

# 车载升降式光电云台共振抑制方法研究

李绍军, 李英杰, 李威, 徐哲, 王国右, 徐妍, 荆凡胜

(北方信息控制研究院集团有限公司, 江苏南京 210000)

**摘要:** 为避免视场遮挡, 光电云台通常置于升降式桅杆顶端, 桅杆的结构刚度将直接影响云台伺服系统的刚度, 继而影响云台动态性能。实际使用时发现, 由于桅杆刚度不足导致云台在方位向转动过程中极易发生共振, 引起云台工作不稳定。针对该问题文中先后引入巴特沃斯低通滤波器、陷波滤波器和线性自抗扰控制方式对升降式光电云台共振现象进行抑制, 通过对比三种方式的优缺点发现采用线性自抗扰控制方式具有响应速度快、共振抑制效果好、鲁棒性好的优点, 适宜应用于升降式光电云台控制系统。

**关键词:** 光电云台; 升降式桅杆; 巴特沃斯滤波器; 陷波滤波器; 线性自抗扰控制

中图分类号: TN06 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2024)04-0406-07

## Resonance Suppression Method of Vehicle Mounted Lifting Photoelectric Platform

LI Shaojun, LI Yingjie, LI Wei, XU Zhe, WANG Guoyou, XU Yan, JIN Fansheng

(North Information Control Research Academy Group Co. LTD., Nanjing 210000, China)

**Abstract:** To avoid obscuring the field of view, a photoelectric platform is usually placed on top of a lifting mast. The structural stiffness of the mast directly affects the stiffness of the photoelectric platform servo system and its dynamic performance. In actual use, it is deduced that an insufficient stiffness of the mast causes the photoelectric platform to resonate easily in the process of azimuthal rotation, causing it to work unstably. To solve this problem, a Butterworth low-pass filter, notch filter, and linear auto disturbance rejection control mode are introduced successively to suppress the resonance phenomenon of the lifting photoelectric pan tilt table. By comparing the advantages and disadvantages of the three methods, it is concluded that the linear ADRC method has the advantages of fast response, good resonance suppression effect, and good robustness, and is suitable for the control system of the lifting photoelectric photoelectric platform.

**Key words:** photoelectric platform, lifting mast, Butterworth filter, notch filter, LADRC

## 0 引言

侦察车辆通常装备有集成高清 CCD 摄像机、红外热像仪的光电云台, 以便于昼夜实时获取侦察车辆周边态势。为了减少观察盲区, 获取更远范围的视场, 通常将光电云台置于升降式桅杆顶端。受限于重量、成本和技术限制, 升降式桅杆一般都为空心结构, 这导致桅杆结构刚度明显低于车辆安装基面。光电云台安装于桅杆顶端后, 云台方位向的加减速切换以及不同的速度控制方式易使桅杆产生挠曲变形<sup>[1]</sup>, 载体车辆发动机的振动也会传递到桅杆上, 这将加剧桅杆振

动, 导致光电云台视场模糊, 严重时甚至导致光电云台转动异常。

通过对光电云台共振原因进行分析, 结合观测到的光电云台共振时的速度时域波形, 对升降式光电云台的共振现象有了进一步认识。为了解决这一问题, 文中分别采用了速度环添加巴特沃斯低通滤波器、速度环添加陷波滤波器、速度环采用自抗扰控制方式来抑制共振。实验结果表明采用自抗扰控制方式可以实现在无需降低光电云台动态性能的前提下, 仍能具有良好的共振抑制效果。

