



# 中华人民共和国国家军用标准

FL

GJB 1407—92

---

## 可靠性增长试验

Reliability growth test

1992—07—18 发布

1993—03—01 实施

---

国防科学技术工业委员会 批准

# 前 言

可靠性增长试验是 GJB 450 的一个工作项目,是增长可靠性的主要手段之一。

可靠性的增长应贯穿于工程研制的整个过程之中,其计划管理工作的内容在可靠性管理手册中有详细论述,本标准只是对其中的一个特殊阶段进行了规定。可靠性增长试验是在预期的使用环境条件下连续多次模拟任务循环以提高设备的可靠性的试验,其试验环境剖面的制定应以 GJB 899 为导则。

增长试验与 FRACAS 构成一个整体。增长试验适合于设备的工程研制阶段,在这个阶段,承制方为提高设备的可靠性可以进行设计改进,而无严格的合同限制。如果投产之前已完全达到了可靠性要求,则一项成功的增长试验可以免去可靠性鉴定试验。

# 目 次

1	范围 .....	(1)
2	引用文件 .....	(1)
3	定义 .....	(1)
4	一般要求 .....	(1)
4.1	试验大纲 .....	(1)
4.2	受试设备 .....	(2)
4.3	试验设备及仪器 .....	(2)
4.4	订购方提供的设备、装置及器材 .....	(2)
4.5	性能测试 .....	(2)
4.6	故障报告、分析和纠正措施系统(FRACAS) .....	(2)
4.7	试验评审 .....	(3)
4.8	报告 .....	(4)
5	详细要求 .....	(4)
5.1	试验前的处理 .....	(4)
5.2	确定试验环境条件 .....	(4)
5.3	确定试验时间 .....	(4)
5.4	维修 .....	(5)
5.5	故障的处理 .....	(5)
5.6	试验计划曲线 .....	(5)
5.7	试验的监控 .....	(7)
5.8	试验截尾 .....	(7)
附录 A	可靠性增长试验的图分析法 (补充件) .....	(9)
附录 B	可靠性增长试验的统计分析法 (补充件) .....	(13)
附录 C	试验环境剖面 and 试验循环示例 (参考件) .....	(20)

---

## 1 范围

### 1.1 主题内容

本标准规定了可靠性增长试验的要求和方法。

### 1.2 适用范围

本标准主要适用于各类军用电子系统或设备的工程研制阶段,其它阶段和其它设备也可参照执行。

## 2 引用文件

- GJB 150—86 军用设备环境试验方法
- GJB 299—87 电子设备可靠性预计手册
- GJB 450—88 装备研制与生产的可靠性通用大纲
- GJB 451—90 可靠性维修性术语
- GJB 813—90 可靠性模型的建立和可靠性预计
- GJB 841—90 故障报告、分析和纠正措施系统
- GJB 899—90 可靠性鉴定和验收试验
- GJB/Z 23—91 可靠性和维修性工程报告编写一般要求
- GJB 1391—92 故障模式、影响及危害性分析程序

## 3 定义

本标准有关可靠性术语均采用 GJB 451 的定义。

## 4 一般要求

可靠性增长试验是 GJB 450 的一个工作项目,是实现可靠性增长的一个正规途径。可靠性增长试验目的在于有计划地激发故障、分析故障和改进设计并证明改进的有效性。

### 4.1 试验大纲

试验前应编写试验大纲,试验大纲应包括以下内容:

- a. 试验的目的和要求;
- b. 受试设备的说明(如受试设备的任务剖面、受试设备的代表性、数量等);
- c. 试验仪器及设备的说明和要求;

- d. 试验环境条件,性能合格范围、故障判据及接口限制;
- e. 可靠性增长模型;
- f. 数据的收集和记录要求;
- g. 预防性维修的说明;
- h. 试验进度安排及试验程序;
- i. 用于分析故障及改进设计等所需要的工作时间及资源要求;
- j. 受试设备的最后处理;
- k. 其它有关事项。

## 4.2 受试设备

4.2.1 受试设备应具备设备规范要求的功能和性能,并已通过了环境试验。受试设备在设计、材料、结构与布局及工艺等方面应能基本反映将来生产的设备。

4.2.2 应按 GJB 299 和 GJB 813 的应力分析法或其它方法,用有依据的数据对设备进行最新的可靠性预计。除非订购方另有规定,只有预计值不小于要求值时才能开始试验。

2.3 应按 GJB 1391《故障模式、影响及危害性分析程序(FMECA)》对受试设备进行故障模式、影响及危害性分析。故障模式、影响及危害性分析可以指出设计的薄弱部位,并有助于对可靠性增长试验过程中可能发生的故障进行分析。

## 4.3 试验设备及仪器

试验设备及仪器应满足 GJB 899 的 4.5 条的要求。

## 4.4 订购方提供的设备、装置及器材

订购方提供的设备、装置及器材应在合同中加以规定或在试验大纲中给以说明。安装在受试设备内由订购方提供的器材应附有可靠性数据。

## 4.5 性能测试

应将设备规范或试验大纲规定的性能参数合格范围作为受试设备在可靠性试验期间的性能基准。试验前后均应在 GJB 150.1 中 3.1 条规定的标准大气条件下对受试设备进行测试。

### 4.5.1 试验前的性能测试:

试验开始前,应按照规定对受试设备进行测试,并记录性能数据,以确定是否符合性能基准,并为试验期间和试验结束时测试提供参考。然后将受试设备装入试验箱内进行试验前最后的性能测试,测试不合格的设备一律不准参加试验。

### 4.5.2 试验期间的性能测试:

每一试验循环期间,应记录受试设备的性能参数,并将这些参数与试验前和试验期间其它循环的性能参数进行比较。性能测试时的环境条件应符合设备规范和试验大纲的规定和要求。

### 4.5.3 试验后的性能测试:

试验结束后,应对受试设备进行测试,并将测试参数与试验前和试验期间的性能参数按性能基准进行比较。

## 4.6 故障报告、分析和纠正措施系统(FRACAS)

应当使用 FRACAS 来收集可靠性增长试验期间出现的所有故障信息,对这些故障信息及时地分析,并及时记录对这些故障采取的纠正措施。这一系统应与受试设备、受试设备接口、试

验仪器、试验设备、试验程序以及安装和操作说明相关联。这一系统及所有记录格式和表格应符合 GJB 841 的规定。

4.6.1 试验中发生故障时应及时填写故障报告表。

4.6.2 试验中发生故障时应及时组织有关人员进行分析,填写故障分析报告表。

4.6.3 故障原因分析后,应采取相应的纠正措施,以消除或减少故障的再现。为保证纠正措施的有效性,验证应在发生故障的环境条件下进行。纠正措施应经批准后实施。纠正措施的实施应填写纠正措施实施报告表。如果不需采取纠正措施,应说明理由。

