



指导性文件

GD013-2024

中国船级社

# 油气设备可靠性、可用性、可维修性 和安全性（RAMS）评估指南

2024年10月1日生效

北京

# 目 录

前 言 .....	1
第 1 章 通 则 .....	1
1.1 适用范围 .....	1
1.2 一般说明 .....	1
1.3 接受的规范和标准 .....	1
1.4 术语 .....	2
1.5 缩略语 .....	4
第 2 章 油气设备 RAMS .....	6
2.1 一般说明 .....	6
2.2 RAMS 与油气设备系统运行质量 .....	6
2.3 油气设备 RAMS 的要素 .....	6
2.4 影响油气设备 RAMS 的因素 .....	8
第 3 章 RAMS 参数体系 .....	10
3.1 一般说明 .....	10
3.2 可靠性参数 .....	10
3.3 维修性参数 .....	13
3.4 可用性参数 .....	14
3.5 安全性参数 .....	16
第 4 章 油气设备 RAMS 评估流程 .....	17
4.1 一般说明 .....	17
4.2 系统功能分析 .....	17
4.3 RAMS 初步分析 .....	19
4.4 数据收集与分析 .....	20
4.5 系统模型构建 .....	22
4.6 RAM 分析 .....	26
4.7 安全性分析 .....	29
4.8 系统改进与优化 .....	32
4.9 RAMS 分析结论与报告 .....	32
第 5 章 全生命周期 RAMS 管理 .....	34
5.1 一般说明 .....	34
5.2 油气设备全生命周期阶段划分 .....	34
5.3 全生命周期 RAMS 管理及任务 .....	34
附录 1 常用故障分布模型 .....	37
附录 2 RAMS 评估报告内容 .....	41
附录 3 水下采油树 RAM 分析示例 .....	43

# 前 言

随着油气资源的社会需求不断增加，油气资源开发、存储、输送、利用的产业化发展加速演进，油气系统面临大型化、复杂化发展趋势，其安全性和可靠性的意义进一步凸显。如何评估油气设备及系统的可靠性、可用性和安全性，已成为业界关注的重点问题。可靠性、可用性、可维修性和安全性（RAMS）评估为油气设备安全性和可靠性设计提供了有效的评价工具，也逐渐成为国际标准对关键油气设备的规定要求。然而，当前油气设备领域尚缺乏 RAMS 评估技术的指导性文件，亟需相对完整的 RAMS 理论框架和技术指导。

基于业界需求，中国船级社制定了本指南，包含 5 个章节及 3 个附录，以油气设备领域对 RAMS 评估技术的需求为出发点，明确了油气设备 RAMS 的概念基础、基本要素和影响因素，归纳了 RAMS 参数体系，建立了基于可靠性框图模型和蒙特卡洛仿真方法的油气设备 RAMS 评估流程，为开展油气设备 RAMS 评估、优化设计、运营维护提供了决策工具。本指南给出了几种常用的故障分布模型，为可靠性参数和维修性参数的选择和描述提供基本工具。本指南给出了 RAMS 评估报告的主要内容概要，为开展油气设备 RAMS 评估提供指导和参考。此外，本指南以水下采油树设备作为示例，简要给出了油气设备开展 RAM 分析的过程，为开展同类油气设备的 RAM 分析提供基本示范。

本指南是中国船级社为油气设备开展 RAMS 评估的一般建议性技术指导，非强制性要求，指南的目的是为评估人员提供理论概念、方法流程和原则要求等方面的说明和指导。本指南由中国船级社编写和更新，通过网页 <http://www.ccs.org.cn> 发布，本指南使用相关方对于指南的意见可反馈至 [rd@ccs.org.cn](mailto:rd@ccs.org.cn)。

# 第 1 章 通 则

## 1.1 适用范围

本指南为评估油气设备的可靠性、可用性、可维修性和安全性（RAMS）性能，规定了开展 RAMS 评估的方法流程、基本原则和一般要求，为油气设备设计方、运营方、评估机构以及设备与系统的供应方提供技术指导。

本指南适用于可维修的、需长期稳定运行的油气设备，包括水下、水面及岸上的石油天然气相关的生产、输送、处理等设备，例如水下生产系统、FPSO/FSRU/LNG 中的生产处理与转化模块、海上固定式或浮式油气生产平台、岸基油气处理装置，以及海底管道的阀门、控制或加压加热等辅助设备。在其设计阶段、试验验证及运营阶段开展可靠性、可用性及安全性等性能指标的预测评估，并基于分析结果为油气设备的设计、生产、采购、检测和评估提供指导。

## 1.2 一般说明

油气设备 RAMS 评估是通过全面地分析油气设备的组成、结构、部件性能来评价其系统总体在预期寿命周期内所表现出来的可靠性、可用性、可维修性和安全性指标，并通过制定和调整维修计划以提高可用性能、降低成本，为性能评估、采购管理、维修保养提供决策依据。

## 1.3 接受的规范和标准

1.3.1 本指南接受下列规范和标准及其等效规范和标准。凡是注明版本号的引用文件，仅引用版本适用。凡是不注明版本号的引用文件，其最新版本适用于本指南。

1.3.2 下列规范和标准如与本指南有冲突，以本指南为准。

接受的规范和标准

表 1.3

序号	版本号	中文名称	对应的国际标准
1	—	中国船级社《船舶设备与系统可靠性验证指南》	—
2	—	海底生产系统可靠性、技术风险和完整性管理的推荐实施规程	API RP 17N-2018 Recommended Practice on Subsea Production System Reliability, Technical Risk, and Integrity Management
3	GB/T 20172-2006	石油天然气工业 设备可靠性和维修数据的采集与交换	ISO 14224:2016 Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment
4	GB/T 21562.1-2008	轨道交通 可靠性、可用性、可维修性和安全性规范及示例	IEC 62278:2002 Railway applications- Specification and demonstration of reliability,

			availability, maintainability and safety (RAMS)
5	GB/T 21562.2-2015	轨道交通 可靠性、可用性、可维修性和安全性规范及示例 第2部分：安全性的应用指南	—
6	GB/T 21562.3-2015	轨道交通 可靠性、可用性、可维修性和安全性规范及示例 第3部分：机车车辆 RAM 的应用指南	IEC/TR 62278-3:2010 Railway applications - Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS) - Part 3: Guide to the application of IEC 62278 for rolling stock RAM, MOD
7	GB/T 14099.9-2006	燃气轮机 采购 第9部分：可靠性、可用性、可维护性和安全性	ISO 3977-9:1999 Gas turbines-procurement - Part 9: Reliability, availability, maintainability and safety.

## 1.4 术语

### 1.4.1 油气设备 (Oil and Gas Equipment)

本指南所述油气设备系指用于水下、水上或岸上石油、天然气等碳氢化合物采集、集输、外输、分配、分离、增压、管道连接、设备间跨接、化学注入、气液转化、存储等功能的可维修的、需长期稳定运行的设备或系统的统称，包含动力、储存、控制、保护等方面的设备或系统。

### 1.4.2 产品 (Item)

能够被单独考虑的任何元器件、零部件、组件、设备或系统，在本指南应用中作为系统拆分、数据收集的最小单元。

### 1.4.3 可靠性 (Reliability)

在给定的时间和给定条件下，产品无故障履行规定功能的能力。

### 1.4.4 可用性 (Availability)

假定所需外部资源齐备，在给定条件下和给定瞬时或时段，产品处于履行规定功能状态的能力。

### 1.4.5 维修 (Maintenance)

旨在使产品保持或恢复至能履行规定功能的状态的一组活动。

### 1.4.6 维修性 (Maintainability)

在规定的使用条件下，在规定的时间内，按照规定的程序和方法维修时，可维修的产品保持或恢复到能完成规定功能的能力。

### 1.4.7 安全性 (Safety)

产品所具有的不导致人员伤亡、系统损坏、重大财产损失、不危害员工健康与环境的能力。

#### 1.4.8 危害 (Hazard)

对人、环境、资产等造成潜在伤害的物理状况。

#### 1.4.9 风险 (Risk)

导致伤害的危害发生概率及严重等级。

#### 1.4.10 事故 (Accident)

导致死亡、伤害、系统、服务丧失或环境破坏的一个或一系列非预期事件。

#### 1.4.11 故障 (Fault)

产品不能执行某要求功能的一种特征状态。不包括在预防性维护和其他有计划的行动期间，以及因缺乏外部资源条件下不能执行要求的功能。

**注：**故障经常作为功能项本身失效的结果，但也许在失效前就已经存在。

#### 1.4.12 失效 (Failure)

执行要求功能的某项能力的终结。

**注：**“失效”是一个事件，而区别于作为一种状态的“故障”。

**注：**实际上，故障和失效这两个术语经常做同义语用。

#### 1.4.13 危险故障 (Hazard Failure)

产品所有故障中引发事故（与安全相关的）的故障。

#### 1.4.14 致命失效 (Critical Failure)

造成产品执行规定功能能力立即终止的失效。

#### 1.4.15 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。

#### 1.4.16 失效机理 (Failure Mechanism)

导致失效的物理、化学或其他过程。

#### 1.4.17 失效模式 (Failure Mode)

失效时与运行状况有关的指定项目失效原因的预计或观察结果。

#### 1.4.18 失效率 (Failure Rate)

指工作到某时刻尚未失效的产品在此后单位时间内发生失效的概率。

#### 1.4.19 平均失效前时间 (Mean Time to Failures)

指产品无故障运行的平均时间。

#### 1.4.20 平均故障间隔时间 (Mean Time between Failures)

在给定条件下，产品相继两次故障之间的平均时间。

#### 1.4.21 不可修复系统 (Repairable System)

在发生故障后，无法进行修复，只能通过更换整个系统或部分设备来恢复运行的系统。

#### 1.4.22 可修复系统 (Unrepairable System)

在发生故障后，可以通过维修和更换零部件等方式修复并恢复运行的系统。

#### 1.4.23 修复性维修 (Corrective Maintenance)

在出现失效或测出故障后，为使产品复原至能履行规定功能的状态而进行的维修。

#### 1.4.24 预防性维修 (Preventive Maintenance)

为降低失效概率或减少功能降级, 按预定的时段或设定的准则对产品所进行的维修。

#### 1.4.25 计划性维修 (Scheduled Maintenance)

按既定时间计划进行的预防性维修。

#### 1.4.26 实际维修时间 (Active Maintenance Time)

不包括后勤延迟的维修时间。

#### 1.4.27 维修人时 (Maintenance man-hour)

所有维修人员在规定的维修工作中或规定时间区间内所用的以小时表示的累积维修时间。

#### 1.4.28 总时间 (Total Time)

油气设备运行周期内的所有时间, 包括能工作时间和不能工作时间。

#### 1.4.29 能工作时间 (Uptime)

油气设备处于能执行其预定功能的状态的时间, 包括不工作时间、待命时间、反应时间和任务时间。

#### 1.4.30 不能工作时间 (Downtime)

油气设备不处于能执行其预定功能的状态的时间或不能执行其预定功能的时间, 包括维修时间和延误时间。

#### 1.4.31 容许风险 (Tolerable Risk)

可接受的最大级别的风险。

#### 1.4.32 全寿命周期 (Life Cycle)

从系统的构思开始到系统不能再使用而退役或淘汰的时间内所发生的活动。

#### 1.4.33 可靠性预计 (Reliability Prediction)

根据设备结构和使用特性来评估其可靠性水平。

#### 1.4.34 可靠性分配 (Reliability Apportionment)

指在系统设计阶段, 将系统规定的可靠性指标合理地分配给组成系统的各部件的过程。

### 1.5 缩略语

下列缩略语适用于本指南:

RAMS: 可靠性、可用性、可维修性和安全性 (Reliability, Availability, Maintainability and Safety);

RAM: 可靠性、可用性、可维修性 (Reliability, Availability and Maintainability);

MTTF: 平均失效前时间 (Mean Time to Failure);

MTBF: 平均故障间隔时间 (Mean Time between Failure);

MTTR: 平均修复时间 (Mean Time to Repair);

FMEA: 失效模式与影响分析 (Failure Mode and Effect Analysis);

FMECA: 失效模式、影响及危害性分析 (Failure Mode, Effect and Criticality Analysis);

FTA: 故障树分析 (Fault Tree Analysis);

RBD: 可靠性框图 (Reliability Block Diagram);

HAZOP: 危险与可操作性分析 (Hazard and Operability Analysis);

HAZID: 危险辨识分析 (Hazard Identification Analysis) ;

FRACAS: 故障报告、分析及纠正措施系统 (Failure Report Analysis and Corrective Action System) ;

ALARP: 最低合理可行原理 (As Low As Reasonably Practicable) ;

GAMAB: 综合最优原理 (Globalement Au Moins Aussi Bon, 法语) ;

EME: 最小内源性死亡原理 (Minimum Endogenous Mortality) 。

## 第 2 章 油气设备 RAMS

### 2.1 一般说明

本章描述有关 RAMS 和 RAMS 工程的基本概念,包括 RAMS 与油气设备系统运行质量之间的关系、RAMS 的要素及其相互关系,以及影响油气设备 RAMS 的因素,为使用者提供足够的背景知识和概念,使本指南能够有效运用到油气设备系统中。

### 2.2 RAMS 与油气设备系统运行质量

RAMS 是系统的长期工作特性,在系统的全寿命周期内,可通过应用已建立的工程概念、方法、工具和技术实现。系统 RAMS 可以用与系统或子系统或组成系统的部件有关的定性和定量指标来表示,且可保证达到规定的功能、可用和安全。

油气设备 RAMS 体现系统能保证在指定的时间内安全地实现油气设备预定功能水平的置信度。RAMS 对油气设备在油气开发、运输、存储过程中的系统运行质量有明显的影响。系统运行质量还受其他有关功能和性能特性的影响,例如设备运行间隔、运行荷载和费用结构。其关系如图 2.2 所示。

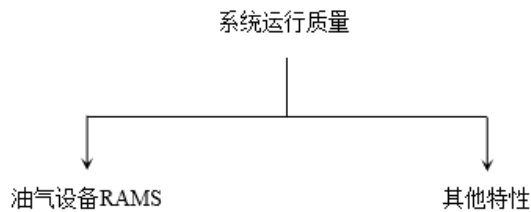


图 2.2 系统运行质量与油气设备 RAMS 的关系

### 2.3 油气设备 RAMS 的要素

油气设备 RAMS 由可靠性、可用性、可维修性和安全性等要素组成,在各要素相互关系中,安全性和可用性相互关联,如不能处理好安全性要求和可用性要求之间的冲突,会影响获得可信赖的系统。油气设备 RAMS 各要素的相互关系如图 2.3 所示。

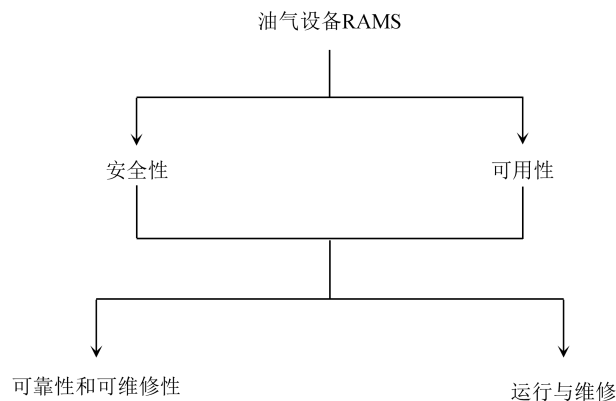


图 2.3 油气设备 RAMS 各要素及相互关系

只有满足了可靠性和可维修性所有要求,并控制正在进行的、长期的维修、运营及系统环境才能达到运行期间的安全性和可用性目标。

安全防护反映油气设备系统对抗故意破坏或不合理的人员行为的防御能力,属于 RAMS 的更深层次上的要素,但是安全防护需考虑的事项不在本指南的范围之内。

### 2.3.1 可用性概念基础

可用性的技术概念以下述内容为基础：

- (1) 可靠性包括：
  - 1) 规定应用及环境下所有可能的系统失效模式；
  - 2) 每个失效发生的概率，或者每个失效出现的几率；
  - 3) 失效对系统功能的影响。
- (2) 可维修性包含：
  - 1) 执行计划维修的时间；
  - 2) 故障检测、识别及定位的时间；
  - 3) 失效系统的维修时间（修复性维修）。
- (3) 运行与维修包括：
  - 1) 系统寿命周期内全部可能的工作模式和必要维修；
  - 2) 人为因素问题。

