

基于自抗扰控制的典型 RLC 系统仿真研究

马 壮, 刘 鹏, 王建龙

(唐山学院 智能与信息工程学院, 河北 唐山 063000)

摘要: 为有效解决二阶线性系统的时变参数与外部干扰的控制问题, 提出采用自抗扰控制方法对系统进行鲁棒跟踪控制。以经典的串联 RLC 电路为研究对象, 在考虑时变参数、外部干扰及其他不确定性因素的基础上, 建立二阶系统模型; 根据模型设计自抗扰控制器, 其工作原理是通过扩张状态观测器实时观测系统扰动, 进而补偿到自抗扰控制器中用以抑制扰动。应用 Matlab 进行系统仿真分析, 验证了所设计控制器的有效性。

关键词: 自抗扰控制器; 二阶系统; RLC 电路; 扰动抑制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-349X(2019)06-0005-04

DOI: 10.16160/j.cnki.tsxyxb.2019.06.002

Simulation Study on Classical RLC System Based on Active Disturbance Rejection Control

MA Zhuang, LIU Peng, WANG Jian-long

(School of Intelligence and Information Engineering, Tangshan University, Tangshan 063000, China)

Abstract: To solve the control problem of the time-varying parameters and external disturbances in the second-order linear system, the active disturbance rejection control (ADRC) method is proposed for a robust tracking control about the system. In this paper, the classical RLC circuit as the research object, a second-order system model is first established after considering some uncertain factors, such as time-varying parameters, the external disturbances and the others. Then, ADRC is designed according to the model, with the working theory that the system disturbances are observed in real time by the extended state observer (ESO) and are to be compensated to ADRC for disturbance suppression. The system simulation analysis based on Matlab proves the effectiveness of the designed ADRC.

Key Words: active disturbance rejection control; second-order system; RLC circuit; disturbance suppression

0 引言

二阶线性定常系统是控制理论中非常重要的内容^[1-3]。目前相关研究通常是在系统参数不变以及无外部摄动的理想情况下进行控制分

析, 并未考虑系统参数实际变化以及外部不可预想信号的影响。因此, 结合实际工况, 摆脱参数不变的理想情形对系统控制进行研究显得尤为重要。

基金项目: 河北省教育厅项目高等教育教学改革研究与实践项目(2018GJJG540)

作者简介: 马壮(1977—), 男, 河北迁安人, 副教授, 博士研究生, 主要从事自动控制理论与技术应用研究。

近年来,对于二阶系统的跟踪控制问题研究成果较多。文献[4]主要针对变系数二阶系统设计了模糊变结构控制器,降低了传统滑模控制的抖振问题,提高了系统的稳定性。文献[5]与文献[6]提出采用模糊控制与 PID 控制相结合的方法,实时调整 PID 控制器参数,在保证系统控制精度的同时,提高了瞬态响应指标。文献[7]基于神经网络的直接逆控制和模型参考自适应控制的原理设计了二阶系统控制,采用 Matlab 神经网络工具箱对其进行了仿真,并进行了不同控制方法的对比。文献[8]针对典型的二阶系统频域响应实验中常见问题提出了处理方法。但目前不足之处是还缺乏对实际系统中系统时变参数以及抑制系统外部扰动等方面的研究。

自抗扰控制技术(Active Disturbance Reject Control, 简称 ADRC)^[9-11]是韩京清教授提出的一种新型控制器设计方法,可有效抑制系统不确定问题,提高系统跟踪控制精度,有着广泛的应用前景。为有效解决二阶线性系统的时变参数与外部干扰的控制问题,提高系统控制的稳定性和鲁棒性。本文以典型的二阶 RLC 串联电路为例,采用自抗扰控制技术对此二阶系统进行设计。首先,根据具体电路建立系统模型,由具体的 RLC 电路模型抽象为典型的二阶系统数学模型,同时考虑参数时变特性与其他不确定性因素的影响;其次,参照自抗扰控制技术基本原理与方法,根据二阶系统模型设计自抗扰控制器;最后,采用 Matlab 进行自抗扰控制仿真,并与经典 PID 控制算法进行比较。

