

# 上海海运学院

硕士学位论文

## 船舶主机遥控装置仿真 及故障诊断智能系统研发

专    业： 交通运输工程

研究方向： 现代船舶管理

研 究 生： 韩成敏

导    师： 郑士君

企业导师： 吴树雄

二〇〇三年三月

## 摘 要

本文结合中国远洋运输（集团）总公司科研项目《船舶主机遥控装置故障诊断及计算机辅助分析系统》，以中远集装箱运输有限公司主要集装箱船舶的 MAN B&W 主机遥控系统气动装置为研究对象，进行计算机原理仿真及故障诊断。

论文第二章主要是根据具体机型的 MAN B&W 气动装置，详细分析气动装置结构组成，以及各功能块的工作原理，充分描述系统中的元器件（主要是阀件）逻辑动作流程。为以后各章的论述提供实际参考对象。

论文第三章是在第二章的基础上对 MAN B&W 气动装置进行功能分解，对备车、停车、换向和起动控制逻辑规律建立相应的数学模型。最后从系统化角度，将分段功能的逻辑表达式规范成便于计算处理的矩阵表达形式。

论文第四章主要以可靠性理论的故障树分析（FTA）和故障效应分析（FEA）对 MAN B&W 气动装置建立相应的 FTA 模型和 FEA 模型，并通过关联矩阵将二者联系起来。

论文第五章提出将设备可靠性维修思想应用于 MAN B&W 气动装置的维修保养。通过概率方法，建立气动装置的状态评估模型，为气动装置的可靠性维修保养提供定量化依据。同时，可运用这种方法，对 FTA 的故障诊断进行优化分析。

论文第六章主要阐述了本课题计算机应用程序的研制开发框架结构。应用程序设计与开发着重体现理论与实际需求的有机结合。主程序为多文档多窗口界面，所建立的主窗口为：主机遥控气动装置基本数据库窗口；原理图分析和说明窗口；气动装置原理动态仿真窗口；气动装置 FTA 窗口和 FEA 窗口。由于 WINDOWS 支持多线程操作，因此这些窗口可以同时工作而互不影响。

本论文所论述的船舶主机遥控系统气动装置原理仿真与故障信息流分析，并由此而设计开发的计算机应用软件，已安装在中远集运 30 多艘集装箱船舶上。因其界面友好，图形逼真，仿真效果直观明了，资料丰富，操作方便，实用性强，而深受轮机管理人员欢迎。特别是主机遥控气动装置的故障分析（FTA 与 FEA）能够帮助轮机管

理人员及公司机务人员对其所发生的故障现象进行分析和评估，搜索出导致系统失效的故障源，指出故障源所在的物理位置，提供修复方法。

**关键词：** 主机遥控，计算机仿真，故障树分析，故障效应分析

### **Abstract**

In this article, based on the research project "Fault Diagnosis and Aided Analysis of Marine M/E remote control device for Computer-Based System", the principle emulating and fault-analysis of MAN B&W M/E remote control system in huge container vessels in COSCON are made.

The second chapter of this article is based on certain model of MAN B&W pneumatic execution units that analyses the construction and the work principle of all units particularly. The logic gas loop of all components (mainly in valve) is fully described. It becomes the reference object in the latter of this paper.

According the second chapter, the third chapter decompose the MAN B&W pneumatic execution units in prepare, start, stop and invert logic control, and builds corresponding mathematic model. And lastly, from the point of systematization, establishes the logic matrix criterion that can easily to be computed.

In the fourth chapter, the author sets up the FTA model and FEA model of MAN B&W pneumatic execution units grounding on the FTA and FEA theory. And links up the two matrix by associated matrix.

In the fifth chapter, the author applies the reliability maintenance theory to the MAN B&W pneumatic execution units. By probability method, this paper established a model of status evaluating, which can provide ration level bases for the pneumatic execution units. And by this method, the optimized analysis of FTA fault diagnose can be made.

The sixth chapter is mainly about the architecture of the computer application of the project. The application emphasizes on the combination of theory and real demand. The main application is a multiple document interface, divided into four parts, base information browse windows, windows of gas loop for logic control specific, windows of the dynamic effect of principle emulation and its dynamic synchronous processing, FTA & FEA analysis windows of pneumatic execution units. All these windows can run synchronously for the multiple thread support techniques of Windows OS.

The computer application, which was developed from the Ship M/E remote control system pneumatic execution units principle emulation and fault information flow analysis has been deployed on more than 30 vessels of COSCON. It is welcomed because of the friendly interface, vivid images, directed effect, rich of data, operate easily and the ability of problem solving. Especially the FTA & FEA of ME pneumatic execution units can help the ship engineers analysis and evaluate

the fault, find the source of the fault and point out the fault position and precaution maintenance as well.

KeyWords: M/E remote control, computer-based Simulation, Fault Tree Analysis, Fault Effect Analysis

## **Abstract**

Based on the research project "Safety & Technique Management System" of ship management company of COSCON and characters of developing and deploying MIS (manage information system) in both at home and abroad, the author expands on the blue print and techniques of ship management software system of shipping lines that is fit for our country's shipping lines which integrates the specialty of developing and deploying of informationization software in home and foreign. And makes an exploration of the project management of the informationization of shipping lines.

Chapter one of this thesis, explains the necessity and importance of developing the manage system, in terms of the current ship manage model, manage measurement having restriction on the improvement of ship manage level, on the basis of integrating shipping lines' MIS in both at home and abroad.

Chapter two conducts a detailed study on the demand of structure, manage model and the setting and specialization of MIS's function module, and builds a foundation for developing a ship management MIS that suits our country's lines.

In the essence, MIS is a sequential combination of useful operation information that is presetting at the system demand. Chapter three tries to analyses work flow of "safety & technique management system", and taking ship equipment management as example, describing the structure of function modules and operation flow of the system after establishes the information flow.

Gives an example of subsystem of equipment management, chapter four introduces the object oriented modeling method in ship manage system, and using the modeling language UML (unified Modeling Language) and UML based visual design tool Ration Rose, to understand the requirement of the customers, the thesis establishes a system model, designs a agile and suitable system architecture and work flow, thus provides the technique support for the successful system.

On the principle of practical and high return, chapter five puts forward the scheme of the informationization. The thesis also brings forward the hardware, software, implementation, data safety scenario to meet the demand of the current resource and requirement of COSCON, and makes a detailed discussion on the scenarios.

Lastly, taking as reference the practice of developing MIS and software

development process control and ISO quality system, the thesis proposes the whole steps and means of process control of the system. The thesis discusses the problems facing in the process of ship manage informationization, and puts forward the strategy of combining ship management informationization with the reforming, reorganizing and enhancement of shipping lines, with the strengthening of skeleton management, with the introduction of developed management conception of both domestic and foreign, with fostering comprehensive talent.

**KeyWords:** ship management, informationization, manage model, system model, project management

# 目 录

第一章 绪 论 .....	1
1.1 主机遥控系统的发展 .....	1
1.2 主机遥控系统计算机模拟仿真 .....	3
1.2.1 实现主机遥控系统原理仿真 .....	3
1.2.2 实现主机遥控系统故障诊断与分析 .....	4
1.3 本课题的主要研究内容和任务 .....	5
1.3.1 主要研究内容 .....	5
1.3.2 课题的实用价值与达到的水平 .....	6
第二章 主机遥控气动装置原理分析 .....	8
2.1 主机遥控系统结构组成 .....	8
2.2 MAN B&W 气动控制装置结构组成 .....	9
2.3 备车工况 .....	11
2.4 停车工况 .....	12
2.5 换向工况 .....	13
2.6 起动工况 .....	14
2.7 供油调速工况 .....	16
第三章 主机遥控气动装置控制原理模型 .....	17
3.1 功能块分解 .....	17
3.2 备车就绪逻辑 .....	20
3.3 停车逻辑 .....	21
3.4 换向逻辑 .....	22
3.5 起动工况 .....	22
3.6 模型的系统化 .....	23
第四章 主机遥控气动装置故障诊断模型 .....	25
4.1 FTA 描述 .....	25
4.2 MAN B&W 气动装置的 FTA 模型 .....	27
4.2.1 FTA 构造 .....	27
4.2.2 FTA 矩阵模型 .....	29
4.3 FEA 描述 .....	32
4.4 MAN B&W 气动装置的 FEA 模型 .....	32

4.4.1	FEA 构造.....	32
4.4.2	FEA 矩阵模型.....	34
第五章	主机遥控气动装置状态评估模型 .....	36
5.1	主机遥控气动装置的维修方式.....	36
5.1.1	预防性维修.....	37
5.1.2	事后维修.....	37
5.1.3	以可靠性为中心的综合维修.....	37
5.2	失效与失效分布.....	39
5.3	以最大概率分布描述的气动装置状态评估模型.....	40
5.3.1	元器件故障底事件及其失效率计算.....	41
5.3.2	系统各级故障事件发生概率及各级不可靠度计算.....	42
5.4	实例.....	44
第六章	应用程序开发研制 .....	45
6.1	应用程序结构.....	45
6.2	基本数据库窗口.....	47
6.3	原理图分析和说明窗口.....	48
6.3.1	热点链接.....	48
6.3.2	热点调用.....	48
6.4	气动装置的原理仿真窗口.....	50
6.4.1	动态仿真框架结构.....	50
6.4.2	仿真图形界面.....	51
6.5	气动装置的故障诊断 FTA 窗口.....	52
6.6	气动装置的故障诊断 FEA 窗口.....	53
结束语	.....	54
致谢	.....	55
参考文献	.....	57

# 第一章 绪 论

## 1.1 主机遥控系统的发展

在船舶集控室或驾驶台通过自动控制设备操纵主机的系统称为主机遥控系统。主机遥控系统是机舱自动化系统的一个重要组成部分，是现代船舶不可缺少的设备之一。

主机遥控系统的形成和发展是和机电控制技术的发展密切相关的。五十年代开始从不完善的机械式远距离操纵起步，到了六十年代初期，已经出现了集控室或驾驶室主机遥控；与此同时，机舱内各主要设备的自动化程度也有进一步提高，例如船舶电站自动化、辅机动力设备的自动切换，出现了性能良好的机舱故障报警系统等等。到了六十年代中期，各船级社纷纷提出机舱无人值班的技术规范，这对机舱自动化技术的不断发展起了很好的推动作用。

七十年代，一些技术领先的国家开始致力于微机在主机遥控方面的应用，并在八十年代使其日趋完善。主机遥控技术的进一步发展，不仅在功能方面表现为更符合无人机舱以及最佳运行的要求，而且还出现遥控系统主要组件的标准化设计。

九十年代中期，网络结构的分布式计算机控制系统已成功地应用于主机遥控，这就是说，随着电子技术、数字处理和微机技术的广泛应用，已使主机遥控在可靠、安全、经济、操作方便等综合指标方面日趋完善。

以上所述的主机遥控系统的发展，从其采用的技术手段看，可以归纳为以下四种类型<sup>[1]</sup>：

1) 气动遥控系统。这类系统把对主机的起动、换向、停车等逻辑控制与执行机构视为一体，通常是主机厂商随主机一同提供给用户（如早期的 MAN 主机）。由于控制源是气源，管路损耗较大，因此一般仅提供机旁（应急）和机舱集控室控制。

2) 气动-液压遥控系统。这类系统把对主机的起动、换向、停车等逻辑控制以气

动控制，而对执行机构则以液压控制，通常也是由主机厂商随主机一同提供给用户（如早期的 SULZER 主机）。由于同样的原因，管路损耗较大，因此一般仅提供机旁（应急）和机舱集控室控制。

3) 电动-气动（液压）遥控系统。这类系统是在上述 1) 和 2) 的基础上增加了电动控制单元，这样可使遥控的距离大大加长。近距离遥控（机旁控制、集控室控制）以气动为主，而驾驶台遥控则通过电动控制。

4) 计算机-电动-气动（液压）遥控系统。这类系统是在 1)、2) 或 3) 的基础上增加了微计算机控制单元，它使主机遥控系统的功能和性能大为增强。除了常规的起动、换向、停车等逻辑控制外，主机的调速控制，安全保护等重要功能均由计算机控制实现，自动化程度大大提高。

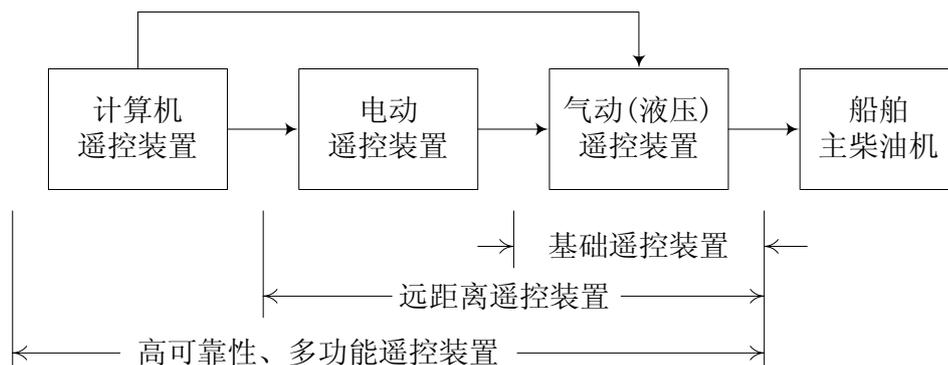


图 1-1 主机遥控系统发展示意图

为了适应日趋激烈的国际航运竞争、运输船舶日益朝大型化、集装箱化、班轮化方向发展。如中国远洋运输（集团）总公司(简称：中远集团)的集装箱船舶近十年来也由 1600 箱 / 船，2800 箱 / 船，3800 箱 / 船再发展到 5400 箱 / 船，主机马力不断攀升。对船舶的航行速度，对主机运行的稳定性与可靠性提出了更高的要求，而这样的大型船舶绝大多数均采用了上述 4) 先进的、高度自动化的主机遥控装置。保证主机遥控装置安全可靠地工作，是船舶运行管理中一项重要任务。

## 1.2 主机遥控系统计算机模拟仿真

中远集团下属中远集装箱运输有限公司(简称中远集运)现有各类集装箱船舶 110 多艘,总箱位逾 23 万标准箱;其中 13 艘 5446 标准箱位超巴拿马型全集装箱船是当今世界最先进的船舶。主机遥控系统型号各异,但从气动(液压)控制的基础装置看,分为二类:一类是以 MAN B&W 机型为代表的气动控制装置;另一类是以 SULZER 机型为代表的气动(液压)控制装置。前者占了 80%。所有的气动(液压)基础装置的前级,均带有电动遥控单元(七、八十年代),约占 30%;或计算机遥控单元(九十年代),约占 70%,此比例随着船舶的更新正在逐年增加。

主机遥控系统作为一种重要机电设备,中远集运早已将其纳入到 CWBT(船舶维修保养体系)中。但是,由于主机遥控装置的自动化程度较高,因各种故障而造成船舶主机不能正常运行,降低主机运行质量;因故障源不能及时识别和排除,造成故障蔓延或系统瘫痪,导致自动化船舶只能手动操作。这些都影响船舶的航行安全,也增加了公司机务管理难度。

### 1.2.1 实现主机遥控系统原理仿真

正是主机遥控系统对主机控制的重要性,船舶轮机管理人员迫切希望能有一种仿真系统,借助于计算机技术,实用而又直观地模拟具体机型的主机遥控系统的工作原理,即对主机遥控系统进行原理仿真。通过这种模拟仿真<sup>[2]</sup>:

- 1) 能使轮机人员正确掌握具体机型主机遥控系统的工作原理、操作过程、参数设定、维护保养要求等。
- 2) 对具体机型主机遥控装置进行各种运行工况动态演示,可大大缩短轮机管理人员对具体机型遥控装置的摸索适应期。

