# 高性能扰动观测器：一种统一的综合方法

Emre Sariyildiz 机械、材料、机电与生物医学工程学院，工程与信息科学学院 伍伦贡大学 伍伦贡，新南威尔士州 2522，澳大利亚
emre@uow.edu.au

摘要—**本文提出了一种新型高性能扰动观测器（HPDOb），显著提高了运动控制系统中的扰动估计精度和鲁棒性，超越了传统扰动观测器（扰动观测器）的性能。本文在离散时间域内对传统观测器和所提出的观测器进行了分析与综合，从而真实地描述其动态行为，并为实际应用中的控制器设计提供支持。HPDOb 的核心贡献在于提出了一种新型综合方法，将高阶截断误差动力学纳入扰动估计。不同于局限于零阶截断误差的传统扰动观测器，HPDOb 实现了一阶截断误差，从而显著提高了运动控制系统中的估计精度以及抗扰鲁棒性。此外，该框架支持灵活的误差动力学设计，包括高阶截断模型，因而拓宽了其在各种鲁棒运动控制问题中的适用范围。仿真和实验研究表明，在伺服系统受到内部和外部扰动时，无论是调节任务还是轨迹跟踪任务，HPDOb 都能显著提升扰动估计和控制性能。**

关键词——扰动观测器、离散时间控制、鲁棒性与性能，以及鲁棒运动控制。

## I. 引言

过去三十年来，扰动观测器（DObs）已成为运动控制研究的基石，尤其是在鲁棒控制策略的发展中 [1–6]。基于扰动观测器的控制器已应用于众多工程领域，涵盖伺服机构的高精度位置控制、机器人系统中的力估计，以及通信延迟补偿 [6–13]。在这些框架中，通过将扰动估计嵌入内控制回路来实现鲁棒性，从而减轻不确定性和外部扰动的影响[13 –15]。为有效实施这一策略，研究人员提出并广泛研究了多种扰动观测器综合技术 [15–20]。

扰动观测器的综合设计需要定义作用于伺服系统的扰动动态模型 [21]。传统扰动观测器通常在连续时间域中设计，并采用简化假设，认为扰动保持不变 [1, 13]。然而，这种传统方法存在两大主要局限。首先，由于鲁棒运动控制系统几乎总是部署在微控制器和计算机等数字平台上，连续时间模型无法充分刻画其离散时间行为，这可能导致意料之外的稳定性和性能问题 [5, 23,24]。其次，恒定扰动的假设在实际中很少成立，因为伺服系统经常受到时变扰动的影响 [26, 27]。这种过度简化会限制估计精度，进而削弱鲁棒性，并最终降低现实场景中的控制性能 [28]。

为提升鲁棒稳定性与性能，研究人员提出了许多用于分析和综合基于数字扰动观测器的鲁棒运动控制器的方法 [22–33]。例如，文献[30, 31], 给出了数字扰动观测器的鲁棒稳定性与性能分析，而文献[32, 33]则介绍了控制器参数的最优整定方法。然而，扰动估计的精度仍从根本上受到扰动观测器综合中将扰动视为恒定值这一传统假设的限制。为克服这一局限，研究人员探索了其他扰动模型。例如，周期性扰动观测器能够有效处理周期性扰动[34], ，而采用高阶扰动估计的广义扰动观测器则可进一步提高估计精度 [35, 36]。然而，高阶扰动观测器往往对测量噪声更加敏感 [35–37], ，因此在估计精度与抗噪鲁棒性之间形成了难以权衡的取舍。众所周知，当这类观测器集成到鲁棒运动控制器中时，这一取舍尤为关键 [15, 19, 35]。近期，有研究提出了一种基于预测器–观测器综合方法的高性能扰动观测器 [38], ，通过采用更切合实际的扰动模型提升扰动估计能力。然而，该方法偏离了传统扰动观测器综合框架，限制了其普适性 [39]。这些进展表明，需要开发数字扰动观测器，在保持与既有综合原理兼容的同时，兼具更强的鲁棒性和更高的估计精度。

本文介绍了一种全新的离散时间域扰动观测器综合方法，可在运动控制应用中实现更高的扰动估计精度和更强的鲁棒性。与传统扰动观测器不同，所提出的 HPDOb 在综合过程中将扰动的高阶泰勒级数近似纳入其中，从而显著提高估计精度 [40, 41]。这一进展为运动控制任务带来了显著益处，包括提升位置调节和轨迹跟踪的鲁棒性。通过全面的仿真和实验研究验证了所提出的 HPDOb 的有效性，结果表明，改进后的扰动

估计可直接提升伺服系统在内部和外部扰动下的控制性能。

本文其余部分安排如下。第二节回顾离散时间域中的传统扰动观测器综合，并介绍一种简单而有效的设计方法，适用于鲁棒运动控制。第三节介绍所提出的高性能扰动观测器（HPDOb），与传统方法相比，该方法具有更高的扰动估计精度。第四节通过仿真和实验验证 HPDOb 的有效性。最后，第五节总结全文。

## II. 运动控制中的扰动观测器综合

基于伺服的运动控制系统的连续时间状态空间动力学可表示为：

$$\dot{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{A}_{\mathbf{C}}\mathbf{x}(t)+\mathbf{B}_{\mathbf{C}}u(t)-\mathbf{D}_{\mathbf{C}}\tau_d(t) \tag{1}$$

