

基于跟踪微分器的加速度反馈控制

申 帅^{1,2}, 张 葆¹, 李贤涛¹, 朱 枫^{1,2}, 晋超琼^{1,2}

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

摘 要: 为了提高航空光电稳定平台的抗扰性的同时不增加平台成本, 本文在传统平台的电流反馈、速度反馈、位置反馈系统的基础上增加基于跟踪微分器的高增益加速度反馈环节, 相对于传统基于差分的加速度反馈系统, 基于跟踪微分器的加速度反馈系统改善了其对噪声干扰敏感等问题。通过模拟转台, 对平台进行 1° 、 $0 \sim 2.5$ Hz 正弦扰动测试, 结果表明: 相对于传统速度反馈平台系统, 基于跟踪微分器的加速度反馈系统, 超调量减小了约 4.9%, 视轴稳定精度提高了至少 63.4%, 平台的过渡过程加快; 且该伺服系统结构简单, 有较好通用性和实用价值。

关键词: 自动控制技术; 抗扰性; 加速度反馈; 跟踪微分器; 视轴稳定精度

中图分类号: TP273 文献标志码: A 文章编号: 1671-5497(2017)04-1217-08

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201704029

Acceleration feedback control based on tracking differentiator

SHEN Shuai^{1,2}, ZHANG Bao¹, LI Xian-tao¹, ZHU Feng^{1,2}, JIN Chao-qiong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to improve the noise immunity of airborne optoelectronic stabilization platform and save cost, high-gain acceleration feedback by utilizing the tracking differentiator is studied based on current feedback, speed feedback and position feedback on a traditional platform. Compared with the traditional differential acceleration feedback system, the acceleration feedback system based on the tracking differentiator reduces the sensitivity to noise interference. The stabilization platform is tested with one degree, $0 \sim 2.5$ Hz sinusoidal interference on a flight simulator. Results show that, compared with the traditional speed platform feedback system, the acceleration feedback system based on the tracking differentiator can reduce the overshoot by 4.9%, increase LOS stabilization accuracy at least by 63.4% and improve the transition process of the platform greatly. Besides, the servo system has simple structure, better generality and higher practical value.

Key words: automatic control technology; noise immunity; acceleration feedback; tracking differentiator; LOS stabilization accuracy

收稿日期: 2016-05-12.

基金项目: “863”国家高技术研究发展计划重点项目(2013AA122102).

作者简介: 申帅(1991-), 男, 博士研究生. 研究方向: 航空光电稳定平台视轴稳定. E-mail: shenshuaiharry@163.com

通信作者: 张葆(1966-), 男, 研究员, 博士. 研究方向: 航空光电成像技术. E-mail: zcleresky@vip.sina.com

0 引言

航空光电稳定平台主要挂载于直升侦察机底部的吊舱中,其作用是实现恶劣环境条件下对目标的精确瞄准和稳定跟踪。直升机侦查过程中的振动、载体姿态的变化以及大气紊流等因素都将直接导致光电载荷平台的视轴指向不稳定,而平台工作过程中的启动、制动都要求其超调量尽量不超过目标值的 20%^[1],因而平台需要较强的抗扰性,来提高平台的视轴稳定精度。

目前国内外的航空光电稳定平台主要采用传统电流反馈、速度反馈、位置反馈的三闭环控制模式^[2],没有从根本上,即从力矩作用角度对扰动进行衰减;一些利用加速度反馈的平台大都利用差分陀螺速度或直接用线加速度计组合的方式来获取加速度,以达到直接衰减扰动力矩的目的,但是差分陀螺速度所获得加速度信号受噪声的影响相对较大,而高精度加速度计造价昂贵^[3],一些小型平台负担不起这样的成本。

通过将基于跟踪微分器的加速度反馈环节引入到传统电流反馈、速度反馈、位置反馈调节的平台系统中可以使平台的扰动抑制能力大幅上升。文中航空光电稳定平台系统利用增加开关区域线性区宽度的最速控制跟踪微分器来获取加速度信号,以搭建加速度反馈环节,兼顾了加速度信号的快速性和抗扰性,并以较低成本基本达到了与基于加速度计的加速度反馈系统的同等抗扰水平。从而实现了在不增加平台成本的基础上提高平台抗扰性的目的。

