

# 第四章 失效模式、后果与严重 分析 (FMECA)



## 内 容 提 要

### § 4-1 概 述

### § 4-2 失效模式与后果分析 ( FMEA和FMECA )

- 一、FMEA及FMECA的概念
- 二、建立FMEA (FMECA) 的一般方法
- 三、FMEA的应用实例

### § 4-3 失效严重度分析

- 一、定性分析
- 二、定量分析
- 三、严重度矩阵
- 四、严重度分析的用途

前面我们学习了可靠性方面的知识和理论，掌握了在产品的设计阶段进行可靠性预计和分配的基本方法，可以讲大家能保证所设计的产品具有一定的可靠性（较高的可靠性）。

但该产品的可靠性再高也**不能杜绝该产品在使用中出现故障**，其中还可能包括一些后果极其严重的故障。

因此，为了保证产品的可靠性，还应该学会在**产品设计阶段**，用科学的方法去分析计算故障（失效）和故障的产生情况，即用科学的方法去**预防和控制产品失效（故障）**，从而保证产品的可靠性。

**研究产品失效的方法**，当前世界上主要使用**两种**：

- (1) 故障（失效）模式、后果与严重度分析  
(**FMECA**)
- (2) 故障树分析 (**FTA**)

在下面的第四章和第五章分别讲述以上两方面内容（**FMECA**和**FTA**）。

首先介绍第四章内容：

## § 4-1 概 述

1. **失效**（故障）：产品丧失规定的功能。
2. **失效模式**：失效或故障的形式。

例如半球牌远红外线自动电烤箱（组成：电源线、控温器、电热器、定时器、指示灯等）为例说明。

有以下故障模式（按产品说明书整理）：

- (1) 电源线插头与屋内插座接触不良；
  - (2) 电源线内部断开；
  - (3) 控温器触点烧坏（断路）；
  - (4) 控温器触点熔接一起（短路）；
  - (5) 控温器触点接触不良；
  - (6) 控温器控温旋钮紧固螺钉松开；
  - (7) 电热器烧断（断路）；
  - (8) 电热器接触不良（断路）；
  - (9) 电热器转换开关无弹性（断路）；
- 电源线故障
- 控温器故障
- 电热器故障

- (10) 定时器机械装置有病；—— 定时故障
- (11) 指示灯灯泡坏了；
- (12) 指示器接线坏了等。 } 显示故障

### 3. 失效后果

**失效后果**是指一个部件失效时对整机所产生的影响。

如上述电烤箱的失效模式产生以下后果：

(读产品说明书最后一页)

- (1) 烤箱不发热，指示灯不亮 ( II )，
- (2) 烤箱不发热，指示灯亮 ( II )，

- (3) 烤箱发热，指示类不亮 (III)，
- (4) 烤箱发热，控温器失灵 (III)，
- (5) 烤箱发热，定时器失灵 (IV)。

#### 4. 严重度（危害度）：**失效后果的严重程度**

严重度与故障等级有较大的关系，故障等级分为**四级**：

I — 灾难性的。造成机毁人亡后果；

II — 严重的。系统工作失效；

III — 一般的。系统性能下降；

IV — 次要的。可用其他方法（或计划外维修）  
保证系统的性能不变。

可见电烤箱失效后果的严重度为：

II、 II、	III、 III、	IV
		
不能工作	工作不好	用表计时代 之可很好工作

## § 4 - 2 失效模式与后果分析 ( FMEA和FMECA )

### 一、FMEA及FMECA的概念

**FMEA**为失效模式与后果分析，**CA**为严重程度分析，合起来为**FMECA**。

#### 1. FMEA的含义

**FMEA**是用以**找出**产品设计、工艺设计和设备设计等阶段中的**缺点或潜在的缺陷**。

进而分析各组成元素的故障模式及其对上一层次结构乃至系统产生故障影响的一种方法。

## 2. FMEA的特点

(1) FMEA 是一种**自下而上**（由元件到系统）的**失效因果关系的分析程序**，旨在**不漏掉一个**后果严重的故障模式。

(2) FMEA 是一种**定性分析**手段。它**使用统计表格来进行分析**，可不使用数学工具。

### 3. FMEA的局限性和优点

#### (1) FMEA的**局限性**

是一种**单因素分析法**。即把影响系统失效的单个元件的失效看做是独立的，而研究某一个失效模式对系统的影响时，是将其作为系统中唯一存在的失效来考虑的。这种方法难以分析几种因素同时起作用才能导致的某种后果。

