

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.06.014

基于 RPi 的面曝光快速成形机控制系统

陈 振, 胥光申, 巨孔亮, 秦绍辉

(西安工程大学机电工程学院, 陕西 西安 710048)

摘 要:为了简化面曝光快速成形机的控制系统,降低其成本,提出了一种基于树莓派(Raspberry Pi, RPi)卡片电脑的面曝光快速成形机控制系统。系统以 Raspberry Pi 为控制核心,以 Linux 为操作系统,通过 Python 编程控制,实现了对面曝光快速成形机的掩模图形投影和工作台运动控制;利用接入以太网的 Raspberry Pi,实现了对面曝光快速成形机的远程登录、文件传输以及实时监控。控制系统大大减小了面曝光快速成形机的占用空间,降低了成本,且具备远程操作功能,有利于面曝光快速成形机进入大众市场。

关 键 词:快速成形机;面曝光;树莓派(Raspberry Pi);Python 程序

中图分类号:TP29 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2015)06-0060-05

Control System of Mask Projection Stereolithography Based on Raspberry Pi

CHEN Zhen, XU Guangshen, JU Kongliang, QIN Shaohui

(Mechanical and Electrical Engineering College, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Aiming at simplifying the control system of mask projection stereolithography (SL) machine, reducing the cost of SL machine, the control system of SL machine based on Raspberry Pi was presented. The system took Raspberry Pi as the control core, Linux as the operation system, achieving the projective control of mask image and the lifting motion of platform by Python program. Remote login, document transmission and real-time monitoring to SL machine came true through utilizing the Raspberry Pi of accessing internet. This control system greatly reduces the occupation space and the cost of SL machine, and provides the function of remote operation which benefits SL machine to enter the mass market.

Key words: rapid prototyping machine; mask projection stereolithography; Raspberry Pi; Python program

智能工厂是“工业 4.0”的目标,而“3D 打印”在现实中最接近这个目标,对“工业 4.0”目标的达成也最有实际意义^[1]。目前,在我国 3D 打印生产正处于快速发展阶段。3D 打印技术也被称为快速成形技术,成形方法多达十余种,目前应用较多的有立体光固化(SLA)^[2-3]、熔积成型(FDM)^[4-5]、选择性激光烧结(SLS)^[6-7]和分层实体制造(LOM)^[8]等。近年迅速发展起来的面曝光快速成形技术^[9]是利用紫外光源选择性固化一个层面的光敏树脂,形成相应截面的轮廓薄片,并逐层堆积成三维零件原型,成形精度高,表面质量好,应用范围也最广泛。面曝光快速成形机需紫外光源进行图像投影,且需要 PC 机对三维模型截面轮廓的掩模图形进行投影控制;同时为保证制作精度,

面曝光快速成形机多采用工控用步进电机驱动器对工作台的步进电机进行驱动,并采用运动控制卡进行控制。这些都使具有成形精度高、表面质量好等优势的面曝光快速成形机因占用空间大、控制系统复杂、成本高等原因,而难以推向大众市场。

针对以上问题,本文设计了一种占用空间小、易远程操作的面曝光快速成形机控制系统。设计采用的串口控制和远程服务的核心设备—Raspberry Pi,是一款体积小、价格便宜,功能强大的单板计算机。Raspberry Pi 配置了用于串口控制的通用输入/输出(general purpose input output, GPIO)口, HDMI 高清视频输出口,可通过多种通信方式接入互联网,便于远程操作。随着可作为掩模图形投影设备的便携式投影仪的普

收稿日期:2015-08-11;修回日期:2015-09-21

基金项目:陕西省教育厅产业化培育项目(2011JG17);陕西省工业科技攻关项目(2015GY070)

作者简介:陈振(1990),男,山东日照人,硕士研究生,主要研究方向为面曝光快速成形。E-mail:changing2013@163.com。通信作者:胥光申(1964),男,陕西宝鸡人,教授,博士。E-mail:gingchan@foxmail.com

