

ICS 75.180.10

E 92

团体标准

T/CPI XXXX-2022

石油化工设备 以可靠性为中心的 维修（RCM） 应用指南

Reliability Centered Maintenance Application Guide for
Petrochemical Equipment

2022-XX-XX 发布

2022-XX-XX 实施

中国石油和石油化工设备工业协会

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2020 给出的规则起草。
本标准由中国石油和石油化工设备工业协会提出。
本标准由中国石油和石油化工设备工业协会归口。
本标准起草单位：。
本标准主要起草人：。

目 录

1 范围.....	3
2 规范性引用文件.....	3
3 术语和定义.....	3
3.1 术语.....	3
3.2 缩略语.....	5
4 总体要求.....	5
4.1 基本原则.....	5
4.2 实施目的.....	5
4.3 基本程序.....	6
5 实施过程.....	6
5.1 启动与计划.....	6
5.1.1 前期准备.....	6
5.1.2 确定分析范围.....	7
5.1.3 知识与培训.....	7
5.2 可靠性分析.....	7
5.2.1 分析流程.....	7
5.2.2 数据要求.....	8
5.2.3 分析方法.....	9
5.3 策略制定与优化.....	11
5.3.1 策略原则.....	11
5.3.2 维修策略.....	11
5.3.3 维修任务间隔.....	13
5.4 策略实施.....	13
5.4.1 细化维护任务.....	13
5.4.2 优先实施的任务.....	14
5.4.3 合理化任务间隔.....	14
5.5 持续改进.....	14
5.5.1 效果评价.....	14

5.5.2 持续改进.....	14
附录 A（规范性）FMECA 分析方法	15
附录 B（规范性）逻辑树分析（LTA）方法	22
附录 C（资料性）RCM 预防性策略样表.....	23
附录 D（资料性）RCM 维护任务样表	25
附录 E（资料性）RCM 分析过程记录样表.....	26

石油化工设备 以可靠性为中心的维修（RCM） 应用指南

1 范围

本文件提供了石油化工企业应用以可靠性为中心的维修（以下简称RCM）方法开展设备可靠性与维修性分析的指导，规范了开展RCM的基本程序、方法与实施流程。

本文件适用于石油化工成套装置或特定设备系统，主要适用设备类型包括石油化工装置动设备、静设备、仪控系统、电气设备以及其他设备。油气输送管道站场、集输气站场等可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是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 7826	系统可靠性分析技术 失效模式和影响分析(FMEA)程序
ISO14224	石油、石化产品和天然气工业设备可靠性和维修数据的采集与交换
ISO31000	风险管理标准
IEC 60300-3-11	Application guide -Reliability centred maintenance
RCM3	Risk-Based Reliability Centered Maintenance

3 术语和定义

3.1 术语

3.1.1 系统 System

相关或相互影响要素的集合，本文件中指生产装置中根据工艺流程划分相对独立的设备系统单元。

3.1.2 故障 Fault

设备不能执行规定功能的状态。预防性维修或其他计划性活动或缺乏外部资源的情况除外。

3.1.3 失效 Failure

指系统、结构或部件丧失规定的功能。本文件中失效等同故障。

3.1.4 功能故障 Functional fault

是指使设备不能继续完成所具有功能的故障。

3.1.5 隐蔽性故障 Hidden fault

在正常情况下，由故障模式本身所引起的设备功能丧失对操作者而言是隐蔽性的故障。

3.1.6 故障模式 Fault mode

故障的具体表现形式。

3.1.7 危害性 Criticality

故障影响严重程度与发生可能性或其他属性的综合，作为处理和减缓故障影响的必要性尺度。

3.1.8 风险 Risk

不确定性对目标的影响。本文件中风险是指故障后果与故障发生可能性的乘积，用以度量危害性大小。

3.1.9 风险准则 Risk criteria

风险重要性评定的依据。风险准则可以涉及到成本与效益、法律与法规要求、社会效益与环境保护、受风险影响者的利益以及上述各项的优先顺序和评估的其他方面进行综合考虑。

3.1.10 关键性分析 Critical analysis

依据设备故障影响后果以及故障发生可能性确定的可接受准则，对装置设备或系统进行筛选，确定对装置影响至关重要的关键性设备或系统。

3.1.11 逻辑树分析 Logical tree analysis

将问题的所有子问题分层罗列，从最高层开始，并逐步向下扩展的分析方法。

3.1.12 维修 Maintenance

维持、复原或替代物体状态，令其可实现规定功能的所有技术与管理措施。

3.1.13 故障维修 Breakdown maintenance

故障发现并确认后，为使设备恢复到能完成既定功能的状态所实施的维修，又称事后维修。

3.1.14 预防性维修 Preventive Maintenance

为防止设备性能劣化或降低，在设备没有发生故障或尚未造成损坏的前提下，按事先规定的计划和相应的技术要求所进行的维修活动。广义的预防性维修包括定期维修、状态维修和主动维修。

3.1.15 定期维修 Periodic maintenance

在对设备或系统的故障规律有充分了解的前提下，根据规定的维修间隔或者设备的工作时间，按照已经安排好的时间来进行计划内的维修工作。定期维修一般包括定时更换、定时修理和定期检查。

3.1.16 预测性维修 Predictive maintenance

在设备运行时，对其主要或需要部位进行定期或连续的状态监测和故障诊断，判定设备所处的状态，预测设备状态未来的发展趋势，依据设备的状态发展趋势和可能的故障模式，预先制定维修计划。

3.1.17 状态维修 Condition-based maintenance

根据设备的日常点检、状态监测和诊断信息，运用数据分析方法，综合专家知识，分析设备的劣化程度和故障的发展趋势，确定设备修理的时间、内容、方式和必需的技术和物资支持，在故障发生前有计划地进行适当的维修。

3.1.18 故障查找 Fault finding

对设备的系统性检查和测试，确定设备是否已经发生故障，使其保持在规定状态所进行的全部活动。

3.1.19 改善性维修 Corrective maintenance

为消除设备的先天性缺陷或频发故障，对设备的局部结构或零件加以改进，结合修理加以改装以提高其可靠性和维修性的修理。

3.1.20 维修策略 Maintenance policy

对维修各个方面活动的安排、方法和要求的具体规定，是为了达到组织既定的维修目标而预先确定的用以指导维修活动的方针、计划、标准、作业指导文件等的集合。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

FMECA：故障模式、影响和危害性分析 (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)

LTA：逻辑树分析 (Logic Tree Analysis)

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

MTTF：平均无故障时间 (Mean Time To Failure)

MTTR：平均故障修复时间 (Mean Time To Restoration)

P-F：设备从潜在故障到功能故障之间的间隔时间 (Potential failure To Functional failure)

RCM：以可靠性为中心的维修 (Reliability Centered Maintenance)

4 总体要求

4.1 基本原则

设备以可靠性为中心的维修 (RCM) 的实施，是以最小的资源消耗保持设备固有的安全性、可靠性为原则，按照系统化、科学化的评价流程确定设备预防性维修工作要求，制定和优化设备预防性维修策略，实现设备基于可靠性的维修管理和风险管控。

4.2 实施目的

通过RCM实施，识别系统或设备的风险，确定设备预防性维修工作要求，并实现以下目的：

- 通过对设备历史维护信息及数据的分析，提出更有效的维护建议；
- 建立设备维护策略，通过执行、评估、不断优化设备维护工作的绩效和成本；
- 实现以可靠性为中心的维护策略，提高设备的可用率；
- 对设备失效模式及后果进行记录、分析，为设备维护策略提供维护优化建议。