#### (2) FMEA的**优点**

**简单、易行、便于掌握和推广**，在没有数据时，只要有关人员具有一定的工程经验均可进行该项工作，因此**花钱不多，实际效果好**，深受广大工程技术人员欢迎。

## 4. FMEA的发展及主要应用方面

### **FMEA的发展:**

在FMEA的基础上，再加一层判定被统计故障模式后果危害度的任务，就变成了FMECA，称故障模式、后果与严重度分析或故障模式，后果与危害度分析。

本节在介绍FMEA的基础上，也讲述FMECA。

### **FMEA应用:**

FMEA主要应用于设计的每一个阶段，另外也可用于预防维修和工艺监督检查等方面。

设计各阶段的FMEA为：

方案设计和中间设计阶段：功能FMEA

最终设计阶段：可行性FMEA

工艺设计阶段：工艺FMEA

设备设计阶段：设备FMEA

我们在这里仅研究产品**功能的FMEA**。

## 二、建立FMEA（FMECA）的一般方法

### 1. 画出被研究产品的功能简图

在完成设计方案草图和试生产图的情况下，用框图或符号示意图表示各组成元件的有关功能对产品设计功能的影响。

如图4-1为空气压缩机功能图，图4-2为空气压缩机的可靠性框图。

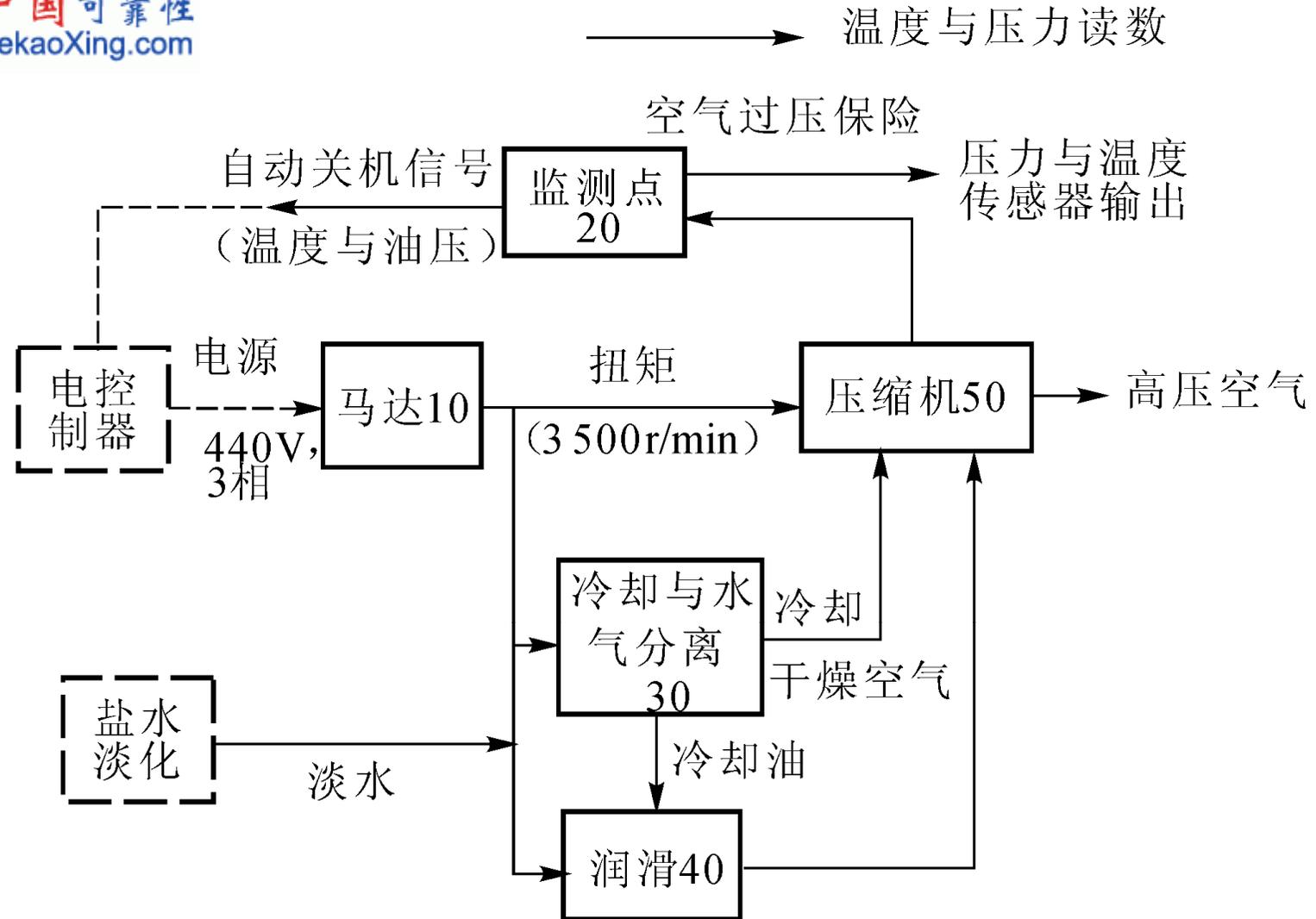
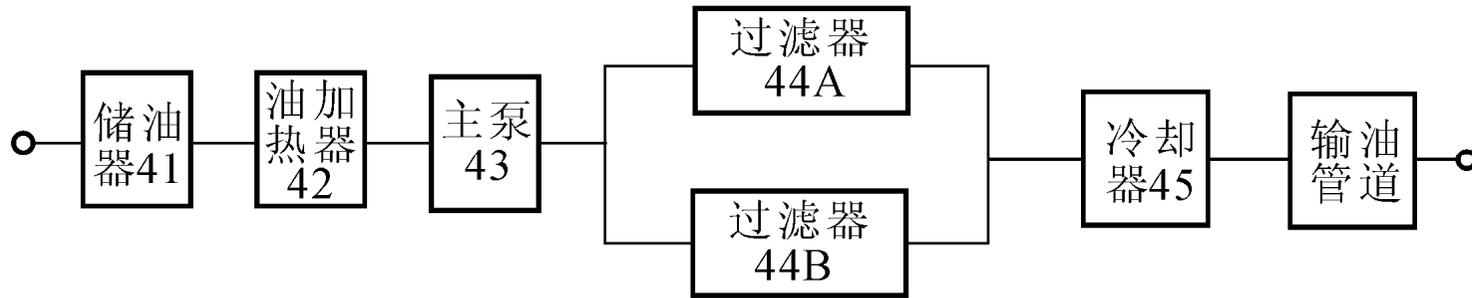


