

学校代号: 10532

学 号: S07093040

密 级:

湖南大学硕士学位论文

# 基于CANOpen总线低压断路器智能控制器的研究与设计

学位申请人姓名: 何孝发

导师姓名及职称: 戴瑜兴 教授

培 养 单 位: 电气与信息工程学院

专 业 名 称: 电子科学与技术

论文提交日期: 2010年4月10日

论文答辩日期: 2010年4月28日

答辩委员会主席: 刘宏立 教授



The Research and Design of Intelligent Controller of Low Voltage  
Circuit Breakers Based on CANOpen Bus

by

HE Xiaofa

B.E.( Hunan University)2007

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Electronic Science and Technology

in the

Graduate School

of

Hunan University

Supervisor

Professor DAI Yuxing

April, 2010



# 湖南大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：何孝发

日期：2010年 5月 18日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权湖南大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

1、保密□，在\_\_\_\_\_年解密后适用本授权书。

2、不保密□。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：何孝发

日期：2010年 5月 18日

导师签名：封培培

日期：2010年 5月 18日



## 摘 要

低压断路器是保护电气配电网络和电气设备免受过载、短路和漏电等故障危害的重要电气元件,智能控制器是其实现测量和保护等功能的核心控制单元。本文在回顾和总结了智能控制器的发展历程基础上,针对低压电器行业的发展趋势,致力于可通信低压断路器新型智能控制器的设计工作,研究设计一种基于 CANOpen 总线的低压断路器智能控制器。

(1) 通过分析断路器的研究现状和发展趋势,指出了传统断路器功能的局限性,阐述了配电系统对可通信智能断路器提出的更高应用要求。并在此基础上研究了智能控制器的技术基础:电量参数的测量原理、电流的三段保护特性和 CANOpen 总线技术等。

(2) 根据国家标准和企业标准以及项目的功能要求,提出了智能断路器控制系统的总体方案。设计了系统 DSP 主控模块、电源控制模块、拨码开关参数设定模块、总线通信模块、信号调理等硬件电路,详细阐述了系统各模块电路的组成原理和实现方法,给出了整个电路系统的原理图。

(3) 阐述了软件的总体设计,结合硬件电路设计实现系统的应用程序,详细论述了电流三段保护程序以及 CANOpen 从站协议栈程序的实现方法,并给出了系统的软件设计流程及部分代码实现。

(4) 在 QQ2812 开发板平台结合配套的 DSP 仿真器及开发软件 CCS2.2,对系统软件进行反复调试,给出了试验结果,同时通过 USBCAN 通信转换器及上位机 CAN 功能测试软件,对 CANOpen 从站进行简单的通信验证,给出测试方法。

最终的测试和运行结果表明,本文所设计的智能断路器能够稳定的实现三段电流保护,并且电流、时间的调节精度等技术指标均达到了预期的设计要求,智能控制器总线通信基本满足功能需求。

**关键词:** 低压断路器; 智能控制器; 三段保护; CANOpen 协议; DSP





## Abstract

Low-voltage circuit breakers is to protect the electrical distribution networks and industrial equipment from overload, short circuit and leakage and other important electrical components against malfunction. Intelligent controller is the core control unit of the realization of measurement and protection functions. This paper reviewed and summarized the development process for low-voltage electrical industry trends of the intelligent controller, and committed to the design work of communication intelligent controller for low-voltage circuit breaker, researched and designed a fieldbus-based CANOpen Intelligent Circuit Breaker controller.

(1) Analyzed the circuit breaker situation and development trend of the research , pointed out the limitations of the traditional circuit breaker function, and elaborated high level demand on applications of intelligent circuit breaker in the electrical distribution protection system. On this basis, this paper researched the intelligent controller technology : measurement principle of power parameter, the current three pahse protection features and CANOpen bus technology.

(2) According to national standards and enterprise standards and considering functional requirements of the project, put forward the overall intelligent control system circuit breaker program. This paper designed DSP control module system, power control module, the DIP switches module, communication module, signal conditioning module.etc, described the composition of the module circuit theory and methods in detail, then gave out the entire circuit system schematic.

(3) Described the software design, combined with the hardware circuit, then designed system application programs, discussed the implementation method of current three-segment protection procedures and CANOpen slave protocol stack program in detail, and gave the system software design process and some code implementation.

(4) On the platform of QQ2812 development board, combined with DSP emulator and software CCS2.2, debug the system software and over again, gave the results, while communications checked through USBCAN PC CAN converter and functional test software, and verified slave CANOpen communication, simple test methods were given.

Final test and operation results showed that the intelligent circuit breaker designed to stabilize the realization of three pahse current protection, and regulation



accuracy of current and time, other technical specifications have reached the desired requirements, the basic bus traffic control to meet the functional requirements .

**Keywords:** Low-voltage Circuit Breaker ; Intelligent Controller ; CANOpen Protocol; Three Phase Protection; DSP;



## 目 录

学位论文原创性声明和学位论文版权使用授权书 .....	I
摘 要 .....	II
Abstract .....	III
第 1 章 绪 论 .....	1
1.1 选题背景 .....	1
1.2 国内外研究现状及发展趋势 .....	2
1.3 选题研究的目的与意义 .....	3
1.4 本文主要研究内容 .....	4
第 2 章 基于 CANOpen 总线智能控制器的技术基础 .....	6
2.1 智能控制器算法原理分析 .....	6
2.1.1 测量的算法及分析 .....	6
2.1.2 保护的算法及分析 .....	7
2.1.3 三段电流保护的实现原理 .....	9
2.2 CAN 总线及 CANOpen 应用层协议 .....	10
2.2.1 CAN 总线协议 .....	10
2.2.2 CAN 报文帧结构 .....	11
2.2.3 CANOpen 应用层协议 .....	13
第 3 章 基于 CANOpen 总线智能控制器硬件设计及实现 .....	16
3.1 智能控制器总体设计 .....	16
3.1.1 设计要求 .....	16
3.1.2 总体硬件结构原理 .....	17
3.2 电流互感器特性 .....	18
3.3 主控电路模块设计 .....	19
3.4 信号调理模块设计 .....	21
3.4.1 调理电路 .....	21
3.4.2 硬件误差考虑 .....	21
3.5 电源模块设计 .....	22
3.5.1 双电源设计 .....	22
3.5.2 DSP 子系统电源设计 .....	23
3.5.3 电源隔离 .....	24
3.6 控制输入和输出模块 .....	24
3.7 通信模块设计 .....	26



3.7.1 eCAN 模块概述·····	26
3.7.2 CAN 节点的硬件设计·····	27
3.7.3 RS485 总线接口·····	27
第 4 章 基于 CANOpen 总线智能控制器软件设计及实现·····	29
4.1 软件总体流程·····	29
4.2 信号采样处理·····	30
4.2.1 信号采样·····	30
4.2.2 A/D 校准·····	30
4.3 保护动作特性软件实现·····	31
4.3.1 过载长延时反时限保护实现·····	32
4.3.2 短路短延时保护实现·····	33
4.3.3 瞬时保护实现·····	34
4.4 CANOpen 从节点软件设计·····	34
4.4.1 协议分析·····	34
4.4.2 协议栈的实现·····	37
4.4.3 对象字典的设计·····	39
4.4.4 协议栈初始化·····	41
4.4.5 通讯报文处理程序·····	41
第 5 章 系统调试及测试方法·····	45
5.1 开发环境与调试工具·····	45
5.2 电流保护功能测试·····	46
5.2.1 长延时特性测试·····	46
5.2.2 短延时特性测试·····	47
5.2.3 瞬时特性测试·····	47
5.3 CANOpen 从站功能测试·····	49
5.4 测量误差分析·····	50
总结与展望·····	52
参考文献·····	54
致 谢·····	57
附录 A 攻读学位期间发表的论文·····	58
附录 B 攻读学位期间参加的科研项目·····	59
附录 C 部分原理图·····	60
附录 D 开发测试平台·····	61





# 第1章 绪论

## 1.1 选题背景

在输配电网络中,塑壳低压断路器是重要的电器设备之一,对那些经常发生用电设备过载、短路的应用场合,能够安全、可靠地切断故障电流,防止事故扩大危及到整个输配电网络<sup>[1]</sup>。常用于不频繁操作的低压配电线路和开关柜中作为电源开关,对线路、电器设备和电动机等实施保护,在发生严重过电流、过载、短路、断相、漏电等故障时,能够自动分断线路,启动保护功能,不仅可以接通和分断正常的负载电流、电动机工作电流和过载电流,还可以接通和分断短路电流<sup>[1][2]</sup>。传统的低压断路器的检测功能和保护功能大多采用电磁元器件来完成,其抗干扰能力较差,动作时间长,保护精度较低,同时电流保护参数整定比较困难,如果器件受到损坏,很有可能引起误动作。

电力系统的快速发展促使供用电系统的规模和等级在不断扩大,输配电网络的结构、运行方式及管理调度都发生了巨大的变化,对电力系统的供电质量提出了更高的要求:要求能实现不间断供电,即使断电也必须要求断电时间尽可能的短、停电范围尽可能的小。这就要求供电系统具有比较高的智能化和自动化程度,当电力网络出现一些故障时,网络中的智能化保护设备能立即识别故障类别,快速切除网络中的故障部分,确保整个系统的正常运行。不管是传统的电磁式还是早期电子式的控制器都越来越难满足系统的可靠性、经济性、实时性、多样性和开放性的需求<sup>[2]</sup>。随着社会对供电系统自动化程度要求越来越高,对塑壳低压断路器也提出了更高的要求:体现在智能断路器实现它的自动化、智能化、模块化;对于输配电系统中多台断路器要求能实现网络通讯的集中监控。

为完善塑壳低压断路器的各种保护功能,降低功耗,进一步提高断路器工作的可靠性和稳定性,断路器中的保护元件由电子式向数字化、智能化、模块化方向发展。同时微处理器和数字处理技术的飞速发展,开始出现采用高性能微处理器设计的智能控制器,提高了断路器的智能化水平。智能控制器作为断路器的核心控制单元,基本功能是对检测线路进行故障保护,还可以实时显示电网的电能参数,允许用户根据现场的情况来整定各种保护参数,具备报警指示功能,同时提供远程通讯接口,能方便地组网与监控中心进行通信。若干智能断路器节点通过现场总线构成智能供电监控系统,实现电力系统遥测、遥控、遥信和遥调功能<sup>[3]</sup>。

## 1.2 国内外研究现状及发展趋势

### 1. 国外断路器的发展现状

目前国外的ABB、西门子、施耐德等公司不断推出新一代产品,国内某些著名电气企业也在低压电器领域跟进,形成第四代塑料外壳式断路器。新一代电器的主要技术特征为:高性能的触头灭弧系统,模块化结构,电子式脱扣器,性能优越,安装方式简便,能与现场总线进行通讯等。

其中高性能的触头灭弧系统以ABB公司、施耐德、GE等欧美大部分公司新一代产品所采用,即双断点旋转式触头系统,其加强了短弧度近阴极效应,具有较高的电弧电压,以提高分断能力,并省去了软连接。国内部分企业也申请了相关双断点旋转式触头的专利,例如浙江正泰电器股份有限公司的发明专利,公开了一种多极低压双断点塑壳断路器。该发明采用相对简单的结构,达到各单元之间可靠的机械连接和传动;并使安装更为方便灵活,可简化装配工艺,降低制造成本<sup>[1]</sup>。

ABB公司则推出 SACEIsmaxS 低压塑壳断路器,采用了微处理器电子式脱扣器,分断方式和形状特殊的开断元件使断路器能在极短时间内断开高达200kA的短路电流<sup>[2]</sup>。另外与现场总线通讯全球电力与控制专家施耐德公司合作在M系列基础上推出了MT、MVV和MTE等系列框架断路器。产品外形小、保护功能齐全、智能控制器在原有保护功能基础上,增加了电压、频率和功率的测量以及谐波和基波的计算,精确分析电能质量,能与多种总线联通等<sup>[3][4]</sup>。而 Osmart Powerpact 塑壳断路器符合 UL、CSA 等多种认证,则采用双旋转分断系统,限流能力强,分断能力最高可达100kA,具有短路保护功能和过载保护功能。

西门子公司推出了它的新一代产品 SENTRON WL/VL 断路器系列, SENTRON WL 型号万能式断路器额定电流为630~6300A, WL 型号可以通过COM模块配件接入 ProfiBus 网络,而 SENTRON VL 型号塑壳断路器额定电流为160~1600A,两款产品虽然功能不尽相同,接入网络的途径也不完全一样,但使用相同的通信规约和设备描述,具有 Profibus-DP、Ethernet、DeviceNet、RS-232C 等多种总线接口<sup>[4]</sup>。

另外,施耐德、GE、ABB、西门子等国外企业的电能管理系统已经可以将智能断路器、智能化的仪表、网关、显示设备等各类产品与上层的计算机相连,通过强大的电能管理软件对整个配电系统进行统一的调度、分析与控制。同时国外一些企业最新推出的智能断路器,在原有基础上加入了选择性保护功能<sup>[5][6]</sup>,加强了电能管理,通过控制电能质量来达到节能增效的目的,这与整个智能电网的发展趋势是一致的。相比较而言,虽然我国的智能断路器具有通信功能,但缺少电能管理功能,没有完善的软件支撑,没有从智能电网的高度考虑系统构建问题<sup>[1][2]</sup>。

### 2. 国内低压电器的发展趋势

国内对高性能、高可靠、小型化新型低压电器除了提高考虑其主要技术性能

外,重点追求综合技术经济指标。未来控制器智能化不仅体现在可实现长延时、短延时、瞬时过流保护、接地、欠保护等基本保护功能、还可显示电压、电流、频率、有功功率、无功功率、功率因数等系统运行电能参数,且具备更强的分析能力和综合能力<sup>[5][6]</sup>。

智能电网发展计划的提出,给我国智能电器的发展带来良好发展空间。我国第一代智能电器诞生于20世纪90年代,从本世纪初开始全面进行可通信低压电器的研制,并制订了相关标准包括总线通讯协议、低压电器通信规约、通信适配器等系统配套产品标准、可通信低压电器标准<sup>[1]</sup>。到了第三代低压电器则全面实现可通信产品包括:可通信万能式断路器和可通信塑壳断路器等,这些产品均能与多种现场总线连接。其系统的主要特点是具有开放性、允许多主站、多总线配置;支持多厂商设备、方便用户选择;全汉化、专用工程组态软件,组态方便、快捷、正确;适用于国内大部分开关柜;兼容第三方设备接入;系统配套件、附件齐全等。我国第三代低压电器已基本实现智能化、可通信、网络化。我国可通信、网络化电器发展基本跟上世界发展潮流<sup>[2]</sup>。但是可通信、网络化电器的应用刚刚起步,智能电器功能尚未全面发挥,系统配套性尚有差距。尤其是部分关键技术、产品核心技术,总线协议等与国外有较大差距<sup>[4]</sup>。

智能电网牵涉到很多新的概念,其中一个重要概念就是要保证用电的可靠性、连续性与安全性,从低压电器行业来看,选择性保护是着重发展的技术。目前智能电器应用涉及的相关技术:低压配电与控制系统网络化技术,典型网络系统与配套设备标准化工作;低压与中压配电网络系统一体化技术;低压向中压扩展;配电与控制系统网络化整体解决方案及配套产品研制与完善<sup>[4]</sup>。

随着智能电网发展,一批智能电网整体解决方案供应商将应运而生,它将为智能电器推广创造更好条件。智能电网用户、相应研制机构、重点实验室国家检测中心以及国家工程中心将相应建立,必将有力推动智能电器的发展与应用<sup>[5]</sup>。随着智能电器进一步发展,我国智能电网相应标准也将不断制定与实施,将进一步促进智能电器的发展与应用。

### 1.3 选题研究的目的与意义

#### 1. 课题来源及作者承担的科研开发任务

本课题来源于浙江省重大科技专项、湖南大学与浙江天正集团合作开发项目“基于现场总线的智能断路器技术研究与应用”[2007C11072]。本项目致力于研究并开发基于Modbus、Profibus、DeviceNet和CAN四种现场总线的智能断路器,主要内容包括:设计开发新型零飞弧断路器系统;研究并开发具有保护、监测、试验、自诊断、显示等功能的智能控制器;研究并开发处理软件;设计并开发四种总线的标准通讯接口。

本文研究的研究对象是低压塑壳式断路器的核心控制单元—智能控制器，设计开发基于DSP芯片的检测、计量、保护核心的智能化数字式控制器。在对智能断路器实现的基础上，内嵌现场总线的功能，使之具有高性能、高可靠性、小型化、智能化、可通信的特点<sup>[21]</sup>。主要致力于在原有的低压塑壳式断路器产品上开发基于CANOpen总线的低压断路器智能控制器，设计相关的硬件和软件，使断路器不仅能够提供断路器的各种基本保护和控制功能，既能够准确的实现三段保护，还能够设定和修改各种保护功能的动作事件参数，研究实现CANOpen高层应用层协议，并且能够通过CAN总线网络实现CANOpen从节点，实现具备遥测、遥信、和遥调等功能的智能配电系统。

## 2. 课题意义

目前，将信息技术应用到电器行业产品中已成为世界趋势，国外和国内对智能化、可通信的断路器的市场应用需求越来越大。其中，这种智能化、可通信的、高档次断路器产品市场占有率将达到30%以上，具有非常广阔的市场前景<sup>[1]</sup>。国外大型企业，如施耐德、西门子、ABB等都投入巨资进入该领域，如施耐德已经可以向用户提供外置式现场总线的智能断路器产品，目前正着手研究开发内嵌式现场总线的智能断路器、外置式Web服务器的智能断路器、内嵌式Web服务器的智能断路器等<sup>[5][6]</sup>。智能控制器是新一代低压断路器——智能断路器的核心控制单元，其特征是采用了微处理器技术，用数字化测控保护方式取代过去的电磁式和半导体式保护装置，不但使原有保护功能的精确度和稳定性大大提高，而且使其功能呈现多样化。目前国内正致力于开发国产第四代断路器——智能化、可通信断路器，其主要特征是在智能化的基础上具备基于现场总线的可通讯特点。产品就其品种、规格、性能、质量、技术水平来看，和国外产品有很大的差距。基于以上形势，我们必须抢占先机，研制具有高性能的网络化断路器产品，以提高我国在国际电力电器领域内技术与产品的竞争力。因此，研制和开发基于现场总线可通信的智能断路器意义重大。

### 1.4 本文主要研究内容

智能控制器是智能型低压断路器的中枢部件，它的设计首先要满足较高的可靠性、实时性、电磁兼容性要求，同时也要从产品角度考虑其体积及成本。

基于DSP和CAN总线的智能控制器，将采用DSP作为核心为处理器，定期采集电流信号，实时计算出电流有效值，判断过电流保护装置是否需要启动长延时、短延时或瞬时动作保护，在达到动作要求后，输出信号给动作执行机构。并在保护动作执行后，输出报警、指示信号。通过现场总线进行联网通信，将控制器多种设定值、运行电流、故障电流、动作时间及故障状态等多种参数进行网络传输，实现遥测、遥调、遥控、遥讯功能。

第1章 绪论。通过分析断路器的国内外研究现状和发展趋势，阐述了基于现场总线智能断路器开发在配电保护中应用的目的和意义。

第2章 智能控制器技术基础。主要分析了电量参数的计量原理、电流的三段保护特性、CAN总线及CANOpen应用层协议等。

第3章 基于CANOpen总线智能控制器的硬件设计与实现。结合国家标准和浙江天正电气股份有限公司企业标准，给出了系统的主要功能、设计要求以及技术指标。根据硬件方案，设计了系统DSP主控模块、电源控制模块、拨码开关参数设定模块、通信接口模块等硬件电路。详细论述了系统各模块电路的组成原理和实现方法，给出了整个电路系统的原理图。

第4章 基于CANOpen总线智能控制器的软件设计及实现。根据软件方案，结合硬件电路，设计实现系统的应用程序，详细论述了控制器三段保护算法以及CANOpen协议栈等程序的实现方法，并给出了系统的软件设计流程及代码实现。

第5章 系统调试与测试。采用TI公司的TMS320F2812数字处理器的开发板（QQ2812增强版），结合开发软件CCS2.2以及USBCAN调试器，对系统样机进行反复调试，给出了试验结果，验证了系统功能。