1 RLC 系统数学模型的建立

以典型的无源二阶 RLC 电路为研究对象,建立微分方程形式的系统数学模型,并考虑参数时变特性以及外部扰动情形。

RLC 电路如图 1 所示,其中 $U_i(t)$ 为系统输入, $U_o(t)$ 表示电容 C 两端的电压,作为系统输出。

以电路回路的电流 $i_o(t)$ 作为中间变量,则根据系统电路特性可得到:

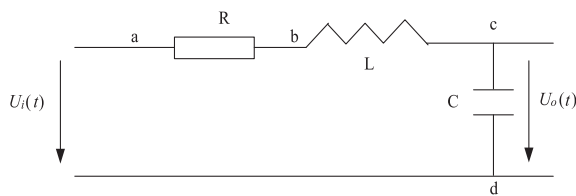


图 1 RLC 串联电路示意图

$$U_i(t) - U_o(t) = U_{ac}(t), \quad (1)$$

$$U_{ac}(t) - U_{bc}(t) = U_{ab}(t), \quad (2)$$

$$U_{ab}(t) \times \frac{1}{R} = i_o(t), \quad (3)$$

$$C \frac{dU_o(t)}{dt} = i_o(t), \quad (4)$$

$$L \frac{di_o(t)}{dt} = U_{bc}(t). \quad (5)$$

联立式(1)(2)(3)(4)和式(5),可以得到二阶 RLC 电路的微分方程数学模型:

$$C \frac{dU_o(t)}{dt} = i_o(t), \quad (6)$$

$$L \frac{di_o(t)}{dt} = -i_o(t)R - U_o(t) + U_i(t). \quad (7)$$

为了便于分析,令 $x_1 = U_o(t)$, $x_2 = i_o(t)$, $u = U_i(t)$, $y = U_o(t)$, 则式(6)(7)可以整理为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1 x_2 \\ \dot{x}_2 = a_2 x_1 + a_3 x_2 + bu, \\ y = x_1 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $a_1 = 1/C$, $a_2 = -R/L$, $a_3 = -1/L$, $b = 1/L$ 。

以上模型是在理想情况下建立的,然而实际上系统的电路参数具有时变特性以及系统易受外部扰动的影响,因此,将系统时变参数 $\rho_1 \sin \omega_1 t$ 项与外部扰动项 ρ_2 作为复合扰动项定义为:

$$d(t) = \rho_1 \sin \omega_1 t + \rho_2. \quad (9)$$

在理想模型基础上,综合考虑复合扰动因素,同时便于控制器的设计,将式(8)变为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1 x_2 \\ \dot{x}_2 = a_2 x_1 + a_3 x_2 + bu + d(t). \\ y = x_1 \end{cases} \quad (10)$$

2 二阶系统自抗扰控制设计

ADRC 控制技术能够有效抑制系统内外部扰动,提高系统跟踪控制精度,其主要包含跟

踪微分器、控制器和扩张状态观测器三部分。自抗扰控制系统原理(主要针对二阶系统)如图2所示,其中, $z_i (i=1,2,3)$ 分别表示二阶系统经扩张状态观测器观测后的系统状态 x_1, x_2 的观测值以及扰动 $d(t)$ 的观测值。

