

COTS 器件空间应用的可靠性保证技术研究

党 炜^{1,2}, 孙惠中², 李瑞莹³, 吕从民^{1,2}

(1. 中国科学院光电研究院, 北京 100190; 2. 中国科学院空间科学与应用总体部, 北京 100190;
3. 北京航空航天大学工程系统工程系, 北京 100191)

摘 要: 为保证 COTS (Commercial off-the-shelf) 器件成功应用于我国高可靠的航天产品中, 本文总结分析了国内外空间应用 COTS 器件的发展情况, 提出了空间应用 COTS 器件的可靠性保证总体思路. 该思路特点是首先进行与任务剖面相结合的可靠性评估试验, 再对 COTS 器件进行可靠性筛选. 对于热环境的可靠性保证, 通过研究 NASA 的筛选规定, 提出了不同任务要求下的老练温度-老练时间的对应关系式; 实例表明温度可靠性评估试验方法能够指导工程. 对于电离总剂量的可靠性保证, 提出了不同任务条件下的回归筛选模型, 并进行了验证, 相对误差为 1%. 结果表明本文能够系统性地指导空间工程应用 COTS 器件.

关键词: 商业现货器件; 空间应用; 可靠性评估试验; 可靠性筛选

中图分类号: V443 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 11-2589-06

Research on Reliability Assurance of COTS Components in Space Application

DANG Wei^{1,2}, SUN Hui-zhong², LI Rui-ying³, LU Cong-min^{1,2}

(1. Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. General Establishment of Space Science and Application, CAS, Beijing 100190, China;
3. Department of Systems Engineering, BeiHang University, Beijing 100191, China)

Abstract: For successful application of COTS (Commercial off-the-shelf) components in high reliable space systems, the history of COTS used in space systems was inducted and the general route was investigated. Traits of the route were COTS 'reliability screening and COTS 'reliability evaluation test ahead of the screening, and the relationship between reliability technologies and mission profile. A formulate of burrr-in temperature and time adapted to different reliability requirements was researched according to NASA 's rules. Regression models adapted to different missions were investigated and verified. Cases indicated that the method of thermal reliability evaluation test is useful in engineering and the total-ionizing-dose reliability screening model 's relative error is 1%. The systemic method of COTS applied in space items is significant and certificated by engineering practices.

Key words: commercial off-the-shelf components; space application; reliability evaluation test; reliability screening

1 引言

COTS (Commercial Off-The-Shelf) 意为商业现货, COTS 产品是指公众能够在市场上租购到的商品^[1]. 对于电子器件而言, COTS 器件一般包括质量等级为工业级或商业级的民用器件, 并且大部分为塑料封装 (Commercial Off-The-Shelf/ Plastic Encapsulated Microcircuits, COTS/PEMs). 它在项目管理三要素上有如下特点: (1) 质量——能够满足高性能需求, 但不能满足空间高可靠要求, 而且可追溯性不强, 不能得到其生产商充分的生产信息和试验信息; (2) 成本——能够降低全寿命周期成本 (Life Cycle Cost, LCC); (3) 时间——能够保证购货渠道和缩短采办周期. COTS 系统指包含 COTS 器件的系统 (或产品).

本文在总结分析国内外空间应用 COTS 器件的基础上, 系统性地研究并提出了 COTS 器件空间应用的可靠性保证技术, 为保证空间系统的可靠性和明确 COTS 器件空间应用的研究方向提供了依据.

2 COTS 器件空间应用分析

2.1 需求分析

近年全球元器件市场中, 宇航级器件贸易额仅占全球半导体器件市场总额的 0.1~0.2%, 军品级也仅占 1~2%, 由于市场驱动能力不足, 导致宇航级抗辐射加固 (Radiation Hardened, RH) 处理器与 COTS 处理器的性能差距在 10 年以上^[2]. 同时, COTS 器件的空间应用是美国国家航空航天局 (NASA) 实践“快、好、省”原则所长期推崇的重要举措.

