

倾斜校正中基于重复控制的高频扰动抑制方法

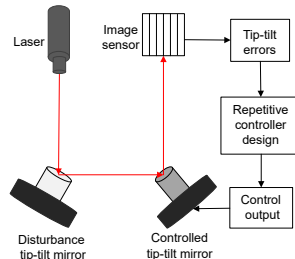
冯念^{1,2,3,4}, 唐涛^{1,2,3*}, 胡龙^{1,2,3,4}

¹中国科学院光场调控科学技术全国重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209;

³中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

⁴中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049



摘要: 扰动抑制尤其是超过闭环带宽外的高频扰动抑制是实现倾斜校正系统高精度稳定控制的核心。重复控制具有周期性的轨迹跟踪和扰动抑制的良好性能, 应用于高精度系统的稳定控制。对倾斜校正系统的高频扰动抑制问题进行分析, 并研究基于重复控制的高频扰动抑制性能。针对传统重复控制器存在的固有频率漂移和水床放大问题, 研究设计一种基于 Youla 参数化的梳状重复控制器来抑制超过闭环带宽外的高频扰动。针对重复控制阶次取整数时仅对特定频率点有效, 尤其在大部分高频区域会因扰动波动和不确定导致控制器失效的问题, 优化设计一种全通型的分数阶延时滤波器用在倾斜校正系统中抑制可至 Nyquist 频率的任意频率点的高频扰动。最后, 针对难以抑制的非周期结构振动抑制问题, 设计并行式重复控制方案并讨论该方案在应对多个非周期扰动抑制时的鲁棒稳定性和有效性。

关键词: 扰动抑制; 倾斜校正; 重复控制; 高频扰动

中图分类号: TP273

文献标志码: A

冯念, 唐涛, 胡龙. 倾斜校正中基于重复控制的高频扰动抑制方法 [J]. 光电工程, 2025, 52(4): 240294

Feng N, Tang T, Hu L. Repetitive-control-based high-frequency disturbance suppression method in tip-tilt correction[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(4): 240294

Repetitive-control-based high-frequency disturbance suppression method in tip-tilt correction

Feng Nian^{1,2,3,4}, Tang Tao^{1,2,3*}, Hu Long^{1,2,3,4}

¹National Key Laboratory of Optical Field Manipulation Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

⁴School of Electronics, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Disturbance suppression, especially high-frequency disturbance suppression beyond the closed-loop

收稿日期: 2024-12-16; 修回日期: 2025-03-03; 录用日期: 2025-03-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (62375267)

*通信作者: 唐涛, taotang@ioe.ac.cn。

版权所有©2025 中国科学院光电技术研究所

bandwidth, is the core of realizing high-precision stability control for tip-tilt correction systems. Repetitive control has good performance of periodic trajectory tracking and disturbance suppression, which is applied to the stability control of high-precision systems. The high-frequency disturbance suppression problem of the tip-tilt correction system is analyzed in this paper, and the performance of high-frequency disturbance suppression based on repetitive control is summarized. To solve the problems of natural frequency drift and waterbed amplification in traditional repetitive controllers, a comb-like repetitive controller based on Youla parameterization is designed to suppress high-frequency disturbances beyond the closed-loop bandwidth. In order to solve the problem that the integer-order repetitive control is only effective for specific frequency points, especially in most high frequency regions, the controller will fail due to disturbance fluctuations and uncertainty, an all-pass finite-order delay filter is optimized to suppress the high frequency disturbance at any frequency point up to Nyquist frequency in the tip-tilt correction system. Finally, a parallel repetitive control scheme is designed to suppress the vibration of aperiodic structures which is difficult to suppress, and its robust stability and effectiveness are discussed.

Keywords: disturbance suppression; tip-tilt correction; repetitive control; high-frequency disturbance

1 引言

倾斜镜具有高带宽、响应快、体积小等优点被应用在光学望远镜系统中的精跟踪环节, 可以将控制精度提高到微弧度甚至亚微弧度级别^[1-4]。随着望远镜系统不断的发展, 从地基到运动载体的转变, 为了进一步探测更远, 更暗的物体, 对倾斜校正系统的控制性能提出了新的挑战^[5-7]。因此, 增强倾斜校正系统的扰动抑制能力是望远镜系统实现高精度闭环从而逼近系统的衍射极限是一项必要的工作^[8-10]。在实际应用场景中, 倾斜校正系统的扰动来源多种多样, 这些扰动大多由基座振动, 载体运动以及风扇、冷却机运行等带来^[11-13]。这些扰动可以分为两大类: 一是来自基座的扰动, 这些扰动的幅值和频率常常是随机时变的, 使得扰动的预测和抑制变得困难; 二是来自于系统光链路中难以测量的扰动, 表现为非周期, 大幅度窄带扰动。针对第一类扰动, 常用的解决方案是增加额外的惯性传感器对其进行测量后直接前馈到反馈回路中从而抵消扰动^[14-16]。这种方法简单有效, 但是带来了成本增加的问题, 且不适用于环境有限的空间观测。因此, 大部分研究人员侧重于控制算法的优化设计来提高倾斜校正系统的控制性能, 其中主流的包括基于线性二次高斯 (linear quadratic Gaussian, LQG) 的控制算法、基于扰动观测器的控制算法和基于 H 无穷的控制算法等, 这些控制算法在一定程度上提高了控制性能^[17-19]。虽然这些方法针对控制带宽之内的扰动是有效的, 然而当扰动集中在闭环带宽之外的高频部分时, 这些算法难以保证系统在高频部分的稳定性。因此, 需要研究新的算法抑制超过闭环带宽, 甚至可

至 Nyquist 频率的高频扰动从而提高倾斜校正系统的整体闭环性能。

重复控制是一种基于内模的控制器, 具有周期性轨迹跟踪和扰动抑制能力被广泛应用在电源逆变器、永磁同步电机、纳米定位平台等高精度控制系统^[20-22]。在近年来的研究中, 针对重复控制器实现过程中所存在的频率漂移以及非重复频率的水床放大问题, 研究人员开展了大量的工作。其中, 一种频率选择滤波器设计来降低重复控制非周期频率点的水床放大效应, 被大量文献证实是行之有效的, 该方法在应对水床放大问题时展现出了良好的效果^[23-24]。其次, 将重复控制器的内部滤波器设计为零相滤波器可以解决频率漂移问题, 并成功应用在系统中^[25-26]。此外, 针对倾斜校正系统的扰动抑制工作, 研究人员在重复控制器的基础上进行了优化设计并应用于解决望远镜系统的结构振动问题, 通过对周期性扰动抑制验证了重复控制器在周期性扰动抑制上的优越性, 有效提高了系统的控制精度^[27-28]。在高频扰动抑制工作中, 重复控制器还需要解决的难点有两个: 一是扰动频率变化较大时, 整数阶重复控制器难以满足系统所需性能; 二是重复控制器应对非周期扰动时, 如何保证系统的稳定性和多个控制器之间的耦合问题。对于分数阶重复控制算法, 主流算法大致可以分为两类, 一是对分数阶延时算子直接进行 Taylor 级数展开实现分数阶延时滤波器的效果^[29-31]; 二是对重复控制器中滤波器设计实现分数阶延时^[32-34]。这两种算法在低频部分实现了准确的分数阶次重复控制, 有效缓解了重复控制器在应对低频扰动波动频率大的问题。但是, 由于这两类延时

滤波器本身存在控制器的精确度和分数阶延时滤波器的阶次是成正比的关系, 需要考虑计算复杂度和内存之间的矛盾。此外, 由于算法的低通特性, 在高频部分会衰减甚至完全丢失重复控制器的梳状陷波效果, 对于高频扰动抑制而言是不理想的。因此, 一种新型的无限冲击响应 (infinite impulse response, IIR) 分数阶延时滤波器被应用来实现分数阶延时^[35-37], 这种延时滤波器仅采用相位延时来实现分数阶延时, 在幅值上表现恒为 1, 其全通特性可以最大程度地保留重复控制器的全频段效果, 有望用于实现可至 Nyquist 频率的高频扰动抑制。但是, 该方法也存在有效估计带宽和延时滤波器的阶次成正比的问题, 因此需要在有效带宽和算法复杂度之间做一个平衡。对于倾斜校正系统中的多个扰动抑制而言, 重复控制器对周期性信号的跟踪和抑制是一种有效的算法。但是对于非周期扰动而言, 其性能显得比较弱, 因为应对非周期扰动时通常需要设计多个重复控制器来实现, 此时需要考虑控制器之间的耦合以及系统鲁棒性的问题^[38-40]。在倾斜校正系统中的高频扰动抑制问题, 重复控制可以用于校正由于平台倾斜或负载变化引起的高频扰动。本文概述了重复控制器在倾斜校正系统中的应用发展历程, 并综述了相关热点以及研究方向。同时将重点介绍应对超过闭环带宽外的扰动抑制技术, 研究了分数阶重复控制器和非周期重复控制器的应用发展历程。