## 1 共振原理分析

光电云台安装于倒伏升降式桅杆顶部, 倒伏升降式桅杆基座安装于车辆载体表面, 系统安装连接关系示意图如图 1 所示。

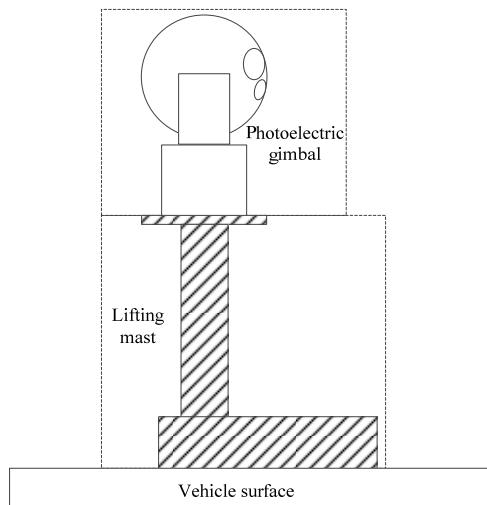


图 1 系统安装连接关系示意图

Fig.1 System installation connection diagram

云台方位电机采用了正弦波永磁同步电机, 由于云台重心与桅杆轴向不一定完全重合以及桅杆自身结构刚度不足, 当云台方位向转动时, 桅杆会不可避免地产生柔性形变, 此时可将桅杆和光电云台统一视为一个二质量柔性伺服系统进行分析<sup>[2]</sup>, 该简化模型如图 2 所示。

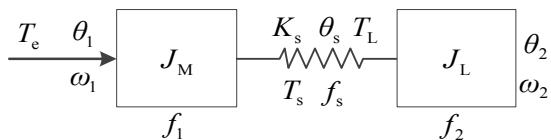


图 2 二质量柔性伺服系统等效示意图

Fig.2 Equivalent diagram of two-mass servo system

电机和负载侧动力学方程:

$$\begin{cases} J_M \frac{d\omega_1}{dt} = T_e - f_1\omega_1 - T_s \\ J_L \frac{d\omega_2}{dt} = T_s - f_2\omega_2 - T_L \\ \dot{\omega}_1 = \theta_1 \\ \dot{\omega}_2 = \theta_2 \\ \theta_s = \theta_1 - \theta_2 \\ T_s = f_s \frac{d\theta_s}{dt} + K_s \theta_s \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $T_e$  为电机输出转矩;  $T_s$  为连接轴转矩;  $T_L$  为负载扰动转矩;  $J_M$  为电机惯量;  $J_L$  为负载惯量;  $\theta_1$

为电机转角;  $\theta_s$  为连接轴转角;  $\theta_2$  为负载转角;  $\omega_1$  为电机转速;  $\omega_2$  为负载转速;  $f_1$  为电机阻尼系数;  $f_s$  为连接轴阻尼系数;  $f_2$  为负载阻尼系数;  $K_s$  为连接轴刚度系数。

忽略电机、负载的阻尼系数以及负载的扰动转矩影响, 由式(1)可得到负载转速和电机转矩的传递函数为:

$$\frac{\omega_2}{T_e} = \frac{f_s s + K_s}{J_M J_L s^3 + (J_M + J_L)(f_s s + K_s)s} \quad (2)$$

由式(2)可知系统零点存在一组谐振频率

$\omega_z = \sqrt{\frac{K_s}{f_s}}$  使系统产生共振, 极点存在一组反谐振频率

$\omega_p = \sqrt{\frac{K_s(J_M + J_L)}{J_M J_L}}$  使系统不响应任何输入。一旦

有相应频率的激励信号, 系统在这两个频率点将易发生机械共振<sup>[3]</sup>。

## 2 共振抑制方式介绍

### 2.1 速度环添加巴特沃斯滤波器

巴特沃斯滤波器在相同阶数的滤波器中, 具有最大斜率的衰减, 且在波特图幅频特性中不产生凸峰, 因此在控制系统中被经常采用<sup>[4]</sup>。文中采用阻尼比为 0.707 的二阶巴特沃斯低通滤波器为:

$$G_b(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + \sqrt{2}\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

