DOI: 10.3724/SP. J. 1187.2013.00823

利用加速度计的大型光电望远镜抖动测量方法*

杨晓霞 孟浩然 阴玉梅 王 帅 吴庆林

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘 要: 为了克服传统抖动测量评价方法在更大口望远镜上的局限性 提出了利用多加速度计来对抖动进行全面测量和评价的方法。在介绍加速度计测量原理及安装方式的基础上 重点说明了如何利用加速度计测量信息来获得系统抖动信息的时、频域数据处理方法,分析了直接时域积分方法的不足,提出了利用频域积分方法获得系统抖动统计特性的新方法。最后 在某 1 m 级以上望远镜上做了抖动测量实验 结果表明 该测量方法可以计算 0.5~500 Hz 频率范围内任意频率段的抖动 RMS 值 望远镜方位轴系在静态条件下最大抖动量在 0.21"以内,闭环条件下最大抖动量在 0.35"以内。加速度计不但能敏感齿槽力矩、摩擦力矩等内扰力引起的抖动,还能敏感因外扰力——风阻、地基振动等带来的轴系晃动,是全面评价望远镜抖动性能的有效方法。该测量方法可以为大型望远镜机械最优设计、控制带宽设计和系统最终性能指标评价提供数据支撑。

关键词: 抖动; 加速度计; 频域积分; 大型光电望远镜

中图分类号: TP206.1 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

Jitter measurement for large opto-electronic telescope using accelerometers

Yang Xiaoxia Meng Haoran Yin Yumei Wang Shuai Wu Qinglin (Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences Changchun 130033 China)

Abstract: In order to overcome the limitation for the traditional jitter measurement methods a novel method using accelerometers for jitter measurement was proposed. The principles for accelerometers were first introduced and the placement of the accelerometers was discussed. The time domain and frequency domain data processing methods were studied and the limitation for time domain methods was analyzed. The frequency domain integral method was presented which can caculate the statistic characteristics of the jitter using acceleration measurement. In the end, the jitter measurement experiment was performed on a 1 m telescope. The experimental results show that the root mean square (RMS) of the jitter can be calculated for arbitrary frequency intervals between 0.5 Hz and 500 Hz. The jitter RMS under static conditions is less than 0.21 arcsecond and less than 0.35 arcsecond under close loop conditions. The accelerometers can reflect the cogging torque friction torque and wind torque ground based vibration simultaneously. This method can supply data support for the optimal mechanical designs control bandwidth designs and the ultimate performance evaluation of the system.

Keywords: jitter; accelerometer; frequency integral; large opto-electronic telescope

1 引 言

随着对深空探测研究的深入和人类各项太空 计划的实施 对地基大型光电望远镜成像技术提出 了越来越高的要求 地基望远镜的发展趋势呈现出 口径越来越大、成像精度越来越高等特点。国内几个研究所多年来致力于大口径地基望远镜技术的研究,已经研制成功了1 m 级以上的设备多台,这也对大型光电望远镜抖动测量和评价技术提出了新的挑战。

收稿日期: 2013-04 Received Date: 2013-04 * 基金项目: 中科院第三期创新工程资助项目

望远镜的抖动[1] 是指望远镜各被测位置处的 实际指向与指令指向之间的位置偏差 它是评价光 电设备性能的一个重要指标。引起抖动的原因是 多方面的,它是系统的所有内部和外部扰动加权作 用到设备上的综合结果。传统的抖动测量和评价 一般依赖于编码器数据[23]或者图像的脱靶量数 据[4-5]。对于较小型的光电设备来说,由于系统整 体体积较小 刚度较好 视轴受风阻、地基振动等的 影响不是很明显 此时使用编码器提供的最终速度 误差或者位置误差作为系统的最终性能指标评价 已经足够。但是随着地基望远镜口径的变大,系统 整体体积变大,刚度变差,设备受各种内扰和外扰 的影响更为明显,尤其是对于车载平台[6]来说,编 码器只能反映望远镜轴系位置处的抖动信息 而不 能全面反映系统各不同位置处的综合抖动信息。 而依赖干图像脱靶量数据的抖动评价方法受脱靶 量提取噪声、算法精度的影响,且受图像帧频的限 制,只能对中低频抖动信息进行分析,亦不能全面 反映各种内外扰动在望远镜不同位置处引起的抖 动信息。

