

doi: 10.7690/bgzd.2013.04.008

航天发射场 PMSCM 任务可靠性仿真评估

黄生俊, 刘亚杰, 郭波

(国防科学技术大学信息系统与管理学院, 长沙 410073)

摘要: 为了解决航天发射场复杂可维修多阶段任务系统 (phased-mission system, PMS) 的任务可靠性评估问题, 依据考虑维修的多阶段任务系统 (phased-mission system considering maintenance, PMSCM) 理论和蒙特卡罗方法, 基于系统特殊的任务成功定义规则, 通过任务阶段的形式化描述与零部件的虚节点处理, 建立可靠性评估仿真模型。将模型应用于航天发射场垂直总装厂房液压系统, 成功分析了系统多阶段任务的可靠性均值、方差和置信区间。仿真结果表明: 该模型能够找出系统的关键部件, 为垂直总装厂房及航天发射场系统总体任务进行可靠性预计、分配和评估提供重要参考和决策支持。

关键词: 多阶段任务系统 (PMS); 考虑维修的多阶段任务系统 (PMSCM); 任务可靠性; 蒙特卡罗仿真; 航天发射场

中图分类号: TJ86 文献标志码: A

PMSCM Mission Reliability Simulation Evaluation of Space Launch Site

Huang Shengjun, Liu Yajie, Guo Bo

(School of Information System & Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: For solving mission reliability evaluation problem of complex maintenance phased-mission system (PMS) space launch site, according to phased-mission system considering maintenance (PMSCM) theory and Monte Carlo method, and mission success definition principle based on system feature, establish reliability evaluation simulation model through mission phase formal description and translating components into virtual nodes. Then, the model was used in assembly shop's hydraulic pressure system cell of space launch site. The phased-mission system reliability's mean, variance and confidence interval were analyzed successfully. Finally, the simulation result also indicated that the model could help people find out the key component in a system, providing decision support and reference for the reliability prediction, allocation and evaluation of vertical assembly shop and even space launch site.

Key words: phased-mission system (PMS); phased-mission system considering maintenance (PMSCM); mission reliability; Monte Carlo simulation; space launch site

0 引言

航天发射场是为航天器和运载器的装配、测试、运输等发射前准备, 航天器发射、弹道测量、发送控制指令以及接收和处理遥测信息而专门建造的一整套地面设施、设备。航天发射意义重大, 航天器及运载工具价格昂贵, 通常要求发射场具有很强的发射试验能力、良好的安全性和可靠性^[1]。航天发射任务可靠性是指在规定的发射任务周期内圆满完成发射任务的能力。要保证航天发射成功, 必须严格按照流程进行测试发射(以下简称为“测发”)工作。测发的工作流程是航天器等进入发射场后, 按照既定程序进行测试、组装、运输、加注和发射, 这是一组顺序执行的阶段任务, 它们的执行时间连续但不相交; 因此, 整个测发任务系统属于一种典型的多阶段任务系统 (phased-mission system,

PMS)。航天测发系统的可靠性评估, 是整个航天发射场可靠性预计、分配的重要参考, 能够为各级领导和专家提供可靠的决策支持, 因此测发系统任务可靠性评估具有重要的现实意义。

针对 PMS 的可靠性建模、预计和评估问题, 国内外相关学者已开展了多项研究工作: 文献[2]采用了基于马尔科夫链的分析方法, 利用解析模型解决了不考虑维修、结构简单的 PMS 任务可靠性问题, 但假设条件太多, 无法应用于复杂系统; 文献[3-5]采用仿真模型, 加入失效模式的判断, 成功计算了较为复杂结构的 PMS 任务可靠性, 但不够完善, 没有考虑部件维修; 文献[6-7]对以往仿真模型进行了进一步探讨和完善, 结合实际引入了部件维修机制, 但忽视了各任务阶段之间的时间关联性, 任务中缺乏时间限制。

笔者将系统任务成功率定义为: 各阶段都必须

收稿日期: 2012-10-12; 修回日期: 2012-11-17

作者简介: 黄生俊(1989—), 男, 湖南人, 在读硕士, 从事装备综合保障管理研究。

在各自的任务时间内完成任务，如果某阶段超过了规定的任务时间，该阶段任务失败，但只要所有任务完成总时间不超过总的规定时间，仍然判定系统任务成功。这种定义规则更加适用于真实系统中任务之间的灵活调整，在以前的研究中并不多见。此外，笔者还针对航天发射场时间窗限制、部件可紧急抢修、可靠性维修性参数服从多分布的特殊现实问题，形式化地描述了带时间约束的考虑维修的多阶段任务系统 (phased-mission system considering maintenance, PMSCM)，建立了通用性的仿真模型。

