

小型光电编码器误差自动检测系统

杜玉康^{1,2}, 赵长海¹, 万秋华¹, 孙树红³

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所; 2. 中国科学院大学; 3. 驻沈阳地区代表局驻长春地区第一代表室

摘要: 为了提高小型光电编码器误差检测的精度和效率, 拓展编码器误差检测的应用, 设计了一种误差检测系统。通过对编码器误差来源分析, 以步进电机为动力, DSP 芯片为数据采集与电机驱动核心, 21 位高精度编码器为角度基准, 搭建了可进行编码器动态误差与静态误差自动检测的系统。并通过对误差的分析与拟合, 实现了对编码器的误差补偿, 提高了被检编码器测量精度。经实际检测验证, 所设计编码器误差检测系统达到设计要求。

关键词: 光电编码器; 动态误差; 静态误差; 自动检测; 误差补偿

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A

Compact Photoelectric Encoder Error Automatic Detection System

DU Yukang^{1,2}, ZHAO Changhai¹, WAN Qiuhua¹, SUN Shuhong³

1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences; 2. University of Chinese Academy of Sciences; 3. No. 1 Delegate Office in Changchun Area, Delegate Bureau in Shenyang Region

Abstract: In order to improve the accuracy and efficiency of compact photoelectric encoder error detection and expand the application of encoder error detection, a error detection system was designed. By analyzing the source of the encoder error, a system that can automatically detect the encoder dynamic error and static error was built with a stepping motor as the power, a DSP chip as the core of data acquisition and motor drive, and a 21-bit high-precision encoder as the angle reference. And through the analysis and fitting of the error, it realized the error compensation of the encoder and improved the measurement accuracy of the inspected encoder. After actual testing and verification, the designed encoder error detection system meets the design requirements.

Keywords: photoelectric encoders; dynamic error; static error; automatic detection; error compensation

0 引言

光电轴角编码器是以光栅莫尔条纹现象作为理论基础的一种角位移传感器。经过光信号与电信号的转换, 光电轴角编码器可以将角度位置信息转化为相应脉冲信号或数字代码, 具有精度高、反应灵敏、工作状态稳定等优点, 被广泛应用于测量、航空航天、工业控制等领域^[1]。

编码器作为角度的测量工具, 其自身需要确保足够的精度。对所生产的编码器进行误差检测是保证其出厂精度的必要环节。根据所处工作状态, 编码器误差分为动态误差和静态误差, 需要设计相应的检测装置完成编码器的误差检测工作。现有的误差检测装置存在不能进行全分辨力的误差检测、检测流程复杂、效率低等缺点^[2]。为了改善上述不足, 本文设计了以三相步进电机、高精度编码器和 DSP 芯片为主要

部件, 可以完成小型编码器的动态误差和静态误差检测的自动检测系统。

1 编码器误差检测原理

1.1 编码器误差来源

光电编码器核心部件为平行安装的码盘和狭缝, 光束通过码盘和狭缝形成莫尔条纹被光电接收元件转换为电信号。编码器的精度主要受码盘和狭缝的质量与安装精度的影响^[3]。小型编码器由于自身体积与结构的限制, 码盘固定在轴系上, 轴系只有一端与编码器外壳连接, 运动时轴系受力会偏离轴线, 使得码盘与狭缝形成倾角, 影响莫尔条纹的质量, 造成误差。因轴系晃动造成误差的示意图如图 1 所示^[4]。

1.2 静态误差检测原理

编码器测量值与实际值的差值为编码器误差, 本文以更高精度的 21 位编码器输出值作为实际值进行计算, 静态误差为编码器处于静止状态时输出的角度值与实际值的差值^[5]。实际进行误差检测工作时, 待检的角度位置为所设定检测角度间隔的整数倍, 即:

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52075520)

收稿日期: 2023-08-29

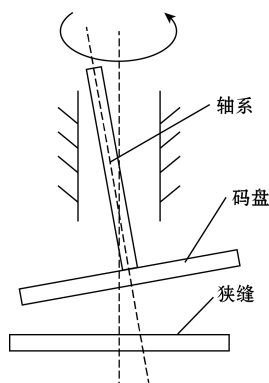


图1 因轴系晃动引入误差示意图

$$Z = ak \quad (1)$$

式中: Z 为进行静态误差检测角度位置; a 为所设定的检测角度间隔, 其可在能够被 360° 整除的前提下根据工作环境的精度要求选择; $k=0, 1, 2, \dots, (360^\circ/a)-1$ 。

