

西安工业大学

硕士学位论文

制导光纤精确缠绕计算机控制

姓名：尹若丹

申请学位级别：硕士

专业：机械制造及其自动化

指导教师：马保吉

20080507

# 制导光纤精确缠绕计算机控制

学 科：机械制造及其自动化

研究生签字：尹若丹

指导教师签字：—} 1.4.6

## 摘 要

光纤自动精确缠绕是光纤制导导弹制导中的一项重要技术,这是因为光纤的缠绕质量会影响到光纤制导的两个重要参数,即导弹的飞行速度和射程。还决定着光纤信号传输的质量及成品线包的存放时间等导弹制导的重要特性。光纤线包绕制时要求施胶固定光纤,严格控制滞后角,严格控制缠绕时光纤上的张力。

本文着重研究光纤缠绕的特殊性,结合光纤自身的特殊性质,分析细化了光纤缠绕机的各项功能要求,选定了缠绕控制系统的设计方案,将各个功能模块化并协调一致,在此基础上确定了计算机控制系统的设计方案,并对缠绕过程进行了微观研究,提取了合理可行的系统控制参数;从系统的整体要求出发,用软件工程原理,采用结构化程序设计的思想,对软件进行总体设计和模块划分,用高级语言 C++Builder 完成代码编写,程序主要由参数设定、数据采集、数据存储、图像显示、运行状态显示、控制算法等构成,能够稳定、协调地运行及实现设计功能。根据数控系统的工作原理完成了上位机与下位机通讯协议的选择和通讯链路的设计。

关键词：光纤缠绕; 计算机控制系统; 滞后角; 张力

# **Cyber-Control Of The Optical Fibre Automatic Winding**

**Discipline:** Mechanical Manufacture and Automatization

**Student signature:** YinRuodan

**Supervisor signature:** Ma Baoji

## **Abstract**

The Optical Fibre Automatic Winding is the one of key techniques of the Optical Fibre guided missile. It seriously influences the important character of the missile guide, such as the life of optical fibre bobbin and the speed and the cannon-shot of the fibre guided missile and the velocity of releasing optical fibre during guided missile blast-off, and so on. It must use gluewater to make fibre fixed and made the Lagging angle and strain are situation when fibre bobbin is wedding.

By analyzing the winding particularity of the guidance optical fibre and the special character of fibre , this article analysed the detailed needs of the optical fibre winding system; choose the blue print of the optical fibre winding system's control. By researching the microcosmic process of the winding, the quantitative relation between the lagging angle and the clearance of optical fibre loops as well as the orientation which winding optical fibre tends towards was built; By researching the requirement of microcosmic process of the winding, use the software engineering theory and the high language--C++Builder to program. The programme comprise set parameter and control code, and so on. The optical fibre winding system comprises setting initial variable, get and store data, show the drawing of data, the programme of controlling, and so on. This system can run steadily. The serial communicating system communicating module of plc and the communicating program of supervision interface. It was realized with the serial port programming theory of C++Builder.

**Key word:** Optical Fibre Winding; Cyber-Control System; Lagging angle; Strain

## 学位论文知识产权声明

本人完全了解西安工业大学有关保护知识产权的规定，即：研究生在校攻读学位期间学位论文工作的知识产权属西安工业大学。本人保证毕业离校后，使用学位论文工作成果或用学位论文工作成果发表论文时署名单位仍然为西安工业大学。学校有权保留送交的学位论文的复印件，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内  
容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存学位论文。

（保密的学位论文在解密后应遵守此规定）

学位论文作者签名：2008 尹若丹

指导教师签名：— 5 — 1.5.14

日期：2008.5.14

## 学位论文独创性声明

秉承学校严谨的学风与优良的科学道德,本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知,除了文中特别加以标注和致谢的地方外,学位论文中不包含其他人已经发表或撰写过的成果,不包含本人已申请学位或他人已申请学位或其他用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了致谢。

学位论文与资料若有不实之处,本人承担一切相关责任。

学位论文作者签名: 尹若丹

指导教师签名: 王东去

日期: 2008.5.14

## 1 绪论

### 1.1 课题研究的背景

#### 1.1.1 引言

光纤制导导弹是融电视制导、光传感器、计算机智能化数据处理和控制技术等为一体,利用光纤做双向数据传输来实现图像制导的一种新型武器<sup>[1][2]</sup>,光纤以其独特的信息传输性质,使光纤制导有很多不可替代的优点。光纤制导是利用光导纤维双向传输测量信息和控制信号来完成对受控导弹的制导控制。光纤制导属于遥控制导系统,导弹导引头将所测得的信息通过光纤下行传输到控制站,控制站对信号进行处理并发出新的控制指令,再通过光纤上行传输到导弹上的执行系统,从而完成对导弹飞行的控制<sup>[3]</sup>。光纤制导导弹有很多独特功能及特点。

光纤自动精确缠绕是导弹光纤制导中的一项重要技术,这是因为光纤的缠绕质量会影响到光纤制导的两个重要参数,即导弹的飞行速度和射程。光纤绕组排线整齐,粘接剂配方好,光纤在释放时才可顺利快速剥离,有利于提高放线速度。光纤自动精确缠绕技术是指按照光纤制导导弹的要求,把光纤缠绕在线轴上的技术。要求把直径几百微米的光纤自动精确地缠绕成无差错绕组,以利于其在导弹飞行过程中的顺利高速释放<sup>[4]</sup>。

光纤制导导弹(FOG-M)具有导线制导和无线电波、红外、可见光制导及激光制导导弹所不具有的独特优点,其保密性强、隐蔽性好、信息传输容量特别大,不但制导精度高,而且抗电磁干扰、抗核辐射以及抗化学反应的能力强。光纤制导导弹体积小、重量轻、成本也低。是近年来国外重点研究的用于对付武装直升机和坦克的一种全新的制导技术和制导体制,颇受以美国为首的西方国家陆、海、空三军的高度重视。在高速、中远距离光纤制导导弹的研制过程中,为了解决在强拉力条件下的光纤断纤问题,国外十分重视光纤线管结构的设计问题及光纤线包的绕制问题。国外光纤制导导弹的具体信息被严格保密<sup>[5]</sup>。

我国在“九五”期间已完成 3km 光纤制导导弹演示验证;“十五”期间开展射程为 15km 以上,飞行速度达 300m/s 的光纤制导导弹的研制,并将很快进入型号研究阶段。但如何保证在高速、长距离导弹飞行放线制导过程中能够顺利释放光纤而不断纤,还是一项急需的未完全解决的关键技术<sup>[6]</sup>。前期研究的结果证明,要攻克这一关键技术难题,必须解决光纤线包精确缠绕的问题。

#### 1.1.2 制导光纤线包的发展状况

##### 1) 国外现状

光纤在制导领域的应用始于 20 世纪 70 年代,美国率先进行了光纤图像制导导弹的概念研究,到 20 世纪 80 年代中后期,光纤制导导弹已进入高速发展阶段,先后出现了美国

的 FOG-M、NLOS、EFOG-M 和 LONG FOG-M 计划和法/德/意的 POLYPHEME 和 TRIFOGM 计划。目前正在研制的是:由美国 RAYTHEON 公司电子系统部研制的 EFOG-M, 和由美国陆军航空导弹(AMCOM)负责研制的 LONG FOG-M; 至于 POLYPHEME 族设计, 法国 AEROSPATIALE 和德国 MBB 公司将其分为四个射程档次发展, 即 10km、15km、30km 和 60km<sup>[7][8]</sup>。目前, 首先要完成的是电视/光纤型和红外/光纤型, 将来还要发展毫米波/光纤型, 乃至红外/毫米波复合/光纤型, 其应用领域也将进一步扩大。到目前为止, 不管是电视或红外摄像机导引头还是光纤本身, 都不存在技术冒险性, 通过一系列飞行试验, 其放线可靠性、上下行双向信息传输能力和图像处理能力、以及全系统目标捕获和导弹跟踪能力都成功地做了演示, 这为全尺寸工程发展打下了技术基础。

欧洲的独眼巨人和美国的光纤制导导弹系列是最著名的光纤制导导弹, 另外还有一些光纤制导导弹已在服役或处在开发阶段。如日本的 96 式多用途导弹 MPMS(射程 8km)、巴西的 FOG-MPM(射程 10km)、以色列的 SPIKE (4km)和 DANDY (6km), 英国、西班牙等国家也在研制。光纤制导新概念在技术上业已成熟, 其战术上的发展前景已为人们所认识, 从事这一制导技术的国家越来越多, 攻击目标的范围也在日益扩大。导弹的发射平台也不局限于载车、载机, 而已扩展到海岸、舰只和水下潜艇。100km 射程的发展工作已列入计划。可见, 战术需求对光纤制导技术的应用是多种多样的。

## 2) 国内现状

我国的光纤制导技术研究是从 1990 年开始起步的, 兵总、中船总等单位相继开展了光纤制导导弹、制导鱼雷的研究工作。经过 10 年的艰苦研制, 我国的光纤制导技术从无到有, 有了长足的进展, 主要表现在光纤制导系统总体技术、光纤缠绕与释放技术、光纤双向传输技术等方面已经取得了一批科研成果。组织相关单位, 在“八五”期间, 研制成功了 3 - 5km 单模单芯高强度制导光缆, 基本突破了短距离光纤缠绕与释放的关键技术, 初步解决了总体测试和试验技术。“九五”期间, 研制出 10km 制导光缆并进行了 10km 光缆线管地面模拟放线试验。开展了多用途导弹系统集成演示验证研究, 成功地进行了光纤初始段放线试验、全程飞行放线试验、单向及双向光纤传输飞行试验和全系统集成演示验证试验<sup>[9]</sup>, 在多用途导弹演示验证有控飞行试验中, 导弹命中靶心, 光纤双向传输系统工作正常, 并实现了连续 8 发全程可靠正常传输, 为进行远距离光纤双向传输技术奠定了坚实的技术基础。

### 1.1.3 光纤线包的基本构造

#### 1) 材料特性

制导光纤的结构和材料特性影响了光纤的表面摩擦力和张力对纤芯的作用; 制导光纤粘接剂的组分和固化情况直接影响光纤剥离点受到张力时的弯曲半径; 光纤线包的结构和缠绕特征从整体上影响放线张力的的大小和线包的稳定性, 线包的缠绕缺陷将导致断线的严重后果。

光纤线缆的结构是将光纤放置在中心, 周围用承力材料纺纶编制成套管, 并涂上一层

聚氯乙烯以改善表面光洁度。这种成缆方式已经通过了试验考核。

在光纤缠绕中需要使用光纤粘接剂,其作用是既要保证线管存贮、运输和发射过程中有较好的稳定性,又要保证导弹发射后,光纤能均匀的有规律的放出。光纤粘接剂是一类工艺性能和使用性能要求极苛刻的专用材料。特点如下:

- a、粘接力适中,既要保证线包稳定,又要有利于光纤释放;
- b、粘接剂对缠绕光纤光缆的特性影响很小或没有影响;
- c、必须在每一缠绕层施用,并且在下一层缠绕开始前适当地固化;
- d、粘接剂完全固化后,每公里光缆粘接剂固体含量同粘接剂用量的比值在  $1/4-1/5$  之间;
- e、不产生硬胶棱,对缠绕附加损耗基本无影响;
- f、具有较好的高、低温性能。

光缆粘接剂选用有机硅高分子为主要材料,通过与固化剂混合形成更高分子量的有机硅高分子聚合物,并加入石油醚作溶剂,配成一定浓度的溶液作为光缆粘接剂。

## 2) 结构特性

光纤缠绕同其它类型线的缠绕相比,具有其自身的特点,首先,光纤比纱线刚硬得多,没有什么可压扁性,绕组(也就是线包)表面层不光滑,因此,上层的光纤匝将会落入下层各匝之间形成的槽中,而不完全遵守绕线机排线的控制。其次,光缆的缆芯光纤与铜线或钢线相比,光纤的拉断强度要低。光纤不像金属线,光缆在大拉力或剧烈弯曲之下容易破碎或断裂。从信号传输的角度来看,光纤对微弯有更加严格的要求。此外,光纤绕组不能妨碍高速放线,绕组必须稳定,耐一定的冲击和过载<sup>[10]</sup>。

根据以上特点,采用了精密缠绕方法。这种方法所用的线轴带有一定的稍度,使光纤从其一端(小端)更容易地解绕,光纤缠绕在锥形圆柱体上形成一轴向层,然后以相反的轴向绕另一层,每个新绕的匝几乎都紧挨着前一匝,以此方式继续缠绕直至整个线包完成。这样,一个具有非常高的密度、良好的线包稳定性、较低的附加损耗和可靠的放线状态的光纤线包被完成。

虽然光纤线包的几何形状和缠绕概念看似简单,但在实际操作中却并不简单。由于缠绕一层有螺旋方向,每绕新的一层必须改变方向。然而,新的一层光纤的各匝的自然趋势是遵照前一层各匝形成的槽,因此在缠绕一周的某个地方必然要从槽中跳出,形成周期性地跨线部分,以便在同前一层缠绕方向上相反的方向上继续前进。同时由于线径变化造成排线节距的变化,所以,我国目前的状态是:需要人工来辅助排线,同时参与修整缠绕线层的缺陷(间隙或叠线)。另外,光纤的摩擦系数较低,缠绕时需要一定的张力,而这种张力不能太大或太小。太小易于垮线,太大使光缆承受的应力增大,同时附加损耗增加<sup>[11][12]</sup>。

### 1.1.4 光纤线包的技术性要求

光纤制导弹弹体尾部安装了一个近似圆柱状的光纤载体——绕线轮<sup>[13]</sup>,见示意图 1.1 所示,上面致密均匀地缠绕着多层制导光纤,见示意图 1.2。光纤一端连接于地面指挥



中心，另一端固连于绕线轮上。

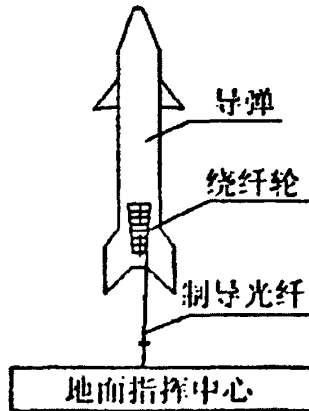


图 1.1 光纤制导导弹

如图 1.2 所示，绕线轮呈一段略大另一端略小的圆锥状，锥角 2 度，大端直径 5.3inch，线管长 12inch。

光纤在绕线轮上多层分布，各层边缘相差 2-3 匝。每层光纤要求排列紧密均匀，各匝之间间隙相等，以保证下一层的正确缠绕。绕线轮在导弹尾部安装时小头向后，这样有利于导弹升空后光纤的顺利解开。

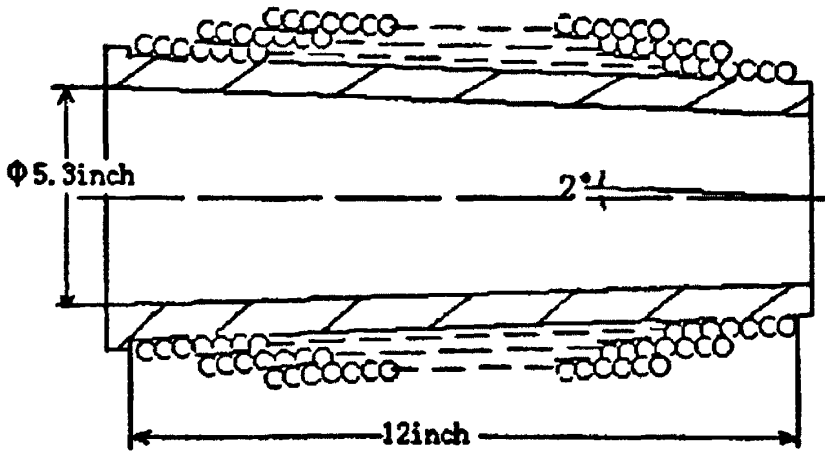


图 1.2 绕线轮

可见绕线轮上的光纤绕制合格与否是光纤制导导弹正常工作的关键。因此，光纤缠绕必须满足以下要求：

- 1) 绕纤质量高、速度快、线损小、适应性强；
- 2) 排纤致密、间隙均匀、张力适合，光纤解开无阻碍；
- 3) 光纤绕到绕线轮一端时，应进行换向绕制，并使当前层比上一层回退 2-3 匝的间距，以保证多层缠绕时不乱纤；
- 4) 同一层不得出现压纤，开纤或光纤出错等现象，更不能造成断纤。

本课题正是针对以上绕纤要求而提出的。它的宗旨在于提供一种制导光纤从而高效的缠绕于绕线轮上的方案，解决光纤缠绕中自动高速绕纤的关键问题。

## 1.2 光纤绕线机研制的目的和意义

本课题所研究的制导光纤精确缠绕计算机控制系统就是利用计算机来实现光纤的自动精确缠绕。其目的在于可以迅速、大量并且优质的进行光纤线包的绕制，并且在绕制过程中，可以实时的采集记录各种参数。

国内的绕线技术大多仍停留在半自动方式，西安 203 研究所的第一代缠绕机并没有上下位机的概念，功能简单粗糙，只是通过单片机来实现简单控制。控制精度不高，响应时间不够快，不能很好的满足实时性要求。203 所的第二代绕线机基本实现了绕线的功能，但是存在以下问题：a、不能显示光纤上张力的大小；b、施胶装置不够理想；c、平行密绕功能不完善；d、不能实现自动上绕。这种情况产生的结果是：在机器运作时要保证光纤的正确缠绕，就必需保证一定的缠绕角度和张力的，但是其导向功能是由操作人员用手或类似器件来实现的，而且当一层光纤缠绕到绕线管的端部时，电机停转，人工对光纤进行换向操作，之后再启动电机带动滑台反向运动，进行下一层的缠绕，如此反复，完成缠绕作业。施胶也是绕好一层后停车，靠手工用刷子将胶液刷在刚绕好的这一层上。这种方法需要技术娴熟的工人和高度的注意力，其出错率高、速度慢，缠绕质量难以保证，且浪费了大量人力物力，尤其是缠绕长度受到很大限制。我国目前的人工无错缠绕长度只有十几千米，最好的达二十多千米，效率低下，浪费严重，远远不能满足光纤制导技术的发展需要<sup>[14]</sup>。

因此，研制一种消除缠绕缺陷，自动化程度高的光纤缠绕系统成为当务之急。光纤自动精密缠绕技术旨在发挥光纤的多种用途，主要是在光纤制导导弹上的应用，并提高光纤缠绕的质量和速度。由于它在光纤制导中的重要而不可替代的地位，已被我国列入 863 计划中。

随着生产的发展、技术的进步，对自动化的要求越来越高，常规连续控制系统的应用受到了极大的限制。而在计算机控制系统中，一台计算机可同时控制多个被控量或被控对象，即可为多个控制回路服务。随着对自动控制系统功能要求的不断提高，计算机控制系统的优越性表现地越来越突出。现代的控制系统，不管是简单的还是复杂的，几乎都是采用计算机进行控制的<sup>[15]</sup>。由于计算机的运算速度快、精度高、具有丰富的逻辑判断功能和大容量的存储能力，故能实现复杂的控制规律；计算机控制系统的控制规律是由软件程序实现的，故容易实现工作状态的转换，实现不同的控制功能；计算机是一种可编程的智能元件，易于修改系统功能和特性，故可构成一种柔性(弹性)系统；随着微电子技术的发展，大规模集成电路的出现，计算机体积减小，重量轻、成本也会大幅下降。

当前，我国的计算机控制光纤自动缠绕技术的研究，与世界先进国家还有一定的差距。所有这些现状激励着我国科研人员努力研制自己的自动光纤缠绕机，并在这个领域做了很

多研究。

由于采用计算机进行总体控制的系统具有上述很多无可比拟的优越性,因此,采用计算机控制的光纤缠绕机比一般光纤缠绕机(如机械式或数字程序控制式)具有无可比拟的优越性,具有良好的柔性,缠绕精度和缠绕效率也大大提高。

