

# 上海海运学院

硕士学位论文

船用电子调速器计算机仿真系统研制

专业：轮机工程

研究方向：现代船舶管理

研究生：黄爱平

导师：郑士君

2002年1月

## 摘 要

本文结合中远集团科研项目《SPC-33 电子调速器计算机辅助分析系统》，对我国近几年在新建船舶中采用的 SPC-33 电子调速器，运用 FTA 故障树分析理论及计算机仿真，实现电子调速器故障计算机分析和诊断，并对调速器操作面板和转速控制系统进行仿真。论文所解决的问题是：调速器接口、原理仿真；调速器控制面板仿真；电子调速器故障信息流分析；转速控制系统仿真。

本文将电子调速器分为转速调节单元、驱动控制单元、电动执行单元，对这些功能单元从结构、功能上进行原理仿真，建立单元的热点信息链与具体功能建立二次热点信息链。对调速器相关的单元：遥控控制台、电子 VIT 控制、高压油泵、转速检测单元、SPC-33 外部接口等建立热点信息，并以图形界面显示。

本文对 SPC-33 电子调速器控制面板建立仿真操作系统，包括转速控制功能说明、参数设定功能说明、参数设置操作。以软件操作模拟形式对控制面板操作进行图形和文字说明，并进行模拟操作和参数设置。使轮机管理人员在模拟环境下熟悉调速器各项性能参数的调整，并获得操作经验。

本文运用 FTA 故障树分析方法和最小路集方法，对 SPC-33 电子调速器进行故障信息流分析，从系统化角度构筑 FT，并建立镜像对称的故障逻辑矩阵模型。从顶事件开始，计算各级故障的失效率和不可靠度，按照各级故障发生的最大概率，排列出底事件序列，迅速找到某一项事件最可能对应的底事件，实现智能故障分析与诊断。

在充分调研与分析后，导出了电子调速器的物理和数学模型，并对 SPC-33 电子调速器调速系统建立仿真模型。在仿真模型基础上，运用面向对象和面向组件的设计思想，对电子调速系统进行软件设计开发，系统设计语言采用统一模型语言（UML），进行可视化系统模块构造。采用面向对象的编程模式，运用 Windows 操作系统下动态链接库技术，使系统结构紧凑、运算速度快。

本课题第一版应用软件已在中远集团装船使用，因其界面友好，图形逼真，仿真效果直观明了，能解决实际问题而受到用户欢迎。

**关键词：** 电子调速器，船舶柴油机，故障诊断，系统仿真

## ABSTRACT

Based on the research project “SPC-33 digital governor computer aided analysis system”, this paper realizes the digital governor, which has been fixed in newly built vessels in our country fault analysis and diagnosis with computer and simulates the SPC-33 digital governor control panel and speed control system by adopted the FTA analysis theory and computer based simulation. The technique problems that have been solved are digital governor structure and principle emulating, control panel simulation, fault information stream analysis and SPC-33 digital governor speed control system simulation.

In this paper, the author divides the digital governor as speed control unit, drive unit, electronic execution unit. For above three parts, the author also makes principle emulating from structure and function and constructs the hotspot information chain with next class hotspot information chain of specific functions. For the relative units like remote control panel, electronic VIT control, oil eject, speed pick up unit and SPC-33 external interface the hotspot information is also made and displayed by visual components.

Including speed control function specification, parameter setting function specification, parameter setting operation, the author build a simulation operation system for SPC-33 digital governor control panel. Through the way of software simulation, the system presents dynamic specification of images and texts and simulates the parameter setting operation. It makes the management personal familiar with digital governor speed control parameters and obtain experience under simulating environment.

By adopting FTA (fault tree analysis) and minimal path sets theory, the fault information stream analysis of SPC-33 digital governor is made, and from the point of system the FT is constructed. And the fault model with logic matrix in mirror symmetry has been built. From top level event fault, every level events' ineffective rate and unreliability limit are

calculated and sorted by maximum probability of occurred faults in each level, the sequence of the bottom-event is arranged, and then the most probably happened bottom-event correspond to the specific top-event is found rapidly. Therefore the intelligent fault analysis and diagnose system is realized.

After sufficient research and analysis, we make up the logic and math model of digital governor, and establish simulating system of it. On the basis of the model, using unified model languish(UML), we design and develop the simulating system. By adopted object oriented and component based design theory, using dynamic library link technique under windows programming, the system was compacted in structure and run faster.

The first edition of the system has been using in COSCON Group, it is welcomed because of the friendly interface, vivid images, directed effect and the ability of problem solving.

Huang Aiping (Marine Engineering)

Directed by Zheng Shijun

**KEYWORDS:** digital governor, ship main engine, fault-tree analysis, system simulation

## 目 录

第一章 绪 论 .....	1
1.1 船舶柴油机调速器的发展历史 .....	1
1.2 国内外在这一领域进行的工作及前沿的主要问题 .....	1
1.3 课题主要研究内容 .....	2
1.4 课题的实用价值与达到的水平 .....	4
第二章 船舶电子调速器 .....	6
2.1 电子调速器结构 .....	6
2.2 电子调速器结构功能 .....	7
2.2.1 转速控制器功能 .....	7
2.2.2 驱动控制单元功能 .....	9
2.2.3 电动执行单元功能 .....	10
第三章 SPC-33 电子调速器 .....	11
3.1 SPC-33 外部接口 .....	11
3.2 SPC-33 转速调节原理 .....	12
3.2.1 比例-积分 (PI) 调节 .....	13
3.2.2 供油自动补偿调节 .....	15
3.2.3 执行器标定 .....	16
3.2.4 供油限制 .....	17
3.2.5 临界转速自动避让 .....	19
3.2.6 气缸润滑油注入量自动调节 .....	19
3.2.7 VIT 调节控制 .....	20
3.2.8 转速控制器工作方式 .....	20
第四章 电子调速器计算机仿真模型 .....	23
4.1 系统仿真概述 .....	23
4.2 SPC-33 电子调速器系统建模 .....	24
4.3 电子调速器系统仿真模型 .....	26
4.3.1 SPC-33 电子调速器模型 .....	26
4.3.2 高压油泵仿真模型 .....	29

4.3.3 柴油机（增压器）仿真模型 .....	31
4.3.4 螺旋桨仿真模型 .....	32
4.4 SPC-33 控制系统仿真计算 .....	33
第五章 电子调速器故障诊断 .....	34
5.1 故障诊断数学描述 .....	34
5.1.1 故障树（FT）的数学描述 .....	34
5.1.2 故障树最小路集（FTMPS）数学描述 .....	36
5.2 电子调速器的 FTA 信息流模型 .....	36
5.2.1 系统级故障（顶事件）与故障树 .....	36
5.2.2 FTA 系统化矩阵模型 .....	39
5.2.3 故障概率值计算 .....	42
5.3 FTA 故障搜索及故障预测 .....	43
第六章 电子调速器仿真软件系统设计与开发 .....	47
6.1 应用软件研制开发概述 .....	47
6.1.1 开发方法和过程 .....	47
6.1.2 调速器仿真软件的研制目标 .....	48
6.1.3 开发工具简介 .....	48
6.2 仿真软件系统结构 .....	49
6.2.1 调速器原理说明 .....	50
6.2.2 操作与参数设定 .....	51
6.2.3 故障分析与诊断 .....	51
6.2.4 模拟运行 .....	51
6.3 软件系统设计 .....	52
6.4 仿真软件系统开发 .....	54
结 论 .....	57
致 谢 .....	58
参 考 文 献 .....	59

## 1.1 船舶柴油机调速器的发展历史

柴油机的不同转速是通过改变循环喷油量来获得的，改变柴油机的油量调节机构，使其转速调节到规定的转速范围内称柴油机调速。根据柴油机负载的变化自动调节供油量，维持其规定的转速范围的装置称调速器。其转速调节基本框图如图 1-1 所示。

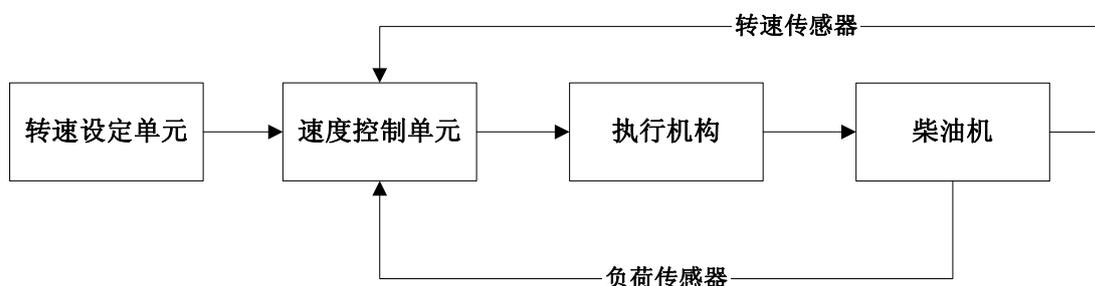


图 1-1 转速调节原理框图

调速器按执行机构的不同，调速器可分为：机械式调速器、液压调速器、电子调速器。电子调速器又有模拟电子调速器和数字电子调速器二种。

机械式调速器由于靠飞重等机械构件调节转速，感应元件与油量调节机构之间采用了刚性连接，故不能保持柴油机在调速前后的转速不变，易产生转速误差。

液压调速器由控制滑阀和动力活塞组成的液压伺服器和为改善动态性能、调节稳定性的反馈补偿机构组成，使得其具有广阔的转速调节范围、调节精度和灵敏度，并且稳定性好，但其结构复杂、管理要求与故障率较高。

电子调速器是一个电子控制系统，通常分为三类：全电子调速器、电-液或电-气调速器、液-电双脉冲调速器。由于全电子调速器不使用机械机构，动作灵敏、响应速度快。动态与静态精度高、无调速驱动机构、装置简单、安装方便，便于与其它控制系统的接口，有利于实现遥控与自动控制。

## 1.2 国内外在这一领域进行的工作及前沿的主要问题<sup>[1]</sup>

随着电子技术与计算机技术的飞速发展，自九十年代以来，全数字式电子调速

装置（简称电子调速器）在自身的工作可靠性、调速控制性能、人机操作界面、与柴油机遥控系统接口等各方面都得到了大幅度提升，因而在近几年新建大型船舶的主柴油机调速控制已由数字调速器广泛取代传统的全制式液压调速器。

船舶柴油机一般存在较明显的变增益非线性问题，也就是当柴油机在低负荷时，其单位转速变化对应的油泵齿条位移较少，而在高负荷时对应的油泵齿条位移较大，其变化规律呈非线性。同时，由于船舶柴油机运行环境变化较大，不同的海况、工况对柴油机的调速要求各不相同。

目前在柴油机电子调速器产品中，无论是模拟式还是数字式电子调速器，转速反馈控制普遍采用 PID 控制规律。这对柴油机机组来说存在一定问题。由于柴油机机组一般存在较明显的变增益非线性问题，单纯的 PID 控制在柴油机负荷远离额定负荷工作点时，PID 整定参数不再适合，所以控制性能将明显下降。

电子调速器调速过程的各个阶段对控制增量的要求不尽相同，应对 PID 参数进行在线校正，以达到理想的控制效果。一般是采用分段调节，即在调速的不同阶段，调整 PID 控制的三个增益，达到不同控制效果。而通过模糊控制的方法进行参数校正是一个发展方向。目前，控制参数模糊自校正一般在线分别校正 PID 三个参数，而如何建立模糊逻辑系统则是建立模糊 PID 控制的关键。

数字式电子调速器除输入/输出通道和油门执行器及其伺服放大单元外，几乎所有的控制环节、人机交互环节、以及故障检测和报警环节都是程序化软件。这给操作、使用和维护电子调速器的轮机管理人员带来了较大难度。就电子调速器本身而言，电子元器件软、硬件的高集成度和高可靠性，使其发生故障的几率较低，通常情况是：1) 不熟悉操作规则造成操作失误或违规操作；2) 吃不透参数设定值含义而造成设定偏差或设定错误；3) 调速器外部传感器及其通道发生故障；4) 电动执行器及其机械运动部件发生故障。上述这些往往造成调速器不正常运行的主要因素。

### 1.3 课题主要研究内容<sup>[2]</sup>

本课题在技术方面需做如下工作：

#### 1. 选择研究对象

目前我国新建船舶柴油主机，无论是 MAN B&W 机型还是 SULZER 机型，主要安装有几类数字调速器：目前我国新建船舶上使用较多的有：SEIMENS 公司的 SPC-33 系列数字调速器，与之配套的是 RCS-33 主机遥控装置；NOR Control 公司的 DGS-8800

数字调速器，与之配套的是 AC-IV 主机遥控装置。日本 NABCO 公司的 MG-800 数字调速器等。本课题按用户要求选择 SEIMENS 公司的 SPC-33 系列全制式数字调速器为研究对象。

## 2. 建立虚拟环境

在对 SPC-33 和 DGS-8800 电子（数字式）调速器深入剖析的基础上，导出电子调速器运行的数学模型，并进行适当简化，通过图形、动态图象等手段提供一个直观、逼真的计算机虚拟环境。在这个环境中，可对调速器进行各种仿真操作和训练，如操作控制、参数设定、故障模拟寻找等。

## 3. 建立故障信息流模型

运用 FTA（Fault Tree Analysis 故障树分析）分析方法对电子调速器进行故障信息流分析。构造相应的 FTA 数据库，建立镜像对称的 FTA 逻辑矩阵模型，实现 FTA 的计算机搜索。所谓 FTA，是指从电子调速器系统级失效开始，通过专家分析直至不可再分解的元器件失效。故障信息在这里作为一种“流”，自上而下，顺着这种流，可以找到故障源。

## 4. 用 VC++6.0 编写仿真系统程序

电子调速器原理仿真与故障信息流分析的计算机应用程序采用 Microsoft Visual C++ 6.0 工具开发。经编译后生成的应用程序对运行环境的最低要求为：586CPU，32M 内存，200M 硬盘空间，能支持 800×600 分辨率增强 256 色的显示卡，WIN9.x 以上操作系统。

应用程序结构框架如图 1-2 所示。

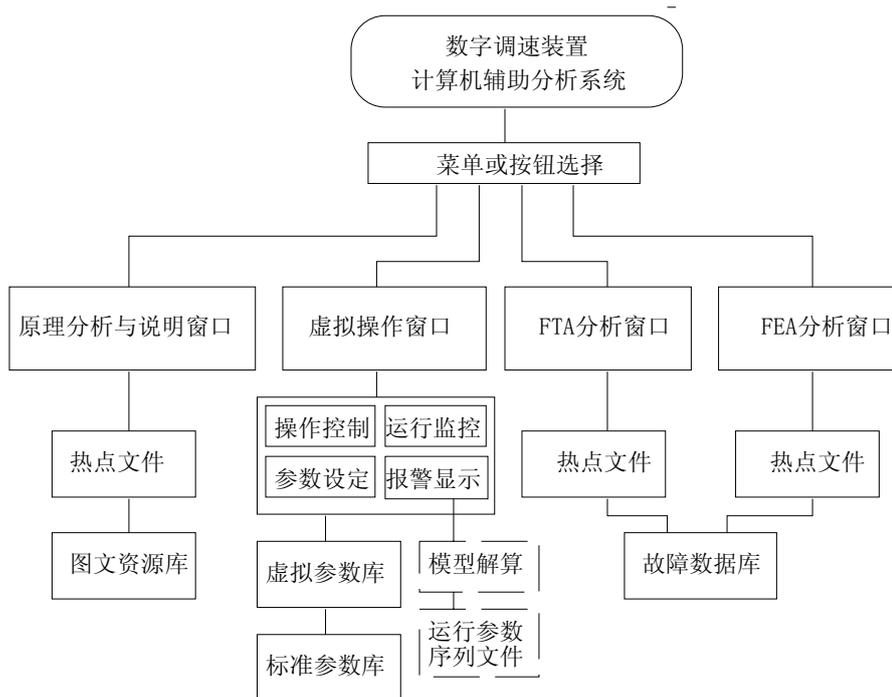


图 1-2 系统结构框架

#### 1.4 课题的实用价值与达到的水平

自九十年代以来，全数字式电子调速装置（简称数字调速器）在自身的工作可靠性、调速控制性能、人机操作界面、与主机遥控系统接口等各方面都得到了大幅度提升。因而在新建大型船舶的主柴油机调速控制已由数字调速器广泛取代传统的全制式液压调速器。<sup>[3]</sup>

但是数字调速器除输入/输出通道和油门执行器及其伺服放大单元外，几乎所有的控制环节、人机交互环节、以及故障检测和报警环节都是程序化软件。这给操作、使用和维护数字调速器的轮机管理人员带来了较大难度。由于不熟悉操作规则而造成操作失误或违规操作；由于吃不透参数设定值含义而造成设定偏差或设定错误，导致调速器不正常运行；当调速器发生故障时，由于分不清软、硬件故障而使查找故障无从下手等等情况均有发生。

因此，本课题通过深入研究船舶主机数字式电子调速装置软硬件结构原理及其故障分析，在此基础上运用计算机技术开发出适用于供单船和船舶管理公司机关使用的计算机应用软件，此应用软件应实现三大功能（用户需求）：

1) 建立数字调速器的故障信息流, 能够帮助船舶轮机管理人员和公司机务人员查找和分析调速器软硬件故障以及故障产生原因, 推荐维护保养措施和方法。

2) 提供数字调速器的计算机化分类资料, 包括装置软硬件构成原理、输入/输出接口、故障诊断、维护要求等。使船舶轮机管理人员和公司机务人员能够迅速查找所需的各种信息, 提高机务管理能力。

3) 建立一个虚拟调速器环境, 通过与实际调速器一致的操作运行、参数设定、故障报警等虚拟过程, 能够使船舶轮机管理人员和公司机务人员在这个虚拟环境中获得技术培训, 迅速熟悉和掌握数字调速器的操作和运行。

## 第二章 船舶电子调速器

电子调速器是一种电子控制系统，由检测环节、调节环节、执行机构三个基本部分组成，它与柴油机本身组成一个闭环控制系统<sup>[4]</sup>。检测环节把柴油机的实际转速以负反馈的形式送至调节环节；调节环节把给定的转速与实际转速相比较得出转速偏差，然后对偏差进行预算处理，向执行机构输出一个油门给定位置信号；执行机构利用本身的内反馈通道，根据油门给定位置与实际油门位置之间的位置偏差信号，相应的调节柴油机油门位置，实现对柴油机转速的控制。

### 2.1 电子调速器结构

电子调速器用作转速调节或负荷调节控制，整个电子调速器是由转速控制器、电子驱动单元和电动执行器三大部分组成。它以其精确、快速和稳定的反应来控制主机的供油调速运行。

**转速控制器：**转速控制器涉及到转速检测，根据各种情况自动对主机的转速进行调节控制。其核心部分就是微处理器。它充分考虑到低速柴油机运行特点，十分注意转速调控的稳定性。转速控制器的输出是对油门开度的设定值，它被输送到电子驱动单元。

**电子驱动单元：**电子驱动单元是电子调速器的一个重要中间环节，它接受转速控制器发来关于油门开度设定值的指令，经过线性变换与功率放大，其输出信号就去控制电动执行器输出轴的转角变化。同时，它还接受电动执行器有关转角输出变化的反馈等信号。

**电动执行器：**电动执行器主要是由驱动电机、减速机构所组成的，减速机构的输出轴通过传动机构、供油离合器来控制主机油门开度。此外电动执行器还为系统提供一些必要的反馈信息。

电子调速器结构如图 2-1 所示。电子调速的转速控制器和电子驱动单元被安装在设于集控室的控制箱内，电动执行器被固定安装在机侧，以便通过杠杆传动与供油机构相连接。

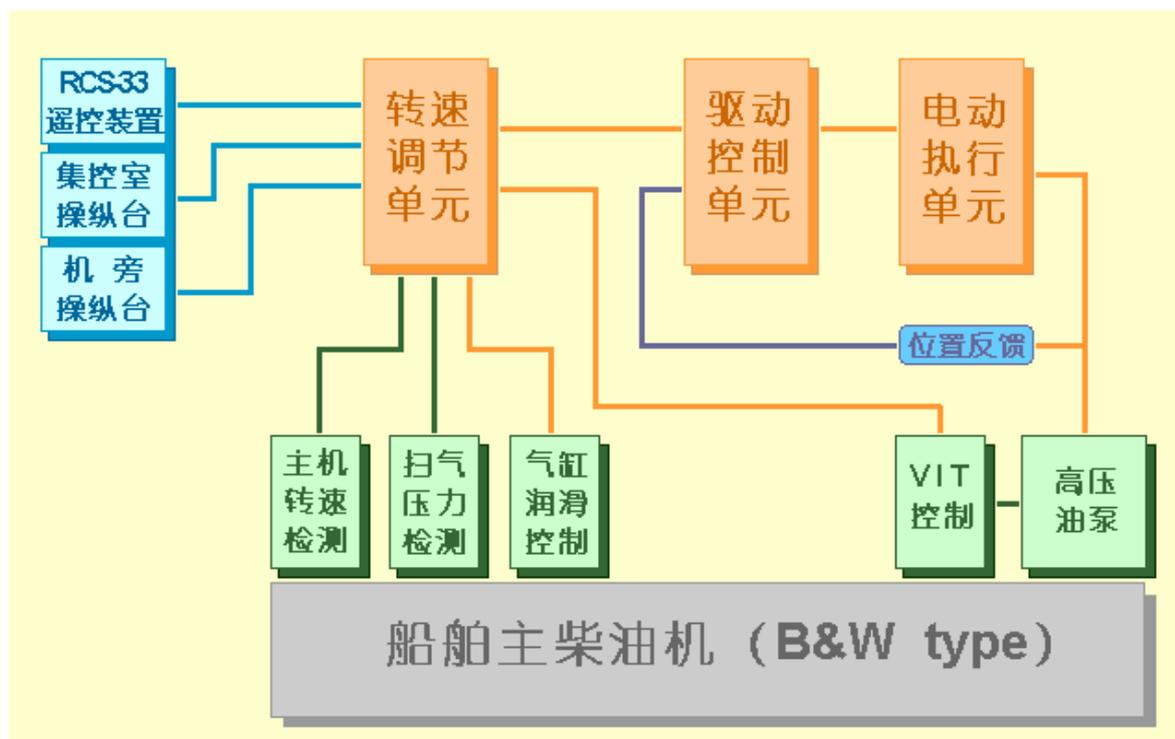


图 2-1 船舶电子调速器控制流程图

## 2.2 电子调速器结构功能

### 2.2.1 转速控制器功能

转速控制器根据主机各种工况，在既定操作模式下自动对主机的转速进行调节控制。转速控制器包括操作面板及其电路板。

转速控制功能包括：工作方式选用、比例积分系数、转速限制、供油限制、故障自检、转速检测、前置处理、转速调节、供油补偿、气缸润滑控制、VIT 控制、执行器标定。功能控制框图如图 2-2 所示。