静态误差传统的检测方法有自准直仪检测法和高精度编码器对比检测法。其中自准直仪检测法检测流程繁琐, 不适合进行小型编码器误差检测。使用高精度编码器对比检测法要求基准编码器精度与分辨率在被检编码器 2 倍以上, 本系统采用步进电机作为动力, 基准编码器作为角度反馈, 实现静态误差的自动检测。

为了提高编码器的静态检测精度, 消除被检编码器的分辨力误差, 本文采用沿面检测方法。当被检编码器在检测点位置跳变时, 要求基准编码器的角度变化量小于 δ , 否则该点将重新检测。 δ 值根据检测精度的需要进行设置。

1.3 动态误差检测原理

编码器在进行动态测角工作时, 轴系转动由于不能完全贴合中轴线, 会产生晃动造成码盘偏心, 导致编码器输出角度产生动态误差, 在不同的转速下编码器的动态误差也会有一定差距^[6]。另外, 光电编码器有较高的分辨力, 如只检测静态误差则检测点位极其有限, 而进行动态误差检测可以检测更多的分辨力, 在一定转速下可以完成对编码器的全分辨力检测。对于 n 位小型光电编码器, 每周共输出 2^n 个数据^[7]。

本文采用贝塞尔公式(式 2)计算被检编码器的动态误差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_i - y_i)^2}{m-1}} \quad (2)$$

式中: σ 为被检编码器动态误差; x_i 为基本编码器输出角度值; y_i 为被检编码器输出角度值; m 为被检编码器完成 1 周检测实际完成误差检测的点位数量。

2 角度信息采集系统设计

2.1 误差检测系统的建立

误差检测系统以步进电机为驱动动力, 电机驱动模块与数据采集模块集成在同一电路中。以 21 位、精度优于 $2''$ 的绝对式光电编码器作为角度基准, DSP 芯片作为主控芯片, 计算机作为数据处理的上位机, 各模块安装在系统安装框架上。步进电机、基准编码器、被检编码器同轴连接。电机运转时, 带动基准编码器与被检编码器同步转动。系统结构如图 2 所示。

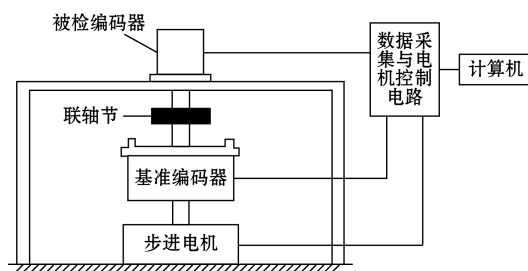


图2 系统结构图

为顺利完成角度信息采集, 需要实时采集基准编码器和被检编码器输出的角度数据, 通过串口通信将采集到的信息发送到计算机做数据处理。

本系统采用 DSP 作为主控芯片, 芯片型号为 TMS320F28335, 该芯片工作频率为 150 MHz。基准编码器与被检编码器的角度信息被 DSP 采集, 通过串口通信传输到计算机中进行数据处理。

误差检测系统实物如图 3 所示, 系统各部分已在图中标示。

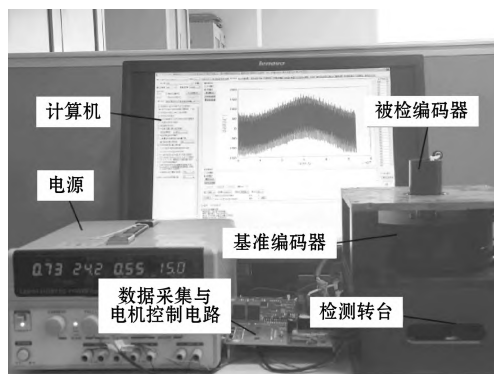


图3 误差检测系统实物图

2.2 角度采集系统的设计

被检编码器与基准编码器输出的角度信息通过串口通信输出到 DSP 芯片内, 采集到的角度数据通过串口通信传输到计算机中进行进一步处理, 完成小型编码器的误差检测与结果输出。

