

摘 要

作为主推进动力装置的船舶柴油机具有大惯性、多变量、多输出、运行工况复杂的特点，其工作状况好坏直接影响船舶与人身安全以及船舶经营利润。船舶柴油机冷却水的温度是影响柴油机工作的重要热工参数，精确控制冷却水的温度，对于提高柴油机的动力性、减少废气的产生、减少燃料消耗量等方面都有着重要的意义。柴油机冷却水的温度过高，会加快润滑油的老化，加速零件的磨损；柴油机冷却水温度过低（30℃以下），燃气中的酸根与水结合成酸类物质，使气缸的磨损增加。冷却水温控制的好坏直接影响柴油机的工作状态。然而由于冷却水本身的热传递过程以及系统的管路延迟使冷却水的温度变化具有了长时滞大惯性的特点，加之船舶柴油机工作状况的复杂性，给船舶柴油机温度的调节带来了很大难度，冷却水温度经常超调。

论文针对船舶柴油机冷却水温度大惯性、长时滞、易超调的特点，在深入研究船舶柴油机高温冷却水系统热力学模型与温度控制系统模型的基础上。基于前馈控制理论利用 MATLAB 仿真软件设计了两款前馈模糊控制器，并对控制效果进行了仿真对比试验。结果表明引入前馈模糊控制环节以后系统的控制速度与抗扰动能力显著提高。为了提高船舶柴油机冷却水温度控制系统的可靠性以及控制效果的快速性与准确性，本文设计了一套基于 PLC S7-200 的新型船舶柴油机冷却水温度控制系统，系统具有前馈模糊控制功能，有自动与手动运行两种工作模式，拥有人机界面，具有高低温报警、系统相关参数的设定及修改等功能。

关键词：船舶柴油机；冷却水温度；模糊控制；Matlab 仿真；PLC

ABSTRACT

Marine diesel engine is a power plant with big inertia, multi-variable, multi-output and complexity operating conditions. Its working conditions have direct impact on navigation security and ships operating profits. The temperature of cooling water of marine diesel engine is an important reference. It is very significant to control the temperature of cooling water accurately. For improving the power performance of diesel engine, decreasing the exhausting and saving fuel. If the temperature of cooling water is very high, the high temperature will speedup the ageing speed of lubricate oil, and accelerate the wear and tear of parts; if the temperature is very low (below 30℃), the acid radical in combustion air and water come into new acid, and the new acid also accelerate the corruption of the parts. So the temperature of cooling water affects the performance of diesel engine. However, due to the heat transfer process and the pipeline delay, there is a long delay and big inertia for the temperature of cooling water, combining with the complexity operating conditions of the engine, it is very difficulty to control the temperature of cooling water.

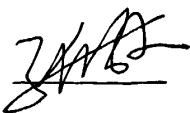
In this paper, for big inertia, long delay and easy overshooting of the temperature, thermodynamic model and control system model of cooling water of marine diesel engine are studied. Based on feedforward control theory, two fuzzy controllers are designed, and control effects of the controllers are compared in MATLAB. The simulation results show that the control speed and anti-disturbance ability are significantly improved after feedforward fuzzy controller introduced. In order to improve reliability, control speed and accuracy of the control system, in this paper, a new temperature control system based on S7-200 PLC is designed. The new control system has the function of feedforward fuzzy control, automatic and manual operation modes. With the HIM of the control system, system parameters can be set and modified, also abnormal condition such as high and low temperature can be alarmed.

Key Words: Marine Engine; Temperature of Cooling Water; Fuzzy Control; Matlab Simulink; PLC

大连海事大学学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：本论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，撰写成硕士学位论文“船舶柴油机冷却水温度控制系统的设计”。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表或未公开发表的成果。本声明的法律责任由本人承担。

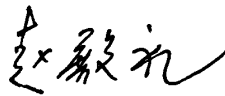
学位论文作者签名：

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者及指导教师完全了解大连海事大学有关保留、使用研究生学位论文的规定，即：大连海事大学有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权大连海事大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，也可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。同意将本学位论文收录到《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》（中国学术期刊（光盘版）电子杂志社）、《中国学位论文全文数据库》（中国科学技术信息研究所）等数据库中，并以电子出版物形式出版发行和提供信息服务。保密的论文在解密后遵守此规定。

本学位论文属于： 保 密 ☐ 在 _____ 年解密后适用本授权书。

不保密 ☒ （请在以上方框内打“√”）

论文作者签名： 导师签名：

日期：2010年6月25日

第1章 绪论

1.1 研究背景

在船舶柴油机中燃油燃烧释放出的热量约有 30%~33%要经过气缸、气缸盖和活塞等部件散发出去^[1]。船舶柴油机冷却水担负着带走这些热量以保障受热部件处在正常温度的任务。冷却水温度的高低变化与船舶柴油机的工作性能、运行寿命有着密切的联系。精确控制冷却水的温度，对于提高柴油机的动力性、减少废气的产生、降低燃料消耗量等方面有着重要的意义。然而由于冷却水本身的热传递过程以及系统的管路延迟使冷却水的温度变化具有了长时滞大惯性的特点，加之船舶柴油机工作状况的复杂性，给船舶柴油机温度的调节带来了很大难度，而仅以柴油机冷却水出口温度这一被控量作为控制通道的输入量来进行控制难免会使冷却水温度超调^[2]。

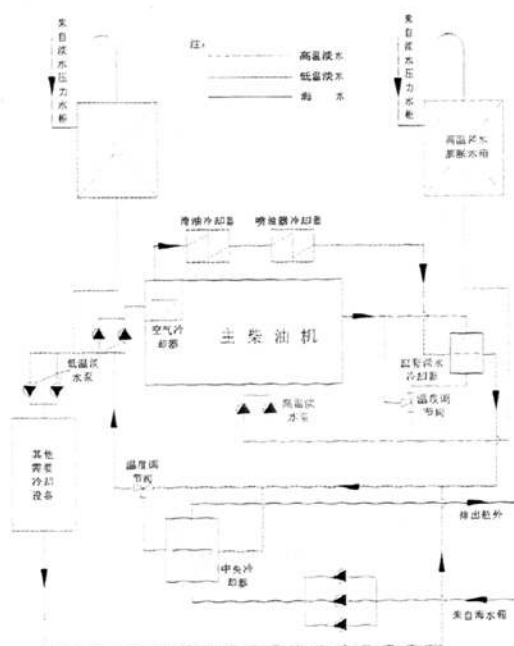


图 1.1 船舶柴油机中央冷却系统原理图

Fig.1.1 Central Cooling System of Marine Diesel Engine

目前，船舶柴油机冷却系统以中央冷却水系统为主，图 1.1 为船舶柴油机中央

冷却系统原理图。这种冷却系统的特点是使用两个不同工作温度的单独淡水循环系统：高温淡水（60~85℃）和低温淡水（30~40℃）闭式系统。高温淡水用于冷却柴油机，低温淡水用于冷却高温淡水和各种冷却器，最后由开式海水系统在中央冷却器中对低温淡水进行冷却。由此可以保证只使用一个用海水作为冷却液的冷却器。中央冷却器较传统的冷却水系统有以下优点：

（1）用于冷却柴油机的高温淡水温度相对稳定，受工况变化的影响较小，因而能保障柴油机始终在最佳冷却状态下运行。

（2）淡水在循环使用中可长时间保持清洁，维修工作量大大降低。

（3）中央冷却器及海水管系的维修工作降至最低限度。

冷却水温度自动控制系统作为中央冷却系统中的核心部分有电动、气动、液动等作用方式，目前电动控制系统在船舶上应用最为广泛，电动控制系统与其它类型的控制系统(如气动)相比，具有以下优势：

（1）无需特殊的气源和空气净化等装置。电源消失时，三通阀开度能保持在原来的位置上。

（2）能够远距离传输信号，电缆的安装比气管方便，且便于检查与维护。

（3）能够很方便地与计算机连接，适应新技术的发展，有利于机舱自动化程度的提高。

传统的冷却水温度自动控制系统的作用方法是，利用安装在船舶柴油机冷却水进口或者出口管路中的感温元件，经分压器分压把冷却水温度成比例地转换为电压信号，这个测量信号与由电位器整定的给定值电压信号相比较得到偏差信号，再经过 PD、PI 或 PID 输出一个控制信号，并将此控制信号送至脉冲宽度调制器，将连续的控制信号变成断续的脉冲信号来控制执行器的转动，从而调节三通阀的开度改变冷却水进入冷却器的旁通量，进而调节冷却水温度^[3]。大连海事大学教学实习船“育鲲”轮采用的便是 OMRON 公司生产的基于 PID 控制的 E5EN-C3T 型电动温控仪。但无论是气动控制方式还是电动控制方式目前冷却水温度的自动控制均采用单输入、单输出的 PD、PI 或 PID 闭环控制，这种控制方法很难将受多个变量制约的船舶柴油机冷却水温度稳定而精确的控制在给定的值上，从而影响了柴油机的使用寿命及运行成本。

为提高船舶柴油机运行的可靠性与经济性,目前国内外对船舶柴油机冷却水温度控制系统的研究也在逐渐深入,Alfa Laval 公司开发的 ENGRAD 控制系统不仅能够对淡水温度进行 PI 调节,而且具有根据热负荷的变化对海水泵进行流量模式转换的功能,同时系统还能够定时对海水系统进行清洗^{[4][5]}。OMRON 公司研制的 E5EN-C3T 型电动温控仪能够实现对系统的 PID 控制,并能够根据运行工况方便地调节 PID 参数。文献[3]“基于单片机的船舶柴油机冷却水温度控制系统”以及文献[6]“船舶柴油机冷却水温度智能控制系统研究与设计”均提出了基于单片机的冷却水温度控制系统的设计思路与设计方法,并针对船舶柴油机冷却水系统的时滞特性提出了“带有 Smith 预估器的 PID”控制方法。文献[7]提出了“船用柴油机冷却水温度的模糊控制”方法,控制系统接收油门刻度、扫气压力、进机温度差等多种前馈信号进行模糊控制,克服了单输入、单输出的 PD、PI 或 PID 控制的缺陷;文献[8]提出了基于神经网络的模糊 PID 控制方法,该方法的优点是控制系统具有适应控制环境变化和自学习的能力,当柴油机运行工况发生变化时仍具有很好的控制性能。

1.2 本文研究的内容及意义

本文针对船舶主机缸套冷却水温度自动控制系统进行了研究,针对柴油机冷却水温度大惯性、易超调的特点,本文作了以下工作:

(1) 对船舶柴油机高温淡水回路的热力学模型及控制系统模型进行了研究,并利用 Ziegler-Nichols 方法对控制系统 PID 参数进行了整定。

(2) 在传统 PID 控制基础上系统引入前馈模糊控制环节,在分析柴油机各种工况与调速特性的基础上对前馈模糊控制环节引入参数做了定性分析,分别以柴油机排烟温度、油门拉杆位移为前馈信号进行了前馈模糊控制器的设计,并进行了基于这两款模糊控制器的综合控制系统的控制效果仿真分析研究。

(3) 针对船舶机舱的特殊环境,提出了基于 S7-200PLC 的船舶柴油机冷却水温度控制系统的设计思路,并对控制系统各硬件环节作了研究与设计,在此基础上利用 HITECH ADP6 软件设计了系统人机界面的控制画面,并利用 STEP7-Micro/WIN 编程软件进行了控制系统部分 PLC 程序的编写。

(4) 针对实船海水泵运行状况(通常机舱设置两台功率较大的海水泵,一台

作为备用，工作状态下另一台海水泵运行，通过人工调节海水泵出口开度来调节海水流量，且一般情况下海水泵出口阀开度仅为全开状态的 $1/5$ 左右)，引入海水变流量自动控制环节，系统选用三台功率不同的海水泵按一定的运行模式进行合理组合，由 PLC 中央处理器控制四种流量模式之间的转换，最大程度地实现节能及海水流量的优化控制。

船舶柴油机冷却水温度控制系统是船舶柴油机自动控制系统及机舱自动化系统的重要组成部分。深入研究船舶柴油机冷却水温度控制系统，不仅能够促进轮机综合状态监控和故障诊断系统的发展，提高船舶机舱自动化程度，同时对于能源节约、船舶安全性与可靠性的提高都具有重要的意义。

第 2 章 船舶柴油机冷却水温度控制系统模型的研究

2.1 船舶柴油机高温冷却水系统的热力学模型的研究

典型的船舶柴油机中央冷却水系统由高温淡水回路、低温淡水回路以及海水回路三部分组成，如图 1.1 所示。本文主要研究高温淡水回路的传热与流量模型。

图 2.1 为船舶柴油机缸套的热量传递关系原理图。根据热量的平衡关系可得出以下结论：单位时间缸套水腔内冷却水及缸套的蓄热量变化等于单位时间内由于柴油机燃烧传给缸套的热量减去单位时间内冷却水带走的热量，再减去单位时间内系统通过辐射等传热方式传给环境的热量^{[9][10][11]}。

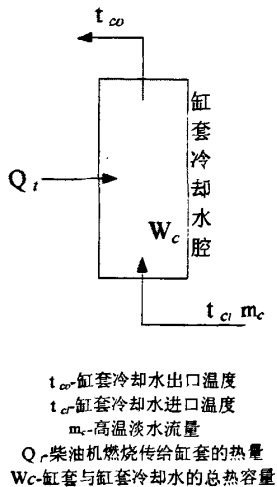


图 2.1 柴油机缸套冷却热量传递关系图

Fig.2.1 Heat Transfer Relationship of Cylinder Liner Cooling

图 2.2 为船舶柴油机缸套水冷却器热量传递关系原理图。根据缸套冷却水侧的热量传递关系可得出以下结论：单位时间内高温水侧蓄热量的变化量等于单位时间内缸套冷却水带来的热量减去单位时间内传递给低温水侧的热量。根据低温冷却水侧的热量传递关系可以得出以下结论：单位时间内低温水侧蓄热量的变化等于单位时间内高温水侧传递给低温水侧的热量减去单位时间内低温冷却水带走的热量^{[12][13]}。

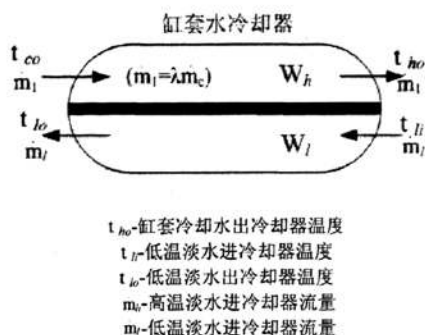


图 2.2 柴油机缸套冷却器热量传递关系图

Fig.2.2 Heat Transfer Relationship of Cylinder Liner Water Cooler

由图 2.3 可知高温淡水回路的流量传递关系：单位时间内流入柴油机的高温淡水流量 $\dot{m}_c$ 等于单位时间内流经缸套冷却器的高温淡水流量 $\dot{m}_i$ 与单位时间内三通阀的旁通淡水流量 $\dot{m}_2$ 之和^{[14][15]}。由以上热量及流量传递关系可得出船舶柴油机高温冷却水系统的热力学模型^{[16][17]}。

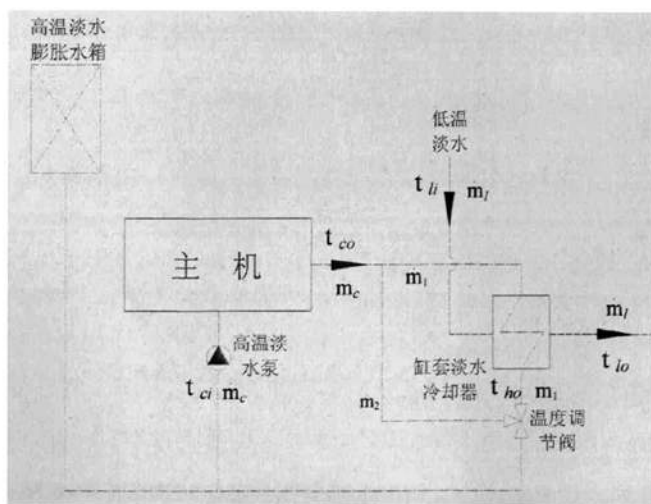


图 2.3 船舶柴油机高温冷却水系统原理图

Fig.2.3 Schematic Diagram of High Temperature Cooling Water System

$$W_c \frac{dt_{co}}{ds} = Q_t - \dot{m}_c C_w (t_{co} - t_{ci}) - \frac{1}{R_1} (t_{co} - t_a) \quad (2.1)$$

$$W_h \frac{dt_{ho}}{ds} = \dot{m}_1 C_w (t_{hi} - t_{ho}) - \frac{1}{R_2} \Delta t_m \quad (2.2)$$

$$W_l \frac{dt_{lo}}{ds} = \frac{1}{R_2} \Delta t_m - \dot{m}_l C_w (t_{lo} - t_{li}) \quad (2.3)$$

$$\dot{m}_c = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad (2.4)$$

式中, C_w 为淡水的比热, 这里假设高低温淡水的比热相同。 R_1 为柴油机散发给环境的热阻, R_2 为缸套冷却器的传热热阻, t_a 为环境温度, Δt_m 为缸套冷却器的平均温差 $\Delta t_m = \frac{(t_{ho} + t_{co}) - (t_{lo} + t_{li})}{2}$ 。

$$\Delta t_m = \frac{(t_{ho} + t_{co}) - (t_{lo} + t_{li})}{2}。$$

对于 (2.1) (2.2) (2.3) 式整理得:

$$\frac{dt_{co}}{ds} = - \left[\frac{C_w \dot{m}_c}{W_D} + \frac{1}{R_1 W_D} \right] t_{co} + \frac{C_w \dot{m}_c}{W_D} t_{ci} + \frac{Q_l}{W_D} + \frac{1}{R_1 W_D} t_a \quad (2.5)$$

$$\frac{dt_{ho}}{ds} = \left(\frac{\dot{m}_1 C_w}{W_1} - \frac{1}{2R_2 W_1} \right) t_{co} - \left(\frac{\dot{m}_1 C_w}{W_1} + \frac{1}{2R_2 W_1} \right) t_{ho} + \frac{1}{2R_2 W_1} t_{lo} + \frac{1}{2R_2 W_1} t_{li} \quad (2.6)$$

$$\frac{dt_{lo}}{ds} = \frac{1}{2W_2 R_2} t_{co} + \frac{1}{2W_2 R_2} t_{ho} - \left(\frac{1}{2W_2 R_2} + \frac{\dot{m}_l C_w}{W_2} \right) t_{lo} - \left(\frac{1}{2W_2 R_2} - \frac{\dot{m}_l C_w}{W_2} \right) t_{li} \quad (2.7)$$

