

文章编号 1004-924X(2023)13-1922-11

## 航空光电载荷串级动态复合限幅分幅步进控制

付金宝<sup>1,2\*</sup>, 张洪文<sup>1,2</sup>, 黄厚田<sup>1,2</sup>, 张雷<sup>1,2</sup>

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

**摘要:**在某型面阵分幅步进成像的航空光电载荷中,俯角分幅步进控制系统存在位置给定突变以及电机启停导致机身整体微晃动的问题,使系统调整时间延长超过时序控制并影响成像效果。提出了串级动态复合限幅控制方法,在带有 Anti-Windup 的主副回路串级控制基础上,根据“一周拍照开始信号”和“位置/速度控制信号”动态规划电压限幅和速度限幅的幅值,实现对步进给定突变的自适应以及根据需要减小机身整体微晃动影响,最终满足载荷时序控制要求。控制实验测试及动态成像实验表明:在该航空光电载荷俯角分幅步进控制系统采用串级动态复合限幅控制后,实现了拍照段步进位置和返程段回位控制的快速性和稳态性能,拍照段位置步进控制的稳态调整时间缩短了 26.56%,返程段位置回位控制的稳态调整时间缩短了 18.47%。该方法满足载荷时序控制要求,提高了动态成像的横向像移补偿效果。

**关键词:**航空光电载荷;航空相机;限幅;抗饱和;串级控制

**中图分类号:**TP273;V241; **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20233113.1922

## Cascade dynamic hybrid amplitude limitation frame division step control of airborne optical electronic load

FU Jinbao<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Hongwen<sup>1,2</sup>, HUANG Houtian<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** For a certain type of airborne optical electronic load with frame-division step imaging, the system undergoes a sudden change in the given position value and slight shaking of the camera body when the motor starts and stops. The system takes so long that the steady-state setting time exceeds the time-sequence control requirements, which affects the image quality. This study proposes a control method called cascade dynamic hybrid amplitude limitation. On the basis of cascade control with primary and subsidiary loops, the system realizes the adaptation of the sudden jump in the given step angle value and reduces the influence of slight body shaking via dynamic programming of voltage limits and speed limits according to the photoperiodic starting signal and position-speed control signal. Finally, the system satisfies the time-sequence control requirements of an airborne optical electronic load. Experiments and dynamic imaging

收稿日期:2022-12-01;修订日期:2023-01-13.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 61675202)

tests indicate that when cascade dynamic hybrid amplitude limitation control is adopted, the system realizes fast and steady-state performance of step position control during the imaging and back periods. The steady-state setting time of position control during the imaging and back periods is reduced by 26.56% and 18.47%, respectively. This method satisfies the time-sequence control requirements of an airborne optical electronic load and improved the rolling direction image motion compensation effect.

**Key words:** airborne optical electronic load; aerial camera; amplitude limitation; anti-windup; cascade control

## 1 引言

航空侦察是军事侦察的重要组成部分,相对于卫星侦察而言,航空侦察具有时效性强、机动灵活等<sup>[1-3]</sup>特点,提升航空侦察载荷性能对于提升国防信息安全具有十分重要的意义。以某型面阵航空光电载荷俯角分幅步进控制系统为研究对象,该航空相机采用步进分幅成像,其效率略低于动态扫描成像,主要是因为动态扫描成像的航空相机采用快速补偿镜<sup>[4-7]</sup>。由于该相机成像光路特点及原理无法使用快速反射镜,本文在相机步进分幅工作方式的基础上通过串级动态复合限幅控制方法提升成像效果。

自动控制系统通常会面临多种多样的限制条件,例如工业过程控制系统往往受温度、压力、电压等限制,以电机等作为被控对象的自动控制系统会受转速、输入电压等因素的制约。此外,被控系统在有些特定场合需要进行控制模式的切换,例如从位置模式切换到速度模式,从手动控制切换到自动控制。输入条件限制、模式切换的存在以及能量供给单元的能力限制,往往会导致实际被控对象的输入与控制器计算的期望输出不相等,由此引起的系统响应变差的现象被称为 Windup 现象<sup>[8-9]</sup>。系统设计中必须要充分考虑这些非线性负面的影响,否则系统在给定值大突变的情况下容易出现大超调现象,导致系统不稳定。常用的 PID 控制器中,积分饱和现象就是 Windup 现象的典型代表。控制器中一般都会包含积分环节用于消除系统稳态静态误差,提升系统稳态性能,但积分项也会导致 Windup 现象的产生,使得系统动态响应过程延长,而这是有些对时序要求苛刻的系统所不能承受的。

某型面阵航空光电载荷俯角分幅步进位置

控制系统在工作中存在步进角度给定值的悬殊突变性、功率驱动单元能力限制以及为了减小启动力矩造成的机身晃动而采取软件限幅等非线性因素,为获得良好的稳态静态特性,控制器中必然存在积分环节,因此,系统会不可避免地产生 Windup 现象。本文在串级主副回路步进位置控制的基础上,除采用积分饱和抑制措施之外,在内外双环均增加动态复合限幅措施,以解决电机启动力矩引起的机身整体微晃动问题,即在小给定信号时根据速度/位置信号动态植入限幅,在大给定信号时根据一周拍照开始信号上升沿适时调整限幅,从而保证在俯角分幅步进位置控制在给定条件下均能较好抑制积分 Windup 现象,且不会出现严重超调,削弱机身整体微晃动的影响,提高像移补偿效果。

