

基于龙格-库塔法自适应PID控制的 太阳双轴跟踪系统

谷中豪, 李淑娟, 王 超, 杨 轩, 卜文浩, 李 言

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

摘 要: 论述太阳光源双轴跟踪系统的工作原理, 针对其控制系统中存在的时间滞后问题提出基于龙格-库塔法的自适应PID控制。并以基于直流电机的方位角传动机构为基础, 建立方位角传动机构的数学模型, 在 MATLAB 中进行仿真。仿真结果表明, 基于龙格-库塔法的自适应PID控制系统响应速度快、稳定性高, 具有较强的鲁棒性, 能有效解决方位角传动系统中的时间滞后问题。

关键词: 太阳跟踪系统; 数学模型; 计算机仿真; 龙格-库塔法; 自适应PID控制

中图分类号: O232

文献标志码: A

0 引 言

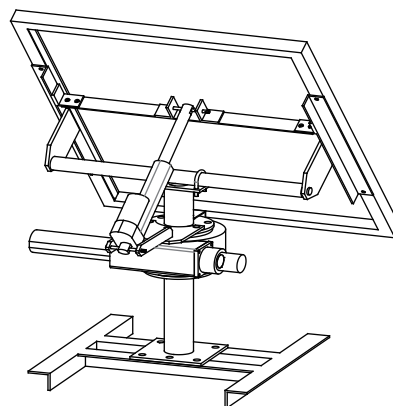
太阳能是一种新兴的可再生能源, 高效的利用太阳能对缓解资源危机具有重大作用。研究利用电力电子装置, 对太阳轨迹进行追踪, 提高太阳能发电系统的太阳能利用率、降低发电系统的制造成本, 是太阳能应用领域面临的主要难题^[1]。

目前普遍采用的太阳双轴跟踪系统结构紧凑, 精度较高, 但其控制系统中存在不同程度地时间滞后问题。较大的时滞会降低系统的稳定性, 容易导致较大的超调量和较长的调节时间^[2]。针对此问题, 文献[3]研究表明太阳光源跟踪伺服系统参数对系统动态性能影响很大, 提出 PID(比例、积分、微分)控制在此机构的应用, 表明该应用可在组建实物前通过仿真改善系统动态性能。苏海滨等^[4]在文献[3]的基础上提出模糊 PID 控制器在双轴系统上的应用, 可改善模糊控制和传统 PID 控制精度不高的问题。Al-Rousan 等^[5]设计出双轴跟踪伺服系统自适应模糊 PID 控制器, 并通过仿真验证其控制器的可行性和鲁棒性。本文的设计基于龙格-库塔法的自适应 PID 控制器, 利用 4 阶龙格-库塔法^[6]具有一步法、步长可更换、预测精度高等优点提出一种基于龙格-库塔法的 PID 控制算法, 将这种算法和最优梯度下降法结合, 实现加权系数的在线修改和在线优化, 仿真曲线表明该方法切实可行, 对大滞后系统具有很强的适应性和鲁棒性。

1 太阳光源双轴跟踪系统

目前国内外跟踪太阳轨迹的方式主要分为 2 种: 光电子跟踪和视日轨迹跟踪^[7]。其中, 视日轨迹跟踪方式按照装置的自由度多少可以分为 3 类, 即单轴式、双轴式、三轴式^[8]。对比来说单轴跟踪实现方法虽简单但精度低; 三轴跟踪较复杂, 且性价比低; 双轴跟踪不但结构紧凑, 且精度较高, 现已被普遍采用。

太阳光源双轴跟踪系统的基本功能是利用视日轨迹算法^[7]精确的获取太阳高度角和方位角, 使太阳电池板可准确地定位和跟踪太阳光源, 并通过双轴控制, 保证电池板快速平稳转动。图 1 为太阳光源双轴跟踪系统结构示意图。



a. 结构

收稿日期: 2017-07-03

通信作者: 李淑娟(1968—), 女, 博士、教授、博士生导师, 主要从事硬脆材料的加工机理及控制方面的研究。shujuanli@xaut.edu.cn

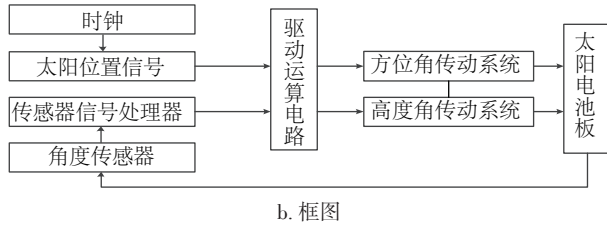


图1 太阳光源双轴跟踪系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of solar biaxial tracking system for solar light source

