



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1024—2006

测量仪器可靠性分析

Reliability Analysis for Measuring Instruments

2006-09-06 发布

2007-03-06 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

测量仪器可靠性分析

Reliability Analysis for

Measuring Instruments

JJF 1024—2006
代替 JJF 1024—1991

本规范经国家质量监督检验检疫总局 2006 年 9 月 6 日批准，并自 2007 年 3 月 6 日起施行。

归口单位：全国法制计量管理计量技术委员会

起草单位：信息产业部电子第五研究所

江西省计量测试研究院

中国计量科学研究院

江苏工业学院图书馆
藏书章

本规范由全国法制计量管理计量技术委员会负责解释

本规范起草人：

- 谢少锋 （信息产业部电子第五研究所）
虞惠霞 （江西省计量测试研究院）
陈大舟 （中国计量科学研究院）
张增照 （信息产业部电子第五研究所）
古文刚 （信息产业部电子第五研究所）
施昌彦 （全国法制计量管理计量技术委员会）

目 录

1 范围	(1)
2 引用文献	(1)
3 术语	(1)
4 可靠性分析程序和方法	(2)
4.1 可靠性指标的分析 and 确定	(2)
4.2 建立可靠性模型	(3)
4.3 可靠性指标的分配	(5)
4.4 可靠性预计	(7)
4.5 故障模式与影响分析	(10)
4.6 故障树分析	(10)
4.7 容差和漂移分析	(11)
5 可靠性评估	(11)
5.1 寿命试验	(12)
5.2 环境试验	(14)
5.3 检修期分析	(15)
6 可靠性工作项目应用时机	(15)
附录 A 测量仪器可靠性寿命评价试验	(16)
附录 B 全电子式电能表型式评价可靠性试验	(21)
附录 C 参考标准	(25)

测量仪器可靠性分析

1 范围

本规范规定了测量仪器可靠性分析的基本原则、要求和方法,为测量仪器的可靠性描述、建模、预计、指标分配及指标系列划分、故障模式与影响分析、故障树分析、试验验证、故障判定等提供指导。适用于测量仪器在设计、研制、试验、生产、验收、使用阶段以及型式评价中的可靠性分析。

2 引用文献

- GB/T 2423 系列标准 电工电子产品基本环境试验规程
- GB/T 3187—1994 可靠性、维修性术语
- GB/T 5080.4—1985 设备可靠性试验 可靠性测定试验的点估计和区间估计方法(指数分布)
- GB/T 5080.6—1996 设备可靠性试验 恒定失效率假设的有效性检验
- GB/T 5080.7—1986 设备可靠性试验 恒定失效率假设下的失效率与平均无故障时间的验证试验方案
- GB/T 7289—1987 可靠性、维修性与有效性预计报告编写指南
- GB/T 7826—1987 系统可靠性分析技术 失效模式和效应分析(FMEA)程序
- GB/T 7829—1987 故障树分析程序
- GJB/Z 89—1997 电路容差分析指南
- GJB/Z 108A—1998 电子设备非工作状态可靠性预计手册
- GJB/Z 299B—1998 电子设备可靠性预计手册
- JJF 1015—2002 计量器具型式评价和型式批准通用规范
- JB/T 6214—1992 仪器仪表可靠性验证及测定试验(指数分布)导则
- JB/T 50070—2002 电能表可靠性要求及考核方法
- 使用本规范时,应注意使用上述引用文献的现行有效版本。

3 术语

3.1 可靠性 reliability [performance]

测量仪器在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。

注:规定时间是广义的,根据测量仪器的不同可为小时、年、里程、次数等。

3.2 基本可靠性 basic reliability

测量仪器在规定条件下无故障的持续时间或概率。

3.3 任务可靠性 mission reliability

测量仪器在规定的任务剖面内完成规定功能的能力。

注:任务剖面是指测量仪器在完成规定任务的时间内所经历的事件和环境的时序描述。

3.4 可靠度 reliability

测量仪器在规定条件下和规定时间内完成规定功能的概率，一般记为 R 。它是时间的函数，故也记为 $R(t)$ ，称为可靠度函数。

$$R(t) = p(\theta > t)$$

式中， t 为规定时间，当 $t=0$ 时， $R(0)=1$ ；当 $t=\infty$ 时， $R(\infty)=0$ 。

3.5 失效 fault

测量仪器丧失规定的功能，表现为其不确定度超过允许值或功能失常（对可修复测量仪器，也称故障）。

3.6 寿命 T life

测量仪器的持续使用期，测量仪器的寿命是一个随机变量。

3.7 平均故障间隔时间 mean time between failures (MTBF)

