

船舶电站自动控制系统

吴浩峻 编著

大连海事大学出版社

内容提要

全书共分9章。第1章为船舶自动化电站概述,主要介绍了船舶电站自动化的历史发展和发展前景,船舶电站自动化的规范要求,船舶自动化电站的基本功能以及集散型船舶电站自动控制系统结构图;第2章为船舶自动化电站控制技术,主要介绍了在现代船舶电站自动控制中采用的各种控制技术;第3章为主柴油发电机组的自动控制,主要介绍了主柴油发电机组的自动起动与停机功能、主柴油发电机组自动控制系统故障与处理以及主柴油发电机组的安全保护;第4章为发电机自动并车控制,主要介绍了自动准同步并车装置的基本功能,模拟式和数字式自动准同步装置的工作原理;第5章为同步发电机的自动调频调载控制,主要介绍了发电机频率变化的原因及危害,频率及有功功率的调整,模拟式和数字式自动调频调载装置;第6章为船舶同步发电机电压及无功功率的自动调整,主要介绍了发电机电压变化的原因及危害,电压及无功功率的调整,相复励自励恒压装置;第7章为船舶应急电站自动控制,主要介绍了供电电源的自动转换功能及电路分析,应急柴油发电机组的自动控制;第8章为船舶高压电力系统,主要介绍了在海洋工程船舶及特种工程船舶中普遍应用的高压电力系统,对船舶使用高压电力系统的主要原因、高压电力系统的结构及特点、船舶高压电力系统接地技术、船舶高压电力系统安全操作及检修注意事项进行了分析和讨论;第9章为典型电站自动控制系统分析,主要介绍了船舶电站自动控制系统整体构架,实船中应用比较广泛的PPU模块的主要功能,PPU硬件电路及外部接线工作原理分析。

本书结合轮机工程专业学生培养的要求,结合多年理论教学和实践工作的体会,注重理论与实践的结合,深入浅出、通俗易懂。本书满足《中华人民共和国海船船员培训大纲(2016版)》中关于船舶电站自动化的教学要求,使学生掌握必备的船舶电站知识,为成为机电复合型技术人员奠定基础。可作为轮机管理人员实船工作时处理电气故障的参考书,也可作为电气技术人员自学和做为培训教材使用。

前 言

本书是为轮机工程专业《船舶电站自动控制系统》课程编写的教材,《船舶电站自动控制系统》是为轮机工程专业学生开设的专业课程,本课程具有较强的理论性和实践性。本书注重系统性和实用性,结合最新船员培训要求,面向考证等社会需求,使轮机员能够适应新形势的需要,适应机电一体化要求,胜任船舶电站自动化设备的管理、使用和维护工作而编写的。

本书在编写过程中参考了中国船级社《钢制海船入级规范 2018 版》、《中华人民共和国海船船员培训大纲(2016 版)》、国内外有关教材以及实船自动化电站的资料,依据船舶电站管理技术要求及相关规范,结合作者多年从事船舶电气类课程理论教学与船舶电站自动化维修的实践经验,全面系统地叙述了船舶电站自动控制系统中涉及的基本知识、基本理论和基本技能。

电站是船舶电力系统的核心,船舶电站自动化是船舶自动化的重要组成部分,其最主要的目的在于保证船舶供电的连续性、可靠性和供电品质。船舶自动化电站是具有船舶发电机组自动起动、自动连接到不带电母线、自动并联、自动调频调载、重载询问、自动停机、自动卸除次要负载和自动分析功率储备等全部或部分功能的自动控制系统。电站运行的可靠性、经济性及自动化程度对保证船舶的安全运行有重要的意义。

本书从教学角度出发,力求使读者对船舶电站自动控制系统中的各个子系统和功能有一个系统的概念,着重讲述了几个主要的内容:(1)船舶自动化电站的基本功能以及集散型船舶电站自动控制系统结构图;(2)船舶自动化电站控制技术,主要涉及传感器技术、PLC 控制技术、现场总线控制技术、触摸屏控制技术、工业以太网控制技术等;(3)主柴油发电机组的自动控制;(4)发电机自动并车控制;(5)同步发电机的自动调频调载控制;(6)船舶同步发电机电压及无功功率的自动调整;(7)船舶应急电站自动控制;(8)船舶高压电力系统;(9)典型电站自动控制系统分析。

除讲述基本理论外,考虑到故障分析和排查的需要,对一些实际应用的电路图做了详细的说明。

本书由大连海事大学吴浩峻编著,张春来教授主审,孙才勤、史成军、康宝仲、赵楠楠、王满、张金男、王浩亮等参与了部分内容的编写工作。在编写过程中,得到了轮机工程学院领导、大连海事大学出版社的大力支持与帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中会有不足之处,诚请专家、读者多提宝贵意见。

编 者

2020 年 4 月

防疫期间自主学习使用

目 录

第1章 船舶自动化电站概述	1
1.1 船舶电站自动化的历史发展和发展前景.....	1
1.1.1 船舶电站自动化的历史发展.....	1
1.1.2 船舶电站自动化的发展前景.....	2
1.2 船舶电站自动化的规范要求.....	3
1.3 船舶自动化电站的基本功能.....	3
1.3.1 自动控制子系统.....	4
1.3.2 安全保护子系统.....	6
1.3.3 自动监测报警子系统.....	6
1.4 集散型船舶电站自动控制系统结构图.....	7
第2章 船舶自动化电站控制技术	11
2.1 传感器技术.....	11
2.1.1 传感器的定义.....	11
2.1.2 传感器的组成.....	11
2.1.3 传感器的输出信号.....	11
2.1.4 电站控制系统中的常用传感器.....	12
2.2 可编程控制 (PLC) 技术.....	16
2.2.1 PLC 在船舶电站中的应用.....	16
2.2.2 PLC 在船舶电站中应用的优越性.....	16
2.2.3 PLC 基本数据类型.....	17
2.2.4 数据存储区.....	18
2.2.5 寻址方式.....	20
2.2.6 高速计数器.....	21
2.2.7 中断的使用.....	23

2.3 现场总线控制技术	26
2.3.1 DCS 与 PLC 控制系统的区别	26
2.3.2 现场总线控制的特点	26
2.4 触摸屏控制技术	27
2.4.1 触摸屏在船舶电站中的应用	27
2.4.2 西门子 SMART LINE 触摸屏	27
2.4.3 触摸屏与 PLC 的连接与通讯	28
2.5 工业以太网控制技术	32
2.5.1 船舶电站以太网控制系统框架	32
2.5.2 以太网通讯中的几个重要概念及设备	32
2.5.3 网络的连通性测试	35
第3章 主柴油发电机组的自动控制	38
3.1 主柴油发电机组的自动起动与停机功能	38
3.1.1 备用机组的自动起动	38
3.1.2 主柴油发电机组的自动减机及停机	45
3.2 主柴油发电机组自动控制系统故障与处理	47
3.2.1 机组的自动控制电路	47
3.2.2 故障处理	48
3.3 主柴油发电机组的安全保护	50
第4章 发电机自动并车控制	52
4.1 发电机自动准同步并车装置的基本功能和原理	52
4.1.1 自动准同步并车装置的基本功能	52
4.1.2 自动准同步并车装置的工作原理	52
4.2 模拟式自动并车原理分析	53
4.3 数字式自动并车原理分析	60

第 5 章 同步发电机的自动调频调载控制	67
5.1 概述	67
5.1.1 发电机频率变化的原因	67
5.1.2 发电机频率变化的危害	67
5.1.3 调速器及其调速特性	68
5.1.4 频率及有功功率的调整	70
5.2 自动调频调载装置	71
5.2.1 模拟式自动调频调载装置	71
5.2.2 数字式调频调载装置	78
第 6 章 船舶同步发电机电压及无功功率的自动调整	84
6.1 发电机电压变化的原因、危害及调整措施	84
6.1.1 发电机电压变化的原因	84
6.1.2 发电机电压变化的危害	84
6.1.3 发电机电压变化后的调整措施	85
6.2 自励恒压装置的作用、技术指标、分类及调压原理	86
6.2.1 自励恒压装置的作用	86
6.2.2 自励恒压装置的技术指标	86
6.2.3 自励恒压装置的分类及调压原理	87
6.3 相复励自励恒压装置原理分析	89
6.3.1 不可控电流叠加相复励装置调压原理	89
6.3.2 发电机自励起压过程分析	93
6.3.3 电磁叠加相复励装置	94
6.3.4 相复励装置的调节	94
6.3.5 无刷同步发电机的可控电磁叠加相复励自励恒压装置 ..	95
6.4 并联运行发电机组间的无功功率分配	97

6.4.1	自励恒压装置的调压特性	97
6.4.2	船舶同步发电机组间无功功率自动分配	98
第7章	船舶应急电站自动控制	102
7.1	供电电源的自动转换	102
7.2	应急柴油发电机组的自动控制	106
第8章	船舶高压电力系统	111
8.1	船舶高压电力系统概述	111
8.2	船舶高压电力系统基本知识	112
8.2.1	高压电力系统的电压等级	112
8.2.2	高压电力系统的结构	112
8.2.3	高压电力系统的特点	112
8.2.4	船舶高压电力系统防护要求	114
8.3	船舶高压电力系统实例	114
8.4	船舶高压电力系统接地技术	116
8.4.1	不接地方式	116
8.4.2	直接接地方式	117
8.4.3	消弧线圈接地方式	117
8.4.4	高电阻接地方式	117
8.5	船舶高压电力系统的配电装置与发电机保护	117
8.5.1	高压配电装置	117
8.5.2	高压发电机保护	120
8.6	船舶高压电力系统安全操作及检修注意事项	121
8.6.1	安全操作规程	121
8.6.2	船舶高压开关柜的“五防”措施	123
第9章	典型电站自动控制系统分析	125

9.1 PPU 模块+PLC 控制的主要功能.....	125
9.2 PPU 模块介绍.....	126
9.3 PPU 模块+PLC 控制的电站自动控制系统结构框图.....	133
9.4 PPU-3 模块主要功能介绍.....	135
9.5 PPU-3 硬件电路模块及外部接线端子.....	136
9.6 PPU-3 控制器的外部接线及工作原理分析.....	137

防疫期间自主学习使用

第1章 船舶自动化电站概述

随着船舶的大型化和自动化程度的不断提高,越来越多的船用设备需要电能来驱动和控制,所以需要设置电站。

电站是船舶电力系统的核心,船舶电站自动化是船舶自动化的重要组成部分,其最主要的目的在于保证船舶供电的连续性、可靠性和供电品质。船舶自动化电站具有船舶发电机组自动起动、自动连接到不带电母线、自动并联、自动调频调载、重载询问、自动停机、自动卸除次要负载和自动分析功率储备等全部或部分功能的自动控制系统。电站运行的可靠性、经济性及自动化程度对保证船舶的安全运行有重要的意义。

1.1 船舶电站自动化的历史发展和发展前景

1.1.1 船舶电站自动化的历史发展

船舶电站自动化系统,大致经历了五个发展阶段。

20 世纪 60 年代,采用继电器控制技术及其后来的晶体管分立元件控制技术。如英国的 MMF 自动并车装置,日本的 XET 自动并车装置和 XPT 自动负载分配装置。

20 世纪 70 年代,采用小规模集成电路及其后来功能齐全、性能稳定的中大规模集成数字、模拟电路控制技术。到 70 年代中后期,人们在单元自动化装置的基础上,把它们系统地组合成成套电站自动化设备,系统可在集控室进行集中控制。如 SIEMENS 公司的 EEA-22 船舶电站自动控制系统,“里言斯顿”号船的 SEPA 电站自动化控制系统,日本“星光”号船的电站自动化系统等。

20 世纪 80 年代,采用微处理器 CPU 控制技术。进入 80 年代,世界各国都先后研制由单板机或单片机组成的微机控制系统。在 80 年代初期,国外研制成功了微型计算机单机控制系统,如我国远洋救助船“德大”轮上的日本大发公司配套的电站自动控制系统,丹麦 SEMCO 公司的 APM 电站自动控制系统。到 80 年代中后期,随着微机网络技术的日趋成熟,SIEMENS、AEG、TERASAKI、Kongsberg、ABB 等国际著名的大公司相继研制开发多微机分布式网络型船舶电站自动控制系统。

20 世纪 90 年代,采用可编程 PLC 控制技术。PLC 控制系统的可靠性已被世人所共识,其产品的通用性、仅需少量备件且易在世界各地购置而得到广大客户的青睐。在这一点上,SIEMENS 公司以其世界著名大公司的气魄于 90 年代初首先在机舱自动化控制设备中采用了通用性的 PLC 做为控制核心器件,淘汰了其 80 年代闻名于世的微机控制系统,如当年的 SIMOS32、DIFA41 等系列产品,而代之基于 PLC 的新一代控制系统,如当时 SIMOS PMA52、SIMOS RCS51、SIMOS IMA32C 等系列产品。到目前为止,PLC 控制的电站、主机遥控、集中监测报警等系统也已不断地更新换代,如船舶电站自动控制系统已由 SIMOS PMA52 发展到 SIMOS PMA53、SIMOS PMA71,主要是核心控制器件由原来的 SIMATIC S5-115U 被更小型的 SIMATIC S5-95U 所取代。

PLC 控制技术发展至今,形成了最可靠的船舶电站 PLC 自动控制系统,已成为大多数工程技术人士之共识,机舱自动化领域中 80 年代的由单板机或单片机组成的微机控制系统正逐步被 PLC 控制系统所取代。

随着计算机信息处理技术的发展,船舶电站自动化系统正朝着集散型控制系统(网络式或分布式控制系统)的方向发展。船舶自动化电站是集自动控制、报警监测于一体的监控系统,涉及到现代控制技术、通讯、信息处理、数字化信息技术、计算机网络等多学科和技术,船舶电站正以标准化、模块化、集成化、网络化等方式向船舶电站综合自动化的高级阶段发展。

1.1.2 船舶电站自动化的发展前景

随着船舶自动化程度的不断提高,电站自动化由局部控制发展到了综合控制,由单一的控制发展到集中的控制。

1. 系统控制的综合化

由于电气设备已经日趋通用化、模块化、系列化,可以做到组态灵活。计算机所有功能选择均能通过屏幕软件按钮直接完成,为系统监控的综合化提供了必要的基础。当然,根据需求不同仍旧存在着先进程度不同和性能要求不同的船舶,但是单机单控的系统必将逐步向综合监控的系统过渡。因为采用综合监控的形式,可以构成双重或多重冗余,对提高系统或全船整体可靠性具有积极的意义。

2. 系统的网络化

进入20世纪90年代后,随着现场总线技术的不断完善,在新造船舶中,越来越多地采用现场总线做为各个子系统的现场控制网络,上层网络采用局域网,形成全分布式的网络型监控系统。

当前,数字化技术和总线技术应用已经相当成熟。现场总线是一种互联现场设备(或模块)与控制系统之间的双向数字通信网络。通常采用双层网,第一层为数据采集与传送网,第二层为控制网。为保证系统的可靠性,控制网络可采用冗余结构。考虑到危险分散原则,按系统又分成若干子网,如:推进系统、管路系统、电力监控系统等独立子网。通过系统的网络化,功能上集各子系统之众,从可靠性出发又是一个分布式系统;在数据采集和控制平台上各子系统密切结合,但在系统结构上又是一个主动性极强的系统,在平台某系统局部受损时不影响独立工作;采用网络冗余和设备冗余设计及不间断后备电源,生存能力很强;具有图像控制功能,人机界面和对话效果良好。网络系统的优势在于采用数字化和高层次的自动化技术代替大量繁琐的人工操作,提高工作效率是显而易见的。它有助于减少频繁操作和减轻人员疲劳,把船员从环境恶劣的工作场合中解放出来。

在计算机、通信、显示和控制技术迅速发展且互相交叉渗透,还有人工智能和模糊技术的应用,将会给船舶电站自动化带来重大的变革。未来船舶电站的自动化系统会朝着自动故障预测、自诊断的方向发展,上位机将会实现专家系统等智能连接,船舶电站自动控制系统正在经历着从集中型计算机监控系统、分散型微机监控系统、集散型(分布式)多级多微机监控系统、网络型(智能式)计算机监控系统的发展。而这些技术的发展会使船舶工业朝着智能综合自动化、微机监视、智能控制、卫星通信导航、全球定位系统、船岸信息直接交流、全船自动化领域进一步发展。

1.2 船舶电站自动化的规范要求

电站自动化从属于轮机自动化,后者通常也叫机舱自动化。我国《钢制海船入级规范》对船舶的机舱自动化划分为三个级别:

BRC 标志级:它是指推进装置由驾驶室控制站遥控(通常叫主机遥控),机器处所(机舱)有人值班。

MCC 标志级:它是指机舱集控站(室)有人值班,对机电设备进行监控。

AUT-0 标志级:它是指推进装置由驾驶室控制站遥控,机器处所包括机舱集控站(室)周期无人值班。

AUT-0 标志级是机舱自动化的最高级别,通常也叫无人机舱。要求船舶自动化电站保证在无人值班的周期内连续正常运行,即要保证:

1. 若由一台发电机组运行供电,在该机组发生故障时,备用发电机组应能在 45s 内自动起动合闸,向船舶电网供电。

2. 若由两台以上的发电机组并联供电,在其中一台机组出现故障时,应有措施保证对重要负载的连续供电。

3. 因短路故障停电后,备用机组的自动合闸只允许进行一次,合闸失败后应报警。

4. 当运行发电机组超负荷时,应能自动卸除非重要负载,保证对重要负载的不间断供电;或自动起动用备用的发电机组并网供电。

5. 自动化电站应显示电压、频率及应急蓄电池组向临时应急照明供电的指示。

6. 自动化电站应实现电压过高或过低报警、频率过高或过低报警、自动卸载动作时报警、自动合闸失败报警、主开关脱扣报警、对地绝缘电阻低报警、应急蓄电池组向临时应急照明供电时报警等。

1.3 船舶自动化电站的基本功能

近年来,随着计算机技术、控制技术、通信技术以及网络技术等的不断发展,船舶电站自动化系统的结构也发生了很大变化,逐步形成以网络集成自动化系统为基础的船舶电站自动化控制、管理信息系统,目前船舶上已出现集监、控、管于一体的网络型船舶电站综合自动化系统,即船舶自动电站管理系统 PMS (Power Management System), 也称之为船舶电站自动控制系统。

所谓“船舶自动电站管理系统”是将船舶发电、配电、船舶设备用电统一调度和集中控制。船舶电站管理系统主要由发电系统管理模块、配电系统管理模块、用电设备管理模块、系统监测报警管理模块、电力优化分配和管理模块等若干模块组成。

做为电站自动控制的重要内容之一的励磁控制系统,现在一般均未包含在船舶电站管理系统(自动化电站)中。这是因为励磁控制系统是由发电机制造厂家配套生产的,是属于发电机的一部分,通常安装在发电机上。发电机制造厂家在船舶制造调试中,已能保证发电机电压调整及并联运行时无功分配均能满足船级社规范要求,在船舶营运中通常无需再做进一步的调整。

在常规电站中,调压、调速、并车、调频调载等功能多采用模拟控制器来实现;发电机自动起停、重载询问等功能多采用继电器、半导体逻辑电路或程序控制器来实现;在采用微处理器 CPU 控制的船舶电站自动控制系统中,则借助硬件电路,采用事先编写调试好的程序来实现电站自动化控制功能。

船舶电站自动控制系统一般由三大主要子系统组成，即自动控制子系统、安全保护子系统和自动监测报警子系统。

图 1-1 是船舶电站自动控制系统的功能框图，下面对这三个子系统的主要作用做简要介绍。

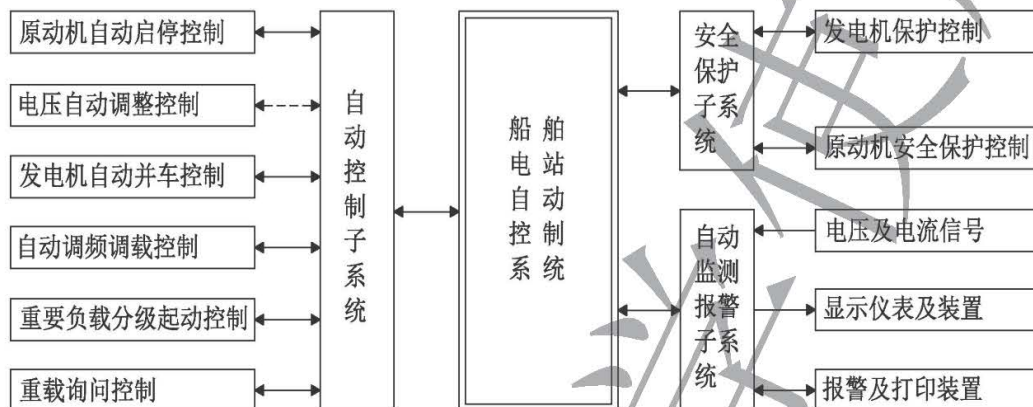


图 1-1 船舶电站自动控制系统功能框图

1.3.1 自动控制子系统

自动控制子系统是船舶电站的核心，它主要完成以下控制功能：

1. 电压自动调整

电压自动调整就是对发电机励磁电流的自动调节，从而使发电机输出电压稳定。衡量电压调节的性能指标有两个，即静态特性和动态特性。一般情况下，静态电压调整率应不超过额定电压的 $\pm 2.5\%$ ；动态电压调整率应不超过额定电压的 $\pm 15\%$ ，恢复时间不超过 1.5s（电压波动 $\leq 3\%$ 额定电压）。

2. 原动机预润滑预热控制

发电机组在长期不用或环境温度较低条件下，机组自动起动前首先要进行原动机的预润滑，主要是控制机组预润滑油泵投入运行一段时间，待机组起动成功后再停止，此后机组的润滑工作由机带润滑油泵承担；其次，是对机组冷却水的预热，自动起动冷却水加热装置给冷却水预热。一般冷却水预热装置有电预热和蒸汽预热两种。

3. 机组自动起动

机组自动起动应具有三次起动功能，若三次起动失败要给出报警指示。

在出现下列情况时，应使备用机组自动起动：

- (1) 电网失电
- (2) 运行机组平均功率大于 $85\%P_e$ （可调整）
- (3) 运行机组出现故障或停机
- (4) 重载询问时，若电站功率余量不够
- (5) 汇流排参数异常

(6) 备用机组起动失败或合闸失败

4. 首机自动投入

在电网失电时, 备用机组自动起动, 最先起动成功的备用机组投入电网运行。

5. 自动同步并车

电站系统需要增加机组时, 备用机组起动成功后, 自动进入同步并车程序, 并车一般需要满足四个条件: 1) 电压有效值相等; 2) 频率相同; 3) 相位角相同; 4) 相序相同。在四个条件满足后发出合闸信号, 一般合闸信号要提前 0.1s 发出, 并且待发电机频率要略大于电网频率。

6. 自动调频调载

对已投入电网运行的发电机组实现频率和有功功率分配的控制, 使各机组负载按比例分配, 一般负载分配差度小于 $\pm 5\%P_e$, 频率调节精度为 $50 \pm 0.25\text{Hz}$ 。

7. 自动解列

对已投入电网运行的发电机组, 出现下列情况时, 按顺序使运行机组逐个解列。

(1) 电网轻载, 在网运行机组平均功率小于 $35\%P_e$ 。

(2) 机组出现冷却水温度高、滑油压力低等机械故障报警。

(3) 有半自动解列指令, 且 $P = \sum_{i=1}^n P_i / (n-1) \leq 85\%P_e$ 。当解列机组的负载转移到

约 $5\%P_e$ 时, 发出分闸信号。

8. 机组自动停机

当投入电网运行的机组解列分闸后, 则该机组就自动停机。一般情况下, 机组出现以下情况之一则自动停机: 1) 机组出现严重故障; 2) 机组平均功率小于 $35\%P_e$ 。

9. 重载询问功能

由于船舶电站的容量小, 因此船舶上的负载尤其是大负载发生变化时会使电网频率及电压产生较大的波动。因此, 大功率负载启动时, 要求电网能够提供足够的功率余量。大功率负载启动之前, 首先向电站发出询问信号, 如果电网的剩余功率能够符合大功率负载启动条件, 那么大功率负载可以启动。否则, 电站控制系统首先控制备用发电机组启动并入电网供电, 直到功率满足条件后, 才允许大功率设备启动。

10. 重要负载分级起动

当船舶主电源因故障失电又恢复供电时, 为避免因负载同时起动造成的电流冲击, 甚至使发电机主开关再次跳闸, 自动电站能够对原来工作的重要设备按顺序进行分级起动, 按照在紧急状况下各负载的重要性排好先后次序, 并按其起动电流大小分组, 然后按程序逐级起动, 每两级起动之间的间隔为 $3 \sim 6\text{s}$ 。以下是某船舶五级起动的分级情况:

第一级 (0 秒, 可调): 舵机、通讯、照明、无线电、航行设备、自动化设备、航行灯、信号灯等。

第二级 (5 秒, 可调): 主滑油泵、主机缸套冷却淡水泵。

第三级 (10 秒, 可调): 主机十字头滑油泵、低温淡水冷却泵。

第四级（15 秒，可调）：主冷却海水泵。

第五级（20 秒，可调）：机舱风机。

1.3.2 安全保护子系统

船舶电站的安全保护子系统非常重要，它直接关系到船舶运行的安全。一般分为柴油机的安全保护和发电机的安全保护两类。

1. 柴油机的安全保护

主要包括：滑油压力过低应急停机；机组冷却水温度过高应急停机；机组超速应急停机等。

2. 发电机的安全保护

（1）过载保护：当运行机组输出功率或电流超过额定值时要进行过载保护。一般情况下过载保护有如下功能：当过载达 101%~120%额定值时，延时 5~10s，自动卸掉部分次要负载；当过载达 150%额定值时，延时 10~20s，使发电机主开关自动跳闸。

（2）发电机外部短路保护：对于带时限的发电机，当发电机电流为 2~2.5 倍额定电流时，延时 0.2~0.6s，使发电机主开关跳闸；对于不带时限的发电机，当发电机电流为 5~10 倍额定电流时，瞬时动作使发电机主开关跳闸。

（3）欠压保护：对带时限的发电机，当电压低于其额定电压 70%~80%时，延时 1~3s，发电机主开关跳闸；对不带时限的发电机，当电压低于其额定电压 35%~70%时，发电机主开关跳闸。

（4）逆功率保护：当发电机出现逆功，其逆功为 8~15%额定功率时，延时 3~10s，发电机主开关跳闸。

（5）其他保护：以上为船舶电站安全保护系统必须具备的功能，在特殊情况下还应该考虑过压、过频、欠频、差动保护和定子绕组内部短路保护。

1.3.3 自动监测报警子系统

船舶自动电站管理系统 PMS 具有信号采集单元，可以实时地采集船舶电站各设备运行的参数，这些信号参数不仅用于对船舶电站的控制，而且也用于对船舶电站设备运行状态的监测。各种信号参数通过传感器转换为电信号，数字信号直接传给主控制模块，模拟信号通过 A/D 转换为数字信号后传输给主控制模块。

自动监测报警子系统应具有对电站的运行情况进行实时显示、报警、记录和打印等功能，具体包括：

1. 显示和打印

包括各种测量参数的实时动态显示和打印，各种状态图的实时动态显示和打印。主柴油发电机组自动监测的项目和报警内容主要有：

（1）对柴油机：转速（点火转速、超速）；润滑油压力（压力低和过低）；冷却水出口温度（温度高和过高）；各缸排烟温度；柴油机运行时数累计等。

（2）对于发电机：电压、频率、功率、电流、功率因数。

（3）对于断路器：储能状态、合闸状态、断开状态。

(4) 对于电网：汇流排电压、频率；绝缘状态以及系统是否有接地（对于三相绝缘系统）等。

(5) 对系统状态及工作过程的监视与指示：机组的预热、预润滑；起动空气压力；各机组控制方式选择；正在起动；起动成功或失败；正在停机过程中；停机成功或失败；机组用完以及控制系统的工作电源等。

(6) 负载的电压、电流、功率等模拟量信号。

2. 自动记录

所有测量数据能进行自动记录，报警和消警信息也能自动记录。

3. 报警

当检测到系统运行参数不正常或船舶电站系统出现故障时，PMS 将立即发出声光报警，提示船舶操作者采取应对措施，并设有消声、消闪及试灯按钮。同时，PMS 会按故障性质对船舶电站进行相应的保护。

声光报警消音后不得影响后来的报警信号。灯光报警为闪光方式，确认后变平光。报警系统的线路要独立于控制线路，并具有灯光和声响的试验功能。

4. 报警闭锁

机组的起动和停机过程，会引起某些控制参数偏离整定值，因此，要能自动闭锁相应的报警线路，防止误报警。

1.4 集散型船舶电站自动控制系统结构图

船舶电站自动化系统发展至今，其结构与组成形式上主要分为两大类型，即基于数字-模拟集成电路构成的常规船舶电站自动化系统和基于 CPU 控制的船舶电站自动化系统。

集散型电站自动控制系统融合了单片机控制技术、PLC 控制技术、触摸屏控制技术、现场总线控制技术以及工业以太网控制技术，是以微处理器 CPU 为核心，将分散控制装置、通信设备和集中操作与信息综合管理结合在一起的新型工业控制系统。这类自动化系统在国内外船舶中逐年增多，它的技术指标、经济指标和可靠性指标更高，功能更强。它是开放式和网络化的未来船舶电站自动化的创新模式，具有自动化程度高、可靠性高、维护简便等特点。建立在网络通信基础上的集散型自动控制系统的出现，使船舶电站自动化开始进入一个全新的时代。

集散型电站自动控制系统的主要特点是把过去一台小型计算机独自承担的监控任务合理有序地分散到多个子系统，多个微处理器 CPU 分别实现对各个子系统的监测和控制，因此，分散控制和集中管理是其主要特征。

集散型控制系统与现场总线控制技术、网络控制技术相结合，是船舶电站自动控制系统的发展方向，也是目前新造船舶所采用的主流控制系统。

图1-2是比较典型的集散型电站自动控制系统结构框图。该系统分别由现场设备控制层、监控层和网络管理层组成三层网络监控系统，包含了船舶电站自动化应具备的各项功能，通过总线和工业以太网把它们有机组织在一起，各种功能相互独立又相互联系，共同完成船舶电站的自动化运行。

1. 现场设备控制层

自动电站管理系统PMS功能主要由三台发电机的PPU模块、可编程控制器PLC和触摸屏组成，做为集散型电站自动控制系统的现场设备控制层。一般是每台发电机组配置一套微处理器PPU控制装置，主要对发电机组的起动、停机、并联运行进行控制以及发生机电故障时实现自动处理等功能，上面还有一套微机（或PLC）控制装置主要进行功率管理及信息通信等系统管理控制。

在现场控制层，采集发电机及电网中大量的数据信息，反映现场设备的运行状态。现场设备控制层主要承担发电机组的起停控制、调频调载、并联运行控制、机组运行台数、大功率负载投入管理、机组故障处理等任务。通过总线通讯形成网络，将船舶自动化电站的数据及状态信息采集、传输、存储和处理，使数据资源在网内共享，便于实现系统的集散控制。

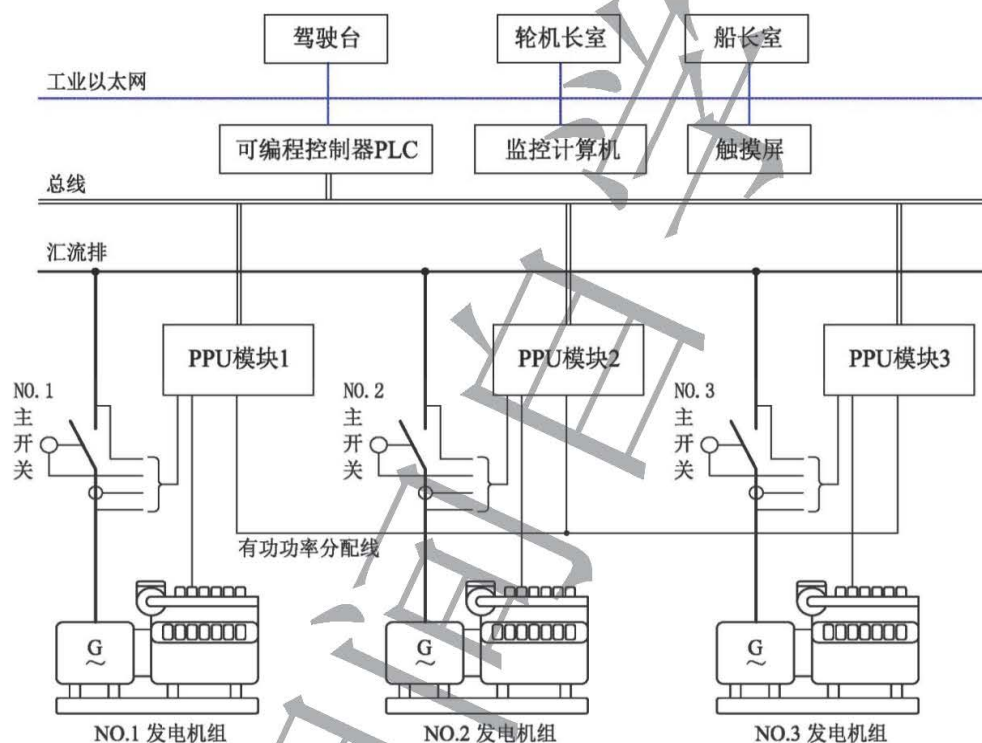


图1-2 典型的集散型电站自动控制系统结构框图

2. 监控层

一方面，对下连接现场设备控制层，收集现场数据，对其进行初步分析处理。监控层计算机通过WINCC、组态王等组态软件设置不同的监控画面，在画面中通过实时动画、状态显示开关及数字和模拟表头显示，实时显示船舶电站的运行状态，利用鼠标或功能按键可以完成对电站设备的操作，实现船舶电站的自动化管理；另一方面，向上连接网络管理层，接受管理层的各种指令，进行相应处理。

监控层在整个电站控制系统中起着承上启下的桥梁作用。监控层与网络管理层通过工业以太网通讯进行数据传递。

3. 网络管理层

主要包括驾驶室、船长室、轮机长室的计算机，在计算机上可以浏览监控画面，并且根据授权许可对现场设备进行操作。根据数据库中的大量数据信息，可以对船舶电站运行做出趋势分析，也可以通过海事卫星传递给岸基管理部门。

该系统中各PPU模块相互独立，发生故障只有局部影响，不会引发大的电站运行故障，保障系统的可靠运行。图1-3是主配电板实物图。



图1-3 主配电板实物图

本章小结

本章讲述的主要内容有：船舶电站自动化的历史发展和发展前景；船舶电站自动化的规范要求；船舶自动化电站的基本功能；集散型船舶电站自动控制系统结构图。

本章的重点内容如下：

1. 船舶电站自动控制系统的三大主要子系统，即自动控制子系统、安全保护子系统和自动监测报警子系统。PMS 的概念。
2. 典型的集散型电站自动控制系统结构框图。

复习思考题

- 1-1 《钢制海船入级规范》对无人机舱船舶自动化电站有哪些基本要求？
- 1-2 船舶电站自动控制系统一般由哪三个子系统组成。
- 1-3 船舶电站自动控制系统的自动控制子系统主要有哪些控制功能。
- 1-4 比较典型的集散型电站自动控制系统中，主要包括哪几个层级。

第2章 船舶自动化电站控制技术

船舶自动化电站是集自动控制、报警监测于一体的监控系统，涉及到传感器技术、PLC控制技术、现场总线控制技术、触摸屏控制技术、工业以太网控制技术等，船舶电站正以标准化、模块化、集成化、网络化等方式向船舶电站综合自动化的高级阶段发展。

2.1 传感器技术

2.1.1 传感器的定义

传感器能在规定的条件下，感受被测物理量，包括温度、压力、流量等，并按照一定规律变换成与之对应的有确定关系的有用信号（通常是电信号），满足信号传输、处理、记录、显示或控制等要求。传感器就是把非电量转换成电量的装置。由传感器的定义可知，其基本功能是检测信号和信号的转换。因此，传感器总是处于控制系统的最前端，用来获取检测信息，其性能将直接影响整个控制系统，对测量精度起着决定性的作用。

2.1.2 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件和其他辅助元件组成。但是随着传感器集成技术的发展，传感器的信号调理与转换电路，甚至显示部分也会安装在传感器的壳体内或者与敏感元件集成在同一芯片。因此，信号调理电路以及所需辅助电源都应做为传感器组成的一部分，如图 2-1 所示。



图 2-1 传感器组成框图

敏感元件：感受被测量，并输出与被测量成确定关系的其他量的元件。若敏感元件能直接输出电量（如热电阻、热电偶等），也可兼为传感元件。

转换元件：又称传感元件，是传感器的重要组成元件。它可以直接感受被测量（一般为非电量）而输出与被测量成确定关系的电量。传感元件也可以不直接感受被测量，而只感受与被测量成确定关系的其他非电量。例如差动变压器式压力传感器。

信号调理与转换电路：能把转换元件输出的电信号转换为便于显示、记录和控制的有效信号的电路。

2.1.3 传感器的输出信号

传感器输出信号可以分成两大类：

1. 开关量（或数字量）

常常与参数敏感元件配套使用的电气微动开关就是一例，这个微动开关成为控制电路中的一个“开/合”控制环节，借此发送开关量电信号。例如一个常用的压力开关，它主要是由开关壳体、弹性膜片、传动杠杆和电气微动开关组成的。气压从管路上输入，使膜片产生相应

变形, 气压的压力可以是连续的, 但只要它没有超过设定值, 电气微动开关始终保持初始状态, 控制线路就起不了作用; 如果压力越限, 膜片的变形已经足以通过传动杠杆使电气微动开关状态变化, 控制线路就立即起作用。从传递信号的性质来看, 这个微动开关就是一个把模拟量转换成开关量的转换环节, 输出只能是以“0”、“1”来表示的电信号。

2. 模拟量信号

模拟量输出信号具有随时间改变发生连续变化或以无限小的阶跃量变化的特点, 也即电流或电压的大小变化模拟被测物理量的大小。例如对温度、压力、流量等参数进行检测而得出电压、电流等模拟量信号。

对于模拟量输出信号来讲, 虽然传感器本身就是一个信号变换环节, 但是它所给出的信号通常还存在不规范、信号的数量级还比较低等问题, 因此常常把外加的信号调节转换电路同传感器串联起来, 以便获得如下的标准信号:

4~20 mA 或 0~20 mA 或 0~10 mA 的直流电流信号

0~10V 的直流电压信号

变送器是从传感器发展而来的, 凡能输出标准信号的传感器就称为变送器, 如压力变送器、温度变送器等。标准信号是物理量的形式和数值范围都符合国际标准的信号, 例如比较常用的 DC 4~20mA。有了统一的信号形式和数值范围, 就便于把各种变送器和仪表组成检测系统或调节系统; 输出为非标准信号的传感器, 必须和特定的仪表或装置配套, 才能实现检测或调节功能。为了加强通用性和灵活性, 某些传感器的输出可以通过转换器把非标准信号转换成标准信号, 使之与带有标准信号的输入电路或接口的仪表配套。

2.1.4 电站控制系统中的常用传感器

传感器种类很多, 主要有温度、压力、流量、液位、转速等传感器。

下面主要介绍在电站自动控制系统中常用的压力开关、热电阻式温度传感器、温度开关和磁电式转速传感器。

1. 压力继电器 (压力开关)

在电站自动控制系统中, 压力继电器用于检测柴油机运行时的滑油压力。在船舶中, 常用两个压力开关来实现滑油压力的报警和安保停机功能。

波纹管是压力测量仪表及传感器中的一种测压弹性元件, 如图 2-2 所示。它是具有多个横向波纹的圆柱形薄壁折皱的壳体, 波纹管具有弹性, 在压力、轴向力、横向力或弯矩作用下能产生位移。波纹管在仪器仪表中应用广泛, 主要用途是做为压力测量仪表的测量元件, 将压力转换成位移或力。波纹管管壁较薄, 灵敏度较高, 测量范围为数十帕至数十兆帕。另外, 波纹管也可以用做密封隔离元件, 将两种介质分隔开或防止有害流体进入设备的测量部分。它在船上多用于

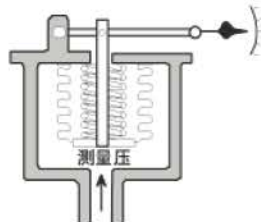


图 2-2 波纹管原理示意图



图 2-3 压力继电器外形图

压力继电器。

压力继电器又称压力开关,由压力/位移转换机构和电气微动开关等组成,前者通常包括感压元件、调压复位弹簧和限位机构等。图2-3是船上常用的YWK-50型压力继电器外形图,它属于波纹管式传感器,可用于气体、蒸汽等气体介质和液体介质,继电器的设定值可调,调节范围 $0.1\sim 4\text{MPa}$ 。它利用介质压力与弹簧力的平衡关系来开、闭电气微动开关触点,在介质压力上升或下降到由弹簧力预先调定的开、闭压力时,使微动开关触点通、断,控制电气元件(如电动机、电磁阀、各类继电器等)动作或者送入PLC的开关量输入通道,用以实现泵的起动或停止、执行元件的顺序动作或系统的安全保护和互锁等功能。

图2-4是双位压力继电器结构图,其工作原理是:将下部管子与被测介质密封连接,当被测压力上升到低限压力 P_L 时,波纹管4向上的顶力克服弹簧1的压力,左边的摆板5逆时针偏转,使微动开关6(低压开关)动作(常闭触点断开、常开触点闭合),改变其触点状态;随着压力继续升高,低压、高压开关状态均保持不变,直至压力升高至高限压力 P_H 时,微动开关7(高压开关)动作,改变其触点状态;当压力从高限降低时,高压开关7的状态又立即复原,但低压开关6的状态暂不变;直至压力继续降低至低限压力 P_L 以下,低压开关6的状态才复位。调节螺帽8和9,可分别调节低限压力和高限压力动作的整定值。

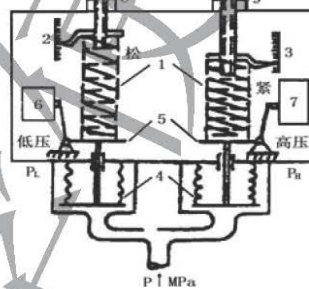


图2-4 双位压力继电器结构图

2. 热电阻式温度传感器

热电阻式温度传感器用于检测发电机定子绕组的温度。热电阻式温度传感器是利用金属材料电阻值随温度升高而增大,且在检测范围内它们之间保持良好线性关系的特性制造的。

图2-5是热电阻结构示意图及外形图,由电阻体、绝缘套管、保护套、接线端与接线盒五部分组成。常用铜丝或铂丝双线缠绕在绝缘骨架上,再把它插入保护套管内,装在要检测的管路或设备中。

常用的热电阻温度传感器有铂电阻和铜电阻两大类,常用的是Pt100和Cu50。

铜电阻在 $-50^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ 范围内,其阻值与被测温度之间具有良好的线性关系。铜电阻在高温下易氧化,实际使用时,最适于在 $-50^{\circ}\text{C}\sim +80^{\circ}\text{C}$ 范围内测量温度,很少用于测量超过 100°C 的温度。在目前船舶中极少使用铜电阻。

铂电阻具有较宽的测温范围,可以在 $-220^{\circ}\text{C}\sim +850^{\circ}\text{C}$ 范围内测量温度。在船舶中多使用铂电阻Pt100,表2-1是 $0^{\circ}\text{C}\sim +100^{\circ}\text{C}$ 的铂电阻分度表。当Pt100温度为 0°C 时它的阻值为100欧姆,在 100°C 时它的阻值约为138.5欧姆。



图2-5 热电阻结构图及外形图

表 2-1 Pt100 型铂热电阻分度表

温 度℃	电阻值 (Ω)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51
10	103.9	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.4
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.73	110.12	110.51	110.9	111.28
30	111.67	112.06	112.45	112.83	113.22	113.61	113.99	114.38	114.77	115.15
40	115.54	115.93	116.31	116.7	117.08	117.47	117.85	118.24	118.62	119.01
50	119.4	119.78	120.16	120.55	120.93	121.32	121.7	122.09	122.47	122.86
60	123.24	123.62	124.01	124.39	124.77	125.16	125.54	125.92	126.31	126.69
70	127.07	127.45	127.84	128.22	128.6	128.98	129.37	129.75	130.13	130.51
80	130.89	131.27	131.66	132.04	132.42	132.8	133.18	133.56	133.94	134.32
90	134.7	135.08	135.46	135.84	136.22	136.6	136.98	137.36	137.74	138.12
100	138.5	138.88	139.26	139.64	140.02	140.39	140.77	141.15	141.53	141.91

当被测温度变化时，热电阻的阻值也随之发生变化，而在自动监控系统所需要的是随温度变化的电流、电压等。为了获得反映被测温度的电流、电压信号，并使之有足够的信号幅度和测量精度，需要通过一定形式的电路来进行再次变换和放大。

图 2-6 是一种将被测温度变化转换成其阻值变化，再由电桥将电阻值的变化转换成输出电压变化的测温电路。该电路的输出电压可直接用于推动温度指示仪表以指示被测温度，也可以做为监控系统的输入电压信号。图中热电阻 R_t 是测温电桥的一个桥臂，在实际使用时放在测温现场，而电桥电路放在集控室，两者相距较远。连接热电阻的两根导线的电阻值会随环境温度的变化引起一定的测量误差。

为了消除引线电阻随温度变化所产生的误差，在实际测量电路中往往把“两线制”接法改为“三线制”，如图 2-6 所示。这时，图中 R_{ia} 和 R_{ib} 不再同属热电阻 R_t 的同一桥臂，而是分属两个相邻的桥臂。当环境温度变化时，这两根导线电阻值的变化可互相抵消，实现了对环境温度变化的补偿。 R_0 是调零电位器，当测量温度为 0°C 时，调整 R_0 使桥路输出 $U_{ab}=0$ 。

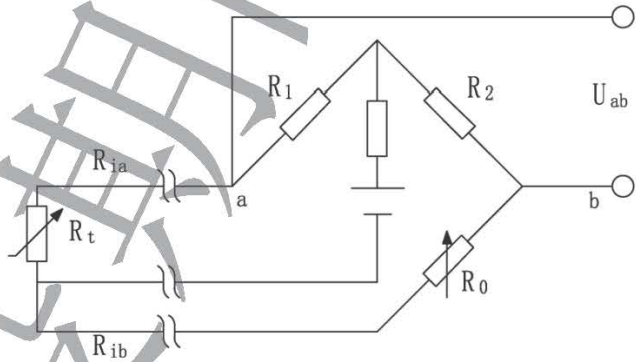


图 2-6 热电阻式三线制测温电桥原理图

3. 温度继电器（温度开关）

温度继电器用于检测柴油机运行时的冷却水温度。温度继电器又称温度开关，由毛细管温包式的传感器和电气微动开关等组成，前者通常包括毛细管温包、调压复位弹簧和限位机构等。图 2-7 是船上常用的 WTZK-50 压力式温度继电器（控制器），它属于波纹管式传感器，可用于对铜和铜合金无腐蚀作用的气体、蒸汽等气体介质或液体介质，控制器的设定值可调，调节范围为 $-60\sim 170^{\circ}\text{C}$ 。当被测介质温度升高时，插入其中的温度继电器的温包毛细管和波纹管中的感温剂气体膨胀，使波纹管伸长并克服弹簧的弹力控制微动开关动作；当温度降低时，感温包气体收缩，波纹管收缩与弹簧一起动作，使微动开关复位，如此反复动作，从而达到温度控制的目的。



图 2-7 压力式温度继电器

4. 磁电式转速传感器

转速传感器用于检测柴油机的实际转速。采用磁电式转速传感器，不需要辅助电源，通过飞轮凸齿改变磁通变化，经电磁感应输出感应电动势，该电动势波形类似于正弦波。在柴油机的主轴或凸轮轴上装一个齿轮（可利用盘车的齿轮）把磁头对准齿顶固定，磁头与齿顶之间保持一个较小的间隙。当齿轮转动时，磁头将交替对准齿顶和齿槽，即可输出一定幅值的正弦波信号。该正弦波信号接入可编程控制器的开关量输入通道，通过程序处理，即可得到柴油机的实际转速。

因此，在 CPU 控制的发电机组起动控制单元中，原动机转速的测量一般是以开关量的形式进入其输入通道；检测结果可用于判断柴油机是否起动成功、判断原动机是否超速。

磁电式转速传感器属于非接触式测速器件，它没有相对摩擦的运动部件，故这种传感器寿命长，能够适应柴油机本体强振动和高温的工作环境。它的结构原理及实物如图 2-8 所示。

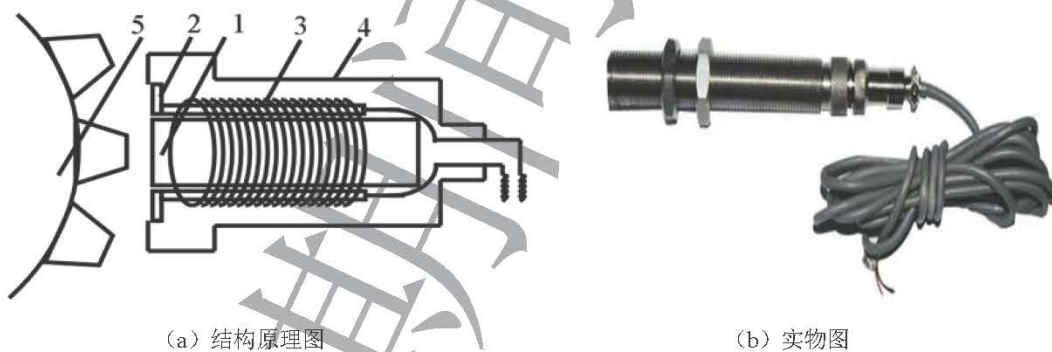


图 2-8 磁电式转速传感器

在永久磁铁 1 和软磁铁芯 2 上绕一组线圈 3，非导磁外壳 4 对线圈组件起保护作用。当齿轮转动时，磁头对准齿顶和齿槽会交替变化，使磁路磁阻变化，将引起线圈内磁通的变化，从而在线圈内产生感应电动势。

