

基于自抗扰算法的“动中通”系统控制策略

陆叶, 邓桐彬, 蒋忠伟, 陶慧敏

(中国电子科技集团公司第二十八研究所, 南京 210001)

摘要:“动中通”(SOTM)伺服控制系统通常采用三闭环PID控制策略进行控制器的设计;然而,由于系统扰动和系统时变性参数的存在,传统PID算法难以保证“动中通”系统稳定、可靠地工作;针对传统控制策略的弊端,建立了“动中通”系统数学模型,并提出了一种基于自抗扰(ADRC)算法的双闭环控制策略;仿真实验表明,基于ADRC的双闭环控制策略不仅具有更快的响应速度和更高的控制精度,还有更强的鲁棒性,能有效地弱化系统扰动的影响,满足“动中通”系统的功能需求。

关键词:动中通;自抗扰;伺服控制系统

An Active Disturbance Rejection Control Strategy for SOTM Servo Control System

Lu Ye, Deng Tongbin, Jiang Zhongwei, Tao Huimin

(28th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210001, China)

Abstract: Satcom-on-the-Move (SOTM) servo control system is usually designed as a three closed-loop system with PID algorithm. However, traditional PID algorithm can hardly meet the requirements of SOTM servo control system because of the influences from the time-varying property of the parameters and the disturbance. In this paper, a mathematical model of SOTM system is depicted and a dual closed-loop system with active disturbance rejection control (ADRC) algorithm is proposed. Compared with the traditional PID algorithm, the proposed algorithm has many advantages, such as faster response and higher precision, robustness to the influence of the load disturbance, etc.. The simulating results have verified these advantages.

Keywords: SOTM; ADRC; servo control system

0 引言

“动中通”(SOTM)是一种在运动状态下利用通讯卫星传递话音、数据、图像及其他信息的重要通信技术,由于其抗干扰能力强,保密性能好,通信距离远的特点,“动中通”系统在军事指控系统中得到了广泛应用。为了能在运动过程中保持精准的对星,“动中通”系统要求建立一个响应速度快、控制精度高、鲁棒性好的伺服控制系统,目前“动中通”系统的控制主要采用PID控制、超前-滞后控制等传统控制算法^[1]。但是,考虑到在“动中通”系统对星过程中参数时变性的影响,传统的控制算法很难满足“动中通”系统的要求^[2]。另一方面,由于军事作业的特殊性,要求“动中通”系统能在各种复杂恶劣的路况下正常工作,对系统鲁棒性提出了极高的要求,针对传统控制算法的弊端,本文提出了一种基于ADRC控制算法的双闭环控制策略,并在MATLAB/Simulink环境下进行仿真实验。仿真结果表明,本文提出的控制策略能对“动中通”系统实现精确控制,不仅具有快速的响应速度和较高的控制精度,还具有较强的鲁棒性,能有效地弱化外部扰动和时变性参数对系统的负面影响。

1 系统分析与建模

基于仿真实验的要求,本文在实验室环境下搭建了“动中通”系统,其机械结构如图1所示。

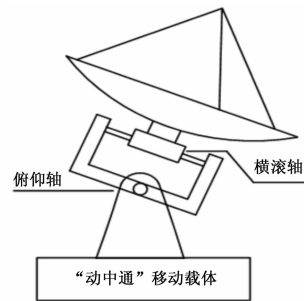


图1 “动中通”系统机械结构

“动中通”系统主要由卫星天线和二自由度转台组成。转台由俯仰轴和横滚轴两个轴系构成,两轴系彼此正交,无耦合关系,可在电机驱动下独立工作。卫星天线固定于转台上,通过调整转台俯仰角和横滚角,即可实现“动中通”系统的姿态控制,以达到对星目的^[3-4],其主要技术参数如表1所示。