综上所述,本课题的研究目的就是开发一种新的光纤缠绕工艺,研制出与高性能光纤缠绕机相配套的计算机控制系统,实现自动化精确缠绕,在提高生产效率的同时,降低生产成本,满足光纤制导导弹的需求。

### 1.3 光纤缠绕机的发展现状及趋势

#### 1) 国外现状

从网上查阅得知,在美国有全自动光纤绕线机生产,该全自动绕线机的特点:

- a、自动控制光纤的张力;
- b、根据环的结构全自动绕制;
- c、自动修正错误。

但是由于美国对我国实行技术封锁,包括各种光纤缠绕配套技术封锁以及设备禁运。我们只有根据自己的实际情况,独立自主,研制自己的光纤绕线机,实现技术攻关。

#### 2) 国内现状

经过市场调查,在纺织等领域,有许多的绕线机,但是,由于其速度、精度、缠绕要求等原因,无法采用漆包线型绕线机来实现光纤线包的绕制。另外,在光纤缠绕时需要每层光纤上胶,从实际角度来看,无法实现光纤的全自动绕制。目前,国内的光纤缠绕机在机器运作时要保证光纤的正确缠绕,其导向功能是由操作人员用手或类似器件来实现的,施胶也是绕好一层后停车,靠手工用刷子将胶液刷在刚绕好的这一层上。

从我国目前的实际情况来看,因为光纤线包的要求很高,国内尚没有针对光纤缠绕的绕线机,一般是外送加工<sup>[16]</sup>。由于我国的光纤缠绕机研制起步较晚,因此仍处于探索阶段,尚待继续改进。

### 1.4 计算机控制系统

#### 1.4.1 计算机控制系统的组成

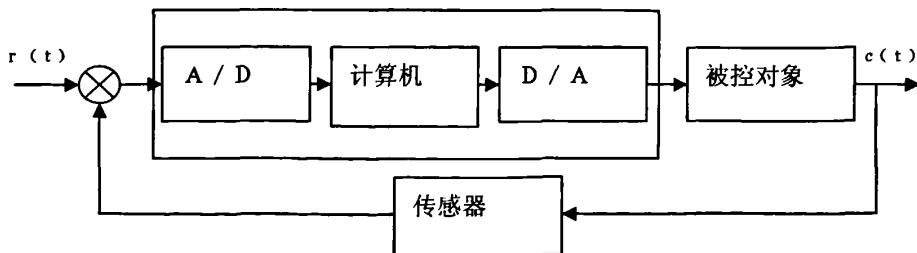


图 1.3 计算机控制系统组成

典型的计算机控制系统组成如图 1.3 所示。图中方框部分为计算机控制系统部分。数字计算机的出现和发展,在科学技术上引起了一场深刻的革命。数字计算机不仅在科学计算、数据处理等方面获得了广泛的应用,而且在自动控制领域也得到了越来越广泛的应用。数字计算机在自动控制中的基本应用就是直接参与控制,承担了控制系统中控制器的任务,从而形成了计算机控制系统。

### 1.4.2 计算机控制系统的特点

相对于连续控制系统而言,计算机控制系统的主要特点可以归纳为以下几点:

#### 1) 系统结构特点

计算机控制系统必须包括有计算机,它是一个数字式离散处理器;此外,由于多数系统的别控对象及执行元件、测量元件是连续模拟式的,因此还必须加入信号转换装置(如 A/D 和 D/A 转换器)。所以,计算机控制系统通常是模拟与数字部件的混合系统。若系统中各部件全为数字部件,则称为全数字式控制系统。

#### 2) 信号形式上的特点

连续系统中各点信号均为连续模拟信号,而计算机控制系统有多种控制形式。由于计算机是串行工作的,必须按一定的采样间隔(采样周期)对连续信号进行采样,将其变为时间上是连续的信号才能进入计算机。所以,它除有连续模拟信号外,还有离散模拟、离散数字、连续数字信号等信号形式,是一种混合信号形式系统。

#### 3) 系统工作方式上的特点

在连续控制系统中,控制器通常都是由不同的电路构成并且一台控制器仅为一个控制回路服务。在计算机控制系统中,一台计算机可同时控制多个被控量或被控对象,即可为多个控制回路服务。每个控制回路的控制方式由软件来决定,同一台计算机可以采用串行或分时并行方式实现控制。

尽管由常规仪表组成的连续控制系统已获得了广泛的应用,并具有可靠、易维护操作等优点,但随着生产的发展、技术的进步,对自动化的要求越来越高,这种常规连续控制系统的应用受到了极大的限制。例如,难于实现多变量复杂控制,难于实现自适应控制等等。与连续控制系统相比,计算机控制系统除了能完成常规连续控制系统的功能外,还具有运算速度快、精度高、性价比高等独特优点。但是,计算机控制系统也有一些不足和缺点。例如,抗干扰能力较低,特别是由于系统中插入了数字部件,信号复杂,给设计实现带来了一定的困难。但全面比较起来,随着对自动控制系统功能要求的不断提高,计算机控制系统的优越性表现的越来越突出。现代的控制系統,不管是简单的还是复杂的,几乎都是采用计算机来进行控制的<sup>[17]</sup>。

## 1.5 选题的目的和意义

由于计算机的运算速度快、精度高、具有丰富的逻辑判断功能和大容量的存储能力,故能实现复杂的控制规律;计算机控制系统的控制规律是由软件程序实现的,故容易实现

工作状态的转换,实现不同的控制功能;计算机是一种可编程的智能元件,易于修改系统功能和特性,故可构成一种柔性(弹性)系统;随着微电子技术的发展,大规模集成电路的出现,计算机体积减小、重量轻、成本也会大幅下降。因此,采用计算机控制的光纤缠绕机比一般光纤缠绕机(如机械式或数字程序控制式)具有无可比拟的优越性,具有良好的柔性,缠绕精度和缠绕效率也大大提高。

经过调查和分析,随着国民经济的快速发展,综合国力的不断增强,在军用或民用方面,光纤缠绕制品必定将拥有广大的市场需求空间。当前我国的计算机控制光纤缠绕技术的研究,与世界先进国家还有一定的差距。

综上所述,本课题的研究目的就是开发一种新的光纤缠绕机,研制出高性能光纤缠绕机和与之配套的计算机控制系统,实现自动化生产,在提高生产效率的同时,降低生产成本,满足要求。

## 1.6 本章小结

介绍了国内外光纤缠绕的发展状况,简介了计算机控制系统在光纤缠绕机种的应用,根据国内外的研究状况,阐述课题的基本情况及其意义,确定了本论文的研究内容和目标。

## 2 光纤绕线系统方案分析

### 2.1 缠绕机系统的整体要求

#### 2.1.1 光纤特性及其在缠绕中容易出现缺陷

光纤缠绕是光纤制导中的关键技术问题,光纤制导对光纤传输系统的主要要求有:一、绕组结构牢固,所占体积最小。受导弹尺寸和容积的限制,绕组的体积应该尽可能小,使缠绕密度达到最大;二、导弹飞行过程中光纤能高速顺利放线。导弹的飞行速度直接关系它的作战能力,光纤制导导弹的飞行速度可达到  $300\text{m/s}\sim 320\text{m/s}$ ,但由于光纤释放速度的限制,实际中的飞行速度只有  $125\text{m/s}\sim 220\text{m/s}$ 。光纤缠绕是保证光纤顺利释放的关键技术。要使释放时,光纤不紊乱,不断折,不纠缠,除了其它方面的合理设计,在缠绕时要做到缠绕图样简洁,绕组的匝、层排列整齐流畅;三、传输损耗最小。

这些目标对光纤在缠绕过程中以及成型绕组提出了较高的要求,使得光纤缠绕过程很易出现以下缺陷。

##### 1) 匝间间隙过大和回叠现象

绕组每一层匝与匝之间的间隙应该达到最小。如果出现如图 2.1 所示匝间间隙过大,将导致绕组内部存在空隙,且致使后续绕层排列杂乱,直接增加成品线包的附加体积。缠绕过程中,匝间间隙是由滞后角控制的,如图 2.2 所示。

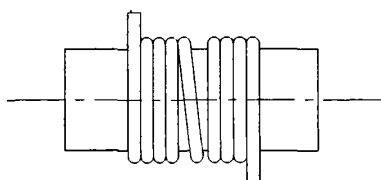


图 2.1 匝间间隙过大

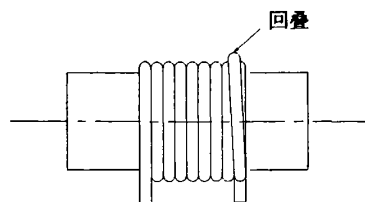


图 2.2 光纤匝的回叠

设馈线孔固定,绕轴的轴向直线运动位移,对随着匝数增加而增加的每一层的实时长度进行补偿,以此来控制滞后角的大小。如果补偿过快,则出现匝间间隙过大的缺陷;补偿过慢则会发生另一种缺陷,即回叠现象,如图 2.3 所示。回叠也是缠绕中的一种严重缺陷

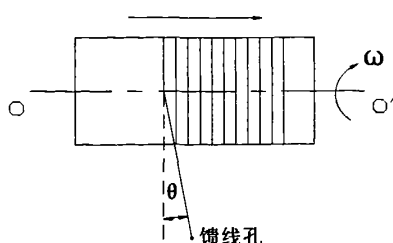


图 2.3 缠绕时的滞后角

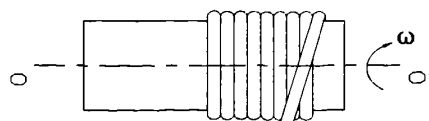


图 2.4 跨越

陷，它和间隙过大一样，会使缠绕杂乱，存留空隙，增加线包体积。

## 2) 跨越过大或过小

跨越是当一层缠满，光纤绕上第二层的行为。如图 2.4 所示。导弹在发射时，有很强的冲击过载，要求绕组整体结构牢固坚实，所以每当缠绕后面一层时，后续层在端面必须跨越前层一定的匝数，这就是线包成纺锤形的原因。所跨越的前层匝数过多，会直接减小每层的缠绕匝数，相同长度的光纤就需要更多的层数，线包体积增加是显然的。图 2.5 是绕组的轴向剖面图，对比了在不同跨越匝数的情况下，线包体积的变化，白色所示即跨越过大而没有利用的空间截面。但是，跨越过小会失去跨越本身的意义，导致绕组松弛甚至坍塌，这些都是要杜绝的现象。跨越匝数的多少其实是衡量缠绕技术的一个指标，技术先进时，跨越匝数仅为 1.5~2.5 之间即可达到绕组牢固的要求。

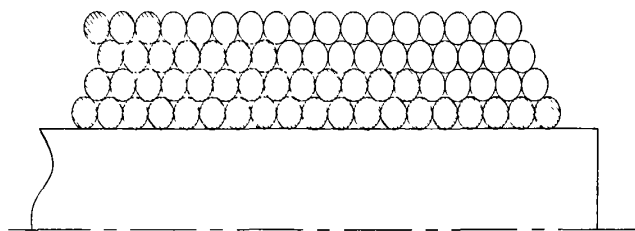


图 2.5 跨越过大的体积浪费

## 3) 陷入缺陷

如图 2.6 所示，光纤在缠绕时，没有在本层位置正确排列，而是卡进了前一层的两匝间隙中，这就是陷入缺陷。这种缺陷不仅导致前层光纤的变形，本层排列图样的破坏，并给后面的正确缠绕埋下严重隐患；更重要的是，随着后续层数的增加，陷入的光纤会被紧紧卡住，在高速释放时极易被拉断，造成毁灭性失败。

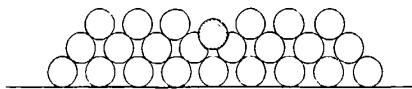


图 2.6 陷入缺陷

光纤缠绕时，除了端面处的跨越，其线匝轨迹应该严格垂直于绕轴，而且，后层光纤是绕在前层光纤形成的沟槽内的。

基于光纤的特殊缠绕图样，有两个主要因素可导致陷入缺陷的出现，即前已述及的过大的匝间间隙和过大的缠绕张力。过大的匝间间隙就像陷阱，光纤绕至此处，自然会陷入，随着间隙的过大的程度不同，陷入深度有所区别；缠绕张力过大，会使光纤见缝插针，“挤”进前层间隙中。光纤半径并不是非常均匀的，有资料显示它的误差甚至可达到 50%，这直接导致匝间间隙的误差范围的扩大，所以，张力过大是产生陷入缺陷的一个重要因素。

#### 4) 绕组松弛

绕组的匝与匝、层与层之间如果有接触不紧密的地方,使摩擦力不够大,释放时在强烈的拉动作用下,光纤就会从该处整块出脱,导致放线失败。光纤表面非常光滑,摩擦系数很小,很容易出现绕组松弛的现象;缠绕时的跨越如果控制不当,即“收边”没有做好,也会导致绕组松弛,甚至坍塌。

总之,绕组的很多缺陷,如间隙大、回叠、陷入等,都会导致光纤排列杂乱,在放线时发生折断、纠缠等现象,使放线不能顺利进行。

### 2.1.2 系统性能要求

#### 1) 稳定性

稳定的控制系统,其被控量偏离期望值的初始偏差应随时间的增长逐渐减小并趋于零<sup>[18]</sup>。具体来说,对于稳定的恒值控制系统,被控量因扰动而偏离期望值后,经过一个过渡过程时间,被控量应恢复到原来的期望值状态;对于稳定的随动系统,被控量应能始终跟随参考量的变化。排线系统本质上是一个机械旋转系统,它的转动惯量  $J$ 、阻尼比  $B$  为正直,所以,根据劳斯稳定性判别法,在设计时,首先要保证绕轴和丝杠的增益为正,才能得到稳定系统。衡量系统稳定性的指标有超调量  $M_p$ ,它表达了系统的行对稳定性,越小系统越稳定。

#### 2) 快速性

对于系统过渡过程的快慢提出的要求,一般称为动态性能。这个过渡过程就是瞬态响应,即系统受到外加作用激励后,从初始状态到最终状态的响应过程<sup>[19]</sup>。

表征了系统的灵敏性的指标有:

延迟时间  $t_d$ 、上升时间  $t_r$ 、峰值时间  $t_p$ 、调整时间  $t_s$  等。根据绕轴转速  $1\sim 800\text{r/min}$ ,得绕轴的最小周期:

$$T_{x\min} = \frac{120\pi}{\omega_{x\max}} = \frac{120\pi}{800} = 0.4712\text{s} \quad (2.1)$$

式(2.1)中  $T_{x\min}$ 、 $\omega_{x\max}$ 、分别是绕轴的最小周期和最大转速。期望在绕轴缠绕四分之一匝时,系统达到稳态。所以系统的调节时间为:  $0.1193\text{s}$ ,这是缠绕速度最快时的最大调整调整时间,如果缠绕速度慢,这个时间可以增加。

#### 3) 准确性

被控量的稳态值与期望值之间会有误差存在,成为稳态误差。稳态误差是衡量系统控制准确性的重要标志。指标中很明确的要求排线系统输出滞后角的精度控制在  $0.001^\circ$  之内。

综上所述,实现系统的快速性和准确性是系统设计的两个难点。



### 2.1.3 系统控制功能要求

光纤自动精密缠绕系统的作用是按光纤制导导弹的要求以规定的方式将光纤绕到线轴上。希望得到的是这样的一个线轴,即最小的缠绕空隙,良好的稳定性(即绕组不松开)、良好的放线特性,最后还要保证线包在存放一定年限后依然可以正常使用<sup>[20]</sup>。

光纤线包的特殊要求以及光纤的特殊物理特性使缠绕过程需解决三大方面的技术问题:

#### 1) 缠绕中光纤所受拉力必须控制在一定范围内

这样会使线包的残余应力减小,有效保持光纤的传输性质,且防止陷入等缠绕缺陷的产生。

#### 2) 对缠绕图样的严格要求

正确的缠绕图样是顺利放线的基本保证。它要求线匝排列致密整齐,无局部突起、下陷等缺陷以防光纤形变;无夹塞卡缝现象以防放线时拉断;为了保证线匝排列致密整齐,要求光纤在缠绕时有一定的滞后角;层与层间退匝限定在很小范围内如 1~2 匝,这样尽量减小线包体积,节省导弹尾部的宝贵空间;绕组每层的边缘必须缠绕精确,层跨越必须紧凑利落,来促使线包边缘紧致牢固,以防线包垮塌凌乱,来加强线包整体抗冲击能力。

#### 3) 为了加强线包牢固性,还在每层绕匝间涂胶来保证内结合强度

根据上述要求,将光纤自动精密缠绕系统功能详细划分后得到六个功能模块:上位机总体控制、平行密绕、施胶装置、滞后角监测装置、张力控制及自动上绕功能的实现。

平行密绕子系统的主要功能是将光纤逐匝逐层有序的密绕在一个带锥度的圆柱线轴上,每一条光纤匝的缠绕纹路垂直于线轴,匝与匝互相平行,而上层光纤嵌入到下层光纤所形成的沟槽内。绕线机的主体排线系统就是保证线包缠绕成符合要求的正确图样的关键部件。缠绕系统要完成的任务目标主要有三点:①在每层的匀速缠绕过程中,保持旋转运动速度和直线运动速度的恒定比例关系;②当缠绕至端点时,按要求(即跨越 1~2 匝)完成上绕至后续层的动作,同时保证不出现线包的其他缺陷;③旋转运动和直线运动之间位置误差的控制和补偿等。显然,这需要绕线运动和绕轴直线运动的紧密配合。通过对缠绕过程的分析研究,得出缠绕运动规律和直线运动规律以及它们的关系。经过中间段的匀速缠绕,当缠绕到端点时,设绕轴转速保持不变,直线进给开始减速,并使光纤回叠(有效回叠),绕上第二层;随之,为了配合直线运动的反向动作,绕轴开始减速,在绕上后续层后,设定绕轴转速的一个周期的时间里,和直线运动同时停止,速度为零。这样做是为了避免因减速时的速度比难以恒定带来的间隙偏离。为了保证光纤确实绕上后续层,旋转运动的减速最好在光纤绕上四分之一周开始为好。在直线运动完成减速、停止的运动状态转换的过程中,其所运行的总位移应该正好满足产生第二层的滞后角的需要。

施胶装置完成对光纤表面施胶。光纤的表面摩擦系数较小,非常光滑,缠绕过程中绕层容易滑脱。为了加强线包牢固性,要在缠绕过程中还要在每层绕匝间涂胶来保证内结合强度。

缠绕过程中, 光纤相对缠绕图案要有一定的滞后角, 用滞后角的大小来控制排线的匝间间隙及实现层间跨越动作的完成。经分析滞后角的大小非常小,  $<0.1^{\circ} \sim 0.2^{\circ}$ , 误差范围就更小, 为  $<0.01^{\circ}$ 。如果滞后角过小, 缠绕线包不够紧实, 如果滞后角过大, 又容易造成光纤回叠。因此, 需要滞后角监测系统来实时监测滞后角的大小。

张力控制子系统中将光纤上张力的大小严格控制在要求范围内。这是因为, 光纤张力的大小对缠绕图样的影响很大, 张力过小造成的回叠、张力波动造成的局部间隙和张力过大造成的坍塌以及将光纤拉断。

最后, 还有自动上绕子系统。自动上绕是指缠绕从本层过渡到下一层的过程。导弹在发射时, 有很强的冲击过载, 要求绕组整体结构牢固坚实, 所以每当缠绕后面一层时, 后续层在端面必须跨越前层一定的匝数最后绕制成一个纺锤状线包。利用上位机总体控制子系统用来控制上述功能模块, 协调各个功能模块之间的运动状态, 即进行实时监控。通过上位机的调控来实现精确、实时高效的自动缠绕, 并实时记录下缠绕过程中的各种参数。