对可修复的测量仪器，平均故障间隔时间是指两次故障间隔时间的平均值。有时也称平均无故障工作时间。

3.8 平均失效前时间 mean time to failure (MTTF)

对不可修复的测量仪器，平均失效前时间是指从开始投入工作至失效前时间的平均值。有时也称平均失效时间。

3.9 平均寿命 θ mean life

在可靠性分析评估与可靠性试验中，常用 θ 来表示平均寿命，此时视测量仪器特点不同可代表 MTBF 或 MTTF。

3.10 失效分布函数 $F(t)$ failure distribution function

测量仪器在规定的条件下，其出现失效的概率随时间变化的函数，记作 $F(t)$ 。

$$F(t) = p(\theta \leq t)$$

式中， t 为规定时间，当 $t=0$ 时， $F(0)=0$ ；当 $t=\infty$ 时， $F(\infty)=1$ 。

3.11 瞬时失效率函数 $\lambda(t)$ failure rate function

工作到某时刻 t 尚未发生失效的测量仪器，在该时刻后单位时间内发生失效的概率。简称失效率。

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)\Delta t} = \frac{dF(t)}{dt} \frac{1}{R(t)}$$

注：当测量仪器的寿命分布规律服从指数分布时，可以得到：

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

$$\lambda(t) = \lambda(\text{常数})$$

$$\theta = \frac{1}{\lambda}$$

式中， $f(t)$ 为失效分布密度。

4 可靠性分析程序和方法

4.1 可靠性指标的分析 and 确定

测量仪器的可靠性指标通常规定为 MTBF（或 MTTF）和 $R(t)$ 。在测量仪器方案

论证阶段,可根据用户要求和测量仪器的特点,选择其一或两者作为可靠性指标并确定其高低。

4.2 建立可靠性模型

为了对测量仪器的可靠性做出定量的分配、预计、评价,以及对可靠性设计进行分析,应建立可靠性模型。

可靠性模型应在测量仪器设计阶段建立,并在测量仪器设计、技术指标、环境要求、实验数据、工作模式发生变更时及时修改。

4.2.1 一般描述

测量仪器的可靠性模型包括可靠性框图和与之对应的数学模型。

可靠性框图是仪器组成各单元从任务可靠性角度出发,表现其逻辑关系的方框图,即表示仪器在成功完成任务时所有单元之间的相互依赖关系。可靠性框图可用对应的数学模型加以描述。

4.2.2 建立可靠性框图的原则

4.2.2.1 可靠性框图中每个方框都是能完成某一功能的功能模块,根据仪器本身的复杂程度,功能模块可以是一台仪器、一个单元电路、一个部件、一个元器件或一个零件;

4.2.2.2 除特殊情况外,可靠性框图中每个方框发生的故障是独立的,即任一方框发生的故障与其他方框是否出现故障无关;

4.2.2.3 可靠性框图描述的是各单元之间的逻辑关系,不是工作原理图或测量流程图,在图中应表明工作环境的严酷度以及各单元的工作时间(任务时间)。

4.2.3 测量仪器的可靠性数学模型

测量仪器的可靠性模型主要有串联模型、并联模型及混联模型。

4.2.3.1 串联模型是指组成仪器的所有单元中任一单元发生故障都会导致整个仪器故障的模型,串联系统的可靠性框图就是下属几个单元的串联图(如图1)。



图1 串联模型的可靠性框图

设测量仪器下属单元的可靠度分别为 $r_1, r_2, \dots, r_n$, 串联系统的可靠度为 R_s , 则测量仪器的可靠度等于各单元的可靠度的乘积, 即:

$$R_s = r_1 r_2 \cdots r_n = \prod_{i=1}^n r_i \quad (1)$$

若各单元失效服从指数分布, 则无冗余或替代工作模式的测量仪器失效也服从指数分布。此时, 测量仪器的失效率等于各单元的失效率之和, 即:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (2)$$

