



**CECS 93 : 97**

---

中国工程建设标准化协会标准

# 工业给水系统可靠性设计规范

**Design Code for Reliability  
of Industry Water Supply System**

1997 北京

中国工程建设标准化协会标准

# 工业给水系统可靠性设计规范

**CECS 93 : 97**

主编单位：中国工程建设标准化协会工业  
给水排水委员会

批准单位：中国工程建设标准化协会

批准日期：**1997**年**10**月**9**日

**1997**年 北京

# 前 言

现批准《工业给水系统可靠性设计规范》，编号为 **CECS93 : 97**，并推荐给各工程建设设计、施工单位使用。在使用过程中，请将意见及有关资料寄交中国工程建设标准化协会工业给水排水委员会（北京市和平街北口，中国寰球化学工程公司，邮政编码：**100029**），以便今后修订。本规范由中国工程建设标准化协会工业给水排水委员会负责管理和解释。

《工业给水系统可靠性设计规范》的编制工作由中国工程建设标准化协会工业给水排水委员会主持，于 **1995** 年 **5** 月在北京召开了其立项审查会，会议通过了本规范的编制工作，**96** 年年中还请多位可靠性权威学者进行专项理论评审，后于 **1997** 年 **3** 月经中国工程建设标准化协会批准立项，**97** 年 **4** 月在京再次召开以可靠性、给排水两方面专家学者参加的本规范研讨会，现经数次易稿，于 **1997** 年 **6** 月在岳阳通过审查会审查。

以现行标准、规范设计建设的工业给水系统的安全可靠性还不能完全满足社会生产和人民生活日益提高的需要，而可靠性理论技术，尤其是系统可靠性分类法的产生及其在多项工业给水工程上成功地应用，使其需求得到了满足，从而为制定本规范奠定了基础。本规范对工业给水系统的可靠性设计一般采用系统可靠性分类法。当其有条件且又有可靠度要求时，还可在不破坏分类法设计结果的基础上再进行可靠度法设计。

系统可靠性分类法设计是根据系统可靠性分类模型所揭示的系统可靠性类别的高低按系统的子系统数量的多少来进行分配的规律，在结构上按子系统数—分组冗余—可轮换检修控制来组织系统，并按此编制的给水系统可靠性分类对照表来进行的。分类表中的类别主要依据用户对可靠性的要求来确定，其状态主要依据

系统是否允许降低功能使用来区分。

系统的可靠度法设计是依据串联、并联及网络等的计算方法，再加上经济制约条件来进行其可靠度的计算及优化分配，以满足用户对系统可靠度的要求。

本规范的第 3.3.2 条第 2 款采用了发明专利，使用者应遵守专利法。

**本规范主编单位：**中国工程建设标准化协会工业  
给水排水委员会

**参编单位：**长沙冶金设计研究院  
湖南省冶金规划设计院  
清华大学核能设计研究院  
中国寰球化学工程公司

**审查单位：**中国工程建设标准化协会工业给水排水委员会  
《工业给水系统可靠性设计规范》审查委员会

**主要起草人：**吴宗吉 丁宏达 李昌群 黄祥瑞

# 目 次

1	总则 .....	1
2	术语、符号.....	2
2.1	术语 .....	2
2.2	符号 .....	5
3	给水系统可靠性分类法设计 .....	6
3.1	系统可靠性类别的选择与子系统的设计 .....	6
3.2	系统的分组冗余 .....	6
3.3	系统轮换检修的联结控制 .....	8
4	给水系统可靠度的定量设计 .....	9
4.1	给水系统中元件的可靠度 .....	9
4.2	给水系统可靠度计算 .....	9
4.3	给水系统可靠度的优化分配.....	12
附录 A	元件可靠度数据的统计方法 .....	13
附录 B	网络给水系统的可靠度计算 .....	14
附录 C	系统可靠度优化分配的逐步探索法举例 .....	15
附录 D	本规范用词说明 .....	17

# 1 总 则

- 1.0.1** 为使工业给水系统的可靠性满足工业企业安全生产的要求,特制定本规范。
- 1.0.2** 本规范适用于工业企业给水的新建、扩建、改建工程设计。
- 1.0.3** 工业给水系统可靠性采用系统可靠性分类法设计,当条件具备、数据充分、对可靠性指标有具体要求时,也可再进行系统可靠度法设计。
- 1.0.4** 用于本规范设计的给水系统的元件和材料应符合国家有关标准。
- 1.0.5** 对给水系统有重要影响的配套辅助工程设施应进行可靠性设计,使其达到与给水系统的可靠性相适应的要求。
- 1.0.6** 执行本规范时,除应符合本规范外,尚应符合现行的有关标准、规范的规定。

