

改善步进电机电流响应速度的抗饱和 PI 控制

聂川, 祝九思, 唐佳
(中南大学, 长沙 410083)

摘要: **目的** 为了提高连续式包装机的生产效率, 提出一种新型的抗积分饱和 PI 电流控制器设计方法。**方法** 针对 PI 控制器积分饱和现象引起的步进电机绕组电流响应过慢问题, 根据控制器输入输出状态, 确定抗饱和增益值的大小, 调整积分作用效果。在控制器输入变化较慢时, 充分发挥积分器的作用, 减小超调量; 在输入变化较快时, 使积分器更快地退出饱和, 提高系统响应速度。**结果** 实验结果表明, 该方法较传统 PI 控制和反计算固定增益 PI 控制能更精确地控制绕组电流, 有效提高了电流响应速度和减小了超调量。**结论** 该方法使绕组电流更好地跟随参考值变化, 改善了电机在不同运行状态下的动态性能。

关键词: 连续式包装机; 步进电机; 闭环电流控制; PI 控制器; 抗积分饱和; 响应速度

中图分类号: TB486⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)17-0153-05

Improvement of Anti-windup PI Control of Current Response Speed for Stepping Motor

NIE Chuan, ZHU Jiu-si, TANG Jia
(Central South University, Changsha 410083, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a new design method for the anti-integral windup PI current controller, in order to improve the production efficiency of continuous packaging machine. With respect to the excessively slow response speed for the stepping motor winding current caused by the integral windup of PI controller, the size of anti-windup gain value was determined and the integral action effects were adjusted according to the input and output states of the controller. When the input changed slowly, this controller gave the full play to the integrator to reduce the overshoot; when the input changed quickly, the integrator withdrew from the windup more quickly to improve the response speed of the system. The experiment results showed that, compared with the traditional PI control and back-calculation PI controller with a fixed gain, the proposed method could control the winding current more accurately, which improved the current response speed and reduced the overshoot. This method makes the winding current change with the reference value in a better way and improves the dynamic performance of the motor under different operating conditions.

KEY WORDS: continuous packaging machine; stepping motor; closed-loop current control; PI controller; anti-windup; response speed

步进电机输出位移量与输入脉冲数成比例, 无累积误差, 在没有复杂闭环位置反馈环节下, 便能达到高位置精度, 被广泛应用于各类自动化包装机械。连续式包装机可通过步进电机实现对横封轮和纵封轮的同步转速控制。同时, 步进电机的非恒速运动, 还

可提高横向封口的质量^[1]。步进电机在不同转速运行时的动态性能直接决定着连续式包装机的生产效率和产品质量。

步进电机控制系统中的绕组电流控制一般采用传统的闭环 PI 控制器^[2], 然而, 这种控制方法并未考

收稿日期: 2017-03-14

基金项目: 国家自然科学基金 (51575534); 国家科技重大专项 (2012ZX02702006); 湖南省自然科学基金 (2015JJ4078); 高性能复杂制造国家重点实验室自主课题基金 (ZZYJKT2015-10)

作者简介: 聂川 (1992—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为机电一体化和计算机测控技术。

虑实际控制系统中的各种输出限制,忽略了系统饱和区的非线性因素^[3]。由于实际控制系统中必须对 PI 控制器的输出进行限幅,将导致电机输入量不能继续线性增加,进而影响闭环系统的响应速度。这种由于 PI 控制器积分环节引起的系统响应变慢的现象被称为 Windup 现象^[4]。如果不对传统的 PI 控制器进行修正,积分饱和将大幅降低电机的动态运行性能^[5]。

为了解决 Windup 现象对系统性能的影响,国内外学者进行了大量科学研究,主要提出了条件积分法和反计算跟踪法这两大类抗积分饱和的控制算法^[6-9]。这里在传统反计算抗饱和 PI 控制器的基础上,提出一种新型的步进电机抗饱和 PI 电流控制器。该方法根据电机转速调整控制器积分状态,在控制器输入变化较慢时,充分发挥积分器的作用,减小超调量;在输入变化较快时,使积分器更快地退出饱和,提高系统响应速度。该方法大幅改善了步进电机在不同转速下的运行性能,提高了使用步进电机作为主驱动连续式包装机的生产效率。