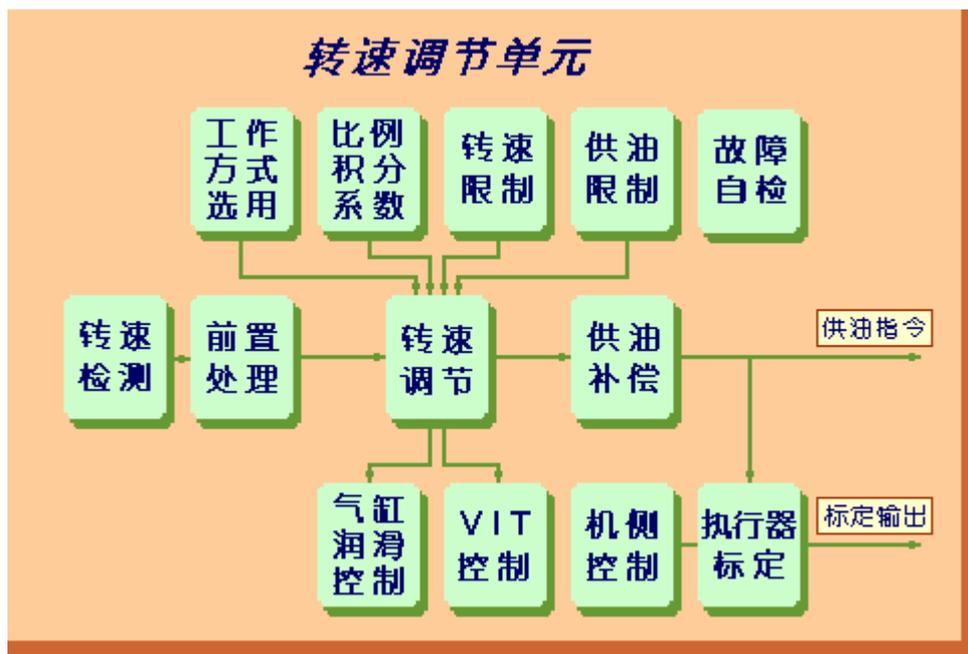


图 2-2 转速调节单元功能

工作方式选用：转速调节器工作方式有两种：一为转速控制方式（AUTO 方式）；另一种为非转速调节控制方式（MANUAL SETPOINT 方式）。当出现以下情况之一者，转速调节器就自动进入非转速调节控制方式，这时调节器的输出为设定供油指令输出：1) 主机起动时；2) 主机未进入正常运行状态时；3) 系统处于定值供油操纵时；4) 机侧（应急）操纵时。

比例积分系数：

转速限制：调速器的转速限制是指命令转速限制，1) 主机运行时，命令转速被限制在最大转速和最小转速之间；2) 命令转速的加速速率限制，目的是使主机的加减速平稳；3) 共振区转速避让。

供油限制：考虑到实际条件的变化，有时需对供油指令的上限加以限制。涉及到三个因素：1) 根据主机工况给出人工供油限制指令；2) 为使气缸内的燃油尽可能达到充分燃烧，由扫气压力高低给出供油限制指令；3) 为避免柴油机发生机损，从扭矩作用出发，在高负荷区内运行时根据柴油机转速高低给出相应的扭矩供油限制指令。供油限制能够实现“取消限制”。

故障自检：转速调节器具有自检能力，实时检查可能导致系统失效的重大故障。自检故障有：1) 控制电源故障，通过电源监视逻辑，如果电源正常，则面板上的“SYSTEM ON”指示灯亮，否则灯灭，且发出报警信号；2) 系统故障，系统故障包括控制软件故障，看门狗（WATCHDOG）溢出（一般为程序陷入死循环），以及控制电路板故障等。此时“I/O BOARD FAILURE”指示灯亮，且发出报警信号，同时，驱动单元停止工作，执行器立即锁定；3) 传感器接地故障，当一个或多个传感

器故障时，“EARTH FAILURE”指示灯亮，且发出报警信号。

转速检测：经该环节处理后，有两类信号输出：1) 为转速调节提供气缸转速 RPM 及主机转速 RPM；2) 给出转速检测故障报警，当测速传感器在工作中可能出现异常情况时，在操纵面板上给出相应灯光报警指示。与此同时，自动以备用的另一套传感器予以代替。

前置处理：前置处理环节包括主机转速检测和转速设定前置环节。主机转速检测包括气缸 RPM 和主机 RPM。且前置环节中设有停车指令的逻辑判断。

转速调节：转速调节器以给定转速指令与主机实际转速之间的偏差值，通过比例积分微分进行转速调节，同时考虑恶劣海况对调节品质的影响，在恶劣海况下加入相应的分度系数和倍率系数。同时，转速调节受到最大和最小供油限制的制约。

供油补偿：转速调节过程中，高压油泵将出现燃油泄漏，尤其在低负荷运行时，油门动作频繁，但转速调节作用却不明显，因此必须增加供油自动补偿环节（称之为 Lost Motion）。

气缸润滑控制：当油门开度指令及其油门开度变化量在一个短时间内有比较大的变动时，气缸内的工作条件就变得更为苛刻，为了改善气缸内的工作条件，应增加气缸油注入量。

VIT 控制：喷油定时（VIT）的自动调节，可以有两种选择，数字 VIT 调节和机械 VIT 调节。数字 VIT 调节由转速调节器对 VIT 模型进行数字值解算，然后给出 4—20mA 的操调指令，通过电—气变换，使驱动机构得以执行喷油定时的自动调节。它考虑了主机的负荷变化、扫气压力的高低等相关因素，以求通过提高气缸爆压达到节油与改善柴油机工况的目的。机械 VIT 调节是目前比较常用的 VIT 调节，但在主机处于倒车、停车工况时，控制电磁阀将使 VIT 的自动调节成为不可能。

执行器标定：执行器标定是转速控制器的后置环节，用于对电动执行器输出转角的设定，使油门实际开度与转速调节器输出的油门开度指令值一一对应。

### 2.2.2 驱动控制单元功能

驱动控制功能包括：状态监视、无差调节、品质调节、功率放大。功能控制框图如图 2—3 所示。

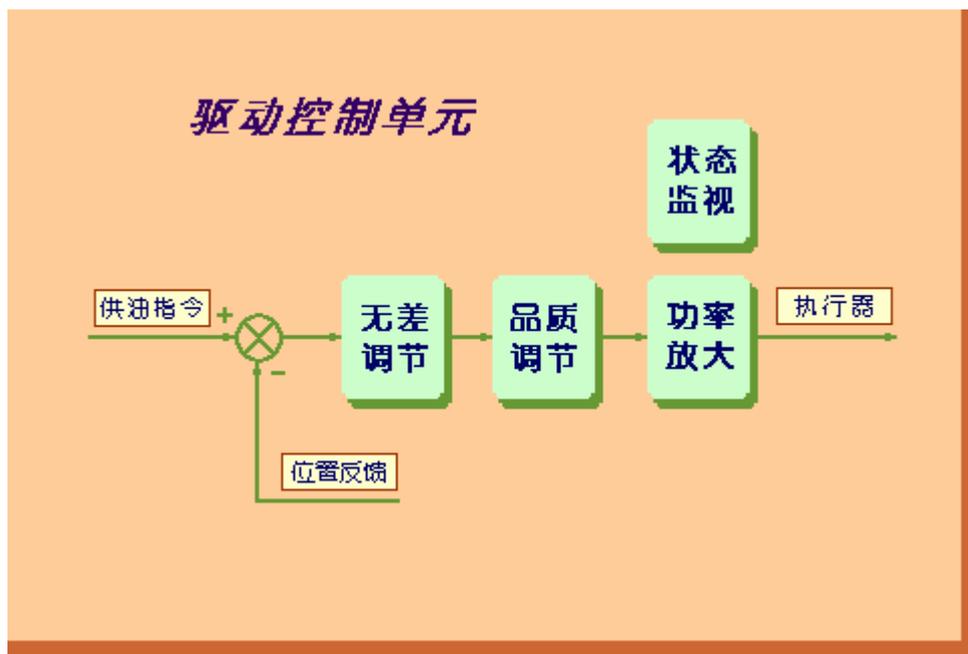


图 2-3 驱动控制单元功能

状态监视：驱动单元的状态监视是整个调速器自检功能的一部分。一旦在它监视范围内的软硬件发生故障或异常，则在操作面板上相应的 LED 指示灯点亮。

无差调节：执行器转角位置无差调节环节是一个比例—积分（PI）环节，即它是油门开度（油门齿条刻度对应执行器转角）位置跟随伺服控制环节。PI 的调节作用一直到消除偏差值为止。

品质调节：品质调节环节用以改善执行器伺服电机的转速响应控制质量。增加超调量可以加快执行器响应速度，而提高衰减频率则可使执行器动作更为稳定。

功率放大：驱动单元的功率放大环节作用与对输出给执行器的驱动信号进行能量放大，以便能拖动执行器伺服电机工作。因此功率放大环节可以看作是执行伺服电机驱动器，根据驱动信号的要求，变换伺服电机的交流电源，以满足伺服电机转速响应的品质。

### 2.2.3 电动执行单元功能

电动执行器本质上是一个带有内置式制动器的伺服电动机，并且安装在高压油泵油门齿条侧，用以驱动油门齿条。

### 第三章 SPC-33 电子调速器

船用SPC-33 电子调速器以转速设定值与主机实际转速之间的偏差值通过比例—积分（PI）进行转速调节，这种操调工作每隔 10ms进行一次。同时考虑恶劣海况对调节质量的影响。<sup>[6][7][8]</sup>

#### 3.1 SPC-33 外部接口

安装于机舱集控室的 SPC-33 控制箱与遥控系统及其外部设备之间的接口关系可以通过图 3—1 予以描述。

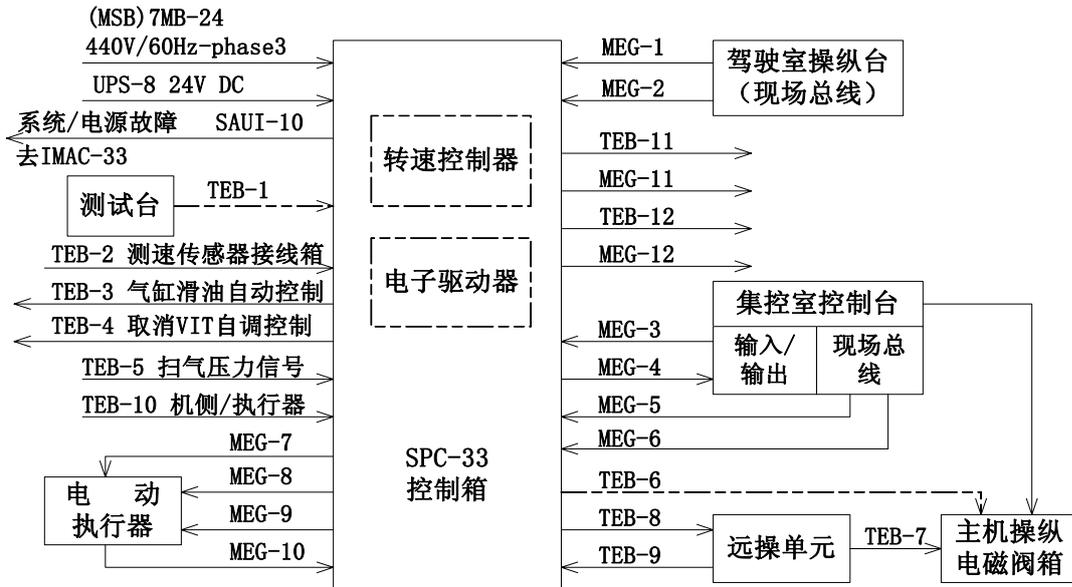


图 3—1 SPC-33 控制箱及外部接口图<sup>[6]</sup>

图 3—1 中线路标示说明如下：

测试台：TEB—1 执行器转角指令；执行器转角反馈信号；主机转速；超速；执行器扭矩。

测速传感器接线箱：TEB—2

主机侧：JB—2：TEB—3 气缸滑油自动控制电磁阀（EV—2）。

主机侧：JB—5：TEB—4 取消 VIT 自调控制电磁阀（40）；机侧操纵（107、P2）；供油离合器处于“遥控”位置（41、S6）。

主机侧： JB—1： TEB—5 扫气压力。

电磁阀箱： TEB—6 （该线路用虚线表示，仅用于测试台调试时使用）。

远操单元： TEB—7

TEB—8 发送动车指令的各微动开关。

TEB—9 发送转速指令的电位器。

TEB—10 机侧执行器。

TEB—11 油门开度指示。

TEB—12 主机转速、转向指示。

现场总线： MEG—1驾驶室操纵台、现场总线（主线。

MEG—2驾驶室操纵台、现场总线（备用。

MEG—3集控室操纵台、输入/输出信号。

MEG—4集控室操纵台、输入/输出信号。

MEG—5集控室操纵台、现场总线（主线。

MEG—6集控室操纵台、现场总线（备用。

MEG—7机侧接线箱、电动执行器、指令信号。

MEG—83 相交流执行指令信号。

MEG—9温度监测、制动控制。

MEG—10 油门开度的编码反馈信号。

MEG—11 油门开度指示输出。

MEG—12 主机转速、转向指示输出。

### 3.2 SPC-33 转速调节原理

SPC-33 转速控制器以转速给定指令与主机实际转速之间的偏差值通过比例分析—积分（PI）进行转速调节，PI 参数可按主机的具体情况进行设置。在进行 PI 转速调节时，还要考虑一些相关的其它因素：1）PI 控制受到工作方式的制约，而工作方式是可以选用和自动转换的。2）PI 控制受到最大和最小供油限制的制约。3）PI 控制的输出大小将决定气缸润滑油注入量控制是否起作用。

SPC-33 转速调节工作原理框图如图 3-2 所示。

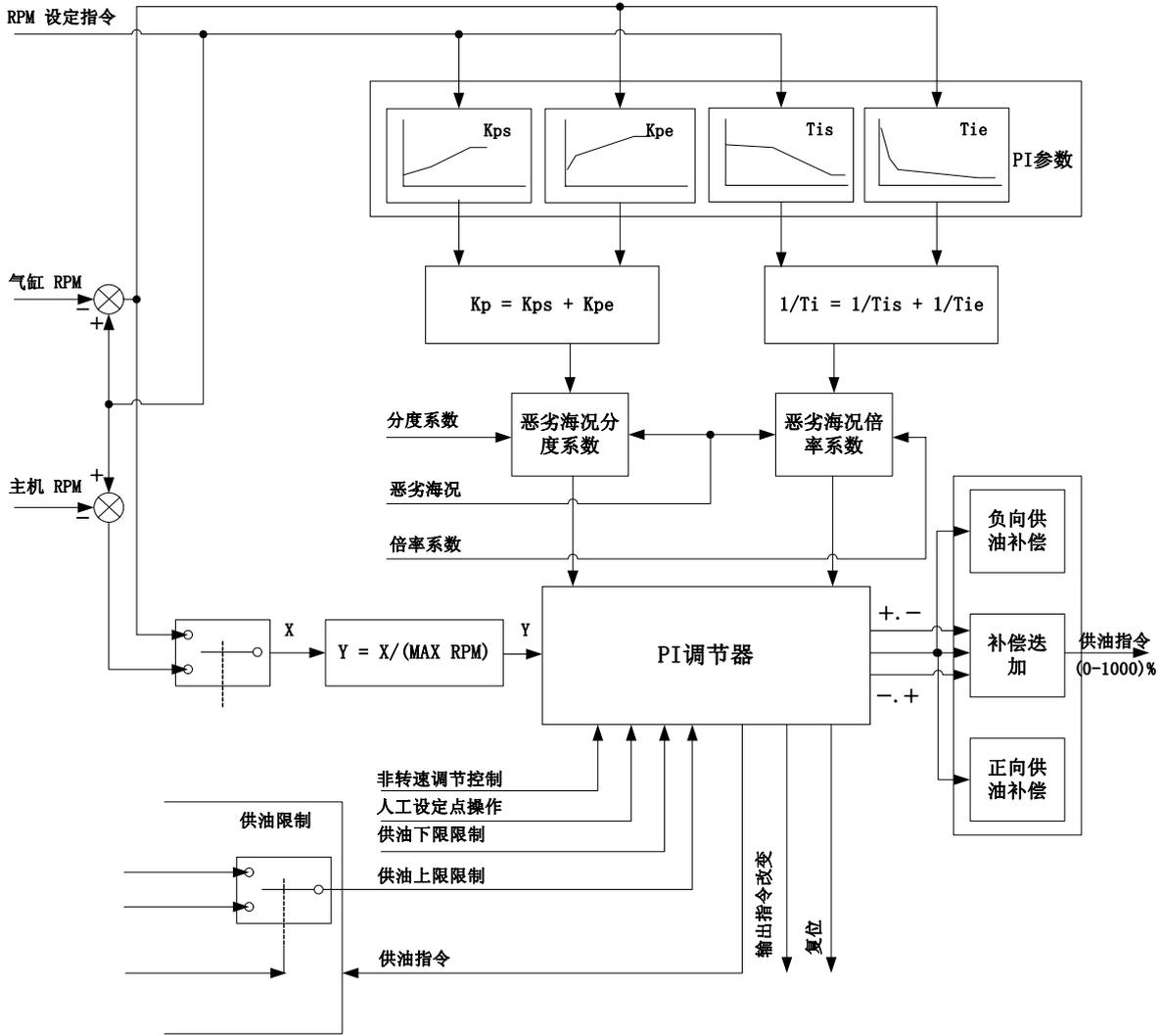


图 3-2 转速条件工作原理框图<sup>[6]</sup>

### 3.2.1 比例-积分（PI）调节

SPC-33 所实现的转速比例-积分调节，采用分类、分段控制算法，将设定转速加速速率限制与转速偏差值的 PI 调节有机集成为一体。图 2-1 中可以看到，PI 参数设置为二套，一套用于设定转速，即设定转速的比例增益  $K_{ps}$  和积分时间  $T_{is}$ 。使设定转速指令既有快速响应，又有加速速率限制，防止主机在加速或减速过程中，转速变化过快。PI 参数的另一套用于转速偏差值的 PI 调节，即转速差的比例增益  $K_{pe}$  和积分时间  $T_{ie}$ 。这才是真正意义上的 PI 参数。

#### 1) 设定转速比例增益 $K_{ps}$

设定转速比例增益  $K_{ps}$  使来自驾/集操纵台的设定转速指令获得快速响应。图 3-

3 (a) 所示为设定转速比例增益 $K_{ps}$ 特性曲线。可以看出, 比例增益曲线有三个可设置的转折点: ①0 转速增益; ②正常运行转速增益; ③最高转速增益。这三个转折点的设置范围均可为(0~9999)%。①②③将比例增益曲线分成二段折线, 即低转速增益段和高转速增益段。

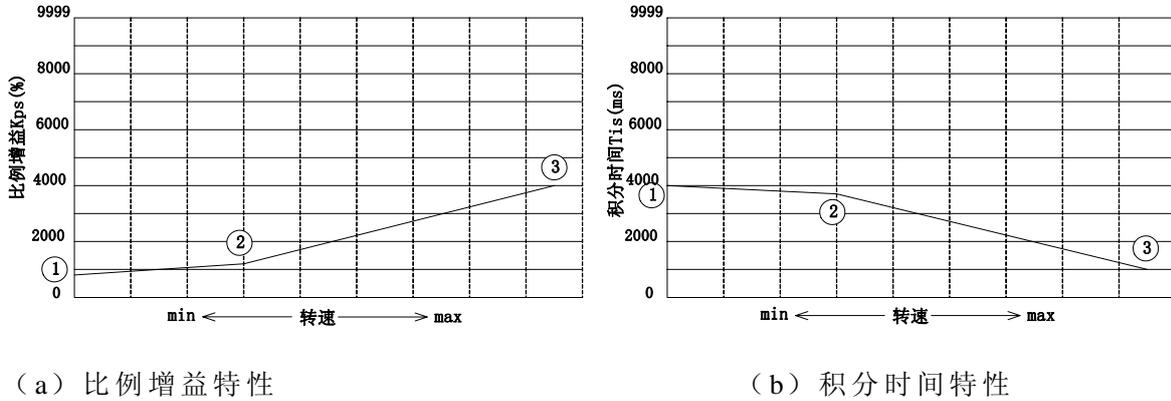


图 3-3 设定转速比例-积分特性曲线<sup>[6]</sup>

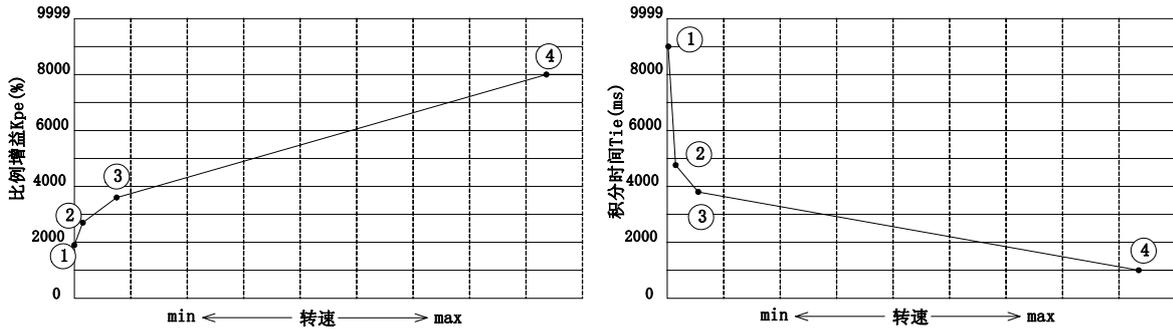
## 2) 设定转速积分时间 $T_{is}$

设定转速积分时间 $T_{is}$ 使来自驾/集操纵台的设定转速指令由阶跃信号变成斜坡信号, 从而实现设定转速加速速率的限制。图 3-3 (b) 所示为设定转速积分时间 $T_{is}$ 特性曲线。与比例增益曲线相同, 积分时间曲线也有三个可设置的转折点: ①0 转速积分时间; ②正常运行转速积分时间; ③最高转速积分时间。这三个转折点的设置范围均可为(0~9999)%。三个转折点将曲线分成二段折线, 即低转速积分时间段和高转速积分时间段。