对于 (2.4) 式, 假设温度调节阀处于某一开度时流经缸套冷却器的高温淡水比例为 λ , 则有:

$$\dot{m}_1 = \lambda \dot{m}_c \quad (2.8)$$

$$\dot{m}_2 = (1 - \lambda) \dot{m}_c \quad (2.9)$$

$$\dot{m}_c \cdot t_{ci} = \dot{m}_1 \cdot t_{ho} + \dot{m}_2 \cdot t_{co} \quad (2.10)$$

以各温度的变化量来表示方程 (2.5) (2.6) (2.7) (2.8) (2.9) (2.10), 即可得高温淡水回路的热力学数学模型:

$$\frac{d\varphi_{co}}{ds} = -\left[\frac{C_w \dot{m}_c}{W_D} + \frac{1}{R_1 W_D}\right]\varphi_{co} + \frac{C_w \dot{m}_c}{W_D}\varphi_{ci} + \frac{Q_f}{W_D} + \frac{1}{R_1 W_D}\Delta t_a \quad (2.11)$$

$$\frac{d\varphi_{ho}}{ds} = \left(\frac{\dot{m}_1 C_w}{W_1} - \frac{1}{2R_2 W_1}\right)\varphi_{co} - \left(\frac{\dot{m}_1 C_w}{W_1} + \frac{1}{2R_2 W_1}\right)\varphi_{ho} + \frac{1}{2R_2 W_1}\varphi_{lo} + \frac{1}{2R_2 W_1}\Delta t_{li} \quad (2.12)$$

$$\frac{d\varphi_{lo}}{ds} = \frac{1}{2W_2 R_2}\varphi_{co} + \frac{1}{2W_2 R_2}\varphi_{ho} - \left(\frac{1}{2W_2 R_2} + \frac{\dot{m}_1 C_w}{W_2}\right)\varphi_{lo} - \left(\frac{1}{2W_2 R_2} - \frac{\dot{m}_1 C_w}{W_2}\right)\Delta t_{li} \quad (2.13)$$

$$\dot{m}_1 = \lambda \dot{m}_c \quad (2.14)$$

$$\dot{m}_2 = (1 - \lambda)\dot{m}_c \quad (2.15)$$

$$\dot{m}_c \cdot \varphi_{ci} = \dot{m}_1 \cdot \varphi_{ho} + \dot{m}_2 \cdot \varphi_{co} \quad (2.16)$$

将方程 (2.14) (2.15) (2.16) 代入 (2.11) (2.12) (2.13) 可将高温淡水回路的热力学数学模型进一步化简为:

$$\frac{d\varphi_{co}}{ds} = -\left[\frac{C_w \lambda \dot{m}_c}{W_D} + \frac{1}{R_1 W_D}\right]\varphi_{co} + \frac{C_w \lambda \dot{m}_c}{W_D}\varphi_{ho} + \frac{Q_f}{W_D} + \frac{1}{R_1 W_D}\Delta t_a \quad (2.17)$$

$$\frac{d\varphi_{ho}}{ds} = \left(\frac{\lambda \dot{m}_c C_w}{W_1} - \frac{1}{2R_2 W_1}\right)\varphi_{co} - \left(\frac{C_w \lambda \dot{m}_c}{W_1} + \frac{1}{2R_2 W_1}\right)\varphi_{ho} + \frac{1}{2R_2 W_1}\varphi_{lo} + \frac{1}{2R_2 W_1}\Delta t_{li} \quad (2.18)$$

$$\frac{d\varphi_{lo}}{ds} = \frac{1}{2W_2 R_2}\varphi_{co} + \frac{1}{2W_2 R_2}\varphi_{ho} - \left(\frac{1}{2W_2 R_2} + \frac{\dot{m}_1 C_w}{W_2}\right)\varphi_{lo} - \left(\frac{1}{2W_2 R_2} - \frac{\dot{m}_1 C_w}{W_2}\right)\Delta t_{li} \quad (2.19)$$

2.1.1 模型的实例验证与仿真结果分析

通过查找 YANMAR 6N280-SN 型柴油机的相关设计手册, 将相关查找出的相关参数代入方程(2.17)(2.18)(2.19)中, λ 设定为 0.4, 并利用 Matlab7.0 中 Simulink 的 State-Space 模块进行仿真, 图 2.4 为利用 State-Space 模块搭建的仿真框图^[18],

此时 Step 模块的 Step time 设定为 100, Initial value 设定为 0, Final value 设定为 100, 即假设系统开始时处于稳定状态, 100 秒时给系统一个 100kw 的功率突加扰动, 图 2.5 为突加功率扰动时仿真曲线。

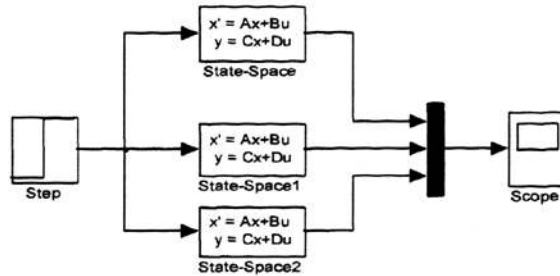


图 2.4 突加功率扰动时的高温冷却水温度变化仿真框图

Fig.2.4 Simulation Block Diagram of High Temperature Cooling Water When Sudden Power Disturbances

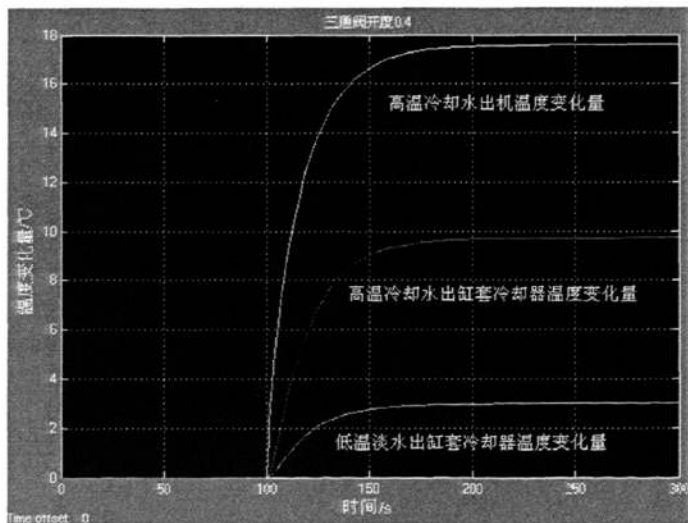


图 2.5 三通阀开度为 0.4 时突加功率扰动的高温冷却水温度变化曲线

Fig.2.5 Temperature Variation Curve of Sudden Power Disturbances When Three-way Valve Opening is 0.4

修改温度调节阀的开度系数 λ 由 0.4 增加到 0.6, 可以得出新的温度变化曲线, 如图 2.6 所示。

仿真结果分析: 考虑到仿真过程中的以下因素:

(1) 由高温淡水回路的热力学数学模型可知, 给系统突加的 50kw 功率扰动全部以热能的形式传递给缸套冷却水;

(2) 在阀门开度固定不变的情况下, 由于冷却器冷却量的限制, 高温淡水温度显著升高;

(3) 由于未考虑系统的时滞环节, 各出口温度在突加负载后迅速升高到热平衡状态。

综上所述, 仿真结果较能反映实际情况, 同时也证明了所建高温淡水冷却回路数学模型的有效性。

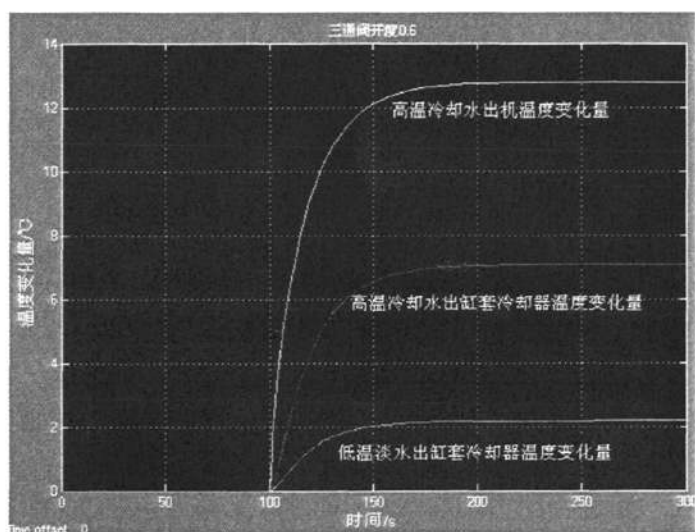


图 2.6 三通阀开度为 0.6 时突加功率扰动的高温冷却水温度变化曲线

Fig.2.6 Temperature Variation Curve of Sudden Power Disturbances When Three-way Valve

Opening is 0.6

2.2 船舶柴油机冷却水温度控制系统 PID 参数的研究

PID 控制器以其结构简单、稳定性好、可靠性高等优点被广泛应用于工业过程控制当中。船舶柴油机冷却水的温度控制过程广泛采用基于 PID 的闭环控制系统, 如图 2.6 所示:

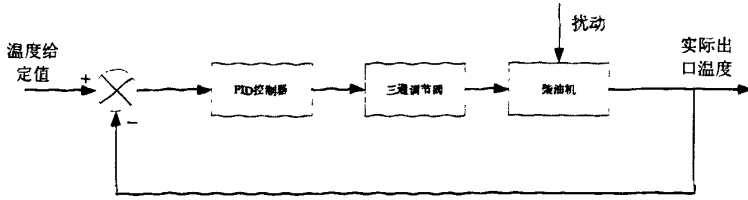


图 2.7 船舶柴油机冷却水温度闭环 PID 控制简图

Fig.2.7 PID Closed-loop Control Diagram of Cooling Water Temperature

PID控制是一种比例、积分、微分并联控制器，其运动方程为^[19]：

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{d}{dt} e(t)] \quad (2.20)$$

式中： $u(t)$ 和 $e(t)$ 分别为系统的控制信号和误差信号， K_p 、 T_i 、 T_d 为需要调节的参数，其相关传递函数为：

$$G(s) = K(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \quad (2.21)$$

PID 控制器中 K_p 、 T_i 、 T_d 对调节过程有以下影响：

(1) 比例系数 K_p

比例系数 K_p 越大，控制器对被控量偏差的控制作用就越大，纠正偏差的速度也就越快，有利于减小系统的稳态误差，但是过大的比例系数会使系统产生严重的振荡，使系统变得不稳定。同样比例系数过小，系统不能及时纠正偏差，也达不到良好的控制效果^[20]。

(2) 积分时间常数 T_i

T_i 的倒数 $1/T_i$ 称为积分速度，表示被控量偏差积累的快慢，所以 T_i 大表示偏差积累速度慢，积分作用弱，反之 T_i 小表示偏差积累速度快，积分作用强。较大的积分时间常数能够降低系统超调，有利于系统稳定，但由于积分作用较弱使系统消除静态偏差的时间延长。同样积分时间常数过小就会使系统的振荡次数增加，降低了系统的稳定性。

(3) 微分时间常数 T_d

微分控制作用的特点是被控量偏差一旦出现, 控制器就立即输出一个较大的控制作用, 然后逐步消失。微分控制作用大都在控制对象惯性大和时间延迟作用比较明显的系统中使用, 用于发挥超前控制作用迅速纠正偏差。因此微分时间常数 T_d 越大微分作用就越强, 反之则微分作用越弱。太小的微分时间常数控制过程的质量改善不明显, 而太大的微分时间常数会使系统的稳定性不但得不到改善, 反而使系统趋向振荡。只有选择合适的 T_d , 才能获得比较满意的过度过程^[20]。

由以上分析可以看出, K_p 、 T_i 、 T_d 三个参数调整的合理与否直接关系到 PID 控制器的控制效果。

从PID控制器的3个参数的作用可以看出3个参数直接影响控制效果的好坏, 所以要取得较好的控制效果, 就必须合理的选择控制器的参数。总之, 比例控制主要用于偏差的“粗调”, 保证控制系统的“稳”; 积分控制主要用于偏差的“细调”, 保证控制系统的“准”; 微分控制主要用于偏差的“细调”, 保证控制系统的“快”。

2.2.1 控制系统 PID 参数整定方法

如果被控对象的数学模型无法精确获得, 则不能用解析法去设计控制器。对于这种情况可借助于实验方法来整定控制器的参数, Ziegler-Nichols在大量实验的基础上提出了PID控制器的两种参数整定公式, 下面对两种方法的参数整定过程分别进行简单介绍。

(1) Ziegler-Nichols 临界比例法PID参数整定^{[21][22]}

Ziegler-Nichols 临界比例法整定比例系数 K_p 的思想是, 首先置 $T_i = \infty$, $T_d = 0$ 然后将 K_p 值由零逐渐增大到系统的输出呈现持续的等幅振荡, 此时对应的 K_p 值称为临界增益, 用 K_u 表示, 并记下震荡的周期 T_u , 利用公式2.22即可得到整定后的 K_p 、 T_i 、 T_d 值。

$$K_p = 0.6K_u, T_i = 0.5T_u, T_d = 0.125T_u \quad (2.22)$$

(2) Ziegler-Nichols 响应曲线法PID参数整定^[23-26]

Ziegler-Nichols 响应曲线法是一种不需要建立被控对象的数学模型, 而仅依赖于设备阶跃响应曲线的参数整定方法。根据设备的 s 型响应曲线, 图2.8所示, 可获得控制对象增益 K 、滞后时间 τ 以及时间常数 T , 具有 s 型阶跃响应曲线的装置, 其传递函数可用公式2.23式近似描述。利用公式2.24即可得到整定后的 K_p 、 T_i 、 T_d 值。

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts+1} \quad (2.23)$$

$$K_p = 1.2 \frac{T}{K\tau}, \quad T_i = 2\tau, \quad T_d = 0.5\tau \quad (2.24)$$

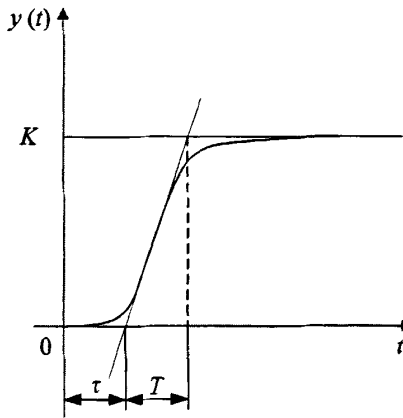


图 2.8 Ziegler-Nichols S 型响应曲线

Fig.2.8 S Type Response Curve of Ziegler-Nichols

2.2.2 基于响应曲线法的 PID 控制器参数整定与控制效果仿真

通过研究船舶柴油机高温冷却水出水温度随温度调节阀开度变化的响应曲线可以得到冷却水出口温度随三通阀阀门位置变化的近似传递函数^{[8][27]}:

$$G(s) = \frac{17.133}{152.5s+1} \cdot e^{-7.05s} \quad (2.25)$$

由传递函数中我们可以得到控制对象增益 $K=17.133$, 滞后时间 $\tau=7.05$, 时间常数 $T=152.5$, 因此我们可以得到:

$$K_p = 1.2 \frac{T}{K\tau} = 1.515, \quad T_i = 2\tau = 14.1, \quad T_d = 0.5\tau = 3.525$$

如图 2.9 所示, 利用 Simulink 搭建船舶柴油机高温冷却水系统 PID 控制器仿

真框图, 将 PID 参数修改为整定值并进行仿真, 这里 $K_p = 1.515$, $K_i = \frac{K_p}{T_i} = 0.107$, $K_d = K_p T_d = 5.341$ 。仿真曲线如图 2.10 所示。

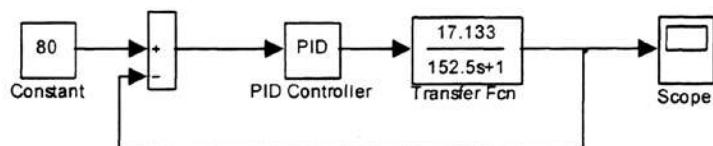


图 2.9 船舶柴油机高温冷却水系统 PID 控制器仿真框图

Fig.2.9 Simulation Block Diagram of PID Controller of Temperature Control System

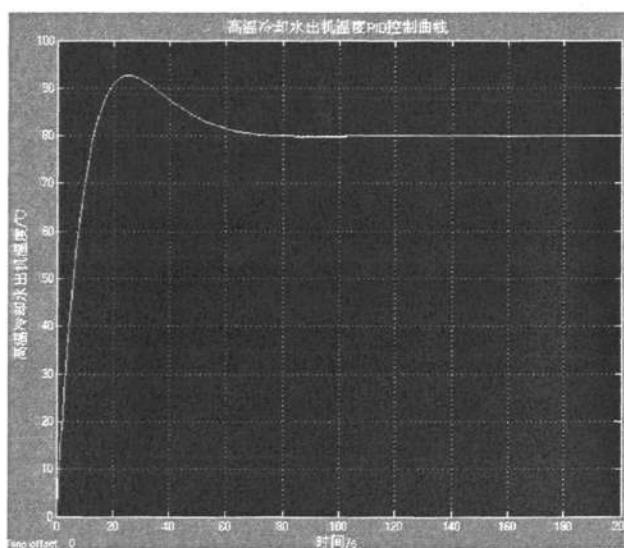


图 2.10 PID 参数整定后的高温冷却水出机温度控制曲线

Fig.2.10 Temperature Control Curve after Parameters Setted up

第 3 章 基于 MATLAB 的船舶柴油机冷却水温度前馈模糊控制器的设计

3.1 前馈模糊控制

船舶柴油机高温冷却水温度控制系统多采用以柴油机出机温度为控制对象的 PID 控制方式，但由于冷却水系统具有较大惯性，当柴油机运行工况发生变化时冷却水出机温度经常超调，而且需要经过很长一段时间才能稳定在设定值。以现有的 PID 闭环控制为基础，并将柴油机的功率变化量作为前馈信号对柴油机出口温度进行预调节，根据系统扰动进行预调节，可以克服系统因大惯性、长时滞带来的温度超调缺陷，从而优化控制性能^{[14][28]}。

在整定前馈装置时，不考虑反馈控制所引起的稳定性问题，只考虑利用前馈作用来直接抵消扰动的影响，而使被调量不变化。要想完全抵消扰动的影响，那么前馈调节器的动态特性可能是很复杂的。实际生产过程中并不要求把扰动作用的影响全部抵消，只要求剩余的扰动作用对被调量的影响不要太大，而且在前馈-反馈控制系统中，由于已经有了反馈控制的作用，故加入前馈作用的目的是进一步减小被调量的动态偏差（对于主要扰动）。因此，前馈调节器非常适合采用模糊控制原理。

3.1.1 模糊控制原理

模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的计算机智能控制，其原理如图 3.1 所示^[29]。模糊控制器是核心部分，由计算机来实现。模糊控制方法虽应用了模糊数学理论，但是它却模仿人的思维方法，克服了传统控制方法获得精确数学模型的缺点，做的仍然是确定性的工作。