1 加速度反馈优势、原理及抗扰性分析

1.1 加入加速度反馈的优势

传统航空光电稳定平台采用电流反馈、速度反馈、位置反馈的三闭环控制模式,其中电流反馈的目的主要是为了给外环带来足够的相位裕度,提高系统的响应速度,同时使得电机不再受到电子噪声即反电动势的影响,从而使得力矩和电机呈线性关系^[4]。如果没有高带宽的电流环,力矩不会很快由电流产生,而是受到反电势的影响会慢一些。

电流反馈的引入实际上使电机在加速度反馈环节内变成一个理想的比例环节,而如果没有加速度反馈环节,则电流环会使电机在速度环内变

成一个理想的积分环节^[5]。从物理学的角度,根据力矩和加速度的关系可知,当平台各部件确定后其质量是一定的,因而力矩与加速度是线性关系,对加速度进行操作相当于直接从力矩的角度对扰动进行衰减。而如果没有加速度环,只用对速度环进行调控,则相当于对加速度的积分进行操作。在扰动抑制方面,相对于直接对加速度进行操作已经有了一定时间的延迟和误差积累,由此可见采用加速度反馈的优越性。

1.2 加速度反馈的基本原理

带有加速度反馈的航空光电稳定平台系统闭环原理图(在这里没有画出位置环)如图 1 所示。

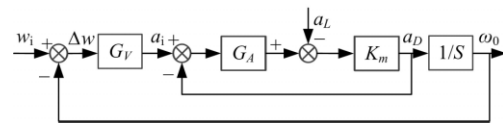


图 1 将加速度反馈环节引入平台系统后的系统框图
Fig. 1 Block diagram of platform system containing acceleration feedback loop

图 1 中, G_V 为速度环控制器; G_A 为加速度环控制器; a_D 为电机输出力矩产生的加速度; a_L 为扰动力矩在电机轴系上产生的扰动加速度; K_m 为电流环比例系数; ω_i 为输入角速率; ω_o 为输出角速率; a_i 为输入角加速度。

电机正常工作时:

$$T = F \times D = C \times \varphi \times I \times D \quad (1)$$

式中: T 表示电机力矩; F 表示电磁力; D 表示半径; φ 表示电机磁通; C 表示电机常数; D 表示电机转矩。电机正常工作时 C 、 D 、 φ 均为常数,设 K 为 C 、 D 、 φ 的乘积,则有: $T = KI$ 。再根据力矩和加速度的关系有:

$$T = m\dot{\omega} \quad (2)$$

式中: m 表示平台质量; $\dot{\omega}$ 表示角加速度。

在加速度环内进行拉氏域变换有:

$$KI = m\dot{\omega}(s) \quad (3)$$

将 KI 按比例与系统电压 $U(s)$ 等效可知加速度输出 $\dot{\omega}(s)$ 与输入电压 $U(s)$ 的关系为:

$$\frac{\dot{\omega}(s)}{U(s)} = K_m \quad (4)$$

式中: K_m 为综合了系统的电压与力矩的比例以及 K 、 m 关系的电流环比例系数。

扰动本身就是一种力矩作用设为 F , 平台的质量 m 是确定的,则在扰动力矩经过电流环后在加速度环内同样表现为一个跟随外部环境实时变

化的扰动加速度 a_L , 对于稳定平台来说, 就是期望扰动力矩产生的 a_L 与输出 ω_o 的比值越小越好。

1.3 加速度反馈对系统扰动抑制及稳定性的影响

1.3.1 加速度反馈对系统扰动抑制的影响

在航空光电稳定平台中引入加速度反馈后, 其对抗动的抑制能力显著提高。

传统速度反馈调节系统, 在理想情况下转台速度环简化框图如图 2 所示。

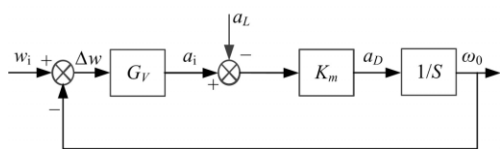


图 2 传统速度反馈系统简化框图

Fig. 2 Simplified block diagram of classical speed feedback system

由图 2 知, 扰动加速度对速率的影响结果可以表示为:

$$\Delta\omega_o = \frac{K_m}{s + G_V K_m} a_L \quad (5)$$

基于加速度反馈的闭环调节系统在理想情况下系统速度环简化框图如图 1 所示, 扰动加速度对速率的影响结果可以表示为:

$$\Delta\omega_o = \frac{K_m}{s[1 + G_A K_m] + G_V G_A K_m} a_L \quad (6)$$

显然对于式(5)(6)满足:

$$|s + G_V K_m| \ll |s[1 + G_A K_m] + G_V G_A K_m| \quad (7)$$

从频域角度出发, 引入加速度反馈后, 力矩干扰产生的扰动加速度 a_L 经过加速度反馈环节后的速率波动将大幅度减小。

1.3.2 加速度反馈对系统稳定性的影响

由图 1 可以得到带有加速度反馈闭环的速度环输出为:

$$\omega_o = \frac{G_V G_A K_T}{s[1 + G_A K_m] + G_V G_A K_m} \omega_i + \frac{K_m}{s[1 + G_A K_m] + G_V G_A K_m} a_L \quad (8)$$