最后，对本文研究工作进行总结与展望。

## 第2章 基于CANOpen总线智能控制器的技术基础

智能控制器单元是断路器的核心,主要完成断路器的各种测量、保护、报警、显示与控制功能。早期的控制器以过电流保护和脱扣功能为主,通过逐步改进和发展,除过电流保护功能外,还具有报警、接地保护、温度保护、多电能参数计量、故障记录以及与计算机通信等功能。智能控制器通过互感器将主线路中的电压、电流大信号转换成模拟电路可处理的小信号,信号处理单元对这些信号进行滤波和整形,信号采样后送入处理控制器,在处理控制器内部进行A/D转换后进行逻辑运算与处理,运算结果与整定值比较后控制输出符合预设保护特性的逻辑电平信号,直接驱动断路器的执行机构和其他辅助继电器,使断路器动作或输出声音、光信号报警指示。各种故障保护的动作电流和时间整定值通过拨码开关设定,并可在运行期间随用户进行修改,还能通过现场总线实现“四遥”(遥讯、遥测、遥调、遥控)及附加的电能质量监控等功能。本章从测量、保护功能方面讨论断路器智能控制单元的设计技术基础和原理及其实现方法,同时对CANOpen总线协议应用的关键问题进行分析 and 介绍。

### 2.1 智能控制器算法原理分析

#### 2.1.1 测量的算法及分析

控制器测量部分主要完成电网参数的测量,直接测量电流、电压参量,再通过电流电压计算出电能质量的指标。要想准确地监测电网的质量及实现可靠的保护功能,关键就是准确地检测出电网的电流、电压等,因而对这些信号的数据处理算法尤为重要。

(1) 电压、电流的测量。采用均方根法,根据周期性连续函数有效值的定义,其有效值的表达式分别为

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (2-1)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (2-2)$$

将函数离散化,可得电压、电流有效值的表达式:

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} U_k^2} \quad (2-3)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} I_k^2} \quad (2-4)$$

式中： $N$ 为每周波的采样点数， $U_K$ 、 $I_K$ ，为电压、电流的离散采样值。

(2) 数字滤波。数字滤波实际上是一种程序滤波，即通过分析，对采样信号进行平滑加工，减少干扰在有用信号中的比重。为防止采样信号有微小的波动而影响计算的精度，采用加权平滑滤波的方法，以消除电网波动的影响，其算法公式为：

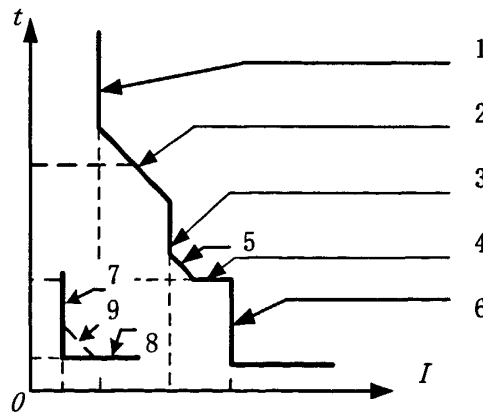
$$U_K = \frac{U_K}{2} + \frac{U_{K-1}}{4} + \frac{U_{K-2}}{8} + \dots + \frac{U_{K-(N-1)}}{2^{N-1}} = \sum_{j=1}^{N-1} \frac{U_j}{2^j} \quad (2-5)$$

$$I_K = \frac{I_K}{2} + \frac{I_{K-1}}{4} + \frac{I_{K-2}}{8} + \dots + \frac{I_{K-(N-1)}}{2^{N-1}} = \sum_{j=1}^{N-1} \frac{I_j}{2^j} \quad (2-6)$$

式中： $U_K$ 、 $I_K$ ，为本次计算得到的瞬时值； $U_{K-1}$ 、 $I_{K-1}$ ，为上一次计算得到的瞬时值，依次类推。实验结果表明，采用加权平滑滤波的方法非常有效，等效低通数字滤波， $N$ 为滤波所需的采样点数，一般取3~4点。

## 2.1.2 保护的算法及分析

功能保护算法是智能控制器的核心部分，完成智能控制器的大部分功能，包括过电流保护、欠压过压保护、接地保护等功能。过电流保护是智能型断路器最重要的保护功能。智能控制器的过电流保护特性由时间—电流曲线表示，见图2.1。

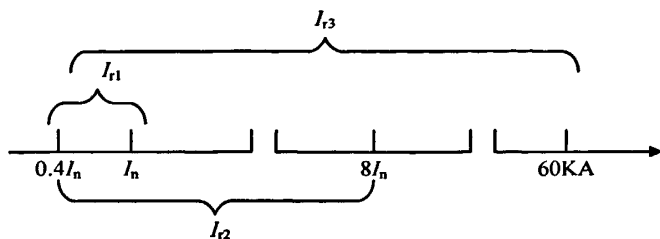


注：	序号	参数说明	备注
	1	$I_r$	长延时保护电流设定值，最大等于额定壳架电流 $I_n$
	2	$t_r$	长延时保护延时时间设定值
	3	$I_{sd}$	短路短延时保护电流设定值
	4	$t_{sd}$	短路短延时保护延时时间设定
	5	$I^2t$	短路短延时保护脱扣特性（反时限或定时限）
	6	$I_i$	短路瞬时保护电流设定值
	7	$I_g$	接地故障保护电流设定值
	8	$t_g$	接地故障保护延时时间设定值
	9	$I^2t$	接地故障保护脱扣特性（反时限或定时限）

图 2.1 保护特性曲线

曲线位于直角坐标系中，纵坐标与横坐标均对数化。纵坐标为动作时间，横坐

标为过电流倍数。智能断路器具有过载长延时、短路短延时和短路瞬动三段电流保护等特性。三段电流保护的电流整定值覆盖范围可以用数轴表示见图2.2。



注：  $I_n$ ：额定壳架电流  $I_{r1}$ ：长延时整定电流  $I_{r2}$ ：短延时整定电流  $I_{r3}$ ：瞬动整定电流

图 2.2 电流整定值的覆盖范围

根据电流保护整定值的不同，断路器可以同时或分别具有三段保护特性，如表2.1所示。表中  $I_n$  为控制器额定电流；  $I_{r1}$  为长延时电流整定值；  $I_{r2}$  为短延时电流整定值；  $I_{r3}$  为瞬时电流整定值。

表 2.1 电流整定与保护特性表

序号	电流整定值	电流保护功能	备注
1	$I_{r1} < I_{r2} < I_{r3}$	三段保护	
2	$I_{r1} \geq I_{r2}, I_{r3} > I_{r2}$	短延时、瞬时	
3	$I_{r1} < I_{r2}, I_{r3} \leq I_{r2}$	长延时、瞬时	
4	$I_{r1} = I_{r2} = I_{r3}$	瞬时	$I_{r1} = I_{r2} = I_{r3} = I_n$
5	$I_{r1} < I_{r2}, I_{r3} = \text{OFF}$	长延时、短延时	$I_{r3} = \text{OFF}$ ，表示瞬时
6	$I_{r1} > I_{r2}, I_{r3} = \text{OFF}$	短延时	功能被关闭
7	$I_{r1} < I_{r3}, I_{r2} = \text{OFF}$	长延时、瞬时	$I_{r2} = \text{OFF}$ ，表示短延时 功能被关闭

依据低压断路器智能控制器对供电系统和用电设备的不同保护功能，分别采用了反时限和定时限两种保护特性。

### （1）反时限特性

配电系统和用电设备的过载运行是时有发生。如照明线路的过负荷、大容量电动机的启动、变负荷系统中负载的增减等。这些被保护对象的热承受能力一般呈反时限特性，反时限特性即电流~时间特性。其主要思想是，假定被保护对象具有一定的过载能力，也就是在一定时间段内能承受固定的发热量，允许一定的温升。被保护对象允许的温升热量可用  $I^2T$  表示，实际发热量可用  $\sum I_i^2 t_i$  度量。因此，在允许温升条件下，反时限特性表现为当通过被保护对象的过载电流较小时，允许其通电时间长些；反之，允许通电时间短些<sup>[18]</sup>。

为了充分发挥配电系统和用电设备的过载能力，保障系统的正常运行，智能控制器应能提供反时限特性保护。早期的智能控制器采用双金属片实现反时限特性保护。虽然简单有效，但由于其存在许多难以克服的缺点，不能满足当今断路器的保护要求。在智能控制器中，主要采用被保护对象热积累的数字模拟方法实



现反时限保护特性。其原理如下，不管电流如何变化，被保护对象最终的热积累总值应符合<sup>[15]</sup>：

$$I^2T = \sum I_i^2 t_i \quad (2-7)$$

在式中， $I^2T$ 是被保护设备允许的发热总量， $I_i^2 t_i$ ，是在第 $i$ 个时间段的发热量。因此，在实际实现过程中，当计算出的总热量超过允许的发热总量时，控制器应立即发出脱扣信号。

## (2) 定时限特性

相对于反时限特性而言，定时限特性要简单得多。当被保护对象的故障电流大于设定的电流值时，启动定时器进行时间计时。当时间大于预先设置的过载时间时，触发保护动作。如果，在计时时间内，通过被保护对象的电流由故障电流恢复至正常值，则停止时间计时，退出定时限特性保护。

### 2.1.3 三段电流保护的实现原理

下面分析三段保护的具体实现：

#### 1. 过载长延时保护

在电力系统的运行当中，可能发生各种的故障和一些不正常的运行现象，其中最常见的不正常运行状态就是过载。过载是指供电线路中的电流高于额定电流的一种不正常的工作状态。过载电流不会马上危害到电网和电器设备，但是如果长期存在的话，会使导体发热，影响其的使用寿命。

针对电机和用电设备在过载状态，采用过载长延时反时限特性进行保护<sup>[11]</sup>。过载长延时具有斜波特性，即 $I^2t$ 特性，数学表达式为<sup>[18]</sup>：

$$T_D = \frac{(1.5I_r)^2}{I_i^2} \times t_D \quad (2-8)$$

式中 $I_r$ 为过载长延时整定电流值，是可调的额定电流的档位值， $t_D$ 为额定允许通过能量的时间设定值， $I_i$ 为 $i$ 时刻电流的均值， $T_D$ 为动作时间。由公式可见长延时保护具有反时限特性，其动作时间与故障电流平方成反比。长延时动作时间整定值 $T_D$ 决定了过载长延时的保护范围。反时限保护的实质是热保护，动作时间和电流平方成反比，根据测得的电流值，及设定的额定值，利用公式（2-8）计算得到延时时间，时间一到，就发生保护动作。

#### 2. 短路短延时特性

短延时功能包括反时限和定时限特性，反时限和定时限就是以 $8I_r$ 为分界点，当短延时电流整定值小于 $8I_r$ 时，控制器短延时特性按照反时限来执行，反时限特性就是当电流增大时时间迅速减小，它们的关系满足式<sup>[12][28]</sup>：

$$T_s = \frac{(8I_r)^2}{I_s^2} \times t_s \quad (2-9)$$

其中  $I_r$  为过载长延时整定值,  $I_s$  为过电流值,  $T_s$  为动作时间,  $t_s$  为短延时动作时间整定值。当短延时动作电流大于  $8I_r$  时, 保护特性自动转换为定时限, 动作时间按照设定的动作时间来动作, 不再受电流的影响。短路短延时的动作的时间的设定在行业标准中一般有 0.03s、0.1s、0.2s、0.3s 可供选择。短路短延时动作特性的选择与过载长延时特性的选择类似。

### 3. 短路瞬动特性

瞬动保护采取即采即比的方案, 将每次的采样值与设定值比较, 在满足分断时间要求的基础上本文采取判断连续四次采样值均大于设定瞬动值, 则判断为故障出现, 给出脱扣信号, 执行机构执行脱扣动作起到保护作用, 否则判断为尖峰干扰, 继续监控采样值<sup>[16]</sup>。短路瞬动保护主要是在短路情况下能对线路突增的大电流起到及时反应, 从而确保对设备和线路起到保护的作用, 所以它要求快速分断, 但由于执行机构和其他因素的影响, 国家标准上要求分断时间小于 0.2s<sup>[10]</sup>。由于在某些场合不需要短路瞬时保护功能, 在此增加了一个 OFF 档位, 关闭短路瞬动功能, 使应用更加方便灵活。

### 4. 接地保护

严重的三相不平衡或相线对地短路能产生大中性电流, 引起接地故障。接地故障根据故障形式又分为金属性和电弧性两种。前者为故障点以熔焊形式出现, 故障电流大; 后者为故障点接触不良, 产生电弧火花, 阻抗大, 又称接地电弧短路, 故障电流小<sup>[25]</sup>。及时切断接地故障线路是确保线路短路时的热稳定, 如未切断电路, 它具有极大的危险性, 在发生接地短路的持续时间内, 与它有关联的电气设备和管道外露可导电部分对地和装置外可导电部分间存在故障电压, 此电压可使人遭电击, 严重的对地电弧或火花可能会引起火灾爆炸。

接地保护功能是对供电电网或电气设备的 N 相 (中线) 的电流进行监控并保护。其保护特性为定时限保护。对监控的中线电流信号有两种获取方式, 一种是信号直接取自于 N 相 (中线) 电流互感器, 一种是由 A、B、C 三相电流测量信号进行矢量求和计算, 求得中性线电流  $I_G = I_A + I_B + I_C$ 。

## 2.2 CAN 总线及 CANOpen 应用层协议

### 2.2.1 CAN 总线协议

CAN 总线是根据开放系统互联模型 (OSI) 制定的, 采用了七层模型的物理层和数据链路层<sup>[7][13]</sup>, 其分层结构见图 2.3。

#### (1) 物理层

物理层的作用是在不同节点之间根据所有的电气属性进行位的实际传输。它定义信号怎样进行发送, 涉及位定时、位编码及同步的描述<sup>[7]</sup>。

#### (2) 数据链路层

数据链路层分为逻辑链路控制（LLC-Logic Link Control）和媒体访问控制（MAC-Medium Access Control）两部分。

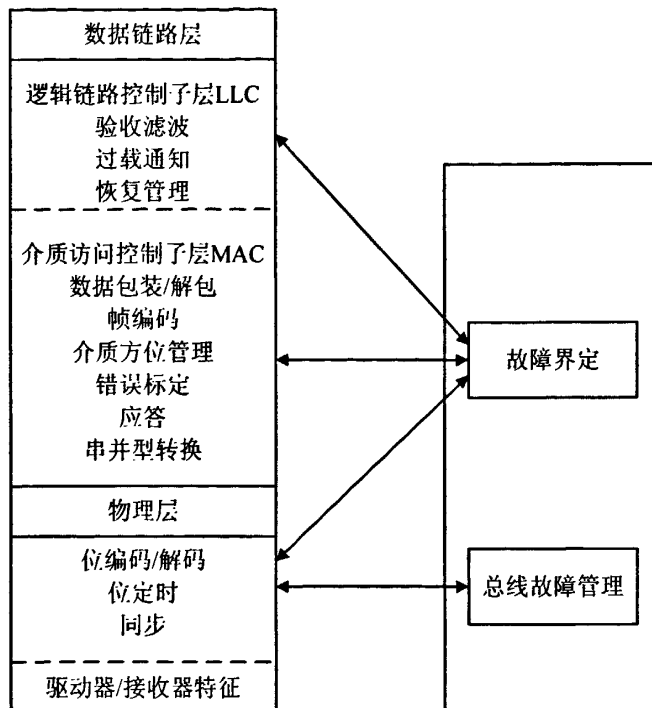


图 2.3 CAN 的 ISO/OSI 参考模型的层结构

### ① LLC 子层<sup>[7]</sup>

LLC 子层主要负责报文滤波、过载通知和恢复管理。

报文滤波：确定接收哪一个报文，每个接收器通过帧接收过滤确定此帧是否需要接收。

过载通知：如果接收器内部条件要求延迟下一个 LLC 数据帧或远程帧，则通过 LLC 子层开始发送超载帧。最多可产生两个超载帧，以延迟下一个数据帧或远程帧。

恢复管理：发送期间，对于丢失仲裁或错误干扰的帧，LLC 子层具有自动重发功能，在发送成功完成前，帧发送服务不被用户认可。

### ② MAC 子层<sup>[7]</sup>

MAC 子层是 CAN 协议的核心，负责把接收到的报文提供给 LLC 子层，并接收来自 LLC 子层的报文。MAC 子层负责报文分帧、仲裁、应答、错误检测和标定。MAC 子层也受名为“故障界定”的管理实体监管。此故障界定定为自检机制，以便将永久故障和短时扰动区分开来。

## 2.2.2 CAN 报文帧结构

报文传送由四种不同类型的帧表示和控制：数据帧负责携带数据由发送器到接收器；远程帧通过总线单元发送，以请求发送具有相同标识符的数据帧；出错

帧由检测出总线错误的任何节点发送；超载帧则用于提供当前和后续的数据帧的附加延迟。数据帧和远程帧通过帧空间与当前帧分开<sup>[14]</sup>。

## 1. 数据帧

数据帧由7个不同的位场组成<sup>[7]</sup>，包括帧起始、仲裁场、控制场、数据场、CRC场、应答场和帧结束。数据场的长度可以是0。在 CAN 2.0B 版本中存在两种不同的帧格式，其主要区别在于标识符的长度，11位标识符的帧称为标准帧，而包含29位标识符的帧称为扩展帧，数据帧格式见图2.4。

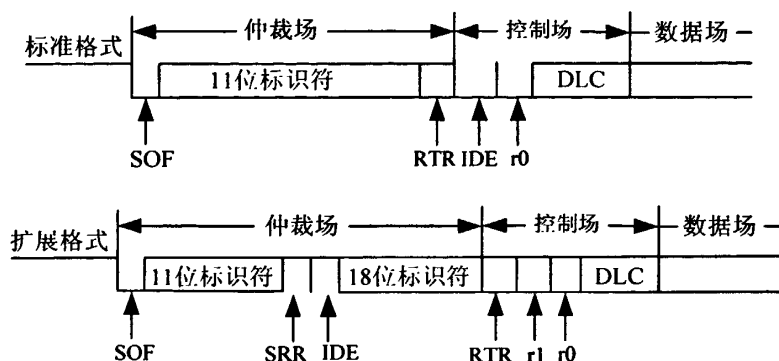


图 2.4 标准格式和扩展格式数据帧

## 2. 远程帧

作为数据接收器的站可以通过发送一个远程帧初始化各自的源节点数据的发送。远程帧远程发送请求（RTR）位是隐位，且不存在数据场。数据长度代码 DLC 的数据是独立的，它可以是 0~8 中的任意数值，这一数值为对应的数据帧的 DLC。

## 3. 出错帧

出错帧由两个不同场组成，第一个场由来自各站的错误标志叠加得到，随后的第二个场是出错界定符。错误标志有两种形式：一种是活动错误标志，一种是认可错误标志。活动错误标志由 6 个连续的显位组成，而认可错误标志由 6 个连续的隐位组成，除非被来自其他节点的显位冲掉重写<sup>[7]</sup>。

出错界定符包括 8 个隐位，出错标志发送后，每个站都发送一个隐位，并监视总线，直到检测到隐位，此后开始发送剩余的 7 个隐位。

## 4. 超载帧

超载帧由两个位场组成：超载标志和超载界定符。

## 5. 帧间空间

数据帧和远程帧同前述的任何帧（数据帧、远程帧、出错帧、超载帧）以帧间空间的位场隔开。与此相反，超载帧和错误帧前面不存在帧间空间，且多个超载帧也不用帧间空间分隔。帧间空间包括间歇场和总线空闲场，对于前面已发送报文的“错误认可”站还有暂停发送场。

### 2.2.3 CANOpen应用层协议

CAN (Controller Area Network) 现场总线仅仅定义了第1层、第2层 (ISO11898 标准)；实际设计中，这两层完全由硬件实现，设计人员无需再为此开发相关软件或固件 (Firmware) [8][9]。由于CAN协议只定义物理层和数据链路层，没有规定应用层，本身并不完整，就需要一个高层协议来定义CAN报文中的11/29位标识符和8字节数据的使用。其中CANOpen协议是CAN-in-Automation(CiA)定义的标准之一，并且在发布后不久就获得了广泛的承认。尤其是在欧洲，CANOpen协议被认为是基于CAN的工业系统中占领导地位的标准[23]。大多数重要的设备类型，例如数字和模拟的输入输出模块、驱动设备、操作设备、控制器、可编程控制器或编码器等，都在称为“设备描述”的协议中进行描述；“设备描述”定义了不同类型的标准设备及其相应的功能[8]。依靠CANOpen协议的支持，可以对不同厂商的设备通过总线进行配置，满足兼容性。