其中，$\mathbf{x}(t)$ 表示状态向量，其中第一项和第二项分别为位置和速度。系统动力学由状态矩阵 $\mathbf{A}_{\mathbf{C}}$ 描述，其第一行为 [0 1]，[0 ，– 第二行则包含 $b_m/J_m$]，表示黏性摩擦系数 $b_m$ 与电机转动惯量 $J_m$ 之比。外部控制输入信号和扰动输入信号为 和 ，它们通过控制输入向量和扰动向量 $\mathbf{B}_{\mathbf{C}}$ 和 $\mathbf{D}_{\mathbf{C}}$ 进入动态模型，其第一项和第二项分别为 0 和 $1/J_m$。

根据式 (2)，可定义相应的标称动态模型如下：

$$\dot{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{A}_{\mathbf{Cn}}\mathbf{x}(t)+\mathbf{B}_{\mathbf{Cn}}u(t)-\mathbf{D}_{\mathbf{Cn}}\tau_{dn}(t) \tag{2}$$

其中，$\mathbf{A}_{\mathbf{Cn}}$、$\mathbf{B}_{\mathbf{Cn}}$ 和 $\mathbf{D}_{\mathbf{Cn}}$ 是标称状态矩阵和输入矩阵，由标称转动惯量 $J_{mn}$ 和黏性摩擦系数 $b_{mn}$ 确定。利用式 (1) 和式 (2)，标称扰动变量可表示为

$$\tau_{dn}(t)=\frac{\mathbf{D}_{\mathbf{Cn}}^T}{\mathbf{D}_{\mathbf{Cn}}^T\mathbf{D}_{\mathbf{Cn}}}\left(\Delta\mathbf{A}_{\mathbf{C}}\mathbf{x}(t)+\Delta\mathbf{B}_{\mathbf{C}}u(t)+\mathbf{D}_{\mathbf{C}}\tau_d(t)\right) \tag{3}$$

其中， 和 表示动态模型中的参数不确定性。

方程（1–3）简洁而有效地描述了鲁棒运动控制分析中使用的伺服动力学。关于基于扰动观测器的鲁棒运动控制的更多建模细节，请参阅 [2, 27]。

伺服系统的状态空间动力学也可以使用式（4）在离散时间域中表示。

$$\mathbf{x}_{k+1}=\mathbf{A}_{\mathbf{D}}\mathbf{x}_k+\mathbf{B}_{\mathbf{D}}u_k-\mathbf{\Pi}_{\mathbf{D}_k} \tag{4}$$

where $\mathbf{A}_{\mathbf{D}}=e^{\mathbf{A}_{\mathbf{C}}T_s}$ is the discrete-time state matrix; $\mathbf{B}_{\mathbf{D}}=\int_0^{T_s}e^{\mathbf{A}_{\mathbf{C}}\tau}\mathbf{B}_{\mathbf{C}}d\tau$ and $\mathbf{\Pi}_{\mathbf{D}_k}=\int_0^{T_s}e^{\mathbf{A}_{\mathbf{C}}\tau}\mathbf{D}_{\mathbf{C}}\tau_d\left((k+1)T_s-\tau\right)d\tau$ are the discrete-time control 以及扰动输入向量；是状态向量，表示伺服系统在采样时刻 $kT_s$ 的位置和速度；而是同一时刻 [38]的控制输入。 $u_k$

同样，伺服系统在离散时间域中的标称状态空间模型如下：

$$\mathbf{x}_{k+1}=\mathbf{A}_{\mathbf{Dn}}\mathbf{x}_k+\mathbf{B}_{\mathbf{Dn}}u_k-\mathbf{\Pi}_{\mathbf{Dn}_k} \tag{5}$$

where $\mathbf{A}_{\mathbf{Dn}}=e^{\mathbf{A}_{\mathbf{Cn}}T_s}$ is the nominal discrete-time state matrix, and $\mathbf{\Pi}_{\mathbf{Dn}_k}=\int_0^{T_s}e^{\mathbf{A}_{\mathbf{Cn}}\tau}\mathbf{D}_{\mathbf{Cn}}\tau_{dn}\left((k+1)T_s-\tau\right)d\tau$ and $\mathbf{B}_{\mathbf{Dn}}=\int_0^{Ts}e^{\mathbf{A}_{\mathbf{Dn}}\tau}\mathbf{B}_{\mathbf{Dn}}d\tau$ are the nominal discrete-time disturbance and control input vectors, respectively [24].

为了综合扰动观测器，我们需要为扰动变量引入一个标称模型。接下来利用式（6）推导扰动向量的动态模型。

$$\mathbf{\Pi}_{\mathbf{Dn}_k}=\int_0^{T_s}e^{\mathbf{A}_{\mathbf{Cn}}\lambda}\mathbf{D}_{\mathbf{Cn}}\left(\sum_{i=0}^{m}\left(\frac{1}{i!}\tau_{dn_k}^{(i)}\left(T_s-\lambda\right)^i\right)+R_{m_k}\right)d\lambda \tag{6}$$

其中 表示 $(m+1)^{\text{th}}$ 阶截断 $\tau_{dn}^{(i)}$ 误差，且表示 $i^{th}$ 阶导数 。 $R_m$

为推导传统扰动观测器，假设截断误差为零，即 其中 是采样周期内的一个未知时刻。在此假设下，标称扰动 在每个采样间隔内均视为常数，因此可以在扰动观测器综合中采用以下标称扰动模型。 $R_m=0$ $\lambda\in[0,T_s)$ $\tau_{dn}$

$$\tau_{dn_k}=\tau_{dn}(kT_s) \quad \text{when} \quad kT_s\le\xi_k<(k+1)T_s \tag{7}$$

