

# 基于马尔科夫模型的船用柴油机 电子调速器可靠性分析

李京<sup>1</sup>, 张永洋<sup>2</sup>

(1. 海军驻兴平地区军事代表室, 陕西 兴平 713105; 2. 海军装备部装备采购中心, 北京 100071)

**摘要:** 应用马尔科夫模型对柴油机电子调速器可靠性进行了系统分析。采用失效模式以及影响性分析(FMEA)进行整个系统部件级失效模式与影响分析, 提出了柴油机电子调速器失效的分类方法, 针对在线诊断技术和调速系统的维修特性, 引入系统维修率, 对调速器的可靠性进行更加全面有效的分析, 得到电子调速器时变失效概率。分析结果表明: 马尔科夫模型可以应用于柴油机电子调速器可靠性分析, 并指导系统设计。

**关键词:** 柴油机; 马尔科夫模型; 电子调速器; 可靠性

**中图分类号:** TK424.3<sup>+</sup>1    **文献标识码:** B    **文章编号:** 1001-4357(2016)06-0011-04

## Reliability Analysis of Marine Diesel Electric Governor Based on Markov Model

Li Jing<sup>1</sup>, Zhang Yongyang<sup>2</sup>

(1. Naval Deputy Office of XingPing District, Shanxi XingPing 713105;

2. Equipment Purchasing Center, Naval Equipment Department, Beijing 100071)

**Abstract:** The reliability of diesel electric governor is systematically analyzed using the Markov model. Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) was carried out on the whole system based on each component to analyze the failure mode and its influence. The classification of diesel electric governor failures was put forward. In accordance with on line diagnostics and the maintenance characteristics of speed governing system, system maintenance ratio was introduced into the model. More comprehensive and efficient reliability analysis was carried out on the speed governor and limit state failure probability was obtained. The result shows that Markov model can be used to predict the reliability of diesel electric governor and guide system design.

**Key words:** diesel engine; Markov model; electric governor; reliability

## 0 引言

电子调速器是船用柴油机的核心部件, 柴油机电子调速器的可靠性是船舶动力系统设计的重要指标。一个安全可靠的动力系统能够减少停机时间, 提高产品质量, 降低维护成本。传统的可靠性分析通常采用串联模型和并联模型, 通过计算各部件的失效率, 并代入模型中进行简单叠加, 求得总的失效率, 再进一步计算出可靠性指标。但是大量实践

表明: 传统模型对电子调速器的可靠性预计过于简单, 仅仅能够给出系统期望的失效时间。为了克服传统模型的缺点, 本文将马尔科夫模型应用于柴油机电子调速器, 对电子调速器的可靠性进行更加全面有效的预测。

## 1 马尔科夫模型简介

马尔科夫模型由俄国数学家马尔科夫提出, 他定义了马尔科夫过程。在马尔科夫过程中, 未来变

量取决于现在变量而与原来状态无关。马尔科夫模型是一种采用状态图的可靠性和安全性的建模方法,模型中仅采用两个简单的符号,如图 1 所示。圆(状态)表示正常工作的部件与发生失效的部件的组合,转移弧表示可能的部件失效或维修行为。图 1 所示为一个简单的马尔科夫模型,在该模型中有两个状态:状态 0 和状态 1,四条状态转移曲线。

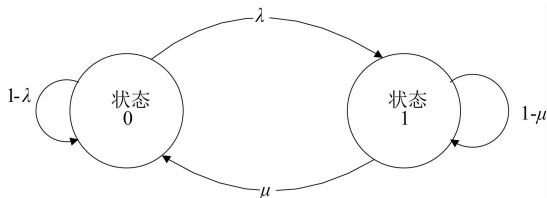


图 1 马尔科夫模型

模型用概率矩阵的形式表示,用一个  $n \times n$  的矩阵( $n$  代表状态数)来表示各个概率,这个矩阵被称为随机转移概率矩阵,记为  $P$ 。模型的转移矩阵为:

$$P = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda \\ \mu & 1-\mu \end{bmatrix} \quad (1)$$

转移矩阵  $P$  中第 1 行第 1 列代表系统处于状态 0 的概率,第 1 行第 2 列代表下一个时间间隔从状态 0 转移到状态 1 的概率,依此类推,得到系统的转移矩阵<sup>[1]</sup>。马尔科夫模型一些相关的概念和可靠性参数如下:状态概率矩阵,表示系统处于每一个状态的概率,记为  $S$ 。任意时间段内的状态矩阵  $S^n$ ,可以通过  $S^{n-1}$  乘以  $P$  得到。把所有时间段内的状态矩阵进行统计就可以得到各状态时变的概率。平均故障前时间(MTTF)是最广泛使用的可靠性参数,是整个系统期望的故障时间,MTTF 是可靠度函数的无穷积分。但是当系列原件的失效率为常数时,  $MTTF = 1/\lambda$ <sup>[2]</sup>。