### 2.3.2 安全性概念基础

安全性的技术概念以下述内容为基础：

- (1) 在所有运行、维修和环境模式下系统中所有可能的危害。
- (2) 每个危害的特征，以危害后果的严重性表示。
- (3) 安全性\安全相关的失效包括：
  - 1) 导致危害的全部系统失效模式（安全相关的失效模式），它是全部可靠性失效模式的子集。
  - 2) 每个安全相关系统失效模式发生的概率；
  - 3) 在应用中，可能导致事故的事件（即导致事故的危害）的顺序和\或并发率、失效、工作状态、环境条件等等；
  - 4) 在应用中，每个事件、失效、工作状态和环境条件等出现的概率。
- (4) 系统的安全相关部件的可维修性包括：
  - 1) 与安全相关失效模式或危害有关的系统中子系统或其他部件维修的方便性；
  - 2) 系统安全有关部件在维修工作期间发生错误的概率；
  - 3) 系统恢复到安全状态的时间。
- (5) 系统操作与系统安全相关部件的维修包括：
  - 1) 人为因素对系统安全相关部分的有效维修及系统安全运营的影响；
  - 2) 用于系统安全有关部分的有效维修和系统安全运营的工具、设备和工序；
  - 3) 有效的控制、处理危害并减轻危害后果的措施。

在应用和环境界限内运行的系统的故障，将对系统行为产生影响。所有故障都将对系统可靠性产生负面影响，而其中只有特定的一些故障模式将在特定的应用中对安全性产生负面影响，导致危险事件发生。因此，在油气设备系统中故障是危险的主要来源，危险故障（安全相关的故障模式）是全部故障的子集，其联系如图 2.3.2 所示。

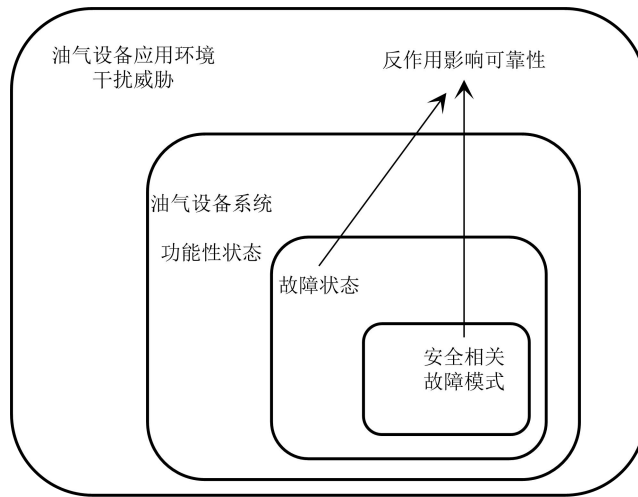


图 2.3.2 油气设备系统功能状态关系图

## 2.4 影响油气设备 RAMS 的因素

### 2.4.1 总则

油气设备 RAMS 主要受到三个方面因素的影响，分别为系统寿命周期内任何阶段系统内部的失效（系统环境），运营过程中产生的系统失效（运营环境），以及在系统维修中产生的系统失效（维修环境），如图 2.4.1 所示。

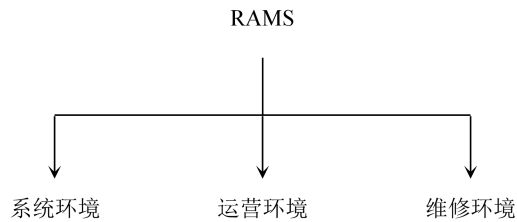


图 2.4.1 RAMS 的影响因素类型

为了保证油气设备系统可靠性，需要确定影响系统 RAMS 的因素，估计其影响，并且在系统全寿命周期内应用适当的措施来控制产生这些影响的原因，优化系统 RAMS 性能。

### 2.4.2 因素分类

油气设备应用环境中影响 RAMS 的因素普遍存在，图 2.4.2 包含了影响油气设备 RAMS 的一些普遍因素，并说明了这些因素之间的相互关系。为确定影响油气设备 RAMS 的具体因素，在指定的环境中应考虑每一个普通的影响因素，这些因素可分为人为因素和特定因素两类。

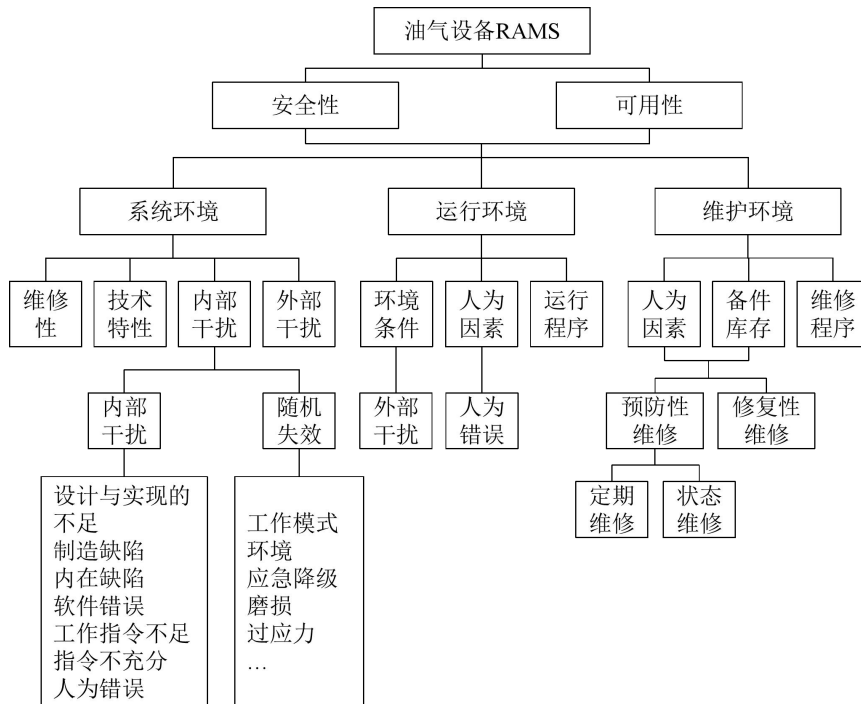


图 2.4.2 影响油气设备 RAMS 的因素

人为因素可规定为人的性格、期望和行为对系统的影响。典型油气设备系统相关的人群涉及运营操作人员、维修人员，每个人以不同的方式反作用于油气设备系统，并对系统具有重大的潜在影响。因此，在油气设备 RAMS 寿命周期内，应注意控制人为因素。人为因素包括但不限于以下方面：

- (1) 人机间系统功能的分配；
- (2) 人的相互配合；
- (3) 人的能力、动机；
- (4) 人对风险的感知；
- (5) 人为错误；
- (6) 人员培训等。

特定因素系指系统运营、环境、应用条件、工作条件等方面的影响因素，包括但不限于以下方面：

- (1) 系统运营：
  - 1) 系统应执行的工作和执行该工作的条件；
  - 2) 系统寿命需求，包括系统寿命期望、工作强度、寿命周期费用等方面的要求。
- (2) 环境：
  - 1) 油气设备系统工作的物理环境，包括温度、湿度、振动、海水腐蚀、海生物附着等方面；
  - 2) 油气设备运行环境中进行系统测试的有限机会。
- (3) 应用条件：
  - 1) 既有基本设施与系统对新的油气设备系统的影响和约束；
  - 2) 在寿命周期内油气设备系统维修服务的需要。
- (4) 工作条件：
  - 1) 油气设备系统应用场地的维修条件；
  - 2) 既有设备与新设备的集成。

## 第3章 RAMS 参数体系

### 3.1 一般说明

RAMS 参数是指油气设备 RAMS 定量化描述的数学属性, RAMS 参数体系是 RAMS 的参数集合, 包括可靠性参数、维修性参数、可用性参数和安全性参数四种类型。本章对油气设备 RAMS 评估中涉及的 RAMS 参数进行描述。

### 3.2 可靠性参数

#### 3.2.1 失效概率密度与累计失效分布

失效概率密度是指某时刻单位时间内产品失效数量占总数的百分比, 通常用  $f(t)$  表示失效概率密度函数。累计失效分布函数, 又称累计故障概率, 是指在某时刻  $T$  以前发生的产品失效的概率, 通常用  $F(t)$  表示。

$$F(t) = P(T < t) = \int_0^t f(t)dt$$

#### 3.2.2 可靠度

可靠度是指产品在规定的条件和规定的时间内, 能够完成规定功能的概率, 表示为  $R(t)$ , 即产品寿命  $T$  超过规定时间  $t$  的概率。

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(t)dt$$

因此,  $R(t) + F(t) = 1$ , 累计失效分布函数  $F(t)$  又称为不可靠度。

可靠度函数也可通过统计的方法获得。假定有  $N$  个产品, 在规定的时间内失效产品数量为  $n(t)$ , 则可靠度可以估计为:

$$\bar{R}(t) = \frac{N - n(t)}{N}$$

#### 3.2.3 失效率

失效率是可靠性参数体系的关键参数之一, 是指工作到某时刻尚未失效的产品在此后单位时间内发失效的概率, 通常记为  $\lambda$ 。失效率随时间的变化情况可通过失效率函数  $\lambda(t)$  来表示, 也称为故障率函数或风险函数。

$$\lambda(t) = \frac{\int_t^{t+\Delta t} f(t)dt}{\Delta t}$$

失效率度函数也可通过统计的方法获得。假定有  $N$  个产品, 在规定的时间内失效产品数量为  $n(t)$ , 在  $t+\Delta t$  时间内, 新增的产品失效数量为  $\Delta n(t) = n(t+\Delta t) - n(t)$ , 则产品失效概率为  $\frac{\Delta n(t)}{N - n(t)}$ 。因此, 单位时间内的失效概率表示为:

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(t)}{\Delta t} \frac{1}{N - n(t)}$$

国际通常采用菲特 (FIT) 作为高可靠性产品的失效率单位 ( $10^{-9}/h$ ), 即:

$$1\text{菲特} = \frac{1\text{个}}{1000\text{个} \times 10^6 h}$$

### 3.2.4 可靠性参数转化关系

失效概率密度  $f(t)$ 、累计失效分布  $F(t)$ 、失效率  $\lambda(t)$  与可靠度  $R(t)$  可相互转化。根据定义，失效率函数可表示为：

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T < t + \Delta t | T > t)}{\Delta t}$$

且有

$$P(t < T < t + \Delta t | T > t) = \frac{P(t < T < t + \Delta t)}{P(T > t)} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)}$$

因此，

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \frac{1}{R(t)} = \frac{F'(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

由  $F(t) = 1 - R(t)$  可得， $F'(t) = -R'(t)$ ，即  $f(t) = -R'(t)$ ，则有：

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)}$$

求解微分方程可得：

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}$$

则：

$$f(t) = \lambda(t) e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}$$

因此，不同可靠性参数  $R(t)$ 、 $F(t)$ 、 $f(t)$ 、 $\lambda(t)$  之间相互关联，其关系如图 3.2.4 所示。

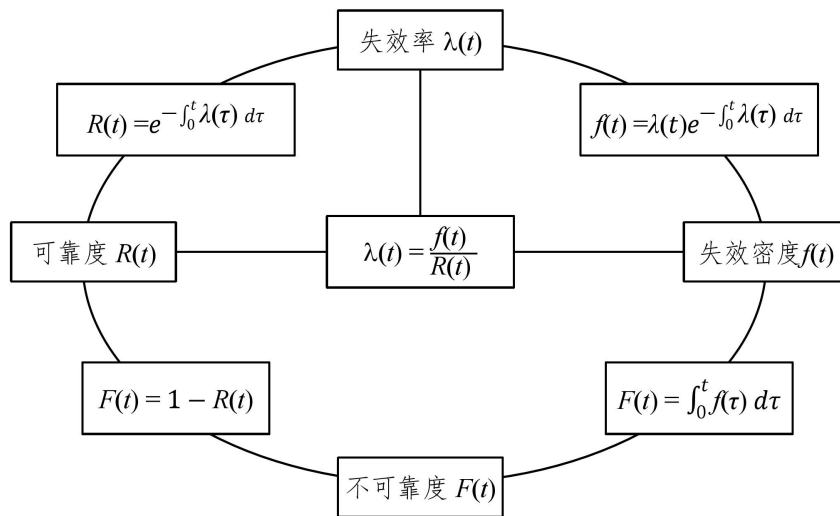


图 3.2.4 可靠性参数关系图

### 3.2.5 平均失效前时间 $MTTF$

平均失效前时间  $MTTF$  (Mean Time to Failure)，也称平均无故障时间，是指产品能够正常运行的时间期望，可表示为：

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt$$

$MTTF$  通常用于表示不可修复产品可靠性的统计参数，反映在规定的条件下和规定的时间内产品寿命单位总数与失效产品总数之比。可表示如下：

$$MTTF = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i$$

其中， $N_0$ 为同样条件下不可修复产品的试验数量， $t_i$ 为第*i*个产品的失效时间。

对于不可修复产品，失效时间即产品寿命，因此 *MTTF* 即产品平均寿命。

### 3.2.6 平均故障间隔时间 *MTBF*

平均故障间隔时间 *MTBF* (Mean Time between Failures) 是表示可修复产品可靠性的统计参数，是指在规定的条件下和规定的时间内产品的寿命单位总数与故障次数之比。

对于可维修系统，设备运行时间可粗略划分为正常工作状态时间和故障维修时间两部分。设定正常工作状态的时间为  $T_{fi}$ ，故障维修时间为  $T_{ri}$ ，则其运行状态可简化如图 3.2.6 所示。

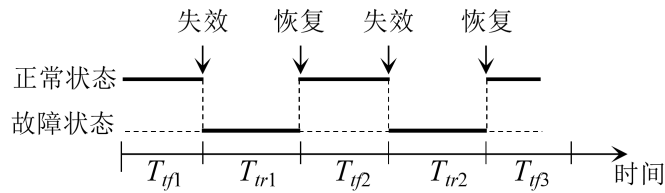


图 3.2.6 可维修系统运行状态示意图

设某个可修复产品在使用过程中发生了  $N_0$  次故障，故障修复后继续投入使用，每次工作持续时间为  $T_{f1}, T_{f2}, \dots, T_{f_{N_0}}$ ，则平均故障间隔时间 *MTBF* 可计算如下：

$$MTBF = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} T_{fi}$$

当产品的寿命服从指数分布时，产品故障率为常数  $\lambda$ ，则有

$$MTBF = 1/\lambda$$

另外，对于具有周期性往复性动作的产品，也可以周期为量纲代替时间，用平均故障间隔周期 *MCBF* (Mean cycle between failures) 来表征。

