

复杂光电系统可靠性鉴定试验方案研究*

吴晗平

(华中光电技术研究所, 武汉 430073)

摘要 针对复杂光电系统实际情况, 依据可靠性试验理论, 分析了指数寿命型假设的统计检验, 阐述了可靠性定时和定数截尾鉴定试验, 以及定时试验标准方案, 探讨了故障加权处理、试验剖面与综合环境条件, 对复杂光电系统可靠性鉴定试验方案设计 & 质检验收有一定的指导意义。

关键词: 复杂光电系统; 可靠性; 鉴定试验; 方案设计; 平均故障间隔时间(MTBF)

1 引言

现代战争是高技术密集的全天候战争, 电子干扰日趋严重, 这就对武器装备的战术技术性能以及抗电子干扰能力提出了更高的要求。复杂光电系统是光、机、电一体化的高新武器装备, 以其先进的性能和良好的抗干扰能力, 应运而生作为搜索警戒、跟踪、制导、导航、独立或辅助火力控制通道等, 已引起各国军方的高度重视, 具有广泛的应用前景。

复杂光电系统一般是指由红外、电视、激光、微光、计算机、伺服控制等部分构成的一类光电系统; 常见的复杂光电系统有舰用光电跟踪仪、红外搜索警戒系统、制导用电视、红外跟踪系统、激光雷达等; 舰用光电跟踪仪由红外跟踪器、激光测距机、电视跟踪器、伺服控制等组成, 全方位红外搜索警戒系统由高性能红外探测器、光学系统、信号处理器、图像处理器、稳定平台、伺服控制等组成。但是, 随着光电系统复杂程度的增加, 其可靠性问题显得比较突出, 已提到使用方的重要议事日程。

产品的可靠性是设计出来的, 为了验证复杂光电系统的设计是否达到规定的最低可接收的可靠性要求, 就必须进行可靠性鉴定试验, 为生产决策提供管理信息。因此, 对复杂光电系统可靠性鉴定试验方案进行探讨是必要的。

收稿日期: 1997年2月26日

* 军方资助复杂光电系统可靠性研究课题的子课题研究

可靠性鉴定试验方案用于确定受试系统的可靠性是否符合规定的指标要求,并估计 M TBF (平均故障间隔时间) 的真值。在寿命为指数分布假设下,其试验方案有: 定时截尾试验方案、定数截尾试验方案、概率比序贯试验方案。定时或定数截尾试验的优点是: 定时试验的最大累积试验时间是固定的,在试验之前就可以确定试验设备、人力、物力的最大需要量; 定数试验在试验之前已确定了最大故障数,在没有修复或更换的情况下能够确定受试产品的最大数量; 其最大累积试验时间比类似的截尾序贯试验时间要短。根据复杂光电系统的特点,采用定时截尾试验方案较为适宜,受试系统在达到规定的试验时间就停止试验; 其次采用定数截尾试验方案。

2 指数寿命型假设的统计检验

复杂光电系统一般由很多部分组成,从理论上说,不论这些部分的寿命是什么分布,只要系统的任一部分出了故障,即予修复再投入使用,则较长时间之后,系统的寿命基本上即指数分布。这是很多光电、电子等设备寿命为指数分布的理论基础。

复杂光电系统的寿命为指数分布,这个假设是否正确?在得到试验数据后,应该先检验这些数据是否来自寿命为指数分布的总体。可用指数寿命拟合优度检验法进行检验,其程序如下:

Step 1. 将到试验截止时刻出现的故障时刻从小到大记录成:

$$t_1, t_2, \dots, t_{r-1}, t_r$$

r 为规定的一个故障数。

Step 2 计算统计量:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^d 2 \ln \frac{T^*}{T_i} \quad (1)$$

这里的 T^* 是总试验时间, T_i 为出现第 i 次故障时的累积试验时间。

$$d = \begin{cases} r - 1 & \text{定数截尾试验} \\ r & \text{定时截尾试验} \end{cases} \quad (2)$$

Step 3 给定显著性水平 α (IEC 605-6 建议取 $\alpha = 10\%$)。

如果 $\chi^2 < \chi_{d, \frac{\alpha}{2}}^2$, 则拒绝指数寿命假设, 此时故障率不为常数, 且可能是递增的。 (χ^2 是自由度为 $2d$ 的 χ^2 分布)