系统实时检测光伏阵列的位置和太阳光源的位置,将同一时刻的 2 个位置同时输入到驱动运算电路单元,输出电压信号驱动 2 部电机分别在水平面和铅垂面内带动调整太阳能电池板的表面,使太阳光保持垂直入射到光伏阵列太阳能电池板的表面上,实现准确快速跟踪太阳光源的目的^[9]。

高度角跟踪太阳能电池板俯仰运动的角度,方位角跟踪传动机构控制太阳能电池板旋转运动的角度。实现对太阳高度角和方位角的跟踪就可实现对太阳的完全跟踪。2 个机构在各自方向上工作时互不影响。对于跟踪系统的模型建立与识别就相当于对于 2 个方向上的直流电机建立模型与模型的识别。

2 方位角传动结构数学模型

在此次设计的太阳光源双轴跟踪装置的方位角和高度角的跟踪传动系统中应用的是直流电机传动。直流电机在近代工业中应用比较广泛,特别是在工业的电力拖动中是一种很重要的电机^[10]。直流电动机相比较于其他类型的电机具有良好的起动、制动性能,可用于大范围内平滑调速,在许多需要调速、快速正反转的电力拖动领域中均得到了广泛的应用^[11]。

由于控制方位角的直流电机为直流力矩电机(转速较低),其电枢等效电路图如图 2 所示。

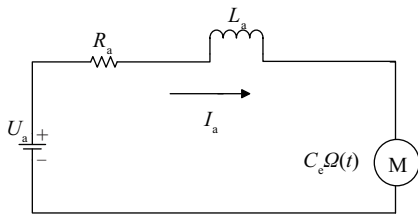


图2 直流电机电枢等效电路图

Fig. 2 DC motor armature equivalent circuit diagram

直流电机的电气方程和机械方程^[12]分别为:

$$L_a \frac{dI_a}{dt} = U_a - I_a R_a - C_e \Omega(t) \quad (1)$$

$$J_1 \frac{d\Omega(t)}{dt} = T - T_L \quad (2)$$

式中, R_a ——电枢内阻; L_a ——直流电动机电枢电感; U_a ——电枢额定电压; I_a ——电枢电流; $\Omega(t)$ ——电机空载角速度; C_e ——电机电势系数; T ——额定转矩; T_L ——负载转矩; J_1 ——整个电机质量折算到电动机运动轴上的总转动惯量与整个太阳能系统支架相对于电动机运动轴的转动惯量的总和。

转动惯量 J_1 为 $0.03 \text{ J} \cdot \text{s}^2$ 。对式(1)、式(2)进行拉氏变换,经整理后可得直流电机转速相对于输入电压的传递函数模型:

$$H(s) = \frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{1/C_e}{T_m T_a s^2 + T_m s + 1} \quad (3)$$

式中, T_m ——机械时间常数, $T_m = \frac{J R_a}{C_e C_r}$; T_a ——电气时间常数, $T_a = \frac{L_a}{R_a}$ 。表 1 所示为直流电机额定参数。

表1 方位角直流电机额定参数

Table1 Parameters of Azimuth DC motor

额定电压/V	额定电流/A	额定转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	额定输出功率/W
24	0.5	3	9.6

转矩系数:

$$C_T = \frac{M_c}{I_c} = 1 \text{ Nm/A} \quad (4)$$

转矩:

$$M_c = \frac{9.55 P_c}{n_c} = 0.509 \text{ Nm} \quad (5)$$

式中, P_c ——额定功率, W; n_c ——额定转速, r/min。

电机电势系数:

$$C_e = \frac{30(U_{aR} - I_{aR} R_a)}{\pi \cdot n_c} = 1.1332 \text{ V} \cdot \text{s/rad} \quad (6)$$

式中, U_{aR} ——电机额定电压, V; I_{aR} ——电机额定电流, A。

电枢内阻:

$$R_a \approx (0.5 \sim 0.6) \times (U_{aR} I_{aR} - P_c) \frac{1}{I_{aR}^2} (\Omega) = 5.28 \Omega \quad (7)$$

