

文章编号 1004-924X(2007)02-0254-07

光电跟踪系统噪声分析及其抑制

李文军, 陈 涛

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:噪声是光电跟踪系统的一个关键问题。分析了影响光电跟踪系统跟踪性能两种主要噪声-脱靶量噪声和力矩波动引起的噪声,及其与闭环带宽的关系。从抑制噪声的角度综合给出了速度回路和位置回路带宽的设计策略。分析表明,高的速度回路和位置回路带宽有利于抑制力矩波动引起的随机噪声,而对脱靶量噪声而言,低位置回路有利于对该噪声的抑制。进一步分析表明,力矩波动主要对速度回路的影响较大,也主要靠速度回路来抑制。力矩波动引起的随机跟踪误差比脱靶量噪声引起的随机跟踪误差小一个数量级,约为后者的 $1/6\sim 1/10$ 。因此在设计位置回路带宽时,可以不考虑力矩波动的影响。

关键词:光电跟踪;随机噪声;力矩波动;脱靶量;带宽

中图分类号:V556.5 **文献标识码:**A

Analysis and restraining of random noise of optoelectronic tracking system

LI Wen-jun, CHEN Tao

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

Abstract: Random noise is one of the key problems in the optoelectronic tracking systems. Two kinds of primary noise affecting the tracking performance-the noise of tracking error and the noise caused by momentum fluctuation and their relationship with the closed bandwidth are analyzed. Then the design strategy of the bandwidths of the velocity loop and the position loop are discussed. The analysis results show that the higher bandwidths of the velocity loop and the position loop are favorable to restrain the random the noise caused by momentum fluctuation. While it's just reverse to the random noise caused by tracking error. Further analysis shows that the magnitude or the power of the output noise produced by the momentum fluctuation is lower than that caused by the tracking error by a quantitative level, about $1/6\sim 1/10$ of the latter, So the noise of momentum fluctuation can be ignored in the decision of the control bandwidth.

Key words: optoelectronic tracking; random noise; momentum fluctuation; tracking error; bandwidth

1 引言

当前,对光电跟踪系统的跟踪精度要求越来越高,其本身的噪声问题日益突出。如在复合轴光电跟踪系统中,子系统主要用来克服主系统的系统误差和随机误差,复合轴系统最终的性能取决于其对主系统随机误差的抑制能力^[1]。因此噪声成为复合轴控制系统的关键问题,需要对主系统的随机误差进行分析。但是目前有关光电跟踪系统噪声的文献较少。本文对影响光电跟踪系统跟踪性能的两种主要随机噪声进行了分析,并从抑制噪声的角度给出了光电跟踪系统速度回路和位置回路带宽的设计策略,对高精度光电跟踪系统的设计具有重要的指导意义。

2 经纬仪的两种主要噪声分析

2.1 力矩波动引起的随机噪声

电机本身的力矩波动包括电磁场相互作用产生的波动、齿槽效应引起的波动和导体换向时引起的波动^[2]。其中,电磁场相互作用产生的波动与磁场分布有关,是产生力矩波动的主要因素。齿槽效应与导体分布有关,导体分布均匀,则力矩波动均匀,是一种周期性的小波动。对外表现为同电机转子的位置及转子电流大小有关^[3]。电流为常数时,它同电机转子的位置有一定的关系,并且有很好的重复性,与转速成固定倍数的周期函数。导体换向时可引起电枢电流的变化,导致速度波动。

根据我国成都精密电机厂生产的某型号力矩电机技术说明,其力矩波动系数为 1.4%。根据长春光机所自行研制的力矩电机技术说明,其力矩波动系数为 0.75%。考虑到风阻、摩擦、负载扰动等因素,本文在力矩波动的研究中将其定为 3%。

