

基于线性自抗扰控制器的光伏板旋转定位控制^①

王林青^{②*} 李大虎^{** ****} 孙建波^{**} 刘 佳^{③****} 陈宝塔^{*} 黄柳柳^{*}

(* 杭州平旦科技有限公司 杭州 310000)

(** 国网湖北省电力有限公司 武汉 430077)

(*** 湖北工业大学电气与电子工程学院 武汉 430068)

(**** 武汉理工大学信息工程学院 武汉 430000)

摘 要 针对光伏板旋转定位系统设计了线性自抗扰控制器。通过跟踪微分器分别得到光伏板旋转参考倾角的过渡值及其微分信号,使参考倾角平滑化,防止产生超调。设计扩张状态观测器(ESO)估计光伏板旋转倾角及其微分的同时,估计总和扰动,进而设计具有干扰补偿的控制律实现了对光伏板旋转定位系统的跟踪控制。最后,通过数值仿真验证了所设计的线性自抗扰控制方法的有效性与优越性。

关键词 光伏板旋转定位系统, 扩张状态观测器(ESO), 总和扰动, 干扰补偿, 线性自抗扰控制(LADRC)

0 引 言

太阳能的使用是人类对可再生资源利用的重要方面之一。如何使光伏板旋转对准太阳,成为太阳能利用的重要课题。现有的跟踪方法主要有压差式、控放式、光敏传感式、视日运动轨迹跟踪式等,而无论采用何种跟踪方法,光伏板旋转定位控制器的设计是其中的核心技术之一^[1-4]。由于现代控制策略对系统模型普遍存在较强依赖性,因此研究一种无需精确建立系统模型的控制理论算法,从而全面提高光伏板旋转定位系统的跟踪控制性能,具有重要的理论和实际意义。

目前,已在光伏板旋转定位系统上实现的控制方法有 PI 控制^[3]、模糊控制^[5,6]等。然而,光伏板旋转定位系统会受外在干扰等因素影响,如随机方向且大小不定的自然风的干扰,对光伏旋转定位系统的抗扰性能提出更高的要求。因此,本文采用一

种具有抗扰动性能的自抗扰控制器(active disturbance rejection controller, ADRC)^[7,8]对这样存在强干扰和不确定性的光伏板旋转定位系统实现跟踪控制。ADRC 吸收现代控制理论成果,采取了 PID 误差反馈控制的理念,其最突出的特征就是把作用于被控对象的所有不确定因素作用都归结为总和扰动,并用对象的输入输出数据对其进行估计并给予补偿,进而将控制对象变为普通的积分串联型系统,实现动态系统的反馈线性化。它具有算法简单、抗干扰能力强,无需建立系统精确模型等特点。

本文在获取系统的阶次先验知识的基础上,通过设计相应阶次的线性自抗扰控制器,并进行数值仿真验证了所设计方法的有效性和优越性,使得系统具有良好的跟踪性能和抗扰动性能。

1 问题描述

太阳能电池阵列吸收太阳辐射的多少与太阳辐射

① 湖北省科技支撑计划(2015BAA110)资助项目。
② 男,1978 年生,硕士;研究方向:电力系统信息化,新能源优化配置和能量管理系统;E-mail: wlinq@sina.com
③ 通信作者,E-mail: liujial23@whut.edu.cn
(收稿日期:2018-01-05)

入射光线和阵列法向之间夹角即入射角 $\Delta\theta$ 有关,通过天文算法实现对光伏板东西方向转角、南北方向斜角的计算,在此基础上结合倾角传感器测量的角度反馈,使得所设计的跟踪控制算法控制电机的正反转,实现光伏板旋转定位。光伏板旋转定位控制系统结构如图 1 所示,其主要由控制器、传感检测机构、驱动电路与电机等组成。它的基本原理是:当有

