

中文摘要

摘要: 中国高速铁路发展迅速,迫切需要装备先进、可靠及安全的铁路信号系统来保证列车的安全运行。列车速度的提高使得基于轨道电路的列车控制系统不能满足安全性要求,而基于无线传输的列车控制系统能满足。无线闭塞中心(RBC)是高速铁路信号系统的地面核心子系统。其通过与调度集中系统交互,实现列车运行状态信息及控制信息的传递;与车站联锁系统交互,实现列车运行状态信息及进路状态信息的传递;与列车车载系统交互,实现列车运行状态信息、行车许可及列车运行间隔管理信息的传递;与相邻 RBC 系统交互,实现列车控制权的交接。RBC 系统对实现高速铁路信号系统“运行指挥、安全防护”的功能起着关键作用。

目前,国外 RBC 系统研究比较成熟,而国内相关技术的研究正处于起步阶段。本文以国内高速铁路项目引进的信号系统为应用背景,在分解其功能的基础上提出了 RBC 系统功能需求及其实现方案,并基于单片机、CAN 总线研制 RBC 原理样机,搭建了其仿真运行环境,完成了原理样机的软、硬件测试与功能实验。

论文的主要工作包括:

第一,介绍了 RBC 系统在不同结构信号系统中的工作机理,在描述信号系统功能分解方案的基础上,提出了 RBC 系统功能需求及其实现方案。分析了 RBC 系统的内外部结构,以此为基础设计了 RBC 原理样机的总体结构。

第二,设计了原理样机硬件总体结构,基于 Mega128 单片机、CAN 总线研制了由二取二乘二核心处理单元、表决单元、切换单元、信号调理单元及通信单元构成的 RBC 原理样机,并分析了其安全性可靠性。

第三,设计了原理样机软件总体结构,并依据 RBC 系统技术规范编制了列车启动模块软件、注册模块软件、行车控制模块软件、级间转换和 RBC 切换模块软件及通信模块软件。其中行车控制模块软件由接车作业软件、发车作业软件、通过作业软件及区间运行作业软件等组成。

第四,搭建了原理样机仿真运行的外部环境,完成了软件的测试,并以此为基础实现了硬件的调试。最后实现了其与调度集中系统、车站联锁系统及列车车载设备的功能实验。

关键词: 无线闭塞中心(RBC); 原理样机; 单片机; CAN 总线

分类号: U284. 91

ABSTRACT

ABSTRACT: Chinese high-speed railway is developing rapidly, which demands urgently of equipping advanced, safe and reliable railway signaling system for train operation safety. The Track circuit Based Train Control system (TBTC) can't satisfy the safety requirement as the train speed increased, while the Communication Based Train Control system (CBTC) can. Radio Block Center (RBC) is the kernel subsystem of the ground system in high-speed railway signaling system. The information of train operation state and train control is transferred between RBC system and Centralized Traffic Control system (CTC); the information of train operation state and route state is transferred between RBC system and Computer Interlocking System(CIS); the information of train operation state, movement authorities and train interval control is transferred between RBC system and Train On-board system; the handover of train control is realized between RBC system and neighborhood RBC system. RBC system makes key effect of actualizing the function of "operation commanding, safety protection" in the high-speed railway signaling system.

At present, the research on the RBC system abroad is mature, while the domestic counterpart is still at the start stage. The functional requirements and implementation scheme were presented based on the functional decomposition of the signaling system introduced by high-speed railway project. And a RBC principle prototype based on MCU and CAN bus was developed, the running environment of RBC principle prototype for simulation was constructed. The software & hardware debugging and functional experiment were completed.

Research works in this paper are focused on the followings:

Firstly, the working principles of RBC system in the signaling system of different architecture were studied, the scheme of functional decomposition of signaling system was described, and the functional requirements and implementation scheme of RBC system were presented. The interior and exterior architecture of RBC system were analyzed, and the architecture of RBC principle prototype was designed.

Secondly, the principle prototype hardware architecture was designed, and the principle prototype consisting of kernel 2002M2 processing unit, voting unit, switch unit and communication unit based on Mega128, CAN bus was developed. The safety and reliability of the principle prototype were analyzed.

Thirdly, the principle prototype software architecture was designed. The software modules for train registration, start-up, operation control, switch between RBC system and neighborhood RBC system or different line levels and communication were complied according to the RBC system's technical specification. And the operation control module was composed of train receiving, departure, passing and block running etc.

Finally, the external running environment for simulation was constructed, and the software testing was completed, then the hardware debugging was realized. At last the functional experiment of the principle prototype with CTC, CIS and Train On-board system was realized.

KEYWORDS: Radio Block Center (RBC); Principle prototype; MCU; CAN bus

CLASSNO: U284. 91

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解北京交通大学有关保留、使用学位论文的规定。特授权北京交通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，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期： 年 月 日

签字日期：2008年6月10日

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京交通大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。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了谢意。

学位论文作者签名：彭传贤 签字日期：2008年6月10日

致谢

本论文的工作是在我的导师郑伟副教授的悉心指导下完成的，郑伟副教授严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响。在此衷心感谢两年来郑伟老师对我的关心和指导。

徐洪泽老师在学习上和生活上都给予了我很大的关心和帮助，在此表示衷心的感谢。

中铁第四勘察设计院集团有限公司的张敏慧、黄蓉、陈宁及李乾社等高工对于我信号系统的学习和研究给予了热情帮助，岳强、仲维锋老师对于我的科研工作和论文提出了许多的宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

在实验室工作及撰写论文期间，程梁、周鹏、杨昭军、吴良坤等师兄及张阳、吴梦媛、郑长宗等同学对我论文中的系统软件、硬件研究工作给予了热情帮助，在此向他们表达我的感激之情。

另外也感谢我的父母、姐姐，他们的理解和支持使我能够在学校专心完成我的学业。

1 引言

现在,人们的时间价值观念越来越强,“时间就是生命,时间就是效益”。交通运输速度的提高能获得时间的节省,因此,力求提高运输速度已成为日益受到重视的重点科技课题之一^[1]。欧洲各国及日本很早就开始了高速铁路的研究与修建,并取得了重大的成绩。而我国现在运输压力越来越大,对高速铁路的研究及修建也势在必行。

高速铁路的发展,造成既有信号系统难以达到“运行指挥、安全防护”的需要,因此传统的调度集中系统、继电集中联锁及列车控制系统都需要得到进一步的发展。而现代计算机技术、控制技术、网络技术及通信技术的发展为传统信号系统的革新提供了新思路、新方法。新一代的分散自律调度集中系统、计算机联锁系统及基于 GSM-R (Global System for Mobile Communication-Railway) 的列车控制系统就是在这样的背景下发展起来的,而 RBC (Radio Block Center) 作为信号系统的地面核心子系统,要实现列车间隔的控制和行车许可的下达,无疑也是研究的重点。

1.1 研究背景

1) 高速铁路的发展现状

为了提高运输能力、同航空和公路等运输方式竞争,并减少污染,国外很早就开始了高速铁路的研究。国外高速铁路的发展是以日本、法国及德国为代表:1964年10月1日,日本建成了世界上的第一条高速铁路——东海道新干线,时速达到210km/h,随后陆续修建了山阳、东北、上越等新干线,现在日本的高速铁路营业里程达1831.5km。日本的新干线全部是新建的,仅运行旅客列车;法国在1981年修建了第一条高速铁路,部分新建,部分在既有线路基础上改造,也是旅客列车专用,速度达到270km/h。后来又建成TGV (Traina Grande Vitese) 大西洋线,时速达300km/h;原联邦德国是继日本、法国后最先在世界上实现最高时速达250km/h的铁路高速化国家,从1981年开始高速铁路的新线建设及旧线改造,至1991年,共修建新线426km,改造旧线1000km,实行的是客货混跑的客运专线模式,速度达到250km/h。随后为实现与欧洲其它国家的高速铁路相连接,构成高速铁路网,德国开始对一系列旧线改造,并研制新一代的ICE (Inter City Express) 高速列车。除了上述国家外,英国、意大利、瑞典、西班牙及美国等都进行了高速铁路的研究及修建。^{[1][2]}

1994年,广州—深圳准高速铁路建成,这是国内第一条准高速铁路,列车运行速度达到160—200km/h,这条线的建成通车为我国高速铁路的建设打下了基础。2003年,我国第一条客运专线——秦皇岛—沈阳建成并投入运营,通过此条线的建设,更是为建设符合中国国情的高速客运专线积攒了大量经验^[2]。根据中国《中长期铁路路网规划》,到2020年,我国客运专线将形成“四纵四横”的客运专线格局,营运里程达1.2万km。目前,武广、郑西、甬台温等客运专线已进入施工建设阶段。

2) 列车控制技术的发展现状

列车速度的提高,对通信信号设备的安全性、可靠性提出了更高的要求,作为地面控制系统核心的列车控制系统也不例外。当今世界各国已投入使用的高速列车运行控制系统主要有法国的U/T系统、德国LZB80系统、日本新干线ATC(Automatic Train Control)系统及欧洲的ETCS(European Train Control System)系统,这些系统最根本的差别在于列车控制方式和车—地间信息传输方式不同。

(1) 法国U/T系统

法国高速铁路TGV区段均采用TVM300型或TVM430型机车信号,地面信息传输采用UM71或UM2000轨道电路,简称U/T系统。

机车信号带有列车速度监督是法国U/T系统的一个特点,它是保证行车安全、防止列车超速运行的有效手段。U/T系统对速度的控制是采用分段制动的列车控制模式,司机按照每一段轨道电路地面信息给出的速度值运行时,速度监督设备不干预司机正常操作,当司机违章操作或列车速度超过规定的允许速度时,速度监督设备就将自动实施制动。

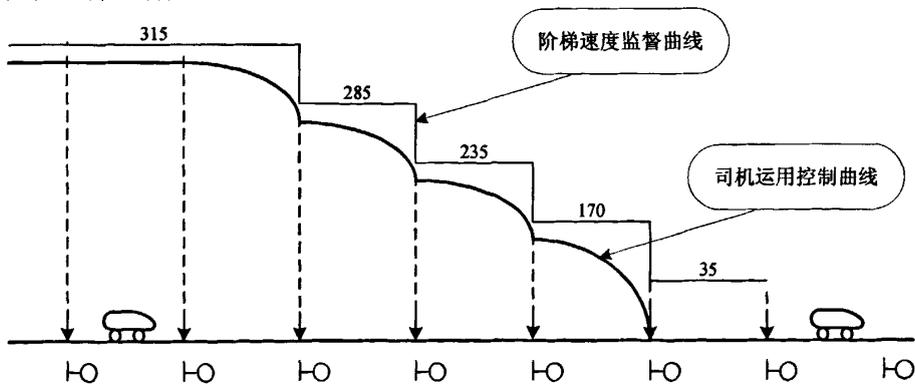


图 1-1 TVM300 速度监控曲线

Figure 1-1 Speed supervision curve of TVM300

由于高速铁路列车速度不断提高,特别是1993年开通法国第三条北方线高速

铁路后,列车运行速度已达 320km/h,为此法国有关公司对原由模拟电路构成的 U/T 系统进行了数字化改造,现已投入使用的有 TVM400 系列产品。新的数字化 U/T 系统除保留了旧系统的基本结构和功能外,其最大特点就是采用了数字电路技术使设备结构小型化、模块化,采用数字通信技术使车一地间的信息传输数字编码化,从而使车一地间的信息传输量有较大增加,传输的信息更可靠、更安全,这些信息除满足列车间隔控制外,还可满足传输线路坡道、距离等不同线路数据的要求,因此其速度监督由过去的阶梯控制方式改为分段曲线控制方式,原 TVM300 系统的保护区段可以取消,其线路通过能力有所提高,同时,其控制曲线已接近现代列车的连续控制模式。

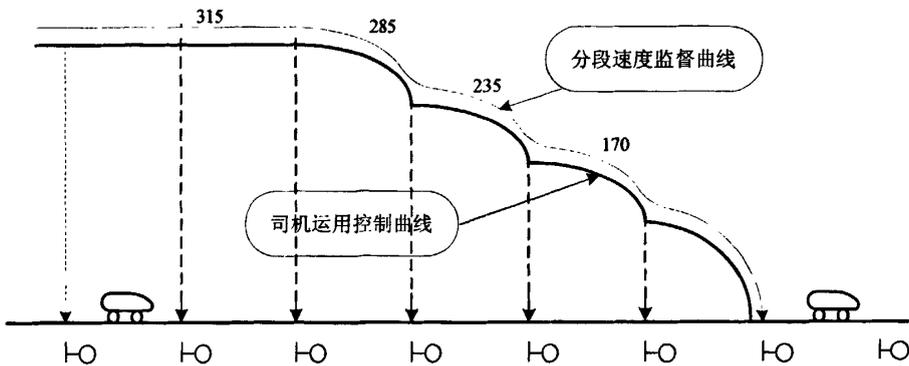


图 1-2 TVM400 速度监控曲线

Figure 1-2 Speed supervision curve of TVM400

法国的 U/T 系统大多采用 UM71 无绝缘轨道电路,该轨道电路是法国 1971 年为防止交流电气化牵引电流谐波干扰而研制的一种移频轨道电路,它分为 1700Hz、2000Hz、2300Hz 及 2600Hz 四种类型。两个相邻的轨道电路间采用电气分隔接头,实现了无机械轨缝的电气隔离。为解决地面向机车传递多种信息,在 TVM300 系统中,采用 UM71 轨道电路向机车发送 18 种低频调制信息,以实现速差式机车信号及带阶梯型速度控制曲线的速度监督。在 TVM400 系统使用中,在继承原 UM71 轨道电路基本特性基础上,通过对设备器材的数字改造,低频数量增加到 27 种,并且进行编码处理,使其信息传输量由 TVM300 的 18 种变为 221 种,这为提高列车控制系统的性能创造了非常好的前提条件。^{[3][4][5]}

(2) 日本 ATC 系统

日本于 1964 年即交付使用了世界上第一条高速铁路——东海道新干线。它每天开行 200 多次列车,至今已有 30 多年的历史。

日本新干线列车控制模式与法国 TVM300 系统相似,也为阶梯方式,所不同

的是 TVM300 是速度监督滞后控制，速度的控制一般由司机完成，只有在司机没有按规定将列车速度降下时设备才起作用，而日本新干线采用的制动是设备优先的模式，即列车控制设备根据轨道区段的速度指示，对列车速度进行减速或缓解控制，使列车出口速度达到本区段的要求，因此它没有滞后控制所需的保护区段，在线路通过能力上较 TVM300 系统有所提高。

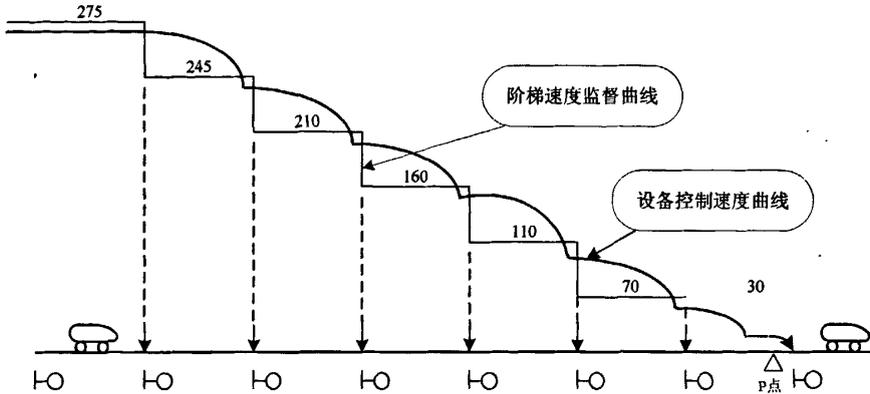


图 1-3 日本 ATC 速度监控曲线

Figure 1-3 Speed supervision curve of Japan's ATC

随着电子数字技术的发展，日本铁路公司新开发了多种数字式 ATC 系统，它不仅是对装置实施微电子化，还使通过轨道电路向列车传送的信息数字化。数字 ATC 分地面设备和车载设备两部分，地面轨道电路检查列车出清或占用，并将线路状况信息传输给列车，车载设备根据该数据确定能保证列车安全运行的速度，从而控制列车运行。^{[4][5]}

(3) 德国 LZB 系统

德国 LZB 连续式列车运行控制系统是德国两家在信号方面最具实力的公司：阿尔卡特 SEL 公司和西门子公司联合开发的。首次将列车连续速度控制模式用于对高速列车的实际控制是 LZB 系统的一大特点，这种列车控制模式打破了传统闭塞区段分段控制的概念，列车的制动由传统的分段多次制动变为一次制动，其制动过程是由列车自身参数、列车至变速点线路参数以及变速点的速度决定的，它与传统轨道闭塞分区速度参数无关。其列车追踪间隔主要是根据每一列车的制动性能和实际速度确定的，而且其安全制动距离是自动调节的，因此在各种列车性能不一样的情况下，它可以最大限度地提高线路的通过能力，同时其所具有的一次制动的性能也与列车实际制动方式相吻合。

LZB 连续式列车运行控制系统主要由地面列车控制中心、车—地双向信息传输设备及列车车载控制设备三大部分组成。LZB 地面控制中心是 LZB 系统的核心，

它负责实时确定所管辖范围内各列车的安全运行速度，并通过车—地双向信息传输系统将速度控制命令传送给相应的列车车载控制设备，控制列车安全运行。

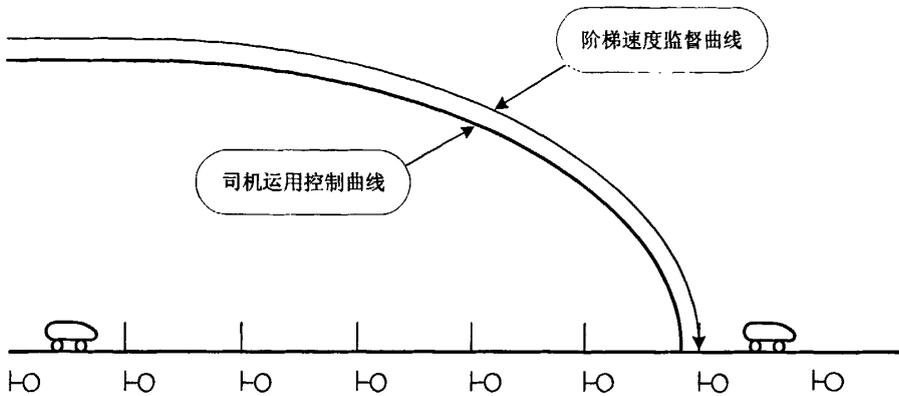


图 1-4 LZB 速度监控曲线

Figure 1-4 Speed supervision curve of LZB

LZB 连续式列车运行控制系统在移动列车与地面控制中心之间的信息传输媒介有两种：一是轨道电缆——按一定方式铺设在轨道内的 LZB 专用电缆；二是无线设备——GSM-R 数字移动铁路专用无线通信网。

通过 LZB 车—地双向信息传输系统，LZB 车载控制设备将列车的精确位置、实际速度、机车及列车工作状况等信息送到 LZB 地面列车控制中心，LZB 地面列车控制中心的计算机对列车运行线路状况信息、相邻联锁中心传送来的列车进路信息及采集的列车实时运行信息等经计算、比较后，确定在保证列车行车安全的前提下使列车运行间隔最小的列车运行速度，并立即通过 LZB 地—车双向信息传输系统将这一速度命令传给机车上的 LZB 车载控制设备，由此实现对列车运行速度的控制。^{[3][4][5]}

(4) 欧洲列车控制系统

随着欧洲铁路的发展，欧盟各国为解决跨国运行时列车控制系统的兼容性，于 20 世纪 90 年代联合制定了欧洲列车控制系统(ERTMS/ETCS, European Railway Traffic Management System)技术规范，并确定了 ERTMS/ETCS 应用等级：

ERTMS/ETCS-0: 装备了 ERTMS/ETCS 的列车可以在没有装备 ERTMS/ETCS 地面设备或者无本国信号系统的线路上运行，或者在试运行中的 ERTMS/ETCS 线路上运行。在列车控制等级转换处设置欧洲应答器 Eurobalise，车载装设具有 Eurobalise 传输功能的 BTM (Balise Transmission Module) 模块。

ERTMS/ETCS-STM: 装备了 ERTMS/ETCS 的列车，在装备了本国信号系统的

线路上运行。为了能够识别本国地面信号，车载设备还需另增加 STM (Specific Transmission Module, 专用传输模块) 接口设备。STM 把接收到的本国信号译成标准的 ETCS 报文格式，然后传送给 ETCS。

ERTMS/ETCS-1: 装备了 ERTMS/ETCS 的列车，在装备有点式传输设备欧洲应答器的线路上运行，地面向列车传输的信息完全依靠 Eurobalise，轨道电路只完成轨道区段的空闲/占用检查和列车的完整性检查。为了增加信息传输的覆盖范围，线路上可以安装欧洲环线 Euroloop 或者无线注入单元，因此 ERTMS/ETCS 等级 1 分成带注入信息和不带注入信息两种类型。

