

武器装备损耗备件预测模型研究

毕义明, 王汉功

(第二炮兵工程学院 基础部, 陕西 西安 710025)

摘 要: 备件消耗标准的预测与制定是装备维修保障有效性和经济性的基础性工作;运用平稳随机过程理论,给出了 $MA(q)$, $MA(p)$, $ARMA(p, q)$, 3种线性预测模型;考虑了与备件相关的多种因素,对模型进行修正,建立了装备备件消耗标准的预测模型;给出了某基地某特种零部件消耗标准预测的一个应用实例;该模型可用于备件的定货、储存和供应等管理决策。

关键词: 备件; 消耗标准; 模型; 装备

中图分类号: TP 91

文献标识码: A

文章编号: CN11-3987(2004)01-0001-04

Research on the Consumption Standard Model of Weapon's Equipment Spare

BI Yi-ming, WANG Han-gong

(Department of Basic Theories, Second Artillery Engineering Institute, Xi'an Shaanxi 710025, China)

Abstract: The forecasting and calibrating of spare consumption standard is a fundamental work to equipment repairing quarantine. By using the theory of the stable stochastic process, the $MA(q)$, $MA(p)$, $ARMA(p, q)$ models are present. The factors relevant to weapon's equipment spare are discussed in the paper. A consumption standard model of weapon's equipment spare is set up. An example of spare forecasting for a base shows that the model for this problem is suitable and it can be used in the equipment management.

Key words: spare; consumption standard; model; equipment

备件是武器装备维修保障的物质基础。备件的管理工作包括备件的订货、储备、供应等。备件的管理科学化是提高装备管理效益,提高装备完好性,恢复和提高部队战斗力的核心内容之一。备件的消耗标准是备件管理工作的基础,只有建立起准确、可靠的备件消耗标准,备件的维修保障才有根本的依据。因此,备件消耗标准的预测与制定是实现军队装备维修保障有效性和经济性的基础工作,科学合理的备件模型具有明显的军事效益和经济效益。

1 问题描述

在非战争状态,按照美军的定义^[1],装备备件的消耗标准是指在规定的的工作时间(一年、一月)或其他度量单位内消耗零部件的数量。消耗体现在零部件上,一个零部件的维修率是按100件(包含该零部件)的装备以一年为期,来计算该零部件发生故障的预期次数。战争期间,装备的消耗与正常消耗有较大的差距,有故障损耗(第一类损耗)与战伤损伤消耗(第二类损耗)双重作用,故障

收稿日期: 2003-06-30

基金项目: 部委级资助项目

作者简介: 毕义明(1963-),男(汉族),山东阳信人,教授,博士生导师,本刊特约编委, Bjym@cetin.net.cn.

损耗会加剧,战场损耗会随着战争的不同而呈现很大的差异。

备件消耗标准的制定,既要有其理论依据,又要联系实际,解决实际问题。备件消耗标准的依据是备件的维修保障理论、备件消耗的历史数据及对这些数据进行统计分析的数理基础。在数理统计中,变量间的相互关系分为2类:一类是确定性关系,也就是各种函数关系;另一类是相互关系,即变量之间虽存在密切的关系,但又不能由一个(或几个)变量的值,精确地求出另一变量的值。例如:备件的消耗标准涉及装备数量、维修保障期限,它们与备件消耗之间具有某种关系;但装备数量、维修保障期限与备件消耗之间又不存在确定的关系;这种关系是一种典型的不确定性相关关系^[2]。因此,我们无法根据已知的装备数量及维修保障期限,精确地求出备件的需要量。但是,确定性关系与非确定性相关关系之间,并没有一条不可逾越的鸿沟,由于测量中的误差等原因,确定性关系在实际中往往通过相关关系表现出来;反之,当人们对事物的内部规律了解得更加深刻时,非确定性相关关系又能转化为确定性关系。由此可见,对于装备数量、维修保障期限与备件消耗间的关系,可以通过其相关性分析作出具有实际意义的估计。

2 制定备件消耗标准

2.1 备件消耗标准相关因素分析

备件的正常消耗标准实质上也就是备件维修率。消耗标准的制定要考虑备件本身的技术性能和外部因素(使用条件、使用环境),一般制定消耗标准的依据有以下6点:

