# 考虑非预期电击穿的离子推力器可靠性分析

李 婧,冯 杰,王紫桐,贾艳辉\*

(兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室

甘肃省空间电推进技术重点实验室,兰州 730000)

**摘要**:针对离子推力器服役过程中的非预期电击穿对可靠性的影响问题,首先进行了非预期电击穿的失效影响 及综合风险评估,然后结合非预期电击穿导致的突发失效特征建立了基于δ冲击模型的离子推力器可靠性评估模 型,最后以20 cm Xe离子推力器为例,在收集地面试验历史数据的基础上计算了考虑非预期电击穿的离子推力器可 靠度随服役时间的关系。另外,综合考虑了由于栅极系统性能退化导致的退化型失效和由于非预期电击穿导致的突 发型失效共存的情形,对离子推力器的整机可靠性评估进行了分析讨论。

**关键词:**非预期电击穿;冲击模型;离子推力器;可靠度 中图分类号:V439<sup>+</sup>.1 **文献标志码:**A

中图分类号:V439<sup>+</sup>.1 文献标 DOI:10.3969/j.issn.1006-7086.2022.06.007 文章编号:1006-7086(2022)06-0676-06

## Reliability Analysis of Ion Thruster Considering Unexpected Electric Breakdown

### LI Jing, FENG Jie, WANG Zitong, JIA Yanhui\*

# (Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Key Laboratory of Space Electric Propulsion Technology of Gansu Province, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Aiming at the impact of unexpected electric breakdown on the reliability of ion thruster in service, firstly, the failure impact and comprehensive risk assessment of unexpected electric breakdown are carried out, and then combined with the sudden failure characteristics caused by unexpected electric breakdown, a reliability assessment model of ion thruster based on impact model is established. Finally, taking the 20 cm Xe ion thruster as an example, the relationship between the reliability of the ion thruster and the service time considering the unexpected electric breakdown is calculated on the basis of collecting the historical data of the ground test. In addition, the coexistence of degraded failure caused by grid system performance degradation and sudden failure caused by unexpected electric breakdown is comprehensively considered, and the overall reliability of ion thruster is analyzed and discussed.

Key words; unexpected electric breakdown; shock models; ion thruster; reliability

## 0 引言

离子推力器是电推进分系统的核心组件,由放 电阴极、放电室、栅极系统和中和器等关键部组件 构成<sup>111</sup>。离子推力器工作的基本原理是借助外部电 能电离推进剂并在电场作用下使离子聚焦并加速 喷出,从而将外部电能转化为动能,产生推力。高 比冲、长寿命、推力小是其显著特征。正是因为离 子推力器产生的推力较小,所以必须在轨稳定可靠 运行数千甚至数万小时才能满足总冲要求。因此, 针对离子推力器长服役寿命可靠性的评估具有重

#### 收稿日期:2021-12-24

基金项目:甘肃省科技计划(18JR3RA412)

作者简介:李婧,工程师,主要从事空间电推进可靠性研究。E-mail:lijing171118@126.com

通信作者:贾艳辉,高级工程师,主要从事空间电推进技术研究与工程研制。E-mail:jiayh06@lzu.edu.cn

引文信息:李婧,冯杰,王紫桐,等.考虑非预期电击穿的离子推力器可靠性分析[J].真空与低温,2022,28(6):676-681.

LI J, FENG J, WANG Z T, et al. Reliability analysis of ion thruster considering unexpected electric breakdown[J]. Vacuum and Cryogenics, 2022, 28(6):676–681.

要的工程意义。

现有离子推力器长寿命可靠性的研究主要从 性能退化机制出发,采用有限时间内的地面试验数 据加模型外推的手段获取离子推力器的"伪"寿命 信息,进而得到寿命分布及可靠性分析的相关指 标<sup>[2]</sup>,例如,林逢春等<sup>[3]</sup>基于性能退化理论,选取离子 推力器加速栅表面坑槽腐蚀深度、加速栅孔径和电 子反流极限电压作为可靠性特征量,通过拟合短期 地面试验数据得到三者与服役时间之间变化关系 的经验模型,然后结合机制分析得到三个特征量的 失效阈值,由此对离子推力器的寿命进行估计,并 采用Weibull分布作为其寿命分布模型,进一步得到 可靠性评估的点估计和置信下限结果;贾艳辉等4 结合加速栅溅射腐蚀的发生机制,以质量损失经验 模型为基础,采用蒙特卡洛(Monte Carlo)仿真对加 速栅寿命进行预测,并拟合离子推力器寿命相对概 率分布和不同寿命下的可靠度曲线,得到了离子推 力器不同特征寿命下的可靠度评估结果。另外,针 对小子样情形下的离子推力器极少数据可靠性评 估,李军星等時借助区间统计量进行可靠性建模,充 分利用短期试验的失效数据信息,由Gauss-Markov 定理得到离子推力器寿命分布的最好线性无偏估计, 进一步得到了可靠度的单侧置信下限预测结果。

