

# RAM分析技术在伊朗雅达油田地面工程中的应用

徐占友<sup>1</sup> 张欣雨<sup>1</sup>

**摘要：**RAM分析技术是针对可靠性、可用性和可维修性三个要素的量化技术，可用于评估系统中设备的关键性，确定最佳的冗余设置方法，提高完整性管理水平，为确定投资成本和运行成本提供参考。在伊朗雅达油田地面工程设计中，采用PLASMA软件，基于蒙特卡洛方法和马尔科夫模型，对油气分离装置和中央处理站的备选方案开展了RAM研究。经过分析范围定义、失效与维修分析和敏感性分析等步骤，得到了各方案的可用度和各子系统的关键性，为设计方案的完善提供了有效的技术支持。RAM分析在本例中的作用和优势可为国内地面工程技术人员提供参考。

**关键词：**雅达油田；RAM分析；基本概念；可用度；风险控制

Doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2016.7.034

## Application of RAM Analysis Technique in the Surface Engineering of Iran Yadavaran Oilfield

Xu Zhanyou, Zhang Xinyu

**Abstract:** RAM analysis technique is a quantization technique focused on the reliability, availability and maintainability of a system. It can be adopted to evaluate the criticality of facilities in the system, determine the optimal redundancy setting scheme, improve the level of integrity management, and provide reference for the determination of CAPEX and OPEX. In the design of facility engineering in Iran Yadavaran oilfield, PLASMA software is adopted to conduct the RAM analysis on the design options of GOSU and CTEP, based on the Monte Carlo approach and Markov model. Through the analysis procedures, including scope definition, failure and repair data analysis and sensitivity analysis, availability of the options and criticality of the subsystems are obtained, which provide effective technical supports for the improvement of the design options. It is expected that the function and advantages of RAM in this example could provide some reference for the domestic surface facility engineers.

**Key words:** Yadavaran oilfield; RAM analysis; basic concept; availability; risk control

油田地面工程是一项庞大的系统工程，具有规模大、投资高、周期长和系统性强等特点。地面工程系统能否安全、可靠、经济地运行，对油气田开发和生产整体效益的好坏具有举足轻重的影响。近几年来，由于油价波动、经济形势和地缘政治等原因，地面工程面临的风险不断增大，将完整性的理念引入地面工程管理的思路，越来越受到人们的瞩目。完整性主要包括可靠性（Reliability）、可用性（Availability）、可维修性（Maintainability）等三个要素，对其进行量化的技术称为RAM分析技术<sup>[1]</sup>。

国外地面工程项目中，业主一般明确要求承包

商提供RAM研究报告。在国内，RAM在航空、电力和轨道交通等领域应用较多，在石油领域的应用鲜有报导。刘太元<sup>[2]</sup>针对深水油气田开发项目，介绍了可靠性、可用性和可维修性技术的应用过程。于庆林<sup>[3]</sup>介绍了RAM研究的理论基础，并对海外大型油田集中处理站的应用实例进行了剖析。以上研究均从各自领域对RAM的理论和应用进行了介绍，但在系统性和深入性上尚有一定局限性。本文将对RAM分析技术进行较为全面的介绍，并以伊朗雅达油田中央处理站为例，介绍其在地面工程中的应用模式。

<sup>1</sup>中国石化集团国际石油勘探开发有限公司

## 1 RAM分析技术

RAM分析的主要作用是了解系统中最关键的设备, 确定最佳的冗余设置方法, 为完整性管理提供参考, 为确定投资成本和运行成本提供参考。本节首先介绍RAM分析中的基本概念, 然后按分析步骤介绍RAM的基本分析方法。

### 1.1 基本概念

平均连续运行时间是指设备总运行时间与总失效次数之比。对于可修复的设备, 用MTTF (Mean Time to Failure) 表示; 对于不可修复的设备 (失效后不再修复而是更换为新品, 多是生产中的耗材), 用MTBF (Mean Time between Failures) 表示。在RAM分析的计算过程中, 二者并无实质差别, 下文均统一采用MTBF进行说明。

平均修复时间MTTR (Mean Time to Repair) 是指从失效发生到产量完全恢复所需的时间, 包括图1中动员维修人员的时间 (a); 诊断和修复失效设备使其达到可操作状态的时间 (b); 爬升至正常产量的时间 (c)。