1 传统闭环 PI 电流控制器

步进电机绕组电压平衡方程为^[10-11]:

$$u_m(t) = Ri_m(t) + L \frac{di_m}{dt} + M \sum_{j=1}^2 L_{mj} \frac{di_m}{dt} \quad (1)$$

式中: u_m 为第 m 相电压; i_m 为第 m 相电流; R 为相绕组电阻; L 为相绕组自感; M 为电机绕组之间的互感。

忽略电机互感的影响,简化后的电机绕组电压方程为:

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (2)$$

将式(2)作拉普拉斯变换可得电机传递函数为:

$$H_M(s) = \frac{1}{Ls + R} \quad (3)$$

式中: s 为拉普拉斯算子。

步进电机闭环电流控制采用经典的 PI 控制器,没有加入微分项是因为定子电流无法跟随给定参考值快速变化,如加入微分项,将导致控制器输出过度变化,降低控制器性能。PI 控制器传递函数为:

$$H_{PI}(s) = K \frac{\frac{L}{R}s + 1}{s} \quad (4)$$

式中: K 为控制器参数。

根据式(3—4)可得系统闭环传递函数为:

$$H_0 = \frac{H_M H_{PI}}{1 + H_M H_{PI}} = \frac{1}{\frac{R}{K}s + 1} \quad (5)$$

式(4)是在连续时间域下的 PI 控制器,但对于实际工程应用,算法编程需要通过数字信号控制器实

现其离散化,其离散化方程的选择直接影响系统运行性能^[12]。采用双线性变换法对式(4)作离散变换。其离散时间域下的 PI 控制器为:

$$H_{PI}(z) = G \frac{\left(L + \frac{Rt}{2}\right)z - \left(L - \frac{Rt}{2}\right)}{z - 1} \quad (6)$$

式中: G 为离散增益值; t 为采样时间; z 为 z 变换算子。

在数字控制系统中,离散 PI 控制器可用差分方程在各离散时刻近似地逼近连续系统的动态变化^[13]。将式(6)转化为差分方程:

$$u[(k+1)t] = u(kt) + GP_1 e[(k+1)t] - GP_2 e(kt) \quad (7)$$

式中: k 为采样序号; $P_1 = L + Rt/2$; $P_2 = L - Rt/2$; e 为电流误差。

2 新型抗饱和 PI 电流控制器

2.1 PI 控制器的积分饱和现象

PI 电流控制器输出电压可以表示为:

$$u = K_p e + q \quad (8)$$

式中: K_p 为比例增益; q 为积分状态。 q 应满足:

$$\dot{q} = K_i e \quad (9)$$

式中: K_i 为比例增益。

在步进电机硬件系统中,闭环 PI 电流控制器输出电压经过脉宽调制后通过逆变器来控制绕组电流。由于受驱动电压源和硬件 PWM 频率等实际因素限制^[14],被控对象输入电压 u_s 将小于 PI 控制器的输出电压 u ,其关系可以表示为:

$$u_s = \begin{cases} U_{\max} \operatorname{sgn}(u) & |u| \geq U_{\max} \\ u & |u| \leq U_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $U_{\max}$ 为控制信号的最大允许幅值; $\operatorname{sgn}(x)$ 为符号函数。

控制器输出电压 u 满足 $|u| \geq U_m$ 时称为非线性饱和区,否则为线性区。具有输出限制的 PI 控制器结构见图 1。

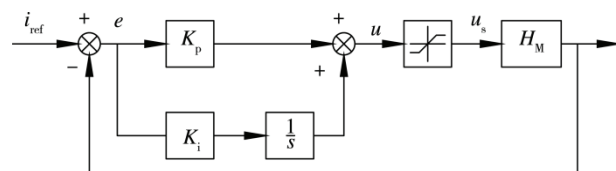


图 1 具有输出限制的 PI 控制器结构

Fig.1 PI controller structure with output limits

2.2 新型抗饱和 PI 电流控制器设计

为抑制积分饱和带来的影响,需要对控制器积分输入进行修正。采用反计算思想,在控制器中加入抗饱和增益,通过将输入和输出的差值作为反馈量来抵

消一部分积分累加器的输入，以此减小 Windup 现象对系统性能的影响。修正后的控制器结构见图 2，其积分状态可以表示为：

$$\dot{q} = K_i e + K_a [u - u_s]$$

(11)

