

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.05.015

蜂窝体脱硝催化剂智能锯切系统的设计与研究^{*}

王定胜¹, 卢勇波¹, 李斌胜¹, 许 明^{2*}

(1. 浙江锯力煌锯床股份有限公司, 浙江 缙云 321404; 2. 杭州电子科技大学 机械工程学院 杭州 310018)

摘要:针对现有蜂窝体脱硝催化剂锯切加工系统人工参与过多、智能化程度较低的问题,对蜂窝体脱硝催化剂的物理特性、几何尺寸进行了分析,对现有蜂窝体脱硝催化剂锯切系统的相关成果进行了研究,设计了一款集成六自由度机器人的新型、高效、智能锯切加工系统,实现了自动进料输送、机器人上料、双端同步锯切、机器人下料、自动出料输送等工作流程,该系统采用了模糊PID控制策略来实现恒锯切力变进给速度的闭环控制,六自由度机器人与PLC控制系统的控制信息交互采用了Profibus总线。实验研究表明,研制的蜂窝体脱硝催化剂智能锯切系统能够实现锯切系统的无人管理,大大降低由于蜂窝脱硝催化剂工件锯屑毒性对人体造成的伤害;该系统具有高效、高精度和高智能化等显著优点。

关键词:锯切;脱硝催化剂;机器人;模糊PID

中图分类号:TH39;TG56

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)05-0498-06

Intelligent saw cutting system for honeycomb denitrification catalyst

WANG Ding-sheng¹, LU Yong-bo¹, LI Bin-sheng¹, XU Ming²

(1. Zhejiang Julihuang Sawing Machine Group Co., Ltd., Jinyun 321404, China;

2. School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problems of too much manual participation and low intelligence in the existing sawing processing systems for honeycomb denitrification catalysts, the physical properties and cutting dimensions of honeycomb denitrification catalysts were analyzed, and the existing achievements of sawing cutting system for honeycomb denitrification catalysts were summarized. A novel high efficiency and intelligent saw cutting system was designed which combines with a 6-DOF industrial robot. The saw cutting system can perform a complicated workflow, automatic feeding, robot loading, double-ended synchronous sawing, robot laying-off, and automation ejection. The fuzzy PID control strategy was used to achieve the closed-loop control of the constant cutting force while varying the cutting feeding speed, and the Profibus bus was used to exchange the information between the 6-DOF industrial robot and the PLC control system. The experiment results indicate that the presented intelligent saw cutting system can work on the situation of unmanned operation, so as to greatly reduce the toxic sawdust damage on the human body, the system also has the remarkable features of high efficiency, high precision and intelligence.

Key words: saw cutting; denitrification catalyst; industrial robot; fuzzy PID control

0 引 言

锯切一般应用在金属型材、棒材、管材等的上料加工,本研究所研制的锯切系统是金属带锯床在金属行

业以外的新型节能环保行业中新的尝试与应用。硝烟(气)是几种氮氧化物(NO_x)气体的混合物,主要由一氧化氮(NO)、二氧化氮(NO_2)组成,硝烟都具有不同程度的毒性,是一种对人体健康和自然环境都存在极大危害的大气污染物,其90%以上来自煤、石油等能

收稿日期:2016-10-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375129)

作者简介:王定胜(1970-),男,浙江缙云人,主要从事带锯床方面的研究. E-mail: info@julihuang.com

通信联系人:许明,男,副教授,硕士生导师. E-mail: xumzju@163.com

源物的燃烧和汽车尾气的排放。随着大气污染治理的不断重视,硝烟处理即烟气脱硝技术已经成为环保领域的研究热点。选择催化还原脱硝(selective catalytic reduction, SCR)是一种很有应用前景的烟气脱硝技术^[1-3],在含氧气氛下及催化剂存在时,以氨、尿素或碳氢化合物等作为还原剂,将烟气中 NO_x 还原为 N₂ 和 H₂O。SCR 法具有反应温度较低(300 ℃ ~450 ℃),脱硝效率高(可达 90% 以上),技术成熟,运行可靠,二次污染小等优点,所以在世界上得到了广泛地应用。选择催化还原脱硝催化剂的结构类型主要有蜂窝体、平板式和波纹板式 3 种类型。蜂窝体 SCR 催化剂以 TiO₂ 为基材,与活性物质等混合后通过挤压成型,整体充满活性成分,比表面积大,脱硝率高,且催化体积小,催化活性物质比其他类型多 50% ~70%,失效催化剂通过再生后仍可重复使用,因此得到广泛应用,占到脱硝催化剂的 95% 以上。

