

基于改进模糊PID的挤出橡胶定量分剪系统研究

王嘉恩, 聂晓根*

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要:对高精度挤出橡胶定量分剪系统进行研究,设计了基于质量反馈的称量系统及模糊PID控制算法。称量系统设计为上压多辊式结构,称量反馈装置设计为杠杆-带式结构。系统采用模糊PID控制算法,通过质量闭环控制实现了挤出橡胶动态定量分剪的自动化和高精度化。通过对偏差信号调节能力分析,对模糊算法的隶属函数参数进行相应地动态调整,提高了模糊PID控制的机器学习能力,实现了PID控制算法参数的自整定。联机运行试验结果表明,该系统可实现挤出橡胶的高精度定量分剪,具有抗扰动和自适应能力,显著提高了定量分剪效率。

关键词:挤出橡胶;定量分剪;PID控制;模糊算法;动态称量

中图分类号:TQ330.4⁺93;TP331.1

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2020)11-0861-07

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2020.11.0861



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

橡胶是一种可逆形变的高弹性聚合物材料,具有电绝缘和耐磨等优良特性,广泛应用于工业、农业和医疗卫生等领域^[1]。目前,橡胶制品种类繁多,衍生出各种加工制造设备,但其生产工艺过程却基本相同,一般以生胶为主要原料,生产工艺过程主要包括塑炼、混炼、成型和硫化等^[2]。在模压成型工艺之前,需要对混炼后的挤出橡胶进行定量分剪,使分剪的橡胶条质量精度符合模具型腔容积和加工件质量要求。因为在模压成型过程中,若胶料用量不足会造成填充间隙,导致产品出现缺胶和致密性问题;若胶料用量过大则容易导致产品产生飞边,造成原材料浪费^[3]。当分剪橡胶条质量为40~100 g时,要求分剪精度不低于0.5%。然而,现有的挤出橡胶称量和分剪工序都由人工完成,分剪时需要多次反复称量才能达到精度要求,导致加工效率低,成为橡胶制品行业生产的瓶颈工序。

挤出橡胶的定量分剪属于动态称量,其称量结构设计和控制算法都直接影响系统定量分剪的精度。针对橡胶机械设备,许多研究人员研发了不同的分剪系统,王飞翔等^[4]发明了一种橡胶条同步切割的机械设备,通过将橡胶条缠绕固定后,同

时驱动多把刀片进行切割,但是该方案只能分剪出定长的橡胶条,若橡胶条因挤出温度和压力等因素导致本身密度不均,则无法高精度定量分剪出橡胶条。王嘉恩等^[5]针对橡胶条的挤出特点设计了一种同轴双向式剪切机,通过定量来分剪挤出的橡胶条,但是该设计方案为开环系统,对于高精度称量分剪系统来说,缺乏必要的反馈控制。在动态称量精度控制方面,研究人员不断地进行探索,申颖^[6]针对皮带秤自动配料系统中存在的控制精度问题,将模糊控制技术结合传统的PID控制策略应用在配料系统调节中。李爽^[7]分析了各种隶属函数对模糊控制器性能的影响。Zafer Bingul等^[8]对Mamdani型模糊控制器隶属函数的结构进行了优化。

本工作结合橡胶挤出规律及其本身固有特性,根据橡胶制品行业的高精度备料要求,以提高橡胶分剪精度和生产效率为目标,对高精度挤出橡胶定量分剪系统进行研究与改进。

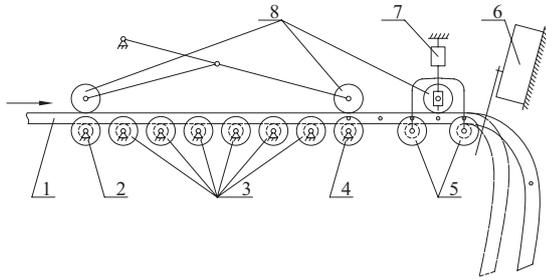
1 称量与反馈系统结构

橡胶定量分剪系统需要配合橡胶挤出机使用。橡胶挤出机将橡胶源源不断地从出料口挤出,形成一条连续运动的橡胶条,经称量装置称量定量后,由分剪机进行分剪。橡胶条的称量系统结构如图1所示。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51405084)

