

某型控制力矩陀螺寿命与可靠性评估方法研究

栾家辉 代永德 朱兴高 石士进 韩慧超

(中国航天标准化研究所, 北京 100071)



摘要: 分析某卫星平台的主要姿态控制执行机构控制力矩陀螺, 梳理其主要故障模式, 提出相应的寿命与可靠性评估模型和方法, 采集了产品在轨飞行和地面试验数据, 对控制力矩陀螺开展寿命与可靠性评估, 从而有效提高其可靠性、使用寿命以及保障质量水平。

关键词: 控制力矩陀螺; 寿命与可靠性评估; 威布尔分布模型

Research on Method of Life and Reliability Assessment of Control Moment Gyroscopes

Luan Jiahui Dai Yongde Zhu Xinggao Shi Shijin Han Huichao

(China Astronautics Standards Institute, Beijing 100071)

Abstract: The paper analyzed a certain type of control moment gyroscopes. Firstly it sorted out main failure modes, then proposed corresponding life and reliability assessment models and methods. Finally, it collected the in-orbit flight and ground test data, and evaluated the life and reliability of the control moment gyroscopes. The research improved the control moment gyroscopes' reliability, service life and quality assurance effectively.

Key words: control moment gyroscopes; life and reliability; exponential distribution model

1 引言

目前, 我国武器装备的研制多以开发新型性能装备为主, 而质量与可靠性工程的相关研究较少, 导致快速发展背后武器装备高可靠、长寿命的特点没有得以完整体现。控制力矩陀螺是某卫星平台的主要姿态控制执行机构, 具有高输出力矩、低消耗功率、高可靠、长寿命等特点。准确的寿命与可靠性评估可有效地提高可靠性、延长使用寿命以及保障质量水平。

2 产品功能结构

控制力矩陀螺由转子-框架部分和框架驱动-机座部分构成。转子-框架部分是一个独立、封闭的高速转子系统, 组件包括: 旋转质量本体、支承及润滑系统、转子电机组件、框架组件, 其作用为支撑高速转子和

提供接口。框架驱动-机座部分的组件包括: 框架驱动组件(由框架支承组件、框架电机及测角装置组成)、框架支承导电环组件(包括供电端轴承组件和导电环组成)、机座组件, 其作用是提供实现转子-框架系统在框架上方的支撑、驱动以及框架轴的角度测量, 同时实现机构对外的机械及电气连接。

3 产品工作条件分析

按照控制力矩陀螺框架轴旋转一圈计算, 在轨框架驱动组件和框架支承组件(包括导电环)的总圈数为约 87.6 万转; 地面状态下, 从产品装配完毕到整星发射, 累计转动一般不超过 1500 转。因此, 产品实际全寿命周期的总转动圈数一般不超过 100 万转。

4 产品寿命与可靠性评估方案

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 (JSZL2015 203B030)。

作者简介: 栾家辉 (1977), 博士, 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: 2019-05-13

4.1 主要故障模式及寿命评估特征量

控制力矩陀螺为典型的空活动部件，由高速组件、低速组件、导电环组成。

控制力矩陀螺高速组件为油润滑，寿命期内标称转速为 9500r/min，其寿命主要取决于高速轴承的运转寿命。一方面，由于长期高速转动，其失效模式表现为润滑油消耗或失效导致高速组件卡滞、停转，润滑不良导致磨损引起轴承组件振动等；另一方面，控制力矩陀螺由于侧摆，高速组件轴承额外承受力矩，导致高速组件会发生侧摆失效。高速组件的润滑方式与动量轮基本一致，而动量轮的组件润滑失效模式已经通过地面试验及在轨飞行经历得到了很好的验证。因此，该部分的失效模式主要表现为侧摆导致的失效。低速组件为脂润滑，一方面，长期工作带来的转数增加导致的耗损失效，另一方面，磨损导致转速的控制精度降低，产生精度失效。导电环转速较低，主要用来传输电功率与电信号，长期在轨工作会导致电噪声增大。此外，侧摆也会增加导电环的转数和耗损。