如果 $\chi^2 > \chi_{d, 1-\frac{\alpha}{2}}^2$, 则拒绝指数寿命假设, 此时故障率不为常数, 且可能是递减的。

如果 $\chi_{d, \frac{\alpha}{2}}^2 \leq \chi^2 \leq \chi_{d, 1-\frac{\alpha}{2}}^2$, 则不能以显著性水平 α 拒绝指数分布的假设。如有一定的工程物理依据, 则可接受指数寿命假设。

随着试验中故障数的增多, 本检验法的灵敏度愈高。如果 $r < 3$, 例如 $r = 0, 1$, 或 2 , 由于时间、资源或其它条件不允许作更多试验, 则可接受指数寿命假设, 不必作检验, 这对小批量研制生产复杂光电系统是有用的。

如果检验的判决是拒绝指数分布假设, 则有几种情况:

(a) 故障率可能是递减的, 即存在早期故障, 对此, 可采取的措施是改进产品的生产过程的质量管理, 并加强筛选与老炼等等。

(b) 故障率可能是递增的, 即存在耗损故障, 对此, 可采取的措施是及时更新、预防性维修、改进设计、工艺等等。

在采取这类改进措施后, 很可能影响产品(系统)原来的可靠性规律, 从而应重新验证其可靠性。

3 可靠性定时截尾鉴定试验

假设复杂光电系统寿命为指数分布, 对其进行可靠性定时截尾鉴定试验, 在试验过程中, 不同样品由于出故障要修理或其它原因, 试验时间不尽相同。设到预定时间结束时, 试验的全体产品(可修复)的累积试验时间为 T^* , (对于不修复产品, 则出现故障后该产品的以后试验时间不存在), 出现的故障数为 r 。

订购方需要根据试验数据或现场数据估计产品(系统)的MTBF(平均故障间隔时间), 订购方必须规定置信区间的置信水平 γ 。可靠性试验单位根据试验数据向订购方提供MTBF的观测值(点估计值) $\hat{\theta}$ 及相应于给定 γ 的置信区间 (θ, θ_1) 。GJB 450建议的 $\gamma = 1 - 2\beta$, β 取 10%, 20%, 30%, β 是使用方风险。

MTBF 的观测值为:

$$\hat{\theta} = \frac{T^*}{r} \quad (3)$$

故障率 λ 的观测值为:

$$\hat{\lambda} = r/T^* \quad (4)$$

如果试验中未观测到故障, 即 $r = 0$, 则 IEC 建议:

$$\lambda = 1/(3T^*) \quad (5)$$

给定置信水平 γ , 则 $\hat{\theta}$ 的单侧置信下限 θ 为:

$$\theta = \frac{2r}{\chi_{2r+2, \gamma}^2} \cdot \hat{\theta} = \frac{2T^*}{\chi_{2r+2, \gamma}^2} \quad (6)$$

$\hat{\theta}$ 的双侧置信区间 (θ, θ_1) 为:

$$\theta = \frac{2r}{\chi_{2r+2, \frac{1+\gamma}{2}}^2} \cdot \hat{\theta} = \frac{2T^*}{\chi_{2r+2, \frac{1+\gamma}{2}}^2} \quad (7)$$

$$\theta_1 = \frac{2r}{\chi_{2r, \frac{1-\gamma}{2}}^2} \cdot \hat{\theta} = \frac{2T^*}{\chi_{2r, \frac{1-\gamma}{2}}^2} \quad (8)$$

故障率 λ 的单侧置信上限 $\lambda_1 = 1/\theta$ 。

故障率 λ 的双侧置信区间 (λ, λ_1) 为:

$$\lambda = 1/\theta, \quad \lambda = 1/\theta$$

令:

$$\begin{aligned} \theta(\psi, r) &= 2r/\lambda_{r+2, \psi}^2 \\ \theta_r(\psi, r) &= 2r/\lambda_{r, \psi}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