2.2 脱靶量噪声

造成脱靶量随机误差的因素有 CCD 分辨率误差、大气抖动、信号处理误差等^[4]。其中 CCD 分辨率误差、大气抖动是造成脱靶量随机误差的主要因素。

CCD 分辨率误差与 CCD 视场大小和像元数有关^[5]。以主系统所采用的 CCD 为例,在 1 m 焦

距下,该 CCD 的视场为 $0.68^\circ \times 0.68^\circ$,像元数 $1\,024\text{ pixel} \times 1\,024\text{ pixel}$,则脱靶量的结尾误差为:

$$\frac{0.68^\circ \times 3600''}{1024} = 2.4''.$$

由于结尾误差服从均匀分布,其均方值为 $\frac{2.4''}{2\sqrt{2}} = 0.84''$ 。

大气抖动将造成像点位置和像上的密度发生随机起伏,同时还会造成像的弥散扩大或不规则的随机弥散,从而产生随机测量误差^[6]。

大气抖动对目标成像的影响取决于大气状况。根据我国 718 电影经纬仪项目组在海平面标准大气状况下的实际测量,大气抖动造成的脱靶量随机误差均方值为 $2'' \sim 4''$ 。若在沙漠等非标准大气条件下,大气抖动造成的脱靶量随机误差将远大于此值。若取该随机误差均方值为 $3.9''$,则脱靶量总随机误差均方值为:

$$\sqrt{3.9^2 + 0.84^2} = 4.0''.$$

3 光电跟踪系统的仿真模型

为定量分析上述两种噪声对系统的影响,本文建立了带这两种噪声的光电跟踪系统仿真模型。如图 1、2 所示。

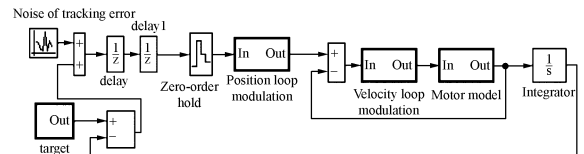


图 1 光电跟踪系统仿真模型

Fig. 1 Simulation model of optoelectronic tracking system

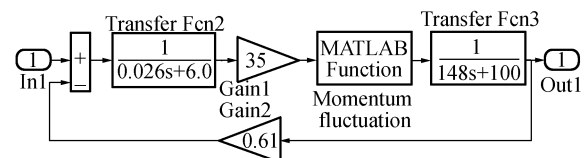


图 2 电机模型

Fig. 2 Motor model

根据光电跟踪设备的实际情况,系统中加入了均方值为 $4''$ 的白色脱靶量噪声和幅值为 3% 的白色力矩波动噪声。电机模型中的力矩波动采用

Matlab 函数实现。其表达式为:

$$y = (1 + 0.03 \text{rand}(1))x, \quad (1)$$

其中 $\text{rand}(1)$ 函数的作用是生成幅值为 1 的高斯白噪声。

4 系统闭环带宽与力矩波动的关系

为了简化分析,我们只分析速度回路放大倍数和位置回路放大倍数与力矩波动的关系。图 3 为速度回路、位置回路双闭环结构的伺服系统模型框图,最内层回路为力矩电机等效框图。图中 k_{cp} 和 k_{cv} 分别为位置回路和速度回路的开环放大倍数, $N(s)$ 为力矩波动。

$$\Phi_{PN}(s) = \frac{C(s)}{N(s)} = \frac{L_a s + R_a}{JLs^3 + (JR_a + BL_a)s^2 + [BR_a + k_t(k_e + k_{cv})]s + k_t k_{cv} k_{cp}}, \quad (3)$$

由于在力矩波动作用下系统的理想输出应为零,故速度回路和位置回路响应力矩波动 $N(s)$ 的输出端误差信号为:

$$E_{VN}(s) = -\Phi_{VN}(s), \quad (4)$$

$$E_{PN}(s) = -\Phi_{PN}(s), \quad (5)$$

其稳态误差的表达式为:

$$\epsilon(t) = C_0 N(t) + C_1 \dot{N}(t) + C_2 \ddot{N}(t) + C_3 \dddot{N}(t) + \dots, \quad (6)$$

其中, $C_0, C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ 依次称为位置、速度、加速度、加加速度等各阶误差系数,并称 $K_n = 1/C_n$ 为对应的系统位置、速度、加速度、加加速度等品质因数。

对速度回路输出误差,根据式(4),并联立式(2),可以求得其位置和速度误差系数为:

$$C_{0V} = \frac{R_a}{k_t(k_e + k_{cv})}, \quad (7)$$

$$C_{1V} = \frac{L_a}{k_t(k_e + k_{cv})} - \frac{R_a(JR_a + BL_a)}{k_t^2(k_e + k_{cv})^2}, \quad (8)$$

