

钢屏蔽实验室表面平整度检测及分析

田林亚¹ ,张铎强¹ ,赵士华²

(1.河海大学地球科学与工程学院 ,江苏 南京 210098 ;2.铜陵学院土木建筑系 ,安徽 铜陵 244000)

摘要 :采用钢板连续拼装建造钢屏蔽仿真实验室 ,要求拼装初步完成时进行内表面平整度检测 ,并分析平整度是否达到最大平面误差不大于 $\pm 3\text{ mm}$ 的要求。针对工作场地小、精度要求高、非接触测量等检测特点 ,采用高精度全站仪和短基线空间测角交会法进行检测 ,计算空间最弱点的点位中误差小于 $\pm 1.5\text{ mm}$,表明该法满足平整度检测的精度要求。结合内表面 121 个测点的三维坐标 ,采用平面方程进行拟合 ,偏差的最大值为 2.91 mm ,全部测点满足平整度限差要求。
关键词 :钢屏蔽仿真实验室 ;平整度 ;短基线 ;空间测角交会 ;点位中误差 ;平面拟合
中图分类号 :P22 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2010)04-0076-03

Detection and analysis of surface smoothness of steel shielding laboratories//TIAN Lin-ya¹ ;ZHANG Duo-qiang¹ ,ZHAO Shi-hua² (1. College of Geosciences and Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;2. Department of Civil Architecture , College of Tongling , Tongling 244000 , China)

Abstract : A steel shielding simulation laboratory was built by using continuous assembling of steel plates. The smoothness of the inner surface of the steel shielding laboratory was required when it was preliminarily completed. The requirement whether or not the maximum plane error for the smoothness was not larger than $\pm 3\text{ mm}$ was analyzed. With regard to the detecting characteristics of small site , high precision and non-contact survey , the high-precision total station and the method of space angular intersection based on the short baselines was employed. The mean square error of a space weakest point was smaller than $\pm 1.5\text{ mm}$, indicating that the proposed method can satisfy the precision requirements of detecting smoothness. Based on the three-dimensional coordinates with 121 survey points on the inner surface , the plane equation was employed for the fitting , and the maximum deflection was 2.91 mm . All the survey points satisfied the requirements of smoothness.
Key words : steel shielding simulation laboratory ; smoothness ; short baseline ; space angular intersection ; mean square error of a point ; plane fitting

某科研基地新建 1 个钢屏蔽壳体作为仿真实验室 ,实验室由钢板连续拼装而成 ,要求在拼装初步完成时对其立面平整度进行检测和分析 ,并以最大平面误差不大于 $\pm 3\text{ mm}$ 作为平整度评判指标。如果设立面上任意 1 个测点 p 的空间点位中误差为 m_p ,视最大平面误差 $\pm 3\text{ mm}$ 为允许误差 ,并取允许误差的 $1/2$ 作为测量误差 ,则有 $m_p \leq \pm 1.5\text{ mm}$,因此这是一项精度要求很高的检测工作。此外 ,检测工作在室内进行 ,立面上未设任何观测标志 ,也无法安置目标反射器 ,因此这又是一项小区域非接触式的检测工作。为了达到较高的检测精度 ,保证立面平整度分析的可靠性 ,采用高精度全站仪和短基线空间测角交会法进行检测 ,采用平面方程进行拟合和平整度分析。

1 检测方法

1.1 短基线的建立

实验室由边长 2 m 的正方形钢板连续拼装而成 ,立面宽约 20 m 。在待测立面的底部近似水平地设置 1 根横基尺 ,在距立面 18 m 的地面上粘贴 1 根长约 20 m 的钢尺 ,钢尺近似平行于待测立面 ,其 0 m 和 20 m 的刻度分别对准立面底部的 2 个拐角。以钢尺 1 m 和 19 m 刻度线与尺边缘的交点作为标志 ,安置全站仪 TC2003(测角中误差为 $0.5''$ 、测距中误差为 $1\text{ mm} + 1 \times 10^{-6} D$)^[1] ,精确对中整平。设左右 2 台仪器望远镜 ,其旋转中心分别为 A 和 B ,以 A 为坐标原点 , AB 连线在水平面内的投影为 x 轴 ,过 A 点的铅垂方向为 z 轴 , $A-xyz$ 构成右手坐标系^[2]。设 A 的坐标为 $(0,0,0)$, AB 在 x 轴上的投影长度即

