

按可用度要求选择和确定备件保障概率

张义芳 杨秉喜
空军第二研究所 100085

摘要: 本文简要阐述了备件保障概率提出的历史背景、定义、别称以及利用备件保障概率计算备件需求量的公式; 独立推导出备件保障概率与使用可用度的关系式, 备件保障概率是影响固有可用度 A_i 和使用可用度 A_0 比例关系的主要因素; 并给出按使用可用度要求选择和确定备件保障概率的应用示例。

关键词: 使用可用度; 备件保障概率

1. “备件保障概率”概念的提出

装备综合保障要素之一的备件供应, 其不确定性通常比其他要素更大, 对可用度的影响也更直接。以连续工作的现代雷达为例, 在影响可用度的诸要素中, 年修复性维修停机时间约 10h, 年预防性维修停机时间约 40h, 而年等备件停机时间可达 100h。可见, 备件供应问题已成为制约现代雷达可用度提高的瓶颈。国外对备件供应问题研究起步较早, 据文献 [1] 介绍, 文献 [2] 在 1951 年就已提出按泊松方程计算备件需求量, 但据文献, 这一思想直到二十世纪 70 年代才引起重视, 而在二十世纪 60 年代以前, 美国军界和工业界沿用的备件供应模式是比例法或百分比法^[3]。用泊松方程计算备件需求量, 首先要解决如何选择和确定备件保障概率(probability of spares sufficiency)。备件保障概率的定义在美军采办术语中尚未标准化, 使用较多的是“在规定的时间内, 需要备件时不缺备件的概率”。也有一些文献不叫备件保障概率, 仅文献 [4] 就例举了 3 种叫法: 成功概率(probability of success)、置信系数(confidence factor)、保险程度(the level of protection)。不管叫法如何, 对寿命分布服从指数分布的电子件, 计算备件需求量的公式是一致的, 都是:

$$P = \sum_{j=0}^s \frac{(N\lambda t)^j}{j!} \exp(-N\lambda t) \dots\dots\dots (1)$$

式中:

S —装备中某零部件的备件需求量;

N —某零部件在装备中的机用数;

λ —失效率;

t —备件供应更新周期或采购期, 可按不同情况分别处理, 例如:

1) 对消耗件, t 用装备初始保障时间(例如 1~2 年)内装备累积工作时间(h)或备件供应更新

周期内累积工作时间(h);

2) 对可修复件又分两种情况: 基层级更换, 后送中继级或基地级修复, 此时 t 按修理周转期内装备累积工作时间(h)计算, 修理周转期取值一般比装备初始保障时间可以短很多, 例如 3~6 个月, 但要注意周转期(日历时间)也不能太短, 以保证中继级或基地级不出现待修备件排队现象; 在基层级对该件进行修复, 此时当满足该件的 $MTBF_i$ 远大于该件的平均修复时间 \bar{M}_{cii} 时,

在至少备一个供换件修理的条件下, 用该件的 \bar{M}_{cii} 代替式中 t 即用 \bar{M}_{cii} 代替周转时间内装备累积工作时间。在两种情况下均不考虑可修复件可能出现的因不值得再修复的报废问题。

P — 备件保障概率, 即在规定的保障时间内, 需要该备件时, 能得到它(不缺备件)的概率。

j — 为递增符号, j 从 0 开始逐一增加, 直至某 S 值, 使得 $P \geq$ 规定的保障概率, 该 S 值即为所求备件需求量。

文献 [5]、[6] 用式 (2) 计算备件需求量, 并称为备件满足率 FR (Fill Rate):

$$FR = \sum_{j=0}^{s-1} \frac{(N\lambda t)^j}{j!} \exp(-N\lambda t) \dots \dots \dots (2)$$

其定义为: 在采购期 t 内, 库存量用完的概率, 即每次订货的无货率。

多数后勤专家在工程上都是选用式 (1) 计算备件需求量。因为, 式 (1) 除了更能反映工程需要外, 在库存控制中, 期望后订货数 (Expected Backorder) 也是以式 (1) 为基准进行计算的, 计算式为:

$$E(B) = \sum_{j=s+1}^{\infty} (j-s)p(j|N\lambda t) \dots \dots \dots (3)$$

值得一提的是, 在备件供货场合, FR 还用来表示备件供货满足率, 按文献 [7], 其定义为按时到货备件数与订货备件数之比, 典型值为 95%。另外, 在一些文献中也有 FR 与备件保障概率混用的情况。可见, FR 是一个比较宽泛的概念, 应按使用场合理解其具体含义。所以, 本文选用备件保障概率这个既通用又符合工程需要的概念。

