doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.201903008

# 碳纤维角联织机卷取系统张力网络化控制研究

# 吴晓宇

(天津工业大学 机械工程学院,天津 300387)

摘要:针对碳纤维角联织机卷取系统中的张力控制问题,对卷取系统进行动力学分析并建立动 力学模型;在考虑网络诱导时延、数据包丢失及网络带宽占有率等因素的基础上设计一种自适 应模糊 PID 控制器,将此控制方法与常规的 PID 控制方法进行仿真对比。结果表明,在同时存 在网络诱导时延、数据包丢失及网络带宽占有率的情况下,自适应模糊 PID 控制方法超调量小、 输出张力波动小、跟踪效果良好、系统稳定性强,具有更好的控制效果。

关键词:碳纤维角联织机;卷取系统;网络化控制系统;自适应模糊 PID 控制

中图分类号:TS103.7 文献标识码:A 文章编号:1671-5322(2019)03-0052-06

近年来,碳纤维复合材料因其独特的性能而 得到广泛的应用,但由于碳纤维织物厚度厚、表面 不耐磨且层数多,在织造时难以保持纱线张力稳 定<sup>[1]</sup>。碳纤维角联织机是一种全新的设计,在织 造工艺动作要求和机构设计上比以往的织机更为 复杂。碳纤维角联织机整机装备由开口、送经、引 纬、打纬和卷取5大核心装置组成<sup>[2]</sup>,整机工作原 理图如图1所示。





卷取系统的目的是为了将织物引离织口并按 一定的张力卷绕到卷取辊上,从而保证织造生产 的连续进行。合理的张力控制对于提高织物的质 量有着重大的意义。针对碳纤维纱线弹性小的特 点,本文采用积极式的卷取机构,在保证碳纤维织 物卷取过程中张力达到控制要求的基础上,与送 经过程的张力控制系统相配合,可实现整机织造 过程的恒张力控制。

近年来,织机张力控制中不断地引入先进的 控制算法和控制技术,其中将自动控制理论与计 算机技术相结合的计算机控制技术呈现出越来越 数字化、智能化、网络化的发展趋势<sup>[3-4]</sup>。孙哲 等<sup>[5]</sup>将自适应控制方法与传统的滑模控制方法 相结合,设计了一种自适应滑模控制器来控制织 机的经纱张力;王友钊等<sup>[6]</sup>对织机的2种卷布机 构进行了力学分析,根据分析得出的力学模型,找 到能使卷布机构自适应卷布的控制策略,再利用 BP神经网络改进传统的 PID 控制策略,实现织物 卷取的恒张力控制;应腾云等<sup>[7]</sup>设计了模糊 – PI 控制器并联控制模型,该新型控制器可消除经纱

#### 收稿日期:2019-05-30

作者简介:吴晓宇(1994-),男,安徽阜阳人,硕士生,主要研究方向为智能控制与网络化控制。

张力的静态误差,实现经纱张力的稳定控制。

在众多先进的织机张力控制方法中,将网络 化控制技术应用到织机张力控制中的相关文献却 很少,传统的点对点控制系统难以满足系统功能 不断增长的需求。与传统的点对点控制系统相 比,网络化控制系统具有布线方便、连接线数大大 减少、易于扩展与维护、成本低、便于远程监测与 控制、数据可交换性强等优点<sup>[8-9]</sup>。但是,将网络 化控制技术引入到碳纤维角联织机卷取系统中, 由于通信网络的介入,不可避免地会导致一些网 络诱导时延、数据包丢失以及网络带宽占有率等 相关问题,进而影响张力的恒定。

针对上述网络化控制技术存在的问题,本文 设计一种自适应模糊 PID 控制器,以降低网络诱 导时延、数据包丢失以及网络带宽占有率等对卷 取系统张力恒定的影响。

## 1 被控对象动力学模型的建立

卷取机构传动原理示意图如图2所示。



图 2 卷取机构传动原理示意图 Fig 2 Transmission principle sketch of take-up mechanism

图 2 中,*T* 为经纱张力,N;r<sub>1</sub> 为卷取辊半径, mm;r<sub>0</sub> 为卷绕空轴半径,mm;*M<sub>D</sub>* 为卷取电机电磁 转矩,N・m;v<sub>1</sub> 为卷取线速度,m/s;*i* 为减速比。

卷取辊随时间变化的半径 r1(t)表达式为

$$r_1(t) = r_0 + n(t)\delta = r_0 + \frac{\varphi(t)}{2\pi}\delta$$
 (1)

式中:n(t)为对应卷取轴上织物卷取的层数, r/min; $\delta$ 为每层织物的厚度,mm; $\varphi(t)$ 为卷取辊 随时间变化的角位移,rad。

