

东北大学

硕士学位论文

基于CAN总线和CANopen协议的运动控制系统设计

姓名：张贺

申请学位级别：硕士

专业：控制理论与控制工程

指导教师：杨光红

20061201

基于 CAN 总线和 CANopen 协议的运动控制系统设计

摘 要

本论文以“血管造影仪的研究与开发”为背景，对血管造影仪的运动控制系统进行了深入研究，提出了基于 CAN 总线和 CANopen 协议的运动控制系统的整体设计方案，进行了系统各智能节点的硬件和一些相应软件的设计开发。同时本文对无刷直流电机进行了研究，提出了电机控制算法的改进方案，最终实现了运动控制系统的各项功能。

本论文采用 COPLEY 驱动器作为驱动控制节点的电机驱动，设计了驱动器外围电路，完成了驱动控制节点的设计，实现了 CAN 接口、RS232 接口的通讯及驱动器与电机的对接。在研究了 PIC18F458 单片机和 TLC3574A/D 转换器的功能的基础上，设计了位置反馈节点。通过电源隔离、硬件滤波、CAN 通讯、A/D 数据采集等模块功能的实现，完成了实际位置模拟信号经滤波、采集、模数转换模块成为数字信号，再经 SPI 接口到达单片机，最后经 CAN 总线传给上位机的反馈过程。在硬件电路设计的基础上，完成了位置反馈节点软件的设计工作，使其成为完整的位置反馈系统。运动状态显示节点完成了运动状态的显示。通过四个 4—16 译码器组成的译码电路实现片选，单片机控制液晶模块的使能、初始设置和命令信息的传递，实现了运动状态的显示。

为了改进电机的控制效果，本文提出了采用 smith 预估计器来解决系统的时滞问题和采用模糊自整定 PID 控制器使控制参数最优，并利用 MATLAB 实现了仿真。仿真结果表明两种改进算法的有效性，提高了系统的品质性能。

本论文理论与实际相结合，设计了血管造影仪运动控制系统，对提出的方法进行了实验检验，实验的结果表明本文设计的软、硬件结构合理，控制精度高，响应快，可以满足生产使用的需求。

关键词： CANopen 协议；位置反馈节点；Smith 预估计器；模糊自校正控制器

Design of motion control systems based on CAN bus and CANopen protocol

Abstract

With the background of “The Research And Design Of Cardio Vessel Apparatus” , this thesis presents a study on motion control system of Cardio Vessel Apparatus. An overall scheme of motion control system is proposed, which is base on CAN bus and CANopen communication protocol, and gives a design development of each module of the hardware system and some modules of software system. The thesis also studies the brushless DC motor (BLDCM), proposes the improved project of control method of motor, and achieves all functions of the motion control system.

In this work, the COPLEY driver is used in the motion control system to design the exterior circuits of the driver, fulfill the designing task of driver control node, achieve the CAN interface communication, RS232 interface communication, and the interface between motor and driver. Based on the study on PIC18F458 series SCM and TLC3574 series analog-to-digital converter, the position feedback node is designed. Based on functions of the module of isolation power source, hardware filter, CAN communication and A/D data collection, the system achieves the process that the actual position signal is converted to digital signal by using filter module, sampling module and A/D conversion module, then the digital signal reaches to the SCM through the SPI interface and is transferred to the PC by CAN bus in the end. Based on hardware circuit designing, the software designing task of position feedback node is fulfilled, which makes position feedback system integrated. The motion state display node can show the motion state. The system can choose the CMOS chip by the coding circuit composed by four 4-line to 16-line decoders, the SCM control the enable state, initialization setting and conversion of command information so that the system achieves the display of motion states.

In order to improve the control effect, the thesis proposes to use the smith pre-estimator to solve time-lag problem of system and use fuzzy self-turning PID controller to make the control parameter optimization, the corresponding logic control system is simulated with MATLAB, The simulation show that the two improved methods are available and improve the system's quality.

With the combination of theory and practice, the thesis presents experiments to verify the

proposed methods based on motion control system of Cardio Vessel Apparatus. The results show that both the hardware and software structures are reasonable, the control accuracy is high and the response time is fast. The system is able to meet the requirement of practical applications.

Key words: CANopen protocol; position feedback node; smith pre-estimator; fuzzy self-tuning controller.

独创声明

本人声明所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。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诚挚的谢意。

学位论文作者签名：

签 字 日 期：

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

（如作者和导师同意网上交流，请在下方签名；否则视为不同意）

学位论文作者签名：张贺

导 师 签 名：高志红

签 字 日 期：2007.3.8

签 字 日 期：2007.3.8

第一章 绪论

1.1 选题意义

随着国民经济的发展及人们生活水平的提高,对医疗及保健设备提出了越来越高的要求。用于人体心、脑血管疾病诊断和治疗的大型 X 射线血管造影仪,已经进入各大医院和中等规模的医院。这种设备高端机基本上都从国外进口,其价格昂贵,使一般医院望而生畏。中低端机国内目前只有一家生产厂商,其产品仍有许多需要改进之处,且其产量远远不能满足需求。在这种国内国际形势下,研发经济、实用的数字血管造影仪对于改善我国医疗设备落后的现状具有重大意义。

1.2 放射介入科学在医疗上的应用

介入治疗属于放射学的范畴,主要是利用放射诊断学的器械技术、方法,利用多种导管技术,达到治疗疾病的目的。

介入放射学(IVR)这一术语是 1976 年 Wallace 首先应用,早在 1967 年 Margulis 曾使用介入诊断放射学 interventional Diagnostic Radiology 一词,1978 年出版了专门杂志,真正发展只有二十几年历史。随着放射影像学的不断发展,尤其是先进的数字减影技术(DSA)广泛应用,优良导管及栓塞材料使介入治疗得到了突飞猛进的发展,现已广泛应用于身体各个系统和多种疾病。故可以概括为介入医学(Interventional Medicine, IVM),随着新世纪的到来,这一门新学科,将会极为活跃,具有广阔前景。介入医学是医疗与工程技术学密切结合发展起来的。介入治疗技术具有微创、简便、安全而疗效快特点。过去用外科手术治疗一些疾病(如血管和瓣膜成形术、冠状动脉狭窄等),现已逐步被介入治疗所取代,为那些无法治疗和疗效欠佳的疾病,如:中晚期癌症、手术不能和难以接近的脑动静脉畸型等,提供了新的治疗方法,介入治疗现已成为同内外科相并列的三大诊疗技术之一。今后随着人们生活质量不断提高,对安全有效而微创的诊治技术的需求会不断加大,进入新世纪将会有更长足的发展。

1.2.1 数字减影血管造影技术介绍

数字减影血管造影(Digital Subtraction Angiography DSA),又称数字血管成像(Digital Vascular Image DVI),属电子计算机数字图像处理范畴^[3]。它是 70 年代继 CT 后开发的高科技之一。DSA 是用电子计算机将含碘浓度低的血管影像提高、增强到肉眼可见水平,并消除造影血管以外的组织影像,便于研究血管疾病或其他原因疾病所致异常。从广义而言,CT、MRI、B 型超声扫描及 DSA 均属数字图像处理范畴,均系利用计算机的数/

模转换作为主要手段来成像的，其不同点为成像初始阶段激发能源及能量不同。

1.2.1.1 数字减影 DSA 原理 (digital subtract art)

DSA 则是利用计算机处理数字化的影像信息，以消除骨骼和软组织影的减影技术，是新一代血管造影的成像技术^[4]。Nudelman 于 1977 年获得第一张 DSA 的图像。目前，在血管造影中这种技术应用已很普遍。DSA 是数字 X 线成像 (digital radiography, DR) 的一个组成部分^[5]。DR 是先使人体某部在影像增强器 (IITV) 影屏上成像，用高分辨力摄象管对 IITV 上的图像行序列扫描，把所有的连续视频信号转为间断各自独立的信息，有如把 IITV 上的图像分成一定数量的水方块，即像素。复经模拟/数字转换器转成数字，并按序排成数字矩阵。这样，图像就被像素化和数字化了，如图 1.1 所示。数字矩阵可为 256×256 、 512×512 、或 1024×1024 。像素越小、越多，则图像越清晰。如将数字矩阵的数字经数字/模拟转换器转换成模拟图像，并于影屏上显示，则这个图像就是经过数字化处理的图像。

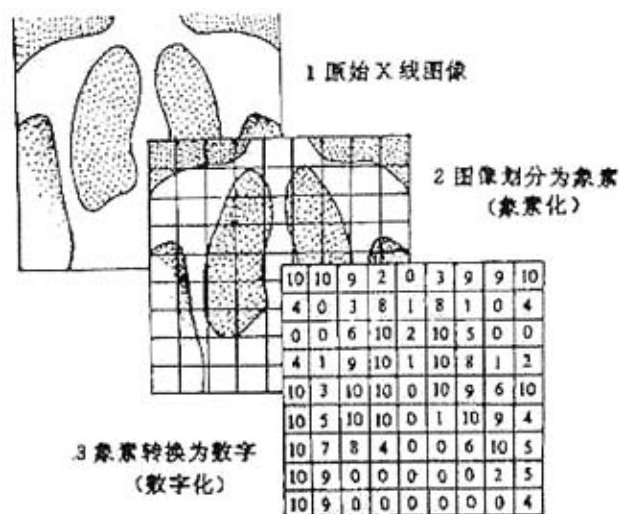


图 1.1 数字化图像

Fig. 1.1 Digital image

数字减影血管造影的方法有几种，目前常用的是时间减影法 (temporal subtraction method)，经导管内快速注入有机碘水造影剂^[6]。在造影剂到达欲查血管之前，血管内造影剂浓度处于高峰和造影剂被廓清这段时间内，使检查部位连续成像，比如每秒成像一帧，共得图像 10 帧。在这系列图像中，取一帧血管内不含造影剂的图像和含造影剂最多的图像，用这同一部位的两帧图像的数字矩阵，经计算机行数字减影处理，使两个数字矩阵中代表骨骼及软组织的数字被抵销，而代表血管的数字不被抵销。这样，这个经计算机减影处理的数字矩阵经数字/模拟转换器转换为图像，则没有骨骼和软组织影像，

只有血管影像，达到减影目的。

1.2.1.2 三维重组血管照相术

三维重组技术被普遍公认为评价 CT 与 MRI 图像的极有价值的工具。现在此技术已扩展到血管 X 线系列，用于创建计划介入程序和外科手术的新方法。这有助于医师决定为患者进行治疗的最佳方案以及对于选定方案的正确执行。此技术成功的关键在于，在 200 度的转动图像采集过程中进行一次造影剂的注射，然后在三维血管模型中重组数据。不需要操作者的干预，系统就能把图像数据从一个 200 度的预编程的减转采集系统传送到高级工作站。在那里，数据被迅速重组并显示为三维图像。实际上，软件对于血管分支的数据重组非常之快（包括了数据从血管系统向前进工作站传送的时间，全部过程在 2 分钟之内），因此这项功能可以应用于介入过程。在易于使用的处理工具的帮助下，可以在实际的任何角度下查看三维图像，包括在 X 线系统中不可能得到的角度，还可以进行精确测量。更令人激动的是，使用三维导航软件可以快速创建难以形象化的血管结构的实时动态演示。

1.2.1.3 DSA 检查技术

根据将造影剂注入动脉或静脉而分为动脉 DSA（intraarterial DSA，IADSA）和静脉 DSA（intravenous DSA，IVDSA）两种。由于 IADSA，具有很高的对比分辨力及具有瞬间减影、实时显像、检索再显和动态观察等功能，非常有利于造影和介入治疗操作，节省省力并能减少 X 线照射剂量，从而减少造影副作用。

IADSA 的操作是将导管插入动脉后，经导管注入肝素 3000~5000u，使全身低肝素化，以防止导管凝血。将导管尖插入欲查动脉开口，导管尾端接压力注射器，快速注入造影剂。注入造影剂前将 IITV 影屏对准检查部位。于造影前及整个造影过程中，以每秒 1~3 帧或更多的帧频，摄像 7~10 秒。经操作台处理即可得减影的血管图像。

1.3 ECV 系统介绍

1.3.1 ECV 系统的结构和组成

本课题所设计的 DSA 设备从形式和种类等的分类为大 C 臂多轴落地式中低档机。

ECV(Economic Cardio Vessel)系统由八个部分组成：

(1)、机架：俗称 C 臂，是心血管造影机标志性部件是整机最显眼部分。通过 C 臂的转动满足了心血管造影时对各种复杂投照角度的需要，显示了精确的拟真解剖位置。

(2)、导管床：具有纵向移动、水平移动、上下升降及床边控制的功能，使病者卧位舒适，术者操作方便。

(3)、高压发生器：功能达 100KW，具有高频逆变，有栅栏脉冲，自动曝光、自动调节最大电流 1000mA。

(4)、X 线球管：产生高品质的 X 线，采用阳极旋转 X 线管的方式。

(5)、影像增强器：将不可见的 X 线信号转变成可见图像，并将图像亮度提高数千倍，大大减低 X 线剂量。影像增强器是本机的关键部分。

(6)、电视摄像系统：将来自影像增强器的可见信号转换成电信号，再由模拟信号转换成数字信号；其中包括记录影像、阅读影像、检查影像，经处理很弱的 X 线转变为具有 100 万像素以上的清晰信号。

(7)、影像数字处理系统：实时图像处理：三档透视剂量并有智能透视技术，可将多帧透视图象叠加更正，间断脉冲式曝射而图像能连续无缺失。图像后期处理：有图像放大、电子光栅、动态回放、数字减影。

(8)、图像显示和外部数据存储：操作间内利用双显示器，一个为实时，另一个为参考屏。而外部数据存储系统：容量为 12000M，并配有麦迪克斯工作站可随时处理，可刻录和存储全部影像资料。

1.3.2 数字血管造影仪的主要用途

- 常规的 R/F、基本的血管造影图像。
- 在线数字剪影采集 (DSA)。
- 实时心脏电影采集 (CINE)。
- 提供术前、术后解剖生理方面的信息。
- 观察与肿瘤相关的不正常脉管系统。
- 心血管的介入治疗。

1.3.3 运动控制系统介绍

运动控制系统是整套 ECV 系统的重要组成部分，是 ECV 系统的运动实体和运动中枢的结合体，其运动效果的好坏直接影响着图像采集的优劣。本系统采用 CAN 总线作为系统的通讯总线，智能节点作为功能单元子系统，各子系统又细分为各种功能模块。图 1.2 为运动系统实体模型。

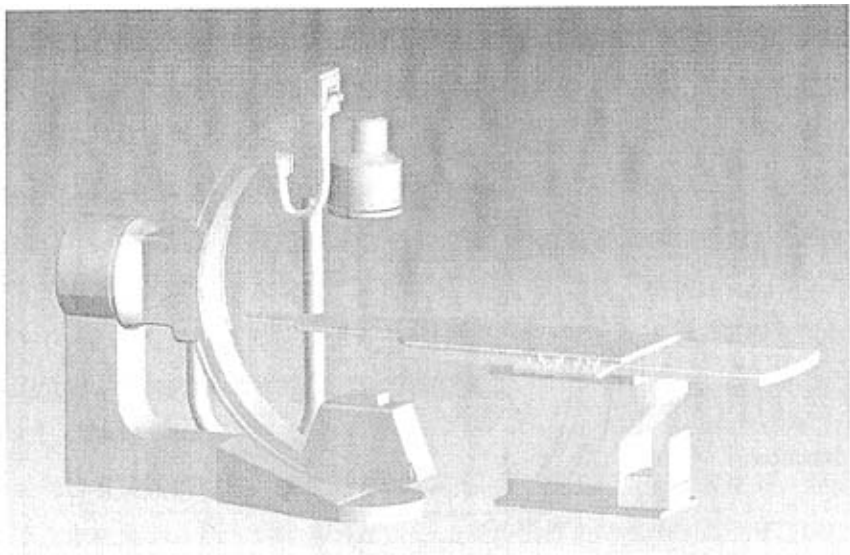


图 1.2 ECV 系统结构图
Fig 1.2 ECV system structure

运动系统由 C 臂，II 轴，Junction 轴和 L 轴组成，而运动控制系统相应的也分为 C 臂控制子系统，II 轴控制子系统，Junction 轴控制子系统和 L 轴控制子系统，以及位置反馈子系统和运动显示子系统。其中，位置反馈子系统包括 C 臂位置反馈、II 轴位置反馈、Junction 轴位置反馈和 L 轴位置反馈，使对应的各子系统通过 CAN 总线与上位机之间构成完整的闭环控制，如图 1.3 所示。

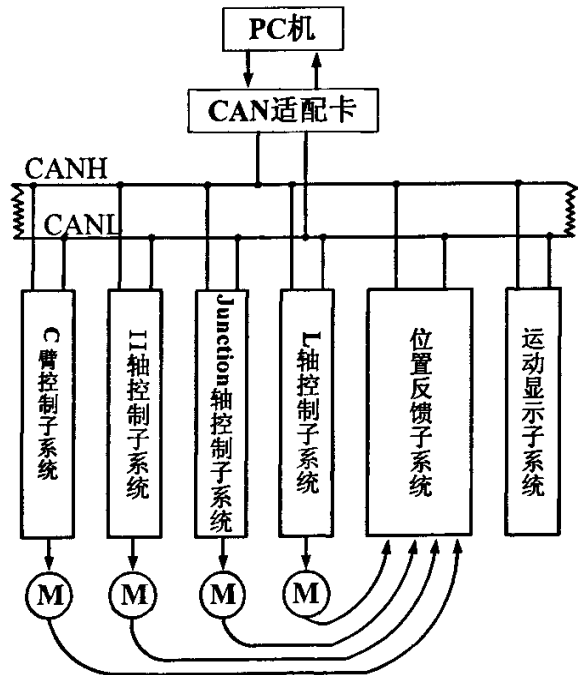


图 1.3 运动控制系统结构图
Fig 1.3 Motion control system structure

1.3.3.1 运动定义

各轴运动方向如图 1.4 所示，为方便控制，将各种运动分类定义为特定的几种运动方式。

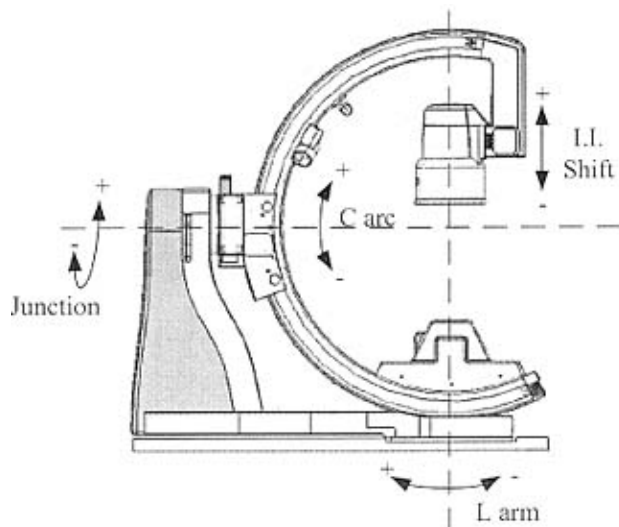


图 1.4 各轴运动方向示意图

Fig 1.4 Every axis motion direction sketch map

C 臂和 Junction 轴运动定义如下：根据 L 臂的不同位置而定义的运动名称，以检查床为分界线，L 臂在床的左边为 Left side，在床的右边为 Right side，正对床为 Head side。以 RAO 为例说明，在 Left side 位 C 臂正向运动，在 Right side 位 C 臂负向运动和在 Head side 位，Junction 轴负向运动都称为 RAO 运动。

表 1.1 运动名称

Table 1.1 Motion name

L arm position	Caud	Cran	LAO	RAO
Left side	Junction+	Junction-	C arc-	C arc+
Right side	Junction-	Junction+	C arc+	C arc-
Head side	C arc+	C arc-	Junction+	Junction-

L 臂的向左和向右运动分别定义为 CW 和 CCW，II 轴的运动定义为 SID。

在各个轴上都有一个常态为锁定的电磁制动闸，当电机没上电的时候电磁制动闸被锁定，当电机上电的时候电磁制动闸释放。另外，还有个正常状态为释放的电磁离合器，随着电机的上电和关断而锁定和释放。

C 臂可沿着 C 臂弧所在圆周空间位置运动，C 臂的运动角度不小于 180° 。Junction 轴的旋转范围是 310° ，即 $-115^\circ \sim +195^\circ$ （C 臂在垂直位置时为 0° ）。I.I. 轴的运动是沿着 X 射线束的方向，其动程为 300mm，当朝向病人运动时，速度为 30mm/s，当远离病人

运动时速度为 60mm/s, L 臂的运动范围是 $-90^{\circ}\sim+90^{\circ}$ 。系统中, 为兼顾安全和快速考虑, C 臂、L 臂、Junction 轴的旋转角速度都设置为 $8^{\circ}/s$ 。

1.3.3.2 运动控制系统其他功能

(1)、C 臂位置存储和 (APC) 自动位置控制

当按动存储按钮时, 系统能够存储 C 臂位置, 并且按动回调按钮时, 系统能够回调存储位置。本系统可存储两次位置, 根据需要调用。当系统上电初始化时, 各轴的位置均设定为 0, 之后可根据需要由操作者自行设定记忆位置, 当运动到其他位置时, 调用已存储的位置, 系统就会自行操作回到原来位置。

(2)、防碰撞

当运动或者旋转的时候, 每个轴都需要能够感应撞击, 当碰撞发生时, 应该立即刹车并且停止电机驱动, 所有运动部件撞击病人或者操作员的撞击力不大于 50N。

(3)、紧急制动

当紧急事件发生时, 要求电机立即停止并关断电机离合器的电源。

1.4 本文结构

本文围绕着 ECV 系统的运动控制系统的设计进行了多方面深入研究, 各章节具体研究内容如下:

第一章作为绪论, 论述了本研究课题的概况, 包括选题的意义和所涉及的背景知识, 目前国内外的研究现状和发展趋势。说明了本论文所研究的范围, 最后给出了本论文的结构。

第二章介绍了 CAN 总线和 CANopen 协议。在介绍了 CAN 总线的历史及发展现状的基础上, 比较了 CAN 总线和其它总线。本章详细介绍了 CANopen 高层协议的特点和主要内容, 为后面的设计工作奠定了基础。

第三章研究了无刷直流电机, 包括其模型、控制结构、控制过程和其配套器件位置传感器、编码器, 最后给出了直流电机的静态和动态模型, 为第六章的控制算法的研究提供了理论依据。

第四章是本课题设计工作的核心。本课题采用 CAN 总线通讯方式, 以设计 CAN 总线上的智能节点为思路, 设计了运动控制系统的整体方案。按照功能要求, 逐层分解为子系统子模块, 最终完成了各智能节点的硬件设计。