$$MTTF = E(T) = \int_0^{+\infty} R(t) dt \quad (2)$$

## 2 柴油机电子调速器简介

柴油机电子调速器是一种根据柴油机负荷变化来调整柴油机供油量以达到稳定转速的目的的装置。电子调速器结构主要包括磁电式转速传感器、控制器、电磁执行器。

电子调速器的工作原理如图 2,调速器通过磁电式转速传感器得到类正弦的转速信号,经过调理电路处理变成方波信号;使用单片机的输入捕捉功能测量转速,与设定转速比较后经 PID 运算;转速环的输出作为位置环的设定,通过 AD 读取位移传

感器的电压信号,再经位置环 PID 运算,将最后的运算结果通过 PWM 的形式驱动执行器。柴油机调速器的主要功能是:在柴油机负荷变化的情况下调节柴油机转速,使其稳定在一定的范围内<sup>[3]</sup>。

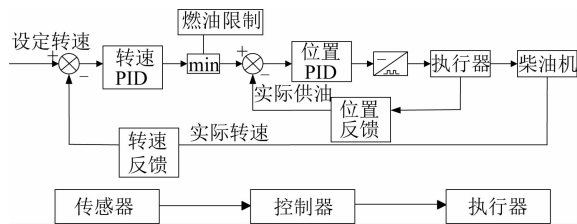


图 2 调速器原理框图

## 3 电子调速器马尔科夫模型建模分析

### 3.1 柴油机电子调速器失效

控制系统失效的定义为:“在规定的时间内不能完成需要的功能”。根据调速器的功能和失效的定义,对数字式柴油机电子调速系统而言,系统的失效就是指柴油机转速调节能力的失效。本文中对于失效的危险或者安全的界定是以该失效对系统功能的损害程度来区分的。定义如下:危险失效为柴油机无法正常运行的失效,安全失效为柴油机能够在一定程度上正常运行的失效。安全失效表达为:  $\lambda^S$ ; 危险失效:  $\lambda^D$ 。

### 3.2 柴油机电子调速器的 FMEA 分析

FMEA 分析指失效模式以及影响性分析,柴油机电子调速器的 FMEA 分析首先从部件级别的分析开始,以数字式柴油机电子调速系统的执行器驱动以及电流采集模块(图 3)为例。

常用的电子元气件都存在多种失效模式,例如电阻的失效模式就高达八种,如果电阻器在电路中起到的仅是限流作用,那么阻值漂移对于系统正常工作没有什么影响。为了简化分析,按照对各种失效模式对系统功能的影响程度,把原件的失效模式划分为两类,即安全和危险,并分别计算失效率。按照表 1 的形式对整个控制系统进行分析,其中电子元件失效率的计算按照军用电子元器件可靠性手册进行计算<sup>[4,5]</sup>。

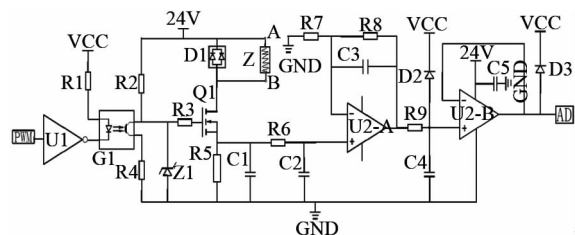


图 3 执行器驱动以及电流采集电路

表 1 FMEA 分析

| 部件名       | 功能       | 失效模式   | 影响             | 重要性 | 失效率/失效率 $\times e^{-6}$ | 是否可发现 |
|-----------|----------|--------|----------------|-----|-------------------------|-------|
| R1        | 光耦限流     | 断路     | 执行器无法驱动        | 危险  | 0.015 12                | 是     |
|           |          | 阻值漂移   | 限流失效           | 安全  | 0.003 78                | 否     |
| 光耦 G1     | 执行器驱动    | LED 衰退 | 输出失效           | 危险  | 4.12                    | 是     |
| 场效应管 Q1   | 执行器回路的开关 | 击穿     | 执行器无法正常打开      | 危险  | 3.853 85                | 是     |
| D1MUR3020 | 执行器回反向路  | 击穿     | 执行器无法动作        | 危险  | 0.223 2                 | 否     |
| R5 精密电阻   | 电流采集     | 断路     | 电流无法采集, 执行器无动作 | 危险  | 0.015 12                | 是     |
|           |          | 阻值漂移   | 电流采集失真         | 安全  | 0.003 78                | 否     |
| C2        | 滤波       | 击穿、开路  | 滤波失效           | 危险  | 0.014 3                 | 否     |
| LM258     | 电流放大     | 多种     | 电流采集失效         | 危险  | 0.36                    | 是     |

