

基于机器视觉的薄膜厚度均匀性 控制系统设计

张 兵, 王 涛, 李文杰, 陶学攀, 朱家君

(山东建筑大学 信息与电气工程学院, 济南 250101)

摘要: 针对薄膜生产吹塑过程中均匀性不稳定、需经常进行人工调整等问题, 提出了一种基于机器视觉的多自由度薄膜厚度均匀性控制系统; 视觉模块通过摄像头对成型轮廓的进行检测, 提取塑料薄膜外形轮廓的图像信息, 经过图像处理输出不对称度信息, 用作控制部分的控制参数; 控制模块依据视觉检测结果及控制模型, 对装有两轴伺服电机的XY移动平台上的膜口间隙调节机构进行实时控制与反馈; 实验测试结果表明, 所设计的系统偏离度识别误差 0.485° , 控制误差 0.098 mm , 满足设计要求及质量要求。

关键词: 薄膜厚度均匀性; 机器视觉; 图像处理; 伺服电机; XY移动平台

Design of Film Thickness Uniformity control system Based on Machine Vision

ZHANG Bing, WANG Tao, LI Wenjie, TAO Xuepan, ZHU Jiajun

(College of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: Aiming the unstable uniformity and frequent needs for manual adjustment during the blown film production process, a film thickness uniformity control system with multi degree of freedom based on machine vision is proposed. A camera is used in the visual module to detect the contour of the formed film, extract the image information of the plastic film contour, and output asymmetry information after image processing. This asymmetry information is then utilized as a control parameter for the system. According to the visual detection results and control model, the control module is used to achieve the real-time control and feedback of adjustment structure for film gaps on the XY motion platform equipped with two servo motors. Experimental results show that the designed system achieves a deviation recognition error of 0.485° and a control error of 0.098 mm , thereby meeting the design and quality requirements.

Keywords: uniformity of film thickness; machine vision; image processing; servo motors; XY mobile platform

0 引言

塑料吹膜机是一种常见的塑料加工设备, 主要用于将塑料颗粒或树脂加热熔融后, 通过膨胀、拉伸和冷却等工艺, 制成薄膜产品^[1]。这些塑料薄膜在包装、农业、建筑、医疗、工业、日常生活等多个领域得到广泛应用。作为一种成熟的技术, 塑料吹膜技术已经在实际生产中得到广泛应用, 然而吹膜过程中容易出现厚度不均匀问题, 进而影响产品质量稳定性, 增加生产成本, 浪费材料及资源^[2]。因此, 如何确保吹膜产品质量成为

制约薄膜材料生产行业发展的一个重要因素。

随着科技的进步, 吹膜技术不断升级和改进, 使其更加智能化和自动化。现代吹膜机配备了高精度传感器, 能够实现高度自动化的生产过程, 从而提高了生产效率和产品质量, 并最大程度地减少了人工干预的需求。目前常见的吹膜均匀性检测有接触式检测和非接触式检测两种方法^[3], 接触式检测方法主要用微探针检测、刮片检测等机械检测方法^[4], 这种检测方法操作简单, 但是工作量大、效率低, 接触薄膜表面容易破坏损

收稿日期:2023-12-04; 修回日期:2024-01-09。

基金项目:山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2022TSGC1356)。

作者简介:张 兵(1996-),男,硕士研究生。

通讯作者:王 涛(1967-),男,硕士,教授。

引用格式:张 兵,王 涛,李文杰,等.基于机器视觉的薄膜厚度均匀性控制系统设计[J].计算机测量与控制,2025,33(2):110

伤样本。非接触式检测方法主要用光学、电磁场等传感器进行检测,主要有激光干涉法、光学反射法、微波干涉法等,这些方法能够实时、快速地检测薄膜厚度,而无需直接接触薄膜表面^[5],但这些检测方法大部分费时费力,不能满足实施检测任务需求。在厚度均匀性控制方面,主要包括传统的控制方法,如反馈控制,此类控制方法具有较高的稳定性,但对于复杂度较高的系统准确性不够。还有先进方法,如模型预测控制,此类控制能够实现多变量控制,但计算复杂度较高,难以满足实时性检测的系统需求。

为了能够实现更高效的薄膜厚度均匀性的控制,许多学者都在这一方面做着努力。雷李华等人^[6]提出了一种基于激光椭圆系统的薄膜厚度测量装置,利用调制偏振光的反射进行检偏调制,避免了与薄膜材料直接接触。杨云^[7]提出了一种基于机器视觉的非织造材料厚度均匀性检测系统,利用视觉的方式实现了对非织造材料的自动检测。王刚^[8]设计了一种薄膜卷材传输张力控制系统,保证薄膜在收卷过程中张力恒定以控制薄膜厚度的均匀性。于涵等人^[9]提出了一种静电喷雾法制薄膜的预测模型,实现了薄膜厚度的精确控制。虽然这些方法较于早期的人工检测和手动控制等方法,在自动化及控制精度上有了很高的提升,但是其智能化程度及控制精度依然不能满足实际工作的需求。鉴于此,本文采用基于机器视觉的非接触式测量方法和基于高精度重载核的伺服电机 XY 控制平台相结合的策略,通过将这两种技术融合,以提升吹膜厚度均匀性检测及控制的自动化水平和智能化程度。

本系统的设计涵盖了系统的总体结构、摄像头实时采集方法、图像处理、直线拟合偏差计算等关键方面,以及控制部分的插补运动调整,最后探讨了基于视觉伺服的薄膜厚度均匀性检测及控制系统的应用前景。系统的总体结构设计是基础,它决定了系统各部分之间的协同工作方式。在本系统中,采用了一个综合的视觉伺服系统,由两个主要部分组成:视觉检测部分和控制部分。视觉检测部分通过摄像头实时采集薄膜的图像,并进行图像处理、直线拟合和偏差计算,以获取薄膜的不对称度信息。这一信息被发送给上位机,以便进行进一步的分析。控制部分接收上位机的控制指令,通过插补运动来调整薄膜口的间隙,以实现薄膜厚度的均匀性控制。这一系统可以在薄膜生产过程中实时监测和控制薄膜的厚度均匀性,提高产品质量。潜在的应用领域包括自动化制造、医疗设备、包装行业等,为各种工业应用提供了一种高效的质量控制手段。此外,该系统还为未来的研究和开发提供了有力的支持,有助于推动视觉伺服技术在不同领域的进一步应用和发展。