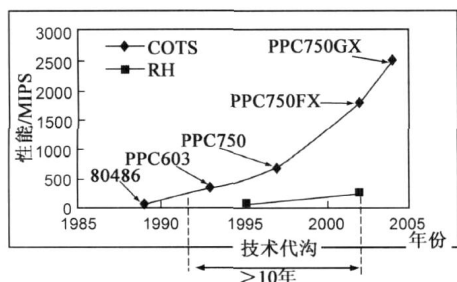


图1 COTS与RH器件性能比

在国内航天工程方面,现阶段我国载人航天工程和探月工程等众多空间项目正在顺利开展,但在研制过程中存在以下矛盾:(1)需求与能力不匹配,即产品的性能需求高与国内电子产品生产工艺水平低的矛盾,导致选用进口电子元器件;(2)需求与渠道不协调,即产品的高可靠需求与购货渠道的矛盾,导致选用进口低可靠COTS器件;(3)LCC的矛盾等。

因此,空间高可靠系统之所以对COTS器件有很大需求,主要是因为选用COTS器件能够达到任务规定的功能、性能指标要求,但存在空间环境条件下达不到可靠性要求的风险。

2.2 国外应用情况

20世纪70年代,COTS器件的空间应用研究开始萌芽.1979年,英国萨瑞大学研制了使用COTS微处理器的微小卫星,并于1981年10月成功发射.1993年9月发射的Polsat-1航天器,第一次在轨使用了全球定位系统(GPS),并且是COTS的GPS接收机^[3].萨瑞大学从1981年至1998年,共完成了14颗基于COTS器件的微小卫星。

20世纪90年代中期至现在,COTS器件的空间应用研究处于全面发展阶段。

1995年,NASA开展新千年计划(NMP)研究,其将“空间应用COTS产品”和“低成本电子产品”列入了研究目标.目前NMP在研的ST8航天器计划于2009年2月发射,要验证的四项重要技术之一是基于COTS的多处理器系统的可靠性研究^[4]。

NASA于2002年2月发布了COTS/PEMs器件空间应用的白皮书,其政策为:“倘若对特定应用的元器件在热、力学、辐射方面进行彻底的评估后,确认其可以满足任务需求的情况下,NASA哥达德航天中心允许在航天器中使用塑封微电子元器件。”

新千年以来,NASA喷气推进实验室(NASA/JPL)对SCS750微处理器和RAD6000抗辐射加固微处理器进行了辐射试验研究,得到在空间辐射环境下COTS处理器经过抗辐射设计后相当于甚至更好于抗辐射保证(RHA)处理器的结论.NASA在火星探测的“探险者”号和其它登陆车、漫游车等空间项目中,成功应用了COTS

的16M DRAM、场效应管、ASIC和微控制器等.NASA的电子元器件和封装项目(NEPP)和NASA EEE元器件保证组(NEPAG)也将COTS的空间应用作为主要研究内容。

2001年10月,欧洲空间局(ESA)成功发射了名为proba的航天器进行技术验证,COTS技术为验证目的之一.2001年12月发射的美法合作Jasour-1航天器使用了大量COTS器件.2002年2月发射的日本MDS-1航天器目的是验证COTS器件的空间应用.2002年3月发射的2颗美德合作GRACE航天器含80%的COTS产品.2003年10月发射的日本SERVS-1航天器,目的是评估COTS器件的空间应用,为COTS器件空间应用的可靠性设计指南积累数据.2006年6月发射的美国MITEx微小卫星使用了COTS处理器.2008年4月发射的德国COMPASS-1航天器广泛使用了COTS器件,进行技术验证.正在研制的美国NPSAT1小卫星、澳大利亚JAESat航天器、日本PRISM微小卫星、马来群岛D-Sat航天器都使用了COTS器件^[4]。