式中： K_a 为抗饱和增益。

此时，PI 控制器差分方程可以表示为：

$$u[(k+1)t] = u(kt) + GP_1 e[(k+1)t] - GP_2 e(kt) - K_a [u(kt) - u_s(kt)]$$

(12)

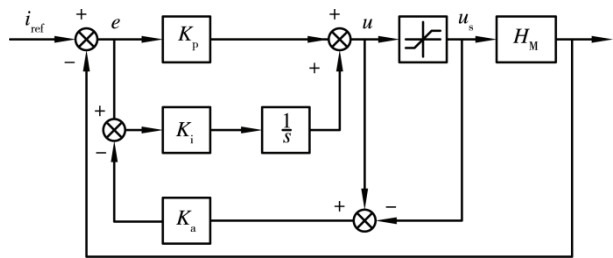


图 2 带抗饱和和增益的 PI 控制器结构
Fig.2 PI controller structure with an anti-windup gain

根据式 (11) 可以看出，抗饱和和增益值的选取是改善系统性能的关键。在以往的设计中，根据控制器输出是否饱和和选择抗饱和和增益值^[15]。这种方法可以改善系统在输入阶跃变化时的系统动态性能，但在步进电机多细分控制系统中，输入电流参考值是一个快速、连续的动态变化过程，每一微步距即一次阶跃输入。在电机高速运行时，微步距的变化率甚至接近于 PWM 输出频率。一个微步距的时间极其短暂，绕组电流还未达到稳定状态，系统便输入下一微步距的参考电流值。转速越高，绕组电流响应单次阶跃输入的时间越短。

步进电机在低转速运行时，绕组电流有足够的时间响应系统输入，PI 控制器的主要作用应该是消除较小的静态误差，使电流精确地跟随电流参考值。控制器应充分发挥积分项的作用，选取较小的抗饱和和积分增益值。如果电机转速进一步提高，在电机的驱动电压源不变的情况下，额定驱动电压无法在一个微步距的时间周期内迫使电机绕组电流快速响应参考值的变化。这将导致绕组电流波形滞后参考电流一定相位，大幅降低电机高速运转时的动态性能。如果大幅增加电机转速，由于电流上升不及时，定子绕组磁极错过正确的励磁时间，将导致电机堵转而不是加速。在电机高转速运行时，应着重考虑电机定子电流的相位，提高绕组电流的响应速度。通过采用较高的抗饱和和积分增益值，迫使输出电压快速退出饱和状态。电机绕组中的实际电流在转子到达正确的励磁位置前可以获得足够的响应时间。滞后的绕组电流将获得一个相位超前角用于补偿滞后的相位，便能更好地跟随给定参考值变化。

结合步进电机在不同状态下的运行特性，设计抗饱和 PI 电流控制器，见图 3。此时的增益值可根据式 (13) 选取， a 和 b 系数由电机转速范围确定。该控制器根据电机输入转速，调整抗积分饱和和增益，以适合不同转速下电机高性能运行的要求。

$$K_a = a|\omega| + b$$

(13)

式中： a 和 b 均为控制器常数； ω 为转速。

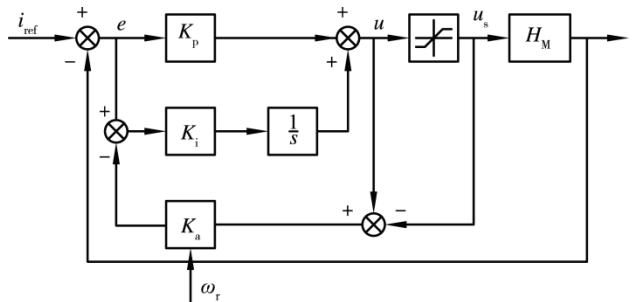


图 3 新型抗饱和和 PI 电流控制器
Fig.3 New anti-windup PI current controller

3 实验

为验证该抗积分饱和 PI 电流控制器的有效性，搭建了以 dsPIC33EP512MU810 数字信号控制器为核心的硬件实验平台，并按照文中提出的控制方法编写了实验程序。使用一台 28H45H 型的两相步进电机，在四细分微步模式下对传统 PI 控制器、反计算固定抗饱和和增益 PI 控制器和文中提出的 PI 控制器进行对比实验。