理论上,主机遥控系统的仿真,应包括在轮机模拟器中。中远集运公司下属船员培训中心已经装备有轮机模拟器。但是轮机模拟器不能够对实际机型的主机遥控系统进行原理仿真。这是因为轮机模拟器要满足一定的普适性,它不会也不可能对各种实际机型的主机遥控系统进行原理仿真。鉴于此,独立开发主机遥控系统的计算机仿真

软件，就显得十分必要。

主机遥控系统的原理仿真也不同于轮机模拟器。后者作为对高级船员的培训，它必须把实物模拟和原理模拟有机结合起来，投资大、要求高。而前者集中于对一个具体的装置，由于范围小，故可以深入细化，界面可以做得生动活泼，而且对计算机配置要求不高，可以安装在同一机型的各条船舶上供轮机管理人员使用，有极大的灵活性。

## 1.2.2 实现主机遥控系统故障诊断与分析

主机遥控系统的计算机模拟仿真还应包括故障诊断和分析的内容、及其维修指导方法。它可以帮助轮机管理人员及公司机务管理人员对主机遥控系统所发生的故障现象进行分析，迅速搜索出导致系统失效的故障源，并准确指出故障源所在的物理位置，提供修复方法，从而使故障得以迅速排除，系统恢复正常。

对主机遥控系统进行故障诊断，方法有多种多样。广义上讲，故障诊断就是一种信息诊断，通过不同手段或方法获取故障信息并进行诊断的过程，是对故障信息的加工和处理的过程。

故障诊断与分析仿真本质上就是根据具体机型的主机遥控系统，建立故障模型和故障数据库，真实地复现故障。因此故障仿真具有更大的实用性。上海远洋运输公司曾于一九九三年与有关单位合作开展过主机遥控系统故障分析的研究项目，但限于当时的研究水平及研究经费，未最后实现实用化的计算机辅助分析系统。

## 1.3 本课题的主要研究内容和任务

本课题由中远集运提出、报请中远集团批准立项，并提供研究经费的科研项目。课题以中远集运公司主要集装箱船舶（3400TEU，5446TEU）的主机遥控系统气动装置为研究对象，进行计算机原理仿真及故障诊断，在此基础上，开发一套计算机应用软件。

### 1.3.1 主要研究内容<sup>[2]</sup>

1) 主机遥控系统气动装置的原理分析和建立控制模型。根据中远集运主要集装箱船舶上的主机机型多为 MAN B&W 型，因此本课题选择机型为 MAN B&W 46~98MC 的主机遥控气动装置，详细分析其工作原理。在此基础上建立其起动、停车、换向等运行工况的逻辑控制模型。

2) 主机遥控系统气动装置的故障诊断分析和建立故障模型。运用可靠性理论的 FTA (Fault Tree Analysis) 和 FEA(Fault Effect Analysis)技术，实现遥控系统气动装置故障信息流分析。

3) 运用可靠性理论建立主机遥控系统气动装置的状态评估模型，合理确定主机遥控系统气动装置的维修周期，推荐维修方法。

4) 运用计算机技术，实现主机遥控系统气动装置的原理仿真、动态演示、以及故障诊断辅助分析。

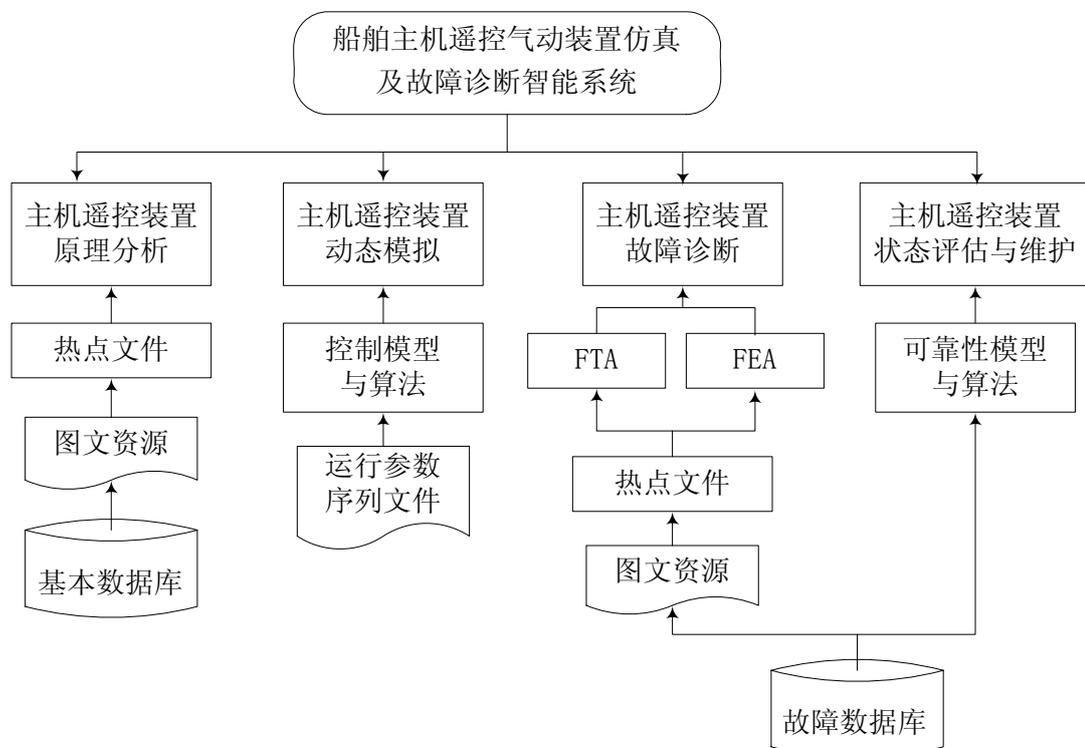


图 1-2 本课题的结构框架

### 1.3.2 课题的实用价值与达到的水平

主要目的是在计算机辅助分析系统的帮助下提高轮机管理人员对主机遥控装置的故障诊断能力与管理水平；增强轮机管理人员的自修能力，降低维修费用；减少主机遥控装置故障对船期的影响与确保船舶的航行安全。为完善主机遥控装置的故障分析，本项目开发成功后，可在中远集团系统内推广应用，有利于轮机管理技术适应新技术的发展与轮机管理技术自身创新的需要。

本课题力求对主机遥控系统气动装置的原理仿真和故障分析实用化，填补中远集团在机务管理上对船舶轮机管理人员进行业务培训方面的空白，并对进一步开发全船机电自动化设备的计算机仿真及其故障辅助分析应用软件起到示范作用。提高轮机管理人员对新设备、新系统的管理、维护能力。

本课题取得的成果在船舶上使用后可获得可观的经济效益与社会效益，对于大型集装箱船舶来说，光减少船期损失这一项产生的经济效益就十分可观，准班率产生的社会效果对提高船公司信誉也是十分有益的。

## 第二章 主机遥控气动装置原理分析

### 2.1 主机遥控系统结构组成

中远集运拥有的MAN B&W 46~98MC系列船舶主机遥控系统结构组成原理框图如图 2-1 所示<sup>[3]</sup>。

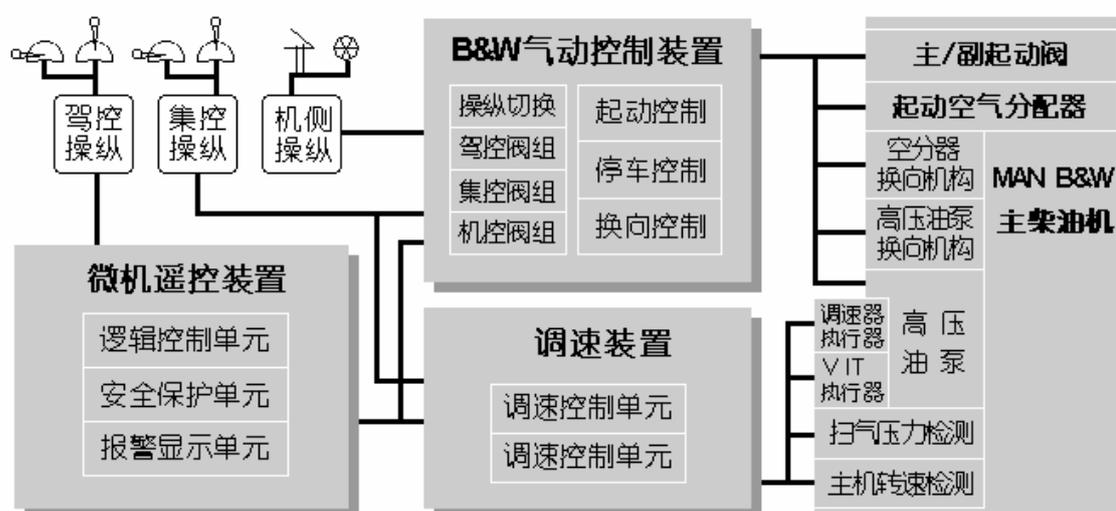


图 2-1 MAN B&W 主机遥控系统原理框图

由图 2-1 可见，系统主要由三大块组成：

1) 安装于机舱的与 MAN B&W 主机配套的气动控制装置，机旁应急操纵和集控室远程操纵均为直接通过气动控制装置实现对主机的操纵。

2) 安装于驾驶台和集控室的分布式计算机遥控装置。它是气动控制装置的前一级控制环节，主要用于驾驶台遥控操纵和集控室控制操纵（集控室的计算机遥控操纵单元为可选单元，而上述 1) 的气动远程操纵则为必须）。计算机遥控装置与气动控制装置的接口为控制电磁阀组。目前使用较为广泛的计算机遥控装置是：挪威 NOR CONTROL 公司的 Auto Chief IV 系列、德国 SEIMENS 公司的 RCS-33 系列、以及日本 NABCO 公司的 M-800 系列。

3) 安装于机舱集控室的电子调速装置，它实现主机转速管理任务。在集控室控制或驾驶室控制方式下，电子调速器投入运行。而在机侧操纵时，电子调速器将被切除，直接由机旁调速手轮控制油门开度。与计算机遥控装置相配套，电子调速器通常是：挪威 NOR CONTROL 公司的 DGS-8800 系列、德国 SEIMENS 公司的 SPC-33 系列、以及日本 NABCO 公司的 MG-800 系列。

此外，还有一些主机遥控系统的外部设备：驾控或集控用于发送主机转速指令的调速手柄（转速指令发送器）；驾控或集控用于控制主机转向的组合车钟；驾控与集控用于信号联系的副车钟；以及车钟记录仪，数据打印仪等。

## 2.2 MAN B&W 气动控制装置结构组成

图 2-2 所示的是MAN B&W气动控制装置气路原理图<sup>[5]</sup>。

1) 操纵地点切换。操纵地点切换通过手动切换阀实现，有“机侧/遥控”切换（手动阀 100）和“集控/驾控”切换（手动阀 80），操纵的优先级次序为机侧—集控室—驾驶台。

2) 操纵方式切换。机侧操纵，集控操纵和驾控操纵的操纵信号（起动，换向和停车）都通过“或门”（双向止回阀 85、23）送出。因此无论哪种操纵方式，所实现的控制目标和要求都是相同的。

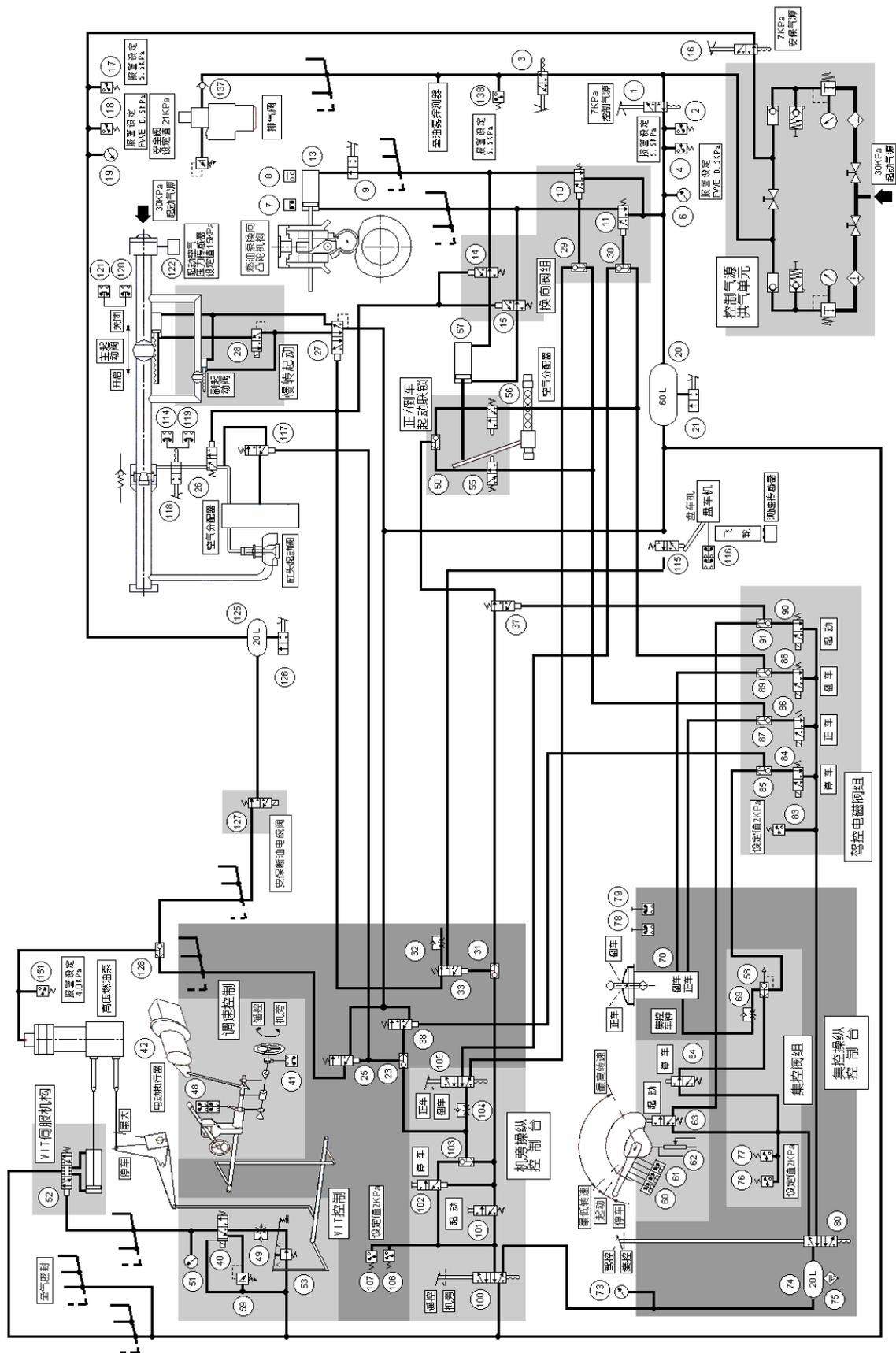


图 2-2 B&W 型船舶主机气动控制装置气路原理图

## 2.3 备车工况

### 1) 备车检查

- 脱开盘车机；
- 确认管路上各阀的启、闭状态；
- 起动滑油、燃油泵；
- 起动各冷却水泵；
- 起动辅助鼓风机；
- 开启起动、控制、安保与气弹簧压缩空气阀并检查压力值；
- 调节燃油、滑油与各种冷却介质温度、压力与液位至要求值；
- 气缸预润滑；
- 开启示功考克与压缩空气等管路的放残；
- 通过试验按钮确认安保系统、控制系统工作状态；
- 确认主机操纵位置并保持与值驾的联系；
- 检查控制面板上是否有报警信号。