在磁电式转速传感器的实际安装和使用时,要注意:(1)磁头与齿顶之间的间隙约 $0.5 \pm 0.25\text{mm}$; (2)输出正弦波的幅值在 $12 \sim 20\text{V}$ 之间,与转速及间隙成正比。

假设齿轮齿数为 Z ,被测轴转速为 $n(\text{r/min})$, f 为感应电动势频率(Hz),磁头每转过一个齿(从齿顶到齿槽),线圈中磁通就变化一次,线圈中产生的感应电动势 e 也就变化一次,每秒钟电动势的变化次数(也即频率 f)也就是每秒钟转过的齿数,则:

$$f = Z \frac{n}{60}$$

根据上式,可以通过测得频率 f 值来获得被测轴的转速信号。

2.2 可编程控制(PLC)技术

2.2.1 PLC 在船舶电站中的应用

在20世纪80年代后期,船舶电站的自动控制形成了功能比较齐全、性能较稳定的由数字集成电路与线性模拟电路组成的控制系统。由于船舶机舱环境恶劣,微机控制系统在防电磁干扰上或多或少存在一些问题,因此电站的微机控制系统并没有被船电领域的一些著名企业所接受。20世纪90年代,PLC控制系统的可靠性已为世人所共识,其产品通用性强,仅需少量备件且易于在世界各地购置,因而得到广大客户的青睐。在这一点上SIEMENS公司以其世界大公司的气魄于20世纪90年代初首先在机舱自动化中采用了通用性的PLC做为控制核心器件,淘汰了80年代闻名于世的微机控制系统,而代之基于PLC的新一代控制系统。到目前为止,PLC控制的船舶电站、主机遥控、集中监测报警等系统也已不断更新换代。

PLC是通用型工业控制器件,因其稳定可靠、功能齐全、应用灵活、操作方便及维修容易等显著优点,在各行各业已得到广泛的应用。PLC做为自动控制的三大技术支柱(PLC、机器人、CAD/CAM)之一,成为大多数自动化系统的设备基础。由于综合了计算机和自动化技术,使PLC技术的发展日新月异,不但可以很容易地完成逻辑、顺序、定时、计数、数字运算、数据处理等功能,而且可以通过输入输出接口建立与各类生产机械数字量和模拟量的联系,从而实现生产过程的自动控制。特别是超大规模集成电路的迅速发展以及信息、网络时代的到来,扩展了PLC的功能,使之具有很强的联网通讯能力,从而更广泛地应用于众多行业。PLC控制系统中模拟量控制模块,其功能由软件完成,系统的精度由位数决定,不受元件影响,因而可靠性更高,容易实现复杂的控制和先进的控制方法,可以同时控制多个控制回路和多个控制参数。

目前,PLC可以实现多台PLC之间或多台PLC与计算机之间的通讯联网要求,从而组成多级分布式控制系统,构成自动控制网络。联网的方式主要有:(1)通过通讯模块、上位机以及相应的软件来实现对控制系统的远距离监控。(2)通过调制解调器和公用电话网与远程客户端计算机相连,从而使管理者可通过电话线对控制系统进行远距离监控。

2.2.2 PLC 在船舶电站中应用的优越性

1. 抗干扰能力强、稳定性好、可靠性高、

在继电器接触器的控制系统中, 由于恶劣的工作环境, 这些电器元件很容易出现老化、脱焊、接触不良等故障, 使控制系统的稳定性变差。但是采用 PLC 为核心控制器的系统中, PLC 内部的辅助继电器 (软继电器) 可以取代大部分中间继电器和时间继电器, 同时 PLC 能够在高电磁干扰及复杂多变的环境下稳定运行。

2. 丰富的 I/O 接口模块

PLC 不仅提供了工程上所常用的 I/O 模块, 还提供了各种的通讯接口模块、人机对话的接口模块等。

3. 采用模块化结构

为了满足各种工业要求, 大部分 PLC 采用电源、CPU、I/O、通讯模块等模块化设计。

4. 系统的设计、调试周期短

PLC 利用软件编程的方式来完成对系统的控制功能, 软件编程与硬件开发相比, 工作量大大减少, 同时工程人员可以在实验室条件下进行模拟运行调试, 使现场的工作量大大减少。

5. 安装简单、维修方便

PLC 能在各种工业环境下稳定运行, 使用时只需将 PLC 相应的 I/O 口与现场的各种设备连接起来即可。PLC 的可靠性高、稳定性强、故障率很低, 并且具有完备的自诊断和显示功能。

2.2.3 PLC 基本数据类型

结合 PLC 技术在电站控制系统中的应用, 本节以 S7-200 SMART 为例, 讲解 PLC 的基本数据类型。

1. 位 (bit)

常称为 BOOL (布尔型), 只有两个值: 0 或 1。如: I0.0, Q0.1, M0.0, V0.1 等。

2. 字节 (Byte)

一个字节 (Byte) 等于 8 位 (Bit), 其中 0 位为最低位, 7 位为最高位。如: IB0 (包括 I0.0~I0.7 位), QB0 (包括 Q0.0~Q0.7 位), MB0, VB0 等。范围: 00~FF (十进制的 0~255)。

3. 字 (Word)

一个字 (Word) 等于 16 位 (Bit), 相邻的两个字节 (Byte) 组成一个字 (Word), 用来表示一个无符号数。如: IW0 由 IB0 和 IB1 组成, 其中 I 是存储区标识符, W 表示字, 0 是字的起始字节。需要注意的是, 字的起始字节 (如例中的“0”) 都必须是偶数。字的范围为十六进制的 0000~FFFF (即十进制的 0~65536)。在编程时, 如果已经用了 IW0, 再用 IB0 或 IB1 就要特别注意。

4. 双字 (Double Word)

一个双字 (Word) 等于 32 位 (Bit), 相邻的两个字 (Word) 组成一个双字, 用来表示一个无符号数。如: MD100 是由 MW100 和 MW102 (也即 MB100\MB101\MB102\MB103) 组成的, 其中 M 是存储区标识符, D 表示双字, 100 是双字的起始字节。需要注意的是, 双字的起始字节 (如例中的“100”) 和字一样, 必须是偶数。双字的范围为十六进制的 0000~FFFFFFFF (即十进制的 0~4294967295)。在编程时, 如果已经用了 MD100, 再用 MW100 或 MW102 要特别注意。

5. 16位整数 (INT, Integer)

整数为有符号数, 最高位为符号位, 1表示负数, 0表示正数。范围为-32768~32767。

6. 32位整数 (DINT, Double Integer)

32位整数和16位整数一样, 为有符号数, 最高位为符号位, 1表示负数, 0表示正数。范围为 -2147483648~2147483647。

7. 浮点数 (R, Real)

浮点数为32位, 可以用来表示小数, 在计算机中用以近似表示任意某个实数。

2.2.4 数据存储区

PLC编程需要使用各种各样的数据, 不同的数据存放在CPU不同的存储区中。熟悉CPU的存储区是编程的前提。S7-200 Smart的存储区可以分为两大类: 一是跟外部物理信号相关的输入/输出映像区/存储区; 二是CPU内部的存储区;

1. 输入/输出映像区/存储区

包括以下两个映像区和两个存储区:

(1) 数字量输入映像区 (DI, process-image input), CPU在每个扫描周期的初期将物理外设的数字量输入信号扫描到数字量输入映像区 (DI) 中。

(2) 数字量输出映像区 (DO, process-image output), 程序在运行过程中的数字量输出值暂存在数字量输出映像区 (DO) 中, 并在扫描周期的末期将数字量输出映像区的值刷新到物理输出模块。数字量输入/输出映像区是可读且可写的, 在程序中对某些数字量输入位进行写操作, 便可以模拟外部的数字量输入信号。

(3) 模拟量输入存储区 (AI), 模拟输入 (AI) 存储区是只读的 (Read Only)。

(4) 模拟量输出存储区 (AO), 模拟量输出 (AO) 存储区是只写的 (Write Only)。

CPU对模拟量的处理有所不同, 模拟量的值存放在模拟量输入/输出存储区中。注意, 模拟量的存放区被称为“存储区”而不是“映像区”或者“缓存区”。对于程序中使用的模拟量, 是直接从存储区进行读取或写入的。

2. 内部存储区

内部存储区的类别比较多, 包括:

(1) 变量存储区 (V, Variable memory), 可以按位、字节、字或双字来存取 V 区数据。变量存储区 (V) 用来存放程序在运行过程中的中间变量或者需要的数据。

(2) 标志存储区 (M, Flag memory), 可以按位、字节、字或双字来存取M区数据。标志存储区 (M) 用来存放逻辑运算的中间结果 (标志, flag); 其实, 在编程时, 变量存储区和标志存储区没有明显的界限, 也可以用变量存储区来存放逻辑运算的中间结果。两者都可以位、字节、字或者双字的方式进行访问, 其区别在于变量存储区 (V) 比标志存储区 (M) 要大很多。比如, 在CPU SR20中, 变量存储区的范围为VB0到VB8191; 而标志存储区的范围为MB0到MB31。程序运行过程中需要的数据, 需要在数据块 (Data Block) 编辑器中设置并存放在变量存储器 (V) 中。

(3) 定时器存储区 (T, Timer), 用于时间累计。S7-200 Smart定时器的时间基准有1ms, 10ms和100ms三种。定时器有两种变量: 当前值 (Current value) 和定时器位 (Timer bit)。

当前值是一个16位的无符号整数，用来记录当前的时间；定时器位是一个位（bit），用来记录定时器是否已经被触发（当前值大于设定值）。以定时器的地址（T+number）既可以访问当前值，也可以访问定时器位，取决于访问指令的类型。位操作指令访问的是定时器的位，字操作指令访问的是定时器的当前值。如图2-9所示：

程序段1是定时器指令T37，在M0.0为1时，启动定时器。

程序段2是读取定时器T37的位，并将其输出到Q0.0，属于位操作。

程序段3是读取定时器T37的当前值，并将其存放到VW100，属于字操作。

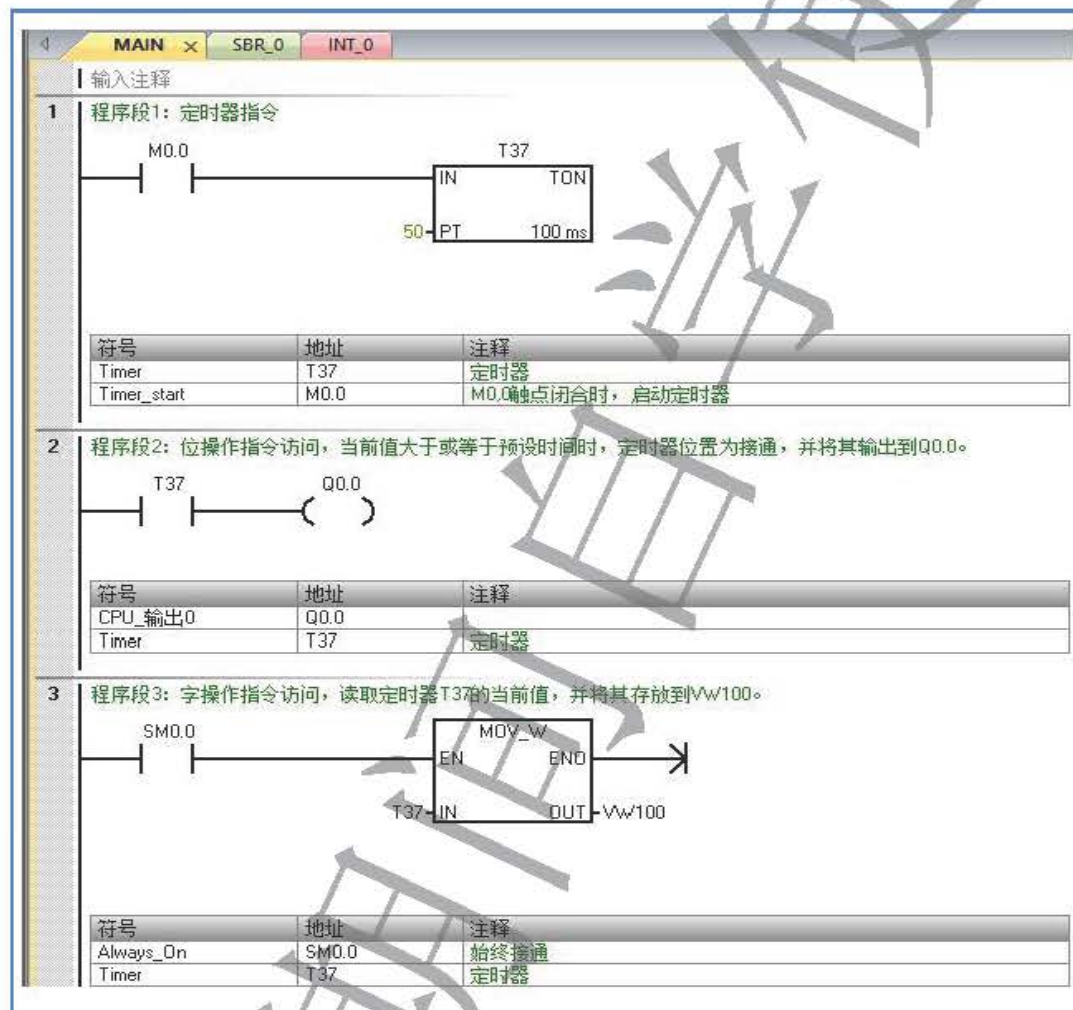


图 2-9 定时器位操作及字操作指令梯形图

(4) 计数器（C，Counter），用于累计其输入端脉冲电平由低到高的次数。S7-200 Smart 提供三种计数器：向上计数器、向下计数器和上下计数器。与定时器类似，计数器也有一个当前值（16位无符号整数）和一个计数器位（bit），其地址是以字母C加上编号（比如C10）。使用字操作指令可以访问计数器的当前值，使用位操作指令可以访问计数器的位。

(5) 高速计数器 (HC, high speed counter), 独立于 CPU 的扫描周期, 对高速事件进行计数, 可以用来对高速信号 (比如脉冲) 进行计数。高速计数器的值是一个 32 位的有符号整数, 其性质为只读 (Read Only), 可以通过高速计数器的地址 (HC+number) 进行访问。

(6) 累加器 (Accumulator), 可以像存储器一样使用的读/写器件, 可以按位、字节、字或双字访问累加器中的数据。

(7) 特殊存储器 (SM, special memory), 提供了在 CPU 和用户程序之间传递信息的一种方法。可以使用这些位来选择和控制 CPU 的某些特殊功能, 可以按位、字节、字或双字访问 SM 位。特殊存储器 (SM) 存放着与系统运行有关的特殊变量, PLC 的操作系统会将系统状态等信息写入到特殊存储器中, 用户程序通过访问特定的特殊存储器, 就可以获取一些系统级的信息。比如, SM0.0 始终为 1, SM0.5 会产生 1s 的时钟脉冲等。

(8) 局部存储区 (L, Local memory), 用于向子例程传递形式参数。

(9) 顺序控制继电器存储区 (Sequence Control Relay), 用于将机器或步骤组织到等效的程序段中, 实现控制程序的逻辑分段。可以按位、字节、字或双字访问 S 存储器。

2.2.5 寻址方式

所谓“寻址”, 是指 CPU 根据程序中变量的地址, 找到其对应的物理地址的过程。CPU 将信息存储在不同存储区, 每个位置均具有唯一的地址。寻址时, 数据地址以代表存储区类型的字母开始, 随后是表示数据长度的标记, 然后是存储单元编号; 对于二进制位寻址, 还需要在一个小数点分隔符后指定位编号。

位地址元素	说明
M 3 . 4	A 存储区标识符
Ⓐ Ⓑ Ⓒ Ⓓ	B 字节地址: 字节 3
	C 分隔符 (“字节.位”)
	D 位在字节中的位置 (位 4, 共 8 位, 编号 7 到 0 的位)
	E 存储区的字节
	F 选定字节的位

图2-10 位寻址举例

1. 位寻址

位寻址是直接访问存储区中的某一位 (bit) 的寻址方式, 其语法规则为:

存储区标识 + 物理地址 + “.” + “位地址”

图2-10是位寻址举例, 存储区和字节地址 (“M3”) 代表 M 存储器的第 3 个字节, 用句点 (“.”) 与位地址 (位 4) 分开。

2. 字节寻址

字节寻址是访问存储区的某个字节、字或者双字的寻址方式。其语法规则为:

存储区标识 + 访问宽度 + 物理地址

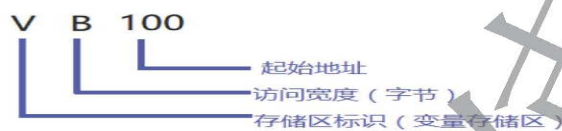
其中，访问宽度包括三种类型：

B：表示访问一个字节（Byte）

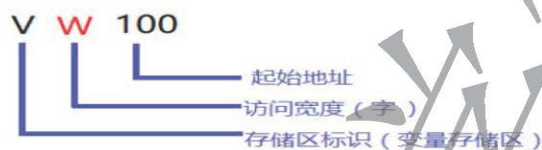
W：表示访问一个字（Word）

D：表示访问一个双字（Double Word）

如果要访问变量存储区V的第100个字节，写做：VB100，其各部分的含义如下：



如果要访问V存储区的第100个字节开始的一个字（两个字节），要写做：VW100，如下：



如果要访问V存储区的第100个字节开始的一个双字（四个字节），要写做：VD100，如下：



使用“字节地址”格式可按字节、字或双字访问多数存储区（V、I、Q、M、S、L 和SM）中的数据。从上述例子可以看出，VW100包括VB100和VB101；VD100包括VW100和VW102，即VB100，VB101，VB102，VB103这4个字节。这些地址是互相交叠的。

2.2.6 高速计数器

高速计数器是指能计算比普通扫描频率更快的脉冲信号，它的工作原理与普通计数器类似，只是计数通道的响应时间更短。

PLC中普通计数器的最短计数周期为程序的扫描周期，是按照顺序扫描的方式进行工作。在每个扫描周期中，对计数脉冲只能进行一次累加；随着系统程序增加，则计数周期也将随之增加，这样PLC就无法检测到比程序扫描周期更短的脉冲信号，造成系统出错。

PLC高速计数器和PLC程序是两个不同的内部机构。PLC程序是扫描机制，读取的对象是输入映像存储器的数据。普通计数器测量外部信号时，需要经过扫描周期刷新过程映像区，才能判断信号输入。而PLC高速计数器测量外部信号时，不是读取输入映像存储器的数据，而是直接读取输入点的数据，不受扫描周期影响。因此，PLC高速计数器一旦启动，其专用的输入点就不再刷新其对应的输入映像存储器。

一般高速计数器可以与编码器结合使用，例如用来进行精确定位控制或测量位移等。采用高速计数器进行多点定位，主要为了精确定位，而定位精度既决定于高速计数器的测量，

也决定于执行机构的快速性。如果采用普通输出指令，在一个扫描周期的程序执行阶段，改变的是输出映像存储器的值，PLC输出点不会立即刷新，只有在程序执行完毕后，PLC的输出映像存储器才能对输出点刷新，执行输出。因此，为增加定位精度，尽量采用立即输出指令，高速计数器不受扫描周期影响，可以立即刷新PLC输出点，提高程序执行的速率。

1. 高速计数器HSC计数模式

高速计数器一共可使用四个HSC设备（HSC0、HSC1、HSC2和HSC3），其中HSC0和HSC2支持八种计数模式（模式0、1、3、4、6、7、9和10）；HSC1和HSC3只支持一种计数模式（模式0），如表2-2所示。

表2-2 S7-200SMART HSC模式和输入分配

模式	说明	输入分配		
	HSC0	I0.0	I0.1	I0.4
	HSC1	I0.1		
	HSC2	I0.2	I0.3	I0.5
	HSC3	I0.3		
0	具有内部方向控制的单相计数器	时钟		
1		时钟		复位
3	具有外部方向控制的单相计数器	时钟	方向	
4		时钟	方向	复位
6	具有2个时钟输入的双相计数器	加时钟	减时钟	
7		加时钟	减时钟	复位
9	A/B 相正交计数器	时钟A	时钟B	
10		时钟A	时钟B	复位

2. 高速计数器的编程使用

可以使用高速计数器向导简化HSC编程任务，如图2-11所示。通过HSC向导可选择计数器类型/模式、预设值/当前值和计数器选项，并会生成必要的特殊存储器分配、子例程和中断例程。

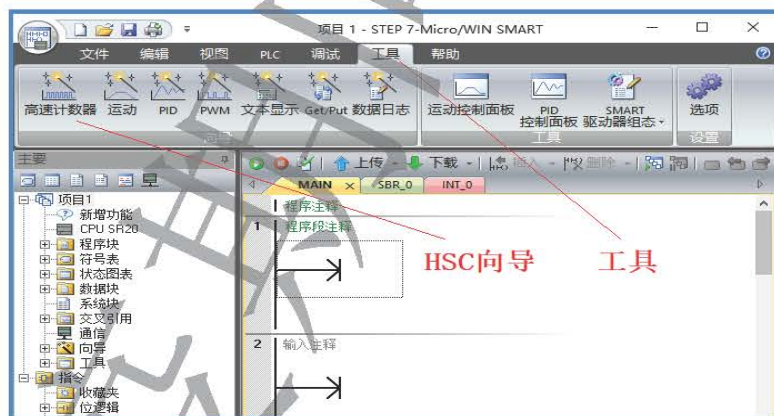


图2-11 高速计数器HSC向导窗口

2.2.7 中断的使用

1. 中断的概念

PLC 的中断功能和单片机的中断功能相似,当随机的中断事件发生时,CPU 将中止当前运行的主程序,并保存断点,去执行为立即响应的信号而编制的中断服务程序,执行完毕自动返回原先中止的主程序并继续执行。能够向 PLC 发出中断请求的事件叫中断事件,如外部开关量输入信号的上升沿或下降沿事件、通信事件、高速计数器的当前值等于设定值等。PLC 事先并不知道中断事件何时发生,可根据中断事件的出现情况,及时发出控制命令,调用处理特殊情况的中断服务程序,进而实现对现场设备的实时控制。中断程序是为处理中断事件而事先编好的程序。中断程序不是由主程序调用,而是在中断事件发生时调用。

S7-200 SMART 系列可编程控制器最多有 38 个中断源(8 个预留),分为三大类:通信中断、输入/输出(I/O)中断和时基中断,S7-200 SMART 规定的中断优先由高到低依次是:通信中断、I/O 中断和时基中断。每类中断中不同的中断事件又有不同的优先权。表 2-3 是列举的部分中断事件。

表 2-3 部分中断事件

事件	说明	CR40	SR20/ SR40/ST40 SR60/ST60
0	上升沿 I0.0	Y	Y
1	下降沿 I0.0	Y	Y
2	上升沿 I0.1	Y	Y
3	下降沿 I0.1	Y	Y
4	上升沿 I0.2	Y	Y
5	下降沿 I0.2	Y	Y
6	上升沿 I0.3	Y	Y
7	下降沿 I0.3	Y	Y
8	端口 0 接收字符	Y	Y
9	端口 0 发送完成	Y	Y
10	定时中断 0 (SMB34 控制时间间隔)	Y	Y
11	定时中断 1 (SMB35 控制时间间隔)	Y	Y

2. 中断指令

中断指令主要有 4 条,包括中断允许、中断禁止、中断连接、中断分离,如表 2-4 所示。要注意的是:一个中断事件只能连接一个中断程序,但多个中断事件可以调用一个中断程序。表 2-5 是中断指令的有效操作数。

表 2-4 中断指令的格式及功能

梯形图LAD	语句表STL		功能
	操作码	操作数	
	ENI	无	中断允许指令ENI，开放中断处理功能。中断事件的每次出现均被排队等候，直至使用全局开中断指令重新启用中断。
	ATCH	INT, EVNT	中断连接指令ATCH，将中断事件（EVNT）与中断程序号码（INT）相连接，并启用中断事件。表2-4是中断指令的有效操作数。
	DISI	无	中断禁止指令DISI，禁止处理中断服务程序，但中断事件仍然会排队等候。
	DTCH	EVNT	中断分离指令DTCH，将中断事件号（EVNT）与中断服务程序（INT）之间的关联切断，并禁止该中断事件。

表 2-5 中断指令的有效操作数

输入/输出	数据类型	操作数
INT	BYTE	常数：中断例程编号（0 到 127）
EVNT	BYTE	常数：中断事件编号（CPU CR40： 0-13、16-18、21-23、27、28 和 32；CPU SR20、SR40、ST40、SR60、ST60： 0-13、16-18、21-28、32 和 35-38）

3. 中断程序实例

假设要通过中断实现如下功能：在 PLC 的 I0.0 输入端接入一个常开 NO 按钮，当按钮被按下时，触发上升沿中断使 Q0.0 置位；在 PLC 的 I0.1 输入端接入另一个常开 NO 按钮，当按钮被按下时，触发上升沿中断使 Q0.0 复位。

