

中国指挥与控制学会

中国指挥与控制学会“复杂系统可靠性与安全性”系列

5项团体标准发布公告

中国指挥与控制学会根据《中国指挥与控制学会团体标准管理办法》规定，对中国指挥与控制学会可靠性系统科学与工程专业委员会负责的《产品可靠域实验》《产品退化律实验》《确信可靠性分配》《卫星通信网络可靠性和可用性评估》《通信网络可靠性试验通用方法》等五项团体标准进行了立项、征求意见、评审等工作。将在全国团体标准信息平台上进行发布。现予以公告，公告期为10个工作日，联系方式：cicc_tb@c2.org.cn。

具体内容见附件1-附件5。

特此公告



中国指挥与控制学会团体标准

T/CICC 35010—2026

产品可靠域实验

Product reliable region experiment

2026-06-30 发布

2026-06-30 实施

中国指挥与控制学会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语与定义	1
4 通用要求	1
4.1 工作输入	1
4.2 实验变量的分类	1
4.3 实验前准备	2
4.3.1 实验大纲	2
4.3.2 实验样品的一致性要求	2
4.3.3 实验设备与测试仪器	2
4.4 注意事项	2
5 技术方法	2
5.1 学科交叉方程确认实验	2
5.1.1 实验目的	2
5.1.2 干预变量与控制变量	3
5.1.3 观测变量	3
5.1.4 实验时间	3
5.1.5 参数辨识与方程验证	3
5.2 性能极限确认实验	4
5.2.1 实验目的	4
5.2.2 干预变量与控制变量	4
5.2.3 实验样品数量	4
5.2.4 观测变量	4
5.2.5 实验时间	4
5.2.6 性能极限判据	4
5.3 实验报告	5
附录A (资料性) 学科交叉方程的未知参数辨识方法	6
附录B (资料性) 学科交叉方程的验证方法	7
附录C (资料性) 锂离子电池的可靠域实验示例	9
附录D (资料性) 配电器的可靠域实验示例	12

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。

本文件由中国指挥与控制学会提出并归口。

本文件起草参与单位：北京航空航天大学、深圳市为民可靠性系统工程研究院、杭州市北京航空航天大学国际创新研究院（北京航空航天大学国际创新学院）、厦门蓝威可靠性系统工程研究院有限公司、四川航天系统工程研究所、中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所、兰州空间技术物理研究所、北京卫星环境工程研究所、宁德时代新能源科技股份有限公司、中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所、中国飞行试验研究院、国家电网有限公司直流技术中心、深圳市正浩创新科技有限公司、深圳市奥伦德元器件有限公司、中国空空导弹研究院、山东芯赛思电子科技有限公司、中国航天空气动力技术研究院、北京天宇航天新材料科技有限公司、怀柔实验室、北京海博思创科技股份有限公司、中国船舶集团有限公司综合技术经济研究院、北京罗克维尔科技有限公司。

本文件主要起草人：李晓阳、陈文彬、孙富强、陶昭、陈世舜、康锐、张清源、祖天培、阮进喜、陈玉冰、陈怡宇、李喜喜、刘东、贾艳辉、何贝琛、汤耀宇、屈重君、连晓棠、苏明、陕华平、向云、马明来、李华府、齐敏、黄帅、苏周、刘杰、张宪坤、杨诚、闫戈、于浩。

产品可靠域实验

1 范围

本文件规定了产品可靠域实验的要求和方法，用于制定实验方案，基于实验数据，验证产品的学科交叉方程并摸清性能极限。可靠域实验同时可以代替可靠性强化试验，快速激发产品潜在设计、工艺缺陷，确定产品薄弱环节，通过设计改进提高产品可靠性水平。

本文件适用于新研产品在研发生产阶段建立可靠性学科方程时使用，也可供已投入使用的产品进行可靠性评价时参照。

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。

T/CICC 35001—2025	确信可靠性术语
T/CICC 35002—2025	功能、性能及裕量分析
T/CICC 35004—2025	确信可靠性建模与预计

3 术语与定义

T/CICC 35001—2025 确立的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

学科交叉方程确认实验 **interdisciplinary equation confirmation experiment**

用于验证并确认学科交叉方程的实验。

3.2

性能极限确认实验 **performance limit confirmation experiment**

用于确认产品性能弹性极限和性能破坏极限的实验。

3.3

实验样品 **experimental sample**

基于不同设计方案和工艺方案组合得到的可备选的产品。

4 通用要求

4.1 工作输入

开展产品可靠域实验工作前，应做好以下工作输入：

- 根据 T/CICC 35002—2025 完成产品的功能、性能及裕量分析；
- 根据 T/CICC 35004—2025 完成产品的学科交叉方程建立。

4.2 实验变量的分类

根据 T/CICC 35004—2025，产品的学科交叉方程如公式(1)所示：

$$P = f(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \quad (1)$$

式中：

- P —— 性能参数；
- X —— 内因变量；
- Y —— 外因变量；
- $f(\cdot)$ —— 描述 X 和 Y 与 P 之间定量关系的函数。

可靠域实验中应将学科交叉方程的输入、输出变量划分为控制变量、干预变量和观测变量，具体如下：

- a) 控制变量是在实验中受控保持不变的输入变量 X 和 Y ；
- b) 干预变量是在实验中受控变化的输入变量 X 和 Y ；
- c) 观测变量是在实验中受控观测的输出变量 P ，以及输入变量 X 和 Y 的性能极限。

4.3 实验前准备

4.3.1 实验大纲

可靠域实验大纲应至少包括以下内容：

- a) 实验目的；
- b) 实验产品说明和要求；
- c) 实验方案；
- d) 实验设备和测试仪器的要求；
- e) 实验产品测试项目；
- f) 实验报告要求等。

4.3.2 实验样品的一致性要求

各实验样品的功能和性能参数应与产品的设计要求和工艺要求保持一致，并符合相关规范要求。

4.3.3 实验设备与测试仪器

实验设备与测试仪器应满足以下要求：

- a) 实验设备应能保证产生和保持实验所需的实验条件，经检定合格并在有效期内；
- b) 测试仪器仪表应经计量合格并在有效期内，测量精度满足实验要求；
- c) 实验夹具应不影响实验产品的固有特性及所承受的应力，并能提供合适的振动传输率、热均匀性和均衡的温度变化率等。

4.4 注意事项

可靠域实验应注意：

- a) 每种实验样品数至少为 1 个；
- b) 在实验样品数量有限的条件下，应首先确保确认外因变量的性能弹性极限；
- c) 若外因干预变量的类型数目为 1 个时，则只需开展学科交叉方程确认实验，并直接通过其寻找摸清外因干预变量的性能极限；
- d) 若外因干预变量的类型数目大于等于 2 个时，应注意首先开展学科交叉方程确认实验，再开展每一类外因干预变量的性能极限确认实验。

5 技术方法

5.1 学科交叉方程确认实验

5.1.1 实验目的

学科交叉方程确认实验的目的包括：

- a) 辨识学科交叉方程中的未知参数；
- b) 验证输入变量 X 和 Y 与输出变量 P 之间函数关系的正确性。

5.1.2 干预变量与控制变量

5.1.2.1 干预变量与控制变量的确定

干预变量与控制变量的确定方式如下：

- a) 若实验样品只有一种，则应在实验前对输入变量 \mathbf{X} 中的所有元素进行测试记录，在实验中将其视为控制变量；若实验样品有多种，则应在实验前对每种实验样品的输入变量 \mathbf{X} 中的所有元素进行测试记录，在实验中将其视为干预变量。
- b) 应尽可能将输入变量 \mathbf{Y} 中所有元素同时作为干预变量开展实验。若实验条件不允许，可将部分元素作为干预变量，剩余元素作为控制变量。

5.1.2.2 干预变量的取值

各干预变量的取值应遵循以下原则：

- a) 每一种实验样品的干预变量 \mathbf{X} 中各元素的实测值为干预变量 \mathbf{X} 的一组取值，多种实验样品即为多组取值；
- b) 干预变量 \mathbf{Y} 中各元素的取值由产品的典型使用场景和设计要求确定，取值数越多越好，一般不应少于5个；
- c) 干预变量 \mathbf{Y} 中各元素的取值范围应最大可能地覆盖典型使用场景分析结果中 \mathbf{Y} 中各元素的值；
- d) 应根据学科交叉方程的性质（如线性、非线性）合理设置干预变量 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 中各元素的取值间隔；
- e) 随着实验的开展，可对干预变量 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 中各元素的取值进行更新。

5.1.3 观测变量

5.1.3.1 观测变量的确定

观测变量应包括：

- a) 输出变量 P ；
- b) 与输出变量 P 相关的功能、性能参数。

5.1.3.2 观测变量的测试

实验中，观测变量的测试应符合以下要求：

- a) 尽可能多次测试，每组干预变量取值下至少开展3次测试；
- b) 若实验中发生故障，可对实验样品进行修复，并在不改变实验样品的状态的前提下，重新进行测试；若不对实验样品进行修复，则实验中止。

5.1.4 实验时间

实验时间的确定方法如下：

- a) 每组干预变量取值下的实验持续时间包括干预变量和控制变量的稳定时间和观测变量的测试时间；
- b) 实验总时间根据实验样品数、每组干预变量取值下的实验持续时间、实验设备和测试设备能力综合估算。

5.1.5 参数辨识与方程验证

5.1.5.1 未知参数辨识

针对实验数据进行回归分析，辨识学科交叉方程中的未知参数，具体方法可参见附录A。

5.1.5.2 学科交叉方程验证

根据已完成参数辨识的学科交叉方程，按照实验施加的干预变量和控制变量的取值，计算产品的性能参数，并从确定性趋势和不确定性包络两个方面，拟定正确性判据。依据判据，将学科交叉方程的计算结果与实验结果进行对比，给出方程验证是否通过的结论，具体方法可参见附录B。

5.2 性能极限确认实验

5.2.1 实验目的

性能极限确认实验的目的为确认产品性能弹性极限和性能破坏极限。

5.2.2 干预变量与控制变量

5.2.2.1 干预变量与控制变量的确定

同本文件第 5.1.2.1 条。

5.2.2.2 干预变量的施加方式

干预变量采取步进施加方式，即实验中干预变量 X 或 Y 中某个元素的取值随实验时间步进增加，施加方式如图 1 所示。

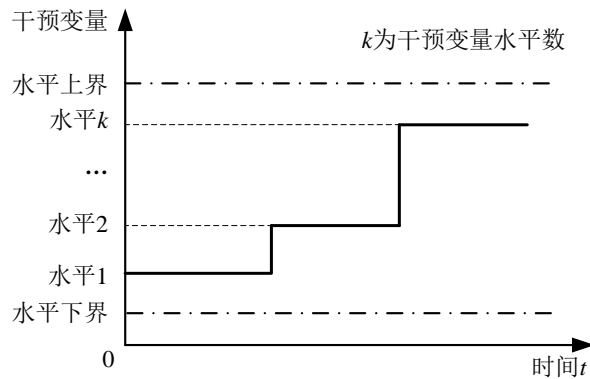


图 1 干预变量步进施加方式

5.2.2.3 干预变量的取值

各干预变量的取值应遵循以下原则：

- 每一种实验样品的干预变量 X 中各元素的实测值为干预变量 X 的一组取值，多种实验样品即为多组取值；
- 干预变量 Y 中各元素的取值应依据极限使用场景分析结果中 Y 中各元素的值确定；
- 越接近产品干预变量 X 和 Y 中某个元素的性能极限，取值的步长越短。

5.2.3 实验样品数量

每一种干预变量 X 和 Y 中各元素的性能极限应至少投入 1 个实验样品，也可以按实验中对样品损伤的程度，决定是否可共用实验样品。

5.2.4 观测变量

5.2.4.1 观测变量的确定

同本文件第 5.1.3.1 条。

5.2.4.2 观测变量的测试

同本文件第 5.1.3.2 条。

5.2.5 实验时间

同本文件第 5.1.4 条。

5.2.6 性能极限判据

5.2.6.1 性能弹性极限的确认

当顺序施加的干预变量取值在某水平时，产品性能参数 P 首次不能够恢复至其性能工作极限内所对应的 P ，则干预变量前一水平取值确定为产品的性能弹性极限。

5.2.6.2 性能破坏极限的确认

当顺序施加的干预变量取值在某水平时，产品性能参数 P 消失，则干预变量当前水平取值确定为产品的性能破坏极限。

5.3 实验报告

实验结束后，应根据实验的各项原始记录，编制正式实验报告。实验报告至少应包括以下内容：

- a) 实验目的；
- b) 实验依据的标准和文件；
- c) 实验地点、日期和参加人员；
- d) 实验对象说明；
- e) 学科交叉方程与可靠域实验变量；
- f) 可靠域实验方案的制定；
- g) 实验设备和测试仪器的说明；
- h) 实验实施过程；
- i) 实验数据及分析结果；
- j) 实验结论等。

附录 C 和附录 D 给出了锂离子电池和配电器的可靠域实验示例。

附录 A
(资料性)
学科交叉方程的未知参数辨识方法

根据 T/CICC 35004—2025，结合可靠域实验中的控制变量、干预变量和观测变量，产品的学科交叉方程可写作公式(A.1)：

$$P = f(\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i | \mathbf{X}_c, \mathbf{Y}_c, \boldsymbol{\theta}) \quad (\text{A.1})$$

式中：

- P —— 性能参数；
- \mathbf{X}_i —— 内因干预变量；
- \mathbf{X}_c —— 内因控制变量；
- \mathbf{Y}_i —— 外因干预变量；
- \mathbf{Y}_c —— 外因控制变量；
- $\boldsymbol{\theta}$ —— 待估参数， $\boldsymbol{\theta} = (\boldsymbol{\theta}_d, \boldsymbol{\theta}_u)$ ，其中， $\boldsymbol{\theta}_d$ 为确定性部分的待估参数， $\boldsymbol{\theta}_u$ 为不确定性部分的待估参数；

$f(\cdot)$ —— 描述内因变量 $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_c)$ 和外因变量 $\mathbf{Y} = (\mathbf{Y}_i, \mathbf{Y}_c)$ 与 P 之间定量关系的函数。

记 \mathbf{S} 为干预变量， $\mathbf{S} = (\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i)$ 。

如果公式(A.1)的概率密度函数能够获得，记为 $p(\mathbf{S} | \boldsymbol{\theta})$ ，构建基于可靠域实验数据的似然函数，如公式(A.2)所示：

$$L(\boldsymbol{\theta} | \mathbf{P}) = \prod_l^k \prod_i^{n_l} p(\mathbf{s}_l, \mathbf{P} | \boldsymbol{\theta}) \quad (\text{A.2})$$

式中：

- \mathbf{s}_l —— 可靠域实验中施加的第 l 组干预变量取值， $\mathbf{s}_l = (X_{1l}, \dots, X_{ql}, Y_{1l}, \dots, Y_{rl})$ ， $l = 1, 2, \dots, k$ ，其中， X_{1l}, \dots, X_{ql} 为 q 个内因干预变量的第 l 个取值， q 为内因干预变量的数量， Y_{1l}, \dots, Y_{rl} 为 r 个外因干预变量的第 l 个取值， r 为外因干预变量的数量， k 为 \mathbf{s}_l 的组数；
- \mathbf{P} —— 可靠域实验的观测数据， $\mathbf{P} = (P_{li}, l = 1, 2, \dots, k, i = 1, 2, \dots, n_l)$ ，其中， P_{li} 为 \mathbf{s}_l 下第 i 个实验样品的观测变量值， n_l 为 \mathbf{s}_l 下的实验样品数量。

通过令公式(A.2)最大，获得待估参数的极大似然估计结果，如公式(A.3)所示：

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \arg \max_{\boldsymbol{\theta}} L(\boldsymbol{\theta} | \mathbf{P}) \quad (\text{A.3})$$

如果公式(A.1)的概率密度函数难以获得，可先基于最小二乘法估计公式(A.1)中确定性部分的待估参数 $\boldsymbol{\theta}_d$ ，如公式(A.4)所示：

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_d = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}_d} \sum_l^k \sum_i^{n_l} (f(\mathbf{s}_l | \boldsymbol{\theta}_d) - P_{li})^2 \quad (\text{A.4})$$

然后，再基于极大似然法估计公式(A.1)中不确定性部分的待估参数 $\boldsymbol{\theta}_u$ ，如公式(A.5)所示：

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_u = \arg \max_{\boldsymbol{\theta}_u} L(\boldsymbol{\theta}_u | \mathbf{P}, \hat{\boldsymbol{\theta}}_d) \quad (\text{A.5})$$

对于仅有 1—2 个实验样品的小样本情况，也可采用本方法进行统计分析。但需要注意的是，由于此类情形不具有统计意义，可不开展其中不确定性部分的参数估计。

附录 B
(资料性)
学科交叉方程的验证方法

根据已完成参数辨识的学科交叉方程，按照实验施加的干预变量和控制变量的取值，计算产品性能参数的确定性趋势和不确定性包络上下界。

产品性能参数的确定性趋势的计算方法如公式(B.1)所示：

$$\hat{P}_l^d = f(\mathbf{s}_l | \mathbf{X}_c, \mathbf{Y}_c, \hat{\boldsymbol{\theta}}_d), l = 1, 2, \dots, k \quad (\text{B.1})$$

式中：

\mathbf{s}_l —— 可靠域实验中施加的第 l 组干预变量取值， $\mathbf{s}_l = (X_{1l}, \dots, X_{ql}, Y_{1l}, \dots, Y_{rl})$ ， $l = 1, 2, \dots, k$ ，其中， X_{1l}, \dots, X_{ql} 为 q 个内因干预变量的第 l 个取值， q 为内因干预变量的数量， Y_{1l}, \dots, Y_{rl} 为 r 个外因干预变量的第 l 个取值， r 为外因干预变量的数量， k 为 \mathbf{s}_l 的组数；

\mathbf{X}_c —— 内因控制变量；

\mathbf{Y}_c —— 外因控制变量；

$\hat{\boldsymbol{\theta}}_d$ —— 确定性部分待估参数的辨识结果；

\hat{P}_l^d —— \mathbf{s}_l 下性能参数的确定性趋势的计算结果， $l = 1, 2, \dots, k$ 。

为了计算产品性能参数的不确定性包络上下界，考虑不确定性的影响，可首先基于蒙特卡洛方法对产品性能参数进行仿真计算，如公式(B.2)所示：

$$\hat{P}_l^w = f(\mathbf{s}_l | \mathbf{X}_c, \mathbf{Y}_c, \hat{\boldsymbol{\theta}}), l = 1, 2, \dots, k, w = 1, 2, \dots, N \quad (\text{B.2})$$

式中：

$\hat{\boldsymbol{\theta}}$ —— 待估参数的辨识结果， $\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\hat{\boldsymbol{\theta}}_d, \hat{\boldsymbol{\theta}}_u)$ ，其中， $\hat{\boldsymbol{\theta}}_u$ 为不确定性部分待估参数的辨识结果；

\hat{P}_l^w —— \mathbf{s}_l 下第 w 次蒙特卡洛仿真计算得到的性能参数结果， $l = 1, 2, \dots, k, w = 1, 2, \dots, N$ ，其中， N 为蒙特卡洛仿真次数，一般情况下，取 $N \geq 1000$ 。

选择合适的置信区间水平 $1 - \alpha$ ，根据产品性能参数的蒙特卡洛仿真结果，计算 \mathbf{s}_l 下的不确定性包络上下界，如公式(B.3)所示：

$$\begin{cases} \hat{P}_l^{\text{lower}} = g\left(\hat{\mathbf{P}}_l, \frac{\alpha}{2}\right) \\ \hat{P}_l^{\text{upper}} = g\left(\hat{\mathbf{P}}_l, 1 - \frac{\alpha}{2}\right) \end{cases}, l = 1, 2, \dots, k \quad (\text{B.3})$$

式中：

\hat{P}_l^{lower} —— \mathbf{s}_l 下性能参数的不确定性包络下界， $l = 1, 2, \dots, k$ ；

\hat{P}_l^{upper} —— \mathbf{s}_l 下性能参数的不确定性包络上界， $l = 1, 2, \dots, k$ ；

$\hat{\mathbf{P}}_l$ —— \mathbf{s}_l 下性能参数的蒙特卡洛仿真结果， $\hat{\mathbf{P}}_l = (\hat{P}_l^w, w = 1, 2, \dots, N), l = 1, 2, \dots, k$ ；

$g(\hat{\mathbf{P}}_l, \beta)$ —— 用于计算 $\hat{\mathbf{P}}_l$ 的 β 分位点的函数。

一般情况下，取 $\alpha = 0.1$ 。

根据学科交叉方程所计算的产品性能参数的确定性趋势和不确定性包络上下界，拟定正确性判据，以验证方程确定性趋势和不确定性包络的正确性。

对于确定性趋势的正确性判据，可采用均方根误差RMSE（见公式(B.4)）、平均绝对误差MAE（见公式(B.5)）、决定系数 R^2 （见公式(B.6)）等指标，量化学科交叉方程所计算的产品性能参数的确定性趋势对可靠域实验观测数据的样品均值的拟合效果。在工程实际中可根据各指标特征，结合学科

交叉方程的性质，选择合适的正确性判据。根据正确性判据的计算结果，给出学科交叉方程确定性趋势的验证是否通过的结论。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{l=1}^k (\hat{P}_l^{\text{d}} - \bar{P}_l)^2} \quad (\text{B.4})$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k |\hat{P}_l^{\text{d}} - \bar{P}_l| \quad (\text{B.5})$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{l=1}^k (\bar{P}_l - \hat{P}_l^{\text{d}})^2}{\sum_{l=1}^k (\bar{P}_l - \bar{P})^2} \quad (\text{B.6})$$

式中，

$$\bar{P}_l = \frac{1}{n_l} \sum_{i=1}^{n_l} P_{li} \quad (\text{B.7})$$

$$\bar{P} = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k \bar{P}_l \quad (\text{B.8})$$

对于不确定性包络的正确性判据，可采用覆盖率 CP（见公式(B.9)）、平均区间边界绝对偏差 MIBAD（包括平均区间下边界绝对偏差 MILABD 和平均区间上边界绝对偏差 MIUABD，见公式(B.10)）等指标，量化学科交叉方程所计算的产品性能参数的不确定性包络范围对可靠域实验观测数据的覆盖程度。在工程实际中可根据各指标特征，结合学科交叉方程的性质，选择合适的正确性判据。根据正确性判据的计算结果，给出学科交叉方程不确定性包络的验证是否通过的结论。

$$\text{CP} = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k I(P_{li} \in [\hat{P}_l^{\text{lower}}, \hat{P}_l^{\text{upper}}]) \quad (\text{B.9})$$

$$\begin{cases} \text{MILABD} = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k |\hat{P}_l^{\text{lower}} - P_l^{\text{min}}| \\ \text{MIUABD} = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k |\hat{P}_l^{\text{upper}} - P_l^{\text{max}}| \end{cases} \quad (\text{B.10})$$

式中，

$$P_l^{\text{min}} = \min \{P_{li}, i=1, 2, \dots, n_l\} \quad (\text{B.11})$$

$$P_l^{\text{max}} = \max \{P_{li}, i=1, 2, \dots, n_l\} \quad (\text{B.12})$$

式中：

$I(\cdot)$ —— 指示函数：若 P_{li} 在区间 $[\hat{P}_l^{\text{lower}}, \hat{P}_l^{\text{upper}}]$ 内， $I = 1$ ，否则， $I = 0$ 。

附录 C (资料性)

锂离子电池的可靠域实验示例

C.1 可靠域实验的工作输入

C.1.1 功能、性能及裕量分析

锂离子电池是储能的核心部件，广泛应用于电子设备、新能源汽车等领域。针对某锂离子电池，根据 T/CICC 35002—2025 开展了功能、性能及裕量分析，确认了锂离子电池的关键性能参数及其阈值、关键内因变量和关键外因变量，简要结果如表 B.1 所示。

表 B.1 锂离子电池的功能、性能及裕量分析简要结果

关键性能参数	影响关键性能参数的关键内外因变量		阈值
	内因变量	外因变量	
电池容量	正负极材料、电解液材料、制造工艺等	温度	70%

C.1.2 学科交叉方程构建

由于锂离子电池的结构组成复杂，电化学机理复杂，导致基于原理的学科交叉方程构建难度较大，因此本案例根据 T/CICC 35004—2025，选择基于数据驱动方法构建锂离子电池容量的学科交叉方程。根据锂离子电池的功能、性能及裕量分析结果，电池容量受到温度的影响，因此，考虑电池容量的学科交叉方程形式如公式(C.1)所示：

$$P = f(T) \quad (\text{C.1})$$

式中，

P —— 电池容量；

$f(\cdot)$ —— 电池容量的学科交叉方程；

T —— 温度。

C.1.3 可靠域实验变量

根据锂离子电池的功能、性能及裕量分析结果和所构建的学科交叉方程形式，结合实验的可控性和可测性，可以确定可靠域实验变量，如表 B.2 所示。

表 B.2 锂离子电池的可靠域实验变量

实验项目	控制变量	干预变量	观测变量
交叉方程确认实验	内因变量	温度	电池容量
性能极限确认实验	内因变量	温度	电池容量

C.2 可靠域实验方案的制定与实施

C.2.1 实验前准备工作

根据工程实际情况，实验样品数量为 8 个。由于外因干预变量只有温度，因而可只需开展学科交叉方程确认实验，并直接通过其寻找摸清温度的性能极限。

根据锂离子电池可靠域实验目的，结合学科交叉方程和可靠域实验变量，确定观测变量，包括电池容量，以及锂离子电池规范要求的其他功能、性能参数。

实验前，将实验样品安装在实验温度箱内，底部垫高以使气流顺利通过。

C.2.2 实验方案制定

根据锂离子电池的学科交叉方程和可靠域实验变量，结合工程实际情况，制定了温度步进应力实验剖面，作为锂离子电池的可靠域实验剖面：温度的起始水平为-20℃，以 20℃为步长，步进升至

60℃，再以 10℃为步长，步进升至 80℃，最后以 5℃为步长，截止水平为 100℃。实验样品在每个温度水平下，待温度稳定且实验样品达到热稳定状态（或温升曲线走势明显平稳）后，按照标准充放电倍率循环一次，测试实验样品的功能性能并记录。实验剖面如图 B.1 所示。

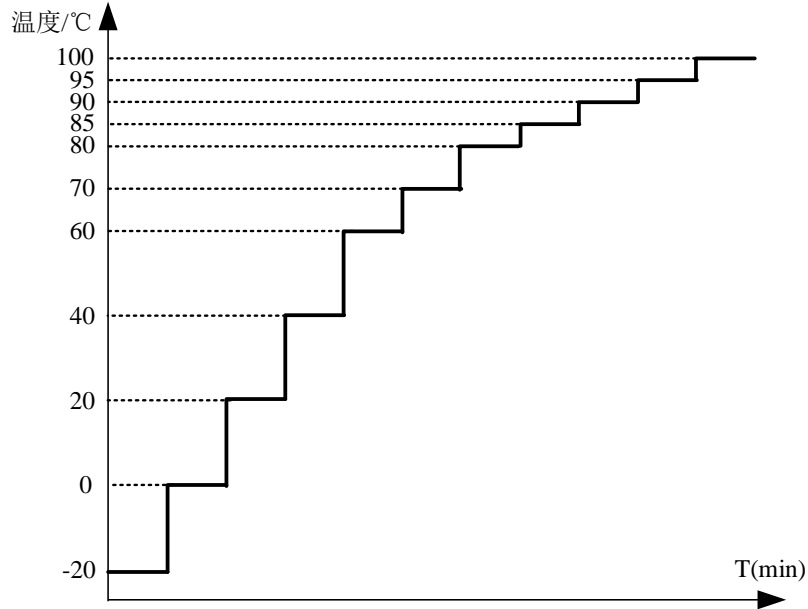


图 B.1 锂离子电池的可靠域实验剖面

C.2.3 实验实施

按照锂离子电池的可靠域实验实施方案，实施实验。实验前、中、后，按照测试要求，对锂离子电池实验样品进行全面的目视检查和功能性能参数测试，填写测试记录表。

C.3 可靠域实验结果分析

由于仅根据功能、性能及裕量分析获得了锂离子电池容量输入输出的定性关系，如公式(B.1)所示，则应首先基于可靠域实验数据，根据 T/CICC 35004—2025 第 5.1.4 条开展基于数据驱动的学科交叉方程构建，然后开展未知参数辨识、学科交叉方程验证和性能极限确认，具体如下。

C.3.1 基于数据驱动的学科交叉方程构建

由于电池容量受到温度的影响，结合现有研究，选择修正 S 型曲线模型（Logistic 模型）对电池容量的学科交叉方程进行建模，如公式(B.2)所示：

$$\tilde{P} = \frac{A}{1 + e^{-k(T-T_0)}} + B + \tilde{\delta} \quad (\text{B.2})$$

式中，

\tilde{P} —— 电池容量，其上标波浪线表示包含不确定性；

T —— 温度；

A —— 模型参数；

B —— 模型参数；

k —— 模型参数；

T_0 —— 模型参数；

$\tilde{\delta}$ —— 不确定性项，其主要由生产、制造、装配等过程中的不确定性导致的，假设 $\tilde{\delta}$ 服从正态概率分布，即 $\tilde{\delta} \sim N(0, \sigma^2)$ ， σ 为标准差。

根据电池容量的学科交叉方程，待估参数包括 $\theta = (A, B, k, T_0, \sigma)$ 。

C.3.2 未知参数辨识

首先，设置锂离子电池的可靠域实验参数：实验中设置了从 -20°C 至 80°C 的 $k = 7$ 个温度应力水平，在第 l 个温度应力水平 T_l 下，投入了 $n = 8$ 个锂离子电池实验样品进行测试，对于第 i 个实验样品，记录了电池容量 P_{li} ， $l = 1, 2, \dots, k, i = 1, 2, \dots, n$ 。上述可靠域实验的观测数据记为 D 。

基于可靠域实验数据 D ，根据电池容量的概率分布，可以获得 θ 的似然函数，如公式(B.3)所示：

$$L(\theta|D) = \sum_{l=1}^k \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\left(P_{li} - \left(\frac{A}{1 + e^{-k(T-T_0)} + B}\right)\right)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (\text{B.3})$$

基于公式(B.3)进行极大似然估计，通过令公式(B.3)最大，可以得到 θ 的极大似然估计结果，如表B.3所示。

表 B.3 锂离子电池容量的学科交叉方程中未知参数的估计结果

参数	A	B	k	T_0
估计结果	-354.3960	287.7836	0.0085	34.6875

C.3.3 学科交叉方程验证

为了验证锂离子电池容量的学科交叉方程的准确性，首先，计算方程确定性趋势的拟合 R^2 ，结果为 $R^2 = 0.9501$ ，这表明方程预测的确定性趋势比较准确。

