

# 滑模寻优机构非线性改造及其 在自寻最优点控制中的应用\*

侯增广

韩京清

(中国科学院自动化研究所 北京 100080) (中国科学院数学与系统科学研究院)

**摘要** 在寻优机构非线性改造的基础上,利用自抗扰控制器对被控对象和外部扰动实时作用量的良好观测能力,将该寻优机构用于自寻最优点控制。自抗扰控制器的自寻最优点控制可以调控系统位于最佳运行状态。

**关键词** 非线性,滑动模态,自寻最优点控制

**分类号** TP 273

## Improvement for an Optimization Mechanism with Sliding Modes and Its Application to Optimum Seeking Control Systems

Hou Zengguang, Han Jingqing

(Chinese Academy of Sciences)

**Abstract** Non-linearities are used to improve the efficiency and stability of an optimization mechanism with sliding modes. On the basis of this mechanism and by employing the fine estimation abilities of the auto-disturbance-rejection-controller (ADRC), an optimum seeking control system is constructed. The proposed optimum seeking control system can adjust non-linear systems to run under optimal states and with satisfactory performance.

**Key words** non-linearity, sliding mode, optimum seeking control

### 1 引言

在许多实际系统中,希望能够控制系统运行于平衡点,以改善系统运行性能,提高控制效率,如机械系统中力的平衡点。考虑控制系统  $\dot{x} = f(x, t) + u$ , 设  $x^*(t)$  为  $t$  时刻系统的平衡点,如果  $f(x^*(t), t) = 0$ , 则当系统控制在平衡点运行时,不但系统运行性能好,而且控制能耗小。

自寻最优点控制系统的关键在于建立一个非线性环节,通过这个非线性环节来确定相应的最优运行条件。因为每个系统都有相应的最优运行点,自寻优的目的就是要找到这个最优点,并使系统保持在这一点附近运行。这是控制工程师追寻的目标之

一<sup>[1]</sup>。钱学森和宋健在其专著《工程控制论》<sup>[2]</sup>中专门以一章内容讨论自寻最优点控制系统,并以长距离火箭导航控制和结冰气候条件下的飞机飞行控制为背景,阐述了“连续理解和连续测量的控制设计原理”。自寻最优点控制系统对于不确定性时变系统的控制具有重要意义。

本文在 Korovin 和 Utkin<sup>[3,4]</sup>的工作基础上,利用非线性特性对具有滑动模态的寻优机构进行改进;利用自抗扰控制器(ADRC)对被控对象和外部扰动实时作用量的良好观测能力,将该自寻优机构用于自抗扰控制器的自寻最优点控制。自抗扰控制器的自寻最优点控制可以调控系统位于最佳运行状态,提高系统效率。

\* 国家自然科学基金项目(G 69574033) 和中国博士后科学基金项目

## 2 一种滑模自寻优系统的非线性改造

考虑系统  $y = f(x)$  的优化问题, 其中  $x, y$  分别为系统的输入输出变量. 设函数  $f(x)$  可微且存在一个极小值点  $x^*$ , 当  $x = x^*$  时,  $df/dx = 0$ . 则当系统结构未知, 即在梯度信息不可得的情况下, 可用如下控制系统结构求得系统的最优点.

$$\dot{x} = u \tag{1}$$

$$y = f(x) \tag{2}$$

$$\epsilon = g - y \tag{3}$$

$$s_1 = \epsilon \tag{4}$$

$$s_2 = \epsilon + \delta \tag{5}$$

$$\dot{g} = -\rho + Bh(s_1, s_2) \tag{6}$$

$$u = A \text{sign}(s_1 s_2) \tag{7}$$

其中,  $\delta, \rho, A, B$  均为正数;  $h(\bullet)$  是具有滞环的三位继电器, 幅值为  $(-1, 0, 1)$ , 幅值放大系数为  $B$ , 滞环宽度为  $\Delta$ , 且  $\Delta < \delta, B > A|df/dx| + \rho$ . 系统控制的目的是将由  $\epsilon = g(t) - y(t)$  确定的协调量  $\epsilon$  归于零, 最终得到  $f(x)$  的极小值. 这里  $g(t)$  是单调下降的参考输入量.