直流电机极对数为 1。直流电动机电枢电感为:

$$L_a = \frac{3.82 U_{aR}}{p \cdot n_c I_{aR}} = 1.019 \text{ H} \quad (8)$$

太阳能电池板的长×宽×厚为 $700 \text{ mm} \times 540 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, 质量为 4 kg , 则其绕着竖直轴的转动惯量 J_a 为 $0.43053 \text{ J} \cdot \text{s}^2$, 减速器的转动惯量 J_d 为 $0.0433 \text{ J} \cdot \text{s}^2$, 减速器的传动比为 $62:1$, 则系统支架相对于电机转动轴的转动惯量为:

$$J_2 = J_a + J_d = (0.43053 + 0.0433) \times \left(\frac{1}{62}\right)^2 = 0.0001234 \text{ J} \cdot \text{s}^2 \quad (9)$$

则总的转动惯量为：

$$J = J_1 + J_2 = 0.0301234 \text{ J} \cdot \text{s}^2 \quad (10)$$

最终得到方位角传动机构的传递函数模型为：

$$H(s) = \frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{0.8825}{0.0271s^2 + 0.1404s + 1} \quad (11)$$

3 基于龙格-库塔预测模型的自适应 PID 控制

PID 控制器因结构简单、易实现,且有较强的鲁棒性被广泛应用于各种工业过程控制中^[13]。传统 PID 控制的最大优点是控制机理完全独立于对象的数学模型,只用控制目标与被控对象实际行为之间误差来产生消除此误差的控制策略,这也是 PID 控制技术的精髓^[14]。而随着科技的进步和对控制品质要求的提高,经典 PID 控制技术的缺陷越来越凸现出来,如信号处理太简单不适合大时滞系统的控制^[15],不能使目标值的跟踪特性和干扰抑制特性同时最优^[16]等。

本文基于 PID 控制的缺陷问题和太阳光源双轴跟踪系统的方位角传动机构特性,设计出基于龙格-库塔法的自适应 PID 控制器。利用 4 阶龙格-库塔法具有步长可更换、预测精度高的优点,提出一种基于龙格-库塔法的 PID 控制算法,将这种算法和最优梯度下降法结合,实现加权系数的在线修改和在线优化。

设被控对象的状态方程为：

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (12)$$

式中, u ——输入函数; $A \sim D$ ——系数矩阵。

为实现“事先调节”,减少超调量和加速调节的过程,消除对系统控制品质的影响较大的因素——时滞,将龙格-库塔预测与自适应 PID 控制结合起来,利用 k 时刻的值 $x(k)$,对后面 d 步的值 $x(k+d)$ 进行预测,得到系统的输出 $y(k)$ 的预测值 $y(k+d)$,将期望设定值与以此预测值作为反馈的信号进行比较得出偏差,此偏差被作为自适应 PID 控制的输入,依照 PID 控制律来设定控制器的输出,这样就使控制器提前接收到被延迟了的被控量,可让控制器提前做出反应^[17]。

龙格-库塔法预测被控对象为：

$$\hat{x}(k+d) = x(k) + (d/6)(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (13)$$

式中, $\begin{cases} k_1 = Ax(k) + Bu(k) \\ k_2 = A[x(k) + dk_1/2] + Bu(k) \\ k_3 = A[x(k) + dk_2/2] + Bu(k) \\ k_4 = A[x(k) + dk_3] + Bu(k) \end{cases}$

$u(k)$ ——系统 k 时刻的输入。

则 $k+d$ 时刻系统的输出为：

$$\hat{y}(k+d) = C\hat{x}(k+d) + Du(k) \quad (14)$$

PID 离散控制算式为：

$$u(k) = k_p e(k+d) + k_i T_s \sum_{j=0}^{k+d} e(j) + k_d \frac{e(k+d) - e(k+d-1)}{T} \quad (15)$$

式中, T ——采样周期; k ——采样序号; k_p 、 k_i 、 k_d ——比例、积分、微分系数。

设 $e(k+d)$ 为设定值与测量值之间的偏差：

$$e(k+d) = r(k+d) - \hat{y}(k+d) \quad (16)$$

式中, $r(k+d)$ ——系统输入。

由 $u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$ 可以很容易得到其增量算式：

$$\Delta u(k) = k_p [e(k+d) - e(k+d-1)] + k_i e(k+d) + k_d [e(k+d) - 2e(k+d-1) + e(k+d-2)] \quad (17)$$