*MTBF* 是油气设备的主要可靠性参数，适用于油气设备系统及其下属各级可维修产品。

### 3.2.7 其他可靠性参数统计量

(1) 产品故障时间中位数  $t_{med}$ ，表示累计故障概率达到 0.5 时的寿命值，此时：

$$R(t_{med}) = F(t_{med}) = 0.5$$

(2) 产品故障时间众数  $t_{mod}$ ，表示最可能发生故障的时间，此时， $f(t)$  数值取得最大值  $f(t_{mod})$ 。

(3) 产品故障时间方差，表示故障时间的离散程度，表示为：

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - MTTF)^2 f(t) dt$$

(4) 平均故障率函数  $AFR(t)$ ，表示时间段 0~*t* 内的故障率平均值，表示为：

$$AFR(t) = \frac{L(t)}{t}$$

(5) 条件可靠度函数，表示产品在正常工作  $T_0$  时间后，继续正常工作时间 *t* 的概率，表示为：

$$R(t|T_0) = P(T > T_0 + t | T > T_0)$$

(6) 剩余平均故障时间  $MTTF_{rest}$ , 表示产品正常工作  $T_0$  的条件下, 剩余寿命的平均值, 表示为:

$$MTTF_{rest} = \int_{T_0}^{\infty} R(t|T_0) dt$$

### 3.3 维修性参数

维修性表征产品预防故障和修复故障的能力, 表达产品维修的难易程度, 是产品设计所赋予的一种固有属性。维修性包括修复性维修和预防性维修两类。

修复性维修是针对发生故障的产品开展的非计划性维修, 也可称为修理或修复。

预防性维修是针对尚未发生故障的产品开展的有计划的维修, 也可称为维护或保养。

故障维修时间包括故障实际维修时间和故障管理时间, 其中故障实际维修时间包括:

- (1) 准备时间;
- (2) 故障鉴别时间;
- (3) 故障定位时间;
- (4) 获得人员及配件时间;
- (5) 排除故障时间;
- (6) 检验时间。

维修性参数以定量的方式描述产品的维修能力, 主要包括维修度、维修率和平均维修时间。

#### 3.3.1 维修度

维修度表示在规定的使用条件下, 在规定的时间内, 按规定的程序和方法进行维修时, 产品保持或恢复到能完成规定功能状态的概率。维修度通常记作  $M$ , 是维修时间  $\tau$  的参数,  $M(\tau)$  为维修度函数。记维修时间为随机变量  $T$ , 则从维修开始时刻到某一时刻  $\tau$ , 能完成修复的概率为:

$$P(T \leq \tau) = M(\tau), \quad 0 \leq M(\tau) \leq 1$$

如果维修度函数  $M(\tau)$  连续可导, 则  $M(\tau)$  的导数即为维修密度函数  $m(\tau)$ , 则有:

$$m(\tau) = \frac{dM(\tau)}{d\tau}$$

$$M(\tau) = \int_0^{\tau} m(\tau) d\tau$$

#### 3.3.2 维修率

维修率表示维修时间达到某一时刻  $\tau$  尚未维修完成的产品, 在  $\tau$  时刻后的单位时间内完成维修的概率, 记作  $\mu(\tau)$ , 称为维修率函数, 也称修复率。

$$\mu(\tau) = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta\tau} P(\tau \leq T \leq \tau + \Delta\tau | T > \tau) = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta\tau} \frac{P(\tau \leq T \leq \tau + \Delta\tau)}{P(T > \tau)}$$

$$\mu(\tau) = \frac{m(\tau)}{1 - M(\tau)}$$

平均修复率  $\bar{\mu}(\tau)$  表示在某一规定时间间隔内修复率的平均值。

$$\bar{\mu}(\tau) = \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \int_{\tau_1}^{\tau_2} \mu(\tau) d\tau$$

#### 3.3.3 平均维修时间 $MTTR$

平均维修时间  $MTTR$  是维修时间  $T$  的数学期望, 是衡量产品可维修性的主要参数。

$$MTTR = \bar{\tau} = \int_0^{\infty} \tau m(\tau) d\tau$$

$MTTR$  的观测值  $\overline{MTTR}$  是维修时间的总和与已维修产品数之比。根据图 3.2.6 所示,  $MTTR$  可表示为:

$$\overline{MTTR} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ttr_i$$

$MTTR$  需要考虑各个维修活动所占用的时间, 通常应包括确认失效发生所需时间、获得配件的时间、维修团队的响应时间、记录所有任务的时间、以及失效产品重新投入使用的时间等。

若维修率  $\mu(\tau)$  符合指数模型 (即恒定维修率  $\mu$ ), 则  $MTTR$  可定义为:

$$MTTR = \frac{1}{\mu}$$

维修度  $M(t)$  可表示为:

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} = 1 - e^{-\frac{t}{MTTR}}$$

### 3.4 可用性参数

油气设备可用性是表征一段时间内设备可用时间所占比例的参数。在一段时间内, 油气设备不同工作状态所占时间可细分如图 3.4 所示。其中, 能工作时间可分为不工作时间、待命时间、反应时间和任务时间四部分, 不能工作时间可分为维修时间 (包括修复性维修和预防性维修) 和延误时间 (包括资源保障延误和管理延误)。

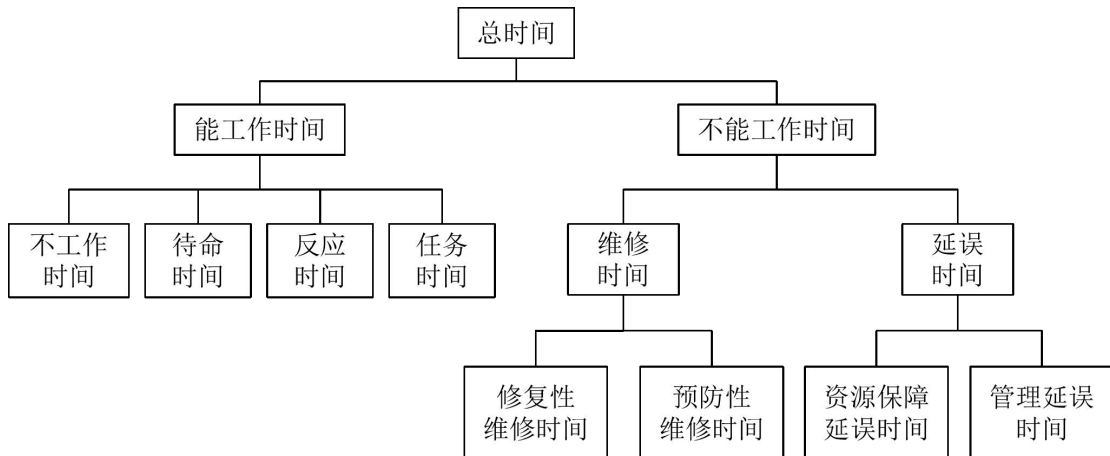


图 3.4 油气设备系统运行中的时间类型

油气设备可用性可通过可用度  $A$  (Availability) 来衡量, 指在任意随机时刻, 油气设备处于可运行状态的概率, 可通过下式表示:

$$A = \frac{\text{能工作时间(MUT)}}{\text{能工作时间(MUT)} + \text{不能工作时间(MDT)}} = 1 - \frac{MDT}{MUT + MDT}$$

#### 3.4.1 瞬时可用度

瞬时可用度 (Punctual Availability) 指设备、子系统或系统在特定的  $t$  时刻正常运转的概率, 可表示为:

$$A(t) = P\{x(t) = 1\}$$

设  $x(t)$  表示  $t$  时刻系统的状态 (正常/故障), 且有:

$$x(t) = \begin{cases} 1, & t \text{时刻系统正常} \\ 0, & t \text{时刻系统故障} \end{cases}$$

在任意给定时刻  $t$ ，仅在以下情况设备处于正常运转状态，一是设备在  $[0, t]$  时间区间内未曾发生失效，二是设备在  $[0, t]$  时间区间内发生过失效，且最后一次修复完成的时间点为  $u$  ( $u < t$ )。因此， $t$  时刻的瞬时可用度可表示如下：

$$A(t) = R(t) + \int_0^t R(t-u)m(u)du$$

其中， $R(t)$  为可靠度函数， $m(u)$  为恢复密度函数。

### 3.4.2 平均可用度

平均可用度 (Average Availability) 是指在一段时间  $T$  内，系统处于正常状态的时间所占的比例，表示为：

$$\overline{A(T)} = \frac{1}{T} \int_0^T A(t)dt$$

### 3.4.3 稳态可用度

稳态可用度 (Steady-State Availability) 也称永久可用度 (Permanent Regime Availability)，是指当时间趋于无穷大时的平均可用度的数值，表示为：

$$A(T = \infty) = \lim_{T \rightarrow \infty} \overline{A(T)}$$

此外，根据对不能工作时间的多种考虑方式，可用性参数还可分为以下多种类型，如图 3.4.3 所示。

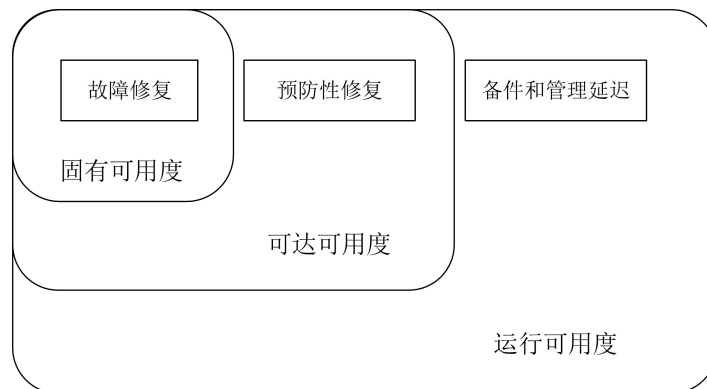


图 3.4.3 不同可用度关系

### 3.4.4 运行可用度

运行可用度  $A_0$  (Operational Availability) 是指设备、子系统或系统在使用周期内，正常运行时间所占的百分比，考虑修复性维修和预防性维修，同时也考虑保障延迟的影响。可表示为：

$$A_0 = \frac{\text{正常可用时间}}{\text{总时间}}$$

或：

$$D(t) = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n T_i}$$

其中， $t_i$ 表示在时间段*i*内系统工作的实际时间， $T_i$ 表示时间段*i*的名义时间。

运行可用度中，考虑可能造成停机的所有因素，包括行政因素、物流因素等。

### 3.4.5 可达可用度

可达可用度  $A_a$  (Achieved Availability) 是考虑预防性维修和修复性维修，未考虑备件和管理延迟的可用性参数，可表示为：

$$A_a = \frac{MTBM}{MTBM + \bar{M}}$$

其中， $MTBM$  是指维修间平均时间， $\bar{M}$  是指预防性维修和修复性维修停机时间。

### 3.4.6 固有可用度

固有可用度  $A_i$  (Inherent Availability) 是指仅考虑修复性维修，不考虑预防性维修和延迟的可用性参数，表示为

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

### 3.4.7 平均产量可用度

平均产量可用度  $A_p$  (Mean Production Availability) 是从生产能力角度考量系统的可用性水平，指预计实现产量与要求产量之比，可以考虑某些失效状态下系统产量并未降低为零的情况。其数学表达式为：

$$A_p = \frac{\text{预计实现产量}}{\text{要求产量}}$$

## 3.5 安全性参数

安全性是指不发生系统危险事件的能力，系统在寿命周期内不应对人、环境或其他资产造成伤害。油气设备安全性参数主要包括平均危险故障间隔时间和危险率。

### 3.5.1 平均危险故障间隔时间

平均危险故障间隔时间  $MTBF(H)$  (Mean Time between Hazard Failure) 与平均故障间隔时间  $MTBF$  的概念和计算方法类似，其差异在于定义中的故障为危险故障。

### 3.5.2 危险率

类似于故障率  $\lambda$  与平均故障间隔时间  $MTBF$ ，可定义系统的安全性参数危险率（也称事故率），其数值为  $MTBF(H)$  的倒数，用  $H$  表示。

$$H = \frac{1}{MTBF(H)}$$

## 第 4 章 油气设备 RAMS 评估流程

### 4.1 一般说明

本章提供一种开展油气设备 RAMS 评估的流程。RAMS 作为可靠性 (R)、可用性 (A)、可维修性 (M) 和安全性 (S) 四种要素的一种组合描述, 可主要分为两部分进行评估, 即 RAM 评估和安全性 (S) 评估。其中 RAM 评估针对油气设备在使用性方面所表现出的可靠性、可用性和维修性指标参数进行评估, 而安全性评估针对不发生危险故障的性能进行评估, 体现为安全风险评估。

具体地, 油气设备 RAMS 评估流程包含八个过程, 分别为:

- (1) 系统功能分析;
- (2) 初步分析;
- (3) 数据收集与分析;
- (4) 系统模型构建;
- (5) RAM 分析;
- (6) 安全性分析;
- (7) 系统改进与优化;
- (8) RAMS 分析结论与报告。

主要流程如图 4.1 所示。

### 4.2 系统功能分析

本阶段应调查审阅各类可能影响油气设备 RAMS 性能的相关文件, 全面分析总体设计功能要求, 功能边界和系统接口, 识别油气设备的主要特征。

油气设备主要特征规定了油气设备完成任务所需的条件, 应包含任务概要、运行条件、环境条件和维修条件, 包括但不限于以下几方面:

- (1) 任务概要:
  - 1) 设备处理的介质;
  - 2) 设备运行的能力, 功率、流量等;
  - 3) 每年运行的时间;
  - 4) 设备运行模式, 连续性、间歇性或计划性;
  - 5) 预计使用的总时间 (以年计)。
- (2) 运行条件:
  - 1) 温度条件;
  - 2) 机械条件 (振动或冲击);
  - 3) 电气条件 (供电);
  - 4) 人机交互性;
  - 5) 其他运行条件。
- (3) 环境条件:
  - 1) 地理位置;
  - 2) 工作环境状态, 水面、水下或其他;
  - 3) 外部温度 (水温或气温);
  - 4) 湿度条件, 降水条件;
  - 5) 盐度等腐蚀性条件;
  - 6) 污染物或致污物。
- (4) 维修条件:

- 1) 维修计划安排（如最小预防性维修间隔、按维修间隔同时工作所需的最大人员数、完成维修工作所需的最大停用时间等）；
- 2) 维修场所的数量、位置和说明；
- 3) 维修场所的标准设备、工具、和备件等维修资源的说明。

为充分理解和定义油气设备系统功能，确定合理的功能边界和分析范围，应组织一次启动会议，会议应包含所有参与 RAMS 评估的专家，会议目标为：

- (1) 明确 RAMS 评估的对象、目标和期望；
- (2) 定义相关方责任；
- (3) 解释分析过程所需的必要信息；
- (4) 制定检查表以明确每项任务及相应时间节点。

为了跟踪和控制分析阶段，可以在每一个或两个阶段分别召开一次会议，以确保 RAMS 评估是在所有需要的情况下进行的，以及每个阶段所需要的内容都得以实施，使各方能够直接或间接得参与 RAMS 分析。