将巴特沃斯滤波器添加到速度环中, 用于对采用 M 法 (即通过在固定时间间隔获得的转角差值求商) 取得的电机转速进行滤波, 如图 3 所示。

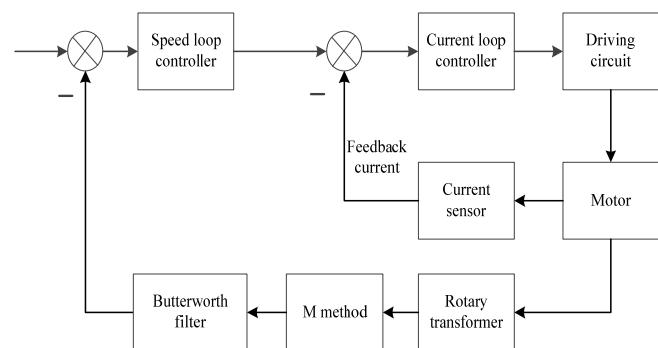


图 3 巴特沃斯滤波器使用原理

Fig.3 Butterworth filter usage principle

### 2.2 速度环添加陷波滤波器

陷波滤波器是一种带阻滤波器, 它可将陷波中心频率附近的频率点的输入幅值衰减到对系统的影响

最小, 而对陷波频带以外的频率信号基本没有影响<sup>[5]</sup>。因此是一种得到广泛应用的机械共振抑制方法。一种常用的陷波滤波器传递函数表达式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} G_x(s) = \frac{as^2 + cs + 1}{as^2 + bs + 1} \\ a = \frac{1}{\omega_n^2} \\ b = B_\omega a \\ c = b \cdot 10^{\left(\frac{D_\omega}{20}\right)} \end{array} \right. \quad (4)$$

式中:  $\omega_n$  为陷波频率;  $B_\omega$  为陷波滤波器的陷波带宽;  $D_\omega$  为陷波滤波器的陷波深度。

$\omega_n$  的值应根据系统共振频率进行调整, 以使得陷波滤波器可以将共振频率抑制住; 通过调整陷波带宽  $B_\omega$  值和陷波滤波器深度  $D_\omega$  可以影响陷波滤波器作用频带窄和幅频特性下陷深度深浅; 应合理设置这 3 个值, 使陷波滤波器既能有效抑制共振频率又能对其他频率不产生影响<sup>[6]</sup>。

将陷波滤波器串入速度环输出环节如图 4 所示, 以整定速度环输出即电流环的给定输入, 实现抑制光电云台机械共振的目的。

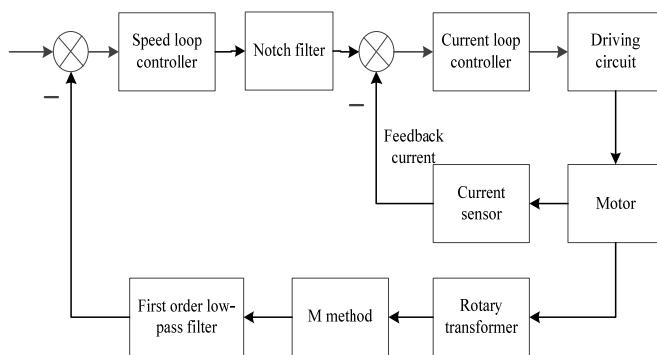


图 4 陷波滤波器使用原理

Fig.4 Notch filter usage principle

### 2.3 速度环添加自抗扰控制

将速度环控制律由比例积分 (proportional integral, PI) 控制器方式改为线性自抗扰控制方式 (linear active disturbance rejection control, LADRC), 光电云台控制原理如图 5 所示。

LADRC 的优势在于它将系统内外部的各种扰动和未知量统一视为一个总扰动, 通过一个线性扩张状态观测器去估计该总扰动, 并通过控制律实时进行补偿<sup>[7-8]</sup>。而升降式光电云台的共振扰动可视为一个未知的扰动量, 可通过 LADRC 方式对其进行抑制。

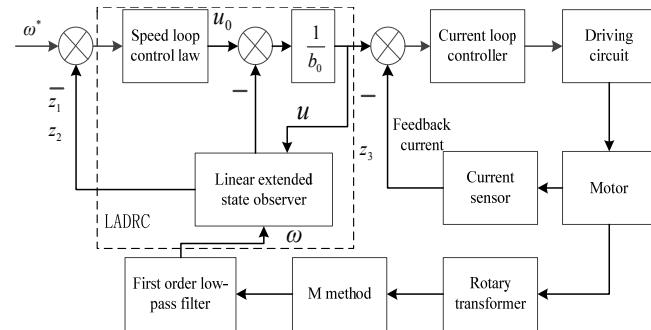


图 5 速度环采用 LADRC 方式原理

Fig.5 The speed loop uses LADRC mode schematic diagram  
式(2)可改写为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{y} + a_1 \dot{y} + a_2 y = b_0 \dot{u} + b_1 u + f \\ a_1 = \frac{(J_M + J_L)f_s}{J_M J_L} \\ a_2 = \frac{(J_M + J_L)K_s}{J_M J_L} \\ b_0 = \frac{f_s}{J_M J_L} \\ b_1 = \frac{K_s}{J_M J_L} \end{array} \right. \quad (5)$$