1 系统结构及原理

1.1 系统整体架构

吹膜机塑料加工过程包括将塑料聚合物加热之后通过挤出机进行挤压,形成薄壁管状结构,随后通过注入压缩空气将塑料聚合物吹膨至所需厚度,再由风机通过风环吹出均匀的冷却风对薄膜进行定型,最后在经过冷却辊固化后进行收卷^[10]。在整个过程中,检测系统所需要检测的关键部位为膜泡的开泡位置,将摄像头置于该位置,确保与开泡位置平行,而摄像头底部支架与旋转平台刚性连接,以便摄像头充分采集图像数据,方便后续不对称度分析。控制系统由工业控制平板电脑(以下简称上位机)和搭载 STM32F407ZGT6 芯片的控制板(以下简称 STM32)构成,摄像头采集的图像数据发送给工控机进行图像处理,将其不对称度信息传给 STM32,接到控制指令之后控制两轴伺服电机带动 XY 移动平台做相应的运动,另外在 XY 平台下装有两个高精度的位移传感器,用于对膜口间隙调节机构所移动的距离数据进行反馈,方便与后续对薄膜形状偏离度和 XY 移动平台移动数据进行对比验证,以形成相关联的函数关系。吹膜机系统的整体架构如图 1 所示。

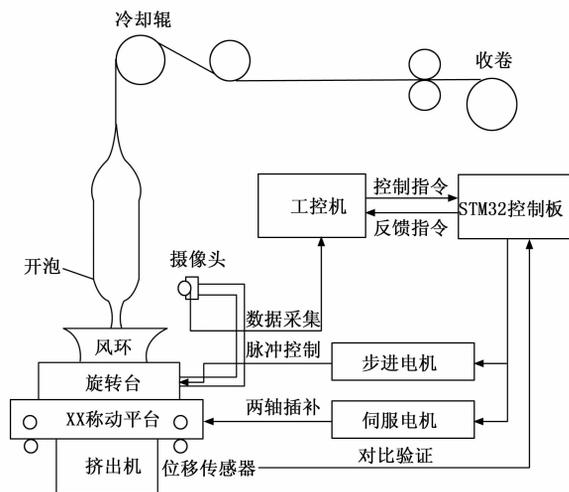


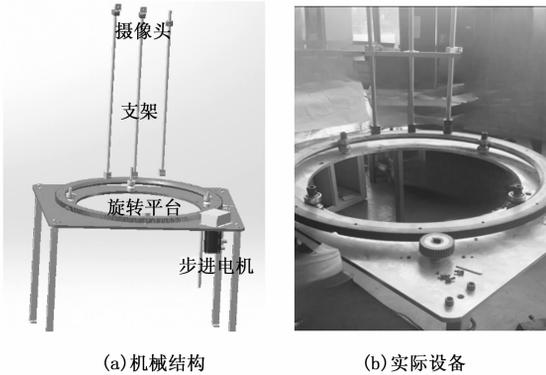
图1 系统整体架构

薄膜厚度均匀性检测需要对薄膜表面进行扫描。为此,通常使用摄像头和扫描架结构来实现对薄膜表面的扫描。

摄像头是一种常见的视觉传感器,用于捕捉图像并将其转换为电信号。在薄膜厚度均匀性检测中,摄像头被用于获取薄膜表面的图像,随后,通过应用图像处理算法,分析薄膜的厚度均匀性。由于薄膜表面通常相对平整,摄像头的使用能够获得清晰的图像,从而提高了检测的准确性^[11]。

扫描架结构则是一种机械构造,用以固定摄像头并实现对薄膜表面的扫描^[12]。此类结构一般包括横

梁、纵梁、支架、旋转平台以及齿轮等组件，横梁、纵梁和支架用于固定摄像头，旋转平台上的齿轮与步进电机齿轮协同工作，带动摄像头旋转，其机械架构图及实际设备如图 2 所示。通过控制步进电机以及旋转平台的运动，可以实现对薄膜表面的均匀扫描，进而得到薄膜厚度均匀性的数据。总之，将摄像头和扫描架结构结合，为薄膜厚度均匀性检测提供了一种高效而可靠的方法。



(a) 机械结构 (b) 实际设备
图 2 数据采集模块机械架构及实体

1.2 机器视觉检测模块

机器视觉作为人工智能领域的一个关键组成部分，旨在利用光学设备和非接触式传感器模拟人类视觉系统的功能，从而为各种应用场景提供更智能、自动化的解决方案^[13]。基于机器视觉的吹膜厚度均匀性检测系统主要由数据采集系统、步进电机、旋转平台、光电开关以及上位机软件组成。通过控制 PWM 输出来控制步进电机运转，进而驱动旋转平台运转，旋转平台上配备高清工业摄像头，用于图像采集；光电开关用于标记开始采集的零点位置，以便记录后续结果分析中的偏离度最大值。薄膜厚度均匀性检测部分如图 3 所示。该系统实现薄膜厚度的实时监测和自动化控制，以确保最终产品的质量达到所需标准。图像采集和分析是系统的核心功能，通过机器视觉技术，能够高效地获取并分析薄膜的图像，从而实现对薄膜厚度均匀性的准确评估。