## 3) 转速偏差值比例增益 $K_{pe}$

这里的转速偏差值是指设定转速与所检测的气缸转速之间的差值 $e_c$ 。气缸转速与主机转速相比, 其精度和稳定性更高些, 响应更快速些。SPC-33 的转速PI调节本质上是利用转速偏差值通过PI作用来消除其偏差, 从而实现主机转速的定值控制(实际转速等于设定转速)。

差值比例调节的作用是使调节器获得快速响应。图 3-4 (a) 所示为差值比例增益 $K_{pe}$ 特性曲线, 曲线有四个可设置的转折点, 分别为: ①0 转速差增益; ②1 转速差增益; ③10 转速差增益; ④最大转速差增益。这四个转折点的设置范围均可为(0~9999)%。四个转折点将增益曲线分成三段折线。



(a) 比例增益特性

(b) 积分时间特性

图 3-4 转速偏差值比例—积分特性曲线<sup>[6]</sup>

4) 转速偏差值积分时间  $T_{ie}$

转速偏差值积分调节的作用是使调节器具有消除转速差的能力，积分时间长短在不同海况下对转速调节有直接影响。图 3-4 (b) 所示为差值积分时间  $T_{ie}$  特性曲线，曲线也有四个可设置的转折点，分别为：①0 转速差积分时间；②1 转速差积分时间；③10 转速差积分时间；④最大转速差积分时间。这四个转折点的设置范围均可为 (0~9999) %。四个转折点将积分时间曲线分成三段折线。

以上  $K_{ps}$ 、 $T_{is}$ 、 $K_{pe}$ 、 $T_{ie}$  特性曲线集成后，应具有以下基本关系式：

$$K_D = K_{ps} + K_{pe} \tag{3-1}$$

$$T_i = 1 / [1/T_{is} + 1/T_{ie}] \tag{3-2}$$

5) 恶劣海况调节

当遇到大风浪等恶劣海况时，可以起用“恶劣海况”操纵。在这种情况下，它要求油门操作应少于正常海况转速调节时的操调次数，其允许的转速偏差要比正常时大一些。由图 3-2 可见，在起用恶劣海况操纵时，PI 环节中的  $K_p$  应以  $K_p$  的分度系数  $P_k$  相除。 $T_i$  应以  $T_i$  的倍率系数  $I_k$  相乘。这时它们之间应具有以下基本关系式。

$$K_D = (K_{ps} + K_{pe}) / P_k \tag{3-3}$$

$$T_i = I_k / [1/T_{is} + 1/T_{ie}] \tag{3-4}$$

由于  $P_k > 1$ ， $I_k > 1$ ，因而在起用恶劣海况操纵时，实际的比例增益减小了，而积分时间加长了，这意味着调节器转速调节的响应变得迟缓。

### 3.3.2 供油自动补偿调节

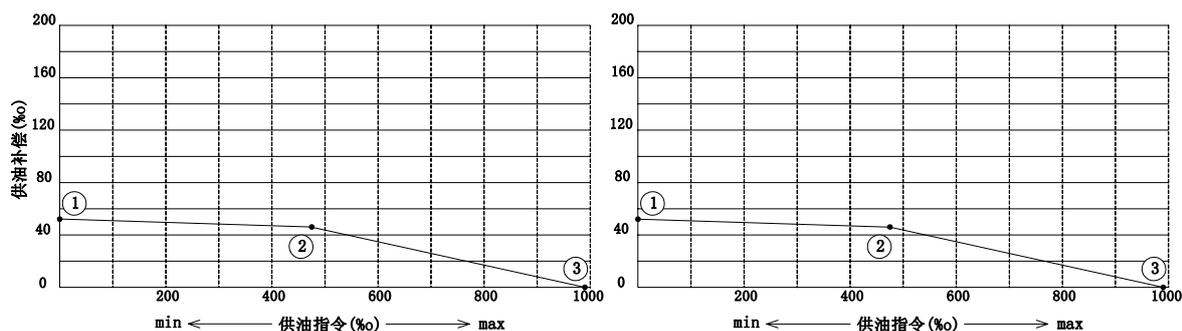
在转速调节中的供油自动补偿，是结合主机具体情况补偿，以获得良好的调节品质。船舶柴油主机为了更好地使用低成本的劣质燃料油，高压油泵的柱塞机

构活动间隙调整的比较宽松，于是在转速操调过程中，高压油泵内不可避免地会出现燃油泄漏，尤其在低负荷运行时。油门虽然出现频繁的操调动作，但是转速作用却不明显。因此必须增加供油自动补偿环节（这种环节被称之为 Lost Motion）。

图 3-2 中所示的供油补偿环节是由加速补偿、减速补偿和综合迭加三部分组成的。PI 调节器的调速输出信号不仅同时被引入负向和正向两个泄漏补偿环节及综合迭加环节，还分别有加速、减速的操调指令送到综合迭加环节，从而使由泄漏补偿特性曲线所确定的补偿输出为有效，最终给出调节输出所要求的供油指令。

### 1) 负向泄漏补偿

当 PI 的转速调节输出由高转速向低转速进行时（即减速运行），供油补偿为负向泄漏补偿。图 3-5 (a) 所示为负向泄漏补偿特性曲线，该特性曲线设有三个转折点，对应为：①PI 调节器输出为 0% 时；②PI 调节器输出为 ‘x’ % 时；③PI 调节器输出为 1000% 时。三个转折点的设置范围均为（0~200）%。于是将曲线分为二段折线。注意到在高转速段，补偿作用将比低转速段明显减少。



(a) 负向泄漏补偿特性

(b) 正向泄漏补偿特性

图 3-5 供油自动补偿特性曲线

### 2) 正向泄漏补偿

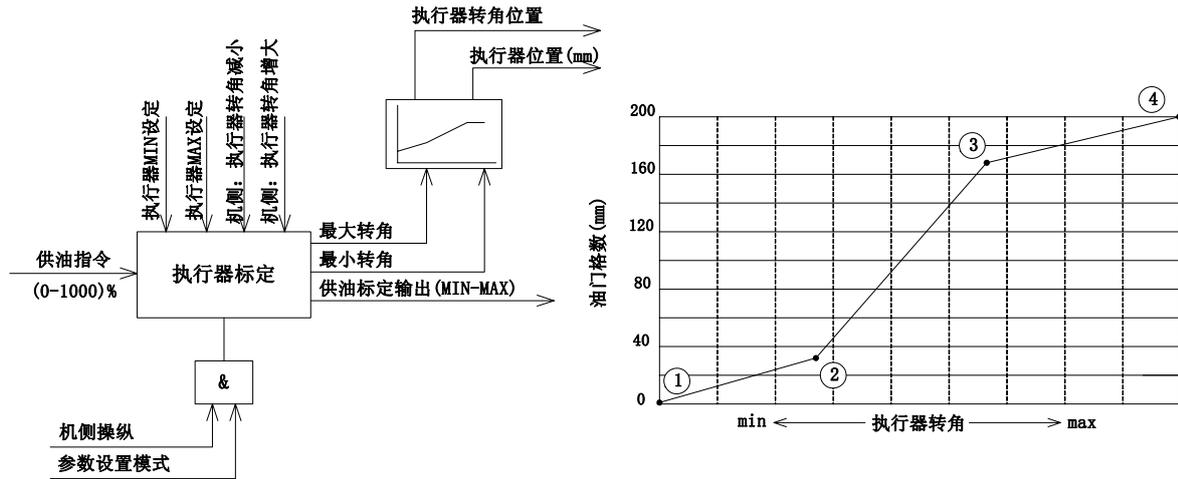
当 PI 的转速调节输出由低转速向高转速进行时（即加速运行），供油补偿为正向泄漏补偿。图 3-5 (b) 所示为正向泄漏补偿特性曲线，与负向泄漏补偿一样有三个转折点，对应为：①PI 调节器输出为 0% 时；②PI 调节器输出为 ‘x’ % 时；③PI 调节器输出为 1000% 时。三个转折点的设置范围均为（0~200）%。

## 3.3.3 执行器标定

执行器标定是转速控制器的后置环节，用于对电动执行器输出转角的设定，使油门实际开度与 PI 调节器输出的油门开度指令值一一对应。此环节框图如图 3-6

(a) 所示。

经泄漏补偿后的供油指令为 (0~1000) %，则在 0% 时对应与电动执行器的 0° 转角相对应，而在 1000% 时应与执行器的 MAX<sup>0</sup> (42°) 转角相对应。图 3-5 (b) 所示为执行器转角变化与油门开度 (mm) 之间的特性关系曲线。曲线设有四个转折点①输出转角为 MIN<sup>0</sup> 时油门开度；②输出转角为 (MIN<sup>0</sup>~MAX<sup>0</sup>) 1/3 时油门开度；③输出转角为 (MIN<sup>0</sup>~MAX<sup>0</sup>) 2/3 时油门开度；④输出转角为 MAX<sup>0</sup> 时油门开度。油门开度设置范围均为 (0~200) mm。



(a) 执行器标定环节框图

(b) 输出转角与油门开度特性曲线

图 3-6 执行器标定环节

### 3.2.4 供油限制

在通常情况下，主机转速是由转速控制器所给出的油门开度指令（供油指令）进行控制的。考虑到实际条件变化，有时需对供油指令的上限加以限制。主要涉及到三个因素：1) 轮机长根据主机工况的异常变化而给出供油限制指令；2) 要求主机气缸内的燃油尽可能达到充分燃烧，故由扫气压力的高低来给出供油限制指令；3) 为了避免柴油机发生机损，从限制输出扭矩的角度出发，在高负荷区内运行时根据主机转速高低来给出相应的供油限制。

供油限制必须能够实现“取消供油限制”的实际需要。通过 RCS-33 或直接在 SPC-33 下达取消指令，即以比原先给定的供油上限大为提高的控制值来取消这个上限限制。

供油限制的每一项限制都由设定的限制值在 PI 调节器内部与 PI 的供油指令进

行比较，在该项目起作用时，相应的 LED 会给出显示。这三项经低值选通才能对 PI 调节器起供油限制作用。供油限制原理框图如图 3-7 所示。

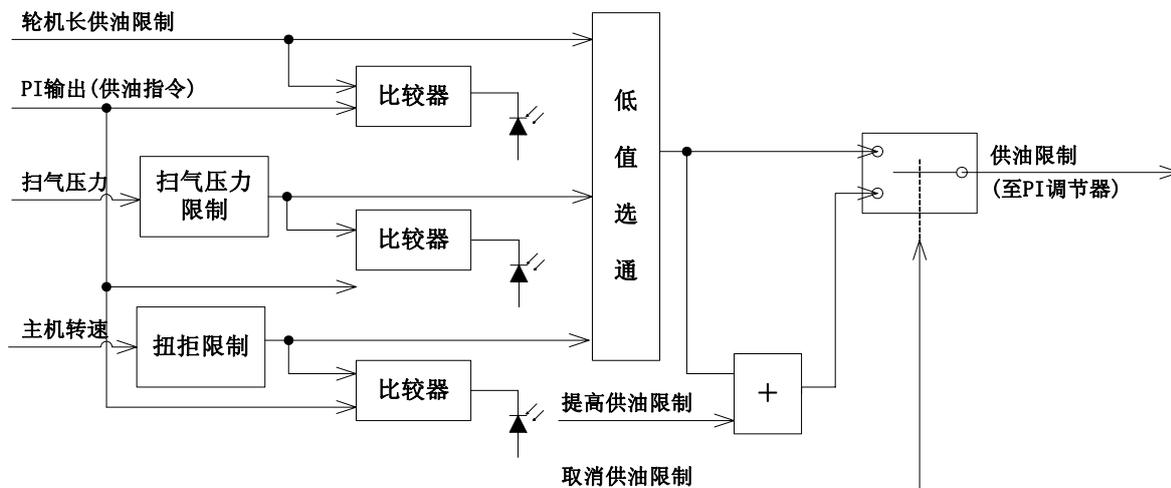


图 3-7 供油限制原理框图

### 1) 轮机长供油限制

这一限制指令是由轮机长通过集控室操纵台给出的，它经过 RCS-33 送到 SPC-33，可以对遥控转速指令起到上限限制作用。

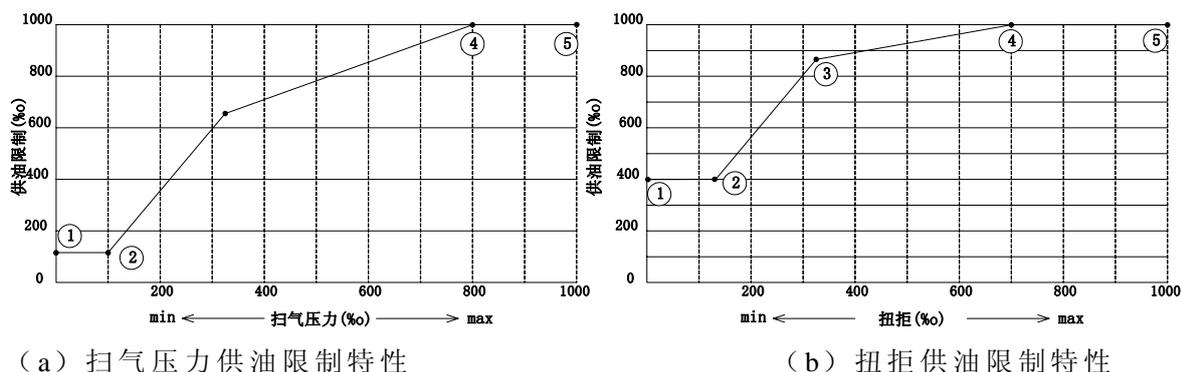


图 3-8 供油限制特性曲线

### 2) 扫气压力供油限制

为了使柴油机气缸内燃油得到充分燃烧，目前普遍以扫气压力的高低来限制供油的上限，而不论设定转速所确定的油门开度多大。扫气压力供油限制是一个动态限制量，它随着气缸内燃烧的加剧而得到提高，其所允许使用上限限制也会相应有所提高。其限制控制的输出值可以在 (0~1000) %o 内变化。图 3-8 (a) 所示为扫气压力供油限制特性曲线。它有五个转折点：①扫气压力为 0%o 时；②扫气压力为“ $x_2$ ” %o 时；③扫气压力为“ $x_3$ ” %o 时；④扫气压力为“ $x_4$ ” %o 时；⑤扫气压力为 1000%o 时。这五个转折点的设置范围均为 (0~1000) %o 。

### 3) 扭炬供油限制

扭炬供油限制是一种对主机运行的保护性限制，在高负荷运行时，扭炬限制的

保护作用益发明显。图 3-8 (b) 为扭矩供油限制特性曲线。与扫气压力限制类似，有五个转折点，①扭矩为 0‰时；②扭矩为“ $x_2$ ”‰时；③扭矩为“ $x_3$ ”‰时；④扭矩为“ $x_4$ ”‰时；⑤扭矩为 1000‰时。这五个转折点的设置范围均 (0~1000) ‰。

### 3.2.5 临界转速自动避让

临界转速自动避让在 RCS-33 中已经有所考虑，在集中控制室内进行远操时发出的转速指令对于 SPC-33 的转速控制器来讲也具备这种功能。如果给出的转速指令正好落在临界转速范围内，那么控制器的输出就自动地以与指令值相近的临界转速的上限或下限作为转速指令送出。临界转速有三个区域可供选用，可以由 RCS-33 通过现场总线为 SPC-33 所接受。

### 3.2.6 气缸润滑油注入量自动调节

当油门开度指令及其油门开度变化量在一个短时间内有较大变动时，气缸内的工作条件就变得更为苛刻，为了改善气缸内的工作条件，增加气缸油注入量是其中的一个重要措施。在设定的  $T_r$  秒内，油门开度变化时超过  $I_r$ ‰，就认定有必要立即增加气缸油注入量，这个注入量得到  $T_s$  的延时控制。

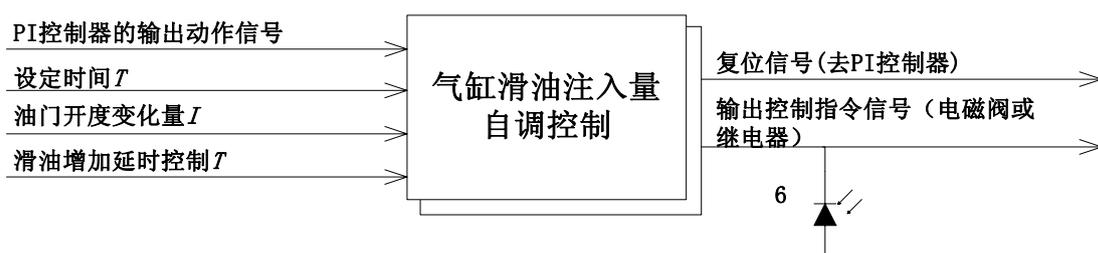


图 3-9 气缸润滑油自动调节输入/输出信号

图 3-9 是气缸润滑油注入量自动调节输入输出信号框图。从 PI 调节器输出的油门开度指令信号是一个主要的输入信号。图中  $T_r$ 、 $I_r$ 、 $T_s$  这三个参数是调试时通过 SPC-33 操作面板确定的设置参数，输入信号在经过设定参数认定有必要加大气缸油注入量时，它就立即发出具有一定延时控制的增加气缸油注入量的电信号。与此同时，转速控制器面板上的 LED 给出常亮显示。

在经过  $T_s$  延时控制以后，气缸油增量指令取消，注油器恢复到正常的气缸油注

入量。LED熄灭，并且有复位信号反馈到PI调节器，这时气缸油的自调控制才告结束。

### 3.2.7 VIT 调节控制

喷油定时（VIT—Variable Injection Timing）的自动调节，可以有两种选择：一种是电子 VIT 调节方案，另一种是机械 VIT 调节方案。

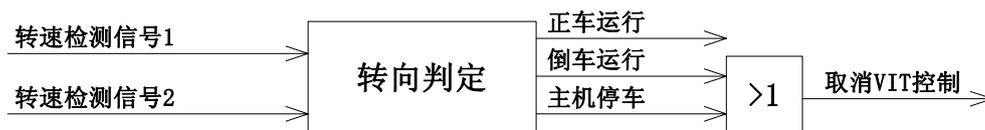


图 3-10 电子 VIT 控制输入/输出信号

电子 VIT 调节是在主机处于正车运行时，由转速控制器对 VIT 模型进行数值解算，然后给出 4-20mA 的操作指令，通过电-气转换，使驱动机构得以执行喷油定时的自动调节。它考虑了主机的负荷变化、扫气压力的高低等相关因素，以求通过提高气缸燃烧爆压达到节油与改善柴油机工况的目的。其中，扫气压力这一因素有助于对工作条件自动作一些补偿控制。这种电子 VIT 控制，要求接受两套转速检测传感器送来的测速信号，并根据其相位差来确定主机正、倒车的运行方向，以便对倒车、应急操纵给出不同处理。可以通过 SPC-33 操作显示面板上的操作按钮予以取消 VIT 控制。图 3-10 所示为电子 VIT 控制输入/输出信号框图。

机械 VIT 调节是最早出现也是目前比较常用的 VIT 调节。对于 SPC-33 来讲，在主机处于倒车、停车工况时，控制电磁阀将使 VIT 的自动调节成为不可能。

### 3.2.8 转速控制器工作方式

转速控制器工作方式有二种：一为转速调节方式，即所谓 AUTO 方式。另一种为非转速调节方式，即所谓 MANUAL SETPOINT 方式。图 3-11 所示为 SPC-33 工作方式选用原理框图。当出现以下情况之一者，转速控制器就自动进入非转速调节方式，这时控制器的输出为设定供油指令输出：①主机启动时；②主机未进入正常运行状态时；③系统处于定值供油操纵时；④机侧（应急）操纵时。

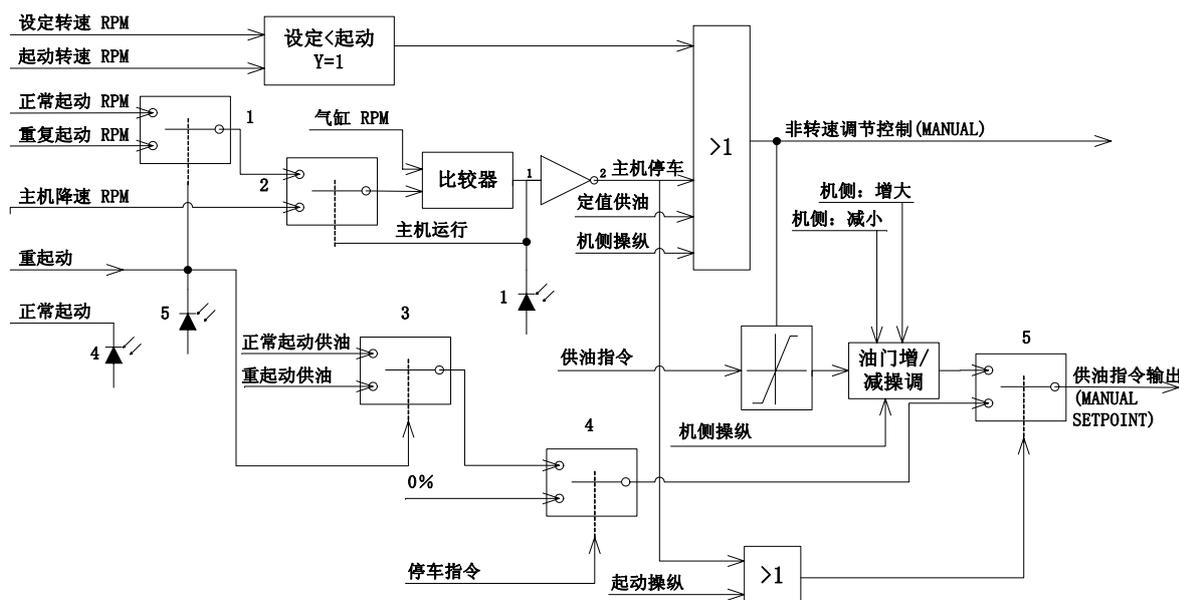


图 3-11 工作方式选用原理图

例如采用集控室远操时，当远操手柄处于 STOP 位置，主机处于停车状态，这时通过电子开关 4、5 使 0% 起作用。若远操柄放到 START 位置，系统则给出一个已设置好的、通常情况下的启动供油指令。这个指令通过电子开关 3、4、5 发送出去。如果第一次启动没有成功，系统会判定应进行重起动，LED 显示要进行切换。在重起动指令的控制下，一方面通过电子开关 1、2 使重起动 RPM 起作用。另一方面通过电子开关 3、4、5 使设置好的重起动供油指令作为控制器的输出。如果主机已经启动起来，远操手柄被推到供油区内，那么在持续 (6~8) S 以后 LED 有显示，SPC-33 即自动进入转速调节方式 (AUTO)。