进一步地，分析锂离子电池容量的学科交叉方程的不确定性量化结果。首先，绘制误差项 $\tilde{\delta}$ 的残差QQ图，结果如图B.2(a)所示，可以发现残差QQ图基本呈线性关系，这表明基于正态概率分布对误差项 $\tilde{\delta}$ 的量化是合理的。进一步地，对比电池容量的学科交叉方程预测的90%置信上下界与实验数据，如图B.2(b)所示，可以发现，方程预测的上下界很好地包络了90%以上的数据点，这表明方程具有较高的预测精度。

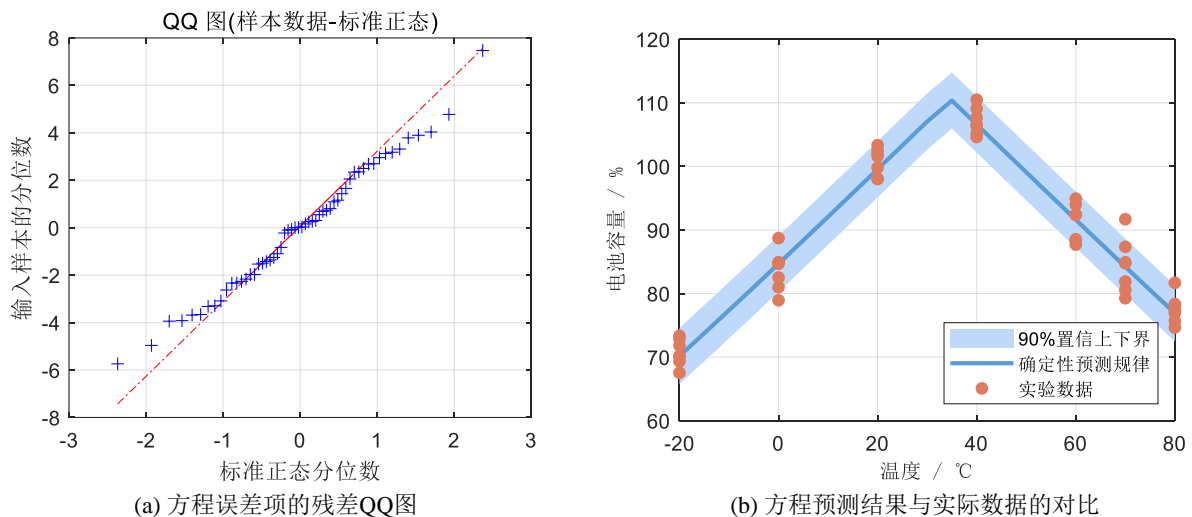


图 B.2 锂离子电池容量的学科交叉方程的实验验证结果

综上，所构建的锂离子电池容量的学科交叉方程通过了实验验证，确定性规律和不确定性的量化均具有较高的精度。

C.3.4 性能极限确认

锂离子电池实验样品在 85°C 之前，当温度从实验条件恢复至其性能工作极限内，电池容量也恢复至其性能工作极限内的状态；在 90°C 时，实验样品出现鼓包现象，电池容量降低，不满足阈值要求。由此确认锂离子电池温度的性能弹性极限和性能破坏极限均介于 85°C 和 90°C 之间。

附录 D

(资料性)

配电器的可靠域实验示例

D.1 可靠域实验的工作输入

D.1.1 功能、性能及裕量分析

配电器用于分配和管理电力资源，将输入电能合理分配给多个设备，确保各设备获得稳定且适配的电压和电流。针对某配电器，根据 T/CICC 35002—2025 开展了功能、性能及裕量分析，确认了配电器的关键性能参数及其阈值、关键内因变量和关键外因变量，简要结果如表 C.1 所示。

表 C.1 配电器的功能、性能及裕量分析简要结果

关键性能参数	影响关键性能参数的关键内外因变量		阈值
	内因变量	外因变量	
热性能	材料的热导率、比热容、结构拓扑等	电应力、温度	需满足环境条件要求，基于可靠域实验确定
振动性能	材料的弹性模量、质量、泊松比、结构拓扑等	振动	
效率	电路拓扑、元器件的电阻率等	电应力、温度	90%

D.1.2 学科交叉方程构建

针对配电器关键性能参数（热性能、振动性能和效率），分别构建了学科交叉方程，具体如下。

D.1.2.1 热性能的学科交叉方程

基于配电器的 CAD 文件进行了有限元仿真建模，结果如图 C.1 所示。

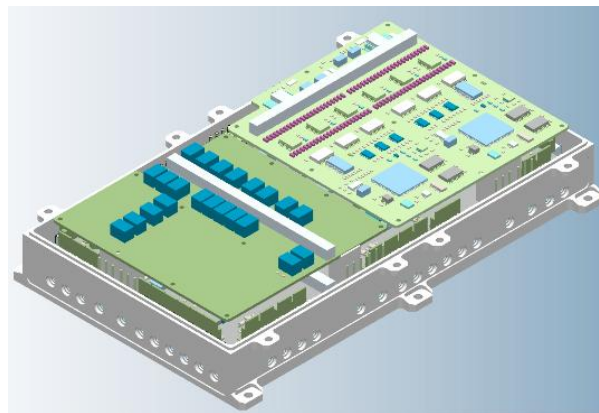


图 C.1 配电器的整机三维有限元仿真模型

根据配电器的使用规格书，设置主要功率器件的热耗参数，如表 C.2 所示。

表 C.2 配电器中部分功率器件热耗统计表

序号	型号规格	位号	热耗（极端工况）/W	热耗（典型工况）/W
1	SQP90P06-07L	Q7-Z1	0.53	0.3
2	SQP90P06-07L	Q7-Z2	0.17	0.08
.....

基于关键区域局部加密的方式，对配电器有限元仿真模型进行网格划分，从而获得配电器的热性能仿真模型，即配电器热性能的学科交叉方程，如图 C.2 所示。

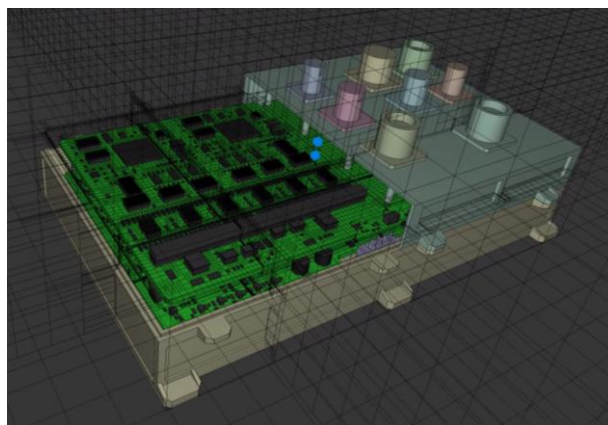


图 C.2 配电器的热性能仿真模型

D.1.2.2 振动性能的学科交叉方程

基于配电器的有限元仿真模型，以自由剖分的实体单元为主，使用四面体与六面体结合的方式进行网格划分，获得配电器的振动性能仿真模型，即配电器振动性能的学科交叉方程，如图 C.3 所示。

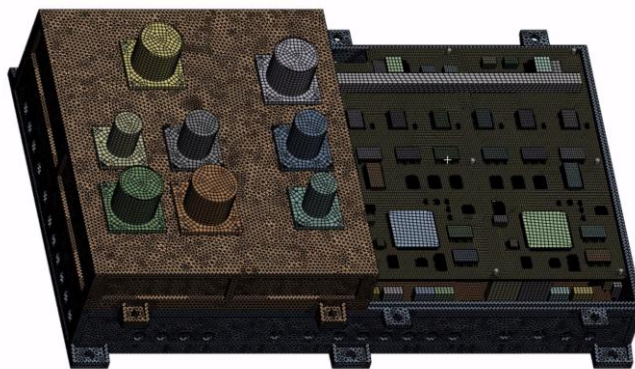


图 C.3 配电器的振动性能仿真模型

D.1.2.3 效率的学科交叉方程

配电器的效率难以开展基于工作原理的建模，因此本案例根据 T/CICC 35004—2025，选择基于数据驱动方法构建配电器效率的学科交叉方程。根据配电器的功能、性能及裕量分析结果，配电器效率受到电应力和温度的影响，因此，考虑配电器效率的学科交叉方程形式如公式(D.1)所示：

$$\eta = f(T_e, P_d) \quad (D.1)$$

式中，

η —— 效率；

$f(\cdot)$ —— 效率的学科交叉方程；

T_e —— 温度；

P_d —— 输入功率；

D.1.3 可靠域实验变量

根据配电器的功能、性能及裕量分析结果和所构建的学科交叉方程，结合实验的可控性和可测性，可以确定可靠域实验变量，如表 C.3 所示。

表 C.3 配电器的可靠域实验变量

实验项目	变量类型	控制变量	干预变量	观测变量
学科交叉方程确认实验	热性能	内因变量、输入功率	温度	内部最高温度
	振动性能	内因变量	振动	振动响应
	效率	内因变量	输入功率、温度	效率
性能极限确认实验	热性能	内因变量、输入功率	温度	内部最高温度
	振动性能	内因变量	振动	振动响应
	效率	内因变量	输入功率、温度	效率

D.2 可靠域实验方案的制定与实施

D.2.1 实验前准备工作

根据工程实际情况，实验样品数量为 1 个。考虑学科交叉方程确认实验对实验样品的损伤程度较小，因而学科交叉方程确认实验和性能极限确认实验共用同一个实验样品。

根据配电器可靠域实验目的，结合学科交叉方程和可靠域实验变量，确定观测变量，包括内部最高温度、振动响应、效率，以及配电器规范要求的其他功能、性能参数。

在外因干预变量为温度的实验前，将实验样品安装在实验温度箱内，底部垫高以使气流顺利通过，取走实验样品的外盖，将其暴露在充足的气流量下。在外因干预变量为振动的实验前，用夹具将实验样品安装在振动台上。

D.2.2 学科交叉方程确认实验方案制定

根据配电器的学科交叉方程和可靠域实验变量，结合工程实际情况，在配电器的学科交叉方程确认实验中设置了三个剖面，具体如下。

D.2.2.1 温度和输入功率的步进应力实验剖面

温度的起始水平为 -20°C ，以 20°C 为步长，截止水平为 80°C ；每个温度水平下设置两个输入功率水平：900W 和 1800W。实验样品在实验过程中持续通电。在每个温度和输入功率水平下，待温度稳定且实验样品达到热稳定状态（或温升曲线走势明显平稳）后，对实验样品的功能性能进行测试记录。实验剖面如图 C.4 所示。

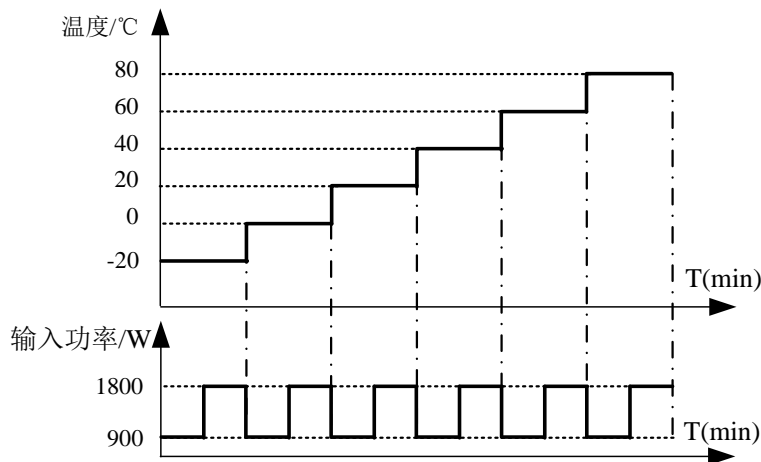


图 C.4 配电器的温度和输入功率的步进应力实验剖面

D.2.2.2 振动扫频实验剖面

对实验样品进行对数正弦扫频方式下的振动响应测试，实验设置要求：扫描率为 $1\text{oct}/\text{min}$ ，定加速度 1g ，扫描范围为 $10\text{Hz}\sim 2000\text{Hz}$ 。

D.2.2.3 振动步进应力实验剖面

采用电磁振动台开展振动步进应力实验，振动谱型采用配电器环境试验的功能实验谱。振动应力的起始水平为 1Grms，以 2Grms 为步长，截止水平为 9Grms。实验样品在实验过程中持续通电。每个振动水平台阶保持时间不少于 10min 后，对实验样品的功能性能进行测试记录。实验剖面如图 C.5 所示。

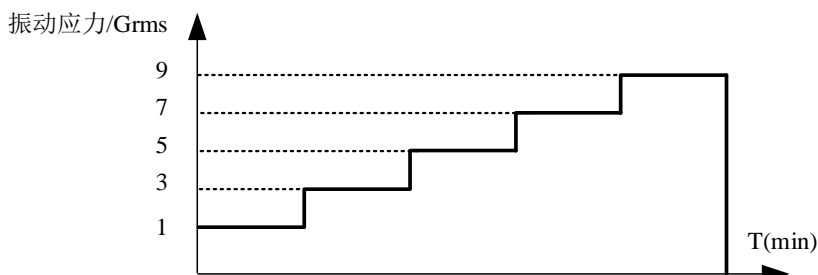


图 C.5 配电器的振动步进应力实验剖面

D.2.3 性能极限确认实验方案制定

根据配电器待寻找摸清的性能极限和可靠域实验变量，结合工程实际情况，在配电器的性能极限确认实验中设置了五个剖面，具体如下。

D.2.3.1 高温应力极限确认实验剖面

温度的起始水平为 75℃，以 5℃为步长，截止水平为 110℃；输入功率水平设置为 1800W。实验样品在实验过程中持续通电。在每个温度水平下，待温度稳定且实验样品达到热稳定状态（或温升曲线走势明显平稳）后，对实验样品的功能性能进行测试记录。实验剖面如图 C.6 所示。

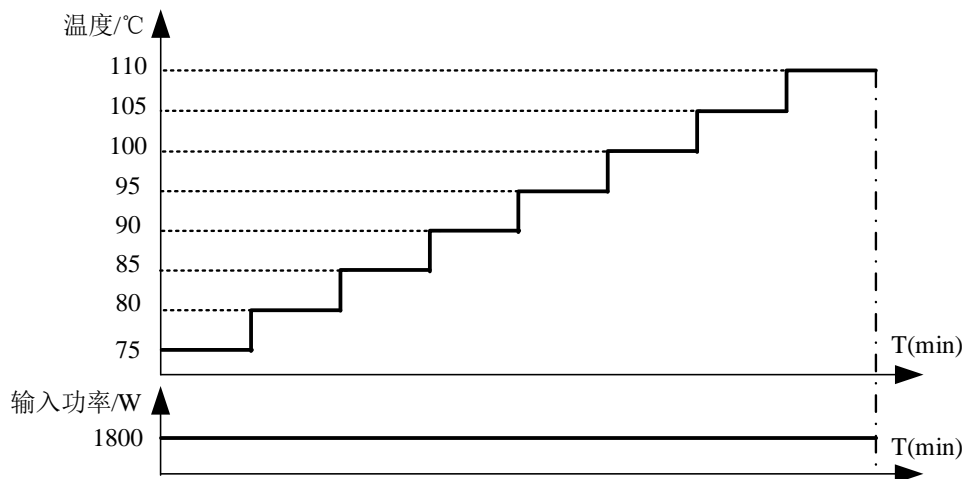


图 C.6 配电器的高温应力极限确认实验剖面

D.2.3.2 低温应力极限确认实验剖面

温度的起始水平为-15℃，以-5℃为步长，截止水平为-50℃；输入功率水平设置为 900W。实验样品在实验过程中持续通电。在每个温度水平下，待温度稳定且实验样品达到热稳定状态（或温升曲线走势明显平稳）后，对实验样品的功能性能进行测试记录。实验剖面如图 C.7 所示。

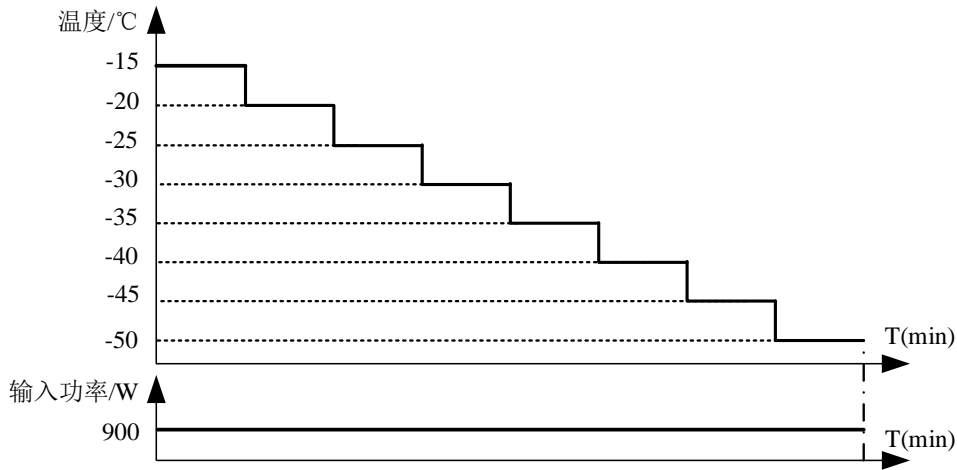


图 C.7 配电器的低温应力极限确认实验剖面

D. 2. 3. 3 快速温度变化实验剖面

温度的低温水平-45℃，高温水平 105℃，温度变化速度 15℃/min；输入功率在高水平 1800W 和低水平 900W 之间循环，共计 5 个循环。实验样品在实验过程中持续通电。在每个温度和输入功率水平下，待温度稳定且实验样品达到热稳定状态（或温升曲线走势明显平稳）后，对实验样品的功能性能进行测试记录。实验剖面如图 C.8 所示。

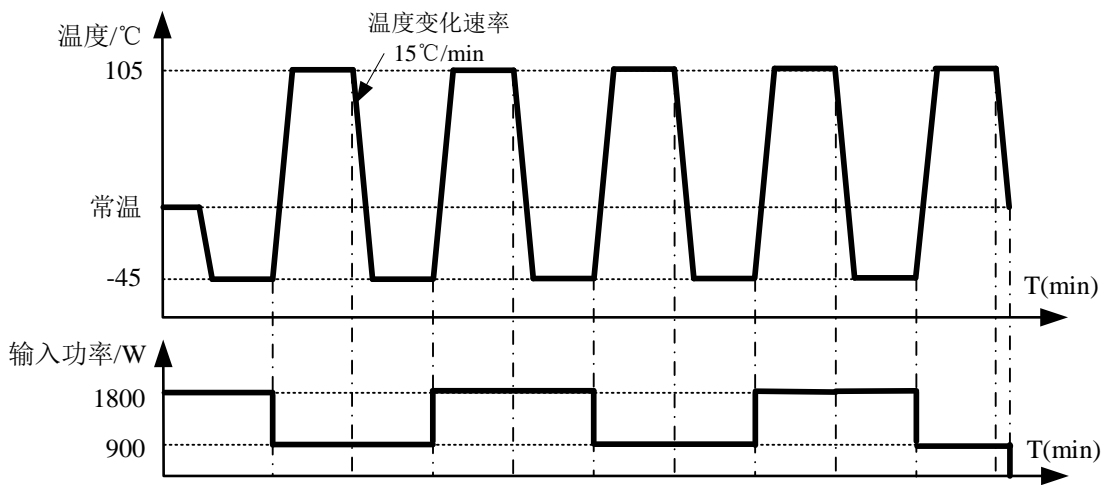


图 C.8 配电器的快速温度变化实验剖面

D. 2. 3. 4 振动应力极限确认实验剖面

采用电磁振动台开展振动应力极限确认实验，振动谱型采用配电器环境试验的功能实验谱。振动应力的起始水平为 8Grms，以 1Grms 为步长，截止水平为 14Grms。实验样品在实验过程中持续通电。每个振动水平台阶保持时间不少于 10min 后，对实验样品的功能性能进行测试记录。实验剖面如图 C.9 所示。

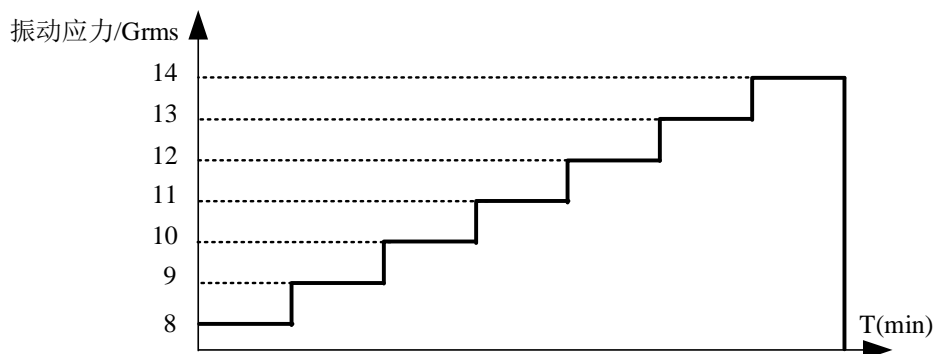


图 C.9 配电器的振动应力极限确认实验剖面

D.2.3.5 综合环境应力实验剖面

温度低温水平 -45°C ，高温水平 105°C ，温度变化速度 $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ；振动应力的起始水平为 4Grms ，以 2Grms 为步长，截止水平为 12Grms ；输入功率在高水平 1800W 和低水平 900W 之间循环，共计5个循环。实验样品在实验过程中持续通电。在每个温度、振动应力和输入功率水平下，待温度稳定且实验样品达到热稳定状态（或温升曲线走势明显平稳）后，对实验样品的功能性能进行测试记录。实验剖面如图C.10所示。

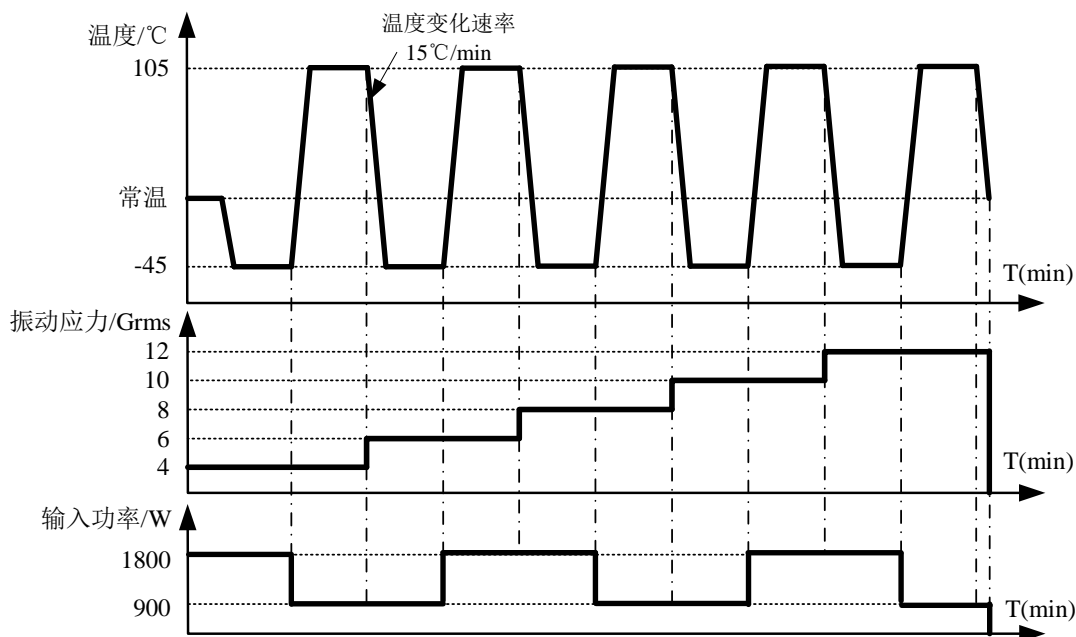


图 C.10 配电器的综合环境应力实验剖面

D.2.4 实验实施

按照配电器的可靠域实施方案，实施实验。实验前、中、后，按照测试要求，对配电器实验样品进行全面的目视检查 and 功能性能参数测试，填写测试记录表。

D.3 可靠域实验结果分析

配电器的可靠域实验结果分析包括学科交叉方程构建、未知参数辨识、学科交叉方程验证和性能极限确认，具体如下。

D.3.1 学科交叉方程建模

由于仅根据功能、性能及裕量分析获得了配电器效率的学科交叉方程输入输出的定性关系，如公式(C.1)所示，则应首先基于可靠域实验数据，根据 T/CICC 35004—2025 第 5.1.4 条开展基于数据驱动的学科交叉方程构建。

由于配电器效率受到温度和输入功率的影响，考虑二次模型对非线性的刻画能力，选择二次模型对效率的学科交叉方程进行建模，如公式(C.2)所示：

$$\tilde{\eta} = k_0 + k_1 T_e + k_2 (T_e)^2 + k_3 P_d + k_4 (P_d)^2 + k_5 T_e P_d + \tilde{\delta} \quad (\text{C.2})$$

式中，

- $\tilde{\eta}$ —— 效率，其上标波浪线表示包含不确定性；
- T_e —— 温度；
- P_d —— 输入功率；
- $k_0 \sim k_5$ —— 模型参数；
- $\tilde{\delta}$ —— 不确定性项，其主要由生产、制造、装配等过程中的不确定性导致的，假设 $\tilde{\delta}$ 服从正态概率分布，即 $\tilde{\delta} \sim N(0, \sigma^2)$ ， σ 为标准差。

根据配电器效率的学科交叉方程，其待估参数包括 $\theta = (k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, \sigma)$ 。

D.3.2 未知参数辨识

配电器的热性能学科交叉方程（即热性能仿真模型）和振动性能学科交叉方程（即振动性能仿真模型）中没有未知参数，因而无需开展未知参数辨识，仅辨识效率学科交叉方程中的未知参数即可，具体如下。

首先，设置配电器学科交叉方程确认实验中温度和输入功率的步进应力实验参数：实验设置了 $k = 12$ 个温度和输入功率的组合水平，在第 l 个温度和输入功率的组合水平 (T_{el}, P_{dl}) 下，投入了 $n = 1$ 个配电器实验样品进行测试，记录了配电器效率 $\eta_l, l = 1, 2, \dots, 12$ 。上述可靠域实验的观测数据记为 D 。

首先，基于可靠域实验数据 D ，通过最小二乘方法确定 $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$ ，如公式(C.3)所示：

$$\min \sum_{l=1}^k \left[\eta_l - \left(k_0 + k_1 T_{el} + k_2 (T_{el})^2 + k_3 P_{dl} + k_4 (P_{dl})^2 + k_5 T_{el} P_{dl} \right) \right]^2 \quad (\text{C.3})$$

然后，基于估计得到的 $\hat{k}_0, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \hat{k}_3, \hat{k}_4, \hat{k}_5$ ，根据配电器效率的不确定性项 δ 的正态概率分布，可以获得 σ 的似然函数，如公式(C.4)所示：

$$L(\sigma|D) = \sum_{l=1}^k \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left(- \frac{\left(\eta_l - \left(\hat{k}_0 + \hat{k}_1 T_{el} + \hat{k}_2 (T_{el})^2 + \hat{k}_3 P_{dl} + \hat{k}_4 (P_{dl})^2 + \hat{k}_5 T_{el} P_{dl} \right) \right)^2}{2\sigma^2} \right) \quad (\text{C.4})$$

基于公式(C.4)进行极大似然估计，通过令公式(C.4)最大，可以得到 σ 的极大似然估计结果 $\hat{\sigma}$ 。

综上，可以得到配电器效率的学科交叉方程中未知参数的估计结果，如表 C.4 所示。

表 C.4 配电器的效率学科交叉方程中未知参数的估计结果

参数	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	σ
估计结果	0.848	4.92×10^{-4}	-1.47×10^{-6}	5.5×10^{-5}	-6.89×10^{-9}	-1.08×10^{-7}	0.0122

D.3.3 学科交叉方程验证

配电器的学科交叉方程验证包括热性能学科交叉方程（即热性能仿真模型）、振动性能学科交叉方程（即振动性能仿真模型）和效率学科交叉方程的验证，具体如下。

D.3.3.1 热性能学科交叉方程验证

为了验证热性能学科交叉方程的准确性，对比配电器实验样品的实测数据和方程预测结果，部分结果如表 C.5 所示。

表 C.5 配电器的实测数据和热性能学科交叉方程的部分预测结果对比

实验条件	对比数据	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6	测点 7
温度 20℃ 输入功率 900W	实测数据/℃	53.482	46.417	42.779	43.512	49.517	57.29	45.651
	模型预测/℃	50.85	46.7	45.3	46.2	51.9	54.1	46.2
	预测误差/℃	2.632	-0.283	-2.521	-2.688	-2.383	3.19	-0.549
温度 80℃ 输入功率 900W	实测数据/℃	98.32	89.2	85.9	88.69	97.4	107.71	93.55
	模型预测/℃	98.1643	93.9	93	94.2	93.5	101	94.4
	预测误差/℃	0.1557	-4.7	-7.1	-5.51	3.9	6.71	-0.85
温度 20℃ 输入功率 1800W	实测数据/℃	58.079	48.293	44.963	46.994	53.172	63.373	48.322
	模型预测/℃	56.7638	49.3	47.2	48.3	55.9	61.6	49.7
	预测误差/℃	1.3152	-1.007	-2.237	-1.306	-2.728	1.773	-1.378
温度 80℃ 输入功率 1800W	实测数据/℃	108.34	94.66	89.07	93.12	106.2	121.28	100.39
	模型预测/℃	109.26	102	99	98	108	114	102
	预测误差/℃	-0.92	-7.34	-9.93	-4.88	-1.8	7.28	-1.61

根据表 C.5, 配电器热性能学科交叉方程的 90% 预测误差小于 3℃, 这表明方程具有较高的精度, 通过了实验验证。

D.3.3.2 振动性能学科交叉方程验证

为了验证振动性能学科交叉方程的准确性, 对比了振动扫频实验和振动步进应力实验结果与方程预测结果, 部分结果如表 C.6 和表 C.7 所示。

表 C.6 配电器的振动扫频实验结果与振动性能学科交叉方程的部分预测结果对比

模态	1	2	3
实验结果 / Hz	105.5	155.5	223.5
方程预测结果 / Hz	104.34	151.75	217.63

表 C.7 配电器的振动步进应力实验结果与振动性能学科交叉方程的部分预测结果的对比

振动应力水平	振动响应	测点 1	测点 2	测点 3
1 Grms	实验结果 (RMS 值)	1.71 G	3.29 G	2.37 G
	方程预测结果 (RMS 值)	1.79 G	3.59 G	2.25 G