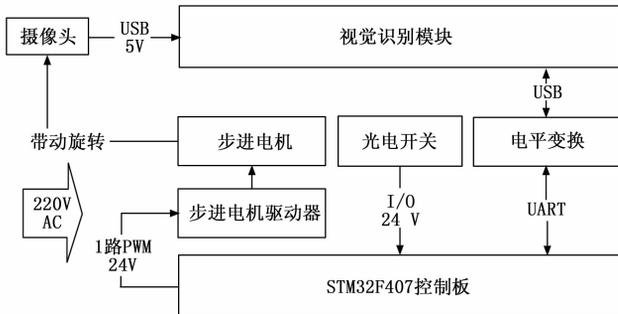


图 3 视觉检测模块框图

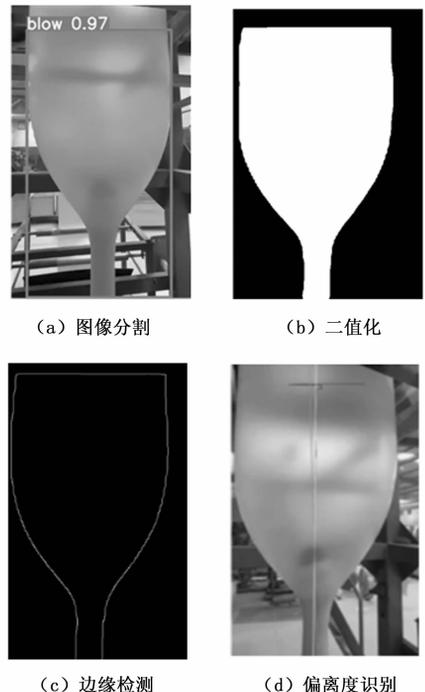
摄像头采集完数据之后，需要进一步提取薄膜外轮廓信息，以深入分析薄膜外轮廓的不对称性，并进一步评估薄膜均匀性。将采集到的图像数据进行图像语义分割处理，本文选用 YOLOv8 的图像分割模型对采集到的图像数据进行分割，并对分割后的图像进行二值化处理^[14]，Canny 边缘检测^[15]，偏离度分析。

1) 图像处理：本文数据集来源于吹膜制品工业现场，分别采集不同时段、不同颜色、不同背景下的训练集 1 000 张，测试集 400 张。采用 labelme 对薄膜轮廓进行标注后使用 YOLOv8 各种图像分割网络模型进行训练学习，得到最佳模型后，进行实例分割，得到如图 4 (a) 所示的分割图像。

2) 二值化：本文所采用的二值化处理没有直接使用传统的阈值处理，但通过将多个目标的 mask 叠加起来，再进行适当的像素值处理，达到了将目标从原始图像中提取出来的效果。这种方法可能更适用于复杂场景下的目标提取。二值化结果如图 4 (b) 所示。

3) Canny 边缘检测：Canny 算子是一种经典的边缘检测算法，其主要思路是通过多次模糊和梯度计算来获取图像中的边缘信息。其计算步骤大概分为：图像灰度处理、高斯滤波、梯度计算、非极大值抑制、双阈值选取和滞后边界跟踪。处理结果如图 4 (c) 所示。

4) 偏离度识别：针对本实验所采集图像数据特点，本文设计了一种偏离度识别算法：该算法具体原理如下：首先拟合未开泡区域（如图 4 (d) 所示细直部分）中线并延长，再拟合开泡处的中线并延长，计算其夹角作为薄膜偏离度衡量指标，左偏为负、右偏为正，以此



(a) 图像分割 (b) 二值化 (c) 边缘检测 (d) 偏离度识别
图 4 视觉模块图像处理

来反映薄膜厚度的不均匀性。同时将该偏离度作为控制部分的控制参数。

1.3 多轴插补控制模块

在控制系统中, STM32 扮演着核心控制器的角色, 协调各个组件的工作, 以实现... 它实现了多个组件之间的协同工作, 以确保薄膜厚度的均匀性在生产过程中得到有效控制。

2 系统硬件设计

2.1 主控芯片选择

STM32F407ZGT6 采用 ARM Cortex-M4 内核, 具有高性能和低功耗特性[16]。Cortex-M4 内核支持硬件浮点运算单元, 提供了更快的浮点运算能力。其工作频率可高达 168 MHz, 提供了足够的处理能力来处理复杂的任务。

提供灵活性和效率。综上, STM32F407ZGT6 满足本文所设计系统各种需求。

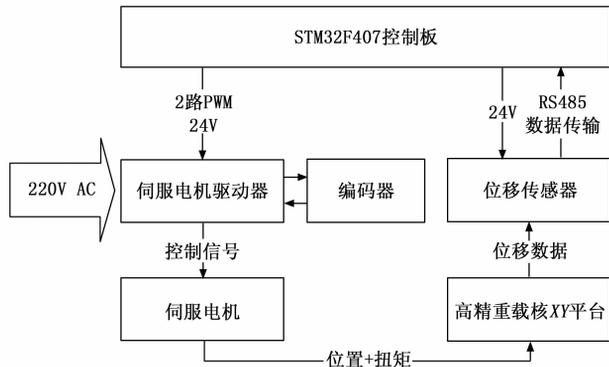


图 5 插补控制部分框图

2.2 步进电机控制电路设计

步进电机是一种精度较高的电机, 其运动是按照一定的步进角度进行的。这种电机可以通过控制电流的方式来实现精确的步进运动。步进电机具有速度快、精度高、运动平稳等优点, 因此在薄膜厚度均匀性检测中得到广泛应用。

