

杭州电子科技大学

硕士学位论文

题目：基于 ePLC 的视觉控制系统研究

研究生 张跃喜

专业 计算机技术

指导教师 严义教授

完成日期 2013 年 12 月

杭州电子科技大学硕士学位论文

基于 ePLC 的视觉控制系统研究

研 究 生： 张 跃 喜

指导教师： 严 义 教授

2013 年 12 月

**Dissertation Submitted to Hangzhou Dianzi University
for the Degree of Master**

The Research of Vision Control System Based on ePLC

Candidate: Zhang YueXi

Supervisor: Prof. Yan Yi

December, 2013

**杭州电子科技大学
学位论文原创性声明和使用授权说明**

原创性声明

本人郑重声明： 所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名： 日期： 年 月 日

学位论文使用授权说明

本人完全了解杭州电子科技大学关于保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属杭州电子科技大学。本人保证毕业离校后，发表论文或使用论文工作成果时署单位名称仍然为杭州电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。（保密论文在解密后遵守此规定）

论文作者签名： 日期： 年 月 日

指导教师签名： 日期： 年 月 日

摘 要

粗线径绕线机是生产大型变压器和稳压器等粗线径线圈的专用设备。在粗线径线圈的生产过程中，由于线径较粗和张力较大，排线时容易出现排线不均、重排、漏排、边缘排线易错等问题，而传统粗线径绕线机所采用的传统 PLC 控制方法只能根据静态逻辑控制算法控制绕线机运动，无法在绕线机运动过程中进行实时、动态的调控，使得产品质量不高。因此，为了解决粗线径绕线机的排线问题，满足大型发电项目对粗线径线圈的生产需求，研究设计出根据粗线径绕线机的实时运动状况进行自主智能反馈调节控制的新型粗线径绕线机具有重大的现实意义。ePLC 是可扩展的嵌入式可编程控制器技术，它可以使专用控制系统实现可编程化功能，是 PLC 技术新的发展趋势。在工业控制领域中，机器视觉技术的使用越来越普及。该课题基于 ePLC 技术创新性的将视觉应用于粗线径绕线机的运动控制上，实现了绕线机的自主智能反馈调控功能，提高线圈质量。如何设计和实现一种基于 ePLC 的粗线径视觉绕线机是论文的主要工作内容。

该课题针对粗线径绕线机做了大量的实验和研究，并在此基础之上设计出了基于 ePLC 的粗线径视觉绕线机系统。该系统采用软硬件协同设计的理念，系统硬件由主控引擎板、视觉辅控板、驱动电机、PC 机、绕线机等模块共同组成，系统软件由数控程序、视觉处理程序和反馈控制算法程序共同构成，在软硬件系统的共同作用下实现了对粗线径绕线机铜丝的视觉反馈运动控制。第一步，系统根据主从轴的参数，设计出数控层程序，并为逻辑控制层分配软元件资源。第二步，为了解决无法实时监控的问题，设计出体积小、价格低的视觉模块，实现对铜丝运动信息的采集与显示，并通过视觉处理算法计算出铜丝偏转角度。第三步，根据绕线机运动特点将绕线机运动周期划分为八个状态，结合视觉模块处理出的铜丝实时偏转角度，对不同的状态设计出不同的反馈调控策略。在视觉反馈控制算法的控制下，绕线机实现了自主智能反馈控制的功能。

系统测试实例结果表明，论文基于 ePLC 所设计的粗线径视觉绕线机具有实时自主智能反馈控制的功能，并且减少了排线错误，提高了粗线径线圈的质量，从而验证了本设计的可行性和实用性。

关键词：粗线径绕线机、ePLC、实时监控、视觉处理算法、视觉反馈控制算法

ABSTRACT

Thick line diameter winding machine is special equipment for the production of thick line diameter coil such as large transformers and voltage regulators. In the production process of thick line diameter coils, due to the line diameter is thicker and its tension is bigger, it is easy to appear problems of uneven line, overlap line, leakage line and edge line is easy to wrong. But the control method of traditional programmable logic controller that adopted by traditional thick line diameter winding machine, can only control the movement process of winding machines according to the static and logical control algorithm and not real-time and dynamic control the movement process of winding machine and that make the product quality is not high. Therefore, so as to solve the line arrangement problem of the winding machine for thick line diameter coils and satisfy the production requirements of thick line diameter coils for large power generation projects, research and design the new-type thick line diameter winding machines, which can autonomous intelligent feedback adjustment control according to its real-time movement condition, have the great practical significance. ePLC is extensible and embedded programmable controller technology, it can make the special control system programmable and is new trend of development of PLC technology. Machine vision technology is used more and more widely in many ways of the industrial control field. The subject applies vision technology to the motion control of thick line diameter winding machine innovatively and realize the function of intelligent feedback regulation and then improve the quality of products. How to design and implement a kind of thick line diameter vision winding machine that based on ePLC is the major issue studied in this paper.

On the basis of large experiments and research for the thick line diameter winding machine, this paper design the thick line diameter vision winding machine system based on ePLC. The system uses the concept of hardware and software co-design and that system hardware consists of the main engine board and vision control board and drive motor and PC machine and winding machine. System software consists of numerical control program and vision processing program and vision feedback control algorithm. The thick line diameter winding machine realizes vision feedback control for thick line diameter winding machine under the common action of the hardware and software system. Firstly, according to the parameters of winding machine's master-slave axis we design numerical control layer program and allocate the software elements resources for logical control layer. Then, in order to solve the problem of unable to real-time monitoring we design a small volume and low

price vision module and realize the function of collection and display for the copper wire movement information, and through the vision processing algorithm to calculate the copper wire deflection angle. Finally, according to the movement characteristics of thick line diameter winding machine we divide its movement cycle into eight state and combine with the copper wire deflection angle that vision module real-time process, design different feedback control strategy for different state of winding machine. We realize the function of autonomous intelligent feedback control for the thick line diameter winding machine as the effect of the vision feedback control algorithms.

System test case results show that the thick line diameter vision winding machine system has the function of real-time autonomous intelligent feedback adjustment control and decreases its line arrangement errors, so that it improves the quality of thick line diameter coils and also verifies the feasibility and practicality of this design by this paper based on ePLC.

Keywords: Thick Line Diameter Winding Machine, Embedded Or Extensible Programmable Logic Controller, Real-Time Monitoring, Vision Processing Algorithms, Vision Feedback Control Algorithms

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	II
目 录	IV
第一章绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 粗线径绕线机研究现状	2
1.2.1 粗线径绕线机的发展及现状	2
1.2.2 粗线径绕线机控制技术演变	3
1.2.3 粗线径绕线机的瓶颈问题	4
1.3 机器视觉技术发展	4
1.3.1 机器视觉原理及组成	4
1.3.2 机器视觉的工业应用	5
1.3.3 机器视觉的发展趋势	6
1.4 ePLC 的技术发展	6
1.4.1 PLC 的技术发展	6
1.4.2 ePLC 概念及发展	6
1.4.3 ePLC 开发平台 CASS	8
1.5 主要工作及创新点	8
1.6 论文组织结构	9
第二章视觉绕线机总体架构设计	10
2.1 视觉绕线机的系统结构	10
2.1.1 系统物理结构	10
2.1.2 系统模块架构	11
2.2 系统工作流程及硬件架构	12
2.2.1 视觉绕线机工作流程	12
2.2.2 主控引擎板硬件架构	13
2.2.3 视觉辅控板硬件架构	13
2.3 系统软件架构及数据交互	14
2.3.1 视觉绕线机软件层次结构	14

2.3.2 引擎驱动层的设计原理.....	15
2.3.3 软件各层间数据交互.....	17
2.3.4 视觉调控数据交互.....	18
2.4 本章小结.....	18
第三章数控实现及逻辑资源分配	19
3.1 数控层程序实现.....	19
3.1.1 数控程序设计原理.....	19
3.1.2 数控程序实现过程.....	19
3.1.3 绕线机数控层实现.....	21
3.2 逻辑资源分配设计.....	23
3.2.1 系统逻辑控制内存资源.....	23
3.2.2 绕线机主从轴资源分配.....	24
3.3 系统逻辑控制过程.....	26
3.4 本章小结.....	27
第四章绕线机视觉模块实现	28
4.1 视觉底层物理结构.....	29
4.1.1 S3C2440 核心结构.....	29
4.1.2 OV9650 芯片结构.....	30
4.1.3 视觉底板电路设计.....	31
4.2 视觉软件工作流程.....	32
4.2.1 视觉整体工作流程.....	32
4.2.2 视觉板初始模块流程.....	33
4.2.3 摄像头视频模块流程.....	33
4.2.4 视觉控制模块流程.....	34
4.3 视觉信息采集显示.....	35
4.3.1 铜丝信息采集.....	35
4.3.2 铜丝信息显示.....	37
4.4 铜丝角度处理算法.....	38
4.4.1 视觉处理过程.....	38
4.4.2 霍夫变换原理.....	39
4.4.3 偏转角度计算.....	40
4.4.4 结果去抖处理.....	41
4.5 本章小结.....	41

第五章视觉反馈控制算法实现	42
5.1 视觉反馈控制算法总体设计方案.....	42
5.2 视觉反馈控制数据计算.....	44
5.2.1 各状态标准偏转角度.....	44
5.2.2 相对偏差角度.....	48
5.2.3 反馈控制校正表.....	48
5.3 各状态反馈控制算法.....	49
5.3.1 状态一反馈调控.....	49
5.3.2 状态二反馈调控.....	51
5.3.3 状态三反馈调控.....	51
5.3.4 状态四反馈调控.....	52
5.3.5 状态五至状态八反馈调控.....	52
5.4 反馈控制算法实现.....	52
5.5 本章小结.....	54
第六章绕线机视觉控制测试	55
6.1 视觉绕线机平台搭建.....	55
6.2 视觉绕线机实例测试.....	56
6.3 视觉绕线机性能分析.....	58
6.4 本章小结.....	58
第七章总结和展望	59
7.1 研究工作总结.....	59
7.2 未来工作展望.....	59
参 考 文 献.....	62
附录	66

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

绕线机主要是用来生产线圈的设备^[1]，是集机械、气压、电子、计算机等先进领域的前沿技术于一体的自动化生产设备，主要用于各类电磁线圈、变压器、发电机和稳压器、电动机等线圈的生产制造。随着计算机技术和工业控制技术的大力发展，人类生产生活中的线圈越来越多，品种也比较齐全，从大型的电力变压器^[2]、发电机粗线径线圈到迷你型充电器线圈、灯具专用线圈以及各种电子产品生产所必须使用的线圈，这给绕线机的技术发展和生产制造创造了新的发展时机^[3]。当前针对细线经线圈^[4]生产的绕线机技术相对较成熟，生产出来的产品质量较高^[5-19]；然而，在粗线径线圈的生产过程中，由于线径较粗和张力较大，在排线运动过程中容易出现排线不均、重排、漏排、边缘排线易错等问题，同时粗线径绕线机在骨架边缘排线过程中容易出现不规则挤压现象使得所绕线圈品质不高和难以完全避免产品瑕疵的出现。绕线机的核心技术是控制技术，现代自动化绕线机均采用传统的 PLC 控制技术^[20-21]；而传统 PLC 的控制方法已经无法满足绕线机智能化调控的需求。在粗线径绕线机运动过程中，传统 PLC 只能根据静态逻辑控制算法控制绕线机运动，无法根据绕线机运动过程进行实时、动态的调控。随着大型发电项目对巨型变压器^[22]、巨型稳压器等粗线径线圈的大量生产需求，解决粗线径绕线机的排线问题以实现生产高品质的粗线径线圈显得更加迫在眉睫。因此，研究设计出根据绕线机的实时运动状况进行自主智能反馈调节控制的新型粗线径绕线机具有重大的现实意义。设计和实现新一代的粗线径绕线机，探索新的绕线机智能化控制方法是整个绕线机界所要克服和解决的重要问题，也是绕线机发展的必然趋势。

机器视觉是使用具有摄像、处理、分析功能的控制板或机器来替换人的眼睛对目标物体进行测量、定位、识别的一种新型智能技术。机器视觉不仅是扩展了人类的视觉范围，同时也是延伸了人类大脑思维的功能。目前机器视觉主要应用在诸如工业视觉检测、医学视觉检测、机器人视觉轨迹跟踪、目标监视与定位分析等与工业生产和民用生活较为密切的领域中。在工业控制领域中，机器视觉发展非常迅速，其主要用于诸如尺寸、形状、大小等产品外观的检测和生产线上的视觉手臂的智能控制等。机器视觉的蓬勃发展为该课题研究设计新一代粗线径绕线的控制方法提供了灵感，本文将视觉技术应用到绕线机的运动控制中，藉此解决绕线机运动中无法实时动态反馈运动信息的问题，这也必将是绕线机在智能化发展道路上的向前推进的重要一步。

为了解决粗线径绕线机中所存在的无法实时反馈控制的问题，基于 ePLC 技术将视

觉专用技术和 PLC 控制技术结合起来,探索出一种新型绕线机即粗线径视觉绕线机,用于解决粗线径绕线机所遇到的重排和漏排的瓶颈问题。粗线径视觉绕线机中的视觉模块实时采集绕线机铜丝运动图像信息,经过图像处理算法处理出实时偏转角度,通过 ModBus 协议将偏转角度传送给主控制器,主控制器根据绕线机铜丝实时偏转角度产生的相对偏转误差做出反馈调节控制以使绕线机避免绕出重排漏排的产品。基于 ePLC 技术的粗线径视觉绕线机可以实现绕线机的自主智能反馈调控,这将是一步具有重要突破意义的探索,同时为绕线机的智能化指明了未来的发展方向。

本课题基于 ePLC 对粗线径视觉绕线机进行研究和设计,采用自主设计双 CPU 主控制器的硬件架构和自主研制设计出的微型廉价视觉处理模块独立开发而出的一种实时化、智能化、动平衡化的粗线径绕线机控制系统。该系统软件设计是基于自主研发的 CASS 开发平台设计^[23]出主控逻辑控制算法和视觉反馈控制逻辑算法视觉处理采用模块化图形处理算法。该研究具有一定的实用价值和广阔的市场前景,可促进粗线径绕线机朝着智能化的方向进行发展。

1.2 粗线径绕线机研究现状

1.2.1 粗线径绕线机的发展及现状

绕线机是工业和生活使用的各种线圈的专用生产设备。随着现代社会的高速发展,其对线圈的品质提出了更高的要求,这也使得绕线机需要具备更强的控制功能和生产工艺。绕线机的出现提高了生产线的自动化水平,发展到现在一共经历了三个发展过程,分别是传统绕线机、数控绕线机、自动绕线机。传统绕线机从开始采用手工绕线排线的方式到后期发展为主轴使用电动机绕线和步进电机驱动从轴进行排线的方式进行生产,这种方式只能绕制中间过程,需要较大的人工参与并且工作效率低下,生产的产品质量也不是很高。数控绕线机的出现大大提高了绕线机的自动化程度和电气控制技术并将数字集成电路应用于绕线机的程序控制,此类绕线机分别在意大利、美国、瑞士、德国和日本等国家出现并快速发展。全自动绕线机是目前生产线上使用最广泛的绕线机,该类绕线机采用高精度的伺服控制电机驱动主从轴进行绕线和排线,自动化程度最高。

粗线径绕线机是绕制诸如超大型变压器等线径较粗的线圈产品的生产制造设备,其与普通绕线机的唯一区别就是绕制材料的不同,所绕制的材料为较粗线径的漆包线。粗线径绕线机的发展同样经历了三个发展过程,首先是传统粗线径绕线机的问世,其解决线径较粗的办法是采用多段齿轮减速箱驱动主轴充分利用粗线径的张力进行紧密绕制,该方法虽然能够简单绕制粗线径线圈,但线圈产品容易出现凹凸不平和不规则的间隙和漆包线容易发生偏转且人工操作比例较大,不适于大量生产。然后,数控粗线径绕线机将数控技术应用于对粗线径线圈的绕制,该绕线机可以实现自动排线和张力的调节

且有较大宽度满足粗线径的回转调节，大大的减少了粗线径线圈间的空隙现象和凹凸不平现象。目前，粗线径绕线机使用高精度伺服驱动电机驱动主轴并结合减速器实现动力传输的高精度控制适合绕线精度要求高的场所，这代粗线径绕线机更好的解决了对粗线径绕制时容易漏排的问题，但是由于线径较粗容易偏转带来的问题不易消除，该绕线机依然不能完全消除粗线径线圈间隙的问题。

国外的绕线机发展较早、技术也比较成熟，其中德国、日本、美国、意大利等国家生产的绕线机比较先进^[24-37]，绕制的线圈产品质量较高，在绕制专用线圈方面占有极大的市场并擅长绕制精密线圈产品。国外绕线机代表厂商有美国的 Sarcem、日本的日特机械工程会社、意大利的 Marsilli。国内绕线机从八十年代开始起步，从德国、日本进口数控绕线机到自主研发数控和自动绕线机，国内绕线机已基本实现了自动化功能，国内比较有名的绕线机厂商有深圳市的拓维新精密机械厂、厦门精合电气自动化有限公司和台湾的一些绕线机制造商。虽然我国绕线机发展较快，但是其在线圈绕制精度和可靠性以及自主核心控制技术方面与国际绕线机制造商仍有不小的差距，尤其体现在粗线径绕线机的生产能力上。目前，由于国产绕线机设备的绕线机质量低于进口的绕线机设备，国内的小型电器产品质量和可靠性都明显低于国际制造水平。

面对线圈不断向大型化、粗线径化的方向发展，粗线径绕线机设备亦不能满足粗线径线圈绕制的质量需求，必须提高粗线径绕线机绕制高品质产品的能力。同时，国家倡导低碳环保节能和大力发展风力发电工程日益增大对粗线径线圈的需求也促使着绕制粗线径线圈的绕线机技术的大力发展。未来粗线径绕线机的发展必将向智能化的方向发展，研制新一代智能化粗线径绕线机是绕线机从业人员的共同任务。

1.2.2 粗线径绕线机控制技术演变

粗线径绕线机控制技术经过了多次发展从起初的手工绕制的绕线机到目前的伺服控制的绕线机，设备的功能和自动化程度越来越完善，许多电子和计算机技术逐步应用于绕线机的控制系统中，粗线径绕线机的控制技术一般分为简易控制技术、数控技术、伺服控制技术三个阶段^[38]。

- 简易控制技术

简易控制系统多采用电动机驱动主轴绕线并结合多节齿轮调速箱调整转矩以满足粗线径漆包线的绕制需求，该控制系统只能实现粗线径线圈的简单绕制，并且手工操作的步骤较多，自动化程度较低。

- 数控技术

CNC 数控技术可控制多轴绕线机并且结合电气控制技术提高粗线径绕线机的自动化控制能力，该控制技术可实现宽度的回转调节以满足粗线径线圈的绕制需求。

- 伺服控制技术

伺服控制技术应用于粗线径绕线机对线圈的绕制,结合伺服电机和调速器可传输高精度的动力,使粗线径绕线机具有更高的自动化功能,目前伺服控制系统是绕线机生产厂商使用最多的控制系统。

1.2.3 粗线径绕线机的瓶颈问题

国家倡导低碳环保节能和大力发展风力发电工程促使对粗线径线圈的需求越来越大;然而,目前粗线径绕线机对粗线径漆包铜丝排线难以达到精密控制,这就使粗线径绕线机绕出的产品质量不高,难以高效生产出合格的产品。较粗的漆包铜丝由于张力大小不易把握以及粗线径的铜丝中容易出现间隙,导致绕线机绕出线圈间隙较多,重排、漏排现象严重,绕线到骨架边缘的时候容易产生叠排。造成这种现象产生的主要就是因为目前粗线径绕线机中传统的 PLC 控制方法^[39]无法实时反馈铜丝的运动情况,更无法根据铜丝的实际情况动态调整控制器的绕线动作,如此以来,绕线机不能够动态调整绕线误差,进而使骨架排线容易出现重排和漏排的现象产生。无法动态时候反馈绕线状态和无法根据实际绕线状态动态控制是粗线径绕线机的瓶颈问题,本文重点就是为了解决该问题,基于视觉控制来探索新的绕线机控制方法,进而推进绕线机发展的进程。

1.3 机器视觉技术发展

1.3.1 机器视觉原理及组成

机器视觉^[40-42]是使用工业控制技术或者计算机技术仿真人类视觉对物体信息采集、大脑进行决策、手臂进行控制的新型仿生控制技术。机器视觉系统一般通过摄像设备采集目标物体的实时图像原始信息并将该原始信息转换成可处理的信息格式,然后将摄像设备传过来的可处理图像信息传送给图像处理中心系统,根据图像中的光感、色泽和形状信息进行各种图像算法的处理来提取出控制所需要的特征值比如目标物体的个数、位置关系、大小和形状,并对其进行物理意义的分析,将根据最终分析结果生成的控制命令,最终将控制命令传送给运动控制设备产生相应的动作,从而仿真生物由眼睛看、大脑思考到产生手脚动作的一系列行为形成的一个由机器控制的视觉系统。工业视觉系统^[43-45]一般由三个部分组成,分别为信息采集、处理和分析及显示和控制,如图 1.1。

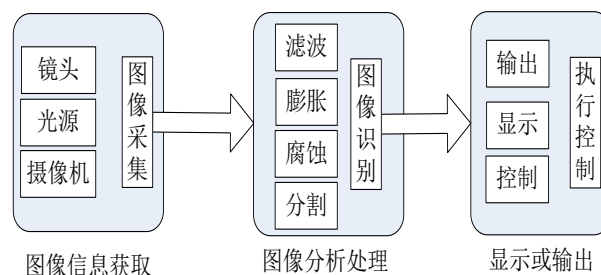


图 1.1 一个典型的工业机器视觉系统构成

- 图像信息获取

图获取图像信息的功能使仿真生物的眼睛，是机器视觉的前提和基础。该过程是采集图像的实时信息并转换成可处理的格式如数字图像信息，一般使用摄像机、传感器等进行采集。工业上的机器视觉使用的摄像设备大多为 CMOS、CCD，有单目、双目或多目三种形式。

- 图像分析和处理

对采集到的图像信息进行处理和分析是视觉系统的核心步骤，该步骤模拟人类大脑的思考过程，最终做出决策和生成控制指令。该过程主要使用图像处理相关技术对图像信息进行增强、二值化、分割、识别等算法提取出目标物体中包含的关键信息，据此生成控制指令传送给控制设备。

- 输出显示或控制

控制设备接收到上一步骤分析出来的控制指令后并解析产生相应的动作如手臂调整、主从轴速度协调等。为了方便程序员对视觉系统的开发和调试，必要时加上显示器观察图像中间处理过程。

1.3.2 机器视觉的工业应用

- 检测

当前工业控制领域中机器视觉主要应用于检测物体^[47]，检测的目标主要是对各种机械零件的几何尺寸进行测量，如机器零件测量系统、汽车制造质量检测。在汽车制造质量检测中，机器视觉技术被应用于汽车零部件外形尺寸检测、车身轮廓检测、装备完整性检测等方面。在半导体及电子行业有基于机器视觉的管脚尺寸自动检测系统。此外，机器视觉还被用于对于如刀具等工业设备的检测。

- 定位

在工业中使用机器视觉进行定位一般都是对精度要求较高的物体进行定位如钻头视觉定位系统、金属板材轨迹坐标视觉定位系统、PCB 钻机视觉定位系统、机床中无夹具工件视觉定位以及啤酒瓶生产线上瓶盖视觉定位系统等。对于有高精度定位要求的工业生产系统使用机器视觉技术来解决定位难的问题，机器视觉进行定位可以实现非接触、高强度、高精度定位等高自动化的功能。

- 识别

机器视觉在工业机器人对物体的识别上的应用也比较普遍。随着经济的快速发展，各种场合的专用机器人大量出现，工业机器人一般都有摄像头对目标物体进行识别、分拣、检测和控制，如焊接机器人进行点焊和弧焊、装配机器人进行装配和喷漆、码头机器人进行搬运和码垛等需要机器视觉对目标物体识别。

1.3.3 机器视觉的发展趋势

- 价格持续下降

硬件生产技术每 18 个月革新一次，生产成本随着技术的发展越来越低。摄像头 CMOS 和 CCD 的生产工艺越来越成熟，机器视觉产品价格逐年呈现出下降的趋势^[46]。

- 功能更强大

由于计算能力的增强、分辨率更高，扫描更快和图像处理软件的快速发展，机器视觉产品的功能将越来越强大。

- 视觉体积更小

视觉模块逐渐变的体积小、外设部件多，这样可以减小对空间的要求，对视觉产品的开发和测试都比较方便。

- 集成产品增多

FPGA、微处理器和 DSP^[47] 技术为智能相机添加了智能化采集和计算的功能，此类相机的发展表示视觉集成产品越来越多，同时集成产品正在为实现视觉芯片而努力。

1.4 ePLC 的技术发展

1.4.1 PLC 的技术发展

第一台 PLC 控制器产生于 20 世纪 70 年代的 USA 并将其成功应用于 GM 公司制造汽车的自动装配生产线上，经过近半个多世纪的技术和工业发展，可编程控制器凭借完善的技术和多样化的功能逐步成为工业控制行业中的核心控制技术。PLC 控制器技术的革新经历了五个过程：①由分立元件和集成电路实现只具有简单的定时技术功能②由 CPU 作为处理器，增加存储器提高了计算能力并具有自诊和容错的功能③具有多处理器架构并有通讯、抗干扰和运算功能④存储容量增大和处理器速度大幅提高并具有组网和显示功能，扩展性更强。⑤PLC 控制技术结合电子和计算机技术发展迅速并制定了国际 PLC 编程标准 IEC31131-3。