## 2 术 语 、 符 号

### 2.1 术 语

#### 2.1.1 可靠性

产品(系统)在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力。

#### 2.1.2 系统可靠性分类法

从组成系统的子系统和部件之间的可靠性结构功能关系出发,开发各种功能最优的结构组合和各种最优系统,从而研究揭示出系统可靠性按子系统数量分配、分组冗余组合和可轮换检修控制的规律性的一种系统可靠性设计方法。

#### 2.1.3 给水系统可靠性分类法

采用系统可靠性分类法,着重从系统的功能结构分类来设计建设给水系统的方法。

#### 2.1.4 系统可靠性分类模型

由  $m$  个子系统按分组冗余或再加超越传输通道组成的系统可靠性结构功能模型。

#### 2.1.5 给水系统可靠性

按系统可靠性标准系统和非标准系统确定的各类给水系统的统称。

#### 2.1.6 标准给水系统

在系统可靠性分类模型中  $m$  为整数且不允许降低功能设计建设的所有给水系统被称为标准可靠性给水系统,简称标准给水系统。

#### 2.1.7 非标准给水系统

在系统可靠性分类模型中  $m$  为整数和非整数且允许降低功能设计建设的所有给水系统被称为非标准可靠性给水系统,简称非标准给水系统。

### **2.1.8 串联给水系统**

组成系统的所有单元中任一单元发生故障就会导致整个系统发生故障的给水系统。

### **2.1.9 冗余**

产品所包含的完成规定功能所必不可少的组成部份之外的成分(包括硬件或软件),当冗余为硬件时也称贮备。

### **2.1.10 并联**

组成系统的所有单元都发生故障时才发生故障的逻辑关系。

### **2.1.11 并联给水系统**

组成给水系统的所有单元都发生故障时才发生系统故障的给水系统。并联给水系统也即为贮备给水系统,按其并联(冗余)成分的同时工作与不同时工作状态,可分为工作贮备给水系统与非工作贮备给水系统。

### **2.1.12 分组冗余**

由两组或两组以上零件构成的组合完成一种功能的技术,每一组零件构成一个通道,从而形成两个或两个以上通道,一个正常的通道,一个或多个冗余(备用)的通道。

### **2.1.13 部分冗余给水系统**

由冗余单元和串联单元共同组成的给水系统

### **2.1.14 分组冗余给水系统**

那种所有单元系统均采用分组冗余技术处理的给水系统。亦即分组并联给水系统。

### **2.1.15 子系统**

具有系统功能的各单元的组合。

### **2.1.16 单元系统**

只具有系统单项功能的各单元的组合。

### **2.1.17 网络系统**

那种由若干给定的元件及连接它们的边所组成的交错闭合的系统。

### **2.1.18 网络给水系统**

那种由若干给水元件用管道连接而成的交错闭合的系统。

### **2.1.19 部分故障设计**

按系统允许发生部分故障来进行的设计,本规范所采用的系统事故用水量设计即为部分故障设计。

### **2.1.20 部分故障**

产品的性能超过某种确定的界限,但没有完全丧失规定功能的故障。

### **2.1.21 超越设计**

在工艺允许时采用传输通道超越某一部分流程的设计。

### **2.1.22 轮换检修**

系统中所有元件的故障检修和预防性维修都在系统不失其功能的条件下,采取大部分元件运行,小部分停车检修,待其检修恢复投运后再停下另一部分,这样轮换着进行的检修就叫做轮换检修。