2 基于倾斜校正的高频扰动抑制

2.1 倾斜校正系统及其扰动抑制性能分析

图 1 为倾斜校正系统的光路图, 其中图像传感器为电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 图像传感器, 为闭环系统提供倾斜误差, 倾斜镜是倾斜校正系统的核心器件, 它具有体积小、响应快、高带宽等优点被应用在复合轴控制系统中的精跟踪环节。控制器将参数输入到执行机构倾斜镜中, 通过控制倾斜镜的偏转, 实现视轴稳定和校正工作, 使得图像传感器能够获取到稳定清晰的图像。在获取高清晰度的图像信息时, 图像传感器需要大量的曝光时间, 这使得系统存在大量延时。

传统闭环反馈控制结构如图 2 所示, $C(z)$ 和 $P(z)$ 分别表示离散控制器和被控对象传递函数, z^{-m} 表示系统延时, m 为延时系数, $r(k)$ 、 $e(k)$ 、 $d(k)$ 和 $y(k)$ 分别为闭环控制的输入信号、误差信号、扰动信号和输出信号, k 表示连续信号。可以推导出闭环传递函数

和灵敏度传递函数为

$$T_0 = \frac{C(z)P(z)z^{-m}}{1 + C(z)P(z)z^{-m}}, \quad (1)$$

$$S_0 = \frac{1}{1 + C(z)P(z)z^{-m}}. \quad (2)$$

从式 (1) 可以看出, 控制系统的闭环带宽取决于控制器的高增益和精确的系统模型。其中, 由于图像传感器的采样是有限的, 以及由传感器延时、AD-DA (analog to digital-digital to analog) 采样、驱动器迟滞等带来的时延是不可避免的。因此, 仅使用传统比例-积分 (proportion-integral, PI) 反馈控制结构时, 系统的扰动抑制能力有限的。此外, 式 (2) 所示的灵敏度函数呈高通特性, 也就是说系统在超过控制带宽外会丢失控制性能, 影响闭环精度。因此, 研究新的算法提高闭环系统的带宽之外的高频扰动抑制能力是一项必要的工作 (补充说明: 定义灵敏度传递函数带宽之外的频率为高频, 带宽之内为低频)。

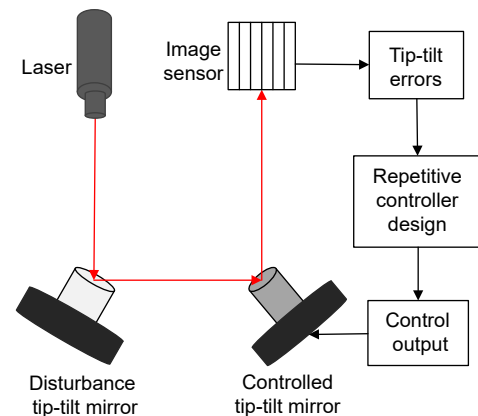


图 1 倾斜校正系统的光路图

Fig. 1 Optical path diagram of tip-tilt correction system

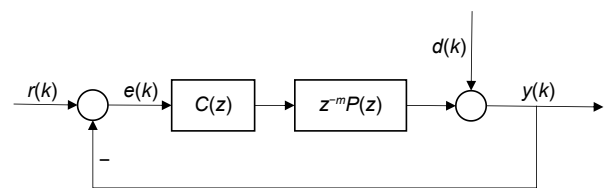


图 2 传统闭环反馈控制框图

Fig. 2 Traditional closed-loop feedback control block diagram

2.2 经典重复控制

经典重复控制在内环使用了内部延时来实现周期性的扰动抑制或轨迹跟踪。如图 3 所示, G_{RC} 表示重复控制器, 根据图推导出传统重复控制的传递函数为

$$S_{CRC}(z) = \frac{1 - z^{-N}q(z)}{1 + z^{-m}C(z)P(z) - z^{-N}q(z)}, \quad (3)$$

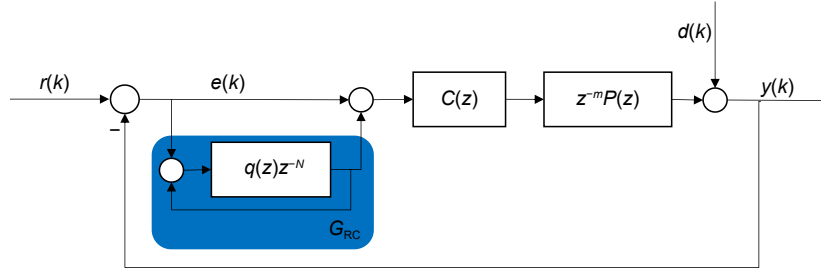


图3 经典重复控制框图

Fig. 3 Classical repetitive control block diagram

式中: N 为重复控制器的阶次。进一步推导可以得出, 系统的稳定性取决于 $\left\| \frac{z^{-N}q(z)}{1+z^{-m}C(z)P(z)} \right\|_{\infty}$ 是否小于 1。因此, 研究人员将 $q(z)$ 滤波器设计为低通滤波器或 $q(z) < 1$ 的一个常数来保证系统的稳定性。此时引入的 $q(z)$ 会衰减重复控制器的高频性能, 这也是应对高频扰动时需要保留的控制效果。重复控制在应对高频扰动抑制问题时, 除了考虑系统的闭环稳定性, 更应该保证灵敏度函数性能在高频部分的提升。此外, 重复控制器还面临以下问题: 1) 设计 $q(z)$ 时带来的频率漂移问题; 2) 重复控制在非重复频率部分的水床放大问题。

2.3 改进重复控制

为了解决重复控制在抑制超过闭环带宽外的高频扰动, 提出了一种基于 Youla 参数化的重复控制算法。根据 Youla 参数化设计倾斜校正系统中的重复控制器为

$$C_Y(z) = \frac{C(z) + P_m^{-1}(z)Q(z)}{1 - z^{-n}Q(z)}, \quad (4)$$

式中: $Q(z)$ 表示待设计的重复控制器; z^{-n} 表示拟合后的系统延时。根据控制器, 进一步推导得到该控制器作用下的灵敏度传递函数为

$$S_Y = \frac{1 - z^{-n}Q(z)}{1 + C(z)P(z)z^{-m} + Q(z)(P(z)P_m^{-1}(z)z^{-m} - z^{-n})}. \quad (5)$$

可以看出, 通过设计优化分子部分, 就可以增强闭环系统的扰动抑制能力。根据小增益定理, 得到系统闭环稳定的条件为

$$\left\| \frac{Q(z)(P(z)P_m^{-1}(z)z^{-m} - z^{-n})}{1 + C(z)P(z)z^{-m}} \right\|_{\infty} < 1, \quad (6)$$

式中: $\frac{1}{1 + C(z)P(z)z^{-m}}$ 为传统闭环控制结构的灵敏度传递函数, 随着频率的增加不断接近为 1 表现为高通特性, $(P(z)P_m^{-1}(z)z^{-m} - z^{-n}) \approx 0$ 在低频区域是可获得的, 因此只要设计 $Q(z)$ 为低通特性且满足

$$BW(Q(z)) < BW\left(\frac{1}{1 + C(z)P(z)z^{-m}}, (P(z)P_m^{-1}(z)z^{-m} - z^{-n})\right), \quad (7)$$

就可以保证系统的稳定性, 其中 BW 为带宽 (bandwidth) 的简写。进一步分析上式, 由于系统延时 z^{-m} 是不可避免的, 为了保证系统的稳定性, 需要保持 $n = m$, 这是高频部分稳定性的充要条件之一。此时, 灵敏度函数的分子部分出现了一个较大的 n 值, 在低频部分, 可以忽略 n 值带来的相位损失。在高频部分, 这个延时会丢失特征频率点处的控制效果, 严重的情况下会破坏系统的稳定性。考虑延时补偿从而提高系统稳定性是必要工作。此外, 当 $Q(z)(P(z)P_m^{-1}(z)z^{-m} - z^{-n}) \approx 0$ 时, 扰动抑制的问题就转换为最小化 $1 - z^{-n}Q(z)$, 为方便后续分析, 将其命名为 $L(z)$ 。也就是说, 只要设计控制器 $Q(z)$ 使得 $L(z)$ 在特征频率点处展现凹陷的控制效果, 就可以增强控制系统在特征频率点处的扰动抑制能力。通常情况下, $L(z)$ 被设计成低通、高通或峰值滤波器来分别增强系统在特殊频率区域的扰动抑制能力, 此时 $Q(z) = z^n(1 - L(z))$ 。由于 $L(z)$ 设计为因果滤波器, 在求解控制器的过程中 $Q(z)$ 会变成非因果滤波器, 在物理上是不可实现的。进一步说明, 该控制结构在实现高频扰动抑制的过程中, 考虑延时补偿对于实现所需的控制效果是非常重要的。