4.6.4 故障报告闭环系统应对出现的问题、故障及分析和纠正措施进行跟踪,以考察故障纠正措施的有效性。

#### 4.7 试验评审

##### 4.7.1 试验准备状态的评审

试验准备工作完成后应对大纲进行评审,并按大纲内容逐项进行评审,以确定是否已具备了开始试验的条件并保证受试设备、试验设备和所有辅助设备已处于准备开始试验的状态。评审应着重以下几个方面:

- a. 受试设备设计和制造状态;
- b. 专用测试设备和试验设备状态;
- c. 所有可用的以前的试验结果;
- d. 试验前能提供的故障及纠正措施信息;
- e. 可靠性预计的结果;
- f. 故障模式、影响及危害性分析报告;
- g. 故障报告、分析与纠正措施系统;
- h. 试验进度安排及试验程序;
- i. 其它有关项目;
- j. 评审结论(批准或不批准开始试验)。

##### 4.7.2 试验中的审查

根据实际需要可在试验的预定阶段安排审查,并按试验大纲检查试验进展情况,以使订购方能够对试验状况及所达到的结果进行审查。审查应尽可能考虑下列内容,但不限于下列各项:

- a. 根据试验结果对当前可靠性增长的估计及预测;
- b. 对发生的问题和故障的研究及工程分析的结果;
- c. 对预防及纠正措施的建议以及由此引出的潜在的设计问题;
- d. 运行日志及测试项目的记录情况;
- e. 试验前指定工作项目的执行情况;
- f. 根据审查结果指定的工作项目。

##### 4.7.3 试验结束后的评审

试验结束后应及时对试验结果进行评审,以评定试验结果是否符合合同、设备规范及大纲的要求。主要应评审以下项目:

- a. 试验记录的完整性；
- b. 根据试验结果对当前可靠性增长的估计和达到的水平；
- c. 发现的问题和故障以及故障分析和纠正措施；
- d. 试验前指定的工作项目完成情况；
- e. 尚未解决的问题和故障情况以及预计的设计改进措施；
- f. 根据评审结果指定的工作项目；
- g. 评审结论。

#### 4.8 报告

试验结束后,应提供以下报告:

- a. 试验大纲；
- b. 试验结果报告；
- c. 故障报告；
- d. 故障分析报告；
- e. 故障纠正措施实施报告。

以上报告应按 GJB/Z 23《可靠性和维修性工程报告编写一般要求》的有关规定编写。

### 5 详细要求

#### 5.1 试验前的处理

5.1.1 可靠性增长试验之前,应先做功能和环境试验。

5.1.2 可靠性增长试验之前,应先按 GJB 899 的 5.2 条的规定进行热测定试验和振动测定试验。除非订购方有特殊规定,该项试验与增长试验不能用同一台设备。

5.1.3 应尽量模拟受试设备的现场使用方式将其安装在试验箱内,当必需使用安装支架时不应影响受试设备的固有特性及其所承受应力的情况。

#### 5.2 确定试验环境条件

5.2.1 试验期间采用的环境条件及其随时间变化情况应能反映受试设备现场使用和任务环境的特征,即应选用模拟现场的综合环境条件。如果条件不具备,可选择一项或几项环境条件,所选条件应慎重考虑,应选择对设备可靠性影响最大或较大的环境条件。

5.2.2 应按 GJB 899 的 4.3 条及其附录 B 确定。

5.2.3 在应力种类和应力等级确定后,应确定一个试验环境剖面。试验环境剖面是将所选的环境应力及其变化按时间轴进行安排,以利试验时对应力变化进行控制。这种安排应能反映受试设备现场使用时所遇到的工作模式、环境条件及其变化。各种应力的施加时间应按设备寿命周期内预期会遇到的在各种环境条件下任务持续时间的比例确定。

试验环境剖面一般由电、温度、振动和潮湿等应力构成。根据设备不同用途,还应考虑其它应力。附录 C 的图 C1 给出了一个试验环境剖面示例。

5.2.4 试验循环是指受试设备按照规定的工作模式施加应力,并经历完整的试验环境剖面一次。附录 C 给出了一个完整的试验循环示例。

#### 5.3 确定试验时间

试验需要的总试验时间决定于可靠性增长模型、工程经验及设备规范的可靠性要求。它是受试设备现阶段可靠性增长到要求值的最长时间,一般取要求的 MTBF 的 5~25 倍就足以达到所要求的可靠性增长。

#### 5.4 维修

除以下规定外,试验过程中的维修只限于修复性维修。预防性维修应仅限于试验大纲或设备规范特别规定的范围;操作人员对其控制机构的调准,不应认为是预防性维修。

#### 5.5 故障的处理

5.5.1 受试设备发生故障时应先记录并报告,然后将其撤出试验,撤出时应尽量不影响其它受试设备的连续试验,并不要妨碍数据的连续记录。

5.5.2 故障原因调查期间,可以先更换失效的零部件,或临时更换接插件,以便在调查故障原因期间能继续试验。

5.5.3 在查找故障过程中发现的所有故障都应纳入 FRACAS。

5.5.4 所有的纠正措施引入设备的设计环节之前,都应先验证它的有效性。

#### 5.6 试验计划曲线

试验开始前,应先选定增长模型,并根据增长模型绘制一条试验计划曲线,作为监控试验的依据。图 1 提供了一条试验计划曲线示例。绘制试验计划曲线应考虑以下原则。

5.6.1 应按以下方法确定试验计划曲线起始点:

- a. 根据以往类似设备试验信息确定起始点的纵坐标;
- b. 指定为满足规定的要求必须达到的最低可靠性水平为起始点的纵坐标;
- c. 对设计和以往某项研制试验的数据作一次工程上的估计定出起始点的纵坐标;
- d. 以受试设备已有的累积试验时间为横坐标。