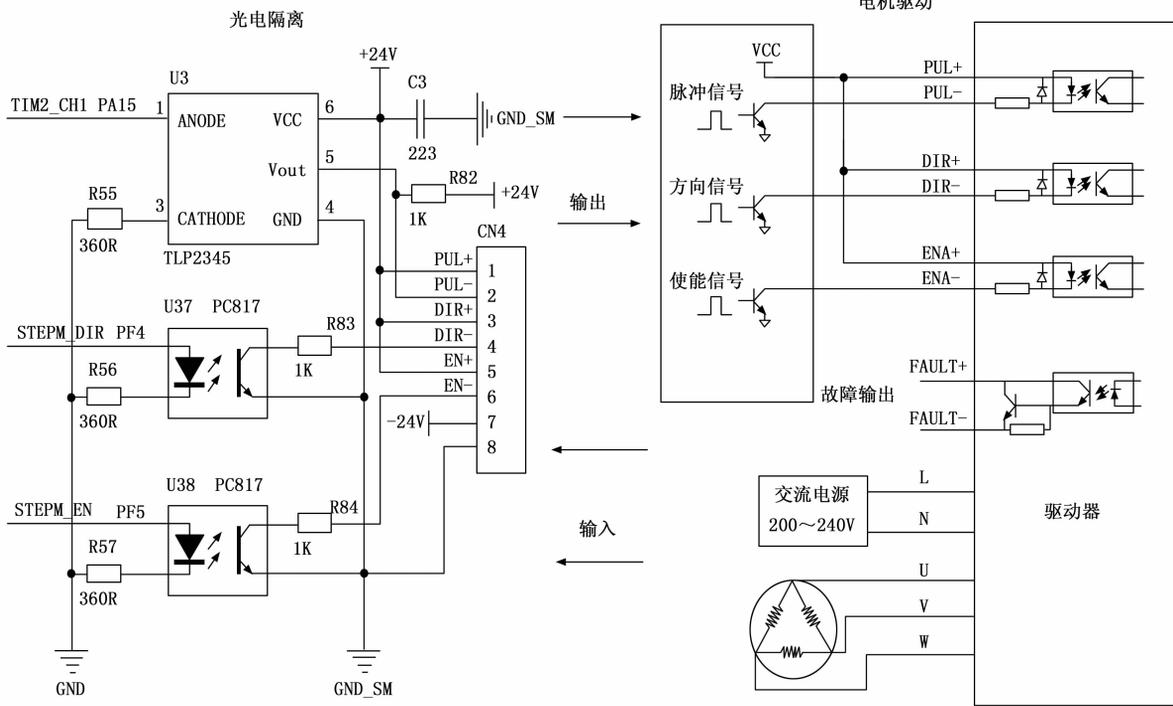


图 6 步进电机控制电路

2.3 伺服电机控制电路设计

本文选用 JSDEP 系列伺服电机控制 XY 平台。JSDEP 系列伺服电机适用范围广，与大多数 PLC 和运动控制卡兼容并且支持多种通讯协议^[18]。该系列电机高速性能优异，最高转速可达 10 000 r/min，快速响应、高精度定位可以大幅提高生产效率。电机输出转矩大，额定转矩范围为 0.4~108 Nm，满足重载度的 XY 平台负载需求。内部采用高分辨率编码器、先进的 PID 闭环控制算法、双闭环位置控制等技术，可实现高精度的定位和转矩控制，控制精确度高。配有丰富的软件和人机界面，可灵活完成参数调整、运行监测等工作，易于操作。伺服电机控制电路如图 7 所示。

2.4 位移传感器电路设计

选用两个 LVDT 位移传感器分别布置在 X、Y 轴两侧来记录插补过程中 X、Y 方向上磨口调节机构的位移量。LVDT 位移传感器是一种电磁式位移传感器，其原理基于互感器的磁耦合作用^[19]。当 LVDT 位移传感器的机械轴心发生位移时，主线圈中的磁通量会发生变化，因此次级线圈中感应出来的电动势也随之发生变化。通过测量次级线圈中感应出来的电动势的大小，就可以确定位移传感器当前的位移量。该位移量可通过 RS485 总线 MODBUS 协议传输给主控芯片。位移传感

器数据传输电路如图 8 所示。

2.5 RS232 电路设计

RS232 是一种串行通信协议，以其简单性和广泛兼容性被用于在计算机和外部设备之间传输数据^[20]。本文 RS232 电路用于主控芯片与通信串口之间的数据传输，选择 SP3232E 作为 RS232 收发器芯片，此芯片可以将微控制器或计算机的串行数据转换为 RS232 电平，它提供了一种简单而可靠的方式来实现串行通信，允许数据在数字设备之间进行双向传输。连接芯片所需的 +3.3 V 电源引脚，将 TX 引脚连接到发送数据的设备的 RX 引脚，将 RX 引脚连接到接收数据的设备的 TX 引脚，配置发送和接收设备的波特率均为 9 600 bps。经测试和调试，数据能够通过该电路正确传输和接收，RS232 电路设计如图 9 所示。

2.6 PCB 设计

在上述硬件电路方案下，设计制作了 PCB 电路板，分别对 RS232 数据传输模块，伺服电机控制模块，步进电机控制模块，位移传感器控制模块，MCU 主控模块，电源电路进行封装绘制、板框布局。实际焊接操作时，按照从低到高、从小到大的顺序焊接，焊接时锡的焊接量不宜过大或过小，以防止虚焊、漏焊。用电压表测量各个元器件与地之间的电压检测电路板焊接的可靠性，最终完成电路板的焊接。

3 系统软件设计

3.1 系统软件设计总体思路

基于机器视觉的薄膜厚度均匀性控制系统的软件设计是一个关键的组成部分，它包括多个关键模块，用于实现系统的各项功能。这些模块包括上位机指令主控程序、摄像头采集控制程序、步进电机控制程序、光电开关中断处理程序以及伺服电机插补控制程序。系统整体设计通过使用 Keil5 编程工具实现硬件设备的精确控制，同时使用上位机软件 Pycharm 编写 Python 程序以实现控制指令的发送和接收。其中上位机指令主控程序负责接收来自操作员或者主控芯片的指令，并协调整个系统的运行。它还处理各个控制程序模块之间的通信，确保协同工作；摄像头采集控制程序负责与机器视觉系统中的摄像头进行通信，捕获图像数据以供后续分析。这包括设置摄像头参数、触发图像采集、图像处理等任务；步进电机控制程序负责控制步进电机的旋转，来带动旋转平台的转动，以实现薄膜数据的逐步采集。它需要根据

