

卫星太阳能电池阵在轨故障统计及分析

杨倩, 薛培元

(北京空间科技信息研究所, 北京 100086)

摘要: 文章针对2000年1月至2012年9月期间79颗在轨卫星发生的114次太阳能电池阵故障事件进行了分类统计分析, 并利用Kaplan-Meier估计量分析方法对这些在轨故障进行了可靠性分析。结果表明: 太阳能电池阵的故障多发生在卫星在轨第一年, 其中电子类故障发生率较高; 不同卫星平台的系统缺陷或设计共性问题也与太阳能电池阵故障紧密相关。最后, 结合我国卫星太阳能电池阵设计及制造工艺技术, 提出了加强出厂前的测试和试验验证、加强仿真建模、加强冗余设计等建议。

关键词: 在轨故障; 太阳能电池阵; 统计分析; Kaplan-Meier估计量; 可靠性设计

中图分类号: V417.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2013)05-0555-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2013.05.019

0 引言

随着飞行器在轨寿命的延长和发射数量的逐步增加, 在轨飞行器的总数不断增加, 而飞行器在轨故障总数也逐年递增。根据国外的数据统计, 在所有在轨卫星故障中, 电源分系统故障约占27%; 而在电源分系统的故障中, 大约42%的故障源于太阳能电池阵^[1-4]。

本文主要关注太阳能电池阵故障的统计与分析, 所涉及的故障类型主要有两种: 太阳能电池阵展开(SAD)故障和太阳能电池阵运行(SAO)故障。针对2000年1月至2012年9月期间79颗在轨卫星发生的114次太阳能电池阵故障事件进行分类统计分析, 并对该期间出现太阳能电池阵故障的地球同步轨道卫星进行了可靠性函数的Kaplan-Meier估计量分析。

1 卫星太阳能电池阵在轨故障统计与分析

1.1 研究范围

本文统计与分析的卫星太阳能电池阵故障数据主要来自商业卫星和公开报道的卫星数据, 包括背景资料、卫星参数、故障原因、相关信息和保险理赔情况等^[5-9]。由于部分军用卫星的故障情况未公开,

还有一些卫星出现了故障后及时得以恢复, 故不包含在本文的研究范围。本文研究的在轨卫星太阳能电池阵故障情况主要指永久或临时性故障导致任务功能降低的意外事件, 包括备用系统的故障, 但不包括推进剂的正常损耗和材料不完备造成的故障情况。具体114次太阳能电池阵故障, 其中包含63颗通信卫星、10颗科学实验卫星、3颗地球观测卫星、2颗技术试验卫星和1颗导航卫星^[5]。

1.2 统计分类方法

为了使故障统计更有意义, 同一故障模式影响同一卫星分系统的故障都按一次故障事件统计。例如, “回声星-6”于2001年10月发生了太阳能电池阵两串电池失效的事件, 该事件就按一次故障事件统计。而不同故障模式造成同一卫星的故障或同一故障模式造成不同卫星故障的情况, 就要按故障发生次数统计。例如, 2001年, “天狼星”FM1、FM2、FM3三颗卫星均发生了因短路而造成太阳能电池阵的一串电池阵列失效的事件, 这就要按3次故障事件统计。这样的故障分类方法可以在有限的信息条件下更清晰全面地对比卫星故障情况。

依据故障对任务的影响程度^[10], 把故障事件

收稿日期: 2013-06-06; 修回日期: 2013-08-30

作者简介: 杨倩(1982—), 女, 助理研究员, 从事空间技术情报研究工作。E-mail: cast512_yq@163.com。

分为轻微(III级)、关键(II级)和致命(I级)3级。例如,2008年11月10日尼日利亚“通信卫星1号”发生了北太阳电池阵驱动机构(SADA, Solar Array Drive Mechanism)故障,电池耗尽,卫星失效,该故障为I级。2012年1月,AMC-16卫星也经历了一次太阳电池阵短路故障,因故障而减弱了支持有效载荷运行的供电能力,致使一部分冗余的有效载荷被关闭,该故障不可修复但没有导致卫星失效,此类故障为II级。2012年2月15日,SES-4卫星发生了太阳电池阵无法正常展开的故障,随后卫星不得不通过摇晃的方式完全展开了太阳电池阵,该故障为III级。