### 2) 驾控状态

驾/集工况选择开关(80)处于驾控位置，阀(100)下位，电子调速器处于工作状态。

### 3) 集控状态

驾/集工况选择开关(80)处于集控位置，阀(100)下位，电子调速器处于工作状态。

### 4) 机侧状态

阀(100)上位，电子调速器处于脱开状态。

上述 2)、3)、4) 状态下，阀(1)、(16)处于下位，阀(3)、(118)处于左位，阀(115)处于上位。控制、安保、气弹簧压缩空气正常值为 0.7Mpa，主机处于停车工况。

## 2.4 停车工况

阀(1)、(16)、(3)、(118)、(115)位置与备车工况相同。控制空气→阀(1)下位→气容

(20)→阀(27)右位→主起动阀主、辅阀的启闭装置使其处于关闭状态。

### 1) 驾控停车工况

驾 / 集工况选择开关(80)处于下位；阀(100)处于下位；电子调速器处于工作状态；电磁阀(84)受控位于左位，阀(37)处于上位。

- 控制空气→阀(1)下位→阀(100)下位→连接板(164)→气容(74)→遥控停车电磁阀(84)左位→梭阀(85)→阀(38)控制腔使其受控位于下位。
- 控制空气→阀(1)下位→阀(38)下位→阀(23)→阀(25)、(117)控制腔使其受控分别位于下位。
- 控制空气→阀(1)下位→阀(25)下位→阀(128)→高压油泵控制腔使其受控断油。
- 控制空气→阀(1)下位→阀(115)上位→阀(117)左位→阀(14)、(15)待用；
- 控制空气→阀(1)下位→阀(115)上位→阀(32)上位待用。

### 2) 集控停车工况

驾 / 集工况选择开关(80)处于上位，阀(100)处于下位，电子调速器处于工作状态，阀(64)受控处于上位。由集控室电动远操单元与电动车钟实现集控操车。

- 控制空气→阀(1)下位→阀(100)下位→连接板(164)→气容(74)→阀(80)上位→阀(64)上位→阀(58)→阀(85)→阀(38)控制腔使其受控位于下位。
- 控制空气→阀(1)下位→阀(100)下位→连接板(164)→气容(74)→阀(80)上位→阀(64)上位→阀(58)→阀(69)→车钟(70)待用。
- 其它气路与驾控相同。

### 3) 机侧停车工况

阀(100)受控位于上位，电子调速器处于脱开状态。

- 控制空气→阀(1)下位→阀(100)上位→阀(102)上位→阀(103)→阀(23)→阀(25)、(117)控制腔使其受控分别位于下位与左位。
- 其它气路与集控相同。

#### 4) 应急停车及故障减速工况

主机应急停车由应急停车阀(127)换位至下位，直接切断高压油泵供油。

当主机运行参数超过安保系统的设定值时，安保输出停车信号使应急停车电磁阀(127)受控，安保控制空气→阀(16)→阀(127)→阀(128)→高压油泵断油阀切断主机各缸供油实现应急停车。

主机故障减速由调速器自动按设定值降低油门开度。

## 2.5 换向工况

换向操作正常情况下应在主机停车状态下进行。现设从正车工况换向至倒车工况（从倒车工况换向至正车工况时，在各操纵点操纵情况与从正车工况换向至倒车工况基本相同，差别在受控电磁阀为(86)，最终的受控分别为阀(10)和阀(14)）。

#### 1) 驾控换向工况

遥控正车电磁换向阀(86)失电位于右位；遥控倒车电磁换向阀(88)受控位于左位。

- 控制空气→阀(100)下位→遥控倒车换向电磁阀(88)左位→阀(30)→阀(11)、(15)控制腔使阀(11)、(15)分别换位至左位与下位，使燃油泵、空气分配器换向至倒车位置。
- 换向到位后，阀(56)位于左位，由阀(88)输出的控制空气→阀(56)左位→阀(50)→阀(37)上位待用。

#### 2) 集控换向工况

电车钟(70)位于倒车位置，电动远操单元操纵手柄从正车位置换位至倒车位置。

气路走向与驾控换向相同。

#### 3) 机侧换向工况

操纵手动换向阀(105)位于上位。

- 控制空气→阀(100)上位→阀(102)上位→阀(103)→阀(104)→阀(105)上位→阀(30)→阀(11)、(15)控制腔使阀(11)、(15)分别换位至左位与下位，使燃油

泵、空气分配器换向至倒车位置。

## 2.6 启动工况

启动工况应在换向操纵成功后进行。

### 1) 驾控启动工况

驾 / 集工况转换开关 (80) 位于驾控位置, 由驾驶台进行主机操纵。电子调速器处于工作状态, 遥控启动电磁阀(90)受控位于左位。

- 控制空气→阀(100)下位→遥控启动电磁阀(90)左位→阀(31)→阀(33)控制端, 使阀(33)受控位于下位。
- 控制空气→阀(115)上位→阀(33)下位→阀(26)、(27)控制端, 使阀(26)、(27)受控分别换位至右位与左位。
- 控制空气→阀(27)左位(若停车超过 30 分钟电磁阀(28)受控, 主机为慢转启动工况)开启主启动阀的辅阀, 30MPa 的启动空气经主启动阀的辅阀进入空气分配器, 按发火顺序进入各缸, 主机慢转超过一转后, 阀(28)在 RCS-33 控制下失电, 使主启动阀的主阀开启, 主机进入正常启动工况, 直至主机达到发火转速。
- 主机达到发火转速后, 启动电磁阀(90)与停车阀(84)同时失电, 使燃油泵的断油信号消失, 燃油泵开始向各缸喷油, 由于阀(32)的延时作用使主机有一秒左右的油气并进过程, 确保主机启动成功率。油气并进时间由阀(32)中节流阀开度来调定(1~2 秒)。

### 2) 集控启动工况

驾 / 集工况转换开关 (80) 位于集控位置, 通过集控室电动远操单元操纵手柄与电动车钟操作手柄实现操纵。电子调速器处于工作状态。

- 气路走向与驾控工况相同。
- 正车启动: 电动远操单元操作手柄向前推 10 度发出正车启动指令, 再推 10 度为正车启动供油位置, 推至 70 度为正车最大供油位置。

- 倒车起动：电动远操单元操作手柄向后拉 10 度发出倒车起动指令，再拉 10 度为倒车起动供油位置，拉至 70 度为倒车最大供油位置。
- 电动远操单元电位器（62）当操作手柄在 20~70 度范围内变化时，有 1~9V 的电压变化，并有 4~20 mA 的电流输出到电子调速器；起动供油指令可在 6~13mA 范围内按实际情况设定，起动指令消失后起动供油指令在延时控制的作用下还有 6~8 秒的延时控制作用。

### 3) 机侧起动工况

起动时阀(101)位于上位。机侧起动属应急起动，慢转起动功能失效，计算机遥控单元与电子调速器均不起作用，整个起动过程均由人工控制。

- 控制空气经阀(100)上位→阀(101)上位→阀(31)→阀(33)控制端，使阀(33)受控位于下位。
- 其它气路与集控相同。

## 2.7 供油调速工况

当主机起动成功后，进入正常的供油调速阶段。此阶段对主机的控制是转速-负荷控制。

### 1) 驾控供油调速工况

驾控调速通过设在驾驶台主机控制板上的油门手柄来实现,控制原理与集控相同。

### 2) 集控供油调速工况

集控调速由电动远控单元上的起动/油门联合手柄通过控制精密电位器(62)的输出值来设定；经电子调速器中的调速单元、伺服放大单元，最后由电动执行器(42)通过油门拉杆控制各缸燃油泵油门开度实现调速与负荷控制。

### 3) 机侧供油调速工况

机侧调速时，电子调速器处于断开状态，主机调速可直接通过机侧控制台处的操纵手轮来实现调速与负荷控制。

## 第三章 主机遥控气动装置控制原理模型

运用计算机技术进行船舶主机遥控气动装置计算机原理仿真，通过图形、动态图像等手段为轮机管理人员提供一个直观逼真的教育训练环境。气动装置的元器件多为气控阀件，实现的控制多为逻辑控制，控制对象是主机<sup>[6]</sup>。所实现的控制有：

- 起动控制；
- 停车控制；
- 换向控制；
- 调速控制。

其中对主机的调速控制主要由电子调速器来完成，不在本课题讨论范围。为了实现计算机原理仿真，需要对主机遥控气动装置的运行控制规律建立相应的数学模型，然后再设计相应的便于计算机编程的仿真算法。

### 3.1 功能块分解

从控制功能上对主机遥控系统气动装置的控制气路进行分解，可分解为：气源气路、停车控制气路、换向控制气路和起动控制气路。

#### 1) 气源气路

从第二章 MAN B&W 原理图 2-2 分解出来的气源气路如图 3-1 所示。由分解的图 3-1 可知，气源来自于二部分：

- (1) 主控制气源（阀(1)），用于气动装置的正常控制（起动、停车和换向）；
- (2) 安全保护气源（阀(16)），用于气动装置的紧急停车。

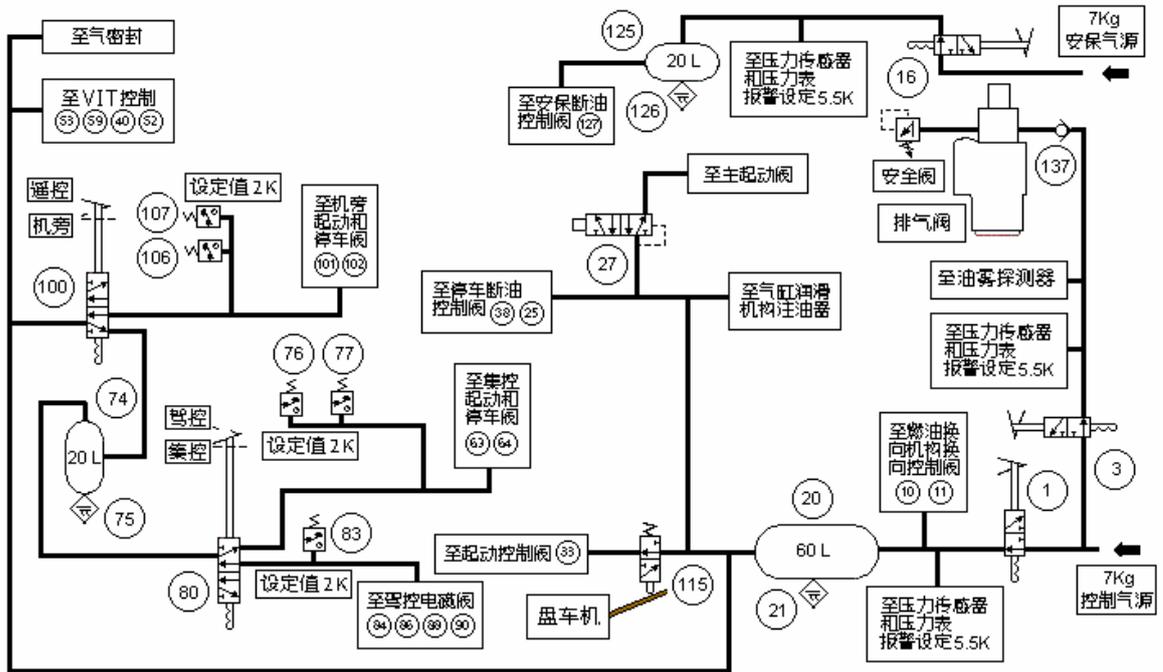


图 3-1 气源气路图

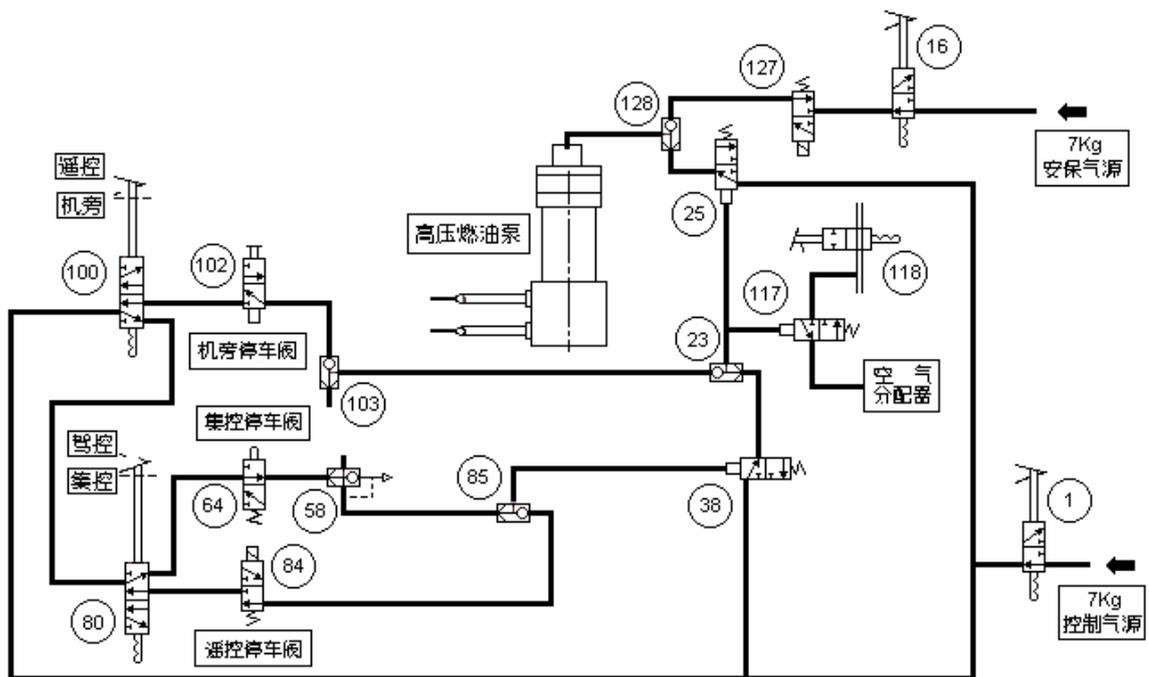


图 3-2 停车控制气路图

## 2) 停车控制气路

从第二章 MAN B&W 原理图 2-2 分解出来的停车控制气路如图 3-2 所示。由分解的图 3-2 可知，停车控制由二部分构成：

- (1) 气动装置的正常停车控制，由机侧（阀(102)）、集控室（阀(64)）、或驾驶台（阀(84)）发出停车控制指令；
- (2) 安全保护应急停车，由计算机遥控单元的安全保护环节发出紧急停车指令（阀(127)）。