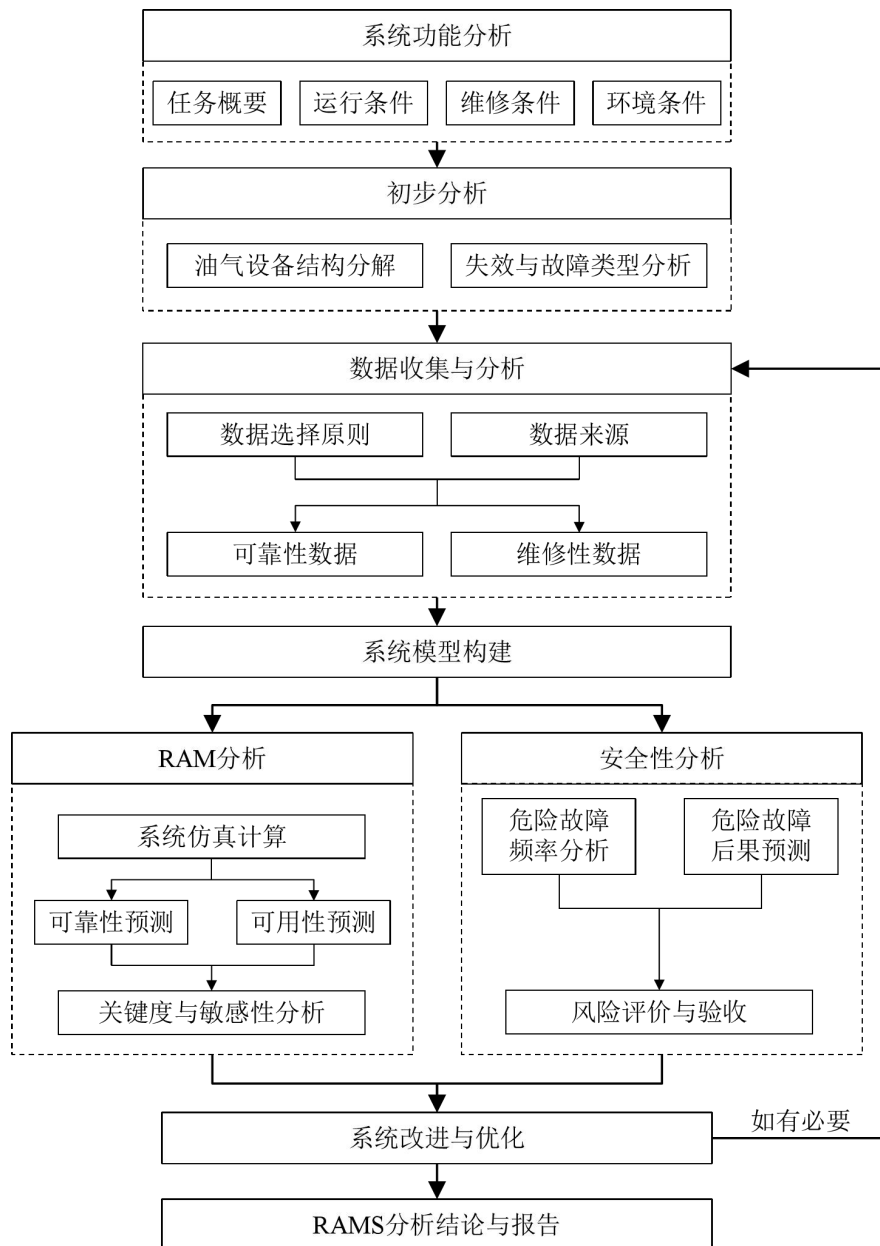


图 4.1 RAMS 评估流程图

## 4.3 RAMS 初步分析

### 4.3.1 油气设备分解结构

油气设备分解结构是全面分析系统组成的重要环节，将为所有 RAMS 评估活动提供清晰的参考概略和逻辑基础。

分解结构的工作内容包括建立系统的边界，对系统采用适当的分解级别，列出所有油气设备系统的子系统，并确定油气设备不同子系统之间存在的关系。系统边界的划分和描述可参考 GB/T 20172-2016 第 5.1 节关于设备边界描述的要求。

分解结构的方式包括：

(1) 功能分解。常用于执行初步的重要分析，从设备总体功能为出发点，按照功能任务设计逐级解构，功能的最终分级用于确定功能失效模式的因果关系。

(2) 物理分解。常用于执行可维修性分析，列出关键的子系统，分解的最终分级是可更换单元。

分解结构的分解流程应逐级划分各个层级，并确定所有子系统及其功能关系。采用分层方式，按从上至下的流程对评估对象进行分级。

RAMS 应用的分解结构应遵循以下原则：

- (1) 避免采用过多的层级；
- (2) 沿着层级分支确定的最终子系统应为可更换单元，或具有确定的可靠性、可维修性参数的；
- (3) 对相同子系统强制使用相同的术语和定义；
- (4) 分解结构确定之后应尽量避免修改；
- (5) 应避免使用含糊或不清晰的定义。

为识别油气设备和所有子系统、组件、部件，分解结构的分析结果应至少明确：

- (1) 分解结构中子系统之间的所有关系；
- (2) 不同系统、子系统、组件之间的功能界限。

### 4.3.2 失效与故障类型

初步分析阶段应明确油气设备系统、子系统、组件和部件的失效与故障类型定义，并根据油气设备分解结构，初步分析各系统、子系统、组件和部件可能出现的故障类型，为数据收集与分析 and 模型构建提供基础。

可根据发生损伤或异常后设计功能所受影响程度来定义故障的类型，油气设备可能遇到的通用故障类型分为：

- (1) 轻微故障；
- (2) 部分故障；
- (3) 完全故障。

其定义描述如表 4.3.2 所示。

故障类型定义

表 4.3.2

故障类型	情况描述
轻微故障	油气设备系统、子系统、组件或部件的设计功能未受影响或轻微功能损失，基本满足设计要求水平。
部分故障	油气设备系统、子系统、组件或部件的设计功能部分丧失，部分符合设计要求，进而可能导致上部系统功能折损。例如流速降低、换热速率下降等。
完全故障	油气设备系统、子系统、组件或部件的设计功能完全丧失，完全无法满足设

计要求，导致上部系统功能丧失、停车。例如流速归零、换热速率归零等。
-----------------------------------

推荐采用 FMEA/FMECA 方法，分析油气设备系统中各子系统、组件和部件的潜在故障模式，确立数据收集与建模的对象和内容。

#### 4.4 数据收集与分析

获取关键设备组件、零件的可靠性数据和可维修性数据，是开展油气设备及系统 RAMS 评估的基础和前提，也是改进生产和保障关键设备安全的重要手段。

为了确保油气设备运行、操作、维修相关过程和可靠性的准确表示，具有此类系统知识的专业人员应参与这一阶段，开展定量的失效和维修数据分析，提供有效的信息支持以辅助以下工作：

- (1) 产品设计；
- (2) 当前产品改进；
- (3) 建立、验证维修计划和备件计划；
- (4) 基于条件的维修；
- (5) 判定不可用性的贡献因素；
- (6) 提高预测可信度以支持决策。

##### 4.4.1 收集数据的类型

用于 RAMS 评估的数据收集的类型主要包含以下几类：

- (1) 装置数据，即对可靠性数据所收集的装置的描述；
- (2) 运行数据，即设备、运行和环境条件的技术描述；
- (3) 失效数据，即失效事件信息，如失效模式、失效影响、失效原因等；
- (4) 维修数据，即与失效事件相关的修复性维修信息，以及预防性维修事件信息。

具体地，需要重点收集油气设备相关的可靠性数据和维修性数据。

##### 4.4.1.1 可靠性数据

应根据初步分析的结果，获取关键设备、组件或部件的可靠性参数，例如以下统计参数：

- (1) 失效概率密度函数  $f(t)$ ；
- (2) 失效率  $\lambda(t)$ ；
- (3) 平均失效前时间  $MTTF$ ；
- (4) 平均故障间隔时间  $MTBF$ ；
- (5) 平均危险故障间隔时间  $MTBF(H)$ 。

若可靠度服从某种典型分布特性，应选择适合的分布函数并提供特征参数，具体形式可参照 4.4.4 节中所述。常用的可靠度分布模型可参考附录 1。

##### 4.4.1.2 维修性数据

对于可维修系统，应考虑设备的维修性参数及相关特征。如涉及成本和费用分析，还应收集费用相关数据。

设备维修类型包括修复性维修和预防性维修，应提供以下维修特征数据：

(1) 维修任务的时长。包括定常式时长和分布式时长。其中，定常式时长表示在不同时刻开展维修任务，所用维修时长固定，应明确单次维修所需时长；分布式时长表示维修任务的时长服从一定的随机分布特性，可通过分布函数及其特征参数来表征，具体形式可参照 4.4.4 节中所述。

(2) 维修人员数量及成本需求。能够执行该维修任务的维修人员，同一时间执行任务数量的限制，以及该人员未能及时到达的滞后时间；每个维修人员每单位时间的直接成本，

单次事故的固定维修成本等。

(3) 备件数量、库存及成本需求。应明确执行该维修任务所需的备件，单位数量备件的直接成本；备件数量是否有限，库存量及持有成本；备件缺货概率，备件采购所需时间；是否需应急备件，额外成本以及所需供应时间等。

(4) 维修任务是否会导致系统停机或部件停机。

(5) 复原后的部件恢复程度。应明确故障设备维修后其可靠性是否恢复如新，或恢复至一定的可靠性水平。

(6) 维修带来的额外成本。应明确单次维修任务成本以及单位时间的停机损失。

需注意，维修任务的时间特性通常只针对某一个具体的维修团队，尽量不要选用不同维修团队的维修时间，除非由此维修团队开展维修工作。

#### 4.4.2 数据来源

油气设备失效（或维修）时间（或成本）模型的建立应基于收集的可靠性（或维修性）数据，并使用标准的统计方法。收集数据的来源可参照但不限于以下方式：

(1) 可靠性试验分析。开展可靠性试验是获取设备可靠性数据的最有效方式，可靠性试验的设计和要求可参照 CCS《船舶设备与系统可靠性验证指南》（2023）中的要求执行。

(2) 运维数据统计。如具备同类产品相似环境剖面下的运行的历史失效数据，可通过统计拟合分析确定设备失效和维修数据。

(3) 数据库查询。可参考同类产品失效和可靠性数据库记录情况，确定当前分析对象的可靠性参数数据。常用的数据库类型可参照 CCS《油气定量风险评估指南》（2020）中 4.1.1 内容。

(4) 专家评估。若历史数据不可得，可通过相关领域专家定性分析每个失效模式的概率密度函数的特征参数，且多数情况下只考虑致命失效。为了避免专家对维修时间存在疑问，辨别维修活动的具体内容，应尽量描述维修活动步骤。

(5) 其他方式收集到的数据。如上述方式仍无法满足数据需求，亦可采用经评估认可的其他方式收集的数据。

#### 4.4.3 数据选择的原则

通过 4.4.2 所述数据来源，选取可靠性和维修性参数应基于以下原则：

(1) 数据应源于相同类型的设备，如果可能，应源于完全相同的设备类型；

(2) 数据应源于使用相似技术的设备；

(3) 数据应源于稳定操作状态时期，尽管寿命早期和启动时期也应给与应有考虑。此外，也包含源于操作过程的测试和检验阶段的数据；

(4) 来源于实验室测试的数据，比如，加速寿命试验和技术开发、技术资质鉴定阶段的可靠性试验，以及来源于运行前的性能测试阶段的数据。这种运行前数据应该正式的冠以“运行前/测试阶段可靠性数据”，以区别于实际运行统计数据；

(5) 数据基础应足够广泛；

(6) 用于评估或预测可靠性参数的失效事件的数量应足够大，以避免源于“例外”的偏差；

(7) 维修时间和停机时间数据应反映当地的特殊条件；

(8) 数据源的设备边界和分析对象应尽可能匹配，否则应给出研究的假设条件；

(9) 应对使用的数据源进行引用标注；

(10) 对于数据稀少的情况，可采用专家评估数据。

#### 4.4.4 数据的形式

为反映油气设备的可靠性、维修性参数的统计特性，可采用以下形式的分布函数描述时

间、费用等参数的随机特性：

- (1) 威布尔分布 (Weibull 分布)，所需参数分别为形状参数  $\beta$  和尺度参数  $\eta$ ；
- (2) 正态分布，所需参数分别为均值 Mean 和 标准差 Std；
- (3) 对数正态分布，所需参数分别为 Log-Mean 和 Log-Std；
- (4) 指数分布，所需参数为均值 Mean；
- (5) Gamma 分布，所需参数分别为  $\mu$  和 K；
- (6) Logistic 分布，所需参数分别为  $\mu$  和  $\sigma$ ；
- (7) Gumbel 分布，所需参数分别为  $\mu$  和  $\sigma$ 。

用于时间参数定义时，应同时明确基本单位，如小时、日、周、月、年等。

#### 4.5 系统模型构建

根据油气设备功能分析和分解结构，判断油气设备系统、子系统、组件和部件间的可靠性逻辑关系，构建 RAMS 分析计算模型。常用的 RAMS 分析模型构建方法包括但不限于以下几种。

##### (1) 可靠性框图方法

可靠性框图 (Reliability Block Diagram, RBD) 是描述和模拟系统运行的最常用工具之一，能够从可靠性角度构建系统与子系统、组件、部件间逻辑图，是系统单元及其可靠性意义下逻辑关系的图形化表示方法，能够有效反映系统单元的正常或失效状态对系统总体运行状态的影响。

##### (2) 马尔可夫方法

马尔可夫方法通过状态转移矩阵描述系统不同状态之间的转换行为，对某时刻系统不同状态的概率进行预测计算，适于模拟存在多种故障状态的情况。

##### (3) 故障树与动态故障树方法

故障树分析方法以系统故障为导向，以演绎的方式寻找故障事件，通过逻辑门描述故障事件的联系反映系统失效机理。适于处理两状态（正常与故障）和无时序的系统，但无法处理多态系统和有时序系统，只能处理最简单的可修系统。

动态故障树方法是故障树方法的延伸，通过引入一系列动态门，如冷备件门、热备件门、温备件门、优先与门、功能相关门、同时与门、不完全共因门等，描述事件之间的动态关系和复杂系统中的失效行为，求解顶事件的故障概率。

##### (4) GO 法与 GO-FLOW 方法

GO 法以成功为导向，直接进行系统成功概率分析，可以直接以系统的流程图和原理图为基础，通过操作符来描述具体设备的运行和逻辑关系，计算系统成功或部件故障状态状态的概率，定量分析系统可靠度和可用度，可用于多状态系统的可靠性分析。

GO-FLOW 方法源于 GO 法，通过基本操作符和信号流对系统进行模拟，能够清晰展现系统的工作原理，描述在不同事故条件下具有多状态的大型复杂系统的功能，具有计算逻辑严密、过程简洁、精度较高等特性，适用于处理有复杂时序或状态随时间变化的系统，且能够有效处理共因失效问题。

考虑到建模复杂性和计算时间成本，本指南采用可靠性框图方法开展油气设备系统 RAMS 建模分析。

#### 4.5.1 可靠性框图

可靠性框图通过方框和连线表示系统部件及其连接关系，以描述各个系统部件发生故障时对系统功能状态的影响。可靠性框图能够描述的系统部件间逻辑关系模型主要包括以下几类：

- (1) 串联模型。组成系统的所有部件中任一部件的故障都会导致整个系统故障，称为

串联模型，其框图结构如图 4.5.1(1)所示。串联模型是最常用和最简单的模型之一。

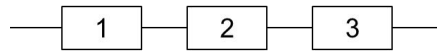


图 4.5.1(1) 串联模型可靠性框图

(2) 并联模型。组成系统的所有部件都发生故障时，系统才发生故障，称为并联模型。并联模型是最简单的工作贮备模型。其框图结构如图 4.5.1(2)所示。

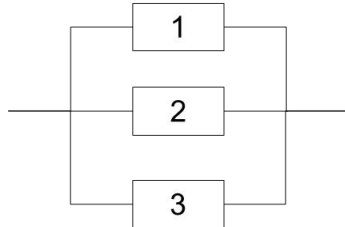


图 4.5.1(2) 并联模型可靠性框图

(3) 表决模型。组成系统的  $n$  个部件中，若正常的部件数不小于  $k$  ( $1 \leq k \leq n$ )，则系统不会发生故障，称为  $k/n$  表决模型。框图结构如图 4.5.1(3) 所示。

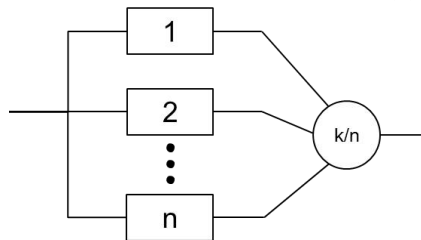


图 4.5.1(3) 表决模型可靠性框图

表决模型属于工作贮备模型的一种形式。

特别地，当  $k=1$  时， $1/n$  型表决模型即为并联模型；当  $k=n$  时， $1/n$  型表决模型即为串联模型。

(4) 旁联模型。组成系统的各部件只有一个工作，当某部件故障时，通过转换装置接到另一个部件继续工作，直到所有部件都发生故障时系统才发生故障，也称非工作贮备（冷贮备）。框图结构如图 4.5.1(4) 所示。