加速度计作为一种惯性测量器件 能够直接反映对象在测量位置处的受力信息,且安装简单灵活,可以在多位置处同时安装、同步测量,适用于大型光电设备的全面抖动测量与评价。近年来,国内外陆续有文献报道了利用加速度计来抑制系统抖动的方法^[7-43],但是利用加速度计来对大型光电设备的抖动进行全面测量和评价的工作还较少。文献[14-15]总结了利用加速度计对多个地基大口径望远镜的抖动测量结果,但是并未对实际测量方法、数据计算以及处理方法进行论述。

从加速度计的测量原理出发,详细介绍利用加速度计进行大型光电探测设备进行抖动测量和评价的方法,分析了测量抖动的目的,讨论了加速度计的安装方式、重点介绍了数据的时域、频域计算方法,最后,给出在某1 m 级以上级望远镜上做的加速度计抖动测量实验结果。

2 基于加速度计测量数据的抖动测量方法

基于加速度计的大型光电设备抖动测量方法 主要解决如下几个问题: 一是加速度计的测量原理; 二是加速度计的测量方式; 三是如何根据加速 度计的测量信号来计算得到抖动的量化信息。

2.1 抖动测量目的及基于加速度计的抖动测量 原理

对大型光电设备进行抖动测量和评价的目的 主要有以下几点:

- 1) 将不同因素引起的抖动进行分类量化 ,从 而可以有针对性地对系统的软硬件进行优化设计 , 达到优化系统最终性能指标的目的;
- 2) 根据抖动的频率域特性,有针对性地设计控制器带宽,即为抖动的抑制控制方式的选择提供依据:
- 3)验证最终设备的抖动是否达到了任务指标要求对系统的最终性能指标的量化提供数据支撑。

可见 对抖动的测量和计算 在系统硬件设计、机械件设计、控制器参数设计以及最终全系统性能指标量化等方面都有重要的意义。

根据牛顿第二定律 加速度信息反映了物体的 受力信息 因此加速度计的测量信息能够从本质上 反映被测对象的受力信息。根据前面抖动的定义 , 力是引起设备发生抖动现象的原因 ,并且抖动最终 表现为系统的位置误差。因此 ,可以通过测量被测对象的加速度来进一步经过数值计算得到对象抖动的特性 ,这将在 2.3 节中给出详细计算方法。

2.2 加速度计的选型及安装方式

根据测量目的及测量精度要求 ,选取 wilcoxon research 的 731A 压电振动加速度计 ,加速度计的标度因数设为 10~V/g ,量程为 $\pm\,0.5~g$,放大器采用 P31 ,内部设定 450~Hz 的滤波器 设备图如图 $1~finshed{finshed}$ 所示。



图 1 731A 振动加速度计

Fig. 1 731A seismic accelerometer

拟使用尽量少的加速度计来完成本项测试实验 但是为了消除随机误差、随机扰动、系统误差等的影响 提高输出信号的信噪比 加速度计的安装方式需采用配对式安装的方式 即每个加速度计都有一个与之位置相对(即在旋转径向直径的两端)且敏感方向相反的加速度计进行同时测量 ,这样可以有效地提高测量信号的信噪比 增强信号的有效性 ,下面具体给出几种安装方式。

1) 测量绕旋转轴系的抖动时,可以采用2个加速度计和4个加速度计的安装方式,如图2所示。

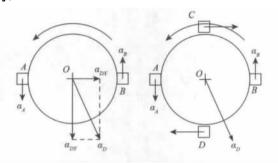


图 2 加速度计的安装方式一

Fig. 2 Placements of the accelerometers

图中 α_D 代表旋转平面内的扰动加速度 ,经过简单的计算可以看出 2 加速度计的安装方式可以消除扰动加速度 α_D 在加速度计敏感方向分量 α_{DY} 的影响。4 加速度计安装方式是对 2 加速度计安装方式的加强 ,通过安装 4 个加速度计 ,能够提高系统测量信号的信噪比和抖动的均方根值(root mean square ,RMS) 计算精度 ,并且能够同时对旋转平面内的扰动加速度 α_D 进行计算。