由公式(1)、(2)可知, 减少单元数目、降低单元失效率即可提高测量仪器的可靠度。

若各 λ_i 相同, 则 $MTBF = MTBF_1/n$

4.2.3.2 并联模型是指组成测量仪器的所有单元（或通道）同时工作，只要有一个单元（或通道）不出现故障，仪器就不出现故障，并联系统的可靠性框图为 n 个组件的并联图（如图 2）。

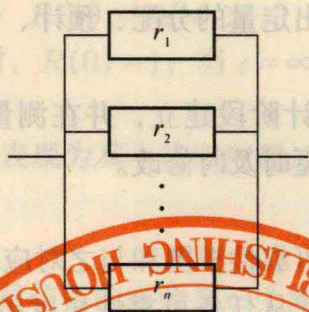


图 2 并联模型的可靠性框图

设测量仪器下属组件的可靠度分别为 $r_1, r_2, \dots, r_n$ ，并联系统的可靠度为 R_s ，则并联模型的可靠度

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - r_i) \quad (3)$$

对于指数分布，若各并联单元相同即 λ_i 相同，则

$$\text{MTBF} = \text{MTBF}_1 \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n}\right) \quad (4)$$

4.2.3.3 混联系统是把若干个串联系统和并联结构组合在一起，测量仪器最简单的混联系统如图 3 所示。

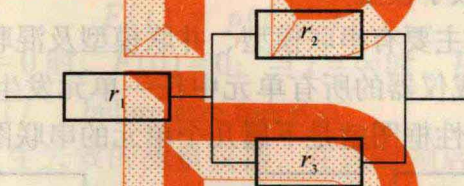


图 3 混联系统的可靠性框图

设下属单元的可靠度分别为 r_1, r_2, r_3 ，混联系统的可靠度为 R_s ，则测量仪器的可靠度

$$R_s = r_1 [1 - (1 - r_2)(1 - r_3)] \quad (5)$$

4.2.4 可靠性建模要求

4.2.4.1 按研制总要求或合同规定，分别建立基本可靠性模型和任务可靠性模型。前者用以预计和分配基本可靠性要求，即估计测量仪器组成单元故障引起的维修人力与保障费用；后者用以预计和分配任务可靠性要求，即估计测量仪器在执行任务过程中完成规定功能的能力。

4.2.4.2 适时建立并不断完善可靠性模型。在方案论证阶段，建立测量仪器较粗略的可靠性模型，随着工作的进展，不断修改、完善、细化，进而准确地分配、预计和评价可靠性。

4.2.4.3 建模时应正确区分可靠性框图和工作原理图。前者表示仪器中各组成单元之间的故障逻辑关系，后者表示各单元之间的物理关系。

4.3 可靠性指标的分配

可靠性指标的分配是指将可靠性指标或预计所能达到的指标加以分解，科学合理地分配到规定的仪器单元。可靠性指标的分配应根据可靠性框图进行分配，即每一个方框均应有相应的可靠性指标，使仪器的可靠性指标得以保证。

4.3.1 比例分配法

符合下列条件之一者，可应用比例分配法来进行可靠性指标分配：

——测量仪器的结构比较简单、成熟，各功能块已作过可靠性预计，或有这方面的经验数据；

——有经长期使用的相似仪器，具有一定的历史现场失效率记录，或有这方面的实例；

——设备主要部分由外购件构成，且这些外购件有较完整的可靠性资料。

当原仪器的系统可靠性指标已知，且各分系统的失效率已知时，其分配公式为：

$$\lambda_{i\text{新}} = \lambda_{s\text{新}} \times K_i \quad (6)$$

式中： $\lambda_{i\text{新}}$ ——分配给第 i 个新的分系统的失效率；

$\lambda_{s\text{新}}$ ——规定的新系统的失效率；

K_i ——原系统中第 i 个分系统失效率与原系统的失效率之比。

例：在原仪器的基础上进行小型化设计的某测量仪器，已知原仪器的可靠性指标为 MTBF = 40h，要求新测量仪器的可靠性指标为 MTBF = 100h。显然

$$\lambda_{i\text{原}} = \frac{1}{40\text{h}} = 25 \times 10^{-3}/\text{h}$$

$$\lambda_{i\text{新}} = \frac{1}{100\text{h}} = 1 \times 10^{-2}/\text{h}$$

原仪器的 6 个分系统的失效率指标如表 1 所示。以分系统 1 为例

$$K_1 = \frac{2 \times 10^{-3}}{25 \times 10^{-3}} = 0.08$$

则分配给分系统 1 的失效率

$$\lambda_{1\text{新}} = \lambda_{s\text{新}} \cdot K_1 = 8 \times 10^{-4}/\text{h}$$

