ICS 75.200
CCS E 98

中华人民共和国国家标准

GB/T 48150—2026

输气管网系统可靠性评价技术规范

Technical specification for gas transmission network system reliability assessment

2026-08-28 发布　　2027-03-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会　发布

目　　次

前言 …… Ⅲ
1　范围 …… 1
2　规范性引用文件 …… 1
3　术语和定义 …… 1
4　总体要求 …… 2
5　管道分段 …… 3
6　评价指标 …… 3
6.1　一般要求 …… 3
6.2　评价指标体系 …… 3
7　数据采集 …… 4
7.1　一般要求 …… 4
7.2　数据采集内容 …… 4
8　可靠性计算 …… 4
8.1　单元可靠性计算 …… 4
8.2　系统可靠性计算 …… 7
9　可靠性目标确定 …… 11
9.1　一般要求 …… 11
9.2　目标可用度确定 …… 11
9.3　目标可靠度确定 …… 11
10　评价报告 …… 12
附录 A（规范性）　数据采集清单 …… 13
附录 B（规范性）　管段可靠性计算 …… 14
附录 C（资料性）　压缩机组可靠性计算 …… 17
参考文献 …… 34

前　言

本文件按照GB/T 1.1—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。

本文件由全国石油天然气标准化技术委员会(SAC/TC 355)提出并归口。

本文件起草单位：国家石油天然气管网集团有限公司科学技术研究总院分公司、国家管网集团北京管道有限公司、国家管网集团浙江省天然气管网有限公司、中国石油大学(北京)、西南石油大学、中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司、杭州锐溯三海科技有限公司、中国石油天然气管道工程有限公司、国家石油天然气管网集团有限公司油气调控中心、长江大学、昆仑数智科技有限责任公司、中国石化工程建设有限公司。

本文件主要起草人：郑洪龙、杨凯、孙巧飞、王东营、陈健、薛鲁宁、宫敬、陈利琼、王飞、熊至宜、侯磊、唐环、陈小平、杨建、谭笑、许铎、魏然然、薛向东、何婷、温凯、张磊、王艺环、虞维超、苏怀、陈潜、柳建军、刘丽君、杨建彬、张振永、刘玉卿、白芳、杨宇坚、潘彪、唐帅帅、闪向营、熊毅、彭星煜、戴志向、王金培、刘权、王秋麟、黄海、张大双、伍颖、张笑语、刘玉辉、彭世亮、孟凡林、丁信东、李金泓。

输气管网系统可靠性评价技术规范

1 范围

本文件建立了输气管网系统可靠性评价的指标体系，规定了输气管网系统可靠性评价的内容、流程及相关要求，包括管道分段、评价指标、数据采集、可靠性计算、可靠性目标确定、评价报告等。

本文件适用于陆上在役长输天然气管网系统的可靠性评价。

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 50251 输气管道工程设计规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

输气管网 gas transmission network

由若干输气管道联结而成的综合网络系统。

3.2

可靠性 reliability

评价对象(单元或系统)在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。

3.3

结构可靠度 structural reliability

管网结构或设备在规定时间和条件下完成设计功能的概率。

3.4

任务可靠度 task reliability

评价对象完成特定输气任务的概率。

3.5

失效 failure

管道、设备及附属构件因结构完整性或输送功能完全丧失而不再符合安全运行标准的异常状态。

3.6

故障 fault

管道、设备及附属构件因性能参数异常或局部功能失常引起的影响管网输送运行的异常状态。

3.7

可靠性指标 reliability index

一系列用来评估单元或系统在一定条件下完成规定功能的能力的度量标尺。

3.8

可用性　availability

当需要评价对象工作时，在该时刻其处于可用状态（正常运行或备用状态）的能力。

3.9

平均无故障工作时间　mean time between failures

评价对象在每两次相邻故障之间的工作时间的平均值。

3.10

维修性　maintainability

评价对象由具备规定技术水平的人员，利用规定的程序和资源进行维修，恢复到规定的状态的能力。

3.11

平均修复时间　mean time to repair

评价对象完成修复（由故障状态转为可用状态）所耗费时间的平均值。

3.12

目标可靠度　target reliability

期望评价对象在规定条件下和规定时间内完成规定功能所需达到的可靠度要求。

3.13

目标可用度　target availability

期望评价对象处于可用状态（正常运行或备用状态）所需达到的可用度要求。

4　总体要求

4.1　输气管网系统相关条件有较大改变（输送任务改变、系统物理结构变化等）时进行可靠性评价。

4.2　可靠性评价所采用的数据应反映评价对象最新状况，数据应全面、准确。

4.3　管网系统可靠性评价流程见图 1。

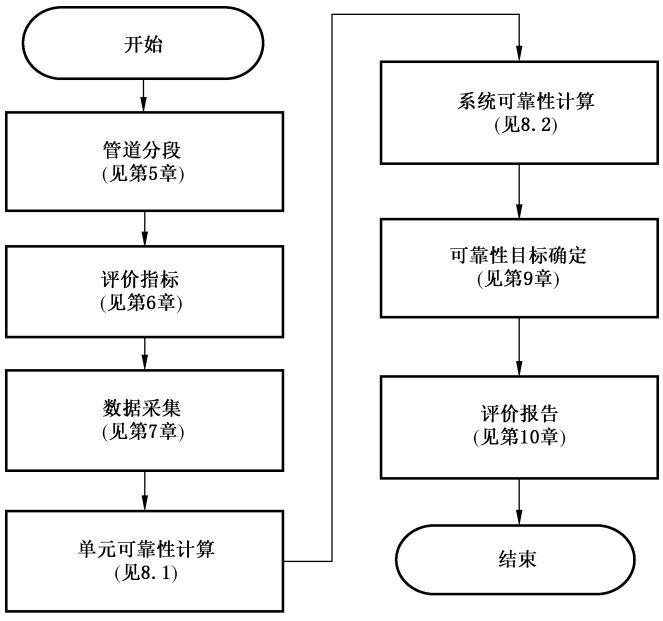


图 1　管网系统可靠性评价流程

5 管道分段

5.1 宜按管道的关键参数进行分段，关键参数包括管材、管径、壁厚、防腐层类型、输送压力、站场、阀室、地形地貌、穿跨越、高后果区等。

5.2 同一管段的管道基本参数、沿线环境参数等应保持一致，任一参数发生变化时，应重新划分管段。

5.3 管道分段时，单个管段长度不小于 2 km，管段影响范围宽度按式(1)计算：

$$W = 0.198\sqrt{PD^2} \qquad \cdots\cdots(1)$$

式中：

W ——管段影响范围单侧宽度，单位为米(m)；

P ——设计压力，单位为兆帕(MPa)；

D ——管道外直径，单位为毫米(mm)。

5.4 管道分段按以下要求，以便与管道沿线的地区等级段落划分保持一致：

a) 当计算的管段宽度小于或等于 400 m 时，地区等级划分应按照 GB 50251 的规定；

b) 当计算的管段宽度大于 400 m 时，地区等级划分管道两侧的宽度范围应采用计算的管段宽度。

5.5 高后果区及穿跨越段单独分段。

5.6 可靠性计算所涉及的相关参数，需根据各管段长度及影响宽度范围的实际工况条件进行确定。

6 评价指标

6.1 一般要求

6.1.1 评价指标的建立应遵循系统性、科学性、可操作性原则，全面反映输气管网系统及各组成单元(管段、压缩机组等)的可靠性水平，为可靠性评价提供量化工具。

6.1.2 单元可靠性指标与系统可靠性指标应相互衔接、相互补充。单元可靠性指标是系统可靠性指标的基础，系统可靠性指标应能综合体现单元组合后的整体可靠性特征。

6.1.3 可根据输气管网系统的规模、复杂程度及评价需求，对评价指标进行适当调整，但调整后的指标应仍能满足可靠性评价的核心要求。

6.2 评价指标体系

6.2.1 单元可靠性指标体系包括可靠性、维修性和可用性三类指标，系统可靠性指标体系包括可靠性和可用性两类指标。

6.2.2 单元主要包括管段和关键设备两类单元，其中管段单元包括站场工艺管道单元以及管道分段后形成的长输管道单元，关键设备单元包括压缩机组、截断阀、分离器、过滤器、计量、调压等设备单元。

6.2.3 单元可靠性指标主要为失效/故障频率、平均无故障工作时间、可靠度等；单元维修性指标主要为平均维修时间；单元可用性指标主要为可用度。

6.2.4 系统主要包括站场系统、管道系统及管网系统。

6.2.5 系统可靠性指标主要为可靠度，系统可用性指标主要为可用度。

6.2.6 可靠性评价指标体系见表 1。

表 1　可靠性评价指标体系

对象		指标				
		可靠性			维修性	可用性
单元	管段	失效频率	平均无故障工作时间	可靠度	平均维修时间	可用度
	关键设备	故障频率	平均无故障工作时间	可靠度	平均维修时间	可用度
系统	站场系统	可靠度			—	可用度
	管道系统	可靠度			—	可用度
	管网系统	可靠度			—	可用度

7　数据采集

7.1　一般要求

7.1.1　数据采集应确保数据完整、准确、及时和可追溯，为系统可靠性评价提供基础数据支撑。

7.1.2　应建立统一的数据采集标准，明确各类数据的采集要求、格式、频率及精度，实现不同来源、不同阶段数据的有效整合与共享，提升数据质量及利用效率。

7.1.3　对采集的数据应定期进行维护及更新，确保评价的实时性与准确性。

7.1.4　数据采集时应对数据进行实时或定期校验、审核，确保其真实性、完整性及准确性。发现数据异常或错误时，应及时查明原因，并予以纠正或补充采集。

7.1.5　数据传输与存储应采用安全可靠的传输方式，将采集数据及时、准确传输至指定存储设备或数据库。传输过程中应采取数据加密、校验等措施，防止数据丢失或篡改。

7.2　数据采集内容

7.2.1　数据采集内容包括规划设计、施工建设、运行维护、环境社会及事故数据等。

7.2.2　可靠性数据采集清单按照附录 A 执行。

8　可靠性计算

8.1　单元可靠性计算

8.1.1　线路管道

8.1.1.1　管段失效频率

管段失效频率直接反映了管段发生故障的频繁程度，可通过失效记录及运行时间统计计算获得，计算公式见式(2)：

$$f_g = \frac{N_g}{L \times t} \qquad \cdots\cdots(2)$$

式中：

f_g ——管段失效频率，单位通常为“次/(长度单位·时间单位)”，例如：次/(km·a)；

N_g——统计时长内管段失效次数，单位通常为次；

L ——管段长度，单位通常为千米(km)；

t ——统计时长，单位通常为年(a)。

8.1.1.2 管段平均无故障工作时间

管段平均无故障工作时间反映了管道的运行稳定性，可由管道运行及失效数据计算得出，计算公式见式(3)：

$$T_{\mathrm{MTBF,g}}=\frac{T_{\mathrm{g}}}{N_{\mathrm{g}}} \quad \cdots\cdots(3)$$

