

基于 Markov 的发射场地面设备可用性分析

张光升 吴 非 陈文利

(中国酒泉卫星发射中心)

摘 要 针对发射场地面设备的特点, 提出基于 Markov 的可修复系统可用性分析方法, 并完成了一个低压配电系统可用度的分析估算。

关键词 地面设备 故障率 维修率 可用性 Markov 模型

中图分类号 V553 **文献标识码** A **文章编号** 1674-5825 (2009) 03-0030-04

1 引言

产品可靠性的意义已被人们所认识。但是, 产品不可能百分之百地可靠, 而且, 许多产品随着使用、贮存时间的延长, 总会出现故障或失效。此时, 如果能通过维修, 迅速而经济地恢复装备的性能, 就可以恢复生产。而能否迅速而经济地修复, 则取决于产品的维修性。实际上, 可靠性和维修性都是为了使产品随时可用, 即有良好的可用性。可靠性是从延长其正常工作时间来提高可用性, 而维修性则从缩短停机时间来提高可用性。

在我国现有的条件下, 由于科技工业水平的限制, 作为发射场地面设备, 与上天产品相比而言, 地面设备的使用环境条件恶劣, 可靠性较低, 普遍大幅度地提高产品可靠性很困难, 而且, 成本和代价也非常高。发射场地面设备大部分都属于可维修产品, 产品出现故障后经维修可以再次投入使用。在这种情况下, 通过提高维修性来弥补其可靠性的先天不足, 保证产品达到所要求的可用性水平, 将是一种经济有效的手段。因此, 本文将针对发射场地面设备的特点, 运用马尔可夫(Markov)模型及理论进行可用性分析。

2 可用性的定义及指标

2.1 可用性定义

可用性的定义是: 当需要时, 系统在该时刻处于

正常工作状态(正常可用状态)的能力。可用性的度量是可用度, 可用度是指产品在规定的条件下, 任一时刻($t>0$), 当任务需要时, 系统处于可使用状态的概率。

2.2 可用性的主要度量指标

(1) 故障率 $\lambda(t)$

设一批同名产品到时刻 t 仍能正常工作的总数为 $N_s(t)$, 而它们在下一段 Δt 时间内出现故障的数目为 $\Delta N_f(t)$, 残存数为 $N_s(t-\Delta t) = N_s(t) - \Delta N_f(t)$ 。由于在处理实际问题时, 只能根据某一段时间间隔内的平均残存数 $\bar{N}_s(t)$ 来计算平均故障率 $\bar{\lambda}(t)$ ^[1]

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{\Delta N_f(t)}{\bar{N}_s(t) \times \Delta t}$$

$$\text{式中: } \bar{N}_s(t) = \frac{1}{2} [N_s(t) + N_s(t-\Delta t)]$$

(2) 维修率 $\mu(t)$

平均维修时间可用下式表达

$$M = \frac{\lambda \bar{M}_{ct} + f_p \bar{M}_{pt}}{\lambda + f_p}$$

式中: λ 为装备的故障率, $\lambda = \sum \lambda_i$; f_p 为装备预防维修的频率, $f_p = \sum f_{pj}$; \bar{M}_{ct} 为平均修复时间; \bar{M}_{pt} 为平均预防维修时间。

当设备的使用时间远远大于维修时间时, 可以认为它们服从指数分布。此时, 维修率 $\mu = 1/\bar{M}$ 。

(3) 可用度

当系统寿命分布服从指数分布时, 其固有稳态

来稿日期: 2008-10-8

作者简介: 张光升(1967, 03—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事发射场地面设备技术保障工作。

可用度 A_s 可用下式表示

$$A_s = \frac{1/\lambda}{1/\lambda + 1/\mu} = \frac{\mu}{\mu + \lambda}$$

3 可修复系统可用性分析方法

3.1 Markov 过程

发射场地面设备大多属于可维修产品, 产品出现故障后经维修可以再次投入使用。当组成系统的部件的寿命分布、维修时间分布和其它有关分布均为指数分布时, 这样的系统可用马尔可夫(Markov)过程来描述^[23]。