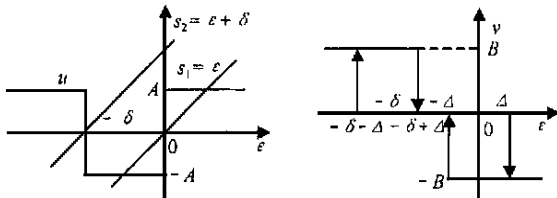


图1 两个非线性环节

参见图1: 开始时,  $|\epsilon|$  一般较大, 初始状态满足  $(s_1 - \Delta)(s_2 - \Delta) > 0$ , 所以  $s_1 s_2 > 0$ , 则  $s_1 s_1 < 0$  和  $s_2 s_2 < 0$  同时成立. 这时  $|s_1|$  和  $|s_2|$  将减小, 即  $|\epsilon|$  减小. 当  $|\epsilon|$  减小到满足  $(s_1 + \Delta)(s_2 - \Delta) < 0$  时, 则  $h(s_1, s_2) = 0, s_1 s_2 < 0$ , 可得  $\dot{\epsilon} = \dot{g} - \dot{y} = -\rho + (df/dx)A$ . 此时分为两种情形:

1) 如果  $|df/dx|A > \rho$ , 则  $s_1 \dot{s}_1 < 0$  或  $s_2 \dot{s}_2 < 0$ , 其结果是系统维持在  $s_1 = 0$  或  $s_2 = 0$  附近高频切换, 即处于滑动模态; 当  $h(s_1, s_2) = 0$  时,  $\dot{g} = -\rho$ , 则系统输出以  $\dot{g} = -\rho$  递减, 直到  $|df/dx|A < \rho$ . 如果  $\rho$  足够小, 则  $df/dx \rightarrow 0$ .

2) 当  $|df/dx|A < \rho$  时, 有  $\dot{\epsilon} = \dot{s}_1 = \dot{s}_2 < 0$ , 因此无论  $s_1 = 0$  或  $s_2 = 0$ , 系统都将运动到  $s_2 = -\Delta$ , 然后又被控制到  $s_1 = 0$  或  $s_2 = 0$ . 如此反复.

可以看出, 通过适当设置参数, 利用该系统可以

实现自寻最优. 但该系统的缺陷是存在颤振, 稳定性较差, 当系统达到最优状态时不能停留, 必然脱离后重新寻找最优点, 寻优效率较低.

为进一步提高系统的稳定性和效率, 利用非线性特性对其进行改造. 令  $u = \text{sign}(u)|u|^\alpha$ , 即在控制通道增加一个非线性环节. 这里通过一个简单例子来观察非线性改造的效果. 求  $y = f(x) = x|x|^{1/2} \sin(8x)$  的极值, 初始状态  $x_0 = 0.8$ . 滑模寻优仿真结果如图2所示.

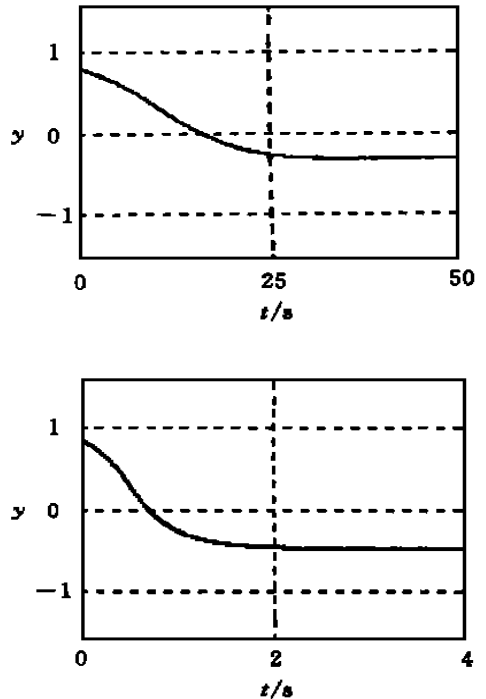


图2 滑模寻优仿真结果

(a) 加非线性前 (b) 加非线性后

仿真结果表明, 经过非线性特性改进, 一方面可以显著加快系统的收敛速度, 改善系统动态特性, 特别是在到达极值点附近时, 可使系统很快达到最优状态; 而改造前的系统, 寻优时间长且精度很低. 另一方面, 可以削弱系统处于滑动模态时的颤振现象, 避免寻优机构脱离最优状态后再返回再脱离的反复过程所引起的抖动.

## 3 在ADRC自寻最优点控制系统中的应用

下面结合自抗扰控制器(ADRC)<sup>[4]</sup>的特点, 将具有滑动模态的自寻优机构用于自抗扰控制器的自寻最优点控制. 对于二阶对象, 在ADRC中, 扩张状态观测器(ESO)的输出  $z_3$  为对象及外扰实时作用

