

# 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

上海海运学院 褚建新 顾 伟 郑士君  
中远集装箱运输有限公司 吴树雄 蒋国仁

**摘 要** 该文通过对主机遥控气动装置故障记录和维修记录的历史数据分析,计算系统各级失效率与不可靠度,由最大概率路径对故障树(FT—Fault Tree)进行搜索和排队,实现其定量优化分析。所研制的计算机应用程序已实船使用。

**关键词** 失效率 不可靠度 故障分析 故障信息流

## 1 引 言

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,船舶主机遥控系统疑难故障大多出现在气动控制部分<sup>[1]</sup>。对主机遥控气动装置进行故障诊断与分析,或者对其进行状态评估,用故障树分析(FTA—Fault Tree Analysis)方法是行之有效的。这种方法在信息流上有明确的因果关系。对 FTA 而言,它建立起主机遥控气动装置的失效信息逻辑关系链,使顺着这种信息流的逻辑关系链,最终找到可能导致系统失效的故障源,即系统某功能失效(果)是由若干元器件失效(因)所引起。

但是,这种由专家经验和逻辑法则所建立的 FTA,并不能对故障信息给出定量解释。当进一步要求在某系统级故障发生时,能够指出引起此故障的最可能原因,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,应该采取哪些预防维护措施等等。此时常规的 FTA 显得无能为力。

从信息学角度看,信息(当然包括故障信息)具有弥漫性,可以在时间上无限延续。因此,如果某系统积累了相当数量的历史数据,通过恰当的统计分析,可以获得极有价值的有用信息。本文尝试采用历史数据统计方法,通过故障记录与维修记录的历史数据分析,将其运用于对 MAN B&W 主机遥控气动装置基本元器件的失效率和不可靠度计算。通过对这些基本事件(故障源)的概率统计,实现 FTA 的定量化优化分析。

## 2 元器件故障底事件及其失效率

主机遥控气动装置元器件(大多为控制阀件)的失效分布密度服从负指数分布,即:

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

因此根据可靠性有关定义,有

$$\text{失效率} \quad (t) = \quad (2)$$

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

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

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

由气动阀件厂商推荐的主机遥控气动装置维修保养说明中,对工作压力为 10bar 的气动阀件,平均寿命 8 年;工作压力为 30bar 的气动阀件,平均寿命 4 年。但实际情况是:大多数有 10 年以上船龄的船舶,主机遥控气动装置并未在要求期限内大修,仍保持较少故障率;而有的仅 4~5 年船龄的船舶,因维护保养不善,主机遥控气动系统却故障不断,甚至造成主机失控。

为了客观评价主机遥控气动装置失效状态,根据主机遥控气动装置故障记录和维修记录的历史数据进行统计分析:

(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:

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

(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:

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

式中,  $N_m$  为器件动作总次数,由专家经验确定。

的准确程度取决于统计样本的规模和统计时间的长短。如只统计一条船(样本规模较小),或只统计5年纪录(统计时间较短),则数据的准确性肯定不高。为此,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,用以记录船上主机遥控气动装置所发生的故障和维修,以便于统计分析。

设第  $i$  个元器件故障(底事件)发生概率为  $i$ , 则此事件不发生的概率为:

$$i = 1 - i \quad (8)$$

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:

$$= (1 - i_1)(1 - i_2) \dots (1 - i_k) = \prod_{i=1}^k (1 - i) \quad (9)$$

因此,上一级故障事件的概率,即失效率为:

$$= 1 - \prod_{i=1}^k (1 - i) \quad (10)$$

在获得  $i$  的有效数据后,可由式(10)计算出。依据式(4)就可计算出上一级部件的不可靠度为:

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

其中,  $t$  的计时起点为最近一次故障修复时刻。

至此,我们可以通过  $F$  的有效数据来评价系统各级元器件状态,为 FTA 定量分析提供客观依据。

### 3 系统各级故障事件发生概率及各级不可靠度

在对 FTA 构筑故障树模型时,把主机遥控气动装置故障源分成三级(功能块、组件和元器件),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。这为故障定量分析带来了很大方便。图 1 为所定义的 FTA 失效率计算原型。

根据图 1 的 FTA 原型,设第  $i$  个系统级故障  $f_i$  的故障概率(失效率)为  $f_i$ ,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:

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

式中,  $f_i$ 、 $u_{ij}$ 、 $v_{ijk}$  及  $w_{ijkl}$  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(12),通过底事件失效率,即可推出第  $i$  个系统级故障发生的可能性。

