

文章编号 1004-924X(2018)07-1642-11

## 机载光电载荷视轴指向控制技术综述

车 鑫<sup>1,2,3</sup>, 贾 平<sup>1,2</sup>, 田大鹏<sup>1,2\*</sup>

- (1. 中国科学院 航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**针对远距离、长焦距、高分辨机载光电成像载荷对提升视轴指向控制精度的迫切需求,从电流、速度、位置三环控制的基本原理入手,对电机的力矩控制、干扰的抑制、对延迟的鲁棒性等问题进行了分析。首先,分析了新型无刷电机电流驱动和控制方法及相应的优缺点。论述了主动抗扰内回路以及速度反馈外回路控制问题,从算法的角度提高对视轴运动速度的控制性能;另一方面,考虑机械结构刚度对控制增益的制约,从两级控制结构的角度对相应的控制方法进行分析。对目标跟踪控制这一典型位置环控制问题进行了分析,从时滞反馈控制的角度论述了相应的理论研究进展。最后,综合当前技术发展趋势给出机载光电载荷视轴指向控制技术的思考和建议。

**关键词:**机载光电载荷;视轴指向控制;主动抗扰;两级控制;目标跟踪

**中图分类号:**TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182607.1642

## A survey of line of sight control technology for airborne photoelectric payload

CHE Xin<sup>1,2,3</sup>, JIA Ping<sup>1,2</sup>, TIAN Da-peng<sup>1,2\*</sup>

- (1. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
  2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
  3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*
- \* *Corresponding author, E-mail: d.tian@ciomp.ac.cn*

**Abstract:** The need to improve the accuracy of Line of Sight (LOS) for long-distance, long-focus, and high-resolution airborne photoelectric payloads is crucial. Starting from the basic principles of current, speed, and position three-loop control, our study analyzed torque control of motors, disturbance suppression, and robustness of time delay. First, the drive and control methods of a new brushless motor at the current loop were analyzed, and the corresponding advantages and disadvantages were presented. Second, the problem of active disturbance rejection internal loop and speed feedback external loop control was discussed, and the control performance of visual axis motion

收稿日期:2018-06-04;修订日期:2018-07-02.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61673365, No. 51705496);中国科学院青年创新促进会资助项目(No. 2017257);吉林省省级产业创新专项资金资助项目(No. 2018C038-1)

speed was improved from a control algorithm perspective. Moreover, considering the constraint of mechanical rigidity on control gain, the corresponding control method was analyzed from the perspective of two-stage control based on fast steering mirrors. Third, the typical position loop control problem of target tracking and tracking control was analyzed, and the corresponding theoretical research progress was discussed from the viewpoint of time-delay feedback control. Finally, some research suggestions on airborne photoelectric payload LOS control technology were presented, combined with the developing trends of current technologies.

**Key words:** airborne photoelectric payload; line of sight control; active disturbance rejection; two-stage control; target tracking

## 1 引言

机载光电成像技术具有机动灵活、时效性强等特点,广泛应用于侦察、灾情防救等军事及民用领域,是重要的前沿高技术研究课题。搭载成像系统的飞机在飞行过程中会受到自身姿态变化、气流冲击、发动机振动、轴系摩擦、质量不平衡、内部运动机构(如调焦、变倍机构)等扰动因素的影响,造成载荷的视轴指向偏离既定目标。

机载光电载荷的视轴指向控制问题涵盖了视轴在惯性坐标系下的稳定问题以及视轴与成像目标区域之间相对运动的控制问题。视轴指向控制精度与光学系统的焦距成正比,成像系统焦距越长,瞬时视场的角度则越小,对视轴指向控制精度的要求也越高。在照相曝光时间内,视轴指向控制精度低将会导致图像模糊;在视频的若干帧之间,较低的视轴指向控制精度会造成视频图像晃动,严重影响观察效果。因此,视轴指向控制精度制约了机载光电系统的整体性能。特别是对于高分辨率、长焦距的机载远程成像系统,必须采取适当的手段提升视轴指向控制精度。提高系统视轴指向控制精度是航空光电载荷集成制造的关键问题之一。

国外机载光电载荷的研发起步早、发展快,德国LEO-III-HD吊舱实现了 $5\ \mu\text{rad}$ 稳定控制,美国全球鹰相机的视轴稳定精度达到 $3\ \mu\text{rad}$ <sup>[1]</sup>。国内近年来也开展了大量相关工作。目前,国内外机载光电载荷的视轴指向控制精度均能达到微弧度级<sup>[2]</sup>。

为实现对视轴指向的控制,机载光电载荷中的光学系统通常安装在电机驱动的多轴机械框架

上。对于每一个电机驱动轴,采用电流环、速度环和位置环嵌套的三环控制形式。其中,电流控制回路用来补偿电机内部反电动势等特性;利用陀螺反馈构建的速度控制回路补偿载机姿态扰动的影响;再通过位置控制回路实现对目标的图像跟踪等目的。本文基于机载光电载荷视轴指向控制的三环控制原理和要素,论述了每个关键环节的最新技术手段与控制算法,并结合提升视轴指向控制精度这一核心目标,对机载光电系统视轴指向控制技术的发展给出了相应的思考和建议。