在这里加速度闭环采用高增益控制方法^[6,7], 则系统特征方程为:

$$s[1 + G_A K_m] + G_V G_A K_m = 0 \quad (9)$$

在式(9)中加速度反馈环节采用高增益的 PI 控制方式, 速度环控制器同样也采用经典的 PI 控

制方式, 则由劳斯判据可知, 引入加速度反馈的平台控制系统稳定。

1.4 加速度反馈存在的问题

1.4.1 差分速度获取加速度的弊端

在传统的电流反馈、速度反馈、位置反馈的基础上增加加速度反馈, 虽然可以在很大程度上提升系统的稳定性和抗扰性, 但是目前对于加速度信号的获取还存在一定的困扰。首先是传统差分陀螺速度获取加速度信号的方式, 对噪声信号敏感, 容易造成原始信号失真。这样当被测信号不能连续被系统接收时, 或者被测信号在接收过程中受到严重的噪声污染时, 通过差分方式所得到的加速度信号一般都不能被工程应用。这时如果想利用这个加速度信号的最直接办法就是使接收到的信号再经过低通滤波器, 滤除噪声干扰。但是滤波器的加入会使原始信号在时间上有一定的延迟, 这种延迟在对跟踪性能要求较高的航空光电稳定平台系统中是难以被接受的。

1.4.2 加速度计获取加速度的限制

如果利用加速度计获取加速度信号, 虽然加速度计安装方便、精度高, 但是造价昂贵, 一些小型的平台系统负担不起这样昂贵的成本。图 3 分别是常见的单轴、两轴、三轴加速度计。

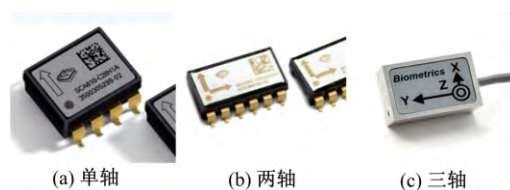


图 3 单轴、两轴、三轴加速度计

Fig. 3 Single axis, two axis, three axis accelerometer

加速度计的价格与其精度的高、低和测量方向的多少成正比, 其中能够满足平台需求的高精度加速度计的市场价格大约是 3~4 万元, 一些小型平台难以负担如此高的成本。针对以上问题, 作者提出了一种利用跟踪微分器获取加速度的方法。

2 利用跟踪微分器获取加速度信号

2.1 跟踪微分器的基本原理

由于传统获得加速度的两种方法各自存在其弊端: 加速度计价格昂贵、差分速度对噪声敏感。韩京清教授^[8]于 1994 年, 提出了非线性跟踪微分器的全新理论。其中跟踪微分器巧妙的利用数值积分来代替传统的数值微分, 这样微分作用对噪

声的敏感问题就被巧妙地回避了。根据跟踪微分器的理念就可以用对微分方程求积分的方式来求解本来要获取的微分信号,以达到对任意信号求微分的目的。

跟踪微分器的工作流程^[9]:输入信号 $v(t)$ 经过跟踪微分器后将输出两个信号 z_1 和 z_2 , 其中 z_1 跟踪 $v(t)$, $z_2 = \dot{z}_1$, 从而把 z_2 作为 $v(t)$ 的“近似微分”。

二阶 TD 描述如下:若系统(10)的任意解均满足: $z_1(t) \rightarrow 0, z_2(t) \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$, 则对任意有界可积函数 $v(t)$ 和任意常数 $T > 0$, 系统(11)的解 $x_1(t)$ 满足式(12)。

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = f(z_1, z_2) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = R^2 f(x_1 - v, \frac{x_2}{R}) \end{cases} \quad (11)$$

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \int_0^T |x_1(t) - v(t)| dt = 0 \quad (12)$$