通过对产品全寿命周期各阶段的应用环境、工况和任务分析，控制力矩陀螺可能发生随机失效或耗损性失效的事件。

4.2 故障判据

- 电流不能超过门限值，高速组件稳态电流不能超过门限值，低速组件最大电流不能超过门限值；
- 轴承温升不能超过门限值；
- 电机电流波动不能大于 50%。

4.3 寿命与可靠性评估模型

根据控制力矩陀螺的组成及主要故障模式分析，其可靠性评估采用系统综合的方法，在高速组件和低速组件可靠性评估的基础之上，应用串联模型估计得到控制力矩陀螺的可靠性。控制力矩陀螺可靠性数学模型如式 (1) 所示：

$$R = R_{\text{高速组件}} R_{\text{低速组件}} R_{\text{导电环}} \quad (1)$$

其中， $R_{\text{高速组件}}$ ——高速组件可靠性； $R_{\text{低速组件}}$ ——低速组件可靠性； $R_{\text{导电环}}$ ——导电环可靠性。

4.4 寿命与可靠性评估方法

4.4.1 评估模型

本次评估采用威布尔模型如公式所示：

$$R_2(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \quad t > 0 \quad (2)$$

其中， η ——威布尔分布的特征寿命； m ——威布尔分布的形状参数； t ——任务时间，本次评估中为 8a。

评估数据：开展评估所需的数据包括高速组件、低速组件、导电环各子样试验时间 t_i 及对应的失效情况，失效数 r_s 。

可靠度计算：

a. 形状参数确定

控制力矩陀螺高速组件与飞轮产品结构组成相似，高速组件采用与飞轮产品的轴承组件相同，且润滑方式相同，工作转速 9500r/min 左右，主要的故障模式为润滑失效。高速组件为成熟产品，本次评估中形状参数取 1.5。低速组件轴承采用固体润滑，形状参数本次评估中取 1.5。导电环与高速、低速组件一样，形状参数取 1.5。

b. 计算公式

具体的可靠性计算可按照下列公式评估计算得到：

$$t^* = \sum_{i=1}^{n_s} t_i^m \quad (3)$$

$$\hat{\eta} = \left(\frac{t^*}{r_s}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (4)$$

$$\hat{R}_{\text{高速组件}} = e^{-\left(\frac{t_0}{\hat{\eta}}\right)^m} \quad (5)$$

$$R_{\text{高速组件}L} = \exp\left[-\frac{t_0^m}{2t^*} \chi^2(2r_s + 2)\right] \quad (6)$$

寿命评估计算：高速组件、低速组件、导电环寿命服从威布尔分布，威布尔分布的平均寿命可按式 (7) 计算得到：

$$MTTF = \frac{t}{(-\ln R)^{1/m}} \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (7)$$

上式中 $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数。

4.4.2 整机可靠性评估方法

控制力矩陀螺整机的可靠性为高速组件、低速组件、导电环的串联，根据 $\hat{R}_{\text{高速组件}}$ 、 $\hat{R}_{\text{高速组件}L}$ 、 $\hat{R}_{\text{低速组件}}$ 、 $\hat{R}_{\text{低速组件}L}$ 、 $\hat{R}_{\text{导电环}}$ 、 $\hat{R}_{\text{导电环}L}$ ，采用 CMSR 方法开展评估。

$$\hat{R}_{CMG} = \hat{R}_{\text{高速组件}} \times \hat{R}_{\text{低速组件}} \times \hat{R}_{\text{导电环}} \quad (8)$$

$$D(\hat{R}) = \hat{R}_{CMG}^2 \left(\frac{r_{\text{高速组件}}}{\eta_{\text{高速组件}}^2} + \frac{r_{\text{低速组件}}}{\eta_{\text{低速组件}}^2} + \frac{r_{\text{导电环}}}{\eta_{\text{导电环}}^2} \right) \quad (9)$$