式中：

$T_{\mathrm{MTBF,g}}$ ——管段平均无故障工作时间，单位通常为小时(h)；

T_{g} ——管段总工作时间，单位通常为小时(h)；

N_{g} ——统计时长内管段失效次数，单位通常为次。

8.1.1.3 管段平均修复时间

管段平均修复时间反映了管道运营方的应急响应能力、维修效率和资源调配水平，可依据管道维修记录统计计算得出，计算公式见式(4)：

$$T_{\mathrm{MTTR,g}}=\frac{1}{N_{\mathrm{g}}}\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{g}}}T_{\mathrm{TTR},i} \quad \cdots\cdots(4)$$

式中：

$T_{\mathrm{MTTR,g}}$ ——管段平均修复时间，单位通常为小时(h)；

N_{g} ——统计时长内管段失效次数，单位通常为次；

$T_{\mathrm{TTR},i}$ ——第 i 次管段失效的修复时间，单位通常为小时(h)。

8.1.1.4 管段可靠度

当采用统计法时，管段可靠度按式(5)计算。待评价管道历史失效数据缺失时，可采用同类管道数据；当采用数值法时，管段可靠性的计算按附录 B。

$$R_{\mathrm{g}}=\mathrm{e}^{-\lambda_{\mathrm{g}}t} \quad \cdots\cdots(5)$$

式中：

R_{g} ——每千米管段的可靠度；

λ_{g} ——管段失效率，$\lambda_{\mathrm{g}}=1/T_{\mathrm{MTBF,g}}$，或采用式(2)所得的失效频率近似代替，单位通常为“次/长度单位·时间单位”，例如：次/(km·a)；

t ——评价时间，单位通常为年(a)，一般为 1a。

8.1.1.5 管段可用度

管段可用度综合反映了管道的可靠性和维修性，是衡量管道长期运行效率的关键指标。管段可用度按式(6)计算：

$$A_{\mathrm{g}}=\frac{T_{\mathrm{MTBF,g}}}{T_{\mathrm{MTBF,g}}+T_{\mathrm{MTTR,g}}} \quad \cdots\cdots(6)$$

式中：

A_{g} ——管段可用度，通常是一个介于 0～1 之间的无量纲数值；

$T_{\mathrm{MTBF,g}}$ ——管段平均无故障工作时间，单位通常为小时(h)；

$T_{\mathrm{MTTR,g}}$ ——管段平均修复时间，单位通常为小时(h)。

8.1.2 站内工艺管道

站内工艺管道可靠性指标与线路管道类似，其计算公式参见式(2)～式(6)。

8.1.3 关键设备

8.1.3.1 压缩机组

8.1.3.1.1 压缩机组故障频率

压缩机组故障频率反映了压缩机组发生故障的频繁程度，可通过压缩机组故障记录统计计算获得。

基于统计数据计算压缩机组故障频率，应按式(7)计算：

$$f_j = \frac{N_j}{M_j\ T_j} \qquad \cdots\cdots(7)$$

式中：

f_j ——机组故障频率，单位通常为“次/(台·时间单位)“，例如：次/(台·a)；

N_j ——统计期内机组故障的总次数，单位通常为次；

M_j ——机组台数，单位通常为台；

T_j ——机组运行总时间，单位通常为年(a)。

8.1.3.1.2 压缩机组平均无故障工作时间

平均无故障工作时间反映了压缩机组的运行稳定性，可由压缩机组运行及故障数据计算得出。

基于历史故障数据统计计算压缩机组平均无故障工作时间，应按式(8)计算：

$$T_{MTBF,j} = \frac{1}{N_s}\sum_{i=1}^{N_s} t_i \qquad \cdots\cdots(8)$$

式中：

$T_{MTBF,j}$ ——机组平均无故障工作时间，单位通常为小时(h)；

t_i ——机组第 i 次无故障工作的时间，单位通常为小时(h)；

N_s ——统计的机组无故障工作次数，单位通常为次。

8.1.3.1.3 压缩机组平均修复时间

压缩机组平均修复时间反映了压缩机组运营方的应急响应能力、维修效率和资源调配水平，可依据压缩机组维修记录统计计算得出。

基于历史故障数据计算压缩机组平均修复时间，应按式(9)计算：

$$T_{MTTR,j} = \frac{1}{N_r}\sum_{r=1}^{N_r} t_r \qquad \cdots\cdots(9)$$

式中：

$T_{MTTR,j}$——机组平均修复时间，单位通常为小时(h)；

N_r ——统计的机组总维修次数，单位通常为次；

t_r ——第 r 次维修的修复时间，单位通常为小时(h)。

8.1.3.1.4 压缩机组可靠度

基于历史故障数据计算压缩机组的可靠度，应按式(10)计算：

$$R_j = e^{-\lambda_j t} \quad \cdots\cdots(10)$$

式中：

R_j ——压缩机组的可靠度；

λ_j ——机组失效率，$\lambda_j = 1/_{T_{MTBF,j}}$，或采用式(7)所得的故障频率近似代替；

t ——评价时间，单位通常为年(a)，一般为 1a。

8.1.3.1.5 压缩机组可用度

压缩机组可用度综合反映了压缩机组的可靠性和维修性，是衡量压缩机组长期运行效率的关键指标。

基于历史故障数据计算压缩机组可用度，应按式(11)计算：

$$A_j = 1 - \frac{\sum_{r=1}^{N_r} t_r}{T_z} \quad \cdots\cdots(11)$$

式中：

A_j ——机组可用度，通常是一个介于 0～1 之间的无量纲数值；

t_r ——第 r 次维修的修复时间，单位通常为小时(h)；

N_r ——机组总维修次数，单位通常为次；

T_z ——统计期内总时间，单位通常为小时(h)。

8.1.3.1.6 压缩机组可用度修正

根据待评价机组的实际情况对统计得到的可靠性指标进行修正，从而得到待评价机组的可靠性指标值，修正系数的求取见附录 C。以可用度为例，修正的压缩机组可用度应按式(12)计算：

$$A'_j = CA_j \quad \cdots\cdots(12)$$

式中：

A'_j ——修正后的压缩机组可用度；

C ——总修正系数；

A_j ——统计得到的可用度。

8.1.3.1.7 基于数值法的压缩机组可靠性

基于数值法的压缩机组可靠性计算方法见附录 C。

8.1.3.2 其他关键设备

8.1.3.2.1 其他关键设备包括截断阀、过滤器、分离器、计量设备、调压设备等。

8.1.3.2.2 其他关键设备的可靠性指标主要包括故障频率、平均无故障工作时间、平均修复时间、可靠度及可用度等，各指标计算公式参见式(7)～式(11)。

8.2 系统可靠性计算

8.2.1 站场系统

8.2.1.1 站场系统任务可靠度

8.2.1.1.1 根据一次任务需求，通过仿真分析计算参与该任务的关键设备及设备工艺参数。

8.2.1.1.2 根据设备工艺参数，计算各设备及工艺管道的可靠度，计算方法见 8.1.2 和 8.1.3。

8.2.1.1.3 根据参与该输送任务的设备及工艺管道的拓扑结构关系，运用串联、并联或工作－贮备系统计算公式计算站场系统的任务可靠度。

串联系统按式(13)计算：

$$R_S(t)=\prod_{i=1}^{n}R_i(t) \quad \cdots\cdots(13)$$

式中：

$R_S(t)$——系统可靠度；

$R_i(t)$——第 i 个单元的可靠度；

n ——串联系统单元个数。

并联系统按式(14)计算：

$$R_S(t)=1-\prod_{i=1}^{n}[1-R_i(t)] \quad \cdots\cdots(14)$$

当工作-贮备系统中各单元相同时，按式(15)计算系统可靠度：

$$R_S(t)=\sum_{i=0}^{n-r}C_n^i R^{n-i}(t)[1-R(t)]^i \quad \cdots\cdots(15)$$

式中：

$R_S(t)$——系统可靠度；

$R(t)$——各单元的可靠度；

r ——工作-贮备系统中，正常工作的单元个数。

8.2.1.2 站场系统结构可靠度

8.2.1.2.1 计算站场系统结构可靠度时，设备及工艺管道的工艺参数为设计参数。

8.2.1.2.2 根据设备设计工艺参数，计算各设备、工艺管道可靠度，计算方法见 8.1。

8.2.1.2.3 利用各单元可靠度，计算整个站场的可靠度，计算方法见 8.2.1.1。

8.2.1.3 站场系统可用度

8.2.1.3.1 根据一次任务需求，通过仿真分析计算参与该任务的关键设备及设备工艺参数。

8.2.1.3.2 根据设备工艺参数，计算各设备及工艺管道的可用度，计算方法见 8.1.2 和 8.1.3。

8.2.1.3.3 根据参与该输送任务的设备及工艺管道的拓扑结构关系，运用串联、并联或工作-贮备系统计算公式计算站场系统的可用度。

串联系统可用度按式(16)计算：

$$A_S(t)=\prod_{i=1}^{n}A_i(t) \quad \cdots\cdots(16)$$

式中：

$A_S(t)$——系统可用度；

$A_i(t)$——第 i 个单元的可用度；

n ——串联系统单元个数。

并联系统可用度按式(17)计算：

$$A_S(t)=1-\prod_{i=1}^{n}[1-A_i(t)] \quad \cdots\cdots(17)$$

当工作-贮备系统中各单元相同时，按式(18)计算系统可用度：

$$A_S(t)=\sum_{i=0}^{n-r}C_n^i A^{n-i}(t)[1-A(t)]^i \quad \cdots\cdots(18)$$

式中：

$A_S(t)$——系统可用度；

$A(t)$——各单元的可用度；

r ——工作-贮备系统中，正常工作的单元个数。

8.2.2 管道系统

8.2.2.1 阀室间管道计算

8.2.2.1.1 阀室间管道任务可靠度计算

####### 8.2.2.1.1.1 统计法

当采用统计法得到每千米管道的失效频率时，则阀室间管道的任务可靠度由式(19)计算(统计时尽量统计与任务工况相似失效事件的频率)：

$$R_{\mathrm{fg}}(t)=\mathrm{e}^{-l_{\mathrm{f}}\lambda_{\mathrm{g}}t} \quad \cdots\cdots(19)$$