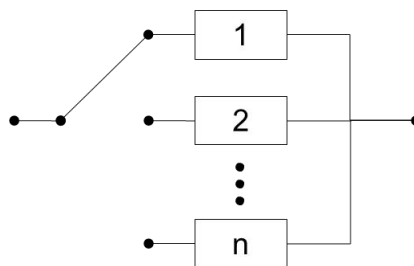


图 4.5.1(4) 旁联模型可靠性框图

旁联模型能够显著提高系统的可靠度，但由于增加了故障监测与转换装置而提高了系统的复杂度。同时，要求故障监测与转换装置的可靠度非常高，否则贮备带来的优势会被严重削弱。

(5) 桥联模型。某些系统结构不能简单地分解为串联或并联关系，而是一种桥联形式，

称为桥联模型。其数学模型的建立较为复杂，不能建立通用的表达式。框图结构如图 4.5.1(5) 所示。

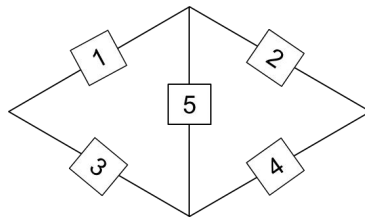


图 4.5.1(5) 桥联模型可靠性框图

含有串联、并联和桥联的可靠性框图将构成更加复杂的组合模型，即网络可靠性模型。

采用可靠性框图建模应遵循以下假设条件：

- 1) 模拟的系统中各部件相互独立；
- 2) 系统及其部件只有故障与正常两种状态；
- 3) 当软件可靠性没有纳入框图时，是假设另做考虑；
- 4) 当人的因素没有纳入框图时，是假设人员对可靠性的影响另做考虑。

若系统中各个部件存在一定影响，则不再满足独立性假设条件，可考虑采用负荷共载模型来模拟。

值得注意的是，可靠性框图不同于工作原理图和功能框图。工作原理图用以描述系统部件之间的物理关系，功能框图用以描述系统部件之间的功能关系，反映物质在系统部件间的流动关系和系统功能的衔接。可靠性框图是以工作原理图和功能框图为基础，只反映系统部件间的逻辑关系，描述系统部件为完成功能任务的各种组合，与可靠性框图中的绘制顺序无关，与工作原理图和功能框图中的连接关系不一定完全相同。

示例 1：对于工作原理图中串联的两个常开阀门，其设计功能为管路流通。因此，两个阀门任意一个故障（阀门关闭），都能导致设计功能故障（管路关闭）。则在可靠性意义下，两个常开阀门应建立串联模型，如图 4.5.1(6)所示。

示例 2：对于工作原理图中串联的两个常闭阀门，其设计功能为管路关闭。因此，两个阀门必须同时故障（阀门打开），才能导致设计功能故障（管路流通）。则在可靠性意义下，两个常闭阀门应建立并联模型，如图 4.5.1(7) 所示。

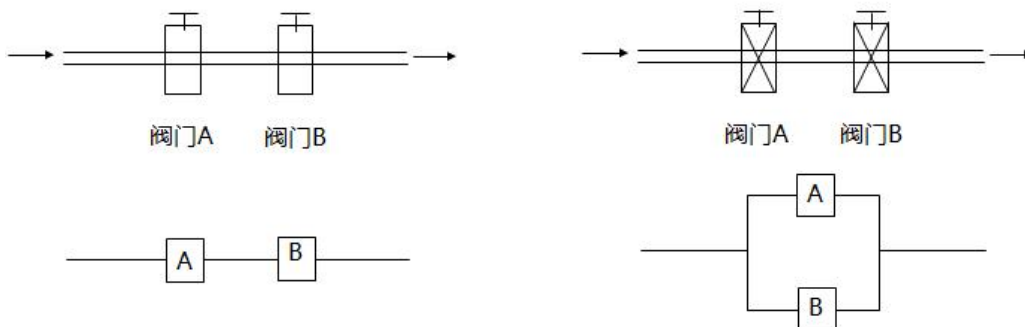


图 4.5.1(6) 串联常开阀原理图及可靠性框图

图 4.5.1(7) 串联常闭阀原理图及可靠性框图

#### 4.5.2 可靠性模型

可靠性模型是从数学上建立可靠性框图与时间、事件和故障率数据的关系。能根据可靠性试验和其他有关试验信息、产品配置、任务参数和使用限制等的变化进行及时修改。

可靠性模型分为基本可靠性模型和任务可靠性模型两类，其基本性质如下：

- (1) 基本可靠性模型

- 1) 全串联模型;
- 2) 包括一个可靠性框图及有关的可靠性数学模型;
- 3) 可用以估计设备及其部件引起的维修及后勤保障要求;
- 4) 设备的所有部件都应包括在模型内, 包括产品所有用于储备工作模式的部件;
- 5) 储备单元越多, 系统的基本可靠性越低。

(2) 任务可靠性模型

- 1) 是一种用来描述设备在执行任务过程中完成其规定功能的概率的模型;
- 2) 包括一个可靠性框图及其有关的可靠性数学模型;
- 3) 能描述设备在完成的任务过程中其各部件的预定作用, 储备工作模式的单元在模型中反映为并联或旁联结构, 因此复杂产品的任务可靠性模型通常是一个由串联、并联及旁联等构成的复杂结构;
- 4) 储备单元越多, 其任务可靠性越高。

针对 4.5.1 节中所述的各类 RBD 框图模型, 则有以下可靠性数学模型描述系统可靠性与部件可靠性的关系。

(1) 串联模型

对于具有两个部件的串联模型系统, 其系统可靠性可数学地描述为:

$$R_S(t) = R_1(t) \times R_2(t)$$

对于包含  $n$  个相同部件的串联系统, 其系统可靠性可表示为:

$$R_S(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

此外, 串联条件下, 系统可用度与部件可用度的关系为:

$$A_S = \prod_{i=1}^n A_i \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

其中,  $A_S$  为串联系统可用度;  $A_i$  为第  $i$  个部件的可用度。

(2) 并联模型

对于具有两个部件的并联模型系统, 其系统可靠性可数学地描述为:

$$R_S(t) = 1 - [1 - R_1(t)][1 - R_2(t)]$$

对于包含  $n$  个相同部件的并联系统, 其系统可靠性可表示为:

$$R_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)]$$

其中,  $n$  为部件数量。

此外, 并联条件下, 系统可用度与部件可用度的关系为:

$$A_P = \sum_{i=1}^n A_i - \prod_{i=1}^n A_i \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

其中,  $A_P$  为并联系统可用度;  $A_i$  为第  $i$  个部件的可用度。

(3) 表决模型

对于具有  $n$  个相同部件的表决模型系统, 其系统可靠性可数学地描述为:

$$R_S(k, n, R) = \sum_{r=k}^n C_n^r R^r (1-R)^{n-r}$$

其中,  $k$  为所需的并联模块数量,  $n$  为并联模块数量,  $R$  为每个模块的可靠度。

#### (4) 旁联模型

对于具有一个活动单元和一个备用单元的旁联模型，其系统可靠性可表示为：

$$R(t) = R_1(t) + \int_0^t f_1(x) R_{2,inactive} \frac{R_{2,active}(t_2 + t - x)}{R_{2,active}(t_2)} dx$$

其中， $R_1(t)$  为活动单元的可靠性， $f_1(t)$  为活动单元的失效概率密度函数， $R_{2,inactive}(t)$  为当活动单元运行时，备用单元的可靠性。 $R_{2,active}(t)$  为活动单元不工作时备用单元的可靠性， $t_2$  为备件的运行时间。

若考虑切换过程的影响，则有：

$$R(t) = R_1(t) + \int_0^t f_1(x) R_{2,inactive} \frac{R_{2,active}(t_2 + t - x)}{R_{2,active}(t_2)} R_{sc,inactive}(x) R_{sc,required}(x) dx$$

其中， $R_{sc,inactive}(t)$  为备用状态下切换的可靠性，

$R_{sc,required}(t)$  为需要操作时切换动作的可靠性。

(5) 负荷共载模型。组成系统的各部件将共同承载负荷，当其中一个单元失效后，其余单元将分担由失效单元所承载的负荷，并对各自的失效率产生一定影响。

对于具有两个部件的系统，负荷共载模型可描述为：

$$R(t, L) = R_1(t, L_1) \cdot R_2(t, L_2) + \int_0^t f_1(x, L_1) R_2(x, L_2) \frac{R_2(t_{1e} + t - x, L)}{R_2(t_{1e}, L)} \\ + \int_0^t f_2(x, L_2) R_1(x, L_1) \frac{R_1(t_{2e} + t - x, L)}{R_1(t_{2e}, L)} dx$$

其中， $L$  为总载荷， $L_1$ 、 $L_2$  分别为当两个模块均工作时模块 1、2 分担的部分总载荷。 $P_1$ 、 $P_2$  分别为模块 1、2 分担的总载荷比例， $t_{1e}$  为模块 1 在总载荷  $L$ （而非  $L_1$ ）条件下工作的等效时间， $t_{2e}$  为模块 2 在总载荷  $L$ （而非  $L_2$ ）条件下工作的等效时间，且有

$$L_1 = P_1 \cdot S$$

$$L_2 = P_2 \cdot S$$

## 4.6 RAM 分析

RAM 分析以确定油气设备的可靠性和可用性性能参数为基本目标，基于建立的系统模型和收集的可靠性、维修性参数，开展系统仿真计算、可靠性预测、可用性预测以及系统设备关键度和敏感性分析。

### 4.6.1 系统仿真计算

蒙特卡洛仿真是面向含有随机分布特性的研究对象，以随机试验方式获取统计值来推定未知特征量的计算方法，适用于模拟复杂系统运行中的故障和维修过程。其优势在于能够求解无法通过解析法解决的复杂问题，且模拟思路清晰，易于理解。其缺点在于计算步骤较多，需要运用随机数生成方法，必须借助计算机进行求解。

基于蒙特卡洛法进行油气设备故障与维修仿真分析的过程如图 4.6.1(1) 所示：

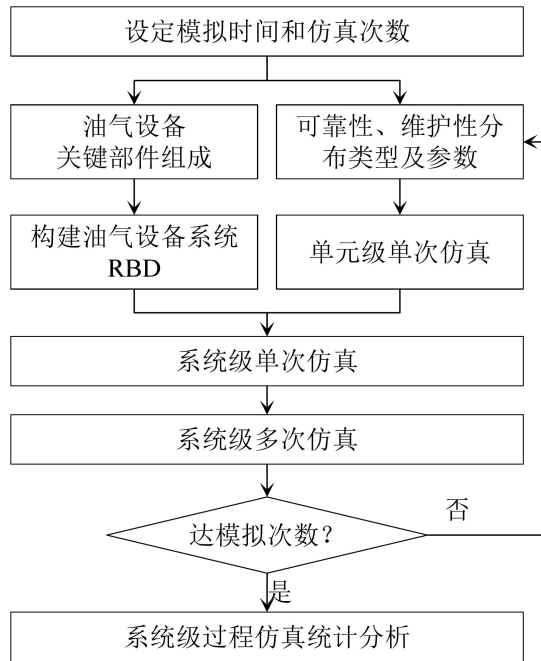


图 4.6.1(1) 蒙特卡洛仿真过程

#### (1) 设定模拟时间及仿真次数

模拟时间指预期的油气设备运行总时间，将对该时间范围内设备运行中可能出现的故障状态与维修状态进行仿真模拟。

仿真模拟次数指采用蒙特卡洛法对油气设备系统运行状态进行重复模拟的次数，次数越多，统计结果越接近系统性能的真实分布特性，同时计算量也会线性增大。因此，仿真模拟次数的确定应在保证精度的前提下尽量小，以降低计算成本，可以通过以下方式确定。

1) 通过验证收敛性确定。根据精度需求确定收敛性阈值，设置不同的模拟次数分别求解，当前后两次计算结果的偏差小于收敛性阈值时，模拟次数即满足精度要求。

2) 通过历史经验确定。基于相同或相似复杂程度的系统分析经验，选用相同的仿真模拟次数。

#### (2) 确定油气设备组成部件及系统可靠性框图 RBD

根据 4.3 节初步分析，确定油气设备系统中用于 RAM 分析的关键部件。

根据 4.5.1 节所述，构建油气设备系统可靠性框图 RBD。

#### (3) 确定可靠性和维修性随机分布类型和参数

根据 4.4 节所述，收集分析步骤 (2) 中各油气设备部件的可靠性和维修性分布类型及其参数。其中，可靠性和维修性参数允许设定为恒定值。

#### (4) 生成随机时间值，构建单元级单次仿真结果。

基于收集的可靠性、维修性统计参数，逐一生成每个部件的随机时间值。例如，某设备故障间隔时间 TBF 服从双参数威布尔分布 Weibull2P( $\beta, \eta$ )，可通过下述公式生成随机故障间隔时间：

$$TBF_i = n \{-\ln[U_i]\}^{\frac{1}{\beta}}$$

其中， $U_i$  为 0 至 1 之间的随机数， $TBF_i$  为模拟产生的一次故障间隔时间值。

如满足其他分布形式，也可据此方式反向生成随机故障间隔时间值。

通常，仅考虑系统正常、故障两种状态，则逐次生成该部件的 TBF~TTR，按顺序记录该部件在设定模拟时间范围内的数值，形成设备单元级单次仿真结果，如图 4.6.1(2) 所示。

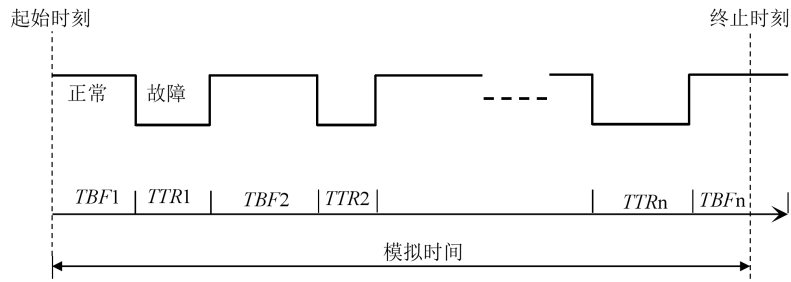


图 4.6.1.2(2) 设备单元级单次仿真结果

若同时考虑 3.4 节中图 3.4 所示的各时间类型，并基于该设备的统计特征参数，也可形成图 4.6.1(3) 所示的单元级单次仿真结果，以描述复杂时间状态下的系统运行状况。

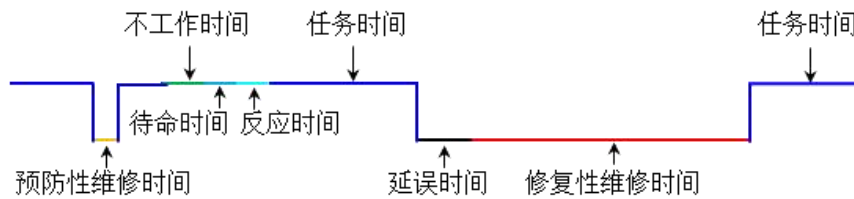


图 4.6.1(3) 考虑复杂时间状态下设备单元级单次仿真结果

(5) 确定系统级单次仿真结果。

基于可靠性框图进行逻辑判断，由设备单元级单次仿真结果推断系统级单次仿真结果。例如，具备两个串联部件的系统，推断过程如图 4.6.1(4) 所示。图中蓝色时段表示正常工作状态，红色时段表示维修状态。