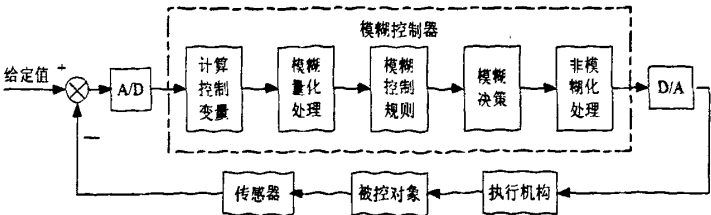


图 3.1 模糊控制原理图

Fig.3.1 Schematic Diagram of Fuzzy Control

模糊控制的特点在于^[30]:

(1) 模糊控制是一种基于规则的控制, 它直接采用语言型控制规则, 出发点是现场操作人员的控制经验或相关专家的知识。在设计中不需要建立被控对象的精确的数学模型, 因而使得控制机理和策略易于接受与理解, 设计简单, 便于应用。

(2) 由工业过程的定性认识出发, 比较容易建立语言控制规则, 因而模糊控制对那些数学模型难以获取, 动态特性不易掌握或变化非常显著的对象非常适用。

(3) 基于模型的控制算法及系统设计方法, 由于出发点和性能指标的不同, 容易导致较大差异; 但一个系统语言控制规则却具有相对的独立性, 利用这些控制规律间的模糊连接, 容易找到折中的选择, 使控制效果优于常规控制器。

(4) 模糊控制是基于启发性的知识及语言决策规则设计的, 这有利于模拟人工控制的过程和方法, 增强控制系统的适应能力, 使之具有一定的智能水平。

(5) 模糊控制系统的鲁棒性强, 干扰和参数变化对控制效果的影响被大大减弱, 尤其适合于非线性、时变及纯滞后系统的控制。

3.2 基于 Matlab 的前馈模糊控制器的研究与仿真

3.2.1 Matlab 中的模糊控制工具箱

Matlab 是 MathWorks 公司于 1982 年推出的一套高性能数值计算和可视化软件。它集数值分析、矩阵运算、信号处理和图形显示于一体, 构成了一个方便的、界面友好的用户环境。Matlab 强大的扩展功能为各个领域的应用提供了基础, 由各个领域的专家学者相继开发了 Matlab 工具箱, 模糊工具箱正是其中一个。模糊工具箱有五个主要的 GUI 工具可以用来建立、编辑和观察模糊推理系统。如图 3.2 所示, 这五个 GUI 工具箱包含了 3 个编辑器, 即模糊推理系统 (Fuzzy Inference System, FIS) 编辑器、隶属度函数编辑器、模糊规则编辑器; 2 个观察器, 即模糊规则观察器和输出曲面观察器。这些图形化工具相互之间是动态连接的, 因此, 在使用中, 只要模糊推理系统任何一个 GUI 的参数和性质被用户修改, 其它打开的任何 GUI 中相应的参数或性质都将自动地被改变, 这一点极大地方便了用户对自己的模糊推理系统进行调试^[31]。

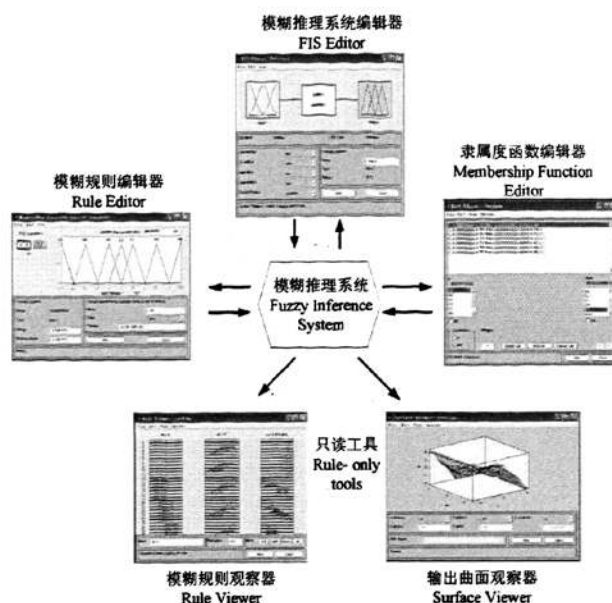


图 3.2 模糊逻辑工具箱图形工具相互关系

Fig.3.2 Interrelationship of Graphics Tools in Fuzzy Logic Toolbox

3.2.2 前馈模糊控制环节输入变量的选定

考虑到在正常情况下，主机功率变化和海水温度变化是引起缸套冷却水变化的主要因素，尤其是主机启动与调速时功率的变化对缸套冷却水温度的影响最为显著，而主机转速、供油量、排烟温度、扫气压力等参数的变化都是由主机功率变化所引起的，因此一般引入主机功率的变化量来进行前馈控制。船舶柴油机的输出轴功率一般通过测量扭矩来获得^[32]。测量柴油机输出轴扭矩可以使用水力测功器、电力测功器、电涡流测功器和扭矩仪等^[33]。

然而以上对于柴油机输出轴功率的测量一般都是在实验室条件下或是少部分新造船厂上采用。因此这里考虑通过其他一些与柴油机负荷变化密切相关的参变量来代替功率信号。通过 YANMAR 6N280-SN 型柴油机测试记录数据可以得出柴油机排烟温度随负荷变化曲线，如图 3.3 所示，进而得出排烟温度随柴油机负荷的变化关系。同时排烟温度具有便于获取的优点，因此可以将柴油机排烟温度变化量作为前馈控制信号。同理船舶柴油机的油门刻度与负载变化有最直接的关系，采用油门拉杆的位移作为前馈信号送给模糊控制器进行前馈模糊控制简单易行。

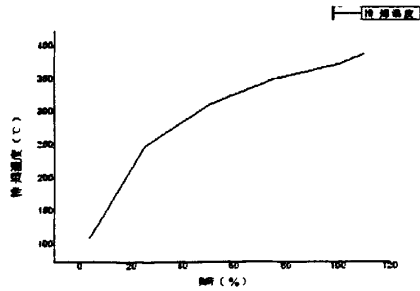


图 3.3 YANMAR 6N280-SN 型柴油机排烟温度随负荷变化曲线

Fig.3.3 Temperature Variation Curve of Exhaust Gas with the Variation of Loading

3.2.3 以排烟温度为前馈信号的二维模糊控制器的设计

(1) 输入、输出变量的选取与模糊化

本控制器是以柴油机排烟温度为前馈信号的双输入单输出二维模糊控制器，即以排烟温度变化量 e 和排烟温度变化率 ec 作为模糊控制器的输入量，以执行电机的转角变化量 u 作为输出变量。

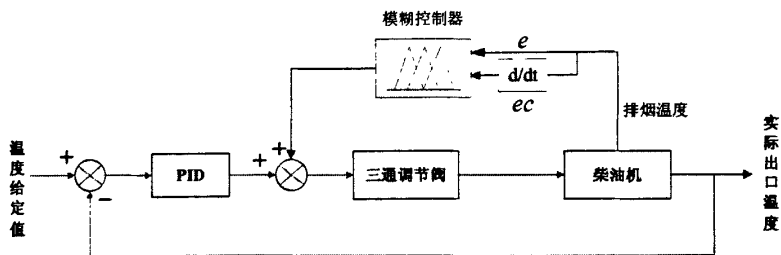


图 3.4 以排烟温度为前馈信号的二维模糊控制器控制框图

Fig.3.4 Control Block Diagram of Two-dimensional Fuzzy Controller with the Feed-forward Signal of Exhaust Gas Temperature

根据 YANMAR 6N280-SN 型柴油机的排烟温度随负荷变化的测量结果，排烟温度的基本论域设定为 $[-300, 300]$ ，排烟温度的变化率设定为 $[-600, 600]$ ，执行电机转角变化量设定为 $[-60, 60]$ ，令 e ， ec ， u 的基本论域为 $[-6, 6]$ ，则可得排烟温度变化量、变化率的量化因子 $k_e = \frac{6}{300} = 0.02$ ， $k_{ec} = \frac{6}{600} = 0.01$ ，控制输出量的比例因子 $k_u = \frac{60}{6} = 10$ 。如表 3.1 所示设置 e 、 ec 、 u 的模糊子集^[34-37]：

表 3.1 变量 e、ec、u 的模糊子集

Tab.3.1 Fuzzy Subsets and Meanings of e, ec, u							
语言值	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
含义	正大	正中	正小	0	负小	负中	负大

(2) 建立模糊规则

如表 3.2 所示建立模糊规则：

表 3.2 模糊控制规则

Tab.3.2 Fuzzy Rules								
u ec								
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	PB	PB	PB	PB	PM	ZO	ZO
	NM	PB	PB	PB	PB	PM	ZO	ZO
	NS	PM	PM	PM	PM	ZO	NS	NS
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	ZO	NM	NM	NM	NM
	PM	ZO	ZO	NM	NB	NB	NB	NB
	PB	ZO	ZO	NM	NB	NB	NB	NB

由表 3.2 可以得到 49 条 “If …Then…” 模糊规则语句：

- 1) If (e is NB) and (ec is NB) then (u is PB)
- 2) If (e is NB) and (ec is NM) then (u is PB)
- 3) If (e is NB) and (ec is NS) then (u is PB)
- 4) If (e is NB) and (ec is ZO) then (u is PB)
- 5) If (e is NB) and (ec is PS) then (u is PM)
- 6) If (e is NB) and (ec is PM) then (u is ZO)
- 7) If (e is NB) and (ec is PB) then (u is ZO)
- 8) If (e is NM) and (ec is NB) then (u is PB)
- 9) If (e is NM) and (ec is NM) then (u is PB)

- 10) If (e is NM) and (ec is NS) then (u is PB)
- 11) If (e is NM) and (ec is ZO) then (u is PB)
- 12) If (e is NM) and (ec is PS) then (u is PM)
- 13) If (e is NM) and (ec is PM) then (u is ZO)
- 14) If (e is NM) and (ec is PB) then (u is ZO)
- 15) If (e is NS) and (ec is NB) then (u is PM)
- 16) If (e is NS) and (ec is NM) then (u is PM)
- 17) If (e is NS) and (ec is NS) then (u is PM)
- 18) If (e is NS) and (ec is ZO) then (u is PM)
- 19) If (e is NS) and (ec is PS) then (u is ZO)
- 20) If (e is NS) and (ec is PM) then (u is NS)
- 21) If (e is NS) and (ec is PB) then (u is NS)
- 22) If (e is ZO) and (ec is NB) then (u is PM)
- 23) If (e is ZO) and (ec is NM) then (u is PM)
- 24) If (e is ZO) and (ec is NS) then (u is PS)
- 25) If (e is ZO) and (ec is ZO) then (u is ZO)
- 26) If (e is ZO) and (ec is PS) then (u is NS)
- 27) If (e is ZO) and (ec is PM) then (u is NM)
- 28) If (e is ZO) and (ec is PB) then (u is NM)
- 29) If (e is PS) and (ec is NB) then (u is PS)
- 30) If (e is PS) and (ec is NM) then (u is PS)
- 31) If (e is PS) and (ec is NS) then (u is ZO)
- 32) If (e is PS) and (ec is ZO) then (u is NM)
- 33) If (e is PS) and (ec is PS) then (u is NM)
- 34) If (e is PS) and (ec is PM) then (u is NM)
- 35) If (e is PS) and (ec is PB) then (u is NM)
- 36) If (e is PM) and (ec is NB) then (u is ZO)
- 37) If (e is PM) and (ec is NM) then (u is ZO)

- 38) If (e is PM) and (ec is NS) then (u is NM)
- 39) If (e is PM) and (ec is ZO) then (u is NB)
- 40) If (e is PM) and (ec is PS) then (u is NB)
- 41) If (e is PM) and (ec is PM) then (u is NB)
- 42) If (e is PM) and (ec is PB) then (u is NB)
- 43) If (e is PB) and (ec is NB) then (u is ZO)
- 44) If (e is PB) and (ec is NM) then (u is ZO)
- 45) If (e is PB) and (ec is NS) then (u is NM)
- 46) If (e is PB) and (ec is ZO) then (u is NB)
- 47) If (e is PB) and (ec is PS) then (u is NB)
- 48) If (e is PB) and (ec is PM) then (u is NB)
- 49) If (e is PB) and (ec is PB) then (u is NB)

这里以规则 1 与规则 49 为例将模糊规则代表的含义解释如下：规则 1，如果排烟温度负大同时排烟温度变化速度负大，那么执行电机转动正大。其代表的意义为：如果排烟温度降低了很多，同时降低的速度很快，这里就认为柴油机功率急剧降低，高温冷却水出机温度就会快速降低，这时执行电机正向大角度旋转，减小三通阀的开度，使出机冷却水历经高温冷却器的流量大幅减少，从而使高温冷却水温度不会大幅降低，起到了稳定高温冷却水温度的目的；规则 49，如果排烟温度正大同时排烟温度变化速度正大，那么执行电机转动负大。其代表的意义为：如果排烟温度升高了很多，同时升高的速度很快，这里就认为柴油机功率急剧上升，高温冷却水出机温度就会快速升高，这时执行电机负向大角度旋转，增大三通阀的开度，使出机冷却水历经高温冷却器的流量大幅加大，从而使高温冷却水温度不会大幅升高，稳定了高温冷却水的温度。

(3) FIS的建立^{[38][39]}

1) 在Matlab命令窗口输入fuzzy命令即可打开FIS编辑器，Fuzzy创建的原始的FIS图形编辑函数窗口中只有一个输入变量，对于该双输入系统，可点击Edit/Addinput选项，增加一个输入变量，用鼠标分别单击输入、输出模块，将变量名称分别改为e、ec、u。如图3.5所示。

2) 分别双击输入、输出模块, 将变量的量化论域修改为 $[-6, 6]$, 在Edit/Addmf菜单项中可以设定输入输出变量的语言值, 在此将输入输出变量的模糊子集个数设置为7, 隶属度函数设置为trimf型, 如图3.6所示。

3) 用鼠标双击模糊控制规则模块, 打开一个新的编辑窗口, 窗口中会给出前面已经设定好的语言值, 根据控制规则表3.2选中互相对应的语言值, 然后点击“Add rule”, 编辑窗口就会自动增加相应的规则, 本控制器共有49条模糊规则, 规则编辑完后, 可以从View/View rule菜单项中检查该模糊控制器的模糊推理过程是否和我们所期望的相同, 如图3.8与3.9所示。

4) FIS建好后, 将其命名为cooling并存盘, 并且存入MATLAB的工作空间(workspace)中, 以便仿真时应用。

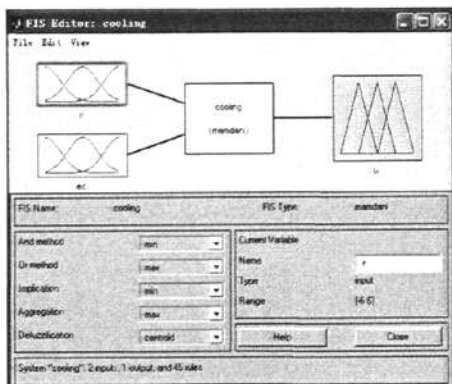


图 3.5 设置输入输出变量

Fig.3.5 Setting input and Output Variables

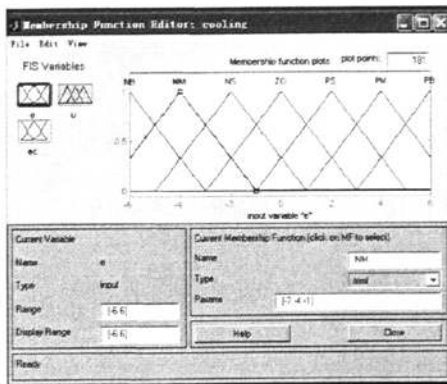


图 3.6 设置隶属度函数

Fig.3.6 Setting Membership Function

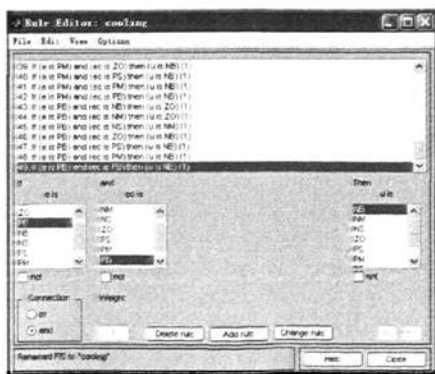


图 3.7 编辑模糊规则

Fig.3.7 Editing Fuzzy Rules

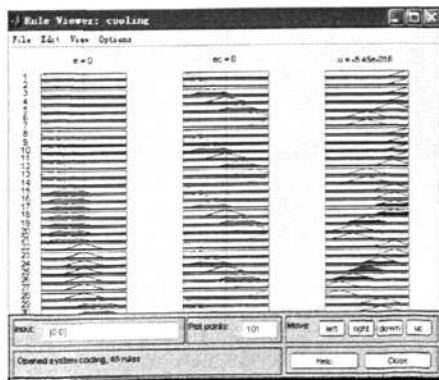


图 3.8 查看模糊规则

Fig.3.8 Examining Fuzzy Rules

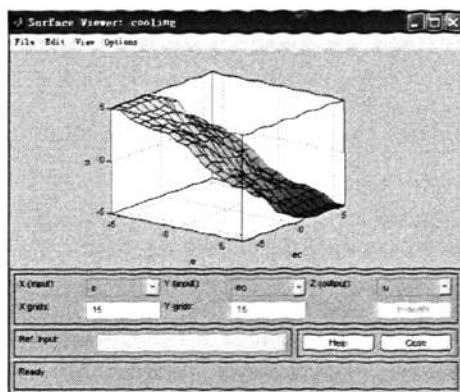


图 3.9 查看模糊曲面

Fig.3.9 Examining Fuzzy Surface

(4) 基于simulink的控制系统模型的建立与仿真

如图 3.10 所示在 simulink 中搭建船舶柴油机冷却水温度控制系统模型^[39-41], 为了便于对比分析, 模型中同时包含了带有模糊前馈控制的复合控制系统和传统 PID 控制系统。