及,基于 Raspberry Pi 控制系统的面曝光快速成形机将以体积小、成本低,易于远程控制及其自身成形精度高,表面质量好等优势进入大众视野。

1 Raspberry Pi 用于面曝光快速成形机控制系统的基础

Raspberry Pi^[10-12] 是由慈善组织“Raspberry Pi 基金会”开发的一款为学生计算机编程教育而设计的卡片式电脑,外形只有信用卡大小,却具有电脑的所有基本功能。作为一款廉价的单板计算机(A 型售价 25 美元,B 型售价 35 美元),2012 年 2 月启售至今已推出第 2 代——RPi 2(B 型),如图 1 所示。RPi2 配备基于 ARM Cortex-A7 架构的 900 MHz BCM 2836 处理器,1 GB 运行内存,具有 4 个 USB 接口(可用于连接键鼠、U 盘和 Wi-Fi 模块等),以太网接口及 HDMI 高清视频输出等常规接口。还具有一个 40 针的插座(A 型为 26 针插座),集成了 GPIO,I2C,SPI 等接口。通过该插座可以连接光感、温度、湿度和灰尘等各类传感器。Raspberry Pi 可以搭载 Linux 操作系统,使用 Python 语言编写程序代码。

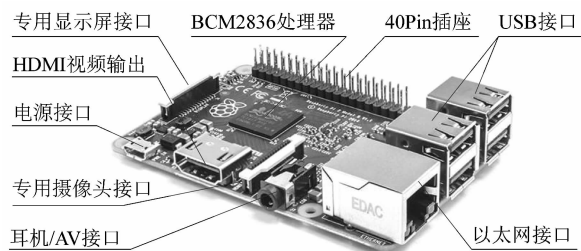


图 1 RPi2 接口布局

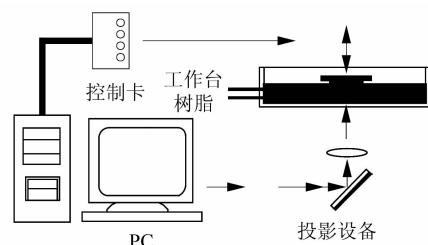
Figure 1 Interface layout of RPi2

将 Raspberry Pi 的 HDMI 视频输出口连接面曝光快速成形机的投影设备,可用于掩模图形的投影控制;GPIO 口既可连接面曝光快速成形机工作台限位开关作信号输入端口,也可连接小型步进电机驱动器作输出端口控制工作台升降;通过以太网口或者 Wi-Fi 模块连接网络,可实现对 Raspberry Pi 的远程登录,文件传输,实时监控等。目前市面上销售的其他开源控制板,例如 Arduino^[13],BeagleBone^[14]等,从系统配置、串口控制、视频输出及售价等方面综合考虑,都远不及廉价的 Raspberry Pi。

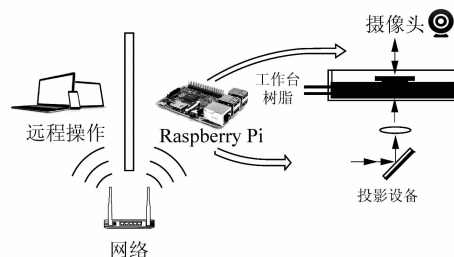
2 基础控制系统组成

面曝光快速成形机的基础控制系统主要由掩模图形投影控制和工作台升降控制两部分组成。目前,面曝光快速成形机多采用“PC 机 + 运动控制卡”的控制方式^[15],PC 主机 VGA 视频输出口连接投影设备,运

动控制卡连接步进电机驱动器、限位开关等,且运动控制卡的 PCI 总线端需插入 PC 主机内部的 PCI 插槽中,该控制方式占用了面曝光快速成形机的大部分空间。而仅使用 Raspberry Pi 作控制核心的控制方式,既可实现图像投影的控制,又能实现对工作台升降的控制,大大节省了 PC 机和运动控制卡的占用空间,且降低了控制系统成本,如图 2 所示。



(a) 传统面曝光快速成形机简图



(b) 基于树莓派控制系统的面曝光快速成形机简图

图 2 传统面曝光快速成形机与基于树莓派控制系统的面曝光快速成形机对比
Figure 2 Traditional MPSLA machine contrast to MPSAL machine based on RPi

2.1 掩模图形的投影控制

Raspberry Pi 搭载的 Linux 系统(官方推荐 Debian Wheezy 版本)支持 Python 语言^[16]作为编程开发环境。Python 是一种面向对象,直译式计算机编程语言,已有近 20 年的发展历史,包含了一组完善而且容易理解的标准库,语法简捷、清晰,常用于处理系统管理任务和网络程序编写。

