

层流炉二维 PIV 自动控制系统*

杨延强¹ 易维明² 李志合² 柏雪源² 李永军²

(1. 沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110161; 2. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049)

【摘要】 在层流炉冷态粒子图像测速(PIV)系统中,相机与测量管的相对位置是保证试验数据精确的重要条件。为使试验过程中整个 PIV 系统操作起来更加方便、准确、快捷,设计了二维 PIV 自动控制系统,并在层流炉冷态模拟装置上对该系统的可靠性进行了试验验证。与没有使用二维 PIV 自动控制系统之前的试验结果相比:各测量段颗粒的轴向中心速度相互之间的衔接实现了平滑过渡,消除了跳跃性变化;收集距离为 350 mm,主气流流量为 1.5 m³/h 时,层流炉内颗粒停留时间的相对误差为 9.218%。说明该二维 PIV 自动控制系统能够满足层流炉冷态试验需要,实现了均匀、连续拍摄,减少了人为误差,提高了试验数据的准确性。

关键词: 生物质半焦 层流炉 粒子图像测速 自动控制系统

中图分类号: S216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)03-0088-05

Design and Experiment of the Two-dimensional PIV Automatic Control System for Laminar Entrained Flow Reactor

Yang Yanqiang¹ Yi Weiming² Li Zhihe² Bai Xueyuan² Li Yongjun²

(1. School of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China

2. School of Agricultural and Food Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract

In the cold PIV (particle image velocimetry) system of the laminar entrained flow reactor, the relative position between the camera and the measuring tube was an important condition to ensure accurate test data. To make the PIV operation more convenient, accurate, and fast in the test, two-dimensional PIV automatic control system was designed. And the reliability of the system was tested in the cold simulation equipment of laminar flow furnace, compared with no using two-dimensional PIV automatic control system, the results showed that in different sections of the measuring tube, the particle speed of the axial center achieves a smooth transition, and eliminates the jump change; when collection distance is 350mm and main air flow rate is 1.5 m³/h, the relative error of particle residence time is 9.218%; and the operation saves time and effort in the test process. These suggested that the two-dimensional PIV automatic control system could satisfy the cold test of the laminar entrained flow reactor needs, achieve uniform and continuous test, reduce human error and improve the accuracy of test data.

Key words Biomass char, Laminar entrained flow reactor, Particle image velocimetry (PIV), Automatic control system

引言

近年来粒子图像测速 (particle image

velocimetry,简称 PIV) 作为可以测量从慢速到超音速流场的一种无接触全场测试技术,获得了飞速发展^[1~2],并广泛应用于风洞、多相流等^[3~10]的可视

收稿日期: 2011-03-29 修回日期: 2011-07-12

* 国家自然科学基金资助项目(50876056,51006065)

作者简介: 杨延强,博士生,主要从事生物质能源开发和综合利用技术研究, E-mail: yanqiang227@163.com

通讯作者: 易维明,教授,博士生导师,主要从事生物质能源开发和综合利用技术研究, E-mail: yiweiming@sdut.edu.cn

化研究。为探索层流炉内颗粒的运动规律,同时为层流炉内生物质颗粒热解挥发规律提供数据支持,将 PIV 技术应用在层流炉上进行了测试研究^[9]。

在层流炉冷态 PIV 试验过程中,由于测量区域一般较大,同时相机拍摄区域的大小又有限制,因此常常需要把测试区域分成几部分分别测试,进而需要多次调节相机和激光器的位置,其中相机位置调整是关键,也是难点。

现有的试验装置由于用人工手动操作,难免在调整相机位置时相机与测试区域之间的相对距离发生变化造成试验误差,而且调整耗时较长。为了更加准确、快捷地进行层流炉冷态模拟试验,提高试验数据的准确性和精确性,本文利用 PLC 设计一套二维 PIV 自动控制系统,以满足试验过程中相机位置多次调整的要求,实现相机移动的自动控制。

1 试验设备与仪器

1.1 硬件组成

该自动控制系统主要硬件组成为:步进电动机、滚珠丝杠、联轴器、导轨和滑块以及附属装置。相机的移动主要集中在上下和左右方向。

1.1.1 步进电动机选型

作为整个控制系统的动力元件,步进电动机的选型尤为重要。步进电动机是将电脉冲信号转变为角位移或线位移的开环控制元件。在非超载的情况下,步进电动机的转速、停止的位置只取决于脉冲信号的频率和脉冲数,而不受负载变化的影响,即给电动机加一个脉冲信号,电动机则转过一个步距角。这一线性关系的存在,加上步进电动机只有周期性的误差而无累积误差等特点使得在速度、位置等控制领域得到广泛的应用^[11~12]。