1.4.2 ePLC 概念及发展

早在上世纪 90 年代初期年 IEC61131 标准制订以后软 PLC 技术就开始发展。软 PLC 是使用软件工程思想和方法实现将 PLC 控制功能封装在软件程序中，软 PLC 克服了传统 PLC 难以构建硬件体系结构的缺点。随着工业控制领域中 IEC61131-3 标准的制定和实施，软 PLC 得到快速发展并具有更加强大功能如开发的控制算法接口和丰富的控制模块。但是软 PLC 是以 PC 操作系统为基础的控制引擎下实现的，其控制程序只能运行在 PC 中，因此软 PLC 不能快速准确的相应运动控制，满足用户对实时性的要求。软

PLC 虽然存在局限性，但它为 ePLC 的出现和发展打下了坚实的基础。

ePLC 是在 CASS 平台的基础上提出的一种新的可编程控制器技术，是将专用控制系统可编程化的软硬件开发技术。ePLC 是 embedded PLC 和 extensible PLC 的简称，它是可扩展的嵌入式可编程控制器。ePLC 的开发主要有以下七个方面的特点：

- 1) 实时性高。ePLC 是嵌入式 PLC，其基本特点就是实时性比较高，在硬件设计上嵌入式 PLC 很少使用存取速度较低的磁盘存储器，软件上采用无操作系统的设计的使嵌入式可编程控制器系统快速响应工业控制时间。实时性高也是其相比软 PLC 系统的较为突出的优势。
- 2) 适应性强。ePLC 是可扩展的 PLC，其软件开发平台 CASS 可以按照用户需求扩充新的功能，使用 CASS 平台进行程序开发符合 IEC61131-3 标准且编程简单方便快捷；嵌入式硬件引擎平台可以扩展各种各样的硬件芯片，使硬件不受限制，可以适应各种难度的系统设计。ePLC 的可扩展功能支持模块化开发，除传统 PLC 的逻辑控制功能外，可扩展的模块包括运动控制模块、RFID 模块、AD/DA 模块、视觉模块、网络模块等，可使得 PLC 的应用领域不断扩展。
- 3) 高可靠性。嵌入式系统对产品质量的可靠性和涉及人身安全国家机密的安全性要求较为严格，ePLC 系统采用复用技术和软件自检为系统提供了高可靠性。
- 4) 资源丰富。ePLC 充分利用 SOC 片上系统的芯片资源，使其具有更快的运算能力、更大的内存容量和扩展的指令集，用户可设计高级控制算法嵌入到原有的控制系统中，并且相应的操作指令依然符合 IEC61131-3 标准。
- 5) 可定制性。ePLC 系统硬件体系结构开放，用户可根据需求自主定制满足要求的硬件以实现预期的控制功能；软件开发 CASS 平台构件化，用户可自主定制合适的构件进行快速开发。
- 6) 开发周期短。基于 CASS 平台的构件化和硬件引擎系统的硬件定制化开发方式，ePLC 大大简化了 PLC 控制系统的开发流程，缩短了开发周期，方便用户
- 7) 性价比高。硬件的可定制化使得用户尽量选择能满足控制要求的低成本嵌入式芯片，并且软件开发方便快捷，使用户使用最小的成本开发出满足用户最大要求的控制系统，开发出性价比高的产品。

ePLC 系统的开发使用具有两大实用特点，分别是嵌入 C 语言功能和多线程编程功能。该系统采用混合编程的方式使其具有在 PLC 梯形图中嵌入 C 语言的功能。基于该功能，ePLC 以构件化的方式嵌入复杂智能算法如 PID 算法、神经网络、遗传算法、模糊控制算法等智能算法。在 CASS 算法生成平台的基础上使用 ePLC 嵌入 C 的功能实现智能控制算法具有编程方便，代码量小，可读性好的优点。ePLC 可以采用多线程的编程方式使系统充分使用 CPU 空闲资源添加智能优化算法，优化线程的调度，达到系统资源最优使用的效果。

ePLC 系统是以 CASS 平台为基础构建可扩展的开放式软硬件开发系统,用户可以按照需求定制满足控制功能的硬件控制器,以构件化的方式进行软件开发,方便快捷开发产品,并由 CASS 算法生成平台和用户所需的硬件控制器共同组成的扩展化开放式系统。该系统是可编程控制器的平台化、扩展化的大胆实践取得了稳定可靠的开发生产,同时也为可编程控制器提供了新的发展方向。

基于 ePLC 控制技术,该课题将视觉应用于粗线径绕线机的实时运动控制中并设计和实现视觉绕线机以解决粗线径绕线机排线易错的问题。论文将视觉绕线机分为两个关键部分进行设计,分别是视觉和反馈控制。视觉部分采用自主研发的视觉控制器模块进行设计,该视觉控制器为 ePLC 的视觉专用控制系统,它采用精简高效的图像处理算法处理出漆包铜丝偏转角度并传送给反馈控制部分。反馈控制部分是基于 ePLC 的 CASS 平台开发的绕线机视觉反馈控制算法。该反馈控制算法根据绕线机的运动特点将每个运动周期划分为八个状态,分别设计对应的反馈控制策略并通过梯形图编程实现。

1.4.3 ePLC 开发平台 CASS

CASS 是在智能控制实验室自主研发的控制系统,该控制系统开发平台完全符合国际 PLC 编程标准 IEC61131-3,采用构件化、开放式的编程方式将软 PLC 技术与嵌入式系统结合起来较好的适应了 ePLC 项目的开发^[48],该平台具有以下三大特点:

- 1) SoC PLC: 采用嵌入式微处理器全面实现 PLC 控制功能。
- 2) 硬件定制化: 构建开放的可扩展的硬件体系结构,支持 C51,AVR,ARM,DSP 等系统类硬件的定制扩展编程并以自由选择的方式确保系统对资源的充分利用。
- 3) 软件平台化: 软件 PLC 开发符合国际 PLC 标准,基于平台化的思想使程序开发呈现构件化的特点,且开发的程序移植性较强,开发时间比较短,非常适合项目的快速开发。

1.5 主要工作及创新点

该课题通过对当前粗线径绕线机控制方法的研究和对机器视觉及可编程控制器控制技术分别进行深入的实践和分析,创新性的提出一种基于 ePLC 的视觉运动控制系统架构和设计方案,并将该设计应用在粗线径绕线机上,实现自主智能反馈调控,提高了产品质量,得到了比较理想的实验结果,论文的工作如下:

- (1) 深入分析并设计出绕线机数控程序。该数控程序提供给操作工人的主要是绕线机控制参数的接口。该接口方便工人设置绕线机主轴和从轴的运行速度、加速度、限制速度、主轴方向、运动总脉冲数、个状态脉冲数以及视觉偏转角度等,这些参数可以针对不同线径绕线机进行不同的设计,使视觉粗线径绕线机适应

不同的线圈的绕制需求。

- (2) 设计视觉模块的硬件电路。使用 ARM9 核心板和 OV9650 Camera 设计出体积较小, 价格便宜的视觉控制板, 并为控制板中的摄像头编写驱动程序, 实现对绕线机漆包铜丝运动信息的实时采集。
- (3) 视觉模块图像分析实现。该功能主要对实时采集的漆包铜丝实时信息进行横向去噪、自适应阈值二值化、膨胀、细化等步骤进行处理, 最后经 hough transfer 算法处理出铜丝实时偏转角度并将该角度通过 Modbus Protocol 传送给视觉反馈控制逻辑层。
- (4) 反馈控制逻辑算法的设计。将绕线机运动过程划分为相应的状态, 并对不同的绕线状态和铜丝偏转角度实行不同的反馈控制策略, 该算法主要使用 CASS 的梯形图程序实现。

1.6 论文组织结构

第一章讲解了基于 ePLC 的粗线径视觉绕线机的研究背景、意义和粗线径绕线机的发展及控制技术的演变, 研究机器视觉技术及 ePLC 技术的发展, 并简略讲解了视觉绕线机的开发平台和本论文的主要工作内容、创新工作点。

第二章主要讲解视觉绕线机的总体架构设计, 对设计框架中硬件架构和软件层次结构进行详细的介绍并重点展开软件层次结构中的引擎驱动层的设计与实现。

第三章为数控层的设计与实现, 对逻辑控制层的逻辑资源进行分配予以介绍。

第四章为绕线机视觉模块的架构实现。首先介绍视觉模块的硬件设计, 然后对视觉模块的软件部分进行展开, 依此叙述 OV9650 摄像头驱动设计、绕线机基本图像处理介绍、绕线机角度检测算法的实现, 为第五章的反馈控制逻辑算法的实现奠定了视觉基础。

第五章重点介绍反馈逻辑控制算法的设计, 通过介绍反馈控制逻辑的总体设计思想进而详述视觉绕线机关键状态的划分、标准偏转角度的计算、反馈调节的控制策略以及数据的交互。该算法是在自主研发的 PLC 开发平台 CASS 上进行独立编写梯形图程序而实现。本章亦是视觉 ePLC 粗线径绕线机设计的精髓, 反馈逻辑控制算法的设计是实现绕线机实时反馈调控的关键所在。

第六章介绍视觉粗线径绕线机的平台搭建, 进行绕线机的实例测试和性能分析。

第七章对整篇论文进行深入的总结并对进一步的研究做出展望。

第二章 视觉绕线机总体架构设计

2.1 视觉绕线机的系统结构

2.1.1 系统物理结构

基于 ePLC 的粗线径视觉绕线机是由主控引擎板、驱动电机、视觉辅控板、绕线机以及 PC 机共同组成。主控引擎板采用多轴协同作用的双 CPU 运动控制器，该控制器是系统的运算控制处理中心并且可实现逻辑控制功能、多轴同步控制功能、程序执行功能、在线调试功能、梯形图编程等功能。视觉辅控板是 ePLC 专用视觉控制系统的核心部件，采用 CMOS OV9650 摄像头嵌入到 ARM9^[49-50]核心板的方式设计的视觉辅控模块，主要实现采集绕线机漆包铜丝实时运动的图像信息并经过视觉处理算法处理出反馈调节控制所需要的铜丝实时偏转角度等相关的视觉调控信息，将其作为反馈调控的关键视觉因素传送给主控板。CAN 转串口线将 PC 机与主控制器连接起来，通过 CASS PLC 开发平台实现对绕线机的运动变量及参数进行实时监控，通过 ComEditorX 实现以数控方式传送绕线机的初始电机控制指令。主控引擎板发送脉冲给伺服电机来驱动粗线径绕线机的主轴和从轴一起协调运动。视觉绕线机物理结构，如图 2.1。

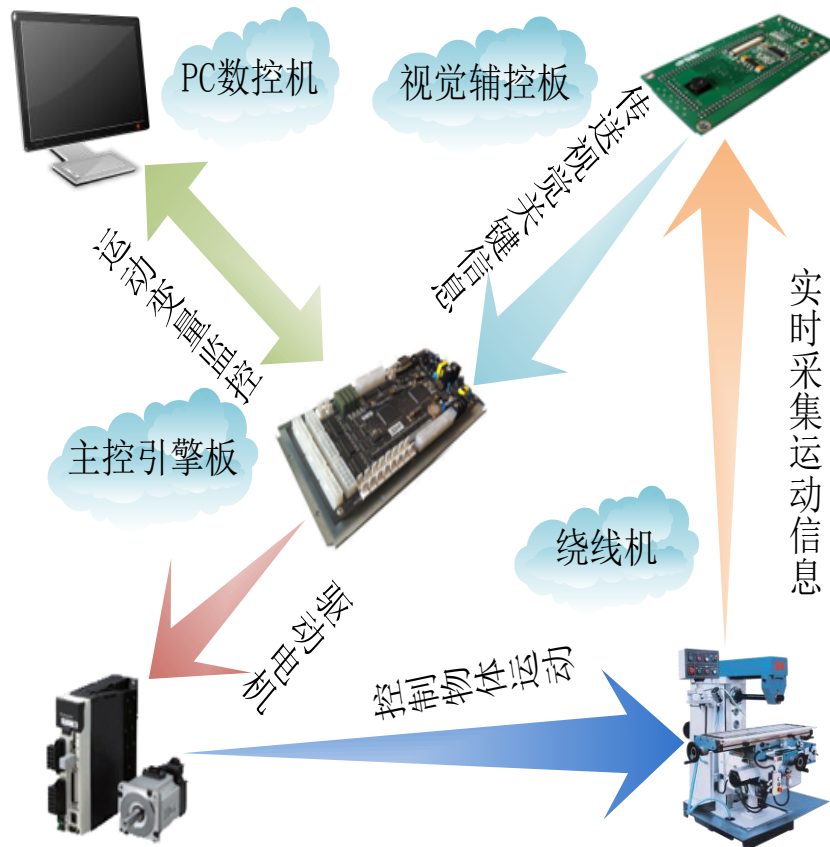


图 2.1 视觉绕线机物理结构

2.1.2 系统模块架构

为了增强系统的可扩展性和可维护性，视觉绕线机采用软件工程模块设计的思想将系统分为五个模块进行设计和开发。视觉绕线机系统包括引擎驱动、主控逻辑、反馈调控、视觉和数控五个模块，其中视觉模块是在 PLC 控制系统的基础之上加入并构成视觉控制系统，这也是视觉绕线机系统的一大创新点。五大模块一起有序、协调、稳定的对绕线机漆包铜丝进行实时监控。

数控模块通过数控程序由引擎中相关控制算法负责解析和执行。本系统数控模块实现的功能较为简单，主要负责实现对与多轴电机运动相关的速度、运动状态等参数的相关设置，通过 ComEditorX 进行程序编写通过串口将工人设置的电机参数传送到主控制器的引擎驱动层进行解析。数控模块使视觉绕线机系统适应不同粗细线径线圈的生产。

视觉模块主要实现实时图像信息的采集和视觉信息的处理，最终向引擎驱动层提供反馈控制的视觉信息，绕线机所需的视觉信息是漆包铜丝的偏转角度，此处处理向反馈调控模块提供视觉偏转角度。

逻辑主控模块实现绕线机 PLC 逻辑控制所需的资源分配如电机主轴和从轴的 VD 区、VM 区、M 区等共享内存空间的分配，使用这些资源进行主控逻辑算法的实现，使绕线机按照既定的指令运动。

反馈调控模块与视觉模块协调有序配合工作，反馈调控模块从视觉模块获取偏转角度后，根据标准偏转角度判断绕线机铜丝是否偏转，如果偏转执行相应的反馈调控策略将绕线机运动误差矫正过来。

引擎驱动模块是双 CPU 主控器的驱动程序和实现对 PLC 逻辑程序的解析和执行。PLC 逻辑主控程序和视觉反馈逻辑调控算法均是通过该模块解析并执行的。视觉绕线机系统模块结构，如图 2.2。

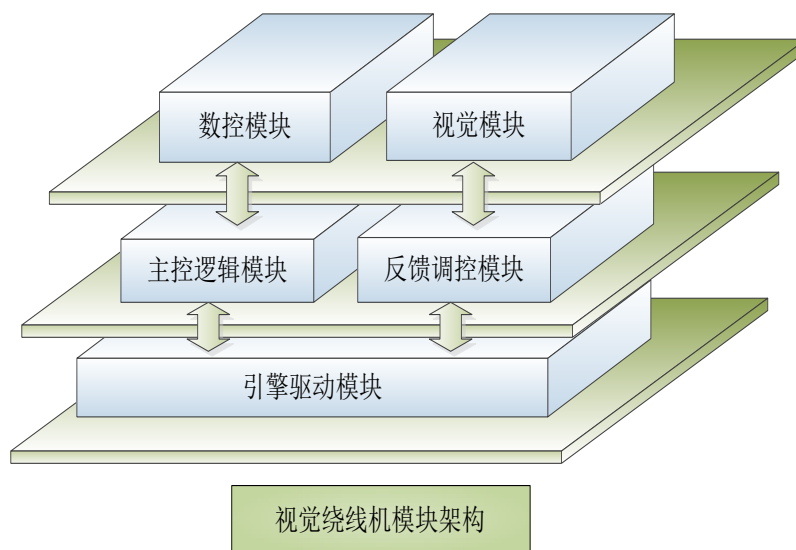


图 2.2 视觉绕线机系统模块结构

2.2 系统工作流程及硬件架构

2.2.1 视觉绕线机工作流程

在视觉绕线机系统中，双 CPU 的主控引擎板通过运动控制逻辑驱动电机主轴和从轴，控制物体协调运动；主轴控制绕线机骨架的旋转，是绕制铜丝的驱动轴，从轴用来调节铜丝及视觉辅控板随着铜丝绕线逐渐左右运动以使铜丝始终保持成一条无偏差角度直线的协调轴。运动控制逻辑包括运动主控逻辑和反馈调控逻辑。首先运动主控逻辑控制的电机驱动主轴和从轴协调有序的绕制线圈；于此同时，视觉辅控板通过 CMOS Camera 采集绕线机铜丝实时运动的 YUV 图像信息，经过摄像头 OV9650 芯片处理成数字图像信息，ARM 接收到图像信息后通过视觉图像处理算法计算出视觉调控所需的铜丝偏转角度，将绕线机铜丝偏转角度通过 RS232 串口传送给主控引擎板的反馈调控逻辑，反馈调控逻辑重新计算出主轴和从轴协调运动所需要的电机速度和方向参数，对电机控制下的主轴和从轴进行反馈调控，使绕线机铜丝的偏转角度保持在标准偏转角度误差范围之内，以使铜丝更加精准的绕制线圈。PC 机通过 CAN 转串口线与主控引擎板连接，实现数控和实时运动监控的功能。在绕线机工作前，通过数控方式配置主轴和从轴的运动参数，经引擎驱动板中的运动主控逻辑解析后产生绕线机的初始启动的动作和运动中的速度及方向。系统组成结构及工作流程，如图 2.3。

在视觉摄像头的监控下，视觉绕线机可以自主调控铜丝的偏转角度，使系统具有智能化、动平衡化、自主演化的特点，绕制出较高质量的线圈。

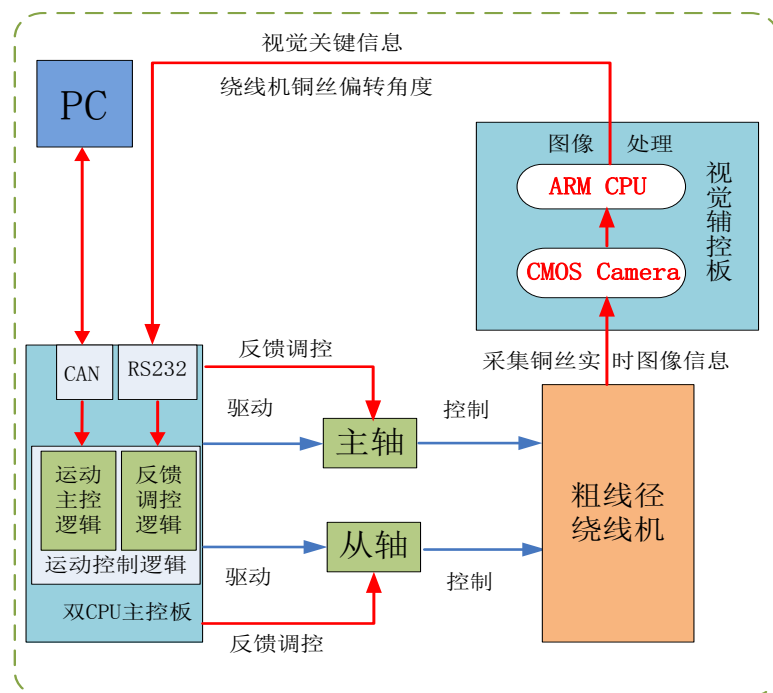


图 2.3 系统组成结构及工作流程

2.2.2 主控引擎板硬件架构

主控引擎板采用双 CPU 嵌入式 PLC 运动控制器系统的架构进行设计。该控制器系统既可实现运动控制亦能实现可编程控制器的主要功能，其主控引擎板包括五个部分：引擎、通信、IO、电源、运动控制，主控引擎板硬件架构^[51]，如图 2.4。

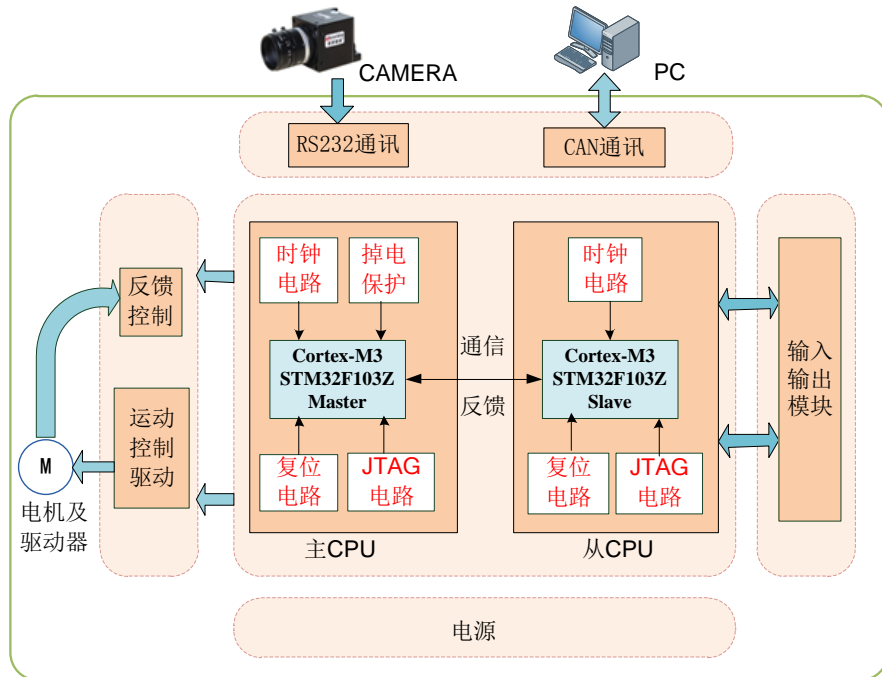


图 2.4 主控引擎板硬件架构

主控引擎模块由两个基于 ARM 内核的处理器 STM32F103ZCT6 及最小系统电路构成并具有支持六轴运动的控制 IO。通信模块包括串口通信和 CAN 总线通信，其中串口通信用来和视觉辅控板进行交互，用来交互经过图形处理算法处理出的绕线机铜丝偏转角度。CAN 总线通信通过 CAN 转串口模块与 PC 机进行通信，主要负责更新系统的程序、对绕线机运动情况进行实时监控和数控程序的执行。运动控制模块包括主控逻辑控制和反馈逻辑控制，主控逻辑控制主要是解析主控逻辑程序和实现运动控制指令脉冲切换。反馈逻辑控制是解析绕线机偏转角度所对应调控策略的逻辑程序，校正控制指令脉冲计数对电机的驱动。输入输出模块的设计提高了输出的驱动能力和系统抗干扰能力。电源模块为系统提供了稳定的+24V 电压。

2.2.3 视觉辅控板硬件架构

视觉辅控板采用 OV9650 CMOS 摄像头和基于 ARM9 微内核的 S3C2440 CPU 核心板结合构成视觉控制器，该视觉控制器包含有 Jtag Debug Interface、RS232 串口、TFT LCD、5 伏电源等开发和使用必备的接口。视觉控制器通过 RS232 串口与主控制器通信，

连接 LCD 实时显示运动信息方便调试, 通过 Jtag 接口使用 AK100 仿真器进行在线开发方便快捷。视觉控制器硬件架构, 如图 2.5。

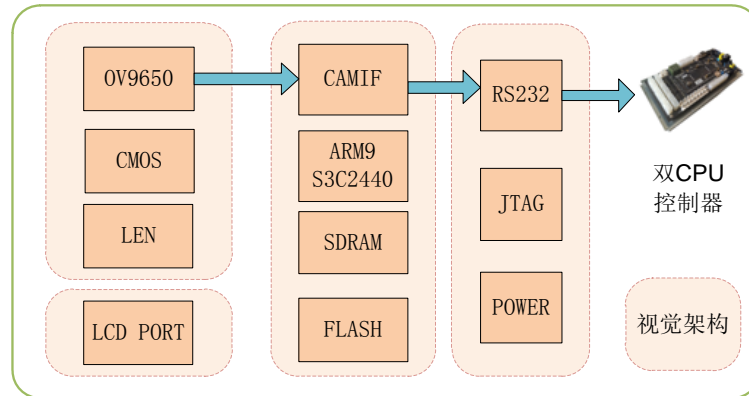


图 2.5 视觉控制器硬件架构

S3C2440 内部包含 CAMIF 接口, 可以采集彩色和灰度两种图像通过 DMA 方式保存到指定内存区, 摄像头接口支持 YUV8 为灰度模式和 16 位彩色图像模式。S3C2440 核心板留有 LCD 引脚接口, 通过排线连接 TFT LCD, 实时显示摄像头采集到的图像信息。OV9650 是 CMOS Camera, 支持 RGB565、YUV、YcbCr 数据格式, 支持的分辨率有 SXGA、VGA、CIF、QVGA、QCIF, 最高可达 130 万像素。OV9650 通过 SCCB 接口与 ARM9 芯片通信。通过写寄存器来配置 OV9650, 可手动旋转镜头进行调焦。