第五章进行了位置反馈智能节点的软件设计。主体设计思路包括 PIC18F4585 单片机的各功能模块的初始化和参数配置及 A/D 转换器的配置。

第六章研究了电机控制算法。为了改善电机的控制性能, 提出了采用 smith 预估和

模糊自校正 PID 控制的方案，并进行了仿真，对比了改进前后的效果，进行了分析。

结论中一方面总结全文，指出本文的创新点和通过研究得出的结论，另一方面展望未来工作，指出了下一步的研究方向和研究内容。

第二章 CAN 总线与 CANOpen 协议

本章在介绍了现场总线技术概况的基础上，着重介绍了CAN总线技术，并与其他总线技术比较，说明了CAN总线技术的优点。在此基础上，又重点介绍了CANOpen协议，突出了CANOpen协议优越性。

2.1 CAN 总线介绍

现场总线技术自20世纪70年代诞生至今，由于它在减少系统线缆，简化系统安装、维护和管理，降低系统的投资和运行成本，增强系统性能等方面的优越性，引起人们的广泛注意，得到大范围的推广，导致了自动控制领域的一场革命^[7]。

典型的分散式控制系统由现场设备接口与控制器以及通信设备组成，设备间的信息互联，需要一种信息传送的载体。而现场总线(Field Bus)技术是采用一条通讯线路将所有设备挂在一条通讯线缆上，每个设备控制单元靠标识码参与信息交换与命令传递，避免了DCS(集散控制系统)方式的星形布线量大、通讯距离短等固有性质所造成的各种麻烦。可以说，现场总线技术在工业过程控制领域的成功应用，是自动化领域技术进步的一个重要里程碑。现场总线将是今后自动控制领域主要发展方向之一。

现场总线是用于现场仪表与控制室系统之间的一种开放、全数字化、双向通信与多站的通信系统。现场总线在企业网(Intranet)内仅处于最低层的控制系统(Infranet)。现场总线发展迅速，目前已有40多种现场总线，已通过IEC审核作为IEC国际标准的共有12种，而目前较为常用的现场总线有基金会现场总线FF、CAN总线、LonWorks总线、PROFIBUS总线和HART总线几种，它们都有各自的特点和应用领域。

现场总线技术在中国正在健康的发展，一些总线在中国的推广已取得了一定的成绩，但在现场总线的应用中依然存在许多问题。在多种总线共存的格局在国际和国内成为必然的情况下，我国的策略是选择协议真正开放、在技术上有作为的，建立一个具有预测性、开放性、动态性的中国现场总线标准体系，让各种现场总线在各自适合的领域为我国的研究建设服务。而近年来，CAN总线技术的发展，使之成为诸多行业领域中不可替代的总线技术之一。

2.1.1 CAN 总线概述

CAN (Control Area Network) 即控制器局域网，是由德国的BOSCH公司首先提出的用于汽车控制，有效支持分布式控制和实时控制的串行通讯网络。它是一种多主总线，通信介质可以是双绞线、同轴电缆或光导纤维。通信速率最高可达1Mbps。CAN总线的技

术规范包括CAN2.0A合CAN2.0B两部分, CAN协议只有物理层和数据链路层两个底层协议, 规定了对数据通讯的成帧处理, 包括位填充、数据块编码、循环冗余检验、优先级判别等工作标准^[10]。

由于CAN总线采用了许多新技术及独特设计, CAN总线的数据通信具有突出的可靠性、实时性和灵活性, 已成为国际标准化组织ISO1898标准, 其具有如下特性:

(1)、CAN采用多主方式工作, 网络上任意节点均可以在任意时刻主动的向网络上的其他节点发送信息, 不分主从, 但节点之间有优先级之分, 通讯方式灵活;

(2)、CAN信息帧采用短帧结构, 每一帧的有效字节数为8个, 传输时间短, 受干扰的概率低;

(3)、CAN协议废除了传统的站地址编码, 而对通讯数据块进行编码, 使网络中的节点个数在理论上不受限制, 网络中的不同节点同时接到相同的数据, 使总线上传输的信息总量减少;

(4)、CAN网络上的信息可分成不同的优先级, 满足不同的实时性要求;

(5)、CAN采用非破坏性总线仲裁技术(CSMA/CD), 大大节省了总线冲突裁决时间、在网络负载很重的情况下也不会出现网络瘫痪情况(以太网则可能);

(6)、CAN网络具有点对点、一点对多点 and 全局广播等几种通讯方式;

(7)、具有极好的检错效果, CAN的每帧信息都具有CRC校验和其他检错措施, 保证了极低的错误率;

(8)、CAN的直接通讯距离最远可达10km(速率5Kbps以下), 通讯速率最高可达1Mbps(此时距离不超过40m), 最多可接节点110个。

2.1.2 CAN 现场总线和其他通讯方案的比较

在实践中, 由两种重要的总线分配方法: 按时间分配和按需要分配。在第一种方法中, 不管节点是否申请总线, 都对节点按最大期间分配。由此, 总线可被分配给每个节点并且是唯一的节点, 而不论其是立即进行总线存取或是特定时间进行总线存取。这将保证在总线存取时有明确的总线分配。在第二种方法中, 总线按传送数据的基本要求分配给一个节点, 总线按节点系统的传送分配, 因此, 当多个节点同时请求总线存取时, 总线将终止所有节点的请求, 此时将不会有任何一个节点获得总线分配。

CAN 实现总线分配的方法, 可保证当不同的节点申请总线存取时, 明确地进行总线分配。这种位仲裁的方法可以解决当两个节点同时发送数据时产生的碰撞问题。不同于以太网网络的消息仲裁, CAN 的非破坏性解决总线存取冲突的方法确保在不传送有用消息时总线不被占用。甚至当总线在重负载情况下, 以消息内容为优先的总线存

取系统也被证明是一种有效的系统。虽然总线的传输能力不足,但所有未解决的传输请求都按重要性顺序来处理。在 CSMA/CD 这样的网络中,如以太网,系统往往由于过载而崩溃,这种情况在 CAN 中不会发生。

2.2 CANOpen 协议

基于CAN现场总线的优势所在,国内外有越来越多的公司在控制系统中使用了CAN现场总线技术,开发出了很多CAN现场总线方面的控制产品,并得到广泛应用,这也是本课题研究CAN总线的原因之一。CANopen应用层协议在国外已有很多方面的应用,受到了足够的重视。在欧洲,CANopen协议已被广泛的应用于医疗装置中,并进一步扩展应用到保安控制系统中;在美国,CANopen协议已经成为装载机械和公共运输设备的协议标准,同时也应用于嵌入式系统的控制。目前,国外已有许多大公司开发了CANopen 软件和硬件产品,比如:Northampton公司的CANopen开发工具,Downers Grove公司的CANopen控制模块,Elkhart公司的CANopen的开发工具和软件代码;还有一些公司开发了CANopen协议的组态软件和配套的硬件下载工具。

在我国CAN的应用层协议主要应用DeviceNet,很少用到CANopen,因此CANopen协议需要在我国进一步推广。

2.2.1 CANOPEN 高层协议概述

由于CAN本身并非一个完整的协议,只包括物理层和数据链路层两个底层协议,要进行高效率的通讯还需要进一步开发高层协议。目前已出台的几种高层协议标准有CANopen、Devicenet、CAL、CAN kingdom、SDS、SAE J1939。其中CANopen、Devicenet应用较多。

CAL (CAN Application Layer) 协议是目前基于CAN的高层通讯协议中的一种,最早由Philips医疗设备部门制定。现在CAL由独立的CAN用户和制造商集团CiA (CAN in Automation) 协会负责管理、发展和推广^[20]。

CAL提供了所有的网络管理服务和报文传送协议,但并没有定义CMS (CAN-based Message Specification) 对象的内容或者正在通讯的对象的类型,而这正是CANopen切入点。CANopen是在CAL基础上开发的,使用了CAL通讯和服务协议子集,提供了分布式控制系统的一种实现方案。简单的说,CANopen就是将CAN网络中通讯数据的组建和传输进行标准化,并给用户很大的自由度,允许用户随时添加自己所需要的新功能^[13]。

从 OSI 网络模型的角度来看,CAN 仅仅定义了物理层和数据链路层,没有规定应用层,因此需要一个高层协议来定义 CAN 报文中的 11/29 位标识符,8 字节数据的使

用^[16]。CANopen 协议应运而生，由 CiA (CAN in Automation) 定义，是一个基于 CAL (CAN Application Layer) 的子协议，提供了分布式控制系统的一种实现方案。CANopen 协议是一个开放的标准化的高层协议，支持各种 CAN 厂商设备的互用性、互换性，能够在 CAN 网络中提供标准的、统一的系统通讯模式，提供设备功能描述方式，执行网络管理功能。CANopen 协议在保证通用性的前提下，允许节点的功能随意扩展：或简单或复杂。

CANopen 的核心概念是设备对象字典 OD (Object Dictionary)，它不是 CAL 的一部分，是在 CANopen 中实现的。

在 OSI 模型中，CAN 标准、CANopen 协议之间的关系如图 2.1 所示：

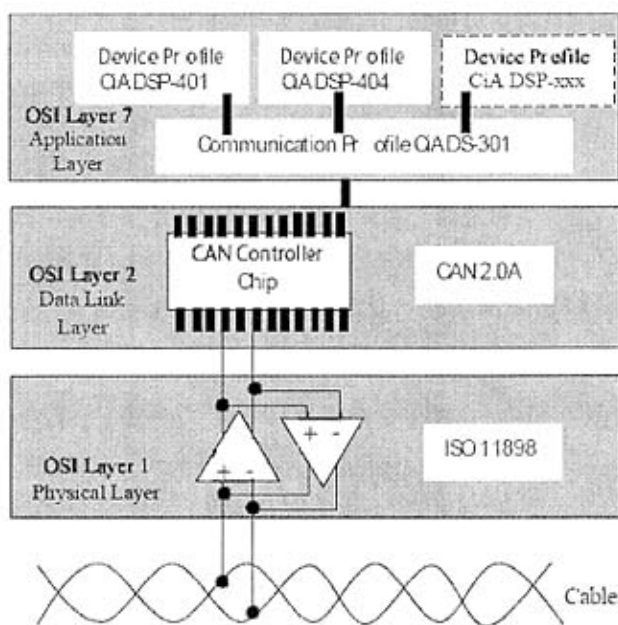


图 2.1 CAN、CANopen 标准在 OSI 网络模型中的位置框图

Fig 2.1 Position structure of CAN、CANopen standard in the OSI net module

CANopen 协议主要有以下内容^[15]：

- (1)、以对象字典为核心概念，用来定义设备和通讯的相关参数和与各类操作之间的接口，其它操作均需对对象字典进行；
- (2)、针对数据流量需要和实时性要求的不同，定义了用于过程数据通讯 (PDO) 和服务型数据通讯 (SDO) 两种主要得通讯模式；
- (3)、定义了状态管理、节点保护和特殊标识符分配 (DBT) 等网络管理服务 and 应急

对象、时间标记同步信息 (SYNC) 预操作对象。

2.2.2 CANopen 高层协议特点

(1)、既支持管理控制层的数据传输，同时也兼容同一物理层比较小的传感器和执行器，这就避免了传感器执行器与高层通讯之间网关的不必要的花费^[14]；

(2)、既支持对设备参数的直接读取，也支持实时过程的数据通讯；

(3)、既支持周期性通讯也支持事件触发通讯，可以最大可能地减小总线上地负载，同时保证最小地响应时间，使网络在波特率较低的情况下也可以获得比较好的通讯特性，特别适合于实时性的工业自动化；

(4)、在 CAN 总线系统的所有硬件设备不变的情况下，能够开发出 CAN 所有的潜在功能，而对物理层硬件连接无特殊的要求。

2.2.3 选择 CANopen 作为 CAN 总线高层协议的原因

目前CANopen和Devicenet应用都较为广泛，选择CANopen为标准编写CAN网络的应用层协议是因为CANopen与Devicenet相比有以下几个优势：

(1)、Devicenet网络中最多可接64个节点，而CANopen最多可接127个节点。

(2)、通过参数的设置，CANopen协议可以根据用户的特殊需要最大限度的将系统专用化和最优化。无须改变硬件设置，就可以获得最优的通讯特性。

(3)、Devicenet对物理层的接口设备要求严格，硬件设备必须符合Devicenet物理层协议标准。而 CANopen对此没有特殊要求，可在CAN总线控制系统的硬件基础上直接构建。

(4)、Devicenet协议并不是完全公开的，而CANopen协议则完全公开。

2.3 CANopen 高层协议主要内容

2.3.1 对象字典 OD (Object Dictionary)

OD 是一个有序的对象组，每个对象采用一个 16 位的索引值来寻址，为了允许访问数据结构中的单个元素，同时定义了一个 8 位的子索引。对象字典的结构参照表 2.1，一个节点的对象字典的有关范围在 0x1000 到 0x9FFF 之间。

表 2.1 CANopen 标识符分配
Table 2.1 Distribution of CANopen identifiers

CANopen 预定义主/从连接集的广播对象			
对象	功能码	COB-ID	Index
NMT Module Control	0000	000H	-
SYNC	0001	080H	1005H-1007H
TIME STAMP	0010	100H	1012H,1013H
CANopen 预定义主/从连接集的对等对象			
对象	功能码	COB-ID	Index
紧急	0001H	081H-0FFH	1024H,1015H
PDO1(发送)	0011H	181H-1FFH	1800H
PDO1(接收)	0100H	201H-27FH	1400H
PDO2(发送)	0101H	281H-2FFH	1801H
PDO2(接收)	0110H	301H-37FH	1401H
PDO3(发送)	0111H	381H-3FFH	1802H
PDO3(接收)	1000H	401H-47FH	1402H
PDO4(发送)	1001H	481H-4FFH	1803H
PDO4(接收)	1010H	501H-57FH	1403H
SDO(发送)	1011H	581H-5FFH	1200H
SDO(接收)	1100H	601H-67FH	1200H
NMT Error Control	1110H	701H-77FH	1016H-1017H

CANopen 网络中的每个节点都有一个 OD。OD 中包含了描述这个设备和它的网络行为的所有参数。一个节点的 OD 是在电子数据文档（EDS: Electronic Data Sheet）中描述或者记录在纸上，不必也不需要通过 CAN-bus 访问一个节点的 OD 中的所有参数。节点本身只需要能够提供 OD 中必须的对象以及其他可选择的、构成节点部分可配置功能的对象即可。

CANopen 由一系列称为子协议的文档组成。通讯子协议（communication profile），描述 OD 的主要形式和 OD 中的通讯子协议区域中的对象，通讯参数。同时描述 CANopen 通讯对象。这个子协议适用于所有的 CANopen 设备。各种设备子协议(device profile)，为各种不同类型设备定义 OD 中的对象。它为每个对象描述了它的功能、名字、索引、子索引、数据类型，以及这个对象是必需的还是可选的，这个对象是只读、只写或者可读写等等。

2.3.2 CANopen 通讯

CANopen 通讯模型定义了 4 种报文（通讯对象）：

(1)、管理报文 NMT(Network Management)

用于网络中主节点对从节点的监控和管理。只有主节点能够传送 NMT 报文，所

有的从设备必须支持 NMT 模块控制服务。此消息不需要应答。NMT 消息格式如表 2.2 所示(cs 是命令字)。当 Node-ID=0，则所有的 NMT 从设备被寻址。

NMT-Master-> NMT-Slave(s):

表 2.2 NMT 消息格式

Table2.2 NMT information frame

COB-ID	Byte0	Byte1
0x000	CS	Node-ID

(2)、服务数据对象 SDO(Service Data Object)

通过使用索引和子索引 SDO 使客户机（client）能够访问设备（服务器 server）OD 中的对象。协议是确认服务类型，为每个消息生成一个应答（一个 SDO 需要两个 ID）。客户的 CAN 报文和服务器的应答 CAN 报文总是包含 8 字节数据，尽管不是所有的数据字节都有一定的意义。SDO 通过 CAL 中多元域的 CMS（CAN-based Message Specification）对象来实现，允许传送任何长度的数据（超过 4 个字节时，分拆成几个报文）。相应的，SDO 有两种传送机制：

- ①加速传送，最多传送 4 字节数据；
- ②分段传送，传送的数据长度大于 4 字节。

SDO 的基本结构如表 2.3 所示：

Client->Serve/Serve->Client（最大 4 字节）:

表 2.3a SDO 加速传送基本结构

Table2.3a SDO expedited transfer basic frame

Byte0	Byte1-2	Byte3	Byte4-7
SDO 命令字	对象索引	对象子索引	...

Client->Serve/Serve->Client（大于 4 字节）:

表 2.3b SDO 分段传送基本结构

Table2.3b SDO segmented transfer basic frame

Byte0	Byte1-7
SDO 命令字	最大 7 字节数据

(3)、过程数据对象 PDO(Process Data Object)

用于传输正常网络操作中的实时数据。数据传送限制在 1 到 8 个字节。PDO 通讯没有协议规定，数据内容只由它的 CAN-ID 决定。每个 PDO 在对象字典中用 2 个对象描述：

- ①PDO 通讯参数，包含哪个 COB-ID 将被 PDO 使用，传输类型，禁止时间和定时器周期；
- ②PDO 映射参数，包含一个 OD 中对象的列表，这些对象映射到 PDO 里，包括他们的数据长度（in bits）。

PDO 消息的内容是预定义的，在 OD 中描述，当设备支持可变 PDO 映射时，可以使用 SDO 配置 PDO 映射参数。

PDO 可以有多种传送方式，支持同步传输和异步传输。

假设第二个发送 PDO 映射如表 2.4 所示（在 CANopen 中用对象字典索引 0x1A01 描述）：

表 2.4 PDO 映射参数
Table2.4 PDO mapping parameters
对象 0x1A01:第二个发送 PDO 映射

子索引	值	意义
0	2	2 个对象映射到 PDO 中
1	0x6000208	对象 0x6000，子索引 0x02，由 8 位组成
2	0x64010110	对象 0x6401，子索引 0x01，由 16 位组成

如果这个 PDO 报文被发送，则由 3 字节数据组成，格式如表 2.5：

PDO-producer->PDO-consumer(s):

表 2.5 PDO 报文格式
Table2.5 PDO message frame

COB-ID	Byte0	Byte1	Byte2
0x280+Node-ID	对象 1 的数据	对象 2 的数据低 8 位	对象 2 的数据的高 8 位

（4）、预定义报文或特殊功能报文

主要有五种类型的报文用于配合以上三种通讯：

①同步（SYNC）

在网络范围内同步，尤其是在驱动应用中。采用主从模式，SYNC 主节点定时发送 SYNC 对象，SYNC 从节点收到后同步执行任务。在 SYNC 报文传送后，在给定的时间窗口内传送一个同步 PDO。使用 CAL 中基本变量类型 CMS 对象实现。

②时间标记对象（Time Stamp）

为应用设备提供公开的时间帧参考，用 CAL 中基本变量类型 CMS 对象实现。

③紧急事件（Emergency）

当设备内部出错时触发。用 CAL 中基本变量类型 CMS 对象实现。

④节点/寿命保护（Node/life guarding）

NMT 主节点监控节点状态称作节点保护（Node guarding）。反过来，节点也可以监控 NMT 主节点的状态，称作生命保护（life guarding）。采用主从通讯模式，检测设备的网络接口错误，根据 NMT 节点保护协议实现。

⑤Boot-UP

采用主从通讯模式，NMT 从节点通过发送这个报文，向 NMT 主节点说明该节点已经由初始化状态进入预操作状态。

在上面介绍的四类通讯对象类型中，SDO 和 PDO 用于数据传输，他们采用不同的数据传输机制实现：

①SDO 用来在设备之间传输大的低优先级数据，典型的是用来配置 CANopen 网络上的设备；

②PDO 用来传输 8 字节或更少数据，没有其他协议预设。

一个 CANopen 设备必须支持一定数量的网络管理服务，需要至少一个 SDO。每个生产或消费过程数据的设备需要至少一个 PDO。所有其他的通讯对象都是可选的。

2.3.3 CANopen 预定义连接集

为了减小简单网络的组态工作量，CANopen 定义了强制性的缺省标识符（CAN-ID）分配表。这些标识符在预操作状态下可用，通过动态分配还可修改他们。缺省 ID 分配表是基于 11 位 CAN-ID，包含一个 4 位的功能码部分和一个 7 位的节点 ID(Node-ID)部分，如图 2.2 所示。

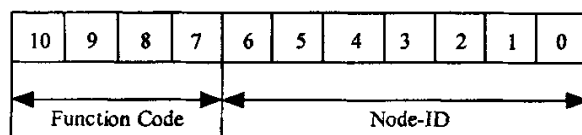


图 2.2 预定义连接集 ID
Fig 2.2 Pre-defined link muster ID

Node-ID 由集成商定义，范围是 1~127（0 不允许被使用）。预定义的连接集定义了 4 个接收 PDO（Receive-PDO），4 个发送 PDO（Transmit- PDO），1 个 SDO（占 2 个 CAN-ID），1 个紧急对象和 1 个节点错误控制（Node-Error-Control）ID。也支持不需确认的 NMT-Module-Control 服务，SYNC 和 Time Stamp 对象的广播。缺省 ID 分配表如 2.3.1 节表 2.1 所示。

ID 地址分配表与预定义的主从连接集相对应，因为所有的对等 ID 是不同的，所以实际上只有一个主设备能和连接的每个从节点以对等的方式通讯。两个连接在一起的从节点不能够通讯，因为他们彼此不知道对方的节点 ID。

CANopen 网络中 CAN 标识符（COB-ID）的分配由三种不同的方法：

（1）、使用预定义的主从连接集。ID 是缺省的，不需要配置。如果节点支持，PDO 数据内容也可以配置。本论文中的 CANopen 通讯协议的实现即采用这种方式；

（2）、上电后修改 PDO 的 ID（在预操作状态），使用（预定义的）SDO 在节点

的 OD 中适当位置进行修改;

(3)、使用 CAL 动态分配 (DBT, DistriBuTor) 服务: 节点或从节点最初由他们的配置 ID 支持。节点 ID 可以由设备上的拨码开关配置, 或使用 CAL LMT (Layer Management) 服务进行配置。当网络初始化完毕, 并且启动后, 主节点首先通过“连接远程节点”报文和每个连接的从设备建立一个对话, 一旦这个对话建立, CAN 通讯 ID 用 CAL DBT 服务分配好, 这需要节点支持扩展的 boot-up。

第三章 无刷直流电机的研究

直流电机具有响应快速、较大的起动转矩、从零转速至额定转速具备可提供额定转矩的性能，但直流电机的优点也正是它的缺点，因为直流电机要产生额定负载下恒定转矩的性能，则电枢磁场与转子磁场须恒维持 90° ，这就要藉由碳刷及整流子。碳刷及整流子在电机转动时会产生火花、碳粉因此除了会造成组件损坏之外，使用场合也受到限制。交流电机没有碳刷及整流子，免维护、坚固、应用广，但特性上若要达到相当于直流电机的性能须用复杂控制技术才能达到。现今半导体发展迅速功率组件切换频率加快许多，提升驱动电机的性能^[21]。微处理机速度亦越来越快，可实现将交流电机控制置于一旋转的两轴直交坐标系统中，适当控制交流电机在两轴电流分量，达到类似直流电机控制并有与直流电机相当的性能。此外已有很多微处理机将控制电机必需的功能做在芯片中，而且体积越来越小；像模拟/数字转换器(Analog-to-digital converter, ADC)、脉冲宽度调制(pulse wide modulator, PWM)…等。直流无刷电机即是以电子方式控制交流电机换相，得到类似直流电机特性又没有直流电机机构上缺失的一种应用。