太阳辐射时,将经过方位计算或传感器检测得到的太阳位置信息作为给定值,与传动机构中的太阳电池阵列的位置信息进行比较,其偏差值送给跟踪控制器,控制器利用得到偏差信号进行算法上的处理后驱动电机与机械传动,控制太阳电池阵列随着太阳位置的变化而变化跟踪角度,从而达到跟踪的目的。

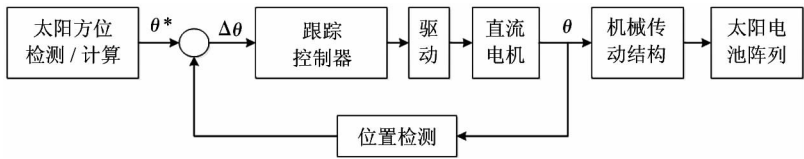


图 1 光伏板旋转定位控制系统结构

自动追光过程中,光伏板件东西方向的运动轨迹依据图 2 变化。光伏板旋转定位系统在夜间或大风期间处于安全模式(即放平状态)。

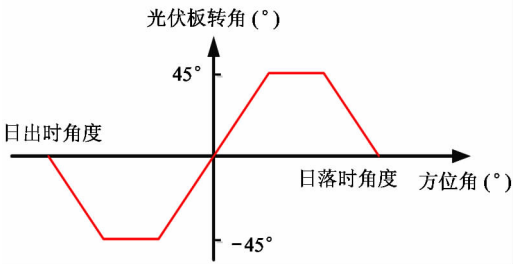


图 2 光伏板件东西方向的运动轨迹图

直流电机模型^[9]描述如下:

$$\begin{aligned} \frac{d\delta}{dt} &= \omega \\ \frac{d\omega}{dt} &= -\frac{F}{J}\omega + \frac{A}{J}i_a + \frac{B}{J}i_a^2 - \frac{1}{J}T(t) \\ \frac{di_a}{dt} &= -\frac{A}{L}\omega - \frac{B}{L}\omega i_a - \frac{R}{L}i_a - \frac{1}{L}V \end{aligned} \tag{1}$$

式中, δ 为转子输出转角(rad), ω 为转子速度(rad/s), i_a 为电枢电流(A), V 为端电压(V), A 为反负载机械常数, B 为小的负电枢电流系数, R 为电枢阻抗(Ω), L 为电枢感抗(H), $T(t)$ 为负载转矩(N/m), J 为转子的转动惯量(kg/m^2), F 为摩擦力(N), 将直流电机模型式(1)转化为以下状态方程得

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x) \\ \dot{x}_2 &= f_2(x) \\ \dot{x}_3 &= f_3(x) + g_3(x)u \\ y &= x_1 \end{aligned} \tag{2}$$

式中:

$$\begin{aligned} f_1(x) &= x_2, f_2(x) = k_1x_2 + k_2x_3 + k_3x_3^2 + k_4T(t), \\ f_3(x) &= k_5x_2 + k_6x_2x_3 + k_7x_3, g_3(x) = k_8, \\ T(t) &= a1 \times x_2^2, x_1 = \delta, x_2 = \omega, x_3 = i_a, k_1 = -F/J, \\ k_2 &= A/J, k_3 = B/J, k_4 = -1/J, k_5 = -A/L, \\ k_6 &= -B/L, k_7 = -R/L, k_8 = -1/L. \end{aligned}$$

2 线性自抗扰控制器(LADRC)设计

由于光伏板旋转定位控制系统的倾角传感器受测量传感器的限制,除了倾角的状态实时可测外,其他状态不可测和外界干扰(不定向的风力等因素)的存在,因此设计具有抗扰动性能的三阶线性自抗扰控制器(LADRC)实现对光伏板旋转定位系统的控制。其基本原理是利用扩张状态观测器(extended state observer, ESO)在估计系统状态的同时,对系统的总和扰动(包括未建模动态以及外界干扰)进行估计,并利用得到的估计值对跟踪控制系统进行前馈补偿,进而设计线性反馈控制律实现光伏板旋转定位系统的跟踪控制。基于三阶 LADRC 的光伏板旋转定位控制系统结构如图 3 所示。