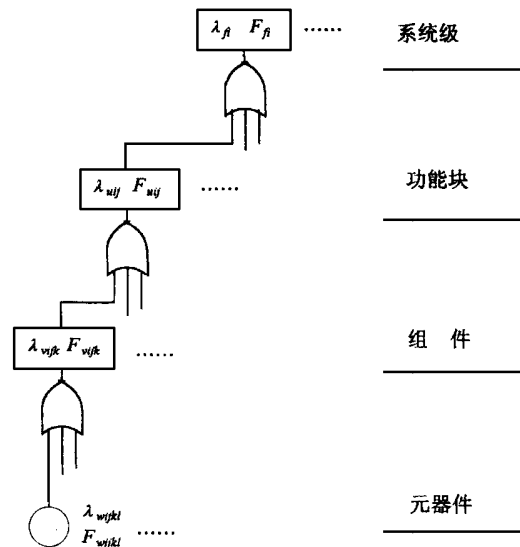


图 1 FTA 失效率计算原型

但是,由于负指数失效分布无时间记忆性,因此仅仅根据式(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 1 所示的 FTA 原型以及式(3)和(4),可导出系统级事件  $i$  不发生的可靠度为:

$$\begin{aligned} R_{f_i} &= \prod_{j=1}^m R_{u_{ij}} = \prod_{j=1}^m \prod_{k=1}^n R_{v_{ijk}} \\ &= \prod_{j=1}^m \prod_{k=1}^n \prod_{l=1}^p R_{w_{ijkl}} = e^{-\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^p w_{ijkl} t} \quad (13) \end{aligned}$$

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:

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

由式(14)可见,系统级故障状态评估,完全可由底事件的  $w_{ijkl}$  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(14)后,为优化分析提供了数学模型。

### 4 FTA 定量优化搜索与排队

FTA 定量优化搜索的具体步骤为：定义数组，用以储存自底事件至顶事件的各级失效率  $w$ 、 $v$ 、 $u$ 、 $f$  和各级不可靠度  $F_w$ 、 $F_v$ 、 $F_u$ 、 $F_f$ 。各级失效率和各级不可靠度数组的全体构成失效数据库；对每级  $\lambda$  和  $F$  的数值从大到小进行排序；编制计算机程序，以“最大概率法”进行故障搜索；按照搜索结果，优化故障分析排序。

定义各级数组如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} f[i] \quad i = 1, 2, \dots, g \\ u[i, j] \quad j = 1, 2, \dots, m \\ v[i, j, k] \quad k = 1, 2, \dots, n \\ w[i, j, k, l] \quad l = 1, 2, \dots, p \\ F_f[i] \quad i = 1, 2, \dots, g \\ F_u[i, j] \quad j = 1, 2, \dots, m \\ F_v[i, j, k] \quad k = 1, 2, \dots, n \\ F_w[i, j, k, l] \quad l = 1, 2, \dots, p \end{array} \right.$$

上述一至四维数组构成的失效数据库分别储存着由计算得到的各级  $\lambda$  和  $F$ 。数据可按规定时间（如一个月、一个季度或半年）更新一次。直接从元件基本数据库中的故障记录和维修记录中获得底事件基本数据，再由上列给出公式计算，然后更新，更新后数据写入失效数据库中。

为了能使计算机程序进行故障优化搜索，对数组中的  $\lambda$  和  $F$  进行排序，排序格式为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Soat} \{ f[i] \mid i = 1 \text{ to } g \} \\ \text{Soat} \{ u[i, j] \mid i = 1, 2, \dots, g \} \\ \text{Soat} \{ v[i, j, k] \mid i = 1, 2, \dots, g; j = 1, 2, \dots, m \} \\ \text{Soat} \{ w[i, j, k, l] \mid i = 1, 2, \dots, g; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n \} \\ \text{Soat} \{ F_f[i] \mid i = 1 \text{ to } g \} \\ \text{Soat} \{ F_u[i, j] \mid i = 1, 2, \dots, g \} \\ \text{Soat} \{ F_v[i, j, k] \mid i = 1, 2, \dots, g; j = 1, 2, \dots, m \} \\ \text{Soat} \{ F_w[i, j, k, l] \mid i = 1, 2, \dots, g; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n \} \end{array} \right.$$

### 5 计算机程序实现

在上述基础上，编制了最大概率法则优化搜索程序，其流程框图如图 2 所示。

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最大概率，排列出底事件序列，迅速找到某一顶事件最可能对应的底事件，显

