

某型终端控制器寿命与可靠性评估方法研究

代永德 栾家辉 朱兴高 石士进 韩慧超

(中国航天标准化研究所, 北京 100071)



摘要: 针对某卫星平台、各分系统和各单机的寿命和可靠性指标的地面综合评价问题, 提出一种基于无失效数据的单机寿命与可靠性评估方法。以某型终端控制器为研究对象, 针对其主要故障模式提出了电子类产品的寿命与可靠性评估模型和方法, 应用控制器的地面试验数据和相似产品在轨飞行数据, 对终端控制器开展寿命与可靠性评估计算。

关键词: 终端控制器; 寿命与可靠性; 贝叶斯方法; 指数分布

Research on Evaluation Method to Life and Reliability of Terminal Controller Based on Zero-failure Data

Dai Yongde Luan Jiahui Zhu Xinggao Shi Shijin Han Huichao

(China Astronautics Standards Institute, Beijing 100071)

Abstract: Aiming at ground comprehensive assessment problem of the life and reliability indexes for a certain satellite platform, sub-system and stand-alone device, a method for life and reliability of stand-alone device which based on zero-failure data is proposed. A certain terminal controller is taken as the research object, and the life and reliability evaluation model and method of electronic products are proposed according to the main failure modes. Base on the ground test data and the on-orbit flight data of terminal controller, the life and reliability are calculated.

Key word: terminal controller; life and reliability; bayesian method; exponential distribution

1 引言

目前国内低轨卫星的设计寿命一般为3~5年, 根据未来卫星任务需求, 平台提出了设计寿命达到8年的指标, 明确要求“完成平台系统、分系统和关键单机的长寿命的设计、分析及部分关键单机的寿命试验验证, 实现平台设计寿命不低于8年”, 相对于当前水平技术跨越很大。

2 产品功能结构

终端控制器由接口电路、配电器、主份控制器、备份控制器组成, 4个盒体拼装后卧式安装, 通过AIRBORN连接器相连。终端控制器三维模型见图1。

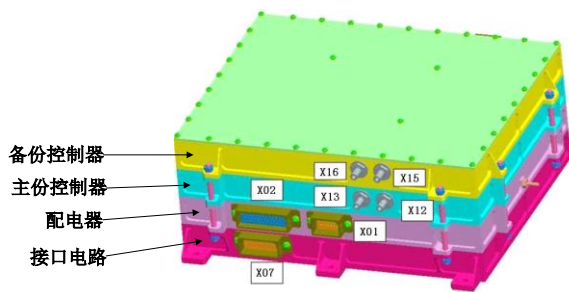


图1 终端控制器三维模型

终端控制器是某卫星平台捕获跟踪分系统的重要组成部分, 其主要功能是接收来自数管分系统的总线指令, 完成对卫星的角度程控跟踪、GPS程控跟踪、轨道程控跟踪或自动跟踪, 采用双机冷备份, 外部接口连接, 如图2所示。