## 2 原理

### 2.1 俯角分幅步进控制系统组成

某型面阵航空光电载荷俯角分幅步进控制系统的组成框图如图 1 所示。俯角分幅步进控制系统的被控对象为俯角扫描头组件,其三维图如图 2 所示。

该型面阵航空光电载荷俯角分幅步进控制

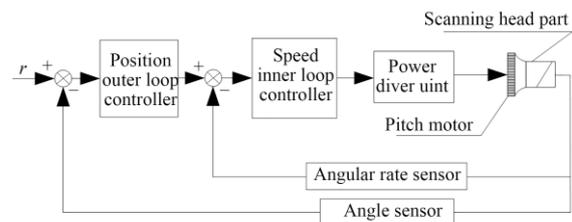


图 1 俯角分幅步进控制系统组成框图

Fig. 1 Block diagram of pitch-angle frame division step control system

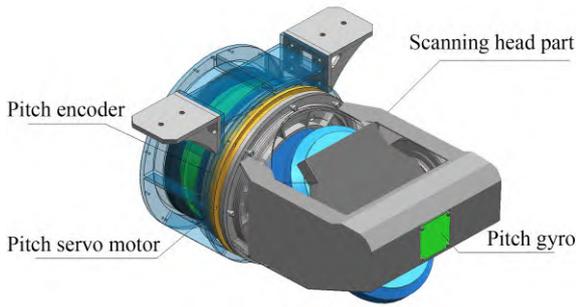


图 2 俯角分幅步进控制系统被控对象  
Fig. 2 Controlled object of pitch-angle frame division step control system

系统采用有刷直流力矩电机为执行机构,直流 H 桥式驱动作为功率驱动单元,俯角电机转动带动俯角组件沿着俯角轴系步进转动实现分幅步进成像;采用光纤陀螺作为速率传感器,光电轴角编码器作为角度传感器,俯角分幅步进控制系统采用串级控制架构,位置控制外环为主回路,速度控制内环为副回路。

2.2 俯角分幅步进控制系统时序控制

该型面阵航空光电载荷采用分幅步进成像的工作原理。光电载荷前端设置有二维俯角扫描头,通过俯角扫描头沿着航向轴线横向步进实现分幅,通过俯角和位角分别补偿横向和前向像移。俯角分幅步进控制系统在拍照指令期间分为成像段和返程段。在成像段,以光电载荷控制器发送的位置/速度(PS 信号)控制信号的上升沿作为步进位置切换控制点,分幅步进采用大、小步进交替进行,步进角度分别为 6°和 2°;在返程段,步进角度最大可达 26°,俯角分幅步时序控制状态如图 3 所示。

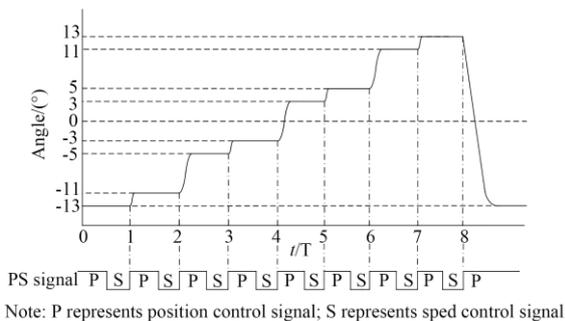


图 3 俯角分幅步进时序控制状态  
Fig. 3 State of pitch angle frame division step and sequence control

2.3 俯角分幅步进控制系统的控制难点

俯角分幅步进控制系统工作中,步进采用大、小步进交替进行,步进角度分别为 6°和 2°,在返程段步进角度最大可达 26°。因此,俯角分幅步进控制系统在工作中步进给定值存在的悬殊突变性是控制难点之一。

该型面阵航空光电载荷的伺服功率电源设计为直流 28 V,故加载在直流电机两端的最大电压为  $(28 - S_{drop})$ ,  $S_{drop}$  为 IGBT 管压降。如果内外环控制器计算得到的最终控制电压超过  $(28 - S_{drop})$ ,即运算电压超过了实际电压限值,在无 Anti-Windup 措施条件下系统会进入饱和区,直到系统出现反向偏差,控制器输出的控制量才开始逐渐退出饱和区<sup>[10]</sup>。因此,功率驱动单元能力限制问题必然是系统饱和和非线性的一个典型因素。

该型光电载荷的机身本体与温控舱的安装示意图如图 4 所示。机身本体与温控舱之间通过 4 个减振器压装柔性连接。俯角分幅步进控制系统工作中电机的启停力矩会导致本体产生微晃动,机身本体的微晃动成为俯角分幅步进控制系统的干扰源。对于机身本体的微晃动没有特殊的主动制约手段,只能依靠减振器缓慢消除,消除本体微晃动需要一定时间,这势必影响俯角分幅步进控制的快速性。这种微晃动会直接耦合在俯角分幅步进控制系统的动态过程之中,增大进入稳态过程的时间,延长控制系统的整体控制进程,同时有一定的机身微晃动干扰分量耦合到位角控制系统并最终影响位角前向像移的补偿

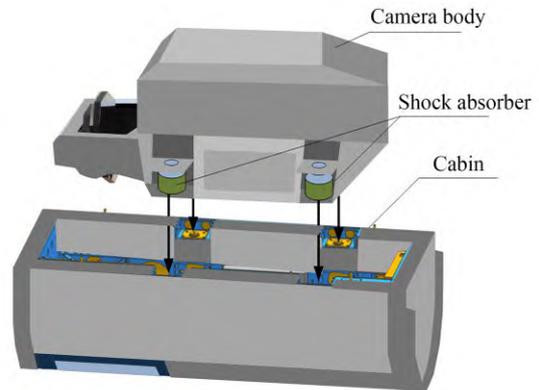


图 4 机身本体与温控舱体安装示意图  
Fig. 4 Installation diagram of camera body and temperature control cabin

效果。为减少机身本体的微晃动,在电机力矩满足快速性的前提下,对功率电压进行软件限幅是必要的,这同样会导致输出和输入之间存在非线性,出现积分饱和的不良现象。因此,需要统筹考虑功率电压限幅的时机与幅度。

该航空光电载荷俯角步进位置伺服控制系统中,系统输出和输入之间必然存在非线性,引起控制器的 Windup 问题。

#### 2.4 光电载荷时序对俯角步进位置控制系统的制约

光电载荷对俯角分幅步进位置控制系统的约束控制信号为速度/位置控制信号,该信号在光电载荷拍照指令期间由光电载荷的中枢控制器发送,俯角控制系统既要按照速度/位置信号的高低电平转换来切换位置控制和速度控制,又需要满足时序规定的时间要求。

