

文章编号 1004-924X(2013)02-0408-08

大口径光学望远镜油垫非线性干扰的检测与抑制

杨世海^{1,2,3*}

- (1. 中国科学院 国家天文台 南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;
2. 中国科学院 南京天文光学技术研究所 天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:研究了静压油垫带来的非线性干扰对大口径天文光学望远镜跟踪精度的影响。分析了油垫干扰的成因;综合采用加速度计法和编码器法,精确测得了油垫的非线性干扰频率;通过分析油垫开启前后的振动曲线、编码器位置曲线及其快速傅里叶变换(FFT)曲线,提出了油垫液压振动是一种窄带干扰。然后,采用 Notch 数字滤波器,将陷波频率设置在主要干扰频率处来抑制油垫液压振动干扰。给出了滤波器的具体设计过程及其 Bode 图和零极点图。当需要调整油膜厚度时,可改变 Notch 参数来适应干扰频率的变化。最后,给出了带 Notch 滤波器的控制系统和滤波结果。仿真和 2.5 m 天文望远镜的实验结果表明:通过检测并抑制油垫 0.825 Hz 的主要干扰,望远镜可在保证运动控制系统原有的稳定性和响应能力的情况下,方位轴跟踪精度达到 RMS 值为 0.0837",PV 值为 0.571"。相对于脉动衰减装置,该方法灵活、简单、通用性好。

关键词:天文望远镜;油垫;非线性干扰;跟踪;陷波

中图分类号:TH751 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132102.0408

Detection and suppression of oil pad nonlinear disturbance for large optical telescope

YANG Shi-hai^{1,2,3*}

- (1. *National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;*
 2. *Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;*
 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*
- * *Corresponding author, E-mail: shyang@niaot.ac.cn*

Abstract: This paper explores the effect of nonlinear disturbance of a static pressure oil pad in an optical astronomical telescope on the tracking accuracy. Firstly, the causes of oil pad disturbance are analyzed and the frequencies of nonlinear disturbances are measured accurately with accelerometers and an encoder. By analysis of the vibration curve of the accelerometer, the position curve and Fast Fourier Transfer(FFT) curve of the encoder when the oil pad is turning on or turning off, it points out that

收稿日期:2012-09-25;修订日期:2012-10-29.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 11073034, No. 10903033);江苏省“333 高层次人才培养工程”资助项目

the vibration of oil pad is narrow band interference. Then, a Notch filter is proposed to suppress the oil pad disturbance by setting the central frequency at the main disturbance frequency. The design process of the proposed method is discussed in detail. The bode diagram and the zero-pole map of Notch filter are given. When oil film thickness needs to be changed, the Notch frequency band can be adjusted flexibly by changing the parameters of Notch filter. Finally, the control system with Notch filter is implemented and filtering results are shown. Simulation and experimental results of tracking and pointing on a 2.5 m astronomical optical telescope indicate that the tracking precision of the azimuth system is 0.083 7"RMS and 0.571"PV by measuring and eliminating the main noise at 0.825 Hz. As comparing with pressure fluctuation attenuation devices, the proposed method shows the advantages of convenience, flexibility and good universality.

Key words: astronomical telescope; oil pad; nonlinear disturbance; tracking; notch

1 引言

1938年,美国帕罗马尔山天文观测站的一台500 t望远镜最先使用了静压油垫^[1],即在一对平滑表面间注入液压油,形成压力油膜起到托起载荷并润滑轴承面的作用,这个支承系统称为望远镜的静压油垫系统。它的优点是:轴承润滑面的刚度高,寿命长,起动功率小,可以承载极大的载荷,动静摩擦变化小。由于望远镜使用油垫后运动平稳,精度高,此后许多大型天文光学望远镜都采用这种支承方式^[2-4],例如目前已经建成的世界口径最大的Keck望远镜(10 m口径)、8.2 m口径的SUBARU、8 m口径的GEMINI和VLT。中国口径最大的LAMOST望远镜——郭守敬望远镜、2.16 m望远镜、上海天文台佘山观测站的1.56 m望远镜、中法合作为俄罗斯研制的2.5 m望远镜同样采用了静压油垫。

油膜压强来自于液压泵。液压泵的吸油、压油循环会导致流体周期性的流量变化。流量脉动在遇到系统阻抗后产生压力脉动,最终引发液压振动,并经管道和出口向整个望远镜系统传播。