分配给分系统 1 的可靠性指标 $\text{MTBF} = \frac{1}{8 \times 10^{-4}}\text{h} = 1250\text{h}$

同理可得其他分系统的可靠性指标，详见表 1。

表 1 某测量仪器的可靠性指标分配表

分系统序号	原失效率/ ($10^{-3}/\text{h}$)	K_i	新分配的失效率/ ($10^{-3}/\text{h}$)	新分配的 MTBF
1	2.0	0.08	0.8	1250
2	2.5	0.10	1.0	1000
3	10.5	0.42	4.2	238

表 1 (续)

分系统序号	原失效率/ ($10^{-3}/\text{h}$)	K_i	新分配的失效率/ ($10^{-3}/\text{h}$)	新分配的 MTBF
4	7.9	0.32	3.2	313
5	0.3	0.01	0.1	10000
6	1.6	0.06	0.6	1667
总计	24.8		9.9	

4.3.2 综合因子评定法

符合下列条件之一者，可应用综合因子评定法进行可靠性指标分配：

- 有多台仪器组成系统，对系统进行可靠性指标分配时；
- 技术比较复杂，工作条件比较恶劣或采用新技术时；
- 无相似仪器时。

综合因子评定法考虑了各功能块的复杂性、重要性、环境条件、维修性、技术成熟程度、可靠性改进潜力等因素。

每一个因素给出一个定量的评价系数 K ，第 i 个单元的第 j 个评价系数记作 K_{ij} 。

对于指数分布串联结构的模型，其分配公式为：

$$\text{MTBF}_j = \frac{\sum_{j=1}^N \prod_{i=1}^n K_{ij}}{\sum_{i=1}^n K_{ij}} \text{MTBF}_s \quad (7)$$

式中： MTBF_j ——第 j 个分系统的平均故障间隔时间；

MTBF_s ——整机（或系统）的平均故障间隔时间；

K_{ij} ——第 j 个分系统的第 i 个分配因子。

例：某测量仪器的可靠性指标为： $\text{MTBF} = 40\text{h}$ ，已知该测量仪器由 6 个分系统构成，以第 1 个分系统的各项分配加权因子为 1，其他各分系统与其相比较的取值如表 2 所示，则按可靠性指标分配，按公式 (7) 该测量仪器的可靠性指标分配如下：

分系统 1： $\text{MTBF} = 11.44 \div 1 \times 40 \approx 458 \text{ (h)}$

分系统 2： $\text{MTBF} = 11.44 \div 1.12 \times 40 \approx 408 \text{ (h)}$

分系统 3： $\text{MTBF} = 11.44 \div 4.80 \times 40 \approx 95 \text{ (h)}$

分系统 4： $\text{MTBF} = 11.44 \div 3.60 \times 40 \approx 127 \text{ (h)}$

分系统 5： $\text{MTBF} = 11.44 \div 0.16 \times 40 \approx 2860 \text{ (h)}$

分系统 6： $\text{MTBF} = 11.44 \div 0.75 \times 40 \approx 610 \text{ (h)}$

表 2 某测量仪器的可靠性指标分配表

项目	分系统 1	分系统 2	分系统 3	分系统 4	分系统 5	分系统 6
复杂因子	1.0	0.5	2.0	3.0	0.2	0.5
重要因子	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

表 2 (续)

项目	分系统 1	分系统 2	分系统 3	分系统 4	分系统 5	分系统 6
环境因子	1.0	1.0	2.0	1.0	2.0	1.5
标准因子	1.0	3.0	2.0	2.0	2.0	1.0
维修因子	1.0	0.5	0.6	0.6	0.4	0.5
元器件质量因子	1.0	1.5	1.0	1.0	0.5	2.0
$\prod_{i=1}^n K_{ij}$	1.00	1.12	4.80	3.60	0.16	0.75
$\sum_{j=1}^N \prod_{i=1}^n K_{ij}$	11.44					