一个标准的CANOpen节点结构见图2.5，在数据链路层之上，添加了应用层。该应用层一般由软件实现，和控制算法一起运行在实时处理单元内。

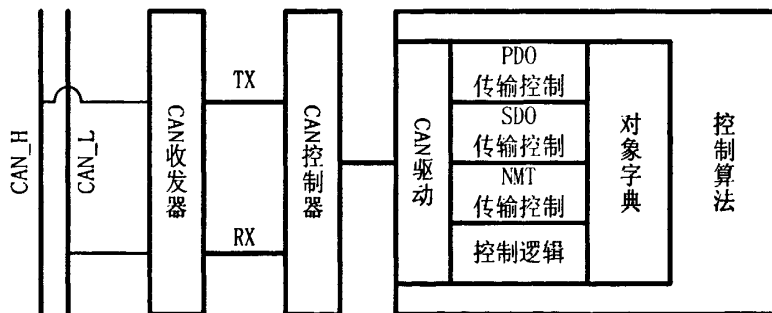


图2.5 CANOpen节点结构

CANOpen应用层协议具体化了CAN总线协议中关于标识符的定义。定义标准报文的11bit标识符中的高4bit为功能码，后7bit为节点号，重命名为通讯对象标识符 (COB-ID) [8]。功能码将所有的报文分为7个优先级，按照优先级从高至低依次为：网络命令报文 (NMT)、同步报文 (SYNC)、紧急报文 (EMERGENCY)、时间戳 (TIME)、过程数据对象 (PDO)、服务数据对象 (SDO) 和节点状态报文 (NMT Error Control) [15]。7位的节点号则表明CANOpen网络最多可支持127个节点共存[15]。各通信报文的COB-ID范围见表2.2。

NMT命令为最高优先级报文，由CANOpen主站发出，用以更改从节点的运行状态[8]。SYNC报文定期由CANOpen主站发出，所有的同步PDO根据SYNC报文发送。EMERGENCY报文由出现紧急状态的从节点发出，任何具备紧急事件监控与处理能力的节点会接收并处理紧急报文。TIME报文由CANOpen主站发出，用于同步所有从站的内部时钟。PDO分为4对发送和接收PDO，每一个节点默认拥有4对发送PDO和接收PDO，用于过程数据的传递。SDO分为发送SDO和接收SDO，

用于读写对象字典。优先级最低的为 NMT Error Control 报文，由从节点发出，用以监测从节点的运行状态。

表2.2 CANOpen的COB-ID分配

报文类型	功能码 (B)	COB-ID 范围 (Hex)
NMT	0000	000h
SYNC	0001	080h
EMERGENCY	0001	081h~0FFh
TIME	0010	100h
PDO1 (发送)	0011	181h~1FFh
PDO1 (接收)	0100	201h~27Fh
PDO2 (发送)	0101	281h~2FFh
PDO2 (接收)	0110	301h~37Fh
PDO3 (发送)	0111	381h~3FFh
PDO3 (接收)	1000	401h~47Fh
PDO4 (发送)	1001	481h~4FFh
PDO4 (接收)	1010	501h~57Fh
SDO (发送)	1011	581h~5FFh
SDO (接收)	1100	601h~67Fh
NMT Error Control	1110	701h~77Fh

每个节点维护一个对象字典 (Object Dictionary, OD)。对象字典保存了节点信息、通讯参数和所有的过程数据，是CANOpen节点的核心数据结构<sup>[8][16]</sup>。同时，上层应用软件也主要通过读写对象字典来与CANOpen应用层进行交互。CANOpen对象字典为两级数组结构。第一级数组称为主索引，范围为FFFFh。每一个主索引可拥有一个范围为FFh的子索引表。因为CANOpen对象字典支持的索引范围巨大 (将子索引和主索引一同考虑，对象字典支持约16.8M个索引)，因此，CANOpen对象字典的实现也是CANOpen应用层开发的一个难点。不过，并非所有索引都需实现，一个节点只需实现能完成功能的最小对象字典集合就可正常工作<sup>[8]</sup>。根据CANOpen协议，表2.3为定义的主索引数据分布。

表2.3 主索引数据分布

索引 (Hex)	对象说明
0000h	保留
0001h~001Fh	基本的数据类型
0020h~003Fh	复杂的数据类型
0040h~005Fh	生产商相关数据类型
0060h~007Fh	设备描述的基本的数据类型
0080h~009Fh	设备描述的复杂数据类
00A0h~0FFFh	保留
1000h~1FFFh	通讯参数
2000h~5FFFh	制造商的特殊设备描述文件
6000h~9FFFh	标准设备描述文件
A000h~BFFFh	标准接口描述文件
C000h~FFFFh	保留

根据节点所支持的通讯方式，每一个节点都必须实现索引1000h~1FFFh其中的一个必要子集，同时实现索引6000h以上部分的设备数据区。数据区大小根据节点的功能用户自行决定。索引1000h以下部分所有的节点都不需实现。

另外，CANOpen的每一个节点都维护了一个状态机，见图2.6。该状态机的状态决定该节点当前支持的通讯方式以及节点行为<sup>[18]</sup>。初始化时，节点将自动设置自身参数和CANOpen对象字典，发出节点启动报文，并不接收任何网络报文。初始化完成后，自动进入预运行状态。在该状态，节点等待主站的网络命令，接收主站的配置请求，因此可以接收和发送除了PDO以外的所有报文。运行状态为节点的正常工作状态，接收并发送所有通讯报文。停止状态为一种临时状态，只能接收主站的网络命令，以恢复运行或者重新启动。表2.4 列出了各状态之间转换的具体条件。

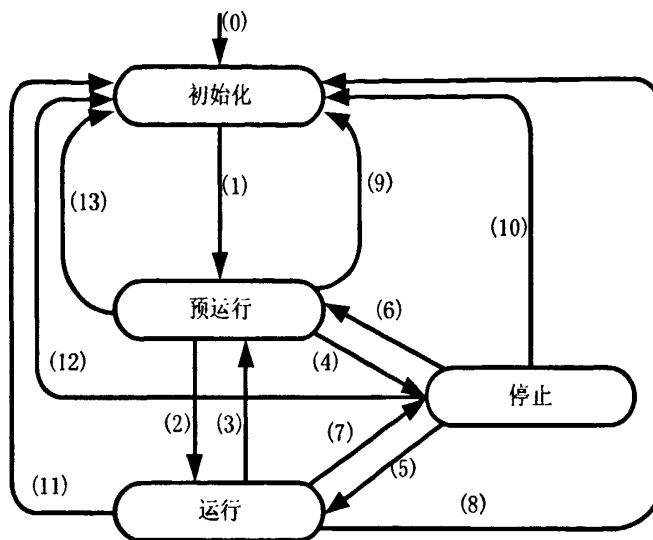


图2.6 CANOpen状态机

表2.4 CANOpen节点状态转换条件

(0)	设备上电
(1)	设备初始化完成
(2) (5)	收到启动节点命令
(3) (6)	收到进入预运行命令
(4) (7)	收到停止节点命令
(8) (9) (10)	收到重启节点命令
(11) (12) (13)	收到重启通信命令

## 第3章 基于CANOpen总线智能控制器硬件设计及实现

硬件电路的设计制作围绕智能控制器单元功能的要求进行,本控制器集测量、保护、控制、通讯等功能于一体,为此控制器必须对电流进行采样,并输出各种控制和状态信号,同时可以和上位机进行通讯。中央控制模块基本上是一个以DSP为中心的最小系统,完成对断路器运行状态和参数的处理;根据处理结果或系统控制中心下达的命令,判断断路器当前是否进行分合操作,是否有故障并识别故障类型<sup>[16][20]</sup>。根据不同故障,按不同的方式(如长延时、短延时、瞬动等)输出保护控制信号。中央控制模块向开关电器元件发出的操作控制信号经过输出模块驱动传送至断路器的操作机构,使其按预设的方式执行保护。

在设计时应充分考虑增强其自身的抗干扰性能,本章主要介绍低压断路器智能控制器单元硬件模块电路的设计。硬件设计的主要任务是综合考虑系统所要实现的各种功能和各部分硬件之间的关系,来选择所需芯片,设计出系统电路原理图以及最终的印刷电路板。

### 3.1 智能控制器总体设计

#### 3.1.1 设计要求

根据国家标准 GB14048.1~2和浙江天正电气股份有限公司企业标准<sup>[45]</sup>,本文设计的智能断路器壳架额定电流为100A,断路器额定电流设置从50A到100A,额定绝缘电压690V,额定工作电压为500V以下。智能控制器要求具有如下主要功能:

##### 1. 测量与监视功能

通过电流互感器实时测量各项电网参数,实现大范围的一次侧电流,检测和计量,同时保证采样精度。包括三相电流 $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 和 $I_N$ ,实时指示运行状态,如预报警状态、故障状态等。

##### 2. 保护功能

控制器的基本保护功能是指低压断路器的基本保护要求,包括过载长延时、短路短延时和短路瞬时保护三种保护特性。控制器可以选择其中的一项或几项作为自身的基本保护特性,但基本保护特性必须满足本标准及GB14048.2的相关技术要求,且应能在无辅助电源的情况下,主电路所有相电流不小于 $1.4I_n$ 时,控制器应能可靠工作,且必须能实现基本保护功能;主电路所有相电流小于 $0.4V_m$ 时,控制器不应误动作。在低压断路器的基本保护中,瞬动保护优先于短延时保护,短延时保护优先于过载长延时保护。在不影响基本保护功能的情况下,控制器可以增加其他功能,如附加保护功能、输入输出功能、测量功能、扩展功能、显示功



能、通信功能和区域选择性联锁等。

实现过载长延时、短路短延时和短路瞬动三段电流保护，具体参数如下：

表3.1 断路器控制器的电流—时间特性曲线

	长延时脱扣				短延时脱扣	瞬动脱扣
实验 电流	$1.05 I_r$	$1.2 I_r$	$1.5 I_r$	$7.2 I_r$	$I_{sd}$ 为 $(1.5 \sim 10) I_r$	$I_i$ 为 $(2 \sim 12) I_r$
动作 时间	$T \leq 2h$ 不动作	$T < 1h$ 动作	16s、 32s、 64s、 128s、 256s 可调	0.7s~ 11s	定时限 $t_{sd}$ : 0.03s、0.1s、 0.2s、0.3s 分级可调	$\leq 0.2s$
T					反时限: $T_s = \frac{(8I_r)^2}{I_s^2} \times t_{sd}$	

注1：调节整定电流时，瞬时脱扣电流应大于短延时脱扣电流，短延时脱扣电流应大于长延时脱扣电流。如果短延时和瞬时脱扣电流整定值重叠时，动作时间优先次序为：瞬时脱扣—短延时脱扣—长延时脱扣。

注2：瞬时脱扣电流的整定允许误差： $\pm 10\%$ 。长延时和短延时动作时间允许误差： $\pm 15\%$ 。

### 3. 通信组网功能

实现通信功能时，优先选用国际、国内的标准通信协议。通过现场总线，向上位机发送现场的各种运行参数和工作状态，同时接受上位机下传的数据和命令，即具有遥测、遥信、遥控、遥调“四遥”功能，本控制器是通过CAN总线通信实现一个CANOpen节点，同时设计了传统的RS485通信接口。

#### 3.1.2 总体硬件结构原理

智能控制单元具有测量、控制、保护、指示、通讯等功能，其硬件设计围绕功能进行。整个智能控制器单元根据所完成的功能分为以下几个主要功能模块：电流互感器、整流模块、信号调理模块、DSP基本系统模块、自生电源、拨码开关输入模块、通信模块等。其中DSP系统为整个控制器单元的核心，是断路器实现数字智能化的标志。智能控制器单元的硬件总体结构框图见图3.1。

断路器工作时，电流互感器前端检测供电线路中的电流，并将其转换为数字电路和DSP可处理的电平信号，经过模拟信号调理电路（隔离、滤波、放大等）送入DSP，DSP集成的A/D转换单元将模拟信号转换成数字信号，供DSP进行逻辑运算和处理，通过与拨码开关输入的参数相比较，通过软件控制断路器的状态以及控制器的动作，实现三段保护功能。为了保证在小电流及断路器断开的时候DSP以及CAN总线能正常工作，设计了后备电源，在正常工作时由自生电源供电，在

自生电源不足以供电情况下，后备24V直流电源给系统供电。通信模块主要完成与上位机的CAN总线通信，将断路器的状态与参数传递给上位机，同时也可以通过上位机设置断路器的参数，实现智能控制器的“四遥”功能<sup>[30][37]</sup>。

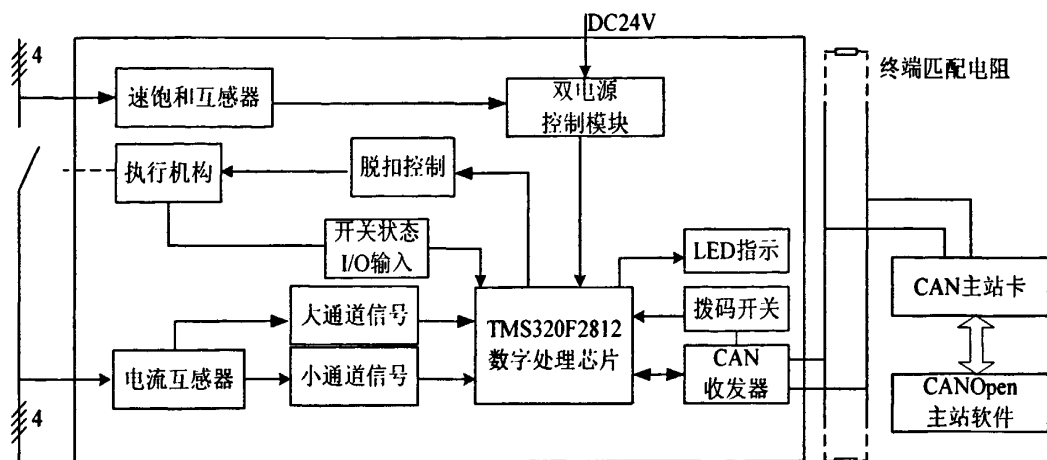


图3.1 总体硬件结构框图

## 3.2 电流互感器特性

互感器是以法拉第电磁感应定律为基本检测原理，电流互感器是一种将供电线路大电流变换为小电流的电气设备，用于对线路和供、用电设别的测量与保护，因此，电流互感器能否正确传变一次电流，对断路器的正确工作有较大的影响，其转换的准确性和精度直接影响断路器的性能<sup>[12]</sup>。

常用的电流互感器有铁芯和空心两种，铁芯电流互感器在处理小电流时线性度很好，但大电流时铁芯易饱和，从而使线性失真，测量范围小；而空心电流互感器在处理大电流时线性度很好，测量范围广，但小电流情况下容易受干扰，这也使线性度失真，测量误差大<sup>[12][13]</sup>。因此在实际运用中应根据一次回路电流的大小来选择合适的电流互感器。在一次电流范围较宽（含小电流）时，可以考虑同时使用铁芯和空心两种互感器，通过软件控制两种互感器的切换。也可以用补偿算法对两种互感器进行补偿，使得互感器的线性度好，精度高。

本设计采用的是由上海电器科学研究所研制，万松集团生产的SAZ-100电流互感器，经取多组该种互感器反复实验测试，该互感器在输入电流为0.4-12倍时有很好的线性度。图3.2为随机抽取的一个互感器输入输出电流关系曲线。

速饱和电流互感器是普通型电流互感器的一种特殊形式，其区别仅在于速饱和电流互感器所取的铁心磁密较大<sup>[12]</sup>。在原边电流较小时，副边输出电流与原边电流成线性关系；当原边电流超过一定值时，由于磁通迅速饱和，从而副边电流输出趋向一恒定值<sup>[13]</sup>。

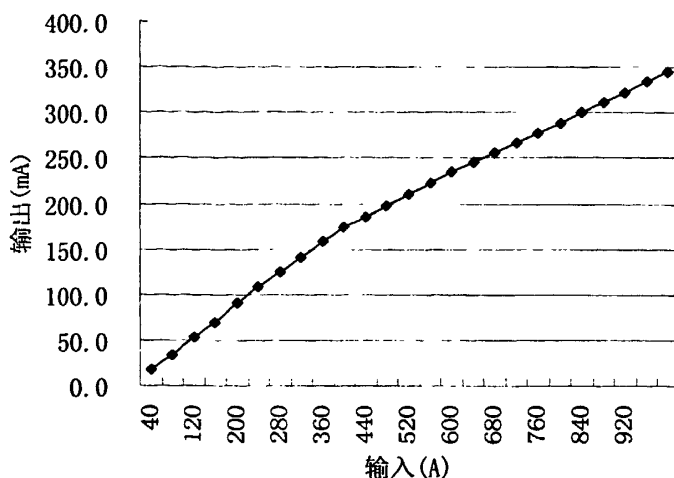


图3.2 互感器特性曲线

速饱和电流互感器可作为智能控制器的电流源能量拾取感应器。在智能控制器行业规定中要求，在无辅助电源的情况下，断路器三相同同时通过 $>0.4 I_n$ 。工作电流时，控制器应能可靠工作。因此，在控制器由电流源供电情况下，要求在大于 $>0.6 I_n$ （20%的电流差限）时，速饱和电流互感器副边感应电流应为一恒定值<sup>[12][13]</sup>。否则，持续增长的电流所具有的能量会使控制器的电源模块温升加剧，降低控制器的可靠性。

### 3.3 主控电路模块设计

本系统选用的DSP芯片 TMS320F2812 能有效的解决了控制功能和运算速度不能兼得的矛盾。在TI公司C2000系列DSP芯片中，它是功能强大的32位定点DSP芯片，不仅具有最高150MHz主频和32位高性能的中央处理器，运算高速，处理能力强；而且带有丰富的片上资源，因而具有强大的嵌入式控制功能<sup>[19][27]</sup>。

#### （1）存储空间

芯片自带18K×16 RAM和128K×16 FLASH，满足了大型程序设计需求。另外，TMS320F2812芯片还预留了五段外部空间地址，以方便存储器扩展，满足对存储空间有特殊要求的系统设计<sup>[27]</sup>。

#### （2）A/D转换模块

TMS320F2812芯片集成一个12位、转换频率为25MHz的A/D转换器，其前端为两个8选1的多路切换器和两路同时采样/保持器，允许模拟量输入的范围为0V- 3V。应用时，既可以用作两个独立的8通道模块，也可级联成一个16通道的模块<sup>[27]</sup>。

#### （3）事件管理器

事件管理器（EV）多用于调制PWM波，可以对电机进行有效的控制。TMS320F2812片内两个事件管理器，均带有通用目的定时器、比较单元、捕获单元和正交编码脉冲电路的功能<sup>[27]</sup>。

#### (4) GPIO口资源

TMS320F2812 对外 I/O 口, 采用引脚复用模式: A-F 组 I/O 口资源, 几十个对外引脚, 均可通过 I/O 功能控制寄存器配置成特殊功能引脚或普通 I/O 口 (GPIO) 引脚。GPIO 方式下, 每个引脚又均可通过方向控制寄存器, 设置为输入或输出引脚 [27]。

#### (5) 外围通讯接口

TMS320F2812 带有一个同步串口 (SPI)、两个异步串口 (SCI, 标准的 UART)、一个增强型 CAN 控制器 (eCAN) 和多通道串行口 (MCBSP) [27]。

