

RAM 可靠性可用性可维护性分析在油气管线站场中的应用

孔令仪¹, 鲁毅¹

(¹风控(北京)工程技术有限公司, 北京 100025)

摘要: 某天然气长输管线为了评估长输管线、压气站和阀室的整体可用性, 确保管线输送能力, 对管线的典型段进行了 RAM 可靠性可用性和可维护性分析。本文介绍了 RAM 分析的计算原理, 以及如何通过 RAM 分析来优化长输管线的系统配置, 并针对可靠性薄弱环节, 找出提高系统可靠性的改进方案。

关键词: 可靠性; 长输管线; 站场; RAM 可靠性、可用性和可维护性分析, FMECA 失效模式分析

通讯作者: 鲁毅 (1972—), 男, 高级工程师, 学士, 从事可靠性与风险咨询相关工作。

第一作者: 孔令仪 (1989—), 女, 工程师, 学士, 从事可靠性与风险咨询相关工作。

引言

在石油天然气行业, 设备随机失效所引起的停产停输往往损失巨大, 油气长输管线对输送可靠性的要求越来越高, 系统的复杂性也日益提高。可靠性、可用性和可维护性(RAM)分析是一种定量评估系统可靠性的方法, 可以在投资设计阶段对那些复杂系统进行有效的可靠性评估, 并针对可靠性薄弱环节, 找出提高系统可靠性的改进方案。

本文简述的 RAM 分析是一种基于蒙特卡罗算法进行数学模拟的方法, 应用此方法对某天然气长输管线的局部段(含一座压气站及一座阀室)进行了可靠性分析。

1 RAM 分析介绍

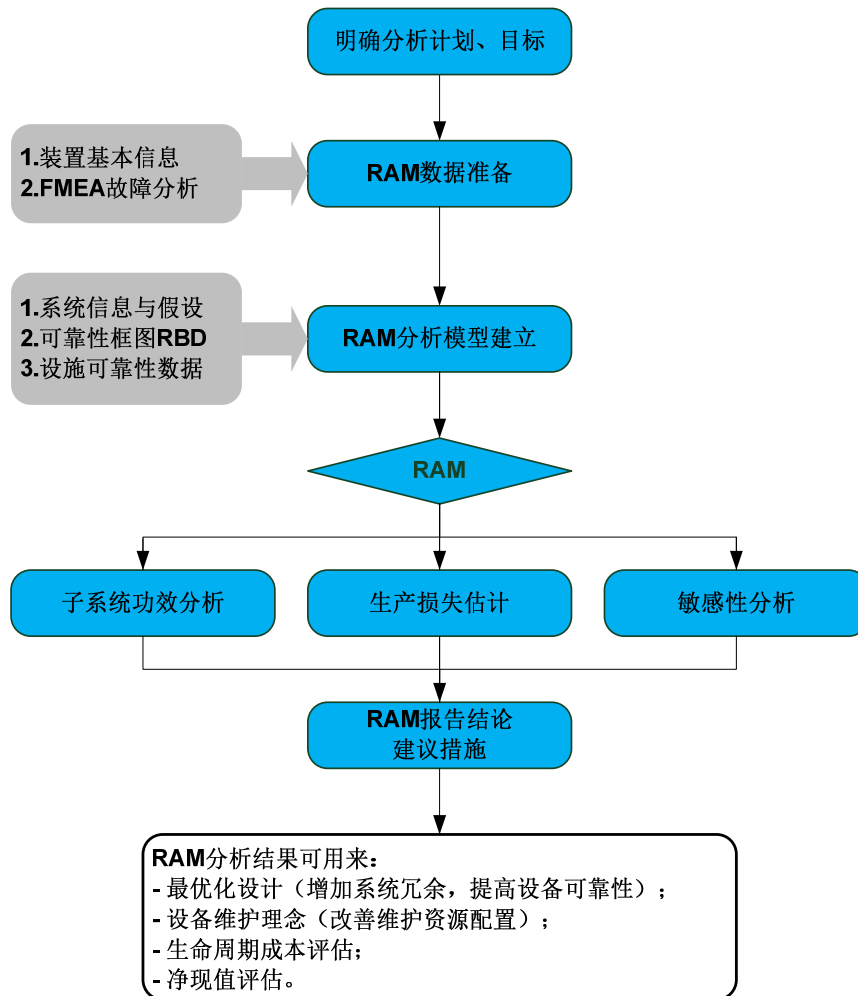
可靠性、可用性和可维护性(RAM)可以通过建立模型对系统及所有系统部件的故障率和维修时间等因素进行模拟, 以此来评价系统在给定寿命周期内的可靠性。

