

基于蒙特卡罗方法的船用发电柴油机喷油器维护

侯梦超, 林少芬, 陈清林, 朱兆一, 苏呈祥

(集美大学轮机工程学院, 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 船舶发电柴油机的关键零部件需要定时进行维护, 为了满足必要的可靠度指标, 需要获取符合可靠度要求的维修时间点。选择 YANMAR 6N21A-V 柴油机喷油器, 通过对其无故障运行时间的分段, 采用蒙特卡罗方法确定不同运行时间段的平均可靠度。结果表明, 从 56 种维修组合中可分别筛选出可靠度为 0.7、0.8 和 0.9 的维修方案, 为船舶公司或轮机人员制订关键零部件的维修保养时间提供依据。

[关键词] 发电柴油机; 喷油器; 可靠度; 蒙特卡罗方法

[中图分类号] TK 428

Maintenance Scheme of Injector for Marine Diesel Engine Based on Monte Carlo Method

HOU Mengchao, LIN Shaofen, CHEN Qinglin, ZHU Zhaoyi, SU Cengxiang

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Fujian Provincial Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Xiamen 361021, China)

Abstract: In observation of the immediate maintenance of key components on a marine diesel engine, it is a necessity to obtain the information about the maintenance schedule required by the reliability index. In this paper, a marine diesel engine YANMAR 6N21A-V was selected, by employing Monte Carlo approach, segmentation on mean time between failure (MTBF) of its injectors was firstly conducted and then used to determine the average reliability within different durations. Results show that the reliability about 0.7, 0.8 and 0.9 can respectively be determined based on 56 maintenance schedules. It suggests that the results from the Monte Carlo approach are beneficial to planning the maintenance schedule for marine engineers or ship managers.

Keywords: diesel generator; injector; reliability; monte carlo method

0 引言

船舶发电柴油机的正常运转, 对航行安全以及设备安全具有重要作用。喷油器是船舶柴油机的关键部件之一, 在所有关键部件中, 对喷油器的维护保养的次数最频繁, 选取合适的维修时间间隔十分必要。关键部件对可靠性有较高要求, 这些部件的维护保养计划会对生产造成重要影响^[1]。

喷油器的失效形式主要表现为喷油量和雾化效果的下降, 若不及时对喷油器进行有效维护, 将导致柴油机各缸做功不均, 影响柴油机的正常运转和使用寿命。目前船舶轮机员主要依据柴油机说明

[收稿日期] 2017-08-08

[修回日期] 2017-10-22

[基金项目] 交通运输部应用基础研究项目(2014329815100); 福建省高校产学研重大项目(2014H6020); 福建省自然科学基金(FB12006); 校启动金(F02006)

[作者简介] 侯梦超(1990—), 男, 硕士生, 从事船舶与海洋结构物设计制造。通信作者: 林少芬(1962—), 女, 教授, 博士, 从事机电液一体化的可靠性和仿真研究, E-mail: shaofenlin@163.com。

书, 使用推荐的维修间隔时间, 来确定其维修间隔时间, 并没有结合设备的具体情况合理制订维修周期。

以可靠性为中心的维修策略是: 根据故障的严重程度, 选择最适合的维修方法, 通过维修, 恢复设备规定的功能, 提高设备的可靠性或者消除设备修前存在的缺陷, 并优化维修周期, 充分利用零部件的有效寿命, 力求减少维修费用, 以及设备停修对生产造成的经济损失^[2]。目前以可靠性为中心的维修理论在船舶设备中的应用价值已日益得到广大维修管理人员的重视, 并在实际应用中取得了良好的效果^[3]。因此, 为了寻求柴油机喷油器准确的维修时间间隔, 本文以可靠性为中心, 对柴油机喷油器维护维修方案进行筛选, 并以某商船 YANMAR 发电柴油机喷油器为研究对象, 验证其方法的有效性。

1 可靠性评估原理

基于可靠性的维修理论认为, 维修活动的目的是为了保持和恢复机械系统的固有可靠性, 并提高其使用可靠性^[4]。可靠性维修模型建立如下:

考虑 n 个单元串联系统, 独立同分布, 每个单元的寿命均服从二参数威布尔分布, 每个单元寿命的密度函数^[5]为:

$$f(t_i) = \begin{cases} (\beta/\eta)(t_i/\eta)^{\beta-1}\exp[-(t_i/\eta)^\beta], & t_i \geq 0; \beta, \eta > 0; \\ 0 & t_i \leq 0. \end{cases}$$

其中: β 为形状参数; η 为尺度参数; n 个单元在同一时刻, 运行时间 $t_i \geq 0, i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

其分布函数为:

$$F(t_i) = P(T \leq t_i) = 1 - \exp[-(t_i/\eta)^\beta]。$$

其中: T 为随机变量。

每个单元寿命的可靠度函数为

$$R(t) = 1 - F(t_i) = \exp[-(t_i/\eta)^\beta]。 \tag{1}$$

串联系统的可靠度函数为:

$$R(t_1, t_2, \dots, t_n) = \prod_{i=1}^n R(t_i) = \prod_{i=1}^n (1 - F(t_i)) = \exp[-\sum_{i=1}^n (t_i/\eta)^\beta]。$$

蒙特卡罗方法对系统状态空间的维数不敏感, 是解决复杂多维问题的唯一方法^[6]。由大数定律验证蒙特卡罗方法的稳定性和收敛性。

随机抽样方法确定的各单元工作时间样本值 T_{ij} 独立同分布, 其中由于样本值 T_j 是独立同分布的, 所以统计量即该时间点某一单元的可靠度 $R(T_{ij})$ 也是独立同分布的, 如果存在统计量的期望即该时间点的单元的平均可靠度 $E[R(T_{ij})] = \mu$, 根据辛钦强大数定律, 统计量的估计值 \hat{R}_i ^[7] 为:

$$\hat{R}_i = \sum_{j=1}^m R_i(T_{ij})/m = \sum_{j=1}^m \exp[-(T_{ij}/\eta)^\beta]/m。$$

其中: n 为系统维数, 即喷油器个数; m 为样本总量, $j = 1, 2, 3, \dots, m$ 。

依概率收敛到期望 μ , 对任意的 $\varepsilon > 0$, 有:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} P(|\hat{R}_i - \mu| < \varepsilon) = 1。$$

由于统计量的估计值的期望等于该统计量, 所以统计量的估计值是统计量的无偏估计值, 此时统计量称为无偏统计量, $R_i = \hat{R}_i$, 蒙特卡罗方法所确定的估计值能够收敛到正确的结果。

于是, 得到系统的可靠度 R 为:

$$R(t_1, t_2, \dots, t_n) = \prod_{i=1}^n [\sum_{j=1}^m R_i(T_j)]/m。$$

2 实例分析

考虑一台船舶发电柴油机有 6 个气缸，每个气缸有一个燃油喷油器，6 个喷油器组成串联系统。在排除其他影响因素后，对各缸做爆压测试，爆压过高或过低，则认为喷油器“失效”，如果确认该气缸喷油器“失效”，则需要切换到备用发电机。

对已经达到维修间隔周期或检查认为已经失效的喷油器，可以采用两种维修方式：1) 更换当前失效的喷油器；2) 同时更换 6 个喷油器。

如果采用第 1) 种维修方式，经过若干次检修维护后，同一台柴油机喷油器运行寿命和无故障工作时间将各不相同，串联系统的可靠度低于可靠度最低的单元，因此可见：维修方式 1) 的可靠度小于维修方式 2) 的可靠度，维修方式 2) 的维修时间大于维修方式 1) 的维修时间，且增加维修成本。

当船舶存有充足的备用喷油器时，采用维修方式 2) 时的可靠度估计值明显高于采用维修方式 1) 时的可靠度估计值。

在实际远洋船舶维护管理工作中，由于远洋船舶营运环境的孤立性以及备件采购、物流供应、备件库存等原因^[8]，往往出现船舶现存备件不足以一次性同时更换 6 个喷油器的情况，如果此时轮机员采用方式 2) 进行维修，需要同时对 6 个喷油器做清洗、调压、雾化试验、喷油压力试验等一系列工作^①，需要较长时间完成。因此船舶轮机员常常采用方式 1) 进行维修。但如果各喷油器规划维护时间不合理，则会导致某段周期内，柴油机可靠度偏低，甚至柴油机需要频繁停机维护。因此，需要选择采用可靠度平均、维修间隔时间平均且较长的维护方案。