ERTMS/ETCS-2: 装备了 ERTMS/ETCS 的列车，在由无线闭塞中心控制的、并且装备了 Eurobalise 和 Euroradio 的线路上运行。车地之间的双向信息通信通道由 GSM-R 提供，由 Eurobalise 提供定位信息，地面设备完成列车完整性检查。

ERTMS/ETCS-3: 装备了 ERTMS/ETCS 的列车，在由无线闭塞中心控制的、并且装备了 Eurobalise 和 Euroradio 的线路上运行。车地之间的双向信息通信由 GSM-R 提供传输通道，列车定位和列车完整性检查由车载设备实现，Eurobalise 只提供 ETCS 等级转换命令。^{[4][5]}

(5) 中国列车控制系统

中国即将建设的高速铁路列车运行速度高达 350km/h,在高速运行的条件下列车制动距离长达数公里，由司机根据机车信号显示、了望地面线路情况并根据其经验驾驶列车，从而保证列车安全运行是不可能的。其列车控制方式与目前普通铁路使用的系统有着本质的区别，在这方面我国还是空白。为此铁道部于 2002 年提出了 CTCS (Chinese Train Control System) 方案：

CTCS-0: 为既有线的现状，由通用机车信号和运行监控记录装置构成。

CTCS-1: 由主体机车信号 + 安全型运行监控记录装置组成。面向 160km/h 以下的区段，实现列车运行安全监控功能。

CTCS-2: 基于轨道传输信息的列车运行控制系统。面向提速干线和高速新线，采用车—地一体化设计，适用于各种限速区段，地面可不设通过信号机。

CTCS-3: 基于无线 (GSM-R) 传输信息并采用轨道电路等方式检查列车占用的列车运行控制系统。面向提速干线、高速新线或特殊线路，基于无线通信的固定闭塞或虚拟自动闭塞，适用于各种限速区段，地面可不设通过信号机。

CTCS-4: 基于无线传输信息的列车运行控制系统。面向高速新线或特殊线路，基于无线通信的虚拟闭塞或移动闭塞，由 RBC 和车载验证系统共同完成列车定位和列车完整性检查，地面不设通过信号机。^{[4][5]}

1.2 RBC 系统研究及应用现状

根据欧洲列车控制系统规范,当达到 ERTMS/ETCS 2 级或 ERTMS/ETCS 3 级,需要在地面设置 RBC,通过 GSM-R 进行列车控制。RBC 是 ERTMS/ETCS 2 级或 ERTMS/ETCS 3 级信号系统地面设备的核心,因此对 RBC 的研究,国外很早就开始并取得了很大的进展。如在^[6]中作者以 RBC 为核心建立了其与 CTC (Centralized Traffic Control) 系统、列车车载系统、车站联锁系统及相邻 RBC 系统的交互模型,并分析了它们交互的信息类型及交互流程,且在此基础上分析了 RBC 功能实现的原理,还列举了 RBC 判断出某一应答器不属于本辖区、接收列车数据不正确及发现前方轨道区段不能确认空闲时的处理方案;在^[7]中作者提出了基于卫星的列车定位及安全防护方案,并给出了基于此技术的 RBC 系统结构及功能软件实现流程;在^[8]中作者研究了 RBC 利用无线通信失败前提下的系统处理策略,并建立了移动闭塞模型进行分析;在^[9]中作者基于 CSP-OZ-DC 语言研究了 RBC 对紧急信息的处理。在国外研究不断深入,并走向应用的同时,国内对 RBC 的研究还处于起步阶段。

RBC 在 ERTMS/ETCS 2 级和 ERTMS/ETCS 3 级中存在的最大差别是闭塞方式的不同,在 ERTMS/ETCS 2 级中 RBC 采取的是固定自动闭塞,而在 ERTMS/ETCS 3 级中采取的是移动闭塞,对应中国的列车控制等级,要到 CTCS 3 级或 CTCS 4 级才需要在地面设置 RBC。现在能提供 RBC 设备的主要是欧洲的几个厂家,即 ALCATEL 公司、ALSTOM 公司、BOMBARDIER 公司及 SIEMENS 公司。如 BOMBARDIER 公司和 SIEMENS 公司研制成功的基于无线通信的列车控制系统 FFB,此系统在 2000 年就分别在德国的劳特塔尔铁路和汉诺威出口国际博览会线路上投入了试运行^[5]。由这些厂家提供的 RBC 系统采用安全计算机,具有极高的安全性和可用性,在同其它设备的冗余接口上使用标准的安全通讯协议,通过通讯网络实现接口,如 GSM-R 网或并行接口。具体工程实践中 BOMBARDIER 公司的 RBC 设备被放置在一个标准的电气机柜中,每个机柜可放 5 块 RBC 的板子,每块板子可控 6 列车,一个 RBC 机柜可监控 30 列车。

中国铁路经过第六次大提速后,旅客列车运行水平达到 200km/h。提速不仅加大了中国铁路的运输能力,带来巨大的经济效益和社会效益,也使相关的通信信号技术水平、装备得到极大的提高,为了进一步缓解中国铁路的运输压力,我们需要加快建设高速铁路,从高速铁路线发展到高速铁路网,所以现在一大批的客运专线项目上马,如郑西、甬台温、武广等。如武广客运专线就是一条纯旅客列车运行线,设计时速 300km/h,其信号系统拟建成一个以车站设备为基础、通信网络为骨架、综合调度中心为龙头,集调度指挥、行车控制、设备监测和信息管理等功能于一体的自动化系统,主要包括列车运行调度子系统、列车运行控制子系统、联锁子系统和信号设备集中监测维护子系统四个部分。由于速度高,传统的

基于轨道电路的列车控制模式已不能保证行车安全,需要使用达到 CTCS 3 级的列车控制设备,所以武广客运专线采购了 BOMBARDIER 公司的列车控制设备,在武汉调度中心设置 RBC。研究 RBC 系统对使用引进的信号设备、吸收其先进技术具有重要的意义。

1.3 主要研究内容

目前国外 RBC 系统的研究已经成熟,国内相关技术的研究也进入仿真实验阶段。为了更好的了解和熟悉 RBC 工作原理及工作流程,本文将以国内引进的 RBC 系统为研究对象,详细分析 RBC 系统功能需求,在此基础上描述 RBC 系统结构、通信平台和控制功能的实现原理,并结合实验室条件,研制 RBC 原理样机,搭建其仿真运行环境,最终实现系统仿真。

各章内容安排如下:

- 第一章 介绍高速铁路、列车控制技术及 RBC 的研究及应用现状。
- 第二章 研究 RBC 在信号系统中的工作机理,提出信号系统功能分解方案,在此基础上描述 RBC 系统功能需求及其实现方案,分析 RBC 系统外部结构及其内部结构,设计 RBC 原理样机的总体结构。
- 第三章 设计原理样机硬件总体结构,研制核心安全处理单元,该单元基于多个 Mega128,采取二取二乘二技术,满足了高安全性、高可靠性的功能要求;研制基于 CAN 总线的通信模块;最后分析研制模块的安全性、可靠性。
- 第四章 设计原理样机软件的总体结构,实现 RBC 功能软件设计,并编写部分模块的程序代码。
- 第五章 根据 RBC 仿真运行环境,实现原理样机的测试及功能实验。
- 第六章 总结论文完成的工作内容并提出下一步的研究内容。

2 RBC 样机的总体方案设计

2.1 RBC 工作机理

RBC 系统作为地面信号系统的核心子系统，其功能主要是实现列车间隔管理及行车许可下达。此功能是通过与调度集中系统、车站列控联锁系统及列车车载系统交互实现的，因此要了解 RBC 的工作机理，有必要分析整个铁路信号系统的结构。根据 RBC 系统设置方式的不同，信号系统的构成有两种结构：一是 RBC 分开设置的信号系统结构，二是 RBC 集中设置的信号系统结构。分开设置就是把 RBC 系统设置到车站里面，集中设置就是把 RBC 设置在调度中心，两者互有优缺点。

分开设置的优点：可以使用不同的系统连接技术，以及不同的厂家提供的调度集中系统、联锁系统、轨道电路和 RBC 等设备；CTCS-2 和 CTCS-3 功能之间具有一定的独立性，这样就可以在不触及轨道平面和接口的情况下，对它们分别认证和升级；如果 GSM-R 网络出现故障或某个 RBC 失效，列车可以一直在 CTCS-2 的模式下行驶。

分开设置的缺点：由于设备更多，必然导致成本更高；分步实施时，预先必须要考虑安装 RBC 的场地。

集中设置的优点：该结构预期的主要优势就是节约成本；可以只用一个厂家的设备；设备间的连接被简化；维修可能会更简单，但由于接收设备分布在轨道沿线，且这些设备对故障又非常敏感，所以感觉不会那么明显。

集中设置的缺点：对这种设备的开发会更复杂，因为设备生产企业必须同时掌握 CTCS-2 和 CTCS-3 的功能技术；技术认证的程序也更加复杂，因为一种功能的调整可能会对其它功能产生影响，所以要进行非退化性的测试；系统结构复杂，使用起来效果不太好。

目前，在欧洲几条高速铁路的建设中，信号系统基本上都是采用分开设置方式，通过安全接口连接。其信号系统整体结构如下：

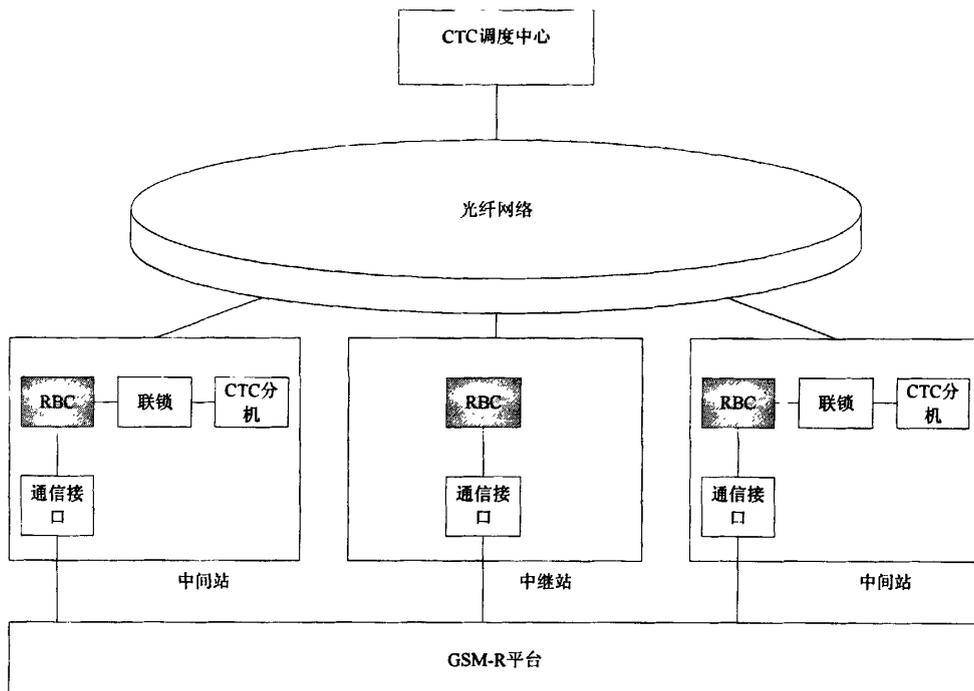


图 2-1 RBC 分设信号系统结构图

Figure 2-1 RBC decentralized architecture of signaling system

在这种结构下，RBC 与联锁系统、CTC 分机都是通过冗余的 RS422 串口进行通信，与 GSM-R 网络通过 ISDN (Integrated Services Digital Network) 服务器实现连接，而 RBC 与相邻 RBC 之间通过专用的数字通道实现连接。RBC 通过与联锁系统的交互获得进路状态信息、轨道占用信息，与 CTC 分机的交互获得调度命令、临时限速等信息，与 GSM-R 网络连接后同列车车载系统交互获得列车运行状态、定位等信息，结合自身存储的线路参数等信息，进行比较、计算，得出新的行车许可控制列车运行。

在国内客运专线的建设中，为防止基于 GSM-R 网络的列车控制系统发生故障带来重大的行车事故，在建设 CTCS 3 模式的列车控制系统时，采取 CTCS 2 级列车控制系统作为备用。这样，车站列车控制系统 (TCC, Train Control Center) 得以保留，如果 RBC 系统采取分开设置方式，必然会凸显其分开设置的缺点，而集中设置方式的缺点现在能克服，所以经过权衡比较，决定采用集中设置的方式，即把所有的 RBC 都集中放置的一个调度中心，其结构如图：

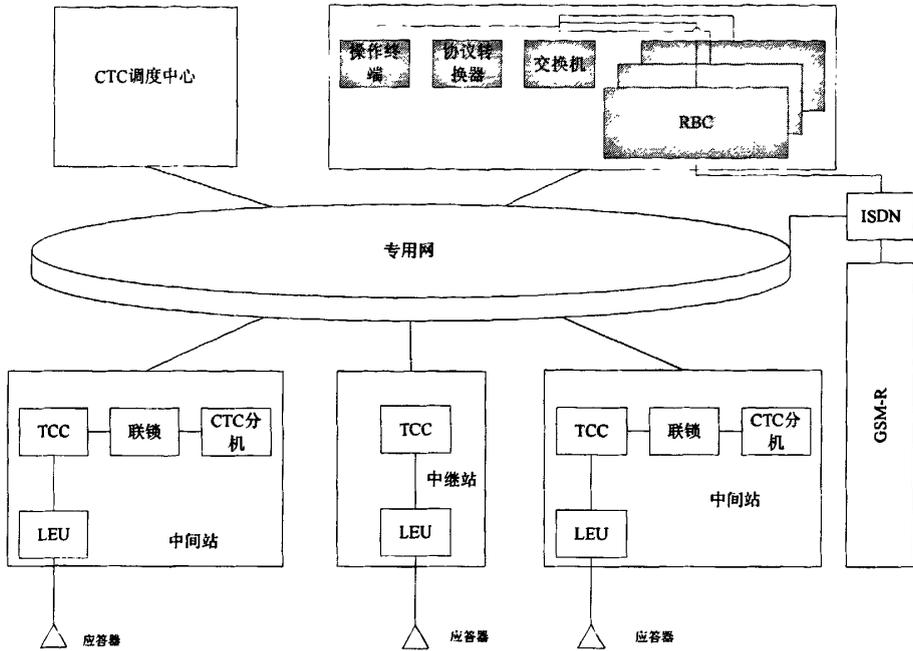


图 2-2 RBC 集中设置信号系统结构图

Figure 2-2 RBC centralized architecture of signaling system

在这种结构下，TCC 与联锁系统、CTC 分机采用冗余的 RS422 进行连接，与 LEU 采用冗余的 RS485 进行连接，TCC 与相邻 TCC 采用专用的数字通道连接，而调度中心的 RBC 与 CTC 调度中心通过 CTC 系统通信网连接，RBC 经交换机后与管辖车站的 TCC 相连，RBC 通过 ISDN 服务器与 GSM-R 连接，而 RBC 与相邻 RBC 就可以通过串口进行连接。在 CTCS 3 模式下，通过 RBC 来进行列车控制，当 RBC 故障或 GSM-R 网络故障，列车不能运行在 CTCS 3 模式下时，通过 TCC 控制列车在 CTCS 2 模式下运行。

不管是集中设置还是分开设置，RBC 都要通过车载设备的身份识别确定受控的列车数据、根据轨道电路及联锁情况确定每列列车各自的移动授权、向每列车单独发送列车移动授权和轨道情况数据、进行不同 RBC 在边界点的切换等功能。

2.2 RBC 功能需求分析

2.2.1 信号系统功能分解

RBC 系统功能的实现与外部系统息息相关，RBC 与外部系统构成一个整体，他们之间的有机交互，实现了信息的正确传输，从而实现所需的功能。信号系统整体功能模块图如下：

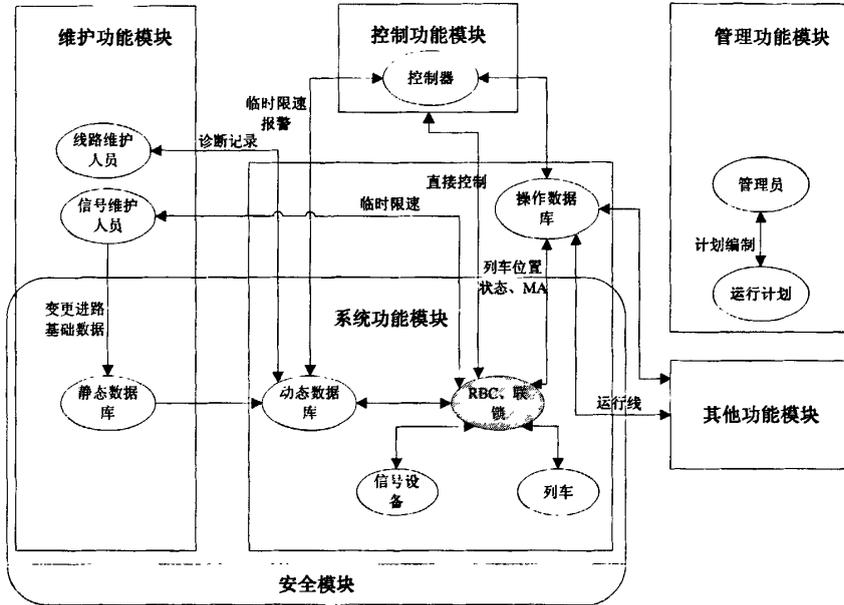


图 2-3 信号系统功能模块图

Figure 2-3 Functional blocks of signaling system

图 2-3 是从人的角度定义的功能模块图，人分为调度人员、控制人员、维护人员和司机。而图中的功能模块不能认为是某个实体或者是某个系统结构的一部分，它仅仅是按功能来划分的。管理功能模块实现调度员的功能，如计划的事先编制、下达，行车的调度指挥，行车的全景监控等。控制功能模块通过人机交互，实现列车控制操作所需信息的验证及系统的自检，而系统功能模块实现系统实时的处理功能，二者一起完成系统的控制功能，如：列车的注册，RBC-RBC 控制区域切换，列车及调车运行授权，临时限速的下达，临时限速控制区域的设定，运行计划的执行、进路的办理、锁闭、解锁等，系统状态的监测，信号设备的控制与监测，特殊功能的实现等。维护模块就是实现相关数据的收集、定期维护、状态修、系统监测、设备测试及记录等功能，并实现对静态数据库的维护，必要时提供远程技术支持。^[10]

以上功能模块的良好协作实现了信号系统的“运行指挥、安全防护”作用。同时也实现了 RBC 系统的功能。

2.2.2 RBC 功能需求分析

高速铁路信号系统使用的 RBC 是一种基于计算机的系统, 用于处理从各种外部地面系统接收到的信息以及与车载系统交换信息, 其具体功能需求为:

1) 列车的注册及注销功能

判断列车传送的参照位置参数信息是否有效, 如有效则 RBC 向列车传送运行授权请求参数、位置报告参数等, 否则, RBC 将删除无效的参照位置参数信息, 取消列车的注册, 并把相关情况向 CTC 反映。

2) 列车启动控制功能

当列车车载设备进入确定的工作等级后, 记录司机输入的列车参数、车次号, 并把这些信息上传给 CTC 系统, 同时给列车回执信息。根据这些信息, 判断列车符合启动条件时, 给列车启动授权。

3) 列车运行控制功能

(1) 级间转换, 此功能综合考虑了 CTCS 2→CTCS 3、CTCS 3→CTCS 2 的转换过程, 正常情况下级间转换将在 CTCS 3 级系统控制下, 通过 RBC 在固定地点按转换点线路和 CTCS 2 级系统最高允许速度进行转换。在进行 CTCS 2→CTCS 3 级转换开始前, 车载设备应已完成与 RBC 的连接和注册, 在转换边界不具备 CTCS 3 级控车条件时, 列车将继续保持 CTCS 2 级运行, 直到 CTCS 3 级控车条件具备后, 车载将自动转入 CTCS 3 级工作。

具体说来, 在转换开始点前设置 RBC 连接点, 当列车前端通过该点时, 车载设备根据应答器信息呼叫 RBC 并进行注册, 在至转换点唯一进路入口处设置转换预告点, 当列车前端通过该点时, 车载设备向 RBC 报告所在位置, RBC 判断此进路为唯一进路时向车载设备提供行车许可及级间转换命令, 当列车前端通过转换执行点时执行转换。

(2) RBC-RBC 切换, 各 RBC 设备间不进行列车控制信息的传输和交换, 仅进行状态信息的转发。通过车载设备在不同 RBC 设备中的重新连接注册和 RBC 与联锁系统的交互, 形成不同 RBC 在分界处行车许可的交叉重叠, 进而实现列车在两个 RBC 间行车许可的安全切换。