2.3 系统软件架构及数据交互

2.3.1 视觉绕线机软件层次结构

基于 ePLC 的视觉系统模块设计和硬件架构, 提出了四层程序架构的系统软件设计即引擎驱动层、逻辑控制层、视觉层、数控层。视觉绕线机软件层次架构如图 2.6。

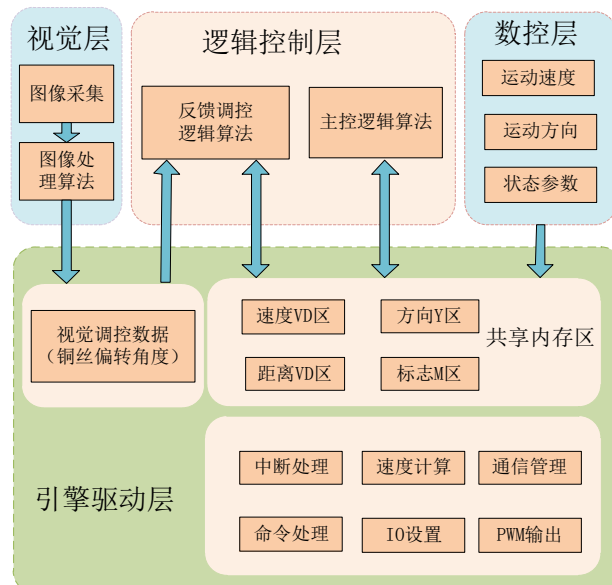


图 2.6 视觉绕线机软件层次架构

视觉层主要实现 S3C2440 驱动、摄像头驱动、图像采集和图像处理算法。该层的核心是图像处理算法的设计，提取出视觉调控关键信息并传送给引擎驱动层，该层程序运行在视觉模块的视觉控制器中，采用 C 语言在 ADS 1.2 中开发。

数控层实现操作员工对初始运动速度、运动方向及状态参数的设置。由 ComEditorX 编写通过 Modbus 协议下传给引擎驱动层的运动控制共享内存区中。此外，数控层的 PC 机可以通过 Modbus 协议读写共享内存区的主从轴运动软元件数据实现实时监控。

逻辑控制层是视觉控制逻辑实现的核心，该层包括主控逻辑算法和反馈调控逻辑算法，算法中可嵌入智能算法。主控逻辑算法是物体不同运动状态下的控制逻辑，是通过共享内存区与引擎驱动层进行交互实现的。反馈调控逻辑算法是读取视觉层写入的视觉调控关键数据和共享内存区数据，结合运动逻辑设计而出的使物体运动更加精准、更加协调的反馈调控算法。逻辑控制层是在 CASS PLC 开发平台下使用梯形图语言编写实现。

引擎驱动层主要实现物体运动的控制和主控制器的底层驱动。物体运动控制通过共享内存区与以上三层进行数据交互，接收运动参数和状态以及视觉调控数据，执行逻辑层控制算法及最终的绕线机运动指令。该层在 Keil 下使用 C 语言开发，在应用开发中只需针对应用需求添加少许代码，因此该课题称之为 CASS Engine。

2.3.2 引擎驱动层的设计原理

(1) 引擎驱动层的功能实现

引擎驱动层是整个视觉绕线机运动控制系统的底层核心，它直接影响到双 CPU 运动控制器的运行速度、命令响应速度和控制精度，还关系到整个系统运行的稳定性和可靠性。引擎驱动层包括硬件驱动、通信管理和命令处理，其中硬件驱动主要包括 PWM 驱动输出、IO 驱动、电机方向控制及电机位置信息采集的处理。引擎驱动层主要用来处理不同任务、协调各种程序执行并通过调用逻辑控制层 PLC 算法模块、通信模块、中断处理模块、时钟模块等实现 PLC 的逻辑控制功能，同时其也可以根据运动过程和目标的需求，实现多轴的同步运动控制和插补运动控制。因此，即具有 PLC 的逻辑控制功能，又具有运动控制的功能。

(2) 引擎驱动层的存储布局

引擎驱动层程序的存储与逻辑控制层程序相同，都是储存在主卡 CPU 的 FLASH 上。引擎驱动由 Keil 平台编译器编译成目标二进制文件，逻辑控制层程序通过预编译器编译成与目标 CPU 无关的中间代码并将其翻译成目标 CPU 可识别的汇编代码再调用对应 CPU 厂商提供的编译器进行编译进而生成支持硬件控制平台的专用机器语言，嵌入到引擎驱动层中，完成系统运行程序。BootLoader 是系统下载的引导程序，逻辑控制程序是 CASS 平台开发的 PLC 逻辑算法程序，它们和引擎驱动层在 FLASH 中的起始地址和大

小，引擎驱动层程序存储布局如图 2.7。

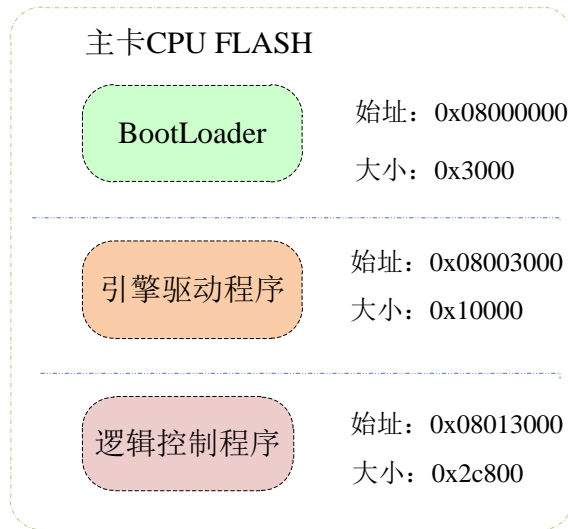


图 2.7 引擎驱动层程序存储布局

(3) 引擎驱动层的工作流程

引擎驱动层程序从系统引导程序 **BootLoader** 程序开始执行，其工作原理为：**Bootloader** 程序通过串口接收上位机程序并写入指定的 **FLASH** 程序存储区。当引擎各模块初始化程序执行完后开始执行主循环，等待触发任务。系统任务分别是 **PLC** 扫描任务、运动控制任务和通信任务。梯形图程序是由定时器触发的周期扫描任务，该周期的扫描在主循环中进行。运动控制任务由 **PLC** 扫描程序触发，当程序检测到有运动任务时，就调用相关的运动指令，执行运动输出。通信处理为梯形图逻辑中需要发送的数据触发相应的标志位，并在主循环中传送数据，引擎驱动层的工作流程如图 2.8。

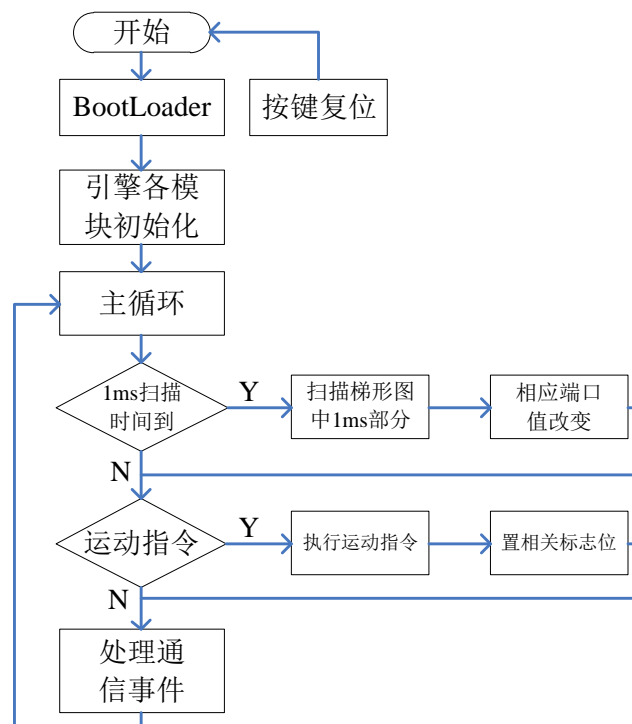


图 2.8 引擎驱动层的工作流程

2.3.3 软件各层间数据交互

由于主控引擎板采用双 CPU 结构设计,故引擎程序分为主 CPU 引擎和从 CPU 引擎。其中,主引擎负责逻辑控制(即 PLC 扫描任务)、运动状态控制和运动反馈收集等,从引擎主要负责接收主引擎的运动控制命令并输出 PWM 信号,主 CPU 和从 CPU 一起合作协调完成运动控制功能和 PLC 的逻辑控制功能。逻辑控制层即使用 CASS 平台开发的梯形图层,该层由软元件来标示,一般为 VD(数据存储器)、S(状态器)、T(定时器),并用这些软元件来管理系统的内存分配。引擎驱动层和其他软件各层间交互的关键,一是保证通信的稳定和安全性,二是将梯形图中的各软元件与内存中的实际物理地址的转换。通过共享内存的方式实现不同软件层的数据交互,实现的具体途径是串口通信。

(1) 共享内存

在主控引擎板的双 CPU 内存中划分出的一段内存空间作为共享内存数据区。内存中的物理地址与软元件地址是一一对应的关系。引擎驱动层、逻辑控制层、视觉层、数控层通过 ModBus 协议对指定软元件地址进行读取和写入以实现共享内存数据交互,如图 2.9。

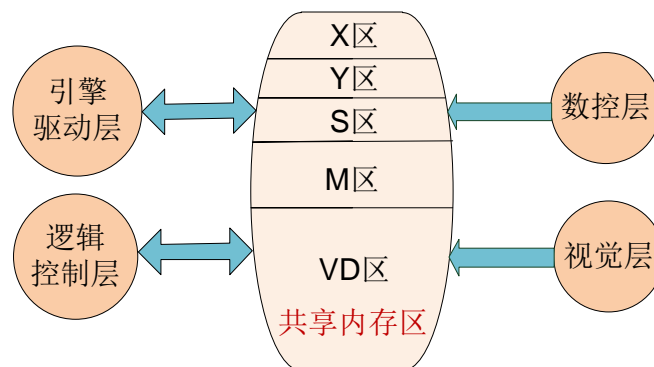


图 2.9 软件各层间数据交互

(2) 串口通信

本系统串口通信采用 Modbus 协议与视觉辅控模块和 CASS 平台开发的 PLC 逻辑控制模块进行通信并采用该协议的 RTU 传输模式,每帧最后两字节为 CRC 校验。首先由主机主动发起通信连接命令,从机在收到请求命令后根据帧内数据发起回应帧。主机在发出通信请求后一直等待从机的响应帧,若超时就重发通信请求帧,继续等待响应帧。主从站数据帧格式如图 2.10。地址转换则是内存分配方式计算其真实物理地址。

主站发送帧的格式

主站地址	功能码	数据起始地址	发送数据	CRC校验
------	-----	--------	------	-------

从站发送帧的格式

从站地址	功能码	数据起始地址	接收数据	CRC校验
------	-----	--------	------	-------

图 2.10 主从站帧格式

2.3.4 视觉调控数据交互

视觉绕线机系统的核心是视觉调控数据的交互，针对绕线机的视觉调控数据位漆包铜丝的实时偏转角度。视觉调控数据是由视觉图像处理算法处理出来并通过 Modbus 协议传送给引擎驱动层的视觉调控数据所对应的共享内存中，反馈调控逻辑算法从该内存中读取视觉调控数据，结合逻辑控制层的运动控制变量和实际的运动逻辑设计出反馈调控逻辑算法并在引擎驱动层执行以实现视觉调控绕线机运动，视觉调控数据交互的整个过程如图 2.11。

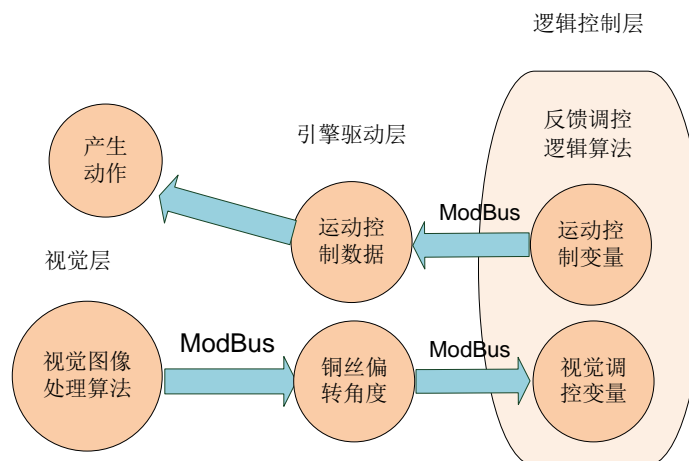


图 2.11 视觉调控数据交互

2.4 本章小结

本章详细介绍了视觉绕线机的总体硬件设计和软件设计以及软件各层之间的数据交互。基于 ePLC 技术介绍了视觉绕线机的系统物理结构和系统模块结构并详细阐述了视觉绕线机的工作流程。通过详细讲述视觉绕线机的硬件架构，将视觉层和逻辑控制层深入透彻的与主控引擎层结合起来，从硬件角度上构成了创新型的视觉绕线机系统。本章第三小节阐述了视觉绕线机的软件层次结构，并从共享内存和串口通信的角度介绍了软件层间的协调、有序、稳定的数据交互。本章为阐述的软硬件架构设计为系统的详细设计和实现提供了有力的理论基础和实践思路，同时也为后面章节的介绍从技术上做出了铺垫。

第三章 数控实现及逻辑资源分配

3.1 数控层程序实现

3.1.1 数控程序设计原理

数控程序是在不增加 ePLC 系统额外的硬件的条件下利用现有软硬平台通过软件方式设计出来。本系统使用的数控层程序是以逻辑控制层为基础，通过与逻辑控制程序交互的方式实现数控程序的功能。数控指令由逻辑控制程序实现其功能，由引擎中的逻辑控制算法进行解析和执行。数控程序的设计主要有两个部分，一个是对专用存储空间分配，另一个是数控指令的设计。

(1) 专用存储空间分配

在可编程控制器中专用存储空间的分配中，将数控程序和可编程逻辑程序分别存于 RAM 和 ROM 中。数控程序分别包括指令标志区、交换数据区和数控程序暂存区。

(2) 数控指令的设计

数控程序的设计主要是设计数控指令，其包括对指令的设计、实现、编译和执行。数控指令的设计包括指令格式、指令功能以及指令的使用规则的设计，数控指令由梯形图程序实现。最终，经过编译、下载和执行，实现数字控制工业生产过程。

3.1.2 数控程序实现过程

(1) 数控指令设计

数据指令格式首先是指令名称，后面就是跟上参数与对应的参数值，参数与对应参数值之间没有间隔，参数与其值组成一对基本单元，而单元之间用空格分开。指令名称表示其需执行的功能一般用符号表示如 MOV 表示某一轴的运动数控指令。

数控指令格式： 名称 参数 1 值 1 参数 2 值 2 … 参数 n 值 n

每条指令的具有独一无二的指令名称，在指令中参数名是通过 ComEditorX 设置代表一定意义的一个地址空间的符号名。比如 MV 表示主轴运行速度，其所代表的引擎内存地址为软元件 VD6000 所表示的内存区域，大小为 4 个字节。

(2) 数控指令实现

数控指令的功能是通过逻辑控制程序来实现的。在逻辑控制程序中开辟一块内存区域作为共享内存用来从 PC 层接收数控指令中对应的每一个参数值。共享内存作为数控程序在逻辑控制程序中的接口是以软元件的形式存在的，每个参数都唯一对应一个软元件，如 VM6020 软元件内存区域只能接受其所表示的主轴目标运行点数。

(3) 数控程序编译

数控程序的编辑、编译和下载功能由 PC 机数控程序的 ComEditorX 编译器完成。ComEditorX 是智能控制实验室在 Windows 平台下开发的数控程序编译器,如图 3.1。该编译器具有编辑、编译数控程序和与 PLC 及主控引擎驱动程序通信的主要功能。数控程序采用编译的处理方式使逻辑控制程序执行速度较快和实时性较好。

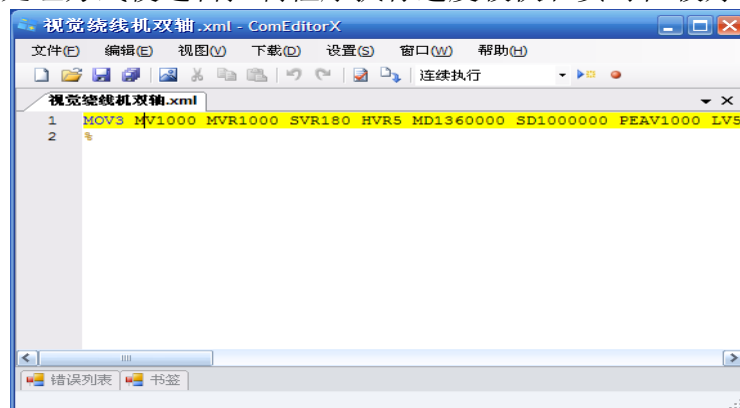


图 3.1 ComEditorX 数控编译器

ComEditorX 数控编译器具有很强的通用性,它可以对不同应用的指令集或指令系统进行编译处理,并有指令管理功能。指令管理主要有指令增加、修改、删除等指令管理功能,可以自定义数控指令,修改参数个数和参数数据类型以及指令码等操作,通过这种方式可以方便的扩展和维护指令系统,管理绕线机数控指令如图 3.2 所示。



图 3.2 管理绕线机数控指令

(4) 数控程序执行

数控程序首先将 ComEditorX 编译生成的可执行代码通过串口烧写到主控引擎板中相应的内存区里，然后结合逻辑控制 PLC 算法程序和数控程序的内存参数值，执行相应的动作指令，最终实现对目标物体的运动控制。

3.1.3 绕线机数控层实现

(1) 绕线机数控程序内存分配

视觉绕线机采用主从模式双轴控制方式，对骨架和漆包铜丝的运动进行协调控制。绕线机的数控程序作用主要是在绕线机工作前对主轴和从轴的一些参数进行初始设置，包括主轴和从轴的初始速度、加速度、运行速度、限制速度、运行目标点数、偏转角度、状态 1 至状态 8 的主轴运行目标点数等。数控程序的逻辑控制程序的逻辑地址范围是 VD6000 ~ VD6100。PLC 逻辑软件元和主控引擎共享内存中的地址是一一对应的关系。通过查询 MemMap.h 得出绕线机数控程序对应的物理地址范围为 0x1A7C 至 0x1ABC。软元件逻辑地址向引擎内存地址转换，如图 3.3。

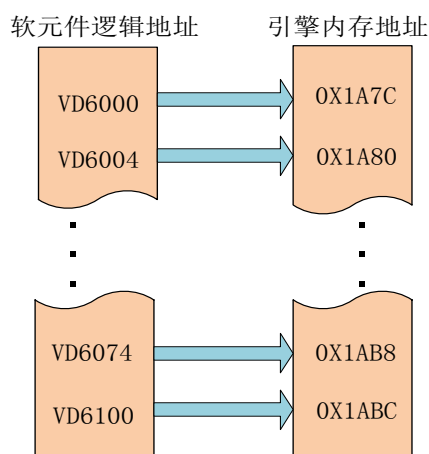


图 3.3 软元件逻辑地址向引擎内存地址转换

(2) 绕线机数控指令设计

绕线机数控指令如图 3 所示，MOV3 是命令字。参数名和参数值紧密相邻，如 MV1000 表示主轴运行速度为 1000pps。绕线机数控指令设置初始参数包括主轴和从轴的初始速度、加速度、运行速度、运行目标点数、偏转角度、状态 1 至状态 8 的主轴运行目标点数等。绕线机数控指令中的数控参数标记、数据类型、参数长度及参数说明。图 3.2 已表明 ComEditorX 对绕线机数控指令的管理，而绕线机数控指令参数意义如表 3.1。

表 3.1 绕线机数控指令参数意义

参数标记	数据类型	参数长度 (B)	参数说明
MV	无符号整型	4	主轴运行速度
MVR	无符号整型	4	主轴运行速度系数
SVR	无符号整型	4	从轴运行速度系数

HVR	无符号整型	4	高速倍乘系数
MD	无符号整型	4	主轴运行目标点数
SD	无符号整型	4	从轴运行目标点数
PEAV	无符号整型	4	角度产生和消除运行速度
LV	无符号整型	4	限制运行速度
SMDA	无符号整型	4	状态 1 主轴运行点数
SMDB	无符号整型	4	状态 2 主轴运行点数
SMDC	无符号整型	4	状态 3 主轴运行点数
SMDD	无符号整型	4	状态 4 主轴运行点数
SMDE	无符号整型	4	状态 5 从轴运行点数
SMDF	无符号整型	4	状态 6 主轴运行点数
SMDG	无符号整型	4	状态 7 主轴运行点数
SMDH	无符号整型	4	状态 8 主轴运行点数
SSDI	无符号整型	4	状态 8 从轴运行点数

绕线机控制指令中的指令参数标记共有 17 个，表示的意义也各不相同。其中，MV 是主轴运行速度，表示主轴低速运行的速度。MVR 为主轴运行速度系数，表示主轴高速运行的速度与低速运行时速度的商。这样，数控工作人员可以通过调节 MVR 的值来调节绕线机主轴高速运行的速度，单位为脉冲每秒（pps）。SMDA~SMDB 表示绕线机在一个来回运行过程中，主轴运行的脉冲点数。主控逻辑控制算法和反馈逻辑调控算法将会根据这些数据判断绕线机所处的运行状态，根据具体实时运行状态做出相应的反馈调控策略，并执行相应的绕线动作。

（3） 绕线机数控指令数值

通过 ComEditorX 数控编译器，用户可以任意设置绕线机数控指令数值，本论文实验所用的漆包铜丝数据的直径为 0.8mm，基于状态机的划分将绕线机的数控参数数值设置如表 3.2 所示，该绕线机数控参数数值是第六章视觉控制测试所需的数据。

表 3.2 视觉绕线机数控参数数值

参数	MV	MVR	SVR	HVR	MD	SD	PEAV	LV	
值	1000	1000	180	5	1360000	100000	1000	50000	
参数	SMDA	SMDB	SMDC	SMDD	SMDE	SMDF	SMDG	SMDH	SSDI
值	0	30000	290000	320000	60000	350000	610000	640000	0

3.2 逻辑资源分配设计

3.2.1 系统逻辑控制内存资源

逻辑控制层的程序编写需要使用软元件符号所标示的引擎驱动层的系统内存资源。引擎驱动层所包含的系统内存资源足够 PLC 梯形图程序员使用。其内存组成如下。

- (1) 辅助控制器 M 有 6000 个，范围从 M0 至 M13557。
- (2) 状态寄存器 S 有 16 个，范围从 S0 至 S15。
- (3) 软计数器 C 从 C0 至 C15 也有 16 个。
- (4) 整型变量 VD 最多，总共有 8000 个，范围从 VD0 至 VD1747，保存在 Flash 中。
- (5) 软定时器 T 有 80 个。

这些底层内存资源除了一些极少量的适用于特定应用，程序员不能自定义其含义之外，梯形图程序员都可以任意使用。

系统内部特定应用的内存标示符主要集中在辅助控制器 M 和数据变量 VD。如表 3.3 和表 3.4 分别列出了引擎驱动层为逻辑控制层定义的特定应用的辅助控制器 M 的标示和数据变量 VD 的标示。

表 3.3 特定应用的辅助控制器 M

M50 ~ M55	常闭	轴 1 至轴 6 急停
M60 ~ M65	常闭	轴 1 至轴 6 机械原点
M70 ~ M75	常闭	轴 1 至轴 6 回机械原点
M100 ~ M105	常闭	轴 1 至轴 6 停止命令
M110 ~ M115	常闭	轴 1 至轴 6 运行某位置换向
M120 ~ M125	常闭	轴 1 至轴 6 设为程序原点
M130 ~ M135	常闭	轴 1 至轴 6 回程序原点
M140 ~ M145	常闭	轴 1 至轴 6 运行 N 点命令

表 3.4 特定应用的数据变量 VD

VD2040 ~ VD2064	INT32	轴 1 至轴 6 当前坐标值
VD2120 ~ VD2144	INT32	轴 1 至轴 6 换向时运行点数
VD2150 ~ VD2174	INT32	轴 1 至轴 6 当前运行速度
VD2200 ~ VD2224	INT32	轴 1 至轴 6 当前目标运动点
VD2310 ~ VD2322	INT16	轴 1 至轴 6 反转去向增点
VD2324 ~ VD2336	INT16	轴 1 至轴 6 反转回向增点

3.2.2 绕线机主从轴资源分配

(1) 主轴和从轴系统特定内存资源

主轴和从轴的起始速度、运行速度、加速度、减速度、运行点数、快速反转增加点数、当前坐标值、方向等内存资源标示符为特定应用内存范围。绕线机运动控制用到六轴中的轴一作为主轴、轴二作为从轴。主从轴系统特定应用内存资源如表 3 所示。