4.3 基本程序

RCM 在石油化工装置应用的基本程序包括启动和规划、可靠性分析、策略制定与优化、策略实施和持续改进五个部分，实施过程基本程序见表 1。

表 1 RCM 实施基本程序与内容

序号	实施程序	主要内容
1	启动与计划	1) 确定分析的边界和目标
		2) 确定分析的主要内容
		3) 确定专业知识和经验、外部专业知识和平行要求
2	可靠性分析	1) 收集和分析基础数据、运行和测试数据、故障和维修数据等
		2) 进行功能定义和设备划分
		3) 识别功能、功能故障、故障模式、影响和危害性
3	策略制定与优化	1) 策略分类与内容确定
		2) 选择合适和有效的维修策略
		3) 确定维修任务和时间间隔
4	策略实施	1) 识别维护内容的细节
		2) 确定优先考虑并实施的任务
		3) 合理化任务间隔
5	持续改进	1) 监控维护工作效率
		2) 监控安全、操作和经济目标
		3) 合理化任务间隔
		4) 进行检修周期的确定

5 实施过程

5.1 启动与计划

5.1.1 前期准备

5.1.1.1 在分析开始前应制定分析方案，方案中应明确以下内容：

- a) 分析的目的和范围；
- b) 分析流程；
- c) 分析需要的知识与技能；
- d) 分析小组的组成；
- e) 小组成员的分工与职责；
- f) 分析的对象（系统、设备及部件）；
- g) 分析使用的数据以及采用的规范、标准；
- h) 分析的工作进度；
- i) 分析的有效期及更新时间；

j) 分析结果的应用。

5.1.1.2 分析组成员与单位管理者应就 RCM 分析建立的的目的与目标达成共识，一般应包括如下内容：

- a) 确定风险可接受准则；
- b) 设备运行风险以及所采取的检修、维护等风险减缓措施的效果；
- c) 通过风险优化和风险管理，在安全生产条件下延长设备运行周期，降低运行成本；
- d) 为符合安全与环境管理要求，建立并实施的有效检修程序；
- e) 选择除检修以外的其他降低风险的措施；
- f) 在设计阶段对新设备或新项目进行 RCM 分析，以实现风险最小化；
- g) 建立设备完整性管理的风险基础数据库并实施持续风险管理；
- h) 分析小组认为需要建立的其他 RCM 分析的目的和目标。

5.1.2 确定分析范围

RCM 初始范围的筛选，通过定性分析将最重要的装置、工艺单元或系统筛选出来优先进行分析或根据需要确定。工艺单元筛选因素包括：

- a) 相对风险水平；
- b) 对装置经济性的影响；
- c) 相对失效后果；
- d) 相对可靠性；
- e) 检修计划；
- f) 类似装置及工艺单元的经验。

5.1.3 知识与培训

5.1.3.1 RCM 分析人员应具备相关专业知识和经验，人员要求如下：

- a) 设备管理的知识和经验；
- b) 对涉及设备操作环境的了解；
- c) 了解设备失效模式及其影响；
- d) 专业知识的了解,如安全和环境立法、法规等；
- e) 掌握维修技术和工具；
- f) 对成本的了解。

5.1.3.2 RCM分析所需的知识和经验不足时，应进行专业培训。

5.2 可靠性分析

5.2.1 分析流程

设备可靠性分析通过确定分析设备或系统范围，收集和分析可靠性数据，运用故障模式、影响与危害性分析(FMECA)等方法，通过关键性分析确定关键设备，进行故障模式与影响、危害性分析确定设备的可靠性状况，分析流程见图 1。

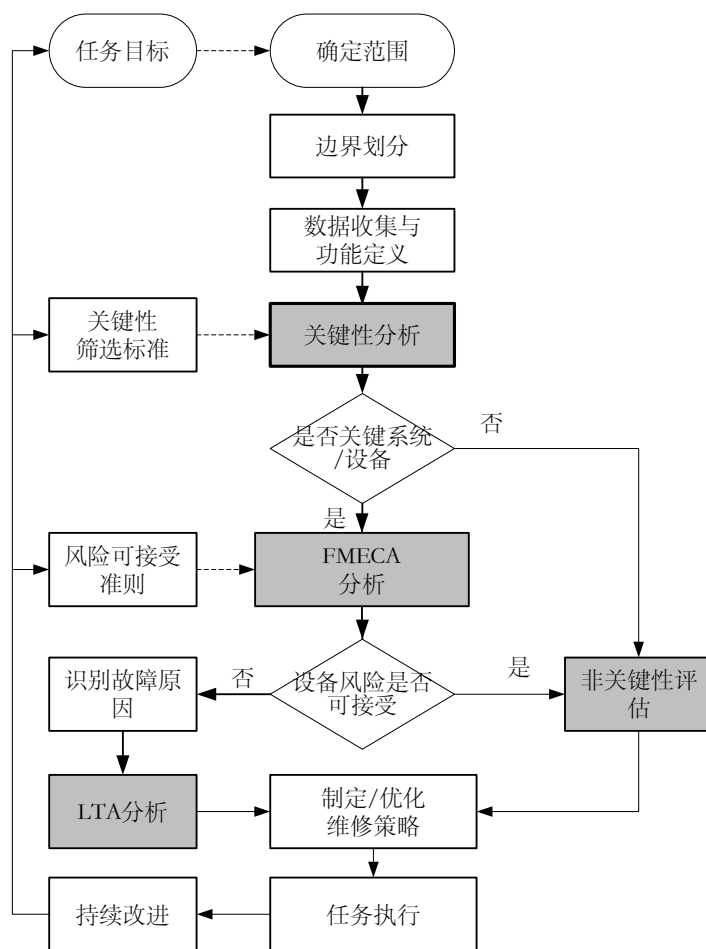


图 1 成套装置/系统设备 RCM 实施流程

5.2.2 数据要求

企业应依据 ISO14224《石油、石化产品和天然气工业设备可靠性和维修数据的采集与交换》，明确设备可靠性数据收集要求，建立数据收集规则，进行 RCM 分析所需数据的收集工作。

执行 RCM 分析需要有关设备基本信息、维护维修信息、操作信息以及可用的相关信息。所有可获得的故障数据、维修记录都应进行整理，以确保之前发生的所有故障都被收集。维修记录应显示设备使用后的状况。如果没有足够的信息，可以使用对设备有知识的专家的判断。相关信息包括但不限于以下内容：

- a) 使用概况；
- b) 性能要求；
- c) 操作程序和实际操作经验；
- d) 可靠性分析报告；
- e) 故障案例或评估报告；
- f) 制造商的手册；
- g) 设计文件；
- h) 现有预防性维护任务；
- i) 现有的维修过程和实际维护人员的经验；
- j) 维护和故障报告；
- k) 事件和事故报告。

5.2.3 分析方法

5.2.3.1 关键性分析

关键性分析是识别对装置影响至关重要的关键性设备/系统，对于非关键性系统或设备进行非关键性评估，采取最低纠正措施，对于中等关键和高关键性设备/系统进行故障模式与影响 FMECA 分析，制定降低故障概率或减轻后果的维修策略。关键性分析依据设备故障发生频率以及故障影响后果确定可接受准则，筛选矩阵如图 2 所示。

故障可能性			关键性筛选活动				
等级		筛选准则					
5	高可能性	$\geq$ 可接受故障频率	中等关键性 进行 FMEA 分析，应考虑维修策略以降低失效概率	高关键性 进行 FMEA 分析，编制合适的维修维护策略以降低失效概率、减轻后果			
4							
3							
2							
1	低可能性（可忽略）	$<$ 可接受故障频率	非关键 进行非关键性分析评估，但只要求最低的纠正措施	中等关键性 进行 FMEA 分析，应考虑维修策略以减轻后果			
故障后果等级			A	B	C	D	E
故障后果			低故障后果（可忽略）	高故障后果（不可接受）			

