

# 激光跟踪仪组网测量在大型紧缩场反射面装调中的应用

兰翔 李晓星 周国锋 栾京东 张航

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)



**摘要:** 针对大型紧缩场装调过程中单台激光跟踪仪测量范围有限的情况, 提出采用两台或多台激光跟踪仪组建一测量网络进行大型紧缩场的装调工作。解决了组网过程中激光跟踪仪测量位置优化及坐标转换过程中公共点布置等问题, 并将该测量方式成功应用于某大型紧缩场反射面装调中, 保证了装调精度并提高了工作效率。

**关键词:** 紧缩场; 测量网络; 位置优化; 公共点; 装调精度

## Application of Laser Tracker Network Measurement in Alignment of Large-scale Compact Range

Lan Xiang Li Xiaoxing Zhou Guofeng Luan Jingdong Zhang Hang

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191)

**Abstract:** Constructing a measurement network with two or more laser trackers was presented considering the limited measurement range of one laser tracker in the alignment of large compact range. The laser tracker location was optimized, and the common points were used to coordinates transformation in contributing the network. The measurement method was applied in alignment of large compact range, which ensured high precision and improved the efficiency.

**Key words:** compact range; measurement network; location optimization; common point; alignment precision

### 1 引言

紧缩场天线是反射面天线的一种, 由点馈源发出的球面波信号, 经过一个或者几个反射面的反射作用, 形成平行性好的平面波, 从而允许在室内进行天线方向图、雷达散射截面等需要远场测试条件的电气测量。目前国内紧缩场正在向高频率、大静区的方向发展, 大型紧缩场反射器面板的制造精度要求和现场装调精度要求, 也随之越来越高。国内大型反射面天线的反射器面板一般采用分块制造, 然后现场拼装, 单块面板成形基于“点阵钉模、真空负压、蜂窝夹层”精密成形工艺制造<sup>[1]</sup>。由于反射面尺寸大, 分块数量

多, 反射面的装调工作中发射面的定位以及检测是一项重要技术。激光跟踪仪是一种高端坐标测量设备, 具有测量范围广, 测量精度高, 易于操作, 便于携带等特点, 因此广泛应用于目前的反射面检测与装调过程中, 但是随着测量距离和测量角度的增大, 激光跟踪仪的测量精度也在降低, 对于大型的反射面单台激光跟踪仪可能无法满足测量与装调的精度要求。

针对大型天线反射面的测量与装调, 提出采用激光跟踪仪组网测量解决单台测量达不到要求的问题。研究了组网过程中测量坐标系统以及各激光跟踪仪各站位和空间回归点布置的问题, 并将该研究成果应用于反射面的现场测量与装调中。

作者简介: 兰翔 (1991-), 硕士, 航空宇航制造工程专业; 研究方向: 大型紧缩场应用激光跟踪测量技术测量及装调。

收稿日期: 2015-01-22

## 2 激光跟踪测量系统的组网

激光跟踪仪组网测量是指由两个或多个仪器利用公共点（回归点）的测量组成同一个测量网络，通过预先设置好的公共参考标志点的坐标转换，实现两次测量的坐标系一致，这样能够完整描述测量对象的位置和姿态信息，但是转站仪器或坐标转换都会带来测量误差；同样，当多台激光跟踪仪在不同位置时，也通过坐标转换使它们各自的测量坐标系一致，完成描述被测物体的姿态信息。多台激光跟踪仪可以在多站位协同工作，如图 1 所示（图中  $P_1, P_2, P_3, P_4$  为四个站位位置）。

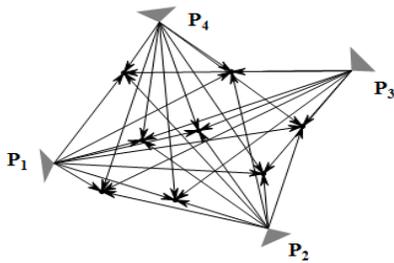


图 1 多站位激光跟踪仪协同工作

建立多站激光跟踪仪的测量网络就是将各台激光跟踪仪都转站到现场坐标系下（装调坐标系），使激光跟踪仪测量的数据具备一致性。这里的一致性有两层含义：一是在同一时间内，不同的激光跟踪仪测量同一点的测量数据相同；二是在不同时间内，测量网络测量同一点的测量数据相同。

在激光跟踪仪组网测量中，测量精度不仅与仪器本身测量精度有关，同时和仪器与测量对象相对位置以及建立不同仪器之间相互关系的回归点有关，因此该组网测量应该是通过优化测量仪器、回归点和被测物体三者之间的空间位置关系，得到高精度的一个测量网络<sup>[2]</sup>。

