

ICS 91.140.10

CCS P 46

团 体 标 准

T/CDHA ××××-××××

供热元件可靠性分析方法

Reliability analysis method for items in heating system

（征求意见稿）

××××-××-××发布

××××-××-××实施

中国城镇供热协会 发布

目 次

前 言 11

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 基本规定 3

5 元件基础信息 3

6 元件失效、修理与替换、失效影响信息..... 4

7 元件可靠性指标与计算方法..... 5

附录 A（规范性）元件失效、修理与替换、失效影响信息记录 9

附录 B（规范性）失效模式、失效描述与失效原因分类 11

附录 C（资料性）可靠性分析示例 14

前 言

本文件按照 GB/T1.1—2020《标准化工作导则第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国城镇供热协会提出。

本文件由中国城镇供热协会标准化技术专业委员会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

供热元件可靠性分析方法

1 范围

本文件给出了术语和定义，基本规定，元件基础信息，元件失效、修理与替换、失效影响信息，规定了恒定失效率假设的元件可靠性指标与计算方法。

本文件适用于已投入运行的供热系统。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2900.99—2016 电工术语 可信性

CJJ/T 55—2011 供热术语标准

GB/T 4086.2 统计分布数值表 χ^2 分布

GB/T 5080.6 设备可靠性试验 恒定失效率假设的有效性检验

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

元件 item

可靠性分析的对象。可以是单个部件、组件、功能单元、设备或分系统。

[来源：GB/T 2900.99—2016，定义 192-01-01，有修改]

3.2

可修复元件 repaired item

失效后，在给定条件下能重新恢复到执行要求功能状态的元件。

[来源：GB/T 2900.99—2016，定义 192-01-11，有修改]

3.3

不可修复元件 non-repaired item

失效后，在给定条件下不能重新恢复到执行要求功能状态的元件。

[来源：GB/T 2900.99—2016，定义 192-01-12，有修改]

3.4

失效 failure

执行要求的能力的丧失。

[来源：GB/T 2900.99—2016，定义 192-03-01，有修改]

3.5

故障 fault

因内在状况丧失按要求执行的能力。

[来源：GB/T 2900.99—2016，定义 192-04-01]

3.6

失效影响 failure effect

影响失效元件本身或之外的失效后果。

[来源：GB/T 2900.99—2016，定义 192-03-08，有修改]

3.7

失效模式 failure mode

观测到的失效方式。

[来源：GB/T 20172—2006，定义 3.1.16]

3.8

失效描述 failure descriptor

失效的明显、可见原因的表述。

[来源：GB/T 20172—2006，定义 3.1.14]

3.9

失效原因 failure cause

引起失效的设计、制造或使用阶段的有关事项。

[来源：GB/T 20172—2006，定义 3.1.13]

3.10

失效率 failure rate

在一定运行时间内元件失效次数与系统中该类元件总数的比值。

[来源：CJJ/T 55—2011，定义 2.4.8，有修改]

3.11

可靠度 reliability

在给定的条件下，元件在时间区间 (t_1, t_2) 内按要求执行的概率。

[来源：GB/T 2900.99—2016，定义 192-05-05]

3.12

平均失效前工作时间 mean operating time to failure (缩写词 MTTF)

从首次使用或从恢复使用直到失效的累计工作时间的期望值。

[来源：GB/T 2900.99—2016，定义 192-05-11]

3.13

平均失效间隔工作时间 mean operating time between failures (缩写词 MTBF)

相邻两次失效间的累计工作时间的期望值。

[来源：GB/T 2900.99—2016，定义 192-05-13]

3.14

修复时间 time to restoration

从发现元件失效至元件修理完成且供热系统恢复到执行要求功能状态所用的时间。

[来源：CJJ/T 55—2011，定义 2.4.10，有修改]

3. 15

平均修复时间 mean time to restoration (缩写词 MTTR)

修复时间的期望值。

[来源: GB/T 2900.99—2016, 定义 192-07-23]