式中:  $y$  为电机转速  $\omega_2$ ;  $u$  为电机转矩  $T_e$ ; 系统  $f$  为外部扰动量。

式(5)可进一步改写为:

$$\begin{aligned} \ddot{y} &= \int (b_0 \dot{u} + b_1 u + f - a_1 \ddot{y} - a_2 \dot{y}) \\ &= b_0 u + \int (b_1 u + f - a_1 \ddot{y} - a_2 \dot{y}) \\ &= b_0 u + f' \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $f' = \int (b_1 u + f - a_1 \ddot{y} - a_2 \dot{y})$  视为总扰动。

取  $x_1 = \omega_2$ ,  $x_2 = \frac{d\omega_2}{dt}$ ,  $x_3 = f'$ , 建立系统的状态

方程:

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} f' \\ y = [0 \ 0 \ 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (7)$$

对应可建立系统的扩张状态观测器为:

$$\begin{bmatrix} \cdot \\ z_1 \\ \cdot \\ z_2 \\ \cdot \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{b}_0 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} (x_1 - z_1) \quad (8)$$

式中:  $z_1$ 、 $z_2$ 、 $z_3$  分别为  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  的观测量;  $\hat{b}_0$  为  $b_0$  的观测值。

控制律采用的比例微分控制器为:

$$\begin{cases} u_0 = K_p(\omega^* - \hat{\omega}) + K_d(\dot{\omega}^* - \dot{\hat{\omega}}) \\ u = \frac{u_0 - f'}{\hat{b}_0} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\omega^*$  为速度环给定转速;  $\hat{\omega}$  为扩展状态观测器观测到的负载转速。

### 3 测试结果

光电云台方位向采用 J110LWX004 型无刷力矩电机和 J90XFS001 型双通道旋转变压器, 采用的电机和旋转变压器参数见表 1。

表 1 电机和旋转变压器参数

Table 1 Motor and rotary transformer parameters

J110LWX004 type motor		J90XFS001 type rotary transformer	
Stall torque	1.5 N·m	Excitation voltage	4 V
Stall current	2 A	Excitation frequency	2000 Hz
No-load speed	240 rpm	Polar number	1:32
Torque coefficient	0.75 N·m/A	Precision	<30"
Phase resistance	3.4 Ω		
Phase inductance	7.5 mH		

速度环给定转速  $\omega^* = 5^\circ/\text{s}$ , 测试速度环采用 PI 控制器和负载速度反馈采用 250 Hz 一阶低通滤波器时处于升起状态下光电云台方位向速度响应情况, 速度环响应曲线如图 6 所示。

可见转速达到  $5^\circ/\text{s}$  后, 云台迅速进入了共振状态, 已经无法正常工作。

速度环仍采用 PI 控制器, 负载速度反馈采用二阶 250 Hz 巴特沃斯滤波器后, 处于升起状态下光电云台方位向速度响应曲线如图 7 所示。

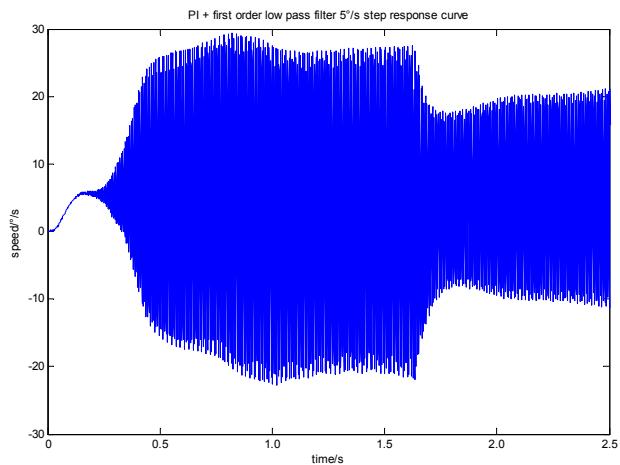


图 6 PI + 一阶 250 Hz 低通滤波器速度响应曲线  
Fig.6 PI + first-order 250 Hz low-pass filter speed response curves