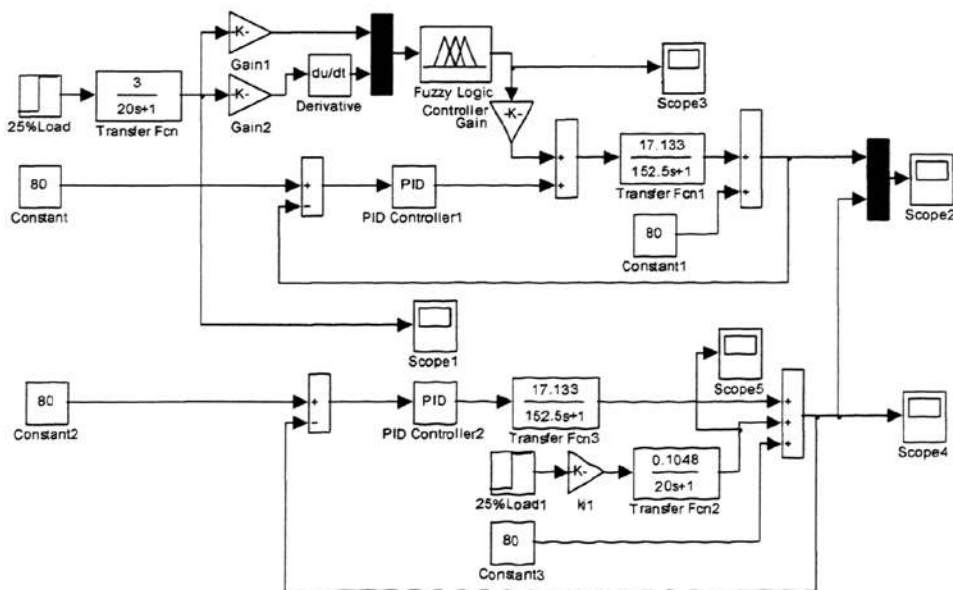


图 3.10 以排烟温度为前馈信号的综合控制系统与传统 PID 仿真对比框图

Fig.3.10 Simulation Comparison Diagram of Traditional PID and Integrated Control System

仿真过程中应注意以下问题:

1) 必须将建立的 FIS 系统载入模糊控制器, 载入方法为: 首先打开已保存的命名为 cooling 的 FIS 系统, 单击 File/Export/To workspace 将所建立的 FIS 文件送入工作空间, 然后双击 Simulink 控制系统模型中的 Fuzzy Logic Controller 模块, 在 FIS File or Structure 栏输入事先建好的 FIS 文件的名称“cooling”, 点击 OK 便完成了 FIS 文件的上载工作。

2) 由于模糊控制器的输入变量为排烟温度的变化量与变化率, 所以这里必须对模型中的功率阶跃信号加以处理, 本文根据 YANMAR 6N280-SN 型柴油机排烟温度随功率变化关系近似得到排烟温度随功率变化的传递函数, 以此提高仿真效果的准确度, 该模块的仿真结果如图 3.11 所示。

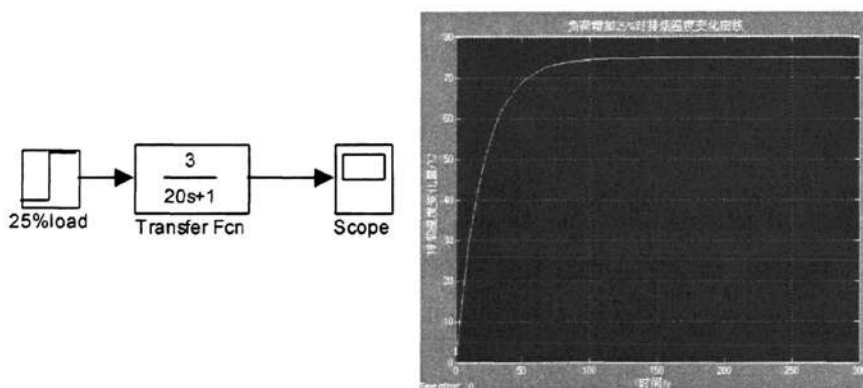


图 3.11 排烟温度随负荷变化仿真

Fig.3.11 Simulation of Exhaust Gas Temperature with the Variation of Loading

3) 在搭建的仿真模型中基于前馈模糊控制的复合控制系统与传统的 PID 控制系统中 PID 参数相同, 以达到对比验证的目的。

(5) 仿真结果分析

通过仿真模型中的各个 Scope 模块可以得到相应环节的仿真曲线, 图 3.12 为基于排烟温度的前馈模糊控制与传统 PID 控制效果的方针对比, 从图中可以看出当给系统突加 25% 负荷扰动时, 前馈模糊控制环节起到了提前控制的效果, 经过一段时间以后 PID 控制环节对系统进行了进一步的调节, 综合整个调节过程, 温度的超调量相比传统单独 PID 控制有了明显降低, 系统稳定性明显提高。

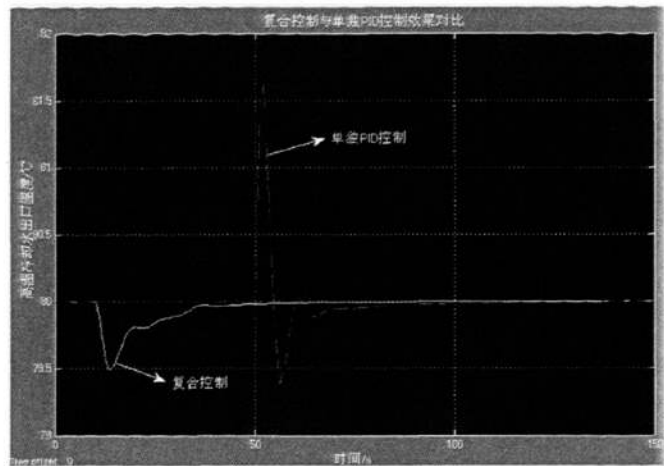


图 3.12 仿真效果对比图

Fig.3.12 Comparison Diagram of Control Effect Simulation

3.2.4 以油门拉杆位移为前馈信号的一维模糊控制器的设计

以油门拉杆的位移作为前馈信号更能直观的反映船舶柴油机的功率变化，同时结合实船操纵过程，可以更准确的为模糊控制器输入变量的模糊子集赋值。

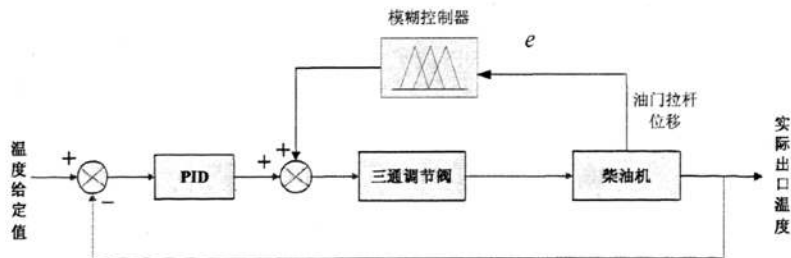


图 3.13 以油门拉杆位移为前馈信号的一维模糊控制器控制框图

Fig.3.13 Control Block Diagram of One-dimensional Fuzzy Controller

(1) 以油门拉杆位移为前馈信号的模糊控制器的设计

本控制器是以油门拉杆位移 E 为输入量，以执行电机的转角变化量 U 作为输出变量的单输入单输出一维模糊控制器。结合上文中基于排烟温度的前馈模糊控制器的设计过程，油门拉杆的基本论域设定为 $[-75, 75]$ ，执行电机转角变化量设定为 $[-60, 60]$ ，令 E 、 U 的基本论域为 $[-6, 6]$ ，则可得功率偏差、偏差变化率的量化因子 $k_e = \frac{6}{75} = 0.08$ ，控制输出量的比例因子 $k_u = \frac{60}{6} = 10$ 。如表 3.3 所示设置 E 的

模糊子集:

表 3.3 变量 E 的模糊子集及含义

Tab.3.3 Fuzzy subsets and meanings of E

语言值	含义	功率变化量 (%)
PB	正大 (微速-全速)	75
PM	正中 (微速-半速, 慢速-全速)	50
PS	正小 (微速-慢速, 慢速-半速, 半速-全速)	25
ZO	0	0
NS	负小 (全速-半速, 半速-慢速, 慢速-微速)	-25
NM	负中 (半速-微速, 全速-慢速)	-50
NB	负大 (全速-微速)	-75

如表 3.4 建立模糊规则:

表 3.4 模糊规则

Tab.3.4 Fuzzy Rules

E→	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
U→	NB	NM	NC	ZO	PS	PM	PB

七条模糊规则:

- 1) If(E is PB), then(U is NB)
- 2) If(E is PM), then(U is NM)
- 3) If(E is PS), then(U is NS)
- 4) If(E is ZO), then(U is ZO)
- 5) If(E is NS), then(U is PS)
- 6) If(E is NM), then(U is PM)
- 7) If(E is NB), then(U is PB)

这里同样以规则 1 与规则 7 为例将模糊规则代表的含义解释如下：规则 1，如果油门拉杆位移变化正大，那么执行电机转动负大。其代表的意义为：如果油门拉杆从微速扳到全速，这里就认为柴油机功率急剧上升，高温冷却水出机温度就会快速升高，这时执行电机负向大角度旋转，增大三通阀的开度，使出机冷却水流经高温冷却器的流量大幅增加，从而使高温冷却水温度不会大幅上升，起到了稳定高温冷却水温度的目的。同样对于规则 7，如果油门拉杆位移变化负大，那么执行电机转动正大。其代表的意义为：如果油门拉杆从全速扳到微速，这里就认为柴油机功率急剧降低，高温冷却水出机温度就会快速下降，这时执行电机正向大角度旋转，减小三通阀的开度，使出机冷却水流经高温冷却器的流量大幅减少，从而使高温冷却水温度不会大幅下降，同样起到稳定高温冷却水温度的目的。

按照基于排烟温度的模糊控制器 FIS 设计过程建立基于油门拉杆位移的模糊控制器 FIS 文件，过程从略，如图 3.14 至图 3.18 所示。

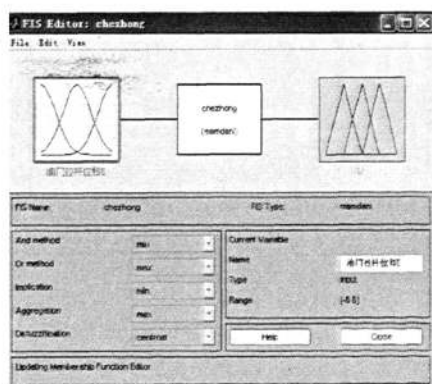


图 3.14 设置输入输出变量

Fig.3.14 Setting input and Output Variables



图 3.15 设置隶属度函数

Fig.3.15 Setting Membership Function



图 3.16 设置模糊规则

Fig.3.16 Editing Fuzzy Rules

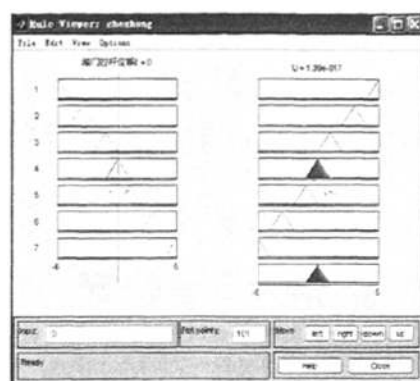


图 3.17 观察模糊规则

Fig.3.17 Examining Fuzzy rules

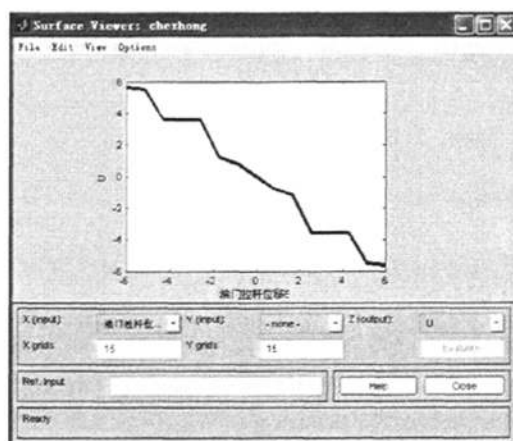


图 3.18 观察模糊曲面

Fig.3.18 Examining Fuzzy Surface

(2) 控制效果仿真验证

首先搭建 Simulink 仿真模型如图 3.19, 将排烟温度扰动改为功率扰动, 本文在该仿真模型中, 将功率扰动设定为油门拉杆在 30s 从微速扳到慢速, 150s 将油门拉杆从慢速搬到全速。将建好的基于油门拉杆位移的 FIS 文件载入仿真模型中开始仿真, 仿真结果如图 3.20 所示。

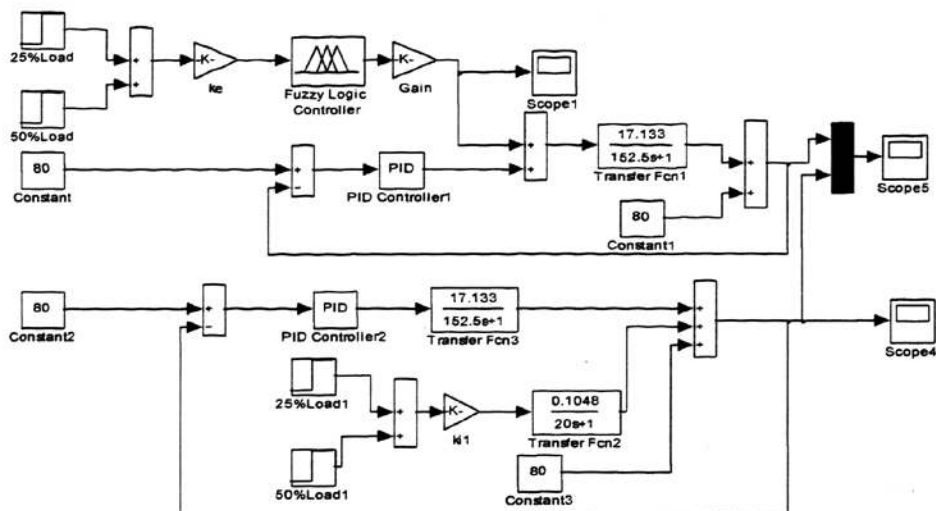


图 3.19 以油门拉杆位移为前馈信号的综合控制系统与传统 PID 仿真对比框图

Fig.3.19 Simulation Comparison Diagram of Traditional PID and Integrated Control System

(3) 仿真结果分析

从图 3.20 的仿真结果可以看出，模糊控制器针对每一次油门拉杆位移都做出了控制量输出，由于模糊控制器的超前控制作用，在柴油机负荷增加的瞬间，三通阀开度增加，高温冷却水温度有小幅下降，通过 PID 的控制作用冷却水温度最终稳定在给定值上，比较传统的 PID 控制系统，控制效果有了明显的提高。

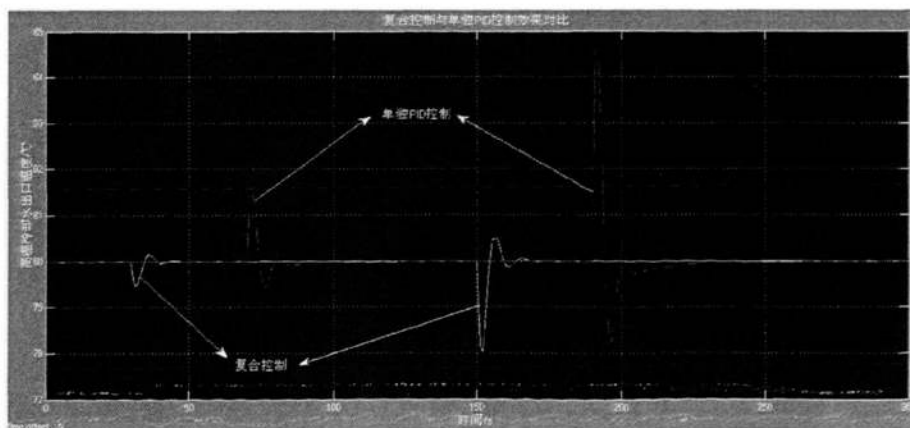


图 3.20 仿真结果对比图

Fig.3.20 Comparison of Simulation Results

第 4 章 船舶柴油机冷却水温度控制系统设计

4.1 系统的控制任务及设计方案

本文设计的船舶柴油机冷却水温度控制系统主要完成以下控制任务：

（1）检测柴油机高温冷却水出机温度，设置高低温越限报警；检测高温淡水膨胀水箱液位，设置水箱高低位越限报警；检测高温淡水泵吸口压力，设置吸口压力压越限报警；检测并显示海水温度；检测油门拉杆位移。

（2）控制系统能够根据油门拉杆位移利用模糊控制原理对三通阀的开度进行预调节，并运用 PID 控制方法精确调节三通阀的开度来改变出机高温冷却水进入冷却器的旁通量，进而调节高温冷却水的进机温度，最终使高温冷却水的出机温度保持稳定。控制系统能够自动调节膨胀水箱液位，使水箱液位稳定在要求范围内以确保柴油机冷却水压力稳定。控制系统能够根据海水温度自动选择海水泵工作模式。

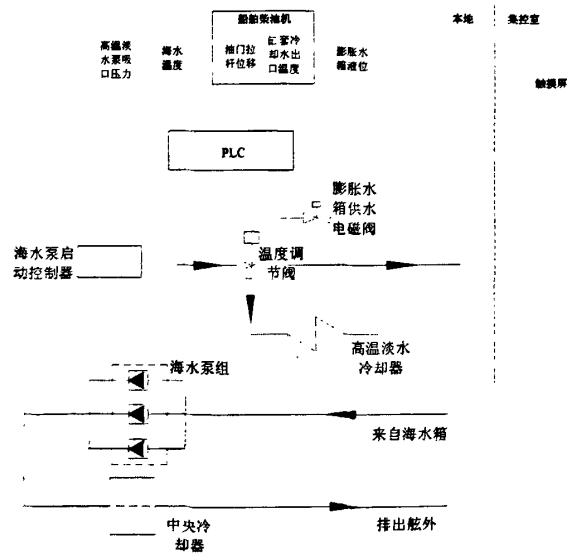


图 4.1 控制系统设计原理图

Fig.4.1 Schematic Diagram of Control System

系统拟采用 PLC 作为中央控制器对系统检测的模拟量及开关量信号进行处理，通过运算实现：三通阀开度的调节，膨胀水箱进水电阀的开闭，海水泵组

运行模式的选择，系统各参数的显示与报警。同时系统在集控室设置触摸屏，实现本地与集控室两种控制模式。图 4.1 为本文拟设计的船舶柴油机冷却水温度控制系统原理图。

4.2 PLC 控制器

PLC 即可编程序控制器，是一种数字运算操作的电子系统，专为在工业环境下应用而设计。它采用可编程序的存储器，用来在其内部存储执行逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算等操作的指令，并通过数字式、模拟式的输入和输出，控制各种类型的机械或生产过程。PLC 主要有以下特点^{[42][43]}：

（1）可靠性高、抗干扰能力强

在继电器接触器控制系统中，大量使用了中间继电器、时间继电器等，由于船舶上的恶劣条件，这些电器元件很容易出现老化、脱焊、触点的抖动、接触不良等现象，这样大大降低了系统的可靠性。而在 PLC 控制系统中，大部分中间继电器、时间继电器完全可以通过程序来取代。

（2）可编程

PLC 控制系统的控制作用的改变主要不是取决于硬件的改变，而是取决于程序的改变，即硬件柔性化。柔性化的结果使整个系统可靠性提高，给控制系统带来一系列好处。计数器、定时器、继电器等器件在 PLC 中变成了编程变量，控制作用的实现更加容易。