## 3 激光跟踪仪测量位置优化

仪器的测量位置是另一个影响测量精度的重要因素，为了保证在装调过程中激光跟踪仪测量系统的精度，必须选择最佳测量位置。跟踪仪的安置原则应该使反射面面型测量误差最小，即反射面上任一点的法向误差最小<sup>[3]</sup>。马骊群等<sup>[4]</sup>提出了紧缩场反射面法向测量不确定度作为测量系统的不确定度，根据法向测量不确定度最小原则，提出对于在水平方向对称配

置的紧缩场，如图 2，激光跟踪仪摆放  $X=0$  平面上。

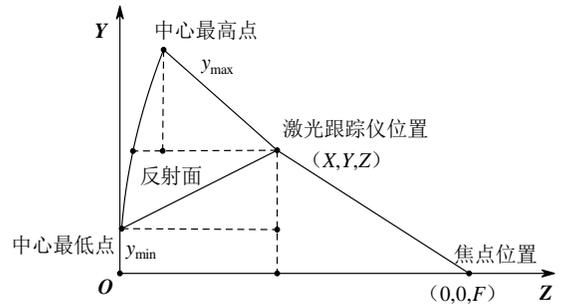


图 2 激光跟踪仪的测量位置

但法向测量不确定度并不能完全表征激光跟踪仪测量精度。最佳位置应该满足以下原则<sup>[5]</sup>：

a. 保证能测量所有的测量目标，包括反射面所有区域，馈源位置。

b. 在满足 a 条件下，保证所有反射面测量点的测量误差平方和最小，即满足测量误差最小二乘原则。

如图 3 所示， $P_s(x^*, y^*, z^*)$  表示激光跟踪仪的测量位置，其中  $S$  表示测站号（对于一台仪器不能满足精度要求的情况下，可以采用多台联网测量，组网测量中的跟踪仪的安置位置决定了跟踪仪的测量精度）， $G_0(x_0, y_0, z_0)$  表示反射面  $f(x, y, z)$  的几何中心，并且  $G_i(x_i, y_i, z_i)$  表示目标测量点，其中  $i = 1, 2, \dots, n$ ，表示测量点数量。

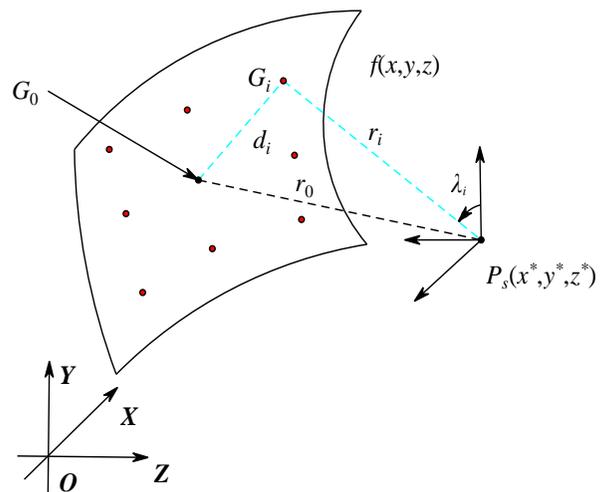


图 3 仪器最佳测量位置示意图

首先，假设测量误差服从正态分布，目标测量点  $G_i$  的最小测量误差的平方和是用于确定最佳传感器位置的最佳解决方案，如果对误差分布的任何信息是未知的，最小测量误差的平方和是一个很好的解决方

法。因此，与之相关的最小二乘问题可以表示如下：

$$\min(U_{xyz}^i)^2 \quad (1)$$

其中  $U_{xyz}^i$  表示激光跟踪仪位于  $P_s$  站位时测得的每一目标点  $G_i$  的误差，那么  $U_{xyz}^i$  也可以写成如下形式：

$$U_{xyz}^i = U(G_i, P_s) \quad (2)$$

其次，考虑对应于被测目标的不同的权重，Anderson 等人<sup>[6]</sup>提出了用于在其中分别测量了每个环的不同区域的归一化的加权因子。这个因子被定义如下：

$$\rho_i = I_i \frac{\sum d_i}{nd_i} \quad (3)$$

其中  $I_i$  是电磁波对应被测点的功率谱密度分布系数，且  $d_i = G_i - G_0$ 。

最后，要考虑激光跟踪仪的极限测量范围，测量角度和测量半径的极限与测量位置密切相关。设  $R_{max}$  为最大距离范围， $\pm\Psi$  为俯仰角的极限， $\pm\Phi$  为水平角，并制定以下约束优化问题：

$$\min \rho_i (U(G_i, P_s))^2 \text{ st. } \begin{cases} r_i \leq R_{max} \\ -\Psi \leq \varphi_i \leq \Psi \\ -\Phi \leq \lambda_i \leq \Phi \end{cases} \quad (4)$$