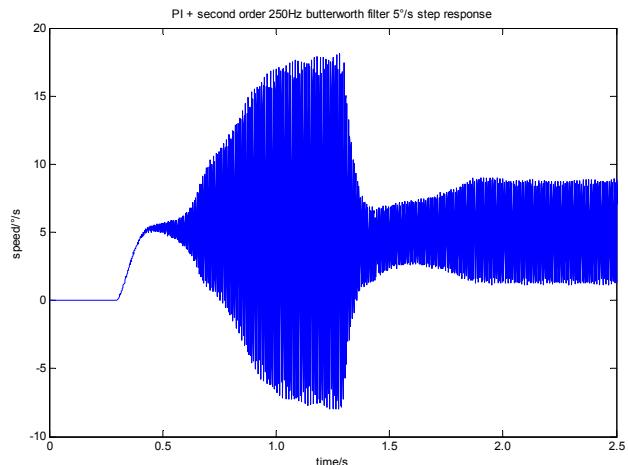


图 7 PI + 二阶 250 Hz 巴特沃斯滤波器速度响应曲线  
Fig.7 PI + second-order 250 Hz butterworth filter speed response curves

可见云台方位速度环共振现象有所减弱, 但云台仍处于共振状态不能正常工作。

将巴特沃斯滤波器截止频率设为 60 Hz 后, 分别测试云台给定速度为  $0.5^\circ/\text{s}$ 、 $5^\circ/\text{s}$ 、 $30^\circ/\text{s}$  时云台方位向速度响应曲线, 如图 8 所示。 $0.5^\circ/\text{s}$  子图中小图为稳态误差段局部放大图。 $5^\circ/\text{s}$ 、 $30^\circ/\text{s}$  子图中左侧小图为上升时间段局部放大图, 右侧小图为稳态误差段局部放大图。

可见此时云台方位向均可以正常工作, 阶跃响应超调和稳态误差都较小, 但较小的滤波频率会影响云台的动态性能, 实际会影响云台方位向刚度。

由图 6, 通过离线分析, 速度环共振频率约为 170 Hz, 设计共振频率点为 170 Hz, 带宽 20 Hz, 深度 -60 db 的陷波滤波器。速度环采用 PI 控制器和负载速度反馈采用 200 Hz 一阶低通滤波器时, 速度环

串入该陷波滤波器后,采集处于升起状态下光电云台方位向给定速度分别为 $0.5^{\circ}/s$ 、 $5^{\circ}/s$ 、 $30^{\circ}/s$ 时的速度响应情况,速度环响应曲线如图9所示。 $5^{\circ}/s$ 子图中左侧小图为上升时间段局部放大图,右侧小图为稳态误差段局部放大图。

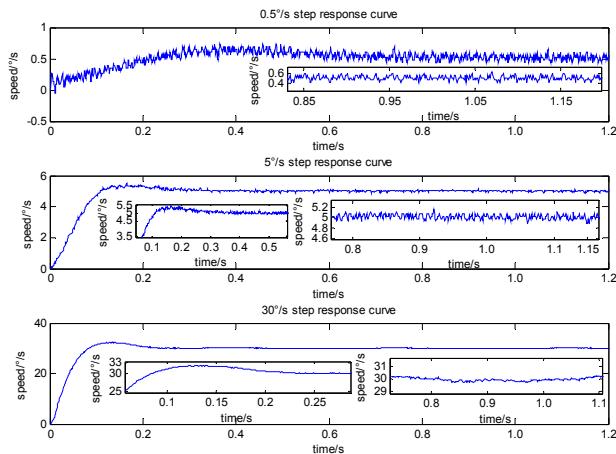


图8 PI十二阶 60 Hz 巴特沃斯滤波器速度响应曲线  
Fig.8 PI + second-order 60Hz butterworth filter speed response curves