蜂窝体 SCR 催化剂在放置到烟道之前,一般要进行尺寸加工以满足烟道尺寸要求,主要是催化剂长度方向上的减小,可以采取锯切的加工方式。在以往锯切过程中,先将脱硝催化剂的一端切去,然后通过人工翻转再将另一端切去,因产品料性很脆,翻转过程中材料极易碰碎,需重复定位,对精度影响很大,且在锯切过程中极易导致崩边,报废率很高,如立式带锯床,在切割蜂窝陶瓷催化剂的过程中,需要人工换边对工件两端进行定位、加工,对加工精度和生产效率影响较大。为了解决上述问题生产出一种全自动双面切割机,如转轮连续进给式蜂窝陶瓷自动切割机^[4]、SCR 蜂窝陶瓷催化剂专用全自动双面切割机^[5]等。其中转轮连续进给式蜂窝陶瓷自动切割机采用变频调速电机转动六角转轮和双切割刀盘能够实现自动锯切,夹紧方面采用气动夹具夹紧配体,但工件的定位仍然是人工安装,而 SCR 蜂窝陶瓷催化剂专用全自动双面切割机则采用两台立式带锯床组合而成,其中一台可横向移动,另一台固定不动,工件通过 V 型座固定在两个锯床的液压工作台上,只需一次定位,并且可自动锯切,但是在上料和下料的过程中仍然需要工人在传送带上放置或移下工件。上述两种加工技术不能避免锯切过程会产生的大量锯屑粉尘,因此,迫切需要研制一种尽量减少人工参与、高防尘的智能化锯切设备。

本研究首先说明蜂窝体脱硝催化剂智能锯切系统的总体设计方案,接着阐明机械部件主要结构及工作原理,说明控制系统运行工作原理,并对所研制的蜂窝体脱硝催化剂智能锯切系统进行总结说明。

1 系统总体设计方案

蜂窝体脱硝催化剂外观如图 1 所示。

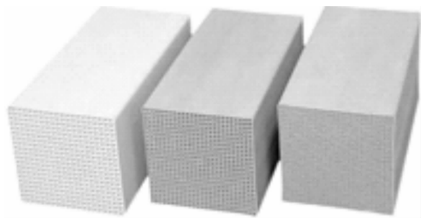


图1 蜂窝体脱硝催化剂

截面一般是正方形,呈蜂窝体密布小孔,硝烟通过蜂窝小孔时,与脱硝催化剂反应,将烟气中的 NO_x 还原为 N₂ 和 H₂O。锯切加工的目的是将其两端切去以得到要求的长度尺寸,便于安装到吸尘装置中。

蜂窝体脱硝催化剂智能锯切系统总体结构如图 2 所示。

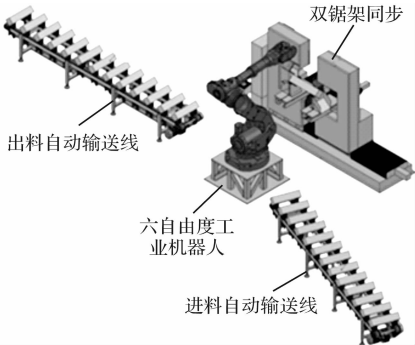


图2 蜂窝体脱硝催化剂智能锯切系统总体结构

锯切系统主要由 5 部分组成:进料自动输送线、搬运机械手、双锯架同步锯床、出料自动输送线 and 控制系统。

其中,搬运机械手将进料自动输送线上的蜂窝体脱硝催化剂搬运至双锯架同步锯床,待锯切完毕后,再将其搬运至出料自动输送线。双锯架同步锯床能够对蜂窝体催化剂的两端进行同步锯切加工,避免单端锯切翻转对加工精度及工件的不利影响。控制系统是整个锯切系统的核心,主要完成自动送料、机械手搬运、自动锯切以及自动出料的协调统一控制。