RAM 模型计算输出结果主要包括(但不限于)以下预测:

- 系统在完整生命周期内的可用性;
- 各种可能导致可用性降低的因素, 及其贡献率;
- 维修、更换、干预的预期次数;
- 系统按要求生产的平均时间。

1.1 RAM 分析流程

典型的 RAM 分析流程如图表 1 所示:



图表 1 RAM 分析流程

1.1.1 明确分析计划、目标

对于 RAM 分析来说，第一步就是先要明确分析的对象和范围。

针对 RAM 分析的系统（子系统），根据产量、投资和维修资源等给出 RAM 预测指标。RAM 预测指标包括可靠性、可用性（生产能力）和可维护性。

1.1.2 RAM 分析数据准备

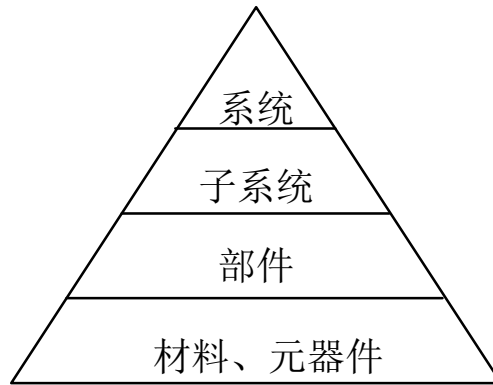
在进行 RAM 分析之前需准备一些资料，这是做好 RAM 分析的基础，主要包括：设计基础（BOD）、管道和仪表设备图（P&IDs）、工艺流程图（PFD）、操作和维护原则、设备失效数据、设备维护数据（维修计划）、因果图、设备产能信息。

通常情况下，失效数据可从以下来源获得：

- 客户使用数据、或设备厂商统计数据
- 行业数据库
- 基于行业经验的专家评估
- FMECA 分析
- 可靠性测试

1.1.3 RAM 分析模型建立

任何复杂系统均是由不同层级的子系统、部件、元器件组成。其相互关系如下图表 2 所示金字塔模型：



图表 2 金字塔模型

构建可靠性框图 RBD 是 RAM 模型的基础，RBD 的主要作用就是描述系统内可靠性关系。只有金字塔模型的层级关系正确和完整，才可能对该系统的可靠性做出准确的描述。一般可根据系统设计意图和流程，将系统划分为若干子系统，并将各个部件间的可靠性关系用 RBD 表达。RBD 可以用来表示串联结构、并联结构、串联-并联结构、并联-串联结构、桥架结构和普通网状结构等不同的可靠性关系。

为了模拟生命周期中系统的性能，利用软件建立 RAM 分析模型，并将各设备/单体/元器件的可靠性相关数据录入模型。

1.1.4 RAM 分析

在进行 RAM 分析时，通常采用的是蒙特卡罗方法。在数据有效的情况下，蒙特卡罗模型可以用于模拟任何失效模式、维修特性或条件逻辑。模拟的输出结果之一是基于时间的可用性曲线，其适合被用来预测系统生命周期中的低可用性时期，如停车等。此外，它还展示了子系统或者单一部件的可用性及其对整体系统可靠性的贡献度，这对识别产量降低的主要原因和系统可靠性强健有着非常重要的作用。

1.1.5 RAM 分析报告

RAM 分析结束后，需要将结果、总结和建议形成分析报告。

分析报告通常应包含以下几点：

- 系统描述；
- 分析方法；
- 假设条件；
- RBDs；
- 可靠性数据（失效和维护）
- 计算结果与结论；

敏感性分析 1.2 分析软件

本项目采用风控（北京）工程技术有限公司 RAM 分析软件 ReliaSuite® 进行分析，算法为 Monte Carlo 模型。此软件可用于建模模拟、可视化分析及优化各种间歇/连续生产工艺。