（3）丰富的 I/O 接口模块

PLC 针对不同的工业现场信号，如交流或直流、开关量或模拟量、电流或电压、脉冲或电位、强电或弱电等，有相应的 I/O 模块与工业现场的器件或设备，如按钮、行程开关、接近开关、传感器及变送器、电磁线圈和控制阀等直接连接。另外为了提高操作性能，PLC 还有多人一机对话的接口模块；为了组成工业局部网络，它还有多种通信联网的接口模块。

（4）系统的设计、调试周期短

PLC 是通过程序来实现对系统的控制，因此，它可以通过软件编程减少硬件开发的工作量，同时，设计人员可以在实验室里进行设计和修改程序，还可以在实验室方便地进行系统的模拟及运行调试，使现场的工作量大大减少。

(5) 安装简单、维修方便

PLC 不需要专门的机房，可以在各种工业环境下直接运行。使用时只需将现场的各种设备与 PLC 相应的 I/O 端相连接，即可投入运行。

PLC 的故障率很低，且具有完善的自诊断和显示功能。当 PLC 或外部的输入装置和执行机构发生故障时，可以根据 PLC 各模块上的运行和故障指示装置或编程软件提供的信息，方便查出故障的原因。

考虑到 PLC 的诸多优点并根据船舶柴油机冷却水温度控制系统的具体情况，本文拟采用西门子 PLC S7-200 作为控制器来实现船舶柴油机冷却水温度的控制。

SIMATIC S7-200 系列属于小型 PLC，其可靠性高，可以用梯形图、语句表（即指令表）和功能块图三种语言来编程。它的指令丰富、指令功能强、易于掌握、操作方便，内置有高速计数器、高速输出、PID 控制器、RS-485 通信/编程接口、PPI 通信协议、MPI 通信协议和自由端口模式通信功能，最大可以扩展到 248 点数字量 I/O 或 35 路模拟量 I/O，最多有 30KB 程序和数据存储空间^[44]。无论是控制功能还是成本价格 S7-200 都非常适合船舶柴油机冷却水温度控制系统的设计要求。

4.2.1 模拟量扩展模块

在工业控制系统中，像温度、湿度、压力、流量等模拟量信号需要借助相应的传感器或变送器把相关的物理量转换成标准的电信号后传送给 PLC 进行处理。另外，有些现场设备也需要用模拟量信号进行控制，如一些电动阀门、伺服电磁阀等。这就需要将 PLC 输出的数字量变换成模拟量信号，以满足控制设备的要求。模拟量扩展模块正是为完成这一设计任务而设计的。S7-200 相应的模拟量处理模块有模拟量输入模块 EM231、模拟量输出模块 EM232 和模拟量输入/输出混合模块 EM235^[45]。

根据 S7-200 选型手册，结合柴油机冷却水温度控制系统冷却水温度、海水温度等模拟量输入信号，系统选择 EM231 热电阻模拟量输入扩展模块实现对温度模拟量信号的处理^[46]。

4.2.2 利用 PLC 实现 PID 控制

用 PLC 对模拟量进行 PID 控制大致有如下几种方法^[47-49]：

(1) 使用 PID 过程控制模块：这种模块的 PID 控制程序是 PLC 厂家设计的，并

放在模块中，用户使用时只需要设置一些参数，使用起来非常方便。

(2) 使用PID功能指令：它是用于PID控制的子程序，与模拟量输入/输出模块一起使用，可以得到类似于使用PID过程控制的效果，但价格便宜得多。如S7200的PID指令。

(3) 用自编的程序实现PID闭环控制：在没有PID过程控制模块和功能指令的情况下，仍希望采用某种改进的PID控制算法，此时用户需要自己编制PID控制程序。

4.3 执行器环节

在对阀门实行远程控制、集中控制、自动控制的过程中，电动执行器是一种必不可少的执行部件。电动执行器分为电磁式和电动式两类^[50]，这里所述的是电动式，即由电动机提供动力，输出转角控制冷却水三通阀的开度。电动执行器按伺服电动机划分，有步进电机式执行器、直流电机式执行器、交流电机式执行器；按控制方式划分，又分为开环执行系统与闭环执行系统。基于交流伺服电机的闭环控制系统在当今工业控制用的电动执行器中应用最为广泛^[51]。本系统拟采用以带有位置反馈的交流永磁低速同步电机为伺服电机的闭环执行系统来实现冷却水三通阀的开度控制，控制原理如图4.2所示。

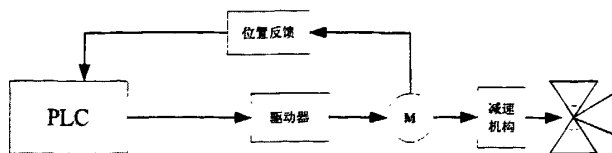


图 4.2 执行机构原理图

Fig.4.2 Schematic Diagram of Actuating Mechanism

4.3.1 永磁低速同步伺服电机

永磁同步电机与传统的异步电机相比，具有以下优点^{[52][53]}。

(1) 明显的节能效果。永磁同步电机用永磁体代替电励磁，无励磁损耗，由于定、转子同步，转子铁心没有铁耗，因此永磁同步电机的效率较电励磁同步电机和异步电机高，而且不需要从电网吸取滞后的励磁电流，从而节约了无功，提高了电机的功率因数；

(2) 稀土永磁同步电机较异步电机尺寸大大减小，成为高密度、高效率的电机；

(3) 永磁同步电机具有较硬的机械特性，对于因负载变化而引起的电机转矩变化具有较强的抑制作用；

(4) 永磁同步电动机的转速与电源频率间始终保持准确的同步关系。控制电源频率就能控制电机的转速。

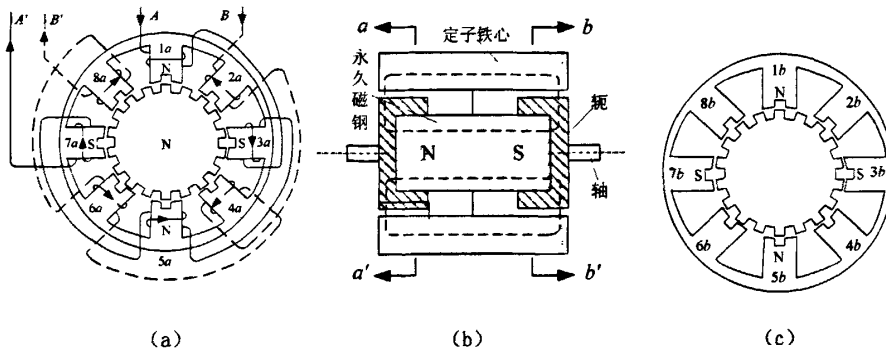


图 4.3 永磁低速同步电机的结构

Fig.4.3 Structure of Constant Magnetism Low-speed Synchronous Motor

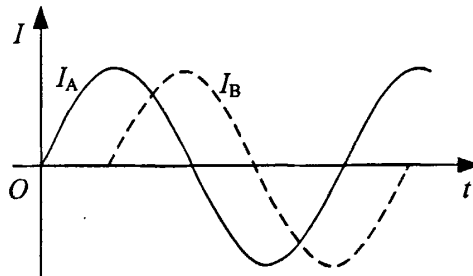


图 4.4 定子线圈的电流波形

Fig.4.4 Current Waveform of Stator Coil

根据冷却水温度控制三通阀转动特点与精度要求，本文拟采用永磁低速同步电机作为执行器的伺服电机，这种电机的原理^{[54][55]}可参见图 4.3。该电机的定子铁心除有安放线圈的槽之外，还在每个磁极表面开有小槽。转子中央有永磁磁钢，磁钢的 N、S 极与轴平行。磁钢两端各有一个导磁材料制成的轭，轭的表面也开有小槽，两个轭和轴装配时，左轭上的槽与右轭上的齿对准。永久磁钢产生的磁力

线沿图中虚线经过定子而闭合。定子线圈分为 $A-A'$ 和 $B-B'$ 两组，靠电容分相供电。接通电源后，假设电流 I_A 领先于 I_B 90° ，如图 4.4 所示。

在电流 I_A 为最大值时，定子磁极 1, 3, 5, 7 上的极性分别为 N, S, N, S。于是左边带 N 极性的转子带 S 极的 $3a$, $7a$ 相吸引，转子上的齿与定子 $3a$, $7a$ 两个极上的小齿对准。同理，右边带 S 极性的转子上的齿与定子 $1b$, $5b$ 两个极上的小齿对准。也就是说，定子与转子的齿中心差半个齿轮（此处的“齿距”就是一个齿宽与一个槽宽之和）。此时转子处于平衡状态，转子上的齿中心与不带极性的 2, 4, 6, 8 极的齿中心差 $1/4$ 个齿轮。当 I_A 为零 I_B 为最大时，在定子 2, 4, 6, 8 极上显示出 N, S, N, S 极性，根据原理，左边转子上的齿与 $4a$, $8a$ 极上的小齿对准，左边转子上的齿与 $2b$, $6b$ 极上的小齿对准，这时又处于一个新的平衡状态。它和前一个平衡状态相比，转子转动了 $1/4$ 个齿距。这就是说，每经过电源的 $1/4$ 周期，转子转过 $1/4$ 齿距。那么每经过一个周期（即定子磁场旋转一周）时，转子转过一个齿距。因此输出转速为：

$$n = \frac{60f}{Z_2} \quad (4.1)$$

式中， n 为转子转速 (r/min)； f 为电源频率 (Hz)； Z_2 为转子齿数。

为了便于说明原理，图中 $Z_2=18$ ，实际采用的齿数远大于此，例如 $Z_2=50$ ，则在 50Hz 的电源情况下 $n=60\text{r/min}$ ，相当于 1r/s ，这是普通交流电机难以做到的^[54]。

4.3.2 基于增量式脉冲编码器的电动机转轴位置检测

(1) 工作原理^[51]

如图 4.5 (a) 所示，有一个中心有轴的光电码盘，其上有环形通、暗的刻线，有光电发射和接受器件读取，获得两组正弦波信号组合成 a 与 b ，如图 4.5 (b) 所示，每个正弦波相差 90° 相位差（相对于一个周波为 360° ），将 a 信号反向输出 c ，叠加在 a 相上，可增强稳定信号；另每转输出一个 Z 相脉冲以代表零位参考位。

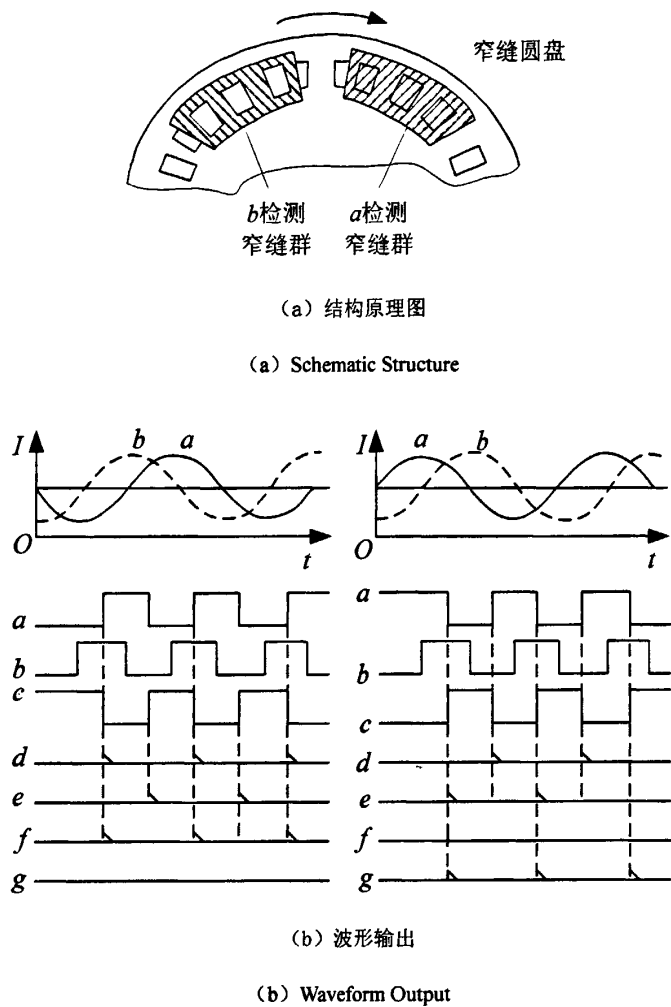


图 4.5 增量式脉冲编码器工作原理

Fig.4.5 Operational Principle of Incremental Pulse Encoder

由于 a 、 b 两相相差 90° ，可通过比较 a 相在前还是 b 相在前，以判别编码器的正转（ g 脉冲）与反转（ f 脉冲），通过零位脉冲，可获得编码器的零位参考位。

编码器码盘的材料有玻璃、金属、塑料，玻璃码盘是在玻璃上沉淀很薄的刻线，其热稳定性好，精度高；金属码盘直接以通和不通刻线，不易碎，但由于金属有一定的厚度，精度就有限制，其热稳定性就要比玻璃的差一个数量级；塑料码盘是经济型的，其成本低，但精度、热稳定、寿命均要差一些。

编码器每旋转 360° 提供多少的通或暗刻线称为其分辨率，也称解析分度或直

接称多少线，编码器的分辨率一般在每转分度 5 线~10000 线。

(2) 信号输出

信号输出有正弦波（电流或电压）、方波（TTL、HTL）、集电极开路（PNP、NPN）、推拉式多种形式，其中 TTL 为长线差分驱动（对称 A，A-；B，B-；Z，Z-），HTL 也称推拉式、推挽式输出，编码器的信号接收设备接口应与编码器对应。

编码器的脉冲信号一般连接计数器、PLC 以及计算机，PLC 和计算机连接的模块有低速模块与高速模块之分，开关频率有低有高。

单向连接，用于单方向计数和单方向测速。

A、B 两相连接，用于正反相计数、判断正反向和测速。

A、B、Z 三相连接，用于带参考位修正的位置测量。

A、A-，B、B-，Z、Z-连接，由于带有对称负信号的连接，电流对于电缆贡献的电磁场为 0，衰减最小，抗干扰能力最佳，可传输较远的距离。

对于 TTL 的带有对称负信号输出的编码器，信号传输距离可达 150m。

对于 HTL 的带有对称负信号输出的编码器，信号传输距离可达 300m。

4.3.3 附属部件

(1) 电磁制动器

执行器里的电机转子经过减速器与被带动的负载相连之后，具有很大的转动惯量，在转动中一旦信号消失仍能靠惯性继续转动一段时间，这就是惰走现象。惰走对自动控制极其有害，单靠伺服电机设计往往还不足以防止这种现象。尤其是负载有不平衡力矩（例如带动很重的闸门）时，即使没有输入信号也有可能出现转动，这是不能允许的。为此，在伺服电机上设计了电磁制动器。有输入信号时制动器是松开的，不妨碍转动。输入信号消失后制动器将转子轴抱紧，不允许转动，这就避免了惰走和自行转动。遇到停电也保证原有阀位不会改变。在伺服电机的壳外装有手柄，可以人为地松开制动器，以便进行手动操作。

(2) 限位开关

一般执行器的输出轴上都装有上下挡块，以避免输出过大时把阀门损坏。但是对于电动执行器来说仅仅有这样的措施还不够，因为万一输出轴已被挡块阻挡而输入信号依然存在，则电机处于堵转状态，时间长了就会发热毁坏。为避免此

此种事故，在上下限附近装微动开关，用它经过接触器或固态继电器来断开电机的电源。

（3）操作手轮

电动执行器在停电时完全失去作用，但如果要求在停电状态下把阀门打开或者关闭的话，应该由人工操作的可能。为此，一般在执行器上装有手轮，平时此手轮和传动系统间的离合器处于脱离状态，不起传动作用。停电时把手轮拉开，离合器就处于挂挡状态，这时把制动器放松，就能用手操作阀门、闸板等被控对象。

（4）减速器

减速器用来增大输出轴的转矩，以便带动有较大阻力的负载。因为需要的减速比通常都很大，若用普通齿轮的话，级数就太多了，为了结构紧凑起见，在角行程的执行器里经常用到内行星齿轮和偏心轮结合的减速器；在直行程的执行器里多半用涡轮蜗杆和螺母丝杠结合的减速器。这类机构的减速比很大，往往还具有自锁功能，即只能由电机轴向输出轴单向传动，而不能反向传动。这就进一步保证不会因为负载有不平衡力而自行转动了^[54]。

4.4 温度检测环节

对于温度的检测有接触式和非接触式两种测量方式。接触式测量温度发展较早。这种测量方法的优点是：简单、可靠、低廉、测量精度较高，一般能够测得真实温度；但由于检测元件热惯性的影响，响应时间较长，对热容量小的物体难以实现精确的测量，并且该方法不适宜于对腐蚀性介质测温，不能用于超高温测量，难于测量运动物体的温度。非接触式测温方法是通过对辐射能量的检测来实现温度测量的。其优点是：不破坏被测温场，可以测量热容量小的物体，适于测量运动物体的温度，还可以测量区域的温度分布，响应速度较快。但也存在测量误差较大，仪表指示值一般仅代表物体表面温度，测温装置结构复杂，价格昂贵等缺点。因此，在实际的温度测量中，要根据具体的测量对象及使用环境选择合适的测量方法^[56]。本课题的温度测量对象为管内淡水与海水的温度，采用接触式测量较为方便准确。常见的接触式温度传感器有热电偶与热电阻式温度传感器两种。

4.4.1 热电偶式温度传感器

(1) 测温原理

热电偶的测温原理基于热电效应，它将两种不同的导体或半导体连成闭合回路，当两个节点处的温度不同时，回路中将产生热电势，这种现象又称为赛贝尔效应。热电偶温度传感器就是利用这种原理将两种不同的金属导体的端点焊接在一起，并插入护套制成。焊接端称为热端，与导线连接端称为冷端，当冷端温度不变时，其热电势随热端温度的升高而增大。由于冷端温度是随室温变化的，若热端测量温度不变而室温升高，则因冷、热端之间的温差减小使热电势也减小，这就降低了测量精度。为了消除冷端温度变化对测量精度的影响，可采用冷端温度补偿^[57]。图 4.6 为电桥法补偿原理图，图中 R_0 、 R_1 和 R_2 为锰铜丝绕制的电阻，它们的电阻值基本不随温度变化。 R_{cu} 为铜绕制的补偿电阻，其电阻值随温度的升高而增大。温度补偿电桥的输出 u_{ab} 与热电偶输出电势 e 串联，回路的输出电压 u_0 为

$$u_0 = e + u_{ab} = f(T) - f(T_0) + u_{ab} \quad (4.2)$$

式中， $f(T)$ 为热端接触电势， $f(T_0)$ 为冷端接触电势。若 $u_{ab} = f(T_0)$ ，则 $u_0 = f(T)$ 。

可见，只要使补偿电桥输出 u_{ab} 在室温范围内能保持与热电偶冷端接触电势相等，

即可实现冷端温度的补偿。根据 $u_{ab} = i\Delta R_i = iR_{i_0}\alpha T_0 = f(T_0)$ ，可得到

$$R_{i_0} = \frac{f(T_0)}{i\alpha T_0} \quad (4.3)$$

式中， α 为补偿电阻的电阻系数， T_0 为室温， R_{i_0} 为补偿电阻的零温度电阻值。因此，只要从热电偶的分度表中查出 $f(T_0)$ 在 $0^\circ\text{C}\sim 50^\circ\text{C}$ 的取值代入上式即可算出补偿电阻的零温度阻值 R_{i_0} 。