天文光学望远镜是对跟踪精度要求极高的精密光学仪器,例如Keck望远镜设计要求10 min开环跟踪精度为0.1" RMS^[5]。而大型天文望远镜的主轴系统在超低速运行中,油垫液压振动这种非线性干扰对性能的影响比较明显,造成跟踪不平稳,跟踪精度下降,星像在视场中抖动。一般在设计与装调油垫系统时,可以采取机械手段加以解决^[6]:(1)齿轮泵齿数尽量多,模数尽量

小,合理设计在泵盖上开的卸载槽形状和尺寸,尽量减少柱塞泵的困油,这样可减少压力脉动;(2)防止泵产生气穴现象,采用直径较大的吸油管,以减小管道局部阻塞;(3)避免液压缸活塞杆弯曲变形或油封过紧。但是装调好的油垫往往还存在一定振动,有时直接导致望远镜跟踪精度不能满足要求。由于重新设计或改造油垫代价高,这时望远镜通常采取的办法是使用脉动衰减装置,即液压脉动滤波器或蓄能器^[7]。脉动衰减装置种类较多,滤波效果也各有千秋。不过采用脉动衰减装置共同的缺点是^[7-8]:(1)若液压泵的转速恒定或变化范围小,则利用脉动衰减装置可以有效地降低脉动;若液压泵的转速变化范围大,油垫液压振动的频带会发生转移,则必须更换其它合适频段的衰减装置;(2)购买脉动衰减装置的代价较高。

本文研究发现,油垫液压振动干扰是一种窄带干扰。窄带干扰的成因是周期性的液压振动,存在多条窄带的原因是液压振动包含了多个频率的振动谐波。多频率谐波出现的原因是液压泵流量脉动和压力脉动都具有周期性,而传输管道有固有频率,流体亦有频率特性^[9],它们重叠、耦合在一起。采用数字Notch滤波器,将陷波频率设置在振动频率处,可以滤除振动对位置反馈的影响。Notch是去除油垫液压振动窄带干扰的理想数字滤波器,可以消除确定频率的干扰信号而不对其他频率有衰减。本文提出了把Notch滤波器加入到望远镜运动控制系统中,构成带Notch滤波器的速度和加速度前馈的PID复合控制方式。该方法在2.5 m口径的天文光学望远镜上得到了验证,实验证明通过精心设计陷波器的参

数,可以抑制望远镜油垫系统的扰动,使望远镜跟踪精度达到光学设计的要求,同时能保证运动控制系统原有的稳定性和响应能力。

2 油垫非线性干扰的检测

俄罗斯 2.5 m 望远镜要求跟踪误差小于 $0.2''$ RMS, PV 值小于 $0.7''$ 。由于这是包含光机电误差在内的总允许误差,分配给方位轴跟踪系统的误差小于 $0.1''$ RMS。而油垫造成的误差不能大于 $0.03''$ (PV),否则对控制系统其它部分的要求就太高,成本也过高。

2.1 干扰检测的加速度计法

如图 1 所示,把 2 个加速度传感器分别放置在 2.5 m 口径望远镜方位轴的基座上 and 油垫的齿轮分油器上,其中望远镜连同基座位于隔振平台上。加速度计的型号为 DJB A/800,检测灵敏度可达 $8 \times 10^{-6} g$,最低测试频率可达 1 Hz。加速度计的信号通过 ADC 控制卡 ACC-28E+OPT-1 输入 UMAC 运动控制器,并经过 Ethernet 总线进入工控机。

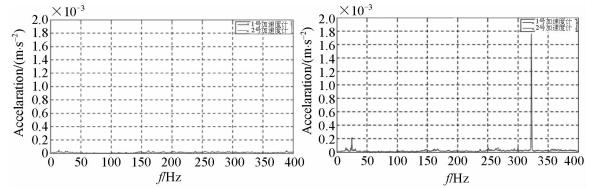


(a)方位轴基座 (b)齿轮分油器
(a)Basement of azimuth (b)Gear oil separator

图 1 加速度计放在不同的位置

Fig. 1 Accelerometers in different places

在油垫关闭状态,望远镜静止,测得 2 个加速度计的信号,并且绘制出加速度与频率的关系曲线;在油垫开启状态,即液压泵的变频调速电机运行,望远镜静止,测得 2 个加速度计的信号,并且绘制出加速度与频率关系曲线如图 2 所示。对比两曲线,可以发现,油垫开启后,望远镜方位轴基座和齿轮分油器振动曲线在 24.75 Hz 和 322 Hz 2 个频率处同时出现了振动峰值,干扰成窄带状,2 个加速度计的曲线相当吻合。说明方位轴转台基座的该频率段振动来自油垫液压系统,而不是源于系统结构谐振。