## 3) 换向控制气路

从第二章 MAN B&W 原理图 2-2 分解出来的换向控制气路如图 3-3 所示。

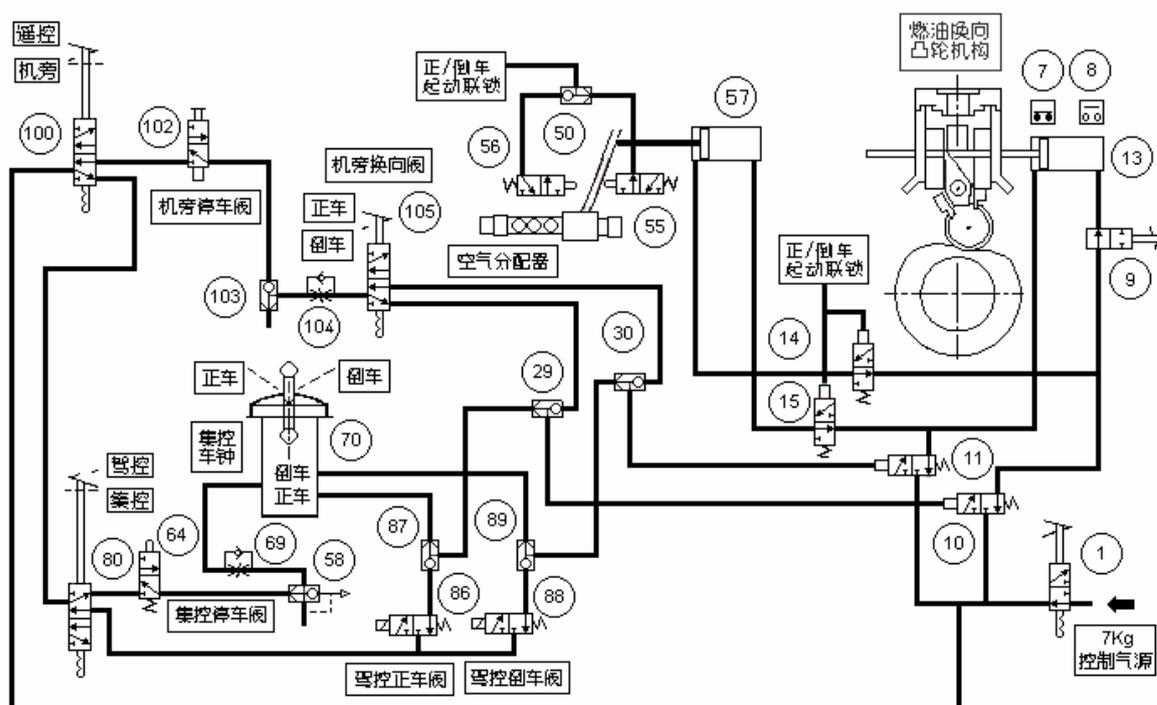


图 3-3 换向控制气路图

由分解的图 3-3 可知，换向控制由二部分构成：

- (1) 正车换向控制，由机侧（阀(105)）、集控室（集控车钟(70)）、或驾驶台（阀(86)）发出正车换向控制指令；
- (2) 倒车换向控制，由机侧（阀(105)）、集控室（集控车钟(70)）、或驾驶台（阀(88)）发出倒车换向控制指令。

#### 4) 起动控制气路

从第二章 MAN B&W 原理图 2-2 分解出来的起动控制气路如图 3-4 所示。

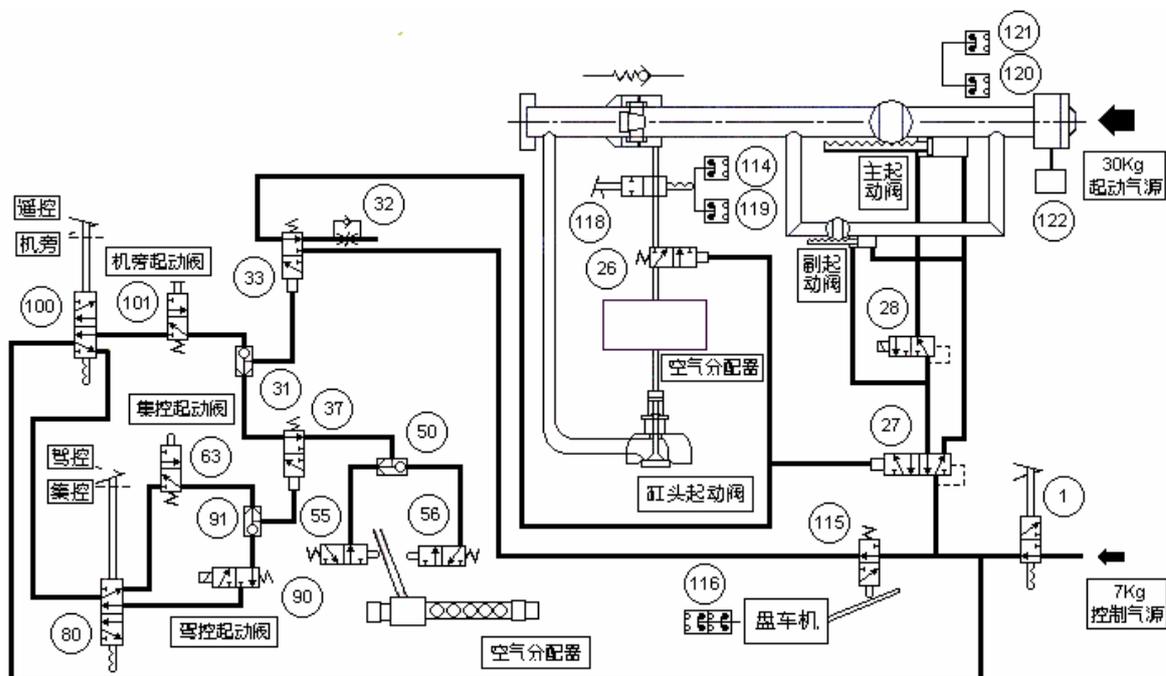


图 3-4 起动控制气路图

由分解的图 3-4 可知，起动控制由机侧（阀(101)）、集控室（阀(63)）、或驾驶室（阀(90)）发出起动控制指令。起动控制不分正、倒车，前提是正、倒车换向已经到位。

### 3.2 备车就绪逻辑

根据第二章“备车工况”的备车分析，设 12 个备车条件分别为  $S_1, S_2, \dots, S_{12}$ ，同时考虑图 3-1 的控制气源气路，则备车就绪逻辑的数学表示为<sup>[8]</sup>：

$$H_{S \tan d-by} = (S_1 S_2 S_3 S_4 S_5 S_6 S_7 S_8 S_9 S_{10} S_{11} S_{12}) \cdot (V_1 \cdot V_{16}) \quad (3-1)$$

式中  $V_1$  和  $V_{16}$  分别表示为控制气源阀开启和安保气源阀开启状态。只有在备车就绪情况下，即只有当式 (3-1) 为“1”时，MAN B&W 主机遥控气动装置才能正常工作。由此可分别得机侧 ( $H_{Local}$ )、集控 ( $H_{Eng}$ ) 和驾控 ( $H_{Bridge}$ ) 的备车就绪信号：

$$\left. \begin{aligned} H_{Local} &= \bar{V}_{100} \cdot H_{S \tan d-by} \\ H_{Eng} &= V_{100} \cdot V_{80} \cdot H_{S \tan d-by} \\ H_{Bridge} &= V_{100} \cdot \bar{V}_{80} \cdot H_{S \tan d-by} \end{aligned} \right\} \quad (3-2)$$

式中 $V_{100}$ 为遥控/机侧切换阀， $V_{80}$ 为集控/驾控切换阀。

### 3.3 停车逻辑

停车逻辑控制的本质是将运转中的主机切断燃油供应。根据第二章“停车工况”的分析，以及图 3-2 的停车控制气路分析可知，停车由二部分组成：正常停车（阀 $V_{25}$ ）和安保停车（阀 $V_{127}$ ），即：

$$H_{Stop} = (V_{25} + V_{127}) \quad (3-3)$$

式（3-3）中的正常停车命令 $V_{25}$ 可由三种方式发出：

- （1）机侧停车手操阀 $V_{102}$ ；
- （2）集控停车机控阀 $V_{64}$ ；
- （3）驾控停车电磁阀 $V_{84}$ 。

停车断油是无条件的，由此可得机侧（ $H_{Local-Stop}$ ）、集控（ $H_{Eng-Stop}$ ）和驾控（ $H_{Bridge-Stop}$ ）的停车信号：

$$\left. \begin{aligned} H_{Local-Stop} &= \bar{V}_{100} \cdot \bar{V}_{38} \cdot V_{102} \\ H_{Eng-Stop} &= V_{100} \cdot V_{80} \cdot V_{38} \cdot V_{64} \\ H_{Bridge-Stop} &= V_{100} \cdot \bar{V}_{80} \cdot V_{38} \cdot V_{84} \end{aligned} \right\} \quad (3-4)$$

式中 $V_{38}$ 为遥控（集控和驾控）起动阀。式（3-4）的停车指令发出后，立即发生二个事件：

- （1）高压燃油泵停止供油，主机停车；
- （2）起动空气分配器待机，为下一次主机起动作好准备。

可把式（3-3）和（3-4）合并为：

$$\begin{aligned}
H_{Stop} &= H_{Local-Stop} + H_{Eng-Stop} + H_{Bridge-Stop} + H_{Safe-Stop} \\
&= \bar{V}_{100} \cdot \bar{V}_{38} \cdot V_{102} + V_{100} \cdot V_{38} \cdot (V_{80} \cdot V_{64} + \bar{V}_{80} V_{84}) + V_{127}
\end{aligned} \tag{3-5}$$

### 3.4 换向逻辑

在停车状态下进行主机的正/倒车换向。根据第二章“换向工况”的分析，以及图3-3的换向控制气路分析可知，换向由二部分组成：正车换向（阀 $V_{10}$ ）和倒车换向（阀 $V_{11}$ ），且这二种换向状态不能同时出现。即：

$$H_{Reverse} = (V_{10} + \bar{V}_{11}) \tag{3-6}$$

式（3-6）中的换向命令信号 $V_{10}$ 和 $V_{11}$ 也由三种方式发出：

- （1）机侧换向手操阀 $V_{105}$ ；
- （2）集控组合车钟 $V_{70}$ ；
- （3）驾控换向电磁阀 $V_{86}$ （正车）和 $V_{88}$ （倒车）。

由此可得机侧（ $H_{Local-Reverse}$ ）、集控（ $H_{Eng-Reverse}$ ）和驾控（ $H_{Bridge-Reverse}$ ）的换向信号：

$$\left. \begin{aligned}
H_{Local-Reverse} &= V_{105} \cdot V_{10} + \bar{V}_{105} \cdot V_{11} \\
H_{Eng-Reverse} &= V_{70} \cdot V_{10} + \bar{V}_{70} \cdot V_{11} \\
H_{Bridge-Reverse} &= V_{86} \cdot V_{10} + V_{88} \cdot V_{11}
\end{aligned} \right\} \tag{3-7}$$

式（3-7）在换向时必须满足以下条件：

- （1）必须满足备车就绪条件 $H_{Stand-by}$ ；
- （2）燃油机构换向气缸进气阀 $V_9$ 打开；
- （3）主机必须处于断油停车状态 $\bar{H}_{Start}$ （参见下节“起动逻辑”）。

合并式（3-6）和（3-7），可得换向逻辑：

$$\begin{aligned}
H_{Reverse} &= V_9 \cdot \bar{H}_{Start} H_{Stand-by} (H_{Local-Reverse} + H_{Eng-Reverse} + H_{Bridge-Reverse}) \\
&= V_9 \cdot H_{Stand-by} H_{Start} [(V_{105} + V_{70} + V_{86}) \cdot V_{10} + (\bar{V}_{105} + \bar{V}_{70} + V_{88}) \cdot V_{11}]
\end{aligned} \tag{3-8}$$

### 3.5 起动逻辑

起动逻辑控制是将停车状态下的主机经 30bar 压缩空气动力将其起动，起动点火成功后，主机进入供油调速阶段。根据第二章“起动工况”的分析，以及图 3-4 的起动控制气路分析可知，起动由二部分组成：正车起动和倒车起动，且这二种起动状态不能同时出现（阀  $V_{55}$  和阀  $V_{56}$  互锁）。即：

$$H_{Start} = V_{33} \cdot (V_{55} + \bar{V}_{56}) \quad (3-9)$$

式 (3-9) 中  $V_{33}$  为起动控制阀。 $V_{33}$  的起动命令信号可由三种方式发出：

- (1) 机侧起动手操阀  $V_{101}$ ；
- (2) 集控起动机控阀  $V_{63}$ ；
- (3) 驾控起动电磁阀  $V_{90}$ 。

由此可得机侧 ( $H_{Local-Start}$ )、集控 ( $H_{Eng-Start}$ ) 和驾控 ( $H_{Bridge-Start}$ ) 的起动信号：

$$\left. \begin{aligned} H_{Local-Start} &= V_{101} \cdot V_{33} \\ H_{Eng-Start} &= V_{63} \cdot V_{37} \cdot V_{33} \\ H_{Bridge-Start} &= V_{90} \cdot V_{37} \cdot V_{33} \end{aligned} \right\} \quad (3-10)$$

式 (3-10) 中， $V_{37}$  为遥控起动控制阀。式 (3-10) 的起动还必须满足以下条件：

- (1) 满足备车就绪条件  $H_{Stand-by}$ ；
- (2) 动力气源阀  $V_{118}$  打开；
- (3) 动力气源无低压报警  $\bar{P}_{122}$ ；

合并式 (3-9) 和 (3-10)，可得换向逻辑：

$$\begin{aligned} H_{Start} &= V_{118} \cdot \bar{P}_{122} \cdot H_{Stand-by} (H_{Local-Start} + H_{Eng-Start} + H_{Bridge-Start}) \\ &= V_{118} \cdot \bar{P}_{122} \cdot H_{Stand-by} \cdot V_{33} \cdot [V_{101} + V_{37} \cdot (V_{63} + V_{90})] \cdot (V_{55} + \bar{V}_{56}) \end{aligned} \quad (3-11)$$

### 3.6 模型的系统化

式 (3-5)、(3-8)、(3-11) 表示的是气动装置的分段功能控制律表达式<sup>[9]</sup>，当把主机遥控系统气动装置看作一个整体时，它实质是一个特殊的逻辑型多输入多输出的多

变量控制系统，可表示为：

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} H_{Stop} \\ H_{Reverse} \\ H_{Start} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_{Local-Stop} & 0 \\ H_{Eng-Stop} & 0 \\ H_{Bridge-Stop} & 0 \\ 0 & H_{Local-Reverse} \\ 0 & H_{Eng-Reverse} \\ 0 & H_{Bridge-Reverse} \\ 0 & H_{Local-Start} \\ 0 & H_{Eng-Start} \\ 0 & H_{Bridge-Start} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ H_{Stand-by} \end{pmatrix}$$

$$= \sum_{i=1}^N \mathbf{B}_i \prod_{j=1}^i \mathbf{A}_j \mathbf{V}^T$$

式中  $\mathbf{V}^T = (V_1 \ V_2 \ \dots \ V_N)$  为气动装置功能部件级元器件（阀件、开关等）向量；

$\mathbf{A}_j (j=1,2,\dots,N)$   $\mathbf{B}_i (i=1,2,\dots,N)$  为各阶逻辑关联矩阵，分别表示积的关联、和的关联。关联矩阵的元素值取“1”或“0”表示关联与否。

这样所构造的主机遥控系统气动装置的系统化控制原理逻辑模型，具有普遍适用性。其优点是：

(1) 系统化模型更能显示出完整性特点，比之分段功能逻辑表达式更完善和有效，有利于计算机控制程序的完整性设计开发。

(2) 当系统的控制不仅有开关量，亦有模拟量时，可以通过将关联矩阵适当扩充定义，使之满足系统化要求。

## 第四章 主机遥控气动装置故障诊断模型

由于主机遥控系统对船舶运行的重要性，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。

对主机遥控系统进行故障诊断与分析，用FTA（Fault Tree Analysis）和FEA（Fault Effect Analysis）方法是行之有效的。这两种方法在信息流上有明确的因果关系。对FTA而言，它以可靠性理论为基础，运用逻辑演绎方法建立主机遥控气动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<sup>[22]</sup>。

与FTA相对应的FEA，即系统中某元器件失效模式（因）将引起系统的若干故障效应（果）。它也是运用逻辑演绎方法，通过故障源（失效模式）来寻找危害系统的功能失效效应。

在以往的故障检测与分析技术中，上述两种方法通常是独立进行的。但是实质上这两种方法有内在的联系。找出这种关系，将会对故障分析有很大的帮助。

### 4.1 FTA 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（系统级故障）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（功能块或部件级故障）和底事件（不可再分解的单元元件故障），以一种倒树状结构表示。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）之间的逻辑关系，因此是分析系统故障、查找故障单元的一种有效手段。

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  $n$  个单元组成的系统，把系统失效作为故障树顶事件  $F$ ，把各单元失效作为故障树底事