2) 测量沿旋转轴方向的抖动时,仍可以采用2个加速度计和4个加速度计的安装方式,如图3所示。它与前面所述的绕旋转轴方向抖动的加速度计安装方式是相对应的,只是各加速度计的敏感轴方向不是在旋转平面内,而是与旋转轴平行(即垂直于旋转平面)。

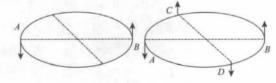


图 3 加速度计安装方式二

Fig. 3 Placements of the accelerometers

3) 测量基座振动引起的不同位置处的三维抖动时,需要在同一位置安装相互正交的3个加速度计如图4所示,将3个加速度计分别安装在1个正六面体工装的3个垂直面上,此时3个加速度计分别敏感沿空间三维方向的加速度信息,根据该测量结果可以计算沿空间任意方向的抖动信息。另外,在测量三维抖动时,为了提高测量信号的信噪比,仍可以采用对径安装的方式,即针对每1个加速度计安装1个敏感轴平行且敏感方向相反的加速度计。

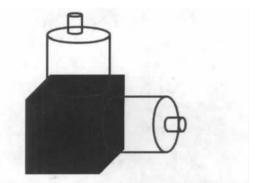


图 4 三轴加速度计安装方式

Fig. 4 Placements of the 3D accelerometers

2.3 加速度计的数据处理方法

731A 加速度计输出的是电压模拟量,根据测量分辨率的要求,设计了16 位 A/D 数据采集卡,将加速度信号的输出以数字格式存储到计算机中。设采集到的数字信号为 M,则对应的加速度大小为:

$$a = \frac{(M - 2^{15}) \times 0.5 \times g}{2^{15}} \tag{1}$$

式中: $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 为重力加速度 ,a 的量纲为 m/s^2 。

最终测量目的是得到被测对象在各种不同状态、不同位置处的抖动信息,而前面已经讲到,抖动最终表现为测量位置处的实际位置与指令位置的差,即表现为位置误差,因此需要解决的关键问题就是如何通过加速度计的测量信息来分析计算出抖动信息。为此,一般采用2种分析方法,一种是时域分析方法;一种是频域分析方法,其中时域分析方法较简单、直观,但是局限性较大;而频域分析方法能够有效克服时域分析方法的局限性,且能够给出抖动信号在任意频率段范围内的 RMS 值,下

面分别介绍。

2.3.1 时域分析方法及其局限性

加速度信息是直接量测量,它存在着随机量测误差和量测噪声,因此它是一个随时间变化的随机时间序列。由它计算得到的位置误差信号仍然是一个随机时间序列。对随机时间系列进行时域分析时,一般是计算信号的2个指标,一个是峰谷值(peak valley,PV);1个是均方根值(RMS),这2个指标就能够反映随机信号在整个时间尺度上的离散程度。

要从加速度信号计算得到位置信号,需要将测量信号两次积分。记 [0,T] 时刻区间内测量得到的加速度信号为 a(t) 则位置信号为:

$$p(t) = p(0) + \int_0^t v(\tau) d\tau =$$

$$p(0) + \int_0^t \left(v(0) + \int_0^\tau a(s) ds\right) d\tau$$
 (2)

式中: $v(\tau)$ 代表 τ 时刻的速度信息 p(0) 和 v(0) 分别代表初始位置和初始速度。位置误差为:

$$e(t) = p_{\sharp \bowtie} - p(t) \tag{3}$$

式中: p_{H} 代表已知的指令位置。如果加速度测量信号是完全准确的,即 a(t) 中不含有噪声和干扰,那么在已知初始速度和初始位置的情况下很容易求得位置误差。但是由于加速度信号 a(t) 是通过传感器 —— 加速度计测量得到的,其中势必会包含着测量噪声和测量误差,那么采用式(2) 直接积分的方法求得的位置信号是不可信的,它会完全被淹没在低频噪声中。图 5 给出了静态条件下测得的加速度信号及由它经过时域积分得到的速度和位置信号曲线。