图 2 关键性分析筛选矩阵

5.2.3.2 故障模式、影响与危害性分析

对选定的关键性设备进行故障模式、影响与危害性分析（FMECA），具体方法和流程详见附录 A。通过 FMECA 明确设备的功能、故障模式、故障原因和故障影响，从而为基于故障模式的 RCM 决断分析提供基本信息。故障模式、影响与危害性分析（FMECA）的主要内容包括以下五个方面：

- 故障模式分析，确定系统中每一设备所有可能出现的故障模式；
- 影响分析，分析系统中每一设备的每一个故障模式所产生的影响；
- 原因分析，分析每一个故障模式可能产生的原因；
- 危害性分析，分析每一种故障模式影响的危害度大小，危害性用风险进行度量，风险大小与故障影响的严重程度和发生频率有关，分析结果用风险等级进行划分；
- 识别方法分析，分析每一种故障模式是否存在有效的识别方法，从而为维修策略制定提供依据。

5.2.3.3 风险分析

故障后果的类型分为隐蔽性后果、安全性后果、环境性后果、使用性后果、非使用性后果。根据 FMECA 分析结果，对设备进行分类排序。度量故障后果危害性的方法是采用风险表示， $\text{风险} = \text{故障后果} \times \text{发生可能性}$ 。

依据故障模式和风险等级，制定和优化设备维护维修策略。风险等级矩阵的制定依据企业风险可接受准则，风险矩阵格式参见图 3。

可能性		故障后果				
5	非常高	M	MH	H	H	H
4	高	L	M	MH	H	H
3	中	L	M	M	MH	H
2	低	L	L	M	M	MH
1	非常低	L	L	L	L	M
故障频率 故障后果		非常低	低	中	高	非常高
		A	B	C	D	E

图 3 风险等级矩阵（示例）

5.2.3.4 逻辑树分析

针对设备故障模式和风险情况，按照故障后果的类型和设备可靠性特性应用逻辑树分析（LTA）确定维修工作类型。对于关键性设备的主要故障模式按逻辑决断图进行分析决断，提出针对该故障模式的预防性维修工作模式，逻辑树分析依据图 4 基本逻辑决断图进行，推荐常用的详细逻辑决断图见附录 B。LTA 分析遵循以下基本原则：

- 对于隐蔽性功能故障，应采取预防措施；
- 对于安全性、环境性后果，应采取预防措施；
- 对于使用性后果，按经济性有利的原则分析是否要采取预防措施；
- 对于非使用性后果，通常考虑事后维修。

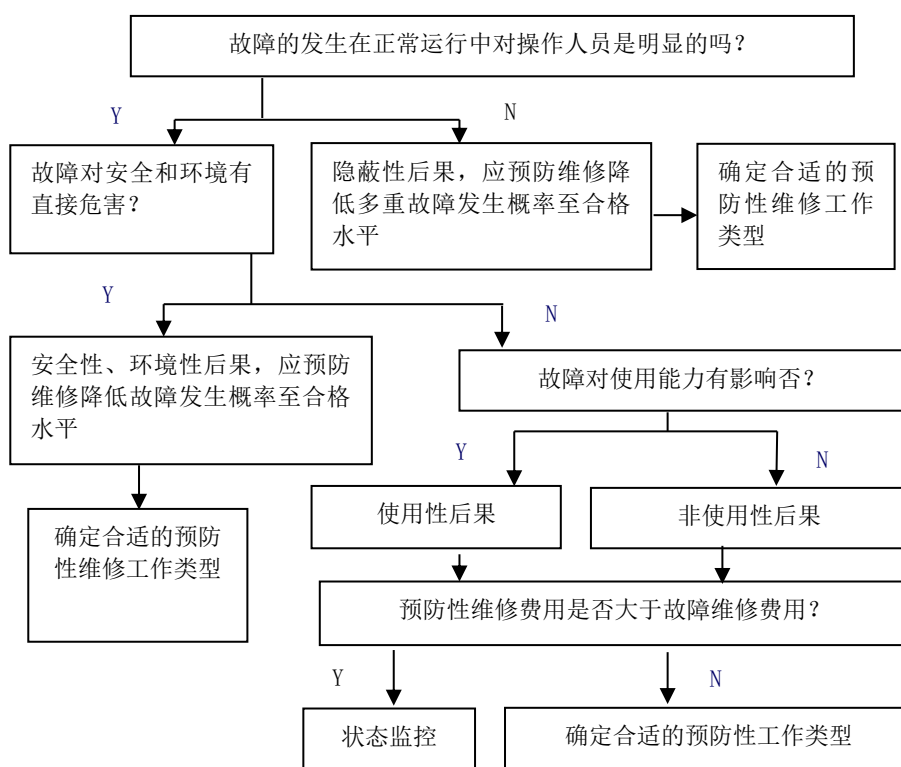


图 4 LTA 逻辑决断基本原则

5.2.3.5 非关键性分析

对在关键性分析中被确定为非关键性设备，进行设备非关键性分析。非关键性分析主要从经济性方面考虑，分析维持现有的维护策略或评估新维护策略所带来的益处而不是允许设备运行至发生故障，为完整的维护策略提供依据。非关键性分析执行要求见表 2。

表 2 非关键性分析

序号	问题描述
N1	维修或更换的费用能否接受？（例如：>1 万元）
N2	是否已有简单维护活动保证其可靠性？
N3	是否导致其他部件或设备故障？
N4	是否增加HSE风险？

通过以上问题的分析和判断，用以确定非关键性设备应采取预防性维修或故障维修。

5.3 策略制定与优化

5.3.1 策略原则

5.3.1.1 维修策略是由维修方式和实现的具体维修任务两个部分的内容共同构成。其中维修方式的规定体现在所确立的维修方针之中，对具体维修任务的规定主要体现在指导维修活动的各种作业指导文件之中，是组织开展维修活动的基础。

5.3.1.2 策略制定依据风险可控、经济有利原则。根据设备故障模式和后果风险，选择最合适和有效的维修任务，制定优化设备维修策略。采取主动管理策略对不可接受风险进行管控，以经济高效的方式降低或管理可接受风险。设备维修策略的制定参照附录 C 进行。

5.3.2 维修方式

5.3.2.1 维修方式选择，根据 LTA 分析并按照其适用的应用条件进行选择，维修方式和应用条件见表 3。

表 3 维修方式分类和应用条件

维修方式	应用条件
预测性维修	状态维修：故障征兆容易发现、后果可以接受、状态维修可行且有效
	故障查找：故障征兆发现困难，且不宜状态维修、定时检修和更换时
定期维修	定期检修：故障征兆发现困难、后果难以接受、定时检修可行且有效
	定期更换：故障征兆发现困难、后果难以接受、定时检修不可行或无效
故障维修	故障费用明显小于采用以上任一策略时的总费用
改善性维修	故障后果不能接受、总费用 $\leq$ 采用其他策略时的总费用

a) 如故障特征是以磨损为主，而状态监测又比较困难或费用较大，且平均故障间隔期较长，则应首选定期维修。

b) 如同样是磨损故障，或状态监测容易、费用小，或平均故障间隔较短，则应把状态监测放在首位。

c) 对于随机故障为主的故障，如平均故障间隔较长，应首选定期维修；对于处于耗损区，则应首选状态维修。

d) 如随机故障发生频繁，不论平均故障间隔长短，均应首先考虑改进维修；其中故障

间隔较长的故障，还可以依次选择事后、状态维修；而频繁发生的故障，还可以依次选择状态、事后维修方式。

5.3.2.2 维修方式的确定和选择遵循四个基本原则。

- a) 功能丧失或者其故障具有安全性和环境性后果，则应进行预防维修，如果预防维修不能满足要求，即不能将该故障的危害降低到一个可接受的水平，应重新设计或改变工艺流程（改善性维修）。
- b) 功能故障对操作人员来说不是显而易见的(隐蔽性故障)，则应进行预防维修。
- c) 故障后果的经济性，即预防故障的维修任务经济上应是合理的。
- d) 设计中考虑维修性原则，即符合标准化、模块化、互换性、可达性的要求，易于故障查找和识别。