图4-1空气压缩机**功能图**



(a) 空气压缩机可靠性逻辑框图

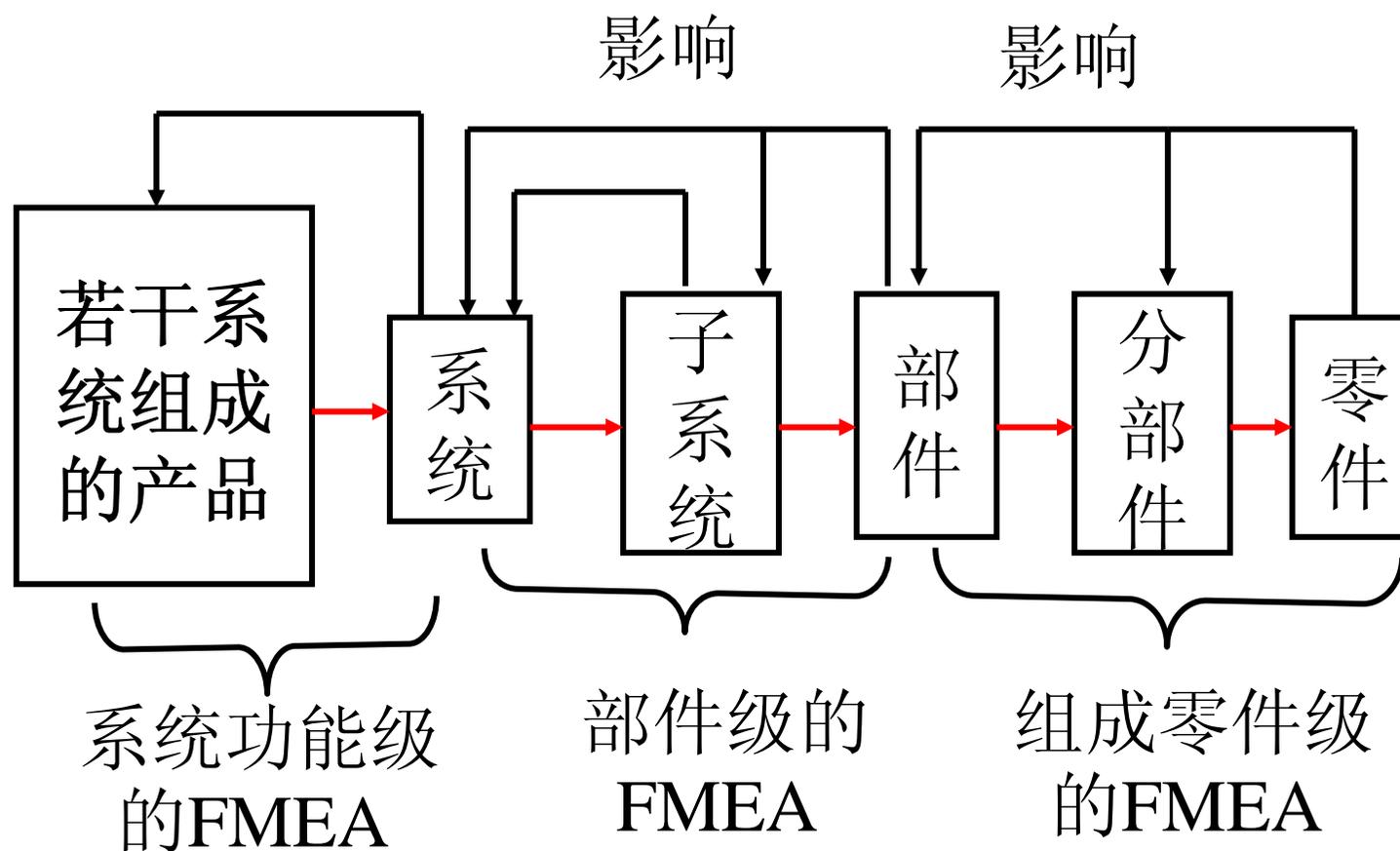


(b) 润滑40的可靠性逻辑框图

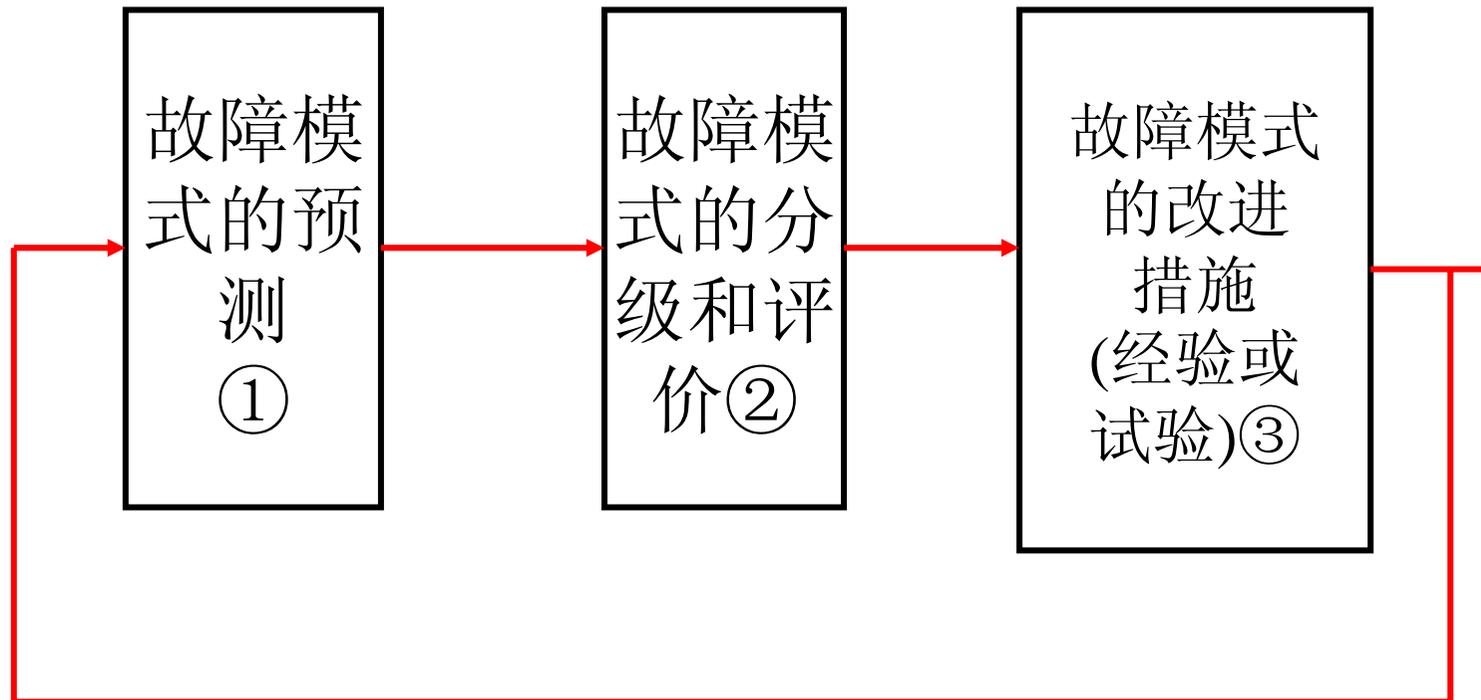
图4-2空气压缩机可靠性框图

## 2. 明确产品FMEA的分析层次和基本过程

(1) 分析层次见（见下图）



(2) 分析的基本过程（见下图）



### (3) 产品FMEA的分析方法

- ① **召集有关**（包括设计、制造、试验及供销部门等）**人员**对以前生产过的最类似产品产生过的故障情况进行分析讨论；
- ② 收集生产过程的有关试验统计数据 and 用户反馈意见为依据，**确定出故障模式**（即预测出故障模式）；
- ③ **分析产生故障原因**（即物理失效机理）；
- ④ 生产中**消除办法**（即检测方法），使用中**弥补方法**（即补偿措施）等；