显而易见, k_{cv} 越大,位置误差系数 C_{0V} 越小。对速度误差系数 C_{1V} 求导,有:

$$\frac{\partial C_{1V}}{\partial k_{cv}} = \frac{k_t R_a}{k_t^2(k_e + k_{cv})^2} \left[\frac{2(JR_a + BL_a)}{k_t(k_e + k_{cv})} - 1 \right], \quad (9)$$

根据长春光机所研制的某型设备所采用的力矩电机参数, $R_a = 6.0 \Omega$, $L_a = 26 \text{ mH}$, $k_e = 0.61 \text{ V/}^\circ/\text{s}$, $k_t = 35.0 \text{ N} \cdot \text{m/A}$, $J = 148 \text{ N} \cdot \text{m}$, B

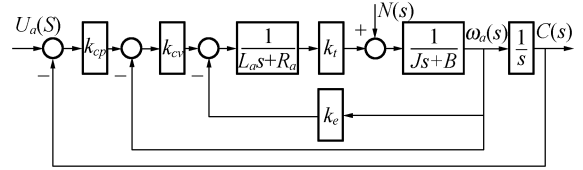


图 3 力矩波动下的伺服系统模型框图

Fig. 3 Model of servo system with momentum fluctuation

速度回路带宽与力矩波动的关系:

$$\Phi_{VN}(s) = \frac{\omega_v(s)}{N(s)} = \frac{L_a s + R_a}{JLs^2 + (JR_a + BL_a)s + k_t(k_e + k_{cv})}, \quad (2)$$

位置回路带宽与力矩波动的关系:

$$\Phi_{PN}(s) = \frac{C(s)}{N(s)} = \frac{L_a s + R_a}{JLs^3 + (JR_a + BL_a)s^2 + [BR_a + k_t(k_e + k_{cv})]s + k_t k_{cv} k_{cp}}, \quad (3)$$

$= 100$, 并且一般光电跟踪设备所采用的力矩电机参数与这些数值相差不大。又通常 $k_{cv} > 1000$, 因此有:

$$\frac{2(JR_a + BL_a)}{k_t(k_e + k_{cv})} < 1, \quad (10)$$

即:

$$\frac{\partial C_{1V}}{\partial k_{cv}} < 0, \quad (11)$$

因此, k_{cv} 越大,位置误差系数 C_{1V} 也越小。根据 k_{cv} 与 C_{0V} 和 C_{1V} 的关系,可以得出结论, k_{cv} 越大,由力矩波动引起的速度波动量越小。

对位置回路输出误差,根据式(5),并联立式(3),可以求得其位置和速度误差系数为:

$$C_{0P} = \frac{R_a}{k_t k_{cv} k_{cp}}, \quad (12)$$

$$C_{1P} = \frac{L_a}{k_t k_{cv} k_{cp}} - \frac{BR_a^2 + k_t R_a(k_e + k_{cv})}{(k_t k_{cv} k_{cp})^2}, \quad (13)$$

显而易见, k_{cp} 越大,位置误差系数 C_{0P} 越小。对速度误差系数 C_{1P} 求导,有:

$$\frac{\partial C_{1P}}{\partial k_{cp}} = \frac{k_t k_{cv}}{(k_t k_{cv} k_{cp})^2} \left[\frac{2R_a [BR_a + k_t(k_e + k_{cv})]}{k_t k_{cv} k_{cp}} - L_a \right], \quad (14)$$

按上述力矩电机的参数,又通常 $k_{cp} > 1000$, 因此有:

$$\frac{\partial C_{1P}}{\partial k_{cp}} < 0, \quad (15)$$

所以 k_{cp} 越大,位置误差系数 C_{1P} 也越小。根据 k_{cp}

与 C_{0p} 和 C_{1p} 的关系,可以得出结论, k_{cp} 越大,由力矩波动引起的位置随机误差越小。

若力矩波动为阶跃扰动转矩,令 $N(s) = \frac{n_0}{s}$, 则根据拉普拉斯变换的终值定理,速度回路和位置回路响应力矩波动 $N(s)$ 的稳态输出值为:

$$e_{sv} = \lim_{s \rightarrow \infty} s E_{VN}(s) N(s) = \frac{n_0 R_a}{k_t(k_e + k_{cv})}, \quad (16)$$

$$e_{sp} = \lim_{s \rightarrow \infty} E_{PN}(s) N(s) = \frac{n_0 R_a}{k_t k_{cv} k_{cp}}, \quad (17)$$