主从轴系统特定应用内存资源主要使用与轴一、轴二相关的系统内存资源。VD430 存放主轴加速度，占两个字节；VD444 占两个字节为主轴减速度；VD460 存储主轴最高速度，占四个字节；VD510 表示起始速度占两个字节，VD2000 占一个字节表示主轴属性，VD2010 占四个字节表示主从比例系数。VD432 表示从轴加速度占两个字节；VD446 从轴减速度占个两字节；VD464 表示从轴最高速度，占四个字节；VD512 表示从轴起始速度占两个字节；VD2001 表示从轴属性占 1 个字节。

与主轴运动策略相关的内存资源分配如下：

- ✓ VD2120 存储主轴快速反转运行点数占四个字节；
- ✓ VD2150 存储主轴运行速度占四个字节；
- ✓ VD2200 表示主轴运行点数占四个字节；
- ✓ VD2230 表示主轴快速反转延时时间占四个字节；
- ✓ VD2310 表示主轴快反去方向增加点数占四个字节；
- ✓ M40 存储主轴向从轴开始发送参数占一个比特；
- ✓ M220 存储主轴向从轴发送参数，占一个比特；
- ✓ M20 表示主轴运行命令占一个比特；
- ✓ M30 存储主轴运行中标识占 1 个比特；
- ✓ VD2040 存储主轴当前坐标值占四个字节；
- ✓ Y120 表示主轴运行方向占一个比特。

与从轴运动策略相关的内存资源分配如下：

- ✓ VD2124 存储从轴快速反转运行点数占 4 个字节。
- ✓ VD2154 存储从轴运行速度占 4 个字节。
- ✓ VD2204 存储从轴运行点数占 4 个字节。
- ✓ VD2234 存储从轴快速反转延时时间 4 个字节。
- ✓ VD2324 存储从轴快反去方向增加点数占 4 个字节。
- ✓ M21 表示从轴运行命令占 1 个比特。
- ✓ M31 表示从轴运行中标识占 1 个比特。
- ✓ M110 表示快速反转有效占 1 个比特。
- ✓ VD2044 存储从轴当前坐标值占 4 个字节。
- ✓ Y121 表示从轴运行方向占 1 个比特。

(2) 逻辑控制算法应用内存资源

在逻辑控制算法设计中需要用到一些辅助表示地址变量作为中间变量，这部分资源变量的内存分配需要梯形图程序员在除特定用途内存的系统内进行自定义分配。反馈逻辑控制算法需要梯形图程序员分配一部分中间地址变量内存。

用两个字节存放视觉处理模块传送过来的铜丝实时偏转角度，存放入 VD3000。而 M3000 绕线机是否开启视觉调控功能的总开关。VD3100 至 VD3136，每两个字节为一个地址变量空间，如图 3.4 所示，用来存储绕线机一个周期内各个状态的标准偏转角度，每个角度占两个字节。

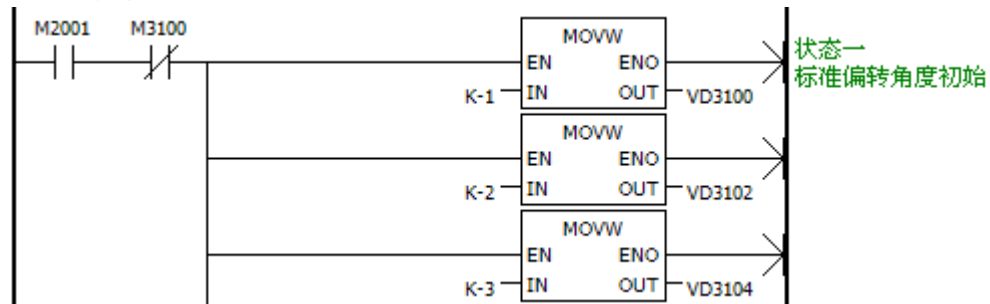


图 3.4 部分标准偏转角度资源分配使用

状态一、三、五、七的单位偏差角度所需调控的从轴速度存放在 VD3200 中，占四个字节。状态二、四、六、八的单位偏差角度所需调控的从轴速度存放在 VD3204 中，也是占四个字节。另外，VD3210 存放根据相对偏差角度绝对值查表所得速度的调控量。VD3214 存放与原来运行速度做相应运算如加或者减所得的调控速度。VD3220 存放从轴原来运行速度，方便还原调控前的运行现场。VD4000 用来实时记录主轴相对运行点数，VD4010 用来实时记录主轴绝对运行点数，VD4020 用来记录上周周期结束时主轴运行点数。VD4400 用来实时记录从轴运行点数，VD4410 实时记录从轴运行点数的相反数，主要是状态五使用，分配资源记录主从轴运行点数，如图 3.5 所示。绕线机系统开辟一部分地址变量空间用于存放公共数据，如 VD3300 存放公共标准偏转角度，VD3304 存放公共调控速度，VD3312 表示相对偏差角度的绝对值，VD3314 检测不到直线度数（如 255），VD3316 相对偏差角度的上限度数（如 8 度），VD3320 存放相对偏差角度波动范围（状态二、状态六使用，如 2 度）。

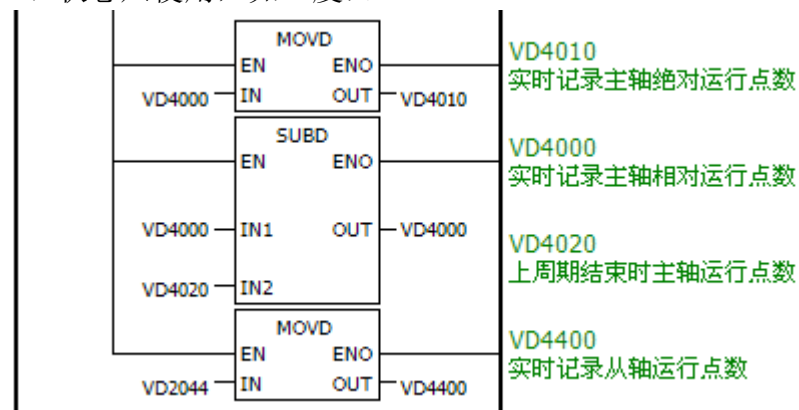


图 3.5 分配资源记录主从轴运行点数

由于反馈控制逻辑算法的中间计算过程较多，中间变量相应也比较多。为此，本系统也分配了大量的存放临时数据的中间变量用于程序之中。M3200 表示是否检测到直线，若没有检测到则为 255，否则将 M3200 置 1。M3201 表示相对偏差角度绝对值是否大于 8，若大于 8 度则置 1。M3202 置 1 表示左偏，M3203 置 1 表示正常，M3204 置 1 表示右偏。M3205 表示调控速度是否为负，若为 1 表示需改变从轴方向。M3206 为左偏调控标志，M3207 为右偏调控标志。M3210 为已经调控标志，若调整过置 1，M3211 表示调控速度是否与现在运行速度相同，若是则值为 0，表示无需改变现有速度。M4100 至 M4107 为状态一到状态八的状态标志。M4000 至 M4007 为状态一、四、五、八的第一圈数的临时计数标识及其状态标志。M4010 至 M4017 为状态一、四、五、八的起始圈数标志。M4020 为状态八的标志，M4021 为周期结束标志。

3.3 系统逻辑控制过程

绕线机逻辑控制程序的设计是绕线机运动控制的核心部分，其包括绕线机主控逻辑算法程序和反馈逻辑控制算法程序，均在主控引擎驱动平台程序下解析和执行。绕线机数控程序与逻辑控制程序共享专用内存区，他们的解析和执行原理相同。在绕线机逻辑控制程序中，无论是主控算法还是反馈逻辑算法，其控制过程和运动过程都是一样的。

绕线机逻辑控制过程和其他工业控制程序大体相同，首先，对绕线机主轴和从轴的运动状态进行初始，然后启动运动开关，按照逻辑控制一步一步的循环执行。绕线机运动时循环进行，将去方向和来方向划分为一个周期，每个周期划分为八个状态，运动绕线时以周期为单位，循环往复，周而复始。绕线机去方向和来方向各四个状态，四个状态分别表示慢开始、快运行、慢结束、快差补，无论来方向和去方向，绕线机运行的过程皆为这四个状态。视觉反馈调控逻辑算法在绕线机运行的每个状态中都有不同调控策略。绕线机只需按照既定状态的调控策略根据视觉运行的效果进行反馈调节控制即可，反馈调控逻辑算法将会在第五章详细阐述。整个绕线机的逻辑控制过程如图 3.6 所示。

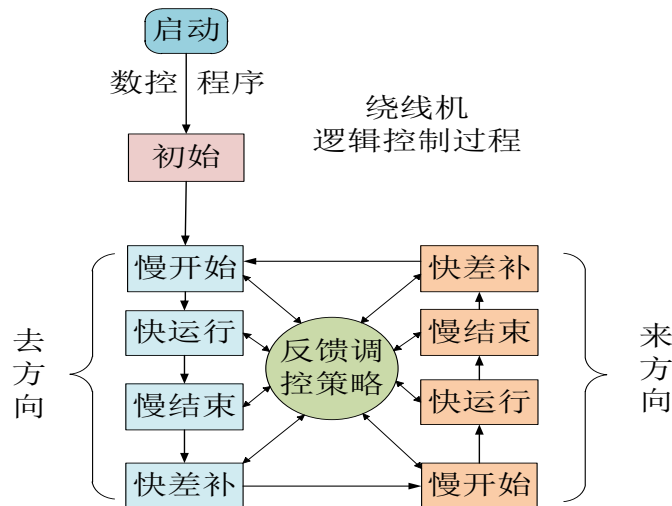


图 3.6 绕线机的逻辑控制过程

3.4 本章小结

本章介绍了绕线机数控程序的实现和绕线机逻辑控制资源的分配情况。首先通过对数控程序原理的进行详细介绍并进一步实现了视觉绕线机的数控程序。然后阐述了系统可用的逻辑控制内存资源，接下来分别从系统特定内存资源分配和具体应用自定义的内存资源分配这两个角度详细介绍了本视觉绕线机逻辑控制层所使用到的内存资源，同时为第五章的反馈逻辑控制算法的设计奠定了实践基础。

第四章 绕线机视觉模块实现

视觉模块是智能控制实验室为机器视觉能在工业控制中方便快捷的使用而设计的一个微型、低成本、耗能小、功能强大且扩展性较高的视觉产品，目前该产品已成功应用在视觉 ePLC 粗线径绕线机的设计当中。该模块采用天嵌科技公司生产的 ARM9 核心板和豪威的 OV9650 摄像头^[52]感光芯片通过自主研发的视觉底板组合设计而成，其硬件架构已在第二章的视觉辅控板硬件架构一节进行介绍。ARM9 核心板采用 Samsung 生产的 2440 处理器芯片,该芯片功能较全且具有标准的 CMOS Camera 接口使其方便图像信息的采集和处理。OV9650 通过类 I²C 通信模式设置芯片内部寄存器可实现灰度和彩色两种类型的图像信息获取并可改变帧速调节曝光等功能。该模块软件设计采用模块化的方式进行开发并配有高效精简的算法库进行视觉处理，能确保工业视觉控制系统稳定实时高效的工作。软硬件一体的设计使其开发非常快捷且使用起来比较方便，本文基于此视觉模块开发出了具有自主反馈功能的视觉粗线径绕线机控制系统。自主研发的视觉模块实物图如图 4.1 所示。



图 4.1 视觉模块实物图

4.1 视觉底层物理结构

4.1.1 S3C2440 核心结构

本系统视觉模块控制器采用由天嵌科技公司专门针对低端用户生产的功能强大、体积较小的 S3C2440^[53-54]核心板。该板具有良好的电气特性和稳定性的六层 PCB 布线工艺设计使其具有很强的抗干扰性和抗震性，主频为 400 兆赫兹同时具有 192 个引脚的双列插针式设计使其成为性价比较高的小微控制器。S3C2440 核心板完全采用全静态的设计并使其具有内部的资源有大小均扩展的 64M SDRAM、2M Nor Flash 和 256M Nand Flash、10 位模数转换器和 Camera 接口、LCD 接口、USB 主从设备、串口、DMA 通信、内存管理单元以及 I²C、I²S 总线。

CAMIF 是 S3C2440 专用的摄像头接口，可以采集彩色和灰度两种图像通过 DMA 方式保存到指定内存区，摄像头接口支持 YUV8 位灰度模式和 16 位 RGB565 彩色图像模式，采集灰度图像使用预览模式，采集彩色图像使用编码模式，使用任何一种方式都传送到 S3C2440 的数据总线上，通过数据 DMA 方式传送到指定的内存地址中，S3C2440 的 Camera 接口如图 4.2 所示。本系统选择使用 S3C2440 芯片主要是使用此芯片的摄像头接口，该芯片方便设置图像采集格式和 DMA 传输图像信息的内存存放地址，本系统将 DMA 的内存地址与 LCD 液晶屏设置为相同的区域即可实时显示铜丝运动信息到液晶屏上。

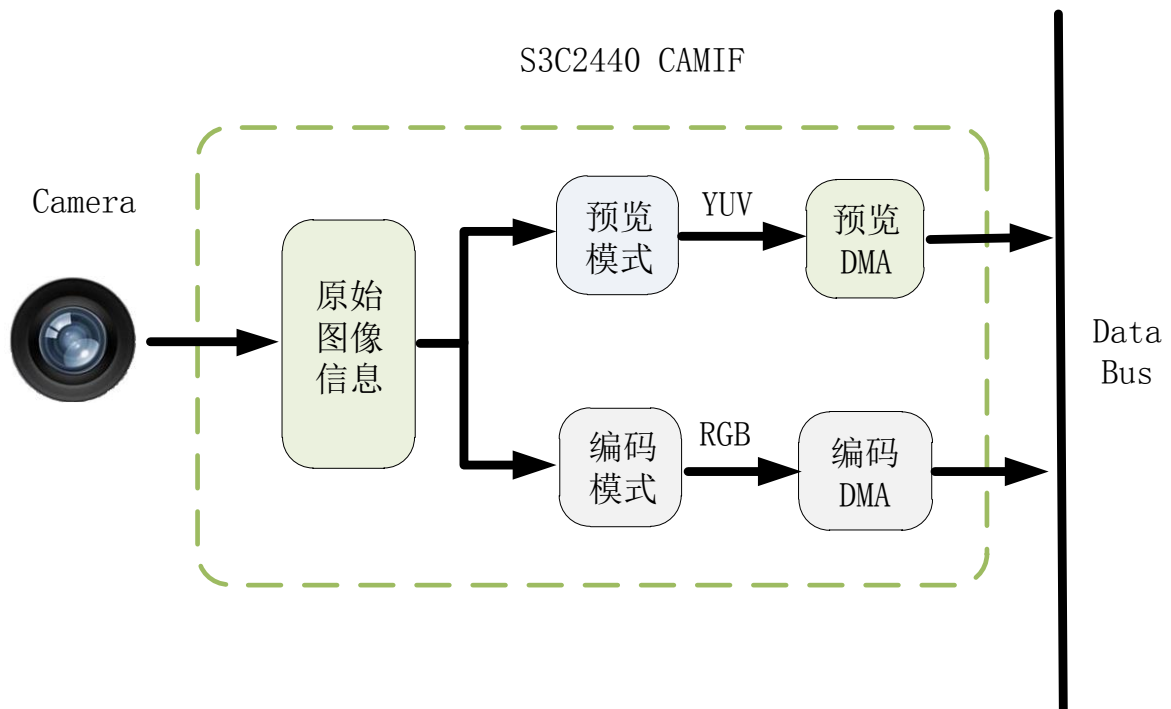


图 4.2 S3C2440 的 Camera 接口

除了使用 S3C2440 专用的摄像头接口之外，视觉绕线机也重点使用了它的 LCD 接口，用来连接 TFT 触摸屏，主要用来显示漆包铜丝实时运动信息和算法处理中间过程。

4.1. 20V9650 芯片结构

OV9650 是美国半导体公司豪威科技公司生产的一款基于 CMOS 的彩色图像视频传感器芯片并与透镜组成摄像头模组并具有高敏感度、低功耗，高分辨率的特点。OV9650 内部集成有很多功能强大的部件，用户通过 SCCB 总线接口对芯片寄存器进行写操作就可以控制帧频、分辨率、曝光度以及传输信息格式，其内部功能块如图 4.3 所示。

OV9650 的输入时钟 XCLK1 为 12MHZ，通过输入时钟控制视频时序发生器分别产生像素产生时钟、输出行和输出场的同步信号，并且通过 SCCB 写特定的寄存器可实现曝光增益控制和白平衡控制。图像矩阵的长度有 1300 的像素，宽有 1028 个像素，通过向摄像头寄存器中写值来控制矩阵的行选择和列选择可将分辨率分别设置为 7 万、30 万、130 万。模拟处理单元可以从图像矩阵中获得原始像素并处理出 Red、Green、Blue 三种彩色分量并经过模数转换和 DSP 单元共同处理下将彩色图像组合成一定的图像格式如 Ycbcr、YUV、RGB565 等，最后通过视频引脚使形成既定格式的图像信息传输给 ARM9 控制器的专用摄像头接口中进行后续处理。SCCB 控制总线与 I2C 协议相似，包含两条线分别是 SIO_C 和 SIO_D，SIO_C 是时钟引脚，SIO_D 是数据引脚。通过 SCCB 总线可以配置图像传感器寄存器的参数来控制芯片的运行。

OV9650 的输出格式包括 8 位 YUV/YcbCr、GRB 和 16 位的 RGB565、RGB555、Raw RGB。本系统通过对 OV9650 芯片的寄存器 COM7 和 COM15 进行配置，该视觉模块使用 8 位的 YUV 输出格式作为图像采集格式。

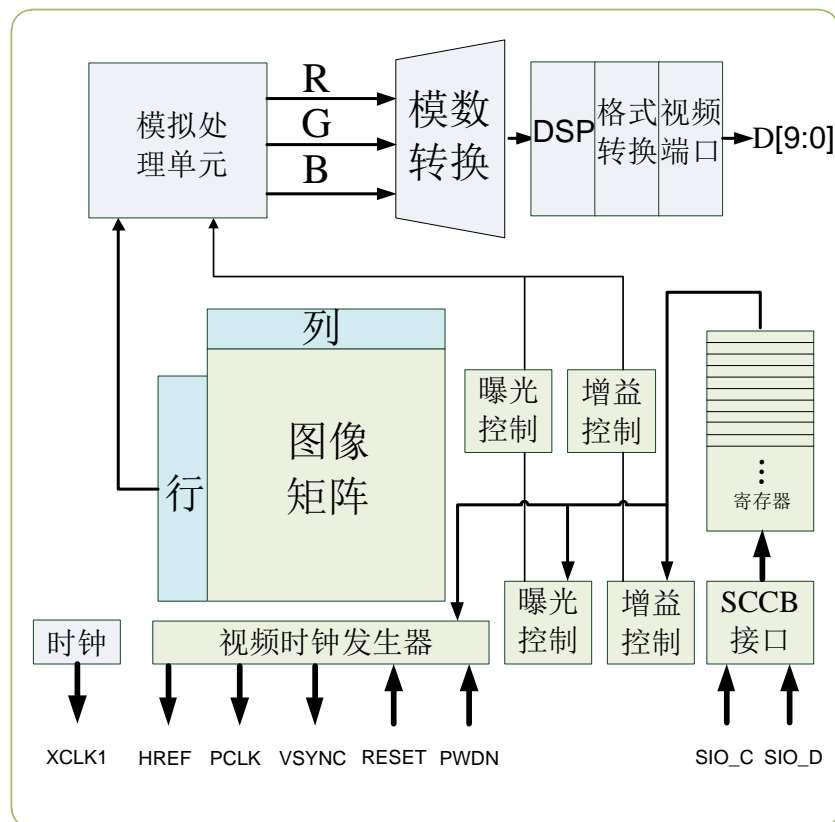


图 4.3 OV9650 内部功能块

本视觉绕线机系统选择 OV9650 作为视觉模块的核心部分主要是基于以下五点：

- (1) 支持的分辨率格式较多，有 SXGA、VGA、CIF、QVGA、QCIF、QQVG 绕线机配置使用的分辨率是 QVGA。
- (2) 支持曝光和增益调节以及帧速调节的功能。由于视觉模块要求体积小、价格低，且需要自动调节曝光率和手动调节曝光的功能。
- (3) 通信协议方便简单，SCCB 协议类似于 I²C 协议，方便编程。
- (4) 可编程控制芯片，选择使用需要的功能。以上功能均可通过对寄存器配置实现。
- (5) 功能强大，电路简单，体较小、价格低，是设计视觉模块最好的选择。图 4.4 和图 4.5 分别是 OV9650 的实物图和电路图。

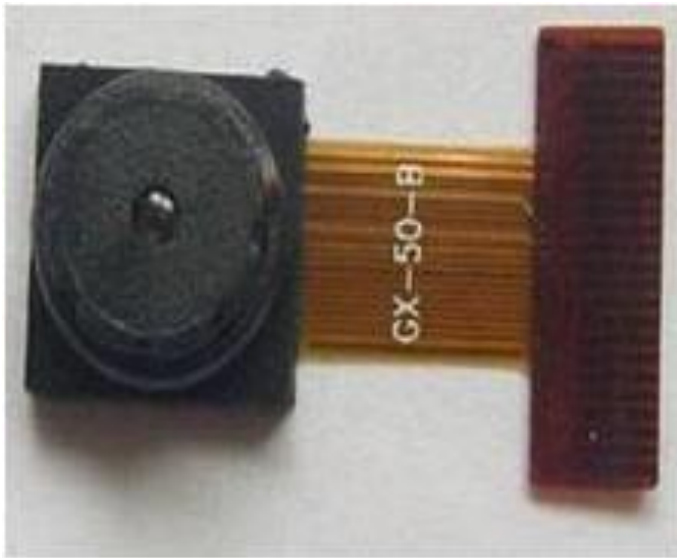


图 4.4 OV9650 的实物图

摄像头接口 CAMERA			
I ² CSCL	2	1	I ² CSDA
CAMRST	4	3	EINT19
CAM_HREF	6	5	CAM_PCLK
CAMCLK	8	7	CAM_VSYNC
CAMDATA6	10	9	CAMDATA7
CAMDATA4	12	11	CAMDATA5
CAMDATA2	14	13	CAMDATA3
CAMDATA0	16	15	CAMDATA1
VDD33V	18	17	VDD5V
GND	20	19	GND

图 4.5 OV9650 的电路图

4.1.3 视觉底板电路设计

视觉模块底板是专门为视觉模块定制而成，由智能控制实验室独立自主研发设计出来。该底板电路集 S3C2440 核心板针脚插口、OV9650 接口、LCD Port、RS232 串口、电源接口、JTAG 调试接口于一体并以插口形式连接 ARM9 核心板和 Camera 摄像头的方式组成一个体积小、功能强大视觉模块。

(1) S3C2440 与 OV9650 的连接

S3C2440 的 CAMCLK 作为 OV9650 的输入时钟与 XCLK1 连接起来，同时产生像素时钟由 PCLK 输出到 CAMCLK，输入时钟为 12MHZ，而 OV9650 的场同步 VSYNC 和行同步 HREF 与 CAMIF 的 CAM_VSYNC 和 CAM_HREF 连接起来，达到视频信号同步的控制。GPGLL 为摄像头提供电能输出到 PWDN。CAMIF 的 I²CSCL 和 I²CSDA 为 I²C 的时钟线和数据线分别与 OV9650 的 SCCB 的 SIO_C 和 SIO_D 相连，由此 SCCB 总线，向 OV9650 寄存器中写值，通过编程对 OV9650 Camera 进行控制。图 4.6 详细的描述了 S3C2440 与 OV9650 的连接。

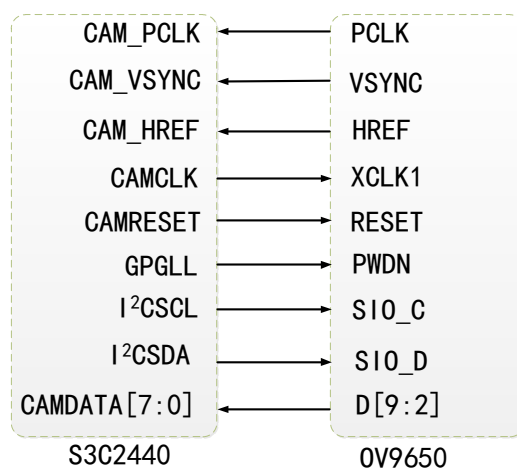


图 4.6 CAMIF 与 OV9650 Pin 连接

(2) S3C2440 LCD Port 的预留

视觉模块底板留有 LCD 接口，方便连接 LCD 触摸屏。视觉模块附带的 LCD 主要是方便程序调试和运动过程的实时观察，使控制系统的运动所见即所得。预留的引脚包括 VD0~VD23、GND、LCD PWR、I²CSDA、I²CSCL、VM、VFRAME、VLINE、VCLK、TSXM、TSXP、TSYM、TSYP 共 40 个引脚。

(3) S3C2440 串口的预留

视觉模块需要一个串口与主控引擎控制板进行通信，主要是用来向主控引擎传送铜丝偏转角度。除了以上接口，视觉模块还预留了 JTAG 接口方便使用仿真器进行在线调试和一个 5V 的电源接口。