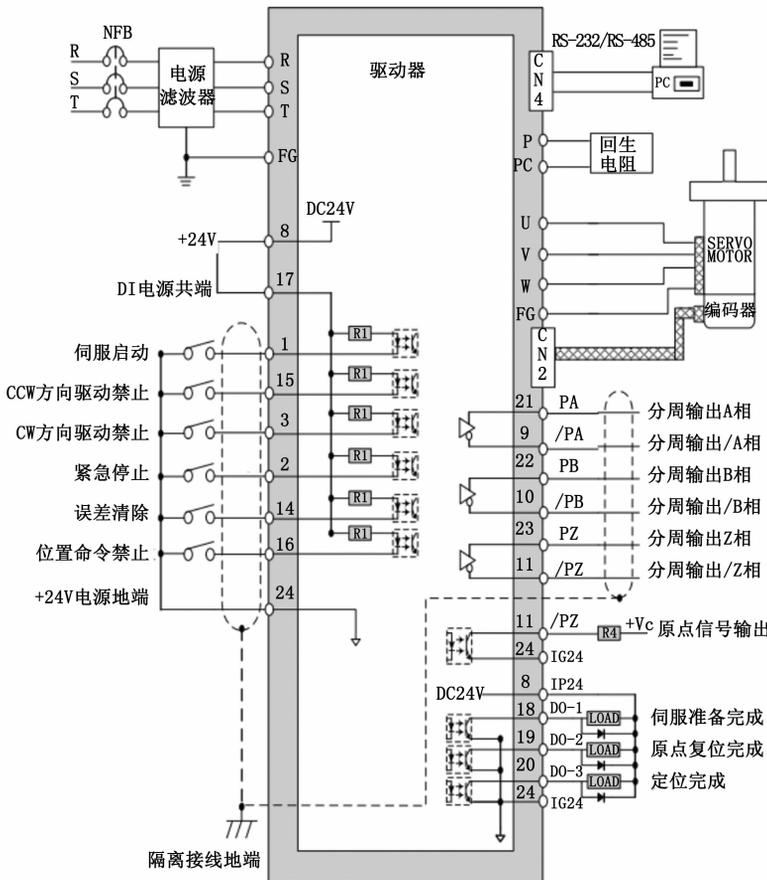


图 7 伺服电机控制电路

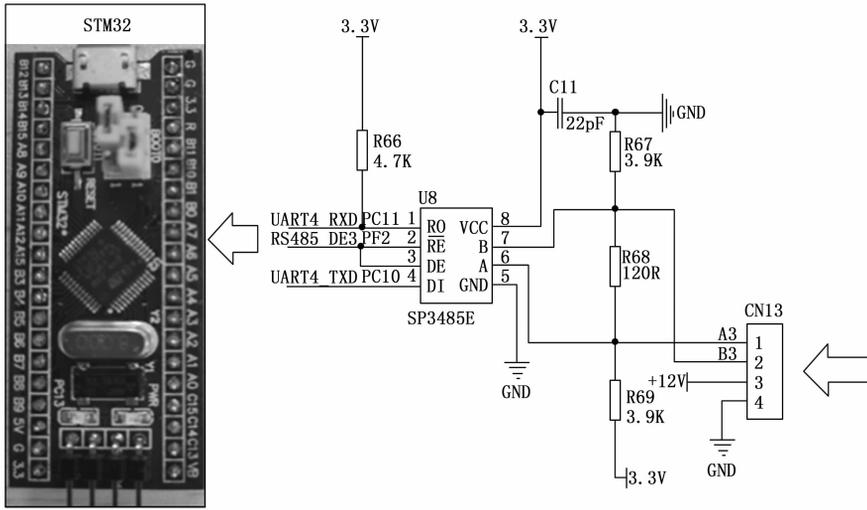


图 8 位移传感器数据传输电路

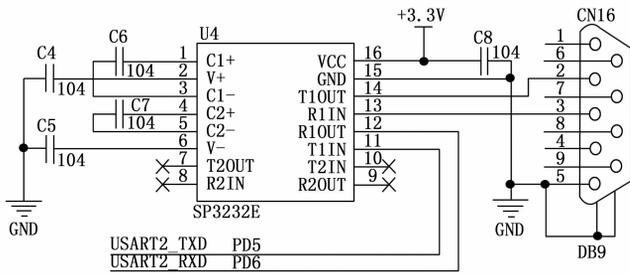


图 9 RS232 电路

电机的移动步数来逐步采集图像, 以保证数据采集的充分性并对每一步采集的图像编号, 方便后续提取最大偏离图像的索引; 光电开关中断处理程序在检测到高电平信号时, 标记旋转平台的零点位置, 以便于精细的控制步进电机的步数以及图像拍摄的索引数; 伺服电机插补控制程序负责对伺服电机进行插补控制, 来调节膜口间隙调机构, 以确保膜口出料的均匀性进而控制薄膜的厚度均匀性。

整个系统的设计是多模块、多任务的, 通过这些模块的协同工作, 可以实现对薄膜厚度的精确控制。Keil5 编程工具用于嵌入式系统的底层硬件控制, 而 Python 编程在 pycharm 中用于上位机控制和指令传输, 实现了系统的整体流程。这一综合的软件设计在实现薄膜厚度均匀性控制系统中发挥了关键作用, 以下将对上位机控制程序和插补控制程序两大模块深入地分析和解释。

3.2 视觉模块控制程序

首先上位机发出 Reset_Step 指令控制旋转平台进行零点复位, 串口接收到指令后, 单片机输出 PWM 控制步进电机控制器进而驱动步进电机转动^[21], 步进电机连接着齿轮, 带动旋转平台旋转, 旋转平台下设置 3 处不透明垫片作为遮挡物, 光电开关被牢固固定在旋转平台外侧; 在旋转过程中, 当光电开关光束被垫片遮挡时, 单片机将会检测到光电信号^[22], 当检测到 3 个光