由式(16)和(17)知, k_{cv} 和 k_{cp} 越大,速度回路和位置回路响应力矩波动 $N(s)$ 的稳态输出值越小,系统对力矩波动的抑制能力就越强。又:

$$k_{ssvp} = \frac{e_{sv}}{e_{sp}} = \frac{k_{cv} k_{cp}}{k_e + k_{cv}}, \quad (18)$$

且: $k_e \ll k_{cv}$, 故:

$$k_{ssvp} \approx k_{cp}, \quad (19)$$

通常 $k_{cp} > 1\ 000$, 所以力矩波动对速度回路的影响要远大于其对位置回路的影响,对力矩波动的抑制也主要靠速度回路。

由于通常情况下, k_{cv} 和 k_{cp} 越大,速度回路和位置回路的带宽越宽,因此从抑制力矩波动的角度,应加大速度回路和位置回路的带宽。图 4 给出了速度回路带宽分别为 5 Hz 和 13 Hz 时,速度回路对力矩波动的抑制曲线。可见,高带宽下,速度回路对力矩波动的抑制能力比低带宽下平均提高了 10 dB。图 5 给出了位置回路带宽分别为 0.5 Hz 和 2.2 Hz 时,位置回路对力矩波动的抑制曲线。可见,即便位置回路带宽为 0.5 Hz 时,位置回路对力矩波动的抑制能力在高带宽速度回路的基础上又平均提高了 10 dB。高带宽位置回路对力矩波动的抑制能力比低带宽下平均提高了 10 dB。图 6 和图 7 在假定力矩波动 3%, 且为服

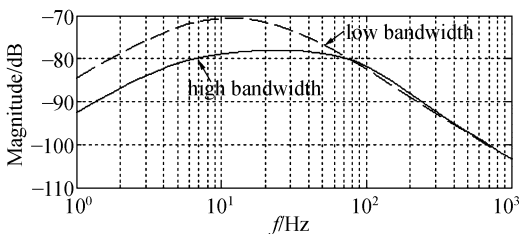


图 4 速度回路高低带宽对力矩波动的抑制能力对比
Fig. 4 Contrast of restraining ability of velocity loop to momentum fluctuation with high/low bandwidth

从高斯分布的白噪声的情况下,给出了速度回路分别为 5 Hz 和 13 Hz 时,力矩波动引起的仪器速度波动频谱对比。图 8 和图 9 为相同位置调节器下,力矩波动在高低带宽速度回路中造成的仪器位置随机跟踪误差对比,高带宽速度回路下,力矩波动可以给仪器造成 0.8'' 的随机跟踪误差,而低带宽速度回路下,则会增大到 1.7''。综合来看,较高带宽的速度回路可以更好地抑制力矩波动的影响。

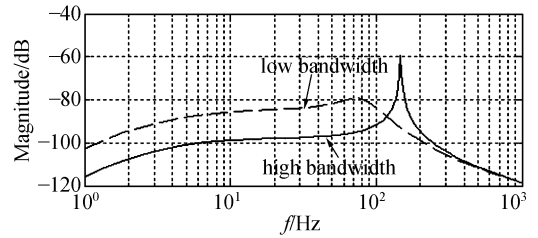


图 5 位置回路高低带宽对力矩波动的抑制能力对比
Fig. 5 Contrast of restraining ability of position loop to momentum fluctuation with high/low bandwidth