Python Imaging Library, PIL 是 Python Ware 公司提供的免费的图像处理工具包,是 Python 下的图像处理模块,支持多种图片格式,并提供强大的图形与图像处理功能。在 Raspberry Pi 的终端窗口中输入:

```
pi@ raspberrypi: ~ $ sudo apt-get install python-imaging
```

即可在 Raspberry Pi 的 Python 上安装 PIL 库。在 Python 编程软件(Python2.7.3 版)中输入:

```
>>> from PIL import Image
>>> im = Image.open("/home/pi/JPG/1.jpg")
```

>>> im.show()

即可在投影设备上显示三维模型截面轮廓的掩模图形文件。

Raspberry Pi 配有两个视频输出口用于面曝光快速成形机时,仅使用 HDMI 接口连接投影设备即可(另一个为方便用户连接小尺寸触摸屏的 Display 专用视频输出口),面曝光快速成形机的实时运行状况可通过远程登录 Raspberry Pi 进行查看。

2.2 工作台的升降运动控制

面曝光快速成形机是通过步进电机转动驱动精密滚珠丝杠转动来实现工作台在直线导轨的升降运动的。步进电机多采用两相四线或两相六线,步距角为 1.8°的小功率步进电机;步进电机的驱动器多采用工控专用的细分型驱动器,如 DMD402A 型驱动器、SH-2024B2 型驱动器以及 M542-05 型驱动器等。这些驱动器的体积较大,价格为 100 ~ 300 元。由于面曝光快速成形机的工作台载荷并不大,且不需要快速升降运动,所以步进电机的驱动器可用小型步进电机驱动器模块代替。Raspberry Pi 配有 28 个 GPIO 口,可实现类似于单片机的 I/O 口控制,通过 GPIO 口置高、低电平,实现对步进电机驱动器的控制。

目前市场上可用于控制两相步进电机的小型驱动器模块有 A3967^[17], A4988^[18], DRV8825^[19] 等。这些驱动器模块价格低(10 元左右)、体积小,且可实现细分控制,其中 A3967 驱动器模块可实现 8 步细分模式, A4988, DRV8825 驱动器模块可实现 16 步细分模式。由于面曝光快速成形机要求工作台具有较低的升降速度,为使步进电机低速运转时噪音低、振动小,设计采用具有 16 步细分模式的 A4988 驱动模块做步进电机驱动器。各种型号步进电机驱动器尺寸如图 3 所示。



图 3 各型号步进电机驱动器尺寸对比

Figure 3 Size comparison of several step-motor driver

使用 A4988 驱动器模块时,将步进电机及供电电源按图 4 所示连接,STEP, DIR, ENABLE 引脚接 RPi 2

的 GPIO 口, VDD, GND 引脚分别连接 RPi 2 引脚的 5 V 和 GND。在使用前可将 MS1, MS2, MS3 引脚与右下角 VDD 引脚焊接在一起,即为设置驱动器为 16 步细分模式。