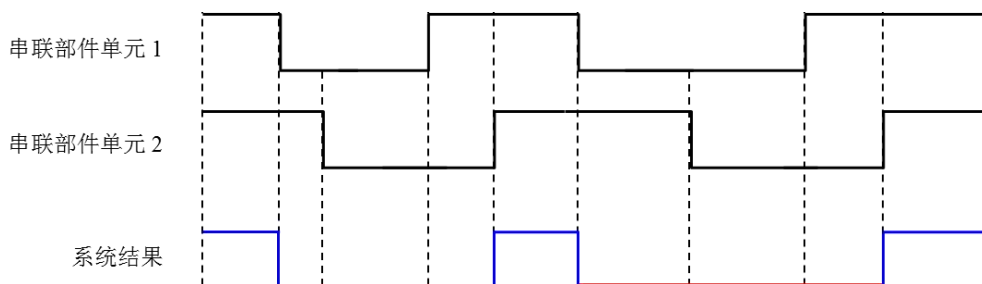


图 4.6.1(4) 具有两个串联部件的系统仿真结果

(6) 多次执行仿真过程，记录系统级仿真结果。

重复执行步骤 (4) ~ (5)，直至仿真次数达到预设模拟次数，记录多次执行系统仿真结果。

#### 4.6.2 可靠性预测分析

基于多次系统级仿真计算结果，可进行油气设备系统可靠性预测分析。

以系统运行后首次故障时间为节点，故障发生以前的时间视为正常工作状态，故障发生后的时间视为系统故障，可计算油气设备系统的可靠度函数。

#### 4.6.3 可用性预测分析

基于多次系统级仿真计算结果，可进行油气设备系统可用性预测分析。

系统可用性随运行时间发生变化，统计分析系统运行  $t$  时刻后系统运行总时间、维修时

间（可包括故障修复时间、预防性修复时间、备件和管理延迟时间），基于 3.4 节中可用度参数计算公式，可计算油气设备系统的各类可用性参数  $A(t)$ 。

此外，如果掌握系统运行状态与生产效率的关系，可基于 3.4 节中计算公式，计算油气设备的产量可用度。

#### 4.6.4 关键度分析

除了预计系统可靠性和可用性，RAM 分析还应开展系统关键度分析，辨识影响系统可用性的关键因素，确定系统中的薄弱环节，以明确提高系统可用性的重点方向和有效措施。基于多次系统级仿真计算结果，可通过以下两个参数表征系统部件的关键度。

##### (1) 停机时间关键度指数 $DTCI$

停机时间关键度指数（Downtime Criticality Index,  $DTCI$ ）表示某部件故障对系统停机时间的贡献，是在时间尺度下表示部件对系统停机时间影响程度的指标。停机时间关键度指数  $DTCI$  越高，该部件对系统停机时间的影响程度越大。（注：此处的系统停机仅包括系统故障停机，与维修导致的系统停机无关。）

$$DTCI = \frac{\text{功能单元导致的系统停机时间}}{\text{总系统停机时间}}$$

##### (2) 失效关键度指数 $FCI$

失效关键度指数（Failure Criticality Index,  $FCI$ ）表示某部件故障导致系统故障的次数百分比。 $FCI$  仅与失效次数相关，与失效导致的停机时间长度无关。失效关键度指数  $FCI$  越高，表示该部件对系统故障停机次数的影响程度越大。

$$FCI = \frac{\text{功能单元导致的系统故障数}}{\text{系统故障总数}}$$

#### 4.6.5 敏感性分析

敏感性分析用于识别上述 RAM 分析过程中不同假设条件、参数设置、RBD 框图结构对系统可靠性和可用性的影响。

敏感性分析可通过多次改变计算输入条件，统计分析不同输出结果来执行。如研究某部件预防性维修时间间隔的影响，可通过给定不同时间间隔数值，分别执行上述计算过程，对比不同数值对应的可用度，以确定最佳维修时间间隔。

#### 4.7 安全性分析

安全性分析以确定油气设备的潜在危险性故障发生概率及安全性水平为基本目标，主要考虑由设备或系统发生危险性故障导致的安全事故。安全性分析可通过定性或定量风险分析实现。风险的概念包括两个方面，即导致危害的事件或事件组合发生的概率或频繁程度，以及危害后果。风险分析通过评估事故的频率分析和后果分析，确定系统的风险可接受程度。

定量的风险分析可基于建立的系统模型和收集的安全相关设备可靠性数据，开展安全性事故发生概率的预测分析，即频率分析。后果分析方面，可结合多物理场仿真模拟手段开展事故后果的定量预测分析，亦可结合定性分析方式开展。

定性的风险分析过程可采用故障模式、影响以及危害性分析（FMECA/FMEA），故障树分析（FTA），事件树分析（Bow-Tie），危险与可操作性分析（HAZOP），危险源辨识（HAZID）及其他方法执行。具体可参考以下规范指南：

- (1) 中国船级社：《故障模式和影响分析应用指南》2017；
- (2) 中国船级社：《油气定量风险评估指南》2020；
- (3) IEC 31010 Risk management-Risk assessment techniques 2019；

(4) GB/T 27921-2011 风险管理 风险评估技术 Risk management - Risk assessment techniques;

(5) IEC 60812 Analysis techniques for system reliability - Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA);

(6) IEC 61025 Fault tree analysis (FTA);

(7) IEC 61882 Hazard and operability studies (HAZOP studies) –Application guide.

油气设备安全性分析应着重考虑引发安全事故的危险故障，即哪些设备故障能够对人、环境、其他资产等造成伤害。

油气设备的危险涉及在各种环境条件和工作条件下，在运营和维修过程中发生的所有后果，包括以下方面：

- (1) 人员伤亡；
- (2) 重大财产损失；
- (3) 生态环境破坏；
- (4) 违反政府法规；

具体地，油气设备可能产生的危险包括以下几种类型：

- (1) 爆炸物；
- (2) 火灾；
- (3) 化学毒性材料；
- (4) 电；
- (5) 强光；
- (6) 机械危险；
- (7) 热危险；
- (8) 放射性材料；
- (9) 非电离辐射；
- (10) 压力危险；
- (11) 噪音；
- (12) 环境危险；
- (13) 其他危险。

#### 4.7.1 频率分析

油气设备系统中危害事件发生频率定性地划分为几种不同类型并进行描述，可参照表 4.7.1 所示划分方式。选用的类型划分及数值判定应由应用部门根据具体情况来划定。

频率等级定义 表 4.7.1

分类	定义
频繁	频繁出现，危害将一直存在
经常	发生多次，危害可以预期经常出现
有时	可能发生几次，危害预期有几次出现
很少	在系统寿命周期的某个时期可能发生，危害能合理的预期出现
极少	不太可能发生但可能存在，假定危害极少出现

频率分析的数据可来源于历史案例资料、数据库、专家经验等。也可通过 4.6 节所述的基于可靠性框图和蒙特卡洛法的分析流程，结合危险故障相关的可靠性数据收集分析结果和系统模型构建，计算油气设备系统的平均危险故障间隔时间 MTBF(H)和危险率等安全性参

数，评估由油气设备失效引起的安全相关危险故障发生可能性。

#### 4.7.2 后果分析

后果分析用于估计危险事件的可能影响程度，可通过定性地划分为多个严重性等级来描述不同程度的后果，可参考表 4.7.2。

后果等级定义 表 4.7.2

后果等级	对环境或人的影响	给系统运行带来的后果
特大	多人死亡，和\或多方面伤害，和\或对环境的较多损坏	系统完全失效
重大	一人死亡，和\或单个严重伤害，和\对环境产生明显的损害	主系统失效
次要	较小的损伤和\或对环境的明显影响	严重的系统损害
轻微	可能存在的较小的伤害	较小的系统损害

后果等级的划分标准应由应用部门根据具体应用情况来确定，上表仅作为一种参考形式。

#### 4.7.3 风险评价

风险评价应结合危险事件发生的可能性和后果的严重性来开展，通过风险可接受准则来确定不同风险水平的可接受程度。风险可接受准则表示在规定时间内或某一行为阶段可接受的总体风险等级，为风险分析以及制定减小风险的措施提供参考依据。

风险可接受准则应在风险评估之前给出，其确定方法可基于以下原理：

- (1) ALARP 最低合理可行原理；
- (2) GAMAB 综合最优原理；
- (3) MEM 最小内源性死亡原理。

基于 ALARP 原理，通常以“频率-后果”矩阵的形式表征事故发生可能性、严重性与风险程度的关系，可参考表 4.7.3(1)。

风险矩阵 表 4.7.3(1)

频率等级	后果等级			
	轻微	次要	重大	特大
频繁				
经常				
有时				
很少				
极少				
风险等级				

矩阵中通过不同颜色描述了不同程度的风险等级，其定性描述如表 4.7.3(2)所示。

风险等级及其定性描述 表 4.7.3(2)

风险等级	对各等级应采取的措施
(高风险-红色区域)不可容忍的	必须予以消除
(中风险-黄色区域)可容忍的	应采取措施降低风险至可行的最低水平
(低风险-绿色区域)可忽略的	无需进一步采取措施即可接受

表 4.7.3 (1) 和表 4.7.3 (2) 仅作为风险等级划分和可接受程度的示例参考，实施中可

依据具体需求而确定。

#### 4.7.4 安全性评估报告要求

应对开展的油气设备安全性评估过程与结果记录并形成报告文件，至少应包括：

- (1) 采用的分析方法；
- (2) 方法的假设、限制和判据；
- (3) 数据及其来源；
- (4) 危险辨识结果；
- (5) 可能性与严重性分析结果；
- (6) 风险估计结果；
- (7) 补充安全防控措施或修改意见；
- (8) 参考文件。

#### 4.8 系统改进与优化

基于 RAM 分析和安全性分析，可判断油气设备可靠性、可用性和安全性水平及其关键脆弱环节。根据评估结果情况，应考虑是否有必要对油气设备系统进行改进和优化，从而进一步提高油气设备的可靠性、可用性和安全性水平。改进与优化措施包括但不限于以下方面内容：

- (1) 选择可靠性较高的部件产品

选用具有更高可靠性的部件产品可提高部件正常运行时间，提升  $MTTF$ 、 $MTBF$ 、 $MTBF(H)$  参数，降低系统寿命周期内该部件失效次数。

- (2) 增加或调整预防性维修策略

预防性维修可在设定的时间间隔内，对部件或系统进行维修干预，提高部件当前状态下的可靠性水平。

需注意的是，若采用恒定失效率模型描述部件的可靠性，则制定预防性维修策略对提高系统可用性是无效的。

- (3) 合理调配维修资源

在最可能的故障发生时刻前做好维修人员、备件等维修资源的储备和调配，能够降低系统维修的延误时间，提高系统可用性。维修资源调配策略可参考系统级仿真统计结果进行确定。

上述三类措施从部件层级提高系统可靠性、可用性和安全性。除此以外，系统层级的可靠性结构对系统可靠性、可用性和安全性性能具有重要影响，可通过调整系统内的部件连接关系，增加关键部件的功能冗余并允许运行中的维修等措施，减少系统停机时间。

应根据前期分析结果，评估是否需重复开展 RAM 分析和安全性分析。如有必要，应基于改进的系统设计方案和维修性措施等，再次进行数据收集分析、系统模型构建、RAM 和安全性分析，并考虑进一步的改进措施，直至系统 RAMS 评价结果满足要求为止。

#### 4.9 RAMS 分析结论与报告

RAMS 分析应最终以文件化方式记录上述分析过程的重要节点、评估对象、输入信息、基本假设和主要结论等。具体地，油气设备的 RAMS 分析报告应包括但不限于以下内容（推荐的报告格式见附录 2）：

- (1) 系统描述及功能分析；
- (2) 设备结构分解与故障类型；
- (3) 可靠性和维修性数据及其来源；
- (4) 可靠性框图模型；
- (5) 蒙特卡洛仿真参数设置及典型计算结果；

- (6) 可靠性和可用性预测结果；
- (7) 油气设备部件的关键度分析；
- (8) 关键参数的敏感性分析；
- (9) 改进建议措施及相应计算分析结果（如有）；
- (10) 油气设备安全性评估过程及结论。

## 第 5 章 全寿命周期 RAMS 管理

### 5.1 一般说明

本章规定了油气设备全寿命周期各阶段的一般性任务、RAM 管理任务和安全性（S）管理任务，为在全寿命周期内保障和提高油气设备 RAMS 性能提供理论指导。

全寿命周期 RAMS 管理区别于 RAMS 评估的最大不同，在于前者从全寿命周期管理的视角提供了一套确保油气设备实现预期 RAMS 性能的总体要求和实现思路，而后者针对预期设计的 RAMS 性能指标提供一套分析评估和优化决策的方法。

### 5.2 油气设备全寿命周期阶段划分

油气设备在全寿命周期内可划分为以下 14 个阶段，即：

- (1) 概念
- (2) 系统定义和应用条件
- (3) 风险分析
- (4) 系统需求
- (5) 系统需求分配
- (6) 设计和实现
- (7) 制造
- (8) 安装
- (9) 系统确认（包括安全验收和调试）
- (10) 系统验收
- (11) 运营和维修
- (12) 性能监控
- (13) 修改与更新
- (14) 停用和处置

### 5.3 全寿命周期 RAMS 管理及任务

油气设备在全寿命周期内各阶段的 RAMS 管理任务可参照表 5.3 开展。

全寿命周期阶段及其任务

表 5.3

全寿命周期阶段	该阶段一般任务	该阶段的 RAM 任务	该阶段的安全性（S）任务
1 概念	确定油气设备的用途、概念和范围； 进行财务分析和可行性研究； 设立管理机构	回顾先前达到的 RAM 业绩； 考虑项目的 RAM 蕴涵	回顾先前达到的安全业绩； 考虑项目的安全蕴涵； 回顾安全规章和安全目标
2 系统定义和应用条件	确定系统任务概要； 拟定系统描述； 确定运营和维护策略； 确定运营环境； 确定维修环境； 验证现有基础设备约束	评价 RAM 过去的经验数据； 进行初步 RAM 分析； 制定 RAM 方针； 确定长期运营和维	评价安全性过去的经验数据； 进行初步危害分析； 建立(整个的)安全计划； 定义风险容许判据；

	的影响	修环境； 确定现有基础设施约束对 RAM 的影响	确实现有基础设施约束对安全性的影响
3 风险分析	开展项目相关的风险分析		完成系统危害性和安全性风险分析； 建立危害记录； 完成风险评估
4 系统需求	开展需求分析； 指定系统（所有的要求）； 指定环境； 定义系统论证和验收准则； 建立确认计划； 确定管理、质量和组织需求； 实施变更控制程序	规定（全面的）系统 RAM 要求； 规定（全面的）RAM 验收准则； 规定系统功能结构； 建立 RAM 规划； 建立 RAM 管理	指定系统(全面的)安全要求； 定义安全（全面的）验收准则； 定义安全相关的功能要求； 建立安全管理
5 系统需求分配	系统需求分配； 明确子系统和部件要求； 规定子系统和部件验收准则	系统 RAM 要求分配； 指定子系统和部件 RAM 要求； 规定子系统和部件 RAM 验收准则	系统安全目标和要求的分配； 指定子系统或部件安全要求； 规定子系统和部件安全验收准则； 修改系统安全计划
6 设计和实现	计划编制； 设计和开发； 设计分析和测试； 设计验证； 实施和确认； 进行后勤保障资源设计	通过复核、分析、测试和数据评估来实施 RAM 规划，包括： 可靠性和可用性； 维修和可维修性； 最佳维修策略； 后勤保障； 开展程序控制，包括： RAM 规划管理； 分包商和供应商的控制	通过复核、分析、测试和数据评估来实施安全计划，涉及： 危害记录； 危害分析和风险评估； 论证安全相关的设计决策； 开展计划控制，包括： 安全管理； 分包商和供应商的控制； 准备一般安全论据； 准备（如合适）一般应用安全论据
7 制造	编制生产计划； 制造； 零部件的制造和测试； 准备文件； 建立培训方案	完成环境应力筛选； 进行 RAM 改进测试； 着手运行失效报告分析和纠正实施系统（FRACAS）	通过复核、分析、测试数据评审来实施安全计划； 使用危害记录
8 安装	组装系统； 安装系统	开始维修人员培训； 建立备件和工具供应方	确定安装程序； 实施安装程序