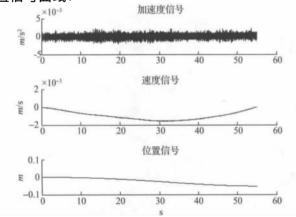


图 5 加速度、速度、位置曲线

Fig. 5 Acceleration velocity position

可见 积分得到的位置信号仅存在低频部分,而高频部分完全被衰减掉,这是因为纯积分环节对低频噪声和误差具有明显的放大作用,而对高频信号具有明显的衰减作用。图 6 给出了纯积分环节的波特图,可以看出,纯积分环节的幅频响应曲线在1 rad/s 处与 0 dB 线相交,即纯积分环节对于频率低于1 rad/s 的信号具有幅值放大作用,且对越低频的信号放大作用越明显。因此,直接对时域加速度信号进行两次积分得到位置信号的方法是不可行的。

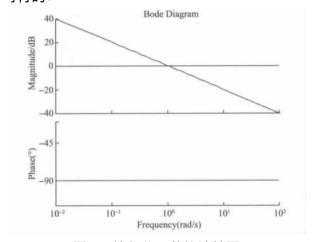


图 6 纯积分环节的波特图 Fig. 6 Bode plot for pure integral

另一方面,对于随机信号来说,关心的并不是它在每个时刻点的具体取值,而是它的统计特性,因此,只需根据加速度测量信号计算出位置信号的统计特性即可,为此,给出以下频域分

2.3.2 频率域分析方法

析的方法。

为了解决从加速度测量信号计算得到位置 抖动信号统计特性的问题,提出了利用加速度 测量信号的功率谱密度(power spectrum density, PSD)频域特性来进一步计算位置信号频域特性 的新方法。

之所以选用 PSD 分析方法的原因有2 个,一方面可以根据 PSD 给出的信号特征频率来分析信号的扰动源组成; 另一方面对 PSD 在某频率区间内积分就可以得到信号在该频率区间内的平均能量,从而达到对信号的统计特性进行量化的目的。可见 利用加速度计对大型光电望远镜的位置抖动信号的进行统计特性分析的关键技术 就是如何根据

加速度计测量时域信号来得到位置抖动信号的 PSD。

记加速度时域信号为 a(t) 是纲为 m/s^2 ,它的 PSD 为 A(f) ,量纲为(m/s^2) 2 /Hz f 的量纲是 Hz。设由加速度信号积分得到的位置信号的 PSD 为 p(f) 则根据 PSD 的定义 A(f) 和 p(f) 之间有如下关系成立:

$$p(f) = \frac{A(f)}{(2\pi f)^4} \tag{4}$$

位置信号在频率区间 [f_1, f_2] 之间的平均能量可用如式(5) 计算:

$$W = \int_{f_i}^{f_2} p(f) \, \mathrm{d}f \tag{5}$$

在频率区间 $[f_1, f_2]$ 之间的 RMS 为:

$$RMS_p(f_1 \ f_2) = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} p(f) \ df}$$
 (6)

由于程序计算出来的能量谱密度 p(f) 是 1 个 关于 f 的离散序列 因此信号在频率区间 $[f_1,f_2]$ 之间 RMS 值需要通过数值计算实现。

可见 根据式(6) 就可以计算出位置误差(抖动信号) 在任意频率区间 $[f_1,f_2]$ 之间的 RMS 值大小。最特殊的情况,取可以计算的最大频率区间,即 $f_1=0$ $f_2=\frac{f_N}{2}$ 式中: f_N 是 Nyquist 采样频率,此时 $RMS_p(f_1,f_2)$ 就刚好是时域计算出来的 RMS 值,也就是信号在整个频率区间内的均方根值,可见,时域分析方法中的 RMS 指标只是频域分析的一个特例。

综上 利用频域分析的方法 ,可以分析位置误差(即抖动信号) 的能量谱密度及在任意关心频率 区间内的 *RMS* 大小。

3 某型望远镜上抖动测量实验及结果分析

由于各种安装方式下的加速度信号的处理方式都是相同的,因此为简单起见,本节只

介绍一种安装方式下的实验及结果分析。被测对象为某1 m级以上地基光电望远镜,如图7 所示。



图 7 1 m 级望远镜设备 Fig. 7 1 m telescope

加速度计采用绕方位轴安装的方式,敏感轴在水平面内且与敏感半径垂直,此时加速度计测量的是望远镜沿方位轴系旋转的抖动。实验分为3步进行,分别为静态实验、开环实验和闭环实验。

