

文章编号:1001-5078(2023)01-0084-06

· 光电技术与系统 ·

光电设备伺服系统机械谐振检测和抑制

杨松涛,和丽清

(中国电子科技集团公司第十一研究所,北京 100015)

摘要:在现代国防军工领域,光电系统被广泛应用于火控、侦察、制导等武器系统中。随着目标机动性能的提升,光电武器系统对其伺服系统动态性能的需求也不断提高,光电伺服系统的带宽也要随之拓展。但机械系统固有特征不会改变,接近或者超过自然机械共振频率的驱动能量就会引起机械谐振。为了提高光电伺服系统性能,需对检测和抑制机械谐振的问题进行研究。首先通过激励信号性质分析,选取性质优良、计算简单的激励信号对光电伺服系统的机械谐振进行参数辨识,然后设计可参数化的陷波滤波器进行在线参数调整,就可实现快速有效地机械谐振抑制。实验结果表明,该机械谐振检测和抑制的方案能够精确地检测机械谐振频率,很好地抑制机械谐振产生的影响,提高光电伺服系统的动态性能。

关键词:光电伺服系统;伪随机序列;陷波滤波器;机械谐振

中图分类号:TM921 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.01.013

Detection and suppression of mechanical resonance in photoelectric equipment servo system

YANG Song-tao, HE Li-qing

(The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China)

Abstract: In the field of modern national defense and military industry, photoelectric systems are widely used in fire control, reconnaissance, guidance and other weapon systems. With the improvement of target maneuverability, the demand for dynamic performance of servo system for photoelectric weapon systems increases, and the bandwidth of photoelectric servo system has to be expanded. However, the inherent characteristics of the mechanical resonance do not change and the driving energy close to or exceed the nature mechanical resonance frequency does cause mechanical resonance. In order to improve the performance of photoelectric servo system, the detection and suppression of mechanical resonance needs to be studied. Firstly, through the analysis of the characteristics of the stimulus signal, the stimulus signal with excellent characteristics and low-calculation is selected to identify the parameters of the mechanical resonance of the photoelectric servo system, and then a parameterized notch filter is designed for online parameter adjustment, which can realize a rapid and effective suppression of mechanical resonance on photoelectric servo system. The experimental results show that the scheme of mechanical resonance detection and suppression can accurately detect the mechanical resonance frequency, well suppress the influence of mechanical resonance and improve the dynamic performance of photoelectric servo system.

Keywords: photoelectric servo system; pseudo random sequence; notch filter; mechanical resonance

1 引言

在光电火控、光电侦察、光电制导等武器系统中,光电伺服系统是重要的组成部分,光电伺服系统为光电武器系统提供稳定、灵活、快速的运动平台。光电伺服系统的精度和动态性能决定了整个光电武器系统的快速性和视轴稳定性。同时搭载在机载、舰载、车载和弹载平台上的长焦、高分辨率光电系统对光电伺服系统的精度和动态性能又有着越来越高的要求,因此,提高光电伺服系统的精度和动态性能就成了关键问题。而光电伺服系统在设计时,认为机械轴弹性系数无穷大,是刚体^[1],不可能产生机械谐振。但实际机械系统不可能是理想刚体,驱动部件和负载相对运动会产生机械谐振问题。机械谐振的存在不仅制约着光电伺服系统性能的提升,而且会带来诸多不利影响,如:缩短机械设备寿命,甚至损坏机械系统;降低驱动系统性能,严重时导致系统振荡;产生噪声污染,降低环境适应性。因此,机械谐振抑制已成为高性能伺服驱动的重要研究课题之一^[2]。本文针对光电伺服系统机械谐振问题,分析了光电伺服系统机械谐振检测方法,并基于检测结果通过设置改进型陷波滤波器的可配置参数,以实现有效抑制机械谐振的功能,最终实现提高光电伺服系统性能的目的。

