
哈工大谭久彬院士团队——一种基于极点配置的变增益观测器用于精密运动台：解决扰动与噪声的权衡问题

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/38907.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

哈工大谭久彬院士团队——一种基于极点配置的变增益观测器用于精密运动台：解决扰动与噪声的权衡问题。论文标题：Adaptive Compensation Algorithm for Slow Response of TBM Hydraulic Cylinders Using a Parallel Auxiliary Pump

论文链接：<https://doi.org/10.3390/act15020100>

期刊名：Actuators

期刊主页：<https://www.mdpi.com/journal/actuators>

创新性

(1)深刻揭示了传统ESO的固有权衡机理：从理论层面清晰地阐明了传统ESO在精密运动控制中无法同时兼顾低频扰动抑制与高频噪声衰减的内在原因。

(2)提出了基于极点配置的变增益ESO (VGESO)：这是一种新颖的观测器结构。其核心创新在于利用两个极点相关参数，实现了对观测器增益在低频段和高频段的解耦设计，从根本上打破了传统ESO的性能折中瓶颈。

(3)提供了系统、直观的参数整定方法：基于极点配置的设计理念使得参数调整具有清晰的物理意义，降低了高性能控制器的应用难度，增强了其工程实用价值。

1. 研究背景

集成电路 (IC) 是现代信息技术的基石。光刻机是IC制造中的核心设备，其运动台 (如晶圆台) 必须在扫描过程中实现纳米级的运动精度。然而，这一要求面临两大挑战：一是系统本身存在模型不确定性 (如参数变化、未建模柔性动态)，二是运行中受到多种外部扰动 (如电磁干扰、线缆力、测量噪声) 的影响。

自抗扰控制 (ADRC) 及其核心的扩张状态观测器 (ESO) 是处理此类问题的有效方法。ESO通

过估计并补偿总扰动（集总内部不确定性和外部扰动）来提升控制性能。然而，传统ESO存在一个根本性的权衡困境：为快速抑制低频扰动，需要高观测器增益（高带宽），但这会不可避免地放大高频测量噪声；反之，降低增益虽能衰减噪声，却会削弱扰动抑制能力。现有改进方法，如级联ESO或重构ESO结构，虽有一定效果，但往往增加了系统复杂度和调参难度，且未能从根本上阐明和解决上述权衡问题。因此，设计一种能同时有效抑制扰动和噪声、且易于工程实现的观测器，对于提升精密运动台性能至关重要。

2. 研究方法

基于极点配置的变增益ESO（VGESO）设计

为解决传统ESO的性能权衡问题，本文提出了一种基于极点配置的变增益扩张状态观测器（VGESO）。

系统建模：将精密运动台（以光刻机晶圆台单自由度子系统为例）的动力学模型表示为包含刚体模式和柔性谐振模式的形式，并将模型不确定性与外部扰动集总为总扰动 $f(t)$ ，得到系统方程： $y(t)=b_0u(t)+f(t)$ 。

传统ESO局限性分析：从频域角度分析了传统ESO的特性，明确指出其观测器增益由单一带宽参数决定，导致低频扰动抑制与高频噪声衰减之间必然存在冲突。

VGESO结构设计：提出一种改进的ESO结构。其核心创新在于引入两个与极点位置相关的可调参数，用于分别构造观测器增益。这两个参数能够解耦观测器在不同频段的响应特性：一个参数主导低频段的扰动估计能力，另一个参数影响高频段的噪声衰减特性。通过调整这两个极点参数，可以独立地、自适应地配置观测器增益，使其在低频区保持高增益以有效估计和抑制扰动，同时在高频区自动降低增益以鲁棒地衰减测量噪声。论文还提供了基于理论的稳定性分析，证明了所提方法的闭环稳定性。