式中: R 为跟踪速度因子; $x_1(t) \rightarrow v(t), x_2(t) \rightarrow \dot{v}(t)$ 。

2.2 几种跟踪微分器的比较

在式(11)中的综合函数 f 的基础上,跟踪微分器得到了广泛的发展。为了更好地了解跟踪微分器的性能,下面对几种常用的跟踪微分器进行分析对比。

(1) 开关型跟踪微分器^[8]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -R \text{sign}(x_1 - v(t) + \frac{|x_2| x_2}{2R}) \end{cases} \quad (13)$$

此类跟踪微分器结构较为简单、参数设置少、调节也比较方便,但由于符号函数 $\text{sign}(\cdot)$ 的存在,在原点附近会存在颤振现象。

(2) 快速非线性跟踪微分器^[10]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \left[-R^2 (a_0(x_1 - v) - a_1(x_1 - v)^{m/n} - b_0 \frac{x_2}{R} - b_1 \left(\frac{x_2}{R}\right)^{m/n} \right] \end{cases} \quad (14)$$

式中: a_0, a_1, b_0, b_1 均大于 0, m, n 为大于 0 的奇数,且 $m < n$ 时,系统在原点处是渐进稳定的。此类跟踪微分器在远离平衡点处,引入的线性环节起主导作用;在接近平衡点附近时,引入的非线性环节起主导作用,从而使系统状态始终保持快速

收敛状态。但参数选取比较困难,一旦选取不当就会出现发散现象。

(3) 离散线性跟踪微分器^[11]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -R^2 \left[a_1(x_1 - v) - a_2 \frac{x_2}{R} \right] \end{cases} \quad (15)$$

式中: a_1, a_2 均大于 0,且 $a_2 = 2a_1$ 时,离散线性跟踪微分器是收敛和稳定的,但失去了由非线性效应带来的快速性,其跟踪效率较低, R 为决定跟踪快慢的参数,可适当取大 R 值,以缩短跟踪过渡过程。

(4) 离散最速型跟踪微分器^[12]

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + h \times x_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + h \times \text{fst}_2(x_1(k) - v(k), x_2(k), R, h) \end{cases} \quad (16)$$

式中: h 为采样周期; $v(k)$ 为第 k 时刻的输入信号。 $\text{fst}_2(\cdot)$ 函数为最速控制函数,描述如下:

$$\text{fst}_2(x_1, x_2, R, h) = \begin{cases} -R \text{sign}(a), & |a| > d \\ -R \frac{a}{d}, & |a| \leq d \end{cases} \quad (17)$$

$$a = \begin{cases} x_2 + \frac{a_0 - d}{2} \text{sign}(y), & |y| > d_0 \\ x_2 + y/h, & |y| \leq d_0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: $d = Rh, d_0 = hd, y = x_1 + hx_2, a_0 = \sqrt{d^2 + 8R|y|}$, 如图 4 所示。

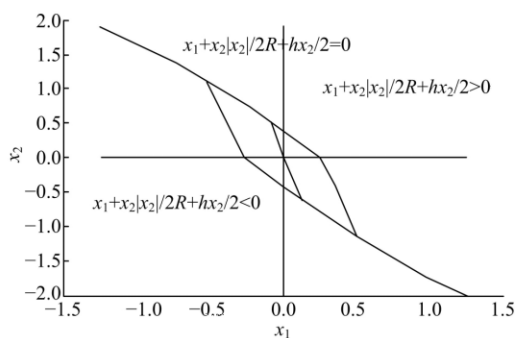


图 4 最速函数分布图

Fig. 4 Distribution map of the most velocity function

此类跟踪微分器是在二阶系统最速控制的基础上,采用“等时区法”推导得到的,其线性区间的大小可直接确定,它能够快速无超调地对输入信号进行跟踪,在微分品质、消颤现象等方面也有很好的效果,只是在形式上稍显复杂。在输入信号受噪声污染或 R 较大时,输出的微分信号容易被污染。

2.3 利用跟踪微分器获取加速度信号的实现

比较以上 4 种跟踪微分器可得出,跟踪微分器设计所追求的目标是:简洁、快速、无振荡、具备滤波功能且调参方便。根据文献[8]可知,最速控制结构可以有效地解决大多数跟踪微分器微分信号获取速度慢以及参数调节复杂的问题;如果在跟踪微分器的开关线附近,加大线性区的宽度可以有效地减小系统震荡,而且根据线性区边界形状的不同,跟踪微分器所表现出的性能也会有很大的不同^[13,14]。