使用 PLC 的中断一般有如下三个步骤，如图 2-12 所示：

（1）使用中断连接指令 ATCH。首先查出 I0.0 上升沿的中断事件号是 0，则在 EVNT 参数中写入 0，在 INT 参数中写入 INT_0。也就是说，当 I0.0 闭合的瞬间，立即进入 INT_0 这个中断子程序中去执行程序；查出 I0.1 上升沿的中断事件号是 2，则在 EVNT 参数中写入 2，在 INT 参数中写入 INT_1。也就是说，当 I0.1 闭合的瞬间，立即进入 INT_1 这个中断子程序中去执行程序。

（2）开中断 ENI。

（3）在要调用的中断子程序中，编写程序。在子程序 INT_0 和 INT_1 中分别编写中断服务程序。

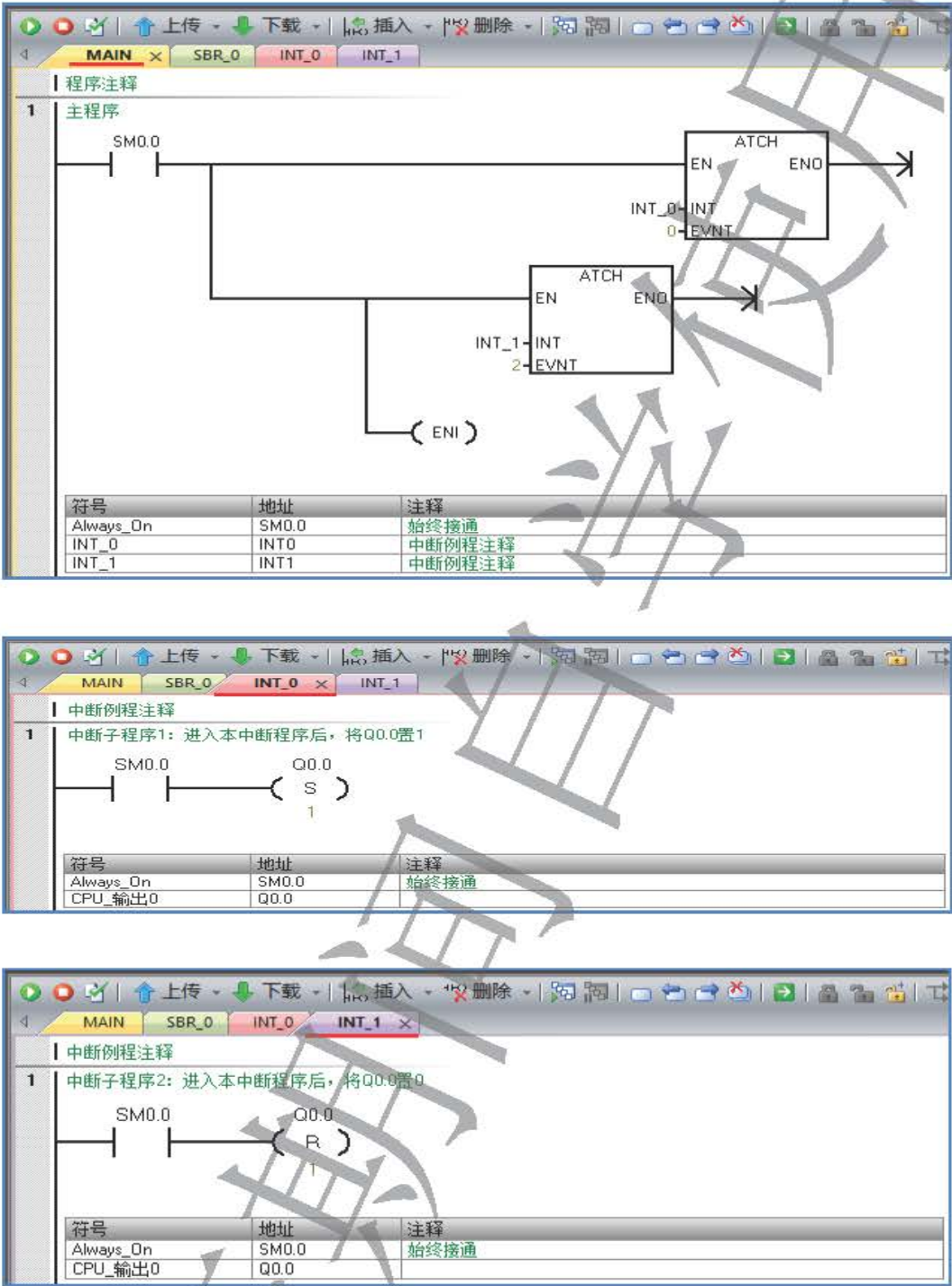


图 2-12 中断程序实例

2.3 现场总线控制技术

随着信息技术的飞速发展,自动化系统结构发生了显著变革,逐步形成了以网络集成自动化为基础的信息系统,现场总线正是顺应这一形势而发展起来的控制技术。现场总线控制系统FCS(Fieldbus Control System)是利用现场总线做为各个子系统的内部控制网络,将监控功能进一步下放到现场。FCS是由集散型控制系统DCS(distributed control systems)发展起来的,但和DCS相比有了质的飞跃。

2.3.1 DCS 与 PLC 控制系统的区别

DCS 侧重于过程控制领域(如化工、冶炼、制药等),主要是一些现场参数的监视和调节控制,而 PLC 则侧重于逻辑控制(机械加工类)。当然,现在的 PLC 也能很好的处理过程控制问题,但是没有 DCS 专业。模拟量大于 100 个点以上的,一般采用 DCS;模拟量在 100 个点以内的,一般采用 PLC。DCS 是一种“分散式控制系统”,而 PLC 只是一种控制“装置”,两者是“系统”与“装置”的区别。系统可以实现任何装置的功能与协调,PLC 装置只实现本单元所具备的功能。

2.3.2 现场总线控制的特点

FCS 的典型特点是由分散控制到现场控制,数据的传输采用“总线”方式,利用智能 I/O 模块、智能变送器、数字传感器和执行器等在现场一级实现系统的控制,由现场智能设备(监控分站)完成数据采集、数据处理、控制运算和数据输出等功能,所有数据和指令通过双向现场总线传输,实现信息资源共享,因此提高了现场信息的可利用程度,增强了整个系统的可靠性。在现场总线控制系统中,每增加一个设备,只需要就近“并联”接入到现场总线即可,成本大幅减少,同时支持多个主机,使得整个系统瘫痪的概率大幅降低。

由于采用了开放的现场总线通信协议,所以实现了控制设备的互换性和互操作性,使得监控系统、船舶电站自动化系统、船舶主机遥控系统、船舶机舱工况巡回检测报警系统等船舶机舱大型自动化系统之间互联更为方便,整个控制系统就像是一台巨大的“计算机”按总线方式运行,这样,资源的共享成了 FCS 的主要发展空间,为船舶电站自动控制系统的构建与实现打下了坚实的基础。图 2-13 是船舶电站现场总线控制系统结构框图。

随着各项技术的发展和现场总线型控制系统的进一步完善,可以预期,船舶上将不断出现集监、控、管于一体的网络型电站自动化产品。

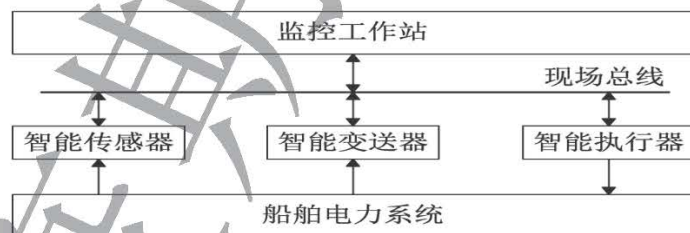


图 2-13 船舶电站现场总线控制系统结构框图

现场总线是自动化领域中发展很快的互连通信网络,具有协议简单开放、容错能力强、实时性高、安全性好、成本低、适于频繁交换等特点。目前,国际上各种各样的现场总线有几百种之多,统一的国际标准尚未建立。较著名的有基金会现场总线(FF)、HART现场总线、CAN现场总线、LONWORKS现场总线、PROFIBUS现场总线、MODBUS、PHEONIX公司的INTERBUS、AS-INTERFACE总线等。

现场总线技术是当今自动化领域技术发展的热点之一。采用现场总线后具有以下优点:

1. 系统的操作性好。不同厂家的多个设备可以工作在同一个系统中,并实现信息交换,从而使用户可以自由选择不同厂商所提供的设备来集成系统。
2. 控制的可靠性高。由于现场总线设备的智能化、数字化,使控制更快、更准确。
3. 安装的费用较低。采用现场总线连接多个设备,大大减少了电缆、接线端子、电缆桥架的用量。从而减少了设计、施工的工作量,并降低了安装的费用。
4. 系统的维护方便。现场总线设备本身具有自诊断能力,并通过数字通讯将有关诊断维护信息传送到控制室,设备维护人员可以查询整个生产设备的运行、维护。

2.4 触摸屏控制技术

2.4.1 触摸屏在船舶电站中的应用

随着控制技术的不断发展,触摸屏与可编程控制器在工业控制中的应用越来越广泛。触摸屏又称可编程终端(Programmable Terminal),简称PT,它是新一代高科技图形化人机界面产品。它具有强大的显示功能和操作功能,既可以对生产现场、设备进行实时显示和监控,同时又可以在其屏上设置触摸开关,对设备进行操作。

无论在显示、操作、调试或是数据存储上,触摸屏都显示出比传统的显示界面如数码管、液晶屏更加强大的优势。它不但可以完全替代一般的显示仪表、信号指示灯、操作按钮、转换开关等,而且还能以实时刷新的动态图表、丰富详实的数据记录、独树一帜的三维动画、图文并茂的制作画面广泛应用在各种控制领域。

通过触摸屏人机交互界面显示并存储电站实时运行参数及历史数据,在出现故障的情况下产生并存储相应报警信息,提供历史数据及报警信息的查看、打印及传输等功能。触摸屏通过Modbus工业以太网发布监控界面,网内任何计算机可以通过不同级别用户名和密码访问监控界面,实现数据信息的查看和打印,在权限允许的情况下可以对电站进行遥控操作。

2.4.2 西门子 SMART LINE 触摸屏

西门子触摸屏SMART LINE系列为用户提供了触摸屏的基本功能,它经济性好,功能完善,可以与多种类型的西门子PLC进行通讯,在自动化控制系统中有着广泛的应用,为用户提供了人机交互友好的操作方法。它的硬件部分具有强大的功

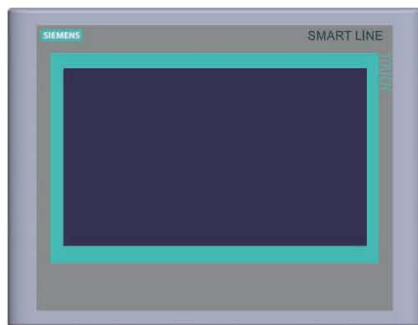


图2-14 SMART LINE触摸屏外观图

能，为用户提供了多种功能，使得用户可以充分利用这些功能完成对自动化系统的控制。图 2-14 是 SMART LINE 触摸屏外观图，它的硬件特点如下：

1. 高分辨率宽屏显示

采用高分辨率 64K 真彩色，画面更清晰，整个画面中可以显示很多信息，也可以使用户感觉更舒适。

2. LED 背光

采用 LED 背光，可以降低设备能耗，结合屏保功能可以延长操作屏的使用寿命。通过控制面板，可以实现西门子触摸屏的组态功能。

3. 通讯功能强大

集成有以太网口，可以和西门子 PLC S7-200 系列、西门子 PLC S7-200 smart 系列之间建立通讯连接；除此之外，它还可以通过串口与西门子 PLC S7-200 系列、西门子 PLC S7-200 smart 系列进行通讯。

4. 处理器性能高

采用高端的 ARM 处理器，主频高，使得数据处理速度快，画面显示流畅，增强的内存使得画面的切换速度更快。

2.4.3 触摸屏与 PLC 的连接与通讯

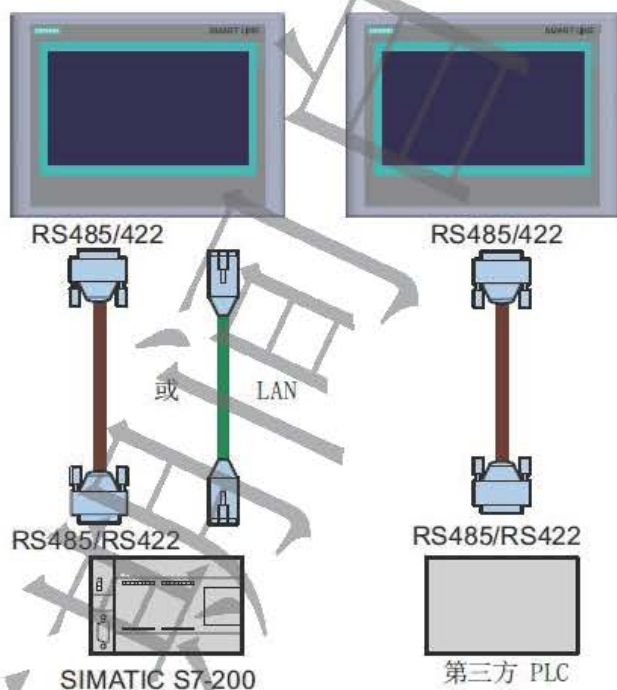


图 2-15 触摸屏与 PLC 的硬件连接

在触摸屏与 PLC 组成的控制系统中，触摸屏完成对设备的操作、显示、报警，PLC 则根

据系统控制的要求, 编制程序, 直接对设备进行控制。触摸屏替代原控制中的显示仪表、操作面板, PLC替代原控制中的控制盘, 这种方式摒弃了传统电气控制中的继电器、指示仪表、操作开关, 变硬件设备为软件设备, 具有占地少、控制精度高、功能强、可编程、智能化等诸多特点。当前在一些控制要求较高、参数变化多、硬件接线有变化的场所, 触摸屏与PLC控制形式已占主导地位。

下面以可编程控制器S7-200SMART与SMART LINE触摸屏的连接为例, 来说明开关量与模拟量的连接与通讯过程。

1. 触摸屏与 PLC 的硬件连接

如图2-15所示, 触摸屏可以通过RS485/422 端口或以太网接口将SmartPanel与SIMATIC S7-200/S7-200CN 以及 SIMATIC S7-200SMART 互连; 也可以通过使用RS485/422 端口与第三方PLC连接, 包括: 三菱FX系列, 欧姆龙CP1H、CP1L、CP1E-N系列、施耐德的Modicon系列(Quantum/M340/Momentum)、Delta DVP-SV系列/DVP-ES2系列。

2. 触摸屏参数设置及通讯连接

(1) 新建项目

打开触摸屏编程用WinCC flexible 软件, 点击“项目”的“新建”, 选择相应的触摸屏型号(SMART 700 IE V3), 点击“确定”, 如图2-16所示。

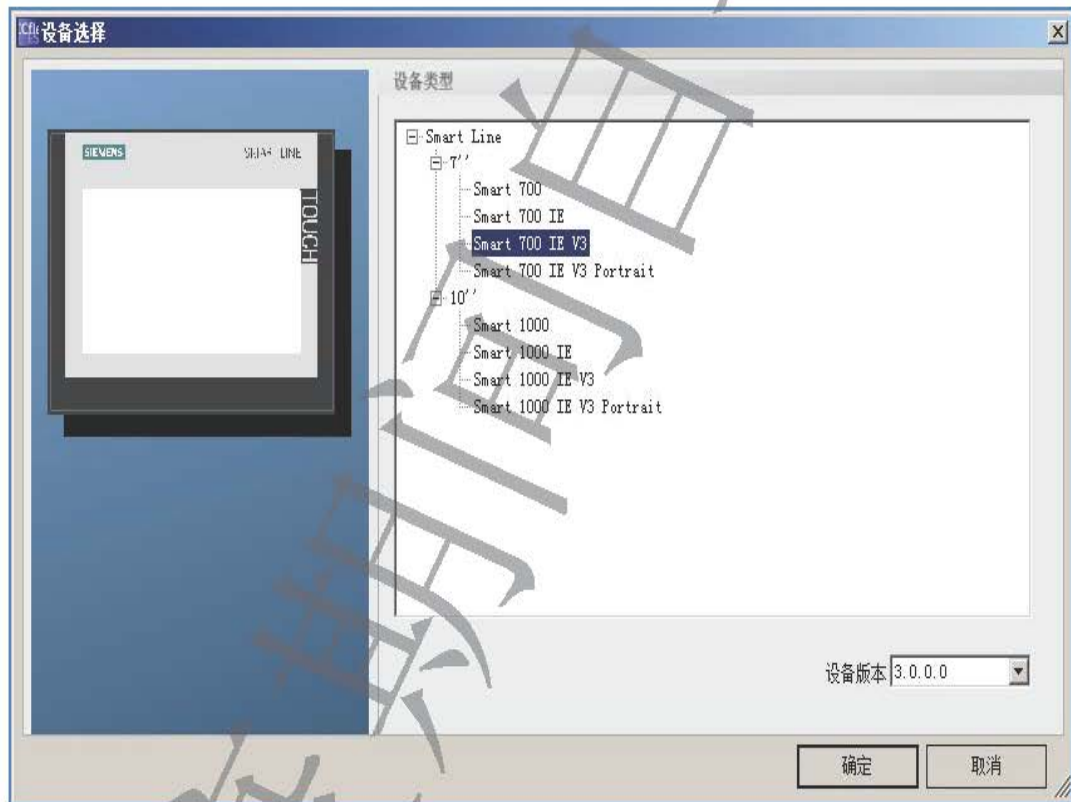


图2-16 触摸屏的设备选择界面

(2) 新建连接

如图 2-17 所示, 双击“通讯”下的“连接”, 在“通讯驱动程序”下选择“SIMATIC S7 200SMART”通讯驱动程序; 在“参数”中: “接口”选择“以太网”; 在“HMI 设备”中: “地址”填入触摸屏的 IP 地址 (如: 192.168.1.11); 在“PLC 设备”中: “地址”填入转换模块的 IP 地址 (如: 192.168.1.41), 其它设置默认。

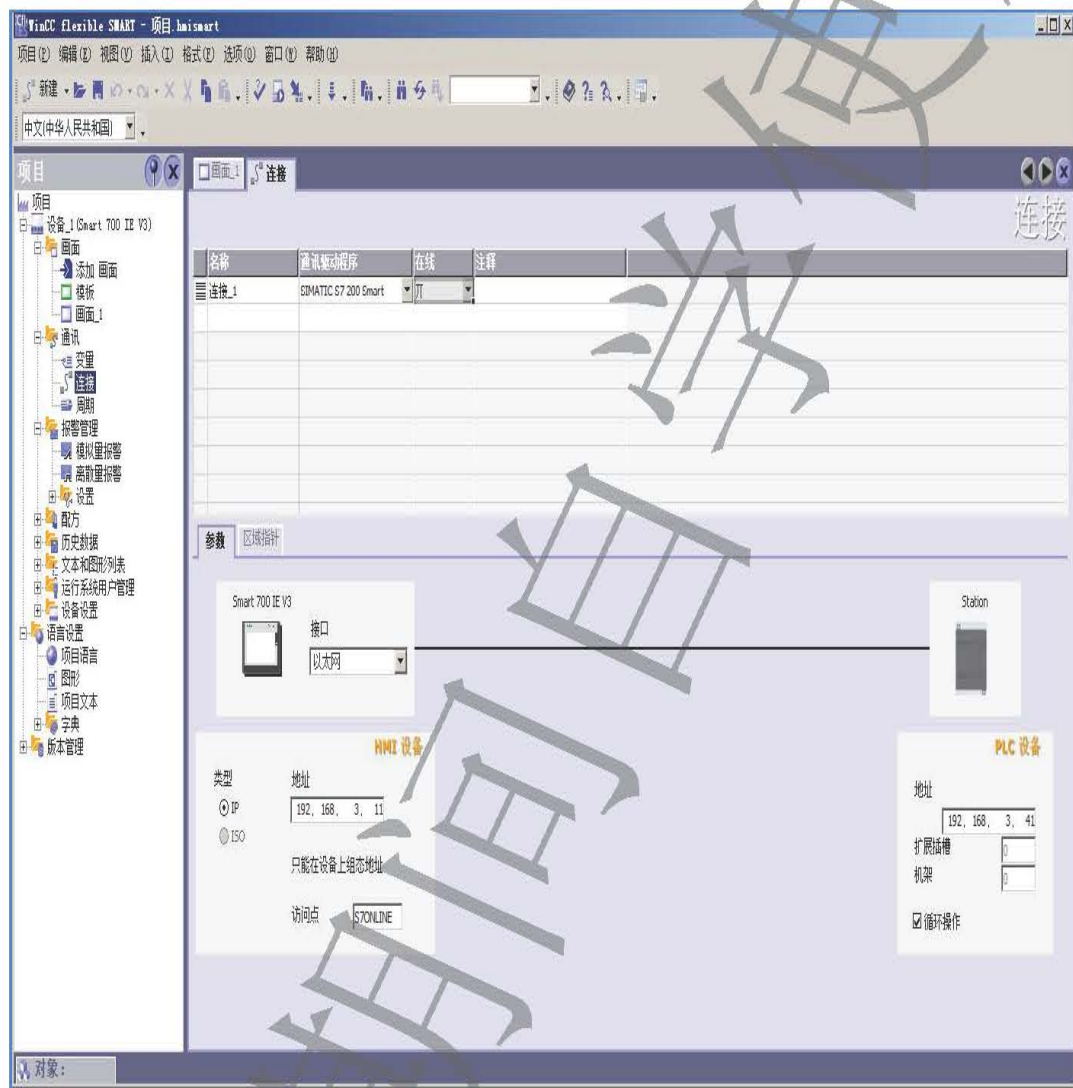


图 2-17 触摸屏与 PLC 的通讯设置界面

(3) 变量连接

在“通讯”下的“变量”界面, 设置触摸屏与 PLC 的变量连接关系, PLC 与西门子 SMART 触摸屏地址对应关系如图 2-18 所示。

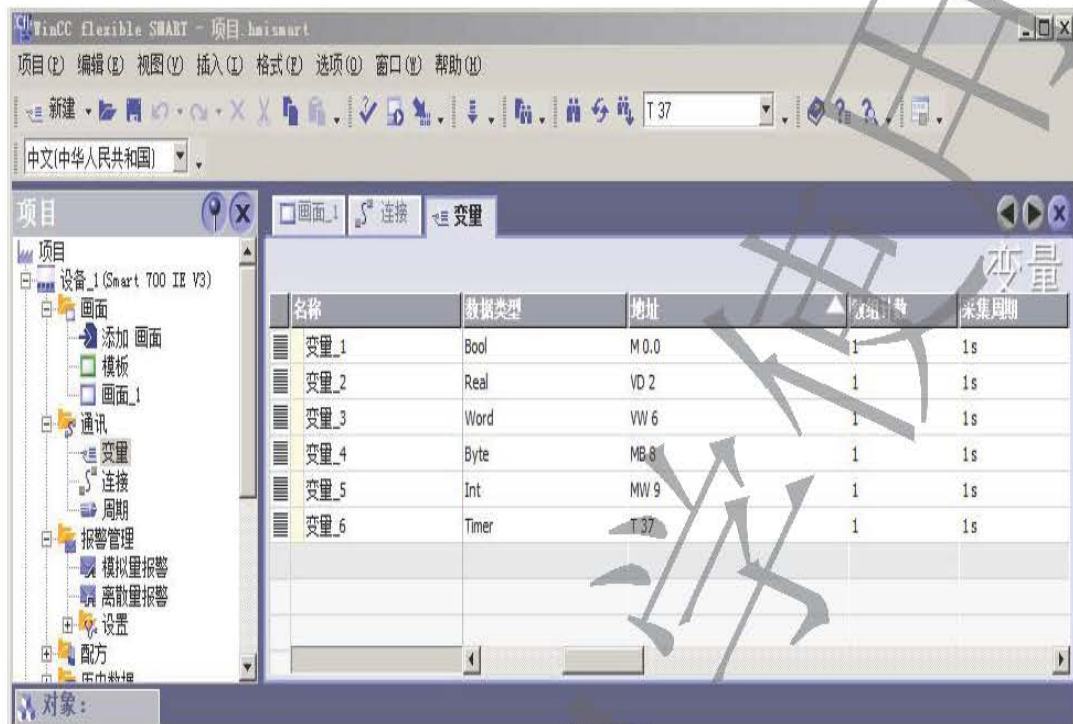


图 2-18 触摸屏与 PLC 的变量连接关系

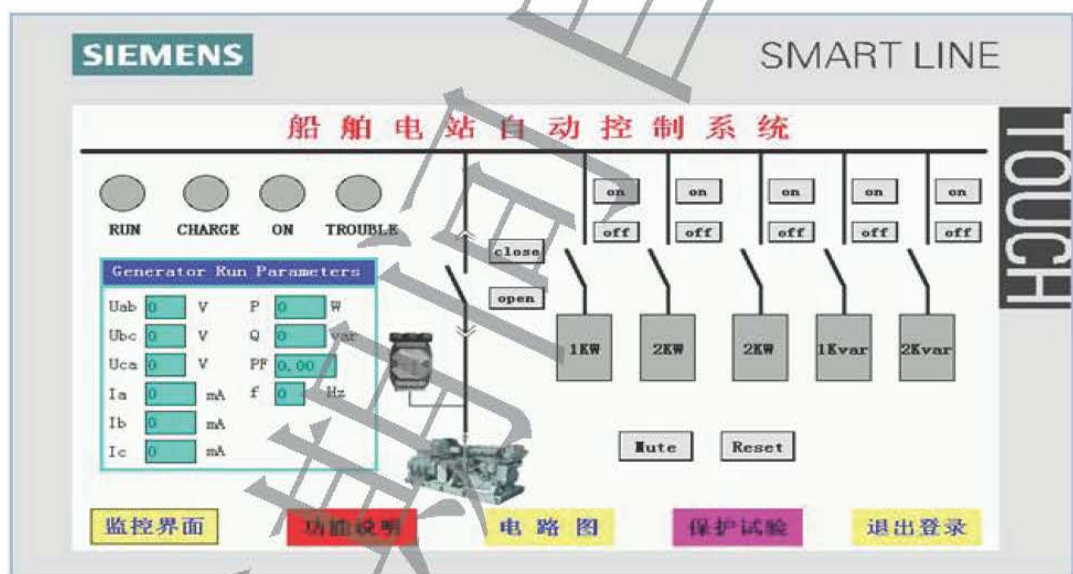


图 2-19 触摸屏的画面组态界面

(4) 画面组态

变量建立完成后, 就可以“添加画面”进行画面组态, 在画面中制作按钮、开关、指示灯

等控件，完成各控件的常规设置和动画设置等。如图 2-19 所示是制作完成的画面组态界面。

2.5 工业以太网控制技术

随着数字技术、工业通信技术和计算机技术等的发展，虽然现场总线系统具有开放性、可互操作性、分散性等特点，但由于现场总线的多样性和难以统一带来的问题，使得现场总线技术难以得到大面积的推广应用，并在一定程度上阻碍了现场总线技术的发展。控制网络采用标准化的工业以太网技术成为必然结果。不仅如此，现场级触摸屏、PLC、驱动器、执行机构等也必将支持工业以太网及TCP/IP 协议，工业控制系统最终发展成为决策管理层（包含传统的决策层和管理层）和控制网络层（包含传统的控制网络和现场总线层）都采用标准化的工业以太网的无缝信息集成系统，这将能够适应智能制造时代对工业通信的更高要求。