电信号时, 标记出旋转平台的零点位置。一旦零点位置被确定, 上位机会发出指令控制步进电机每移动一步, 摄像头采集一张数据 (经计算, 步进电机 6 400 细分下, 步进电机 200 步旋转平台转动半圈, 即采集 200 张图像数据即可)。为防止摄像头外线缠绕以及提高识别效率, 只需采集半圈薄膜外轮廓数据, 为将摄像头限制在半圈内移动, 设置了 3 个光电开关。采集完半圈数据之后, 旋转平台将返回至上位机指定的最大位置处, 直至控制部分调整完成后返回至零点位置。基于以上编程思路和方法, 设计上位机软件流程如图 10 所示。

3.3 伺服电机插补控制程序

本文直线插补控制选择逐点比较法^[23], 每走一步都要和给定轨迹上的坐标值进行比较, 看这点在给定轨迹的上方或下方, 或是给定轨迹的里面或外面, 从而决定下一步的给进方向。比较一次, 决定下一步走向, 以便逼近给定轨迹, 即形成逐点比较插补。具体步骤如下:

1) 偏差判别: 假设偏差为 F_m , 在线段 OA 上偏差判别函数为:

$$F_m = y_m x_e - x_m y_e \begin{cases} = 0, \text{在直线上, 点 } m \\ > 0, \text{在直线上方, 点 } m' \\ < 0, \text{在直线下方, 点 } m'' \end{cases} \quad (1)$$

2) 坐标给进:

当 $F_m = 0$ 时, 动点在直线内, 可向 +X 方向进给一步, 也可向 +Y 方向进给一步, 通常规定向 +X 方向进给;

当 $F_m > 0$ 时, 动点在直线上方, 应该向 +X 方向进给一步;

当 $F_m < 0$ 时, 动点在直线下方, 应该向 +Y 方向进给一步。

3) 偏差计算:

假设当 $F_m > 0$ 时, 加工动点向 +X 方向给进一步,

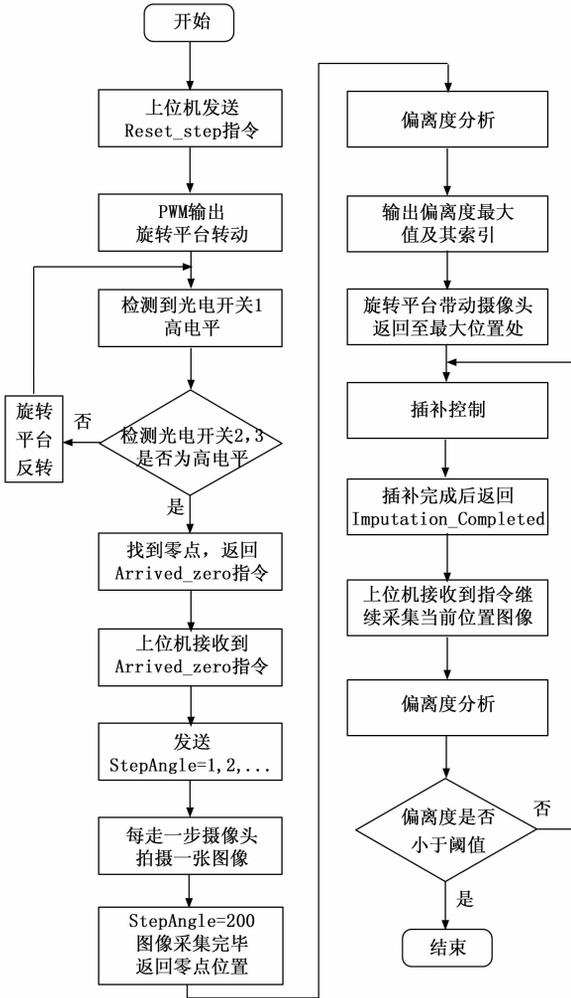


图 10 上位机软件程序流程图

生成新的动点 (x_{m+1}, y_{m+1}) , 则新动点偏差值 F_{m+1} 公式为:

$$F_{m+1} = y_{m+1}x_e - x_{m+1}y_e \quad (2)$$

又因为新动点坐标 (x_{m+1}, y_{m+1}) 可由动点 (x_m, y_m) 表示:

$$\begin{cases} x_{m+1} = x_m + 1 \\ y_{m+1} = y_m \end{cases} \quad (3)$$

将公式 (3) 代入式 (2) 可得:

$$F_{m+1} = F_m - y_e \quad (4)$$

同理可得, 当 $F_m < 0$ 时, 加工动点向 +Y 方向给进一步偏差值递推公式为:

$$F_{m+1} = F_m + x_e \quad (5)$$

4) 终点判别: 插补前, 将终点坐标的 X、Y 值求和, 得到一个总步长计数器, 开始插补后无论哪个轴进给一步, 总步长计数器都减 1, 直到计数器等于 0, 停止插补。插补控制程序流程如图 11 所示。

4 实验结果与分析

4.1 实验步骤和方法

实验过程中, 搭建了如图 12 所示的实验测试结构

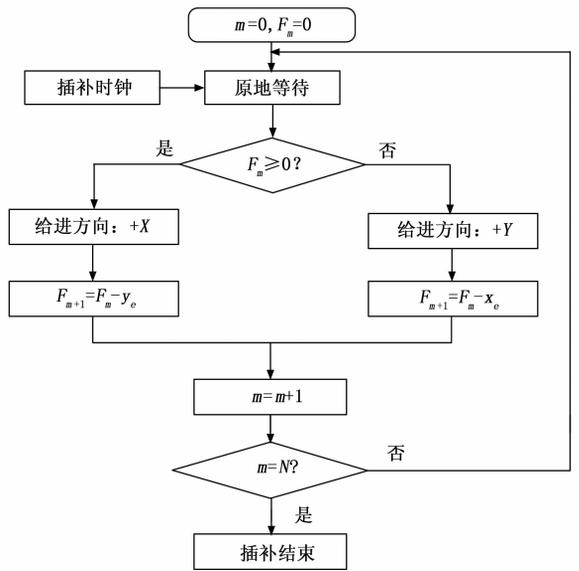


图 11 插补控制程序流程图

原理图。其中, 步进电机测试环境由 24 V 工业电源、步进电机控制器、步进电机以及主控制板组成。实验验证过程中, 通过控制板输出 PWM 信号给步进电机控制器来控制步进电机转动, 控制电压的高低来控制步进电机的正转反转, 步进电机的步数由脉冲数控制, 转速由占空比控制。伺服电机测试环境由 24 V 工业电源、控制板及调试器、两台伺服电机控制器、两台伺服电机组成。实验中, 通过控制板控制伺服控制器的“位置+扭矩”模式来控制两台伺服电机做插补运动。