3. 16

修复率 restoration rate

设在 $t=0$ 发现元件失效而时间 t 之前没有完成修理, 在时间区间 $(t, t+\Delta t)$ 内元件修理完成且供热系统恢复到执行要求功能状态的条件概率与区间长度 Δt 之比, 当 Δt 趋于 0 时的极限(如果存在)。

[来源: GB/T 2900.99—2016, 定义 192-07-20, 有修改]

3. 17

瞬时可用度 instantaneous availability

元件在给定时刻处于按要求执行状态的概率。

[来源: GB/T 2900.99—2019, 定义 192-08-01]

3. 18

稳态可用度 steady state availability

在时间趋于无穷大时, 瞬时可用度的极限(如果存在)。

[来源: GB/T 2900.00—2016, 定义 192-08-07]

4 基本规定

4. 1 统计元件

4. 1. 1 宜选取供热系统中主要设备、管道和管路附件作为统计元件。

4. 1. 2 元件应为同类型的设备、管道或管路附件。

4. 1. 3 元件的选取应保证可获取的失效样本数量不小于 3 个, 并按 GB/T 5080.6 的规定对恒定失效率假设做出有效性检验。

4. 1. 4 当可获取的失效样本数量充足时, 宜按规格、材质、敷设或安装情况等条件细分同类型的设备、管道或管路附件确定元件。

4. 2 统计时间

4. 2. 1 统计时间应至少包括一个统计周期, 且应是统计周期的整数倍。

4. 2. 2 对于全年运行的供热系统, 应以自然年为统计周期; 对于仅在供暖期运行的供热系统, 应以供暖期为统计周期。

5 元件基础信息

5. 1 元件基础信息应包括档案编号、名称、型号和规格、额定参数、位置、敷设情况、安装情况、功能、投入运行时间等。

5.2 元件基础信息应建立档案，并应设唯一档案编号。

6 元件失效、修理与替换、失效影响信息

6.1 一般规定

6.1.1 元件的失效信息、修理与替换信息、失效影响信息均应在统计周期内按失效事件逐次记录。元件失效、修理与替换、失效影响信息记录应按附录 A 的规定执行。

6.2 元件失效信息

6.2.1 元件失效信息包括失效元件基础信息、失效时间、失效模式、失效描述、失效原因、失效前运行数据和失效持续时间运行数据。元件失效信息记录应按 A.1 的规定执行。

6.2.2 失效元件基础信息应记录元件的档案编号。

6.2.3 失效时间应记录发现失效时刻和供热恢复时刻，并计算两时刻间的持续时间。发现失效时刻应为根据元件及其环境现象或监测数据发现失效的最早时刻。供热恢复时刻应为系统流量和供水温度恢复至正常供热规定参数的时刻。

6.2.4 失效模式、失效描述、失效原因分类应按附录 B 的规定执行。失效原因宜附影像资料和检测结果。

6.2.5 失效前运行数据宜记录失效发生时刻前 1 h 的平均室外温度、系统和热源流量、热源供水/蒸汽和回水温度、热源供水和回水压力，并计算系统热负荷。

6.2.6 失效持续时间运行数据宜记录室外平均温度、系统和热源平均流量、热源平均供水/蒸汽和回水温度、热源平均供水和回水压力，并计算系统供热量。

6.3 元件修理与替换信息

6.3.1 元件修理与替换信息包括失效隔离、临时性修理过程、长期性修理过程、替换元件基础信息等项目。元件修理与替换信息记录应按 A.2 的规定执行。

6.3.2 失效隔离宜记录为隔离失效元件而关闭的阀门和电气设备。当不易文字描述，可附图纸或照片。

6.3.3 临时性修理过程应记录修理时间，宜记录人员数量、设备和车辆使用情况、主要步骤和方法、有效期、再修理计划。

6.3.4 长期性修理过程应记录修理时间，宜记录人员数量、设备和车辆使用情况、主要步骤和方法。

6.3.5 替换元件基础信息应按第 5 章的规定建立元件档案，并应记录元件档案编号。

6.4 元件失效影响信息

6.4.1 元件失效影响信息包括供热质量损失、环境破坏、人身伤害和经济损失。元件失效影响信息记录应按 A.3 的规定执行。

6.4.2 对于不导致上述影响的元件失效事件，元件的失效信息、修理与替换信息应按 6.2 和 6.3 的规定执行，失效影响信息不记录，也可根据实际情况另行记录其他失效影响信息。