4.2 视觉软件工作流程

4.2.1 视觉整体工作流程

视觉软件采用模块化的设计思想，将视觉层程序分为三个模块，分别是视觉板载初始模块、摄像头视频模块、视觉控制模块。图 4.7 所示视觉模块的软件工作流程。

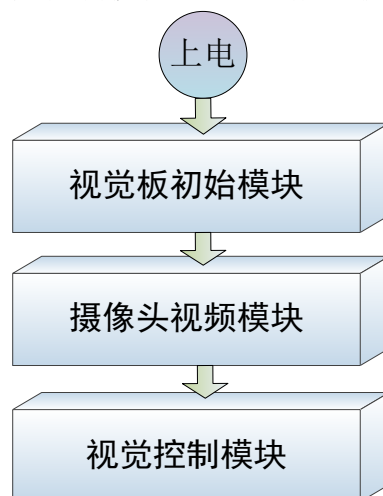


图 4.7 视觉软件工作流程

4.2.2 视觉板初始模块流程

视觉辅控板上电之后开始执行视觉板初始模块，该模块主要是对 S3C2440 控制器的初始化包括端口初始化、时钟初始化、中断初始化、MMU 初始化、串口初始化等控制器内部资源和外部设备的初始化，为摄像头视频模块和视觉控制模块的稳定工作作基础工作，视觉板初始模块工作流程如图 4.8 所示。

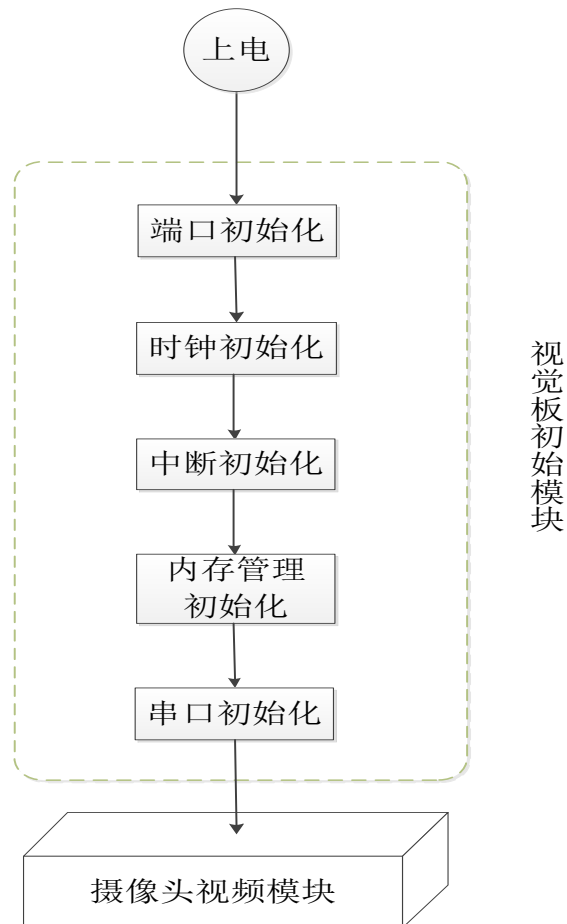


图 4.8 视觉板初始模块工作流程

4.2.3 摄像头视频模块流程

视觉板初始模块执行结束以后开始执行摄像头视频模块，该模块是对 OV9650 摄像头进行初始化，通过 SCCB 总线通信配置相应寄存器包括图像信息格式、分辨率、帧速率等 OV9650 相关的设置、初始 S3C2440 中的 CAMIF 接口的配置和液晶屏寄存器的初始，摄像头视频模块工作流程如图 4.9 所示。

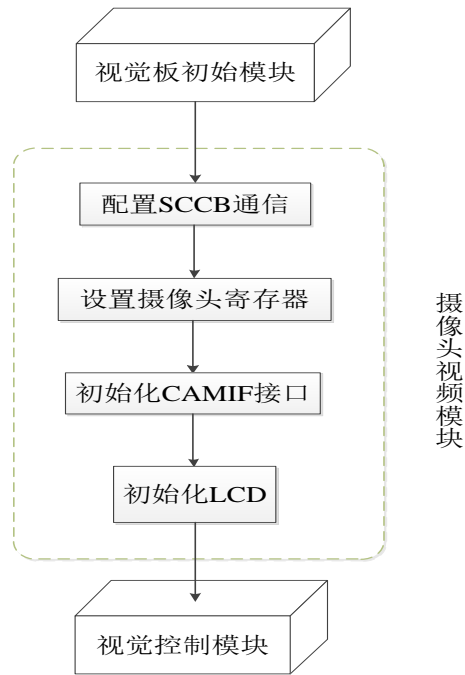


图 4.9 摄像头视频模块工作流程

4.2.4 视觉控制模块流程

摄像头视频模块执行结束以后开始执行视觉控制模块，视觉模块执行到开始循环执行该模块，通过基本视觉算法处理、霍夫变换、去抖处理等视觉处理算法将采集到的实时铜丝运动信息处理出铜丝的偏转角度，并将该偏转角度通过串口 Modbus 协议传送给主控引擎控制器，逻辑控制算法中的反馈控制逻辑算法根据该偏转角度进行视觉反馈调控，以此达到视觉调控的目的，该模块执行过程如图 4.10 所示。

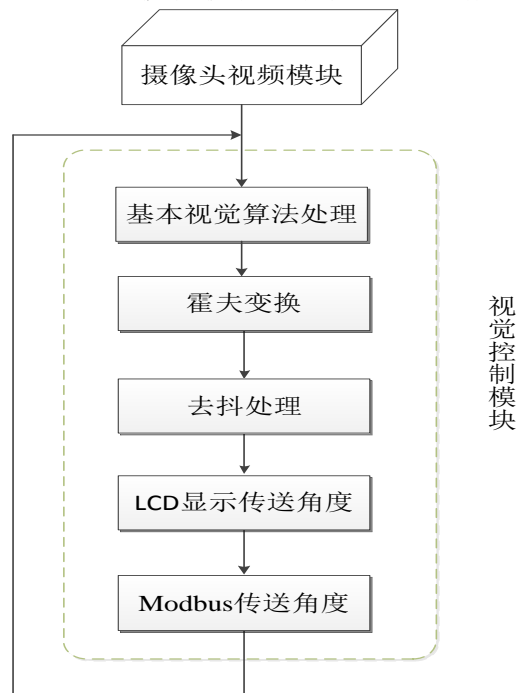


图 4.10 视觉控制模块工作过程

4.3 视觉信息采集显示

4.3.1 铜丝信息采集

(1) 申请图像内存

绕线机工作过程中，系统采集铜丝图像信息是为了处理处实时偏转角度，因此采集的图像面积较小。本视觉模块采用源视频大小和目标视频大小两个概念来定义图像的采集。源视频宽和高分别为 Video_X_Width 和 Video_Y_Height,目标视频的宽度和高度分别定义为 Target_X_Width 和 Target_Y_Height。本系统中采集绕线机铜丝的目标宽度和高度分别为 100 和 120，源图像的宽度和高度分别为 480 和 272。图像内存大小是按照目标图像大小申请的二维数组，灰度时每像素占一个字节，彩色时每像素占两个字节。

(2) 配置 SCCB 通信

SCCB(Serial Camera Control Bus)是为了使 S3C2440 向 OV9650 的寄存器写值，配置相应的曝光、增益、分辨率的功能。其协议和 I2C 相同：时钟线为高电平而数据线出现下降沿时表示开始通信；时钟线为高电平数据线为上升沿停止通信；时钟线为高电平时 SCCB 才进行数据通信。据此原理，本视觉系统为 SCCB 封装了一系列协议 API，方便用户使用。本系统的 SCCB 的协议 API 如下：

x_SCCB_Start	//启动 SCCB 通信
x_SCCB_End	//结束 SCCB 通信
x_SCCB_Write_Bit	//写一位到 CAMERA 中
x_SCCB_Read_Bit	//读一位从 CAMERA 中
x_SCCB_Send_Byte	//发送一个字节到 CAMERA 中
x_SCCB_Receive_Byte	//接收一个字节从 CAMERA 中
x_SCCB_Send_Data	//向指定寄存器发送数据(写操作)
x_SCCB_Receive_Data	//向指定寄存器读取数据(读操作)

(3) 信息采集初始

在摄像头真正开始工作前需要，有一些初始工作要做，其中包括摄像头接口初始化，然后检查摄像头连接是否正确，如果连接正确，就通过 SCCB 设置摄像头的寄存器。接下来就是选择视频信息采集方式，按照选择采集方式配置 S3C2440 的 CAMIF 接口，最后启动摄像头，摄像头开始工作。摄像头接口初始化主要是使能 Camera 控制器时钟并复位 Camera 控制器，设置 Camera 接口管脚属性，并使能 PWEN(GPG12)，设置 Camera 时钟输出时钟为 24MH。

(4) 视频采集初始

S3C2440 内部的 CAMIF 接口有预览模式和编码模式两种采集模式。预览模式采集的图像是灰度图像，编码模式采集的是彩色图像。本视觉模块系统支持这两种采集方式，

并提供给用户选择采集方式的 API 函数 `x_Set_VideoCaptureMode(int vcm)`, `vcm` 是传入的采集方式, 1 为预览方式, 0 为编码模式。绕线机处理铜丝偏转角度使用的是预览模式。任何一种采集方式都要经过四个步骤: 打开对应方式中断、设置对应方式中断向量、对应方式 CAMIF 接口配置、启动灰度视频采集, 视频采集初始, 如图 4.11 所示。

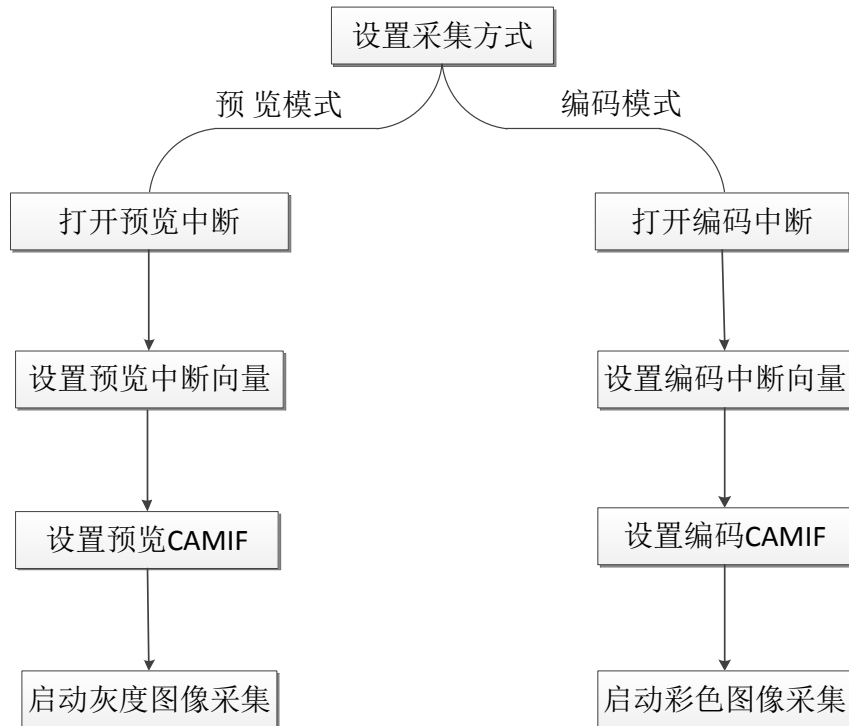


图 4.11 视频采集初始

不同的图像采集方式采集到的图像格式不同, 从 OV9650 采集的源数据格式为 YcbCr, 经过 S3C2440 的 CAMIF 的处理, 将图像最终格式分别转换为 RGB565 和 YUV 格式。显示的时候 TFT LCD 彩色显示为 RGB565, 灰度图像显示是提取 YUV 中的 Y 分量组合成 RGB565 格式即为灰度图像, 图像信息格式转换, 如图 4.12 所示。

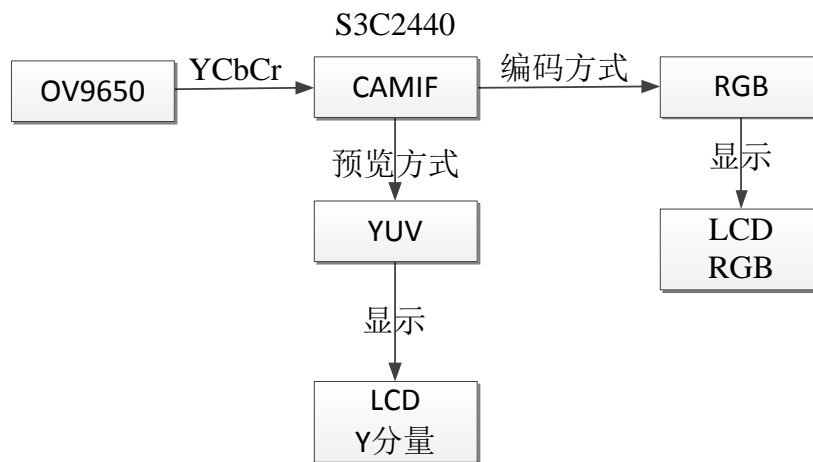


图 4.12 图像格式转换

4.3.2 铜丝信息显示

(1) LCD 驱动程序

LCD 信息的显示需要控制器和 LCD 驱动器共同作用下才能正常工作，其控制器一般外部扩展电路实现，也可以集成在微控制器中实现。本视觉模块使用的 S3C2440 同样集成了 LCD 控制器，通过 LCD 驱动器所需要的控制信号来控制 STN/TFT 屏。这样 LCD 的驱动程序编写起来相对来说就比较简单，主要对 LCD 控制器进行以下配置：

- ① 初始化液晶屏背光灯，配置引脚和输出类型。。
- ② 开启电源，选择电源引脚通过寄存器 LCDCON 控制其开关。
- ③ 设置视频引脚、场同步、行同步和像素时钟引脚。
- ④ 配置视频时钟并由帧数、帧行数和行像素的积计算出来。
- ⑤ 设置其他相关参数主要为寄存器 LCDCON2~LCDCON4。
- ⑥ 设置视频缓冲区及其内存范围边界地址即起始和终止地址。

(2) LCD 视角坐标定位

本视觉模块的终端显示支持横屏和竖屏，目前视觉模块配置使用过一个 320×240 的竖屏和一个 480×272 的横屏。横屏和竖屏的视角不同，铜丝以与视觉模块保持水平的方式放置，当屏幕为宽屏时，宽度大于高度，此时采集的图像信息视角与宽屏相同，图像不需调整，直接可以显示在 LCD 屏幕上；当屏幕为竖屏时，宽度小于高度，此时采集的图像信息视角与竖屏视角有一个差角，需要调整。而竖屏视角调整如图 4.13 所示。

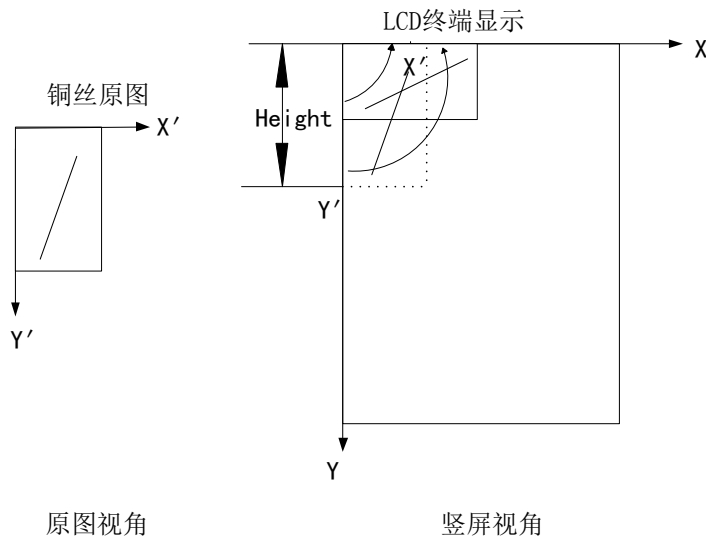


图 4.13 竖屏视角转换原理

$$Y = X' \quad (4.1)$$

$$X = \text{Height} - Y' \quad (\text{Height 竖屏的垂直长度}) \quad (4.2)$$

式 (4.1) 和式 (4.2) 为竖屏视角调整公式，在视觉模块 LCD 竖屏中 Height 为 Target_Y_Height，值为 120。坐标系中，采集到的二维数组图像信息的坐标，均是按照该公式转换后显示到 LCD 液晶屏上。

(3) LCD 显示铜丝信息

视觉模块采用的 LCD 显示屏是 Friendly ARM 的 3.5 寸 TFT 屏，该屏显示两幅图像分别是实时采集漆包铜丝运动的图像信息原图和经过铜丝角度处理算法处理出的最终直线的图像。中间两行以 Modbus 格式发送的偏转角度的帧数据和接收的返回帧数据。下方有处理处出的漆包铜丝实时偏转角度，该角度与视觉反馈控制算法中软元件 VD3000 的值是一致的，并都实时同步更新。图 4.14 是 LCD 显示漆包铜丝实时图像。



图 4.14 LCD 显示漆包铜丝实时图像

4.4 铜丝角度处理算法

4.4.1 视觉处理过程

绕线机漆包铜丝的视觉处理是在采集到的实时原图信息的基础之上进行的，依次经过高斯滤波、二值化、横线去噪、膨胀直线、腐蚀直线的处理过程将原始图像中的漆包铜丝处理成一单像素的细线和白色像素底板，视觉处理过程如图 4.15 所示。

高斯滤波是采用高斯模板将采集到的铜丝原图进行初步清除噪点的处理。二值化处理采用自适应阈值二值化方法，以被处理像素点作为中心在原图中框定一个 3×3 的像素矩阵并求出该矩阵的像素点的平均值，然后再判断该点像素值，若大于平均像素值则值为 255 即白色，否则为黑色置零即可。经过自适应阈值二值化处理，只有黑色和白色的图。此时因为存在很多较长的横线，与铜丝直线存在类似，影响对铜丝的判断，故此再将大的类横线的噪点去掉即进行横线法去噪处理。膨胀直线是将铜丝直线间的间隙去掉，然后采用腐蚀的办法将铜丝细化成单像素的直线，经过霍夫变换求出直线的偏转角度，经去抖算法处理后将求出的铜丝偏转角度通过 Modbus 传送给主控引擎驱动程序进行反馈逻辑控制。

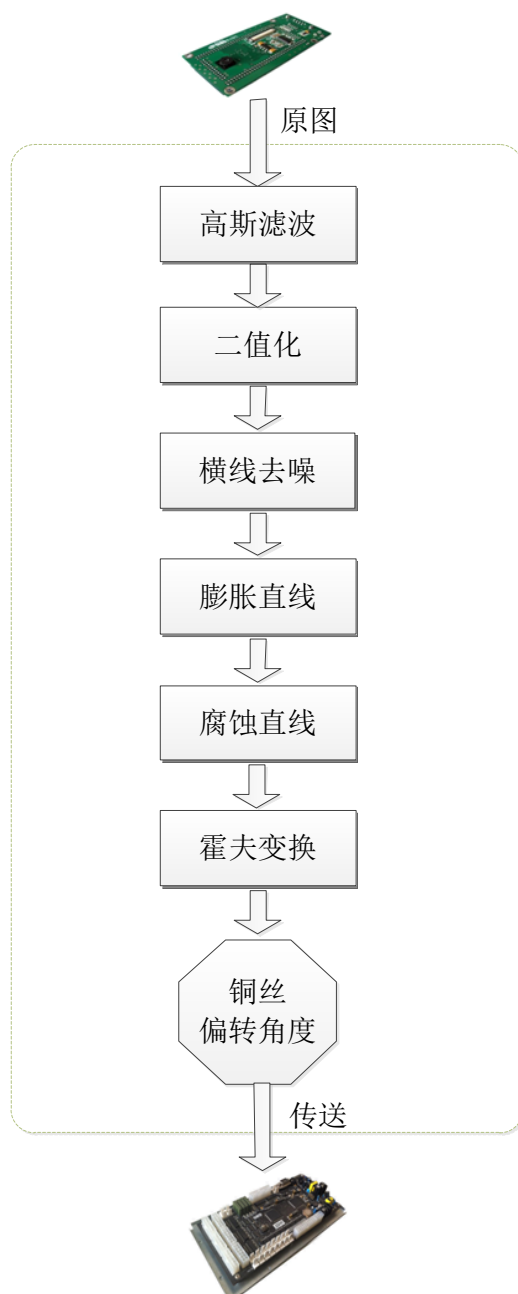


图 4.15 视觉处理过程

4.4.2 霍夫变换原理

图像处理中对直线的检测识别^[55-60]是搜索到构成一条直线的像素点,其本质是对这些像素点 (x,y) 构成的直线几何图形对应的数学表达式 $(y=k*x+b)$,其中 k 和 b 是参数,分别是斜率和截距)中关键参数的计算即计算 k 和 b 的值。

在像素矩阵中,过一点的所有直线均可表示为一个参数方程,假设该点为 (x_m, y_m) 且满足参数方程 $y_m=kx_m+b$ 。进行坐标系变化 $y=k*x+b$ 的 X -- Y 坐标系转换成 K -- B 坐标系,变成 $b=-x_m*k+y_m$ 。直线上的点 (x_m,y_m) ,在转换坐标系后为一条直线。直线坐标系转换,如图 4.16。

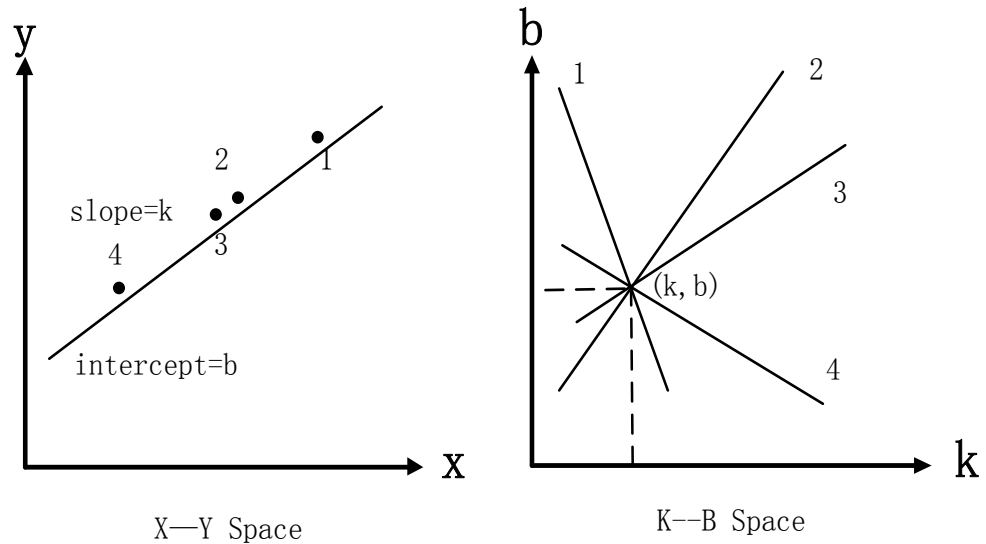


图 4.16 直线坐标系转换

直线上每一个点在 $K-B$ 坐标系中都表现为一条直线，这些直线都相交于一个点 (k, b) 。找到 $X-Y$ 坐标系中所有点的问题转变为寻找 $K-B$ 坐标系中直线的问题。对于图像中的每一个点，在 $K-B$ 坐标系中对应着很多的直线。求出 $K-B$ 坐标系中直线的交点 (k, b) ，就对应着找到图像中的直线。

4.4.3 偏转角度计算

该角度处理算法并不采用直线的斜率和截距公式而是采用的参数方程 $\rho = x \cdot \cos(\theta) + y \cdot \sin(\theta)$ 。 θ 角的取值范围为在 -90° 到 90° ， ρ 的取值范围为 0 至 $\text{Max}(\text{Height}, \text{Width})$ ， $\text{Max}(\text{Height}, \text{Width})$ 为 Height 和 Width 的较大值。以 ρ 和 θ 构造出一个二维数组表格，如图 4.17，然后遍历图像的像素点，当直线的像素点落在一个 (ρ, θ) 时就将相应的二维数组计数加一。遍历完以后，计算 ρ 和 θ 构造的二维数组中的累积值中的最大值。图像的最终处理结果只有一条直线，故只有一个最大值，该最大值对应的下标 (ρ, θ) 就是所求的直线，图 4.17 表示 ρ 和 θ 构造的二维数组空间，其中圆点表示累计数，图中黑色圆点表示累计数的最大值，其对应的 ρ 和 θ 是该算法所求的直线，灰色圆点表示累计数较小的值，其对应的 (ρ, θ) 表示较短的干扰直线，忽略即可。

绕线机铜丝直线检测，计算出的偏转角度根据相对于 0° 的大小，判断左偏和右偏。如果为负，则为左偏，绝对值为偏转角度。如果为正，则为右偏。偏转角度的计算是在 $x_Hough_Calc_Angle$ 函数中计算的，计算出的结果通过 Lcd_printf 函数打印到液晶屏上，方便调试和观察绕线机铜丝的运行状况。

本视觉模块计算出铜丝偏转角度以后，通过 Modbus 协议传送给主控引擎板，执行反馈调控算法。由于视觉处理出的结果未必是有效的，当处理结果超出正常有效范围之内，如直线非常短，不能作为偏转角度，此时进行容错处理，传送给主控引擎程序的偏转角