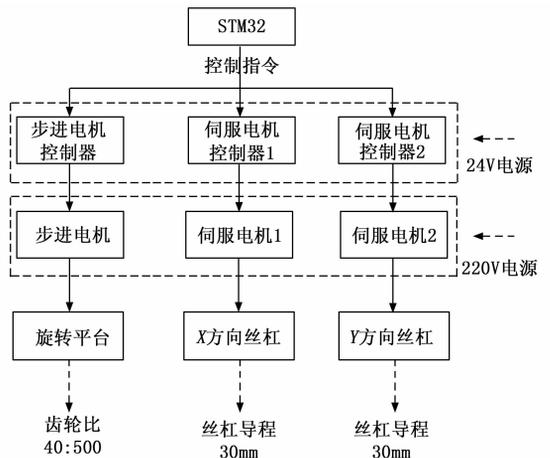


图 12 实验测试结构原理图

通过 USB485 连接位移传感器到上位机, 并使用串口助手软件显示和记录传感器的位移数值, 可以实现对物体位移的实时监测。同时, 使用游标卡尺进行测量验证来确保传感器提供的数据是准确的, 这对于实际设备中的精确度要求至关重要。

4.2 实验数据

配置定时器 TIM8 通道 1 输出 PWM, 设置 1 kHz、

50%占空比用示波器查看当前波形。经计算步进电机每给进一步将带动旋转平台移动 0.9°, 因此控制程序设置旋转平台每 0.9°拍摄一张图片, 直至旋转 180°, 即拍摄两百张图像为止, 到此图像采集结束, 将采集到的图像进行偏离度分析, 并输出最大偏离值及其索引, 用于后续控制参数。

基于以上实验方法, 在吹膜工业现场进行实物装配测试, 进行 20 轮薄膜数据采集之后, 对每轮的 200 张图像分别进行偏离度分析, 随机取 10 次记录每一次的最大偏离值及其索引值信息, 以验证步进电机开环控制精度及误差能否满足系统需求, 实验结果如表 1 所示。

表 1 最大偏离度及其索引值

圈数	最大偏离值/(°)	最大偏离值索引
2	8.105	60
3	8.383	64
6	8.216	63
8	7.996	60
9	8.293	63
11	8.457	64
14	8.228	63
15	7.972	60
17	8.055	61
20	8.292	63

步进电机每 0.9°给进一步, 即每张图像索引值之间相差 0.9°, 因此基于以上结果, 给出最大偏离值位置索引误差范围计算公式为:

$$\Delta\varphi = (max_idx - min_idx) * 0.9 \quad (6)$$

其中: max_idx 为表 1 中索引值的最大值, min_idx 为最小值。由此可得 $\Delta\varphi$ 值为 3.6°, 最大偏离度误差范围 0.485°, 平均最大偏离度 8.199°。根据以上结果, 最大偏离度误差小于所设阈值 0.5°, 因此步进电机控制精度满足系统需求。

根据 1.2 小节所设计的偏离度识别算法, 随机抽取一次实验结果, 记录偏离度识别实验数据。偏离度实验测试数据如表 2 所示。

表 2 偏离度实验测试数据

编号	未开泡偏离角/(°)	开泡偏离角/(°)	偏离角度差/(°)
1	90.558	91.500	-0.942
2	90.079	90.434	-0.355
3	90.595	91.244	-0.649
...
36	91.415	86.288	5.127
37	92.754	87.419	5.335
...
49	90.534	90.026	0.508
50	90.256	90.085	0.171

由表 2 中的结果, 薄膜外轮廓最大偏离度为 5.335,

对应编号 37。上述实验结果和分析提供了有关图像采集的最大偏离度信息及其索引。摄像头随旋转平台旋转半圈所拍摄的所有图像都经过上述处理, 将最大偏离度信息及该图像对应的编号通过串口通信传送给 STM32, 以便控制 XY 平台进行相应的调整。分析结果将有助于评估系统性能, 并为后续的控制部分提供了有力的依据。

上述偏离度信息以及对应的索引值信息通过串口发送给控制板后将进行相应的直线插补运动, 来移动膜口调节机构, 调试结果如图 13 (a) 所示。

插补控制是通过控制伺服电机转动带动减速机后的丝杠移动, 进而控制 XY 移动平台做相应的位移, 此位移量将通过位移传感器来读取并显示, 位移传感器调试结果如图 13 (b) 所示。



(a) 插补调试结果

(b) 位移传感器调试结果

图 13 插补及位移传感器调试

记录上述 10 次实验给进 10 丝后的插补计算理论值、传感器反馈值及实际测量值取平均数得到的数据结果如表 3 所示。

表 3 插补算法有效性验证

数据	理论值 /mm	传感器值/mm	游标卡尺实测/mm	理论与实际误差/mm	每 10 丝偏离度缩小值/(°)
X	1.078	1.253	1.240	0.126	2.663
Y	0.783	0.886	0.853	0.070	

根据以上结果, 插补过程中算法理论值与实际测量值平均误差为 0.098 mm, 每给进 10 丝通过偏离度算法计算得到最大偏离度减小 2.663°左右, 验证了本文所提插补算法的有效性。

4.3 结果分析

通过对以上实验结果的详细分析, 可以清晰地了解到本研究在步进电机和伺服电机的性能与控制方式验证方面的可行性。实验结果表明, 不论是步进电机带动旋转平台的控制, 还是伺服电机插补运动对吹膜机膜口间隙调节机构的精确控制, 均实现了预期的控制效果。