3.2 指数分布应用说明

指数分布应用条件: 系统由大量元件构成; 任一元件失效, 则造成整个系统发生故障; 元件失效后立即维修或更换, 元件失效相互不受影响, 系统发生故障次序与元件发生失效次序相同。故障率为常数或近似常数。说明产品在使用中出现故障随机, 质量相对稳定。工作过程中累计损伤效应不明显, 新旧产品出现故障概率相同。指数分布常用于描述浴盆曲线偶然失效期, 专门用于描述电子设备可靠性。通常适用于电子设备或电子元器件、多部件综合而成的复杂系统以及硬件间隔修理和某些软件失效模型。发射场地面设备使用特点: 一是设备使用频率不高, 除配电系统要保障正常的工作、生活用电外, 多数地面设备只在任务期间和检修检测期间工作。经过磨合期后, 设备大多处于稳定工作期; 二是每次任务进场前, 地面设备都要进行大规模的检修检测, 以便及时发现和消除设备存在的隐患。因此, 任务期间地面设备可近似看成故障率恒定的指数寿命型产品。在众多维修性分布类型中, 指数分布具有方便性和能满足工程精度要求的特点, 因而得到广泛的应用。

3.3 基本假设

(1) 组成系统的各部件的寿命分布及修理时间分布均服从指数分布, 且故障部件修复后的寿命分布和新的部件一样。

(2) 在 $[t, t + \Delta t]$ 时间区间内, 未发生故障的单元发生故障的概率为 $\lambda \Delta t$ 。

(3) 在 $[t, t + \Delta t]$ 时间区间内, 尚未修复的单元被修复的概率为 $\mu \Delta t$ 。

(4) 在 Δt 时间内出现两次或两次以上故障或修

复的概率为零。

(5) 系统中各部件只有“正常”或“故障”两种状态, 每次故障或修复事件是相互独立的事件, 与其它事件无关。

3.4 可修复单元的可用度

设系统只有一个单元部件, 故障率为 λ , 修复率为 μ 。根据马尔可夫有关理论, 系统的稳态可用度为

$$A(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda}$$

3.5 可修复串联系统的可用度

(1) 两个不同部件组成的可修串联系统可用度。设可修串联系统由两个部件组成, 其故障率分别为 λ_1 和 λ_2 , 维修率为 μ_1 和 μ_2 。根据马尔可夫理论, 系统的稳态可用度为

$$A(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \left[1 + \frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} \right]^{-1}$$

(2) n 个相同部件组成的可修串联系统可用度。假设所有随机变量是相互独立的。根据马尔可夫有关理论, 系统的稳态可用度为

$$A(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{\mu}{n\lambda + \mu}$$

(3) n 个不同部件组成的可修串联系统可用度。根据马尔可夫有关理论, 系统的稳态可用度为

$$A_s = \left(1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i} \right)^{-1}$$

4 应用实例

载人航天发射场低压配电系统按照设备维护检修方式不同可以分为如下几类: 配电柜一、二次控制部分, 框架式断路器, 塑壳式断路器, 供配电监测系统, UPS, 工艺插座, 防爆插座、电子脱扣器、接地网及配电线路等。

该地区季节温差和昼夜温差很大, 易导致接插件因热胀冷缩发生松动现象。另外, 由于场区地处巴丹吉林沙漠边缘, 风沙较多, 沙尘易进入设备内部, 致使机构出现卡滞、开关等出现转动不灵活、不到位等现象, 故每年需进行设备换季维护检修工作。

以某发射场低压配电系统为例^[4], 配电柜一次部分故障率统计分析结果见表 1, 配电柜一次部分维修率统计分析结果见表 2。

对某低压配电系统设备级进行可用度评估, 可以将设备看作成败型和指数型设备, 采用单元可用度的马尔可夫公式来计算各部件的可用度, 具体计算结果详见表 3。根据表 3 中单元设备的可用度可以得到可修串联系统的可用度为

表 1 配电柜一次部分故障率统计分析结果

| 年份 | 投用时间 $\Delta t(\text{h})$ | 故障数 $\Delta N_f(t)$ | 残存数 $N_s(t-\Delta t)$ | 平均残存数 $\bar{N}_s(t)$ | 平均故障率 $\bar{\lambda}(t)$ (次/h) | 故障率最大值 λ (次/h) |
|------|------------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 1999 | 130×8=1040 | 10 | 160 | 165 | 0.00006 | 0.00015 |
| 2000 | 63×8=504 | 8 | 162 | 166 | 0.00010 | |
| 2001 | 103×8=824 | 5 | 165 | 167.5 | 0.00004 | |
| 2002 | 61×8=488 | 12 | 158 | 164 | 0.00015 | |
| 2003 | 71×8=568 | 3 | 167 | 168.5 | 0.00003 | |