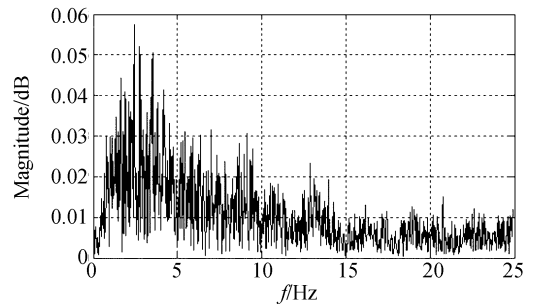


图 6 低带宽速度回路下力矩波动引起的速度波动频谱
Fig. 6 Magnitude-frequency characteristic of velocity undulation caused by momentum fluctuation with low-bandwidth velocity loop

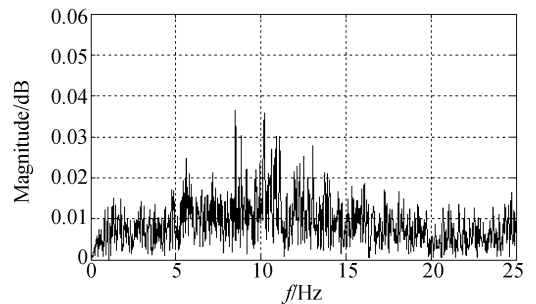


图 7 高带宽速度回路下力矩波动引起的速度波动频谱
Fig. 7 Magnitude-frequency characteristic of velocity undulation caused by momentum fluctuation with high-bandwidth velocity loop

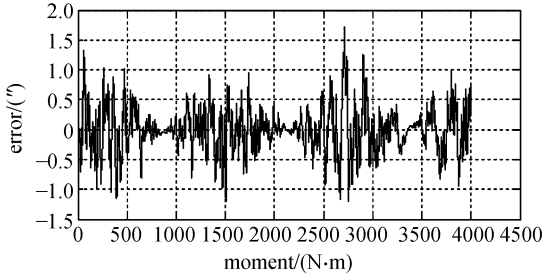


图 8 相同位置回路下速度回路为低带宽时力矩波动引起的位置随机跟踪误差

Fig. 8 Position random tracking error caused by momentum fluctuation with low-bandwidth velocity loop and the same position loop

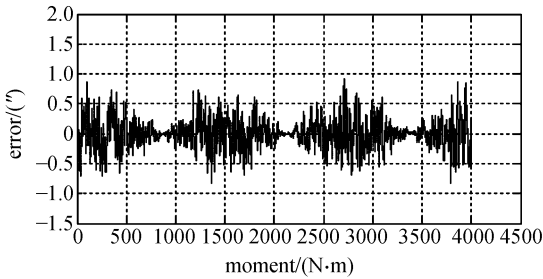


图 9 相同位置回路下速度回路为高带宽时力矩波动引起的位置随机跟踪误差

Fig. 9 Position random tracking error caused by momentum fluctuation with high-bandwidth velocity loop and the same position loop

5 系统闭环带宽与脱靶量噪声的关系

带脱靶量噪声的跟踪系统如图 10 所示。只考虑噪声作用,系统的等效框图如图 11 所示。对脱靶量噪声来说,系统的噪声传递函数即为其闭环传递函数。由于跟踪系统的闭环传递函数等效为低通滤波器^[8],因此,要想抑制脱靶量噪声,就必须降低系统的带宽。图 12 和图 13 给出了脱靶量噪声均方值为 4'' 时,高低带宽下脱靶量噪声产生的随机跟踪误差及其频谱的对比。图中的细实线代表了 2 Hz 下的随机误差,虚线代表了 1 Hz 下的随机误差,粗实线代表了 0.5 Hz 下的随机误差。从图中可以看出,压低带宽对抑制脱靶量噪声效果非常明显。