4.4 可靠性预计

可靠性预计是指根据测量仪器的零件、性能、工作环境及其相互关系,推测其将来的可靠性表现的方法。它是测量仪器可靠性从定性考虑转入定量分析的关键。

4.4.1 可靠性预计方法

在不同阶段,可用不同方法进行可靠性预计。

4.4.1.1 相似法

相似法适用于初始构思、规划测量仪器的总体论证阶段,通常只能作大体上的估计。其中,相似设备法的预计准确程度取决于现有设备可靠性数据的可信程度,以及现有设备和新设备的相似程度。

4.4.1.2 元器件计数法

元器件计数法适用于研制阶段的早期,此时已进行初步设计,形成了功能原理框图和电路草图。每种元器件的数量已基本确定,但尚缺应力数据。此法用于判断设计方案是否满足可靠性指标、进行优选并开展可靠性分配。

4.4.1.3 元器件应力分析法

元器件应力分析法适用于研制阶段的中后期,即在全面开展电路试验之后的样机研制期间,此时已具备详细的电路图、元器件清单及各元器件所承受的应力数据。通过应力分析,发现样机可靠性的薄弱环节并采取相应措施来改进设计。

4.4.2 可靠性预计流程

测量仪器可靠性预计的一般流程如表 3 所示:

表 3 测量仪器可靠性预计流程

流程号	流 程	测量仪器方案论证阶段	测量仪器设计阶段
1	定义测量仪器	规定其工作方式、特征、性能要求	规定其工作方式、特征、性能要求,指标更具体,理由更充足
2	测量仪器组成部分	进行功能块大致划分	了解结构,划分确定的功能块

表 3 (续)

流程号	流 程	测量仪器方案论证阶段	测量仪器设计阶段
3	可靠性框图	简单的串联系统	对并联系统进行简化
4	环境信息	规定对组成部分有影响的环境信息	进一步规定对组成部分有影响的环境信息
5	应力信息	不进行	测量仪器工作时所经受的恶劣条件下, 电应力、热应力及其承受的工作方式
6	概率分布	指数分布	指数分布
7	失效率	利用可靠性预计手册或相似仪器现场失效率求得	利用可靠性预计手册或相似仪器现场失效率求得
8	建立可靠性模型	建立基本可靠性模型	建立基本可靠性模型, 必要时, 还可建立任务可靠性模型
9	可靠性预计	采用相似设备法、相似电路法等	采用元器件计数法、元器件应力分析法
10	编写可靠性预计报告	按 GB/T7289—1987 规定执行	按 GB/T7289—1987 规定执行

4.4.3 可靠性预计要求

4.4.3.1 按 GJB/Z 299B—1998、GJB/Z 108A—1998 的规定进行可靠性预计。

4.4.3.2 可靠性预计与分配和测量仪器的研制工作同步进行。普通测量仪器研制合同签订后, 一般不进行可靠性分配; 但可靠性预计仍要随研制工作的进展, 迭代进行。

4.4.3.3 对于非电子设备, 可采用相似法进行可靠性预计。

例: 采取“元器件计数法”对某新研制的测量仪器进行可靠性预计。

a) 建立可靠性模型, 按测量仪器特点及其结构分成三部分, 即电源部分、测量部分、显示部分, 见图 4。

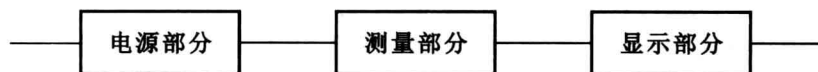


图 4 某测量仪器可靠性模型

b) 列出以上各部分的元器件种类及数量、质量等级和应用环境类别。

c) 从 GJB 299B—1998 的 5.2 节, 查出各种元器件在该环境类别下的通用失效率 λ_G 和通用质量系数 π_Q 。

d) 将 (b)、(c) 步骤得到的数据填入规范化的预计表 4, 5, 6 中。

e) 按照 GJB 299B—1998 的公式

$$\lambda_{GS} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot (\lambda_G \pi_Q)$$

计算各部分的通用失效率。

f) 按可靠性模型计算失效率

$$\lambda_s = \lambda_{\text{电源}} + \lambda_{\text{测量}} + \lambda_{\text{显示}} = (3.9316 + 3.6996 + 0.73536) \times 10^{-6}/h = 8.367 \times 10^{-6}/h$$