2. 建立备件保障概率与使用可用度的关系式

文献 [8] 指出, 预防性维修用备件和修复性维修用备件对使用可用度的影响可以分别考虑、分别计算, 然后再取其积。预防性维修所用的定期更换备件、定期报废备件和维护修理用的消耗品(件), 可以通过以可靠性为中心的维修分析 (RCMA) 和维修任务分析 (MTA) 确定, 并且这些备件都用于计划维修活动, 一般不会导致装备计划外停机, 所以备件供应规划的难点也是关键在于建立非计划维修的备件需求与使用可用度的函数关系。

根据可用度定义, 不考虑预防性维修的使用可用度:

$$A_o = \frac{T_o}{T_o + T_{ICM} + T_{IL}} \dots \dots \dots (4)$$

式中:

A_0 — 使用可用度;

T_0 — 总工作时间;

T_{iCM} — 总修复性维修时间;

T_{iL} — 总保障延误时间。

且定义, 平均保障延误时间 $MLDT = T_{LD} = T_{iL}/r$; 平均供应反应时间 $MSRT = T_{SR} = T_{iL}/r'$ 。 r 为总故障数, r' 为缺备件的故障数。

对式 (4) 分子、分母除以 r , 得:

$$A_0 = \frac{T_0/r}{T_0/r + T_{iCM}/r + T_{iL}/r} = \frac{T_{BF}}{T_{BF} + \overline{M_{ct}} + T_{LD}} \dots\dots\dots (5)$$

式 (5) 中, 平均保障延误时间 T_{LD} , 集中反映了保障资源延误对 A_0 的影响。在允许的总保障延误时间 T_{iL} 一定的条件下, T_{LD} 的大小主要取决于两个因素: 一个是以备件保障概率 P 为主导的保障资源满足率, 另一个是以平均保障资源供应反应时间为主的平均供应反应时间 T_{SR} 。假定在规定的周期内共发生 r 次故障, 其中缺备件的故障数有 r' 次, 则备件保障概率 $P = (r-r')/r$, 平均保障延误时间 $T_{LD} = T_{iL}/r$, 平均供应反应时间 $T_{SR} = T_{iL}/r'$, 且 $T_{LD} = T_{iL}/r = (1-P)T_{iL}/r' = (1-P)T_{SR}$ 。用 $(1-P)T_{SR}$ 代替式 (5) 中的 T_{LD} , 便得到式 (6):

$$A_0 = \frac{T_{BF}}{T_{BF} + \overline{M_{ct}} + (1-P) \times T_{SR}} \dots\dots\dots (6)$$

又据:

$$A_i = \frac{T_{BF}}{T_{BF} + \overline{M_{ct}}} \dots\dots\dots (7)$$

可得:

$$A_i = (1 + \frac{(1-P)T_{SR}}{T_{BF} + \overline{M_{ct}}}) A_0 \dots\dots\dots (8)$$

通常 $T_{BF} \gg \overline{M_{ct}}$, 式 (8) 可进一步简化为:

$$A_i = (1 + (1-P) \frac{T_{SR}}{T_{BF}}) A_0 \dots\dots\dots (9)$$

3. 备件保障概率 P 的选择和确定应用示例

如果已知如下初始条件: 装备平均故障间隔时间 (T_{BF})、平均修复时间 ($\overline{M_{ct}}$)、使用可用度 (A_0)、平均供应反应时间 (T_{SR})。则可以直接利用公式 (6) 计算不考虑预防性维修条件下, 连续使用装备的备件保障概率 P 。

由公式(6)可以看出备件保障概率 P 对使用可用度 A_0 的影响趋势为: 固定 A_0 和 T_{BF} 、 \bar{M}_{ct} , 若 T_{SR} 增长, 就要求备件保障概率 P 值大些; 固定 A_0 和 T_{SR} , 若 T_{BF} 增长、 \bar{M}_{ct} 缩短, 备件保障概率 P 值就可以小一些, 反之亦然。

应用示例:

假定某地面电子装备的使用方案为连续工作, 要求 $A_0 \geq 0.98$, 论证中暂定装备的 $T_{BF} = 600h$, $\bar{M}_{ct} = 1h$ 。按备件供应点布局, 从基层级提出备件需求至备件运抵基层级的平均供应反应时间 $T_{SR} = 100h$ 。求在此使用方案下, 需多大的备件保障概率 P 才能保证 $A_0 \geq 0.98$ 。

解: 将已知数据代入式 (6), 计算出 $P=0.95$ 作为暂定值。如果按此 P 值估算备件费用大于给定备件费用约束值, 且可靠性、维修性设计尚有改进余地, 可以通过适当提高 T_{BF} 等方法降低对 P 的要求。如果按此 P 值估算备件费用小于给定备件费用约束值, 也可以适当提高 P 值以获得更高的 A_0 值。

