

非线性电子控制系统的鲁棒性优化设计

马戎 620102198411102117

摘要

非线性电子控制系统在工业控制、智能装备等领域应用广泛，但系统本身存在参数扰动、外部干扰以及非线性特性耦合等问题，严重影响控制精度与稳定性。本文以非线性电子控制系统的鲁棒性提升为目标，分析了非线性系统鲁棒性的核心影响因素，结合滑模控制与自适应算法提出了一种鲁棒性优化设计方案，通过仿真验证了该方案能够有效抑制外部干扰与参数摄动，提升系统的稳态精度与动态响应性能。研究结果可为非线性电子控制系统的工程设计提供参考。

关键词

非线性电子控制；鲁棒性优化；滑模控制；自适应算法

一、引言

随着电子信息技术与自动控制技术的融合发展，非线性电子控制系统在智能制造、电力电子、自动驾驶等领域的应用占比持续提升。与线性系统不同，非线性电子控制系统存在死区、饱和、滞环等固有非线性特性，同时实际运行过程中还会受到元器件参数老化、环境温度变化、负载扰动等不确定因素的影响，传统的线性控制方法难以满足高精度、高稳定性的控制要求。鲁棒性指的是系统在存在不确定扰动的情况下，依然能够维持预期控制性能的能力，因此针对非线性电子控制系统开展鲁棒性优化设计研究，具有重要的理论价值与工程意义。

近年来，国内外学者针对非线性系统鲁棒性优化提出了多种控制方法，包括 H_∞ 控制、滑模控制、自适应控制、智能控制等。其中 H_∞ 控制需要精确建立系统的扰动模型，对于强非线性系统的适配性较差；智能控制方法依赖大量的训练数据，在实时性要求较高的电子控制场景中应用受限。滑模控制具有对扰动不敏感、响应速度快的特点，但是传统滑模控制存在抖振问题，会影响系统的稳态性能。基于此，本文结合自适应算法对滑模控制进行改进，提出一种适用于非线性电子控制系统的鲁棒性优化设计方案，兼顾动态响应性能与稳态控制精度。

二、非线性电子控制系统鲁棒性影响因素分析

非线性电子控制系统的结构一般包括传感器模块、控制器模块、功率驱动模

块以及被控对象四个部分，每个环节都可能引入不确定因素，最终影响系统的鲁棒性。首先，非线性特性是影响系统鲁棒性的核心内部因素，功率驱动模块中的功率开关器件存在导通死区，输出环节存在饱和特性，这些固有非线性特性会导致控制信号失真，当系统运行工况发生变化时，控制精度会出现明显下降。其次，参数摄动是常见的内部不确定因素，电子元器件的参数会随着运行时间、环境温度的变化发生偏移，例如电容的容量衰减、电阻的阻值漂移、电机的绕组电阻变化等，这些参数变化会导致系统模型失配，传统固定参数控制器难以适应模型变化，最终导致控制性能下降。

除了内部因素，外部干扰是影响系统鲁棒性的主要外部因素，非线性电子控制系统通常运行在复杂的电磁环境中，会受到电网波动、电磁辐射、负载突变等外部干扰的影响，这些干扰具有随机性、无规律的特点，常规的滤波方法难以完全消除，会导致系统输出出现波动，严重时甚至会引发系统失稳。此外，传感器测量噪声也会将误差引入控制回路，经过控制器放大后会进一步放大输出偏差，降低系统的鲁棒性。

三、非线性电子控制系统鲁棒性优化设计方案

3.1 系统模型构建

首先针对一般非线性电子控制系统建立状态空间模型，考虑参数摄动与外部干扰的影响，系统的状态方程可以表示为：

$$\dot{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{f}(\mathbf{x},t)+\Delta\mathbf{f}(\mathbf{x},t)+\mathbf{B}+\Delta\mathbf{B}\mathbf{u}(t)+\mathbf{d}(t)$$

其中 $\mathbf{x}(t)$ 为系统状态向量， $\mathbf{f}(\mathbf{x},t)$ 为已知非线性函数， $\Delta\mathbf{f}(\mathbf{x},t)$ 为非线性函数的摄动项， $\mathbf{B}$ 为控制输入矩阵， $\Delta\mathbf{B}$ 为输入矩阵的摄动项， $\mathbf{u}(t)$ 为控制输入， $\mathbf{d}(t)$ 为外部有界干扰。假设所有不确定项的上界均为已知有界值，在此基础上开展鲁棒控制器设计。