3.3 模型细化程度确定

一个模型的细化程度越高, 模型计算结果的可信度越强。在控制系统的实际应用中为了提高系统的安全性和可用性, 时常采用增强系统诊断能力的方法。控制器的诊断覆盖率对系统  $MTTF$  影响巨大, 相关研究表明: 当诊断覆盖率从 1 下降到 0.94 时, 系统的  $MTTF$  就会下降一个量级<sup>[1]</sup>。在实际情况下, 系统对于失效的诊断覆盖不可能是全面的, 按照故障的诊断能力对系统失效做进一步分类。设系统的诊断覆盖率为  $C$ , 则能检测到的安全失效:  $\lambda^{SD} = C \times \lambda^S$ ; 未能检测到的安全失效:  $\lambda^{SU} = (1 - C) \lambda^S$ ; 能检测到的危险失效:  $\lambda^{DD} = C \times \lambda^D$ ; 未能检测到的

安全失效:  $\lambda^{DU} = (1 - C) \lambda^D$ 。

3.4 系统维修率确定

根据马尔科夫过程的描述, 并结合柴油机电子调速系统的实际应用特点, 电子调速系统出问题, 通常是使用方通知系统供应商, 由供应商派专业人员进行维修。维修率  $\mu$  的计算如式 (3) 所示:

$$\mu = \frac{1}{\text{等待维修时间} + \text{维修时间}} \quad (3)$$

根据实际应用中柴油机电子调速系统从故障发现到维修完成的过程, 取维修率  $\mu = 0.015$ 。

在马尔科夫模型建立之前得到的系统失效率如表 2 所示。

表 2 柴油机电子调速系统失效率

| 名称       | 符号 | 功能      | 失效模式      | 影响     | 危险程度 | 失效率 $\times 10^{-6}$ |
|----------|----|---------|-----------|--------|------|----------------------|
| 磁电式转速传感器 | S  | 转速信号的采集 | 线圈短路、线圈断路 | 转速采集失效 | 危险   | 7.2                  |
| 比例电磁铁执行器 | A  | 调节供油    | 多种        | 执行器失效  | 危险   | 12.445               |
|          |    |         | 多种        | 多种     | 安全   | 5.335                |
| 控制器      | C  | 控制      | 多种        | 多种     | 危险   | 13.887 243 2         |
|          |    |         | 多种        | 多种     | 安全   | 6.575 348            |

3.5 马尔科夫模型建立

马尔科夫模型的建立始于所有部件都是正常工作这一状态, 这一状态一般编号为 0。建立马尔科夫模型时要遵循以下规则: “对于任何正常的工作状态, 要列出所有的正常工作部件的失效率类型”。系统从正常状态 0 出发首先进入一个安全失效状态 1, 失效率  $\lambda_1$ , 在这种失效模式下系统能够正常工作。从状态 0 出发可以进入一系列危险失效, 按照上面的分类, 系统可以进入两类失效, 分别为检测到的失效和未检测到的失效。状态 2 时系统发生了检测到的危险失效, 在状态 2 可以经过维修弧回到正常状态, 完整的系统马尔科夫模型如图 4 所示, 图中  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  见式 (4) ~ (6)。

$$\lambda_1 = \lambda_C^{SD} + \lambda_C^{SU} + \lambda_A^{SD} + \lambda_A^{SU} \quad (4)$$

$$\lambda_2 = \lambda_C^{DD} + \lambda_A^{DD} + \lambda_S^{DD} \quad (5)$$

$$\lambda_3 = \lambda_C^{DU} + \lambda_A^{DU} + \lambda_S^{DU} \quad (6)$$

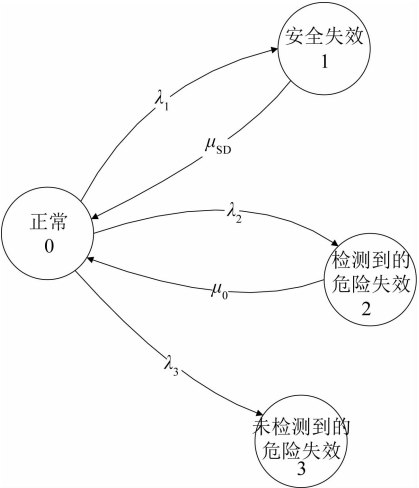


图 4 电子调速器的马尔科夫模型

## 4 模型求解分析

### 4.1 模型求解

以上已得出马尔科夫模型,为了得出系统的可靠性指数,须对马尔科夫模型进行求解。根据转移矩阵的定义,得到电子调速器的转移矩阵  $P$ ,如式(7):

$$P = \begin{pmatrix} 1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 \\ \mu_{SD} & 1 - \mu_{SD} & 0 & 0 \\ \mu_0 & 0 & 1 - \mu_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