2.5.1 船舶电站以太网控制系统框架

图2-20是船舶电站的工业以太网硬件架构图，整个系统由Profinet工业以太网连接起来，其中3个PLC做为下位控制器分别承担并车管理、应急管理及岸电管理任务，实现“分散控制”功能；上位机有一个安装有西门子TIA Portal软件的PC机做为工程师站，构成SCADA

（Supervisory Control And Data Acquisition）数据采集与监控系统平台，另一个是西门子公司的KTP600触摸屏，构成HMI（Human Machine Interface），起操作员站的作用，KTP600和PC机两者共同完成“集中管理”任务，本系统的控制层和信息管理层处在一个工业以太网物理平台。

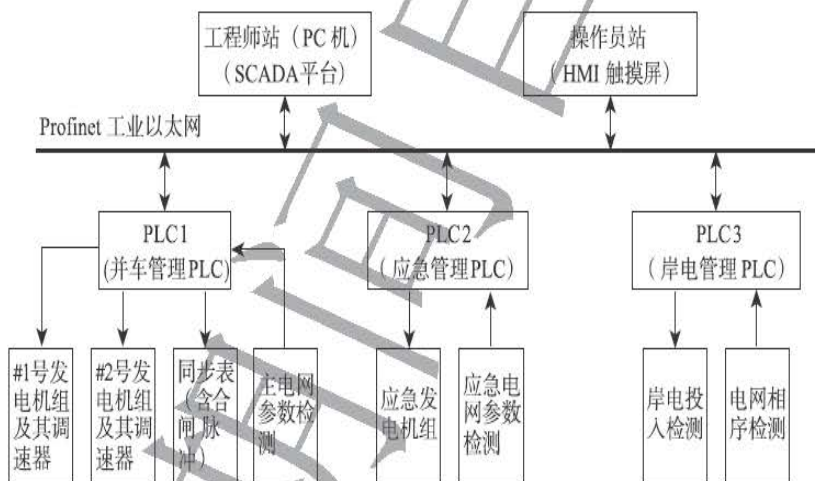


图2-20 船舶电站的工业以太网硬件架构图

2.5.2 以太网通讯中的几个重要概念及设备

1. IP地址

IP地址（Internet Protocol Address）是给每个连接在internet上的主机分配的一个32bit地址，

用点分十进制数表示。

例如, 10000000.00000001.11111111.11111110, 表示为: 128.1.255.254。

IP地址在软件系统中设定, 每个端口可有多个网络地址, 网间寻址时使用, 一般在所有网络内有效, 类似于通信地址。

IP地址只是主机在网络层中的地址, 若要将网络层中传送的数据包交给目的主机, 必须知道该主机的物理地址。

2. 物理地址 (MAC地址)

MAC地址 (Media Access Control) 是网络上的设备的唯一地址, 由48bit (6个字节) 组成。MAC地址固化在物理设备 (网卡) 上, 每个端口仅有一个物理地址, 访问物理介质时使用。

对于网络上的某一设备, 如一台计算机或一台路由器, 其IP地址是基于网络拓扑设计出来的, 同一台设备或计算机上, 改动IP地址是很容易的 (但必须唯一); 而MAC地址则是生产厂商烧录好的, 一般不能改动。我们可以根据需要给一台主机指定任意的IP地址, 如我们可以给局域网上的某台计算机分配IP地址为192.168.0.112, 也可以将它改成192.168.0.200。而任一网络设备 (如网卡, 路由器) 一旦生产出来以后, 其MAC地址不可由本地连接内的配置进行修改。如果一个计算机的网卡坏了, 在更换网卡之后, 该计算机的MAC地址就变了。

3. 子网掩码

子网掩码的作用就是将某个IP地址分为网络地址和主机地址。子网掩码不能单独存在, 它必须和IP地址一起使用。

子网掩码的设定必须遵循一定的规则。与IP地址相同, 子网掩码的长度也是32位, 左边是网络位, 用二进制数字“1”表示; 右边是主机位, 用二进制数字“0”表示。

常用的子网掩码有数百种, 现以小型局域网中常用的子网掩码255.255.255.0为例说明如下:

IP地址为“192.168.1.1”和子网掩码为“255.255.255.0”的二进制对照。其中, 在子网掩码中, “1”有24个, 代表与此相对应的IP地址左边24位是网络地址; “0”有8个, 代表与此相对应的IP地址右边8位是主机号, 最后面一个数字可以在0~255范围内任意变化, 因此可以提供256个IP地址。这样, 子网掩码就确定了一个IP地址的32位二进制数字中哪些是网络地址、哪些是主机地址, 以及这个网络所能连接计算机的规模。这对于采用TCP/IP协议的网络来说非常重要, 只有通过子网掩码, 才能表明一台主机所在的子网与其他子网的关系, 使网络正常工作。

子网掩码应该根据网络的规模进行设置。如果一个网络的规模不超过254台电脑, 采用“255.255.255.0”做为子网掩码足够, 现在大多数局域网都不会超过这个数字, 因此, “255.255.255.0”是最常用的IP地址子网掩码。如果校园网中超过254台电脑, 则局域网的子网掩码可以使用“255.255.0.0”。

4. 网关

网关实质上是一个网络通向其他网络的IP地址。比如有网络A和网络B, 网络A的IP地址范围为“192.168.1.1~192.168.1.254”, 子网掩码为255.255.255.0; 网络B的IP地址范围为

“192.168.2.1~192.168.2.254”，子网掩码为255.255.255.0。在没有路由器的情况下，两个网络之间是不能进行TCP/IP通信的，即使是两个网络连接在同一台交换机（或集线器）上，TCP/IP协议也会根据子网掩码（255.255.255.0）判定两个网络中的主机处在不同的网络里。

而要实现这两个网络之间的通信，则必须通过网关。如果网络A中的主机发现数据包的目的主机不在本地网络中，就把数据包转发给它自己的网关，再由网关转发给网络B的网关，网络B的网关再转发给网络B的某个主机，如图2-21所示。网络B向网络A转发数据包的过程也是如此。所以说，只有设置好网关的IP地址，TCP/IP协议才能实现不同网络之间的相互通信。

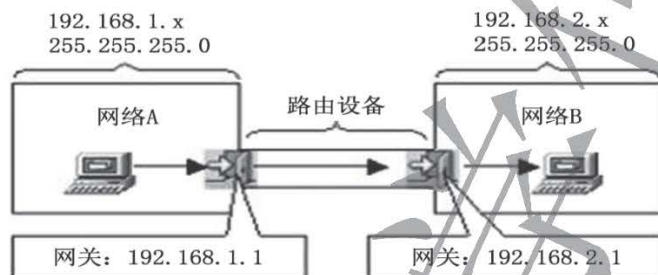


图2-21 不同的局域网通过网关连接图

5. 集线器HUB

集线器是一种共享的网络设备，连接在集线器上的任何一个设备发送数据时，其他所有设备必须等待，此设备享有全部带宽，通讯完毕，再由其他设备使用带宽。所有设备相互交替使用，就好像大家一起过一根独木桥一样。

集线器不能判断数据包的目的和类型，所有的数据以广播方式发送给每个接口，它的工作方式即为广播方式。集线器属于纯硬件网络底层设备，不具有“记忆”和“学习”的能力。集线器是为优化网络布线结构、简化网络管理而设计的，主要用于小型局域网的连接。

图2-22是广播方式数据传输图。总线上的每一个工作的计算机都能检测到B发送的数据信号；由于只有计算机D的地址与数据帧首部写入的地址一致，因此只有D才接收这个数据帧；其他所有的计算机（A、C和E）都检测到不是发送给他们的数据帧，因此就丢弃这个数据帧而不能够接收下来；具有广播特性的总线上实现了一对一的通信。

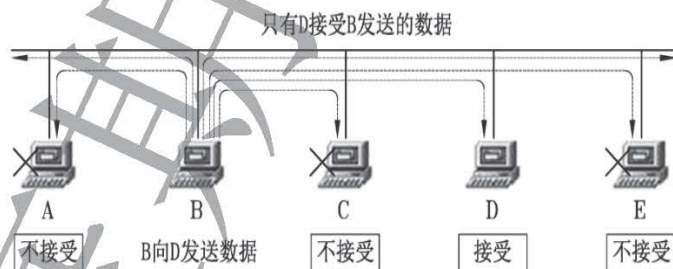


图2-22 广播方式数据传输图

6. 交换机

交换机是集线器的升级换代产品,从外观上来看,与集线器基本上没有多大区别,都是带有多个端口的长方形盒状体。

交换机的特点是独享带宽,交换机之所以能够直接对目的节点发送数据,就是因为交换机可以识别连接在网络上的节点的网卡MAC地址,并把它们放在一个叫做MAC地址表的地方。这个MAC地址表存放于交换机的缓存中,并记住这些地址,这样一来,当需要向目的地发送数据时,交换机就可在MAC地址表中查找这个MAC地址的节点位置,然后直接向这个位置的节点发送。

7. 路由器

路由器是把数据从一个网络发送到另一个网络,这个过程就叫路由。路由器有自己的操作系统,需要人员调试,否则不能工作。

与交换机只能识别MAC地址不同,路由器识别IP地址,路由器的主要功能就是连接不同的网络,如图2-23所示。

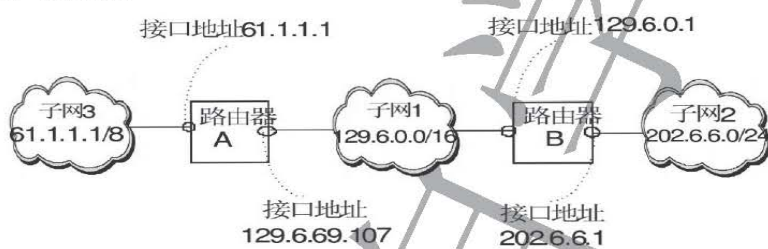


图2-23 路由器连接示例

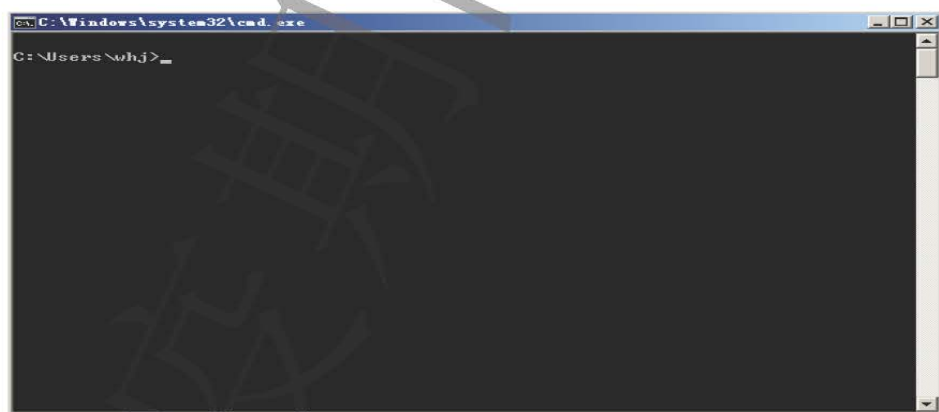
2.5.3 网络的连通性测试

在以太网通讯的控制系统中,造成网络连通故障的原因主要有网卡损坏、传输介质故障(网线、光纤等)、协议等网络配置故障、服务器或网络供应商提供信号故障等。

判断的步骤和方法:

1. 进入windows下的虚拟dos状态

点击“开始”,选择“运行”,在对话框中输入cmd,回车。



2. 查看本机ip地址及其它网络参数

Ipfconfig是调试计算机网络的常用命令,通常使用它显示计算机中网络适配器的IP地址、子网掩码及默认网关。在虚拟dos状态,输入ipconfig /all,回车。

```

C:\Windows\system32\cmd.exe
C:\Users\whj>ipconfig/all

Windows IP 配置

主机名 . . . . . : whj-PC
主 DNS 后缀 . . . . . :
节点类型 . . . . . : 混合
IP 路由已启用 . . . . . : 否
WINS 代理已启用 . . . . . : 否

无线局域网适配器 无线网络连接:

连接特定的 DNS 后缀 . . . . . :
描述 . . . . . : Dell Wireless 1705 802.11b/g/n (2.4GHz)
物理地址 . . . . . : 3C-77-E6-6E-81-1F
DHCP 已启用 . . . . . : 是
自动配置已启用 . . . . . : 是
本地链接 IPv6 地址 . . . . . : fe80::f1eb:2779:9380:3aa9%13<首选>
IPv4 地址 . . . . . : 192.168.0.100<首选>
子网掩码 . . . . . : 255.255.255.0
获得租约的时间 . . . . . : 2016年12月6日 8:06:39
租约过期的时间 . . . . . : 2016年12月13日 14:36:53
默认网关 . . . . . : 192.168.0.1
DHCP 服务器 . . . . . : 192.168.0.1
DHCPv6 IAID . . . . . : 373061606
DHCPv6 客户端 DUID . . . . . : 00-01-00-01-1F-63-08-33-E0-DB-55-B0-2A-80

DNS 服务器 . . . . . : 192.168.0.1
TCP/IP 上的 NetBIOS . . . . . : 已启用
  
```

3. ping本机ip地址

ping是用来检查网络是否通畅或者网络连接速度的命令,如果有信号返回,则本机网卡正常。

原理:利用网络上机器IP地址的唯一性,给目标IP地址发送一个数据包,再要求对方返回一个同样大小的数据包来确定两台网络机器是否连通。

```

C:\Windows\system32\cmd.exe
C:\Users\whj>ping -a 192.168.0.100

正在 Ping whj-PC [192.168.0.100] 具有 32 字节的数据:
来自 192.168.0.100 的回复: 字节=32 时间<1ms TTL=128
来自 192.168.0.100 的回复: 字节=32 时间<1ms TTL=128
来自 192.168.0.100 的回复: 字节=32 时间<1ms TTL=128
来自 192.168.0.100 的回复: 字节=32 时间<1ms TTL=128

192.168.0.100 的 Ping 统计信息:
    数据包: 已发送 = 4, 已接收 = 4, 丢失 = 0 (0% 丢失),
    往返行程的估计时间(以毫秒为单位):
        最短 = 0ms, 最长 = 0ms, 平均 = 0ms

C:\Users\whj>
  
```


本章小结

本章讲述的主要内容有：传感器的输出信号、电站控制系统中的常用传感器、PLC 基本数据类型、数据存储区、高速计数器、寻址方式、中断的使用、现场总线控制技术、西门子 SMARTLINE 触摸屏的使用、船舶电站以太网控制系统框架、以太网通讯中的几个重要概念及设备。

本章的重点内容如下：

1. 电站控制系统中的常用传感器。
2. PLC 基本数据类型及寻址方式。
3. 使用 PLC 的中断的基本步骤。
4. 以太网通讯中的几个重要概念及设备。

复习思考题

- 2-1 如图 2-4 所示是双位压力继电器结构图，叙述其工作原理。
- 2-2 如图 2-8 所示是磁电式转速传感器的结构原理及实物图，试分析其结构原理。
- 2-3 船舶电站控制系统中，常用的传感器有哪几种，说明其作用及输出信号。
- 2-4 简述磁电式转速传感器在实际安装和使用中的注意事项。
- 2-5 简述 PLC 在船舶电站中应用的优越性。
- 2-6 PLC 的基本数据类型主要有哪些。
- 2-7 在 PLC 编程时，如果已经用了 IW0，再用 IB0 或 IB1 就要特别注意。叙述其原因。
- 2-8 如图 2-9 所示是定时器位操作及字操作指令梯形图，叙述其工作原理。
- 2-9 叙述寻址方式的定义，试说明 CPU 如何寻址。
- 2-10 叙述 PLC 中高速计数器与普通计数器的区别。
- 2-11 如图 2-12 所示是 PLC 中断程序实例，叙述使用 PLC 的中断的基本步骤。
- 2-12 叙述 DCS 与 PLC 控制系统的区别。
- 2-13 叙述触摸屏参数设置及通讯连接的步骤。
- 2-14 叙述 IP 地址和物理地址（MAC 地址）的基本概念。
- 2-15 在以太网通讯的控制系统中，叙述造成网络连通故障的主要原因。
- 2-16 叙述网络的连通性测试的步骤和方法。

第3章 主柴油发电机组的自动控制

3.1 主柴油发电机组的自动启动与停机功能

在船舶自动化电站中，控制主柴油发电机组的自动起停是一个非常重要的环节，在发电机组的启动和停机控制中，柴油机是被控制的对象，因此很有必要了解其工作状态。

3.1.1 备用机组的自动启动

船舶电站中各台主发电机组一般都是采用互为备用的原则，备用机组的燃油及压缩空气备好、盘车杆归位、有预热和预润滑、无启动阻塞、操作选择开关置“自动”位置、燃油手柄在“自动”位置，则认为机组已处于“备好”状态，“准备好启动”指示灯亮起，可以进行启动操作。

1. 启动前的预润滑

柴油机都具有滑油循环系统，包括由本身的动力带动的润滑油泵（机带泵）、管路、过滤器和冷却器等。在运行时，能自行建立一定的滑油压力，保证自身的滑油循环，使各主要润滑部位都有良好的润滑；停机后，滑油系统也停止工作。因此，经较长时间停机后，应有启动前的预润滑程序，确保在启动时，各相互接触的运动部位有必要的滑油，避免发生干摩擦。

自动预润滑控制有周期性自动预润滑、非周期性预润滑和一次性注入式预润滑等方式。

周期性自动预润滑是在柴油机机带油泵之外，另设一电动油泵，做为柴油机润滑油循环系统的另一个动力源。该电动油泵应能实现自动控制，当柴油机停机后，就开始工作，保证每隔一定时间（例如4h）接通电源使油泵工作一段时间（例如10min），周期性地实现预润滑，以待机组随时启动。当柴油机投入运行后，自动预润滑油泵的控制电源立即断开，由柴油机自带泵润滑。

对于非周期性预润滑，只要机组一停，预润滑油泵就开始自动启动运行，直至机组启动成功油泵才停止运行。

一次性注入式预润滑是在柴油机润滑系统中，接入一个柱塞式滑油泵，其中贮满滑油。当机器接到启动指令时，压缩空气先作用到柱塞式油泵，推动活塞，将其中所贮滑油，通过滑油管系，注入到机器需要润滑的各部位，然后才开始启动柴油机。

2. 启动时燃油的控制

柴油机的喷油量是由调速器和控制手柄控制的。

3. 预热（暖机）

当启动成功后，柴油机将运行在略高于最低稳定转速上，称为点火转速（又称发火转速），以后再予以升速。一般为了减少热应力，让机器先在中速下运行一段时间进行预热，预热所需时间依机型和冷却系统的设计而不同。

在自动化电站中，通常是将各台柴油机的冷却淡水管系连成一个整体，运行机组的冷却水（约65℃）也循环于备用机的冷却系统中，使备用机组处于预热状态，当备用机组启动成功后，可以较快地加速（甚至无需暖缸）直到额定转速运行，这对于增强自动化电站的功能，保证供电连续性、可靠性非常有利。

4. 机组自动启动控制装置功能

船舶自动化电站对主柴油发电机组的控制一般都有“机旁手动”、“遥控”、“自动”三种操纵方式的转换。且“机旁”优先于“遥控”，“遥控”优先于“自动”。

“自动”是指柴油机的操作方式转换开关置于此位置时，主柴油发电机组自动控制系统投入工作，按既定的程序，自动起动、停止机组；“遥控”是指在驾驶台或集控室用按钮对柴油机实行起、停控制；“机旁”是指在柴油机旁进行常规的手动起、停机组。

“优先”是指当转换开关置于“自动”时，也应能“遥控”或“机旁”操作；置“遥控”时，也可实现“机旁”操作，但不能有“自动”的功能；置“机旁”时，“自动”及“遥控”功能均被取消。

综上所述，主柴油发电机组自动起动控制装置必须具有以下功能：

(1) 对自动起动的各种准备工作进行逻辑判断和监视。例如：转换开关已置于“自动”位置、盘车杆归位、有预润滑、预热、有足够起动动力、本机是处于静止状态等才能自动起动。

(2) 接到起动指令时能自动起动柴油机。当转速达到发火转速时，发出起动成功信号。

(3) 一个起动指令，可以允许三次起动，若三次失败，应给出起动失败信号，并向控制单元发出“起动失败”信号，以便由控制单元判断采取其他措施。

(4) 适当控制起动时的给油量，柴油机自行发火后，应切断起动动力源。

(5) “中速运行”和“加速”控制。若柴油机需要有“暖缸运行”的程序时，应将油门控制于“暖缸转速”下进行暖缸，并给予一定的“暖缸时间”控制，待时限到达后，再予以加速，直到接近额定转速。对于不需要暖缸的机器，可直接加大油门，使转速迅速上升到额定转速附近。

(6) 当转速上升到额定值的90%时，即可认为整个起动加速程序完成，应自动切断本机的预润滑系统，并经适当延时（约几十秒）以后，接入对本机的滑油压力监视。这是因为柴油机自带的滑油泵，在润滑系统中建立一定的油压需要一定的时间，刚起动时，滑油压力尚未达到应有数值，这是正常现象。若不经延时接入监视，它将立即发出“滑油压力低”的信号，造成不必要的报警，甚至自动停机。柴油机所需的其他监视，无需延时。

(7) 具有超速保护。即当柴油机转速超过额定值15%时，延时2~3s停机，同时发出报警信号，禁止柴油机再次起动。

(8) 如果因为柴油机本身的故障（一般有：起动失败、滑油压力低、冷却水高温、排烟温度高、超速等）而导致停机时，应发出“阻塞”信号，使该机的自动起动控制程序阻塞，并发出声光报警。待轮机员排除故障，手动“解除阻塞”后，才能恢复自动功能。

(10) 自动起动、停机控制器，具备“模拟试验”的功能，使运行管理人员能在不影响柴油机的原始状态下，校核控制器的工作是否正常。通常用组合开关和指示灯来实现。

5. 备用机组起动条件

当出现下述任一条件时，自动控制系统就应发出“增机”指令，自动起动备用机组，起动次数应不超过3次。

- (1) 汇流排失电
- (2) 经延时判断，确认运行机组重载
- (3) 经重载询问，电网功率余量不够
- (4) 运行机组机械故障报警
- (5) 汇流排参数异常