式中：

$R_{\mathrm{fg}}(t)$ ——阀室间管道的任务可靠度；

λ_{g} ——管段失效率，$\lambda_{\mathrm{g}}=1/_{T_{\mathrm{MTBF,g}}}$，或由统计得到的失效频率近似代替；

l_{f} ——阀室间管道长度，单位为千米(km)；

t ——时间，单位通常为年(a)，一般为 1a。

####### 8.2.2.1.1.2 数值法

数值法包括：

a) 下限法：分别计算阀室间管道内的每个缺陷点在任务工况下的可靠度 $R_i(t)$，计算方法按附录 B。该阀室间管道在任务期内的可靠度可由式(20)计算：

$$R_{\mathrm{fg}}(t)=\prod_{i=1}^{N_{\mathrm{q}}}R_i^{\mathrm{q}}(t) \quad \cdots\cdots(20)$$

式中：

$R_{\mathrm{fg}}(t)$ ——阀室间管道的任务可靠度；

$R_i^{\mathrm{q}}(t)$ ——每个缺陷点在任务工况下的可靠度。

N_{q} ——阀室间管道内缺陷总个数。

b) 上限法：分别计算阀室间管道内的每个缺陷点在任务工况下的可靠度 $R_i^{\mathrm{q}}(t)$。取该阀室间管道在任务期内所有缺陷点计算结果的最小值作为阀室间管道的可靠度，见式(21)：

$$R_{\mathrm{fg}}(t)=\min\{R_i^{\mathrm{q}}(t),i\in[1,N_{\mathrm{q}}]\} \quad \cdots\cdots(21)$$

式中字符含义同式(20)。

c) 竞争失效法：当阀室间管道内有多种不同类型的缺陷(腐蚀坑、裂纹、凹陷等)时，按附录 B 计算各类缺陷的任务可靠度最小值，再按式(22)计算该阀室间管道的任务可靠度。

$$R_{\mathrm{fg}}(t)=\prod_{i=1}^{n_{\mathrm{q}}}R_i^{\mathrm{q,c}}(t)_{\min} \quad \cdots\cdots(22)$$

式中：

$R_{\mathrm{fg}}(t)$ ——阀室间管道的任务可靠度；

$R_i^{\mathrm{q,c}}(t)_{\min}$ ——第 i 类缺陷任务可靠度最小值，其中 c 标识“类别”属性；

n_{q} ——缺陷类型数。

8.2.2.1.3 阀室间管道结构可靠度计算

阀室间管道的结构可靠度计算公式参见式(19)～式(22)，只需将式中的任务工况换成设计工况。

8.2.2.1.4 阀室间管道可用度计算

阀室间管道可用度计算见式(6)，只需将式中的统计对象换成阀室间管道。

8.2.2.2 管道系统计算

8.2.2.2.1 管道系统任务可靠度计算

输气首站、若干阀室间管道、中间站、阀室及输气末站串联组成了输气管道系统，管道系统的任务可靠度按式(23)计算：

$$R_{gd}(t)=\prod_{i=1}^{n_g}R_i^g(t) \qquad \cdots\cdots(23)$$

式中：

$R_{gd}(t)$ ——管道系统任务可靠度；

$R_i^g(t)$ ——输气首站、阀室间管道、中间站、阀室及输气末站的输气任务可靠度；

n_g ——组成管道系统的串联单元个数。

8.2.2.2.2 管道系统结构可靠度计算

管道系统的结构可靠度计算参见式(23)，其中输气首站、阀室间管道、中间站、阀室及输气末站的可靠度为其结构可靠度。

8.2.2.2.3 管道系统可用度计算

管道系统可用度计算见式(24)：

$$A_{gd}(t)=\prod_{i=1}^{n_g}A_i^g(t) \qquad \cdots\cdots(24)$$

式中：

$A_{gd}(t)$ ——管道系统可用度；

$A_i^g(t)$ ——输气首站、阀室间管道、中间站、阀室及输气末站的可用度；

n_g ——组成管道系统的串联单元个数。

8.2.3 管网系统

8.2.3.1 管网系统任务可靠度计算

8.2.3.1.1 根据一次任务需求，通过仿真分析计算参与该任务的管道及各管道工艺参数。

8.2.3.1.2 根据管道工艺参数，计算各管道任务可靠度，计算方法见 8.2.2.2.1。

8.2.3.1.3 根据参与该输送任务的各管道的拓扑结构关系，运用串联、并联或工作-贮备系统计算公式计算管网系统的任务可靠度，计算公式参见式(13)～式(15)。

8.2.3.2 管网系统结构可靠度计算

8.2.3.2.1 计算管网系统结构可靠度时，管道工艺参数为设计参数。

8.2.3.2.2 根据管道设计工艺参数，计算各管道的结构可靠度，见 8.2.2.2.2。

8.2.3.2.3 根据组成管网的各管道间的拓扑结构关系，计算管网的结构可靠度，参见 8.2.1.1.3。

8.2.3.3 管网系统可用度计算

8.2.3.3.1 根据一次任务需求，通过仿真分析计算参与该任务的管道及管道工艺参数。

8.2.3.3.2 根据管道工艺参数，计算各管道的可用度，计算方法见 8.2.2.2.3。

8.2.3.3.3 根据参与该输送任务管道间的拓扑结构关系，运用串联、并联或工作-贮备系统计算公式计算站场系统的可用度，计算公式参见式(16)～式(18)。

9 可靠性目标确定

9.1 一般要求

9.1.1 可靠性目标确定包括目标可用度的确定和目标可靠度的确定。

9.1.2 目标可用度的确定宜考虑生产任务需求。

9.1.3 目标可靠度的确定根据投资效益情况或系统可接受风险确定。

9.2 目标可用度确定

9.2.1 管道系统或管网系统的目标可用度按式(25)计算得出：

$$A_{tar}=\frac{Q}{q\times t_g} \qquad \cdots\cdots(25)$$

式中：

A_{tar} ——管道系统或管网系统需要达到的目标可用度；

Q ——规定时间内的任务输量，单位为立方米(m^3)；

q ——管道系统或管网系统单位时间内的输送能力，单位为立方米每天(m^3/d)；

t_g ——规定的输送时间，单位为天(d)。

9.2.2 将由 8.2.2.2.3 或 8.2.3.3.3 计算得到的管道系统或管网系统的实际可用度与式(25)计算得到的目标可用度进行对比，分析目前管道系统或管网系统的实际可用度是否满足目标可用度的需求。如果不满足需求，分析查找哪些单元的可用度较低，提出改进建议。

9.3 目标可靠度确定

9.3.1 基于投资效益的确定方法

9.3.1.1 应用经济风险理论，针对能够提升管网系统完成输气任务能力的方案，详细计算可靠性提升投入成本。

9.3.1.2 结合管网系统未完成输气任务的损失成本，如因供气中断导致下游工业用户停产的经济损失、居民生活不便引发的社会影响成本等。

9.3.1.3 构建以总费用最低为目标的优化模型，运用线性规划、非线性规划等优化算法，在众多可能的可靠性水平中，决策出目标可靠度。

9.3.2 基于系统可接受风险的确定方法

9.3.2.1 系统可接受风险指系统下游用户的缺气风险，其值等于系统供气中断概率与用户需求气量的乘积。

9.3.2.2 基于历史数据分析典型案例，确定系统可接受风险。典型案例包含典型供气方案与典型需求方案，二者均可通过对管网历史运行数据进行统计分析获得。典型供气方案涵盖气源供应能力变化、不同气源切换策略、管网运行压力调控等情况；典型需求方案反映不同季节、不同用户类型(工业、商业、居民)的用气规律。

9.3.2.3 根据两部分的排列组合，生成多种典型工况。针对每种工况，运用管网水力模拟软件、可靠性评估模型等工具，计算系统供气中断概率以及对应工况的缺气量，再依据风险计算公式得出系统目标可靠度。

10 评价报告

10.1 评价报告宜包括但不限于以下内容：

a） 项目概况；
b） 评价单元划分；
c） 评价指标简介；
d） 评价方法简介；
e） 数据收集情况；
f） 单元可靠性计算；
g） 系统可靠性计算；
h） 评价结论；
i） 问题及建议。

10.2 应结合评价对象、评价方法和评价结果给出结论与建议，包括当前可靠度与目标可靠度、再评价时间及可靠性提升建议等。

附 录 A
（规范性）
数据采集清单

数据采集清单见表 A.1。

表 A.1 数据采集清单

序号	分类	数据名称
1	规划设计数据	管道线路信息：管道起点、终点、沿线拐点的地理坐标，管道线路走向图，与周边建（构）筑物、道路、河流、铁路等的交叉跨越信息，管道途经地区的地形地貌、地质条件等资料
		管道设计参数：管径、壁厚、管材等级、设计压力、设计温度、输气能力等
		站场及附属设施设计资料：压气站、分输站、阀室等站场的布局设计图，站内设备设施（如压缩机、阀门、过滤器、流量计等）的型号、规格、技术参数及设计说明书，相关自控系统、通信系统设计方案等
2	施工建设数据	施工过程记录：管道焊接记录（含焊缝编号、焊接工艺参数、焊工信息、无损检测结果等）
		管道防腐施工记录（如防腐层类型、厚度、施工工艺及质量检验报告）
		管沟开挖与回填记录（管沟深度、宽度、坡度、回填材料及压实度信息）等
		材料与设备质量证明文件：管材、管件、阀门、设备等原材料和构配件的质量检验报告、产品合格证、使用说明书等
3	运行维护数据	管道实时运行数据：管道运行压力、流量、温度、气质成分等数据
		站场设备设施运行状态参数（压缩机的转速、功率、振动值，阀门的开度等）
		巡检记录：人工巡检的时间、路线、巡检人员，巡检发现的管道及设备设施外观缺陷、泄漏迹象、周边环境异常等情况记录
		维护检修报告：设备设施的定期维护计划、维护内容、维护时间及维护人员记录，设备故障诊断报告、维修方案、维修过程记录、维修后验收报告等
		检测检验数据：管道内检测（如漏磁检测、超声检测等）报告（含管道腐蚀缺陷的位置、大小、类型及严重程度评估），管道外检测（如防腐层检测、阴极保护有效性检测等）数据，设备设施定期检验报告（如压力容器的定期检验、安全阀的校验等）
4	环境与社会数据	气象地质数据：管道沿线地区的气象资料（如气温、气压、降水、风速、风向等）
		地质灾害信息（如地震、滑坡、泥石流等的历史发生情况及潜在风险评估）
		人口分布与土地利用数据：管道沿线周边的人口密度、居民点分布，土地利用类型（如工业用地、农业用地、商业用地等）信息
5	事故数据	事故统计资料：输气管网系统历史各类事故记录，含事故发生时间、地点、类型（如泄漏、爆炸、火灾等）、原因、造成的人员伤亡、财产损失、环境污染及社会影响、处理情况等详细信息

