

## 基于自调整内模控制法的复卷机张力控制的设计与仿真

李伟<sup>1</sup>, 王友权<sup>1</sup>, 董继先<sup>2</sup>, 马超<sup>3</sup>

(1. 济宁职业技术学院, 济宁 272000; 2. 陕西科技大学, 西安 710021;

3. 特变电工山东鲁能泰山电缆有限公司, 泰安 271200)

**摘要:** **目的** 有效克服复卷机收线张力不稳定的问题, 并有效抑制模型失配造成的误差。**方法** 提出了基于内模控制算法优化的PID控制方法, 将内模算法和传统PID控制方法相结合, 用内模算法来调整PID控制参数。**结论** 仿真结果表明, 该基于内模算法的PID控制方法具有优秀的控制品质, 具有动态响应速度快、抗干扰能力强的优点。

**关键词:** 复卷机; 磁粉离合器; 卷绕张力; 内模算法

**中图分类号:** TP273; TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)11-0149-04

### Design and Simulation of Tension Control System of Winder Based on Self-tuning Internal Model Control Method

LI Wei<sup>1</sup>, WANG You-quan<sup>1</sup>, DONG ji-xian<sup>2</sup>, MA Chao<sup>3</sup>

(1. Jining Polytechnic, Jining 272000, China; 2. Shaanxi University of Science Technology, Xi'an 710021, China;

3. Te Bian Electric Apparatus Shandong Luneng Taishan Cable Co., Ltd., Taian 271200, China)

**ABSTRACT:** Self-tuning internal model control can effectively overcome the problem that the take-up tension is not stable, and effectively restrain the error caused by model mismatch. PID control method based on internal model control algorithm was proposed, which combined the internal model control algorithm with the traditional PID control method, and the internal model algorithm was used to adjust the PID control parameters. The simulation results showed that the PID control method based on internal model algorithm has excellent control quality, with advantages such as fast dynamic response and strong anti-jamming capability.

**KEY WORDS:** winder; magnetic particle clutch; winding tension; internal model algorithm

复卷机位于造纸机械末端, 为保证后续工段的高效率和低损耗, 要求其具有高速平稳运行的能力。在纸张卷取过程中, 张力的稳定是提高纸卷质量和生产效率的保障, 因此复卷机的性能好坏, 直接影响纸张的卷取紧度和质量以及造纸机的生产效率, 并影响纸的贮存和后续的加工性能。通过改变纸幅张力来调整卷取的紧度, 卷纸质量高低取决于纸卷

达到均匀的紧度, 太松的纸卷在保存时容易变形、在卷纸轴上产生位移, 在复卷机上复卷该种纸卷时, 由于回转不均匀、有震动, 纸幅所受拉力不一致, 从而增加了纸幅断头的机会。如纸卷卷得过紧, 容易在纸幅中产生很大的应力, 退纸时会使纸幅弹性变形小, 也会增加断头机会。卷纸机要满足卷取过程中线速度保持稳定<sup>[1]</sup>, 因此卷纸机的动力学模型参

收稿日期: 2015-11-09

基金项目: 国家星火计划(2011GA740038, 2012GA740090)

作者简介: 李伟(1982—), 男, 山东曲阜人, 工学硕士, 济宁职业技术学院助教, 主要研究方向为工业过程控制系统的研发与应用。

数时变大、扰动多，对控制系统的要求越来越高，文中通过与传统 PID 控制比较，设计一套基于内模算法的 PID 控制系统，保证纸张卷取质量。

### 1 系统原理

采用造纸行业普遍使用的张力控制设备，该系统主要执行部件是磁粉离合器，其线圈通过的电流与磁粉离合器的输出转矩具有良好的线性惯性。将张力传感器检测到的纸张的实时张力传递给张力控制器，依据激励电流与输出转矩的线性惯性，进而调节磁粉离合器的励磁电流，控制转矩的稳定输出。控制框图见图 1。