#### (6) 功耗

TMS320F2812 内核工作电压 1.8V, 外围模块工作电压 3.3V, FLASH 编程电压 3.3V, 功耗较低 [27]。

#### (7) 温度

TMS320F2812 在 -40 度至 +85 度范围内, 都可稳定正常工作, 符合工业级标准, 满足应用的现场需求 [27]。

智能控制器主控电路模块主要有六大部分组成: DSP、JTAG 接口、晶振、频率锁相环 PLL 电路、外扩 RAM 部分及复位电路, 见图 3.3。

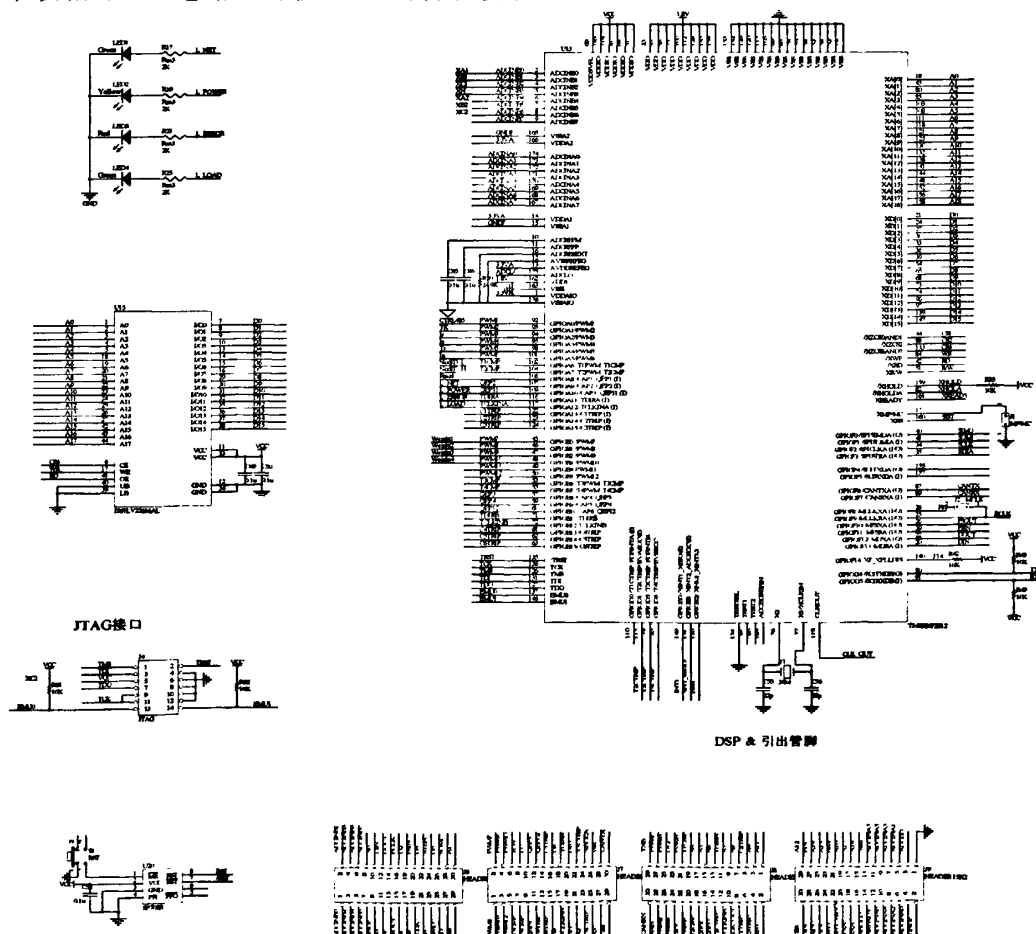


图 3.3 DSP 主控模块电路图

### 3.4 信号调理模块设计

信号处理部分主要实现两大功能。一是低通滤波，滤去高频噪声，使智能控制器提高抗干扰性，符合电磁兼容性设计要求。低通滤波电路的截止频率必须低于A/D的采样频率的一半<sup>[31]</sup>。二是信号放大，由于控制器检测的电流范围非常大，为适应如此大的动态范围，提高A/D采样分辨率，使变换后的数字信号尽可能准确的反映模拟信号的大小，设计了两路放大环节。一路有较大的放大倍数，放大小电流时的信号；另一路放大倍数较小，进行大电流时的信号放大。因为A/D转换器的信号输入范围有限，为防止在大电流信号时产生过高的输入电压，对检测电路和A/D转换器造成损坏，设计了电平限幅保护电路，将A/D输入信号端的信号幅值严格限定在允许范围内。本设计中大电流信号通路放大倍数小为1倍；小电流信号通路放大倍数大为6倍。由软件对两路信号进行选择。

#### 3.4.1 调理电路

采用空芯电流互感器检测电流信号，以保证有较好的线性范围；通过桥式堆的精密电阻输出电压信号经过RC滤波后，经过LM324放大，LM324是四运放集成电路，它的内部包含四组形式完全相同的运算放大器，除电源共用外，四组运放相互独立。由于LM324四运放电路具有电源电压范围宽，静态功耗小，可单电源使用，价格低廉等优点，因此被广泛应用在各种电路中。同时由于采样电流的频率不是很高，在LM324带宽范围内不会出现饱和运放，再由A/D采样，电流采样电路见图3.4。将信号输入DSP芯片A/D模块为可识别的0-3V直流信号范围。

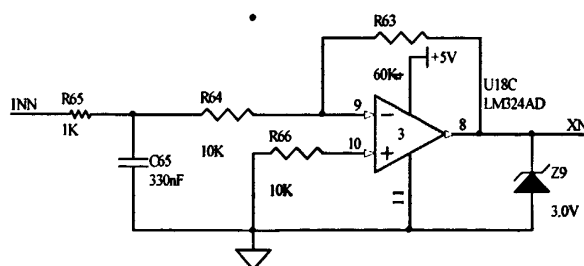


图3.4 单路大电流通道采样电路

#### 3.4.2 硬件误差考虑

为保证采样的准确性，减少误差，从硬件角度需考虑以下问题：

- (1) 硬件滤波，滤除干扰信号；
- (2) 电路板布线时需要注意不要让DSP的ADCINxx引脚运行在靠近数字信号通路的地方，这样能使耦合到A/D输入端的数字信号开关噪声大大降低；
- (3) 采用适当的隔离技术，将A/D模块电源引脚和数字电源隔离；
- (4) 采样通道上的电容效应也可能会导致A/D采样误差，因为采样通道上的等

效电容可能还在保持有上一个采样数据的数值的时候,就对当前数据进行采样,会造成当前数据不准确。如果条件允许,可以在每次转化完成后现将输入切换到参考地,然后在对信号进行下一次采样。

(5) 在模/数转换中,如果 A/D 转换器损坏,检测和控制的功能就不能实现。由于安全考虑,在 A/D 转换器前采用限幅电路,以保障系统的 A/D 转换器安全。利用二极管的钳位特性限幅,如齐纳二极管限幅器、稳压管反向限幅器、桥式限幅器等。

### 3.5 电源模块设计

在国家低压电器行业标准中,智能电器开关的电路可以有三种供电方式:专用电源供电、蓄电池供电和电流互感器供电,后者也称为自供电<sup>[38]</sup>。这三种供电方式可以单独使用,也可以配合使用,形成冗余供电系统。电流互感器供电是断路器所特有的一种供电方式,单独使用时可以省去其他供电电路,而且可以随着电网的接通自动开始工作,是一种理想的供电方式。但电流互感器供电有以下几个问题需要妥善处理:由于电源能量来源于电流互感器,因此电网电路中电流较小时不足以供电,有一个供电范围;当电网电路的电流缓慢上升时,自供电电源的电压也是缓慢上升的;由于电流互感器既要作为电流信号,又要提供电源能量,两者之间必然会产生交叉影响。即智能化电路的工作电流会引起负载的变化,影响对电网电路电流的检测 results。

#### 3.5.1 双电源设计

在电子装置中,电源质量直接关系到装置是否能正常运行,电源的品质也影响着 A/D 采样的精度,其起到的作用不言而喻。本文设计的断路器控制电路从电流互感器中取电,无需外置电源供电,本文设计的双电源原理电路见图 3.5。互感器输入通过场效应管导通控制输入电压的幅度,与 DC24V 并联作为开关稳压芯片 LM2575 的输入,输出稳定的 5V 电源。当互感器输入超过 25V 电压时,通过稳压管 Z1、Z2 来反馈控制 MOS 管的导通接地, Z1、Z2 的漏电电流特性能够保证正常情况下 Z2 的电压很低不能导通 MOS 管,环路控制电压的幅值。

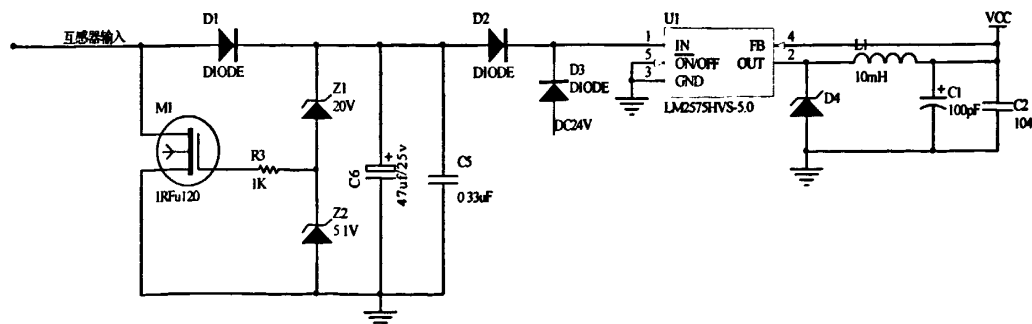


图 3.5 双电源电路图

LM2575系列开关稳压集成电路是美国国家半导体公司生产的1A集成稳压电路，它内部集成了一个固定的振荡器，只须极少外围器件便可构成一种高效的稳压电路，可大大减小散热片的体积，而在大多数情况下不需散热片；内部有完善的保护电路，包括电流限制及热关断电路等；芯片可提供外部控制引脚<sup>[21]</sup>。是传统三端式稳压集成电路的理想替代产品。LM2575系列开关稳压集成电路芯片的主要参数如下<sup>[33]</sup>：

- (1) 最大输出电流：1A；
- (2) 最大输入电压：LM1575/LM2575为45V；LM2575HV为63V；
- (3) 输出电压：3.3V、5V、12V、15V、ADJ（可调）；
- (4) 振荡频率：52KHz；
- (5) 最大稳压误差：4%；
- (6) 转换效率：75%~88%（不同的电压输出的效率不同）；

LM2575内含52KHz振荡器、基准电路、热关断电路、电流限制电路、放大器、比较器及内部稳压等电路。将稳压输出的电压接到反馈输入端的目的是同内部电压基准比较，若电压偏低，则用放大器来控制内部振荡器以提高输出占空比，从而提高输出电压。

设计注意事项在利用LM2575设计电路时，应注意以下问题<sup>[34]</sup>：

(1) 输出回路的电感选择要根据输出的电压档次、最大输入电压 $V_m$ 、最大负载电流 $I_{Load}$ 等参数选择，可参照相应的电感曲线图来查找所需采用的电感大小。

(2) 输入输出回路电容的选择，输入电容应大于47 $\mu$ F，并要求布线时尽量靠近电路。而输出电容推荐使用的电容量为100 $\mu$ F~470 $\mu$ F，其耐压值应大于额定输出的1.5~2倍。对于本设计中5V电压输出，使用耐压值为16V的电容。

(3) 二极管的额定电流值应大于最大负载电流的1.2倍，但考虑到负载短路的情况，二极管的额定电流值应大于LM2575的最大电流限制；另外二极管的反向电压应大于最大输入电压的1.25倍。

### 3.5.2 DSP子系统电源设计

DSP采用3.3V和1.8V两种电源供电，I/O是采用3.3V供电，内核是采用1.8V供电。TI公司为DSP芯片专门设计了电源转换芯片，其中提供两路输出的电源芯片有TPS73HD318。TPS73HD318输出的两路电压为1.8V和3.3V，每路电源的最大输出电流为750mA。TPS73HD318具有节省功率的关断方式和电压监控等优点，内部采用了PMOS晶体管来传送电流，所以静态电流小且在全负载范围内不变，这是常规的稳压器做不到的。同时，芯片还提供两个宽度为200ms的低电平复位脉冲<sup>[34]</sup>。图3.6是TPS73HD318为TMS320F2812的电源电路。TPS73HD318是同时上电。鉴于噪声的简单性，我们通过TI公司提供的DSP专用电源芯片TPS73HD318来构建电源电路，实现5V向3.3V和1.8V的电压转换，同时也避免了上电次序的问题。

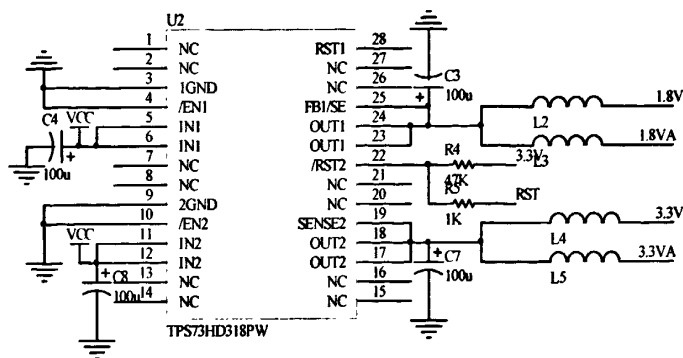


图3.6 DSP电源子系统

### 3.5.3 电源隔离

电路中 CAN 通信模块和模拟部分都是采用 5V 直流电源供电，为了增强 CAN 总线节点的抗干扰能力，实现数字和模拟的隔离，采用适合于小电流隔离和 DC 电压变换器 B0505S 将两部分电源隔离，其电路见图 3.7，B0505S 参数完全能够满足设计的驱动要求。

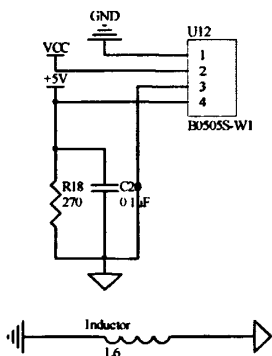


图 3.7 电源隔离电路

## 3.6 控制输入和输出模块

控制输入和输出模块包含拨码开关、控制器控制输出和辅助开关触头信号输入。拨码开关用于设定通信和断路器功能参数设置；控制器控制输出为脱扣器动作控制；辅助开关触头信号为开关状态的 I/O 信号量。

### 1. 拨码开关及参数设置

电路中三段保护电流和时间等参数通过拨码开关输入至 DSP，本设计中用到的拨码开关（分别设定长延时时间、长延时电流、短延时时间、短延时电流以及瞬动电流、节点地址、波特率设置），各档的参数设置参照公司产品系列标准。若直接将拨码开关与 DSP 相连，每个拨码开关占用 5 个 IO 口，总共需要 45 个 IO 口。本设计采用共阳二极管连接拨码开关与 DSP，只需占用 13 个 IO 口，见图 3.8。当拨



码开关的片选信号置为低电平时读Boma1、Boma2、Boma4、Boma8引脚的值便可得出拨码开关的设置档位值。

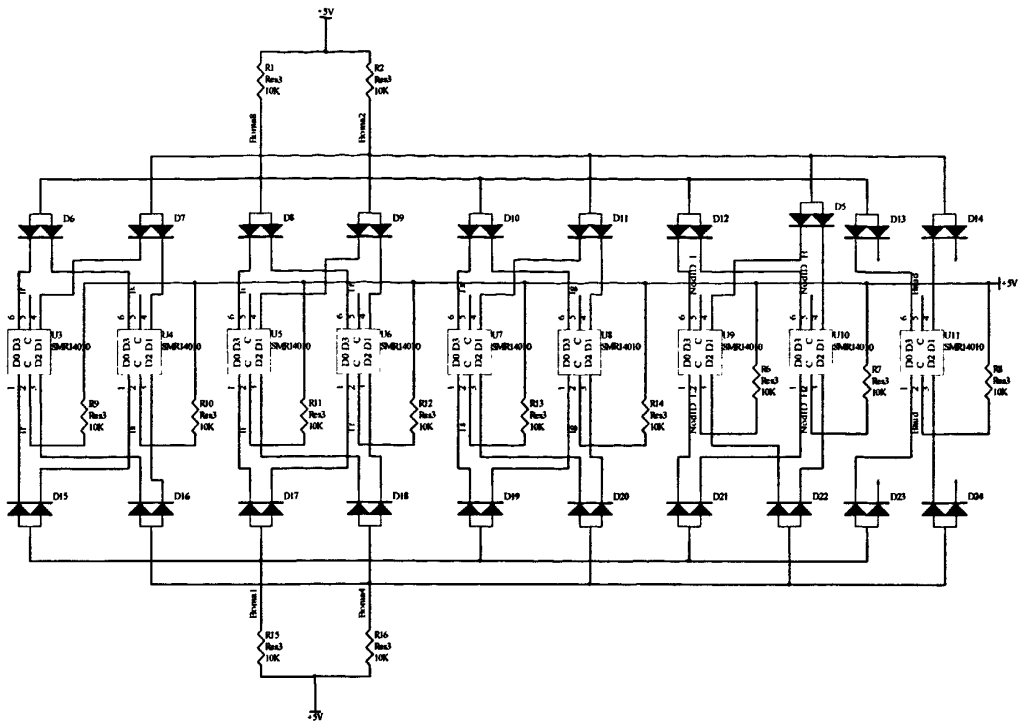


图3.8 拨码开关参数设定电路

## 2. 脱扣器驱动电路

脱扣电路是智能控制器的执行电路，它接收DSP发出的脱扣指令，输出控制驱动电磁铁动作，使断路器分闸。脱扣电路的稳定性和可靠性，关系整个控制器的性能。脱扣电路应具有抗干扰、工作可靠的特性。本设计中的脱扣器为5V供电的脱扣器，脱扣器驱动电路见图3.9。正常情况下，DSP的I/O信号TK为低电平三极管截止，脱扣器无电压差不动作，反之高电平导通执行脱扣。

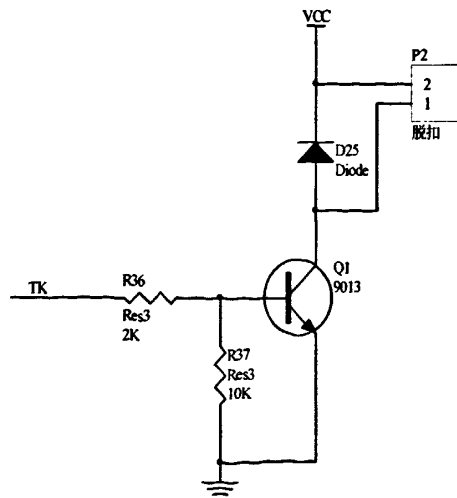


图3.9 脱扣驱动电路

## 3.7 通信模块设计

### 3.7.1 eCAN模块概述

CAN总线是一种串行通信协议,具有较强的抗干扰能力,可以应用在电磁噪声比较大的场合,比较适合于本文断路器的应用环境。CAN通信控制器是接口电路的核心,它主要完成CAN总线的通信协议,而CAN总线收发器的功能则是增大通信距离,保护系统不受干扰。C28x系列DSP集成了增强型CAN总线通信接口,该接口与CAN 2.0B标准接口完全兼容<sup>[27]</sup>。

eCAN模块是TI公司新一代32位高级CAN控制器,性能相当于TI公司TMS470系列微控制器使用的高端CAN控制器。它完全兼容CAN 2.0B协议,可以在有干扰的环境里使用上述协议与其他控制器串行通信。eCAN模块具有32个可以完全控制的邮箱和时间标识特性,提供了一个通用可靠的串行通信接口。除具有一般DSP内嵌CAN控制器的所有功能外,它主要具有如下的一些增强特性<sup>[25]</sup>:

(1)增加了邮箱数量,并且所有邮箱都具有独立的接收屏蔽寄存器。TMS320F2812有多达32个的邮箱,占用512字节RAM,都可以配置为发送或接收邮箱,且都有一个可编程的接收屏蔽寄存器。这样就使数据传输更加方便灵活、信息量大大增加。

(2) eCAN是一个32位的高级CAN控制器。其控制寄存器的状态寄存器必须以32位方式访问;接收屏蔽、时间标识寄存器、超时寄存器和邮箱所在的RAM范围可以以8位、16位和32位方式访问。

(3) 时间标识。eCAN模块应用了一个全速运行的32位定时器(LNT)来获得接收或者发送一个信息(有效的CAN数据帧)的时间。当一个接收信息被保存或被发送的时候,定时器的内容写入到相应邮箱的时间标识寄存器(MOTS)里。这样就可获得接收或发送一个信息的时间。当邮箱16成功发送或接收一个信息时,LNT寄存器被清除。所以可以通过使用邮箱16来实现网络的全局时间同步。

(4) 超时功能:为了确定所有的信息都在预定的时间里送出或接收,每个邮箱都有它自己的超时寄存器(MOTO)。如果一个信息没有在超时寄存器设定的时间完成发送或接收,一个标志位将在超时状态寄存器里被设置,据此可以判断出是否超时。

以上这些增强特性使得TMS320F2812进行CAN通信时,传输更加方便灵活、数据量更大、功能更完备,这也正是eCAN的增强特性所在。

本文自行设计了CAN总线接口电路,CAN收发器选用常见的P82C250芯片。其主要特性如下最高可达1Mbps速率;具有抗瞬间干扰、保护总线能力;降低射频干扰的斜率控制;热防护;防护电池与地之间发生短路;低电流待机方式。通过P82C250连接到物理总线上,由P82C250提供对总线的差动发送能力和对CAN控

制器的差动接收能力。

### 3.7.2 CAN节点的硬件设计

在实际应用中，断路器大电流工作环境对电路的影响很大，所以为了减少这些干扰，CAN节点电路设计见图3.10，通常在电路中使用高速光耦6N137，使DSP的CANTX与CANRX不直接与P82C250的TXD和RXD相连，而是通过高速光耦与P82C250相连，很好地实现总线上各CAN节点间的电气隔离。同时还要注意的，光耦部分所采用的两个电源VCC和+5V必须完全隔离，否则光耦也就失去了意义，即无法达到隔离的目的<sup>[17][22]</sup>。