1 问题描述

整个航天测发流程是典型的 PMS，参与各个任务阶段的厂房也有各自的阶段，同时各厂房中大多数部件可紧急抢修；因此，厂房系统构成了典型的 PMSCM，如垂直总装厂房液压系统。

航天发射场系统分割中，垂直总装厂房主要负责火箭垂直对接任务。具体任务可以划分为：火箭入厂、起吊对接、箭转场 3 个阶段。垂直总装厂房液压系统为整个厂房提供液压动力，辅助完成各阶段任务。液压系统主要由小门分系统、升降分系统、芯级分系统和大门分系统组成，不同任务阶段对液压有不同的要求，如火箭是水平入厂，所以在入厂时只需要小门液压系统工作，而转场时是垂直转场，所以需要大门液压系统工作。具体各任务阶段需要的支持液压分系统对照表见表 1。

表 1 各任务阶段支持液压系统对照

| 阶段任务 | 支持液压系统 |
|------|------------------|
| 火箭入厂 | 小门液压系统 |
| 起吊对接 | 升降液压系统 芯级液压系统 |
| 火箭转场 | 大门液压系统 |

该系统包含一系列不相互覆盖的、有序的基本任务阶段，每个阶段包含多个功能部件并有唯一的可靠性框图 (reliability block diagram, RBD) 与之相对应，各个阶段的 RBD (见图 1~图 4) 不完全一致，各个阶段的工作时间可以不连续，即允许发生故障，且故障后可以及时得到维修。其任务成功是指各个基本任务阶段累计运行规定时间，完成规定任务后，系统总耗费时间不超过规定值。

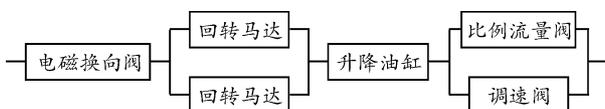


图 1 升降液压系统 RBD

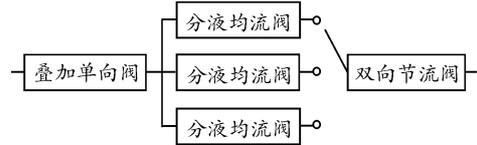


图 2 芯级液压系统 RBD

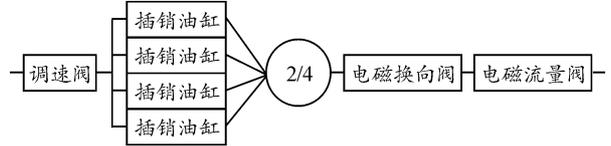


图 3 大门液压系统 RBD

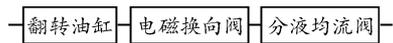


图 4 小门液压系统 RBD

笔者以图 5 为例进行任务阶段及任务成功的说明。垂直总装厂房液压系统保障任务由 3 个基本任务阶段组成，基本任务阶段分别必须累计工作时间 T_1 、 T_2 和 T_3 ，系统任务成功的条件是各阶段消耗时间之和不超过总的任务时间限额 T 。

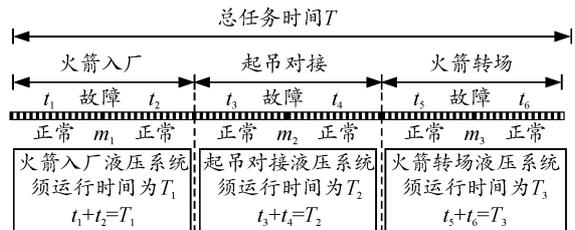


图 5 考虑维修的多阶段任务系统

在图 5 中，火箭入厂阶段所对应的部件系统在工作时间 t_1 后发生故障，然后进行维修，修理时间为 m_1 ，修好后继续工作时间 t_2 ，且 $t_1+t_2=T_1$ ，满足火箭入厂阶段的累计任务时间要求，然后转入起吊对接阶段；起吊对接阶段所对应的部件系统在工作时间 t_3 后发生故障，随即进行维修，修理时间为 m_2 ，修好后继续工作时间 t_4 ，且 $t_3+t_4=T_2$ ，满足起吊对接阶段的累计任务时间要求，然后转入火箭转场阶段；火箭转场的执行过程和前两阶段类似。3 个阶段总的的时间消耗满足 $T_1+T_2+T_3+m_1+m_2+m_3 \leq T$ ，因此该任务成功。