应尽量利用与实际起始点有关的信息,若实际信息不足以确定起始点时,可参照以下方法确定。

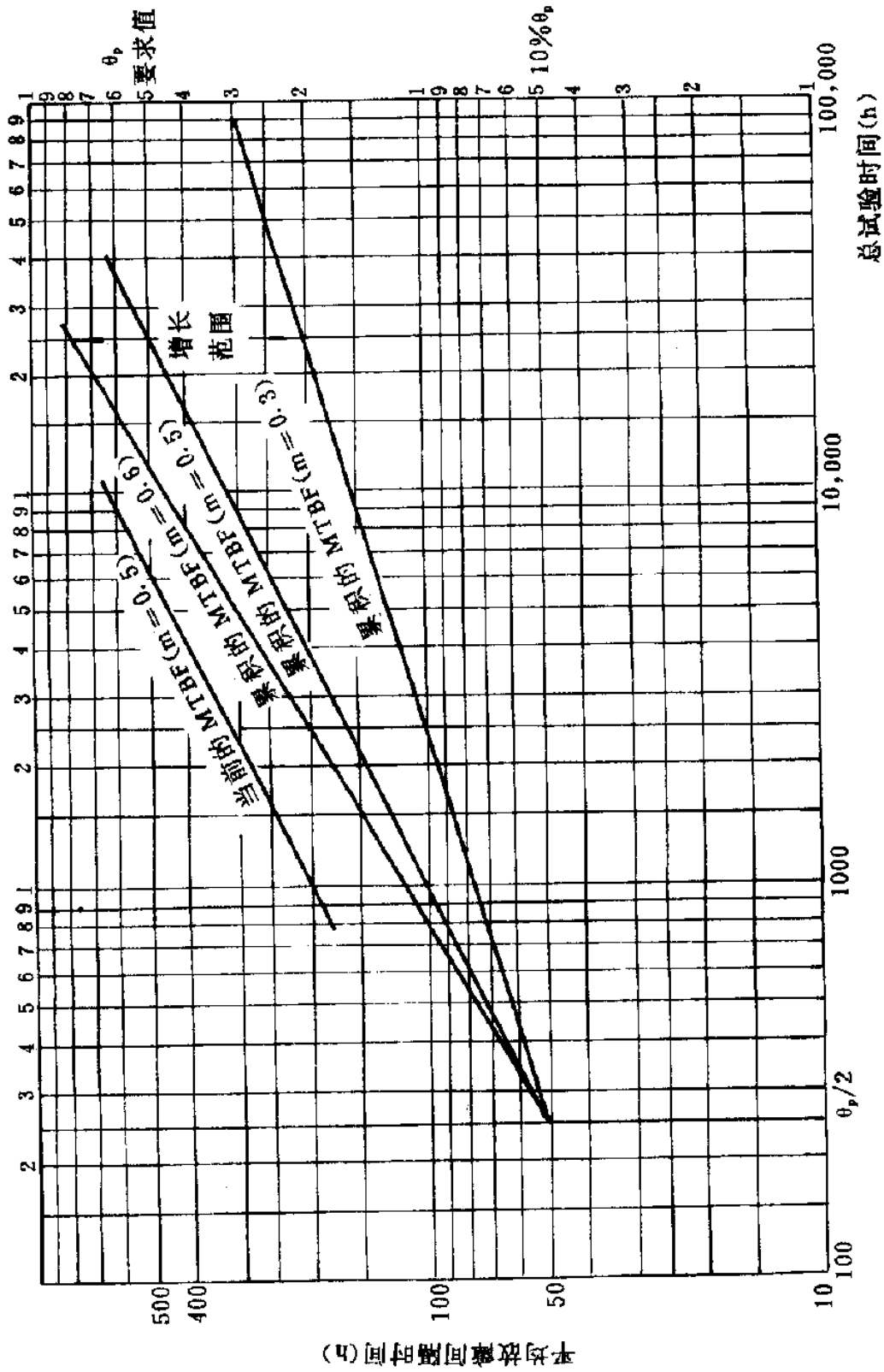
当预计的 MTBF 值不大于 200h 时,以 100h 试验时间为横坐标,以预计的 MTBF 值的 10% 为纵坐标画出起始点;当预计的 MTBF 值大于 200h 时,以预计的 MTBF 值的 50% 为横坐标,以预计的 MTBF 值的 10% 为纵坐标画出起始点。根据设备的可靠性水平和工程经验,纵坐标也可放宽到预计 MTBF 值的 20%。

5.6.2 增长率的确定应综合考虑研制计划、经费及技术水平等。特别值得注意的是增长率是指杜安模型中的  $m$ ,它与 AMSAA 模型中的  $b$  之和等于 1。

可靠性增长率  $m$  的可能范围在 0.3~0.6 之间。 $m$  在 0.1~0.3 之间,表明改正措施不太有力;而  $m$  在 0.6~0.7 之间表明在实施增长试验大纲过程中,采取了强有力的故障分析和纠正措施,是增长率的极限值。

5.6.3 绘制试验计划曲线的步骤如下:

- a. 在双对数坐标纸上,按要求的 MTBF 值画一条水平线;



注:  $m=0.5$  是选定的试验计划曲线

图 1 试验计划曲线示例

b. 从所选的起始点开始,按所选的增长率,画出试验计划曲线,以该曲线作为基准线,根据这条基准线可以在可靠性增长试验过程中评估可靠性增长;

c. 试验计划曲线与要求的 MTBF 线的交点的横坐标代表要求的总试验时间的近似值。

## 5.7 试验的监控

5.7.1 试验中应严格控制试验环境条件,应按照所确定的试验环境剖面施加环境应力,并记录实际的试验环境条件。

5.7.2 试验过程中应按规定的时间对受试设备进行测试,当发现故障时应利用 FRACAS 对其进行处理。

5.7.3 可靠性增长的监控应贯穿整个试验过程。其方法是不断地将观测的 MTBF 值和计划的增长值进行比较,以对增长率和资金进行再分配和控制。监控一般采用以下两种方法。

5.7.3.1 图分析法 只要在试验过程中不断地努力提高可靠性,就可用杜安模型,将观测的累积 MTBF 点估计值画在双对数坐标纸上,作出拟合曲线并与试验计划曲线相比较。只要实际达到的可靠性增长曲线与试验计划曲线之间呈现出下列三种特性之一时,就可认为可靠性增长试验是有效果的。

a. 所画出的观测的 MTBF 值处于试验计划曲线上或上方;

b. 最佳拟合线与试验计划曲线吻合或在试验计划曲线的上方;

c. 最佳拟合线前段低于试验计划曲线,但最佳拟合线从试验计划曲线与要求的 MTBF 水平线的交点左侧穿过要求的 MTBF 水平线。

否则,就可认为试验不可能达到计划的可靠性增长。就应制定一个改正措施方案。

应注意不要因为现在或将来的设计变更可以消除过去的故障而对该曲线进行调整。

杜安曲线的缺陷是在综合试验数据时,因前面数据多,临近试验结束的点有被埋没的趋势。平均故障率曲线则可以弥补这个缺陷。

详细方法见附录 A。

5.7.3.2 统计分析法 在试验过程中或试验结束时,可利用 AMSAA 模型对增长趋势进行统计分析,对试验中的 MTBF 进行估计。统计分析法分定时截尾和定数截尾两种情况。详细方法见附录 B。

注:杜安方法和 AMSAA 方法互为补充。杜安方法直观、简单明了,对增长趋势一目了然。一次拟合优度检验可能会拒绝 AMSAA 模型,却无法指出拒绝理由,而一条由相同数据绘成的杜安曲线却可能指出拒绝的某种原因。但 AMSAA 方法估计参数却比杜安方法好。