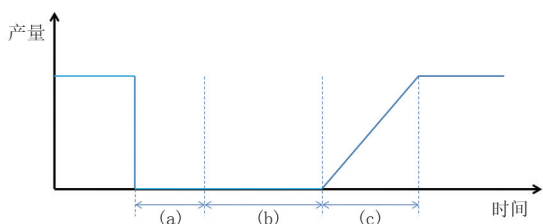


图1 平均修复时间构成

**可靠性 (Reliability):** 指设备在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。

**可用性 (Availability):** 指设备在某时刻具有或维持规定功能的能力。

可用性和可靠性是一对容易混淆的概念。事实上, 可用性可理解为广义的可靠性。可用性的本质是系统能够正常运行的概率。可靠性的本质是系统正常运行一段时间 (保持不失效) 的概率。高可靠性并不能保证高可用性, 反之亦然。由其定义可知, 可用性由可靠性和可维修性共同决定, 三者之间存在的关系见表1。

表1 可用性与可靠性、可维修性的关系

可靠性	可维修性	可用性
不变	降低	降低
不变	提高	提高
提高	不变	提高
降低	不变	降低

由表1可知, 可用性综合反映了系统的可靠性和可维修性, 因此, 可用性是RAM分析的核心。

可用性的量化指标为可用度, 根据应用场所不同有不同的定义方式, 常见的有:

(1) 即时可用度 (Punctual Availability)。即时可用度指设备在某时刻  $t$  处于正常运转状态的概率。该定义与可靠性的定义十分类似, 区别在于其将可维修性纳入考虑中。在任意时刻  $t$ , 且仅在以下情况设备处于正常运转状态: ①设备在  $[0, t]$  时间区间内未发生过失效; ②设备在  $[0, t]$  时间区间内发生过失效, 最近一次修复完成的时间点为  $u$ 。

情况①与情况②是互斥的, 因此  $t$  时刻的即时可用度应为两者之和, 其数学表达式为

$$A(t) = R(t) + \int_0^t R(t-u)m(u)du \quad (1)$$

其中,  $A(t)$  为即时可用度; 等号右侧第一项为情况①的概率,  $R(t)$  为设备可靠度函数; 等号右侧第二项为情况②的概率,  $m(u)$  为系统更新密度函数 (Renewal Density Function)。

(2) 平均可用度 (Mean Availability)。平均可用度  $A_m(T)$  指在一段时间  $T$  内, 系统处于正常运行状态的时间所占的比例, 其数学表达式为

$$A_m(T) = \frac{1}{T} \int_0^T A(t)dt \quad (2)$$

(3) 稳态可用度 (Steady-State Availability)。稳态可用度指时间趋近无限长时平均可用度的数值, 其数学表达式为

$$A(\infty) = \lim_{T \rightarrow \infty} A_m(T) \quad (3)$$

(4) 操作可用度 (Operational Availability)。操作可用度  $A_o$  指设备使用周期内, 正常运行时间所占的比例。其数学表达式为

$$A_o = \frac{\text{正常运行时间}}{\text{使用周期}} \quad (4)$$

操作可用度中, 考虑可能造成停机的所有因素, 如行政因素、物流因素等。

(5) 固有可用度 (Inherent Availability)。固有可用度  $A_i$  是特殊的操作可用度, 只考虑维修因素造成的停机, 其数学表达式为

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (5)$$

(6) 平均产量可用度 (Mean Production Availability)。平均产量可用度  $A_p$  指预计实现产量与要求产量之比, 其考虑了如下情况, 即在某些失效状态下系统产量并未降低到零。平均产量可用度数学表达式为

$$A_p = \frac{\text{预计实现产量}}{\text{要求产量}} \quad (6)$$

**可维修性 (Maintainability):** 指设备在规定条

件下和规定时间间隔内，按照规定的程序和资源进行维修时能够完成规定维修工作的能力。

可靠性框图 (Reliability Block Diagram)：表示系统各模块之间的逻辑关系 (串联或并联)。

不可用度 (Unavailability)：与可用度相对，二者关系为：不可用度=1-可用度。

关键性 (Criticality)：设备不可用度占系统总不可用度的比例。

## 1.2 RAM分析的基本步骤

### 1.2.1 分析范围定义

范围定义是RAM分析的第一步，应根据分析目标、任务紧急程度和客户要求综合确定<sup>[4]</sup>。为了确定合适的范围，应组织启动会议 (Kick-off Meeting)，会议内容包括：①向分析团队展示分析对象、目标以及业主期望；②定义相关责任；③解释重点信息；④确定相关时间节点。为了跟进和控制RAM分析的进展，应在每个或每两个分析阶段完成后均组织一次会议。