⑤ 对各故障模式的**严重后果**（即严酷度等级）进行评定，**必要时可采用投票评分的方法**；

⑥ 对新设计产品与已生产的上述产品的主要不同之处进行分析，以进行必要的补充。





上两表中：

- ① 失效模式即故障模式；
- ② 故障等级确定见前 § 4-1；
- ③ 危害度参数见本书 § 4-3内容。

$\alpha$  : 失效模式频率比（查表得到）  
见表4-5和表4-6

$\beta$  : 损失概率（失效的后果概率）  
取值如下：（设计经验确定）

必然损失	$\beta=1.0$
可能损失	$0.1 < \beta < 1.0$
很少损失	$0 < \beta < 0.1$

### 三、FMEA的应用实例

例4-1某一飞机上的电容式传感器系统由4个电路单元组成，如图4-3所示。4个单元的作用见教材。

试作失效后果分析和可靠性预计。

解： (1) 制作电电容式传感器系统失效后果  
分析表

根据对图4-3的分析，可绘出其FMEA表如表4-2所示(摘录)。

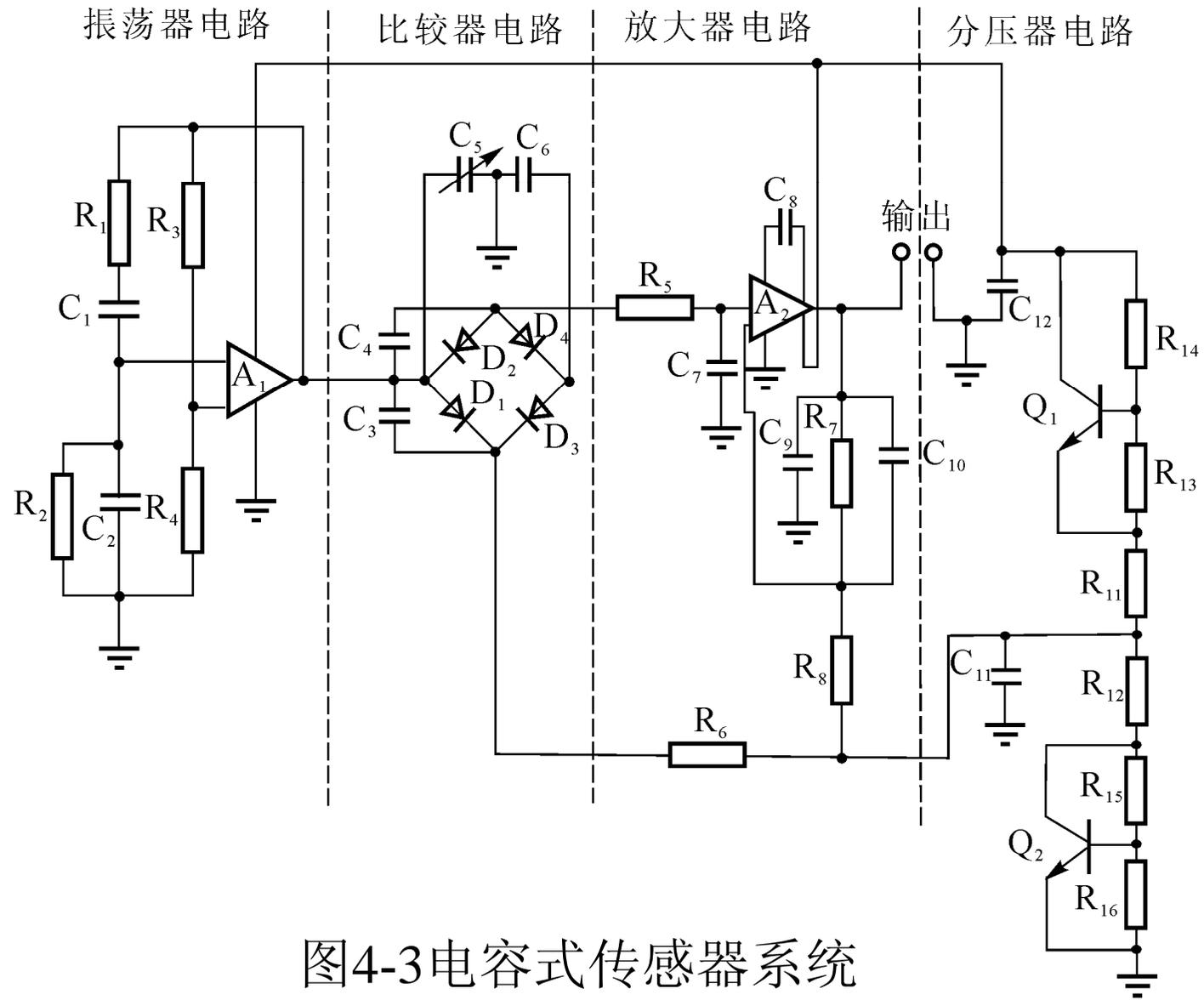
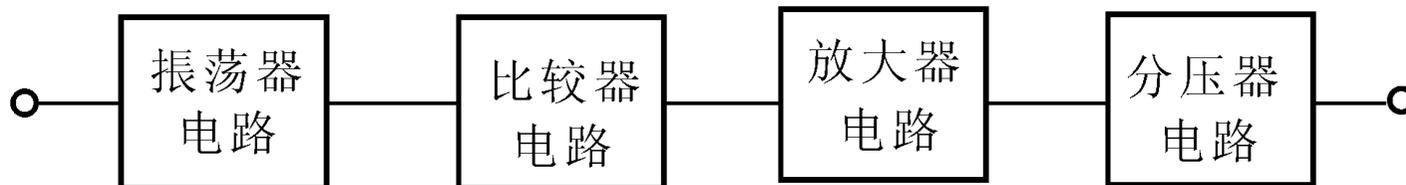