根据表 C.6 和表 C.7, 配电器振动性能学科交叉方程的模态预测结果和振动响应预测结果与实验结果非常接近, 这表明方程具有较高的精度, 通过了实验验证。

D.3.3.3 效率学科交叉方程验证

为了验证配电器的效率学科交叉方程的准确性, 首先, 计算方程确定性趋势的拟合 R^2 , 结果为 $R^2 = 0.697$, 这表明方程预测的确定性趋势比较准确。

进一步地, 分析配电器的效率学科交叉方程的不确定性量化结果。首先, 绘制误差项 $\tilde{\delta}$ 的残差 QQ 图, 结果如图 C.11(a) 所示, 可以发现残差 QQ 图基本呈线性关系, 这表明基于正态概率分布对误差项 $\tilde{\delta}$ 的量化是合理的; 同时, 进行了 KS 检验, p 值结果为 0.2515, 这表明显著性较高, 假设的正态概率分布通过了假设检验。然后, 对比效率的学科交叉方程预测的 90% 置信上下界与实验数据, 如图 C.11 (b) 所示, 可以发现, 方程预测的上下界很好地包络了全部数据点, 这表明方程具有较高的预测精度。

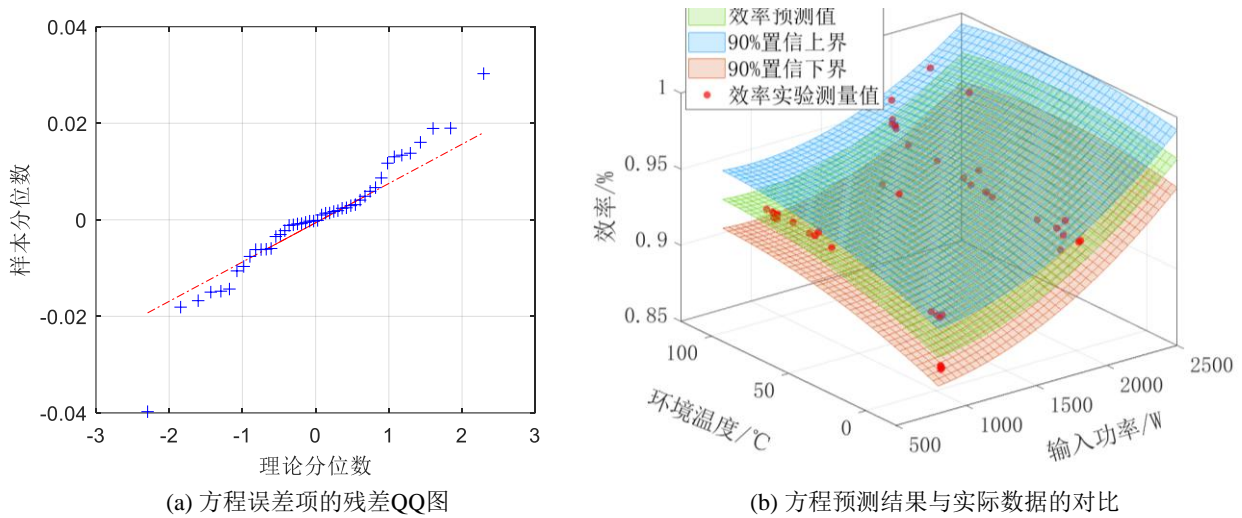


图 C.11 配电器效率的学科交叉方程的实验验证结果

综上，所构建的配电器的效率学科交叉方程通过了实验验证，确定性规律和不确定性的量化均具有较高的精度。

D.3.4 性能极限确认

在高温和低温应力极限确认实验中，配电器实验样品在 -50°C ~ 90°C 的实验条件范围内，当温度从实验条件恢复至性能工作极限内，配电器实验样品的功能/性能也恢复至其性能工作极限内的状态；在 95°C 时，实验样品出现高温保护，停止工作。由此确认：配电器高温的性能弹性极限介于 90°C 和 95°C 之间，性能破坏极限高于 95°C ，低温的性能弹性极限和性能破坏极限均低于 -50°C 。

在振动应力极限确认实验中，配电器实验样品在 12Grms 以下的实验条件范围内，当振动从实验条件恢复至性能工作极限内，配电器实验样品的功能/性能也恢复至其性能工作极限内的状态；在 13Grms 时，实验样品出现零部件脱落，停止工作。由此确认：配电器振动的性能弹性极限和性能破坏极限均介于 12Grms 和 13Grms 之间。

在快速温度变化实验和综合环境应力实验中，配电器实验样品未出现任何性能降级和消失的现象。由此确认：配电器的快速温度变化和综合环境应力的性能弹性极限和性能破坏极限均高于实验施加的最严酷水平。

中国指挥与控制学会团体标准

T/CICC 35011—2026

产品退化律实验

Product degradation law experiment

2026-06-30 发布

2026-06-30 实施

中国指挥与控制学会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语与定义	1
4 通用要求	1
4.1 工作输入	1
4.2 实验变量的分类	1
4.3 实验前准备	2
4.3.1 实验大纲	2
4.3.2 实验样品的一致性要求	2
4.3.3 实验设备与测试仪器	2
5 技术方法	2
5.1 实验方案	2
5.1.1 实验目的	2
5.1.2 干预变量与控制变量	2
5.1.3 实验样品数量	3
5.1.4 观测变量	4
5.1.5 实验时间	4
5.1.6 参数辨识与方程验证	4
5.2 实验报告	4
附录A（资料性）性能退化方程的未知参数辨识方法	5
附录B（资料性）性能退化方程的验证方法	7
附录C（资料性）单面镀铝聚酰亚胺薄膜的退化律实验示例	9
附录D（资料性）离子推力器的退化律实验示例	13

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。

本文件由中国指挥与控制学会提出并归口。

本文件起草参与单位：北京航空航天大学、深圳市为民可靠性系统工程研究院、杭州市北京航空航天大学国际创新研究院（北京航空航天大学国际创新学院）、厦门蓝威可靠性系统工程研究院有限公司、长龙（杭州）航空维修工程有限公司、中国船舶集团有限公司综合技术经济研究院、郑州航空工业管理学院、宁德时代新能源科技股份有限公司、中国航天空气动力技术研究院、北京卫星环境工程研究所、山东芯赛思电子科技有限公司、兰州空间技术物理研究所、中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所、中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所、深圳市正浩创新科技有限公司、怀柔实验室、中国空空导弹研究院、国家电网有限公司直流技术中心、北京海博思创科技股份有限公司、北京罗克维尔斯科技有限公司、中国飞行试验研究院、北京天宇航天新材料科技有限公司。

本文件主要起草人：李晓阳、陈文彬、孙富强、陈世舜、陶昭、康锐、张清源、祖天培、阮进喜、曾康、王建峰、尚大朋、薛殊飞、王瑶瑶、方鹏亚、文振华、杨志斌、贾永清、何贝琛、齐敏、贾艳辉、刘潇、屈重君、连晓棠、向云、刘杰、杨科、周鹏翔、张宪坤、于浩、吕宝、牛栋华。

产品退化律实验

1 范围

本文件规定了产品退化律实验的要求和方法，用于制定实验方案，基于实验数据，验证产品的性能退化方程。退化律实验同时可以代替加速退化试验，对产品的寿命进行外推评估，并暴露产品潜在设计、工艺缺陷，确定产品薄弱环节，通过设计改进提高产品可靠性水平。

本文件适用于新研产品在研发生产阶段建立可靠性学科方程时使用，也可供已投入使用的产品进行可靠性评价时参照使用。

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。

T/CICC 35001—2025	确信可靠性术语
T/CICC 35002—2025	功能、性能及裕量分析
T/CICC 35003—2025	性能参数退化分析
T/CICC 35004—2025	确信可靠性建模与预计
T/CICC 35010—2026	产品可靠域实验

3 术语与定义

T/CICC 35001—2025 和 T/CICC 35010—2026 确立的术语和定义适用于本指导性技术文件。

4 通用要求

4.1 工作输入

开展产品退化律实验工作前，应做好以下工作输入：

- 根据 T/CICC 35002—2025 完成产品的功能、性能及裕量分析；
- 根据 T/CICC 35003—2025 完成产品的性能参数退化分析；
- 根据 T/CICC 35010—2026 完成产品的可靠域实验；
- 根据 T/CICC 35004—2025 完成产品的性能退化方程建立。

4.2 实验变量的分类

根据 T/CICC 35004—2025，产品的性能退化方程如公式(1)所示：

$$P = f_{\vec{t}}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \quad (1)$$

式中：

- P —— 性能参数；
- \mathbf{X} —— 内因变量；
- \mathbf{Y} —— 外因变量；
- \vec{t} —— 退化时间；
- $f_{\vec{t}}(\cdot)$ —— 描述 \mathbf{X} 、 \mathbf{Y} 和 \vec{t} 与 P 之间定量关系的函数。

退化律实验中应将性能退化方程的输入、输出变量划分为控制变量、干预变量和观测变量，具体如下：

- a) 控制变量是在实验中受控保持不变的输入变量 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} ；
- b) 干预变量是在实验中受控变化的输入变量 \mathbf{X} 、 \mathbf{Y} 和 \bar{t} ；
- c) 观测变量是在实验中受控观测的输出变量 P 。

4.3 实验前准备

4.3.1 实验大纲

退化律实验大纲应至少包括以下内容：

- a) 实验目的；
- b) 实验产品说明和要求；
- c) 实验方案；
- d) 实验设备和测试仪器的要求；
- e) 实验产品测试项目；
- f) 实验报告要求等。

4.3.2 实验样品的一致性要求

各实验样品的功能和性能参数应与产品的设计要求和工艺要求保持一致，并符合相关规范要求。

4.3.3 实验设备与测试仪器

实验设备与测试仪器应满足以下要求：

- a) 实验设备应能保证产生和保持实验所需的实验条件，经检定合格并在有效期内；
- b) 测试仪器仪表应经计量合格并在有效期内，测量精度满足实验要求；
- c) 实验夹具应不影响实验产品的固有特性及所承受的应力，并能提供合适的振动传输率、热均匀性和均衡的温度变化率等。

5 技术方法

5.1 实验方案

5.1.1 实验目的

退化律实验的目的包括：

- a) 辨识性能退化方程中的未知参数；
- b) 验证输入变量 \mathbf{X} 、 \mathbf{Y} 和 \bar{t} 与输出变量 P 之间函数关系的正确性。

5.1.2 干预变量与控制变量

5.1.2.1 干预变量与控制变量的确定

干预变量与控制变量的确定方式如下：

- a) 若实验样品只有一种，则应在实验前对输入变量 \mathbf{X} 中的所有元素进行测试记录，在实验中将其视为控制变量；若实验样品有多种，则应在实验前对每种实验样品的输入变量 \mathbf{X} 中的所有元素进行测试记录，在实验中将其视为干预变量；
- b) 应尽可能将输入变量 \mathbf{Y} 中所有元素同时作为干预变量开展实验；若实验条件不允许，可将部分元素作为干预变量，剩余元素作为控制变量；
- c) 退化时间 \bar{t} 为干预变量。

5.1.2.2 干预变量取值范围的确定

各干预变量取值范围的确定方式如下：

- a) 干预变量 \mathbf{X} 中各元素的取值范围：若产品已开展可靠域实验，干预变量 \mathbf{X} 中各元素的取值范围不应超过其性能弹性极限，否则为实验样品的种类；

- b) 干预变量 \mathbf{Y} 中各元素的取值范围：若产品已开展可靠域实验，干预变量 \mathbf{Y} 中各元素的取值范围不应超过其性能弹性极限，否则依据产品最可能的使用场景或其组合确定。
- c) 干预变量 \vec{t} 的取值范围可根据产品预期的使用时间和实验时间约束确定。

5.1.2.3 干预变量的施加方式

退化律实验包括以下两种干预变量施加方式：

- a) 恒定施加方式：将实验样品均分为几组，每组施加的干预变量类型相同但取值不同，且每组实验中，干预变量取值大小不随实验时间变化；
- b) 步进施加方式：所有实验样品不分组，干预变量取值大小随实验时间步进增加。

两种施加方式中，在实验时间可接受，且实验设备和测试仪器资源充足情况下，优先采用恒定施加方式，否则采用步进施加方式。

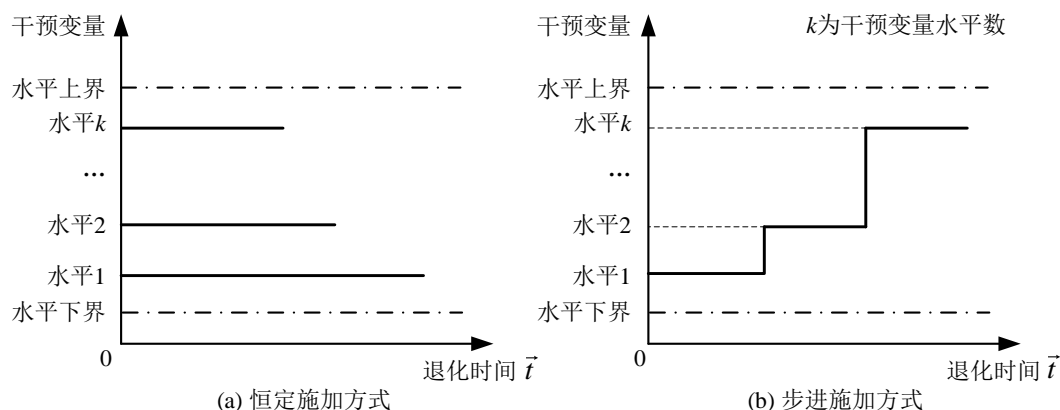


图 1 退化律实验的干预变量施加方式

5.1.2.4 干预变量的取值

各干预变量的取值选取应遵循以下原则：

- a) 每一种实验样品的干预变量 \mathbf{X} 中各元素的实测值为干预变量 \mathbf{X} 的一组取值，多种实验样品即为多组取值；
- b) 在干预变量 \mathbf{Y} 中各元素的取值范围内，对于恒定施加方式和步进施加方式，取值数均越多越好，一般不应少于 3 个；
- c) 干预变量 \mathbf{Y} 中各元素的取值应尽可能覆盖其取值范围；
- d) 干预变量 \vec{t} 的取值应满足下列原则：
- 1) 当选取干预变量的恒定施加方式时，在实验截止时，每组干预变量 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 取值下的性能参数 P 的退化量应保证至少达到实验开始时刻的性能裕量的 30% 以上；
 - 2) 当选取干预变量的步进施加方式时，应保证在每组干预变量 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 取值下均发生性能退化，且实验中性能退化 P 的总量至少达到实验开始时刻的性能裕量的 50% 以上。
 - 3) 性能参数 P 退化速率低的干预变量 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 取值对应的实验时间应比性能参数 P 退化速率高的干预变量 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 取值的实验时间长。
- e) 应根据性能退化方程的性质（如线性、非线性）合理设置干预变量 \mathbf{X} 、 \mathbf{Y} 和 \vec{t} 中各元素的值；
- f) 随着实验的开展，可对干预变量 \mathbf{X} 、 \mathbf{Y} 和 \vec{t} 的取值进行更新。

5.1.3 实验样品数量

每种实验样品数至少为 1 个。

5.1.4 观测变量

5.1.4.1 观测变量的确定

观测变量应包括：

- a) 输出变量 P ；
- b) 与输出变量 P 相关的功能、性能参数。

5.1.4.2 观测变量的测试

实验中，观测变量的测试应符合以下要求：

- a) 观测变量若能通过自动测试设备进行在线监测和数据记录，则首选在线连续监测；
- b) 若不可在线连续监测，则应尽量缩短测试时间间隔，增加测试次数，一般情况下，每组干预变量取值下至少开展 10 次测试；
- c) 若实验样品的某些观测变量的测试手段过于复杂且测试时间过长，可减少其在实验中的测试次数；
- d) 若观测变量对干预变量非常敏感，应尽量保证不改变产品实验状态的前提下进行测试；
- e) 实验样品出现退化趋势后应回到其性能弹性极限内的干预变量取值下进行退化确认，一般情况下，每组干预变量取值下设置 1—2 个确认点；
- f) 若实验中发生故障，可对实验样品进行修复，并在不改变实验样品的状态的前提下，重新进行测试；若不对实验样品进行修复，则实验中止。

5.1.5 实验时间

实验总时间根据实验样品数、干预变量 X 和 Y 的取值数、每组干预变量 X 和 Y 取值下的干预变量 t 的取值、实验设备和测试设备能力综合估算。

5.1.6 参数辨识与方程验证

5.1.6.1 未知参数辨识

针对实验数据进行回归分析，辨识性能退化方程中的未知参数，具体方法可参见附录 A。

5.1.6.2 性能退化方程验证

根据已完成参数辨识的性能退化方程，按照实验施加的干预变量和控制变量的取值，计算产品的性能参数，并从确定性趋势和不确定性包络两个方面，拟定正确性判据。依据判据，将性能退化方程的计算结果与实验结果进行对比，给出方程验证是否通过的结论，具体方法可参见附录 B。

5.2 实验报告

实验结束后，应根据实验的各项原始记录，编制正式实验报告。实验报告至少应包括以下内容：

- a) 实验目的；
- b) 实验依据的标准和文件；
- c) 实验地点、日期和参加人员；
- d) 实验产品说明；
- e) 产品性能退化方程与退化律实验变量；
- f) 退化律实验方案的制定；
- g) 实验设备和测试仪器的说明；
- h) 实验实施过程；
- i) 实验数据及分析结果；
- j) 实验结论等。

附录 C 和附录 D 给出了单面镀铝聚酰亚胺薄膜和离子推力器的退化律实验示例。

附录 A

(资料性)

性能退化方程的未知参数辨识方法

根据 T/CICC 35004—2025，结合退化律实验中的控制变量、干预变量和观测变量，产品的性能退化方程可写作公式(A.1)：

$$P = f_{\vec{t}}(\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i | \mathbf{X}_c, \mathbf{Y}_c, \boldsymbol{\theta}) \quad (\text{A.1})$$

式中：

- P —— 性能参数；
 \mathbf{X}_i —— 内因干预变量；
 \mathbf{X}_c —— 内因控制变量；
 \mathbf{Y}_i —— 外因干预变量；
 \mathbf{Y}_c —— 外因控制变量；
 $\boldsymbol{\theta}$ —— 待估参数， $\boldsymbol{\theta} = (\boldsymbol{\theta}_d, \boldsymbol{\theta}_u)$ ，其中， $\boldsymbol{\theta}_d$ 为确定性部分的待估参数， $\boldsymbol{\theta}_u$ 为不确定性部分的待估参数；
 \vec{t} —— 退化时间；
 $f_{\vec{t}}(\cdot)$ —— 描述内因变量 $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_c)$ 、外因变量 $\mathbf{Y} = (\mathbf{Y}_i, \mathbf{Y}_c)$ 和 \vec{t} 与 P 之间定量关系的函数。

记 \mathbf{S} 为干预变量， $\mathbf{S} = (\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i)$ 。

如果公式(A.1)的概率密度函数能够获得，记为 $p(\mathbf{S} | \boldsymbol{\theta})$ ，在恒定施加应力时，构建基于退化律实验数据的似然函数，如公式(A.2)所示：

$$L(\boldsymbol{\theta} | \mathbf{P}) = \prod_l^k \prod_i^{n_l} \prod_j^{m_l} p_{iij}(\mathbf{s}_l, \mathbf{P} | \boldsymbol{\theta}) \quad (\text{A.2})$$

式中：

- \mathbf{s}_l —— 退化律实验中施加的第 l 组干预变量取值， $\mathbf{s}_l = (X_{1l}, \dots, X_{ql}, Y_{1l}, \dots, Y_{rl})$ ， $l = 1, 2, \dots, k$ ，其中， X_{1l}, \dots, X_{ql} 为 q 个内因干预变量的第 l 个取值， q 为内因干预变量的数量， Y_{1l}, \dots, Y_{rl} 为 r 个外因干预变量的第 l 个取值， r 为外因干预变量的数量， k 为 \mathbf{s}_l 的组数；
 \vec{t}_{iij} —— \mathbf{s}_l 下第 i 个实验样品在第 j 次测试的实验时间， $l = 1, 2, \dots, k, i = 1, 2, \dots, n_l, j = 1, 2, \dots, m_l$ ，其中， n_l 为 \mathbf{s}_l 下的实验样品数量， m_l 为 \mathbf{s}_l 下性能测试次数；
 \mathbf{P} —— 退化律实验的观测数据， $\mathbf{P} = (P_{lij}, l = 1, 2, \dots, k, i = 1, 2, \dots, n_l, j = 1, 2, \dots, m_l)$ ，其中， P_{lij} 为 \vec{t}_{iij} 对应的观测变量值。

通过令公式(A.2)最大，获得待估参数的极大似然估计结果，如公式(A.3)所示：

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \arg \max_{\boldsymbol{\theta}} L(\boldsymbol{\theta} | \mathbf{P}) \quad (\text{A.3})$$

如果公式(A.1)的概率密度函数难以获得，可先基于最小二乘法估计公式(A.1)中确定性部分的待估参数 $\boldsymbol{\theta}_d$ ，如公式(A.4)所示：

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_d = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}_d} \sum_l^k \sum_i^{n_l} \sum_j^{m_l} (f_{\vec{t}_{iij}}(\mathbf{s}_l | \boldsymbol{\theta}_d) - P_{lij})^2 \quad (\text{A.4})$$

然后，再基于极大似然法估计公式(A.1)中不确定性部分的待估参数 $\boldsymbol{\theta}_u$ ，如公式(A.5)所示：

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_u = \arg \max_{\boldsymbol{\theta}_u} L(\boldsymbol{\theta}_u | \mathbf{P}, \hat{\boldsymbol{\theta}}_d) \quad (\text{A.5})$$

在步进施加方式时，将退化律实验的观测数据按照干预变量取值进行划分，并将每组干预变量取值下的性能初始值设为零，即可基于恒定施加方式时的计算方式，构建基于退化律实验数据的似然函数，如公式(A.6)所示。后续步骤均与恒定施加方式时相同。

$$L(\boldsymbol{\theta} | \mathbf{y}_s) = \prod_l^k \prod_i^{n_l} \prod_j^{m_{li}} p_{s_{lij}}(\mathbf{s}_l, \mathbf{P}_s | \boldsymbol{\theta}) \quad (\text{A.6})$$

式中：

\mathbf{P}_s —— 退化律实验的观测数据在各组干预变量取值下变换后的数据， $\mathbf{P}_s = (P_{lij} - P_{li1}, l = 1, 2, \dots, k, i = 1, 2, \dots, n_l, j = 1, 2, \dots, m_l)$ ，其中， $y_{(l+1)i1} = y_{lim_l}$ 。

对于仅有 1—2 个实验样品的小样本情况，也可采用本方法进行统计分析。但需要注意的是，由于此类情形不具有统计意义，可不开展其中不确定性部分的参数估计。

附录 B

(资料性)

性能退化方程的验证方法

根据已完成参数辨识的性能退化方程，按照实验施加的干预变量和控制变量的取值，计算产品性能参数退化的确定性趋势和不确定性包络上下界。

产品性能参数退化的确定性趋势的计算方法如公式(B.1)所示：

$$\hat{P}_{ij}^d = f_{i_j}(\mathbf{s}_l | \mathbf{X}_c, \mathbf{Y}_c, \hat{\boldsymbol{\theta}}_d), l = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, m_l \quad (\text{B.1})$$

式中：

\mathbf{s}_l —— 可靠域实验中施加的第 l 组干预变量取值， $\mathbf{s}_l = (X_{1l}, \dots, X_{ql}, Y_{1l}, \dots, Y_{rl})$ ， $l = 1, 2, \dots, k$ ，其中， X_{1l}, \dots, X_{ql} 为 q 个内因干预变量的第 l 个取值， q 为内因干预变量的数量， Y_{1l}, \dots, Y_{rl} 为 r 个外因干预变量的第 l 个取值， r 为外因干预变量的数量， k 为 \mathbf{s}_l 的组数；

\mathbf{X}_c —— 内因控制变量；

\mathbf{Y}_c —— 外因控制变量；

$\hat{\boldsymbol{\theta}}_d$ —— 确定性部分待估参数的辨识结果；

\vec{t}_{ij} —— \mathbf{s}_l 下第 j 次测试的实验时间， $l = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, m_l$ ，其中， m_l 为 \mathbf{s}_l 下的性能测试次数；

\hat{P}_{ij}^d —— 实验时间 \vec{t}_{ij} 下性能参数退化的确定性趋势的计算结果， $l = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, m_l$ 。

为了计算产品性能参数退化的不确定性包络上下界，考虑不确定性的影响，可首先基于蒙特卡洛方法对产品性能参数退化进行仿真计算，如公式(B.2)所示：

$$\hat{P}_{ij}^w = f_{i_j}(\mathbf{s}_l | \mathbf{X}_c, \mathbf{Y}_c, \hat{\boldsymbol{\theta}}), l = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, m_l, w = 1, 2, \dots, N \quad (\text{B.2})$$

式中：

$\hat{\boldsymbol{\theta}}$ —— 待估参数的辨识结果， $\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\hat{\boldsymbol{\theta}}_d, \hat{\boldsymbol{\theta}}_u)$ ，其中， $\hat{\boldsymbol{\theta}}_u$ 为不确定性部分待估参数的辨识结果；

\hat{P}_{ij}^w —— 实验时间 \vec{t}_{ij} 下第 w 次蒙特卡洛仿真计算得到的性能参数结果， $l = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, m_l, w = 1, 2, \dots, N$ ，其中， N 为蒙特卡洛仿真次数，一般情况下，取 $N \geq 1000$ 。

选择合适的置信区间水平 $1 - \alpha$ ，根据产品性能参数退化的蒙特卡洛仿真结果，计算 \mathbf{s}_l 下在实验时间 \vec{t}_{ij} 的不确定性包络上下界，如公式(B.3)所示：

$$\begin{cases} \hat{P}_{ij}^{\text{lower}} = g\left(\hat{\mathbf{P}}_{ij}, \frac{\alpha}{2}\right) \\ \hat{P}_{ij}^{\text{upper}} = g\left(\hat{\mathbf{P}}_{ij}, 1 - \frac{\alpha}{2}\right) \end{cases}, l = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, m_l \quad (\text{B.3})$$

式中：

$\hat{P}_{ij}^{\text{lower}}$ —— \mathbf{s}_l 下实验时间 \vec{t}_{ij} 对应的性能参数退化的不确定性包络下界， $l = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, m_l$ ；

$\hat{P}_{ij}^{\text{upper}}$ —— \mathbf{s}_l 下实验时间 \vec{t}_{ij} 对应的性能参数退化的不确定性包络上界， $l = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, m_l$ ；

$\hat{\mathbf{P}}_{ij}$ —— \mathbf{s}_l 下实验时间 \vec{t}_{ij} 对应的性能参数退化的蒙特卡洛仿真结果， $\hat{\mathbf{P}}_{ij} = (\hat{P}_{ij}^w, w = 1, 2, \dots, N), l = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, m_l$ ；

$g(\hat{\mathbf{P}}_{ij}, \beta)$ —— 用于计算 $\hat{\mathbf{P}}_{ij}$ 的 β 分位点的函数。

一般情况下，取 $\alpha = 0.1$ 。

根据性能退化方程所计算的产品性能参数退化的确定性趋势和不确定性包络上下界，拟定正确性判据，以验证方程确定性趋势和不确定性包络的正确性。

对于确定性趋势的正确性判据，可采用均方根误差RMSE（见公式(B.4)）、平均绝对误差MAE（见公式(B.5)）等指标，量化性能退化方程所计算的产品性能参数退化的确定性趋势对退化律实验观测数据的样品均值的拟合效果。在工程实际中可根据各指标特征，结合性能退化方程的性质，选择合适的正确性判据。根据正确性判据的计算结果，给出性能退化方程确定性趋势的验证是否通过的结论。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{k} \frac{1}{m_l} \sum_{l=1}^k \sum_{j=1}^{m_l} (\hat{P}_{lj}^d - \bar{P}_{lj})^2} \quad (\text{B.4})$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{k} \frac{1}{m_l} \sum_{l=1}^k \sum_{j=1}^{m_l} |\hat{P}_{lj}^d - \bar{P}_{lj}| \quad (\text{B.5})$$

式中，

$$\bar{P}_{lj} = \frac{1}{n_l} \sum_{i=1}^{n_l} P_{lij} \quad (\text{B.6})$$

对于不确定性包络的正确性判据，可采用覆盖率 CP（见公式(B.7)）、平均区间边界绝对偏差 MIBAD（包括平均区间下边界绝对偏差 MILABD 和平均区间上边界绝对偏差 MIUABD，见公式(B.8)）等指标，量化性能退化方程所计算的产品性能参数退化的不确定性包络范围对退化律实验观测数据的覆盖程度。在工程实际中可根据各指标特征，结合性能退化方程的性质，选择合适的正确性判据。根据正确性判据的计算结果，给出性能退化方程不确定性包络的验证是否通过的结论。

$$\text{CP} = \frac{1}{k} \frac{1}{m_l} \sum_{l=1}^k \sum_{j=1}^{m_l} I(P_{lij} \in [\hat{P}_{lj}^{\text{lower}}, \hat{P}_{lj}^{\text{upper}}]) \quad (\text{B.7})$$

$$\begin{cases} \text{MILABD} = \frac{1}{k} \frac{1}{m_l} \sum_{l=1}^k \sum_{j=1}^{m_l} |\hat{P}_{lj}^{\text{lower}} - P_{lj}^{\text{min}}| \\ \text{MIUABD} = \frac{1}{k} \frac{1}{m_l} \sum_{l=1}^k \sum_{j=1}^{m_l} |\hat{P}_{lj}^{\text{lower}} - P_{lj}^{\text{min}}| \end{cases} \quad (\text{B.8})$$

式中，

$$P_{lj}^{\text{min}} = \min \{P_{lij}, i = 1, 2, \dots, n_l\} \quad (\text{B.9})$$

$$P_{lj}^{\text{max}} = \max \{P_{lij}, i = 1, 2, \dots, n_l\} \quad (\text{B.10})$$

式中：

$I(\cdot)$ —— 指示函数：若 P_{lij} 在区间 $[\hat{P}_{lj}^{\text{lower}}, \hat{P}_{lj}^{\text{upper}}]$ 内， $I = 1$ ，否则， $I = 0$ 。