基金项目: 基于MBD方法的典型空间机电产品可靠性定量设计分析技术研究 (JSZL2015203B030)。

作者简介: 代永德 (1992), 硕士, 可靠性专业; 研究方向: 航天产品寿命与可靠性评估。

收稿日期: 2018-11-09

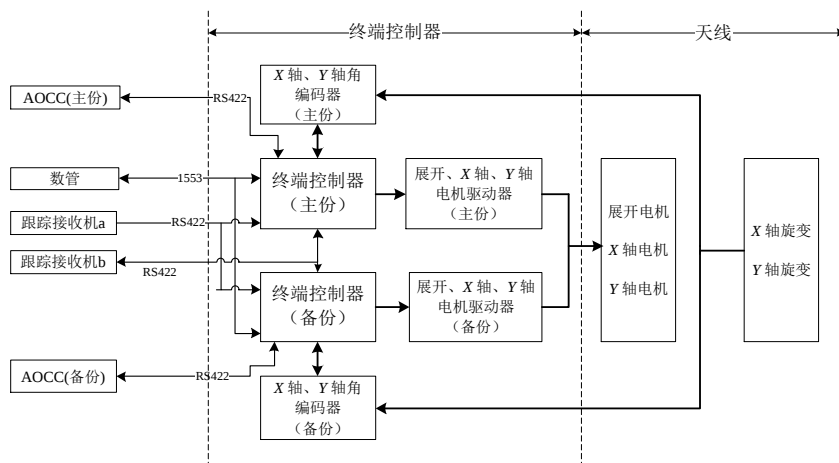


图2 终端控制器组成框图

3 产品试验及在轨应用情况

终端控制器进行了地面鉴定试验，包括力学试验（正弦振动试验、冲击试验和随机振动试验）、热真空试验、热循环试验和热平衡试验，均无异常情况。

平台终端控制器为XX-14基础上预研型号，在XX-14基础上为适应平台做了适应性修改，单机产品DC/DC的输入母线电压由28V调整到42V，其基本功能完全与XX-14一样。XX-14分为XX-14(A)与XX-14(B)两颗星，平台上终端控制器与这两颗星完全一样，目前在轨运行良好，均无失效。

4 产品寿命与可靠性评估方案

4.1 产品寿命与可靠性要求

根据卫星公用平台要求，控制器寿命要求在轨工作30000h。产品在轨承受的空间辐射剂量大，存储单元受单粒子事件和设备散热问题影响显著。辐射效应分为总剂量累积效应和单粒子效应，总剂量累积效应可以通过屏蔽的方式解决，这一点在国内外很多飞行器上已得到验证。但是单粒子效应则必须从系统设计的角度仔细分析才能解决。终端控制器位于载荷舱内，工作温度范围为-15~50℃。

4.2 产品主要故障模式及寿命评估特征量

终端控制器是电子产品，根据终端控制器的FMEA，其主要故障模式为主驱动电路不能工作，电源电路无电源输出，接口电路不能给其他分机供电及发送开关机指令等。不存在单点故障模式，没有严重性等级为I、II的故障模式，其主要故障模式为温度、辐照或者力学环境导致的器件失效，在设计保证的情况

下，其主要故障模式为电子器件的随机失效。终端控制器在轨间歇性工作，其可靠性指标要求为8年寿命末期可靠度为0.99，置信度取0.7。终端控制器在轨间歇运行，其寿命特征量为工作时间。

4.3 评估模型

依据产品结构和功能要求，为了提高可靠性，整机采用了1:1冷备，针对整机开展的地面鉴定级试验，其可靠性框图如图3所示，其可靠性数学模型如式(1)所示。

$$R = \exp(-rt/T) \sum_{i=0}^{N-1} \frac{(rt/T)^i}{i!} \quad (1)$$

其中：N——冷备单元个数；T——累计总试验时间；r——试验失效数；t——任务时间。

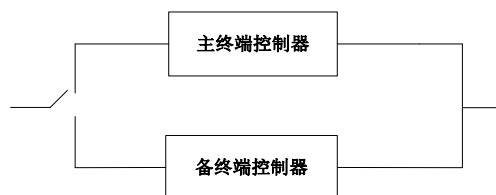


图3 终端控制器1:1冷备份的可靠性框图

4.4 评估方法

终端控制器为电子产品，选用工作时间为特征量采用指数分布模型开展评估，采用Bayes方法：

$$R = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

其中： λ ——整机失效率；t——任务时间，本次评估中为30000h。

可靠性计算方法可采用指数分布模型直接评估计算或应用Bayes方法评估计算，Bayes方法评估中综合应用了产品的可靠性预计、试验及在轨信息，更多地反映产品的可靠性设计情况。

评估数据包括：累计试验时间 T （在轨飞行及地面累计试验时间），失效数 r （在轨及地面试验失效数），失效率预计值 λ_0 。

4.4.1 可靠度计算方法

4.4.1.1 指数分布模型直接计算

指数分布模型可靠度按公式（3）～（6）计算。

$$\hat{\lambda} = r/T \quad (3)$$

$$\lambda_U = \chi^2_{\gamma}(2r+2)/2T \quad (4)$$

$$\hat{R} = e^{-\hat{\lambda}t} \quad (5)$$

$$R_L = e^{-\lambda_U t} \quad (6)$$

式中： $\hat{\lambda}$ ——失效率点估计； λ_U ——失效率上限； T ——累积总试验时间； r ——试验失效数； $\hat{R}$ ——可靠度点估计； R_L ——可靠度下限。

