

doi: 10.7690/bgzdh.2022.11.009

基于随机维修网络的导弹技术准备流程时间特性分析

李万宝, 萧耀友, 王振华, 姚玉林

(中国人民解放军 91515 部队, 海南 三亚 572016)

摘要: 为实现可靠高效的战备作战保障, 分析导弹技术准备流程中的不确定因素及其装备维修性成因, 基于使用数据采用统计推论方法刻画不确定工序的随机维修分布。将维修性参数信息引入图示评审技术 (graphical evaluation and review technique, GERT) 随机网络逻辑计算过程, 构建导弹技术准备流程的随机维修网络模型; 采用 GERT 解析方法对某导弹技术准备流程时间进行求解, 并通过调整部分维修性参数验证模型的灵敏度。仿真结果表明, 该模型算法能为遂行导弹保障任务提供有力数据支撑。

关键词: 导弹技术准备; 维修性参数; 随机维修网络; 图示评审技术

中图分类号: TJ760.7 **文献标志码:** A

Time Characteristics Analysis of Missile Technical Preparation Process Based on Stochastic Maintenance Network

Li Wanbao, Xiao Yaoyou, Wang Zhenhua, Yao Yulin

(No. 91515 Unit of PLA, Sanya 572016, China)

Abstract: In order to achieve reliable and efficient combat readiness support, the uncertain factors in missile technical preparation process and the causes of equipment maintainability were analyzed, and the stochastic maintenance distribution of uncertain processes was described by statistical inference method based on usage data. The information of maintainability parameters is introduced into the logic calculation process of graphical evaluation and review technique (GERT) random network, and the random maintenance network model of missile technical preparation process is constructed. The GERT analytical method is used to solve the time of the technical preparation process of certain type missile, and the sensitivity of the model is verified by adjusting some maintainability parameters. The simulation results show that the model and algorithm can provide strong data support for missile support tasks.

Keywords: missile technical preparation; maintainability parameter; random maintenance network; GERT

0 引言

开展技术准备流程优化研究, 把控进度风险、提高任务质效, 是遂行导弹战备作战任务的迫切需要。对于这一课题, 文献[1-6]主要采用网络计划技术 (program evaluation and review technique, PERT) 方法研究。但在以下方面未深入研究: 1) 流程工序时间并非局限于几个常值, “三点时间估计法”也不够准确, 有些工序存在不确定性; 2) 部分工序之间的传递关系并非确定型邻接逻辑关系, 有些包含有概率分支, 带有不确定性; 3) 未考虑部分工序因装备故障、人员操作等因素带来的“返工”, 甚或系统“宕机”。

PERT 方法属于确定型网络, 在解决上述不确定性方面, 存在先天局限, 基于该方法无法准确刻画导弹技术准备的时间特性。而图示评审技术 (GERT) 是一种不确定型网络计划技术, 采用随机分

布描述活动时间、费用等参数, 其活动项目之间的逻辑关系为概率型, 考虑活动项目返工, 具有更强的一般适用性。近年来, 该方法在国防装备保障领域得到较多研究使用^[7-10]。其中文献[8-10]分别采用危险耦元描述装备活动交互影响、基于机会理论刻画风险传递机理、基于排队论修正任务活动时间等理论方法, 提出了 GERT 改进模型, 这些改进主要集中在随机过程中传递参数与传导逻辑的适应性改进方面, 它们服务于具体装备保障活动的风险逻辑和不确定性实际。

导弹技术准备任务实践表明: 在不考虑人因操作问题等情况下, 上述 3 类不确定性问题主要是由武器装备的使用可靠性与维修性变化带来的。笔者引用 GERT 模型思路框定技术准备流程基本逻辑, 基于导弹使用与维修任务分析 (operation and maintenance work analysis, O&MTA) 完善其中维修

收稿日期: 2022-07-20; 修回日期: 2022-09-03

作者简介: 李万宝(1982—), 男, 山东人, 硕士, 工程师, 从事武器作战使用、装备保障管理研究。E-mail: li_wanbao@163.com。

路径规划，将导弹装备维修性使用数据信息融入模型各参量数据与逻辑关系转换中，构建了用于描述导弹技术准备流程实际的随机维修网络模型。通过该模型数据仿真，验证维修性参数对整个任务流程的影响度，据此提出有助于提高装备组件或系统维修能力水平的针对性措施。