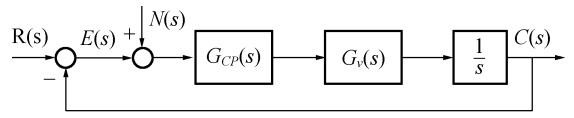


图 10 带脱靶量噪声的跟踪系统

Fig. 10 Tracking system with random noise of tracking error

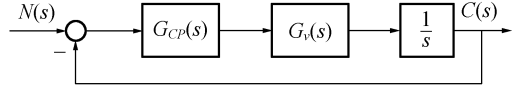


图 11 脱靶量噪声作用下的跟踪系统等效框图

Fig. 11 Equivalent tracking system with random noise of tracking error

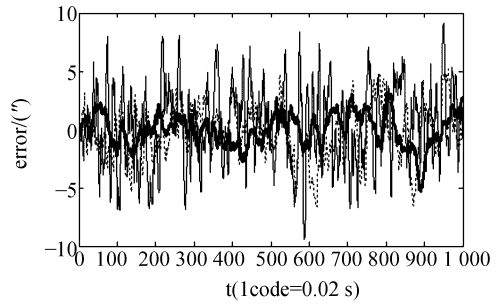


图 12 高低带宽下脱靶量噪声产生的随机跟踪误差对比
Fig. 12 Contrast of random tracking error caused by random noise of tracking error with high/low bandwidth

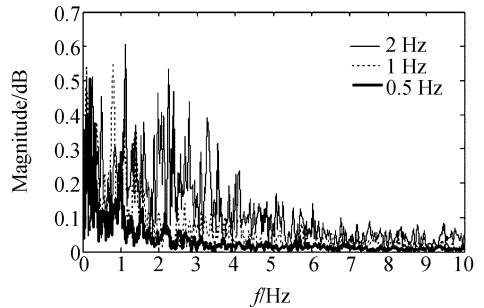


图 13 高低带宽下脱靶量噪声产生的随机跟踪误差频谱对比
Fig. 13 Contrast of magnitude-frequency characteristics of random tracking error caused by random noise of tracking error with high/low bandwidth

6 主系统带宽与输出噪声之间关系的综合分析

速度回路的主要作用为减小电机时间滞后,提高系统的快速性,同时,通过闭环,降低力矩波动等扰动误差,提高跟踪系统的抗干扰能力^[9]。因此,对力矩波动而言,速度回路起着主要的抑制作用。从前面对系统带宽与力矩波动关系的分析,可知速度回路带宽越宽,跟踪系统克服力矩波动影响的能力越强。因此,在复合轴主系统的设计中,速度回路必须设计为高带宽,以尽量降低力矩波动造成的随机跟踪误差。

根据对系统闭环带宽与力矩波动关系的分析,我们还知道,位置回路带宽增大会进一步抑制力矩波动对跟踪系统的不良影响。但是,从对系统闭环带宽与脱靶量噪声关系的分析知道,要想降低脱靶量噪声带来的随机跟踪误差,必须尽量压低主系统的带宽,这与抑制力矩波动对主系统带宽的要求是矛盾的。此时,力矩波动引起的随机跟踪误差和脱靶量噪声带来的随机跟踪误差之间的关系成为主系统带宽高低的决定因素。

图14和图15给出了位置闭环带宽为1 Hz时力矩波动和脱靶量噪声造成的主系统随机跟踪误差及其频谱的对比。图中,实线为力矩波动引起的随机跟踪误差,虚线为脱靶量噪声引起的随机误差,速度回路带宽为13 Hz。从随机误差幅值上看,1 Hz下力矩波动造成的随机误差最大值只有 $0.8''$,而脱靶量噪声引起的随机误差最大值达到 $8''$ 。从随机噪声频谱上看,力矩波动引起的随机误差的幅度在各频段上都比脱靶量噪声引起的随机误差幅度小一个量级。因此,可以得出结论,经过速度环、位置环两级衰减,力矩波动对跟踪系统的影响已经很小,在确定位置回路带宽时,可以不予考虑,而只从如何降低脱靶量噪声对跟踪系统的影响角度来考虑,也就是说应该在满足跟踪要求的前提下压低主系统的带宽。

从两种噪声的频谱看,系统的随机噪声主要频段在1~2倍的系统带宽内。

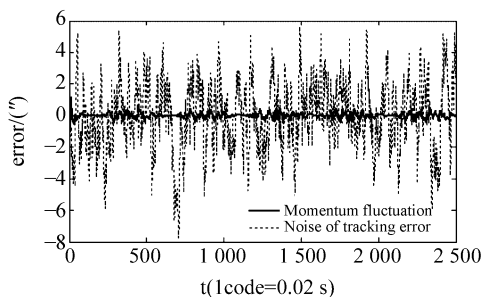


图14 位置带宽1 Hz下两种噪声引起的随机跟踪误差对比

Fig. 14 Contrast of the random tracking error caused by the two kinds of noise with the bandwidth of 1 Hz