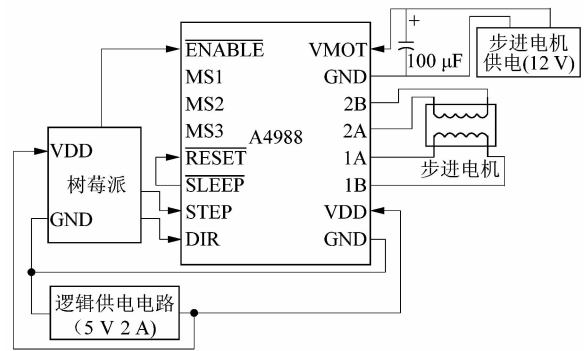


图 4 A4988 步进电机驱动器模块接线图

Figure 4 A4988 step-motor driver model wiring diagram

编写 Python 程序,控制驱动器使能端 ENABLE, 方向端 DIR, 脉冲端 STEP 的高低电平即可控制两相步进电机的转动。控制步进电机正反转一圈的 Python 程序代码为

```
import RPi.GPIO as GPIO
import time
GPIO.setmode(GPIO.BCM) # 设置 GPIO 口的标号方式
GPIO.setup(13, GPIO.OUT) # CP, 将选择的 GPIO 口设置为输出
GPIO.setup(19, GPIO.OUT) # Dir
GPIO.setup(26, GPIO.OUT) # Free
def step(): # 定义步进电机转动函数
    for i in range(0, 200 * 16): # 1/16 步细分模式, 每 3 200 个脉冲步
        # 进电机转动一周
        GPIO.output(13, True) # 高低电平间隔 1 ms 变换
        time.sleep(0.001)
        GPIO.output(13, False)
        time.sleep(0.001)
if __name__ == '__main__': # 主程序
    print('Begin')
    GPIO.output(26, True)
    while True:
        GPIO.output(19, True) # 步进电机正转
        step() # 转动一周
        time.sleep(1) # 暂停 1 s
        GPIO.output(19, False) # 步进电机反转
        step() # 转动一周
        time.sleep(1) # 暂停 1 s
```

3 远程控制

随着工业 4.0 和物联网的发展,快速成形机需具备基础的远程网络功能,实现 PC 端、智能手机等对快

速成形机的远程控制 and 实时监控等,以满足大众对快速成形机的功能需求^[20]。

3.1 VNC 远程登录

虚拟网络计算机(virtual network computer, VNC)是一款由某公司欧洲研究实验室开发的,远程控制开源软件,其远程控制能力强,高效实用^[21]。将 Raspberry Pi 通过以太网口或者插入 USB 接口的 Wi-Fi 模块连接到网络后,可对 Raspberry Pi 控制的面曝光快速成形机进行远程控制。在 Raspberry Pi 的终端窗口,如 PC 端、智能手机及平板电脑中输入

```
pi@ raspberrypi: ~ $ sudo apt-get install tightvncserver
```

即可对 Raspberry Pi 进行远程登录,如图 5 所示。所以不需要在 Raspberry Pi 的专用 Display 接口外接显示屏也可利用 VNC 进行远程登录,对连接在同一局域网的面曝光快速成形机进行实时控制。

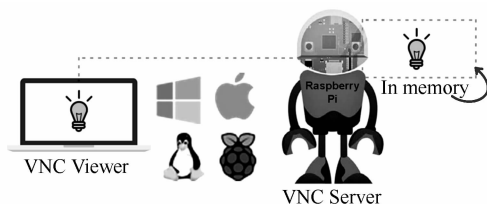


图 5 VNC 远程控制

Figure 5 VNC remote control

3.2 FileZilla 文件远程传输

通过 VNC 连接可很方便的操控面曝光快速成形机,但大部分人仍希望在 PC 上编程再上传到 Raspberry Pi 或者实现文件共享。FileZilla 是一款开源的 FTP 软件,分为客户端版本和服务器版本,具备所有的 FTP 软件功能,是一款小巧并且可靠的支持 FTP&SFTP 的 FTP 服务器软件^[22]。在 Raspberry Pi 的终端窗口中输入:

```
pi@ raspberrypi: ~ $ sudo apt-get install vsftpd
```

```
pi@ raspberrypi: ~ $ sudo service vsftpd start
```

即可在 Raspberry Pi 上安装 FileZilla 服务器,在同一局域网内任何安装 FileZilla 客户端的用户都可实现对 Raspberry Pi 的文件上传、下载、复制和删除等,如图 6 所示。利用 Raspberry Pi 作控制系统的面曝光快速成形机,可将三维模型截面轮廓的掩模图形文件、Python 程序代码等通过 PC 机的 FileZilla 客户端进行文件远程传输,实用方便。