1 随机维修网络模型

1.1 模型构建

GERT 随机网络图由箭线、节点和流组成。箭线表示操作工序，节点表示操作开始、结束的状态及活动间的逻辑关系，流反映操作工序的量化关系。节点由输入侧和输出侧组成，输入侧有 3 种逻辑关系，输出侧有 2 种逻辑关系，节点特征与符号^[7]如表 1 所示。

表 1 GERT 网络图节点

输出	输入		
	异或型 ◁	或型 ◁	与型 ◁
确定型 ◁	◊	◇	○
概率型 ▷	◊	◇	◇

以某导弹技术准备流程中的一道单机测试子流程为例，分析随机维修网络的构建过程。如图 1 所示，该单机测试主要分为 2 道测试工序，其中数字 1、2、3 表示 3 个节点，1→2、2→3 表示 2 个操作工序：“测试 1”与“测试 2”。工序完成概率和所需时间 2 个传递参数构成了流。比如 $U(P_{23}, T_{23})$ 表示活动 2→3 的发生概率为 P_{23} ，该工序所需时间为 T_{23} 。

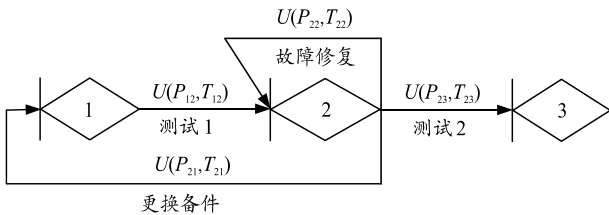


图 1 单机测试流程的随机维修网络

该单机完成第 1→2 道测试工序即“测试 1”后，进行到节点 2。此时可能发生 3 种情况：1) 继续开展第 2→3 道测试工序即“测试 2”；2) 发生故障问题，经基层级修复后，继续开展“测试 2”；3) 发生故障问题，基层级修复不能解决，更换备件单机，由节点 1 重新开始测试。节点 2 的输入活动为异或型，2 个输入活动中有且只有一个完成后，节点 2 才能实现；节点 2 后的 3 个输出活动为概率型关系，只有一个能进行，且有一定实现概率，输出活动实现概率之和为 1，即 $P_{21}+P_{22}+P_{23}=1$ 。基于上述建模思路，构建整个导弹技术装备流程的随机维修网络。

1.2 维修性参数分析

根据导弹技术准备流程工序的时间分布情况，可将其分为确定型工序时间和随机型工序时间。确定型工序时间主要由操作时间、准备时间组成，其中：操作时间与人员编配、操作技能、协同水平等因素密切相关；准备时间是技术准备活动所需资源的就位时间。该部分时间采用数据统计的方法计算，常在某一均值范围内浮动。

随机型工序时间主要消耗在故障定位修复、工位交替、备件更换等作业上，以及因之导致的作业进度变慢、工序交接推迟等情形。若某部组件发生故障异常，应在快速探明故障部位的情况下，根据其损坏程度和故障性质，以任务流程时间裕度为主要判据，部分故障立足于基层级修复解决，更多的故障装备部件采取迅速定位、更换备件策略。

随机型工序是任务风险的主要来源，以一定概率发生，以故障装备的维修性作业为主要内容，其维修时间通常是以某种统计分布形式存在。文献[11]对常用维修分布类型、计算公式和适用规律进行了归纳，如表 2 所示。其中，维修密度函数的均值与方差主要由装备故障数据的统计样本均值与样本方差推断得出。表 2 可用于统计推算图 1 所示 2→2、2→1 两道维修工序的时间。

表 2 常用维修度函数的分布形式

分布类型	维修密度函数	备注
指数分布	$m(t) = \mu \cdot e^{-\mu t}$	适用于短时间修复或者迅速换件的装备
正态分布	$m(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{1}{2}(\frac{t-\mu}{\sigma})^2)$	适用于故障简单、单一装备的维修活动或基本作业
对数正态分布	$m(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}t\sigma} \exp(-\frac{1}{2}(\frac{\ln t - \mu}{\sigma})^2)$	适用于修理频率和持续时间都互不相等的若干活动组成的复杂装备维修任务

