

## TM65 m 天线基础和轨道沉降及对天线指向的影响

付丽<sup>1,2,3</sup>, 凌权宝<sup>1</sup>, 赵融冰<sup>1</sup>, 钱志瀚<sup>1</sup>, 钱宏亮<sup>4</sup>, 苟伟<sup>1</sup>, 郭文<sup>1</sup>, 范庆元<sup>1</sup>, 刘庆会<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院行星科学重点实验室, 江苏 南京 210008;  
3. 中国科学院射电天文重点实验室, 江苏 南京 210008;  
4. 哈尔滨工业大学威海分校, 山东 威海 264209)

**摘要:** 天马望远镜(简称 TM65 m)所建地区属于软土层, 为保证望远镜高指向精度, 需要坚实的基础支撑高精度的方位轨道平面。2012 年 7 月~2015 年 7 月, 基于精密水准测量系统, 采用闭合法对基础沉降及轨道面精度共进行了 11 次测量。测量数据表明基础沉降逐渐趋于均匀沉降, 轨道面均方根误差为 0.47 mm。测量结果显示天线的基础沉降和轨道面高程随方位角的变化具有相关性, 说明基础沉降直接影响了轨道面的精度。采用实验、仿真和理论相结合的方法分析轨道面不平度引起的天线方位轴在东西和南北方向的误差。首先, 线性插值测量的轨道不平度数据, 提取某方位角对应的天线方位滚轮 6 支点的高程, 然后将高程差作为约束边界条件施加到有限元模型上, 最终仿真分析获得不同方位角下方位轴的倾斜量。同时, 利用安装在天线座架上的电子倾斜仪对轨道面不平度进行测量, 建立了倾斜仪  $x$  和  $y$  向输出数据与方位轴倾斜及对应方位角的关系模型, 经拟合计算得到方位轴的倾斜量随方位角的变化关系曲线。仿真和理论分析结果具有很好的一致性, 轨道面不平度对指向精度的影响在  $\pm 4''$  内, 分析结果为天线指向模型修正提供了依据。

**关键词:** 天线结构; 基础沉降; 轨道面精度; 指向精度

**中图分类号:** TH751; TU196.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1117006

## Settlements of foundation and track of TM65 m and its effect on antenna pointing

Fu Li<sup>1,2,3</sup>, Ling Quanbao<sup>1</sup>, Zhao Rongbing<sup>1</sup>, Qian Zhihan<sup>1</sup>, Qian Hongliang<sup>4</sup>, Gou Wei<sup>1</sup>, Guo Wen<sup>1</sup>,  
Fan Qingyuan<sup>1</sup>, Liu Qinghui<sup>1</sup>

- (1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;  
2. Key Laboratory of Planetary Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;  
3. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;  
4. Harbin Institute of Technology, Weihai Campus, Weihai 264209, China)

**Abstract:** The area built TianMa telescope (in brief, TM65 m hereafter) belongs to soft soil layer. Consequently, in order to keep the high level pointing accuracy, it is necessary to build steady foundation to support the high accurate azimuth track. Based on the closed method, the accuracy of foundation settlements and track was measured by the precise leveling survey system for total 11 times from July

收稿日期: 2016-03-11; 修订日期: 2016-04-10

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(08DZ1160100); 中国科学院知识创新工程重大项目(KJCX-YW-18);

国家自然科学基金(Y347201001, U1631114); 天文专项-高精度测量和控制

作者简介: 付丽(1980-), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事大型射电望远镜结构力学方面的研究。Email: fuli@shao.ac.cn

2012 to July 2015. The results show that the foundation tends to even settlement and the root mean square error of the track surface is 0.47 mm. At the same time, the results also show that there are relevant between foundation settlements and track heights with variation of the azimuth angle, which illustrates that the foundation settlements directly affect on the track accuracy. In addition, the methods of experiment, simulation and theory were combined to analyze the azimuth axis errors induced by the track unevenness in the east-west and south-north direction. Firstly, the measured track data were linear interpolated and, at some azimuth angle, the heights of some 6 supporting points of azimuth wheels were extracted. Then, the constrained boundary conditions of height differences were applied to the finite element model. Finally, the azimuth axis tilts at different azimuth angles were obtained by simulating. Simultaneously, the track unevenness was measured by inclinometer. The relationship between the azimuth axis tilt and corresponding azimuth angle and the  $x$  and  $y$  data measured by inclinometer was established and the curve of the variation of the azimuth axis tilt with the azimuth angle was achieved. The simulation results show a good agreement with the theoretical analysis and the effect of track unevenness on the pointing accuracy is within  $\pm 4$  arcsec, which provides basis for the pointing model modification.