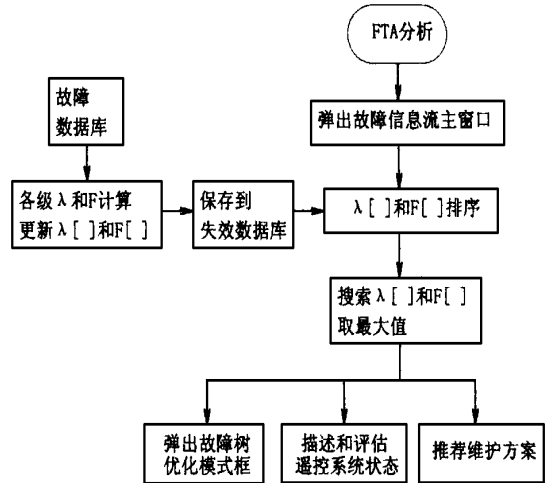


图 2 FTA 优化搜索流程框图

著提高了故障源分析的效率，达到了故障分析的优化目标。

### 6 结语

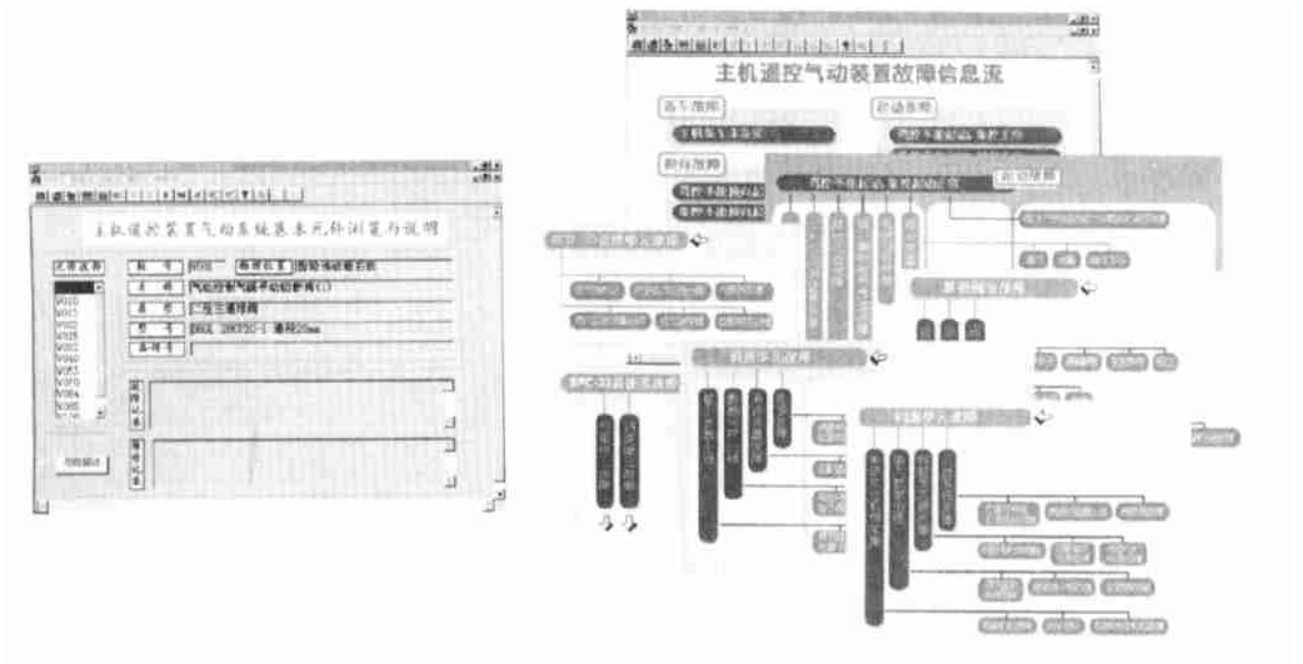
我们对中远集装箱运输有限公司某河字号集装箱轮 MAN B&W 主机遥控气动装置，运用上述最大概率法进行 FTA 优化搜索分析。该轮于 1989 年投入运行，表 1 列出了投入运行以来主机遥控气动装置的部分故障。由最大概率法对 FTA 分析，表中序号 11 的“驾/集控不能起动”故障，FTA 的可能故障源数目为 26 个，经不可靠度计算搜索排序后，一级搜索排序为 4，二级搜索排序为 3，三级搜索排序为 1。因此只需  $4 \times 3 \times 1 = 12$  次搜索即可命中直接故障源。如果按传统的 FTA 分析，则一次罗列出所有 26 个可能故障源，再要从中迅速找出直接故障源，除非有相当经验，否则是有困难的。

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，采用 Microsoft Visual C++ 5.0 工具开发。图 3(a) 为应用程序的基本数据库界面，其中的故障记录和维修记录由船上轮机人员填入，用于应用程序的统计分析。图 3(b) 为 FTA 计算机搜索弹出式窗口界面。

软件第一版已安装在中远集装箱运输有限公司的十余艘大型集装箱船上。界面友好，资料丰富，操作方便，实用性强。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。目前，又在收集各方意见的基础上，着手应用程序第二版的开发工作。

表 1 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



(a) 基本数据库界面

(b) FTA 信息流

图 3 故障信息流计算机屏幕窗口

## 7 参考文献

1 史定华,王松瑞.故障树分析技术方法和理论.北京师范大学

大学社,1993.