本课题所研究的上位机总体控制子系统用来控制上述其它子系统, 协调各个功能模块之间的运动关系, 即进行实时监控。

## 2.2 计算机控制系统的整体要求

光纤在高速卷绕过程中, 光纤滞后角、张力和上胶量随时会超出合理范围, 使绕纤可能无法正常进行。为此, 必须对这几个参数加以控制、调整, 以保证它们始终处于正常范围内, 这就要求控制系统的设计应该具备即时调节光纤滞后角、张力及上胶量的功能。因为系统的监控功能是在绕纤作业高速进行的过程中完成的, 而光纤直径等量的变化频率波动很大、难以预料, 使光纤滞后角和张力的变化也具有很大的随机性, 这要求检测系统对参数的瞬时变化要做到即时跟随。

### 2.2.1 基本功能

在光纤缠绕机生产中, 缠绕工艺可分为平行密绕、张力控制、上胶控制、滞后角控制、上绕控制等过程。平行密绕系统按实现光纤的缠绕, 实际上是一个位置跟踪系统。设计者可以根据缠绕芯模的直径、长度、和应力强度等不同要求, 预先设计出缠绕所需的工艺参数, 有缠绕机实现光纤的平行密绕。为保证光纤之间不产生匝间隙过大、回叠、跨越过大或过小、陷入缺陷、绕组松弛等缠绕缺陷, 要求主轴和滑台的运动必须有严格的位置协调关系。

具体要实现的功能体现在:

#### 1) 平行密绕系统

严格位置跟踪, 实时监控滑台的位置。由滞后角和滑台位置等的反馈值计算并判断当前的位置是否满足当前时刻下平行密绕的要求, 如果不满足就根据差值适当调整电机的速度来控制平行密绕系统的转动速度和平移速度。

#### 2) 张力控制系统

要实现的控制功能具体体现在实时监控张力的大小,和额定值比较,根据差值的正负调整放线电机的转速,以此来保证张力恒在允许范围内。

### 3) 施胶系统

在这里是将缠绕的信息传递给施胶系统,包括开始时间,退绕时刻,恢复缠绕的时刻等。施胶系统根据这些时间参数来计算施胶的工作时间,和休息时间。

### 4) 上绕系统

计算机控制系统负责计算上绕的时刻,这主要通过缠绕的时间和缠绕的长度,芯模参数等计算出缠绕层数和匝数。并在该时刻发信号给上绕系统,完成上绕的动作。

## 2.2.2 控制要求

计算机控制系统具有以下功能:

### 1) 参数设定

缠绕工艺参数可人工设定、修改、添加、保存和查询。输入工艺参数主要包括:绕线长度、主轴转速、顺层滞后角、逆层滞后角、线径大小、绕线管大端直径、小端直径、缠绕的第一层的宽度、右退线距离、左退线距离、排线起始位置等。

### 2) 控制滑台和主轴的速度和方向(修正错误)

计算机能将采集到的张力和滞后角的大小和预先设定的额定值进行比较,根据输入量进行计算并比较,自动修正和设计最优控制规律。即控制滑台和主轴的速度和方向以及放线电机的转速。

### 3) 建立数据库

光纤缠绕时计算机全程监控,记录缠绕中工作状况,并将过程信息存入数据库,并可根据需要查询打印输出。

## 2.3 本章小结

本章分析了光纤缠绕系统的整体要求,并从光纤线包的实际需求出发,分析出了系统的功能模块和控制要求,对计算机控制系统的基本功能和控制要求进行了分析。

### 3 光纤缠绕机计算机控制系统总体设计

光纤缠绕机控制系统采用计算机控制,其总体设计包括硬件设计、软件设计和抗干扰、提高系统可靠性措施等。本章主要分析和比较交直流伺服电动机各项性能。根据控制系统功能要求,进行了系统软件设计和主要控制环节的设计,最后给出了计算机控制系统抗干扰和可靠性措施。

#### 3.1 光纤缠绕机系统总体方案分析

##### 3.1.1 排线系统方案

排线系统主要分为排线主体、参数测量和控制系统三个模块。如图 3.1 所示。

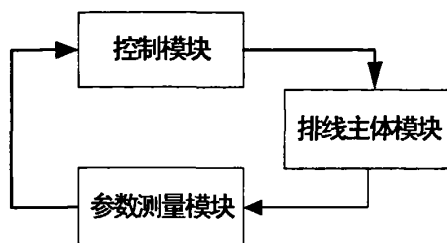


图 3.1 缠绕机各模块间信息流图

排线主体模块有三个运动,一是绕轴自身旋转运动,二是绕轴的轴向直线运动,三是绕轴相对于馈线孔垂直于绕轴的运动。这三种运动是互相关联的。排线主体系统示意图如图 3.2 所示。

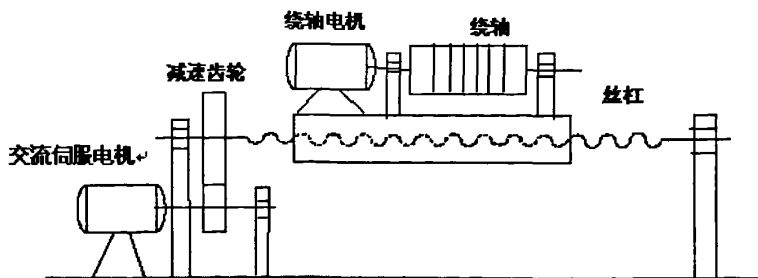


图 3.2 排线系统结构示意图

##### 1) 旋转运动和水平直线运动的配合

显然,排线功能是在绕轴自身的旋转运动和其相对于排线孔的直线运动的精密配合下完成的,因为绕轴是水平放置的,所以直线运动也是水平的。旋转运动的中心轴必须严格平行于直线运动方向。

采用馈线孔静止,绕轴直线运动的方案。该方案结构如图 3.3 所示。

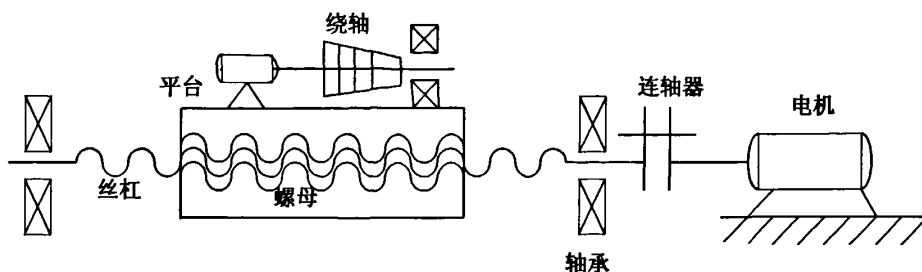


图 3.3 旋转运动和直线运动分离

绕轴置于一个平台上，由电机驱动平台做直线运动。该方案结构紧促，易于保证直线运动和绕轴的平行关系，从而利于排线系统高精度要求的实现<sup>[21][22]</sup>。

绕轴平台做直线运动的情况采取馈线孔静止，绕轴的旋转运动和直线运动分离的方案，直线运动由旋转电机和丝杠实现。即旋转电机经丝杠带动平台，实现绕轴直线运动。

## 2) 旋转运动和垂直直线运动的配合

为了保证缠绕滞后角（见测量部分）测量的精确性，需要使馈线孔和绕轴之间的一段光纤保持在水平面内<sup>[23]</sup>，如图 3.4 所示。随着绕轴半径的增大，馈线孔相对绕轴在垂直方向的位置需要调整，实现这个运动的方式采用绕轴水平相对静止，馈线孔做垂直运动。因为馈线孔质量轻惯性小，而垂直直线运动是单向的，运动简单，便于控制，运动精度易于保证。

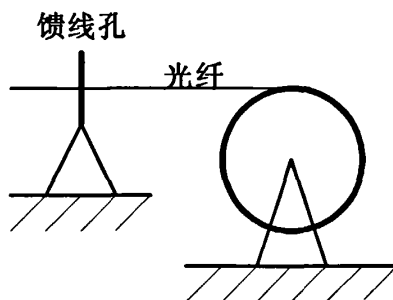


图 3.4 馈线孔与绕轴的垂直位置

## 3.1.2 驱动电机

缠绕系统要完成的主要任务有：一是在每层的匀速缠绕过程中，保持旋转运动速度和直线运动速度的恒定比例关系；二是当缠绕至端点时，按要求（即跨越 1~2 匝）完成上绕至后续层的动作，同时保证不出现线包的其他缺陷。

对缠绕过程的分析，得出缠绕运动规律和直线运动规律以及它们的关系。经过中间段的匀速缠绕，当缠绕到端点时，设绕轴转速保持不变，直线进给开始减速，并使光纤回叠（有效回叠），绕上第二层；随之，为了配合直线运动的反向动作，绕轴开始减速，在绕上后续层后，设定绕轴转速的一个周期的时间里，和直线运动同时停止，速度为零。这样做是为了避免因减速时的速度比难以恒定带来的间隙偏离。为了保证光纤确实绕上后续

层, 旋转运动的减速最好在光纤绕上四分之一周开始为好。在直线运动完成减速、停止的运动状态转换的过程中, 其所运行的总位移应该正好满足产生第二层的滞后角的需要<sup>[24]</sup><sup>[25]</sup>。旋转运动和直线运动的速度大致趋势及它们的联系如图 3.5 所示。

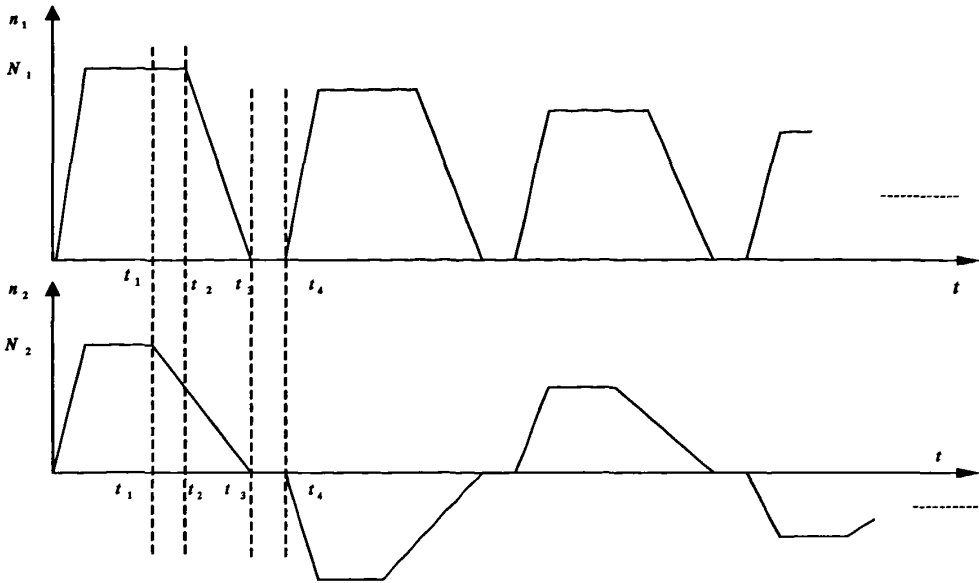


图 3.5 旋转运动和直线运动趋势

图 3.5 中,  $n_1$  为旋转运动的转速,  $n_2$  为直线驱动电机的转速,  $N_1$ 、 $N_2$  分别代表匀速缠绕阶段旋转运动转速和直线驱动转速, 它们之间应该保持恒比关系, 这个比例和丝杠螺距及光纤直径有关。 $t_1$  是缠绕到端点, 直线驱动开始减速的时刻;  $t_2$  是光纤绕上第二层后, 旋转运动开始减速的时刻;  $t_3$  是它们同时停止的时刻,  $t_4$  是后续层开始缠绕的时刻。

由以上分析知, 每缠一层, 旋转电机就要降低一次速度, 直线运动的驱动电机也要配合调速。且光纤本身线径细, 所以对两电机的调速要求也较高。排线系统其实是一个伺服系统, 需要旋转运动和直线运动的精密匹配, 尤其是它们的启动和制动过程在时间上有严格要求。它们的负载特性都是恒功率的。

排线系统使用的永磁同步电机自带有转子位置检测装置, 应用方便。其中, 自控式永磁同步电动机的调速特性与直流电动机基本相同, 它的机械转速与转子电流频率呈线性关系, 可以实现转速微调; 转子电流频率为 0 时, 相当于直流励磁, 转子转速等于电网同步转速; 转子频率为 50Hz 时, 转速为 0, 相当于静态机电互联; 转子频率大于 50Hz 时, 转速为负值, 电机反转; 转子频率为负值时 (即旋转磁场反转), 电机转速高于同步转速。

### 3.1.3 参数测量系统

#### 1) 转速测量

增量式光电编码盘包含了电机转子的初始位置信息<sup>[26]</sup>, 是永磁同步电动机自带的转子位置检测器。它在旋转过程中给定时间  $T$  (s) 内给出脉冲数目为  $m$ , 则电机转速  $n$  (r/min)

可表示为： $n = 60 \times m / T \times p_e$ ， $p_e$  为光电编码盘每转输出的脉冲数。假定电机在静止时转子的初始位置角（电度角）是  $\theta_0$ ，电机的极对数为  $p$ ，则从静止开始经过时间  $T$  后的电机转子位置（机械角）与电机速度  $n$  之间的关系为： $\theta = \theta_0 / p + 2\pi \times m / p_e$ ，该  $\theta$  角就是永磁同步电机矢量控制时进行坐标变换所需要的转子位置角。

## 2) 滞后角测量

滞后角非常小，其测量精度为  $< 0.001^\circ$ ，且光纤处于运动状态，采用非接触式的传感器电荷耦合器件（简称 CCD）来测量滞后角。

电荷耦合器件的突出特点是以电荷作为信号，而不同于其它大多数器件是以电流或电压为信号<sup>[27]</sup>。CCD 的基本功能是电荷的存储和电荷的转移。CCD 的像素数目范围从 128 个到 1600 万个，若溃线孔距绕轴的距离为 450mm，则选取像素阵列为  $4096 \times 4096$  的 CCD 就可达到测量精度的要求。

## 3) 放线轴和绕线轴实时半径测量

采用计算的办法来得到实时半径。在理论上，如图 3.6 示意， $r_{guan}$  为线包线管半径， $r$  为光纤线径， $R$  为绕轴实时半径， $\triangle ABC$  为等边三角形，得绕轴实时半径为：

$$R = r_{guan} + nr \sin 60^\circ = r_{guan} + \frac{\sqrt{3}}{2} nr \quad (3.1)$$

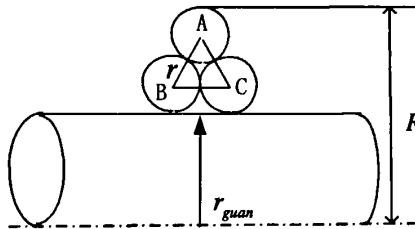


图 3.6 绕轴实时半径

其中  $n$  为正在缠绕的层数。所以，可以通过计数缠绕层数，推算实时半径。这种方法是求平均值的方法，在某种程度上平均了缠绕误差，比起机械测量，中间环节少，无需多种转换，所以不失为一种好的方法，所以，在实际缠绕时，应用式（3.1）计算来推得实时半径。另外，这种方法是建立在前层线包无缺陷的基础上。

## 4) 直线位移测量

缠绕中还需对缠绕点的在绕轴上的位置进行定位，以确定上绕动作的时间。用 CCD 图像传感器测量滞后角同时定位上线点位置。CCD 可以辨别正在缠绕的层和上一层未被覆盖的部分，由此可以通过确定上层未被覆盖部分的长度定位上线点。CCD 固定不动，绕轴的直线位移使滞后角始终处于 CCD 的检测之中，缠绕到每层的端头，被测量部分会自动进入 CCD 视野。

## 3.2 光纤缠绕机的计算机控制系统

### 3.2.1 光纤缠绕机计算机控制系统功能和精度要求

本课题所研究的上位机总体控制子系统用来控制上述其它子系统,协调各个功能模块之间的运动关系,即进行实时监控<sup>[30-32]</sup>。具体要实现的控制功能如下:

**a、**系统开始运行时根据预先设定的参数向下位机发送指令,使下位机按要求工作。具体参数有:绕线长度、主轴转速、顺层滞后角、逆层滞后角、线径大小、绕线管大端直径、小端直径、缠绕的第一层的宽度、右退线距离、左退线距离、排线起始位置等。

**b、**接收滞后角检测系统传递来的信息,与系统设定值比较。当缠绕过程中监控到缠绕图样可信度低或滞后角大小超出设定范围时向相应的下位机发送指令,修正缠绕时产生的问题。

**c、**如果光纤上的张力值过大或过小,及时向张力控制子系统发送指令,调整张力大小。

**d、**接收各个下位机发送的报警信息,并在处理后继续从断点开始操作。

**e、**当缠绕长度达到预先设置的参数要求后自动停车。

计算机控制系统(即上位机)主要起到协调各个模块之间工作状态关系的作用。整个光纤缠绕系统通过上位机的调控来实现缠绕图样精确、实时高效的自动化缠绕。

系统根据实现的主要功能和目的将精度等要求具体列写如下<sup>[28][29]</sup>:

线径:	F0.15mm~F0.80mm
节距范围:	0.100mm~1000mm
节距设定精度:	0.001mm
节距控制精度:	±0.01mm
主轴转速:	1~800r/min
主轴回旋半径:	150mm
有效工作行程:	450mm
线张力范围:	80g~300g, 控制精度: ±5g
计长范围:	1~99999m
滞后角测量精度:	0.001°
缠绕光纤长度:	≈62km
缠绕线包外形:	纺锤型(单边退绕 1.5~2.5 匝)
缠绕层数:	≈170 层

### 3.2.2 光纤缠绕机计算机控制系统硬件设计

本课题所研究和设计的光纤缠绕机控制系统选用 STD 总线工业控制计算机作为核心计算机控制单元,即上位机;通过 PMAC 来和下位机进行通讯,结构图如图 3.7 所示。