附 录 B
（规范性）
管段可靠性计算

B.1 基于极限状态的管段可靠性计算

基于极限状态的管段单元可靠性计算流程如图 B.1 所示。

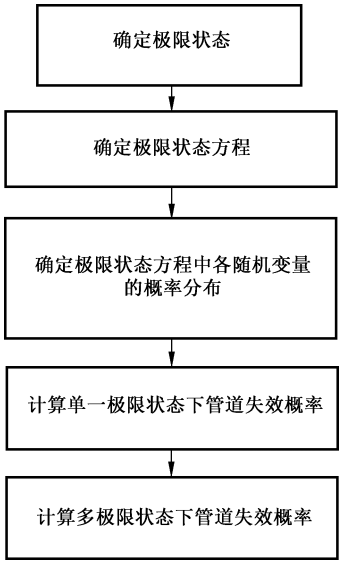


图 B.1 管段单元可靠性评价流程

B.2 极限状态方程确定

B.2.1 管段单元的极限状态确定应考虑管段所承受的载荷组合以及相应失效模式。

B.2.2 极限状态方程应采用载荷-抗力模型进行表征，见式(B.1)：

$$g(\hat{X}) = r - l \qquad \cdots\cdots(B.1)$$

式中：

$g(\hat{X})$ ——抗力和载荷效应之间差异的安全裕度，当 $g(\hat{X}) > 0$ 时，结构处于可靠状态，当 $g(\hat{X}) = 0$ 时，结构达到极限状态，当 $g(\hat{X}) < 0$ 时，结构处于失效状态；

$\hat{X}$ ——与极限状态相关的各种参数变量的集合；

r ——抗力；

l ——载荷效应。

B.2.3 腐蚀缺陷的失效模式为塑性垮塌，极限状态方程确定见 B.5。平面型缺陷的失效模式应同时考虑塑性垮塌和断裂，极限状态方程确定见 B.3。

B.3 腐蚀缺陷极限状态方程

腐蚀下的管道预测失效压力按式(B.2)计算得出。

$$P_f = \left(\frac{2\delta}{D}\right)(\sigma_s + 68.95)\left[\frac{1 - 0.85\,\frac{d}{\delta}}{1 - \left(0.85\,\frac{d}{\delta}\right)M^{-1}}\right] \qquad \cdots\cdots(B.2)$$

式中：

P_f ——预测失效压力，单位为兆帕(MPa)；

δ ——管壁厚度，单位为毫米(mm)；

D ——管道外径，单位为毫米(mm)；

σ_s ——管钢公称最小屈服强度，单位为兆帕(MPa)；

d ——腐蚀缺陷深度，单位为毫米(mm)；

M ——鼓胀因子，按式(B.3)、式(B.4)计算。

对于 $\frac{L_c^2}{D\delta} \leqslant 50$：

$$M = \left[1 + \frac{1.255}{2}\frac{L_c^2}{D\delta} - \frac{0.0135}{4}\frac{L_c^4}{D^2\delta^2}\right]^{1/2} \quad \cdots\cdots (B.3)$$

对于 $\frac{L_c^2}{D\delta} > 50$：

$$M = 0.032\frac{L_c^2}{D\delta} + 3.3 \quad \cdots\cdots (B.4)$$

式中：

L_c ——腐蚀缺陷轴向长度，单位为毫米(mm)。

腐蚀缺陷的极限状态方程见式(B.5)：

$$Z = P_f - P_O \quad \cdots\cdots (B.5)$$

式中：

Z ——安全裕度，当 $Z>0$ 时视为可靠状态，当 $Z=0$ 时视为达到极限状态，当 $Z<0$ 时视为失效状态；

P_f ——预测失效压力，单位为兆帕(MPa)，按式(B.2)计算；

P_O ——管道运行压力，单位为兆帕(MPa)。

B.4 平面型缺陷极限状态方程

B.4.1 平面型缺陷的极限状态确定应采用失效评估图方法。

B.4.2 典型的失效评估图见图 B.2。图中横坐标表示载荷比 L_r，纵坐标表示断裂参数比 K_r，失效评估曲线(FAC)即为极限状态的分界线。当评价点处于安全区域，视为可靠状态；当评价点处于不安全区域，视为失效状态。

B.4.3 载荷比 L_r、断裂参数比 K_r 和 FAC 可根据具体工况参考 GB/T 30064—2025 等标准中的相关方法确定和计算。

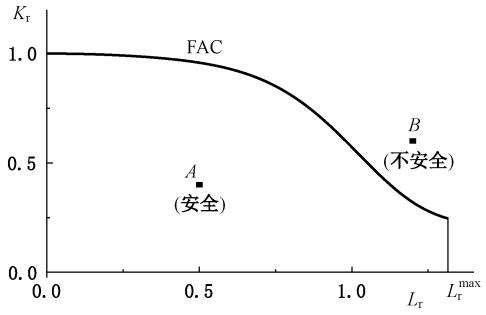


图 B.2 典型失效评估图

B.5 参数概率分布

B.5.1 极限状态涉及的随机变量应根据评价对象管段收集的数据采用统计法确定其概率分布，当实际管道数据缺失时，可采用同类管道数据。

B.5.2 相关参数的常用分布包括但不限于：正态分布、对数正态分布、威布尔分布、伽马分布等。选取拟合度最高的分布类型作为参数的概率分布。

B.6 失效概率计算

B.6.1 基于极限状态计算失效概率的方法包括但不限于蒙特卡洛法、一次二阶距法、直接积分法等，优先选用蒙特卡洛法。

B.6.2 基于蒙特卡洛法失效的概率按照以下步骤计算：

a) 给定抽样次数；
b) 由各参数概率分布函数产生随机样本；
c) 将参数样本代入极限状态方程，根据计算结果累计失效次数；
d) 重复步骤 b)、c)，直至抽样次数达到给定抽样次数；
e) 累计失效次数除以给定抽样次数，得到失效概率。

B.6.3 采用蒙特卡洛法计算小概率失效时，可采用以下模拟抽样技术改进计算效率。

a) 拉丁超立方抽样；
b) 重要性抽样；
c) 自适应抽样；
d) 条件模拟方法；
e) 定向模拟；
f) 轴线正交模拟。

附 录 C
（资料性）
压缩机组可靠性计算

C.1 基于数值法的压缩机叶轮可靠性计算

C.1.1 一般规定

压缩机可靠性数值计算宜综合考虑载荷分析、模型验证、概率建模等核心步骤。在保证几何模型与实际相符的情况下进行后续的耦合计算，确保仿真过程的可信度。

C.1.2 计算步骤

压缩机叶轮可靠性计算应包括以下步骤：

a) 建立压缩机组叶轮的几何模型(叶轮、流道、过流部件)；
b) 进行流固耦合数值模拟；
c) 开展疲劳寿命预测；
d) 实施可靠性评估；
e) 制定维护策略建议。

C.1.3 几何建模

C.1.3.1 几何建模部分需要对压缩机流道、叶轮整体、首级叶轮流道和结构进行建模。在不考虑轮盘顶端定位槽和定位销的条件下建立 1∶1 的几何模型。需收集压缩机的几何参数包括压缩机整体参数：转速、外部总长、外部总高、轴中心高、壳体最小厚度、级数。压缩机各级的详细参数：叶片数、叶轮出口直径、出口宽度、叶片出口安放角。还需要设计叶轮骨线，子午面型线。压缩机的材料参数：弹性模量、泊松比、材料密度、屈服强度、抗拉强度、延伸率、维氏硬度。

C.1.3.2 收集压缩机的相关运行数据：工作转速、进口压力、进口温度，以及压缩机在各个流量下的压力、功率、多变效率、能量头。在后续计算中还会涉及叶轮损伤的计算，还需要收集压缩机机组的运行情况：服役年限、停机次数、旋转失速次数、旋转失速平均持续时间。

C.1.3.3 应采用三维建模软件建立压缩机叶轮的固体域和流体域模型，确保几何形状与实际叶轮一致。流体域模型应从固体域模型中通过布尔运算提取，保证流体域与固体域完全贴合。

C.1.4 流固耦合数值模拟

C.1.4.1 流体域计算要求

计算选用基于压力的求解器并开启能量方程；不可忽略流体的可压缩性，宜选用压力-速度耦合的显式 Coupled 算法；湍流模型选用 SST k-ω，开启发热黏性以及压缩性效应；设置流体域运动形式为参考系运动，旋转轴为 Y 轴，根据计算要求设置需要的转速。

C.1.4.2 固体域计算要求

在静力分析模块中，对结构施加轴孔位移约束以固定边界条件；通过设置转速引入离心载荷，模拟旋转部件的惯性效应；将流体域计算得到的压力分布作为气动载荷导入，实现流固耦合作用下的结构力

学分析。

C.1.4.3 网格划分要求

网格模型质量直接决定叶轮应力分析的计算精度，在网格划分时，应对各连接部位进行局部网格细化，并优先采用自适应网格技术；网格生成后，需开展网格无关性验证，确保计算结果稳定可靠。

C.1.4.4 边界条件设置及材料设置

流体域边界条件设置包括入口条件、出口条件以及流动组分设置。其中入口条件：质量流量（根据压缩机实际流量确定）、进口温度、进口压力。出口条件：出口压力（根据进口压力及压比确定）。流动组分：流动介质设置为理想气体，自定义天然气混合组分，混合物包含 CH_4、C_2H_6、CO_2、H_2S、N_2 总计 5 种气体组分，再根据实际气体组分信息设置各组分的摩尔分数。