表1 “动中通”转台主要参数

设备	参数	值	单位
电机	电枢电阻	0.62	Ω
	电磁转矩常数	3.33×10^{-2}	Nm/A
	电势常数	3.33×10^{-2}	V · S/rad
	转动惯量	5.2×10^{-5}	kg · m ²
	电磁时间常数	2.08×10^{-4}	s
	机电时间常数	2.90×10^{-2}	s
转动平台	质量	10	kg
	半径	0.06	m

收稿日期:2016-09-03; 修回日期:2016-11-02。

作者简介:陆叶(1989-),男,江苏南通人,助理工程师,主要从事系统集成方向的研究。

系统硬件电路总体结构框图如图 2 所示。

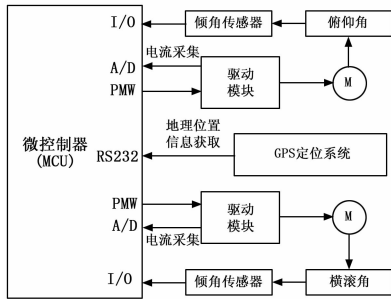


图 2 系统硬件电路总体结构框图

其中系统以微处理器作为控制器的核心，以 FAULHABER 公司的 3863 碳刷直流电机为执行元件，另外配有 GPS 定位系统、倾角传感器用于采集系统当前位置信息和姿态信息。其中控制器通过 RS232 与 GPS 定位系统相连，获取当前地理位置信息。“动中通”系统的姿态信息由倾角传感器测得并送至控制器。控制器根据测得信息分析计算，并发送 PWM 指令驱动电机，通过姿态校正的方式跟踪卫星，实现对“动中通”系统的闭环控制。

为简化研究对象，“动中通”系统可解耦为两个单自由度（俯仰、横滚）转台，在对单自由度“动中通”系统各环节进行线性化分析的基础上，本文建立了“动中通”系统数学模型。考虑到“动中通”系统由转台负载和电机组成，负载与电机之间可视为纯刚性链接，两者之间阻尼效应和弹性效应可以忽略^[5]。因此，单自由度“动中通”系统可用图 3 表示^[6]。

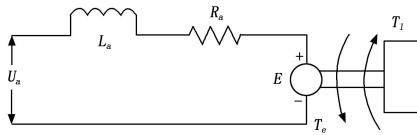


图 3 “动中通”系统原理图

图中参数如下所示：

U_a 为电枢电压； L_a 为电枢电感； R_a 为电枢绕组； E 为反电动势； T_e 为电磁转矩； T_l 为负载转矩。

根据图 3 分析可得，系统平衡方程如下：

电机动力学平衡方程：

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

其中： J 为转动惯量； ω 为转动角速度。

电机电枢电压平衡方程：

$$U_a = E + I_a R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} \quad (2)$$

式 (2) 经 Laplace 变换可得：

$$\frac{I_a(s)}{U_a(s) - E(s)} = \frac{1/R_a}{L_a s + 1} = \frac{1/R_a}{\tau_1 s + 1} \quad (3)$$

其中： τ_1 为电磁时间常数。

根据电机电磁转矩和电枢反电势可表示为：

$$\begin{cases} T_e = C_m I_a \\ E = C_e \omega \end{cases} \quad (4)$$

其中： C_m 为电磁转矩常数； C_e 为电势常数。

式 (4) 代入式 (1) 可得：

$$\begin{cases} C_m I_a - T_l = \frac{J}{C_e} \frac{dE}{dt} \\ T_l = C_m I_{dl} \end{cases} \quad (5)$$

I_{dl} 为等效负载电流。

经 Laplace 变换后可得：

$$\frac{E(s)}{I_a(s) - I_{dl}(s)} = \frac{R_a}{J R_a s / C_e C_m} = \frac{R_a}{\tau_m s} \quad (6)$$