将（7）代入标称离散时间模型（5），可得伺服系统的简化动态表示如下：

$$\mathbf{x}_{k+1}=\mathbf{A}_{\mathbf{Dn}}\mathbf{x}_k+\mathbf{B}_{\mathbf{Dn}}u_k-\mathbf{D}_{\mathbf{Dn}}\tau_{dn_k} \tag{8}$$

其中 和是伺服扰动 $\tau_{dn_k}$ 在采样时刻 $kT_s$ 作用于标称系统。这一表述为鲁棒运动控制中的传统扰动观测器综合奠定了基础。

离散时间域中的传统扰动观测器可使用如下定义的辅助变量进行综合：

$$z_k=\tau_{dn_k}+\mathbf{L}^T\mathbf{x}_k \tag{9}$$

其中，是辅助变量，由采样时刻的标称扰动变量与状态向量乘以观测器增益向量 $\mathbf{L}$ 相加构造而成，该采样时刻为 $kT_s$。

由于在$kT_s$时秒时标称扰动变量未知，因此我们无法直接测量辅助变量。通过推导其离散时间动态模型，可以综合设计出能够估计辅助变量的观测器，如下所示：

$$\begin{aligned} z_{k+1} &= \tau_{dn_{k+1}} + \mathbf{L}^T \mathbf{x}_{k+1} = \tau_{dn_k} + \mathbf{L}^T \mathbf{x}_{k+1} + \tau_{dn_{k+1}} - \tau_{dn_k} \\ &= \left(1 - \mathbf{L}^T \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}}\right) z_k + \mathbf{L}^T \left(\mathbf{A}_{\mathbf{Dn}} + \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}} \mathbf{L}^T - \mathbf{I}_2\right) \mathbf{x}_k + \mathbf{L}^T \mathbf{B}_{\mathbf{Dn}} u_k + \tau_{dn_{k+1}} - \tau_{dn_k} \end{aligned} \tag{10}$$

其中 $\mathbf{I}_2$ 是一个单位矩阵。

利用式（10），辅助变量的观测器可综合如下：

$$\hat{z}_{k+1} = \left(1 - \mathbf{L}^T \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}}\right) \hat{z}_k + \mathbf{L}^T \left(\mathbf{A}_{\mathbf{Dn}} + \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}} \mathbf{L}^T - \mathbf{I}_2\right) \mathbf{x}_k + \mathbf{L}^T \mathbf{B}_{\mathbf{Dn}} u_k \tag{11}$$

其中 是$\hat{z}_k$在 时刻 $kT_s$ 秒的$z_k$估计值。

用式（10）减去式（11），可得

$$z_{k+1} - \hat{z}_{k+1} = \left(1 - \mathbf{L}^T \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}}\right)\left(z_k - \hat{z}_k\right) + \tau_{dn_{k+1}} - \tau_{dn_k} \tag{12}$$

式（12）表明，只要对观测器增益进行适当调节，辅助变量的估计误差就会受到采样周期内扰动变化的约束。换言之，传统扰动观测器是一致最终有界（UUB）的，这意味着估计误差存在上界，且观测器具有稳定性。当采样周期内扰动变量保持恒定时，估计误差将收敛至零，因此可以实现渐近稳定性。利用式（9）和式（11），可按如下方式估计标称扰动变量：

$$\hat{\tau}_{dn_k} = \hat{z}_k - \mathbf{L}^T \mathbf{x}_k \tag{13}$$

其中 是$\hat{\tau}_{dn_k}$在采样时刻$kT_s$处估计的标称扰动变量。

III. 运动控制中的统一 HP-DOb 综合

如式（6）、（7）和（12）所示，传统扰动观测器的性能受到 0 阶截断误差的限制。让我们通过在扰动观测器综合中获得更高阶的截断误差，来改善扰动估计的性能。

为了综合出高性能扰动观测器，让我们考虑以下辅助变量。

$$\begin{aligned} z_{1_k} &= \tau_{dn_{k-1}} + \mathbf{L}_1^T \mathbf{x}_k \\ z_{2_k} &= \tau_{dn_k} + \mathbf{L}_2^T \mathbf{x}_k \end{aligned} \tag{14}$$

首先考虑辅助变量。其动态方程可推导$z_{1_k}$如下：

$$z_{1_{k+1}} = \tau_{dn_k} + \mathbf{L}_1^T \mathbf{x}_{k+1} = \tau_{dn_k} + \mathbf{L}_1^T \left(\mathbf{A}_{\mathbf{Dn}} \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_{\mathbf{Dn}} u_k - \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}} \tau_{dn_k}\right) \tag{15}$$

将由式 (14) 推导得到$\tau_{dn_k}$的代入式 (15)，可得

$$\begin{aligned} z_{1_{k+1}} &= z_{2_k} - \mathbf{L}_2^T \mathbf{x}_k + \mathbf{L}_1^T \left(\mathbf{A}_{\mathbf{Dn}} \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_{\mathbf{Dn}} u_k - \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}} \left(z_{2_k} - \mathbf{L}_2^T \mathbf{x}_k\right)\right) \\ &= \left(1 - \mathbf{L}_1^T \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}}\right) z_{2_k} + \mathbf{L}_1^T \mathbf{B}_{\mathbf{Dn}} u_k + \left(\mathbf{L}_1^T \mathbf{A}_{\mathbf{Dn}} + \mathbf{L}_1^T \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}} \mathbf{L}_2^T - \mathbf{L}_2^T\right) \mathbf{x}_k \end{aligned} \tag{16}$$

