

基于积分全局滑模控制的双闭环直流调速系统设计

杨代利, 刘 霞, 苏博妮, 鲁仕贵

(四川文理学院计算机学院, 四川 达州 635000)

摘要: 针对直流调速系统自身运行参数变化和外界干扰, 造成系统性能降低, 为了改善系统的跟随能力, 采用积分全局滑模控制策略设计直流调速控制系统; 为了消除到达阶段和缩短系统响应时间, 在切换函数设计中, 添加了一个收敛的指数时变因子项; 在控制律中, 将参考输入和系统误差状态变量纳入其中, 使系统能根据外部输入和自身状态快速响应。仿真结果表明, 所设计的积分全局滑模控制器对参数摄动和负载转矩干扰具有较强的鲁棒性, 且跟随响应快。

关键词: 直流调速; 积分; 全局滑模; 时变因子项; 鲁棒性

Abstract: According to operating parameter variations and external disturbances of DC speed control system, resulting in reducing the performance of the system, DC speed control system is designed using integral global sliding mode control strategy to improve the following ability of system. In order to eliminate the reaching phase and shorten the response time of system, a convergent exponential time-varying factor is added in the design of switching function. In the control law, the reference input and the system error state variables are included, which enable the system to quickly respond according to the external input and its state. The simulation results show that the designed integral global sliding mode controller has strong robustness for parameter perturbation and torque disturbance and its following response is faster.

Key words: DC speed control; integral; global sliding mode; time-varying factor; robustness

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)05-0036-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.05.008

0 引 言

直流电动机是将电能转换为机械能的设备, 直流电动机的调速性能较好, 适用于高精度的伺服运动控制, 被广泛应用于电力拖动系统和控制系统中^[1]。为了使直流电动机调速系统达到较好的静、动态性能, 一般采用转速和电流反馈的双闭环控制方式。其转速控制环常采用积分比例控制; 但是, 如要求直流调速控制系统具有较快的跟踪能力和无稳态误差, 且系统对参数摄动和外部扰动具有较强的抗干扰性, 则传统的 PI 控制就很难达到理想效果。因其滑模控制结构简单, 对自身运行导致参数摄动的不敏感性, 对外界负载转矩干扰的鲁棒性以及响应迅速, 而备受关注。且全局滑模消除了到达阶段, 使其响应更加迅捷^[2]。文献[3]在双闭环直流调速系统设计中, 将改进后的指数趋近率用于滑模控制律中, 有效地削弱了系统抖振, 提高了系统的跟随能力和对扰动的鲁棒性。文献[4]将积分滑模面应用

到永磁同步电动机控制器设计中。文献[5]设计了一种基于全程滑动模态的控制律, 且在控制律中加入变因子项, 改善了系统的性能, 消除了到达阶段。

然而, 滑模控制本身存在的不连续性和开关特性, 往往会忽略一些高频部分, 进行近似处理以便于建模; 但是, 正是由于这种忽略的处理, 当抖振过大会激发这种高频部分, 导致系统往往不能正常运行, 所以, 消除或减弱滑模控制的颤抖现象, 在要求较高的调速系统中, 起着非常重要的作用。采用连续化的函数代替继电特性的符号函数并选择适当的参数, 可以有效抑制抖动, 从而保证系统抖振在合理的范围。

为了改善直流调速系统的转速跟踪能力, 在常规切换函数的基础上, 将收敛的指数时变因子项引入切换函数中^[7-8]; 同时, 在控制律的设计中, 考虑参考输入的作用, 且将系统状态误差量添加入切换控制项中, 提高了收敛速度。仿真表明, 所设计控制器能有效地抑制参数和负载扰动带来的影响, 提高了控制系统动态性能, 并具有较强的鲁棒性。

1 转速积分全局滑模控制器设计

1.1 直流调速系统数学模型

直流电动机是一个二阶系统,以转速 ω 和电枢电流 i 作为状态变量,电枢电压 u_d 作为控制输入^[6],则系统的状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{k_e}{L} \\ \frac{k_m}{J} & -\frac{k_f}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_d}{L} \\ -\frac{T_L}{J} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u_d 为直流电动机电枢电压; i 为直流电动机电枢电流; R 为电枢电阻; L 为电枢电感; ω 为转子机械角速度; J 为折算到电机轴上的总转动惯量; k_m 为转矩系数; k_e 为反电动势系数; k_f 为粘滞摩擦; T_L 为折算到电机轴上的总负载转矩。

