

DOI: 10.3901/JME.2019.16.197

FAST 液压促动器液压系统管路可靠性增长试验研究*

赵静一^{1,3} 朱明² 王启明² 蔡伟^{1,3} 茹强^{1,3}
李文雷^{1,3} 司少朋^{1,3}

(1. 燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004;

2. 中国科学院国家天文台 北京 100101;

3. 秦皇岛燕大一华机电工程技术研究院有限公司 秦皇岛 066004)

摘要: 500 米口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter aperture spherical radio telescope reflective, FAST)落成后,针对个别 FAST 液压促动器液压系统管路存在的振动噪声问题,搭建了可靠性试验台,对其进行可靠性增长试验研究,找出故障原因后,对原系统进行可靠性优化设计,并对改进结构设计进行流场分析,确定优化设计方案。采用 Duane 原则,制定了合适的液压系统管路可靠性增长试验方案,通过可靠性增长试验得到样机 B 类失效统计,从而得到 FAST 液压促动器液压系统管路的累积 MTBF 及其可靠性增长模型。运用 ASMAA 模型对 FAST 液压促动器液压系统管路可靠性增长进行趋势检验,得到试验截止时可靠性水平的瞬时 MTBF 和置信区间,验证可靠性优化设计达到计划要求,为促动器整机可靠性增长和促动器群可靠性增长研究提供参考。

关键词: FAST; 液压促动器; 集成液压系统; 可靠性增长

中图分类号: TG156

Reliability Growth Test Study of Five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope Reflective Surface Hydraulic Actuator

ZHAO Jingyi^{1,3} ZHU Ming² WANG Qiming² CAI Wei^{1,3} RU Qiang^{1,3}
LI Wenlei^{1,3} SI Shaopeng^{1,3}

(1. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004;

2. National Astronomical Observatory of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101;

3. Limited company of Yanda-Yihua Electromechanical Engineering Technology Research Institute, Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004)

Abstract: After Five-hundred-meter aperture spherical radio telescope reflective(FAST) is completed, vibration and noise problems in hydraulic system pipeline of individual FAST hydraulic actuators are aimed. The reliability test-bed was built, and the reliability growth test was done. After the cause of it been found, the reliability optimization design of the original system was carried out, and the flow field analysis of the improved structure design was done to determine it. Based on Duane model, a suitable reliability growth of hydraulic system pipeline test scheme is formulated. The failure statistics of type B of the prototype are obtained by reliability growth test, and the cumulative MTBF and its reliability growth model are obtained. The ASMAA model is used to test the reliability growth trend of FAST hydraulic actuator hydraulic system pipeline. The instantaneous MTBF and confidence interval of the reliability level at the end are obtained. The reliability optimization design of hydraulic system pipeline meets the planning requirements. Theoretical basis is laid for ensuring the long-term reliability of FAST hydraulic actuator group.

Key words: FAST; hydraulic actuators; integrated hydraulic system; reliability growth

0 前言

500 米口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter

aperture spherical radio telescope reflective, FAST)是我国重大科技基础建设项目,是国际上最大、最灵敏的单口径射电天文望远镜^[1-2],又称“天眼”,至今 FAST 已发现 44 个脉冲星。FAST 的三大创新点之一为利用 2 225 根液压促动器组成的世界上最大的液压系统群的协调控制实现主动反射面角度的精确调整。液压促

* 国家自然科学基金(11673040)和 FAST 液压促动器改造资助项目。
20181102 收到初稿,20190523 收到修改稿

动器个体及系统群的工作可靠性,是 FAST 可靠运行的重要保障,因此,其可靠性增长研究十分必要。国际上对重大装备可靠性增长的研究已经取得了一定成果,其中具有里程碑意义的是美国电气工程师 Duane 发现的经验模型,以及美国陆军装备系统的 AMSAA 模型,国内学者在研究电子产品以及航天产品的可靠性增长方面按照 Duane 模型以及 AMSAA 模型^[3-7],进行了大量研究工作。但对集成液压群系统进行可靠性增长及其增长模型研究相对较少。