6.4.3 供热质量损失记录应包括供热面积关停率、供热量降低率和系统流量降低率，并应符合下列规定：

a) 供热面积关停率按式（1）计算：

$$a = \frac{A_s}{A} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

a ——供热面积关停率；

A ——供暖期实际供热面积，单位为平方米（ m^2 ）；

A_s ——关停的最大供热面积，单位为平方米（ m^2 ）。

b) 供热量降低率按式（2）计算：

$$q^- = \frac{Q - Q_f}{Q} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

q^- ——供热量降低率；

Q ——失效持续时间内正常供热规定的供热量，单位为吉焦（GJ）；

Q_f ——失效持续时间的实际供热量，单位为吉焦（GJ）。

c) 系统流量降低率按式（3）计算：

$$g^- = \frac{G - G_f}{G} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

g^- ——系统流量降低率；

G ——失效发生前的系统流量，单位为吨每小时（t/h）；

G_f ——失效持续时间的平均系统流量，单位为吨每小时（t/h）。

6.4.4 环境破坏应记录对供热系统周边地理环境、建筑、设施、车辆和设备的破坏情况。

6.4.5 人员伤亡应记录由失效直接和间接导致的损伤人员数量和相应人体损伤程度，以及死亡人员数量。

6.4.6 经济损失包括元件修理和替换费用、赔偿费用、其他费用。

7 元件可靠性指标与计算方法

7.1 失效率

7.1.1 不可修复元件和可修复元件失效率的点估计值按式（4）计算：

$$\hat{\lambda} = \frac{r}{\sum_{i=1}^m n_i t_i} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$\hat{\lambda}$ ——元件失效率的点估计值，单位为每年（ a^{-1} ）；

当元件为管道时，单位为每千米年 $[(\text{km}\cdot\text{a})^{-1}]$ ；

r ——统计时间内元件的失效数量，单位为次；

n_i ——第 i 个统计周期内的元件数量，单位为个；当元件为管道时，第 i 个统计周期内的管道长度，单位为千米 (km)；

t_i ——第 i 个统计周期的时间，单位为年 (a)；

m ——统计周期的数量，单位为个。

7.1.2 在 $1-\alpha$ 置信水平下，元件失效率的置信区间 $(\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2)$ 分别按式 (5) 和式 (6) 计算：

$$\hat{\lambda}_1 = \hat{\lambda} \frac{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}}(2r)}{2r} \dots\dots\dots (5)$$

$$\hat{\lambda}_2 = \hat{\lambda} \frac{\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}}(2r+2)}{2r} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

$\hat{\lambda}_1$ ——元件失效率的置信区间下限，单位为每年 (a^{-1}) ；当元件为管道时，单位为每千米年 $[(\text{km}\cdot\text{a})^{-1}]$ ；

$\hat{\lambda}_2$ ——元件失效率的置信区间上限，单位为每年 (a^{-1}) ；当元件为管道时，单位为每千米年 $[(\text{km}\cdot\text{a})^{-1}]$ ；