3.3 Yeelink 远程监控

快速成形机打印三维模型时,并不需要时刻关注

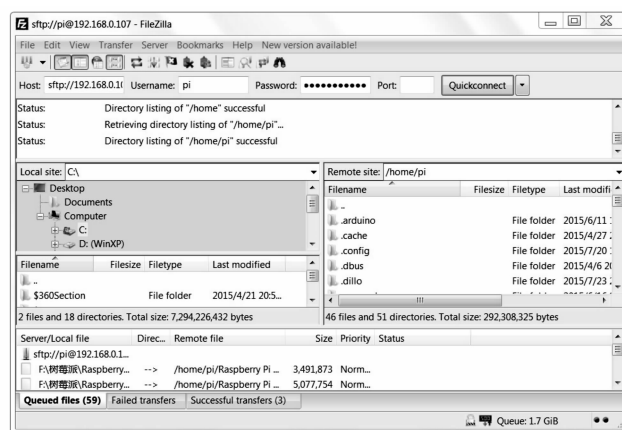


图 6 Windows 7 Filezilla 客户端对 RPi 进行文件传输

Figure 6 Windows 7 Filezilla client transfer file to RPi 打印过程。通过 USB 接口在 Raspberry Pi 上安装摄像头或者通过 Raspberry Pi 的 Camera 接口安装专用的摄像头,将摄像头捕捉的图像上传到网络,通过物联网云平台—Yeelink 提供的物联网云服务,即可实现对快速成形机打印的实时监控^[23]。在 Raspberry Pi 的终端窗口中输入

```
pi@ raspberrypi: ~ $ sudo apt-get install fswebcam
```

即可在 Raspberry Pi 上安装抓图软件 fswebcam,在 Yeelink 官方网站上注册账户名后,添加个人传感器设备,选择 Raspberry Pi 作图像传感器。

在任意 Web 浏览器中输入图像传感器的网络地址即可查看远程监控面曝光快速成形机的打印进程,每分钟更新一次监控画面。下载 APP 客户端至智能手机(可支持 Android 和 iOS)或者微信关注 Yeelink 公众号,将 Yeelink 帐号与微信号绑定,也可每分钟收到更新的面曝光快速成形机监控画面。除此之外,还可以在 Yeelink 中增加其他传感器,例如检测树脂液温度的传感器,甚至可以将打印进度同步到网络中。

4 结语

本文针对面曝光快速成形机占用空间大、控制系统复杂、成本高而难以推向大众市场等问题,提出了以 Raspberry Pi 为控制核心的面曝光快速成形机控制系统。利用 Linux 系统的 Python 软件编程,实现了 HDMI 视频接口对掩模图形的投影控制和 GPIO 输入输出对工作台的升降运动控制;将 Raspberry Pi 接入网络,实现了对面曝光快速成形机的远程登录、远程文件传输、实时监控。通过 Python 编程和网络远程控制即可实现对面曝光快速成形机的所有操作,无需复杂的图形用户界面(GUI)编程。基于 Raspberry Pi 的控制系统大大减少了面曝光快速成形机的占用空间和成本,

使易操作的面曝光快速成形机在工业 4.0 和物联网的大环境下更易推向大众市场。

参考文献:

- [1] 黄顺魁. 制造业转型升级: 德国“工业 4.0”的启示[J]. 学习与实践, 2015(1): 44-51.
- [2] LIMAYE A S, ROSEN D W. Compensation zone approach to avoid print-through errors in mask projection stereolithography builds[J]. Rapid Prototyping Journal, 2006, 12(5): 326-337.
- [3] 路平, 王广春, 赵国群. 光固化快速成型精度的研究及进展[J]. 机床与液压, 2006, 34(5): 206-210.
- [4] JOHNSON W M, ROWELL M, DEASON B, et al. Comparative evaluation of an open-source FDM system [J]. Rapid Prototyping Journal, 2014, 20(3): 205-214.
- [5] 唐通鸣, 张政, 邓佳文, 等. 基于 FDM 的 3D 打印技术研究现状与发展趋势[J]. 化工新型材料, 2015, 43(6): 228-230.
- [6] CHEN Suwei, MURPHY J, HERLEHY J, et al. Development of SLS fuel cell current collectors [J]. Rapid Prototyping Journal, 2006, 12(5): 275-282.
- [7] 许超. 尼龙材料 SLS 快速成型技术研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2005: 7-15.
- [8] 张健, 芮延年, 陈洁. 基于 LOM 的快速成型及其在产品开发中的应用[J]. 苏州大学学报(工科版), 2008, 28(4): 38-40.
- [9] 胥光申. 用于高精度小尺寸零件制作的光固化快速成型技术的现状与发展[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(10): 1223-1225.
- [10] EBEN U, GARETH H. Raspberry Pi user guide[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [11] 王江伟, 刘青. 玩转树莓派 Raspberry Pi[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013.
- [12] RICHARDSON M, WALLACE S. Getting started with Raspberry Pi [M]. California: O'Reilly, 2013.
- [13] 杨继志, 杨宇环. 基于 Arduino 的网络互动产品创新设计[J]. 机电产品开发与创新, 2012, 25(1): 20-21.
- [14] 杨碧玲. 开源单板机让构想更快成为现实[J]. 集成电路应用, 2013(6): 20-21.
- [15] 胡送桥, 胥光申, 马训鸣, 等. 面曝光快速成形系统升降工作台运动精度研究[J]. 西安工程大学学报, 2010, 24(1): 66-70.
- [16] MONK S. Raspberry Pi: getting started with Python [M]. New York: McGraw-Hill Education TAB, 2015.
- [17] 凌均淑. 步进电动机的应用及驱动方式[J]. 电器时代, 2005, 26(7): 62-64.
- [18] 谭秀腾, 郭小定, 李小龙, 等. 基于 ARM 的桌面型 3D 打印机控制系统设计[J]. 应用科技, 2014, 41(5): 57-61.
- [19] 吴迪. 基于 DRV8825 的打印机电机驱动电路设计[J]. 电力技术与软件工程, 2013(11): 62.
- [20] GOODWIN S. Smart home automation with Linux and Raspberry Pi [M]. California: Apress, 2013.
- [21] 杨建英, 贾瑞生, 王春力. 基于 VNC 的桌面共享冲突解决机制的研究与实现[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(5): 229-232.
- [22] 陈慧民. 应用开源软件 FileZilla Server 架设 FTP 服务器[J]. 中国网络教育, 2011(7): 76-77.
- [23] 卞晓晓, 方为建, 李凡. 基于 Yeelink 的远程室内空气监测系统设计与开发[J]. 电脑编程技巧与维护, 2015(10): 26-27.