上述针对离子推力器可靠性的研究聚焦于与 性能退化相关的部组件及其退化机制,然后采用各 自场景适用的数学模型进行寿命和可靠性的建模 评估,这类研究均可归类为针对离子推力器退化型 失效的可靠性评估<sup>[6]</sup>。而随着工程经验的不断积 累,越来越多的试验结果表明,由于离子推力器内 在工作特性和多因素复杂耦合作用的影响,其正常 服役过程中一直伴随着非预期电击穿问题出现, 该问题或导致离子推力器累积性的性能退化,或发 生中和器和放电室熄灭、电极表面损伤和栅极之间 永久短路等较为严重的后果,甚至直接导致推力 器永久失效<sup>[7]</sup>,非预期电击穿带来的突发型失效影 响逐渐成为离子电推进系统寿命和可靠性评估中 不可忽视的研究内容。

本文将在收集离子推力器地面试验数据的基础上,基于δ冲击模型(δ-Shock Models)理论<sup>[8]</sup>建立 考虑离子推力器非预期电击穿情形下的可靠性评 估模型,并结合性能退化失效过程进行离子推力器 可靠性的综合评估,最后结合评估结果给出合理化 建议。

# 1 非预期电击穿

电击穿是指原本绝缘良好的电极之间出现电 流且电压快速降低的现象,具有击穿电压高、电压 作用时间短且与电场强度密切相关的显著特点。

离子推力器非预期电击穿作为推力器正常工作时偶发的一种异常工况,其产生机制较为复杂,可简单理解为离子推力器中阳极、屏栅、放电阴极等高电位电极与推力器外壳、中和器和加速栅等低电位电极之间存在上千伏的高电位差,加上栅极之间、阳极与外壳电极之间的极小间距,使得高低电极之间产生强电场,在相关因素耦合作用下导致推力器电极之间发生电击穿<sup>[9]</sup>。图1所示为发生非预期电击穿时相关电流监测参数的波动示意图。几种典型推力器的电击穿基本情况统计数据如表1所列<sup>[7,10]</sup>。





表1 不同国家的离子推力器击穿数据基本情况统计 Tab.1 Basic statistics of unexpected electric breakdown data of ion thrusters

统计内容	美国NSTAR	美国NEXT	中国LIPS-200	中国LIPS-300
累计工作时长/h	2 031	2 038	2 000	2 100
累计击穿次数/次	393	4 400	40	2 162
平均击穿频次/(次/h)	0.19	2.16	0.02	1.03

离子推力器非预期电击穿会对电推进系统及

其自身产生不同程度的危害,例如推进系统 PPU 单

机失效、系统柔性和可靠性变差等。同时,除了部 分可恢复的束流中断外,非预期电击穿还可导致 离子推力器中和器和放电室熄弧、栅极短路以及电 极表面损伤等不良后果。图2所示为离子推力器 地面试验中由非预期电击穿产生的不同后果的 Pareto统计图,其中风险综合评估值是发生可能性、 性能危害性、失效严酷度三项指标综合打分的评估 结果。



Fig. 2 Influence analysis of unexpected electric breakdown

从图2中可以看出,短路击穿和熄弧的风险综 合评估超过了80%,可认为发生这两种击穿情况最 终会导致推力器工作被动中断,将其归类为第一类 电击穿;其他不到20%的击穿情况归类为第二类电 击穿。每次电击穿的出现是一个离散随机的过程, 对于第二类电击穿,它的发生不会直接导致推力器 的失效,而是随着电击穿带来的内部损伤逐渐积 累,推力器性能逐渐退化,当损伤累积超过失效阈 值时推力器发生失效;对于第一类电击穿,其造成 的损伤将直接导致推力器状态发生阶跃性变化而 中断输出。从薄弱环节的失效分析来看,虽然第一类 电击穿发生的可能性不大,但其综合风险是航天工 程任务中不可接受的,因此导致被动中断的第一类 电击穿更容易成为制约推力器寿命及可靠性的短板 问题。本文通过分析第一类非预期电击穿相关数据,例如发生频次、两次中断之间的时间间隔等数据,摸清失效规律,然后借助冲击模型建立可靠性评估模型,对推力器服役过程的可靠性进行评价。