(a) 油垫关闭 (b) 油垫开
(a) Oil pad is off (b) Oil pad is on

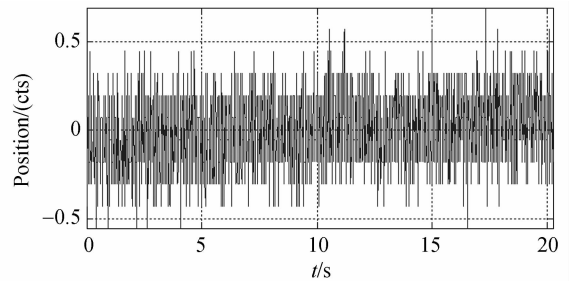
图 2 方位轴基座振动曲线

Fig. 2 Vibration curves of azimuth basement

2.2 干扰检测的编码器法

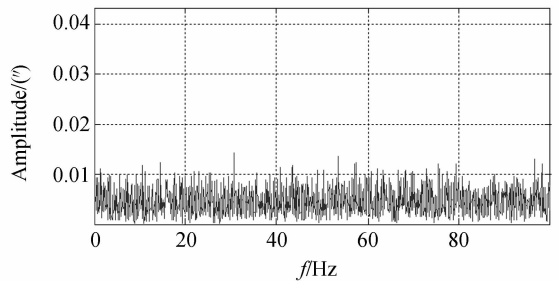
为了进行对比检测与验证,进一步采用编码器法。望远镜方位轴的位置传感器采用钢带光栅编码器,德国 HEIDENHAIN 公司的 ERA780C,其信号通过 ACC-51E 卡 4096 倍细分后输入 UMAC 运动控制器,并经过 Ethernet 总线进入工控机。该钢带编码器安装在基座内部,安装位置接近油垫系统,其信号会受到液压振动的影响。

在油垫关闭状态,望远镜静止,测得光电编码器的信号,在一段时间内连续采样,绘制出编码器数据曲线(即望远镜的位置曲线)以及快速傅里叶变换(FFT)曲线,如图 3 所示。在油垫开启状态,



(a) 位置曲线

(a) Position curve



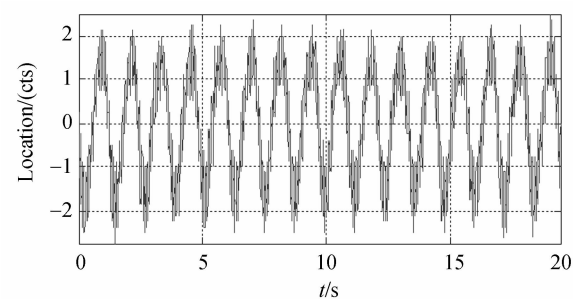
(b) FFT 曲线

(b) FFT curve of encoder

图 3 不开油垫时编码器数据曲线

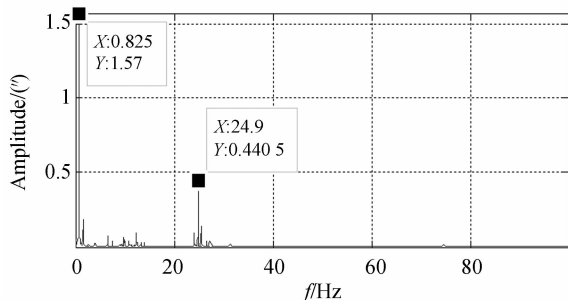
Fig. 3 Data curves of encoder when oil pad is off

望远镜静止,主动采集编码器的数据进行分析,并采用FFT法将其由时域信号变为频域信号,进行频谱分析,如图4所示。



(a) 位置曲线

(a) Location curve



(b) FFT 曲线

(b) FFT curve of encoder

图4 开油垫时编码器数据曲线

Fig. 4 Data curves of encoder when oil pad is on

对比加速度曲线和(FFT)曲线,在油垫开启的情况下,编码器数据波动加大,幅度达5 cts(相当于 $0.07''$),波动周期性强,从中可以读出0.825 Hz和24.75 Hz的频率响应,干扰成窄带状,但是没有出现322 Hz的频率峰值。这种差异显示,322 Hz的振动仅仅传递到方位轴的基座,而位置测量元件处于对此频率振动不敏感的位置,编码器读数没有受到影响,即此振动没有进入控制回路,所以控制系统不会产生该频率的控制信号,从而不会促使执行机构产生对应322 Hz的控制力。另外,0.825 Hz的干扰未能被加速度计反映,是由于此加速度计的频率限制。