现在考虑第二个辅助变量。其动力学方程可类似地推导$z_{2_k}$如下：

$$\begin{aligned} z_{2_{k+1}} &= \tau_{dn_{k+1}} + \mathbf{L}_2^T \mathbf{x}_{k+1} = 2\tau_{dn_k} + \mathbf{L}_2^T \mathbf{x}_{k+1} + \tau_{dn_{k+1}} - 2\tau_{dn_k} \\ &= 2\tau_{dn_k} + \mathbf{L}_2^T \left(\mathbf{A}_{\mathbf{Dn}} \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_{\mathbf{Dn}} u_k - \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}} \tau_{dn_k}\right) + \tau_{dn_{k+1}} - 2\tau_{dn_k} \end{aligned} \tag{17}$$

代入由式 τ(14)3_推导得出，式（17）可得

$$\begin{aligned} z_{2_{k+1}} &= \left(2 - \mathbf{L}_2^T \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}}\right) z_{2_k} + \mathbf{L}_2^T \mathbf{B}_{\mathbf{Dn}} u_k + \mathbf{L}_2^T \left(\mathbf{A}_{\mathbf{Dn}} + \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}} \mathbf{L}_2^T - 2\mathbf{L}_2^T\right) \mathbf{x}_k \\ &\quad + \tau_{dn_{k+1}} - 2\tau_{dn_k} \end{aligned} \tag{18}$$

根据 式 (14)，式(18) 也可写为：

$$\begin{aligned} z_{2_{k+1}} &= -\tau_{dn_{k-1}} + \left(2 - \mathbf{L}_2^T \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}}\right) z_{2_k} + \mathbf{L}_2^T \mathbf{B}_{\mathbf{Dn}} u_k + \\ &\quad \mathbf{L}_2^T \left(\mathbf{A}_{\mathbf{Dn}} + \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}} \mathbf{L}_2^T - 2\mathbf{L}_2^T\right) \mathbf{x}_k + \tau_{dn_{k+1}} - 2\tau_{dn_k} + \tau_{dn_{k-1}} \\ &= -z_{1_k} + \left(2 - \mathbf{L}_2^T \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}}\right) z_{2_k} + \mathbf{L}_2^T \mathbf{B}_{\mathbf{Dn}} u_k + \\ &\quad \left(\mathbf{L}_1^T + \mathbf{L}_2^T \mathbf{A}_{\mathbf{Dn}} + \mathbf{L}_2^T \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}} \mathbf{L}_2^T - 2\mathbf{L}_2^T\right) \mathbf{x}_k + \tau_{dn_{k+1}} - 2\tau_{dn_k} + \tau_{dn_{k-1}} \end{aligned} \tag{19}$$

利用式 (16) 和式 (19)，所提出的 HP-DOb 可综合如下：

$$\hat{z}_{1_{k+1}} = \left(1 - \mathbf{L}_1^T \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}}\right) \hat{z}_{2_k} + \mathbf{L}_1^T \mathbf{B}_{\mathbf{Dn}} u_k + \left(\mathbf{L}_1^T \mathbf{A}_{\mathbf{Dn}} + \mathbf{L}_1^T \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}} \mathbf{L}_2^T - \mathbf{L}_2^T\right) \mathbf{x}_k \tag{20}$$

$$\begin{aligned} \hat{z}_{2_{k+1}} &= -\hat{z}_{1_k} + \left(2 - \mathbf{L}_2^T \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}}\right) \hat{z}_{2_k} + \mathbf{L}_2^T \mathbf{B}_{\mathbf{Dn}} u_k + \\ &\quad \left(\mathbf{L}_1^T + \mathbf{L}_2^T \mathbf{A}_{\mathbf{Dn}} + \mathbf{L}_2^T \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}} \mathbf{L}_2^T - 2\mathbf{L}_2^T\right) \mathbf{x}_k \end{aligned} \tag{21}$$

将式 (20) 和式 (21) 分别从式 (16) 和式 (19) 中相减，可得估计误差动态：

$$\begin{bmatrix} z_{1_{k+1}} - \hat{z}_{1_{k+1}} \\ z_{2_{k+1}} - \hat{z}_{2_{k+1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 - \mathbf{L}_1^T \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}} \\ -1 & 2 - \mathbf{L}_2^T \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{1_k} - \hat{z}_{1_k} \\ z_{2_k} - \hat{z}_{2_k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{dn_{k+1}} - 2\tau_{dn_k} + \tau_{dn_{k-1}} \end{bmatrix} \tag{22}$$

同样，式（22）表明，辅助变量的估计误差受修正扰动变化变量 的约束，且该约束在采样周期内成立，前提是适当整定观测器增益，使离散时间估计误差矩阵的特征值小于 1。由于误差矩阵的特征值可以独立配置，因此，当标称扰动变量在采样时刻有界时，可以获得一致最终有界估计误差$\begin{bmatrix} 0 & 1 - \\ -1 & 2 - \end{bmatrix}^{T}$当修正扰动估计变量为零时，估计误差趋于零，所提出的$\mathbf{L}_1^T \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}} \mathbf{L}_2^T \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}}$HP-DOb 同样实现渐近稳定性。