$\hat{\lambda}$ ——元件失效率的点估计值，单位为每年 (a^{-1}) ；

r ——统计时间内元件的失效数量，单位为次；

α ——显著性水平；

$1-\alpha$ ——置信水平；

χ^2 —— χ^2 分布，按 GB/T 4086.2 的规定取值。

7.2 不可修复元件可靠性分析

7.2.1 统计周期 t 内，元件的可靠度按式 (7) 计算：

$$R(t) = e^{-\hat{\lambda}t} \dots\dots\dots (7)$$

式中：

$R(t)$ ——元件的可靠度；

$\hat{\lambda}$ ——元件失效率的点估计值，单位为每年 (a^{-1}) ；

t ——统计周期，单位为年 (a)。

7.2.2 元件的平均失效前工作时间按式 (8) 计算：

$$MTTF = \frac{1}{\hat{\lambda}} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

$MTTF$ ——元件的平均失效前工作时间，单位为年 (a)；

$\hat{\lambda}$ ——元件失效率的点估计值，单位为每年 (a^{-1}) 。

7.2.3 不可修复元件的可靠性分析示例见附录 C。

7.3 可修复元件可靠性分析

7.3.1 元件的平均失效间隔工作时间按式 (9) 计算：

$$MTBF = \frac{1}{\hat{\lambda}} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

$MTBF$ ——元件的平均失效间隔工作时间，单位为年 (a)；

$\hat{\lambda}$ ——元件失效率的点估计值，单位为每年 (a⁻¹)。

7.3.2 元件修复率的点估计值按式 (10) 计算：

$$\hat{\mu} = \frac{r}{\sum_{i=1}^r \tau_i} \dots\dots\dots (10)$$

式中：

$\hat{\mu}$ ——元件修复率的点估计值，单位为每年 (a⁻¹)；

r ——统计时间内元件的失效数量，单位为次；

τ_i ——第 i 次失效的修复时间，单位为年 (a)。

7.3.3 在 $1-\alpha$ 置信水平下，元件修复率的置信区间 ($\hat{\mu}_1, \hat{\mu}_2$) 分别按式 (11) 和式 (12) 计算：

$$\hat{\mu}_1 = \hat{\mu} \frac{\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(2r+2)}{2r} \dots\dots\dots (11)$$

$$\hat{\mu}_2 = \hat{\mu} \frac{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(2r)}{2r} \dots\dots\dots (12)$$

式中：

$\hat{\mu}_1$ ——元件修复率的置信区间下限，单位为每年 (a⁻¹)；

$\hat{\mu}_2$ ——元件修复率的置信区间上限，单位为每年 (a⁻¹)；

$\hat{\mu}$ ——元件修复率的点估计值，单位为每年 (a⁻¹)；

r ——统计时间内元件的失效数量，单位为次；

α ——显著性水平；

$1-\alpha$ ——置信水平；

χ^2 —— χ^2 分布，按 GB/T 4086.2 的规定取值。

7.3.4 元件的平均修复时间按式 (13) 计算：

$$MTTR = \frac{1}{\hat{\mu}} \dots\dots\dots (13)$$

式中：

$MTTR$ ——元件的平均修复时间，单位为年 (a)；

$\hat{\mu}$ ——元件修复率的点估计值，单位为每年 (a⁻¹)。

7.3.5 元件的瞬时可用度按式（14）计算：

$$A(t) = \frac{\hat{\mu}}{\hat{\lambda} + \hat{\mu}} + \frac{\hat{\lambda}}{\hat{\lambda} + \hat{\mu}} e^{-(\hat{\lambda} + \hat{\mu})t} \dots\dots\dots (14)$$

式中：

$A(t)$ ——元件的瞬时可用度；

$\hat{\mu}$ ——元件修复率的点估计值，单位为每年（ a^{-1} ）；

$\hat{\lambda}$ ——元件失效率的点估计值，单位为每年（ a^{-1} ）；

t ——统计周期，单位为年（ a ）。

7.3.6 元件的稳态可用度按式（15）计算：

$$A_0 = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{\hat{\mu}}{\hat{\mu} + \hat{\lambda}} \dots\dots\dots (15)$$