**Key words:** antenna structure; foundation settlement; track surface accuracy; pointing accuracy

## 0 引言

TM65 m 位于上海市西南郊的佘山地区,距市中心约 30 km,是轮轨式的方位/俯仰天线,天线抛物面口径 65 m,高度约 70 m(朝天时),在轮轨以上可转动部分的总质量约 2 500 t,属于大跨空间钢结构。天线共有 8 个频段,最高工作频段为 Q 波段,在风力  $\leq 4$  m/s、温度变化  $\leq 2$   $^{\circ}$ C/h 时,跟踪指向精度要求  $\leq 3$  arcsec RMS (Root Mean Square)<sup>[1]</sup>。为保证高指向精度,方位轨道面的不平度要求  $\leq 0.5$  mm,为此需要扎实稳固的地基基础和高强度的方位轨道。美国 GBT (Green Bank Telescope) 100 m 射电望远镜<sup>[2]</sup>曾经因为滚轮承担载荷过大(望远镜重约 7 300 t),长期运行导致轨道疲劳并出现裂纹,于 2007 年 4~8 月期间更换了更高强度的轨道。因此,为避免望远镜结构出现安全性、稳定性及精度劣化等问题,有必要长期监测轨道面精度及基础沉降。

基础不均匀沉降会导致轨道面精度变差及滚轮受力不均匀,甚至会引起望远镜结构变形,所以高精度望远镜首先要具备稳固的基础。德国 100 m 射电望远镜<sup>[3]</sup>的基础由 140 根 7~10 m 的桩(支承于基岩层上)及 4 m 高的钢筋混凝土圈梁组成,保证轨道面不平度好于 0.1 mm(rms)。墨西哥 50 m 射

电望远镜<sup>[4]</sup>对基础沉降也提出了严格要求,同时采用先进工艺进行轨道焊接,确保轨道面不平度在  $\pm 0.3$  mm 范围内。天马望远镜旋转部分结构载荷通过 6 组 12 个方位滚轮作用在直径 42 m 的无缝焊接轨道上,轨道通过地脚螺栓将载荷传递到基础上,基础承受动载荷、倾覆力矩和扭转力矩等作用。综合考虑该地区土质情况、载荷工况及轨道面精度要求,基础共打入 144 根灌注桩至地下深 65 m 处。2012 年 7 月开始定期对基础沉降和轨道面精度进行监测。

除了利用水准仪定期对基础和轨道进行沉降测量外,还可利用倾斜仪测量轨道面不平度及其对望远镜指向精度影响。Gawronski<sup>[5]</sup>和 Maneri<sup>[6]</sup>等建立了简单、直观的轨道不平度查询表,显示座架随着方位的变化在三个方向的旋转量。实际观测验证了查询表的作用,结果表明俯仰方向的指向误差由 16.2"降低到 5.0",方位方向的指向误差由 52.2"降低到 11.2"。Juan<sup>[7]</sup>等推导出倾斜仪测量数据与方位轴倾斜量及方位轴倾斜对应的方位角之间的关系表达式,基于测量数据拟合计算得方位轴倾斜造成的指向偏差。GBT<sup>[8]</sup>建立指向模型时,以两台倾斜仪测量数据为基础(两台测量数据吻合很好),考虑了轨道不平对指向的影响。SRT<sup>[9]</sup> (Sardinia Radio Telescope) 利用倾斜仪监测了轨道不平度,测量结果显示精度满足要求,得出轨道不

平引起的指向误差在 $\pm 2''$ 以内。孔德庆<sup>[10]</sup>、姜正阳等<sup>[11]</sup>以中国科学院国家天文台密云 50 m 射电望远镜为研究对象,进行了考虑轨道不平度引起的方位轴非线性倾斜偏差指向误差修正,与现行修正模型相比,总的指向精度有所提高。李永江等研究了乌鲁木齐 25 m 天线轨道变形状况及对天线指向的影响,建立了天线指向模型,结果显示该模型很好地反映了天线指向偏差。