## 2 考虑非预期电击穿的离子推力器可靠性模型

根据离子推力器非预期电击穿发生机制及后 果分析,考虑采用δ冲击模型对离子推力器非预期 电击穿下的可靠性进行评估,并结合离子推力器实 际工作情况进行如下假设:

(1)[0,*t*]时间内发生非预期电击穿的次数服从 参数为λ的Poisson过程<sup>[11-12]</sup>。由于对非预期电击穿 的产生机制及影响的工程研究尚有不足,无法量化 每次非预期电击穿对推力器性能的影响,上述特征 符合δ冲击模型的应用情景;

(2)暂时不考虑非预期击穿对离子推力器性能 退化过程的关联影响,即假设两种失效模式之间是 相互独立的<sup>[13]</sup>。

在实际工程应用中,假设 $B_i$ 为"相邻两次非预 期电击穿导致推力器工作被动中断"事件之间的时 间间隔, $i=0,1,\dots,N(t),t\ge0, \end{bmatrix} \{B_i\}_{i=0}^{\infty}$ 为一非负的 随机变量序列, $\{N(t),t\ge0\}$ 为时间间隔的计数过 程,T为离子推力器寿命,对于给定的时间间隔阈值  $\delta > 0,$ 当 $B_i < \delta$ 时,离子推力器不满足继续工作的要 求,可认为发生停机失效。此时可将离子推力器的 寿命表示为<sup>[13-14]</sup>:

 $\{T \le t\} \Leftrightarrow \{\min B_i < \delta, i = 0, 1, \cdots, N(t), t \ge 0\}$ (1)

对于 $\delta$ 冲击模型,在t时刻尚未发生超过失效阈 值的概率为:

$$P\{T > t\} = \sum_{i=0}^{\infty} P\{T > t, N(t) = i\} = \sum_{i=0}^{\infty} P_i(t) \quad (2)$$
  
其中:

$$P_{i}(t) = P\{T > t, N(t) = i\} = P\{B_{1} > \delta, B_{2} > \delta, \dots, B_{i} > \delta, B_{1} + B_{2} + \dots + B_{i} \le t \le B_{1} + B_{2} + \dots + B_{i} + B_{i+1}\}$$

$$= P\{B_{1} + B_{2} + \dots + B_{i} \le t \le B_{1} + B_{2} + \dots + B_{i} + B_{i+1}|B_{1} > \delta, B_{2} > \delta, \dots, B_{i} > \delta\} \times P\{B_{1} > \delta, B_{2} > \delta, \dots, B_{i} > \delta\}$$

$$= P\{(B_{1} - \delta) + (B_{2} - \delta) + \dots + (B_{i} - \delta) \le t - i\delta \le (B_{1} - \delta) + (B_{2} - \delta) + \dots + (B_{i+1} - \delta)\}$$

$$= P\{N(t - i\delta) = i\}e^{-i\lambda\delta} = \frac{\lambda^{i}(t - i\delta)^{i}}{i!}e^{-\lambda(t - i\delta)}e^{-i\lambda\delta} = \frac{\lambda^{i}(t - i\delta)^{i}}{i!}e^{-\lambda t}, t > 0 \ ; \ i = 0, 1, \dots, \frac{t}{\delta}$$
(3)

当 $i > \frac{t}{\delta}$ 时,在时间[0,t]内至少会发生一次被动 中断的时间间隔小于 $\delta$ ,因此,离子推力器在t时刻 之前停止工作,故考虑非预期电击穿的离子推力器 可靠度函数为:

$$R(t) = \sum_{i=0}^{\overline{\delta}} \frac{\lambda^i (t - i\delta)^i}{i!} e^{-\lambda t}, t > 0 \quad ; \quad i = 0, 1, \cdots, \frac{t}{\delta} \quad (4)$$

δ冲击模型在机械与电子系统故障、器件保护 以及疾病发作等实际问题中的应用较为广泛,也有 不少学者基于δ冲击模型理论进行了可靠性分析和 系统维修决策的相关研究。Wang等<sup>151</sup>提出了基于δ 冲击模型的可靠性评估方法,并在冲击过程服从齐 次和非齐次泊松过程两种情况下计算了系统的可 靠性,该方法更适合对不同系统特征的可靠性评 估;刘颖等<sup>160</sup>拓展了δ冲击模型的参数估计方法,通 过无失效数据进行了冲击模型中的参数统计推断; Li等<sup>181</sup>运用多层Bayes方法对多失效数据下的δ冲击 模型参数进行了估计,并将计算结果应用于地震的 预测。成国庆等<sup>1171</sup>将δ冲击模型与维修理论相结合, 以系统出现故障的次数N等指标为约束条件,单位时 间期望费用C(N)为目标函数,通过最小化C(N)获得系统的最优更换策略。