实验电机参数：基本步距角为 1.8(°)/步；绕组相电阻为 5.6 Ω；绕组相电感为 4.2 mH。硬件实验系统使用 24 V 直流电压作为电机驱动电压源；PWM 频率设定为 40 kHz。控制器参数设置见表 1，实验数据使用 dsPIC 控制器的实时数据监视器传送到上位机。

表 1 PI 控制器参数
Tab.1 Parameters of PI Controller

算法	K_p	K_i	K_a
传统PI	7.14	4100	—
反计算固定增益PI	7.14	4100	10 000
文中提出的PI	7.14	4100	$18 \omega - 3820$

电机给定转速为 240 r/min 时，传统 PI 控制器、反计算固定抗饱和和增益 PI 控制器和文中提出的 PI 控制器绕组电流波形见图 4。可以看出，电机在低转速运行时，电流具有足够的响应时间，使用传统 PI 控制器，电流超调量较小，实际电流波形接近于参考波形，最大相位滞后在 0.1 ms 以内，小于一个微步距的时间；使用固定抗饱和和增益值的 PI 控制器，积分反馈支路作用使控制器输出一直低于限定值，降低了输出

电压作用效果;采用文中提出的PI电流控制器,在低转速时选取的抗饱和增益值较小,此时控制器接近于传统PI控制器,电流超调量较小,能很好地跟随参考电流值变化。3种控制器在转速为240 r/min下,绕组电流与参考电流的最大相位差和幅值差见表2。

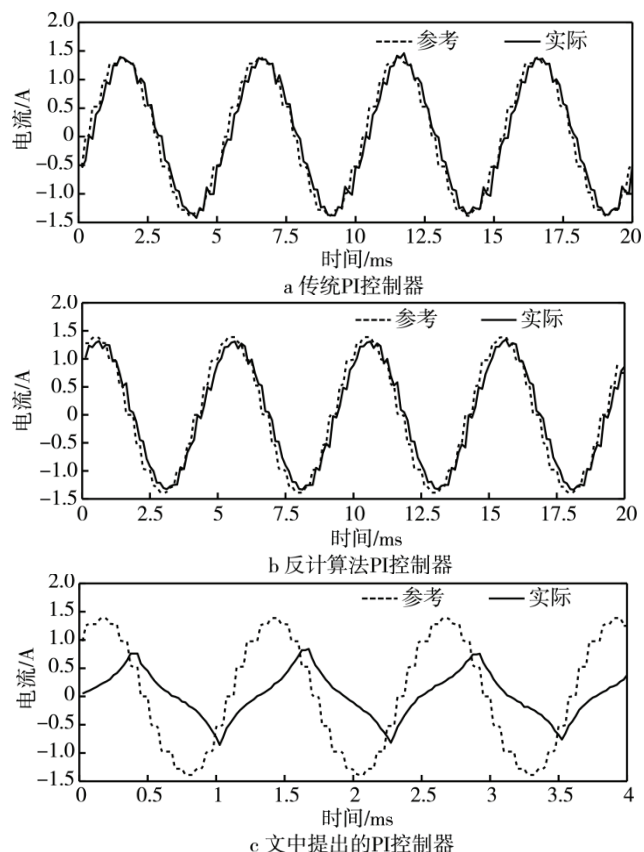


图4 转速为240 r/min时不同PI控制器的电流波形
Fig.4 Current waveforms of different PI controllers when the speed is 240 r/min