图4-3电容式传感器系统

表 4-2 电容式传感器系统失效后果分析

序号	假设失效的项目	可能的原因	征兆与后果	失效率(FPMH) $/10^{-6}h^{-1}$				最终后果
				不工作	漂移、电压偏高	指示偏高	指示偏低	
1	振荡器电路	$A_1$ 失效 $C_1, C_2, R_1, R_2, R_3, R_4$ 开路或短路	振荡器不工作	1.20 0.52				传感器不工作, 读数固定于中间数值
2	比较器电路	$C_3, C_4, D_1, D_2, D_3, D_4$ 开路或短路			2.74			虚假指示
		$C_5, C_6$ 短路	运算放大器不倒相, 输入变到 0V			2.0		虚假最大指标
		$C_5$ 传感器性能恶化	$C_5$ 电容量大幅度下降				0.07	虚假最小指标

## (2) 绘制系统的可靠性框图 (图4-4)



### (3) 进行系统的可靠性预计

根据使用环境，按元器件计数法查GJB299得失效率，进行可靠性预计。

按上述和讨论结果制出表4-3(摘录)。

表 4-3 可靠性预测(电容式传感器系统)

序号	电路	元件	$\lambda_p$ /10 <sup>-6</sup> h <sup>-1</sup>	N	$\lambda_p$ /10 <sup>-6</sup> h <sup>-1</sup>
1	振荡器	电阻	0.10	4	0.40
		电容	0.06	2	0.12
		运算放大器	1.20	1	1.20
				电路小计	1.72
2	比较器	电容	0.01	3	0.03
		二极管	0.68	4	2.72
		传感器电容	0.07	1	0.07
				电路小计	2.82
3	放大器	电阻	0.10	4	0.40
		电容	0.01	4	0.04
		运算放大器	1.20	1	1.20
				电路小计	1.64

例4-2某一固体火箭发动机由推进剂药柱、内衬和发动机壳组成。

请制作其失效模式后果分析表。

解：根据其使用功能、结构特点和以前使用中出现的故障情况，制作出其FMEA表如表4-4所示(见下页)。

表 4-4 固体火箭发动机失效模式后果分析

项目	失效模式	失效原因	可能后果	发生概率	严重性	可能措施
发动机壳	破裂	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 工艺质量差</li> <li>2. 材料缺陷</li> <li>3. 运输中损坏</li> <li>4. 搬运中损坏</li> <li>5. 内压过高</li> </ol>	导弹损坏	0.000 6	严重	严重控制原材料质量，消除缺陷。进行耐压试验。采用合理包装，在运输中保护发动机。
推进剂药柱	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 断裂</li> <li>2. 孔穴</li> <li>3. 粘接面分离</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 固化残余应力</li> <li>2. 温度过低</li> <li>3. 老化</li> </ol>	燃烧速度过高；内压过高；机壳在工作过程中破裂	0.000 1	严重	严格控制生产过程，确保工艺质量。严格控制生产过程限在温度极限之内储存和使用
内衬	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 与外壳分离</li> <li>2. 与药柱或隔热层分离</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 发动机壳成形后净化不够</li> <li>2. 粘接剂不良</li> <li>3. 粘接过程控制不严</li> </ol>	燃烧速度过高；内压过高；机壳在工作过程中破裂	0.000 1	严重	严格执行正常清洁程序。机壳清洁后严格检查，确保清除一切沾染物。

## § 4-3 失效严重度分析

### 一、定性分析

在**缺乏失效数据**的情况下用定性分析，采用发生概率来评定。

#### **分五级：**

**A级** — 常发生。单一失效模式概率  $>$  整个装置总失效概率的**20%**。

**B级** — 较常发生。单一失效模式概率  $>$  总失效概率的**10%**，但  $<$  **20%**。

C级 — 偶尔发生。单一失效模式概率  $>$  总失效概率的**1%**，但  $<$  **10%**。

D级 — 很少发生。单一失效模式概率  $>$  总失效概率的**0.1%**，但  $<$  **1%**。

E级 — 极少发生。单一失效模式概率  $<$  总失效概率的**0.1%**。

## 二、定量分析

能提供正确的失效概率数据时可用定量分析。

### 1. 失效后果概率(也称损失概率) $\beta$ 见表4-5

失效后果	$\beta$ 值
必然损失	1.00
可能损失	$0.1 < \beta < 1.00$
很少损失	$0 < \beta \leq 0.1$
无影响	0