正常情况下 RBC-RBC 的切换应在固定的闭塞分区分界处, 在不降低列车运行速度的情况下进行。中国 CTCS 3 级线路上所有的 RBC 都连接到相同的无线网上, 所以 RBC-RBC 的切换不需要考虑无线网络重新注册。RBC-RBC 的切换分采用 2 个无线电台或 1 个无线电台两种方式, 适用于列车在本线不同 RBC 区域间列车控制权的切换, 同时也适用于不同线路间 RBC 对列车控制权的切换, RBC 的切换应设置预告点、切换点和切换标志牌。

(3) 行车许可, 是列车安全运行的行车凭证, 一个行车许可可以包括多个连续的锁闭进路。与行车许可相关的概念有: 缩短行车许可——可强制列车以接收

到的停车位置作为新的行车许可终点，列车将根据当前位置，确定是否触发常用制动或紧急制动，如列车已经越过该位置，将立即触发紧急制动；无条件紧急消息——要求列车立即制动停车，列车收到该消息后，将实施紧急制动；有条件紧急制动消息——要求列车在指定位置前停车，列车将评估当前位置和新的指定位置间的关系，重新计算制动曲线。

RBC 通过与 CTC、联锁及列车的交互，实现接车进路、发车进路、通过进路、反方向自动站间闭塞等行车许可的生成，并通过无线网络下达给列车，同时 RBC 还可以实现进路降级信息的传递。由于客运专线运行的动车组全部是 8 辆编组的短列车或 16 辆编组的长列车，根据 RBC 的行车许可，可以在车站股道上实现两辆短列车的重联或一辆长列车的摘解。

(4) 进路申请、锁闭及解锁功能

根据车载向 RBC 的请求行车许可，RBC 与联锁进行通信来实现行车许可的生成，具体就是：当 RBC 确认联锁没有办理某条进路，RBC 就向 CTC 系统申请进路，CTC 系统就通过联锁办理进路。当 RBC 确认 CTC 控制联锁办理了一条进路，就根据联锁进路信息、列车运行信息及自身存储信息生成行车许可并发送给列车，车载设备根据得到的行车许可生成允许运行的监控曲线，如果联锁提供的是引导进路，RBC 将向车载发送引导行车许可，司机确认后车载设备转入引导模式。在列车运行出本区段后，联锁系统自动解锁本区段。

(5) 故障处理，当轨道电路故障、道岔失去表示时，RBC 将根据具体情况通知列车以不同的模式行车，以保证安全。故障恢复后，将通知列车转回正常控车模式。当 RBC 本身故障，它将断开受其控制列车的连接，自动删除所有列车的注册信息，以便在故障恢复后实现列车的重新注册。

(6) 临时限速，它的生成、下达及取消都是通过 CTC 传送给 RBC，RBC 一方面以 CTCS 3 的模式通过无线网传给列车，另一方面通过有线通道传给车站 TCC，实现 CTCS 2 模式临时限速的下达，同时 RBC 接收临时限速下达的回执信息，并上传给 CTC。

(7) 防灾报警，对于可以预测的灾害，如风、雨及雪等，可以通过临时限速的方式对列车速度进行限制以实现安全防护。但对突发的灾害，如塌方、落物等事件，防灾报警系统监测到后，会把相关信息传给联锁，RBC 根据联锁发送的灾害报警信息立即激活相应的紧急停车区，对已进入该区域的列车发送无条件紧急停车消息，对于接近该区域的列车发送有条件紧急停车消息。

4) 修正 RBC 车辆数据库和线路数据库

根据列车初始数据和车载设备认可的列车数据进一步确认相关数据的有效性，若确认有效，则送给相应的数据库进行存储，但一旦发现有差错就报警。根

据列车传送的沿线信息，确认后送给线路数据库进行存储。[11][12][13]

2.3 RBC 样机的结构设计

2.3.1 RBC 系统结构分析

1) 信号系统结构分析

由信号系统整体功能分解可以看出，RBC 功能的实现离不开其他的系统，要靠 RBC 系统、CTC 系统、车站列控联锁系统和 GSM-R 等的相互协作，才能实现信号系统的功能，从而实现 RBC 系统的功能。信号系统结构可以抽象为：

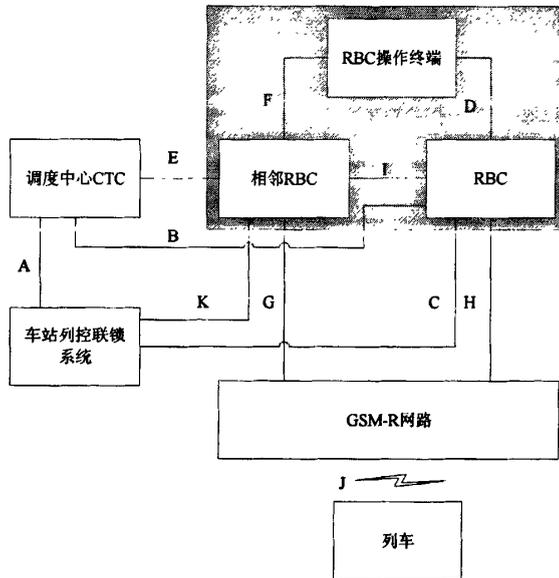


图 2-4 抽象信号系统结构图

Figure 2-4 Abstract architecture of singling system

- A 口：进路办理、锁闭、解锁信息，进路状态信息等传送。
- B 口：调度命令、临时限速、无道岔车站信号控制命令，列车状态信息等传送。
- C 口：临时限速、进路申请，联锁进路相关信息等的传送。
- D 口：RBC 管辖区域列车状态信息的传送。
- E 口：同 B 口。
- F 口：同 D 口。
- G 口：列车控制信息，列车状态信息等传送。

H 口：同 G 口。

I 口：列车运行状态信息的转发。

J 口：列车控制信息，列车状态信息等无线传送。

K 口：同 C 口。

通过上述接口的交互实现了通信信息的正确传送，从而实现了信号系统的功能。

2) RBC 系统结构分析

信号系统集中设置结构下 RBC 全部设在调度中心，这些 RBC 系统间及 RBC 系统与诸如 CTC、操作终端等的连接前面已有过描述，下面将设计 RBC 系统总体结构，并给出其与外部系统的连接关系：

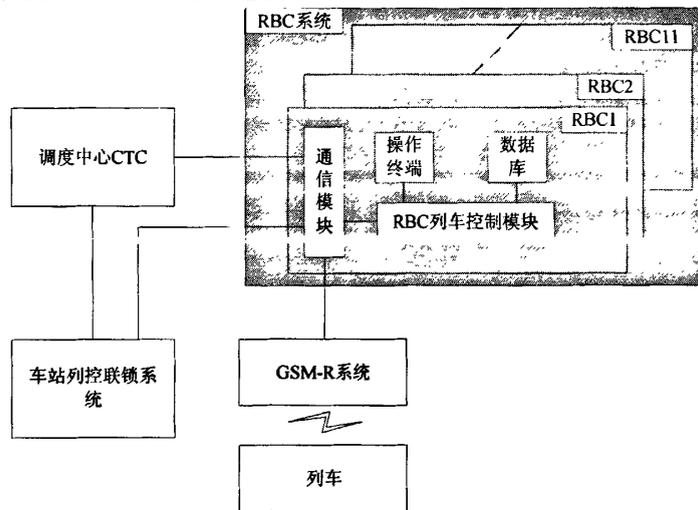


图 2-5 RBC 系统结构图

Figure 2-5 Architecture of RBC system

如图：RBC 数据库存储了其运行管理所需要的所有数据，是 RBC 正常运行的基础。操作终端显示 RBC 辖区站场图及线路图、辖区列车的运行状态、RBC 与外部设备的通信状态、自身的状态信息及故障报警信息。RBC 列车控制模块实现列车运行的管理，是 RBC 的核心部分，具体是进行列车的注册及注销、接收车载设备的定位和运行等信息、与车站列控联锁交互、接收调度中心的调度命令、综合以上的信息计算列车的运行许可、通过 GSM-R 系统传送行车许可给列车等工作。通信模块通过协议转换器实现与调度中心 CTC 系统的连接，通过交换机实现与车站列控联锁系统的连接，通过 ISDN 服务器实现与 GSM-R 系统的连接，通过这些连接来保证通信的实现，从而实现 RBC 系统功能，乃至信号系统功能。

RBC 列车控制模块为安全计算机系统，采用硬件多重冗余结构。每个 RBC 最

多同时控制 30 辆列车，大约 50—80km 控制范围设置一个 RBC。在 RBC 分散设置的系统体系下，RBC 之间通过 2 芯信号专用光纤通道通信，一主一备。一个 RBC 应能与 4 个车站控制中心进行连接，连接方式可以通过串口来实现，如 RS422。在 RBC 集中设置的系统体系下，RBC 之间的通信就变得方便了，可以直接通过串口实现，而多个 RBC 与调度中心的连接也方便了，可以考虑用 CAN 总线来实现，具体实现见第三章。

3) RBC 内部模块分析

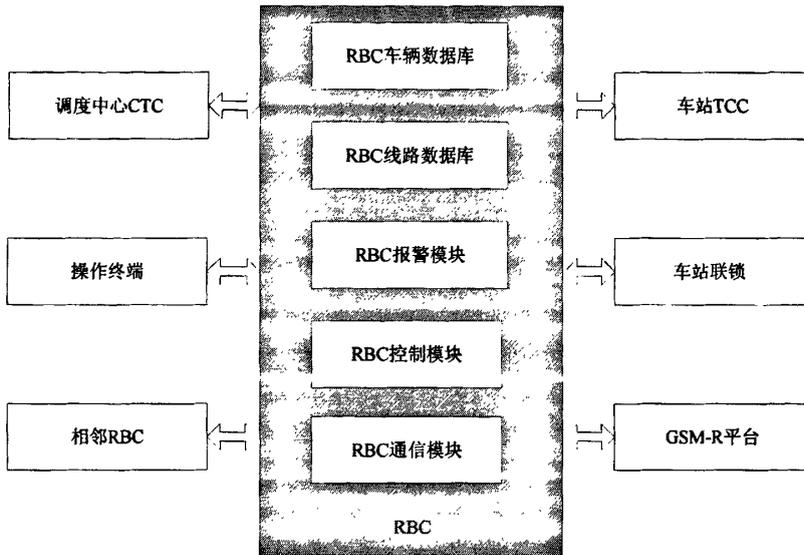


图 2-6 RBC 系统内部模块图

Figure 2-6 Interior functional blocks of RBC system

根据 ERTMS/ETCS 等级描述，RBC 内部由车辆数据库、线路数据库、列车控制子系统、通信模块及报警模块组成。其中：

1) 车辆数据库系统——它含有经过此 RBC 管辖地区的车辆属性的数据，在 RBC 执行重要功能的计算时会使用到它们。

2) 线路数据库——它与车辆数据库系统一样，都非常重要，在 RBC 计算时会使用到。

3) 报警模块——这里的报警分为安全性报警和非安全性报警，安全性报警包括防灾报警，如轴温报警、异物入侵、落物报警等，同时它还包括保护工作人员在车站范围、铁路员工在工作沿线等的安全报警，如 RBC 可以下令平交道口下栅栏保护交通；而非安全性报警是指给旅客提出列车要运行的警报。

4) 控制模块——是指实时控制列车运行，如给出运行授权等。

5) 通信模块——实现与调度中心 CTC 系统、相邻 RBC、车站 TCC 系统、车

站联锁系统及车载设备之间的通信。^{[10][14]}

结合客运专线 C2+C3 的实际, RBC 与外部系统的交互就是通信模块要实现的功能, 即 RBC 与调度中心 CTC 系统、操作终端、相邻 RBC、车站 TCC 系统、车站联锁系统及 GSM-R 系统的交互。其中:

1) RBC 与调度中心 CTC 系统的交互: RBC 把管辖区域列车的运行状态、信号设备状态及线路信息等传给调度中心 CTC 系统, 同时它接收调度中心的调度命令等信息。

2) RBC 与操作终端: RBC 把管辖区域内列车位置信息、速度信息及辖区信号设备状态信息传给操作终端, 操作终端根据 RBC 上传的信息及与相邻 RBC 通信获得的信息, 显示 RBC 辖区内的实时运行图、RBC 的参数信息及设备状态信息, 并进行故障报警提示。

3) RBC 与相邻 RBC: 基于进路联锁状态建立连接关系, 实现列车控制权的交接。

4) RBC 与车站 TCC: 主要是进行临时限速的下达, 通过 TCC 系统—LEU—Balise 将临时限速命令上传给列车, 与通过 GSM-R 网络下达给列车的临时限速命令相校验, 或者在 GSM-R 网路故障时, 通过上述通道实现备用。

5) RBC 与车站联锁系统: 接收联锁向 RBC 发送的进路信息并向联锁发送列车状态信息。如 RBC 在列车进站前, 分析联锁设备向 RBC 传送的进路信息, 如果车站 CTC 系统分机控制联锁设备办理好了列车进路, RBC 就给列车运行许可, 允许列车停在股道的末端, 否则, 仅允许列车运行到进站信号机前。

6) RBC 与 GSM-R 网络: 它们之间的交互, 实际上是实现 RBC 与车载设备的交互, RBC 通过有线网络连接到 GSM-R 的 GGSN (Global Navigation Satellite System), 经过移动交换中心 (MSC, Mobile Switch Center) 和无线基站控制器 (BSC, Base Station Controller), 最后通过基站收发信息机 (BTS, Base Transceiver Station) 与车载设备进行无线通信。主要负责接收列车信息, 发送列车运行许可和相关控制信息, 同时负责信息传输通道的管理、加密并检查所接收信息的完整性。

2.3.2 样机的结构设计

原理样机要实现 RBC 列车控制模块和通信模块的功能。本次设计采用二取二乘二结构, 二取二乘二模块是 RBC 原理样机的核心部分, 其中二取二的设计目前有两种方式, 一是“两硬一软”结构, 即用结构一样、节拍同步、但系统独立的两个 MCU 实现, 它们内部运行同一套软件, 它们的输出通过硬件来实现同步及故障—安全; 二是“一硬两软”结构, 即在一套硬件里面运行两套不同的软件, 这

两套软件由不同的技术小组编制，用来降低共模干扰。本次设计采取的是“两硬一软”的结构，具体结构示意图如下：

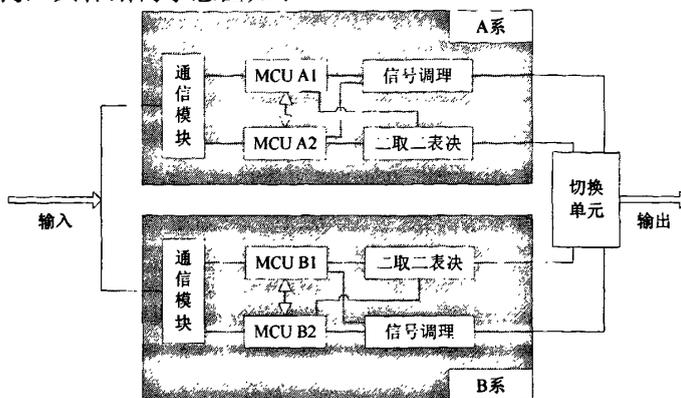


图 2-7 样机系统结构图

Figure 2-7 Architecture of prototype system

对于二取二乘二结构的系统来说，关键是要实现单系两 MCU 的同步、两系之间的同步、两系间的切换及故障定位，本次设计的单系 MCU 之间的同步通过串口来实现，当输入数据到 A 系和 B 系，A 系里面 MCU A1 收到并判断后通过串口通知 MCU A2，MCU A2 收到并判断后也通过串口通知 MCU A1，进而实现同步。而二取二表决模块在实现表决故障—安全的同时，也具有任务级同步的功能。至于两系间的同步也是通过串口来实现，实现方式与单系 MCU 之间的同步类似。

当两系或同一系 MCU 状态不一致时，必须对故障类型及故障位置进行定位，同时确定两系之间的主备关系。本次设计系统采取整系切换的方式，两系的切换通过切换单元实现，切换单元通过固态继电器实现，对固态继电器状态的采集是系统切换实现的关键。如 A 系为主机，当 A 系比较结果不一致，则检查 B 系状态，如 B 系比较结果一致，则 A 系与 B 系结果进行比较，通过比较结果来对故障进行定位，然后对两系进行切换，切换成功后，A 系停机维修。当 B 系为主机，发现比较不一致时，处理流程类似^[15]。

样机系统与外部调度集中 CTC 系统、车站列控联锁系统及列车的接口都采用 CAN 通道实现，而单系两个 MCU 之间和 A、B 两系之间的接口通过串口实现。

2.4 小结

本章分析了 RBC 系统的工作机理，并对信号系统的功能模块进行了分解，在此基础上描述了 RBC 系统功能需求，最后分析了实际 RBC 系统与外部系统构成的信号系统结构和 RBC 内部模块后，设计了 RBC 样机系统结构。

3 RBC 样机的硬件设计与实现

3.1 硬件总体设计

RBC 样机系统硬件设计的任务是根据设计的系统结构及划分的功能模块，选择合适的器件，完成各个模块的硬件设计，最终实现模块的功能需求。

RBC 样机系统主要包括由 Mega128 单片机、表决单元、切换单元组成的二取二乘二模块和 CAN 器件组成的通信模块。第二章已经对这些模块的接口和功能进行了详细描述，本章基于 RBC 系统内部的总体结构，结合其与外部系统的接口，对 RBC 原理样机硬件进行设计，如图：

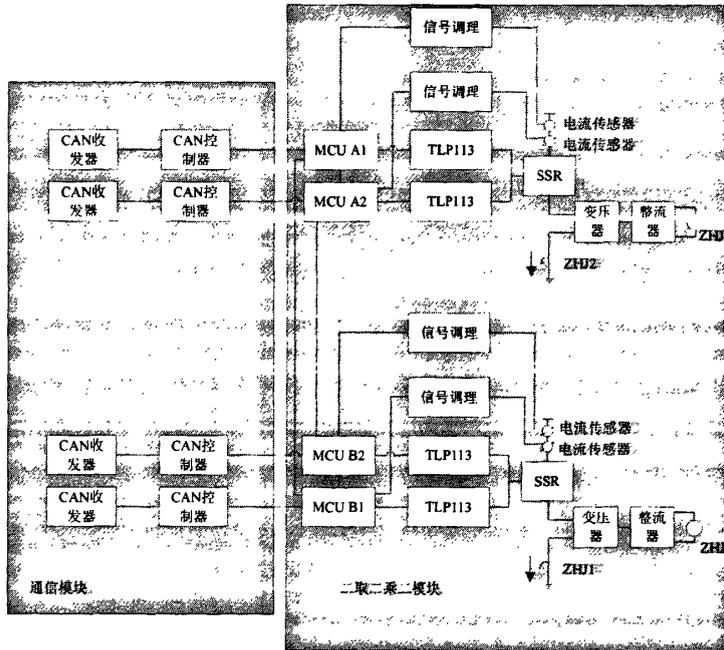


图 3-1 样机系统硬件结构图

Figure 3-1 Hardware architecture of prototype system

整个 RBC 原理样机硬件设计如上，由二取二乘二核心模块和通信模块组成。其中四个 MCU 组成二取二乘二的核心控制器，四个 TLP113 光耦组成同步表决单元，而电流传感器、固态继电器（SSR, Solid State Relay）、变压器、整流器、继电器及另一系继电器的接点组成切换单元，CAN 控制器与 CAN 收发器组成 CAN 通信单元。

外部系统如操作终端、调度中心 CTC 系统及车站列控联锁的信息通过 CAN 通信通道传到 MCU，单系 MCU 经过交互，确定都收到信息后，计算结果，然后

向 TLP113 模块给出控制指令，如果计算的结果一致，则同步表决单元的输出会使得 SSR 上电导通，进而使继电器吸起并切断另一系的继电器电路，使得本系电流传感器采集到电流，而另一系采集不到电流。通过信号调理模块后，把交流电压变为相应的直流电压，最后被 MCU 的 A/D 口捕捉，捕捉到电压的一系自动把处理完的信息标识为主机，而没有捕捉到的一系自动标识为备机，两系通过串口进行确认。最后把要传给操作终端、调度中心 CTC 系统及车站联锁系统的信息经 CAN 通道传送出去。与列车的无线通信过程跟上述类似，只是本次设计无线传输通道也用 CAN 通道模拟。

3.2 二取二模式的核心控制单元设计与实现

由于二取二乘二控制单元的 A 系与 B 系结构一样，所以下面仅对某一系进行具体设计。控制单元是基于 Mega128 实现的，选择 Mega128 的原因主要有以下几点：一是它是一种高性能、低功耗的 8 位微处理器，采用先进的 RISC 结构，133 条指令大多数可以在一个时钟周期内完成；二是它具有 JTAG、SPI、ISP 等多种可编程方式，使用灵活；三是它本身带有 8 路 10 位的 ADC，不需要扩展 A/D 单元，使用方便；四是它带有两个可编程的串行 USART，满足单系模块的交互及两系之间的交互，甚至是 RBC 与相邻 RBC 之间的交互，而不用扩展交互通道；最后，它的 I/O 口达到 53 个，除去 ADC 转换、CAN 通信、串口通信及一些必要指示 I/O 所需，有足够的端口来实现驱动及其它功能。而其它的控制器如 Mega162 不带 ADC，Mega16 仅一个串口等，无法满足系统需求，所以选择 Mega128^[16]。如图：