无刷直流电机采用稀土永磁代替电励磁，采用电子换向代替机械换向，具备体积小、重量轻、动态性能好、出力大、设计简便等特点，故用途更为广泛，特别适合于对性能、体积重量要求较高的场合，如航空、航天、医疗设备、电动汽车、精密电子仪器与设备、工业自动化和现代家用电器等领域^[22]。

3.1 无刷直流电机模型的构成

无刷直流电机的整体模型如图 3.1。

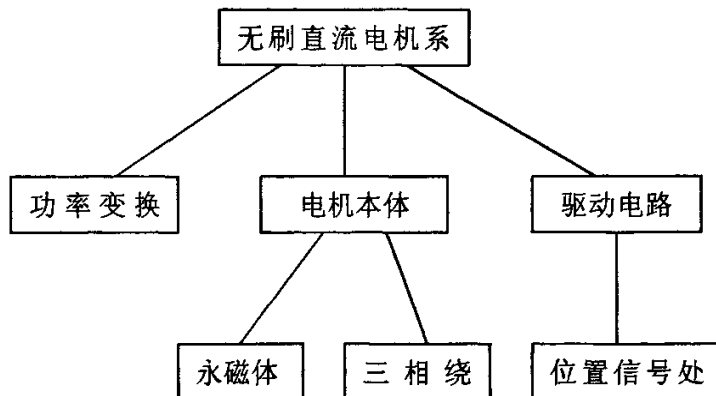


图 3.1 无刷直流电机模型结构
Fig 3.1 BLDCM module structure

一般情况下无刷直流电动机本体定子多为三相结构,绕组为分布式或集中式Y型联接。永磁转子多用钕铁硼等稀土永磁材料,瓦片型永磁体直接粘贴在转子铁心上,故其气隙磁场存空间呈矩形分布^[23]。

3.2 无刷直流电机的控制

3.2.1 无刷直流电机的控制结构

直流无刷电机是同步电机的一种,也就是说电机转子的转速受电机定子旋转磁场的速度及转子极数(P)影响: $N=120f/P$ 。在转子极数固定情况下,改变定子旋转磁场的频率就可以改变转子的转速。直流无刷电机即是将同步电机加上电子式控制(驱动器),控制定子旋转磁场的频率并将电机转子的转速回授至控制中心反复校正,以期达到接近直流电机特性的方式。也就是说直流无刷电机能够在额定负载范围内当负载变化时仍可以控制电机转子维持一定的转速。

无刷直流驱动器包括电源部及控制部如图 3.2,电源部提供三相电源给电机,控制部则依需求转换输入电源频率。

电源部可以直接以直流电输入(一般为 24V)或以交流电输入(110V/220 V),如果输入是交流电就得先经转换器(converter)转成直流。不论是直流电输入或交流电输入要转入电机线圈前,须先将直流器(inverter)转成3相电压来驱动电机。换流器(inverter)一般由6个功率电压换流晶体管(Q1~Q6)构成,分为上臂(Q1、Q3、Q5)和下臂(Q2、Q4、Q6)连接电机,作为控制流经电机线圈电流的开关。这6个功率电子开关(逆变器)用于给电机定子各相绕组在一定的时刻通以一定时间长短的恒定直流电流,以便与转子永磁磁场相互作用产生持续不断的恒定转矩。控制部则提供PWM(脉冲宽度调制)决定功率晶体管开关频度及换流器(inverter)换相的时机。直流无刷电机一般希望使用在当负载变动时速度可以稳定于设定值而不会变动太大的速度控制,所以电机内部装有能感应磁场的霍尔传感器(hall-sensor),做为速度之闭回路控制,同时也做为相序控制的依据。但这只是用来做为速度控制并不能拿来做为定位控制。

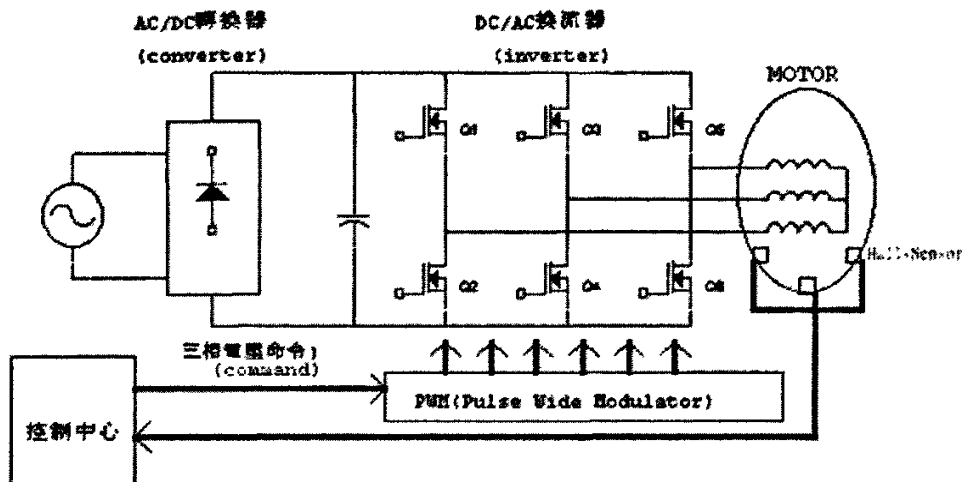


图 3.2 无刷直流电机结构
Fig 3.2 BLDCM structure

3.2.2 无刷直流电机的控制过程

要让电机转动起来，首先控制部就必须根据 hall-sensor 感应到的电机转子目前所在位置，然后依照定子绕线决定开启(或关闭)换流器(inverter)中功率晶体管的顺序^[24]，如图 3.3 inverter 中之 AH、BH、CH(这些称为上臂功率晶体管)及 AL、BL、CL(这些称为下臂功率晶体管)，使电流依序流经电机线圈产生顺向(或逆向)旋转磁场，并与转子的磁铁相互作用，如此就能使电机顺时/逆时转动。当电机转子转动到 hall-sensor 感应出另一组信号的位置时，控制部又再开启下一组功率晶体管，如此循环电机就可以依同一方向继续转动，直到控制部决定要电机转子停止则关闭功率晶体管(或只开下臂功率晶体管)；要电机转子反向则功率晶体管开启顺序相反^[28]。

基本上功率晶体管的开法可举例如下：

AH、BL 一组→AH、CL 一组→BH、CL 一组→BH、AL 一组→CH、AL 一组→CH、BL 一组。

但绝不能开成 AH、AL 或 BH、BL 或 CH、CL。此外因为电子零件总有开关的响应时间，所以功率晶体管在关与开的交错时间要将零件的响应时间考虑进去，否则当上臂(或下臂)尚未完全关闭，下臂(或上臂)就已开启，结果就造成上、下臂短路而使功率晶体管烧毁。

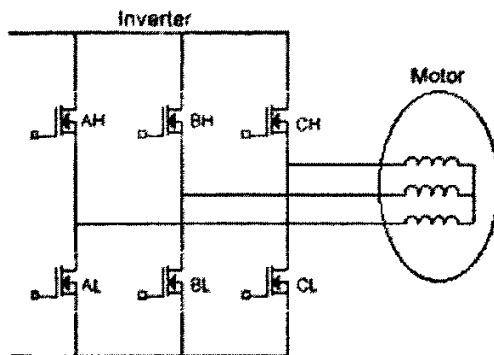


图 3.3 无刷直流电机控制过程
Fig 3.3 BLDCM control process

当电机转动起来，控制部会根据驱动器设定的速度及加/减速率所组成的命令(Command)与 hall-sensor 信号变化的速度加以比对(或由软件运算)再来决定由下一组(AH、BL 或 AH、CL 或 BH、CL 或……)开关导通，以及导通时间长短。速度不够则开长，速度过头则减短，此部份工作就由 PWM 来完成。PWM 是决定电机转速快或慢的方式，如何产生这样的 PWM 才是要达到较精准速度控制的核心。高转速的速度控制必须考虑到系统的 CLOCK 分辨率是否足以掌握处理软件指令的时间，另外对于 hall-sensor 信号变化的资料存取方式也影响到处理器效能与判定正确性、实时性。至于低转速的速度控制尤其是低速起动则因为回传的 hall-sensor 信号变化变得更慢，怎样撷取信号方式、处理时机以及根据电机特性适当配置控制参数值就显得非常重要。或者速度回传改变以 encoder 变化为参考，使信号分辨率增加以期得到更佳的控制。

图 3.4 为本系统中所采用的 BODINE 电子公司生产的 3502 系列无刷直流电机。

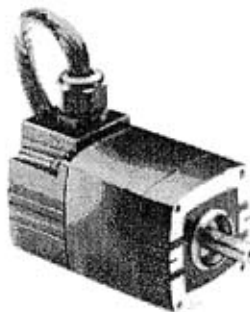


图 3.4 BODINE 3502 系列电机
Fig 3.4 BODINE 3502 series motor

3.3 位置传感器和光电编码器

3.3.1 位置传感器

电机各相绕组通电顺序、通电时刻和通电时间长短取决于转子磁极与定子绕组空间

的相对位置，这是由转子位置检测器来感知、产生出三相位置信号，并经逻辑处理、功率放大后形成功率开关元件的触发信号，再去控制定子绕组的通、断(换向)。

对于有位置传感器无刷电机来说，一般在本体内部安装有三个开关式位置传感器，用以检测转子位置。转子位置传感器一般安装在定子内侧，其基本原理是该传感器能够敏感转子磁极的转动，从而输出指示转子位置的方波信号，供无刷电机换相之用。常用的位置传感器的类型有三种，电磁式位置传感器，光电式位置传感器和磁敏式位置传感器(如霍尔传感器)，均输出开关信号。为了能够在电机运转的过程中输出三路相差 120° 电角度，宽度为 180° 电角度的方波位置信号，位置传感器在定子上应该按照一定的规则排列。以霍尔位置传感器为例说明，如图 3.5 所示。

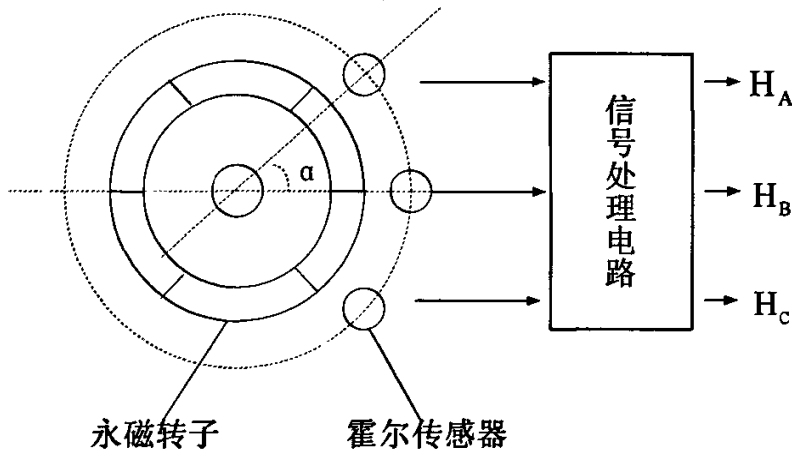


图 3.5 位置传感器在空间的排列位置

Fig 3.5 Space arrange place of position feedback converter

三个位置传感器排列的空间相隔机械角满足关系式

$$\alpha = 2\pi / (3 \times P_m) \quad (3.1)$$

式中 P_m 为转子极对数。当永磁体转子磁极依次转过三个位置传感器时，传感器就会输出方波信号，经过信号处理电路，从而输出指示转子位置的三相互差 120° 的方波信号^[27]。

磁敏式位置传感器是利用霍尔效应和磁阻原理制成的，这种传感器也是由定子和跟踪转子组成；目前用于位置检测的磁敏元件有霍尔元件，磁敏电阻，磁敏二极管、晶体管等；霍尔元件与其他磁敏元件相比，具有体积小、灵敏度高、输出功率大、工作可靠、性能稳定等明显优点^[25]。

3.3.2 光电编码器 (Encoder)

光电编码器与电机主轴直接连接，从而使编码器的旋转与电机的旋转完全一致。通过对光电编码器在旋转的过程中产生的脉冲进行倍频、鉴向和计数，可以测量得到

电机的转速和位置，进而构成电机控制中的速度闭环和位置闭环。光电编码器具有响应速度快，可靠性高，测速准确等优点^[26]。

光电编码器输出 2 个脉冲信号 A, B，分别为 channel A 和 channel B。如图 3.6 所示^[31]。脉冲 A, B 的频率相同，同时频率的大小同电机转速的大小成正比。当电机顺时针(Clock Wise)转动时, A 脉冲超前 B 脉冲 1/4 个周期，而当电机做逆时针(Counter Clock Wise)转动时, A 脉冲滞后 B 脉冲 1/4 个周期，因此根据 A, B 脉冲的相位关系可以判断电机当前的转动方向。

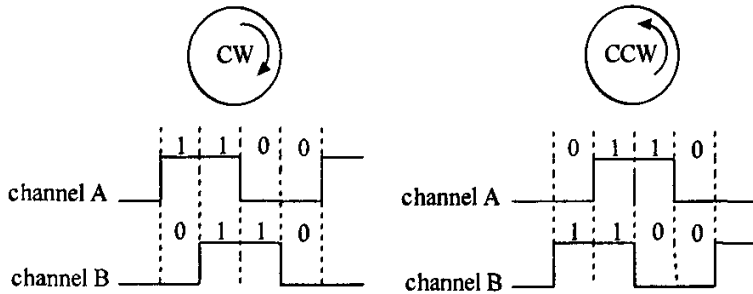


图 3.6 光电编码器输出信号
Fig 3.6 Encoder output signal

光电编码器的一项重要参数是分辨率 (pulse/rotation)，即电机一转将产生的脉冲数。分辨率越高，精度越高，但使得运算量加大。经权衡考虑在本系统的驱动电机上使用了 1024 线的光电编码器。

3.4 电机模型

构建并分析直流电机的模型有助于控制参数的调整，为了简化问题的复杂性，特作如下假设^[28]：

- (1) 直流电机的电枢反应永久磁通 Φ 保持不变^[29]；
- (2) 电机的负载转矩 T_l 保持不变；
- (3) 摩擦转矩分解为粘滞摩擦分量与一常数^[30]，即

$$T_f = B \times \omega + T_{f0} \quad (3.2)$$

其中, B 为粘滞摩擦系数, ω 为电机旋转的角速度, T_{f0} 为一常数。

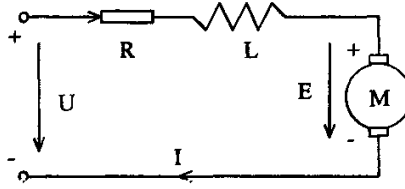


图 3.7 直流电机等效电路图
Fig 3.7 DC motor equivalent circuit

图 3.7 为直流电机的等效电路图。其中：

R 是电机的等效电阻；

L 为电机的等效电感；

E 是电机的反电动势；

K_e 代表电机的反电动常数；

K_T 代表电机的转矩常数；

J 代表电机转子及与转轴相连的负载的总的转动惯量；

U 为加在电机两端的电压，是控制系统的控制变量；

I 是流经电机的电流，是电流闭环的被控变量。

3.4.1 直流电机静态模型

在以上假设的前提下，电机的电压平衡方程式为：

$$U = E + I \times R \quad (3.3)$$

磁通保持不变时，

$$E = K_e \times \omega \quad (3.4)$$

电机的转矩平衡方程式为：

$$T = T_l + T_f = T_{l0} + T_{f0} + B \times \omega \quad (3.5)$$

同时，电机的转矩满足：

$$T = K_T \times I \quad (3.6)$$

综合式(3.2)～式(3.6)，可解出静态时电机的电压、电流同转速的关系：

$$\begin{cases} I = \frac{1}{K_T} (T_{l0} + T_{f0} + B \times \omega) = \frac{B}{K_T} \omega + C_1 \\ U = (K_e + \frac{B}{K_T} \times R) \times \omega + C_2 \end{cases} \quad (3.7)$$

其中, $C_1 = \frac{T_{10} + T_{f0}}{K_T}$, $C_2 = \frac{T_{10} + T_{f0}}{K_T} \times R$, 均为常数。

3.4.2 直流电机动态模型

动态模型中可忽略对常量 Φ , T_{10} , T_{f0} 的考虑。

电机的电压方程式为:

$$U = E + I \times R + L \times \frac{dI}{dt} \quad (3.8)$$

磁通 Φ 保持不变时, 式(3.4)成立, 所以:

$$U = K_E \times \omega + I \times R + L \times \frac{dI}{dt} \quad (3.9)$$

电机的转矩方程为:

$$J \times \frac{d\omega}{dt} = T - B \times \omega \quad (3.10)$$

且电机的转矩满足式(3.6), 所以:

$$J \times \frac{d\omega}{dt} = K_T \times I - B \times \omega \quad (3.11)$$

对式(3.9)和式(4.11)进行拉普拉斯变换, 可得直流电机的传递函数:

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{K_T}{(Js + B)(Ls + R) + K_T K_E} = \frac{K_m}{\alpha s^2 + \beta s + 1} \quad (3.12)$$

直流电机流经的电流同转速的关系为:

$$\Omega(s) = \frac{K_T}{Js + B} I(s) \quad (3.13)$$

直流电机的动态模型如图 3.8 所示。

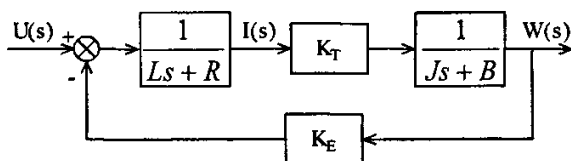


图 3.8 直流电机的动态模型
Figure 3.8 DC motor dynamic model

第四章 运动控制系统智能节点硬件设计

设计思路：

运动控制系统的智能节点是运动控制系统功能的具体实现者，包括驱动控制电路智能节点，位置反馈智能节点，运动显示智能节点。如图 4.1：

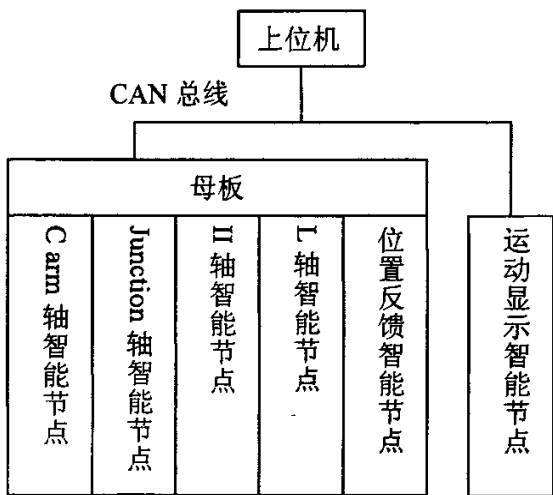


图 4.1 运动控制系统智能节点示意图
Fig 4.1 Motion control system brainpower node

主板实际上是为装载各轴运动控制节点和位置反馈节点而设计，母板上有卡槽，可以将各轴运动控制节点以及位置反馈节点插在上面，另外还起着为各运动智能节点提供电源和接口的作用。本系统中所用电源有三种，DC24V，DC10V 和 DC5V。DC24V 是直接来自外部稳压电源引入到目标板上，DC10V 和 DC5V 是经过母板上的变压模块得到的。这些电源模块可以满足板上所有器件的供电，包括驱动器，AD 转换器，刹车和离合器模块等等的供电需求。

4.1 驱动控制电路智能节点

驱动控制电路智能节点包括 C arm、Junction、L 和 II 三个轴的驱动控制电路。驱动部分是控制系统中的“心脏”，它直接控制着电机的运转，是运动部件的直接控制者。

血管造影机的每个轴的驱动运动控制执行节点都是一个完整的无刷直流电机伺服系统，运动控制过程中与上位机节点的数据传输通信是通过 CAN 总线来实现的。工作过程中上位机通过 CAN 总线向驱动控制节点发送控制命令，经过驱动器的 CAN 控制器识别 ID 后，将转速，正反转等信息转换成模拟电压对电机进行启动，正转，反转，停止等操作。同时伺服驱动部分能够读取电机反馈回来的霍尔信号和编码器信号，并计算出电机本身的电枢电流，转速等参数通过 CAN 总线送给上位机，作为上位机进行控制和

监测的参考数据。执行节点的结构以及与上位机的连接如图 4.2 所示。

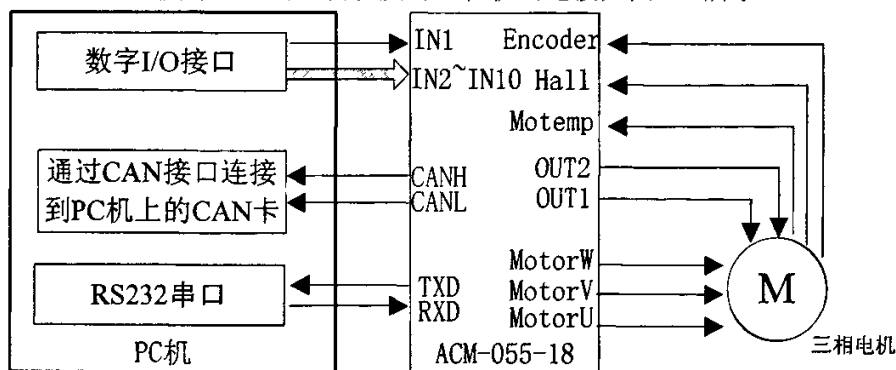


图 4.2 运动控制执行节点的结构图

Fig 4.2 Structure of motion control execute node

4.1.1 驱动器模块

从执行节点的结构图我们可以看到伺服驱动是血管造影仪运动控制系统的核心部分，它既要能实现与上位机的通信，又要驱动电机运动。在基于 CAN 总线的血管造影仪运动控制系统中，我们采用 COPLEY 公司的 Accelnet 无刷直流电机驱动器，它内部集成了 CAN 控制器，支持 CANopen 通信协议，百分百的数字伺服放大器，可用于驱动直流有刷或无刷电机，额定电流 10ADC，最大电流 20ADC，电压范围 20VDC~180VDC。COPLEY 驱动器的主要特点：