表 1 是长航 XX 轮 YANMAR 6N21A - V 型号柴油机喷油器维修间隔时间记录，共有 12 组数据。6N21A - V 说明书建议的维修间隔时间为 1500 h^①。

表 1 YANMAR 6N21A - V 柴油机喷油器维修时间统计
Tab. 1 Statistics of maintenance duration of injectors for YANMAR 6N21A - V diesel engine

数据组号 Data No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
维修周期 Maintenance period/h	1045	1050	1090	1146	1170	1272	1291	1346	1412	1489	1526	1591

使用二参数威布尔分布拟合柴油机喷油器寿命曲线^[8]，MATLAB 计算形状参数 β 和尺度参数 η ，结果如下： $\beta = 7.8086$ ， $\eta = 1366.0402$ 。

根据式 (1) 可知单个喷油器的可靠度函数为：

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp[-(t/1366.0402)^{7.8086}]。$$
 (2)

绘制出单个喷油器可靠度函数曲线如图 1 所示。

日常管理工作中，通常 10 d 左右对柴油机做整体检查，因此认为喷油器更换间隔时间应大于 10 d，即 240 h，每次至少更换一台喷油器。由图 1 可以看出，运行时间 1200 h 后，可靠度降为 0.7。若要求检修后连续运行时间在 240 h 内的可靠度不小于 0.7，则检修后各喷油器运行时间应小于 960 h。

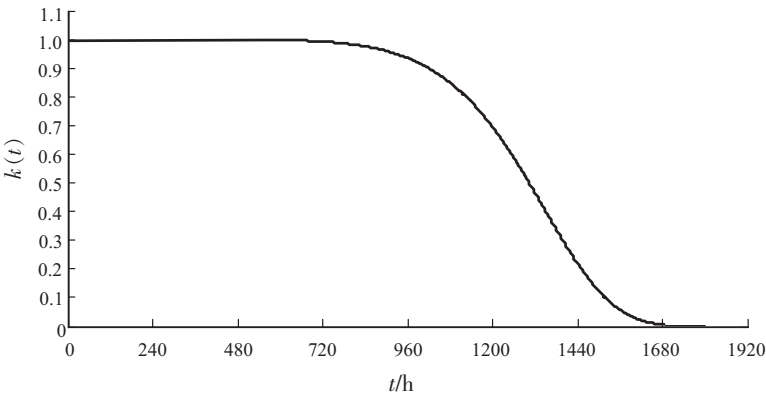


图 1 单个喷油器可靠度曲线
Fig.1 Reliability curve of an injector

① 洋马株式会社. YANMAR DIESEL ENGINE 船用主机 6N21A - V 型说明书，2003.

新更换的喷油器运行时间取 0, 图 1 中时间段 0 ~ 720 h 内可靠度几乎为 1。为了简化计算, 若将新更换的喷油器运行时间视为 0 ~ 240 h, 更换后系统在时间段 0 ~ 480 h 内可靠度数值几乎不变。

将 0 ~ 960 h 分为 4 个时间段, 为查看方便, 用表 2 所列编号代替运行时间。由于每次检修至少更换一个喷油器, 因此不妨假设固定更换 1#喷油器, 其他喷油器视情况更换, 考虑检修后喷油器各自运行情况, 列出表 3 中共 56 种组合, 其中 1 ~ 4 分别为表 2 所列的时间分段。例如: 组合 1 表示当前时间, 1#-6#喷油器经上次维修后的运行时间全为 0 ~ 240 h; 组合 56 表示当前时间, 1#的运行时间为 0 ~ 240 h, 2#-6#的运行时间为 720 ~ 960 h。