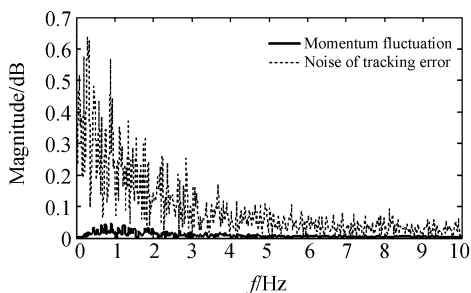


图15 位置带宽1 Hz下两种噪声引起的随机跟踪误差频谱对比

Fig. 15 Contrast of the magnitude-frequency characteristics of the random tracking error caused by the two kinds of noise with the bandwidth of 1 Hz

7 结 论

提高系统带宽有利于抑制力矩波动引起的随机误差,但不利于脱靶量噪声的抑制。通过本文的分析表明,力矩波动主要影响速度回路,也应该主要靠速度回路来抑制。力矩波动引起的随机跟踪误差比脱靶量噪声引起的随机误差小一个数量级。通过两者的频谱对比也可以得出同样的结论。在相同位置回路时,力矩波动给仪器造成的随机跟踪误差一般小于 $1''$,而脱靶量造成的随机误差达 $8''\sim 10''$ 。因此在确定位置回路带宽时,可以不考虑力矩波动的因素。综合来看,复合轴主系统应该采用高速度回路来抑制力矩波动,低位置回路来抑制脱靶量噪声的控制策略。

参考文献:

- [1] 马佳光. 复合控制及等效复合控制原理及应用[J]. 光电工程, 1988, (3): 1-16.
MA J G. Theory and application of compounding control and equivalent compounding control[J]. *Opto-electron. Eng.*, 1988, (3): 1-16. (in Chinese)
- [2] 傅承毓, 马佳光, 叶步霞, 等. 复合轴系统应用研究[J]. 光电工程, 1988, 25(8): 1-12.
FU CH Y, MA J G, YE B X, *et al.*. Research and application of the compound-axis system[J]. *Opto-electron. Eng.*, 1988, 25(8): 1-12. (in Chinese)
- [3] 彭绪金, 马佳光. 光电精密跟踪中的复合轴控制系统的实验和研究[J]. 光电工程, 1994, 21(5): 1-9.
PENG X J, MA J G. Experiment and research of optoelectronic tracking control system with compound-axis[J]. *Opto-electron. Eng.*, 1994, 21(5): 1-9. (in Chinese)
- [4] 傅承毓, 姜凌涛, 任戈, 等. 快速反射镜成像跟踪系统[J]. 光电工程, 1999, 21(3): 1-8.
FU CH Y, JIANG L T, REN G, *et al.*. Imaging tracking system with fast steering mirrors[J]. *Opto-electron. Eng.*, 1999, 21(3): 1-8. (in Chinese)
- [5] 王毅, 高伟志, 王贵文, 等. 光电精密跟踪的双重复合轴伺服系统[J]. 光学精密工程, 1996, 4(4): 58-61.
WANG Y, GAO W ZH, WANG G W, *et al.*. Servo system of optoelectronic tracking system with double compound-axis[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(4): 58-61. (in Chinese)
- [6] 李文军, 陈涛. 基于卡尔曼滤波器的等效复合控制技术的研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 279-284.
LI W J, CHEN T. Equivalent combined control technique based on Kalman filter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 279-284. (in Chinese)
- [7] GERMANN L M. Specification of fine steering mirrors for line-of-sight stabilization systems[J]. *SPIE*, 1991, 1543: 202-212.
- [8] GLAESE R M, ANDERSON E H, JANZEN P C. Active jitter suppression of optical structures[J]. *SPIE*, 2001, 4327: 591-599.
- [9] AIGRAIN M C, WOEHRER M K. Determination of attitude jitter in small satellites[J]. *SPIE*, 1996, 2739: 215-288.

作者简介: 李文军(1978—), 中国科学院长春光学精密机械研究所光电对抗部在职博士研究生, 主要研究方向为光电精密跟踪控制技术。E-mail: jutlwj@126.com

(本栏目编辑 李树军)