燕山大学赵静一教授团队长期从事液压元件与系统的可靠性研究^[8-9],与中国科学院国家天文台合作对 FAST 液压促动器关键零部件进行可靠性试验验证,搭建了节能型并行可靠性试验台,通过 2 000 多小时的可靠性试验,认定液压促动器的泵、溢流阀、液控单向阀等元件满足寿命要求,取得的阶段性成果为液压促动器的安装、FAST 落成提供了理论依据^[10-12]。

FAST 试运行期间,个别液压促动器出现振动噪声的故障现象,为了实现 FAST 液压促动器系统可靠性增长,对原系统进行可靠性试验与可靠性优化设计,为后续整机促动器的可靠性增长以及 FAST 液压促动器群可靠性增长提供理论依据和单体数据。

1 FAST 液压促动器液压系统管路可靠性优化设计

1.1 FAST 液压促动器原液压系统简介

FAST 液压促动器采用高度集成的电液控制系统是将油箱、阀块、阀、电机、控制系统以及其他组件集成到一起,组成集成式液压动力单元与油缸安装在一起,通过调整电机转速,控制液压泵的流量,实现液压缸的伸出、缩回、差动、小负载随动、有源和无源保压功能。其液压原理图如图 1 所示。

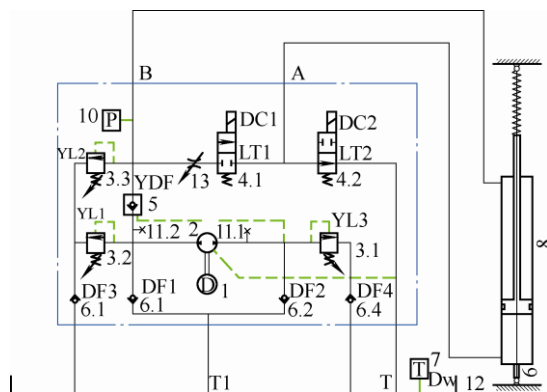


图 1 FAST 液压促动器液压系统原理图

1. 步进电机 2. 齿轮泵 3. 溢流阀 4. 电磁换向阀 5. 液控单向阀
6. 单向阀 7. 温度传感器 8. 液压缸 9. 位移传感器
10. 压力传感器 11. 测压口 12. 油箱 13. 节流口

1.2 FAST 液压促动器可靠性试验

1.2.1 FAST 液压促动器试验台

FAST 液压促动器试验台由两大部分组成。机械部分包括支架、配重和促动器安装机构,支架为支撑,配重为负载,滑轮为导向,通过钢丝绳实现力的传递,可实现促动器位置调整;电控部分可以完成正弦曲线跟踪、三角曲线跟踪、有源保位和无源保位的试验数据采集,试验台如图 2 所示。

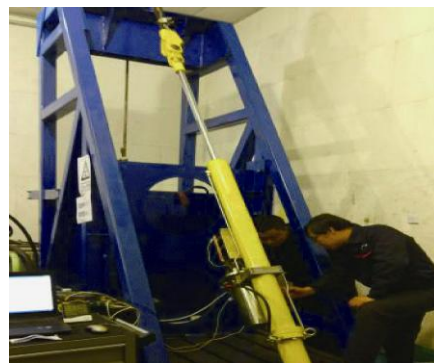


图 2 FAST 液压促动器试验台

1.2.2 FAST 液压促动器试验样机可靠性试验及故障现象

2017 年 12 月 27 日开始,在环境温度为 16 ℃ 左右,湿度为 40% 的环境中,按照天文台要求采用上述试验台,在 6 t 恒定负载工况下进行位置函数为 $480+480\sin(0.000\ 833\pi t)$,速度函数为 $1.256\cos(0.000\ 833\pi t)$ (初始位 480 mm、振幅 480 mm、周期 2 400 s)的正弦循环试验,任意位置调整试验,有源和无源保位试验相结合的可靠性试验。