固体材料基本参数：弹性模量、泊松比、密度、屈服强度、抗拉强度、延伸率、维氏硬度。

C.1.4.5 运行工况设置

针对叶轮的额定运行工况，分别模拟叶轮在不同典型工作转速下的运行情况，计算相应转速下的可靠性曲线。另外，为了更好地符合现场的实际运行情况，在额定工况的基础上引入设备启停机与旋转失速两种基本扰动形式，综合两种因素进行计算。

C.1.4.6 模拟计算结果

基于已建立模型进行流动模拟分析，将模拟分析获得的性能曲线与实际运行的性能曲线对比验证模型精度。对流体域划分网格并施加相应的边界条件，在不同运行工况下进行模拟计算，选取重要参数如压比、出口温度、效率等进行性能曲线绘制，并与实际运行数据对比。

模拟计算结果包括：叶轮流体域的压力云图、固体域的应力分布、加载与未加载气动载荷情况下叶片吸力面和压力面的应力分布云图、危险点处在各转速下的平均压力。

C.1.5 疲劳寿命预测

C.1.5.1 应基于流固耦合计算结果确定叶轮危险点的应力分布。由此可以得到危险点的平均应力。

C.1.5.2 应采用 Basquin 公式建立应力-寿命关系，见式(C.1)：

$$\sigma=\sigma'_{\mathrm{f}}(2N)^{b} \qquad \cdots\cdots(\mathrm{C.1})$$

式中：

σ ——材料在循环周次为 N 时的疲劳强度（应力幅等，随循环条件定）；

σ'_{f}——疲劳强度系数，单位为兆帕（MPa）；

N——循环周次（与疲劳寿命相关，指材料破坏前经历的循环次数）；

b ——疲劳强度因子。

在确定疲劳强度系数与疲劳强度因子的条件下，绘制在不同应力幅值条件下的循环次数（寿命）曲线。

由于叶轮承受的载荷为非对称载荷，因此需要对疲劳强度因子 b 进行修正，见式(C.2)：

$$b'=\frac{\lg(\varepsilon_{\mathrm{d}}\beta\sigma_{-1})-\lg(\sigma'_{\mathrm{f}}-\sigma_{\mathrm{m}})}{\lg(\sigma_{-1})-\lg(\sigma'_{\mathrm{f}}-\sigma_{\mathrm{m}})}b \qquad \cdots\cdots(\mathrm{C.2})$$

式中：

b' ——修正后的疲劳强度因子；

ε_d ——叶轮尺寸影响系数；

β ——表面粗糙度影响系数；

σ_{-1}——对称循环应力下的疲劳强度；

σ_m ——叶轮危险点的单元平均应力。

C.1.5.3 应计算在无限循环次数下叶轮所承受的应力幅值 σ_a，按式(C.3)计算：

$$\sigma_a = \sigma_{-1}(1 - \sigma_m/\sigma_\gamma) \quad \cdots\cdots (C.3)$$

式中：

σ_{-1}——对称循环应力下的疲劳强度；

σ_m ——叶轮危险点的单元平均应力；

σ_γ ——材料屈服极限。

σ_m是由流固耦合数值计算得到的结果，σ_{-1}、σ_γ是材料参数。这是较为保守的计算材料疲劳极限的方法。如果要考虑表面粗糙度、焊接加工工艺和模型尺寸等因素，还要对该公式进行修正。修正后的计算应力幅值的公式见式(C.4)：

$$\sigma_a = \sigma_{-1}(1 - \sigma_m/\sigma_\gamma)\frac{\beta\varepsilon_d}{K_f} \quad \cdots\cdots (C.4)$$

式中：

β ——表面粗糙度影响系数；

ε_d ——叶轮尺寸影响系数；

K_f——焊接强度系数。

C.1.6 可靠性评估

C.1.6.1 概率方法的疲劳寿命模型

获得疲劳寿命模型的概率密度方法：由于疲劳强度因子 b 同时受材料和外部加载条件的影响，具有不确定性。通过建立修正后的疲劳强度因子 b'的概率分布，结合 S-N 曲线，便可获得叶轮疲劳寿命的概率分布。不确定参数 b 的概率分布可以使用较为常见的分布进行拟合，如正态分布、指数分布、三参数威布尔分布等。通过获得不确定参数 b 的概率分布，从而获得不同转速下的叶轮疲劳寿命的概率分布曲线。通常使用的威布尔分布主要包含两种形式：尺度参数和形状参数的双参数模型，以及在此基础上增加位置参数的三参数扩展模型。其概率密度函数(PDF)和累积分布函数(CDF)见式(C.5)～式(C.8)。

双参数威布尔分布：

$$f(t) = \frac{\beta_s}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta_s - 1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta_s}} \quad \cdots\cdots (C.5)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta_s}} \quad \cdots\cdots (C.6)$$

三参数威布尔分布：

$$f(t) = \frac{\beta_s}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta_s - 1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta_s}} \quad \cdots\cdots (C.7)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta_s}} \quad \cdots\cdots (C.8)$$

式中：

β_s——形状参数，控制分布的形状和失效率的变化趋势，$\beta_s<1$：失效率随时间递减，适用于早期失效阶段；$\beta_s=1$：失效率恒定，退化为指数分布；$\beta_s>1$：失效率随时间递增，适用于磨损或老化失效阶段；

η ——尺度参数，表示特征寿命；

γ ——位置参数，表示失效开始的时间，即设备在 $t=\gamma$ 前不失效。

C.1.6.2 叶轮可靠度计算模型搭建

考虑离心式压缩机叶轮的尺寸规模，通过加速破坏试验获得故障次数较为困难，应通过建立设备某一随时间的退化特征量与退化中具有不确定性参量的关系，获得该退化参量的概率分布，从而分析设备的可靠性。假设设备随时间的退化参量 $Y(t)$ 与具有不确定性的参量 θ 的关系为式(C.9)：

$$Y=h(\theta) \qquad \cdots\cdots(C.9)$$

如果 θ 服从某一概率密度函数 $f(x)$ 的分布，可得式(C.10)：

$$\theta=h^{-1}(Y)\sim f(x) \qquad \cdots\cdots(C.10)$$

获得 θ 这个不确定参量的概率分布后，便可计算设备在一定的运行时间内或运行次数下，能够完成预期任务的概率，即设备的可靠度，见式(C.11)：

$$R(t\mid y_c)=1-P_r[Y(t)\leqslant y_c] \qquad \cdots\cdots(C.11)$$

式中：

R ——可靠度；

y_c ——失效阈值；

P_r ——事件发生的概率。

对离心压缩机叶轮的可靠性评价基于叶轮应力寿命模型，见式(C.12)：

$$\sigma=\sigma'_f(2N)^b \qquad \cdots\cdots(C.12)$$

模型中的退化参量即为叶轮的剩余循环次数，疲劳强度因子 b 同时受到材料和外部加载条件的影响，具有一定的不确定性，因此按照上述方法得到叶轮循环次数的概率分布，对叶轮循环次数概率分布的概率密度函数进行随机采样，即可获得不同应力幅值作用下的叶轮运行可靠性曲线。

C.1.6.3 可靠性曲线

根据获得的叶轮疲劳寿命的概率分布曲线和可靠度计算模型，可通过式(C.13)得出叶轮运行至 N_0 循环次数时的可靠度(概率)：

$$R(N_0)=1-F(N_0)=1-\int_0^{N_0}f(N)\mathrm{d}N \qquad \cdots\cdots(C.13)$$

获得的可靠度的值随循环次数 N 变化，因此可以绘图得到不同转速下可靠度随循环次数变化曲线(可靠性曲线)。

C.1.7 剩余寿命预测

C.1.7.1 宜采用经过广泛验证的累积损伤理论模型计算损伤量，运用 Miner 线性积累损伤理论计算叶片工作状态损伤，见式(C.14)～式(C.16)：

$$D_{启停}=\frac{T_{ss}\times f_{ss}}{N_{ss}} \qquad \cdots\cdots(C.14)$$

$$D_{旋转失速}=\frac{n_{rs}\times T_{rs}\times f_{ss}\times 0.8}{N_{rs}} \qquad \cdots\cdots(C.15)$$

$$D_{总}=D_{启停}+D_{旋转失速} \qquad \cdots\cdots(C.16)$$

式中：

T_{ss} ——累计运行时间；

f_{ss} ——气动载荷频率；

N_{ss} ——启停阶段疲劳寿命；

n_{rs} ——旋转失速次数；

T_{rs} ——平均持续时间；

N_{rs} ——旋转失速阶段疲劳寿命；

$D_{总}$ ——总损伤值；

$D_{启停}$ ——启停过程造成的损伤值；

$D_{旋转失速}$ ——旋转失速造成的损伤值。

C.1.7.2 宜考虑启停过程和旋转失速等典型工况对寿命的影响。结合上述计算所得的损伤值，剩余寿命可通过式(C.17)进行预测：

$$T_s = \frac{1-D}{D} T_i \qquad \cdots\cdots (C.17)$$

式中：

T_s ——剩余寿命；

D ——损伤值；

T_i ——已服役寿命。

C.1.7.3 宜考虑现场工况影响，并结合叶轮损伤量与模拟循环次数计算剩余寿命。

C.1.8 实施与维护

C.1.8.1 实施要求

C.1.8.1.1 应定期进行可靠性评估，周期不宜超过 3 年。

C.1.8.1.2 应在压缩机大修后重新进行可靠性评估。

C.1.8.1.3 当运行参数发生重大变化时，应及时更新评估结果。

C.1.8.2 维护策略

C.1.8.2.1 应根据可靠性曲线设置预警阈值。

C.1.8.2.2 当可靠度低于 90%时，应加强监测。

C.1.8.2.3 当可靠度低于 80%时，应计划更换或大修。

C.1.8.2.4 应建立压缩机运行数据库，记录启停次数、旋转失速事件等关键参数。

C.1.9 结果分析与报告

C.1.9.1 一般要求

报告应该简要概括分析目的、方法、关键结果和结论，要说明数据来源、处理分析工具。对结果应进行解读，解释结果的意义，同时要指出结果的局限性。

C.1.9.2 结果分析要求

C.1.9.2.1 应分析不同转速下叶轮的应力分布特征。

C.1.9.2.2 应评估危险点的位置及其应力水平。

C.1.9.2.3 应绘制应力-寿命曲线和可靠性曲线。

C.1.9.3 报告内容要求

C.1.9.3.1 报告应包括以下内容：

a) 计算模型描述；
b) 边界条件设置；
c) 材料参数；
d) 计算结果；
e) 可靠性评估；
f) 寿命预测；
g) 维护建议。

C.1.9.3.2 报告应附有网格划分图、应力云图、可靠性曲线等关键图表。

C.2 基于统计修正的压缩机组可靠性计算

C.2.1 概述

本文件提出的压缩机组统计修正可靠性评价工作内容包括四个部分：确定可靠性指标、确定修正参数、确定修正系数、计算修正后的可靠性指标。

C.2.2 基于统计的压缩机组可靠性指标

C.2.2.1 故障频率

基于统计数据计算的压缩机组故障频率，应按式(7)计算。

修正的压缩机组故障频率应按式(C.18)计算：

$$f'_{\mathrm{j}}=C_{\mathrm{f}}\cdot f_{\mathrm{j}} \qquad \cdots\cdots(\mathrm{C.18})$$