表 2 运行时间编号
Tab. 2 The serial numbers of running periods

运行时间 Duration/h	0 ~ 240	240 ~ 480	480 ~ 720	720 ~ 960
编号 Group No.	1	2	3	4

表 3 维修情况组合
Tab. 3 Maintenance group

喷油器序号 Fuel injector No.	1#	2#	3#	4#	5#	6#	喷油器序号 Fuel injector No.	1#	2#	3#	4#	5#	6#
组合 Group 1	1	1	1	1	1	1	组合 Group 29	1	1	2	3	4	4
组合 Group 2	1	1	1	1	1	2	组合 Group 30	1	1	2	4	4	4
组合 Group 3	1	1	1	1	1	3	组合 Group 31	1	1	3	3	3	3
组合 Group 4	1	1	1	1	1	4	组合 Group 32	1	1	3	3	3	4
组合 Group 5	1	1	1	1	2	2	组合 Group 33	1	1	3	3	4	4
组合 Group 6	1	1	1	1	2	3	组合 Group 34	1	1	3	4	4	4
组合 Group 7	1	1	1	1	2	4	组合 Group 35	1	1	4	4	4	4
组合 Group 8	1	1	1	1	3	3	组合 Group 36	1	2	2	2	2	2
组合 Group 9	1	1	1	1	3	4	组合 Group 37	1	2	2	2	2	3
组合 Group 10	1	1	1	1	4	4	组合 Group 38	1	2	2	2	2	4
组合 Group 11	1	1	1	2	2	2	组合 Group 39	1	2	2	2	3	3
组合 Group 12	1	1	1	2	2	3	组合 Group 40	1	2	2	2	3	4
组合 Group 13	1	1	1	2	2	4	组合 Group 41	1	2	2	2	4	4
组合 Group 14	1	1	1	2	3	3	组合 Group 42	1	2	2	3	3	3
组合 Group 15	1	1	1	2	3	4	组合 Group 43	1	2	2	3	3	4
组合 Group 16	1	1	1	2	4	4	组合 Group 44	1	2	2	3	4	4
组合 Group 17	1	1	1	3	3	3	组合 Group 45	1	2	2	4	4	4
组合 Group 18	1	1	1	3	3	4	组合 Group 46	1	2	3	3	3	3
组合 Group 19	1	1	1	3	4	4	组合 Group 47	1	2	3	3	3	4
组合 Group 20	1	1	1	4	4	4	组合 Group 48	1	2	3	3	4	4
组合 Group 21	1	1	2	2	2	2	组合 Group 49	1	2	3	4	4	4
组合 Group 22	1	1	2	2	2	3	组合 Group 50	1	2	4	4	4	4
组合 Group 23	1	1	2	2	2	4	组合 Group 51	1	3	3	3	3	3
组合 Group 24	1	1	2	2	3	3	组合 Group 52	1	3	3	3	3	4
组合 Group 25	1	1	2	2	3	4	组合 Group 53	1	3	3	3	4	4
组合 Group 26	1	1	2	2	4	4	组合 Group 54	1	3	3	4	4	4
组合 Group 27	1	1	2	3	3	3	组合 Group 55	1	3	4	4	4	4
组合 Group 28	1	1	2	3	3	4	组合 Group 56	1	4	4	4	4	4

按照表 3 中列出的组合, 分别抽样本数 $m = 10\,000$ 的运行时间样本值 T_{ij} , $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$, 分别在喷油器 1#—6#对应的时间段内服从均匀分布, 则每个组合中, 某个喷油器对应的平均可靠度函数为:

$$R_i(t_i) = \frac{1}{10\,000} \sum_{j=1}^{10\,000} R_i(T_{ij})。$$

其中: $j = 1, 2, 3, \dots, 10\,000$ 。

于是系统的可靠度函数 $R(t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6)$ 为:

$$R(t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6) = \prod_{i=1}^6 \left(\sum_{j=1}^{10\,000} R_i(t_i + T_{ij}) / 10\,000 \right)。$$

(3)

将式 (2) 带入式 (3) 得系统的可靠度函数 $R(t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6)$ 为:

$$R(t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6) = \prod_{i=1}^6 \left\{ \sum_{j=1}^{10\,000} \exp \left[- \left(\frac{t_i + T_{ij}}{1366.0402} \right)^{7.8086} \right] / 10\,000 \right\}$$