经过确定驱动机械装置,计算负载力矩,计算负载惯量等步骤后,选用 57 系列的 57YG350 型和 86 系列中的 86YG350A 型 2 个三相混合式步进电动机实现上下和左右方向的移动。

作为相机上下移动的动力元件,其负荷较小,57YG350 型步进电动机最大静转矩为 $1.2\text{ N}\cdot\text{m}$,最大空载启动转速为 360 r/min ,配套驱动器为 MS-3H057M,足够满足装置正常运行的要求。

相机左右移动需要承载上下移动的部件,负荷较大。86YG350A 型步进电动机最大静转矩为 $2.4\text{ N}\cdot\text{m}$,最大空载启动转速为 240 r/min ,配套驱动器为 MS-3H090M。因此选定其作为左右移动的动力元件以满足装置正常运行的要求。

1.1.2 步进电动机驱动器选择

步进电动机的转动需要驱动器来驱动,只需

给驱动器脉冲信号即可,每给驱动器一个 CP 脉冲,步进电动机就旋转一个步距角(细分时为一个细分步距角),也就是说,步进电动机时时跟随 CP 脉冲的变化^[13]。

根据所选步进电动机,设计中采用 MS-3H057M 型驱动器和 MS-3H090M 型驱动器。

1.1.3 步进电动机控制器选择

可以用作步进电动机的控制器主要有单片机、PLC 等。由于 PLC 及其有关的设备,都按易于与工业控制系统连成一个整体、易于扩充功能的原则而设计,比如为了配合步进电动机的控制,许多 PLC 都内置了脉冲输出功能,并设置了相应的控制指令,可以很好地对步进电动机进行控制,实现和其他设备的通信等^[14~15]。本设计选用西门子 CPU222 晶体管输出型 S7-200 PLC 控制步进电动机。

1.1.4 传动元件滚珠丝杠、导轨和滑块

(1) 滚珠丝杠是将回转运动转换为直线运动,或将直线运动转换为回转运动的理想产品,主要由螺杆、螺母和滚珠组成。由于具有很小的摩擦阻力,同时兼具高精度、可逆性和高效率的特点,滚珠丝杠被广泛应用于各种工业设备和精密仪器。

本装置选用的是山东济南原平动力传动有限公司生产的 SF102005-4 型滚珠丝杠,设计长度为 $1\,350\text{ mm}$ 。

(2) 丝杠支承座

丝杠的安装需要有固定端和支撑端,这主要是为了补偿丝杠发热伸长时的变形,固定端是丝杠的受力端,丝杆受到的外力都是由固定端承担的,而支撑端是为了支承丝杠避免丝杠悬垂。本设计选择与 SF102005-4 型滚珠丝杆配套的 TI FF15 支撑端和 FK 固定端。

(3) 直线导轨和滑块

直线导轨用于需要精确控制工作台行走平行度的直线往复运动场合,拥有比直线轴承更高的额定负载,同时可以承担一定的扭矩,可在高负载的情况下实现高精度的直线运动,直线导轨和滑块通常配套使用。

选用直线导轨和滑块作为试验装置的元件,主要是考虑到其具有以下等特点:① 定位精度高,容易获得高度的行走精度。② 总成本低,降低造价并大幅度节约电力,节省能源效果明显。③ 可实现无间隙轻快地高速运动。④ 可长期维持系统的高精度。⑤ 所有方向都具有高刚性。

根据试验装置的设计要求选用山东济南原平动力传动有限公司生产的 TR-20 型直线滑动单元支撑导轨。

(4) 梅花联轴器

本设计中选用 SRJ-20C 型联轴器作为步进电动机和丝杠的连接部件。

1.2 软件组成

软件部分主要包括步进电动机控制方法、主要程序以及监控软件组态王 6.53。

(1) 步进电动机控制方法

步进电动机的控制是通过上位机设定参数,利用 S7-200 PLC 的高速脉冲输出功能输出脉冲信号,送给大功率管组成的驱动电路,经过驱动器去控制步进电动机实现位置控制。结合上述步进电动机驱动器,步进电动机控制框图如图 1 所示。