文中首先介绍了水准仪测量基础和轨道的方法,及倾斜仪测量轨道面不平度的方法;然后从仿真和理论分析两个角度对两种仪器测量的轨道不平度数据进行分析;最终得到了基础沉降和轨道变形规律及方位轴倾斜量随方位角变化的规律。

## 1 基础沉降和轨道面不平度测量方法

基础沉降和轨道面不平度的测量采用传统的闭合法水准测量,由于其对测量精度的要求远高于普通的建筑施工测量,因此需要采用精密水准仪,并对于测量方法很好地进行设计,以保证测量精度。另外,安装在俯仰轴承座上的倾斜仪在方位旋转过程中对轨道进行测量,测量时方位旋转的加速度、风及温度等会引起噪声,所以测量时需要选择合理的方位旋转速度,同时考虑测量环境的影响,尽量减少上述因素对测量数据的影响。

### 1.1 水准测量

采用“L”型不锈钢沉降标头在基础圈梁上预留 16 个永久沉降点(图 1 中 F01~F16),点间距约 8 m 均匀设置。轨道面共由 30 段轨道焊接而成,由于不允

许在轨道面上设置永久沉降点,为保证测量精度,在轨道面的每两条焊缝的中间位置设置一个观测点位,共设置 30 个观测点位(G01~G30)。点位的确定方法为在导轨侧面的轨枕上量出中部实际尺寸(内外两侧),用油漆标记,以后每次采用同一个尺垫摆放在同一位置测量轨道面。

采用 Leica DNA03 电子水准仪(仪器标称精度为 $\pm 0.3$  mm/km)及配套的因瓦水准尺测量基础和轨道。在 TM65 m 附近原来进行天线主反射体安装的钢筋混凝土基础上,选择三个墩台设置沉降基准点(分别命名为 BM1、BM2、BM3)构成观测基准网,作为监测整个项目变形量大小的依据。按照《工程测量规范》(GB 50026-2007)<sup>[12]</sup>中一等变形监测的技术要求,高程系统采用假设高程系,假定 BM3 的高程为 5 m。为了验证基准点的稳定性和可靠性,每次测量前均需先对其进行复测。首次测量时,对基准点 BM1、BM2 和 BM2、BM3 之间的高差分别进行了两次独立测量,测量时进行往返测量,取其平均值作为基准点的初始值。基础沉降测量由 BM3 和 16 个基础沉降观测点组成闭合水准线路,轨道面测量由 BM3 和工作基准点 TP1 和 TP2 组成闭合水准线路,按照技术要求进行往返观测,并独立测量两次。

### 1.2 倾斜仪测量

采用徕卡 Nivel 220 电子倾斜仪测量轨道面不平度。该倾斜仪具有相互垂直的  $x$ 、 $y$  两个传感器,其测角分辨率为  $0.2''$ ,零点稳定度 $< 0.97''/^\circ\text{C}$ ,采样速度最小为 300 ms。

首先把倾斜仪安装在俯仰轴承座的试验工装上,倾斜仪  $x$  轴垂直于俯仰轴。然后调平倾斜仪,使其初始静态读数尽量靠近零点,以保证在测量范围内具有最好的精度。试验选择在无风的晚上进行,试验时天线俯仰朝天顶位置不动,方位以  $0.02$  ( $^\circ$ )/s 的速度旋转,从  $0^\circ$  开始转动到  $365^\circ$  停止,然后反方向以同样的速度转动到起始位置  $0^\circ$ 。倾斜仪 24 h 自动采集数据,天线转动时,倾斜仪的  $x$  和  $y$  数据、对应的方位和俯仰角及旋转速度等会自动记录在控制计算机文档里。

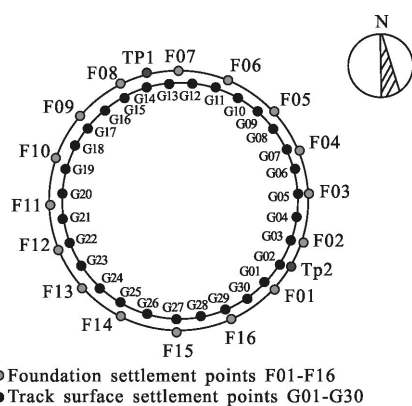


图 1 测量点位置示意图

Fig.1 Location diagram of measured points

## 2 轨道不平对指向精度影响分析方法

### 2.1 天线指向精度模型

望远镜的指示位置相对于待观测目标实际位置

的偏差称为指向误差<sup>[13]</sup>。实际上,天线结构硬件的校准并不能完全解决指向偏差的问题,还必须通过对指向误差进行分析和观测,建立指向误差修正模型,并通过软件校准才能满足精度要求。目前,比较通用的模型为 9 个参数的指向修正模型,其修正公式为<sup>[14]</sup>:

$$\Delta el = -P_4 \sin(az) + P_5 \sin(az) + P_7 + P_8 \cos(el) + P_9 \cot(el)$$

$$\Delta az = \frac{\Delta Xel}{\cos(el)} = \frac{P_1 + P_2 \cos(el) + P_3 \sin(el) + P_4 \sin(el) \cos(az) + P_5 \sin(el) \sin(az)}{\cos(el)} \quad (1)$$

式中: $\Delta el$ 、 $\Delta Xel$  和  $\Delta az$  分别为对指定射电源观测得到的俯仰、垂直于俯仰和方位偏差数据; $el$  和  $az$  分别为天线的俯仰和方位位置; $P_1$  为天线电轴与俯仰轴不垂直误差; $P_2$  为方位零点差; $P_3$  为俯仰轴与方位轴不垂直误差; $P_4$  为方位轴倾斜(东西)误差; $P_5$  为方位轴倾斜(南北)误差; $P_7$  为俯仰零点差; $P_8$  为天线重力变形误差; $P_9$  为大气折射残余误差。

### 2.2 水准仪测量数据分析

以 TM65 m 天线为研究对象,建立有限元模型,将水准仪测量的轨道面不平度数据进行线性插值,并将其作为约束边界条件施加到方位座架的 6 个支点上。TM65 m 天线的有限元模型如图 2 所示,模型的单元类型及材料属性见参考文献[15]。模型的坐标原点在方位轴和俯仰轴的交点处(显示在左下角),Z 轴为方位轴,指向天顶方向为正;X 轴为俯仰轴,天线朝北时(方位角 0°)向西为正,Y 轴根据 X、Z 轴由右手定则确定。

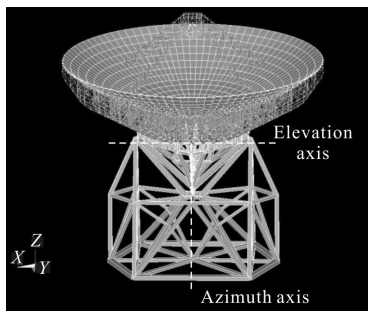


图 2 TM65 m 天线有限元模型  
Fig.2 Finite element model of TM65 m

边界约束包括三部分:(1) 天线背架与俯仰机构间的连接采用耦合来模拟,耦合量为三个方向的位移。(2) 俯仰轴与座架间的连接通过耦合两部分的三个

位移分量和绕 Y 轴、Z 轴的转动分量,只释放绕 X 轴的转动分量来模拟俯仰机构的转动;俯仰齿轮与方位座架间通过驱动装置连接,驱动装置两端分别与上下两部分耦合三个方向的位移分量,当俯仰齿轮转动到一个新位置时,程序根据旋转的角度自动判断俯仰齿轮上需要和驱动装置耦合的点并将两点的三个位移分量耦合,驱动装置与俯仰齿轮始终保持相切。(3) 方位座架与地面的连接中,方位中心枢轴约束边界条件为  $UX=UY=ROTX=ROTY=0$ ;座架滚轮处约束边界条件为  $UX=UY=ROTX=ROTY=ROTZ=0$ ,UZ 取基于水准仪测量的轨道某 6 处的高程差。共模拟了 24 种工况,为天线方位角  $0^\circ \sim 345^\circ$ ,  $15^\circ$  间隔,滚轮 6 支点处不同 UZ 下引起的方位轴在东西和南北向的偏差。

### 2.3 倾斜仪测量数据分析

安装在俯仰轴承座上的倾斜仪在方位旋转过程中对轨道进行测量,测量数据存在噪声,所以数据处理的首要问题是滤波。Tonion 等<sup>[9]</sup>对 SRT64 m 天线的倾斜仪测量数据分析时分别采用了傅里叶和多项式等滤波方法,但是并没有得到满意的结果。而卡尔曼滤波在测量方差已知的情况下能够从一系列存在测量噪声的数据中估计动态系统的状态,并能够对现场采集的数据进行实时的更新和处理,滤波效果较好。因此,文中采用卡尔曼滤波法对测量数据进行滤波,得到俯仰轴方向的倾斜量(y tilt)和垂直于俯仰轴方向的倾斜量(x tilt)如图 3 和图 4 中的灰线所示,滤掉了高频项的影响。由图示可知,x tilt 噪声较大,y tilt 噪声较小。滤波后的 x 向数据直接反应俯仰指向误差,x 和 y 向数据结合可用于分析轨道不平度引起的方位轴误差。