### **2.1.23 可靠度**

产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的概率。

### **2.1.24 系统可靠度法**

采用系统可靠性理论,着重以元件可靠度及其联接方式来计算系统可靠度,并以经济指标和技术约束来对系统优化设计的方法。

### **2.1.25 工作寿命**

对可修复产品指相邻两故障间的工作时间,这时也称无故障工作时间。

### **2.1.26 元件**

组成给水系统的元器件、设备、构筑物、阀门、管道等的统称。

**2.1.27 可靠性基本名词术语及定义应符合 GB3187—82 的规定。**

## 2.2 符 号

$\lambda$ ——故障率

$\lambda_i$ ——元件  $i$  的故障率

$t$ ——系统或元件的工作时间

$t_i$ ——元件  $i$  的累积工作时间

$T_o$ ——工作时间

$T_i$ ——元件  $i$  的工作寿命

$T_M$ ——平均寿命

$n$ ——单元(组)内每个通道的元件数目

$m$ ——组成系统的子系统数或贮备单元数

$N$ ——组成子系统的元件数

$R$ ——可靠度

$R_i$ ——元件  $i$  的可靠度

$R_s$ ——系统可靠度

$R(L)$ ——网络系统分解边  $L$  的可靠度

$R(S|L)$ ——分解边  $L$  正常时网络系统的可靠度

$R(S|\bar{L})$ ——分解边  $L$  发生故障时网络系统的可靠度

$m_i$ ——元件  $i$  的故障频数

$f_i$ ——元件  $i$  的故障频率

## 3 给水系统可靠性分类法设计

### 3.1 系统可靠性类别的选择与子系统的设计

**3.1.1** 在进行工业给水系统的工艺设计时,应按系统可靠性分类法确定其可靠性类别。

**3.1.2** 工业给水系统的可靠性类别应按其工程性质和规模、给水安全性和可靠性要求,以及给水系统故障停水后产生的人身安全、经济损失和社会影响等后果的严重性,其允许或不允许降低功能使用,按照表 3.1.2 的规定确定其类别和状态。

**3.1.3** 当系统不允许故障降低功能时,其每个子系统及冗余元件都必须按其系统负荷设计。

**3.1.4** 当系统允许因故障降低功能时,其设计应遵守下列规定:

1 当系统允许故障降低其供水量时,其冗余子系统及冗余元件应采用系统部分故障设计,无冗余的单元系统则应采用系统供水量设计。

2 当系统允许故障降低其给水水质时,其无冗余及冗余不够的单元系统宜采用超越设计,各子系统及冗余元件均应采用系统供水量设计。

3 当系统允许故障降低其供水量和水质时,其无冗余及冗余不够的单元系统宜采用超越设计,冗余子系统及冗余元件应采用系统部分故障设计,最后无冗余的单元系统则应采用系统供水量设计。

### 3.2 系统的分组冗余

**3.2.1** 工业给水系统可靠性分类模型应为图 3.2.1。

表 3.1.2 给水可靠性分类对照表

系统类别		I	I	II	IV	V
系统状态						
标准系统	子系统数 $m$	1		2		3
	特征	串联系统		$m=2$ 的检修轮的分组余系统		$m=3$ 的检修轮的分组余系统
非标准系统	子系统数 $m$	1	$1 < m < 2$	2	$2 < m < 3$	3
	特征	部分的串联故障系统	部分冗余系统的故障余部分冗余系统的故障余	部分的检修轮的分组余系统	$2 < m < 3$ 的检修轮的分组余系统; $2 < m < 3$ 的检修轮的分组余系统	部分的检修轮的分组余系统
择类指南		可靠性高,系统故障率低,用户要求高,允许停水	可靠性高,故障影响小,用户要求高,承受停水较受	可靠性高,故障影响小,用户要求高,承受停水较受	可靠性高,故障影响小,用户要求高,承受停水较受	可靠性高,故障影响小,用户要求高,承受停水较受