卷取辊随时间变化的转动惯量J(t)为

$$J(t) = \frac{1}{2}m[r_1^2(t) + r_0^2(t)] =$$
  
$$\frac{1}{2}\rho\pi[r_1^2(t) - r_0^2(t)]b[r_1^2(t) + r_0^2(t)] =$$
  
$$\frac{\pi\rho b}{2}[r_1^4(t) - r_0^4] \qquad (2)$$

式中: $\rho$ 为织物的质量密度,g/cm<sup>3</sup>;b为卷取 辊的卷绕宽度,m。

将式(1)代入式(2),得

$$I(t) = \frac{\pi \rho b}{2} \left[ \left( r_0 + \frac{\varphi(t)}{2\pi} \delta \right)^4 - r_0^4 \right] \qquad (3)$$

织物的张力矩 M<sub>r</sub> 为

$$M_T = T \cdot r_1 \tag{4}$$

摩擦转矩 M。为

$$M_s = C_s \cdot \omega \tag{5}$$

式中: $C_s$ 为卷取辊主轴的黏性摩擦系数,N・m/(r・m<sup>-1</sup>); $\omega$ 为卷取辊的旋转角速度,rad/s。

送经主轴的受力分析如图3所示。



图 3 卷取辊主轴受力分析

Fig 3 Force analysis of the take-up roll spindle

假设卷取辊顺时针转动,则电磁转矩方向为 顺时针方向,张力矩与摩擦转矩为逆时针方向。 由此可列写卷取辊主轴的动力学方程为

$$i \cdot M_D - M_s - M_T = J_z(t) \frac{d\omega}{dt} =$$

$$(J_0 + J(t) + i^2 J_D) \frac{d\omega}{dt}$$
(6)

式中: $J_z(t)$ 为t时刻折算后卷取辊主轴的转动惯量,kg・m<sup>2</sup>; $J_0$ 为卷取辊空轴时的转动惯量,kg・m<sup>2</sup>; $J_0$ 为电动机轴的转动惯量,kg・m<sup>2</sup>。

将式(3)~式(5)代入式(6),并整理可得

$$\dot{\omega} = \frac{i \cdot M_D - C_s \cdot \omega - T \left( r_0 + \frac{\varphi(t)}{2\pi} \delta \right)}{\frac{\pi \rho b}{2} [r_1^4 - r_0^4] + J_0 + i^2 J_D}$$
(7)

设织机的纱线卷取线速度为 v<sub>1</sub>,经纱的张力 *T* 可表示为:

$$T = K_f \int_{t_0}^t (v_1 - v_2) \,\mathrm{d}t \tag{8}$$

式中: $K_f$ 为纱线的张力系数; $v_2$ 为纱线退绕的线速度, $m/s_o$ 

假设纱线退绕的线速度 v<sub>2</sub> 为恒定值,对式 (8)的两侧进行求导,可得

$$\dot{T} = K_f [v_1(t) - v_2] = K_f \Big[ \omega \Big( r_0 + \frac{\varphi(t)}{2\pi} \delta \Big) - v_2 \Big]$$
(9)

对式(9)两边同时求导,并整理得

$$\dot{\omega} = \frac{T}{K_{f}r_{1}} \tag{10}$$

将式(9)~(10)代入式(7),并整理得  $\left[\frac{\pi\rho b}{2}(r_1^{4} - r_0^{4}) + J_0 + i^2 J_D\right] \ddot{T} + C_s \dot{T} + K_f r_1^{2} T = iK_d r_1 M_D - C_s K_d v_2$ (11)

按零初始条件下对式(11)进行拉氏变换并 整理,得出传递函数

$$G(s) = \frac{T(s)}{M_{D}(s)} = \frac{iK_{f}r_{1}}{\left[\frac{\pi\rho b}{2}(r_{1}^{4} - r_{0}^{4}) + J_{0} + i^{2}J_{D}\right]s^{2} + C_{s}s + K_{f}r_{1}^{2}}$$
(12)

将相应参数代入,得

$$G(s) = \frac{0.8}{15.3s^2 + 1.65s + 0.3}$$
(13)

# 2 自适应模糊 PID 控制器设计

自适应控制与传统的控制方法相比,不仅能 控制已知系统,而且能控制完全未知或部分未知 的系统。自适应控制的控制策略与控制规律是建 立在未知系统基础之上的,它不但能抑制外界干 扰、环境恶化、系统本身参数变化带来的影响,还 能在某种程度上降低误差的影响。模糊控制适用 于受控对象模型未知和使用传统控制方法效果不 明显的系统。

网络控制系统的被控对象包括物理对象和控制网络,其中控制网络非常复杂,模糊控制非常适合于网络控制系统的控制器设计。Almutai-ri<sup>[10-11]</sup>等将传统的 PID 调节技术与模糊控制技术相结合,利用模糊逻辑对 PID 调节器的参数进行调节以补偿网络时延对系统的影响。Lee 等<sup>[12]</sup>设计了远程模糊控制器,利用 PROFIBUS-DP 组成了一个电动机网络控制系统,分别采用模糊逻辑控制器和传统的 PID 控制器,证明了模糊逻辑控制器非常适合于网络控制系统的结论。