作者简介:王嘉恩(1995—),男,福建莆田人,福州大学在读硕士研究生,主要从事机电系统自动化方面的研究。

*通信联系人(nxg@fzu.edu.cn)

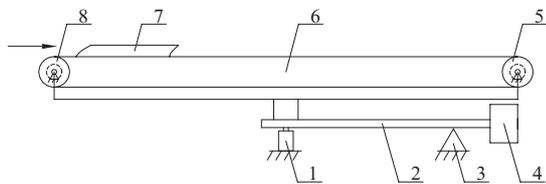


1—橡胶条;2—光电编码器;3—支撑托辊;4—主动托辊;5—称量托辊;6—分剪机;7—称量传感器;8—压辊。

图1 称量系统结构示意图

在称量系统中,橡胶条首先经过安装有光电编码器的托辊,测量出橡胶条的挤出速度,然后控制系统根据实时挤出速度调节主动托辊驱动直流电动机的转速,使主动托辊与橡胶挤出速度相匹配。压辊结构可以使橡胶条运动平稳,避免橡胶条的挤出振动对称量精度产生影响。当称量质量达到系统触发值时,控制系统指令分剪机分剪橡胶条,并根据橡胶挤出速度对分剪机的剪切速度进行调节,以提高定量分剪精度。

高精度挤出橡胶分剪质量为40~100 g时,分剪精度不低于0.5%,同时橡胶条的定量分剪是一个动态过程,工作环境中的噪声、振动、温度、湿度以及传感器的蠕变等都会对称量传感器的称量精度产生影响。为进一步提高定量分剪精度,系统采用质量闭环控制方案。针对轻量物体的高精度称量,称量反馈装置设计为杠杆-带式结构,其结构如图2所示。



1—称量传感器;2—杠杆;3—杠杆支点;4—配质量块;5—从动滚筒;6—传送带;7—橡胶条;8—主动滚筒。

图2 称量反馈装置结构示意图

在该称量反馈装置中,分剪后的橡胶条经传送装置到达称量传送带上,称量传感器实时测量其质量并将数据上传至控制系统,由控制系统对所采集的数据进行处理,经过计算得到分剪后橡胶条的实际质量值,并将该值进行反馈,实现闭环控制。

由于该控制系统属于非线性时变系统,加工环境实时存在不确定的影响因素,因此反馈系统中所得质量值误差只能代表当前的加工环境误差,无法反映系统的历史误差和预测将来的误差变化,具有较大的局限性。如果将反馈系统的测量值直接以线性比例放大作为定量分剪系统的触发值,必然会造成新一轮的误差。为充分利用反馈系统的测量值并尽可能减小存在的随机误差,需要对闭环反馈系统作进一步处理。

2 增量式PID控制算法

在工业控制中,PID控制系统以其结构简单、稳定性好、工作可靠等被广泛应用于各种工控领域。特别是当被控对象结构参数复杂,无法精确建立数学模型时,采用PID控制算法进行系统控制可较大程度地简化建模过程,并取得良好的控制效果。将PID控制算法与挤出橡胶定量分剪系统结合,PID控制原理如图3所示。

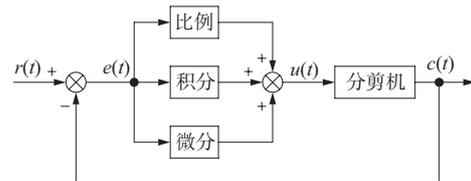


图3 PID控制系统原理

图3中, $r(t)$ 为分剪目标值(t 为时间), $e(t)$ 为当前分剪偏差, $u(t)$ 为PID控制算法输出值,即分剪系统的触发值, $c(t)$ 为橡胶条实测质量,其中:

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (1)$$

传统的PID控制算法在计算机控制系统中经过离散化处理,其表达式为:

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} + u_0 \quad (2)$$

式中, K_p 为比例系数, T_i 为积分时间常数, T_D 为微分时间常数, T 为采样周期, k 为采样序号($k=1, 2, 3, \dots$), u_0 为控制基准。

式(2)中: $K_p e(k)$ 为比例环节,一旦系统出现偏差,该环节将立刻响应并进行反馈调节;