综上所述,如果在一定范围内合理增加控制函数线性区的宽度,线性区的运动速度就会降低,而且会使得跟踪微分器对输入信号的滤波作用增强,从而使得即使输入信号受到严重的噪声污染,在经过跟踪微分器后,所获得的微分信号依然能很好地复现原始信号。因此本文选取一个线性区宽度可变的控制函数:

$$f(x_1, x_2, R, h, n) = x_2 + s \sqrt{\frac{n^2 h^2 R^2}{4} + |Ry|} - s \frac{nhR}{2} \quad (19)$$

式中: $y = (n+1)hx_2 + 2x_1$, $s = \text{sign}(y)$, 使得线性区上边界满足 $f(x_1, x_2, R, h, n) = nhR$, 上边界以上区域的点满足 $f(x_1, x_2, R, h, n) > nhR$, 下边界上的点满足 $f(x_1, x_2, R, h, n) = -nhR$, 在下边界以下的区域满足 $f(x_1, x_2, R, h, n) < -nhR$, 如图 5 所示。

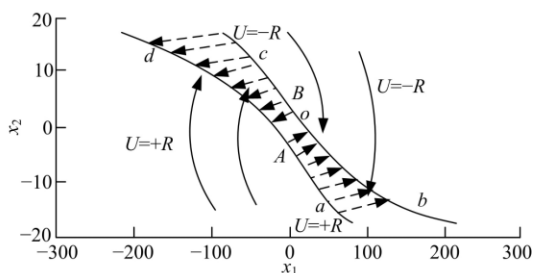


图 5 新设计的线性区

Fig. 5 Newly designed linear region

根据开关系统的特点可取控制综合函数为: $u = -R \times \text{sat}(f(x_1, x_2, R, h, n), nhR)$, 在函数线性区区域的内部取 $u = f(x_1, x_2, R, h, n)$; 在函数线性区域下边界以外的区域,取 $u = +R$; 在函数线性区域上边界以外的区域,取 $u = -R$ 。

由控制综合函数构造出的跟踪微分器如下:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + h \times x_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + h \times R \times \text{sat}_2(z(k), nhR) \end{cases} \quad (20)$$

$$z(k) = x_2(k) + s \sqrt{\frac{n^2 h^2 R^2}{4} + |Ry|} - s \frac{nhR}{2} \quad (21)$$

$$\begin{cases} s = \text{sign}(y(k)) \\ y(k) = (n+1)hx_2(k) + 2x_1(k) - v(k) \end{cases} \quad (22)$$

式中: n 为调节线性区宽度的参数。可以看出离散跟踪微分器具有更加简洁的形式,而且调节参数 n 可以实现对输入信号的滤波。

陀螺速度信号经过此跟踪微分器可以获得品质较好的加速度信号,在一定程度上克服了传统差分获取加速度存在的对噪声敏感的问题,但当 R 取较大数值时会出现一定程度相位延时,因此在合理选取 R 值的情况下,所获得的加速度品质基本达到了与利用加速度计获取加速度的同一水准,大大节约了平台的成本。

将利用跟踪微分器获得的加速度作为加速度反馈环节中反馈回路的加速度,再结合上文提到的对加速度反馈的设计方案,实现了对扰动力矩产生的加速度的衰减,也相当于直接对扰动力矩进行了衰减,这样扰动力矩在经加速度反馈环节时就能被大幅衰减,再经过外层速度环以及位置环对扰动进行衰减,最后输出的速度信号或者位置信号所受到的干扰基本可以忽略不计。

3 实验验证

为了验证将基于跟踪微分器的加速度反馈环节引入传统平台控制系统后的伺服性能及效果,将航空光电稳定平台安装在模拟直升机运动的摇摆台上进行实验,摇摆台如图 6 所示。



图 6 模拟飞机姿态变化的摇摆台

Fig. 6 Swing table simulation on aircraft attitude change

3.1 与传统速度反馈系统的对比

为了比较基于跟踪微分器的加速度反馈系统和传统的速度反馈系统对抗动的抑制能力,在

1°、0~2.5 Hz 的正弦干扰下,对系统进行抗扰对比实验,如表 1 所示。

表 1 视轴稳定精度的提高程度

Table 1 Improvement of LOS stabilization accuracy

实验频率/Hz	LSADS/%	实验频率/Hz	LSADS/%
0.1	79.1	1.5	68.0
0.5	77.0	2.0	63.4
1.0	72.5	2.5	68.5