3.1 静态实验

测试状态:望远镜不上电,处于静止状态,加速度计上电,此时加速度计的输出包含环境噪声、基座振动及加速度计本身的仪表误差等,1组加速度计的输出信号及其功率谱密度,如图8所示。

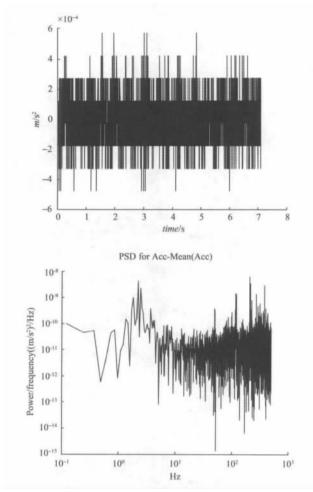


图 8 静态条件下加速度计的测量 信号及功率谱密度

Fig. 8 Acceleration and its PSD under static conditions

从加速度计输出的时域数据可以看出,虽然望远镜处于静止状态,但是由于环境噪声、地基振动及加速度计测量误差等的影响使得加速度计的输出并不是严格为 0。通过多组测量数据的功率谱密度分析结果可以看出,该扰动信号并非严格意义上的白噪声,功率谱密度有几个明显的尖峰,即有明显的特征频率,经分析该特征频率是由风载及工频干扰影响的。静态条件下各频率段的抖动 RMS值如表 1 所示 RMS值的量纲为毫角秒。

表 1 静态条件下各频率段的抖动 RMS
Table 1 Jitter RMS under static conditions

频率段	$0.5 \sim 10~\mathrm{Hz}$	$10 \sim 20 \text{ Hz}$	$20 \sim 100 \ \mathrm{Hz}$	100 ~ 500 Hz
抖动 RMS	208.442	4.093	7.274	0.068

从表 1 可以看出 ,静态条件下 ,位置抖动能量主要集中在 $0.5 \sim 10$ Hz 段 ,这主要是由低频风扰和地基振动引起的。

低频段的计算是从 0.5 Hz 开始的,而不是从 0 Hz开始的,这是因为由加速度信号计算到位置信号是经过 2 次积分运算完成的。而前面已经讲到,积分运算对于小于 1 Hz 的信号是有放大作用的,因而对于特别低频的加速度信号经过积分后会淹没在低频噪声信号中,低频段计算出的位置信号是不准确的,因此对位置信号的运算是从 0.5 Hz 开始的。

3.2 开环实验

开环实验目的是测量转台本身的机械特性,包括轴承、摩擦、齿槽力矩等的影响。测试状态: 对望远镜转台施加常值电压,此时如果不存在摩擦力矩、齿槽力矩、堵转力矩、外扰力矩等的影响,则转台应该按恒定速度做匀速运动,加速度信号为0。但是事实上,由于这些内部和外部扰动力矩的存在,使得转台的速率波动很大,导致加速度计的波动也很大。通过调整施加电压的大小来改变转台的开环转动速度,1个很明显的现象就是每1个速度下,加速度计的输出都存在一个与之对应的特征频率,而且该特征频率与速度成正比关系。将各速度下加速度采集信号的特征频率汇总如表2所示,经分析该加速度波动是由有刷力矩电机的齿槽效应引起的。

表 2 开环下加速度信号特征频率与速度的关系
Tabel 2 Reationship between characteristic frequency
and the velocity under open loop conditions

稳态平均速度 v/(°/s)	加速度的特征频率 f/Hz		
9.0	2.838		
21.0	6.317		
25.5	7.843		
27.0	8 423		

表 3 对各种情况下不同频率段抖动的 RMS 计算结果进行了汇总 表中各量的量纲是角秒 ,可见 ,在不加控制时 ,转台保持匀速运动的能力较差 ,而且低频段抖动量较明显 ,设计控制器时 ,可以有针对性地对之进行抑制。

表 3 开环条件下不同速度各频率段的抖动结果 Tabel 3 Jitter RMS under open loop conditions

	9°/s	21°/s	25.5°/s	27°/s
0.5 ~ 10 Hz	66.370	55.898	71.116	66.513
$10\sim 20~\mathrm{Hz}$	0.269	0.347	0.627	0.488
$20 \sim 100 \text{ Hz}$	0.052	0.069	0.079	0.084
100 ~ 500 Hz	0.004	0.006	0.009	0.011