基线长为 b , AB 的高差为 h , 则 B 的坐标为 $(b, 0, h)$ 。2 台仪器相对定向后, 分别照准横基尺上相隔距离为 d 的 2 个观测端点 1 和 2, 分别观测水平角 α, β 和天顶距 φ , 先假设 AB 间的基线长为 b_0 , 可求得 2 个观测端点的三维坐标 (x, y, z) , 并求得近似距离为

$$d_0 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (1)$$
 进而按式 (2) 和 (3) 分别计算 b 和 h ^[3-4], 建立短基线。

$$b = \frac{b_0}{d_0} d \quad (2)$$

$$h = \frac{b}{2} \left[\frac{\sin \beta_1 \cot \varphi_{A1}}{\sin(\alpha_1 + \beta_1)} - \frac{\sin \alpha_1 \cot \varphi_{B1}}{\sin(\alpha_1 + \beta_1)} + \frac{\sin \beta_2 \cot \varphi_{A2}}{\sin(\alpha_2 + \beta_2)} - \frac{\sin \alpha_2 \cot \varphi_{B2}}{\sin(\alpha_2 + \beta_2)} \right] \quad (3)$$

式中: $\varphi_{A1}, \varphi_{A2}, \varphi_{B1}, \varphi_{B2}$ 分别为点 A 、点 B 照准横基尺上观测端点 1 和 2 所测的天顶距。

1.2 测点的测量

图 1 表示实验室其中 1 个立面, 该面共设 121 个测点, 其中 2 个测点为立面顶部拐角, 2 个测点为立面底部拐角, 其他测点位于相邻钢板的拼接处。

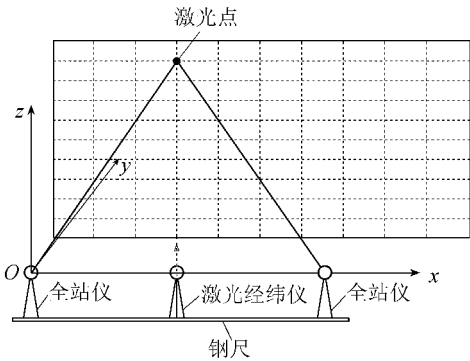


图 1 平整度检测示意图

立面上各测点采用空间测角交会法进行观测, 由于观测时 2 台仪器必须照准同一目标, 由于立面上无观测标志, 因此在钢尺 2 m 的整倍数处安置激光经纬仪, 按断面从立面底部逐步向上在钢板拼接处投点, 每投 1 个点, 2 台仪器同时照准并读取 α, β 以及 φ , 省略推导过程, 立面上任一点 p 的三维坐标为^[5-7]

$$\begin{cases} x_p = b \frac{\sin \beta \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \\ y_p = b \frac{\sin \beta \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \\ z_p = \frac{1}{2} \left(b \frac{\sin \beta \cot \varphi_1 + \sin \alpha \cot \varphi_2}{\sin(\alpha + \beta)} + h \right) \end{cases} \quad (4)$$