附录 C (资料性)

单面镀铝聚酰亚胺薄膜的退化律实验示例

C.1 退化律实验的工作输入

C.1.1 功能、性能及裕量分析

单面镀铝聚酰亚胺薄膜是一种柔性被动热控材料，具有反射率高、质量轻、耐高温等特点，主要用于航天器外壁、星载单机、军用装备部件、线缆等外部包覆，能够提高航天产品和军用装备的热控性能。针对单面镀铝聚酰亚胺薄膜，根据 T/CICC 35002—2025 开展了功能、性能及裕量分析，确认了单面镀铝聚酰亚胺薄膜的关键性能参数及其阈值、关键内因变量和关键外因变量，简要结果如表 C.1 所示。

表 C.1 单面镀铝聚酰亚胺薄膜的功能、性能及裕量分析简要结果

关键性能参数	影响关键性能参数的关键内外因变量		阈值
	内因变量	外因变量	
太阳吸收比	铝层厚度等	/	11%

C.1.2 性能参数退化分析

针对单面镀铝聚酰亚胺薄膜，根据 T/CICC 35003—2025 开展了性能参数退化分析，确认了单面镀铝聚酰亚胺薄膜存在退化的关键性能参数及其退化原因与机理、关键内因变量和关键外因变量，简要结果如表 C.2 所示。

表 C.2 单面镀铝聚酰亚胺薄膜的性能参数退化分析简要结果

关键性能参数	退化原因	退化机理	影响关键性能参数的关键内外因变量	
			内因变量	外因变量
太阳吸收比	铝层厚度减小	铝层腐蚀	/	温度、相对湿度

C.1.3 性能退化方程构建

在单面镀铝聚酰亚胺薄膜使用过程中，其表面的铝会与空气中的氧气与水发生氧化反应，导致铝腐蚀，进而导致太阳吸收比增加，造成单面镀铝聚酰亚胺薄膜的性能退化。对于上述退化过程，基于其物理机理进行建模的难度较大，因此本案例根据 T/CICC 35004—2025，选择基于数据驱动方法构建单面镀铝聚酰亚胺薄膜太阳吸收比的性能退化方程。根据单面镀铝聚酰亚胺薄膜的功能、性能及裕量分析结果和性能参数退化分析结果，其性能退化受到温度和相对湿度的影响，因此，考虑单面镀铝聚酰亚胺薄膜太阳吸收比的性能退化方程形式如公式(C.1)所示：

$$P = f_i(T, RH) \quad (C.1)$$

式中，

P —— 太阳吸收比；

$f_i(\cdot)$ —— 退化方程；

T —— 温度；

RH —— 相对湿度。

C.1.4 退化律实验变量

根据单面镀铝聚酰亚胺薄膜的功能、性能及裕量分析结果、性能参数退化分析结果和所构建的性能退化方程形式，结合实验的可控性和可测性，可以确定退化律实验变量，如表 C.3 所示。

表 C.3 单面镀铝聚酰亚胺薄膜的退化律实验变量

变量类型	控制变量	干预变量	观测变量
变量名称	铝层厚度等	温度、相对湿度	太阳吸收比

C.2 退化律实验方案的制定与实施

C.2.1 实验前准备工作

根据工程实际情况，实验样品数量为 48 个。

根据单面镀铝聚酰亚胺薄膜退化律实验目的，结合性能退化方程和退化律实验变量，确定观测变量，包括太阳吸收比，以及单面镀铝聚酰亚胺薄膜规范要求的其他功能、性能参数。

为了方便实验过程中的样本固定，并保证性能参数检测位置的一致性，设计了单面镀铝聚酰亚胺薄膜的实验夹具，其中，为保证夹具能够经受温湿度变化的实验需求，选取 0.25mm 厚的白色聚乙烯塑料制造夹面；同时，为满足有效测量面不小于直径 55mm 的要求，在夹面中心裁剪出 70mm×70mm 的方孔。

C.2.2 实验方案制定

在退化律实验方案制定中，外因干预变量的施加方式选择恒定施加方式，并通过正交实验设计方法，结合专家经验，设置了 4 个外因干预变量水平，如表 C.4 所示。

表 C.4 单面镀铝聚酰亚胺薄膜的退化律实验方案

外因干预变量水平序号	温度/°C	相对湿度/%
1	40	50
2	40	75
3	50	50
4	50	75

对于每一个外因干预变量水平，基于工程实际条件，设置实验时间为 144 小时，性能参数的检测间隔为 12 小时，共计测试次数 13 次。

为了避免将实验样品取出后出现凝露，从而影响性能参数的检测，本实验在每一个外因干预变量水平下采用先升温后升湿、先降湿后降温的策略，并且控制温度与相对湿度的升降速率在 1°C/min 和 1%/min。

C.2.3 实验实施

按照单面镀铝聚酰亚胺薄膜的性能退化律实施方案，实施实验。实验前、中、后，按照测试要求，对单面镀铝聚酰亚胺薄膜实验样品进行全面的目视检查和功能性能参数测试，填写测试记录表。

C.3 退化律实验结果分析

由于仅根据功能、性能及裕量分析和性能参数退化分析获得了单面镀铝聚酰亚胺薄膜太阳吸收比的性能退化方程输入输出的定性关系，如公式(C.1)所示，则应首先基于退化律实验数据，根据 T/CICC 35004—2025 第 5.2.3 条开展基于数据驱动的性能退化方程构建，然后开展未知参数辨识和性能退化方程验证，具体如下。

C.3.1 基于数据驱动的性能退化方程构建

从单面镀铝聚酰亚胺薄膜太阳吸收比退化的物理过程出发，考虑其退化速率受到温度和相对湿度的影响，结合研究经验，构建了如下的性能退化方程，如公式(C.2)所示：

$$P = P_0 + a \exp(\alpha_1 \varphi_1(T) + \alpha_2 \varphi_2(RH)) \bar{t}^\beta + \sigma W(\bar{t}) \quad (C.2)$$

式中，

$$\varphi_1(T) = \frac{1/T_0 - 1/T}{1/T_0 - 1/T_H} \quad (C.3)$$

$$\varphi_2(RH) = \frac{\ln RH - \ln RH_0}{\ln RH_H - \ln RH_0} \quad (C.4)$$

$$P_0 \sim N(\mu_0, \sigma_0^2), a \sim N(\mu_a, \sigma_a^2) \quad (C.5)$$

式中,

- P —— 太阳吸收比;
- P_0 —— 太阳吸收比初始值;
- a —— 与单面镀铝聚酰亚胺薄膜退化的内因变量相关的参数;
- α_1 —— 温度对退化速率的影响参数;
- α_2 —— 相对湿度对退化速率的影响参数;
- T —— 温度;
- RH —— 相对湿度;
- \vec{t} —— 退化时间;
- β —— 退化的非线性系数;
- σ —— 扩散系数;
- W —— 标准维纳过程;
- μ_0 —— P_0 的正态分布均值;
- σ_0 —— P_0 的正态分布标准差;
- μ_a —— a 的正态分布均值;
- σ_a —— a 的正态分布标准差;
- T_0 —— 使用场景下退化机理一致的最低温度;
- T_H —— 使用场景下退化机理一致的最高温度;
- RH_0 —— 使用场景下退化机理一致的最低相对湿度;
- RH_H —— 使用场景下退化机理一致的最高相对湿度。

根据太阳吸收比的性能退化方程, 待估参数包括 $\theta = (\mu_0, \sigma_0, \mu_a, \sigma_a, \alpha_1, \alpha_2, \beta, \sigma)$ 。

C.3.2 未知参数辨识

根据退化律实验数据, 基于极大似然估计方法, 获得了待估参数 θ 的估计结果, 如表 C.5 所示。

表 C.5 单面镀铝聚酰亚胺薄膜性能退化方程中待估参数的估计结果

参数	μ_0	σ_0	μ_a	σ_a	α_1	α_2	β
估计值	8.762	0.196	0.025	0.001	0.237	0.763	0.358

C.3.3 性能退化方程验证

为了验证性能退化方程的准确性, 首先对比了单面镀铝聚酰亚胺薄膜实验样品实测数据的均值退化和方程预测的确定性退化结果, 结果如图 C.1 (a)所示; 随后, 对比了实测数据和方程预测的 90%退化置信区间结果, 结果如图 C.1 (b)所示。

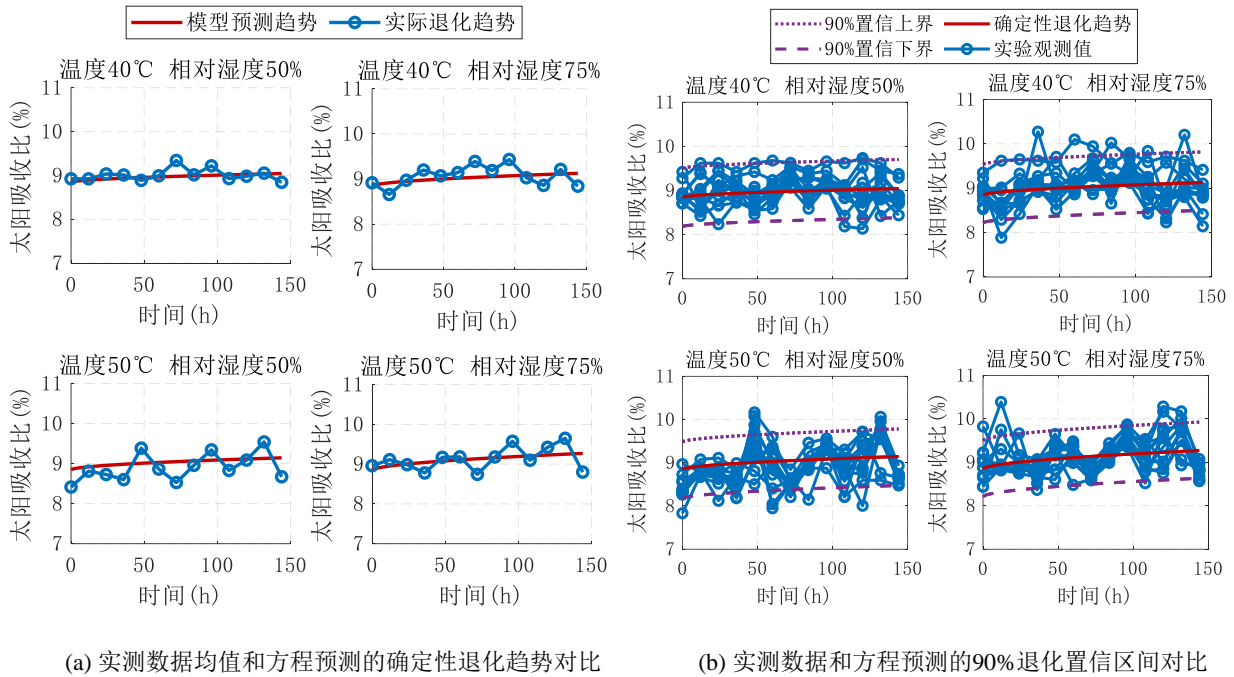


图 C.1 单面镀铝聚酰亚胺薄膜的实测数据和性能退化方程预测结果的对比

根据图 C.1，单面镀铝聚酰亚胺薄膜性能退化方程的确定性预测结果与实测数据贴合情况较好，其退化置信区间基本包络了退化数据，这表明方程对于确定性规律和不确定性的量化均具有较高的精度，通过了实验验证。

附录 D
(资料性)

离子推力器的退化律实验示例

D.1 退化律实验的工作输入

D.1.1 功能、性能及裕量分析

离子推力器是深空探测任务中应用最为广泛的电推进系统，其通过电子的聚焦、加速和定向引出，将电能转换为动能，产生推力。针对某离子推力器，根据 T/CICC 35002—2025 开展了功能、性能及裕量分析，确认了离子推力器的关键性能参数及其阈值、关键内因变量和关键外因变量，简要结果如表 D.1 所示。

表 D.1 离子推力器的功能、性能及裕量分析简要结果

关键性能参数	影响关键性能参数的关键内外因变量		阈值
	内因变量	外因变量	
电子反流极限电压	屏栅尺寸参数、加速栅尺寸参数等	屏栅电压	-200 V

D.1.2 性能参数退化分析

针对离子推力器，根据 T/CICC 35003—2025 开展了性能参数退化分析，确认了离子推力器存在退化的关键性能参数及其退化原因与机理、关键内因变量和关键外因变量，简要结果如表 D.2 所示。

表 D.2 离子推力器的功能、性能及裕量分析简要结果

关键性能参数	退化原因	退化机理	影响关键性能参数的关键内外因变量	
			内因变量	外因变量
电子反流极限电压	加速栅孔径增大	电荷交换离子撞击加速栅孔壁导致的溅射刻蚀	加速栅材料属性参数、屏栅面积等	屏栅电流、阳极电流、屏栅电压、加速栅电压

D.1.3 性能退化方程构建

首先，针对离子推力器的关键性能参数，从离子推力器的工作原理和静电学原理出发，得到离子推力器的学科交叉方程，如公式(D.1)所示：

$$V_m = \frac{-\Delta V - \frac{t_a}{l_d} V_{bp} + \frac{B}{l_d} V_{bp} - \frac{B}{l_e} (V_s + V_d)}{1 + \frac{B}{l_d} - \frac{B}{l_e} - \frac{t_a}{l_d}} \quad (D.1)$$

式中，

$$B = \frac{d_a}{2\pi} \left[\frac{2t_a}{d_a} \arctan \left(\frac{d_a}{2t_a} \right) - 1 \right] \exp \left(-\frac{t_a}{d_a} \right) \quad (D.2)$$

式中，

- V_m —— 电子反流极限电压；
- ΔV —— 空间电荷影响；
- t_a —— 加速栅厚度；
- V_{bp} —— 下游等离子体电势；
- B —— 中间表达式；
- l_d —— 下游电势稳定距离；
- V_s —— 屏栅电压；

- V_d —— 阳极电压；
 l_e —— 束流有效加速距离；
 d_a —— 加速栅中心孔孔径。

在离子推力器工作过程中，电荷交换离子会撞击加速栅孔，使得加速栅孔径增大，最终导致离子推力器失效。首先，通过仿真分析，构建了加速栅孔径退化方程，如公式(D.3)所示：

$$d_a(\vec{t}) = d_{a_0} + 2v_{d_a}\vec{t} \quad (\text{D.3})$$

式中，

$$v_{d_a} = (7411.72 + 1.26268V_s + 78.6841V_a - 39.4481l_g - 1.77987 \times 10^{-15} N_m - 307.768d_a + 1.38125 \times 10^{-15} N_m d_a - 2.21743 \times 10^{-4} V_s^2 + 0.208891V_a^2) \times 10^{-8} \quad (\text{D.4})$$

$$l_g = l_c - (2.562 \times 10^{-4} V_d I_d + 0.2249) \quad (\text{D.5})$$

$$N_m = \frac{2I_b}{e \sqrt{\frac{kT_{eu}}{M_z} A_s T_s}} \quad (\text{D.6})$$

$$V_s \sim N(\mu_{V_s}, (C_{V_s} \mu_{V_s})^2), I_b \sim N(\mu_{I_b}, (C_{I_b} \mu_{I_b})^2), I_d \sim N(\mu_{I_d}, (C_{I_d} \mu_{I_d})^2), V_a \sim N(\mu_{V_a}, (C_{V_a} \mu_{V_a})^2) \quad (\text{D.7})$$

式中，

- d_{a_0} —— 加速栅中心孔初始孔径；
 v_{d_a} —— 加速栅中心孔刻蚀速率；
 V_a —— 加速栅电压；
 l_g —— 屏栅-加速栅热态间距；
 N_m —— 上游离子密度；
 l_c —— 屏栅-加速栅冷态间距；
 I_d —— 阳极电流；
 I_b —— 屏栅电流；
 e —— 电子电荷量；
 k —— 玻尔兹曼常数；
 T_{eu} —— 放电室电子温度；
 M_z —— 加速栅材料的原子质量；
 A_s —— 屏栅面积；
 T_s —— 屏栅透明度。
 μ_{V_s} —— 屏栅电压 V_s 分布的均值；
 C_{V_s} —— 屏栅电压 V_s 的变异系数；
 μ_{V_a} —— 加速栅电压 V_a 的正态分布均值；
 C_{V_a} —— 加速栅电压 V_a 的变异系数；
 μ_{I_d} —— 阳极电流 I_d 的正态分布均值；
 C_{I_d} —— 阳极电流 I_d 的变异系数；
 μ_{I_b} —— 屏栅电流 I_b 的正态分布变异系数；
 C_{I_b} —— 屏栅电流 I_b 的变异系数；

通过将加速栅孔径退化方程带入离子推力器的学科交叉方程，得到离子推力器的性能退化方程，如公式(D.8)所示：

$$V_m(\bar{t}) = \frac{-\Delta V - \frac{t_a}{l_d} V_{bp} + \frac{B(\bar{t})}{l_d} V_{bp} - \frac{B(\bar{t})}{l_e} (V_s + V_d)}{1 + \frac{B(\bar{t})}{l_d} - \frac{B(\bar{t})}{l_e} - \frac{t_a}{l_d}} \quad (\text{D.8})$$

式中,

$$B(\bar{t}) = \frac{d_a(\bar{t})}{2\pi} \left[\frac{2t_a}{d_a(\bar{t})} \arctan \left(\frac{d_a(\bar{t})}{2t_a} \right) - 1 \right] \exp \left(-\frac{t_a}{d_a(\bar{t})} \right) \quad (\text{D.9})$$

D.1.4 退化律实验变量

根据离子推力器的功能、性能及裕量分析结果、性能参数退化分析结果和所构建的性能退化方程形式,结合实验的可控性和可测性,可以确定退化律实验变量,如表 D.3 所示。

表 D.3 离子推力器的退化律实验变量

变量类型	控制变量	干预变量	观测变量
变量名称	屏栅尺寸参数、加速栅尺寸参数等内因变量	屏栅电流、阳极电流、屏栅电压、加速栅电压	加速栅孔径直径、电子反流极限电压

D.2 退化律实验方案的制定与实施

D.2.1 实验前准备工作

根据工程实际情况,实验样品数量为 1 个。

根据离子推力器退化律实验目的,结合性能退化方程和退化律实验变量,确定观测变量,包括:加速栅孔径直径和电子反流极限电压,以及离子推力器规范要求的其他功能、性能参数。

D.2.2 实验方案制定

结合工程实际情况,离子推力器的退化律实验总时间为 12000 小时,测量间隔为 500 小时。结合离子推力器的实际使用场景,确定了 4 个需要经历的外因干预变量水平,如表 D.4 所示。

表 D.4 离子推力器的退化律实验外因干预变量水平

外因干预变量水平序号	屏栅电压/V	屏栅电流/A	加速栅电压/V	阳极电流/A
1	1260	2.1	-200	16
2	1050	1.4	-200	11
3	840	0.7	-200	6.5
4	630	0.5	-200	5

在退化律实验方案制定中,外因干预变量的施加方式选择步进施加方式。在每一个外因干预变量水平,原则上,测试次数不少于 3 次,即实验时间不低于 1500 小时,由此通过专家经验确定了 9 个备选方案,如表 D.5 所示。

表 D.5 离子推力器的退化律实验备选方案

备选方案序号	水平 1/h	水平 2/h	水平 3/h	水平 4/h	总实验时间/h
1	3000	6000	1500	1500	12000
2	4000	5000	1500	1500	12000
3	3500	5500	1500	1500	12000
4	3000	4000	1500	1500	12000
5	3500	3500	1500	1500	12000
6	4000	3000	1500	1500	12000
7	2500	2500	1500	1500	12000
8	3000	2000	1500	1500	12000
9	3500	1500	1500	1500	12000

为了准确验证离子推力器的性能退化方程，以最小化基于实验观测数据得到的性能退化方程与理论构建的性能退化方程之间的误差作为实验优化设计目标。上述误差越小，表明相应的实验方案对性能退化方程的验证效果越好。此外，考虑加速栅孔径退化是离子推力器性能退化的主要机理，且加速栅孔径直径可以在实验中观测。鉴于此，基于加速栅孔径退化方程，构建了实验方案评价指标，如公式(D.10)所示：

$$MSE(\eta) = \sqrt{\frac{1}{KM} \sum_{l=1}^K \sum_{j=1}^M \left[\frac{d_a(\mathbf{S}_l, \vec{t}_j) - \hat{d}_{a,\eta}(\mathbf{S}_l, \vec{t}_j)}{d_a(\mathbf{S}_l, \vec{t}_j)} \right]^2} \quad (\text{D.10})$$

式中，

- $\hat{d}_{a,\eta}$ —— 根据实验方案 η 的实验观测数据得到的加速栅孔径退化方程；
- \mathbf{S}_l —— 用于评价指标计算的第 l 个水平下的干预变量组合， $\mathbf{S}_l = (V_{sl}, I_{bl}, I_{dl}, V_{al})$ ；
- \vec{t}_j —— 用于评价指标计算的第 j 次功能性能测试下的退化时间；
- η —— 选择的实验方案编号；
- M —— 用于评价指标计算的功能性能测试数。
- K —— 用于评价指标计算的干预变量组合 \mathbf{S}_l 的水平数；

根据公式(D.10)，计算了离子推力器退化律实验各备选方案的评价指标，结果如表 D.6 所示。

表 D.6 离子推力器的退化律实验备选方案评价指标结果

备选方案序号	水平 1/h	水平 2/h	水平 3/h	水平 4/h	MSE
1	3000	6000	1500	1500	0.2526
2	4000	5000	1500	1500	0.2607
3	3500	5500	1500	1500	0.6798
4	3000	4000	1500	1500	0.3690
5	3500	3500	1500	1500	0.3793
6	4000	3000	1500	1500	0.4479
7	2500	2500	1500	1500	0.6494
8	3000	2000	1500	1500	0.7152
9	3500	1500	1500	1500	0.8102

基于表 D.6 的结果，结合专家意见，考虑水平 1 的干预外因变量更加严苛，离子推力器的性能退化速率更快，因此，最终选择了序号 2 作为退化律实验的最终方案。

D.2.3 实验实施

按照离子推力器的性能退化律实验实施方案，实施实验。实验前、中、后，按照测试要求，对离子推力器实验样品进行全面的目视检查和功能性能参数测试，填写测试记录表。

D.3 退化律实验结果分析

离子推力器的性能退化方程中没有未知参数，因而无需开展统计分析，仅开展方程验证即可。为了验证性能退化方程的准确性，首先对比离子推力器实验样品加速栅中心孔直径的实测数据与其退化方程的预测结果，结果如图 D.1 所示。在离子推力器运行初期，加速栅中心孔存在快速刻蚀阶段。1500 小时后，加速栅中心孔的增大趋于平稳，处于稳定刻蚀阶段。由于仿真构建的加速栅孔径退化方程针对的是稳定刻蚀阶段，因此采用稳定刻蚀阶段的数据（即 1500 小时-12000 小时）进行验证。

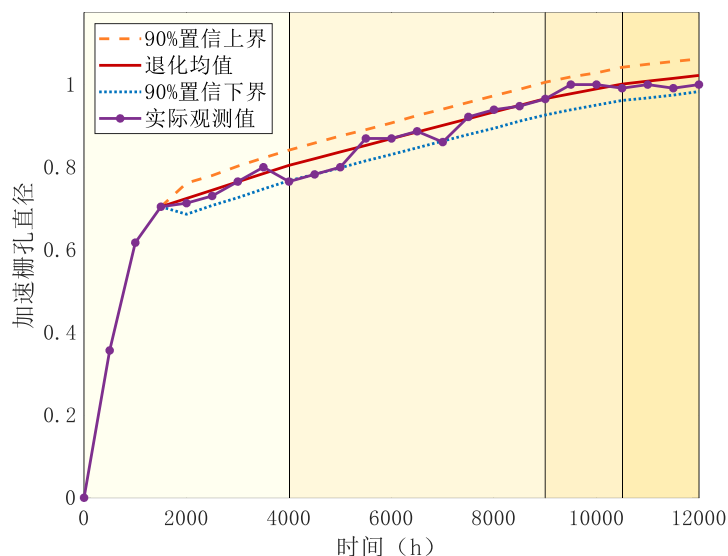


图 D.1 离子推力器实验样品加速栅中心孔直径的实测数据和方程预测结果对比

根据图 D.1，加速栅孔径退化方程预测结果与实测数据贴合情况较好，方程预测的上下界很好地包络了全部数据点，这表明方程对确定性规律和不确定性的量化均具有较高精度，通过了实验验证。

随后，对比离子推力器实验样品电子反流极限电压的实测数据与其性能退化方程的预测结果，结果如图 D.2 所示。

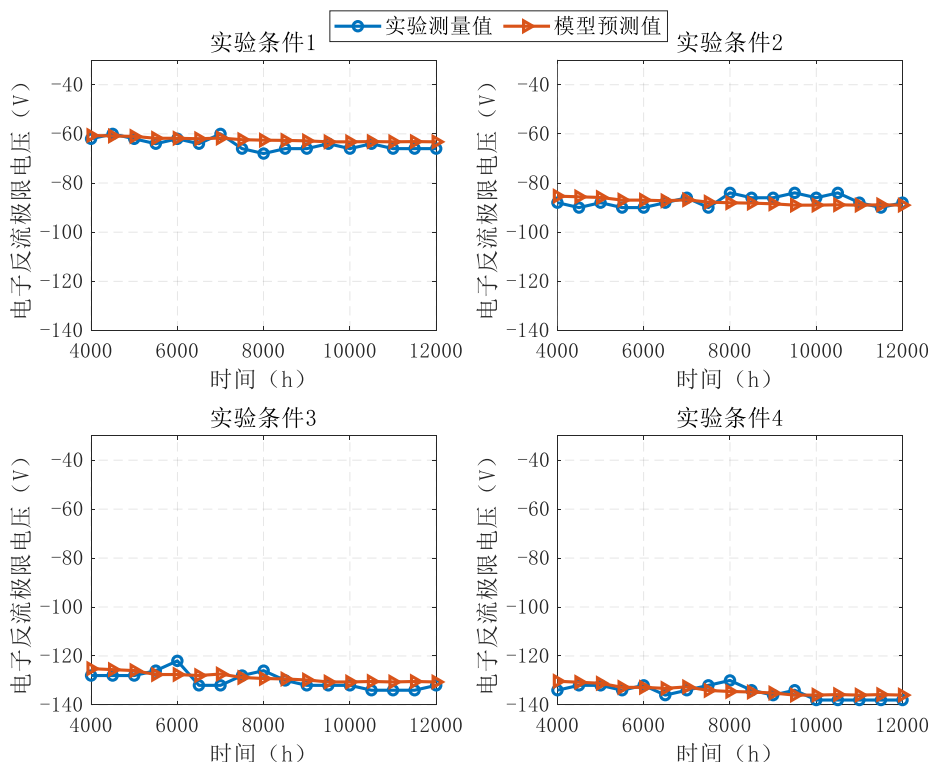


图 D.2 离子推力器实验样品电子反流极限电压的实测数据和性能退化方程预测结果对比

根据图 D.2，离子推力器性能退化方程预测结果与实测数据贴合情况较好，最大的预测偏差不超过 5%，这表明方程具有较高的精度，通过了实验验证。

中国指挥与控制学会团体标准

T/CICC 35012—2026

确信可靠性分配

Belief reliability allocation

2026-06-30 发布

2026-06-30 实施

中国指挥与控制学会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语与定义	1
4 通用要求	1
4.1 工作输入	1
4.2 分配原则	1
5 技术方法	2
5.1 确信可靠性分配步骤	2
5.2 建立确信可靠性分配模型	2
5.2.1 确定分配目的	2
5.2.2 计算重要度	2
5.2.3 构建优化目标	2
5.2.4 确定约束条件	2
5.2.5 分配模型的组成	3
5.3 求解确信可靠性分配模型	3
5.4 验算确信可靠性分配模型	3
5.5 编写报告	3
附录A（资料性）重要度计算方法	4
附录B（资料性）确信可靠性分配模型优化目标构建方法	5
附录C（资料性）光伏发动机的确信可靠性分配示例	6

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。

本文件由中国指挥与控制学会提出并归口。

本文件起草参与单位：北京航空航天大学、深圳市为民可靠性系统工程研究院、杭州市北京航空航天大学国际创新研究院（北京航空航天大学国际创新学院）、厦门蓝威可靠性系统工程研究院有限公司、怀柔实验室、北京海博思创科技股份有限公司、深圳市正浩创新科技有限公司、中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所、中国船舶集团有限公司综合技术经济研究院、山东芯赛思电子科技有限公司、中国飞行试验研究院、国家电网有限公司直流技术中心、中国航天空气动力技术研究院、兰州空间技术物理研究所、中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所、宁德时代新能源科技股份有限公司。

本文件主要起草人：李晓阳、李泊远、陈文彬、康锐、张清源、阮进喜、刘杰、张宪坤、向云、屈重君、连晓棠、唐庆、齐敏、宋海靖、徐海军、李广佳、贺小艳、贾艳辉、刘潇、林坤松。

确信可靠性分配

1 范围

本文件规定了把系统可靠度分配到子系统性能裕量的要求与步骤，主要包括确信可靠性分配模型的建立、求解与验算。

本文件适用于新研系统在论证、方案、工程研制阶段中的可靠性分配，也适用于系统改进或改型中可靠性的分配。

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。

T/CICC 35001—2025	确信可靠性术语
T/CICC 35002—2025	功能、性能及裕量分析
T/CICC 35004—2025	确信可靠性建模与预计

3 术语与定义

T/CICC 35001—2025 确立的术语和定义适用于本文件。

4 通用要求

4.1 工作输入

开展确信可靠性分配工作前，应做好以下工作输入：

- a) 依据 T/CICC 35002—2025 进行系统的功能、性能及裕量分析（FPMA），得到系统功能、子系统、关键性能参数及需求阈值；
- b) 依据 T/CICC 35004—2025 进行系统确信可靠性建模，得到系统各关键性能参数的学科交叉方程、裕量方程与度量方程。

4.2 分配原则

确信可靠性分配需遵循以下原则：

- a) 明确可靠性分配工作的时机。具体要求为：
 - 1) 分配应贯穿于系统全寿命周期各阶段；
 - 2) 从系统论证阶段开始，随着研制工作的推进，结合系统 FPMA、确信可靠性建模与预计以及可靠性实验验证结果进行分配工作的迭代更新；
 - 3) 在系统改型、改进工作中，需要根据实际工作情况进行确信可靠性分配工作的修正或重新开展。
- b) 明确可靠性分配对象的系统层次及其组成。具体要求为：