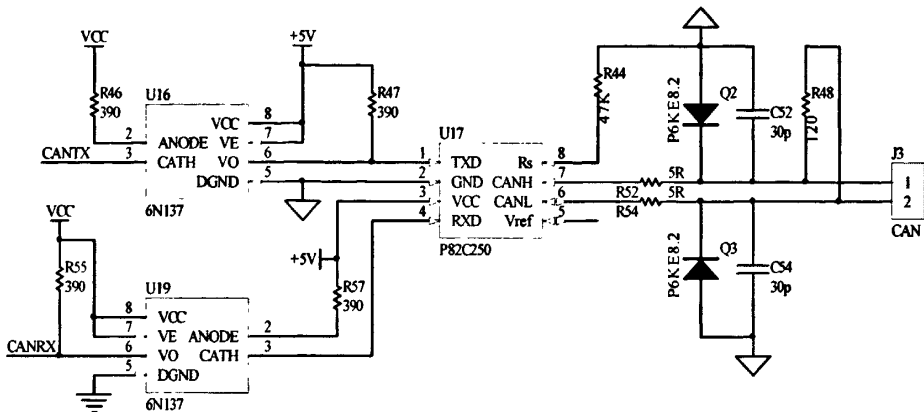


图3.10 CAN节点电路原理图

在设计CAN节点时要注意以下的问题，否则达不到预期的效果。

(1) 物理总线两端120欧姆的终端电阻  $R_T$  对于匹配总线阻抗，起着相当重要的作用，120欧姆是一个经验值。忽略掉它，会使数据通信的抗干扰性及可靠性大大降低，甚至无法通信，在项目过程中通信电路的调试出现过这个问题<sup>[23][32]</sup>。

(2) P82C250为CAN总线通信控制器与物理总线之间的接口，它可以提供向总线的差动发送能力和CAN控制器的差动接收能力，其中TXD和RXD引脚分别发送经过驱动后的发送和接收信号<sup>[23]</sup>，引脚8 ( $R_{44}$ ) 可以选择芯片2种不同的工作模式；在接地时，总线将处于高速工作方式，在这种方式下，为避免干扰，上升及下降的斜率取决于  $R_{44}$  的阻值，而  $R_{44}$  的取值一般在1K~140K欧姆，在这种方式下可以采用双绞线作为总线的物理介质。本设计采用的就是这种方式， $R_{44}$  采用的是47K欧姆的电阻，能够满足设计的要求。

### 3.7.3 RS485总线接口

由于传统的智能断路器等电力设备，大都具有RS485接口，考虑兼容性和可选性的要求本控制器也设计和实现了RS485串行链路上的Modbus总线通信（不是本文的重点不在论述，可参考附录发表的论文），采用SP485E芯片的通信接口见图3.11，SP485E芯片具有很强的驱动能力。由于断路器的分断会对电路产生干扰，



## 第4章 基于CANOpen总线智能控制器软件设计及实现

在硬件电路设计完成确保硬件的可靠性之后，控制器的主要功能则依赖于控制器软件来实现。本设计采用DSP设计的硬件系统，由于对硬件运行速度和运算量不是很苛刻，本文不再论述PCB的相关问题，对于产品应用而言软件是整个系统功能的核心，软件设计的好坏直接影响到硬件系统的性能和可靠性。智能控制器的系统软件设计是智能控制器设计的重点，也是项目的关键所在。

### 4.1 软件总体流程

智能断路器的监控对象是线路运行电流，无论是对电流的检测还是对电器设备的保护动作，都要求具有很高的实时性、可靠性。尤其在发生故障时，能够迅速地检测出故障，快速地判断故障类型，准确地向断路器的操作机构发出相应的操作命令。要求软件必须实时性强、高效、功能语句简单、执行速度快，且便于管理<sup>[19]</sup>。为此智能控制器的软件设计遵循结构化和模块化的原则，将软件划分为若干个独立的功能模块，为了提高系统测量的精度和增强系统的抗干扰能力，在软件设计上采用了数字滤波、软件看门狗等抗干扰措施。图4.1为主程序流程图。

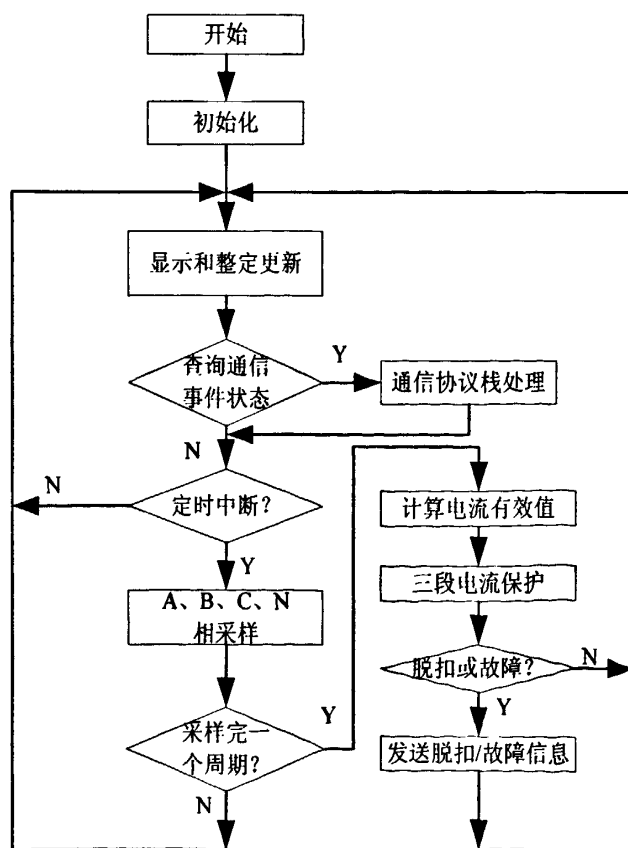


图4.1 主程序流程图

软件设计部分分为两大块：智能控制器控制及算法功能软件模块和 CANOpen 协议栈从节点通信软件模块。智能控制器控制及算法功能软件模块主要实现对信号的 A/D 采样，计算检测电流的有效值，执行三段保护算法，通过比较用户整定值来控制脱扣和故障指示。初始化主要完成对 DSP 各专用寄存器配置和外设初始化，包括系统时钟初始化、各中断向量的设置、软件定时器工作方式的设置、I/O 口的初始化、CAN 控制器的初始化以及对 CANOpen 协议栈配置等。

## 4.2 信号采样处理

### 4.2.1 信号采样

在中、低电压配电网中，6 次以上的谐波分量不会造成对保护精度的任何影响，因此滤波环节截止频率至少可为 6 倍基波频率，即  $300\text{Hz}^{[41][43]}$ 。根据奈奎斯特采样定理，A/D 转换器的采样频率至少应为  $600\text{Hz}$ 。TMS320F2812 内部集成了 A/D 转换模块。该模块是一个 12 位、具有流水线结构的模数转换器，内置双采样保持器（S/H），可多路选择 16 通道输入，快速转换时间运行在  $25\text{MHz}$ 、ADC 时钟或  $12.5\text{Mpsps}$ ，16 个转换结果寄存器可工作于连续自动排序模式或启动/停止模式<sup>[24][27]</sup>。根据 DSP 运算速度快、内部资源丰富的特点，本设计每个电源周期采样 32 个点，这个数字完全满足了中、低电压配电网对测量精度的要求。

互感器电流经过桥式整流以后得到半波信号，半波信号周期为  $10\text{ms}$ ，用 DSP 定时中断对 7 路输入的电流通道进行采样，每个半波周期采 16 个点，采样时间间隔为  $0.625\text{ms}$ 。每次定时中断都对 A、B、C、N 四路电流进行采样。采样完以后进行 A/D 校准，采样完一周期，计算各相的有效值，通过查通道的 ADC 数据表求得实测电流的有效值。

由于测量电流范围较大，同时采用非标准的电流互感器，互感器的特性曲线线性度不高，为了提高精度，硬件设计了两路放大环节。一路有较大的放大倍数，放大小电流时的信号；另一路放大倍数较小，进行大电流时的信号放大。由软件判断选择哪一路进行数据处理。但在实际使用中，TMS320F2812 芯片 A/D 的转换结果误差较大，如果直接将此转换结果用于计算，必然会降低控制精度（最大转换误差可以达到 5% 左右）<sup>[29][39]</sup>。下面主要介绍一下 A/D 校准。

### 4.2.2 A/D 校准

芯片 A/D 转换精度较差的主要原因是存在增益误差和失调误差，要提高转换精度就必须对两种误差进行补偿。本文对 A/D 模块采取了软件校正算法进行校正。

具体的方法是选用 A/D 通道的任意两个通道作为参考输入通道，并分别提供给它们已知的直流参考电压作为输入，通过读取相应的结果寄存器获取转换值，利用两组输入输出值求得 A/D 模块的校正增益和校正失调，然后利用这两个值对

其他通道的转换数据进行补偿，从而提高了A/D模块转换的准确度。理想的12位A/D应该没有增益误差和偏置误差的，因此其转换的计算公式为：

$$Y = x * mi \quad (4-1)$$

其中， $x = \text{input count} = \text{input voltage} * 4095 / 3.0V$ ；

$$Y = \text{output count} \quad Mi = \text{ideal gain} = 1$$

实际上TMS320F2812的A/D是存在增益误差和偏置误差的，其转换的计算公式如4-2所示：

$$Y = x * ma + b \quad (4-2)$$

其中， $ma = \text{actual gain}$ （实际增益） $b = \text{actual offset}$ （输入为0时值）

实际的和理想的转换计算曲线见图4.2：并分别输入已知的直流参考电压，通过读取相应的结果寄存器获取转换值，利用两组输出值便可求得A/D模块得校正增益和校正偏置，然后利用这两个值对其他通道转换数据进行补偿<sup>[29]</sup>。

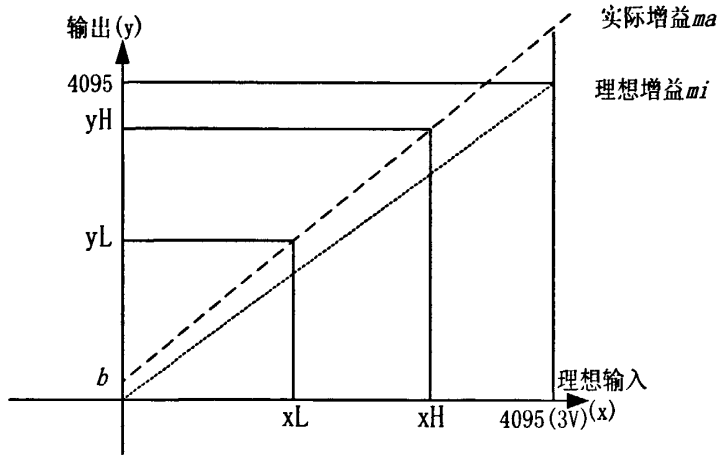


图4.2 转换计算曲线

由图可以得到各参数之间的关系如下：

$$y = x * ma + b \quad (4-3)$$

$$ma = (yH - yL) / (xH - xL) \quad (4-4)$$

$$b = yL - xL * ma \quad (4-5)$$

$$\text{CalGain} = (xH - xL) / (yH - yL) \quad (4-6)$$

$$\text{CalOffset} = yL * \text{CalGain} - xL \quad (4-7)$$

$$x = y * \text{CalGain} - \text{CalOffset} \quad (4-8)$$

### 4.3 保护动作特性软件实现

本论文设计的断路器智能控制器主要功能就是通过测量用电线路的各相电流，获得采样值，利用DSP高速的数据处理和运算能力，实现基于电流的各种保护算法，最主要的就是电流三段保护算法的实现。电流三段保护是指电流的过载长

延时反时限保护、短路短延时定反时限保护和短路瞬动保护。各种延时保护的关系流程见图4.3。

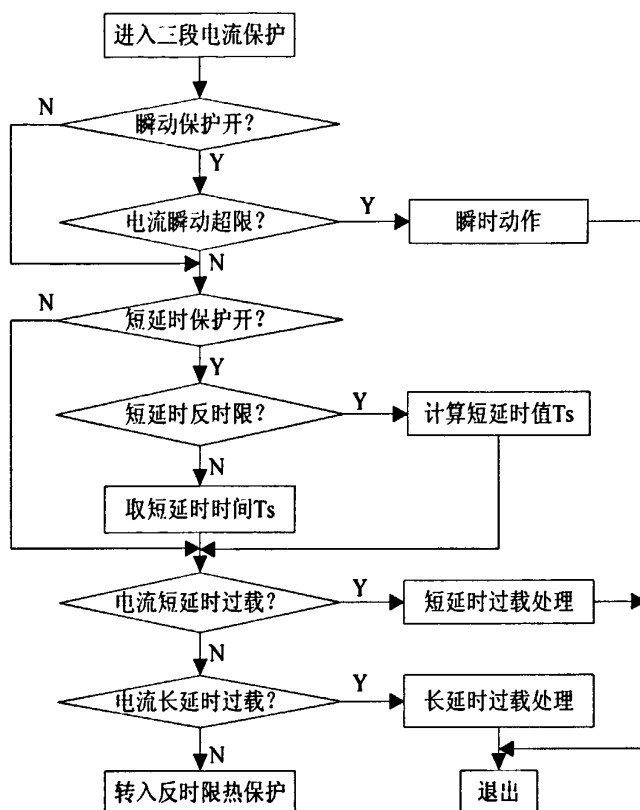


图4.3 电流三段保护流程图

### 4.3.1 过载长延时反时限保护实现

电流的过载长延时反时限保护算法的实现，主要通过公式（2-8）计算出动作时间与电流整定、时间整定的关系。过载长延时反时限保护的软件实现流程见图4.4。

流程图中  $AVG\_I$  是由一个工频周期所有采样电流点采用均方根方法计算求得的实际电流值； $Q$  为能量累加值； $Q_m$  为通过公式（2-8）及拨码输入的整定参数计算得出的脱扣能量阈值，以0.75倍额定电流整定、32s长延时时间整定为例，脱扣能量值计算就是：

$$Q = I^2 t = (1.5 \times (0.75 I_n))^2 \times 32 \quad (4-9)$$

其中电流  $I_n$  为壳架电流的采样值。过载长延时反时限保护的实现过程分析：根据标准规定，当  $AVG\_I$  小于  $1.05 I_n$  时，认为智能控制器已经脱离过载状态，过载指示灯灭，并进行能量消退的计算。能量的累加分两种方式进行，分别进行分段常量和变量值的累加。当线路电流值介于  $1.05 I_n$  和  $1.2 I_n$  之间时，智能控制器进入过载状态，开始能量的累加过程。具体根据电流值分区域在每个周期能量的累



加值增加一个不同的常量，能够保证智能控制器在 $1.05 I_r$  电流时两小时不脱扣， $1.2 I_r$  电流时一个小时脱扣。当线路电流值大于 $1.2 I_r$  时，智能控制器过载，开始按公式（2-8）计算能量的累加值，脱扣动作时间与电流大小呈反时限关系。

为更好的指示状态，当智能控制器过载时，按能量累加值的大小亮过载指示灯，当累加值未达到脱扣能量的一半时，过载灯指示闪亮，否则过载灯指示长亮。当能量累加值达到脱扣能量值时，DSP输出高电平驱动脱扣线圈导通动作。

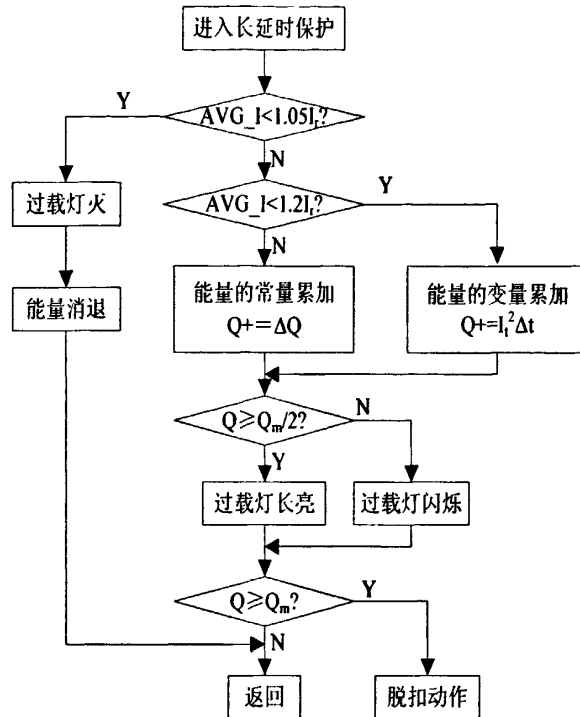


图4.4 长延时保护流程图

### 4.3.2 短路短延时保护实现

短路短延时保护有反时限和定时限两种保护，其中定时限动作延时时间只与整定的时间有关，而与线路的实际电流无关，即只要超过它的门限值就在整定时间内动作<sup>[26]</sup>。为了更有效地实施保护作用，还采用了反时限的保护模式，也就是延时动作时间除了跟短延时整定时间有关还跟实际电流有关，这样当大电流时能够满足有效保护而小电流时有更多选择的动作延时时间；当实际线路电流值大于 $8 I_r$  时，按短延时整定时间定时限脱扣；当实际线路电流值小于 $8 I_r$  时，按照公式（2-9）计算脱扣动作时间，脱扣动作时间与电流呈反时限关系<sup>[44]</sup>。短延时流程见图4.5。图中 $Q_m$  为利用短延时反时限公式（2-9）和整定的短延时电流、整定短延时值计算得到的脱扣能量阈值。

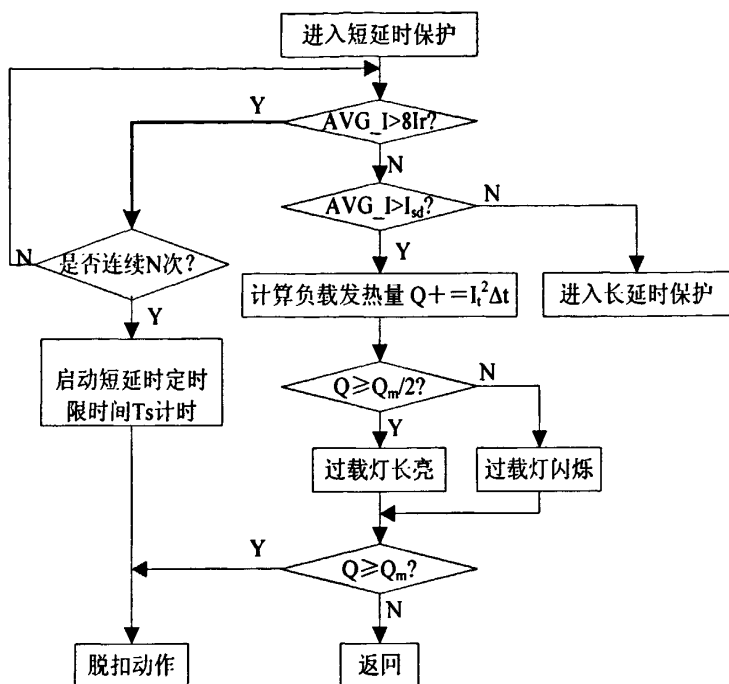


图4.5 短延时保护流程图

### 4.3.3 瞬时保护实现

瞬时保护采用的是即采即比较的方法，没有能量的累积过程，根据每次采样得到的电流有效值判断，为了去除尖峰导致的误动作，本设计中若有连续四个周期检测的有效值都大于等于瞬动电流设置值，则判定为瞬时故障出现，智能控制器发出脱扣动作信号；若检测的有效值都大于等于瞬动电流设置值但不能满足连续四次，则判断为尖峰扰动，对记录次数清零开始新一轮的检测周期。

#### 4.4 CANOpen从节点软件设计

CAN 总线的协议规范只定义了底层的协议, 实现的是物理层和数据链路层的功能, 而 CAN 的应用规范必须通过高层协议来体现。目前国际上 CAN 的应用层协议较多, 比如广泛应用的 DeviceNet 协议、CANOpen 协议等, 用户也可根据实际情况约定一些简单的应用层协议。对于本文 CANOpen 协议栈的智能控制器设计, 由于 eCAN 和 82C250 芯片硬件易实现上述低二层的功能, 所以软件设计也就是根据用户的实际需要编写应用层的程序, 实现一个 CANOpen 从节点。

#### 4.4.1 协议分析

CANOpen 协议是一个以 CAN 协议软硬件为基础的高层协议,协议规范主要可以分为 CANOpen 通讯规范和设备规范两类:

(1) CANOpen的通讯规范分为两种: DS301和DS3xx。DS301是最基础的规范,它定义了CANOpen设备之间的通讯方式和行为规范。所有设备都必须实现