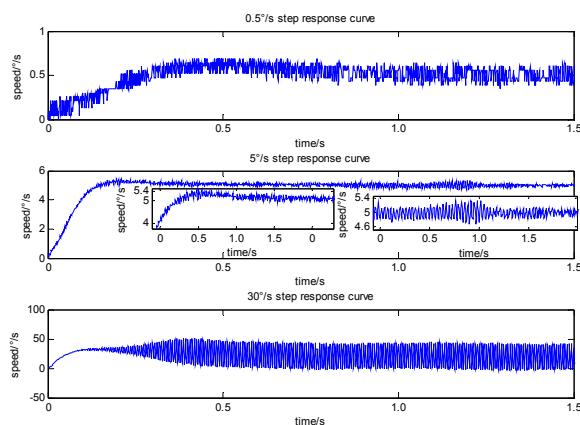


图9 PI+陷波滤波器速度响应曲线  
Fig.9 PI+notch filter speed response curves

可见速度环在转速较低时尚能保持正常运行,一旦转速较高受到较强激励时很容易再次发生共振。随着云台方位向的转动,云台方位向运行位置的共振频率点有所变化,使云台难以保持在其他位置也正常运行,单纯的陷波滤波器难以适应该系统的要求。也可通过在方位向多个位置进行共振频率测定方式,标注多个共振频率点,但随着桅杆长时间使用后结构上进一步松动老化,共振频率又会发生变化,难以保证光电云台系统持续运行正常。

可见云台方位向工作正常,没有发生共振现象。

分别对比给定速度为 $0.5^{\circ}/s$ 、 $5^{\circ}/s$ 、 $30^{\circ}/s$ 时,采用LADRC十一阶250 Hz低通滤波器方式、采用PI控制器十二阶60 Hz巴特沃斯滤波器方式、采用PI控制器+陷波滤波器方式时的速度阶跃响应曲线,对比结果如表2所示。

由于给定速度为 $0.5^{\circ}/s$ 时,响应曲线稳态误差较大,因此此时仅对比响应快慢,不给出具体量化结果。由于使用陷波滤波器时,给定速度为 $30^{\circ}/s$ 时,系统发生共振,不给出此时的具体量化结果。

速度环采用LADRC控制器和负载速度反馈采用250 Hz一阶低通滤波器时,采集处于升起状态下光电云台方位向给定速度分别为 $0.5^{\circ}/s$ 、 $5^{\circ}/s$ 、 $30^{\circ}/s$ 时的速度响应情况,速度环响应曲线如图10所示。 $5^{\circ}/s$ 、 $30^{\circ}/s$ 子图中左侧小图为上升时间段局部放大图,右侧小图为稳态误差段局部放大图。

可见采用LADRC十一阶250 Hz低通滤波器方式响应速度优于其他两种方式。在稳态误差上采用LADRC十一阶250 Hz低通滤波器方式略大于采用PI控制器十二阶60 Hz巴特沃斯滤波器方式,实际中可以考虑LADRC与二阶巴特沃斯滤波器方式进行结合使用。

表2 不同给定转速阶跃响应情况对照表

Table 2 Table of step response at different given speed

Given speed	Method	Rise time	Adjustment time	Over-shoot	Steady state error
$0.5^{\circ}/s$	LADRC	Fastest	Fastest	Minimum	$\pm 22\%$
	Butterworth filter	Middle	Middle	Max	$\pm 30\%$
	Notch filter	Slowest	Slowest	Middle	$\pm 32\%$
$5^{\circ}/s$	LADRC	53 ms	135 ms	11%	$\pm 4\%$
	Butterworth filter	77 ms	240 ms	10%	$\pm 2\%$
	Notch filter	106 ms	310 ms	9%	$\pm 6.4\%$
$30^{\circ}/s$	LADRC	45 ms	128 ms	8.6%	$\pm 0.7\%$
	Butterworth filter	55 ms	174 ms	7.6%	$\pm 1.2\%$
	Notch filter	-	-	-	-