不同批次装备在不同使用时期的维修性表现是不同的。基于装备使用的技术质量信息，采用统计推论的方法，可得到随机型工序在一定置信度与时间约束下的完成概率。很多情况下，装备的使用可靠性数据偏少、故障样本量偏小，工程实践中，常采用假设检验的一些方法，综合判断在一定置信水平下的可靠度指标。比如，运用频率直方图研究分布类型，然后运用卡方检验、K-S 检验等方法验证结果。以图 1 所示某单机随机维修网络为例，任务指挥人员常基于任务时限指令，采取数据统计分析、专家打分法、维修实力评估等方式来综合裁定各概率分支取值，进而推算整个任务的风险系数。

2 随机维修网络计算

由 GERT 理论^[7]可知，操作工序传递函数为：

$$W_{ij}(s) = P_{ij}M_{ij}(s) \tag{1}$$

式中： P_{ij} 为操作工序 $i \rightarrow j$ 发生的概率； $M_{ij}(s)$ 为该工序时间分布的矩母函数。

应用梅森公式，可将导弹技术准备流程随机网络的等价传递函数简化为：

$$W_E(s) = \frac{\sum_k P_k(s)[1 + \sum_m (-1)^m \cdot L_k(m,s)]}{H(s)} \tag{2}$$

式中： $P_k(s)$ 为从源节点到汇节点无回路的第 k 条线路上的 $W_{ij}(s)$ 乘积； $L_k(m,s)$ 为与第 k 条线路不触的第 m 级回路 $W_k(s)$ 函数的和； $H(s)$ 为整个随机网络的行列式，等于 1 减去全部奇数阶回路之和再加上全部偶数阶回路之和。

$W_E(s)$ 为等价网络实现概率 P_E 与实现整个网络所需时间的矩母函数 $M_E(s)$ 之积，即：

$$W_E(s) = P_E \cdot M_E(s) \tag{3}$$

根据矩母函数性质可知，技术准备流程最终实现的概率为：

$$P_E = W_E(s)|_{s=0} = W_E(0) \tag{4}$$

矩母函数 $M_E(s)$ 的 n 阶导数在 $s=0$ 点处的值等于时间 t 的 n 次方的期望值，则有：

$$E[t^n] = \left[\frac{d^n}{ds^n} M_E(s) \right]_{s=0} \tag{5}$$

求得技术准备流程最终实现所需时间均值为：

$$E[t] = \frac{d}{ds} M_E(s) \Big|_{s=0} = \frac{d}{ds} \left[\frac{W_E(s)}{W_E(0)} \right]_{s=0} \tag{6}$$

所需时间的方差为：

$$V[t] = \frac{d^2}{ds^2} \left[\frac{W_E(s)}{W_E(0)} \right]_{s=0} - \left\{ \frac{d}{ds} \left[\frac{W_E(s)}{W_E(0)} \right]_{s=0} \right\}^2 \tag{7}$$

根据项目风险定义，整个流程实现的风险度为：

$$RD = \frac{\sqrt{V(t)}}{E(t)} \tag{8}$$

3 案例分析

以某导弹的一个任务技术准备流程为研究对象，通过 O&MTA，分析各工序逻辑剖面，构建了维修性随机网络模型如图 2 所示。各流程工序名称以 CKG、FJS 等字母组合代替，各随机工序的信号流向与转换逻辑含义参见 1.1 节。