2 易宏等.船舶可靠性工程导论.国防工业出版社,1995.

3 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.

**Concept of container fleet in Jinghang Canal** ..... *He Yanping Qiu Weiwei and Others*(21)

Based on a prediction of the container freight amount in Jinghang Canal ,a concept of setting up a container fleet with self loading equipment is proposed in consideration of the shallow and narrow water ,complicated waterway and insufficient loading and unloading equipments along the banks of the Canal

**Key words** Container transportation Tug and lighter fleet Self-loading ship

**Analysis of full scale experiment of sea-river-going ore barge** .....*Chen Shunhuai Wang Chengfang and Others*(24)

A kind of sea-river-going ore barge has been put forward to settle the problems of existing transportation system of imported ore along Changjiang River. A full scale experiment has been taken to verify the feasibility of application of the sea-river-going technique. Analysis is taken to the experiment and some suggestions are given

**Key words** Fleet Sea-river-going ore barge Full scale experiment

**Study of evaluation about the vehicle system with AHP** ..... *Shi Shoudong Chen Wengpei and Others*(28)

This paper attempts to construct a evaluation s method for the vehicle with AHP. This method can evaluate that every sub-system and parts of the vehivle have various effects on its total properties. By constructing multi-layer structured model of this complicated vehicle. We set up unitary norm judgment matrix and super weigh matrix. Finally , it is obtained the rank of this system. In this paper , a practical example was given.

**Key words** Vehicle AHP Structured model Super matrix Rank

**Evaluation of heat transfer boundary conditions for a marine high-pressure steam turbine rotor** .....

..... *Ji Guang Yan Hua and Others*(31)

The off-design performance of a marine high-pressure steam turbine was calculated using the design data in this paper. Therefore ,the steam parameters along the rotor at various rotation speeds were obtained ,and the heat transfer coefficients calcula-tion along the rotor were performed. The results presented here in can be used to predict transient temperature field ,transient stress field ,and fatigue lifetime of the steam turbine rotor.

**Key words** Steam turbine rotor Off-design performance evaluation Heat transfer coefficient

**Diesel engine wearing state predicating base on Grey Model** ..... *Wu Mingzan Chen Senfa and Others*(35)

In this paper ,we applied Grey System Theory to relativity analysis of the size of the debris sample in time sequence data in diesel engine ,and then we used Grey Model(0 ,N) to predicate diesel engine wearing state. In the example ,it was proved avail-ability.

**Key words** Diesel engine Debris 's size Grey system theory

**A new-type mechanical seal for marine pumps** ..... *Fang Zhigang Zhao Jingang and Others*(38)

A new-type self-contained and double-faced mechanical seal has been succesfully developed for marine pumps which can operate with zero leakage under sea water and make pumps operate normally under an evacuated condition.

**Key words** Zero leakage Marine pump Mechanical seal

**Research of H control in steering gear load system** ..... *Sun Yize Liu Yicheng and Others*(40)

The article analysis the characteristics and effect of redundant force in steering gear load system ,builds exact mathematic model ,and designs a H controller of the system by treating redundant force as exoteric disturbance ,Analysis and simulation re-sults show that H controller can be effective to compensate redundant force of load system ,greatly improve the performance of robust and trace ,and ideally depress redundant force of steering gear load system.

**Key words** Steering gear load system Unwanted redundant force H control.

**Analysis of fault information stream of the pneumatic device for remotely controlling ship main diesel engine based on the maximum probability rule** ..... *Chu Jianxin Wu Shuxiong and Others*(44)

This paper presents a way to calculate the invalidity and unreliability in each degree of the pneumatic device for remotely controlling ship main diesel engine by means of history data of faults and maintenance records. It is also described to search and queue the FT(Fault Tree) based on the maximum probability path to attain the aim of quantitative and optimized analysis. The ap-plication software developed has been used in vessels.

**Key words** Invalidity Unreliability Fault analysis Fault information stream