# 系统失效率预计与 MTBF 计算方法研究

孙永朋

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550009

【摘　要】：系统失效率预计与 MTBF 计算是可靠性工程中连接设计预测、试验验证和运行维护的重要环节。针对工程应用中基准失效率来源不一、环境应力折算边界模糊、系统结构组合口径混用以及小样本 MTBF 点估计偏乐观等问题，本文分析元器件失效率预计、串并联系统建模、环境修正、寿命试验反推、现场故障统计和置信限判定等方法要点。MTBF 计算不能脱离恒定失效率或 HPP 假设，可靠性框图、有效故障定义和累计运行时间应保持一致；故障次数较少或零故障条件下，以置信下限约束工程结论。通过形成预测、试验、统计和回写闭环，可提高失效率预计与 MTBF 指标在系统维护和可靠性验收中的解释力。

【关键词】：系统失效率；MTBF；可靠性预计；置信限；可靠性框图

DOI:10.12417/3041-0630.26.13.018

## 引言

系统可靠性评价常以失效率和 MTBF 作为核心指标，但两者在工程使用中容易被简化为互为倒数的静态数值。实际上，失效率预计涉及器件数据源、环境应力修正、系统结构组合和统计口径；MTBF 计算则依赖运行时间、故障次数、置信限和故障判据。只有把设计阶段预计与运行阶段统计放在同一对象层级、同一任务剖面和同一故障判据下校核，才能形成可解释的可靠性判断依据。

## 1 失效率预计理论的适用性

### 1.1 元器件基准失效率预计的数据来源

系统失效率预计首先取决于元器件基准失效率来源一致性[1]。基准值可来自手册、厂家资料、历史运行记录或专项验证，但进入同一系统模型前必须统一失效定义、任务阶段和统计口径。若把瞬时故障、维修更换和环境诱发异常混为同一事件，后续 MTBF 会失去解释边界。工程应用宜先确认对象层级，再说明器件级、组件级和系统级口径的传递关系；对关键器件还要核对批次、降额状态和工作循环，避免把静态额定值直接当作动态任务剖面下的运行失效率。

### 1.2 串并联系统失效率组合建模规则

串并联系统的失效率组合不能只做数值相加[2]。串联系统通常关注任一关键单元失效造成的任务中断；并联系统则要说明冗余切换、共因失效和维修恢复条件。若备用单元不具备自动切换能力，或共用电源、散热和控制通道存在共同失效源，简单并联会高估可靠性。建模时应先画清功能链路，再判断失效是否会立即传递到系统任务；对旁路、降级运行和人工切换环节，应单独说明其进入 MTBF 计算的条件。这种处理能让模型输出对应真实任务中断机制，而不是停留在模块名单层面的静态相加。

### 1.3 环境应力修正系数折算适用条件

环境应力修正系数用于把基准失效率折算到目标工况。温度、振动、湿度、电应力和负载波动会改变失效机理，修正前必须判断基准条件与现场条件是否同类。若应力水平已经越过器件额定边界，系数折算不能替代结构设计或降额设计。较稳妥的做法是把任务剖面拆成启动、稳定运行、冲击扰动和停机恢复等阶段，分别核对主导失效机理；只有机理相同且应力区间可比时，修正后的失效率才适合继续参与系统组合。在多工况设备中，修正系数还应与实际负载持续时间配合使用，避免把短时冲击条件长期化，也避免把温和工况下的基准值直接迁移到高应力场景。

### 1.4 寿命运行数据反推预计条件

寿命运行数据可反推失效率，但前提是样本来源、观察窗口和失效判据稳定。早期故障、偶发操作失误和磨耗期退化会改变风险率形态，若直接并入恒定阶段计算，MTBF 会被拉低或抬高。可靠做法是先区分寿命阶段，再用故障间隔、维修记录和运行时长校核预计参数。对于可修系统，还应确认维修后是否恢复到近似初始状态；若维修只恢复部分功能，后续间隔就不宜与新件状态混合统计。若缺少维护恢复状态记录，反推结果只能作为预计参数的校核线索，不能直接替代设计阶段的基准失效率选择。

## 2 工程层面 MTBF 计算方法的适用性

### 2.1 恒定失效率假设下 MTBF 换算关系

恒定失效率假设下，MTBF 与失效率可以形成倒数型换算关系[3]。该关系适合风险率近似平稳的任务阶段，用于把预计失效率转化为可读的平均故障间隔。若系统处在早期筛选、磨耗退化或维护策略频繁变化阶段，则应说明模型不再承担寿命承诺，只能作为阶段性比较指标。换算结果还要与任务时间、维护周期和故障后果一起解释；同一个 MTBF 数值，在连续运