重复控制器在系统内部产生一个较大的时间延时来实现周期性轨迹跟踪和扰动抑制, 因此可以使用这个特性来补偿延时。在重复控制中, 为了减小非周期频率的水床放大, 大多数研究人员采用一种频率选择重复控制器 $F(z) = \frac{1 - z^{-N}}{1 - \beta z^{-N}}$, $\beta \in [0, 1)$, 此时 $F(z)$ 的频率响应表现为一种周期性的梳状滤波效果的控制器, 当 $\beta = 0$ 时, 该控制器为传统重复控制器且 $\max|F(z)| = 2$, 约等于 6 dB, 这也是图 4 中蓝线所示的水床放大现象; 随着 β 不断增大到接近 1 时, $\max|F(z)|$ 无限接

近于 1, 也就是 0 dB, 如图 4 红线所示 ($\beta=0.8$)。要在所提控制器作用下的灵敏度传递函数中实现特征频率点的高频陷波效果, 令 $L(z) = F(z)$, 换算解出控制器设计为

$$Q(z) = \frac{(1-\beta)z^{-N+n}}{1-\beta z^{-N}}. \quad (8)$$

此时重复控制器自身带有的延时环节 z^{-N} 正好可以补偿延时因子 z^{-n} 导致的控制器效果丢失和可能带来的高频不稳定现象。图 5 为是否补偿延时系统的灵敏度函数 Bode 图, 可以看出, 当延时补偿后, 可以得到准确特征频率点的高频陷波效果, 为实现高频扰

动抑制奠定了基础。

建立了如图 6 所示的实验平台并进行了实验验证。其中, 被控倾斜镜是压电陶瓷驱动的倾斜镜, 它来自德国 Physik Instrumente 公司的 s-330 系列产品, 它的倾斜角度为 2 mrad, 闭环分辨率为 0.05 μ rad。位置敏感探测器 (PSD) 作为图像传感器模拟电荷耦合期间为闭环系统提供倾斜误差。控制单元主要由数字信号处理 (digital signal process, DSP) 操作系统组成。扰动镜 1 和扰动镜 2 可以分别模拟来自基座和来自光路中的扰动信息。倾斜镜的两个轴特性是一样的, 因此在实验过程中, 只对倾斜镜的 y 轴进行了操作, x 轴是

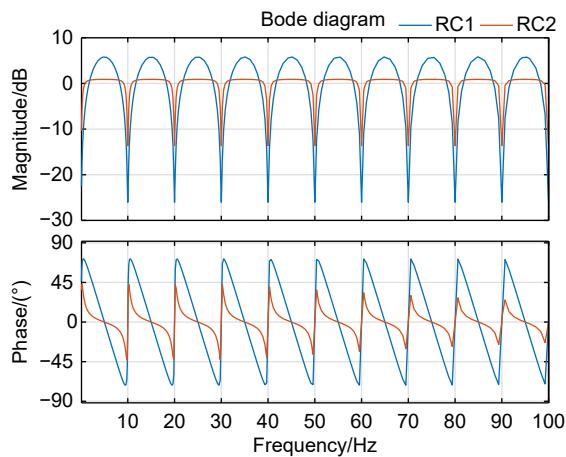


图 4 $L(z)$ 的 Bode 响应图

Fig. 4 Bode response diagram of $L(z)$

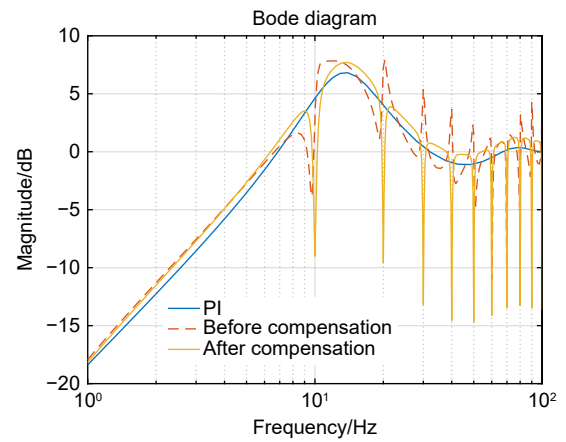


图 5 是否补偿延时的灵敏度传递函数对比

Fig. 5 Comparison of sensitivity transfer function whether time delay is compensated or not

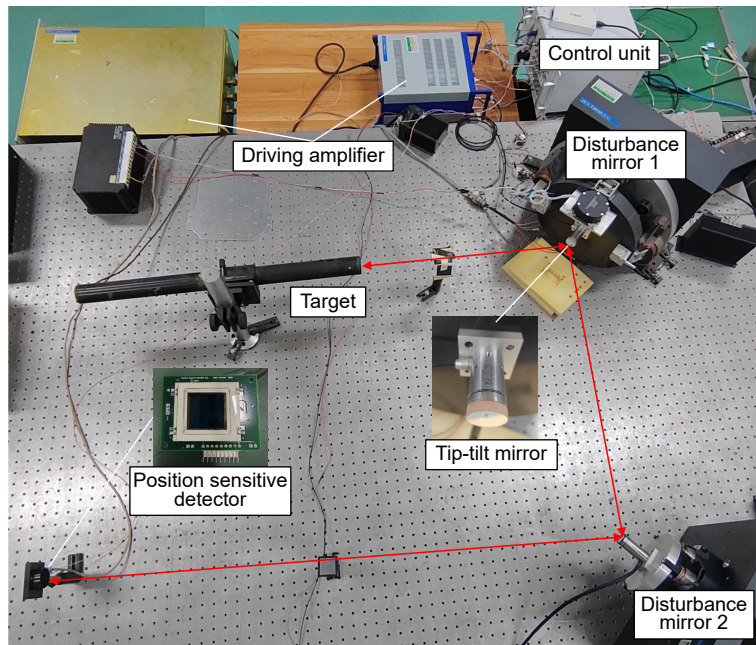


图 6 搭建实验平台

Fig. 6 Build experimental platform

保持静止的。同样, 仅在扰动镜的 y 轴上添加扰动, 而 x 轴始终保持静止状态。本文所提 PSD 的采样频率为 200 Hz, 系统延时为 3 帧。需要补充说明的是, 在所提控制器的实现过程中, 需要在已知扰动频率信息的前提下进行重复控制器的设计。

实验结果如图 7 所示, 已知扰动频率集中在 40 Hz, 重复控制器的阶次设计为 $N=5$ 。红线和黄线分别为仅使用 PI 控制器和增加重复控制器作用下的倾斜误差实验结果。可以看出, 所提出的重复控制结构稳定性好, 可以有效抑制超过闭环带宽外的高频扰动, 有效地减小了闭环误差, 大大提高了控制器的闭环性能。

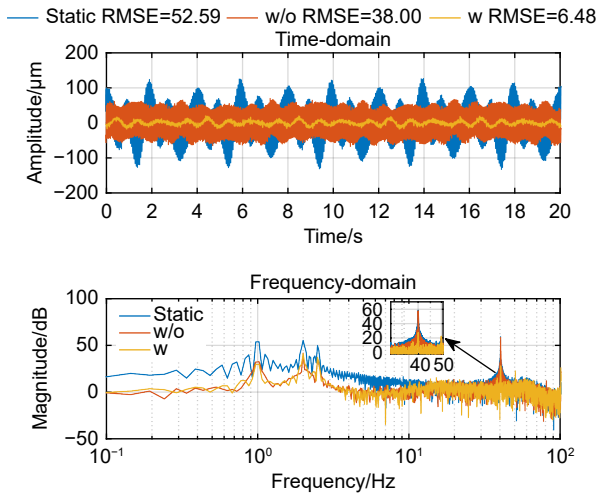


图 7 是否添加重复控制器时的倾斜误差
Fig. 7 Tip-tilt errors with/without adding the repetitive controller

