

文章编号: 1001- 2486(2010) 04- 0100- 05

# 基于可行使用方案的舰船热力系统 RMS 仿真论证研究\*

王 锐, 金家善, 刘隆波

(海军工程大学 船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 舰船热力系统因使用、故障、维修和保障的复杂性, 通过建立数学模型的解析方法不能满足其 RMS 论证的需要, 而基于最小设备清单的 Monte Carlo 仿真法也因组成设备存在性能退化而不适合作为系统的故障判据。文章利用基于热力模型确定的可行使用方案替代基于逻辑关系确定的最小设备清单, 按照系统在部分设备故障后是否还具有可行使用方案来判别系统是否故障, 设计了基于可行使用方案的舰船热力系统 RMS 仿真流程, 在仿真流程改进的基础上编制了舰船热力系统 RMS 论证软件。算例验证表明, 改进的流程能够在保证仿真精度的同时, 具有较高的计算效率。

**关键词:** 热力系统; 使用方案; RMS 论证; 数字仿真

中图分类号: TP202 文献标识码: A

## Research on Ship Thermodynamic System RMS Simulation Argumentation Based on Feasible Using Schemes

WANG Rui, JIN Jia-shan, LIU Long-bo

(College of Naval Architecture and Power, Naval Univ. of Engineer, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Because of complexity related to operation, maintenance, support and malfunction of ship steam power system, establishing math analytical model cannot satisfy the RMS argumentation demand. Based on the minimal equipment listing, Monte Carlo simulation method is not fit for system failure criterion either. The current research utilized feasible using schemes based on thermal model instead of minimal equipment listing based on logic relation. According to whether there were feasible using schemes when system partial equipment faulted, the research designed ship thermal system RMS simulation flow based on feasible using schemes. The ship thermal system RMS software was programmed based on improved simulation flow. Calculation examples demonstrated that the improved flow can satisfy the simulation precision, and the calculation efficiency is also improved.

**Key words:** steam turbine; using schemes; RMS argumentation; digital simulation

舰船热力系统设备众多、管路复杂、使用方式多样, 具有任务期间允许维修、设备性能退化影响系统最大工作能力、系统任务能力与保障资源配备有关等特点, 由于难以绘制可靠性逻辑框图和难以建立能够同时考虑上述因素的系统可靠性、维修性、保障性(RMS, Reliability Maintainability Supportability)指标论证模型, 因而在舰船热力系统 RMS 指标论证中, 要么以类似系统的指标为依据, 要么以主要设备的指标并基于简化模型为依据, 因此论证出的指标说服力不强。

目前, 该类问题的求解方法可分为两类: 解析算法<sup>[1-2]</sup>和 Monte-Carlo 仿真方法<sup>[3-4]</sup>。在系统设备单元数量较少、连接关系简单、性能参数分布已知、给定设备工作时间的情况下, 采用解析方法<sup>[5-6]</sup>可以得到精确的结果, 但其建模复杂、计算量大, 难于描述任务可靠度随时间变化这一动态变化过程, 也常常因为系统内设备单元连接关系错综复杂而无法求解。大量工程实践证明<sup>[7-8]</sup>, 采用仿真方法<sup>[9-10]</sup>可以克服解析算法的这些不足, 具有方法的通用性强、建模直观、便于扩展、计算效率满足工程要求等优点, 并随着仿真次数的增加, 所得计算结果依然能够很好满足工程需要。

Monte Carlo 仿真法早在 20 年前就已经是解决复杂系统可靠性问题的方法之一, 其中, 系统故障判

\* 收稿日期: 2009- 11- 19

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(20080431380); 海军工程大学自然科学基金资助项目(hgdj08014)

作者简介: 王锐(1980—), 女, 博士生, 工程师。

据和仿真流程的设计是最具特色和最为复杂的问题。现有判定舰船蒸汽动力系统是否满足任务要求的方法是“最小设备清单法”<sup>[11]</sup>。这种方法所存在的主要问题是,能够完成规定任务的最小设备清单不随系统的服役时间和工作环境而变化,这对存在设备性能退化和恶劣工作环境的动力系统而言,不能很好描述其使用故障情况。与此同时,系统具有任务过程允许维修、维修需备件保障、执行任务多阶段等特点,还需要建立统一高效的仿真流程,这是软件编成实现的关键。