在设计早期, 难以按公式 (6) 计算 P 值时, 可以通过式 (9) 描述的固有可用度 A_i 和使用可用度 A_0 的关系, 选择备件保障概率 P 的取值范围, 再通过权衡分析确定 P 值。

由式 (9) 可见, P 和 T_{SR}/T_{BF} 是影响 A_i 和 A_0 比例关系的主要因素。

下面再通过 $T_{SR} = 100h$ 的计算示例具体分析 P 、 T_{SR}/T_{BF} 对 A_i 与 A_0 关系的影响程度。计算示例如表 1 所示。

T_{BF}	$A_i = f(A_0) P = 0$	$A_i = f(A_0) P = 0.9$
100 h	2.00 A_0	1.10 A_0
200 h	1.50 A_0	1.05 A_0
300 h	1.33 A_0	1.03 A_0
500 h	1.20 A_0	1.02 A_0
1000 h	1.10 A_0	1.01 A_0

保障概率 P 对可用度的影响直接反映在 A_i 与 A_0 的比值上。在假定 $T_{SR} = 100h$ 的条件下, 由表 1 可见 $T_{BF} = 100h$, $P = 0.9$ 时, 要求 $A_i = 1.1A_0$; 若 $P = 0$ (即每次修复均延误), 则要求 $A_i = 2A_0$ 才行, 如果通过提高 T_{BF} 以达到要求的 $A_i = 1.1A_0$, 需要将 T_{BF} 提高到 1000h。这说明: 如果以 A_i 为设计基准, P 不足, 将导致 A_0 远低于 A_i ; 如果以 A_0 为使用基准, P 不足, 会导致需要设计较高的 A_i 才能保证现场的 A_0 。 P 对可用度的影响程度主要看 T_{SR} 和 T_{BF} 的比值, 比值越大, P 的影响越大; 反之, 若 $T_{SR} \ll T_{BF}$, 则 P 的影响将变得很小。如提高 P 值, 意味着增加备件数量, 可能与备件费用约束条件相冲突。由于 T_{SR} 主要与供应线距离、运输工具和备件申请、供应的管理制度有关, 要改变是较困难的, 所以, 选择 P 值着重考虑的是备件费用、 T_{BF} 及合理

的 A_i 与 A_0 比例关系。从国外工程经验看，文献〔6〕、〔9〕推荐的 P 值一般在 0.8~0.99 之间，文献〔9〕认为对既关键又昂贵的备件， P 值可选 0.999。

所以，在进行权衡设计时，可根据工程经验和目前装备可靠性水平，在 0.8~0.99 之间选择 P 值，然后随着研制工作的开展逐步修正 P 值，以求达到更好的备件保障效果。

4. 结论

按可用度要求确定备件保障概率，利用备件保障概率计算出的备件需求量，能满足使用与维修需要，保证装备在维修过程中等备件停机时间大大减少，从而缩短总的维修停机时间，使装备具有良好的战备完好性。

参考文献：

1. Larry S. Mickel, CPL. Estimating True Demand Using Multiple Source Data[C]. Proceedings Annual Reliability & Maintainability Symposium. USA, 1984
2. G. H. Sander. System Reliability Engineering[M]. New Jersey: Prentice-Hall .Inc.1963, p72
3. 西格蒙.哈尔朋著. 谭振学译. 保证科学 质量控制及可靠性导论[M]. 北京: 中国标准出版社, 1983 年.
4. 布兰恰德著. 王宏济译. 后勤工程与管理[M]. 北京: 中国展望出版社, 1987 年.
5. AD-A280629 The Application of A Readiness-based Sparing Model to Foreign Military Sales [R]. USA, 1994
6. 市田 嵩. 维修性与维修后勤保障. 北京: 机械工业出版社. 1988
7. Douglas K. Orsburn. Spares Management Handbook[M]. USA: McGraw-Hill, Inc. 1991.
8. 杨秉喜主编. 雷达综合技术保障工程[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
9. D.Keceecioglu. Maintainability, Availability and Operational Readiness Engineering HDBK[M]. New Jersey: Prentice-Hall .Inc.1995

作者简介：

张义芳（女）：北京 2862 信箱 4 室（100085），电话 010—66919245，海军工程学院获得硕士学位。现从事可靠性、维修性、保障性研究，高级工程师。

杨秉喜（男）：北京 2862 信箱 4 室（100085），电话 010—66919245，空军雷达学院获得学士学位。现从事可靠性、维修性、保障性研究，高级工程师。