故该测量仪器的失效率为 $8.367 \times 10^{-6}/\text{h}$, MTBF 预计值为 $1.195 \times 10^5 \text{h}$ 。

表 4 某测量仪器电源模块的可靠性预计表

元器件种类及参数	数量 N	π_Q	λ_G / ($10^{-6}/\text{h}$)	$\lambda_G \pi_Q$ / ($10^{-6}/\text{h}$)	$N_i \cdot (\lambda_G \pi_Q)$ / ($10^{-6}/\text{h}$)
CMOS 数字电路, 10 门	1	0.25	1.30	0.325	0.325
电源变压器	1	0.70	2.28	1.6	1.6
半导体稳压器	2	0.20	0.65	0.13	0.26
金属膜电阻	4	0.30	0.073	0.022	0.088
铝电解电容	6	0.30	0.62	0.186	1.116
云母电容	4	0.30	0.16	0.048	0.192
圆形连接器	1	0.40	0.44	0.176	0.176
无绕接烙铁焊点	38	1	0.0045	0.0045	0.171
双面印制板, 40 个金属化孔	10	1	0.00036	0.00036	0.0036
$\lambda_{\text{电源}} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot (\lambda_G \pi_Q) = 3.9316$					

表 5 某测量仪器测量模块的可靠性预计表

元器件种类及参数	数量 N	π_Q	λ_G / ($10^{-6}/\text{h}$)	$\lambda_G \pi_Q$ / ($10^{-6}/\text{h}$)	$N_i \cdot (\lambda_G \pi_Q)$ / ($10^{-6}/\text{h}$)
CMOS 数字电路, 10 门	10	0.25	1.3	0.325	3.25
圆形连接器	1	0.4	0.44	0.176	0.176
无绕接烙铁焊点	60	1	0.0045	0.0045	0.27
双面印制板, 40 个金属化孔	10	1	0.00036	0.00036	0.0036
$\lambda_{\text{测量}} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot (\lambda_G \pi_Q) = 3.6996$					

表 6 某测量仪器显示模块的可靠性预计表

元器件种类及参数	数量 N	π_Q	λ_G ($10^{-6}/\text{h}$)	$\lambda_G \pi_Q$ ($10^{-6}/\text{h}$)	$N_i \cdot (\lambda_G \pi_Q)$ ($10^{-6}/\text{h}$)
CMOS 数字电路, 10 门	1	0.25	1.3	0.325	0.325
2 位数码管	1	0.6	0.24	0.144	0.144
圆形连接器	1	0.4	0.44	0.176	0.176
无绕接烙铁焊点	20	1	0.0045	0.0045	0.09
双面印制板, 40 个金属化孔	1	1	0.00036	0.00036	0.00036
$\lambda_{\text{显示}} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot (\lambda_G \pi_Q) = 0.73536$					

4.5 故障模式与影响分析

故障模式与影响分析 (fault model and effects analysis, 简称 FMEA) 是指通过分析测量仪器各组成单元潜在的故障模式及其对仪器功能的影响, 对改进仪器设计提出可能采取的预防措施。如进一步按故障模式发生概率分析其危害性, 则为故障模式、效应与危害度分析 (fault model, effects and criticality analysis, 简称 FMECA)。

4.5.1 FMEA 的一般步骤

- a) 绘制测量仪器的功能逻辑框图, 说明构成仪器的各个单元或功能模块之间在功能上的依从关系;
- b) 掌握元器件或功能模块的故障模式;
- c) 按照故障模式对仪器造成的严重程度, 划分严酷度等级;
- d) 采用网络图分析法来确定故障模式危害度大小;
- e) 提出预防措施。

4.5.2 通过 FMEA, 应

——鉴别出被分析单元会导致的不可接受或非常严重的故障, 确定可能会对预期或所需运行造成致命影响的故障模式, 并列由由此引起的从属故障;

——决定需另选的元器件、零部件和整件;

——保证能识别各种检测手段引起的故障模式;