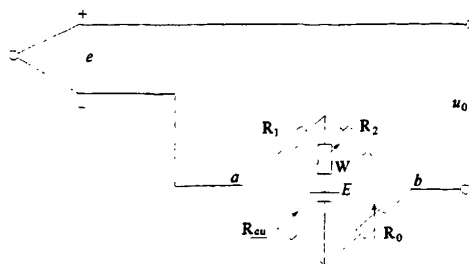


图 4.6 热电偶的冷端温度补偿原理图

Fig.4.6 Temperature Compensating Schematic Diagram of Thermocouple Cold End

（1）热电偶式温度传感器的优点

- 1) 测量精度高。因热电偶直接与被测对象接触，不受中间介质的影响。
- 2) 测量范围广。常用的热电偶从 $-50\sim+1600^{\circ}\text{C}$ 均可连续测量，某些特殊热电偶最低可测到 -269°C （如金铁镍铬），最高可达 $+2800^{\circ}\text{C}$ （如钨-铼）。
- 3) 构造简单，使用方便。热电偶通常是由两种不同的金属丝组成，而且不受大小和开头的限制，外有保护套管，用起来非常方便。

热电偶式传感器适用于检测高温场合，例如主机排烟温度的测量等。

4.4.2 热电阻式温度传感器

热电阻的测温原理是基于导体或半导体的电阻随温度而变化的特性进行测温。工业上被广泛地应用来测量中低温区 $-200^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$ 的温度。

作为测温用的热电阻其材料应具备以下要求：电阻温度系数要尽可能大且稳定，电阻率大，电阻与温度变化最好成线性关系，在整个测温范围内应具有稳定的物理和化学性质，材料易于制取和价格便宜等。

热电阻测温的优点是精度高，不存在冷端问题，信号易于远传，适宜测低温。金属热电阻稳定性高、互换性好、准确度高，可以用作基准仪表。本课题拟采用金属热电阻来测量高温淡水与海水温度。

（1）常用的金属热电阻类型

常用的金属热电阻是由铜丝或铂丝双线并绕在绝缘骨架上，然后插入护套内而制成的。铜热电阻的测温范围是 $-50^{\circ}\text{C}\sim+150^{\circ}\text{C}$ ，铂热电阻的测温范围是 $-200^{\circ}\text{C}\sim+650^{\circ}\text{C}$ ，常用的国产铂热电阻按分度号主要有 PT50、PT100、PT300。

铂热电阻在氧化性介质中，甚至在高温下，它的物理、化学性能稳定，因此不仅用作工业上的测温元件，而且还作为复现温标的基准器。按国际温标 IPTS-68 规定，在 $-259.34^{\circ}\text{C} \sim 630.74^{\circ}\text{C}$ 温域内，以铂热电阻温度计作为基准器。其电阻与温度的关系，在 $0 \sim 850^{\circ}\text{C}$ 范围内为：

$$R(t) = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (4.4)$$

在 $-200^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ 范围内：

$$R(t) = R_0[1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)] \quad (4.5)$$

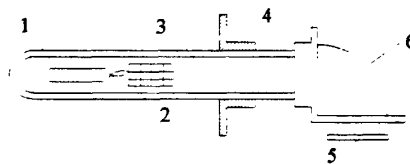
其中

$$A = 3.9083 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$B = -5.775 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$$

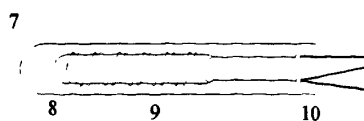
$$C = -4.183 \times 10^{-12} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-4}$$

(2) 热电阻的结构



(a) 热电阻结构

(a) Structure of Thermal Resistance



(b) 电阻丝的无感绕法

(b) Noninductive Winding of Resistance Wire

图 4.7 热电阻结构

- 1) 电阻体; 2) 瓷绝缘套管; 3) 不锈钢套管; 4) 安装固定件; 5) 引线口; 6) 接线盒; 7) 芯柱; 8) 电阻丝; 9) 保护膜; 10) 引线段

Fig.4.7 Structure of Thermal Resistance

- 1) Resistor Body; 2) Ceramic Insulating Sleeve; 3) Stainless Steel Casing; 4) Fixture; 5) Wire Port; 6) Junction Box; 7) Core; 8) Resistance Wire; 9) Protective Sleeve; 10) Wire End

热电阻结构如图 4.7 (a) 所示, 主要由感温元件、内引线、绝缘套管、保护套管和接线盒等部分组成^[56]。

热电阻丝是绕在骨架上的, 骨架采用石英、云母、陶瓷以及塑料等绝缘材料制成, 根据热电阻丝的材料、制造工艺、使用温度和测量精度等, 骨架可做成不同外形。为了使电阻感温体不产生电感, 电阻丝要用无感绕法绕制, 如图 4.7 (b) 所示, 将电阻丝对折后双绕, 使电阻丝的两端均由支架的同一侧引出。

热电阻丝必须防止有害气体腐蚀, 尤其是铜热电阻还要防止腐蚀; 水分浸入会造成漏电, 直接影响阻值。所以工业用热电阻都要有金属保护套管, 保护套管上一般附有安装固定体, 以便将热电阻温度计固定在被测设备上。

(3) 热电阻引线方式

工业热电阻安装在测量现场, 其引线电阻对测量结果有较大影响。如图 4.8 所示, 热电阻的引线方式有两线制、三制和四线制三种。两线制方式是在热电阻两端各连一根导线, 这种引线方式简单、费用低, 但是引线电阻随环境温度的变化会带来附加误差。只有当引线电阻 r 与元件电阻值 R 满足 $2r/R \leq 10^{-3}$ 时, 引线电阻的影响才可以忽略。三线制方式是在热电阻的一端连接两根导线, 另一端连接一根导线。当热电阻与测量电桥配用时, 分别将引线接入两个桥臂, 可以较好地消除引线电阻影响, 提高测量精度, 工业热电阻测温多用此种接法。四线制方式是在热电阻两端各连两根导线, 其中两根引线为热电阻提供恒流源, 在热电阻上产生的压降通过另外两根导线接入电势测量仪表进行测量, 当电势测量端的电流很小时, 可以完全消除引线电阻对测量的影响, 这种引线方式主要用于高精度的温度检测^[56]。

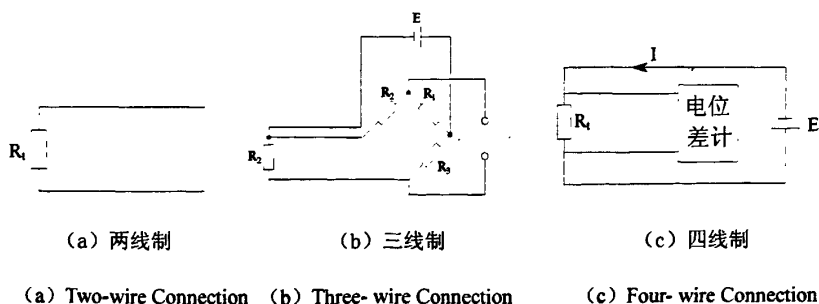


图 4.8 热电阻引线方式

Fig.4.8 Feedthrough Mode of Thermal Resistance

鉴于热电偶式与热电阻式温度传感器的测温特点以及本系统的设计任务，本文采用热电阻传感器 PT100 来检测高温淡水与海水的温度。并采用四线制接法以消除引线电阻影响，提高测量精度。

4.5 基于油门拉杆位移的前馈信号的采集

油门拉杆位移量可有多种检测方法，既可以利用主令控制器原理将油门拉杆位移量转换成数字信号，也可以利用变阻器原理将油门拉杆位移量转换成连续的模拟量信号，鉴于 PLC 强大的数字量处理功能，本文拟将油门拉杆位移量转换成数字信号送给 PLC。

4.6 液位检测环节

中央冷却水系统中设有高位淡水膨胀水箱，其作用有：（1）膨胀，使系统中的淡水受热后有膨胀的余地；（2）补水，补充系统中因蒸发和泄漏而损失的水量并保证淡水泵有足够的吸入压头；（3）排放系统中的空气；（4）投药，可以在投放化学药剂以对冷却水进行化学处理；（5）加热，可对冷却水加热以暖缸（如在其中设置加热装置）；（6）保证高温淡水泵与低温淡水泵的吸入压头。

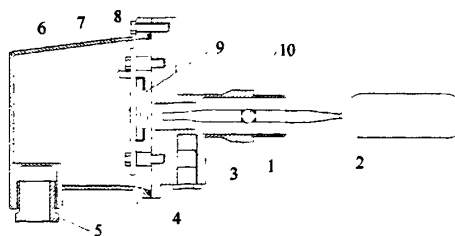


图 4.9 浮球式液位开关

- 1) 开关本体；2) 浮臂及浮球整体；3) 浮力调节螺栓；4) 盖子密封圈；5) 电缆压紧螺母；
6) 盖子；7) 电路板；8) 接线端子；9) 簧片开关；10) 浮子支撑螺钉

Fig.4.9 Level Switch

- 1) Body; 2) Float Arm Assembly; 3) Buoyancy Adj. Screw; 4) Lid Seal Ring; 5) Cable Gland Nut;
6) Lid; 7) Circuit Board; 8) Terminal Block; 9) Reed Switch; 10) Float Pivot Bolt

膨胀水箱中的淡水水位也是系统必须控制的重要参数之一，本系统选用防护

等级 IP56 的浮球式液位开关来控制水箱液位。浮球式液位开关由互为隔离的浮球组和触头组二大部分组成，如图 4.9 所示，其工作过程为：当被测液位升高或降低时，浮球随之升降，使其端部的磁钢上、下摆动，通过磁力作用，推斥安装在外壳内相同磁极的磁钢上、下摆动，其另一端的动触点便在静触头间连通或断开，以此控制水箱补水电磁阀的打开与关闭，从而使水箱水位维持在要求范围内。

4.7 海水流量调节环节

海水流量调节就是根据海水温度的变化，调节流入冷却器中的海水量。通过变流量调节可以大大提高了缸套冷却水温度调节的速度^{[58][59]}。

通常机舱设置两台功率较大的海水泵，一台作为备用，工作状态下一台海水泵运行，通过人工调节海水泵出口开度来调节海水流量，且一般情况下海水泵出口阀开度仅为全开状态的 1/5 左右。使用一台变频调速电机可实现海水泵的多速控制，但对同一台离心式海水泵进行大范围调速又会对海水泵的泵壳及叶轮产生严重的汽蚀。设置三台功率不同海水泵按一定方式组合运行就可以得到多种海水流速，设计方案如表 4.1 所示^[59]。

表 4.1 海水泵选型与组合方案

Tab.4.1 Sea Water Pump Lectotype and Combination Program

泵编号	功率	组合方案	运行泵编号	适用工况 (海水温度)
A	高	I	A+B	>25℃
B	中	II	A+C	18~25℃
C	低	III	B+C	10~18℃
		IV	B	<10℃

根据海水温度的变化情况，PLC 自动选择海水泵的组合方案，控制三台海水泵的启停，这样不仅可以快速调节冷却水水温使其达到所要求的温度值，降低了轮机人员的工作强度，同时减少了海水泵的功耗，节约了能源。

第 5 章 基于 S7-200 的控制系统硬件与软件实现

本文设计的船舶柴油机冷却水温度控制系统硬件环节主要有以下几部分组成：PLC、触摸屏、带位置反馈的永磁低速同步电机、三台不同功率的海水泵电机、传感器（海水及高温带水温度传感器、压力继电器、液位开关）、外围电路及 PPI 通信电缆等部分组成，系统硬件连接结构如图 5.1 所示。

本文设计的船舶柴油机冷却水温度控制系统拟实现的具体功能介绍如下：

- (1) 系统能够对柴油机高温冷却水出机温度、海水温度进行检测并在系统触摸屏上进行实时显示，并设有高温淡水高低温越限报警功能。
- (2) 系统能够以油门拉杆位移为前馈信号根据模糊规则对高温冷却水出机温度进行预调节，并通过 PID 控制器对高温冷却水出机温度进行精确调节，同时能够通过触摸屏进行 PID 参数与高温冷却水目标温度的设定。
- (3) 系统根据前馈模糊控制环节与 PID 环节的输出量自动启动执行电机正转或反转，并根据设在电机上的脉冲编码器所反馈的脉冲数来判断执行电机是否转到位，从而决定执行电机的运行与停止。
- (4) 系统通过控制高温淡水膨胀水箱进水电磁阀的开启与关闭对高温淡水膨胀水箱的液位进行自动调节，同时系统设有膨胀水箱极限高低水位越限报警功能。
- (5) 系统能够根据海水温度自动选择海水泵运行模式，同时系统设有海水泵电机过载报警功能。
- (6) 系统在高温淡水泵吸口压力过低时给出报警信号。

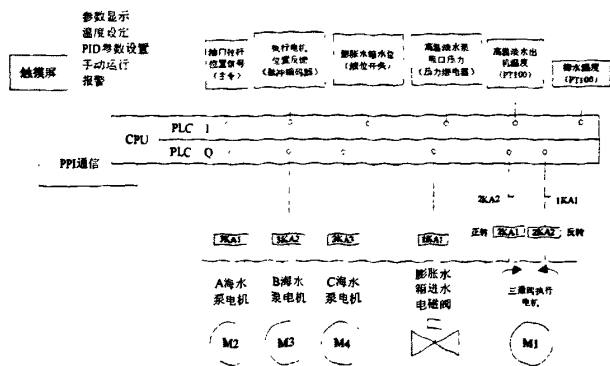


图 5.1 船舶柴油机高温冷却水温度控制系统硬件结构图

Fig.5.1 Hardware structure of temperature control system of high temperature cooling water

5.1 控制系统 I/O 点及地址分配

表 5.1 船舶柴油机冷却水温度控制系统 I/O 表

Tab.5.1 I/O Table of Temperature Control System of High Temperature Cooling Water			
数字量输入	信号内容	数字量输出	信号内容
I0.0	前进 1	Q0.0	高温冷却水低温超限报警
I0.1	前进 2	Q0.1	水箱低水位报警
I0.2	前进 3	Q0.2	进水电磁阀开启
I0.3	前进 4	Q0.3	水箱高水位报警
I0.4	停车	Q0.4	淡水泵吸口低压报警
I0.5	后退 1	Q0.5	执行电机运行指示
I0.6	后退 2	Q0.6	执行电机正转
I0.7	后退 3	Q0.7	执行电机反转
I1.0	后退 4	Q1.0	A 海水泵运行
I1.1	选择系统手动	Q1.1	B 海水泵运行
I1.2	选择系统自动	Q1.2	C 海水泵运行
I1.3	水箱极限低水位	Q1.3	系统故障
I1.4	水箱低水位	Q1.4	A 海水泵运行指示
I1.5	水箱高水位	Q1.5	B 海水泵运行指示
I1.6	水箱极限高水位	Q1.6	C 海水泵运行指示
I1.7	淡水泵吸口压力低	Q1.7	高温冷却水高温超限报警
I2.0	淡水泵过载		
I2.1	执行电机过载		
I2.2	A 海水泵过载		
I2.3	B 海水泵过载		
I2.4	C 海水泵过载		
I2.5	执行电机位置反馈		
I2.6	三通阀开到位(限位)		
I2.7	三通阀关到位(限位)		
I3.0	执行电机正转启动		
I3.1	执行电机反转启动		
I3.2	执行电机停止		
I3.3	A 海水泵运行-反馈		
I3.4	B 海水泵运行-反馈		
I3.5	C 海水泵运行-反馈		
I3.6	试灯		
I3.7	执行电机正转反馈		
I4.0	执行电机反转反馈		
I4.1	消警		
模拟量输入		信号内容	
IW100		高温冷却水出口温度	
IW104		海水温度	

根据系统拟实现的控制功能，系统输入/输出信号名称及地址编号如表 5.1 所列，系统有 34 个数字量输入点，2 个模拟量输入点，16 个数字量输出点。

5.2 控制系统 PLC 相关模块的选择

西门子 S7-200PLC 有 CPU221、CPU222、CPU224、CPU224XP、CPU226 五种中央处理器模块，有 EM221、EM222、EM223 三种数字量扩展模块，有 EM231、EM232、EM235 三种模拟量扩展模块^[60]。结合本系统的输入输出的点数及类型，以及实验室现有的 PLC 试验台，本系统选择 CPU226、EM221 数字量扩展模块以及 EM231 模拟量扩展模块来实现系统的控制任务，各模块具体型号见表 5.2。CPU226 模块的技术指标，如表 5.3 所示。

表 5.2 PLC 单元具体使用的模块及型号

Tab.5.2 Specific Modules Used in PLC Unit

序号	名称	型号	单位	数量	备注
1	中央处理单元	CPU226CN	套	1	34 KB 内存
		AC/DC/RLY			
2	数字量扩展模块	EM221	套	1	16 输入
3	模拟量输入模块	EM231 RTD	套	1	4 输入

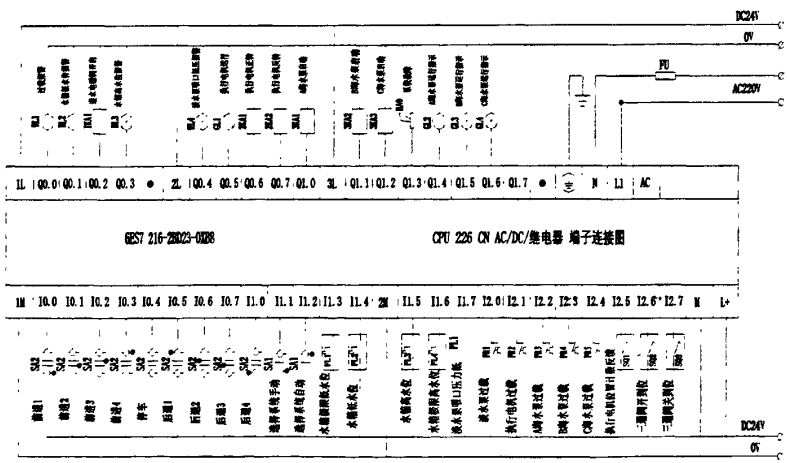
表 5.3 CPU226 模块的技术指标

Tab.5.1 CPU226 module technical index

外形尺寸(mm)	190×80×62	高速计数器个数	6 个
程序存储器:		单相	4 路 30kHz
带运行模式下编辑	16384 字节	双相	2 路 20kHz
不带运行模式下编辑	24576 字节	高速脉冲输出	2 路 20kHz
数据存储器	10240 字节	模拟电位器	2 个, 8 位分辨率
掉电保护时间	100 小时	有无时钟脉冲	有
集成的数字量输入/输出	24 输入/16 输出	通信口	2 个 RS-485
数字量 I/O 映像区	256(128 入/128 出)	AC240V 电源 CPU	40mA/160mA
模拟量 I/O 映像区	32 入/32 出	输入电流/最大负载	
扩展模块数量	7 个	DC24V 电源 CPU	150mA/1050mA
脉冲捕捉输入个数	24 个	输入电流/最大负载	