DS301的协议:它是CAN和CANOpen设备规范的标准接口。而DS3xx则是应用于某些特殊领域的协议构架。

(2) 设备规范:设备规范定义了特定类型的设备进入CAN总线通讯的方式和功能,还定义了需要哪些CANOpen通讯规范工具来实现这些功能,如DS401规范(通用I/O模块)<sup>[36]</sup>、DS402规范(传动及运动控制)。

以下来具体分析协议中的关键内容。

### 1. 对象字典

CAN协议是基于报文的协议,而CANOpen通讯规范将应用层的功能分成各种服务对象,每个服务对象实现一种特定的功能以及与这些功能相关的所有服务<sup>[46]</sup>。当应用程序调用CANOpen服务与远程CANOpen设备通讯的时候,服务对象就会提供相应的服务,与远程CANOpen节点的服务对象进行互动联系,实现数据的交换操作。在CANOpen协议中,不再有电平变化或者消息帧甚至某一具体设备这样的概念,所有的通讯服务都封装为通讯对象,见图4.6。

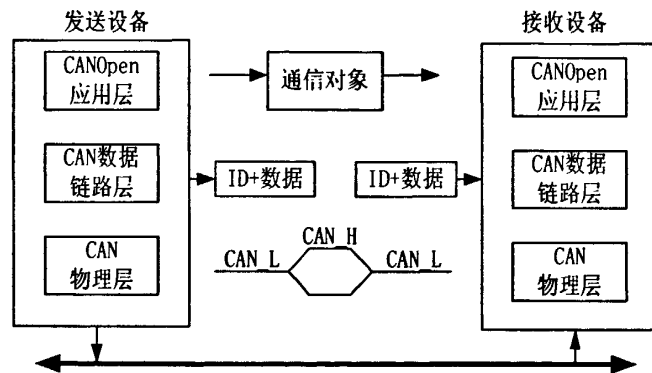


图4.6 CANOpen协议层次结构

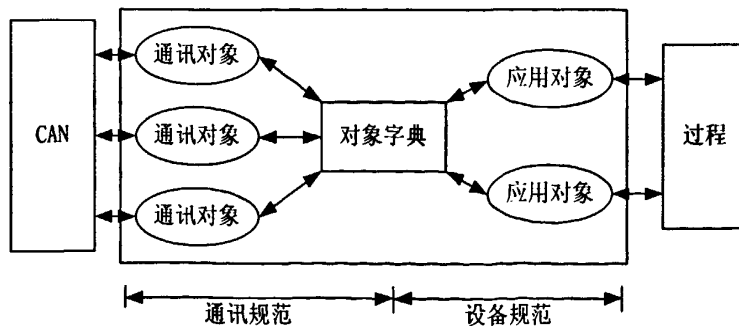


图4.7 对象字典

实际中的各类通讯服务和各种设备的数量是相当庞大的,如何对这些通讯对象和设备对象进行分类识别,以达到实时有效的访问。CANOpen提出了对象字典的概念,图4.7清晰的展示了对象字典的作用:每一个设备都表现为一组对象的集合,能够被网络所访问。对设备的每一个操作都可以映射成一个或者多个对象。通过CAN网络改变特定对象的属性值就可以很方便改变设备的配置和状态<sup>[46]</sup>。而

对象字典正存放着设备和协议的相关信息以及访问途径，因此对象字典是 CANOpen 的核心内容。

2. CANOpen 通讯对象与预定义连结集

CANOpen 协议定义了4类通讯对象，下面给出简单的功能、内容介绍<sup>[46]</sup>。

(1) 网络管理对象 (NMT) 用于控制和管理网络设备，包括参数配置、ID 分配、节点状态控制、错误控制等。

(2) 过程数据对象 (PDO) 主要提供了对设备内的应用对象的直接访问。用于实现优先级较高的数据实时传送，例如：一个 CANOpen 设备可以直接读取另一个 CANOpen 设备的实时过程数据信息。传送的数据长度必须小于或等于8个字节。PDO 对应于设备对象字典中的条目，并且为应用对象提供访问接口。PDO 根据数据流向分为 TPDOS (Transmit-PDOs) 和 RPDOS (Recive -PDOs)。

(3) 服务数据对象 (SDO) 用于建立客户/服务器关系，通过 SDO 服务，可以访问对象字典的条目，对参数配置和映射关系进行修改。

(4) 预定义报文或特殊功能对象包括：同步对象 (SYNC)、时间标记对象 (TIME)、紧急事件对象 (EMCY)。SYNC 由同步发生器定时广播，用于 PDO 的同步通讯；TIME 为设备提供微秒级的网络时钟，使对时间要求苛刻的大型网络能够精确同步；EMCY 是由设备内部出现错误时触发。

为了区分各通讯对象以及解决发生冲突时的优先权问题，CANOpen 利用了 CAN 报文的标识符来进行优先级分配。CANOpen 定义了强制性的缺省标识符 (CAN-ID) 分配表。这些标志符在预操作状态下可通过动态分配方式修改。CANOpen 设备必须向它所支持的通讯对象的提供相应的标识符<sup>[46]</sup>。缺省 ID 分配表是基于标准帧格式的11位 CAN-ID，包含一个4位的功能码部分 (Function Code) 和一个7位的节点 ID (Node-ID) 部分，其结构见图4.8。

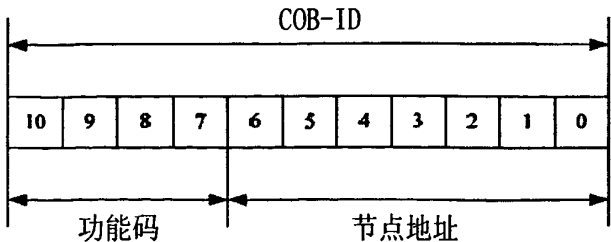


图4.8 COB-ID结构

预定义的连接集定义了4个接收 PDO (Receive-PDO), 4个发 PDO (Transmit-PDO), 1个 SDO (占用2个 CAN-ID), 1个紧急对象和1个节点错误控制 (Node- Error-Control), 也支持不需确认的 NMT-Module-Control 服务、SYNC 和 TIME 对象的广播。缺省 ID 分配表见表4.1。

表4.1 缺省ID分配表

对象	Function ID	COB-ID	通讯参数在OD中的索引
紧急	0001b	081h-0FFh	1024,1015h
PDO1（发送）	0011b	181h-1FFh	1800h
PDO1（接收）	0100b	201h-27Fh	1400h
PDO2（发送）	0101b	281h-2FFh	1801h
PDO2（接收）	0110b	301h-37Fh	1401h
PDO3（发送）	0111b	381h-3FFh	1802h
PDO3（接收）	1000b	401h-471h	1402h
PDO4（发送）	1001b	481h-4FFh	1803h
PDO4（接收）	1010b	501h-57Fh	1403h
SDO（发送/服务器）	1011b	581h-5FFh	1200h
SDO（接收/客户）	1100b	601h-67Fh	1200h
NMT Error Contrl	1110b	701h-77Fh	1016h,1017h

CAN协议的总线仲裁机制表明，在总线访问期间，标识符定义一个静态的报文优先权，而且标识符由低到高依次对应优先级由高到低。CANOpen正是建立在这一仲裁机制上分配COB-ID的，对于优先权比较高的网络管理和应急信息配置了较低的标识符，对于实时性要求较低的数据传输配置了较高的标识符<sup>[46]</sup>。

### 3. 设备子协议

CANOpen特别利益组：低电压开关设备（LVSG），正在负责开发和维护针对低电压开关设备（例如断路器和软起动器）的CANOpen子协议。CiA 442设备规范定义了处理数据和配置参数的功能行为，兼容DeviceNet和Profibus对低电压开关设备的相关配置。但是由于课题所限，项目没有购买该协议，所以本课题采用的是公开的DS401针对数字输入/输出设备子协议规范，后续的研究中将对孩子协议进行升级满足统一兼容性。

### 4.4.2 协议栈的实现

在国际上，在CANOpen协议提出之后，CANOpen协议栈的开发主要由现场总线开发商推动。由于知识产权和产品化的问题，很少有关于实现CANOpen协议栈的学术文章发表。大部分的CANOpen相关文章也都集中在如何在各种控制系统中使用商业化的CANOpen节点<sup>[40]</sup>。

从站软件系统的设计内容主要是在基于DSP从站模块上实现CANOpen通讯协议。由于协议相对复杂，为了缩短开发时间，通过移植开源的CANOpen从站协议栈，目前开放的CANOpen协议栈有<sup>[46]</sup>：

（1）美国嵌入式系统协会提供的Micro CANOpen协议栈、但是Micro CANOpen协议栈本身并不是一个完整的CANOpen从节点协议栈，仅支持部分的对象字典功

能和最多8个静态配置的过程通讯对象。其从节点的通讯功能和可配置性受到很大影响。

(2) 开源社区项目支持的 CanFestival CANOpen 协议栈, 包含主从站协议。但是经过实际测试发现, CanFestival CANOpen 协议栈的实时性较差, 通讯速度缓慢。其基于数组的对象字典实现形式也制约了节点的可配置能力, 在近年逐步发展。

(3) Microchip 公司提供的 CANOpen 从节点协议栈, Microchip 公司的 CANOpen 从节点协议栈通过代码的方式静态支持过程数据通讯, 可配置性较弱, 功能较为完整, 但是可移植性难度大, 本设计中采用了该协议栈来进行移植<sup>[35]</sup>。

从功能上协议栈可分为: 基本功能部分, 其包括节点的通讯初始化和硬件设备初始化、定义和访问对象字典; SDO 通讯、PDO 通讯、节点保护等功能。

(1) 初始化部分: 包括初始化 CANOpen 协议中的通讯相关参数, 其中包括对象字典、PDO 通讯参数、SDO 通讯参数等; 初始化 CAN 控制器硬件, 包括 DSP 的内部寄存器、定时器等;

(2) 对象字典组建和访问: 以数组方式定义本系统中对象字典的内容, 通过 SDO 服务以数组查询的方式实现对对象字典的访问;

(3) SDO 通讯: 响应主站 SDO 报文服务, 接收或发送主节点要求的数据帧;

(4) PDO 对象的发送与接收: 将需要发送的数据封装成 PDO 的形式等待发送, 需要时间触发方式的数据立即可以发送。当 CAN 控制器产生接收中断时, DSP 接收并断定为 PDO 对象并进行分析存储: 刷新过程映像数据数组;

(5) 心跳报文: 可实现用户自定义的周期性心跳报文的发送, 向其它节表明本节点的当前状态信息。

通过上文对 CANOpen 协议的分析, 下面主要通过编写程序来实现 CANOpen 协议栈, CANOpen 协议栈流程见图 4.9。在 CANOpen 协议栈操作程序中, 将实现 CANOpen 协议中规定的状态转移机制, 调用 CAN 报文收发服务程序, 根据从站的当前状态, 处理应答 NMT、SDO、PDO 以及特殊功能对象报文, 保证在主程序 While 语句中进行往复的循环。该函数被频繁调用, 以确保协议栈的恰当操作。

根据协议栈状态机的转换流程, 系统上电情况下, 从站完成初始化后, 会发送一个 boot-up 报文, 然后从站可选择自动进入预运行状态, 并通过周期性的心跳报文向 CANOpen 主站表明从站的状态, 随后等待主站的 NMT 命令操作。在主站 NMT 报文到来之前从站一直持续在预运行状态, 在这个状态里, 从节点可以通过 SDO 进行配置和参数设置, 但是不允许发送 PDO。在相应的 NMT 报文到来后, 即收到启动远程节点命令后, 进入运行状态, 在这个状态就可以进行正常的通讯了, 收到报文的情况下, 可以完成 SDO、RPDO 报文的通讯。如果没有收到信的 CAN 报文, 那么, 程序就会执行 TPDO 报文的处理。在收到 NMT 报文停止远程节点命令之后, 从节点将进入停止状态, 从而停止 PDO 和 SDO 通讯。通过 NMT 报文对心跳

报文内容的刷新，使得CANOpen协议中的NMT状态机得以实现。

在CANOpen协议栈模块中主要包括CANOpen协议栈初始化程序、SDO报文处理程序、PDO接收发送程序、NMT处理程序和心跳报文程序等。由于这一模块中程序很多，而且它们之间存在紧密的调用关系，接下来主要介绍对象字典的设计、CANOpen协议栈初始化程序、通讯报文处理程序这三部分的软件设计。

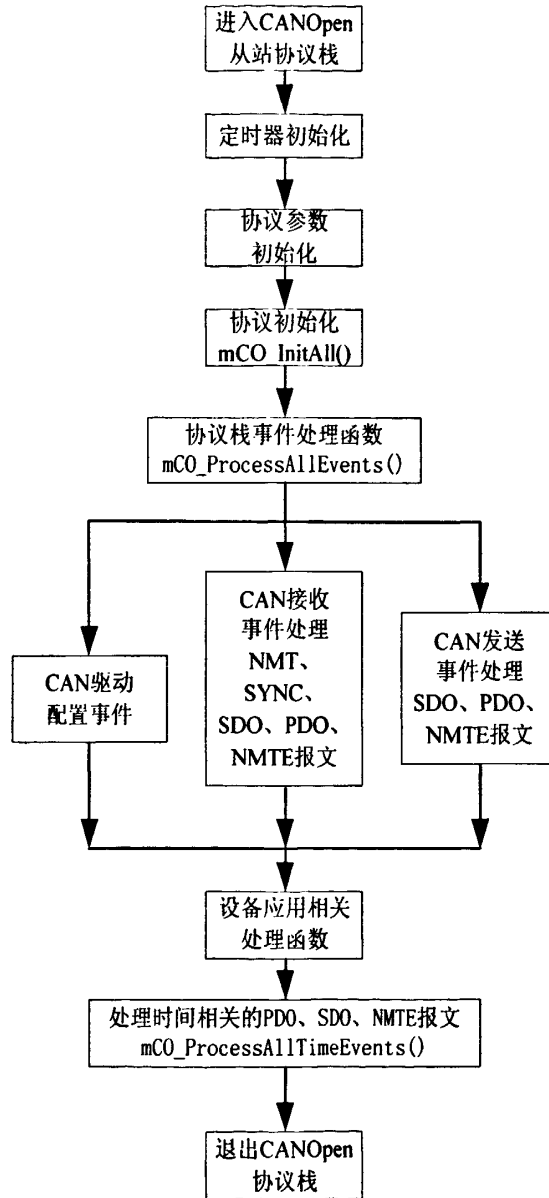


图4.9 CANOpen协议栈流程图

#### 4.4.3 对象字典的设计

对象字典是CANOpen协议的核心内容，对象字典的结构包括一个16位索引和一个8位的子索引。子索引根据不同的对象类型有不同的使用方式。对于一个简单的对象，它只有一个属性值，那么该对象的子索引就为常值00H。而对于数组和记

录,子索引用来查询数组和记录中的每个单独的元素,而子索引00H用来存放元素的个数。对于字符串对象,子索引00H表示字符串的长度。

CANOpen 网络中的每一个节点都必须有且仅有一个对象字典。为了规范性和统一性, CANOpen 规定每个对象字典的有关范围在0x1000到0x9FFF之间,而且对象字典必须按照统一结构定义。对于对象字典索引在0x1000~0x1FFF范围内的对象字典,其变量存储地址已经在协议栈中预定义,不需要开发者再次定义。索引在0x2000~0x9FFF之间的索引,需要重新映射变量地址,否则对象字典无法正确存储数据。其中索引0x6000~0x6FFF为设备子协议 DS401 协议定义的参数,用于控制器运行参数及数据的设定和读取; PDO1~PDO4 根据 CANOpen 预定义连结集分配,用于数据传输。本设计中设计的对象字典部分程序如下所示:

```
// 对象字典结构体定义 DICT_OBJECT_TEMPLATE
typedef struct _DICTIONARY_OBJECT_TEMPLATE
{
    unsigned int index;           //索引
    unsigned char subindex;      //子索引
    unsigned char ctrl;          //属性
    unsigned int len;            //长度
    unsigned char * pROM;        //变量
} DICT_OBJECT_TEMPLATE;

/*uOinFilter、uOinPolarity、uOinIntChange、uOinIntRise、uOinIntFall、uOinIntEnable、
rMaxIndex1、uLocalXmtBuffer、uLocalRcvBuffer在比照DS401对I/O的定义,分别为用于
三相电流数据存储、控制命令、配置参数、断路器工作状态、断路器分合闸状态、壳架等
级等*/

/*对象字典0x6000 to 0x6FFF*/
#define DICTONARY_STANDARD_1
{
    {0x6000,0x00,RO,1,{{( unsigned char *)&uLocalXmtBuffer[0]}},\\
    {0x6002,0x00,CONST,1,{{( unsigned char *)&rMaxIndex1}}, \\
    {0x6002,0x01,RW,1,{{( unsigned char *)&uOinPolarity}}, \\
    {0x6003,0x00,CONST,1,{{( unsigned char *)&rMaxIndex1}}, \\
    {0x6003,0x01,RW,1,{{( unsigned char *)&uOinFilter}}, \\
    {0x6005,0x00,CONST,1,{{( unsigned char *)&rMaxIndex1}}, \\
    {0x6005,0x01,RW,1,{{( unsigned char *)&uOinIntEnable}}, \\
    {0x6006,0x00,CONST,1,{{( unsigned char *)&rMaxIndex1}}, \\
    {0x6006,0x01,RW,1,{{( unsigned char *)&uOinIntChange}}, \\
    {0x6007,0x00,CONST,1,{{( unsigned char *)&rMaxIndex1}}, \\
    {0x6007,0x01,RW,1,{{( unsigned char *)&uOinIntRise}}, \\
    {0x6008,0x00,CONST,1,{{( unsigned char *)&rMaxIndex1}}, \\
    {0x6008,0x01,RW,1,{{( unsigned char *)&uOinIntFall}}, \\
    {0x6200,0x00,RW,1,{{( unsigned char *)&uLocalRcvBuffer[0]}}
```



#### 4.4.4 协议栈初始化

程序的功能是完成 CANOpen 协议栈的初始化。在进行通讯复位操作中被调用。根据拨码开关设定值确定 CAN 波特率和 CANOpen 节点 ID，配置心跳报文发送周期，赋值给 CANOpen 协议栈配置信息结构体中的对应变量，形成配置信息的初始化；然后对 RPDO、TPDO 和 SDO 结构体变量 CAN\_ID 进行初始化，调用 CAN 控制器初始化函数完成 CAN 接口初始化，调用滤波器设置程序完成对 NMT、SDO、PDO 报文的滤波器配置。最后，置位 CANOpen 协议栈初始化成功标志位，发送 boot-up 报文，提示从站刚刚成功完成初始化。其中 eCAN 模块初始化的流程图见图 4.10，要对以下寄存器或寄存器的某些位进行操作<sup>[27]</sup>：主控制寄存器（CANMC）的改变配置请求位，当其为 0 时，eCAN 处于正常工作方式，为 1 时 eCAN 处于配置方式；错误状态寄存器（CANES）的改变配置使能位，当其为 0 时，DSP 不能写控制寄存器，为 1 时则可以；位定时器配置寄存器（CANBTC），它用合适的网络定时器参数配置 CAN 节点。当 CCR 为 1 时，DSP 必须等 CCE 置位为 1 才能操作位定时器配置寄存器<sup>[42]</sup>。

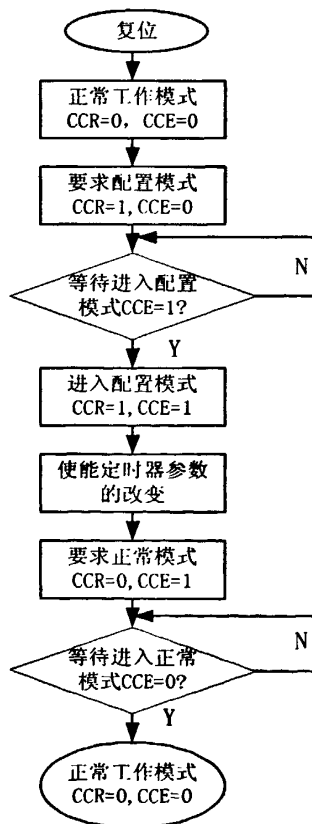


图 4.10 eCAN 模块初始化的流程图

#### 4.4.5 通讯报文处理程序

##### (1) SDO 报文处理

在收到新的 CAN 报文之后, 如果从站当前状态为非停止状态, 经过 COB\_ID 判断, 为 SDO 报文后, 就会调用 SDO 报文处理函数进行处理, 根据 SDO 的控制字做相应的处理, 如下载、初始化下载、初始化上传、上传和取消请求等, 完成后退出 CANOpen 协议栈的一次循环, 响应了主站的一次 SDO 报文服务。SDO 报文处理见图 4.11。