其中： τ_m 为机电时间常数。

根据以上分析，“动中通”系统传递函数为式 (3)、式 (6)，可简化为一个二阶模型，其系统框图如图 4 所示。

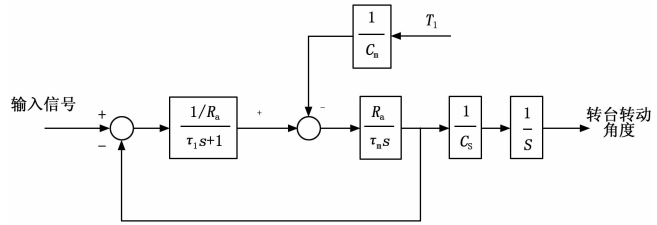


图 4 “动中通”系统框图

根据第 1 章分析可知，在“动中通”工作过程中，负载转矩随卫星天线的转动而改变，考虑到参数时变性的影响，传统 PID 算法难以满足系统工作的稳定性和可靠性。在第 2 章中，本文研究了自抗扰 (ADRC) 控制算法，并将其应用到“动中通”伺服控制系统中。

2 控制器设计

自抗扰 (ADRC) 控制是一种不依赖于被控系统精确数学模型的非线性控制器，它将时变性参数的影响和系统外部扰动作为控制系统的总扰动^[7]，并进行扰动观测和扰动补偿。相比于传统 PID 控制器，本文研究的自抗扰控制器具有更高的控制精度和更强的鲁棒性^[8-9]，其基本结构如图 5 所示。

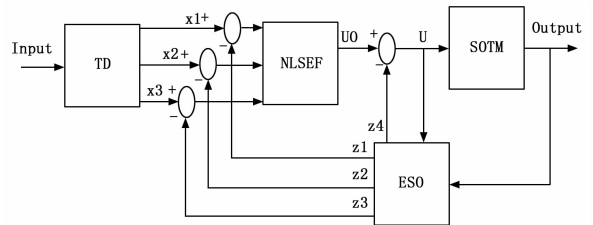


图 5 ADRC 控制器基本结构

2.1 自抗扰理论

如图 5 所示，自抗扰控制器可分为 3 个模块，跟踪微分器 (TD)，扩展状态观测器 (ESO)，非线性控制率 (NLSEF)^[10]。

(1) 跟踪微分器 (TD)。

跟踪微分器用于跟踪输入信号并预测输入信号的变化趋势，可有效地减小系统初始误差，若参数设计合理，可使系统无超调地进入稳态，其数学表达式为：

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + h \cdot x_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + h \cdot fst[x_1(k), x_2(k), \nu(k), r, h] \\ x_3(k+1) = fst[x_1(k), x_2(k), \nu(k), r, h] \end{cases} \quad (7)$$

其中: h 为积分步长; r 为上升时间常数; fst 为非线性函数。

(2) 扩展状态观测器 (ESO)。

扩展状态观测器是自抗扰控制器的核心部分, 可用于估计系统状态、模型和外部扰动, 从而提高控制系统的精确性和鲁棒性, 其数学表达式为:

$$\begin{cases} e(k) = z_1(k) - y(k) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h \cdot [z_2(k) - \beta_{11} \cdot e(k)] \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h \cdot \{z_3(k) - \beta_{12} \cdot fal[e(k), a_1, \delta]\} \\ z_3(k+1) = z_3(k) + h \cdot \{z_4(k) - \beta_{13} \cdot fal[e(k), a_2, \delta]\} + b_0 \cdot u(k) \\ z_4(k+1) = z_4(k) - h \cdot \{\beta_{14} \cdot fal[e(k), a_3, \delta]\} \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$fal(x, y, z) = \begin{cases} |x| \cdot sign(x), & |x| > z \\ \frac{x}{z^{1-y}}, & |x| \leq z \end{cases}$$