注:LSADS 表示基于跟踪微分器的加速度反馈系统视轴稳定精度的提高程度。

如果用 LSAD 表示基于跟踪微分器的加速度反馈系统的视轴稳定精度,LSAS 表示传统速度反馈系统的视轴稳定精度,则:

$$LSADS = \frac{LSAS - LSAD}{LSAS} \times 100\% \quad (23)$$

在 1°、2 Hz 的正弦干扰下,视轴波动曲线如图 7 所示。为了更清楚地比较两系统对抗动的抑制能力,对图 7 做频谱分析,结果如图 8 所示。

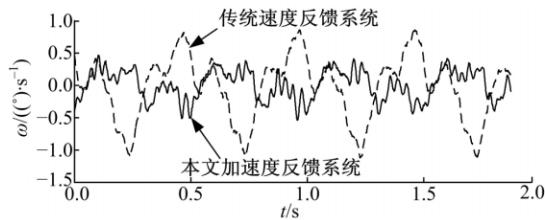


图 7 传统速度反馈系统与本文加速度反馈系统的抗扰曲线

Fig. 7 Disturbance rejection curve of traditional speed feedback system and proposed acceleration feedback system

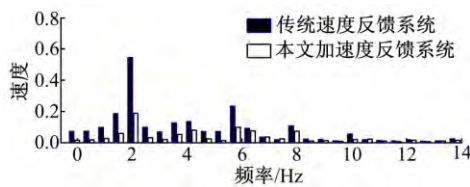


图 8 传统速度反馈系统与本文加速度反馈系统的抗扰曲线频谱分析

Fig. 8 Frequency spectrum analysis of disturbance rejection curve drawn by traditional speed feedback system and proposed acceleration feedback system

从表 1 及图 7、图 8 中可以看出:相对于传统速度反馈系统,基于跟踪微分器的加速度反馈系统在各个频率对抗动均有很好的抑制作用,扰动抑制能力明显优于传统速度反馈系统。图 9 是在

1°、2 Hz 的正弦干扰下,给定 10°/s 的阶跃响应曲线。

从图 9 中可看出,相对于传统速度反馈系统,基于跟踪微分器的加速度反馈系统的超调量从 22.5%减小到了 16.7%,过渡过程提速约 0.1 s,从而使相位裕度变大,提高了系统的稳定性。

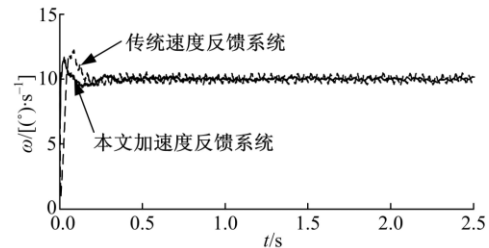


图 9 传统速度反馈系统与本文加速度反馈系统的阶跃曲线

Fig. 9 Step curve of traditional speed feedback system and proposed acceleration feedback system

3.2 与基于差分的加速度反馈系统的对比

图 10 是平台以 $\omega = 10\sin(6\pi t)$ 角速度转动时的加速度信号曲线。

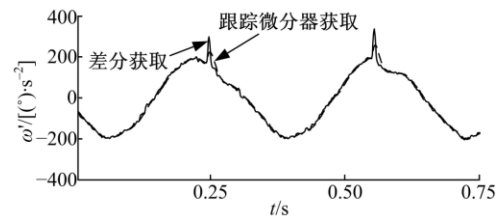


图 10 基于差分与跟踪微分器的加速度反馈的加速度信号

Fig. 10 Acceleration signal based on differential acceleration feedback system and acceleration feedback system based on tracking differentiator

从图 10 可以看出:两种获取加速度的方式在相位上基本上相同,但是差分获取的加速度有较大的尖峰和比较多的毛刺信号,这对于调节系统是很不利的,而跟踪微分器获取的加速度信号相对来说尖峰小、曲线平滑、对噪声有较好的抑制能力。

表 2 是在 1°、0~2.5 Hz 的正弦干扰下,基于跟踪微分器与基于差分的加速度反馈系统抗扰性能的对比实验。

如果用 LSAC 表示基于差分的加速度反馈系统的视轴稳定精度,则:

$$LSADC = \frac{LSAC - LSAD}{LSAC} \times 100\% \quad (24)$$

表 2 视轴稳定精度的提高程度

实验频率/Hz	LSADC/%	实验频率/Hz	LSADC/%
0.1	57.3	1.5	52.7
0.5	55.9	2.0	53.9
1.0	56.2	2.5	52.1

