除公共点中距离仪器较远点拟合圆	半径的平均偏差	0.056
		偏差的 RMS	0.042
USMN 方式转站	实验 C: 转站后所有点拟合圆	半径的平均偏差	0.057
		偏差的 RMS	0.075
	实验 D: 去除公共点中距离仪器较远点拟合圆	半径的平均偏差	0.044
		偏差的 RMS	0.034
实验 E: 公共点使用 USMN 权重点后拟合圆	半径的平均偏差	0.028	
	偏差的 RMS	0.033	

由于在“模拟测量”的实验中, 模拟测量的测量对象使用的是模型中一个完美的圆, 因此, 转站测量的结果中, 经过处理的数据半径的径向跳动越小, 说明拟合结果越接近真实情况。即在拟合圆的过程中半径的平均偏差越小、偏差的 RMS 越小, 说明该转站效果越好。

实验 A 与实验 C 比较, 数据结果较大而且相差不多, 这个较大的偏差与 RMS 有可能由于测量点相较仪器较远而引起的测量不准, 也有可能是由拼接误差带入的。

实验 B 和 D 相较于实验 A 和 C, 去除了离仪器较远的点, 可以明显看到 USMN 拟合结果的偏差和 RMS 都比最小二乘拟合的结果小, 说明 USMN 更加接近真实情况。

再由经过 USMN 重新分配权重点拟合的实验 E 与实验 D 相比, 又稍稍减小了平均偏差和 RMS, 但数据已经十分接近, 说明了 USMN 重新分配权重的点起到了一定效果, 并且距离仪器近的点权重较大, 距离仪器远的点权重较小, 符合第 1 章所介绍的理论。再次从理论上验证了 USMN 统一空间测量网络方式的实时有效。

3 结论

在大型工程测量时, 往往一台测量仪器在一站不能完成全部的测量任务, 需要移动测量仪器在多站或多台仪器在不同的位置实施测量, 后续数据处理及传统测量数据的拟合拼接会引入较大的累积误差, 本文介绍的基于 USMN 统一空间测量网络的测量方法, 通过重新分配拟合要素的权重, 降低多次拼接引入的累积误差, 提高了多站测量方法的精度, 经 USMN 处理得到的数据更加接近真实情况, 为大型工程测量精度的提高提供了有效的方法。

参考文献

- [1] 张心光. 基于船舶操纵性实验分析的辨识建模研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [2] 罗伟林. 基于支持向量机方法的船舶操纵运动建模研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1242-2010 激光跟踪三维坐标测量系统校准规范 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2010.
- [4] 刘建新, 马强, 杨再华. 激光跟踪测量系统及其在航天器研制中的应用 [J]. 航天器环境工程, 2008, 25 (3): 286-290.
- [5] 张于. 基于同一空间测量网络的大尺寸测量方法 [J]. 航天器环境工程, 2011, 28 (3): 277-281.
- [6] 马骊群, 曹铁泽, 王继虎, 等. 大尺寸坐标测量技术在大型部件装配应用中的若干问题 [J]. 计测技术, 2013, 33 (2): 7-11.