3 油垫非线性干扰的抑制

上节的数据显示,液压系统对转台的冲击,传递到作为位置反馈元件的反射式钢带光栅码盘上。这种码盘是将光栅刻在金属环带外侧环面上。金属环带和读数头分别固定在望远镜的转动轴与不动基座上。数据分析已经证明,油垫液压振动的干扰是一种在固定频率处的窄带干扰,油垫的周期性振动导致了非接触的光栅和读数头发生了相对位移。读数头的红外发光管发出的光照射到金属环带的光栅上^[10],从反射的莫尔条纹光信号提取出的位置信号,以及从该位置信号提取出的速度、加速度包含了油垫液压振动的分量,从而影响了系统的运动控制。因此有必要对位置反馈信号进行滤波以抑制位置振动信号。下面采用Notch数字滤波器,滤除油垫系统最主要的干扰,其频率为0.825 Hz。

用Notch滤波器,将陷波频率设置在振动频率处,可以抑制振动。另外亦可以考虑对码盘信号高频采样,然后用低通滤波器滤波。由于希望滤除的频带较低,低通滤波会导致系统快速性不够,望远镜实时跟踪性能受影响,故论文通过陷波滤波器来消除系统中谐振的影响。陷波滤波器属于带阻滤波器的一种特殊情况,它的阻带很窄,理想陷波滤波器的频率响应公式为:^[11]

$$|H(e^{j\omega})| = \begin{cases} 1, & \omega \neq \omega_0 \\ 0, & \omega = \omega_0 \end{cases}, \quad (1)$$

本文采用的Notch滤波器的时域传递函数为:

$$G(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_z \omega_{nz} + \omega_{nz}^2}{s^2 + 2\zeta_p \omega_{np} + \omega_{np}^2}, \quad (2)$$

其中, ω_{nz} 为零点的自然频率, ζ_z 为零点的阻尼系数, ω_{np} 为极点的自然频率, ζ_p 为极点的阻尼系数。

陷波器是无限冲击响应(IIR)数字滤波器,该滤波器可以用以下常系数线性差分方程表示:

$$y(n) = \sum_{i=0}^M a_i x(n-i) - \sum_{i=1}^N b_i y(n-i), \quad (3)$$

式中, $x(n)$ 和 $y(n)$ 分别为输入和输出信号序列, a_i 和 b_i 为滤波器系数。

对式两边进行 z 变换,得到数字滤波器的传

递函数为:

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^M a_i z^{-i}}{\sum_{i=0}^N b_i z^{-i}} = \frac{\prod_{i=1}^M (z - z_i)}{\prod_{i=1}^N (z - p_i)} \quad (4)$$

式中, z_i 和 p_i 分别为传递函数的零点和极点。

频率响应在零点出现极小值, 在极点出现极大值。所以根据所需频率响应配置零点和极点, 可以设计 Notch 数字滤波器。设计于干扰频率处出现凹陷, 极点越靠近单位圆, 则频率响应曲线凹陷越深, 凹陷的宽度也越窄。

采样周期为 $T_s = 0.005 \text{ s}$, 由于本系统测得的有油垫干扰下的响应频率 $\omega = 0.825 \text{ Hz}$, 即希望将待滤除的 0.825 Hz 信号作为滤波器中心频率。

设置一个轻阻尼带阻滤波器: 自然频率 $\omega_{nz} = 0.825 \text{ Hz} = 2\pi \times 0.825 = 5.1836 \text{ rad/s}$, 伺服系统闭环采样周期 $T_s = 0.005 \text{ s}$, 阻尼系数为 $\zeta_z = 0.04$ 。