主轴由交流伺服电机来驱动,通过计算机采用一定的控制算法控制交流伺服电机驱动

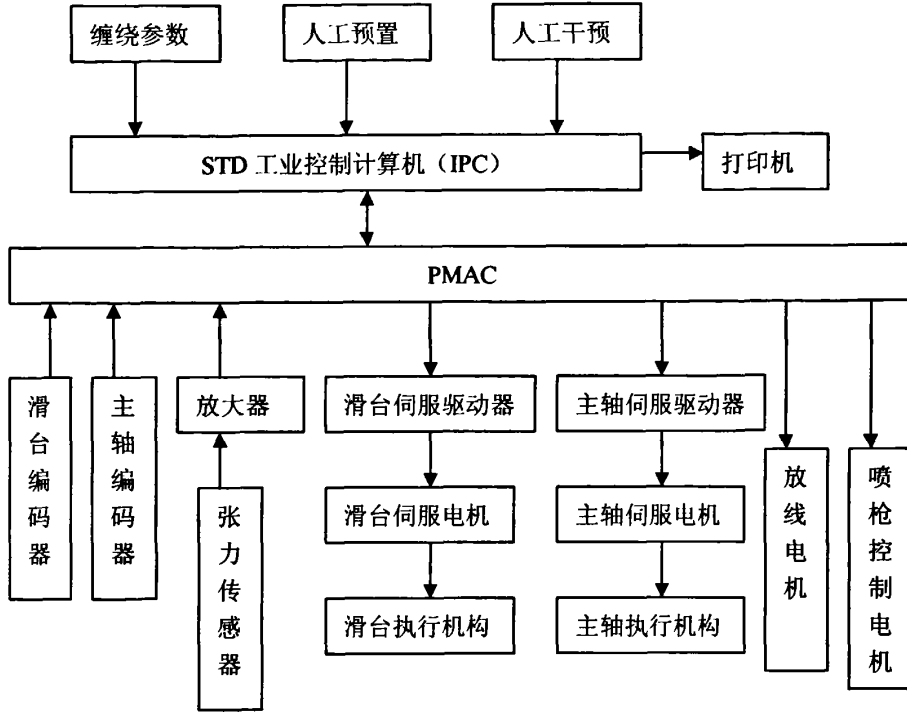


图 3.7 缠绕机计算机控制系统结构框图

器<sup>[30]</sup>,由此来驱动伺服电机,电机经过蜗轮蜗杆减速器(减速比  $i=10$ )带动芯模旋转。同理,滑台也由交流伺服电机驱动,在一定的控制算法下,交流伺服电机驱动器驱动伺服电机,电机经过蜗轮蜗杆减速器(减速比  $i=10$ )带动丝杠运动来控制滑台平台的速度和位置。主轴和滑台伺服控制系统完全采用闭环数字控制策略,内环为速度闭环控制,外环由旋转编码器、计算机和计数器组成了位置闭环。交流伺服电机的转速由伺服控制电压决定,电机正反两个方向的最高转速为 2000rpm,对应的伺服控制电压为-10V~+10V。伺服控制电压为负值时伺服电机顺时针转动,反之为逆时针转动;当伺服控制电压为 0V 时,伺服电机不转动。伺服控制电压每变化 5mV,对应伺服电机转速的变化量为 1rpm。由于光纤缠绕机对电机转速的精度和稳定性有较高的要求,在运转过程中速度波动要小,小车伺服电机正反两个方向转速的一致性要好,因此要求伺服控制电压的精度高,稳定性好。

### 3.2.3 光纤缠绕机计算机控制系统功能设计

为了达到实用、方便和可靠的目的,系统设计尽量考虑使用成熟工控模块产品。在设计软件时,应考虑实际生产中智能性和自动化的要求,软件要求界面直观,操作容易。各种生产工艺参数和设备的运行状态应直接明了。系统开始工作前,要求工作人员输入预先设计好的工艺参数,对产品进行加工制造。为提高系统运行可靠性,系统软件对外部一些不良输入应采取相应校准和保护手段<sup>[31]</sup>。系统硬件应对外部电磁干扰和大电流冲击有一定的保护措施,对系统过压、过流和失速等一些可能出现的意外情况也应给予充分的考虑。

计算机控制系统具有以下功能:

- a、缠绕工艺参数可人工设定、修改、添加、保存和查询。
- b、计算机能根据输入量进行自动修正和设计最优控制规律。输入工艺参数主要包括: 绕线长度、主轴转速、顺层滞后角、逆层滞后角、线径大小、绕线管大端直径、小端直径、缠绕的第一层的宽度、右退线距离、左退线距离、排线起始位置等。
- c、光纤缠绕时计算机全程监控, 记录缠绕中工作状态, 并将过程信息存入数据库, 并可根据需要查询打印输出。
- d、控制台具有控制主轴、滑台伺服电机, 控制回路送断电功能, 滑台方向、主轴方向控制功能, 主轴、滑台加减速控制功能, 紧急停车功能。
- e、软件界面友好简洁, 操作简单方便, 工作稳定可靠。

### 3.2.4 主要控制环节设计

光纤缠绕控制系统采用闭环数字控制策略, 对主轴和滑台交流伺服电机的转速和位置进行实时控制, 保持速度同步, 并保证一定角度的缠绕角, 实现位置随动调速定位控制。因此本系统可分为速度控制和位置控制两部分。系统的模型如图 3.8 所示, 速度控制器实现调速环节, 位置控制由可编程控制器实现。计算机采集给定的位置信号, 与旋转编码器反馈的当前位置信号进行比较, 再根据适当的算法得出给定的电压信号送至速度控制器。控制规律的改变可以通过软件的修改来实现, 比较灵活, 易于达到理想的控制性能。

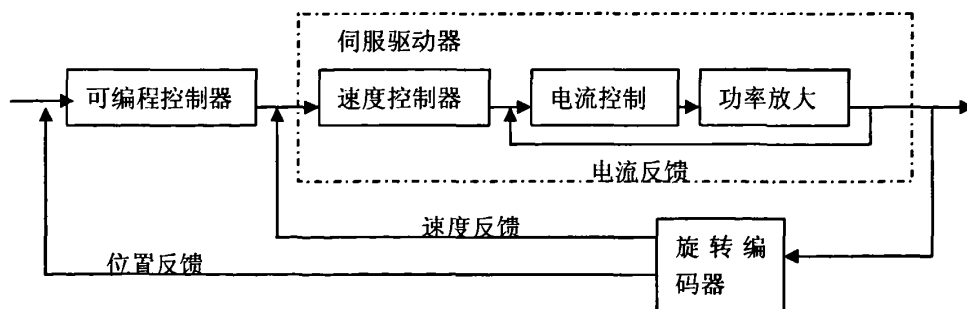


图 3.8 缠绕控制系统组成

#### 1) 速度控制

在控制系统中, 速度控制器的主要功能是增强系统负载扰动的影响, 抑制电动机转速的波动。在本系统中, 速度控制部分是位置环的内环, 采用速度控制单元, 它由电流环和速度环组成。为提高系统的快速性, 电流调节器采用比例器, 整个速度控制部分为可逆式结构。

交流伺服电机的传递函数一般表示为:

$$G_d = \frac{V(s)}{U_d(s)} = \frac{K_d}{T_d T_m S^2 + T_m S + 1} \quad (3.2)$$

$K_d = 1/K_e$ ，忽略电气时间常数，因此本系统伺服电机的传递函数为：

$$G_d = \frac{K_d}{T_m s + 1} = \frac{10}{0.12s + 1} \quad (3.3)$$

速度环的传递函数  $G_v(s)$  为：

$$G_v(s) = \frac{\frac{K_s K_d}{T_m s + 1}}{\left(1 + \frac{K_s K_d K_v}{T_m s + 1}\right)} = \frac{K_s K_d}{T_m s + K_s K_d K_v + 1} = \frac{150}{0.11s + 1} \quad (3.4)$$

## 2) 位置控制

位置控制器的主要作用是保证系统静态精度和动态跟踪的性能，它直接关系到伺服系统的稳定性与高性能运行。当随动系统主轴运动于某一位置时，反馈到计算机计算出给定滑台的目标位置，产生控制信号，使随动系统快速移动到新的位置，并跟踪于该主轴位置。

在控制系统中，选择足够高的采样频率，满足不等式： $2p/T > 10\omega_c$ ，其中  $T$  为采样周期， $\omega_c$  为系统应具备的开环截止频率。需要通过位置来实现控制的最重要的两个因素即滞后角和上绕。

### a、滞后角控制

滞后角可定义为光纤逼近线管时的角度，如图 3.9 所示。测量滞后角的基准是一条垂直于线管转动轴的线，因此，滞后角等于零意味着光纤精确地垂直于线管的转动轴。之所以要使用“滞后”这个词是因为馈线上的各点表现为稍稍靠后于或滞后于在前进中的线匝。缠绕过程中，光纤相对缠绕图案要有一定的滞后角  $\theta$ ，用滞后角的大小来控制排线的匝间间隙及实现层间跨越动作的完成。经分析滞后角的大小非常小， $< 0.1^\circ \sim 0.2^\circ$ ，误差范围就更小，为  $< 0.01^\circ$ 。

如图 3.10 示， $\theta$  角的大小为： $\theta = \arctan \frac{s}{l}$ 。

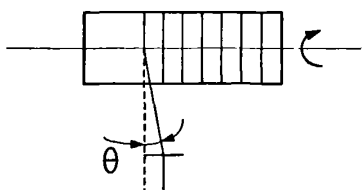


图 3.9 滞后角

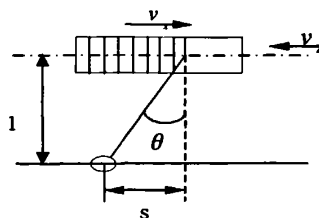


图 3.10  $\theta$  示意图

其中  $l$  为溃线孔到绕轴与  $P$  点所在平面的距离，该距离可近似为到绕轴与上线点  $P'$  所在平面的距离，在缠绕开始后，这是一个固定值； $s$  是溃线孔到过  $P'$  垂直于绕轴的平面的距离，它的初始值由理论计算的  $\theta$  角大小确定，在缠绕过程中这个距离由所缠绕层的宽度和绕轴直线位移的差值确定，是一个动态的容易受到影响的变量。所以在缠绕过程中， $\theta$  角是由  $s$  的值确定的。要实现滞后角的控制需要通过滑台的平移位移来控制。

同层缠绕时影响  $s$  的参量由关系式  $\omega_{x(\Delta t)} = \frac{\tau}{r} \omega_{z(\Delta t)} + \left( \omega_{x(0)} - \frac{\tau}{r} \omega_{z(0)} \right)$ , 其中  $\omega_x$  为绕轴转速,  $\omega_{x(0)} - \frac{\tau}{r} \omega_{z(0)}$  为常数, 所以绕轴转速和直线运动驱动电机的实时转速比应为  $\tau/r$ 。所以, 影响  $\theta$  大小的因素就是这两个实时转速。所以, 直线驱动的速度应和绕轴转速保持一个定比  $\tau/r$ , 这样就可以维持  $\Delta s = 0$ 。

### b、上绕

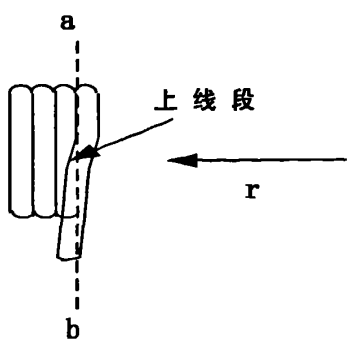


图 3.11 上绕

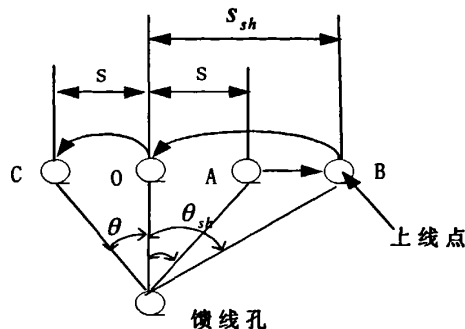


图 3.12 上绕时  $s$  的变换关系图

光纤缠绕时, 理想状态下, 光纤是紧靠着前一匝已绕好的光纤绕上绕轴的。缠绕过程中, 光纤有一个上绕段, 如图 3.11 所示。沿着已绕好的两匝光纤的接缝  $ab$  线把绕轴横切。

如图 3.12 所示, 上绕时, 滞后角  $\theta$  的方向不变, 等到上绕成功时, 即光纤在第二层的第一匝绕过主轴的  $\gamma$  角度之后,  $\theta$  角要改变方向开始缠绕第二层。

图中的 A、B、C、O 是上线点上绕时相对馈线孔的不同位置。上线点从最初的 A 点到上绕后的 B 点, 到  $\theta$  正负过渡的 O 点, 再到缠绕第二层时的 C 点, A—B—O—C 即上线点上绕时的路线。进入上绕过程, 就不需要线径补偿,  $\theta_{sh}$  是由上线点位置确定的。所以这个过程中主要计算上线点的位移量。

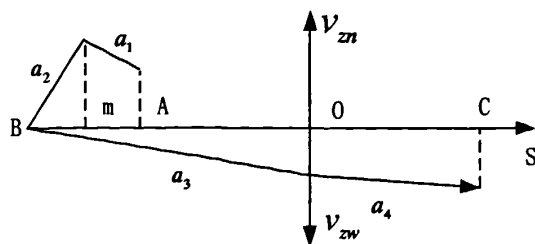


图 3.13 馈线孔速度与位移关系略图

主轴旋转运动为:

为了保证上绕成功, 馈线孔处于 A—B 段时, 主轴缠绕转速不变; 当馈线孔处于 B 点位置时, 主轴开始减速; 馈线孔到达 O 点时, 主轴转速减为零; 馈线孔处于 O—C 段时, 主轴加速, 到达 C 点时, 主轴转速达到第二层缠绕转速。设缠绕内层时, 馈线孔速度为  $v_m$ , 二层时为  $v_{zw}$ ; 设在不同的阶段 (如图 3.13) 所示, 馈线孔加速度分别为  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ ; 所用时间分别为  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$ ; 所经过的位移分别为  $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$ 、 $s_4$ 。

关系方程组如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} s_1 = v_m t_1 + \frac{1}{2} a_1 t_1^2, \\ s_2 = \frac{1}{2} a_2 t_2^2, \\ s_3 = \frac{1}{2} a_3 t_3^2, \\ s_4 = a_3 t_3 t_4 + \frac{1}{2} a_4 t_4^2, \\ t_1 + t_2 + t_3 = t_{sh}, \\ s_1 + s_2 = AB, \\ s_3 = BO, \\ s_4 = AB, \\ a_1 \tau t_1^2 + 2(\omega_m \tau - \omega_x r) t_1 + 4\omega Kl = 0, \\ -a_2 t_2 = \omega_m + a_1 t_1, \\ a_3 t_3 + a_4 t_4 = \omega_{zw}; \end{array} \right.$$

由图 3.13 可看出, mB 段的减速最快, 对系统实时反应的要求也最高, 所以, 在求解上述方程组以确定  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$  和  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$  时, 首先结合电机及系统的反应速度确定  $t_2$  和  $a_2$ , 再求取其他参数<sup>[32]</sup>。

设缠绕第一层即内层时, 绕轴转速为  $\omega_m$ , 缠绕第二层即外层时为  $\omega_{zw}$ ; BO 段加速度为  $a_{x3}$ , OC 段加速度为  $a_{x4}$ , 则有:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{xn} = -a_{x3} t_3, \\ \omega_{zw} = a_{x4} t_4 \end{array} \right.$$

可解得  $a_{x3}$ 、 $a_{x4}$ 。

### 3.3 计算机控制系统的抗干扰和可靠性措施

计算机控制系统一般放置于生产现场, 与其相连的控制对象往往延伸到很多地方, 这就使得生产现场的各种强烈的干扰源, 从不同的渠道向计算机控制系统袭来。在前面我们已经指出, 在满足控制系统快速性要求的基础上, 使系统具有较高的控制精度是光纤缠绕机控制系统设计的一个首要目标。在光纤缠绕生产的工作环境中, 各种大电流用电设备很多, 会对控制系统造成很强的干扰, 必须采取各种措施来抑制干扰。解决计算机控制系统的抗干扰问题, 主要有两种途径: 一是找到干扰源, 寻找相应的办法抑制和消除干扰, 尽

可能避免干扰串入控制系统,从外因解决问题;二是提高计算机控制系统自身抵抗干扰的能力,从内因解决问题。为了使系统具有较高的控制精度,可采取硬件措施和软件措施。

### 3.3.1 硬件措施

a、选用高精度的旋转编码器作为系统速度和位置的测量元件,以保证系统控制中速度及位置的检测精度;选用较高灵敏度的张力传感器,以及高灵敏度和分辨率的 D/A 转换模块,以提高缠绕时光纤张力的检测和控制精度。

b、选用带光耦隔离的计算机外部接口、各类控制模块和输入输出模块,保证外部强电与计算机内部控制电路的充分隔离;同时,选用抗干扰能力较强的工业控制计算机(IPC),提高控制设备的可靠性。

c、电源系统的抗干扰措施。合理配置和使用低通滤波器和交流稳压装置;采用高性能抗干扰开关稳压电源,具有良好的稳压、隔离、滤波和屏蔽能力;采用分布式独立供电,以及备用电源。

d、地线配置的抗干扰措施。接地设计的目的:一是清除各电路电流流经公共地线阻抗时产生的噪声电压;二是避免磁场及地电位差的影响,即不使其形成地回路。采用单点接地,分别电源供电,以去除线路间的共阻抗串扰。数字地线、模拟信号地线、信号源地线和负载地线分开设置,数字电路、模拟电路和负载电路分别供电,独立构成回路。

e、对关键的输入、输出信号(比如传感器检测信号和控制信号)进行重点防护。加小的滤波电容以消除尖脉冲干扰。

### 3.3.2 软件措施

#### 1) 软件故障

软件失效的机理是:由于软件错误引起软件缺陷,当软件错误被激发时产生软件故障,严重的导致软件失效。在软件设计中常采取软件容错、指令冗余、信息冗余和 Watchdog 程序等,来限制、减少乃至消除软件故障的影响。软件容错包括故障检测、损坏估计、故障恢复和缺陷处理四个基本活动;指令冗余是利用消耗时间资源来达到对系统的容错目的;信息冗余就是利用增加信息的多余度来提高控制系统的可靠性。

#### 2) 软件滤波

硬件滤波会增加系统硬件的开销,而造成成本的增加,难以检测和维护。因此,适当的采用软件的方法进行滤波,对于设计者来说,是一个非常有效的抗干扰方法。

#### 3) 在实际采样控制过程中,采取定时检测电机速度

并依次在每个采样周期对系统设定输出值进行修正,以克服由于外部因素引起的速度波动对位置控制带来的误差。

#### 4) 采用双闭环控制结构

在这个缠绕系统中进行跟踪速度同步的环节以外,引入了位置误差修正环节,以最终消除系统位置误差,达到光纤精确缠绕的目的。

### 5) 计算机控制算法

利用数字 PID 递推算法在线计算, 避免计算延时造成滞后所引起的控制误差。减少计算延时的控制算法流程图, 如图 3.14 所示。

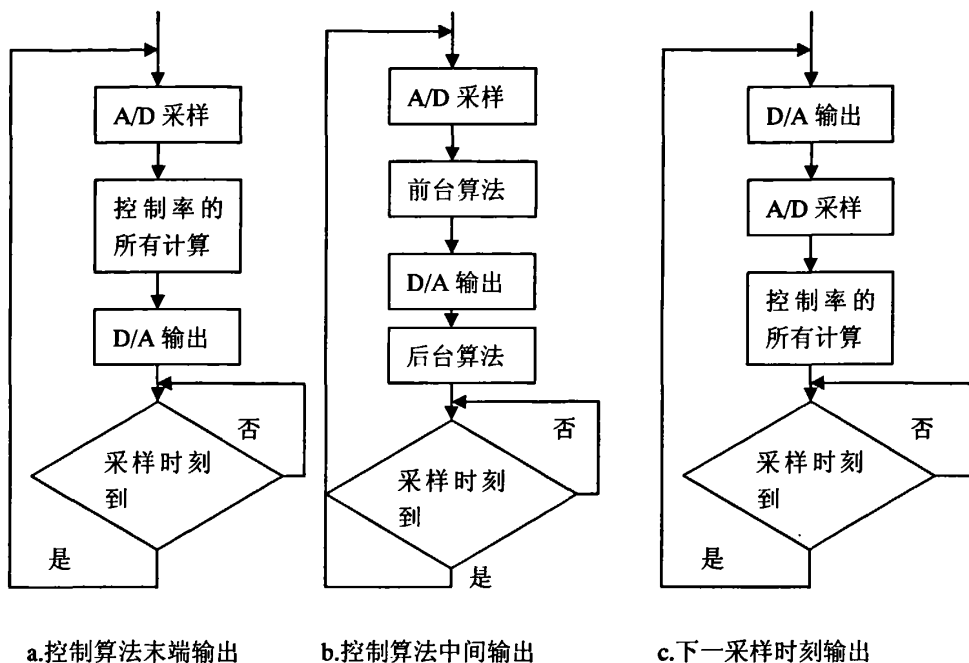


图 3.14 三种控制算法流程图

第一种实现方法如图 3.14(a)所示, 这种方法的计算延时较大(全部计算时间), 且随控制算法的不同而变化。

第二种实现方法如图 3.14(b)所示, 将与当前控制输出计算有关的前台算法计算完后, 立即输出, 然后再计算与当前输出不直接相关的后台算法。这种算法的计算延时最小, 因而对系统的性能影响也较小。