Z_i 为扩展状态观测器输出; y 为系统输出; β_{i1} 为观测器系数; u 为系统控制输入; b_0 为系统控制系数。

(3) 非线性控制率 (NLSEF)。

非线性控制率针对扩展状态观测器反馈的被控对象状态给出控制信号针对外部扰动的实时作用量而给以补偿, 其数学表达式为:

$$\begin{cases} e_1(k+1) = x_1(k+1) - z_1(k+1) \\ e_2(k+1) = x_2(k+1) - z_2(k+1) \\ e_3(k+1) = x_3(k+1) - z_3(k+1) \\ u_0(k+1) = \sum_{i=1}^3 \beta_{2i} \cdot fal[e_i(k+1), a_i, \delta] \\ u(k+1) = u_0(k+1) - z_4(k+1)/b_0 \end{cases} \quad (9)$$

其中: e_i 为误差输入; β_{2i} 为状态反馈系数; u_0 为控制器输出。

2.2 系统结构

“动中通”伺服控制系统通常采用三闭环 PID 控制, 由于负载时变性的影响, PID 参数需要实时在线调整, 不仅参数配置十分麻烦, 而且很难保证系统的稳定性和可靠性^[11-12]。针对三闭环 PID 控制策略的弊端, 本文设计了一种基于自抗扰算法的双闭环控制策略, 其系统框图如图 6。

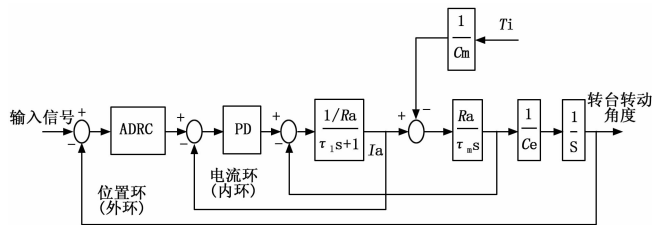


图 6 控制系统系统结构图

如图 6 所示, 控制系统由电流环和位置环组成双闭环控制系统, 内环 (电流环) 用于提高系统响应速度, 采用 PID 控制器设计; 外环 (位置环) 采用 ADRC 控制器设计, 用于“动中通”系统的姿态控制, 并提高系统的鲁棒性, 弱化时变性参数和外部扰动对系统的影响。仿真结果表明, 相比于传统 PID 三闭环控制策略, 基于自抗扰控制算法的双闭环控制策略

不仅简化了系统结构, 降低了参数配置的复杂度, 而且极大地提高了系统控制精度和鲁棒性。

3 仿真实验

为验证 ADRC 双闭环控制策略的有效性, 本文在 MATLAB/Simulink 环境下进行了仿真试验。

3.1 阶跃响应实验

给“动中通”系统输入 30° 或 -30° 的阶跃控制信号, 观察在两种不同控制策略下的系统响应曲线。

如图 7 所示, 在 ADRC 双闭环控制策略的控制下, 系统超调量远远小于传统 PID 控制策略, 同时, 系统阶跃响应上升时间约为 0.2 秒, 而在 PID 控制策略下系统阶跃响应时间为 2 秒。因而, 对于“动中通”系统, 本文提出的 ADRC 双闭环控制策略的控制性能明显优于传统 PID 控制策略。

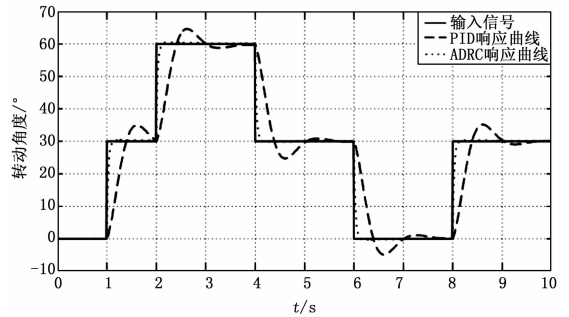


图 7 阶跃响应实验

3.2 抗扰动仿真实验

考虑到“动中通”系统多工作在恶劣的环境下, 因此鲁棒性是检验其控制系统性能的重要指标。在 MATLAB/Simulink 环境下控制系统转轴转动 30° , 给系统施加在 $0 \sim 1$ Nm 范围内变化的扰动转矩, 两种不同控制策略下的系统响应曲线如图 8 所示。

