

复杂可修系统效能中可信度矩阵的构造方法

王武宏 杨为民

(北京航空航天大学 工程系统工程系)

摘 要 复杂可修系统可信度建模对保证效能的定量分析至关重要. 本文在考虑不同维修状况的基础上,着重对不同任务剖面内相应任务阶段中武器装备可信度进行了深入的定量分析和综合,进而构造出武器装备的可信度矩阵,用于武器装备的效能分析;文中以某地面车辆为例,进一步论证了武器装备可信度矩阵的工程含义,旨在为合理确定一大类武器装备的效能和可信度指标提供理论依据.

关键词 系统分析; 可维修性; 系统可靠性; 系统效能; 地面车辆; 可信度

分类号 TJ 07

现代武器装备在执行任务过程中可以在不同的环境条件下实现相应的功能,而且在完成某些特定任务时也可能涉及到几个不同运用工况的任务阶段,因此,在进行效能分析时不仅要考虑到武器装备在不同任务剖面内相关任务阶段中可信度的特征,而且也要注意相应环境条件的影响,更重要的是客观考虑武器装备在不同任务历程中的维修状况,以期实现武器装备可信度矩阵的客观构造.

尽管武器装备的可信度可以用解析法来求解^[1~3],但较少注意到任务持续期间发生多次致命性故障的情况,往往忽略不同运用工况中对致命性故障的不同维修方式,并且将武器装备分解为系统(或分系统、设备等)来通过完成任务的状态转移概率建立可信度矩阵,这样容易导致状态划分和概率计算的冗杂. 本文重点研究当致命性故障率和任务修复率为常数,并且武器装备在执行任务过程中发生多次致命性故障时,如何通过不同任务剖面内不同任务阶段条件下武器装备可信度的综合来构造用于武器装备效能分析的可信度矩阵,最后以某地面车辆为例进行了相关的工程验证.

1 相关设定和符号标记

在进行不同任务剖面内不同任务阶段中可信度定量分析与综合时,为便于构造出可信度矩阵,特做如下设定:

(1) 武器装备在执行任务过程中发生的致命性故障均能发现或测试出来;

(2) 武器装备使用人员在操作时正确无误;

(3) 维修人员、备件器材和工具供应均能满足维修性要求;

(4) 各任务剖面在统计上相对独立,并且同一任务剖面内的每个任务阶段中,武器装备的功能不能相互替代;

(5) 针对不同型号的武器装备做出的相应设定,例如,设定地面车辆在执行任务过程中以平均行驶速度行驶.

公式中相关符号标记:

R ——致命性故障的次数;

I ——任务剖面数;

M_i ——第 i 个任务剖面内武器装备致命性故障间隔任务里程;

V_i ——第 i 个任务剖面内武器装备平均行驶速度;

T_i ——第 i 个任务剖面内武器装备恢复功能用任务时间;

M_{ij} ——第 i 个任务剖面内第 j 个任务阶段中武器装备致命性故障间隔任务里程;

V_{ij} ——第 i 个任务剖面内第 j 个任务阶段中武器装备平均行驶速度;

T_{ij} ——第 i 个任务剖面内第 j 个任务阶段中武器装备恢复功能用任务时间;

$k; k_m; k_n$ ——任务阶段总数;不可修任务阶段的数目;可修任务阶段的数目;

M_{ijm} ——第 i 个任务剖面内涉及不可修的 j 个任务阶段中武器装备致命性故障间隔任务里

程;

M_{ijn} ——第 i 个任务剖面内涉及可修第 j 个任务阶段中武器装备致命性故障间隔任务里程;

ω_i ——第 i 个任务剖面的权重系数;

V_{ijn} ——第 i 个任务剖面内涉及不可修的第 j 个任务阶段中武器装备平均行驶速度;

V_{ijn} ——第 i 个任务剖面内涉及可修的第 j 个任务阶段中武器装备平均行驶速度;

T_{ijn} ——第 i 个任务剖面内涉及不可修的第 j 个任务阶段中武器装备恢复功能用任务时间;

T_{ijn} ——第 i 个任务剖面内涉及可修的第 j 个任务阶段中武器装备恢复功能用任务时间;

$M_i(\tau)$ ——第 i 个任务剖面内武器装备任务维修度;

$t; \tau$ ——任务持续时间;任务修复时间;

S_{ij} ——武器装备的行驶里程。

2 效能与可信度矩阵的关系

2.1 武器装备效能模型^[1~3]