度为 255。

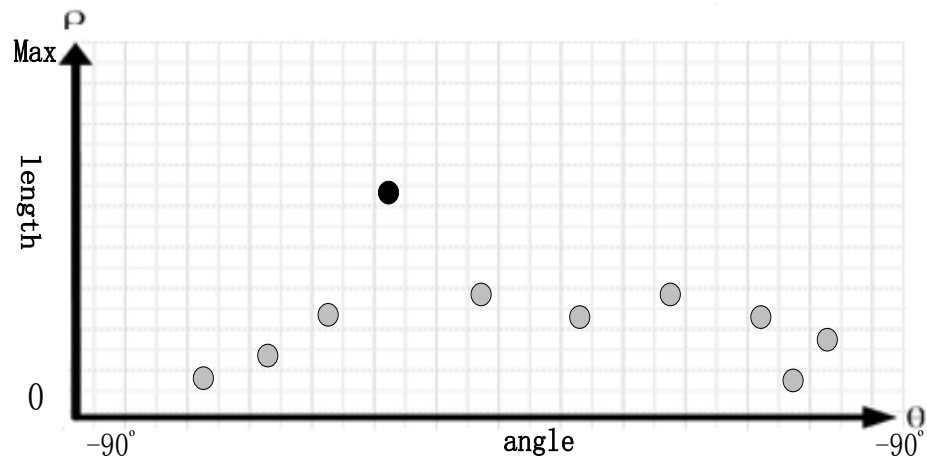


图 4.17 ρ 和 θ 构造的二维数组

4.4.4 结果去抖处理

偏转角度计算结果有时会产生微小的抖动使反馈调控过于频繁，而这些调控实际上是不必要的。鉴于此，本算法对计算出的偏转角度进行去抖动处理，使偏转角度和反馈调控都趋于稳定。每计算出十次偏转角度求出一个均值，将该值作为最终的偏转角度传送给主控引擎程序。

4.5 本章小结

本章介绍了绕线机视觉模块的具体设计和实现。第一小节介绍了视觉底层物理结构包括 S3C2440 核心结构、OV9650 芯片结构和视觉底层的电路设计。第二小节介绍了视觉软件的工作流程。第三小节通过对铜丝信息采集和显示的介绍，阐述了摄像头工作的过程，进一步介绍了铜丝角度处理算法，同时为第五章的视觉反馈控制算法^[61-66]的设计奠定了视觉基础。

第五章 视觉反馈控制算法实现

5.1 视觉反馈控制算法总体设计方案

通过反馈控制逻辑梯形图算法，该算法将绕线机运行的每个周期划分为八个状态，分去方向和来方向。去方向四个状态，来方向四个状态。状态一是去方向中的起始状态，这个状态主要是标志产生一个向左偏转角度的过程。状态二是去方向高速绕线的过程，状态三是消除向左偏转的角度和低速绕线的过程，为慢结束过程。状态四是去方向从轴运行的快速差补即快速将来方向从轴运行距离运行完毕的过程。状态五是来方向的起始状态，这个状态主要标志着产生一个向右的偏转角度的过程。状态六是来方向高速绕线的过程，状态七是消除向右偏转的角度和低速绕线的过程，为慢结束过程。状态八是来方向从轴运行的快速差补即快速将来方向从轴运行距离运行完毕的过程。状态二和状态六分别是去方向和来方向的高速绕线过程，标准偏转角度没有变化，因此在摄像头实时反馈控制中的调控是一致的。由于绕线机每个方向的起始和结束状态比较关键，因此状态一和状态三、状态五和状态七是非常重要的四个监控状态，在反馈控制中需要根据不同特点逐一处理。绕线机一个周期的运行包括去方向和来方向，每个方向的四个状态分别为慢开始、快运行、慢结束、快差补。图 5.1 所示为绕线机去方向状态和来方向状态，图中的 θ 是标准偏转角度。

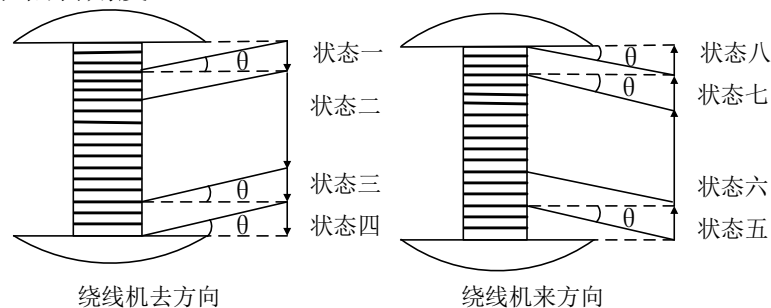


图 5.1 绕线机的去方向和来方向

视觉反馈逻辑控制程序根据绕线机主轴运行的脉冲点数判断绕线机当前的运动状态，根据相应的运行状态执行相应的反馈控制策略。当发现偏转角度异常时，首先保存从轴的运动方向和运动速度到相应的临时 VD 地址区即保存现场，然后进入绕线机偏转角度调整阶段，该阶段是通过查询反馈控制校正表查询进行调整，根据绕线机实际运行情况和查表所得改变从轴的运行速度和方向；调整结束后，恢复保存的从轴的运动方向和运动速度即恢复现场，继续正常运动，如图 5.2 所示反馈调控过程。本视觉绕线机系统的设计，其核心创新思想就是添加了视觉调控的因素，可以根据绕线机的实际运行情况对绕线机铜丝绕制情况进行实时监控，并且可以实时动态的反馈调控，PLC 反馈逻辑控制算法是添加视觉因素所要执行的关键核心控制逻辑程序。

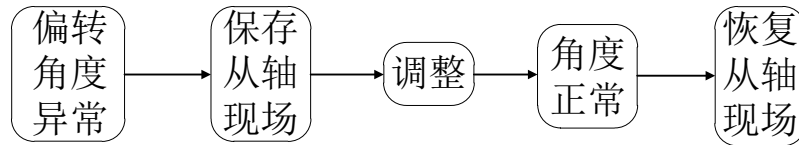
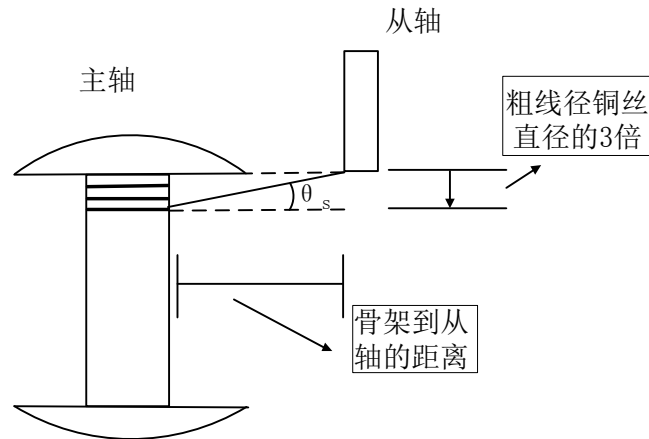


图 5.2 反馈调控过程

在反馈控制中，将根据粗线径铜丝的直径的 3 倍和骨架到从轴的距离来确定每个状态中的标准偏转角度 θ_s ($\theta_s = \theta_{\text{standard}}$ ，即当前时刻的标准偏转角度)。该标准偏转角度是绕线机运动中判断角度偏转错误的准绳，因此，每个标准偏转角度必须经过精密测量和计算，才能保证视觉反馈控制的正常控制运转。如图 5.3 标准偏转角度 θ_s 所需物理量所示。

图 5.3 标准偏转角度 θ_s 所需物理量

通过视觉反馈控制板，摄像头实时采集绕线机铜丝运动图像信息，并通过数字图像处理出实际偏转角度 θ_r ($\theta_r = \theta_{\text{real}}$ 即当前时刻的实际偏转角度)。将实时偏转角度 θ_r 与对应时刻的标准偏转角度 θ_s 做差值运算求得相对偏差度数 $\Delta\theta = |\theta_r - \theta_s|$ 和 $\Delta\theta$ 的符号。绕线机通过两个伺服电机驱动主轴和从轴协调运动。在绕线过程中，主轴与从轴以一定的速度比例（该比例值可由数控程序设置）保持相对运动，使绕线铜丝保持一个标准偏转角度。当绕线产生相对偏差角度时，主轴的运动方向和速度保持不变，只需根据相对偏差角度 $\Delta\theta$ 的符号和绝对值调整从轴的方向和运动速度，进而改变主轴和从轴相对运动速度，既可在单位时间内（单位时间为秒）校正绕线机铜丝的偏转。相对偏差度数 $\Delta\theta$ 的绝对值和符号与从轴相对偏差运动速度 Δv 以及运动方向变化标志 Δd ($\Delta d = \Delta \text{direction}$) 具有一一对应的关系。通过物理参数计算可以得出这组对应关系数据，并构建成一张可供查询的反馈控制校正表。在视觉控制板监控下，只需根据计算出的相对偏差角度 $\Delta\theta$ 查询反馈控制校正表，根据对应的值调整从轴的运动速度和方向，便可通过视觉对绕线机运动实现调整和反馈控制。如图 5.4 所示为绕线机反馈逻辑控制示意图。

视觉反馈控制逻辑算法全部是在 CASS 平台上使用 PLC 梯形图语言开发实现的。通过视觉传送的漆包铜丝偏转角度和设计出的反馈调控逻辑程序达到对绕线机主从轴的调节和控制，反馈控制逻辑算法程序的解析和执行均由主控引擎程序负责。

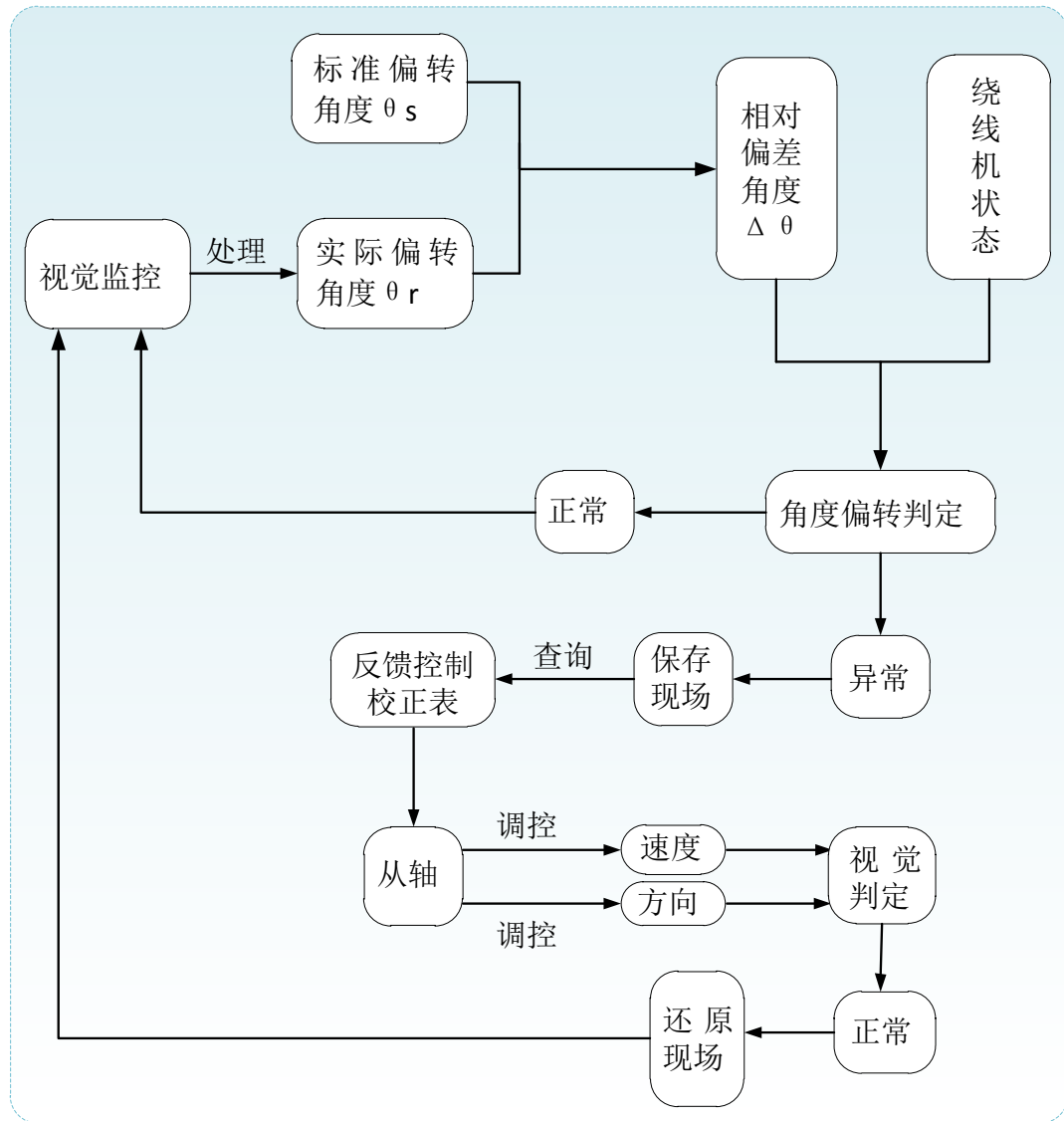


图 5.4 绕线机反馈逻辑控制示意图

5.2 视觉反馈控制数据计算

5.2.1 各状态标准偏转角度

(1) 状态一标准偏转角度计算

绕线机在状态一的过程中，标准偏转角度是一个渐变的过程（递增）。每绕一周，标准偏转角度就会相应的增加一定的度数。在状态一的过程中，绕线机总共要绕 N （本视觉绕线机系统中， $N = 3$ ）周。第 N 周结束时产生的偏转角度即为状态二和状态三绕线机运动时的标准偏转角度。状态一中 N 周的 N 值大小是数控程序由工人操作下传的 SMDB（状态二主轴运行点数）的值决定。伺服电机驱动主轴绕线一周需要向主轴发送一万个脉冲点数。因此， $N = \text{value SMDB} / \text{PPC}(\text{Pulse Per Circle})$; SMDB 为状态主轴运行点数，PPC 为每周脉冲数。

在状态一中运行，绕线机每周都需计算一个标准偏转角度。计算标准偏转角度需要测量从轴到骨架的距离，每一周主轴运动距离脉冲点数。漆包铜丝直径长度由游标卡尺测量为 0.8mm，视觉处理角度精度为 1 度，在计算过程中采取四舍五入的近似值取整数度数。图 5.5 所示为状态一标准偏转角度示意图。

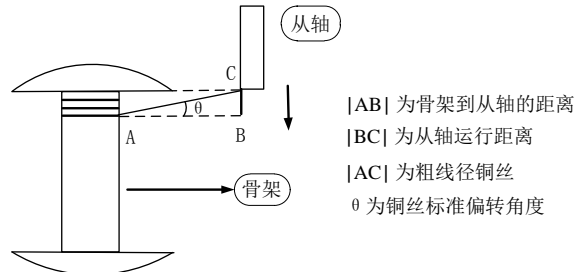


图 5.5 状态一标准偏转角度示意

由图 5 可知， $|BC| = N \cdot 2R$; $N = VD2040/PPC$; ($2R$ 为漆包铜丝直径， $VD2040$ 为主轴运动脉冲距离， PPC 为 Pulse Per Circle 主轴每周脉冲数); $\tan \theta = |BC|/|AB|$; ($|AB|$ 为游标卡尺测量从轴到骨架的距离); 由此，可求得状态一的标准偏转角度为 $\theta = \arctan(|BC|/|AB|)$; θ 精度为 1 度，采取四舍五入作为标准偏转角度。本视觉绕线机状态一共三周，构造状态一标准偏转角度表，如表 5.1。

表 5.1 状态一标准偏转角度表

主轴运行距离脉冲点数	10000	20000	30000
主轴绕线运行圈数	1	2	3
主轴运行实际距离	0.8 mm	1.6 mm	2.4 mm
从轴至骨架距离	45.7mm	45.7mm	45.7mm
偏转角度正切值	0.0175	0.035	0.0525
标准偏转角度	1	2	3

(2) 状态二标准偏转角度计算

视觉绕线机在状态二运动过程是高速绕线的过程。这个状态绕线机漆包铜丝的标准偏转角度是固定的，其值是状态最后一周的标准偏转角度，为 3 度。本视觉绕线机设计时，考虑到漆包铜丝偏转角度有一定的波动且状态二持续时间较长，故将状态二的标准偏转角度设计为一个范围，其范围为标准偏转角度上下波动 2 度，即 1 至 5 度。绕线机漆包铜丝运动中，偏转角度落在这个范围中即为正常，否则进行反馈调控。图 5.6 所示为状态二标准偏转角度范围。

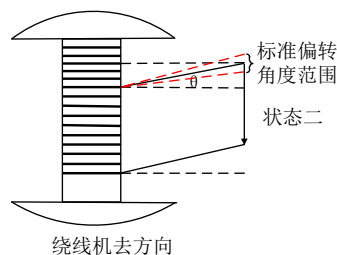


图 5.6 状态二标准偏转角度范围

(3) 状态三标准偏转角度计算

视觉绕线机的状态三是慢结束阶段，该阶段去方向离结束只剩下三周需要绕制，故主轴应降速运行，并且漆包铜丝偏转角度开始恢复成初始时的状态。在最后三周每一周的运行过程中，其标准偏转角度是状态一的标准偏转角度的逆过程。经过游标卡尺测量，骨架内宽为 25.3mm，漆包铜丝直径为 0.8mm，骨架绕制一层漆包铜丝的圈数为 $25.5/0.8 = 31.875 \approx 32$ 圈，对应的主轴运行脉冲点数 290000、300000、310000，故状态三的标准偏转角度如表 5.2 所示。

表 5.2 状态三的标准偏转角度

主轴运行距离脉冲点数	290000	300000	310000
主轴绕线运行圈数	29	30	31
标准偏转角度	3	2	1

(4) 状态四标准偏转角度计算

绕线机状态四是去方向的最后一个状态，该状态标志着去方向绕线已结束，为快差补的阶段。此阶段从轴需要快速向右运动直至从轴运行完数控下单方向的运行脉冲点数的距离。在这一阶段，从轴需要在短时间内运动完去方向的剩余脉冲距离，迅速进入绕线机来方向的状态五。这是一个去方向收尾阶段，其标准偏转角度为零度，此时漆包铜丝偏转角度是一个快速递减归零的过程。

从轴速度由两个因素决定：1、从轴调整系数，2、铜丝偏转角度。该状态无需保存和恢复从轴现场，只需下传从轴快速恢复的速度，使得绕线机迅速结束去方向的运动。

$V_{\text{从新}} = \Delta V + V_{\text{从旧}}$ ， $\Delta V = \Delta \theta \times 3k$ ，从轴的新速度是速度调整差 ΔV 加上从轴原来的速度， ΔV 为相对偏差角度与调整系数 $3k$ 的乘积，其中 k 为 5.2.3 中计算出的相对偏差角度与相对偏差速度之间的线性比例系数， $k=1595$ 。如图 5.7 所示为状态四的快速差补。

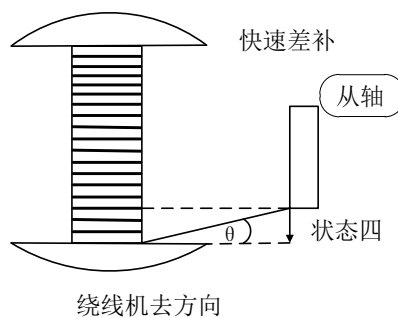


图 5.7 状态四的快速差补

(5) 状态五标准偏转角度计算

绕线机状态五是来方向的第一个状态，该状态的标准偏转角度也是一个渐变的过程。如图 5.8 所示为去方向状态五的慢启动过程。每绕一周，标准偏转角度就会相应的增加一定的度数。该状态绕线机共绕 N 周。第 N 周产生的偏转角度即为状态六运动时的标准偏转角度。 N 值是由工人操作下传数控程序的 SMDD（状态四主轴运行脉冲点数）和

SMDF（状态六主轴运行脉冲点数）的差值的绝对值决定。

伺服电机驱动 $PPC(Pulse\ Per\ Circle)=10000$ 。因此， $N = |Value(SMDD - SMDF)|/PPC$ 。在该状态中运行，绕线机每周都需计算一个标准偏转角度。本视觉绕线机系统中的 SMDD 为 320000，SMDF 为 350000，由此可得 N 值亦为 3。该状态与去方向的状态一是对称的，标准偏转角度的渐变过程和绕制圈数都是一样的，唯有一点不同就是该状态的漆包铜丝标准偏转角度的偏转方向是向右偏转。由此可知状态五的标准偏差角度表如表 5.3 所示。

表 5.3 状态五的标准偏转角度表

主轴运行距离脉冲点数	330000	340000	350000
主轴绕线运行圈数	33	34	35
标准偏转角度	1	2	3

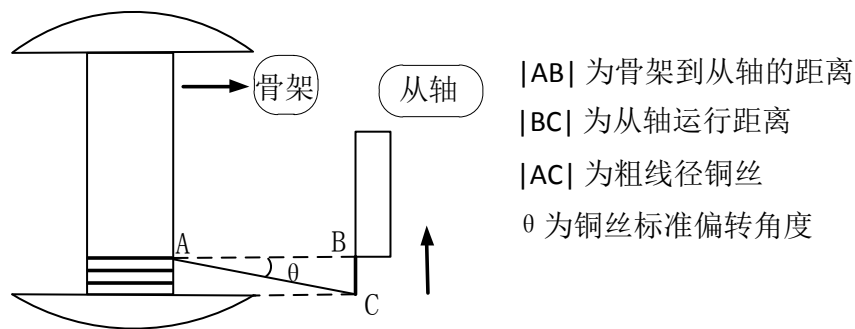


图 5.8 去方向的状态五慢启动

(6) 状态六标准偏转角度计算

状态六是绕线机来方向的高速运行阶段，该阶段与状态二是对称的，其标准偏转角为 3 度，偏转方向为向右偏转。该阶段的标准偏转角度为 1 至 5 度。

(7) 状态七标准偏转角度计算

状态七是绕线机来方向的慢结束阶段，该阶段是偏转角度恢复阶段，当来方向只剩三周的时候开始恢复，其标准偏转角度与去方向的状态三对称，偏转方向为向右偏转。表 5.4 为状态七的标准偏转角度表。

表 5.4 状态七的标准偏转角度表

主轴运行距离脉冲点数	610000	620000	630000
主轴绕线运行圈数	61	62	63
标准偏转角度	3	2	1

(8) 状态八标准偏转角度计算

状态八为一个绕线周期的最后一个状态，也是来方向的结束状态，其标准偏转角度为零度，该状态将剩余偏转角度快速归零，快速差补剩余的从轴运动脉冲点数。其调控速度的计算与去方向的状态四是相同的，在次不再赘述。

5.2.2 相对偏差角度

在视觉辅控板中,通过 Camera OV9650 采集绕线机漆包铜丝实时运动灰度图像信息并经过去噪、自适应阈值二值化、膨胀、腐蚀、角度检测等图像处理过程得出实际偏转角度 θ_r ($\theta_r = \theta_{\text{real}}$ 即当前时刻的实际偏转角度)。实时偏转角度 θ_r 与对应时刻的标准偏转角度 θ_s 的差值为该时刻绕线机运动过程中铜丝的相对偏差角度 $\Delta\theta$ 。

$$\Delta\theta = \theta_r - \theta_s \quad (5.1)$$

式 (5.1) 中 $\Delta\theta$ 的绝对值和符号决定了反馈控制逻辑对从轴调整的速度和方向。在绕线机产生相对偏差角度时,主轴的运动方向和速度保持不变,只需根据 $\Delta\theta$ 的绝对值和符号调整从轴中的速度和方向,依此改变主轴和从轴的相对运动速度,使绕线机在视觉的作用下在最快时间内纠正铜丝产生的偏转角度误差,达到反馈控制的效果。

5.2.3 反馈控制校正表

在整个视觉绕线机的反馈控制过程中,从轴的反馈控制校正表是反馈控制逻辑算法的关键部分。在绕线机实时运动中,每一状态的相对偏差角度 $\Delta\theta$ 的绝对值和符号都与从轴的相对偏差运动速度 Δv 和运动方向标志 Δd 之间具有一对一的关系。由 $\Delta\theta$ 的符号对应得知运动方向标志 Δd 的值: $\Delta\theta$ 若为负值则为左偏,为正值则为右偏,根据绕线机不同的运动状态确定 Δd 的值, Δd 默认为零,若为 1 则表示反馈控制调整需改变从轴方向,改为原来运动方向的相反方向。从轴的相对偏差运动速度 Δv 与相对偏差角度 $\Delta\theta$ 具有线性对应关系。主轴和从轴是协调相对运动,以此保持一个标准偏转角度,故调整单位偏转角度时从轴调控的相对速度 Δv 与主轴运动速度无关。

调整单位偏转角度时从轴相对速度 Δv 的计算稍微复杂一些。首先,正常运动时主轴和从轴相对静止,此时同时向前运动的物理距离(物理距离为实际距离,脉冲距离需转换成脉冲点数)是相同的;当需调整单位偏差角度时,从轴相对主轴应该多走或者少走一个角度的物理距离 dpa (distance per angel),如图 5.9 所示为相对偏差角度对应及从轴运动物理距离示意图。 $\tan \Delta\theta = |BC|/|AB|$,代入 $\Delta\theta = 1^\circ$ 和 $dpa = |BC|$ 可结果计算得 $1 dpa = |AB| * \tan 1^\circ$ 。