## 2 系统组成与控制对象

以图1所示的两轴吊舱为例,机载光电载荷通常由光学系统、机械结构、电控系统等部分组成。光电载荷的光学成像系统安装在机械框架上,由电机驱动框架旋转进而带动视轴运动。

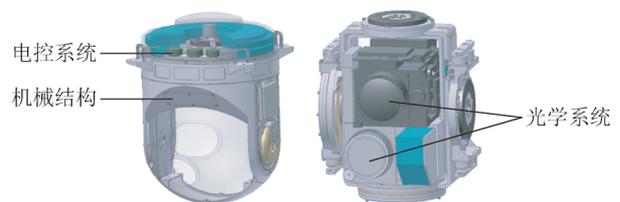


图1 机载两轴吊舱

Fig. 1 Airborne two-axis pod

控制系统采集反映电机输出力矩的电枢电流和反映视轴运动速度、位置等运动信息的传感器数据,构建如图2所示的闭环反馈控制回路,依据控制算法计算控制量,实时调整视轴的运动和指向。各回路控制方法与技术共同决定了机载光电载荷的视轴指向控制性能。

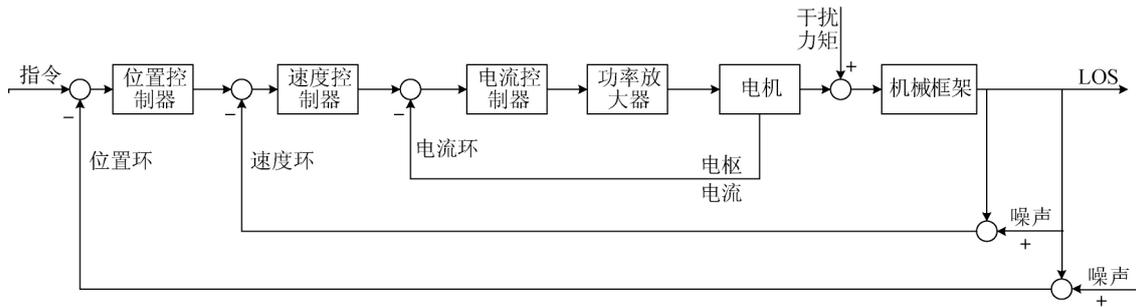


图 2 机载光电载荷视轴指向控制框图

Fig. 2 Block diagram of control of airborne photoelectric payload

### 3 电流控制回路

电机实际作用在光电载荷上的力矩与电流近似于比例关系。对于传统的直流有刷电机,很容易直接测量电枢电流实现反馈控制。然而,电刷会带来严重的摩擦干扰且增加了维护成本。

近年来,随着电机技术的飞速发展,无刷电机在提升效率、减小尺寸、降低重量和减小轴系摩擦等方面的优异性能越来越明显。其中,无刷直流电机(Blushless DC Motor, BLDCM)和永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)的发展最为迅速。由于存在电子换向,这类电机的控制原理更为复杂。

#### 3.1 BLDCM 的驱动与控制

BLDCM 是基于直流电机的原理通过电子换相实现转动,其理想的电流响应特性为方波。由于电机结构特点,BLDCM 的转矩脉动严重。在驱动 BLDCM 时可采用滞环电流法<sup>[3]</sup>、重叠换相法<sup>[4]</sup>、PWM 斩波法<sup>[5]</sup>、电流预测控制<sup>[6]</sup>等方法进行抑制。BLDCM 的驱动通常需要霍尔传感器检测转子位置进行换相。无传感器的驱动控制方法成为近年来的研究热点,通常有基于反电动势的方法<sup>[7]</sup>、续流二极管导通法<sup>[8]</sup>、磁链法<sup>[9]</sup>、电感法<sup>[10]</sup>等。

#### 3.2 PMSM 的驱动与控制

BLDCM 的内部磁场特性与传统有刷直流电机相近,相比之下,PMSM 具有与交流电机相似的特性。同体积下,输出功率较直流电机显著提高。随着交流伺服技术的发展,PMSM 因具有结构简单、转矩惯量比高、功率因数高及低速运行性能良好等优点而得到越来越多的重视。值得一提

的是,大通孔结构形式的 PMSM 相对重量轻,非常适用于光学载荷的内部光路设计,如图 3 所示。

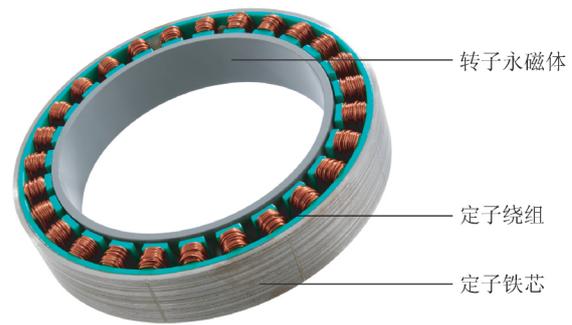


图 3 大通孔形式的永磁同步电机

Fig. 3 PMSM with through-hole

PMSM 的电流响应为正弦波,其控制比直流电机更为复杂。目前,常用的控制策略有矢量控制、直接转矩控制(Direct Torque Control, DTC)等。

#### 3.2.1 矢量控制

矢量控制也称为磁场定向控制(Field Oriented Control, FOC),最早由 F. Blaschke 提出<sup>[11]</sup>,其工作原理如图 4 所示。将定子电流通过坐标变换分解为相互垂直的磁化电流分量和转矩电流分量,通过控制旋转坐标系中的定子电流,实现磁场和转矩的解耦控制。

FOC 的实现需要获取转子电角度,通常可用轴角编码器配合霍尔测量。为减小系统的机械尺寸和提升可靠性,无传感器的 FOC 成为近年来重要的研究热点。基于数学模型<sup>[12]</sup>、观测器理论<sup>[13]</sup>等方法利用反电动势测量值实现 FOC,对反电动势检测信噪比要求苛刻,不适用于低速特性要求高的光电载荷。