需要进一步分析的是, 应用上述重复控制器抑制高频扰动时, 可实现的有效频率是有限的。当 N 仅取整数阶次时, 能实现的最大频率仅为 $f_s/3$ (f_s 表示系统采样频率), 且有效频率之间的跨度较大, 大部分频率范围时无效的。此外, 当 N 的取值较小, 即 $-N+n>0$ 时, 控制器的分子部分表现为超前环节, 这在工程应用上是难以实现的。总的来说, 当 N 为整数的时候可以抑制的频率点有限, 因此需要考虑引入分数阶算法进行任意频率点的扰动抑制。

3 分数阶重复控制对任意频率的扰动抑制

对于分数阶重复控制器设计而言, 研究人员常常采用的方法包括基于 Taylor 级数展开和基于滤波器设计的方式来实现分数阶延时滤波器的设计, 这些方法

本质上都采用了低通型的滤波器来实现分数阶延时, 在高频处会大大衰减重复控制器的凹陷效果, 这正是实现高频扰动抑制时不希望看到的。此外, 分数阶延时滤波器的有效精度和阶次往往是成正比的, 要实现可至 Nyquist 频率的重复控制效果, 需要考虑计算复杂度和系统存储能力的问题。当重复控制器的阶次 N 为小数时, 将重复控制器重写为 $F(z) = \frac{1 - z^{-\text{int}(N)-\alpha}}{1 - \beta z^{-\text{int}(N)-\alpha}}$, 得到

$$Q(z) = \frac{(1-\beta)z^{-\text{int}(N)-\alpha}}{1 - \beta z^{-\text{int}(N)-\alpha}}, \quad (9)$$

式中: $\text{int}(N)$ 和 α 分别为 N 的整数部分和小数部分。一种全通型的分数阶延时滤波器设计为

$$z^{-\alpha} = Q_A(z) = \frac{b_n + b_{n-1}z^{-1} + \dots + b_1z^{-(M-1)} + z^{-M}}{1 + b_1z^{-1} + \dots + b_{n-1}z^{-(M-1)} + b_nz^{-M}}, \quad (10)$$

$$b_k = (-1)^k \binom{M}{k} = \prod_{m=0}^M \frac{\alpha - M + m}{\alpha - M + k + m}, \quad (11)$$

式中: $\alpha = \text{int}(N) - N$; $\binom{M}{k} = \frac{M!}{k!(M-k)!}$ 是二项式系数, $k=0,1,2,\dots,M$; M 是所设计的全通滤波器的阶次。图 8 给出了一阶分数阶延时滤波器的 Bode 图, 可以看出该滤波器的幅值恒为 1, 仅通过相位延时就能实现分数阶延时滤波器, 可以最大程度地保留重复控制器的高频陷波特特性。

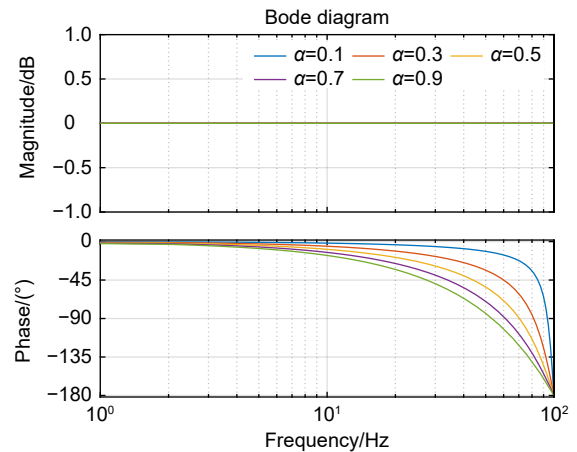


图 8 不同 α 值下一阶分数阶延时滤波器的 Bode 图
Fig. 8 Bode diagram of first-order fractional delay filters with different α

但是, 它也存在精确度和阶次的矛盾, 它的有效精度带宽在 1 阶、3 阶和 5 阶时分别为 Nyquist 频率的 51%、67% 和 73%。要实现可至 Nyquist 频率的分数重复控制, 需要平衡精确度和计算复杂度。基于此, 提出了一种简单的优化算法, 其优化方式为

$$\begin{cases} b_{10} = \frac{1-\alpha}{1+\alpha}, & 4 < N \\ b_{11} = \frac{1-\alpha}{1+\alpha^2}, & 3 < N < 4 \\ b_{12} = \frac{1-\alpha^2}{1+\alpha^2}, & 2 < N < 3 \end{cases} \quad (12)$$

该优化算法仅在一阶滤波器的系数上进行优化, 在不提高滤波器的阶次的前提下就可以提高分数阶延时滤波器的有效精度, 相比于提高阶次来提升控制精确度而言, 大大减小了计算的复杂度。图 9 给出了优化前后的结果, 可以看出, 优化后仅用一阶分数阶滤波器就可以实现准确的特征频率陷波效果, 有效地降低了分数阶滤波器实现时计算量。

此外, 针对 $N < n$ 的情况, 一种延时补偿方案被提出。为了抵消 z^{-n} , 在重复控制器的设计时, 增加额外的延时因子 z^{-r} 来补偿系统的时间延时。具体原理: 已知 $Q(z) = \frac{(1-\beta)z^{-N}}{1-\beta z^{-N}}$, 要抵消延时带来的影响, 则需要满足 $Q(z) = z^{-r} z^{-n} Q(z)$, 将 $Q(z)$ 代入, 得到

$$\frac{(1-\beta)z^{-N}}{1-\beta z^{-N}} = \frac{(1-\beta)z^{-N} z^{-r} z^{-n}}{1-\beta z^{-N}} \quad (13)$$

要使式 (13) 成立, 则需满足 $z^{-N} = z^{-N} z^{-r} z^{-n}$, 进行推导最终得到

$$r = \frac{kf_s - Nf - nf}{f} \quad (14)$$

也就是说, 只要设计 r 满足式 (14), 就可以抵消延时带来的影响, 获得重复控制的高频特性, 提高系统的稳定性。

图 10 给出了补偿前后的 Bode 图, 其中 $N=2.22$, 延时补偿因子设计为 $r=6$, $Q_1(z) = 1 - F(z)$ (未补偿延时, 如图中红色点线所示), $Q_2(z) = Q_1(z)z^{-r}$ (补偿延时, 如图中黑色虚线所示)。从图 10 可以看出, 不补偿延时的时候在特征频率点处会丢失重复控制本身的凹陷效果; 补偿延时后, 可以保证特征频率点处的陷波效果。为了进一步减小中频部分的水床放大, 设计 $Q_3(z) = Q_1(z)z^{-r}Q_H(z)$ 来平衡, 其中 $Q_H(z)$ 是一个带宽为 50 Hz 的一阶高通滤波器, 结果如紫色的虚线所示。