其中：

$$r_i = \|G_i - P_s\|,$$

$$\varphi_i = \tan^{-1} \left( \frac{(y_i - y^*)}{(x_i - x^*)} \right),$$

$$\lambda_i = \cos^{-1} \left( \frac{(z_i - z^*)}{r_i} \right).$$

上述带约束的非线性优化问题可由信赖域方法解决<sup>[7, 8]</sup>，从而可以得到最优测量站位置  $P_s$ 。

#### 4 公共点布局

由于多次转站会带来测量误差，激光跟踪仪的测距和测角精度不同，被测对象与回归标志点的相对位置都会对转站精度产生影响，因此，空间回归点的布局在工程上实际转变为如何设置激光跟踪仪、被测目标和回归点三者之间的关系。坐标转换的常规算法如 7 参数、13 参数或其它，即在相同迭代的情况下，其

转换变量参数的精度是相同的，不同在于算法时间和迭代次数<sup>[9]</sup>。一般来讲对于同一算法而言，坐标转换中回归点的布局决定了坐标转换的精度，被测目标离回归点距离越小，其转换的精度越高；回归点分布越均匀，布设的回归点越多，其转换的变量参数算法越稳定，解算精度也越高<sup>[10, 11]</sup>。在紧缩场工程测量中坐标的转换非常重要，尤其在面板型面精度检测、现场装配坐标系回归中应用尤为广泛，因此其精度会受到回归点的个数和布局以及其点位误差的影响。

#### 4.1 公共点个数对转站精度影响

在空间中均匀布设 10 个公共点，从中选 3~10 个公共点作为转站的回归点，通过激光跟踪仪的稳定点测量模式采集待测点 100 次取平均值作为其点位精度，可得出回归点个数对转站精度的影响规律如图 4 所示。由图可知，当取最少 3 个回归点时，待测点的点位误差较大，且稳定性不高。随着转站回归点个数的增加，待测点的点位精度逐渐减小。但是，当用于转站的回归点个数在 6 个以上时，增加点数对待测点的点位精度的改善作用并不明显，反而导致布局凌乱，测量效率降低。因此，现场装配测量时，为了确保转站精度和测量效率，回归点取 6~8 为宜。

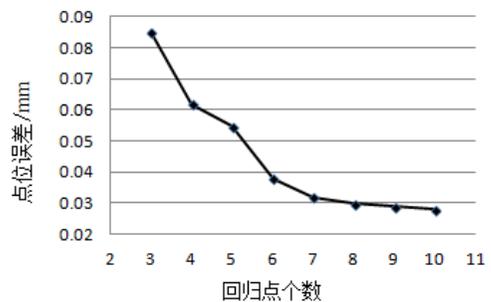


图 4 公共点个数对转站精度的影响

#### 4.2 公共点空间布局对转站精度影响

在实际测量过程中一般根据测量对象的不同对于回归点的布局也会不同，一般采用的布局方式多为均匀布设在测量对象所在空间内，在紧缩场测量过程中布置回归点则应同时考虑面板、仪器和馈源位置均匀布置，在面板测量时可尽量将回归点布置在面板空间内。因此对于不同的紧缩场测量过程中回归点的空间布局，当根据现场情况在装调的不同阶段采用合适的回归点。

#### 5 双站组网测量在工程中的应用

以北航为某研究所研制的 D2120 紧缩场为例,说明双站组网在工程上的应用, D2120 属于双曲抛物面单反射面紧缩场,设计焦距  $f=24000\text{mm}$ ,工作频率范围为  $0.5\sim 40\text{GHz}$ ,型面精度设计指标为  $50\mu\text{m}$ ,反射面尺寸  $23\text{m}$  (宽) $\times 16\text{m}$  (高),理论方程为

$$x^2 + y^2 = 4fz \quad (5)$$

### 5.1 双站测量位置优化

对这种大尺寸高精度紧缩场反射面的装配测量,采用一台激光跟踪仪进行测量显然效率和精度都会降低,因此考虑采用两台激光跟踪仪组网布局来实现高精度装配测量,根据第三部分的优化方法,计算两个激光跟踪仪的最佳测量位置分别为  $(-3000,8500,12000)$  和  $(3000,8500,12000)$ ,此时双站激光跟踪仪测量系统的组网测量精度满足设计指标要求,现场双站位置如图 5 所示。双站激光跟踪仪测量系统的组网测量误差分布,如图 6 所示。