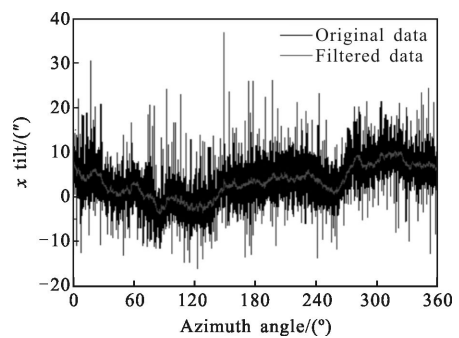


图 3 垂直于俯仰轴方向倾斜量  
Fig.3 Tilt at the direction of cross elevation axis

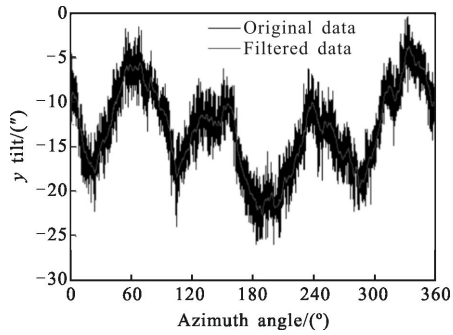


图 4 俯仰轴方向倾斜量

Fig.4 Tilt at the direction of elevation axis

倾斜仪输出值和方位角的关系可用如下线性公式拟合<sup>[16]</sup>:

$$\begin{aligned} I_x(az) &= \theta \cos(az - \varphi) \\ I_y(az) &= \theta \sin(az - \varphi) \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $az$  为天线方位角;  $I_x(az)$  和  $I_y(az)$  分别为倾斜仪  $x$  和  $y$  传感器输出值, 单位为 ( $''$ );  $\theta$  为方位轴倾斜量;  $\varphi$  为方位轴倾斜的方位角。

基于公式(2), 由倾斜仪测量不同方位角下  $x$  和  $y$  向倾斜量, 采用最小二乘法拟合得方位轴倾斜量  $\theta$  和方位轴倾斜的方位角  $\varphi$ 。然后利用下式计算公式(1)中的方位轴东西方向上的倾斜误差  $P_4$ , 方位轴南北方向上的倾斜误差  $P_5$ :

$$\begin{aligned} P_4 &= -\theta \cos(\varphi - 180) \\ P_5 &= -\theta \sin(\varphi - 180) \end{aligned} \quad (3)$$

### 3 结果

基于上述测量和数据分析方法, 测量并分析了 TM65 m 天线基础沉降和轨道面不平度, 并得到了轨道面不平度对天线指向精度的影响程度。

#### 3.1 水准仪测量的基础沉降及轨道面不平度

3 年时间共进行了 11 次测量, 时间间隔由起初的 2 个月、3 个月到后来的半年。统计分析了 2012 年 10 月 19 日~2015 年 7 月 4 日每次测量的各测点的基础沉降量。由图 5 可知, 随着时间的变化, 基础的沉降逐渐趋于均匀沉降。前几次沉降量为正值, 主要原因: 一是可能受地下水位变化的影响; 二是天线的基础相对比基准点 BM1、BM2 和 BM3 的基础坚固, 基准点的沉降大于基础沉降, 但实际上笔者更关注的是天线基础各测点的相对关系, 因此测量数据有效。

图 6 中“—\*—”表示 16 个基础沉降监测点 3 年

的累计沉降量, 为绝对值; “—●—”表示最后一次测量的轨道面起伏变化, 取 30 个测量点高程的毫米位数值, 为相对值。正北方向为天线方位角  $0^\circ$ , 顺时针方向计数, 由图 1 显示的各测点与指北针的位置关系, 可得概略方位角与基础累计沉降和轨道面不平度的关系, 二者具有相似的变化趋势, 基础累计最大沉降处(方位角  $150^\circ$  附近)对应轨道面倾斜的最低点, 说明基础沉降对轨道产生了影响。另外, 最后一次测量的轨道面的精度为  $0.47 \text{ mm}$ , 满足指标要求。