2.3 国内应用情况

目前我国对于COTS器件的空间应用研究处于初级阶段.1999年5月发射的“实践五号”卫星中的单粒子检测器,采用了COTS器件PC104-486DX33.2002年使用COTS器件386EX芯片的“海洋一号”卫星飞行试验成功.2002年12月发射的神舟四号飞船中,微重力流体电控系统采用了COTS器件热电偶放大器AD595C.2003年12月31日和2004年7月25日发射的双星探测一号卫星和探测二号卫星中,有效载荷配电器采用了COTS器件高端电流检测芯片MAX471EPA^[5]。

2.4 小结

综上所述,空间应用COTS器件是未来的发展趋势,保证空间应用COTS器件的可靠性是关键所在.国外先进国家对该方向的研究已经历了萌芽期,正处于全面发展阶段,但尚未成熟,没有统一的规范或标准等;同时,国外大量应用案例表明,COTS器件在一系列可靠性保证措施下,能够可靠地应用于空间环境中。

3 空间应用COTS器件的可靠性保证总体思路

3.1 环境因素范围

COTS器件的空间应用是一项系统工程,要在各个阶段针对不同的故障模式开展可靠性保证设计.引发各故障模式的环境因素主要包括热、力学和空间辐射.COTS/PEMs的封装形式使其内部由刚性材料充填固定,不存在空腔,没有因焊点、导线和密封玻璃导致的多余物,避免了由于管脚松动等原因引起的短路问题,因此具有良好的力学环境适应性,本文则着重研究热和空间辐射两方面的环境因素。

3.2 总体技术路线

NEPP 和 NEPAG 的负责人于 2002 年共同撰写的报告^[6]指出,目前最具意义的是对 COTS 筛选方法的研究.升级筛选对提高系统的可靠性具有增值作用^[7].国内文献^[5]指出,COTS 器件用于空间任务必须加以控制,控制的方式就是进行筛选测试.同时指出,目前国内外还没有一套现成的规范或指导方针可以遵循,建立 COTS 器件空间应用的筛选测试规范已经迫在眉睫.

器件筛选的目的是剔除早期失效产品,要保证既不能欠应力也不能过应力.欠应力指筛选应力过小,不足以充分激发潜在的失效模式;过应力指筛选应力过大,导致对器件引入新的失效模式.因此,为了保证 COTS 器件筛选的有效性和合理性,通过筛选充分暴露各种失效,我们在 COTS 器件 100% 的进行可靠性筛选前,增加了对 COTS 器件批次抽样进行的可靠性评估试验. COTS 器件筛选流程如图 2 所示.

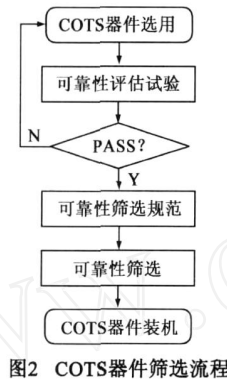


图2 COTS 器件筛选流程

4 空间应用 COTS 器件的可靠性保证技术

4.1 可靠性评估试验

元器件评估试验一般指采用适当应力激发其主要失效模式的批次摸底性的试验.本文提出的 COTS 器件可靠性评估试验(简称为“CRET”)指 COTS 器件在规定的工作状态下,采用适当加速的应力激发其主要失效模式的批次性抽样试验.可靠性评估试验的特点是:与任务剖面相结合,即定义中“规定的工作状态”指可靠性定义中的“规定的时间”和“规定的功能”,试验主要手段是改变了“规定的条件”.

根据国内外元器件可靠性工程经验,CRET 仅对同批次有效.对于没有通过可靠性评估试验的 COTS 器件,在我们任务中不予以使用;通过可靠性评估试验的 COTS 器件,经可靠性筛选后可装机使用. CRET 包括三方面:(1)工艺评估;(2)温度评估;(3)空间辐射评估.