(4)

根据式 (4) 可计算出在组合 1—56 中各个组合的系统可靠度。

为了求出串联系统可靠度在 0.7, 0.8, 0.9 时柴油机对应的可用时间, 使用 MATLAB 编程, 程序流程图如图 2 所示。

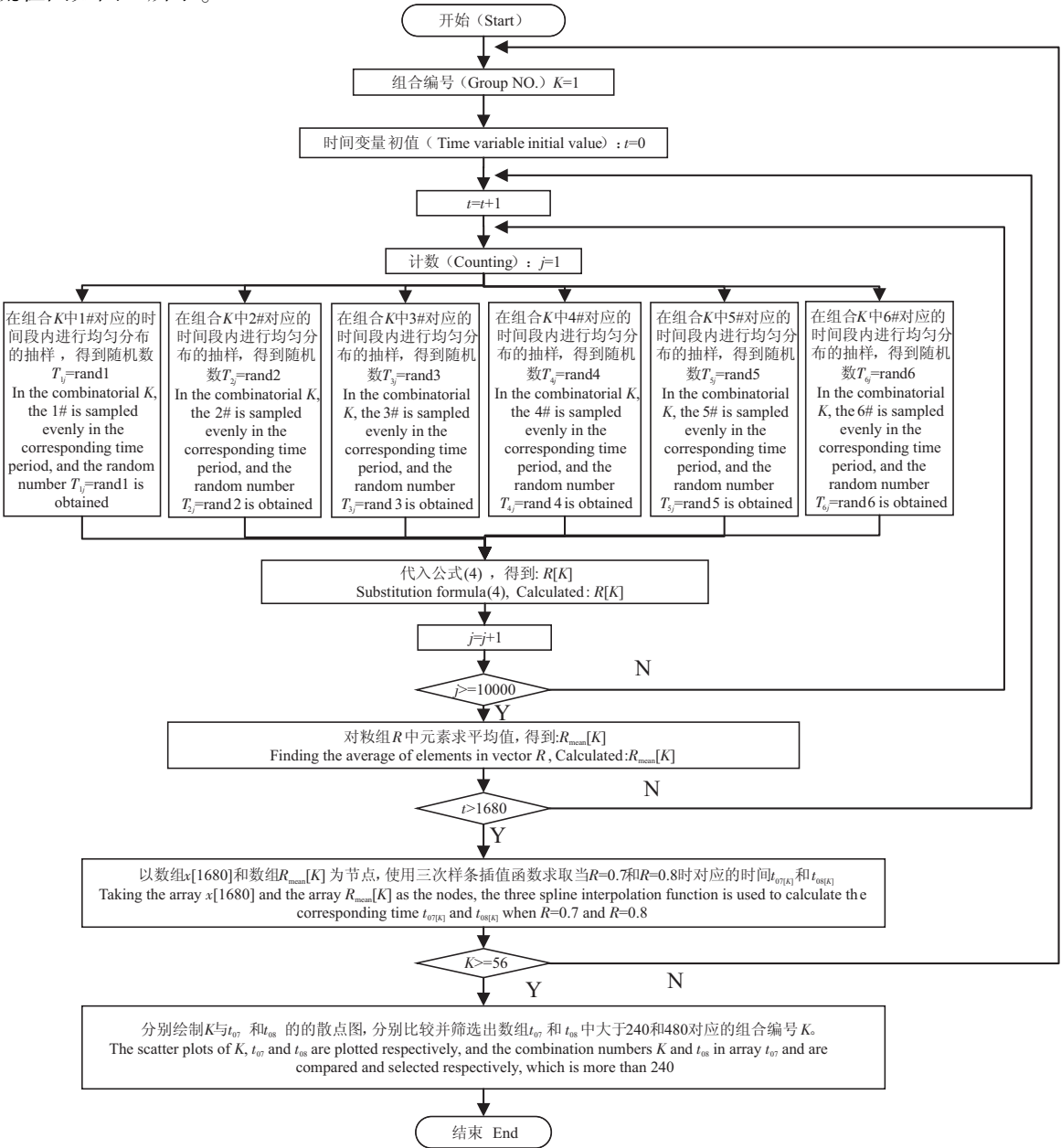


图 2 程序流程图

Fig.2 Flow chart for program

绘制单台柴油机喷油器串联系统可靠度取 0.7、0.8、0.9 时的运行时间与对应维修情况散点图, 如图 3 所示。