设置一个重阻尼的带通滤波器: 自然频率 $\omega_{np} = 0.1425 \text{ Hz} = 2\pi \times 0.1425 = 8.9535 \text{ rad/s}$, 阻尼系数为 $\zeta_2 = 0.8$ 。求得各参数^[12]如下:

$$\alpha_z = 1 + 2\zeta_z \omega_{nz} T_s + \omega_{nz}^2 T_s^2 = 1.0027 \quad (5)$$

$$\alpha_p = 1 + 2\zeta_p \omega_{np} T_s + \omega_{np}^2 T_s^2 = 1.0736 \quad (6)$$

$$n_1 = -\frac{2\zeta_z \omega_{nz} T_s + 2}{\alpha_z} = -1.9966 \quad (7)$$

$$n_2 = \frac{1}{\alpha_z} = 0.9973 \quad (8)$$

$$d_1 = -\frac{2\zeta_p \omega_{np} T_s + 2}{\alpha_p} = -1.9296 \quad (9)$$

$$d_2 = \frac{1}{\alpha_p} = 0.9314 \quad (10)$$

从而得到

$$\frac{N(z)}{D(z)} = \frac{1 + n_1 z^{-1} + n_2 z^{-2}}{1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2}} = \frac{1 - 1.9966z^{-1} + 0.9973z^{-2}}{1 - 1.9296z^{-1} + 0.9314z^{-2}} \quad (11)$$

原比例增益 P 必须同 Notch 滤波器直流增益的倒数相乘以保持整个滤波器的刚度。

$$P_{\text{new}} = P \cdot \frac{\omega_{np}^2 \alpha_z}{\omega_{nz}^2 \alpha_p} = \frac{(8.9535)^2 \cdot 1.0027}{(5.1836)^2 \cdot 1.0736} P = 2.786P \quad (12)$$

该 Notch 滤波器的 Bode 图如图 5 所示, Notch 滤波器的零极点图如图 6 所示, 可见数字

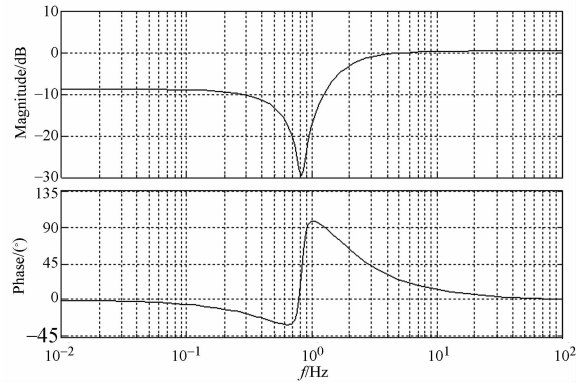


图 5 Notch 滤波器的 Bode 图

Fig. 5 Bode diagram of Notch filter

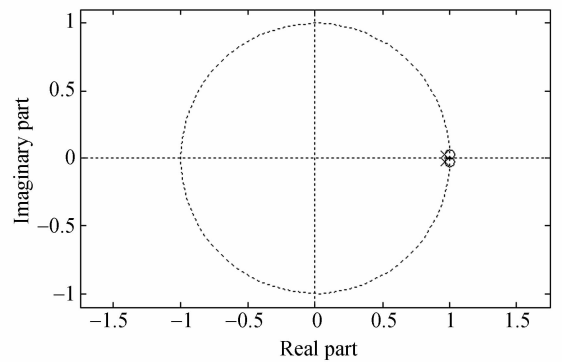


图 6 Notch 滤波器的零极点图

Fig. 6 Zero-pole map of Notch filter

Notch 滤波器的零点和极点呈共轭对称分布, 且所有极点都位于单位圆内, 零点为 $0.9983 \pm 0.0258i$, 极点为 $0.9648 \pm 0.0250i$, 满足系统稳定性的要求。

加入所设计的 Notch 滤波器, 2.5 m 望远镜方位轴控制系统框图如图 7 所示, 使用该滤波器的效果如图 8 所示。成功滤除了影响最大的干扰频率, 即 $\omega = 0.825 \text{ Hz}$ 的低频干扰, 幅值相当于 $0.07''$ 。 24.75 Hz 的振动干扰, 其峰谷值 2 cts , 相当于 $0.028''$, 其值已经在指标要求的 $0.03''$ 内。