4.1.1 工艺评估

工艺评估目的是考核批次工艺缺陷和工艺一致性.主要技术包括:破坏性物理分析(DPA)^[8]、温度循环^[8],以及扫描声学显微镜(C-SAM)^[8].

4.1.2 温度评估

温度评估的目的是考核 COTS 器件的批次热环境适应性,并确定批次参数分布和温度范围余量.主要试验技术为步进循环应力试验,如图 3 所示.

图中 N_U 和 N_L 分别为 COTS 器件温度标称范围的

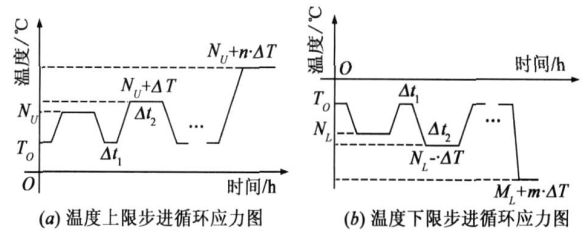


图3 温度步进循环应力

上限和下限, T_0 为航天器热控设计标称值, T 为步进梯度, t_1 为 T_0 温度下充分测试时间, t_2 为每个步进阶梯停留时间, t_2 一般由航天器极端工况持续时间确定.本文以温度上限步进循环应力为例,说明温度评估试验步骤:

- (1) 在航天器热控设计温度标称值 T_0 下对 COTS 器件进行充分测试,持续时间为 t_1 .
- (2) 升温至 COTS 器件标称温度上限,持续时间为 t_2 .
- (3) 降温至 T_0 ,对 COTS 器件进行充分测试,持续时间为 t_1 .
- (4) 升温至比上次阶梯增加 T ,测试规定功能,持续时间为 t_2 .
- (5) 重复(3)、(4)步,记录出现 COTS 器件失效的个数和循环次数,试验截尾判断方法为:定数截尾(第 n 个步进循环,所有 COTS 器件失效为止)或定时截尾(COTS 器件全数达到任务剖面所要求的温度上限值(记做 E_U)为止).

温度 CRET 判定方法:

- (1) 如果温度可靠性评估试验是定时截尾,则此批通过温度可靠性评估试验.

(2) 如果温度可靠性评估试验是定数截尾,则可确定 COTS 器件参数分布,根据大数定律,其分布为正态分布,如图 4 所示,期望为 $\mu = T_U$,标准差为 σ .

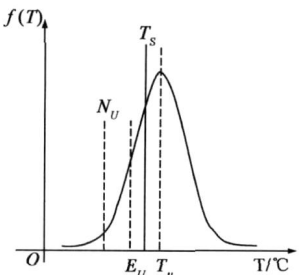


图4 COTS 器件批次温度分布

假设温度评估试验总样本量为 Z ,温度阶梯为 T_i 时,该阶梯的失效数为 F_{T_i} ,共有 n 个评估试验阶梯,则有:

$$T_1 \quad T_2 \quad \dots \quad T_Z, Z = \sum_{i=1}^n F_{T_i}$$

期望和标准差的估计分别为:

$$\hat{\mu} = \frac{1}{Z} \sum_{i=1}^n (T_i F_{T_i}) = \bar{T} \tag{1}$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{Z-1} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2 \tag{2}$$

得到该批次 COTS 器件的温度分布为: $N(\hat{\mu}, \hat{\sigma}^2)$,

则该批次 COTS 器件能够满足任务环境温度上限要求的概率为:

$$P_{mission} = P(T_s \leq E_U) = 1 - \left[\frac{E_U - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \right] \quad (3)$$

式中,各参数关系如图 4 所示.

因此, $P_{mission}$ 能够为 COTS 器件选用的决策机构提供重要信息.