图 1 复卷机张力控制系统  
Fig.1 Tension control system of winder

### 2 控制器设计

#### 2.1 磁粉离合器特性分析

磁粉离合器具有励磁电流、输出转矩成正比例关系的特点，可实现良好的控制精度，并且具有结构简单、响应速度快等优点。保持励磁电流稳定即可实现输出转矩的稳定，因此，在复卷机高速运行中，通过改变励磁电流即可实现高精度的转矩输出，进而使得纸带间张力稳定。励磁电流与传递的力矩间的线性关系可以近似看作一阶惯性环节。由于磁粉离合器内磁粉形成磁链时有具有滞后特性，所以其传递函数为：

$$G_1(s) = \frac{M(s)}{I_M(s)} = \frac{K_m}{T_m s + 1} e^{-\tau s}$$

其中： $I_M(s)$ 为励磁电流； $M(s)$ 为磁粉离合器力矩； $T_m$ 为时间常数， $\tau$ 为磁粉离合器滞后时间； $K_m$ 为磁粉离合器增益。

#### 2.2 内模算法

由于在生产过程中具有张力时变特点，其数学模型会随着纸张的卷径发生变化。由于控制对象动力学模型参数时变，因此传统 PID 控制动态响应时间长及稳态精度较差。内模控制属于鲁棒控制，设计结构简单，引入一个滤波器，通过调整滤波器参

数获得期望的动态品质和鲁棒性能。设计一个内模控制器促使闭环系统获得较好的稳定性，通过调整滤波器参数，提高抗干扰能力并减少模型失配造成的误差，因此可以得到简单的内模控制器，并且具有良好的控制品质。内模控制结构见图 2。

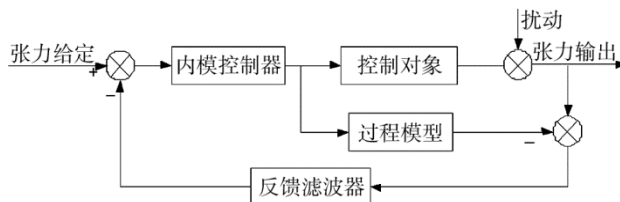


图 2 内模控制结构  
Fig.2 Internal model control structure

其中，过程模型为  $G_m$ 。将图 2 等效为经典反馈控制系统框图，见图 3。

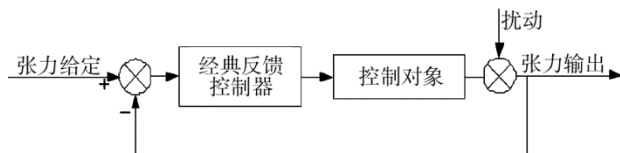


图 3 等效经典反馈结构  
Fig.3 Equivalent classical feedback structure

其中： $G_{IMC}$  为内模控制器； $G_c$  为经典反馈控制控制器， $G_c = \frac{G_{IMC}}{1 - G_m G_{IMC}}$ 。

#### 2.3 IMC-PID 控制器设计

内模控制器设计方法简单清晰，先设计一个稳定的理想控制器，再选择一个与 IMC 相适应的滤波器，依据控制对象模型确定滤波器，因此在 IMC 控制器中只需调整一个的滤波器时间参数，即使得闭环控制系统获得良好的控制品质。

1) 控制系统模型  $G_m$  的分解。将  $G_m$  化简成乘积形式，即：

$$G_m = G_+ G_- \tag{1}$$

式中： $G_-$ 为不包含预测项的稳定传递函数，且具有最小相位特征； $G_+$ 为具有幅度与频率无关的全通滤波器传递函数。

2) 内模控制器设计。为提高系统的鲁棒性和稳定性，在具有最小相位特征的传递函数  $G_-$  添加滤波器。设计内模控制器为：

$$G_{IMC} = G_-^{-1} f \tag{2}$$

$$f(s) = 1/(\lambda s + 1)^n \tag{3}$$

式中：增加  $f(s)$  可以使得  $G_{IMC}$  有理。式中  $\lambda$  为

低通滤波器  $f(s)$  的时间参数，是闭环控制系统的唯一调整参数，通过调节滤波器参数使得闭环系统获得优秀的控制品质。

磁粉离合器的动力力矩和张力的传递函数表达式为：

$$G_2(s) = \frac{T}{M} = \frac{1}{\beta Ks/R + R} \quad (4)$$

式中： $\beta$  为阻尼系数； $K = L_0/EA$  为纸带参数 ( $L_0$  为放卷机卷辊与复卷机卷辊间的距离， $E$  为纸带的弹性模量， $A$  为纸带的横截面积)。