再将 $\Delta u(k)$ 表示为：

$$\Delta u(k) = \sum_{i=1}^3 \omega_i(k) x_i(k) \quad (18)$$

式中,

$$\begin{cases} x_1(k) = e(k+d) \\ x_2(k) = e(k+d) - e(k+d-1) \\ x_3(k) = e(k+d) - 2e(k+d-1) + e(k+d-2) \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \omega_1(k) &= k_i, \omega_2(k) = k_p, \omega_3(k) \\ &= k_d, \omega_i(k+1) = \omega_i(k) + \Delta \omega_i(k+1) \end{aligned}$$

ω_i ——加权系数。

按梯度优化来设计自适应的 PID 控制算法,设系统的性能指标 $J(k)$ 为：

$$J(k) = \frac{1}{2} [r(k+d) - \hat{y}(k+d)]^2 = \frac{1}{2} e^2(k+d) \quad (19)$$

令加权系数 ω_i 的调整沿着 $J(k)$ 对 ω_i 的负梯度方向进行搜索有：

$$\Delta \omega_i(k) = -\eta_i \frac{\partial J(k)}{\partial \omega_i(k)} = \eta_i e(k+d) \frac{\partial \hat{y}(k+d)}{\partial \omega_i(k)} \quad (20)$$

式中, η_1 、 η_2 、 η_3 ——积分、比例、微分项的学习速度。

则：

$$\begin{aligned} \Delta \omega_i(k) &= \eta_i e(k+d) \frac{\partial \hat{y}(k+d)}{\partial \omega_i(k)} \\ &= \eta_i e(k+d) \times \left[\frac{Cd}{6} \left(\frac{d^3}{4} A^3 B + d^2 A^2 B + 3dAB + 6B \right) + D \right] \frac{\partial u(k)}{\partial \omega_i(k)} \\ &= \eta_i e(k+d) \left[\frac{Cd}{6} \left(\frac{d^3}{4} A^3 B + d^2 A^2 B + 3dAB + 6B \right) + D \right] x_i(k) \end{aligned} \quad (21)$$

当系统是确定,即 A 、 B 、 C 、 D 及 d 确定时,
 $\left[\frac{Cd}{6} \left(\frac{d^3}{4} A^3 B + d^2 A^2 B + 3dAB + 6B \right) + D \right]$ 是常数,并将此过程变量记为 λ 。

则:

$$\Delta\omega_i(k) = \eta_i \lambda e(k+d)x_i(k), \quad i=1,2,3 \quad (22)$$

必须考虑到在不同时刻 3 个参数相互之间的互联关系和各自的作用来进行 PID 参数的适应。控制器参数的自整定原则可以根据不同的误差和误差变化率归纳如下:

1) 误差较大的时候,应该增大 k_p 和减小 k_d 参数,使系统具有较好的快速跟踪性能;同时应加以限制积分作用,并减小 k_i 的值避免系统响应出现较大的超调。

2) 误差处于中等大小的时候,应该减少 k_p 的值,使系统响应有较小的超调量,同时调整 k_d 和 k_i 的大小适中,保证系统的响应速度较快。

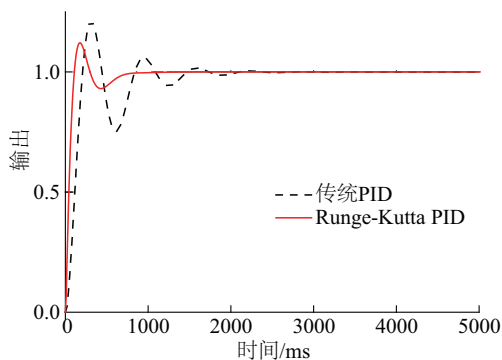
3) 误差较小的时候,应该适当调大 k_p 和 k_i ,保证系统具有较好的稳态特性^[18]。考虑系统的抗干扰性能,同时为避免系统在设定值附近出现振荡,当误差的变化率较小时,适当增大 k_d ;当误差的变化率较大时,适当减少 k_d 。

