

主机遥控装置计算机仿真与故障分析系统研制

中远集装箱运输有限公司 韩成敏 (200090)

上海海运学院 郑士君 (200135)

摘 要

本文借助于计算机技术、图形技术实现对主机遥控装置的系统仿真，方便了对复杂系统的解读，遥控系统工作原理和控制过程的模拟。运用故障树分析（FTA）和故障效应分析（FEA），从系统化角度建立镜像对称故障矩阵模型，实现对 MAN B&W 主机遥控气动装置的计算机故障信息流分析与查询。

关键词：主机遥控装置 仿真技术 故障树分析，故障效应分析，故障信息流

引言

船舶主机遥控系统是船舶机电设备中自动化程度较高的控制装置之一。由于遥控系统的各种故障而造成主机设备不能正常运行，降低了主机运行质量；由于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，也增加了机务管理难度。

1. 主机遥控装置计算机仿真

理论上，主机遥控系统的原理分析及原理仿真，应包括在轮机模拟器中。但是纵观国内外轮机模拟器发展现状，没有哪个轮机模拟器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。

1.2 主机遥控装置原理图分析

在一个独立的窗口屏幕中，装入主机遥控气动控制原理图。所有元器件（包括气动阀件

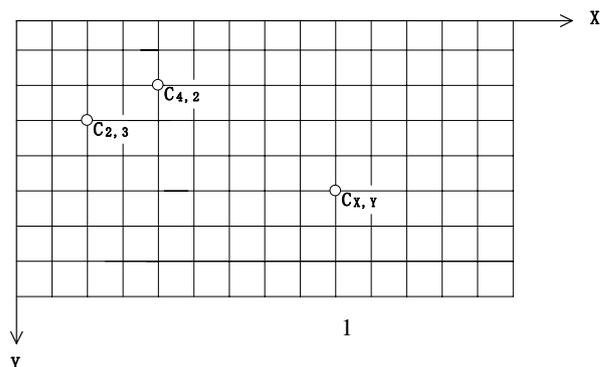


图1 建立热点文件的网格模板

和电气元件等)通过设置热点,以图文方式显示热点所对应的元器件的有关作用与工作原理说明,结构图,操作与调节方法等。实现这种计算机分析与查询程序,要建立热点文件和图文资源数据库。

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。图1所示,凡在图中网格交叉点上的元器件,均可定义热点 CX,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 $\{C_{x,y} | X,Y \in R\}$ 。

对应一个 CX,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。图2所示为热点调用示意图。

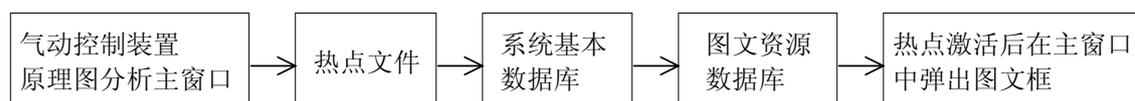


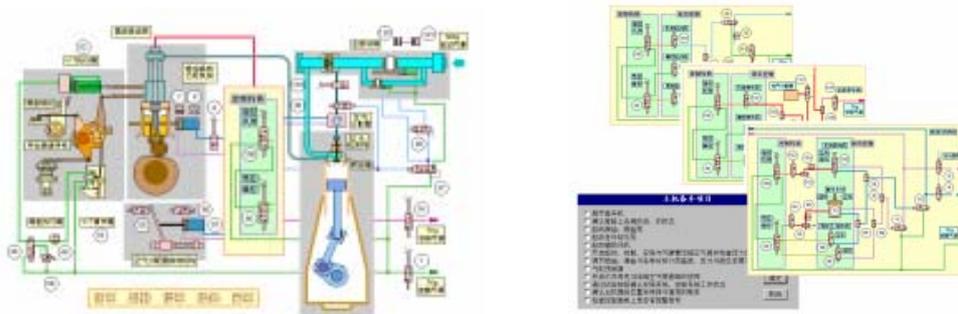
图2 原理图分析热点调用示意图

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,我们只要修改热点文件,增加或删除热点。而不用去修改主程序。

1.3 主机操纵工况原理仿真实现

对主机遥控装置工作原理进行原理仿真要求:1)对主机的三种操纵控制(起动、停车、换向),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,以动态图像播放形式描述;3)主机备车,以人机对答方式描述。

主机遥控装置的气路原理仿真是根据控制气路原理图按照备车过程所给出的条件以及当前仿真状态,以醒目颜色沿所控制的气路流动,给人一种直观的感觉。气路流动演示的速度可以人工设定:慢速(约 50Pix / s),中速(约 100Pix / s)和快速(约 200Pix / s)。图3(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3(a)为动态仿真主窗口界面图形。