2 检测精度分析

对式 (4) 全微分并写成中误差形式, 取 $m_a^2 = m_\beta^2 = m_{\varphi_1}^2 = m_{\varphi_2}^2 = m_0^2$, 可推得

$$\begin{cases} m_x^2 = \frac{m_0^2 b^2}{\rho^2} \frac{\sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + \sin^2 \beta \cos^2 \beta}{\sin^4(\alpha + \beta)} \\ m_y^2 = \frac{m_0^2 b^2}{\rho^2} \frac{\sin^4 \alpha + \sin^4 \beta}{\sin^4(\alpha + \beta)} \\ m_z^2 = \frac{b^2 m_0^2}{4 \rho^2} \left\{ \frac{\sin^2 \alpha \csc^4 \varphi_2 + \sin^2 \beta \csc^4 \varphi_1}{\sin^2(\alpha + \beta)} + \frac{\cot^2 \varphi_1 [\cos \beta \sin(\alpha + \beta) - \sin \beta \cos(\alpha + \beta)]^2}{\sin^4(\alpha + \beta)} + \frac{\cot^2 \varphi_2 [\cos \alpha \sin(\alpha + \beta) - \sin \alpha \cos(\alpha + \beta)]^2}{\sin^4(\alpha + \beta)} \right\} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\rho = 206265''$ 。

测点 p 的空间点位中误差为

$$m_p^2 = m_x^2 + m_y^2 + m_z^2 \quad (6)$$

取 $m_a = m_\beta = m_{\varphi_1} = m_{\varphi_2} = m_0 = 1.0''$, $b = 18 \text{ m}$, 对称轴上测点的交会角 $\gamma \approx 48^\circ$, $\varphi > 50^\circ$, 求得 $m_p \leq \pm 0.3 \text{ mm}$, 立面顶部 2 个拐角点的交会图形最差, $\gamma \approx 40^\circ$, $\varphi > 43^\circ$, 求得 $m_p \leq \pm 1.5 \text{ mm}$, 说明检测方法满足平整度检测的精度要求。

3 平整度分析

3.1 坐标转换

为方便分析立面平整度, 将测量坐标系中的坐标转换成立面坐标系中的坐标, 基本做法是: ① 根据科研要求, 将左下角第 1 块 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的钢板视为标准正方形, 以该钢板左下角点为坐标原点 O' , 钢板与地面的交线为 x' 轴, 过原点垂直于 x' 轴向里的方向为 y' 轴, 过原点垂直于 x' 轴向外的方向为 z' 轴, 建立立面坐标系 $O'-x'y'z'$; ② 在 $O'-x'y'z'$ 中, 选择概略坐标为 $E(1.9, 0, 0), F(0, 0, 1.9), G(1.9, 0, 1.9)$ 的位置做上临时标志, 坐标原点 O' 和 E, F, G 作为 2 个不同坐标系中的 4 个公共点, 用交会法精确测量公共点在坐标系 $O-xyz$ 中的坐标, 用钢尺精确量取公共点在坐标系 $O'-x'y'z'$ 中的坐标; ③ 由于 2 个坐标系之间的转角很小, 采用布尔莎 7 参数模型^[8]求解 2 个坐标系的转换参数, 并将所有测点在 $O-xyz$ 中的坐标转换为 $O'-x'y'z'$ 中的坐标。

3.2 平面拟合

立面的平面方程为^[9]