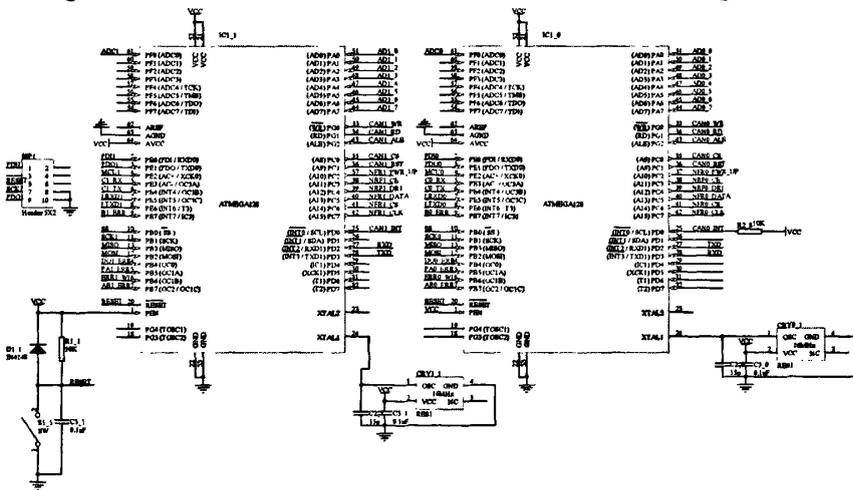


图 3-2 核心单元图

Figure 3-2 Kernel units

图中器件通过网络标号实现连接。PA 口实现 CAN 通信的数据交换，25、33、34、43、35 及 36 引脚分别实现 CAN 通信的初始化、写、读、地址锁存、片选及复位功能，而 38、39、40 及 41 引脚分别实现与列车通信的使能、接收使能、数据交互及片选功能。单系两个 MCU 之间通过串口实现交互，即图中 IC1_0 的 27、28 引脚与 IC1_1 的 28、27 引脚互联实现，两系之间的交互通过另一串口完成。MCU 对表决单元的控制通过普通 I/O 输出就行。图中其它器件与 Mega128 连接后的功能很明显，这里就不再赘述。

结合 RBC 系统实际，二取二乘二核心单元工作情形如下：MCU A1 和 MCU A2 通过通信模块从外部系统接收数据，MCU A1 和 MCU A2 分别接收自己的数据，MCU A1 和 MCU A2 分别计算自己的布尔表达式，MCU A1 的计算结果通过串口送到 MCU A2，MCU A2 的计算结果通过串口送到 MCU A1，MCU A1 和 MCU A2 将本 MCU 的运算结果与对方 MCU 的计算结果进行比较，如果结果一致，MCU A1 和 MCU A2 向二取二表决单元输出数据。二取二表决单元只有从 MCU A1 和 MCU A2 接收的结果一致，才能接通固态继电器 5V 电源，控制其吸起。

RBC 原理样机的 A 系和 B 系同时从调度中心 CTC 系统接收数据，接收到数据的每一系 MCU 向同系中的另外一个 MCU 同步来自 CTC 的数据，两个 MCU 采用安全算法将接收的数据转换为相关的布尔变量真值，经过处理通过 I/O 驱动上述二取二表决单元，如表决成功，再根据是否采集到电流值标识主备后进行发送；RBC 原理样机的 A 系和 B 系同时从车站列控联锁系统接收相关进路状态数据，接收到数据的每一系 MCU 向同一系中的另一个 MCU 传递进路信息，两个 MCU 通过双通道布尔运算，计算出结果后，经表决计算结果一致，采用上述类似方式将数据传送给车站列控联锁系统；两个 MCU 同时计算需要发送给列车的信息，通过表决得出一致后，通过通信模块送出。如果 RBC 系统的一个系在某个周期内比较出的计算结果不一致，该系系统软件退出，将出错的系与其它系隔离。MCU 中事先存储线路及列车参数信息，通过通信模块收到行车相关信息后，能较快的得出结果，从而保证实时性。

3.3 输入输出单元的设计与实现

3.3.1 表决单元的设计与实现

本文设计的表决单元是通过光耦来实现的，在实现同步表决的同时，也把控制芯片与外围器件隔离开来。光耦的总类很多，如 6N137、TIL113 及 TLP113 等，但是对于 TIL113 来说，它的传输速度不到 1M，而 6N137 速度虽然达到 10M，但

是外围的接口电路相对复杂, TLP113 不仅速度达到 10M, 而且外围电路非常简单, 所以本文选择 TLP113 来实现表决单元, 如图:

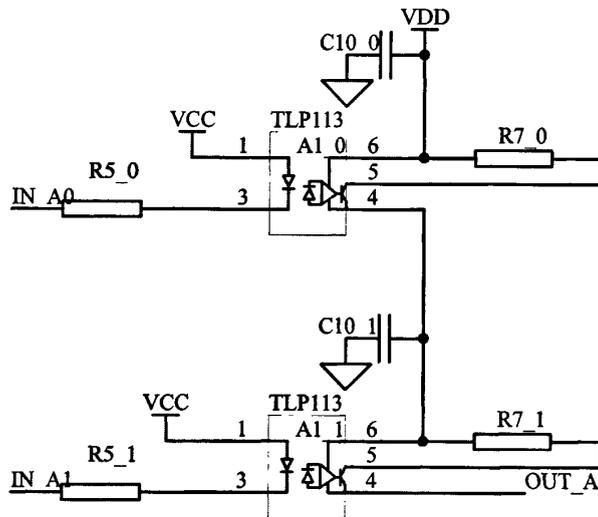


图 3-3 表决原理图

Figure 3-3 Principle of Voting

引脚 1 为电压输入端, 3 为 1 的输出端, 6 为 VCC, 5 为输出端, 4 为地。原理就是 1、3 间构成回路, 通过串在电路中的发光二极管把电信号转换为光信号, 传给光敏管, 光敏管再转换为电信号, 控制内部三极管的导通, 从而在引脚 5 输出高低电平, 这样既传输了光信号, 也实现了隔离。实际使用中在两侧的输入端都串有电阻, 用来限流^[17]。

在 MCU 里面初始化 IN_A0 端口电平为逻辑“1”, IN_A1 端口电平也为逻辑“1”, 则初始化后两个 TLP113 都为截止状态, 而 OUT_A 输出为逻辑“0”。当两个 MCU 处理完一个相同命令后, 经过串口交互, 确认计算结果一致, 则都把 IN_A 端口拉低, 使得两个 TLP113 导通, OUT_A 输出高电平; 当 MCU 计算结果不一致, IN_A 都不拉低, 或者是出现故障, IN_A 一个拉低, 一个保持不变, 两个 TLP113 都不会同时导通, OUT_A 总是为低电平, 切换单元的 SSR 都不会吸起, 从而电流传感器也不会采集到电流, 使得 MCU 也不会把计算结果标识为主机, 也就不会产生危险。

输入、输出状态表如下：

表 3-1 I/O 状态

Table 3-1 I/O states

IN_A0	IN_A0	OUT_A	状态
0	0	1	危险侧
0	1	0	安全侧
1	0	0	安全侧
1	1	0	安全侧

很明显，只有当两个 MCU 处理相同一个指令，并计算结果一致才有输出，所以实现了任务级别的同步并表决。而且采用双通道的驱动输出，系统故障倒向安全的概率为 75%，大于单通道的故障倒向安全的 50%，提高了安全性及可靠性。

3.3.2 切换单元的设计与实现

切换单元使用 SSR、电流传感器、变压器、整流器、继电器及另一系继电器接点组成，具体构成前面已详细给出。

SSR 是一种全部由固态电子元件组成的新型无触点开关器件，它利用电子元件的开关特性，达到无触点地接通和断开电路的目的。根据应用场合的不同，SSR 分为交流型和直流型两种，其区别是没有过零控制电路和吸收电路。本次设计选用固态继电器是因为它能很好的由 5V 电压驱动 SSR 通断，从而导通交流 220V 电压，并实现隔离。同时它体积小，能很方便的集成到一块电路板上。^[18]

电流传感器主要要满足测量电流的范围及测量精度要求，并附带考虑其体积。由于本次设计选用的变压器是把交流 220V 电压变换为交流 25V 或者 18V，得到的电压经整流器整流驱动继电器吸起，则不考虑 SSR 压降及线路损耗时，工作电流为 0.014A 左右，所以电流传感器测量范围应以此为基础，经过比较，选择高精度小电流传感器，因为它能达到以下要求：

1) 采样范围在几百 μA 级至几 mA 级，灵敏度高，输出能灵敏反应输入量的微小变化。

2) 在测量范围内线性度好，输出波形不畸变，输出信号与被测信号间的比值差、角差小，并且其差值稳定，不随温度等因素的变化而变化。

具体选用的电流传感器是 DBC0.1/O.D 交流小电流传感器，输出电流范围是 0—20mA，精度是 0.01mA，加一精密小电阻就可以得到适当的交流电压^[19]。

变压器选择的是 BX1-34 型，原边输入 220V，副边输出 25V 或 18V。整流器

选择一般桥式全波整流器，实现交流到直流的变换。根据选好的器件，切换单元电路如图：

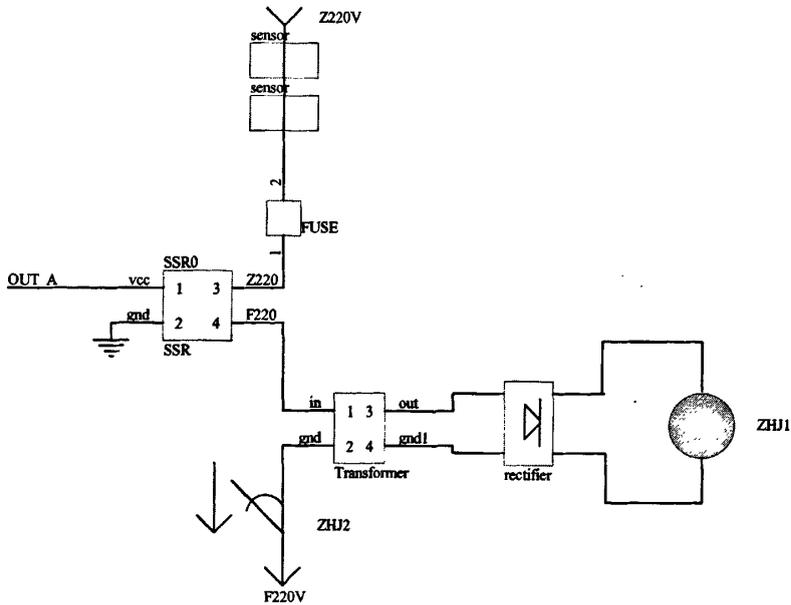


图 3-4 二取二乘二实现图

Figure 3-4 Implementation of 2OO2M2

当 OUT_A 输入为低电平时，SSR 截止，此时电流传感器采集不到电流，则 MCU 的 ADC 口没有信号，说明指令没有同步或者本系处于备系；当 OUT_A 为高电平时，SSR 导通，则 ZHJ1 吸起，同时切断另一系的切换电路，保证另一系 MCU 不处于主系，同时 ZHJ2 落下。而本系由于 ZHJ1 吸起、ZHJ2 前接点断开，使得电路导通，电流传感器采集到电流信号，经信号调理单元传给 MCU，MCU 就知道处理的指令同步且一致，把处理的结果标识为主机，然后就行发送。这样，本电路实现了上电或某系故障下的切换，提高了系统的安全、可靠性。

3.3.3 信号调理单元的设计与实现

信号调理的作用是把电流传感器的信号进行处理，使之输入 MCU 时，满足 MCU 进行 ADC 的要求。我们知道 MCU 处理的电压信号是直流的，所以我们需要把从电流传感器采集到的 mV 级电流变为交流电压，再变为直流电压，并在输入 MCU 前，根据需要进行调整。

前面我们已经粗略的计算出电流传感器采集的电流为 0.014A 左右，输出电压为毫伏级，根据这个数值，本次设计选择美国 AD 公司的 AD736 实现交一直变换

(0-200mV)。AD736 是非常典型的一种实现真有效值的转换器，它具有准确性高 ($\pm 0.3V$ 或 $\pm 0.3\%$)、灵敏度好、测量速率快、频率特性好 (0-460KHz)、输入阻抗高、输出阻抗低、电源范围宽 (+2.8V、-3.2V 至 $\pm 16.5V$) 以及功耗低 (200 μA) 等特点。所谓真有效值是指为克服传统测量仪表采用的平均值转换法存在的较大误差，为了实现交流信号电压有效值的精密测量，并使之不受被测波形的限制，不通过平均值法而是通过对输入交流电压进行“平方 \rightarrow 求平均值 \rightarrow 开平方”的运算而得到直流信号。

它主要由输入放大器、全波整流器、有效值单元、偏置电路及输出放大器等组成。芯片的 2 脚为被测信号 V_{in} 输入端，工作时，被测信号电压加到输入放大器的同相输入端，而输出电压经全波整流后送到 RMS (Root Mean Square) 单元并将其转换成代表真有效值的直流电压，然后再通过输出放大器的 OUTPUT 端输出。偏置电路的作用是为芯片内部各单元电路提供合适的偏置电压^[20]。

考虑到本次设计小电流传感器输出的电压范围，确定 AD736 应该工作在低阻抗的输入电压模式下，实际电路如图：

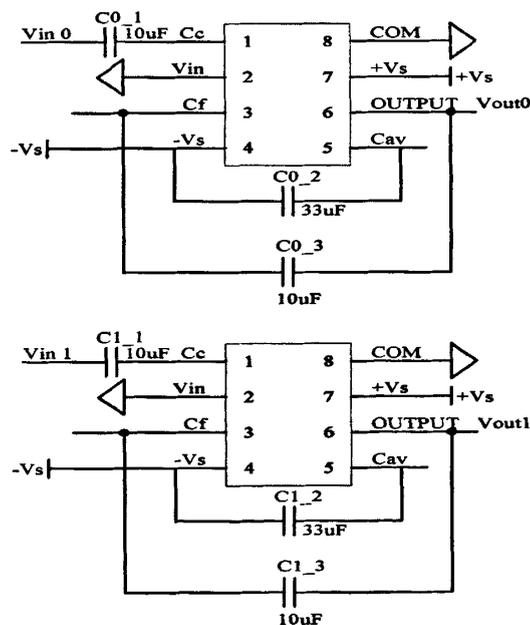


图 3-5 AD736 实现图

Figure 3-5 Implementation of AD736

上图显示了从电流传感器采集的两路信号，分别是 $V_{in 0}$ 和 $V_{in 1}$ ，经过 AD736 处理后，从 OUTPUT 端输出。由于 AD736 的输出电压也为毫伏级，直接给 MCU 处理得出的结果精度不高，为此在输入 MCU 之前，对 OUTPUT 端的输出进行高精度的放大。本次设计选用 AD 公司的高精度仪表放大器芯片 AD620，AD620 是一

种只用一个外部电阻就能设置放大倍数为 1-1000 的低功耗、高精度仪表放大器。它体积小，为 8 管脚的 SOIC 或 DIP 封装、供电电源范围为 $\pm 2.3V - \pm 18V$ 、最大供电电流仅为 1.3mA。AD620 具有很好的直流特性和交流特性，它的最大输入失调电压为 $50\mu V$ ，最大输入失调电压漂移为 $0.6\mu V/^\circ C$ ，最大输入偏置电流为 2.0nA， $G=10$ 时，其共模抑制比为 100dB。以上诸多优点使它能在精确测量系统的运用中取得理想效果。^[20]

本次设计，利用 AD620 将捕捉的电压信号进行放大，具体电路如图：

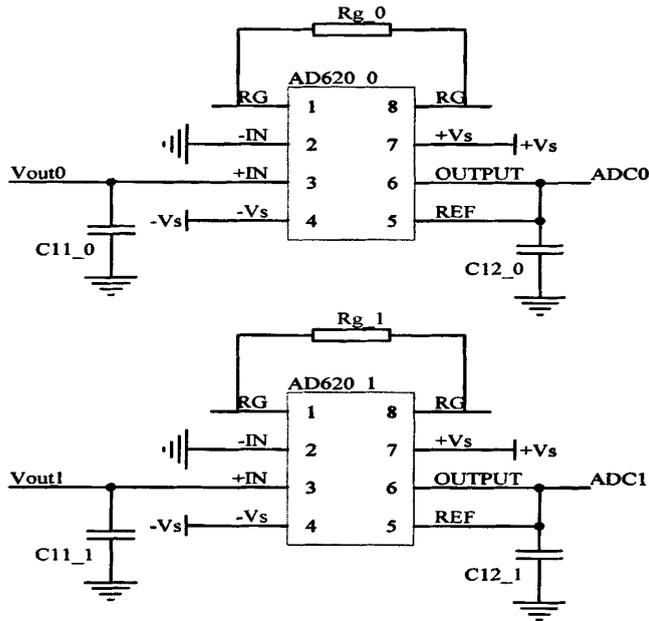


图 3-6 AD620 实现图

Figure 3-6 Implementation of AD620

V_{out0} 和 V_{out1} 是捕捉到的信号经 AD736 处理后得到的有效值，分别输入 AD620_0 和 AD620_1，经放大后形成 ADC0 和 ADC1，分别送入 MCU A0 和 MCU A1 处理。

在 AD620 内部有两个 $24.7K\Omega$ 的电阻，它们的确定使得 AD620 的放大倍数完全由一个外部电阻决定，公式为：

$$G = \frac{49.4K\Omega}{R_g} + 1 \quad (3-1)$$

则：

$$R_g = \frac{49.4K\Omega}{G-1} \quad (3-2)$$

这里如果增益 G 取 10，由 (3-2) 可求得电阻 R_g 的阻值为 $5.5K\Omega$ ^[21]。

3.4 通信单元的设计与实现

3.4.1 CAN 控制器及收发器选型

通信模块实际上分为无线通信和有线通信两部分，不过二者在模拟时都通过 CAN 总线实现。原理示意图如下：

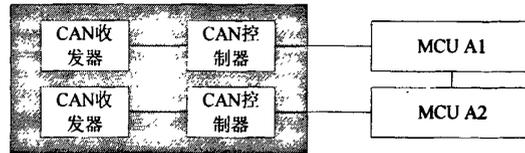


图 3-7 通信模块结构图

Figure 3-7 Architecture of communication module

A 系或 B 系经表决的数据，发给调度中心 CTC 或车站列控联锁系统时经 CAN 控制器和 CAN 收发器传送出去，MCU A1 和 MCU A2 都发送，构成双通道传输，不过 MCU A1 和 MCU A2 传送的数据都有各自的标识符，以表明谁是主机，谁是备机，接收的外部系统会识别，并对主备机数据进行表决，一致时采用主机数据。发给列车的信息实际是无线发送，本次采用 CAN 通道模拟。

由第二章我们对 RBC 系统的总体设计可知，RBC 的设置由以往的分散方式，变为现在的集中方式了。在分散方式下，一个 RBC 系统与 TCC 或联锁系统的交互可以通过串口 RS422 完成，因为它们是点对点通信，用全双工的 RS422 方便、快捷。但是 RBC 系统集中设置后，多个 RBC 都要与操作终端或调度集中 CTC 系统交互，如果还是用 RS422 一个一个的连接，则各种终端访问 RBC 系统时需要一个一个的轮询访问，这样造成系统实时性差，而当某个 RBC 系统通信故障时，轮询时访问不了，会造成整个系统通信的失败。基于以上原因，本文提出 CAN 通信的解决方案，并基于 CAN 总线实现了 RBC 的有线通信。

CAN (Controller Area Network) 是国际上应用最广泛的现场总线之一，最初被提出，是为了解决汽车中庞大的电子控制装置之间的越来越复杂的通讯。一个由 CAN 总线构成的单一网络中理论上可以挂接无数个节点，而实际应用中受网络硬件的电气特性所限制，只能挂接 110 个节点；CAN 总线的通信速率达到 1Mbit/s (40m)，所以实时性很好；另外 CAN 能够检测到通信过程中产生的任何错误，所以可靠性很高，以上诸多原因，使得 CAN 被广泛的应用。

CAN 的通信模型与开放系统互联模型 OSI 一致，不过 CAN 的实际通信由最下层的数据链路层和物理层完成，其中数据链路层控制数据的传输，而物理层实现实际电信号的传输。CAN 的通信介质很多，如双绞线、光纤等，最常用的就是

双绞线,其使用差分电压传送,两条线被称为 CAN_H 和 CAN_L,当它们都是 2.5V 左右时表示逻辑“1”,当 CAN_H=3.5V, CAN_L=1.5V 时,表示逻辑“0”。

CAN 具有一些十分优越的特点:

1) 低成本,且结构简单,用两根线就可以实现信息的交互。

2) 极高的总线利用率。

3) 通信距离与速度的选择灵活,最短 40m 时传输速度达 1Mbit/s,而最远 10Km 时速度为 5Kb/s。速度和距离之间还有多档次的划分,选择方便、灵活。

4) 通信方式灵活,CAN 总线是多主机方式工作,任一节点可以在任意时间向其它节点发送信息,还能方便的实现点对点、点对多及多点对多点的传输。

5) 其它总线通信传输的报文根据报文发送器/接收器的节点地址来识别,而 CAN 总线根据报文的内容来识别,这样方便的实现了信息的广播发送及过滤接收,同时,报文内容的标识符也规定了报文的优先级。

6) 采用非破坏性总线仲裁技术,当多个节点同时向总线发送信息时,优先级较低的节点会主动退出发送,而最高优先级的节点可不受影响的继续传输数据,从而大大节省了总线冲突仲裁时间。

7) 可靠的错误处理和检错机制,当检测到发送的信息遭到破坏后可自动重发。节点在错误严重的情况下还具有自动退出总线的功能,从而不影响其它节点工作。

CAN 通信的实现有两种方式,一是控制器集成,二是通过分立元件实现。P87C591 就是一种集成 CAN 的微控制器,它不仅具有 51 单片机的功能,还片内集成了 CAN 控制器,集成 CAN 的 MCU 还有 AT90CAN128 等,集成 CAN 的 MCU 不仅体积小,使用也方便,但是实际市场上购买渠道不畅通、价格很贵。所以本文设计采用分立元件的方式来实现 CAN 通信。^[22]

CAN 控制器具体选择的是 SJA1000,主要在汽车和一般工业环境中使用,与前一代 CAN 控制器 PCA82C200 相比,增加了一种新的工作模式 PeliCAN,此模式可以支持具有很多新特性的 CAN2.0B 协议。具体特性如下:

1) 和 PCA82C200 独立 CAN 控制器引脚兼容、电气兼容。

2) 具有 PCA82C200 默认的 BasicCAN 工作模式,并扩展了 PeliCAN 工作模式。

3) 同时支持 11bit 和 29bit 的识别码。

4) 扩展 64 字节的接收缓冲器, FIFO 方式工作。

5) 位速率可达 1Mbits/s。

6) 具有对不同 MCU 的接口。

7) 可编程的 CAN 输出驱动器配置。^{[23][24]}

CAN 收发器具体选择的是 PCA82C250,它是 CAN 控制器和物理传输线路之

间的接口，此器件对总线提供差动发送能力，对 CAN 控制器提供差动接收能力。其特点如下：

- 1) 最高速率可以达到 1Mbps。
- 2) 具有抗瞬间干扰的能力，保护总线。
- 3) 斜率控制，降低射频干扰，同时通过调节斜率电阻，使控制器工作在不同的模式下。
- 4) 差分接收器，抗大范围的共模干扰、电磁干扰。
- 5) 可连接 110 个节点，而其中不上电的节点对总线没有影响。

TXD 为发送数据输入端；RXD 为接收数据输出端；VCC 接电源正极；GND 接地；Vref 为参考电压点，一般悬空；CANH 和 CANL 实现数据的差分发送和接收；而 Rs 就是斜率电阻输入端，通过此端口的连接，实现对此器件工作模式的控制[25]。

3.4.2 通信单元的设计与实现

通信单元实现调度集中 CTC 系统、车站列控联锁系统、RBC 原理样机及列车之间的信息交互，基于选好的器件，实际的 CAN 通信电路图如下：

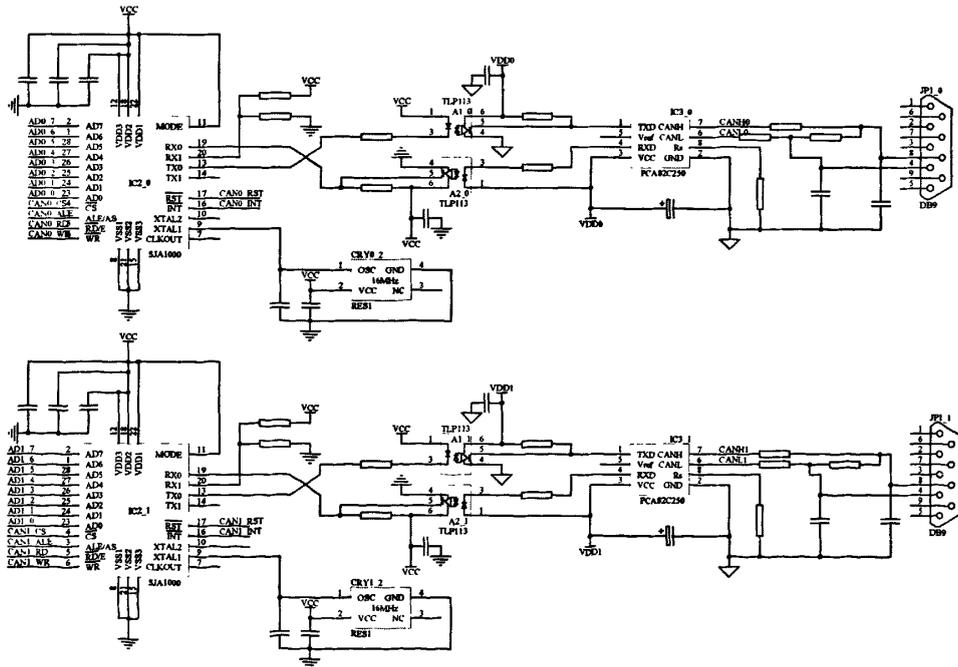


图 3-8 CAN 通信实现图

Figure 3-8 Implementation of CAN based communication

实际 CAN 通信电路如上, SJA1000 在 MCU 的控制下进行数据的接收和发送, 其中 CAN0_CS 实现对 SJA1000 的片选, CAN0_ALE 实现对 SJA1000 的地址锁存, CAN0_RD 和 CAN0_WR 实现对 SJA1000 的读写控制, 而 CAN0_RET 实现对 SJA1000 的复位, CAN0_INT 实现中断信号的传送, 并以此来通知 MCU 对接收到的数据进行处理。AD0_0—AD0_7 实现数据的传送。本文设计中对 MCU 和 SJA1000 分别提供外部晶振输入, 均为 16MHz。

由图可以看出 SJA1000 的 TX0 和 RX0 通过光耦后与 PCA82C250 连接, 而 TX1 与 RX1 没有与 PCA82C250 连接, 这是因为时钟分频寄存器的 CBP 位被置位, 旁路了输入比较器, 只有 RX0 是激活的。而使用光耦的作用主要是实现信号的电气隔离, 要求不高的场合直接连接也可以。

PCA82C250 收到数据后, 经过 CANH 和 CANL 差分线路进行传送, 在 CANH 与 CANL 传输线路上各加一个电阻是为了限流, 而它们之间加电阻是为了匹配输出电阻, 提高稳定性, 而 R_s 直接接地, 说明收发器工作在高速模式下。

3.5 样机的安全性可靠性分析

安全性指的是系统在运行过程中无论发生什么变故都不会产生可能造成人民生命财产损失的危险因素, 这里的变故包括设备故障、错误操作及外界干扰等因素, 即在系统设计时, 保证在任何部分发生故障及系统处于任何可能的外界环境中时系统的输出均处于安全状态。

安全性仅是问题的一方面, 它着重系统故障以后导向安全。而可靠性则着重于防止或减少系统发生故障, 可靠性的定义为: 系统或设备在规定的的时间和规定的条件下完成规定功能的能力, 在该定义中, 规定的功能意味着不能向系统提出过高的要求。有四个指标定量的衡量系统可靠性是否好, 它们是: $f(t)$ ——失效概率密度、 $F(t)$ ——累计失效概率、 $R(t)$ ——可靠度、 $\lambda(t)$ ——失效率, 上述四个指标均与时间有关, 不指定特定的时间点就不能说明问题, 这也是上述四个指标使用起来不方便之处。因此, 有必要引入与时间无关的参数, 其中最重要的一个参数就是所谓的平均无故障工作时间, 或称平均故障间隔时间 MTBF (Mean Time Between Failed), MTBF 可以通过实验得到, 也可以通过上述四个指标计算得来。处于正常工作期间的电子产品, 由于在这一时期其失效率 λ 为一个常数, 因此其 MTBF 等于 λ 的倒数, 即 $MTBF=1/\lambda$ 。^[26]

下面分析设计的二取二乘二模块和通信模块的安全可靠性。通过对二取二乘二结构体系的研究, 根据马尔可夫模型可以得出下面的状态转换图:

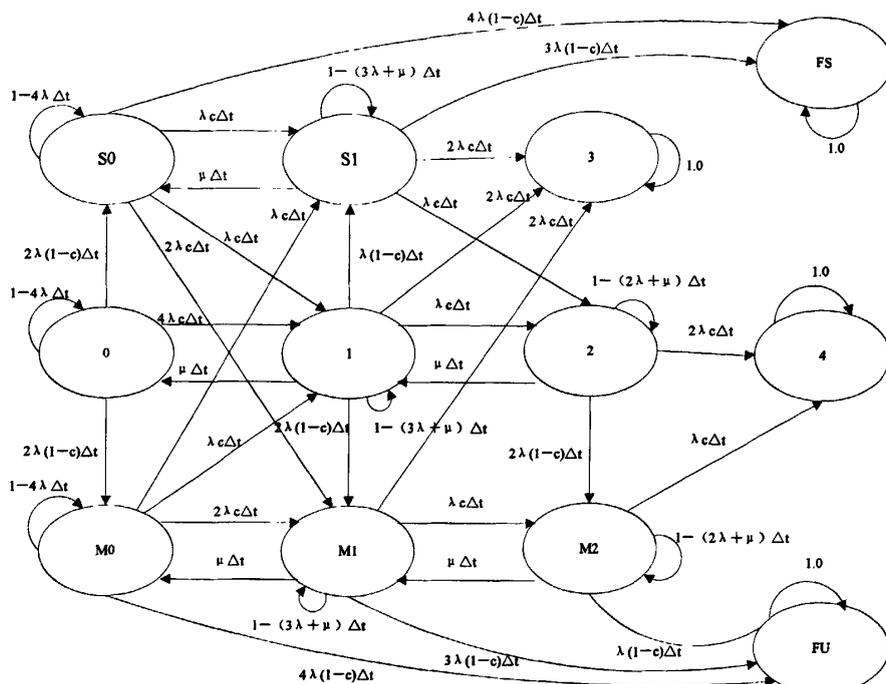


图 3-9 二取二乘二状态转换图

Figure 3-9 States transition of 2002M2

其状态描述为：

- 1) 状态 0 表示主、备机两系均处于完好状态。
- 2) 状态 1 表示某系中有一个模块故障，并被检测定位且切除，子系统只有一个模块正常。
- 3) 状态 2 表示一系出错，停机状态，另一系正常工作。
- 4) 状态 3 表示两系各有一模块故障，系统没有输出，故障—安全。
- 5) 状态 4 表示只有一系的某个模块正常，其他模块故障。
- 6) 状态 M0 表示主机中一模块故障但没有被检测到，系统工作在伪二取二状态。
- 7) 状态 M1 表示主机中一模块故障，但是没有被检测到，备机中一模块故障被检测到并切除。
- 8) 状态 M2 表示备机停机，主机中一模块故障，但没有被检测到。
- 9) 状态 S0 表示备机一模块故障，但没有被检测到。
- 10) 状态 S1 表示主机正常，备机两模块故障，一个被检测并切除，另一个没有被检测，处于伪工作状态。
- 11) 状态 FU 表示系统在伪工作状态时存在危险输出。

12) 状态 FS 表示系统在备机处于伪工作状态时出现不可测故障, 导向安全侧。根据状态转换图, 得到状态转移密度矩阵, 从而得到如下微分方程组:

$$\left\{ \begin{array}{l} p'_{0(t)} = -4\lambda p_{0(t)} + \mu p_{1(t)} \\ p'_{1(t)} = -4\lambda c p_{0(t)} - (3\lambda + \mu) p_{1(t)} + \mu p_{2(t)} + \lambda c p_{m0(t)} + \lambda c p_{s0(t)} \\ p'_{2(t)} = \lambda c p_{1(t)} - (2\lambda + \mu) p_{2(t)} + \lambda c p_{s1(t)} \\ p'_{3(t)} = 2\lambda c p_{1(t)} + 2\lambda c p_{m1(t)} + 2\lambda c p_{s1(t)} \\ p'_{4(t)} = 2\lambda c p_{2(t)} + 2\lambda c p_{m2(t)} \\ p'_{m0(t)} = 2\lambda(1-c)p_{0(t)} - 4\lambda p_{m0(t)} + \lambda p_{m1(t)} \\ p'_{m1(t)} = 2\lambda(1-c)p_{1(t)} + 2\lambda c p_{m0(t)} - (3\lambda + \mu) p_{m1(t)} + \mu p_{m2(t)} + 2\lambda c p_{s0(t)} \\ p'_{m2(t)} = 2\lambda(1-c)p_{2(t)} + \lambda c p_{m1(t)} - (2\lambda + \mu) p_{m2(t)} \\ p'_{s0(t)} = 2\lambda(1-c)p_{0(t)} - 4\lambda p_{s0(t)} + \mu p_{s1(t)} \\ p'_{s1(t)} = \lambda(1-c)p_{1(t)} + \lambda p_{m0(t)} + \lambda c p_{s0(t)} - (3\lambda + \mu) p_{s1(t)} \\ p'_{FU(t)} = 4\lambda(1-c)p_{m0(t)} + 3\lambda(1-c)p_{m1(t)} + 2\lambda(1-c)p_{m2(t)} \\ p'_{FS(t)} = 4\lambda(1-c)p_{s0(t)} + 3\lambda(1-c)p_{s1(t)} \end{array} \right. \quad (3-3)$$

其初始条件为 $t=0$ 时, 各模块均完好, 故有 $P(0) = [1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$ 。于是可以得系统的可靠度为:

$$R_{2 \times 2}(t) = p_0(t) + p_1(t) + p_2(t) + p_{s0}(t) + p_{s1}(t) \quad (3-4)$$

系统的安全度为:

$$S_{2 \times 2}(t) = 1 - p_{FU}(t) \quad (3-5)$$

系统的平均无故障时间:

$$MTBF_{2 \times 2} = \int_0^{+\infty} R_{2 \times 2}(t) dt \quad (3-6)$$

采用 MATLAB 对二取二乘二结构的马尔可夫模型的微分方程进行求解, 得到各状态出现的概率, 设每个单元的失效率为常数 $\lambda=0.0001h$, 故障覆盖率为 $c=0.95$, 仿真时间为 10000h, 可得 $MTBF=2.8536 \times 10^5 h$, 满足实际可靠性要求。^[27]

而通信模块的可靠性通过双通道冗余的方式得以保证。

为了进一步提高系统的可靠性和安全性, 系统 A 系与 B 系及单系两个模块之间的同步是很重要的, 一般同步分两种, 一是时钟脉冲级同步, 二是任务级别同步, 其中时钟脉冲级同步实现的方法有三种:

1) 独立的时钟: 各主机模块采用独立的精确时钟, 保证各主机间的同步, 由于各个时钟是独立工作的, 时间一长, 即使是很小的误差, 由于不断累积而得不到修正, 就不可避免地漂移造成超过最大的时差极限, 从而导致系统运行失去同步, 所有这种方案适用于短时间运行的情况。

2) 公共的时钟: 各主机模块共用一个时钟来保证同步, 虽说解决了同步问题, 但降低了系统可靠性, 因为一旦该时钟故障, 整个系统就会失效。

3) 相互反馈的时钟: 在独立的时钟基础上, 加上互相监视的电路(反馈电路), 一旦检查出时差, 就立即通过反馈信号加以修正, 这样漂移就不会累积。

任务级别同步: 两个 MCU 运行完全相同的程序, 将该程序划分为 1, 2, 3.....n 个任务, 任务级别的同步是以一个任务的一次运行作为同步的基础, 每个任务的结束都会设置一条比较命令, 以便对中间结果和最终结果进行一致性判断。两个 MCU 运行速率不可能完全相同, 所有同一任务在两个 MCU 上执行差异很大, 如果该任务运行时间很长则差异会更大。若 MCU A1 先结束第 i 个任务, 将结果输出给比较器, 同时也传给 MCU A2, 然后设置一个最大的等待时间, 来接收 MCU A2 发出的同步信息。这种方式的同步结果有如下几种:

1) 本次任务先完成的时候, 再收到另一 MCU 的同步信息, 就可以实现同步。

2) 本次任务后完成的时候, 完成后通过传同步信息给另一 MCU, 可实现同步。

3) 本次任务在给定时间内没有收到另一 MCU 发出的同步信息, 等待时间耗尽, 则同步失败, 返回超时的异常码。

本次设计采用的就是任务级别的同步方式^[27]。

其实, 本次设计中采用到的安全、可靠性技术还有很多, 如硬件加电压检测单元, 当电压波动过大时, 就直接切断控制输出; 软件编写采取模块化设计, 并设置软件陷阱防止程序跑飞等。

3.6 小结

本章首先提出了 RBC 样机系统硬件的总体设计方案, 然后在此基础上, 把硬件的总体方案划分为二取二乘二模块和通信模块, 接着详细设计并实现了二取二乘二模块的子单元及通信单元, 最后分析了样机系统的安全性、可靠性。

4 RBC 样机的软件设计与实现

4.1 软件总体设计

RBC 样机功能实验的实现，除了需要完好的硬件电路，还要有相应的功能软件。我们从前面的分析中已经了解 RBC 的功能需求，下文就以软件模块的方式，设计实现 RBC 功能需求的软件总体方案：

1) 对 MCU 的寄存器、I/O 及 CAN 控制器进行正确初始化。

2) 开中断后，根据中断类型，进入相应的中断处理模块后，通过调用相应的函数来实现模块功能，如调度中心 CTC 系统模块、车站列控联锁系统模块、列车车载控制模块及与相邻 RBC 交互模块。其中调度中心 CTC 系统模块通过对 CAN 的数据帧的解析，获得 CTC 下达的命令，如临时限速、调度命令等，而 MCU 把自己获得的相关行车信息按 CAN 数据帧的格式发送给 CTC 系统。车站列控联锁模块按 CAN 数据帧格式给 RBC 相关进路信息，RBC 对这些数据解析后，生成相应的控制命令，而对控制命令的执行情况等也是通过 CAN 数据帧传给车站列控联锁系统。列车车载控制模块实现对列车控制命令的发送和列车相关信息的接收。而与相邻 RBC 的交互是通过 MCU 自带串口实现的。

3) 若进入“与调度中心 CTC 系统相关”处理模块，主要就是进行信息的交互，即 CAN 数据帧的解析与生成。

4) 若进入“与车站列控联锁系统”处理模块，也是通过 CAN 数据帧实现进路信息及信号授权等信息的交互。

5) 若进入“与列车车载控制相关”处理模块，就要通过传输模块实现对列车行车的控制及列车行车相关信息的接收，主要是实现对列车的注册、启动控制、行车许可的下达及级间转换和 RBC/RBC 切换的控制。其中行车许可又分接车、发车、通过及区间行车等类型。