所研制系统的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 蜂窝体脱硝催化剂锯切系统主要技术参数

性能指标	技术参数
催化剂最大加工尺寸/mm	截面 150 × 150
	长度 500 ~ 1 360
双锯架间距调节范围/mm	500 ~ 1 350
锯切线速度/(m · min ⁻¹)	20 ~ 100(变频调速)
锯切进给	恒锯切力变进给速度
锯切精度/mm	0.25

催化剂的最大截面尺寸可达 150 mm × 150 mm,锯切长度在 500 mm ~ 1 360 mm 内可调。锯切速度采用变频调速控制,在 20 m/min ~ 100 m/min 范围内可

调。锯切进给采用锯架的恒锯切力变进给速度来实现,根据检测的工件硬度、切削宽度等参数实时调整锯切进给速度,实现恒锯切力。

2 机械系统设计

双锯架同步锯床是加工蜂窝体脱硝催化剂系统的专用机床,也是系统的关键设备,其外形结构如图 3 所示。

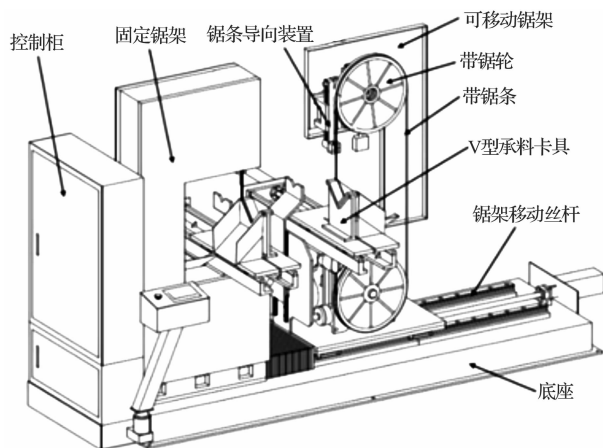


图 3 双锯架同步锯切机床

考虑到蜂窝体脱硝催化剂工件本身的高脆性,设计一种专用的呈 90° 角的 V 型结构承料卡具, V 型承料卡具的两个斜面与水平面成 45° 角且中心对称,左、右两端的承料卡具的中心完全对齐。双锯架同步锯床中,锯切时 V 型承料卡具的中心线与锯条垂直,有效防止加工中工件卡接不牢固而导致其加工破损的问题,保证了锯切的精度和稳定性。

带锯条在锯切过程中循环转动,所以需设计进给装置来实现锯切进给。双锯架同步锯切机床中,锯切进给装置采用滚珠丝杆来驱动,大大降低了滑块与导轨之间的运动摩擦阻力,有效地提高了带锯条进给的响应速度和灵敏度,并能实现高精度定位和重复精度定位,大大降低了进给运动过程中的发热。

蜂窝体脱硝催化剂在锯切过程中,锯床的进给速度并不是恒定的^[6-9],而是采取了恒锯切力变进给速度的策略,原理如图 4 所示。

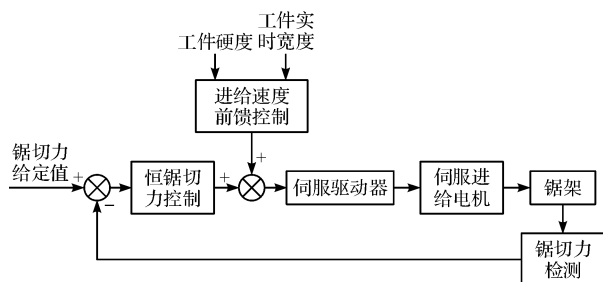


图 4 恒锯切力变进给速度闭环控制策略

在锯切前,需检测工件硬度、尺寸等参数,并将这些参数输入到锯切控制器,执行前馈控制并输出变进给速度给定值的第一部分,锯切过程中,锯切力给定值与实际锯切力构成闭环控制,实际锯切力的检测通过安装在卡具上的力传感器进行实时检测。锯切力的偏差通过恒锯切力控制器输出变进给速度给定值的第二部分,给定值的第一部分与第二部分之和作为伺服控制器的输入值,控制伺服电机对锯架的进给进行实时控制,目的是保证锯切力恒定,从而提高锯切稳定性,提高带锯条使用寿命^[10]。