## 5.8 试验截尾

5.8.1 当试验进行到规定的总试验时间,利用试验数据估计的 MTBF 值已达到试验大纲要求时,可以结束试验。

5.8.2 如果试验过程中一直没有出现故障,可以假设其寿命服从指数分布而在另外某一时间结束试验。例如,试验时间达到要求的 MTBF 值的 2.3 倍时,故障数为零,则可以以 90%置信水平确信受试设备的 MTBF 已达到要求值,从而提前结束试验。

5.8.3 当试验进行到规定的总试验时间,而利用试验数据估计的 MTBF 值达不到大纲的要求时,应立即停止试验,并及时做好以下工作:

- a. 承制方应对纠正措施进行全面的分析,以确定纠正措施的有效性;
- b. 组织专家对准备采取的措施方案进行评审;
- c. 在征得订购方同意后,进行下一阶段工作。

## 附录 A

### 可靠性增长试验的图分析法 (补充件)

#### A1 内容和目的

##### A1.1 内容

本附录提供了设备可靠性增长的图分析法,即杜安(Duane)方法与平均故障率曲线图法,这两种方法是互为补充的方法。

##### A1.2 目的

使设备的可靠性增长分析迅速、简单、直观,并与统计方法互为补充,为进一步的统计分析提供信息。

#### A2 杜安方法

杜安方法是用杜安模型描述可靠性增长的一种方法,这种方法适用于不断努力提高可靠性的试验过程。其含义为设备的累积故障率与累积试验时间呈函数关系,其数学表达式为:

$$\ln(N(t)/t) = \ln a - mt \quad \text{..... (A1)}$$

为了观察上的方便,通常采用累积 MTBF 与累积试验时间的函数关系表示。其数学表达式为:

$$\ln(t/N(t)) = mt - \ln a \quad \text{..... (A2)}$$

式中: $N(t)$ —到累积试验时间  $t$  时所观察到的累积故障数;

$m$ —杜安曲线的斜率;

$a$ —在  $t=1$  时,杜安曲线纵坐标值的倒数。

#### A3 绘制杜安曲线及参数估计

##### A3.1 杜安曲线的绘制程序

应按以下步骤绘制杜安曲线:

- a. 随着试验的进展,不断记录受试设备的累积故障数  $N(t)$  与相应的累积试验时间  $t$ ;
- b. 对选定的各个  $t$  值,计算出相应的  $t/N(t)$ 。如果  $t$  太大,不能绘制在双对数坐标纸上,应对  $t$  进行变换。方法是找一个系数  $d$  ( $d$  取 10, 100, 1000, ……) 使得  $t/d=t'$  不超出双对数坐标纸。然后计算出相应的  $t'/N(t)$ ;
- c. 将各个点  $(t, t/N(t))$  或  $(t', t'/N(t))$  标绘在双对数坐标纸上;
- d. 若这样绘出的点构成一条较好的直线,则说明杜安模型对描述所观察的增长类型是较好的方法。在绘制直线时应对接近试验结束时的数据点给予充分的重视,因为这些点更能体现受试设备此时的可靠性水平。

特别指出的是,对  $t$  进行了变换后,作出的直线的数学表达式为:

$$\ln(t'/N(t)) = mt' - \ln a' \quad \text{..... (A3)}$$

##### A3.2 参数的估计

在绘制成的杜安曲线图上,按以下要求求各参数的估计值:

- a. 参数  $m$  可由直线斜率给出;
- b. 参数  $a$  可根据直线与纵轴交点的纵坐标值  $t/N(t)$  或  $t'/N(t)$  由公式 A4 给出;

$$a = \begin{cases} \left(\frac{t}{N(t)}\right)^{-1} & \text{(无变换时)} \\ \left(\frac{t^d}{N(t)}\right)^{-1} d^{m-1} & \text{(有变换时)} \end{cases} \dots\dots\dots (A4)$$

c. 当前的 MTBF 值记为  $MTBF(t)$ , 它与当前的故障率值  $\lambda(t)$  分别为:

$$MTBF(t) = \frac{t^m}{(1-m)a} \dots\dots\dots (A5)$$

$$\lambda(t) = (1-m)at^{-m} \dots\dots\dots (A6)$$

d. 如果杜安模型是适用的, 且所做的努力程度保持不变, 也可以用公式 A5 和公式 A6 对未来的 MTBF 和故障率进行预测。

#### A4 平均故障率曲线

平均故障率曲线是将选择的每一时间区间上的平均故障率在相应的区间内绘成一条水平线。

#### A5 平均故障率曲线的绘制程序

为了能直观地反应可靠性增长的趋势, 可按下列步骤绘制平均故障率曲线:

a. 在绘制杜安曲线的基础上, 将试验结果分成若干个区间, 区间的选择是任意的, 但它们应小到能够反映出故障率的趋势, 而区间内的故障数目应多到能足以使曲线平滑, 每个区间的故障数一般不少于 3 个。按下式计算各区间上的平均故障率。

$$\bar{\lambda}_i = \frac{N_i}{T_i} \dots\dots\dots (A7)$$

式中:  $\bar{\lambda}_i$ —第  $i$  个区间上的平均故障率;

$N_i$ —第  $i$  个区间上的故障数;

$T_i$ —第  $i$  个区间的长度。

b. 在相应的区间内, 把平均故障率绘成一条水平线。

#### A6 示例

对一个系统做试验, 累积试验时间达到 1000h 停止试验, 在选定的各试验阶段中, 累积故障数及相应的  $t/N(t)$  值见表 A1

表 A1

t(h)	N(t)	t/N(t)
100	3	33.3
200	6	33.3
500	13	38.5
800	18	44.4
1000	22	45.4

由于累积试验时间太大, 做如下变换。取  $d=100$ , 则表 A1 变为表 A2。

表 A2

$t'$	$t'/N(t)$
1.00	0.333
2.00	0.333
5.00	0.385
8.00	0.444
10.00	0.454

将表 A2 中的点( $t', t'/N(t)$ )绘制在双对数坐标纸上,并做出杜安曲线,见图 A1。  
从图 A1 测量可得

$$\hat{m} = \frac{9.8mm}{62.5mm} = 0.157$$

由公式 A4 得

$$\hat{a} = (1/0.310) \times 100^{0.157-1} = 0.0665$$

由公式 A5 与公式 A6 得

$$M\hat{T}BF(1000) = \frac{1000^{0.157}}{(1 - 0.157) \times 0.0665} = 52.8h$$

$$\hat{\lambda}(1000) = (1 - 0.157) \times 0.0665 \times 1000^{-0.157} = 0.019 \text{ 次故障/h}$$