式中：

A_0 ——元件的稳态可用度；

$MTBF$ ——元件的平均失效间隔工作时间，单位为年（ a ）；

$MTTR$ ——元件的平均修复时间，单位为年（ a ）；

$\hat{\mu}$ ——元件修复率的点估计值，单位为每年（ a^{-1} ）；

$\hat{\lambda}$ ——元件失效率的点估计值，单位为每年（ a^{-1} ）。

7.3.7 可修复元件的可靠性分析示例见附录 C。

附 录 A

(规范性)

元件失效、修理与替换、失效影响信息记录

A.1 元件失效信息记录按表 A.1 的规定执行。

表 A.1 元件失效信息记录

序号	记录项目	内容	要求
1	元件基础信息	元件档案编号	√
2		名称	√
3		型号和规格	√
4		额定参数	√
5		位置	√
6		敷设情况	√
7		安装情况	√
8		功能	√
9		投入运行时间（__年__月__日）	√
10	失效持续时间	发现失效时刻（__年__月__日__时）	√
11		供热恢复时刻（__年__月__日__时）	√
12		持续时间（__日__时）	√
13	失效模式	失效模式（按表 B.1 的规定说明）	√
14	失效描述	失效描述（按表 B.2 的规定说明）	√
15		环境描述	○
16	失效原因	失效原因（按表 B.3 的规定说明）	√
17		检测结果	○
18	失效前运行数据	室外温度（℃）	○
19		系统流量（t/h）	○
20		热源流量（t/h）	○
21		热源供水温度（℃）/蒸汽温度（℃）	○
22		热源回水温度（℃）	○
23		热源供水压力（MPa）/蒸汽压力（MPa）	○
24		热源回水压力（MPa）	○
25		系统热负荷（MW）	○
26	失效持续时间运行数据	室外平均温度（℃）	○
27		系统平均流量（t/h）	○
28		热源平均流量（t/h）	○
29		热源平均供水温度（℃）/平均蒸汽温度（℃）	○
30		热源平均回水温度（℃）	○
31		热源平均供水压力（MPa）/平均蒸汽压力（MPa）	○
32		热源平均回水压力（MPa）	○
33		系统供热量（GJ）	○
注：“√”为必选项，“○”为可选项。			

A.2 元件修理与替换信息记录按表 A.2 的规定执行。

表 A.2 元件修理与替换信息记录

序号	记录项目	内容	要求
1	失效隔离	阀门关闭情况	○
2		电气设备关闭情况	○
3	临时性修理过程	修理时间（时）	√
4		人员数量（人）	○
5		设备和车辆使用情况（台）	○
6		主要步骤和方法	○
7		有效期	○
8		再修理计划	○
9	长期性修理过程	修理时间（时）	√
10		人员数量（人）	○
11		设备和车辆使用情况（台）	○
12		主要步骤和方法	○
13	替换元件基础信息	元件档案编号	√
14		名称	√
15		型号和规格	√
16		额定参数	√
17		位置	√
18		敷设情况	√
19		安装情况	√
20		功能	√
21		投入运行时间（__年__月__日）	√
注：“√”为必选项，“○”为可选项。			

A.3 元件失效影响信息记录按表 A.3 的规定执行。

表 A.3 元件失效影响信息记录

序号	记录项目	内容	要求
1	供热质量损失	关停的最大供热面积（m²）	√
		供热面积关停率	√
2		供热量降低率	○
3		系统流量降低率	○
4	环境破坏	对植被破坏情况	√
5		对建筑物破坏情况	√
6		对基础设施破坏情况	√
7		对车辆破坏情况	√
8		对设备破坏情况	√
9	人员伤亡	死亡人数（人）	√
10		重伤人数（人）	√
11		轻伤人数（人）	√
12		轻微伤人数（人）	√
13	经济损失	元件修理和替换费用（万元）	√
14		赔偿费用（万元）	√
15		其他费用（万元）	√
注：“√”为必选项，“○”为可选项。			

附 录 B

(规范性)