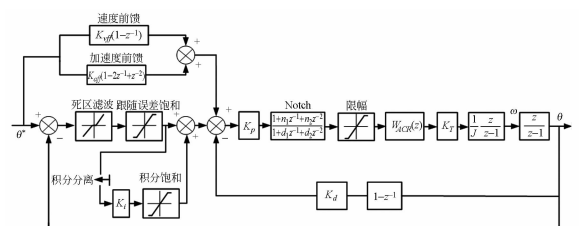
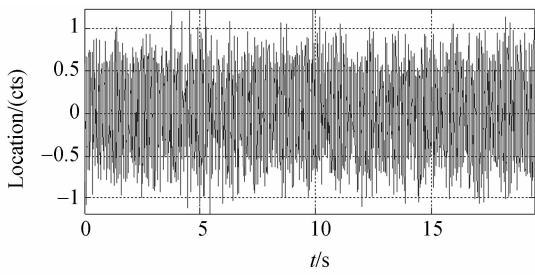
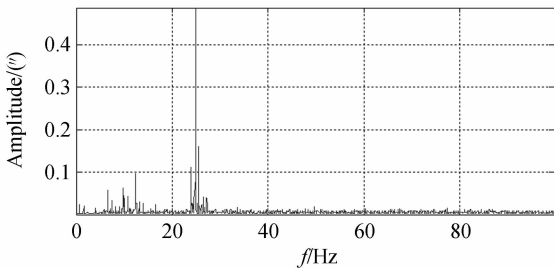


图 7 望远镜方位轴控制系统框图

Fig. 7 Block diagram of azimuth control system



(a) 位置数据
(a) Position curve



(b) FFT 曲线
(b) FFT curve

图 8 Notch 滤波后的结果
Fig. 8 Notch filtering results

对于这个尚存的影响较小的干扰频率,可以采用 2 个 Notch 滤波器串联的方式滤除。实践中,如果还有更多干扰频率,甚至可以采用多个 Notch 串联,形成梳状滤波器。不过,对于实验对象 2.5 m 望远镜,实验证明此时已经满足了跟踪精度的要求,所以为了减小控制系统阶数,便于实现,只采用了 1 个 Notch 滤波器。

4 仿真与实验

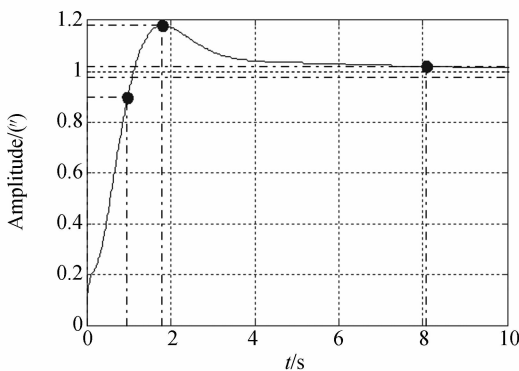
Notch 对望远镜系统的关键性能如稳定性、快速响应能力是否产生不良影响,是一个需要重视的问题。以下为仿真和 2.5 m 望远镜方位轴运行实验。

4.1 仿真验证

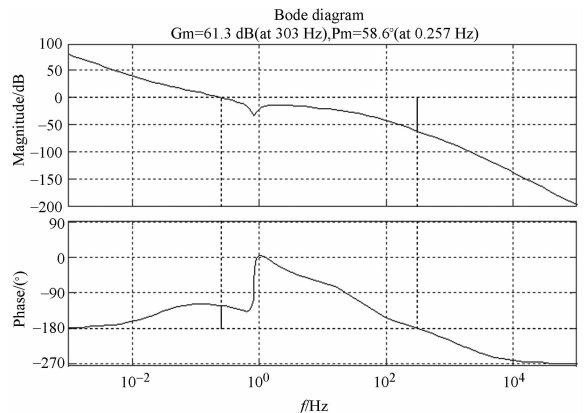
为保证系统的稳定性不被 Notch 破坏,前文特别精心设计了 Notch 的参数,严格限定其陷波的频率、宽度和深度。图 7 所示串入陷波器后控制系统的闭环传递函数为:

$$\Phi(s) = \frac{32\ 062\ 921.247\ 6(s+52.75)(s+200)^2(s+1.092)(s+0.167\ 5)(s^2+0.414\ 7s+26.87)}{(s+10\ 000)(s+200)^3(s+192.8)(s+16.62)(s+1.505)(s+0.180\ 9)(s^2+3.139s+4.765)}$$

(13)