若杜安模型是适用的,且所做的努力程度保持不变时,由公式 A5 得: $t=2000h$  的预测 MTBF 可估算为

$$M\hat{T}BF(2000) = \frac{2000^{0.157}}{(1 - 0.157) \times 0.0665} = 58.9h$$

将上面的试验结果分成 5 个区间,并计算出每个区间的平均故障率,见表 A3。

表 A3

区间	故障数 N	$T_i(h)$	$\bar{\lambda}_i(\text{故障数/h})$
0~100	3	100	0.0300
100~200	3	100	0.0300
200~500	7	300	0.0233
500~800	5	300	0.0167
800~1000	4	200	0.0200

平均故障率曲线见图 A2。

从示例中可以看出,杜安方法能很好的描述所观察的增长类型,而平均故障率曲线法则更清楚地反映出可靠性增长的趋势。

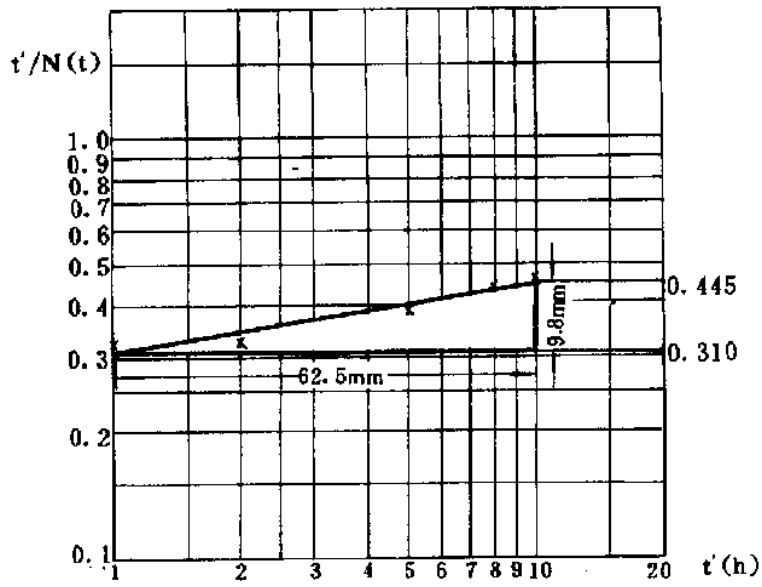


图 A1 杜安曲线图

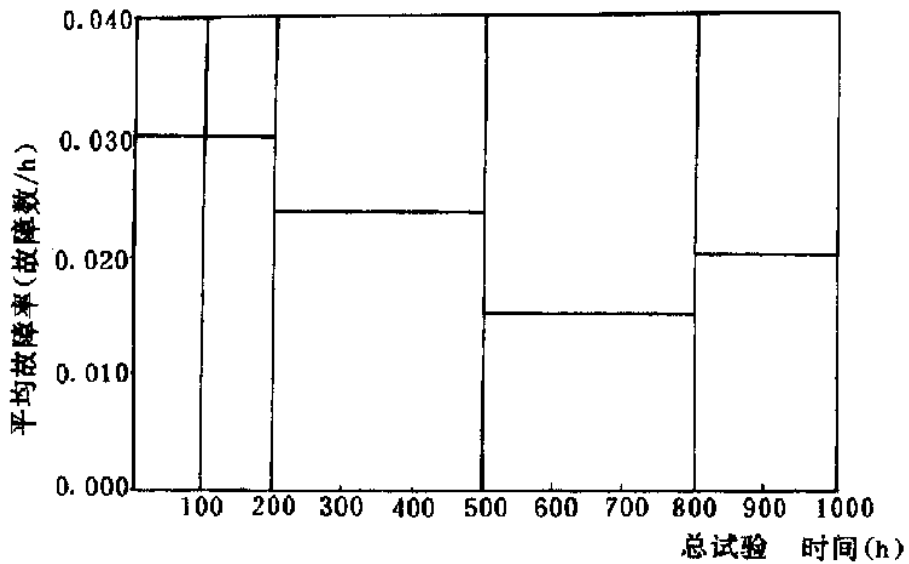


图 A2 平均故障率曲线图

**附录 B**  
**可靠性增长试验的统计分析法**  
(补充件)

**B1 内容和目的****B1.1 内容**

本附录提供了用 AMSAA 方法对可靠性增长进行统计分析的方法和程序。

**B1.2 目的**

通过增长分析得出设备可靠性增长形状参数  $b$  的估计值,以便及时掌握设备当前的可靠性水平和预测将来的可靠性,控制设备可靠性增长的速率。

**B2 AMSAA 方法**

AMSAA 模型是杜安模型的改进型。其数学表达式为:

$$E[N(t)] = at^b \dots\dots\dots (B1)$$

式中:  $N(t)$  — 到累积试验时间  $t$  时观察到的累积故障数;

$a$  — 尺度参数;

$b$  — 增长形状参数;

$t$  — 试验的持续时间;

$E[N(t)]$  —  $N(t)$  的数学期望。

**B3 可靠性增长分析****B3.1 试验趋势分析**

将观察到的累积试验时间  $t_i$  从小到大依次排列,并利用公式 B2 计算  $\mu$  值。

$$\mu = \left( \frac{\sum_{i=1}^M t_i}{MT} - \frac{1}{2} \right) \sqrt{12M} \dots\dots\dots (B2)$$

式中:  $\mu$  — 试验趋势检验统计量;

$N$  — 观察到的故障总数;

$M = \begin{cases} N & \text{定时截尾} \\ N-1 & \text{定数截尾。} \end{cases}$

$t_i$  — 第  $i$  次故障发生时的累积试验时间;

$t_0$  — 定时截尾试验的总累积时间;

$T = \begin{cases} t_0 & \text{定时截尾} \\ t_N & \text{定数截尾。} \end{cases}$

然后,根据给定的显著性水平  $\alpha$ ,从表 B1 中查得  $\mu_0$  值。当:

$\mu \leq -\mu_0$  时,以显著性水平  $\alpha$  表明有明显的可靠性增长趋势;

$\mu \geq \mu_0$  时,以显著性水平  $\alpha$  表明有明显的可靠性降低趋势;

$-\mu_0 < \mu < \mu_0$  时,以显著性水平  $\alpha$  表明没有明显的可靠性变化趋势。

表 B1

显著性水平 $\alpha$	趋势统计量的临界值 $\mu_0$
0.01	2.576
0.02	2.326
0.05	1.960
0.10	1.645
0.20	1.282

### B3.2 增长形状参数 $b$ 和尺度参数 $a$ 的估计

$$\hat{b} = \frac{N}{M \ln T - \sum_{i=1}^M \ln t_i} \quad \text{..... (B3)}$$

$$\bar{b} = \frac{M-1}{N} \hat{b} \quad \text{..... (B4)}$$

$$\hat{a} = N/T^{\hat{b}} \quad \text{..... (B5)}$$

$$\bar{a} = N/T^{\bar{b}} \quad \text{..... (B6)}$$

### B3.3 拟合优度检验

利用排序的试验数据  $t_1 < t_2 < \dots < t_N$ , 按下面公式计算  $C_M^2$  值。

$$C_M^2 = \frac{1}{12M} + \sum_{i=1}^M \left[ \left( \frac{t_i}{T} \right)^i - \frac{2i-1}{2M} \right]^2 \quad \text{..... (B7)}$$