4.4.1.2 Bayes 方法评估计算

a. 验前信息转换方法

将验前信息（可用失效率预计值）转换为先验信息，选定 $r_0 = 1$ ，等效试验时间按照式（7）计算：

$$t_0 = 2.02232/\lambda_0 \times 10^9 \quad (7)$$

（ $t_0, 1$ ）为验前信息，上述公式是将验前信息按置信度 0.6 压缩。

b. 相容性分析

对验前信息（ t_0, r_0 ）与现场试验信息（ T, r ）进行相容性分析，可根据双边区间估计计算公式（8）进行统计显著性检验。

$$\left[\frac{\chi^2_{\alpha/2}(2r+1)}{2T}, \frac{\chi^2_{1-\alpha/2}(2r+1)}{2T} \right] \quad (8)$$

式中： α ——显著性水平，取值为 0.01。

若验前信息的比值 r_0/t_0 ，在式（8）计算的区间内，则接受相容性假设，可以用验后信息计算，若不在该区间内，则拒绝接受相容性假设，舍弃验前信息，仅应用现场试验信息计算。

c. 验后信息计算

综合现场试验信息（ T, r ）和验前信息（ t_0, r_0 ），单元的验后特征量按照式（9）计算：

$$T_1 = t_0 + T \quad (9)$$

$$r_1 = r_0 + r$$

d. 可靠性评估计算

将 T_1, r_1 分别代替 T, r 应用式（3）～式（6）计算得到相应的可靠度。

$$\hat{\lambda} = r_1/T_1 \quad (10)$$

$$\lambda_U = \chi^2_{\gamma}(2r_1+2)/2T_1 \quad (11)$$

$$\hat{R} = e^{-\hat{\lambda}t} \quad (12)$$

$$R_L = e^{-\lambda_U t} \quad (13)$$

4.4.2 可靠性评估方法

终端控制器的可靠性为主终端控制器和备终端控制器的双机冷备，采用 CMSR 方法评估。

$$\hat{R} = \exp(-rt/T) \sum_{i=0}^{N-1} \frac{(rt/T)^i}{i!} \quad (14)$$

$$D(\hat{R}) = r \left\{ \frac{\exp(-rt/T)(rt/T)^{N-1}}{t(N-1)!/T} \right\}^2 \quad (15)$$

$$\begin{cases} \eta = -\frac{\hat{R}^2 \ln(\hat{R})}{D(\hat{R})} \\ r = -\eta \ln(\hat{R}) \end{cases} \quad (16)$$

$$R_L = \exp \left[-\frac{\chi^2_{\gamma}(2r+2)}{2\eta} \right] \quad (17)$$

4.4.3 寿命评估方法

终端控制器为电子产品，在轨主要故障模式为随机失效，因此在寿命评估中对 $MTTF$ 进行评估：

$$\begin{cases} MTTF = -t/\ln(\hat{R}) \\ MTTF_L = -t/\ln(R_L) \end{cases} \quad (18)$$

t ——终端控制器任务时间； $\hat{R}$ 、 R_L ——应用指数分布模型直接计算得到的终端控制器可靠性。

4.5 评估数据

根据可靠性评估模型，本次评估将采集终端控制器的可靠性预计信息、地面试验时间数据和在轨飞行数据，具体数据情况如下：根据终端控制器失效率汇总表，其失效率预计值为 1270.1988fit。

与单机产品相似的在轨卫星共有 2 颗。根据地面数据和在轨数据整理终端控制器的寿命与可靠性评估模型数据，得到终端控制器的评估数据，如表 1 所示。

表 1 终端控制器可靠性评估数据采集卡

（其中，飞行数据截至平台验收）

试验项目		试验时间/h	样本数	失效个数	环境因子	等效时间/h
鉴定级试验	热真空	65	1	0	13	845
	热循环	255	1	0	13	3315
	热平衡	10	1	0	13	130
在轨飞行数据	2014.12 发射	14400	1	0	1	14400
	2015.06 发射	10080	1	0	1	10080
合计						28770