第三种实现方法如图 3.14(c)所示, 所有的计算结果均在下一个采样周期开始时输出, 计算延时等于一个采样周期。这种实现方法的延时最大, 但是延时的大小固定, 不随控制算法而改变。

### 3.4 本章小结

本章主要进行了缠绕机计算机控制系统的总体设计, 并根据系统的整体要求细化出被控对象, 得出被控对象之间存在的控制关系, 并研究了计算机控制系统的抗干扰和可靠性措施。

## 4 通讯协议和通讯链路设计

上位机是为了向用户提供诸如工艺流程图显示、动态数据画面显示、报表编制、趋势图生成、窗口技术以及生产管理等多种功能，为系统提供良好的人机界面。要求：判别计算机上配置的通信卡是否与要连入的设备匹配，如果不匹配，则增加通信模板；要对运行的通信协议分析清楚，按照协议的规定及帧格式编写个人计算机的通信程序；选择适当的操作系统提供的软件平台，编制用户要求的画面。上位机与下位机之间能实现实时通讯，就必须要有相应的通讯协议和通讯链路设计。

### 4.1 数控系统的工作原理

当前，开放型、模块化和集成化已成为数控技术发展的趋势。为此，世界各国都在抓紧研究制订开放式高性能数控系统平台的标准及其规范，并进行相关产品的开发，如美国的 NGC、OMAC 项目、欧洲的 OSACA 计划及日本的 OSEC 计划等。与此同时，世界上各大数控生产厂商也纷纷推出了基于开放式、模块化和集成化的高性能数控系统。

关于开放式数控系统的特征通常认为其包括硬件系统的开放性和软件系统的开放性，开放的硬件系统由微型机及模块化的速度控制单元、位置控制单元和内置的 PLC 构成；开放的软件系统是指数控软件系统的设计模块化及模块间的接口标准化。目前，开放式数控系统有 3 种实现途径：一是 PC 机+数控专用模板；二是 PC 机+可编程运动控制器；三是纯 PC 机型。

这种基于开放式可编程运动控制器的系统结构以通用微机为平台，以 PC 机标准插件形式的开放式可编程运动控制器为核心。通用 PC 机负责如数控程序编辑、人机界面管理等功能，运动控制器负责机床的运动控制和逻辑控制。这种运动控制器以运动子程序的方式解释执行数控程序，以 PLC 子程序方式实现机床逻辑控制，支持用户的开发和扩展，具有上、下两级的开放性。美国 Delta Tau 公司的 PMAC 是这种运动控制器的典型代表，其拥有自身的 CPU，同时开放包括通信端口、存储结构在内的大部分地址空间，具有灵活性好、功能稳定、可共享计算机所有资源等特点。

数控系统硬件部分结构原理如图 4.1 所示。主要由工控机、控制元件 PMAC 卡、伺

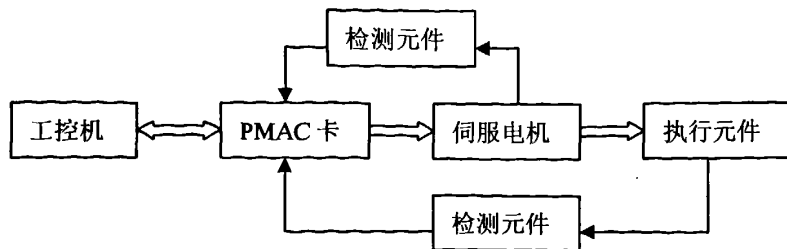


图 4.1 数控系统结构原理图



服电机、执行元件以及全闭环和半闭环检测元件组成。

运动指令执行流程如下：PC 机与运动控制元件 PMAC 卡互相传递信息，由运动控制元件指令伺服电机驱动执行元件完成运动，在每个伺服周期由执行元件上的检测元件反馈回实际运动位置，再由运动控制元件加以比较修正。

整个数控软件的系统体系结构如图 4.2 所示。作为上层软件的可执行 32 位 Windows 应用程序通过 PMAC 卡自带的通讯模块 PCOMM32 与 PMAC 卡的内核程序进行通讯，再由 PMAC 卡内核程序驱动 PLC 程序或者加工程序进行加工。

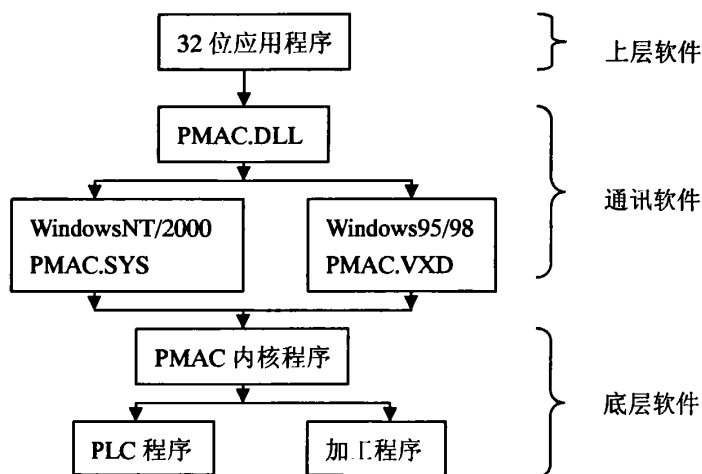


图 4.2 软件系统体系结构

数控系统工作流程图如图 4.3 所示。

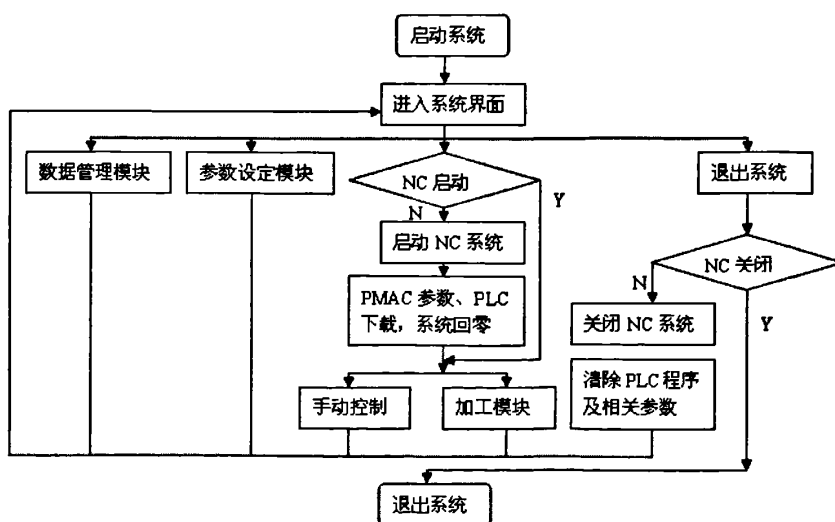


图 4.3 数控系统工作流程图

## 4.2 排线系统 PMAC 2A PC-104 运动控制卡

PMAC 本质上是一台计算机,其具有实时性强、稳定性好、效率高、控制精度高等优点,但是为了满足实际加工时的需求,使用一台计算机作为 PMAC 卡的上位机,结合 PC 和 PMAC 的各自特点,充分发挥二者的优点,提供数控系统良好的整体性能。PC 机具有运行速度快、存储量大、应用灵活的优点,作为系统和用户之间的联系桥梁。在实际应用中,用户通过上位机 PC 进行系统相关的数据输入、参数设定、加工准备等工作,然后跟 PMAC 通讯,再由 PMAC 根据上位机的要求发送指令给伺服驱动器,伺服驱动器再驱动伺服电机等执行机构执行相关指令,推动滑台和升降机架到指定的位置,完成指定的动作。

PMAC 2A PC-104 是 PMAC 板卡级系列产品,是为嵌入式应用系统而开发使用的结构紧凑、经济实惠、被设计成 OEM 系列的产品,在提供齐全的 PMAC 板卡功能的同时,拥有更小巧的结构,更全面的功能和更方便的扩展性。可以通过 PC104 总线与上位机通讯,也可以使用双端口 RAM 扩展总线的通讯速度。

### 4.2.1 PMAC 2A PC-104 运动控制卡性能参数

1) PMAC2A PC-104 运动控制卡提供 4 个轴的步进和伺服能力,性能参数如下:

- a、40 MHz DSP56311CPU ;
- b、128k×24 SRAM 用户内存;
- c、512k×8 闪存进行用户备份和固件程序;
- d、8-bit 并行 PC-104 总线与主机接口(ISA)。

2) 4 通道轴接口,每一个包括:

- a、12 位±10V 微分模拟量输出;
- b、3 路微分编码器电路输入;
- c、脉冲加方向信号输出;
- d、标志信号输入,2 个标志信号输出;
- e、50 针 IDC 放大器和编码器接口电路;
- f、34 针 IDC 标志位,脉冲和方向接口;
- g、10 针的 RS-232 串口;
- h、2 通道 12 位 A/D 输入。

### 4.2.2 PMAC 2A PC-104 运动控制卡的变量

PMAC2A PC-104 运动控制卡的变量是用户丰富的资源,用户可以根据自己配制的系统进行设置。PMAC 卡有四种变量,即 I 变量、P 变量、Q 变量和 M 变量,变量名由相应的字母后面连接 0~1023 组成,不同类型的变量占用各自的地址。

1) I 变量

I 变量是用来进行初始化和设置参数用的，每个变量都有固定的定义，其中，有一部分的设置会影响整个卡的工作，有一部分只针对电机设置，有一部分只针对坐标系设定，而有一部分只针对编码器设置。例如：I900~I904 属于 1 号编码器，负责控制编码器信号的解释；而 I100~I184 属于 1#电机，通过设置来告诉 PMAC 数据的 I/O 地址。

## 2) P 变量

P 变量是 PMAC 中通用用户变量，变量精度为 48-bit 浮点数，是用户在进行 PMAC 编程计算时通用的全局变量。P 变量在编程时有两个作用，一个是计算，如  $P100=P101*(\sin(45))$ ；另一个是软件触发，如  $IF(M1!=1 \text{ AND } P10=0)$  (M 变量在后面说明)。

## 3) Q 变量

Q 变量是用户在进行 PMAC 编程计算时坐标系内部通用的变量，多坐标系时可以用 Q 变量来进行管理，Q 变量在不同坐标系中的物理地址是不一样的，可以用同一个 Q 变量访问不同的物理内存地址：

&1	Q0	访问地址	\$1400
&2	Q0	访问地址	\$1600
...			
&7	Q0	访问地址	\$1580
&8	Q0	访问地址	\$1780

注：&n 表示 n 号坐标系。

假设有 8 个坐标系分别运行 8 个运动程序，所有的程序都可以用同一个 Q 变量 Q0~Q127 而没有冗余，因此不会有内存冲突。

当然也可以用不同的 Q 变量来访问相同的物理内存地址：

&1	Q0	访问地址	\$1400
&2	Q512	访问地址	\$1400
...			
&7	Q640	访问地址	\$1400
&8	Q128	访问地址	\$1400

## 4) M 变量

M 变量用于访问 PMAC 内存和 I/O 点的地址指针，M 变量没有预先定义，用户必须自己定义。M 变量的定义通过减号和大于号组成的“定义箭头”(->)来完成，由于定义后将被存在后备电池 RAM 或闪存内，所以一般只需要用在线命令定义一次。定义时一般加地址前缀，如 X:、Y:、D:、L:、DP:、F:、TWD:、TWB:、TWS:、\*: 等，例如：“M9->Y: \$FFC2, 8, 8”，表示直接控制 I/O08~I/O015。输出一旦定义以后，M 变量就可以进行置位、计算、判别。M 变量的定义格式如下：

{M 变量}->{前缀}: {地址}, {偏移量}, {宽度}, {格式}

地址—内存或 I/O 地址;

偏移量—地址起始位置;

宽度—缺省为 1, 可以是 1、4、8、12、16、20 或 24 位宽;

格式—缺省为 U(无符号), 可以是 S(有符号)。

### 4.3 施胶系统通讯协议选择

一般而言, 上下位机的连接可以采用并行方式、串行方式和通讯控制器方式, 并行连接方式传输速度快, 每次传输 8 位数据, 但当进行远距离传输时, 布线成本会大大提高, 传输的可靠性也会大为下降, 因此采用并行连接方式在计算机控制系统中很少采用, 而大多采用串行连接方式或通讯控制器方式<sup>[42]</sup>。目前广泛采用的串行通讯协议有 RS-232, RS-422 和 RS-485 等, 下面就将介绍几种串行通讯方式的特点。

#### 4.3.1 RS-232 串行接口标准总线

RS-232C 是一个历史比较久的标准(其中的 C 代表这是当前的版本), 它是电子工业协会正式公布的串行总线标准, 也是在微机系统中最常用的串行接口标准, 描述了计算机和相应外设以低速串行数据通信时的物理接口和协议, 这个标准最初是用于电传机的。RS-232C 是计算机和外设(如调制解调器或其它串行设备)交换信息的接口, 在 PC 机内部, 通常由数据终端接口(DTE)通过 UART 芯片数据由计算机内部传送到内置或外置调制解调器(或其它串行设备)上。因为计算机内部的数据一般以并行的形式传送, 所以 UART 必须将并行数据改变为串行数据流, 作为 PC 机的 DTE 代理, 它和符合 RS-232C 标准的而且具有数据通信设备(DCE)接口的外设进行通信。采用 RS-232C 作串行通讯时, 通讯距离可达 15m, 传输数据的速率可任意调整, 最大可达 20kb/s。RS-232C 标准包括机械指标和电气指标, 机械指标规定: RS-232C 接口通向外部的连接器是一种“D”型保护壳插头, 有 9 针的(DB9)和 25 针的(DB25), 其引脚信号具体定义如表 4.1、表 4.2 所示:

表 4.1 RS-232C(DB9)线路功能表

引脚	线路代号	缩写符	功能说明
1	-	CD	数据载波检测
2	-	RD	数据接收
3	-	TD	数据发送
4	-	DTR	数据终端就绪
5	-	SG	信号地
6	-	DSR	数据设备就绪
7	-	RTS	请求发送
8	-	CTS	清除发送
9	-	RI	振铃指示

表 4.2 RS-232C(DB25)线路功能表

引脚	线路代号	缩写符	功能说明
2	BA	TXD	发送数据
3	BB	RXD	接收数据
4	CA	RTS	请求发送
5	CB	CTS	清除发送
6	CC	DSR	数据设备就绪
7	AB	-	信号地
8	CF	DCD	数据载波检测
20	CD	STR	数据终端准备好
22	CE	-	振铃指示
其余	-	-	空或不常用

RS-232C 串行通讯协议有一个起始位, 5-8 位数据位, 1 个奇偶校验位, 1 个或 1.5 个或 2 个停止位。RS-232C 串口可以近程通讯也可以远程通讯, 在波特率较低时, 距离可以远一些。一般而言, 两个标准的 RS-232C 串口互联时, 只需三根线, 即: 数据发送、数据接收和信号地, 当有特殊要求时, 需多根连线, 如图 4.4 所示。图中 DTE 表示计算机或终端。

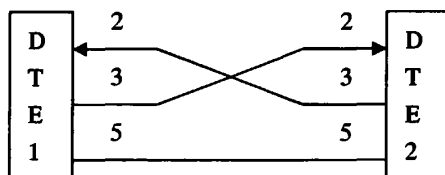


图 4.4 DB9 串口通讯的简单连接图

25 脚(DB25)串口互连时, 其连接如图 4.5 所示。

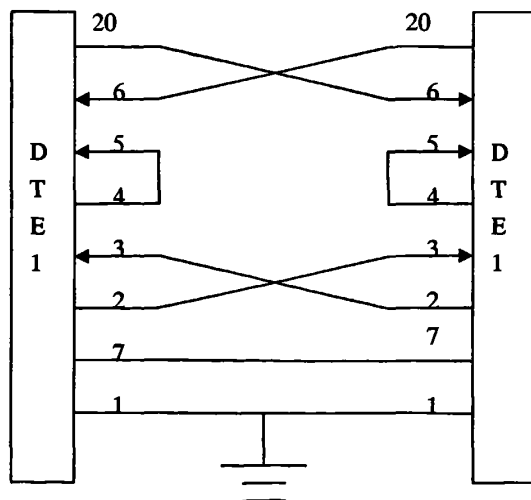


图 4.5 DB25 串口通讯连接图

RS-232C 由于发送器和接收器之间具有公共信号地,不可能使用双端信号,因此公共噪声会耦合到系统中,这是迫使 RS-232C 采用高传输电压的主要原因。总之,RS-232C 缺点很明显,它适合于传输距离较短、对于数据传输率要求不高的一些场合。在本光纤缠绕机控制系统中,上位机与 PLC 以及交流伺服电机驱动器之间的通讯均采用 RS-232C 串行接口标准总线,主要考虑到设备和上位机之间的距离较短。

#### 4.3.2 RS-422/485 串行接口标准总线

RS-422/485 串行接口标准总线克服了 RS-232C 总线的缺点,它采用双线差动传输。采用差动传输,便于隔离,它有较强的共模电压范围,因此具有很强的抗干扰能力,适合远距离传输,在波特率为 100KB/s 时,传输距离为 1.2km。由于具有以上的优点,RS-422/485 串口协议已经在工业控制计算机、可编程控制器和智能仪表上被广泛地采用。研华 IPC-610 工控机主板上的 COM2 串口可以通过跳线设置通讯方式为 RS-232C、RS-422、RS-485 三者之一。

RS-232C, RS-422, RS-485 通讯协议各项指标比较如表 4.3 所示。

表 4.3 RS-232C, RS-422, RS-485 串行接口标准比较

特征参数	RS-232C	RS-422	RS-485
工作模式	单端发、单端收	双端发、双端收	单端发、单端收
传输线上允许的驱动器	1 个驱动器	1 个驱动器	32 个驱动器
和接收器数目	1 个接收器	10 个接收器	32 个接收器
最大电缆长度	15m	1200m	1200m
最大速率	20kb/s	10Mb/s	10Mb/s
驱动器输出 (最大电压)	$\pm 25V$	$\pm 6V$	$-7V \sim +12V$
驱动器输出	$\pm 5V$ 带负载	$\pm 2V$ 带负载	$\pm 1.5V$ 带负载
(信号电平)	$\pm 15V$ 未带负载	$\pm 6V$ 未带负载	$\pm 5V$ 未带负载
驱动器负载阻抗	$3K\dot{U} \sim 7K\dot{U}$	$100\dot{U}$	$54\dot{U}$
驱动器电源开路电流	$V_{\max}/300\dot{U}$ (开路)	$\pm 100iA$ (开路)	$\pm 100iA$ (开路)
接收器输入电压范围	$\pm 15V$	$\pm 12V$	$-7V \sim +12V$
接收器输入灵敏度	$\pm 3V$	$\pm 200mV$	$\pm 200mV$
接收器输入阻抗	$2K\dot{U} \sim 7K\dot{U}$	$4K\dot{U}_{\min}$	$12K\dot{U}_{\min}$

#### 4.4 通讯过程软件实现

该数控系统软件是基于 Windows 的友好界面和强大功能基础,采用了当今流行的面向对象的编程思想,利用 Microsoft 的专业开发工具 C++ Builder6.0 作为开发平台,结合 PMAC 卡通讯驱动函数库 PComm32 作为系统与 PMAC 卡通讯的桥梁,同时结合 PMAC 卡配套软件 PEWIN32 作为执行软件来为该系统的运行和维护提供支持。从系统的工作机理可知,PC 机应用软件的主要任务是作为整个系统的后台管理,调度程序完成系统任务。