(6) 备用机组起动失败或合闸失败

6. 自动增机流程图分析

(1) 主柴油发电机组自动起动程序流程总图

当船舶电站至于自动模式，机组处于“备好”状态，电站PMS系统按照图3-1进行自动增机流程。

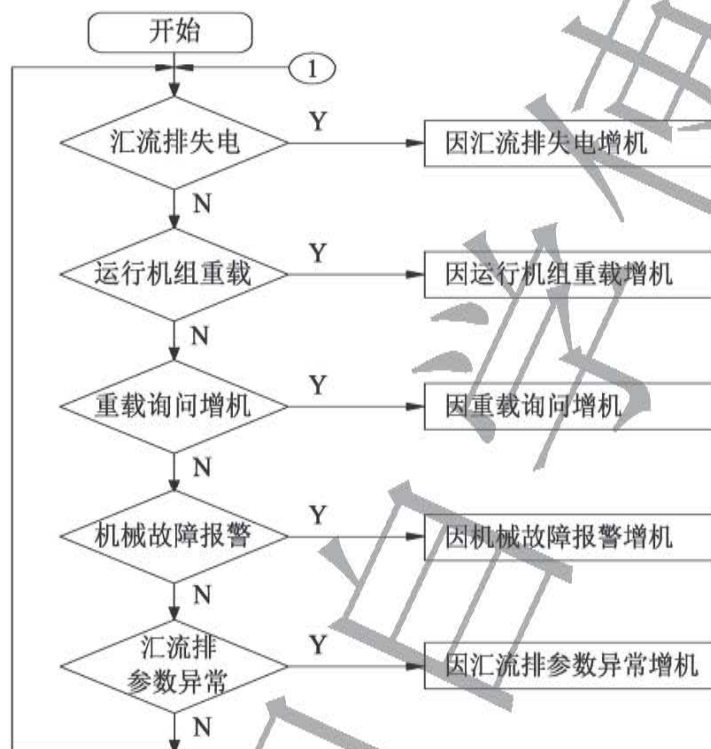


图3-1 主柴油发电机组自动起动程序流程总图

(2) 因汇流排失电增机流程图

如图 3-1 所示，当船舶电站自动控制系统起动后，系统首先会判断电网是否处于失电状态。如果电网失电，如图 3-2 所示，系统发出第一备用发电机组（简称一备机组）的起动指令。如果一备机组在三次内能够起动成功，系统控制器对发电机电压进行判断，电压正常建立后，主开关迅速合闸恢复对电网的供电，自动进行恒频控制。

如果一备机组三次起动不成功，系统会发出“起动失败”报警；或者虽然起动成功，但是电压不能正常建立或者不能正常合闸，则系统会发出“开关不能合闸”报警。

系统发出报警的同时，向二备机组发出起动指令。如果二备机组在三次内能够起动成功，系统控制器对发电机电压进行判断，电压正常建立后，主开关迅速合闸恢复对电网的供电，自动进行恒频控制。

如果二备机组也出现“起动失败”或“开关不能合闸”报警，则程序结束。

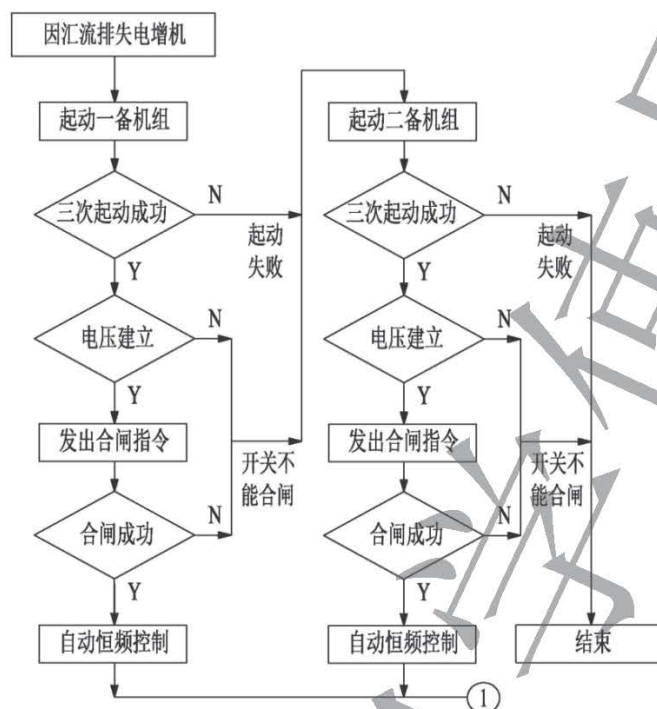


图3-2 主柴油发电机组自动起动程序子流程图：因汇流排失电增机

(3) 因运行机组重载增机流程图

如图3-3所示，汇流排处于有电状态，运行机组出现重载（达到运行机组额定负载的85%，延时20s），为了避开电网中短暂的负载扰动而引起备用机组不必要的起动，起动指令的传送要有一段延时时间。系统经延时后，根据预先设定好的优先级进行机组的自动起动控制，发出第一备用发电机组（简称一备机组）的起动指令。如果一备机组在三次内能够起动成功，系统控制器对发电机电压进行判断。电压正常建立后，控制器重新判断运行机组是否仍重载，若仍重载，自动同步并车单元投入工作，满足合闸条件后发出主开关合闸指令，并车成功后自动进行调频调载。

如果一备机组三次起动不成功，系统会发出“起动失败”报警；或者虽然起动成功，但是电压不能正常建立或者不能正常合闸，则系统会发出“开关不能合闸”报警。

系统发出报警的同时，向二备机组发出起动指令。如果二备机组在三次内能够起动成功，系统控制器对发电机电压进行判断，电压正常建立后，控制器重新判断运行机组是否仍重载，若仍重载，自动同步并车单元投入工作，满足合闸条件后发出主开关合闸指令，并车成功后自动进行调频调载。

如果二备机组也出现“起动失败”或“开关不能合闸”报警，则程序结束。

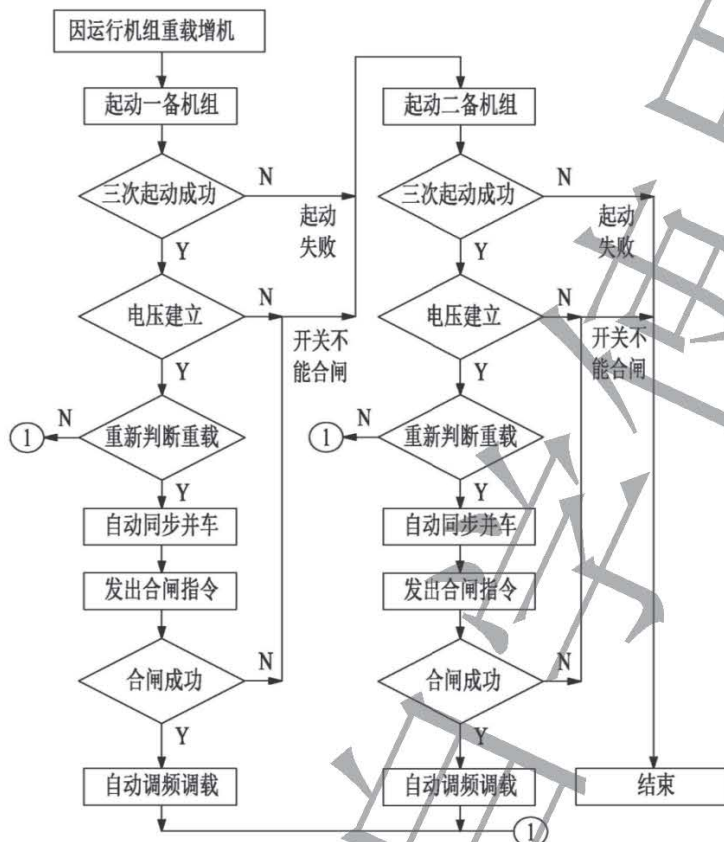


图3-3 主柴油发电机组自动起动程序子流程图：因运行机组重载增机

(4) 因重载询问增机流程图

如图 3-4 所示，汇流排处于有电状态，船舶电站接收到大功率负载的重载询问（起动）信号，系统经计算后，若因电网功率余量不够，发出第一备用发电机组（简称一备机组）的起动指令。如果一备机组在三次内能够起动成功，系统控制器对发电机电压进行判断。电压正常建立后，自动同步并车单元投入工作，满足合闸条件后发出主开关合闸指令，并车成功后自动进行调频调载。

如果一备机组三次起动不成功，系统会发出“起动失败”报警；或者虽然起动成功，但是电压不能正常建立或者不能正常合闸，则系统会发出“开关不能合闸”报警。

系统发出报警的同时，向二备机组发出起动指令。如果二备机组在三次内能够起动成功，系统控制器对发电机电压进行判断。电压正常建立后，自动同步并车单元投入工作，满足合闸条件后发出主开关合闸指令，并车成功后自动进行调频调载。

如果二备机组也出现“起动失败”或“开关不能合闸”报警，则程序结束。

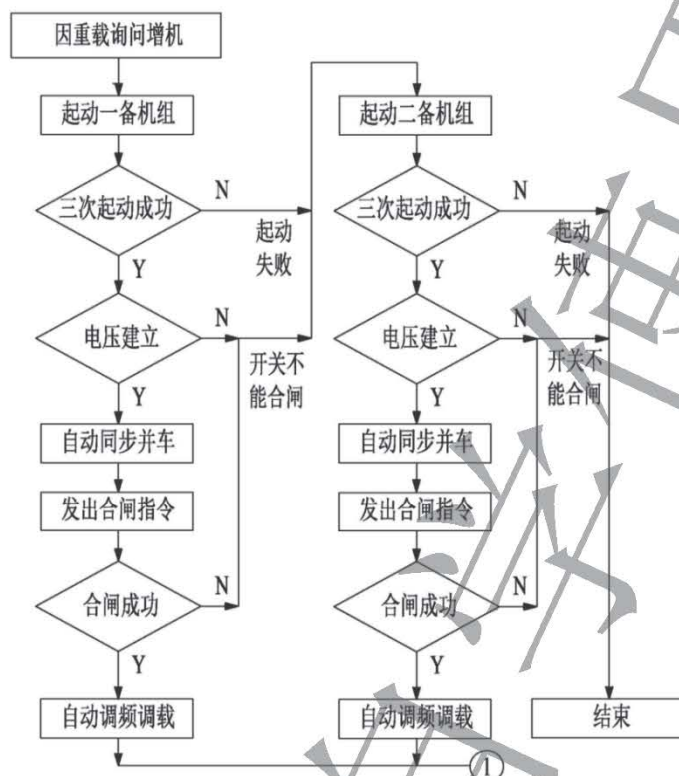


图3-4 主柴油发电机组自动起动程序子流程图：因重载询问增机

(5) 因运行机组机械故障报警增机流程图

如图 3-5 所示，汇流排处于有电状态，运行机组出现滑油压力低、冷却水温度高等机械故障报警信号时，系统发出第一备用发电机组（简称一备机组）的起动指令。如果一备机组在三次内能够起动成功，系统控制器对发电机电压进行判断。电压正常建立后，自动同步并车单元投入工作，满足合闸条件后发出主开关合闸指令，并车成功后自动进行解列控制，满足解列条件后将故障机组分闸、停机。

如果一备机组三次起动不成功，系统会发出“起动失败”报警；或者虽然起动成功，但是电压不能正常建立或者不能正常合闸，则系统会发出“开关不能合闸”报警。

系统发出报警的同时，向二备机组发出起动指令。如果二备机组在三次内能够起动成功，系统控制器对发电机电压进行判断。电压正常建立后，自动同步并车单元投入工作，满足合闸条件后发出主开关合闸指令，并车成功后自动进行解列控制，满足解列条件后将故障机组分闸、停机。

如果二备机组也出现“起动失败”或“开关不能合闸”报警，则程序结束。

要注意的是：如果运行机组出现滑油压力低、冷却水温度高、超速等机械故障停机信号时，系统应发出备用机组自动增机、故障机组停机、主开关分闸信号。

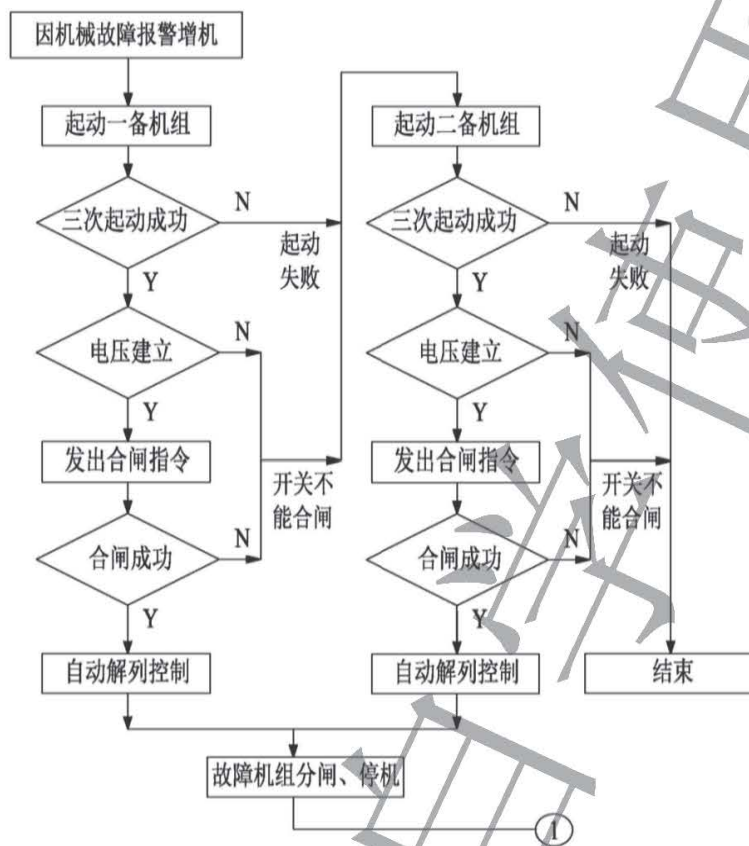


图 3-5 主柴油发电机组自动起动程序子流程图：因机械故障报警增机

(6) 因汇流排参数异常增机流程图

如图 3-6 所示，汇流排处于单机有电状态，汇流排参数出现异常（汇流排电压偏离额定值 5%或频率偏离额定值 2.5%，延时 5s），系统发出第一备用发电机组（简称一备机组）的起动指令。如果一备机组在三次内能够起动成功，系统控制器对发电机电压进行判断。电压正常建立后，首先使造成参数异常的运行机组直接分闸，然后发出一备机组主开关合闸指令，主开关迅速合闸恢复对电网的供电，自动进行恒频控制。

如果一备机组三次起动不成功，系统会发出“起动失败”报警；或者虽然起动成功，但是电压不能正常建立或者不能正常合闸，则系统会发出“开关不能合闸”报警。

系统发出报警的同时，向二备机组发出起动指令。如果二备机组在三次内能够起动成功，系统控制器对发电机电压进行判断。电压正常建立后，首先使造成参数异常的运行机组直接分闸，然后发出二备机组主开关合闸指令，主开关迅速合闸恢复对电网的供电，自动进行恒频控制。

如果二备机组也出现“起动失败”或“开关不能合闸”报警，则程序结束。

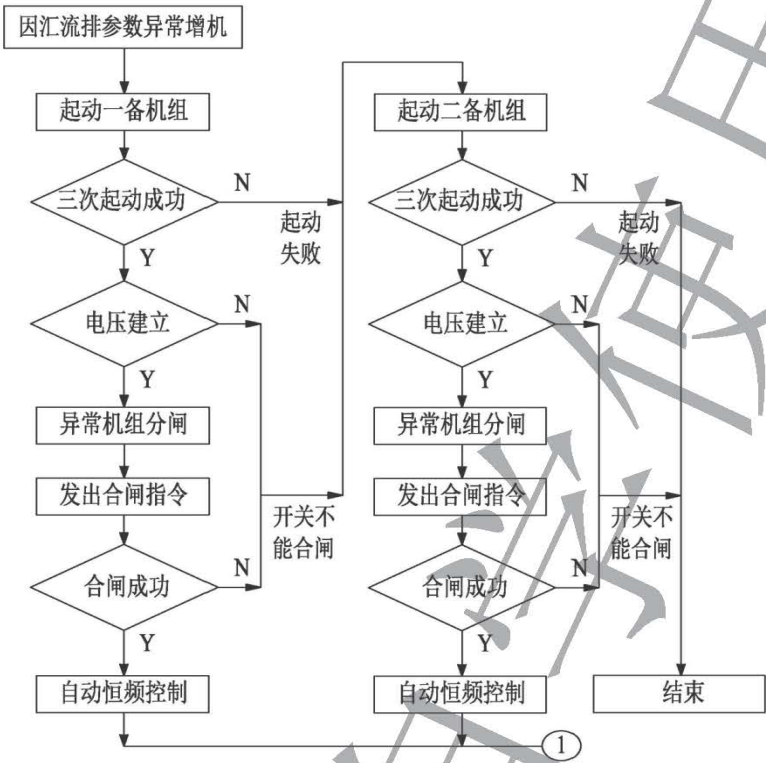


图3-6主柴油发电机组自动起动程序子流程图：因汇流排参数异常增机

7. 重载询问功能

当重载设备投入工作前首先要进行重载询问，电站控制器收到重载询问指令后，对电网剩余功率进行计算，控制系统将比较电网剩余功率与拟投入工作的大功率设备功率的大小。如果电网剩余功率能够符合大功率设备的启动要求，则允许大功率设备投入使用；如果电网剩余功率不能符合大功率设备的启动要求，控制系统先判定机组有无剩余，如果有备用机组，则控制备用机组启动、并入电网供电。然后控制器再进行电网剩余功率计算，确认电网剩余功率能符合大功率负载启动要求后，允许重载设备投入使用。如果没有剩余备用发电机，则延时 20s 后，禁止大功率设备的启动并发出报警信号。

3.1.2 主柴油发电机组的自动减机及停机

当出现下述任一条件时，控制系统就应发出“减机及停机”指令，按程序自动解列或直接分闸。

控制柴油机停机时，只需切断燃油供给，机器即自行停下来。但也需注意，不同型式的机器可能有不同的要求。突然停机是某些机器的性能所不能接受的，一般要求在中速下先运行一段时间（180s），待温度逐渐降低，然后才允许断油停机。

1. 经延时判断，确认电网轻载

如图3-7所示是因电网轻载自动减机的程序流程图。以两台机组并联运行为例，若因电网

负载降低到单台机组额定负载的70%，延时10min，可以停掉一台机组时，自动发出“解列”指令。当要解列的机组功率剩余5%时，再次判断电网是否轻载。若仍轻载，发出主开关分闸指令，使解列机组脱离电网，空转冷却10min后停机；若在解列操作期间，电网负载增加，超过轻载设定值，则停止解列操作，恢复自动调频调载控制。

对于因电力系统负载降低而形成的解列指令，为了使电站中各台机组累计运行时数趋于一致，最好做到总是解列先投入运行的机组。

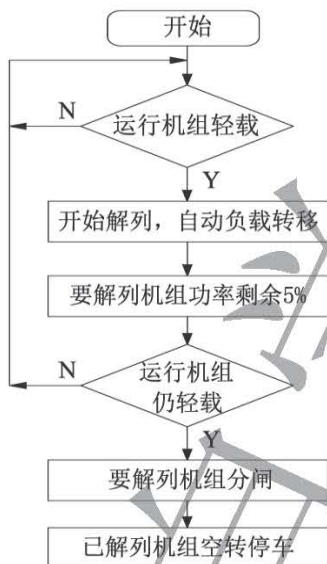


图3-7 主柴油发电机组自动减机停机程序流程图：因电网轻载减机停机

2. 运行中的某机组出现机械故障报警

某运行机组出现冷却水出口温度偏高、滑油压力偏低等机械故障报警时，自动控制系统首先起动备用机组，并车后再转移负载，解列指令发出后，通过自动调频调载装置将待解列机组的负载转移给其他运行机组后，再将待解列发电机主开关分闸，冷却后停机。

为了尽可能地不中断供电，对于“运行不正常”现象的识别信号，可以分为两级：第一级做为预报，第二级做为保护装置的动作极限。预报级信号可以要求起动备用机组，以便赢得时间，等待备用发电机组起动和并车后再解列“不正常”的发电机组。当然，这种期望是建立在不正常的发电机组还可以坚持运行一段时间的基础上。显然，这一段时间决定于两方面：一方面是备用发电机组的起动、加速、并车和负载转移所需的总时间，当然越短越好；另一方面是不正常现象发展的速度，当它发展到保护装置的动作极限时，如果并车尚未成功，则保护装置动作使“不正常”的发电机主开关分闸。

3. 单机运行时，汇流排参数异常

发电机单机运行时，出现电压或频率偏离正常设定值，自动控制系统先起动备用机组，起动成功正常建立电压后，直接分闸运行机组主开关，合上备用机组主开关，原运行机组停机。

3.2 主柴油发电机组自动控制系统故障与处理

3.2.1 机组的自动控制电路

机组的自动控制电路采用有触点的继电器电路较难满足通用性要求。现多采用可编程控制器来实现控制功能。具有这种特点的典型例子是丹麦赛科（SELCO）公司生产的 M2000 型柴油机控制器（以下称控制器）。其电路原理图如图 3-8 所示。

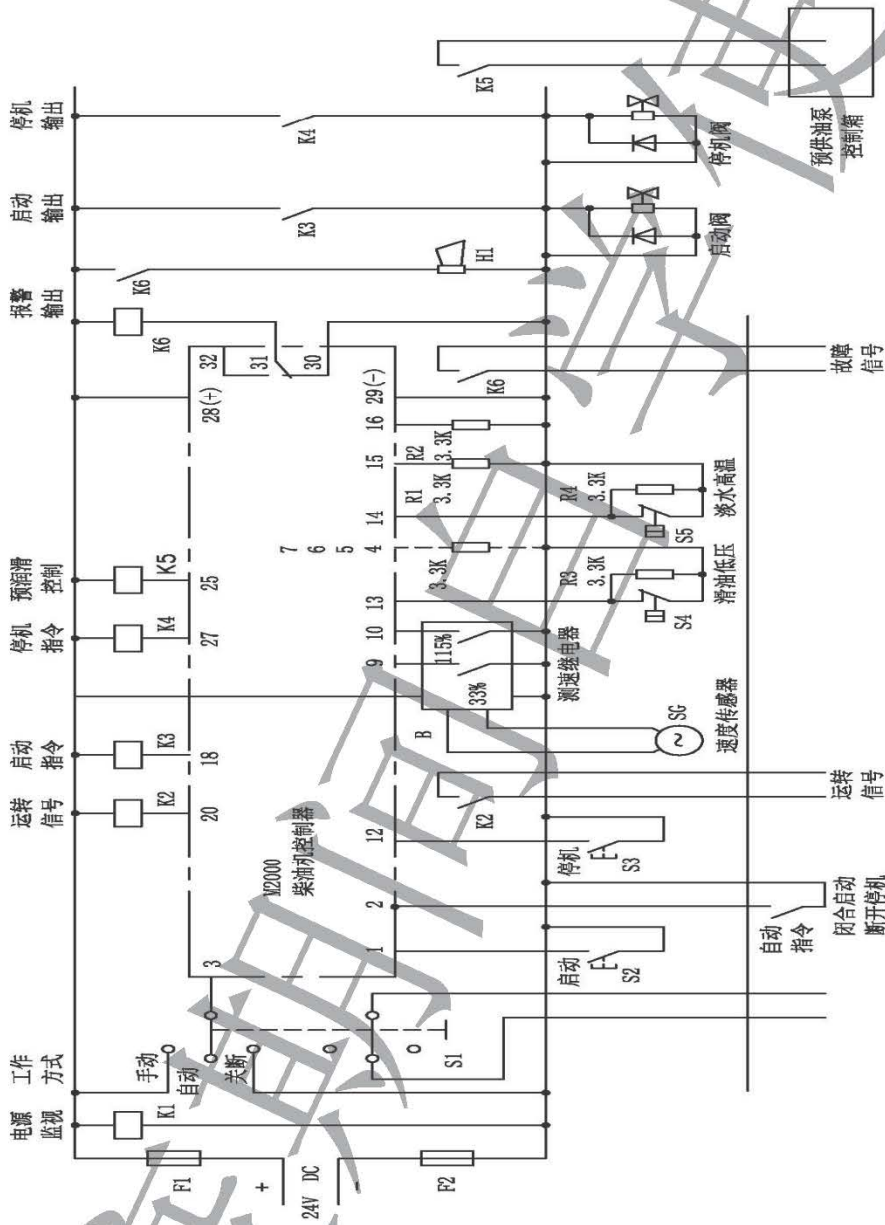


图 3-8 柴油机自动控制电路原理图

控制器的外部接线端子 1 至 17 为输入；18 至 32 为输出。图中只使用部分端子，实现柴油机自动启动/停机控制的基本功能。

1. 工作方式选择

控制箱面板上设转换开关 S1，它有三个位置即手动(MAN)、自动(AUTO)和关断(OFF)。工作方式选择是通过端子 3 的处理来实现的，接电源正为“手动”；开路为“自动”；接电源负为“关断”。S1 另一组开关在“自动”位时接通，对外发出“机组可控”信号。置“手动”位时，允许启动指令由按钮 S2 输入，停机指令由按钮 S3 输入；置“自动”位时，允许自动指令输入；置“关断”位时，控制器不工作。