注:LSADC 表示基于差分的加速度反馈系统视轴稳定精度的提高程度。

图 11 是在 1°、2 Hz 的正弦干扰下,视轴的波动曲线。

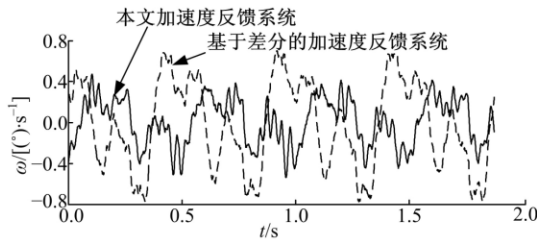


图 11 基于差分与跟踪微分器的加速度反馈系统的抗扰曲线

Fig. 11 Disturbance rejection curve of differential acceleration feedback system and acceleration feedback system based on tracking differentiator

表 2 和图 11 表明基于跟踪微分器的加速度反馈系统的抗扰性明显优于基于差分的加速度反馈系统。

3.3 与基于加速度计的加速度反馈系统的对比

在 1°、0~2.5 Hz 的正弦干扰下,相对于基于跟踪微分器的加速度反馈系统,基于加速度计的加速度反馈系统视轴稳定精度的提高程度如表 3 所示。

表 3 视轴稳定精度的差值

实验频率/Hz	LSAAD/%	实验频率/Hz	LSAAD/%
0.1	10.4	1.5	8.6
0.5	10.7	2.0	6.6
1.0	7.8	2.5	8.0

注:LSAAD 表示基于加速度计的加速度反馈系统视轴稳定精度的提高程度。

如果用 LSAA 表示基于加速度计的加速度反馈系统的视轴稳定精度,则:

$$LSAAD = \frac{LSAD - LSAA}{LSAD} \times 100\% \quad (25)$$

根据上述数据知,相对基于加速度计的加速度反馈系统,基于跟踪微分器的加速度反馈系统的视轴稳定精度虽稍差,但其差值都保持在 10%

左右,是可接受的。

图 12 是在 1°、2 Hz 的正弦干扰下,基于跟踪微分器与基于加速度计的加速度反馈系统抗扰实验图。

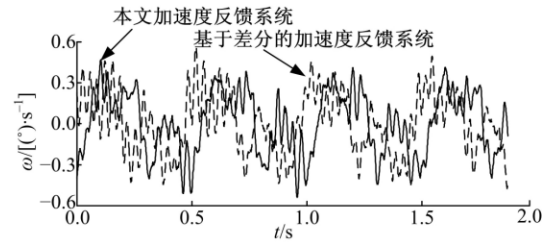


图 12 基于加速度计与跟踪微分器的加速度反馈系统的抗扰曲线

Fig. 12 Disturbance rejection curve of acceleration feedback system based on accelerometer and acceleration feedback system based on tracking differentiator

表 3 和图 12 表明两者的视轴稳定精度相对于传统速度反馈系统基本达到同一水平。图 13 是在 1°、2 Hz 的正弦干扰下,给定角速度为 $\omega = 10\sin(6\pi t)$ 时的对比实验曲线。

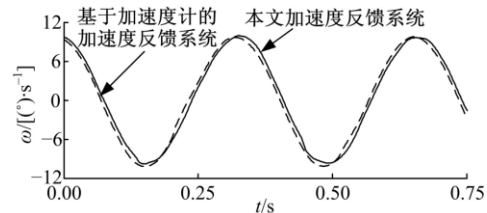


图 13 基于加速度计与跟踪微分器的加速度反馈系统的正弦曲线

Fig. 13 Sine curve of acceleration feedback system based on accelerometer and acceleration feedback system based on tracking differentiator

从图 13 中可以看出,基于跟踪微分器的加速度反馈系统相对于基于加速度计的反馈系统约有 2.5 ms 滞后,但相位裕度的减小量可忽略不计,对于平台跟踪的目标信号,这种滞后在允许范围内。抗干扰能力虽不如基于加速度计的加速度反馈系统,但在允许范围内两者基本处于同一水平。在工程实践中利用跟踪微分器来获取加速度信号,将大大降低以往利用加速度计获取加速度信号的成本。