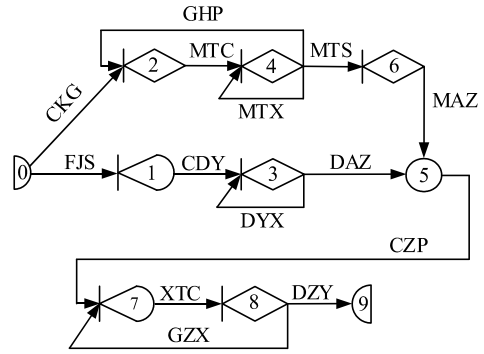


图 2 基于随机维修网络的导弹技术准备流程

基于装备质量信息和操作数据，经数理统计，可得各工序时间、完成概率等参数，如表 3 所示。

表 3 模型传递函数

代号	工序名称	实现概率	时间分布	分布参数 (μ, σ^2)	矩母函数
0-1	FJS	1.00	正态	(1.1,0.2)	$e^{1.1s+0.1s^2}$
1-3	CDY	1.00	正态	(2.0,0.5)	$e^{2s+0.25s^2}$
3-3	DYX	0.10	正态	(1.0,0.2)	$e^{s+0.1s^2}$
3-5	DAZ	0.90	正态	(1.3,0.4)	$e^{1.3s+0.2s^2}$
0-2	CKG	1.00	常值	(0.5,0)	$e^{0.5s}$
2-4	MTC	1.00	正态	(2.0,1.0)	$e^{2s+0.5s^2}$
4-2	GHP	0.15	正态	(2.0,1.0)	$e^{2s+0.5s^2}$
4-4	MTX	0.05	指数	(1.0,1.0)	$1/(1-s)$
4-6	MTS	0.80	正态	(1.6,0.4)	$e^{1.6s+0.2s^2}$
6-5	MAZ	1.00	正态	(1.1,0.2)	$e^{1.1s+0.1s^2}$
5-7	CZP	1.00	正态	(1.2,0.2)	$e^{1.2s+0.1s^2}$
7-8	XTC	0.85	正态	(1.3,0.4)	$e^{1.3s+0.2s^2}$
8-7	GZX	0.15	正态	(2.0,1.0)	$e^{2s+0.5s^2}$
8-9	DZY	1.00	指数	(1.0,1.0)	$1/(1-s)$

由图 2 可以看出，从节点 0 到节点 9 有 2 条流程线路：1) $0 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 9$ ；2) $0 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 5 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 9$ 。

根据式(2)，计算线路 1)，可得：

$$W_{09} = \frac{W_{01} \cdot W_{13} \cdot W_{35} \cdot W_{57} \cdot W_{78} \cdot W_{89}}{1 - W_{33} - W_{87} + W_{33} \cdot W_{87}} = \frac{0.765e^{6.9s+0.85s^2} \cdot \frac{1}{1-s}}{1 - 0.1e^{s+0.1s^2} - 0.15e^{2s+0.5s^2} + 0.015e^{3s+0.6s^2}} \tag{9}$$

根据式(2)，计算线路 2)，可得：

$$W_{09} = \frac{W_{02} \cdot W_{24} \cdot W_{46} \cdot W_{65} \cdot W_{57} \cdot W_{78} \cdot W_{89}}{1 - W_{44} - W_{42} - W_{87} + W_{44}W_{87} + W_{42}W_{87}} = \frac{0.68e^{7s+1.1s^2} \cdot \frac{1}{1-s}}{1 - 0.3e^{2s+0.5s^2} - \frac{0.05}{1-s} + 0.0225e^{4s+s^2} + 0.0075 \frac{e^{2s+0.5s^2}}{1-s}} \tag{10}$$

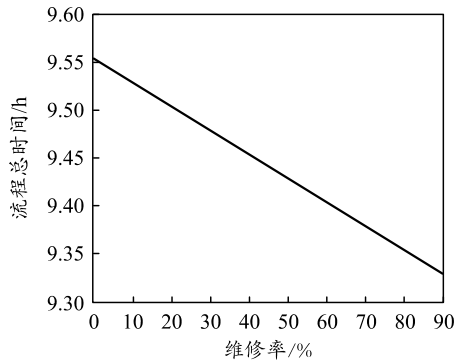
根据式(4)–(8)计算式(9)、(10)可得，2 条线路的任务执行时间均值、方差与风险度，如表 4 所示。