俯角分幅步进控制系统在成像段,需要按照速度/位置信号切换位置控制和速度控制,速度/位置信号上升沿到来时刻,俯角位置控制系统快速转换至步进位置控制模式,俯角电机带动俯角组件沿着俯角轴系转动到下一个拍照角度位置,步进角度行程为 $2^{\circ}$ 和 $6^{\circ}$ 交替进行,要求在 260 ms 完成分幅步进定位控制,否则会影响成像效果。若拍照幅数为光电载荷工作方式中的最大幅数,则光电载荷俯角分幅步进控制系统在返程段的角度行程达到 $26^{\circ}$ ,此时要在 420 ms 内完成返程回位定位控制,如果返程定位时间延长,会影响下一周期第一帧图像的像移补偿效果,尤其是速高比较大、时序紧张时影响更为突出。

将俯角步进位置控制系统未出现饱和严重超调的状态视为理想状态。由于系统饱和和非线性的存在,俯角在每周期步进分幅拍照结束后进入返程段需要在 420 ms 内快速返回到下一周期拍照起始位置,但是返程段 $26^{\circ}$ 角度位置行程给定,相对于成像段 $2^{\circ}$ 和 $6^{\circ}$ 的步进给定而言是一个比较大的突变输入信号,俯角分幅步进位置控制系统会进入饱和状态。退出饱和时间延长了俯角分幅步进位置控制系统的稳态调整时间,使得俯角分幅步进位置控制系统返回到下一周期拍照起始位置的时间超过 420 ms,影响下一周期拍

摄的第一帧图像效果。另一方面,光电载荷的机身本体与温控舱之间通过减振器柔性连接,机身本体晃动成为干扰源,最终影响位置控制的快速性,延长位置控制的动态过程。从抑制机身整体微晃动的角度,在电机力矩满足快速性的前提下,电机电压不能过大,在软件程序上有必要人为限制速度内环的最高速度和功率控制单元的输出电压幅值。然而,这种软件限幅同样会导致积分饱和的不良现象出现,这些均对光电载荷时序产生不利影响,保证光电载荷时序是保证成像质量的必要前提条件。因此,必须确保俯角分幅步进控制系统运行满足光电载荷的时序要求。

### 3 串级动态复合限幅控制系统方案

综上所述,由于光电载荷系统对俯角分幅步进控制系统的时序约束,俯角分幅步进控制系统具有位置响应的快速性,而俯角分幅步进控制系统本身的饱和和非线性特性以及电机启停导致的机身晃动都限制了系统响应的快速性,严重时甚至不满足时序约束要求,影响光电载荷的系统功能的实现。将超过限幅的差值作为反馈信号构成反馈来加以消除,就达到了 Anti-Windup 的目的。因为这种方法采用线性结构反馈,故属于线性结构 Anti-Windup 算法<sup>[1]</sup>。

#### 3.1 PID 算法的 Anti-Windup 方法

众所周知,PID 控制是应用最为广泛的控制结构,在航空光电载荷控制中尤其是伺服控制中,PID 控制也有着相当广泛的应用。但在航空光电载荷控制中,时序要求严格,对快速性和控制精度均有严格的要求,采用简单的 PID 结构,往往不能达到理想效果。PID 积分项的作用简单来说就是抵抗常“力”的干扰,保证系统的稳态精度。然而,积分项的弊端就是容易使系统陷入饱和状态。所谓 Anti-Windup 就是抗积分饱和方法,常用的 Anti-Windup 方法有积分遇限削弱法、变速积分法、积分分离法、反馈抑制饱和法及其改进方法。

经典的 Anti-Windup 在发生功率驱动单元能力受限阶段,将受限制的能量份额向控制器中的

积分项进行反馈及记忆累积,期望随着误差减小,功率单元能力满足的情况下,对前面能力受限所导致的不利影响进行一定的事后补偿。通俗地说,就是把控制器输出的控制量和被控对象获得的控制量做差反馈给积分环节,下一时刻重新计算积分项,这就是经典的 Anti-Windup 方法<sup>[12-13]</sup>,其算法结构简单明了、通俗易懂,非常适合工程应用。PI 算法经典的 Anti-Windup 结构如图 5 所示。

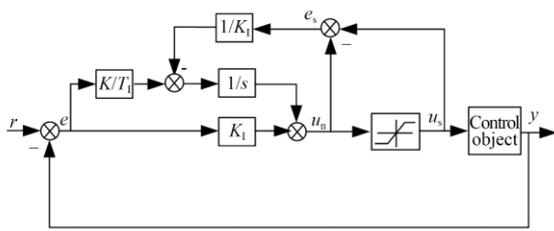


图 5 PI 算法经典的 Anti-Windup 结构

Fig. 5 Structure of Anti-Windup classic PI controller

为了消除控制器输出的控制量和被控对象获得的控制量之间的偏差,经典的 Anti-Windup 结构适合速度控制,也就是单环控制,而俯角控制器为双环串级控制,速度内环一般不设置积分环节,经典的 Anti-Windup 不适用于位置外环控制。本文位置外环控制采用积分分离法实现 Anti-Windup,其基本思想是在系统误差较大时,取消或者削弱积分环节,当误差较小时,引入或者增强积分环节,既不影响控制系统的动态性能,又能提高控制系统的稳态精度。带有积分分离因子的 PID 计算公式如下:

$$u(k) = k_p e(k) + \alpha k_i \sum_{i=1}^{k-1} e(i) + k_d [e(k) - e(k-1)], \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为积分项的分离因子, $\alpha$ 与偏差 $e(k)$ 的关系通常是线性的, $k_p, k_i, k_d$ 分别为比例、积分、微分系数,采用分段线性形式的表达。 $\alpha$ 通常采用两段式即可满足要求:

$$\alpha = \begin{cases} \xi & |e(k)| \geq \gamma \\ \tau\xi & |e(k)| < \gamma \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $\tau$ 为积分因子调整系数, $0 < \tau < 1$ , $\gamma$ 为误差划分界限值, $\xi=1$ , $\tau$ 和 $\gamma$ 均可根据实际系统响应进行试凑,先试凑 $\gamma$ 再试凑 $\tau$ ,二者容易试凑整