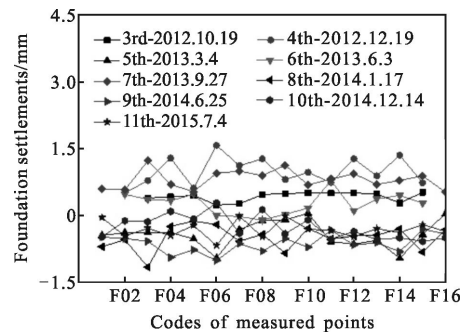


图 5 每次测量的基础沉降

Fig.5 Foundation settlement for each measurement

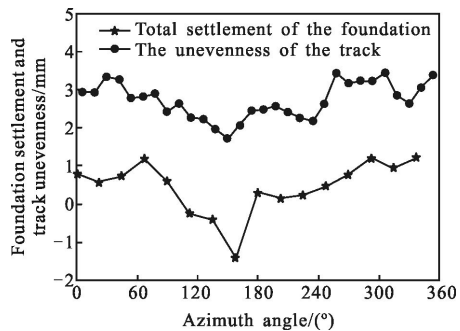


图 6 累计基础沉降与轨道倾斜关系

Fig.6 Relationship between total foundation settlements and track unevenness

#### 3.2 轨道面不平对指向精度的影响

倾斜仪随方位座架从方位  $0^\circ$  旋转到  $360^\circ$ , 输出各方位角对应的  $x$  和  $y$  向倾斜量  $I_x(az)$  和  $I_y(az)$ , 由公式(2)拟合得方位轴的倾斜量  $\theta$  和倾斜方位角  $\varphi$ , 代入公式(3)得方位轴东西方向上的倾斜误差  $P_4$  和南北方向上的倾斜误差  $P_5$ , 最终得到公式(1)中方位偏差  $\Delta az$  中的  $P_4 \cos(az)$  和  $P_5 \sin(az)$ , 其随方位角的变化趋势如图 7 和图 8 中“—■—”所示。同时, 基于水准仪测量数据, 按照天线方位角提取方位滚轮 6 支点

对应的数据作为约束边界条件施加到图 4 所示的有限元模型上, 仿真分析了方位角  $0^{\circ}\sim 345^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$  间隔, 共 24 种工况下方位轴在东西和南北方向上的倾斜量, 具体变化量级如图 7 和图 8 中“—●—”。两种分析方法在东西方向的计算误差最大点在方位角  $45^{\circ}$ , 误差为  $3''$ ; 在南北方向的计算误差最大点在方位角  $30^{\circ}$ , 误差为  $2''$ , 但其变化趋势具有较好的一致性。由图 7 和图 8 可得 TM65 m 天线轨道面不平对指向精度的影响在  $\pm 4''$  内。

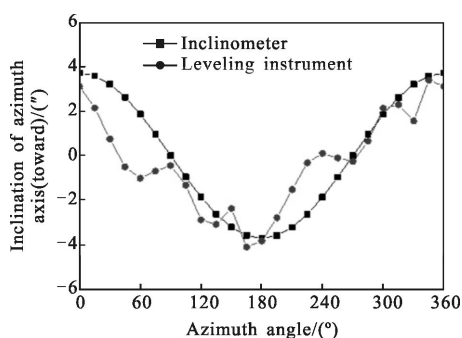


图 7 方位轴在东西方向上的倾斜量随方位角的变化  
Fig.7 Variation of the tilt of azimuth axis with the azimuth angle at the direction of east and west

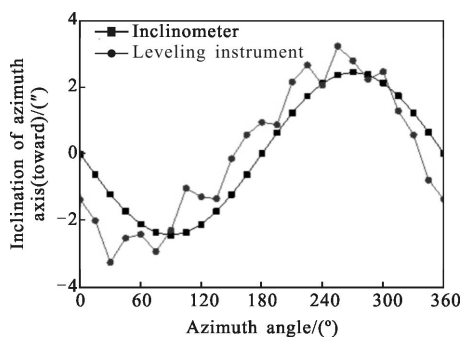


图 8 方位轴在南北方向上的倾斜量随方位角的变化  
Fig.8 Variation of the tilt of azimuth axis with the azimuth angle at the direction of south and north