$$\eta = -\frac{\hat{R}^2 \ln(\hat{R})}{D(\hat{R})} \quad (10)$$

$$r = -\eta \ln(\hat{R})$$

$$R_{CMGL} = \exp\left[-\frac{\chi^2(2r + 2)}{2\eta}\right] \quad (11)$$

4.4.3 整机寿命评估方法

控制力矩陀螺整机由高速组件、低速组件、导电环串联而成，任意一个部分失效均会导致其整机失效，则整机的寿命应为各部分寿命的最小值。

$$L = \min(L_{\text{高速组件}}, L_{\text{低速组件}}, L_{\text{导电环}}) \quad (12)$$

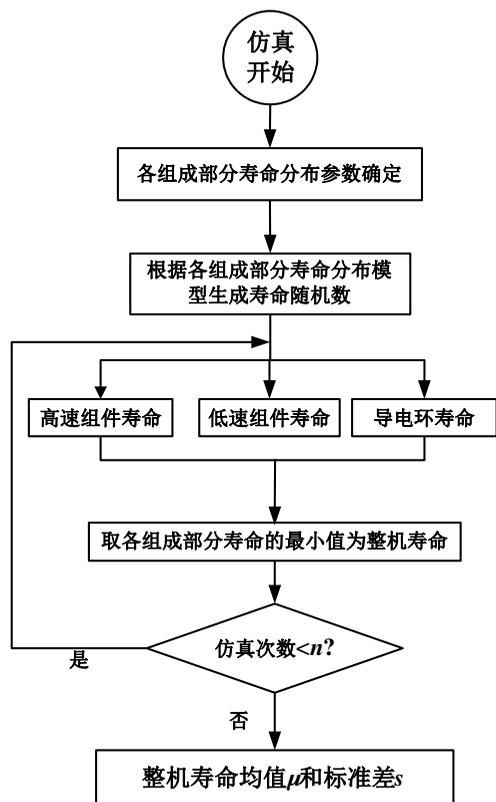


图1 整机寿命评估流程

根据4.4.1节的分析，可以确定各组成部分的寿命分布模型和参数，根据各组成部分的分布模型随机抽样，可以得到各组成部分的寿命，每次抽样，取各组成部分寿命的最小值为整机的寿命，经多次重复抽样，可得到控制力矩陀螺寿命均值和方差，具体流程如图1所示。

4.5 某卫星平台试验数据

在某卫星平台安排了相应的寿命试验，验证控制力矩陀螺寿命是否满足8a需求，同时掌握产品性能随时间的变化趋势。

针对控制力矩陀螺1个整机子样开展了侧摆试验。通过试验验证控制力矩陀螺本体是否满足某卫星平台对控制力矩陀螺的大机动使用寿命要求。

侧摆试验完成141万次摆动，从测试过程数据和整机性能测试结果分析，试验前后的电机高速转子升速曲线如图2a、图2b所示。该产品各项指标遥测数据

及性能在侧摆试验过程中未发生明显变化。具体数据统计如表1所示。

表1 控制力矩陀螺地面寿命试验情况

序号	运行时间/月	运行状态	台数/台
1	12	无失效	1
2	15	无失效	3

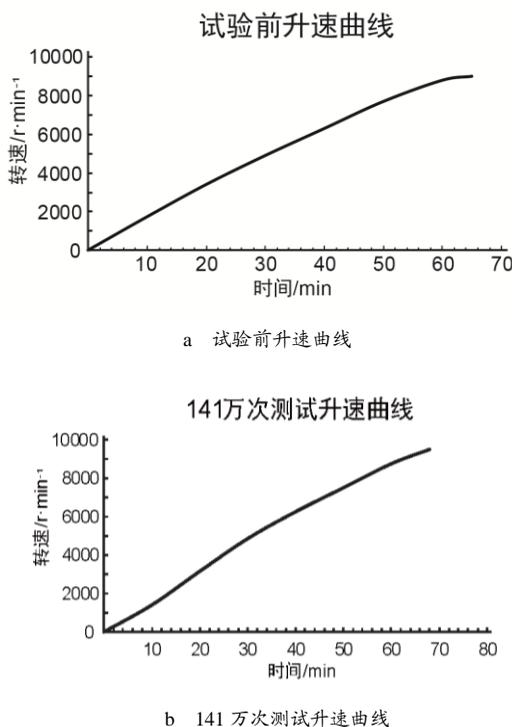


图2 试验前后升速曲线

5 寿命与可靠性评估计算

5.1 高速组件可靠性评估计算

根据整机试验及相似产品在轨飞行情况，共8台高速组件开展了试验和在轨飞行，无失效。高速组件评估数据如表2所示。

表2 高速组件评估数据

序号	子样	运行时间	运行状态	子样数	等效试验时间/h
1	整机寿命件	13个月	良好，无失效	1	7920
2	高速转子试验件	4.5a	良好，无失效	1	39420
3	在轨飞行产品	5a	良好，无失效	6	246240