变进给速度的进给算法,须首先测出在待机状态下测距传感器与脱硝催化剂末端之间的距离 L_1 ,锯条锯齿与脱硝催化剂末端的距离为 L_2 ,工件检测杆下边沿与脱硝催化剂末端距离为 L_3 ,将这些参数存入系统。工件检测杆下端与工件接触时,传感器与脱硝催化剂末端的距离为 L_4 。则工件的待加工长度为:

$$L = L_4 - (L_1 - L_2) - (L_2 - L_3) \quad (1)$$

传感器在锯切过程中与脱硝催化剂末端的实时距离为 l ,则当 $l > L + (L_1 - L_2)$ 时,为非锯切状态,当 $l = L + (L_1 - L_2)$ 为锯切初始状态,当 $l = L + (L_1 - L_2)$ 为锯切状态, $l = L_1 - L_2$ 时,锯切结束。在锯切过程中,进给深度为:

$$h = L - (l - (L_1 - L_2)) \quad (2)$$

当前锯切宽度为:

$$d = \begin{cases} 2h \\ 2(L - h) \end{cases} \quad (3)$$

根据锯切行业推荐的加工各种材料的锯切速度和进给量表可得进给量和锯切宽度成一次线性关系:

$$V_f = kd + b \quad (4)$$

通过传感器获取的当前位置,根据公式(4)即可以求出当前的进给速度值,通过数模转换器和比例放大器控制伺服驱动电机的转速调整锯架(条)的进给速度。

锯架上的带锯条张紧装置采用液压驱动,张紧油缸在控制信号作用下伸出或缩回,能够很方便地调节张紧力^[11]。通过张紧压力表即能准确测算张紧力大小,有效地保护了带锯条,既不会张得太紧而使带锯条断裂,也不会张得太松,而出现锯切时的拉齿现象,延长了带锯条的使用寿命,在锯切结束后张紧油缸会自动卸压并松开锯条,保证带锯条不会在长时间张紧的状态下而变形,而影响锯条的使用寿命。

带锯条液压张紧原理如图 5 所示。

由于带锯床采用的是循环锯切方式,锯条长度长,锯架上设有带锯条导向装置,该带锯条导向装置主要由导向槽来实现,使得带锯条在锯切受力时不会发生

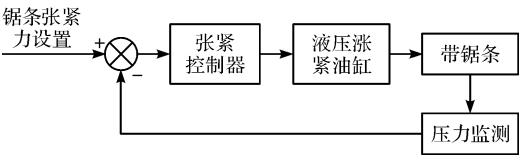


图 5 带锯条液压张紧原理

歪斜影响锯切的精度。同时考虑到在锯切的工件会有不同的尺寸,这样导向块的使用位置也会不同,故本研究通过滑动块调节导向块的使用高度,将导向块设置于距离工件的合适位置,达到最佳的锯切效果。

锯切过程产生大量的脱硝催化剂粉尘,因此双锯架同步锯切机床采取负压吸尘的方式来吸附锯屑。

此外,搬运机械手可以实现锯切系统的无人化运行。采用该工业机器人后,一方面保证了双锯架机床的上料和下料精度,避免重复定位;另一方面可实现系统的无人化运行。

3 电气系统设计

3.1 电气系统原理介绍

控制系统原理如图 6 所示。

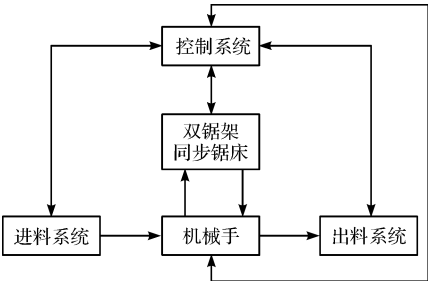


图 6 控制系统原理图

系统主要包括进料系统控制模块、机械手控制模块、出料系统控制模块和双锯架同步锯床控制模块。基于西门子 300 系列 PLC 的控制系统接收各控制模块的检测信号,据此判断各模块的运行状态,并发出控制指令给各模块,使各模块按照指定的流程进行工作。此外,如果其中某个模块发生故障,控制系统能够及时对故障部位进行定位,并通知操作人员排除故障。

其中,控制系统与机械手的控制信息交互采用 Profibus 总线,适用于锯切系统的高速数据交换,满足实时性要求^[12-10]。控制系统与机械手之间的数据交换原理如图 7 所示。

3.2 系统硬件选型与设计

本研究选取电气控制元件如下:

(1)PLC。采用西门子 S7-300 系列;CPU 模块 315-2DP、通讯模块 CP343-1、输入输出模块;

(2)ABB 六自由度机器人控制器。采用 ABB IRC 5;

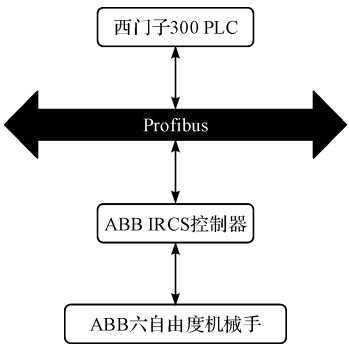


图 7 控制系统与机械手间的信息交互原理

(3) 上位监控计算机。采用研华 IPC 610。

PLC 与 ABB 工业机器人的通信是硬件设计的重要点。在本系统中,选用目前应用非常广泛的 Profibus-DP 现场总线实现 PLC 与 ABB IRC5 之间的通信,通信波特率为 1.5 Mbps,最大传输距离为 200 m,满足蜂窝体脱硝催化剂锯切系统的要求。

3.3 电控软件系统设计

按照系统功能要求,系统流程框图如图 8 所示。

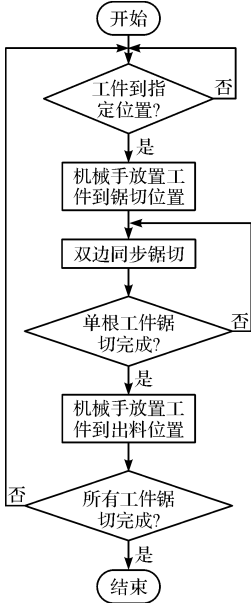


图 8 蜂窝体脱硝催化剂智能锯切系统工作流程

所有操作均可通过程序来自动完成。

3.3.1 恒锯切力变进给速度模糊 PID 控制

在锯切中进给速度和锯切力的控制是保证双锯架同步锯床的锯切过程稳定的关键因素,本研究采用模糊 PID 控制^[17]来实现图 4 所示的恒锯切力变进给速度闭环控制策略。锯切力的通过安装在卡具上的力传感器对锯切力进行实时检测,并反馈给锯切控制器,实现闭环控制。

该控制思想首先在于,将 PID 三大参数以及锯切力偏差 $e(t)$ 和锯切力偏差变化率 e_c 之间的模糊关系探究清楚,在对系统工作进行控制时,对 $e(t)$ 以及 e_c

进行实时检测,结合各个时刻两个数据的具体状况,对该控制器的三大参数进行在线调整,实现控制目标,从而让被控对象具备优越的动态、静态性能。具体原理如图 9 所示。

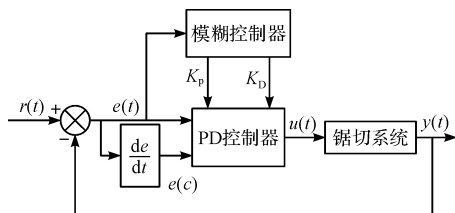


图 9 恒锯切力变进给速度系统模糊 PID 控制原理图

图中模糊控制量的输出为 PID 的控制参数为 K_p , K_i , K_d , $r(t)$ 为锯切力给定输入值, t 是时间变量, $u(t)$ 是系统控制器的控制输出, $y(t)$ 是锯切力的实际输出值, $e(t) = r(t) - y(t)$ 是锯切力的偏差。

首先本研究对锯切力实际输出值 $y(t)$ 和给定锯切力 r 之间的偏差及偏差变化率进行计算,随后对其进行模糊化操作,将得到的模糊变量由模糊规则经过模糊推理变化得到输出模糊集合,在经过解模糊后得到模糊控制器的输出量,即 PID 控制器的调节参数 K_p , K_i 和 K_d 。

为了提高系统的响应速度,增加系统的稳定性本研究采用只包含比例微分的 PD 调节, K_p , K_d 两者的变化范围可表示为 $K_p = [K_{pmin}, K_{pmax}]$, $K_d = [K_{dmin}, K_{dmax}]$ 。为了方便计算,这里对 K_p , K_d 进行归一处理后,化为 K'_p , K'_d [18]:

$$\begin{cases} K'_p = \frac{K_p - K_{pmin}}{K_{pmax} - K_{pmin}} \\ K'_d = \frac{K_d - K_{dmin}}{K_{dmax} - K_{dmin}} \end{cases} \quad (5)$$