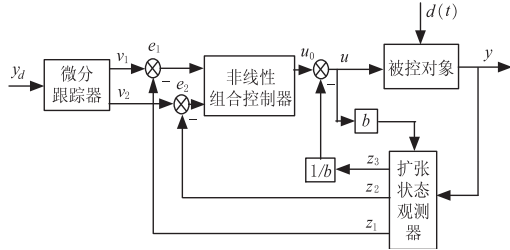


图2 自抗扰控制系统原理图

自抗扰控制主要设计过程为:首先,利用跟踪微分器安排系统过渡过程;其次,通过扩张状态观测器实时观测系统的复合扰动项 $d(t)$ (其观测值为 z_3);最后,将原设计的非线性组合控制器 u_0 减去 $\frac{z_3}{b}$, 得到最终的控制 u , 其目的主要是补偿理想系统控制器中未考虑扰动作用部分,从而起到抑制扰动的作用。

2.1 跟踪微分器

跟踪微分器的主要作用是当系统输入受到污染时,从中提取出有用的给定信号与给定的微分信号,即起到传统意义上的滤波作用。本文采用二阶非线性跟踪微分器,其表达式为^[11]:

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = v_2, \\ \dot{v}_2 = r \operatorname{sign}(v_1 - y_d + \frac{v_2 |v_2|}{2r}). \end{cases} \quad (11)$$

式中, v_1, v_2 是指输入信号的本身及经过跟踪微分器后的微分信号;可调参数 r 为跟踪速度影响因子,其值越大,表明跟踪速度越快。

2.2 扩张状态观测器

扩张状态观测器是 ADRC 控制器的核心部分,主要是对系统内外部扰动以及其他不确定性因素进行观测,从而为精确跟踪控制做铺垫。扩张状态观测器将被控对象的输入与其可测的输出作为观测器系统的输入,从而观测系统的状态及其扰动的实际值。

令二阶系统模型(10)中的状态 x_1, x_2 与

$d(t)$ 对应的观测值为 $z_i (i=1,2,3)$, 根据文献[12]并结合系统模型(10)设计系统的扩张状态观测器,其表达式为:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = a_1 z_2 - \frac{\beta_1}{\sigma} (z_1 - x_1(t)) \\ \dot{z}_2 = a_2 z_1 + a_3 z_2 + z_3 + bu - \frac{\beta_2}{\sigma^2} (z_1 - x_1(t)), \\ \dot{z}_3 = -\frac{\beta_3}{\sigma^3} (z_1 - x_1(t)) \end{cases} \quad (12)$$

式中,参数 $\beta_i (i=1,2,3)$ 为可调增益。

2.3 自抗扰控制器

自抗扰控制器主要是通过扩张状态观测器观测系统的实时扰动来进行动态补偿(自抗扰控制的本质),进而改善闭环系统的动态性能。其表达式为:

$$u = u_0 - \frac{z_3}{b}. \quad (13)$$

因本文主要研究的是自抗扰控制技术,为简便起见非线性组合控制器模型表达式选为:

$$u_0 = \gamma_1 e_1 + \gamma_2 e_2, \quad (14)$$

式中, $e_i = x_i - x_{id} (i=1,2)$; 参数 $\gamma_i (i=1,2)$ 为可调增益。

3 二阶系统自抗扰控制的 Matlab 仿真

采用 Matlab 中的 S-function(即:S 函数)建立二阶系统 RLC 电路的系统方程,同时考虑参数时变以及外部扰动等情形,然后对其输入正弦信号进行系统自抗扰控制仿真,并与传统 PID 控制方法进行对比分析。

经典控制理论中,二阶欠阻尼系统是最具有代表性的系统,本研究主要在二阶系统欠阻尼情形下进行,由此式(8)中的 RLC 参数满足以下不等式:

$$R < 2 \sqrt{L/C}. \quad (15)$$

二阶系统 RLC 参数选取 $R=100 \Omega, L=10 \text{ mH}, C=0.5 \mu\text{F}$, 符合上述条件。

系统输入为 $U_i(t) = \sin \omega_0 t$, 其中 $\omega_0 = 10 \text{ rad/s}$; 考虑到参数慢时变、幅值小的特点,在系统复合扰动项 $d(t)$ 中,选取 $\rho_1 = 0.05, \omega_1 = 0.01 \text{ rad/s}$, 而外部扰动参数选取 $\rho_2 = 1$, 且在 $t=0.5 \text{ s}$ 后产生。