- 1) 故障率。它是个设计工程参量,可根据可靠性试验、工程上判断及经验来确定。
- 2) 使用场合系数 α_1 。它是指零部件在装备中所处的条件。
- 3) 易损程度系数 α_2 。它是指零部件在搬运、安装、维修过程中,由于人为差错受损坏的可能性和程度。
- 4) 气候地理条件系数 α_3 。各地气候、地理条件各不相同,而且差别很大。零部件的故障率、维修率受此影响较大,因此,制定零部件消耗标准应因地制宜。
- 5) 使用率系数 α_4 。由于装备的使用率随作战任务和作战训练任务的不同而会不同,因此,制定零部件消耗标准应考虑此因素。

6) 战时和平时系数 α_5 。平、战时装备的保障要求不同,使用率与损耗率也不同,制定消耗标准时,需要考虑此因素。

2.2 备件消耗标准制定步骤

备件消耗标准的制定,储备量的计算复杂,涉及部门多,是一项极为复杂的工作。一般,备件消耗标准制定的步骤如下:

- 1) 原始数据资料的搜集和分析。这是选配零部件品种,制定消耗标准,计算供应量和储备量的基本依据。
- 2) 零部件的选定。这包括选择、确定零部件的品种,区分其使用范围、重要性等级,以便编制零部件表。零部件的选定可采用模糊综合评判法等,也可根据经验或规范直接选定。
- 3) 建立备件消耗标准模型。这主要是依据维修理论,运用数学工具,建立数学模型,力求较为准确地反映备件消耗的实际情况,并对备件管理发挥辅助决策作用。
- 4) 消耗标准模型的检验。通过实际数据对制定的消耗标准进行检验和修正,特别是结合不同的使用环境,不同的装备数量,维修保障时间来进行检验,以完善模型。
- 5) 消耗标准的制定。根据消耗标准模型及其实际使用情况,将消耗标准以一定形式确定下来,作为备件管理的依据。

3 备件消耗建模

3.1 建立备件消耗模型

本文采用平稳时间序列的线性模型来建立备件消耗模型。假设某备件月消耗的历史统计数据为 Z_t ,计算

$$\bar{Z} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Z_t \quad (1)$$

可得

$$W_t = Z_t - \bar{Z}, \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

由线性模型样本协方差函数定义

$$\begin{aligned} \bar{r}_k &= \frac{W_1 W_{1+k} + W_2 W_{2+k} + \dots + W_n W_{n+k}}{n} = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n-k} W_j W_{j+k}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, K \quad (3) \end{aligned}$$

一般地, $n > 50, k < (n/4)$ 。取 $K = K_0$,则样本自相关函数为

$$\bar{r}_1 = \frac{\bar{r}_1}{0}, \quad \bar{r}_2 = \frac{\bar{r}_2}{0}, \quad \bar{r}_3 = \frac{\bar{r}_3}{0}, \quad \dots, \quad \bar{r}_{k_0} = \frac{\bar{r}_{k_0}}{0} \quad (4)$$

在一定条件下

$$\bar{\varphi}_{kk} = \phi_{kk}, k = 1, 2, \dots, K_0 \quad (5)$$

其中: $\bar{\varphi}_{kk}$ 由式(4) 计算可得。 $\bar{\varphi}_{kk}$ 计算如下:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{\varphi}_{11} &= \bar{\varphi}_{11} \\ \bar{\varphi}_{k+1, k+1} &= [I - \sum_{j=1}^k \bar{\varphi}_{k+1, j} \bar{\varphi}_{kj}] [I - \sum_{j=1}^k \bar{\varphi}_{kj}]^{-1} \\ \bar{\varphi}_{k+1, j} &= \bar{\varphi}_{kj} - \bar{\varphi}_{k+1, k+1} \bar{\varphi}_{k, k-(j-1)} \\ & j = 1, 2, \dots, K_0 \end{aligned} \right. \quad (6)$$

判断 $\bar{\varphi}_{kk}$ 是拖尾还是截尾^[3]。根据判断结果, 及各类线性模型性质考虑以下线性模型类型。

若为 AR(p) 模型

$$\bar{\varphi}_j = \bar{\varphi}_{pj} \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (7)$$

可得关于备件消耗量 Z_t 的线性模型

$$Z_t - \bar{\varphi}_1 Z_{t-1} - \bar{\varphi}_2 Z_{t-2} - \dots - \bar{\varphi}_p Z_{t-p} = \epsilon_t + \sum_{j=1}^p \bar{\varphi}_j \bar{Z} \quad (8)$$

若为 MA(q) 模型, 则样本协方差函数 $\bar{\varphi}_k$ 如下式:

$$\bar{\varphi}_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n-k} W_j W_{j+k}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, K(K-n) \quad (9)$$