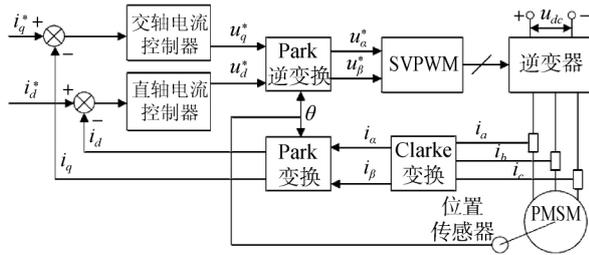


图 4 永磁同步电机矢量控制原理图

Fig. 4 Schematic diagram of PMSM system based on FOC

R. D. Lorenz 等提出的将高频信号叠加到 PWM 基波上,再基于对电流测量值进行高通滤波计算转子位置信息的高频注入法是一种有效的低速、零速 FOC 方法<sup>[14]</sup>。在此基础上,文献<sup>[15]</sup>将零序电压载波注入两倍转子电角度转速的旋转参考坐标系,简化了信号解调计算。文献<sup>[16]</sup>提出了将三个不同频率和振幅的高频脉振电压注入电机三相静止坐标系中,减小了位置估计偏差,提高了系统的稳态和动态性能。

### 3.2.2 直接转矩控制

直接转矩控制由 Depenbrock 提出<sup>[17]</sup>。原理如图 5 所示,通过检测电机定子的电压和电流,计算出定子磁链和电磁转矩,在保证电机磁链为稳定值的前提下,通过控制转矩实现调速的目的。该方法无需复杂的矢量变换,动态性能好。文献<sup>[18]</sup>和<sup>[19]</sup>分别提出了基于自适应饱和控制器和谐振控制器的 DTC 驱动方法,有效抑制了电机转矩脉动。

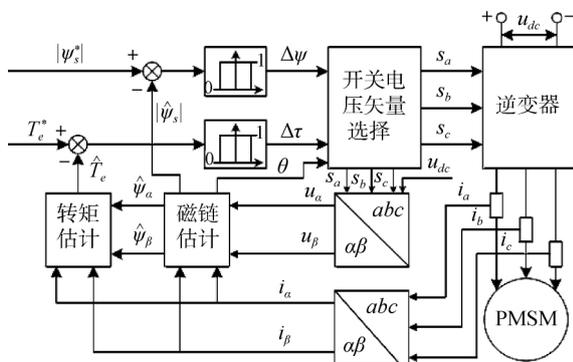


图 5 直接转矩控制结构框图

Fig. 5 Block diagram of Direct Torque Control(DTC)

综上,为提升机载光电载荷的视轴指向控制性能,首先需对电机进行优选、优控。应用无刷电机解决电刷带来的问题;文献<sup>[20]</sup>已将 PMSM 应

用于机载光电载荷中。在无测角要求的低成本光电稳定平台中应用无传感器矢量控制、在有测角要求的高性能机载光电载荷中应用直接转矩驱动控制方法是今后重要的发展方向<sup>[21]</sup>。

## 4 速度控制回路

### 4.1 机械框架的速度环控制方法

在电机选定并驱动良好的前提下,机载光电载荷还受到框架轴系上其它干扰因素的影响。补偿这些影响是保持视轴稳定、控制视轴精确指向的关键。经典的 PID 控制或超前滞后校正尽管得到了广泛的应用,然而由于算法的局限性,进一步提升系统性能是非常困难的。为提高干扰抑制性能,进而提升速度环乃至整套系统的性能,可采用内回路干扰抑制算法、基于新的控制理论改进速度环反馈控制器或增加新的能够控制光束指向的独立元件。

#### 4.1.1 内回路干扰抑制

##### 4.1.1.1 干扰观测器

干扰观测器 (Disturbance Observer, DOB) 是由日本庆应大学 K. Ohnishi 教授提出的抗干扰算法<sup>[22]</sup>,其基本思想是将外部的力矩扰动及模型参数变化统一为等效干扰,利用被控对象的名义逆模型及系统输入之间的差异估计出等效干扰,并在系统的输入端引入等量的补偿,从而实现等效干扰的抑制。其原理如图 6 所示。其中,  $G_p(s)$  为实际被控对象的传递函数,  $G_n^{-1}(s)$  为名义模型的逆,  $Q(s)$  为低通滤波器,  $T_d$  为等效干扰,  $T'_d$  为估计扰动,  $u$  为控制输入,  $n$  为测量噪声,  $Q(s)$  为低通滤波器,用于调节系统的灵敏度与补灵敏度。文献<sup>[23]</sup>验证了加入 DOB 能够有效提升系统在低频段对抗动的抑制能力。

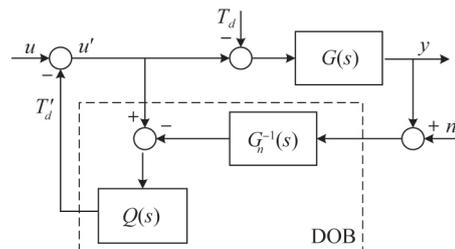


图 6 干扰观测器的基本结构

Fig. 6 Structure of DOB

近年来,进一步提高 DOB 的适用性以及应用 DOB 简化复杂的非线性系统成为较为热门的研究

究方向。文献[24]将 DOB 应用于 MIMO 非仿射非线性系统的自适应输出反馈容错控制。文献[25]将 DOB 应用于一类分数阶混沌系统的鲁棒同步控制。文献[26]提出了使用 Hirschorn 的逆方法设计非线性系统的 DOB,深化了 DOB 的理论构架。

4.1.1.2 自抗扰控制

自抗扰控制 (Active Disturbance Rejection Control, ADRC) 技术是由中科院韩京清研究员提出的一种控制方法<sup>[27]</sup>,其基本组成如图 7 所示。