2 光电伺服系统谐振频率特征检测

在光电伺服系统中,要抑制机械谐振,先要获得精确的谐振频率数值。机械谐振频率检测,首先通过驱动环节给伺服系统施加激励信号,然后通过伺服系统安装的传感器(电流、速率、角度和加速度传感器)获得伺服系统激励后的响应数据,最后通过数据处理获得较为精确的机械谐振频率数值。能够测量到伺服系统谐振后传感器数据的前提是激励信号通过驱动环节放大后能使机械系统产生谐振,故激励信号的选择是机械谐振检测最为重要的环节。

选取的激励信号应是持续的并且随机独立的,且有较宽的频谱特性。从原理上看,白噪声是最理想的激励信号^[3],这一平稳随机过程的每一个瞬间取值都是统计独立的,并且均值为零、谱密度为非零常数的平稳随机过程。但是在实际应用中是很难生

成真正意义上的白噪声。因此常用循环周期充分长的伪随机序列作为激励信号。

逆 m 序列^[4]和 m 序列^[5](最长线性反馈移位寄存器序列(LFSR))都是较好的伪随机序列,都近似于白噪声,m 序列含有直流成分,作为激励信号对系统存在“净扰动”,而逆 m 序列克服了这一缺点,同时逆 m 序列的随机性也优于 m 序列。因此,逆 m 序列常常用于伺服系统的激励信号。其性质如下:

(1)逆 m 序列在一个循环周期内,“0”和“1”的数目均等;

(2)逆 m 序列前半周期与后半周期为逆重复;

(3)逆 m 序列与原 m 序列不相关,即他们的相关函数等于零;

逆 m 序列不仅是非常好的伪随机序列,同时也便于嵌入式系统实时生成,非常适合伺服系统机械谐振的检测。获取逆 m 序列首先要生成 m 序列,m 序列生成简单、规律性强。一般来说,一个 n 级线性移位寄存器能产生的最长周期等于 $N = 2^n - 1$ 。设 n 级移位寄存器的初始状态为: $a_0 a_1 \cdots a_{n-1}$,经过一次移位后,状态变为: $a_1 a_2 \cdots a_n$ 。其中, a_n 可通过下面的递推方程获得:

$$\begin{aligned} a_n &= c_1 a_{(n-1)} \oplus c_2 a_{(n-2)} \oplus \cdots \oplus c_{(n-1)} a_1 \oplus c_n a_0 \\ &= \sum_{i=1}^n c_i a_{(n-i)} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $c_i \in (0,1)$, $i = 1,2,3,\cdots,n$ 。 c_i 的取值决定了移位寄存器的反馈连接和序列的结构,所以 c_i 的取值决定了反馈逻辑。反馈逻辑可用特征多项式 $f(x)$ 表示:

$$f(x) = c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + \cdots + c_n x^n = \sum_{i=0}^n c_i x^i \quad (2)$$

其中, $c_i \in (0,1)$, $i = 0,1,2,\cdots,n$ 。 n 是寄存器级数, $c_0 = 1$ 。线性反馈移位寄存器的反馈连接状态是用特征多项式来描述的,在上面公式(2)中所表示的特征多项式实际上就是反映线性反馈寄存器反馈逻辑的一种本原多项式。在构成 m 序列前,必须找到本原多项式。对于 n 级移位寄存器的 m 序列的本原多项式,一般可以通过查表来完成。因此,只要确定了本原多项式,所产生的序列就确定了。即使线性反馈移位寄存器的初始状态不

同,所产生的周期序列仍是同一序列,只是序列的初始相位不同。

而逆 m 序列是通过 m 序列产生的。设 $M(k)$ 是周期为 N 、元素取值为 0 或 1 的 m 序列, $S(k)$ 的周期为 2、元素取值依次为 0 或 1 的方波,将这两个序列按位进行异或运算,得到复合序列是周期为 $2N$ 、元素取值为 0 或 1 的逆 m 序列,记为 $IM(k)$ 。因此,逆 m 序列生成方法简单,便于嵌入式系统实时产生。

激励信号确定形式后,还需要考虑以下几个因素:

(1) 驱动环节的输出幅值(即激励信号的放大比例),幅值太大则有可能使被激励系统进入非线性区,太小则不能产生机械谐振;