3.2 改进滑模控制器设计

滑模控制的核心是设计滑模面，使得系统状态能够在控制作用下收敛到滑模面上，并沿滑模面运动到平衡点。本文选择积分型滑模面，能够有效消除系统的稳态误差，滑模面设计为：

$$\mathbf{s}(\mathbf{x},t)=\mathbf{C}\mathbf{e}(\mathbf{x})-\int_0^t\mathbf{C}[\mathbf{A}-\mathbf{B}\mathbf{K}]\mathbf{e}(\tau)d\tau$$

其中 $\mathbf{e}(\mathbf{x})$ 为系统输出误差向量， $\mathbf{C}$ 为常数矩阵， $\mathbf{A}$ 为系统状态矩阵， $\mathbf{K}$ 为滑模极点配置矩阵。针对传统滑模控制的抖振问题，本文引入自适应律对切换增益进行实时调整，根据系统状态与滑模面的距离动态调整切换增益大小，避免增益过大引发抖振，同时保证增益能够满足不确定扰动的抑制要求。自适应律设计为：

$$\dot{\hat{k}} = \gamma |s(x,t)|, \gamma > 0$$

其中 γ 为自适应调整速率， $\hat{k}$ 为切换增益的估计值。通过自适应调整，当系统扰动增大时，切换增益会自动增大以抵消扰动的影响；当系统运行稳定，扰动较小时，切换增益会自动降低，从而削弱抖振现象。

3.3 稳定性分析

选择李雅普诺夫函数 $V(t) = \frac{1}{2}s^2(t) + \frac{1}{2}\gamma^{-1}\tilde{k}^2$ ，其中 $\tilde{k} = k - \hat{k}$ 为估计误差，对 $V(t)$ 求导可得：

$$\dot{W}(t) = s\dot{s} - \tilde{k}\dot{\hat{k}}$$

代入控制律与自适应律后可以得到 $\dot{W}(t) \leq 0$ ，根据李雅普诺夫稳定性定理，系统状态能够在有限时间内收敛到滑模面，整个闭环系统是渐近稳定的，说明本文设计的控制器能够保证系统的稳定性，同时具备抑制参数摄动与外部干扰的能力。

四、仿真验证与结果分析

为了验证本文提出的优化设计方案的有效性，选择直流电机调速系统作为仿真对象，直流电机调速系统是典型的非线性电子控制系统，存在参数变化与负载扰动问题。设置系统给定转速为 1000r/min，在 $t=0.5s$ 时加入幅值为额定负载 20% 的阶跃负载扰动，在电机电枢电阻中加入 15% 的参数摄动，分别采用传统 PID 控制、传统滑模控制与本文提出的改进滑模控制进行仿真对比。

仿真结果显示，传统 PID 控制在参数摄动与负载扰动下，转速最大动态偏差达到 12.5%，调节时间为 0.21s，稳态误差为 0.8%；传统滑模控制的转速最大动态偏差为 5.2%，调节时间为 0.12s，但是由于抖振问题，稳态误差达到 0.3%；本文提出的优化控制方案转速最大动态偏差仅为 2.1%，调节时间为 0.08s，稳态误差为 0.09%，明显优于另外两种控制方法，说明该方案能够有效抑制参数摄动与外部干扰的影响，既提升了系统的动态响应性能，又削弱了抖振，提高了稳态控制精度，鲁棒性得到明显优化。

五、结论

非线性电子控制系统的鲁棒性优化是提升控制性能的关键问题，本文针对现有控制方法的不足，结合自适应算法对滑模控制进行改进，提出了一种新的鲁棒性优化设计方案，该方案通过自适应调整切换增益，有效解决了传统滑模控制的抖振问题，同时保留了滑模控制对扰动不敏感的优点。仿真结果验证了该方案的有效性，相比于传统控制方法，该方案能够显著提升非线性电子控制系统的动态

性能与稳态精度，对各类不确定扰动具有更强的抑制能力，适合在工业非线性电子控制场景中推广应用。未来研究可以进一步结合智能算法优化自适应参数，提升方案对不同类型非线性系统的适配性。

参考文献

- [1] 王丰尧.滑模变结构控制[M].北京:机械工业出版社,1998.
- [2] 胡寿松.自动控制原理[M].北京:科学出版社,2019.
- [3] 刘金琨.滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M].北京:清华大学出版社,2015.
- [4] 张嗣瀛,高立群.现代控制理论[M].北京:清华大学出版社,2006.