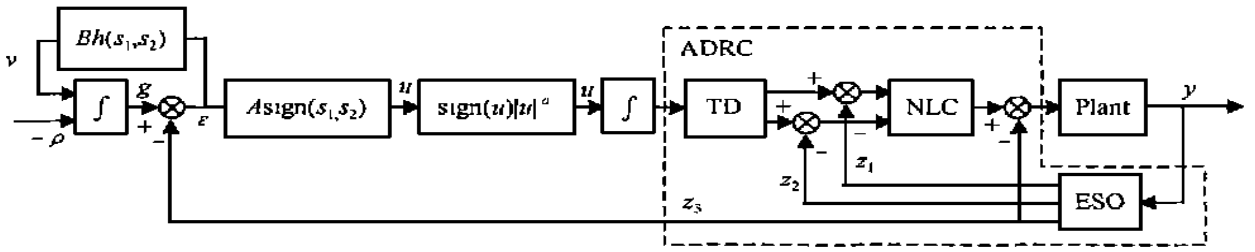


图 3 ADRC 自寻最优点控制系统

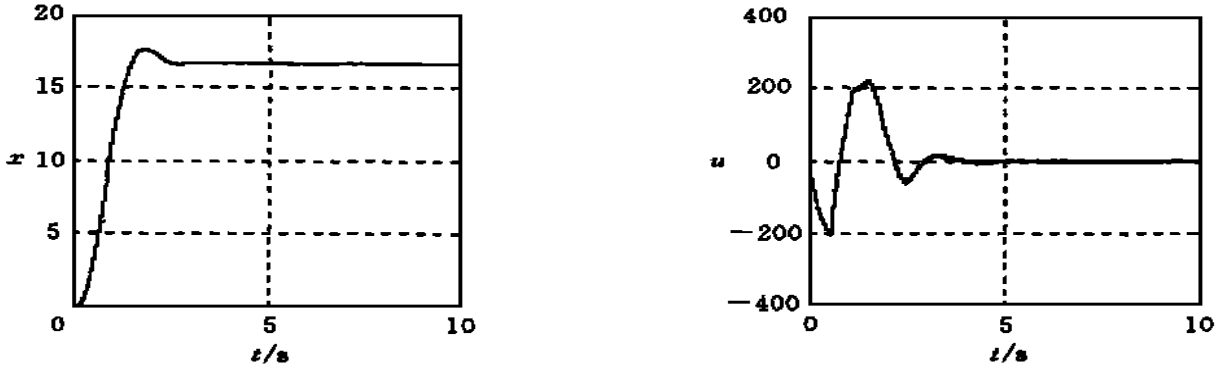


图 4 自寻最优点控制仿真结果

量的观测值, 因此以  $z_3$  作为自寻最优机构的反馈信号, 送入滑模非线性环节。ADRC 自寻最优点控制系统的结构如图 3 所示。

采用 ADRC 自寻最优点控制系统方案, 对如下系统进行控制

$$\ddot{x} = -\frac{92(1 + 0.1u)}{42(1 + 0.0045x^2)} + 0.98$$

这是一个磁悬浮控制实验模型, 控制量  $u$  是输入磁悬浮线圈的电流值。控制的目的是寻找一个最佳状态, 使得当系统在稳态运行时, 控制输入量  $|u|$  最小, 这时系统能耗最小。仿真结果如图 4 所示。可以看出, 该自寻最优机构能使控制系统较快地稳定在最优状态附近运行, 这时控制量  $|u|$  接近于零。

## 4 结 语

本文讨论了自寻最优点控制系统问题, 在不需要系统任何偏导数信息的情况下, 利用自抗扰控制器对不确定对象及外扰的良好估计能力, 建立了一个 ADRC 自寻最优点控制系统。自寻最优点控制系统对改善控制系统的运行性能具有重要的应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 周力军, 韩京清. 不确定系统在线自寻最优点的一种途径. 见: 97 中国控制会议论文集. 庐山, 1997. 633 ~ 636
- 2 钱学森, 宋健. 工程控制论(下册). 北京: 科学出版社, 1981
- 3 Korovin S K, Utkin V I. The use of the sliding mode in static optimization problems. Auto Remote Control, 1972, (4): 50 ~ 60
- 4 Korovin S K, Utkin V I. Using sliding modes in static optimization and nonlinear programming. Automatica, 1974, 10: 525 ~ 532
- 5 韩京清. 自抗扰控制器及其应用. 控制与决策, 1998, 13 (1): 19 ~ 23
- 6 陈翰馥, 朱允民. 随机逼近. 上海: 上海科学技术出版社, 1996

## 作 者 简 介

侯增广 男, 1969 年生。1997 ~ 1999 年在中科院系统研究所做博士后研究工作, 现为中科院自动化研究所副研究员。目前研究兴趣为机器人控制, 非线性控制方法与神经网络技术。

韩京清 男, 1937 年生。1958 年毕业于吉林大学数学系, 1963 ~ 1966 年为莫斯科大学动力系研究生, 现为中科院数学与系统科学研究院研究员, 博士生导师。目前研究领域为控制系统的非线性设计方法及其应用。