定。在航空光电载荷伺服控制中,一般情况下 $\tau$ 不会超过0.4。积分分离实际上就是根据误差大小分段设置积分项,其实质就是一种简化的变速积分方法,在工程上得到了广泛的应用。

### 3.2 串级动态复合限幅

为了削弱机身微晃动带来的不利影响,本系统采取了必要的软件限幅措施,具体是在位置外环控制器的输出量即速度内环的给定速度进行了速度限幅,其次在速度内环控制器的输出量即功率驱动单元的输入量进行了电压限幅。拍照时,俯角电机带动俯角组件沿着俯角轴系转动到下一个拍照角度位置,步进角度行程为 $2^\circ$ 和 $6^\circ$ 交替进行,返程时最大行程角度高达 $26^\circ$ ,电机启停力矩不同,造成的机身晃动程度不一样。另外,限幅势必对系统响应快速性造成影响,如果采用统一限幅措施,无法统筹机身晃动影响以及系统响应的快速性,二者呈矛盾体又相辅相成。因此,单纯 Anti-Windup 和统一限幅,并不能很好解决机身晃动引起的动态过程加长,如若在各种条件下为强制削弱机身晃动而采取过度“一刀切”的限幅,也不利于发挥系统响应的灵活性,机身微晃动与系统响应的矛盾体依然会对光电载荷整体时序造成严峻挑战。

本文提出一种灵活的串级动态复合限幅措施。传统限幅为单一限幅即电压限幅,这里采用电压与速度复合限幅,又因为二者具有串联关系,故称之为串级复合限幅。首先对位置控制环的输出量进行限制,其物理含义就是对速度控制内环的速度给定进行限制管理,其次对速度内环的输出量进行限制,其物理含义就是对功率级电压给定进行限制。该限幅方法与传统的限幅方法相比的另一个不同之处,在于对限幅的时机和限幅的幅值进行动态管理,实现限幅对步进角度给定突变的动态适应,从而根据光电载荷时序要求主动对机身微晃动影响和系统响应快速性的矛盾体进行分时、分类经验干预和控制管理,以满足时序控制为最终目标。

根据速度/位置控制信号和一周拍照开始信号动态加入或适时削弱速度限制,串级动态复合限幅时序如图 6 所示,达到有利于减小启停转动转矩对机身晃动的影响,同时又对系统本身快速性响应不造成太大影响。具体来说,俯角分幅步

进控制系统在拍照段,在速度/位置信号的上升沿到来时刻进行限幅设置,在返程段开始时刻即一周拍照开始信号上升沿到来时刻进行限幅设置。

这种方式虽然有利于减小启停转动转矩对机身晃动的影响,将控制器与被控对象之间的非线性环节移出,其代价则是在给定值中隐含了非线性因素<sup>[7]</sup>。动态设置的目的是根据系统运行需要适时调整给定值中隐含的非线性因素,即适时调整或削弱产生的非线性源。

拍照过程中动态置入或调整速度限制和电压限制,其目的是根据需要对电机启停造成机身

整体晃动进行干预和动态管理。控制器算法具有抗饱和措施,会对这些非线性特性引起的积分不良现象进行抑制。另外,由于控制参数在位置/速度信号切换时进行清零,所以前一阶段的非线性特性不会累积到后一个阶段。在光电载荷返程段,需要俯角分幅步进控制系统具有快速性,在一周拍照开始信号上升沿到来时刻,对限幅进行适时削弱,提升俯角分幅步进系统返程位置响应的快速性,从而满足时序的要求。