武器装备效能 E 与可用度 A 、可信度 D 和固有能力 C 有关,即

$$E = A \times D \times C \quad (1)$$

式中——可用度 A 为向量;可信度 D 为矩阵;固有能力 C 为向量。

该模型表达了可靠性、维修性、保障性特性在武器装备效能中的重要作用,尤其是可信度 D 主要描述武器装备“任务成功”的状况。

2.2 武器装备可信度的定义

武器装备可信性定义为武器装备在任务开始时可用性给定的情况下,在规定的任务剖面中和规定任务时间内,在允许发生了不超过规定时间内修复的致命性故障情况下,能将使用且能完成规定功能的能力。其概率度量称为可信度。

如果武器装备涉及 $i(i = 1, 2, \dots, I)$ 个任务剖面,那么可信度矩阵可进一步表示为

$$D = \sum_{i=1}^I \omega_i \begin{bmatrix} d_{11}^{(i)} & d_{12}^{(i)} \\ d_{21}^{(i)} & d_{22}^{(i)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $d_{pq}^{(i)}$ 表示第 i 个任务剖面内武器装备在任务持续时间 t 内由状态 $p(p = 1, 2)$ 转移到状态 $q(q = 1, 2)$ 的概率。

3 可信度的计算方法

3.1 任务剖面内单任务阶段条件下武器装备可

信度计算公式

3.1.1 不可维修单任务阶段情况

第 i 个任务剖面内武器装备可信度 $D_i(t)$ 为

$$D_i(t) = \exp\left[-\frac{tV_i}{M_i}\right] \quad (3)$$

3.1.2 可维修单任务阶段情况

对于在执行某些特定任务期间内在允许的停机时间内能够实施维修的一类武器装备,其可信度的计算,应根据相应任务剖面内致命性故障发生的次数 $r(r = 1, 2, \dots, R)$ 来分不同情形考虑,即第 i 个任务剖面内武器装备可信度 $D_i(t)$ 为

$$D_i(t) = \exp\left[-\frac{tV_i}{M_i}\right] + \prod_{r=1}^R \left[1 - \frac{r-1}{r} \frac{((tV_i)/M_i)^l}{l!} \exp\left[-\frac{tV_i}{M_i}\right]\right] \cdot \left[\prod_{l=0}^{r-1} \frac{(\tau/T_i)^l}{l!} \exp\left[-\frac{\tau}{T_i}\right]\right] \quad (4)$$

3.2 任务剖面内多任务阶段条件下武器装备可信度计算公式

3.2.1 不允许维修时多任务阶段的情况

第 i 个任务剖面内多任务阶段($j = 1, 2, 3, \dots, k$)条件下武器装备可信度应为不允许维修时各任务阶段条件下其可信度的乘积:

$$D_i(t) = \prod_{j=1}^k \exp\left[-\frac{tV_{ij}}{M_{ij}}\right] \quad (5)$$

3.2.2 允许维修时多任务阶段的情况

第 i 个任务剖面内多任务阶段($j = 1, 2, 3, \dots, k$)条件下武器装备可信度应为允许维修时各任务阶段条件下其可信度的乘积:

$$D_i(t) = \prod_{j=1}^k D_{ij}(t) = \prod_{j=1}^k \left\{ \exp\left[-\frac{tV_{ij}}{M_{ij}}\right] \cdot \prod_{r=1}^R \left[1 - \frac{r-1}{r} \frac{((tV_{ij})/M_{ij})^l}{l!} \exp\left[-\frac{tV_{ij}}{M_{ij}}\right] \cdot \left[\prod_{l=0}^{r-1} \frac{(\tau/T_{ij})^l}{l!} \exp\left[-\frac{\tau}{T_{ij}}\right]\right] \right\} \quad (6)$$

3.2.3 部分任务阶段可修部分任务阶段不可修时武器装备可信度的综合

对于在任务剖面内有些任务阶段可修而有些任务阶段不可修的情况,在任务阶段不可修时按不可维修情形时多任务阶段($j_m = 1, 2, \dots, k_m$)条件下武器装备可信度公式计算可信度,而在任务阶段可修时按可维修情形时多任务阶段($j_n = 1, 2, \dots, k_n$)条件下武器装备可信度公式计算可信度,然后进行综合,即

$$D_i(t) = \prod_{j_m=1}^{k_m} D_{ij_m}(t) \cdot \prod_{j_n=1}^{k_n} D_{ij_n}(t) =$$

$$\prod_{j_m=1}^{k_m} \exp\left[-\frac{tV_{ij_m}}{M_{ij_m}}\right] \cdot \prod_{j_n=1}^{k_n} \exp\left[-\frac{tV_{ij_n}}{M_{ij_n}}\right] +$$

$$\prod_{r=1}^R \left[1 - \prod_{l=0}^{r-1} \frac{((tV_{ij_n})/M_{ij_n})^l}{l!} \exp\left[-\frac{tV_{ij_n}}{M_{ij_n}}\right]\right] \cdot \prod_{l=0}^{r-1} \frac{(\tau/T_{ij_n})^l}{l!} \exp\left[-\frac{\tau}{T_{ij_n}}\right] \quad (7)$$

式中 $k_m + k_n = k$.

