

一种针对 COTS 产品的板级总剂量试验方法

季月明, 张振力, 吴志远, 薛力军

(深圳航天东方红海特卫星有限公司, 深圳 518057)

摘要: 总剂量效应是制约 COTS 产品空间应用的重要因素之一。为了快速验证 COTS 产品能否满足低轨微小卫星的抗总剂量要求, 文章提出一种板级总剂量试验方法, 可以在单次试验中对整块电路板或整个设备进行总剂量试验, 快速获得 COTS 产品的抗总剂量能力, 从而大幅度提高总剂量试验的效率。将该方法应用到低轨微小卫星的研制过程中, 可大大降低 COTS 产品总剂量效应地面试验验证的时间成本, 且截至目前经验证的 COTS 产品在轨未出现因总剂量效应而产生的异常。

关键词: 总剂量试验; 板级试验; COTS 产品; 低轨微小卫星

中图分类号: TN407; V416.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2020)03-0299-04

DOI: [10.12126/see.2020.03.015](https://doi.org/10.12126/see.2020.03.015)

A total dose testing method at board level for COTS products

Ji Yueming, ZHANG Zhenli, WU Zhiyuan, XUE Lijun

(Shenzhen Aerospace Dongfanghong HIT Satellite Co. Ltd, Shenzhen 518057, China)

Abstract: The total dose effect is one of the essential factors restricting the space applications of the COTS (commercial off-the-shelf) products. In order to quickly verify the properties of the COTS products against the total dose environment for the low-orbit micro-satellites, a total-dose testing method at board level is proposed, and the entire circuit board or the entire device can be tested in a single test to quickly obtain the total dose resistance of the COTS products, with the efficiency of the test being greatly improved. This method is applied in the total dose validation test for low-orbit micro-satellites, and the verified COTS products show no abnormality in orbit due to the total dose effect.

Keywords: total dose test; test at board level; COTS product; low-orbit micro-satellite

收稿日期: 2019-11-20; 修回日期: 2020-05-14

引用格式: 季月明, 张振力, 吴志远, 等. 一种针对 COTS 产品的板级总剂量试验方法[J]. 航天器环境工程, 2020, 37(3): 299-302

Ji Y M, ZHANG Z L, WU Z Y, et al. A total dose testing method at board level for COTS products[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2020, 37(3): 299-302

0 引言

COTS 产品在地面环境应用广泛,较同功能的宇航产品性价比更高,故在微小卫星上得到较多应用;但 COTS 产品通常只有地面使用的经历,无空间应用的抗总剂量辐射指标。目前元器件的总剂量辐照试验方法已经比较成熟,以往的航天产品都是先对元器件进行总剂量辐照试验,获得其抗总剂量辐射能力,然后根据航天任务的抗总剂量指标要求,选择满足要求的元器件用于新研产品。采用这种方法需要单独为每种器件研制测试系统,对于大量使用无抗总剂量指标的元器件的 COTS 产品而言,需要花费大量的时间和精力。

本文提出一种板级总剂量试验方法,一次性对整块电路板或整个设备进行抗总剂量辐照试验,旨在快速验证 COTS 产品能否满足低轨微小卫星的抗总剂量辐射要求。

1 试验原理

1.1 辐照条件

板级总剂量试验需要同时对整块电路板或整个设备上的所有元器件进行辐照,且所有元器件接收到的总剂量应基本相同,这就需要辐照源产生的射线或粒子有很强的穿透能力。目前可用于总剂量试验的辐照源有电子源、质子源、 ^{60}Co γ 射线源,其中只有 ^{60}Co γ 射线源具有足够强的穿透能力,可以用于板级总剂量试验。