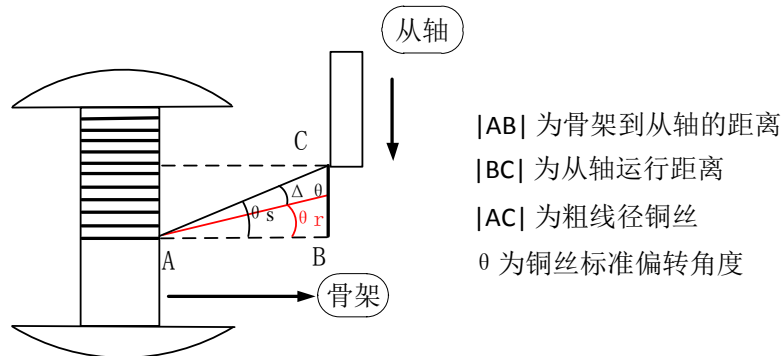


图 5.9 相对偏差角度对应及从轴运动物理距离

单位时间内，主轴和从轴正常相对运动时向前运动的物理距离相同。主轴和从轴相对运动偏差单位角度时，从轴比主轴多走或少走 $\Delta \theta$ 个 dpa。由此可以得出公式 (5.2) 和 (5.3) 来计算出 Δv 。

$$(V_{\text{从}/\text{PPC}}) * S = (V_{\text{主}/\text{PPC}}) * 2R \quad (5.2)$$

$$((V_{\text{从}} + \Delta v) / \text{PPC}) * S - (V_{\text{主}/\text{PPC}}) * 2R = \Delta \theta \text{ dpa} \quad (5.3)$$

式 (5.2)、(5.3) 中的 $\text{PPC} = 10000$ (Pulse Per Circle); $2R$ 为粗线径铜丝直径，经游标卡尺测量其值为 0.8mm; S 为从轴转一周所走的距离，经游标卡尺测量其值为 5mm。因此， $\Delta v = (1\text{dpa}/S) * \text{PPC}$ ，代入 $1 \text{ dpa} = |AB| * \tan 1^\circ$ 得到 $\Delta v = \Delta \theta * (|AB| * \tan 1^\circ) / S * \text{PPC}$ 。 $\Delta \theta$ 与 Δv 为一一对应的正比例关系，设线性比例系数为 k ，故 $\Delta v = k * \Delta \theta$ 。

由以上可知 $k = (|AB| * \tan 1^\circ) / S * \text{PPC}$ ，因为之前测量 $|AB| = 45.7\text{mm}$ ， $\text{PPC} = 10000$ ， $S = 5\text{mm}$ ，计算出 $k = 1595$ 。以此该公式 $\Delta v = 1595 * \Delta \theta$ 构造出从轴反馈控制校正表的速度部分， Δv 的单位为 pps 即 Pulse Per Second 表 5.5。在绕线机来方向和去方向中，相对偏转角度 $\Delta \theta$ 的符号决定反馈控制调节从轴运动时是否改变从轴的运动方向，若改变 Δd 为 1 否则为 0，故构造从轴反馈控制校正表方向部分，表 5.6。

表 5.5 从轴反馈控制校正表速度部分

$ \Delta \theta $	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°
Δv	1595pps	3190pps	4785pps	6380pps	7975pps	9570pps	11165pps	12760pps

表 5.6 从轴反馈控制校正表方向部分

运动方向	去方向 (状态: 1、2、3、4)		来方向 (状态: 5、6、7、8)	
偏转方向	左偏	右偏	左偏	右偏
$\Delta \theta$ 符号	负	正	负	正
Δd	0	1	1	0

5.3 各状态反馈控制算法

5.3.1 状态一反馈调控

绕线机在状态一运行过程中，是慢启动的过程。绕线机起始运动时，主轴以低速运动，从轴以一定的速度比例与主轴保持相对运动。绕线机状态一是在绕线机运动过程中逐渐产生一个偏转角度的过程。在状态一的标准偏转角度计算过程中，主轴每绕一周就对应计算出一个标准偏转角度。主轴每运动一周就需要视觉监控一次，将实际偏转角度与该时刻的标准偏转角度做差计算出相对偏差角度，查询反馈控制校正表，根据查询结果做出相应的运动控制，状态一视觉反馈控制流程如下：

- 1) 查询当前主轴运动脉冲点数 VD2044 的值。
- 2) 根据 VD2044 的值计算出当前绕线机运动的圈数: $N = (\text{VD2044} / \text{PPC}) + 1$ 。
- 3) 查询视觉辅控板传送的当前时刻的实际偏转角度 θ_r 。

- 4) 根据 N 值查询状态一标准偏转角度表得出当前的标准偏转角度 θ_s 。
- 5) 由 $\Delta\theta = \theta_r - \theta_s$ 计算出相对偏差角度 $\Delta\theta$ 。
- 6) 根据 $\Delta\theta$ 的绝对值大小和符号查询反馈控制校正表，若需要调控则保存从轴现场（即保存从轴运行速度和方向）并对从轴的速度和方向做出相应的调节控制。
- 7) 继续监视绕线机铜丝实时偏转角度。
- 8) 若实时偏转角度正常则恢复现场（即恢复从轴原来运行速度和方向）。

本绕线机实验状态一共有三圈，视觉辅控板在第一、二、三圈三个阶段进行反馈控制。在状态一每一圈的进行铜丝偏转角度调整，依次严格监控下去，绕线机可以把状态一的三圈漆包铜丝紧密排列起来。如图 5.10，状态一的三圈偏转角度示意。

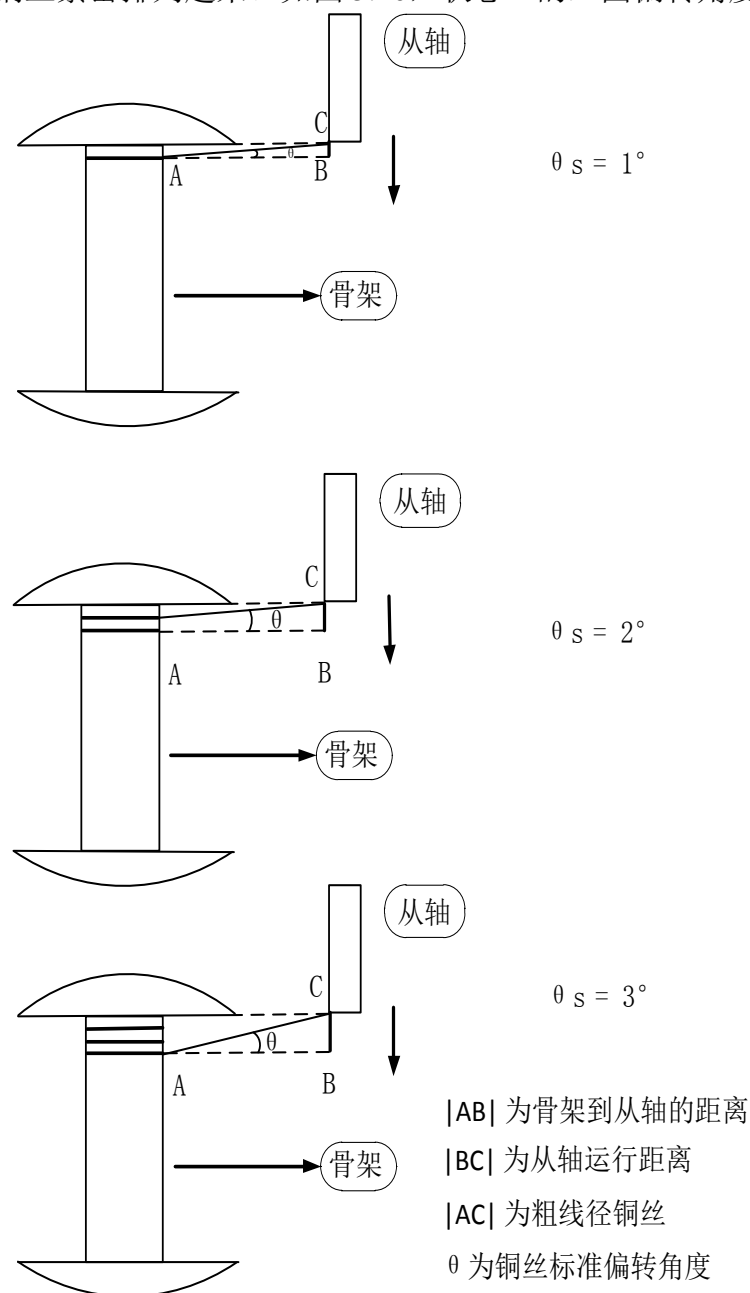


图 5.10 状态一运行过程

5.3.2 状态二反馈调控

运动过程中，绕线机在状态二的反馈控制中的标准偏转角度是固定的。在视觉监控中不采用类似状态一中的每绕一圈调整的策略，而是实时监控调整。为了避免频繁的调控，将标准偏转角度设置为一定的范围，本视觉绕线机系统将标准偏转角度波动值定为 2 度，故状态二的标准偏转角度范围 1 至 5 度。在这个偏转角度的范围之外为绕线机非正常偏转，此时将求出相对偏差角度并查询反馈控制校正表，进行绕线机调整。

在状态二调整中，偏转角度划分为三部分：正常、左偏以及右偏。在实时偏转角度 θ_r 小于 1 度为左偏， θ_r 大于 5 度为右偏，在标准偏转角度范围内为正常。因此，相对偏差角度 $\Delta\theta$ 的绝对值小于等于 2 为正常偏转角度，大于 2 时非正常偏转，此时需要调控绕线机从轴运动速度，根据 $\Delta\theta$ 的符号判断左偏和右偏。状态二视觉反馈控制流程如下：

- 1) 查询视觉辅控板传送的当前时刻的实际偏转角度 θ_r 。
- 2) 查询状态二的标准偏转角度 θ_s 。
- 3) 由 $\Delta\theta = \theta_r - \theta_s$ 计算出相对偏差角度 $\Delta\theta$ 。
- 4) 如果 $\Delta\theta$ 的绝对值小于等于 2，则绕线机运动正常，否则调整。
- 5) 如果 $\Delta\theta < -2$ 则为左偏，此时置起左偏标志位，开始调整。首先，保存现场即保存从轴的速度和方向，然后查询反馈控制校正表得出从轴调控的速度和方向调整从轴的主轴和方向。
- 6) 调整以后，视觉模块继续监控漆包铜丝的偏转角度，当偏转角度正常时，清掉左偏标志，恢复现场即恢复从轴的原速度和方向，继续运行。
- 7) 如果 $\Delta\theta > 2$ 则为右偏，此时置起右偏标志位，开始调整。首先，保存现场即保存从轴的速度和方向，然后查询反馈控制校正表得出从轴调控的速度和方向调整从轴的主轴和方向，此时方向调控为向左运动。
- 8) 调整以后，视觉模块继续监控漆包铜丝的偏转角度，当偏转角度正常时，清掉右偏标志，恢复现场即恢复从轴的原速度和方向，恢复成向右运动，继续运行。

5.3.3 状态三反馈调控

绕线机在状态三运行过程中，是慢结束的过程。绕线机运动至倒数第三圈时，主轴开始以低速运动，从轴以一定的速度比例与主轴保持相对运动。绕线机状态一是逐渐消除原来运动中所保持的偏转角度的过程。状态三的标准偏转角度与状态一是对称的，主轴每绕一周就对应一个标准偏转角度，该状态三圈对应的标准偏转角度分别为 3 度、2 度、1 度。主轴每运动一周就需要视觉监控一次，将实际偏转角度与该时刻的标准偏转角度做差计算出相对偏差角度，查询反馈控制校正表，根据查询结果做出相应的运动控制，状态三的视觉反馈控制流程与状态一相同，不再叙述。

5.3.4 状态四反馈调控

当绕线机运动到状态四的时候，主轴已经将去方向脉冲点数运行完毕，该状态标志着去方向绕线已结束，为快差补的阶段。在这一阶段，从轴需要在短时间内运动完去方向的剩余脉冲距离，迅速进入绕线机来方向的运行状态。该状态的标准偏转角度为零度，此时漆包铜丝偏转角度是一个快速递减归零的过程。从轴即时快速运行需要改变从轴的运行速度，由于速度快，无需按部就班的查表计算，调整的速度为实际偏转角度的绝对值与已固定系数的乘积，本视觉绕线机中，该系数为 $3k$ ，其中 k 为 5.2.3 中计算出的相对偏差角度与相对偏差速度之间的线性比例系数， $k=1595$ ， $3k$ 为 4785。本状态的反馈控制调节最为简单，直接按照以上原则计算出标准偏转角度就可以调控绕线机运动。

5.3.5 状态五至状态八反馈调控

状态五至状态八为绕线机运动周期中来方向的四个状态。这四个状态的反馈调控策略，除了标准偏转角度为向右偏转之外，均与去方向的四个状态的反馈调控策略相同，因为来方向和去方向是对称的。由于之前已详细介绍来方向四个状态的反馈调控策略，在此就不再赘述。

5.4 反馈控制算法实现

反馈控制算法是在 CASS 平台上使用梯形图编程语言根据 5.1~5.3 的设计进行开发和实现并由引擎驱动程序负责该算法程序的执行和解析。基于模块化的开发方法，本文将该算法划分为逻辑清晰的几个模块，分别为双轴数控初始、视觉校控初始、绕线机和八个状态调控模块等，反馈逻辑控制算法组成模块如图 5.11 所示。

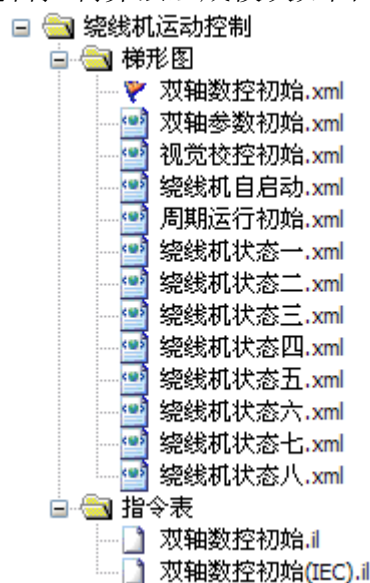


图 5.11 反馈逻辑控制算法组成模块

双轴数控初始模块对数控层的设计的参数进行初始化操作。视觉校控初始为初始化反馈控制所需的各状态标准偏转角度和反馈控制的速度和方向。八个状态调控模块分别为以上各状态反馈控制算法设计的实现。由于对算法设计进行了详尽的阐述，梯形图实现起来比较容易以及篇幅有限，反馈控制算法的梯形图实现不再细讲。部分梯形图程序实现如图 5.12 和图 5.13 所示，分别是状态三左偏调控梯形图算法程序和状态三正常时调控梯形图算法程序。

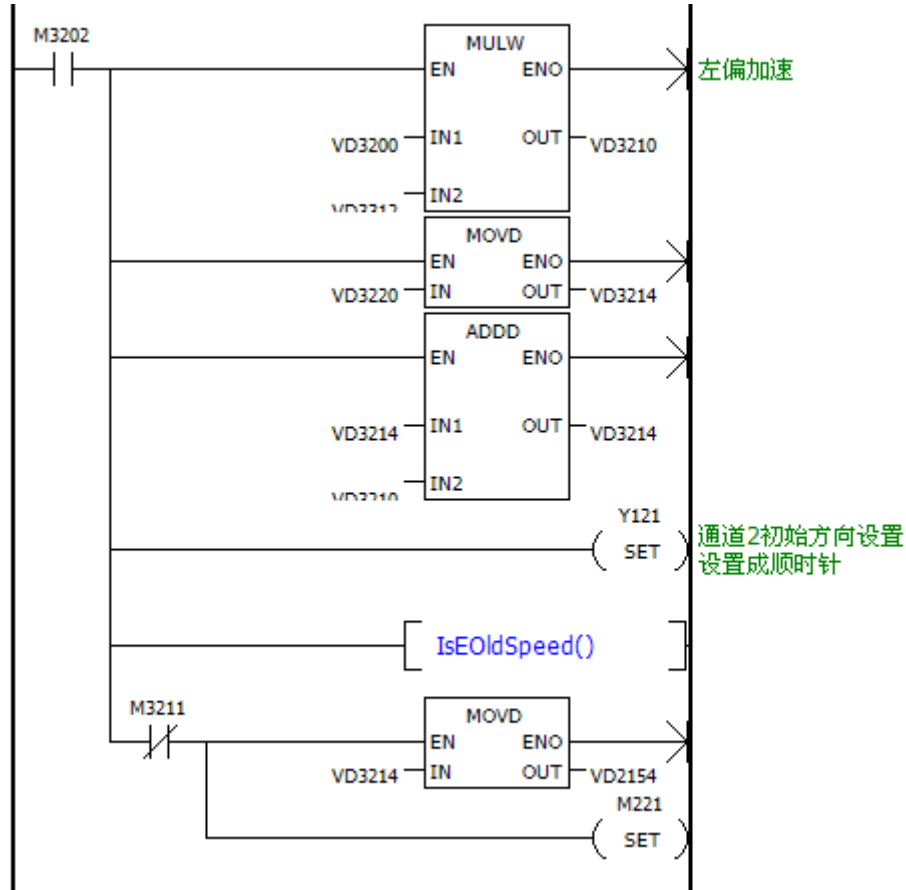


图 5.12 状态三左偏调控梯形图算法程序

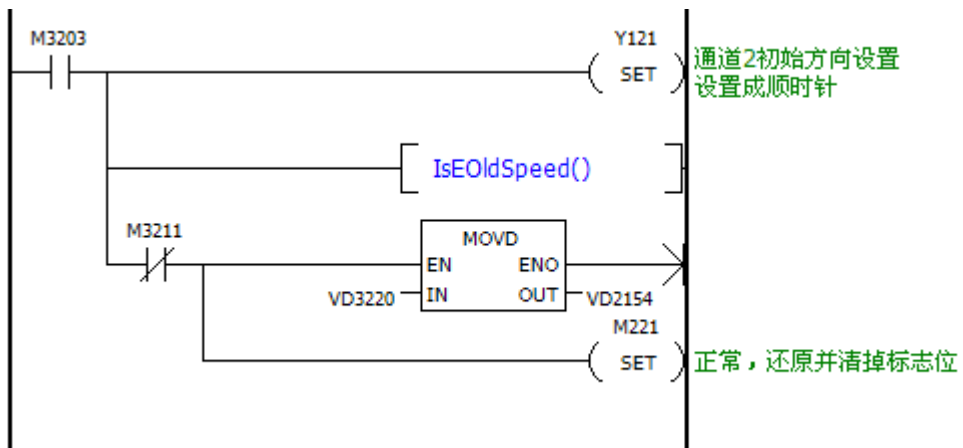


图 5.13 状态三正常时调控梯形图算法程序

5.5 本章小结

视觉反馈控制算法的设计和实现是视觉绕线机系统在视觉的基础上对绕线机的运动执行反馈调控的核心部分。本章对绕线机运动过程进行状态划分，并在此基础上详细阐述了反馈控制算法的设计。首先详细介绍了视觉反馈控制的数据计算，对各状态的标准偏转角度的计算依据进行了分析并对反馈控制校正表的构造进行了阐述；然后详细描述了绕线机各运动状态的反馈调控策略即各状态反馈控制算法的详细步骤；由于视觉反馈控制算法是梯形图程序设计实现的，实现起来方便快捷，故最后简略介绍了反馈控制算法的实现。

第六章 绕线机视觉控制测试

6.1 视觉绕线机平台搭建

视觉粗线径绕线机平台是由主控引擎板、视觉辅控板、PC 机、绕线机主体、伺服电机、串口线、CAN 转串口模块、Jlink 仿真器电源和漆包铜丝组成。视觉模块通过串口与双 CPU 主控板相连，电源为主控引擎板提供近 24 伏电压，PC 机通过 CAN 转串口与主控板连接起来，视觉模块实时采集的铜丝信息显示在 LCD 显示屏上，漆包铜丝穿过视觉模块下方的滤空绕制在骨架上。整个视觉粗线径绕线机平台如图 6.1 所示。



图 6.1 视觉粗线径绕线机平台

视觉粗线径绕线机平台运行，首先通过 Jlink 仿真器仿真运行视觉模块的视觉程序，实时采集并显示漆包铜丝的信息；然后打开电源启动主控引擎板，通过 PC 机将反馈控制梯形图程序下载到主控硬板上，置起 M2001 开始运行。通过 CASS 平台可以实时监控绕线机运行数据和视觉处理数据。视觉模块图像处理程序是使用 ADS1.2 开发并调试的。视觉粗线径绕线机的开发和调试以及大量的绕线实验都是在该平台下完成的。视觉反馈控制算法的探索、构思、成形和实现均是基于该平台逐步解决实现的。除了图 1 所示的物理结构，视觉粗线径绕线机系统还包括软件开发平台，其中有智能控制实验室自主研发的 CASS 梯形图平台、数控程序平台 ComEditorX 和 ADS1.2。

6.2 视觉绕线机实例测试

本视觉绕线机主要是针对粗线径漆包铜丝线圈的生产，该视觉绕线机系统适合生产的粗线径铜丝的线径直径范围为 0.5mm 至 1.5mm。根据该要求本实例选取的漆包铜丝的线径直径为 0.8mm，绕线骨架内侧宽度为 25.3mm，骨架一层可绕 32 圈铜丝。实例测试的视觉绕线机运动一个周期为来方向和去方向共 64 圈。从轴运动一周前进 5mm，绕线运动一个来方向或去方向时，从轴运动 6 周即脉冲点数为 60000；绕线机运动八个状态运动时，主轴运动的脉冲点数如表 6.1 所示。

表 6.1 绕线机各状态主轴运动的脉冲点数

去方向状态	状态一			状态二	状态三			状态四
主轴运动 脉冲点数	0	10000	20000	30000	290000	300000	310000	320000
来方向状态	状态五			状态六	状态七			状态八
主轴运动 脉冲点数	320000	330000	340000	350000	610000	620000	630000	640000

视觉绕线机主从轴状态运行参数有两种方式传送：数控程序下传和梯形图中双轴数控初始模块下传，本测试实例选择后者，如图 6.2 所示。

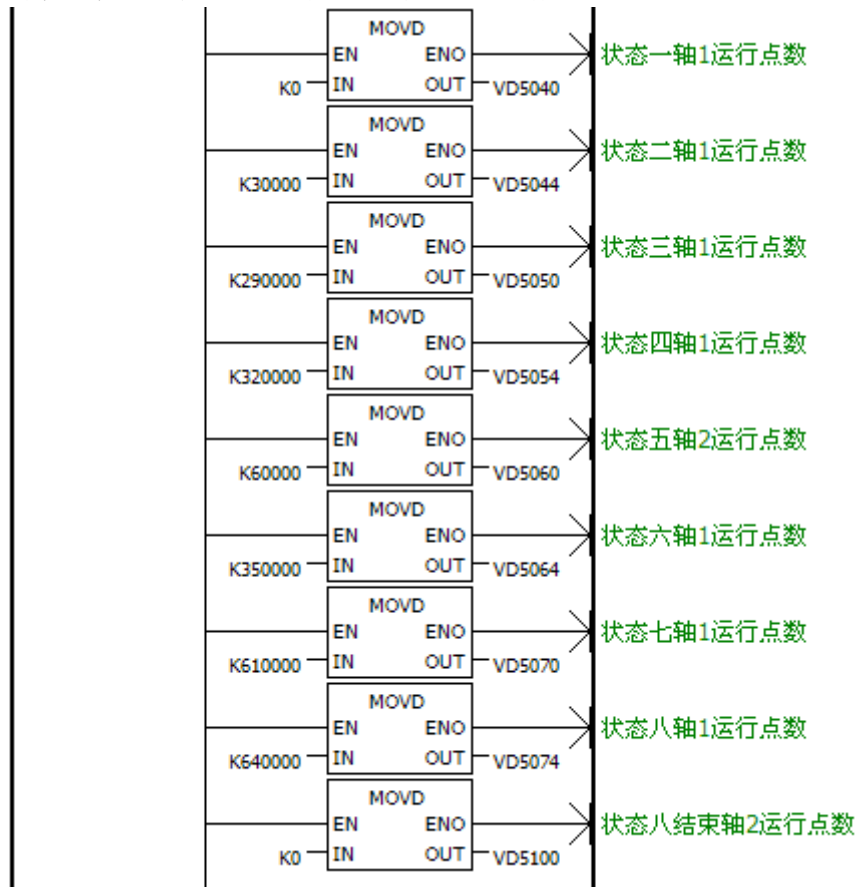


图 6.2 梯形图程序中双轴数控初始模块下传状态参数

本视觉绕线机粗线径实例测试需要预先设置各状态的标准偏转角度和运行速度以及调控速度。这些数据的设置亦采用梯形图程序中的双轴数控初始模块下传。将主从轴的运动参数、绕线机状态数据和反馈调控数据设置好以后执行上一章设计的反馈控制逻辑算法的梯形图程序结合视觉模块的实时监控即可测试该视觉粗线径绕线机的运行。表 6.2 和表 6.3 分别是标准偏转角度表和单位相对偏差角度的调控速度表。