由方程组

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{\varphi}_0 &= \bar{\sigma}^2(1 + \bar{\varphi}_1^2 + \bar{\varphi}_2^2 + \dots + \bar{\varphi}_q^2) \\ \bar{\varphi}_1 &= \bar{\sigma}^2(-\bar{\varphi}_1 + \bar{\varphi}_1 \bar{\varphi}_2 + \dots + \bar{\varphi}_{q-1} \bar{\varphi}_q) \\ &\vdots \\ \bar{\varphi}_q &= \bar{\sigma}^2(-\bar{\varphi}_q) \end{aligned} \right. \quad (10)$$

采用牛顿-拉富森算法^[4]可解出参数 $\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \dots, \bar{\varphi}_q$ (其中 $E\bar{\epsilon}^2 = \bar{\sigma}^2$) , 代入 MA(q) 模型表达式, 得到备件月消耗量 Z_t 线性模型

$$Z_t = \bar{Z} + \epsilon_t - \bar{\varphi}_1 \epsilon_{t-1} - \bar{\varphi}_2 \epsilon_{t-2} - \dots - \bar{\varphi}_q \epsilon_{t-q} \quad t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (11)$$

若为 ARMA(p, q) 模型, 有

$$W_t = \epsilon_t + \bar{\varphi}_1 W_{t-1} + \dots + \bar{\varphi}_p W_{t-p} - \bar{\varphi}_1 \epsilon_{t-1} - \dots - \bar{\varphi}_q \epsilon_{t-q} \quad (12)$$

其中: $\bar{\varphi}_1, \dots, \bar{\varphi}_p$ 由下式求得

$$\bar{\varphi}_j = \sum_{j=1}^p \bar{\varphi}_{q-j} \bar{\varphi}_{q+j+1} \quad (13)$$

令

$$W_t = W_t - \bar{\varphi}_1 W_{t-1} - \dots - \bar{\varphi}_p W_{t-p}$$

记 W_t 的自协方差函数为 \bar{W}_k , 则

$$\bar{W}_k = E(W_t W_{t+k}) = \bar{\varphi}_k + \sum_{l=1}^p \sum_{j=1}^p \bar{\varphi}_l \bar{\varphi}_j \bar{\varphi}_{k-j+l} - \sum_{j=1}^p \bar{\varphi}_j \bar{\varphi}_{k+l} \quad (14)$$

将 \bar{W}_k 代入式(10) 可得 $\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \dots, \bar{\varphi}_q$ 。这样, 可得 W_t 及备件月消耗量 Z_t 的线性模型为

$$Z_t - \bar{\varphi}_1 Z_{t-1} - \dots - \bar{\varphi}_p Z_{t-p} = \epsilon_t + \sum_{j=1}^p \bar{\varphi}_j \bar{Z}_{t-j} - \bar{\varphi}_1 \bar{Z}_{t-1} - \dots - \bar{\varphi}_q \bar{Z}_{t-q} \quad (15)$$

建立了备件消耗模型后, 还需要对模型进行考核, 以检验模型是否合适。考虑到不同的使用场合、易损程度、气候地理条件、使用率、战时和平时, 可收集特定条件下备件的消耗历史数据进行分析, 确定该条件下的备件消耗线性模型; 然后, 再与标准使用条件下的备件消耗线性模型进行比较, 确定该场合相对于标准场合下的维修率系数; 最后, 再对标准模型进行修正。

建立备件消耗的线性模型后, 就可根据过去和现在已知的备件消耗量数值, 对将来的消耗量进行预测。

3.2 对 AR(p) 模型

已知模型参数 $\bar{Z}, \bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \dots, \bar{\varphi}_p$, 并知备件最近 p 个期限消耗值 $\bar{Z}_1, \bar{Z}_2, \dots, \bar{Z}_k (k \geq p)$, 则可预测下一期限的消耗量 \bar{Z}_{k+1} 。

$$Z_{k+1} = \bar{\varphi}_1 Z_{k+l-1} + \bar{\varphi}_2 Z_{k+l-2} + \dots + \bar{\varphi}_p Z_{k+l-p} + \bar{\epsilon}_k \bar{Z} \quad (16)$$

在式中分别取 $l = 1, 2, \dots$, 可分别得到备件下第一期限、第二期限, ……的预测值。

3.3 对 MA(p) 模型

利用平稳时间序列预报基本引理, 令 $t = k + l$, 变换线性模型函数, 并在等式两边取估计值, 得到 MA(p) 模型预报公式:

$$\bar{Z}_{k+l} = (\bar{Z} - \bar{\varphi}_1 \bar{Z}_{k+l-1} - \bar{\varphi}_2 \bar{Z}_{k+l-2} - \dots - \bar{\varphi}_q \bar{Z}_{k+l-q})$$