扩张状态观测器的参数为: $\beta_1=7, \beta_2=12, \beta_3=7$ 。同时考虑到输出波形的抖动,采用了低通滤波器,其形式为 $\frac{1}{0.01s+1}$,取得了较好的滤波效果;控制器模型(14)的参数为: $\gamma_1=1, \gamma_2=0.1$ 。

为了更直观地显示出自抗扰控制算法的有效性,选择经典 PID 控制算法与其进行比较,选取的 PID 控制器模型为:

$$u_{PID} = k_P e_1 + k_I \int e_1 dt, \quad (16)$$

式中,选取 $k_P = 10, k_I = 9\ 000$ 。

仿真结果如图 3 至图 5 所示。

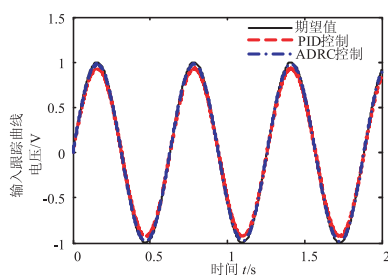


图 3 输入信号跟踪曲线

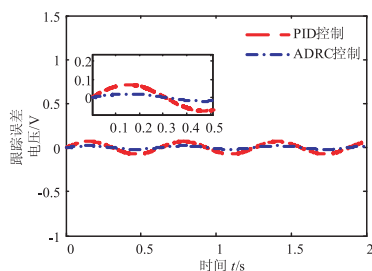


图 4 跟踪误差曲线

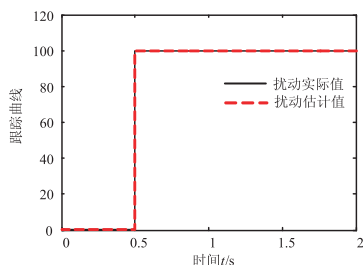


图 5 扰动估计曲线

图 3 为输入信号跟踪曲线,由图 3 可知,两种控制算法的整体跟踪效果都很好,而 ADRC 控制略有优势。在扰动存在的条件下,系统都具有一定的抑制能力。图 4 为跟踪误差曲线,从中可以看出,与经典 PID 控制相比,ADRC 控制稳定性和鲁棒性更强。图 5 为扰动估计曲线,从中

可以看出,系统的整体跟踪性较好,能够较为真实地反映出系统扰动的大小以及变化情况。因此,ADRC 控制对于实际系统来说意义更大。

4 结论

以二阶 RLC 电路系统为研究对象,在考虑实际系统时变参数、外部干扰以及其他不确定性因素的基础上,建立了二阶系统模型,采用 ADRC 控制技术对二阶系统进行了设计,然后对其进行 Matlab 仿真研究。仿真结果表明:RLC 电路系统在本文提出的自抗扰控制方法作用下,不仅实现了对系统给定信号有效的跟踪控制,而且较好地抑制了系统中不确定性因素对系统性能的影响。

参考文献:

- [1] 杨敏. 二阶系统的时域分析软件实验平台设计[J]. 实验技术与管理, 2009, 26(3): 88-90.
- [2] 马壮. 基于 Matlab 的典型二阶 RLC 振荡电路实验教学仿真[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(10): 95-98.
- [3] 严继东, 刘宗群. 自控实验中二阶系统传递函数实验方法的探讨[J]. 实验室研究与探索, 1992(3): 58-61.
- [4] 张翼飞, 杨辉, 邓方林. 二阶系统模糊变结构控制器设计及稳定性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(2): 312-315.
- [5] 钟斌, 程文明, 马莉丽, 等. 二阶系统模糊自适应 PID 变阻尼控制仿真研究[J]. 计算机仿真, 2007, 24(8): 155-158.
- [6] 郑伟勇, 李艳玮. 新型二阶系统自调整模糊 PD 控制器[J]. 微电子学与计算机, 2015, 32(12): 85-89.
- [7] 李朋, 袁铸钢, 王春艳. 基于二阶系统的神经网络控制及仿真[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2005, 19(4): 322-324.
- [8] 马壮, 吴征, 柳延领. 浅谈二阶系统频率响应实验中的常见问题及处理方法[J]. 实验室科学, 2007(2): 170.
- [9] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998(1): 19-23. (下转第 42 页)