对于 n 位小型绝对式光电编码器, 进行测角工作时, 理论上 1 周输出的数据数量为 2^n , 16 位编码器一周输出的数据个数为 $2^{16} = 65\,536$ 。其最高数据输出

频率为

$$f_{\max} = 2^n \cdot v \quad (3)$$

式中: n 为编码器位数; v 为编码器测角工作时的运转速度。

本系统进行误差检测时,电机最大运转速度为 60 r/min,编码器位数 $n = 16$,代入式中得 $f_{\max} = 6.5$ kHz,基准编码器数据刷新率小于 2 kHz,系统采样频率为 100 kHz,远高于被检编码器与基准编码器数据输出频率,综合上述指标,DSP 芯片可以顺利完成误差采集工作。

数据采集系统通过串口通信将角度数据传输到计算机中,在计算机中完成数据处理与误差曲线绘制。

2.3 系统检测转台的设计

动态误差与静态误差检测需要降低运行时系统的震动,提高系统的稳定性与抗干扰能力。系统动力选用 BRS3 系列三相步进电机,额定转矩 1.7 N·m,每转全步数可达 10 000。该型电机通过精密加工,定子和转子间隙仅为 50 μm ,转子和定子直径比达到 95%,运行时几乎无共振区、无爬行、无噪音,具有超高的静态定位精度,满足系统完成误差检测的要求。

系统采用 DIP-IPM 智能模块作为电机驱动,模块型号为 PS21765。该模块使用第 5 代 IGBT、DIP 封装和特定应用的 HVIC,实现减少驱动器的尺寸和总体设计时间。模块自身包含功率器件、驱动器和保护电路,形成一个超紧凑的系统。

动态误差检测时电机需要在设定转速下平稳转动,转动时不间断地读取基准编码器与被检编码器角度数据并发送到计算机中。

进行静态误差检测时,需要控制步进电机在待检测点位缓慢摆动直至完成该点的沿面数据采集^[8-9]。在此以间隔角度 15° 为例,检测点位为 0°、15°、30°、...、345°。进行角度控制时,以 21 位的基准编码器作为角度基准。因为电机控制与信号采集均由 DSP 芯片作为主控芯片,可以根据角度信息实时对电机位置进行调整,在运动至接近检测点位时控制电机减速,采用 PID 控制调整电机位置,使电机在检测点位缓慢摆动,完成该点的沿面数据采集后将检测编码器与基准编码器的角度信息输出至计算机。静态误差检测时电机控制原理图如图 4 所示。

2.4 系统自身误差分析

系统目标为实现检测小型编码器误差自动检测,故系统自身也需要确保足够的精度。本系统的误差

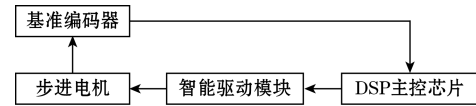


图4 静态误差检测电机控制原理图

来源主要有3个:基准编码器测角误差,系统安装引入的机械误差,数据采集电路引入的延时误差^[10]。

其中 21 位的基准编码器精度优于 2",即 $\sigma_1 = 2''$ 。组装系统时机械误差经过精密测量调整,误差限制在 1"内,即 $\sigma_2 = \pm 1''$ 。DSP 芯片运算频率为 150 MHz,采样频率为 100 kHz。基准编码器数据采集时间为 2 μs ,根据程序量计算得到最大转速设定为 60 r/min,计算可得被检编码器延时误差为

$$\sigma_3 = \frac{60 \times 360^\circ \times 60 \times 60}{100\,000 \times 60} = 12.96'' \quad (4)$$

基准编码器延时误差为

$$\sigma_4 = \frac{360^\circ \times 2 \times 60 \times 60}{100\,000} = 25.92'' \quad (5)$$

根据误差合成公式,静态误差检测时系统误差可以计算得到检测系统的误差为

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = 2.24'' \quad (6)$$

动态误差检测时系统误差为

$$\sigma_m = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2} = 29.1'' \quad (7)$$

为了保证检测精度,对检测仪器进行误差标定时,要求检测系统自身的精度大于被检测仪器精度 3 倍以上,被检 16 位编码器静态精度 20"以上,动态精度 100"以上。所设计的检测装置进行静态误差检测时系统误差 σ_s 为 2.24",动态误差检测时系统误差 σ_m 为 29.1",满足完成动、静态误差检测的精度要求。