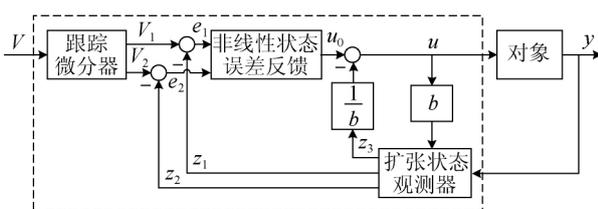


图 7 ADRC 结构框图

Fig. 7 Structure of ADRC

ADRC 由扩张状态观测器 (Extended State Observer, ESO)、非线性跟踪微分器、非线性状态误差反馈和扰动补偿 4 部分组成。其中,最关键的、提升系统在干扰条件下的鲁棒性能的重要环节是 ESO 构成的干扰观测补偿回路,即图 7 中  $z_3$  的反馈。

对于被控系统有:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu \\ \dot{x}_3 = \omega(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $\omega(t)$  为外界扰动,  $x_3 = f(x_1, x_2, \omega(t), t)$  包括内环不确定因素和外界干扰。

可使用 ESO 对系统状态变量进行观测:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01} e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02} |e_1|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(e) + bu \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03} |e_1|^{\frac{1}{4}} \text{sign}(e) \end{cases} \quad (2)$$

通过选择合适的参数  $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ , 实现  $z_3$  对系统扰动量  $x_3$  的估计。

近年来,文献[28]通过高次滑模观测器对具有多重干扰的非线性系统进行了 ADRC 控制。文献[29]提出了一种新型的离散时间增量式 ADRC。文献[30]将线性 ADRC 转换为两自由

度内模控制结构,并据此提高系统的动态性能。文献[31]给出了线性 ADRC 和非线性 ADRC 的切换方案及其必要性。

4.1.1.3 等价输入干扰

等价输入干扰 (Equivalent Input Disturbance, EID) 是由东京工科大学余锦华教授提出的一种干扰估计和补偿算法<sup>[32]</sup>,其原理如图 8 所示。

考虑线性时不变对象:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_d d(t) = \\ Ax(t) + B[u(t) + d_e(t)] \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (3)$$

可证明存在等价输入干扰  $d_e(t)$  对输出的影响与  $d(t)$  对输出的影响完全相同。EID 的估计值为:

$$\hat{d}(t) = B^+ L[y(t) - C\hat{x}(t)] + u_f(t) - u(t), \quad (4)$$

其中:  $B^+ = B^T / B^T B$ ;  $\hat{d}(t)$  经低通滤波器得到  $\tilde{d}(t)$ , 并反馈至系统输入端以补偿系统干扰。

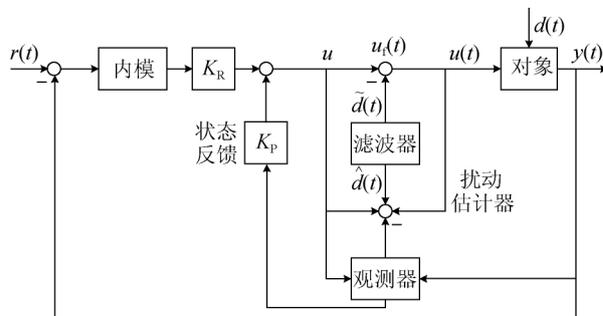


图 8 等价输入干扰结构图

Fig. 8 Structure of EID

在此基础上,文献[33]提出了基于 EID 的鲁棒干扰抑制方法,在具有较大非确定性的非最小相位系统取得了较好的效果。

结合图 6~图 8 及式(2)、式(4)可以看出,内回路干扰抑制方法几乎都通过输入  $u$  和输出  $y$  对干扰进行估计,各方法的核心原理是统一的,区别在于适用对象(最小相位或非最小相位)以及设计方法的不同。对机载光电载荷进行模型辨识后,根据具体模型参数特点选择合适的内回路干扰补偿算法可有效提高速度环的控制精度。

文献[34]将 ADRC 应用于视轴稳定控制中,在 2.5 Hz 的正弦扰动下,系统稳态误差仅为传统 PI 控制方法的 9.76%。文献[35]将 DOB 应用于光电稳定平台中,在 3 Hz 的正弦扰动下,系统的

扰动隔离度至少提高了 14.52 dB。文献[36]采用最优滑模控制方法,减小了光电载荷系统的稳态误差。

#### 4.1.2 非线性速度环反馈控制器设计

使用非线性方法有望改善速度环反馈回路对残余干扰的抑制能力,提升系统性能。滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)是一类特殊的非线性控制,通过切换控制量强迫系统进入预先设定的滑模面滑动。系统的稳定性及动态性能仅取决于滑模面的动态特性,参数变化及外界干扰对系统无作用。滑模控制的设计一般包含设计滑模面和设计滑模变结构控制律两个方面。

常用的滑模面主要可分为线性滑模面和非线性滑模面。线性滑模面系统的稳定性分析简单,参数设计相对容易,但在复杂的非线性系统中控制能力则略显不足,故国内外许多学者都致力于非线性滑模面的研究。如非奇异终端滑模面设计为:

$$s = x_1 + \frac{1}{\beta} x_2^{p/q}, \quad (5)$$

其中  $\beta > 0, p, q (p > q)$  为正奇数,可使系统滑模面上的跟踪误差在有限时间内收敛为零<sup>[37]</sup>。

滑模控制律设计方法可以分为不等式形式到达条件和等式形式到达条件。各国学者在该方法上进行了大量的工作,涌现了诸如输出反馈 SMC<sup>[38]</sup>、自适应 SMC<sup>[39]</sup>、有限时间 SMC 控制<sup>[40]</sup>、高阶 SMC<sup>[41]</sup>等一系列方法,是近年来研究的热点。