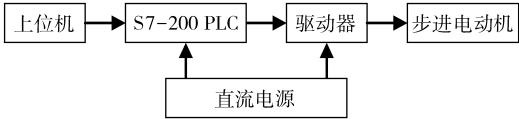


图 1 步进电动机控制框图

Fig. 1 Control diagram of electrical stepper motor

(2) 程序实现

程序的编写主要围绕步进电动机驱动器的控制进行,步进电动机的速度取决于输入控制脉冲的频率,步进电动机的定位取决于输入控制脉冲的数量,PLC 主要控制程序如图 2 所示。

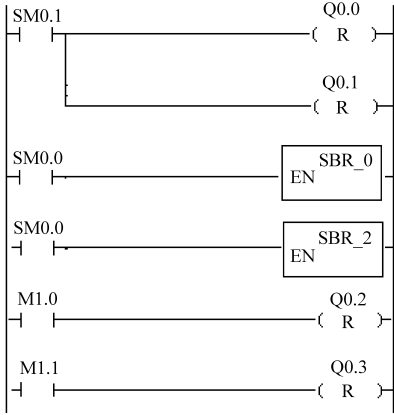


图 2 控制程序梯形图

Fig. 2 Ladder control program

(3) PLC 与上位机的连接

PLC 对步进电动机的速度控制有 3 个方面:
① 对步进电动机启动、停止时加减速的控制。
② 对步进电动机运行脉冲频率的控制。
③ 对运转脉冲数目的控制。

组态 6.53 软件中提供了位置控制向导,该向导可以生成位控指令,可以用这些指令在应用程序中对速度和位置进行动态控制。

作为一种新型的工业自动控制监控系统软件,组态王以标准的工业计算机软、硬件平台构成的集成系统而取代传统的封闭式系统,它具有适应性强、

开放性好、易于扩展等优点。

组态 6.53 相机移动控制界面如图 3 所示。

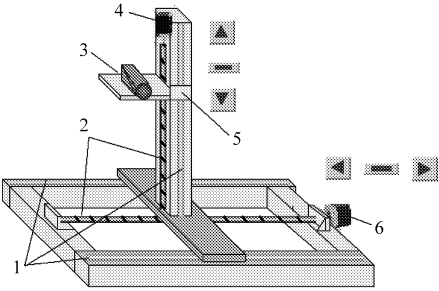


图 3 相机自动控制界面

Fig. 3 Automatic control interface of the camera

1. 导轨 2. 丝杠 3. 相机 4. 步进电动机(上下移动) 5. 滑块
6. 步进电动机(左右移动)

2 试验验证

为了测试二维 PIV 自动控制系统的性能,使用该自动装置重复层流炉试验与人工操作得到的试验数据进行对比分析。

2.1 层流炉冷态 PIV 试验装置

层流炉快速热解装置反应管为圆管,内径为 50 mm,但在 PIV 试验中,由于圆形管中光的反射作用,无法达到预期的测试要求,因此结合当量直径^[16]的概念,将圆管近似为方管进行试验分析。

$$d_e = \frac{2ab}{a + b}$$

式中 a 、 b ——近似方管的边长
 d_e ——当量直径

为尽量减小反应管结构对流场的影响,因此设计的冷态测量管横截面为正方形,边长是 50 mm。层流炉冷态 PIV 试验装置如图 4 所示。

试验时将氩气经主气流进气口通入测量管中,然后用振动喂料器喂入生物质半焦颗粒,氩气通过导流环携带生物质半焦通过测量管,部分生物质半焦被收集管收集,部分被排到大气中,氩气的流量大小由玻璃转子流量计来控制。

2.2 试验结果对比

选择过竖直测量管中心的竖直平面为研究平面,选择水平向右的方向为 X 轴正方向,竖直向上的方向为 Y 轴正方向, X 轴与竖直管左壁面内壁交点为坐标原点,出料管口定为 $H = 0$ (对应标尺的 260 mm 处), H 值向下依此增加。

试验条件为:收集距离为 350 mm,主气流流量为 1.5 m³/h,根据 PIV 系统的拍摄范围,把 350 mm 划分为 5 段,每段 70 mm,即分 5 次拍摄完成整个试验,因此这需要 5 次调节相机的位置,待相机位置调整好后重新开启振动喂料器进行试验,后拍摄标

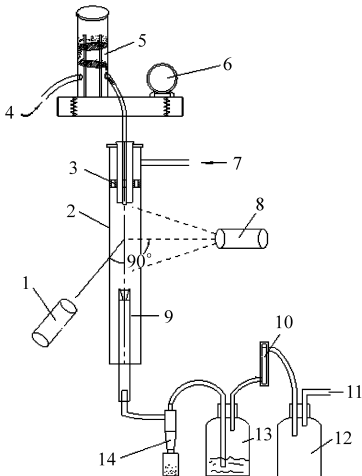


图 4 层流炉试验装置整体布局示意图
Fig. 4 Overall layout diagram of the laminar flow furnace's testing equipment