### 1.2.2 失效与维修信息分析

对失效和维修信息进行定性分析。开展关键设备分析，明确设备不可用性的成因和关键失效模式，对所有的设备失效模式进行标准化。值得注意的是，某些设备失效模式在不同报告中有不同的名称，应在历史失效数据分析中仔细辨别。

### 1.2.3 建模与模拟

为了定义系统中的子系统和设备的完整性参数，应构建定义可靠性框图，对子系统和设备失效对系统可用性的影响进行评估。构建可靠性框图的关键是明确所有设备对系统影响的逻辑关系。当单独的设备失效即可造成系统不可用时，此设备即与系统其他部分呈串联关系；当两个以上设备同时失效才可造成设备不可用时，这些设备之间呈并联关系，其作为一个整体与系统其他部分呈串联关系，见图2。

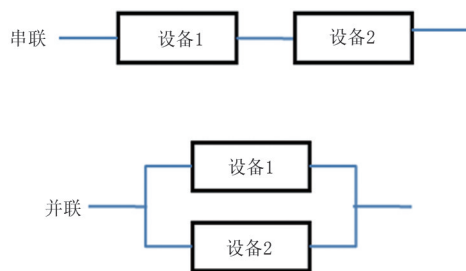


图2 可靠性框图的两种基本逻辑关系  
对于串联关系

$$R(t) = R_1(t)R_2(t) \quad (7)$$

对于并联关系

$$R(t) = 1 - [1 - R_1(t)][1 - R_2(t)] \quad (8)$$

值得说明的是，以上两式适用于设备之间没有互相影响的情况。对于设备之间存在相互影响或存在备用设备的情况，有另外的数学表达式，此处不展开介绍。

系统的可靠性总是小于任何一个串联的模块，这是RAM分析中最重要的概念。在串联逻辑下，可用性最低的设备对系统不可用性贡献最大，是应优先考虑改进的。

在完成可靠性框图建模之后，应使用随机算法对系统可用性进行模拟，蒙特卡洛法是最常用的方法。在模拟过程中，蒙特卡洛法对所有的模块随机造成失效。当模块失效造成系统停机时，相关的不可用度即被记录下来。模拟时间取决于系统的运行时间。

### 1.2.4 敏感性分析

敏感性分析的主要目标是找出影响系统不可用性的关键设备，通过评估系统的可靠性弱点来寻找改进的机会。例如，电力系统、水系统和蒸汽系统通常是影响油气开发系统可用性的主要因素。常用的改进措施一般包括：优化储存、维修计划、增加冗余数量、减少设备数量等。敏感性分析也有助于优化系统配置，因为在其中可以采用不同的假设，以评估其对系统可用性的影响。

### 1.2.5 结论和报告

作为一项有力的决策支持工具，RAM分析的结果和建议必须经过管理层才能达到维持或改善系统可用性的目的。相对于其他工具，RAM分析的结果因其数学过程而显得较为复杂，这使其报告显得尤其重要，应认真编写。

## 2 RAM分析在地面工程中的应用

雅达油田是中国石化国际石油勘探开发公司在伊朗开发的重点项目。在前端工程设计阶段，针对油气分离装置 (GOSU) 和中央处理站 (CTEP) 的11个备选方案开展了RAM研究。研究工具为PLASMA软件 (Plant Simulation using Monte Carlo & Analytical Techniques)，该软件采用蒙特卡洛方法和马尔科夫模型对系统可用性进行分析。研究中，设备在失效与维修方面的量化参数基础数据来源于以下三个公开发表的文献：①挪威船级社于1997年发布的海洋工程可靠性数据手册 (第三版) (OREDA 1997)；②挪威船级社于2002年发布的海洋工程可靠性数据手册 (第四版) (OREDA 2002)；③英国海上作业协会与石油学会于2001年