式中：

f'_{j}——修正后的压缩机组故障频率；

f_{j}——压缩机组故障频率；

C_{f}——故障频率总修正系数。

C.2.2.2 平均无故障工作时间

基于历史故障数据计算压缩机组平均无故障工作时间，应按式(8)计算。

修正的压缩机组平均无故障工作时间应按式(C.19)计算：

$$T'_{\mathrm{MTBF,j}}=C_{\mathrm{w}}\cdot T_{\mathrm{MTBF,j}} \qquad \cdots\cdots(\mathrm{C.19})$$

式中：

$T'_{\mathrm{MTBF,j}}$——修正后的压缩机组平均无故障工作时间；

C_{w}——平均无故障工作时间总修正系数；

$T_{\mathrm{MTBF,j}}$——机组平均无故障工作时间。

C.2.2.3 平均修复时间

基于历史故障修复数据计算的压缩机组平均修复时间，应按式(9)计算。

修正的压缩机组平均修复时间应按式(C.20)计算：

$$T'_{\mathrm{MTTR,j}}=C_{\mathrm{r}}\ T_{\mathrm{MTTR,j}} \qquad \cdots\cdots(\mathrm{C.20})$$

式中：

$T'_{MTTR,j}$——修正后的压缩机组平均修复时间；

C_r——平均修复时间总修正系数；

$T_{MTTR,j}$——机组平均修复时间。

C.2.2.4 可靠度

基于历史故障数据计算压缩机组可靠度，应按式(10)计算。

修正的压缩机组可靠度应按式(C.21)计算：

$$R'_j = C_R R_j \quad \cdots\cdots (C.21)$$

式中：

R'_j——修正后的压缩机组可靠度；

C_R——可靠度总修正系数；

R_j——压缩机组可靠度。

C.2.2.5 可用度

基于历史故障及维修数据计算压缩机组可用度，应按式(11)计算。

修正的压缩机组可用度应按式(C.22)计算：

$$A'_j = C_A A_j \quad \cdots\cdots (C.22)$$

式中：

A'_j——修正后的压缩机组可用度；

C_A——可用度总修正系数；

A_j——压缩机组可用度。

C.2.3 修正参数

C.2.3.1 修正参数确定原则

C.2.3.1.1 压缩机组修正参数应考虑结构本体安全状态、机组运行状态、环境因素对设备运行安全状态的影响，也应考虑管理人员素质、管理制度等全寿命周期管理因素对机组运行性能状态的直接影响。

C.2.3.1.2 应优先采用客观量化指标，避免或减少主观性指标(如现场打分、专家咨询)。

C.2.3.1.3 客观性指标应以现场实际数据为计算依据，其基础数据可通过统计或检测获取。

C.2.3.2 修正参数体系

修正参数体系包括本体修正参数、运行工况修正参数、环境因素修正参数、管理因素修正参数。各级指标的架构如图 C.1 所示。

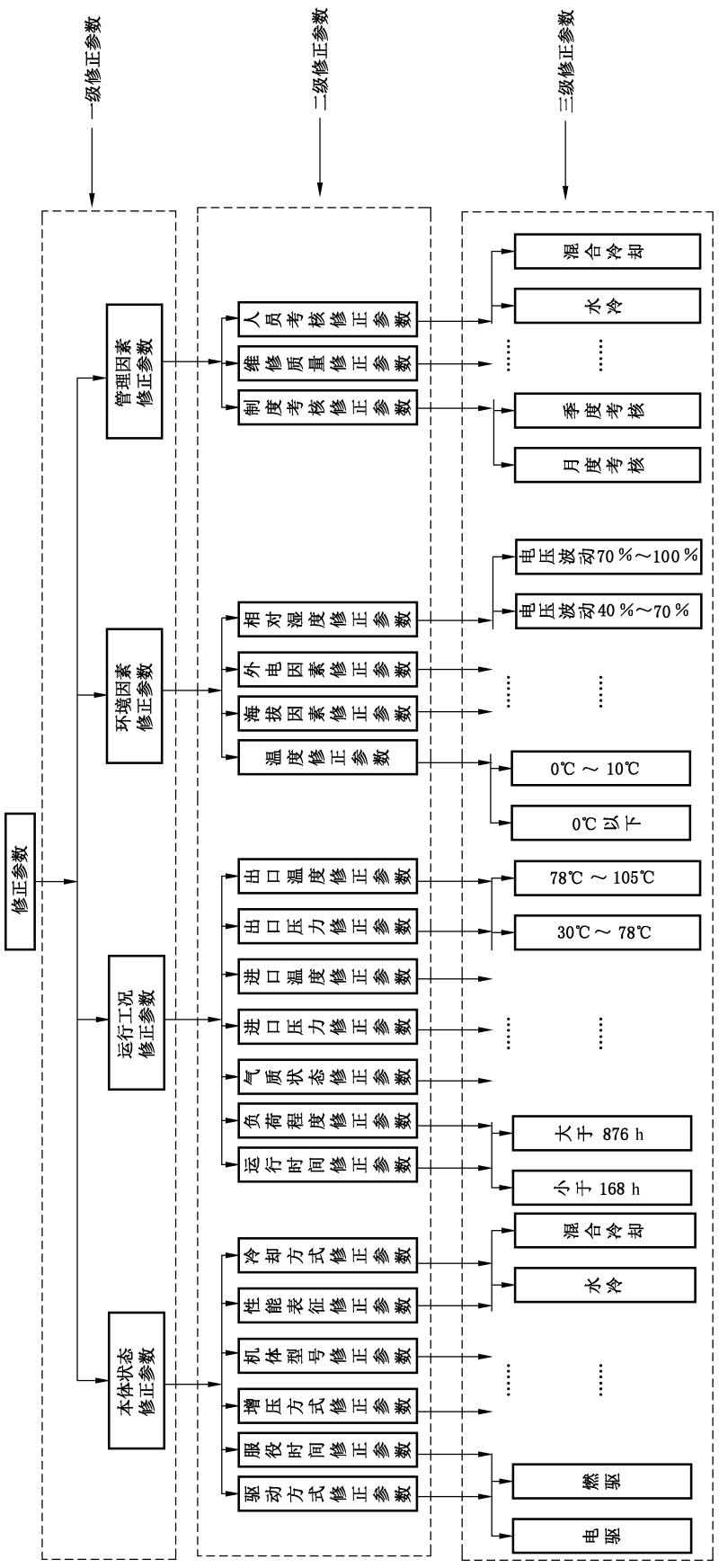

一级修正参数
二级修正参数
三级修正参数
修正参数
本体状态修正参数
运行工况修正参数
环境因素修正参数
管理因素修正参数
驱动方式修正参数
服役时间修正参数
增压方式修正参数
机体型号修正参数
性能表征修正参数
冷却方式修正参数
运行时间修正参数
负荷程度修正参数
气质状态修正参数
进口压力修正参数
进口温度修正参数
出口压力修正参数
出口温度修正参数
温度修正参数
海拔因素修正参数
外电因素修正参数
相对湿度修正参数
制度考核修正参数
维修质量修正参数
人员考核修正参数
电驱
燃驱
小于 168 h
大于 876 h
水冷
混合冷却
30℃ ~ 78℃
78℃ ~ 105℃
0℃ 以下
0℃ ~ 10℃
电压波动40 %~70 %
电压波动70 %~100 %
月度考核
季度考核
水冷
混合冷却

图 C.1 修正参数体系

C.2.4 修正系数

C.2.4.1 系数确定原则

基础修正系数的评估细则设置应符合下列原则。

a) 全面性原则：压缩机组每一个故障情况都有至少一个选项，为避免漏选或多选，对一些因素设置“其他”和“无”选项。
b) 可量化原则：所有的评估细则都界限分明，不能模棱两可。
c) 客观性原则：细则符合我国压缩机组情况，并能反映压气站压缩机组的特质。
d) 数据可采集性原则：细则涉及的评估数据是管理和工作人员所能采集的数据；很重要但现场管理人员难以采集的数据采取定性描述。
e) 直观实用原则：评估细则宜直观，易于理解，能反映压缩机组的不利情况与有利措施。
f) 方便使用原则：由于综合修正系数评估涉及因素众多，为方便现场使用，每个因素细则的设置不宜过多，尽量整合情况，简化细则，减少细则数量。
g) 尊重现场原则：体系最终是供现场人员使用的，通过试用体系，征求使用人员意见，进行修订。