利用公式（14）和（22），估计扰动可表示如下：

$$\hat{\tau}_{d_k} = \hat{z}_{2_k} - \mathbf{L}_2^T \mathbf{x}_k \tag{23}$$

其中，同样表示采样时刻$kT_s$的估计标称扰动变量，但它是利用第二个辅助变量推导得到的。

通过调节观测器增益$\mathbf{L}_1$和$\mathbf{L}_2$，可以改变离散时间估计误差状态矩阵的特征值，从而调整扰动估计误差的动力学。例如，可以使用式（24）调节 HP-DOb 的观测器增益。

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_1^T \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}} &= 1 - \lambda_1^{des} \lambda_2^{des} \\ \mathbf{L}_2^T \mathbf{D}_{\mathbf{Dn}} &= 2 - \lambda_1^{des} - \lambda_2^{des} \end{aligned} \tag{24}$$

其中，和是离散时间估计误差状态矩阵的期望特征值。

与式（12）中传统扰动观测器的误差动力学相比，所提出的 HP-DOb 的误差动力学包含一阶截断误差项。因此，HP-DOb 的扰动估计精度高于传统设计。

## IV. 仿真

本节介绍了仿真和实验研究，用于评估采用传统扰动观测器和所提出的高性能扰动观测器的鲁棒位置控制系统的稳定性与性能。扰动观测器在内环中实现以抑制扰动，而外环则采用比例-微分（PD）控制器来调节运动性能。为确保仿真与实验的一致性，外环控制器参数保持不变，其中比例增益和导数增益分别设为 Kp = 50 和 Kd =5。实验装置如图 1 所示，我们使用 Macon EC90：607931 扁平电机进行位置控制并施加外部扰动。电机由 Maxon Escon 电机驱动器和采样周期为 1ms 的 Matlab/Simulink 实时控制器控制。

传统型和所提出的高性能扰动观测器的观测器增益采用式 (25) 进行调节。

$$\mathbf{L}_1 = \frac{k_1}{|\mathbf{D}_{\mathbf{Dn}}|_1} \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix}^T \text{ and } \mathbf{L}_2 = \frac{k_2}{|\mathbf{D}_{\mathbf{Dn}}|_1} \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix}^T \tag{25}$$

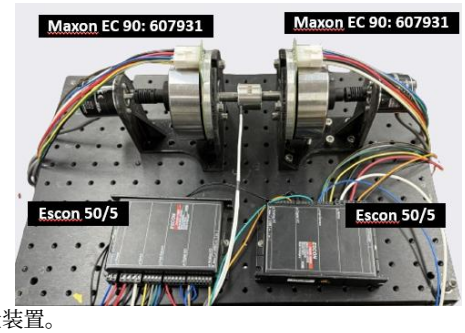



图1：实验装置。

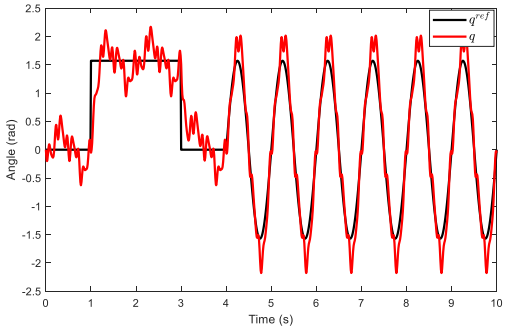
其中 和是自由控制参数，在传统型和高性能型中分别通过式 (12) 和式 (24) 进行调节

-性能扰动观测器综合，分别；以及 是 的 L1-范数

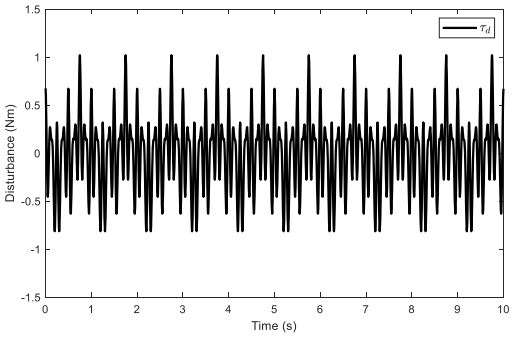
首先来看位置控制仿真。图 2a 显示了 PD 控制伺服系统在图 2b 所示外部扰动下的位置响应。如图 2 所示，仅采用 PD 控制器时，扰动的存在会导致位置控制性能显著下降。因此，当伺服系统受到扰动影响时，鲁棒运动控制技术对于实现高性能至关重要。

为增强抗扰鲁棒性，在内环中采用传统扰动观测器，同时在外环中保留相同的 PD 控制器。所得位置控制性能如图3a所示。与图2相比，传统扰动观测器显著提升了系统在调节和轨迹跟踪控制中的扰动抑制能力。如图3b所示，尽管扰动轮廓基本相似，但随着扰动观测器带宽的增加，估计精度有所提高（图3c）。然而，带宽不能任意增大，因为稳定性和性能限制会约束这一设计参数。关于基于扰动观测器的运动控制系统中稳定性与性能的权衡，详见[15]。