### 3.3 总体方案架构

俯角分幅步进伺服控制系统的总体控制方案框图如图 7 所示。

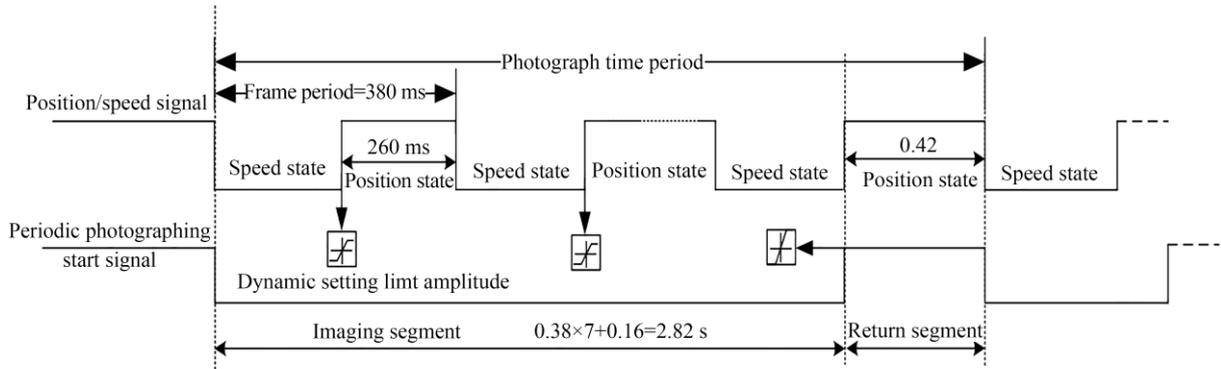


图 6 串级动态复合限幅时序

Fig. 6 Sequence of dynamic cascade hybrid amplitude limitation

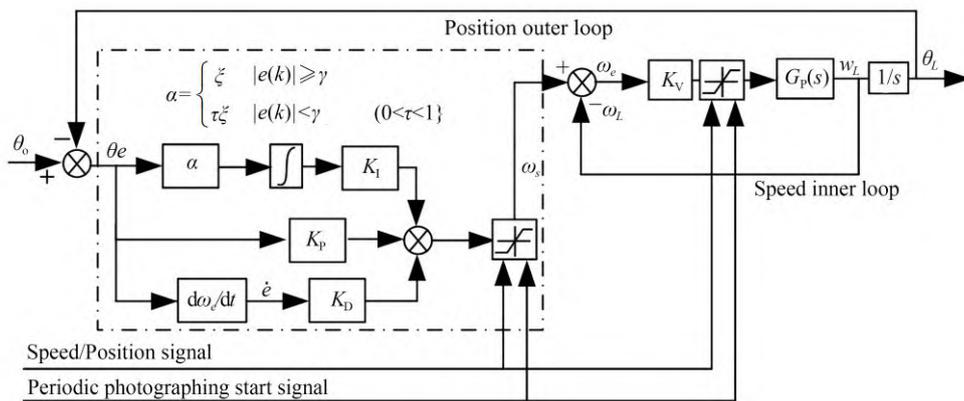


图 7 俯角分幅步进控制系统的总体控制方案

Fig. 7 Master control plan of pitch-angle frame division step control system

俯角分幅步进位置控制系统采用串级主、副双回路的控制方案。位置控制外环为主回路,速度控制内环为副回路, $\theta_0$ 为期望角度位置, $\omega_0$ 为期望角速度,外环控制器采用基于积分分离作为 Anti-

Windup 策略,外环控制器输出进行速度限幅,内环速度控制采用比例控制,内环控制输出采用电压限幅,速度限幅和电压限幅按照速度位置信号和一周拍照开始信号进行动态设置和实时削弱。

## 4 实 验

### 4.1 实验系统平台及参数规划

实验以某型面阵航空光电载荷俯角分幅步进控制系统为平台,将俯角扫描头作为被控对象,俯角扫描头实物如图 8 所示。采用光电载荷俯角分幅步进控制系统实现软件控制方案,将光电载荷电控箱作为控制中枢对整机实验室动态成像实验的时序进行控制,光电载荷电控箱实物如图 9 所示。俯角分幅步进控制系统采用 TI 公司生产的 TMS320F2812 的 32 位定点 DSP 作为处理器,采用光电轴角编码器作为位置外环的角度位置传感器,编码器精度 $\leq 6''(1\sigma)$ ,采用光纤

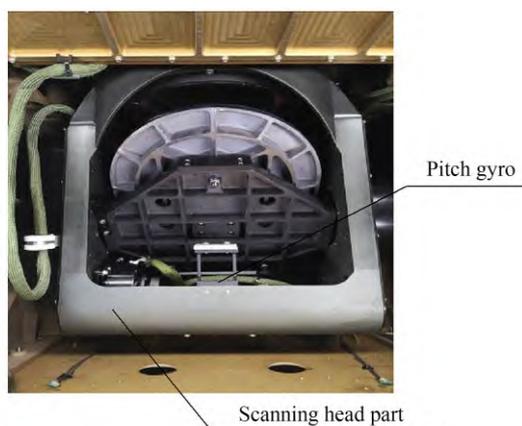


图 8 某型面阵航空光电载荷俯角扫描头

Fig. 8 Pitch-angle scanning head of airborne opto-electronic load

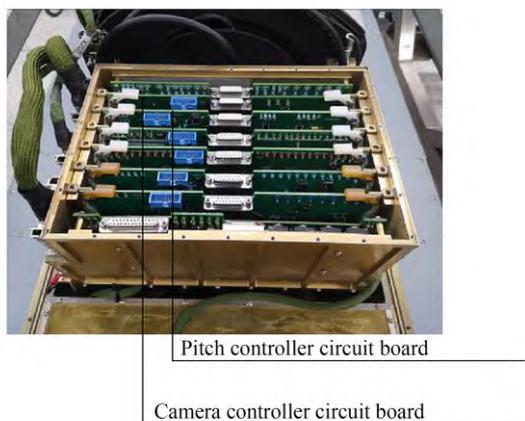


图 9 某型面阵航空光电载荷电控箱

Fig. 9 Electric control box of airborne opto-electronic load

陀螺作为速度内环的速率传感器,光纤陀螺的主要指标如下:零偏稳定性( $1\sigma, 100\text{ s}$ ) $\leq 0.1(^{\circ})/\text{h}$ 、零偏为 $-10\sim+10(^{\circ})/\text{h}$ ,标度因数不对称性 $\leq 50\times 10^{-6}$ 、标度因数非线性度 $\leq 50\times 10^{-6}$ 。实验中还使用了航空光电载荷专用检测仪和调试上位机。

俯角分幅步进控制系统的位置外环 PID 参数为  $fP\_Kpp=100$ (比例系数),  $fP\_Kpi=2.66$ (积分系数),  $fP\_Kpd=0$ (微分系数),采用积分分离法对积分项按照偏差大小进行分段控制实现 Anti-Windup,积分分离比例因子系数 $\xi=1, \tau=0.25$ (积分调整因子)。俯角分幅步进控制系统的速度内环 PID 参数为  $fP\_Kvvp=0.32$ (比例系数),  $fP\_Kvvi$ (积分系数) $=0, fP\_Kvvd=0.01$ (微分系数),俯角分幅步进控制系统的采样周期  $T=0.001\text{ s}$ ,本文涉到的离散化均采用零阶保持离散化方法。

动态复合限幅实施说明:拍照段  $6^{\circ}$  和  $2^{\circ}$  步进,采用相对较强限幅,电压限幅  $Pitch\_VLimit=22\text{ V}$ ,速度限幅  $Pitch\_SLimit=75(^{\circ})/\text{s}$ ,在速度/位置信号上升沿带来时刻配置;返程段,采用较弱限幅,电压限幅  $Pitch\_VLimit=24\text{ V}$ ,速度限幅  $Pitch\_SLimit=95(^{\circ})/\text{s}$ ,在一周拍照开始信号上升沿带来时刻配置。