状态 3 属于系统的一个吸收状态,吸收状态是指系统不能维修或者系统在一段时间内不能维修的永久性破坏。例如电路板发生永久性损害,控制器损坏等失效,系统不能通过在线维修等方式恢复其功能,而是要返厂或者等待专业人员进行维修。带有吸收状态的控制系统的需要一个衡量系统正常工作状态的指标,这里采用平均故障前时间  $MTTF$ 。

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (8)$$

通过马尔科夫模型还可以计算出系统在各个状态的时变概率,计算方法如下:系统起始于状态 0,此时系统的状态矩阵为  $S^0$ ,用  $S$  不断乘以系统的转移矩阵,得到状态矩阵的第  $n$  列,就是系统处于该状态的时变概率,系统的时变概率如图 5~7。 $S^0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$ ,  $S^1 = S^0 P$ 。

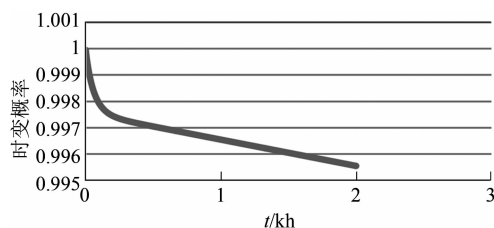


图 5 处于状态 0 的时变概率

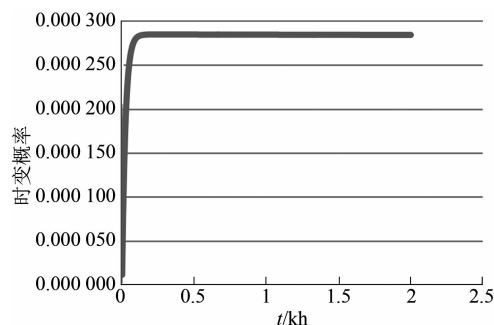


图 6 处于状态 1 的时变概率

### 4.2 结果分析

传统的可靠性预计方法是根据国军标可靠性分

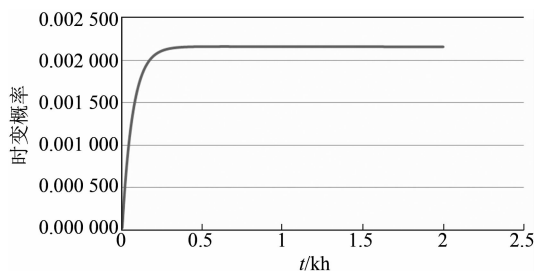


图 7 处于状态 2 的时变概率

析手册,将系统视为一个串联系统,在国军标中查询各个元件的失效率,累加起来计算  $MTTF$ 。这种方法只能得到平均故障前时间这样一个参数,并不能体现随着时间的推移系统可靠性的变化情况。本研究分析的执行器其驱动及电流采集电路的  $MTTF$  为 22 005 h。马尔科夫模型的分析结果表明:系统的失效性会在最初的 300 h 呈现指数型衰减,300 h 之后可靠性以稳定的斜率下降;系统跃迁到安全性失效的概率和可检测到的危险实效概率在系统运行大约 300 h 后也趋于稳定。

## 5 结论

采用马尔科夫模型进行控制系统可靠性预测,对系统可靠性的考察不仅仅是一系列失效率的简单相加,而是对系统的失效进行进一步的分类,各个部件之间的联系更加紧密,可以对控制系统进行更细致的分析。在模型中加入在线维修等因素,能够对控制系统可靠性提供更全面的预测,减少维护成本,最大限度提高系统的可用性。应用马尔科夫模型进行可靠性分析,不仅可以得到系统的  $MTTF$  等可靠性指标,还可以通过运算得到系统处于各个状态的时变概率。马尔科夫模型对冗余控制系统可以加入共因失效,通过比较不同冗余结构,在冗余控制系统的结构设计中起到指导作用,用最小的成本最大限度地提高系统的可靠性。

### 参考文献

- [1] WILLIAM M G. 控制系统的安全评估与可靠性分析 [M]. 白焰, 董玲, 杨国田译. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 冯保红, 王煜. 控制系统动态马尔科夫过程可靠性分析 [J]. 控制工程, 2011 (01): 14.
- [3] 刘志刚, 宋恩哲, 孙军, 等. 电子调速器可靠性设计研究 [J]. 船舶工程, 2005, (27) 6: 56-58.
- [4] 国防科学技术工业委员会. 电子设备可靠性预计手册: GJB299C-2006 [S]. 北京: 2006.
- [5] 冒天诚, 徐强. 故障树与船舶自动控制系统的故障诊断 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2000.