失效模式、失效描述与失效原因分类

B.1 失效模式分类按表 B.1 的规定执行。

表 B.1 失效模式分类

序号	模式类别	说明
1	不能按指令启动	不能启动电动机
2	不能按指令停车	不能停车或不正确的关闭过程
3	误停车	意外关闭
4	无指令运行	不希望的启动
5	事故	严重破坏(破损、爆炸等)
6	高输出	规范以上的输出压力/温度
7	低输出	规范以下的输出功率/压力/温度
8	不稳定输出	波动或不稳定的压力/温度
9	外漏	燃料、加热介质或被加热介质泄漏至环境中
10	内漏	加热介质或被加热介质泄漏至其他部位
11	振动	过分振动
12	噪声	过分噪声
13	过热	过高温度
14	参数偏离	监测的参数超过允许值
15	异常仪器读数	如错误报警、故障读数
16	结构性缺陷	如结构破裂
17	一般运行问题	零件松动、变色、脏污等
18	其他	补充说明
19	未知	不充分的或遗漏的信息

B.2 失效描述分类按表 B.2 的规定执行。当超过 1 个失效描述类别，应判断出最重要的 1 个，尽量避免表中分类 6。

表 B.2 失效描述分类

序号	描述类别	说明
1	一般机械性失效	关于某些机械缺陷的失效，但不知道进一步的详情
1.1	泄漏	液体或气体的外泄或内泄，如果失效模式在设备单元级就是泄漏，应尽可能使用因果关系更为密切的失效描述
1.2	振动	异常振动，如果失效模式在设备级就是振动，应尽可能使用因果关系更为密切的失效描述
1.3	间隙/找正失效	由故障的间隙和找正引起的失效
1.4	变形	扭转、弯曲、压曲、凹痕、屈服、收缩等
1.5	松动	断开、零件松动
1.6	粘着	由于非变形或非间隙/找正失效引起的粘着、卡住、压紧
2	一般材料失效	材料缺陷造成的失效，但不知道进一步详情
2.1	气蚀	与泵和阀等设备有关

2.2	腐蚀	所有腐蚀模式，既包含湿式（电化学），也包含干式（化学）
2.3	冲蚀	冲蚀磨损
2.4	磨损	腐蚀和胶着磨损，如刻痕、表面磨损、划伤、微振磨损等
2.5	破损	破碎、破裂、裂缝
2.6	疲劳	如果破损的原因可追溯到疲劳，应该用此特征
2.7	过热	由于过热或灼烧使材料破坏
2.8	爆炸	组件爆炸、膨胀、爆裂、内向爆炸等
3	一般仪器失效	仪器失效但不知道详情
3.1	控制失效	不能控制
3.2	无信号/指示/警报	无预期的信号/指示/警报
3.3	错误信号/指示/警报	对应实际过程，信号/指示/警报是错误的，可能是假的、时有时无、波动、反复无常
3.4	不能调整	校准错误，参数漂移
3.5	软件失效	由于软件失效造成故障或不能控制、监测、工作
3.6	共因失效	一些仪器组件同时失效
4	一般电气失效	电力供应和传输的失效，但不知道进一步的详情在何处
4.1	短路	短路
4.2	开路	线缆脱开，中断，损坏
4.3	无功率/电压	失去电力供应或供应不足
4.4	错误功率/电压	故障电力供应，如过电压
4.5	接地/绝缘故障	接地故障，低电阻
5	一般外部影响	由某些外部事件或边界物质引起的失效，但不知道进一步的详情
5.1	堵塞	由于污浊、污染、结冰等造成的流动限制或堵塞
5.2	污染	污染流体、空气或地面，如润滑油污染
5.3	其他外部影响	来自邻近系统的外来物体、冲击、环境影响
6	一般其他	未列入上述种类的描述
6.1	未知	对失效描述无可用的信息