综合相似产品在轨飞行数据和地面试验数据，得到等效累计试验时间，为单机产品寿命与可靠性的评估提供数据支持。

5 寿命与可靠性评估计算

5.1 可靠性评估计算

根据上文介绍的评估方法，直接应用指数分布方法和 Bayes 方法分别对终端控制器的可靠性进行了评估计算。

应用表 1 的在轨和试验信息应用指数分布模型评估得到的终端控制器可靠性点估计和置信度 0.7 下的可靠性置信下限分别为 0.890039 和 0.566967。

综合应用产品预计信息和表 1 的试验信息，应用 Bayes 方法评估得到终端控制器的可靠性点估计和置信度 0.7 下的可靠性置信下限分别为 0.999831 和 0.998981。

5.2 寿命评估计算

对终端控制器的寿命评估, 仅应用在轨和试验信息开展, 根据式 (18), 应用式 (19) 的评估结果, 计算得到终端控制器的 $MTTF$ 点估计和置信度 0.7 下的 $MTTF$ 置信下限分别为 68.7 年和 13.7 年。

6 结束语

终端控制器为 A 类电子产品，工作时间要求为 30000h，目前最长在轨时间为 14400h；综合利用可靠 □□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□
（上接第 34 页）

噪比增大检测区域,适当增大 b 值,也会使旁瓣变小。但过大的阵元宽度会产生不利于检测的噪声束,导致局部声压减弱,且使声场发生畸变,进而影响检测结果。所以,通过仿真研究,阵元宽度 $b=0.8\text{mm}$ 时声场合理、可靠,可作为检测优化工艺参数。

性预计值、地面试验和在轨数据，评估计算得到置信度0.7的可靠度下限为0.998981，满足可靠性要求0.99，可认为终端控制器可靠性设计满足要求；由于地面试验、在轨数据不充分，基于已有数据评估计算得到置信度0.7的可靠度下限为0.566967，建议在后续型号进一步积累数据，为验证可靠性水平提供支持。

参考文献

- 1 王宇. 通用电子产品全寿命周期可靠性分析方法[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2017, 35(1): 40~43
- 2 林帅. 基于拓扑的高速列车系统可靠性与安全性评估方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2018
- 3 吴建国. 基于失效比对的复杂系统加速贮存寿命试验方法研究[J]. 强度与环境, 2016, 43(3): 59~64
- 4 Laurent G L. Data relay system satellite: the development of an antenna pointing mechanism for the Inter-orbit link antenna[R]. 2005
- 5 刘继奎. 空间机电活动部件可靠性试验技术研究[J]. 质量与可靠性, 2010: 16~22
- 6 吴来林. 无失效数据可靠性参数的 E-Bayes 统计分析和改进[D]. 苏州: 江苏大学, 2009
- 7 韩明. 产品无失效数据的综合处理[J]. 机械工程学报, 2003, 39(2): 129~

6 结束语

a. 分析仿真数据可知, 频率过小, 能量达不到检测要求, 频率过大则能量衰减过大且检测区域过小, 综合考虑, 对普通钢材料的超声检测频率应选取 5MHz; 随阵元间隙 s 的增加, 声束聚焦指向性越好, 阵元间隙 s 取值过大, 会带入栅瓣, 导致检测灵敏度下降, 综合分析阵元间隙 s 取值 0.2mm; 随阵元宽度的增加, 声场逐步规则合理, 适当增大 b 值, 也会使旁瓣变小, 但过大的阵元宽度会产生不利于检测的噪声束, 因此相控阵阵元宽度 b 取值 0.8mm;

b. 模拟仿真作为一种设计和优化手段, 越来越受

到研究者的青睐, 虚拟的测试远快于实际物理实验。因此通过声场的仿真研究, 可以将抽象的声场直观量化, 为相控阵超声检测技术合理工艺参数的选取提供理论依据。

参考文献

- 1 敬人可, 李建鹏, 周海林. 超声无损检测技术的研究进展[J]. 国外电子测量技术, 2012(7): 28~30, 34
- 2 耿荣生, 景鹏. 航空装备无损检测技术现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2012(12): 55~59
- 3 靳世久, 杨晓霞, 陈世利, 等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014(9): 925~934
- 4 Kuhncke E, Plane arrays-fundamental investigations for correct steering by means of sound field calculations[J]. Wave. Motion, 2007(44): 248~261
- 5 Zhao Xinyu, Gang Tie, Non-paraxial multi-Gaussian beam models and measurement models for phased array transducers[J]. Ultrasonics, 2009(49): 126~130