5.3.3 维修任务

5.3.3.1 预防维修工作任务根据策略内容进行制定。

- a) 隐蔽故障，预防性工作结果应能将该隐蔽故障所引发的多重故障的风险降低到一个可接受水平, 否则应做的暂定工作就是预定故障检测。
- b) 后果难以接受的故障，工作结果能将该后果发生的风险降低到一个可以接受的水平，否则应做的暂定工作就是重新设计。
- c) 使用性或非使用性后果，工作所需总费用应比不做时低，否则不采取预防工作。

5.3.3.2 按故障后果的类型和可靠性特性，确定预防性维修任务的技术可行性和有效性。

预防性维修任务技术可行性和有效性参见图 5 进行判断，维修任务的有效性判断遵循以下原则。

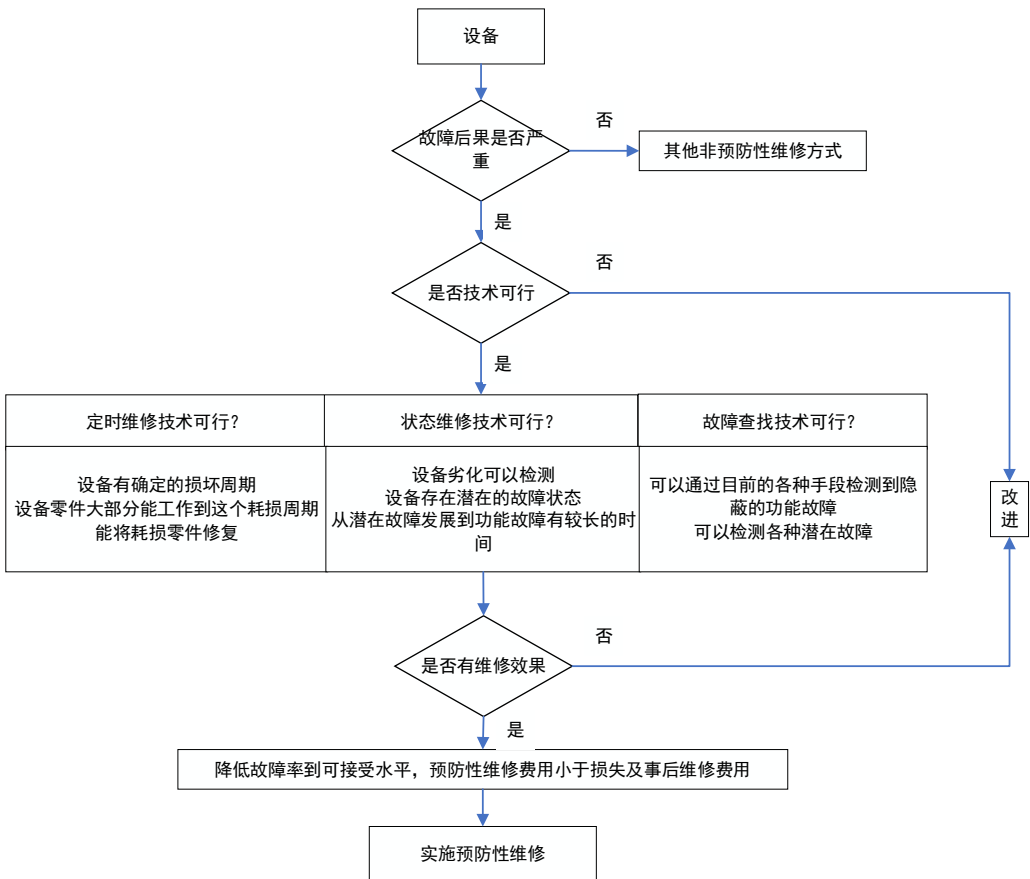


图 5 预防性工作任务技术可行性和有效性选择

- a) 安全、环境、隐蔽性后果：能降低故障概率。
- b) 使用性后果：预防性维修费用小于故障后果损失和修理费用。
- c) 非使用性后果：预防性维修费用低于事后维修的费用。

5.3.3 维修任务间隔

5.3.3.1 确定原则

设置任务频率或间隔，应结合设备故障模式的特征，参考以下一个或多个方面：

- a) 具有相同或类似设备定期维修的经验；
- b) 制造商/供应商可靠性和测试数据；
- c) 可靠性数据分析和预测；
- d) 假定故障规律(如分布、速率)；
- e) 设备全寿命周期成本。

5.3.3.2 状态监测任务间隔

为了使监测任务适用，在现有监测技术和手段前提下，根据故障模式的 P-F 间隔与状态监测对应关系（见图 6）合理选择监测方法与时间，同时应符合以下要求：

- a) 设备或部件劣化是可检测的；
- b) 设备或部件状态劣化是可衡量的；
- c) P-F 间隔应为状态监测任务提供足够长的时间，以防止功能故障成为可能；
- d) P-F 间隔应保持一致。

5.3.3.3 定期更换和修复任务的时间间隔基于设备在安全运行条件下的实际运行时间或使用寿命的评估。

5.3.3.4 故障查找任务只适用于隐藏的故障，只有在确定了明确的可以检测功能故障时才可以使用。故障查找任务可以是检查、功能测试或部分功能测试，以确定项目是否仍然执行所需的功能。

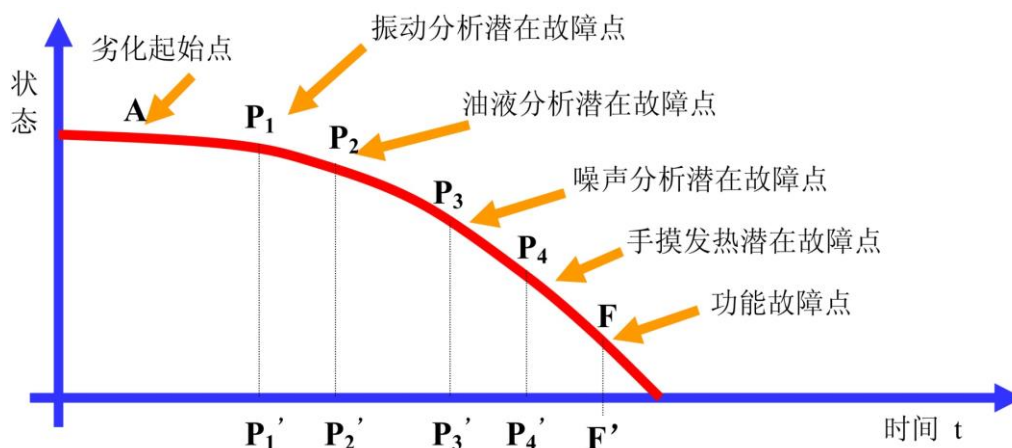


图 6 P-F 间隔时间与状态监测

5.4 策略实施

5.4.1 细化维护任务

RCM 分析所产生的维护任务应根据策略进行细化后组织实施，维护任务包括预测性维护任务、预防性维护任务和故障查找任务，维护任务格式参见附录 D。有关任务细节的信息至少包括内容：