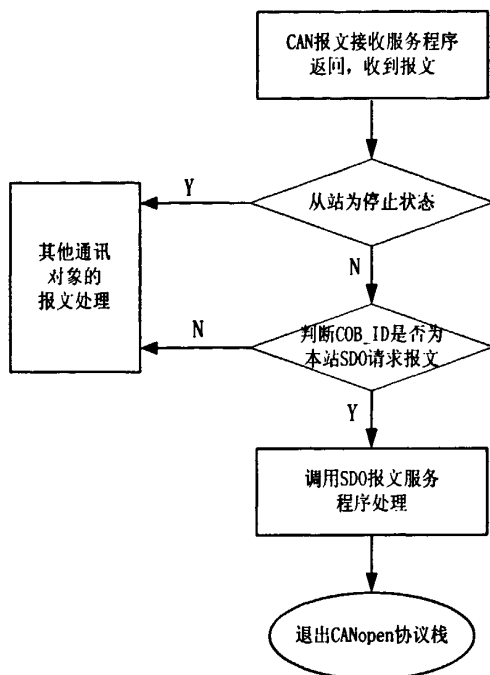


图 4.11 SDO 报文处理流程图

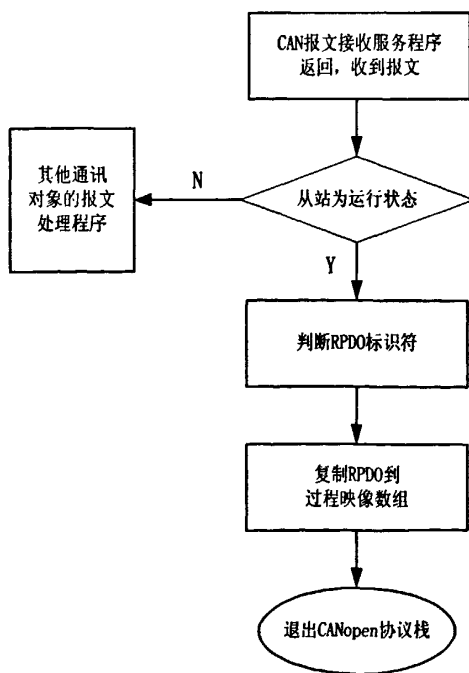


图 4.12 接收 PDO 报文处理流程图

## (2) 接收 PDO 报文处理

在本站为运行状态的情况下, 收到 RPDO 报文, 首先要根据其标示符, 判断它

是哪个RPDO报文，本协议栈实现了4个PDO，然后过程数据内容复制到过程映像PDO数据结构的对应字节，以供应用程序进行数据刷新，接收PDO报文处理见图4.12。

### (3) 发送PDO报文处理

在从站进入运行状态后，进行TPDO报文处理时，设置COB\_ID和转载发送数据，然后检查待发送的TPDO报文，在事件触发模式下，延时结束后，复制过程映像数据结构对应字节信息（已在前次循环刷新），完成TPDO报文发送，然后退出CANOpen协议栈，完成一次循环操作，发送PDO报文处理见图4.13。

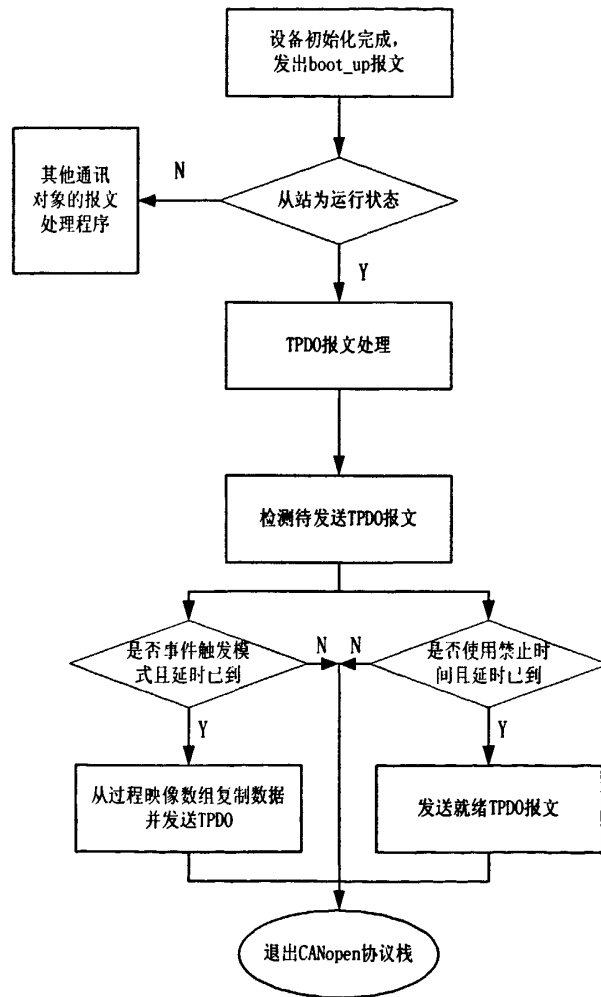


图4.13 发送PDO报文处理流程图

### (4) 心跳报文处理

在设备完成初始化成功启动之后，进行心跳报文处理时，首先检查周期延时是否结束，然后发送本次心跳报文，之后要完成对下次心跳报文发送周期的刷新，最后退出CANOpen协议栈，完成本次循环。心跳报文处理见图4.14。

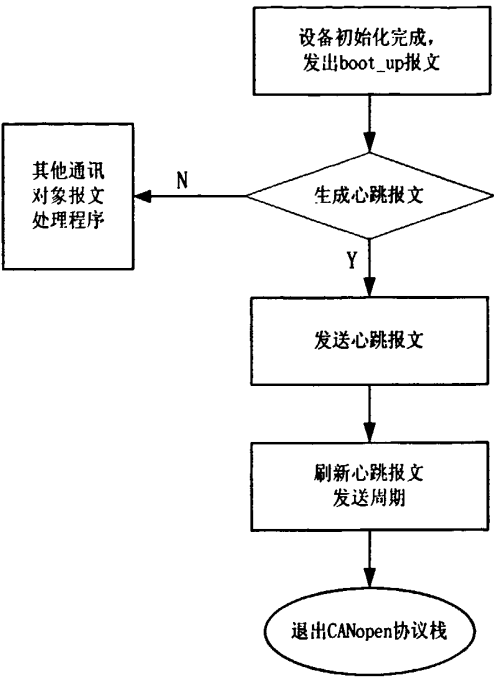


图4.14 心跳报文服务流程图

## 5.1 开发环境与调试工具

[illegible]

为了验证对基于CANOpen总线智能断路器控制系统工作原理分析的正确性、系统实现的可行性，功能的可靠性，了解系统设计的软硬件在断路器工作时的性能状况，本章对实验做了相关调试，并对实验结果进行了相应分析（保护功能在实验平台结合开发板进行调试，通信功能主要在开发板上进行调试）。

- (1) 示波器: Tektronix公司的数字式荧光示波器TDS2004B;
- (2) 开发板之家QQ2812增强型开发板及配套的StudyUSB增强版仿真器;
- (3) 万用表: Fluke189数字万用表;
- (4) 延时特性测试台: 100A-800A型塑壳断路器延时特性智能效验台;
- (5) 瞬动特性测试台: 100A-800A型塑壳断路器瞬时特性智能效验台;
- (6) USBCAN调试器及其配套的CAN上位机调试软件。

5.2 电流保护功能测试

针对保护功能所用到的电流校验台，由天正公司针对自有产品系列定制开发的校验台，分为长短延时和瞬时校验台（见附录）。断路器长短延时特性校验台可以通过按键设定试验电流值，脱扣以后读出LED上的脱扣时间值，与理论值相比较，验证是否符合动作延时保护特性。类似的瞬时特性校验台可以通过按键设置电流的大小，校验台只能使输入电流在一个大致范围内，而不能准确的将输入电流值固定在某个点上，有一定范围的误差，因此在实际测试中所得到的脱扣电流值不一定是瞬动电流的整定值，一般会比整定值大。断路器的拨码开关见图5.2，

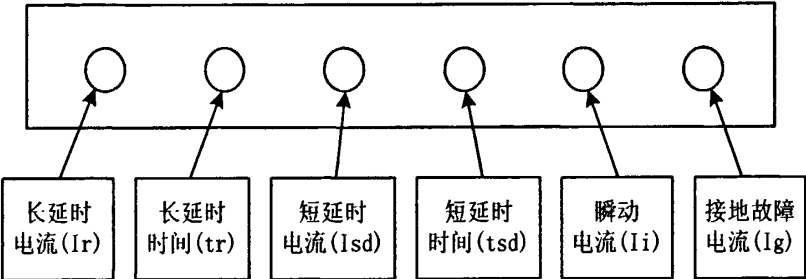


图5.2 控制器拨码开关功能

5.2.1 长延时特性测试

长延时保护测试时，通过断路器控制器上的拨码开关关闭短延时和瞬动电流功能（OFF档位）。各相同时通电进行试验，通电电流由检验台自行设定，分别测试多次，将整定值和延时时间调到不同的档位，其中本测试电流为便于核对设为整定值的1.5倍，测试延时时间与整定时间相比较，结果见表5.1。

表5.1 长延时测试结果

长延时反时限实验		长延时时间T				
长延时整定电流 $I_r$	整定时间 $t_r$ 试验电流 $I$	16s	32s	64s	128s	256s
50A	$n=1.5 \quad I=75A$	16.1	31.7	65.1	130.6	250.3
63A	$n=1.5 \quad I=94.5A$	15.1	30.7	61.9	123.4	249.5
70A	$n=1.5 \quad I=105A$	15.5	31.5	64.1	123.9	249.7
75A	$n=1.5 \quad I=112.5A$	15.9	31.4	61.8	123.8	246.1
80A	$n=1.5 \quad I=120A$	15.2	30.1	60.5	122.5	245.3
85A	$n=1.5 \quad I=127.5A$	15.7	30.4	59.8	117.6	242.3
90A	$n=1.5 \quad I=135A$	15.3	30.5	61.4	123.3	245.9
95A	$n=1.5 \quad I=142.5A$	15.7	31.4	65.1	128.7	259.5
100A	$n=1.5 \quad I=150A$	15.9	31.3	62.5	125.5	258.6

根据低压电器行业和天正企业标准，还需要分别通以1.05倍整定电流、1.2倍整定电流和2倍整定电流进行试验，确保试验结果满足上文表3.1的设计指标，即1.05倍整定电流2小时不脱扣，1.2倍整定电流1小时脱扣，2倍的整定电流时脱扣时间在误差允许范围内满足式（2-8），计算比较可以看出长延时保护达到预期目标。

5.2.2 短延时特性测试

相似的在短延时保护测试时，将断路器控制器的瞬动电流拨码开关调到OFF档。设定校验台电流值，各相同时通电进行试验，将整定值和延时时间调到不同的档位，实验电流设为短延时整定值，测试延时时间，与整定时间相比较，进行反复测试，测试结果见表5.2。

表中每组时间整定值左边为计算得到的理论值，右边为实际测定值。由于短延时校验台的最大设定电流为600A，电流输入范围不如瞬动校验台，因此后面几组数据都是在瞬动效验台上的测试结果。从表中数据可以看出，短延时保护以 $8I_n$ 为分界点，输入电流大于 $8I_n$ 时，输入电流变化时，脱扣时间几乎不变，即具有定时限保护功能；当输入电流小于 $8I_n$ 时，脱扣时间随输入电流的变化而变化，并呈反时限特性，满足公式（2-9），计算比较可以看出短延时保护达到预期目标。

表5.2 短延时测试结果

短延时实验		短延时时间							
长延时 整定电 流 $I_n$	短延时整定倍 数及输入电流 $I$	0.03s		0.1s		0.2s		0.3s	
100A	n=1.5 $I=150A$	0.854	0.932	2.64	2.586	5.68	4.945	8.53	8.05
	n=2 $I=200A$	0.482	0.471	1.52	1.525	3.2	2.776	4.8	4.536
	n=3 $I=300A$	0.213	0.397	0.71	1.030	1.423	1.817	2.13	2.835
	n=4 $I=400A$	0.12	0.195	0.4	0.351	0.810	0.811	1.20	1.223
	n=5 $I=500A$	0.077	0.156	0.256	0.249	0.512	0.534	0.77	0.782
	n=6 $I=600A$	0.053	0.121	0.178	0.179	0.353	0.355	0.53	0.549
	n=8 $I=813A$	0.033		0.093		0.194		0.287	
	n=10 $I=986A$	0.038		0.106		0.196		0.334	
	n=12 $I=1175A$	0.035		0.119		0.195		0.294	

5.2.3 瞬时特性测试

瞬动试验时，瞬动测试时将短延时调到OFF档，每两相串联通以试验电流。长延时脱扣电流整定值调节在最大值，同时整定时间调节在最大值。

从表中数据可以看出，瞬动脱扣脱扣时间都在200ms以内，能够满足设计要求。三段保护都是处于电流过载情况下，因此测试过程中可以看到过载灯在脱扣

时间的前半段是闪亮，后半段常亮，可以根据闪亮的时间大概估算出脱扣时间。由表5.1~表5.3可以得出，测试的数据都在误差范围之内，即瞬时脱扣电流的整定允许误差： $\pm 10\%$ 。长延时和短延时动作时间允许误差： $\pm 15\%$ 。因此本文设计的断路器控制器具有可靠的三段保护功能。

表5.3 瞬动测试结果

瞬时整定倍数 额定电流		n=2	n=4	n=5	n=8	n=10	n=12	n=14
$I_r=50A$	计算电流值 (A)	100	200	250	400	500	600	700
	输入电流 (A)	115	216	268	425	519	607	708
	脱扣时间 (ms)	33	25	24	106	92	71	131
$I_r=63A$	计算电流值 (A)	126	252	315	504	630	756	882
	输入电流 (A)	136	263	327	536	645	770	955
	脱扣时间 (ms)	25	125	64	132	111	72	52
$I_r=70A$	计算电流值 (A)	140	280	350	560	700	840	980
	输入电流 (A)	145	301	366	593	732	867	1130
	脱扣时间 (ms)	192	24	183	191	173	113	50
$I_r=75A$	计算电流值 (A)	150	300	375	600	750	900	1050
	输入电流 (A)	146	299	366	582	717	843	1063
	脱扣时间 (ms)	22	22	24	113	73	113	73
$I_r=80A$	计算电流值 (A)	160	320	400	640	800	960	1120
	输入电流 (A)	152	306	386	624	786	931	1150
	脱扣时间 (ms)	122	62	44	113	53	53	34
$I_r=85A$	计算电流值 (A)	170	340	425	680	850	1020	1190
	输入电流 (A)	164	327	415	655	816	1005	1240
	脱扣时间 (ms)	30	64	73	153	93	54	34
$I_r=90A$	计算电流值 (A)	180	360	350	720	900	1080	1220
	输入电流 (A)	178	353	435	709	890	1067	1373
	脱扣时间 (ms)	22	26	144	74	52	94	34
$I_r=95A$	计算电流值 (A)	190	380	475	760	950	1140	1330
	输入电流 (A)	185	365	456	755	950	1169	1475
	脱扣时间 (ms)	22	44	183	91	73	73	154
$I_r=100A$	计算电流值 (A)	200	400	500	800	1000	1200	1400
	输入电流 (A)	199	395	485	806	990	1266	1468
	脱扣时间 (ms)	21	24	91	114	111	50	55



### 5.3 CANOpen从站功能测试

在完成 CANOpen 协议从站的初步开发之后,应用还需对协议栈的性能进行相关的功能性测试,判断是否实现 CANOpen 协议基本通信功能,并根据测试结果在今后对协议栈软件进行改进,以满足设计的实际应用需求。同时,为了满足兼容性,还会涉及到产品设备规范的协议一致性测试问题,即所开发产品是否完全符合 CANOpen 协议及设备子协议定义,虽然 CANOpen 还没有成为行业国家标准。

目前, CANOpen 设备的测试和认证由 CiA 协会来完成,测试价格昂贵,技术交流不便。由于本文设计开发的 CANOpen 从站还处于研究试验阶段,有别于真正的产品开发,目前尚不需要进行严格的 CANOpen 协议一致性测试,而是利用现有开发调试平台进行初步测试,由于上位机管理软件开发尚未完成,同时没有采用相关公司开发的接口卡及配套软件,因此采用普通的 CAN 的软件工具来对报文进行检测,USBCAN 调试软件界面见图 5.3。

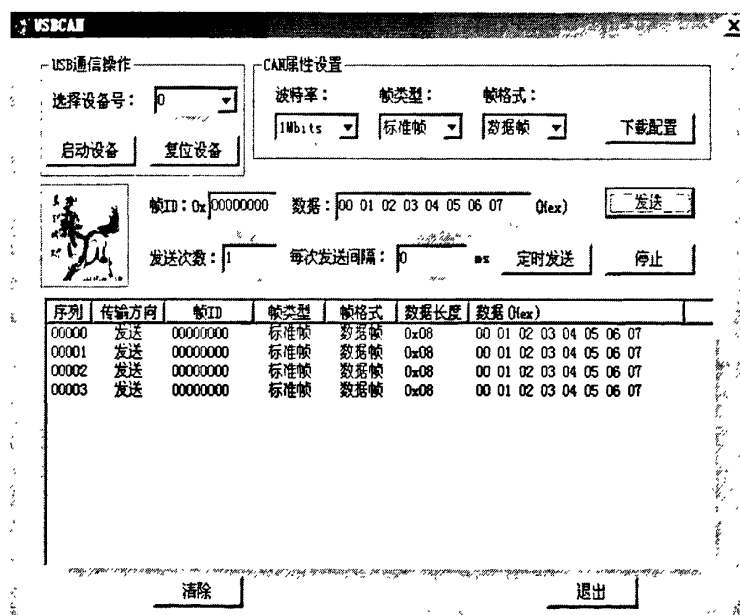


图5.3 USBCAN调试软件界面

USBCAN 调试程序中 CAN 通讯相关信息,包括 CAN 通讯参数设置例如设备号、波特率、帧类型和帧格式等,在设置完成后可以通过点击下载配置按钮进行配置 USBCAN 转换器。通过手动设定发送帧 ID 和数据发送 CAN 报文。配合相应的下位机程序可以实现一个完整的数据收发周期,并在发送数据区和接收数据区显示本次数据传输的信息。可以监视一个完整的数据发送/接收过程,在接收数据区显示了接收到数据的帧 ID、数据帧数据域长度和数据内容,通过解读报文来验证功能。

这里只给出系统初步测试的通信功能的简单测试方法。

(1) 通过发送 NMT 通讯对象对设备状态进行管理,测试设备是否响应 NMT 管理。

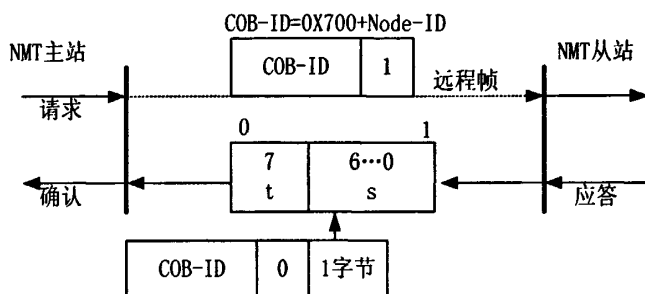
只有CAN网络主节点能够传送NMT报文，从节点接受主节点的请求而不需要应答。NMT报文格式见图5.4，CS是NMT命令字，其值大小代表不同的NMT服务，ID代表接受主节点请求的节点号。

COB-ID	字节0	字节1
0X000	CS	ID

注：CS：0x01 运行模式； 0x02停止模式； 0x80预运行模式；  
0x81重启节点模式； 0x82重启通信模式

图5.4 NMT报文格式

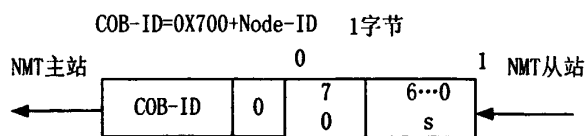
从节点的状态可以通过错误控制协议（Error Control Protocol）验证。节点保护协议（Node Guarding Protocol）来保证NMT主站轮询NMT从站的状态信息和网络管理。NMT主站发送远程帧报文，对应从节点应答报文格式见图5.5。



注：t：0,1,0,1...翻转；s（state）：4=停止；5=运行；7F=预运行

图5.5 节点保护报文测试

（2）心跳报文协议（Heartbeat Protocol）验证，则可以观察上位机CAN测试软件收到的CAN报文帧，从节点周期性的发送报文向主站报告节点的状态，见图5.6。