综上所述,使用内回路干扰抑制算法,能够提升系统速度环的抗扰动能力;采用诸如 SMC 等非线性速度环反馈控制方法能够有效提升系统速度环的控制精度,是今后重要的研究方向。

#### 4.2 基于快速反射镜的二级稳像

由于机载光电载荷机械结构上的谐振和高频未建模动态特性的存在,单纯地依靠控制算法提高系统在外界干扰作用下的视轴指向性能仍然受到较大约束。通过加入能够控制光束指向的独立元件可有效提高视轴控制性能,达到微弧度级的控制精度。快速反射镜(Fast Steering Mirror, FSM)技术是该方法的典型代表。

设系统机械框架速度闭环控制回路的表达式为:

$$y(s) = G(s)(C(s)e(s) + d(s)), \quad (6)$$

其中:  $y(s)$  表示机械框架作用的视轴角速度响应;

$G(s)$  为控制回路中被控对象的传递函数;  $C(s)$  为控制器传递函数;  $d(s)$  为作用在被控对象上的扰动;  $e(s) = r(s) - y(s)$  是控制误差;  $r(s)$  为输入的角速度控制指令。在系统中加入快速反射镜,利用 FSM 折转光束控制视轴角速度,FSM 输入指令为机械框架回路残差,FSM 输出直接作用于视轴上,则成像系统最终的视轴角速度为 FSM 与机械框架二者作用的叠加结果,即有:

$$y'(s) = y(s) + y_{FSM}(s) = G(s)(C(s) \cdot e'(s) + d(s)) + G_{FSM}(s) \cdot e'(s). \quad (7)$$

其中:  $y'(s)$  为系统视轴角速度响应;  $y_{FSM}(s)$  为快速反射镜作用的视轴角速度响应;  $G_{FSM}(s)$  为受控的快速反射镜的传递函数,在较宽频带内可近似为 1。

容易计算得到加入二级稳定的系统输出为:

$$y'(s) = G_{y'r}(s) \cdot r(s) + G_{y'd}(s) \cdot d(s), \quad (8)$$

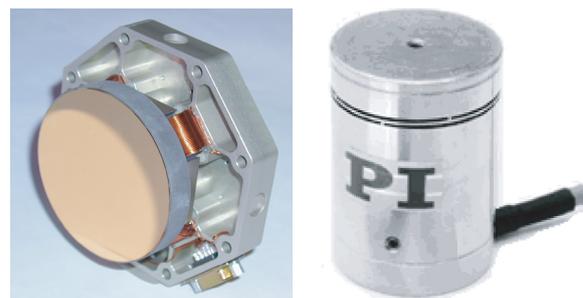
其中:

$$G_{y'r}(s) = \frac{C(s) \cdot G(s) + G_{FSM}(s)}{1 + C(s) \cdot G(s)}, \quad (9)$$

$$G_{y'd}(s) = \frac{G(s) - G(s) \cdot G_{FSM}(s)}{1 + C(s) \cdot G(s)}. \quad (10)$$

低频时,  $G_{FSM}(s) \approx 1$ , 则  $G_{y'r}(s) \approx 1, G_{y'd}(s) \approx 0$ 。系统加入 FSM 后系统性能大幅提升。因此,这一方法的核心在于如何保证  $G_{FSM}(s)$  在较宽频带内近似为 1。

快速反射镜通常由音圈电机(Voice Coil Motor, VCM)或压电陶瓷(Piezoelectric Ceramic, PZT)驱动,如图 9 所示。二者相比较而言,VCM 驱动电压低、行程大,但与 PZT 相比精度低,适用于摆角较大的 FSM;而 PZT 精度高,但驱动电压高、行程小,适用于摆角较小的 FSM。



(a) VCA 驱动快速反射镜 (b) PZT 驱动快速反射镜  
(a) FSM driven by VCA (b) FSM driven by PZT

图 9 快速反射镜实物图

Fig. 9 Photograph of FSM

#### 4.2.1 VCM 驱动的 FSM 控制

VCM 的动态特性较为简单,在柔性传动机构的支撑下,FSM 内部的干扰较小,实现其高性能控制较为容易。文献[42]提出 VCM 驱动 FSM 的高精度鲁棒自适应控制方法,提高了系统的鲁棒性及跟踪性能。文献[23]提出基于加速度测量的改进的 DOB 控制方法,提高了系统的低频特性及抗扰动性能。

#### 4.2.2 PZT 驱动的 FSM 控制

压电陶瓷存在着严重的迟滞和蠕变非线性特性,因此,补偿压电陶瓷的非线性特性是此类执行器控制的核心问题。基于开环前馈逆补偿方法较为常见。此类方法主要分为基于 Prandtl-Ishlinskii 模型等数学拟合方法<sup>[43]</sup>、基于 Maxwell 模型<sup>[44]</sup>等物理机理建模方法和基于智能计算的模型<sup>[45]</sup>三类。但是,基于模型补偿有时会受到参数摄动的影响,因此,也有文献使用鲁棒控制<sup>[46]</sup>、自适应控制<sup>[47]</sup>等反馈方法提升性能。

文献[48]使用双闭环的 PID 控制反馈方法,有效提高了 FSM 的精度及带宽,该方法结构简单,易于工程实现。文献[49]将自适应滑模反演控制方法应用于 PZT 驱动的 FSM 中,提高了控制精度。文献[50]分析了 PZT 驱动的 FSM 在高电压驱动情况下的动态特性,并提高了系统带宽。

对于光电载荷速度反馈回路控制,加入内回路干扰抑制算法、改进速度反馈控制方法与使用二级稳定都能够提升系统性能,对各个算法深入研究、相互结合是实现视轴指向控制精度大幅提升的重要方向。