6) 若进入与“相邻 RBC 系统相关”处理模块，则通过 MCU 自带的 USART 串口实现两个 RBC 辖区列车信息的交互。

以上过程是循环的过程，具体流程图如下：

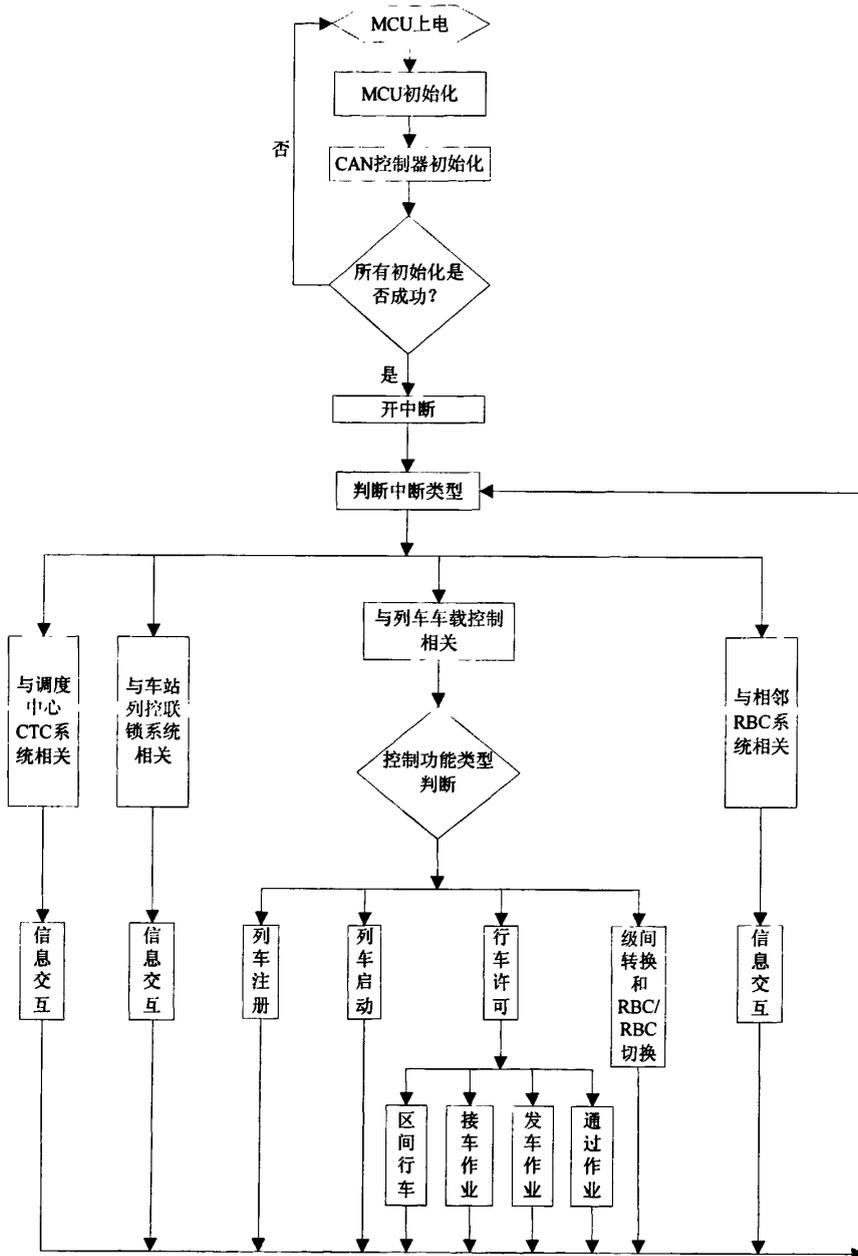


图 4-1 样机系统软件总体流程图

Figure 4-1 Flow chart of Software of prototype system

4.2 注册及启动软件设计与实现

在设计 RBC 功能软件之前，首先介绍一些基本的概念。一是列车的工作模式

有九种，分别是完全监控模式、部分监控模式、调车模式、引导模式、目视行车模式、待机模式、隔离模式、机车信号模式及休眠模式。其中完全监控模式是指车载具备列车控制所需的全部基本数据时，监控列车运行；部分监控模式是指车载工作在 C2 模式时，可以接收轨道电路允许行车信息，但线路数据缺损；调车模式是指车载生成限速 40km/h 监控曲线，指示列车行车；引导模式指存在不能检查列车占用的轨道区段时，司机负责列车运行时检查轨道占用情况；目视行车模式是指禁止信号指示列车停车后，列车需要继续运行时，司机负责安全行车；待机模式是指车载自检后的状态；隔离模式是指停车状态下，司机搬动隔离开关使车载制动失效；机车信号模式是指地面不具备 C3/C2 条件时，按固定 80km/h，通过机车信号行车；休眠模式是指 C3 模式下，非本务端车载的状态。

二是线路等级转换，本文涉及的是 CTCS 2 级与 CTCS 3 级之间的转换。三是 RBC-RBC 切换，是指列车运行过程中从一个 RBC 辖区运行到下一个 RBC 辖区时完成的工作。^[28]

4.2.1 注册软件设计与实现

列车的注册有三种情形，一是列车停在 CTCS 3 级模式股道或线路上，当它要运行时，需要先注册；二是列车将从 C2 模式的线路运行到 CTCS 3 级模式的线路上时，需要提前注册，即 C2 到 C3 级间转换时需要注册；三是列车从一个 RBC 系统控制辖区运行到相邻 RBC 控制辖区时，需要重新注册。

不管哪种情形，注册基本方式都是如下：当 RBC 接收到车载的呼叫信息，首先将判断本 RBC 控制列车容量还有没有，没有就要报警，有就对列车进行注册并把注册信息传给调度中心 CTC 系统，接着 RBC 要求车载传送其参照位置信息及行车许可的参数信息，收到后对这些信息进行判断，根据判断结果的不同，采取不同的处理措施，最终，完成列车的注册或注册失败通知列车降级行驶。其流程图如下：

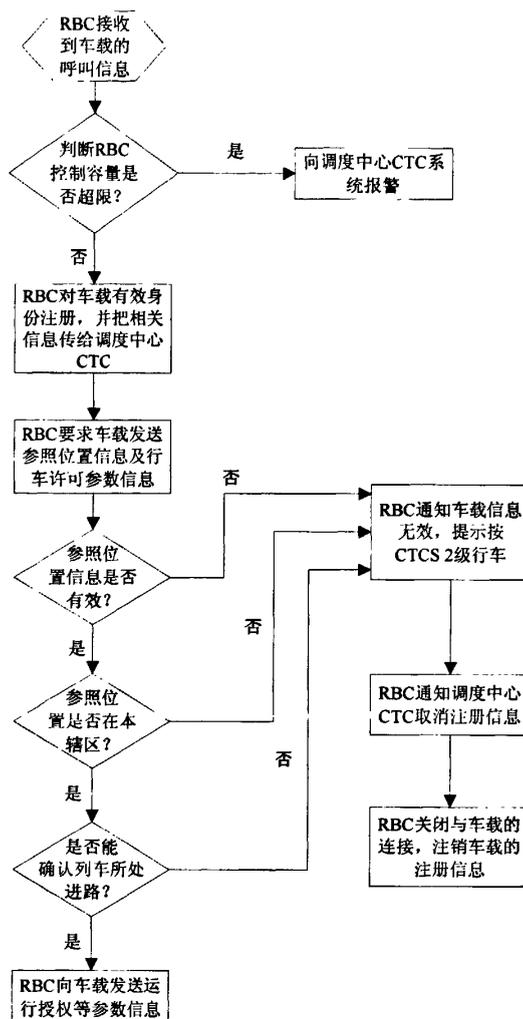


图 4-2 列车注册流程图

Figure 4-2 Flow chart of train registration

4.2.2 启动软件设计与实现

车载设备上电, 完成与 RBC 的注册后, 就可以申请行车许可了。在 C2 模式下, 列车通过 TCC 获得行车许可, 在 C3 模式下, 列车通过 RBC 获得行车许可。通过 RBC 获得行车许可过程是: RBC 根据联锁信息, 向列车提供不同的行车模式, 即当联锁提供的是引导进路, RBC 向车载发送引导行车许可; 当发车信号机有溜车防护报警时, RBC 向车载发送列车前端到出发信号机按目视模式、其余区段按全监控模式的行车许可; 如果没有溜车防护报警, 直接向车载发送全监控模式行车许可。当联锁不能提供进路, 进路信号机关闭, 则向调度报警并确定同意后,

通知列车按目视模式行车。具体流程如下图所示：

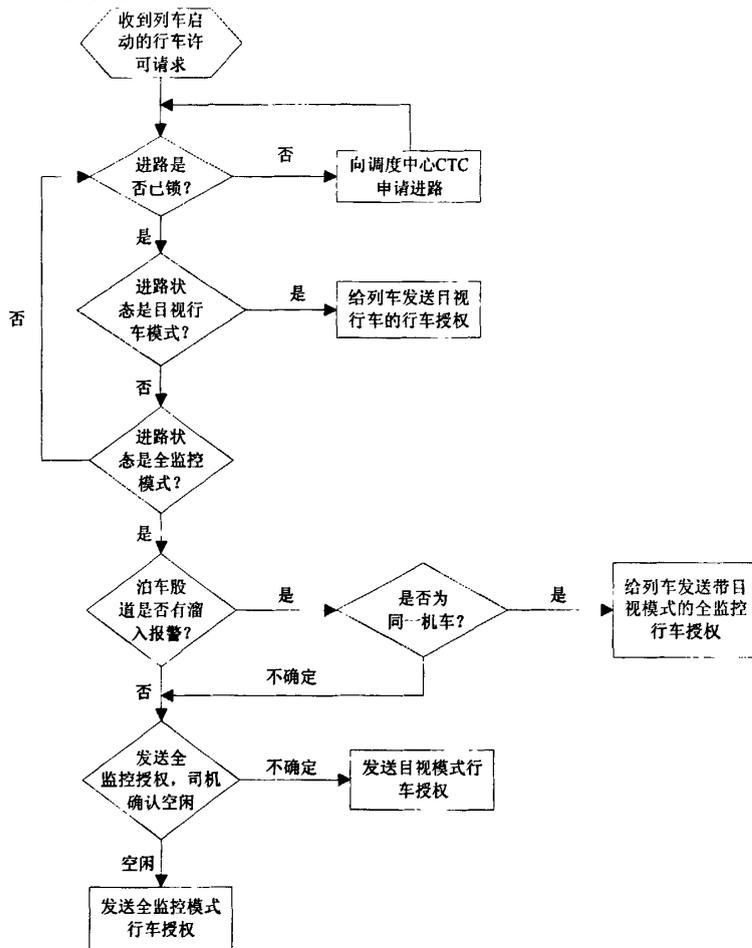


图 4-3 列车启动流程图

Figure 4-3 Flow chart of train start-up

4.3 行车控制软件设计与实现

列车行车控制主要包括接车作业、发车作业、通过作业及区间行车作业等。下面将对这些作业的工作流程进行设计。首先介绍涉及到的一些基本概念，行车许可涉及的基本概念：行车许可，指列车安全运行的行车凭证；缩短行车许可，强制列车以接收到的停车位置为新的行车许可终点；无条件紧急信息，要求列车立即制动；有条件紧急信息，要求列车在指定位置停车，列车将根据当前位置与指定位置的关系采取不同的策略，如当前位置没有越过指定位置且能在指定位置停车时，实行制动停车，不能在指定位置停车时，实行紧急制动，如已越过指定

位置，则拒绝该信息继续按已收到的行车许可行车；信号授权，指联锁进路信息。

4.3.1 接车及发车作业软件设计与实现

列车侧线停车，进路区段在联锁系统的控制下顺序占用和出清，当列车全部进入股道后，接车股道需要继续保持有效，直到列车停稳计时时间结束，接车进路无效后，列车行车许可缩短到列车前端位置，具体流程图如下：

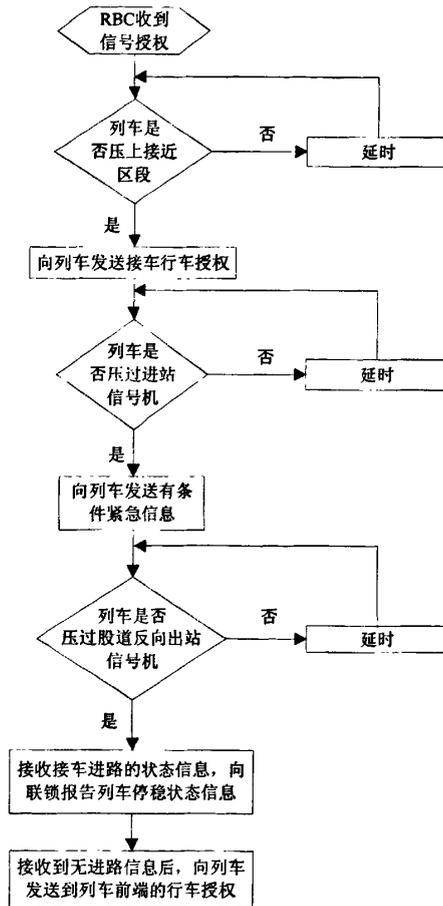


图 4-4 列车接车流程图

Figure 4-4 Flow chart of train receiving

发车时，联锁系统将根据车站信号状态及区间闭塞状态逐个闭塞分区的向 RBC 发送信号授权，RBC 根据收到的信号授权向前延伸行车许可，为了减少缩短行车许可的情况发生，联锁系统一次向 RBC 发送的信号授权不超过 12 个闭塞分区。发车流程如图：

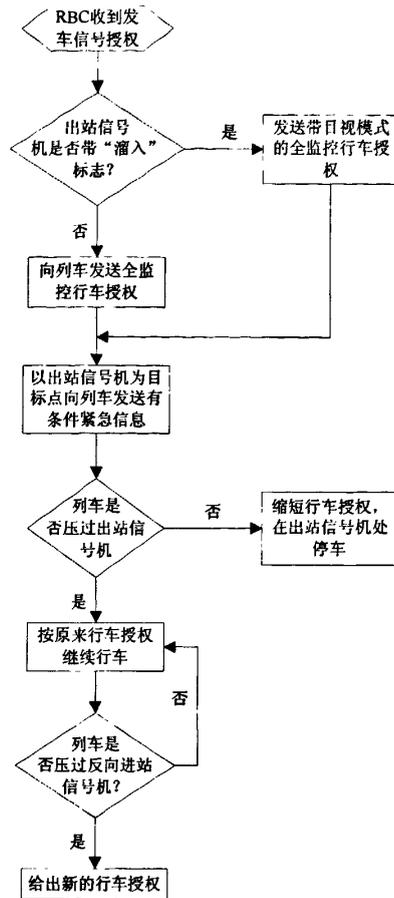


图 4-5 列车发车流程图

Figure 4-5 Flow chart of train departure

4.3.2 通过作业及区间运行软件设计与实现

通过作业分两种情况，一是直接不停车通过车站，二是列车在站内停车后再发车，方式一和方式二的区别在于一个在车站不停车，一个停车，这样带来的结果就是解锁时机的不一样。而上述两种方式都存在不同的办理方式，即先办理接车进路或先办理发车进路，区别在于先办理发车进路时，向 RBC 发送信号授权后，由于没有办理接车进路，进路不连续，RBC 不会产生新的行车许可，而是要等到办好接车进路后才形成新的行车许可；而先办理接车进路，再办理发车进路时，信号授权会根据进路状态不断延伸，从而行车许可也不断延伸。尽管存在上述的差别，但是通过作业的办理还是相似的，下文仅以方式一的处理流程说明：

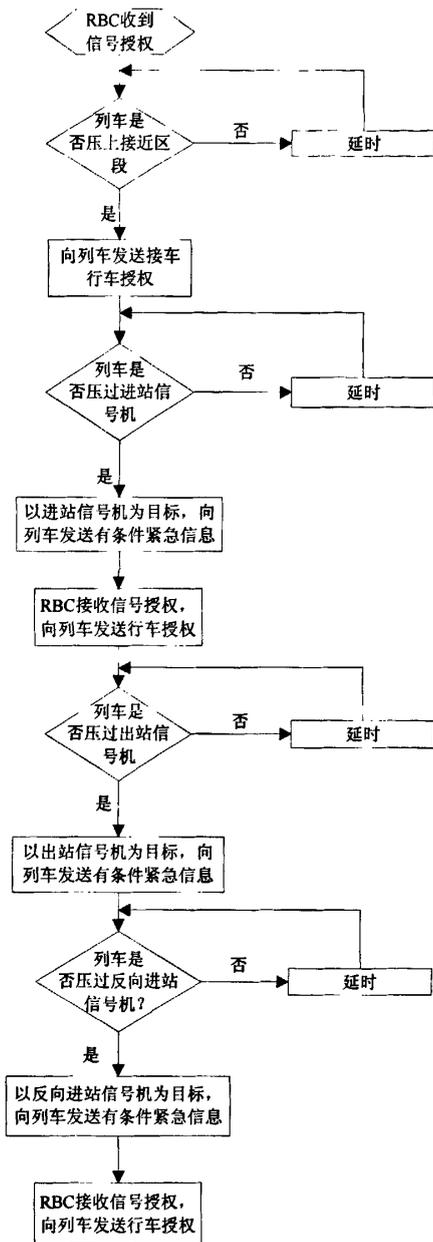


图 4-6 列车通过流程图

Figure 4-6 Flow chart of train through

列车在区间行车有两种方式，当正方向行驶时按自动闭塞追踪运行，而反方向行驶时按站间闭塞的方式运行。对于 RBC 来说，列车正反方向运行时，都具有追踪运行的能力。每个区间闭塞分区只有两种工作状态：锁闭和使用。当分区空闲时其自动转为锁闭状态，当列车占用时就呈现使用状态，列车的行车许可应该在呈现使用状态的闭塞分区处终止。RBC 控制列车区间运行流程很简单，如下：

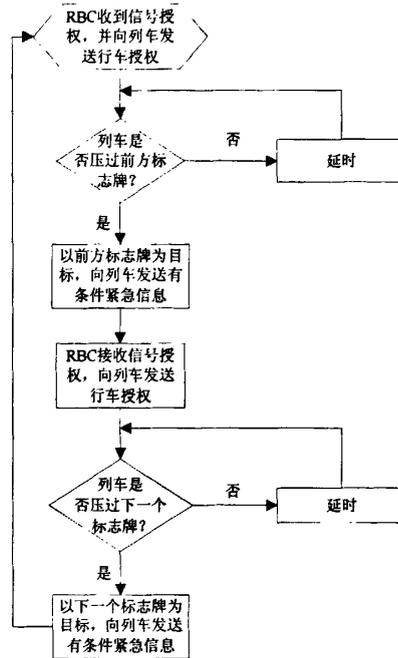


图 4-7 列车区间行车流程图

Figure 4-7 Flow chart of train running in the block

4.3.3 其它控制功能软件设计与实现

除上述作业外，由于客运专线特殊的组织运输模式，即运输车辆仅分 8 辆编组的短列车和 16 辆编组的长列车，这样就存在把两辆短列车通过重联形成一辆长列车，或者把一辆长列车摘解为两辆短列车的作业。重联是以列车进路方式将两列不同的列车从区间线路接入车站同一股道，摘解是将停在车站股道的一列车分解成两列车，然后以列车方式向区间线路发车。这两种作业对提高铁路运输组织效率具有积极的意义，虽然说是两种新的作业，但具体实现就是通过接车作业和发车作业完成的，这里就不再赘述。

另外还存在取消进路、人工解锁进路、自动过分相点、临时限速下达及撤销、设备故障信息及突发灾害信息处理等控制功能，这些功能通过对数据的透明转发或简单解析就可以实现。

4.4 级间转换及 RBC 切换软件设计与实现

级间转换和 RBC-RBC 切换采用的转换方式相同，都是通过车载设备在不同

控制设备中的重新连接注册以及通过分界点时联锁信息的交叉互联形成行车许可的重叠实现的。但具体实现还是有差别的,下面将分别给出级间转换和 RBC-RBC 切换的软件实现。

1) 级间转换

线路等级间的转换分两种,一种是从 C2 到 C3 的转换,还有一种是从 C3 到 C2 的转换。前者在转换时, RBC 与车载应该建立了连接且 RBC 对车载实现了注册,在转换点具备 C3 控车条件时实现转换,否则一直按 C2 模式行车,直到控车条件满足自动实现转换。后者相对简单,正常情况下 RBC 在分界点控制列车转换为 C2 模式后,通知车载断开连接,注销列车身份就可以了。两种转换流程图如下:

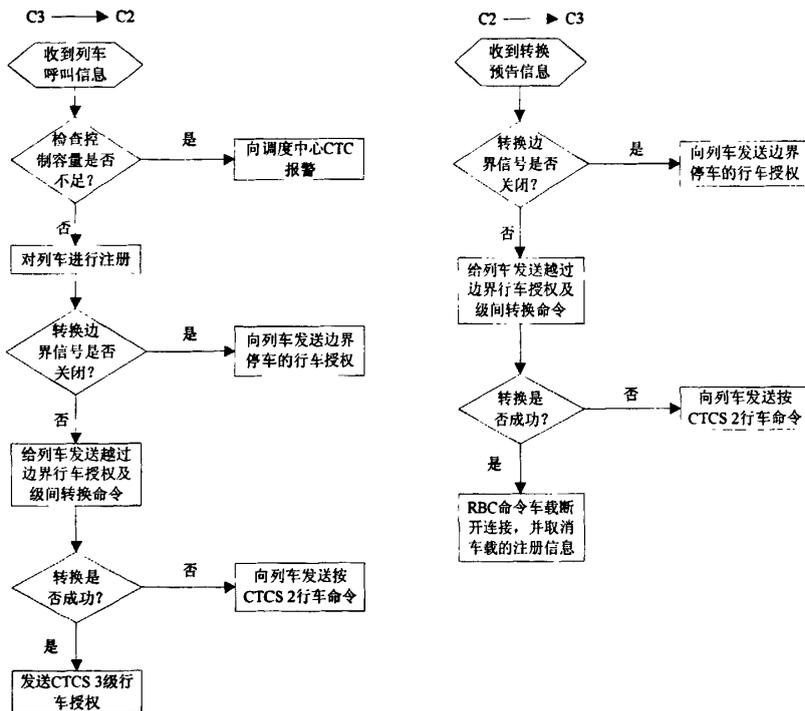


图 4-8 列车级间转换流程图

Figure 4-8 Flow chart of train level transition

2) RBC-RBC 切换

RBC-RBC 的切换主要是实现两个 RBC 间行车许可控制的安全切换,为了消除 RBC-RBC 切换时对列车正常运行的影响,一般车载有两个电台,当列车离切换点有一定距离时,在 RBC1 的控制下通过另一未与 RBC1 连接的电台呼叫 RBC2,在 RBC2 里注册并接受 RBC2 的行车许可。当一个电台故障时,也能实现 RBC-RBC 切换,但会由于切换时间过长,列车在一段时间内会脱离 RBC 控制,从而影响列车的正常运行。正常情况下切换流程如下:

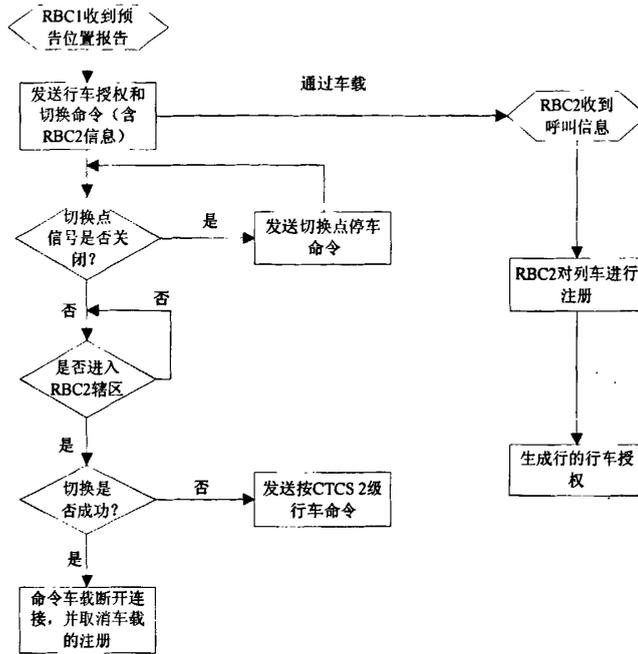


图 4-9 RBC-RBC 切换流程图

Figure 4-9 Flow chart of RBC-RBC switch

故障情况下处理流程如下:

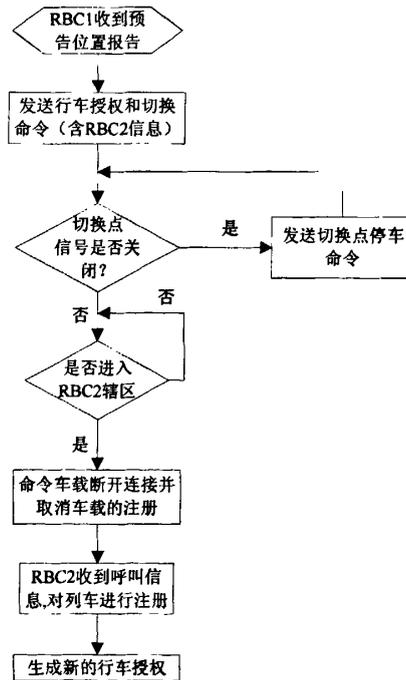


图 4-10 故障时 RBC-RBC 切换流程图

Figure 4-10 Flow chart of RBC-RBC switch in failure

4.5 通信软件设计与实现

系统的通信主要有两种方式，一是通过 CAN 总线，二是通过串口。其中 CAN 总线实现 RBC 与调度中心 CTC 系统、车站列控联锁系统间的通信及与列车的通信，串口实现同一系内两 MCU 之间及两系之间的通信。CAN 通信有两种模式，一是 BasicCAN，二是 PeliCAN，两者主要的差别是 PeliCAN 扩充了含有很多新功能的重组寄存器，从而带来寄存器定义的差别及寄存器数量的差异，还有 PeliCAN 模式支持所有 BasicCAN 模式下的全部功能，同时还支持一些错误分析功能，如系统诊断、系统维护及系统优化^[29]。本次设计使用 PeliCAN 模式，通过设置时钟分频器的第 CDR.7 为逻辑“1”来选择。CAN 通信分以下几个步骤：

1) CAN 的初始化

- (1) 进入复位模式，通过写 SJA 函数实现：WRITE_SJA(MODE, 0x01);
- (2) 设置 PeliCAN 工作模式，并禁止时钟输出：WRITE_SJA(CDR, 0xC8);
- (3) 禁止所有中断：WRITE_SJA(IER, 0x00);
- (4) 设置时钟分频器：WRITE_SJA(BTR0, 0x00); WRITE_SJA(BTR1, 0x1C);

其中最主要的是定义了波特率预置器的值。波特率使得 CAN 系统时钟的周期是可编程的，CAN 系统时钟可由公式计算。

- (5) 设置输出控制寄存器：WRITE_SJA(OCR, 0x1A);
- (6) 设置缓存器起始地址：WRITE_SJA(RBSA, 0x00);
- (7) 设置验收代码和屏蔽代码寄存器，通过这两个寄存器的设置，实现确定对象的通信或禁止通信。WRITE_SJA(ACR0, 0x00); WRITE_SJA(AMR0, 0x00);
- (8) 清除数据溢出和释放接收缓冲器：WRITE_SJA(CMR, 0x0C);
- (9) 回到工作模式并开放中断：WRITE_SJA(MODE, 0x08); WRITE_SJA(IER, 0xEF);

具体流程如下：

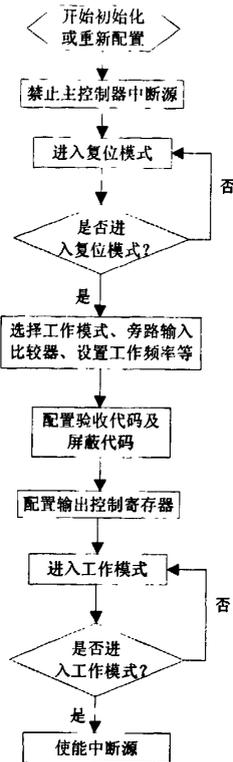


图 4-11 CAN 初始化流程图

Figure 4-11 Flow chart of CAN Initialization

2) CAN 的发送

- (1) 判断发送缓存器的状态，当为空时才可以继续下面的步骤。
- (2) 存储数据的长度信息到标识符。
- (3) 将要发送的对象 ID 和数据存入发送缓冲器。
- (4) 发送触发。

本次设计发送采取轮询的方式，具体流程如下：

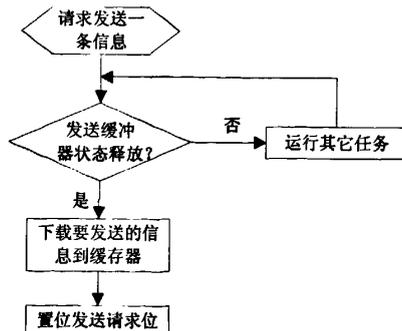


图 4-12 CAN 发送流程图

Figure 4-12 Flow chart of CAN Sending

3) CAN 接收

CAN 接收方式通过中断来实现:

- (1) 读出接收缓存器数据。
- (2) 释放接收缓冲器, 并清除数据溢出。
- (3) 判断数据是标准帧还是扩展帧, 根据判断结果采用不同的存储方式。
- (4) 对数据帧的标识符进行判断, 从而采取不同的处理措施。

其具体流程如下:

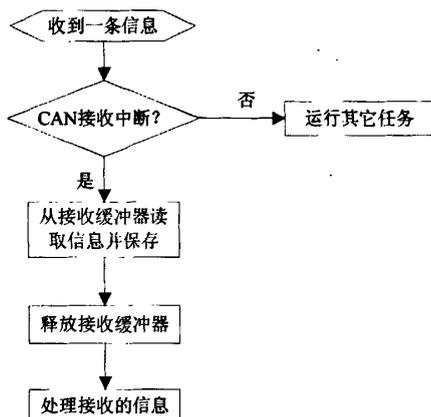


图 4-13 CAN 接收流程图

Figure 4-13 Flow chart of CAN Receiving

4.6 小结

本章设计了 RBC 原理样机软件的整体结构, 并研制了 RBC 功能软件及系统通信软件。其中功能软件包括列车的注册、启动、运行控制软件及级间转换和 RBC—RBC 切换软件, 通信软件包括 CAN 通信软件和串口通信软件。

5 RBC 样机的调试与实验

5.1 调试环境构建

为了实现 RBC 原理样机的仿真，结合实验室的实际条件，操作终端用安装 Windows XP 系统的台式机代替，并加插一块 PCI 接口双路非智能 CAN 通讯卡实现与 RBC 原理样机的连接及通信^[30]。而调度中心 CTC 系统与车站列控联锁给 RBC 的信息也通过 CAN 卡传给 RBC，即 GSM-R 网络的通信也通过 CAN 通道模拟。RBC 样机系统的列车控制模块由二取二乘二 MCU 实现，通信模块由 CAN 控制器和 CAN 收发器实现。为了简化仿真，仿真系统搭建没有完全实现 11 个 RBC 系统互联。这样 RBC 样机系统仿真环境如下：

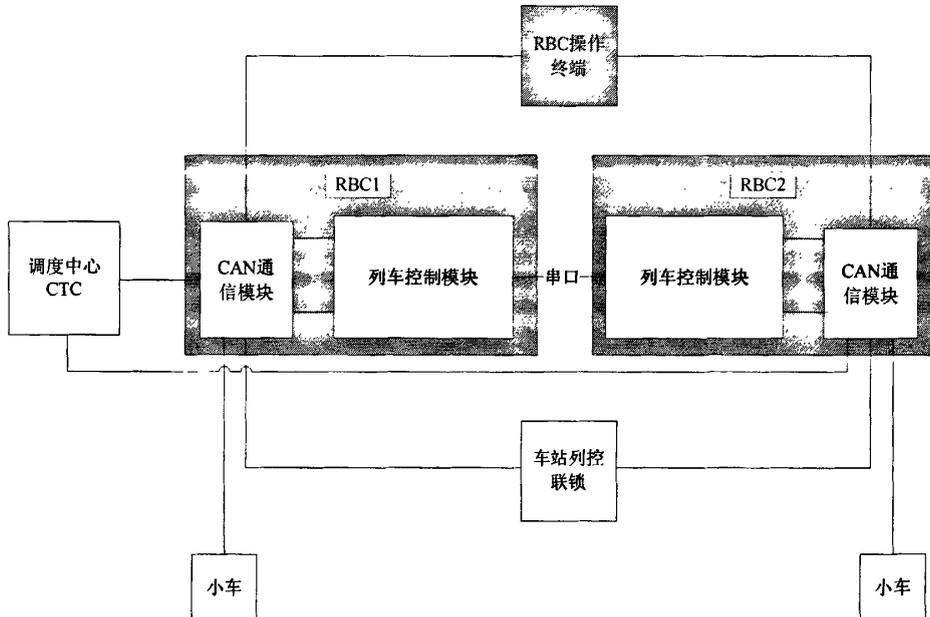


图 5-1 RBC 仿真结构图

Figure 5-1 Simulation architecture of RBC system

调度中心 CTC、车载列控联锁及小车给 RBC 原理样机的信息都是通过 CAN 通信模块输入，经列车控制模块处理后，得到的结果也是通过 CAN 通信模块输出，并通过 CAN 数据帧里面的标识码和屏蔽码确定接收的对象。实际仿真时，我们根据事先定义好的数据帧结构及其意义，即通信协议来判断输入不同信息后，列车控制模块处理的结果是否满足要求。

5.2 调试及实验

编制好系统软件、设计并实现 RBC 原理样机的硬件后，需要做的工作就是对软件及硬件电路的调试和样机功能的实验。

5.2.1 软件调试

1) 在 ICCAVR 环境下编制好软件，头文件为 sja1000.h，然后对应相应的功能软件模块有 Registration.c、Start_up.c、Train control.c、Transition.c 等，sja1000.c 为通信处理软件。所有的软件模块在 main.c 的调度下实现功能实验。编制的软件如图：

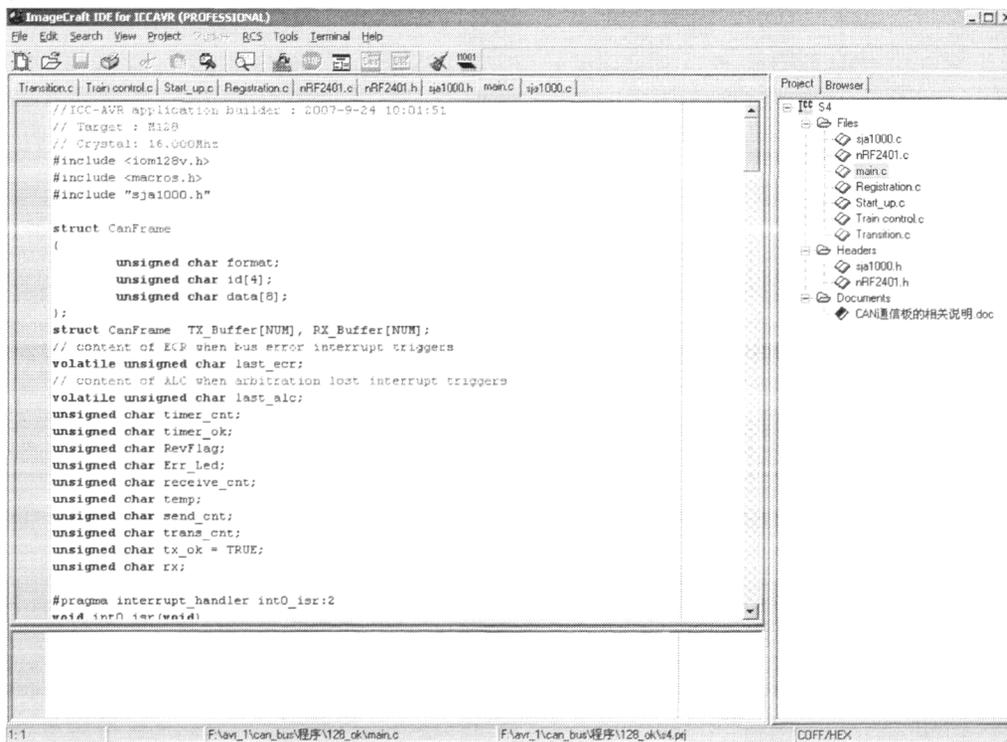


图 5-2 软件编制图

Figure 5-2 Software compiled

上图是软件的编译环境，窗口中显示的是 main.c 函数。在右边工程框中，可以看到头文件和.c 功能软件。在此编译环境下，实现所有软件模块的编写，在编译通过后生成.coff 文件，为下面的软件调试做好准备。

2)把.coff 文件导入到 AVR STUDIO 环境下进行调试。在选好调试平台为 AVR Simulator、器件为 Mega128 后，导入程序成功。



图 5-3 调试平台和器件选择

Figure 5-3 Select Device and debug platform

成功进入调试环境后，用户可以以单个软件模块为对象，逐个的调试。由于通信模块的完好是调试其它功能软件的前提，我们首先对通信软件进行调试，如图：

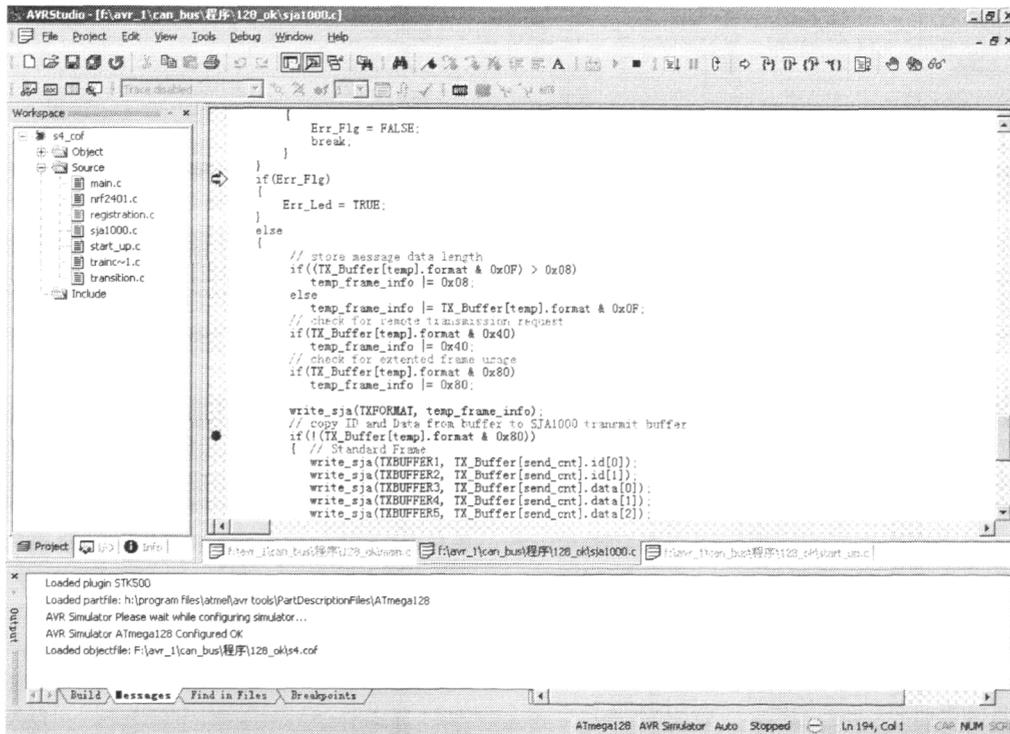


图 5-4 通信软件的调试

Figure 5-4 Communication software debug

由于软件调试是一个繁琐的过程，因此在调试通信软件时，用户可以把通信软件按模块划分，然后逐个模块的调试，如划分为初始化模块、发送模块和接收模块。上图就是发送模块调试时的截图。根据 MCU 寄存器的变化及报错信息，不

断的修改软件，直至调试通过。

功能软件的调试思路与上述类似，不过功能软件是通过 main 函数调用，在自己相应的子函数中进行数据处理，处理好后通过通信软件发出。通过上述调试方式，我们把 Registration.c、Start_up.c、Train control.c、Transition.c 等功能软件逐个的调试完毕，并能保证软件逻辑正确，接下来就可以烧写进 MCU 进行硬件调试。

5.2.2 硬件调试

通过与 CAN 卡通信来验证硬件电路的正确性。

1) 单 CAN 通道调试

首先参照电路图，用万用表对实际电路板的各器件连接进行检查，确保设计的电路板与实际电路图一致。然后通过 ISP 将调试好的通信程序烧录到 MCU 里面，再将实际电路板与购买的 CAN 卡连接，接通电源调试。实际的硬件如图 5-5 所示：

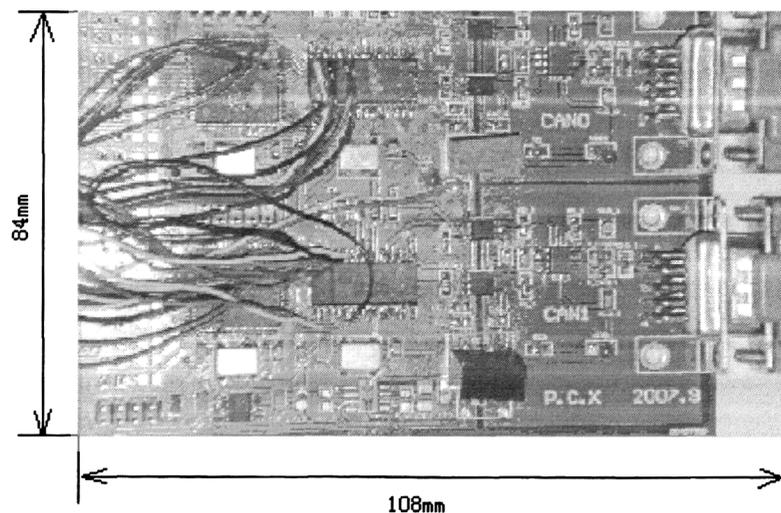


图 5-5 硬件实物图

Figure 5-5 Hardware practicality

调试过程中发现电路收发没有反应，断电用万用表再次检查连线的正确性，确定连线没有错误。再核实电路原理图，发现 MCU 的 AD0—AD7 接到 SJA1000 的 AD7—AD0 上，这样只有通过电路板重新飞线以继续调试，如图 5-6。再次上电后，发现电路收发还是没有反应，用万用表对 CANH 和 CANL 之间电压进行检查，发现购买的 CAN 卡工作正常，自己设计的电路板在 CANH 和 CANL 处电平也有明显变化，这样问题可能出在 CANH 和 CANL 引脚接反，把电路板的 CANH 与 CANL 重新连接，重新上电就能正常通信了，如图：