(a) 动态仿真主窗口

(b) 气路演示弹出窗口

图3 动态仿真界面图形

系统中的一些执行部件，如燃油泵的凸轮机构运动等。这些运动形态仿真以二维动画形式实现。这里的关键难点是：在仿真主窗口界面图形中，执行部件有多个，其运动形态是相互关联的，如主机曲轴和活塞运动必须与高压燃油泵凸轮转动保持同步。因此，不同部件运动时必须保持动画帧频的同步。我们较好地解决了这一问题。其动态仿真较为逼真，无“卡通”现象。

2. 主机遥控装置计算机故障分析系统

许多故障实例表明，由于电子元器件集成度、自检能力及可靠性的日益提高，主机遥控系统疑难故障大多出现在气动控制部分。本文运用 FTA (Fault Tree Analysis 故障树分析) 和 FEA (Failure Effect Analysis 故障效应分析) 技术，从系统化角度构筑 FTA 与 FEA，实现遥控系统气动装置故障信息流分析。这里，FTA 从系统级失效（顶事件）开始，直至不可再分解的元器件失效（底事件）。故障信息在这里作为一种“流”，自上而下，顺着这种“流”，我们可以找到系统失效的故障源。而 FEA 则从元器件失效逆向推断其对系统的影响。故障信息在这里也作为一种“流”，自下而上，根据这种“流”，我们也可以找到某故障源对系统的危害程度。

2.1 系统级故障（顶事件）与故障树

根据调研结果及专家经验，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。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。我们把系统级故障（顶事件）发生原因，从系统的功能块追溯到不可再分解的系统元器件（底事件），从而建立相应的故障树。

2.2 FTA 系统化矩阵模型

当用计算机程序排列故障树，并进行故障查询与分析时，必须对树形图进行数学化描述，即建立 FTA 数学模型。

我们把主机遥控装置的故障链分成三级：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 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：

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

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：

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \mathbf{M} \\ u_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \Lambda & b_{1l} \\ b_{21} & & & \\ \mathbf{M} & & & \\ b_{m1} & & \Lambda & b_{ml} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \mathbf{M} \\ v_l \end{pmatrix} = \mathbf{B}\mathbf{V} \quad (2)$$

显然，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：

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \mathbf{M} \\ v_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \Lambda & c_{1g} \\ c_{21} & & & \\ \mathbf{M} & & & \\ c_{l1} & & \Lambda & c_{lg} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \mathbf{M} \\ w_g \end{pmatrix} = \mathbf{C}\mathbf{W} \quad (3)$$

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。合并式（1）、（2）、（3），则得：

$$\mathbf{F} = \mathbf{A}\mathbf{U} = \mathbf{A}\mathbf{B}\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{B}\mathbf{C}\mathbf{W} = \mathbf{D}\mathbf{W} \quad (4)$$

2. 3 FEA 信息流模型

对主机遥控装置的 FEA，其步骤是：1)确定系统主要元器件的故障模式对系统的危害程度（效应）；2)以表格形式建立 FEA 档案；3)从系统化角度构造 FEA 矩阵模型，并与 FTA 矩阵模型关联起来，为计算机故障查询与分析提供更为有效的手段。

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。

我们把故障效应也分成三级：第三级故障效应为组件（或部件）；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 ，根据上节中的相同推导方法，可得：

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \mathbf{M} \\ w_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \Lambda & \gamma_{1l} \\ \gamma_{21} & & & \\ \mathbf{M} & & & \\ \gamma_{g1} & & \Lambda & \gamma_{gl} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \mathbf{M} \\ v_l \end{pmatrix} = \boldsymbol{\gamma}\mathbf{V} \quad (5)$$

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \mathbf{M} \\ v_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \Lambda & \beta_{1m} \\ \beta_{21} & & & \\ \mathbf{M} & & & \\ \beta_{l1} & & \Lambda & \beta_{lm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \mathbf{M} \\ u_m \end{pmatrix} = \boldsymbol{\beta}\mathbf{U} \quad (6)$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \mathbf{M} \\ u_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \Lambda & \alpha_{ng} \\ \alpha_{21} & & & \\ \mathbf{M} & & & \\ \alpha_{m1} & & \Lambda & \alpha_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \mathbf{M} \\ f_n \end{pmatrix} = \boldsymbol{\alpha}\mathbf{F} \quad (7)$$

式中 $\boldsymbol{\gamma}$ 、 $\boldsymbol{\beta}$ 和 $\boldsymbol{\alpha}$ 分别为组件、功能块和系统级故障效应逻辑矩阵。合并式（5）、（6）、（7），则得：

$$\mathbf{W} = \boldsymbol{\gamma}\mathbf{V} = \boldsymbol{\gamma}\boldsymbol{\beta}\mathbf{U} = \boldsymbol{\gamma}\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{\alpha}\mathbf{F} = \boldsymbol{\delta}\mathbf{F} \quad (8)$$

式（5）、（6）、（7）、（8）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 (1)、(2)、(3) 和式 (5)、(6)、(7)，它们具有镜像对称性，如果我们在建立 FTA 树和 FEA 档案时，相互严格对应起来，则失效矩阵 ABC 与 $\alpha\beta\gamma$ 互逆，即：