件  $B_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ), 对顶事件和的底事件只考虑正常和故障两种状态。设故障树的底事件  $B_i$  的状态用  $S_B$  来表示, 那么:

$$S_i = \begin{cases} = 1 & B_i = True \\ = 0 & B_i = False \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4-1)$$

故障树顶事件  $F$  的状态用  $S_F$  来表示, 因为顶事件的发生与否与底事件的状态直接相关, 因而  $S_F$  必然是所有底事件状态  $S_B = \{S_i \mid i=1, 2, \dots, n\}$  的函数。即:

$$S_F = S_F(S_B) = \begin{cases} = 1 & F = True \\ = 0 & F = False \end{cases} \quad (4-2)$$

对于与门的故障树, 式 (4-2) 可表示为:

$$S_F(S_B) = \prod_{i=1}^n S_i \quad (4-3)$$

对于或门结构的故障树, 结构函数表示为:

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

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。

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的集合称为这棵故障树的路集 (Path Sets)。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)。其状态可表示成底事件状态的函数。

## 4.2 MAN B&W 气动装置的 FTA 模型

### 4.2.1 FTA 构造

根据中远集运调研结果及船舶轮机管理人员的经验各资料统计，主机遥控气动控制装置可能出现的系统级故障现象归纳为五大类：备车故障、起动故障、点火故障、换向故障和调速故障。这些系统级故障见表 4-1 所示。

表 4-1 MAN B&W 主机遥控气动装置 FTA 系统级故障集合表（顶事件）

故障名称	序号	故障现象（顶事件）
备车故障	$f_1$	主机备车未妥
换向故障	$f_2$	驾控不能换向，集控正常
	$f_3$	集控不能换向，机侧正常
	$f_4$	机侧不能换向
起动故障	$f_5$	驾控不能起动，集控正常
	$f_6$	集控不能起动，机侧正常
	$f_7$	机侧正常
	$f_8$	驾控三次起动失败
	$f_9$	主机起动困难，偶尔起动成功时，缸头安全阀起跳
点火故障	$f_{10}$	驾控能起动，但不发火，集控正常
	$f_{11}$	集控能起动，但不发火，机侧正常
	$f_{12}$	机侧能起动，但不发火
调速故障	$f_{13}$	主机转速达不到要求值
	$f_{14}$	主机转速不稳定
	$f_{15}$	主机超速运行

造成系统级故障的原因必然是系统中相应的功能块失效（故障）而引起。而功能块是由一些组件（元部件）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不可分解的单元元件失效所造成。例如表 4-1 中的序号 $f_5$ “驾控不能起动，集控正常”。仔细分析这一顶事件发生原因，将其归纳在表 4-2 中。

表 4-2 “驾控不能起动，集控起动正常”顶事件 $f_5$ 发生原因表

序号	功能块	序号	组件	序号	元器件(不可分解底事件)
U <sub>51</sub>		V <sub>511</sub>		W <sub>5111</sub>	阀(80)至电磁阀箱之间 管路泄漏或堵塞
U <sub>52</sub>	阀(80)故 障	V <sub>521</sub>		W <sub>5211</sub>	阀芯错位
				W <sub>5212</sub>	泄漏
				W <sub>5213</sub>	操作不当
U <sub>53</sub>	电 磁 阀 箱 故 障	V <sub>531</sub>	阀(84)(86) (88)(90) 故 障	W <sub>5311</sub>	阀芯卡死
				W <sub>5312</sub>	弹簧断裂
				W <sub>5313</sub>	密封失效
				W <sub>5314</sub>	电磁铁烧坏
		V <sub>532</sub>	阀(85)(87)(89) (91)故障	W <sub>5321</sub>	阀芯卡死
				W <sub>5322</sub>	泄漏
U <sub>54</sub>	驾/集电信 号传递故 障	V <sub>541</sub>		W <sub>5411</sub>	线路断路
				W <sub>5412</sub>	线路短路
				W <sub>5413</sub>	操作不当
U <sub>55</sub>	联锁阀组故障	△ U <sub>55</sub>			
U <sub>56</sub>	调速器故障	△ U <sub>56</sub>			
U <sub>57</sub>	遥控单元故障	△ U <sub>57</sub>			

由表 4-2 可见，我们把系统级故障（顶事件）发生原因，从系统的功能块追查到不可再分解的系统元器件（底事件）。表中U<sub>55</sub>、U<sub>56</sub>、U<sub>57</sub>功能块故障，还会引起其它的系统级故障，因此将它们从表 4-2 中转出，构建独立的子表，供查用。

这样，根据表 4-2 可画出以三级故障链表示的 MAN B&W 主机遥控气动装置“驾控不能起动，集控起动正常”的最小路集故障树。如图 4-1 所示。对表 4-1 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。

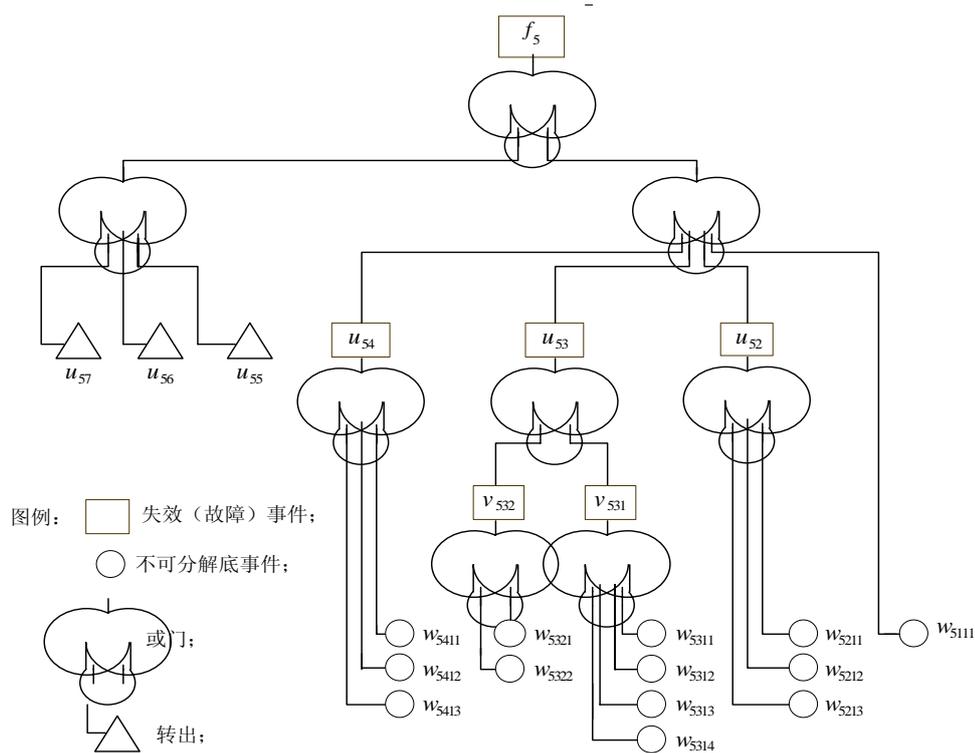


图 4-1 “驾控不能起动，集控起动正常”最小路集故障树

## 4.2.2 FTA 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。把 MAN B&W 气动控制装置的故障树从顶事件到底事件分成三级，根据式 (4-3)、(4-4) 的表达式，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)，故障信息流均以“或”的规律表达。

(1) 第一级故障源为功能块  $U$ 。设系统级故障为  $F = \{f_i | i = 1, 2, \Lambda, n\}$ ，这些故障是由功能块  $U$  的失效（即一级故障源  $U = \{u_i | i = 1, 2, \Lambda, m\}$ ，）而造成：

$$F: f_i = \bigvee_j^m a_{ij} u_j \quad i = 1, 2, \Lambda, n \quad (4-5)$$

(2) 第二级故障源为元部件（或组件） $V$ 。功能块  $U$  的失效是由元部件  $V$  的失效（二级故障源  $V = \{v_i | i = 1, 2, \Lambda, l\}$ ，）而造成：

$$U: u_i = \bigvee_j^l b_{ij} v_j \quad i = 1, 2, \Lambda, m \quad (4-6)$$



## 4.3 FEA 描述

传统意义上的FEA是对设备（产品）的状态进行定性分析，或者说是从可靠性角度对已完成的产品或对投入运行的设备进行详细评价，对潜在的故障按其影响程度确定等级，并根据需要提出改进意见。它的特征是<sup>[26]</sup>：

（1）充分调研后，确定系统的主要功能块、元部件（组件）以及单元元件的故障模式对系统的危害程度（效应）。这个过程除了在逻辑上有直接因果联系的故障流之外，本质上是专家经验的评定过程。专家有高级有低级，因此可设立权重指标对专家排序。我们运用 FEA 对 MAN B&W 主机遥控气动装置进行分析，假定的专家是同一水平的，不设权重，且所有现象均有直接的因果联系。

（2）用表格形式建立 FEA 档案。内容包括：主要功能块、元部件（组件）以及单元元件的功能、故障模式、故障原因、对系统的影响、应采取的预防措施等。FEA 的分析过程于是就等价于对 FEA 档案库的检索。

（3）FEA 的分析从低层（底事件）开始，逐步向高层（顶事件）分析；原则上是全面的分析，是定性的故障预测模拟法。

## 4.4 MAN B&W 气动装置的 FEA 模型

### 4.4.1 FEA 构造

根据中远集运调研结果及船舶轮机管理人员的经验，主机遥控气动控制装置元器件、组件或功能块的故障模式及其故障效应按其作用类别可分为：气源单元、起动单元、停车单元、换向单元和调速单元，如表 4-4 所示。它们的某一失效行为（即故障模式）将导致某系统级故障的发生。

表 4-4 MAN B&W 主机遥控气动装置 FEA 主要元器件分类表

起动单元	换向单元	气源单元	停车单元	调速单元
起动控制阀	驾控正车换向阀	控制空气开关阀	停车控制阀	调速器执行器

驾控起动电磁阀	驾控倒车换向阀	安保气源开关阀	驾控停车电磁阀	VIT 喷油正时调节器
集控起动阀	集控车钟换向阀	气弹簧气源阀	集控停车阀	喷油定时切换阀
机侧手动起动阀	机侧手动换向阀	盘车机连锁阀	机侧手动停车阀	正车喷油定时缓冲阀
遥控起动控制阀	燃油泵正车阀	驾/集控制转换阀	遥控断油控制阀	可变喷油定时执行器
慢转起动控制阀	燃油泵倒车阀	机/遥控制转换阀	安保断油控制阀	正车喷油定时比例阀
起动延时阀	燃油泵换向气缸	气容		倒车喷油定时设定阀
动力气源控制阀	分配器正车阀	空气滤器		
主起动阀	分配器倒车阀			
	换向气源阀			
	正车换向连锁阀			
	倒车换向连锁阀			
	分配器换向气缸			

表 4-4 所示的是我们要做的 MAN B&W 遥控系统气动装置故障效应主要元器件分类。每一元器件建立一 FEA 表格档案，例如表 4-4 中起动单元的“起动控制阀”，其失效模式产生的原因以及对系统的影响，构造如表 4-5 所示的档案。

表 4-5 “起动控制阀(阀 33)” FEA 档案表

功能	故障模式	故障原因	对系统的影响	预防措施
驾控时传递起动信号并输出起动机气控信号	不能正常换位	电磁铁损坏	驾控主机不能起动	检测 AC-IV 的输出信号；电磁铁防潮；提高压缩空气品质；定期维护
		铁芯卡死		
		弹簧失效		
		无信号输入		
	严重泄漏	密封失效	驾控主机起动异常	

(1) 功能栏：所列对象原定应完成的功能。

(2) 故障模式栏：故障模式也即故障的形态。具有代表性的故障模式有：电器部件的短路、断路；回路无输出，不稳定；机械系统中的变形、磨损、粘结；流体系统的泄漏、污染等。

(3) 故障原因栏：经过分析所设想的原因。一般认为，对于这类问题，轮机人员掌握了大量资料。

(4) 对系统的影响栏：在此栏内记述它对上层所产生的影响。首先容易记入的是与其直接相连的上一级硬件的影响，进而向更上一级分析。

(5) 预防措施栏：指出并评价那些能够用来消除或减轻故障影响的补偿措施。它们可以是维护上的补偿措施，也可以是操作人员的应急补救措施。

所生成的 FEA 档案，能够使轮机人员充分感受到 FEA 对他们的帮助，其实用性是十分明显的。与 FTA 相比，FEA 可以看成是 FTA 的逆向信息流。

### 4.4.2 FEA 矩阵模型

为了能够把 FEA 与 FTA 有机结合起来，使计算机程序的故障查寻既能顺向 (FTA 信息流)，又能逆向 (FEA 信息流)，必须建立相应的 FEA 的矩阵模型。

如果把故障效应也象故障树那样分成三级：第三级故障效应为组件 (或元部件)；第二级故障效应为功能块；第一级故障效应为系统失效。设元器件故障模式及其对自身的效应为  $w_1, w_2, \dots, w_g$ ，它们对相应的组件 (或元部件)  $v_1, v_2, \dots, v_l$  造成影响 (三级故障效应)；组件故障效应将对功能块  $u_1, u_2, \dots, u_m$  造成影响 (二级故障效应)；功能块的故障效应将造成系统级失效 (一级故障效应)  $f_1, f_2, \dots, f_n$ ，根据与 FTA 的相同推导方法可得：

$$W : w_i = \sum_j \gamma_{ij} v_j \quad i = 1, 2, \dots, g \quad (4-12)$$

$$V : v_i = \sum_j \beta_{ij} u_j \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (4-13)$$

$$U : u_i = \sum_j \alpha_{ij} f_j \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4-14)$$

式中  $\gamma$ 、 $\beta$  和  $\alpha$  分别为组件、功能块和系统级故障效应逻辑矩阵。合并式 (4-12)、(4-13)、(4-14)，则得

$$W = \alpha V = \alpha \beta U = \alpha \beta \gamma F = \delta F \quad (4-15)$$

式 (4-12)、(4-13)、(4-14)、(4-15) 给出了主机遥控气动控制装置故障效应逻辑矩阵模型。通过解这些方程式，可以寻找系统中任何元器件失效时对系统各级的影响。

考察式 (4-8)、(4-9)、(4-10) 和式 (4-12)、(4-13)、(4-14)，它们具有镜像对

称性，如果在建立 FTA 树和 FEA 档案时，相互严格对应起来，则有：

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \mathbf{A} \\ \beta &= \mathbf{B}^{-1} \\ \gamma &= \mathbf{C}^{-1} \\ \delta &= \mathbf{D}^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (4-16)$$

由此可见，当把 FTA 方法与 FEA 方法通过逻辑表达式有机结合起来后，更适宜于计算机有效、准确、灵活、迅速地分析和查询主机遥控气动控制装置的各类故障。

# 第五章 主机遥控气动装置状态评估模型

第五章中所分析的故障信息流，通过 FTA 和 FEA 能够综合分析故障的因果关系。但是当我们进一步要求：当某系统级故障发生时，引起此故障的最可能原因什么？或者根据当前系统元器件状态，预测或评估系统将要或可能出现何种故障？我们应该采取哪些预防、维护措施？等等。特别是中远集运公司强制性推广 CWBT 管理体系后，对船舶机电设备的视情预防维修保养要求大大提高。因此进一步要求我们能够实现故障信息流的优化分析，为设备的视情预防维修保养提供科学依据。

## 5.1 主机遥控气动装置的维修方式

通常将排除机电设备系统中的故障所进行的作业称为维护或修理（合称维修）。维修是指为恢复可修理的系统的可靠性所进行的处理，即为了保证系统处于使用和运行的可靠状态或为排除故障缺陷等而采取的全部措施和作业。通常，主机遥控气动装置的维修方式选择常以图 5-1 所示方法进行<sup>[38]</sup>。