1.3 按故障等级和类型进行统计与分析

对114次故障事件按上文提到的故障事件严重程度(轻微、关键和致命)等级和所涉及的故障类型(即SAD故障和SAO故障)进行统计,结果见表1。

表1 按故障等级和类型进行太阳电池阵故障事件统计
Table 1 Statistics of solar array failure events according to three grades and failure types

故障等级	SAO故障	SAD故障	总计
轻微(III级)	21	3	24
关键(II级)	73	8	81
致命(I级)	8	1	9
总计	102	12	114

从表1可以看出:就故障类型而言,SAO故障数占总故障数的89.5%;而就故障等级而言,II级故障约占71%;I级故障约占8%。

1.4 按卫星轨道进行统计与分析

不同的轨道对应完全不同的运行周期和空间环境,因此对卫星所造成的影响也不同。例如,LEO卫星要比GEO卫星更频繁地经历日食影响,这样其电源系统的充放电周期更迭就更加频繁;而GEO卫星暴露的辐射环境要比LEO卫星更严厉。其他轨道上的情况更为复杂,如太阳同步轨道、椭圆轨道、高椭圆轨道、极地轨道等。对114次故障按轨道进行统计,结果见表2。

由表2中统计结果可以看出:GEO卫星太阳电池阵发生故障事件的次数远大于LEO和其他轨道的故障次数,这与GEO复杂的空间环境有着密切的关系。

表2 按卫星轨道进行太阳电池阵故障事件统计
Table 2 Statistics of solar array failure events according to different orbits

故障等级	GEO	LEO	其他轨道
轻微(III级)	13	2	9
关键(II级)	66	6	9
致命(I级)	6	0	3
总计	85	8	21

1.5 按故障发生时卫星已在轨的时间进行统计与分析

按照当太阳电池阵故障发生时卫星已在轨的时间对114次故障进行统计,结果见表3。

表3 按太阳电池阵故障事件发生时卫星已在轨时长进行故障统计

Table 3 Statistics of solar array failure events according to satellite flight time before failure

在轨时间段/a	故障次数	占比/%
0~1	41	36
1~3	22	22
3~5	15	15
5~8	16	16
8~25	11	11

从表3中可以看出:36%的太阳电池阵故障发生在卫星成功发射后第1年(其中有13次故障是在发射后1个月内出现的)。因而,卫星入轨后的第1年为故障事件的高发期,这些故障的发生可能由于卫星及其地面环境试验不足或建模不充分,抑或缺少足够的反复验证试验,导致卫星发射入轨后不久即出现故障现象。22%的故障发生在卫星发射后的第1~3年,这是卫星太阳电池阵故障的第2个高发期,期间故障的发生都是前期不可修复故障的累积与集中反映。

1.6 按同一卫星相同故障重复出现次数的统计与分析

在作故障统计时,发现同一故障事件多次发生在同一卫星上的情形,对这些故障事件统计如下: Echostar-5卫星相同故障重复出现了7次; Galaxy-26卫星6次; AMC-16卫星4次; Galaxy-25、PanAmSat-6、Echostar-12三颗卫星均出现了3次; Echostar-6、Sirius FM-1、Sirius FM-2、Sirius FM-3、Intelsat-7、DRTS、Echostar-8、Ekxpress AM-12、AURA、Nigcomsat-1、Echostar-2、Thaicom-3、NSS-6、ZARYA、Landsat-05共15颗卫星均发生了2次。