$K_p \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j)$ 为积分环节,它是将系统的历史偏差全部累加进行反馈调节,有助于从历史的角度综合

判断系统存在的偏差变化; $K_p \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)]$ 为微分环节,它是根据系统偏差的变化量提前预测偏差的变化趋势,能对潜在偏差进行预判。

从式(2)可以发现,虽然传统的PID控制算法

$$u(k-1) = K_p \left\{ e(k-1) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k-1) - e(k-2)] \right\} + u_0 \quad (3)$$

令式(2)减去式(3),得到增量式PID控制算法

$$\Delta u(k) = K_p \left\{ e(k) - e(k-1) + \frac{T}{T_i} e(k) + \frac{T_D}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\} \quad (4)$$

式中, $\Delta u(k)$ 为输出值的变化量,因此PID算法的输出值为:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (5)$$

式中, $u(k-1)$ 为上一轮PID算法的输出值,应用式(5)作为当前PID控制算法的输出值,则只需要储存两次的历史偏差数据,无需进行大量的累加计算。同时,由于该式的输出是一个增量,当环境出现较大扰动时,系统能及时进行个案判断处理,避免个案对系统精度的影响,并避免系统产生误动作,甚至机器故障。

3 引入改进模糊PID控制算法

传统的PID控制算法的比例系数、积分时间常数和微分时间常数是定值,需要研发人员前期做大量试验进行确定,而且在后续工作中,即使环境发生变化,这些常数也无法进行自整定。

针对以上不足,许多研究人员提出了一系列不同的改进算法。其中,针对积分饱和现象,提出了积分分离算法,即限幅滤波法,当偏差超过某一阈值时,令积分时间常数取较大值,以减小积分环节对算法输出值的作用;针对某一次偏差出现急剧变化时微分环节的过度灵敏反馈,提出了不完全微分算法。无论针对什么样的偏差变化,对PID控制算法的改进一般是对其比例系数、积分时间常数和微分时间常数进行整定^[9-10],为叙述方便,将式(4)整理为

$$\Delta u(k) = K_p \Delta e(k) + K_i e(k) + K_D [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (6)$$

式中:偏差变化量 $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$; K_i 为积分系数, $K_i = K_p T / T_i$; K_D 为微分系数, $K_D = K_p T_D / T$ 。

由式(6)可知,对PID控制算法的调节只需要

可以从当前、历史和将来的角度对系统进行反馈调节,但是在积分环节中每一次输出都累加历史全部偏差,在工作较长时间后会占用大量控制器内存,增大运算工作量,而且也有可能导致积分饱和。针对该情况,根据递推原理,令 $k=k-1$,得

表达式:

对 K_p, K_i 和 K_D 进行整定。对于需要实现高精度、快速调整的系统来说,若把每一种可能出现的偏差变化都进行算法编程和实时计算,那么就需要占用大量的控制器内存,且很容易造成控制器运算延迟。针对本研究挤出橡胶定量分剪的特点,系统引入模糊控制算法。

模糊控制是模糊数学在智能控制领域的应用,是模拟人脑决策的一种控制规则,它能将系统的输出值进行模糊化,然后经推理决策,最后解模糊输出控制量。将模糊控制与PID控制相结合,可以通过模糊算法规则对系统偏差及偏差变化量进行分析,进而调整PID控制算法参数,达到系统对PID控制算法参数自整定的目的。

在挤出橡胶定量分剪系统中的模糊PID控制原理如图4所示。

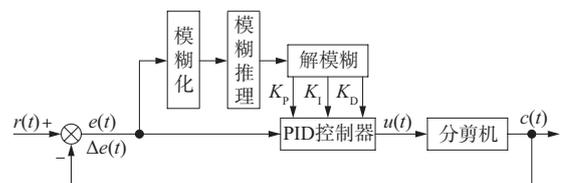


图4 模糊PID控制原理

由图4可知,模糊算法的输入为偏差 $e(t)$ 及偏差变化量 $\Delta e(t)$,输出为PID控制算法参数 K_p, K_i 和 K_D 。以企业常有的加工分剪质量为44.5 g的橡胶条为例,其定量分剪偏差在1 g以内,因此偏差的基本论域为 $[-1, 1]$,偏差变化量的基本论域为 $[-2, 2]$ 。为方便模糊推理,取偏差的量化因子 K_e 为3,偏差变化量的量化因子 $K_{\Delta e}$ 为1.5,因此得到偏差及偏差变化量的模糊论域均为 $[-3, 3]$ 。