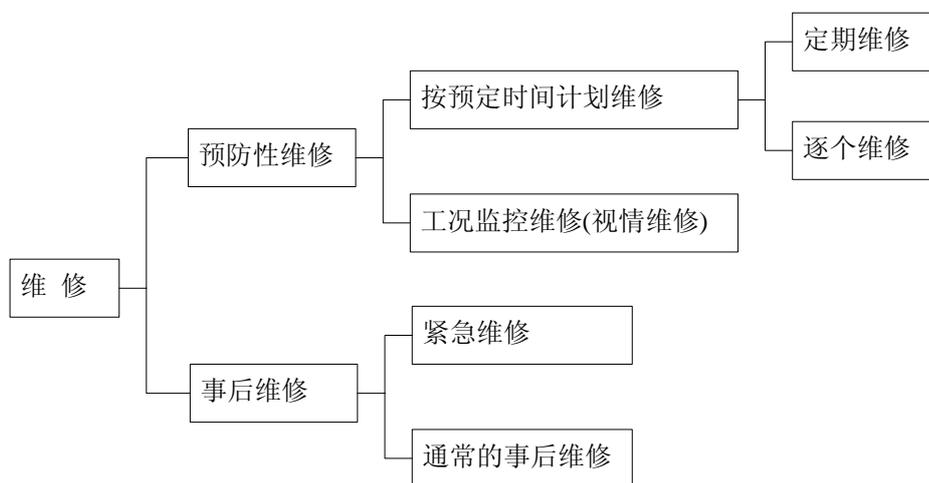


图 5-1 主机遥控气动装置常规维修方式的选择

### 5.1.1 预防性维修

预防性维修也称事前维修，是指根据规定的程序所进行的检查、实验和再调整，以防止使用中发生故障而进行的维修，即为确保在设备在使用中故障尚未发生之前即予以防止，保持设备处于使用可靠状态而按计划进行的维修。

按预定时间计划维修是指基于预定的维修计划进行预防维修的总称。主机遥控系统气动装置属预防性维修的具体维修准则主要有：

1) 为了发现故障的征兆或未超过规定条件的功能块或元部件是否正常工作而进行的维护和检查。

2) 日常对主机遥控系统气动装置进行的清洁和调整等预防性工作，更换和修理未超过规定条件的元部件。

### 5.1.2 事后维修

事后维修是指在设备系统发生故障后所进行的维修，即在故障发生后为使系统恢复到可运行状态而进行的维修。处理未经预防性维修的故障通常称作事后维修；处理经预防性维修后出现的故障称作紧急维修。

通过事后维修来维护主机遥控系统气动装置的方法，在一定程度上具有其相应的优点。这种方法不需要预防维修时间，所以即使不能说明此时系统的可用度最大，一般也是相当高的。但是，有时系统级故障的发生会造成严重的主机失控事故或航行危险，造成很大的经济损失。因此，如果平时就重视检修、维护、防患于未然，自然就保证了系统处于最佳状态。

### 5.1.3 以可靠性为中心的综合维修

以可靠性为中心的维修（Reliability-Centered Maintenance）理论是以最低的维护费用来维持复杂系统的固有可靠性。其主要目的是提高设备系统的利用率，节约设备系统维护费用。其基本观点为<sup>[39]</sup>：

1) 系统的可靠性是由系统设计时决定的，维修工作只能保持或恢复这种可靠性，而不能提高这种可靠性。

2) 必须根据设备系统的固有可靠性, 而不应完全根据使用时间来确定应做的预防维修工作内容。强调在科学分析的基础上, 只进行为保持或恢复设备系统固有可靠性所必须的维修工作, 避免做多余无效的维修。

这种可靠性维修理论其维修方式的选择, 不以采用某一固定的维修方式的方法, 而是采取定时(期)方式、视情方式与状态监控方式相结合的多种维修方式, 使维修工作更趋科学性、合理性与经济性。可靠性维修思想的运作方式如图 5-2 所示。

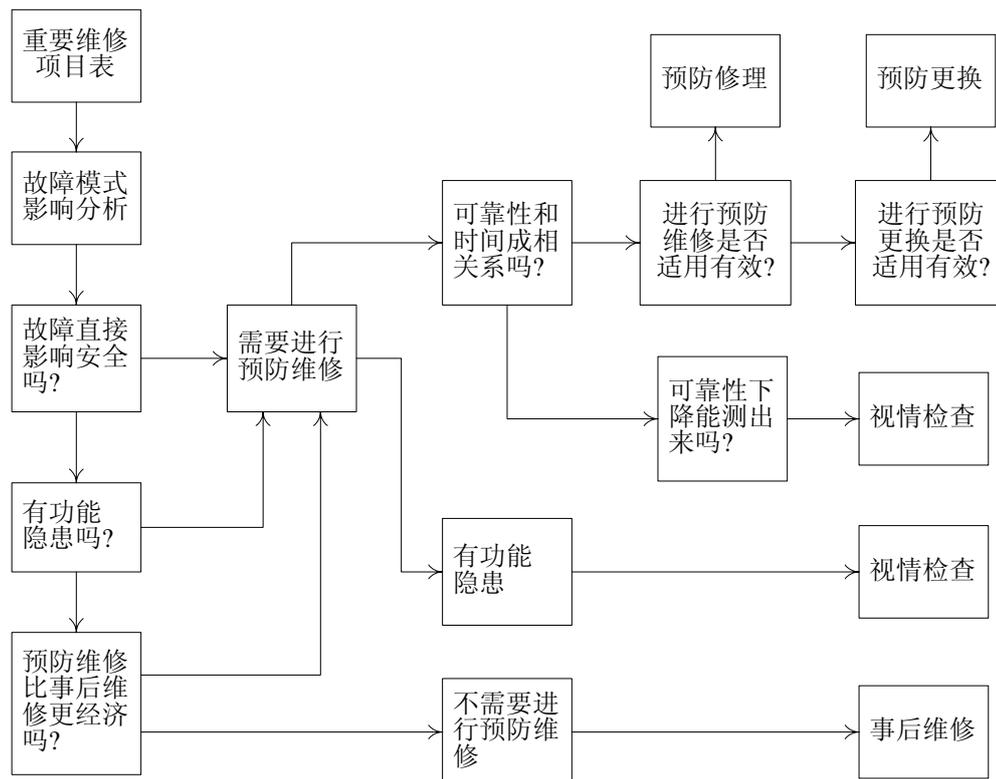


图 5-2 可靠性维修思想的运作方式

与传统的维修思想相比, 可靠性维修思想具有以下特点:

1) 对维修作用认识正确, 并不认为对设备系统的预防维修工作做的越细、越多, 系统的运行可靠性就越高, 摈弃了对诸如主机遥控气动装置这类复杂系统以往采用的常规维修方式;

2) 可靠性维修方式选择合理, 根据设备系统故障产生的后果按适用性和有效性的原则来确定维修方式。可将维修人员的工作经验、专业知识与逻辑判断、系统可靠性参数相结合, 制定出系统维护必需要做的与最好要做的预防性工作, 实现对设备系统的主动预防性维护。

3) 强调做好维修后勤保障工作的重要性，特别注重岸、船间技术支援的重要性。

## 5.2 失效与失效分布

主机遥控气动装置元器件（多为控制阀件）的失效分布密度服从负指数分布：

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (5-1)$$

因此根据可靠性有关定义，有：

$$\text{失效率} \quad \lambda(t) = \lambda \quad (5-2)$$

$$\text{可靠度} \quad R(t) = e^{-\lambda t} \quad (5-3)$$

$$\text{不可靠度} \quad F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (5-4)$$

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

由气动阀件厂商（REXROTH和NABCO）推荐的主机遥控气动维修保养说明中，气动阀件平均寿命见表 5-1 第二栏所示。因而根据式（5-5）可计算得到相应的失效率，见表 5-1 第三栏所示<sup>[28]</sup>。

表 5-1 由厂商提供的气动系统控制阀件平均寿命表

元器件	平均寿命（MTTF）	失效率（ $\lambda$ ）
工作压力为 10bar 的多路阀	8 年	$14.3 \times 10^{-6}$ / 小时
工作压力为 30bar 的多路阀	4 年	$28.6 \times 10^{-6}$ / 小时
电气转换器	8 年	$14.3 \times 10^{-6}$ / 小时
管接头	8 年	$14.3 \times 10^{-6}$ / 小时
转换开关阀	8 年	$14.3 \times 10^{-6}$ / 小时
储气罐	$\infty$	0
气缸，执行元件	8 年	$14.3 \times 10^{-6}$ / 小时
单向阀、节流阀、调压阀	8 年	$14.3 \times 10^{-6}$ / 小时

表 5-1 元器件使用条件是：1) 平均环境温度 20 摄氏度；2) 所使用的压缩空气经过中等程度过滤精度的过滤器过滤及除水处理；3) 阀件年均动作次数 25000 次。由此可见，如果根据厂商要求，则主机遥控系统气动装置在投运 8 年后，均应大修更换元器件，以确保系统安全可靠运行。但是就我们调研结果，实际情况却是大多数 10

年以上船龄船舶上主机遥控气动装置并未在要求期限内大修，而仍保持较少故障率，但也有船舶，因各种原因，投运 4、5 年的气动系统却故障不断，甚至造成主机失控。

因此如果仅根据厂商提供的元器件寿命数据，以常规的预防性定期维修和事后维修，是不客观的。应该是在对气动装置的使用可靠性作出正确评估的基础上制定合理的维修计划。

### 5.3 以最大概率分布描述的气动装置状态评估模型

为了客观评价主机遥控气动装置失效状态，我们使用机舱轮机日志所记载的对主机遥控气动装置故障记录以及维修记录，进行统计分析：

1) 对同一类阀件。如果是不可修复故障，如密封失效等，统计其平均寿命 $T_m$ 。（密封件更新后，表示其前一寿命的终结，新一寿命的开始）。于是可得到失效率：

$$\lambda = \frac{1}{T_m} \quad (5-6)$$

2) 对同一类阀件，如果是可修复故障，如操作不当，或机械故障等，统计其故障次数 $n_m$ ，可得到失效率

$$\lambda = \frac{n_m}{N_m} \quad (5-7)$$

式中 $N_m$ 为器件动作总次数，由专家经验确定。

$\lambda$  的准确程度依据于统计样本的规模和统计时间的长短。如果样本规模较小，如只统计一条船；或统计时间较短，如只统计 5 年纪录，则  $\lambda$  数据的准确性肯定不高。为此我们在本项目所开发的应用程序中对元器件基本数据库专门开辟了故障记录和维修记录二个数据段，装船后，用以记录主机遥控气动装置所发生的故障和维修。以便于我们的统计分析。

计算元器件失效率时，首先要对系统元器件故障进行分类，表 5-2 所示是中远集运 2700TEU 船 MH 轮 MAN B&W 机型主机遥控气动系统元器件故障分类。表中  $\checkmark$  表示可能存在此故障， $\times$  表示不可能有此故障。

表 5-2 2700TEU 东河轮 MAN B&W 气动系统阀件故障分类表

序号	阀类型	故障底事件（不可再分解故障）					
		密封失效 $\lambda_s$	弹簧断裂 $\lambda_t$	阀芯卡死 $\lambda_p$	电磁铁烧坏 $\lambda_c$	机械故障 $\lambda_m$	操作设定不当 $\lambda_h$
1	簧复式气控阀	√	√	√	×	×	×
2	簧复式机控阀	√	√	√	×	√	×
3	簧复式手控阀	√	√	√	×	×	√
4	簧复式电磁阀	√	√	√	√	×	×
5	气复式气控阀	√	×	√	×	×	×
6	气复式手控阀	√	×	√	×	×	√
7	气复式电磁阀	√	×	√	√	×	×
8	转换开关	√	×	√	×	×	√
9	单向一节流阀	×	×	×	×	×	√
10	泄放阀	√	×	√	×	×	√
11	双向止回阀	√	×	√	×	×	×
12	精密调压阀	×	×	√	×	×	√

### 5.3.1 元器件故障底事件及其失效率计算

设某元器件的第*i*个底事件（即故障事件或称失效事件）发生概率为  $\lambda_i$ ，则此事件不发生的概率为

$$\gamma_i = 1 - \lambda_i \quad (5-8)$$

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

$$\gamma = (1 - \lambda_1)(1 - \lambda_2) \dots (1 - \lambda_k) = \prod_{i=1}^k (1 - \lambda_i) \quad (5-9)$$

因此上一级故障事件的概率，即失效率为

$$\lambda = 1 - \gamma = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - \lambda_i) \quad (5-10)$$

根据表 5-2 给出的底事件分类，在获得  $\lambda_i$  的有效数据后，可由式（5-10）计算出。进一步可依据式（5-4）计算出上一级元部件不可靠度

$$F_v = 1 - e^{-\lambda t} \quad (5-11)$$

在计算不可靠度时，时间  $t$  的计时起点为最近一次故障修复时刻。至此，我们可以通过  $\lambda$  和  $F$  的有效数据，来评价系统各级元器件状态。这为第五章中 FTA 和 FEA 分析提供有力的客观依据。

### 5.3.2 系统各级故障事件发生概率及各级不可靠度计算

第四章中，在构筑故障树（FTA）时，我们把主机遥控气动装置故障源分成三级：（功能块、组件元器件和不可分解单元元件），并且直接以最小路集生成故障树，即每一系统级故障（顶事件）树枝，均以或门形式出现。这为现在进行的故障定量分析带来了很大方便。图 5-1 是我们定义的 FTA 失效率计算原型<sup>[39]</sup>。

根据图 5-3 的 FTA 原型，设第  $i$  个系统级故障  $f_i$  的故障概率（失效率）为  $\lambda_{f_i}$ ，它由下一级  $m$  个可能的失效功能块所引起；而功能块故障  $u_{ij}$  它又由下一级  $n$  个可能的失效组件所引起；而组件故障  $v_{ijk}$  它又由下一级  $p$  个可能的失效元器件所引起，故有如下递推关系：

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{f_i} = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - \lambda_{u_{ij}}) \\ \lambda_{u_{ij}} = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - \lambda_{v_{ijk}}) \\ \lambda_{v_{ijk}} = 1 - \prod_{l=1}^p (1 - \lambda_{w_{ijkl}}) \end{array} \right. \quad (5-12)$$

式中  $\lambda_{f_i}$ 、 $\lambda_{u_{ij}}$ 、 $\lambda_{v_{ijk}}$  及  $\lambda_{w_{ijkl}}$  分别为顶事件、功能块、组件及最终不可分解的底事件失效率。因此，根据式（5-12），通过底事件失效率，进行代入计算，即可推出第  $i$  个系统级故障发生的可能性。

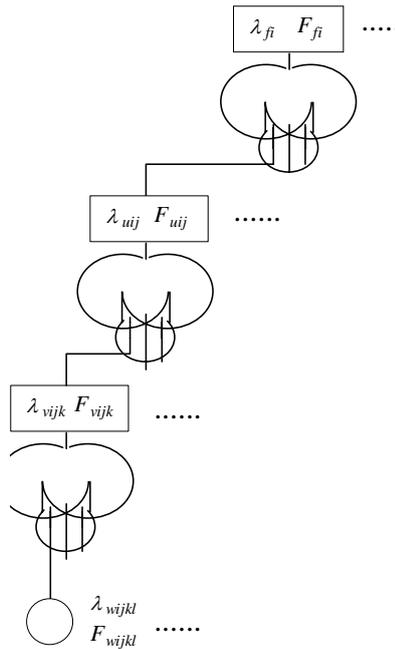


图 5-3 失效率计算原型

但是由于负指数失效分布，它无时间记忆性，因此仅仅根据式 (5-12) 计算结果还不能进一步确定或预测系统目前的状态。还要计算系统的不可靠度  $F$ 。根据图 5-3 所示的 FTA 原型以及式 (5-3) 和式 (5-4)，可导出系统级事件  $i$  不发生的可靠度为

$$R_{f_i} = \prod_{j=1}^m R_{u_{ij}} = \prod_{j=1}^m \prod_{k=1}^n R_{v_{ijk}} = \prod_{j=1}^m \prod_{k=1}^n \prod_{l=1}^p R_{w_{ijkl}} = e^{-\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^p \lambda_{w_{ijkl}} t_i} \quad (5-13)$$