## 2. 失效模式严重度数字 $C_m$

(1)  $C_m$ : 在一种严重性级别下由失效模式之一所占严重数字的份额。

(2)  $C_m$  计算式:

$$C_m = \beta \alpha \lambda_p t \times 10^6 \quad (4-1)$$

式中  $\beta$  — 失效后果概率;

$\lambda_p$  — 元件失效率(  $10^{-6} \text{ h}^{-1}$  );

$t$  — 某任务阶段内的工作时间(h);

$\alpha$  — 失效模式相对频率(其值见表4-6)。

表 4-6 失效模式相对频率

器件	失效模式	$\alpha$ 相对频率 $f$ (%)
薄膜电阻器	断路	80
	输出值不正确	20
陶瓷介质固定电容器	断路	5
	短路	50
	电容值变化	40
纸介质固定电容器	断路	5
	短路	90
管状铝电容器	断路	35
	短路	35
	漏电流过大	20
	电容值下降	10
线圈	绝缘变质	75
	绕阻断路	20

### 3. 产品严重度数字 $C_r$

$$\begin{aligned} C_r &= \sum_n^j C_m \\ &= \sum_n^j (\beta\alpha\lambda_p t \times 10^6)_n \quad n = 1, 2, \dots, j \end{aligned} \quad (4-2)$$

式中  $n$  — 属于某一严重度的失效模式数；  
 $j$  — 产品在该严重度下的最后一个失效模式。

例4-3 若某一产品失效率  $\lambda_p = 7.2 \times 10^{-6} \text{h}^{-1}$  在某一任务阶段，出现两个 II 级严重性的失效模式和一个 IV 级严重性的失效模式。这三个失效模式的相对频率分别为  $\alpha_1 = 0.3$ ， $\alpha_2 = 0.2$ ， $\alpha_3 = 0.5$ ，失效后果概率  $\beta$  均为 0.5，在该阶段工作 1h。

求该产品在此任务段、严重性级别为 II 级的  $C_m$  和  $C_r$ 。

解：(1) 求  $C_m$

根据式(4-1) II 级严重性的第一个失效模式的严重度数字为：

$$\begin{aligned}C_m &= \beta\alpha_1\lambda_P t \times 10^6 \\ &= 0.5 \times 0.3 \times 7.2 \times 10^{-6} \times 1 \times 10^6 \\ &= 1.08\end{aligned}$$

II级严重性的第二个失效模式的严重度  
数字为：

$$\begin{aligned}C_m &= \beta\alpha_2\lambda_P t \times 10^6 \\ &= 0.5 \times 0.2 \times 7.2 \times 10^{-6} \times 1 \times 10^6 \\ &= 0.72\end{aligned}$$

(2) 求  $C_r$

根据式(4-2) II级严重性的产品严重度数字为:

$$\begin{aligned} C_r &= \sum_{n=1}^j (\beta\alpha\lambda_p t \times 10^6)_n = \sum_{n=1}^2 (\beta\alpha\lambda_p t \times 10^6)_n \\ &= (\beta\alpha_1\lambda_p t \times 10^6) + (\beta\alpha_2\lambda_p t \times 10^6) \\ &= (0.5 \times 7.2 \times 10^{-6} \times 1)(0.3 + 0.2) \times 10^6 \\ &= 1.8 \end{aligned}$$

例4-4 某一放大器电路由3个电阻、2个电容、1个二极管、1个三极管和1个变换器共8个元件组成。某任务段内工作1h，试制作其失效严重度分析表。

- 解：
- (1) 根据电路图确定8个元件功能、失效模式及失效后果；
  - (2) 由表4-5确定各失效模式的  $\beta$  值；
  - (3) 由表4-6及有关手册查出每个元件各种失效模式的  $\alpha$  值；
  - (4) 由式(4-1)和(4-2)分别求出  $C_m$  和  $C_r$ ；
  - (5) 制作表格，填写上述有关内容，见表4-7（摘录）。