则 θ 的单侧置信下限 θ :

$$\theta = \theta(\gamma, r) \cdot \hat{\theta} \quad (10)$$

θ 的双侧置信下限 (θ, θ) 为:

$$\theta = \theta\left(\frac{1+\gamma}{2}, r\right) \hat{\theta}, \quad \theta = \theta\left(\frac{1-\gamma}{2}, r\right) \hat{\theta} \quad (11)$$

$\theta(\psi, r)$ 及 $\theta_r(\psi, r)$ 见 GJB 899 的表 A₇。

使用方风险为 β , 通过定时截尾试验验证寿命为指数分布的系统的 M TBF 达到最低可接收值 θ_0 的方法及程序如下:

Step 1. 计算复杂光电系统的总累积试验时间 T^* (单台或多台), 及试验中出现的总故障数 r 。

Step 2 计算 θ 的观测值(点估计值)。

$$\hat{\theta} = T^*/r$$

Step 3 计算 $\gamma = 1 - \beta$, 查出 $\theta(\gamma, r)$, 计算出 θ 的单侧置信下限。

$$\theta = \theta(\gamma, r) \hat{\theta}, \quad \text{置信水平 } \gamma = 1 - \beta$$

Step 4 与规定的 M TBF 的最低可接收值 θ_0 比较。如 $\theta \geq \theta_0$, 则认为达到最低可接收值, 满足鉴定试验要求, 使用方风险为 β 。如 $\theta < \theta_0$, 则根据当前试验数据还不能认为已经以使用方风险 β 达到最低可接收值, 即鉴定试验不通过。

Step 5 由使用方要求的置信水平 $\gamma = 1 - 2\beta$, 计算 θ 的置信区间 (θ, θ) , $\theta = \theta(1 - \beta, r) \hat{\theta}$, $\theta = \theta(1 - \beta, r) \hat{\theta}$

Step 6 把 θ 的置信上限 θ 和 θ_0 比较。如果 $\theta \geq \theta_0$, 说明“ θ 在不可接受的质量范围之内”; 错判概率为 β 。产品(系统)从根本上说质量是不可接受的。

4 可靠性定数截尾鉴定试验

如果复杂光电系统进行可靠性定数截尾鉴定试验, 设 r 是定数截尾试验预先规定的故障数, 当试验进行到出现第 r 个故障时截止试验, 此时总累积试验时间为 T^* , 则 M TBF 的观测值为:

$$\hat{\theta} = T^*/r$$

故障率 λ 的观测值为:

$$\hat{\lambda} = r/T^*$$

如果故障数 r 很少, 得到的估计比较粗糙。因此在有可能的情况下, r 尽可能选大一些。给定置信水平 γ , 则 $\hat{\theta}$ 的单侧置信下限 θ 为:

$$\theta = \frac{2r}{\chi_{2r, \gamma}^2} \hat{\theta} = \frac{2T^*}{\chi_{2r, \gamma}^2} \quad (12)$$

$\hat{\theta}$ 的双侧置信区间 (θ, θ) 为:

$$\theta = \frac{2r}{\chi_{2r, \frac{1+\gamma}{2}}^2} \hat{\theta} = \frac{2T^*}{\chi_{2r, \frac{1+\gamma}{2}}^2} \quad (13)$$

$$\theta = \frac{2r}{\chi_{2r, \frac{1-\gamma}{2}}^2} \hat{\theta} = \frac{2T^*}{\chi_{2r, \frac{1-\gamma}{2}}^2}$$

故障率 λ 的单侧置信上限: $\lambda_U = 1/\theta$

故障率 λ 的双侧置信区间 (λ, λ_U) 为:

$$\lambda = 1/\theta, \quad \lambda_U = 1/\theta$$

令:

$$\begin{aligned} \theta(\psi, r) &= 2r/\chi_{2r, \psi}^2 \\ \theta_U(\psi, r) &= 2r/\chi_{2r, \psi}^2 \end{aligned} \quad (14)$$

则 θ 的单侧置信下限 θ 为:

$$\theta = \theta_L(\gamma, r) \cdot \hat{\theta} \quad (15)$$

θ 的双侧置信区间 (θ, θ) 为:

$$\theta = \theta_L\left(\frac{1+\gamma}{2}, r\right) \hat{\theta} \quad \theta = \theta_U\left(\frac{1+\gamma}{2}, r\right) \hat{\theta} \quad (16)$$