图 11 和图 12 给出了实验结果, 可以看出, 与

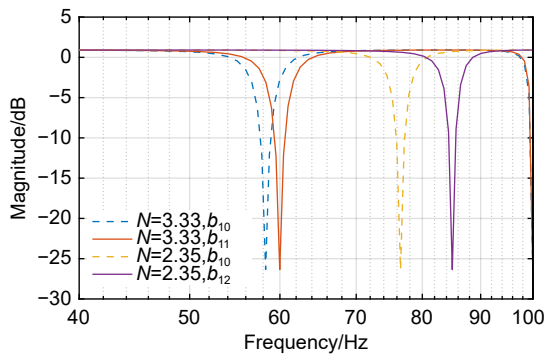


图 9 不同分数阶滤波器参数下分数阶 $F(z)$ 的幅值响应

Fig. 9 Amplitude response of $F(z)$ with different fractional filter parameters

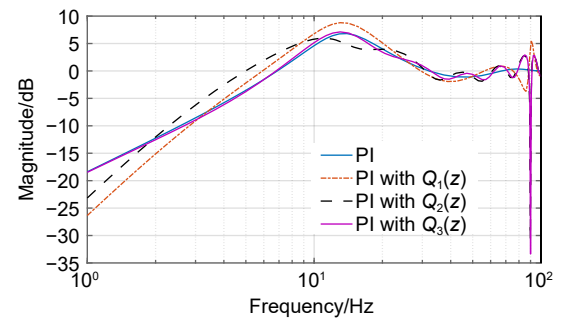


图 10 不同控制器时的灵敏度传递函数

Fig. 10 The sensitivity transfer function with different controllers

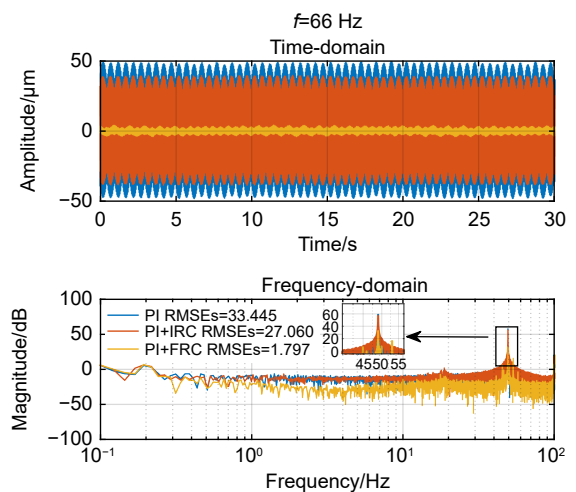
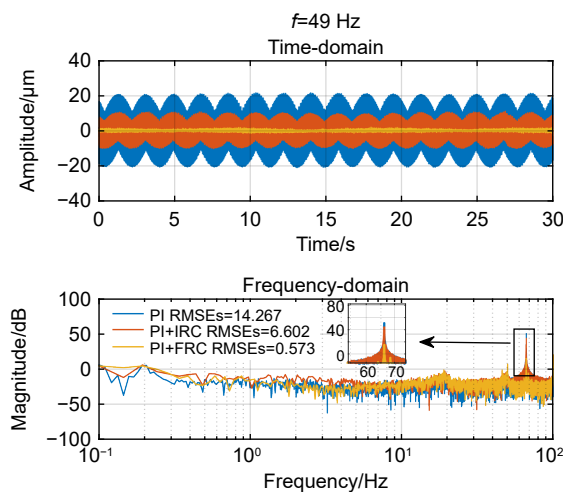


图 11 不同控制器的倾斜误差

Fig. 11 Tip-tilt errors with different controllers

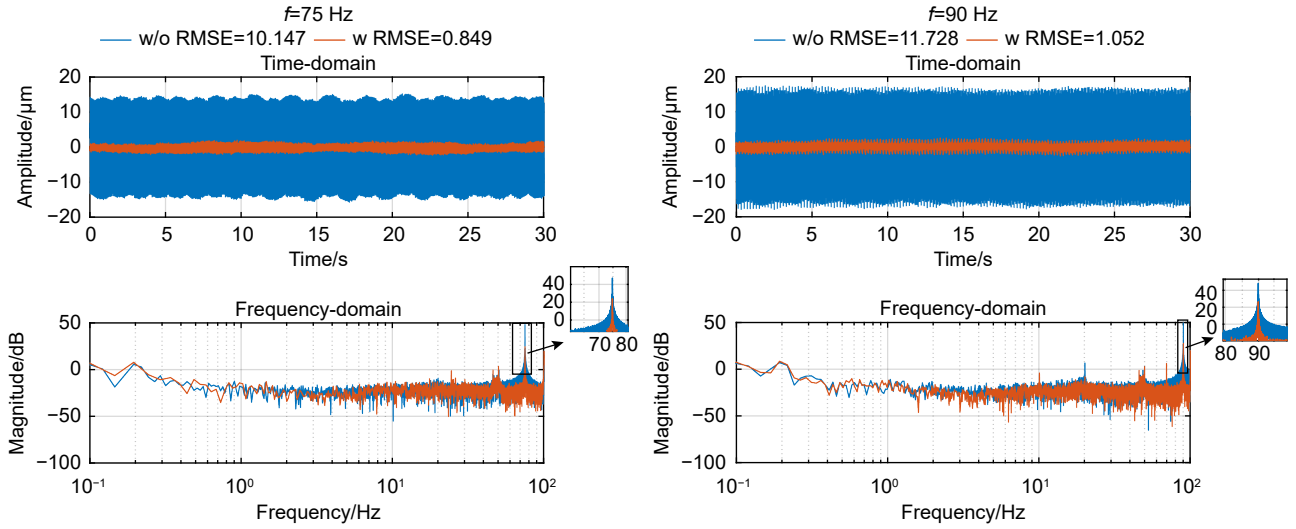


图 12 有无添加分数阶重复控制器的倾斜误差

Fig. 12 Tip-tilt errors with/without fractional repetitive controllers

PI 基线控制相比, 应用所提出的分数阶重复控制器 (fractional repetitive control, FRC) 后, 系统的闭环误差减小了 90% 以上, 大大提高了控制性能。与整数阶重复控制 (integer repetitive control, IRC) 相比, 分数阶的高精确度可以有效作用于特征频率点, 有效避免了扰动频率波动范围大时整数阶重复控制无效的情况。此外, 分数阶重复控制器大大的拓宽了重复控制器的应用频率范围, 远远超过闭环带宽, 可至 Nyquist 频率。

在实际应用系统中, 不止存在单个扰动, 还可能存在多个扰动, 为方便设计重复控制器应对这些扰动, 根据在频率上表现的周期特性和非周期特性划分为周期扰动和频率非周期扰动。众所周知, 重复控制具有周期性的轨迹跟踪和扰动抑制能力, 常常应用在电力系统上的谐波抑制上。对于周期性的扰动而言, 只要设计一个重复控制器, 就可以实现周期性的扰动抑制。图 13 给出了该控制结构抑制周期扰动时的实验结果, 已知周期扰动的基频为 23.5 Hz, 它的倍频分别为 47.0、69.0 和 90.0 Hz。按照式 (9) 设计重复控制器 $N=8.5$ 。从实验结果可以看出, 所设计的重复控制器在应对超过闭环带宽外的高频周期性扰动时同样有效, 与基线控制相比, 抑制比可高达 10 倍以上, 有效减小了倾斜误差, 大大提高了倾斜校正的性能。

4 并行重复控制对非周期扰动抑制

对于频率非周期的扰动抑制, 需要考虑多个重复控制器的设计, 在倾斜校正系统的多个高频扰动抑制

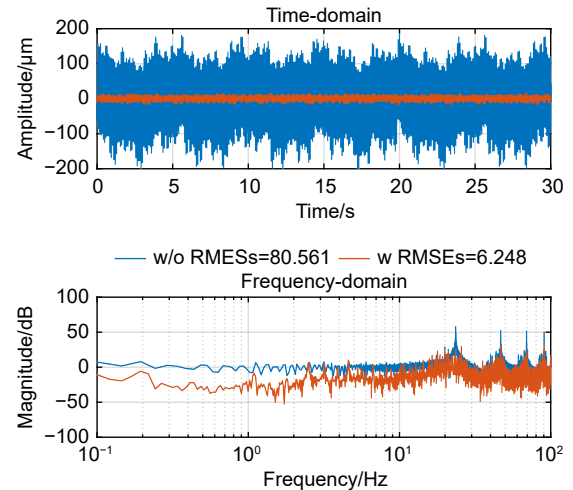


图 13 重复控制器抑制周期扰动时的倾斜误差

Fig. 13 Tip-tilt errors with/without the repetitive controller for periodic disturbances

中, 需要考虑: 1) 在存在多重非周期高频扰动的工况下, 系统仍能保持较高的渐进跟踪性能, 且稳态误差可收敛至较小范围; 2) 在控制器有限闭环带宽约束条件下, 系统表现出良好的误差鲁棒稳定性, 并保持优异的高频扰动抑制特性。为了应对多个非周期扰动信号, 设计了一种并行式多周期的重复控制结构, 这种结构具有鲁棒性能好, 稳定性能高等优点, 其控制结构如图 14 所示。

推导可以得出系统的灵敏度函数为

$$S = \frac{1}{1 + G_c(z)P(z)z^{-m}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{G_{RI}(z)z^{-m}P(z)}{1 + G_c(z)P(z)z^{-m}}}, \quad (15)$$

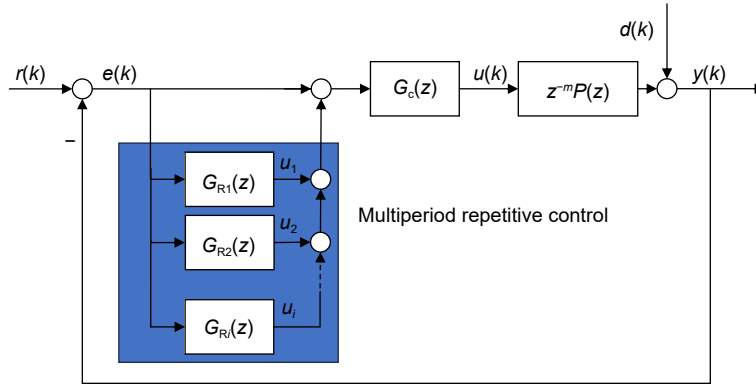


图 14 多周期重复控制框图

Fig. 14 The block diagram of multiperiod repetitive control

式中: $G_{Ri}(z) = \sum_{i=1}^I G_{Ri}(z)$, $i = 1, 2, \dots, I$ 。根据式 (15), 可以把灵敏度传递函数分为两部分 (S_0 和 S_{Ri}), 其中 S_0 是 PI 控制器作用下的灵敏度函数, 它的带宽直接受到传感器采样和系统延时的限制, 难以抑制超过带宽外的高频扰动。进一步分析可知, 通过优化设计重复控制器来增强闭环控制的高频扰动抑制能力。定义 $G_f(z) = \frac{P(z)}{1 + G_c(z)P(z)z^{-m}}$, 将 $G_{Ri}(z)$ 代入, 推导分析可得

$$S_{Ri} = \prod_{i=1}^I \frac{1}{1 + G_{f,i}^{eq}(z)G_{Ri}(z)}, \quad (16)$$

$$G_{f,i}^{eq}(z) = \begin{cases} G_f(z), & i = 1 \\ \frac{G_{f,i-1}^{eq}(z)}{1 + G_{f,i-1}^{eq}(z)G_{R,i-1}(z)z^{-m}}, & i > 1 \end{cases} \quad (17)$$