开展板级总剂量试验,通常要求辐照剂量率不大于 0.1 rad(Si)/s ;在满足要求的前提下,剂量率也不能太小,否则会导致试验时间过长。本试验选取的剂量率是 0.1 rad(Si)/s ,距离 ^{60}Co 辐照源 5 m (不同的 ^{60}Co 辐照源,剂量率为 0.1 rad(Si)/s 的位置距辐照源的距离可能不同)。微小卫星使用的电子设备通常体积较小,厚度在 10 cm 以内。为了验证试验样品所有电子元器件辐照剂量率的均匀性,对 ^{60}Co 源的剂量-深度曲线进行了仿真计算^[1]。 ^{60}Co 源产生 2 种能量的 γ 射线,能量分别为 1.17 MeV 和 1.33 MeV 。仿真计算条件: γ 射线能量为 1.17 MeV ,粒子数为 1.0×10^7 , γ 射线垂直于铝板入射,铝板前有 5 m 厚的空气层。铝板共 19 层,前 5 层每层的厚度均为 2 mm ,后面的铝板每层厚度均为 5 mm ,

仿真计算结果见图 1。通常电子设备外壳等效铝厚度为 2 mm ,每层电路板和元器件的等效铝厚度为 4 mm ,单机设备内的电路板通常在 3 块以内。仿真计算结果表明,第 3 块电路板上的元器件比第 1 块电路板上的元器件接收的剂量小 3.1% 。将 γ 射线能量改为 1.33 MeV ,其他条件不变,则第 3 块电路板上的元器件比第 1 块电路板上的元器件接收的剂量小 2.1% 。以上仿真分析为了提高仿真效率, γ 射线的入射方向均垂直于铝板,且未考虑试验样品随着与 γ 源间距离的增大而带来的剂量率减小。实际的 γ 源可近似为点源,剂量率与距离的平方成反比。本试验中第 1 块电路板上的元器件距离 γ 源 5.0 m ,第 3 块电路板上的元器件距离 γ 源 5.1 m ;若单纯考虑距离因素,则第 3 块电路板上的元器件比第 1 块电路板上的元器件接收的剂量小 3.9% 。因此,综合考虑辐射衰减和距放射源远近不同而带来的辐射场不均匀性在 7% 以内,满足元器件总剂量试验对于辐射场不均匀性小于 10% 的要求^[2]。

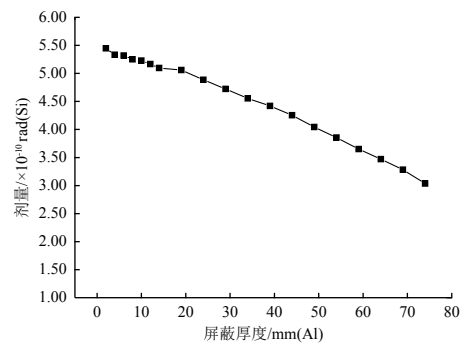


图 1 ^{60}Co 源 γ 射线经 5 m 空气层遮挡后在铝中的剂量-深度曲线

Fig. 1 The dose-depth curve of ^{60}Co γ ray in aluminum after an air shield of 5 m

1.2 测试系统

板级总剂量辐照试验测试系统的基本组成如图 2 所示, ^{60}Co 辐射性强,辐照过程中测试人员禁止进入辐照间,因此测试设备须放置在辐照间以外,以便测试人员实时对试验样品进行监测;为了减小辐照损伤,为辐照间内试验样品供电的稳压电源也放在辐照间外。试验过程中令被测试样品按照在轨的工作状态持续带电工作,试验人员在辐照间外对试验样品的电流、电压等关键参数进行监测。

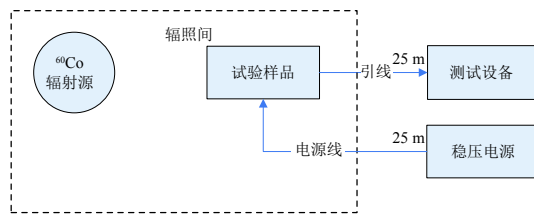


图2 板级总剂量辐照试验测试系统

Fig. 2 The board-level total dose radiation test system

器件级总剂量试验要求至少将整个试验分成5次进行辐照,每次辐照后进行电参数测试。按照5 krad(Si)的辐照总剂量来计算,累积剂量平均每增加1.0 krad(Si)需要做1次电参数测试。本试验的测试系统具备实时监测试验样品功能、性能的能力,试验人员每1 h填写1次测试记录。剂量率为0.1 rad(Si)/s时,可以满足0.36 krad(Si)的测试精度。每次测试记录填写完成后对试验样品进行断电重启,避免某些器件只在设备启动时使用,后续出现失效也无法被及时发现。