$\theta_L(\psi, r)$ 及 $\theta_U(\psi, r)$ 系数表为 GJB 899 的表 A 8。

使用方风险为 β 通过定数截尾试验验证寿命为指数分布的系统的 M TBF 达到最低可接收值 θ_0 的方法及程序如下:

Step 1 计算系统于第 r 个故障出现, 截止试验时的累积试验时间 T^* 。

Step 2 计算 θ 的观测值 $\hat{\theta}$ 。

Step 3 计算 $\gamma = 1 - \beta$, 查出 $\hat{\theta}(\gamma, r)$, 计算出 θ 的单侧置信下限:

$$\theta = \theta_L(\gamma, r) \hat{\theta}, \text{ 置信水平 } \gamma = 1 - \beta$$

Step 4 与规定的 θ_0 比较, 如果 $\theta \geq \theta_0$, 认为通过鉴定试验, 达到最低可接收值。

Step 5 根据使用方要求的置信水平 $\gamma = 1 - 2\beta$, 计算 θ 的置信区间 (θ, θ) , $\theta = \theta_L(1 - \beta, r) \hat{\theta}$, $\theta = \theta_U(1 - \beta, r) \hat{\theta}$

Step 6 把 θ 的置信上限 θ 与 θ_0 比较, 如果 $\theta < \theta_0$, 说明“ θ 在不可接受的质量范围之内”; 错判概率为 β , 产品(系统)从根本上说质量是不可接受的。

5 定时试验标准方案

指数寿命型复杂光电系统进行可靠性鉴定试验可以采用定时试验标准方案。GJB 899提出了标准型的定时试验方案及短时高风险定时试验方案,其方案表分别如GJB 899的A 3和A 4所示。使用方要求产品(系统)平均寿命 θ 的极限质量为 θ_0 ,相应的使用方风险为 β ;生产方可接收质量为 θ_1 ,相应的生产方风险为 α 。标准型试验方案采用正常的 α/β 为10%~20%,短时高风险试验方案采用 α/β 为30%。M TBF的可接收质量水平 θ_1 与最低可接收值 θ_0 之比即鉴别比 $d = \theta_1/\theta_0$ 取1.5 2.0 3.0。方案中的接收数 A_c 、拒收数 R_e ($R_e = R_c + 1$)都是整数,因而 α/β 的实际值为 α/β ,原定的 α/β 值叫名义值。这些方案的试验时间以 θ 作为单位。

用GJB 899选定定时试验方案的程序如下:

Step 1 生产方根据自己产品的可靠性质量与使用方希望的极限质量进行磋商,一开始双方提出的 θ_0 、 θ_1 不一定具有规定的鉴别比 d 值,在协商后,参考试验时间,定下 θ_0 、 d 、 α/β 值。

Step 2 根据 θ_0 、 d 、 α/β 值查试验方案表,得到相应的试验时间(θ 的倍数)、判决故障数 A_c (接收数)或 R_e (拒收数)。

Step 3 根据使用方规定的M TBF的验证区间或置信区间(θ_0 、 θ_1)的置信度 γ (建议 $\gamma = 1 - 2\beta$),由试验数据或现场数据估出(θ_0 、 θ_1)和观测值 \hat{Q} 。当试验结果作出接收判决时(该试验停止前出现责任故障数一定小于或等于接收判决的故障数 A_c ,试验是在达到规定的试验时间而停止),此时根据定时截尾公式进行估计。试验过程中若故障数达到拒收的判决故障数 R_e ,即可停止试验,并作出拒收判决(这实质上是根据预定的 R_e 的定数截尾判决),此时根据定数截止尾公式进行估计。

标准型定时试验是协定 θ_0 、 θ_1 、 α/β 后求 T^* 、 A_c 或 R_e ,这样,试验的重要参数 T^* 就不易直接控制。如果试验允许的总试验时间有要求,则可以考虑采用LQ方案(相应于成功-失败型可靠性试验中的LTPD方案)。(见GJB 899中的A 5.3)。