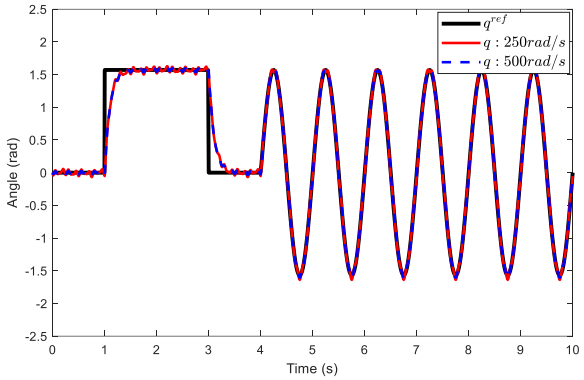
图 4 比较了在内环中分别采用传统扰动观测器和所提出的 HPDOb、外环中采用相同性能控制器时伺服系统的位置控制性能。两种观测器都能准确估计扰动并提升



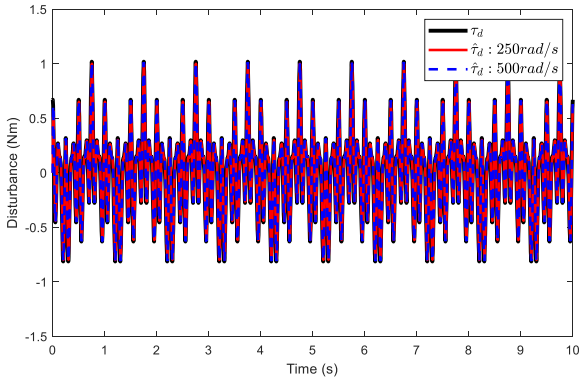

a) 伺服系统的位置控制。



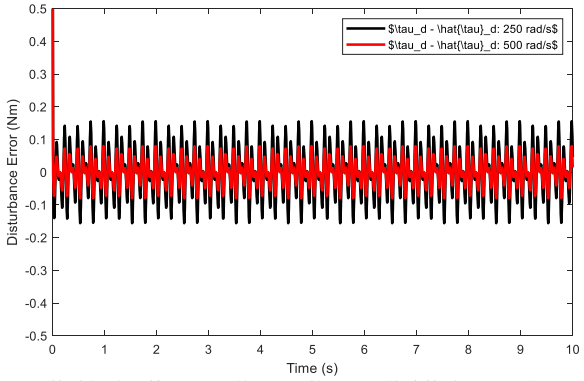

b) 作用于伺服系统的扰动。图2：采用 PD 控制器的位置控制。




a) 伺服系统的位置控制。




b) 作用于伺服系统的扰动及其估计值。



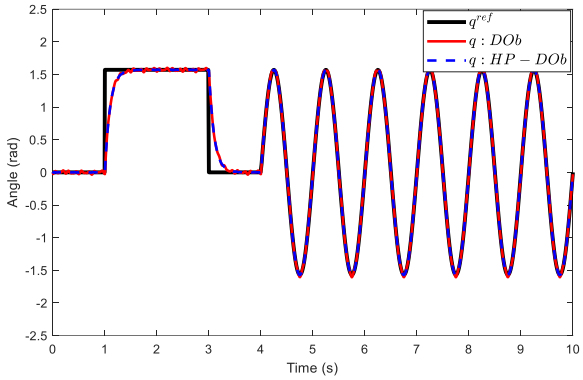

c) 扰动估计误差。图3：使用 PD 控制器和传统扰动观测器进行位置控制。

抗扰鲁棒性，并实现精确调节和轨迹跟踪，如图 4a 所示。然而，得益于更准确的扰动估计，基于 HPDOb 的控制器取得了优于传统设计的性能，如图 4b 所示。

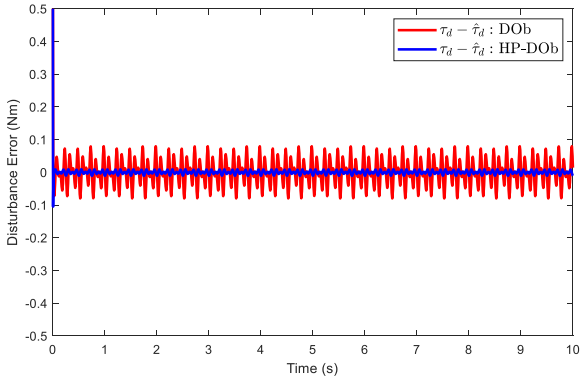
图5展示了基于 HPDOb 的鲁棒运动控制器的位置控制实验。如图所示，所提出的扰动观测器能够准确估计外部扰动，从而实现高性能运动控制应用。