驾驶室遥控的作用情况与集控室远操类似。

如果切换成机侧操纵，转速控制器的输出保持不变，但是已经不起作用，非转速调节 (MANUAL) 则有效。要注意的是：1) 供油离合器已经不在“遥控”位置，它与非转速调节的供油输出没有什么关系，供油调速是由操纵手轮给定的。2) 机侧操纵在向远操/遥控进行操纵地点切换时，使供油输出要满足转速无扰动切换。为此图 3-11 中给出了在机侧面板通过“AXT. RAISE”和“ACT. LOWER”操作按钮来调整这个输出量，直到 LED 熄灭为止（也可以通过 SPC-33 操作面板上的“加大”或“减少”操作按钮来进行操调）。如果要求的转速指令与主机实际转速的差值低于 2RPM 转速差，系统将自动地进行转速调节，从而保证切换是无扰动的。

主机起动并进入运行状态以后，SPC-33 转速控制器依据操纵方式和所涉及到的下列有关转速设定即可以自动进行工作方式的切换：

- 1) 当转速高于 0RPM，低于 STOP RPM 设定时  
——转速控制器处于非转速调节方式；

——供油输出为 0。

2) 当转速高于 STOP RPM, 低于 START RPM 设定时

——转速控制器处于非转速调节方式;

——供油输出为起动供油设定。

3) 当主机转速达到供油转速以上时

——若主机还未进入运行状态, 转速控制器仍处于非转速调节方式;

——油门开度处于起动供油位置;

——经一定延时后若主机进入运行状态, 转速控制器自动切换成转速控制方式。

总而言之, 定值供油这种工作方式, 是一种有条件执行的操纵方式。在切换成定值供油操纵时, 非转速调节方式起作用, 供油输出指令使控制器的油门开度保持不变。

如果经过一定时间运行以后, 定值供油的工作条件不满足, 或者重又选用转速调节方式, 或是出现恶劣情况, 那么定值供油将切换成转速调节方式。

## 第四章 电子调速器计算机仿真模型

SPC-33 电子调速器模拟仿真是以船舶电子调速器为系统原型，用现代系统仿真理论对其进行仿真模型建立，并在计算机上进行模拟运行。利用计算机仿真预演和再现 SPC-33 电子调速系统的控制规律及被控对象的运动规律和运动过程。

### 4.1 系统仿真概述 [9]

系统仿真是建立在控制理论、相似理论、信息处理技术和计算机技术等理论基础之上的，以计算机和其他专用物理效应设备为工具，利用系统模型对真实或假想的系统进行试验，并借助于专家经验知识、统计数据和信息资料对试验结果进行分析研究。所以系统仿真（尤其是数学仿真）实质上应该包括三个基本要素：系统、系统模型、计算机。而联系这三项要素的基本活动则是：模型建立、仿真模型建立、和仿真试验。系统仿真三要素及其联系如图 4-1 所示。

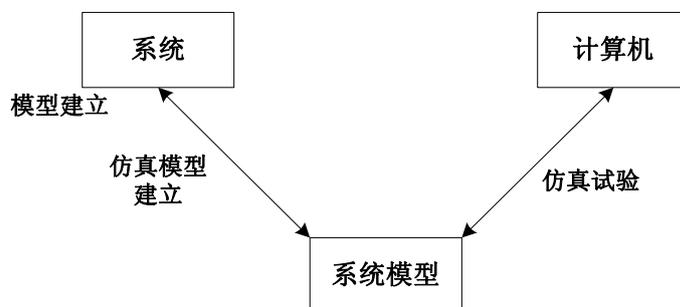


图 4-1 系统仿真概述

对于任一项系统的仿真研究都是一项相当繁复的系统工程，特别是对复杂系统或综合系统的总体仿真研究是一件难度很大的工作。系统仿真一般有七个基本步骤：

- 1 系统定义 (System Definition)：确定所研究系统的边界条件与约束。
- 2 数据准备 (Data Preparation)：收集和整理各类有关信息，简化成适当形式，同时对数据可靠性进行核实，为建模做准备。
- 3 模型表达 (Model Formulation)：把实际系统抽象成数学公式和逻辑流程图，并进行模型验证 (Validation)。
- 4 模型变换 (Model Translation)：用计算机语言描述模型，即建立仿真模型，

并进行模型校核 (Verification)。

5 模型认可 (Model Accreditation): 断定所建立的模型是否正确合理, 是整个建模与仿真过程中极其困难而又非常重要的一步。

6 仿真执行 (Simulation Execution): 运行仿真软件并驱动仿真系统, 得出所需数据, 并进行敏感性分析。

7 整理结果 (Result Interpretation): 由仿真结果进行推断, 得到一些设计和改进系统的有益结论。

在本论文进行的工作中, 对一般意义下仿真的七个步骤进行重新分析和组合, 并定义为在 SPC-33 电子调速器仿真中的三大模块: 实际系统建模、计算机模型建立、仿真运行。

实际系统建模: 在该模块, 任务是从实际的 SPC-33 电子调速系统构造一个系统模型, 包括建立模型结构和提供数据。在建立模型结构时要确定系统边界、鉴别系统的实体、属性和活动; 提供数据则是使包含在活动中的各个属性之间有确定的关系。

计算机模型建立: 在该模块, 任务是把系统模型抽象成数学公式和逻辑流程图, 并进行模型验证; 同时将抽象的公式和流程图转换成计算机语言描述模型, 建立仿真模型。

仿真运行: 在该模块, 我们的任务是把模型的行为同实际系统的行为进行比较, 验证模型程序实现的准确性、计算机产生数据的准确性。

## 4.2 SPC-33 电子调速器系统建模

系统定义即确定所研究系统的边界条件和约束, 以及所要研究系统的对象范围, 在本课题研究中, 系统定义为以 SPC-33 电子调速器为核心, 高压油泵、柴油机、螺旋桨、船体等对象为辅的调速系统。

SPC-33 电子调速器用作转速调节或负荷调节控制, 整个 SPC-33 电子调速器是由转速控制器、电子驱动单元和电动执行器三大部分组成。本论文以 SIEMENS 的 SPC-33 作为分析对象。对系统按功能定义为如图 4-2 所示:

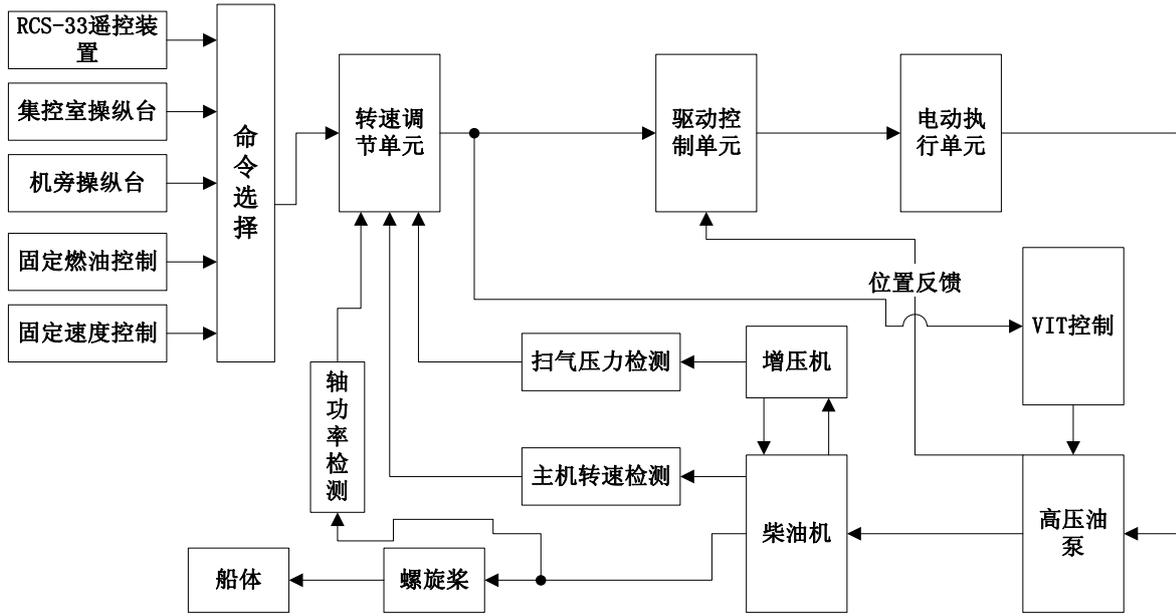


图 4-2 电子调速器仿真控制系统定义

如图 4-2 所示，电子调速器系统仿真主要包括四大功能模块：1) 调速功能模块；2) 伺服放大功能模块；3) 执行功能模块；4) 控制对象。为了实现其原理仿真，我们对图 3-1 进行适当调整，构造出电子调速器的通用仿真框图，如图 4-3 所示：

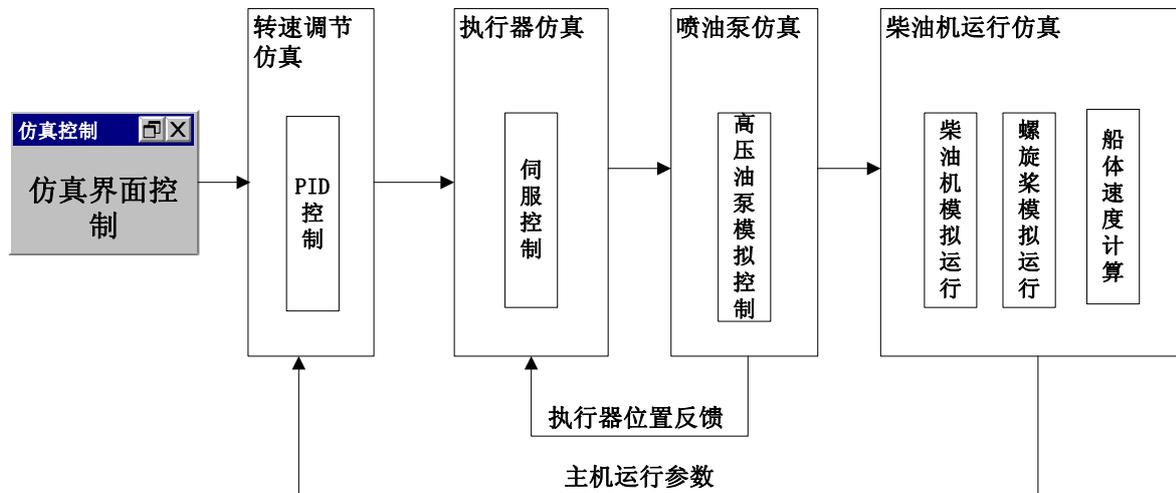


图 4-3 电子调速器仿真框图

本论文的主要任务是对船舶电子调速系统建立仿真系统，所以在图 4-3 中，我们把调速器的执行功能模块不作为仿真对象，这是因为执行器实质上是一个带有内置式制动器的伺服电动机，并且安装在高压油泵油门齿条侧，用以驱动油门齿条。伺服电动机作为一个二阶惯性系统，可对它单独建模仿真。同时，船舶柴油机是一个复杂系统，包含物理、化学、流动、传热、传质的综合过程，我们把它和电子调速器模型分开，对其进行单独数学建模，提供参数输入，柴油机模型返回所需输出。

这样可简化电子调速器的仿真模型，并节省模型解算时间。

数据准备是要确定各个属性在活动中的关系。仿真命令界面用以输入模拟环境参数，包括船型、装载情况、海况、控制方式，同时进行模拟操作，提供调速命令。控制方式主要有驾驶室遥控/集控室遥控/集控室远操。

另外，调速器所需的一些主机运行状态参数，如主机实际转速值，主机扫气压力值，通过仿真柴油机、增压器等模拟运行获得。

本文采用四元数学模型，在构造出的电子调速器通用仿真框图基础上建立系统的物理模型，系统中各实体间的活动关系如图 4-4 所示。包括：1) 电子调速器；2) 高压油泵；3) 柴油机（增压器）；4) 螺旋桨。

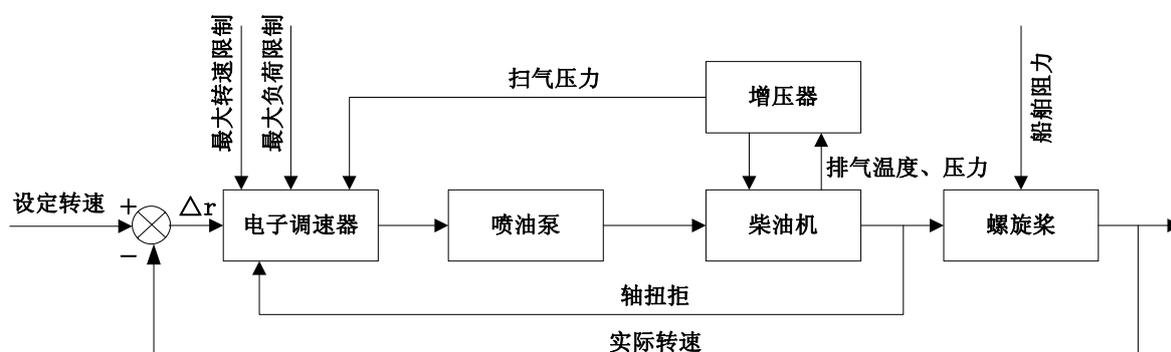


图 4-4 系统仿真物理模型

### 4.3 电子调速器系统仿真模型

#### 4.3.1 SPC-33 电子调速器模型

如图 3-2 所示，SPC-33 电子调速器的转速调节采用分类、分段的 PI（比例—积分）闭环定值调节系统，根据转速差  $\Delta r(t) = r(t) - r'(t)$  按式（4-1）产生控制信号  $e(k)$ ，而控制的比例、积分增益在各阶段按不同的增益曲线进行调整。如图 4-5 所示。系统响应及动—静态品质可通过调节 PI 增益获得。

$$e(k) = k_p \Delta r(t) + \int k_i \Delta r(t) dt \quad (4-1)$$

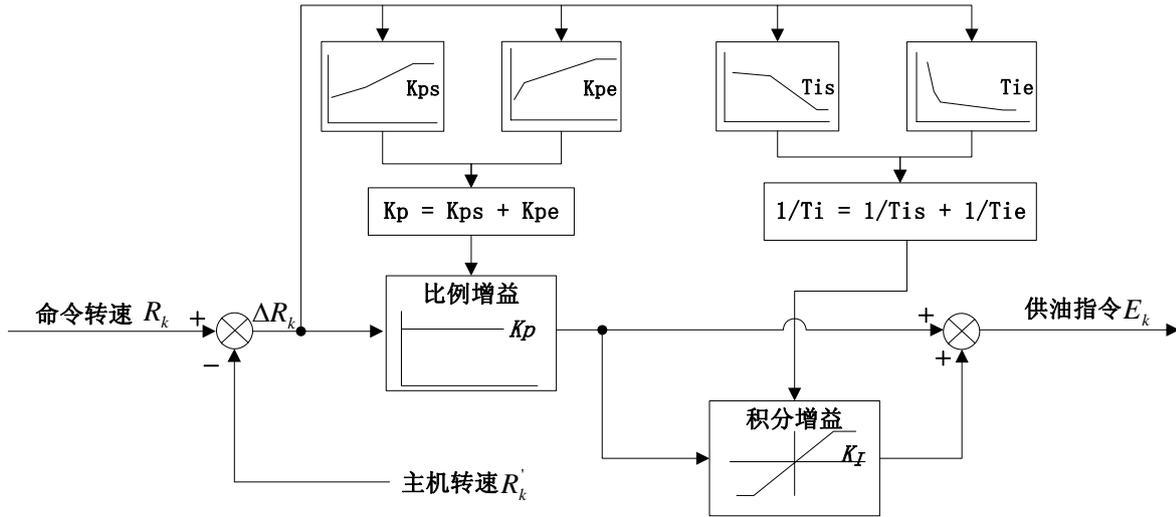


图 4-5 转速调节 PI 仿真框图

如图 4-5 所示，该控制由比例—积分环节组成，在 PI 调节之外，通过调节比例增益和积分时间，达到分段控制的目的。系统输入信号为设定转速  $R_k$ ，实际主机转速（通过模拟得到）  $R'_k$ ，及转速偏差  $\Delta R_k = R_k - R'_k$ 。整个 PI 调节计算公式为：

$$E_k = K_p \Delta R_k + K_I K_p \Delta R_k \sum_{i=0}^k \Delta R_i \quad (4-2)$$

式中， $E_k$  为油门位置输出， $K_p$  为比例增益， $K_I$  为积分增益。积分调节主要用于消除系统静差（转速差  $\Delta R_k$ ），以提高调速精度。

在 PI 调节过程中，系统首先需计算比例增益  $K_p$  和积分增益  $K_I$ 。 $K_p$  通过图 3-3 和 3-4 所示特性曲线进行计算，公式为：

$$K_{ps} = \begin{cases} 3.333R_k + 900 & (R_k < 60) \\ 58R_k - 2380 & (60 \leq R_k < 120) \end{cases} \quad (4-3)$$

$$K_{pe} = \begin{cases} 600\Delta R_k + 1900 & (\Delta R_k < 1) \\ 77.778\Delta R_k + 2422.2 & (1 \leq \Delta R_k < 10) \\ 53.333\Delta R_k + 2666.7 & (10 \leq \Delta R_k) \end{cases} \quad (4-4)$$

$$T_{is} = \begin{cases} -3.333R_k + 4000 & (R_k < 60) \\ -46.667R_k + 6600 & (60 \leq R_k < 120) \end{cases} \quad (4-5)$$

$$T_{ie} = \begin{cases} -3850\Delta R_k + 8500 & (\Delta R_k < 1) \\ -88.889\Delta R_k + 4738.9 & (1 \leq \Delta R_k < 10) \\ -31.667\Delta R_k + 4166.7 & (10 < \Delta R_k) \end{cases} \quad (4-6)$$

$$K_p = K_{ps} + K_{pe} \quad (4-7)$$

$$T_i = 1/[1/T_{is} + 1/T_{ie}] \quad (4-8)$$

当控制为“恶劣海况”操纵时，PI 环节中的增益计算公式为：

$$K_p = (K_{ps} + K_{pe}) / P_k \quad (4-9)$$

$$T_i = I_k / [1/T_{is} + 1/T_{ie}] \quad (4-10)$$

式中， $P_k$ 和 $I_k$ 为比例增益的分度系数和积分增益的倍率系数。

由于高压油泵不可避免地会出现燃油泄漏，所以在转速调节中增加供油自动补偿，其控制如图 3-2 所示。供油补偿分为正向补偿和负向补偿。当转速调节输出由高转速向低转速进行（减速）时，供油补偿为负向，补偿曲线如图 3-5（a）所示，公式为：

$$E_{kL} = \begin{cases} -0.028E_k + 75 & (E_k < 465) \\ -0.1159E_k + 115.89 & (E_k \geq 465) \end{cases} \quad (4-11)$$

当转速调节输出由低转速向高转速进行（加速）时，供油补偿为正向，补偿曲线如图 3-5（b）所示，公式为：

$$E_{kL} = \begin{cases} -0.028E_k + 75 & (E_k < 465) \\ -0.1159E_k + 115.89 & (E_k \geq 465) \end{cases} \quad (4-12)$$

直接油门调节是调速器的一种开环转速控制，命令转速与油门开度一一对应，即：

$$E_k = K_{Fuel} R_k \quad (4-13)$$

式中  $K_{Fuel}$  为直接油门控制增益。

执行器标定是转速控制的后置环节，用于对电动执行器输出转角的设定，设定曲线如图 3-6（b），设定后执行器位置（油门格数）为：

$$E = \begin{cases} 2.4286E_k 42/1000 & (E_k < 333.3) \\ 9.5714E_k 42/1000 - 100 & (333.3 \leq E_k < 666.6) \\ 2.2857E_k 42/1000 + 104 & (E_k \geq 666.6) \end{cases} \quad (4-14)$$

对转速调节的输出，考虑到实际条件变化，有时需要对供油指令的上限加以限制，一般为轮机长供油限制、扫气压力供油限制、扭矩供油限制。如图 3-8 所示。扫气压力供油限制为：

$$E_{maz1} = \begin{cases} 100 & (P_s < 100) \\ 2.5581P_s + 155.81 & (100 \leq P_s < 315) \\ 0.7261P_s + 422.68 & (315 \leq P_s < 800) \\ 1000 & (P_s \geq 800) \end{cases} \quad (4-15)$$

扭矩供油限制为：

$$E_{\max 2} = \begin{cases} 400 & (M_s < 150) \\ 2.7429M_s + 2.2857 & (150 \leq M_s < 315) \\ 0.3158M_s + 778.95 & (315 \leq M_s < 700) \\ 1000 & (M_s \geq 700) \end{cases} \quad (4-16)$$

根据 (4-2) 到 (4-13), 我们构造出调速器转速调节仿真运算框图, 如图 4-6 所示:

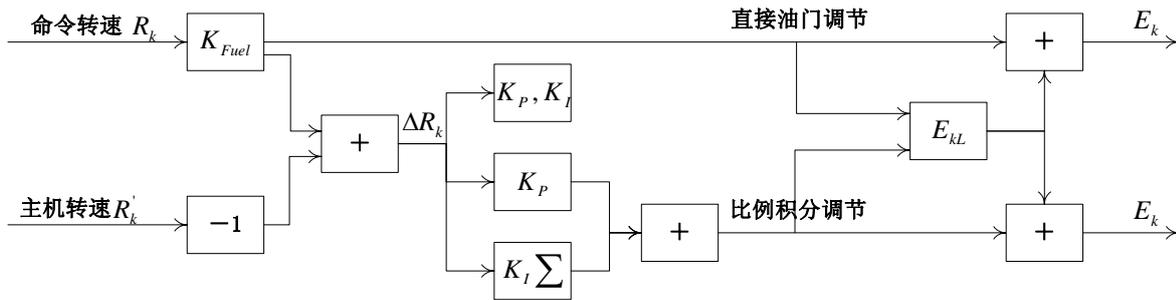


图 4-6 转速调节仿真运算框图

调速器应能在各种不同海况, 不同船舶装载及不同主机工况下正常工作, 因此需带有死区控制。所谓死区控制, 即当转速差  $\Delta R_k = R_k - R'_k$  小于给定的死区范围时, 旁通转速调节而保持油门开度不变, 以减少主机负荷波动。设主机运行转速的上下限为  $R_{upper}$  和  $R_{lower}$ , 固定燃油量约定转速上下限为  $r_{e2}$  和  $r_{e1}$ , 非约定转速上、下限为  $r_{n2}$  和  $r_{n1}$ , 则死区范围内的固定燃油量控制应满足:

$$R_{upper} > r_{n2} > r_{e2} > R' > r_{e1} > r_{n1} > R_{lower} \quad (4-17)$$

式中  $R'$  为主机实际转速。当  $R'$  在非约定转速范围内  $[r_{n1}, r_{n2}]$  波动时, 油门开度不变, 油门位置命令

$$E_k = E_{k-1} \quad (4-18)$$

一旦  $R' > r_{n2}$  或  $R' < r_{n1}$  时, 则系统从死区控制自动进入到转速调节状态, 执行式 (4-2) 的调节。当  $R'$  回落到约定转速  $[r_{e1}, r_{e2}]$  内时, 经搜索延时后, 系统又从转速调节状态自动进入死区控制, 执行式 (4-18) 的调节。

#### 4.3.2 高压油泵仿真模型

油门执行器位置伺服控制仿真单元是一个高压油泵油门开度 (高压油泵齿条刻度) 位置跟随伺服控制环节。来自转速调节单元的油门位置命令  $E$  与实际油门位置  $E'$  比较后的位置偏差  $\Delta E$  经 PI 调节环节及油门刻度比例环节后转换成执行器 (伺服电动机) 驱动信号。原理框图如图 4-7 所示。

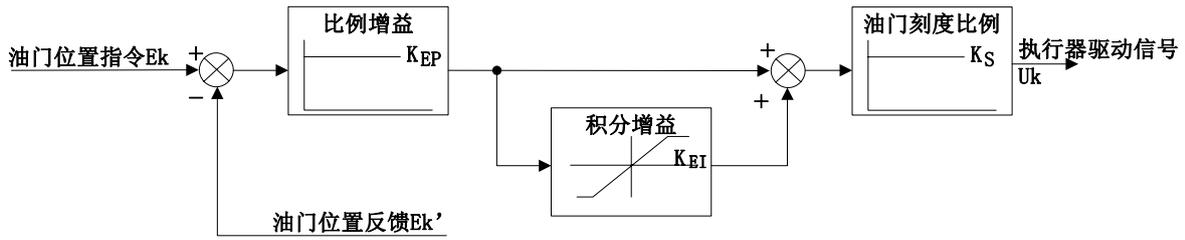


图 4-7 执行器位置伺服控制仿真框图

根据图 4-7，执行器驱动信号  $U_k$ ：

$$U_k = K_s (K_{EP} \Delta E_k + K_{EI} K_{EP} \Delta E_k \sum_{i=k-m}^k \Delta E_i) \quad (4-19)$$

式中  $K_s$  为油门刻度比例， $K_{EP}$  为比例增益， $K_{EI}$  为积分增益， $m$  为积分长度。加大比例增益可加快油门位置跟随的响应速度。 $\Delta E_k = E_k - E_k'$  为第  $k$  次采样的位置命令与实际油门位置差值。由式 (4-16) 可构造出相应的仿真运算框图，如图 4-8 所示。

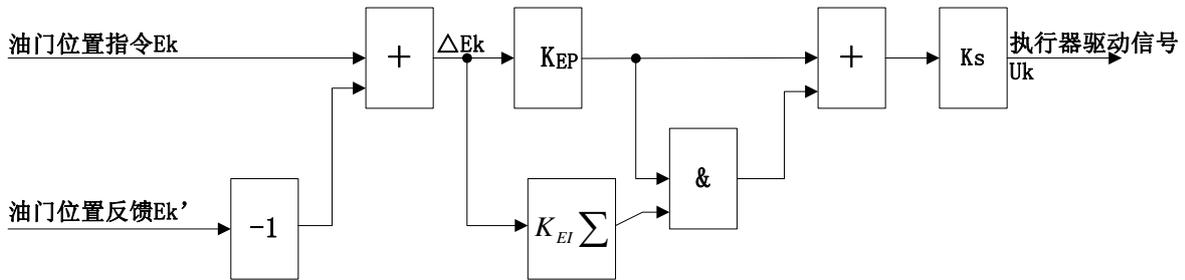


图 4-8 高压油泵仿真运算框图

在执行器伺服控制仿真中，“油门位置反馈  $E_k'$ ” 是一外部输入变量，通过运行伺服电动机（执行器）仿真模型获得。

在高压油泵模型中，我们加入了 VIT 自动调节系统。当处于正车运行时，对 VIT 模型进行数值解算，然后给出操调指令，以求通过提高气缸爆压达到节油与改善工况的目的。VIT 控制的爆压计算一般公式为：

$$P_{\max} = P_{\text{comp}} + \Delta P \quad \Delta P_{\min} \leq \Delta P \leq \Delta P_{\max} \quad (4-20)$$

式中， $\Delta P$  的计算如图 4-9 所示。

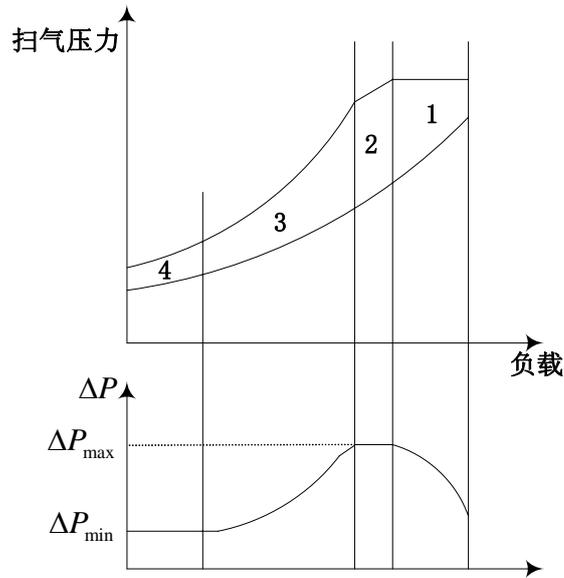


图 4-9 压力增量计算

由图可看出， $\Delta P$  实质上是由自变量为负载的函数决定。

#### 4.3.3 柴油机（增压器）仿真模型

目前，涡轮增压柴油机动态建模的方法有三大类：1) 准稳态线性模型，即把柴油机整体看作动力装置中的一阶线性环节，是柴油机常用的建模方法。这类模型十分简单、粗糙，计算精度低，但计算速度快；2) 容积法模型，它是在稳态工作过程模拟计算的基础上增加了动态微分方程。此类模型能反映柴油机燃烧做功等过程，计算精度高，但计算量很大，难以实现实时仿真；3) 多阶非线性准稳态模型，它是为了兼顾柴油机动态过程仿真的实时性和计算精度的要求而提出的一种折衷方案。它是基于稳态的概念将稳态试验数据用于建立动态模型。

柴油机的指示扭矩  $M_i (N \cdot m)$  为：

$$M_i = H_u * g_f * \eta_i / 2\pi \quad (4-21)$$

$$g_f = 0.006749 * (U_k - 32.09) * R_k' + 18.34 \quad (4-22)$$

式中， $H_u$  为燃油低热值 (J/kg)， $g_f$  为柴油机燃油循环喷油量 (kg)， $\eta_i$  为柴油机的指示热效率。

根据准稳态的概念，可认为柴油机指示热效率是转速和过量空气系数的函数，可根据万有特性取消应有的基本特征，设：

$$\eta_i = f[(n - n_0)^2 + d^2(\alpha_t - \alpha_{t0})^2] \quad (4-23)$$

式中， $n_0, \alpha_{t0}$  分别是柴油机最高指示效率对应的转速和过量空气系数， $d$  为常数，式中参数利用试验数据得出。

柴油机的机械效率可以根据柴油机的试验数据回归得出：

$$\eta_m = 0.6792 + 0.003197n - 0.000000506N_1 \quad (4-24)$$

式中， $N_1$ 为柴油机的指示功率（Kw）。故 $M_e$ 为：

$$M_e = M_i * \eta_i * \eta_m \quad (4-25)$$

柴油机排温 $T_r$ 可表示为柴油机转速和循环喷油量的函数，由柴油机试验数据回归得出：

$$T_r = 4.469g_f + 122.015n^{0.263} + 61.206 \quad (4-26)$$

柴油机的转速由下式确定：

$$\frac{dn}{dt} = \frac{30}{\pi I_{el}} (M_e - M_l) \quad (4-27)$$

式中 $I_{el}$ 是柴油机、轴系和螺旋桨的转动惯量（ $kg \cdot m \cdot s^2$ ）， $M_e$ 为柴油机有效输出扭矩（ $N \cdot m$ ）， $M_l$ 为阻力矩（ $N \cdot m$ ）。

将式（4-26）离散化，为：

$$\Delta n = \frac{30}{\pi I_{el}} (M_e - M_l) \Delta t \quad (4-28)$$

$$n_k = n_{k-1} + \Delta n \quad (4-29)$$

式中， $\Delta t$ 为积分时间，可取固定值。

根据试验数据回归分析，涡轮背压 $P_{t0}$ （Pa）可由下式确定：

$$P_{t0} = P_0 + 2215.783 \left( \frac{P_{ex}}{P_{ex0}} \right)^2 \quad (4-30)$$

式中， $P_0$ 为大气压力， $P_{ex0}$ 为标定工况下排气管内气体压力。

压气机进口温度为 $T_{ci}$ 为环境温度 $T_0$ ，进口压力降 $\Delta P_{ci}$ （Pa）可根据试验数据回归为：

$$\Delta P_{ci} = 1.67 * 10^{-13} P_{co}^{2.716} + 66.506 \quad (4-31)$$

#### 4.3.4 螺旋桨仿真模型

螺旋桨的扭矩 $M_p$ （ $N \cdot m$ ）为：

$$M_p = K_M * \rho * n^2 * D^5 \quad (4-32)$$

螺旋桨的推力 $T_p$ （N）为：

$$T_p = K_T * \rho * n^2 * D^4 \quad (4-33)$$

式中 $K_M$ 、 $K_T$ 、 $\rho$ 、 $n$ 、 $D$ 分别为螺旋桨扭矩系数、推力系数、海水密度（ $t/m^3$ ）、柴油机转速和螺旋桨的直径（m）。 $K_M$ 、 $K_T$ 分别由实船资料确定。

船体阻力 $R_{res}$ 可由下式确定：

$$R_{res} = R_{i0} * (V/V_0)^2 \quad (4-34)$$

船速  $V$  的计算可由下式得出：

$$\frac{dV}{dt} = (T_P - CR_{res}) / M_s \quad (4-35)$$

将式 (4-34) 离散化，得：

$$\Delta V = (T_P - CR_{res}) \Delta t / M_s \quad (4-36)$$

$$V_k = V_{k-1} + \Delta V \quad (4-37)$$

式中  $M_s$  为全船总质量 (kg)，而  $C$  为船体负荷系数，用它考虑重载、轻载、风浪等因素。

#### 4.4 SPC-33 控制系统仿真计算

将 SPC-33 电子调速器模型、高压油泵模型、柴油机（增压器）模型、螺旋桨模型 (4-2) (4-13) (4-19) (4-21) (4-22) (4-28) (4-29) (4-33) (4-36) (4-37) 联系起来，就得到 SPC-33 电子调速系统数学仿真模型。

$$\left. \begin{aligned} E_k &= K_P \Delta R_k + K_I K_P \Delta R_k \sum_{i=0}^k \Delta R_i \\ E_k &= K_{Fuel} R_k \\ U_k &= K_s (K_{EP} \Delta E_k + K_{EI} K_{EP} \Delta E_k \sum_{i=k-m}^k \Delta E_i) \\ M_i &= H_u * g_f * \eta_i / 2\pi \\ g_f &= 0.006749 * (U_k - 32.09) * R_k' + 18.34 \\ \Delta n &= \frac{30}{\pi I_{el}} (M_e - M_l) \Delta t \\ n_k &= n_{k-1} + \Delta n \\ T_P &= K_T * \rho * n^2 * D^4 \\ \Delta V &= (T_P - CR_{res}) \Delta t / M_s \\ V_k &= V_{k-1} + \Delta V \end{aligned} \right\} \quad (4-38)$$

## 第五章 电子调速器故障诊断

在第一章概述中，我们对故障信息流的概念作了简要阐述，由于电子调速器系统对船舶动力装置运行的重要性，因此对其发生故障的可能性作出正确判断，或当故障发生后，能迅速、正确地找出故障源，对船舶轮机管理人员而言是极其重要的。

故障树分析法（FTA）是分析系统可靠性和安全性的一种重要方法，在许多领域得到广泛的应用。基于故障树模型的诊断有许多优点，它兼顾了基于规则和定量模型诊断的优点。故障树有关信息的利用解决了智能诊断系统知识获取的瓶颈问题。

对电子调速器系统进行故障诊断与分析，用 FTA（故障树分析）方法是行之有效的。对 FTA 而言，它以可靠性理论为基础，运用逻辑演绎方法建立电子调速器装置的失效信息逻辑关系链，使我们顺着这种信息流的逻辑关系最终找到可能导致系统失效的原因—故障源，即系统某功能失效（果）是由若干元器件失效（因）所引起（排除人为失误）。

要诊断出 SPC-33 电子调速器系统的故障所在，就要应用系统的各种故障信息。根据系统的功能，故障信息可分为功能信息和非功能信息。对于 SPC-33 电子调速器及其被控对象系统来说，不仅要提取系统的功能性故障信息，而且还要考虑系统的故障现象（征兆）以及其他的非功能性故障信息。将各种故障信息输入并定义为故障现象，将输出故障结果定义为故障点，通过建立故障现象同故障点在空间的函数映射关系，实现对 SPC-33 电子调速器系统的故障诊断与分析。

### 5.1 故障诊断数学描述

#### 1 故障树（FT）的数学描述

故障树（Fault Tree）模型是一个基于研究对象结构、功能特征的行为模型，它是一种定性的因果模型，是以系统最不希望发生的事件作为顶事件，以可能导致顶事件发生的其他事件作为中间事件和底事件，并用逻辑门表示事件之间逻辑联系的

一种倒树状结构。故障树是一种体现故障传播关系的有向图，它反映了系统故障（顶事件）与导致系统故障的诸因素（中间事件和底事件）之间底逻辑关系，因此是分析故障管理、查找系统故障单元底一种有效手段。图 5-1 为一简单故障树。

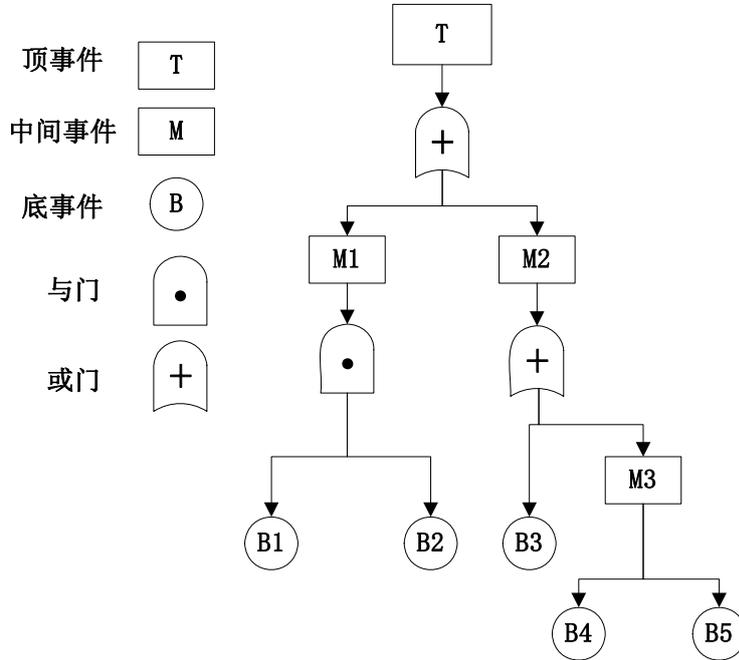


图 5-1 简单故障树示例

为了对故障树作定性分析和定量计算，用结构函数来描述故障树，考虑一个由  $n$  各单元组成的系统，把系统失效作为故障树顶事件  $T$ ；把各单元失效作为故障树底事件  $B_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ，对顶事件和底事件只考虑正常和故障两种状态。

故障树的底事件  $B_i$  的状态用  $S_i$  来表示，那么：

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{当底事件 } B_i \text{ 发生，即系统底第 } i \text{ 个} \\ & \text{单元故障时；} \\ 0 & \text{当底事件 } B_i \text{ 不发生，即系统的第 } i \text{ 个} \\ & \text{单元正常时；} \end{cases} \quad (5-1)$$

故障树顶事件  $T$  的状态用  $S_t$  来表示，因为顶事件的发生与否与底事件底状态直接相关，因而  $S_t$  必然是所有底事件状态  $S_i$  的函数。即：

$$S_t = S_t(S_B) = \begin{cases} 1 & \text{当顶事件 } T \text{ 发生，即系统} \\ & \text{故障时；} \\ 0 & \text{当顶事件 } T \text{ 不发生，即系统} \\ & \text{正常时；} \end{cases} \quad (5-2)$$

利用布尔代数的有关知识，对于与门的故障树，其结构函数可表示为：

$$S_T(S_B) = \prod_{i=1}^n S_i \quad (5-3)$$

对于或门结构的故障树，结构函数表示为：

$$S_T(S_B) = \bigvee_{i=1}^n S_i \quad (5-4)$$

因此，对任一复杂结构的故障树都可以用其结构函数来表达。

## 2 故障树最小路集 (FTMPS) 数学描述

如果故障树的某几个底事件都不发生时，就能保证顶事件不发生，那么这几个底事件所构成底集合称为这棵故障树底路集 (Path Sets)，记为 PS。对于故障树的任一路径，若将其所含底事件任意去掉一个就不再是路集，则该路集就是故障树的最小路集 (Minimal Path Sets)，记为 MPS。其状态可表示成底事件状态底函数：

$$S_{P_k} = S_{P_k}(S_B) = \prod_{B_i \in P_k} \overline{S_i} \text{ 或 } \overline{S_{P_k}} = \overline{S_{P_k}(S_B)} = \bigvee_{B_i \in P_k} S_i \quad (k=1,2,\dots,n_p), \quad n_p \text{ 为故障树的最小路集数量。}$$

## 5.2 电子调速器的 FTA 信息流模型

### 1 SPC-33 电子调速器故障树分析及最小路集表示等价故障树

对于电子调速器的 FTA 分析，我们所采取的具体步骤是：

(1) 分析转速控制单元和驱动单元及其执行器，充分调研后选定系统具体功能失效的顶事件；

(2) 根据 SPC-33 调速器原理图和系统元器件、组件、功能块的使用，维护及故障表现，直接建立最小路集的三级故障树 (FT)；

(3) 从系统化角度，构造 FTA 矩阵模型，为计算机故障分析提供有效手段；

(4) 对各级故障事件 (我们分为三级)，计算故障概率值 (失效率和不可靠度)，进一步实现故障的定量化预测分析与优化搜索。

#### 1.1 系统级故障 (顶事件) 与故障树

根据调研结果及专家经验，SPC-33 电子调速器装置可能出现的系统级故障现象归纳为两大类：转速控制单元故障、驱动单元及其执行器故障。这些系统级故障见表 5-1 所示。

表 5-1 电子调速器系统级故障集合表 (顶事件)

故障类别	故障名称	序号	故障现象（顶事件）
转速控制 单元故障	调速器啮合故障	$f_1$	GONVERNOR ENGAGED 绿色指示灯熄灭
	控制电源故障	$f_2$	SYSTEM ON 绿色指示灯熄灭
	I/O 电路板故障	$f_3$	I/O BOARD FAILURE 红色指示灯点亮
	传感器接地故障	$f_4$	EARTH FAILURE 黄色指示灯点亮
	传感器信号断路故障	$f_5$	WIRE BRAKE CHARGE AIR 红色指示灯点亮 WIRE BRAKE LEVER 红色指示灯点亮
	转速拾取器测速通道故障	$f_6$	SPEED PICK-UP1 FAIL 红色指示灯点亮 SPEED PICK-UP2 FAIL 红色指示灯点亮
	主机超速及超负荷故障	$f_7$	OVERSPEED 红色指示灯点亮 OVERLOAD 红色指示灯点亮
	执行器故障	$f_8$	ACTUATOR FAIL T/NOT READY 红色指示灯点亮
驱动单元 及其执行 器故障	驱动放大单元致命性故障	$f_9$	驱动器操作面板故障指示：1289；RF 黄灯熄灭，CF 红灯点亮
	电源故障	$f_{10}$	驱动器操作面板故障指示：4
	驱动放大单元故障	$f_{11}$	驱动器操作面板故障指示：6；RF 黄灯熄灭，CF 红灯点亮
	执行器伺服电动机过电流	$f_{12}$	驱动器操作面板故障指示：3
	执行器伺服电动机过热	$f_{13}$	驱动器操作面板故障指示：5