5.3 控制系统硬件电路设计

控制系统的硬件电路设计主要包括：外部电路的设计，绘制电气控制系统的总装配图和总接线图，设计组件的装配图和接线图，设计、制作电气控制柜、操作台，进行 PLC 的安装与配线。PLC 的外围电路包括 I/O 接口电路、电源电路和接地电路、执行器（如调速器、电磁阀、继电器等）的主电路和一些不进入 PLC 的控制保护电路等。控制保护电路包括为了提高控制可靠性的原继电器接触器控制系统的一些互锁、限位、零压、过载等控制与保护环。在采用 PLC 控制后，原继电器接触器电路的大部分联锁环节都已编入 PLC 的程序之中，但从保证系统工作可靠性的角度考虑，在外围电路还可保留一些必要的互锁环节。没有必要把所有外部条件都一概纳入 PLC 之中，特别是一些重要的保护环节，仍可保留在与 PLC 无关的外围电路中。由于时间限制这里主要对船舶冷却水温度控制系统的 PLC 及扩展模块外围接线进行了设计，如图 5.2 所示，本系统的 PLC 及其扩展模块需由外界提供 AC220V 与 DC24V 两种电源，接线时应特别注意 DC24V 电源的正负极性以免损坏 PLC，同时为提高系统的准确性与抗干扰性图中的接地点应可靠接地 [61]。



(a) CPU226 外围接线图
(a) Wiring Diagram of CPU226

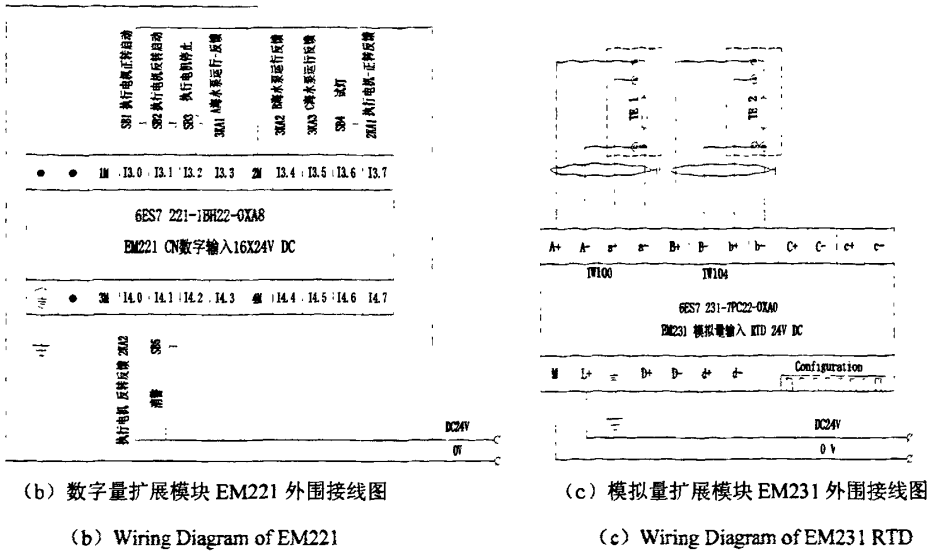


图 5.2 船舶柴油机冷却水温度控制系统 PLC 及扩展模块外围接线图
Fig.5.2 Wiring Diagram of PLC and Expansion Module of Cooling Water Temperature Control System

5. 4 控制系统软件设计

5. 4. 1 系统控制流程图

本文设计的船舶柴油机冷却水温度控制系统的程序设计主要由主控制模块、膨胀水箱液位控制模块以及海水泵模式选择模块三部分组成，如图 5.3 为主控制模块流程图，主控制模块是基于油门拉杆位移的前馈模糊与 PID 复合控制系统，系统在自动运行模式下首先读取油门拉杆的位置信号，如油门拉杆位置发生变化，系统根据模糊规则得出执行电机的转动角度，启动执行电机正转或反转并读取电机转动角度的脉冲反馈，当电机转到位时使电机停转。当油门拉杆位置无变化时，系统自动读取柴油机高温冷却水的出机温度并与给定值相比较，然后系统根据温度的偏差量启动 PID 控制指令，系统根据 PID 输出结果以同样的方式控制执行电机的转动角度。

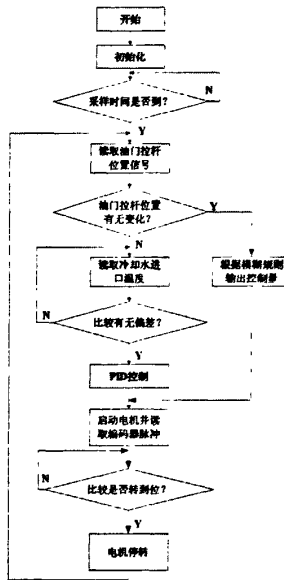


图 5.3 基于油门拉杆位移的前馈模糊控制与 PID 控制流程图

Fig.5.3 Flow Chart of PID Control and Feedforward Control Based on Throttle Lever Displacement

系统对膨胀水箱液位控制过程见图 5.4，当膨胀水箱液位发生异常时系统根据液位开关的位置来控制膨胀水箱进水电磁阀的开启与关闭，当液位由于某些原因高于或低于设定警戒值时系统给出报警指示，指导轮机人员及时排除故障。

图 5.5 为海水泵模式选择流程图，系统首先读取海水温度，并根据设定方案选择海水泵运行模式：海水温度高于 25°C 时启用方案 I，海水泵 A 与海水泵 B 运行；当海水温度低于 25°C 并高于 18°C 时启用方案 II，海水泵 A 与海水泵 C 运行；当海水温度低于 18°C 并高于 10°C 时启用方案 III，海水泵 B 与海水泵 C 运行；当海水温度低于 10°C 时启用方案 IV，海水泵 B 运行。在各种工况下系统保持至少有一台海水泵处于备用状态。

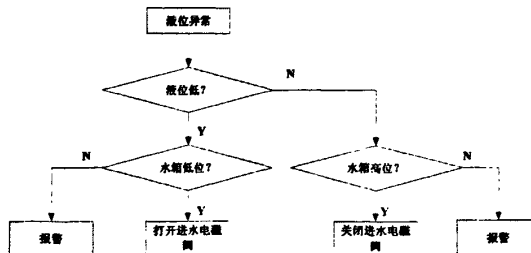


图 5.4 膨胀水箱液位控制流程图

Fig.5.4 Flow Chart of Liquid Level Control of Expansion Tank

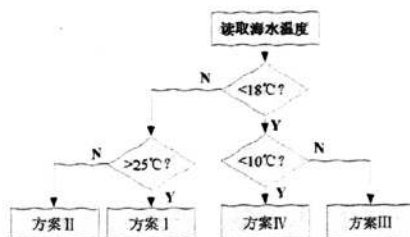
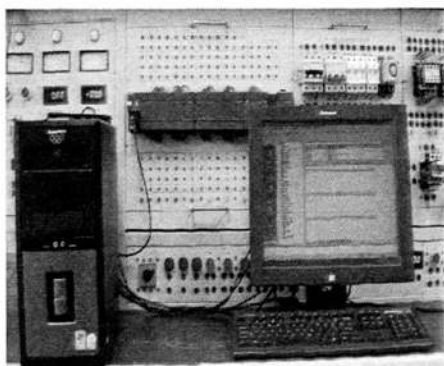


图 5.5 海水泵模式选择流程图

Fig.5.5 Flow Chart of Model Selection of Seawater Pump

5.4.2 基于 STEP7-Micro/WIN V4.0 的软件编程

开发 S7-200 系列 PLC 用户程序需要一台编程器或装有编程软件的 PC，并通过 PC/PPI 通信电缆将 PC 与 S7-200CPU 连接在一起组成用户程序开发系统^[61]。大连海事大学船舶电气电力拖动与仿真实验室具有多套这样的设计与仿真设备如图 5.6 (a) 所示。西门子 S7-200 系列 PLC 使用的是 STEP 7-Micro/WIN V4.0 系列编程软件，该软件的工作界面如图 5.6 (b) 所示，软件的各部分功能这里不再赘述。根据系统控制流程图可编写船舶柴油机冷却水温度控制系统的 PLC 程序，详见附件。



(a) S7-200 程序设计仿真试验设备



(b) STEP7-Micro/WIN V4.0 的界面

(a) The Equipment of S7-200 Program Design and Simulation (b) The Interface of STEP7-Micro/WIN V4.0

图 5.6 S7-200 程序设计仿真试验平台

Fig.5.6 The Platform of S7-200 Program Design and Simulation

5.5 控制系统的人机界面

人机界面 (HMI) 顾名思义就是人与控制过程交流信息的窗口，人可以通过这个窗口下达控制指令，也可以通过这个窗口观测被控系统的运行状态。人机界

面把控制过程变得清楚与透明。作为控制系统的重要核心部件, PLC 与人机界面的结合是必不可少的。过去采用按钮、开关和指示灯等作为为人机界面装置,提供的信息少且操作困难,采用数码管和拨码开关,又会占用大量的 PLC I/O 资源。随着计算机技术的发展,人机界面装置逐步出现了屏幕显示的面板或触摸屏等形式,同时它们的防护等级与可靠性完全按照工业现场设计,从而成为了 PLC 系统的最佳拍档^[62]。

5.5.1 触摸屏硬件

本系统触摸屏硬件采用海泰克人机界面 PWS-3261-FTF 系列产品,该屏显示面积 10.4 寸,分辨率达 640*480 像素;具备 4MB Flash Memory; 1024K 配方存储器; 2 个 COM 通信端口 (9 脚的母接头 RS-232/485; 25 脚的母接头 RS-232/422/485); 支持 USB 高速下载; 兼容并口打印机。

PWS-3261-FTF 系列产品具有强大的通讯功能、灵活的系统构成、生动逼真且丰富的图库,因为稳定可靠、性价比高、简单易用的特点,在船舶制造业得到了广泛的应用。应用于船舶柴油机冷却水温度控制系统,对提高船舶机舱自动化水平起到了重大的作用。

5.5.2 触摸屏界面设计

触摸屏界面的编写使用的是基于 Windows 系统的编程软件 ADP 6.0。在安装好 ADP 6.0 后,打开 ADP 6.0 编程界面如图 5.7 所示^[62]。根据本系统的需要,设计出三个界面:开机画面、运行画面、信息显示画面。画面如图 5.8、5.9、5.10 所示。

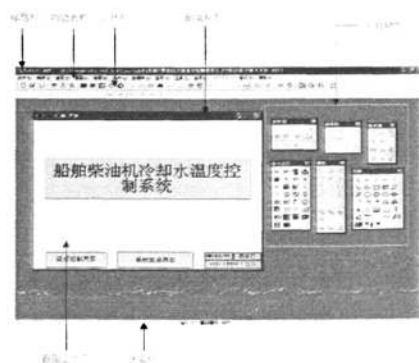


图 5.7 ADP 6.0 编程界面

Fig.5.7 Programming Interface of ADP 6.0



图 5.8 设计开机界面

Fig.5.8 Design the Boot Screen

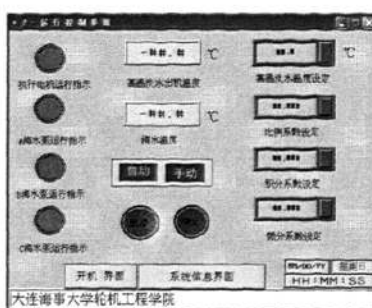


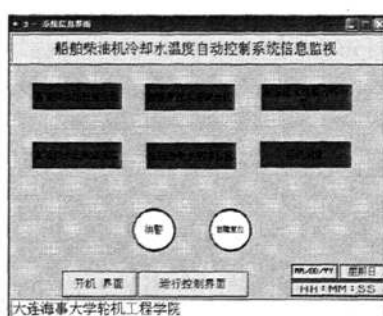
图 5.9 设计运行控制界面

Fig.5.9 Design the Running Screen



(a) 正常运行状态

(a) Normal Condition



(b) 报警状态

(b) Alarm Condition

图 5.10 设计系统信息界面

Fig.5.10 Design the Trip Information Screen

编辑好界面后，用 RS232 接口的西门子 S7-200PLC 编程适配器将触摸屏与计算机连接起来，点击下载应用，即可将此画面下载到触摸屏中。

(1) 开机画面

开机画面是触摸屏接通电源后出现的第一个组态画面，定义为画面 1，画面设置了系统时间、日期等，同时，画面上设置了两个触摸按钮——“运行画面”、“信息显示画面”其功能为切换画面，当点击页面触摸“运行画面”按钮时即进入了运行画面。开机画面如图 5.11 所示。



图 5.11 开机画面

Fig.5.11 Boot Screen

(2) 运行画面

本系统显著特点是通过人机界面能实现“遥控”控制，使冷却水温度控制系统的操作与维护简单、方便，更人性化。

此画面定义为画面 2，可以对冷却水温度控制系统进行“遥控”操作。运行画面与 PLC 的程序相对应。不同工作方式已经由 PLC 软件和硬件进行互锁，通过点击相应控制按钮，即可对冷却水温度控制系统进行相关操作。

在冷却水温度控制系统中，用户需要观察的参数有：高温淡水出机温度、海水温度、海水泵运行指示、执行电机运行指示等。用户需要设定的参数有：高温淡水温度以及控制系统 PID 相关参数。因此，本画面设置的数据显示条目与 PLC 相应数据寄存器地址是一一对应的。当系统启动后，由变送器等将有关信号送入 PLC 进行处理，并存储在 PLC 相应数据寄存器中，此时，触摸屏就可以实时显示数据。运行画面如图 5.12 所示。

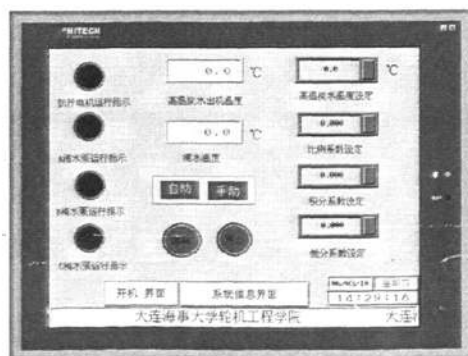


图 5.12 运行画面

Fig.5.12 Running Screen

(3) 信息显示画面



图 5.13 信息显示画面

Fig.5.13 Trip Information Screen

触摸屏上配有“信息显示”画面，如图 5.13 所示，本画面具有信息显示和报警显示功能。通过该页面可以直观的看出船舶柴油机冷却水系统各环节的状态。如：“高温冷却水出机温度 H”这一显示环节，如果高温冷却水温度未超过高温越限报警温度（90℃）那么该栏为黄色，当高温冷却水出机温度超过高温越限设定值时，该栏变为红色发生闪烁并伴有蜂鸣报警，当按下消警按钮后，闪烁与蜂鸣消失，当故障解除后该栏由红色变成黄色。这样使本系统更直观，操作更方便，处理故障更迅速。

5.5.3 触摸屏与 S7-200 之间的通信

西门子 S7-200PLC 与触摸屏可以通过 PPI 通信协议实现通信^[63]。PPI 是 S7-200 基本的通信方式，PPI 通信协议是西门子 PLC 专门为 S7-200 系列 PLC 开发的一个通信协议。S7-200 系列 CPU 上集成的编程口就是 PPI 通信接口，因此，不需要扩展模块，通过内部的 RS485 串行口（也称 PPI 口）即可实现。要进行 PPI 通信，必须在 STEP 7-Micro/WIN 和触摸屏中设定通信参数。在 PLC-200 中 PPI 通信连接参数设置如图 5.14 所示。



图 5.14 配置 PPI 通信连接参数

Fig.5.14 Setting Parameters of PPI

当触摸屏后面的 DIP-switch 的 SW5 在“OFF”位置时，图 5.15 中的参数一定要和 PLC 设定的通信参数相同，否则无法与 PLC 通信。



图 5.15 触摸屏参数的设定

Fig.5.15 Setting Parameters of Touch Screen

当触摸屏后面的 DIP-switch 的 SW5 在“ON”位置, DIP-switch 的 SW6 在“OFF”位置时, 触摸屏与 PLC 通信的参数以图 5.15 中的设定的参数为准, 不需要与 PLC 设定的通信参数相同。

第 6 章 结论与展望

本文针对船舶柴油机冷却水温度大惯性、长时滞、易超调的特点，重点对冷却水温度控制系统前馈环节进行了仿真研究，提出了基于模糊前馈控制的船舶柴油机冷却水温度的控制方法，探讨了基于功率的前馈信号的选取原则，并分别选取油门拉杆位移、柴油机排烟温度作为前馈信号进行了基于 MATLAB 的前馈模糊控制器的设计。最后将基于这两款模糊控制器的复合控制系统与传统的 PID 控制进行了仿真对比，仿真结果表明引入前馈模糊控制环节以后，柴油机冷却水出口温度的控制效果得到大幅度提升，降低了超调量，提高了控制速度与抗扰动能力。

同时本文针对船舶机舱的特殊环境，利用 PLC 可靠性高、指令系统简单、维修工作少、现场接口安装方便等优点，进行了基于西门子 S7-200 的船舶柴油机冷却水温度控制系统设计，利用 S7-200 模拟量扩展功能以及 PID 控制指令，实现系统对于水温的检测与控制，并对系统的硬件与软件进行了研究与设计。通过系统的人机界面，轮机人员可以方便的监控冷却系统的水温、报警状态等各项参数，并能够方便地进行设定温度、PID 参数的修改，以适应系统的不同工况。系统方便的接口功能可以实现与机舱综合报警系统连接，提高机舱的自动化程度。

本文控制系统设计部分在前馈预调节环节采用的是基于油门拉杆位移的模糊控制，根据本文第三章的研究结论，以船舶柴油机排烟温度作为前馈信号进行基于模糊控制的预调节也是一个不错的选择，非常具有研究与应用价值。

由于时间与条件所限，本系统只针对一台主机的高温淡水三通阀的控制进行了设计，对于低温淡水三通阀的控制以及部分船舶的多台主机情况，可考虑使用具有更高运算速度、更多输入输出点数的 PLC 并相应增加模拟量扩展模块来实现系统的综合控制功能。

参考文献

- [1] 孙培廷. 船舶柴油机. 大连:大连海事大学出版社, 2002.
- [2] Sun Peiting. Einfluss der Auslenung des Kuehlwassersystems auf den Verschleiss der Zylinderlaufbushse bei Zwei-Takt-Schiffsdieselmotoren. Berlin: Verlag Koester, 1993.
- [3] 邱德庆. 基于单片机的船舶柴油机冷却水温度控制系统:(硕士学位论文). 大连:大连海事大学, 2003.
- [4] Engard Central Cooling Control System. Alfa-Laval Marine & Power Engineering. 1985: 18-30.
- [5] 李永鹏, 王本明. 船舶中央冷却水系统的多功能控制. 青岛远洋船员学院学报. 2006, (2):25-28.
- [6] 李海峰. 船舶柴油机冷却水温度智能控制系统研究与设计:(硕士学位论文). 大连:大连海事大学, 2008.
- [7] 杜玉恒, 韩学胜, 郭祖平. 船用柴油机冷却水温度的模糊控制. 大连海事大学学报. 2002, 28(1):69-71.
- [8] 吴桂涛, 孙培廷. 船舶主柴油机缸套冷却水出口温度的智能控制. 中国造船. 2004, 45(2):57-61.
- [9] 杨世铭, 陶文铨. 传热学. 北京:高等教育出版社, 1998.
- [10] 岳丹婷. 工程热力学和传热学. 大连:大连海事大学出版社, 2002.
- [11] 吴桂涛, 孙培廷. 船舶中央冷却系统的热力计算数学模型. 大连海事大学学报. 2002, 28(1):13-15.
- [12] 吴桂涛, 任旭东, 孙培廷. 船舶主机缸套冷却水系统的建模与仿真. 哈尔滨工程大学学报. 2003, 24(4):376-379.
- [13] 马量. 船舶主机冷却水系统的建模与仿真:(硕士学位论文). 大连:大连海事大学, 2007.
- [14] 吴桂涛, 孙培廷. 基于功率的缸套冷却水出口温度控制系统的研究. 中国航海. 2003, (3):71-74.
- [15] 吴桂涛, 尹自斌, 孙培廷. 主机缸套冷却水出口温度控制方法. 交通运输学报. 2003, 3(4):35-38.
- [16] Keller J.R., Chiang E.C., Johnson J.H. Computer simulation and design of a truck Diesel cooling system. American Society of Mechanical Engineers. 1988: 277-288.
- [17] Dr. A. Mamoun. Simulation of water cooling system of a marine diesel plant. Maritime Research Journal. 1986, 12(2): 1-15.