#### 4.4.1 PComm32 通讯驱动函数库

为了便于 PMAC 卡与上层应用程序之间进行通讯, PComm32 通讯驱动程序作为上层应用程序与 PMAC 卡之间通讯的桥梁。PComm32 是一个非常有效的开发工具, 几乎囊括了所有与 PMAC 卡的通讯方法, 并且与 C++ Builder6.0 等开发软件有很好的兼容性。它由 PMAC.DLL、PMAC.SYS、PMAC.VXD 三个文件组成, 共包含了 250 多个函数。简要介绍几个常用函数如下<sup>[33-37]</sup>:

##### 1) BOOL OpenPmacDevice(DWORD dwDevice)

这个函数为应用程序使用 PMAC 打开了一个通道。应用的前提是已经安装调试好动态链接库, 并且 PMAC 卡已经在这个操作环境下注册完毕, 能够有效的寻址。其参数 dwDevice 为希望打开的设备号, 一般为 0。返回值为 TRUE 则表示连接成功。

##### 2) BOOL ClosePmacDevice(DWORD dwDevice)

当程序运行完毕, 必须关闭所打开的通道, 此函数就是实现了这个功能。参数及返回值意义与打开通道函数 OpenPmacDevice() 相同, 且必须与 OpenPmacDevice 配对使用。

##### 3) BOOL PmacConfigure(HWND hwnd, DWORD dwDevice)

该函数可以设置 PMAC 卡与上位机的通讯方式: 总线通讯或者串行口通讯。当第一次安装 PMAC 卡或者 PMAC 卡跳线地址发生改变的时候, 必须调用该函数设置 PMAC 卡的通讯方式和总线地址 (当选择总线通讯时)。

##### 4) void PmacSendCommandA(DWORD dwDevice, PCHAR command)

该函数直接发送一条指令到指定的 PMAC, 参数 command 为发送的命令字符串。该函数并不从 PMAC 中得到相应的发应。

##### 5) void PmacSetVariableDouble(DWORD dwDevice, char ch, UINT num, double val)

通过该函数可以在程序中动态的设定指定变量的值, 其中参数 ch 为 PMAC 中变量的类型 (P、I、Q、M 等), 参数 num 为参数号, val 为希望赋予的值。

##### 6) void PmacDownloadFile(DWORD dwDevice, char \*fname)

该函数下载指定的文件到 PMAC 中, 参数 fname 为指定文件的完全路径 (包括文件名)。可以下载的文件包括变量设置程序、PMAC 运动程序以及 PLC 程序。

##### 7) int PmacGetResponseA (DWORD dwDevice, PCHAR response, UINT maxchar, PCHAR command)

发送一个命令字符串 (如“#1j+”, “Open Prog1”, “M162”等) 给 PMAC, 并从缓冲区中得到 PMAC 的反应。它能处理大多数与 PMAC 通讯的要求, 并总是能保证命令字符串与反应字符串相匹配。参数 response 是指向存储 PMAC 反应代码的字符串缓冲区的指针; maxchar 是可以传送的字符串的最大字符数; command 是指向所传送字符串的指针。如果函数执行成功, 将返回所接受的字符数, 包括握手字符。

#### 4.4.2 PComm32 双端口 RAM 函数库

PMAC 的 Option2 提供了一个 8K×16 位的 RAM, 允许 PMAC 和 PC 机之间共享一块快速内存, 实现数据的快速传递。在光纤缠绕的加工过程中需要在实时状态下快速的大量的位置数据信息的下载, 同时又需要重复的快速的从 PMAC 中读取各电机的状态信息<sup>[38] [39]</sup>。电机的状态信息数据可以不停的更新并被 PLC 程序或自动的写入双端口 RAM 中, 如果不使用双端口 RAM, 这些数据必须使用 PAMC 的在线命令通过 PC 总线来存取, 由于使用双端口 RAM 存取不需要经过通讯口发送命令和等待响应时间, 所以要快的多。双端口 RAM 可以实现很多功能具体如下:

- 1) 双端口 RAM 控制面板功能 (从主机到 PAMC);
- 2) 双端口 RAM 伺服数据报告功能 (从 PAMC 到主机);
- 3) 双端口 RAM 后台定点数据报告功能 (从 PMAC 到主机);
- 4) 双端口 RAM 后台变量数据报告功能 (从 PAMC 到主机);
- 5) 双端口 RAM ASCII 通讯缓冲区 (双向);
- 6) 双端口 RAM 二进制旋转程序缓冲区 (从主机到 PAMC);
- 7) 双端口 RAM 数据采集缓冲区 (PMAC 到主机)。

双端口 RAM <CONTROL-W>ASCII 命令功能 (从主机到 PMAC) PComm32 支持对双端口 RAM 的所有操作, 在此基础上建立了一个类 CDpram, 该类封装了对双端口 RAM 的操作的功能函数。下面主要介绍双端口 RAM 后台定点数据报告功能函数:

- 1) BOOL PmacDPRRealTime(DWORD dwDevice, UINT period, int on\_off)

该函数开启或关闭 PMAC 卡自动将定点数据写入双端口 RAM 功能, period 参数设置双端口 RAM 中数据的刷新周期。

- 2) void PmacDPRSetMotors(DWORD dwDevice, UINT n)

该函数设置 PMAC 卡向双端口 RAM 中写入几个电机的相关数据, 参数 n 表示将 1—n 个电机的相关数据写入双端口 RAM 中。

- 3) void PmacDPRSetHostBusyBit(DWORD dwDevice, int on\_off)

- 4) int PmacDPRGetHostBusyBit(DWORD dwDevice)

- 5) int PmacDPRGetPmacBusyBit(DWORD dwDevice)

上面的三个函数联合使用确保主机和 PMAC 卡之间的正常数据通讯。

- 6) double PmacDPRGetCommandedPos(DWORD dwDevice, int motor, double units) 该函数返回指定电机的命令指令位置。

7) double PmacDPRPostion(DWORD dwDevice, int i, double units) 该函数返回指定电机的实际位置。

8) double PmacDPRFollowError(DWORD dwDevice, int motor, double units) 该函数返回指定电机的跟随误差。

- 9) double PmacDPRGetVel(DWORD dwDevice, int motor, double units) 该函数返回指定



电机的速度值。

## 4.5 用 C++Builder 编写串行通信程序

在 Win32 下, 对串口的操作就如同对文件一样打开或关闭, 对串行数据的读写可在用户定义的读写缓冲区中进行。具体使用的函数为:

首先用 `CreateFile()` 打开通信串口, 其中参数 `lpFileName` 指向串口逻辑名, 如“COM1”或“COM2”等, 参数 `dwDesiredAccess` 定义文件的读写权限, 设为 `GENERIC-READ|GENERIC-WRITE`; 参数 `dwShareMode` 定义资源共享方式, 此处必须设为 0, 为独占方式; `lpSecurityAttributes` 定义安全属性, 为 `NULL`; `dwCreationDistribution` 定义文件创建方式; `dwFlagsAndAttributes` 定义文件属性和标记, 设为 `FILE-FLAG-OVERLAPPED`, 表示异步通信方式; `hTemplateFile` 指向一个模板文件的句柄, 为 `NULL`。

然后用 `BuildCommDCB()` 和 `SetCommState()` 函数通过通信设备控制块 DCB (Device Control Block) 设置串口通信参数(如波特率、停止位、数据位、校验位等), 其中 `BuildCommDCB()` 中的字符串参数 `lpDef` 定义同 DOS 命令中 `MODE` 的参数格式, 关于 DCB 更具体的设置需要根据用户对数据流定义、握手信号及通信控制要求具体定义, 参见有关 Windows 技术资料。用 `GetCommState()` 可以得到当前的 DCB 参数值。如果需要还可通过 `SetCommTimeouts()` 和 `GetCommTomeouts()` 重新设置读写的超时参数; 读写缓冲区的设置使用 `SetupComm()`, 参数 `dwInQueue` 和 `dwOutQueue` 分别定义为输入和输出缓冲区的大小。

在串口初始化完毕后, 还要建立与通信有关的事件对象。一般使用 `CreateEvent()` 函数, 它返回一事件句柄, 其中参数 `lpEventAttributes` 指向安全属性结构地址, 在 Win 95 (无安全属性) 中为 `NULL`; 布尔参数 `bManualReset` 定义事件重置方式, `true` 表示手工重置, `false` 表示自动重置 (相关函数为 `SetEvent()` 和 `ResetEvent()`); 参数 `bInitialState` 定义事件初始状态, `true` 表示发信号, 否则为不发信号; `lpName` 是为多进程设置的事件名, 对于单进程定义为 `NULL`。然后用 `SetCommMask()` 定义用户程序可监视的通信事件类别。

以上设置完成后, 用户程序就可以等待通信事件的产生, 一般调用函数 `WaitCommEvent()` 监视通信事件, 其中参数 `lpEvtMask` 指向产生事件的掩码地址, 用于判断事件产生的性质, `lpOverlapped` 指向重叠结构地址, 可简单定义为 `NULL`。对于串口事件的响应一般有四种方式: 查询、同步 I/O、异步 I/O 和事件驱动 I/O, 需要根据用户不同控制要求而定。查询方式占用较长的计算机时间, 同步 I/O 方式直到读取完指定的字节数或超时时才返回, 容易造成线程阻塞, 异步 I/O 用于后台处理, 事件驱动是由系统通知用户程序发生的事件并进行串口操作。比较而言事件驱动 I/O 方式较灵活。

当有通信事件产生时, 就可用函数 `ReadFile()` 和 `WriteFile()` 直接对串口缓冲区进行读写操作了。其中 `lpBuffer` 指向读写缓冲区, `nNumberOfBytes` 为要读写的字节数,

lpNumberOfBytes 为实际读写的字节数, lpOverlapped 指定同步或异步操作。通信结束后, 调用函数 CloseHandle() 将串口关闭。

使用以上的 API 函数, 简化后的串口初始化:

```
HANDLE hcom; //定义句柄
DCB dcb;
OVERLAPPED e; //定义重叠结构
void fastcall TForm1::OkBtnClick(TObject Sender)
{ hcom=CreateFile("COM2",GENERIC-READ|GENERIC-WRITE,0,NULL,OPEN-EXIS
TING,
FILE-ATTRIBUTE-NORMAL|FILE-FLAG-OVERLAPPED,NULL); //打开通讯口
BuildCommDCB("9600,0,8,1",&dcb);
SetCommState(hcom,&dcb);
SetupComm(hcom,512,512); //设置读写缓冲区
e.hEvent=CreateEvent(NULL,false,false,NULL); //设置事件
SetCommMask(hcom,EV-RXCHAR| EV-TXEMPTY); //设置事件掩码
OkBtn->Enabled=false;
}
```

## 4.6 本章小结

本章着重介绍了数控系统的工作原理以及上位机与下位机通讯协议的选择和通讯链路的设计。

## 5 软件设计方案

在硬件电路设计完成后，系统的软件在控制中起主要作用，包括光纤的长度、张力、平移等。保证光纤的参数稳定是软件设计的主要课题。软件编制过程比较复杂，下面先讲述一下应用程序的设计原则和方法。

### 5.1 应用程序设计原则与方法

#### 5.1.1 程序功能模块化的优点

实际的应用程序一般都是由一个主程序(包括若干个功能模块)和多个子程序构成，每一程序模块都能完成某一明确的任务，实现具体的某个功能，如显示、计数等。采用这种模块化的程序设计一方法，有以下优点：

- 1) 单个模块结构的功能单一，因而易于编写、调试和修改；
- 2) 便于分工，可由多个程序员同时进行编写、调试，加快软件研制速度；
- 3) 程序可读性好，便于功能扩充和版本升级；
- 4) 程序的修改可局部进行，其他部分可相对保持不变；
- 5) 使用频繁的子程序可以汇编成子程序库，便于多个模块调用。

#### 5.1.2 程序模块的划分

模块化程序设计是自上而下的过程进行的，主模块即为总模块，然后是多层次的子模块，如图 5.1 所示。在进行模块划分时，应首先弄清楚每个模块所需的功能，数据结构以及与其它模块之间的关系。其次是对主要任务再进行细化，把一些专用的子任务再划分给下一级即第二级子模块去完成，这时也需要弄清除它们之间的相互关系。按这种方法一直细分成易于理解和实现的小模块为止。从图 5.1 程序功能模块化结构示意图还可以看出不同子模块(如 B, D)可以出现在不同的层次上。

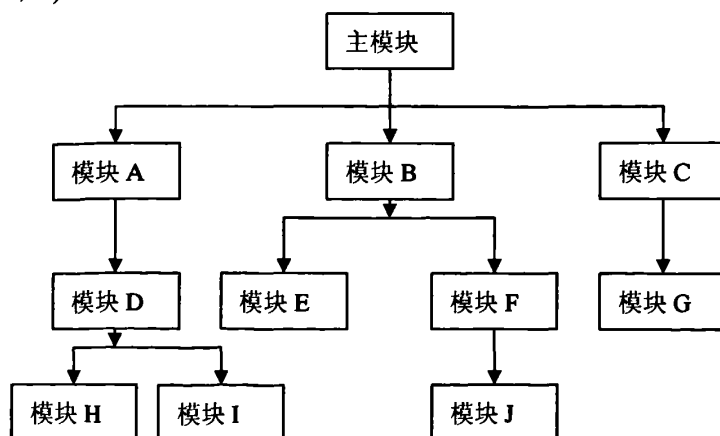


图 5.1 程序功能模块化结构示意图

模块说明应包括实现模块功能所用的基本算法,模块入口参数、出口参数,模块的数据结构及调用子程序等。一般有了层次图和模块说明后,划分模块的工作也就算完成了。

### 5.1.3 模块的划分原则

模块的划分应有很大的灵活性,也不能随意划分,模块划分时应遵循下述原则:

- 1) 每个模块应具有独立的功能,能产生明确的结果,这就是单模块的功能高内聚性;
- 2) 模块之间的控制耦合应尽量简单,模块之间的数据耦合应尽量地少,这就是模块间的低耦合性。控制耦合是指模块进入和退出的条件及方式,数据耦合是指模块之间的信息交换方式、交换量的多少及交换的频繁程度;
- 3) 模块长度适中,模块语句的长度通常在 20-100 条的范围较合适,模块太长时,分析和调试比较困难,失去了模块化程序结构的优越性;若过短则模块的连接太复杂,信息交换太频繁,附加开销太大,因而也不合适。

### 5.1.4 结构化程序设计

结构化程序设计是指程序的设计、编写和调试都采用一种规定的组织形式进行,而不是想怎么写就怎么写。这样可使编制的程序清晰,易读性强,调试、修改也较方便,充分显示了模块化程序设计的优点。

结构化模块均可以有三种程序结构组成,即顺序结构、条件结构(分支结构)和循环结构。每个结构只有一个入口和一个出口,三种结构程序的任意组合和嵌套就构成了结构化的程序。

子程序和宏指令不能作为一种基本的结构,但在应用系统程序的设计中,通常把一些常用的功能编写成子程序或宏指令,构成一个或几个子程序库,便于其它功能模块随时调用。这也是实现模块化结构程序设计的重要技巧。

## 5.2 软件设计总体规划

系统软件设计采用模块式结构、自顶向下布局,使用子程序调用的结构化方法进行,保证系统稳定可靠。这种方法的优点是程序调试方便容易,各个模块之间耦合性小、独立性强,可以逐个调试通过,最终加入主程序正确运行。

### 5.2.1 软件设计方法与功能

本课题的测控软件使用 C++Builder 语言实现,具有较完备的功能。它有友好的人机交互界面,可将采集的数据实时显示出来,采集的数据可以随时存盘或选择打印,便于比较鉴别。

操作界面中,设置了“电机参数显示(数据采集)”、“参数设定”、“控制算法”、“图像识别参数”、“运行情况显示”、“存盘与打印”以及“退出”等菜单按钮;也设置了“图像识别曲线生成”的输出信息框。

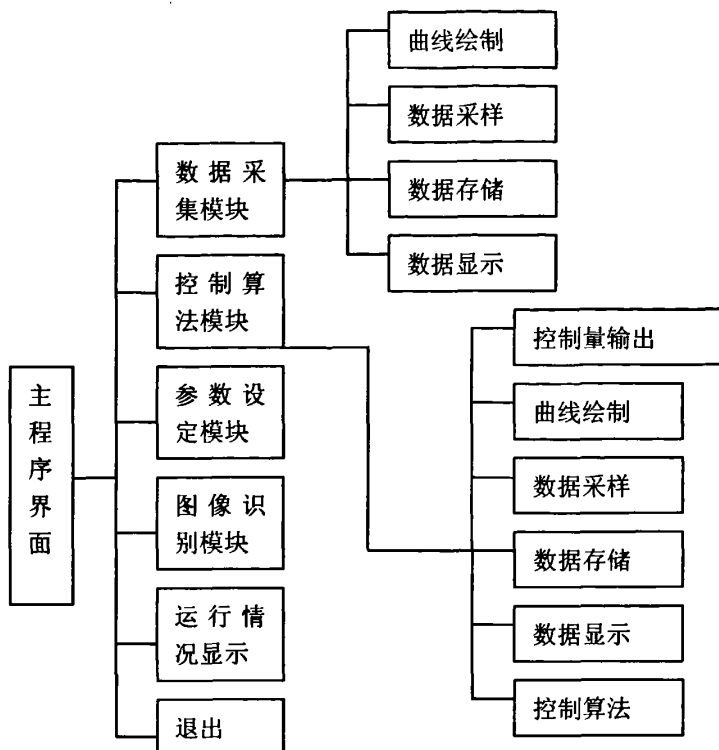


图 5.2 软件总体设计框图

### 5.2.2 主程序处理模块

将功能划分后，就可以很方便的调用功能，不必重复编程。将主程序划分为数据采集模块、控制算法模块、参数设定模块、图像识别模块、运行情况显示模块。在数据采集模块可以采集数据，绘制成图，并存储，显示等。控制算法中有很多共同的计算是可以独立成一个类，在别的功能实现的算法中直接调用即可，因此，在设计中将控制算法模块独立成一个功能。

## 5.3 程序设计流程

测控软件主要由主程序、各功能程序模块组成，而功能程序模块由众多子程序调用来实现其相应功能。

### 5.3.1 主程序设计流程

主界面实现功能模块的按需调用。设计的原则是简单易与操作，方便维护。从主程序界面可以很方便的进入用户需要的界面去查看信息或发出控制命令。

主程序流程框图见图 5.3 所示。

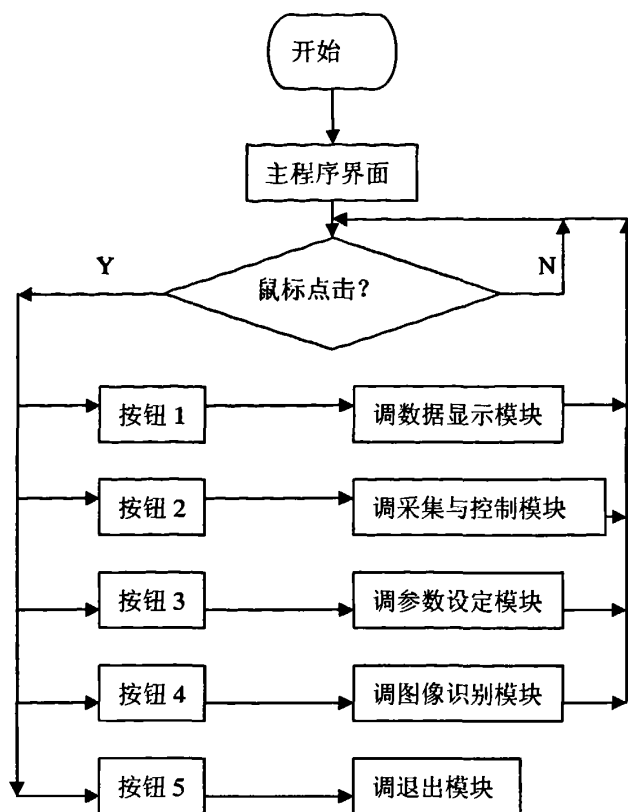


图 5.3 主程序流程图

### 5.3.2 功能模块程序设计

#### 1) 数据采集程序流程

在 PMAC 卡中，系统的某一属性是被存放在一指定的地址空间中的。例如一号电机实际位置，实际速度分别存放在地址：D: \$002B 和 X: \$0033; 0, 24, S 中。数据缓冲区用来存放采集来的数据。以一定的周期采集这两个地址中的数据，并存放至缓冲区中，最后就能得到一号电机在这段时间位置、速度的变化情况。