设计的线性自抗扰控制器包括三部分。第一部分设计线性跟踪微分器(LTD),安排过渡过程,将设定的参考信号平滑化防止产生超调。给定信号 θ^* 作为参考输入,经过跟踪微分器获得参考角度 θ^* 的过渡值 v_1 、一阶导 v_2 、二阶导 v_3 ,并作为控制律的一部分,其形式为:

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = v_2 \\ \dot{v}_2 = v_3 \\ \dot{v}_3 = -r \times (r \times (r \times (v_1 - \theta^*) + 3 \times v_2) + 3 \times v_3) \end{cases} \quad (3)$$

式中, r 为可调节的跟踪微分器的快速因子,所设计的 LTD 不仅可以获得 v_1 、 v_2 、 v_3 ,还具有一定的滤波功能。

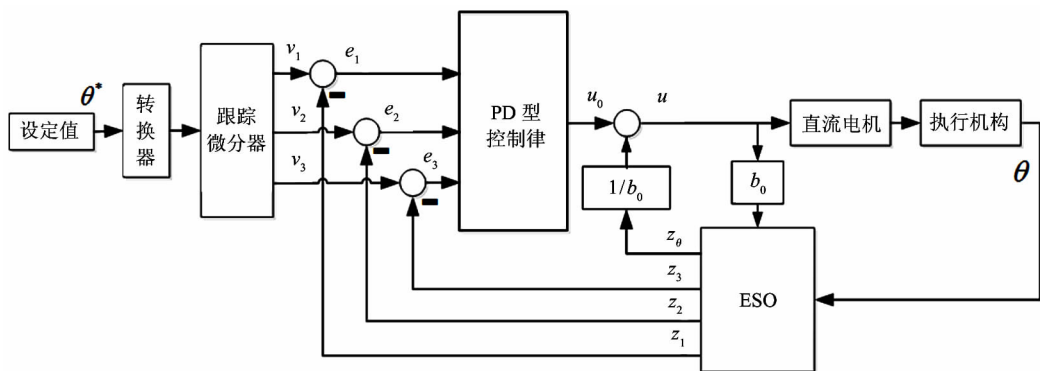


图3 基于三阶 LADRC 的光伏板旋转定位控制系统结构

第二部分为线性扩张状态观测器(LESO),目的是为了得到光伏板旋转倾角 θ 的跟踪值 Z_1 、一阶导 Z_2 、二阶导 Z_3 与总和扰动 Z_θ ,其中倾角的跟踪值 Z_1 、一阶导 Z_2 、二阶导 Z_3 作为控制律的一部分, Z_θ 作为系统总和扰动实时估计。设计的线性扩张状态观测器形式为:

$$\begin{cases} e = \theta - Z_1 \\ \dot{Z}_1 = Z_2 - 4we \\ \dot{Z}_2 = Z_3 - 6w^2e \\ \dot{Z}_3 = Z_\theta - 4w^3e + b_0u \\ \dot{Z}_\theta = -w^4e \end{cases} \quad (6)$$

第三部分为控制律,其形式如下:

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1, e_2 = v_2 - z_2, e_3 = v_3 - z_3 \\ u_0 = K_1e_1 + K_2e_2 + K_3e_3 \\ u = u_0 - Z_\theta/b_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, K_1 、 K_2 、 K_3 为控制器增益,它们的符号以构成负反馈为准。

$$\begin{cases} e = \theta - Z_1 \\ \dot{Z}_1 = Z_2 - \beta_{01}e \\ \dot{Z}_2 = Z_3 - \beta_{02}e \\ \dot{Z}_3 = Z_\theta - \beta_{03}e + b_0u \\ \dot{Z}_\theta = -\beta_{04}e \end{cases} \quad (4)$$