- 1) 分配的系统层次应根据当前系统所处的工作阶段确定，并且随系统研制推进而逐步深化；
 - 2) 在论证与方案阶段，可仅按照系统最高层次需要实现的功能划分下一层次的子系统，并将系统最高层次的可靠度分配至下一层次子系统；
 - 3) 随着研制工作的推进，在研制、制造、使用等阶段，可同步按照下一层次或更低层次子系统需要实现的功能进一步划分再下一层次或更低层次的子系统，并将可靠度向下分配。
- c) 分配结果可考虑成本、系统复杂度、技术成熟度、测试性、维修性等因素进行调整。

5 技术方法

5.1 确信可靠性分配步骤

确信可靠性分配的步骤为：

- a) 建立确信可靠性分配模型，其中包括确定分配目的、计算重要度、构建优化目标以及确定约束条件；
- b) 选择合适的优化算法求解确信可靠性分配模型，得到各子系统性能裕量需要满足的要求；
- c) 进行确信可靠性分配模型验算。若验算得到的系统可靠度结果不满足要求，则从 a)开始重新进行分配；若验算结果满足要求，则分配结束；
- d) 撰写确信可靠性分配报告。

本文件资料性附录 C 中提供了某型光伏发动机的确信可靠性分配示例。

5.2 建立确信可靠性分配模型

5.2.1 确定分配目的

将系统可靠度分配至各子系统性能裕量的确定性水平与不确定性水平。

具体实施参考附录 C 中的 C.2.1 条。

5.2.2 计算重要度

以各子系统性能裕量的确定性水平与不确定性水平对系统可靠度的影响为依据，计算各子系统性能裕量确定性水平与不确定性水平的重要度。

具体计算方法见附录 A，具体实施参考附录 C 中的 C.2.2 条。

5.2.3 构建优化目标

优化目标应最大化各子系统性能裕量确定性水平，同时最小化性能裕量不确定性水平。重要度更高的性能裕量确定性水平应被分配以更大的要求，重要度更高的性能裕量不确定性水平应被分配以更小的要求。

具体数学表达式的构建方法见附录 B。具体实施参考附录 C 中的 C.2.3 条。

5.2.4 确定约束条件

确信可靠性分配的约束条件主要包括：

- a) 裕量约束，应保证各子系统性能裕量至系统可靠度的数学关系；
- b) 成本约束，应考虑退化与不确定性控制等工作的成本限制；
- c) 技术成熟度约束，应考虑退化与不确定性控制等工作的技术成熟度限制。

具体实施参考附录 C 中的 C.2.4 条。

5.2.5 分配模型的组成

确信可靠性分配模型由优化目标及其约束条件构成。
具体实施参考附录 C 中的 C.2.5 条。

5.3 求解确信可靠性分配模型

选择合适的优化算法求解确信可靠性分配模型，得到各子系统性能裕量的确定性水平与不确定性水平需要满足的要求。

具体实施参考附录 C 中的 C.3 条。

5.4 验算确信可靠性分配模型

将分配结果代入系统的学科交叉方程、裕量方程与度量方程，计算系统可靠度，验证其能否满足给定要求。

具体实施参考附录 C 中的 C.4 条。

5.5 编写报告

确信可靠性分配报告至少应包括以下内容：

- a) 概述；
- b) 确信可靠性分配模型的建立；
- c) 确信可靠性分配模型的求解；
- d) 确信可靠性分配模型的验算；
- e) 结论与建议。

附录 A
(资料性)
重要度计算方法

A.1 正向分析法

基于系统主要功能的可靠度对于某一子系统性能裕量降级的敏感性计算重要度。具体而言，以各子系统性能裕量的均值与标准差分别表征确定性与不确定性水平时，重要度计算如下：

对于子系统*i*的性能裕量的均值 E_i ，其重要度 v_i^E 计算如公式(A.1)：

$$v_i^E = \sum_{j=1}^{n_p} \frac{R_j^{\text{init}}}{R_j^{E_i=E_i^{\text{init}}/C_E}} \quad (\text{A.1})$$

式中，

- R_j^{init} —— 主要功能*j*的初始可靠度；
- $R_j^{E_i=E_i^{\text{init}}/C_E}$ —— E_i 下降为原水平 E_i^{init} 的 $1/C_E$ 时，主要功能*j*的可靠度；
- n_p —— 系统主要功能总数。

对于子系统*i*对应的性能裕量的标准差 Std_i ，其重要度 v_i^{Std} 计算如公式(A.2)：

$$v_i^{\text{Std}} = \sum_{j=1}^{n_p} \frac{R_j^{\text{init}}}{R_j^{\text{Std}_i=C_{\text{Std}} \cdot \text{Std}_i^{\text{init}}}} \quad (\text{A.2})$$

式中，

- $R_j^{\text{Std}_i=C_{\text{Std}} \cdot \text{Std}_i^{\text{init}}}$ —— Std_i 增加为原水平 $\text{Std}_i^{\text{init}}$ 的 C_{Std} 倍时，主要功能*j*的可靠度。

A.2 逆向分析法

要求系统主要功能的可靠度下降而不低于特定下限时，评估某一子系统性能裕量容许的最大降级水平，以此为基础计算重要度。以各子系统性能裕量的均值与标准差分别表征确定性与不确定性水平时，对于子系统*i*的性能裕量均值 E_i ，其重要度 v_i^E 计算如公式(A.3)：

$$v_i^E = \sum_{j=1}^{n_p} \frac{E_i^{R_j=R_j^{\text{init}}/C_R}}{E_i^{\text{init}}} \quad (\text{A.3})$$

式中，

- E_i^{init} —— 子系统*i*对应的性能裕量的初始均值；
- $E_i^{R_j=R_j^{\text{init}}/C_R}$ —— 使得主要功能*j*的可靠度下降为原水平 R_j^{init} 的 $1/C_R$ 时对应的 E_i 水平。

对于子系统*i*对应的性能裕量标准差 Std_i ，其重要度 v_i^{Std} 计算如公式(A.4)：

$$v_i^{\text{Std}} = \sum_{j=1}^{n_p} \frac{\text{Std}_i^{\text{init}}}{\text{Std}_i^{R_j=R_j^{\text{init}}/C_R}} \quad (\text{A.4})$$

式中，

- $\text{Std}_i^{\text{init}}$ —— 子系统*i*对应的性能裕量的初始标准差；
- $\text{Std}_i^{R_j=R_j^{\text{init}}/C_R}$ —— 使得主要功能*j*的可靠度下降为原水平 R_j^{init} 的 $1/C_R$ 时对应的 Std_i 水平。

附录 B
(资料性)
确信可靠性分配模型优化目标构建方法

B.1 线性加权法

采用线性形式定义优化目标，其中基于重要度对表征子系统性能裕量的变量进行加权。考虑变量可能具有望大、望小等不同特性，优化目标形式为公式(B.1)：

$$\max \sum_{i=1}^{n_+} v_i^+ \cdot V_i^+ - \sum_{j=1}^{n_-} v_j^- \cdot V_j^- \quad (\text{B.1})$$

式中，

- V_i^+ —— 第*i*个望大变量；
- v_i^+ —— V_i^+ 对应的重要度；
- n_+ —— 望大变量总数；
- V_j^- —— 第*j*个望小变量；
- v_j^- —— V_j^- 对应的重要度；
- n_- —— 望小变量总数。

B.2 分数加权法

采用分数形式定义优化目标，其中基于重要度对表征子系统性能裕量的变量进行加权。优化目标形式为公式(B.2)：

$$\max \frac{\sum_{i=1}^{n_+} v_i^+ \cdot V_i^+}{\sum_{j=1}^{n_-} v_j^- \cdot V_j^-} \quad (\text{B.2})$$

附录 C
(资料性)
光伏发动机的确信可靠性分配示例

C.1 工作输入

C.1.1 产品现状与用户需求

光伏发动机当前处于论证阶段。用户需求为：在光照强度约为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 的地区使用5年，将光能转化为电能，驱动电机转动，转速不低于 1000rpm 的概率是0.9。

C.1.2 FPMA

C.1.2.1 功能分析

基于用户需求，该光伏发动机的主要功能是稳定转动以做功，具体实现这一功能的子系统为电机，相应的性能参数为转速 (N_M)。电机正常工作对工作条件存在要求：

a) 功率

电机的输入功率需要满足电机工作要求，才能保证正常的转速。而对于保证电机输入功率这一功能，又可进一步细分为两个次要功能：

- 1) 电能生成：由用户需求，光伏发动机应利用特定辐照强度的太阳能生成电能最终驱动电机，具体实现这一功能的子系统为光伏电池，性能参数为电池输出功率 (W_p)。
- 2) 电能分配：驱动电机工作时应将光伏电池产生的动力电进行变压与调制，转化为直接输入电机等子系统的设备电。具体实现这一功能的子系统为配电器，性能参数为配电器输出功率 (W_D)。

b) 温度

过高的环境温度会影响电机工作状态以及输出转速的稳定性。因此应控制环境温度，保证电机的正常工作。实现温度控制这一功能的子系统为散热模块，而散热模块应由配电器输出功率以支持工作。散热模块的性能为温度 (T_H)。

由用户需求，该光伏发动机的主要功能为转动做功，而电能生成、电能分配与温度控制为保证转动做功实现的次要功能。产品需求、功能、子系统与相应性能如图 C.1所示。

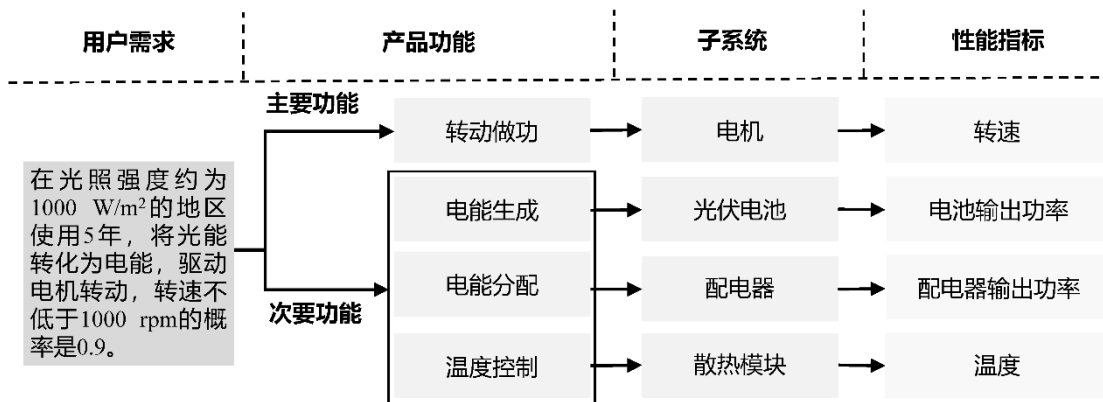


图 C.1 光伏发动机的功能分解

电机工作时，来自配电器的功率与受散热模块调节的温度均满足要求是转速满足要求的必要条件与前提。另外，配电器输出功率满足要求同样为散热模块正常工作的必要条件。进一步地，光伏电池接收光能产生电能，并向配电器输出功率。因此在本案中，可认为配电器输出功率满足要求的必要条件为光伏电池输出功率满足要求，而光伏输出功率满足要求的必要条件为光照强度满足要求。上述各功能之间关系如图 C.2所示

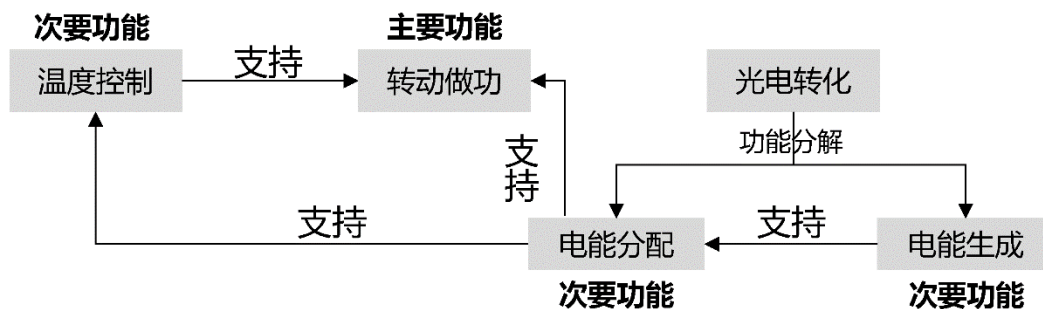


图 C.2 光伏发动机的功能关系

C.1.2.2 性能分析

光伏发动机的性能分析如表 C.1与C.2所示。

表 C.1 光伏发动机性能分解及关键性能参数分析表

功能分析	性能分析		
	性能参数	专家打分	是否关键
转动做功	转速	---	是
电能生成	电池输出功率	---	是
电能分配	配电器输出功率	---	是
温度控制	调节温度	---	是

表 C.2 光伏发动机关键性能参数关联内外因分析表

关键性能参数	类别	关联内因	关联外因
转速	望大	电机属性	配电器输出功率；温度
电池输出功率	望大	光伏电池属性	光照强度
配电器输出功率	望大	配电器属性	电池输出功率
调节温度	望小	散热模块属性	配电器输出功率

C.1.2.3 裕量分析

光伏发动机的裕量分析如表 C.3与C.4所示。

表 C.3 光伏发动机关键性能参数需求阈值分析表

参数属性	关键性能参数	需求阈值	需求阈值分析过程	阈值来源
望大	转速	1000rpm	依据用户需求，考虑产品功能原理与退化机理等信息，确定各关键性能参数需求阈值。	用户需求
	电池输出功率	3000W		产品功能原理与退化机理等信息
	配电器输出功率	3000W		
望小	调节温度	70℃		

表 C.4 光伏发动机裕量分析

关键性能参数	关键性能参数类型	裕量表达式
转速	望大	$M_M = N_M - 1000$
电池输出功率	望大	$M_P = W_P - 3000$
配电器输出功率	望大	$M_D = W_D - 3000$
温度	望小	$M_H = 70 - T_H$

C.1.3 系统确信可靠性建模

C.1.3.1 学科交叉方程建模

基于C.1.2.1条中分析得到的系统功能关系，依据T/CICC 35004 - 2025 5.1.3条 基于功能/故障逻辑的学科交叉方程构建，采用可靠树进行学科交叉方程与裕量方程的建模。可靠树中的事件为各功能对应裕量大于0的事件，并采用逻辑门表征事件之间的逻辑关系。本案例建模得到的可靠树如图 C.3所示：

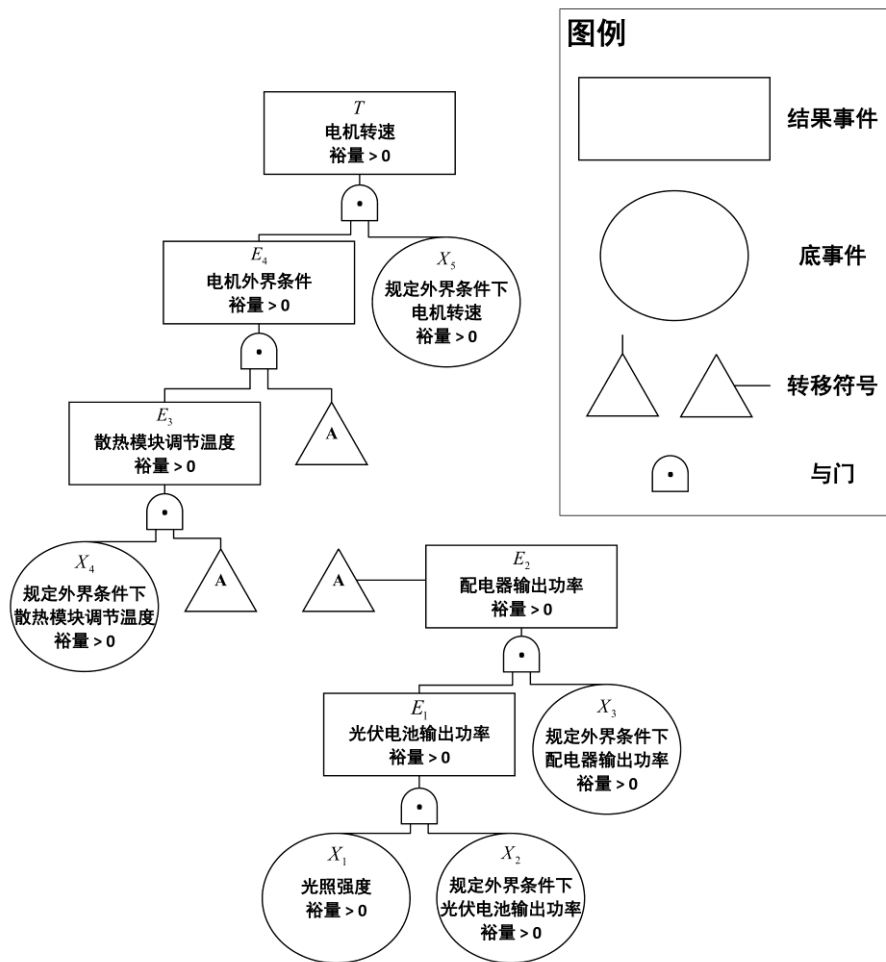


图 C.3 光伏发动机的可靠树

图 C.3中各中间事件及顶事件的结构函数可表示为公式(C.1):

$$E_1 = X_1 \cdot X_2, E_2 = E_1 \cdot X_3, E_3 = E_2 \cdot X_4, E_4 = E_2 \cdot E_3, T = E_4 \cdot X_5 \tag{C.1}$$

公式(C.1)从逻辑层面量化了系统各功能实现的关系，其为光伏发动机的学科交叉方程。

C.1.3.2 裕量方程建模

将图 C.3的可靠树中事件表示为各子系统的性能裕量，如公式(C.2)：

$$\begin{aligned} X_1 &= \{m_G > 0\}, X_2 = \{m_P > 0\}, X_3 = \{m_D > 0\}, \\ X_4 &= \{m_H > 0\}, X_5 = \{m_M > 0\}, \\ E_1 &= \{M_P > 0\}, E_2 = \{M_D > 0\}, E_3 = \{M_H > 0\}, \\ E_4 &= \{M_D > 0, M_H > 0\}, E_5 = \{M_M > 0\} \end{aligned} \quad (C.2)$$

式中，

- M_M —— 电机转速性能裕量；
- m_M —— 规定外界条件下的电机转速性能裕量；
- M_H —— 散热模块调节温度性能裕量；
- m_H —— 规定外界条件下的散热模块调节温度性能裕量；
- M_D —— 配电器输出功率性能裕量；
- m_D —— 规定外界条件下的配电器输出功率性能裕量；
- M_P —— 光伏电池输出功率性能裕量；
- m_P —— 规定外界条件下的光伏电池输出功率性能裕量；
- m_G —— 外界光照强度支持光伏电池工作的裕量，本案例设置为 $\geq 800\text{W}/\text{m}^2$ 。

结合公式(C.1)与公式(C.2)，可综合表征系统各功能的裕量方程，如公式(C.3)：

$$\begin{aligned} \{M_M > 0\} &= \{M_D > 0, M_H > 0\} \cap \{m_M > 0\}; \\ \{M_H > 0\} &= \{M_D > 0\} \cap \{m_H > 0\}; \\ \{M_D > 0\} &= \{M_P > 0\} \cap \{m_D > 0\}; \\ \{M_P > 0\} &= \{m_G > 0\} \cap \{m_P > 0\}. \end{aligned} \quad (C.3)$$

C.1.3.3 度量方程建模

对于该光伏发动机，其主要功能转动做功是产品存在的根本目的，而其他次要功能则为了支持主要功能运行而存在。因此在本案例中，系统可靠度即为电机实现主要功能的可靠度，如公式(C.4)：

$$R_{\text{sys}} = R_M \quad (C.4)$$

式中，

- R_{sys} —— 光伏电动机系统可靠度，其中依据用户需求，使用5年后 R_{sys} 尽可能接近且不低于0.9；
- R_M —— 电机转动做功的可靠度。

依据T/CICC 35004 - 2025 5.4条 度量方程构建，当仅考虑随机不确定性时， R_M 为电机转速裕量大于0的概率，如公式(C.5)：

$$R_M = \Pr\{\tilde{M}_M > 0\} \quad (C.5)$$

式中，

- \tilde{M}_M —— 考虑不确定性的电机转速裕量；
- $\Pr\{\cdot\}$ —— 概率测度；

基于公式(C.3)，公式(C.5)可写作公式(C.6)，从而得到由各子系统性能裕量到系统可靠度的系统确信可靠性模型：

$$\begin{aligned} R_{\text{sys}} &= \Pr\{\tilde{M}_M > 0\} \\ &= \Pr\{\tilde{m}_M > 0\} \times \Pr\{\tilde{m}_H > 0\} \times \Pr\{\tilde{m}_D > 0\} \times \Pr\{\tilde{m}_P > 0\} \times \Pr\{\tilde{m}_G > 0\} \end{aligned} \quad (C.6)$$

式中,

- \tilde{m}_M —— 考虑不确定性的规定外界条件下的电机转速裕量;
- \tilde{m}_H —— 考虑不确定性的规定外界条件下的散热模块调节温度性能裕量;
- \tilde{m}_D —— 考虑不确定性的规定外界条件下的配电器输出功率性能裕量;
- \tilde{m}_P —— 考虑不确定性的规定外界条件下的光伏电池输出功率性能裕量;
- \tilde{m}_G —— 考虑不确定性的光照强度裕量。本案例中令光伏发动机对于光照强度的要求为 $\geq 800\text{W/m}^2$, 而实际光照强度服从 $N(1000,60)\text{W/m}^2$, 则 $\tilde{m}_G \sim N(200,60)\text{W/m}^2$ 。

基于上述系统确信可靠性模型, 在论证阶段进行初始设计时, 各子系统性能裕量预期服从正态分布, 均值与标准差的初始设计水平如表 C.5所示。

表 C.5 光伏发动机性能裕量均值与标准差的初始设计水平

子系统	性能参数	E_i^{init}	$\text{Std}_i^{\text{init}}$
光伏电池	电池输出功率	300W	45W
配电器	配电器输出功率	200W	50W
散热模块	调节温度	10°C	2°C
电机	转速	200rpm	60rpm

C.2 建立确信可靠性分配模型

C.2.1 确定分配目的

分配目的为将系统可靠度分配至各子系统规定条件下性能裕量 (即系统确信可靠性模型中的 $\tilde{m}_P, \tilde{m}_D, \tilde{m}_H, \tilde{m}_M$) 的均值与标准差, 分别表征为 $E_P, \text{Std}_P; E_D, \text{Std}_D; E_H, \text{Std}_H; E_M, \text{Std}_M$ 。

C.2.2 计算重要度

本案例基于正向分析法计算各性能裕量均值与标准差的重要度 (见附录A中的A.1条)。其中计算时所需的各性能裕量均值与标准差的初始设计水平见表 C.5。在此基础上, 为便于优化求解, 分别对各功能的 v_i^E 与 v_i^{Std} 进行指数化与归一化运算, 如公式(C.7)所示:

$$V_i^E = \frac{\exp(v_i^E)}{\sum_{j=1}^n \exp(v_j^E)}, V_i^{\text{Std}} = \frac{\exp(v_i^{\text{Std}})}{\sum_{j=1}^n \exp(v_j^{\text{Std}})} \quad (\text{C.7})$$

式中,

- V_i^E —— 指数化与归一化后的 v_i^E ;
- V_i^{Std} —— 指数化与归一化后的 v_i^{Std} ;
- exp —— 指数运算。

重要度计算结果如表 C.6所示。

表 C.6 光伏发动机重要度

子系统	性能参数	v_i^E	v_i^{Std}
光伏电池	电池输出功率	0.2489	0.2489
配电器	配电器输出功率	0.2499	0.2499
散热模块	温度	0.2490	0.2490
电机	转速	0.2522	0.2522

C.2.3 构建优化目标

各子系统性能裕量均值为望大指标，性能裕量标准差为望小指标。本案例采用分数加权法构建优化目标（见附录B中的B.2条），如公式(C.8)所示：

$$\max \frac{V_P^E \cdot E_P + V_D^E \cdot E_D + V_H^E \cdot E_H + V_M^E \cdot E_M}{V_P^{\text{Std}} \cdot \text{Std}_P + V_D^{\text{Std}} \cdot \text{Std}_D + V_H^{\text{Std}} \cdot \text{Std}_H + V_M^{\text{Std}} \cdot \text{Std}_M} \quad (\text{C.8})$$

C.2.4 确定约束条件

本案例中分配模型约束条件包括：

- 裕量约束，即公式(C.6)；
- 成本约束：在本案例中，考虑到光伏发动机寿命周期中控制不确定性的成本限制，并进行简化假设，设置在使用 5 年后，各性能裕量标准差预期大于初始标准差的 1.5 倍，即 $\text{Std}_i > 1.5 \times \text{Std}_i^{\text{init}}$ ；
- 技术成熟度约束：在本案例中，考虑当前技术条件下光伏发动机性能存在不可避免的退化，并进行简化假设，设置在使用 5 年后，各性能裕量均值预期小于初始均值的 0.9 倍，即 $E_i < 0.9 \times E_i^{\text{init}}$ 。

C.2.5 分配模型的组成

基于上述优化目标及约束条件，可建立确信可靠性分配模型，模型形式如公式(C.9)所示：

$$\begin{aligned} \max & \frac{V_P^E \cdot E_P + V_D^E \cdot E_D + V_H^E \cdot E_H + V_M^E \cdot E_M}{V_P^{\text{Std}} \cdot \text{Std}_P + V_D^{\text{Std}} \cdot \text{Std}_D + V_H^{\text{Std}} \cdot \text{Std}_H + V_M^{\text{Std}} \cdot \text{Std}_M} \\ \text{s.t. :} & \\ & R_{\text{sys}} = \Pr\{\tilde{m}_M > 0\} \times \Pr\{\tilde{m}_H > 0\} \times \Pr\{\tilde{m}_D > 0\} \times \Pr\{\tilde{m}_P > 0\} \times \Pr\{\tilde{m}_G > 0\}, 0 < R_{\text{sys}} - 0.9 < \varepsilon; \\ & \text{Std}_i \geq 1.5 \times \text{Std}_i^{\text{init}}, i = P, D, H, M; \\ & E_i \leq 0.9 \times E_i^{\text{init}}, i = P, D, H, M. \end{aligned} \quad (\text{C.9})$$

式中，

ε —— 极小值，本案例中取0.001。

C.3 求解确信可靠性分配模型

考虑到系统确信可靠性模型较为复杂，本案例采用启发式算法DIWJAYA求解上述确信可靠性分配模型，最终得到针对各性能裕量均值与标准差的分配要求，结果如表 C.7所示。

表 C.7 光伏发动机确信可靠性分配结果

子系统	性能参数	E_i	Std_i
光伏电池	电池输出功率	196.5118W	73.8254W
配电器	配电器输出功率	125.3772W	75.1092W
散热模块	温度	8.9989°C	3.0000°C
电机	转速	148.3027rpm	90.0065rpm

C.4 验算确信可靠性分配模型

将表 C.7中的分配结果代入公式(C.4)，计算系统可靠度以进行验算，结果如表 C.8所示。

表 C.8 光伏发动机各子系统可靠度及系统可靠度

子系统	可靠度
光伏电池	0.9957
配电器	0.9484
散热模块	0.9471
电机	0.9000
系统可靠度	0.9000

验算得到的系统可靠度为0.9000，满足用户需求的系统可靠度要求0.9。

ICS 33.040.40

CCS M 15

T/CICC

中国指挥与控制学会团体标准

T/CICC 35013—2026

卫星通信网络可靠性和可用性评估

**Reliability and availability assessment
for satellite communication networks**

2026-06-30 发布

2026-06-30 实施

中国指挥与控制学会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语与定义	1
4 通用要求	1
4.1 时机	1
4.2 假设	1
4.3 程序	2
5 系统建模	2
5.1 卫星通信网络	2
5.2 故障判据	3
5.3 建立网络模型	3
5.4 动态网络向静态网络转化	4
5.5 网络简化	5
6 数据获取	6
7 可靠性和可用性评估	6
7.1 总体流程	6
7.2 静态网络的可靠性和可用性评估	7
7.2.1 评估方法比较	7
7.2.2 状态枚举评估法	8
7.2.3 不交积和评估法	9
7.2.4 二元决策图评估法	10
7.2.5 蒙特卡洛评估法	11
7.3 动态网络的可靠性和可用性评估	13
8 得出结论和编写报告	14
9 反馈设计	14
附录 A（资料性）基于状态枚举法的卫星通信网络可靠性评估案例	15
附录 B（资料性）基于不交积和法的卫星通信网络可靠性评估案例	19
附录 C（资料性）基于二元决策法的卫星通信网络可靠性评估案例	21
附录 D（资料性）基于蒙特卡罗法的卫星通信网络可靠性评估案例	23

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》的规定编写。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。

本文件由中国指挥与控制学会提出并归口。

本文件起草单位：北京航空航天大学、杭州市北京航空航天大学国际创新研究院（北京航空航天大学国际创新学院）、中国航空综合技术研究所、中国空间技术研究院、航天东方红卫星有限公司、中国电子科技集团公司电子科学研究院、中国飞行试验研究院。

本文件主要起草人：李瑞莹、黄宁、胡依佳、于浩、马骥、李娇、王学望、刘亮、王靖、陈禹名、孙利娜。

卫星通信网络可靠性和可用性评估

1 范围

本文件规定了卫星通信网络可靠性和可用性评估的程序和方法。

本文件适用于对考虑随机不确定性的卫星通信网络的覆盖可靠性/可用性、连通可靠性/可用性和业务可靠性/可用性进行评估。

2 规范性引用文件

下列文件中的有关条款通过引用而成为本文件的条款。凡注日期或版次的引用文件，其后的任何修改（不包括勘误的内容）或修订版本都不适用于本文件，凡不注日期或版次的引用文件，其最新版本适用于本文件。

GJB/Z 23 可靠性维修性工程报告编写要求

GJB 421 卫星术语

GJB 451 装备通用质量特性术语

T/CICC 35001 确信可靠性术语

T/CICC 35014 卫星通信网络可靠性和可用性参数体系

T/CICC 35015 卫星通信网络可靠性和可用性指标确定方法

3 术语与定义

GJB 421、GJB 451、T/CICC 35001、T/CICC 35014、T/CICC 35015界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