4.1.3 空间辐射评估

空间辐射评估的目的是考核 COTS 器件的批次电离总剂量(Total Ionizing Dose, TID) 阈值和批次参数响应情况. COTS 器件的 TID 可靠性评估试验与一般试验方法^[8]的不同之处在于:

(1) 工作模式:受试件在试验过程要按照在轨工作模式或极端工作模式运行.

(2) 监测方式和目的:试验过程要对关键参数的响应进行在线监测和记录,为建立筛选模型收集数据.

4.2 可靠性筛选

可靠性筛选指 COTS 器件结合任务剖面的一种补充筛选. 装机前, COTS 器件要进行 100% 的筛选. 可靠性筛选包括:(1) 物理筛选;(2) 温度可靠性筛选;(3) TID 可靠性筛选. 本文主要研究了后两种筛选方法.

4.2.1 温度可靠性筛选

温度可靠性筛选 表 1 不同可靠性要求的老练参数表
 主要根据可靠性评估试验结果确定老练参数,老练温度和时间依据见表 1^[9]. 表 1 中 L1 表示高可靠等级,对应 5~8 年的任务周期;L2 表示中可靠等级,对应 2~5 年的任务周期.

表 1 中不同老练温度水平对应不同的老练时间,其本质是加速试验的原因. 本文采用加速试验常用的 Arrhenius 反应模型^[10]对其进行研究,该模型表达式为:

$$AF = \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right] \quad (4)$$

式(4)中:AF 为加速因子,同时 $AF = t_1/t_2$, t_1 、 t_2 分别为 T_1 、 T_2 对应的老练时间; E_a 为激活能; k 为波尔兹曼常数,值为 8.617×10^{-5} eV/K; T_1 和 T_2 为绝对温度值.

根据式(4),确定激活能 E_a 为:

$$E_a = \ln \left(\frac{t_1}{t_2} \right) \times k / \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (5)$$

根据式(5),得到表 1 中的 COTS/PEMs 器件激活能 $E_a = 0.4$ eV,将其代入式(4),以 85 为基准,得到不同任务要求下、任意温度水平 T 对应的老练时间 t 为:

$$t = t_0 \times \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

$$= \begin{cases} 885 \times \exp \left[4.46 \times 10^3 \times \left(\frac{1}{T} - 0.00279 \right) \right] & , L1 \text{ 时} \\ 590 \times \exp \left[4.46 \times 10^3 \times \left(\frac{1}{T} - 0.00279 \right) \right] & , L2 \text{ 时} \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6),对表 1 未包含的老练方案进行补充见表 2.

4.2.2 TID 可靠性筛选

TID 可靠性筛选主要根据任务条件下的筛选回归模型进行无损筛选. COTS 器件的 TID 要求由任务时间、任务周期、轨道特性、屏蔽特性等确定,不同

的任务有不同大小的 TID 要求. 通过建立筛选回归模型,仅对 COTS 器件的初始状态进行测试,根据模型预测任务中的响应值,由此对 COTS 器件进行筛选. 由于并未经受 TID 试验,所以称之为无损筛选. TID 可靠性筛选步骤为:

- (1) 对 COTS 器件的 TID 可靠性评估试验数据进行预处理,剔除奇异点.
- (2) 建立 COTS 器件任务条件下的筛选回归模型.
- (3) 测试 COTS 器件参数,进行 TID 筛选.

5 实例

5.1 温度 CRET 实例

我们对某 COTS CODEC(多媒体数字信号编码器)器件进行了温度可靠性评估试验. 试验中该 COTS 器件工作模式按在轨状态运行;温度阶梯持续时间为在轨可能出现的极端工况的最长持续时间,为 2h;试验中监测了功耗电流和其它状态参数,其中功耗电流随试验时间、温度梯度的变化分别见图 5 和图 6 所示.