式中:  $C_M^2$  — 拟合优度检验统计量;

$\bar{b}$  — 参数  $b$  的估计值, 见公式 B4。

根据选定的拟合优度检验的显著性水平  $\alpha$ , 并从表 B2 查出与  $M$  及  $\alpha$  相应的检验统计量的临界值  $C_M^2_{\alpha}$ , 如果  $C_M^2 \leq C_M^2_{\alpha}$ , 不能拒绝 AMSAA 模型。反之, 则拒绝 AMSAA 模型。

### B3.4 MTBF 的估计

若确定模型是可以用的, 那么模型中的参数  $a$  和  $b$  的极大似然估计 ( $\hat{a}, \hat{b}$ ) 或估计 ( $\bar{a}, \bar{b}$ ) 可以用来估计当前的故障率  $\lambda(T)$  和当前的 MTBF 值。

当观察到的总故障数  $N \leq 20$  时, 用  $a$  和  $b$  的估计值 ( $\bar{a}, \bar{b}$ ) 来估计当前的故障率  $\lambda(T)$  和当前的 MTBF; 当  $N > 20$  时, 用  $a$  和  $b$  的估计值 ( $\hat{a}, \hat{b}$ ) 来估计当前的故障率  $\lambda(T)$  和当前的 MTBF。

当前的故障率  $\lambda(T)$  的估计为:

$$\overline{\lambda(T)} = \bar{a} \bar{b} T^{\bar{b}-1} \quad \text{..... (B8)}$$

$$\lambda(\hat{T}) = \hat{a} \hat{b} T^{\hat{b}-1} \quad \text{..... (B9)}$$

当前的 MTBF 的估计为:

$$M\hat{TBF} = (\hat{a} \hat{b} T^{\hat{b}-1})^{-1} \quad \text{..... (B10)}$$

$$\overline{MTBF} = (\bar{a} \bar{b} T^{\bar{b}-1})^{-1} \quad \text{..... (B11)}$$

当需要计算 MTBF 的置信区间时, 可以从表 B3 或表 B4 中查得故障数为  $N$  及置信水平为  $\gamma$  的置信上限系数  $K_U(N, \gamma)$  和置信下限系数  $K_L(N, \gamma)$ 。

MTBF 的置信下限值为:

$$MTBF_L = \hat{MTBF} \cdot K_L(N, \gamma) \dots\dots\dots (B12)$$

MTBF 的置信上限值为:

$$MTBF_U = \hat{MTBF} \cdot K_U(N, \gamma) \dots\dots\dots (B13)$$

#### B4 示例

某一系统试验中发生了 22 次故障,依次发生的时刻为:10,30,60,101,128,150,202,230,270,301,330,380,430,502,540,610,660,740,801,830,870,920h,定时截尾时间为  $t_0 = 1000h$ 。

##### a. 趋势检验

由公式 B2 可得:

$$\mu = -1.4069$$

取显著性水平  $\alpha = 0.20$ ,查表 B1 得  $\mu_0 = 1.282$

由于  $\mu < -\mu_0$ ,

故以显著性水平 0.20 表明可靠性有明显的增长趋势。

##### b. 增长形状参数 b 和尺度参数 a 的估计

由公式 B3 和公式 B4 得:

$$\hat{b} = 0.7634$$

$$\bar{b} = 0.7287$$

由公式 B5 和公式 B6 得:

$$\hat{a} = 0.1128$$

$$\bar{a} = 0.1433$$

##### c. 拟合优度检验

由公式 B7 得:

$$C_{22}^2 = 0.0116$$

取显著性水平  $\alpha = 0.10$ ,查表 B2 得  $C_{22,0.10}^2 = 0.172$

故

$$C_{22}^2 < C_{22,0.10}^2$$

这表明拟合优度检验以显著性水平 0.10 不拒绝 AMSAA 模型。

##### d. MTBF 估计

由公式 B10 得:

$$\hat{MTBF} = 59.53h$$

取置信水平  $\gamma = 0.90$ ,查表 B3 得:

$$K_L(22, 0.90) = 0.606$$

$$K_U(22, 0.90) = 1.796$$

所以

MTBF 的置信下限为:

$$MTBF_L = 36.08h$$

MTBF 的置信上限为:

$$MTBF_0 = 106.92h$$

表 B2 拟合优度检验统计量  $C_M^2$  的临界值  $C_{M,\alpha}^2$

M	$\alpha$				
	0.20	0.15	0.10	0.05	0.01
2	0.138	0.149	0.162	0.175	0.186
3	0.121	0.135	0.154	0.184	0.231
4	0.121	0.136	0.155	0.191	0.279
5	0.121	0.137	0.160	0.199	0.295
6	0.123	0.139	0.162	0.204	0.307
7	0.124	0.140	0.165	0.208	0.316
8	0.124	0.141	0.165	0.210	0.319
9	0.125	0.142	0.167	0.212	0.323
10	0.125	0.142	0.167	0.212	0.324
15	0.126	0.144	0.169	0.215	0.327
20	0.128	0.146	0.172	0.217	0.333
30	0.128	0.146	0.172	0.218	0.333
60	0.128	0.147	0.173	0.221	0.333
100	0.129	0.147	0.173	0.221	0.336