- a) 完成任务的时间；

- b) 技能和技术力量;
- c) 实施程序和方法;
- d) 健康和安全方面的考虑;
- e) 备件准备;
- f) 工具和测试设备。

5.4.2 优先实施的任务

在 RCM 分析需重新设计、操作限制或过程更改时, 应该考虑确定这些任务的优先级。应该考虑以下几点:

- a) 对失效后果的安全性产生影响;
- b) 对可用性和可靠性的影响;
- c) 成本效益分析;
- d) 确保实施的条件。

5.4.3 合理化任务间隔

RCM 分析的输出可能是许多不同频率的任务。通过删除重复任务和任务间隔的对齐方式, 合理化任务, 以生成项目的维护计划。同时应保证间隔内的任何变化都不会危及安全或环境, 或显著降低设备操作能力。

在减少任务时间间隔时, 应考虑在增加频率时执行任务的成本、安全和环境影响。

5.5 持续改进

5.5.1 效果评价

维修任务和策略实施后, 应对维修策略实施效果进行评价, 评价内容主要包括策略有效性评估和策略实施效果。

a) 有效性评价: 在故障原因分析的基础上对维修策略的有效性评估, 为修正维修策略提供依据。

b) 实施效果评价: 制定关键性指标, 对维修策略实施结果进行评价。指标一般包括设备运行、维修计划、维修成本等方面, 可以通过设备 RAM、MTBF、MTTR、故障率等具体指标进行评价。

c) 当目标未达到时, 应对影响预期目标的关键因素进行分析, 必要时重新开展 RCM 分析和/或优化维护策略。

5.5.2 持续改进

RCM 最初确定的预防性维修策略和维护任务是根据企业所获得的经验和运行中的故障而制定的, 一般是不完善的。企业应在设备使用和维修策略实施过程中持续收集、统计、分析设备维护、检修、故障等可靠性相关数据, 持续进行 RCM 分析, 策划并实施持续性改进措施。

5.6 过程记录文件

在RCM分项过程中应建立并保存分析过程记录, 记录格式参照附录E。

附录 A
（规范性）
FMECA 分析方法

A.1 总则

故障模式、影响与危害性分析（FMECA）是通过分析设备所有可能的故障模式、故障潜在原因及其可能产生的影响，并按每个故障模式产生影响的危害性程度予以分类的一种归纳分析方法。

FMECA 是设备在役环节开展维修性分析、安全性分析、测试性分析和保障性分析的重要手段，也是可靠性为中心的维修（RCM）分析的主要工具。

A.2 目的

通过开展设备故障模式、影响与危害性分析，可以实现以下目的：

- 确保设备所有潜在的故障模式及其影响，在正常操作运行下均被识别到；
- 列出故障可能性，定义故障影响的大小，并且为纠正措施的优先顺序提供一个准则；
- 强化及累积工程经验，在早期及时正确找出故障原因，并采取相应措施；
- 为维护维修策略的制定和优化提供支持。

A.3 分析内容

FMECA 分析工作的主要内容包括以下五个方面。

- a) 故障模式分析：确定系统中每一设备所有可能出现的故障模式。
- b) 故障影响分析：分析系统中每一设备的每一个故障模式所产生的影响。
- c) 故障原因分析：分析每一个故障模式可能产生的原因。
- d) 危害性分析：分析每一种故障模式影响的危害度大小，危害性用风险进行度量，风险大小与故障影响的严重程度与发生频率有关，分析结果用风险等级进行划分。
- e) 识别方法分析：分析每一种故障模式是否存在有效的识别方法，从而为维修策略制定提供依据。提出改进和预防的措施，制定和优化设备维护维修策略。

A.4 工作程序

A.4.1 确定分析范围

通过设备边界和可维修部件的划分，明确设备 FMECA 的分析范围。

A.4.1.1 对分析的设备及系统按照以下原则进行边界划分，确定分析设备的边界范围。

- a) 设备及系统边界的划分依据 ISO14224《石油、石化产品和天然气工业设备可靠性和维修数据的采集与交换》。
 - b) 对于每类设备，应定义一个边界，明确可靠性数据收集的范围。设备边界的划分内的所有设备或系统作为 FMEA 分析对象。
- 机泵边界划分示意图 A.1。

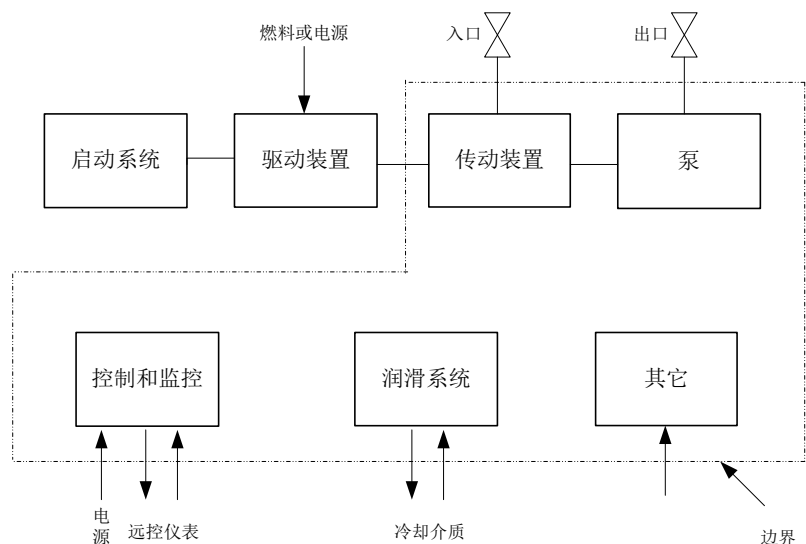


图 A.1 机泵边界划分（示例）

A.4.1.2 分析范围内设备按设备类型依据ISO14224《石油、石化产品和天然气工业. 设备可靠性和维修数据的采集与交换》进行可维修部件划分，作为可分析对象。针对可维修部件进行维修数据的统计和故障模式分析。

离心泵部件划分意见表 A.1。

表 A.1 设备单元细分（示例：泵）

设备类	离心泵				
子单元	传动系统	泵单元	润滑系统	密封辅助系统	其它
可维护部件	齿轮箱 驱动机 轴承 密封 联轴节	壳体 转子 轴承 密封本体 口环 阀	油箱 泵 电动机 过滤器 冷却器 阀	冷却器 蓄能器 监控仪表 阀	