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \mathbf{A}^{-1} \\ \beta &= \mathbf{B}^{-1} \\ \gamma &= \mathbf{C}^{-1} \\ \delta &= \mathbf{D}^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由此可见，当我们把 FTA 方法与 FMTA 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。

3. 应用程序开发

MAN B&W主机遥控装置仿真与故障信息流分析计算机应用程序采用Microsoft Visual C++ 5.0 工具开发。界面设计为多文档多窗口屏幕界面。应用程序结构如图 4 所示。

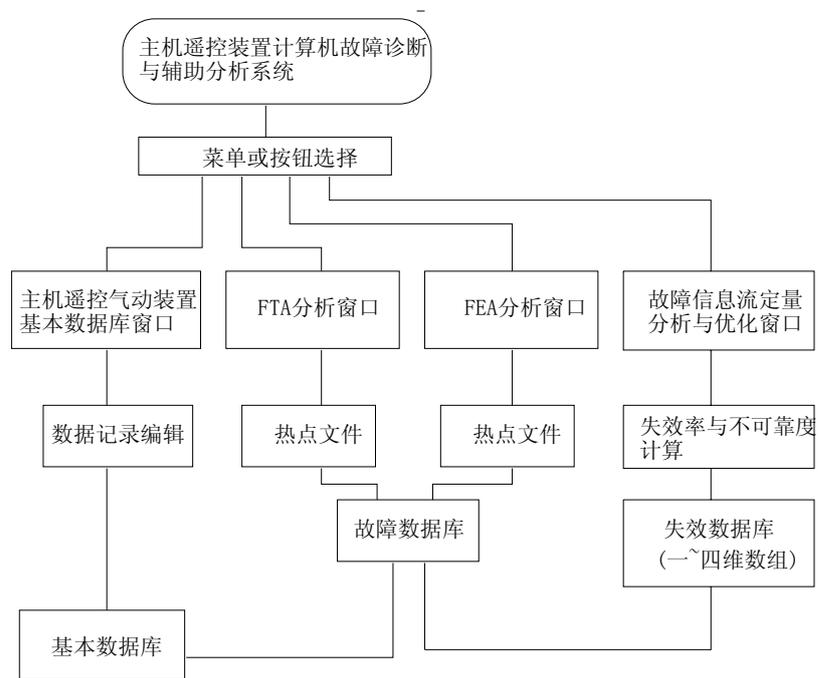


图 4 应用程序结构示意图

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）。数据库中的资源用来支撑应用程序，有基本数据库、故障数据库和失效数据库。数据库之间的关系如图 5 所示。

图中的失效数据库存放着气动装置元器件失效率与不可靠度统计数据，用以定量分析故障信息流。

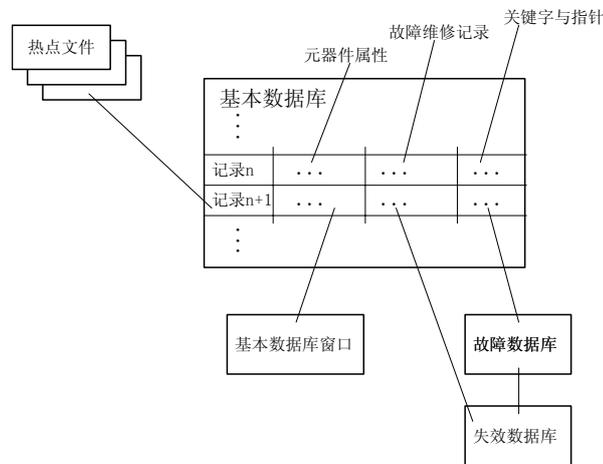


图 5 应用程序数据库关系图

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。

4. 结论

本文为了实现主机遥控装置原理仿真，我们解决了二个技术问题：1) 原理图分析的热点调用以及热点调用的多层嵌套；2) 原理仿真动态效果及动态同步处理，实现对主机的起动、停车、换向三种操纵工况动态描述的逻辑控制，并以二维图像形式描述。

主机遥控装置故障分析系统的开发技术路线是：1) 分析气动装置，充分调研后选定系统某功能失效的顶事件；2) 根据气动装置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；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。

依据本文所论述的船舶主机遥控系统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几十艘大型集装箱船舶与多用途船舶，已取得了相当好的经济效益与社会效益。

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] 韩成敏,“主机遥控装置计算机仿真与故障分析系统研制” 硕士学位论文, 上海海运学院, 2003
- [2] 史定华、王松瑞,“故障树分析技术方法和理论”, 北京师范大学社, 1993
- [3] 易宏等,“船舶可靠性工程导论”, 国防工业出版社, 1995
- [4] 俞勇、盛焕,“计算机图形学”, 上海交通大学出版社, 1996
- [5] 黄凯旋、陈飞燕,“轮机动态模拟系统研制”, 航海技术, 1998(6), pp52-54
- [6] 孙俊,“实时仿真建模技术及其在轮机仿真训练器中的应用”, 计算机仿真, 2000(3), pp64-66