PMAC 卡的数据采集周期为伺服周期的整数倍（伺服周期为 1.28ms），这个倍数由变量 I19 决定。PMAC 卡能同时采集 24 个地址的数据，这 24 个地址由 I24~I44 24 个 I 变量决定。变量 I20 为选择标志，例如 I20=0000, 1010, 0000, 0100, 000B，则只采集 I25, I27, I30, I38 中的数据。

数据采集流程图见图 5.4 所示。

#### 2) 中断采集程序

在数据采集的同时，为了提高控制的及时性和反应灵敏度，利用了 PC 机系统内部的 08H 号中断向量来进行数据的中断采集。

中断采集程序流程图见图 5.5 所示。

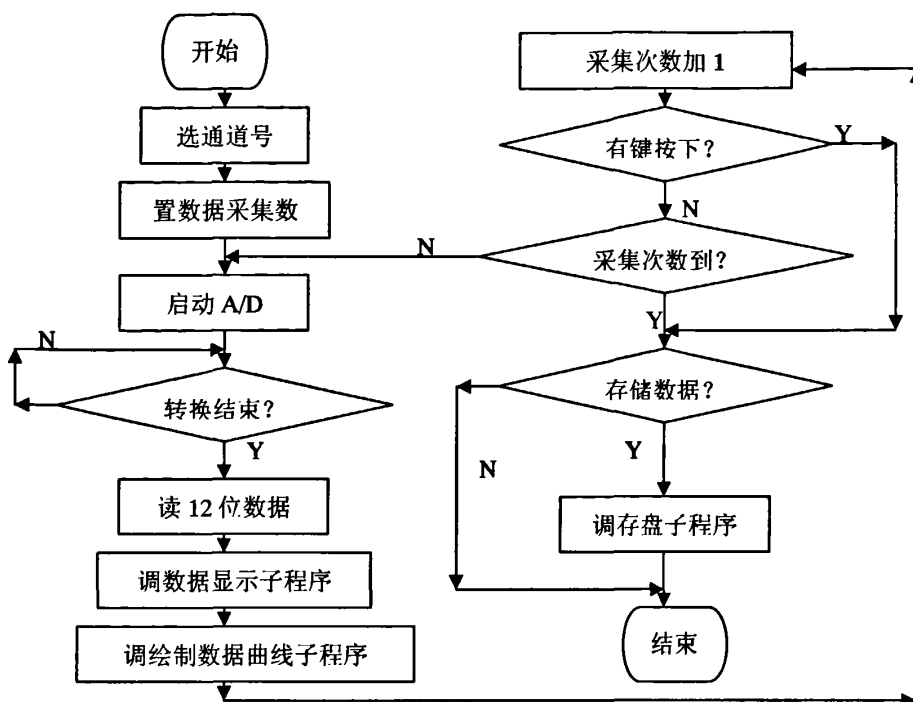


图 5.4 数据采集程序流程

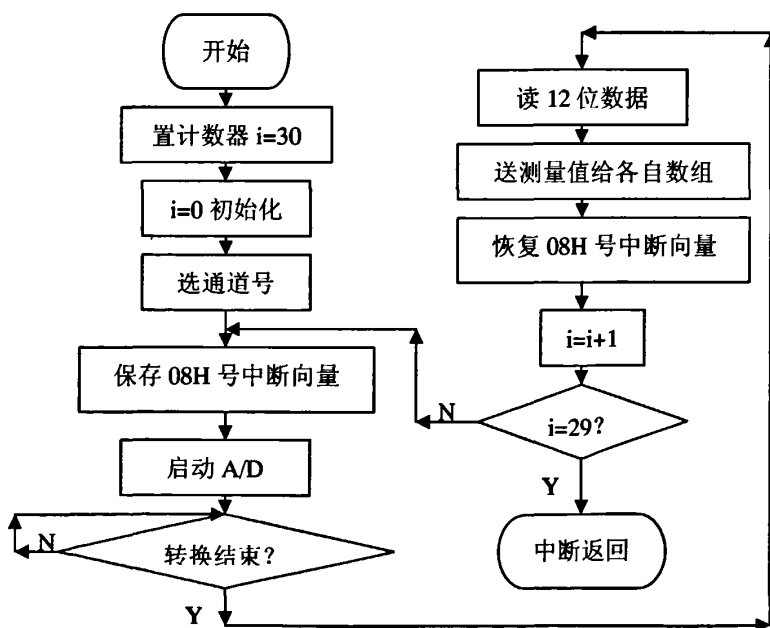


图 5.5 中断采集程序流程

### 3) 数据控制程序

程序流程见图 5.6 所示。同样因为控制的高度即时性的需要，在数据采集与控制的程序模块中，把图形模式转换为文本模式，以最大程度地节约计算机的资源，使其对控制操

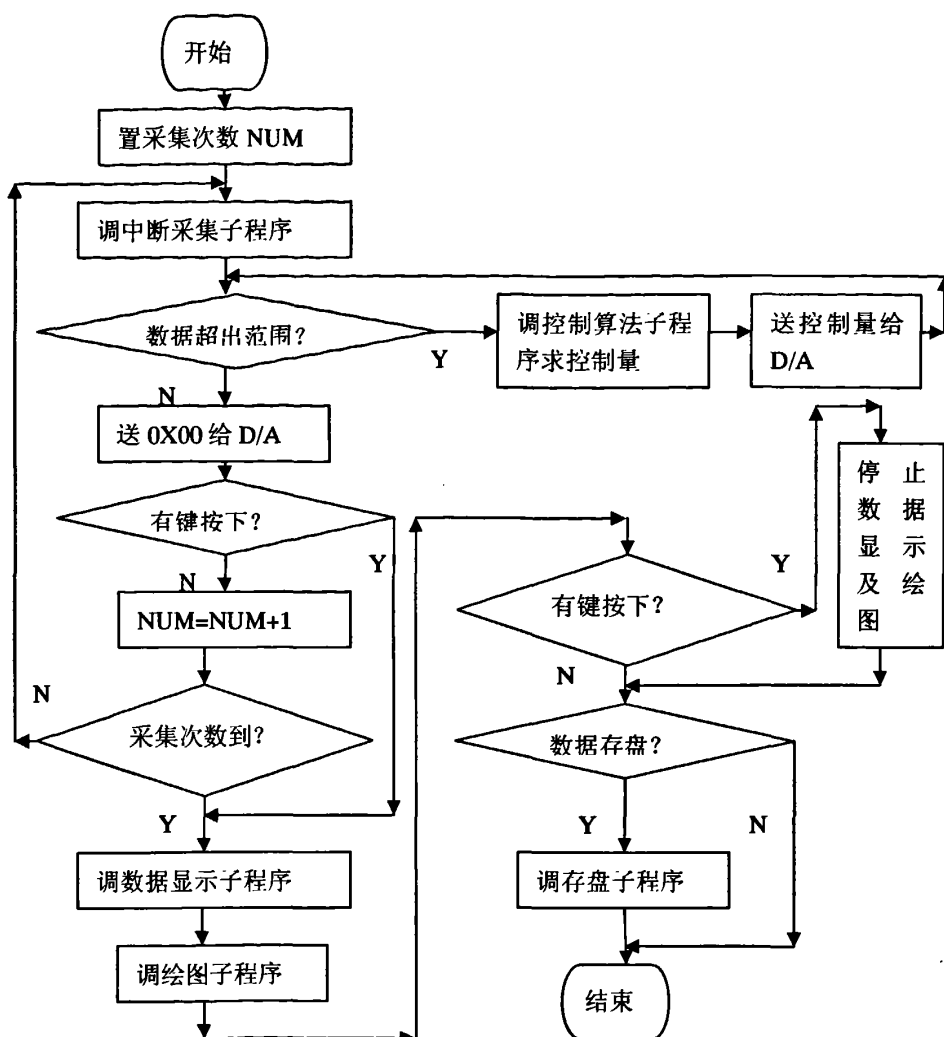


图 5.6 数据采集与控制程序流程

作的判断及控制量的计算过程尽量缩短。为直观地观察控制效果，待数据采集与控制操作完成后，再将文本模式恢复为图形模式，使数据显示和曲线绘制在各自的信息框中同时进行。

## 5.4 本章小结

本章着重介绍了计算机控制系统软件的设计方案，采用了模块化的设计方法进行总体设计，并给出了软件设计的总体规划框图以及程序的主要功能模块的程序流程图。



## 6 系统的设计与实现

### 6.1 系统开发软件简介

#### 6.1.1 C++ Builder 介绍

Borland C++ Builder 是 Interprise (Borland) 公司推出的基于 C++ 语言的快速应用程序开发 (Rapid Application Development, RAD) 工具, 它是最先进的开发应用程序的组件思想和面向对象的高效语言 C++ 融合的产物。从 1997 年 C++Builder 1.0 投入市场以来受到了广大计算机程序员的青睐。到目前, C++Builder 的版本已从 1.0 发展到了 6.0。它充分利用了已经发展成熟的 Delphi 的可视化组件库 (Visual Component Library, VCL)。每个版本的变化都增添了许多新的应用功能, 当前流行的 6.0 版本, 已经成为一个非常成熟的可视化应用程序开发工具<sup>[33]</sup>。

#### 6.1.2 C++ Builder 的特点

##### 1) 高性能简单易学的 C++ 开发工具

C++Builder 6.0 为使用者提供了 300 多个软件应用组件, 辅助开发人员轻松开发 Windows 应用程序。

C++Builder 将 Windows 底层隐藏起来, 提供给用户的是简洁使用的界面, 用户只需构造自己的窗体, 编写与应用程序功能密切相关的控制代码, C++Builder 会自动生成常规的 Windows 应用程序必须的部分, 大大减少了程序员的代码量。由于 C++Builder 是基于 C++ 的, 它具有高速的编译, 连接和执行速度。

##### 2) 程序的可维护性高

代码量的大量减少, 尤其与应用程序并非密切相关的 Windows 底层知识的隐藏, 都使得使用 C++Builder 开发的应用程序更加可读, 从而提高了可维护性。传统的 C/C++ 开发工具是以应用程序的结构为中心, 而 C++Builder 则是以组件为中心, 这样就使 C++Builder 具有比较传统开发工具更高的可重用性。

##### 3) C++Builder 是优秀的可视化应用程序开发工具

所谓可视化是指开发图形用户接口的方法, 这种方法就是建立用户接口时不必编写程序来描述输入输出接口的外观的配置, 只要使用工具箱中的工具, 在设计阶段就可编写出所见即所得的用户要求界面。

##### 4) 双编译引擎

C++Builder 内部带有两个编译引擎, 使 C++Builder 可以同时编译 C/C++ 语言和 Object pascal 语言。在 C++Builder 内部使用最新地 Borland C++Builder 5.02 版的 C/C++ 语言编译器用来编译 C/C++ 语言代码, Borland C++5.02 编译器的良好性能使 C/C++ 代码得到了很

好的优化。同时在 C++Builder 还有一个可以编译 Object Pascal 代码的 Delphi 编译器，也就是说，C++Builder 可以编译 Delphi 程序，并同时也可以编译由 VC++ 所设计的程序。

### 5) C++Builder 具有强大的数据库应用程序开发功能

C++Builder 提供了强大的数据库处理功能，除了支持 Microsoft 的 ADO (Active Data Object) 数据库连接技术，还提供了一种自己开发的成熟的数据库连接技术——BDE (Borland Database Engine) 数据库引擎。C++Builder 提供了对数据库的支持，使用 C 语言和 C++Builder 的组件，就可以编写出数据库处理程序。

在 C++Builder 中提供了两组组件专门用于数据库控制，这些控件的功能是很强大的，直接使用这些控件，就可以生成一个功能比较完善的数据库应用程序，结合 Borland 数据引擎 BDE/IDAPI 可以实现更强的功能。C++Builder 所提供的 Borland 数据引擎是一种非常成熟的数据库连接技术，提供了三种数据库访问技术：

直接存取 Dbase、FoxBase、FoxPro 和 Paradox 等文件型数据库。

提供一个标准的 ODBC 接口，通过整个接口可以访问任何一种支持 ODBC 的数据库。

提供一个高效的 SQL Link 数据库驱动程序，允许直接存取 Oracle、Informix、Sybase。MS SQL Server、DB2 以及 Borland 和 InterBase。

### 6) C++Builder 具有强大的网络编程能力

### 7) 对中文的支持

## 6.2 系统软件设计与实现

### 6.2.1 主要类简介

该数控系统软件是在 Borland C++Builder 6.0 开发平台上，利用 Windows API 函数库就可以开发出适合自己要求的应用程序来[35]。这里对该数控系统软件用到的主要类以及派生的类给予简单介绍，具体实现可以参考相应的技术文档：

#### 1) CMainFrame 类

该类是应用程序的主框架类，用于构造整个应用程序的主体框架，以及相应的消息处理函数。其中 OnCreateClient()函数在程序启动时自动调用，用以构建客户区内的各个功能模块。

#### 2) CPMACView 类

该类是应用程序自动创建的视图类，负责管理所有与视图有关的工作，包括图形的绘制、放大与缩小、清屏，以及图形仿真等。

#### 3) CJog 类

该类从 CFormView 中派生，负责系统的手动控制模块，也是系统与 PMAC 卡通讯的重要模块之一。通过该模块用户可以实现 X 轴或者 C 轴的正转、反转、回零等操作。为了方便，在该类中设置了 NC ON 和 NC OFF 两个开关，由它们来开启或关闭系统与 PMAC 卡的通讯。NC ON 开关负责与 PMAC 卡建立通讯联系，下载相应的变量设置程

序和 PLC 程序, 开启控制面板。NC OFF 开关正好相反, 负责关闭相应的 PLC 程序, 关闭控制面板。在该类中, 设置了一个多媒体计时器, 每隔 10 毫秒从 PMAC 卡中读取需要采集的多种数据, 并且进行相应的处理和转换后赋给相应的变量。

#### 4) CXCPos 类

该类从 CFormView 中派生, 主要负责实时动态的显示 X 轴和 C 轴的位置。在系统启动之后, 该类读取通过 Cjog 类的多媒体计时器从 PMAC 卡中采集回来的数据, 并进行相应的处理, 实时显示在软件界面上。通过该模块, 用户可以实时的了解到当前各轴的进给位置。

#### 5) CControlPanel 类

该类从 CFormView 中派生, 是辅助模块之一, 主要包括数据处理、图形显示、系统设置等多种操作。通过该类, 实现了将系统各种常用的功能放置与人机界面上, 极大的方便了用户快速进行各种操作。

#### 6) CManuInfo 类

该类从 CFormView 类中派生, 负责实际加工模块, 主要包括查找加工代码、加工算法的选择以及加工过程的控制等, 是系统与 PMAC 卡通讯的重要模块之一。

#### 7) CDpram 类

该类封装了 PMAC 卡对双端口 RAM 的操作函数, 可以很方便的实现对各个轴的位置、速度、跟随误差等很多功能函数的调用, 方便了数据采集程序的编写。

#### 8) clPlot 类

该类封装了曲线绘制函数, 利用该类可以很方便的实现各个轴的位置、速度、跟随误差曲线的实时显示, 以便观察和监测加工过程的状态。

#### 9) CList 类

该类封装了数据查看和曲线绘制函数, 利用该类可以很方便的实现对有关凸轮数据和加工数据的查看与验证, 并且可以以图形的方式查看。

### 6.2.2 系统实现

控制系统系统建立了一定的安全机制, 设置了登陆界面, 在系统启动时需要正确的输入用户名和密码才能进入程序主界面, 如图 6.1 所示。此外, 登录部分还调用 initialcomo 函数进行通信端口的初始化, 并进行相应的错误处理。其源程序和相应的解释如下:

```
void_fastcall Tloginform::Button1Click(TObject*Sender)
{
    int commfail;
    int tag=1; //测试通信端口是否正常
    char*Buf;
    inr mes[8];
    if((Edit1->Text=="")&& (Edit2->Text=="")) //在这里检测用户名密码
```

```

{
    int hfile;//该整数用于返回打开文件的结果，如果结果为-1，就表示打开文件失败；
    char*pdt=DateTimeToStr(Now()).c_str();//获取用户登录时候的系统时间
    Show Message(Pdt);// 显示用户登录时候的系统时间
    if(FileExists("denglu.txt")) //判断文件是否存在，如果不存在就显示“文件不存在!”
    的信息

```

```

{
    hfile=FileOpen("denglu.txt", fmOpenReadWrite);//打开一个存在的文件
    if(FileSeek(hfile, 0, 2)==1)
        //找到文件的尾部，然后在尾部添加用户名称和用户登录时间
    {
        Application->MessageBox("cannotwrite", "Message Box", MB_OK);
    }
    if(FileWrite(hfile.&Pdt.strlen(Pdt))==1)
    {
        Application->MessageBox("cannotwrite", "Message Box", MB_OK);
    }
}
else
{
    showMessage(" 文件不存在!");
}
if(initialcom()==false) //用户登录成功后，对通信断口进行初始化
{
    showMessage("通信口故障!");
    if(Application->MessageBoxA("结束监控?", "提示信息", MB_YESNO)==mrYes)
        //close_comm();
    Application->Terminate();
}
this->Hide();
Form1->Show();
}
else//如果用户 3 次登陆失败，那么就直接退出，并向用户发出“非法用户”的警告
{
    //用户名密码检测未通过

```

```

if(count<2)
{count++;//三次不对后自动退出
showMessage("请再试一次");
}
else
{ShowMessage("你是一个非法用户!请自觉离开!");
Application->Terminate();
}
}
}
}

```

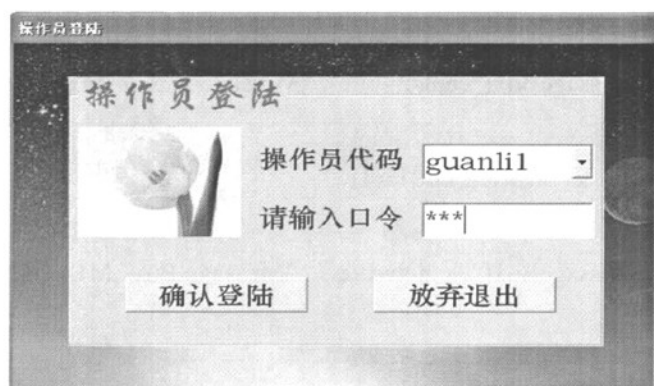


图 6.1 用户登录界面

在输入了正确的操作员代码及口令后，点击“确认登陆”即可进入程序的主界面，如图 6.2 所示。程序的主界面主要由参数设定，电机参数显示，图像识别参数，运行情况显示等功能模块组成。点击“进入系统”即可进行操作。