因此描述系统级第  $i$  个故障状态（危险程度）的不可靠度  $F_{f_i}$  为

$$F_{f_i} = 1 - R_{f_i} = 1 - e^{-\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^p \lambda_{w_{ijkl}} t_i} \quad (5-14)$$

由式 (5-14) 可见，系统级故障状态评估，完全可由底事件的  $\lambda_{w_{ijkl}}$ ，以及累计到目前为止的底事件不发生时间  $t$  来确定。这里每个底事件的  $t$  是不同的， $t = t_i$ 。在 FTA 分析中加入式 (5-14) 后，为制定合理的维修计划提供了定量化依据。

## 5.4 实例

我们对中远集运某河字号集装箱轮 MAN B&W 主机遥控气动装置运用上述最大

概率分布评估模型进行 FTA 优化搜索分析。该轮于 1989 年投运，表 5-3 列出了投运以来主机遥控气动装置的部分故障。由最大概率法对其分析，如表中序号 11 的“驾/集控不能起动”故障，FTA 的可能故障源数目为 26 个，经不可靠度计算搜索排序后，一级搜索排序为 4，二级为 3，三级为 1。因此只需  $4 \times 3 \times 1 = 12$  次搜索即可命中直接故障源。而如果按传统的 FTA 分析，则一次罗列出所有 26 个可能故障源，要从中迅速找出直接故障源，除非有相当经验，否则是有困难的。

表 5-3 最大概率法 FTA 分析结果

序号	故障现象	发生日期	直接故障源	FTA 故障源数目	最大概率法 FTA 分析					
					各级不可靠度计算			搜索排序结果		
					$F_u$	$F_v$	$F_w$	$S_u$	$S_v$	$S_w$
1	驾控不能起动	90/11	驾控电磁阀卡死	20	0.2709	0.2391	0.1015	3	1	2
2	主机转速不稳定	92/5	AC-4 的 D/A 板故障	18	0.2642	0.1172	0.0954	4	2	1
3	主机工作爆炒	92/8	VIT 定时不当	9	0.3203	0.2731	0.1511	1	1	1
4	控制气源低压	93/5	气源减压阀接头漏气	7	0.3781	0.2150	0.1394	1	2	1
5	主机起动困难	95/1	主起动阀泄漏	22	0.4186	0.3154	0.1172	3	1	2
6	慢转起动失败	95/3	慢转起动阀阀芯磨损	4	0.5840	0.5092	0.3224	1	1	1
7	主机自动停车	96/2	测速传感器故障	16	0.5017	0.2456	0.1290	2	2	2
8	起动耗气过多	96/6	主起动阀不能关闭	3	0.5230	0.3231	0.2617	1	1	1
9	运行工况不良	97/7	VIT 执行器故障	8	0.8733	0.4112	0.2803	1	2	1
10	转速达不到设定值	98/12	高压油泵泄漏	24	0.2433	0.2012	0.1179	4	1	2
11	驾/集控不能起动	99/1	控制气路支管破裂	26	0.3611	0.1105	0.0723	4	3	1

## 第六章 应用程序开发研制

MAN B&W主机遥控系统气动装置的原理仿真、动态演示、以及故障诊断辅助分析的计算机应用程序采用Microsoft Visual C++ 5.0 工具开发。经编译后生成的应用程序对运行环境的要求为：586CPU，16M内存，200M硬盘空间，能支持 800×600 分辨率增强 256 色的显示卡，WIN95 操作系统。

### 6.1 应用程序结构

根据本项目所规定的要求，应用程序结构如图 6-1 所示，虚线框将是在第二版中加入的内容。

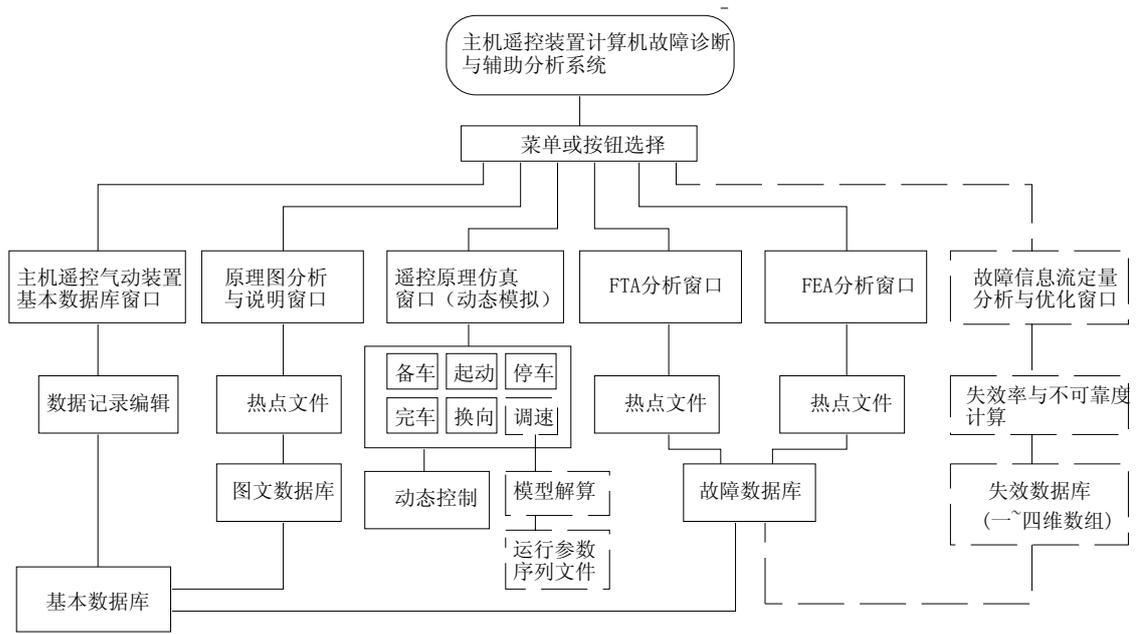


图 6-1 应用程序结构示意图

应用程序主要组成部分为：数据库；热点链接文件和界面（窗口）。

#### 1) 应用程序数据库

数据库中的资源用来支撑应用程序，总共有四个数据库：基本数据库、图文数据库、故障数据库和失效数据库。

基本数据库是一个关系数据库，系统所有元器件作为记录存放在此数据库中。记录的若干字段，用作登记元器件属性，可以允许使用者修改，这在第三章中已阐明。记录的另一一些字段存放着调用其它数据库的指针或关键字。这些字段不允许用户修改。

图文数据库是一种文件格式的数据库，保存着原理图分析的所有图文资源。图文数据库的内容，需通过基本数据库相应记录给出的关键字来检索和寻找。

故障数据库是一个关系数据库。FTA 的所有不可分解故障源（底事件）和 FEA 的主要元器件故障模式均作为记录保存在该数据库中。通过基本数据库相应记录给出的关键字来调用该数据库中的相应内容。

失效数据库是一种文件格式的数据库，保存失效率  $\lambda$  [ ]和不可靠度  $F$  [ ]的计算值，通过故障数据库相应给出的指针来读写对应数组  $\lambda$  [ ]和  $F$  [ ]的内容。

## 2) 点链接文件

应用程序热点文件所起的作用是把窗口界面与数据库联系起来，这种联系是通过特定的指针或关键字实现的。

## 3) 窗口界面

窗口界面即屏幕界面，有五大窗口。从结构化程序角度看，它们实际上是主程序的五个子程序。由于 WINDOWS 支持多线程操作，因此这五大窗口可以同时工作而互不影响，通过窗口中的事件触发来执行窗口任务。

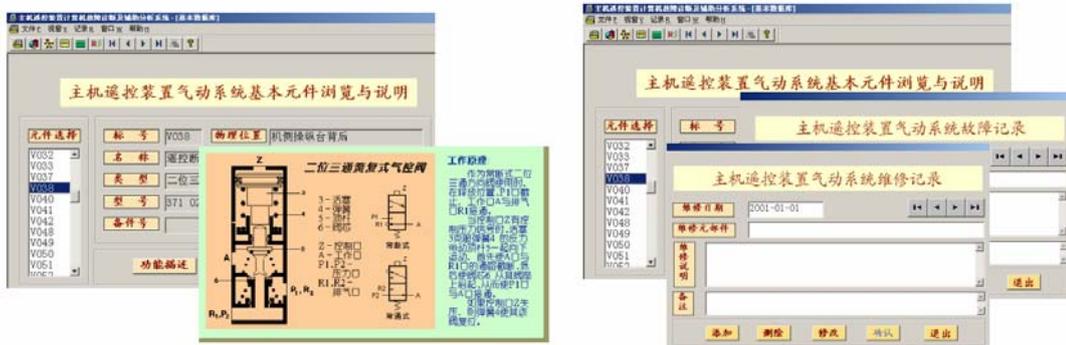
应用程序的五大视窗，如图 6-2 所示。分别为：主机遥控气动装置基本数据库窗口、原理图分析和说明窗口、气动装置的原理仿真窗口、气动装置的故障诊断 FTA 窗口、以及 FEA 窗口。



图 6-2 应用程序窗口界面

## 6.2 基本数据库窗口

它以表格形式给出了 MAN B&W 主机遥控气动装置的全部元器件列表和它们的属性（名称、型号、安装位置、结构图等）。基本数据库允许使用者对其修改并且要求使用者对系统元器件的故障与维修作记录，历史数据积累以便于对系统进行评估分析。图 6-3（a）所示为对应所选中的元器件，可查看其基本属性以及相应的结构原理图弹出窗口。图 6-3（b）所示为对应所选中的元器件，填写相应的故障及维修记录的弹出窗口。



(a) 功能描述

(b) 故障与维修记录

图 6-3 基本元器件浏览与说明

## 6.3 原理图分析和说明窗口

以静态方式实现对 MAN B&W 主机遥控气动装置的气路原理分析,通过热点弹出技术的运用,对气路图进行深入、仔细的分析说明,原理图分析包括了五个窗口:系统总图、控制气源图、起动控制图、停车控制图和换向控制图。由于程序支持多文档界面,因此,既可以打开一个图,又可以五个图全部打开,方法很灵活。

### 6.3.1 热点链接

为了构造热点链接文件,根据在主窗口中所显示的气动控制原理图尺寸,来确定元器件热点的位置坐标。凡在图中网格交叉点上的元器件,均可定义热点 $C_{X,Y}$ 。网格疏密由元器件疏密来决定。于是热点文件实际上是网格节点的集合。对应一个 $C_{X,Y}$ ,就有一个相应指针指向系统基本数据库某一条元器件记录,再搜索图文资源库中相应的图文资源。热点被激活后,则能在主窗口弹出相应图文说明。从而达到了对原理图分析目的。

构造热点链接文件的优点是使应用程序具有开放性。B&W 机型主机型号从 46MC 到 98MC,相应的气动控制系统的一些功能块或组件可根据用户要求而选用。所以当原理图变动时,只要修改热点文件,增加或删除热点。而不用去修改主程序。

热点可以多层嵌套,这特别适用于分析原理图中的功能块或组件。多层嵌套热点文件的构造与前面讲的类似,区别只不过是加上层次识别符。

### 6.3.2 热点调用

作为一个多层嵌套的热点调用例子,我们以可变喷油定时功能块(VIT)为例作一说明。VIT 功能块较为复杂,将其结构原理的分析说明层层分解,表 6-1 所示为 VIT 分解表。

表 6-1 VIT 分析说明分解表

第一级 热点 $C_{XY}$	第二级 热点 $D_{XY}$	第三级 热点 $E_{XY}$	第四级 热点 $F_{XY}$	第五级 热点 $G_{XY}$	
VIT 机构	VIT 调节 系统总成 结构图	高压燃油泵 组成图 $E_{X1Y1}$	结构分解图 $F_{X1Y1}$	立体剖面图 $G_{X1Y1}$	
				平面剖面说明图 $G_{X2Y2}$	
				再分解图 $G_{X3Y3}$	
				断油信号发送阀 $F_{X2Y2}$	结构原理说明图 $G_{X4Y4}$
		VIT集中调节 单元机械结 构示意图 $E_{X2Y2}$	正时设定调节阀 $F_{X3Y3}$	结构原理说明图 $G_{X5Y5}$	
			操作模式说明 $F_{X4Y4}$		
			高载荷调整说明 $F_{X5Y5}$		
			低载荷调整说明 $F_{X6Y6}$		
			拐点调整说明 $F_{X7Y7}$		
				最大燃爆压力调整说明 $F_{X8Y8}$	
		正时信号缓 冲阀 $E_{X3Y3}$	阀件结构及工作原理说明图 $F_{X9Y9}$		

根据表 6-1 的要求，多层嵌套的热点调用如图 6-4 所示。图 6-5 为 VIT 结构原理分析说明的程序实现窗口。

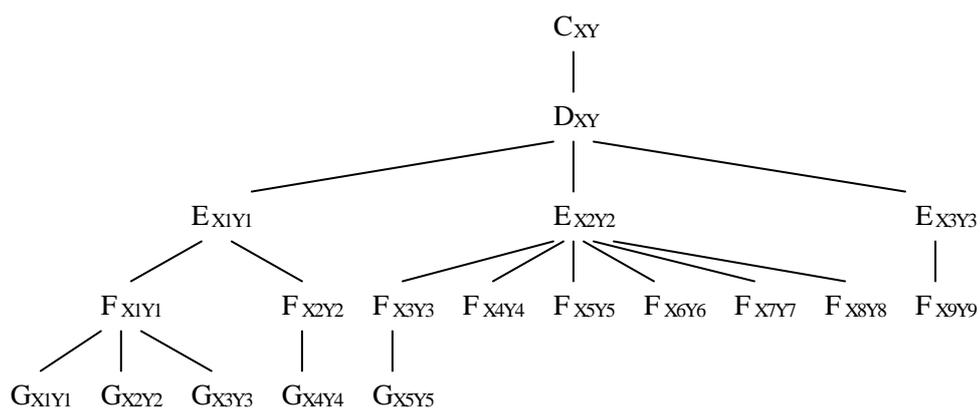


图 6-4 VIT 机构多层嵌套热点调用示意图

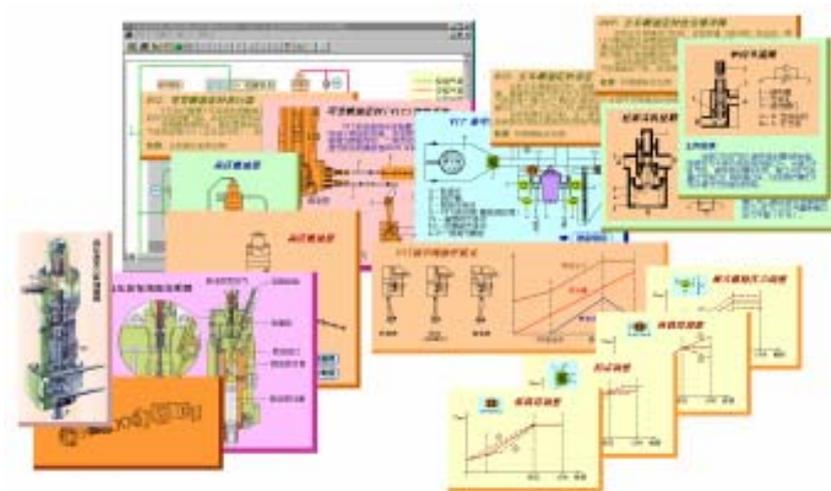


图 6-5 VIT 结构原理分析说明多层次图文窗口

## 6.4 气动装置的原理仿真窗口

以动态方式实现对 MAN B&W 主机遥控气动装置的气路原理分析，仿真四种操纵原理：备车、起动、停车和换向。对其工作原理进行动态仿真。实现如下要求：

- 1) 对主机的起动、停车、换向三种操纵控制，动态地描述逻辑控制气路走向；
- 2) 对气动装置执行部件，如主 / 副起动阀，燃油泵凸轮机构等，以动态图像运动形式描述；
- 3) 主机备车，以人机对答方式描述。