### 4.2 实 验

#### 4.2.1 俯角扫描头的 $2^{\circ}$ 行程步进控制

(1)无限幅积分分离串级 PID 控制方案(简称常规 PID):以  $2^{\circ}$  行程作为俯角步进分幅控制系统的位置步进给定值,控制俯角扫描头在  $-1^{\circ}$  和  $+1^{\circ}$  做往复步进控制,控制方案采用主副串级双回路控制,引入积分分离项实现系统对积分饱和作用的 Anti-Windup,对电压和速度幅值不进行限制,俯角扫描头的  $2^{\circ}$  行程步进位置阶跃响应如图 10 所示,图 10 中点划线为稳态误差带标记;

(2)串级动态复合限幅 PID 控制方案:以  $2^{\circ}$  行程作为俯角步进分幅控制系统的位置步进给定值,控制俯角扫描头在  $-1^{\circ}$  和  $+1^{\circ}$  做往复步进控制,控制方案采用主副串级双回路控制,引入积分分离项实现系统对积分饱和作用的 Anti-Windup,对电压和速度进行限制,电压限幅值设

置为  $Pitch\_VLimit=22\text{ V}$ , 速度限幅值设置为  $Pitch\_SLimit=75\text{ (}^\circ\text{)/s}$ , 俯角扫描头的  $2^\circ$  行程步进位置阶跃响应如图 11 所示。

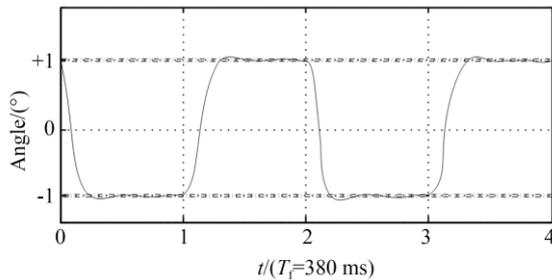


图 10 不带串级动态复合限幅控制的  $2^\circ$  步进位置曲线  
Fig. 10 Location curve of  $2^\circ$  step without cascade dynamic hybrid amplitude limitation

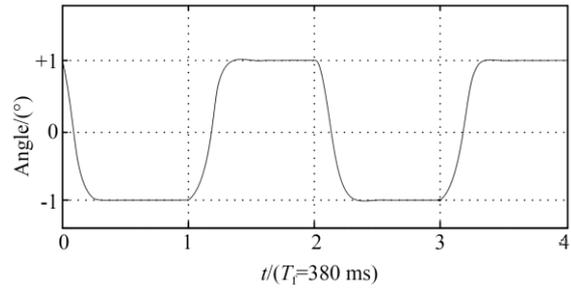


图 11 带串级动态复合限幅控制的  $2^\circ$  步进位置曲线  
Fig. 11 Location curve of  $2^\circ$  step with cascade dynamic hybrid amplitude limitation

对实验数据进行分析, 分别从  $2^\circ$  步进最大超调误差、上升时间、调整时间和稳态误差方面进行对比, 分析结果见表 1。

表 1 两种控制方法的实验结果对比

Tab. 1 Comparison of experimental results of two control methods

Control methods	Maximum overshoot/%	Rise time /ms	Setting time /ms	Steady-state error /( $^\circ$ )
Without amplitude limitation PID	7.5	88	320	0.05
Dynamic cascade hybrid amplitude limitation PID	4.25	97	235	0.005

从表 1 可以看出, 两种方案在控制效果上差异明显, 第一种方案中俯角扫描头最大超调大, 上升时间略小, 但是调整时间达到 320 ms, 且误差带大, 超过拍照段 260 ms 的步进时序限制; 第二种方案超调、稳态调整时间和稳态误差带均占优势, 且稳态调整时间为 235 ms, 小于拍照段 260 ms 的步进时序限制。

俯角扫描头的  $6^\circ$  步进实验与  $2^\circ$  步进实验相似, 由于篇幅关系不再赘述。

#### 4.2.2 俯角扫描头的 $26^\circ$ 行程步进控制实验

(1) 无限幅积分分离串级 PID 控制方案 (简称常规 PID): 以  $26^\circ$  行程作为俯角步进分幅控制系统的位置步进给定值, 控制俯角扫描头在  $-13^\circ$  和  $+13^\circ$  做往复步进控制, 控制方案采用主副串级双回路控制, 引入积分分离项实现系统对积饱和作用的 Anti-Windup, 对电压和速度幅值不进行限制, 俯角扫描头的  $26^\circ$  行程步进位置的阶跃响应如图 12 所示, 图 12 中点划线为稳态误差带标记;

(2) 串级动态复合限幅 PID 控制方案: 以  $26^\circ$

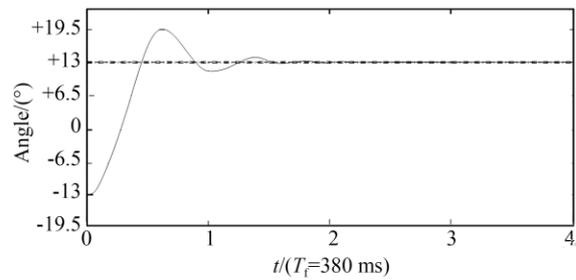


图 12 不带串级动态复合限幅控制的  $26^\circ$  步进位置曲线  
Fig. 12 Location curve of  $26^\circ$  step without cascade dynamic hybrid amplitude limitation

行程作为俯角步进分幅控制系统的位置步进给定值, 控制俯角扫描头在  $-13^\circ$  和  $+13^\circ$  做往复步进控制, 控制方案采用主副串级双回路控制, 引入积分分离项实现系统对积饱和作用的 Anti-Windup, 对电压和速度进行限制, 电压限幅值设置为  $Pitch\_VLimit=22\text{ V}$ , 速度限幅值设置为  $Pitch\_SLimit=75\text{ (}^\circ\text{)/s}$ , 俯角扫描头的  $26^\circ$  行程步进位置阶跃响应如图 13 所示。