结合蒸汽动力系统的使用维修保障特点,本文提出基于可行使用方案的舰船热力系统 RMS 仿真论证方法,主要思路是:运用 Monte Carlo 仿真技术,以系统的可行使用方案为基础,以系统的典型任务剖面为背景,采用 Matlab 和 C# 语言为编程开发工具,编制能够同时考虑系统组成、任务要求、使用中的系统重构和故障设备维修、设备的可靠性与维修性指标、设备性能退化、随船保障资源品种与数量等诸多因素的舰船热力系统 RMS 指标论证软件,并用算例进行计算。

## 1 基于 Monte Carlo 的 RMS 仿真原理

Monte Carlo 数字仿真方法是一种通过随机变量的统计试验来求解数学、物理、工程技术问题的数值方法,该方法用于复杂系统 RMS 指标计算的基本原理是基于对系统的使用、维修和保障过程的多次循环模拟,得到大量的系统故障前工作时间、维修时间和保障延误时间等,从而按照各 RMS 指标与上述时间之间的关系,计算系统的 RMS 指标。其核心是对系统组成单元的故障前工作时间、修理时间和待修时间等按照单元的 RMS 进行抽样,并基于单元状态与系统状态之间的逻辑关系判定系统状态的变化情况,继而根据系统的状态变化情况记录系统的故障前工作时间、停机维修时间和等待修理的时间等。常见分布函数随机变量抽样公式见文献[12]。在 Monte Carlo 数字仿真方法中,处理系统逻辑关系的方法有基于事件法和基于时钟法两种。本文采用基于时钟法,因其编程实现相对容易、逻辑关系更为清楚,而且当前计算机的性能也能达到令人满意的运算速度。

## 2 基于可行使用方案的故障判别方法

Monte Carlo 仿真方法应用于 RMS 计算的难点是建立系统的状态与系统各单元状态之间的逻辑关系,而其中系统故障与否的判定依据又是重点和难点。当前常用的是“最小设备清单法”,该方法的缺点在于最小设备清单是以各设备保持设计性能、按照设计时的可靠性逻辑关系而确定的。通常情况下,设备的工作能力会随着其服役时间的增加而下降。对于一个最小设备清单组成的工作系统来讲,个别设备的性能下降因系统设计时的能力储备而能够保证系统完成规定的功能要求,而当系统内的多个设备均存在不同程度的性能下降时,系统的工作能力就会明显下降。当该能力低于舰船任务所提出的要求时,便应该认为该最小设备清单是不可行的。更进一步地,当工作能力下降的系统遇到恶劣的工作环境时,其胜任的任务范围将更加缩小。

为了解决上述问题,本文引入“可行使用方案”概念,在最小设备清单方法的基础上,进一步发展而形成“基于可行使用方案的故障判别方法”。该方法的核心是使用方案的可行性计算和各任务阶段方案集的建立。使用方案可行性依据的是系统最大工作能力,其判定依据的是系统的热力模型、设备当前的能力状态和系统工作的实际环境条件,因而可把不同任务要求、设备性能退化和工作环境变化等问题予以有效解决,这是固定的最小设备清单法所难以解决的,具体计算可按文献[13]提供的方法。当计算出每一个使用方案的最大能力后,便可根据任务的要求,确定各任务阶段的可行使用方案集。对于如图 1 所示的某舰船蒸汽动力系统典型使用任务剖面,经计算,各任务阶段的可行使用方案集如表 1 所示。

在表 1 中,不同作战使用方案所涉及的设备情况不同。假设蒸汽动力系统的一个独立组由 1 个主汽轮机单元、2 个锅炉单元、2 台汽轮给水泵、2 台电动燃油泵单元、1 台汽轮燃油泵、1 台电动滑油泵、1 台汽轮滑油泵组成,代表这 10 个设备单元启用与否的作战使用方案,可以使用 11 位二进制数表达,每一位分别代表一个单元,1 表示该单元投入,0 表示该单元未投入,多的 1 位是在数串最前面,1 表示高参数,0 表示低参数。例如,数串“01101010110”就表示在该方案下,独立组以低参数工作,投入了主汽轮机单元、1<sup>#</sup> 锅炉单元、1<sup>#</sup> 汽轮给水泵、1<sup>#</sup> 电动燃油泵、汽轮燃油泵、汽轮滑油泵,而 2<sup>#</sup> 锅炉单元、2<sup>#</sup> 汽