表 6.2 标准偏转角度表

绕线状态	一			二	三			四
标准偏转角度	-1	-2	-3	-1~-5	-3	-2	-1	0
绕线状态	五			六	七			八
标准偏转角度	1	2	3	1~5	3	2	1	0

视觉绕线机自动运行过程中，通过查询当前运行状态下标准偏转角度与实际偏转角度做比较得出相对偏差角度，再由此查询调控速度表，进行反馈调控，pps 速度单位为脉冲每秒。

表 6.3 单位相对偏差角度的调控速度表

绕线状态	一	二	三	四
调控速度	500pps	1000pps	500pps	5000pps
绕线状态	五	六	七	八
调控速度	500pps	1000pps	500pps	5000pps

根据以上测试数据设置，对视觉绕线机进行实例测试，本视觉绕线机对漆包铜丝绕制粗线径 128 圈，记录统计实验数据，图 6.3 所示为视觉绕线机实验效果图。

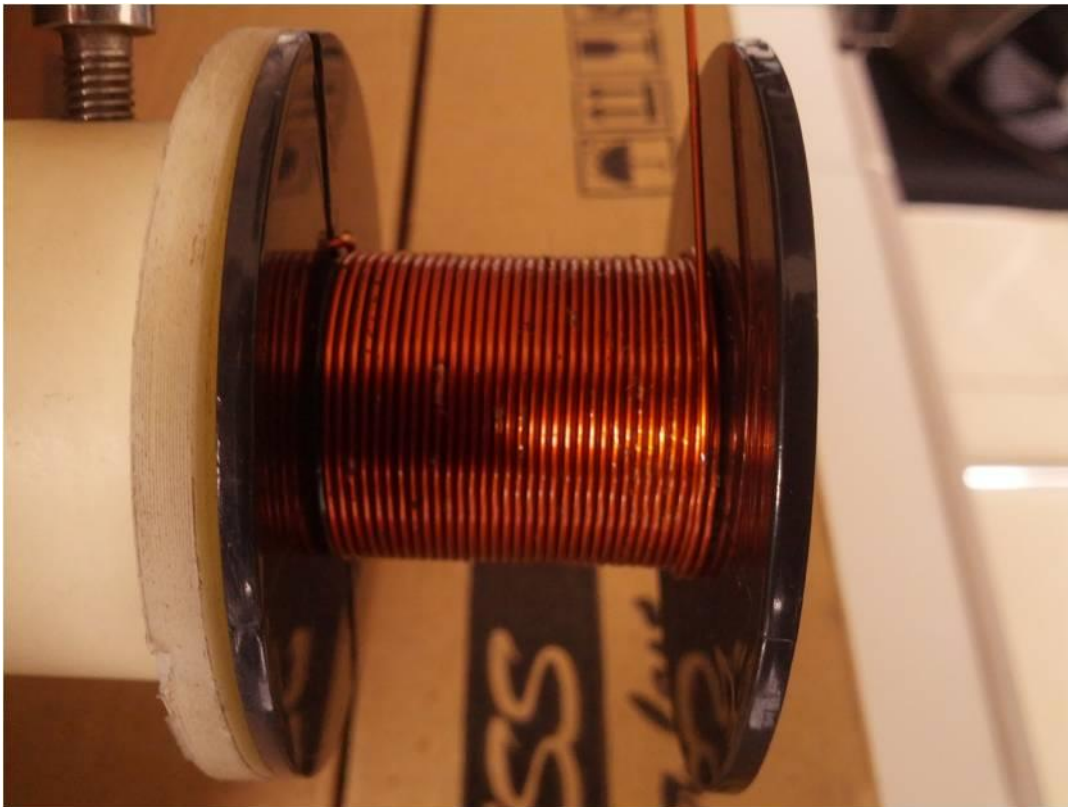


图 6.3 视觉绕线机实验效果

6.3 视觉绕线机性能分析

视觉绕线机实例测试 128 圈并对传统绕线机做同样的实验也绕制 128 圈同样的漆包铜丝。得出视觉粗线径绕线机和传统粗线径绕线机实验数据如表 6.4 所示。

表 6.4 视觉粗线径绕线机和传统粗线径绕线机实验数据

出错圈数	漏排	重排	斜排	正常	总数	出错率
视觉粗线径绕线机	3	0	0	125	128	2.34%
传统粗线径绕线机	6	4	3	115	128	10.15%

由以上实验数据明显可以看出视觉粗线径绕线机的出错率比传统粗线径绕线机的出错率低了一个数量级，从 10.15%降到了 2.34%，其中重排和斜排的圈数降为 0。由于视觉在粗线径绕线机的运动过程中实时密切监控漆包铜丝的偏转角度，并通过反馈逻辑控制算法使该铜丝在运动过程中始终保持在标准偏转角度范围之内，这样就避免了粗线径绕线机的重排和斜排的产生。漏排现象虽然已经大大降低，但并没有完全避免且使产生漏排的现象仅出现在骨架边缘，是因为线径较粗在边缘排线时无法避免剩余的间隙可容下一根漆包铜丝，这就造成了漏排现象只能降低而无法避免。该实验数据验证了本视觉粗线径绕线机设计的正确性，提高了粗线径绕线机生产线圈的质量，同时证明了将视觉技术运用于粗线径绕线机的运动控制即具有创新和现实生产意义。

该视觉粗线径绕线机的设计具有模块化的设计思想，采用数控传参技术使该视觉粗线径绕线机适应各种线径绕线机的线圈生产；同时将视觉监视和视觉反馈控制算法结合起来的技术理念使粗线径绕线机具有动态反馈调控的功能，这将推动绕线机技术在智能化道路上发展的进程。

6.4 本章小结

本章在对视觉控制模块和视觉算法实现两个章节详细阐述的基础上，对视觉粗线径绕线机系统进行了实例测试，其主要工作包括视觉粗线径绕线机平台的搭建和视觉粗线径绕线机实例测试和对实例的性能分析。对视觉粗线径绕线机实例的测试数据进行介绍并统计实验结果与传统粗线径绕线机绕制数据进行比较，用实验验证了视觉粗线径绕线机总体设计和创新点的正确性，为智能化的视觉粗线径绕线机的研究和设计探索出了一条可行的道路。

第七章 总结和展望

7.1 研究工作总结

粗线径线圈的需求日益增大，然而生产该线圈的粗线径绕线机在生产过程中易出现排线不均、重排、漏排、边缘排线易错等问题，其主因是传统粗线径绕线机采用传统 PLC 控制技术，只能根据静态逻辑控制算法控制绕线机运动，无法根据绕线机运动过程进行实时、动态的调控，使得粗线径绕线机的绕线质量不高。因此，研究设计出根据绕线机的实时运动状况进行自主智能反馈调节控制的新型粗线径绕线机具有重大的现实意义。本文的主要目的就是研究粗线径绕线机新的控制方法，设计并实现具有自主智能反馈调节控制功能的新型粗线径绕线机，其主要工作和创新点如下：

- 1) 提出基于 ePLC 的粗线径视觉绕线机的运动控制系统架构和设计方案。本文从硬件系统结构和软件层次结构上详述视觉粗线径绕线机构成和开发，并介绍了视觉调控数据的交互。
- 2) 实现数控设计并对逻辑资源进行分配。以数控的方式对粗线径绕线机的运动进行控制，并从逻辑控制的角度为绕线机主从轴进行资源分配。
- 3) 设计和实现绕线机视觉模块。设计视觉硬件结构组成并开发视觉处理算法，提取出漆包铜丝的偏转角度传送给逻辑控制层。
- 4) 设计和实现视觉反馈控制算法。对绕线机运动过程进行状态划分，并在此基础上设计反馈控制策略，使用 PLC 梯形图语言实现该算法，为视觉 ePLC 粗线径绕线机的反馈控制提供了实践依据。
- 5) 视觉绕线机实例测试。使用粗线径漆包铜丝对整个系统平台进行测试，观察实验过程，总结分析实验数据，最终减小了排线的出错率，提高了线圈质量，从而验证了视觉反馈调控算法的正确性和实用性。

7.2 未来工作展望

本文完成了视觉粗线径绕线机的设计和实现，在绕线机的运动控制中初步使用了视觉反馈调控技术，并在测试实例中取得了一定的效果。但是由于时间、精力有限，只是初步实现了视觉粗线径绕线机，仍然存在着一些问题需要接下来做更深层次的分析：

- 1) 视觉反馈控制算法智能化。视觉反馈控制算法是智能化的核心算法。由相对偏差角度计算反馈控制主从轴的运动速度和方向，本视觉绕线机采用的是线性处理的方法，反馈运动控制还没有达到非常精准的效果。视觉反馈控制算法的深入研究可以使用功能更加强大的智能控制算法，比如神经网络、模糊控制、遗

传算法、粒子群算法等，这样才能使自主反馈调控更加智能精准，这也是视觉绕线机智能化的发展方向。

- 2) 视觉图像处理算法构件化。本系统视觉处理算法的开发是在 ADS1.2 平台下使用 C 语言开发，开发流程繁琐不太方便。未来视觉图像处理算法可采用构件化的方法进行开发，首先通过组态程序对待处理图像进行图像处理算的进行预演；然后，调用 C 语言构建好的图像处理库，使上层组态预演过程转换成开发板真实的处理代码，编译执行可烧写到视觉开发板中。采用组态方法预演处理过程，将预演结果对应调用底层图像处理库。这种开发使处理效果清晰可见，对处理结果所见即所得，开发流程简单快捷，可快速开发出视觉图像处理算法，缩短开发周期，是视觉图像处理算法开发的发展趋势。
- 3) 视觉模块体积更小、价格更低。本视觉模块采用 S3C2440 核心板和 OV9650 结合的方式进行构建，体积虽然很小，但是还是不够微型。未来视觉模块的设计将朝着体积更加微型化迷你化、价格更加低廉的方向发展。

致谢

时光荏苒，岁月无痕。两年半犹如白驹过隙般悄然而逝。值此论文结束之际，我的研究生生涯也即将结束。回首往事，万千感慨，时间虽短，却成为我一生难以忘怀的美好时光。

首先，我要衷心地感谢我的导师严义教授，正是在他的带领下我才有幸步入了绕线机控制这个研究领域，在他的悉心指导下使我不仅学到了专业知识，更掌握了科学研究的方法。在硕士论文的选题、开题、撰写以及修改过程中，严老师都给予了悉心的指导和帮助，提出了许多宝贵的意见，使我的论文最终得以顺利完成。严老师渊博的知识，严谨的治学态度，真诚的为人及谦和的人格魅力在潜移默化中激励着我前进，令我受益匪浅，终生难忘。在此，我向严老师表示最崇高的敬意！

然后，我要感谢实验室的包健老师、李强老师、邬惠峰老师、赵建勇老师、戴钧老师、章复嘉老师，特别感谢孟旭炯老师在视觉绕线机反馈控制算法的设计中给予我的启迪和指导，使我顺利实现了反馈控制算法。在我读研期间，他们渊博的专业知识与对人对事的态度对我的研究工作给予了很大的帮助，作为良师益友他们在生活中也给予我很大的关心与关照。

同时，由衷感谢身边的各位同学，我们在此相聚，同窗三载，朝夕相处，共同进步，培养了彼此间真挚的友情。感谢罗川师兄在粗线径绕线机上所做的研究工作，罗川师兄的科研成果给了我很大的帮助，感谢实验室的刘洋、孙丹枫、罗林丹、陈国龙、白亮、李操、罗奎、李学忠和徐旭昶等师弟师妹们在平时的工作和生活中给予我的帮助，特别是当我在科研中遇到困难的时候，通过与他(她)们的讨论、沟通使得困难得以顺利地解决。

最后，我要感谢我的父母和姐姐，是父亲和母亲对我不断的鼓励和支持以及姐姐给我树立的榜样的力量，才走到了今天。父母对我的疼爱，如山如水，万语千言不能尽详。唯有继续努力，做出成就来才能稍稍报答父母的养育教诲之恩。

相遇不易，缘分难聚，和那些曾经关心和帮助过我的人相识是我的福气，再次向所有帮助和关心过我的人表示诚挚的谢意并向他们送上我最诚挚的祝福。

参 考 文 献

- [1] 马静.一种高精度绕线机控制系统的设计与开发[D].长安大学,2012.
- [2] 唐明明. 新型全自动五吨电力变压器卧式绕线机的研制与开发[D].山东大学,2011.
- [3] 田健男.精密绕线机控制系统设计与实现[D].电子科技大学,2012.
- [4] 翟迎迎. 细线径线圈绕线机控制系统的研发[D].浙江理工大学,2012.
- [5] 凌家武.基于 ARM 的片式电感绕线机嵌入式控制系统的设计[D].华南理工大学,2012.
- [6] Mu-Shin Kwak,Seung-Ki Sul.Flux Weakening Control of an Open Winding Machine with Isolated Dual Inverters,Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE :pp.251,255, 23-27 Sept. 2007
- [7] Weifeng Zhong,Zengchao Zhang,Jiazhong Xu,Liming Mao. Design of three-axis composite material vessel winding machine control system,Measurement, Information and Control (MIC), 2012 International Conference , vol.2: pp.796,800, 18-20 May 2012
- [8] Barcaro, M. Bianchi, N.,Magnussen. Six-Phase Supply Feasibility Using a PM Fractional-Slot Dual Winding Machine, Industry Applications, IEEE Transactions, vol.47, no.5:pp.2042,2050, Sept.-Oct. 2011
- [9] Patel, Pradhan. Special Purpose Winding Machine for Fusion Relevant Magnets in India,Applied Superconductivity, IEEE Transactions, vol.22, no.3:pp.4202404,4202404, June 2012
- [10]Svensson,Frogner,Reinap,Hogmark, Alakula,Andersson. Alternative production process for electric machine windings, Electric Drives Production Conference (EDPC), 2012 2nd International:pp.1,7, 15-18 Oct. 2012
- [11]Peng Wen, Stapleton, Yan Li. Tension control of a winding machine for rectangular coils,Control, Automation, Robotics and Vision, 2008. ICARCV 2008. 10th International Conference:pp.2031,2037, 17-20 Dec. 2008
- [12]Kamper. Comparison of linear permanent magnet machine with overlapping and non-overlapping air-cored stator windings,Power Electronics, Machines and Drives, 2008. PEMD 2008. 4th IET Conference:pp.767,771, 2-4 April 2008
- [13]Jiazhong Xu,Wenbin Gao,Xinying Wang,Bo You.The winding machine system of large diameter FRP tank, Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference:pp.1273,1278, 9-12 Aug. 2009
- [14]Wei Jian, Zhang Xu,Wang Minghong,Ding Dehong.Research on Spindle Drive Control System of High Speed Winding Machine,Electronic Measurement and Instruments, 2007. ICEMI '07. 8th International Conference:pp.3-473,3-477, Aug. 16 2007-July 18 2007
- [15]张戈.电阻绕线机总体方案及结构设计[D].西南交通大学,2011.
- [16]张强,陈婵娟,闫永志.基于运动控制器的偏转线圈绕线机数控系统[J].机械设计与制造,2007,07:162-164.
- [17]林锦实.基于 PLC 的绕线机自动控制系统[J].机电工程技术,2009,04:48-50.

- [18]李玮,沈勇.精密绕线机计算机控制系统的设计与应用[J].机械设计与制造,2008,01:72-74.
- [19]Jinwook Kim,Oh-Kyu Choi, Lee. Adaptive transition disturbance observer for winding machine, ICCAS-SICE, 2009: pp.4693,4697, 18-21 Aug. 2009
- [20]Meng Xiangde, Li Lishun. Control system design of Palletized Loading System based on PLC and fuzzy control technology, Computer Science and Automation Engineering (CSAE), 2012 IEEE International Conference, vol.2: pp.666,670, 25-27 May 2012
- [21]Capetta, Luciano, Tornelli, Carlo. Digital PLC technology to support the MV and HV grid remote control: practical experience and standardisation open issues, Power Line Communications and Its Applications, 2007. ISPLC '07. IEEE International Symposium:pp.10,10, 26-28 March 2007
- [22]杨雪,关长伟. 基于 LPC2132 的 X 射线探伤机变压器绕线机的设计[J]. 工业和信息化教育,2013,05:73-77.
- [23]胡峰令.基于 CPU 的 CASS 逻辑控制引擎与开发工具研究[D].电子科技大学,2010.
- [24]Ponsart, Sauter, Theilliol. Control and Fault Diagnosis of a Winding Machine Based on a LTV Model, Control Applications, 2005. CCA 2005. Proceedings of 2005 IEEE Conference:pp.1642,1647, 28-31 Aug. 2005
- [25]Chao-Huang Wei,Chih-Hsing Wu.A simulator of winding machine controller using LabView environment, Control, Automation, Robotics and Vision Conference, 2004. ICARCV 2004 8th , vol.3:pp.2105,2110 Vol. 3, 6-9 Dec. 2004
- [26]Jiazhong Xu,Bo You, Deli Jia,Dongjie Li,Zhongcai Li. Research and Development on Control System of Winding Machine for FRP Sand-filling Pipes, Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress, vol.2 : pp.7997,8001, 0-0 0
- [27]Gupta,Mohapatra, Somani, Mohan. Direct-Matrix-Converter-Based Drive for a Three-Phase Open-End-Winding AC Machine With Advanced Features, Industrial Electronics, IEEE Transactions, vol.57, no.12:pp.4032,4042, Dec. 2010
- [28]Jiazhong Xu,Bo You,Deli Jia,Dongjie Li. Motion Synchronization System of Filament Winding Machine, Innovative Computing, Information and Control, 2006. ICICIC '06. First International Conference , vol.1: pp.105,108, Aug. 30 2006-Sept. 1 2006
- [29]Liu Lingshun,Lu Fang,Wang Jing.Research on calculation relation between stator slot leakage inductance and windings distributing for dual stator-winding machines,Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), 2011 10th International Conference, vol.1:pp.288,291, 16-19 Aug. 2011
- [30]Diaz, Martin, Prieto, Linera, Nuno. Development of a deceleration control system for a winding machine based on a microcontroller, Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE , vol.2: pp.1142,1147 vol.2, 2000
- [31]Dodds, Sooriyakumar. Observer based robust tension control for a segmented stator coil winding machine,Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium:pp.1925,1930, 27-30 June 2011
- [32]Schoenwandt.A multiprocessor controlled roll slitting and winding machine,Implementation Problems in Digital Control, IEE Colloquium : pp.31,35, 9 May 1989

- [33]Mirza.Toroidal coil winding machines making the best choice, Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, 1993. Proceedings., Chicago '93 EEIC/ICWA Exposition: pp.243,250, 4-7 Oct 1993
- [34]Noura, Bastogne,Dardinier-Marion. A general fault-tolerant control approach: application to a winding machine,Decision and Control, 1999. Proceedings of the 38th IEEE Conference,vol.4:pp.3575,3580 vol.4, 1999
- [35]Mu-Shin Kwak,Seung-Ki Sul. Control of an Open Winding Machine in a Grid-Connected Distributed Generation System,Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE , vol.5:pp.2576,2580, 8-12 Oct. 2006
- [36]Jassal, Polinder, Lahaye,Ferreira.Analytical and FE calculation of eddy-current losses in PM concentrated winding machines for wind turbines,Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International: pp.717,722, 15-18 May 2011
- [37]Iversen.Coupled helix winding machine, Electron Devices, IRE Transactions,vol.5, no.4: pp.317,317, Oct. 1958
- [38]罗川. 基于 CASS 数控绕线机非线性算法的设计与实现[D].杭州电子科技大学,2011.
- [39]谭威.基于 PLC 的工业控制系统的设计与实现[D].华中科技大学,2007.
- [40]关胜晓. 机器视觉及其应用发展[J]. 自动化博览,2005,03:88-92.
- [41]朱瑞. 机器视觉及其应用(系列讲座) 第五讲 机器视觉的典型应用 [J]. 应用光学,2007,04:525-528.
- [42]范祥,卢道华,王佳. 机器视觉在工业领域中的研究应用[J]. 现代制造工程,2007,06:129-133.
- [43]Arsalan, Aziz. Low-cost Machine Vision System for dimension measurement of fast moving conveyor products, Open Source Systems and Technologies (ICOSST), 2012 International Conference:pp.22,27, 20-22 Dec. 2012
- [44]Jin-Fang Shi, Cai-Jian Hua; Guo-Hui Li.A simplifying method of vision attention simulating human vision in machine vision system, Machine Learning and Cybernetics (ICMLC), 2010 International Conference,vol.6:pp.3097,3100, 11-14 July 2010
- [45]Bulanon, Kataoka, Okamoto, Hata. Development of a real-time machine vision system for the apple harvesting robot, SICE 2004 Annual Conference, vol.1:pp.595,598 vol. 1, 4-6 Aug. 2004
- [46]张五一,赵强松,王东云. 机器视觉的现状与发展趋势[J]. 中原工学院学报,2008,01:9-12+15.
- [47]陈伟. 基于 DSP+FPGA 的智能相机关键技术研究[D].天津大学,2010.
- [48]董禄.PLC 上构建数控语言的方法研究[D].杭州电子科技大学,2011.
- [49]Kuang Shunming,He Xiaojian.Design and application of CMOS device driver based on S3C2440, Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), 2011 10th International Conference, vol.1:pp.110,114, 16-19 Aug. 2011
- [50]Min Zhang,Jin-guang Sun,Shi Wang. Research and Implementation of the CMOS Camera Device Driver Based on S3C2440, Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2010 International Conference , vol.2: pp.1039,1042, 11-12 May 2010
- [51]卢冠军.一种多核嵌入式 PLC 运动控制系统的研究[D].杭州电子科技大学,2011.

- [52]高丽萍,周斌. 在嵌入式 Linux 下 OV9650 驱动程序的实现[J]. 软件导刊,2012,04:73-75.
- [53]Zhang Baoling, Li Xiaobo,Wang Tianxiang. Design of a long distance monitoring and control system based on ARM S3C2440, Computer Science & Education (ICCSE), 2013 8th International Conference:pp.1397,1400, 26-28 April 2013
- [54]Zhang Lefang,Wang Jian-xin.Zhang Kai, Design of Embedded Video Monitoring System Based on S3C2440, Digital Manufacturing and Automation (ICDMA), 2013 Fourth International Conference:pp.461,465, 29-30 June 2013
- [55]Nakanishi, Mamoru,Ogura.Real-time line extraction using a highly parallel Hough transform board, Image Processing, 1997. Proceedings., International Conference, vol.2:pp.582,585 ,Oct 1997
- [56]Dagao Duan,Meng Xie,Qian Mo,Zhongming Han,Yueliang Wan.An improved Hough transform for line detection, Computer Application and System Modeling (ICCAS), 2010 International Conference on , vol.2: pp.V2-354,V2-357, 22-24 Oct. 2010
- [57]Christopher,Gregson, Detecting corners using the 'patchy' Hough transform, Electrical and Computer Engineering, 1994. Conference Proceedings. 1994 Canadian Conference,vol.2: pp.576,579, Sep 1994
- [58]Qian Cao,Ku Wang,Han Li.Fast and precise detection of straight line with Improved Hough Transform, Intelligent Control and Automation (WCICA), 2010 8th World Congress:pp.6014,6017, 7-9 July 2010
- [59]Dongjin Fan,Hui Bi,Lidong Wang.Implementation of efficient line detection with oriented hough transform, Audio, Language and Image Processing (ICALIP), 2012 International Conference: pp.45,48, 16-18 July 2012
- [60]Yu Ji,Aiwei Xu.A New Method for Automatically Measurement of Vickers Hardness Using Thick Line Hough Transform and Least Square Method, Image and Signal Processing, 2009. CISP '09. 2nd International Congress: pp.1,4, 17-19 Oct. 2009
- [61]Gotoh, Shimada. Visual feedback control for endoscopes using tension estimation, Advanced Motion Control, 2008. AMC '08. 10th IEEE International Workshop:pp.165,169, 26-28 March 2008
- [62]Jiajia Yang,Jinglong Wu,Honda.Development of a new experimental device and investigate human characteristics on visual feedback control and pointing movement,Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference: pp.129,134, 9-12 Aug. 2009
- [63]Tonet, Marinelli,Megali,Sieber,Valdastri. Control of a Teleoperated Nanomanipulator with Time Delay under Direct Vision Feedback, Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference:pp.3514,3519, 10-14 April 2007
- [64]Zhao-Hui Jiang,Eguchi. Vision feedback based end-effector motion control of a flexible robot arm, Systems, Man and Cybernetics, 2007. ISIC. IEEE International Conference:pp.2413,2419, Oct. 2007
- [65]Oda,Yoneda, Abe.Image-based visual feedback control for biped walking robot, Advanced Motion Control (AMC), 2012 12th IEEE International Workshop:pp.1,6, 25-27 March 2012
- [66]Sungon Lee, Nakamura, Yamane, Toujo,Tanikawa, Takahashi. Image Stabilization for In Vivo Microscopy by High-Speed Visual Feedback Control, Robotics, IEEE Transactions, vol.24, no.1:pp.45,54, Feb. 2008

附录

作者在读期间发表的学术论文及参加的科研项目

- [1] 玻璃管液位视觉识别系统的研发. 横向课题. 2012.03—2012.12.
- [2] 基于 ePLC 的粗线径视觉绕线机的研发. 横向课题. 2013.01—2013.10.