然后,需要对该范围进行模糊化,将其划分为7个等级,即模糊子集为{负大,负中,负小,零,正

小,正中,正大},用符号表示为{NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB}。取常用的三角形隶属函数trimf和钟形隶属函数gbellmf表示,则在模糊论域中量化输入值关于模糊子集的隶属度,如图5所示。

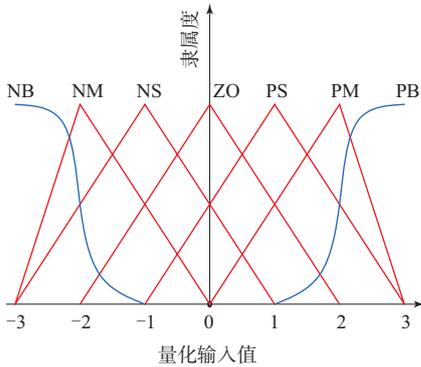


图5 模糊论域与模糊子集的隶属函数
图5中三角形隶属函数的解析式为

$$f(x,m,a,n) = \begin{cases} 0 & x \leq m \\ \frac{x-m}{a-m} & m < x < a \\ 1 & x = a \\ \frac{n-x}{n-a} & a < x < n \\ 0 & x \geq n \end{cases} \quad (7)$$

式中, m,n 分别为三角形左、右边腰线于横坐标轴的交点, a 为三角形中间顶点的横坐标。

图5中钟形隶属函数的解析式为

$$f(x,h,b) = \frac{1}{1+|x-b|^{2n}} \quad (8)$$

式中, h 为钟形上部的开口大小, b 为钟形中间顶点的横坐标。

在该模糊PID控制系统中,输入的偏差及偏差变化量在模糊子集上的隶属度由式(7)和(8)决定。为增加控制系统的机器学习能力,本研究在隶属函数中引入参数变量,即三角形隶属函数的参数 m,n 和钟形隶属函数的参数 h 。通过改变这些参数值来改变模糊控制的隶属度,从而调节整个系统的输出。因为本系统的称量精度为0.1g,偏差值的数量在20个左右,所以对每个具体偏差值经算法调节后的输出结果,系统都可以储存记录下来。然后当系统再次遇到该偏差值时,通过分析上次算法对该偏差值的调节情况,有针对性地调整相应隶属函数的参数,从而改变算法的输出,不断优化算法对工作环境的调节能力。

由图5所示的隶属函数可以得到偏差 $e(t)$ 在模糊子集中的隶属度,如表1所示。

表1 $e(t)$ 在各模糊子集中的隶属度

模糊子集	量化输入值						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
NB	1	0.5	0	0	0	0	0
NM	0	1	0.5	0	0	0	0
NS	0	0.5	1	0.5	0	0	0
ZO	0	0	0.5	1	0.5	0	0
PS	0	0	0	0.5	1	0.5	0
PM	0	0	0	0	0.5	1	0
PB	0	0	0	0	0	0.5	1

同理可得,偏差变化量的隶属度和PID控制算法参数 K_p,K_i 和 K_D 的隶属度。

输入值经过模糊化后,需要对参数 K_p,K_i 和 K_D 分别建立模糊控制规则,从而进行模糊推理。通过对本研究试验数据分析,探究PID控制算法参数对系统控制的调节规律,得出以下结论。

(1)当偏差较大时, K_p,K_i 和 K_D 应取较大值,控制系统快速减小偏差,同时为防止积分、微分饱和,应限制 K_i 和 K_D 。

(2)当偏差为中等时, K_p,K_i 和 K_D 也应取中等值。

(3)当偏差较小时, K_p 应取较小值,同时适当增大 K_i 和 K_D ,减小稳态误差。

根据上述经验,针对不同的输入偏差及偏差变化量,建立PID控制算法参数变化量 ΔK_p 的模糊控制规则表,如表2所示。

表2 ΔK_p 的模糊控制规则表

$\Delta e(t)$	$e(t)$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	PM	NS	NS	ZO
NM	NB	NM	NM	PM	NS	ZO	ZO
NS	NM	NM	NM	PS	ZO	PS	PM
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NS	NS	ZO	NS	PS	PM	PM
PM	ZO	ZO	PS	NM	PM	PM	PB
PB	ZO	PS	PS	NM	PM	PB	PB