轮给水机组、2<sup>#</sup> 电动燃油泵和电动滑油泵未投入。

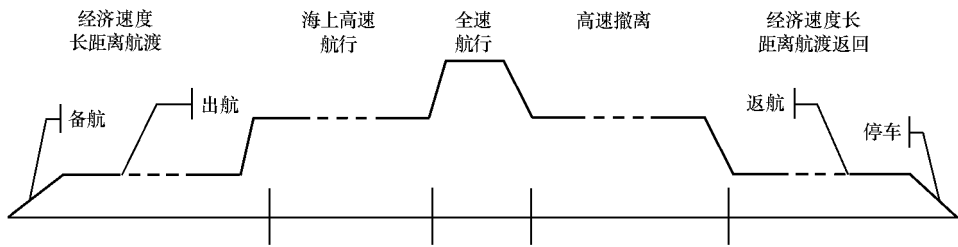


图1 热力系统的典型任务剖面  
Fig. 1 Typical mission profile of steam turbine

表1 各任务阶段的可行使用方案集  
Tab. 1 Feasible using schedule

序号	阶段	子阶段	可行系统使用方案集
1	出航	驶向海域阶段	01、02、03、04、06、07、08、09、10、12、13、14、15、17
		临近高速航行阶段	01、02、03、04、06、07
2	海上高速航行	初始阶段	01、02、03、04
		关键阶段	01、02
3	全功率	全阶段	01
4	撤离	关键阶段	01、02
		撤离海域阶段	01、02、03、04
5	返航	全阶段	01、02、03、04、06、07、08、09、10、12、13、14、15、17、24、25、28、29、37、38、41、42

对应于最小设备清单不成立而判定系统故障, 基于可行使用方案的系统故障判别依据是面对一个具体的任务要求, 系统没有可行使用方案。

### 3 基于可行使用方案的仿真

#### 3.1 仿真软件的基本结构

RMS 数字仿真软件的主要任务是模拟系统执行任务的过程。首先要模拟出系统在执行任务期间的各类事件的发生时间, 包括设备投入使用、设备发生故障及维修、备件获取、故障件的维修、维修人员的占用等; 然后根据事件发生情况推断系统的状态, 同时控制其他相关事件的发生, 并记录各事件的时间; 最后根据各事件的时间统计系统的 RMS 指标。其基本组成包括输入仿真数据和预定仿真参数的初始化模块、各事件发生时间的抽样模块、判断系统状态并控制程序执行的控制模块、记录有关数据的模块、统计分析模块等, 如图 2 所示。

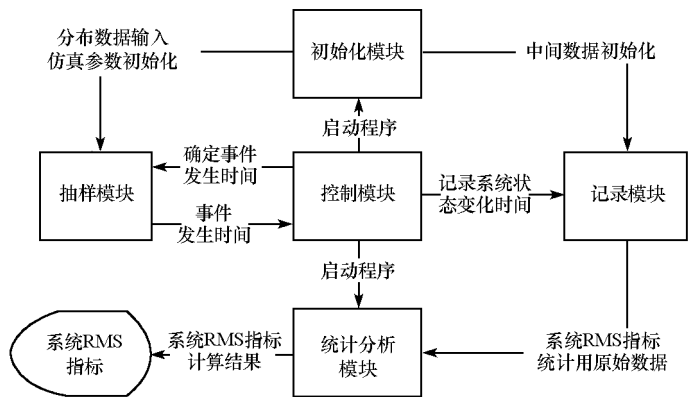


图2 舰船蒸汽动力系统 RMS 数字仿真软件结构  
Fig. 2 Software structure of ship steam turbine RMS numeral simulation

#### 3.2 基于可行系统使用方案的仿真流程及优化

基于可行使用方案的舰船热力系统 RMS 仿真流程如图 3 所示。在一次仿真中记录的数据包括: 此

次任务是否成功  $MC$  ( $MC=1$  表示任务成功)、各设备的累计故障次数  $FNOE$ 、系统发生致命性故障前的累计工作时间  $TTCF$  (仿真中未发生致命性故障时, 该时间等于任务时间)、系统发生致命性故障前的累计次数  $FNOS$ 、系统发生致命性故障后恢复任务能力的累计时间  $TTTSR$  (没有发生致命性故障时, 该时间为0)、各设备累计故障修理时间  $TTORE$ 、各备件累计故障修理时间  $TTORP$ 、舰上各备件获取累计时间  $TTOPL$ 、任务完成后剩余的备件数量  $NP$ 。而整个仿真结束后, 根据每次仿真记录的中间数据计算系统的 RMS 指标, 可以得到的指标包括: 使用可用度  $A_o$ 、任务可靠度  $R_M$ 、系统致命故障间隔平均时间  $MTBCF$ 、系统平均故障间隔时间  $MTBFE$ 、系统平均恢复时间  $MTTSR$ 、设备平均维修时间  $MTTER$ 、舰上备件获取平均时间  $PMLDT$ 、备件平均维修时间  $MTTPR$ 、备件过剩率  $PR$ 。根据每次任务仿真所记录的数据, 系统 RMS 指标仿真后统计计算公式如表 2 所示。