(2) 逆 m 序列的移位脉冲频率至少应大于机械谐振频率的 3 倍;

(3) 逆 m 序列的周期时间应大于 1.5 倍的机械谐振的过渡过程时间。

光电伺服系统传感器采样频率为 2 kHz,选取移位脉冲频率为 0.5 kHz,其序列周期为 2.044 s。 $n = 9$ 逆 m 序列的数据、自相关特性和功率谱如图 1 所示。

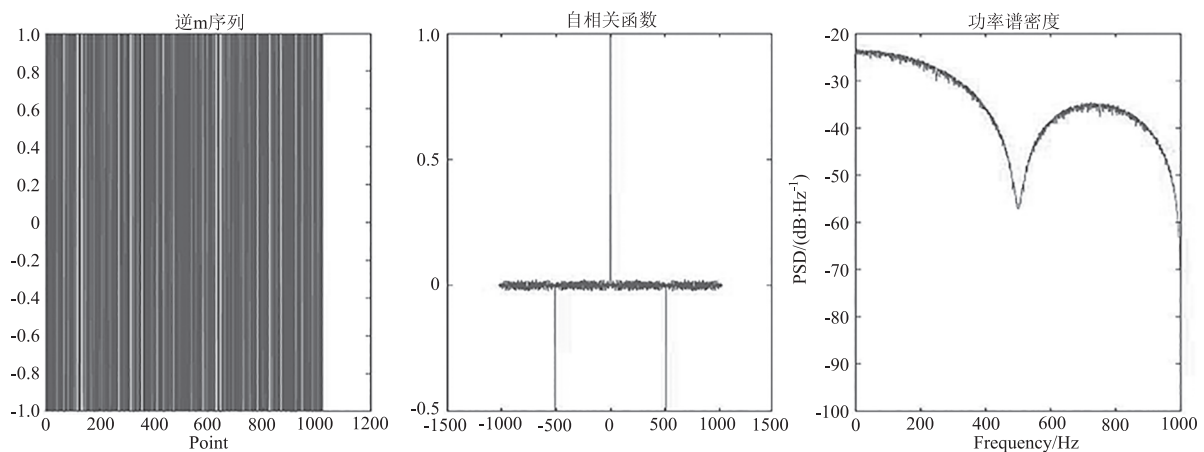


图 1 $n = 9$ 逆 m 序列及其特性图

Fig. 1 Inverse m sequence ($n = 9$) and its characteristics

3 光电伺服系统谐振频率抑制

机械谐振抑制的主要方法有:(1)基于加速度状态反馈的机械谐振抑制^[6-7]:电机加速度反馈能够改变伺服系统的等效负载转动惯量比,进而对系统机械谐振进行抑制。其缺点是给伺服系统带来相位严重滞后。(2)基于滤波器的机械谐振抑制:一般选用数字低通滤波器或者数字陷波滤波器来抑制机械谐振。其中数字陷波滤波器可通过参数调整,实现实时调整陷波滤波器的陷波中心频率、陷波宽度和陷波深度,因此其在实际工程中得到了非常广泛的应用。(3)基于现代控制理论的机械谐振抑制:基于扰动观测器的机械谐振抑制^[8-10]、采用具有约束的预测控制策略抑制机械^[11]、基于滑模控制器的谐振抑制^[12]和基于 LMI 的 H_∞ 控制方法的机械谐振抑制^[13]等。

目前,在光电伺服系统应用中,通常采用陷波滤

波器来抑制机械抖振,与使用加速度反馈抑制机械谐振相比,其只对谐振频率附近的幅频和相频特性进行调整,不会使整个系统产生严重的相位滞后;与使用先进算法等谐振抑制手段相比,其使用相对成熟,不改变原有系统闭环设计、调试方法,工程实践案例丰富,设计简单方便。

改进型陷波滤波器的传递函数如下所示:

$$G(s) = \frac{s^2 + \alpha k \omega_n s + \omega_n^2}{(\beta s)^2 + \beta k \omega_n s + \omega_n^2}; \quad 0 < \beta \leq 1, 0 < \alpha < 1 \quad (3)$$