同理可得PID控制算法参数变化量 ΔK_i 和 ΔK_D 的模糊控制规则表。

将上述输入、输出值的隶属函数及输出值的模糊规则表通过Matlab软件的Fuzzy工具箱进行模糊推理和解模糊,选用Mamdani模糊推理算法和重

心法 (Centroid) 解模糊, 如图6所示。



图6 Matlab软件Fuzzy工具箱 ΔK_p 的解模糊界面

同理可得PID控制算法变化量参数 ΔK_I 和 ΔK_D 的数值, 然后代入下述公式:

$$K_P = K_{P0} + K_{KP} \Delta K_P \quad (9)$$

$$K_I = K_{I0} + K_{KI} \Delta K_I \quad (10)$$

$$K_D = K_{D0} + K_{KD} \Delta K_D \quad (11)$$

式中, K_{P0} , K_{I0} 和 K_{D0} 分别为PID控制算法参数的初始值, K_{KP} , K_{KI} 和 K_{KD} 为量化因子。

由此可以计算出PID控制算法参数, 再由式(5)和(6)计算得到系统输出值 $u(t)$ 。

4 试验分析

为了验证以上结构设计和控制算法是否满足橡胶分剪精度要求, 制作样机进行加工试验。为适应复杂的工作环境, 系统采用可编程逻辑控制器 (PLC) 作为主控器^[11], 称量仪表作为称量控制器。称量仪表采用两通道称量控制器, 分别用作称量和反馈通道。称量仪表将称量信号实时在线发送给仪表, 仪表与PLC之间采用RS485通讯方式, 经PLC数据处理后控制分剪机执行分剪动作, PLC程序控制流程如图7所示。

根据所设计的系统装置结构和模糊PID控制算法制作试验样机, 如图8所示。

采用试验样机加工分剪的橡胶条的质量分布如图9所示。

从图9可以看出, 机器首次分剪时存在较大误差, 通过前几次的模糊PID控制算法的调节, 橡胶条的质量逐渐稳定, 并在设定值(44.5 g)附近小范围波动, 实现了算法控制的目标, 符合橡胶分剪精