路集 **path set**

若干单元的集合，这些单元全部正常工作能够保证系统正常工作。

3.2

最小路集 **minimal path set**

单元数目不能再减少的路集，即在最小路集中任意去掉一个单元之后，剩下的单元集合就不是路集。

4 通用要求

4.1 时机

卫星通信网络的可靠性和可用性评估应在研制阶段早期进行，并随研制工作进展迭代细化，随设计更改而修正。通过评估，可对卫星通信网络未来可能达到的可靠性和可用性水平进行预计。

4.2 假设

本文件适用于以下模型假设：

- a) 卫星通信网络中所有平台和设备(包括但不限于卫星平台及其载荷、信关站、运行控制中心等)以及所有链路(包括星间链路、用户链路、馈电链路和控制链路)均仅有正常与故障两种状态;
- b) 卫星通信网络中各个平台、设备、链路的故障相互独立。

4.3 程序

卫星通信网络可靠性和可用性评估的程序见图 1。

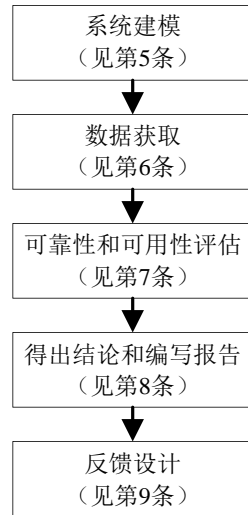


图1 卫星通信网络可靠性和可用性评估的程序

5 系统建模

5.1 卫星通信网络

卫星通信网络由卫星平台及其载荷、运行控制中心、信关站和用户终端组成。其中，卫星平台是由卫星服务系统组成的可支持某一种或几种有效载荷的组合物，其载荷一般包括负责卫星之间通信的星间通信载荷、负责卫星与地面用户之间通信的用户载荷、负责卫星与信关站之间通信的馈电载荷，卫星平台及其载荷共同提供卫星中继服务；运行控制中心是全系统运行的中枢，通过星地及星间链路实现卫星通信网络的网络化管控；信关站是星地互联的枢纽，负责呼叫处理、交换并与地面通信网连接；用户终端则包括各类手持、机载或固定终端等。卫星之间通过星间链路进行通信；卫星与用户终端之间通过用户链路进行通信；卫星与信关站之间通过馈电链路进行通信；运行控制中心与信关站之间通过控制链路进行通信。卫星通信网络示意图见图 2。

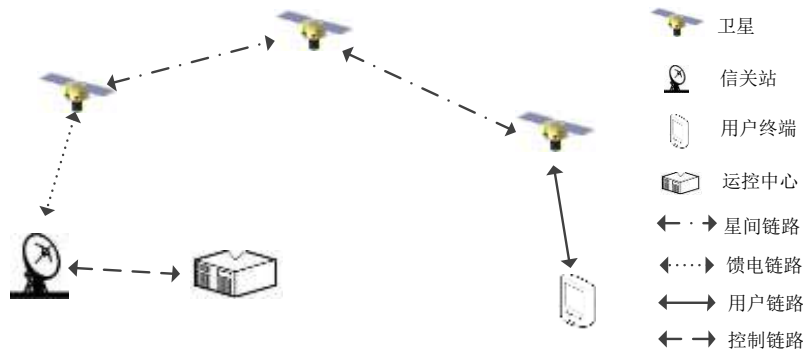


图2 卫星通信网络示意图

由于运行控制中心与卫星通信网络其余部分构成串联结构，其故障将直接影响全网运行。因此，在评估卫星通信网络本身的可靠性/可用性时，可暂不考虑运行控制中心及其控制链路。完成卫星通信网络其余部分的确信可靠度/可用度评估后，再联合运行控制中心及其控制链路按可靠性框图法建模并计算整个网络的确信可靠度/可用度。

5.2 故障判据

基于T/CICC 35014定义的覆盖可靠性/可用性、连通可靠性/可用性和业务可靠性/可用性，本文件的故障判据定义如下：

表1 卫星通信网络的故障判据

功能维度	故障判据
覆盖	满足覆盖重数的服务区面积<规定的服务区面积阈值
连通	能连通的节点对数<规定的节点对数阈值
业务可用	能成功执行业务的节点对数<规定的节点对数阈值，其中成功执行业务是指满足业务规定的性能要求（如时延、丢包率、误码率、容量等）

5.3 建立网络模型

将卫星通信网络构建成动态网络模型 $G(V(t), E(t), W(t))$ 。其中， $V(t)$ 是 t 时刻的节点集合，包括卫星平台及其载荷、信关站和用户终端； $E(t)$ 是 t 时刻的链路集合，包括星间链路、用户链路和馈电路径； $W(t)$ 是 t 时刻的节点与链路权重集合，权重可以表达链路长度、丢包率、误码率等属性特征。

节点建模过程中，卫星平台及其载荷、信关站可直接抽象为节点；并将地球表面划分为多个地面小区，并在每个地面小区中心处设置一个虚拟节点，以表征用户终端。若某虚拟节点可与某卫星连接，则认为其对应整个地面小区的用户终端均可与该卫星连接。地面小区的划分应满足以下要求：

- a) 每个地面小区面积不大于卫星单波束对地覆盖面积；
- b) 地面小区总数的确定，应兼顾计算效率和精度。

图3给出了一个地面小区和虚拟节点的划分示例，图中每一个“+”代表一个虚拟节点。

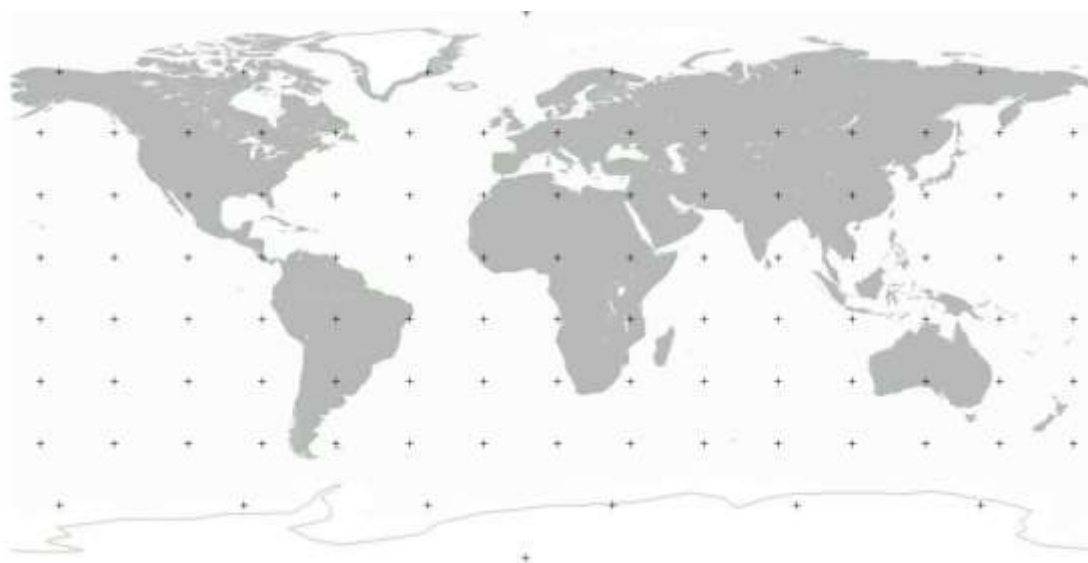


图3 地面小区和虚拟节点示意图

链路建模过程中，将链路关系通过下述邻接矩阵表达：

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0 & a_{1,2}(t) & \dots & a_{1,k}(t) \\ a_{2,1}(t) & 0 & \dots & a_{2,k}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{k,1}(t) & a_{k,2}(t) & \dots & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$a_{i,j}(t)$ —— t 时刻节点 i 和节点 j 之间有链路记为 1，否则记为 0；

k ——网络节点数量。

具体建模规则如下：

- a) 卫星与其载荷通过链路连接，该链路视为绝对可靠/可用；
- b) 卫星间通过其星间通信载荷建立连接。图4给出了一个星间链路示意图，图中每颗卫星搭载了4个星间通信载荷，可与相邻四颗卫星建立四条星间链路；

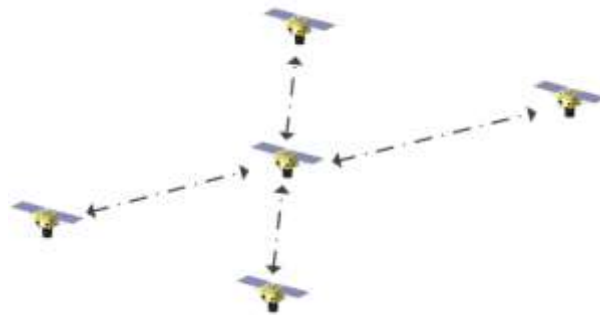


图4 星间链路示意图

- c) 卫星的用户载荷与地面虚拟节点之间，以及卫星的馈电载荷与信关站之间的连接，应依据卫星对地覆盖动态关系确定。如图5所示， t 时刻，若某虚拟节点/信关站位于某卫星的覆盖范围内，则此时此刻视该虚拟节点/信关站与该卫星存在相应的用户链路/馈电链路。

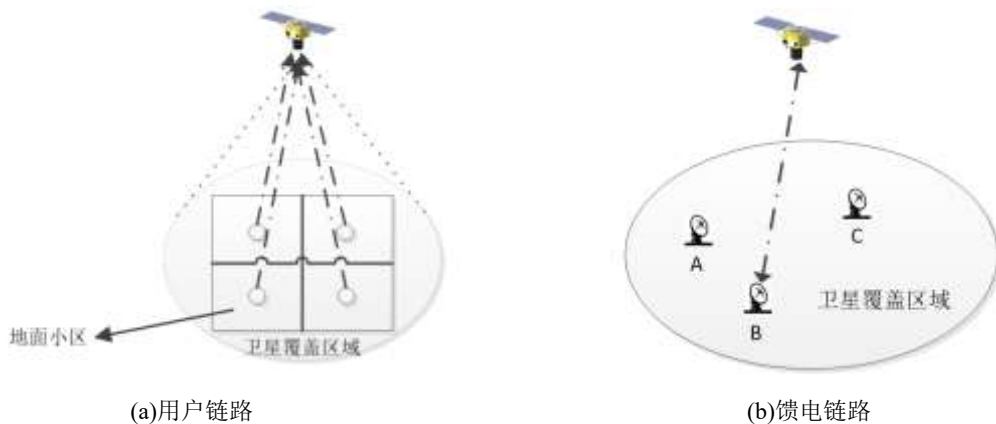


图5 卫星-虚拟节点/信关站连接示意图

5.4 动态网络向静态网络转化

卫星通信网络中卫星与地球间若存在相对运动，则每颗卫星的对地覆盖情况一直在变化，从而使得卫星通信网络中节点间的连接关系和链路的属性呈现出动态性。考虑卫星通信网络是一个典型的周期性动态系统，为便于可靠性/可用性评估，可采用时间切片技术将动态网络转化为一系列典型时刻的静态网络，分别评估后再进行综合。

具体转化过程如下：令卫星通信网络一个运行周期为 T ，以固定时间间隔 Δt 抽取一个拓扑快照，共获得若干静态拓扑。 Δt 的取值应遵循以下原则：

- a) 反映网络可靠性/可用性特征，并兼顾计算效率；
- b) 一般应小于用户终端在两颗卫星之间的切换时间。

图 6 给出了一个简单的基于时间切片的静态拓扑示例。

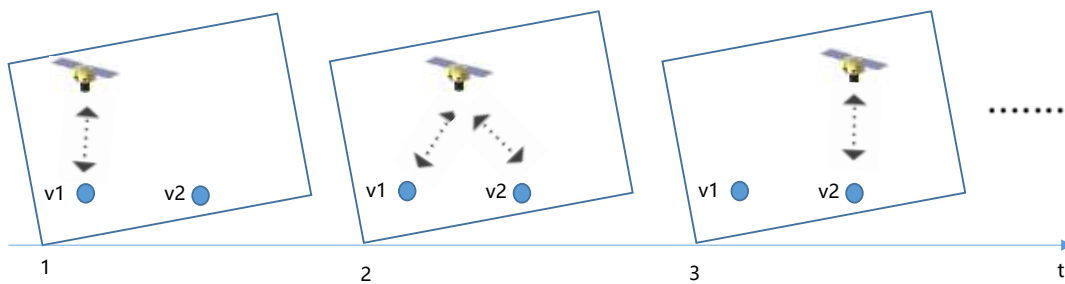


图6 时间切片示例

基于上述时间切片方法，动态卫星通信网络模型 $G(V(t), E(t), W(t))$ 可以转化为一系列静态网络模型： $G_1(V_1, E_1, W_1), G_2(V_2, E_2, W_2), \dots, G_h(V_h, E_h, W_h)$ ，其中， h 为总切片数， $h = \lceil T/\Delta t \rceil$ ， $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整； $G_i(V_i, E_i, W_i)$ 代表第 i 个时间切片的静态网络模型。

5.5 网络简化

为简化计算，可对网络中存在的串联、并联及度1节点的三类拓扑结构进行化简，其简化规则如下：

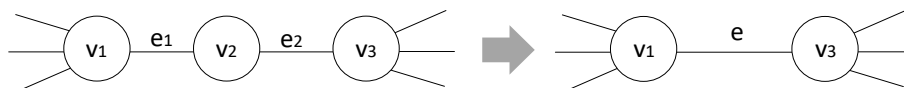
- a) 串联化简：对于如图7(a)所示的串联结构中，若中间节点 v_2 为中继节点（如卫星节点或其载荷）而非终端节点（如虚拟节点和信关站），则可以将两条串联链路 e_1 和 e_2 以及中间节点 v_2 简化为图7(b)所示的单一等效链路 e ，简化后的链路 e 可靠度/可用度 p_e 计算如下：

$$p_e = p_{e_1} p_{v_2} p_{e_2} \dots \dots \dots (2)$$

式中：

p_{v_k} —— 节点 v_k 的可靠度/可用度；

p_{e_k} —— 链路 e_k 的可靠度/可用度。



(a)化简前

(b)化简后

图7 串联化简

- b) 并联化简：对于如图8(a)所示的并联结构，可将两条并联链路 e_1 和 e_2 简化为如图8(b)所示的单一等效链路 e 。简化后，链路 e 的可靠度/可用度 p_e 计算如下：

$$p_e = 1 - q_{e_1} q_{e_2} \dots \dots \dots (3)$$

式中：

q_{e_k} ——链路 e_k 的不可靠度/不可用度， $q_{e_k} = 1 - p_{e_k}$ 。

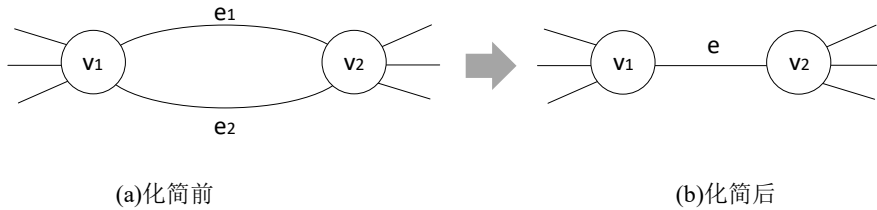


图8 并联化简

- c) 度1节点化简：对于如图9(a)所示度为1的节点 v_1 （即仅通过单条链路 e_1 连接至网络），可将其与链路 e_1 一同删除，简化为图9(b)所示结构。

- 1) 若节点 v_1 是终端节点而非中继节点，则简化后节点 v 的可靠度/可用度 p_v 计算如下：

$$p_v = p_{v_1} p_{e_1} p_{v_2} \dots \dots \dots (4)$$

- 2) 若节点 v_1 是中继节点非中终端节点，则 p_v 计算如下：

$$p_v = p_{v_2} \dots \dots \dots (5)$$

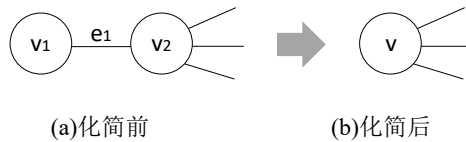


图9 度1节点化简

6 数据获取

卫星通信网络可靠性和可用性评估，需获取以下三类数据：

- a) 网络拓扑数据：即网络连接关系；
- b) 节点和链路的可靠性/可用性数据：包括卫星平台及其载荷、信关站、运行控制中心和各链路的可靠度/可用度；
- c) 性能属性数据：即各时间切片下节点与链路的权重，如链路长度、丢包率、误码率等。

不同评估目标所需的具体数据及其获取方式见表 2。

7 可靠性和可用性评估

7.1 总体流程

卫星通信网络的可靠性和可用性评估，应首先对 5.4 条转化得出的各时间切片下的静态网络可靠性/可用性进行评估，再综合计算动态网络的可靠性/可用性。

表2 数据需求及其获取方式

评估目标	所需数据	数据获取方式
覆盖确信 可靠度/可用度	每个时间切片卫星与地面虚拟节点间、卫星与信关站间的连接关系	仿真
	卫星平台及其用户载荷、馈电载荷、信关站、运行控制中心、用户链路、馈电链路、控制链路的可靠度/可用度	可靠性/可用性预计或试验评估
连通确信 可靠度/可用度	每个时间切片卫星间、卫星与地面虚拟节点间、卫星与信关站间的连接关系	仿真
	卫星平台及其载荷、信关站、运行控制中心、星间链路、用户链路、馈电链路、控制链路的可靠度/可用度	可靠性/可用性预计或试验评估
业务确信 可靠度/可用度	每个时间切片卫星间、卫星与地面虚拟节点间、卫星与信关站间的连接关系	仿真
	卫星平台及其载荷、信关站、运行控制中心、星间链路、用户链路、馈电链路、控制链路的可靠度/可用度	可靠性/可用性预计或试验评估
	每个时间切片设备和星间链路、用户链路和馈电链路的属性（如链路长度、丢包率、误码率等）。如，关注时延是否满足要求时需要链路长度；关注丢包率时需要丢包率；关注误码率时需要误码率等	仿真、计算或经验数据

7.2 静态网络的可靠性和可用性评估

7.2.1 评估方法比较

表3列出了状态枚举、不交积和、二元决策图及蒙特卡洛仿真四种常用的静态网络可靠性和可用性评估方法的原理、适用参数与适用条件。方法的选用可依据网络的复杂程度及所需评估的参数确定，具体实施步骤见7.2.2-7.2.5条。

表3 卫星通信网络可靠性和可用性评估方法对比

方法	原理	适用参数	适用条件
状态枚举	通过枚举所有满足网络正常工作条件的状态组合，计算其对应概率之和，从而求得网络确信可靠度/可用度	覆盖确信可靠度/可用度 连通确信可靠度/可用度 业务确信可靠度/可用度	简单卫星通信网络，如节点少于20个，具体数值视计算能力而定
不交积和	首先寻找网络的最小路集，然后把相交的最小路集转化为相互不交的集合，再对各集合事件的概率进行求和，最终计算出网络确信可靠度/可用度	连通确信可靠度/可用度 业务确信可靠度/可用度	
二元决策图	首先寻找网络的最小路集，然后将系统状态对应的布尔函数表达为二元决策图，通过分析图中所有使系统正常的路径，计算其概率之和，从而求得网络确信可靠度/可用度	连通确信可靠度/可用度 业务确信可靠度/可用度	

表3 卫星通信网络可靠性和可用性评估方法对比（续）

方法	原理	适用参数	适用条件
蒙特卡洛仿真	根据节点和链路的可靠度/可用度，通过抽样模拟卫星通信网络中每个节点和链路的状态，统计满足正常工作条件的比例，经多次仿真后以频率逼近概率，获得网络确信可靠度/可用度的近似估计	覆盖确信可靠度/可用度 连通确信可靠度/可用度 业务确信可靠度/可用度	适用于规模较大，结构较复杂的卫星通信网络

7.2.2 状态枚举评估法

7.2.2.1 概述

状态枚举法通过枚举所有可能的网络状态组合，识别其中满足网络正常工作条件的状态组合，并将其对应概率累加，从而计算静态网络的覆盖、连通或业务确信可靠度/可用度。

由于需遍历全部系统状态，状态枚举法的计算复杂度随网络规模增大而显著增加，因此主要适用于结构简单的卫星通信网络。相关应用案例见附录 A。

7.2.2.2 评估实施步骤

步骤 1：枚举网络全部状态

对于一个有 n 个二态节点 m 条二态链路的网络，枚举网络所有状态，每个状态记为节点和链路状态的集合，如 $\{x_1^v, x_2^v, \dots, x_n^v, \overline{x_1^e}, \overline{x_2^e}, \dots, \overline{x_{n+m}^e}\}$ ，其中 x_k^v 表示节点 k 正常， $\overline{x_k^v}$ 表示节点 k 故障； x_k^e 表示链路 k 正常， $\overline{x_k^e}$ 表示链路 k 故障。

步骤 2：识别满足正常工作条件的状态

针对每一种网络状态，判断其是否满足正常工作的条件：

- a) 对于覆盖确信可靠度/可用度，判断满足覆盖重数的服务区面积是否达到要求；
- b) 对于连通确信可靠度/可用度，判断是否满足连通节点对数要求；
- c) 对于业务确信可靠度/可用度，判断是否满足成功执行业务的节点对数要求。

将满足条件的状态加入集合 S 。

步骤 3：计算满足条件的状态存在概率

基于节点和链路的可靠度/可用度，计算每个满足条件的状态存在概率。第 j 个满足条件的状态 S_j 的存在概率 p_{S_j} 计算公式如下：

$$p_{S_j} = \prod_{v_k \text{ 或 } e_k \in S_j} p_{v_k} p_{e_k} \prod_{v_k \text{ 或 } e_k \notin S_j} q_{v_k} q_{e_k} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

- p_{v_k} —— 节点 v_k 的可靠度/可用度；
- p_{e_k} —— 链路 e_k 的可靠度/可用度；
- q_{v_k} —— 节点 v_k 的不可靠度/不可用度， $q_{v_k} = 1 - p_{v_k}$ ；
- q_{e_k} —— 链路 e_k 的不可靠度/不可用度， $q_{e_k} = 1 - p_{e_k}$ 。

步骤 4：计算确信可靠度/可用度

将所有满足条件的状态的存在概率累加，得到第 i 个时间切片下的静态网络确信可靠度/可用度 θ_i ，

计算公式如下：

$$\theta_i = \sum_{S_j \in S} p_{S_j} \dots\dots\dots(7)$$

7.2.3 不交积和评估法

7.2.3.1 概述

不交积和法是通过寻找网络正常工作所需的最小路集，将其转化为互不相交的事件集合，进而计算这些不相交事件概率之和，以获得静态网络确信可靠度/可用度。

本方法计算效率优于状态枚举法，适用于结构相对简单的静态网络的连通/业务确信可靠度/可用度评估。相关应用案例见附录 B。

7.2.3.2 评估实施步骤

步骤 1：网络转化

将节点非绝对可靠网络转化为节点绝对可靠网络，具体实现方法如图 10 所示，将非绝对可靠节点 v 替换为两个绝对可靠节点 v_1, v_2 及连接二者的一条等效链路 e ，链路 e 的可靠度/可用度等于原节点 v 的对应值（即 $p_e = p_v$ ）。

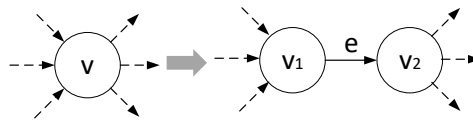


图10 网络转化

步骤 2：确定网络最小路集

采用联络矩阵法或网络遍历法，求解使网络正常工作的所有最小路集。以端端连通确信可靠度为例，联络矩阵法求解最小路集的过程如下：

a) 对包含 n 个节点的网络，定义一阶联络矩阵 $C^{(1)} = [c_{ij}^{(1)}]_{n \times n}$ ，其中

$$c_{ij}^{(1)} = \begin{cases} e_x & \text{节点 } i \text{ 到 } j \text{ 有链路 } e_x \text{ 直接相连} \\ 0 & \text{节点 } i \text{ 到 } j \text{ 无链路直接相连} \end{cases} \dots\dots\dots(8)$$

式中：

$c_{ij}^{(1)}$ ——节点 v_i 和节点 v_j 之间长度为 1 的连接关系；

e_x ——连接节点 v_i 和节点 v_j 的链路。

b) 定义二阶联络矩阵 $C^{(2)} = C^{(1)}C^{(1)} = [c_{ij}^{(2)}]_{n \times n}$ ，其中

$$c_{ij}^{(2)} = \bigcup_{k=1}^n (c_{ik}^{(1)} \cap c_{kj}^{(1)}) \dots\dots\dots(9)$$

式中：

$c_{ij}^{(2)}$ ——节点 i 和节点 j 之间长度为 2 的所有最小路集；

n ——网络中节点总数。

c) 继续定义高阶联络矩阵 $C^{(r)} = C^{(1)}C^{(r-1)} = [c_{ij}^{(r)}]_{n \times n}$ ，其元素 $c_{ij}^{(r)}$ 记录节点 i 和节点 j 之间长度

为 r 的所有最小路集。对于包含 n 个节点的网络，其最长路径长度 $r_{\max} \leq n-1$ ；

d) 通过多次矩阵乘法，得到 $C^{(1)}, C^{(2)}, C^{(3)}, \dots, C^{(n-1)}$ ，可求解网络中任意两节点间的全部最小路集。

具体研究某个网络的端端可靠性时，往往只关心输入节点 i 到输出节点 j 之间的所有最小路集。这时只需要求出 $C^{(1)}, C^{(2)}, C^{(3)}, \dots, C^{(n-1)}$ 中的第 j 列元素即可，记为 $[C^{(1)}]_j, [C^{(2)}]_j, \dots, [C^{(n-1)}]_j$ ，将最小路集表示为 M_1, M_2, \dots, M_s 。

步骤 3：计算确信可靠度/可用度

根据最小路集 M_1, M_2, \dots, M_s ，构建如下不交积和表达式，计算第 i 个时间切片下的静态网络确信可靠度/可用度 θ_i ：

$$\theta_i = \Pr(M_1) + \Pr(\overline{M_1}M_2) + \dots + \Pr(\overline{M_1}\overline{M_2}\dots M_s) \dots\dots\dots (10)$$

式中：

$\Pr(\cdot)$ ——不交积的存在概率。

7.2.4 二元决策图评估法

7.2.4.1 概述

二元决策图是一种图形化概率建模技术，其通过将系统正常工作状态的布尔逻辑函数（即由所有最小路集构成的逻辑表达式）转化为一个规范化的图形数据结构，即二元决策图。二元决策图中从根节点到任意叶节点“1”的每一条路径，均代表一组互不相交的、能使系统正常的链路状态组合。通过计算所有通往叶节点“1”的路径存在概率之和，可得到静态网络的连通/业务确信可靠度/可用度。

二元决策图法的计算效率高于状态枚举法，适用于计算简单卫星通信网络的连通/业务确信可靠度/可用度。相关应用案例见附录C。

7.2.4.2 评估实施步骤

步骤 1：网络转化和确定网络最小路集

该步骤与7.2.3.2条相同，最终找到网络中所有最小路集 M_1, M_2, \dots, M_s 。

步骤 2：建立布尔函数

根据获得的最小路集建立系统正常工作的布尔函数 f ，其具体规则如下：

- a) 同一最小路集内的链路元素间为逻辑“与”关系（布尔乘“ \cdot ”）；
- b) 不同最小路集之间为逻辑“或”关系（布尔加“+”）。

示例：若最小路集为 $\{e_1, e_4\}$ 、 $\{e_2, e_5\}$ 、 $\{e_2, e_3, e_4\}$ 、 $\{e_1, e_3, e_5\}$ ，则建立布尔函数为：

$$f = e_1e_4 + e_2e_5 + e_2e_3e_4 + e_1e_3e_5。$$

步骤 3：构建二元决策图

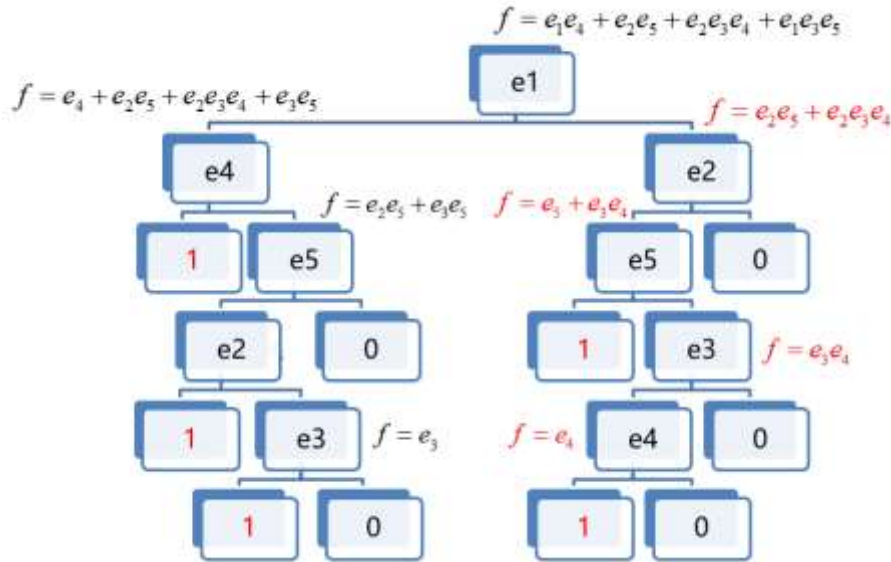
二元决策图的构建应遵循以下递归过程：

- a) 从布尔函数 f 中选择某个元素作为当前节点，可优先选择在多个最小路集中出现的元素，以简化二元决策图；
- b) 从当前节点派生出两个子分支：
 - i) 0 分支：令该元素取值为 0（代表故障）。将该变量代入布尔函数 f 并进行布尔简化。若简化后函数值为 0，则该分支叶节点取“0”，该分支终止；
 - ii) 1 分支：令该元素取值为 1（代表正常）。将该变量代入布尔函数 f 并进行布尔简化。若简