改进型滤波器的幅频特性如下所示:

$$|G(j\omega)| = \sqrt{\frac{(\alpha k \omega_n \omega)^2 + (\omega_n^2 - \omega^2)^2}{(\beta k \omega_n \omega)^2 + (\omega_n^2 - \beta^2 \omega^2)^2}} \quad (4)$$

改进型滤波器的相频特性如下所示:

$$\angle G(j\omega) = \arctan\left(\alpha k \frac{\omega}{\omega_n} / \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)\right) -$$

$$\arctan\left(\beta k \frac{\omega}{\omega_n} \left(1 - \frac{\beta^2 \omega^2}{\omega_n^2}\right)\right) \quad (5)$$

一般取 $\beta = 1$, 选择 $\omega_n = 2\pi f_g$ (f_g 为谐振频率), 这时改进型陷波滤波器在 $\omega = \omega_n$ 处的幅值增益为 $A_{G(\omega=\omega_n)} = \alpha$, 即 α 表征改进型陷波滤波器的在谐振点的衰减系数; 在 $\omega = \omega_n$ 处滤波带宽为 $B_w = \sqrt{1 - 2\alpha^2} k \omega_n$ (条件: $\alpha \leq 1/\sqrt{2}$)。如图 2 所示, 在 $\beta = 1$ 条件下, α 不变, 调整 k 的改进型陷波滤波器的幅频和相频特性如图 2(a) 所示; 在 $\beta = 1$ 条件下, k 不变, 调整 α 的改进型陷波滤波器的幅频和相频特性如图 2(b) 所示。

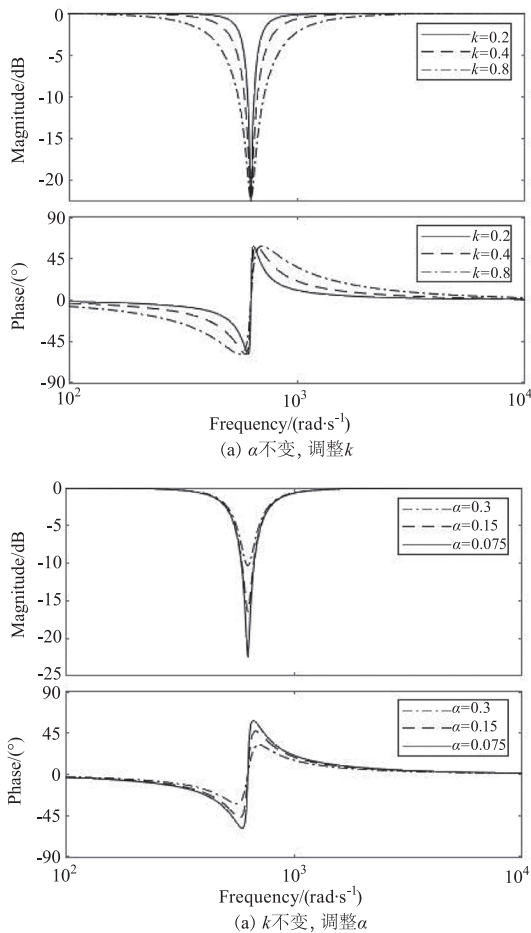


图2 在 $\beta = 1$ 条件下,改进型陷波滤波器随 k 和 α 变化的波特图

Fig.2 Bode diagram of the improved notch filter changing with k and α parameters under the condition of $\beta = 1$

由于改进型陷波滤波器会在 $\omega < \omega_n$ 的频带产生相位滞后,影响闭环伺服系统稳定性,从公式(5)可以看出参数 β 的存在可以对 $\beta = 1$ 时的改进型陷波滤波器的 $\omega < \omega_n$ 频带相位进行调整,减小 $\beta = 1$