4 仿真结果分析

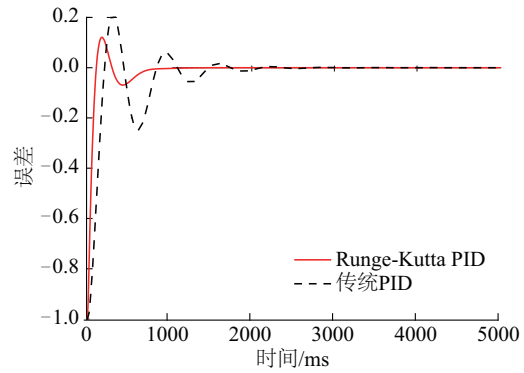
方位角跟踪传动机构的传递函数为:

$$H(s) = \frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{0.8825}{0.0271s^2 + 0.1404s + 1} \quad (23)$$

搭建龙格-库塔(Runge-Kutta)自适应 PID 和传统 PID 仿真平台,对仿真模型施加阶跃信号,取采样周期 $T=0.01$ s,采样时间 5 s。调节传统 PID 控制的参数为: $k_p=3, k_i=0.1, k_d=10$, Runge-Kutta 自适应 PID 的参数为 $k_p=5, k_i=20, k_d=0.4$ 。其响应曲线、误差曲线分别如图 3a、图 3b 所示。



a. 响应曲线



b. 误差曲线

图3 自适应龙格-库塔和传统PID控制方案的系统响应&误差分析图

Fig. 3 System response & error analysis of adaptive Runge-Kutta and traditional PID control scheme

如图 3 对比了 2 种控制方法的仿真结果,可看出基于龙格-库塔自适应 PID 控制响应的速度较传统 PID 控制要快,且超调量小,稳定速度快。综上所述,本文太阳能双轴跟踪系统中的基于龙格-库塔自适应 PID 控制器具有响应时间短、超调量小等特点,而且系统也具有更好的适应性和鲁棒性。表 2 所示为 2 种控制方案的效果比较。

表 2 2 种控制方案效果比较

Table 2 Effect comparison between PID and adaptive Runge-Kutta PID controller

指标	PID 控制	Runge-Kutta PID
峰值	1.196	1.109
超调	0.196	0.109
调节时间/s (偏差 2%)	0.185	0.790
稳态误差 (绝对误差)	0	0
稳态误差 (相对误差)	0	0

5 结 论

1) 基于龙格-库塔法的自适应 PID 控制方法能弥补传统 PID 控制不适合大时滞系统的缺点,减少超调量,加速调节过程。

2) 计算太阳光源双轴跟踪系统方位角传动机构的传递函数,并分别施加基于龙格-库塔法自适应 PID 控制算法和传统 PID 算法进行仿真。仿真结果验证了前者的响应时间更短,有效的解决方位角传动机构中的时间滞后问题。

3) 本文提出的方法能够在太阳光源双轴跟踪系统上进行应用,且控制精确,响应时间快,具有较高的鲁棒

性和一定的普适性。

[参考文献]