(a) 闭环阶跃响应曲线
(a) Response curve for closed-loop step



(b) 开环 Bode 图
(b) Bode diagram for open loop

图 9 方位轴控制系统仿真曲线

Fig. 9 Simulation curves of azimuth control system

Notch 串联于 2.5 m 望远镜控制系统中,使用 MATLAB 仿真。得到开环频率特性,幅值稳定裕度 $L_h=61.3$ dB,相角稳定裕度 $\gamma=58.6^\circ$,系统的开环剪切频率 $\omega_c=1.6$ Hz。系统的闭环带宽频率 $\omega_b=3.0$ Hz。单位阶跃响应的超调量 $\sigma\%=17.0\%$,2%误差带调节时间 $t_s=8.1$ s。这些数据证明了运动控制系统稳定,响应能力较好。方位轴控制系统的闭环阶跃响应曲线和开环 Bode 图如图 9 所示。可见本文所采用的方法是一种去除油垫液压振动窄带干扰的理想方法。

4.2 实验验证

进一步在 2.5 m 望远镜的方位轴上进行实验。望远镜的指向跟踪过程如图 10 所示。望远镜关心指向到跟踪切换的过程,该过程不仅反映了望远镜的性能,而且此过渡时间对望远镜的观测效率有较大的影响。该过程即为图中的下降沿,相当于一个阶跃响应,反映了系统的动态性能。

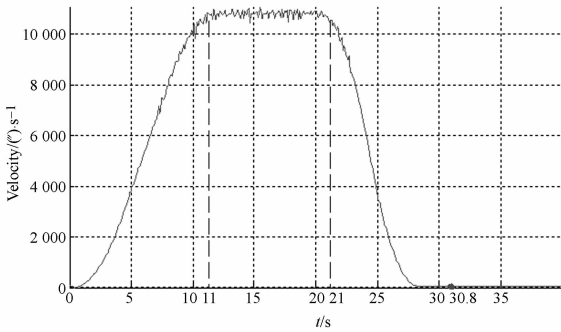


图 10 方位轴过渡过程速度曲线

Fig. 10 Velocity curve of transient process of azimuth

方位轴从静止加速到 $3^\circ/\text{s}$,为清楚显示运动过程,特别保持此速度一段时间后(约 10 s),减速并开始跟踪速度为 $45''/\text{s}$ 的运动目标。

从图 10 中可见,过渡过程时间即从 $3^\circ/\text{s}$ 降速到 $45''/\text{s}$ 并达到精度要求的时间为 9.8 s,且整个过渡过程运动平稳。考虑到该望远镜方位轴油垫承载的旋转部件重达 32 t,转动惯量高达 $116\,060.00\sim 100\,744.57\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (望远镜运转时转动惯量是个变化量),且实验是在最高指标速度 $3^\circ/\text{s}$ 的情况下进行,方位轴的表现还是令人满意的。

望远镜的方位轴低速跟踪 $45''/\text{s}$ 的匀速目标,共 11 min 数据,如图 11 可知,方位轴跟踪精度达到 $0.083\,7''\text{RMS}$,满足了天文观测的要求。

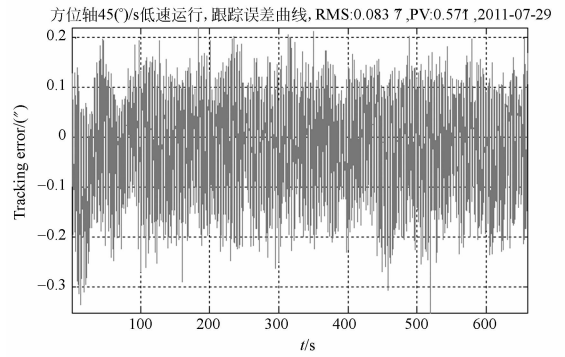


图 11 方位轴低速跟踪实验误差曲线

Fig. 11 Tracking error curve of azimuth at low speed

5 结论

本文针对大口径天文光学望远镜跟踪精度要求高、油垫液压振动带来非线性干扰的实际情况,提出了综合运用位置编码器和加速度计检测和分析油垫液压振动窄带干扰。本文研究发现,油垫液压振动对望远镜跟踪精度造成影响的干扰是一种窄带干扰,因此,提出采用 Notch 滤波器抑制油垫液压振动中的主要干扰。实践证明,该方法可以精确得到油垫系统对望远镜的干扰频率,并使信号在油垫液压振动响应频率附近衰减很大,而其余部分几乎不受影响。这样 Notch 滤波器对期望频段内的信号有抑制作用,而不影响系统其它频段的跟踪性能。如果希望改变油膜厚度,油垫的振动频率会随液压泵的转速而改变。传统的脉动衰减装置必须更换,很不方便,也不经济。而本文的方法通过修改参数即可灵活改变滤波器的频段,有较强的实用价值。另外,本方法与采用脉动衰减装置并不冲突,完全可以视情况同时采用。