根据式 (16) 和式 (17), 可以看出, S_{Ri} 被重新表述为递归相关因素的乘积, 通过等效的系统 $G_{f,i}^{eq}$ 。实际上, $G_{f,i}^{eq}$ 是将 $G_{f,i-1}^{eq}$ 映射到 $G_{R,i-1}$ 的传递函数, 包括每一个回路的闭环。接下来, 分析系统的稳定性, 如果 (16) 中的每个因子 $1/(1 + G_{f,i}^{eq}(z)G_{Ri}(z))$ 是稳定的, 则 S_{Ri} 是稳定的。分两部分讨论:

1) 当 $i=1$ 时, 设计的重复器仅针对一个周期的宽带扰动即可, 此时系统的稳定性取决于 $S_{R1} = 1/(1 + G_f(z)G_{R1}(z)z^{-m})$, 也就是说, 只要 S_{R1} 是稳定的, 就可以保证系统的稳定性。定义控制器作用时的幅值裕度和相位分别为

$$\begin{cases} K_f = 20 \log |G_f(z)_{z=jwT_s}| \\ K_{R1}(z) = 20 \log |G_{R1}(z)_{z=jwT_s}| \\ \theta_0 = \angle G_f(z)_{z=jwT_s} \\ \theta_{R1} = \angle G_{R1}(z)_{z=jwT_s} \\ -\theta_m = \angle z^{-m} \end{cases}, \quad (18)$$

式中: w 是角频率; T_s 是采样时间。要使系统稳定,

则应该满足

$$\begin{cases} K_f K_{R1} > 6 \text{ dB} \\ \pi + \theta_f + \theta_{R1} - \theta_m > \frac{\pi}{4} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} K_{R1} > 1 \\ \theta_{R1} > \theta_m > 0 \end{cases} \quad (19)$$

2) 当 $i>1$ 时, 应该满足

$$\begin{cases} K_f K_{R1} K_{R2} \cdots K_{Ri} > 6 \text{ dB} \\ \pi + \theta_f - \theta_m + \theta_{R1} + \theta_{R2} + \cdots + \theta_{Ri} - i\theta_m > \frac{\pi}{4} \end{cases} \Rightarrow \prod_{i=1}^I K_{Ri} > 1, \sum_{i=1}^I \theta_{Ri} > I\theta_m \quad (20)$$

进一步推导得到

$$\begin{cases} K_f \prod_{i=1}^I K_{Ri} > 6 \text{ dB} \Rightarrow \prod_{i=1}^I K_{Ri} > 1 \\ \pi + \theta_f + \sum_{i=1}^I (\theta_{Ri} - \theta_m) > \frac{\pi}{4} \Rightarrow \sum_{i=1}^I \theta_{Ri} > \theta_m \end{cases} \quad (21)$$

综上, 可以看出, 当单个重复控制器满足稳定性条件的时候, 多个重复控制器也很容易满足系统的稳定性。也就是说, 只要设计的每个重复控制器满足式 (19) 中的条件, 则式 (21) 是满足的。综上所述, 如果满足以下条件, 闭环系统是稳定的。

1) $1 + G_c P(z)z^{-m} = 0$ 的根位于单位圆内;

2) G_{Ri} 满足条件 $K_{Ri} > 1$ 且 $\theta_{Ri} > I\theta_m > 0$ 。

定义系统模型 $P(z)$ 和 $P_m(z)$ 之间的不确定性定义为 $\Delta(z)$ (其中 $\Delta(z)$ 是稳定的并且具有有限冲击响应), 此时 $P(z) = P_m(z)(1 + \Delta(z))$, 将其代入式 (14) 中得到闭环控制的特征多项式为

$$\tilde{A} = 1 + G_c(z)P_m(z)(1 + \Delta(z))z^{-m} + G_{R1}(z)z^{-m}P_m(z) \cdot (1 + \Delta(z)) = A(1 + T(z)\Delta(z)) \quad (22)$$

式中: $A = 1 + G_c(z)P(z)z^{-m} + G_c(z)P(z)z^{-m}$, 系统的鲁棒稳定性条件是

$$\|T(z)\Delta(z)\|_\infty < 1. \quad (23)$$

此外, 需要进一步说明的是, 该结构的优点包括以下两个方面: 1) 并行式的结构可以将延时信息统一到并行回路中去, 有利于高频部分对延时的单独补偿。2) 并行式的控制器互相设计不干扰, 只要保证每个支路都是稳定的, 就可以实现稳定的多周期控制, 避免控制器之间的相互耦合。分析灵敏度函数后可知, 与上文一致, 只要设计每一个控制器都带有凹陷滤波效果, 就可以在不同的特征频率点实现多个非周期的扰动抑制。满足 $G_{Ri}(z) \approx 1$ 且不考虑系统延时环节 z^{-m} 带来的影响时, 重复控制器设计为

$$\begin{cases} S_{Ri} = \frac{G_{Ri}(z)}{1 + G_{Ri}(z)} \\ G_{Ri}(z) = \frac{1 - S_{Ri}}{S_{Ri}} \end{cases} \quad (24)$$

令 $S_{Ri} = F(z)$, 解出 $G_{Ri}(z) = \frac{(1-\beta)z^{-N_i}}{1-z^{-N_i}}$ 。与第 2 节一致, 应用延时补偿算法和分数阶延时滤波器设计后, 可以在任意频率点实现特征频率点的扰动抑制效果。

图 15 分别给出了所提出的控制结构应对频率非周期扰动时的倾斜误差, 其中非周期扰动集中在 33.3、43.5 和 50.8 Hz, 控制器设计为 $N_1=6.00$ 、 $N_2=4.59$ 和 $N_3=3.93$ 。从实验结果可以看出, 该方法可以有效抑制非周期扰动, 大大减小倾斜误差, 有效地提高了倾斜校正系统在应对多个非周期扰动时的闭环性能。

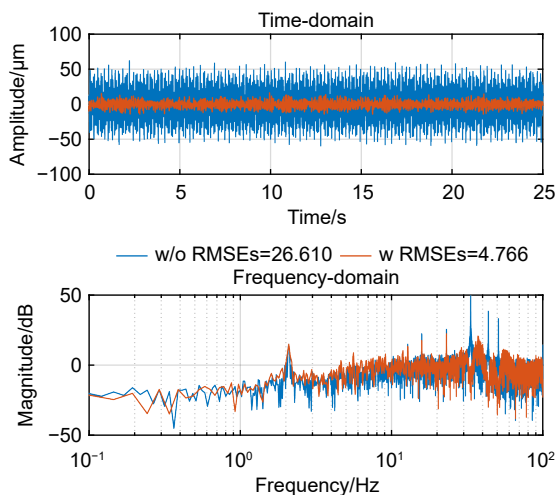


图 15 重复控制器抑制非周期扰动时的倾斜误差
Fig. 15 Tip-tilt errors with/without the repetitive controller for non-periodic disturbances

在以上工作中, 针对重复控制在应对倾斜校正的高频扰动抑制工作中存在的问题进行了分析, 并通过设计优化重复控制器对不同工况下的扰动进行抑制。

根据实验结果得出结论, 重复控制器在应对超过闭环带宽外的高频扰动是有效的。其设计方便实现简单, 无论是整数阶次的高频扰动, 还是分数阶次的高频扰动都可以通过设计重复控制器来进行抑制。除了周期性扰动抑制性能外, 所设计的并行重复控制结构也适用于抑制非周期扰动, 与基线控制相比, 抑制能力增强了 80% 以上。总的来说, 在闭环带宽有限的前提下, 优化设计重复控制器可以实现可至 Nyquist 频率的单个峰值扰动、多个周期扰动以及多个非周期扰动的抑制。下一步将考虑针对超过 Nyquist 频率超高频扰动抑制工作, 在这个过程中, 应用重复控制器来提高闭环系统的超高频扰动抑制性能也是一种有效的手段。