步进电机的实验验证清楚地展示了在每一步移动时采集图像的能力, 确保了图像采集的时序准确性。伺服电机的插补运动也得到了充分的验证, 其能够在不同方向上实现非常精确的控制, 这对于薄膜厚度的均匀性调

节至关重要。

图像采集和偏离度分析的结果表明,该系统能够以极高的精确度获取薄膜的偏离度信息。每一张图像都经过仔细的分析,以确定薄膜的不对称性程度。这一过程的自动化有助于实时监测和控制薄膜的质量。

此外,位移传感器的调试结果证实了使用位移传感器来测量膜口间隙调节机构位移量的可行性。这为系统提供了精确的反馈,以便更准确地控制薄膜的均匀性。

综上所述,以上实验结果对于本文所描述的控制系统的研究和性能评估至关重要。这些结果验证了实验方法和控制策略的有效性,为系统在实际应用中的可行性提供了有力的支持。这些成果为薄膜生产领域提供了一种高效的自动化控制方案,有望在工业制造中发挥关键作用。

5 结束语

在本研究中,提出了一种基于机器视觉的薄膜厚度均匀性控制系统,该系统将机器视觉与插补控制相结合,成功解决了薄膜生产过程中常见的厚度不均匀问题。通过实验验证,我们的研究取得了显著的成果,具体总结如下:

1) 采用了步进电机加两轴伺服电机的多轴控制方案,在多轴电机控制系统协同性方面给出了系统性的方案设计,对于复杂运动控制非常关键。

2) 开发了一种机器视觉系统,它能够实时监测和识别薄膜的不对称度。这一创新性的方法为薄膜生产工程提供了一种全新的控制方式,允许操作员更准确地了解薄膜的状态。

3) 控制部分采用了插补控制,通过两轴伺服电机组成的 XY 移动控制平台,根据机器视觉系统输出的控制参数,实时调整吹塑机膜口间隙。这种智能控制方法不仅提高了生产效率,还确保了薄膜的厚度均匀性和整体质量,这为自动化设备和精确位置控制领域提供了有力的解决方案。

综上所述,本文所研究的系统不仅在技术层面取得了重要突破,还为工业应用和质量控制提供了一种创新的方法。未来,期望这一研究成果能够在更广泛的工程和制造领域中得到应用,进一步推动技术进步,提高生产效率,满足市场需求。

参考文献:

- [1] 胡晓东. 吹塑薄膜厚度检测与厚度控制系统设计 [J]. 湖南工程学院学报 (自然科学版), 2004 (2): 33-35.
- [2] 曲双红, 俞孟燕, 孟 昕. 神经网络在薄膜厚度控制系统中的应用 [J]. 华东船舶工业学院学报 (自然科学版), 2003 (4): 51-55.
- [3] 王子懿. 薄膜样片厚度均匀性测量系统研究 [D]. 哈尔

滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

- [4] 李 硕, 吴国栋, 任玲玲, 等. 一种压力接触式薄膜材料样品加载装置及其测试方法 [P]. 中国: 202310409810, 2024-01-09.
- [5] 王志龙. 大幅面薄膜厚度在线检测及控制系统的研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- [6] 雷李华, 曹程明, 沈瑶琼, 等. 一种基于激光偏振系统的薄膜厚度测量装置及测量方法 [P]. 中国: 202210957257, 2024-01-08.
- [7] 杨 云. 基于机器视觉的非织造材料厚度均匀性检测系统的研究 [D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2011.
- [8] 王 刚. 薄膜卷材传输张力控制系统的研究与设计 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [9] 于 涵, 王 宏, 朱 恂, 等. 静电喷雾沉积半径的预测模型 [J]. 化工进展, 2022, 41 (6): 2864-2870.
- [10] 张春吉. 塑料挤出成型发展概况 [J]. 工程塑料应用, 2004, 32 (2): 67-70.
- [11] 高 浩. 摄像表记示值图像的机器视觉识别算法研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
- [12] 黄卿铭. PS-BASED 架构的线扫描 (LINE-SCAN) 影像检测系统 [J]. 电气时代, 2005 (8): 172-174.
- [13] ZHONGHE R, FENGZHOU F. State of the art in defect detection based on machine vision [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology, 2022, 9 (3): 461-483.
- [14] 石 炜, 张袁祥. 轴承缺陷图像二值化处理及形态学边缘检测 [J]. 舰船电子工程, 2020, 40 (8): 114-117.
- [15] 李 静, 陈桂芬, 丁小奇. 基于改进 Canny 算法的图像边缘检测方法研究 [J]. 计算机仿真, 2021, 38 (4): 371-375.
- [16] 赵晓军, 李学良, 湛 钊. 基于 STM32F407ZGT6 的云台式空间测距定位终端设计 [J]. 电视技术, 2017, 41 (Z3): 112-116.
- [17] 吕淑平, 赵斌韬. 步进电机控制系统设计 [J]. 实验室科学, 2020, 23 (6): 94-97.
- [18] 马 兵. 运动控制中伺服电机选型需求分析 [J]. 现代工业经济和信息化, 2020, 10 (12): 103-104.
- [19] 彭春文, 李永清, 刘 妍, 等. 浅谈 LVDT 位移传感器可靠设计分析技术 [J]. 电子世界, 2020 (19): 186-187.
- [20] 文 灏, 雷守宁. RS232 通信技术在单片机通信中的应用 [J]. 信息通信, 2020 (2): 130-131.
- [21] 房玉明, 杭柏林. 基于单片机的步进电机开环控制系统 [J]. 电机与控制应用, 2006 (4): 61-64.
- [22] 谢 容, 郑良剑. 光电开关在家电上应用的常见问题及解决方案 [J]. 家电科技, 2022 (s1): 552-555.
- [23] 唐友亮, 余 勃, 袁 梦, 等. 实现两轴联动的逐点比较法的改进算法 [J]. 煤矿机械, 2009, 30 (12): 12-13.