A.4.2 数据收集与统计

A.4.2.1 数据收集范围

对设备的可靠性数据进行收集，数据一般包括：设备基础信息（明确）、运行与监测数据、维护与检修数据、故障案例等。

A.4.2.2 数据统计分析

数据统计分析包括故障部件、故障模式、原因及故障频次统计。对不同部件、不同故障模式下的故障次数进行统计。

A.4.3 设备FMEA分析

单台设备 FMEA 分析按照图 A.2 步骤进行。

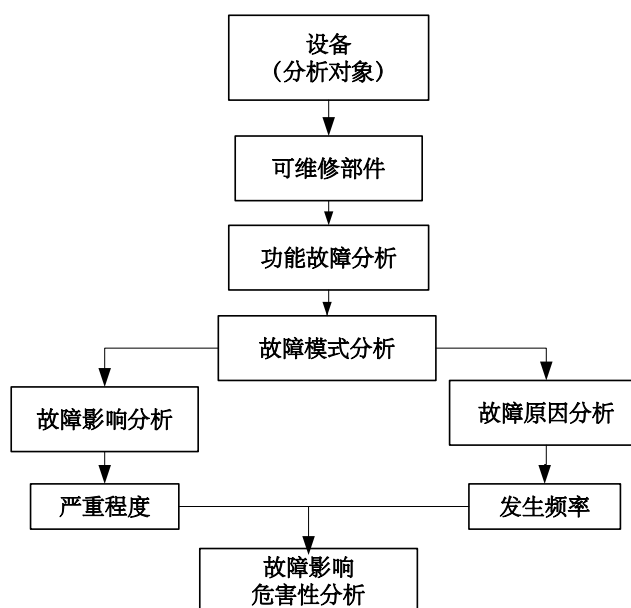


图 A. 2 单台设备 FMECA 分析步骤

A. 4. 4 确定纠正预防措施

A. 4. 4. 1 现有措施有效性分析

设备现有维护维修措施分析应包括以下内容。

a) 对于各种故障模式，应该确定探测故障所使用的方法和使用人员或维护人员发现故障的手段。

b) 故障探测可以通过仪器设备检查程序，或者通过维修活动期间的检查来实现。探测可以在系统启动时进行，也可在系统运行过程中连续进行或者在规定的阶段进行。

c) 确认设备现有维护工作（包括检测、检查和保养）的方法、周期与设备故障模式和风险等级适应性、有效性。

A. 4. 4. 2 制定预防性措施

根据设备危害性后果，依据可接受准则确定设备风险水平，结合现有措施及其有效性，确定纠正预防措施，编制或修订维修策略，包括维修方式的选择、维修部件、维修项目和方法、维修时间等内容。

A. 5 FMECA分析过程

A. 5. 1 功能故障分析

设备故障由设备的功能及其相应的期望性能标准所确定。故障模式分析首先要确定设备在其使用环境下的功能和性能标准，以识别功能关键部件及其故障模式。

A. 5. 1. 1 功能故障

功能故障包含了功能的完全丧失、功能退化，不能达到规定的性能、需求时无法完成其功能、不需求其功能时出现无意的作业等。

A. 5. 1. 2 故障模式

对设备无法完成其既定功能的状态，确定为设备故障模式。故障模式通过分析功能故障进行确定，确定导致设备终止运行或运行不正常，达不到功能要求的故障模式，一般包括：

- a) 识别未获得预期的功能（如不能启动）；
- b) 确定对某项功能的偏离超出公认的极限之外（如高输出）；

c) 观测到失效迹象,但没有立即和严重影响设备单元的功能(如泄漏)。

设备故障模式分类与定义参照 ISO14224《石油、石化产品和天然气工业设备可靠性和维修数据的采集与交换》。

A.5.2 故障模式分析

A.5.2.1 关键功能部件识别

按照可维修部件划分对分析设备进行关键功能部件识别,主要依据设备主要功能、设备常见故障、分析设备已发生故障、同类型设备故障情况,识别出进行故障模式分析的关键部件。

A.5.2.2 设备故障模式的确定

对设备关键功能部件按照以下原则进行分析,确定设备故障模式,关键部件故障模式识别示例见附表 A.2。

- a) 分析部件已出现过的故障模式。
- b) 相同或相似设备部件上已出现的故障模式。
- c) 尚未发生过但认为确有可能发生的故障模式。
- d) 后果非常严重,即使可能性很小的故障模式。
- e) 其他明确需要分析的故障模式。

表 A.2 关键功能部件故障模式识别(示例:离心泵)

可维修部件									故障模式	
传动系统	泵本体				润滑系统		密封系统			
联轴器	轴承	转子	密封	口环	油泵	阀	蓄能器	阀	编码	描述
				X		X		X		内部泄漏
			X							过程介质外漏
					X	X		X		有用介质外漏
	X	X			X					振动
	X									过热
X	X	X		X			X	X		损坏
	X									噪声
					X					不能按指令启动
					X					不能按指令停止
					X					意外停止/停机
					X					高输出
					X					低输出
					X					不稳定输出
					X					参数偏离
							X			异常仪表读数

A. 5. 3 故障影响及危害性分析

A. 5. 3. 1 故障影响分析

分析故障模式对设备的影响，在分析故障影响时应以未做过任何预防性维修为前提。分析故障发生后产生的影响，主要包括以下方面：

- a) 人身或财产安全问题；
- b) 对生产和操作环境的影响；
- c) 由该设备完成的生产任务停止；
- d) 维修或修复故障设备的成本。

A. 5. 3. 2 故障影响危害性分析

确定危害度是对故障模式影响危害性后果进行定性度量的补充。进行危害性分析的目的是确定每一种失效模式影响的相对大小，为维修决策提供帮助。度量危害性的方法是采用风险表示， $\text{风险} = \text{故障后果} \times \text{发生频次}$ 。

A. 5. 3. 2. 1 故障影响后果

FMECA中将故障后果根据重要性分为以下四种：

- a) 安全性和环境性后果：故障会引起人员伤亡或导致违反行业、地方和国家的环境标准。此类故障后果是应该避免或应尽一切努力将其风险降到可接受的水平；
- b) 隐蔽性故障后果：对设备运行没有直接影响，但可能导致严重的、甚至灾难性的故障后果。判别隐蔽故障关键是明确两点，一是这种故障模式真的发生时是否是明显的，第二个是这种故障模式所引发的功能失效是否明显；
- c) 使用性后果：影响到正常使用。如停产、产量下降、次品率提高等；
- d) 非使用性后果：只涉及直接维修费用的故障后果。

A. 5. 3. 2. 2 发生频次或概率

为了恰当地评价故障模式影响的危害性，应当确定每种故障模式的发生频度或概率。可从以下方面估计故障模式发生概率：

- a) 来自元部件寿命试验的数据；
- b) 可用的失效率数据库；
- c) 现场失效数据；
- d) 相似产品或元部件的失效数据。

A. 5. 3. 3 危害性程度

依据可接受风险矩阵，根据风险大小（故障后果 $\times$ 发生频次），确定设备风险等级。

A. 5. 3. 3. 1 可接受准则制定，根据企业风险接受水平，参照图A. 3确定风险矩阵。

a) 故障频次等级，建议分为1-5级，严重程度分别对应非常低、低、中、高、非常高；故障频次等级的划分依据企业可接受程度；参考故障频次等级划分示例见表A. 3。

b) 安全后果、环境后果、生产影响和维修成本等级划分为1-5级，严重程度分别对应非常低、低、中、高、非常高，等级的划分依据具体企业可接受程度确定。参考后果影响等级划分示例见表A. 4。

表 A.3 故障频率等级划分（示例）

等级	严重程度	发生频率 X
1	非常低	$X < 0.25$ 次/年
2	低	$0.25 \leq X < 0.5$ 次/年
3	中	$0.5 \leq X < 1$ 次/年
4	高	$1 \leq X < 2$ 次/年
5	非常高	$X \geq 2$ 次/年

表 A.4 故障影响后果等级划分（示例）

等级	严重程度	影响分类			
		安全影响	环境影响	生产损失	维修成本
A	非常低	无影响	事件影响未超过工厂界区	<1h 的短时生产波动	<0.5 万元
B	低	医疗处理，但不需住院；短暂身体不适	事件不会受到管理部门的通报或违反许可条件	1(含)~4h 的生产波动	0.5(含)~1 万元
C	中	工作受限制；轻伤	泄漏事件受到政府主管部门的通报或违反许可条件	降量生产	1(含)~5 万元
D	高	严重伤害；职业相关疾病	重大泄漏，给工作场所外带来严重影响	局部单元短时停工	5(含)~10 万元
E	非常高	1-2 人死亡或丧失劳动能力；3-9 人重伤	重大泄漏，给工作场所外带来严重的环境影响，且会导致直接或潜在的监控危险	装置停工（切断进料）	≥ 10 万元

c) 依据“风险=频率×后果”，确定风险矩阵，用以表征危害性大小。风险矩阵格式参见图A.3。风险等级分为四级，分别是：低风险（用L表示）、中风险（用M表示）、中高风险（用MH表示）、高风险（用H表示）。