## 5 位置控制回路

对图像中的目标进行跟踪是视轴指向控制中典型的位置回路控制问题。随着载机与目标机动性能的增强,对跟踪控制回路频率特性的要求也在提升。位置控制回路的有效工作频带受到成像帧频、跟踪器计算延迟及速度反馈回路带宽的限制。其中,延迟因素对跟踪性能的影响最为严重。

从光电探测器开始敏感目标信号到伺服控制器收到脱靶量要有一定的延迟时间,其中包括光电转换延迟、信号处理延迟和通讯传输延迟等。信号处理延迟是指图像处理系统根据图像数据计算目标脱靶量所需的时间。控制系统的采样周期

为一毫秒甚至更小,而在此控制回路中,延迟通常达到数十毫秒。机载光电载荷跟踪目标的位置控制回路本质为闭环时滞控制系统。为了保证实际系统的实时性和快速性,一般采样频率较高,运算时间有限。因此,探求简单、实用且具有强鲁棒性的延迟补偿方法对于提升目标的跟踪控制精度具有重要意义。

工程中常采用 PID 控制算法。当 PID 增益较小时能够容忍回路中延迟环节的影响。然而,当延迟较大时,PID 控制的增益也难以提高,跟踪控制的实际性能有限<sup>[51]</sup>。近年来,随着控制理论的发展,考虑延迟的目标跟踪算法也有了一定的进步,控制性能得到了提升。文献<sup>[52]</sup>采用基于自适应估计的跟踪器延迟补偿方法,具有较高的鲁棒性。

实际上,闭环时滞控制系统是一项富有挑战性的课题,通常涉及到预测与鲁棒两大方向。Smith 预估器方法是具有代表性的预测思想,其基本原理是将滞后环节提前反映到系统的串联前向控制器,消除滞后环节对系统的影响。

以单回路时滞控制系统为例, $D(s)$ 表示预估器的传递函数, $G_p(s)$ 为被控对象中不含纯滞后部分的传递函数, $e^{-\tau s}$ 为滞后环节。不加入 Smith 预估器时系统的闭环传递函数为:

$$\Phi(s) = \frac{D(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1 + D(s)G_p(s)e^{-\tau s}}. \quad (11)$$

系统的特征方程是一个超越方程,有无穷多解,随着延迟时间的增大容易产生复右半平面极点,导致系统不稳定。加入 Smith 预估器后,闭环传函为:

$$\Phi(s) = \frac{D(s)G_p(s)}{1 + D(s)G_p(s)}. \quad (12)$$

特征方程变回代数方程,延迟造成的不稳定问题得到解决,可以大幅提升控制器的增益。

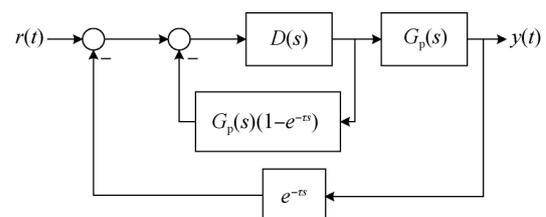


图 11 史密斯预估补偿控制的原理图

Fig. 11 Principle schematic of Smith predictive compensation control

该方法依赖于被控对象的数学模型,对模型误差十分敏感,并且当控制对象含有纯积分环节时,无法消除系统的稳态误差。近些年,科研人员在传统的史密斯预估器的基础上,结合模糊控制<sup>[53]</sup>、自适应控制<sup>[54]</sup>等算法对系统进行了改进。

在时滞系统的稳定性分析中, Lyapunov-Krasovskii 函数取代了传统意义上的二次正定 Lyapunov 函数,成为时滞系统稳定性分析最重要的方法之一。

来源于电路系统的无源性方法最早由 Lurie 和 Popov 引入控制中,无源性原理是一种从系统能量的角度入手的非线性控制方法<sup>[55]</sup>。文献<sup>[56]</sup>利用 Lyapunov-Krasovskii 泛函方法,获得了原系统时滞相关无源的充分条件。

无源性控制是以系统能量角度入手,所设计的控制器可实现系统的全局稳定,对参数变化及外界扰动有较强的鲁棒性。将无源性方法应用于机载光电载荷位置回路的延迟补偿将会取得明显的效果。

综上,采用先进的延迟系统控制理论提升跟

踪控制精度是未来重要的研究方向。

## 6 总结与展望

高精度机载光电载荷视轴指向的控制精度是影响机载光电成像系统整体性能的重要因素。本文针对载荷视轴指向控制问题,分别从机载光电载荷的各个控制回路入手进行了深入分析。论述了视轴指向控制中各回路控制方法的研究进展和应用情况,并对相应的控制方法、性能和适用领域进行了探讨,基于这些分析,针对机载光电载荷的视轴指向控制,采用新型无刷电机结合直接转矩驱动控制等方法代替传统有刷电机是今后重要的发展方向。选择合适的干扰抑制方法和非线性反馈算法改良速度控制回路能有效提升控制精度。在此基础上采用二级稳定技术能进一步提升视轴指向控制精度,将控制矛盾转变为二级稳定元件的高精度控制。基于预测和时延鲁棒控制理论有望提升目标跟踪控制这一典型含延迟位置的控制性能。

### 参考文献:

- [1] 谢瑞宏. 机载光电平台伺服系统稳定与跟踪控制技术的研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.  
XIE R H. *The Research of Stabilization and Tracking Control Techniques on Airborne Opto-electric Platform Servo System* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2017. (in Chinese)
- [2] 吉书鹏. 机载光电载荷装备发展与关键技术[J]. 航空兵器, 2017(6): 3-12.  
JI SH P. Equipment development of airborne electro-optic payload and its key technologies [J]. *Aero Weaponry*, 2017 (6): 3-12. (in Chinese)
- [3] CARLSON R, LAJOIE-MAZENC M, FAGUNDES J. Analysis of torque ripple due to phase commutation in brushless DC machines [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1992, 28 (3): 632-638.
- [4] MURAI Y, KAWASE Y, OHASHI K, et al.. Torque ripple improvement for brushless DC miniature motors [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1989, 25(3): 441-450.