行设备和间歇运行设备中代表的风险含义并不相同。这种限定能让 MTBF 成为阶段可靠性沟通工具，而不是脱离故障机理的单一评价标签。

### 2.2 可靠性框图中的 MTBF 分配计算步骤

可靠性框图先把元器件失效率库、环境应力修正、现场故障数据和寿命运行数据汇入失效率预计，再按系统结构组合形成等效输入，随后进入 MTBF 计算、置信限判定和参数回写[4]。实际分配时，应把关键功能链路、冗余路径和公共支撑模块分开，避免把局部模块平均值直接当作整机 MTBF。左侧四类输入分别对应基准数据、工况修正、现场反馈和寿命边界，中部节点表示模型化预计，右侧节点则表示计算结果如何经过统计判定回到参数体系。图 1 用于说明失效率预计输入、系统结构组合、MTBF 计算、置信限判定和参数回写的衔接关系。

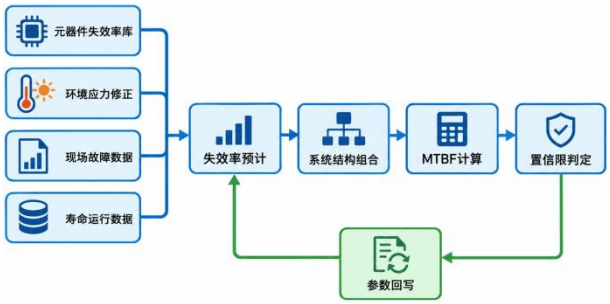



图 1 系统失效率预计与 MTBF 计算流程

图 1 中，元器件失效率库、现场故障数据和寿命运行数据先进入失效率预计环节，环境应力修正使基准数据贴近目标工况，系统结构组合决定等效失效率，再由 MTBF 计算和置信限判定给出可解释结果；底部参数回写说明现场统计值应反向修正预测参数。

### 2.3 现场故障间隔数据统计处理

现场故障间隔数据统计要先清洗事件边界。独立故障、重复报警、维修复现、计划停机和外部供电中断不能使用同一计数规则；运行时长也应扣除不承担任务的停放或检修窗口。统计口径稳定后，才可把故障间隔用于 MTBF 估计，并与失效率预计形成闭环校核。对于多台同型设备，还应区分并行运行、轮换值守和备用待命状态，不能只把日历时间相加；对同一故障链上的连续报警，应按根因归并后再进入故障次数。经过清洗的数据还要保留故障原因、维修动作和恢复确认记录，使后续参数回写能够追溯到具体失效链条。

### 2.4 小样本置信限下 MTBF 误差判定依据

小样本条件下，MTBF 点估计容易被少数长间隔或短间隔影响。NIST 可靠性手册的恒定修复率示例给出一组按小时计的方法校核值：总运行时间为 800，失效次数为 2，MTBF 点估计为 400，双侧置信区间下限为 127、置信区间上限为 2251。该示例说明，同一个点估计在小样本下会对应很宽的可信范围。工程判定应同时关注置信限、任务风险和故障后果，而不是只比较一个平均值。若置信下限低于任务要求，即使点估计较高，也应把结论写成需要继续跟踪或补充样本，避免把统计偶然性解释为系统能力。对安全关键系统，还应把故障严重度和维修可达性纳入解释；对一般保障设备，则可把置信边界作为维护策略调整和备件配置的依据。

## 3 结语

系统失效率预计与 MTBF 计算应以同一故障判据、同一运行边界和同一统计口径为基础。元器件基准失效率提供初值，可靠性框图明确组合关系，环境应力修正解决工况迁移，寿命运行与现场故障数据则用于修正预测偏差。恒定失效率条件下，MTBF 可由总运行时间和有效故障次数估计，但小样本和零故障情形必须引入置信限解释。工程应用中，预测值不宜单独作为可靠性承诺，只有与试验点估计、置信下限和现场回写机制结合，才能支撑维护优化、备件配置和可靠性验收。后续应用中，应把元器件基准值、环境修正、现场故障间隔和置信限结果作为同一条证据链管理，避免只保留单个 MTBF 数字而丢失模型假设。

## 参考文献：

[1] 田恺,赵勇,陈新伟,等.基于 MTBF 的电推进羽流诊断系统可靠性预计与试验[J].真空与低温,2024,30(6):644-650.

[2] 廉长亮,王星妍,郑艺.电子设备 MTBF 可靠性试验的方法研究与应用[J].通信管理与技术,2023,(4):23-26.

[3] 尹宝石,潘翼,周国强,等.基于高斯的飞机 MTBF 和 MTTR 变化趋势研究与应用[J].飞机设计,2024,44(5):40-44.

[4] 张国华,李晓东,高喜超.MTBF 在设备维护考核中的应用[J].设备管理与维修,2023,(22):1-2.