化后函数值为 1，则该分支叶节点取“1”，该分支终止。

c) 对每个新生成的、函数值非 0 或 1 的子分支，重复步骤 a)与 b)，直至所有分支均终止于“0”或“1”叶节点。

图11给出了一个对 $f = e_1e_4 + e_2e_5 + e_2e_3e_4 + e_1e_3e_5$ 进行分析的二元决策图示例。



注：左向分支为“1”分支，右向分支为“0”分支。

图11 二元决策图示例

步骤 4: 计算确信可靠度/可用度

对所有到叶节点1的路径 ψ 存在概率求和，即得第*i*个时间切片下的静态网络确信可靠度/可用度。

$$\theta_i = \sum_{\psi} \prod_{k \in \psi_j} prob_k \dots\dots\dots(11)$$

式中：

θ_i ——第 *i* 个时间切片下的确信可靠度/可用度；

$prob_k$ ——*k* 事件发生概率，即某条链路正常/故障的概率，取值为该链路可靠度/不可靠度，或可用度/不可用度；

ψ ——从根节点出发，叶节点为“1”的所有分支。

7.2.5 蒙特卡洛评估法

7.2.5.1 概述

蒙特卡洛模拟法是一种基于统计抽样的概率评估方法，其核心原理是通过大量随机试验中事件发生的频率，来估计该事件发生的概率。评估结果的精度与仿真次数正相关。在相同条件下，仿真次数越大，评估结果的统计置信度越高，估计误差越小。

本方法适用于评估中等及大规模卫星通信网络的覆盖、连通及业务确信可靠度/可用度。相关应用案例见附录 D。

7.2.5.2 评估实施步骤

步骤 1: 计算蒙特卡洛仿真次数

蒙特卡洛仿真的次数 n 应基于所需的置信水平与估计精度确定。在 $1-\alpha$ 置信度下, 静态网络可靠度/可用度估计值 $\hat{\theta}$ 与真值 θ 之间误差 ε 可表示为:

$$\varepsilon = |\hat{\theta} - \theta| \leq \frac{x_{\alpha} \sigma_{\theta}}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

式中:

σ_{θ} ——静态网络确信可靠度/可用度 θ 的标准差;

x_{α} ——正态分布中的 $\alpha\%$ 分位数;

n ——仿真运行的总次数。

网络节点和链路状态(故障/正常)服从(0,1)分布, 其标准差为 $\sigma = \sqrt{\theta(1-\theta)}$ 。为保证估计误差不大于 ε , 仿真次数 n 应满足:

$$n \geq \frac{\theta(1-\theta)x_{\alpha}^2}{\varepsilon^2} \quad (13)$$

这里, $\hat{\theta}$ 可依据先验知识或初步仿真进行预估。

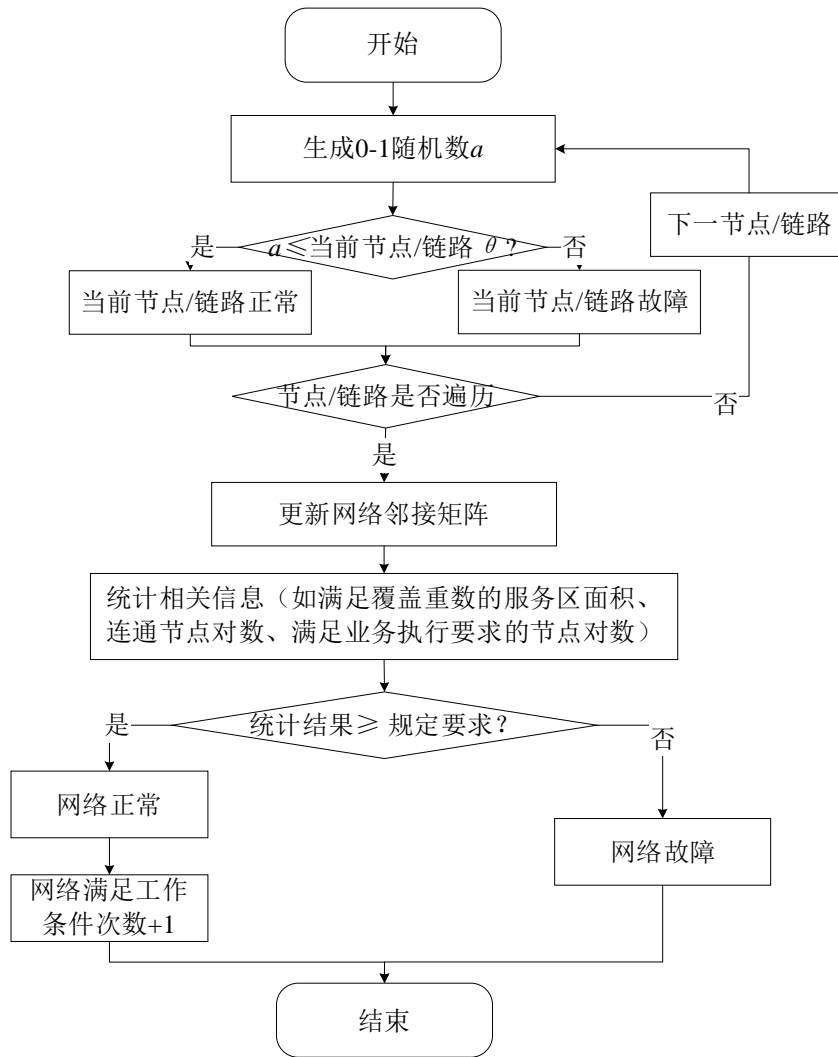
步骤 2: 建立单次仿真程序

单次蒙特卡洛仿真流程见图 12, 主要步骤如下:

- a) 单元状态抽样。对每个节点/链路, 生成一个[0,1]区间的均匀分布随机数。若该随机数小于或等于该节点/链路的可靠度/可用度, 则判定其状态为正常; 否则, 判定为故障。
- b) 更新网络模型。根据抽样结果更新网络模型:
 - 1) 若某链路故障, 则将其在网络邻接矩阵中对应的元素置 0;
 - 2) 若某节点故障, 则将其上所有链路在网络邻接矩阵中对应的元素置 0, 即将该节点所在邻接矩阵的行和列所有元素置 0。
- c) 评估网络状态。基于更新后的网络模型, 根据评估目标判定网络状态(正常/故障):
 - 1) 如评估覆盖确信可靠度/可用度, 则计算满足覆盖重数要求的服务区面积。若该面积达到规定阈值, 则判定网络满足覆盖条件; 否则, 判定为不满足;
 - 2) 如评估连通确信可靠度/可用度, 则计算网络中能够连通的节点对数。若该数目达到规定阈值, 则判定网络满足连通条件; 否则, 判定为不满足;
 - 3) 如评估业务确信可靠度/可用度, 则计算网络中满足特定业务性能要求(如时延、丢包率、误码率、容量)的节点对数。若该数目达到规定阈值, 则判定网络满足业务执行条件; 否则, 判定为不满足。各业务性能的计算方法如下:
 - ① 时延: 端到端时延为路径上所有节点与链路产生的时延之和;
 - ② 丢包率/误码率: 考虑到星间链路长度相仿、用户链路数量固定, 可将端到端丢包率/误码率要求转化为最大跳数限制;
 - ③ 容量: 整个网络在规定条件下所能提供的总业务容量。

步骤 3: 计算确信可靠度/可用度

完成 n 次仿真后, 第 i 个时间切片下的静态网络确信可靠度/可用度, 计算公式如下:



注： θ ——可靠度或可用度

图12 网络可靠性/可用性蒙特卡洛仿真流程图

$$\hat{\theta} = \frac{n-r}{n} \dots\dots\dots (14)$$

式中：

$\hat{\theta}$ ——第 i 个时间切片下的网络覆盖/连通/业务确信可靠度的估计值；

n ——仿真运行的总次数；

r ——仿真中网络处于相应故障状态的次数。

7.3 动态网络的可靠性和可用性评估

对每个时间切片使用表 3 所示方法计算出其对应静态网络的确信可靠度/可用度后，用其均值作为卫星通信网络确信可靠度/可用度的近似：

$$R(t_0, T) \approx \sum_{i=1}^h R_i / h \text{ 或 } A \approx \sum_{i=1}^h A_i / h \dots\dots\dots (15)$$

式中：

$R(t_0, T)$ ——卫星通信网络在 $[t_0, t_0+T]$ 时间段内的确信可靠度；

R_i ——第 i 个时间切片下的确信可靠度；

h ——卫星通信网络的时间切片数；

A ——卫星通信网络的确信可用度；

A_i ——第 i 个时间切片下的确信可用度。

如需考虑运控中心及其控制链路的可靠度/可用度，则进一步使用可靠性框图模型进行建模和计算。

8 得出结论和编写报告

卫星通信网络可靠性和可用性评估结论应根据不同目的得出，主要包括：

- a) 方案对比与水平评价：用于对比不同设计方案时，应比较其确信可靠度/可用度；用于评价通信卫星网络水平时，应判断评估结果是否达到规定的可靠度/可用度要求；
- b) 提出改进建议：无论通信卫星网络可靠性/可用性水平是否达到了规定值，都应该进行此项工作。如有可能，应提供改进后可以达到的可靠性/可用性水平分析。

评估完成后，应按 GJB/Z 23 规定的格式和内容编写评估报告，并按规定程序提交有关单位。

9 反馈设计

应将卫星通信网络可靠性和可用性评估结果反馈到设计过程中，必要时开展系统或局部设计改进，以提高卫星通信网络可靠性和可用性水平。

附录 A (资料性)

基于状态枚举法的卫星通信网络可靠性评估案例

A.1 概述

本案例以图 A.1 所示的某静止轨道卫星通信网络为例，演示应用状态枚举法求解其覆盖、连通及业务确信可靠度的过程。该网络由以下部分构成：1) 静止轨道均匀分布 3 颗通信卫星，可实现对除两极地区外的全球服务区覆盖，单颗卫星对地覆盖面积约占全球总面积的 40%；2) 每两颗卫星之间均建立星间链路；3) 地面设有一个信关站（位于海口），该信关站可同时被两颗卫星覆盖。



图A.1 某静止轨道卫星通信网络

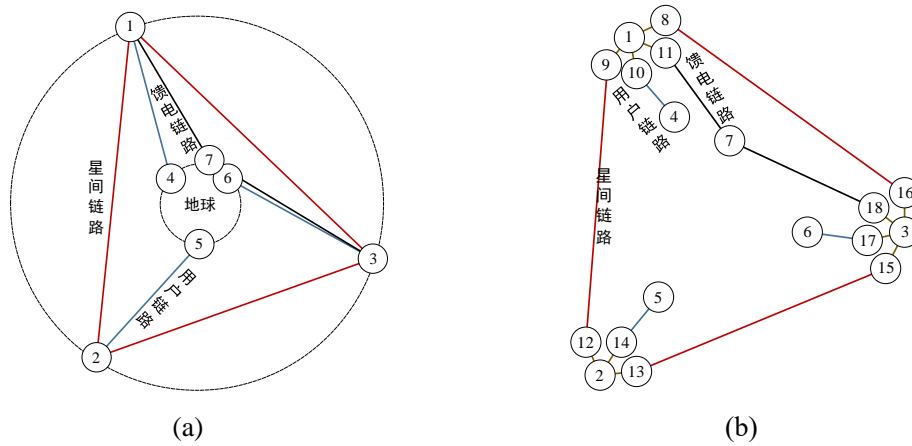
已知卫星平台可靠度为 0.99，星间通信载荷、用户载荷和馈电载荷可靠度为 0.999，信关站和星间链路、用户链路和馈电链路可靠度视为 1（视为绝对可靠）。该网络的覆盖要求为实现对除两极外全球服务区的一重覆盖；连通要求为除两极外全球服务区 100%存在连通路程；业务要求为除两极外全球服务区 100%能成功执行业务，端到端时延不超过 500ms。下面对该静止轨道卫星通信网络进行统可靠性评估。

A.2 系统建模

为进行评估，需按第 5 条将实际系统抽象为网络模型，过程如下：

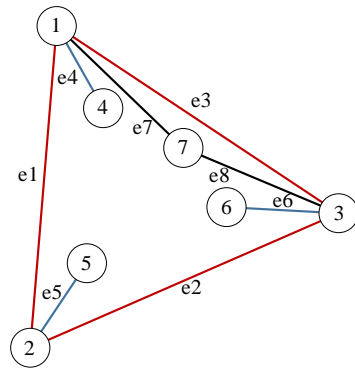
- a) 节点建模：将 3 颗卫星、卫星所载通信载荷（其中，卫星 1 与卫星 3 各载有 2 个星间通信载荷、1 个用户载荷和 1 个馈电载荷；卫星 2 载有 2 个星间通信载荷和 1 个用户载荷）以及海口信关站，抽象为网络节点。同时，根据各卫星的覆盖范围，将地面服务区划分为 3 个区域，并在赤道三等分点处设立对应的 3 个虚拟节点。至此，网络共包含 18 个节点。考虑用户终端绝对可靠，所有虚拟节点的可靠度均视为 1（绝对可靠）；
- b) 链路建模：包括卫星及其载荷之间的链路、星间链路、用户链路和馈电链路。其中卫星平台与载荷间的链路可靠度为 1。

由于采用静止轨道卫星，网络连接关系固定。其物理连接示意图见图 A.2(a)，据此抽象得到的网络拓扑图见图 A.2(b)。其中，1-3 号节点为卫星节点，4-6 号节点为地面虚拟节点，7 号节点为信关站，8、9、12、13、15、16 为星间通信载荷，10、14 和 17 为用户载荷，11 和 18 为馈电载荷。3 个地面虚拟节点（4、5、6）仅可被一颗卫星（分别对应 1、2、3）覆盖，信关站（7）可被两颗卫星（1、3）覆盖。



图A.2 某静止轨道卫星通信网络网络拓扑

根据本文件 5.4 条规定的网络简化方法，对图 A.2(b)所示网络进行串联化简，简化后的网络拓扑见图 A.3。简化后，各链路的可靠度计算如下：1) 链路 e_1 、 e_2 和 e_3 由两个星间通信载荷、一条星间链路和两条星间通信载荷与卫星间的链路串联构成，其可靠度为 0.999^2 ；2) 链路 e_4 、 e_5 和 e_6 由一个用户通信载荷、一条用户链路和一条用户载荷与卫星间的链路串联构成，其可靠度为 0.999 ；3) 链路 e_7 和 e_8 由一个馈电通信载荷、一条馈电链路和一条馈电载荷与卫星间的链路串联构成，其可靠度为 0.999 。



图A.3 网络化简

A.3 可靠性评估

A.3.1 枚举网络全部状态

图 A.3 所示简化网络中，信关站与虚拟节点绝对可靠，故影响系统状态的仅有 3 个卫星平台 (v_1, v_2 和 v_3) 和 8 条链路 (e_1, e_2, \dots, e_8)。故该卫星通信网络共有 2^{11} 种可能状态，这些状态可记录为：

$$\{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_1^e, \dots, x_8^e\}, \{\overline{x_1^v}, x_2^v, x_3^v, x_1^e, \dots, x_8^e\}, \{x_1^v, \overline{x_2^v}, x_3^v, x_1^e, \dots, x_8^e\}, \dots, \{\overline{x_1^v}, \overline{x_2^v}, \overline{x_3^v}, \overline{x_1^e}, \dots, \overline{x_8^e}\}$$

式中：

x_k^v —— 节点 k 正常；

$\overline{x_k^v}$ —— 节点 k 故障；

x_k^e —— 链路 k 正常；

$\overline{x_k^e}$ —— 链路 k 故障。

A.3.2 识别满足正常工作条件的状态

(1) 覆盖可靠性

满足覆盖要求需要同时满足：1) 3个地面虚拟节点均被卫星覆盖；2) 信关站被卫星覆盖。

由此，要求节点 v_1, v_2, v_3 和链路 e_4, e_5, e_6 全部正常工作，且链路 e_7, e_8 至少有一条正常工作，即这8个节点/链路满足覆盖要求的状态为 $\{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, x_6^e, x_7^e, x_8^e\}$ ， $\{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, x_6^e, \overline{x_7^e}, x_8^e\}$ 和 $\{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, x_6^e, \overline{x_7^e}, \overline{x_8^e}\}$ 共3种，其他3条链路 e_1, e_2, e_3 的状态不影响。满足此条件的覆盖正常状态共24种：

$$\begin{aligned} & \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, x_6^e, x_7^e, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, x_6^e, \overline{x_7^e}, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, x_6^e, x_7^e, \overline{x_8^e}\}, \\ & \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, x_5^e, x_6^e, x_7^e, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, x_5^e, x_6^e, \overline{x_7^e}, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, x_5^e, x_6^e, x_7^e, \overline{x_8^e}\}, \\ & \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, \overline{x_5^e}, x_6^e, x_7^e, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, \overline{x_5^e}, x_6^e, \overline{x_7^e}, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, \overline{x_5^e}, x_6^e, x_7^e, \overline{x_8^e}\}, \\ & \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, \overline{x_5^e}, \overline{x_6^e}, x_7^e, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, \overline{x_5^e}, \overline{x_6^e}, \overline{x_7^e}, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, \overline{x_5^e}, \overline{x_6^e}, x_7^e, \overline{x_8^e}\}, \\ & \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, \overline{x_5^e}, \overline{x_6^e}, \overline{x_7^e}, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, \overline{x_5^e}, \overline{x_6^e}, \overline{x_7^e}, \overline{x_8^e}\}, \\ & \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, x_6^e, x_7^e, \overline{x_8^e}\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, x_6^e, \overline{x_7^e}, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, x_6^e, x_7^e, \overline{x_8^e}\}, \\ & \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, x_6^e, \overline{x_7^e}, \overline{x_8^e}\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, x_6^e, x_7^e, \overline{x_8^e}\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, x_6^e, \overline{x_7^e}, \overline{x_8^e}\}, \\ & \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, x_6^e, \overline{x_7^e}, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, x_6^e, x_7^e, \overline{x_8^e}\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, x_6^e, \overline{x_7^e}, \overline{x_8^e}\}, \\ & \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, \overline{x_5^e}, \overline{x_6^e}, \overline{x_7^e}, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, \overline{x_5^e}, \overline{x_6^e}, x_7^e, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, \overline{x_5^e}, \overline{x_6^e}, \overline{x_7^e}, \overline{x_8^e}\}. \end{aligned}$$

(2) 连通可靠性

满足连通要求需确保所有4个地面节点（虚拟节点 v_4, v_5, v_6 和信关站 v_7 ）之间互联互通。

由此，经枚举发现满足上述连通要求，需要同时满足：1) 节点 v_1, v_2, v_3 和链路 e_4, e_5, e_6 需要全部正常工作；2) 链路 e_7, e_8 至少一条正常；3) 链路 e_1, e_2, e_3 中至少两条正常。满足此条件的连通正常状态共12种：

$$\begin{aligned} & \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, x_6^e, x_7^e, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, x_6^e, \overline{x_7^e}, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, x_6^e, x_7^e, \overline{x_8^e}\}, \\ & \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, x_5^e, x_6^e, x_7^e, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, x_5^e, x_6^e, \overline{x_7^e}, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, x_5^e, x_6^e, x_7^e, \overline{x_8^e}\}, \\ & \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, \overline{x_5^e}, x_6^e, x_7^e, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, \overline{x_5^e}, x_6^e, \overline{x_7^e}, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, \overline{x_5^e}, x_6^e, x_7^e, \overline{x_8^e}\}, \\ & \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, \overline{x_5^e}, \overline{x_6^e}, x_7^e, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, \overline{x_5^e}, \overline{x_6^e}, \overline{x_7^e}, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, \overline{x_5^e}, \overline{x_6^e}, x_7^e, \overline{x_8^e}\}, \\ & \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, \overline{x_4^e}, \overline{x_5^e}, \overline{x_6^e}, \overline{x_7^e}, \overline{x_8^e}\}. \end{aligned}$$

(3) 业务可靠性

通信业务是在连通要求的基础上增加时延约束 (≤ 500 ms)。地球静止轨道的标准轨道高度 $h=35786$ km，光速 $c=2.99792458 \times 10^8$ m/s，计算得单跳星地传播时延为 119.4ms。同样可以计算得三颗静止轨道卫星的距离各为 73030.2km，可知单跳星间传播时延为 243.6ms。这样，允许的最大时延 (500 ms) 限制通信路径最多包含一条星间链路中转。

由此，经枚举发现满足上述业务使用要求，需要同时满足：1) 节点 v_1, v_2, v_3 和链路 $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6$ 全部正常工作；2) 链路 e_7, e_8 至少一条正常。满足此条件的业务正常状态共3种：

$$\{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, x_6^e, x_7^e, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, x_6^e, \overline{x_7^e}, x_8^e\}, \{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, x_6^e, x_7^e, \overline{x_8^e}\}.$$

A.3.3 计算满足条件的状态存在概率

按照公式(6)计算每个满足条件的状态存在概率，如对状态 $\{x_1^v, x_2^v, x_3^v, x_4^e, x_5^e, \dots, x_8^e\}$ ，其存在概率 $p_{S_1} = 0.99^3 \times (0.999^2)^3 \times 0.999^3 \times 0.999^2 = 0.959679$ 。

A.3.4 计算确信可靠度

(1) 覆盖确信可靠度

通过累加覆盖正常状态的存在概率，计算覆盖确信可靠度 R_{cov} 为：

$$\begin{aligned}
 R_{cov} &= p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} p_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} p_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} q_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} p_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} q_{e_8} \\
 &+ p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} q_{e_1} p_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} q_{e_1} p_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} q_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} q_{e_1} p_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} q_{e_8} \\
 &+ p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} q_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} q_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} q_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} q_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} q_{e_8} \\
 &+ p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} p_{e_2} q_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} p_{e_2} q_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} q_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} p_{e_2} q_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} q_{e_8} \\
 &+ p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} q_{e_1} q_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} q_{e_1} q_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} q_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} q_{e_1} q_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} q_{e_8} \\
 &+ p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} q_{e_1} p_{e_2} q_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} q_{e_1} p_{e_2} q_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} q_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} q_{e_1} p_{e_2} q_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} q_{e_8} \\
 &+ p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} q_{e_2} q_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} q_{e_2} q_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} q_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} q_{e_2} q_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} q_{e_8} \\
 &+ p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} q_{e_1} q_{e_2} q_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} q_{e_1} q_{e_2} q_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} q_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} q_{e_1} q_{e_2} q_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} q_{e_8} \\
 &= 0.99^3 \times 0.999^{11} + 2 \times 0.99^3 \times 0.999^{10} \times 0.001 \\
 &+ 3 \times 0.99^3 \times (1 - 0.999^2) \times 0.999^9 + 6 \times 0.99^3 \times (1 - 0.999^2) \times 0.999^8 \times 0.001 \\
 &+ 3 \times 0.99^3 \times (1 - 0.999^2)^2 \times 0.999^7 + 6 \times 0.99^3 \times (1 - 0.999^2) \times 0.999^6 \times 0.001 \\
 &+ 0.99^3 \times (1 - 0.999^2)^3 \times 0.999^5 + 2 \times 0.99^3 \times (1 - 0.999^2) \times 0.999^4 \times 0.001 \\
 &= 0.967405
 \end{aligned}$$

式中：

p_{v_k} ——节点 v_k 的可靠度/可用度；

p_{e_k} ——链路 e_k 的可靠度/可用度。

q_{v_k} ——节点 v_k 的不可靠度/不可用度， $q_{v_k} = 1 - p_{v_k}$ ；

q_{e_k} ——链路 e_k 的不可靠度/不可用度， $q_{e_k} = 1 - p_{e_k}$ 。

(2) 连通确信可靠度

通过累加连通正常状态的存在概率，计算连通确信可靠度 R_{con} 为：

$$\begin{aligned}
 R_{con} &= p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} p_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} p_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} q_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} p_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} q_{e_8} \\
 &+ p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} q_{e_1} p_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} q_{e_1} p_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} q_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} q_{e_1} p_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} q_{e_8} \\
 &+ p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} q_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} q_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} q_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} q_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} q_{e_8} \\
 &+ p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} p_{e_2} q_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} p_{e_2} q_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} q_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} p_{e_2} q_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} q_{e_8} \\
 &= 0.99^3 \times 0.999^{11} + 2 \times 0.99^3 \times 0.999^{10} \times 0.001 \\
 &+ 3 \times 0.99^3 \times (1 - 0.999^2) \times 0.999^9 + 6 \times 0.99^3 \times (1 - 0.999^2) \times 0.999^8 \times 0.001 \\
 &= 0.967378
 \end{aligned}$$

(3) 业务确信可靠度

通过累加业务正常状态的存在概率，计算业务确信可靠度 R_{app} 为：

$$\begin{aligned}
 R_{app} &= p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} p_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} p_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} q_{e_7} p_{e_8} + p_{v_1} p_{v_2} p_{v_3} p_{e_1} p_{e_2} p_{e_3} p_{e_4} p_{e_5} p_{e_6} p_{e_7} q_{e_8} \\
 &= 0.99^3 \times 0.999^{11} + 2 \times 0.99^3 \times 0.999^{10} \times 0.001 \\
 &= 0.9616
 \end{aligned}$$

附录 B
(资料性)

基于不交积和法的卫星通信网络可靠性评估案例

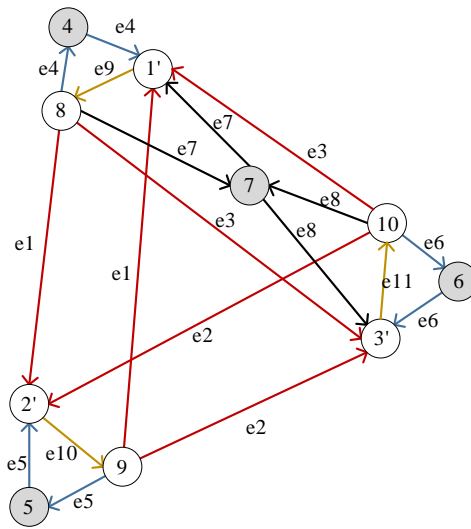
B.1 概述

本案例采用不交积和法评估附录A所述静止轨道卫星通信网络的连通与业务确信可靠度，评估步骤按本文件7.2.3条规定执行。

B.2 可靠性评估

B.2.1 网络转化

基于图A.3所示的简化网络模型，将其转化为节点绝对可靠的网络模型。转化后的网络包含10个节点和11条链路，拓扑结构见图B.1。其中 e_9 、 e_{10} 和 e_{11} 对应原卫星平台节点，其可靠度为0.99。



图B.1 节点绝对可靠的网络拓扑

该网络模型的邻接矩阵表达如下：

$$\begin{pmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_9 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{10} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{11} \\
 e_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & e_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & e_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 e_7 & 0 & e_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & e_1 & e_3 & e_4 & 0 & 0 & e_7 & 0 & 0 & 0 \\
 e_1 & 0 & e_2 & 0 & e_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 e_3 & e_2 & 0 & 0 & 0 & e_6 & e_8 & 0 & 0 & 0
 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (B.1)$$

B.2.2 确定网络最小路集

(1) 连通可靠性

为实现节点3个地面虚拟节点（ v_4 、 v_5 、 v_6 ）以及信关站（ v_7 ）之间互联互通，分析得到6条最小路集： $\{e_1, e_2, e_4, e_5, e_6, e_7, e_9, e_{10}, e_{11}\}$ 、 $\{e_1, e_2, e_4, e_5, e_6, e_8, e_9, e_{10}, e_{11}\}$ 、 $\{e_1, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_9, e_{10}, e_{11}\}$ 、 $\{e_1, e_3, e_4, e_5, e_6, e_8, e_9, e_{10}, e_{11}\}$ 、 $\{e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_9, e_{10}, e_{11}\}$ 和 $\{e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_8, e_9, e_{10}, e_{11}\}$ 。

（2）业务可靠性

在连通要求基础上，考虑时延约束（ ≤ 500 ms，即路径最多包含一条星间链路），分析得到2条最小路集： $\{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_9, e_{10}, e_{11}\}$ 和 $\{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_8, e_9, e_{10}, e_{11}\}$ 。

B.2.3 计算确信可靠度

（1）连通可靠性

基于6条最小路集，应用不交积和法计算连通确信可靠度 R_{con} ：

$$\begin{aligned}
 R_{\text{con}} &= \Pr(M_1) + \Pr(\overline{M_1}M_2) + \Pr(\overline{M_1}\overline{M_2}M_3) + \Pr(\overline{M_1}\overline{M_2}\overline{M_3}M_4) \\
 &+ \Pr(\overline{M_1}\overline{M_2}\overline{M_3}\overline{M_4}M_5) + \Pr(\overline{M_1}\overline{M_2}\overline{M_3}\overline{M_4}\overline{M_5}M_6) \\
 &= \Pr(e_4e_5e_6e_9e_{10}e_{11}) \left[\Pr(e_1e_2e_7) + \Pr(\overline{e_1e_2e_7}e_1e_2e_8) + \Pr(\overline{e_1e_2e_7}e_1e_2e_8e_1e_3e_7) \right. \\
 &+ \Pr(\overline{e_1e_2e_7}e_1e_2e_8e_1e_3e_7e_1e_3e_8) + \Pr(\overline{e_1e_2e_7}e_1e_2e_8e_1e_3e_7e_1e_3e_8e_2e_3e_7) \\
 &\left. + \Pr(\overline{e_1e_2e_7}e_1e_2e_8e_1e_3e_7e_1e_3e_8e_2e_3e_7e_2e_3e_8) \right] \\
 &= \Pr(e_4e_5e_6e_9e_{10}e_{11}) \left[\Pr(e_1e_2e_7) + \Pr(e_1e_2\overline{e_7}e_8) + \Pr(e_1\overline{e_2}e_3e_7) + \Pr(e_1\overline{e_2}e_3\overline{e_7}e_8) \right. \\
 &\left. + \Pr(\overline{e_1}e_2e_3e_7) + \Pr(\overline{e_1}e_2e_3\overline{e_7}e_8) \right] \\
 &= p_{e_4}p_{e_5}p_{e_6}p_{e_9}p_{e_{10}}p_{e_{11}} \left[p_{e_1}p_{e_2}p_{e_7} + p_{e_1}p_{e_2}q_{e_7}p_{e_8} + p_{e_1}q_{e_2}p_{e_3}p_{e_7} + p_{e_1}q_{e_2}p_{e_3}q_{e_7}p_{e_8} \right. \\
 &\left. + q_{e_1}p_{e_2}p_{e_3}p_{e_7} + q_{e_1}p_{e_2}p_{e_3}p_{e_7}q_{e_8} \right] \\
 &= 0.999^3 \times 0.999^3 \times (0.999^5 + 0.999^5 \times 0.001 \\
 &+ 2 \times 0.999^5 \times (1 - 0.999^2) + 2 \times 0.999^5 \times (1 - 0.999^2) \times 0.001) \\
 &= 0.967378
 \end{aligned}$$