B.3 失效原因分类按表 B.3 的规定执行。当超过 1 个失效原因类别，应判断出最重要的 1 个，尽量避免表中分类 5。

表 B.3 失效原因分类

序号	原因类别	说明
1	一般与设计相关的原因	对运行和（或）维修的不适当设计引起的失效，但不知道进一步详情
1.1	不合适的容量	不适当的尺寸或容量
1.2	不合适的材料	不合理的材料选择
1.3	不合理的设计	不适当的设备设计或配置（形状、尺寸、技术、配置、操作性、维修性等）
2	一般与制造安装相关的原因	制造或安装引起的失效，但不知道进一步的详情
2.1	制造失误	制造或加工失效
2.2	安装失误	安装或配置失效（不包括维修后的装配）
3	一般与运转维修相关的失效	与设备运转/使用或维修相关的失效，但不知道进一步的详情
3.1	非设计工况	非设计工况或无意识的工作状况，在工作范围之外运转
3.2	运行错误	运行期间错误、误用、疏忽、失察等
3.3	维修错误	维修期间错误、误用、疏忽、失察等
3.4	预期的磨损和撕裂	设备单元正常工作引起的磨损和撕裂造成的失效

4	一般与管理相关的失效	与某些管理系统相关的失效，但不知道进一步的详情
4.1	文件错误	与程序、规范、图纸、报告相关的失效
4.2	管理失误	与计划、组织、质量控制/保证等相关的失效
5	一般其他	不能列入上述种类的失效原因
5.1	未知	对失效描述无可用的信息

附录 C
(资料性)
可靠性分析示例

C.1 不可修复元件可靠性分析

C.1.1 不可修复元件基本情况

设管道为不可修复元件。统计时间为连续的 3 个供暖期，每个供暖期 179d (0.490a)。3 个供暖期内供热管网的管道总长度分别为 242.6km、259.0km 和 270.8km。管道共失效 18 次，各次失效与相关信息见表 C.1。

以第 10 次失效为例，失效发生在第 2 个供暖期内第 128 天 (0.351a)。

表 C.1 管道失效与相关信息

失效记录序号	供暖期序号	失效发生时间	
		d	a
1	1	7	0.019
2		81	0.222
3		108	0.296
4		128	0.351
5	2	25	0.068
6		32	0.088
7		39	0.107
8		43	0.118
9		93	0.255
10		128	0.351
11		163	0.447
12		170	0.466
13		172	0.471
14	3	20	0.055
15		63	0.173
16		97	0.266
17		134	0.367
18		150	0.411

C.1.2 不可修复元件可靠性指标计算

C.1.2.1 失效率的点估计值：

根据 7.1.1，管道失效率的点估计值为：

$$\begin{aligned}\hat{\lambda} &= \frac{r}{\sum_{i=1}^m n_i t_i} = \frac{18}{(242.6 + 259.0 + 270.8) \times 0.49} \\ &= 0.0476 \text{ (km} \cdot \text{a)}^{-1}\end{aligned}$$

C.1.2.2 失效率的置信区间：

根据 7.1.2，在 90%置信水平 (α=0.1) 下，管道失效率的置信区间下限为：

$$\begin{aligned}\hat{\lambda}_1 &= \hat{\lambda} \frac{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}}(2r)}{2r} = 0.0476 \times \frac{\chi^2_{0.05}(36)}{36} = 0.0476 \times \frac{23.269}{36} \\ &= 0.0308 \text{ (km} \cdot \text{a)}^{-1}\end{aligned}$$

管道失效率的置信区间上限为：

$$\begin{aligned}\hat{\lambda}_2 &= \hat{\lambda} \frac{\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}}(2r+2)}{2r} = 0.0476 \times \frac{\chi^2_{0.95}(38)}{36} = 0.0476 \times \frac{53.384}{36} \\ &= 0.0706 \text{ (km} \cdot \text{a)}^{-1}\end{aligned}$$