根据采样定理, 超过传感器 Nyquist 频率的信号会出现混叠的现象, 针对这个混叠信号设计控制器是无效的。因此, 如何辨识未知信号是否混叠, 如何恢复原始信号以及如何对恢复出来的高频信号进行实时地跟踪控制工作是具有挑战的。图 16 给出了一种重复采样控制下的实验结果, 传感器采样频率为 200 Hz, 超高频扰动信号的频率为 120 Hz, 设计并行重复控制器对其进行抑制也得出了较好的实验结果。可以得出结论: 将重复控制器和重复采样相结合, 可以克服传感器采样有限的难题, 从而提高倾斜校正系统的在超过传感器 Nyquist 频率的高频轨迹跟踪和扰动抑制能力是可行的。

5 结 论

在应对倾斜校正系统中的高频扰动抑制研究中, 重复控制是一种有效的控制技术, 可以增强系统的跟踪性能和抗干扰能力。整数阶和分数阶重复控制器在不同的应用场景中具有各自的优缺点, 需要根据具体的需求进行选择。同样地, 重复控制器不但在应对周期扰动时具有良好的效果, 在应对频率非周期的扰动信号时, 设计并行式的重复控制结构也同样可以实现, 该方法应用方便, 可以保证系统的鲁棒性和稳定性。在倾斜校正系统中, 重复控制的设计简单, 仅需特征频率点一个参数就可以实现, 从而提供精确的校正效果, 且其自身的延时功能在应对带有时延的控制系统而言, 有助于提高系统的稳定性和可靠性。未来的研究方向包括进一步提高重复控制的性能、降低实现成本以及拓展其在更多领域的应用。此外, 应用重复控制器来解决超过传感器 Nyquist 频率的超高频扰动信

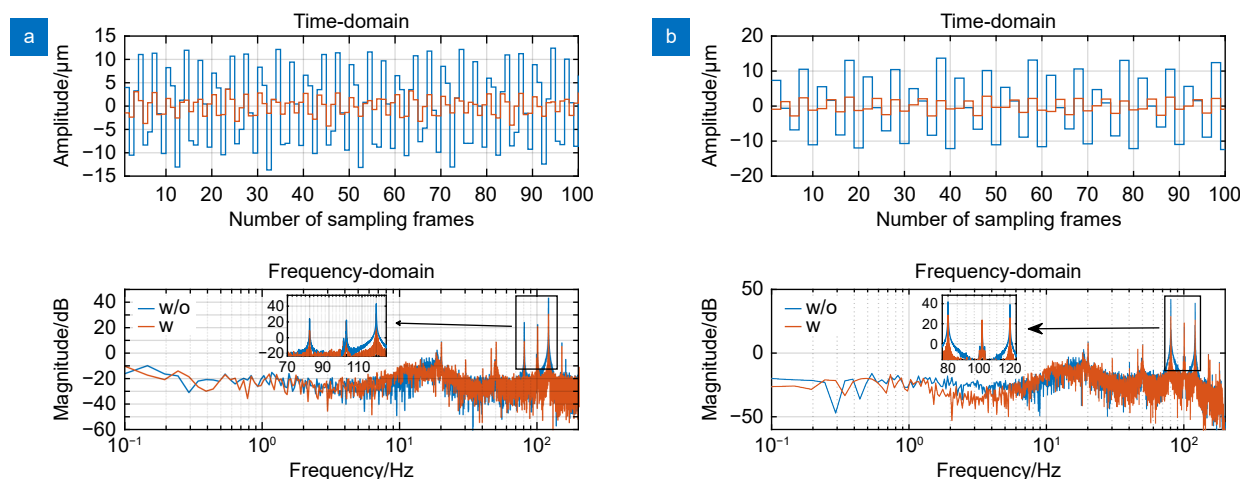


图 16 重复控制器抑制超高频扰动时的倾斜误差

Fig. 16 Tip-tilt errors with/without the repetitive controller for ultra-high frequency disturbance

号抑制工作也是未来的重点方向之一。

利益冲突:所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Glück M, Pott J U, Sawodny O. Piezo-actuated vibration disturbance mirror for investigating accelerometer-based Tip-Tilt reconstruction in large telescopes[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, **49**(21): 361–366.
- [2] Huang L H, Fan M W, Zhou R, et al. System identification and control for large aperture fast-steering mirror driven by PZT[J]. *Opto-Electron Eng*, 2018, **45**(3): 170704.
黄林海, 凡明文, 周睿, 等. 大口径压电倾斜镜模型辨识与控制[J]. *光电工程*, 2018, **45**(3): 170704.
- [3] Luo Y, Liu K K, Yang F, et al. Observation and compensation control of sliding mode compound layered interference for the fast steering mirror system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(4): 220330.
罗勇, 刘凯凯, 杨帆, 等. 快反镜系统滑模复合分层干扰观测补偿控制[J]. *光电工程*, 2023, **50**(4): 220330.
- [4] Liu X, Li X Y, Du R. Modeling and inverse compensation control of hysteresis nonlinear characteristics of piezoelectric steering mirror[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(4): 180654.
刘鑫, 李新阳, 杜睿. 压电倾斜镜迟滞非线性建模及逆补偿控制[J]. *光电工程*, 2020, **47**(4): 180654.
- [5] Tumarina M, Ryazanskiy M, Jeong S, et al. Design, fabrication and space suitability tests of wide field of view, ultra-compact, and high resolution telescope for space application[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(3): 2390–2399.
- [6] Wang X, Su X Q, Liu G Z, et al. Laser beam jitter control of the link in free space optical communication systems[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(25): 41582–41599.
- [7] Guesalaga A, Neichel B, O'Neal J, et al. Mitigation of vibrations in adaptive optics by minimization of closed-loop residuals[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(9): 10676–10696.
- [8] Tang T, Niu S X, Ma J G, et al. A review on control methodologies of disturbance rejections in optical telescope[J]. *Opto-Electron Adv*, 2019, **2**(10): 190011.
- [9] Sanfedino F, Preda V, Pommier-Budinger V, et al. Robust active mirror control based on hybrid sensing for spacecraft line-of-sight stabilization[J]. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2021, **29**(1): 220–235.
- [10] Tang T, Ma J G, Chen H B, et al. A review on precision control methodologies for optical-electric tracking control system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(10): 200315.
唐涛, 马佳光, 陈洪斌, 等. 光电跟踪系统中精密控制技术研究进展[J]. *光电工程*, 2020, **47**(10): 200315.
- [11] Wu H M, Wang C, Feng N, et al. Adaptive Tip-Tilt disturbance suppression technique for characteristic disturbance frequency identification[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(10): 230177.
吴红梅, 王琛, 冯念, 等. 特征扰动频率辨识的自适应倾斜扰动抑制技术[J]. *光电工程*, 2023, **50**(10): 230177.
- [12] Ruan Y, Xu T R, Yang T, et al. Position-rate control for the time delay control system of Tip-Tilt mirror[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(12): 200006.
阮勇, 徐田荣, 杨涛, 等. 具有延迟特性的倾斜镜系统中速度-位置控制方法[J]. *光电工程*, 2020, **47**(12): 200006.
- [13] Zhou R, Zhang Q, Liao Y, et al. Research on beam jitter control technology base on hybrid adaptive filter[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2021, **58**(13): 1314004.
周睿, 张强, 廖勇, 等. 混合自适应滤波的光束抖动控制技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, **58**(13): 1314004.
- [14] Wen L, Xu T R, Ruan Y, et al. Disturbance feedforward control of Tip-Tilt mirror with gyro measuring for large-amplitude vibration rejection[J]. *IEEE Sens J*, 2022, **22**(16): 16351–16358.
- [15] Wang Y, Bian Q H, Liao J, et al. Strapdown inertial stabilization technology based on SBG inertial navigation in inertial stabilization gimbal[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(5): 220238.
王玉, 边启慧, 廖军, 等. 惯性稳定万向架中基于 SBG 惯导的捷联控制技术[J]. *光电工程*, 2023, **50**(5): 220238.
- [16] Fan Y F, Tan U X. Design of a feedforward-feedback controller for a piezoelectric-driven mechanism to achieve high-frequency nonperiodic motion tracking[J]. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2019, **24**(2): 853–862.
- [17] Xu T R, Ruan Y, Zhao Z Q, et al. Error-based observer control of an optic-electro tracking control system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(11): 190713.
徐田荣, 阮勇, 赵志强, 等. 基于误差的观测器在光电跟踪系统中的应用(英文)[J]. *光电工程*, 2020, **47**(11): 190713.