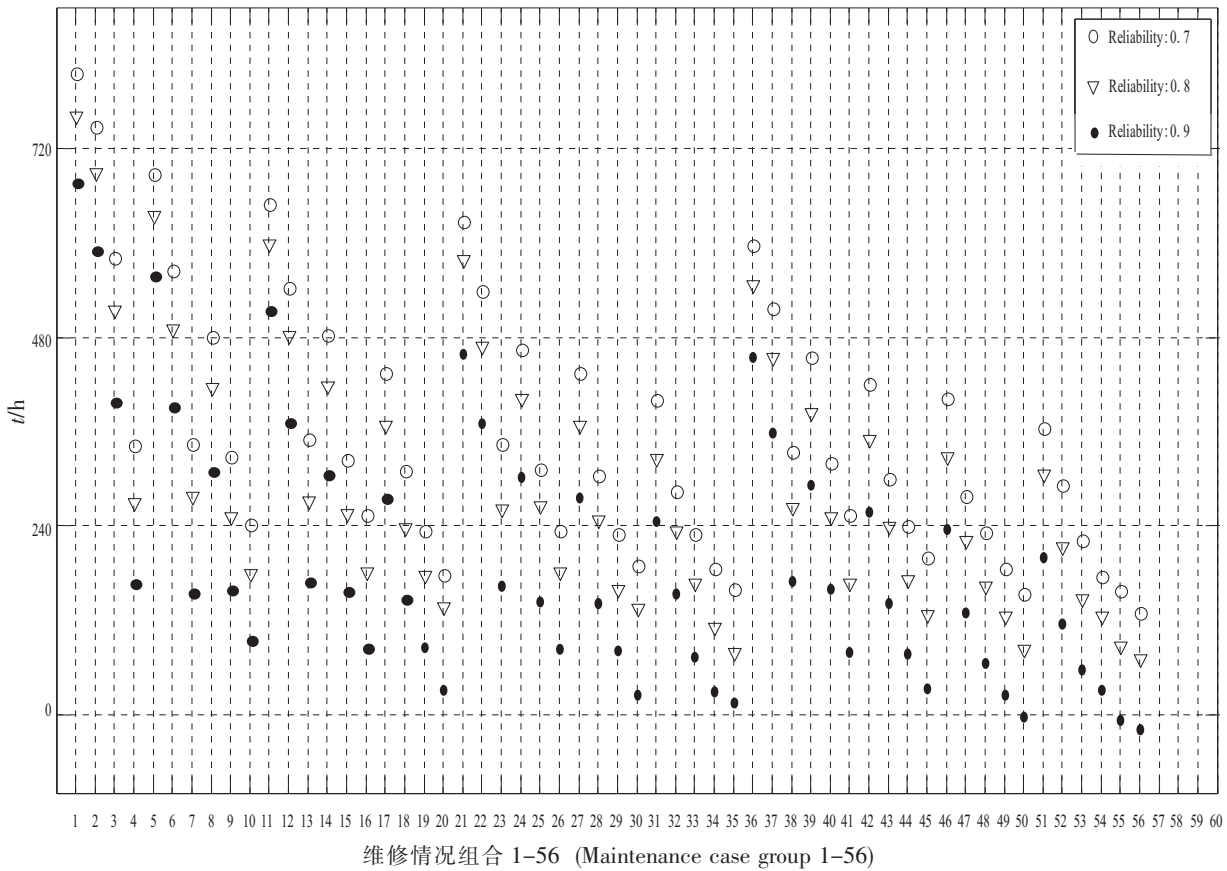


图 3 系统可靠度取 0.7、0.8 和 0.9 时的运行时间与维修情况散点图

Fig.3 Diagram of duration and maintenance scatter while system reliability is respectively about 0.7、0.8 and 0.9
由图 3 可以看出:

- 1) 若要求柴油机在可靠度 0.7 情况下工作 240 h, 有维修情况组合 19、20、30、33、34、35、45、48、49、50、53、54、55、56 共 14 种情况不符合要求; 若要求柴油机在可靠度 0.7 情况下工作 480 h, 则仅有 1、2、3、5、6、11、12、21、22、36、37 共 11 种维修情况符合要求。
- 2) 若要求柴油机在可靠度 0.8 下工作 240 h, 有维修情况组合 10、16、19、20、26、28、29、30、32、33、34、35、41、44、45、47、48、49、50、52、53、54、55、56 共 24 种情况不符合要求; 若要求柴油机在可靠度 0.8 下工作 480 h, 则仅有 1、2、3、5、6、11、21、36 共 8 种维修情况符合要求。
- 3) 若要求柴油机在可靠度 0.9 下工作 240 h, 有维修情况组合 1、2、3、5、6、8、11、12、14、17、21、22、24、27、31、36、37 共 17 种情况符合要求; 若要求柴油机在可靠度 0.9 下工作 480 h, 则仅有 1、2、5、11 共 4 种维修情况符合要求。
- 4) 维修情况组合 1 即单元全部更换时, 在相同可靠度要求下的可运行时间最长, 随着同时更换的单元数减少, 在同一可靠度要求下的可运行时间减短。

本例计算有以下两个方面需要注意:

- 1) 由于实船喷油器样本数偏少, 实际应用中可能导致以此计算的喷油器寿命分布函数参数不准确, 但是在大型船舶营运公司实际管理中, 通常以同型号同配置船舶以船队方式运营, 岸基指导人员可获取大量的样本数据, 可以弥补此缺陷。

2) 由于本例定义的“失效”,与传统意义上的失效不同,当认定喷油器“失效”时,是人为认定性能下降到不可接受的范围内,并非传统意义的“损坏”,故本例计算主要源于船舶轮机员的判断,其判断准确度与经验有一定的关系,而计算结果未考虑人的影响因素。

3 结论

本文通过对实船各个维修方式组合的喷油器可靠度曲线以及相应的散点图的分析,获取了在 56 种维修方式下相应的可靠度变化规律,可供管理人员以可靠度量化指标为依据,选择符合要求的维修方案。

提高更换单元的个数,能够提高系统总的可靠度,但过高的可靠度要求也会增加维修时间。在实际运营中,应在运行时间段内选择合适的可靠度下限。

另外可以用此办法计算柴油机其他关键部件的可靠度,进而改进发电柴油机整体维护保养方案。船舶公司、岸基指导人员与船舶轮机员可依此为参考,实现精准、高效的船舶运营管理。

[参考文献]

- [1] 金玉兰,蒋祖华,侯文瑞.以可靠性为中心的多部件设备预防性维修策略的优化[J].上海交通大学学报,2006,40(12):2051-2056.
- [2] 刘涛.船艇柴油机可靠性分析及管理研究[D].长沙:国防科学技术大学,2009.
- [3] 汪洋.以可靠性为中心的船舶维修辅助决策系统研究[D].武汉:武汉理工大学,2009.
- [4] MALIK M A K. Reliable Preventive Maintenance Policy [J]. AIIE Transactions, 1994, 1(3): 22-228.
- [5] 宋保维.系统可靠性设计与分析[M].西安:西北工业大学出版社,2008:35-38.
- [6] ENRICO ZIO. 可靠性与风险分析算法[M].李梓,译.北京:国防工业出版社,2014:34.
- [7] 康崇禄.蒙特卡罗理论和应用[M].北京:科学出版社2014:128.
- [8] 裴学博.基于即时采购制的船舶备件零库存管理研究[D].天津:天津大学;2008:8-10.
- [9] 凌丹.威布尔分布模型及其在机械可靠性中的应用研究[D].成都:电子科技大学,2011:51-53.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)