可得复卷机张力控制模型为：

$$G(s) = G_1(s)G_2(s) = \frac{K_m}{(T_m s + 1) \left( \frac{\beta K}{R} s + R \right)} e^{-\tau s} \quad (5)$$

由 (5) 式可知，该张力控制模型为二阶纯滞后系统，采用二阶纯时滞系统为：

$$G_m = \frac{1}{as^2 + bs + c} e^{-\tau s} \quad (6)$$

将式 (6) 中纯时滞环节近似为：

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1 - \tau s/2}{1 + \tau s/2}$$

代入 (6) 中并将其进行化简：

$$G_m = \frac{1}{as^2 + bs + c} \cdot \frac{1 - \tau s/2}{1 + \tau s/2} = G_+ G_- \quad (7)$$

取二阶滤波器为： $f(s) = 1/(\lambda s + 1)^2$ ，反馈控制器  $G_c$  为：

$$G_c = \frac{G_{IMC}}{1 - G_m G_{IMC}} = \frac{G_-^{-1} f(s)}{1 - G_+ f} = \frac{\frac{a\tau s^3}{2} + \left(a + \frac{b\tau}{2}\right)s + \left(b + \frac{1}{2}c\tau\right)s + c}{\frac{\tau\lambda^2}{2}s^3 + (\lambda^2 + \lambda\tau)s^2 + (2\lambda + \tau)s} \quad (8)$$

### 3 仿真实验

复卷机张力控制系统具有时变性、负载扰动多、非线性等特点，纸带张力控制受到卷辊纸张半径及纸张线速度的变化的影响。由于纸张厚度很薄，卷辊半径变化很慢，可以近似视作固定值。在纸张生产中，复卷机辊轴心半径  $R_0$  的变化范围为 0.2~1.5 m，成纸张宽度为  $b=1.2$  m，其密度为  $625 \text{ kg/m}^3$ ，纸张厚度  $\sigma=0.0005$  m，复卷机的线速度为  $v=200$  m/min，根据设备的参数结构选择磁粉离合器的型号参数为：

励磁电流为 1 A，允许滑差功率为 7 kW，最高允许转速为 1500 r/min，额定转矩为 600 N·m。从而得到控制对象模型为：

$$G(s) = \frac{112.5e^{-0.5s}}{2272s^2 + 927s + 1} \quad (9)$$

选取二阶滤波器  $f(s) = 1/(\lambda s + 1)^2$ ，根据经验取  $\lambda=0.5$ ，可得  $G_c$  为：

$$G_c = \frac{G_-^{-1} f(s)}{1 - G_+ f} = \frac{5.05s^3 + 22.26s^2 + 8.24225s + 0.009}{0.0625s^3 + 0.5s^2 + 1.5s}$$

下面在 PID 控制和 IMC 控制系统仿真中，给定同样的设定值为 600 的阶跃输入信号，在存在干扰时、模型不匹配情况下的仿真结果见图 4。

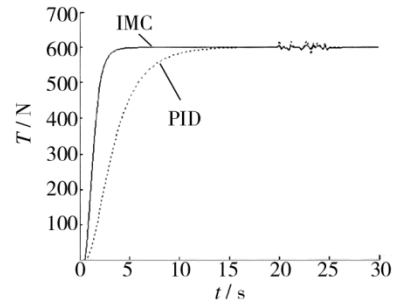


图 4 存在干扰的 PID 和 IMC 仿真图  
Fig.4 Simulation diagram of PID and IMC in the presence of interference

由图 4 可知，在输入阶跃信号时，传统 PID 控制方法的输出需要较长时间才能达到稳定值，而采用自调整内模控制方法的输出动态响应快，即调节时间短就能达到稳定值，因此自调整内模控制器具有很好的控制品质。

由图 5 仿真结果可知，当复卷机控制模型不匹配时，内模控制器输出仍然可以有效抑制在模型失配时产生的误差，具有较好的控制效果，所以 IMC 控制性能要明显优于传统 PID 控制器，进而满足复卷机与造纸机具有相同的生产能力的要求。