其中, Echostar-5 卫星是重复出现故障次数最多的, 自 1999 年 9 月发射后, 于 2000 年 3 月、2001 年、2002 年 8 月、2003 年 1 月、2004 年 3 月、2006 年 7 月和 2007 年 6 月发生因短路而导致太阳能电池串失效的事件。Echostar-5 卫星的太阳电池阵共设计有 96 个太阳能电池串, 在设计寿命周期内, 要求不少于 92 个电池串工作才能确保电源正常运行。在第 5 次故障出现之前, 电池串的故障并没有影响卫星的正常工作; 而第 5 次电池串失效故障发生时, 卫星的总电源功率已下降到预期的 95%, 但仍可保持运行状态。从这里可以看出在卫星设计与制造过程中冗余量(硬件和功能冗余)的处理是非常必要的。

1.7 按故障原因进行统计与分析

为便于统计, 将太阳电池阵故障发生的原因分为机械、电子、软件、环境、工艺和未知 6 类。机械类故障是由诸如温度、压力、摩擦和其他外力等物理变化而引起的; 电子类故障包括因功率超载、短路、异常电池耗竭等导致的; 软件类故障主要指传送到卫星和控制软件的错误指令而使太阳电池阵失效; 环境类故障主要指电磁辐射、电磁风暴、陨石、日食、太阳风暴和空间碎片等环境因素引起的; 工艺类故障是指由于焊接、装配等工艺不合理而引起的。按故障原因对 114 次故障事件进行统计, 结果见表 4。

表 4 按故障原因进行卫星太阳电池阵在轨故障统计
Table 4 Statistics of the on-orbit satellite solar arrays failure events according to the failure reasons

故障原因	故障次数	所占比例/%
机械	23	20
电子	71	62
软件	1	1
环境	10	9
工艺	3	3
未知	6	5

从表 4 可以看出, 电子类故障占绝大多数。因此, 在太阳电池阵设计时应有针对性地开展故障仿真试验, 发现产品设计缺陷机理并及时采取预防与改进措施。

另外, 根据故障原因分析的详细资料来看, 卫星平台的系统缺陷或设计共性问题可能与太阳电池阵故障有很大联系, 具体情况如下:

1) 采用劳拉空间系统公司的 LS-1300/FS-1300 平台的卫星多次发生因短路而使太阳电池串失效的故障;

2) 采用波音公司的 Boeing-702/GEM 平台的卫星多次发生由于太阳电池阵连接器过热的排气而导致连接器的“雾化”现象, 从而造成电池阵功率的损失;

3) 采用欧洲泰雷兹-阿莱尼亚空间公司的 Spacebus-3000 平台的卫星多次发生太阳电池阵轴承与功率传输机构(BAPTA, Bearing and Power Transfer Assembly)故障^[11];

4) 采用印度空间研究组织的 I-3000 平台的卫星多次发生太阳电池阵驱动机构(SADA)故障, 该故障也是导致 2008 年 11 月“尼日利亚-1”卫星失效的主要原因^[12]。

2 GEO 卫星太阳电池阵故障数据的可靠性分析

在上述故障统计与分析的基础上, 本章节重点对 GEO 卫星太阳电池阵故障数据进行可靠性分析。有关的卫星数据来自于文献[6], 卫星故障数据来自于文献[2]。选取的样本空间为 2000 年 1 月时在轨的和其后一直到 2012 年 9 月期间发射的共计 359 颗 GEO 卫星(在轨工作、退役、降轨、失效), 其中出现太阳电池阵故障的卫星为 55 颗, 故障次数为 85 次, 故障率 0.236 8。这 85 次故障发生时相关卫星的总在轨时间合计 290.91 年, 年平均故障率为 0.292 2。

按故障类型进行可靠性统计结果如表 5。

表 5 按故障类型对 GEO 卫星在轨故障数据的可靠性分析
Table 5 The reliability analysis data of on-orbit failure of GEO satellites according to failure types

故障类别	故障次数	故障率	年平均故障率
SAD	11	0.030 6	0.037 8
SAO	74	0.206 1	0.254 4

由于太阳电池阵故障属于随机截尾样本, 即:

1) 卫星成功入轨时间随机: 样本单元在不同时间点启动, 且该时间点已知; 2) 故障发生时间以及卫星失效或退役的发生时间随机; 3) 截尾检验的发生时间可以是由于某一故障发生前样本中的卫星退役或失效, 也可以是由于样本检验末期该卫星

仍然运行。那么,针对随机截尾样本的故障可靠性分析,可采用 Kaplan-Meier 估计量分析方法^[13]。

随机截尾数据可靠性函数的 Kaplan-Meier 估计量为

$$\hat{R}(t) = \prod_{t_i < t} i \cdot \hat{p}_i = \prod_{t_i < t} i \frac{n_i - 1}{n_i} \quad (1)$$

如果故障数据完整,即非截尾数据时,那么 Kaplan-Meier 估计量就等于经验可靠度函数,即

$$\hat{R}(t) = \frac{N - n(t)}{N} = \frac{1 - n(t)}{N} \quad (2)$$

其中 $\hat{R}(t)$ 为产品在 t 时刻的可靠度函数 $R(t)$ 的估计。该可靠性统计分析方法属于非参数可靠性分析,即所计算的试验数据相互之间没有关联。

依据式(1)计算 GEO 卫星太阳电池阵故障截尾数据可靠性函数的 Kaplan-Meier 估计量。样本总量 N 为 359 颗,故障 85 次,截尾检验 274 次,且发生故障与截尾检验相互之间没有关联,因检验时间段内失效或退役等原因而删除的卫星数为 37 颗。当卫星在轨时间为 t_i 时,则估计量 $\hat{R}(t_i)$ 见表 6。

表 6 GEO 卫星在轨故障可靠性的 Kaplan-Meier 估计量
Table 6 The Kaplan-Meier reliability estimator of on-orbit satellite failures in GEO

故障时间/a	$\hat{R}(t_i)$	故障时间/a	$\hat{R}(t_i)$	故障时间/a	$\hat{R}(t_i)$
0.002 7	0.994 4	1.448 3	0.915 1	4.621 5	0.836 4
0.005 5	0.991 3	1.514 0	0.912 3	4.851 5	0.833 6
0.008 2	0.988 4	1.538 7	0.909 5	4.925 4	0.830 8
0.027 4	0.985 6	1.727 6	0.906 7	5.144 4	0.828 0
0.030 1	0.982 5	1.768 7	0.903 9	5.201 9	0.825 2
0.038 3	0.979 7	1.971 3	0.901 1	5.358 0	0.822 4
0.043 8	0.976 9	1.998 6	0.898 3	5.571 5	0.819 4
0.049 3	0.974 1	2.376 5	0.895 5	5.867 2	0.816 6
0.084 9	0.971 3	2.453 1	0.892 7	5.872 7	0.813 7
0.109 5	0.968 4	2.505 1	0.889 9	6.113 6	0.810 9
0.134 2	0.965 5	2.559 9	0.887 2	6.606 4	0.808 0
0.147 8	0.962 7	2.614 6	0.884 4	6.644 8	0.805 2
0.199 9	0.959 9	2.705 0	0.881 6	6.647 5	0.802 4
0.397 0	0.957 1	2.759 8	0.878 8	6.811 8	0.799 6
0.432 6	0.954 4	2.976 0	0.875 9	7.033 5	0.796 8
0.531 1	0.951 6	3.003 4	0.873 1	7.039 0	0.793 7
0.558 5	0.948 8	3.069 1	0.870 3	7.279 9	0.790 9
0.700 9	0.946 0	3.091 0	0.867 5	7.753 6	0.787 7
0.791 2	0.943 2	3.282 7	0.864 7	7.791 9	0.784 9
0.854 2	0.940 4	3.326 5	0.861 8	8.000 0	0.782 0
0.856 9	0.937 6	3.356 6	0.858 9	9.081 5	0.779 1
0.870 6	0.934 8	3.520 9	0.856 1	9.243 0	0.776 3
0.930 9	0.932 0	3.619 4	0.853 3	9.456 5	0.773 5
0.939 1	0.929 1	3.937 0	0.850 5	10.431 2	0.770 7
0.944 6	0.926 3	3.945 2	0.847 7	10.505 1	0.767 8
1.204 7	0.923 5	4.000 0	0.844 8	11.833 0	0.765 0
1.212 9	0.920 7	4.271 0	0.842 0	11.846 7	0.762 3
1.404 5	0.918 0	4.520 2	0.839 1		