		案	
9 系统确认 (包括安全验收和调试)	调试; 进行运营前的试运行; 进行培训	完成 RAM 论证	建立调试程序; 实施调试程序; 准备应用特定的安全论据
10 系统验收	以验收准则为基础实施验收程序; 汇集验收证据; 投入运行; 继续试运行工作(如果适合)	评估 RAM 论证	评估应用特定的安全论据
11 运营和维修	长期系统运营; 进行计划内维修; 执行计划内培训方案	备件和工具的计划内采购; 进行计划内以可靠性为中心的维护后勤保障	进行计划内以安全为中心的维护; 进行计划内的安全性能监控和危害记录维护
12 性能监控	收集运营性能统计; 获取、分析和评审数据	收集、分析、评估和使用性能及 RAM 统计	收集、分析、评估和使用性能及安全统计
13 修改与更新	实施修改请求程序; 实施修改与更新程序	考虑修改和更新的 RAM 蕴涵	考虑修改和更新的安全蕴涵
14 停用和处置	编制停用和报废处置计划; 执行停用; 进行处置	无 RAM 工作	建立安全规划; 进行危害分析和风险评估; 实施安全计划

注：本表引自 GB/T 21562.1-2008 《轨道交通 可靠性、可用性、可维修性和安全性规范及示例》，详细要求可参照该标准执行。

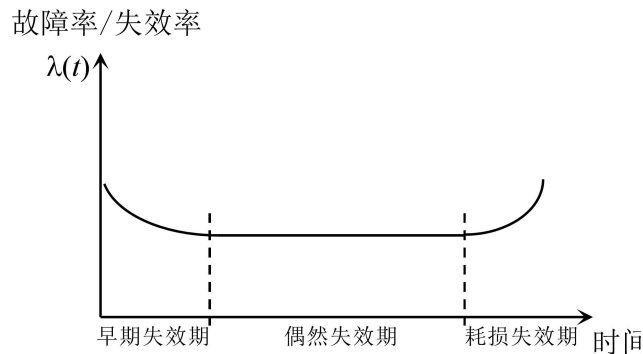
## 附录 1 常用故障分布模型

### 1 一般说明

本附录提供几种典型设备故障随机分布模型,反映设备故障概率或失效率随时间变化的统计规律。此外,设备维修性参数与可靠性参数相似,也体现一定的随机分布特性,可类似地选取指数分布、威布尔分布、正态分布、三角分布等模型进行描述。

### 2 浴盆曲线模型

为了反映产品失效率在产品使用不同阶段随时间变化情况,产品失效率函数  $\lambda(t)$  可通过浴盆曲线模型来描述,如附图 2 所示。



附图 2 浴盆曲线

其中,偶然失效期失效率保持稳定较低水平,为有效寿命或有效工作时期,该时期产品可靠度通常假设为恒定值,采用恒定失效率模型来描述。

### 3 恒定失效率模型（指数模型）

恒定失效率模型即为指数分布故障模型,假定产品的失效率为一恒定值,即  $\lambda(t) = \lambda$ , 可得  $R(t) = e^{-\lambda t}$ , 产品可靠度函数满足指数分布特性,进一步可推得:

累计失效分布函数为:

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

失效率概率密度函数为:

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

此外,可推出其他特征参数:

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

$$\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2}$$

$$t_{med} = 0.69315MTTF$$

$$t_{mod} = 0$$

将  $MTTF$  带入可靠度函数,得到  $R(MTTF) = 0.368$ ,即在故障率恒定时,产品的实际寿命超过平均寿命的概率为 0.368。

恒定故障率模型中,通常可将失效率  $\lambda$  表示如下:

$$\lambda = 1/MTTF$$

同时，对于可维修系统，也可假定维修率  $\mu$  为一恒定值：

$$\mu = 1 / MTTR$$

指数分布具有“无记忆性”，即产品的失效率在任何时刻都与已工作过的时间长短没有关系。因此指数分布的这一特性与机械零件的疲劳、磨损、腐蚀、蠕变等损伤过程的实际情况不相符，不适合机械零件功能参数的描述，而适用于电子元器件、半导体器件等产品的失效率分析。此外，指数分布模型可以近似地作为高可靠性的复杂部件、机器或系统的失效率分布模型，特别是在部件或机器的整机试验以及大型复杂系统（如计算机）中得到广泛应用。

#### 4 威布尔分布模型（Weibull 分布）

如果失效率与时间相关，且符合幂函数形式，则产品的故障分布符合威布尔分布。

##### (1) 双参数威布尔分布

双参数威布尔分布通过两个参数来反应故障随时间变化情况，包括形状参数  $\beta$  和尺度参数  $\theta$ 。

双参数威布尔分布的失效率函数为：

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1}, \quad \beta > 0, \theta > 0, t > 0.$$

可靠性函数为：

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}$$

累计失效分布函数为：

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}$$

失效概率密度函数为：

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}$$

此外，可推出其他特征参数：

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

$$t_{med} = \theta (0.69315)^{\frac{1}{\beta}}$$

$$t_{mod} = \begin{cases} \theta \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)^{\frac{1}{\beta}}, & \beta > 1; \\ t_{mod} \leq 1, & \beta \leq 1. \end{cases}$$

$$\sigma^2 = \theta^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right)^2 \right]$$

式中， $\beta$  为形状参数，其变动会对  $\lambda(t)$ 、 $f(t)$ 、 $R(t)$  和  $F(t)$  的形状带来很大影响，能够反映不同的故障类型。 $\theta$  为尺度参数，影响函数的均值和广度，及影响到预期寿命。

$\beta$  对故障率函数  $\lambda(t)$  的影响如下：

- 1)  $\beta$  在 0~1 之间时，故障率函数  $\lambda(t)$  递减，在  $t=0$  时趋近无穷大，随着  $t$  增大  $\lambda(t)$  无限靠近 0。
- 2)  $\beta=1$  时，故障率  $\lambda(t)$  变成常数，成为指数分布模型；
- 3)  $\beta$  在 1~2 之间时，故障率函数  $\lambda(t)$  递增，增长越来越慢。
- 4)  $\beta=2$  时，故障率函数  $\lambda(t)$  是关于  $t$  的一次函数，也称为瑞利分布。
- 5)  $\beta > 2$  时，故障率函数  $\lambda(t)$  递增，增长越来越快。

$\theta$  对  $f(t)$  和  $\lambda(t)$  的影响表现为：随着  $\theta$  的数值越大， $f(t)$  和  $\lambda(t)$  在纵轴上覆盖的范围越

小，即故障率更小，相应同时刻的可靠度更大。

### (2) 三参数威布尔分布

三参数威布尔分布相比于二参数威布尔函数增加了位置参数  $\gamma$ ，该参数表示产品在  $\gamma$  时刻之前具有 100% 的可靠度。

双参数威布尔分布的失效率函数为：

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\theta} \left( \frac{t-\gamma}{\theta} \right)^{\beta-1}$$

可靠性函数为：

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^\beta}$$

累计失效分布函数为：

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^\beta}$$

失效概率密度函数为：

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta} \left( \frac{t-\gamma}{\theta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^\beta}$$

威布尔分布模型是可靠性工程中的通用模型，通过调整分布参数可以构成多种不同的分布，可为各种不同类型的产品寿命特性建立模型。威布尔分布既包括故障率为常数的模型，也包括故障率随时间变化的递减（早期故障）和递增（耗损故障）模型，可描述复杂的失效过程。很多产品的故障率是单调递增过程，因此威布尔分布可以很好地描述机电类产品的疲劳、磨损等耗损故障。

## 5 正态分布模型

正态分布故障模型中，失效概率函数  $f(t)$  服从正态分布  $N(\mu, \sigma^2)$ ，将工作时间  $t$  转换成  $z = \frac{t-\mu}{\sigma}$ ，构造标准正态分布  $z \sim N(0,1)$ ，可计算时刻  $t$  的累计失效概率  $F(t)$  和可靠度  $R(t)$  和失效率  $\lambda(t)$ 。

累计失效分布函数为：

$$F(t) = \Phi(z) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$$

可靠性函数为：

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$$

失效率函数为：

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

正态分布模型适用于分析由于磨损（如机械装置）而发生故障的产品，磨损故障通常最接近于正态分布。此外，正态分布适用于对制造的产品及其性能是否符合规范进行分析，用以描述零件的差别。

## 6 对数正态分布模型

对数正态分布，也称为高尔顿分布，是一种对数服从正态分布的概率分布。适用于所关注的变量必须为正数的情况。对数正态分布与正态分布的关系可描述为：如果  $X$  服从具有参数  $\mu$  和  $\sigma$  的对数正态分布，则  $\log(X)$  服从具有均值  $\mu$  和标准差  $\sigma$  的正态分布。

满足对数正态分布的失效概率密度函数表示如下：

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\log t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad t > 0$$

满足对数正态分布的累计失效分布函数表示如下：

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{t} \exp\left\{-\frac{(\log t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dt, \quad t > 0$$

对数正态分布常用于半导体器件的可靠性分析和机械零件的疲劳寿命分析。也可用于维修分析中对维修时间数据的分析。

## 7 三角分布模型

三角分布又称辛普森分布或三角形分布，三角分布适用于描述下限为  $a$ 、众数为  $b$ 、上限为  $c$  的连续概率分布。

符合三角分布的失效概率密度函数  $f(t)$  表示如下：

$$f(t|a,b,c) = \begin{cases} \frac{2(t-a)}{(c-a)(b-a)} & a \leq t \leq b \\ \frac{2(c-t)}{(c-a)(c-b)} & b \leq t \leq c \\ 0 & t < a, t > c \end{cases}$$

累计失效分布函数  $F(t)$  的公式如下：

$$F(t|a,b,c) = \begin{cases} 0 & t < a \\ \frac{(t-a)^2}{(c-a)(b-a)} & a \leq t \leq b \\ 1 - \frac{(c-t)^2}{(c-a)(c-b)} & b \leq t \leq c \\ 1 & t > c \end{cases}$$

## 附录 2 RAMS 评估报告内容

附录 2 列举了 RAMS 评估报告的主要内容，可为开展 RAMS 评估提供总体思路和报告模版。

### 1 概要

总体描述报告的评估对象、项目来源、项目阶段、主要目标等相关项目信息，以及评估工作的开展形式、方案、工具、数据来源等内容。介绍评估中所采用的关键术语、定义、缩略语等，以及参考的计算书、工艺图等相关技术图纸文件清单。

### 2 系统描述

描述评估对象及其配套系统或设备的任务概要、运行条件、环境条件、维修条件、运行模式、关键设备参数、工作原理等，描述评估对象的主要组成设备、设计性能指标及其预期功能。描述设备功能分解或物理分解结构，以及不同结构或子系统之间的边界。

### 3 FMEA 分析

针对评估对象开展故障模式与影响分析（FMEA）分析，识别系统中各设备或部件的潜在故障模式及其对系统可靠性和安全性的影响，梳理系统关键设备清单，为开展 RAMS 评估提供数据收集与建模的基础。

描述针对评估对象开展 FMEA 的工作流程和方式，列出 FMEA 分析表，描述 FMEA 分析结论、关键设备清单及其故障类型。

### 4 RAMS 评估

#### 4.1 基本假设

描述本次分析中所遵循的基本假设，包括分析模型构建、可靠性与维修性参数选择、数据库引用、随机分布模型、设备分析边界、环境条件以及其他方面的各类假设条件，尽可能详细地展现分析模型与评估对象实际情况存在地差异。

#### 4.2 数据收集分析

详细描述和列举 RAMS 分析中涉及的各设备相关数据，包括装置数据、运行效数据、维修数据，明确各设备的可靠性参数和维修性参数。其中，可靠性参数可选用失效概率密度函数、失效率、平均失效前时间、平均故障间隔时间或平均危险故障间隔时间等；维修性数据分为就整形维修和预防性维修两类，均涉及维修任务时长，并在必要时提供维修资源（包括人力、备件等）和成本数据。

可靠性数据和维修性数据可来源于（1）可靠性试验分析结果；（2）运维数据统计；（3）数据库查询；（4）专家评估结果；（5）其他方式收集到的数据。数据选择方式的优先度按编号顺序依次降低，并根据实际情况选定优先度更高的方式。

#### 4.3 可靠性框图（RBD）构建

根据评估对象中各类设备或部件的连接或功能逻辑关系，依据 4.5.1 所述各类模型的含义，构建油气设备总体的可靠性框图，应包含所有可获得数据参与计算的设备或部件。

#### 4.4 仿真计算参数设置

本指南以蒙特卡洛法作为 RAMS 评估的推荐算法，在报告中应说明设定的模拟时间、仿真模拟次数及其选择依据，进而根据 4.6.2 所规定程序描述单次仿真模拟过程和结果。

#### 4.5 设备可靠性分析

依据仿真计算结果，描述设备总体可靠性指标随时间变化情况。

#### 4.6 设备可用性分析

依据仿真计算结果，描述设备总体可用性指标随时间变化情况。

#### 4.7 关键度与敏感性分析

依据仿真计算结果，计算系统停机时间关键度指数 DTCTI 和失效关键度指数 FCI，分析说明不同设备或部件对系统总体的可靠性、可用性指标影响程度。

#### 4.8 安全性分析

针对油气设备故障引起的安全性问题，开展安全性评估，分析潜在安全故障模式、原因及影响，并结合相关设备在该故障模式下的可靠性参数，计算系统总体的安全性水平。结合 4.7.4 要求形成安全性分析报告。

#### 4.9 维修策略优化

依据可靠性分析、可用性分析、安全性分析和敏感性分析结果，设定关键部件的维修策略或优化策略，重新进行仿真计算，分析计算结果的变化方向，择优确定合理的维修策略。

### 5 结论与建议

综合以上研究内容，总结说明 RAMS 评估的总体工作内容，重点描述可靠性、可用性和安全性指标的评估结果，以及对设计方案、设备选型、运营维护、维修策略等方面的意见或建议。

## 附录 3 水下采油树 RAM 分析示例

### 1 一般说明

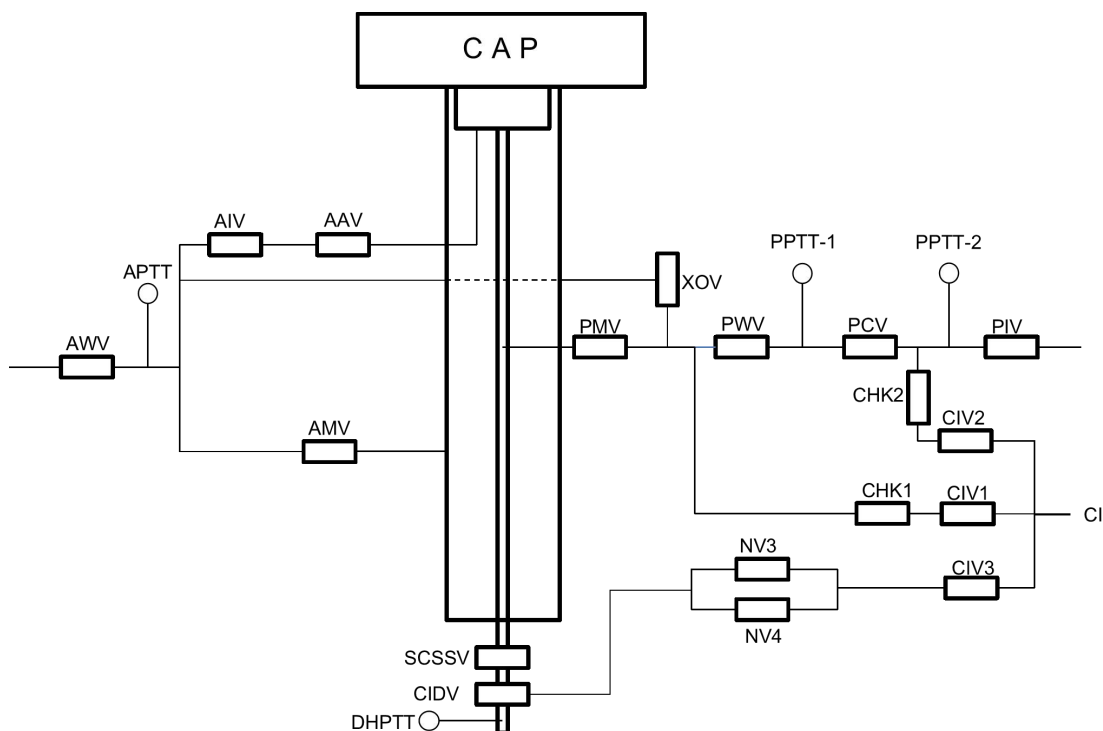
水下采油树是海洋油气水下生产系统的关键设备，是连接井口头部各类阀门的合体，由数量巨大的零部件组成，可对井下产出的气液进行测试、操作、关断和节流，具备安全隔离储油层、保证井下作业安全等功能。水下采油树采办周期长、价格昂贵、维保困难等特点，对于可靠性和可用性等性能指标的要求较高。