1. 相机 2. 测量管 3. 导流环 4. 携带气流进口 5. 喂料器
6. 振动电动机 7. 主气流进口 8. 激光 9. 收集管 10. 流量计
11. 接真空泵 12. 稳压罐 13. 过滤装置 14. 旋风分离器

尺,处理试验所得数据。

2.2.1 生物质半焦在管中心轴向速度

试验结果比较如图 5 所示。

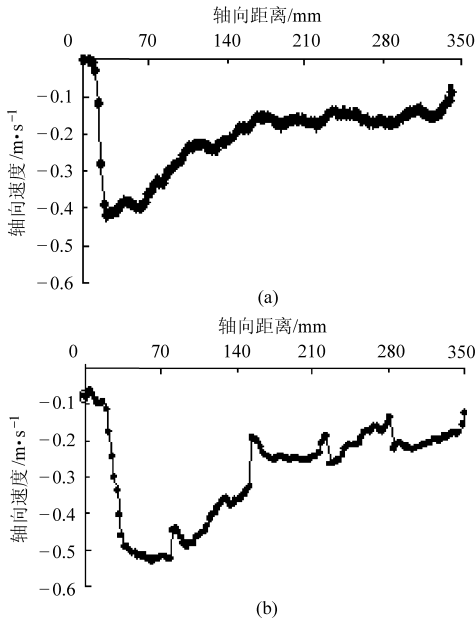


图 5 350 mm 收集距离管中心轴向速度分布
Fig. 5 Center axial velocity distribution of 350 mm collection distance
(a) 自动调节 (b) 手动调节

由图 5 可以看出,使用自动控制系统后得到的管中心生物质半焦颗粒的轴向速度分布数据明显较

使用前的合理,各段间的速度比较平滑、衔接很好,说明其能更好地满足试验要求。

2.2.2 停留时间的对比

生物质半焦颗粒由喂料器喂入竖直测量管内,通过出料口到收集口这段距离的时间为停留时间,利用 PIV 技术拍摄的图像进行处理后生成数据文件,生物质半焦颗粒通过反应管中心的时间可近似为

$$T = \sum_{i=0}^n \frac{\Delta S_i}{V_i}$$

式中 ΔS_i ——相邻两点轴向距离的差(即 PIV 图像处理中所选取的 Y 方向的步长乘以图像放大率)

V_i ——PIV 系统测得的各点速度

根据 PIV 判读区的定义知道 ΔS_i 值较小,由于各段的图像放大率不同,各段的 ΔS_i 稍微有所差别,但是大约都在 1.25 mm 左右,在这么短的距离内 V_i 的差别比较小,因此这样计算出的速度较为准确。

试验利用 PIV 技术测得生物质半焦颗粒在层流炉内停留时间计算结果如表 1 所示。

表 1 生物质半焦颗粒停留时间对比
Tab. 1 Residence time comparative analysis of the biomass chars

收集距离 /mm	主气流流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	停留时间/ms		相对 误差/%
		手动	自动	
350	1.5	1 338.457	1 215.076	9.218

由表 1 可以看出,手动控制半焦颗粒停留时间比自动控制停留时间要大,相对误差大约为 9.218%,这主要是人为操作造成的。可见采用二维 PIV 自动控制系统可以很好地避免人为误差。

3 结论

(1) 自动控制系统测量得到的层流炉中心生物质半焦颗粒各测量段间的轴向速度分布数据比手动控制衔接更加平滑。

(2) 手动控制测得的半焦颗粒停留时间比自动控制停留时间要大,相对误差大约为 9.218%。

(3) 二维 PIV 相机移动自动控制系统能够满足 PIV 试验过程中相机位置多次平稳调整的要求,实现了相机移动的自动控制,减小了试验误差,提高了试验数据的准确性和精确性。

参 考 文 献

1 Baldassarre A, De Lucia M, Nesi P, et al. A vision-based particle tracking velocimetry[J]. Real-Time Imaging, 2001, 7(2):145 ~ 158 .