1.3 试验流程

板级总剂量试验的目的是验证COTS产品能否满足卫星的抗总剂量要求,因此试验为验证试验。一块电路板上可能同时包含MOS型器件和双极型器件,而这2种器件的总剂量验证试验流程稍有不同——MOS型器件的试验流程比双极型器件的多了加速退火流程。保守起见,本文开展的板级总剂量试验参照MOS型器件的试验流程开展。如果元器件在轨的实际总剂量小于5 krad(Si),MOS型器件也可以不进行加速退火试验。根据“实践五号”探测结果,870 km高度太阳同步轨道上,经热控涂层、卫星蒙皮、2 mm铝屏蔽后在轨总剂量为 $1\sim 1.5 \text{ rad(Si)/d}^{[3]}$,假设在轨飞行时间为5年,则累积总剂量为 $1.83\sim 2.74 \text{ krad(Si)}$ 。因此低轨微小卫星中的元器件按照试验流程不需要进行168 h的高温加速退火试验,可以节省试验时间和人力物力。

2 低轨短寿命卫星辐照总剂量的确定

为了避免过设计,辐照总剂量的确定需要开展三维总剂量分析,即不仅考虑卫星蒙皮对元器件的屏蔽作用,也要考虑卫星上其他产品对元器件的屏蔽作用。三维总剂量分析结果更加接近元器件在轨的真实总剂量环境^[4]。一块电路板上有多个元器件,需对电路板上的多个元器件开展三维总剂量分

析,找到电路板上环境总剂量最大的位置,以这个最大总剂量值并考虑一定的余量作为板级总剂量试验的辐照总剂量量级。

以3年寿命、700 km高度太阳同步轨道卫星为例,使用空间环境分析软件Space得到其一维剂量-深度曲线如图3所示^[5]。考虑3 mm铝屏蔽,3年累积剂量为4.4 krad(Si)。以星载机为例,开展三维总剂量分析,3年累积剂量为1 krad(Si)左右。

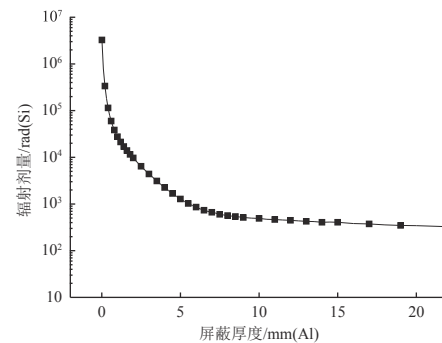


图3 3年寿命、700 km高度太阳同步轨道卫星一维剂量-深度曲线

Fig. 3 The one-dimensional dose-depth curve for SSO satellite with 700 km height and three years service life

3 试验结果及分析

3.1 板级和器件级总剂量试验的区别

器件级总剂量试验通过测试器件的输入、输出参数并与制定的失效判据进行对比判断器件是否失效。板级总剂量试验测试整块电路板的电流、电压、功能、性能,通过判断电路板的功能、性能是否正常来判断电路板上是否有器件发生失效。器件级总剂量试验制定的失效判据通常过于严苛,在实际的电路板上,即使单个器件的参数超差达到器件级试验制定的失效标准,电路板的功能、性能也不一定出现异常。因此,板级总剂量试验的失效判据能够更准确地反映电路板在轨的实际表现。

3.2 试验结果

我们已经开展了大量COTS产品的板级总剂量试验。包括星载计算机、测控模块、数传模块、控制组件、电源控制器等。COTS产品使用的器件类型涵盖集成电路、电阻、电容、电连接器、微波元件等。大部分COTS产品在接受10 krad(Si)的辐照之后都能继续正常工作。很多COTS产品在辐照总剂量达到一定值后会出现功耗或电流变化的现象,