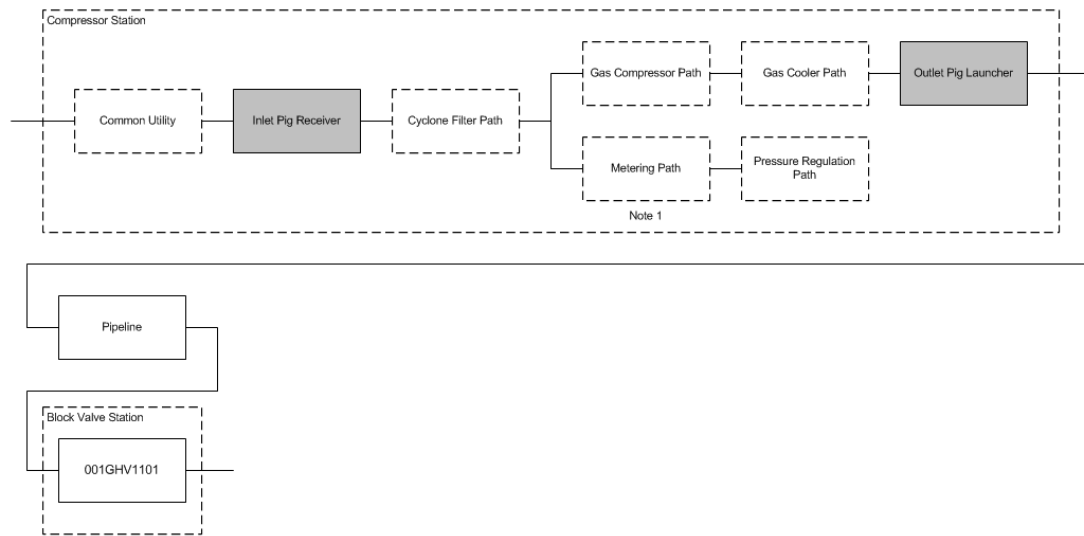
2 某天然气长输管线局部段概况

2.1 项目背景

该天然气长输管线全线包括 1 干 8 支，全长 2016 公里，共设置 10 座压气站。本次 RAM 分析针对其局部段，包括：1 座分输压气站，1 座压气站下游阀室，以及压气站至下游阀室间的干线管道。天然气进入本项目压气站后有两种去向，其中占总流量 99% 的一路去往下

游管线（去长输管线上的下一个站点），占总流量 1% 的一路去往分输用户。

图表 3 描述了某天然气长输管线局部段关键系统之间的可靠性关系。



图表 3 某天然气长输管线局部段总体可靠性框图（RBDs）

2.2 项目分析目的

本次分析的主要目的有以下几点：

- 识别压气站及阀室内关键设备的故障模式，影响以及检维修配置；
- 评估分析范围内典型压气站、长输管线段以及阀室的整体可用性；
- 识别系统内各子系统/关键设备对停车时间的贡献度，找出影响整体系统可用性的瓶颈；
- 针对薄弱环节，找出可以提高系统整体可靠性的改进方案。

2.4 失效数据选取

本次 RAM 分析模型中使用的可靠性数据摘自有代表性的行业数据库，如：

- 海上可靠性数据（OREDA）手册；
- 可靠性信息分析中心（RIAC）标准；
- 欧洲天然气管道事故数据组（EGIG）；

3 分析结果

3.1 分析结果概述

本次 RAM 分析分别对下游管线和分输用户这两条路线进行了可靠性分析。

表格 1 为下游管线系统与分输用户系统的可靠性计算结果。

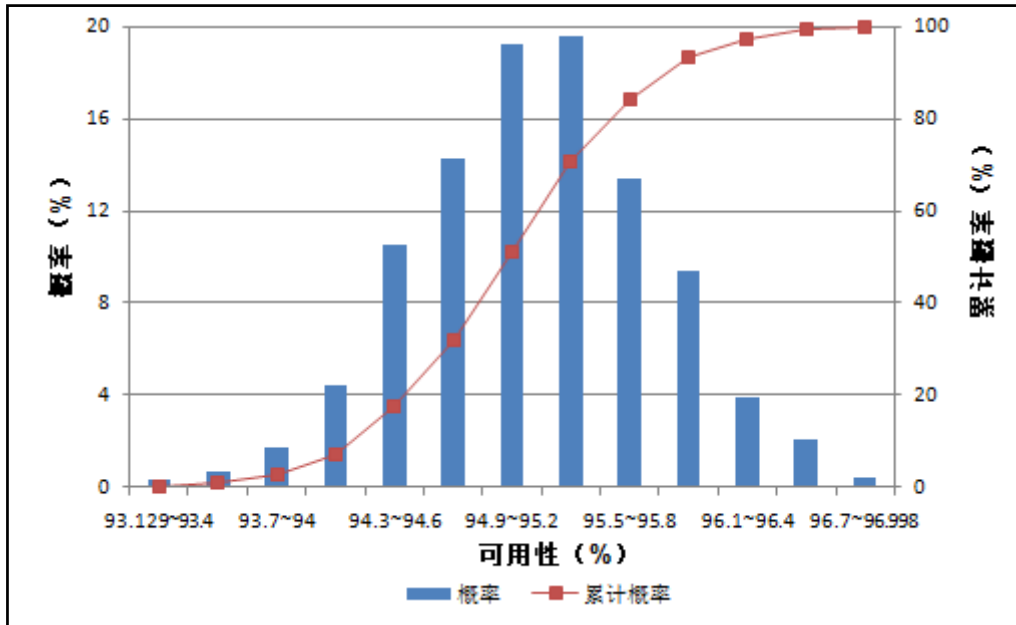
表格 1 可靠性计算结果

计算指标	下游管线系统	分输用户系统
可用性 (%)	95.177	99.408
标准偏差 (%)	0.61	0.061
平均产量 (Nm ³ /d)	80,760,384.759	852,026.935