由上述结果可以看出,采用低碳成分设计生产特厚高强钢板时,需大量添加 Ni, Cr, Mo 等合金元素来获得较高的强度(碳是提高钢的淬透性、强度特别是抗拉强度最有效的元素,因此碳含量的降低使得获得更高的抗拉强度更加困难),不但导致生产成本大幅提高,且在钢板中心部易于出现粗大的 M/A,经过较高温度回火后,M/A 区域碳化物的大量析出会导致钢的低温韧性恶化。因此,在现有的淬火冷却条件下,此种成分设计不适合生产厚度超过 100 mm,屈服强度 500 MPa 以上的钢产品。在此类产品的生产过程中,采用常规碳含量设计并进行调质处理能够获得更优良的综合力学性能。

3 结论

(1)采用常规碳和低碳的成分设计均能够生产出性能满足要求的钢产品,但两种成分的钢所采取的热处理工艺有较大的差异。

(2)采用常规碳含量的钢,通过高温回火获得回火索氏体能得到良好的强韧性匹配,由于碳含量对淬透性和强度的提高作用非常明显,因此贵重合金元素的加入量可适当降低,这种成分设计适合于高强度级别、大厚度钢板的生产。

(3)采用低碳成分设计的钢,由于淬火态组织较为粗大,M/A 也相应粗化,在较低温度回火后即能获得较高的低温韧性,而再升高回火温度 M/A 区域碳化物则会集中析出,导致韧

性恶化,因此经过 500 °C 回火后钢就能够获得优良的综合力学性能。

参考文献:

- [1] 高志玉,潘涛,王卓,等.高淬透性硼微合金化特厚板钢成分优化设计[J].工程科学学报,2015,37(4):447-453.
- [2] 帅勇,孙乐飞,闫博,等.回火工艺对海洋工程用钢 E690 组织与性能的影响[J].金属热处理,2016,41(12):97-101.
- [3] 胡锋,张晓雪,车马俊,等.心部组织对特厚超高强海工钢力学性能的影响[J].金属热处理,2018,43(1):107-112.
- [4] 张志军,高雅,王少义.TMCP+回火型高性能耐候桥梁钢 A709M-HPS-485WT2 的研究开发[J].宽厚板,2017,23(5):1-4.
- [5] 杨跃辉,赵英利,许磊,等.低碳贝氏体型特厚调质高强钢强韧化机理研究[J].热加工工艺,2013,24(10):180-183.
- [6] 杨婷,苏航,罗小兵,等.高强度船体钢淬火工艺下截面组织与性能均匀性[J].钢铁研究学报,2017,29(7):583-589.
- [7] 刘东雨,方鸿生,白秉哲,等.我国中低碳贝氏体钢的发展[J].江苏冶金,2002,30(3):1-5.
- [8] 洪良,左秀荣,姬颖伦,等.厚规格 X80 管线钢低温断裂行为研究[J].材料研究学报,2018,32(1):33-41.

(责任编辑:夏玉玲)

(上接第 8 页)

- [10] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3):900-906.
- [11] 韩京清,黄远灿.二阶跟踪-微分器的频

率特性[J].数学的实践与认识,2003,33(3):71-74.

- [12] 王新华,陈增强,袁著祉.基于扩张观测器的非线性不确定系统输出跟踪[J].控制与决策,2004,19(10):1113-1116.

(责任编辑:李秀荣)