通过在云台方位轴心 20 cm 处增加一个 2 kg 的配重测试采用 LADRC+一阶 250 Hz 低通滤波器方式时系统的鲁棒性, 给定速度为  $0.5^\circ/\text{s}$ 、 $5^\circ/\text{s}$ 、 $30^\circ/\text{s}$  时, 增加配重前后阶跃响应对比情况如图 11 所示。 $5^\circ/\text{s}$ 、 $30^\circ/\text{s}$  子图中左侧小图为上升时间段局部放大图, 右侧小图为稳态误差段局部放大图。

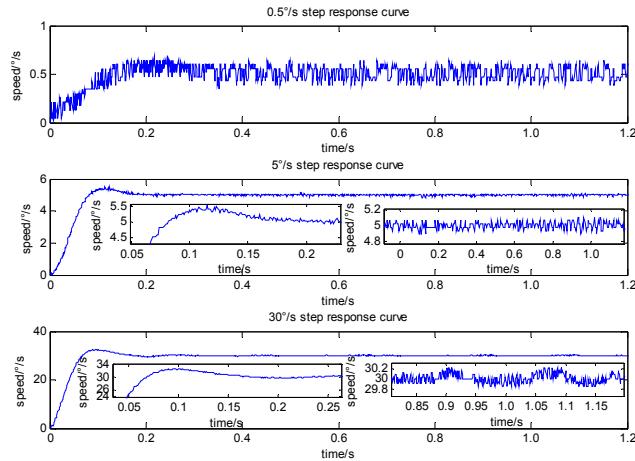


图 10 LADRC+一阶低通滤波器速度响应曲线

Fig.10 LADRC+ first-order low-pass filter speed response curves

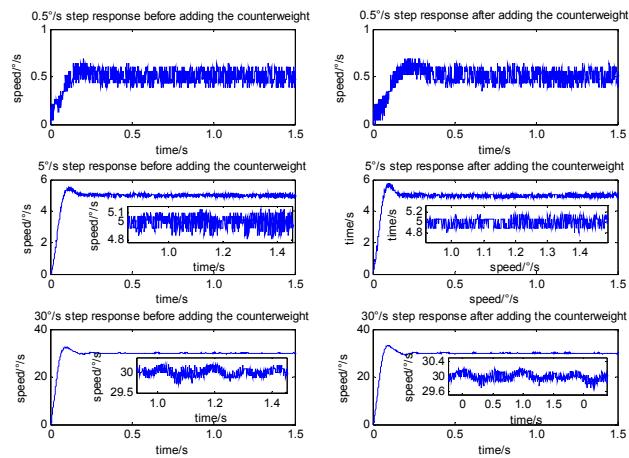


图 11 采用 LADRC 增加配重前后速度响应曲线

Fig.11 Speed response curves before and after adding the counterweight used LADRC

在不同的给定速度下, 增加配重前后的速度阶跃响应超调有所增加, 给定转速为  $5^\circ/\text{s}$  时超调增加了 5%, 给定转速为  $30^\circ/\text{s}$  时, 超调增加了 2.6%。调节时间和稳态误差基本一致。

通过将给定速度分别置为  $5^\circ/\text{s}$ 、 $10^\circ/\text{s}$ 、 $-10^\circ/\text{s}$  和  $-5^\circ/\text{s}$ , 观察增加配重前后系统的动态响应情况, 如图 12 所示。

结合图 11、图 12 综合对比, 可见采用 LADRC 方式当系统发生结构变化也能以较好的性能正常工作, 具有较好的鲁棒性。

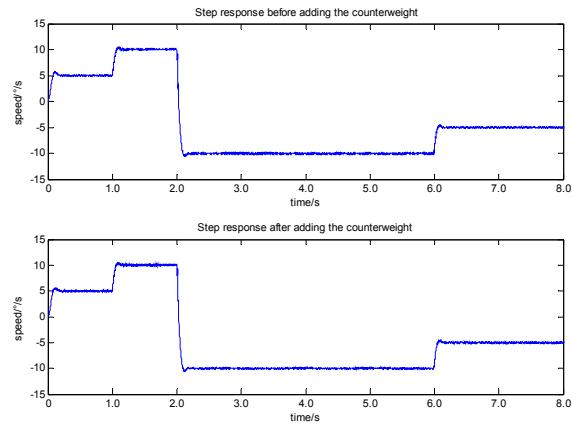


图 12 采用 LADRC 增加配重前后变速响应曲线

Fig.12 Variable speed response curves before and after adding the counterweight used LADRC