3.2 下游管线系统结果分析

用蒙特卡罗方法模拟该系统 1000 个生命周期，每个生命周期都是随机的、唯一的，因

此可以统计出系统生命周期内的可用性参数。图表 4 为下游管线系统生命周期内的可用性分布。



图表 4 下游管线系统生命周期内的可用性分布

由图表 4 可见，下游管线系统的 P10 置信值为 94.378%，90% 以上的分析结果大于这个数值；下游管线系统的 P90 置信值为 95.963%，10% 以上的分析结果大于这个数值。

下游管线系统中的关键子系统故障时间分布如表格 2 所示。

表格 2 下游管线系统故障时间分布

子系统	平均失效概率 (%)	平均可用性 (%)	系统失效贡献率 (%)	平均失效数	年平均故障时间 (h)
压缩单元	4.299	95.701	89.126	940.897	376.559
公用工程	0.354	99.646	7.339	536.721	31.006

从表格 2 所描述的下游管线系统各子系统的故障时间分布可以看出：压缩单元（年平均故障时间 376.559 小时，系统失效贡献率 89.126%）是导致下游管线系统故障的主要原因；公用工程（年平均故障时间 31.006 小时，系统失效贡献率 7.339%）是导致下游管线系统故障的第二原因。

3.3 设备关键性排序

通过设备停车时间，能够看出某一设备是否具有相应较高的失效频率或较长的停车时间。通常动设备（例如压缩机）具有相对较高的失效频率，应当进一步进行失效模式分析。通常关键性设备可通过 FMECA 分析来确定其失效模式。

表格 3 和表格 4 分别列出了下游管线系统与分输用户系统中部分设备的关键性排序。

表格 3 下游管线系统设备关键性排序

设备	年停机次数	年平均停机时间 (h)	平均设备可用性 (%)
透平	9.419	250.094	97.145
压缩机	3.833	90.843	98.963

表格 4 分输用户系统设备关键性排序

设备	年停机次数	年平均停机时间 (h)	平均设备可用性 (%)
过滤分离器	2.66	12.262	10.519

由此可见，在下游管线系统中，失效频率最高的两种设备分别为透平（年平均停机次数 9.419 次，年平均停机时间 250.094 小时）和压缩机（年平均停机次数 3.833 次，年平均停机时间 105.891 小时）。

4 结论

在对某天然气长输管线局部段 RAM 分析得出以下结论：

1、在现有设计条件下，自压气站去往下游管线和分输用户的两条气体输送路线的可用性分别能够达到设计能力的 95.177%和 99.408%。

2、导致下游管线系统故障的主要原因是压缩单元故障（年平均故障时间 376.559 小时，系统失效贡献率 89.126%）和公用工程故障（年平均故障时间 31.006 小时，系统失效贡献率 7.339%）。

4、本项目中失效概率最高的三种设备为透平、压缩机、过滤分离器，由此可见动设备（透平、压缩机）故障是导致系统停车的主要原因，可以考虑结合其他方法（如 FMECA）对其进行进一步分析。

在未来油气行业，RAM 分析应该成为投资决策、设计决策的重要决策支持工具。RAM 模型的精确性取决于输入数据的完整性与准确性，因此在运行阶段，应对运行条件下系统/设备的故障和失效数据进行记录与管理。在后续的分析中，这些数据可作为提高可维护性的基础数据来使用。在装置/设备发生较大的工艺或设计变更时，应重新进行 RAM 分析，以确保装置的整体可靠性能够满足要求

参考文献

- [1] 刘岚岚, 刘品. 可靠性工程基础（第四版）[M]. 北京:中国质检出版社, 中国标准出版社, 2014.
- [2] Failure Rate and Event Data for use within Land Use Planning Risk Assessments, HSE UK
- [3] Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries - Production Assurance and Reliability Management, ISO 20815:2008
- [4] Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries – Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data for Equipment, ISO 20815:2008
- [5] Offshore Reliability Data Handbook, 2009

通讯作者联系方式：鲁毅，yi.lu@irc-risk.com, 13381113970

第一作者联系方式：孔令仪，lingyi.kong@irc-risk.com, 13331137205