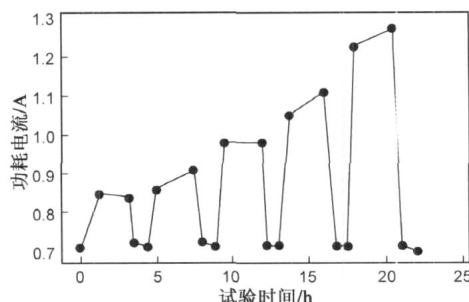


图 5 COTS 器件温度 CRET 时间-功耗电流图

通过该 COTS 器件的温度 CRET,我们得到如下结论:

- (1) 功耗电流随温度升高而增加,并随温度减低而

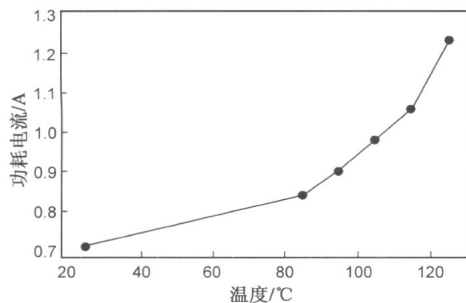


图6 COTS器件温度-CRET温度-功耗电流图

减小恢复。

(2) 此次试验定时截尾, 并且工作状态正常, 满足任务要求, 在我们任务中可以选用。

5.2 TID CRET 与可靠性筛选实例

考虑空间辐射因素, 对某型 COTS ARM 微控制器进行了可靠性评估、可靠性筛选, 以及对筛选方法的验证。

5.2.1 ARM 的 TID CRET

按照 4.2.2 中步骤说明如下:

(1) TID 可靠性评估试验样本量为 22 个, 敏感参数选为功耗电流, 试验过程采集的响应值见表 3。

表 3 TID 评估试验功耗响应表

序号	功耗/mW				序号	功耗/mW			
	0Gy	30Gy	90Gy	120Gy		0Gy	30Gy	90Gy	120Gy
1	33	45	55	60	12	37	37	43	46
2	34	44	52	55	13	37	36	42	45
3	35	38	46	50	14	37	36	45	50
4	36	42	52	56	15	37	39	44	46
5	36	40	46	50	16	38	37	42	45
6	36	39	47	52	17	38	36	45	49
7	36	39	48	54	18	38	40	44	48
8	36	37	50	46	19	38	40	52	59
9	36	39	50	59	20	38	40	44	50
10	36	39	42	48	21	38	36	41	46
11	37	37	43	44	22	38	40	40	45

(2) 针对不同任务环境条件要求, 分别建立 30Gy (Si)、90Gy (Si) 和 120Gy (Si) 电离总剂量环境的 ARM 无损筛选回归模型如下:

$$y_{30} = 647.56 - 32.77x + 0.44x^2 \quad (7)$$

$$y_{90} = \frac{18.46x}{-21.84 + x} \quad (8)$$

$$y_{120} = \frac{21.31x}{-20.96 + x} \quad (9)$$

式中: y_{30} 、 y_{90} 和 y_{120} 分别为功耗电流在 30Gy (Si)、90Gy (Si) 和 120Gy (Si) 时的响应值, x 为初始 0Gy (Si) 时功耗电流值。

(3) 进行该批次 COTS 器件的 TID 筛选。

5.2.2 ARM 的 TID 可靠性筛选和验证

我们取独立的一个表 4 ARM 器件可靠性筛选验证表

分类	功耗/mW		相对误差/%
	预测值	实测值	
0Gy	—	38	—
30Gy	37.66	38	1
90Gy	43.41	44	1
120Gy	47.52	48	1

ARM 器件进行了筛选和方法验证。根据式 (7)、(8) 和 (9) 进行筛选测试和预测, 表明满足任务要求。筛选测试后, 对该 ARM 器件又进行了 TID

试验, 以验证本文筛选方法的正确性。可靠性筛选测试和验证结果见表 4。

6 结论

本文总结分析了 COTS 器件空间应用的发展情况, 初步系统性地研究了空间应用 COTS 器件的可靠性保证技术, 其中大部分内容已经得到了工程验证。通过研究和工程实践得到如下结论:

(1) COTS 器件的空间应用是可行的, 其关键在于可靠性评估试验和可靠性筛选。

(2) 可靠性评估试验是决定 COTS 器件能否应用于空间的关键, 其结果既是能否选用的准则, 又是可靠性筛选的基础。

(3) 可靠性评估试验的环境应力主要是热和空间辐射, 该环境应力取决于任务剖面和环境剖面。

(4) 空间应用 COTS 器件的可靠性保证方法初步经过了试验验证, CODEC 的温度 CRET 证明该 COTS 器件在在轨极端工况时, 具有和宇航级器件相当的环境适应性和可靠性; ARM 器件的 TID CRET 和可靠性筛选证明该 COTS 器件能够根据空间任务需要, 筛选出具有一定抗 TID 能力的器件。

(5) 本文研究成果不仅用于空间领域, 而且对其它有高可靠性要求的产品也有一定的参考价值。

参考文献:

[1] GSA, DOD, NASA. Federal Acquisition Regulation [DB/OL]. USA: GSA, DOD and NASA, 2005.

[2] R Hillman, G Swift, P Layton, et al. Space processor radiation mitigation and validation techniques for an 1800 MIPS processor board [A]. Proceedings of RADECS, 2003 [C]. USA: IEEE, 2003: 347 - 352.

[3] Herbert J. Kramer. Observation of the Earth and Its Environment: Survey of Missions and Sensors [M]. New York: Springer-Verlag, 2002. 1.

[4] 党炜. COTS 应用于空间辐射环境的可靠性研究 [D]. 北

京:中国科学院空间科学与应用研究中心,2007.

Dang Wei. Reliability study on cOTS used in space radiation environment[D]. Beijing: Center of Space Science and Application Research, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese)

- [5] 姜秀杰,孙辉先,王志华,等. 商用器件的空间应用需求、现状及发展前景[J]. 空间科学学报,2005,25(1):76-80.
Jiang Xiujie, Sun Huixian, Wang Zhihua, et al. The demand, status and perspective of COTS components in space application [J]. Chin. J. Space Sci., 2005, 25(1): 76-80. (in Chinese)
- [6] C Barnes, M Sampson. Enabling COTS parts insertion in NASA systems[R]. NASA/NTRS, 2002. 10.
- [7] JPL-D-19426RC, Plastic encapsulated microcircuits reliability/usage guidelines for space applications[R]. NASA/JPL, California Institute of Technology, 2005. 5.
- [8] MIL-STD-883G. Test method standard for microcircuits[S]. USA:DOD, 2006.
- [9] NASA/TP-2003-212244, PEM-INST-001:instructions for plastic encapsulated microcircuit (PEM) selection, screening, and qualification[R]. USA:NASA, 2003.
- [10] Guangbin Yang. Life Cycle Reliability Engineering[M]. USA:John Wiley & Sons, Inc, 2007.

作者简介:



党 炜 男,1982 年 10 月生于陕西富平,硕士,助理研究员,载人航天工程空间应用系统总体可靠性主管设计师、元器件审核组成员,主要研究方向为可靠性系统工程、COTS 可靠性工程. E-mail:dangwei@aoe.ac.cn



孙惠中 男,1937 年 9 月生于江苏张家港,研究员,国务院政府特殊津贴获得者,载人航天工程空间应用系统可靠性与元器件专家顾问、探月工程专家组成员,曾任空间应用系统可靠性主任设计师、总体室主任,主要研究方向为可靠性系统工程、元器件可靠性工程.

李瑞莹 女,1982 年生于四川成都,博士,讲师,主要研究方向为可靠性系统工程、网络可靠性.

吕从民 男,1972 年生于河北省,博士,研究员,主要研究方向为空间飞行器总体设计.