2. 自动启动/停机

自动启动/停机指令为触点信号，由控制器端子 2 输入，触点闭合使端子 2 接电源负，控制器执行启动功能；开关断开，执行停机功能。

自动启动时，端子 2 接电源负，在满足启动条件的情况下，端子 18 输出启动指令使启动输出中间继电器 K3 线圈得电动作，其常开触点闭合接通启动电磁阀，机组启动运转。速度传感器 SG 检测的转速信号接入测速继电器 B，转速超过发火转速（33%）时，发火转速输入触点闭合，输入端子 9 接负，表示机器已运转，端子 18 输出被关断，停止启动，柴油机在调速器的作用下进油运转，并升至额定转速；另一方面输出端子 20 使运行信号中间继电器 K2 线圈得电动作，输出常开触点闭合，向自动控制系统发出运行信号，表示机组运行可以使用。

自动停机时，端子 2 开路，控制器执行停机程序。停机指令由端子 27 输出使停机输出中间继电器 K4 线圈得电动作，其常开触点闭合接通停机电磁阀（线圈），停机。停机程序具有“冷却停机”功能，即输入停机指令（端子 2 开路），空载运转一段时间，待机冷却后再输出接通停机电磁阀停机。停机后，电磁阀可以断电。这里有两个时间需要整定：停机电磁阀通电时间和空载运转时间。通电时间和空载时间由设于控制器内侧的程序开关整定。

3. 重复启动

重复启动的次数、启动时间和间歇时间由控制器内的程序开关整定。重复启动次数由 S1、S2 整定；启动时间由 S3、S4 整定；间歇时间由 S5、S6 整定。

4. 预润滑控制

控制器内部有一个预润滑控制定时电路，从端子 25 输出，通过中间继电器 K5 输出控制预供油泵控制箱。输出固定为间歇 30 分钟、动作 2 分钟。

3.2.2 故障处理

控制器的面板上有 10 个显示条，除第 1 条即 1 号显示“运行”外其他都用来显示故障。2 号显示“启动失败”。3 号至 10 号是外部故障输入信号。已经定义的故障、待定义的故障和对应的输入端子号分别是：

显示条号	故障名称	输入端子号
3	超速	10
4	滑油低压	13
5	冷却水高温	14

6	待定	15
7	待定	4
8	待定	5
9	待定	6
10	待定	7

柴油机运行参数超限应发出报警，呼唤值班人员处理，称为 1 级故障；如果参数超限已不允许运行，应立即停机，称为 2 级故障。由上面已定义的故障来看，一般必须设置超速、滑油低压和冷却水高温。用于限值监视的都是开关量（压力开关和温度开关）。控制器的特点是可以接受（常开）接通信号也可以接受（常闭）断开信号。超速信号从端子 10 输入，不受任何约束执行立即停机程序。4 号至 10 号故障的处理由端子 16 的状态确定。这个端子有两个功能：越控和电路监视。越控的意思是只报警不停机，电路监视的意思是故障信号电路断线时报警。端子 16 的状态和对应的功能表示如下：

端子 16 的状态	功能
接电源正	越控
接电源负	电路监视
经 3.3kΩ 电阻接电源负	越控/电路监视
开路	停机

电路监视一般称为断线报警。信号接点采用常开时，平时电路中没有电流，线路断开也无法觉察，监视线路是否完好是在常开接点的两端并联一个电阻，让线路中有一很小的检测电流流过，该电流可以被检测出来，又不会引起保护动作。

该电路是采用常开信号接点，为了监视电路断线，接点两端并联 3.3kΩ 电阻。需要注意的是，电阻必须并在接点的两端，否则起不到监视作用。检测电阻的作用是构成检测电流回路。外部电路断开时，无信号输入的端子 4、5、6、7、15 都需用电阻接电源负，构成检测电流回路，避免报警。端子 16 经电阻接负，表示故障只报警、不停机；执行电路监视功能。

了解故障信号在什么时候起作用，是很有必要的。有的运行参数如滑油压力，机器不运行时表现出故障值（机带泵不运转就没有压力），机器不运行和启动时应予阻塞。这个控制器对除超速外的所有故障信号进行机器不运行和启动阻塞，在启动成功即超过发火速后延时 8s 解除阻塞，投入监视。

滑油压力和机器的运转是联系在一起的。滑油有压力说明机器已运转，如果滑油有压力而无机器运转信号，说明测速电路有故障，在这种情况下控制器发“转速故障”信号，显示在 3 号超速显示条上，这个显示条显示两个故障，上面的大字表示超速，下面小字表示转速故障。在同一故障显示条上，光快闪表示故障；慢闪表示线路断线；复位后长亮。超速显示条闪光表示超速；长亮表示转速故障。

故障除面板上显示外，有一组转换干触点输出，端子号 30、31 和 32。正常时动作，常开闭合、常闭断开；故障时相反。这里用常闭控制中间继电器 K6，向控制系统发故障信号，并控制声报警器。控制器由蓄电池供电，电源由 K1 监视，断电时向系统发电源故障信号。

3.3 主柴油发电机组的安全保护

柴油机必须处理的故障通常有：滑油压力低（也称油压低）、冷却水温度高（也称水温高）和超速。

超速是严重故障，发电机主开关必须跳闸、机组必须停机。一般整定在额定转速的 1.15~1.20 倍。

滑油压力和冷却水温度的检测，一般把故障分为两级：发生 1 级故障报警时，控制系统将自动发出增机指令，以不断电交换机组的方式处理；发生 2 级故障停机时，直接使机组停机。

滑油一般是由机带油泵输送，柴油机起动运转后才能建立压力，机组不运行和在起动过程中必须对滑油压力信号的作用进行闭锁。柴油机的控制系统独立设在机旁控制箱内，滑油低压信号经处理后输入电站自动控制系统。柴油机由自动控制系统控制时，信号由压力开关直接输入；由于冷却水温度的升高需要一定的时间，机组起动时无需闭锁。

船舶主柴油发电机组应具有安全保护功能，当柴油机本身出现故障时，安全保护系统监测到滑油压力低、冷却水高温、排烟温度高、超速等信号，均应触发应急停机信号，控制燃油切断使发电机组应急停机。同时发出“阻塞”信号，使该机的自动起动控制程序阻塞，并发出声、光报警，待轮机员排除了故障，手动解除“阻塞”后，才能恢复自动功能。

本章小结

本章讲述的主要内容有：主柴油发电机组的自动启动与停机功能；自动增机流程图分析；自动减机流程图分析；主柴油发电机组自动控制系统故障与处理；主柴油发电机组的安全保护。

本章的重点内容如下：

1. 主柴油发电机组的自动启动与停机功能。
2. 自动增减机组的条件及流程图分析。
3. 重载询问的概念。
4. 主柴油发电机组的安全保护。

复习思考题

- 3-1 叙述机组已处于“备好”状态的基本条件。
- 3-2 叙述备用机组的自动增机条件。
- 3-3 如图 3-2 所示，叙述因汇流排失电增机的整个工作过程。
- 3-4 如图 3-3 所示，叙述因运行机组重载增机的整个工作过程。
- 3-5 如图 3-4 所示，叙述因重载询问增机的整个工作过程。
- 3-6 如图 3-5 所示，叙述因运行机组机械故障报警增机的整个工作过程。
- 3-7 叙述重载询问功能的基本工作原理。
- 3-8 叙述主柴油发电机组的自动减机及停机条件。
- 3-9 叙述柴油机安全保护的几个重要参数。
- 3-10 在柴油机滑油压力和冷却水温度的检测中，如何理解 1 级故障和 2 级故障。

第4章 发电机自动并车控制

在船舶电站中，通常在下列三种情况下需要并车操作：

1. 当单机负荷达到 80%额定容量时，应考虑并联一台发电机。
2. 进出港靠离码头或进出狭水道等机动航行状态时，为了航行安全，需要发电机并联运行。
3. 当备用机组需要替换运行机组时，为保证不间断供电，需要并车进行替换。

4.1 发电机自动准同步并车装置的基本功能和原理

4.1.1 自动准同步并车装置的基本功能

自动并车装置是指能够完成手动准同步并车操作全部逻辑程序的自动装置。

通常自动并车装置的控制方案有两类，即模拟控制和数字控制。国内在 20 世纪 70 年代已有多模拟控制式的自动并车装置，随着船舶电站自动化程度的不断提高和微机控制技术的快速发展，先进的数字控制式自动并车装置已显示出其特有的优越性。

数字控制方案可采用单片机、微机（工控机）做为控制核心，也可采用数字信号处理器（DSP）或可编程控制器 PLC 实现自动控制。目前数字控制式自动准同步并车装置在船舶电站中应用得越来越多。无论采用哪种控制方式，自动准同步并车装置都应具有下列功能：

1. 频差方向鉴别

检测待并发电机电压与电网运行发电机电压的频率差，并根据频差的大小和方向自动地对待并发电机组发出增速或减速信号，进行频率预调，使待并发电机组频率接近并略高于电网运行发电机组频率，减小频差，创造合闸条件。

2. 鉴别合闸条件

设置一个合闸与门，检测待并发电机与电网运行发电机的电压差、频率差和相位差，当任一条件不符合并车要求时，实现闭锁，不允许发出合闸指令。

3. 捕捉合闸时刻

当电压差、频率差在允许范围内时，需要考虑发电机主开关的固有动作时间，相应地在同步点之前提前发出合闸指令，实现自动准同步。

4.1.2 自动准同步并车装置的工作原理

发电机的自动准同步操作是发电机自动并联运行控制的一个基本环节。无论是模拟式还是数字式自动并车装置，其工作原理都是一样的。

船舶同步发电机并联运行时，待并发电机组与运行发电机组之间必须满足 4 个条件，实际上除相序外，其他三个条件不可能完全满足，只能接近满足，即：

(1) 电压差接近零，即 $\Delta U \approx 0$ （允许 $<10\%$ ）；

(2) 频率差接近零，即 $\Delta f \approx 0$ （允许 $<1\%$ ）；

(3) 相角差接近零，即 $\delta \approx 0$ （允许 $<15^\circ$ ）。

船舶电网是一个独立电网，主配电板的母线电压几乎就等于发电机机端电压。规范规定，发电机在正常负载情况下机端电压的静态调整率应在 $\pm 2.5\%$ 之内，而发电机投入并联时的电

压差允许在10%以内,目前船用发电机励磁恒压装置的调压精度都能保证在并车允许的范围内。因此船舶电站使用的自动并车装置一般都不设置电压调节环节,只有电压闭锁环节。

用于船舶电站的自动准同步装置,按操作功能主要分为三个部分:同步检测(合闸)、速度匹配(调速)、附加功能,其原理框图如图4-1所示。

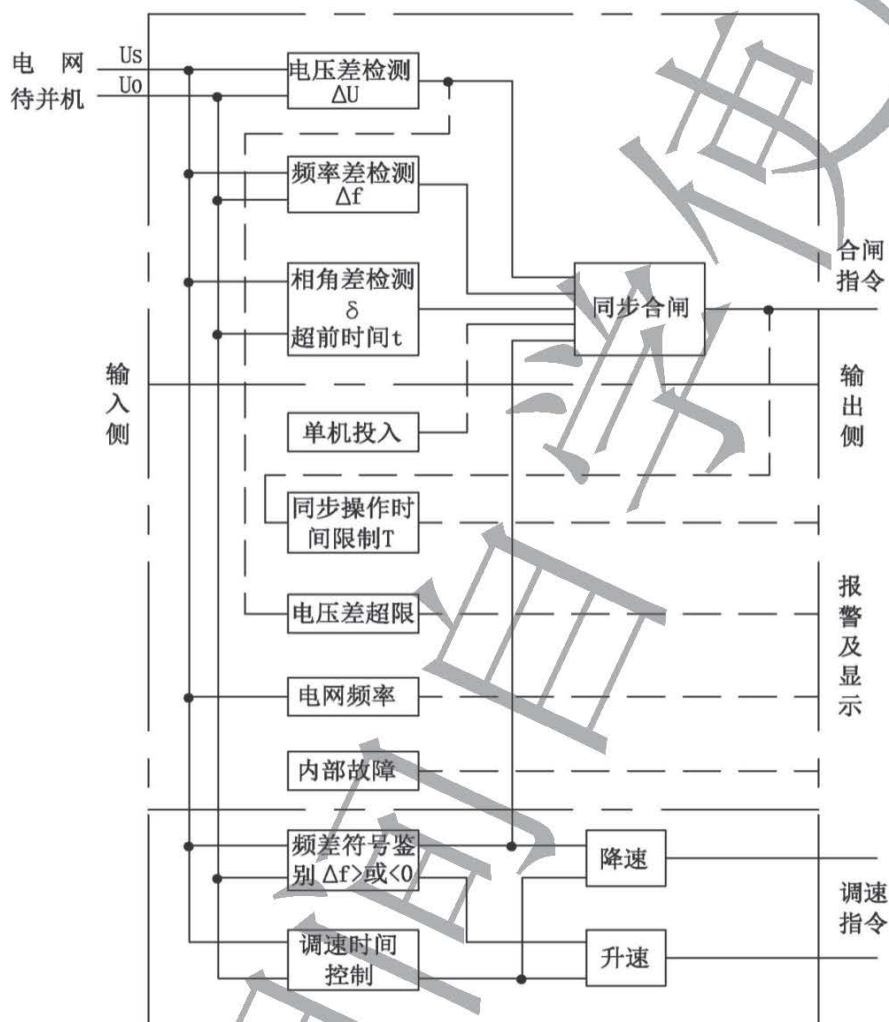


图 4-1 自动准同步并车装置的原理框图

4.2 模拟式自动并车原理分析

模拟式自动并车装置主要由差频脉动电压形成环节、频差方向鉴别及调速脉冲控制电路、恒定超前控制环节、允许合闸频差检测环节、允许合闸电压差检测及合闸“与”门环节等构成。在模拟式自动并车中,合闸指令的产生往往是利用差频电压来获得的。

1. 差频脉动电压的形成

(1) 正弦波差频脉动电压

所谓差频电压是指待并发电机电压频率与电网电压频率不一致但差值不大, 电压的幅值相等或接近相等时, 这两个交流电压的差, 又称“频差电压”或“脉动电压”。模拟式自动并车装置利用差频电压的特性进行工作, 因此需要设置差频电压形成环节。

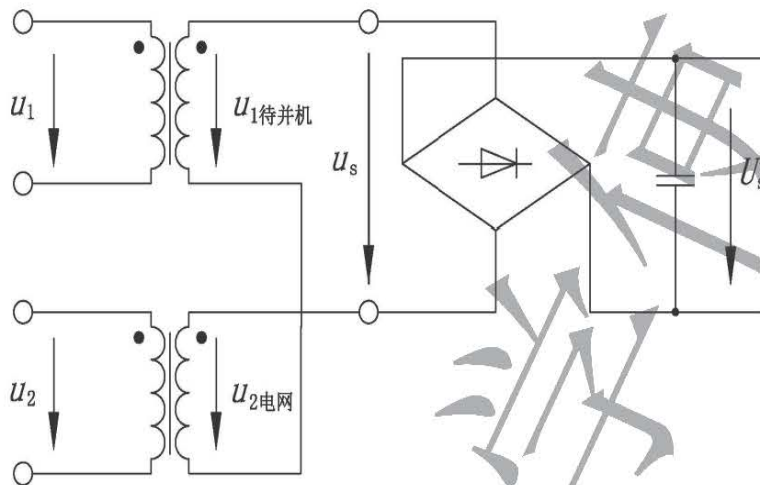


图 4-2 正弦波差频电压形成电路

图 4-2 为一个简单的差频电压形成电路。为简便起见, 变压器变比为 1, $u_{1待并机}$ 是待并机电压, $u_{2电网}$ 是电网电压, 幅值相等且初相位均为 0。因此有:

$$u_{1待并机} = U_m \sin \omega_1 t \quad u_{2电网} = U_m \sin \omega_2 t$$

把待并机电压与电网电压相减, 得到差频电压:

$$\begin{aligned} u_s &= u_{1待并机} - u_{2电网} \\ &= U_m \sin \omega_1 t - U_m \sin \omega_2 t \\ &= U_m (\sin \omega_1 t - \sin \omega_2 t) \\ &= 2U_m \sin \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t \cdot \cos \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t \end{aligned}$$

式中, U_m 为电压幅值; $\omega_s = \omega_1 - \omega_2$ 为滑差角频率; $\delta = \omega_s t$ 为相位差。

图 4-3 是正弦波差频电压波形图, 在波形图中, u_s 波形的实线部分是差频电压的瞬时值。 u_s 波形的虚线表示出差频电压幅值的变化, 称为包络线。在自动并车装置中, 最有实际意义的是差频电压幅值变化的规律。差频电压 u_s 经过整流 (取正半波)、滤波 (滤掉 $\cos \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$ 的谐波部分) 后, 就得到 U_s 电压波形, 我们所说的差频脉动电压的概念都是指 U_s 电压变化

的规律。有:

$$U_s = 2U_m \sin \frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t = 2U_m \sin \frac{\omega_s}{2}t = 2U_m \sin \frac{\delta}{2}$$

由上式可以看出, 差频脉动电压的幅值是按正弦规律变化的, 频率是滑差角频率的一半, 最大值等于 $2U_m$ 。

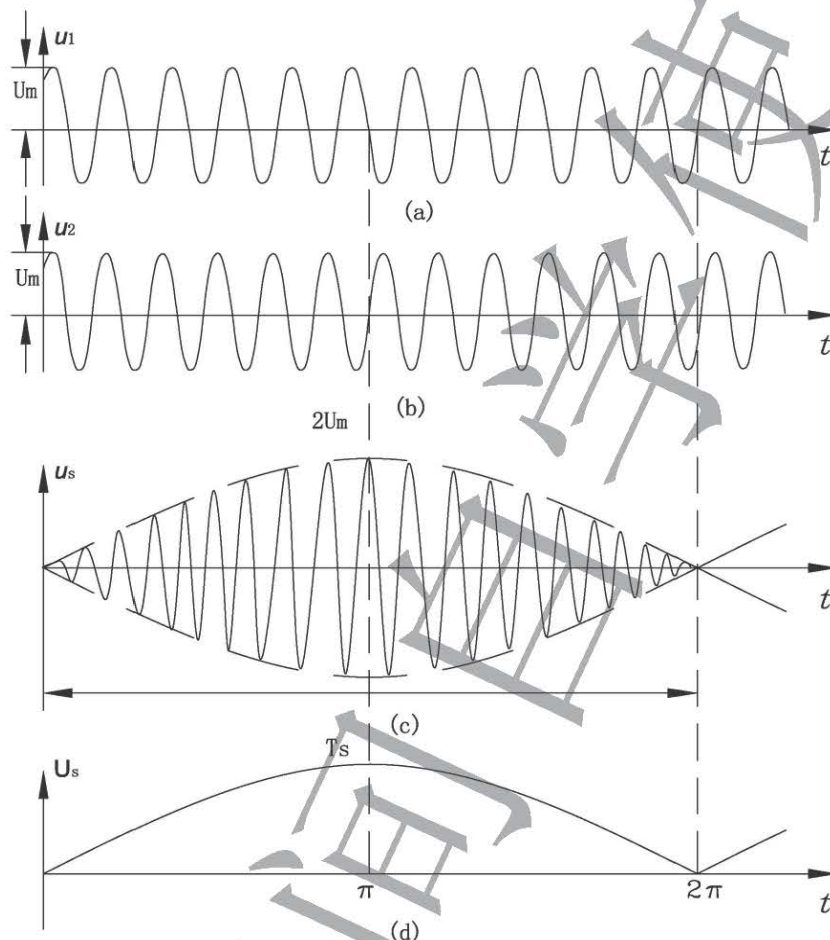


图 4-3 正弦波差频电压波形

(2) 正弦波差频脉动电压的性质

由波形图可以看出:

① 脉动电压的瞬时值随时间而按正弦规律变化。当差频脉动电压 $u_s = 0$ 时, 待并机电压 u_1 和电网电压 u_2 处在同相位时刻; 当差频脉动电压的幅值最大, 也即 $U_s = 2U_m$ 时, 待并机电压 u_1 和电网电压 u_2 正好相位差 180° , 相位相反。

② 待并机电压 u_1 和电网电压 u_2 的相位差每变化 2π , 两个电压波形重合一次。因此, 相位差变化 2π 所经过的时间称为脉动周期或差频周期 T_s 。脉动周期和滑差角频率有如下关系:

$$T_s = \frac{2\pi}{\omega_s} = \frac{2\pi}{2\pi(f_1 - f_2)} = \frac{1}{\Delta f}$$

由上式可见, 脉动周期与频差成反比, 频差越小, 则脉动周期越长, 如图4-4所示。

(3) 并车条件分析

如果运用脉动电压的概念, 则准同步并车的三个条件可以用下面两个条件代替:

① 并车时, 待并发电机主开关的动静触点应该在脉动电压为零时闭合。此时, $U_s = 0$, $U_1 = U_2$, $\delta = 0$ 。这一个条件代替了并车时电压大小相等、相位一致的两个条件。

② 当脉动周期 T_s 足够长时, 频差 Δf 足够小。并车时的频差要求小于额定频率的 1%, 50Hz 时为 0.5Hz。若 $\Delta f < 0.5\text{Hz}$, 则 $T_s = 1/\Delta f > 2\text{s}$ 时, 即可满足并车时允许频差的要求。

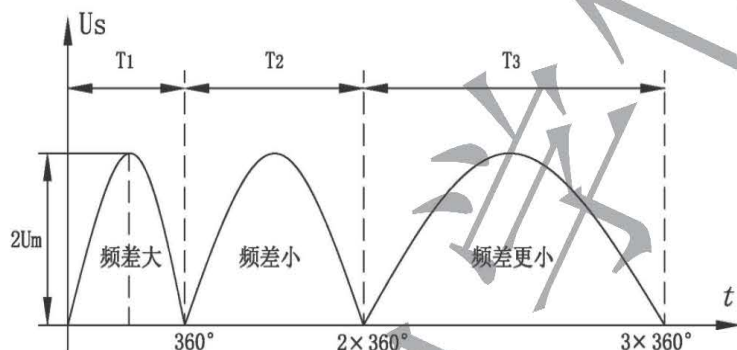


图 4-4 脉动电压与滑差角频率的关系

(4) 差频三角波电压

上面直接通过电压合成得到正弦波差频电压 U_s 的方法, 是以待并机和电网电压幅值相等为前提的。在实际并车操作中, 两者幅值往往不相等, 因此, 即使相位差 $\delta = 0$, 差频电压也不等于零, 而等于电压差 $\Delta U = U_2 - U_1$, 这将影响并车装置对 $\delta = 0$ 的检测, 降低了装置的可靠性。如图 4-5 所示是 $\Delta U \neq 0$ 时的脉动电压波形。

为了克服这一缺点, 把电压合成改为相位比较, 由此得出的差频三角波与电压幅值大小的关系就比较小。

差频三角波电压一般都由相敏电路获得。相敏电路的基本功能是将两个频率不同的电压信号, 变换成一个仅与它们之间的相位差 $\delta = \omega_s t$ 有关的直流电压。

相敏电路的输出电压就是差频三角波电压, 它与正弦形脉动电压有类似的特性, 但它不像正弦波那样通过信号电压相减而获得, 而是经过波形变换后进行叠加而获得。

产生三角波的电路在此不做分析。它的主要优点是输出三角波电压的幅值不受信号电压幅值的影响, 并且当 $\delta = 0$ 时, 总能令三角波过零。图4-6所示是 $\Delta U \neq 0$ 时的差频三角波电压波形。

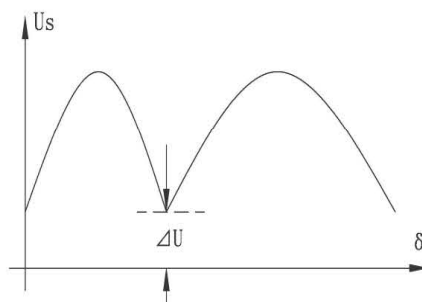
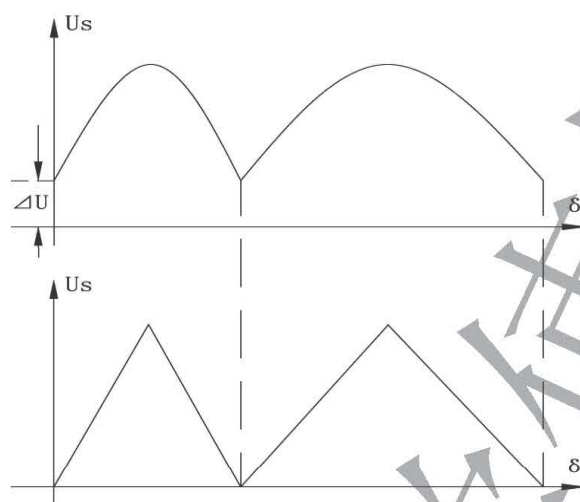


图 4-5 $\Delta U \neq 0$ 时的脉动电压波形

图4-6 $\Delta U \neq 0$ 时的差频三角波电压波形

2. 频差方向鉴别及调速脉冲控制

频差方向鉴别及调速脉冲控制是对待并发电机进行速度调节（调频操作），使待并机频率与电网一致。

频差符号鉴别是用待并发电机频率 f_1 与电网频率 f_2 进行比较，当 $(f_1 - f_2) < 0$ 为负频差 $-\Delta f$ ，向待并发电机发出增速指令； $(f_1 - f_2) > 0$ 为正频差 $+\Delta f$ ，向待并发电机发出减速指令。