本文仿真控制采用自适应模糊 PID 控制方法。自适应模糊 PID 控制方法是在 PID 控制的基础上引入模糊控制,利用模糊逻辑对 PID 控制器参数进行调节以补偿网络诱导时延对系统的影

响,其控制框图如图 4 所示。自适应模糊 PID 控制器以张力偏差 e 和张力偏差变化率 ec 作为输入,采用二维 Mamdani 控制器,模糊控制决策采用极大 - 极小,解模糊方法采用重心法。K<sub>P</sub>、K<sub>1</sub>和 K<sub>p</sub>的模糊控制规则建立后,根据各模糊子集的隶属度赋值表和参数模糊控制模型,运用模糊合成推理设计 PID 参数的模糊矩阵表。



## 图 4 自适应模糊 PID 控制框图 Fig 4 Block diagram of adaptive fuzzy PID control

仿真时,设置初始参数如下:初始比例增益  $K_p = 800,初始积分增益 K_l = 10,初始微分增益 K_p = 480。通过误差 e 和误差变化率 ec 用模糊规则表解模糊来确定 PID 参数的修正量<math>\Delta K_p$ 、 $\Delta K_l$ 和 $\Delta K_p$ ,得到 PID 控制器实际的 PID 调节参数 (见式(14))。

$$\begin{cases} K_P(k) = K_P(k-1) + \Delta K_P \\ K_I(k) = K_I(k-1) + \Delta K_I \\ K_D(k) = K_D(k-1) + \Delta \Delta K_D \end{cases}$$
(14)  
此时,可以如下计算控制量:

$$u(k) = K_{P}(k)e(k) + K_{I}(k)\sum_{i=0} e(i) + [e(k) - e(k-1)]$$
(15)

在 MATLAB 与 True-Time 环境下建立张力系 统的 True-Time 仿真结构图,如图5所示。图5中 Interference 节点为干扰节点, Actuator 节点和 Sensor 节点为传感器节点, Controller 节点为控制 器节点, Network 为网络模块。Sensor 节点周期地 进行采样,采样值通过 Network 模块发送给 Controller 节点, Controller 节点接收到数据后立即进 行控制计算,并将计算得到的控制信号通过 Network 模块发送给 Actuator 节点。

在控制系统中,采样周期为1 ms,根据情况 对各种网络环境参数的设置如下:

(1)存在网络诱导时延。分别设置传感器到 控制器的预处理时延、控制器计算预处理时延及 控制器到执行器的预处理时延,三者之和即为系





Fig 5 True-time simulation structure diagram of tension system

统闭环预处理时延。仿真程序中通过给各程序中 的变量 exectime 赋值来返回时延。

(2)存在数据包丢失。可通过 Network 模块 中的 Loss probability (0-1)来设置数据包丢失 率,从而仿真出不同数据包丢失率给纱线张力带 来的影响。

(3)存在网络带宽占有率。在干扰节点中, 通过改变网络带宽占有率,从而改变网络负载,产 生信息传输冲突以制造时延和丢包等现象。仿真 程序中通过给变量 BWshare 赋值来确定。

## 3 仿真结果及分析

针对上述张力系统模型进行以下几种情况的 仿真,并将得到的结果与 PID 控制方法做对比。

(1)当张力控制系统存在 10 ms 网络诱导时延、10% 的数据包丢失率以及 10% 的网络带宽占 有率,且张力为恒定值 1.2 N时,控制效果如图 6 所示。





b 自适应模糊 PID 控制

图 6 两种控制方式下同时存在 10 ms 时延、 10% 丢包和 10% 网络带宽占有率时的控制结果 Fig 6 Control results of two control modes with 10 ms delay, 10% packet loss and 10% network bandwidth occupancy

图 6 中的仿真结果表明:常规 PID 控制方法 超调量达到 100%,而自适应模糊 PID 控制方法 超调量低于 30%。显然,自适应模糊 PID 控制方 法有较小的超调量,能达到更好的控制效果。

(2)当张力控制系统存在 30 ms 网络诱导时延、20%的数据包丢失率以及 20%的网络带宽占 有率,且张力为恒定值 1.2 N时,控制效果如图 7 所示。

图 7 中的仿真结果表明:常规 PID 控制方法 输出张力波动大,系统不稳定;而自适应模糊 PID 控制方法虽然产生一定的超调量,但仍能在有效 时间内达到输出张力的稳定。