(3) 串级动态复合限幅 PID 控制方案: 以  $26^\circ$

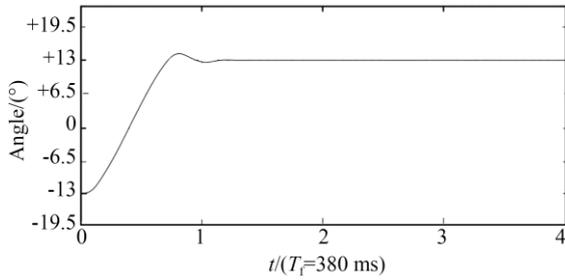


图 13 带串级动态复合限幅控制的 2A-26° 步进位置曲线  
Fig. 13 Location curve of 2A-26° step with cascade dynamic hybrid amplitude limitation

行程作为俯角步进分幅控制系统的位置步进给定值,控制俯角扫描头在  $-13^\circ$  和  $+13^\circ$  做往复步进控制,控制方案采用主副串级双回路控制,引入积分分离项实现系统对积饱和作用的 Anti-Windup,对电压和速度进行限制,电压限幅值设置为  $\text{Pitch\_Vlimit}=24\text{ V}$ ,速度限幅值设置为

$\text{Pitch\_Slimit}=95\text{ (}^\circ\text{)/s}$ ,俯角扫描头的  $26^\circ$  行程步进位置阶跃响应如图 14 所示。

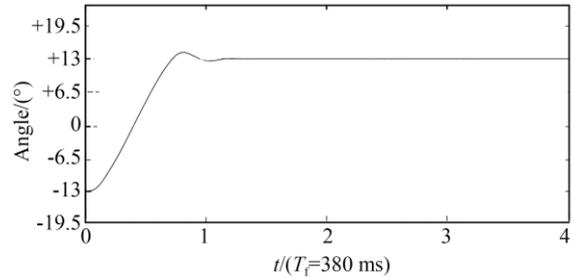


图 14 带串级动态复合限幅控制的 2B-26° 步进位置曲线  
Fig. 14 Location curve of 2B-26° step with cascade dynamic hybrid amplitude limitation

对实验数据进行分析,分别从  $26^\circ$  步进最大超调误差、上升时间、调整时间和稳态误差方面进行对比,分析结果见表 2。

表 2 不同控制方法的实验结果对比

Tab. 2 Comparison of experimental results of different control methods

Control methods	Maximum overshoot/%	Rise time /ms	Setting time /ms	Steady-state error/( $^\circ$ )
Without amplitude limitation PID	13.46	155	874	0.05
Dynamic cascade hybrid amplitude limitation PID(22 V)	2.69	244	494	0.005
Dynamic cascade hybrid amplitude limitation PID(24 V)	3.9	166	403	0.005

从表 2 可以看出,3 种方案在  $26^\circ$  大行程步进控制效果上的差异相对于  $2^\circ$  步进更加明显,第一种方案中,俯角扫描头上升时间短,但最大超调大,稳态误差带大,且调整时间长达 874 ms,远远超过返程段位置回位时间不得超过 420 ms 的时序限制要求;后两种方案虽然上升时间有所延长,但是超调、调整时间以及稳态误差带均降低,其中第二种方案因为限幅相对较强,系统响应的动态过程较长,导致最终的稳态调整时间达到 494 ms,也超过返程段位置回位时间 420 ms 的时序限制要求,第三种方案中限幅适当削弱,系统响应的动态时间缩短,并且相对于方案二对机身晃动的影响差别不大,方案三的稳态调整时间为 403 ms,满足返程段俯角位置回位时间不超过 420 ms 的时序限制要求。在该航空光电载荷中

采用动态复合限幅措施后,实现拍照段步进位置控制和返程段回位控制的相对平稳和快速性,拍照段步进位置稳态调整时间缩短了 26.56%,回位稳态调整时间缩小了 18.4%,满足载荷的时序要求。

#### 4.2.3 实验室动态成像实验

为验证串级动态复合限幅对像移补偿效果的影响,在航空光电载荷成像实验室中开展光电载荷动态成像实验。采用动态目标发生器模拟载机前向飞行造成的前向像移,采用航空光电载荷专用检测仪模拟飞机载荷任务处理系统对该光电载荷进行控制,采用专用图像采集软件采集图像,成像目标选用 4#分辨率板,使用动态目标发生器模拟载机任务巡航速高比 0.013 1/s 的飞行参数(速度设置为 842 km/h,高度设置为

18 000 m)。航空光电载荷专用检测仪发送拍照指令,光电载荷中枢控制器根据速高比参数控制俯角分幅步进控制系统进行速高比自适应分幅步进拍照,分幅步进控制效果会影响横向像移补偿效果,分幅步进是否满足时序要求是影响横向像移补偿效果的基本因素,同时,位角控制软件按照速高比参数控制位角反射镜实现前向像移补偿。

采用带有串级动态复合限幅控制的分幅步进控制方案获得的实验室动态靶标图像和未带有串级动态复合限幅控制的分幅步进控制方案获得的实验室动态靶标图像分别如图 15 和图 16 所示。视觉感观上,图 15 中的靶标明显更清晰。为便于比较分析,对图 15 和图 16 中的第 13 组靶标进行放大,图 15 中第 13 组靶标 4 个方向的黑白条纹清晰可辨,而图 16 中第 13 组靶标只有水平方向和 45° 条纹可分辨,还有变模糊的趋势,而竖向条纹更加模糊,竖向条纹受横向像移的影响,俯角分幅步进时序对横向像移的影响更加显著。

## 5 结 论

针对某型面阵分幅步进成像的航空光电载荷,本文提出了串级动态复合限幅措施,在俯角分幅步进位置控制环的输出限制速度控制内环的速度给定,在速度内环的输出限制功率级电压给定,根据“一周拍照开始信号”和“速度/位置控制信号”动态规划二者限幅的幅值,实现限幅对步进角度给定突变的自适应,也减小了机身微晃动的影响。实验测试及实验室动态成像试验结