通过计算可以看出,利用 Kaplan-Meier 可靠性估计量方法和可靠性经验分析方法所得到的结果相近。据此得到的可靠性分析结论是, GEO 卫星太阳电池阵可靠性随在轨时间的延长而降低:当在轨时间 2 年左右时,其可靠性降到约 0.9;在轨时间 10 年时,可靠性约为 0.77。

3 启示与建议

针对上述统计分析结果,结合我国目前卫星太阳电池阵设计及制造工艺技术,提出以下 3 个方面的建议:

1) 加强卫星可靠性试验,提高卫星太阳电池阵产品的固有可靠性

通过统计分析发现, 太阳电池阵失效多发生在卫星在轨的第一年, 尤其是电子类故障的发生率非常高, 有很多失效发生在飞行器入轨后不久。对比卫星可靠性理论分析结果可以推断, 卫星的早期失效原因可能是产品的筛选不够彻底。因此, 适当地增加卫星出厂前的测试和可靠性验证试验, 可以有效降低在轨故障的发生。实际工作中, 航天器的预算和进度安排一般都有严格限制, 为降低故障率, 应充分优化太阳电池阵出厂前试验, 做好筛选与测试, 确保产品的所有接口和状态均得到充分测试, 以此来暴露卫星太阳电池阵分系统的设计或制造缺陷。

2) 加强卫星太阳电池阵产品的故障仿真试验, 减少系统的设计缺陷

在卫星太阳电池阵产品的研制过程中, 加强故障仿真与环境建模至关重要, 特别是对于新系统、新产品的的设计。故障率的逐年递增与新技术或新产品的应用有一定的关系, 没有经过实际在轨飞行验证的新技术、新产品可能存在设计不完善或对空间环境适应性不强等问题。近年来, 国外航天器系统可靠性分析技术的研究方向已经从单一的分系统故障诊断逐步向集成健康管理方向发展, 其主要工作多为对故障的预测、诊断和修复及对系统健康状态的评估, 而这些都是以故障仿真试验为基础的。因此, 开展卫星太阳电池阵产品的故障仿真试验, 有助于加强对故障机理的研究和在设计阶段尽可能地发现和改进产品设计缺陷^[14]。

3) 加强卫星太阳电池阵的冗余设计及在轨环境监测, 提高产品在轨可靠性

从统计数据可以看出, 卫星太阳电池阵经常会反复出现相同的故障事件, 如多颗卫星都曾发生因短路而导致太阳能电池串失效。尽管部分电池串发生了失效故障, 但由于采取冗余设计使得卫星仍能正常工作, 由此可见加强硬件或功能的冗余处理是非常必要的。由于卫星在轨期间一直处于复杂的空间等离子体环境中, 而太阳电池阵则更容易吸附等离子体中的电子, 造成大量负电荷的累积。除了采用对静电不敏感的温控涂层来减缓表面带电的影响外, 还应该加强对卫星表面充放电现象的在轨监测, 获得静电放电的时间、概率和区域, 这些监测数据对后续卫星可靠性的改善有重要作用。

另外, 加强航天器在轨环境监测, 建立准确、实时的空间环境模型, 做好异常空间环境的预测预报, 增加异常空间环境情况下的人工实时干预措施, 也是提高卫星在轨可靠性的重要手段。

参考文献 (References)