1.2 直流调速系统的转速误差状态方程

取直流调速系统的误差状态变量为

$$x_1 = \omega_{ref} - \omega \quad (2)$$

式中: ω_{ref} 为转速给定; ω 为实际转速。

将其代入式(1)可得状态方程为

$$\dot{x}_1 = -\frac{k_f}{J}x_1 - \frac{k_m}{J}i + \dot{\omega}_{ref} + \frac{k_f}{J}\omega_{ref} + \frac{T_L}{J} \quad (3)$$

双闭环直流调速控制系统,由电流控制器和转速控制器串联连接而形成的负反馈控制环。电流控制器的输入作用由积分全局滑模转速控制器输出而得,所以令 $u = i$ 。并且假设: $A = \frac{k_f}{J}$; $B = \frac{k_m}{J}$; $C = \frac{k_f}{J}$

$$\omega_{ref}; F = \dot{\omega}_{ref} + \frac{T_L}{J}。$$

整理后,状态方程变为

$$\dot{x}_1 = -Ax_1 - Bu + C + F \quad (4)$$

鉴于参考输入、负载转矩和转动惯量都是变化的,将 F 看成是系统的综合扰动干扰项。

1.3 切换函数的设计

设计积分全局切换函数为

$$s = x_1 + k \int_0^t x_1 dt + \lambda e^{-\alpha t} \quad (5)$$

式中: k 为积分系数,积分项能有效消除系统的静态误差; $\lambda e^{-\alpha t}$ 为指数时变因子项,是全局控制项,选取适当的系数,可以让系统状态初始时刻就处于切换面上,从而消除趋近切换面阶段。

2 控制律的求取和稳定性分析

直流调速系统运行中存在各种干扰因素,考虑系统不确定性,可得

$$\dot{x}_1 = -(A + \Delta A)x_1 - (B + \Delta B)u + (C + \Delta C) + (F + \Delta F) \quad (6)$$

式中 ΔA 、 ΔB 、 ΔC 、 ΔF 为系统的不确定项,主要由系统参数 B 、 J 、 k_f 、参考输入 ω_{ref} 和负载转矩 T_L 变化引起。

整理式(6):

$$\dot{x}_1 = -Ax_1 - Bu + C + d \quad (7)$$

式中 $d = -\Delta Ax_1 - \Delta Bu + \Delta C + F + \Delta F$,且 d 有界,即 $|d| \leq D$, D 是一个正整数。

所设计的积分全局切换函数,系统状态一开始就位于其上,则令 $s(x_1(0), t) = 0$ 。

$$\lambda = -x_1(0) \quad (8)$$

系统处在切换面上也有 $\dot{s} = 0$,即

$$\frac{ds}{dt} = \dot{x}_1 + kx_1 - \lambda\alpha e^{-\alpha t} = 0 \quad (9)$$

将状态方程(7)代入式(9)式得

$$\frac{ds}{dt} = -Ax_1 - Bu + C + d + kx_1 - \lambda\alpha e^{-\alpha t} = 0 \quad (10)$$

求解等效控制为

$$u_{eq} = \frac{(k-A)x_1 - \lambda\alpha e^{-\alpha t} + C + d}{B} \quad (11)$$

针对不确定性和外加干扰,确保系统全局鲁棒性,可采用控制率为等效控制加切换控制,即

$$u = u_{es} + u_{ss} \quad (12)$$

$$\text{式中 } u_{es} = \frac{(k-A)x_1 - \lambda\alpha e^{-\alpha t} + C}{B}。$$

切换控制即

$$u_{ss} = \eta |x_1| \text{sgn}(s) \quad (13)$$

切换控制项考虑系统误差状态量,能根据其大小调整切换增益项。直流调速系统启动时,其系统状态量误差较大;这时切换增益也较大,保证了大的控制输入,从而使系统状态快速调节到给定输入。当系统状态变量误差较小时,切换增益项也较小,控制输入就较小,从而避免大的输入引起系统抖动过大。

为了削弱系统颤抖,用连续化的饱和函数 $\text{sat}(s)$ 取代理想滑动模态控制作用中的符号函数 $\text{sgn}(s)$ 。

$$\text{sat}(s) = \frac{s}{|s| + \varepsilon} \quad (14)$$

式中: ε 是一个小的正因子, 通过选择适合的值, 可以有效减弱系统抖振。

选择李雅普洛夫函数为 $V = \frac{1}{2}s^2$, 对李雅普洛夫函数求导可得

$$\dot{V} = s\dot{s} \quad (15)$$

为了保证系统满足可达性条件, 即使 $\dot{V} < 0$, 将式(7)、式(9)和式(13)代入式(15)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s(\dot{x}_1 + kx_1 - \lambda\alpha e^{-\alpha t}) \\ &= s(-Ax_1 - Bu + C + d + kx_1 - \lambda\alpha e^{-\alpha t}) \\ &= s(-B\eta|x_1| \operatorname{sgn}(s) + d) \\ &\leq (D|s| - B\eta|x_1||s|) \end{aligned} \quad (16)$$