## V. 结论

本文提出了一种新型扰动观测器（DOb）。与依赖标称




a) 伺服系统的位置控制。

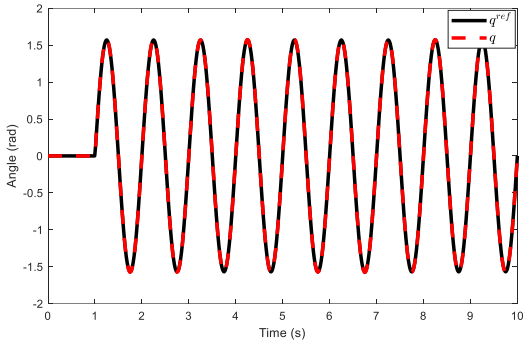



b) 扰动估计误差 图 4：使用 PD 控制器、传统扰动观测器和高性能扰动观测器的位置控制。

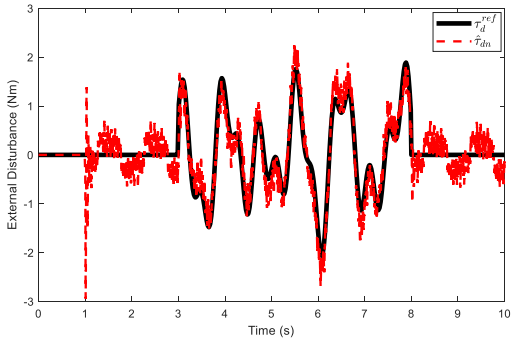
扰动模型且具有零阶截断误差的传统扰动观测器不同，所提出的 HPDOb 将高阶截断误差动力学纳入观测器综合。这种方法显著提高了扰动估计的准确性，从而提升了整体系统性能。仿真和实验结果证实，通过更准确的估计增强抗扰鲁棒性，HPDOb 能够精确跟踪设定值和轨迹参考。除了扰动抑制之外，该框架还为设计具有定制误差动力学的观测器提供了灵活的基础，为先进鲁棒控制架构开辟了新的可能性。未来的研究应进一步考察基于 HPDOb 的控制器的鲁棒稳定性和性能，并探索其在力控制和阻抗控制应用中的集成，以及在机器人学和精密机电一体化等更广泛领域中的应用。

## 参考文献

[1] K. Ohnishi、M. Shibata 和 T. Murakami，《高级机电一体化运动控制》，*IEEE/ASME* 机电一体化汇刊，第 1 卷，第 56–67 页，1996年。[2] E. Sariyildiz、R. Oboe 和 K. Ohnishi，《基于扰动观测器的鲁棒控制及其应用：35周年综述》，载于 *IEEE* 工业电子学汇刊，第 67，3，2042 2053，2020 卷，第 页，3月 H. [3] Shim、G. Park、Y. Joo、J. Back、N. Jo，《扰动观测器的又一教程：鲁棒稳定化与标称性能恢复》，控制理论与技术，第 14 卷，第 4 期，第 237-249 页，2016年。[4] H. Chang、H. Kim、G. Park、H. Shim，《DO-DAT：用于扰动观测器设计与分析的 MATLAB 工具箱》，*IFAC* 在线论文，第 51 卷，第 25 期，第 340-345 页，2018年。




a) 伺服系统的位置控制。




b) 外部扰动和估计的标称扰动 图5：位置控制实验。

[5] I. Godler、H. Honda 和 K. Ohnishi，《离散时间下扰动观测器滤波器的设计指南》，先进运动控制国际研讨会论文集，马里博尔，斯洛文尼亚，2002年，第 390-395 页。[6] S. Li、J. Yang、W.H. Chen、X. Chen，《基于扰动观测器的控制：方法与应用》，CRC出版社，2014年。[7] K. Yuki、T. Murakami、K. Ohnishi，《利用谐振比控制对双质量谐振系统进行振动控制》，电气学会工业应用汇刊，第 113 卷，第 10 期，第 1162-1169 页，1993年10月。[8] F. Bechet 等，《用于微创机器人技术的电液传动系统》，*IEEE* 工业电子学汇刊，2015年12月，第 62 卷，第 12 期，第 7643-7654 页。[9] K. Nam、H. Fujimoto 和 Y. Hori，《基于利用轮胎横向力传感器进行侧偏角估计的轮毂电机驱动电动汽车横向稳定性控制》，*IEEE*车辆技术汇刊，第 61， 5， 1972 1985， 2012 卷，第 期，第 页，6月 [10] E. Sariyildiz、R. Mutlu、H. Yu，《串联弹性执行器的滑模力与位置控制器综合》，*Robotica*，2020年1月，第 38 卷，第 1 期，第 15-28 页。[11] K. Natori 和 K. Ohnishi，《考虑网络扰动动态特性的时延补偿通信扰动观测器设计方法》，*IEEE* 工业电子学汇刊，第 55 卷，第 5 期，第 2152-2168 页，2008年5月。[12] O. Ozen 等，《运动控制的实用 PID控制器整定》，*IEEE* 国际机电一体化会议（*ICM*），名古屋，日本，2015年，第 240-245 页。[13] C. Mitsantisuk、K. Ohishi 和 S. Katsura，《利用卡尔曼滤波器估计双边控制中的作用力/反作用力》，载于 *IEEE*工业电子汇刊，第 59 卷，第 11 期，第 4383-4393 页，2012年11月。[14] E. Sariyildiz 和 K. Ohnishi，《基于扰动观测器的运动控制系统的稳定性与鲁棒性》，*IEEE* 工业电子学汇刊，第 62 卷，第 1 期，第 414-422 页，2015年1月。[15] E. Sariyildiz 和 K. Ohnishi，《扰动观测器设计中的性能与鲁棒性权衡》，*IECON 2013 - IEEE*工业电子学会第*39*届年度会议，2013年，第 3681-3686 页。[16] H. Kobayashi、S. Katsura 和 K. Ohnishi，《运动控制中扰动观测器参数变化的分析》，*IEEE* 工业电子学汇刊，第 54 卷，第 6 期，第 3413-3421 页，2007年12月。[17] X. Chen、S. Komada、T. Fukuda，《非线性扰动观测器的设计》，载于 *IEEE* 工业电子学汇刊，第 47 卷，第 2 期，第 429-437 页，2000年。