3.3 闭环实验

实验目的是测量不同角速度运动条件下关心的各频率段内的抖动大小。测量速度分别取为 $0.1^\circ/s$ 、 $0.5^\circ/s$ 、 $1^\circ/s$ 、 $5^\circ/s$ 、 $10^\circ/s$ 、 $20^\circ/s$,图 9给出了速度为 $1^\circ/s$ 条件下的加速度信号 PSD 曲线及由其计算出的位置抖动的 PSD 曲线。

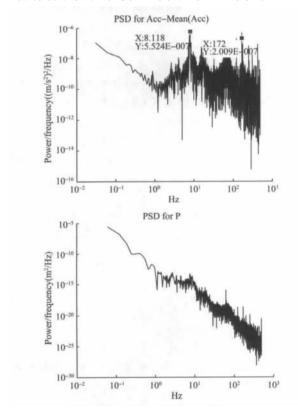


图 9 速度为 1°/s 时的加速度和 位置信号 PSD 曲线

Fig. 9 PSD figure for acceleration and position $(v = 1^{\circ}/s)$

表 4 对各种情况下不同频率段 Jitter 的 RMS 计算结果进行了汇总 ,表中各量的量纲是毫 角秒。

表 4 不同速度条件下各频率段的抖动结果 Tabel 4 Jitter RMS for different velocities

	0.1°/s	0.5°/s	1°/s	5°/s	10°/s
0.5 ~ 10 Hz	115.36	155.63	247. 13	343.31	239.90
$10\sim20~\mathrm{Hz}$	14.876	7.343	8.082	9.150	9.234
$20\sim100~\mathrm{Hz}$	2.293	1.779	1.454	1.949	2.692
100 ~ 500 Hz	0.101	0.105	0.107	0.103	0.103

从表 4 可以看出,闭环后,各频率段的抖动量明显降低,尤其是中低频段,各种速度下位置抖动RMS 值最大不超过 0.35",而在高频段(100~500 Hz),各种速度下的 Jitter 大小的变化不大,而且与静态条件下的数据比较变化也不大,该部分主要就是高频环境噪声等带来的影响,控制器对其是无能为力的。通过分析闭环抖动量的频谱特性,可以看出,闭环后的位置误差仍然集中在齿槽力矩引起的位置波动,因此需要考虑在机械设计上改进齿槽效应,以期达到更高的控制精度。

4 结 论

针对传统望远镜轴系精度评价方法的局限性,文章提出了一种利用惯性测量器件——加速度计来对大型光电望远镜的抖动进行测量的新方法,该测量方法从引起抖动的本质出发,能够全面反映出由系统内扰和外扰引起的在设备各种不同位置处的三维抖动信息,突破了传统使用编码器只能反映轴系精度的局限性,为更大口径望远镜的设计和评价提供了一种有效的手段。为了克服时域积分对加速度计测量低频干扰信号的放大作用的影响,文章提出利用频域积分来对位置抖动信号进行计算的新计算方法,该方法能够直接从加速度测量信号的频域特性,保证了位置信号统计特性的真实性。

通过在某 1 m 级以上望远镜上的一组实验,可以看出加速度计不但能敏感齿槽力矩、摩擦力矩等内扰力引起的抖动,还能敏感因外扰力——风阻、地基振动等带来的轴系及镜面抖动,是全面评价望远镜抖动性能的有效方法,该测量方法可以作为大型望远镜机械最优设计、控制带宽设计和系统最终性能指标评价的工具。