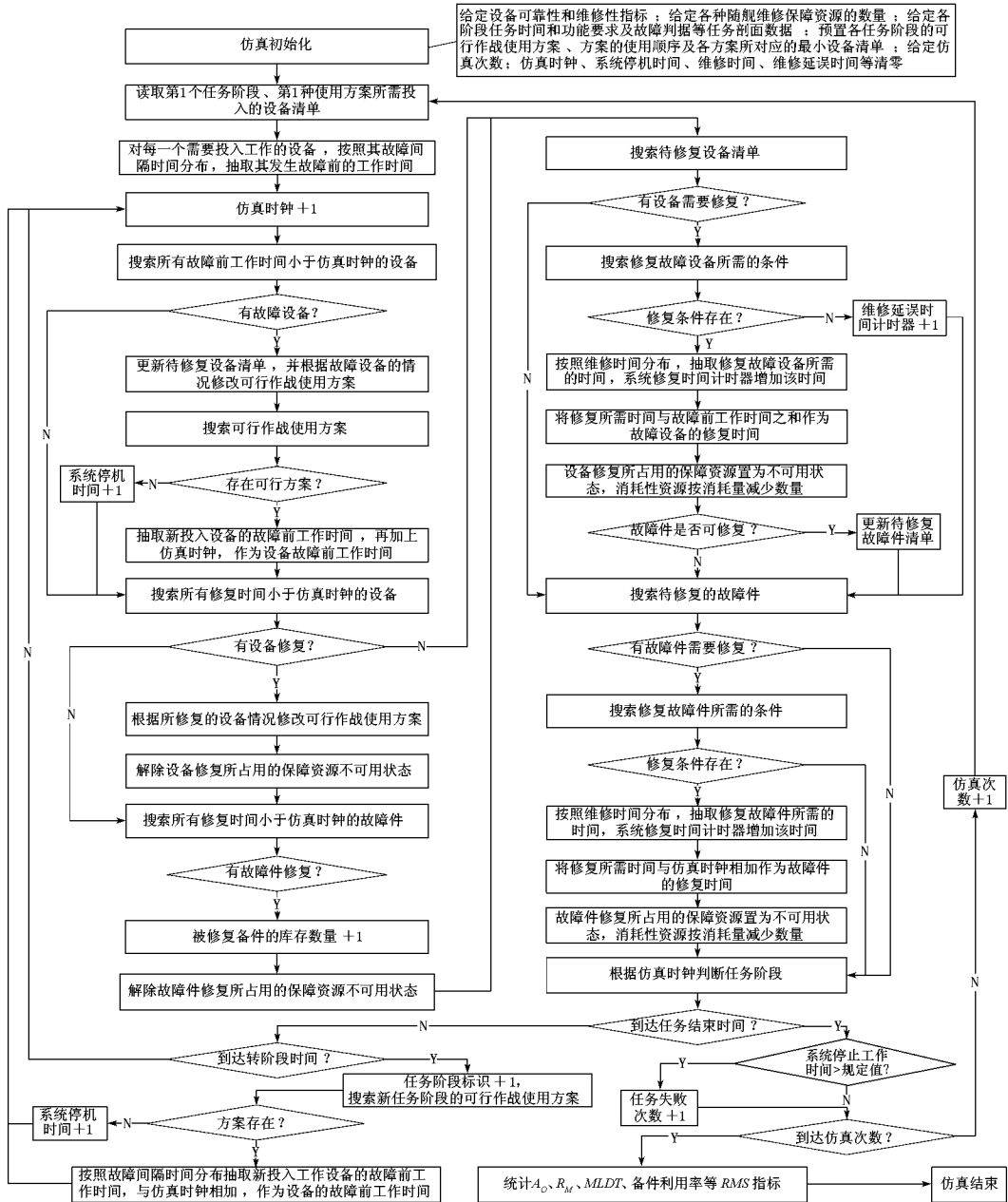


图 3 基于可行系统使用方案的舰船蒸汽动力系统 RMS 仿真基本流程

Fig. 3 Basal simulation flow of steam turbine RMS based on feasible using schedules