可能性		故障后果				
5	非常高	M	M	MH	H	H
4	高	L	M	MH	H	H
3	中	L	M	MH	MH	H
2	低	L	M	M	MH	H
1	非常低	L	L	M	MH	MH
故障频率 故障后果		非常低	低	中	高	非常高
		A	B	C	D	E

图 A.3 风险矩阵图（示例）

- 注1：L-低风险，表示可忽略的风险；
- 注2：M-中风险，表示可接受的风险；
- 注3：MH-中高风险，表示不期望的风险；
- 注4：H-高风险，表示不可接受的风险。

A. 5. 3. 3. 2 风险确定遵循以下原则。

- a) 风险等级计算，四种风险类型中最高风险为该故障模式的风险等级。根据其风险大小排序确定该设备主要故障模式。
- b) 设备风险：设备不同故障模式的最高风险为该设备的风险等级。

A. 5. 4 原因分析

分析可能导致故障模式的故障原因，某一失效模式可能有多种不同的原因引起，某一原因也可引起多种失效模式。故障原因分析基本要求包括：

- a) 应在故障影响及其严酷度分析的基础上，确定和描述失效原因，并提出预防的建议。但不必对分析中确定的所有失效模式都确定和描述其失效原因；
- b) 故障模式的影响越严酷，故障原因的确定和描述应越准确；
- c) 故障原因可通过分析现场故障或试验件失效来确定。当设计是全新的、没有先例时，失效原因可参考专家的意见确定；
- d) 当原因确定后，应根据失效模式的估计发生概率和影响严重程度来评估建议措施。

A. 6 FMECA分析结果

A. 6. 1 分析结果记录

记录FMECA分析过程，形成分析结果记录，表格形式见表A. 5。

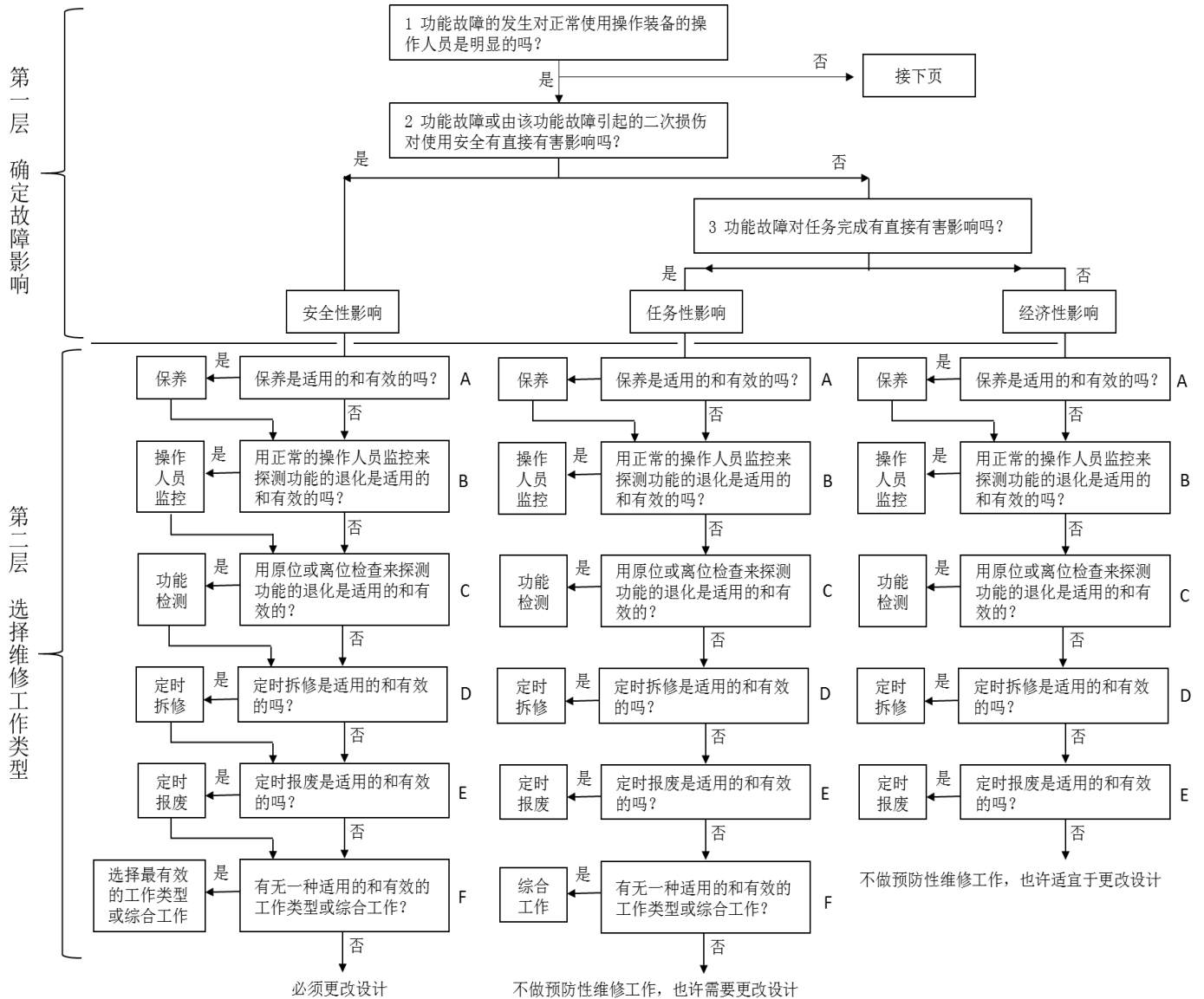
表 A. 5 FMECA 分析结果记录表（示例）

序号	设备位号	设备名称	子单元	关键部件	故障模式	故障原因	故障频率	故障频率等级	故障影响				安全风险等级	环境风险等级	生产损失风险等级	维修风险等级	总体风险等级	设备风险等级
									安全影响	环境影响	生产损失	维修成本						
示例	P-101	高温油泵	泵本体	轴承	振动	变形	0. 5	4	A	A	B	A	M	L	L	L	M	H
					过热	润滑不良	0. 1	2	A	A	B	A	L	L	L	L	L	
				密封	泄漏	划伤	0. 4	3	E	B	B	B	H	M	M	M	H	