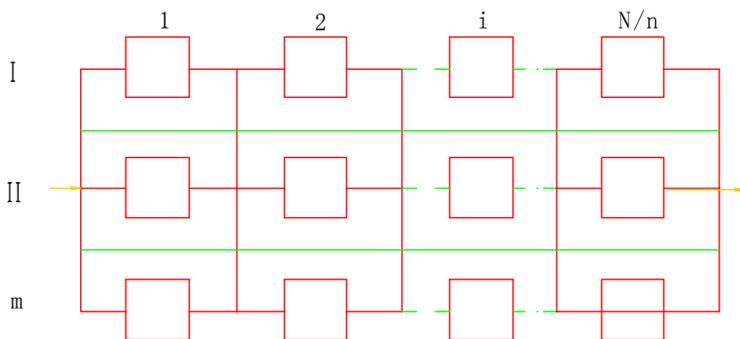


图 3.2.1 系统可靠性分类模型

**3.2.2**  $m > 1$  的给水系统的功能组合应按照图 3.2.1 的规定,将各工艺设计的单元系统从输入端到输出端,根据需实现部分或全部分组冗余。

### 3.3 系统轮换检修的联结控制

**3.3.1** 在  $m > 1$  的给水系统可靠性设计中应根据需实现可轮换检修。

**3.3.2** 实现不停水轮换检修联结控制的方法应符合下列规定:

- 1 构筑物、水池的进水口宜采用非淹没口或半淹没口。
- 2 给水系统的下述部位应采用一对串联阀门的联结方法:
  - 1) 两条输(供)水管道的每条连通管上;
  - 2) 取(供)水泵房的取(供)水干管的分段处;
  - 3) 环网管道上要求不停水的供水管接点的两边;
  - 4) 两水工设施间的淹没出入口管道或管槽上;
  - 5) 双母管上同时接管后合并成单管输水的两接水管头部;
  - 6) 环网管段上同时接双管后合并成单管输水的两接管头部及两接管点间的环网管段上;
  - 7) 两水池隔墙的淹没连通上。

## 4 给水系统可靠度的定量设计

### 4.1 给水系统中元件的可靠度

**4.1.1** 由设备、设施、管道和仪表等元件组成的工业给水系统中,各元件投入运行后到第一次发生故障的时间(工作寿命)在工程上可接近似指数分布处理。其中第*i*元件的可靠度 $R_i$ 按下式计算:

$$R_i = \exp(-\lambda_i \cdot t_i) \quad (4.1.1)$$

式中  $\lambda_i$ ——元件*i*的故障率;

$t_i$ ——元件*i*的累积工作时间。

**4.1.2** 给水系统中元件的可靠度可通过对多个同类元件的工作寿命的统计数据,用附录A中的方法求得。

当缺乏足够数据不能使用该统计方法时,亦可参照有关资料选用。

### 4.2 给水系统可靠度计算

**4.2.1** 对于工业给水系统的可靠度计算,应按照给水工程工艺设计的流程,根据系统的功能要求和各元件或单元系统之间的可靠性关系,建立起该系统的可靠性关系框图。

对于工业给水系统可靠性框图由串联系统、并联系统、贮备系统和网络系统等所构成。

**4.2.2** 依照工业给水系统的可靠性关系框图,对其中构成系统的各元件,按本规范第4.1.2条的规定,取得各有关元件的可靠度数据。

**4.2.3** 对各类不同的工业给水系统的可靠度,可分别按下述方法计算:

1 由*N*个元件构成的串联给水系统可靠性框图如图4.2.3-1所示。



图 4.2.3-1 串联给水系统

当该系统中各元件可靠度为  $R_1, R_2, \dots, R_N$  时, 系统可靠度按下式计算:

$$R_{s1} = R_1 \cdot R_2 \cdots R_N = \prod_{i=1}^N R_i \quad [4.2.3-1]$$

当各元件的故障率为  $\lambda_i$ , 累积工作时间为  $t_i$ , 系统可靠度也可按下式计算:

$$R_{s1} = \exp\left(-\sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot t_i\right) \quad [4.2.3-2]$$

2 由  $N$  个元件构成并具有  $m$  个相同的子系统组成的并联给水系统, 其可靠性框图如图 4.2.3-2。

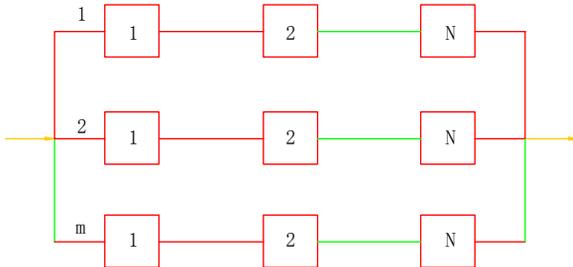


图 4.2.3-2 并联给水系统

系统的可靠度按下式计算:

$$\begin{aligned} R_{s2} &= 1 - [1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot t_i\right)]^m \\ &= 1 - (1 - R_{s1})^m \end{aligned} \quad [4.2.3-3]$$

由  $N$  个单元构成并具有  $m$  个相同的子系统组成的分组并联给水系统, 其可靠性框图如图 4.2.3-3。

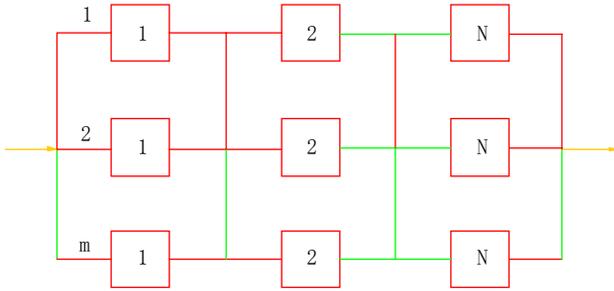


图 4.2.3-3 分组并联给水系统

系统的可靠度按下式计算

$$R_{s3} = \prod_{i=1}^N \{1 - [1 - \exp(-\lambda \cdot t_i)]^m\} \quad [4.2.3-4]$$