## 3 计算结果与分析

3.1 非预期电击穿下的可靠性评估结果

结合 20 cm Xe 离子推力器地面试验数据进行 考虑非预期电击穿情况的离子推力器可靠性评估。 在此情况下,20 cm Xe 离子推力器的可靠度随服役 时长的变化曲线如图3所示。







从图3的评估结果可以看出,考虑非预期电击 穿的情形下,离子推力器在15000h服役时长下的 可靠度达到0.9728,该分析结果在保证产品一致性 的前提下具有较好的鲁棒性。

3.2 分析讨论

如前所述,基于性能退化的寿命分布及可靠性 评估也是离子推力器可靠性评估中重要的分析内 容,因此,综合考虑由于栅极系统性能退化导致的 退化型失效和由于非预期电击穿导致的突发型失 效共存的情形,计算离子推力器整机可靠性。

由完全地面试验结果可知,加速栅坑槽结构腐 蚀是离子推力器性能退化的可靠性特征量,由其表 征的离子推力器寿命符合"最薄弱环节模型"。另 外,通过查阅国外文献发现,有很多学者选择 Weibull分布作为离子推力器及其关键部组件的寿 命分布模型。因此,本文选定离子推力器的寿命服 从Weibull分布,借助寿命先期试验数据(先验数据) 确定形状参数,并给出基于栅极退化过程的离子推 力器可靠性评估结果。

由于只有1台离子推力器可以用来进行寿命试 验,极端小子样特征导致所得到的试验数据无法反 映寿命随机分布的正确信息,故无法根据已有失效 数据来确定寿命分散性,即Weibull分布形状参数 α。因此,本文将同批次加速栅历史试验数据作为 先验数据来估计推力器的性能退化寿命,首先构建 寿命预测结果的顺序统计量,然后根据传统的 Weibull参数的最佳线性无偏估计对Weibull分布的 形状参数进行估计,计算结果如表2所列,其中*C* (*m*,*r*,*k*)可以查表<sup>[18]</sup>。

表 2 历史试验数据分析 Tab. 2 Analysis of historical test data

k	$t_k$ /h	$t_k^* = \ln t$	C(8,8,k)	$Ct_k^*$
1	13 356.175 2	9.499 7	-0.101 9	-0.968 0
2	13 558.541 5	9.514 8	-0.108 1	-1.028 5
3	13 927.840 3	9.541 6	-0.102 7	-0.979 9
4	13 982.245 9	9.545 5	-0.087 2	-0.832 4
5	14 037.078 2	9.549 5	-0.058 9	-0.562 5
6	14 491.720 4	9.581 3	-0.011 1	-0.106 4
7	15 039.726 7	9.618 5	0.075 8	0.729 1
8	15 630.807 6	9.657 0	0.394 2	3.806 8

$$\sigma^* = \sum_{i=1}^{8} Ct_k^* = 0.0582 \tag{5}$$

则Weibull分布的形状参数为:

$$\alpha = \frac{1}{\sigma^*} = \frac{1}{0.0582} = 17.2 \tag{6}$$

此时离子推力器可靠度单侧置信下限为:

$$R_{\rm L}^* = \exp\left\{\frac{\frac{t^{\alpha}\ln(1-\gamma)}{\sum_{k=1}^{n}t_k^{\alpha}}\right\}$$
(7)

式中: $\alpha$ 为形状参数; $\gamma$ 为置信度; $t_1, t_2, \cdots t_n$ 为先验数据。

由于非预期电击穿不直接导致离子推力器栅 极系统的溅射腐蚀,因此假设离子推力器性能退化 和非预期电击穿之间是相互独立的,根据串联模型 准则,二者共存情形下的离子推力器可靠性评估结 果如图4所示。





从图4中可以看出,在离子推力器服役初期,非 预期电击穿占据主要地位,这与地面验证及空间飞 行数据显示的规律以及工作机制相符。整机可靠 性不超过性能退化可靠度和非预期电击穿可靠度 的值,这不仅符合串联模型的数学逻辑,也解释了 仅考虑退化型失效而忽略突发型失效在产品及系 统可靠性评估中造成分析结果与实际应用符合度 失真的现象。