## 4 结 论

针对 TM65 m 天线结构的基础和轨道, 基于精密水准仪测量系统, 测量的结果显示轨道面的高低起伏随着基础累计沉降量的变化而变化, 最大累计沉降发生在方位角  $150^{\circ}$  附近, 相应地, 此处亦是轨道面倾斜的最低点。另外, 就目前 3 年的测量数据分析得基础沉降随着时间的变化逐渐均匀沉降, 说明基

础沉降对轨道面精度及天线结构变形的影响逐渐减小, 并且轨道面的精度满足技术指标要求。

提出基于实验和仿真相结合的方法将轨道不平度作为独立因素分析其对天线指向精度的影响。仿真与理论分析结果具有很好的一致性, 得到方位轴倾斜随方位角的变化呈正弦和余弦曲线变化关系。

进一步将进行方位轴倾斜误差的非线性分析, 具体为将模型改正后所剩每点(如  $0.1^{\circ}$  间隔)的误差和轨道不平度对应, 生成表格数据, 加入指向模型, 从中找出进一步改进天线指向的潜力。

## 参 考 文 献:

- [1] Liu Guoxi, Zheng Yuanpeng. Report on design of Shanghai 65 m antenna structure [R]. Shijiazhuang: CETC54, China, 2009. (in Chinese)  
刘国玺, 郑元鹏. 上海 65 m 射电望远镜天线方案设计报告 [R]. 石家庄: 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 2009.
- [2] Robert A, Arthur S, Dennis E. Replacement of the green bank telescope azimuth track[C]//SPIE, 2008, 63(14): 3026–3030.
- [3] Wielebinski R. The effelsberg 100 –m radio telescope [J]. *Naturwissenschaften*, 1971, 58(3): 109–116.
- [4] Joseph A, Frank W K. Precision continuous high-strength azimuth track for large telescopes [C]//SPIE, 2003, 4840: 612–623.
- [5] Wodek G, Farrokh B, Eric G. Track-Level-Compensation look-up table improves antenna pointing precision[C]//SPIE, 2006, 6273: 1–9.
- [6] Maneri E, Gawronski W. A method and a graphical user interface for the creation of an azimuth-track-level look-up table, TMO progress report [R]. California: Jet Propulsion Laboratory, 2000.
- [7] Juan P, Ute L, Rainer M. Pointing with the IRAM 30 m telescope[C]//SPIE, 2000, 4015: 632–640.
- [8] Kim C. The GBT pointing model PTCS Project Note 63.0 [C]//Green Bank: NRAO, 2008.
- [9] Tonino P, Franco B, Sergio P, et al. The SRT inclinometer for monitoring the rail and the thermal gradient effects on the alidade structure[C]//SPIE, 2014, 9145(28): 72–78.
- [10] Jiang Zhengyang, Kong Deqing, Zhang Hongbo, et al. Pointing calibration method of radio telescope considering track nonlinear levelness [J]. *Astronomical Research &*

- Technology*, 2015, 12(4): 417–423. (in Chinese)
- 姜正阳, 孔德庆, 张洪波, 等. 考虑轨道不平度的射电望远镜指向修正方法 [J]. *天文研究与技术*, 2015, 12(4): 417–423.
- [11] Kong Deqing, Wang Songgen, Wang Jinqing, et al. A new calibration model for pointing a radio telescope that considers nonlinear errors in the azimuth axis [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, 14(6): 733–740.
- [12] 中国有色金属工业协会. GB 50026–2007 工程测量规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- [13] Zhao Yan. Research on modeling analysis and design of pointing errors for large radio telescope [D]. Xi'an: Xidian University, 2008. (in Chinese)
- 赵彦. 大型射电望远镜指向误差建模分析与设计研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [14] Guiar C N, Lansing F L. Antenna pointing systematic error model derivations, TDA Progress Report 42–88 [R]. California: Jet Propulsion Laboratory, 1986.
- [15] Qian Hongliang, Liu Yan, Fan Feng, et al. Surface precision analysis on main reflector of 65 m antenna structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 3027–3033. (in Chinese)
- 钱宏亮, 刘岩, 范峰, 等. 65 m 天线结构主反射面面形精度分析 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(11): 3027–3033.
- [16] Wodek G, Farrokh B, Ofelia Q. Azimuth track level compensation to reduce blind pointing errors of the deep space network antennas [J]. *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, 2000, 42(2): 28–38.