3 误差检测实例

3.1 静态误差检测实例

为验证本文设计的误差检测系统,选用 16 位绝对式光电编码器进行误差检测。由于小型编码器刷新率的限制,在高转速下不能实现全分辨率的输出,但能够完成动态误差检测。

该型号编码器属于小型编码器,一个圆周内有 2^{16} 即 65 536 个分辨率,分辨力为 20",可在 -40 ~ +55 $^\circ\text{C}$ 内正常工作。

为对比所设计系统与传统手动进行误差检测的差异,使用所设计的误差检测系统对 2 台编码器进行静态误差检测。使用所设计检测系统和传统手动检测进行对比,对比结果如表 1 所示,其中 σ_s 为本系统测得误差, σ_m 为传统手动检测测得误差, t_s 为本系统检测时间, t_m 为传统手动检测时间。

表 1 2 台编码器静态误差检测对比

序号	$\sigma_s/(\prime)$	$\sigma_m/(\prime)$	t_s/min	t_m/min
1	49.15	51.35	1	4
2	56.23	57.26	1	4

对比检测结果可得,本文所设计检测系统测得静态误差与传统手动检测测得误差基本一致,检测效率提高了 4 倍左右,证明本文设计的误差检测系统精度满足检测要求,并大幅减少了检测用时。

3.2 动态误差检测实例

使用所设计误差检测装置对上述小型光电编码器在不同转速下进行误差检测。

在 1 r/min 的较低转速下,系统可实现对 16 位小型编码器的所有分辨力进行误差检测,如图 5 所示。由于数据量较大,图 5 中动态误差曲线不能得到良好展示,故截取 0~10°的动态误差曲线,如图 6 所示。