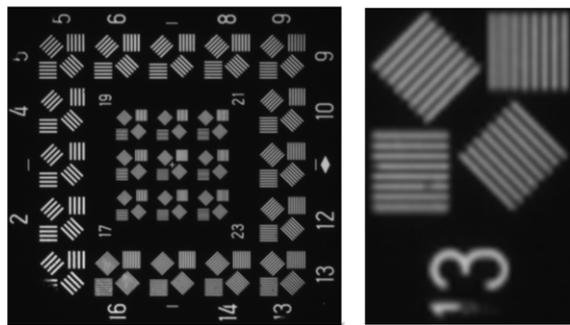


图 15 带有串级动态复合限幅控制的实验室动态靶标图像  
Fig. 15 Target images of dynamic imaging in laboratory with cascade dynamic hybrid amplitude limitation

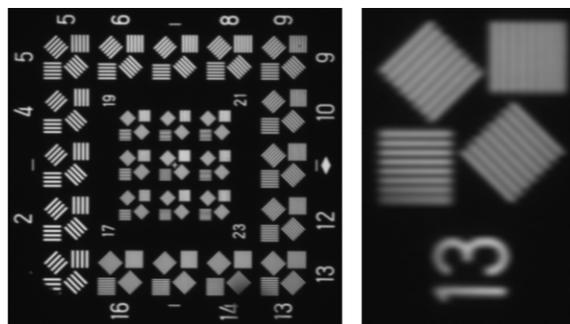


图 16 不带串级动态复合限幅控制的实验室动态靶标图像  
Fig. 16 Target images of dynamic imaging in laboratory without cascade dynamic hybrid amplitude limitation

果表明:该航空光电载荷采用动态复合限幅措施后,实现拍照段步进位置控制和返程段回位控制的相对平稳和快速性,拍照段步进位置稳态调整时间缩短了 26.56%,回位稳态调整时间缩短了 18.4%,满足载荷的时序要求,保证了实验室动态成像效果。该方法易实现,不需复杂编程算法,编程效率较高,适合于周期紧张的航空产品研发。

## 参考文献:

- [1] 田大鹏,邵晓鹏. 航空光学成像与测量技术新进展[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6):1221-1225.  
TIAN D P, SHAO X P. New emerging technologies in airborne optical imaging and measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1221-1225. (in Chinese)
- [2] 王惠林,宁飞,刘吉龙. 航空光电侦察技术发展研究[J]. 应用光学, 2022, 43(5):825-832.

- WANG H L, NING F, LIU J L. Development of aviation electro-optical reconnaissance technology [J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(5):825-832. (in Chinese)
- [3] 张岚,赵显宇,熊钟秀. 机载光电侦察装备发展现状分析[J]. 航空科学技术, 2022, 33(7):1-7.  
ZHANG L, ZHAO X Y, XIONG ZH X. Analysis on the development status of airborne EO-reconnaissance equipments [J]. *Aeronautical Science and Technology*, 2022, 33(7):1-7. (in Chinese)

- [4] 王正玺, 张葆, 李贤涛, 等. 快速反射镜在像移补偿中的应用[J]. 中国光学, 2020, 13(1):95-105.  
WANG ZH X, ZHANG B, LI X T, *et al.* Application of fast steering mirror in image motion compensation[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2020, 13(1): 95-105. (in Chinese)
- [5] 王福超, 王昱棠, 田大鹏. 音圈快速反射镜的完全跟踪控制[J]. 光学精密工程, 2020, 28(9): 1997-2006.  
WANG F CH, WANG Y T, TIAN D P. Perfect tracking control for fast-steering mirror driven by voice coil motor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(9): 1997-2006. (in Chinese)
- [6] 谭淞年, 王福超, 许永森, 等. 航空光电平台两轴快速反射镜结构设计[J]. 光学精密工程, 2022, 30(11):1344-1352.  
TAN S N, WANG F CH, XU Y S, *et al.* Structure design of two-axis fast steering mirror for aviation optoelectronic platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(11):1344-1352. (in Chinese)
- [7] 吴雄雄, 栾亚东, 王惠林, 等. 航空光电成像系统像移补偿技术研究[J]. 应用光学, 2022, 43(3): 424-429.  
WU X X, LUAN Y D, WANG H L, *et al.* Image motion compensation technology of aerial photoelectric imaging system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(3):424-429. (in Chinese)
- [8] TARBOURIECH S, TURNER M. Anti-windup design: an overview of some recent advances and open problems[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2009, 3(1): 1-19.
- [9] HIPPE P. *Windup in Control: its Effects and Their Prevention*[M]. London: Springer, 2006
- [10] 付金宝, 丁亚林, 李清军, 等. Anti-Windup 变结构自适应 PID 控制在航空相机位角控制系统的应用[J]. 光学精密工程, 2014, 22(3): 626-632.  
FU J B, DING Y L, LI Q J, *et al.* Application of Anti-Windup variable structure adaptive PID control to position angle control system of aerial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3): 626-632. (in Chinese)
- [11] 董锡君, 姚郁, 王子才. 基于滤波器的 Anti-Windup 设计及其在伺服系统中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(1):101-104.  
DONG X J, YAO Y, WANG Z C. Anti-Windup design based on filter and its application to servo system[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2002, 34(1):101-104. (in Chinese)
- [12] ZHANG G H, QIAI F, SHAO H. Anti-windup Scheme for the controller of integrating processes with dead-time[J]. *Journal of Donghua University (English Edition)*, 2006, 23(3):79-83.
- [13] CAMPO P J, MORAR I M. Robust control of processes subject to saturation nonlinearities [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1990, 14(4/5): 343-358.

#### 作者简介:



付金宝(1982—),男,吉林长春人,副研究员,2006年于吉林大学获得学士学位,2008年于浙江大学获得硕士学位,2013年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事航空成像与测量技术方面的研究。E-mail: fujinbao@ciomp.ac.cn