求得式(4)所示的线性扩张状态观测器的特征方程为:

$$s^4 + \beta_{01}s^3 + \beta_{02}s^2 + \beta_{03}s + \beta_{04} = 0 \quad (5)$$

将式(5)改写为理想特征方程 $(s + w)^4 = 0$,于是把参数 β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} 、 β_{04} 配置成 $4w$ 、 $6w^2$ 、 $4w^3$ 、 w^4 形式, w 称为观测器带宽^[10],其中 w 根据系统带宽的要求确定或在线整定,一般情况下 w 的适应范围很宽,因此比较容易调整出合适的 w 。

由上述分析可将式(4)改写为

3 仿真实验

通过一个仿真例子来检验所提出的控制器的可行性。采用的直流电机参数为 110V, 1800rpm, 2.5 HP 电机, $R = 1\Omega$, $L = 0.046\text{H}$, $F = 0.008\text{N}$, $J = 0.093\text{kg/m}^2$, $A = 0.57$, $B = -0.01$, $TL = aw^2$, $a = 0.00028$,并将系统进行近似处理,取采样周期 $h = 0.005\text{s}$,采用的自抗扰控制器参数如下:

$$\begin{cases} r = 100, b_0 = 2, w = 100, \\ k_1 = 5, k_2 = 20, k_3 = 20 \end{cases} \quad (8)$$

此处, r 决定系统跟踪目标的快慢, 根据系统响应的快慢需求预先调试得到; b_0 近似为系统稳定时控制输入的放大系数的近似值。整个调参过程中需要调节的只有这 3 个量, 它们的符号以构成负反馈为准, 由 PID 调参原则, 使得系统响应最优。

如图 4 所示, 本文采用 PID 方法与 LADRC 方法比较, 本文方法较 PID 方法具有更好的跟踪控制性能。在系统稳定运行的第 15h 引入一个干扰, 控制的倾角迅速回正, 跟踪变化曲线如图 4 中子图所示, 补偿前与补偿后的控制量曲线如图 5 所示, 以及对总和扰动的估计值如图 6 所示。仿真结果表明本方法使得系统具有良好的响应和抗扰动性能, LADRC 方法能实现对光伏板旋转定位系统很好的跟踪控制。