评估垂直总装厂房液压系统的任务可靠性，需要考虑部件的可维修性以及参数多分布的情况，而传统的马尔科夫链分析和数学解析方法都难以甚至无法解决多分布问题；因此，笔者的做法是采用仿真原理，建立仿真模型。

2 任务可靠性仿真模型建立

该仿真主要基于离散事件调度法的仿真方式进行，其主要思路为：依据每个阶段所对应部件的故

障和维修参数产生各种故障事件和维修事件, 并围绕这些事件的处理来推进仿真时钟。

2.1 基本假设

实际系统是可抢修系统, 有许多维修规则, 笔者以实际问题为基础, 提出如下基本假设:

1) 在每个阶段任务中, 系统和部件只有正常和故障 2 种状态, 一个部件不能在同一时刻处于多种状态;

2) 部件的故障和修复是独立进行的;

3) 修好后的部件, 不影响装备的使用功能;

4) 只有发生导致阶段内工作系统停机的故障才进行维修, 其他类型故障在运行期间不进行修理;

5) 修理时对所有积累的故障进行维修, 再次运行时将确保无故障单元;

6) 多阶段任务中各个阶段任务之间是按顺序执行的串联关系, 即只要有一个阶段任务失败, 后续任务将无法继续, 造成整个多阶段任务无法完成, 任务失败。

基于以上假设, 要建立仿真模型还需要解决 4 个问题: 形式化描述 PMSCM 的 RBD、确定任务阶段故障到达时间、确定任务阶段维修时间以及更新阶段故障到达时间。

2.2 形式化描述 PMSCM 的 RBD

本模型初始化时需要采集整个系统的 RBD, 以及系统各部件的可靠性、维修性参数, 各任务阶段 i 需要正常工作的时间 $t(i)$, 总的任务时间 T 。

系统 RBD 的采集方式有许多种, 为了便于计算机识别计算, 笔者采用正则表达式的描述方式: 英文大写或小写字母表示各个部件, 符号“&”表示串联结构, “|”表示并联结构, “+”表示冷储备结构, “%”表示 K/N 结构, “*”为阶段分隔符。例如: $A\&(B|C)*D\&(E+F+G)$ 表示一个两阶段的系统, 第一阶段是 B 与 C 构成并联结构然后再和 A 形成串联结构, 第二阶段是 E、F 和 G 构成冷储备结构然后再与 D 构成串联结构。

2.3 确定任务阶段故障到达时间

基本任务阶段内工作系统的 RBD 可能为串联、混联或包含冷储备和 K/N 在内的其他可靠性逻辑关系。为了简化任务阶段故障到达时间的计算, 笔者通过引入虚节点的方法, 将非串联结构转换为串联虚节点进行处理。非串联结构指并联结构、冷储备结构和 K/N 结构等。

之所以考虑非串联结构, 是因为非串联结构中的设备发生故障并不导致阶段故障, 只有整个非串联结构故障时才导致阶段故障。运用虚节点方法处理非串联结构的规则如下:

1) 并联结构: 单元 Unit1 和 Unit2 并联, 其故障到达时刻抽样分别为 T_1, T_2 , 则并联结构的故障到达时刻并联结构组成设备的故障到达时间的最大值, 即 $\max[T_1, T_2]$ 。

2) 冷储备结构: 单元 Unit1, Unit2, ..., UnitN 构成冷储备结构, 其故障到达时刻分别为 T_1, T_2, \dots, T_N , 则冷储备结构的故障到达时间为 $\sum_{i=1}^N T_i$ 。

3) K/N 结构: 单元 Unit1, Unit2, ..., UnitN 构成 K/N 结构, 故障到达时刻分别为 T_1, T_2, \dots, T_N , 则 K/N 结构的故障到达时间为第 K+1 个部件发生故障的时间, 计算方法是首先将 T_1, T_2, \dots, T_N 按升序排序, 然后取第 K+1 个 T 即为 K/N 结构的故障到达时间。