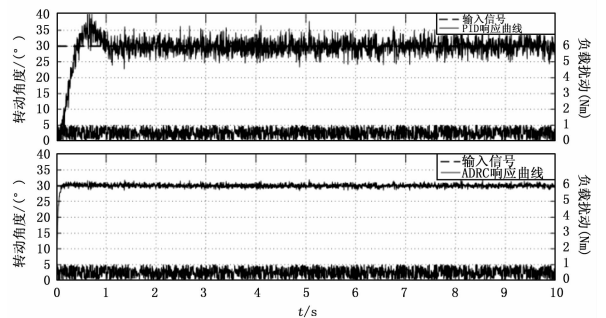


图 8 抗扰动仿真实验

如图 8 所示, 采用 PID 控制策略的动中通系统受外部扰动影响严重, 其转轴最大角度误差高达 5° 。相比于传统 PID 控制策略, 本文提出的 ADRC 双闭环控制策略几乎不受外部扰动影响, 具有更强的鲁棒性。

4 结论

仿真实验结果证明了本文提出的 ADRC 控制策略具有优秀的控制性能和极强的鲁棒性。事实上, ADRC 控制策略不仅适用于单自由度“动中通”系统, 还能应用于各种复杂的多阶

系统。仿真试验表明，相比于传统的 PID 控制策略，ADRC 控制策略具有以下特性：

(1) 减小了系统超调量，提高了系统响应速度。相比于 PID 控制策略，ADRC 控制策略表现出更好的静、动态特性。

(2) 通过扩展状态观测器实时观测时变性参数和外部环境扰动的负面影响，并通过控制算法予以补偿，极大地提高了系统的鲁棒性。

参考文献：

[1] 田 华. 船载“动中通”定向天线控制系统的研究与开发 [D]. 西安：西安电子科技大学，2008.

[2] James Debruin. Establishing and Maintaining High-bandwidth Satellite Links During Vehicle Motion [J]. IEEE control magazine, 2008, 28 (1): 93-101.

[3] Xu H, Yao M, Shen X. Study on basic principles of tri-axial stabilization for flat SOTM on vehicle [J]. System Simulation and Scientific Computing . 2008, 47 (2): 1104-1109.

[4] 杜江鹏. 基于三轴自助跟踪平台的研究与实现 [D]. 南京：南京理工大学，2010.

(上接第 62 页)

系统温湿度阈值设置界面中，“TH”为温度上限，“TL”为温度下限，“HH”为湿度上限，“HL”为湿度下限，管理员可通过“+”，“-”按钮进行温湿度阈值设置，确定后按下“ok”按钮即可。若系统温湿度均没超出阈值，显示屏第二行显示“Good enviroment”，经测试系统阈值设置功能及显示界面正常。系统采集的室内温湿度超过阈值时，显示屏的第二行显示“It’s very hot!”，蜂鸣器报警，且系统会发送短信到管理员手机显示当前温湿度及继电器情况。系统发送短信给管理员后，管理员可根据温湿度情况，以系统回复短信的方式进行远程调节室内温湿度。温度超过阈值后系统发送短信给管理员。

继电器开关控制模块中，“JW”为降温继电器开关，“SW”为升温继电器开关，“QS”为去湿继电器开关，“JS”为加湿继电器开关。管理员通过按下“+”按钮进行开关继电器操作，继电器开启，“JW”从“OFF”变为“OK”，风扇开启，经测试继电器开关控制系统及显示界面正常。