## 4 结束语

文中针对车载升降式光电云台在桅杆升起后云台方位向转动时容易共振的情况, 通过对比巴特沃斯滤波器、陷波滤波器和自抗扰控制方式对云台共振的抑制效果, 总结出了适用于车载升降式光电云台共振抑制的方法, 可在升降式光电云台使用领域得到广泛应用。

## 参考文献:

- [1] 付存银, 丁少华, 王兆基, 等. 堆垛机速度控制与立柱动态挠曲变形分析[J]. 机械设计与制造, 2019(6): 247-251.
- [2] FU Cunyin, DING Shaohua, WANG Zhaoji, et al. Single mast stacker crane speed control and stand column dynamic flexure deformation analysis[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2019(6): 247-251.
- [3] 龚文全, 曾岳南, 黄之锋, 等. 基于改进型陷波器的伺服系统谐振抑制研究[J]. 机电工程, 2018, 37(7): 845-850.
- [4] GONG Wenquan, ZENG Yuenan, HUANG Zhifeng, et al. Resonance suppression of servo system based on improved notch filter[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018, 37(7): 845-850.
- [5] 龚文全, 罗炳章. 基于自适应陷波滤波器的伺服系统谐振频率估计及抑制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(11): 37-42, 93.
- [6] GONG Wenquan, LUO Bingzhang. Resonance frequency estimation and suppression of servo system based on adaptive notch filter[J]. *Electric Machine Control Application*, 2019, 46(11): 37-42, 93.
- [7] 乔治·埃利斯. 控制系统设计指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [8] George Ellis. *Control System Design*[M]. Beijing: China Machine Press, 2016.

- [5] 郭高洁. 伺服控制系统谐振实时抑制方法探究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- GUO Gaojie. Online resonance suppression exploration of Servo system[D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [6] 黄正敏. 滚珠丝杠进给系统二阶陷波滤波抑振法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- HUANG Zhengmin. Research on Second-order Notch Filter Vibration Suppression Method of Ball Screw Feeding System[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [7] ZHAO Shen, GAO Zhiqiang. An active disturbance rejection based approach to vibration suppression in two-intertia systems[J]. *Asian Journal of Control*, 2013, **15**(2): 350-362.
- [8] 李英杰, 李绍军, 蒋鹏, 等. 一种高精度船只目标光电定位系统设计与实现[J]. 红外技术, 2023, **45**(10): 1090-1095.
- LI Yingjie, LI Shaojun, JIANG Peng, et al. Design and implementation of a high-precision ship target photoelectric positioning system[J]. *Infrared Technology*, 2023, **45**(10): 1090-1095.

## 《红外技术》第八届编辑委员会名单

荣誉主编: 褚君浩 姜会林 曾毅 曾桂林

主编: 苏君红

执行主编: 姚立斌

副主编: 姬荣斌 李凯 朱颖峰 陈钱

蔡毅 何力 金伟其 郑云峰(常务)

编委(以姓氏笔画为序)

马文坡 王双保 王霞 石峰 卢进 史衍丽 白廷柱 白瑜  
朱颖峰 刘逸平 麦绿波 苏君红 巫广华 李云红 李凯 李晓峰  
杨宇 吴一冈 吴晗平 何力 邹继鑫 汪岳峰 张长泉 张若岚  
张建奇 陆卫 陈钱 陈效双 陈福胜 金伟其 郑云峰 郑凯  
赵勋杰 赵俊 胡伟达 施加林 姚立斌 顾国华 凌福日 郭杰  
唐剑 唐利斌 唐良瑞 姬荣斌 常本康 葛宝臻 蒋亚东 曾宇  
蔡毅 熊平