表 B3 定时截尾 MTBF 置信区间系数表

N	γ							
	0.80		0.90		0.95		0.98	
	K <sub>L</sub>	K <sub>U</sub>	K <sub>L</sub>	K <sub>U</sub>	K <sub>L</sub>	K <sub>U</sub>	K <sub>L</sub>	K <sub>U</sub>
2	0.261	18.66	0.200	38.66	0.159	78.66	0.124	198.7
3	0.333	6.326	0.263	9.736	0.217	14.55	0.174	24.10
4	0.385	4.243	0.312	5.947	0.262	8.093	0.215	11.81
5	0.426	3.386	0.352	4.517	0.300	5.862	0.250	8.043
6	0.459	2.915	0.385	3.764	0.331	4.738	0.280	6.254
7	0.487	2.616	0.412	3.298	0.358	4.061	0.305	5.216
8	0.511	2.407	0.436	2.981	0.382	3.609	0.328	4.539
9	0.531	2.254	0.457	2.750	0.403	3.285	0.349	4.064
10	0.549	2.136	0.476	2.575	0.421	3.042	0.367	3.712
11	0.565	2.041	0.492	2.436	0.438	2.852	0.384	3.441
12	0.579	1.965	0.507	2.324	0.453	2.699	0.399	3.226
13	0.592	1.901	0.521	2.232	0.467	2.574	0.413	3.050
14	0.604	1.846	0.533	2.153	0.480	2.469	0.426	2.904
15	0.614	1.800	0.545	2.087	0.492	2.379	0.438	2.781
16	0.624	1.759	0.556	2.029	0.503	2.302	0.449	2.675
17	0.633	1.723	0.565	1.978	0.513	2.235	0.460	2.584
18	0.642	1.692	0.575	1.933	0.523	2.176	0.470	2.503
19	0.650	1.663	0.583	1.893	0.532	2.123	0.479	2.432
20	0.657	1.638	0.591	1.858	0.540	2.076	0.488	2.369
21	0.664	1.615	0.599	1.825	0.548	2.034	0.496	2.313
22	0.670	1.594	0.606	1.796	0.556	1.996	0.504	2.261
23	0.676	1.574	0.613	1.769	0.563	1.961	0.511	2.215
24	0.682	1.557	0.619	1.745	0.570	1.929	0.518	2.173
25	0.687	1.540	0.625	1.722	0.576	1.900	0.525	2.134
26	0.692	1.525	0.631	1.701	0.582	1.873	0.531	2.098
27	0.697	1.511	0.636	1.682	0.588	1.848	0.537	2.068
28	0.702	1.498	0.641	1.664	0.594	1.825	0.543	2.035
29	0.706	1.486	0.646	1.647	0.599	1.803	0.549	2.006
30	0.711	1.475	0.651	1.631	0.604	1.783	0.554	1.980
35	0.729	1.427	0.672	1.565	0.627	1.699	0.579	1.870
40	0.745	1.390	0.690	1.515	0.646	1.635	0.599	1.788
45	0.758	1.361	0.705	1.476	0.662	1.585	0.617	1.723
50	0.769	1.337	0.718	1.443	0.676	1.544	0.632	1.671
60	0.787	1.300	0.739	1.393	0.700	1.481	0.657	1.591
70	0.801	1.272	0.756	1.356	0.718	1.435	0.678	1.533
80	0.813	1.251	0.769	1.328	0.734	1.399	0.695	1.488
100	0.831	1.219	0.791	1.286	0.758	1.347	0.722	1.423

表 B4 定数截尾 MTBF 置信区间系数表

N	Y							
	0.80		0.90		0.95		0.98	
	$K_L$	$K_U$	$K_L$	$K_U$	$K_L$	$K_U$	$K_L$	$K_U$
2	0.8065	33.76	0.5552	72.67	0.4099	151.5	0.2944	389.9
3	0.6840	8.927	0.5137	14.24	0.4054	21.96	0.3119	37.60
4	0.6601	5.328	0.5174	7.651	0.4225	10.65	0.3368	15.96
5	0.6568	4.000	0.5290	5.424	0.4415	7.147	0.3603	9.995
6	0.6600	3.321	0.5421	4.339	0.4595	5.521	0.3815	7.388
7	0.6656	2.910	0.5548	3.702	0.4760	4.595	0.4003	5.963
8	0.6720	2.634	0.5668	3.284	0.4910	4.002	0.4173	5.074
9	0.6787	2.436	0.5780	2.989	0.5046	3.589	0.4327	4.469
10	0.6852	2.287	0.5883	2.770	0.5171	3.286	0.4467	4.032
11	0.6915	2.170	0.5979	2.600	0.5285	3.054	0.4595	3.702
12	0.6975	2.076	0.6067	2.464	0.5391	2.870	0.4712	3.443
13	0.7033	1.998	0.6150	2.353	0.5488	2.721	0.4821	3.235
14	0.7087	1.933	0.6227	2.260	0.5579	2.597	0.4923	3.064
15	0.7139	1.877	0.6299	2.182	0.5664	2.493	0.5017	2.921
16	0.7188	1.829	0.6367	2.114	0.5743	2.404	0.5106	2.800
17	0.7234	1.788	0.6431	2.056	0.5818	2.327	0.5189	2.695
18	0.7278	1.751	0.6491	2.004	0.5888	2.259	0.5267	2.604
19	0.7320	1.718	0.6547	1.959	0.5954	2.200	0.5341	2.524
20	0.7360	1.688	0.6601	1.918	0.6016	2.147	0.5411	2.453
21	0.7398	1.662	0.6652	1.881	0.6076	2.099	0.5478	2.390
22	0.7434	1.638	0.6701	1.848	0.6132	2.056	0.5541	2.333
23	0.7469	1.616	0.6747	1.818	0.6186	2.017	0.5601	2.281
24	0.7502	1.596	0.6791	1.790	0.6237	1.982	0.5659	2.235
25	0.7534	1.578	0.6833	1.765	0.6286	1.949	0.5714	2.192
26	0.7565	1.561	0.6873	1.742	0.6333	1.919	0.5766	2.153
27	0.7594	1.545	0.6912	1.720	0.6378	1.892	0.5817	2.116
28	0.7622	1.530	0.6949	1.700	0.6421	1.866	0.5865	2.083
29	0.7649	1.516	0.6985	1.682	0.6462	1.842	0.5912	2.052
30	0.7676	1.504	0.7019	1.664	0.6502	1.820	0.5957	2.023
35	0.7794	1.450	0.7173	1.592	0.6681	1.729	0.6158	1.905
40	0.7894	1.410	0.7303	1.538	0.6832	1.660	0.6328	1.816
45	0.7981	1.378	0.7415	1.495	0.6962	1.606	0.6476	1.747
50	0.8057	1.352	0.7513	1.460	0.7076	1.562	0.6605	1.692
60	0.8184	1.312	0.7678	1.407	0.7267	1.496	0.6823	1.607
70	0.8288	1.282	0.7811	1.367	0.7423	1.447	0.7000	1.546
80	0.8375	1.259	0.7922	1.337	0.7553	1.409	0.7148	1.499
100	0.8514	1.225	0.8100	1.293	0.7759	1.355	0.7384	1.431

**附录 C**  
**试验环境剖面 and 试验循环示例**  
(参考件)

**C1 内容和目的****C1.1 内容**

本附录给出了一个试验环境剖面 and 试验循环应用示例。

**C1.2 目的**

为使用试验环境剖面 and 试验循环提供参考。

**C2 试验环境剖面示例**

综合环境可靠性试验环境剖面图示例见图 C1。该示例是根据机载设备执行高一低一低一高任务剖面用 GJB 899 中规定的方法和程序制定的。

**C3 试验环境剖面与试验循环实施**

图 C1 的试验环境剖面与试验循环示例中, A、B、C、D 四项代表试验环境剖面中一个循环内各应力施加的时间、大小及变化速率。E 项代表电应力偏移从上限—标称—下限—上限……在各循环间转换方式。