——选择预防或正确维护要点, 制定故障检修指南。

4.5.3 FMEA 应从方案论证阶段开始进行, 随着设计工作的逐步深入, 还须不断修改、补充、完善。FMEA 的具体方法和程序可参见 GB/T 7826—1987。

4.6 故障树分析

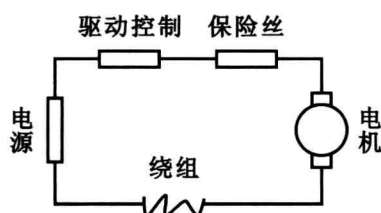
故障树分析 (fault tree analysis, 简称 FTA) 是从所研究的故障现象出发, 找出其产生的根源, 从果到因或从上到下地研究系统故障的一种方法。它把系统不希望发生的故障状态 (顶事件) 作为分析目标, 找出导致这一故障发生的所有可能的直接原因 (中间事件), 再追踪找出导致各中间事件发生的所有可能原因, 循序渐进, 直至找出基本原因 (底事件) 为止。

4.6.1 故障树分析的一般步骤

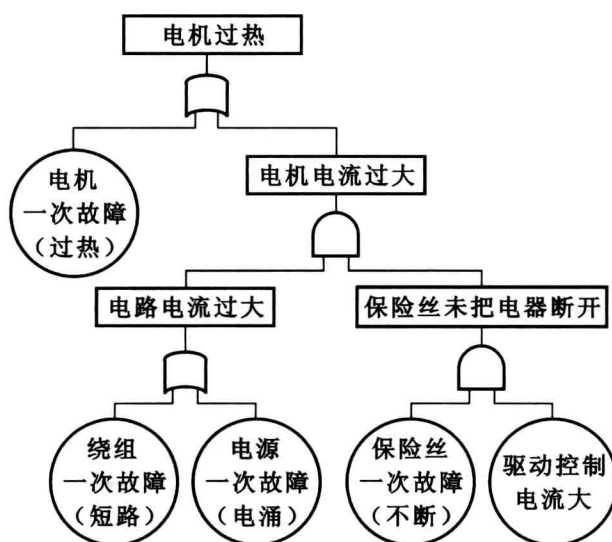
- a) 建造故障树;
- b) 化简故障树;
- c) 定性分析, 即找出最小割集, 进行定性比较, 确定改进方向;
- d) 定量计算, 即根据最小割集、底事件概率及数学模型, 计算顶事件概率; 进行重要度分析, 确定采取纠正措施的优先顺序;
- e) 提出改进措施。

图 5 所示为某电能表电机过热的故障树分析图。

4.6.2 FTA 应与 FMEA 结合进行, 即通过 FMEA 找出影响安全及任务完成的关键故障模式, 以此为顶事件建立故障树; 同时进行多因素分析, 找出各种故障模式的组合, 为改进设计提供依据。故障树应由设计人员在 FMEA 的基础上建立, 并由有关的技术



(a)电能表电机部分工作原理图



(b)“电能表电机过热”故障树

图5 故障树分析示例

人员审查，以保证其逻辑关系正确。

4.6.3 FTA 应在研制阶段的早期开始进行。随着设计工作的进展，FTA 必须不断补充、修改、完善。FTA 的具体方法和程序可参见 GB/T 7829—1987。

4.7 容差和漂移分析

容差和允许漂移能力的设计与测量仪器的性能、可靠性、工艺、成本和经济效益等密切相关。若设计范围过窄，将导致选用元器件的严格程度提高，进而增加材料成本或延长制造工时。

容差和漂移分析方法主要有

- 最坏值设计法，适用于可靠性要求甚高的测量仪器；
 - 均方根偏差设计方法，适用于可靠性要求不甚高的一般测量仪器；
 - 概率设计法，适用于可靠性要求不甚高的一般测量仪器；
 - 蒙特卡洛统计方法，适用于准确度要求较高又可借助计算机进行处理的测量仪器。
- 容差和漂移分析的详细方法可参见 GJB/Z 89—1997。

5 可靠性评估

在设计方案通过设计评审后，方可试制样机，并进行样机阶段的性能试验和可靠性试验。可靠性试验通常包括环境试验、寿命试验、筛选试验、现场使用试验和鉴定试验

等。对于样机试制，一般需要经历环境试验与现场使用试验；对于批量生产的仪器，还应增加鉴定试验。

5.1 寿命试验

对于在合同、协议中有特殊要求的仪器，应进行寿命试验，包括寿命的测定试验和验证试验。所谓测定试验（determination test），是指确定产品的特性值或性能值的试验；所谓验证试验（compliance test），是指证明产品的特性或性能是否符合规定要求的试验。有关的试验要求和方法应符合 GB/T 5080.4—1986、GB/T 5080.6—1986 和 GB/T 5080.7—1986 的规定，主要试验内容包括：