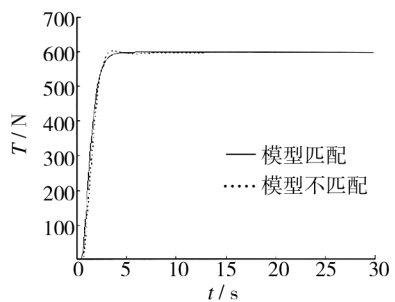


图 5 模型匹配和失配情况下的仿真  
Fig.5 Simulation diagram of model matching and mismatch conditions

## 4 结语

针对复卷机工作特点, 在存在干扰、模型失配时进行仿真, 与传统 PID 控制进行比较, IMC 闭环控制系统具有动态响应快、抗干扰性强, 并在模型失配时具有良好的控制品质。将该闭环控制系统应用在复卷机张力控制中, 可以保证前后支撑辊的速度差, 保持纸幅张力稳定。

### 参考文献:

- [1] 陈克复. 制浆造纸机械与设备[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2013.  
CHEN Ke-fu. Pulp and Paper Machinery and Equipment[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2013.
- [2] 王孟效, 孙瑜, 汤伟, 等. 制浆造纸过程测控系统及工程[M]. 北京:化学工业出版社, 2003.  
WANG Meng-xiao, SUN Yu, TANG Wei. Pulping and Papermaking Process Measurement and Control System and Engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [3] 何金保, 郭帅, 何永义, 等. 基于遗传优化的张力模糊控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(3):243—248.  
HE Jin-bao, GUO Shuai, HE Yong-yi, et al. A Fuzzy Tension-controller Based on Genetic Algorithm(GA)[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(3):243—248.
- [4] 陆焯, 袁梦, 余勃. 基于模糊 PID 控制在混合自动定量给料器中应用的研究[J]. 包装工程, 2008, 29(6):14—16.  
LU Ye, YUAN Meng, SHE Bo. Based on the Fuzzy PID Control in the Mix and the Study of the Application of the Auto Doser[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(6):14—16.
- [5] 丁毅, 龚宇. 模糊专家系统在包装机械故障诊断中的应用[J]. 包装工程, 2008, 29(8):69—70.  
DING Yi, GONG Yu. Fuzzy Expert System Application in Packaging Machinery Fault Diagnosis[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(8):69—70.
- [6] 余勃, 宋迎法, 袁梦, 等. 包装机混合式自动定量控制系统的的设计[J]. 包装工程, 2008, 29(8):74—76.  
SHE Bo, SONG Ying-fa, YUAN Meng, et al. The Design of the Control System of Packaging Machine of automatic Quantifying[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(8):74—76.
- [7] 田卫华. 现代控制理论[M]. 北京:人民邮电出版社, 2012.  
TIAN Wei-hua. Modern Control Theory[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2008.
- [8] 王广雄, 何朕. 控制系统设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.  
WANG Guang-xiong, HE Lian. Control System Design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [9] 陈晓平. 线性系统理论[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.  
CHEN Xiao-ping. The Linear System Theory[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011.
- [10] 薛定宇. 反馈控制系统设计与分析——MATLAB 语言应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.  
XUE Ding-yu. Feedback Control Systems Design and Analysis-MATLAB Language Application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [11] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京:国防工业出版社, 1993.  
XI Yu-geng. Predictive Control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993.
- [12] EDOUARD L, DOMINIQUE K, HAKAN K, et al. Web Winding System Robustness Analysis Viaanalysis[J]. Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications, 2001, 5(7):948—953.
- [13] KNITTEL D, LAROCHE E, GIGAN D. Tension Control for Winding Systems with Two Degree So Freedom Sub Splinfin Controllers[J]. Industry Application, 2003, 1(39): 113—120.
- [14] WANG Chun-xiang, WANG Yong-zhang, YANG Ru-qing. Research on Precision Tension Control System Based on Neural Network[J]. Industrial Electronics, IEEE. 2004, 51(2):381—386
- [15] ZHANG Qi-Hong, XU Yuan-Qing, CHEN Xiang-Guang, et al. Improved Optimization for Simplex Method Based on Matrix Calculation[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(3):251—255.