- [5] XIA K, LU J, BI C, et al.. Dynamic commutation torque-ripple reduction for brushless DC motor based on quasi-Z-source net[J]. *Iet Electric Power Applications*, 2016, 10(9): 819-826.
- [6] WEI K, LOU ZH L, ZHANG ZH CH. Research on the commutation current prediction control in brushless DC motor [C]. *Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2005: 6-10.
- [7] YEO H G, HONG C S, YOO J Y, et al.. Sensorless drive for interior permanent magnet brushless DC motors [C]. *1997 IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record*, 1997: 18-21.
- [8] OGSAWARA S, AKAGI H. An approach to position sensorless drive for brushless DC motors [C]. *Conference Record of the 1990 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1990: 7-12.
- [9] ERTUGRUL N, ACARNLEY P. A new algorithm for sensorless operation of permanent magnet motors [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1994, 30(1): 126-133.
- [10] CHAMPA P, SOMSIRI P, WIPASURAMONTON P, et al.. Initial rotor position estimation

- for sensorless brushless DC drives [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2009, 45 (4):1318-1324.
- [11] BLASCHKE F. The principle of field orientation as applied to the new transvector closed loop control systems for rotating field machines [J]. *Siemens Review*, 1972, 39:217-220.
- [12] WU R, SLEMON G R. A permanent magnet motor drive without a shaft sensor [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1991, 27 (5): 1005-1011.
- [13] SOLSONA J, VALLA M I, MURAVCHIK C. A nonlinear reduced order observer for permanent magnet synchronous motors [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1996, 43 (4): 492-497.
- [14] CORLEY M J, LORENZ R D. Rotor position and velocity estimation for a salient-pole permanent magnet synchronous machine at standstill and high speeds [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1998, 34(4):784-789.
- [15] XU P L, ZHU Z Q. Novel carrier signal injection method using zero-sequence voltage for sensorless control of PMSM drives [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(4):2053-2061.
- [16] TANG Q, SHEN A, LUO X, *et al.*. PMSm sensorless control by injecting HF pulsating carrier signal into ABC frame [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(5):3767-3776.
- [17] DEPENDROCK M. Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1988, 3(4):420-429.
- [18] ZHANG Z, WEI C, QIAO W, *et al.*. Adaptive saturation controller-based direct torque control for permanent-magnet synchronous machines [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(10):7112-7122.
- [19] ABOSH A H, ZHU Z Q, REN Y. Reduction of torque and flux ripples in space vector modulation-based direct torque control of asymmetric permanent magnet synchronous machine [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(4): 2976-2986.
- [20] 程龙. 光电跟踪系统永磁同步电机快速捕获控制技术[D]. 长春: 长春工业大学, 2016.  
CHENG L. *Fast Acquisition Control for the Optical Tracking System with Permanent Magnet Synchronous Motor* [D]. Changchun: Electric and Electronic College of Changchun University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [21] BETIN F, CAPOLINO GA, CASADEI D, *et al.*. Trends in electrical machines control: samples for classical, sensorless, and fault-tolerant techniques [J]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2014, 8(2):43-55.
- [22] OHNISHI K, SHIBATA M, MURAKAMI T. Motion control for advanced mechatronics [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1996, 1(1):56-67.
- [23] DENG C, TANG T, MAO Y, *et al.*. Enhanced disturbance observer based on acceleration measurement for fast steering mirror systems [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3):1-11.
- [24] MA Z, TONG S, LI Y. Adaptive output feedback fault-tolerant control for MIMO non-affine non-linear systems based on disturbance observer [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2016, 10(18):2422-2436.
- [25] CHEN M, SHAO S Y, SHI P, *et al.*. Disturbance-observer-based robust synchronization control for a class of fractional-order chaotic systems [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2017, 64(4):417-421.
- [26] DASGUPTA S, SADHU S, GHOSHAL T K. Designing disturbance observer for non-linear systems-a hirschorn inverse approach [J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2017, 11(2):164-170.
- [27] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3):900-906.
- [28] DAI C, YANG J, WANG Z, *et al.*. Universal active disturbance rejection control for non-linear systems with multiple disturbances via a high-order sliding mode observer [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2016, 11(8):1194-1204.
- [29] HERBST G. Practical active disturbance rejection control: bumpless transfer, rate limitation, and incremental algorithm [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(3):1754-1762.
- [30] TAN W, FU C. Linear active disturbance-rejection control: analysis and tuning via IMC [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(4):2350-2359.
- [31] LI J, XIA Y, QI X, *et al.*. On the Necessity, scheme, and basis of the Linear&#8211;nonlin-