其中: $\bar{\epsilon}_{k+l-1}, \bar{\epsilon}_{k+l-2}, \dots, \bar{\epsilon}_{k+l-q}$ 这 q 个白噪声的估计值按如下求得

取 $l = 1$, 由式(11) 得到一步预报估计值表达式

$$\bar{\epsilon}_t = \bar{Z}_t - \bar{Z} + \bar{\varphi}_1 \bar{Z}_{k-1} + \bar{\varphi}_2 \bar{Z}_{k-2} + \dots + \bar{\varphi}_q \bar{Z}_{k-q} \quad (17)$$

取 $t = 1$, 并令 $\bar{\epsilon}_0 = \bar{\epsilon}_{-1} = \bar{\epsilon}_{1-q} = 0$, 得

$$\bar{\epsilon}_1 = \bar{Z}_1 - \bar{Z}$$

令 $t = k$, 得

$$\bar{z}_k = \frac{1}{k} \bar{z}_k - \bar{z} + \frac{1}{k-1} \bar{z}_{k-1} + \frac{1}{k-2} \bar{z}_{k-2} + \dots + \frac{1}{k-q} \bar{z}_{k-q}$$

取 $l = 2$, 利用基本引理: $\bar{z}_{k+l} = 0$, 得二步预报值表达式

$$\bar{z}_k(2) = Z_{k+2} = \bar{z} - \frac{1}{2} \bar{z}_k - \dots - \frac{1}{q} \bar{z}_{k-q+2}$$

取 $k = 3$, 得三步预报值表达式

$$\bar{z}_k(3) = Z_{k+3} = \bar{z} - \frac{1}{3} \bar{z}_k - \dots - \frac{1}{q} \bar{z}_{k-q+3}$$

3.4 对 ARMA(p, q) 模型

综合 AR(p) 模型和 MA(p) 模型的求法, 并作适当变换即可求得备件消耗量的预报模型。

4 示例计算

某基地一个备件仓库, 从 1988 年到 1993 年记录某特种元器件每月的消耗量统计, 共 60 个数据^[5](表略)。通过计算, 得月消耗量模型方程为

$$Z_t = 396 - 0.14 Z_{t-1} + 0.223 Z_{t-2} + \dots$$

则预报公式为

$$\bar{z}_{k+l} = 396 - 0.14 \bar{z}_{k+l-1} + 0.223 \bar{z}_{k+l-2}$$

又知: 1996 年 11 月 $Z_{11} = 410$, 12 月 $Z_{12} = 460$, 则可得 1997 年各月备件消耗量为

$$Z_1 = 396 - 0.14 \times Z_{11} + 0.223 \times Z_{12} =$$

$$396 - 0.14 \times 410 + 0.223 \times 460 = 441;$$

$$Z_2 = 396 - 0.14 \times Z_{12} + 0.223 \times Z_1 =$$

$$396 - 0.14 \times 460 + 0.223 \times 440 = 430;$$

同理:

$$Z_3 = 431; Z_4 = 431; Z_5 = 432; Z_6 = 432;$$

$$Z_7 = 433; Z_8 = 432; Z_9 = 432; Z_{10} = 432;$$

$$Z_{11} = 432; Z_{12} = 432。$$

这样, 可得到该种元器件的年备件消耗量 $Z = 5177$, 由此可以作好该年的备件储备。该数据与实际结果较为吻合。

5 结论

综上所述, 采用平稳时间序列的线性模型, 解决了武器装备备件管理中的根本问题——备件消耗标准, 即备件的计划、筹划、供应、储备等项工作的依据问题。该模型可在计算机上实现, 对解决装备备件的自动化管理有较好的应用前景。

参考文献 (References)

- [1] John D, Parsons A. Comparison of models for determining spare requirements for aircraft battle damage repair[R]. U. S. Naval research activity center. ADA233086, 1988.
- [2] 陈学楚. 装备系统工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [3] 汪荣鑫. 随机过程[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992.
- [4] Ross S M. Stochastic processes[M]. John Wiley & Sons, 1983.
- [5] 毕义明. 特装备件消耗标准研究[R]. 西安: 第二炮兵工程学院, 2002.

(责任编辑: 傅鸿吉)