注：t：0,1,0,1...翻转；s（state）：0=boot-up报文；4=停止；5=运行；7F=预运行

图5.6 心跳报文测试

## 5.4 测量误差分析

### （1）互感器误差

电流互感器把低压断路器工作现场一次侧的大电流比例变换成小电流信号，本身存在诸如非线性、相位移等特性，使变换结果有一定的误差。本设计中采用的是非标准的空心电流互感器，本身线性度不是很高，虽然采用了大小通道运放来减小误差，但仍然存在误差。

## (2) 调理电路误差

运放放大器及其外部无源电路元件引起的调理电路误差,表现在运放由于环境变化引起的漂移和失调电压、失调电流;电阻电容等无源器件由于温度变化引起的偏离标称值,从而影响运放倍数、滤波和变换精度指标。

## (3) 采样误差

A/D转换的误差主要有量化误差和非线性误差。量化误差不可避免,例如,DSP中A/D为12位,则转换器的一个量化单位值为 $1/2^{12}$ 。由于A/D转换结果只能是量化单位的整数倍,但不一定是量化单位值的整数倍。非线性误差则表现在数字输出与模拟输入之间的比例关系在整个变换量程中不完全一致,同时还存在器件的偏移误差、满量程误差等。

## (4) 不同步采样误差

同步采样就是采样频率为电源频率的整数倍。但控制器采集电流信号时,对交直流信号采样,是以工频50Hz为采样基准的,即 $T_s=20\text{ms}/N$ 为采样周期。当电源频率发生波动时,就不能保证采样频率是电源频率的整数倍,从而导致有效值结果误差<sup>[30]</sup>。

## 总结与展望

### 1. 本文研究成果

本研究课题是理论结合实际、技术研究与工程设计紧密结合的实际课题。是在浙江天正电气股份有限公司开发设计该类产品的基礎上，结合当前嵌入式和现场总线发展的现状，设计了一款基于 CANOpen 总线的低压塑壳断路器智能控制器。

(1) 分析国内外低压断路器中智能控制器的发展现状及其趋势，根据现代信号处理技术在智能电器中的应用及我国新一代智能断路器的发展要求，提出了一种基于 DSP 和 CANOpen 总线智能控制器的设计方案。

(2) 详细讨论了智能控制器系统实现的技术基础，研究智能控制器的测量算法、三段功能保护算法（长延时、短延时、瞬时）和 CAN/CANOpen 总线协议，分析其实现原理。

(3) 根据基于 CANOpen 总线的技术的项目总体需求，设计了以 TI 公司的 TMS320F2812 芯片作为主控制器的硬件系统，包括信号调理、电源模块、通信模块（CAN 接口和 RS485 接口）和输入输出模块，并详细论述了各模块电路的组成原理和实现方法，给出了整个电路系统的原理图。

(4) 根据软件方案，结合硬件电路，设计实现系统的应用程序，主要是信号采样处理和三段保护功能的算法实现，同时详细论述了协议栈的设计实现方法，并给出了系统的软件设计流程及代码实现。

(5) 采用开发板配套的 DSP 仿真器结合软件平台 CCS2.2 及保护功能测试台，对系统进行反复调试，给出了试验结果和数据分析。在上位机 CAN 调试软件平台上测试验证总线通信，给出了 CANOpen 总线通信简单的调试方法。

最终的测试和运行结果表明，本文所设计的智能断路器能够稳定可靠的实现三段电流保护等功能，电流、时间的调节精度等指标均达到了预期的设计要求。

### 2. 本项目下一阶段的科研任务

(1) 完善 CANOpen 总线协议内容，对应用层软件进行相关的规范性测试，整个协议栈还很不成熟，改善协议栈在应用程序中的实时性。

(2) CAN/CANOpen 软硬件接口仅在只在开发板上的调试，还没有完全整合到低压断路器智能控制器中，另外缺乏对总线性能测试，包括抗干扰测试、EMC 测试。

(3) 本文仅建立了单主单从通讯网络，有关 CAN/CANOpen 总线通信的多节点组网和管理应用，需要工程组网测试。

### 3. 本项目研究展望

经过一年多的努力,本人对低压断路器中智能控制器的开发有了一个较为系统的认识和理解,同时研究了现场总线在断路器中的应用,而且在此基础上设计的总线式可通信智能控制器也基本达到了预期的目标。然而,为了适应不断发展的市场和社会需求,本课题可在以下几个方面进一步改进和完善:

(1) 完善多功能参数测量,设计可显示电压、电流、频率、有功功率、无功功率、功率因数等系统运行参数,使其具备更强的分析能力和综合能力,随着处理的任务增加,为满足实时性要求最好考虑采用DSP/BIOS实时系统<sup>[19]</sup>。

(2) 对于应用中前端电流互感器铁心饱和引起二次电流畸变进行补偿,降低对互感器线性度和一致性的要求,提高采样精度和断路器可靠性同时节约生产成本。

(3) 提高和扩展壳架测试的额定电流,同时相应的开发附加功能,使可通信智能断路器的适用范围更广。浙江天正电气股份有限公司下一步项目任务开发壳架额定电流分别为225A、400A、800A的可通信的智能断路器。

(4) 完善CANOpen总线协议内容,尤其是与低压断路器相关的设备子协议。比如DS442、DS306协议(EDS文件生成规范)。并开发针对智能断路器的CANOpen的主站监控软件,对应用层软件进行相关的规范性测试,完善整个从站协议栈。

## 参考文献

- [1] 顾惠民,周积刚. 国外新一代塑壳断路器的现状和发展动向. 电气制造 2006 (10): 26~28
- [2] 冯永海,冯关水. 新一代塑壳断路器的设计及其在现场总线系统中的应用. 电气制造,2008 (5): 48~52
- [3] 李云非,姜晓峰,陈小平. 智能断路器在线测试系统. 计算机工程,2003,29 (21): 174~176
- [4] 赵跃华,任敏. 智能断路器的可通信设计. 测控技术与设备,2003,29 (12): 31~38
- [5] 曾庆军,刘阳. 基于CAN总线的低压断路器新型可通信智能控制器研制. 低压电器 2004 (11): 30~34
- [6] 田仲,岳继光,曹聪. 三相智能断路器测控单元的设计与实现. 电工技术杂志,2003 (11): 43~45
- [7] CAN-bus规范V2.0版本. [www.zlgmcu.com](http://www.zlgmcu.com)
- [8] CAN in Automation. CANopen Application Layer and Communication Profile. CiA Draft Standard 301,Version 4. 2002. [www.can-cia.org](http://www.can-cia.org)
- [9] CANopen协议介绍-流行欧洲的CAN-bus高层协议. [www.zlgmcu.com](http://www.zlgmcu.com)
- [10] Shaohua Ma and Jimei Wang, An Approach for Intelligent Detection and Fault Diagnosis of Vacuum Circuit Breakers, 19<sup>th</sup> ISDEIV Conference, September 2000, 69~73
- [11] J. Cosgrave, S. Stangherlin, J. Humphries, G. R. Jones, C. Piazza, S. Volponi and L. Sfondrini, Intelligent Optical Fibre Monitoring of Oil-filled Circuit Breakers, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib, November 1999, Vol. 146, No. 6: 279~283
- [12] 张新刚,王泽忠. 采用电压波形特征的电流互感器饱和检测方法. 电网技术, 2005, 29 (14): 59~63
- [13] 张新刚,王泽忠. 电流互感器铁心饱和引起二次电流畸变的补偿研究. 中国电机工程学报, 2006, 26 (3): 36~42
- [14] 刘瞰东,周文博. 基于CAN总线的智能断路器控制器设计. 厦门大学学报 (自然科学版), 2006, 45 (6): 783~788
- [15] B. Stephen, S. M. Strachan, S. D. J. McArthur, J. R. McDonald and K. Hamilton. Design of trip current monitoring system for circuit breaker condition assessment. The Institution of Engineering and Technology 2007: 876~882
- [16] 黄绍平,李永坚. 低压断路器智能控制器的设计与实现. 工矿自动化, 2004 (2):

42~44

- [17] 陈国军,曾庆军,黄巧亮. 基于CAN总线通信的新型智能控制器的研制. 工矿自动化,2007 (2) : 15~18
- [18] Nochumson, C.J.. Application of new technologies in power circuit breakers with higher interrupting capacity and short time ratings. Pulp and Paper Industry Technical Conference. 1999 (6) :27~41
- [19] Wayne Wolf, Computers as Components: Principles of Embedded Computing System Design: Morgan Kaufmann,2001 (6) :142~148
- [20] 杨旭雷,张浩,王鹏光. 智能型断路器测控单元的软硬件设计. 电力自动化设备,2002,22 (7) : 35~37
- [21] 任敏,赵跃华. 内嵌CAN总线在智能断路器中的应用. 电力自动化设备,2003,23 (11) : 60~62
- [22] 刘阳,曾庆军,黄巧亮. 基于CAN总线的低压断路器新型控制器的研究. 华东船舶工业学院学报 (自然科学版),2004,18 (3) : 44~49
- [23] 李文雄,陆俭国. CAN现场总线技术及发展. 江苏电器,2004, (1) ,1~3
- [24] 王新波,马永波,宋矿利,程博,张浩. 过采样技术在基于DSP的智能断路器设计中的应用. 电测与仪表,2004,1 (1) : 20~22
- [25] MarceloE .Valdes, Indrajit Purkayastha, and Tom Papallo, The Sigle-Processor Concept for Protection and Control of Circuit Breakers in Low-Voltage Switchgear, IEEE Transactions on Industry Applications, 2004,40 (4) :974~986
- [26] LiulingLi, Y.Qiu Controlled Switching of Circuit Breaker and Its Site Measurement in Power Distribution System, Proceedings of 2001 International Symposium,2001 (3) :132~145
- [27] 苏奎峰 吕强. TMS320F2812原理与开发. 北京:电子工业出版社.2005,18~80
- [28] ThanhC.Nguyen.Sherman Chan,Ron Bailey and Thanh Nguyen,Auto-check circuit breaker interrupting capabilities, IEEE Computer Applications in Power, 2002, 15 (1) :877~886
- [29] 刘幼林,姬劳. 基于TMS320F2812+uC/OS-II 智能控制单元设计. 电气应用,2006,25 (1) : 29~31
- [30] Knezev, M,Djekic, Z, Kezunovic, M. Automated Circuit Breaker Monitoring. Power Engineering Society General Meeting,2007,6:1~6
- [31] 黄巧亮,陈国军,蔡亮,曾庆军. 基于DSP的现场总线式低压断路器新型智能控制器研究. 江苏科技大学学报 (自然科学版),2006,20 (3) : 68~72
- [32] 刘剑. 基于DSP和现场总线CAN的智能脱扣器设计: [西北工业大学硕士学位论文]. 西安: 西北工业大学,2006: 15~18

- [33] Grega Bizjzk, Peter Zunko, Dusan Povh. Combined Model of SF6 Circuit Breaker for Use in Digital Simulation Programs. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19 (1) :1207~1211
- [34] TPS73HD318 Data Sheet. Texas Instruments Incorporated. focus.ti.com.cn
- [35] A CANopen Stack for PIC18 ECAN<sup>TM</sup> Microcontrollers. www.microchip.com
- [36] CiA Draft Standard 401 Device profile for generic I /O modules. Version: 3.003 June. www.can-cia.org
- [37] Jeffrey H. Nelson, Electric Utility Considerations for Circuit Breaker Monitoring, the Proceedings of the 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 (8) :83~94
- [38] P. Choonhapran, G. Balzer. Study of Stresses of Circuit-breakers Combined Statistical Method. 9<sup>th</sup> International Conference on Probabilistic Applied to Power Systems, 2006:162~174
- [39] 刘幼林,姬劳. 基于DSP+CPLD的断路器智能控制单元设计. 电力自动化设备, 2005 (11) : 65~68
- [40] 郑楠. 无刷直流电机控制系统的通讯策略研究: [华中科技大学硕士学位论文]. 武汉:华中科技大学, 2008: 25~28
- [41] Valentine, R.D. A perspective of low-voltage circuit breaker interrupting rating. IEEE Transactions. on Industry Applications. 2000, 36 (3) : 916~919
- [42] 宁运, 翁显耀. 基于TMS320LF2407的智能断路器的CAN通信设计. 自动化技术与应用. 2007, 26 (7) : 70~73
- [43] 矫莉, 曹云东. 基于嵌入式ARM与CAN总线的低压断路器智能控制器设计的研究. 电气应用, 2007, 26 (9) : 81~83
- [44] 李兴文, 陈德桂, 汪倩, 李志鹏, 王云峰. 低压塑壳断路器三相短路开断特性的仿真分析. 电工技术学报, 2005, 20 (10) : 76~87
- [45] 2008全国低压电器标准化技术委员会. GB14048.2-2001 低压开关设备和控制设备低压断路器. 北京: 中国标准出版社, 2001
- [46] 宋威. CANOpen 现场总线应用层协议主站的开发与实现: [北京工业大学硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2008.5: 11~38



## 致 谢

首先要诚挚的感谢我的指导老师戴瑜兴教授。本文的研究工作是在戴老师的悉心指导下完成的，从论文的选题到课题研究的具体工作，戴老师都给予我极大的帮助和热情指导，为本文的完成提出了许多宝贵的意见。在两年多的攻读硕士学位期间，戴老师为我提供了宝贵的学习和实践机会，使我在各方面都得到了长足的进步。我从他那里不仅学到了知识，也学会了做人的态度，这些对我今后的人生都将有很大的帮助。

感谢浙江天正电气股份有限公司的领导给我提供了宝贵的实践机会以及工作上的支持，特别要感谢李芑总工、技术中心主任王卫国工程师、王兴仙工程师、杨斌工程师、王兴刚、许玲燕助理工程师在技术上的指导，生活上的关心。感谢老师黄文清老师、全惠敏老师及其同学好友广建设、罗轶峰、李志娟、王金武、温烨婷、叶慧聪、曾哲、李军、王善伟、沈坤等同学，是他们给我提供了热心的帮助和鼓励。

同时感谢我的所有任课老师以及湖南大学电气与信息工程学院所有帮助和关心我的老师。

感谢我的家人对我学业的理解和支持以及生活上的关心，正是他们的理解和支持，我才得以顺利完成硕士阶段的学习和论文的撰写。我将用我一生的努力来回报他们。

再一次感谢所有关心和帮助我的人！

何孝发

2010年4月 于岳麓山下



## 附录A 攻读学位期间发表的论文

- [1] 何孝发, 戴瑜兴, 王卫国, 李芃. 基于DSP和Modbus总线的智能断路器控制器设计. 电子技术应用, 2009年12期。

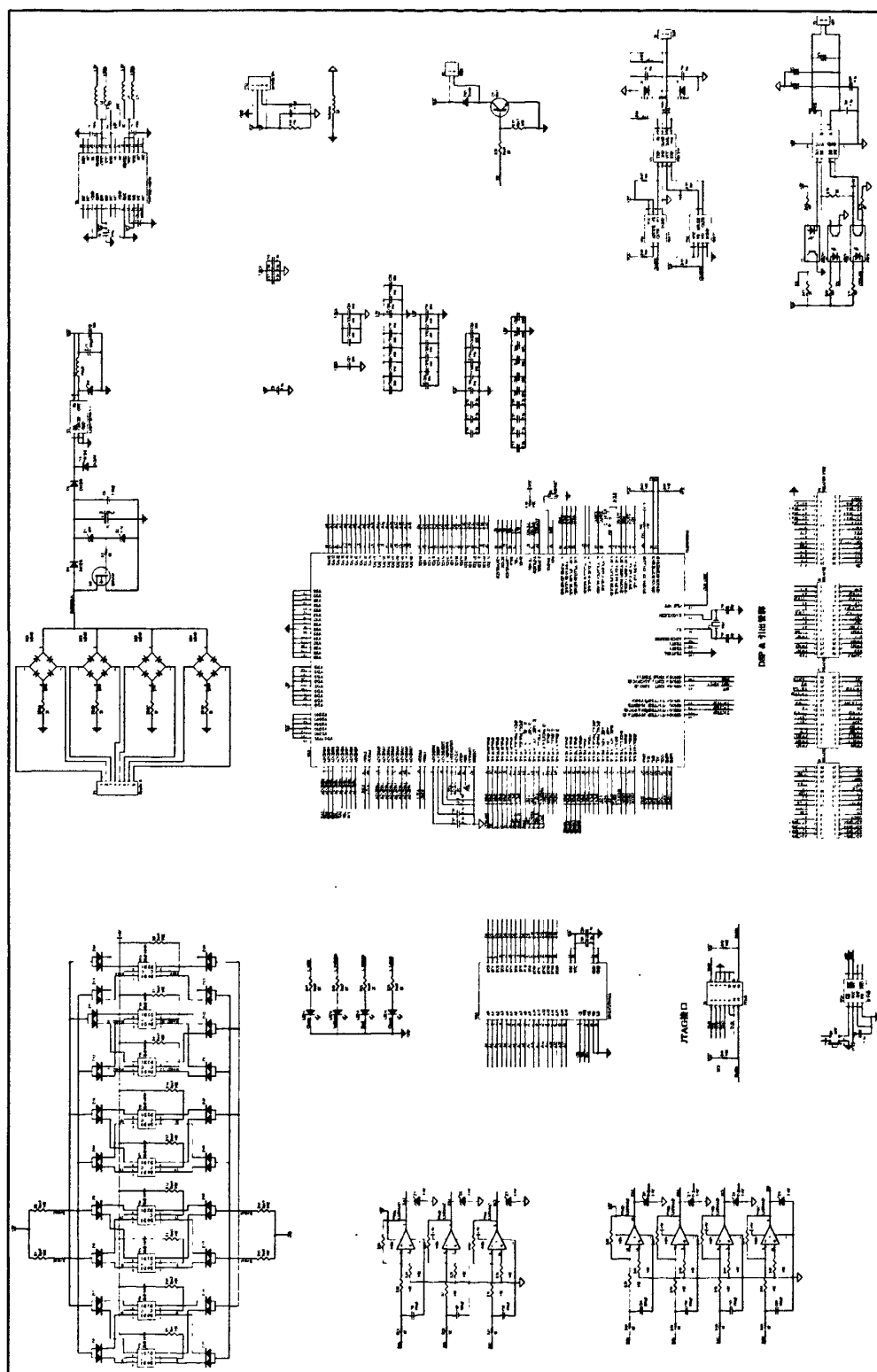


## 附录B 攻读学位期间参加的科研项目

- [1] 2008.7-2009.8 在浙江天正电气股份有限公司，参与浙江省重大科技专项（湖南大学与浙江天正集团的校企合作项目）“基于现场总线的智能断路器技术研究与应用”[2007C11072]。主要承担低压断路器智能断路器的智能控制器和现场总线协议模块软硬件设计和调试。
- [2] 2007.10-2008.6 参与湖南大学与深圳市华力特电气股份有限公司的校企合作项目“在线式电能质量监测仪”，主要承担软件件设计和部分人机接口软件设计。



## 附录C 部分原理图

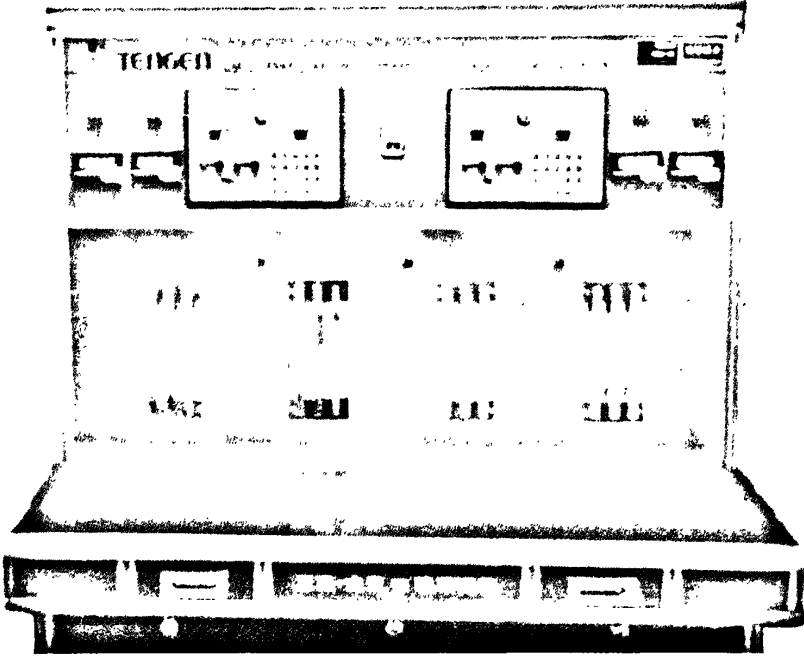






## 附录D 开发测试平台

### D.1 断路器长延时/短延时/瞬时测试台



### D.2 DSP开发板