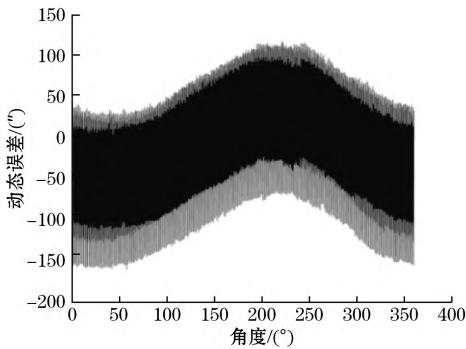


图 5 1 r/min 下的动态误差

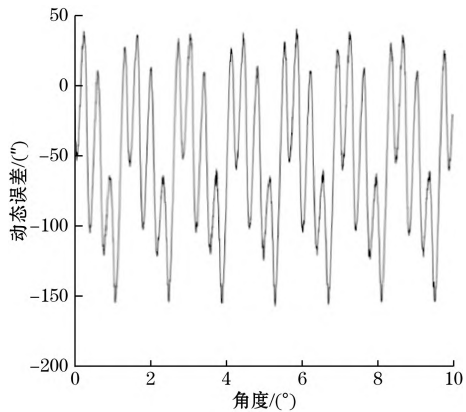


图 6 1 r/min 下 0~10°动态误差

在 60 r/min 下误差曲线如图 7 所示,同样截取 0~10°的动态误差曲线,如图 8 所示。

不同转速下被检编码器动态误差如表 2 所示。

表 2 不同转速下被检编码器动态误差

转速/(r·min ⁻¹)	动态误差/(°)
5	49.15
60	62.23

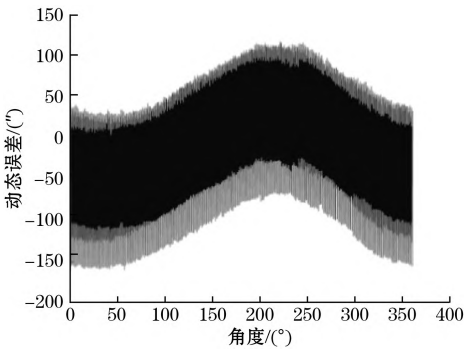


图 7 60 r/min 下的动态误差

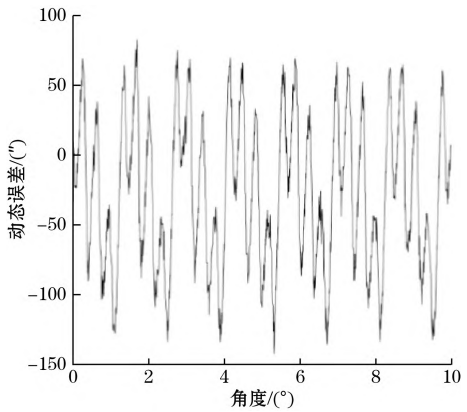


图 8 60 r/min 下 0~10°动态误差

根据上述误差检测实例可以得到随着系统转速的增加,编码器输出角度的误差曲线波动幅值有明显增大,动态误差也明显增大。并且由于被检编码器的刷新率限制,实际检测点位数量也有明显减少。

3.3 误差检测的扩展

通过误差检测得到编码器的精度,根据检测结果判断其能否顺利完成角度检测工作是误差检测的主要目的。除此之外,可以进一步发掘误差检测的作用^[11-13]。

由上述实际检测可知,检测装置可在较低转速下实现对编码器的全分辨力误差检测,全分辨力下的误差曲线可以更好地反映编码器的误差情况。编码器误差有长周期误差和短周期误差之分,其中长周期误差表示误差偏离的整体趋势。由图 5 和图 7 可以看出,编码器误差曲线有明显的变化趋势,通过神经网络对所测得误差曲线进行拟合,可以得到误差函数。误差函数图像如图 9 所示。

短周期误差来自于对编码器 2 路正弦波的细分,16 位编码器一个周期内共有 256 个短周期,每个短周期有 256 个分辨力,其中一个短周期的误差曲线如图 10 所示,其他短周期误差曲线与该曲线类似。

根据所得到的长周期和短周期误差函数,将拟合得到的误差函数写入被检编码器的单片机芯片中,可

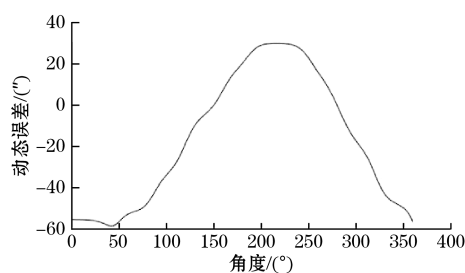


图9 动态误差拟合所得函数

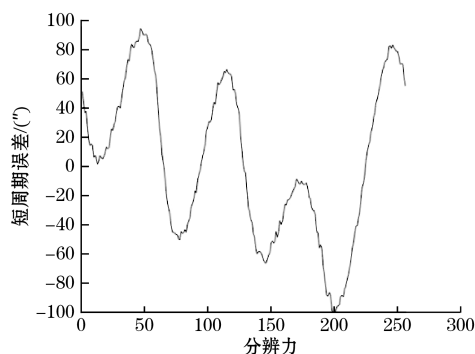


图10 短周期误差曲线图

以对编码器的长、短周期误差进行补偿。补偿后编码器的部分误差曲线如图11所示。截取误差曲线中部170°~180°范围内误差曲线如图12所示。

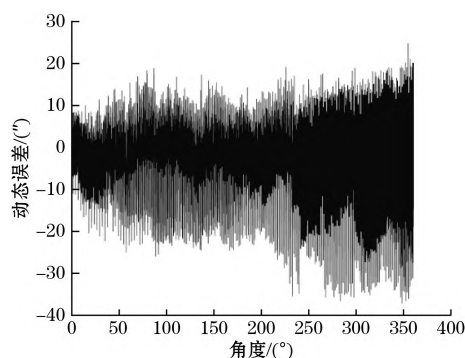


图11 误差补偿后编码器误差曲线

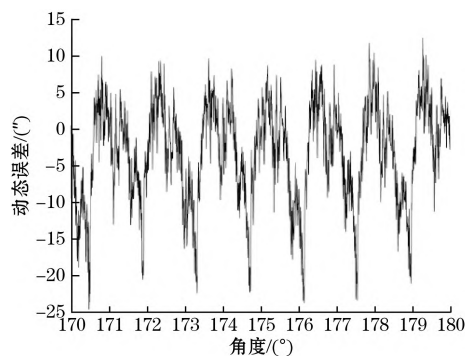


图12 误差补偿后170°~180°误差曲线

补偿完成后,在1 r/min转速下测得动态误差为20.72",相比未补偿时被检编码器的误差情况得到了较大的改善。由图11的误差曲线可以看出,误差补偿消除了被检编码器的长周期误差,短周期误差也得到