本指南选取水下采油树作为 RAM 分析案例，考虑到系统复杂性和数据的可得性，对设备系统进行适当简化，选取关键产品进行建模分析，其目的在于明晰 RAM 分析的基本过程和思路，为开展同类油气设备的 RAM 分析提供基本示范。

### 2 水下采油树设备原理图

选取的水下采油树设备原理简图见附图 2.1 所示（仅作示例），包括各类阀门、传感器、连接器设备、注入阀等设备。图中的英文及缩写符号含义如下：

- (1) AAV (Annulus Access Valve)：环空接入阀；
- (2) AIV (Annulus Isolation Valve)：环空隔离阀；
- (3) AMV (Annulus Master Valve)：环空主阀；
- (4) APTT (Annulus Pressure & Temperature Transducer)：环空压力温度传感器；
- (5) AWV (Annulus Wing Valve)：环空翼阀；
- (6) CAP：采油树帽；
- (7) CI (Chemical Injection)：化学注入入口；
- (8) CIV (Chemical Injection Valve)：化学注入阀；
- (9) DHPTT (Downhole Pressure & Temperature Transducer)：井口压力温度传感器；
- (10) NV (Needle Valve)：针阀；
- (11) PCV (Production Choke Valve)：生产节流阀；
- (12) PIV (Production Isolation Valve)：生产隔离阀；
- (13) PMV (Production Master Valve)：生产主阀；
- (14) PPTT (Production Pressure & Temperature Transducer)：生产压力温度传感器；
- (15) PWV (Production Wing Valve)：生产翼阀；
- (16) SCSSV (Surface Controlled Subsurface Safety Valve)：水面控制的井下安全阀；
- (17) XOV (Crossover Valve)：转换阀。



附图 2.1 水下采油树设备原理图 (PID 图)

### 3 水下采油树部件及相关数据获取

对水下采油树设备系统进行初步分析, 确定参与 RAM 分析的关键部件。基于数据库统计数据, 收集典型部件的可靠性和维修性数据, 如附表 2.1 所示, 表中可靠性数据和维修性数据均采用了指数分布模型。

水下采油树典型部件及可靠性和维修性数据 附表 2.1

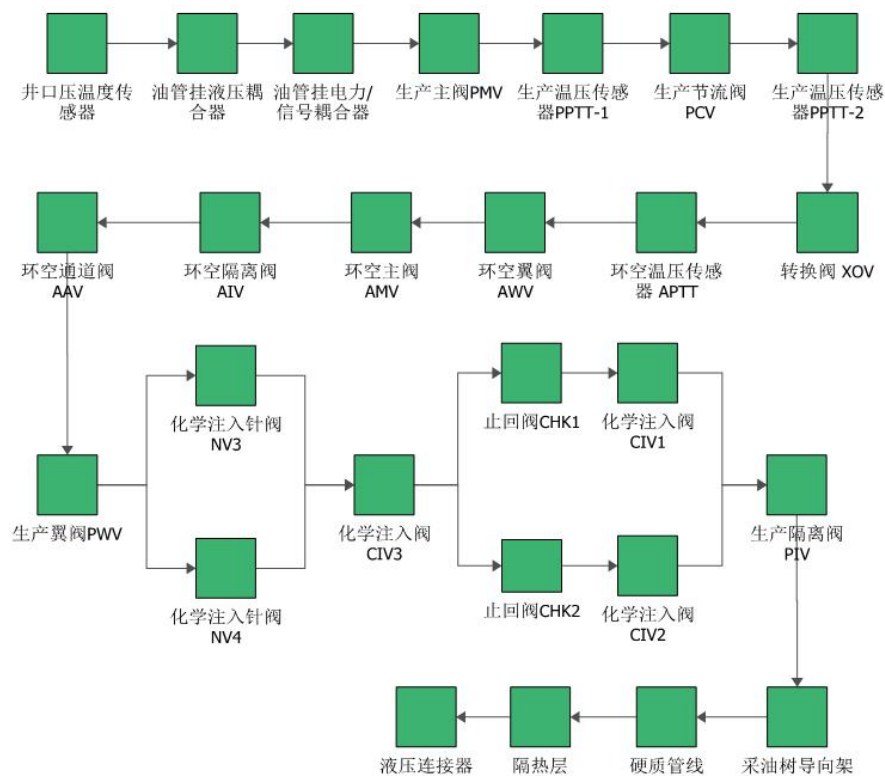
部件名称	平均失效率 (每百万小时)	MTTF (年)	实际维修时间 (小时)
井口温压传感器 DHPTT	1.92	59.46	0
化学注入阀 CIDV-CIV3	0.69	165.44	15.66
化学注入针阀 NV3	0.69	165.44	15.66
化学注入针阀 NV4	0.69	165.44	15.66
油管挂液压耦合器	0.09	1268.39	168
油管挂电力/信号耦合器	0.37	308.53	0
生产主阀 PMV	11.53	9.90	12
转换阀 XOV	11.53	9.90	12
化学注入阀 CIV1	0.69	165.44	15.66
止回阀 CHK1	0.26	439.06	0
生产温压传感器 PPTT-1	1.92	59.46	0
生产翼阀 PWV	11.53	9.90	12
生产节流阀 PCV	2.81	40.62	34
化学注入阀 CIV2	0.69	165.44	15.66
止回阀 CHK2	0.26	439.06	0
生产温压传感器 PPTT-2	1.92	59.46	0
生产隔离阀 PIV	0.79	144.50	57
环空通道阀 AAV	11.53	9.90	12
环空隔离阀 AIV	11.53	9.90	12

环空主阀 AMV	11.53	9.90	12
环空温压传感器 APTT	1.92	59.46	0
环空翼阀 AWV	11.53	9.90	12
液压连接器	0.04	2853.88	8
隔热层	23.71	4.81	13.22
硬质管线	0.39	292.71	0
采油树导向架	0.18	634.20	0

(注：上表中数据引自行业数据库，仅作为计算输入示例，无工程应用推荐意义。)

#### 4 可靠性框图构建

基于水下采油树设备原理图，构建 RBD 框图，如附图 2.2 所示，RBD 中各部件主要涉及串联模型和并联模型连接方式。



附图 2.2 水下采油树 RBD 框图

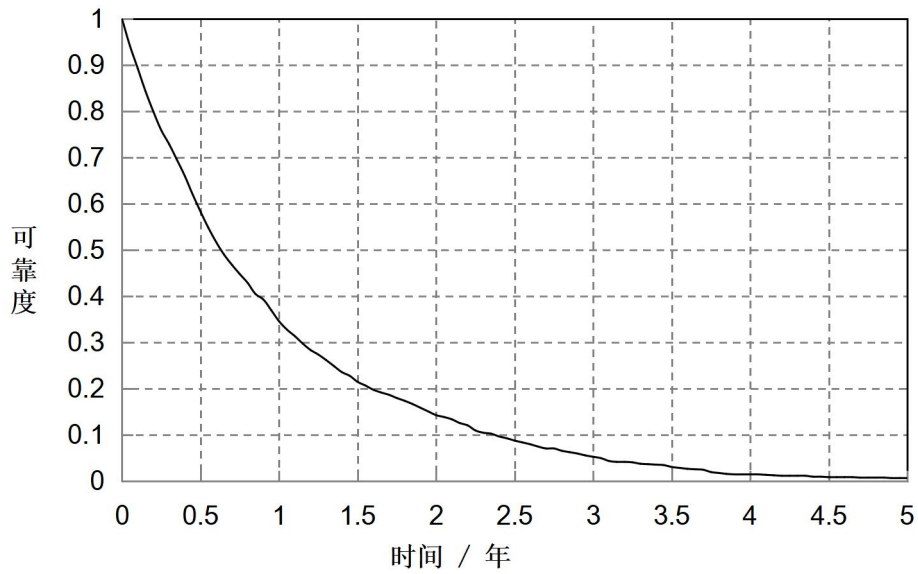
### 5 可靠性和可用性预测分析

#### 5.1 蒙特卡洛仿真参数设定

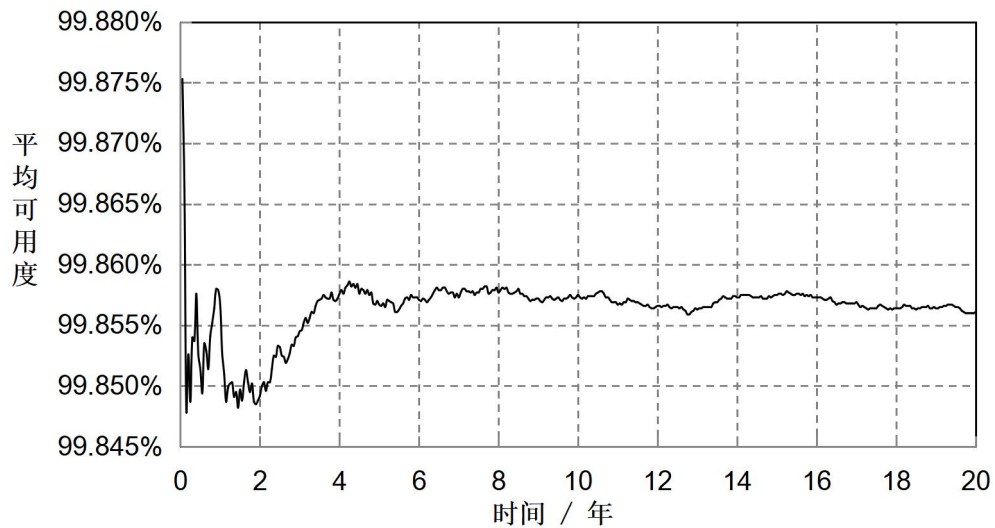
根据设备预期寿命设定蒙特卡洛仿真参数，针对水下采油树设备，设定预期寿命为 20 年，即预测 20 年内的设备可靠性和可用性参数变化情况，设定仿真次数为 1000 次，开展蒙特卡洛法仿真分析。分析计算过程中，仅考虑修复性维修，未考虑预防性维修、维修资源延误等影响。

#### 5.2 预测分析结果

基于蒙特卡洛仿真分析，可得到水下采油树设备系统可靠度和平均可用度随时间变化曲线，如附图 2.3 和附图 2.4 所示。



附图 2.3 水下采油树可靠度变化曲线

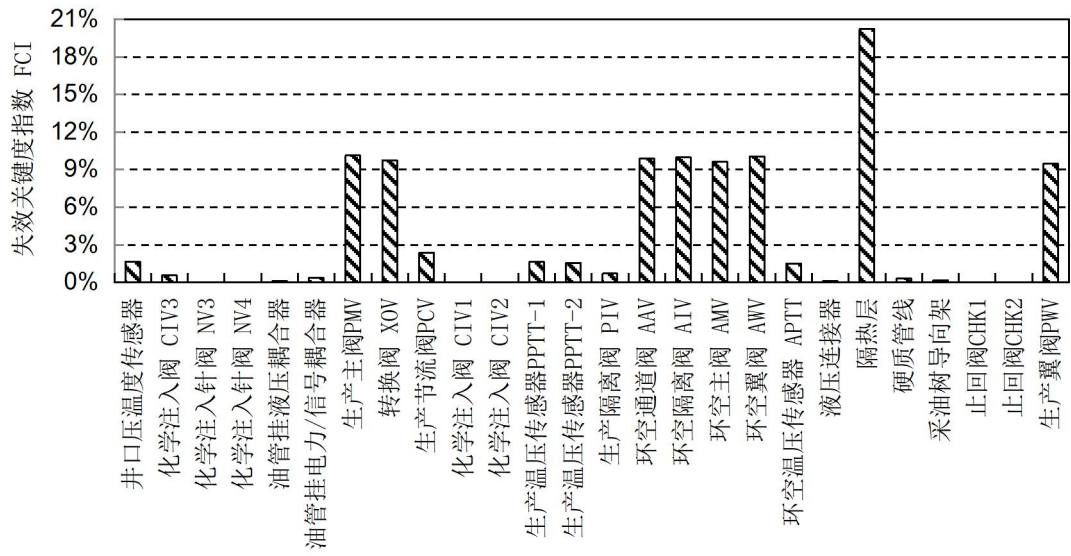


附图 2.4 水下采油树系统平均可用度变化曲线

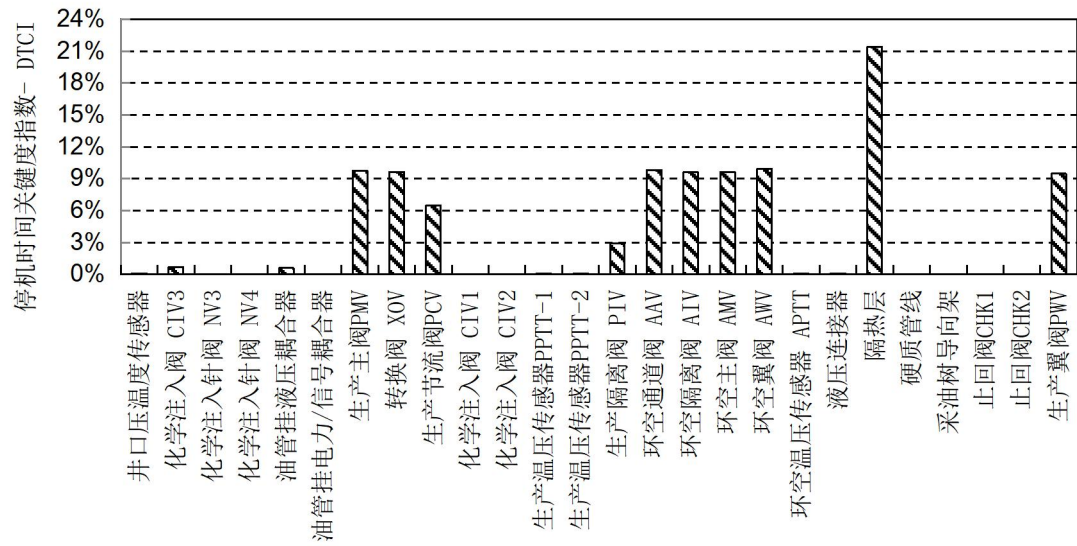
## 6 关键度分析

基于蒙特卡洛仿真结果,分析水下采油树各部件对于系统失效次数和维修时间的影响程度,得到失效关键度指数  $FCI$  和停机时间关键度指数  $DTCI$ ,如附图 2.5 和附图 2.6 所示。

由图中可以得出,隔热层、生产主阀、生产翼阀、环空主阀、环空翼阀、环空通道阀以及环空隔离阀等设备具有较高的关键度。



附图 2.5 各部件的失效关键度指数 FCI



附图 2.6 各部件的停机时间关键度指数 DTCI