- [1] Mak Tafazoli. A study of on-orbit spacecraft failures[J]. *Acta Astronautica*, 2009, 64(2/3): 195-205
- [2] Castet J F, Saleh J H. Satellite and satellite subsystems reliability: Statistical data analysis and modeling[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2009, 94(11): 1718-1728
- [3] Kim So Young, Castet J F, Saleh J H. Satellite electrical power subsystem: statistical analysis of on-orbit anomalies and failures[C]//2011 IEEE Aerospace Conference. MT, USA, 2011: 1-12
- [4] Kim So Young, Castet J F, Saleh J H. Spacecraft electrical power subsystem: Failure behavior, reliability, and multi-state failure analysis[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2012, 98(1): 55-65
- [5] Ascend Worldwide. SpaceTrak[DB/OL]. [2012-09-04]. <http://www.ascendworldwide.com/what-we-du/ascemd-data/space-data/space-data/space-trak.html>
- [6] Satellite news digest[EB/OL]. [2012-09-04]. <http://www.sat-index.com/failures>
- [7] 2011: The year in review[EB/OL]. [2012-09-04]. <http://www.spacenews.org>
- [8] Information on spaceflight, launch vehicles and satellites[EB/OL]. [2012-09-04]. <http://www.space.skyrocket.de/index.html>
- [9] List of satellites at geostationary orbit[EB/OL].<http://www.satbeams.com/satellites>
- [10] 中华人民共和国航空航天工业部. QJ 2437—1993 卫星故障模式影响和危害度分析[S]
- [11] Landis G A, Bailey S G, Tischler R. Causes of power-related satellite failures[C]//Proceedings of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2006: 1943-1945
- [12] Haga R A, Saleh J H. Epidemiology of satellite anomalies and failures: A subsystem-centric approach[C]//2011 IEEE Aerospace Conference. MT, USA, 2011: 1-19
- [13] Saleh J H, Castet J F. A statistical approach of spacecraft reliability and multi-state failures[M]. New York: Wiley Press, 2011
- [14] 谭春林, 胡太彬, 王大鹏. 国外航天器在轨故障统计与分析[J]. *航天器工程*, 2011, 20(4): 130-136
Tan Chunlin, Hu Taibin, Wang Dapeng. Analysis on foreign spacecraft in-orbit failures[J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(4): 130-136

Statistical data and reliability analysis of on-orbit anomalies and failures of satellite solar array

Yang Qian, Xue Peiyuan

(Beijing Institute of Space Scientific and Technological Information, Beijing 100086, China)

Abstract: For the analysis of on-orbit anomalies and failures of the satellite solar arrays and their reliabilities, 114 sets of satellite in-orbit solar array anomalies and failures between January 2000 and September 2012 are studied, and of particular interest is the Kaplan-Meier estimator of on-orbit solar array failures of GEO satellites. The following results are obtained: the most frequently happened failures are the SAO failures; the number of GEO satellite failures are the largest; the first year in the orbit is the failure season; the electrical failures are the commonest; the system fault or the common problems of certain satellite buses could be involved. Some suggestions are made to improve the simulation model, the validation test before delivery or the redundancy design, which may help to improve the reliability of satellite solar arrays.

Key words: in-orbit failures; solar array; statistical analysis; Kaplan-Meier estimator; reliability design

(编辑: 肖福根)

航天快讯

航天科技集团公司总结“天宫一号”在轨飞行任务

9月30日,中国航天科技集团公司召开“天宫一号”目标飞行器在轨飞行任务系统级评审会,审议通过了《天宫一号在轨飞行任务总结》,认为“天宫一号”在两年寿命期内飞行结果满足工程总体要求,在轨飞行任务取得圆满成功。

会议就“天宫一号”的飞行任务执行情况和主要技术成果等方面进行了汇报,总结了“天宫一号”的发射及在轨测试阶段主要飞行事件及执行情况、平台功能验证等。“天宫一号”探索并建立了适应多飞行器在轨并行管理、技术状态新、接口关系复杂、协同性高、决策实时性强等要求的联合飞控管理模式,实现了在轨运营全过程“统一组织、统一调度、统一监视、统一决策、统一确认”,为空间实验室和空间站的研制奠定了坚实的基础,标志着我国实现了载人航天“三步走”战略的第二步第一阶段任务目标。

(摘自2013-10-09《中国航天报》1版)