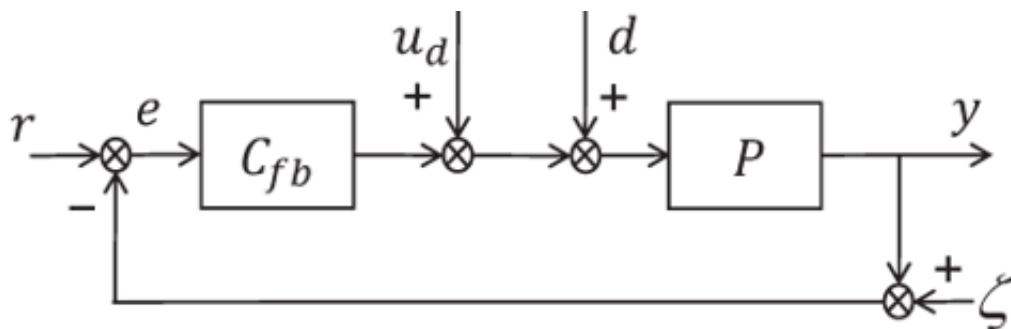


图 1. 单自由度控制配置

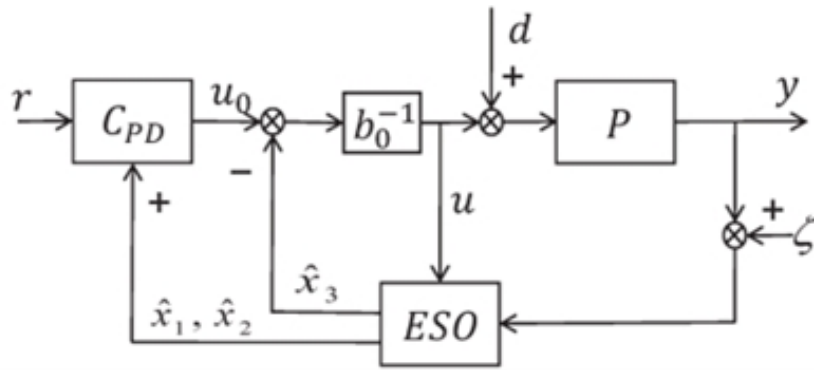


图 2. 自抗扰控制 (ADRC) 系统框图

3. 仿真实验与结果分析

为验证VGESO的有效性，在精密运动台系统上进行了仿真实验，并与传统ESO和现有变增益ESO方法进行了对比。

实验设置：

被控对象：采用一个包含刚体模式和两阶柔性谐振模式的单自由度运动台模型，并设置了模型参数名义值与实际值之间的偏差，以模拟模型不确定性。

扰动与噪声：在系统中同时施加了低频扰动（如阶跃扰动、周期扰动）和高频测量噪声（带限白噪声）。

对比方案：将所提出的VGESO与传统ESO、以及文献中已有的另一种变增益ESO进行对比。所有控制器均在相同条件下进行测试，以评估其综合性能。

实验结果与分析：

扰动抑制能力：在低频扰动作用下，VGESO展现出与高增益传统ESO相当快速估计和补偿能力，能够迅速消除扰动引起的跟踪误差，其收敛速度和抑制精度均优于对比的变增益ESO方法。

噪声衰减能力：在高频测量噪声环境下，VGESO的输出控制信号更为平滑，有效避免了因噪声放大导致的控制量高频抖动。相比之下，传统高增益ESO的控制信号中噪声成分被显著放大。

综合性能对比：仿真结果清晰地表明，VGESO成功地打破了传统ESO的权衡限制。它同时实现了低频扰动的有效抑制（误差峰值和稳态误差小）和高频噪声的鲁棒衰减（控制信号平滑，位置输出噪声低），综合性能显著优于对比方法。这证明了通过极点配置解耦增益设计的有效性。

4. 结论

本文针对精密运动台在同时存在低频扰动和高频测量噪声时难以实现纳米级定位的难题，提出了一种基于极点配置的变增益扩张状态观测器（VGESO）。

- 方法：该方法通过深入分析传统ESO的性能权衡，创新性地引入两个极点相关参数来重构观测器增益结构，实现了对低频扰动和低频噪声的差异化、解耦处理。

- 实验验证：在精密运动台模型上进行的仿真实验验证了该方法的有效性。结果表明，与传统的ESO和现有变增益ESO相比，VGESO能够在有效抑制低频扰动（如阶跃、周期扰动）的同时，显著衰减高频测量噪声的影响，成功解决了精密运动控制中这一长期存在的关键权衡问题，实现了更优的综合控制性能。

- 价值与意义：该研究为提升光刻机等高端装备的运动控制精度提供了一种有效的理论方法和实用的技术途径，其系统性的参数整定策略也使其具备良好的工程应用前景。

- 未来工作：后续研究计划将所提出的方法在实际的精密运动平台上进行实验验证，并探索其在更复杂多自由度耦合系统中的应用。

阅读英文原文：

Wu, A.; Wu, X.; Song, F.; Sun, P.; Tan, J. A Pole-Placement-Based Variable-Gain Observer for Precision Motion Stages: Addressing the Disturbance-Noise Trade-Off. *Actuators* 2026, 15, 100.
<https://doi.org/10.3390/act15020100>

Actuators期刊介绍

主编：Kenji Uchino, The Pennsylvania State University, USA

Norman M. Wereley, University of Maryland, USA

期刊涵盖与执行器和控制系统相关的科学与技术,期刊下设包括执行器材料、航空执行器、机器人执行器、控制系统等10个专题，为执行器和控制系统的科学和技术提供了一个先进的论坛。

2024 Impact Factor 2.3 2024 CiteScore 4.3 Time to First Decision 20.9 Days Acceptance to Publication 2.7 Days

来源：Actuators

更多科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发