C.2.4.2 系数赋值规则

上级修正系数依赖于下级修正系数，下级修正系数可以参照具体压缩机组的实际运行情况进行改进或者调整。上述每一个系数修正细则需要赋予一定的分值，以系数修正的方式进行赋值。系数赋值应满足下列要求。

a) 对于修正系数，每一个系数是一个大于 0 的数值。所涉及的故障次数越多，系数越大，故障次数越少，系数越小。
b) 修正系数中，无影响的赋值为“0”。
c) 修正系数为 1 表示基础故障频率不需要进行修正，“其他”“不清楚”则按一般情况赋值。
d) 以故障频率为例，各级修正系数应按式(C.23)～式(C.25)计算。
e) 公式(C.25)为故障频率的二级参数计算方法，其他指标如平均无故障工作时间、平均修复时间、可靠度、可用度的二级参数计算方法参照式(C.25)进行计算，将公式中的故障频率值相应换成平均无故障工作时间、平均修复时间、可靠度、可用度等值。

$$C=\sum_{i=1}^{m} w_i C_i \qquad \cdots\cdots(\text{C.23})$$

式中：

C ——总修正系数；

w_i——一级修正参数 i 在总修正参数中的权重；

C_i——一级修正系数的值；

i ——故障原因编号；

m ——故障原因分类数。

$$C_i=\prod_{j=1}^{n} C_{ij} \qquad \cdots\cdots(\text{C.24})$$

式中：

C_{ij}——二级修正系数的值；

j ——修正参数编号；

n ——一级修正参数 i 中二级参数的个数。

$$C_{ij}=\frac{f_{ij}}{f_i} \qquad \cdots\cdots(\text{C.25})$$

式中：

f_{ij}——由 i 原因引起的第 j 个故障频率；

f_i ——由 i 原因引起的平均故障频率(积分中值定理或故障频率的平均值)。

C.2.4.3 压缩机组修正系数计算

C.2.4.3.1 故障频率修正系数

C.2.4.3.1.1 本体状态修正系数

考虑服役时间、驱动方式、增压方式、机体型号、冷却方式等共同影响本体状态的故障频率，本体状态的修正系数应按式(C.26)计算：

$$C_{bf}=C_{f11}\times C_{f12}\times C_{f13}\times C_{f14}\times C_{f15} \quad \cdots\cdots(C.26)$$

式中：

C_{bf} ——本体状态的故障频率修正系数；

C_{f11}——服役时间修正系数；

C_{f12}——驱动方式修正系数；

C_{f13}——增压方式修正系数；

C_{f14}——机体型号修正系数；

C_{f15}——冷却方式修正系数。

C.2.4.3.1.2 运行工况修正系数

考虑运行时间、负荷程度、气质状态、进口压力、进口温度、出口压力、出口温度等共同影响运行工况的故障频率，运行工况的修正系数应按式(C.27)计算：

$$C_{yf}=C_{f21}\times C_{f22}\times C_{f23}\times C_{f24}\times C_{f25}\times C_{f26}\times C_{f27} \quad \cdots\cdots(C.27)$$

式中：

C_{yf} ——运行工况的故障频率修正参数；

C_{f21}——运行时间修正系数；

C_{f22}——负荷程度修正系数；

C_{f23}——气质状态修正系数；

C_{f24}——进口压力修正系数；

C_{f25}——进口温度修正系数；

C_{f26}——出口压力修正系数；

C_{f27}——出口温度修正系数。

C.2.4.3.1.3 环境因素修正系数

考虑温度、海拔、外电、相对湿度等共同影响环境因素的故障频率，环境因素的修正系数应按式(C.28)计算：

$$C_{hf}=C_{f31}\times C_{f32}\times C_{f33}\times C_{f34} \quad \cdots\cdots(C.28)$$

式中：

C_{hf} ——环境因素修正系数；

C_{f31}——温度修正系数；

C_{f32}——海拔因素修正系数；

C_{f33}——外电因素修正系数；

C_{f34}——相对湿度修正系数。

C.2.4.3.1.4 管理因素修正系数

考虑制度考核、维修质量、人员考核等共同影响管理因素的故障频率，管理因素的修正系数应按式(C.29)计算：

$$C_{gf}=C_{f41}\times C_{f42}\times C_{f43} \quad \cdots\cdots(C.29)$$

式中：

C_{gf}——管理因素的故障频率修正系数；

C_{f41}——制度考核修正系数；

C_{f42}——维修质量修正系数；

C_{f43}——人员考核修正系数。

C.2.4.3.1.5 故障频率总修正系数

故障频率总修正系数按式(C.30)计算：

$$C_{f}=\sum_{i=1}^{4}w_{i}C_{if} \quad \cdots\cdots(C.30)$$

式中：

C_{f}——故障频率总修正系数；

w_{i}——一级修正参数 i 在总修正参数中的权重；

C_{if}——故障频率一级修正系数，按式(C.26)～式(C.29)计算；

i——故障原因编号。

C.2.4.3.2 平均无故障工作时间修正系数

C.2.4.3.2.1 本体状态修正系数

考虑服役时间、驱动方式、增压方式、机体型号、冷却方式共同影响本体状态的平均无故障工作时间，其本体状态修正系数应按式(C.31)计算：

$$C_{bw}=C_{w11}\times C_{w12}\times C_{w13}\times C_{w14}\times C_{w15} \quad \cdots\cdots(C.31)$$

式中：

C_{bw}——本体状态的平均无故障工作时间修正系数；

C_{w11}——服役时间修正系数；

C_{w12}——驱动方式修正系数；

C_{w13}——增压方式修正系数；

C_{w14}——机体型号修正系数；

C_{w15}——冷却方式修正系数。

C.2.4.3.2.2 运行工况修正系数

考虑运行时间、负荷程度、气质状态、进口压力、进口温度、出口压力、出口温度共同影响运行工况的平均无故障工作时间，运行工况的修正系数应按式(C.32)计算：

$$C_{yw}=C_{w21}\times C_{w22}\times C_{w23}\times C_{w24}\times C_{w25}\times C_{w26}\times C_{w27} \quad \cdots\cdots(C.32)$$

式中：

C_{yw}——运行工况的平均无故障工作时间修正系数；

C_{w21}——运行时间修正系数；

C_{w22}——负荷程度修正系数；
C_{w23}——气质状态修正系数；
C_{w24}——进口压力修正系数；
C_{w25}——进口温度修正系数；
C_{w26}——出口压力修正系数；
C_{w27}——出口温度修正系数。

C.2.4.3.2.3 环境因素修正系数

考虑温度、海拔、外电、湿度共同影响压缩机平均无故障工作时间，环境因素的修正系数应按式(C.33)计算：

$$C_{hw}=C_{w31}\times C_{w32}\times C_{w33}\times C_{w34} \quad \cdots\cdots(C.33)$$

式中：
C_{hw}——环境因素的平均无故障工作时间修正系数；
C_{w31}——温度修正系数；
C_{w32}——海拔因素修正系数；
C_{w33}——外电因素修正系数；
C_{w34}——相对湿度修正系数。

C.2.4.3.2.4 管理因素修正系数

考虑制度考核、维修质量、人员考核共同影响管理因素的平均无故障工作时间，管理因素的修正系数应按式(C.34)计算：

$$C_{gw}=C_{w41}\times C_{w42}\times C_{w43} \quad \cdots\cdots(C.34)$$

式中：
C_{gw}——管理因素的平均无故障工作时间修正系数；
C_{w41}——制度考核修正系数；
C_{w42}——维修质量修正系数；
C_{w43}——人员考核修正系数。

C.2.4.3.2.5 平均无故障工作时间总修正系数

平均无故障工作时间总修正系数按式(C.35)计算：

$$C_{w}=\sum_{i=1}^{4}w_{i}C_{iw} \quad \cdots\cdots(C.35)$$

式中：
C_{w}——平均无故障总修正系数；
w_{i}——一级修正参数 i 在总修正参数中的权重；
C_{iw}——平均无故障工作时间一级修正系数，按式(C.31)～式(C.34)计算；
i——故障原因编号。

C.2.4.3.3 平均修复时间修正系数

考虑制度考核、维修质量、人员考核这 3 种因素共同影响平均修复时间，管理因素平均修复时间应按式(C.36)计算：

$$C_{r}=C_{r41}\times C_{r42}\times C_{r43} \quad \cdots\cdots(C.36)$$

式中：
C_{r}——平均修复时间修正系数；

C_{r41}——制度考核修正系数；
C_{r42}——维修质量修正系数；
C_{r43}——人员考核修正系数。

C.2.4.3.4 可靠度修正系数

C.2.4.3.4.1 本体状态修正系数

考虑服役时间、驱动方式、增压方式、机体型号、冷却方式共同影响本体状态的可靠度，本体状态的修正系数应按式(C.37)计算：

$$C_{bR}=C_{R11}\times C_{R12}\times C_{R13}\times C_{R14}\times C_{R15} \quad \cdots\cdots(C.37)$$

式中：
C_{bR}——本体状态的可靠度修正系数；
C_{R11}——服役时间修正系数；
C_{R12}——驱动方式修正系数；
C_{R13}——增压方式修正系数；
C_{R14}——机体型号修正系数；
C_{R15}——冷却方式修正系数。

C.2.4.3.4.2 运行工况修正系数

考虑运行时间、负荷程度、气质状态、进口压力、进口温度修正系数、出口压力修正系数、出口温度修正系数共同影响运行工况的可靠度，运行工况的修正系数应按式(C.38)计算：

$$C_{yR}=C_{R21}\times C_{R22}\times C_{R23}\times C_{R24}\times C_{R25}\times C_{R26}\times C_{R27} \quad \cdots\cdots(C.38)$$

式中：
C_{yR}——运行工况的可靠度修正参数；
C_{R21}——运行时间修正系数；
C_{R22}——负荷程度修正系数；
C_{R23}——气质状态修正系数；
C_{R24}——进口压力修正系数；
C_{R25}——进口温度修正系数；
C_{R26}——出口压力修正系数；
C_{R27}——出口温度修正系数。

C.2.4.3.4.3 环境因素修正系数

考虑温度、海拔、外电、湿度共同影响可靠度，环境因素的修正系数应按式(C.39)计算：

$$C_{hR}=C_{R31}\times C_{R32}\times C_{R33}\times C_{R34} \quad \cdots\cdots(C.39)$$

式中：
C_{hR}——环境因素的可靠度修正系数；
C_{R31}——温度修正系数；
C_{R32}——海拔因素修正系数；
C_{R33}——外电因素修正系数；
C_{R34}——相对湿度修正系数。

C.2.4.3.4.4 管理因素修正系数

考虑制度考核、维修质量、人员考核共同影响可靠度，管理因素的修正系数应按式(C.40)计算：

$$C_{gR}=C_{R41}\times C_{R42}\times C_{R43} \quad \cdots\cdots(C.40)$$

式中：

C_{gR} ——管理因素的可靠度修正系数；

C_{R41}——制度考核修正系数；

C_{R42}——维修质量修正系数；

C_{R43}——人员考核修正系数。

C.2.4.3.4.5 可靠度总修正系数

可靠度总修正系数按式(C.41)计算：

$$C_r=\sum_{i=1}^{4}w_iC_{ir} \quad \cdots\cdots(C.41)$$

式中：

C_r ——可靠度总修正系数；

w_i ——一级修正参数 i 在总修正参数中的权重；

C_{ir}——可靠度一级修正系数，按式(C.36)～式(C.40)计算；

i ——故障原因编号。

C.2.4.3.5 可用度修正系数

C.2.4.3.5.1 本体状态修正系数

考虑服役时间、驱动方式、增压方式、机体型号、冷却方式等均会对可用度产生影响，因此本体状态的修正系数应按式(C.42)计算：

$$C_{bA}=C_{A11}\times C_{A12}\times C_{A13}\times C_{A14}\times C_{A15} \quad \cdots\cdots(C.42)$$