式中 B, η 都为 >0 的正数, η 只需满足 $\eta \geq \frac{D}{B}$ 就能使 $\dot{V} < 0$, 能保证系统是大范围渐进稳定的。

3 仿真与结论

为了验证所设计的积分全局滑模转速控制器的可行性, 对直流调速系统进行仿真, 使用 Matlab/Simulink 软件电气模型库 SimPowerSystems 搭建仿真模型。系统的仿真结构示意图如图 1~图 3 所示。

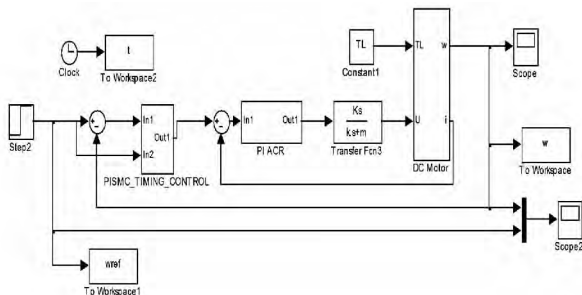


图 1 直流电动机速度控制系统仿真框图

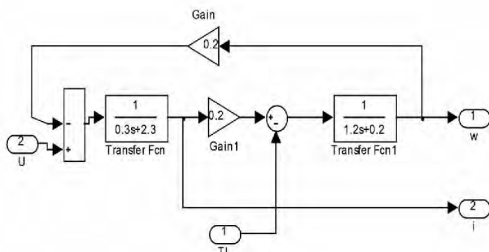


图 2 DC Motor 模型

仿真电动机参数如下: $K_f = 0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$, $L = 0.5 \text{ H}$, $R = 2.0 \Omega$, $J = 1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $K_m = K_b = 0.2 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$ 。直流调速系统空载启动时, 给定参考转速 ω 为 50 rad/s , 在 $t = 0.3 \text{ s}$, 调整为 150 rad/s 持续 0.3 s 后, 转速回落为 50 rad/s 。仿真如图 4 所示。

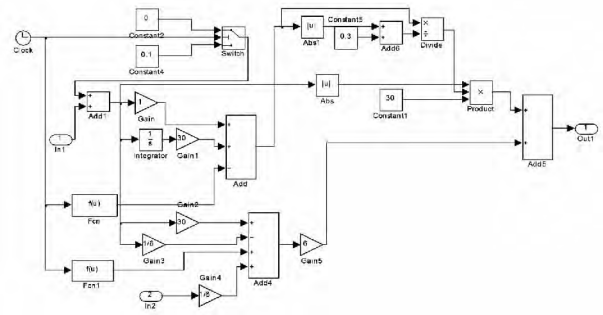


图 3 积分全局滑模控制器

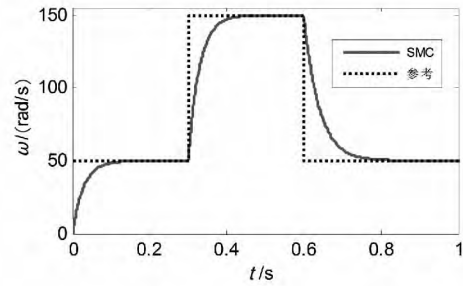


图 4 转速阶跃响应曲线

从图 4 可得, 在给定速度变化时, 转速响应能准确跟踪给定转速并快速达到稳态; 在转速从 50 rad/s 突增到 100 rad/s 又突降到 50 rad/s 的大范围调节时, 系统转速也能迅速平稳地调整为给定值, 且无稳态误差。由此可见, 所设计的积分全局滑模控制器能满足设计要求。

直流调速系统带负载启动时, 给定参考转速 $\omega = 200 \text{ rad/s}$, 负载转矩为 $T_L = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 且在 $t = 0.4 \text{ s}$ 时, 负载转矩变为 $T_L = 2 \text{ N} \cdot \text{m}$, 并持续时间 0.1 s , 负载干扰取消。如图 5 和图 6 所示。