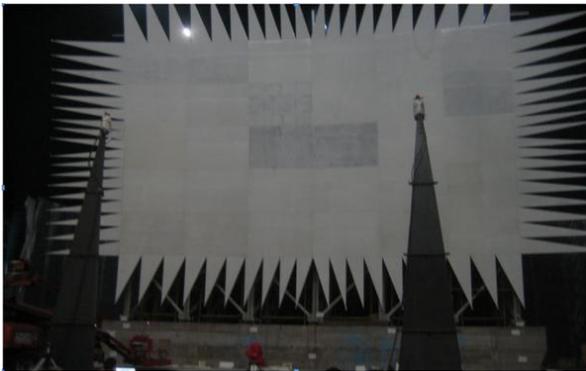


图 5 现场双站位置示意图

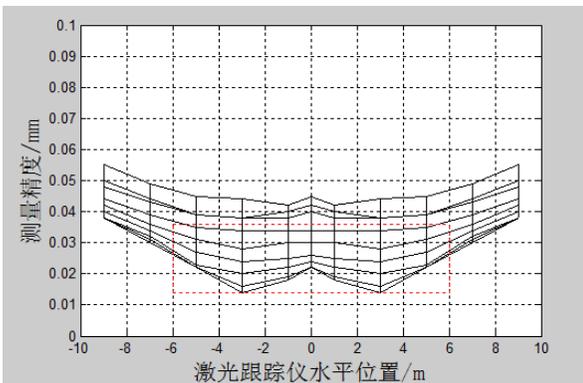


图 6 双站组网的测量试验误差分布

### 5.2 公共标志点确定

根据 4.1 节,公共点宜采用  $6\sim 8$  个,回归点多了精度反而提高不明显,且对空间布局来说显得凌乱,也给测量带来不便。虽然公共点布局在整个空间其转站精度很高,但是紧缩场装配现场的布局环境非常复

杂且背架的动态漂移对装配也有严重影响,综上所述,考虑采用分布整个反射面背架上布置 8 个公共点,其布局如图 7 所示。

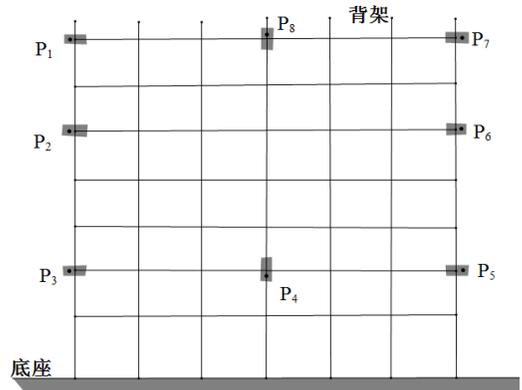


图 7 反射面背架上的参考点

反射面背架上的参考点在建立双站激光跟踪仪测量网过程中,在紧缩场现场装调工作中,在环境监控过程中,都有许多的基准功能,主要功能如下:

- a.  $P_1\sim P_8$  可以作为公共测量点,建立满足多站测量的测量网;
- b.  $P_1、P_3、P_4、P_8$  用来作为双站测量网的左站的测量基准参考点和回归参考点;
- c.  $P_4、P_5、P_7、P_8$  可作为双站测量网的右站的测量基准参考点和回归参考点。

确定好仪器位置和公共点以后,可以通过这些公共点建立我们所要的测量网络,对反射面进行测量和装调。

### 5.3 组网装调最终结果

30 块反射面与理论 CAD 的型面偏差为  $RMS=0.054\text{mm}$ ,30 块反射器面板的型面误差图,如图 8 所示。

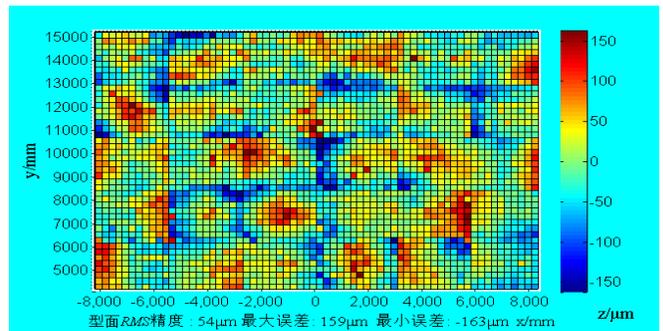


图 8 全部 30 块反射器面板的型面误差图

## 6 结束语

针对大型紧缩场天线现场装调过程中,单台激光