本研究根据实际 $e(t)$ 的实际变化范围将其的论域划分为 $\{-6, -5, -4, \dots, 0, \dots, 4, 5, 6\}$ 13 个等级,量化因子为 1,则系统控制量 U 的论域为 $[-6, 6]$ 其模糊子集为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。笔者在对 PID 控制参数 K'_p , K'_d 的模糊化中,将它们划分为 $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 这 7 个等级,则 K'_p , K'_d 的论域为 $U_1 = U_2 = [0, 6]$,表示为模糊子集 $\{S, M, B\}$ 。笔者在模糊论域的划分中采用均匀划分的方法。在隶度函数的选取上选择三角函数,这类函数较为简单,曲线形状较尖,分辨率较高,相应地控制灵敏度也较高。

为了满足快速调节的要求,模糊控制器采用了离线计算、在线查表的控制方法,即根据已有的技术知识和操作经验,针对不同的输入情况,离线计算出相应的输出参数,并绘制一张模糊查询表,存放在 PLC 的数据块中。模糊控制器的输出作为 PID 控制器的运算参数,由 PLC 提供的功能块 FB41 实现运算。在 Step7 中完成系统硬件组态,并在功能块中写下梯形图及 STL

(STL, Step Ladder Instruction) 语言程序 [19]。

3.3.2 上位机软件设计

双锯架同步锯床的软件采用 Visual Basic 6.0 编写,其主要界面如图 10 所示。

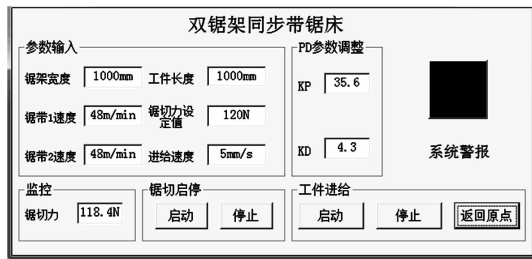


图 10 系统软件界面

主要包括以下几个模块:

- (1) 参数输入。设置锯架宽度、锯带速度、工件长度和锯切力设定值、进给速度;
- (2) PD 参数整定。用于输入 PID 算法的 2 个增益;
- (3) 锯切监控模块。对锯切过程的锯切力进行实时监控;
- (4) 锯切启停模块。对同步锯切的启动停止进行控制;
- (5) 工件进给模块。对工件的启动、停止以及夹具返回原点进行控制;
- (6) 系统报警模块。当系统检测识别出工作台工作异常时,系统将会报警。

在设计中要保证双锯架同步锯床在锯切过程中同步锯切以及锯切力的恒定,首先对锯带 1、2 的速度进行测试,满足条件后才能进行自动加工。当机械手将工件放置在卡具指定位置,并退出后,同步电机工作,锯切开始,此时可根据观测结果对 PID 参数进行在线调整,实现恒锯切力变进给速度的加工过程,满足锯切要求。

4 系统实验

本研究搭建了试验台进行试验验证,具体实验条件表 2 所示。

表 2 恒锯切力变进给速度锯切系统实验参数

参数名称	参数值
锯切速度/($m \cdot min^{-1}$)	48
初始进给速度/($mm \cdot min^{-1}$)	5
待加工催化剂尺寸/mm	截面 150 × 150, 长度 1 000
锯切力设定值/N	120
锯条类型	3TPI

在模糊 PID 控制下,本研究基于上位机所给出的进给速度指令,进行恒锯切力变进给速度锯切后,对压力监测装置所采集的信号进行处理后得出的锯切力随时间的波动曲线如图 11 所示。

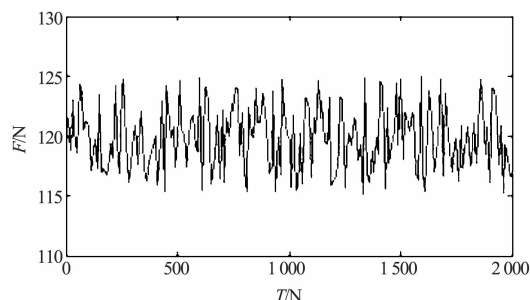


图 11 锯切力检测实验

实验数据表明:采用恒锯切力变进给速度控制系统进行锯切,锯切力波动较小,保持在 115 N ~ 125 N 之内,满足设计要求。实验结果表明该系统采用的模糊 PID 控制对锯切力控制较小范围内波动,对锯切力的控制精度高,整个系统稳定可靠、波动小、抗干扰能力强,工件的断面精度经测试符合要求。