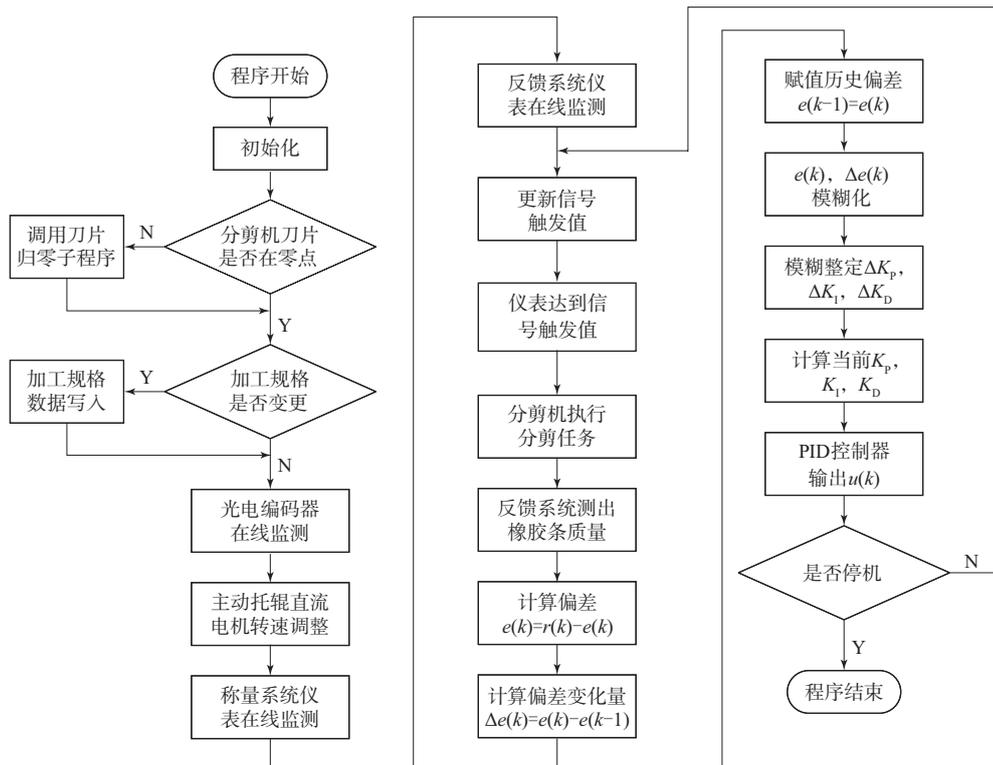


图7 系统程序控制流程



图8 试验样机

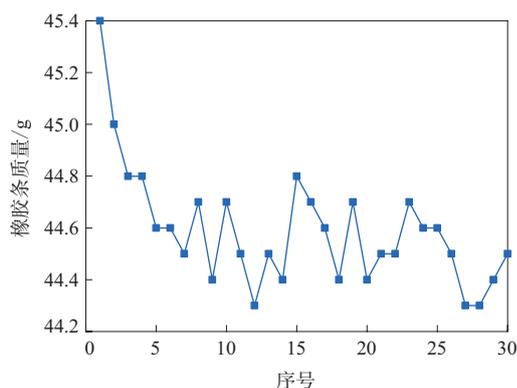


图9 分剪橡胶条的质量分布

度要求。

5 结语

针对高精度挤出橡胶定量分剪系统进行研究,开发了一种基于改进模糊PID控制的定量分剪闭环控制系统,结合橡胶条固有特性设计了一种双辊式称量结构和杠杆-带式反馈结构,实现对橡胶条的初次定量分剪和二次称量反馈。针对存

在的系统偏差及偏差变化量,基于模糊PID控制算法,改进了模糊隶属函数,建立了模糊控制规则表,实现了对PID控制参数的自整定,经Matlab软件计算得到算法输出值,验证了改进模糊算法的正确性。试验结果表明,挤出橡胶在40~100 g称量范围内备料精度稳定地达到 $\pm 0.5\%$,实现了挤出橡胶在线动态高精度定量分剪,可为在线高精度分剪称量研究和生产提供借鉴。

参考文献:

- [1] 陈维芳. 橡胶机械:30年发展奠定强国梦基础[J]. 中国橡胶, 2015, 31(5):11-13.
- [2] 程源. 国内外橡胶机械现状与展望[J]. 橡胶工业, 2000, 47(7):434-441.
- [3] 肖遵文, 聂晓根, 陈立挺, 等. 挤出橡胶高精度自动称量与分剪系统的研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(5):204-208.
- [4] 王飞翔, 王义金. 一种橡胶条生产加工同步分切机械[P]. 中国: CN 110788916A, 2020-02-14.
- [5] 王嘉恩, 聂晓根. 高精度挤出橡胶在线定量分剪机设计与启停抑振控制研究[J]. 机电工程, 2020, 37(6):647-652.
- [6] 申颖. 电子皮带秤自动配料系统的研究与开发[D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [7] 李爽. 基于改进模糊PID气体流量控制的传感器动态测试系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [8] Bingul Zafer, Karahan Oguzhan. A Fuzzy Logic Controller Tuned with PSO for 2 DOF Robot Trajectory Control[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(1):1017-1031.
- [9] 王利宁. 模糊PID控制算法在电动压力发生器开发中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [10] Sharma R, Rana K P S, Kumar V. Performance Analysis of Fractional Order Fuzzy PID Controllers Applied to a Robotic Manipulator[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(9):4274-4289.
- [11] 谷裕, 李健, 付建生, 等. 基于LabVIEW的橡塑自送料机器人远程监控系统[J]. 橡胶工业, 2018, 65(12):1407-1412.