系统收到管理员短信后会执行相关指令，实现远程控制，例如温度太高，系统接受短信后，降温风扇开启，直至温湿度达到阈值范围内，继电器会自动关闭。平时管理员也可发短信“kan”给系统，系统会自动回复当前温湿度情况给管理员。

系统经测试，无线监控各功能正常，只要有 GSM 信号的地方，管理员均能通过 GSM 无线远程监控系统。系统能正常采集温湿度数据，温度测量精度为±1℃，温湿度情况液晶显示界面正常；温湿度阈值设置及控制、继电器开关工作正常，短信发送、接收及系统收信息后工作正常。

6 结束语

系统是以 STC89C52 单片机为核心的无线温湿度监控系统，管理员可远程即时查看室内温湿度情况，当室内温度或湿

[5] 钱 健, 王维亚. 无刷直流电机模型的建立及控制系统仿真研究 [J]. 广西大学学报(自然科学版), 1995, 20 (1): 73-77.

[6] Yu X H, Man Z H. Fast terminal sliding mode control design for Nonlinear Dynamical Systems [J]. IEEE transaction on Circuits and Systems: Fundamental Theory and Applications , 2002, 49 (2): 262-264.

[7] 韩京清. 自抗扰控制技术：估计补偿不确定因素的控制技术 [M]. 北京：国防工业出版社，2008.

[8] 韩京清. 非线性状态误差反馈控制律——NLSEF [J]. 控制与决策, 1995 (3).

[9] 孟凡东. 自抗扰控制器的设计与应用研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2009.

[10] Hikert J M. Inertially Stabilized Platform Technology [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2008, 28 (1): 26-46.

[11] Lure A I, Postnikov V N. On the theory of stability of control systems [J]. Applied mathematics and mechanics, 2005, 8 (3).

[12] Han Jingqing. From PID to Active Disturbance Rejection Control [J]. Industrial Electronics, 2009, 56 (3): 900-906.

度超过系统设置的阈值时，系统自动启动报警，且系统自动发短信给管理员报告当前室内的温湿度情况。管理员可根据具体情况通过发短信指令给系统的方式远程控制系统，使得系统进行加温，降温，加湿，去湿等操作，直到室内温湿度重新回归正常，系统会自动停止报警，并且会自动终止管理员的操作指令。系统具有体积小、性能稳定、灵活方便等优点，可广泛地应用于在智能家居、农作物管理、仓储等领域。

参考文献：

[1] 薛 玲, 孙 曼, 张志会, 等. 基于单片机 STC89C52 的温湿度控制仪 [J]. 化工自动化及仪表, 2010, 37 (7): 66-69.

[2] 申忠如, 张 倩. 单片微型计算机原理与接口技术 [M]. 西安：西安交通大学出版社，2013.

[3] 程 军. 传感器与实用检测技术 [M]. 西安：西安电子科技大学出版社，2008.

[4] 谢自美. 电子线路设计·实验·测试(第三版) [M]. 武汉：华中科技大学出版社，2010.

[5] 王明新. 基于 SIM900A 的 GSM 远程监控系统设计 [J]. 网络通讯及安全, 2014 (15): 26-43.

[6] 熊志金. 基于无线传感器网络的列车货物安全监测系统 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (8): 2102-2104.

[7] 纪文义, 张继成, 郑 萍, 等. 基于无线网络的农田灌溉智能监测系统 [J]. 农机化研究, 2013, 35 (10): 171-173.

[8] 于志赣, 刘国平, 张旭斌. 液显 LCD1602 模块的应用 [J]. 计算机技术应用, 2009, (3): 35-46.

[9] 曾素琼, 黄华杰. 基于单片机和 LabVIEW 的无线火灾监测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 196 (1): 43-45.

[10] 宋德杰. AT24C02 在单片机中的应用 [J]. 单片机开发与应用, 2014, (4): 36-47.

[11] 于 眉. 电磁继电器知识及其应用 [J]. 名师导学, 2009, (4): 25-32.