4 结束语

基于跟踪微分器的加速度反馈控制摒弃了传

统基于差分和加速度计获取加速度的方法,而是以跟踪微分器获取加速度作为反馈。实验结果表明,将基于跟踪微分器的加速度反馈环节引入到传统航空光电稳定平台系统后,相对于传统速度反馈系统,基于跟踪微分器的加速度反馈系统超调量减小了约4.9%,视轴稳定精度提高了至少63.4%,平台的过渡过程加快。新的伺服系统结构简单、性能优越,具有较好的通用性和实用价值。在传统平台系统中引入基于跟踪微分器的加速度反馈环节后,对外层速度环、位置环等反馈环节的影响基本可以忽略不计,且新的航空光电稳定平台系统的扰动抑制能力大幅提升,从而平台的视轴能更好地稳定在惯性空间内。而且基于跟踪微分器的加速度反馈控制系统的性能基本达到了与基于加速度计的加速度反馈系统的同等水准,可在工程应用中利用跟踪微分器代替加速度计获取加速度信号,从而大大降低实际平台系统的使用成本,使小型平台拥有更广阔的发展前景。

参考文献:

- [1] 胡松涛. 自动控制原理[M]. 5版. 北京: 科学出版社, 2007:76-93.
- [2] 魏伟, 戴明, 李嘉全, 等. 航空光电稳定平台的自抗扰控制系统[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2296-2305.
Wei Wei, Dai Ming, Li Jia-quan, et al. ADRC control system for airborne opto-electronic platform[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(8): 2296-2305.
- [3] 吴校生, 陈文元. 角加速度计发展综述[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(4): 458-463.
Wu Xiao-sheng, Chen Wen-yuan. Review on angular accelerometer development[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(4): 458-463.
- [4] 李贤涛, 张葆, 赵春蕾, 等. 基于自适应的自抗扰控制技术提高扰动隔离度[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2015, 45(1): 202-208.
Li Xian-tao, Zhang Bao, Zhao Chun-lei, et al. Improve isolation degree based on adaptive active disturbance rejection controller[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2015, 45(1): 202-208.
- [5] 申帅, 张葆, 李贤涛, 等. 航空光电稳定平台质量不平衡力矩的前馈补偿[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1281-1290.
Shen Shuai, Zhang Bao, Li Xian-tao, et al. Feedforward compensation of mass unbalance moment for airborne photoelectric stabilized platform[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(5): 1281-1290.
- [6] De Jager B. Acceleration assisted tracking control[J]. IEEE Control Systems, 1994, 14(5): 20-27.
- [7] Zhu W H, Tryggvason B, Piedboeuf J C. On active acceleration control of vibration isolation systems[J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(8): 863-873.
- [8] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学, 2007, 1(1): 24-31.
Han Jing-qing. Active disturbance rejection control technique[J]. Frontier Science, 2007, 1(1): 24-31.
- [9] 韩京清, 王伟. 非线性跟踪-微分器[J]. 系统科学与数学, 1994, 14(2): 177-183.
Han Jing-qing, Wang Wei. Nonlinear tracking-differentiator[J]. Systems Science and Mathematical Science, 1994, 14(2): 177-183.
- [10] 王新华, 陈增强, 袁著祉. 全程快速非线性跟踪-微分器[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(6): 875-878.
Wang Xin-hua, Chen Zeng-qiang, Yuan Zhu-zhi. Nonlinear tracking-differentiator with high speed in whole course[J]. Control Theory and Applications, 2003, 20(6): 875-878.
- [11] 杨丽君, 卢志刚. 三阶线性跟踪-微分器的收敛性证明及仿真研究[J]. 燕山大学学报, 2006, 30(1): 44-47.
Yang Li-jun, Lu Zhi-gang. Proof of a third-order tracking differentiator's convergence and simulation of its dynamic characteristics[J]. Journal of Yanshan University, 2006, 30(1): 44-47.
- [12] 韩京清, 袁露林. 跟踪-微分器的离散形式[J]. 系统科学与数学, 1999, 19(3): 268-273.
Han Jing-qing, Yuan Lu-lin. Discrete tracking differentiator[J]. Systems Science and Mathematical Science, 1999, 19(3): 268-273.
- [13] Tian D, Shen H, Dai M. Improving the rapidity of nonlinear tracking differentiator via feedforward[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3736-3743.
- [14] 彭建亮, 孙秀霞, 董文瀚, 等. 利用跟踪-微分器构造增广比例导引律[J]. 应用科学学报, 2009, 27(4): 435-440.
Peng Jian-liang, Sun Xiu-xia, Dong Wen-han, et al. Construction of augmented proportion navigation law with tracking differentiator[J]. Journal of Applied Science—Electronics and Information Engineering, 2009, 27(4): 435-440.