(1)、集成了 CAN 通信，采用 CANopen 通信协议

- 有很高的性能价格比
- 线缆连接简单
- 在工作中可以动态的改变参数
- 不需要添加运动控制卡
- 可以任意的添加轴。

(2)、定位模式

- 内插定位（PVT）
- 轮廓线定位（加速度，减速度，速率，位置值）

(3)、复位模式

- 到复位开关
- 到编码索引

(4)、保护功能

- 通讯错误检测

- I2T 电流限保护
- 电机过热保护

管脚说明：

COPLEY 的驱动器引脚分为两部分，一部分为数字信号，另一部分为电源输入和三相电压输出引脚。其中数字信号如图 4.3 所示：

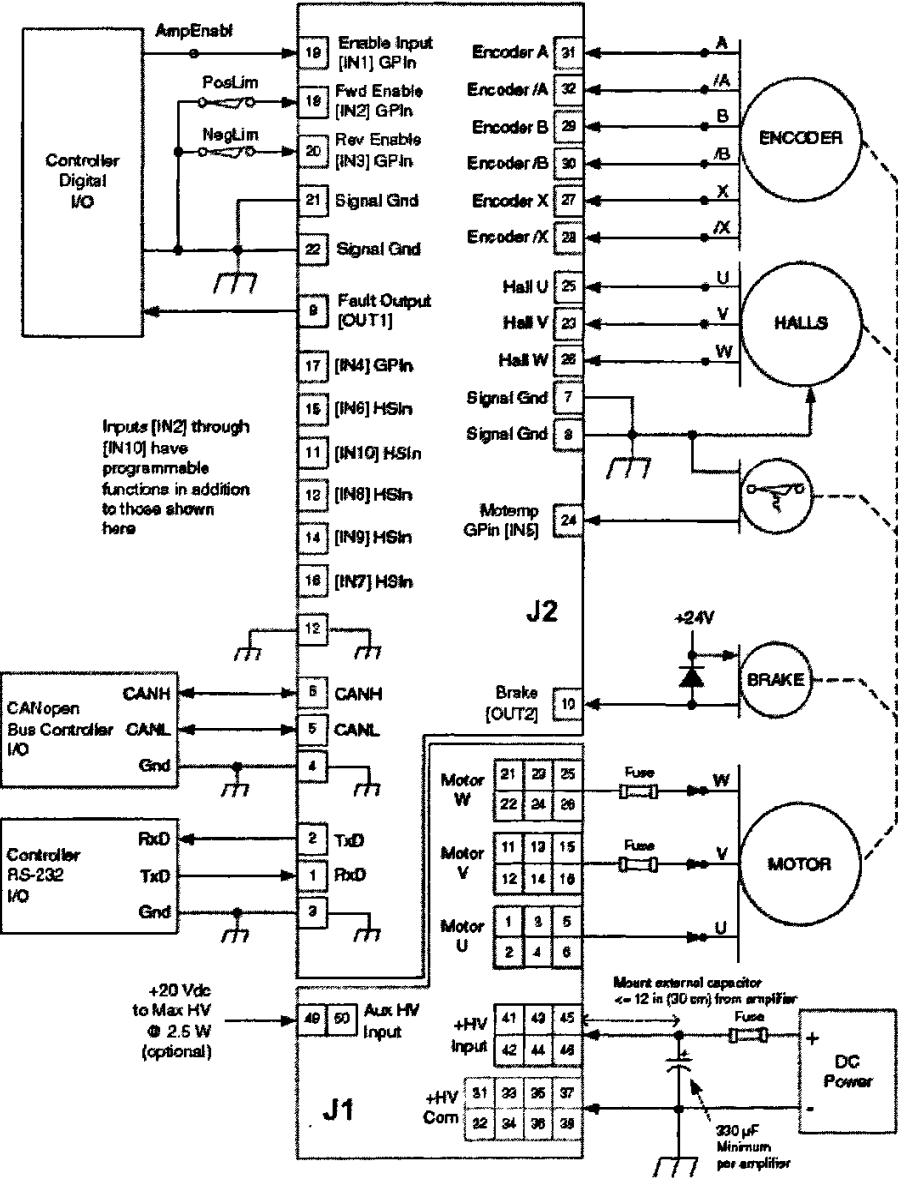


图 4.3 驱动器模块引脚结构
Fig 4.3 Driver module port structure

具体功能说明：

- (1)、逻辑输入

10 个逻辑输入用于配置 CAN 地址位, 使能, 限制和复位开关, 电机温度开关, 步进/编码脉冲和复位。有两个逻辑输出用于报告放大器的状态或驱动电机制动器。

(2)、软件优势

除了 CANOPEN 的运动命令, Accelnet 能采用来自于步进电机控制器的增量定位命令在 Pls/Dir 或 CW/CCW 形式, 如同于来自于主编码器的 A/B 求积分命令。WINDOWS 与 Accelnet 的通讯中使用 CME2 软件使得放大器的应用更加便利, CME2 中的自动调协算法通过自动电机调向和电流环谐振(加速了)设置快速系统交付使用的时间。为了更好的调谐振用一个功能强大的示波器和波形发生器显示放大器的运行。放大器的配置数据存储在非易失的 FLASH 存储器中。

(3)、采样频率

空间向量调幅比传统的正弦 PWM 调幅传递更高的电机速度和更低的电机功率损耗, 电流环在 14KHz 采样, 位置环和速度环采样在 2.8KHz, PWM 纹波采样在 28KHz。

(4)、CANOPEN 网络

基于 CAN 物理层的坚固的两线通信总线, 原来设计应用于汽车行业, 具有低成本抗干扰等特点, CANOPEN 提供了对运动控制器件和命令同步的支持, 是多轴运动控制系统中数据传输率与低成本的高效结合, 器件同步使多个轴能够和谐的运动, 就好像由一个控制卡驱动的一样。

(5)、面向域的电机控制

不同于传统的正弦换向(只控制电机位相电流的幅度), 为了保持电机磁轴与位相电流所产生的场正交面向场的控制(FOC)控制的是电气位相, 这样可以尽量的加大电机的效率, 减小驱动电流产生的发热, 与传统的正弦换向相比转矩保持更宽的速度范围, 在相同供电电压下空间向量调相提供更高的电机速度。

(6) RS-232 通信

Accelnet 通过 3 根线来配置, 全双工的 RS232 接口, 波特率 9600~115200, 软件提供了图解的用户接口用于设置 Accelnet 的所有特点通过计算机的串口。RS232 口用于放大器调试与配置。配置后, Accelnet 就可独立工作, 接收来自控制器的数字位置、速度、转矩命令, 或者作为一个 CANOPEN 总线的网络放大器。

(7)、CANOPEN 通信

Accelnet 用 CAN 物理层信号 CANH, CANL 和 GND 连接, CANOPEN 协议通信。Accelnet 连接到 CAN 网络中之前, 一定要指定 CAN 地址, 指定 CAN 地址的工作通过 RS232 串口来完成。CAN 地址是 FLASH 存储器中的内部地址和配置成 CAN 地址位的

数字输入的结合, CAN 网络中最大允许连接 128 个 CAN 节点, 这时就要用到 7 个数字输入用于 CAN 地址的配置, 只剩下 3 个数字输入用于其它的功能。很多安装设备 CAN 节点达不到最大值, 那么用于 CAN 地址配置的数字输入就会小于 7 个, 这样可以省下较多的数字输入用于其它功能。

(8)、数字输入

Accelnet 有 10 个数字输入, 9 个为可编程输入用于功能选择, IN1 为使能输入, 用于控制 PWM 输出的关闭和打开状态。为安全测量, 当安装后控制器不能使其关闭时, 用 IN1 使放大器不能进行可编程。其它的 9 个用于功能选择, 两种 RC 滤波用于 GP&HS, 功能为脉冲, 方向, CW/CCW 的输入有 HS 滤波, 有 GP 滤波的输入用于一般的逻辑功能例如限制开关, 点击温度传感器, 输入 IN4 有一个 33uf 的 RC 滤波。

I/O 输入可编程功能有:

- CAN 地址
- 正限制开关
- 负限制开关
- 复位开关
- 放大器复位
- 相位/方向, CW/CCW 步进电机控制命令
- 四种 A/B 主编码位置命令
- 电机温度传感器或开关输入

除了选择功能外, 每个输入的有效电平也是可编程的, 放大器的复位发生在输入的边沿位置, 可编程为由高电平到低电平, 或由低电平到高电平, 当电机过热时, 关闭放大器的电机温度传感器。

(9)、数字输出

数字输出 OUT1 和 OUT2 是开沟道的 MOSFETS 通过 1K 的上拉电阻和二极管连接到 +5VDC。当加 30 伏直流电压供电时, 从外部负载中能得到 1A 的电流。输出通常被配置成放大器错误和电机制动器, 额外的功能是可编程的。作为一个放大器错误输出, 有效电平是高电平还是低电平都是可编程的。作为电机制动器输出时, 释放电机制动器使放大器使能也是可编程的。当驱动感性负载时, 例如继电器, 需要一个外加的倒转的二极管。输出的二极管用于驱动通过光耦接到 24V 上的 PLC 输入, 这个二极管防止电流由 24V 电压通过 1K 电阻流入放大器内部。这使得 PLC 输入断开, 给出放大器输出状态的错误描述。

(10)、电机连接

电机有 3 种连接信号：相位信号，霍尔信号和编码信号，相位信号传送放大器的输出电流，驱动电机产生运动，霍尔信号是三个数字信号在一个电子换向周期内给出绝对的位置反馈值，编码信号给出位置反馈的增量用于速度，位置模式。

(11)、电机编码

电机编码接口是差动的带有 RC 滤波的线性接收输入，差动输出的编码器比单端输出的编码器抗干扰能力强，在 PCB 布线时，编码器成对的信号线要尽量靠近达到最好的传输特性，如果用的是单端编码器在 PCB 板上要加一个上拉电阻，不用的一端悬空，建议反向输入悬空因为它的开路电压 2V 接近于 TTL 和 CMOS 电平，而正向输入的开路电压为 2.9V。

(12)、电机霍尔信号

霍尔信号提供电机一个电气换向周期内绝对的反馈值，它们是 U, V, W，它们通过电机内的电磁传感器或编码盘上有霍尔条纹的编码器得到，通常工作频率比编码信号的工作频率低的多，在 Accelnet 中，霍尔信号用于启动之后的换向初始化和在放大器进入正弦换向之后检查电机的相位。

(13)、电机相位连接

放大器的输出是一个三相的 PWM 换向器，把直流高电压转换成 3 个正弦电压波形驱动电机相位绕组，PCB 板上两个相邻印刷线之间的电压等于+HV，最大和额定电流不能超过特殊放大器模式的额定值。布线时，线宽 0.175 英寸，敷 3 盎司的铜对于 Accelnet 的所有模式，0.25 英寸的空间就足够了。

(14)、电源

Accelnet 的供电电源通常采用变压器隔离的不可调的直流电压源，要求在高压线没有负载的条件下最大输出电压不能超出放大器最大电压范围，电源电压范围取决于放大器向负载传输的功率。在很多情况下，放大器输出的额定功率颇高于增量运动应用中所需要的实际功率。也可采用不可调的开关电源供电，但要在电源和放大器之间增加一个二极管防止再生能量达到电源的输出值，这样，在二极管和放大器之间还需要一个外部电容，电容最小值为 330 μ F。

(15)、封装和散热

小体积和良好的散热特性使 Accelnet 能集成到有较少电缆和连接的设备中，如果需要可以靠近电机，可选择对流散热提供了两种散热电容。Accelnet 的 PCB 封装采用两个双排 0.1 英寸的针头，这样不用焊接便于放大器的安装和拆卸，带螺纹的支架旋入 PCB

板中正确良好的固定放大器，允许安装时朝任何方向。散热选择：不散热，对流散热，散热片散热。

4.1.2 刹车和离合器控制模块

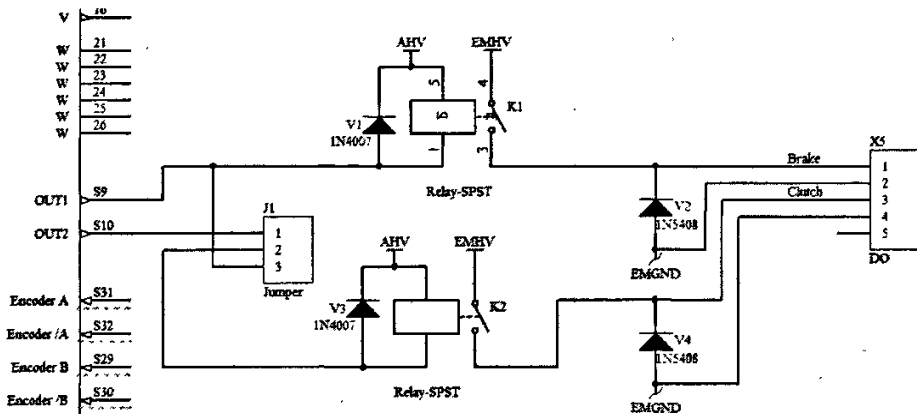


图 4.4 刹车和离合器模块
Fig 4.4 Brake and clutch module

驱动器输出 OUT1 和 OUT2 分别为刹车和离合器的输出控制信号引脚，低电平有效。跳线器 J1 起选择的作用，当跳线 1.2 引脚闭合时，OUT2 控制离合器；当跳线 2.3 引脚闭合时，OUT1 同时控制刹车和离合器。当 OUT1 为低电平时，继电器线圈流过电流，产生磁场，继电器 K1(若 OUT1 同时也控制离合器，则 K2 也吸合，离合器响应)吸合，刹车输出端子导通，电机迅速响应停转。当 OUT2 控制离合器且输出电平为低时，继电器 K2 吸合，离合器响应。

4.1.3 驱动器使能和显示灯模块

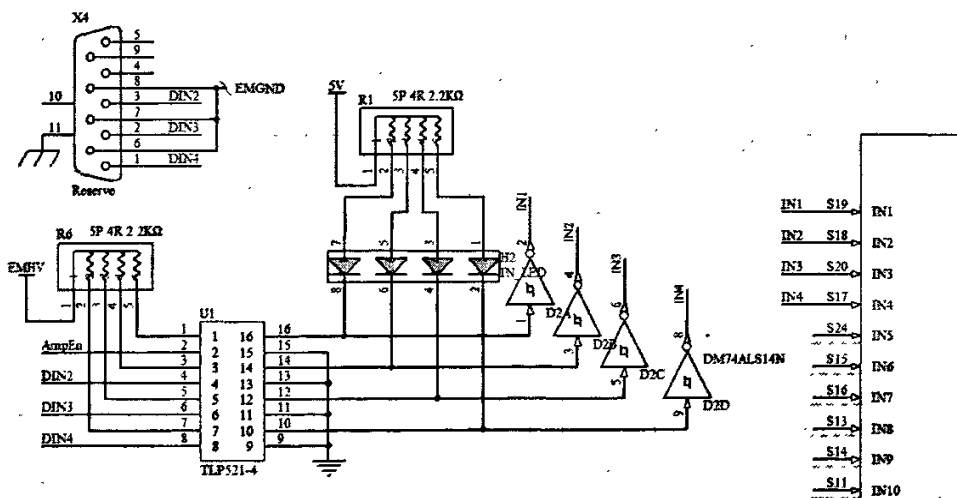


图 4.5 驱动器使能和显示灯模块
Fig 4.5 Driver enable input and LED module

如图 4.5，TLP521-4 为光电耦合器，DM74ALS14N 为反相器，R1 和 R6 为电阻排，

H2 为 LED 指示灯。光耦隔离就是采用光耦合器进行隔离，以光为耦合媒介，通过光信号的传递来实现输入与输出间电隔离的器件，可在电路或系统之间传输电信号，同时确保这些电路或系统彼此间的电绝缘。光耦合器的结构相当于把发光二极管和光敏(三极)管封装在一起。发光二极管把输入的电信号转换为光信号传给光敏管转换为电信号输出，由于没有直接的电气连接，这样既耦合传输了信号，又有隔离作用，而且其抗共模干扰能力强，能很好地抑制干扰并消除噪音。

使能信号 AmpEn 低电平有效，光耦输入端低电平时，输出端也为低电平，经反相器使信号为高电平，驱动器使能，此时 LED 指示灯亮，表示驱动器已经工作。DIN2、DIN3、DIN4 为保留引脚。

4.1.3 通讯模块

驱动器通讯模块支持两种通讯形式：CAN 总线通讯和 RS232 串行通讯。CAN 通讯模块由驱动器内部集成 CAN 控制器和外部接口电路组成，外部接口电路如图 4.6 所示，CANH,CANL 和 CGND 端口与接插件相连，最后连接到 CAN 总线上。

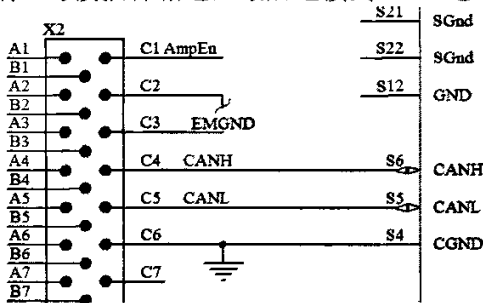


图 4.6 CAN 通讯接口
Fig 4.6 CAN communication interface

RS232 通讯模块的外部接口如图 4.7 所示，TXD,RXD 和 RGND 与电路板上的接插件相连，信号经转换器件转换成 TTL 电平。

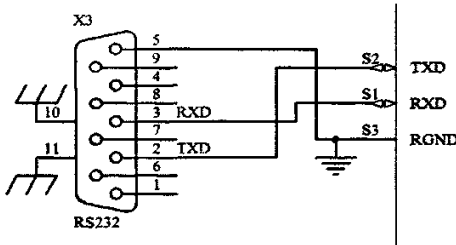


图 4.7 RS232 通讯接口
Fig 4.7 RS232 communication interface

4.2 位置反馈智能节点

该节点实现血管造影机 C 臂的四个轴位置信息数据采集的功能。由 CAN 通讯接口、

A/D 数据采集、滤波放大以及电源等部分组成。电路结构框图如图 4.8 所示。

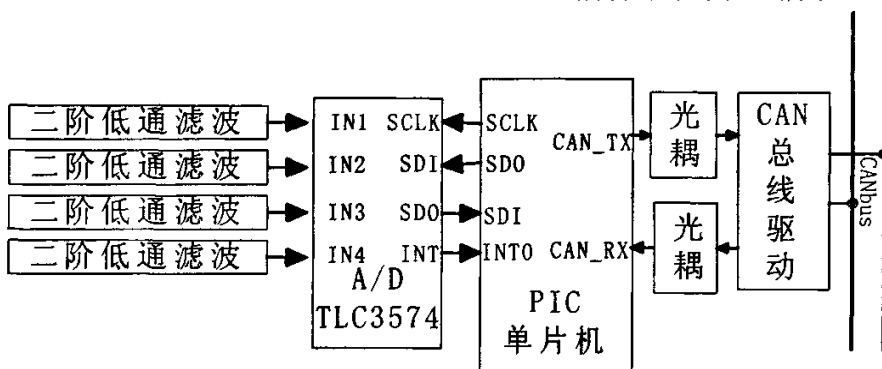


图 4.8 位置信息反馈节点结构框图

Fig 4.8 Position information feedback node structure

该智能节点以单片机为核心，采用 Microchip 公司的 PIC18 系列高档单片机，内部集成了 CAN 总线控制器，节省了外部 CAN 控制器的连接。CANH 和 CANL 通过高速光耦 6N137 与 CAN 总线驱动 82C250 连接，实现 CAN 位置总线各个节点间的电气隔离，提高了系统的抗干扰能力。单片机与 A/D 之间采用 SPI 串行通信方式实现数据采集。

4.2.1 单片机简介

位置信息反馈节点需要处理的信息量不是很大，需要 CAN 接口实现与上位机的通讯，基于以上原因，单片机选择了 PIC18 系列高档单片机 PIC18F458，该款单片机采用了 16 位 RISC 的精简指令集，哈佛总线结构，流水线取指令方式，具有实用，低价，指令集小，简单易学，低功耗，高速度，体积小，功能强及抗干扰能力强等特点^[32]。主要特征如下：

- 高性能的 RISC CPU：

高达 2MB 的程序存储器。

高达 4KB 的数据存储器。

高达 10MIPS 的执行速度。

DC~40MHz 时钟输入。

4~10MHz 带 PLL 锁相环有源晶振/时钟输入。

16 位宽指令，8 位宽数据通道。

带优先级的中断。

8×8 单周期硬件乘法器。

- 外围功能模块特性：

最大拉电流/灌电流可达 25mA。

3 个外部中断引脚。

定时器 TMR0: 带有 8 位可编程前分频器的 8 位或 16 位定时器/计数器。

定时器 TMR1: 16 位定时器/计数器。

定时器 TMR2: 带 8 位周期寄存器的 8 位定时器/计数器 (作为 PWM 的时基)。

定时器 TMR2: 16 位定时器/计数器。

2 个振荡器时钟选择: 定时器 TMR1/定时器 TMR3。

捕捉/比较/脉宽调制 (PWM) CPP 模块。

CCP 引脚配置如下:

—捕捉输入: 16 位, 最大分辨率为 6.25ns;

—比较单元: 16 位, 最大分辨率为 100ns (T_{cy});

—脉宽调制 (PWM) 输出: 分辨率为 1~10 位。

—最大 PWM 频率: 8 位分辨率时为 156KHz, 10 位分辨率时为 39KHz。

增强型 CCP 模块具有标准型 CCP 模块的所有特性, 但它在先进的电机控制时还有如下特性:

—1, 2, 4 路的 PWM 输出;

—可选择 PWM 极性;

—可编程的 PWM 的死区时间。

有两种工作方式的主同步串行通信 (MSSP):

—3 线 SPI 主控方式 (支持所有 4 种 SPI 工作模式)。

—I²C 主控/从动方式。

可寻址的 USART 模块: 支持中断地址位。

高级的模/数转换特性。

10 位, 8 个通道的模/数转换模块 (A/D):

—休眠时可以转换;

—8 个输入通道可用。

模拟比较模块: 可编程多路输入/输出技术。

比较器参考电压模块。

可编程的低电压探测模块 (LVD): 支持低电压检测时产生的中断。

可编程的锁定复位 (BOR)。

● CAN 总线模块特征:

符合国际标准 CAN 测试要求。

可编程位速率可达到 1Mbps。

支持 CAN1.2, CAN2.0A 和 CAN2.0B 协议。

标准和扩展的数据帧。

支持远程帧。

0~8 字节的数据长度。

三个带优先级的信息发送缓冲器。

带 2 个优先级的接收信息存储接收缓冲器。

6 个接收过滤器 (标准/扩展标识符), 其中 2 个与高优先级接收缓冲器相关, 另外 4 个与低优先级的接收缓冲器相关。

2 个接收屏蔽器, 分别与高, 低优先级接收缓冲器相关。

对所有 CAN 接收器和发送器的错误状态, 可以发出信号以产生中断。

优越的错误处理特性。

● 特殊的单片机特性:

上电复位电路 (POR), 上电延时定时器 (PWRT) 和振荡器起振定时器 (OST)。

带有片内 RC 振荡器的监视定时器 (WDT) 即看门狗。

可编程代码保护功能。

休眠 (SLEEP) 省电方式。

可选择不同的振荡器工作方式, 包括:

—4 锁相环 (主震荡器);

—2 路振荡器 (32KHz) 时钟输入。

通过 2 个引脚可进行线串行编程 (ICSP)。

FLASH 技术: 低功耗, 高速增强型 FLASH 技术。

全静态设计。

宽范围的工作电压: 2.0~5.5V。

工业级和扩展级温度范围。

低功耗。

PIC18F458 芯片的 TQFP 管脚封装图如图 4.9 所示:

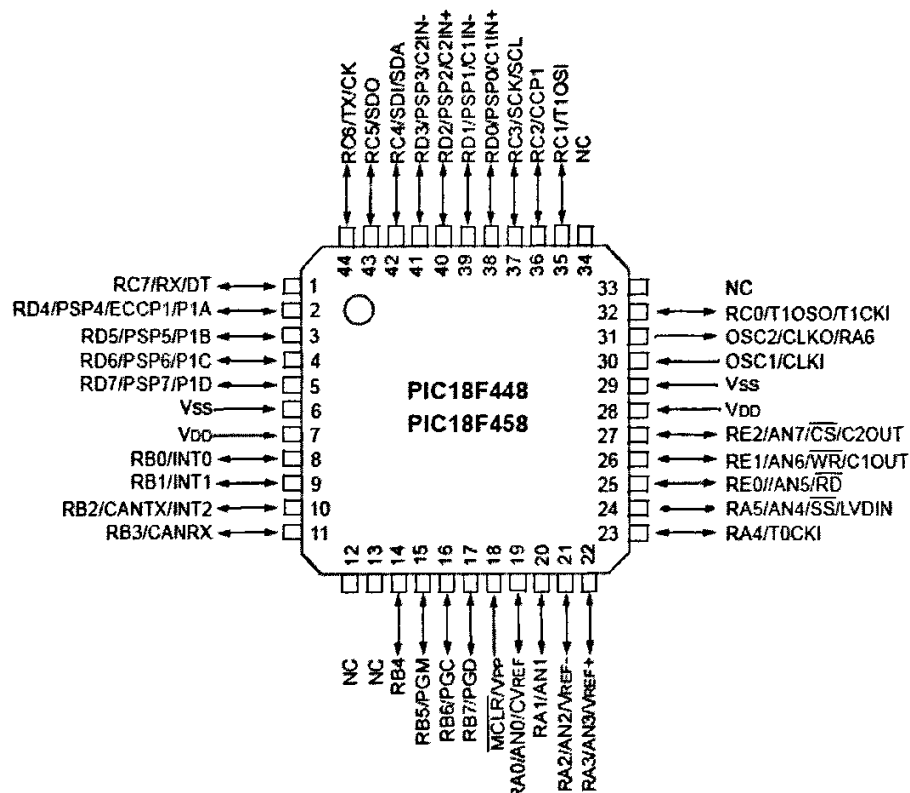


图 4.9 TQFT 管脚封装结构
Fig 4.9 TQFT pin encapsulation structure

PIC18F458 增强型单片机芯片有 3 种存储器：

- 增强型 FLASH 程序存储；
- 数据存储器；
- EEPROM 数据存储器；

数据和程序存储器使用分离的总线，PIC18F458 有 21 位宽的程序计数器 PC，最大可寻址 2MB 的程序存储器空间，复位矢量是 0000h，中断矢量是 0008h 和 0018h，0008h 为高优先级中断入口地址，0018h 为低优先级中断入口地址。

4.2.2 电源隔离模块

系统设计中，我们采用 SUS01L-05 实现 CAN 通信部分电源与其他部分电源的隔离，SUS01L-05 是 5V 输入 5V 输出的 DC-DC 电压转换模块，使用这种方法能有效的减少系统电源对 CAN 通信的干扰，确保 CAN 信息传输的准确性，电路图如图 4.10 所示：

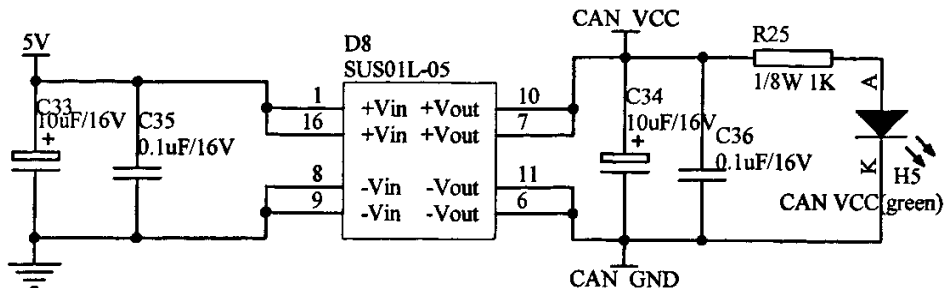


图 4.10 电源隔离模块
Fig 4.10 Electrical source insulation module

4.2.3 滤波模块

为了更好的实现系统的抗干扰性，设计中虽然使用了软件滤波，但是硬件滤波也是必不可少的，这里我们采用了典型的二阶有源低通滤波对 A/D 的模拟输入信号进行处理，滤除高频干扰，达到真实准确测量的目的。滤波电路如图 4.11 所示：

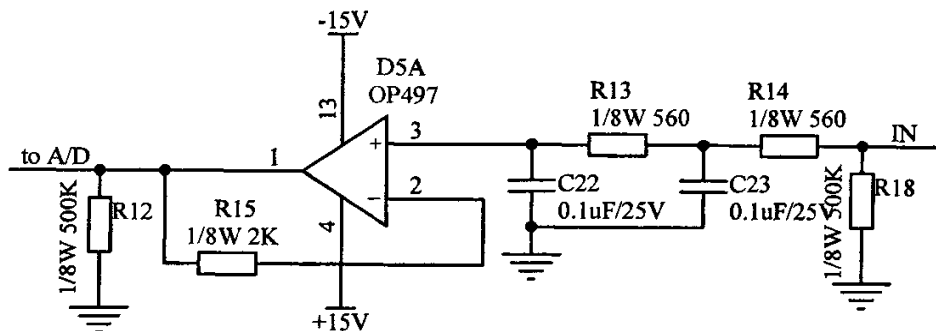


图 4.11 滤波电路
Fig 4.11 Filter circuit

该电路实质上是由一个二阶无源低通滤波和一个跟随器组成的，其增益为：

$$A = U_o / U_i = 1 \quad (4.1)$$

对于一个二阶滤波电路， $\omega_0 = 1/RC$ 并不是通带的截至频率，现假设 ω_p 为截止频率，则：

$$\omega_p = \sqrt{\frac{\sqrt{53} - 7}{2}} \omega_0 = \frac{0.37}{RC} \quad (4.2)$$

$$R_{26} = R_{27} = 620 \Omega$$

$$C_{38} = C_{39} = C = 0.1 \mu F$$

$$f_p = \omega_p / (2 * \pi) \approx 1000 \text{ Hz}$$

二阶有源低通滤波电路的截止频率为 1KHz。

4.2.4 A/D 数据采集

将各个反馈通道的模拟信号转换为数字信号再送入单片机进行数据处理是位置信息反馈节点的核心部分。

A/D 转换采用的是 TI 公司的性价比较高的一款 A/D 转换芯片，型号为 TLC3574，主要特点如下：

- 14 位精度
- 最大吞吐量能达到 200KSPS（每秒采样点数）
- 4 个单端输入通道，可配置成 2 对伪差分输入
- 模拟输入范围： $\pm 10V$
- SPI/DSP 兼容的串行通信接口，通信时钟最大支持 25MHz
- 内嵌转换时钟和 8 个 8 位的先进现出形式的堆栈；
- 硬件控制，可编程的采样周期

TLC3574 是一款高性能，低功耗，CMOS 的 ADC，需单 5V 模拟电源，3V~5V 的数字电源，串行通信接口由 4 个数字输入（片选信号 CS,帧同步信号 FS,串行输入输出时钟信号 SCLK,串行数据输入信号 SDI）和一个 3 态的串行输出(SDO)组成。其中，CS，SDI，SDO 和 SCLK 构成 SPI 接口,而 FS，SDI，SDO 和 SCLK 构成了 DSP 接口。使用 DSP 串行通信时，FS 表示一个串行数据帧正在传输，当多个 ADC 连接到 DSP 的一个串口时，CS 作为片选信号，当只有一个 ADC 被使用时，CS 可直接接地。不使用 FS 时一定要将其接到数字电源 DVDD 上,例如采用 SPI 接口方式通信 FS 是无用的。如果 SDI 连接到 DVDD 上，上电后 A/D 处于硬件默认模式，不需要软件配置，这是最简单的情况，只用三条线（SDO，SCLK，CS 或 FS）就可实现与主机的通信。

本系统中，采用 SPI 串行通信方式实现单片机与 A/D 之间的数字通信，电路图连接如图 4.12 所示：

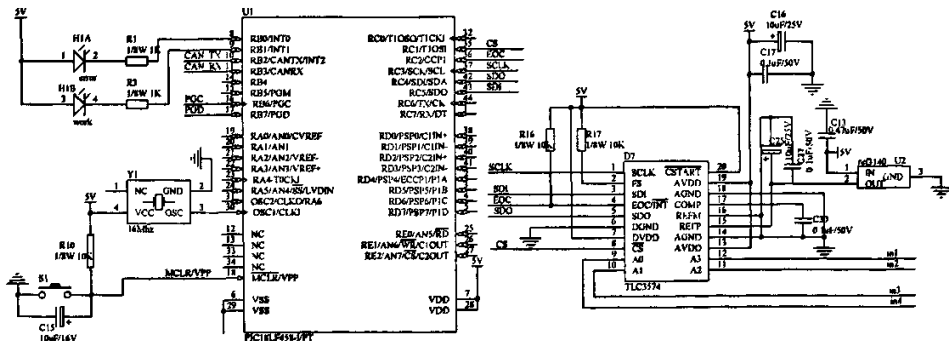


图 4.12 PIC18F4585 单片机与 TLC3574 的接口电路
Fig 4.12 Interface circuit between PIC18F4585 SCM and TLC3574

FS 接到高电平使其无效，单片机的 RC1 口控制 CS 信号，CS 的下降沿初始化 A/D，复位内部的 4 位计数器并且使能 SDO，SDI 和 SCLK 信号。通过 SDI 单片机对 A/D 执行配置，选择通道等操作，对所选择的模拟通道进行采样，转换，转换完成时 INT 变为低电平，通知单片机 A/D 转换完成，转换结果通过 SDO 输出给单片机。

4.2.5 CAN 通信

PIC18 系列单片机最突出的优点是它集成了 CAN 控制器模块，使用时不需要外接 CAN 控制器芯片，简化了电路。CAN 总线通讯接口电路如图 4.13 所示：

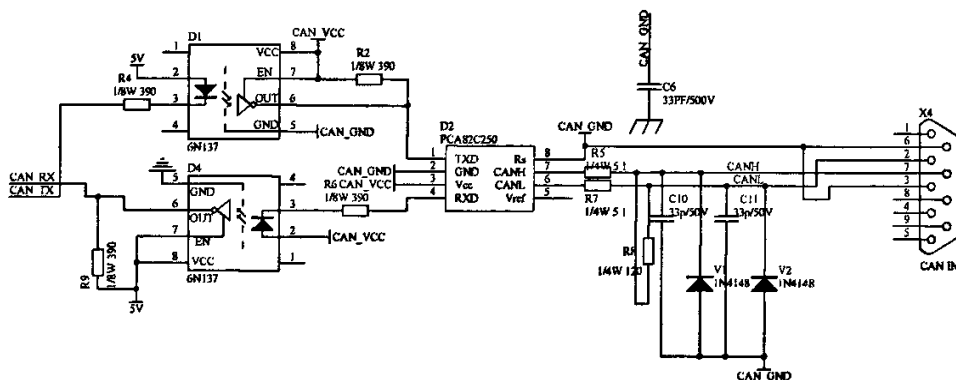


图 4.13 CAN 通信接口电路
Fig 4.13 CAN communication interface

CAN 模块使用单片机 B 口的 RB3/CANRX 和 RB2/CANTX/INT2 引脚和 CAN 总线连接，要配置 CANRX 和 CANTX 为 CAN 接口，需要将 TRISB<3>位置 1，即将 RB3 配置为输入引脚；TRISB<2>位清 0，即将 RB2 配置成输出引脚。使用光耦 6N137 隔离单片机和 CAN 总线，提高 CAN 通信接口的抗干扰能力。

CAN 总线模块由协议驱动和信息缓冲与控制组成。CAN 协议驱动 CAN 总线上接收和发送信息的所有功能，信息通过首先装载到某个相应的数据寄存器发送，通过读相应的寄存器可以检查状态与错误信息。在 CAN 总线上检测到的任何信息都要进行错误检查，然后与过滤器进行比较，判断是否应该被接收和存储到 2 个接收寄存器之一。PIC18F458 单片机的 CAN 模块支持标准数据帧，扩展数据帧，远程帧，出错帧，过载帧和空闲帧。

4.3 运动状态显示节点设计

运动状态由安装在检查室外的上位机监控，而在检查室是由一个显示板来告诉检查室里的医师当前的运动状态。

4.3.1 系统功能

运动显示节点作为 CAN 总线的的一个节点,接收经过上位机整理的来自 CAN 总线上其他节点的信息,然后以状态和运动数据直观的显示出来。它所显示的内容包括特定的位置 CAU/CRA, LAO/RAO, L arm CCW/CW 等和正常状态、自动位置控制状态、紧急事故状态。

本节点采用 PIC18F4585 单片机,以 74LS154 作为片选芯片,驱动液晶点阵文字模块。

PIC18F4585 单片机在前面已有介绍,这里用 RA0~RA5 端口作为片选端口, RC1~RC5 及 RE0~RE2 作为液晶模块的控制端口, RD0~RD7 作为显示数据的传输端口。

4.3.2 系统主电路

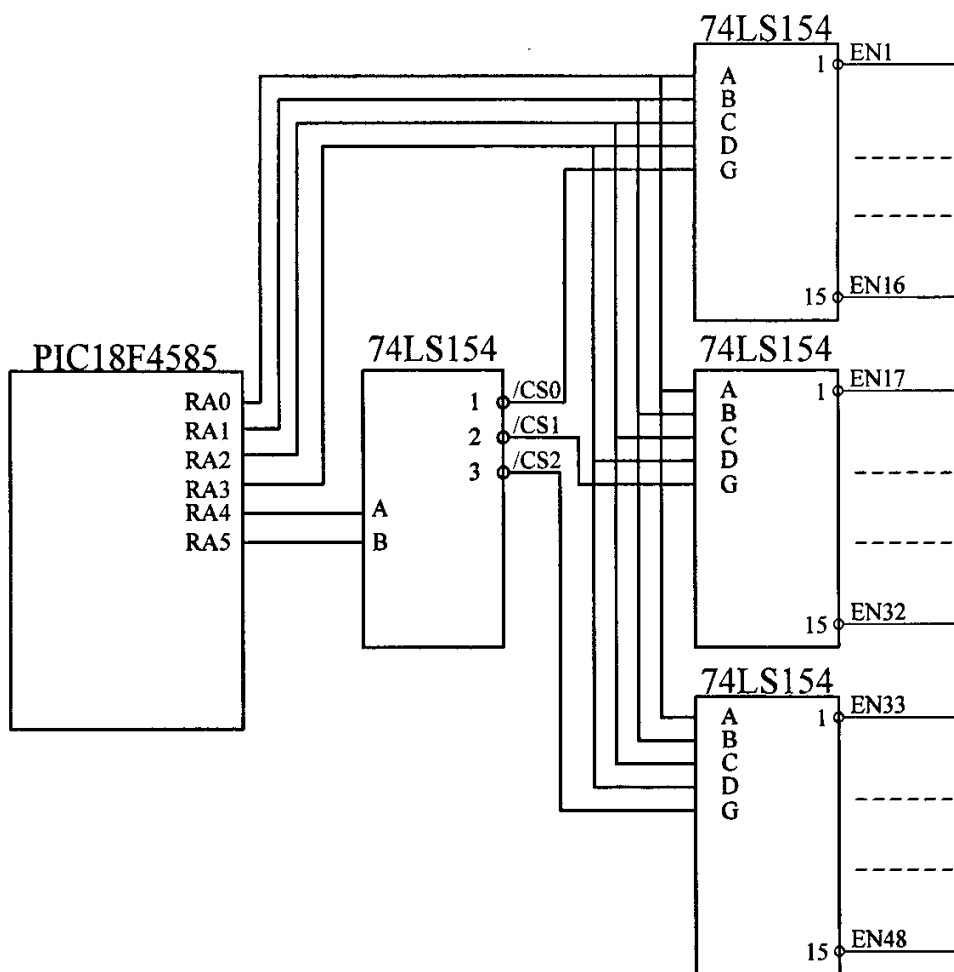


图 4.14 运动显示节点系统框图
Fig 4.14 Motion display node system structure

74LS154 是 TTL 电平的 4-16 译码器^[37],本显示节点包括 48 个液晶点阵模块,利

用四个 74LS154 芯片搭成两级译码电路来分别控制各液晶模块的使能端。单片机控制片选芯片的选通，使想要选通的液晶模块通过二级译码电路译码，使之使能，并通过单片机的设置端口为液晶模块配置相应的模式。单片机在接收到显示信息时，由控制端口发送命令，通过 8 位数据端口向液晶模块发送信息，使液晶模块显示相应的信息。

单片机各端口配置如下：

(1) 液晶模块控制端口

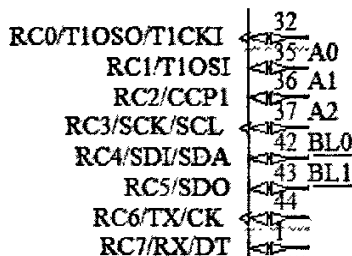


图 4.15 液晶模块控制端口

Fig 4.15 Control port of LED module

(2) 数据信息传输端口

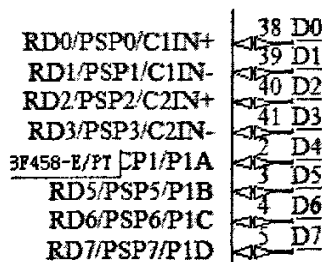


图 4.16 数据信息传输端口

Fig 4.16 Data information transfer port

(3) 片选端口

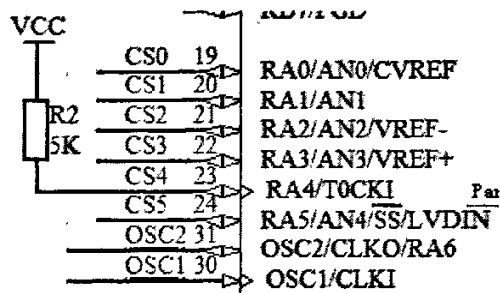


图 4.17 片选端口

Fig 4.17 Chip choice port

4.3.3 液晶显示模块

所采用的显示模块为德国 OSRAM 公司生产，根据显示字符的不同需要，选用了两种不同的模块 DLO7137 和 PD3537。以 PD3537 为例说明其功能和工作原理。

PD3537 是一种高档 LED 模块，内嵌 4 个位显示块，也就是说它可以同时显示 4 个

字符, 每个位显示块由 35 个点排列成 5X7 点阵, 再由内部电路控制 LED 点的亮灭, 从而可以显示出 128 个 ASCII 字符。

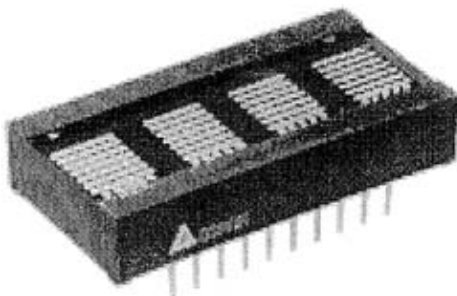


图 4.18 PD3537 液晶模块
Fig 4.18 PD3537 LED module

PD3537 包括几个主要的模块:

- 寄存器模块: 5 个 8 位的 RAM (随机存取寄存器), 其中四个作为存储 ASCII 代码数据, 用于存储 4 个位显示块的字符, 一个用于存储位显示块的控制字。每个 8 位寄存器都是可设定地址的, 并且其数据可读可写。
- 控制逻辑模块: 规定了显示部分所有的特性。
- 字符发生器: 将数据转换点亮对应的点, 使之成为可显示的 128 个 ASCII 字符。
- 微处理器接口: 与微处理器的接口是通过地址线 (A0-A2), 数据总线 (D0-D7), 两根芯片选择线 (/CE0, CE1), 和读、写线连接起来的。

图 4.19 为液晶模块内部结构图:

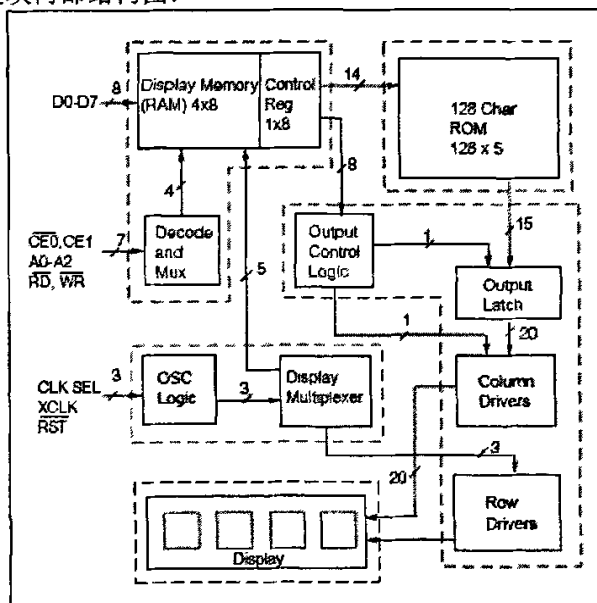


图 4.19 液晶模块结构
Fig 4.19 LED module structure

数据输入命令如图 4.20 所示：

CE0	CE1	RD	WR	A2	A1	A0	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	Operation
1	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	No Change
0	1	0	1	1	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X	Read Digit 0 Data to Bus
0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	(\$) Written to Digit 0
0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	(W) Written to Digit 1
0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	(f) Written to Digit 2
0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	(3) Written to Digit 3
0	1	1	0	1	0	0	1	X	X	X	X	X	X	X	Char. Written to Digit 0 and Cursor Enabled

图 4.20 设置命令定义
Fig 4.20 Command define

设置地址：

显示模块的地址如图 4.21 所示。

Address			Contents
A2	A1	A0	
0	X	X	Control Word
1	0	0	Digit 0 (rightmost)
1	0	1	Digit 1
1	1	0	Digit 2
1	1	1	Digit 3 (leftmost)

图 4.21 显示单元地址定义
Fig 4.21 Display unit address define

位显示块地址的 D7 位用来设定位显示块的属性，在这里我们设其位标准属性。当 D7 位被设置为 1，字符能够使用已设定的属性显示。如果 D7 位被清除，字符也能够正常显示。

控制字：

当地址位 A2 被置为低，进入控制字设置。当设置控制字时，显示模块可清除当前字符，可以测试显示点是否正常，可以选择显示亮度，当 D7 位置高时可以设置位显示块的属性。控制字的 D0,D1 两位用来设定点阵的亮度，D2-D4 三位用来设定显示属性，D5 位用来设定是否要闪烁显示，D6 位用来测试显示点阵是否正常。D7 位用来清零。

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Clear	Lamp test	Blink	Attribute enable	Attributes		Brightness	