造成系统级故障的原因必然是系统中相应的功能模块失效（故障）而引起。而功能块是由一些组件构成，所以功能块失效必然是其中某些组件失效所造成。功能组件的失效又必然是构成该组件的若干元器件失效所造成。例如表 5-1 中的序号  $f_5$  “传感器信号断路故障”。仔细分析这一顶事件发生原因，将其归纳在表 5-2 中。

表 5-2  $f_5$  “传感器信号断路故障” 发生原因表

序号	功能块	序号	功能组件	序号	元器件
$U_{51}$	主机扫气压力信号断路故障	$V_{511}$	信号线及接线端故障	$W_{5111}$	电缆（TEB-5）断路
				$W_{5112}$	接线端 ME-JB6 松动、接触不良

				$W_{5113}$	接线端 TB321A(7C/7A) 松动、接触不良
		$V_{512}$	信号适配器故障	$W_{5121}$	适配器损坏
				$W_{5122}$	适配器松动、接触不良
		$V_{513}$	传感器故障	$W_{5131}$	传感器损坏
				$W_{5132}$	P/I 变送器损坏
$U_{52}$	集控室远操转速指令信号断路故障	$V_{521}$	信号线及接线端故障	$W_{5211}$	电缆(TEB-8、9)断路
				$W_{5212}$	接线端 LEVER 松动、接触不良
				$W_{5213}$	接线端 TB321A(13C/13B) 松动、接触不良
		$V_{522}$	信号适配器故障	$W_{5221}$	适配器损坏
				$W_{5222}$	适配器松动、接触不良
		$V_{523}$	远操单元故障	$W_{5231}$	发讯触头接触不良
				$W_{5232}$	0-5K $\Omega$ 电位器损坏
		$V_{524}$	电源故障	$W_{5241}$	无 24VDC 电压
				$W_{5242}$	电源端子松动、接触不良

由表 5-2 可见, 我们把系统级故障(顶事件)发生原因, 从系统的功能块查找到不可再分解的系统元器件(底事件)。这样可画出以三级故障链表示的 SPC-33 电子调速器“传感器信号断路故障”的最小路集故障树。如图 5-2 所示。

对表 5-1 中所描述的其它系统故障, 都可以通过上述方法建立故障树。

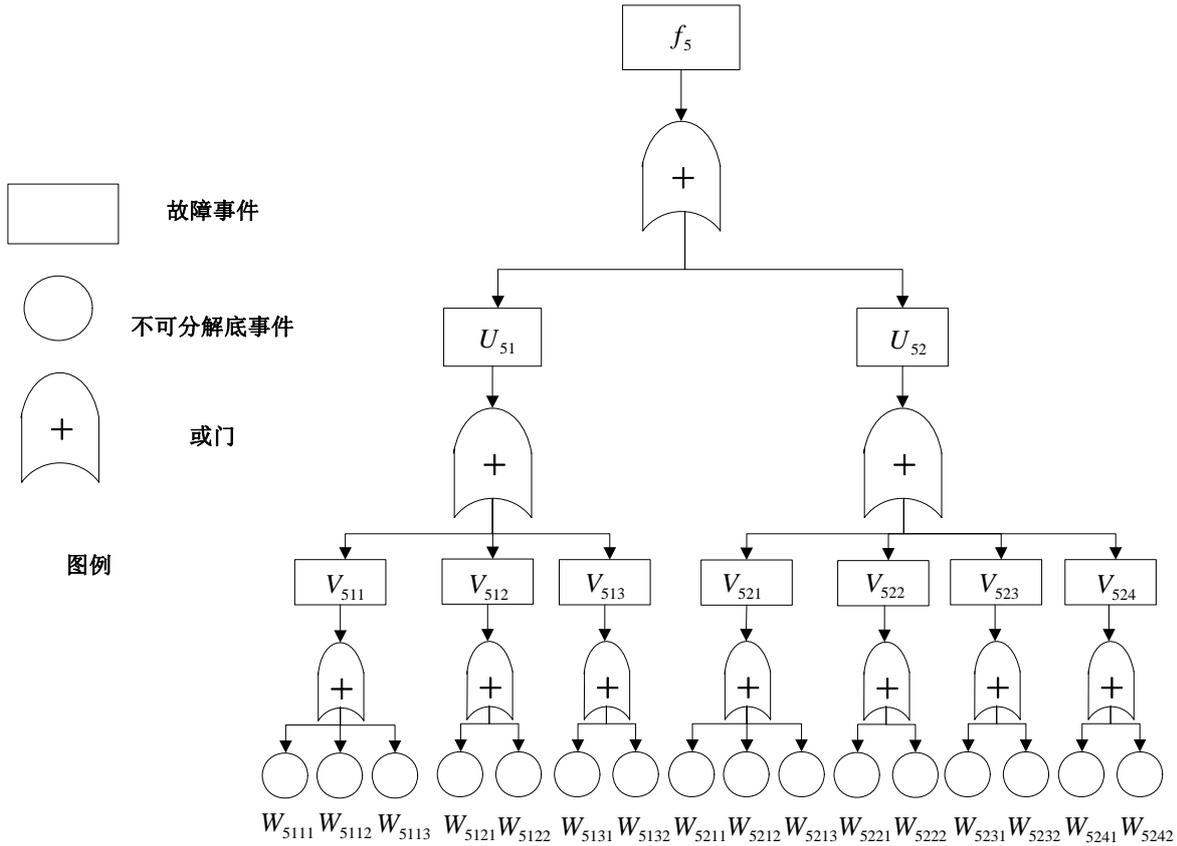


图 5-2 “传感器信号断路故障” 最小路集故障树

1.2 FTA 系统化矩阵模型

当用计算机程序排列故障树，以及用计算机进行故障查询与分析时，必须对上述的故障表格或树形图进行数学化描述，即建立 FTA 数学模型。

为了统一分析，我们把 SPC-33 电子调速器的故障链分成三级：第一级故障源为功能块；第二级为组件（或部件）；第三级为元器件。元器件故障是不可再分解的故障源。设系统级故障（顶事件） $f_1, f_2 \dots f_n$ ，这些故障是由功能块  $U_1, U_2 \dots U_m$  的失效（一级故障源）而造成，于是有：

$$\begin{aligned}
 f_1 &= (a_{11} \quad a_{12} \quad \Lambda \quad a_{1m}) (u_1 \quad u_2 \quad \Lambda \quad u_m)^T \\
 f_2 &= (a_{21} \quad a_{22} \quad \Lambda \quad a_{2m}) (u_1 \quad u_2 \quad \Lambda \quad u_m)^T \\
 &\quad \Lambda \quad \Lambda \\
 f_n &= (a_{n1} \quad a_{n2} \quad \Lambda \quad a_{nm}) (u_1 \quad u_2 \quad \Lambda \quad u_m)^T
 \end{aligned}$$

即：

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \mathbf{M} \\ f_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \Lambda & a_{1m} \\ a_{21} & & & \\ \mathbf{M} & & & \\ a_{n1} & & \Lambda & a_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \mathbf{M} \\ u_m \end{pmatrix} = \mathbf{A}\mathbf{U} \quad (5-5)$$

式中  $\mathbf{A}$  为功能块失效矩阵，它是一个布尔型逻辑矩阵。 $\mathbf{A}$  中的元素  $a_{ij}$  取 1 或 0，表示相应的功能块失效而造成系统的故障与否。

功能块的失效是由组件  $V_1, V_2 \dots V_l$  的失效（二级故障源）引起，于是有：

$$\begin{aligned} u_1 &= (b_{11} \quad b_{12} \quad \Lambda \quad b_{1l}) (v_1 \quad v_2 \quad \Lambda \quad v_l)^T \\ u_2 &= (b_{21} \quad b_{22} \quad \Lambda \quad b_{2l}) (v_1 \quad v_2 \quad \Lambda \quad v_l)^T \\ &\Lambda \quad \Lambda \\ u_m &= (b_{m1} \quad b_{m2} \quad \Lambda \quad b_{ml}) (v_1 \quad v_2 \quad \Lambda \quad v_l)^T \end{aligned}$$

即：

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \mathbf{M} \\ u_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \Lambda & b_{1l} \\ b_{21} & & & \\ \mathbf{M} & & & \\ b_{m1} & & \Lambda & b_{ml} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \mathbf{M} \\ v_l \end{pmatrix} = \mathbf{B}\mathbf{V} \quad (5-6)$$

式中  $\mathbf{B}$  为组件失效矩阵。 $b_{ij}$  取 1 或 0，表示相应的组件失效而造成功能块的失效与否。

组件的失效又是由元器件  $W_1, W_2 \dots W_g$  的失效（三级故障源）引起，于是有：

$$\begin{aligned} v_1 &= (c_{11} \quad c_{12} \quad \Lambda \quad c_{1g}) (w_1 \quad w_2 \quad \Lambda \quad w_g)^T \\ v_2 &= (c_{21} \quad c_{22} \quad \Lambda \quad c_{2g}) (w_1 \quad w_2 \quad \Lambda \quad w_g)^T \\ &\Lambda \quad \Lambda \\ v_l &= (c_{l1} \quad c_{l2} \quad \Lambda \quad c_{lg}) (w_1 \quad w_2 \quad \Lambda \quad w_g)^T \end{aligned}$$

即：

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \mathbf{M} \\ v_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \Lambda & c_{1g} \\ c_{21} & & & \\ \mathbf{M} & & & \\ c_{l1} & & \Lambda & c_{lg} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \mathbf{M} \\ w_g \end{pmatrix} = \mathbf{C}\mathbf{W} \quad (5-7)$$

式中  $\mathbf{C}$  为元器件失效矩阵。 $c_{ij}$  取 1 或 0，表示相应的元器件失效而造成组件的失效与否。

如果合并式 (5-5) (5-6) (5-7)，则得：

$$\mathbf{F} = \mathbf{A}\mathbf{U} = \mathbf{A}\mathbf{B}\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{B}\mathbf{C}\mathbf{W} = \mathbf{D}\mathbf{W} \quad (5-8)$$

作为应用，以图 5-1 的传感器信号断路故障为例，可写出其系统化逻辑矩阵式：

$$\begin{pmatrix} \mathbf{M} \\ f_5 \\ \mathbf{M} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \Lambda & 0 \\ \mathbf{M} & 1 & 1 & \mathbf{M} \\ 0 & \Lambda & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{M} \\ u_{51} \\ u_{52} \\ \mathbf{M} \end{pmatrix}$$

$$= A \begin{pmatrix} 0 & \Lambda & & & & & & & & & \Lambda & 0 \\ M & & & & & & & & & & M & \\ 0 & & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & & 0 & \\ & & & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & & \\ M & & & & & & & & & & M & \\ 0 & \Lambda & & & & & & & & & \Lambda & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M \\ V_{511} \\ V_{512} \\ V_{513} \\ V_{521} \\ V_{522} \\ V_{523} \\ V_{524} \\ M \end{pmatrix}$$

$$= AB \begin{pmatrix} 0 & \Lambda & & & & & & & & & \Lambda & 0 \\ M & 0 & 0 & 0 & & & & & & & M & \\ & & & 1 & 1 & 1 & 0 & & & & & \\ & & & & 0 & 1 & 1 & 0 & & & & \\ & & & & & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & & \\ & & & & & & 0 & 1 & 1 & 0 & & \\ & & & & & & & 0 & 1 & 1 & 0 & \\ & & & & & & & & 0 & 1 & 1 & 0 \\ & & & & & & & & & 0 & 1 & 1 & 0 \\ & & & & & & & & & & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ M & & & & & & & & & & M & \\ 0 & \Lambda & & & & & & & & & \Lambda & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M \\ W_{5111} \\ W_{5112} \\ W_{5113} \\ W_{5121} \\ W_{5122} \\ W_{5131} \\ W_{5132} \\ W_{5211} \\ W_{5212} \\ W_{5213} \\ W_{5221} \\ W_{5222} \\ W_{5231} \\ W_{5232} \\ W_{5241} \\ W_{5242} \\ M \end{pmatrix}$$

即：

$$f_5 = w_{5111} + w_{5112} + w_{5113} + w_{5121} + w_{5122} + w_{5131} + w_{5132} + w_{5211} + w_{5212} + w_{5213} + w_{5221} + w_{5222} + w_{5231} + w_{5232} + w_{5241} + w_{5242}$$

由于在建立故障树时，直接以最小路集方法构建(当然也可以用最小割集方法构建)，所以故障信息流均以“或”的规律表达，这对计算机程序实现带来了极大方便。

### 3.3 故障概率值计算

在可靠性技术中，产品（设备）的失效（故障）率定义为：工作到 t 时刻尚未失效的产品在该时刻之后的单位时间内发生失效的概率，记为  $\lambda(t)$ 。与绝大多数机电设备一样，SPC-33 电子调速器的失效率曲线呈浴盆状，如图 5-3 所示。

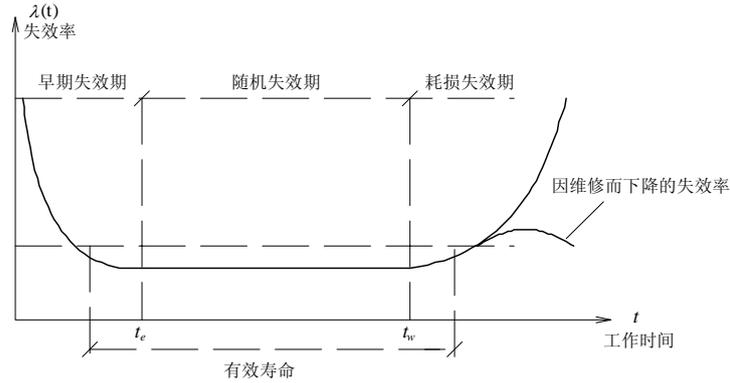


图 5-3 失效率  $\lambda(t)$  曲线 (浴盆曲线)

元器件 (大多为控制阀件) 的失效分布密度服从负指数分布, 即:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (5-9)$$

因此根据可靠性有关定义, 有

$$\text{失效率} \quad \lambda(t) = \lambda \quad (5-10)$$

$$\text{可靠度} \quad R(t) = e^{-\lambda t} \quad (5-11)$$

$$\text{不可靠度} \quad F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (5-12)$$

$$\text{平均无故障时间 (平均寿命)} \quad MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (5-13)$$

设某元器件的第  $i$  个底事件 (失效率) 发生概率为  $\lambda_i$ , 则此事件不发生的概率为:

$$\gamma_i = 1 - \lambda_i \quad (5-14)$$

元器件组件或功能块故障可能由  $k$  个底事件引起, 因而底事件的上一级事件不发生的概率为:

$$\begin{aligned} \gamma &= (1 - \lambda_1)(1 - \lambda_2) \Lambda (1 - \lambda_k) \\ &= \prod_{i=1}^k (1 - \lambda_i) \end{aligned} \quad (5-15)$$

因此, 上一级的故障事件的概率, 即失效率为:

$$\lambda = 1 - \gamma = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - \lambda_i) \quad (5-16)$$

设的  $i$  个顶事件 (系统级故障) 的失效率为  $\lambda_{fi}$ , 它由下一级  $m$  个可能的失效部件所引起, 故有:

$$\lambda_{fi} = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - \lambda_{ujj}) \quad (5-17)$$

式中  $\lambda_{ujj}$  为可能引起第  $i$  个系统级故障的第  $j$  个功能块  $u_j$  的失效率。而  $u_j$  下又有一

级  $n$  个可能失效的部件所引起，故有：

$$\lambda_{uij} = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - \lambda_{vik}) \quad (5-18)$$

以此类推：

$$\lambda_{vik} = 1 - \prod_{l=1}^p (1 - \lambda_{wijkl}) \quad (5-19)$$

式中， $\lambda_{wijkl}$  为最终不可分解的底事件。

有了公式 (5-16) (5-17) (5-18) (5-19)，我们可以计算每个底事件发生故障的失效概率，从而也可计算出顶事件发生故障的概率。

### 4.3 FTA 故障搜索及故障预测

故障树分析方法运用于 SPC-33 电子调速器系统的可靠性分析，可以直观地看出导致顶事件发生的各种路径，从而为避免顶事件的发生找到了各种直接方法，并从最小路集分析中，找出导致顶事件发生的各种路径的重要程度。因此，故障树分析方法为分析电子调速器故障提供了一种有效的方法。同时，基于故障树最小路集的诊断推理，可以有效地缩小故障系统的诊断空间，对于某些系统可进行故障源定位。为了通过 FTA 分析，分析引起 SPC-33 电子调速器故障的原因和失效元器件、评估或预测当前 SPC-33 电子调速器系统的状态，我们需利用已经建立的计算公式进行，对最小路集计算方法进行优化设计。

在最小路集计算方法中，目前比较成熟的方法有：联络矩阵方法和节点遍历方法。联络矩阵方法的缺点是对  $n \times n$  的矩阵，需运行  $n-1$  次乘积运算，占用系统内存、运算量大。我们采用节点遍历方法。

基于最小路集分析的故障分析可根据专家知识，检索出所有导致顶事件故障的发生原因（即各元器件）故障，并根据故障发生的可能性进行排列，从而指导轮机管理人员对故障进行排除。并根据轮机管理人员对故障现场的反馈情况更新专家知识库，从而提高故障分析准确性，其分析流程如图 5-4。每一最小路集导致顶事件故障都可根据公式算出，从而用户可对故障分析设定一个用户值，即最小概率阈值  $f_{MIN}$ 。对所以故障率小于该值的最小路集进行排除。

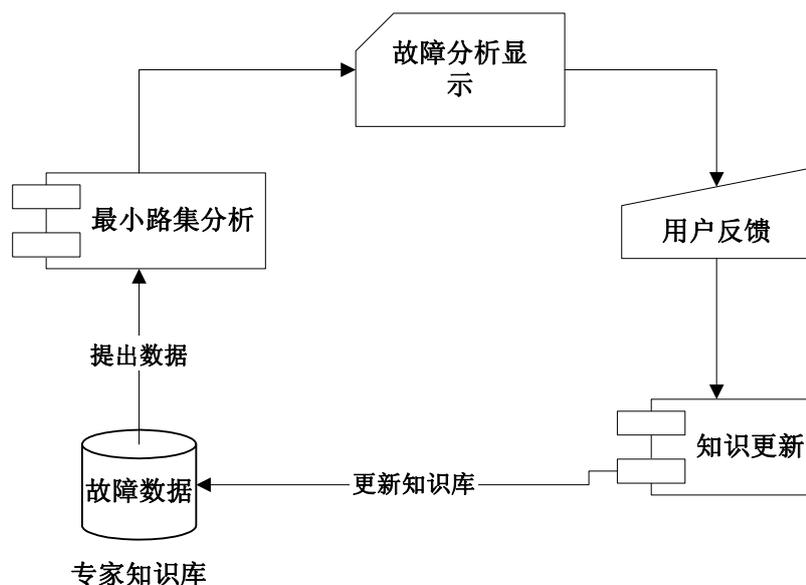


图 5-4 故障分析工作流程

根据设计的计算机程序，FTA 搜索由给定的顶事件，按照各级故障发生的概率的大小，排列出底事件序列，并根据用户设定最小阈值，排除不可能的故障事件，迅速找到某一项事件最可能对应的底事件，显著提高了故障源分析的效率，达到了故障分析的优化目标。

同时，系统可根据用户反馈信息，对故障专家知识库中最小路集分析的参数进行修正，及时更新数据库，使故障分析更加准确。基于专家知识库和最小路集的故障分析信息流如图 5-5 所示。故障分析计算机应用软件界面如图 5-6 所示。