3 由  $m$  个相同元件(或系统)组成的贮备给水系统,其中只有一个元件(或系统)工作,当其失效时,立即转换为另一贮备元件(或系统)工作。该种给水系统的可靠性框图如图

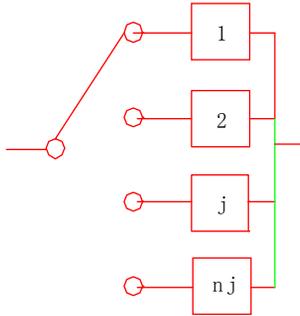


图 4.2.3-4 贮备给水系统

4.2.3-4。

当各元件(或系统)故障率  $\lambda$  和工作时间  $t$  相同时,其可靠度按下式计算:

$$\begin{aligned} R_{s4} &= \exp(-\lambda \cdot t) \sum_{j=0}^{m-1} (\lambda \cdot t)^j / j! \\ &= R \cdot \sum_{j=0}^{m-1} (-\ln R)^j / j! \end{aligned} \quad [4.2.3-5]$$

4 对于网络给水系统,在其结构较简单时,可采用附录 B 中的概率分解法计算。

## 4.3 给水系统可靠度的优化分配

**4.3.1** 给水系统可靠度优化分配的原则应是在规定的系统可靠度指标和已知部件的可靠度及确保系统可靠性分类法设计结果的条件下,采用结合价格,调整元件可靠度和冗余设计,以实现系统的费用最低。

**4.3.2** 工业给水系统可靠度优化分配方法可采用逐步探索法进行计算,应符合附录 C 的要求。

# 附录 A 元件可靠度数据的统计方法

## A. 0. 1 确定收集数据的项目

对给水系统中的元件的可靠度数据,选用其投入运行后到第一次发生故障的时间为其工作寿命。对于能“修复如新”的元件,从修复后投入运行到发生故障的时间也可作为其工作寿命加以统计。如统计  $N$  个元件则可得  $N$  个工作寿命  $T_i$ 。

## A. 0. 2 建立故障数据直方图

当数据数目为  $N$ ,可取规定工作时间  $T_0$  为一年来划分组数。工作寿命时间间隔为  $T_0/K$  ( $K$  取  $10\sim 20$ ),分别填入工作寿命  $T_i$ ,计算故障频数  $m_i$  和故障频率  $f_i = m_i/N$ ,列表 A. 0. 2,并画出直方图。

表 A. 0. 2 划组与故障频数和故障频率计算表

$T_i = T_0/K$	$T_i$	$m_i$	$f_i$	$T_i \cdot f_i$
$0 \sim T_0/K$				
$T_0/K \sim 2T_0/K$				
$2T_0/K \sim 3T_0/K$				
...				
$(K-1)T_0/K \sim T_0$				

## A. 0. 3 确定分布类型并确定参数

根据直方图或在单对数格纸上判断是否指数或近似指数分布。并计算可靠性估计参数元件的平均寿命

$$T_M = \sum_{i=1}^K T_i \cdot f_i$$

## A. 0. 4 确定元件可靠度

当发生故障时间随机变量服从指数时,其平均寿命为故障率的倒数  $T_M = 1/\lambda$ ,则  $R = \exp(-\lambda t) = \exp(-t/T_M)$

## A. 0. 5 选用元件可靠度现有数据

当其给水系统不能用统计方法求得元件可靠度时,可参照有关资料选用。

## 附录 B 网络给水系统的可靠度计算

**B.0.1** 给水系统的可靠性框图为非串并联结构的网络系统时，本规范推荐在结构简单情况下采用概率分解法计算系统可靠度。

### B.0.2 概率分解法

在组成的系统比较简单，元件数量不多的情况下可采用概率分解法计算网络系统的可靠度：建立给水系统的可靠性网络框图，网络各边视为系统组成元件，每条边只考虑两种状态正常或故障，选好网络中的一条分解边  $L$ ，则网络系统的可靠度按下式计算：