式中：

$\Pr(\cdot)$ ——不交积·的存在概率；

p_{e_k} ——链路 e_k 的可靠度/可用度。

q_{e_k} ——链路 e_k 的不可靠度/不可用度， $q_{e_k} = 1 - p_{e_k}$ 。

（2）业务可靠性

基于2条最小路集，应用不交积和法计算业务确信可靠度 R_{app} ：

$$\begin{aligned}
 R_{\text{app}} &= \Pr(M_1) + \Pr(\overline{M_1}M_2) \\
 &= p_{e_1}p_{e_2}p_{e_3}p_{e_4}p_{e_5}p_{e_6}p_{e_7}p_{e_9}p_{e_{10}}p_{e_{11}} + p_{e_1}p_{e_2}p_{e_3}p_{e_4}p_{e_5}p_{e_6}q_{e_7}p_{e_8}p_{e_9}p_{e_{10}}p_{e_{11}} \\
 &= (0.999^2)^3 \times 0.999^3 \times 0.999 \times 0.999^3 \\
 &+ (0.999^2)^3 \times 0.999^3 \times 0.001 \times 0.999 \times 0.999^3 \\
 &= 0.9616
 \end{aligned}$$

附录 C
(资料性)

基于二元决策法的卫星通信网络可靠性评估案例

C.1 概述

本案例采用二元决策法评估附录A所述静止轨道卫星通信网络的连通与业务确信可靠度，评估步骤按本文件7.2.4条规定执行。

C.2 可靠性评估

网络转化和确定最小路集的方法同附录B.2.1和B.2.2，下面阐述二元决策法的其他步骤。

C.2.1 建立布尔函数

(1) 连通可靠性

基于B.2.2确定的6条连通可靠性最小路集，建立系统连通正常的布尔函数： $f_{con}=e_4e_5e_6e_9e_{10}e_{11}(e_1e_2e_7+e_1e_2e_8+e_1e_3e_7+e_1e_3e_8+e_2e_3e_7+e_2e_3e_8)$ 。

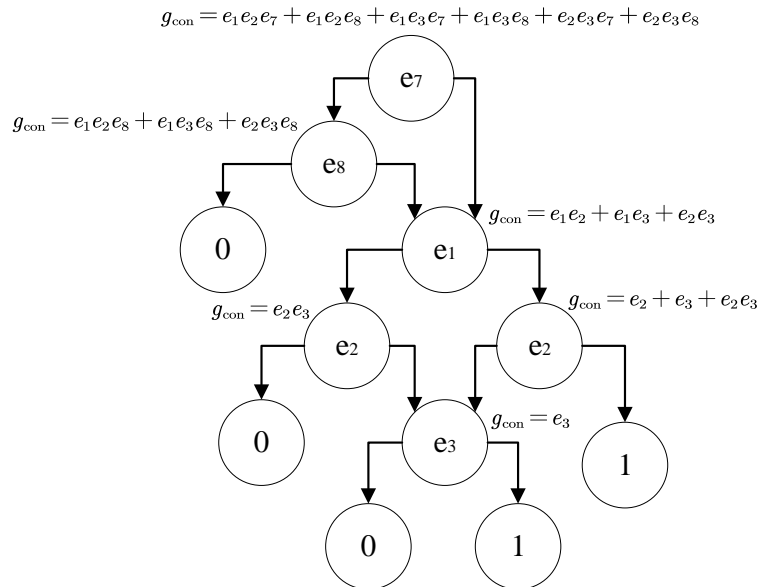
(2) 业务可靠性

基于B.2.2确定的2条业务可靠性最小路集，建立系统业务正常的布尔函数： $f_{app}=e_1e_2e_3e_4e_5e_6e_9e_{10}e_{11}(e_7+e_8)$ 。

C.2.2 构建二元决策图

(1) 连通可靠性

为计算简洁，对其中 $g_{con}=e_1e_2e_7+e_1e_2e_8+e_1e_3e_7+e_1e_3e_8+e_2e_3e_7+e_2e_3e_8$ 建立二元决策图如图C.1所示。

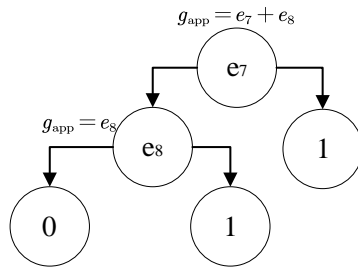


注：左向分支为“0”分支，右向分支为“1”分支。

图C.1 连通可靠性二元决策图

(2) 业务可靠性

为计算简洁，对其中 $g_{app}=e_7+e_8$ 建立二元决策图如图C.2所示。



注：左向分支为“0”分支，右向分支为“1”分支。

图C.2 业务可靠性二元决策图

C.2.3 计算确信可靠度

(1) 连通可靠性

基于图 C.1 所示的二元决策图，计算从根节点到所有“1”叶节点的路径概率之和，得到连通确信可靠度 R_{con} ：

$$\begin{aligned} R_{con} &= p_4 p_5 p_6 p_9 p_{10} p_{11} (p_7 + q_7 p_8) [q_1 p_2 p_3 + p_1 (p_2 + q_2 p_3)] \\ &= 0.999^3 \times 0.99^3 (0.999 + 0.001 \times 0.999) \\ &\quad \times \{ (0.999^2)^2 \times (1 - 0.999^2) + 0.999^2 [0.999^2 + (1 - 0.999^2) \times 0.999^2] \} \\ &= 0.967378 \end{aligned}$$

式中：

p_{e_k} ——链路 e_k 的可靠度/可用度。

q_{e_k} ——链路 e_k 的不可靠度/不可用度， $q_{e_k} = 1 - p_{e_k}$ 。

(2) 业务可靠性

$$\begin{aligned} R_{app} &= p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6 p_9 p_{10} p_{11} (p_7 + q_7 p_8) \\ &= (0.999^2)^3 \times 0.999^3 \times 0.99^3 \times (0.999 + 0.999 \times 0.001) \\ &= 0.9616 \end{aligned}$$

式中：

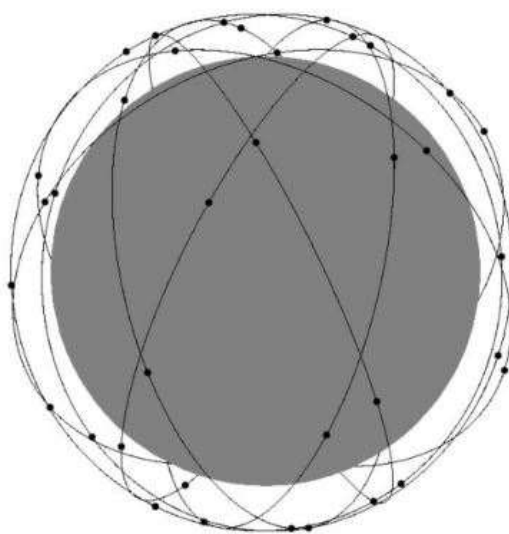
R_{app} ——网络的业务确信可靠度。

附录 D (资料性)

基于蒙特卡罗法的卫星通信网络可靠性评估案例

D.1 概述

本案例以图D.1所示的某低轨卫星通信网络为例，演示应用蒙特卡洛法评估其覆盖、连通及业务确信可靠度的过程。该卫星通信网络为 2π 型，包括8个轨道面上的48颗卫星，卫星轨道高度为1,300 km，卫星相位差为 18° ，轨道倾角为 70° ，升交点赤经为 30.36° ，相位因子为1。每颗卫星与4颗相邻卫星建立星间链路（包括2颗同轨邻居卫星和2颗异轨邻居卫星）。地面4个信关站，分别为北京、海口、喀什和佳木斯。



图D.1 某低轨卫星通信网络

已知卫星平台可靠度为0.99，星间通信载荷、用户载荷和馈电载荷可靠度为0.999，信关站和星间链路、用户链路和馈电链路可靠度视为1（视为绝对可靠）。该网络的覆盖要求为全球服务区的一重覆盖；连通要求为全球服务区100%存在连通路径；业务要求为全球服务区100%能成功执行业务，端到端丢包率不超过0.5%。要求覆盖/连通/业务确信可靠度误差不超过0.001。

D.2 系统建模

为进行评估，需按第5条将实际系统抽象为网络模型，过程如下：

- a) 节点建模：将48颗卫星和信关站抽象为网络节点。同时，将地球表面按经纬度每 20° 选取一个虚拟节点，由虚拟节点负责其对应地面小区内所有用户终端的通信服务。由此地面共有146个虚拟节点。
- b) 链路建模：包括星间链路、用户链路和馈电链路。

考虑该低轨卫星通信网络为2h为周期的动态网络，因此以每10min取一个时间切片，共获得12个时间切片，以模拟卫星切换过程。在每个时间切片下，生成并存储以下基础数据矩阵：

(1) 覆盖可靠性

通过仿真，在每个时间切片下得到48颗星对104个地面虚拟节点的覆盖关系，以及48颗星对4个

信关站的覆盖关系，并储存在 12 个 48×104 的星-地布尔矩阵和 12 个 48×4 的星-信布尔矩阵中。

(2) 连通可靠性

连通可靠性要求可以转化为全球 104 个地面虚拟节点之间连通要求，因此，当该低轨卫星通信网络正常运行时，要求整个系统的 5356 个节点对互联互通。

连通可靠性除了覆盖可靠性描述的星地布尔矩阵，还需要在每个时间切片下描述卫星间的连接关系，并存储在 12 个 48×48 的星间布尔矩阵中。

(3) 业务可靠性

在连通可靠性数据基础上，增加空口丢包率和单跳丢包率（均为 6×10^{-4} ），并将丢包率要求转化为星间跳数要求不多于 6 跳。

D.3 可靠性评估

D.3.1 计算蒙特卡洛仿真次数

应用 7.2.5 条算法计算蒙特卡罗仿真次数，在 90% 的置信度下，取确信可靠度为 0.9，若要使得计算误差小于 0.005，则仿真次数至少为：

$$n \geq \frac{\hat{R}(1-\hat{R})x_{0.05}^2}{\varepsilon^2} = \frac{0.9 \times 0.1 \times 1.645^2}{0.005^2} = 9742$$

式中：

\hat{R} ——网络确信可靠度估计值；

x_α ——正态分布中的 α 分位数；

ε ——网络确信可靠度估计值与真值之间误差。

D.3.2 建立单次仿真程序

应用 7.2.5 条方法建立仿真程序，对该低轨卫星通信网络的覆盖/连通/业务确信可靠度进行仿真。

D.3.3 计算确信可靠度

根据 9742 次蒙特卡罗仿真，计算该低轨卫星通信网络确信可靠度，结果为覆盖确信可靠度为 0.9488，连通确信可靠度为 0.9486，业务确信可靠性为 0.9382。

ICS 33.040.40

CCS M 15

T/CICC

中国指挥与控制学会团体标准

T/CICC 35014—2026

通信网络可靠性试验通用方法

General method of reliability testing for communication networks

2026-06-30 发布

2026-06-30 实施

中国指挥与控制学会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语与定义	1
4 通用要求	1
5 技术要求	2
5.1 确定试验对象	2
5.2 确定故障判据	2
5.3 确定试验剖面	3
5.3.1 组成和要求	3
5.3.2 环境剖面	3
5.3.3 使用剖面	3
5.4 编制试验大纲	4
5.5 试验大纲评审	4
5.6 受试网络状态检查	4
5.7 试验实施	4
5.7.1 试验实施要求	4
5.7.2 试验剖面配置	4
5.7.3 试验数据收集	5
5.8 可靠性评估	5
5.9 编写试验报告	6
5.10 试验评审	6
附录 A（资料性） 战术互联网可靠性试验案例	7

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》的规定编写。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。

本文件由中国指挥与控制学会提出并归口。

本文件起草单位：北京航空航天大学、杭州市北京航空航天大学国际创新研究院（北京航空航天大学国际创新学院）、深圳市为民可靠性系统工程研究院、中国飞行试验研究院、航天东方红卫星有限公司、中国电子科技集团公司电子科学研究院。

本文件主要起草人：李瑞莹、何宝琦、李颖异、王彦林、孙利娜、王靖、宁宇。

通信网络可靠性试验通用方法

1 范围

本文件规定了通信网络可靠性试验的要求、程序和方法。

本文件适用于研制阶段的通信网络，可为承试方组织实施可靠性试验、使用方监督可靠性试验过程提供依据。

2 规范性引用文件

下列文件中的有关条款通过引用而成为本文件的条款。凡注日期或版次的引用文件，其后的任何修改（不包括勘误的内容）或修订版本都不适用于本文件，凡不注日期或版次的引用文件，其最新版本适用于本文件。

GB/T 4087 数据的统计处理和解释 二项分布可靠度单侧置信下限

GB/T 4088 数据的统计处理和解释 二项分布参数的估计与检验

GJB/Z 23 可靠性维修性工程报告编写要求

GJB 451 装备通用质量特性术语

GJB 899 可靠性鉴定与验收试验

T/CICC 35001 确信可靠性术语

3 术语与定义

GB/T 4087、GB/T 4088、GJB/Z 23、GJB 451、GJB 899、T/CICC 35001界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

使用剖面 operation profile

通信网络在完成规定任务这段时间内所经历的业务使用事件及节点移动事件的时序描述。

3.2

业务剖面 application profile

通信网络在完成规定任务这段时间内所经历的业务使用事件的时序描述。

3.3

移动剖面 mobility profile

通信网络在完成规定任务这段时间内所经历的节点移动事件的时序描述。

4 通用要求

通信网络可靠性试验评估程序见图1。

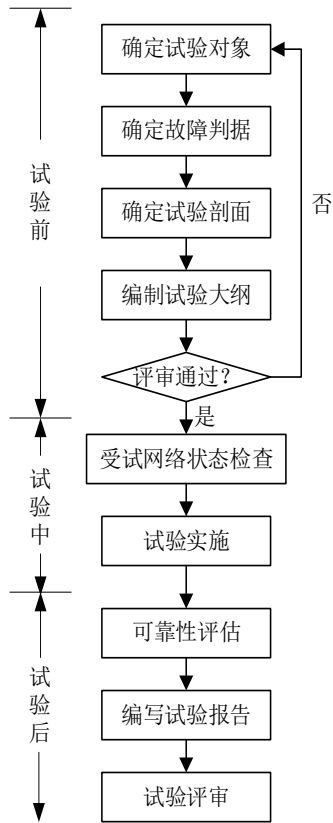


图1 通信网络可靠性试验评估程序

5 技术要求

5.1 确定试验对象

试验前，应明确受试网络的拓扑结构，以及硬件、软件与网络配置。受试网络应满足以下要求：

- a) 拓扑结构完整，软硬件配置合理，能够满足典型任务需求；
- b) 网络中所含设备类型应覆盖其典型应用场景；
- c) 若通信终端等设备无法实际参试，可采用计算机模拟替代，但应保证网络进出流量与真实设备一致。

5.2 确定故障判据

故障判据的确定应遵循以下要求：

- a) 故障判据、分类原则与统计原则应在试验评估前予以明确；
- b) 所定义的故障判据不应包含物理层设备故障所直接导致的通信中断，试验中出现的此类故障应予以剔除，不计入可靠性统计，并待设备修复后继续进行试验；
- c) 通信网络的故障类型应包括但不限于以下性能劣化示例：传输时延超过规定阈值、丢包率超过规定阈值、误码率超过规定阈值；
- d) 故障判据的确定应基于具体的业务性能需求，可采用表1所示“业务-性能参数”故障判据矩阵制定故障判据。

表1 “业务-性能参数”故障判据矩阵

业务类型 \ 性能参数 故障判据	性能参数 1	性能参数 2	性能参数 3
	业务 1			
业务 2				
业务 3				

该矩阵表中各字段的定义如下：

- 1) 业务类型，用于区分通信网络所承载的具体业务类别，如移动宽带业务、海量物联业务及高可靠低时延业务（远程医疗、无人机飞控指令）等；
- 2) 性能参数，指业务正常运行所必须满足的性能参数，主要包括时延、丢包率、误码率等；
- 3) 故障判据，用于判定业务性能故障的准则，也称故障判断准则。该准则为定量描述，定义了各项性能指标不可接受的阈值。

5.3 确定试验剖面

5.3.1 组成和要求

通信网络的试验剖面包括环境剖面和使用剖面，其中使用剖面由业务剖面 and 移动剖面组成。试验剖面应基于任务想定，通过分析各任务阶段信息确定。在试验条件允许时，应尽可能构造完整的试验剖面；当条件受限时，可对剖面进行适当剪裁。

5.3.2 环境剖面

环境剖面的确定应满足以下要求：

- a) 环境剖面应描述影响通信网络可靠性的各类环境参数与时间的对应关系，其定义包括环境因素类型、量值、持续时间及变化顺序；
- b) 环境剖面应包括温度、湿度、振动等环境要素，还应重点关注以下与通信网络相关的因素：
 - 1) 电磁环境，包括任务执行过程中通信网络内设备间的电磁环境以及任务所处区域的电磁环境，用于评估电磁干扰对通信网络数据传输可靠性的影响；
 - 2) 气候因素，指网络设备在任务执行期间所经历的气候条件，主要包括温度、湿度、淋雨等环境要素，用于评估区域气候对网络数据传输可靠性的影响；
 - 3) 地形因素，任务执行区域的地形条件，典型如丘陵、山地等，用于评估地形遮挡对网络数据传输可靠性的影响。

5.3.3 使用剖面

使用剖面的确定应满足以下要求：

- a) 使用剖面由业务剖面 and 移动剖面构成，用于描述通信网络所经历的事件序列。业务剖面关注业务使用事件，移动剖面关注节点移动事件；
- b) 业务剖面应描述业务参数与时间的对应关系，通常可表示为业务发送的时间序列及其概率的集合。业务剖面的定义宜包含以下要素：业务类型、业务对象、数据帧产生时间间隔、数据帧大小、业务发生时间与业务持续时间。其中，数据帧产生时间间隔、大小及业务持续时间等要

素宜以概率分布形式表达。不同业务的剖面要素存在差异，可基于上述一般要素进行剪裁。为便于工程应用，业务剖面的信息应简洁，必要时可借鉴极值包络法等，建立工程化的处理原则；

c) 移动剖面应描述节点移动事件与时间的对应关系，可采用以下方式描述：

- 1) 移动轨迹法：将节点轨迹划分成多个轨迹段，并分别定义各段的起始位置、目的位置、开始时间与结束时间；
- 2) 移动模型法：将节点移动行为划分为多个阶段，并分别定义各阶段的开始时间、结束时间及所采用的移动模型（如随机游走模型、群组移动模型等）。

5.4 编制试验大纲

试验前应编制通信网络可靠性试验大纲，为可靠性试验提供依据。通信网络可靠性试验大纲一般包括：

- a) 试验目的和适用范围；
- b) 引用标准和文件；
- c) 受试网络说明（包括受试网络的组成、功能、技术状态等）；
- d) 试验剖面；
- e) 检测工具说明和要求；
- f) 受试网络检测项目及合格判据（包括检测项目、内容、方法等）；
- g) 故障判据、分类和统计原则；
- h) 试验前有关工作；
- i) 试验过程中的监测及记录要求；
- j) 故障的报告和处理要求；
- k) 可靠性评估要求；
- l) 有关问题的说明。

5.5 试验大纲评审

试验大纲应通过正式评审，评审通过后方可开展试验。

5.6 受试网络状态检查

受试网络状态应满足以下要求：

- a) 受试网络应具备所要求的功能与性能；
- b) 试验前应完成受试网络与所有试验工具（包括流量生成工具、数据采集与存储软件及配套工具）的组网联调，确保网络在试验过程中能稳定运行。

5.7 试验实施

5.7.1 试验实施要求

试验实施应满足以下要求：

- a) 试验实施过程主要包括试验剖面配置与试验数据收集；
- b) 试验期间若发生重大事件，可安排中期评审，以审查试验进展与结果。若评审未通过，应分析原因并采取纠正措施。

5.7.2 试验剖面配置

剖面配置旨在试验中复现环境剖面、业务剖面及移动剖面所定义的各项特征，其要求如下：

- a) 环境剖面配置应通过试验设备实现或部署在实际使用环境，以实现剖面所要求的各类环境应力；
- b) 业务剖面配置应借助流量生成工具实现，使通信网络产生符合业务使用特征的流量；
- c) 移动剖面配置应通过改变节点间相对位置实现，以模拟剖面所定义的节点移动。

5.7.3 试验数据收集

试验数据收集应满足以下要求：

- a) 数据收集应覆盖整个试验过程，并聚焦于故障判别相关的数据；
- b) 所需收集的数据类型应根据既定的故障判据确定；
- c) 数据收集过程不得干扰通信网络的正常运行；
- d) 宜采用专业的数据采集、存储软件及配套工具辅助完成数据收集工作。

5.8 可靠性评估

可靠性评估应按以下步骤与方法进行：

- a) 应分别对每类业务进行可靠度评估，要求如下：
 - 1) 根据该类业务的故障判据，逐帧判断其对应的数据帧的传输状态，并记录故障情况。定义第*i*类业务的第*j*个数据帧的状态变量 ϕ_{ij} ：

$$\phi_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{(没有故障发生)} \\ 1, & \text{(发生故障)} \end{cases} \dots\dots\dots(1)$$

- 2) 统计该类业务故障数据帧总数，记第*i*类业务的故障数据帧总数为 r_i ：

$$r_i = \sum_{j=1}^{n_i} \phi_{ij} \dots\dots\dots(2)$$

式中：

n_i ——第*i*类业务的试验样本量，即该类业务的总数据帧个数。

- 3) 对业务可靠度进行点估计和区间估计。在数据帧传输结果服从二项分布的情况下：

第*i*类业务可靠度的极大似然点估计 \hat{R}_i 为：

$$\hat{R}_i = (n_i - r_i)/n_i \dots\dots\dots(3)$$

第*i*类业务可靠度的单侧置信下限 $R_{i,L}$ 为：

$$\sum_{x=0}^{r_i} \binom{n_i}{x} R_{i,L}^{n_i-x} (1 - R_{i,L})^x = \alpha \dots\dots\dots(4)$$

式中：

$1-\alpha$ ——置信度。

特殊地，若 $r_i=n_i$ ，则 $R_{i,L}=0$ 。

第*i*类业务可靠度的双侧置信区间 $[R_{i,L}, R_{i,U}]$ 为：

$$\begin{cases} \sum_{x=0}^{r_i} \binom{n_i}{x} R_{i,L}^{n_i-x} (1 - R_{i,L})^x = \alpha/2 \\ \sum_{x=0}^{n_i-r_i} \binom{n_i}{x} (1 - R_{i,U})^{n_i-x} R_{i,U}^x = \alpha/2 \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

特殊地，若 $r_i=0$ ，则 $R_{i,U}=1$ ；若 $r_i=n_i$ ，则 $R_{i,L}=0$ 。GB/T 4087 和 GB/T 4088 提供了单侧置信下限 $R_{i,L}$ 和置信区间 $[R_{i,L}, R_{i,U}]$ 的近似计算方法和置信限数据表，可通过近似计算或查表得到相应的单侧置信下限和置信区间。

- b) 综合各类业务可靠度，得到通信网络可靠度。综合时可采用加权法，考虑业务流量占比和业务重要性确定各类业务权重。

5.9 编写试验报告

通信网络可靠性试验评估结束后，应依据试验大纲要求，按 GJB/Z 23 规定的格式和内容，编写试验评估报告，并按规定提交有关单位。

5.10 试验评审

试验结束后，应及时对试验完成情况组织评审。若评审未通过，应分析原因并采取有效的纠正措施。

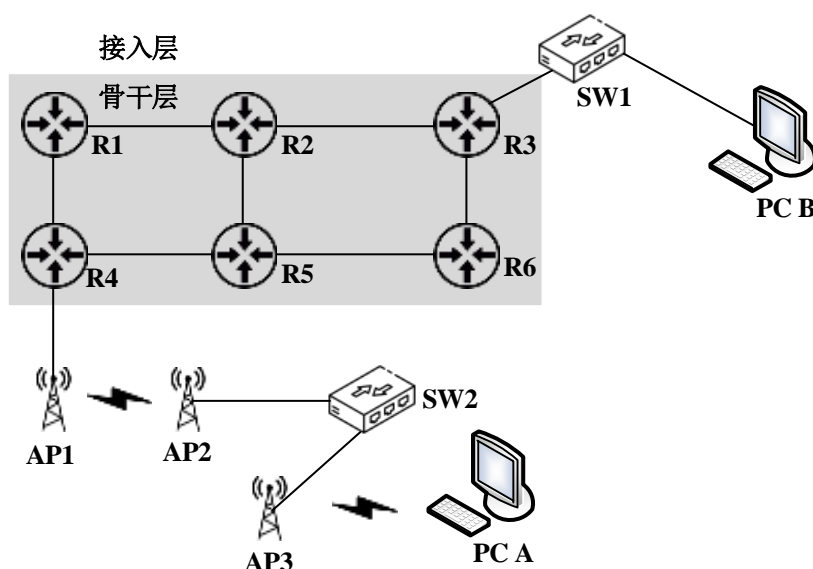
附录 A (资料性)

战术互联网可靠性试验案例

A.1 概述

本案例以某两层战术互联网为评估对象（网络拓扑见图A.1）。其骨干网由R1,R2,...,R6六个路由节点构成；接入网中，路由节点R3连接交换机SW1，终端PC B采用有线网络通过SW1接入骨干网；路由节点R4连接无线接入点AP1，交换机SW2通过AP2以桥接的方式与AP1连接后接入到骨干网，终端PC A则以无线方式接入AP3再通过桥接方式连入。其中PC A模拟单兵节点集合，PC B模拟C⁴ISR系统。

试验目标为评估该网络在一个为期4小时的任务周期内的业务可靠度。该任务包括突袭、搜索与撤退三个阶段，涉及态势感知（上下行）、实时语音、语音指挥、文本指挥及图像指挥共6类业务。



图A.1 某战术互联网骨干网

A.2 确定试验对象

试验对象为图A.1所示的战术互联网。

A.3 确定故障判据

针对该网络所承载的6类业务——态势感知（上下行）、实时语音、语音指挥、文本指挥与图像指挥，其故障判据按“业务-性能参数”故障判据矩阵进行定义，具体见表A.1。

表A.1 战术互联网“业务-性能参数”故障判据

业务类型 \ 故障判据	性能参数	
	时延	丢包率
态势感知（上行）	>2s	>1%
态势感知（下行）	>2s	>1%
实时语音	>0.1s	>3%

表A.1 战术互联网“业务-性能参数”故障判据（续）

业务类型	性能参数	时延	丢包率
	故障判据		
语音指挥		>0.1s	>3%
文本指挥		>2s	>3%
图像指挥		>2s	>1%

A.4 确定试验剖面

该战术互联网的任务剖面包括突袭、搜索与撤退3个阶段。本试验聚焦于骨干网性能，因此主要考虑业务剖面，环境剖面与移动剖面可忽略。该战术互联网的业务剖面详见表A.2-表A.5。其中语音类业务流量记为1 kbps。

表A.2 战术互联网的态势感知（上行）业务剖面

阶段	源节点	目的节点	试验时间/h	文件大小/B	间隔时间/s
突袭	PC A	PC B	1	5242880	2
搜索			2	71680	5
撤退			1	71680	3

表A.3 战术互联网的态势感知（下行）业务剖面

阶段	源节点	目的节点	试验时间/h	文件大小/B	间隔时间/s
突袭	PC B	PC A	1	71680	2
搜索			2	5242880	5
撤退			1	5242880	3

表A.4 战术互联网的语音业务剖面

阶段	源节点	目的节点	试验时间/h	每次通话时长/s	通话间隔时间/s
突袭	PC B	PC A	1	30	1.5
搜索			2	30	1.5
撤退			1	20	1.5

表A.5 战术互联网的指挥控制业务剖面

阶段	源节点	目的节点	试验时间/h	语音指挥		信息指挥		图像指挥	
				每次通话时长/s	通话间隔时间/s	文件大小/B	间隔时间/s	文件大小/B	间隔时间/s
突袭	PC B	PC A	1	5	1.5	10240	正态分布(5,2 ²)	2097152	正态分布(5,2 ²)
搜索			2	5	1.5	10240	正态分布(10,3 ²)	2097152	正态分布(10,3 ²)
撤退			1	3	1.5	10240	正态分布(5,2 ²)	2097152	正态分布(5,2 ²)

A.5 制定试验大纲

按5.4条的要求制定试验大纲。

A.6 受试网络状态检查

按5.6条的要求进行受试网络状态检查。

A.7 试验实施

试验中，采用流量发生器生成A.4节所示业务剖面，并同步收集试验数据。

A.8 可靠性评估

按 5.8 条的要求，计算得到战术互联网各阶段不同业务可靠度的点估计和区间估计，如表 A.6 中 3~5 列所示。在此基础上，结合各业务重要性定义每个阶段不同业务的权重，并计算各任务阶段的网络可靠度点估计和区间估计，如表 A.6 中 6~9 列所示。

表A.6 战术互联网的业务可靠度评估

阶段	业务类型	可靠度			权重	各阶段可靠度综合		
		点估计	置信下限	置信上限		点估计	置信下限	置信上限
突袭	态势感知(上行)	0.99937	0.99860	0.99985	0.1	0.966919	0.949351	0.975917
	态势感知(下行)	0.98246	0.93805	0.99787	0.2333			
	实时语音	0.95873	0.95577	0.96155	0.3333			
	语音指挥	0.96300	0.96148	0.96447	0.1333			
	文本指挥	0.94737	0.91807	0.96852	0.1333			
	图像指挥	0.95318	0.92267	0.97417	0.0667			
搜索	态势感知(上行)	0.96070	0.94962	0.97030	0.1	0.947987	0.916028	0.965245
	态势感知(下行)	0.94915	0.85833	0.98939	0.2333			
	实时语音	0.95027	0.94854	0.95197	0.3333			
	语音指挥	0.95704	0.95597	0.95809	0.1333			
	文本指挥	0.92386	0.87744	0.95677	0.1333			
	图像指挥	0.94500	0.90368	0.97223	0.0667			
突袭	态势感知(上行)	0.98746	0.97940	0.99296	0.1	0.951984	0.918865	0.976991
	态势感知(下行)	0.92000	0.84000	0.99000	0.2333			
	实时语音	0.95430	0.95238	0.95616	0.3333			
	语音指挥	0.99646	0.99596	0.99691	0.1333			
	文本指挥	0.95192	0.89129	0.98421	0.1333			
	图像指挥	0.91176	0.83889	0.95887	0.0667			

综合三阶段，根据时间占比定义权重分别为 0.25, 0.5, 0.25，通过加权可以得到整个战术互联网的可靠度如下：

点估计为： $\hat{R} = 0.953719$ ，

区间估计为： $\begin{cases} R_L = 0.925068 \\ R_U = 0.970850 \end{cases}$ 。

A.9 编写试验报告

试验结束后，按5.9条的要求编写试验报告。