确定任务阶段的故障到达时间的流程为: 依据任务阶段各组成部件的故障参数, 产生各自故障到达时间, 运用虚节点处理规则计算虚节点故障到达时间, 求出虚节点故障到达时间的最小值, 即为任务阶段的故障到达时间。

2.4 确定任务阶段维修时间

根据基本假设, 系统故障后, 对其所有已坏部件进行维修。根据不同的节点类型, 其维修时间可以通过下面方法确定。

1) 串联类型节点, 其对应的设备维修时间为根据维修参数抽样的维修时间。

2) 非串联类型的节点, 维修时间为节点对应底层设备的维修时间抽样的最大值。

如果阶段系统内同时存在可修和不可修单元, 可通过维修时间进行区分。

1) 可修系统维修时间可以通过相应的维修时间分布如指数分布、正态分布、威布尔分布等, 抽样取得。

2) 不可修系统的维修时间可以设定为一个足够大的常数, 使其在任务时间内无法完成。

2.5 更新阶段故障到达时间

更新阶段 k 故障到达时间, 需要遍历系统中所有的部件, 判断其是否参加工作。如果部件没有工作则不需要进行数据更新; 如果工作, 则将部件分 3 种情况进行讨论:

1) 已损坏的部件：因为该部件已经损坏，上一次的故障到达时间已经没有意义，需要根据其可靠性参数重新抽样生成节点的故障到达时间。

2) 可靠度为非指数分布的正常部件：虽然该类部件没有损坏，但是它的故障到达时间已经耗费了一部分，由于可靠度是非指数分布，节点具有记忆性，所以其故障到达时间应该减去已经耗费的时间，也就是减去阶段的故障到达时间。

3) 可靠度为指数分布的正常部件：该类部件没有损坏，虽然它的故障到达时间已经耗费了一部分，但由于可靠性参数服从指数分布，节点具有非记忆性，每次开始工作都是“完好如新”，所以需要根据其可靠性参数重新抽样生成节点的故障到达时间。

2.6 仿真流程

本仿真算法的主要依据是：根据 RBD 表示的系统可靠性模型，在已知各个基本部件失效分布和维修分布函数的情况下，运用蒙特卡罗和事件调度法进行系统仿真运行，最后统计任务可靠性的估计值。具体的可靠性仿真流程图如图 6 所示。

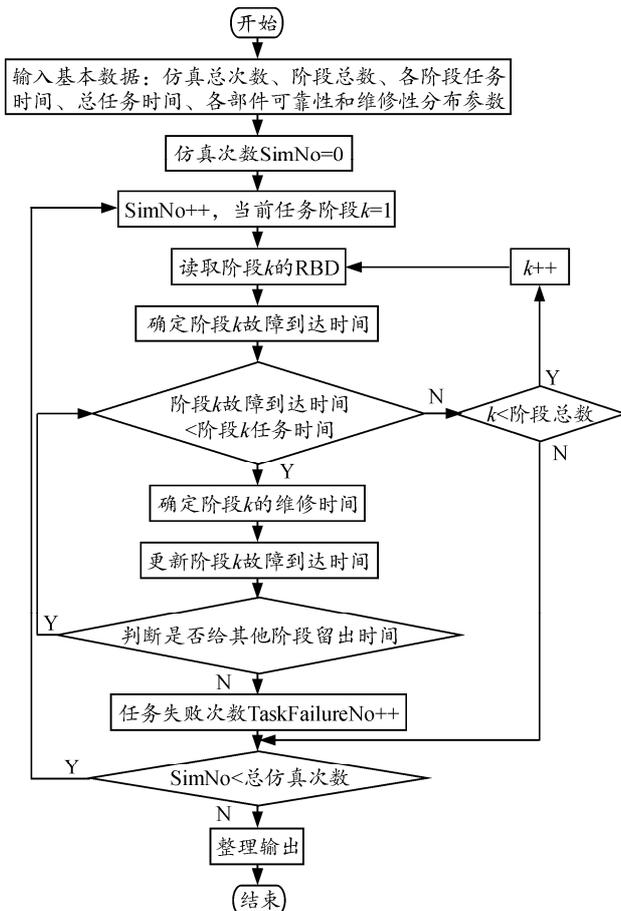


图 6 仿真流程

2.7 仿真模型的输出

运行该仿真模型 Num 次，每次仿真循环次数为 N，统计任务失败次数 n，计算系统任务可靠度 $R_i = (N - n) / N$ ；总的部件数为 Ncom，统计由每个部件 (如 X) 故障导致系统故障的次数 $M_x(i)$ 。对数据进行整理，可以得到如下输出结果：