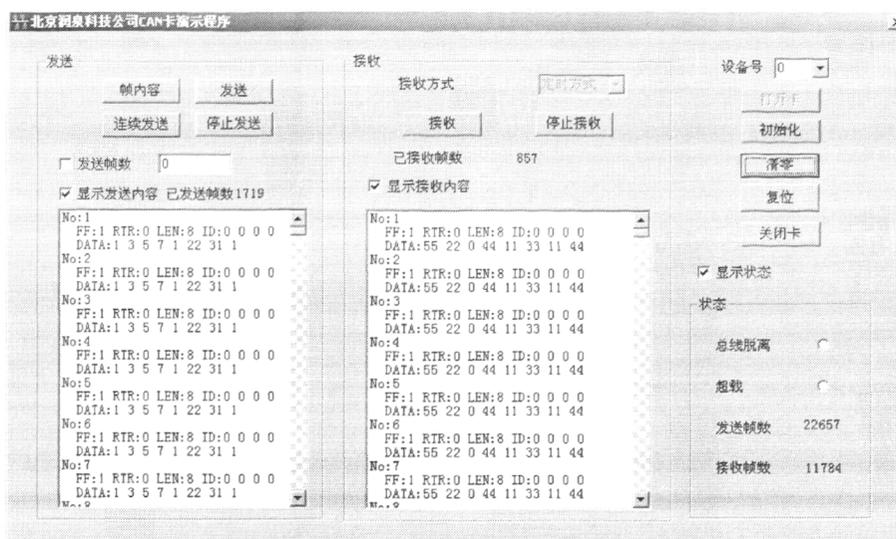


图 5-6 单 CAN 通信图

Figure 5-6 Communication of single CAN

上图是在波特率为 500kbs、扩展帧格式、验收码均为 0x00、屏蔽码均为 0xFF、双通道滤波的设置下，CAN 通信发送接收图。

2) 双 CAN 通道调试

参照前文单 CAN 通道的调试，对另一通道的 AD0-AD7、CANH 及 CANL 重新连接，上电后通信正常，这样就实现了单系的双 CAN 通道通信。如图：



图 5-7 双 CAN 通信图

Figure 5-7 Communication of Bi-CAN

图 5-7CAN 通信的设置与单通道 CAN 通信的设置一致。由图可知双通道 CAN 通信非常稳定，为下一步的功能实验做好了准备。

5.2.3 功能实验

1) 与相邻 RBC 系统的交互

与相邻 RBC 的交互通过串口来实现，由于 Mega128 本身自带两个串口，所以用串口来仿真 RBC 与相邻 RBC 之间的通信非常简单，仅仅需要设置好相应寄存器，然后在合适的时机进行信息的发送即可。

2) 与调度中心 CTC 系统的交互

由 PC 机模拟调度中心 CTC 系统，通过双 CAN 通道实现其与 RBC 原理样机的交互，即调度中心 CTC 系统把调度命令、临时限速等信息传给 RBC 原理样机，RBC 原理样机把管辖区域列车的运行状态、信号设备状态及线路信息等传给调度中心 CTC 系统。首先我们先设定接收码和屏蔽码，使得调度中心 CTC 系统在 CAN 网络中具有唯一的标识符，只有 CAN 数据帧里面的标识符相符，此信息才能被接收，如图 5-8 所示：

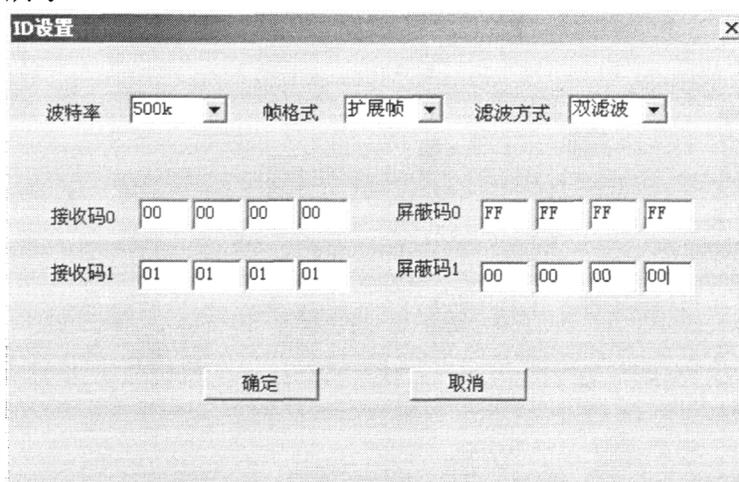


图 5-8 ID 设置图

Figure 5-8 ID setting

首先，设置波特率为 500kbs，帧格式为扩展帧，滤波方式是双滤波，即一条信息只要被一个滤波器验证通过，就可以被接收。上图就表示验收码为 0000000001010101，屏蔽码为 1111111100000000，从而可以确定数据帧 ID 为 xxxxxxxx01010101 都可以被接收，其中 x 表示通配符，这样列车的运行状态、信号设备状态及线路信息等数据的 ID 通过前 8 位区别，后 8 位都设为 01010101，就既满足数据帧的区别又能满足特定对象的接收。

其次，根据通信协议，如列车状态信息：0x5 表示实际速度，0xA 表示最高速度，0 表示停车；临时限速标志信息：0x50 表示下达验证新命令，0xA0 表示批准执行此命令，0x00 表示为无效命令等。设定好数据帧内容后，就可以通过 CAN 卡发送给 RBC 原理样机，再接收其处理后返回的数据进行功能实验，如图 5-9 所示：

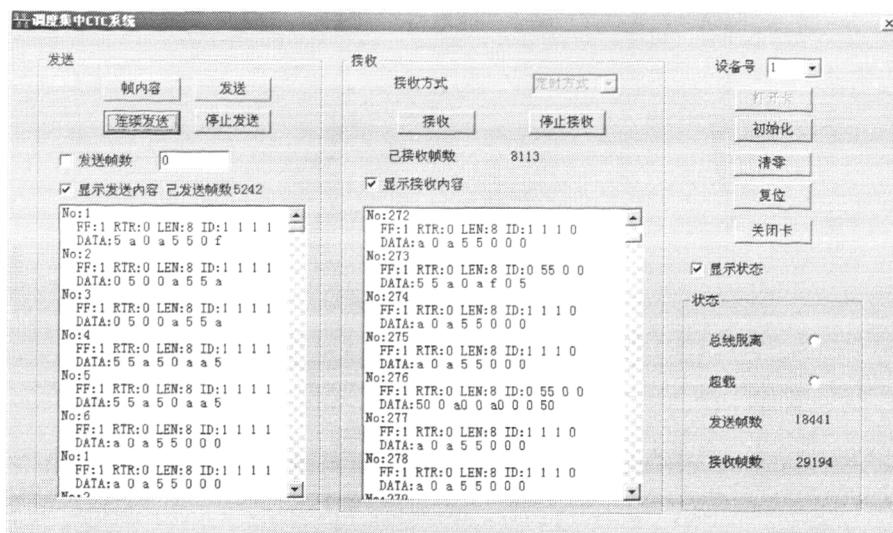


图 5-9 与 CTC 系统通信图

Figure 5-9 Communication with CTC

图 5-9 表示调度集中 CTC 系统根据通信协议发送相应的调度命令给 RBC 原理样机，RBC 原理样机在接收调度命令的同时，也把自己获得的列车状态信息按协议上传给调度中心 CTC 系统。而临时限速以调度命令的形式下达，如图 5-10 所示：

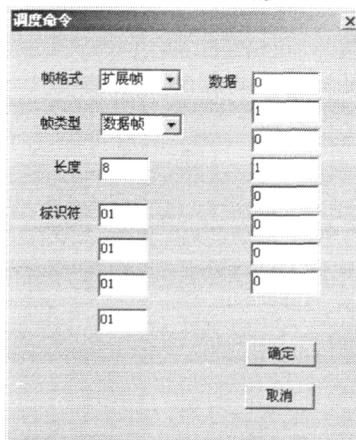


图 5-10 临时限速设置

Figure 5-10 Temporary Speed Restrict setting

图 5-10 就是把临时限速按调度命令的形式下达的用户界面，标识符设定接收 RBC 的 ID，而数据 01010000 就是 0x50，是调度中心 CTC 要求 RBC 原理样机验证临时限速命令。

3) 与列车的交互

RBC 原理样机与列车的交互主要是接收列车状态信息，发送列车运行许可和相关控制信息，同时负责信息传输通道的管理、加密并检查所接收信息的完整性。由于实际条件的限制，本次 RBC 原理样机与列车的交互采用 CAN 通信来模拟，代替无线通信，其实现方式类似于调度中心 CTC 系统与 RBC 样机的通信。如图：

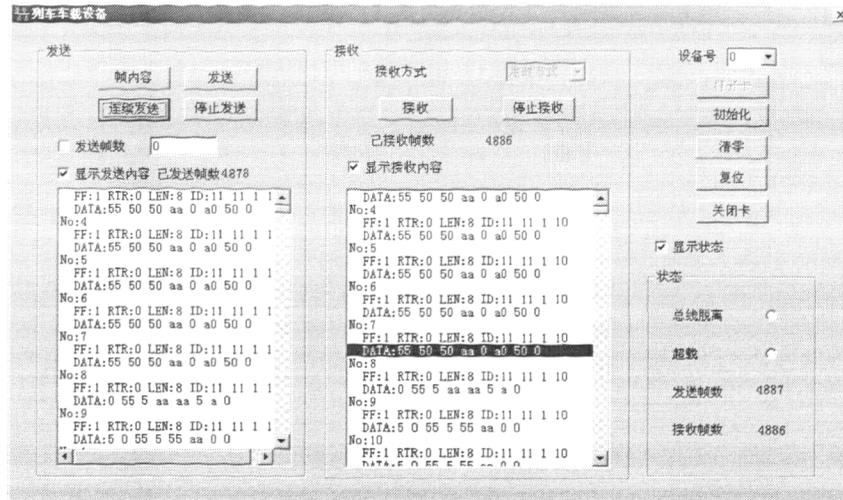


图 5-11 与列车通信图

Figure 5-11 Communication with Train

实际 RBC 与列车车载设备的交互是通过 GSM-R 实现，本次实验由于条件的限制，也因为本次实验定位于验证 RBC 的工作原理，于是采用 CAN 通信进行模拟。图 5-12 中 RBC 原理样机 ID 为 11110110，列车车载设备 ID 为 11110101，RBC 样机成功的下达了对列车的控制命令，车载设备也成功上传了列车运行状态信息。

4) 与车站联锁系统的交互

RBC 原理样机与联锁系统交换进路信息、闭塞区段信息及列车状态信息。RBC 原理样机向联锁发送的列车状态信息包括：列车状态、行车许可、列车位置、列车长度及列车速度等信息，而联锁向 RBC 原理样机发送的进路信息包括：进路类型、进路状态、降级信息、进路识别号、溜入危险及灾害报警等。如图 5-12 所示：

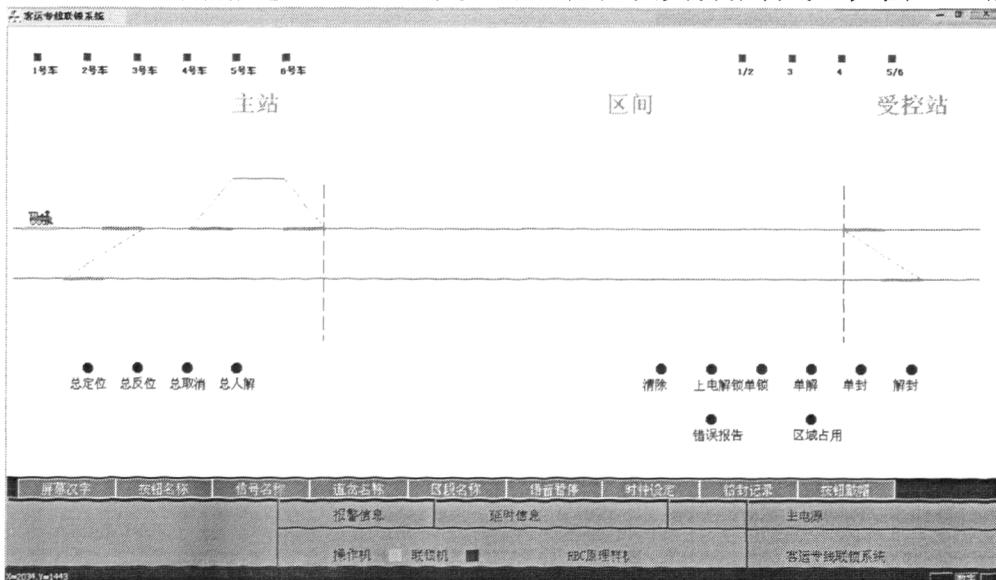


图 5-12 与联锁系统交互图 1

Figure 5-12 Graph 1 of communication with CIS

列车状态信息根据通信协议编码后进行传送，如区段 1 锁闭状态：01 表示锁闭，10 表示解锁。联锁系统通过调用 CAN 卡接收的数据，按协议进行解析后就可以在联锁上位机上显示出来，图 5-12 中青色线段处表示列车向主站运行，列车准备在主站侧线停车，向 RBC 申请授权。RBC 根据列车状态信息，向 CTC 系统申请进路，CTC 控制联锁系统驱动主站道岔动作，办理列车的侧线接车业务。如图 5-13:

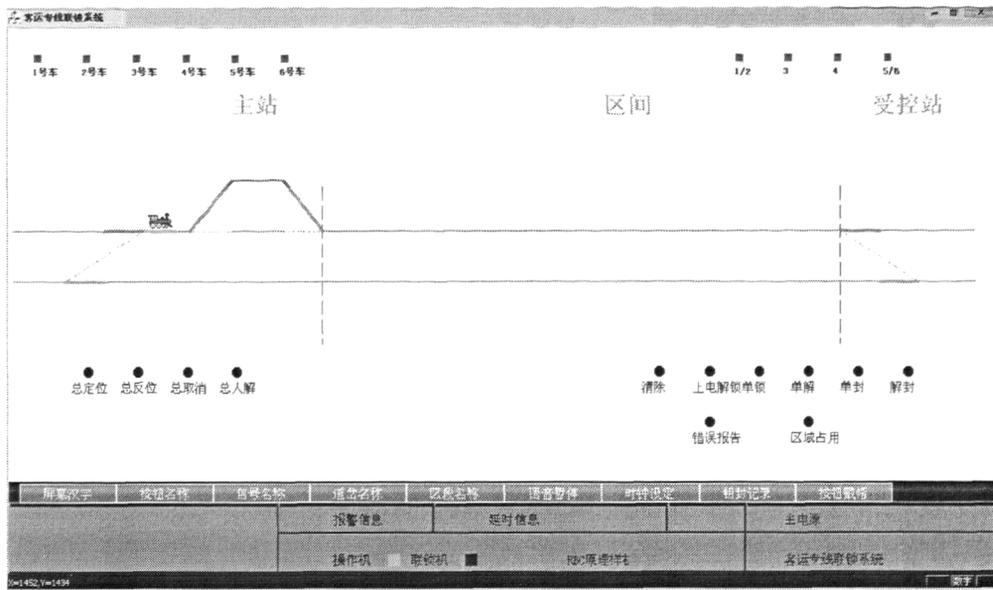


图 5-13 与联锁系统交互图 2

Figure 5-12 Graph 2 of communication with CIS

从图可以看出下行侧向道岔已被驱动为反位并锁闭，列车正向侧线运行。以上实现了 RBC 原理样机与联锁系统的功能实验。

5.3 小结

本章设计了 RBC 原理样机的软、硬件调试方案，完成了 RBC 原理样机的软件、硬件调试，实现了 RBC 原理样机的功能验证。结果表明本文设计的 RBC 原理样机能正确的实现 RBC 工作原理的演示，具有一定的安全可靠性的。

6 结束语

RBC系统是高速铁路信号系统实现列车控制的核心，本文以国内引进的CTCS 3级信号系统为应用背景，分析了RBC系统的工作机理，在分解信号系统功能的基础上分析了RBC系统功能需求及其实现方案，并基于单片机、CAN总线研制了其原理样机，完成了样机的软、硬件调试和功能实验。

论文的主要工作包括：

第一，通过研究RBC系统在信号系统中的工作机理和分解信号系统功能，完成了RBC系统功能需求及其实现方案的分析，通过分析RBC系统外部及内部结构，设计了RBC原理样机总体结构。

第二，通过单片机及通信器件的选型，研制了基于单片机和CAN总线的二取二乘二核心处理单元及通信单元。

第三，通过研究RBC系统技术规范，编写了部分列车控制代码及通信代码。

第四，通过搭建RBC原理样机仿真运行环境，实现了样机的测试与功能实验。

实验结果表明，本文设计的样机满足RBC系统功能演示的需求，具有一定的安全、可靠性。但由于本人研究水平，开发时间和调试环境的限制，本文设计的RBC原理样机还存在许多不足之处，如硬件设计结构不合理、软件控制代码不够完善、仿真环境不够逼真等。要使该系统更贴近实际演示应用，并达到高可靠性、高安全性的要求，还有很多工作要做。为此下一步的研究内容如下：

第一，完善硬件设计与实现，如切换单元的优化设计、无线模拟通道的建立等。

第二，完善软件设计与实现，主要是对列车控制部分软件的优化、对RBC系统功能软件的完善等。

第三，完善仿真环境的搭建，如对调度集中CTC系统、车站联锁系统操作界面的设计等。

参考文献

- [1] 钱仲候. 高速铁路概论[M]. 第二版. 北京. 中国铁道出版社. 1999. 12: 1-2
- [2] 高家驹 王文仓. 高速铁路与广深准高速铁路概论[M]. 北京. 中国铁道出版社. 1994. 6: 1-3
- [3] Hill, R. J. Electric railway traction Part 5 Train detection, communication and supervision. Power Engineering Journal. April 1996: 3-4
- [4] 谢静高. 客运专线信号设备[M]. 2005 培训教材. 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 2005. 6: 20-23, 43-45
- [5] 李开成 卜长堃 毛俊杰 傅世善等. 国外铁路通信信号新技术纵览[M]. 北京. 中国铁道出版社. 2005. 8: 55-58
- [6] Pasquale di Tommaso, P Flammini, F Lazzaro, A Pellicchia, R Sanseviero, A. The simulation of anomalies in the functional testing of the ERTMS/ETCS trackside system. High-Assurance Systems Engineering. 2005: 1
- [7] Albanese, A. Marradi, L. The RUNE project: the integrity performances of GNSS-based railway user navigation equipment. Rail Conference, 2005. Proceedings of the 2005 ASME/IEEE Joint. March 2005: 1
- [8] Zimmermann, A Hommel, G. A train control system case study in model-based realtime system design . Parallel and Distributed Processing Symposium, 2003. Proceeding. International. April 2003: 1
- [9] Faber, J Meyer, R. Model Checking Data-Dependent Real-Time Properties of the European Train Control System . Formal Methods in Computer Aided Design, 2006. NOV. 2006: 1
- [10] System Requirements Specification Chapter 4 modes and Transtions. SUBSET-026-4. UIC. Feb 2002: 1
- [11] ERTMS/ETCS Functional Requirements Specification FRS. V.4.29. UIC. March 1999: 2-4
- [12] ERTMS Regional Functional Requirements Specification. V.1.0. UIC. March 2002: 2-4
- [13] ERTMS/ETCS Functional Statements. V.2.0. Jan 2004: 2-6
- [14] 汪希时. 智能铁路运输系统 ITS-R[M]. 北京. 中国铁道出版社. 2004: 55
- [15] 孙蕾. 二取二乘二计算机联锁系统的设计与实现[硕士学位论文]. 万方数据库. 北京交通大学. 2005. 3: 30-32
- [16] Atmel. Atmega128.pdf. Jun 2006: 2
- [17] HEWLETT PACKARD. HCMOS Compatible, High CMR, 10MBd Optocouplers Technical Data. 2002: 2
- [18] 周志敏. 固态继电器的原理与应用. 中国通信电源情报网. 2002: 1
- [19] 烟台天宇机电有限公司. DBC0.1/O.D 交流小电流电流传感器. www.tzsensor.com. 2008: 1
- [20] ANALOG DEVICES Semiconductors. AD736 Low Cost, Low Power, True RMS-to-DC

- Converter. 2003. 4: 1
- [21] ANALOG DEVICES Semiconductors. AD620 Low Cost, Low Power Instrumentation Amplifier. 1999. 7: 1
- [22] BOSCH. CAN Specification 2. 0. 1991. 9: 1-2
- [23] SJA1000 独立的 CAN 控制器应用指南. 广州周立功单片机发展有限公司. 2002: 1-2
- [24] SJA1000_cn.pdf. 广州周立功单片机发展有限公司. 2002: 1-2
- [25] PHILIPS Semiconductors. PCA82C250 CAN controller interface. 2000. 1: 1-2
- [26] 徐洪泽 岳强等. 车站信号计算机联锁控制系统原理及应用[M]. 北京. 中国铁路出版社. 2006: 58-60
- [27] 岳强. 二取二乘二计算机联锁系统的研究[硕士学位论文]. 万方数据库. 北京交通大学. 2004. 3: 32-34
- [28] ERTMS Regional Operational Scenarios. V.1.0. UIC. Oct 2003: 2-5
- [29] CAN 控制器 PeliCAN 模块.pdf. 广州周立功单片机发展有限公司. 2002: 34-36
- [30] 双路 PCI 非智能卡说明书.pdf. 北京润泉科技有限公司. 2002: 1

作者简历

个人简历:

彭传贤, 男, 1983年11月生。

2006年7月毕业于昆明理工大学 电子信息工程学院自动化专业。

2006年9月入北京交通大学读硕士研究生。