- 试验目的与要求；
- 试验条件与方法；
- 试样状态与来源；
- 试验组织与管理；
- 试验进度与地点；
- 试验评审与报告；
- 试验结束后故障与样品的处理意见。

5.1.1 截尾寿命试验的类型

截尾寿命试验可分为定时截尾试验（fixed time test）和定数截尾试验（fixed number test）两种。前者是按规定的抽样方案抽取一定数量的试验样品进行可靠性试验，当累积试验时间达到规定时间（ t ）时截止试验，统计样品的累计故障数，根据截止试验时间和累计故障数来评估仪器的可靠性特征量。后者是按规定的抽样方案抽取一定数量的试验样品进行可靠性试验，当累积故障数达到规定值（ r ）时截止试验，统计样品的累计时间，根据故障数和总试验时间来评估仪器的可靠性特征量。

按照出现故障的仪器是否允许替换进行划分，寿命试验又可分为无替换试验和有替换试验。前者是指试验中出现故障的仪器不用相同的仪器替换；后者是指可用相同的仪器替换试验中出现故障的仪器或对仪器立即修复，然后继续试验。

假定受试验仪器数为 n ，按上述分类，可以组成以下四种类型。

- a) 取 n 个仪器进行无替换定时截尾寿命试验，记为（ n ，无， t ）。
- b) 取 n 个仪器进行无替换定数截尾寿命试验，记为（ n ，无， r ）。
- c) 取 n 个仪器进行有替换定时截尾寿命试验，记为（ n ，有， t ）。
- d) 取 n 个仪器进行有替换定数截尾寿命试验，记为（ n ，有， r ）。

5.1.2 截尾试验的寿命评估

5.1.2.1 无替换

样品个数 n ，故障后无替换，试验结束前测到 r 次故障，得故障时间 $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_r$ 。

定数截尾：做到 r 个故障停止，则平均寿命估计值

$$\hat{\theta} = \frac{1}{r} \left\{ \sum_{i=1}^r t_i + (n-r)t_r \right\} \quad (8)$$

定时截尾：试验到时间 t 结束，则平均寿命估计值

$$\hat{\theta} = \frac{1}{r} \left\{ \sum_{i=1}^r t_i + (n-r)t \right\} \quad (9)$$

例：某测量仪器在无替换定时 $t = 20\text{h}$ 截尾下，试验 $n = 88$ 台，得

故障时间/h	故障数 r
0.32	2
0.76	2
1.44	1
2.36	2
4.52	14
9.73	9
19.60	18

于是

$$\hat{\theta} = \{0.32 \times 2 + 0.76 \times 2 + \cdots + 19.60 \times 18 + (88 - 48) \times 20\} / 48$$

$$= 27.33\text{h}$$

5.1.2.2 有替换

样品个数 n ，一旦某个样品发生故障，有好样品替补，试验结束前测到 r 次故障，得故障时间 $t_1 \leq t_2 \leq \cdots \leq t_r$ 。

定数截尾：做到 r 个故障停止，则平均寿命估计值

$$\hat{\theta} = \frac{1}{r} n t_r \quad (10)$$

定时截尾：试验到时间 t 结束，则平均寿命估计值

$$\hat{\theta} = \frac{1}{r} n t \quad (11)$$

例：某测量仪器在有替换定时 $t = 70\text{h}$ 截尾下试验 7 台，试验结束前测得 8 次故障，则平均寿命估计值

$$\hat{\theta} = \frac{1}{8} \times 7 \times 70\text{h} = 61.25\text{h}$$

5.1.3 加速试验寿命的计算

为缩短寿命试验时间，有时可进行加速试验。根据测量仪器的不同，加速应力可选择热应力（温度）或电应力（电流、电压、功率）。当选择热应力时，可用阿伦尼斯方程描述寿命与温度的关系

$$t = 10^{a + \frac{b}{T}} \quad (12)$$

式中： a, b ——常数；

T ——热力学温度，K。

则

$$\lg t = a + \frac{b}{T} \quad (13)$$

按已有 (t_i, T_i) 用代数法或最小二乘法求出 a, b ，据此得出正常应力 T_0 下的