注: 配电柜总数 $N_s(t)=170$ 面, 表中计算结果参见前文第 2.2 节中公式。

表 2 配电柜一次部分维修率统计分析结果

| 年份 | 故障率 $\bar{\lambda}(t)$ (次/h) | 单项平均修复时间 (h) | 预防维修频率 (次/h) | 预防维修平均时间 (h) | 总平均维修时间 $\bar{M}(h)$ | 维修率 μ (次/h) |
|------|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|--------------------|
| 1999 | 0.00006 | 0.5 | 1/1040=0.00096 | 1 | 1 | 1 |
| 2000 | 0.00010 | 0.5 | 1/504=0.00198 | 1 | | |
| 2001 | 0.00004 | 0.5 | 1/824=0.00121 | 1 | | |
| 2002 | 0.00015 | 0.5 | 1/488=0.00205 | 1 | | |
| 2003 | 0.00003 | 0.5 | 1/568=0.00176 | 1 | | |

表 3 配电系统设备可用度估算结果

| 序号 | 设备名称 | 故障率 λ_i | 维修率 μ_i | 可用度 $A_{a_i}(3424\text{h})$ |
|----|----------|-----------------|-------------|-----------------------------|
| 1 | 配电柜一次部分 | 0.00015/h | 1/h | 0.99985 |
| 2 | 配电柜二次部分 | 0.00032/h | 1/h | 0.99968 |
| 3 | AH 系列断路器 | 0.00024/h | 1/h | 0.99976 |
| 4 | ME 系列断路器 | 0.00020/h | 1/h | 0.99980 |
| 5 | 配电监测系统 | 0.00039/h | 1/h | 0.99961 |
| 6 | UPS 电池 | 0.00002/h | 0.125/h | 0.99984 |
| 7 | 接地网 | 0.000011/h | 0.59/h | 0.99998 |
| 8 | 电子脱扣器 | 0.00026/h | 1/h | 0.99974 |
| 9 | 塑壳式开关 | 0.00005/h | 1/h | 0.99995 |
| 10 | 防爆插座 | 0.00044/h | 2/h | 0.99978 |
| 11 | 工艺插座 | 0.000013/h | 5/h | 0.99999 |
| 12 | 配电线路 | 0.00010/h | 2/h | 0.99995 |

$$A_s = \prod_{i=1}^{12} A_{st} = 0.99793$$

表 3 中故障率是从低压配电系统各设备最近 5 年工作期间统计出来的,5 年来实际任务中运行时间累计为 3424h。从表 3 中的计算结果可以看到,低压配电系统维修后的可用度很高。这进一步说明了发射场低压配电系统是可维修的,检修检测方法可行,检修检测后的系统可用度很高,维修措施非常有效。

5 结束语

本文采用基于 Markov 的可修复系统可用性分析方法,对某低压配电系统可用度进行了分析估算,得出了发射场地面设备可通过提高维修性来弥补其可靠性先天不足,从而达到系统可用性要求的结论。

文中的结果是在系统及设备满足指数分布的前提下得出的,但该方法对于研究其它分布类型的系统也有一定参考价值。◇

参 考 文 献

- [1] 于江.汽车可靠性与维修管理工程基础.中国人民解放军运输工程学院,1992
- [2] 金星,洪延姬.系统可靠性与可用性分析方法.北京:国防工业出版社,2007
- [3] 章国栋,陆廷孝,屠庆慈等.系统可靠性与维修性的分析与设计.北京航空航天大学出版社,1990
- [4] 张光升.载人航天发射场配电系统维修性分析评估方法研究.北京:装备指挥技术学院硕士学位论文,2005
- [5] 贺国芳,许海宝.可靠性数据的收集与分析.北京:国防工业出版社,1997
- [6] 郑铭芳.低压电器选用维修手册.北京:机械工业出版社,1989

Availability Analysis Based on Markov Model for the Ground Equipment of Launch Site About

ZHANG Guangsheng WU Fei CHEN Wenli
(Jiuquan Satellite Launch Centre)

Abstract: Aimed at the characteristics of ground equipment of launch site, this paper puts forward a method of repairable system availability analysis method based on Markov model. As an example, we have analyzed and estimated availability of a low-voltage power distribution system, and get a conclusion of ground equipment of the launch site can remedy its inherent shortage of reliability by raising maintenance. This method can be used to availability analysis of similar system and equipment.

Key words: ground equipment, failure rate, repair rate, availability, Markov model