表2 转速为240 r/min时绕组电流响应

Tab.2 Winding current response when the speed is 240 r/min

算法	相位差/ms	幅值差/A
传统PI	0.1	0.08
反计算固定增益PI	0.2	0.4
文中提出的PI	0.1	0.1

电机给定转速为960 r/min时,绕组电流波形见图5。此时,传统PI控制器由于控制器输出限制,电流上升过慢,绕组实际电流波形滞后参考电流0.5 ms,约3个微步距时间。定子磁极励磁时转子已转过对应位置,此时电机运行具有较大的噪声和振动,相比于低速运行时的系统性能大幅降低。反计算PI控制器有助于改变绕组电流相位,此时相位时间差为0.25 ms,但使用固定抗饱和增益值的PI控制器并不能使电机运行在最佳状态。文中提出的PI控制器电流相位时间差仅为0.2 ms,电机振动和噪声大幅降

低,改善了步进电机在高速运行时的平稳性。3种控制器在960 r/min下,绕组电流与参考电流的最大相位差和幅值差见表3。

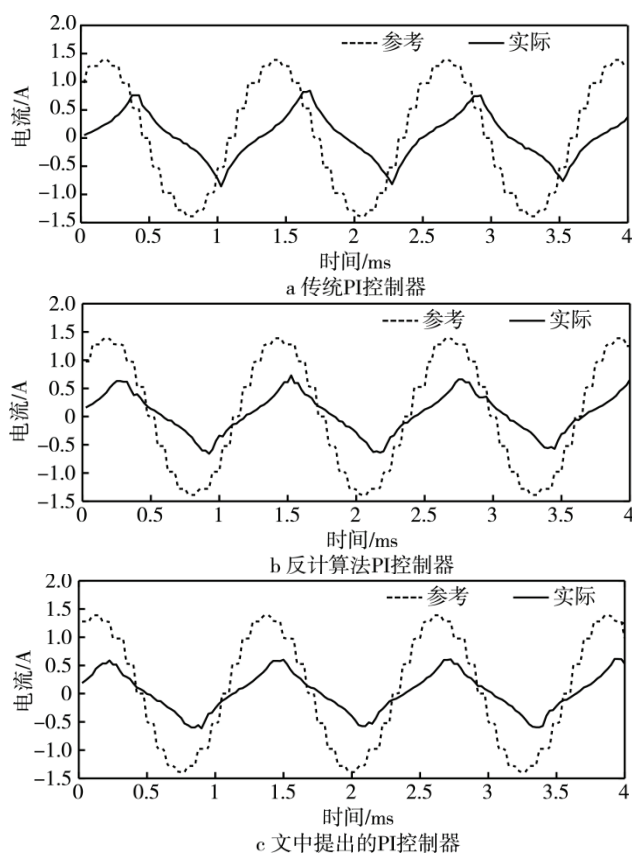


图5 转速为960 r/min时不同PI控制器的电流波形
Fig.5 Current waveforms of different PI controllers when the speed is 960 r/min

表3 转速为960 r/min时绕组电流响应

Tab.3 Winding current response when the speed is 960 r/min

算法	相位差/ms	幅值差/A
传统PI	0.5	0.7
反计算固定增益PI	0.25	0.8
文中提出的PI	0.2	0.85

4 结语

针对连续式包装机步进电机控制系统,指出了传统PI控制器中积分饱和现象对步进电机不同运行状态下性能的影响,提出了一种新型的抗饱和PI电流控制器。该方法在传统的PI控制器中加入采用反计算思想的抗饱和环节,根据电机不同转速调整抗积分饱和增益值,在保证电机低速运行时电流超调量较小的同时,解决了步进电机在高速运行时绕组电流响应过慢的问题,提高了电机的动态性能。该方法系统结构简单,易于设计,可有效提高连续式包装机的生产效率和产品质量。

参考文献:

- [1] 陈文革, 尹芳. 步进电机在制袋式包装机械运动控制中的应用[J]. 包装工程, 2005, 26(1): 36—38.
CHEN Wen-ge, YIN Fang. Application of Step Motor in Motion Control of Package Wrapping Machine[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(1): 36—38.
- [2] ELSODANY N M, REZEKA S F, MAHAREM N A. Adaptive PID Control of a Stepper Motor Driving a Flexible Rotor[J]. World Pumps, 2011, 50(2): 127—136.
- [3] 张兴华, 姚丹. 感应电机直接转矩控制系统的“抗饱和”控制器设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 181—188.
ZHANG Xing-hua, YAO Dan. Anti-windup Speed Controller Design for Direct Torque Controlled Induction Motor Drives[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5): 181—188.
- [4] 杨明, 李钊, 胡浩, 等. 永磁同步伺服系统速度调节器抗饱和补偿器设计[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(4): 46—51.
YANG Ming, LI Zhao, HU Hao, et al. Anti-windup Design for PI Regulator of PMSM Servo System[J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(4): 46—51.
- [5] 杨明, 徐殿国, 贵献国. 控制系统 Anti-Windup 设计综述[J]. 电机与控制学报, 2006, 10(6): 622—626.
YANG Ming, XU Dian-guo, GUI Xian-guo. Review of Control System Anti-windup Design[J]. Electric Machines and Control, 2006, 10(6): 622—626.
- [6] ZHANG D, LI H, COLLINS E G. Digital Anti-windup PI Controllers for Variable-Speed Motor Drives Using FPGA and Stochastic Theory[J]. Power Electronics IEEE Transactions, 2006, 21(5): 1496—1501.
- [7] MONTEIRO J R B A, PEREIRA W C A, SANTANA M P, et al. Anti-windup Method for Fuzzy PD+I, PI and PID Controllers Applied in Brushless DC Motor Speed Control[C]// Brazilian Power Electronics Conference, 2013: 865—871.
- [8] SHIN H B, PARK J G. Anti-windup PID Controller with Integral State Predictor for Variable-Speed Motor Drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(3): 1509—1516.
- [9] LI X, PARK J G, SHIN H B. Comparison and Evaluation of Anti-windup PI Controllers[J]. Journal of Power Electronics, 2011, 11(1): 45—50.
- [10] 李先峰, 颜昌翔, 于平. 五相混合式步进电动机在空间扫描驱动机构中的应用[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 797—804.
LI Xian-feng, YAN Chang-xiang, YU Ping. Application of Five-phase Hybrid Stepping Motor to Spatial Scanning Drive System[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(4): 797—804.
- [11] 周黎, 杨世洪, 高晓东. 步进电机控制系统建模及运行曲线仿真[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(1): 20—25.
ZHOU Li, YANG Shi-hong, GAO Xiao-dong. Modeling of Stepper Motor Control System and Running Curve Simulation[J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(1): 20—25.
- [12] 赵雷廷, 刁利军, 张哲, 等. 低开关频率下异步电机电流环的数字控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21): 3456—3466.
ZHAO Lei-ting, DIAO Li-jun, ZHANG Zhe, et al. Discrete-time Current Controller for Induction Motors at Low Switching Frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(21): 3456—3466.
- [13] 胡斯登, 赵争鸣, 袁立强, 等. 高性能变频调速系统的离散控制问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2010(3): 1—6.
HU Si-deng, ZHAO Zheng-ming, YUAN Li-qiang, et al. Discrete Control in High-performance Adjustable Speed Drives System[J]. Proceedings of the CSEE, 2010(3): 1—6.
- [14] 杨立永, 刘硕, 李正熙, 等. 异步电机电流调节器 PI 参数整定及抗饱和研究[J]. 电力电子技术, 2011, 45(4): 55—57.
YANG Li-yong, LIU Shuo, LI Zheng-xi, et al. Current Regulator Parameter Tuning and Anti-windup Control Research in Induction Motors[J]. Power Electronics, 2011, 45(4): 55—57.
- [15] 张海明, 缪仲翠. 双闭环直流调速系统“抗饱和”速度控制器设计[J]. 微特电机, 2016, 44(10): 70—73.
ZHANG Hai-ming, MIAO Zhong-cui. Anti-windup Speed Controller Design for Double Closed-Loop DC Motor Control System[J]. Small & Special Electrical Machines, 2016, 44(10): 70—73.