图 4.22 控制字
Fig 4.22 Control word

字符定义：点阵模块的字符定义采用 ASCII 码定义标准，如图 4.23 所示：

ASCII CODE				D0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	
				D1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	
				D2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	
				D3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	
D6	D5	D4	HEX	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0	0	0	0																
0	0	1	1																
0	1	0	2																
0	1	1	3																
1	0	0	4																
1	0	1	5																
1	1	0	6																
1	1	1	7																

图 4.23 ASCII 码

Fig 4.23 ASCII code

总线上各节点的运动状态信息通过 CAN 总线传送到上位机以后，经上位机识别，整理再发送给显示节点，显示节点接收以后，经单片机判断识别传送给相应的显示模块，显示出特定位置运动状态值，如图 4.24 所示。

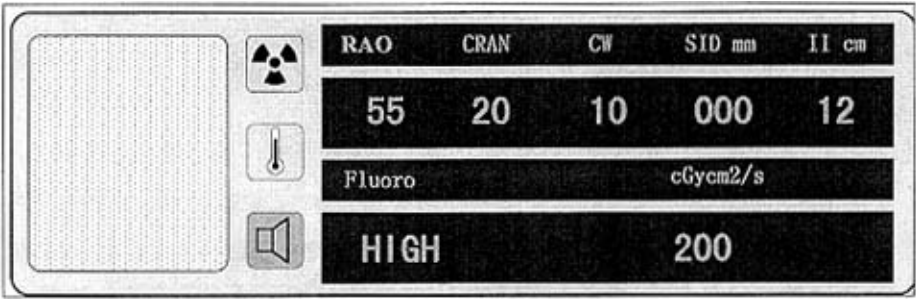


图 4.24 运动状态显示图

Fig 4.24 Motion state display

第五章 位置信息反馈 (PFB) 智能节点软件设计

PFB 节点通过对连接在电机轴上的电位计的电压的测量间接测量各个轴的位置，其软件设计流程如图 5.1 所示：

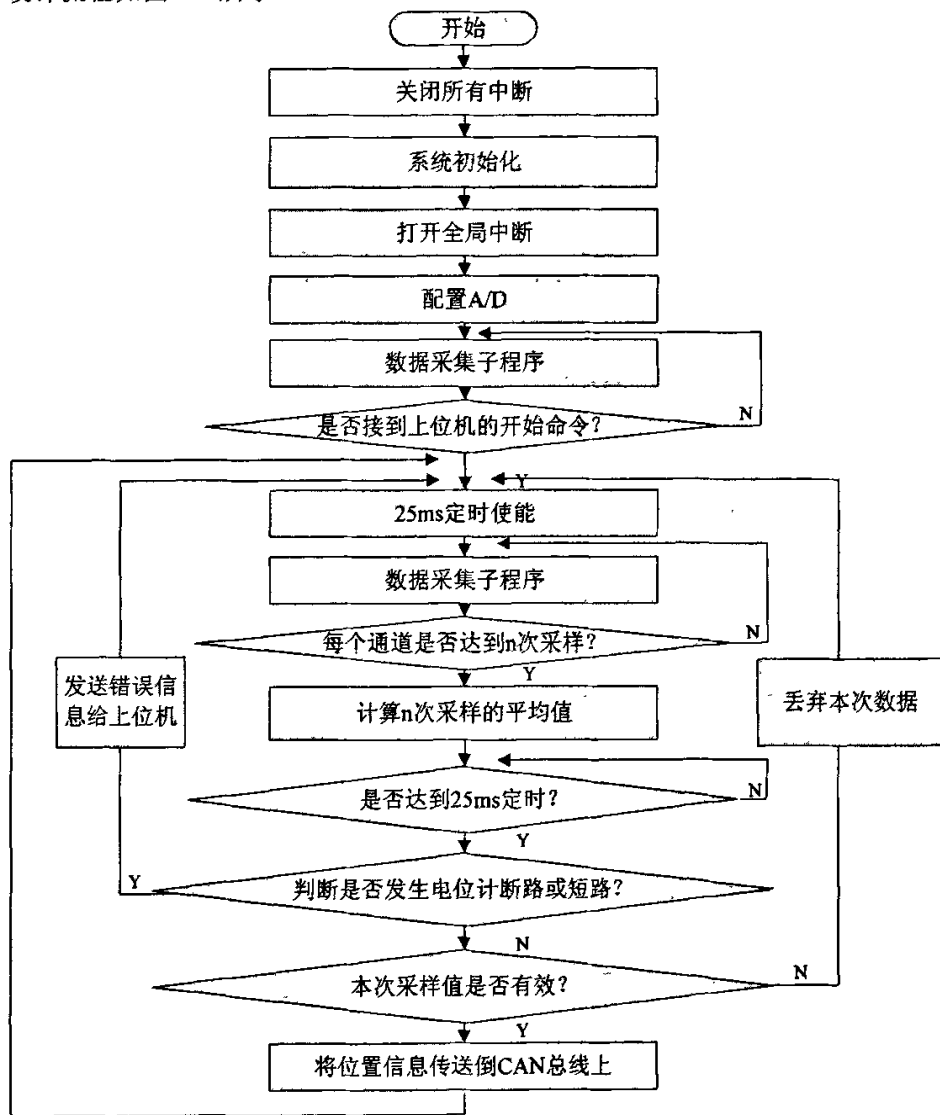


图 5.1 PFB 智能节点软件流程
Fig 5.1 PFB brainpower node software flow

上电后进行系统初始化，配置 A/D，然后进入等待状态，直到接到上位机发送给该节点的启动命令，并做出回应后开始对各个轴的位置数据进行采集。在系统中对每个轴的数据进行多次采样，采用平均值软件滤波的方法消除干扰得到每个轴的最终位置数据。通过得到的数据判断电位计是否发生断路或短路的情况，如果出现则通过 CAN 总线将错误代码发送给上位机，上位机发现出错使电机停止运动，进行故障检修。如果数

据为有效数据, 将数据通过 CAN 总线发送给上位机, 作为运动控制的参考数据。该节点以最小间隔 25ms 的速度向 PC 机发送一次轴的位置数据。

5.1 系统初始化

系统初始化包括对 CAN 通信的初始化, SPI 通信初始化, TMR0 定时中断初始化以及自定义变量等的初始化^[33]。

5.1.1 CAN 通信初始化

(1) 配置 I/O 口:

CAN 控制模块使用 RB3/CANRX 和 RB2/CANTX/INT2 引脚和 CAN 总线相连接, 首先要配置 CANRX 和 CANTX 为 CAN 接口, 将 TRISB<3>位置 1 即把 CANRX 设为输入, 将 TRIS<2>位清零即把 CANTX 设为输出。

TRISB=(TRISB|0x08)&0xF8;

(2) 对 CAN 各寄存器进行配置:

首先请求进入 CAN 配置模式, 相关的寄存器有 CAN 控制寄存器 CANCON 和 CAN 状态寄存器 CANSTAT。

CAN 控制寄存器 CANCON:

REQOP2	REQOP1	REQOP0	ABAT	WIN2	WIN1	WIN0	—
--------	--------	--------	------	------	------	------	---

REQOP=100, 请求进入配置模式

REQOP=000, 请求进入正常工作模式

CAN 状态寄存器 CANSTAT:

OPMODE2	OPMODE1	OPMODE0	—	ICODE2	ICODE1	ICODE0	—
---------	---------	---------	---	--------	--------	--------	---

OPMODE 为操作方式状态位 100 表示进入了配置模式

000 表示已进入了工作模式

CANCON=0x80;

//请求进 CAN 配置模式

while(CANSTAT&0x80==0){;}

//等待进入到配置模式

与波特率有关的寄存器配置:

波特率控制寄存器 1 BRGCON1:

SJW1	SJW0	BRP5	BRP4	BRP3	BRP2	BRP1	BRP0
------	------	------	------	------	------	------	------

BRP: 波特率前分频位

SJW: 同步跳转宽度位

波特率控制寄存器 2 BRGCON2:

SEG2PHS	SAM	SEG1PH2	SEG1PH1	SEG1PH0	PRSEG2	PRSEG1	PRSEG0
---------	-----	---------	---------	---------	--------	--------	--------

SEG1PH: 相位段 1 时间选择位

PRSEG: 传播时间选择位

波特率控制寄存器 3 BRGCON3:

—	WAKFIL	—	—	—	SEG2PH2	SEG2PH1	SEG2PH0
---	--------	---	---	---	---------	---------	---------

SEG2PH: 相位段 2 时间选择位

CAN 总线上所有节点必须使用相同的波特率, 最大波特率可达到 1MBPS, PFB 节点单片机晶振采用 $F_{osc}=16\text{MHz}$, 波特率计算如下:

$$T_Q = [2 \times (\text{BRP} + 1)] / F_{osc}; \quad (5.1)$$

$$T_{bit} = T_Q (\text{SJW} + \text{PRSEG} + \text{SEG1PH} + \text{SEG2PH}); \quad (5.2)$$

$$\text{波特率} = 1 / T_{bit}; \quad (5.3)$$

系统中使用的波特率位 250KHz。波特率配置程序如下:

```
BRGCON1=0X03;           //设置 SJW 和 BRP,SJW=1TQ,BRP=00H
BRGCON2=0X90;           //设置 PHASE_SEG1=3TQ 和 PROG_SEG=1TQ
BRGCON3=0X42;           //设置 PHASE_SEG2=3TQ
```

与接收有关的寄存器配置:

配置接收寄存器包括接收寄存器标识符, 接收滤波寄存器标识符, 接收屏蔽寄存器标识符, 接收数据长度寄存器, 接收数据寄存器的配置。

标识符采用 11 位标准标识符, 11 位标准标识符存放在两个寄存器中其中 SIDH:

SID10	SID9	SID8	SID7	SID6	SID5	SID4	SID3
-------	------	------	------	------	------	------	------

SIDL:

SID2	SID1	SID0	—	EXIDE	—	EID17	EID16
------	------	------	---	-------	---	-------	-------

其中 EXIDE 为扩展标识符使能位, 为 1 表明采用扩展 29 位标识符, 为 0 表示采用标准 11 位标识符, 扩展 ID EID17 和 EID16 被忽略。

接收滤波寄存器和接收屏蔽寄存器用于确定信息缓冲器中的信息是否被装入其中的一个缓冲器。一旦一条有效的信息被接收, 信息的标识符区域将与过滤器比较, 如果匹配那么信息将被装入相应的接收缓冲器, 过滤器屏蔽器用于确定标识符中的哪一位被过滤器检查。表介绍了标识符中的每一位如何与屏蔽器和过滤器进行比较, 来确定信息是否应该被装入接收缓冲器。屏蔽位通常是来确定哪一位用于接收过滤器。如果任一屏蔽位配置为 0, 那么此位将自动接收, 而不考虑过滤器位的状态。

表 5.1 过滤器和屏蔽器标识符真值表
Table 5.1 Filter and shield's identifier ture value

屏蔽位 n	过滤器位 n	信息标识符位 n	接收或拒绝位 n
0	×	×	接收
1	0	0	接收
1	0	1	拒绝
1	1	0	拒绝
1	1	1	接收

例如：若节点 A 的屏蔽寄存器 ID 和过滤寄存器 ID 都为 0010 0000，B 节点的屏蔽寄存器和过滤寄存器都为 0001 0000，当总线中的信息标识符为 XX1X XXXX 时，节点 A 接收，信息标识符为 XXX1 XXXX 时，节点 B 接受，信息标识符为 XX11 XXXX 时，A 和 B 都接收。

本节点中关于接收寄存器的配置如下：

```

RXB0CON=0X24;           //只接收有效的标准标识符信息
RXB0SIDH=0X20;           //设置接收标准标识符高字节寄存器
RXB0SIDL=0X00;           //设置接收标准标识符低字节寄存器
RXB0DLC=0X04;            //数据长度为 8 个字节
RXB0D0=0X00;             //初始化数据域字节寄存器组
RXB0D1=0X00;
RXB0D2=0X00;
RXB0D3=0X00;
RXF0SIDH=0X20;           //设置接收滤波器标准标识符高字节寄存器
RXF0SIDL=0X00;           //设置接收滤波器标准标识符低字节寄存器
RXM0SIDH=0X20;           //设置屏蔽器标准标识符高字节寄存器
RXM0SIDL=0X00;           //设置屏蔽器标准标识符低字节寄存器
    
```

完成 CAN 的配置后，使 CAN 进入正常工作状态，对 CAN 中断寄存器进行设置：使能 CAN 接收缓冲器 0 接收中断，CAN 接收中断为高优先级中断相对于定时器 TMR0 中断。

这里对中断寄存器的设置如下：

```

PIE3=0x01;               //使能接收缓冲器 0 接收中断
IPR3=0x01;               //CAN 接收缓冲器 0 中断优先级为高优先级
    
```

PIR3=0x00;

//清除发送接收完成标志位

5.1.2 SPI 通信接口初始化

单片机与 A/D 的通信是通过 SPI 串行接口来实现的, 因此对 SPI 接口的初始化工作是必不可少的。

SPI 通信分为主控和从动两种方式^[34], 我们采用主控方式, 与 SPI 通信有关的寄存器的配置如表 5.2 所示:

表 5.2 SPI 通信相关寄存器
Table 5.2 SPI Registers related to communication

TIRSC	7	6	5	4	3	2	1	0
	1	1	0	1	0	1	0	0
SSCON1	WCOL	SSPOV	SSPEN	CKP	SSPM3	SSPM2	SSPM1	SSPM0
	0	0	1	1	0	0	0	0
SSPSTAT	SMP	CKE	D/A	P	S	R/W	UA	BF
	0	1	0	1	0	0	0	0

使用 SPI 通信, 单片机的三个引脚 SDO(RC5), SDI(RC4), SCK(RC3)的输入输出状态一定要设置, SDO 和 SCK 为输出, SDI 为输入。

配置 SSPM=0001, SCK=Fosc/16;

CKP=1: 时钟高电平为空闲状态;

CKE=1: 基于 CKP=1, 表示在串行时钟 SCK 的下降沿发送数据。

SMP=0: 主控方式下, 在数据输出中间采样输入数据。

注意: SSPEN (SSPCON1<5>) 为串口使能位。要复位或重新配置 SPI 方式, 需要清 SSPEN 位, 重新初始化 SSPCON 寄存器, 然后配置 SSPEN 位为 1, 这样就把 SDI,SDO,SCK 和 SS 引脚配置成了串行端口引脚。

5.1.3 TMR0 定时器初始化

单片机 PIC18F458 中的定时器/计数器 TMR0 由 T0CS 位确定是工组在定时方式还是计数方式, 而且可以配置成 8 位工作方式也可配置成 16 位工作方式, 我们采用定时器 16 位方式。当晶振为 16M 时, 16 位定时器最大定时时间为 16.383ms, 达不到系统要求的 25ms 定时, 既然这样我们可以用 16 位定时器定时 1ms, 再对定时中断的次数进行计数 25 次, 即可实现 25ms 定时。

实现定时器 1ms 定时, 首先计算定时初值, 16 位方式定时初值存放在 TMR0H 和 TMR0L 中:

Fosc=16M;

$$\text{指令周期: } T_s = 4 * \frac{1}{f_{osc}} \text{ us} = 0.25 \text{ us};$$

工作时每个指令周期定时器的计数值加一，所以要实现 1ms 定时，需要计指令周期的个数：

$$N = 1000 \text{ us} / 0.25 \text{ us} = 4000 = \text{FA0H};$$

TMR0 定时器使用前的初始化程序如下：

```
T0CON=0X08;           //TMR0ON=0: 禁止 TMR0
                        //T08BIT=0: 16 位定时/计数器方式;
                        //T0CS=0: 内部指令周期时钟;
                        //PSA=1: 不用前分频器

INTCON2bits.TMR0IP=0;  //TMR0 低优先级中断
TMR0H=0XF0;            //TMR0 定时器计数初值
TMR0L=0X5F;
```

5.1.4 CAN 信息的发送与接收

PFB 节点采用 CAN2.0B 协议实现 CAN 通信，标识符为 11 位标准标识符，只用了其中的高 8 位作为有效 ID，低 3 位可补 0。CAN 数据帧格式定义如表 5.3 所示：

表 5.3 CAN 数据帧格式
Table 5.3 CAN data frame mode

字节	名称	位							
		7	6	5	4	3	2	1	0
字节 1	目标节点 ID (高 8 位)	目标节点 ID							
		CAN.8	CAN.7	CAN.6	CAN.5	CAN.4	CAN.3	CAN.2	CAN.1
字节 2	目标节点 ID(低 3 位)和数据长度	保留 ID			Set 0	CAN 数据长度			
		ID.3	ID.2	ID.1	RTR	DLC.3	DLC.2	DLC.1	DLC.0
字节 3	数据 1	源节点 ID							
字节 4	数据 2	命令字							
字节 5	数据 3	数值 1							
字节 6	数据 4	数值 2							
字节 7	数据 5	保留							
字节 8	数据 6	保留							
字节 9	数据 7	保留							
字节 10	数据 8	保留							

PFB 节点所要上传给 PC 机的信息包括 C 臂, L 轴, Junction, II 的当前位置以及各轴短路或断路错误信息, 具体定义如表 5.4 所示:

表 5.4 PFB 节点 CAN 信息
Table 5.4 CAN information of PFB node

命令来源	命令状态	命令字	注释
C 轴	位置数据	0X70	信息上传给 COPLY&PC
	断路	0X71	信息上传给 COPLY&PC
	短路	0X72	信息上传给 COPLY&PC
Junction	位置数据	0X73	信息上传给 COPLY&PC
	断路	0X74	信息上传给 COPLY&PC
	短路	0X75	信息上传给 COPLY&PC
L 轴	位置数据	0X76	信息上传给 COPLY&PC
	断路	0X77	信息上传给 COPLY&PC
	短路	0X78	信息上传给 COPLY&PC
II	位置数据	0X79	信息上传给 COPLY&PC
	断路	0X7A	信息上传给 COPLY&PC
	短路	0X7B	信息上传给 COPLY&PC
保留	保留	0X7C-0X80	保留

除了以上信息外, 上位机会在上电准备好后给 PFB 发送一个命令字为 55 的信息, PFB 接到该信息后将源帧返回, 再开始进行数据采集并上传数据, 如果上电后没有接到 55 信息, 则一直等待下去, 不上传数据。在工作过程中, 各轴的位置没有发生改变, 则 PFB 也不上传数据, 如果这时上位机需要各轴的位置信息, 要向 PFB 发送命令字为 7C 的数据帧, PFB 接到该帧后上传各轴的当前位置数据。

(1)、CAN 信息接收

CAN 信息的接收采用中断方式, 定义为高优先级中断, 中断入口地址为 0X08。接收中断服务子程序流程图如图 5.2 所示:

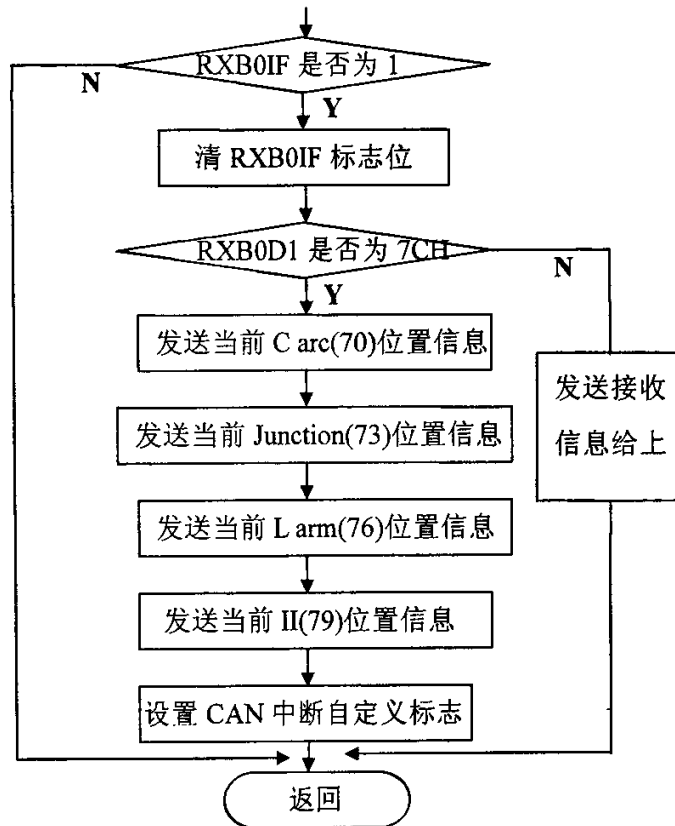


图 5.2 CAN 接收中断服务子程序

Fig 5.2 CAN receive interrupt serve subprogram

(2)、CAN 信息发送

CAN 发送子程序流程图如图 5.3 所示:

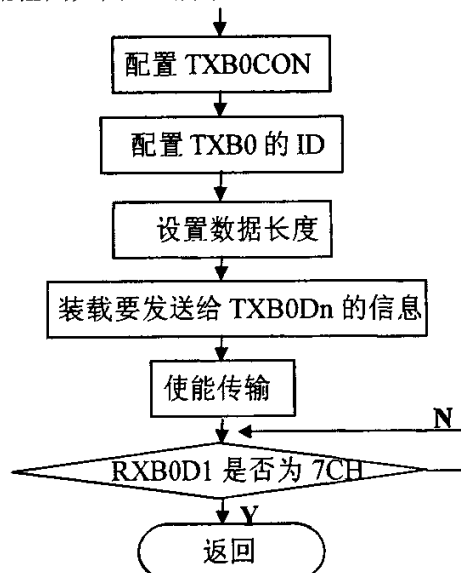


图 5.3 CAN 发送子程序

Fig 5.3 CAN send subprogram

5.2 数据采集

5.2.1 数据采集初始化

上电后, EOC/INT 初始化为高, 输入数据寄存器都为 0。器件在开始转化之前必须进行初始化, 初始化过程由工作方式而定, 上电后第一个转化结果要忽略。

硬件默认模式: 默认的无编程模式, 上电后如果 SDI 接到 DV_{DD} , \overline{CS} 的下降沿或 FS 的上升沿使器件进入硬件默认模式, 用 800h 加载 CFR 寄存器 (即配置成双极性的偏移二进制输出码, 正常的长采样, 内部转化时钟, 单端输入, 单次转化模式, EOC/INT 脚配置为 INT) 不需要额外的软件配置。

软件可编程模式: 如果转化器需要配置, 上电后主控制器一定要写 A000H 到转化器, 然后执行写 CFR 操作配置转化器。

工作周期开始: 根据由主控制器发出的命令每次转化都由几个步骤构成, 工作周期包括 3 个阶段: 命令阶段, 采样阶段, 转换阶段。在命令阶段, 器件把从主控制器得到的命令进行译码。采样阶段, 器件对命令阶段中选择的模拟通道进行采样。转换阶段, 将模拟信号的采样值转换为数字格式。工作周期开始于命令阶段, 接下来的是一个或多个的采样和转换阶段, 结束于上一个转换阶段。由 \overline{CS} 的下降沿或 FS 的上升沿来完成器件的初始化。