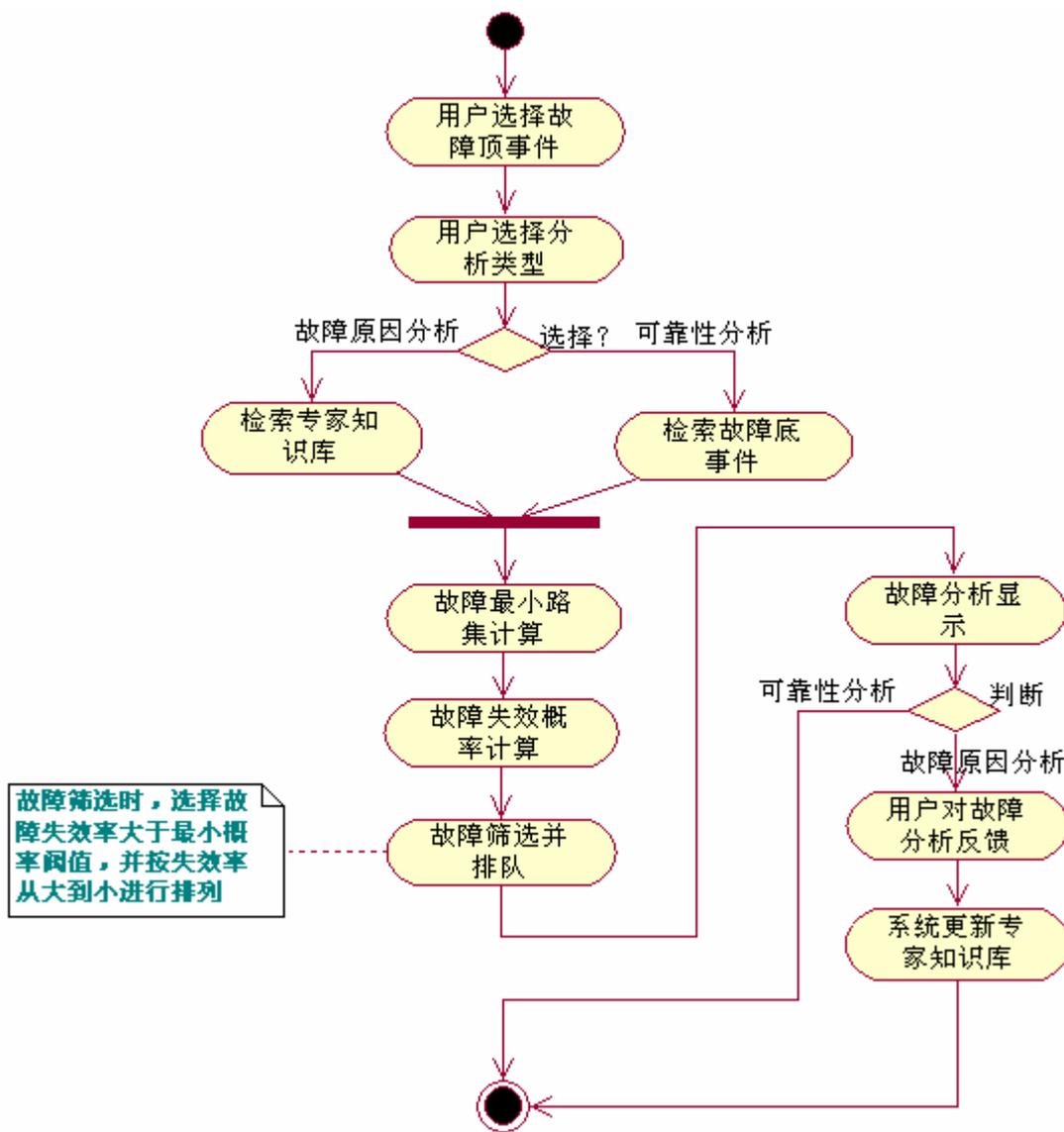


图 5-5 故障分析信息流图

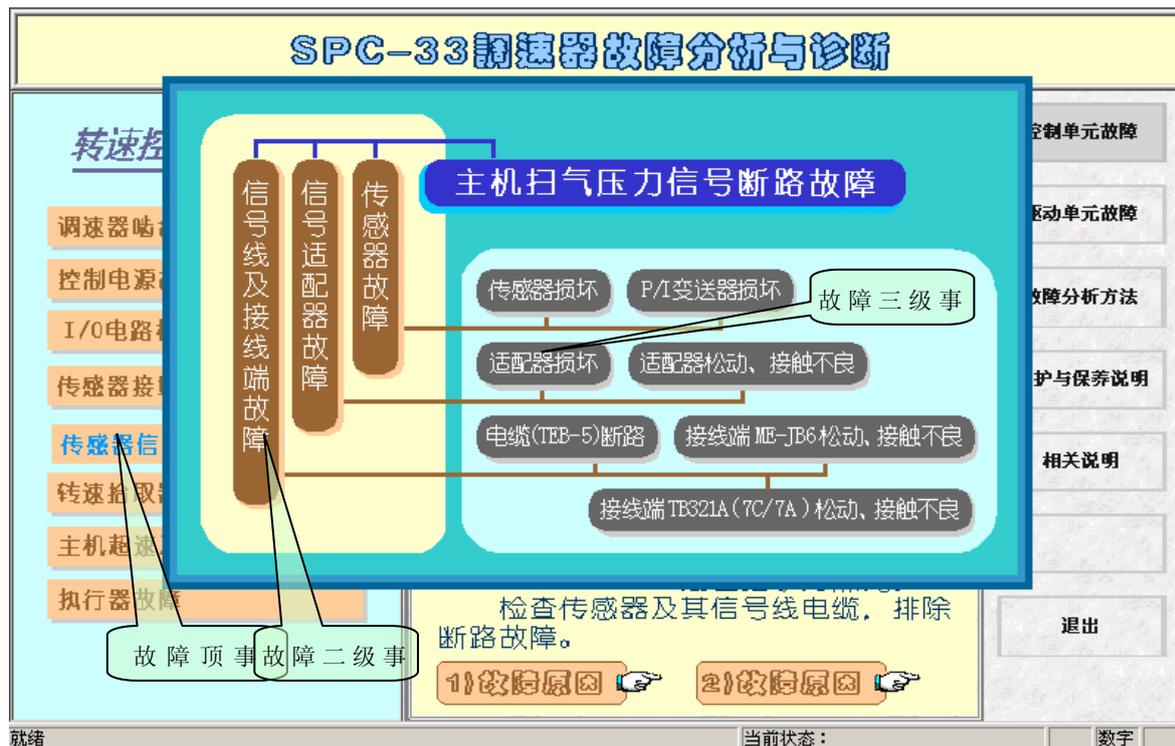


图 5-6 故障分析计算机界面

## 第六章 电子调速器仿真软件系统设计与开发

SPC-33 电子调速器仿真软件是在对 SPC-33 电子调速器和船舶柴油机等设备进行数学建模的基础上，应用计算机仿真技术实现的软件系统。

### 6.1 应用软件研制开发概述

#### 6.1.1 开发方法和过程

软件生命周期 (Software Life Cycle) 法是指从软件的立项开发到软件的最终消亡的全过程控制，软件生命周期经历下列阶段：制度计划、需求分析、软件设计、编码、测试、运行与维护。我们采用新的软件工程开发方法—原型法 (Prototyping)。原型法开发模型的基本思想如下：

- 首先取得基本的需求，迅速构造一个系统原型。
- 运行原型系统，对原型进行评价，提出修改意见。
- 根据新需求，再实现新一轮的系统原型。
- 重复上述步骤，直到实现满意的最终系统。

在原型法中，用户成了程序开发的参与者，从而使用户提出的需求更加明确和具体，使系统的开发能够沿着正确的方向进行，这种开发方法是一种螺旋上升式的开发模式。原型法的工作流程如图 6-1 所示。

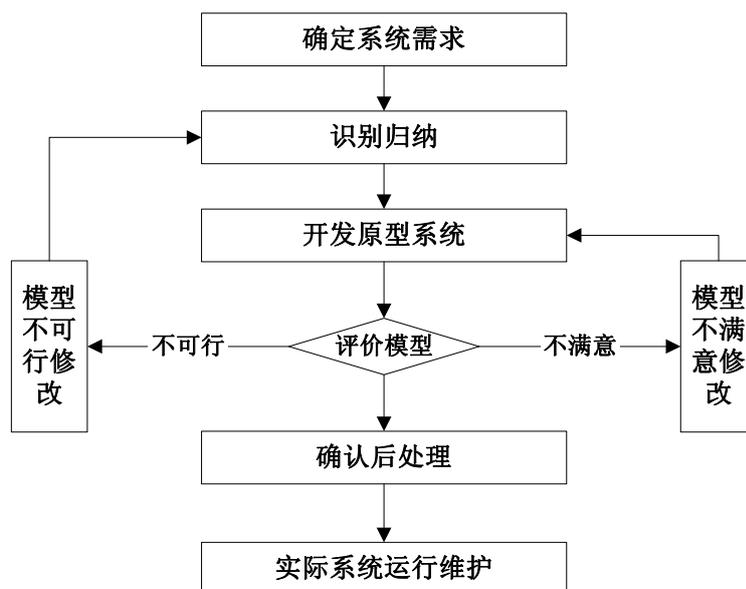


图 6-1 原型法工作流程

### 6.1.2 调速器仿真软件的研制目标

仿真软件是对调速器仿真模型的软件实现，因此，软件不但要实现在第一章中提出的三大功能，更要以软件界面形式进行表达：1) 提供数字调速器的计算机化分类资料，包括装置软硬件构成原理、输入/输出接口、维护要求等。根据船舶轮机管理人员和公司机务人员的交互要求，迅速查找所需的各种信息，并以图形、热点连接等进行表达；2) 建立一个虚拟调速器操作面板，通过与实际调速器一致的操作运行、参数设定等虚拟过程，能够使船舶轮机管理人员和公司机务人员在这个虚拟环境中获得技术培训，迅速熟悉和掌握数字调速器的操作和运行；3) 建立数字调速器的故障信息流，同船舶轮机管理人员和公司机务人员进行信息交互，分析定位调速器软硬件故障以及故障产生原因，推荐维护保养措施和方法；4) 建立以数字调速器为主，调控对象为辅的转速控制系统，并以模拟操作方式同轮机管理人员进行交互，并模拟运行，以仿真界面显示系统运行情况。

### 6.1.3 开发工具简介

#### 1 系统设计语言 UML 及工具 Rational Rose 介绍

UML 是编制软件蓝图的标准化语言，用于对复杂软件系统的各种成分的可视化，说明和构造系统模型，以及建立软件文档。UML 包含了 3 方面的内容：模型的概念和表示法、语言的公共机制、对象约束语言。1) UML 的模型概念和表示法：UML 提供了 3 类基本的标准模型建筑块：事物、联系和图形。事物是一个模型的一级抽象成员，即构成模型的元素。UML 规定了 4 种事物的表示法：结构性事物、行为性事物、成组性事物、注释性事物。其中结构性事物指模型的静态部分，如对象类、Use Case、接口 (Interface)、组件 (Component)、节点(Node)等；行为性事物指模

型的动态部分，如交互、状态机等；组成性事物指模型的组成部分，如包(Package)；注释性事物指模型的解释说明部分，如注释(Note)； 2) UML 语言的公共机制：UML 规定了语言的四种公共机制：说明、装饰、通用划分、扩展机制。UML 规定可以自定义 3 种语言成分：构造型(Stereotype)、标记值(Tagged Value)和约束。UML 规定了许多标准的预定义的构造型、标记值和约束，但是允许自动扩充； 3) UML 的对象约束语言：UML 的对象约束语言(Object Constraint Language, OCL)是一种表达施加于模型元素的约束语言。

Rational Rose 是基于 UML 语言的图形化 OO CASE (Object Oriented) 工具，面向对象的开发设计方法有利于理解和把握用户的需求，建立系统模型，设计出灵活、适应性强的系统构架，最终实现容易维护的软件系统。Rational Rose 集中体现了当代软件开发的先进思想，把面向对象的建模与螺旋上升式的开发过程相结合，支持团队开发，并且综合了其他的开发技术，对软件系统的开发提供了强有力的支持，为运用面向对象的思想和技术、控制系统的复杂性、提高软件开发效率创造了必要的条件。Rational Rose 的主要优点如下：

- ✓ 降低开发风险。
- ✓ 提高软件成分的可用性。
- ✓ 提高系统的弹性。
- ✓ 提高开发进程的灵活性。
- ✓ 降低开发成本。

## 2 系统开发工具 VC++6.0 介绍

Microsoft Visual C++6.0 是微软公司推出的面向对象编程工具集中的一个主要成员(其它有如 VB, VFP, VJ++等)。

VC++是一种面向对象的编程工具，其基本技术是使用对象、类、封装、继承、消息等基本概念进行程序设计和实现。1) 对象：对象(Object)是描述客观事物的一个实体、是构成系统的基本单元，由一组属性和一组服务组成；2) 类：类(Class)是一组具有相同属性和相同操作的对象的集合，类是对象的抽象，包括属性、服务和其他性质，一个具体对象是类的一个实例(Instance)；3) 封装：封装(Encapsulation)是指把对象的属性和操作结合在一起，构成一个独立的对象，内部信息对外界是隐蔽的，只能通过有限的接口与对象发生关系；4) 继承：继承(Inheritance)是指子类可以拥有父类的全部属性与服务。继承具有传递性；5) 消息：消息(Message)指对象之间在交互中所传递的通信信息。面向对象的封装机制使对象各自独立，对象之间通过消息互相联系、协同工作，实现系统的各种服务功能。

MFC (Microsoft Foundation Class Library) 是微软提供的基于面向对象机制的基础类库，用户以 MFC 为基础，可以迅速开发自己的系统。

## 6.2 仿真软件系统结构

仿真软件的系统结构如图 6-1，系统主要分为四大模块：1) 调速器原理说明；2) 操作与参数设定；3) 故障分析与诊断；4) 模拟运行。其中，调速器原理说明分为调速器结构组成、调速器外部联接。

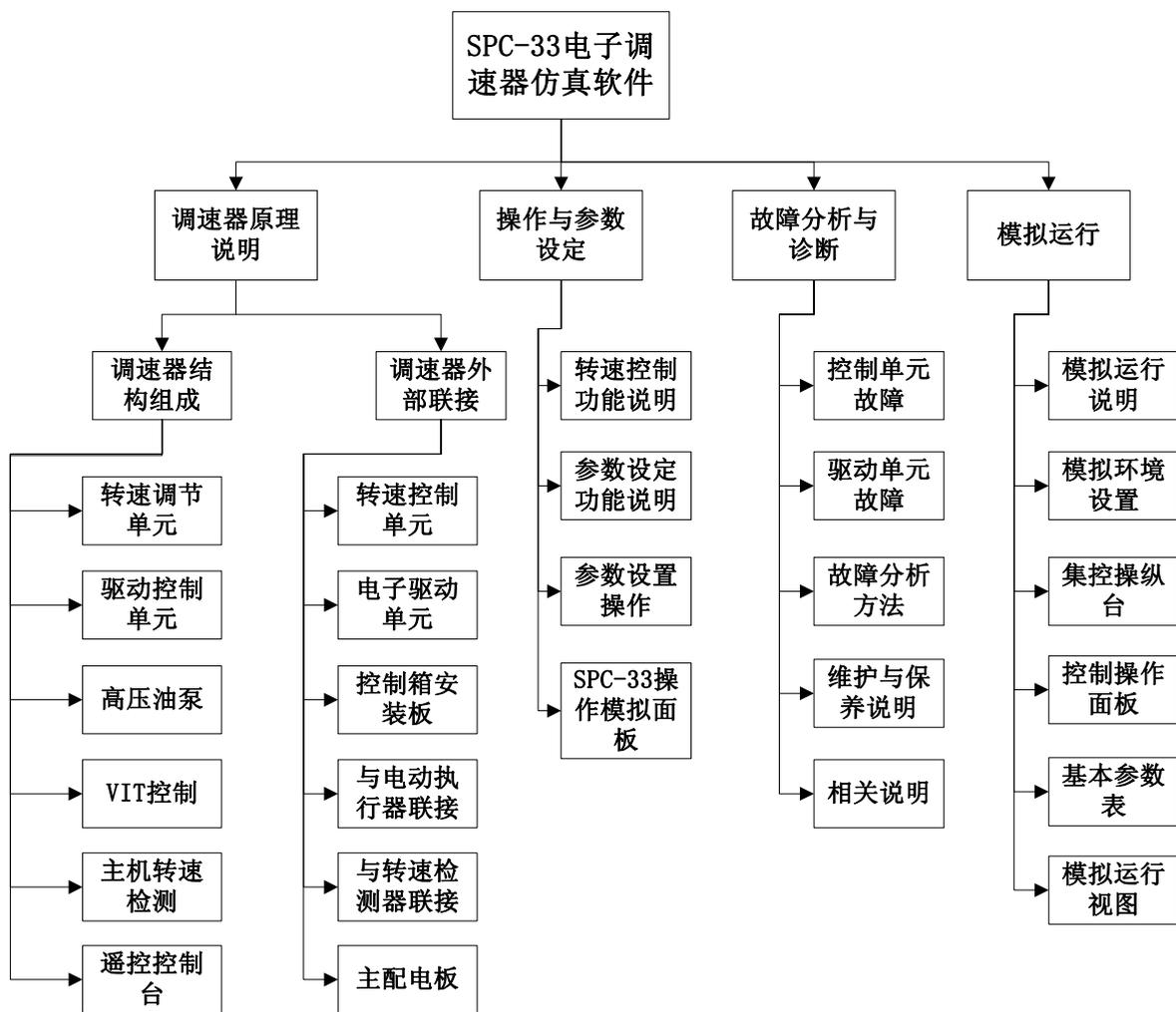


图 6-1 SPC-33 电子调速器仿真软件结构

### 1 调速器原理说明

1.1 调速器结构组成：调速器结构组成是把 SPC-33 电子调速器按功能分为：RCS-33 遥控装置/集控室操纵台/机旁操纵台、转速调节单元、驱动控制单元、电动执行单元、高压油泵、VIT 控制、气缸润滑控制、扫气压力检测、主机转速检测。

这些是一级功能单元，然后再对这些一级功能单元再次按功能分二级单元。如对转速调节单元又分为：工作方式选用、转速限制、供油限制、转速检测、供油补偿等二级功能单元。这样对电子调速器建立多级功能单元，并对每一功能单元建立热点，对功能单元做具体介绍。如介绍功能单元有预置参数，则建立热点，显示具体参数信息。

1.2 调速器外部联接：调速器外部联接即 SPC-33 控制箱外部联接，以 SPC-33 电气原理对控制箱外部联接作分类，主要分为：转速控制单元、电子驱动单元、控制箱安装板、MEG1-MEG10、TEB1-TEB12、主配电板（7MB-24）、监控系统安装板（SAU1-10）、不间断电源箱（UPS-8）。用户按系统设定分类热点即可对调速器外部联接进行查看。

## 2 操作与参数设定

操作与参数设定是以船舶 SIEMENS SPC-33 电子调速器为原型，用软件仿真方法建立同船舶调速器面板相同的用户操作界面，对电子调速器操作进行实际训练，并熟悉电子调速器各项参数及性能。在“操作与参数设定”功能中设立了：转速功能控制说明、参数设定功能说明、参数设置操作三大项目。这三大功能项目都以模拟调速器操作面板为基础。

## 3 故障分析与诊断

故障分析与诊断是根据第四章电子调速器故障诊断为基础，对故障 FTA 分析以计算机程序实现。

## 4 模拟运行

模拟运行是以第三章电子调速器仿真模型和计算机仿真技术为基础，以船舶 SPC-33 电子调速器为仿真重点、喷油泵、柴油机、增压器、螺旋桨等仿真单元为辅，建立对电子调速器模拟运行的软件仿真系统。仿真系统包括：模拟运行说明、模拟环境设置、集控操纵台、控制操纵面板、基本参数表、模拟运行视图。其中模拟运行视图是模拟运行系统的核心部分，负责后台数据处理、前台仿真单元显示；模拟环境设置、控制操纵面板是对模拟运行视图中运行参数的设定；集控操纵台是模拟船舶“驾驶台遥控”、“集控室遥控”、“集控室远操”，对模拟运行视图进行操纵；基本参数表采用 SPC-33 电子调速器控制参数。

模拟运行视图包括整个电子调速仿真单元的后台处理和前台显示，显示部分有：主机运行仿真视图、喷油泵运行仿真视图、各类仪表和计数器。仪表包括：主机转速仪表、增压器转速仪表、润滑油油位表、航速表、舵角指示器；计数器包括：主机转速累计表、指令转速、主机转速、主机负荷、轴功率、轴扭矩、扫气压力等。

### 6.3 软件系统设计

在计算机软件系统的分析与设计中，首先需要准确的描述用户需求中的功能需求，以便进一步确定系统中应该建立那些对象。Use Case 图提供了这样一种方法，所谓 Use Case 图是指系统的外部事物 Actor（活动者）与系统的交互，它表达了系统的功能。Actor（活动者）是用户作用于系统的一个角色（Role）；Use Case（用例）是对系统的用户需求（主要是功能需求）的描述，表达了系统的功能和所提供的服务。

SPC-33 电子调速器仿真软件的仿真部分是模拟操纵面板的操作和电子调速器的仿真运行，在这里我们以电子调速器仿真运行设计为例，分析 SPC-33 电子调速器仿真软件的设计。在面向对象分析（OOA—Object Oriented Analysis）中，注意力着重放在分析问题论域和系统责任，确定问题的解决方案，建立独立与实现的系统模型。在仿真部分的设计中，确定的活动者为模拟操纵用户，与用户相关的活动为用户设置模拟环境、设置操纵方式、模拟操纵；此外，为实现与用户的交互，系统必须完成参数检索、仿真运算、信息反馈等活动，以响应用户操作。用例分析（Use Case 图）如图 6-2。

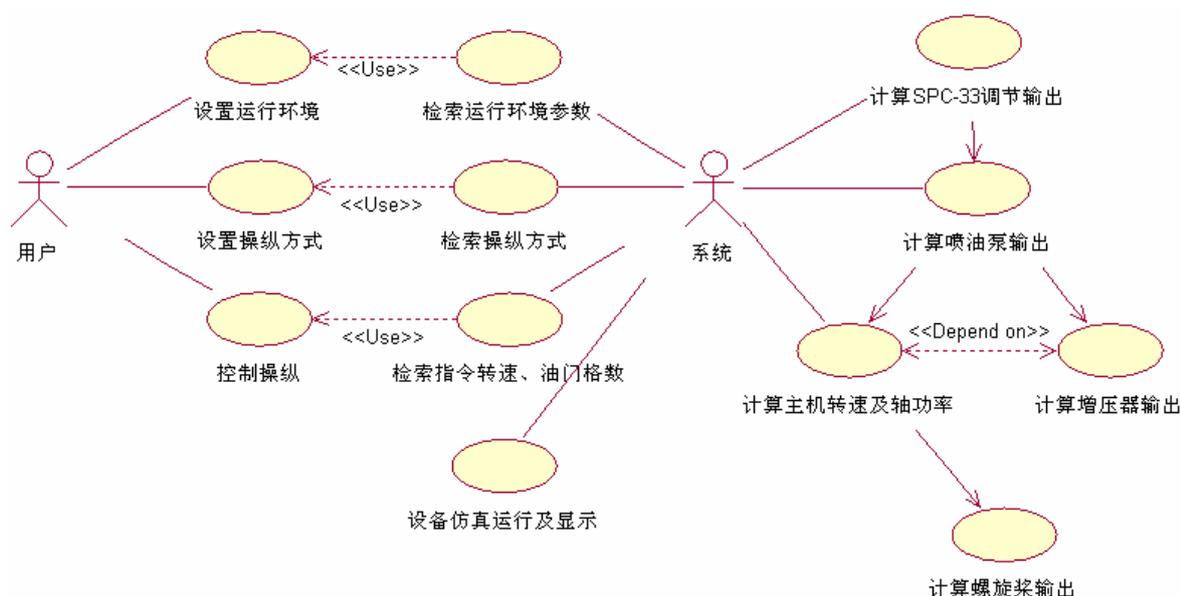


图 6-2 电子调速器仿真运行用例分析

图中，“用户”、“系统”为 Actor 元素，分别代表实际使用的用户和仿真软件本身，其他如“设置运行环境”为 Use Case 元素，是对系统功能的描述。实线代表关联，带箭头虚线代表依赖或例示，带箭头实线代表单方向关联。在仿真运行系统中，用户所需功能是：1) 设置运行环境，如天气、海况、船型、装载情况等；2) 设置

操纵方式，如驾驶台遥控、集控室遥控、集控室远操；3) 控制操纵，如在驾驶台遥控时操作车钟，设置航行速度。系统所要完成的功能是：1) 检索仿真运行模拟环境参数、检索操纵方式、检索指令转速、油门信息、计算仿真运行各项参数、最终以用户视图显示模拟运行情况。