$$R_s = R(L)R(S|L) + [1 - R(L)]R(S|\bar{L})$$

式中  $R(L)$  为分解边单元  $L$  的可靠度；

$R(S|L)$  为分解边  $L$  正常时网络系统的可靠度；

$R(S|\bar{L})$  为分解边  $L$  故障时网络系统的可靠度。

例：图 B.0.2 网络的计算如下：选取分解边  $L$ ，各元件的可靠度均为 0.9。

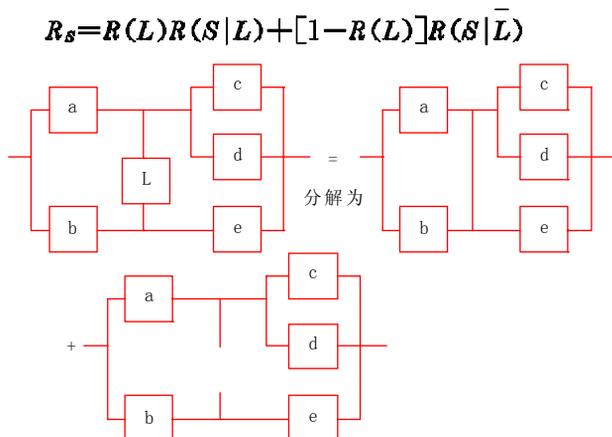


图 B.0.2 网络图的分解

$$R_s = 0.9 \cdot 0.9891 + 0.1 \cdot 0.9793 = 0.9886$$

## 附录 C 系统可靠度优化分配的逐步探索法举例

某给水工程系统通过合并和简化等步骤最终化为由  $A_1, A_2, A_3, A_4$  四个元件串联组成,其可靠度分别为  $R_1=R_3=0.8, R_2=R_4=0.7$ ,费用分别为  $R_1=2, R_2=3, R_3=1.5, R_4=1$ ,要求满足该系统可靠度  $R_S=0.99$ ,费用最低时的各元件可靠度分配。

解题步骤:

**C. 0.1** 无冗余时:  $R_S=R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4=0.8 \cdot 0.7 \cdot 0.8 \cdot 0.7=0.314$  显然不能满足  $R_S=0.99$  的要求。

**C. 0.2** 为使  $R_S=0.99$  应使每个元件  $R_i > 0.99$ ,经采用冗余技术,求得满足可靠度的最少冗余数,可得下表 C. 0.2 情况。

表 C. 0.2 可靠度及费用的分配计算

单元	元件 $R_i$	冗余数	冗余后 $R_i$	元件费用	冗余后费用
$A_1$	0.8	3	0.9920	2	6
$A_2$	0.7	4	0.9919	3	12
$A_3$	0.8	3	0.9920	1.5	4.5
$A_4$	0.7	4	0.9917	1	4
			$R_S=$ 0.9682		总费用= 26.5

**C. 0. 3**  $R_s$  仍小于 0. 99, 还需增加系统的单元系统的冗余数, 先增加  $A_1, A_2$  冗余, 见表 C. 0. 3

表 C. 0. 3 可靠度及费用的再分配计算

		$A_2$		
$A_1$	冗余数	4	5	6
	3	0. 9840(18)	0. 9896(26)	0. 9913(24)
	4	0. 9903(20)	0. 9960(23)	0. 997(24)
	5	0. 9916(23)	0. 9973(25)	0. 9989(28)
	6	0. 9916(24)	0. 9936(27)	0. 9972(32)

表中括号内为费用, 括号外为系统的可靠度

当冗余数  $A_1=3, A_2=4$  或 5 时,  $R_s$  均小于 0. 99, 不略考虑。

当  $A_1=3, A_2=6$  或  $A_1=6, A_2=4$  时, 费用比  $A_1=4, A_2=5$  为大, 但可靠度反而小, 也不予考虑。

**C. 0. 4** 余下的  $A_1, A_2$  组与冗余数  $A_3=3\sim 6$  进行组合, 作进一步探索比较。

**C. 0. 5** 最终选用  $A_1, A_2, A_3, A_4$  的冗余数为 4, 5, 4, 5,  $R_s=0. 9920$ , 费用=34 为最低, 此时的各元件可靠度即为最优分配。

## 附录 D 本规范用词说明

执行本规范条文时,对于要求严格程度的用词,说明如下,以便在执行中区别对待。

- 1、表示很严格,非这样做不可的用词:  
正面词采用“必须”;  
反面词采用“严禁”。
- 2、表示严格,在正常情况下均应这样做的词:  
正面词采用“应”;  
反面词采用“不应”或“不得”。
- 3、表示允许稍有选择,在条件许可时,首先应这样做的用词:  
正面词采用“宜”或“可”;  
反面词采用“不宜”。