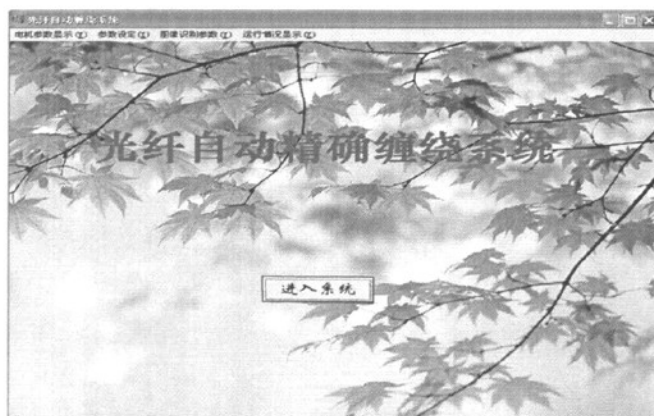


图 6.2 系统主界面

### 6.2.3 参数设置功能的实现

每次用户开启监控程序的时候，程序会自动调入上次设定的工艺参数。用户也可以对

运行的参数进行预先设定。当设定完成后用户可以保存参数。

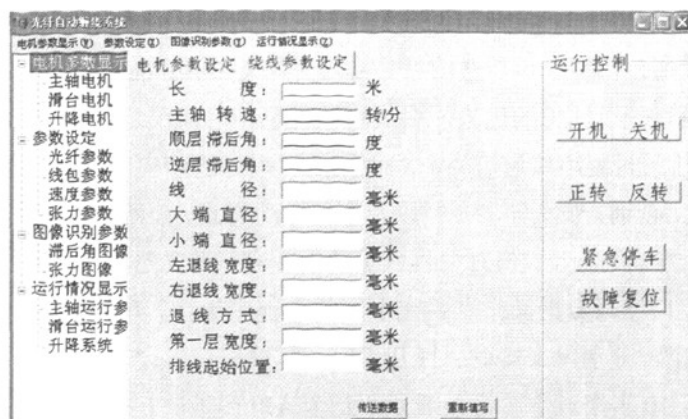


图 6.3 参数设定界面

相应的函数及功能分别如下：

1) `para--init()`: 实现参数初始化。当用户开启程序时，从 `form.txt` 中读取上次保存的参数作为缺省参数。

2) `set--Para()`: 用于接受用户的设定并将这些设定传递给下位机。

3) `para()`: 函数用于在用户设定参数的时候，将下位机的状态设定为监视状态，当用户设定成功后，才将下位机的状态转为运行状态。所以，用户可以在机器运行的时候改变参数而不必重新启动机器。

4) `para-store()` 用于储存用户的设定到 `form.txt` 中。它和 `Para--init()` 的使用是基于用户在很长的一段时间里可能让生产线作相同的事情，从而很少作参数修改这件事。同时，如果需要，由于 `form.txt` 的数据是添加而不是覆盖的写入方式，可以根据用户的需要对 `form.txt` 文件里面的数据进行统计。

## 6.2.4 数据采集

在工业控制领域，计算机经常通过串口实现与单片机、DSP、PLC 等通信，并且得到了广泛的应用<sup>[40]</sup>。数据采集系统需要 PC 机与现场数据采集仪器进行控制、监测和数据交换<sup>[41]</sup>，经常要对计算机的端口进行读写操作。`BorlandC++Builder` 是一种新颖的可视化编程语言，利用 `C++Builder` 语言编写应用程序、实现交互界面、数据采集和端口操作，不但功能强大，而且应用灵活。使用 `C++Builder` 的 VCL 组件可以快速开发出优秀的 Windows 应用程序，但遗憾的是 `C++Builder` 自身没有提供串口通信的命令或组件，不过利用 `ActiveX` 控件或者第三方案件来实现串口通信程序设计就完全可以弥补这一遗憾。在 `C++Builder6` 环境下串口通信的 3 种实现方法：一是采用在 `C++` 程序中嵌入行内汇编，直接对 UART 串口通信硬件进行操作，实时性最高，但编程需要了解硬件。二是利用 VB 下高性能的 `ActiveX` 控件 `MSComm` 编程，简单、实时性不错，二进制接收模式编程稍有点复杂。三是利用 Windows 的 API 通信函数，编程较复杂，但灵活性最大，实时性较高。

但无论用哪种方法来开发串口通信程序,其实现步骤差不多。其中使用 API 通信函数实现步骤稍微不同,它是先打开串口,再进行串口参数的配置。

Windows API 通信函数的串口通信程序实现方法 C++Builder 在调用 Windows API 函数方面有着其它语言无可比拟的优势,多线程编程也相对简单。利用 Windows 的 API 通信函数,用户可以任意封装串口通信类,编程灵活,串口通信实时性较高。串口通信有四种方式:同步方式、查询方式、异步方式以及事件驱动方式,前两种方式实时性稍差一点,编程简单;后两种方式则相反,但对编程人员要求较高,需要熟悉线程和消息驱动机制等相关知识,因为串口读写数据操作需要在不同的线程中进行。串口通信有关的 Windows API 函数共有 26 个,分别用来实现:打开串口、配置串口、读写数据和关闭串口操作,不过常用的也只有 10 多个。下面将详细介绍几个 API 函数。

### 1) CreateFile 函数

在 Windows 环境下串口的打开将如同文件打开一样,而相应的操作函数如下所示:

```
HANDLE CreateFile(
    LPCTSTR lpFileName, //文件名指针
    DWORD dwDesiredAccess, //存取模式
    LPSECURITY_ATTRIBUTES lpSecurityAttributes, //共享模式
    LPSECURITY_ATTRIBUTES lpSecurityAttributes, //Security Attributes 结构指针
    DWORD dwCreationDistribution, //指定打开文件方式
    DWORD dwFlagAndAttributes, //文件属性:0
    HANDLE hTemplateFile //带属性复制的文件:0
)
```

若成功打开则串口通信端口即可使用,并返回一个 Handle 值,程序中将使用此 Handle 值进行相关的串口操作。

### 2) GetCommState 函数

读取显示设置参数的 GetCommState 函数形式如下所示:

```
BOOL GetCommState(
    HANDLE hFile, //通信设备的句柄,此值即为使用 CreateFile 函数后所返回的值
    LPDCB lpDCB, //设备控制块结构的地址,在此是与串口相关的参数;
);
```

### 3) SetCommState 函数

设置串口状态的 SetCommState 函数形式如下所示:

```
BOOL SetCommState(
    HANDLE hFile, //通信设备的句柄,此值为使用 CreateFile 函数后所返回的值;
    LPDCB lpDCB, //设备控制块结构的地址;
);
```

#### 4) WriteFile 函数

写入串口数据的 WriteFile 函数形式如下所示:

BOOL WriteFile(

HANDLE hFile, //要写入文件的句柄

LPCVOID lpBuffer, //写入文件中的数据的指针, 指向欲发送的数据的地址

DWORD nNumberOfBytesToWrite, //写入的字节数

LPDWORD lpNumberOfBytesWritten, //写入的总字节数的指针

LPOVERLAPPED lpOverlapped, //Over-lapped I/O 结构的指针, 通常设为 NULL 表示

不使用

);

数据通信程序实现的主要代码有:

写控制命令

Comm1->DtrControl=DtrEnable //控制串口的 DTR 端, 表明串口数据为发送给电台的命令

令

If(Comm1->WriteDataEmpty)

Comm1->WriteCommDa

(SendBuffer, Length); //SendBuffer 为数据指针, Leng 为数据长度

发送数据或命令

Comm1->DtrControl=DtrDisable; //控制串口的 DTR 端, 表明串口数据为通过电台发送的

数据

If(Comm1->SendDataEmpty)

Comm1->WriteCommDa

(SendBuffer, Length);

收到的串口数据在 OnReceiveData 事件中处理。

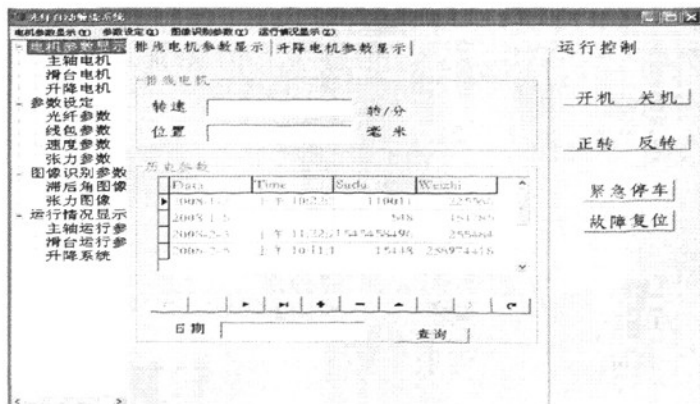


图 6.4 电机参数采集显示界面



### 6.2.5 数据管理

数据管理包括数据的内存管理和数据的存储,数据内存管理采用 BorlandC++Builder 的 Tlist 对象实现,Tlist 对象用于维护各种类指针的索引,这些索引本身存有指向对象的指针,是 BorlandC++Builder 中用于实现动态链表的对象能够在运行时修改。

监控系统的各种数据包括电机运行参数、实时数据、报警数据、张力数据、滞后角等记录数据都保存在数据库,数据库采用 Borland C++Builder 中的 Paradox 数据库,数据库引擎采用 Borland 数据库引擎 BDE(BorlandDatabaseEngine),BDE 是直接在 VCL 下的一个层次,允许不同的数据库格式无缝地使用 VCL,BDE 对 Paradox 数据库格式可以直接处理,因此处理速度快,使用方便。采用数据库方式进行数据存储,对数据的查询、增加、删除等操作也容易实现,便于实现系统的功能。

### 6.2.6 图像显示功能的实现

图像的显示界面统统由一个个自编的作图函数来完成,作图时要用到两个很重要的数组:state[]和 needdraw[]。State[]里面保存的是整条生产线的状态,里面的数据是通过上位机在查询线程中不断地查询下位机而得到的,生产线的状态的每一改变,state[]里的数据都会作相应变化。也就是说,在任何时候,根据 state[]数组里面的数据,可以画出整个生产线的图形。而 needdraw[]则只是储存了与需要更新的图形数据。

作图是这样实现的,先调入一张包含内容最少而且所包含的内容都是不会变的固定位图。然后在此位图的基础上根据下位机传来的数据(保存在 state[]和 needdraw[]数组中)在适当的位置正确地画图,画图时各项数据都是预先测试好的,储存在数组中,画图时根据下位机的数据选择正确的位置数据,画出图形,而要擦去某一位置的图形时,在该位置再画一遍原来的图形,只是此时画图的颜色变成无色,这样就把原位置的图形给擦去了。

## 6.3 本章小结

本章重点介绍了上位机人机交互界面的各个部分的实现。它由登陆部分,图形显示部分,参数设定部分以及数据采集管理部分组成。完成用户登录,参数初始化,参数存储以及运行状态显示等功能。

## 7 结论

### 7.1 结论

在阅读大量文献的基础上,本文系统的综述了近几年来光纤维绕新技术的发展,详细介绍了光纤制导研究的背景和发展概况,分析和评论了前人对光纤维绕的研究情况,提出了研究本课题的必要。

整个设计开发历时一年多,涉及机械、电子、自动控制等多方面内容。从最初的需求分析,查阅国内外文献资料,研究机械结构设计和控制电路得出控制系统的流程、控制量的提取等,到软件的编写调试。

这期间主要的完成了以下工作:

#### 1) 明确项目要求

从分析系统的要求出发,定性和定量分析了影响光纤精确缠绕的因素。

#### 2) 结构的选择

在众多的方案中,经过研究分析与实验最后选择了一个最为适合的方案。用小型步进电机和交流电机为动力,组成了排线机构和绕线机构。并从实际问题出发,选定了缠绕控制系统设计方案,在此基础上确定了计算机控制系统的设计方案。

#### 3) 提取了合理可行的系统控制参数

在对文献的大量阅读中,根据光纤缠绕较普通纤维的特殊性及其军事上的高精度要求,本文研究了光纤缠绕控制系统的特点,对系统的控制量进行了详细分解,提取了合理可行的系统控制参数——绕轴和丝杠电机的转速。

#### 4) 给出了通用、简便的通讯模块,完成了上下位机之间的通讯

#### 5) 软件的设计

用软件工程原理,采用结构化程序设计的思想,用高级语言完成了软件。首先对软件进行总体设计和模块划分,使得程序具备了可读性及可继承、扩展。用 C++Builder 语言完成代码编写,程序代码简洁,效率高,执行速度快。以提高控制精度为目标,完成了光纤维绕控制的系统软件设计。程序主要由数据采集、控制算法等构成。能够稳定、协调地运行及实现设计功能。

### 7.2 展望

控制算法是控制系统的核心,也是系统设计的重点。系统的不同,所用的控制算法也不同,没有一种算法可以始终满足系统的要求,因此,在控制器的设计中,不仅要掌握各种基本算法的优点和缺点,还要将不同的算法结合起来,来弥补不同算法的缺点,才能达到较好的控制性能。希望能研究出适应能力更强的系统。

基于已完成的内容,我们下一步还可以将软件系统进一步完善:进一步根据设备特性将功能进行封装,省去大量流程图的辅助;现在的界面虽然简洁,但缺乏特色,还需要更好的满足用户要求。作为一个应用系统来说,还比较脆弱,对于软件运行过程中许多异常出错没有处理或消息提示,还需要进一步测试和改正。

由于时间仓促和作者的学识水平有限,论文中难免有错误和不当之处,恳请各位前辈、各位专家、各位同行批评指正。

## 参考文献

- [1] 谭显裕.光纤制导导弹技术发展概述[J].火力与指挥控制.2000 vol.25 No.1 p:8-13
- [2] 陆永红, 钟生新.光纤技术及其军事应用[J].光电子技术.2004.3
- [3] 白木,周洁, 王泽和.光纤制导导弹综述[J].航空兵器.2003No.3
- [4] 刘永昌.光纤制导关键技术分析和研究[J].应用光学.1994 第三期
- [5] 林玉琛.光纤导弹技术及其应用和发展[J].现代防御技术.1998.5
- [6] 崔得东.光纤制导系统光损耗动态范围测试研究[J].弹箭与制导学报.2003
- [7] J.Y.Hung and H.V.White.“Precision winding of fiber optic filament,part 2 winding control” [J].IEEE Trans. Ind. Electron,to appear.Aug.1992
- [8] homas L.De Fazio.”Development issues for optic fiber coil winding”Andre Sharon, ”Development of an automated fiber optic winding machine for gyroscope production” [J].Robotics and computer integrated manufacturing,2001
- [9] 高锴.光纤系统[C].北京:国防工业出版社,1994
- [10] 胡君良.制导光缆线包光附加损耗分析与计算[J].应用光学,1998 年第 6 期
- [11] L.M.Sheppard,”The revolution of filament winding,” Advanced Materials & Processes Incorporating Metal Progress[J]. vol.132,no.7,P.31-35, July 1987
- [12] John Y-Hung and H·Van white,“precision winding of fiber optic filament,part1:winding characteristics[J].IEEE Trans.Ind.Electron, vol.39, no.3,June 1992.
- [13] 王淑芬.独眼巨人导弹研制动态[J].飞航导弹,2001
- [14] 施德恒.光纤制导导弹述评[C].空军第一航空学院基础部,2002
- [15] 陈静.纤维缠绕机计算机控制系统的设计及实现[J].天津工业大学,2005
- [16] 李国伟.纤维缠绕机的发展状况[J].玻璃钢/复合材料,1988
- [17] 李国伟等.微机控制纤维缠绕机的主机设计[J].机械工程师,1986
- [18] 李国伟等.微机控制纤维缠绕机运动规律的研究[J].哈尔滨工业大学学报,1987
- [19] 刘晓彦.玻璃钢管道缠绕计算机控制系统的研制[D].硕士学位论文,西北工业大学,2000
- [20] 彭吉虎,吴伯瑜.光纤技术及应用 [M].北京:北京理工大学出版社,1995.6
- [21] 陈康宁,王馨,李天石.机械工程控制基础 [M].西安:西安交通大学出版,1997.11
- [22] 胡寿松.自动控制原理 (第四版) [M].北京:科学出版社,2001.2
- [23] 机械工程手册编辑委员.电机工程手册 [M].北京:机械工业出版社,1982 第 1 卷:基础理论
- [24] 徐元昌.机电系统设计 [M].北京:化学工业出版社,2005, 5
- [25] 成大先.机械设计手册:机械传动: 单行本 [M].北京:化学工业出版社,2004

- [26] 机械设计手册编委会.机械设计手册：新版.第2卷 [M] 北京:机械工业出版社,2004
- [27] 丁志刚.直线步进电动机的原理控制和应用 [M] .北京:机械工业出版社,1994.
- [28] 王春香.精密张力控制系统及其控制精度的研究[J].仪器仪表学报.2000年8月
- [29] 王春香等.纤维缠绕过程中的张力分析[J].复合材料学报,2002年6月
- [30] 薛钧义,武自芳.微机控制系统及其应用 [M] .西安:西安交通大学出版社,2003, 2
- [31] 王勤.计算机控制技术 [M] .南京:东南大学出版社,2003
- [32] 王春香.微机数控纤维缠绕机精密张力控制系统研究[D].博士学位论文,哈尔滨工业大学,1999
- [33] 胡波,张昆. C++Builder 6 编程实例教程 [M] .北京希望电子出版社,2002
- [34] 雷聚超,高巍. C++Builder 编程技术 [M] .西安地图出版社,2003
- [35] 余明兴,吴明哲,黄世阳. Borland C++Builder 6 程序设计经典 [M] .科学出版社,2004
- [36] 吴逸贤,吴目诚.精彩 C++Builder 6 程序设计 [M] .科学出版社,2003
- [37] 席卫文,张春晓,李光明. C++Builder 6 程序设计与实例 [M] .冶金工业出版社,2003
- [38] Joyce Van de Vegte 著.数字信号处理基础 [M] .电子工业出版社,2003
- [39] 马鸣锦,赵秋霞,曾光裕编著.高性能个人计算机硬件结构及接口 [M] .国防工业出版社.2001
- [40] 李朝青.单片机原理及接口技术 [M] .北京航空航天大学出版社,1999
- [41] 何博 pc 原理与接口技术的研究 [M] .华中科技大学,2005
- [42] M.Farsi, K.Ratctiff, Manuel Barbosa."An overview of Controller Area Computing & Control engineering journal" [J].Jun 1999
- [43] Brian Wilson.Filament winding-the jump from aerospace to commercial frame[J].SAMPE Journal.1997,33(3):25-32
- [44] John E Green: Overview of filament winding[J].SAMPE Journal,2001,37(1):7-11
- [45] Robert Grand, James Harris, Michael Higgins. Composite over-wrapped pressure vessels for space applications[J].SAMPE Journal,2003,
- [46] Evans R N.Development of the filament wound composite motorcase for the compact kinetic energy missile[J].SAMPE Journal,2000,36 C4):42-48
- [47] Kepi A, Corona-Bittick, Everett Baker. Filament winding of the navy composite storage module[J].SAMPE Journal,2001,37(1):52-56
- [48] Ulrich Rembold. Computer-Integrated Manufacturing Technology and System.Marcel Dekker, Inc, 198

## 攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 尹若丹,马保吉. 基于 VC++6.0 的 PC 机和单片机的接口设计[J]. 电脑知识与技术: 学术交流.2007,(7).

## 致 谢

感谢导师马保吉教授的关心、指导和教诲。老师追求真理、献身科学、严以律己、宽以待人的崇高品质对学生将是永远的鞭策。

作者在攻读硕士学位期间的工作自始至终都是在马保吉教授全面、具体的指导下进行的。老师渊博的学识、敏锐的思维、民主而严谨的作风，使学生受益匪浅，终生难忘。

感谢朱育权教授、晋小莉教授和宁生科教授在课题研究中所给予的帮助。

感谢父母和家人的支持。

感谢我的学友和朋友们。