中法合作的俄罗斯莫斯科大学 2.5 m 天文光学望远镜,其方位轴油垫系统采用此方法,实测方位轴跟踪精度 RMS 值达到 $0.083\,7''\text{RMS}$,PV 值达到 $0.571''$;从 $3^\circ/\text{s}$ 降速到 $45''/\text{s}$ 并达到精度要求,过渡时间为 9.8 s。仿真与实验结果证明,该方法满足了望远镜跟踪精度和动态响应的要求。

6 致谢

感谢 Alain Fournol 博士提供了振动测试方

面的部分数据。感谢徐进工程师和 Cyril Cava-

dore 博士在本文实验中的配合与帮助。

参考文献:

- [1] 董增勇. 微型动静压主轴温度对动态特性影响的理论与实验研究[D]. 浙江:浙江工业大学, 2011.
DONG Z Y. *Theoretical and experimental study on temperature influence on the dynamic characteristics of small hybrid spindle* [D]. Zhejiang: Zhejiang University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [2] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 327-336.
ZHANG J X. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 327-336. (in Chinese)
- [3] 王槐, 代霜, 张景旭. 大型地平式望远镜的方位轴系支撑结构[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1509-1516.
WANG H, DAI SH, ZHANG J X. Azimuth shafting bearing structure in a large Alt-azimuth telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1509-1516. (in Chinese)
- [4] GU B ZH, WANG G M, JIANG X, *et al.*. Introduction of a 2.5m telescope mount and its performance [J]. *SPIE*, 2010, 7733: H1-H7.
- [5] JERRY E N, PETER R G. Overview of the performance of the W. M. Keck observatory [J]. *SPIE*, 1994, 2199: 82-93.
- [6] 李丽云. 液压系统常见振动与噪声的分析与解决措施[J]. 液压气动与密封, 2011, (1): 5-6.
LI L Y. Analysis and measure on common vibration and noise in hydraulic system [J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2011, (1): 5-6. (in Chinese)
- [7] 邢科礼, 葛思华, 丁崇生, 等. 新型串联囊式蓄能器对油源压力脉动影响的试验研究[J]. 机床与液压, 1998, (1): 39-40.
XING K L, GE S H, DING CH SH, *et al.*. Experimental study of the effect of new series connected bag accumulator on pressure pulsation of oil source [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 1998, (1): 39-40. (in Chinese)
- [8] 何志勇, 何清华, 贺尚红, 等. 基于流体-结构耦合振动的液压脉动滤波器试验研究[J]. 中国造船, 2012, 53(1): 137-144.
HE ZH Y, HE Q H, HE SH H, *et al.*. Experimental research on fluid pulsation attenuator filtering based on fluid-structure coupling vibration mechanism [J]. *Shipbuilding of China*, 2012, 53(1): 137-144. (in Chinese)
- [9] 付永领, 荆慧强. 航空液压系统脉动衰减技术的发展[J]. 液压与气动, 2012, (2): 3-7.
FU Y L, JING H Q. The development of fluctuation attenuation technology for aviation hydraulic system [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2012, (2): 3-7. (in Chinese)
- [10] 盖竹秋, 程志峰. 钢圈反射式光栅信号的补偿 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2947-2953.
GAI ZH Q, CHENG ZH F. Compensation of signal for reflective grating engraved on steel ring [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2947-2953. (in Chinese)
- [11] 张维奎. 巴特沃斯数字陷波滤波器的设计[J]. 现代电子技术, 2008, 31(18): 129-131.
ZHANG W X. Design of digital Butterworth notch filter [J]. *Modern Electronic Technique*, 2008, 31(18): 129-131. (in Chinese)
- [12] DELTA TAU DATE SYSTEMS, INC. TURBO PMAC USER MANUAL [Z]. 2008, 154-156.

作者简介:



杨世海(1973—),男,安徽凤阳人,博士,副研究员,2005年、2012年于中国科学院研究生院分别获得硕士、博士学位,主要从事天文仪器的精密测量和运动控制方面的研究。E-mail: shyang@niaot.ac.cn