发布的海底管道失效数据库 (PARLOC 2001)。该项目可用性量化指标采用平均产量可用度, 要求可用度达到95%。

在RAM分析建模过程中, 关键步骤是基于工

艺流程建立可靠性框图。基准方案整体可靠性框图如图3所示, 其中轻油处理子系统的可靠性框图如图4所示。

值得注意的是, 可靠性框图中各模块的逻辑关

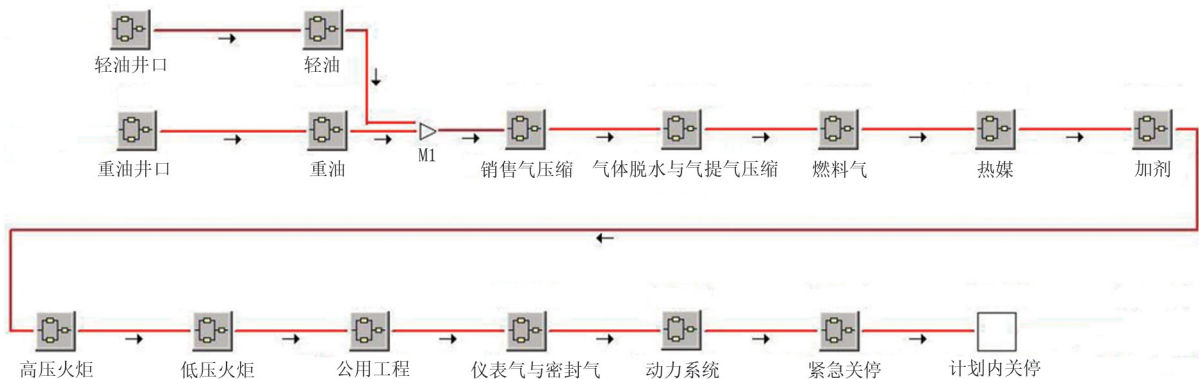


图3 系统总体可靠性框图

系与其在工艺流程中的逻辑关系并不完全一致。例如, 轻油外输与产出水处理在RBD中是串联的, 但在工艺流程中是并联的。RBD的绘制应根据其对生产的影响确定, 而不是照搬工艺流程图。

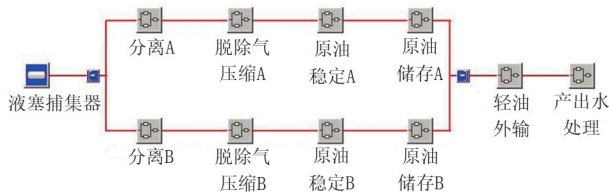


图4 轻油处理子系统可靠性框图

在搭建的逻辑性框图基础上, 利用软件进行模

拟得到各方案可用度计算结果如表2所示。

由表2可见, 各备选方案均达到了可用度目标。通过观察比较得出以下规律:

(1) 方案1和方案2的可用度几乎相同。因为脱出气压缩系统中本身存在冗余度, 其变化对整体可用度几乎没有影响。

(2) 当考虑计划内关停时, 可用度有所降低。每3至5年计划关停须进行10天, 造成可用度降低。

(3) 对比方案1、4、5、9可以看出, 只有1台

表2 RAM分析结果

方案	方案描述	生产可用度/%	
		不包括计划内关停	包括计划内关停
1	基准方案 每套原油处理装置均有独立的脱出气压缩系统, 5×25%电站 (1台备用)	96.91	96.24
2	基于方案1 所有原油装置的脱出气统一进低压和中压压缩系统	96.91	96.25
3	基于方案1 包含储油装置, 容量为每套装置24h的产量	98.88	98.37
4	基于方案1 4×33%电站 (1台备用)	97.43	96.77
5	基于方案1 3×50%电站 (1台备用)	97.84	97.17
6	基于方案1 6×20%电站 (2台备用)	97.79	97.12
7	基于方案2 6×20%电站 (2台备用)	97.80	97.13
8	基于方案3 6×20%电站 (2台备用)	99.39	98.71
9	基于方案1 6×20%电站 (1台备用)	96.28	95.62
10	基于方案2 6×20%电站 (1台备用)	96.28	95.62
11	基于方案3 6×20%电站 (1台备用)	98.46	97.78