原动机速度从一个值变化到另一个值，需要一定的响应时间。手动调节是采用断续调节的方式，操作者按“点动”方式扳动调速开关，等待转速（频率）变化，然后再扳动。自动速度匹配调节也是以脉冲断续调节的方式进行。

断续调节是输出调速触点闭合一段时间即调速脉冲宽度，间隔一段时间，再重复操作。脉冲宽度和间隔时间构成调节周期。调节周期（脉冲宽度或间隔时间）应随 Δf （ ΔT ）的变化而相应变化，这样可以缩短匹配调节的时间，又不会引起振荡。

3. 恒定超前控制

由于主开关在接到合闸信号到主触头闭合需要一定的动作时间（称为固有动作时间），因此，要使主开关在相角差 $\delta = 0$ 时闭合，就必须提前一个相角或者提前一个时间发出合闸信号，提前的相角或者提前的时间要求等于主开关的固有动作时间。也即“恒定超前时间”和“恒定超前相角”，超前时间 t_c 和超前相角 δ_c 的关系为 $\delta_c = \omega_s |t_c|$ 。

由于船舶主开关动作时间足够快（0.1s左右），与超前时间相对应的超前相角很小，实际中一般采用电路比较简单的恒定超前相角的方法。

（1）恒定超前相角的获得

方法：对脉动电压进行鉴幅，从而获得恒定超前相角的信号。

根据前面分析的脉动电压表达式 $U_s = 2U_m \sin(\delta/2)$ ，任一瞬间的 U_s 值总是对应于一

定大小的 δ 角, 因此要想获得恒定超前相角 δ_q , 只要检测出对应于 δ_q 的脉动电压值即可, 一般由鉴幅器电路便可实现检测, 如图 4-7 所示。

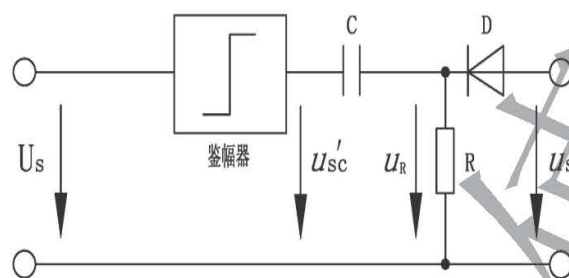


图 4-7 鉴幅器电路图

图 4-8 是采用鉴幅器获得恒定超前相角的波形图, 从图中可以看出, 对应于同一个脉动电压瞬时值 U_{s1} , 在每个周期均有两个与之对应的 δ 角 (δ_q 和 δ'_q), 其中只有 δ_q 才是超前于同步点的相角, 符合要求, 而另一个 δ'_q 是同步点之后的相角。

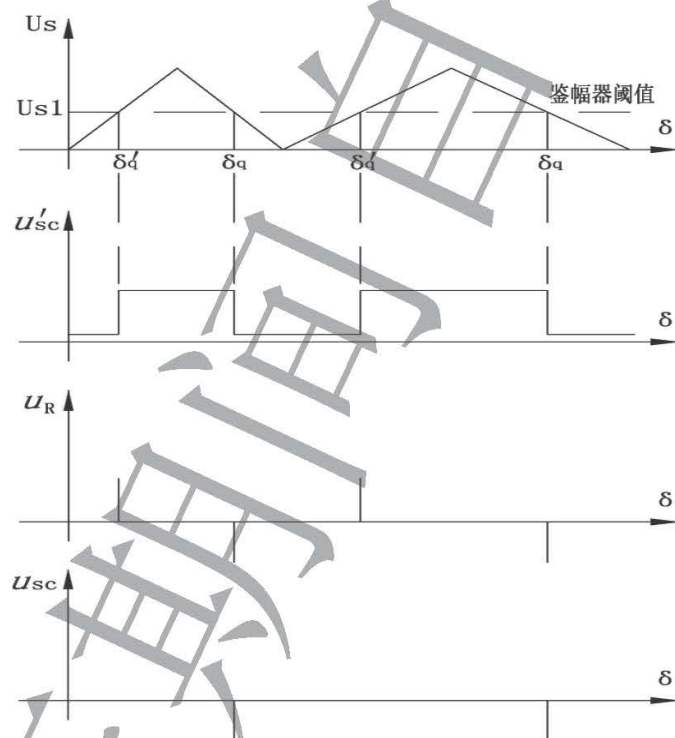


图 4-8 采用鉴幅器获得恒定超前相角的波形图

因此, 在设计电路时应考虑在鉴幅器的输出电路后一级加一个单向微分电路, 使之只能

检出单向的脉冲,也就是超前相角信号,只有负脉冲(即恒定超前相角信号)得以输出去触发合闸控制回路。

实际上,鉴幅器有一个动作电平、一个释放电平(返回电平),动作电平大于释放电平。获得的超前相角取决于释放电平,如图4-9所示。

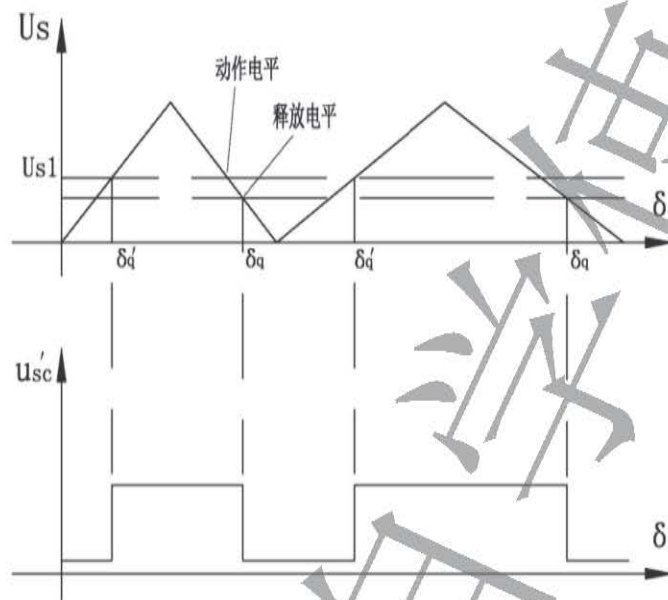


图4-9 鉴幅器的动作电平大于释放电平

(2) 恒定超前相角的整定

要使发电机主开关的动、静触头恰好在待并机与电网电压相位重合时闭合,恒定超前相角 δ_q 的大小必须满足:

$$\delta_q = \omega_{SY} \cdot t_{kd}$$

式中: ω_{SY} 是允许角频差; t_{kd} 是主开关合闸的固有动作时间。

当把角频差换算成频率差时,恒定超前相角 δ_q 的表达式:

$$\begin{aligned} \delta_q &= 2\pi \cdot \Delta f_Y \cdot t_{kd} \quad (\text{用弧度表示}) \\ &= 360 \cdot \Delta f_Y \cdot t_{kd} \quad (\text{用角度表示}) \end{aligned}$$

例如: 允许频差整定为 $\Delta f_Y = 0.5 \text{ Hz}$, 开关的固有动作时间 t_{kd} 为 0.1s, 则恒定超前相角:

$$\delta_q = 2\pi \cdot 0.5 \cdot 0.1 = 0.1\pi (\text{弧度}) = 18^\circ (\text{角度})$$

由此可知, 根据发电机主开关的合闸动作时间和允许频差的数值就可以整定自动并车装置的恒定超前相角 δ_q 。

4. 允许合闸频差检测

合闸信号一定要在恒定超前相角或恒定超前时间时发出, 但是若待并发电机的频率不符合要求, 即频差 Δf 太大, 是不允许主开关合闸的, 必须在频差允许的范围内 ($\Delta f = 0.5\text{Hz}$ 左右, 额定频率是 50Hz), 才能使发电机主开关合闸。这一任务就由频差闭锁电路来完成, 即当频差大于允许频差时, 不允许合闸。

5. 允许合闸电压差检测

本环节的作用是自动检测发电机的电压是否符合要求, 当电压差值超过允许值 ($\pm 10\%U_N$) 时, 不允许合闸信号输出, 起闭锁作用。而当电压差在允许值范围内时, 则开放合闸通道, 在其他两个条件满足的情况下, 输出合闸信号。

6. 合闸“与”门控制

合闸控制一般是由一只三端“与门”电路组成。在相位、频差、压差三个条件同时满足时, 就送出合闸信号, 主开关合闸。只要其中之一不满足, 就不允许输出合闸信号。

4.3 数字式自动并车原理分析

采用微处理器 CPU 技术的数字式自动并车装置, 与由模拟电子及数字电子电路组成的模拟式自动并车装置相比较, 在自动并车的实现方式上完全不同。采用微处理器技术来实现自动并车控制时, 除采用必要的信号检测单元完成数据采集外, 主要的控制和处理环节均由程序完成。本节采用西门子公司 200SMART 的 PLC 控制为例分析并车控制的主要环节。

1. 电网电压及待并机电压的电压差鉴别

采用电压变送器, 可以将电网电压及待并机电压变换成标准电信号 ($0\sim 20\text{mA}$), 通过 PLC 模拟量模块的 A/D 转换单元, 转变成数字信号, 然后编写一个 $\Delta u < 10\%U_N$ 的程序段即可。

根据规范要求, 发电机在正常负载情况下机端电压的静态调整率应在 $\pm 2.5\%$ 之内, 目前船用发电机自励恒压装置的调压精度都能保证在并车允许的范围内。而发电机投入并联时的电压差允许在 10% 以内, 因此自动并车装置一般不必设置电压调节环节, 只需要设置电压闭锁环节。但是要考虑到船舶电网大功率负载变化时, 引起的电压超限。

2. 频差方向鉴别及频率调节

根据规范要求, 并车合闸时的频差应不超过额定频率的 1% (额定频率是 50Hz 时是 0.5Hz), 频差周期 ($T_s = 1/\Delta f = 2\text{s}$) 应大于 2s 。在实际并车时, 为了使待并机在合闸瞬间即带上小部分负载, 防止出现逆功率状态, 同时又避免大的冲击电流, 将并车合闸时的频差控制在

0.3Hz~0.5Hz。如果在设定的时间内，频率的调节仍不能使频差在允许范围内，则控制器会发出“频率异常报警”。

图 4-10 是数字式自动并车频率调节流程图。其主要流程如下：

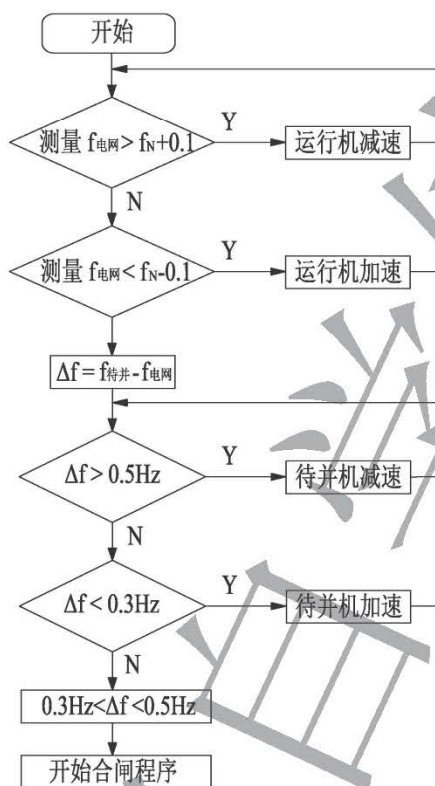


图 4-10 数字式自动并车频率调节流程图

(1) 首先采用计时或者是计数的方法，利用 PLC 中的高速计数器，编程计算出电网运行机和待并机的频率值，在程序中采用直接比较法检测频差的大小和方向。

频率测量的工作原理如下：

通过方波变换模块将同步发电机或电网的正弦波电压信号转换成方波信号，然后运用 PLC 的输入中断和高速计数器功能来实现对频率信号的检测。下面以电网频率信号的检测为例来说明频率测量的工作原理，其主要测量电路如图 4-11 所示。

从电压互感器取来的 110V 交流电压信号 u 经过变压器 T1 变为 24V 交流电压信号，然后经过方波变换模块变换成同频率的电压方波信号（从 11 端输出），该信号输入到 PLC 的 I0.0 口，并启动该输入口的上升沿中断事件 0；同时将计数器 HSC1 设置在模式 0，将 10KHz 的基准脉冲输入到该高速计数器的时钟计数口 I0.1。

当系统开始工作，在电压方波上升沿时，PLC 进入上升沿中断，高速计数器开始计数，记录产生中断的个数（即电压方波的周期个数），当中断个数达到设定值 n 时，读出高速计数器此时的计数值，设为 N ，并将中断个数值和高速计数器值清零，以备下次测量使用。

根据基准脉冲的频率以及设定值 n 和计数值 N 的关系, 可以计算出电网的频率为 $f = (10K)n/N$ 。这里需要注意的是 n 的取值要合适, 其取值越大测量误差越小, 但同时测量周期也越长, 时效性越差, 综合时效性和准确性考虑, 一般取 $n=5$ 。

(2) 然后调节电网运行机频率为额定值, 额定值控制在 50Hz 的正负 0.1Hz 之内。调节信号为等宽度脉冲。

(3) 调节待并机频率, 使待并机频率高于运行机, 并且频差为 $0.3\text{Hz} < \Delta f < 0.5\text{Hz}$, 满足并车时频差条件在 1% , 也即 0.5Hz 之内。调节信号为等宽度脉冲。

满足上述条件后, 即可进入相位差条件的鉴别控制程序。

上面的流程图是以方波信号测得频率信号来进行频差鉴别。此外, 也可以采用模拟量测量法, 将频率信号转换为标准电压信号, 送入 PLC 的模拟量输入接口, 然后按并车流程进行频率的调节。

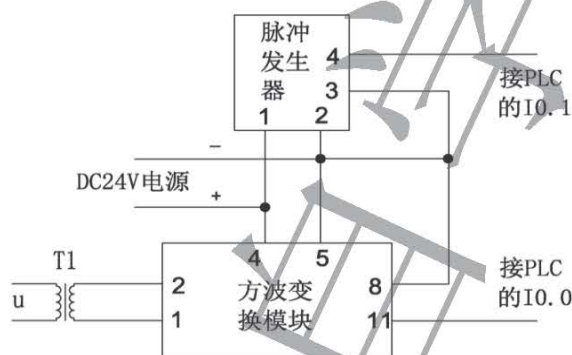


图 4-11 电网频率检测电路

3. 相位差鉴别控制

相位一致是船舶同步发电机并车操作的必备条件之一, 因此发电机并车操作时一定要对相位信号进行检测, 以满足同相位的要求。由于主开关从接收到合闸指令到主触头闭合需要一段动作时间 (称固有动作时间), 所以若想在 $\delta = 0$ 的瞬间合上主开关, 就需要提前一段特定的时间或者提前一个特定的相角发出指令进行合闸, 并且要求这个提前量必须要和主开关固有动作时间相等。因此, 自动准同步并车装置分为两种: 采用恒定超前时间的并车装置和采用恒定超前相角的并车装置。

在采用 PLC 来实现相位差鉴别时, 常用的方法是时间差法。这种方法是利用测量电网和待并发电机电压的方波上升沿的时间差, 以此来获得实际超前时间。实际超前时间与理论超前时间相比较, 当满足条件时发出合闸指令; 若不满足条件, 则程序返回, 再次检测实际超前时间。

图 4-12 是电网电压 U_w 和待并发电机电压 U_d 经方波变换模块转变为同频率的方波信号。

这里, 以电网电压过零做为基准点进行分析:

图中 T_W 、 T_d 分别表示电网电压和待并发电机电压的周期； Δt_0 表示待并发电机电压方波信号滞后电网电压方波信号的时间差，也是 PLC 内部计数器要测量的时间差。

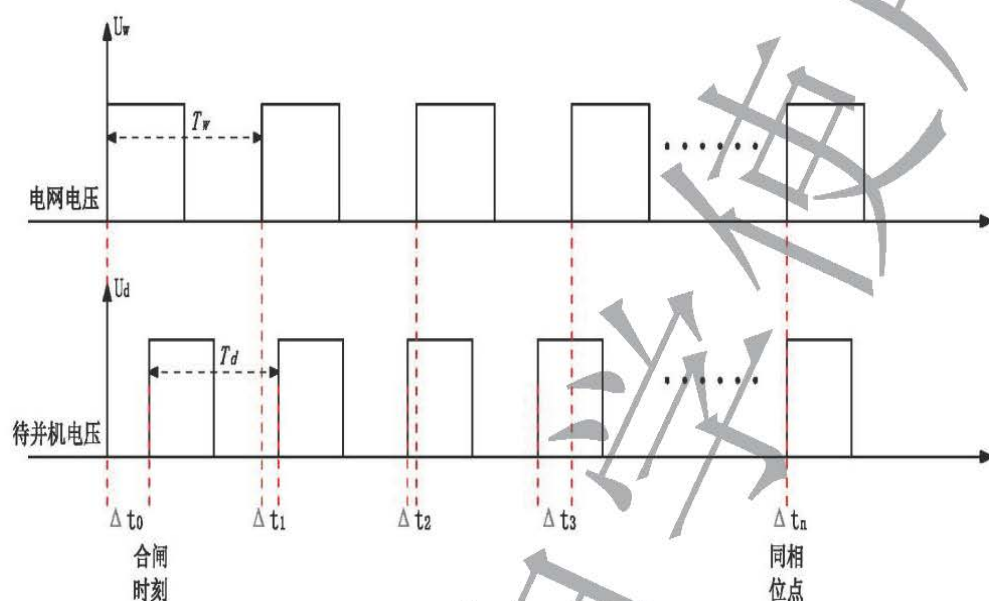


图 4-12 发电机和电网电压变换后的方波信号

Δt_1 是过一个周期后两个方波上升沿的时间差：

$$\Delta t_1 = (T_d + \Delta t_0) - T_W = \Delta t_0 - (T_W - T_d)$$

Δt_2 是过两个周期后两个方波上升沿的时间差：

$$\Delta t_2 = (2T_d + \Delta t_0) - 2T_W = \Delta t_0 - 2(T_W - T_d)$$

Δt_3 是过三个周期后两个方波上升沿的时间差：

$$\Delta t_3 = (3T_d + \Delta t_0) - 3T_W = \Delta t_0 - 3(T_W - T_d)$$

Δt_n 是过 n 个周期后两个方波上升沿的时间差：

$$\Delta t_n = (nT_d + \Delta t_0) - nT_W = \Delta t_0 - n(T_W - T_d)$$

假设经过 n 个周期后，两个电压方波达到同相位，也即开关实际合闸点。则有：

$$\Delta t_n = (nT_d + \Delta t_0) - nT_W = \Delta t_0 - n(T_W - T_d) = 0$$

从合闸时刻按下合闸按钮开始, 经过 n 个待并机电压周期, 达到同相位点, 即实际开关合闸点。这个时间是主开关的固有动作时间, 即: $t_{ACB} = nT_d$ 。

$$\text{根据 } \Delta t_n = (nT_d + \Delta t_0) - nT_W = \Delta t_0 - n(T_W - T_d) = 0$$

可以得到:

$$\frac{\Delta t_0}{(T_W - T_d)} = \frac{t_{ACB}}{T_d}$$

$$\Delta t_0 = (T_W - T_d) \cdot f_d \cdot t_{ACB} = \frac{f_d - f_W}{f_W} \cdot t_{ACB}$$

其中 t_{ACB} 为主开关固有动作时间, 电网及待并机频率可以通过测频程序计算获得, 也就是说, 在 PLC 程序中计算出恒定超前时间等于 Δt_0 即可发出合闸脉冲。

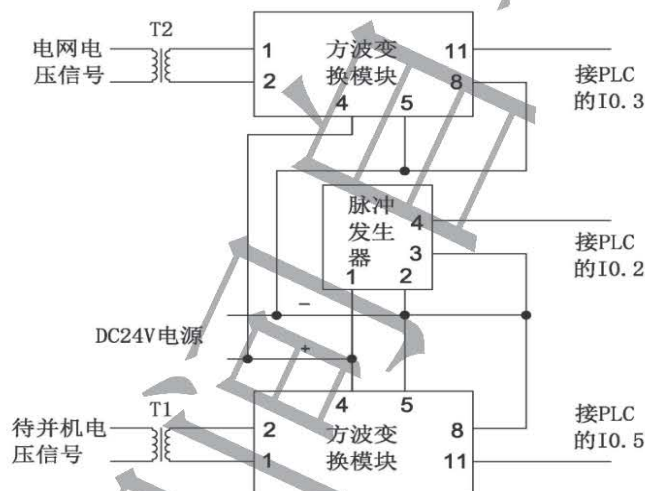


图 4-13 并车超前时间检测电路

其主要硬件电路图如图 4-13 所示。

相位差测量的工作原理如下:

通过将电网电压和待并机电压转换成方波信号, 然后运用 PLC 的高速计数器和输入口中断功能来实现对两者相位差的检测。由电压互感器采集来的电网和待并发电机的电压信号 (AC100V) 经过变压器变为 24V 交流电压信号, 然后通过方波变换模块转换成同频率方波信号。将 PLC 的高速计数器 HSC2 设置为模式 1, 待并机电压方波信号接到该高速计数器的复位口 I0.5, 并设置为低电平复位有效, 10KHz 基准脉冲信号接到 HSC2 的时钟计数口 I0.2,

电网电压方波信号接到 PLC 的 I0.3 口, 并启动该输入口的上升沿中断事件 6。

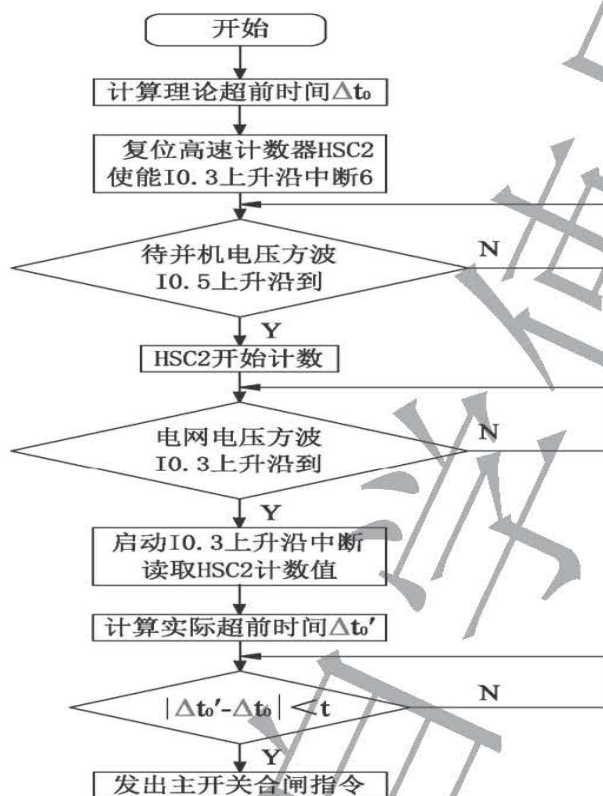


图 4-14 超前时间检测程序流程图

高速计数器 HSC2 和 I0.3 口上升沿中断配合的程序控制流程如图 4-14 所示: 在待并机电压方波信号为低电平时, 对 HSC2 的计数值进行复位并保持在 0, 当待并机电压方波信号由低电平变为高电平时, HSC2 开始计数, 其计数值来自于时钟计数口 I0.2 所接的 10KHz 基准脉冲, 在电网电压方波由低电平变为高电平时会产生一个输入口上升沿中断, 利用该中断将此时高速计数器 HSC2 的计数值读出来。

设高速计数器 HSC2 的计数值为 n , 由于基准脉冲频率为 10KHz, 由两者可以求得待并机电压超前电网电压的实际超前时间为 $\Delta t'_0 = n/10K$, 然后再将其与理论提前合闸时间 Δt_0 相比较, 当满足 $\Delta t'_0 = \Delta t_0$ 时, 就是发出合闸指令的时刻。

但是在实际的检测中很难检测到 $\Delta t'_0 = \Delta t_0$ 的时刻, 在这种情况下, 就要对该条件进行适当的放宽处理, 当 $\Delta t'_0$ 满足 $|\Delta t'_0 - \Delta t_0| \leq t$ 时, 就认为满足了合闸提前量的要求, 通常取 $t = 4 \times 10^{-4}$ 。

本章小结

本章讲述的主要内容有：自动准同步并车装置的基本功能；自动准同步装置的工作原理；模拟式自动并车原理分析；差频脉动电压的概念；恒定超前控制的概念；数字式自动并车原理分析。

本章的重点内容如下：

1. 自动准同步并车装置的基本功能。
2. 差频脉动电压的概念。
3. 恒定超前控制的概念。

复习思考题

- 4-1 叙述船舶电站中需要进行并车操作的几种情况。
- 4-2 叙述自动准同步并车装置的控制方案和基本功能。
- 4-3 船舶电站的自动准同步装置，按操作功能主要分为哪几个部分。
- 4-4 叙述差频电压的概念，引入差频电压后，准同步并车的条件可以用哪几个条件代替。
- 4-5 如图 4-10 所示是数字式自动并车频率调节流程图，叙述其工作过程。