6 故障的分类及加权

在上述的可靠性试验方案中,对试验中出现的故障在确定为责任故障后是否应该进行加权处理,尚存争议,笔者认为,根据复杂光电系统故障的严重程度及其对完成规定功能的能力的影响,若能进行故障加权处理,则可更真实地反映出复杂光电系统的实际水平。另外,在上述可靠性统计试验方案里,一个核心问题就是总试验时间及总责任故障数是多少。为此必须较准确地给故障分类、定级和加权,最终统计出故障总数。

在可靠性试验所规定的试验条件下和试验时间内,复杂光电系统有可能局部地、部分地或全部地丧失其规定的功能,也可能只是在试验中出现使其功能略低于指标要求,而并未完全丧失其工作能力。从实际出发,依据故障对系统的影响程度,本着数理统计的观点,将故障可分别定义为致命故障、严重故障、轻微故障。即导致系统预定功能丧失,致使任务失败,对系统和环境造成重大损害并可能导致人身伤亡的故障为致命故障;系统性能低于指标要求,从而导致完

成任务降级的故障为严重故障,不足以导致上述二类后果发生,但它会导致需要进行非计划性维修的故障为轻微故障。

试验中若发生致命故障,应立即停止试验,待问题查明并彻底解决后,方可恢复试验,其故障权系数定为1。严重故障的权系数定为0.4~0.9。轻微故障的权系数为0.1~0.3。

为何要这样对故障进行加权处理?是因为系统发生故障后,不论它属于何种程度的故障,即使是轻微故障,尽管系统还能全功能工作,也应进行修理,以免这些轻微故障累积后会引发严重故障,造成不应有的损失。但是,这又带来故障数的统计问题,若记故障一次,产品又未丧失任何规定功能,若不记故障,产品又经过了维修。为了既防止因试验中出现的轻微故障拒绝好的产品,又防止频繁的轻微故障对产品性能造成不可忽视的影响,提出对故障进行加权统计,总责任故障保留小数位的方法,该统计方法无论在理论还是在实际都较为合理。

但是,由于对故障加权处理,所得到的总的责任故障数往往不是正常情况下的整数,是一个非整数值,这样,就无法求出M TBF的下限值和上限值。若是累积故障(加权)数采用四舍五入的方法进行处理,则会使计算结果产生较大的误差,因而有必要进行适当的处理。

假设加权故障数为 r ,相应的M TBF的观测值 $\hat{\theta}$ 的置信区间为 (θ_L, θ_U) ,置信水平为 γ 。由于 r 为非整数值,无法利用前面所述的计算公式和GJB 899的常用表直接得出 (θ_L, θ_U) 。

令:

$$\begin{aligned} r &= \text{Fix}(r) \quad (\text{即对 } r \text{ 取整数}) \\ r &= \text{Fix}(r) + 1 \end{aligned} \quad (17)$$

因而有: $r < r < r$

对于 r 和 r ,相应的M TBF的观测值分别为 $\hat{\theta}$ 和 $\hat{\theta}$,有: $\hat{\theta} = \frac{T^*}{r}$, $\hat{\theta} = \frac{T^*}{r}$ 。同理,可以得到故障数为 r 的 θ 的置信区间 (θ_L, θ_U) ,以及故障数为 r 的 θ 的置信区间 (θ_L, θ_U) , (置信水平亦为 γ)。由此可知, θ 在 θ_L 与 θ_L 之间, θ 在 θ_U 与 θ_U 之间,再加上 r, r, r 这三个数,然后利用内插法或最小二乘法就可以分别求出 θ 和 θ 。

7 试验剖面与综合环境条件

复杂光电系统的可靠性与环境条件密切相关,因此可靠性鉴定试验的环境条件应尽可能反映系统在现场使用与任务环境的特征。另外,几种应力同时施加于复杂光电系统,往往比将各项应力分开进行单项试验的总效果要大得多,所得到可靠性特征值也更真实,因而,在条件许可的情况下,或争取创造条件,进行综合环境试验。

试验剖面是直接试验用的环境参数与时间的关系图,是按照一定的规则对环境剖面进行处理后获得的。复杂光电系统往往有多个任务剖面、环境剖面的多个试验剖面合成一个合成试验剖面。