5 结束语

本研究所研制的蜂窝体脱硝催化剂系统是由智能化双锯架同步锯床、高精度搬运机械手以及智能送料、出料输送线组成的高度智能化集成系统,具有锯切力控制精度高、锯切效率高、无人化操作等优点,且已在电厂、汽车从等实际生产过程中得到成功应用,具有较为实用的价值和广阔的市场前景。

参考文献 (References):

- [1] 袁 处. 蜂窝体 SCR 催化剂制备及其脱硝性能研究[D]. 镇江:江苏科技大学能源与动力学院,2011.
- [2] 高 岩. 选择性催化还原脱硝催化剂的实验与机理研究[D]. 济南:山东大学机械工程学院,2013.
- [3] 张忠金,关 磊,王 莹. 汽车尾气脱硝新型催化剂的制备及应用研究进展[J]. 化工新型材料,2014,42(8):219-221.
- [4] 程小军,孙晓放,高 鑫,等. 转轮连续进给式蜂窝陶瓷自动切割机的设计[J]. 中国陶瓷,2011(11):73-74.
- [5] 东莞乔鑫自动化科技有限公司. SCR 催化剂专用全自动双端面切割机 QXZ-1300 系统手册[EB/OL]. <http://www.11467.com/3038950.htm>

- [6] VARVATSOULAKIS. Design and implementation issues of a control system for rotary saw cutting[J]. **Control Engineering Practice**,2009,17(1):198-202.
- [7] 韩 斌. 金属切削带锯床设计的若干问题研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2012.
- [8] 梁利华,韩 斌,陈栋栋,等. 带锯床锯切过的力建模[J]. 浙江工业大学学报,2013,41(4):375-379.
- [9] 倪 敬,汤海天,刘湘琪,等. 带锯床锯切负载检测系统研制[J]. 机电工程,2014,31(5):620-623.
- [10] 杭州飘哲电子科技有限公司. 恒锯切力变进给速度的锯架进给系统及其方法[P]. 中国:20121576921,2012-05-17.
- [11] 么永强,弋景刚,王泽河,等. 立式轻型金属带锯床张紧力的研究[J]. 河北农业大学学报,2002,25(5):289-291.
- [12] 朱雅光,程志海,吴永平. 基于 ARM-CPL 的可编程金属带锯床控制系统[J]. 机电工程,2015,32(12):1616-1619.
- [13] 孙鹤旭,梁 涛,云利军. Profibus 现场总线控制系统的设计与开发[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
- [14] 汤态强,马钧华,杨薇薇. 电梯现场总线系统的优化设计[J]. 轻工机械,2016,34(4):58-62.
- [15] 杨红亮,冯 巍,段文军,等. 基于 PROFIBUS DP 通讯的微量灌装闭环控制[J]. 包装与食品机械,2015(5):28-31.
- [16] EDUARDO ANDRÉMOSSIN, DENNIS BRANDÃO, GUILHERME SPERA SESTITO, et al. Automatic diagnosis for profibus networks[J]. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**,2016,27(6):658-669.
- [17] LEONID REZNIK, OMAR GHANAYEM, ANNA BOURMISTR OV. PID plus fuzzy controller structures as a design base for industrial applications[J]. **The International Journal of Intelligent Real-Time Automation**,2000,13(4):419-430.
- [18] 蒙 臻. 带锯床恒功率锯切系统研制[D]. 杭州:杭州电子科技大学机械工程学院,2012.
- [19] 西门子(中国)有限公司. S7-300 PLC 系统手册[M]. 北京:西门子(中国)有限公司,2008.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

王定胜,卢勇波,李斌胜,等. 蜂窝体脱硝催化剂智能锯切系统的设计与研究[J]. 机电工程,2017,34(5):498-503.

WANG Ding-sheng, LU Yong-bo, LI Bin-sheng, et al. Intelligent saw cutting system for honeycomb denitrification catalyst[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017,34(5):498-503.

《机电工程》杂志:<http://www.meem.com.cn>