[18] D. Tian 等，《一种用于高精度伺服控制的自适应切换增益滑模辅助扰动观测器》，IEEE 工业电子学汇刊，第 69 卷，第 2 期，第 1762–1772 页，2022 年 2 月。[19] E. Sariyildiz 和 K. Ohnishi，《自适应反作用力观测器设计》，IEEE/ASME 机电一体化汇刊，第 20 卷，第 2 期，第 750–760 页，2015 年 4 月。[20] E. Sariyildiz 和 K. Ohnishi，《扰动观测器设计指南》，ASME。《动力系统、测量与控制杂志》，第 136 卷，第 2 期，第 1–10 页（021011），2014 年 3 月。[21] E. Sariyildiz、H. Sekiguchi、T. Nozaki、B. Ugurlu 和 K. Ohnishi，《通过扰动观测器实现机器人机械臂基于加速度的鲁棒位置控制的稳定性分析》，IEEE/ASME 机电一体化汇刊，第 23 卷，第 5 期，第 2369–2378 页，2018 年 10 月。[22] T. Uzunovic 等，《关于基于扰动观测器的控制离散实现的讨论》，先进运动控制国际研讨会，东京，2018 年，第 613–618 页。[23] M. Bertoluzzo、G. S. Buja 和 E. Stampacchia，《高带宽转矩扰动补偿器的性能分析》，IEEE/ASME 机电一体化汇刊，第 9 卷，第 4 期，第 653–660 页，2004 年 12 月。[24] E. Sariyildiz，《状态空间中的基于扰动观测器的数字鲁棒运动控制系统分析与综合》，IEEE 工业电子学汇刊，第 72， 8， 8376 8385， 2025 卷，第 页，–，8 月。[25] B-K Choi、C-H Choi 和 H. Lim，《切削过程中数控加工中心的基于模型的扰动衰减》，IEEE/ASME 机电一体化汇刊，第 4 卷，第 2 期，第 157–168 页，1999 年 6 月。[26] B. Ugurlu 等，《基于扭转的串联弹性执行器转矩控制策略基准测试》，IEEE《机器人与自动化杂志》，第 29 卷，第 2 期，第 85–96 页，2022 年 6 月。[27] E. Sariyildiz、R. Mutlu、C. Zhang，《状态空间中基于主动扰动抑制的鲁棒轨迹跟踪控制器设计》，ASME《动力系统、测量与控制杂志》，2019 年 6 月，第 141 卷，第 6 期，第 1–7 页。[28] E. Sariyildiz 等，《基于扰动观测器的鲁棒力控制系统的离散时间分析与综合》，IEEE Access，2021 年 10 月，第 9 卷，第 148911–148924 页。[29] S. Endo、H. Kobayashi、C. Kempf、S. Kobayashi、M. Tomizuka、Y. Hori，《高速定位系统的鲁棒数字跟踪控制器设计》，《控制工程实践》，第 4 卷，第 4 期，第 527–536 页，1996年。[30] K. Kong 和 M. Tomizuka，《通过标称模型调整提高基于扰动观测器的控制系统的稳定鲁棒性》，《国际控制、自动化与系统杂志》，第 11 卷，第 1 期，2013 年 2 月。[31] E. Sariyildiz 等，《离散时间域中基于扰动观测器的运动控制系统的稳定性与鲁棒性》，IEEE/ASME 机电一体化汇刊，2021 年 8 月，第 26 卷，第 4 期，第 2139–2150 页。[32] A. Tesfaye、H. S. Lee 和 M. Tomizuka，《数字运动控制系统中扰动观测器设计的灵敏度优化方法》，IEEE/ASME 机电一体化汇刊，第 5 卷，第 1 期，第 32–38 页，2000 年。[33] X. Chen 和 M. Tomizuka，《离散扰动观测器中用于高带宽扰动抑制的对象整形优化》，IEEE美国控制会议，马里兰州巴尔的摩，2010 年。[34] H. Muramatsu 和 S. Katsura，《用于周期扰动抑制的自适应周期扰动观测器》，IEEE《工业信息学汇刊》，第 14 卷，第 10 期，第 4446–4456 页，2018 年 10 月。[35] K. Kim、K. Rew 和 S. Kim，《基于时间序列展开的高阶扰动估计扰动观测器》，IEEE《自动控制汇刊》，第 55 卷，第 8 期，第 1905–1911 页，2010 年 8 月。[36] E. Sariyildiz、C. Gong、H. Yu，《串联弹性执行器的统一鲁棒运动控制器设计》，IEEE/ASME 机电一体化汇刊，第 22 卷，第 5 期，第 2229–2240 页，2017 年 10 月。[37] S. Katsura、K. Irie 和 K. Oishi，《通过位置—加速度集成扰动观测器实现宽带力控制》，IEEE 工业电子学汇刊，第 55 卷，第 4 期，第 1699–1706 页，2008 年 4 月。[38] E. Sariyildiz，《高性能扰动观测器》，IEEE国际机电一体化会议（ICM），澳大利亚伍伦贡，2025，[39] E. Sariyildiz，《基于扰动观测器的数字鲁棒运动控制系统的新型稳定性分析》，IEEE国际机电一体化会议（ICM），澳大利亚新南威尔士州伍伦贡，2025 年。[40] E. Sariyildiz、C. Gong、H. Yu，《状态空间中多质量共振系统的鲁棒轨迹跟踪控制》，IEEE 工业电子学汇刊，2017 年 12 月，第 64 卷，第 12 期，第 9366–9377 页。[41] 益观测器的高阶内模扰动观测器设计》，国际控制、自动化与系统会议（ICCAS），大韩民国济州，2024年