参考文献

- [1] SOBEK R D. Mitigating wind induced telescope jitter [J]. Proceeding of SPIE 2005 5810:1-10.
- [2] 赵长海,万秋华,孙莹. 光电轴角编码器的误码检测系统[J]. 电子测量与仪器学报,2012,26(5):463-468.
 - ZHAO CH H ,WAN Q H ,SUN Y. Code error detection system for photoelectric shaft encoder [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument ,2012 ,26(5): 463-468.
- [3] 孙莹 ,万秋华 ,王树洁. 小型光电编码器细分误差补偿系统 [J]. 电子测量与仪器学报 ,2012 ,26(8): 699-704.
 - SUN Y, WAN Q H, WANG SH J. Interpolation error compensation system of mini-type photoelectrical encoder [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument 2012 26(8):699-704.
- [4] ERM T. Analysis of tracking performance [J]. Proceeding of SPIE 1997 2871: 1032-1040.
- [5] WARNER C M ,VICTOR K ,GERMAN S ,et al. SOAR Telescope: 4 meter high performance mount performance results [J]. Proceeding of SPIE 2004 ,5495:77-86.
- [6] 王涛 宋立维 车载经纬仪的测量误差修正[J] 仪器 仪表学报 2012 33(2):469-473.

 WANG T SONG L W. Measurement error correction of vehicular theodolite [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2012 33(2):469-473.
- [7] 孔德杰 戴明 程志峰 等 动基座光电稳定平台伺服 系统中加速度反馈的实现 [J]. 光学精密工程 2012, 20(8):1782-1788.
 - KONG D J DAI M CHENG ZH F. Realization of acceleration feedback for servo system of moving base optoelectronic platform [J]. Optics and Precision Engineering 2012 20(8):1782-1788.
- [8] 丁科 ,黄永梅 ,马佳光 ,等. 抑制光束抖动的快速反射 镜复合控制 [J]. 光学精密工程 ,2011 ,19(9): 1991-1998.
 - DING K ,HUANG Y M ,MA J G ,et al. Composite control of fast-steering-mirror for beam jitter [J]. Optics and Precision Engineering 2011 ,19(9):1991-1998.
- [9] 唐涛,黄永梅,付承毓,等. 跟踪系统中多闭环控制模式的分析和实现[J]. 光电工程,2008,35 (7):1-5.
 - TANG T ,HUANG Y M ,FU CH Y ,et al. Analysis and design of multi-close loops control mode for tracking

- control system based on acceeration feedback [J]. Opto Electronic Engineering 2008 35(7):1-5.
- [10] 孔德杰 程志峰 沈宏海 等 动基座光电平台伺服系统扰动力矩抑制能力仿真与分析[J]. 长春理工大学学报 2011 34 (2):67-69.
 - KONG D J ,CHENG ZH F ,SHEN H H ,et al. Simulation and analysis of resisting disturbance moment of servo system of moving base electro-optical platform [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology 2011 34 (2):67-69.
- [11] 徐国柱 刘樾 孟凡军. 利用加速度反馈改善转台低速性能 [J]. 中国惯性技术学报 ,2008 ,16 (4): 502-504.
 - XU G ZH ,LIU Y ,MENG F J. Improving low-rate performance of turntable by acceleration feedback [J]. Journal of Chinese Inertial Technology ,2008 ,16 (4): 502-504.
- [12] TANG T ,HUANG Y M ,FU CH Y ,et al. Acceleration feedback control for low velocity friction in servo control system [J]. Proceeding of SPIE 2009 7281:1-6.
- [13] SEDGHI B ,BAUVIR B ,DIIMMLER M. Acceleration feedback control on an AT [J]. Proceeding of SPIE , 2008 ,7012: 1-42.
- [14] JIM MAYO ,Mechanical jitter measurement results for large ground based telescope [J]. Proceeding SPIE , 2004: 98-103.
- [15] NOBUHARU UKITA HAJIME EZAWA SACHIKO ON-ODERA et al. Wind induced pointing errors and surface deformation of a 10-m submillimeter antenna [J]. Proceeding of SPIE 2010 7733:1-11.

作者简介

杨晓霞 ,1984 年出生 ,2005 年于山东大学数学与系统科学学院获得学士学位 ,2010 年于中国科学院数学与系统科学研究院获得博士学位 ,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所助理研究员 ,主要研究方向为大型光电设备的精密跟踪控制等。

E-mail: yxxair@ 163. com

Yang Xiaoxia was born in 1984, received B. Sc. from Shandong University in 2005 and Ph. D. from Academy of Mathmatics and System Sciences, Chinese Academy of Science. Now she is an assistant researcher in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. Her present research interests include fine tracking and control for large ground based telescopes.