\overline{CS} 初始化操作: FS 高电平, \overline{CS} 的下降沿初始化器件操作。当 \overline{CS} 为高时, SDO 处于高阻状态, SDI 不考虑, SCLK 串行数据输入输出时钟功能禁止, \overline{CS} 的下降沿使内部的 4 位计数器复位并且使能 SDO, SDI 和 SCLK。通过 SDI 输入数据的最高位 ID(15)在 \overline{CS} 下降沿后的第一个 SCLK 下降沿发生时被锁存, 从 SDO 输出的最高位 OD(15)在 SCLK 的下降沿之前是有效的。这种模式是 SPI 通信模式, 这种模式 FS 一定要接到高电平上。

FS 初始化操作: 如果在 \overline{CS} 的下降沿发生时 FS 位低电平, 则 FS 的上升沿初始化操作, 它将复位内部的 4 位计数器使能 SDI, SDO 和 SCLK。通过 SDI 输入数据的最高位 ID(15)在 FS 下降沿后的第一个 SCLK 下降沿发生时被锁存, 从 SDO 输出的最高位 OD(15)在 SCLK 的下降沿之前是有效的。这种模式用于转换器于 DSP 主控制器的通讯, FS 连接到 DSP 的帧同步管脚上, 当多个转换器连接到同一个 DSP 串口时, \overline{CS} 用作片选, 当只有一个转换器时, \overline{CS} 可直接接地。

初始化之后, 剩下的 SDI 数据位一位一位的移入, 移入的同时 SDO 的数据一位一位的移出, 在 SCLK 的下降沿处输入的数据被锁存, 在 SCLK 的下降沿之前输出的数据有效。4 位的计数器计数达到 16 后, SDO 变为高阻状态。在单次转化模式中, 从 SDO 输出的数据是前次的转化结果, 如果使用了 FIFO, 则从 SDO 输出的数据是 FIFO 最顶

层的内容。

5.2.2 命令阶段

FS 的上升沿或 \overline{CS} 的下降沿之后，SDI，SDO 和 SCLK 被使能，前 4 个 SCLK 时钟周期构成了命令阶段，输入数据的高 4 位 ID[15:12]顺序移入被解码，这 4 位代表主控制器请求进入的操作命令，与此同时，通过 SDO 输出数据的高 4 位 OD[15:12]被移出。TLC3574 支持的操作命令由表 5.4 所示：

表 5.5 TLC3574 的操作命令
Table 5.5 Operation command of TLC3574

SDI D[15:12]		TLC3574 命令说明
二进制	十六进制	
0000b	0h	选择模拟通道 0
0001b	1h	选择模拟通道 1
0010b	2h	选择模拟通道 2
0011b	3h	选择模拟通道 3
0100b	4h	选择模拟通道 0
0101b	5h	选择模拟通道 1
0110b	6h	选择模拟通道 2
0111b	7h	选择模拟通道 3
1000b	8h	保留
1001b	9h	保留
1010b	Ah	写 CFR,SDI 的后 12 位写入到 CFR 中，次命令复位 FIFO
1011b	Bh	测试，电压 = (REFM+REFP) /2
1100b	Ch	测试，电压 =REFM
1101b	Dh	测试，电压 =REFP
1110b	Eh	读 FIFO,使 FIFO 的内容在 SDO 输出
1111b	Fh	硬件默认模式，CFR 默认加载 800h

从上述表中我们可以看到命令大体上可分选择/转换命令，写 CFR 命令，读 FIFO 命令和硬件默认配置命令，其中选择/转换命令包括选择模拟通道和选择测试命令，这些命令都将完成选择要转换的模拟通道，采样然后转化的过程。写 CFR 命令是用于配置操作方式，把配置信息写入 CFR 寄存器。FIFO 是一个 8×8 的先入先出的堆栈，读 FIFO 操作是将 FIFO 的内容读出再由 SDO 输出。默认模式是配置器件为默认设置模式，不需要软件设置。

对于写 CFR 命令，4 位命令字写入之后，剩余的 12 位 SDI 数据被写入 CFR 寄存器

中作为配置信息。

5.2.3 采样阶段

命令阶段之后就是采样阶段，被选择的信号在这个阶段被采样，由 3 种不同的采样模式：标准短采样模式，标准长采样模式和扩充模式。

标准短采样模式：采样时间由 SCLK 控制持续 12 个 SCLK 周期，在采样结尾转换器自动进入转化阶段。在初始化配置完后第 4 个 SCLK 下降沿标准采样自动开始。

标准长采样模式：同标准短采样模式相同，只是长采样要持续 44 个 SCLK 周期完成采样。

扩充采样模式：外部信号 CSTART 触发采样和转化。CSTART 的下降沿开始对选择的模拟通道进行采样，CSTART 的上升沿结束采样，接着大概有 15ns 内部延时开始转化，这种采样模式用于时钟频率高不适于采样或为了容纳不同输入信号源阻抗需要扩展的采样周期的场合使用。

5.2.4 转化阶段

转化阶段是操作周期的第三部分，对于标准短采样模式它开始于第 16 个 SCLK 时钟的下降沿之后，对于标准长采样模式转化阶段在第 48 个 SCLK 时钟的下降沿后开始转化，对于扩展采样模式则是在 CSTART 信号为高电平再经过 15ns 的内部延时之后开始转化。

转化时钟源可以是内部时钟源 OSC，也可以是外部时钟源 SCLK 是可编程选择的，为了避免转化过程中间中断，在两次连续触发之间要保持足够长的转化时间。如果 EOC/INT 管脚配置成 EOC 功能，转化过程中 EOC 一直为低电平，在转化阶段结束时 EOC 变为高电平，若配置成 INT 功能，则转化过程一直为高电平，转化结束时变为低电平对主控制器产生中断。

转化模式：有四种转化模式—单次模式，重复模式，休眠模式，重复休眠模式。

单次模式（模式 00）：每个工作周期对所选择的通道只执行一次采样和一次转化，不使用 FIFO。当 EOC/INT 管脚配置成 EOC 方式时，转化过程中 EOC 保持低电平直到转化完成，如果配置成 INT 方式，则在转化完成产生中断信号，这样可以通过检测 EOC 或 INT 的电平状态判断是否转化完成。

重复模式（模式 01）：对所选择的模拟通道进行多次采样和转化，结果存放在 FIFO 中，将采样的次数与通过 D[1:0]可编程的 FIFO 的阈值相比较，达到阈值则 INT 产生中断信号，工作过程结束，如果转化完成后 FIFO 没有被读出，里面的数据将被下一次操

作结果取代。

重复休眠模式 (模式 11): 除了在 FIFO 阈值之后下次操作开始之前不是必须要读 FIFO 这个区别以外, 这种模式与休眠模式基本相同。

PFB 节点中 TLC3574 转换器采用 SPI 方式实现与 PIC 单片机的通信, 转换器工作之前的配置如下:

```

PORTCbits.RC1=0;           //使能 A/D, 即由  $\overline{CS}$  初始化 A/D
SSPBUF=0XAE;                //写 CFR 命令
                              //配置 A/D 以二进制补码形式输出;
                              //标准短采样模式;
                              // 转化时钟采用内部转化时钟
while(PIR1bits.SSPIF!=1)    //SPI 通信配置高 8 位是否发送完成;
{
    PIR1bits.SSPIF=0;        // 清发送完成标志位;
    SSPBUF=0X00;              //转化模式采用单次模式;
                              // 模拟输入为单端输入;
                              //EOC/INT 管脚配置成 INT 功能;
while(PIR1bits.SSPIF!=1)    //SPI 通信配置低 8 位是否发送完成;
{
    PIR1bits.SSPIF=0;

```

TLC3574 由 \overline{CS} 初始化的工作时序图如图 5.4 所示:

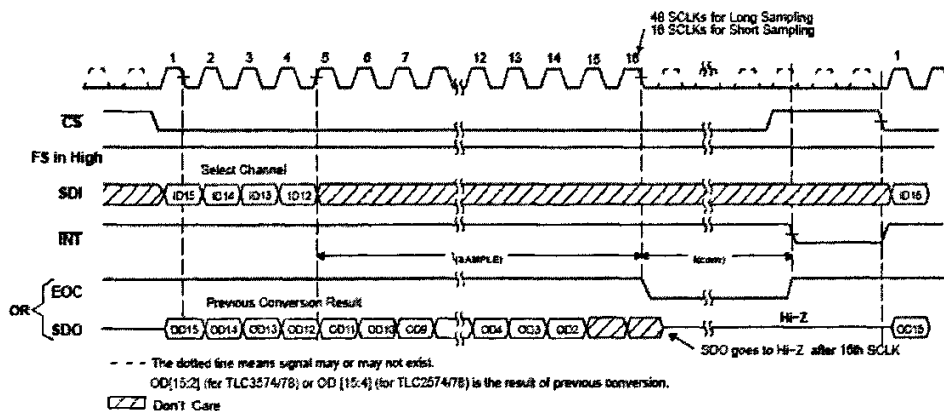


图 5.4TLC3574 工作时序图
Fig 5.4 TLC3574 work scheduling

第六章 控制算法的研究

6.1 PID 控制算法

本系统采用的是位置、速度、电流三闭环控制结构，采用 PID 控制器。

PID 控制是迄今为止应用最广泛的一种控制算法，在工业过程控制中占 90% 以上。这种控制方法原理简单、通用性强、鲁棒性好并且使用方便。其关键技术是 PID 参数的设置和整定，常见的参数整定方法有：衰减曲线法和临界振荡法(Z-N 法)等^[42, 43]。

6.2 Smith 预估器的使用

6.2.1 问题提出

在设计的转速、电流闭环控制系统中，使用 PI 控制，原理简单、通用性强、鲁棒性好且使用方便。然而在全数字伺服系统中，存在诸多固有的时间滞后因素，使系统稳定性降低、动态质量下降、调节品质下降，难以实现宽范围、高精度调速。

全数字伺服系统中的时间滞后 τ 由四部分组成^[18]：

(1) 测速时间滞后 T_r 。使用光电编码器测速存在一个固有的时间滞后，而且滞后的时间因转速的不同而异；

(2) 数据处理时间；

(3) PWM 功率转换电路有延迟时间；

(4) 机械传动部件的“死区时间 T_{PWM} ”，不同的机械结构方案中的机械时间常数会相差很大。

通常，(2) 和 (3) 引起的滞后时间可以忽略，因此系统的主要滞后时间为：

$$\tau = T_r + T_{PWM} \quad (6.1)$$

另外，在三闭环控制系统中，数字滤波器的使用也会引起系统延时，成为滞后时间 τ 的组成部分。

6.2.2 Smith 预估器的设计

在控制理论中，一般认为滞后时间 τ 与对象的惯性时间常数 T_m 的比值大于等于 0.5 时，即 $\frac{\tau}{T_m} \geq 0.5$ ，是难以控制的系统。1957 年 O. J. M. Smith 提出的滞后预估补偿算法^[17]从理论上解决了大滞后系统的控制问题。

(1) Smith 补偿控制原理^[19]

Smith 控制器在负反馈控制的基础上引入了一个预估补偿环节，使系统的闭环控

制特征方程不含纯滞后项，从而改善纯滞后控制系统的动态性能。许多纯滞后被控对象经过简化后都具有这样的形式：

$$G_p(s) = \frac{k_p e^{-\tau s}}{T_p s + 1} = G_0(s) e^{-\tau s} \quad (6.2)$$

带有纯延迟的单回路控制系统如图 6.2 所示，其闭环传递函数为：

$$\phi(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}} \quad (6.3)$$

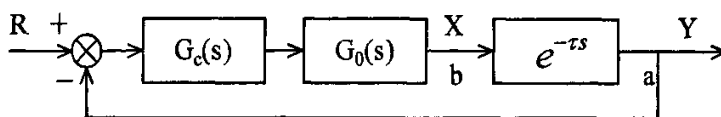


图 6.1 有纯延迟的单回路控制系统

Fig 6.1 Single closed loop control system with delay

特征方程为：

$$1 + G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s} = 0 \quad (6.4)$$

可见特征方程中出现了纯延迟环节，使系统的稳定性降低，如果 τ 足够大，系统将不稳定，这就是大延迟过程难于控制的本质。而 $e^{-\tau s}$ 之所以出现在特征方程中，是由于反馈信号是从系统的 a 点引出来的，若能将反馈信号从 b 点引出，则把纯延迟环节移到控制回路的外面，如图 6.2 所示，经过 τ 的延迟时间后，被调量 Y 将重复 X 同样的变化。

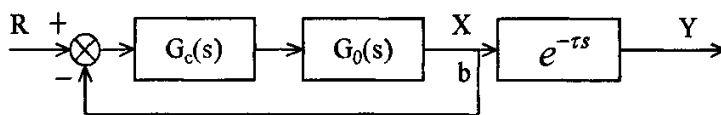


图 6.2 改进的有纯延迟的单回路控制系统

Fig 6.2 Improved single closed loop control system with delay

由于反馈信号 X 没有延迟，系统的响应会大大的改善。但实际系统中，b 点或者不存在，或者受物理条件的限制，无法从 b 点引出反馈信号来。针对这种问题，Smith 提出采用人造模型的方法，构造如图 6.3 所示的控制系统。

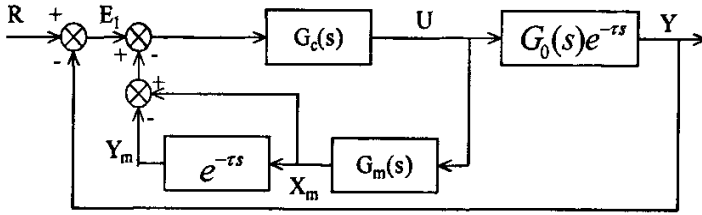


图 6.3 Smith 预估控制系统等效图

Fig 6.3 Smith predict control system equivalent block

相应的，数字 Smith 预估控制系统的框图如图 6.4 所示。

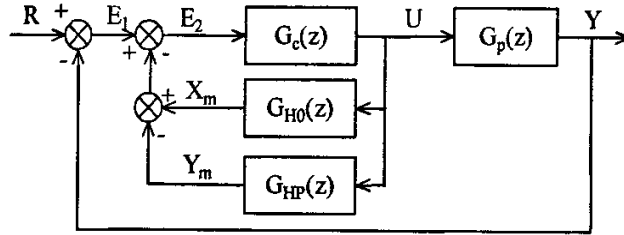


图 6.4 数字 Smith 预估控制系统等效图

Fig 6.4 Digital Smith predict control system equivalent block

由图 6.4 可得：

$$e_2(k) = e_1(k) - x_m(k) + y_m(k) = r(k) - y(k) - x_m(k) + y_m(k) \quad (6.5)$$

如果模型是精确的，则：

$$\begin{cases} y(k) = y_m(k) \\ e_2(k) = r(k) - x_m(k) \end{cases} \quad (6.6)$$

$e_2(k)$ 为数字控制器 $G_c(z)$ 的输入。

显然，Smith 控制方法的前提是必须确切的知道被控对象的数学模型，在此基础上才能建立精确的预估模型。

(2) Smith 预估器的参数

在三闭环控制系统中，在电流闭环使用 Smith 预估控制器，通过改善电流的动态响应波形，提高系统的控制性能。在实验中，通过测量电流和转速的响应曲线，测得延迟时间 τ 为 2ms。

6.2.3 仿真控制效果对比与分析

(1) Simulink 仿真控制模型的建立

直流电机电流闭环的控制对象为 $G_1(s) = \frac{1}{0.01s+1}$ ，速度闭环的控制对象为

$G_2(s) = \frac{1}{0.0067s+1}$ 。建立起来的 Smith 预估器控制模型如图 6.5 所示。

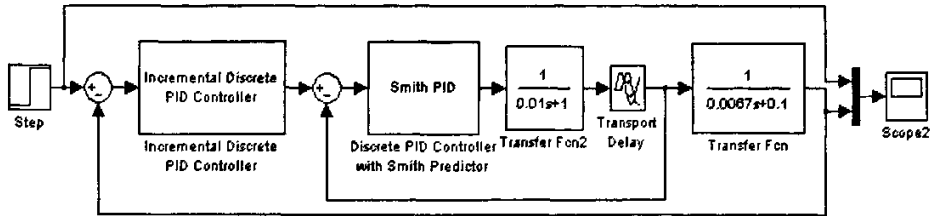


图 6.5 Smith 预估器仿真模型
Fig 6.5 Smith predict control system simulink model

为了对比说明 Smith 预估器控制的有效性,同时建立了使用增量式数字 PI 控制的 Simulink 仿真控制模型,如图 6.6 所示。

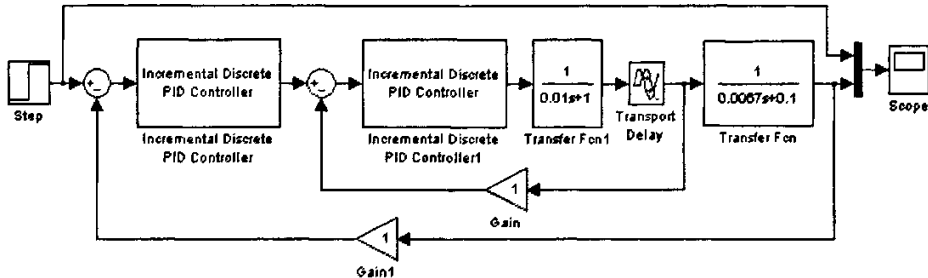


图 6.6 增量式数字 PI 控制仿真模型
Fig6.6 Increment digital PI control system simulink model

(2) 控制参数调整

按照图 6.5 和图 6.6 建立起来的仿真模型,在 MATLAB SIMULINK 环境中进行仿真,通过调整控制参数,可以得到最优控制效果。

Smith 预估器仿真模型中控制器参数设置如表 6.1 中所示。

表 6.1 Smith 控制器的参数

Table 6.1 Parameters of Smith controller

	K_p	K_i	K_d	限幅值	采样时间 T(s)	延时时间 τ (s)	预估模型
电流环	0.8	2.15	0	4000	0.001	-	-
速度环	35	60	0	32767	0.0002	0.002	$G_2(s)=G_1(s)$

增量式数字 PI 控制仿真模型中控制器参数设置如表 6.2 中所示。

表 6.2 增量式数字 PI 控制器的参数

Table 6.2 Parameters of increment digital PI controller

	K_p	K_i	K_d	限幅值	采样时间 T(s)	延时时间 τ (s)	预估模型
电流环	0.9	12.5	0	4000	0.001	-	-
速度环	5	60	0	32767	0.0002	0.002	$G_2(s)=G_1(s)$

(3) 控制效果对比与分析

以阶跃响应为例，两种控制方法得到的响应曲线如图 6.7 所示。

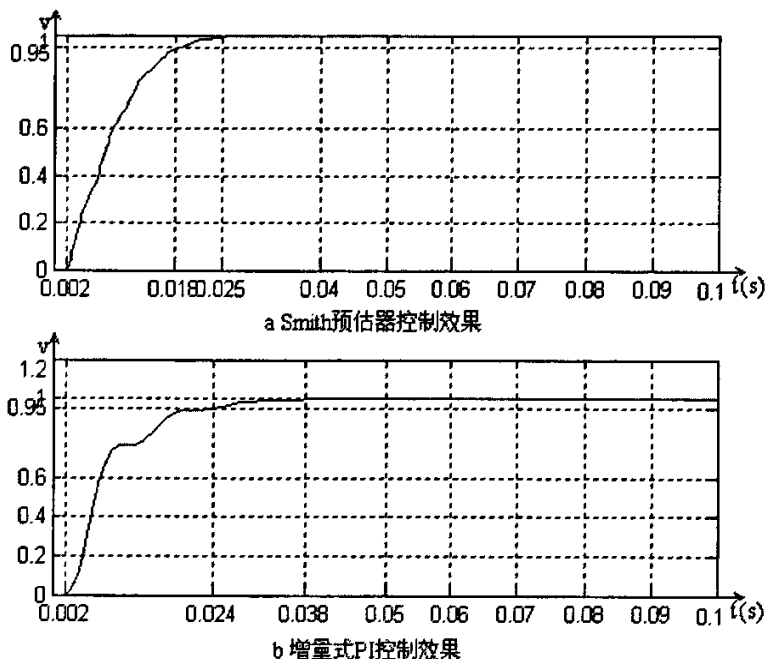


图 6.7 Smith 预估器和增量式 PI 控制器控制效果对比图
Fig 6.7 Effecton contrast of Smith controller and Increment digital PI controller

从图 6.7 中可以清楚的看出，使用 Smith 控制时，上升时间为 18ms，达到无静差跟踪的时间是 25ms，而使用增量式数字 PI 控制器时，上升时间是 24ms，达到无静差跟踪的时间是 38ms。可以看出使用 Smith 预估器可以缩短系统响应时间，提高系统控制性能。

本论文对 Smith 控制进行了研究，并得出了仿真结果，验证了 Smith 控制的有效性和可行性。为下一步建立被控对象的精确模型后进行实验研究奠定了基础。

6.3 电机控制算法

6.3.1 问题提出

在实现的全数字伺服驱动系统控制性能测试实验和仿真调试的过程中都发现：不同速度下使用同一组控制参数得到的控制性能并不能总是保持最优，有时和理想效果相差相当大^[38]。如图 6.8 所示的速度响应曲线，图 6.8(a) 为给定速度为 250 rpm（转/分）时的阶跃响应效果，图 6.8(b) 为给定速度为 750rpm（转/分）时的阶跃响应效果。可以看出，(a) 中上升时间为 12ms，达到稳态的时间是 18ms，而 (b) 中上升时间为 74ms，达到稳态的时间是 240ms。在给定速度增大时动态响应时间变得很长，控制性能变的很差。

为了改善这种情况，提高控制系统的鲁棒性和稳定性，对电机控制算法进行了改进，设计了一种参数模糊自整定控制器，并对其控制性能进行了研究。

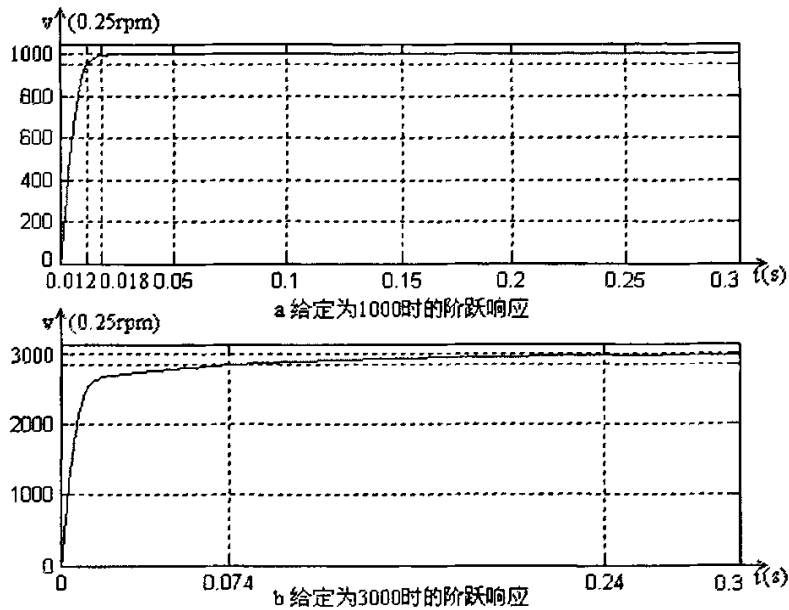


图 6.8 不同给定下增量式 PI 控制器控制的阶跃响应
Fig 6.8 Step response of different input with Increment digital PI controller