- ear switching in active disturbance rejection control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017,64(2):1425-1435.
- [32] SHE J H, XIN X, OHYAMA Y. Estimation of equivalent input disturbance improves vehicular steering control [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2007,56(6):3722-3731.
- [33] LIU R J, WU M, LIU G P, *et al.*. Active disturbance rejection control based on an improved equivalent-input-disturbance approach [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(4):1410-1413.
- [34] 方宇超, 李梦雪, 车英, 等. 车载光电侦察平台视轴稳定技术研究[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(2):410-417.  
FANG CH Y, LI M X, CHE Y, *et al.*. Study on boresight stabilized technology of vehicle photoelectric reconnaissance platform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(2):410-417. (in Chinese)
- [35] 晋超琼, 张葆, 李贤涛, 等. 基于扰动观测器的光电稳定平台摩擦补偿策略[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2017, 47(6):1876-1885.  
JIN CH Q, ZHANG B, LI X T, *et al.*. Friction compensation strategy of photoelectric stabilized platform based on disturbance observer[J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2017, 47(6):1876-1885. (in Chinese)
- [36] 程龙, 陈娟, 陈茂胜, 等. 光电跟踪系统快速捕获时间最优滑模控制技术[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(1):148-154.  
CHENG L, CHEN J, CHEN M SH, *et al.*. Fast acquisition of time optimal sliding model control technology for photoelectric tracking system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1):148-154. (in Chinese)
- [37] FENG Y, YU X H, MAN ZH H. Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators [J]. *Automatica*, 2002, 38(12):2159-2167.
- [38] NGUYEN T, SU W C, GAJIC Z, *et al.*. Higher accuracy output feedback sliding mode control of sampled-data systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, 61(10):3177-3182.
- [39] HU X, WU L, SI X, *et al.*. Adaptive sliding mode control of non-linear non-minimum phase system with input delay [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2016, 11(8):1153-1161.
- [40] SONG J, NIU Y, ZOU Y. Finite-time stabilization via sliding mode control [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(3):1478-1483.
- [41] UTKIN V. Discussion aspects of high-order sliding mode control [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, 61(3):829-833.
- [42] WANG G, RAO CH H. Adaptive control of piezoelectric fast steering mirror for high precision tracking application [J]. *Smart Mater. Struct.*, 2015, 24(3):11.
- [43] GU G Y, ZHU L M, SU C Y. Modeling and compensation of asymmetric hysteresis nonlinearity for piezoceramic actuators with a modified prandtl-ishlinskii model [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(3):1583-1595.
- [44] LIU Y F, SHAN J J, MENG Y, *et al.*. Modeling and identification of asymmetric hysteresis in smart actuators: a modified MS model approach [J]. *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(1):38-43.
- [45] LIU W, CHENG L, HOU Z G, *et al.*. An inversion-free predictive controller for piezoelectric actuators based on a dynamic linearized neural network model [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(1):214-226.
- [46] AL-GHANIMI A, ZHENG J, MAN ZH H. Robust and fast non-singular terminal sliding mode control for piezoelectric actuators [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2015, 9(18):2678-2687.
- [47] XU Q. Precision motion control of piezoelectric nanopositioning stage with chattering-free adaptive sliding mode control [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2017, 14(1):238-248.
- [48] 王昱棠, 张宇鹏, 徐钰蕾. 压电陶瓷驱动快速反射镜双闭环控制 [J]. *仪器仪表学报*, 2014(S1):68-72.  
WANG Y T, ZHANG Y P, XU Y L. Dual-loop control strategy for fast-steering mirror driven by PZT [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014(S1):68-72. (in Chinese)
- [49] 田福庆, 李克玉, 王珏, 等. 压电驱动快速反射镜的自适应反演滑模控制 [J]. *强激光与粒子束*, 2014(1):65-69.  
TIAN F Q, LI K Y, WANG J, *et al.*. Adaptive backstepping sliding mode control of fast steering mirror driven by piezoelectric actuator [J]. *High*

- Power Laser and Particle Beams*, 2014(1):65-69. (in Chinese)
- [50] FAN M, HUANG L, LI M, *et al.*. A fast high voltage driver for the piezoelectric fast steering mirror [C]. *XX International Symposium on High Power Laser Systems and Applications, SPIE*, 2015.
- [51] 岳玉芳. 光电跟踪系统传感器延迟及控制算法研究 [J]. *计算机工程与设计*, 2012, 33(7): 2868-2873.  
YUE Y F. Research of delay of sensor and control algorithms in opto-electronic tracking system [J]. *Computer Engineering and Design*, 2012, 33(7): 2868-2873. (in Chinese)
- [52] 张静, 王宏伦, 盖文东. 基于自适应估计的光电平台目标跟踪方法 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2010(12):1465-1468.  
ZHANG J, WANG H L, GAI W D. Ground target tracking method research based on adaptive estimation for electro-optical platform [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010(12):1465-1468. (in Chinese)
- [53] HWANG C L. Decentralized fuzzy control of nonlinear interconnected dynamic delay systems via mixed  $H_2/H^\infty$  optimization with smith predictor [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2011, 19(2):276-290.
- [54] LAI C L, HSU P L. Design the remote control system with the time-delay estimator and the adaptive smith predictor [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2010, 6(1):73-80.
- [55] ORTEGA R, SCHAFT AJVD, MAREELS I, *et al.*. Putting energy back in control [J]. *IEEE Control Systems*, 2001, 21(2):18-33.
- [56] MAHMOUD M S, ZRIBI M. Passive control synthesis for uncertain systems with multiple-state delays [J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2002, 28(3):195-216.

## 作者简介:



车 鑫(1991—),男,吉林长春人,博士研究生,2010 年于吉林大学获得学士学位,主要从事机载光电载荷视轴指向控制方面的研究。E-mail: chexin15@mails.ucas.ac.cn

## 导师简介:



贾 平(1964—),男,吉林延吉人,研究员,博士生导师,主要从事航空、航天成像与测量仪器技术方面的研究。E-mail:jiap@ciomp.ac.cn

## 通讯作者:



田大鹏(1984—),男,辽宁铁岭人,副研究员,硕士生导师,中国科学院青年创新促进会会员,2007 年于北京理工大学获得学士学位,2012 年于北京航空航天大学获得博士学位,2009—2012 年任日本庆应义塾大学先导研究中心共同研究员,主要从事运动控制理论与技术方面的研究。E-mail:d.tian@ciomp.ac.cn