$$ax' + by' + cz' + d = 0 \quad (7)$$

将式 (7) 变为

$$y' = Ax' + Bz' + C \quad (8)$$

将式 (8) 写成误差方程, 即

$$v'_i = Ax'_i + Bz'_i + C - y'_i \quad (9)$$

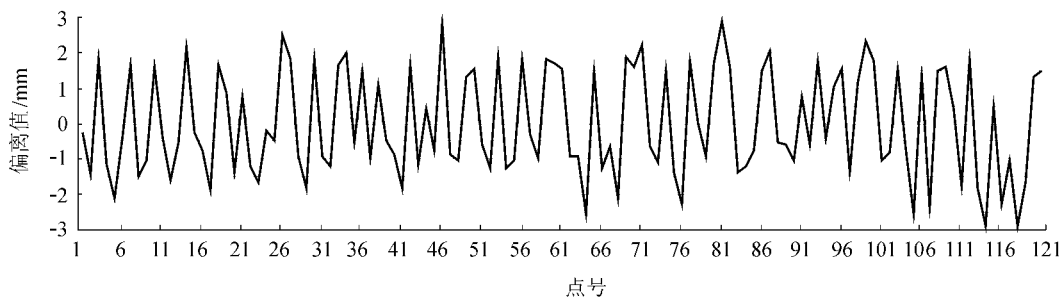


图2 测点到拟合平面的偏差

式中: v'_i 为各测点沿 y' 轴方向的拟合残差, 表示测点到拟合平面的偏差, 直接用于立面平整度的评判。将式(9)写成矩阵形式

$$V = AX - L \quad (10)$$

按最小二乘法求出平面拟合参数, 并获得各测点的 v'_i 。根据 121 个测点在 $O'-x'y'z'$ 中的坐标和式(7)~(9)建立平面方程为

$$y' = -3.0117 \times 10^{-5}x' - 1.0869 \times 10^{-5}z' + 8.4337 \times 10^{-4} \quad (11)$$

通过计算, 该立面拟合残差的最大值为 2.91 mm, 全部测点满足平整度不大于 ± 3 mm 的限差要求。各测点到拟合平面的偏差如图 2 所示。

4 结 语

仿真实验室表面平整度检测具有测量场地小、测量精度要求高、非接触式测量等特点, 采用横基尺配合全站仪测定基线的长度和高差建立短基线, 采用激光经纬仪配合全站仪空间测角交会法测定各点的三维坐标, 给出了空间测点点位中误差的计算公式, 并计算了最弱点的点位精度, 表明检测方法满足平整度检测要求; 采用布尔莎 7 参数模型将测量坐标系中的坐标转换为立面坐标系中的坐标, 采用

平面方程进行最小二乘拟合, 根据拟合残差进行了平整度的评判。

参考文献:

- [1] 华锡生, 田林亚. 安全监测原理与方法[M]. 南京: 河海大学出版社, 2007: 50-55.
- [2] 花向红. 空间坐标测量系统定向问题探讨[J]. 武测科技, 1995(1): 29-33.
- [3] 冯文灏. 工业测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004: 13-15.
- [4] 李宗春. 电子经纬仪交会测量系统在大型天线精密安装测量中的应用[J]. 海洋测绘, 2005, 25(1): 26-29.
- [5] 华锡生, 黄腾. 精密工程测量技术与应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 2002: 216-219.
- [6] 金超. 工业测量系统在多波束天线安装检测中的应用[J]. 解放军测绘学院学报, 1998, 15(3): 173-177.
- [7] 李军正, 张建军. 工业测量系统在水轮机组安装中的应用[J]. 测绘工程, 2003, 12(2): 53-55.
- [8] 孔祥元, 郭际明. 控制测量学(下)[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006: 169-172.
- [9] 同济大学数学教研室. 高等数学(上)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988: 419-426.

(收稿日期: 2009-12-02 编辑: 方宇彤)

· 简讯 ·

Water Science and Engineering 成为美国工程索引核心源期刊

据美国工程信息公司消息, 河海大学主办的英文国际学术期刊 *Water Science and Engineering* (水科学与水工程) 自 2010 年起被美国工程索引(EI)收录, 成为核心源期刊。

Water Science and Engineering 创刊于 2008 年, 是一份以水科学理论和水工程实践为主题的英文国际学术期刊, 主要刊登水科学、水工程、水资源、水环境、水管理方面的原创性研究(技术)论文。*Water Science and Engineering* 创刊两年来, 学术水平和国际影响力不断提升, 已先后被美国化学文摘(CA)和波兰哥白尼索引(IC)收录。这次被 EI 收录, 标志着该刊的质量跨上了一个新的台阶, 正逐渐成为国际上有影响的学术期刊。

目前 EI 是国际上最有影响的三大数据库之一, 在工程科学界和科技出版界享有很高的声誉。目前 EI 收录的中国英文期刊只有 36 种。

Water Science and Engineering 的网络地址: www.waterjournal.cn

(本刊编辑部供稿)