4 武器装备可信度矩阵

4.1 确定各任务剖面内武器装备状态转移概率

依据任务剖面内不同任务阶段条件下武器装备可信度的计算方法得到可信度 $D_i(t)$ 后, 分别确定出武器装备在各任务剖面内由初始状态经历任务期间到任务结束状态的概率 $d_{pq}^{(i)}$. 由于武器装备执行任务所对应的任务剖面有 i 个, 因此, 武器装备的转移概率共有 i 组 ($i \times 4$ 个变量), 即

$$\left. \begin{aligned} d_{11}^{(i)} &= p(D_1 \rightarrow D_1) = D_i(t) \\ d_{12}^{(i)} &= p(D_1 \rightarrow \bar{D}_1) = 1 - D_i(t) \\ d_{21}^{(i)} &= p(\bar{D}_1 \rightarrow D_1) = M_i(\tau) \\ d_{22}^{(i)} &= p(\bar{D}_1 \rightarrow \bar{D}_1) = 1 - M_i(\tau) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 $d_{11}^{(i)}$ 表示第 i 任务剖面内武器装备由任务成功状态转移到任务成功状态的概率;

$d_{12}^{(i)}$ 表示第 i 任务剖面内武器装备由任务成功状态转移到任务失败状态的概率;

$d_{21}^{(i)}$ 表示第 i 任务剖面内武器装备由任务失败状态转移到任务成功状态的概率;

$d_{22}^{(i)}$ 表示第 i 任务剖面内武器装备由任务失败状态转移到任务失败状态的概率.

4.2 构造可信度矩阵

由各任务剖面内武器装备状态转移概率和任务剖面的权重系数即可构造出可信度矩阵为

$$D = \sum_{i=1}^I \omega_i [d_{pq}^{(i)}] = \sum_{i=1}^I \omega_i \begin{bmatrix} d_{11}^{(i)} & d_{12}^{(i)} \\ d_{21}^{(i)} & d_{22}^{(i)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

这样, 依据构造出的可信度矩阵, 即可用于武器装备的效能分析, 从而为武器装备系统可靠性、维修性和保障性分析与设计提供依据.

5 可信度矩阵构造的算例

某地面车辆在执行任务过程时, 其任务样式

表现为: 冲击突破、迂回运动、集结、开进、展开、长距离奔袭和追击、机动行军, 等等. 因此, 该类地面车辆的任务剖面主要分为: ① 战役机动任务剖面; ② 进攻作战任务剖面; ③ 机动作战任务剖面.

根据武器装备在任务剖面内多任务阶段可信度计算方法, 结合地面车辆的主要任务剖面, 考虑相应任务剖面内对应任务阶段中地面车辆的行驶里程 S_{ij} 和平均行驶速度 V_{ij} , 依据有关地面车辆任务可靠性和任务维修性的基本统计数据^[4~6], 战役机动任务剖面内地面车辆可信度 D_1 可近似地计算为

$$D_1 = \prod_{j=1}^4 \exp\left[-\frac{V_{ijt}}{M_{ij}} + \left[1 - \exp\left[-\frac{V_{ijt}}{M_{ij}}\right]\right] \cdot \left[1 - \exp\left[-\frac{\tau}{T_{ij}}\right]\right]\right] =$$

$$\prod_{j=1}^4 \exp\left[-\frac{(S_{ij}V_{ij})/V_{ij}}{M_{ij}} + \left[1 - \exp\left[-\frac{(S_{ij}V_{ij})/V_{ij}}{M_{ij}}\right]\right] \cdot \left[1 - \exp\left[-\frac{\tau}{T_{ij}}\right]\right]\right] =$$

$$\left[e^{-\frac{60}{1348}} + \left(1 - e^{-\frac{60}{1348}}\right) \times 0.7\right]^2 \cdot \left[e^{-\frac{90}{1348}} + \left(1 - e^{-\frac{90}{1348}}\right) \times 0.7\right]^2 =$$

$$0.9741 \times 0.9616 = 0.9367$$

进攻作战任务剖面内地面车辆可信度 D_2 为

$$D_2 = \left[e^{-\frac{60}{289}} + \left(1 - e^{-\frac{60}{289}}\right) \times 0.6\right]^2 \cdot \left[e^{-\frac{45}{289}} + \left(1 - e^{-\frac{45}{289}}\right) \times 0.6\right]^2 \cdot \left[e^{-\frac{35}{289}} + \left(1 - e^{-\frac{35}{289}}\right) \times 0.6\right]^2 =$$