1) 系统的任务可靠度均值 \bar{R} ：

$$\bar{R} = \left(\sum_{i=1}^{Num} R_i \right) / Num$$

2) 部件 X 的重要度 W_x ：

$$W_x = \left(\sum_{i=1}^{Num} M_x(i) \right) / \sum_{j=1}^{Ncom} \sum_{i=1}^{Num} M_x(i)$$

3) 任务可靠度均值 \bar{R} 的方差 $\Delta(\bar{R})$ ：

$$\Delta(\bar{R}) = \left(\sum_{i=1}^{Num} (R_i - \bar{R})^2 \right) / (Num - 1)$$

4) 任务可靠度均值 \bar{R} 的 95% 置信区间：

$$[\bar{R} - z_c \sigma_{\bar{R}}, \bar{R} + z_c \sigma_{\bar{R}}]$$

其中标准差 $\sigma_{\bar{R}} = \sqrt{\Delta(\bar{R})}$ ， z_c 可以查正态分布表得到 $z_c = 1.96$ 。

3 实例

对于前文描述的航天发射场垂直总装厂房液压 PMSCM 的可靠性，笔者运用 Visual Studio 2005 对其进行仿真评估，仿真环境为 Pentium 4, 3.06 GHz, 内存 4 G。

PMSCM 的任务共分 3 个阶段，各阶段的任务时间以及总的任务时间见表 2。

表 2 系统任务时间

| 阶段名称 t/h | 火箭入厂 1 | 起吊对接 20 | 火箭转场 2 | 总任务 35 |
|-------------|-----------|------------|-----------|-----------|
| | | | | |

笔者利用 Relex 软件提供的 NPRD (non-electronic parts reliability data) 系列数据库^[8]和相关液压系统资料^[9]，初步建立了垂直总装厂房液压系统可靠性预计所需底层部件的故障率、维修率数据，如表 3 所示。

对任务可靠度仿真模型运行 Num=100 次，每次仿真循环次数 N=10 000，仿真结果如下。

1) 系统任务可靠度均值、方差和 95% 置信区间，结果如表 4 所示。

表3 系统组成部件可靠性、维修性参数

| 部件代号 | 部件名称 | 故障分布密度函数类别 | $F(t)$ 的特征参量(h) | 维修时间分布密度函数类别 | $M(t)$ 的特征参量(h) |
|------|-------|------------|---|--------------|--|
| A | 电磁换向阀 | 指数分布 | $1/\lambda = 1.52 \times 10^6$ | 正态分布 | $\mu = 3.14, \sigma = 0.71$ |
| B | 回转马达 | 指数分布 | $1/\lambda = 4.37 \times 10^6$ | 威布尔分布 | $m = 5.22 \times 10^{-4}, \eta = 1.04$ |
| C | 升降油缸 | 正态分布 | $\mu = 5.47 \times 10^6, \sigma = 7.01 \times 10^3$ | 正态分布 | $\mu = 4.32, \sigma = 1.16$ |
| D | 比例流量阀 | 指数分布 | $1/\lambda = 2.14 \times 10^6$ | 正态分布 | $\mu = 2.24, \sigma = 0.91$ |
| E | 调速阀 | 指数分布 | $1/\lambda = 2.07 \times 10^6$ | 威布尔分布 | $m = 9.74 \times 10^{-4}, \eta = 2.53$ |
| F | 叠加单向阀 | 指数分布 | $1/\lambda = 0.86 \times 10^6$ | 威布尔分布 | $m = 2.98 \times 10^{-4}, \eta = 4.01$ |
| G | 分液均流阀 | 正态分布 | $\mu = 3.17 \times 10^6, \sigma = 6.21 \times 10^3$ | 指数分布 | $1/\lambda = 8.49$ |
| H | 双向节流阀 | 指数分布 | $1/\lambda = 0.51 \times 10^6$ | 正态分布 | $\mu = 4.16, \sigma = 1.24$ |
| I | 插销油缸 | 正态分布 | $\mu = 4.58 \times 10^6, \sigma = 7.64 \times 10^3$ | 正态分布 | $\mu = 1.63, \sigma = 0.59$ |
| J | 电磁流量阀 | 指数分布 | $1/\lambda = 2.41 \times 10^6$ | 指数分布 | $1/\lambda = 7.32$ |
| K | 翻转油缸 | 正态分布 | $\mu = 9.21 \times 10^6, \sigma = 5.32 \times 10^4$ | 正态分布 | $\mu = 2.73, \sigma = 0.98$ |