备用设备时，在满足用电需求的前提下，增大单机能力，减少设备数量，有利于提高可用度。这是因为设备数量越少，其中任意2台同时失效的概率越小，使可用度增大。

(4) 对比方案9、6、10、7、11、8可以看出，当备用设备数量从1台提高到2台时，可用度大幅度提高。这是因为当备用设备为1台时，2台设备同时失效会造成系统停产；当备用设备为2台时，3台设备同时失效会造成系统停产。后者的概率远小于前者。

(5) 由方案1和方案3可以看出，当考虑储油装置时，可用度大幅提高。

为了考察不同子系统对可用度的影响，进一步进行关键性分析，以方案1为例，其关键性分析结果如图5所示；部分子系统的关键性分析结果见表3~表7。

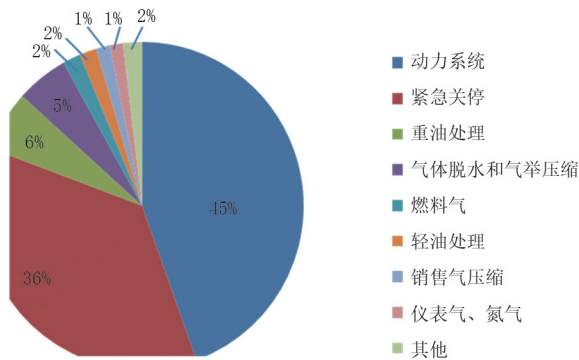


图5 方案1关键性分析结果

表3 动力子系统关键性分析结果

设备	关键性/%
涡轮机	96.3
发电机	3.7

表4 紧急关停子系统关键性分析结果

设备	关键性/%
Fire&Gas Trip	71.9
紧急关停 Trip	28.1

表5 重油处理子系统关键性分析结果

设备	关键性/%	设备	关键性/%
脱出气压缩	88.9	产出水处理	0.7
分离	5.7	原油储存	0.4
原油稳定	3.2	重油外输	0.3
液塞捕集器	0.8		

由上表可以看出，在很多子系统中都存在一个关键性显著大于其他部分的设备，如动力子系统种的涡轮机，重油处理子系统种的脱出气压缩，气体脱水子系统种的三甘醇再生橇等，这部分设备即是在设计和运行中重点改进的对象。

通过RAM分析，技术人员可对系统中的薄弱环节和相应风险做到心中有数，可以有的放矢地对系统设计进行优化改进，并在运行中合理安排检修。

表6 气体脱水子系统关键性分析结果

设备	关键性/%
三甘醇再生橇	77.6
气提气压缩	8.1
气体脱水入口分离鼓	6.6
聚结脱水过滤器	4.0
气提气电动发动机	3.4
气提气压缩机吸入鼓	0.2
气提气压缩机泄放冷却器	0.1

表7 其他部分关键性分析结果

设备	关键性/%	设备	关键性/%
热媒	36.9	低压火炬	20.6
高压火炬	20.6	加剂	21.9

### 3 结语

作为一项在国外已经日趋成熟的风险控制技术，RAM分析在我国油气开发地面工程中尚未得到应用。本文介绍了RAM的基本概念和实施步骤，并以伊朗雅达油田为例，介绍了RAM在地面工程中的应用模式，以期为国内地面工程的设计、建设和运行提供参考。

### 参考文献

- [1] RUDOLPH FREDERICK STAPELBERG. Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design [M]. London: Springer, 2009: 296-302.
- [2] 刘太元, 胡夏琦, 郝伟修, 等. RAM分析技术在海上油气田建设项目中的应用研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9 (1): 75-78.
- [3] 于庆林, 翟峰, 迟大伟. RAM研究在海外大型油田集中处理站初步设计的应用[J]. 石油规划设计, 2013, 24 (3): 25-27.
- [4] CALIXTO EDUARDO. Gas and oil reliability engineering modeling and analysis [M]. Oxford: Elsevier, 2013: 169-182.

### 作者简介

徐占友：工程师，1986年毕业于华东石油学院，从事油田地面工程技术管理工作，010-69165585, xuzhanyou2000@163.com, 北京市朝阳区惠新东街甲6号，100029。

收稿日期 2015-10-19

(栏目编辑 樊韶华)