线路 2)流程所需时间均值较大、风险度偏高,应作为关键线路重点关注,在流程安排时,应针对该线路上的部分工序预留一定时间裕度。

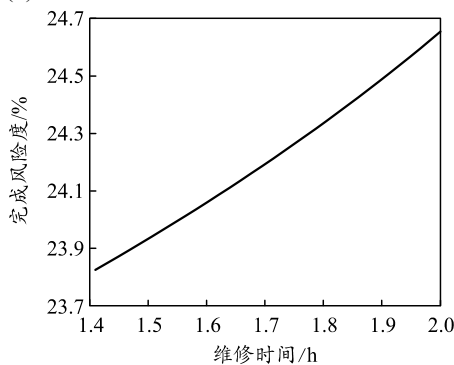
表 4 随机维修网络模型仿真数据

线路	时间均值/h	时间方差	风险度/%
1)	8.364	3.853	23.47
2)	9.490	5.461	24.62

以表 3 中工序 2—4 “MTC” 单机测试为例,进行模型灵敏度分析。该单机装备测试平均每 5 台中出现 1 台故障,基层维修率为 25%,平均 2 h 能排除一次故障。若调整其维修性参数,即提高对该单机装备的维修度,降低故障修复时间,则能较大缩短技术准备流程的总时间,有效降低任务风险度。仿真结果验证了这一点,如图 3 所示。这表明,该模型能够准确刻画任一随机维修性因素带来的导弹任务技术准备流程时间与风险度的变化。



(a) 单机维修率对任务流程总时间的影响



(b) 单机维修时间对任务完成风险度的影响

图 3 维修性参数对流程总时间和风险度的影响

基于上述验证分析,对该导弹技术准备工作提出以下建议: 1) 提高关键单机装备的使用可靠度,增加平均故障间隔时间(mean time between failures, MTBF),提高基层快速维修能力; 2) 做好预防性维修,采取备件策略,对故障症候做到早

发现,具备可行性条件下做到早修复; 3) 加强装备质量信息统计,加强使用数据挖掘研究,准确掌握其质量规律,以优化装备批次性动用使用序列安排。

4 结束语

大数据时代背景下,导弹技术状态已趋数字化。通过使用数据挖掘、故障预测与健康管理,使得导弹技术准备中维修性作业的不确定性更加可控,为应急作战准备条件下大批量使用导弹武器的有效风险防控,创造了更有利条件,是一项具有现实意义的重要课题。笔者基于随机维修网络构建的技术准备流程模型,能准确量化上述背景下导弹技术准备任务的时间特性,已应用于某导弹战备任务风险的预测控制,为可靠遂行任务提供了有力数据支撑。

参考文献:

- [1] 左传友. PERT 方法优化的导弹技术准备流程[J]. 海军航空工程学院学报, 2008, 23(5): 569-572.
- [2] 李明雨, 杨萍, 毕义明. 网络计划在导弹批量测试中的应用[J]. 兵工自动化, 2005, 24(4): 19-21.
- [3] 吴文军, 瞿军, 胡习平. 基于 PERT 仿真的导弹技术准备流程优化分析[J]. 兵工自动化, 2010, 29(8): 1-3,6.
- [4] 马登武, 郭小威, 吕晓峰. 基于网络计划技术的舰载机航空导弹转运流程[J]. 兵工自动化, 2010, 29(9): 48-51.
- [5] 谢芝亮, 陈维义, 彭英武, 等. 基于网络计划法的防空装备技术准备流程优化[J]. 兵工自动化, 2016, 35(7): 27-31.
- [6] 吕为民, 胡文林, 王哲, 等. 基于生产线平衡的导弹技术准备流程优化[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(7): 1589-1593.
- [7] 吴勇, 潘星, 康锐, 等. 基于图示评审技术的舰载机航空保障时间分析[J]. 兵工学报, 2013, 34(12): 1611-1615.
- [8] 李超, 王瑛, 陈超, 等. 基于 QHSME 的装备危险耦合传导 GERT 分析[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(11): 2219-2225.
- [9] 王瑛, 孙贲, 孟祥飞, 等. 基于机会理论的复杂装备系统风险传递 GERT 研究[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(12): 2707-2713.
- [10] 夏宏青, 焦健, 褚嘉运, 等. 基于改进 GERT 的任务过程时间特性建模分析方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(11): 2140-2148.
- [11] 徐宗昌. 保障性工程[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2002: 50-65.