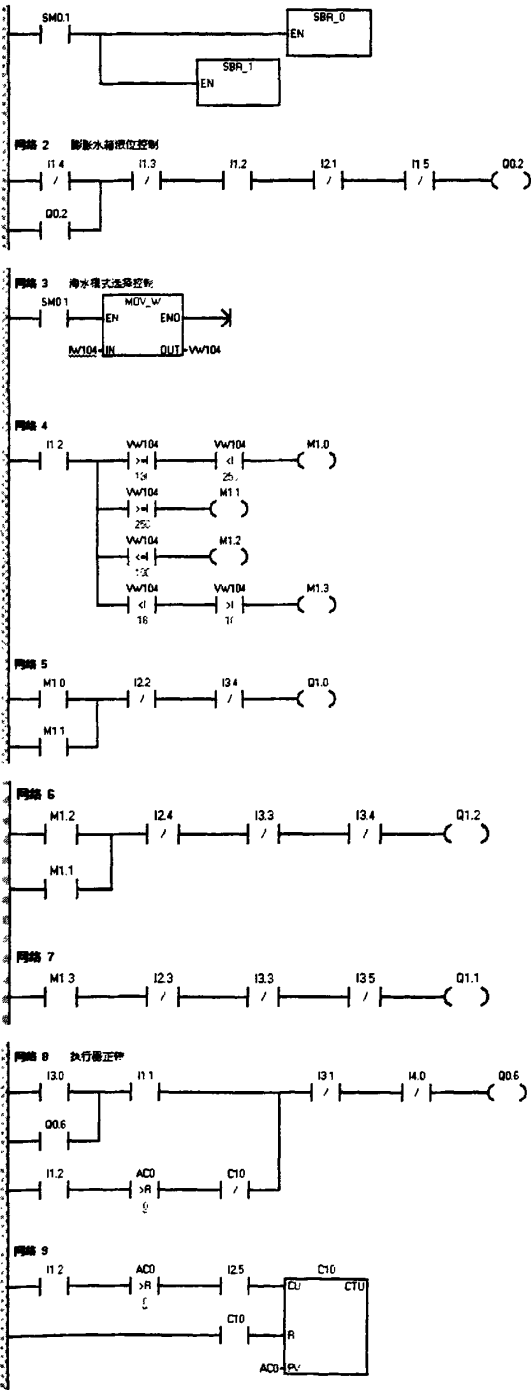
- [18] Lawrence N., Kortekaas H. Y. P., DECSIM: A PC-Based Diesel Engine Cycle and Cooling System Simulation Program, Mathematical and computer modeling. 2001, 33:565-575.
- [19] 白金, 韩俊伟. 基于 MATLAB/Simulink 环境下的 PID 参数整定. 哈尔滨商业大学学报. 2007. 23(6):673-676.
- [20] 滕青芳, 范多旺, 董海鹰等. 自动控制原理. 北京:人民邮电出版社, 2008.
- [21] Astrom K J. A Ziegler-Nichols auto-tuners. Report TFRT-3167, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund University, Sweden, 1982.
- [22] Wen Tan, Yingqin Yuan, Yuguang Niu. Tuning of PID controller for unstable process. Control Application, Kohala Coast, HI, 1999:121-124.
- [23] 王素青, 姜维福. 基于 MATLAB/Simulink 的 PID 参数整定. 自动化技术与应用. 2009. 28(3):24-25.
- [24] Dorigo, M., Maniezzo, V., Colorni, A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Transactions on SMC, 1996, 26(1): 29-41.
- [25] 周晖. 基于 MATLAB 的 PID 参数整定. 船舶电子对抗. 2008. 31(2):107-109.
- [26] Bennett, S. Development of PID controllers. Control Systems Magazine, IEEE. 1993, 13(6):58-62.
- [27] 林叶锦, 朱绍庐. 主机缸套水温度控制的改进研究. 大连海事大学学报. 1998, 24(2):41-44.
- [28] Xiaoyan Xu, Min He, Huayao Zheng. Neuron Based Control of Main Engine Cooling Water Temperature. International Conference on Control and Automation, Guangzhou, 2007:2293-2296.
- [29] 李士勇. 模糊控制、神经控制和智能控制论. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1996.
- [30] 徐洪华. 模糊 PID 参数自整定技术的研究. 硕士学位论文. 长春:长春理工大学 2004, 12:17-19.
- [31] 张国良, 曾静等. 模糊控制系统及其 MATLAB 应用. 西安:西安交通大学出版社, 2002.
- [32] 杨光昇, 魏荣年. 柴油机测试技术. 北京:国防工业出版社, 1984.
- [33] 肖华. 船舶动力装置轴功率测量方法研究: (硕士学位论文). 武汉:武汉理工大学, 2009.
- [34] 刘龙江. 浅析模糊控制及其一种模糊控制器的设计. 陕西国防工业职业技术学院学报. 2006, 16(6):14-16.
- [35] Rainer Hampel, Michael Wagenhecht, Nasredin Chaker. Fuzzzy control. New York: Physica-Veriag, 2000.
- [36] Li Sheng, Xin Pulin. Research on Fuzzy VQC in Substation Based on MATLAB. Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, Tianjin, 2009:356-359.

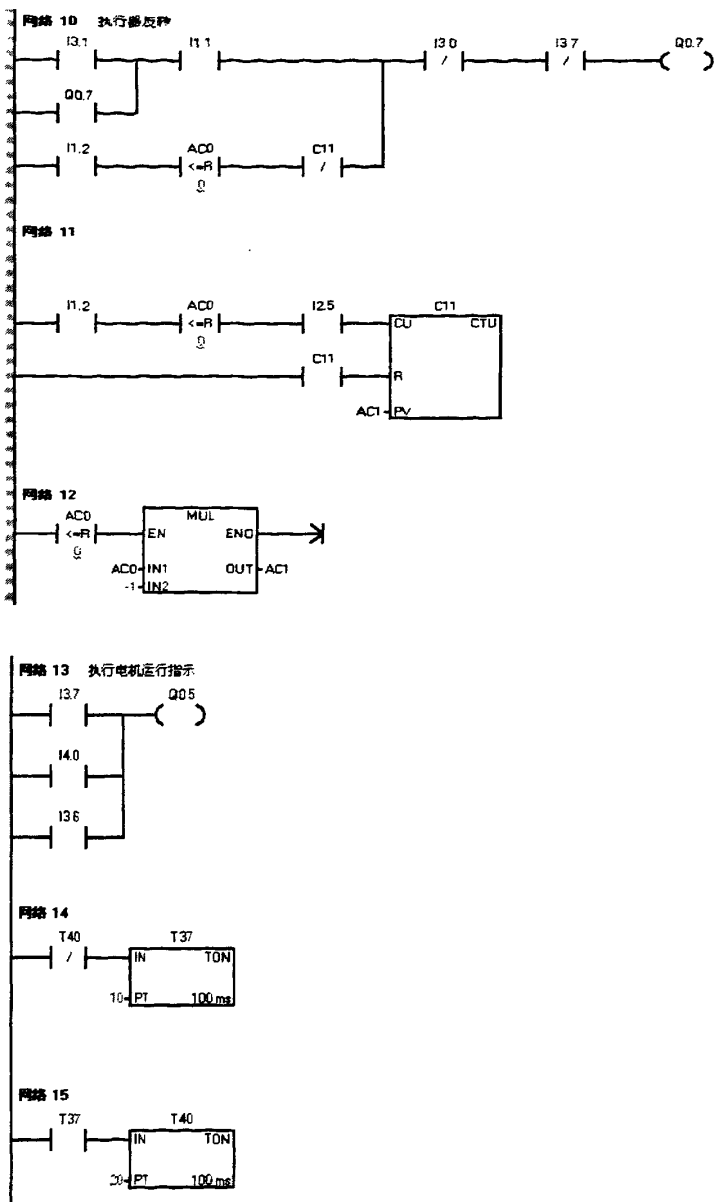
- [37] Gerald Gibson. A supervisory controller for optimization of building central cooling system. ASHRAE Transactions. 1997, 95: 431-438.
- [38] 王正林, 郭阳宽. 过程控制与 Simulink 应用. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [39] 钟麟, 王峰. MATLAB 仿真技术与应用教程. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [40] Seem. J. E. A New Pattern Recognition Adaptive Controller with Application to HVAC System. Automatic. 1998, 34(8):969-982.
- [41] Rivera. D. E., Morari. M., Skogestad. S. Internal Model Control. 4. PID controller Design. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 1986, 25(1)252-260.
- [42] 王永华. 现代电气控制及 PLC 应用技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [43] 吉顺平, 孙承志, 路明等. 西门子 PLC 与工业网络技术. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [44] SIMATIC S7-200 Programmable Controller System Manual. 2004.
- [45] 杨后川, 张瑞, 高建设等. 西门子 S7-200PLC 应用 100 例. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [46] <http://www.automation.siemens.com/mcms/programmable-logic-controller/de/simatic-S7-controller/S7-200/Seiten/Default.aspx>.
- [47] 李楠, 张德强. 基于 S7-200PLC 的模糊控制研究. 辽宁工学院学报. 2006, 26(6):403-405.
- [48] 叶建美. 基于 PLC 的瓦楞原纸模糊 PID 温度控制系统的设计与应用. (硕士学位论文). 浙江: 浙江工业大学, 2009.
- [49] 孙小权, 钱少明. 基于 PLC 的 PID 控制器设计与实现. 应用科技. 2008, 35(6):29-32.
- [50] 李光彬. 流体阀门电动执行器数字化控制技术研究: (硕士学位论文). 山东: 山东科技大学, 2007.
- [51] 舒志兵, 周玮等. 交流伺服运动控制系统. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [52] 王秀和等. 永磁电机. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [53] Braid, J., Van Z A., Landy, C. Design, analysis and development of a multistage axial-flux permanent magnet synchronous machine. Proceedings of IEEE 6th Africon Conference in Africa, 2002, 2: 675-680.
- [54] 王家桢. 调节器与执行器. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [55] Platt D. Permanent Magnet Synchronous motor with axial flux geometry, IEEE Transactions on Magnetics, 1989, 25(4):3076-3079.
- [56] 方彦军, 程继红. 检测技术与系统设计. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [57] 郑凤阁. 轮机自动化. 大连: 大连海事大学出版社, 1998.
- [58] 刘鑫. 中央冷却系统节能研究. (硕士学位论文). 大连: 大连海事大学, 2003.
- [59] 张立文, 赵殿礼, 张春来等. 船舶主机缸套冷却水温度自动控制系统的研究. 首届中国航海类院校研究生学术论坛论文集. 大连: 大连海事大学出版社, 2009:259-262.

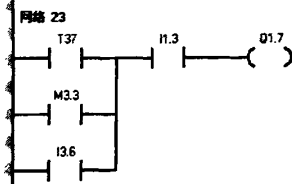
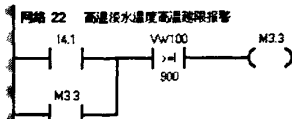
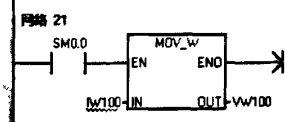
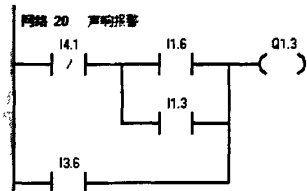
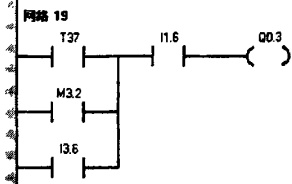
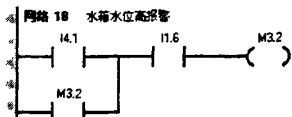
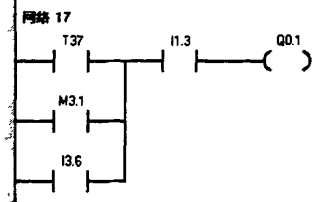
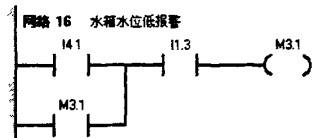
- [60] STEP7 V4.0 User Manual. SIEMENS AG, 2003.
- [61] 柴瑞娟, 孙承志等. 西门子 PLC 高级培训教程. 北京: 人民邮电出版社, 2009.
- [62] 张运刚, 宋小春. 从入门到精通——触摸屏技术与应用. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [63] Lihong Xing, Qiyi Xu, Yacan Sun. Study on S7-200 PPI Protocol Catching and its Communication Components. 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Harbin, 2007: 411-415.

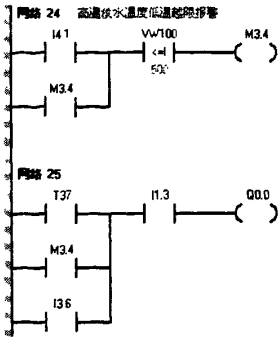
附录 程序清单

1.主程序

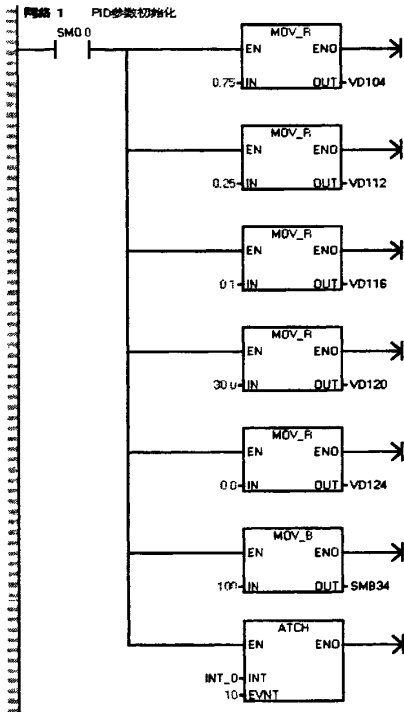




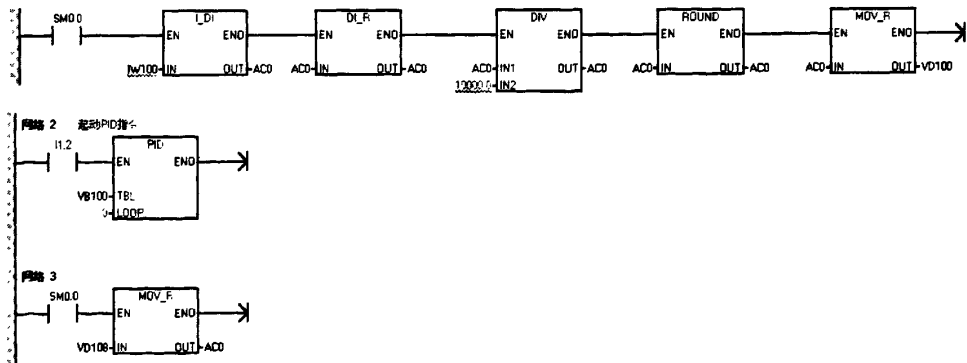




2. PID 参数初始化



3. 启动 PID 指令



攻读学位期间公开发表论文

- [1] 张立文, 赵殿礼, 张春来等. 船舶主机缸套冷却水温度自动控制系统的研究. 首届中国航海类院校研究生学术论坛论文集. 大连: 大连海事大学出版社, 2009: 259-262.

致 谢

首先感谢我的导师赵殿礼教授和张春来副教授。本论文正是在两位导师的精心指导下完成的，在课题的研究过程中，两位导师给予了我悉心的关怀，并提出了许多宝贵的指导性意见。赵殿礼教授和张春来副教授知识渊博、治学严谨，他们的谆谆教诲让我在两年的研究生期间受益匪浅，对我将来的工作和学习产生深远的影响，终生难忘。

论文写作过程中得到了吴浩俊老师的指导与帮助，在此表示感谢。

感谢实验室的老师和师兄弟们，在我完成毕业论文期间给我提供很多支持和帮助。

感谢我的女朋友对我的理解、关爱和支持；感谢同学王雪松、任俊杰给予我的帮助。

最后感谢在百忙中抽时间进行论文评审的各位老师！

研究生履历

姓 名	张立文
性 别	男
出生日期	1984 年 07 月 29 日
获学士学位专业及门类	工学
获学士学位单位	大连海事大学
获硕士学位专业及门类	工学
获硕士学位单位	大连海事大学
通信地址	辽宁省大连市凌海路 1 号
邮政编码	116026
电子邮箱	zlw0729@hotmail.com