- 2 许联锋, 陈刚, 李建中, 等. 粒子图像测速技术研究进展[J]. 力学进展, 2003, 33(4): 533 ~ 540.
Xu Lianfeng, Chen Gang, Li Jianzhong, et al. Research progress of particle image velocimetry[J]. Advance in Mechanics, 2003, 33(4): 533 ~ 540. (in Chinese)
- 3 徐宏庆, 何文奇, 李良杰, 等. 应用 PIV 技术对气固两相流粒子浓度场的瞬时测量[J]. 流体力学实验与测量, 2003, 17(3): 53 ~ 56.
Xu Hongqing, He Wenqi, Li Liangjie, et al. The instantaneous measurements of particle concentration in gas-solid two phase flow using PIV technique[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2003, 17(3): 53 ~ 56. (in Chinese)
- 4 张东东, 许宏庆, 何枫. 气固两相射流瞬时速度场和浓度场的 PIV 研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2003, 43(11): 1 491 ~ 1 494.
Zhang Dongdong, Xu Hongqing, He Feng. Particle imaging velocimetry of instantaneous velocity and concentration distributions in gas-solid two-phase jet flows[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2003, 43(11): 1 491 ~ 1 494. (in Chinese)
- 5 Kaoru Miyazaki, Gang Chen, Fujio Yamamoto, et al. PIV measurement of particle motion in spiral gas-solid two-phase flow [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1999, 19(4): 194 ~ 203.
- 6 Medina A, Garrielides A, Kovanis V, et al. Velocity field measurements in granular gravity flow in a near 2D silo[J]. Physics Letters A, 1998, 250(1 ~ 3): 111 ~ 116.
- 7 Daniel A Steingart, James W Evans. Measurements of granular flows in two-dimensional hoppers by particle image velocimetry. part I: experimental method and results[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(4): 1 043 ~ 1 051.
- 8 李志合, 易维明, 王娜娜. 水平携带床内玉米秸颗粒速度场的 PIV 实验研究[J]. 实验流体力学, 2006, 20(4): 94 ~ 98.
Li Zhihe, Yi Weiming, Wang Na'na. Experimental study on velocity field of corn stalk granules in horizontal entrained bed by PIV[J]. Experiments in Fluid Mechanics, 2006, 20(4): 94 ~ 98. (in Chinese)
- 9 王丽红, 易维明, 柏雪源, 等. 层流炉内颗粒停留时间 PIV 测量[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 124 ~ 127.
Wang Lihong, Yi Weiming, Bai Xueyuan, et al. PIV measurement of resident time for char particle in laminar entrained flow reactor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 124 ~ 127. (in Chinese)
- 10 王娜娜, 易维明, 杨延强. 竖直管内陶瓷球和玉米秸粉混合颗粒运动的 PIV 测量[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 154 ~ 157.
Wang Na'na, Yi Weiming, Yang Yanqiang. Particle image velocimetry of motion of the mixture of corn stalk particles and spherical ceramic particles in a vertical pipe[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(3): 154 ~ 157. (in Chinese)
- 11 贲洪玲, 刘繁明. 一种步进电动机的微机控制方法[J]. 微处理机, 1997(4): 54 ~ 56.
Ben Hongling, Liu Fanming. A microcomputer-based control method for stepper-motor[J]. Microprocessors, 1997(4): 54 ~ 56. (in Chinese)
- 12 郝鸿安. 3-4 相步进电动机控制器 5G8713[J]. 电子技术, 1991, 18(8): 42 ~ 43.
- 13 董里扬. 浅谈步进电动机的工作原理[J]. 科技信息, 2007(8): 74.
- 14 钟肇新, 彭侃. 可编程控制器原理及应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2000.
- 15 王啸东, 阚子振. PLC 控制步进电动机应用系统设计[J]. 实用科技, 2009(6): 234.
- 16 王松岭. 流体力学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

(上接第 87 页)

- 12 张金凤, 袁寿其, 付跃登, 等. 分流叶片对离心泵流场和性能影响的数值预报[J]. 机械工程学报, 2009, 45(7): 131 ~ 137.
Zhang Jinfeng, Yuan Shouqi, Fu Yuedeng, et al. Numerical forecast of the influence of splitter blades on the flow field and characteristics of a centrifugal pump [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(7): 131 ~ 137. (in Chinese)
- 13 朱荣生, 苏保稳, 杨爱玲, 等. 离心泵压力脉动特性分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 43 ~ 47.
Zhu Rongsheng, Su Baowen, Yang Ailing, et al. Numerical investigation of unsteady pressure fluctuations in centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 43 ~ 47. (in Chinese)