时的改进型陷波滤波器的相位滞后。但引入参数 β 对改进型陷波滤波器在 $\omega = \omega_n$ 的陷波深度和陷波带宽都产生影响。其中,改进型陷波滤波器在 $\omega = \omega_n$ 处的幅值增益为:

$$A_{G(\omega=\omega_n)} = \alpha / \sqrt{\beta^2 + ((1 - \beta^2)/k)^2}$$

在 $\omega = \omega_n$ 处滤波带宽为:

$$B_w = \omega_n \sqrt{4 - 2\beta^2 - 2\sqrt{2 - \beta^4} + (\beta^2 - 2\alpha^2)k^2} / \sqrt{2 - \beta^4}$$

在 α 和 k 不变条件下,调整 β 的改进型陷波滤波器的幅频和相频特性如图 3 所示。从图 3 可以看出,选择合适的参数 β ,可以在 $\omega < \omega_n$ 的频带获得了较大的相位补偿,并且不影响谐振抑制效果。

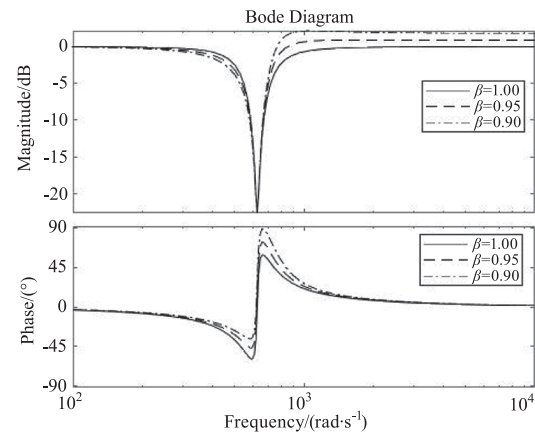


图3 在 α 和 k 不变条件下,改进型陷波滤波器随 β 变化的波特图

Fig.3 Bode diagram of improved notch filter changing with β parameter under the certain conditions α and k parameters

4 实验数据

某光电伺服系统,速度采样频率为 2 kHz,根据采样定理,系统能获得 0 Hz ~ 1 kHz 带宽范围内的反馈信号(实际传感器带宽小于 300 Hz)。选用移位脉冲频率 0.5 kHz、9 级线性移位寄存器的逆 m 序列作为激励信号,DFT 分析获得的频谱结果如图 4(a) 所示。通过系统谐振后的频谱曲线可获得相关谐振参数为:谐振中心频率为:10.25 Hz 和 23.94 Hz,谐振频率宽度为 1 Hz 和 2 Hz,谐振幅值约为:20 dB,系统有两个谐振点。因此,配置 2 个改进型陷波滤波器参数分别为: $\omega_n = 64.4$ 和 150.4 (rad/s), $k = 0.11$, $\alpha = 0.09$, $\beta = 1$ 。将同样的逆 m 序列在系

统输入驱动器前进行陷波处理,激励后的频谱特性如图 4(b)所示。可以看出,机械谐振受到了极大地抑制。

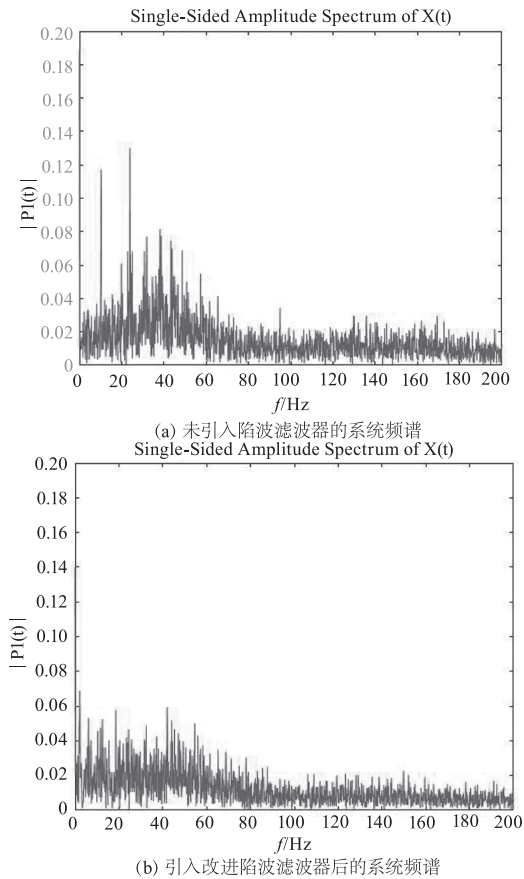


图 4 谐振系统及抑制效果的频谱图

Fig. 4 Spectrum diagram of mechanical resonance system before and after filter suppression