(上接第 59 页)

参考文献:

- [1] BAKER K R. Scheduling of jobs in the two machine flow shop[J]. Mathematics and Computer Model, 1990(13): 29-36.
- [2] LOGENDRAN R, SRIKANDARAJAH C. Two-machine group scheduling problem with blocking and anticipatory setups[J]. Europe Journal of Operational Research, 1993(9): 467-481.
- [3] VAKHARIA A J, CHANG Y L. A simulated annealing approach to scheduling a manufacturing cell [J]. Naval Research Logistics Quality, 1990, 37(4): 559-577.
- [4] RIOA-MERCADO R Z, BARD J F. The flow shop scheduling polyhedron with setup times [J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2003, 7(3): 291-318.
- [5] RUIZ R, MAROTO C, ALCARAZ J. Solving the flowshop scheduling problem with sequence dependent setup times using advanced metaheuristics[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 165(1): 34-54.
- [6] ALLAHVERDI A, NG C T, CHENG T C E, et al. A survey of scheduling problems with setup times or costs[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 187(3): 985-1032.
- [7] 朱珈楠, 陈勇, 鲁建厦. 多品种多工艺制造企业车间作业调度的 ACA 建模[J]. 轻工机械, 2013, 31(3): 99-103.
- [8] 邹律龙, 谭光宇, 侯东亮. 基于改进遗传算法的单机成组作业调度[J]. 计算机仿真, 2010, 27(4): 308-312.
- [9] CHENG T C E, GUPTA J N D, WANG G. A review of flow shop scheduling research with setups times[J]. Production and Operations Management, 2000, 9(3): 257-268.
- [10] ZHU X Y, WILHELM W E. Scheduling and lot sizing with sequence-dependent setup: a literature review[J]. IIE Transactions, 2006, 38(11): 987-1007.
- [11] SCHALLER J E, GUPTA J N D, VAKHARIA A. Scheduling a flow line manufacturing cell with sequence dependent family setup time [J]. European Journal of Operational Research, 2000, 125(2): 324-339.
- [12] 衣杨, 汪定伟. 基于模糊规则的 GA 求解成组调度[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(5): 554-557.
- [13] FRANCA P M, GUPTA J N D, MENDES M, et al. Evolutionary algorithms for scheduling a flow shop manufacturing cell with sequence dependent family setups [J]. Computers & Industrial Engineering, 2005, 48(3): 491-506.
- [14] 郑永前, 谢松杭, 钱伟俊. 带缓冲流水车间成组调度问题的混合微分算法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(8): 1941-1947.