### 6.4.1 动态仿真框架结构

主机遥控装置的仿真程序既要符合船舶主机操纵规范，又要使编程不太复杂，仿真程序的框架结构如图 6-6 所示。

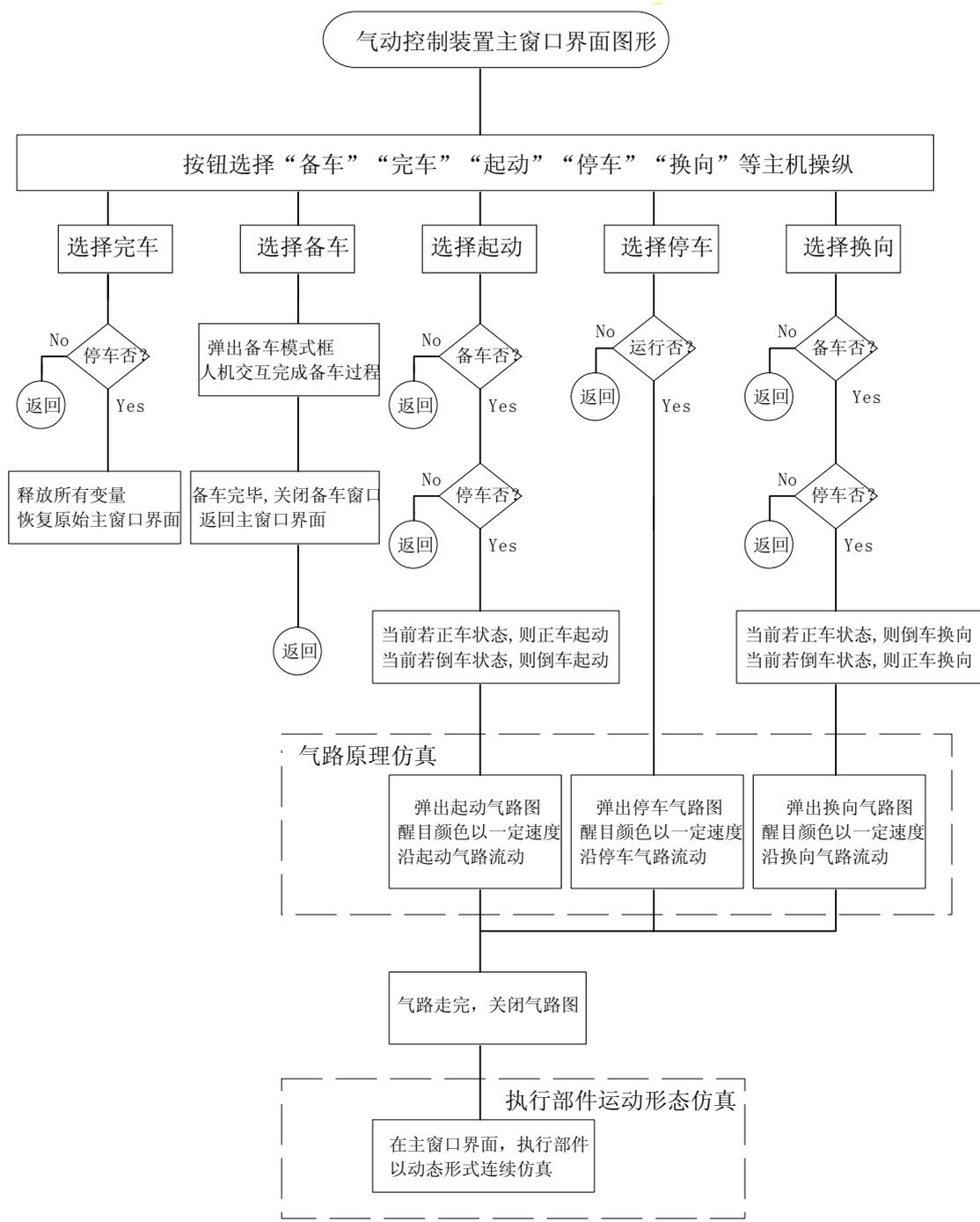


图 6-6 工作原理动态仿真程序框架结构

## 6.4.2 仿真图形界面

气路原理仿真是根据第三章给出的逻辑模型实现的。按照备车过程所给出的条件

以及当前仿真状态，当满足式 (3-5) (3-8) (3-11) 中给定逻辑时，以醒目颜色流条沿所控制的气路流动，给人一种直观的感觉。

为了方便使用者，气路流动演示的速度设为慢速 (约 50Pix / s)，中速 (约 100Pix / s) 和快速 (约 200Pix / s)。图 6-7 (a) 是仿真主窗口。图 6-7 (b) 是从仿真主窗口弹出的三种操纵工况 (起动、停车、换向) 演示图以及备车项目。

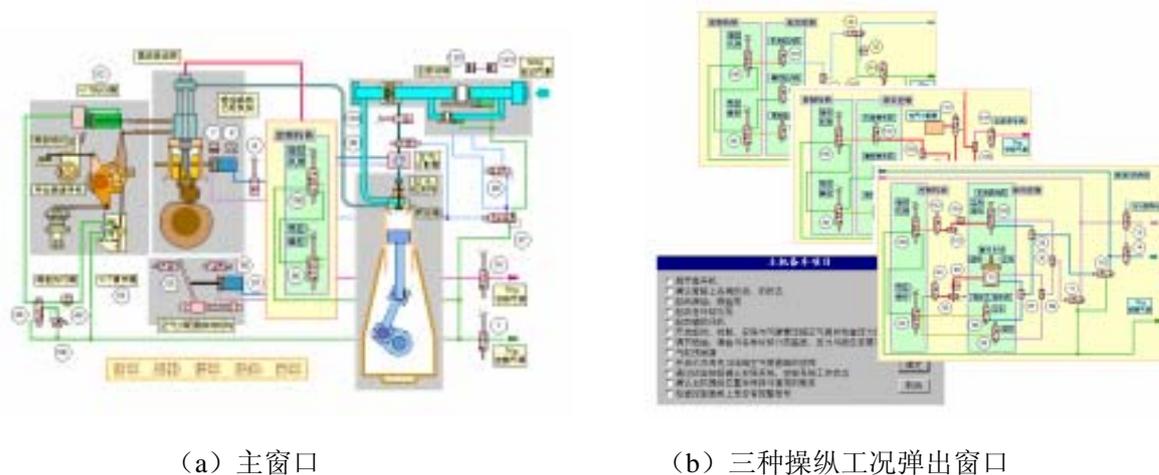


图 6-7 气路原理仿真图形界面

## 6.5 气动装置的故障诊断 FTA 窗口

FTA 故障信息流计算机查询程序实现方法，应用第四章的 FTA 模型的解算结果，以及第五章的失效概率分布计算结果。其步骤为：

- 1) 创建 FTA 顶事件屏幕窗口，和 FEA 元器件分类表屏幕窗口；
- 2) 创建 FTA 和 FEA 热点文件；
- 3) 由热点文件指针搜索 FTA 和 FEA 故障数据库。
- 4) 由弹出模式框显示故障信息。

图 6-8 所示为 FTA 的窗口界面。

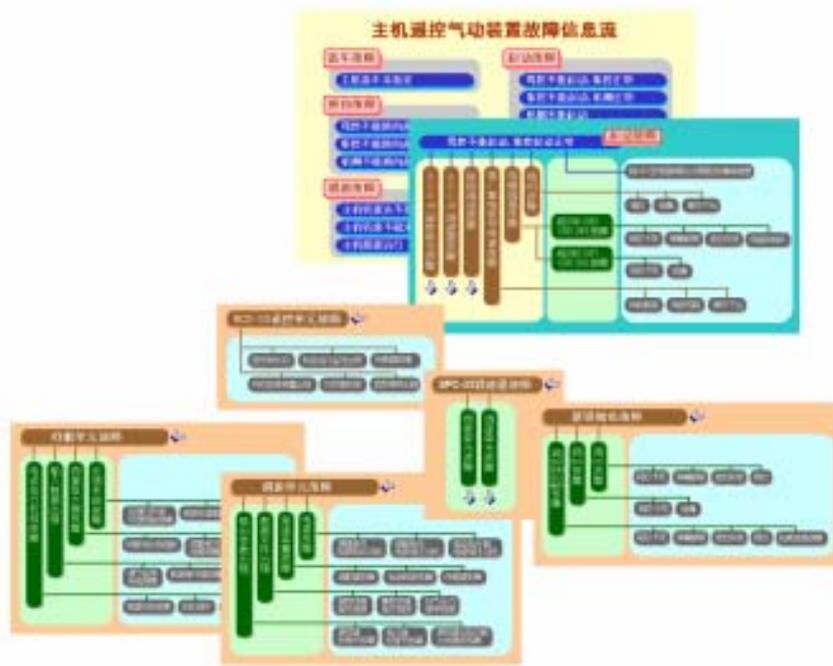


图 6-8 FTA 信息流计算机查询屏幕窗口

## 6.6 气动装置的故障诊断 FEA 窗口

FEA 计算机查询程序实现方法, 是 FTA 的逆过程。方法同 FTA。图 6-9 所示为 FEA 的窗口界面。



图 6-9 FEA 信息流计算机查询屏幕窗口

## 结 束 语

本课题的部分研究成果。本人参与和课题组其他人员先后分别在《中国航海》、《船舶工程》、《中国修船》、《航海技术》等杂志上发表。依据本文所论述的船舶主机遥控系统气动装置原理仿真与故障信息流分析而设计开发的计算机应用软件，已安装在中远集运 30 艘集装箱船舶上。因其界面友好，图形逼真，仿真效果直观明了，资料丰富，操作方便，实用性强，而深受轮机人员欢迎。特别是主机遥控气动装置的故障分析（FTA 与 FEA）能够帮助轮机管理人员及公司机务人员对其所发生的故障现象进行分析和评估，搜索出导致系统失效的故障源，指出故障源所在的物理位置，提供修复方法。

本文的基本思想和设计框架有着广泛的应用前景，可推广到其它类型控制设备的原理仿真与故障分析，实现计算机化教育和业务培训。对大型、复杂控制设备，运用这种手段进行原理仿真和故障分析训练及维修方法指导，可大大缩短操作人员的摸索适应期。

## 参考文献

1. 郑士君等,“MAN B&W 主机遥控气动装置计算机故障分析系统研制”,中国航海,2001(1),pp89-92
2. 郑士君等,“主机遥控气动装置 FTA 与 FEA 计算机分析软件开发”,中国修船,2001(3)
3. 郑士君等,“MAN B&W 主机遥控气动装置计算机原理仿真”,中国造船学会华东地区年会论文集,2001.5, pp89-92
4. 向阳等,“MAN B&W 主机遥控气动装置计算机辅助分析系统研制与开发”,航海技术,2001(3), pp40-42
5. 顾伟等,“基于故障统计模型的可修系统维修周期预测法”,机械强度,2000(3), pp1-3
6. 吴科良,“故障树分析技术在船舶自动化设备维修中的应用”,中国修船,1996(2)
7. 宋志国等,“故障树分析法在 CWBT 中的应用”,中国修船,1996(4), pp36-38
8. 刘世居,“船舶主机遥控系统的故障分析”,中国修船,1998(1), pp34-36
9. 高强等,“船用柴油机故障诊断专家系统的研制”,中国修船 1998(6), pp40-43
10. 褚建新等,“基于最大概率法的船舶主机遥控气动装置故障信息流分析”,船舶工程,2001(3),
11. 林叶锦,“微机主机遥控系统故障诊断分析”,航海技术,1998(1), pp44-46
12. 黄凯旋等,“轮机动态模拟系统研制”,航海技术,1998(6), pp52-54
13. 聂延生,“轮机仿真器的现状及展望”,航海技术,1999(5), pp57-58
14. 尹迪等,“以可靠性为中心的维修分析”,中国修船,1999(1), pp42-44
15. 杨春金等,“船舶电子设备可靠性与维修储备数据库设想”,中国造船,2000(3),
16. 孙建波等,“船用柴油机气动操纵系统故障判断和处理的一般方法”,中国修船,2000(4)
17. 詹志刚等,“以可靠性为中心的维修储备数据库设想”,中国造船,2000(4), pp39-41
18. 郭书祥等,“维修结构的动态可靠性预估”,机械强度,2000(3), pp43-45
19. 魏志成,“VC++中多文档、多视及窗口之间的内在关系”,电脑与信息技术,1999(3)
20. 应力等,“基于节点模型的船舶主机故障辅助分析系统设计”,交通与计算机,2001(4),
21. “NORCONTROL AUTO CHIEF—4 驾集主机遥控系统 MAN B&W 6L80MC 主机气动操纵系统”,中远集运五处安技科,1998.5
22. 史定华等,“故障树分析技术方法和理论”,北京师范大学社,1993
23. 吴今培等,“智能故障诊断与专家系统”,科学出版社,1997
24. 潘吉安,“可靠性维修性可用性评估手册”,国防出版社,1995
25. 陈文伟,“智能决策技术”,电子工业出版社,1998
26. 李杰仁,“轮机自动化”,科学出版社,1996
27. 陈鸿璆等,“主机遥控”,上海海运学院,1993
28. 田蔚凤等,“可靠性技术”,上海交通大学出版社,1996
29. 概率论与数理统计编写组,“概率论与数理统计”,重庆大学出版社,1991
30. 张训培等,“可靠性及其应用”,兵器工业出版社,1991
31. Kate Gregory, “Visual C++5.0 开发使用手册”,机械工业出版社,1998
32. 易宏等“船舶可靠性工程导论”,国防工业出版社,1995
33. 吴德铭等“船舶产品可靠性工程:可靠性设计”,哈尔滨大学出版社,1995
34. 盐见 弘等,“故障模式和影响分析与故障树分析的应用”,机械工业出版社,1987
35. S. A. Lapp, G. J. Powers, “Computer-aided synthesis of fault-trees”, IEEE Trans, Reliability, Vol. 26, 1977 Apr, pp2-13

36. J. D. Andrews, G. Brennan, "Application of the digraph method of fault-tree construction to a complex control configuration", Reliability Engineering and System Safety, 1990, pp357-384
37. J. B. Dugan, "Automated analysis of phased-mission reliability", IEEE Trans, Reliability, Vol. 40, 1991 Apr, pp45-52
38. J. B. Dugan, S. Bavuso, M. Boyd, "Dynamic fault-tree models for fault tolerant computer systems", IEEE Trans, Reliability, Vol. 41, 1992 Sep, pp363-377
39. K. J. Sullivan, J. B. Dugan, D. Coppit, "Developing a high quality tool for fault-tree analysis", Proc. Int'l Symp. Software Reliability Eng'g (ISSRE-99), 1999
40. K. Vemuri, J. Dugan, K. Sullivan, "Automatic Synthesis of Fault Trees for Computer-Based Systems", IEEE TR on Reliability, Vol. 48, No. 4 1999
41. R. Chinnam, "On-Line reliability estimation of individual components, using degradation signals", IEEE TR on Reliability, Vol. 48, No. 4 1999