表2 系统RMS指标统计公式  
Tab.2 Statistics formula of system RMS index

参数名称	参数符号	计算公式
使用可用度	$A_o$	$A_o = \frac{\sum_{i=1}^n TTBCF_i}{\sum_{i=1}^n TTBCF_i + \sum_{i=1}^n TTTSR_i}$
任务可靠度	$R_M$	$R_M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n MC_i$
系统致命故障间隔平均时间	$MTBCF$	$MTBCF = TTBCF / FNOE$
系统平均故障间隔时间	$MTBFE$	$MTBFE = (MT \times \sum_{i=1}^n MC_i + TTTSR) / FNOE$
系统平均恢复时间	$MTTSR$	$MTTSR = TTTSR / FNOE$
设备平均维修时间	$MTTER$	$MTTER = TTOR / FNOE$
舰上备件获取平均时间	$PMLDT$	$PMLDT = \sum_{i=1}^n TTOP / FNOE$
备件平均维修时间	$MTTPR$	$MTTPR = TTOR / FNOE$
备件过剩率	$PR$	$PR = NP / n \times SPNI$

## 4 软件编制

根据改进的仿真流程,舰船热力系统RMS指标论证软件以Matlab 7.1为核心,使用Microsoft C#语言在Matlab源码的基础上二次开发完成。软件使用Matlab语言建立核心函数,所有仿真运算的编码均在Matlab代码中实现,C#部分的程序负责完成与用户交互的输入、仿真结果输出界面。

软件编制完成后,选择一组典型试验数据进行仿真试验,所得结果令人满意,符合仿真的逻辑与工程实践。

## 5 结论

本文针对舰船热力系构成复杂、使用方式多样、任务期间允许维修、设备性能退化等特点,提出了基于可行使用方案的RMS指标论证方法。将可行使用方案代替最小设备清单作为系统故障判据,比以最小设备清单是否成立判定系统故障具有更强的解决复杂热力系统可靠性分析问题的能力;建立了包括系统使用、维修、保障为一体的仿真计算流程,能有效地将基于热力模型的使用方案可行性计算嵌入到仿真中,具有计算效率高、仿真精度能够满足要求的特点。算例证明了所编制软件的有效性和研究方法的正确性。在今后的研究中,可以将该方法应用于其它复杂系统,为解决类似指标论证问题提供参考。

## 参考文献:

- [1] 张涛,郭波,谭跃进.基于路集的多阶段系统可靠性分析模型[J].系统工程与电子技术,2008,30(4):764-766.
- [2] 陈光宇,黄锡滋,唐小我.不完全覆盖的多阶段任务可靠性集成分析[J].系统工程理论与实践,2005,4:1-8.
- [3] 聂成龙,张柳,于永利,等.多阶段任务系统任务持续能力仿真模型研究[J].系统仿真学报,2008,20(3):729-732.
- [4] 胡涛,王树宗,杨建军.基于最小维修策略的多阶段任务成功性仿真模型[J].海军工程大学学报,2009,20(3):66-70.
- [5] 宋光明,宋建社,何志德,等.备件保障能力评估模型研究[J].火力与指挥控制,2009,34(2):17-23.
- [6] 林武强,康锐.舰船总体RMS指标分解技术研究[J].舰船科学技术,2005,27(4):12-17.
- [7] 龚九功,译.以可用性为中心的库存模型(ACIM) Using the TIGER Simulation Program[R]. AD-A194 659, 1988.
- [8] Lenny B, Stephanie B. Multi-echelon Readiness Based Sparing Solutions[C]. Proc Ann R&M symp, 1997.
- [9] 李岩,王社伟.一种新型的多阶段任务系统可靠性分析方法[J].计算机仿真,2008,1:100-104.
- [10] 胡志刚,黎放,陈波.复杂装备维修性验证仿真方法研究[J].系统仿真学报,2007,19(1):206-209.
- [11] 金家善.舰用蒸汽动力装置技术状态评估方法研究[D].武汉:海军工程大学,2003.
- [12] 杨为民,盛一兴.系统可靠性数字仿真[M].北京:北京航空航天大学出版社,1990.
- [13] 罗云.舰用蒸汽动力装置原理与设计[R].海军工程学院,1982.