了较大的改善。在工作环境稳定的编码器上进行上述的误差补偿,可以有效提高编码器精度。

4 结论

本文研究了小型光电编码器误差检测系统的误差来源,设计了可以自动进行动、静态误差检测的检测装置。其以高精度三相步进电机作为动力,DSP芯片作为数据采集和电机控制的核心。通过实际检测,该系统的检测精度与检测效率满足小型光电编码器误差的检测要求,在较低的转速下可以实现被检编码器的全分辨率检测,可以更好地反映编码器的动态误差特性。并且由于本装置实现了小型编码器的全分辨率检测,更好地反映了编码器的误差特性,扩展了误差检测的应用,实现了对小型编码器的误差补偿,有效提高了被检小型编码器的精度。

本系统具有结构紧凑,拆装简便,抗干扰性强的特点,能够满足工业生产中光电编码器动态、静态误差检测的需要。

参考文献:

- [1] WANG H, WANG J, CHEN B, et al. Absolute optical imaging position encoder[J]. Measurement, 2015, 67: 42-50.
- [2] LI K, CAO G, DING H, et al. Research on the new type of error detection platform for photoelectric encoder[C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021, 2029(1): 012140.
- [3] YANG F, LU X, KILIKEVIČIUS A, et al. Methods for reducing subdivision error within one signal period of single-field scanning absolute linear encoder[J]. Sensors 2023, 23(2): 865.
- [4] YU H, CHEN X, LIU C, et al. A survey on the grating based optical position encoder[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 143: 107352.
- [5] YU H, WAN Q, LU X, et al. Small-size, high-resolution angular displacement measurement technology based on an imaging detector[J]. Applied Optics, 2017, 56(3): 755-760.
- [6] KAPLYA E V. Identification and compensation of static errors in the phase coordinates of elements of an optical encoder[J]. Measurement Techniques, 2014, 57(5): 493-500.
- [7] 张嘉鑫, 李少康. 基于Zynq-7010的光电编码器数据采集系统[J]. 内燃机与配件, 2022(24): 97-99.
- [8] LEE K, GU T, BANG Y B. Measurement and compensation of errors in absolute encoder using dual absolute encoder system[J]. Microsystem Technologies, 2020, 26(11): 3469-3476.
- [9] WANG H B, LIU H P. A novel sensorless control method for brushless DC motor[J]. IET Electric Power Applications, 2009, 3(3): 240-246.

(下转第70页)

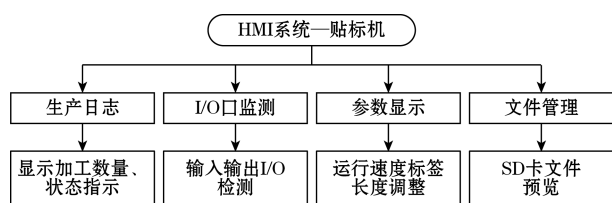


图 16 贴标机界面框架图

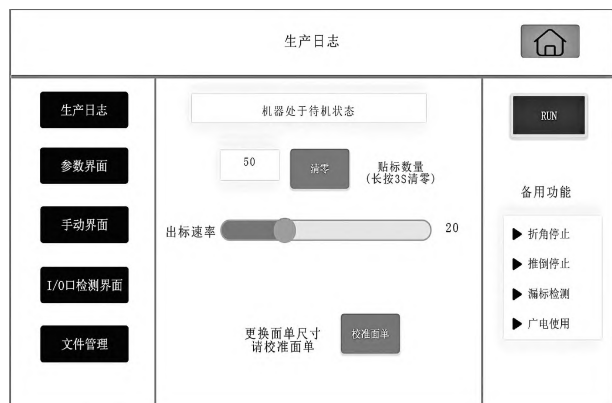


图 17 贴标机生产日志界面

5 结束语

本文基于 STM32 设计了针对中小型工业控制设备的工业 HMI 系统,预留了多种通讯方式,可适应多种设备,提高设备的通用性。JSON 解析程序的设计可使嵌入式设备解析大型文件,搭配 LVGL 的使用,可根据设备定制界面获得丰富的界面效果且易于维护。工程人员运用图形化拖拽完成逻辑控制程序编写、编辑和修改用户程序,简化了现场控制流程。通过实验验证该工业控制 HMI 系统简化了项目开发流程并提升了工作效率。