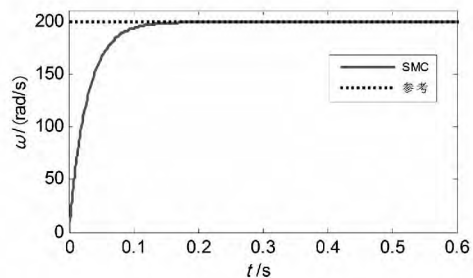


图 5 带载启动以及负载干扰转速响应曲线

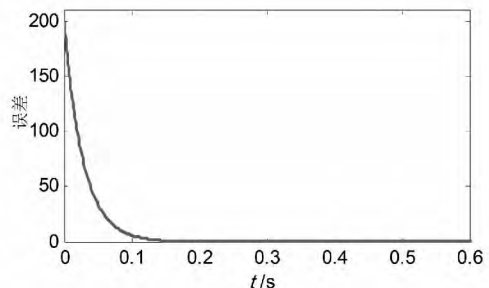


图 6 转速误差曲线

由图5和图6所示,直流调速系统带负载启动时,系统转速响应能较快跟随给定参考值变化,达到稳态后,系统能够平稳运行,稳态误差为0;突加负载干扰,转速响应有所下降,但是转速调节速度变化较小,系统转速在合理变化范围,负载干扰撤除后,转速又迅速回到给定参考转速。可见积分全局滑模控制器对负载干扰具有较强的抗干扰能力。

直流调速控制系统给定参考转速 $\omega = 200 \text{ rad/s}$, 由于直流调速系统自身运行导致温度升高或者磁路饱和等情况,考虑直流电机参数变化,即电枢电阻变化 $\Delta R = 0.3$, 绕组电感变化 $\Delta L = 0.2$, 仿真如图7和图8所示。

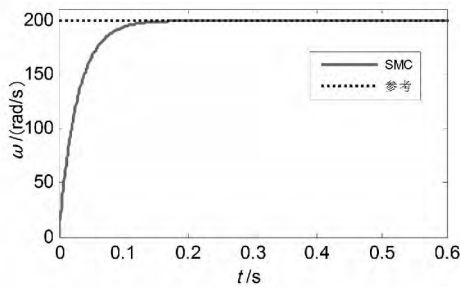


图7 结构参数变化转速阶跃响应曲线

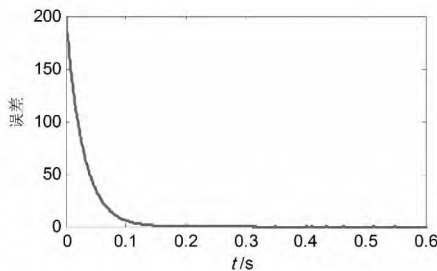


图8 结构参数变化转速误差曲线

如图7所示,直流调速系统由于内部温升或磁路饱和导致结构参数发生变化时,转速响应在也能按照给定输入较快进入稳态运行;由图8可知,电动机自身运行导致参数摄动,系统转速响应达到稳态后,其稳态误差几乎为0。由此可知,所设计的积分全局滑模控制器对电机自运行导致结构参数的变化具有较强的鲁棒性和自适性。

4 结 语

为了改善直流调速系统转速跟随性能,采用积分全局滑模控制理论设计了直流电动机调速系统。在设计切换函数时,添加指数时变因子项,确保系统全程的抗干扰能力,消除到达阶段,提高转速响应速度。切换控制项中,考虑误差状态量,根据系统状态误差适时调整切换增益。仿真表明,所设计的积分全局滑模控制器响应迅速,具有较好的静、动态性能和抗干扰能力,达到了预期的设计要求。

参考文献

- [1] 李珍国. 交流电机控制基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [2] 王丰尧. 滑模变结构控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [3] 李书舟, 容慧. 滑模变结构控制在双闭环调速系统中的应用[J]. 自动化技术与应用, 2013, 32(12): 26 - 29.
- [4] 陈振, 耿洁, 刘向东. 基于积分时变滑模控制的永磁同步电机调速系统[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 56 - 61.
- [5] 张科, 周凤歧. 不确定多变量系统的全程滑态变结构控制方案设计[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(2): 221 - 224.
- [6] 肖文英, 李军红, 阳武娇. 基于 MATLAB/SIMULINK 直流电机模糊控制系统的建模与仿真[J]. 日用电器, 2006(3): 42 - 43.
- [7] 张晓光, 赵克, 孙力, 等. 永磁同步电机滑模变结构调速系统动态品质控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(15): 47 - 52.
- [8] 王东旭, 王莉, 王轩. 动态滑模控制器在感应电动机矢量调速系统中的应用[J]. 微特电机, 2010(6): 62 - 64.

作者简介:

杨代利(1985), 主要研究领域为物联网工程和滑模控制理论。
(收稿日期: 2016-05-05)

欢迎订阅

《四川电力技术》