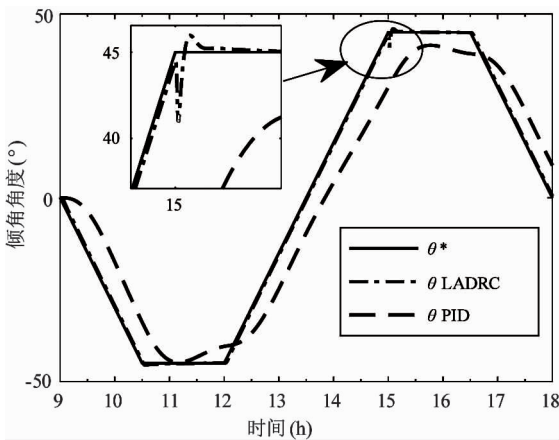


图 4 倾角轨迹曲线

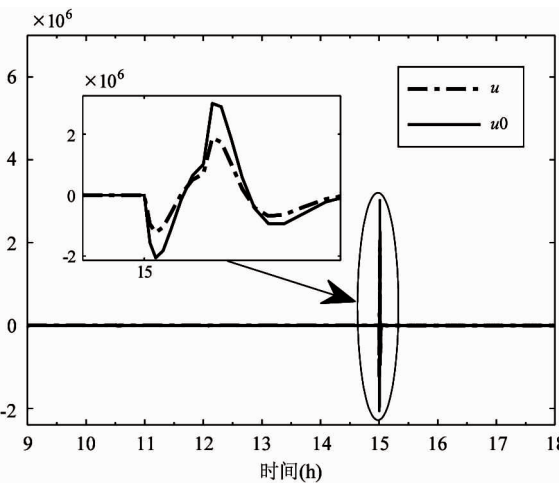


图 5 补偿前与补偿后的控制量

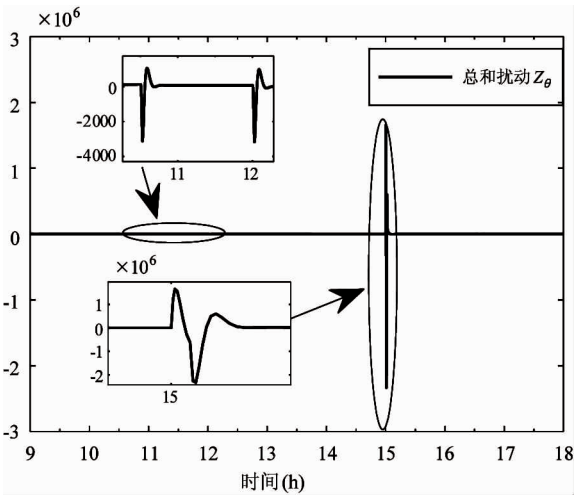


图 6 总和扰动

4 结 论

本文针对光伏板旋转定位系统设计了线性自抗扰控制器。仿真表明自抗扰控制方法具有良好的跟踪控制性能和抗干扰能力, 对光伏板旋转定位系统这样的无法建立精确模型且存在随机扰动的对象能够实现有效的跟踪控制。下一步工作将在实际光伏板旋转定位系统平台上进行实验验证。

参考文献

[1] 张起勋, 于海业. 太阳能及提高其利用率方法综述 [J]. 农机化研究, 2010, 10(32): 241-244

[2] 刘剑, 李彤, 陈兆华. 太阳能电池板自动跟踪系统 [J]. 现代建筑电气, 2016, 2(7): 58-61

[3] 徐晓冰. 光伏跟踪系统智能控制方法的研究: [博士学位论文] [D]. 合肥: 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 2010. 2-20

[4] 张翔. 太阳能板自动跟踪系统: [硕士学位论文] [D]. 西安: 西安工业大学电子信息工程学院, 2012. 3-10

[5] 万庆祝, 张翊帆. 基于模糊控制与自适应步长相结合的光伏发电系统最大功率点跟踪研究 [J]. 电气工程学报, 2017, 12(3): 33-40

[6] 杨桥桥. 光伏发电系统最大功率跟踪算法研究与分析 [J]. 机电信息, 2017, 12(1): 127-128

[7] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用 [J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23

[8] 王瑶为, 邢科新, 马剑, 等. 直线一级倒立摆的自抗扰控制方法及实现 [J]. 控制工程, 2017, 24(4): 711-715

- [9] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统-运动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2003. 253-272 controller tuning[C]. In: Proceedings of 2003 American Control Conference, Denver, USA, 2003. 4989-4996
- [10] Gao Z Q. Scaling and bandwidth parameterization based

Active disturbance rejection controller for the rotary positioning system of photovoltaic panels

Wang Linqing^{*}, Li Dahu^{** ***}, Sun Jianbo^{**}, Liu Jia^{****}, Chen Baota^{*}, Huang Liuliu^{*}

(^{*} Hangzhou Pingdan Technology Co., Ltd., Hangzhou 310000)

(^{**} State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077)

(^{***} School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068)

(^{****} School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430000)

Abstract

The linear active disturbance rejection controller (LADRC) is designed for the rotary positioning system of photovoltaic panels. A tracking differentiator (TD) is designed to obtain the transition value and the differential of the rotary reference angle. An extended state observer (ESO) is designed to estimate the rotary angle and its differential of the act rotating angle, and the total disturbance is estimated simultaneously. Then, a linear control law is properly designed based on the ESO and TD to achieve satisfying performance in controlling the rotary positioning system of photovoltaic panels. Finally, an illustrative example is provided to verify the effectiveness and superiority of the proposed LADRC.

Key words: rotating and positioning system of photovoltaic panels, extended state observer (ESO), total disturbance, disturbance compensation, linear active disturbance rejection control (LADRC)