- [18] Mooren N, Witvoet G, Oomen T. Gaussian process repetitive control: Beyond periodic internal models through kernels[J]. *Automatica*, 2022, **140**: 110273.
- [19] Niu S X, Jiang J, Tang T, et al. Optimal design of Youla controller for vibration rejection in telescopes[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(9): 190547.
牛帅旭, 蒋晶, 唐涛, 等. 望远镜中扰动抑制的 Youla 控制器优化设计[J]. *光电工程*, 2020, **47**(9): 190547.
- [20] Zou Z X, Zhou K L, Wang Z, et al. Fractional-order repetitive control of programmable AC power sources[J]. *IET Power Electron*, 2014, **7**(2): 431–438.
- [21] Liu T Q, Wang D W. Parallel structure fractional repetitive control for PWM inverters[J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2015, **62**(8): 5045–5054.
- [22] Feng Z, Ming M, Ling J, et al. Fractional delay filter based repetitive control for precision tracking: design and application to a piezoelectric nanopositioning stage[J]. *Mech Syst Signal Process*, 2022, **164**: 108249.
- [23] Feng N, Ruan Y, Xu T R, et al. Enhanced observer-based repetitive control for Tip-Tilt disturbance rejections beyond control bandwidth in optical-stabilized systems[J]. *IEEE Photonics J*, 2023, **15**(1): 7800207.
- [24] Li L L, Aphale S S, Zhu L M. Enhanced odd-harmonic repetitive control of nanopositioning stages using spectrum-selection filtering scheme for high-speed raster scanning[J]. *IEEE Trans Autom Sci Eng*, 2021, **18**(3): 1087–1096.
- [25] Zhang Q F, Guo H H, Liu Y C, et al. Robust plug-in repetitive control for speed smoothness of cascaded-PI PMSM drive[J]. *Mech Syst Signal Process*, 2022, **163**: 108090.
- [26] Li L L, Huang W W, Wang X Y, et al. Dual-notch-based repetitive control for tracking lissajous scan trajectories with piezo-actuated nanoscanners[J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2022, **71**: 4503612.
- [27] Nie K, Xue W C, Zhang C, et al. Disturbance observer-based repetitive control with application to optoelectronic precision positioning system[J]. *J Franklin Inst*, 2021, **358**(16): 8443–8469.
- [28] Tang T, Niu S X, Yang T, et al. Vibration rejection of Tip-Tilt mirror using improved repetitive control[J]. *Mech Syst Signal Process*, 2019, **116**: 432–442.
- [29] Li L L, Gu G Y, Zhu L M. Fractional repetitive control of nanopositioning stages for tracking high-frequency periodic inputs with nonsynchronized sampling[J]. *Rev Sci Instrum*, 2019, **90**(5): 055108.
- [30] Zhou K L, Tang C, Chen Y X, et al. A generic multi-frequency repetitive control scheme for power converters[J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2023, **70**(12): 12680–12688.
- [31] Cui P L, Zhang G X, Liu Z Y, et al. A second-order dual mode repetitive control for magnetically suspended rotor[J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2020, **67**(6): 4946–4956.
- [32] Li L L, Chen Z Z, Aphale S S, et al. Fractional repetitive control of nanopositioning stages for high-speed scanning using low-pass FIR variable fractional delay filter[J]. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2020, **25**(2): 547–557.
- [33] Chen D, Zhang J M, Qian Z M. An improved repetitive control scheme for grid-connected inverter with frequency-adaptive capability[J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2013, **60**(2): 814–823.
- [34] Li L L, Fleming A J, Yong Y K, et al. High performance raster scanning of atomic force microscopy using Model-free Repetitive Control[J]. *Mech Syst Signal Process*, 2022, **173**: 109027.
- [35] Feng N, Ruan Y, Tang T. Youla parameterization-based fractional repetitive control of arbitrary frequency disturbance rejections for line-of-sight stabilization[J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2024, **71**(8): 9460–9469.
- [36] Ye J, Liu L G, Xu J B, et al. Frequency adaptive proportional-repetitive control for grid-connected inverters[J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2021, **68**(9): 7965–7974.
- [37] Chen S N, Zhao Q S, Ye Y Q, et al. Using IIR filter in fractional order phase lead compensation PIMR-RC for grid-tied inverters[J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2023, **70**(9): 9399–9409.
- [38] Blanken L, Bevers P, Koekebakker S, et al. Sequential multiperiod repetitive control design with application to industrial wide-format printing[J]. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2020, **25**(2): 770–778.
- [39] Feng N, Ruan Y, Bian Q H, et al. High-frequency multiperiod wideband vibration rejections of piezoelectric tip-tilt mirror using parallel odd-harmonic repetitive control[J]. *Mech Syst Signal Process*, 2025, **224**: 111958.
- [40] Chen Y X, Zhou K L, Tang C, et al. Fractional-order multiperiodic odd-harmonic repetitive control of programmable AC power sources[J]. *IEEE Trans Power Electron*, 2022, **37**(7): 7751–7758.

作者简介



冯念(1998-), 女, 博士研究生, 研究方向为精密跟踪测试技术。

E-mail: fengnian20@mails.ucas.ac.cn



【通信作者】唐涛(1980-), 男, 研究员, 研究方向为光电跟踪控制。

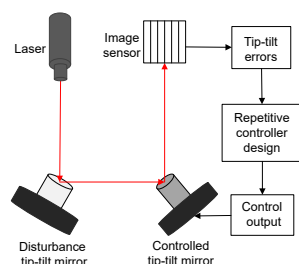
E-mail: taotang@ioe.ac.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Repetitive-control-based high-frequency disturbance suppression method in tip-tilt correction

Feng Nian^{1,2,3,4}, Tang Tao^{1,2,3*}, Hu Long^{1,2,3,4}



Optical path diagram of tip-tilt correction system

Overview: In optical telescope systems, the control accuracy with tip-tilt correction systems as a fine tracking link is improved to the level of micro radian or even sub-micro radian. Disturbance suppression, especially high-frequency disturbance suppression outside the closed-loop bandwidth, is the key to achieving high precision stability control of tip-tilt correction systems, so as to approach the diffraction limit of the telescope system. Repetitive control has good performance of periodic trajectory tracking and disturbance suppression and is widely applied to improve the control performance of high-precision control systems, such as nanopositioning stages, power inverters, and hard disk drive systems. Therefore, repetitive control is a promising algorithm for high-frequency disturbance suppression. Firstly, this paper analyzes the problem of high-frequency disturbance suppression of tip-tilt correction systems and summarizes the performance of high-frequency interference suppression based on repetitive control. To solve the problem of natural frequency drift and waterbed amplification of traditional repetitive controllers, a comb-like repetitive controller based on Youla parameterization is designed to suppress high-frequency interference outside the closed-loop bandwidth. In the optimal design of the controller, time delays are compensated by the delay characteristic of the repetitive controller to improve the stability of the closed-loop system in suppressing high-frequency disturbance. In addition, in order to solve the problem that the integer-order repetitive controller is only effective for certain frequency points, especially in most high frequency regions, the controller fails due to interference fluctuations and uncertainties, an all-pass fractional delay filter is optimized, which can suppress high-frequency disturbance at any frequency point up to the Nyquist frequency in the tip-tilt correction system. An additional delay compensation factor is designed to preserve the notch characteristic of the repetitive controller in high-frequency domains and improve the system's stability. Finally, a parallel repetitive control scheme is designed for the non-periodic structure vibration which is difficult to suppress, and its robust stability and effectiveness are discussed. A series of experiments were designed to suppress a single peak disturbance, and the results show that repetitive control suppresses any frequency disturbance up to the Nyquist frequency. Furthermore, the experimental results of multiple periodic and aperiodic disturbance suppression prove that the repetitive controller is superior in dealing with multiple high-frequency disturbances beyond the closed-loop bandwidth. In general, these proposed repetitive controllers have good performance in improving the high-frequency disturbance suppression ability of the tip-tilt correction system, and these algorithms are also suitable for other high-precision control systems in the future.

Feng N, Tang T, Hu L. Repetitive-control-based high-frequency disturbance suppression method in tip-tilt correction[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(4): 240294; DOI: [10.12086/oee.2025.240294](https://doi.org/10.12086/oee.2025.240294)

Foundation item: General Program of National Natural Science Foundation of China (62375267)

¹National Key Laboratory of Optical Field Manipulation Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; ²Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; ³Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; ⁴School of Electronics, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* E-mail: taotang@ioe.ac.cn