收稿日期: 2020-06-18

Research on Weighing and Shearing System of Extruded Rubber Based on Improved Fuzzy PID

WANG Jiaen, NIE Xiaogen

(Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The high precision weighing and shearing system of extruded rubber was studied, and a weighing system based on weight feedback and a fuzzy PID control algorithm were designed. The weighing

system was designed as an upper pressure multi-roller structure. The weighing feedback device was designed as a lever-belt structure. Fuzzy PID control algorithm was adopted in the system to realize the automation and high precision of dynamic weighing and shearing of extruded rubber through weight closed-loop control. Through the analysis of the adjustment ability of the deviation signal, the membership function parameters of the fuzzy algorithm were dynamically adjusted accordingly, which improved the machine learning ability of the fuzzy PID control and realized the self-tuning of the parameters of the PID control algorithm. The online operation experiment results indicated that the system could achieve high precision weighing and shearing of extruded rubber, which had the ability of anti-disturbance and self-adaptation, and significantly improved the weighing and shearing efficiency.

Key words: extruded rubber; shearing system; PID control; fuzzy algorithm; dynamic weighing

吉林玲珑轮胎年产1 420万条轮胎智能生产项目启动 山东玲珑轮胎股份有限公司(简称玲珑轮胎)全球第7个生产基地——吉林玲珑轮胎有限公司(简称吉林玲珑轮胎)项目从首洽到签约仅用112天,并于2020年4月15日即签约第2天就在长春国际汽车城启动。该项目计划总投资48.93亿元,总占地64.7万 m^2 ,规划总建筑面积46万 m^2 。项目全部建设完成后,可实现1 200万条半钢子午线轮胎、200万条全钢子午线轮胎和20万条翻新轮胎的年产能力,达产后可实现年销售收入44.4亿元。

吉林玲珑轮胎项目启动至今,在吉林省、长春市以及长春汽车经济技术开发区的支持下,破解了一系列重点、难点问题,项目中年产200万条全钢子午线轮胎生产线车间已全线进行基础施工。项目建成后,将实现硬件、软件与服务三位一体的生态化能力,提高生产效率、优化产品结构、提升质量品牌。

吉林玲珑轮胎1 420万条轮胎智能生产项目是长春国际汽车城今年启动实施的重点项目之一。玲珑轮胎将依托该项目,实现制造、销售、服务本地化,更好地服务于一汽集团及吉林周边各大汽车厂和东北三省零售客户。

吉林玲珑轮胎项目的实施,将加快推动玲珑轮胎国际化发展战略实施。玲珑轮胎力争到2030年实现轮胎产销量1.6亿条,实现销售收入超800亿元,产能规模进入世界前五,打造具有世界一流技术水平、一流管理水平、一流品牌影响力的技术型轮胎制造企业。

(摘自《吉林日报》,2020-09-21)

一种耐高温的热塑性弹性体材料及其制备方法 由滁州睿兴高分子材料有限公司申请的专利(公布号 CN 111732772A,公布日期 2020-10-02)“一种耐高温的热塑性弹性体材料及其制备方法”,公开了一种耐高温的热塑性弹性体材料制备方法。所用配方为:苯乙烯类弹性体 15~40,三元乙丙橡胶 10~35,聚烯烃 10~40,热塑性树脂 25~45,矿物填充剂 2~20,有机溶剂 8~12,交联剂 0.05~0.5,交联助剂 0.05~0.5,抗氧剂 0.5~1.5。本发明制备的热塑性弹性体材料具有较低的生产成本和较好的耐热性能,材料在热老化后仍具有较高的性能保持率和适度的交联程度,可有效抑制高温热氧老化导致高分子降解引起的物理性能急剧下降。

(本刊编辑部 马 晓)

一种玉色外观的硅橡胶下颌植入体的制作方法 由周锋杰申请的专利(公布号 CN 111759545A,公布日期 2020-10-13)“一种玉色外观的硅橡胶下颌植入体的制作方法”,公开了一种玉色外观的硅橡胶下颌植入体的制作方法,其主要材料为医用硅橡胶MED-4720和医用硅橡胶色母MED-4502-1, MED-4502-3和MED-4502-4。本发明制作的 下颌假体表面具有一定的粗糙度,使用时能够与人体组织更好地融合,效果自然,减少了临床排异反应和包膜现象,且其外观呈玉色,与人体皮肤接近,避免了植入人体下颌后出现“透光”的现象。

(本刊编辑部 马 晓)