$$0.8538 \times 0.9423 \times 0.9544 = 0.7678$$

机动作战任务剖面内地面车辆可信度 D_3 为

$$D_3 = \left[e^{-\frac{60}{517}} + \left(1 - e^{-\frac{60}{517}}\right) \times 0.4\right]^2 \cdot \left[e^{-\frac{45}{517}} + \left(1 - e^{-\frac{45}{517}}\right) \times 0.4\right]^2 \cdot \left[e^{-\frac{35}{517}} + \left(1 - e^{-\frac{35}{517}}\right) \times 0.4\right]^2 =$$

$$0.7618 \times 0.8174 \times 0.9500 \times 0.9607 = 0.5683$$

设定战役机动、进攻作战、机动作战任务剖面的权重系数分别为 $\omega_1 = 0.30$, $\omega_2 = 0.20$, $\omega_3 =$

0.50,这样,依据各任务剖面内地面车辆的可信度,构造出的可信度矩阵 D 如下:

$$D = \omega_1 D_1 + \omega_2 D_2 + \omega_3 D_3 =$$
$$0.3 \begin{bmatrix} 0.9367 & 1 - 0.9377 \\ 0.7 & 1 - 0.7 \end{bmatrix} +$$
$$0.2 \begin{bmatrix} 0.7678 & 1 - 0.7678 \\ 0.6 & 1 - 0.6 \end{bmatrix} +$$
$$0.5 \begin{bmatrix} 0.5683 & 1 - 0.5683 \\ 0.53 & 1 - 0.53 \end{bmatrix} = jn$$
$$1 \prod \begin{bmatrix} 0.7187 & 0.2813 \\ 0.5300 & 0.4700 \end{bmatrix}$$

6 结束语

本文设定武器装备在执行任务过程中发生多次致命性故障且可修复时,并且当致命性故障率和任务修复率均为常数的情况下,对不同任务剖面内不同任务阶段中武器装备可信度进行了较为深入的定量分析和综合,进而依据对不同维修状况的识别,构造出武器装备的可信度矩阵,用于复杂可修系统的效能分析.文中以某地面车辆的典型任务剖面为例,进一步论证了武器装备可信度矩阵在效能分析中的工程含义,旨在为合理确定一大类武器装备的效能和可信度指标提供理论依据与工程化的方向.研究表明,可信度矩阵的

构造方法不仅适应于可修系统,而且也适应于不可修系统,因而,本文提出的方法在具体型号中的应用具有较为广泛的通用性和适用性.

参 考 文 献

1 杨为民主编.可靠性、维修性、保障性总论.北京:国防工业出版社,1995.24~31

2 DOD.可靠性设计手册.第一卷.曾天翔译.北京:航空工业出版社,1987.147~298

3 DOD. Military handbook. Electronic reliability design handbook. MIL - HDBK - 338. Vol I. 1984.4~43

4 孔繁柯、刘 馥.军用车辆运用工程.北京:国防工业出版社,1993.256~370

5 Zhang J , Zhang Q C. The determing process of the product 's reliability indexes. In: Ma H Z,ed. Proceedings of the third International Conference on Reliability , Maintainability and Safety. Beijing: Publishing House of Electronics Industry ,1996. 186 ~ 190

6 Zhang Q C. Statistics analysis of maintenance time for ground vehicle. In: Ma H Z,ed. Proceedings of the third International Conference on Reliability , Maintainability and Safety. Beijing: Publishing House of Electronics Industry ,1996. 263~268

7 萧元星,毛和瑞.系统效能建模方法综述.兵工学报,1997,18(3):256~259

8 Shunji O. Stochastic system reliability modeling. Singapore: World Scientific Publishing Co ,1986. 24~59

Approach to Dependability Modelling for Effectiveness
Analysis of Ground Vehicle System

Wang Wuhong Yang Weimin

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics ,Dept. of System Engineering of Engineering Technology)

Abstract The dependability analysis of every mission period within every mission profile for repairable system is essential for the quantitative evaluation of system effectiveness and for designing effective system. In this paper , the mission succession probability is chosen as measurement of dependability while both Mission Mileage Between Critical Failure(MMBCF) and Mission Time To Restore Function(MTTRF) are constant. On the basis of various repairable situations , the dependability matrix for effectiveness analysis is established with analytical solutions of mission reliability and mission maintainability. Finally , the establishment of dependability matrix for effective analysis of ground vehicle is given as an engineering application example. The results give helpful and practicable basis for effective analysis of complex engineering systems such as flying vehicles ,ground vehicles ,automobiles. etc.

Key words systems analysis; serviceability; system reliability; system effectiveness; ground vehicle; dependability