复杂光电系统进行可靠性鉴定试验时,施加的试验应力一般有电应力和环境应力(模拟真实环境)。环境应力通常采用振动应力、温度应力和湿度应力、冲击应力等。下面以舰用复杂光电系统为例进行说明。

舰用复杂光电系统可分为舱室内设备和舱室外设备(如光电跟踪仪的指向器)两部分。舱

室内设备大都处于温控环境下,舱室内具有空调通道;而舱室外设备安装在甲板、上层建筑和桅杆区,无遮蔽,往往会经受更为严酷的环境应力。

工作循环期间,订购方若无其他规定,输入电压的变动范围应为标称电压的+6%~-10%;系统在冷浸和热浸期间应通电,在其它时间内有10%的随机时间处于断电状态。工作循环周期的最长时间应不超过规定的连续工作时间,不同的复杂光电系统,其工作循环周期应有所不同,例如,跟踪系统的工作循环周期与搜索警戒系统的工作循环周期就明显不同,显然后者的工作循环周期长(即连续工作时间要长得多)。振动应力应安排在随机抽取的25%工作循环内施加振动应力;振动应力含战斗损坏振动应力和运输随机振动应力,其频谱规定应满足实际需要;并且,舱室内与舱室外的设备应有振动应力上的区别,舱室外的设备的振动应力大一些。温度和湿度应力,对于舱室内、外的设备也应有所区别对待;舱室内的设备的温度应力可为-10~40,相对湿度可为25%~75%,舱室外的设备的温度应力为-50~60,相对湿度为25%~95%。重复多个循环,直至达到所要求的试验持续时间。

8 结 束 语

如果试验样机较多,有必要进行指数寿命型假设的统计检验,以提高试验结果的可信度,但目前大多数复杂光电系统的试验样机非常有限(研制、试验经费有限),在此情况下,可直接接受指数寿命假设。另外,可靠性鉴定试验的时机,通常的做法是在研制阶段结束时,生产阶段开始前。

值得一提的是,已做过环境试验的样机,不宜再作为可靠试验的样机,虽然它在环境鉴定试验那样严酷的条件下未出现任何故障,试验合格,但仍不宜作为可靠性鉴定试验的样机投入试验,因为环境试验的试验条件是按产品极限条件的加权平均值来制定的,而可靠性试验的试验条件是按产品在运输、贮存、使用中的实际任务剖面来设计的,一般是指产品在实际使用的条件下,而不是在比实际使用高得多的某些极限环境条件下,在规定的时间内去完成规定的功能。此外,本文所述也适用复杂光电系统可靠性验收试验。

参 考 文 献

- [1] GJB 899-90 可靠性鉴定和验收试验 北京:国防科工委军标出版发行部,1991
- [2] 丁其伯 关于可靠性鉴定试验目的和时机的探讨 环境技术,1993,(2)
- [3] 卢昆祥 电子产品可靠性试验 天津:科学技术出版社,1987
- [4] 吴晗平 多阶段任务系统的可靠度研究 现代防御技术,1995,(1):32~47
- [5] MIL-HDBK-781 Reliability Test Methods Plan and Environments for Engineering Development, Qualification and Production, 1987
- [6] IEC 605-6(1986). Equipment Reliability Testing. Part 6

Research into Testing Scheme of Reliability Qualification of Complex Optoelectronic Systems

Wu Hanping

(Huazhong Institute of Optics & Electronics, Wuhan 430073)

Abstract

For complex optoelectronic systems, this paper, according to theory of reliability testing, analyzes statistical test for exponential life hypothesis, describes fixed-time and fixed-number censored reliability testing, and fixed-time testing standard scheme, discusses weighted failure rate and test profile, combined environment condition. It plays directive roles of scheme design of reliability qualification test and production acceptance for complex optoelectronic systems.

Keywords: Complex optoelectronic systems, Reliability, Qualification test, Scheme design, Mean time between failure

吴晗平 男, 1964年10月出生, 1985年毕业于湘潭大学近代光学专业(理学士), 1991年毕业于海军航空工程学院信号与信息处理专业(工硕士)。工程师, 从事图像处理、成像跟踪、光电系统装备的研制及其可靠性工程研究等领域的工作。已在国家级专业刊物和国家正式出版刊物上发表论文二十多篇。