(3)实际情况中由于各种因素的影响,张力 往往不可能是一个恒定值。将恒定的期望张力值 改为动态值1.2・sin(πt) N,在10 ms 时延、10%







包率、10% 网络带宽占有率下常规 PID 控制方法 和自适应模糊 PID 控制方法的仿真结果如图 8 所 示;在 30 ms 时延、20% 丢包率、20% 网络带宽占 有率下常规 PID 控制方法和自适应模糊 PID 控制 方法的仿真结果如图 9 所示。





b 自适应模糊 PID 控制

图 8 动态张力下同时存在 10 ms 时延、10% 丢包 和 10% 网络带宽占有率时两种控制方式的控制结果 Fig 8 Control results of two control modes with 10 ms delay, 10% packet loss and 10% network bandwidth occupancy under dynamic tension



a 吊戏 FID 控制

图 8 ~ 图 9 的仿真结果表明:常规 PID 控制 方法输出张力波动大、不稳定、跟踪效果差;而自 适应模糊 PID 控制方法输出张力波动小、稳定、跟 踪效果良好,具有更好的控制效果。

### 4 结论

通过对碳纤维角联织机卷取系统的动力学分 析,建立了相应的动力学模型,在此基础上考虑网 络诱导时延、数据包丢失及网络带宽占有率等对 经纱张力的影响,设计一种自适应模糊 PID 控制 器,并进行仿真。仿真结果表明,当系统同时存在 网络诱导时延、数据包丢失及网络带宽占有率等 因素时,自适应模糊 PID 控制方法超调量小、输出 张力波动小、跟踪效果良好、系统稳定性强,具有 更好的控制效果,更适合运用在碳纤维角联织机



b 自适应模糊 PID 控制

图 9 动态张力下同时存在 30 ms 时延、20% 丢包 和 20% 网络带宽占有率时两种控制方式的控制结果 Fig 9 Control results of two control modes with 30 ms delay, 20% packet loss and 20% network bandwidth occupancy under dynamic tension

张力网络化控制系统中。

### 参考文献:

[1] PANG Y Q, LI Y F, WANG J F, et al. Carbon fiber assisted glass fabric composite materials for broadband radar cross section reduction [J]. Composites Science and Technology, 2018,158:19-25.

[2] 刘薇,蒋秀明,杨建成,等.碳纤维多层角联机织装备的集成设计[J].纺织学报,2016,37(4):128-136.

- [3] LU R J, WANG C G, WANG Y X, et al. A CVD method for preparing CNTs – grafted carbon fiber fabrics under quasi – vacuum at low temperature[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2018,7(3): 49-53.
- [4] FAN W, LI D D, LI J L, et al. Electromagnetic properties of three-dimensional woven carbon fiber fabric/ epoxy composite[J]. Textile Research Journal, 2018,88 (20):2353-2361
- [5] 孙哲,吴震宇,武传宇,等. 织机经纱张力自适应滑模 控制器的设计与仿真[J]. 机电工程,2015,32(8): 1124-1127.
- [6] 王友钊,周香琴,黄静,等.织机卷布机构的力学分析及其张力控制系统[J].纺织学报,2013,34(11):141-146.
- [7] 应腾云,张森林. 基于模糊 PI 并联控制的经纱张力控制系统[J]. 纺织学报,2010,31(9):122-127.
- [8] 王岩,孙增圻. 网络控制系统分析与设计[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
- [9] 俞立,张文安. 网络化控制系统分析与设计: 切换系统处理方法[M].北京:科学出版社,2012.
- [10] ALMUTAIRI N B, CHOW M Y. PI parameterization using adaptive fuzzy modulation (AFM) for networked control systems:Part I Partial adaptation[C] // 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2002, Sevilla, Spain. DOI: 10.1109/iecon.2002.1182901.
- [11] ALMUTAIRI N B, CHOW M Y. PI parameterization using adaptive fuzzy modulation (AFM) for networked control systems. :Part II Full adaptation [C] // 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2002, Sevilla, Spain. DOI: 10.1109/iecon.2002.1182902.
- [12] LEE K C, LEE S, LEE M H. Remote fuzzy logic control of networked control system via profibus dp[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003,50(4):784-792.

# Study on Tension Network Control of Take-up System of Carbon Fiber Angle Loom

#### WU Xiaoyu

(School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Aiming at the tension control problem in the take-up system of carbon fiber angle loom, the dynamic analysis of coiling system is carried out and the dynamic model is established. An adaptive fuzzy PID controller was designed based on factors such as network induced delay, packet loss and network bandwidth occupation. This control method is compared with the conventional PID control method by simulation. The results show that under the conditions of network induced delay, packet loss and network bandwidth occupancy, the adaptive fuzzy PID control method has small overshoot, small output tension fluctuation, good tracking effect, strong system stability and better control effect.

Keywords: carbon fiber angle loom; take-up system; network control system; adaptive fuzzy PID control

(责任编辑:李华云)