5 结 论

光电伺服系统的机械谐振成因复杂,在工程上为了能够很好地检测和抑制机械谐振对光电伺服系统性能产生的影响。本文首先选取具有零均值、随机独立的伪随机序列——逆 m 序列作为激励信号,驱动装置将宽频带的激励信号施加于系统中,通过对传感器数据的频谱分析,分离出机械谐振相关参数(谐振中心频率,谐振频率宽度,谐振峰值),然后通过在线配置改进型滤波器的相关参数,完成谐振频率地抑制。实验结果证实,文中的相关方法和方案可有效地检测和抑制光电伺服系统机械谐振。

参考文献:

- [1] Ma Xiaoliang. Variable speed drives with elastic loads [J]. Electric Drive, 2008, 38(7): 3-7. (in Chinese)
- [2] Jin Jie, Wang Shuang, Huang Surong. Research of mechanic resonance suppression for flexible system based on acceleration feedback [J]. Electric Machines & Control Application, 2015, 42(11): 4-9. (in Chinese)
- [3] Chen Cheng, Zhang Maoqing, Cui Xiumei. Design of programmable M-sequence generator based on FPGA [J]. Industrial Control Computer, 2013, 26(6): 15-16. (in Chinese)
- [4] Zhong Yenjiong. Inverse-repeat m sequence and system identification [J]. Acta Automatica Sinica, 1979, 5(2): 107-115. (in Chinese)
- [5] Zu Yunxiao, Wang Fuping, Wang Zhanji. Triple correlation function of m-sequence and its peak feature [J]. Journal of Tianjin University, 2004, 37(9): 836-841. (in Chinese)
- [6] Tang Tao, Huang Yongmei, Zhang Tong, et al. Reduction of mechanical resonance based on load acceleration feedback for servo system [J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(7): 14-17. (in Chinese)
- [7] George W. Yountkin. Compensating structural dynamics for servo driven industrial machines with acceleration feedback [A]//Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004.
- [8] Makoto Iwasaki, Terukazu Hiroe, Nobuyuki Matsui. Measurement of mechanical parameters in two-mass resonant system using disturbance observer [J]. Electrical Engineering in Japan, 1997, 118(2): 19-29.
- [9] Yang Ming, Zheng Weilong, Yang Kaixuan, et al. Sup-

- pression of mechanical resonance using torque disturbance observer for two-inertia system with backlash [C]//2015 9th ICPE-ECCE Asia, 2015.
- [10] Jong Namyun, Su Jianbo, Yong Il Kim, et al. Robust disturbance observer for two-inertia system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (7): 2700 – 2710.
- [11] Yu Liye, Wang Jianhui, Gu Shusheng. A new technique to suppress torsional of drive trains-Constraint predictive control [J]. Control & Decision, 2007, 22 (8): 889 – 892. (in Chinese)
于立业, 王建辉, 顾树生. 抑制传动中扭振的一种新方法——具有约束的预测控制 [J]. 控制与决策, 2007, 22 (8): 889 – 892.
- [12] SV Drakunov, Özgüner, Ü. Vibration suppression in flexible structures via the sliding-mode control approach [C]//Proceedings of the 31st IEEE Conference on Decision and Control, 1992: 1365 – 1366.
- [13] Zhang Ruicheng, Tong Chaonan, Li Boqun. H_{∞} control based on LMI for electromechanical vibration of a rolling mill main drive system [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28 (2): 179 – 183. (in Chinese)
张瑞成, 童朝南, 李伯群. 基于 LMI 方法的轧机主传动系统机电振动 H_{∞} 控制 [J]. 北京科技大学学报, 2006, 28 (2): 179 – 183.