面向对象的分析（OOA）的主要任务是分析问题论域，找出问题解决方案，发现对象、分析对象的内部结构和外部联系，建立软件系统的对象模型。面向对象的设计（OOD—Object Oriented Design）的主要任务是根据已确立的系统对象模型，运用面向对象技术，进行系统软件的设计。完成用例分析后，即完成了 OOA，接下来就是运用 OOD 方法建立软件设计，即要解决系统“怎么做”的问题，也要从软件实现的角度出发，修改、细化、完善系统的分析模型。SPC-33 电子调速器仿真软件设计的系统设计如图 6-3。

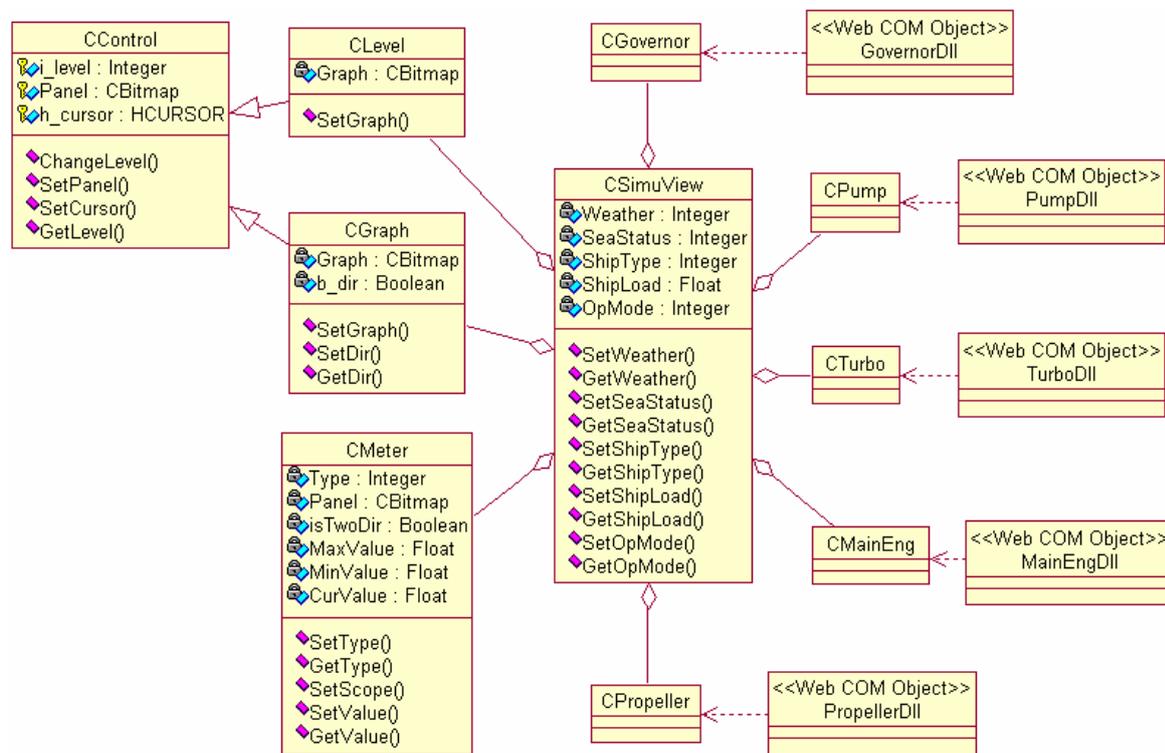


图 6-3 SPC-33 电子调速器仿真软件设计系统设计

根据图 6-2 所示的仿真运行系统设计的对象（Object），我们对系统设计了如图 6-3 所示的类（Class），包括 CSimuView（仿真视图），CLevel（油门），CGraph（车钟），CMeter（计数仪表），CGovernor（SPC-33 电子调速器），CPump（高压油泵），CTurbo（增压器），CMainEng（主机），CPropeller（螺旋桨），\*\*\*Dll（Windows 动态链接库）。其中，带空心箭头实线代表泛化，带菱形的实线代表聚合。由图我们可看出，仿真视图由各仿真模块的类对象组成，仿真视图是一个容器，负责管理各相关对象的配合仿真运行，由 CGraph 类对象负责具体参数的人机接口，由 CGovernor

等类负责具体仿真参数计算，并由 `CMeter` 等类对象负责参数显示。而 `CGovernor` 类对象的实际数学模型计算交由 `GovernorDll` Windows 动态链接库具体负责计算，把 `View`（视图）和 `Model`（模型）分开。这样做的好处就是系统维护和升级方便，若以后数学模型有所改变，只需更新 Windows 动态链接库文件即可，不需对系统进行更改。

## 6.4 仿真软件系统开发

仿真软件系统开发是以计算机语言实现电子调速器的数学计算模型和系统结构设计。在开发阶段，注重的是用面向对象的编程方法实现用 OOD 方法建立的类、类间继承、数据封装、类对象间消息的传递、以及用户界面的设计。同样，我们以电子调速器仿真运行为例，说明仿真系统开发大概。如图 6-3 所示，对于仿真运行模块，我们设计了基础类、容器类、仿真计算类（Windows 动态链接库）。基础类是程序运行的最小单元，如螺旋桨类、喷油泵类，这些类是相对独立的类，通过类接口实现数据的输入输出。容器类是建立在基础类之上的扩展类，对基础类建立成员变量，从而使基础类成为容器的内置对象。容器通过成员函数及发送消息协调内置对象的运行。

为了使仿真协调运行，容器必须管理内置对象，并负责对象间信息传递，另外，各对象的模拟仿真运算是相当复杂的，需消耗大量系统资源，如何处理这两个问题是系统实现的关键。为此，我们采用 VC++60 下面面向对象开发系统的消息传递机制和动态链接库机制来解决这些问题。“消息传递”即一旦对象完成某种任务，便以广播形式发送 Windows 消息，在消息传送过程中，有处理该消息能力的对象捕获该消息，并触发该对象的处理事件，这样，通过消息传递机制，解决了对象之间的通信问题。“动态链接库”是在系统运行期间被连接进来的，由 Windows 自动完成，而且，所有使用动态链接库的同时运行的线程共用一个连接库备份，提高系统资源的使用率和系统的整体性能。并且，把仿真计算程序放在动态链接库中，有利于系统程序的简化与便于系统更新维护。

VC++60 系统本身有许多已定义消息，用户自定义消息从 `WM_USER` 开始。为了各对象之间通信，例如，我们定义 `UWM_CHANGESPEED` 为用户改变指令转速，容器发送的消息，具体定义：

```
#Define UWM_CHANGESPEED (WM_USER + 104)
```

那么，在需要对该消息处理的对象中，建立处理事件，并编写程序。这样，容器只

要发送一条消息，就可触发若干对象自动进行处理，而不用在容器中写若干条调用子程序的命令，大大简化了程序，并提高了系统的效率。消息处理对象需在类对象头文件中加入：

```
Afx_msg LRESULT OnChangeSpeed (WPARAM wParam, LPARAM lParam);
```

并在实现文件中编写消息处理映射及处理代码：

```
ON_MESSAGE(UWM_CHANGESPEED, OnChangeSpeed)
```

```
LRESULT CSimuDlg::OnChangeSpeed(WPARAM wParam, LPARAM lParam)
```

```
{
```

```
    //处理事件函数、代码；
```

```
}
```

在实现仿真基础对象的模拟计算时，由于采用了动态链接库，将大量计算代码移植到动态链接库中，简化了基础类的程序编写。在动态链接库的入口函数中声明函数计算所需的参数变量，并返回计算值；在基础类中调用动态链接库函数计算数据时，需在实现文件中声明链接库中计算函数为外部函数：

```
extern float compute_n(float y, float n, float nset);
```

并在项目属性 Link 标签页中设置“Object/Library modules”属性，将所用到的动态链接库进行说明，如图 6-4 所示。

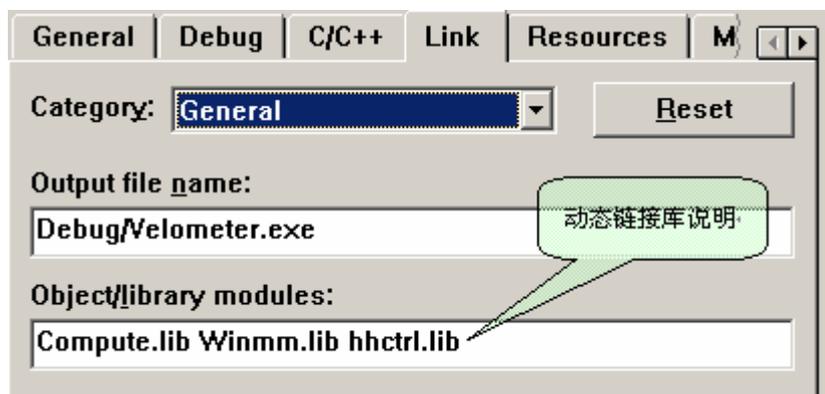


图 6-4 动态链接库说明

在实现 SPC-33 电子调速器模拟面板操纵、故障分析与诊断、模拟运行功能模块时，需实现故障数据和模拟数据的持久性，我们采用数据库形式保存运行数据，并在运行时调用并更新数据。用 ODBC 方式调用数据，保证系统平台通用性。数据持久性实现如图 6-5。

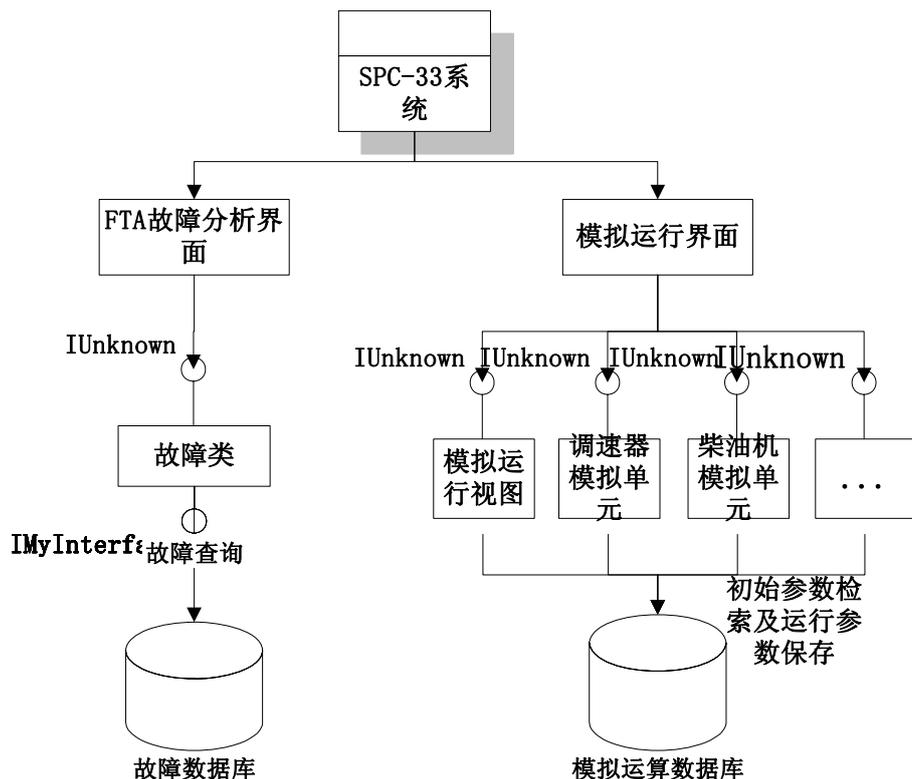


图 6-5 参数持久性实现

用户界面的设计采用 Windows 标准，界面干净整洁。模拟运行界面布置参见图 6-6 所示。

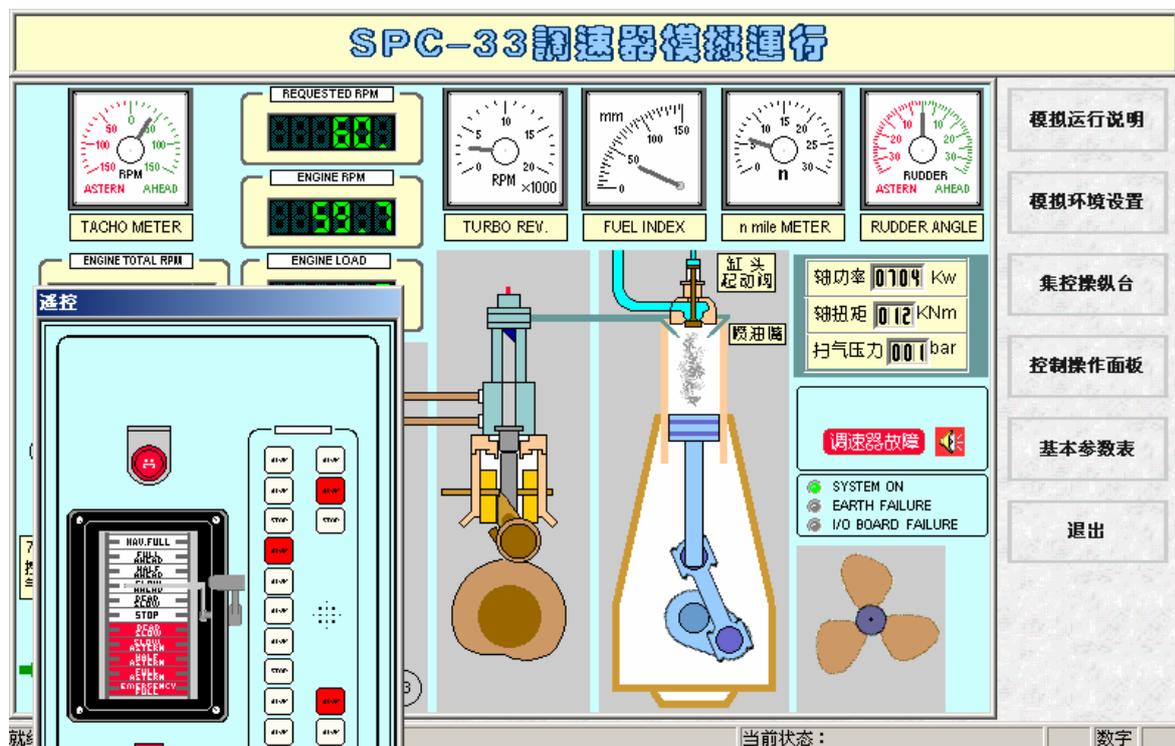


图 6-6 模拟运行界面

## 结 论

船舶柴油机电子调速器仿真与故障信息流分析系统的开发对于轮机管理人员操作、使用和维护船舶电子调速器具有较大的实用价值，本文在了解国内外船舶柴油机电子调速器技术的最新发展和计算机仿真技术的基础上，对这一领域进行了探索，在科研项目实施过程中，对中远、中海使用电子调速器的船舶进行了调研，并与 SEIMENS 公司进行了交流，获得了大量的电子调速器控制理论和故障诊断方面的资料。在这基础上，设计和开发了以计算机仿真和故障信息分析为核心的系统仿真软件。本工作的结论如下：

1. 仿真系统的设计在于有效、实用、满足仿真需求，因而在本课题系统设计上，重点放在 SPC-33 电子调速器的转速控制仿真上，而对柴油机等运行过程相当复杂的动力装置采用了比较简单的简化模型。即考虑了仿真的精度，又兼顾了仿真运算的速度。仿真运行数据同船舶实际运行数据基本符合。

2. 软件设计开发采用了当今流行的开发模式，设计、开发、实现均采用面向对象的方法进行。在软件的具体实现上，采用 Windows 编程的突出优点：消息和动态链接库技术，使软件结构更为紧凑、软件运行效率大为提高。

3. 运用 FTA（故障树分析）对 SPC-33 电子调速器进行故障信息流分析和故障诊断是切实可行的。故障诊断对顶事件的分析能够帮助轮机人员查找故障原因；故障分析能够帮助轮机人员对 SPC-33 电子调速器进行合理维护。

4. 对电子调速器建立的仿真模型，在各运行阶段对 PI 控制增益进行分段计算，符合实际情况，但控制精度、速度还存在不足，有待改进。在故障诊断进行的 FTA 分析中，原始数据的积累是相当重要的，本次研究所采集故障数据还有待继续扩展。

本课题研究成果已实际运用于中远集团所属的十多艘船舶上，取得了一定的经济效益与社会效益，并得到了用户的认可，正准备推广到更多的船舶上使用，并被中远所属的船员培训单位选作为船员知识更新内容。

## 参考文献

- [1] 郑士君, 褚建新. 电子调速器立项报告. 2001
- [2] 郑士君, 褚建新. 电子调速器技术开发方案. 2001
- [3] 钱耀南. 船舶柴油机. 1999 大连海事大学出版社 175~190
- [4] 沈爱第. 中速柴油机电子调速器. 航海技术
- [5] SIMOS Electronic Governor for MAN B&W Operator Guide.1998.6
- [6] SIMOS Electronic Governor Commissioning Manual for MAN B&W Engine. 1999.9
- [7] SIMOS Electronic Governor SPC-33 Test Report for MAN B&W. 1999.9
- [8] 王红卫. 建模与仿真. 科学出版社, 2002
- [9] 刘藻珍, 魏华梁. 系统仿真. 北京理工大学出版社, 1998
- [10] 杨胜国, 朱梅林, 陈来坤. 改善柴油机电子调速器性能的仿真研究. 华中科技大学学报. 第 29 卷. 第 10 期
- [11] 翁史烈. 船舶动力装置仿真技术. 上海交通大学出版社, 1991
- [12] 吴恒, 王家绂. 船舶动力装置技术管理. 大连海事大学出版社, 1999
- [13] 张伯鹏. 控制工程基础. 机械工业出版社
- [14] 韩曾晋. 自适应控制. 清华大学出版社
- [15] 向阳. 船舶主机遥控系统原理仿真与故障信息流分析. 海运学院硕士论文, 2000
- [16] 韩成敏. 主机遥控气动系统电子控制 VIT 原理(VIT--可变喷油定时)
- [17] K. J. 奥斯特隆姆, B. 威顿马克. 自适应控制. 1992
- [18] 朱访君, 吴坚. 内燃机工作过程数值计算及其优化. 国防工业出版社 1997
- [19] 高孝洪. 内燃机工作过程数值计算. 国防工业出版社, 1986.
- [20] 顾宏中. 涡轮增压柴油机热力过程模拟计算. 上海交通大学出版社, 1985.
- [21] 刘颖. 柴油机原理. 机械工业出版社
- [22] 彭水生, 吴恒, 孙建波. 船舶柴油机动态建模与仿真. 大连海事大学出版社, 1999. 18~24
- [23] 陈华清, 敖晨和. 舰船推进系统仿真中的柴油机数学模型. 船舶工

- 程, 2000, 第 5 期: 33~37
- [24] 陆平, 王之秋, 张志华. 柴油机数字式调速器调速精度研究. 内燃机工程, 1991, 第 2 期第 12 卷: 40~46
- [25] 陆平, 张志华, 张滨阿. 柴油机电子调速系统的变增益非线性问题研究. 内燃机工程, 1992, 第 1 期的 13 卷: 65~69
- [26] 吴巍, 韩宝琦, 孙庆丰. 6110Z 增压柴油机工作过程的模拟计算. 吉林林学院学报, 1999, 第 15 卷, 第 2 期
- [27] 李伟华, 冯学东. 柴油机调速系统动态调节过程的模拟计算与研究. 小型内燃机, 1999, 第 28 期, 第 2 卷: 37~40
- [28] 龚金科, 刘孟祥, 刘湘玲. 柴油机工作过程数学模拟. 移动电源与车辆, 2002, 第 2 期: 11~13
- [29] 罗福强, 邹长征, 刘胜吉. 柴油机换气过程缸内压力模拟计算. 小型内燃机, 1999, 第 28 卷, 第 2 期: 27~31
- [30] 王国锋, 贾欣乐. 柴油机数学模型及最优调整软件. 大连海运学院学报, 1991, 第 17 卷第 4 期: 371~377
- [31] 武继阳, 郑士君. NABCO MG-800 数字调速器故障分析. 机电设备 2001.6
- [32] 吴今培, 肖建华. 智能故障诊断与专家系统. 科学出版社
- [33] 周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制. 清华大学出版社
- [34] 黄国强, 叶维章. 柴油机电子调速器可靠性设计. 船舶工程, 1998, 第 1 期
- [35] 肖田元, 张燕云. 系统仿真导论. 清华大学出版社
- [36] 官章全, 刘加明. Visual C++6.0 类库大全. 电子工业出版社
- [37] 齐舒. Visual C++ 6.0 开发技巧及实例剖析. 清华大学出版社, 1999
- [38] 陈坚, 陈涛, 孙志月. 实用 Visual C++编程大全. 西安电子科技大学出版社, 2000: 191~222
- [39] 陈宗海, 蔡松林. 电子调速器的仿真系统. 工业仪表与自动化装置 1997.1
- [40] GUZZELLA L, AMSTUTZ A. Control of diesel engines[J]. IEEE Control Syst Mag, 1998, 18(5):53-71
- [41] 杨治平. 柴油机电子调速器微机控制系统设计. 四川轻化工学院学报 Vol.9 No.4
- [42] 王新全. NORCON DGS-8800e 电子调速器在远洋船舶上的应用. 航海

技术 2002.2

[43] 宋金阳. 柴油机电子调速器配机性能模拟试验方法的研究. 海军工程大学, 1998

[44] Kawakam I S, Hayashi H. Electronic Governor. Journal of Marine Engineering Society in Japan, 1992, 27(6):46—53

[45] Mike Brezonick. Intelligent Systems for Gen-Sets. DIESEL PROGRESS Engines&Drives, 1995, (8):64—66

[46] 赵国光. 船舶动力装置自动化. 上海交通大学出版社, 1993. 238~266

[47] Yang Jun, Cheng Jiabin. Applying Software Performance Engineering Method to Deployment of Interactive Software. Journal of Software, 2002, Vol. 13, No. 10

[48] 杨正甫. 面向对象分析与设计. 中国铁道出版社, 2001

[49] 刘润东. UML 对象设计与编程. 北京希望电子出版社, 2001

[50] 张龙祥. UML 与系统分析设计. 人民邮电出版社, 2001