如某星载计算机在辐照剂量达到 5.76 krad(Si) 时, 电流开始发生变化, 具体结果见图 4。试验剂量率为 0.1 rad(Si)/s, 每小时累积剂量为 0.36 krad(Si), 星载计算机开启(记为 0 时刻)同时施加辐照。

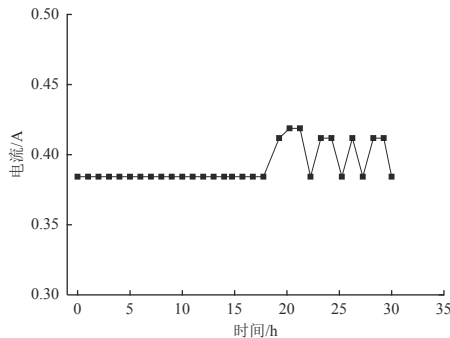


图 4 某星载计算机在辐照后电流发生变化

Fig. 4 The current vibration after radiation observed in an on-board computer

3.3 分析与小结

板级总剂量试验的目标是验证 COTS 产品能否满足型号卫星的抗总剂量要求, 而卫星的目标是获得满足型号抗总剂量要求的产品。如果板级总剂量试验证明 COTS 产品不能满足型号的抗总剂量要求, 则对失效器件进行更换, 再重新开展板级总剂量试验验证, 直到 COTS 产品通过板级总剂量试验。我们开展的板级总剂量试验过程中曾出现几次 COTS 产品部分功能异常的情况。如果只是少部分功能异常则继续辐照, 完成规定剂量的辐照之后再定位失效的元器件。但有些功能是由多个器件组合实现的, 若这些功能出现异常, 则无法直接定位失效元器件。此时需要在试验后先采用故障树分析 (FTA) 圈定失效的元器件, 然后将这个器件拆除, 换上未经辐照的同型号器件。若更换器件后 COTS 产品的功能恢复正常, 则可以最终确定上述器件为失效的器件。之后寻找与失效器件功能类似的新器件, 对新器件进行器件级试验或使用新器件替换失效器件重新投产一块电路板开展板级总剂量试验, 直到试验通过。

4 结束语

本文论述了板级总剂量辐照试验测试系统的搭建、试验流程和试验过程中出现失效的处理方法。板级总剂量试验充分借鉴了器件级总剂量试验的条件和流程, 可以客观评价 COTS 产品上器件的抗总剂量能力; 可以一次性对整块电路板上的所有 COTS 器件进行抗总剂量能力验证, 大幅提高了试验效率。

某型号卫星采用了大量 COTS 产品, 采用本文所述的板级总剂量试验方法验证并进行设计改进之后一直在轨稳定运行, 截至目前已经在 524 km 高度太阳同步轨道安全运行 4 年。我们开展的大量试验实践和 COTS 产品的在轨表现证明, 本文提供的板级总剂量试验方法可操作性强, 试验结果可信。

参考文献 (References)

- [1] LEI F, TRUSCOTT R R, DYER C S, et al. MULASSIS: a Geant4-based multilayered shielding simulation tool[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002, 49(6): 2788-2793
- [2] Department of Defense. Test method standard: microelectronics: MIL-STD-883K[S], 2017
- [3] 师立勤, 王世金, 叶宗海, 等. 实践五号高能粒子环境探测结果[C]/中国空间科学学会“实践五号”卫星空间探测与试验成果学术会议. 武夷山, 2002
- [4] 张振力, 李郑发, 唐心春, 等. 基于 Pro/E 的三维总剂量分析软件实现及在微小卫星中的应用[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(6): 620-624
ZHANG Z L, LI Z F, TANG X C, et al. Development of three-dimensional total dose analysis software based on Pro/E and its application in micro-satellites[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31(6): 620-624
- [5] Space Radiation Associates. Space Radiation 7.0: space radiation feature[EB/OL].[2017-06-01]<http://www.spacerad.com/sr7features/html>

(编辑: 闫德葵)