**C3.1 试验设备的一般要求**

如图 C1 示例所表明的试验环境剖面在实施时要求试验设备具备电应力、温度应力、潮湿应力与振动应力同时施加的能力, 并具备对应力施加的时间、大小、变化速率等记忆与程序控制的功能。试验箱中受试设备在通电时应能进行实时监控与测试。

**C3.2 温度应力的施加**

按图 C1 中 C 项规定的时间顺序, 将施加的温度应力的温度值及其变化率送入温度程序控制装置并记忆。图 C1 中所有温度变化速率如图 C1 中的 b, d, f, h, j, l, n, p 各段均不小于  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

**C3.3 振动应力的施加**

按图 C1 中 D 项规定的时间顺序, 将施加的振动应力的功率谱密度、频率范围、容差大小送入振动应力程序控制装置并记忆。图 C1 示例中的振动为随机振动。其振动频谱根据受试设备的任务剖面。按照 GJB 899 制定, 其中功率谱密度小于  $1 \times 10^{-3} \text{g}^2/\text{Hz}$  的所有阶段均采用  $1 \times 10^{-3} \text{g}^2/\text{Hz}$ , 其持续时间大致应为出现此应力的任务阶段的持续时间。

**C3.4 潮湿应力的施加**

在一个循环的高温断电阶段开始如图 C1 中的  $t_8$  到  $t_{10}$  时间内给试验箱注湿。此后保持试验箱内露点温度大于或等于  $31^{\circ}\text{C}$ 。

**C3.5 通断电**

在每个循环内的低温、高温阶段各有一个断电阶段。如图 C1 中  $0 \sim t_0$ ,  $t_8 \sim t_9$  的时间段。它代表受试设备在所装备的环境中存放, 如飞机停放在地面。也可称冷浸、热浸阶段。在冷浸、热浸结束时启动受试设备两次, 并保证受试设备具备规定的功能。

**D3.6 电应力的施加**

在第一循环通电阶段电应力设置在上限值, 第二循环设置在标称值, 第三循环设置在下限

值,第四循环再设置到上限值依次如图 C1 中 E 项所示。由于试验时间较长,此过程一般也用时间程序控制器控制供电装置自动执行。

### C3.7 试验过程监测

可用统一的时钟和程序控制装置启动 C3.2 节到 C3.6 节的各项应力的程序控制器进入试验循环。

在试验中受试产品应处于实时监督状态。在每一循环的高、低温通电阶段应按设备规范的要求检查、测试受试设备的功能和性能。

试验中试验装置所施加的各项应力也应实时监督、受控并有记录以保证各次试验循环都按试验环境剖面正确无误地执行。

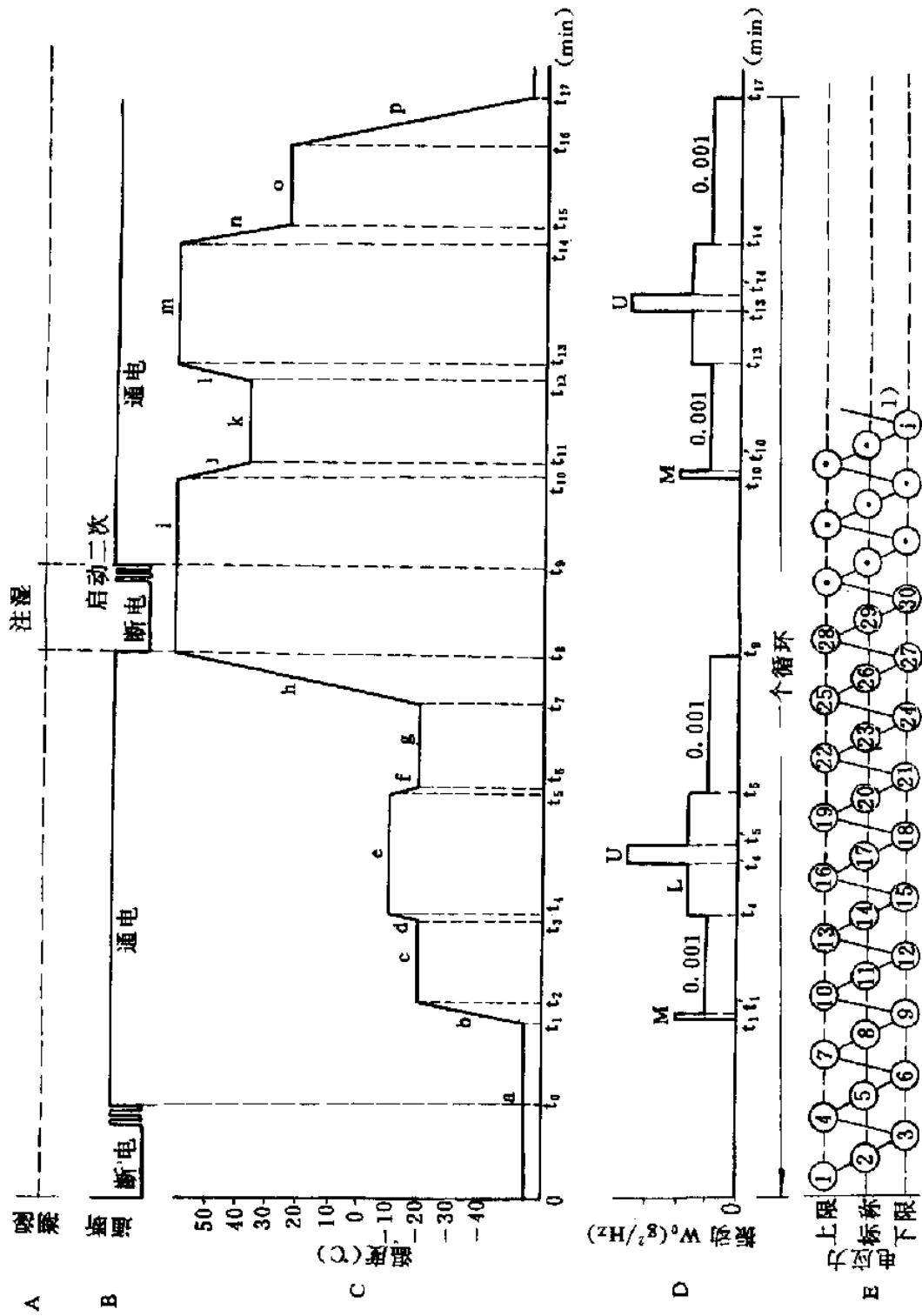


图 C1 试验环境剖面 and 试验循环示例

**附加说明：**

本标准由国防科学技术工业委员会综合计划部提出。

本标准由航空航天工业部七零八所主办。

本标准由航空航天工业部 12 所主编；海军装备技术部、二炮四所、机电部电子标准化所、兵器标准化所、中船总公司 603 所、航空航天工业部 708 所、301 所、702 所和 11 所等单位参加了起草。