在 90%置信水平下，管道失效率的置信区间为[0.0308 (km·a)⁻¹，0.0706 (km·a)⁻¹]。

C.1.2.3 可靠度：

根据 7.2.1，统计周期内每 km 管道可靠度为：

$$\begin{aligned}R(t) &= e^{-\hat{\lambda}t} = e^{-0.0476 \times 0.49} \\ &= 0.9769\end{aligned}$$

C.1.2.4 平均失效前工作时间：

根据 7.2.2，每 km 管道平均失效前工作时间为：

$$\begin{aligned}MTTF &= \frac{1}{\hat{\lambda}} = \frac{1}{0.0476} \\ &= 21.0084 \text{ a}\end{aligned}$$

C.2 可修复元件可靠性分析

C.2.1 可修复元件基本情况

设热力站二次侧循环水泵为可修复元件。统计时间为连续的 2 个供暖期，每个供暖期 179d（0.490a）。统计时间内循环水泵（无备用）失效 9 次，各次失效与相关信息见表 C.2。

表 C.2 循环水泵失效与相关信息

失效记录序号	供暖期序号	水泵数量	失效发生时间		修复时间	
			(d)	(a)	(h)	(a)
1	1	50	21	0.058	12	1.89×10 ⁻³
2			89	0.244	18	2.83×10 ⁻³
3			129	0.353	6	9.43×10 ⁻⁴
4	2	55	45	0.123	10	1.57×10 ⁻³
5			72	0.197	12	1.89×10 ⁻³
6			94	0.258	20	3.14×10 ⁻³
7			117	0.321	8	1.26×10 ⁻³
8			134	0.367	6	9.43×10 ⁻⁴
9			158	0.433	24	3.77×10 ⁻³

C.2.2 可修复元件可靠性指标计算

C.2.2.1 失效率的点估计值：

根据 7.1.1，循环水泵失效率的点估计值为：

$$\hat{\lambda} = \frac{r}{\sum_{i=1}^m n_i t_i} = \frac{9}{50 \times 0.49 + 55 \times 0.49}$$

$$= 0.1749 \text{ a}^{-1}$$

C. 2. 2. 2 平均失效间隔工作时间：

根据 7.3.1，循环水泵平均失效间隔工作时间为：

$$MTBF = \frac{1}{\hat{\lambda}} = \frac{1}{0.1749}$$

$$= 5.7167 \text{ a}$$

C. 2. 2. 3 修复率的点估计值：

根据 7.3.2，循环水泵修复率的点估计值为：

$$\hat{\mu} = \frac{r}{\sum_{i=1}^r \tau_i} = \frac{9}{1.82 \times 10^{-2}}$$

$$= 4.93 \times 10^2 \text{ a}^{-1}$$

C. 2. 2. 4 平均修复时间：

根据 7.3.4，循环水泵平均修复时间为：

$$MTTR = \frac{1}{\hat{\mu}} = \frac{1}{4.93 \times 10^2}$$

$$= 2.03 \times 10^{-3} \text{ a}$$

C. 2. 2. 5 瞬时可用度：

根据 7.3.5，统计周期内循环水泵瞬时可用度为：

$$A(t) = \frac{\hat{\mu}}{\hat{\lambda} + \hat{\mu}} + \frac{\hat{\lambda}}{\hat{\lambda} + \hat{\mu}} e^{-(\hat{\lambda} + \hat{\mu})t} = \frac{4.93 \times 10^2}{0.1749 + 4.93 \times 10^2} + \frac{0.1749}{0.1749 + 4.93 \times 10^2} \times e^{-(0.1749 + 4.93 \times 10^2) \times 0.49}$$

$$= 0.9997$$

C. 2. 2. 6 稳态可用度：

根据 7.3.6，循环水泵稳态可用度为：

$$A_0 = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{\hat{\mu}}{\hat{\mu} + \hat{\lambda}} = \frac{4.93 \times 10^2}{4.93 \times 10^2 + 0.1749}$$

$$= 0.9997$$