表4 系统任务可靠度的统计量

| 统计量 | 均值 | 方差 | 95%置信区间 |
|-----|---------|--------------|-------------------|
| 结果 | 0.999 6 | 2.266 3e-008 | [0.999 3 0.999 9] |

2) 系统各次仿真任务可靠度均值, 如图7。

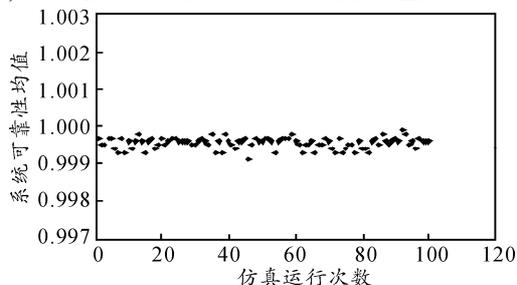


图7 系统各次仿真任务可靠度均值

由表4和图7可知, 整个多阶段任务系统的任务可靠度水平较高, 方差较小, 一方面说明航天发射场液压系统结构功能设计较合理, 另一方面也反映了仿真模型稳定性比较高。

3) 系统各部件的重要度, 结果如图8所示。

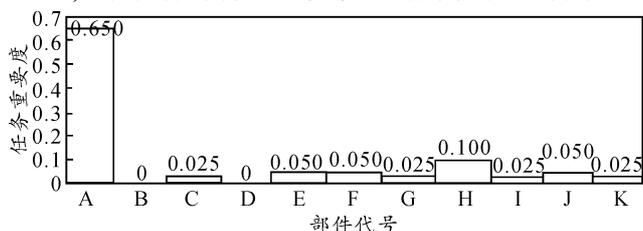


图8 系统各部件的重要度

由图8可知, 系统中各部件的重要度差别较大, 结合重要度的定义规则, 得出的结论为: 大多数的系统故障是由部件A(电磁换向阀)故障所导致。所以要提高系统任务可靠性, 关键在于增加部件A的故障到达时间, 可以考虑的措施是更改A的单元结构, 如将单个A结构改为并联或者冷储备的冗余结构, 提高A单元的故障到达时间, 从而增加系统可

靠性。

4 结论

笔者在已有数据库和经典文献数据的基础上, 对垂直总装厂房液压系统的多阶段任务进行分析, 利用蒙特卡罗和虚节点处理方法, 建立了计算多PMSCM任务可靠性的仿真模型, 并对实际液压系统进行了仿真。仿真结果表明: 该方法解决了普通解析模型无法解决的多阶段、多分布、可维修的复杂系统任务可靠性求解问题, 而且结果相对误差较小, 比较稳定, 同时输入简单灵活, 适用于这一类型的PMSCM, 具有较为广泛的通用性。

参考文献:

- [1] 中国载人航天工程办公室. 登天神港[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009: 6-7.
- [2] M Alam, UMAL-Saggaf. Quantitative reliability evaluation of repairable phased-mission system using Markov Approach[J]. IEEE Trans. Reliability, Dec. 1996, R-35: 498-503.
- [3] 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, 25(1): 4-100.
- [4] 姜朝毅, 于永利, 张柳, 等. 基于Petri网的装备系统任务成功概率仿真[J]. 计算机仿真, 2006, 23(1): 29-32.
- [5] Smotherman M K, Zemoudeh K. A non-homogeneous Markov model for phased-mission reliability analysis[J]. IEEE Trans. Reliability, Dec. 1989, 38: 585-590.
- [6] 杨建军, 刘锋, 黎放. 多阶段任务多态系统可靠性建模与仿真[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(2): 89-92.
- [7] 聂成龙, 张柳. 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(2): 729-732
- [8] NPRD-98, Nonelectronic Parts Reliability Data, Rome: Reliability Analysis Center (RAC), 1998.
- [9] 瑟里岑. 液压和气动传动装置的可靠性[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989: 127-128.