式中：

C_{bA} ——本体状态的可用度修正系数；

C_{A11}——服役时间修正系数；

C_{A12}——驱动方式修正系数；

C_{A13}——增压方式修正系数；

C_{A14}——机体型号修正系数；

C_{A15}——冷却方式修正系数。

C.2.4.3.5.2 运行工况修正系数

考虑运行时间、负荷程度、气质状态、进口压力、进口温度、出口压力、出口温度共同影响可用度，运行工况的修正系数应按式(C.43)计算：

$$C_{yA}=C_{A21}\times C_{A22}\times C_{A23}\times C_{A24}\times C_{A25}\times C_{A26}\times C_{A27} \quad \cdots\cdots(C.43)$$

式中：

C_{yA} ——运行工况的可用度修正系数；

C_{A21}——运行时间修正系数；

C_{A22}——负荷程度修正系数；

C_{A23}——气质状态修正系数；

C_{A24}——进口压力修正系数；

C_{A25}——进口温度修正系数；

C_{A26}——出口压力修正系数；

C_{A27}——出口温度修正系数。

C.2.4.3.5.3 环境因素修正系数

考虑温度、海拔、外电、湿度共同影响可用度，环境因素的修正系数应按式(C.44)计算：

$$C_{hA}=C_{A31}\times C_{A32}\times C_{A33}\times C_{A34} \quad \cdots\cdots(C.44)$$

式中：

C_{hA} ——环境因素的可用度修正系数；

C_{A31}——温度修正系数；

C_{A32}——海拔因素修正系数；

C_{A33}——外电因素修正系数；

C_{A34}——相对湿度修正系数。

C.2.4.3.5.4 管理因素修正系数

考虑制度考核、维修质量、人员考核共同影响可用度，管理因素的修正系数应按式(C.45)计算：

$$C_{gA}=C_{A41}\times C_{A42}\times C_{A43} \quad \cdots\cdots(C.45)$$

式中：

C_{gA} ——管理因素的可用度修正系数；

C_{A41}——制度考核修正系数；

C_{A42}——维修质量修正系数；

C_{A43}——人员考核修正系数。

C.2.4.3.5.5 可用度总修正系数

可用度总修正系数按式(C.46)计算。

$$C_{A}=\sum_{i=1}^{4}w_{i}C_{iA} \quad \cdots\cdots(C.46)$$

式中：

C_{A} ——可用度总修正系数；

w_{i} ——一级修正参数 i 在总修正参数中的权重；

C_{iA}——可用度一级修正系数，按式(C.42)～式(C.45)计算；

i ——故障原因编号。

C.3 基于统计法的压缩机组可靠性计算示例

统计机组累计运行时间和故障停机次数等信息。统计表见表 C.1。

表 C.1 统计表

投用时间/a	运行时间/h	停机次数	停机时间/h
0～1			
1～2			
2～3			
……			

计算出平均无故障时间 T_{MTBF}，进而按式(C.47)得出故障率 λ：

$$\lambda=1/T_{MTBF} \quad \cdots\cdots(C.47)$$

分析机组故障情况与投运时间关系，如图 C.2 和图 C.3 所示。

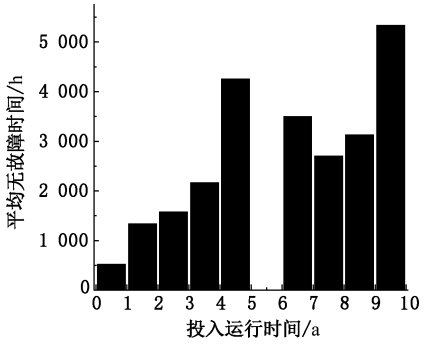


图 C.2　平均无故障时间统计结果

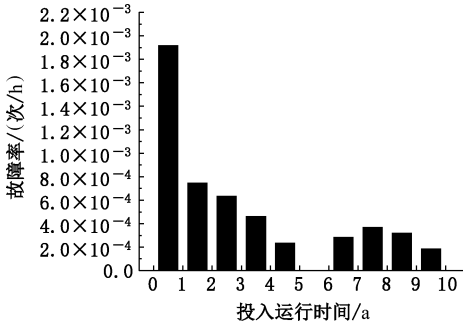


图 C.3　故障率统计结果

将故障率与投用时间进行线性拟合，得到故障率与投用时间函数关系，见式(C.48)：

$$\lambda(t)=0.000\ 137\ 951\ 4+\frac{0.069\ 54}{\left[1+\left(\frac{t}{89.395\ 27}\right)^{0.934\ 12}\right]} \qquad \cdots\cdots(\text{C.48})$$

将 $\lambda(t)$ 代入式(C.49)，进行数值积分计算，得到机组投产后可以一直运行的可靠度(见图 C.4)。

$$R(t)=\exp\left[-\int_0^t\lambda(t')\right]\mathrm{d}t' \qquad \cdots\cdots(\text{C.49})$$

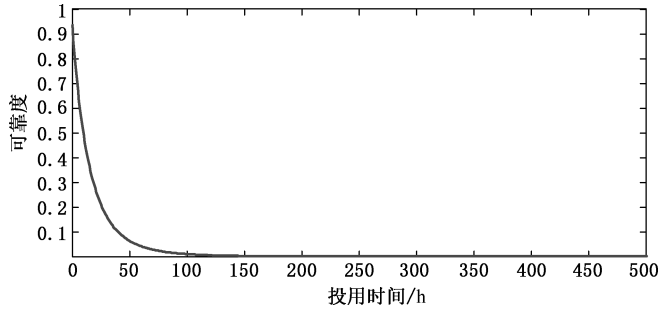


图 C.4　投产后一直运行的可靠度函数图

然而，实际过程中，机组常常是在某一时刻发生故障，进行必要维修，然后继续运行，此时可靠度函数与机组一直运行的可靠度函数会有较大差异。

假设机组在 t_0 时刻发生了故障，并进行了完全维修，维修如新，故障率函数 $\lambda'(t)$ 为：

$$\lambda'(t)=\lambda(t+t_0) \qquad \cdots\cdots(\text{C.50})$$

则

$$\lambda'(t)=0.000\ 137\ 951\ 4+\frac{0.069\ 54}{1+\left(\frac{t+t_0}{89.395\ 27}\right)^{0.934\ 12}} \qquad \cdots\cdots(\text{C.51})$$

此时可靠度函数 $R(t)$ 见式(C.52)，函数图如图 C.5 所示。

$$R(t)=\exp\left[-\int_0^t \lambda'(t')\right]\mathrm{d}\,t' \qquad \cdots\cdots(\text{C.52})$$

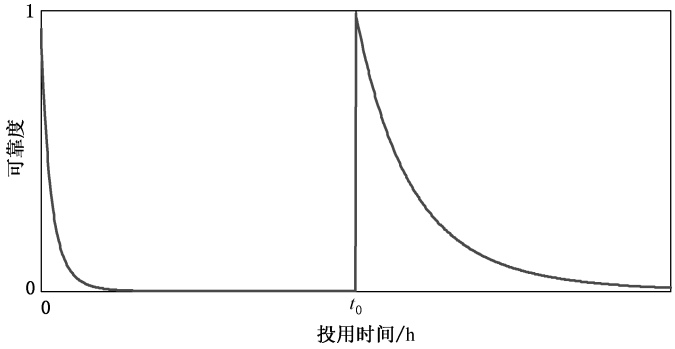
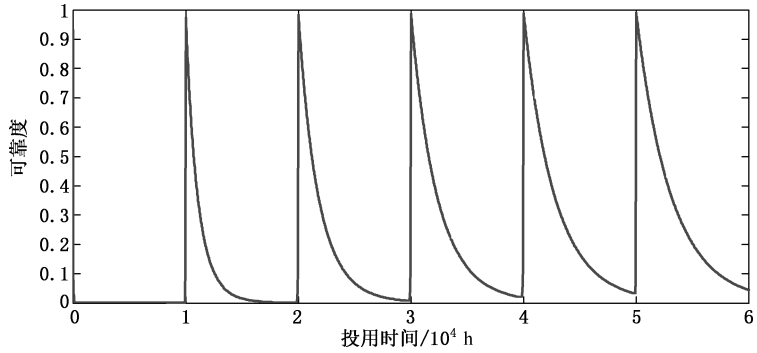
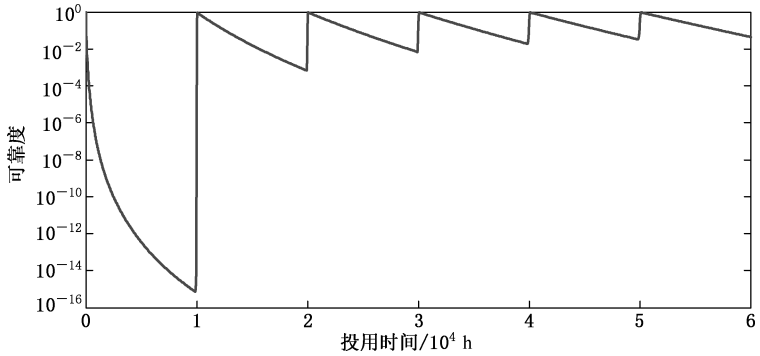


图 C.5　故障并维修如新后可靠度函数

为了更加详细说明故障后维修情形，以每 10 000 h 发生一次故障并维修如新为例，做出可靠度函数图，如图 C.6 所示，分图 a)纵坐标为线性坐标，分图 b)纵坐标为对数坐标。



a)　纵坐标为线性坐标



b)　纵坐标为对数坐标

图 C.6　每 10 000 h 发生一次故障并维修如新情况

参 考 文 献

[1] GB/T 19624 在用含缺陷压力容器安全评定

[2] GB/T 30064—2025 金属材料 钢构件断裂评估中裂纹尖端张开位移(CTOD)断裂韧度的拘束损失修正方法

[3] SY/T 6597 油气管道内检测技术规范