根据4.4.1节可靠性评估方法，计算得到高速组件可靠度点估计和置信度0.7下的可靠度置信下限：

$$R_{\text{高速组件}} = 0.8024, R_{\text{高速组件}L} = 0.6822.$$

5.2 低速组件可靠性评估计算

根据低速组件试验情况，共1套低速组件开展了

试验和在轨飞行,无失效。低速组件评估数据如表 3 所示。

表 3 低速组件评估数据

序号	子样	运行时间	运行状态	子样数	转动圈数/万转
1	整机寿命件	13 个月	良好,无失效	1	110

根据可靠性评估方法,计算得到低速组件可靠度点估计和置信度 0.7 下的可靠度置信下限: $R_{\text{低速组件}}=0.548368$, $R_{\text{低速组件}L}=0.352190$ 。

5.3 导电环可靠性评估计算

根据导电环件试验情况,共 1 套导电环组件开展了试验和在轨飞行,无失效。导电环组件评估数据如表 4 所示。

表 4 导电环组件可靠性评估数据

序号	子样	运行状态	子样数	转动圈数/万转
1	导电环组件整机寿命件	良好,无失效	1	350

根据 4.4.1 节可靠性评估方法,计算得到导电环可靠度点估计和置信度 0.7 下的可靠度置信下限: $R_{\text{导电环}}=0.820335$, $R_{\text{导电环}L}=0.708934$ 。

5.4 寿命评估计算

控制力矩陀螺共投入 3 个子样开展加速寿命试验,试验共进行了 141 万转,能够满足平台的寿命要求。

表 5 控制力矩陀螺寿命与可靠性评估结果

可靠性评估结果	指数分布评估方法	点估计	0.245931
		置信下限	0.108830
	Bayes 方法	点估计	0.346696
		置信下限	0.161101
寿命评估结果	寿命均值	5.7473	
	寿命方差	3.9161	

应用寿命计算公式,分别计算得到高速组件、低速组件、导电环的寿命值,其中,高速组件为 15.1858a,低速组件为 6.6118a, 45.0616a。根据图 1 的评估流程及控制力矩陀螺的寿命评估程序,得到控制力矩陀螺

的寿命均值与方差分别为 $Miu=5.7473^{\circ}$; $Thita=3.9161a$ 。最终得到的控制力矩陀螺产品寿命与可靠性评估结果如表 5 所示。

6 结束语

控制力矩陀螺工作时间要求为 8a,该产品在某卫星平台中开展了等效 8a 的加速寿命试验。

通过可靠性评估计算得到置信下限为 0.161101,小于 0.9651,不满足可靠性要求;基于已有地面数据、在轨数据估算得到置信下限为 0.108830,数据并不充分,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 代永德. 某型终端控制器寿命与可靠性评估方法研究[J]. 航天制造技术, 2018(6): 38~41
- 2 袁忠大. 基于威布尔混合分布的航空发动机可靠性评估[J]. 北京: 航空计算技术, 2015, 45(5): 65~68
- 3 陈晓彤. Relx Software Co. & Intellect. 可靠性实用指南[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005
- 4 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
- 5 Pascual F. Accelerated life test planning with independent weibull competing risks[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2008, 57(3): 435~444
- 6 金光. 长寿命卫星活动部件 Bayes-Weibull 可靠性评估方法[J]. 石油化工设备技术, 2012, 33(6): 41~48
- 7 林静. Weibull 分布下基于 MCMC 的贝叶斯恒加试验数据评估[J]. 统计与决策(理论版), 2007(18): 10~12
- 8 朱寿雷. Weibull 分布下的系统可靠性评估方法研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2010, 28(1): 20~23
- 9 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
- 10 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