参考文献:

- [1] 陈新,蒲庆文. 基于 emWin 图形库的电动汽车液晶仪表设计[J]. 仪表技术与传感器,2013(7):105-107.
- [2] 邓霞. 一种新型储能变流器的人机界面设计方法与实现[J]. 电测与仪表,2016,53(4):97-101.

- [3] 翟延忠,翟宝蓉,马强,等. 基于 STM32 的人机交互终端的设计[J]. 仪表技术与传感器,2020(2):105-109.
- [4] 申淑丽,黄昕,祝润泽,等. 基于 Linux 系统的通用工业机器人示教器开发[J]. 机床与液压,2021,49(3):63-68.
- [5] 刘伟,周焰红,周强,等. MCU 的嵌入式设备通用软件平台研究[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2023,23(8):53-56.
- [6] 许贞俊. 基于 Cortex-M4 的快速嵌入式 PLC 研究[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2019,19(4):49-52.
- [7] 史晓娟,姚兵,王磊,等. 基于 STM32 和 LabVIEW 的嵌入式可编程控制系统[J]. 仪表技术与传感器,2023(4):97-101.
- [8] 赵昶宇,胡平. 嵌入式软件界面自动生成方法[J]. 科技与创新,2022(4):141-144.
- [9] 马相芬. XML 和 JSON 数据格式在 Ajax 中的对比分析[J]. 电脑编程技巧与维护,2015(10):34.
- [10] 季俊,蔡锦达. 基于 STM32 的制管机人机界面系统[J]. 轻工机械,2020,38(6):68-71.
- [11] 李敏波,许鑫星,李强,等. 基于 JSON 文档结构的工业大数据多维分析方法[J]. 中国机械工程,2020,31(14):1700-1707.
- [12] 夏雨,陈超,陈振中,等. Scratch 在 PLC 自动编程中的开发与应用[J]. 东华大学学报(自然科学版),2022,48(4):85-91.
- [13] 王鹏举,何丰,陈国平,等. 基于 STM32F7 的可编程电源显示系统设计与实现[J]. 液晶与显示,2021,36(7):973-982.
- [14] 杨玥,邵浩然,张索非. FreeRTOS 与 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{III}$ 内核分析及选型研究[J]. 科技界,2018(24):11-13.
- [15] 魏列江,安贞媛,李健伟,等. 集中控制式智能阀 CAN 通信环形缓冲存取技术[J]. 液压与气动,2023,47(9):15-23.

作者简介:刘瑾(1999—),硕士研究生,主要研究领域为嵌入式工业技术开与应用。E-mail:1976536122@qq.com

通信作者:邓文娟(1981—),教授,博士,主要研究领域为半导体技术及应用、嵌入式系统应用。E-mail:wjdeng@ecut.edu.cn

(上接第 63 页)

- [10] INCZE II, SZABÓ C, IMECS M. Incremental encoder in electrical drives: modeling and simulation[J]. Computational Intelligence in Engineering, 2010:287-300.
- [11] NING Z, CAI N, ZHAO J, et al. Error compensation for optical encoder based on variational mode decomposition with a coarse-to-fine selection scheme[J]. IEEE Transactions on Instrumentation Measurement Techniques, 2023, 72:1-10.
- [12] 毕今朝,蒋佳奇,张洪博,等. 光电编码器信号误差补偿

技术研究[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2022, 40(4):553-558.

- [13] 魏艳平,肖海柳. 卷积神经网络的光电编码器误差补偿[J]. 激光杂志, 2022, 43(8):174-179.

作者简介:杜玉康(1997—),硕士研究生,主要从事光电位移精密测量技术的研究。E-mail:yianxianqi@163.com

通信作者:赵长海(1980—),副研究员,博士,主要从事光电位移精密测量技术的研究。E-mail:changhai403@163.com