6.3.2 模糊自校正 PID 控制

(1) 模糊自校正 PID 控制原理^[19]

在工业生产的过程中，许多被控对象随着负荷变化或干扰因素影响，其对象特征参数或结构发生变化。自适应控制运用现代控制理论在线辨识对象特征参数，实时改变控制策略，使控制系统品质指标保持在最佳范围内，但其控制效果的好坏取决于辨识模型的精确度。

随着计算机技术的发展，人们利用人工智能的方法将操作人员的调整经验作为知识存入计算机中，根据现场实际情况，计算机能自动调整 PID 参数，这样就出现了智能 PID 控制器。由于操作者的经验不易精确描述，控制过程中各种信号量以及评价指标不易定量表示，模糊理论是解决这一问题的有效途径，所以人们运用模糊数学的基本理论和方法，把规则的条件、操作用模糊集表示，并把这些模糊控制规则以及有关信息（如评价指标、初始 PID 参数等）作为知识存入计算机知识库中，然后计算机根据控制系统的实际响应情况（相当于专家系统的输入条件），运用模糊推理，即可自动实现对 PID 参数的最佳控制，这就是模糊自适应控制。

自适应模糊 PID 控制器以误差 e 和误差的变化 ec 作为输入，可以满足不同时刻的

e 和 ec 对 PID 参数自整定的要求。利用模糊规则在线对 PID 参数进行修改便构成了自适应模糊 PID 控制器。

控制器结构如图 6.9 所示。

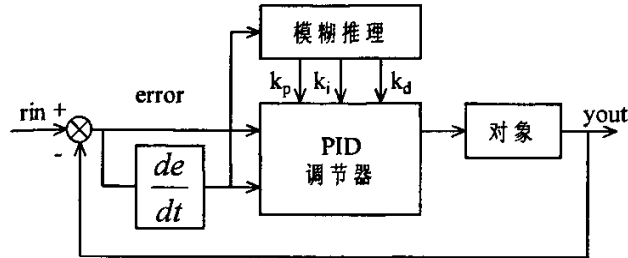


图 6.9 自适应模糊控制器结构
Fig 6.9 Self-tuning fuzzy controller struture

PID 参数模糊自整定是找出 PID 三个参数 e 和 ec 之间的模糊关系^[39]，在运行中通过不断检测 e 和 ec ，根据模糊控制原理来对 3 个参数进行在线修改，以满足不同 e 和 ec 时对控制参数的不同要求，从而使被控对象有良好的动、静态性能。

从系统的稳定性、响应速度、超调量和稳态精度等各方面来考虑， k_p ， k_i ， k_d 的作用如下：

① 比例系数 k_p 的作用是加快系统的响应速度，提高系统的调节精度。 k_p 越大，系统的响应速度越快，系统的调节精度越高，但易产生超调，甚至会导致系统不稳定。 k_p 取值过小，则会降低调节精度，使响应速度缓慢，从而延长调节时间，使系统的静态、动态特性变坏。

② 积分作用系数 k_i 的作用是消除系统的稳态误差。 k_i 越大，系统的静态误差消除越快，但 k_i 过大，在响应过程的初期会产生积分饱和现象，从而引起响应过程的较大超调。若 k_i 过小，将使系统静态误差难以消除，影响系统的调节精度。

③ 微分作用系数 k_d 的作用是改善系统的动态特性，其作用主要是在响应过程中抑制偏差向任何方向的变化，对偏差变化进行提前预报。但 k_d 过大，会使响应过程提前制动，从而延长调节时间，而且会降低系统的抗干扰性能。

PID 参数的整定必须考虑到在不同时刻三个参数的作用以及相互之间的互联关系。

（2）模糊规则表

模糊自整定 PID 是在 PID 算法的基础上，通过计算当前系统误差 e 和误差的变化率 ec ，利用模糊规则进行模糊推理，查询模糊规则表进行参数调整。

模糊控制设计的核心是总结工程设计人员的技术知识和实际操作经验，建立合适

的模糊规则表，得到针对 k_p ， k_i ， k_d 三个参数分别整定的模糊控制表。

通过仿真实验，调整和验证，针对本系统建立了下面的模糊规则表。

① k_p 的模糊规则表（见表 6.3）

表 6.3 k_p 的模糊规则表
Table 6.3 Fuzzy rules list of k_p

<div><div>ec</div><div>Δk_p</div><div>e</div></div>	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PS
NB	NB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	NM	NM	NM	NB	NB	PB

② k_i 的模糊规则表（见表 6.4）

表 6.4 k_i 的模糊规则表
Table 6.4 Fuzzy rules list of k_i

<div><div>ec</div><div>Δk_i</div><div>e</div></div>	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PS
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PB	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

③ k_d 的模糊规则表（见表 6.5）

表 6.5 k_d 的模糊规则表
Table 6.5 Fuzzy rules list of k_d

Δk_d ec e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PS
NB	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
NM	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
NS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PB	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO

(3) 参数的自适应校正

k_p , k_i , k_d 的模糊控制规则表建立好后, 可根据如下方法进行 k_p , k_i , k_d 的自适应校正。

将系统误差 e 和误差变化率 ec 变化范围定义为模糊集上的论域:

$$e, ec = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$$

其模糊子集为:

$e, ec = \{NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB\}$, 子集中元素分别代表负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大。设 e , ec 和 k_p , k_i , k_d 均服从正态分布, 因此可得出各模糊子集的隶属度, 根据各模糊子集的隶属度赋值表和各参数模糊控制模糊, 应用模糊合成推理设计 PID 参数的模糊矩阵表, 查出修正参数代入下式计算:

$$k_p = k_p' + \{e, ec\}_p$$

$$k_i = k_i' + \{e, ec\}_i$$

$$k_d = k_d' + \{e, ec\}_d$$

在线运行过程中, 控制系统通过对模糊逻辑规则的结果处理、查表和运算, 完成对 PID 参数的在线自校正。

6.3.3 仿真控制效果对比与分析

(1) Simulink 仿真控制模型的建立

在 matlab 的 simulink 仿真中建立如图 6.10 所示的仿真控制系统。

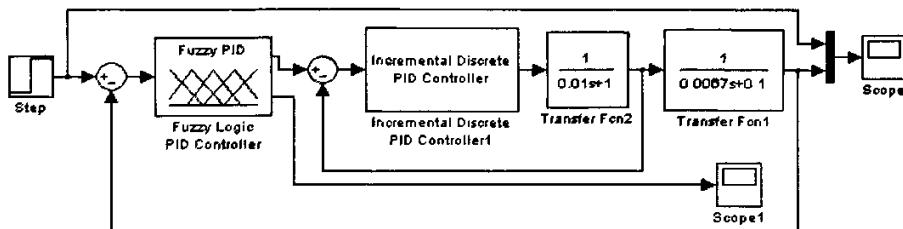


图 6.10 自适应模糊控制仿真模型
Fig 6.10 Self-tuning fuzzy controller simulink model

模糊逻辑 PID 控制器中有四个参数需要设定，如图 6.11 所示。

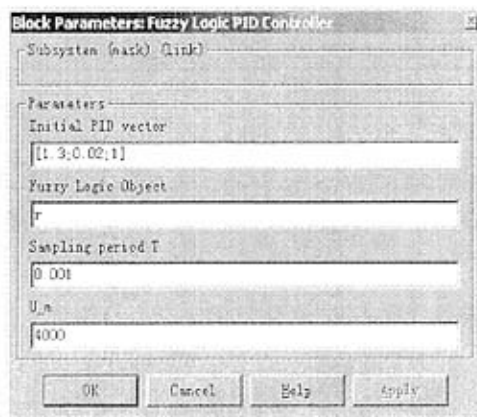


图 6.11 模糊逻辑 PID 控制器参数设定
Fig 6.11 Fuzzy logic PID controller parameters setting

其中参数 Fuzzy Logic Object 和模糊推理系统（FIS）密切相关。模糊推理系统可以通过模糊逻辑工具箱提供的图形用户界面（GUI）来建立。

（2）控制效果对比与分析

以阶跃响应为例，将不同输入下模糊自适应控制得到响应和增量式 PID 控制得到的结果进行了对比。给定 1000（0.25rpm）时的阶跃响应如图 6.12 中所示。

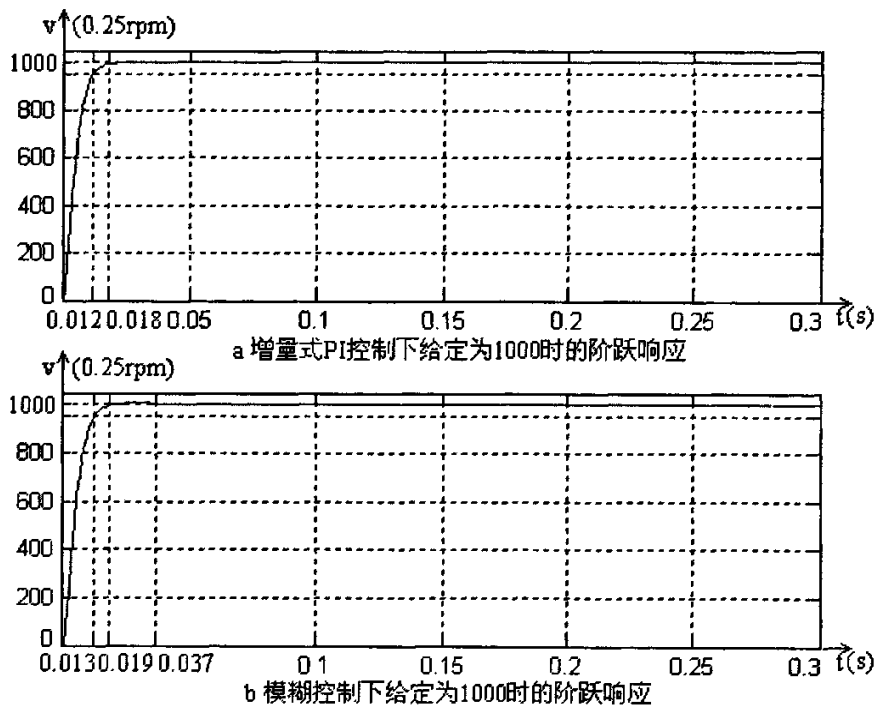


图 6.12 给定1000时的阶跃响应对比
Fig 5-14 Step response of given 1000 input

给定为 3000 (0.25rpm) 时的阶跃响应如图 6.13 中所示。

从图 6.12 中可以看出增量式 PI 控制下上升时间为 12ms, 达到稳态的时间为 18ms, 模糊自适应控制下上升时间为 13ms, 达到稳态的时间是 19ms, 控制性能相当。

从图 6.13 中可以看出增量式 PI 控制下上升时间为 74ms, 达到稳态的时间为 240ms, 模糊自适应控制下上升时间为 11ms, 达到稳态的时间是 15ms, 与给定为 1000 (0.25rpm) 的情况下的控制性能不相上下。

从以上两组数据的对比中可以看出, 模糊自适应控制很好的解决了在给定速度变化时, 系统的动态响应时间变化较大, 控制性能不稳定的问题, 提高了系统的鲁棒性。

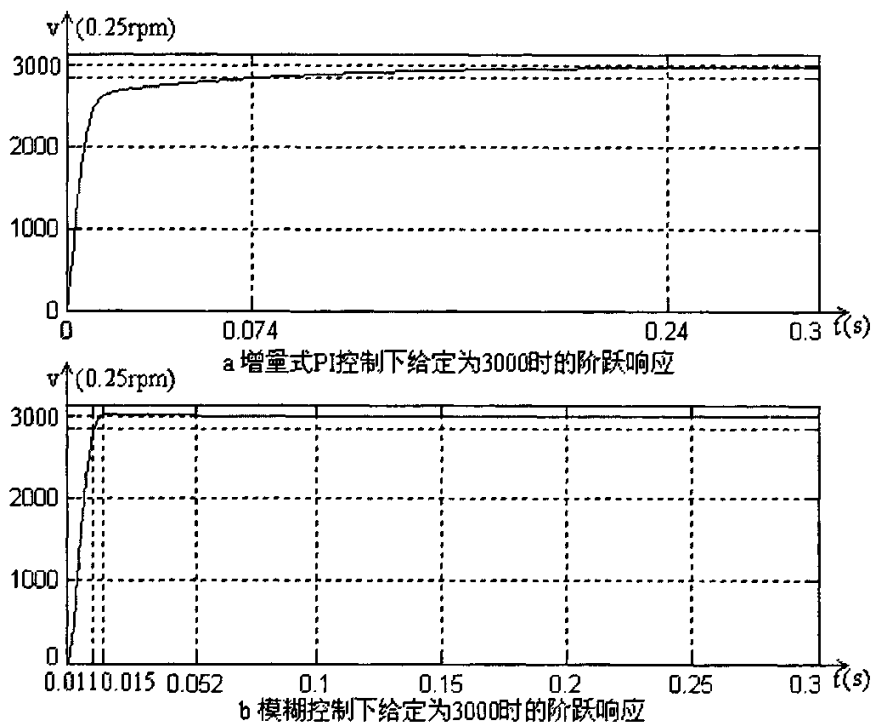


图 6.13 给定 3000 时的阶跃响应对比
Fig 6.13 Step response of given 3000 input

总结

(1)、结论

作者参与的课题是“经济型血管造影仪（ECV）的研发”，主要负责运动控制系统的设计。本论文对 ECV 系统进行了深入研究，结合 ECV 系统功能实现了一套运动控制系统，目前的使用结果表明可以获得良好的控制性能。

本论文中提出了运动控制系统的硬件设计方案，设计并调试了硬件电路的实际性能，对系统的部分软件进行了设计和实现。本文的创新点在于将 CAN 总线和 CANopen 协议引入运动控制系统的设计与实现中，使系统节点化、模块化，同时提出了采用 Smith 预估和模糊自校正 PID 控制算法改进控制性能，并做了相应的算法仿真。

在本课题实现的运动控制系统中，使用 CAN 总线技术和 CANopen 通讯实现了系统监控功能，为提高系统的通用性和扩展性提供了条件，为将来系统升级和技术改进奠定了基础。使用了节点设计方案，使系统设计工作清晰明了，节点作为子系统，方便了将来的功能改进和实际生产、维修。

由于系统中的延时因素会导致系统出现难以控制的现象，论文中对 Smith 控制进行了研究。在实现的运动控制系统控制性能测试实验和仿真调试的过程中，发现使用固定参数的 PID 控制效果不佳，因此对参数模糊自校正控制算法进行了研究。借助 MATLAB 对无刷直流电机控制系统进行尝试性的 Smith 控制和模糊自校正 PID 控制仿真，仿真结果证明，可以显著提高控制性能。

本课题实现的基于 CAN 总线和 CANopen 协议的运动控制系统将应用于 ECV 系统中，作为一个产品需要具有更好的可靠性、和通用性，还有很多的东西需要进一步细化和完善。

(2)、展望

论文中提出的 Smith 预估器的使用和参数模糊自整定控制算法虽然在仿真中可以得到理想的效果，但在实验中的效果还不是很理想。前者主要原因是不容易建立起精确的控制模型，而后者主要是由于不容易建立准确的模糊规则。在实践中的完全应用，还依赖于对算法的进一步研究和完善。

本系统在实现调试的过程中，发现硬件电路中存在一些疏忽和缺欠之处，为确保其稳定运行，下一步要进行多次实验调试，加强其可靠性。

在医疗电机控制领域，有着各种新的技术发展方向。新的医疗运动控制系统不但噪

音更小、安全性高、控制精度也会更高，这些都是今后的改进方向。

参考文献

1. 范凯. 现场总线的发展趋势. 中国自动化仪器仪表网
2. 叶云燕. 应用方便灵活的 CAN 总线网络. 亚太资源网, 2005.3
3. 余建明. 数字减影血管造影技术[M]. 人民军医出版社, 1999
4. 吴恩惠. 医学影像学[M]. 人民卫生出版社, 2003
5. 江林华, 陈仕东, 柴振明. 基于对数非线性映射的 X 光数字减影图像的获取与处理. 中国图象图形学报[J], 1999 年第 4 卷第 9 期
6. 王明时等. 数字血管减影系统的研究[J]. 天津大学学报, 2002 年第 35 卷第 1 期
7. 杨瑞江, 于秀丽. CAN 总线的特点及应用[M]. 甘肃科技, 2004.5
8. 郭宽明. CAN 总线原理和应用系统设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1996
9. H.Boterenbrood., CANopen:high-level protocol for CAN-bus
10. 李旭 谢运祥. PWM 技术实现方法综述. 电源技术应用, 2005.2
11. 李为民, 姜漫. 基于光电编码器的速度反馈与控制技术[J]. 现代电子技术, 2004 年 23 期
12. CAN 总线的浅析 CANopen 协议. <http://www.21control.com> . 2006.3.31
13. CANopen Device Profile for I/O Modules. CiA Draft Standard roposal 401, 1996.12.1
14. Electronic Data Sheet Specification for CANopen. CiA Draft Standard Proposal 306. 2001.6.29
15. CANopen Programmer's Manual. Version 2.3. Copley Controls Corp.2004.12
16. Jan Bosteels. An Introduction To CANopen Based Distributed Motion Control
17. Smith O.J.M.. Closed control of loops with dead time[J]. Chemical engineering progress, 1957
18. 杜振辉, 李朝阳, 蒋诚志, 桂垣. 基于 Smith 预估器的直流伺服控制器[J]. 仪器仪表学报, 2003.8 第 24 卷第 4 期增刊
19. 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 电子工业出版社, 2003.1
20. CANopen Communication Profile for Industrial Systems Based on CAL. CiA Draft Standard 301, 1996.10.30
21. 贡俊, 陆国林. 无刷直流电机在工业中的应用和发展[J]. 微特电机, 2000 年, 第 5 期
22. 叶金虎等. 无刷直流电动机[M]. 北京: 科学出版社, 1991
23. 张深. 直流无刷电动机原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996

24. 杨明,于泳等. 最重要的 BLDCM 位置检测方法[J]. 交流永磁同步伺服系统, 2004.11.
25. 卢文科, 朱长纯, 方建安. 霍尔元件与电子检测应用电路. [M] 中国电力出版社, 2005.9
26. 梁廷贵. 现代集成电路实用手册[M]. 科学技术文献出版社, 2002.2
27. 张相军, 陈伯时. 无刷直流电机无位置传感器控制技术的研究. [M] 上海大学出版社, 2003
28. 周科等. ROBOCUP 小型机器人串级控制系统的实现[J]. 工程设计学报, 2003.8, 第 10 卷第 4 期
29. 许大中, 何冀康. 电机特性及控制[M]. 机械工业出版社, 1988
30. 罗修杭. 机电控制[M]. 浙江大学出版社, 1996
31. Zhen-Yu Zhao, Masayoshi Tomizuka and Satoru Isaka. Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers. IEEE Transactions on Systems, MAN. And Cybernetics. Vol.23. No.5. September/October. 1993
32. 刘和平. PIC[R]18Fxxx 单片机原理及接口程序设计[M]. 北京航空航天大学出版社, 2004
33. 袁涛著. 单片机C高级语言程序设计及其应用[M]. 北京航空航天大学出版社, 2001.10
34. 求是科技. 单片机典型模块设计实例导航[M]. 人民邮电出版社, 2005.6
35. 曾峰, 侯亚宁, 曾凡雨. 印刷电路板(PCB)设计与制作[M]. 电子工业出版社, 2002
36. 肖忠祥, 孟开元, 尚海燕, 金树波. 数据采集原理[M]. 西北工业大学出版社, 2001
37. 王楚, 沈伯弘. 数字逻辑电路[M]. 高等教育出版社, 1989
38. 章卫国. 模糊控制理论与应用[M]. 西北工业大学出版社, 2001
39. 张化光. 模糊自适应控制理论及其应用[M]. 北京航空航天大学出版社, 2002
40. L.Mokrani and R.Abdessemed. A Fuzzy Self-Tuning PI Controller for Speed Control of Induction Motor Drive. 0-7803-7229-X/03 2003 IEEE
41. S.Tunyasirirut, J. Ngamwiwit and T.Furuya. Adaptive Fuzzy PI Controller for Speed of Separately Excited DC Motor. 0-7803-5731-0/99. 1999 IEEE
42. 金以惠. 过程控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996
43. 邵惠鹤. 工业过程高级控制. 上海: 上海交通大学出版社, 1997

致 谢

本文在导师杨光红教授的细心指导下完成，在我两年半的硕士学习期间，得到了杨老师悉心的指导和帮助。在课题的提出、设计和实现的整个阶段，为我提供许多的资料并提出了很多宝贵建议。导师严谨的治学作风和精益求精的治学态度给我留下了深刻的印象。在此对导师表示衷心的感谢！

感谢东北大学控制与导航研究所提供的良好的学术氛围，使我在短暂的二年半研究生学习期间深受感染，各位老师严谨的治学态度、严谨的工作态度、渊博的学识令我难忘。在这里我不仅学到了很多知识，更重要的是我还学到了做学问的态度和许多做学问的方法，这将使我受益非浅，让我在完成学业的同时收益颇丰。

我在东软飞利浦公司实习期间，单位的老师们给我以极大的鼓励和帮助，使我学到很多书本上没有的知识和技能。尤其感谢于宾、杨华老师，在我的论文设计中给予了中肯的意见，并且在设计、调试的实践中给我以支持和指导。

感谢师兄董久祥，师姐叶丹，同学李萍、杜鑫、王乐贤、吴振宇给予我的支持和帮助。

最后感谢参加论文评阅和答辩的各位老师。

基于CAN总线和CANopen协议的运动控制系统设计

作者: [张贺](#)
学位授予单位: [东北大学](#)

本文读者也读过(9条)

1. [赵峰](#) [CANopen协议研究及一体化适配器开发](#)[学位论文]2009
2. [田山](#) [基于CANopen协议的网络主控制器的设计](#)[学位论文]2008
3. [王峰](#) [基于嵌入式系统的CANopen协议分析研究](#)[学位论文]2010
4. [刘莉](#) [基于CANopen协议模块化CAN控制器的研究](#)[学位论文]2003
5. [吴金红](#) [基于CANopen协议的摊铺机控制系统研究](#)[学位论文]2010
6. [宋威](#) [CANOPEN现场总线应用层协议主站的开发与实现](#)[学位论文]2008
7. [张云廷](#) [基于CANopen协议的从站的设计与应用](#)[学位论文]2009
8. [曹硕](#) [基于CANopen协议的CAN总线应用抽象层的设计与实现](#)[学位论文]2009
9. [孟诏](#) [基于CANopen协议的CAN总线控制系统研究](#)[学位论文]2008

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1220509.aspx