# 4 结论及建议

本文在考虑非预期电击穿对离子推力器服役 过程可靠性影响的基础上,结合非预期电击穿导致 的失效特征建立了基于δ冲击模型的可靠性评估模 型,并以20 cm Xe离子推力器为例计算其可靠度, 结果显示,当离子推力器服役时长达到15 000 h时, 其对应的可靠度为0.972 8。

另外,本文还综合考虑了由于栅极系统性能退 化导致的退化型失效和由于非预期电击穿导致的 突发型失效共存的情形,对离子推力器的整机可靠 性评估进行了分析讨论。结果显示,综合考虑退化型 "软失效"和突发型"硬失效"的可靠性评估结果低 于单一失效模式,符合串联模型准则,且能够更为 全面准确地反映推力器整机的可靠性变化过程。

为了更加深入地分析非预期电击穿对离子推 力器可靠性的影响,后续工作可以从以下几个方面 展开:

(1)考虑非预期电击穿发生频次随服役时间的 变化关系,即发生频次符合非齐次 Poisson 过程,此 时发生频次是一个依赖于时间的函数,这样可以更 好地将推力器实际服役过程中非预期电击穿在任 务初期、平稳期和任务末期发生频次有所不同的现 状纳入模型。

(2)通过地面及在轨运行数据经验的累积,逐 步量化每一次非预期电击穿的发生对推力器性能 退化的影响,建立加法模型来研究非预期电击穿和推 力器内部性能退化共存下的性能退化失效分析。

#### 参考文献:

[1]张天平.离子电推进技术[M].上海:科学出版社,2020.

- [2] LI J X, WANG Z H, ZHANG Y B, et al. Remaining useful life prediction and reliability analysis for an individual ion thruster[J]. Journal of Propulsion & Power, 2016, 32(4):1–10.
- [3]林逢春,王宗仁,耿海,等. 氙离子推力器寿命试验与可靠 性评估方法[J]. 质量与可靠性,2018(5):17-20.
- [4] 贾艳辉,张天平,李小平.离子推力器加速栅寿命的概率 性分布和可靠性预测[J].真空与低温,2011,17(2):75-79.
- [5] 李军星,张勇波,傅惠民,等.离子推力器极少数据可靠性 评估方法[J].航空动力学报,2015,30(10):2352-2356.
- [6] 袁容.基于性能退化分析的可靠性方法研究[D]. 成都: 电子科技大学,2015.
- [7]张雪儿,张天平,李得天,等.离子推力器非预期电击穿特 性及其主要影响因素对比研究[J]. 航天器环境工程, 2021,38(1):63-70.
- [8] LIZ, KONG X. Life behavior of δ-shock model[J]. Statistics & Probability Letters, 2007, 77(6): 577–587.
- [9]张天平,张雪儿,蒲彦旭,等.离子推力器非预期电击穿的 主要诱发因素及机制[J].真空与低温,2021,27(1):1-11.
- [10] YIM J T. Update of the NEXT ion thruster service life assessment with post-test correlation to the long-duration test[R]. IEPC 2017-061, 2017.
- [11] 李昊. 基于随机过程和竞争失效理论的可靠性建模方法 [D]. 兰州:兰州理工大学, 2017.
- [12] 邹慧鹏.有限区间上的齐次与非齐次泊松过程研究[D]. 重庆:重庆师范大学,2012.
- [13] 刘晓娟. 基于多失效模式的复杂系统可靠性分析研究

[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.

- [14]孙富强,李艳宏,程圆圆.考虑冲击韧性的退化-冲击相依竞争失效建模[J].北京航空航天大学学报,2020,46 (12):2195-2202.
- [15] WANG Z, HUANG H Z, LI Y, et al. An approach to reliability assessment under degradation and shock process [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2011,60(4):852–863.
- [16] 刘颖, 刘冬雪, 马瑶. 不确定环境下的致命冲击模型[J].

天津科技大学学报,2019,34(2):75-80.

- [17] 成国庆,李玲,柳炳祥,等.多阈值故障的δ-冲击模型最优维修更换策略[J].应用数学,2013,26(1):165-171.
- [18]中华人民共和国机械电子工业部,中国电子技术标准化研究所,中国科学院计算中心.寿命试验用表简单线性无偏估计用表(极值分布,威布尔分布):SJ/T11100-1996[S].北京:国家技术监督局,1996.

(责任编辑:任 妮)