- [1] 张晓霞, 侯竞伟, 殷攀攀, 等. 太阳能发电系统现状及发展趋势[J]. 机电产品开发与创新, 2007, 20(5): 14-16.
ZHANG X X, HOU J W, YIN P P, et al. The condition and development trend of the solar generator system[J]. Development & innovation of machinery & electrical products, 2007, 20(5): 14-16.
- [2] MOUSAZADEH H, KEYHANI A, JAVADI A, et al. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output[J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2009, 13(8): 1800-1818.
- [3] MECKE R, HARZ H, 魏厚震, 等. 太阳光源跟踪伺服系统建模与仿真分析[J]. 电力电子, 2011(1): 20-23.
MECKE R, HARZ H, WEI H Z, et al. Modeling and simulation of the sun track servo-system[J]. Application devices, 2011(1): 20-23.
- [4] 苏海滨, 申伟, 张迪, 等. 基于模糊PID控制的太阳能电池板跟踪系统[J]. 自动化技术与应用, 2009, 28(6): 10-1.
SU H B, SHEN W, ZHANG D, et al. Fuzzy PID control of a solar tracking system[J]. Industry control and applications, 2009, 28(6): 10-12.
- [5] AL-ROUSAN N, AL-ROUSAN M, SHAREIAH A. A fuzzy logic model of a tracking system for solar panels in northern Jordan based on experimental data [C]// 2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Nagasaki, Japan, 2012.
- [6] 曾金平. 微分方程数值解[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
ZENG J P. Numerical solutions of differential equations [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [7] 郑小年, 黄巧燕. 太阳跟踪方法及应用[J]. 电力与能源, 2003, 24(4): 149-51.
ZHENG X N, HUANG Q Y, Study on sun-tracking methods and application [J]. Energy technology, 2003, 24(4): 149-51.
- [8] 陈仕国, 陈学永, 林福财, 等. 视日轨迹太阳跟踪装置控制系统设计[J]. 福建农林大学学报(自然版), 2014, 43(2): 215-219.
CHEN S G, CHEN X Y, LIN F C, et al. Design of solar tracking control system[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (natural science edition), 2014, 43(2): 215-219.
- [9] SEFA İ, DEMIRTAS M, ÇOLAK İ. Application of one-axis sun tracking system [J]. Energy conversion & management, 2009, 50(11): 2709-2718.
- [10] 殷云华, 郑宾, 郑浩鑫. 一种基于Matlab的无刷直流电机控制系统建模仿真方法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(2): 293-298.
YIN Y H, ZHENG B, ZHENG H X. A method for modeling and simulation of brushless DC motor control system based on Matlab [J]. Journal of system simulation, 2008, 20(2): 293-298.
- [11] 黄桂梅, 刘永立, 邵联合. 基于单片机的直流电机调速系统设计与实践[J]. 电气自动化, 2016, 38(1): 1-2.
HUANG G M, LIU Y L, SHAO L H. Design and practice of a DC motor speed control system based on the single-chip microcomputer[J]. Electrical automation, 2016, 38(1): 1-2.
- [12] 周儒勋, 张泽龙, 亓迎川. 直流电机模型参数的直接辨识[J]. 计算机仿真, 2006, 23(6): 31-33.
ZHOU R X, ZHANG Z L, QI Y C. Direct identification of DC electromotor model parameter [J]. Computer simulation, 2006, 23(6): 31-33.
- [13] 何芝强. PID控制器参数整定方法及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
HE Z Q. Parameters tuning of PID controller and its application [J]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [14] 王积伟. 现代控制理论与工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
WANG J W. Modern control theory and engineering [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [15] 晋成龙, 徐群. 基于单纯形法参数寻优的预测PI与经典PID控制的仿真对比[J]. 科技信息(学术版), 2007(7): 40-42.
JIN C L, XU Q. Simulation comparison of predictive PI and classical PID control based on simplex method parameter optimization [J]. Science and technology information (An academic edition), 2007(7): 40-42.
- [16] 王蕾, 宋文忠. PID控制[J]. 自动化仪表, 2004, 25(4): 1-6.
WANG L, SONG W Z. PID control [J]. Process automation instrumentation, 2004, 25(4): 1-6.
- [17] 王江荣. 基于龙格-库塔法的自适应PID控制算法及其应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 2012, (1): 3-5.
WANG J R. Adaptive PID control algorithm and its

- application based on Runge-Kutta algorithm[J].
Industrial instrumentation & automation, 2012, (1): 3-5.
- [18] 刘金琨. 先进PID控制MATLAB仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- LIU J K. Advanced PID control MATLAB simulation
[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2004.

A SOLAR DOUBLE-AXIS FOLLOWER SYSTEM BASED ON RUNGE-KUTTA METHODS ADAPTIVE PID CONTROL

Gu Zhonghao, Li Shujuan, Wang Chao, Yang Xuan, Bu Wenhao, Li Yan

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The working principle of the dual-axis tracking system of the solar light source is discussed. Based on the azimuth-based transmission mechanism of the DC motor, the mathematical model of the azimuth angle transmission mechanism is established. The adaptive PID control based on the Runge-Kutta method is proposed and simulated in Matlab. Compared with the traditional PID control and the adaptive PID control based on the Runge-Kutta method, the simulation results show that the adaptive PID control system based on the Runge-Kutta method is faster and more stable, with strong robustness which is suitable for use in the control model of the azimuth drive mechanism.

Keywords: solar tracking system; mathematical model; computer simulation; Runge-Kutta methods; adaptive PID control