表 4-7

## 失效严重度分析

严重度分析表		系统：雷达 (Z)				装置：放大器 20A1 各元件			
		分系统：接收机 20							
装置	标号	功能	失效模式	失效后果	损失概率 ( $\beta$ )	失效模式相对频率 ( $\alpha$ )	失效率 ( $\lambda_p$ ) $/10^{-6} h^{-1}$	严重度 ( $C_m$ )	备注
电阻	20A1R1	电压分配器	断路	无输出	1.00	0.80	1.5	1.200	薄膜电阻器
			电阻值变化	输出值不正确	0.10	0.20	1.5	0.030	
电阻	20A1R2	电压分配器	断路	无输出	1.00	0.80	1.5	1.200	薄膜电阻器
			电阻值变化	输出值不正确	0.10	0.20	1.5	0.030	
电阻	20A1R6	电阻偏差	断开电路	无输出	1.00	0.05	0.005	0.000	混合式
			电阻值变化	无影响	0.00	0.95	0.005	0.000	
电容器	20A1C3	去耦	断路	无影响	0.00	0.35	0.22	0.000	管状钽 电容器
			短路	无输出	1.00	0.35	0.22	0.077	
			漏电过大	无影响	0.00	0.20	0.22	0.000	
			电容值下降	无影响	0.00	0.10	0.22	0.000	

### 三、严重度矩阵

**严重度矩阵**是将产品项目或失效模式的标号按严重性级别与失效模式的发生概或严重度数字 $C_r$ 进行排列。

即以严重性级别为横坐标，以发生概或严重度数字 $C_r$ 为纵坐标画一严重度的分布图，如图4-5所示。

**严重度矩阵是FMECA中的一部分。**

由图可见，某一失效模式在图中沿对角上线离开原点愈远，则愈严重，而愈迫切要采取补救措施。

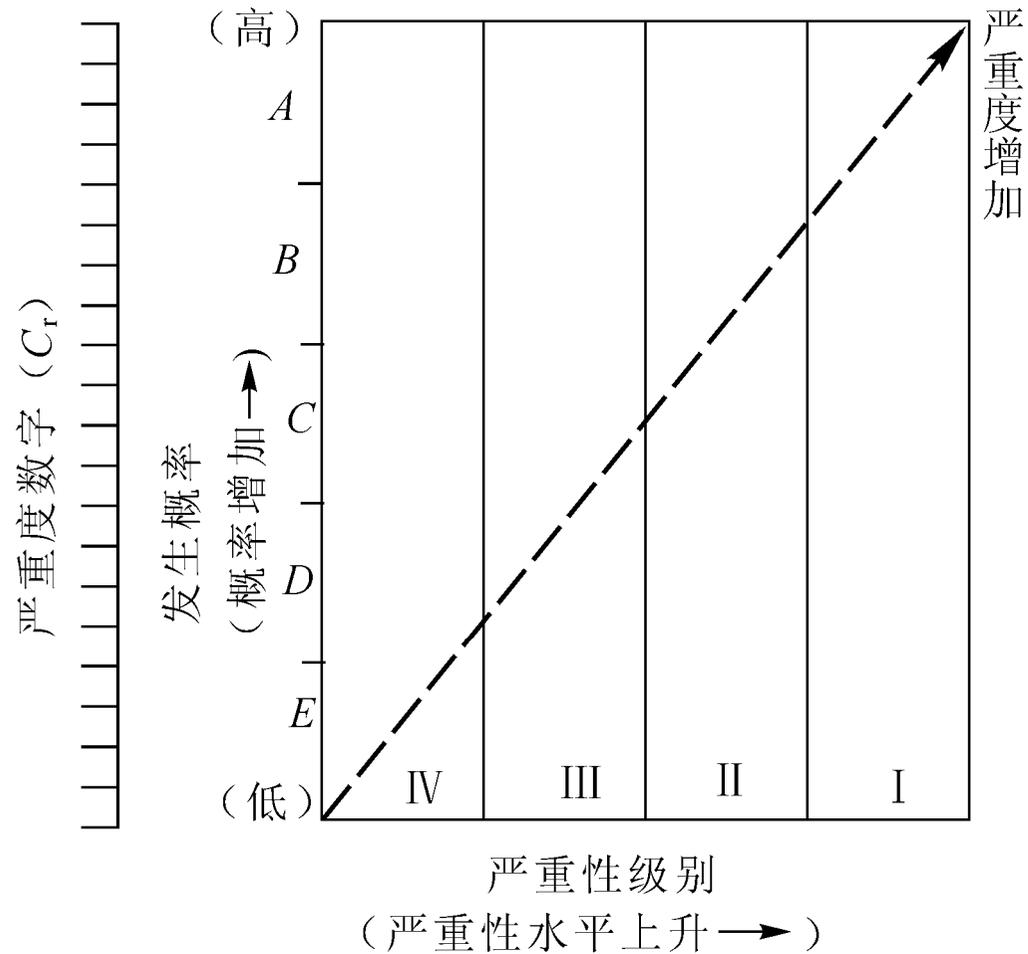


图4-5 严重度矩阵

## 四、严重度分析的用途

严重度分析的用途:

**主要用手维修和后勤保障方面的分析。**

若某种失效模式发生概率很高，则有必要采取措施降低对维修和后勤的要求。



中国可靠性网

<http://www.kekaoxing.com>

感谢 [kingdoodoo](#) 分享