A. 6. 2 纠正措施制定

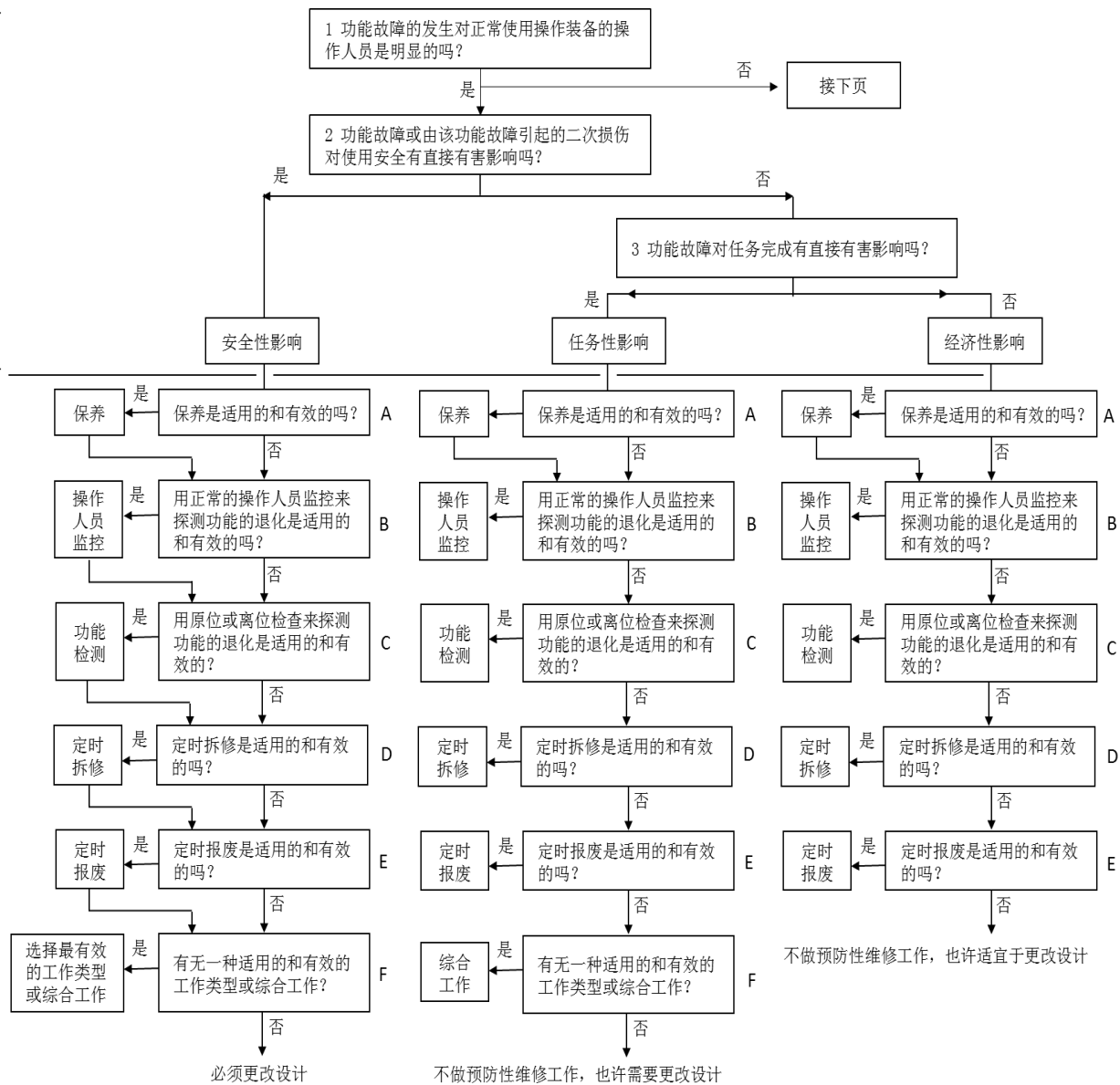
根据FMECA分析结果确定的故障模式、故障原因和风险情况，确定针对性纠正预防措施。

附录 B
(规范性附录)
逻辑树分析 (LTA) 方法



第二层
确定故障影响

第二层
选择维修工作类型



附录 C

(资料性附录) RCM 预防性策略样表

表C.1 不可接受风险设备预防性策略（示例：离心泵）

序号	设备位号	设备名称	可维修部件	故障模式	推荐维修方式	
					状态维修	预防维修
1	P101/1	粗汽油泵	机械密封	高风险外漏	LDAR 检测结果	26000 小时
			径向轴承	振动或噪音	振动监测	30000 小时
			转子	振动	状态监测	/
2	P201/2	稳定塔进料泵	机械密封	高风险外漏	LDAR 检测结果	25000 小时
			转子	振动	状态监测	/
			联轴器	损坏	振动监测	定期检查
3						

表 C.2 可接受风险设备预防性策略（示例：离心泵）

设备类型	故障模式	推荐维修方式及内容	
		状态维修	预防性维修
离心泵	1. 轴承振动	振动指标（执行标准 GBT6075.3）	累计运行 30000h
	2. 密封泄漏	泄漏监测指标	累计运行 25000h
	3. 联轴器损坏	振动监测、定期检查、周期更换	

表C.3 维护项目与方法推荐表（示例）

序号	维修项目	方法描述	建议周期		
			高风险、中高风险	中风险	低风险
1	巡回检查或点检	操作者/维护者例行的检查，主要通过感官(声音、气味、烟雾、泄漏、外观、局部显示)检查设备	执行企业现有规定		
2	定期维护	一般包括设备的清洁、润滑、紧固、调整、防腐等不停机维护作业	执行企业现有规定		
3	振动监测	定期或连续对设备规定部位进行振动测试，滚动轴承建议测量振动加速度或脉冲、滑动轴承建议测量振动位移，壳体测量振动速度。	连续监测或1次/天	2次/周	1次/周
4	温度监测	通过监测仪表或手持仪器对轴承部位、冷却系统、润滑油系统、电机定子等进行温度监测	1次/天	2次/周	1次/周
5	油液监测	目视检查	随巡检进行		
		排放抽查、油质分析	1次/月	按实际需要	
6	常规检测	LDAR泄漏检测、噪声测试、保温测试	按实际需要		
7	专业测试与分析	振动频谱(滚动轴承建议采用包络法或冲击脉冲法分析法)、润滑铁谱或光谱分析等进行故障诊断分析和发展趋势预测	1次/季度	按实际需要	/
8	试运转	备用设备试运转	执行现有规定		
9	停机修理	修复、更换	根据预防性计划		缺陷发现

附录 D

(资料性附录)
RCM 维护任务样表

表D.1 预测性维护任务样本（示例：汽轮机）

序号	设备名称	设备类型	设备编号	设备风险等级	预测故障部位	故障模式	预测性技术	任务状态	频率	特征参数	故障特征	视情况维修任务
1	161K301A 透平	背压式汽轮机	161K301A	H	联轴器	联轴器不对中	振动分析	推荐	在线监测	2X 特征频率	以 2X 特征信号为主，也产生 1X 和 3X 特征信号	联轴器找正对中；消除管道外力的影响，视情况进行热态对中检查。

表D.2 预防性维护任务样本（示例：离心泵）

序号	设备名称	设备类型	设备位号	可维修部件	故障模式	任务内容	预防性方法	MTBF（小时）
1	塔底泵	离心泵	P-101	轴承	振动	检查轴承运行状态，根据实际情况确定是否需要更换	定期更换	30000h

附录 E

(资料性附录) RCM 分析过程记录表

表E.1 关键性分析记录表

装置/系统名称:			工作日期:			
分析人员:			负责人:			
编号	系统单元	设备位号	设备名称	故障频次	故障影响	关键性等级

表E.2 故障模式与故障后果分析记录表

系统名称:			工作日期:				
分析人员:			负责人:				
设备或 部件	故障模式	故障原因	故障后果				是否逻辑树分析?
			安全	环境	生产	维修成本	

表E. 3 危害性分析记录表

资料：各种故障模式的后果严重性分析							
系统/设备名称：				工作日期：			
分析人员：				负责人：			
功能故障	部件及故障模式	严重性程度分析					等级或类别
		是否明显？	是否造成人身安全？	是否停机？	是否降负荷？		

表E. 4 逻辑树分析（LTA）记录表

资料：选择过程与决策														
系统/设备名称：											工作日期：			
分析人员：											负责人：			
功能故障	部件及故障模式	故障原因	选择过程								维修方式	有效资料	选择决定	维护频度
			1	2	3	4	5	6	7	8				