2018 年 1 月 4 日,总可靠性试验进行了 120 h 左右,试验样机在低速运行的缩回阶段出现振动噪声现象,出现故障时的跟踪曲线截图如图 3 所示。

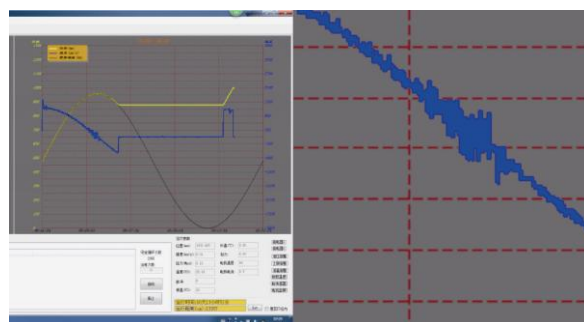


图 3 出现故障现象时的截图及其局部放大图

1.3 FAST 液压促动器故障原因分析

由图 3 所示曲线可得出故障时促动器的速度变化幅度较大,说明在出现故障时泵供给液压缸的流量不足导致运行速度低于给定值,而按照所给定程序,控制器做出响应使得电机转速突然增大,泵的输出流量增大,速度突然增大,如此往复,出现上

述的速度波动现象。

根据上述分析推断产生故障的原因为泵吸空导致齿轮泵供给系统的油液不足,解体电液动力单元,发现集成块中的泵的吸油管路和集成块管路过细,致使泵入口油液流速过高,油液压力低于饱和蒸气压使气体析出,从而造成泵吸空,说明试验样机产生故障的原因为加速运行一段时间之后,泵在低转速时的吸空导致系统产生振动噪声以及速度波动。

1.4 FAST 液压促动器液压系统管路可靠性优化设计

基于小改动原则,两种可靠性优化设计方案进行选择。

方案一是截断原系统中 LT1 与 LT2 液压管路,将 LT1 出口与液压缸无杆腔相连,将 LT2 的出油口引回泵的吸油口来改善泵的吸油,同时为解决缸杆伸出后无杆腔的补油问题,增加一条支路与换向阀 LT3 使得油箱通过 LT3 与液压缸无杆腔相连。具体原理如图 4 所示。

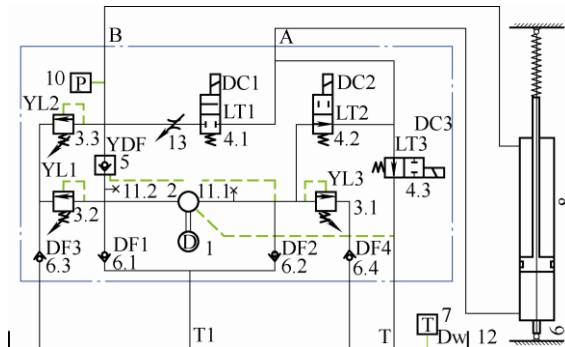


图 4 优化设计方案一原理图

1. 步进电机 2. 齿轮泵 3. 溢流阀 4. 电磁换向阀 5. 液控单向阀
6. 单向阀 7. 温度传感器 8. 液压缸 9. 位移传感器
10. 压力传感器 11. 测压口 12. 油箱 13. 节流口

通过对阀块结构以上的位置空间分析,确定其不存在多余的位置安装增加的换向阀 LT3,从而确定方案一为难于实现且增加成本方案,故不采用。

方案二是对动力单元的集成块及管路进行可靠性优化设计,其中吸油管路结构如图 5 所示。

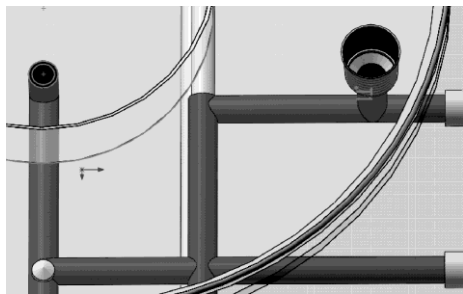


图 5 阀块中吸油管路三维图

通过对吸油管路直径优化改善泵的吸油能力,根据泵入口的密封圈的情况,确定管路扩大系数(扩

大后的管路直径与扩大前的管路直径之比)为 1.3 的可靠性优化设计方案。

对不同管路扩大系数下的吸油管路进行流场,得到不同管路扩大系数下的压降与最大速度值如表 1 所示;原管路直径与 1.3 倍管路扩大直径下的的流场结果如图 6 所示。

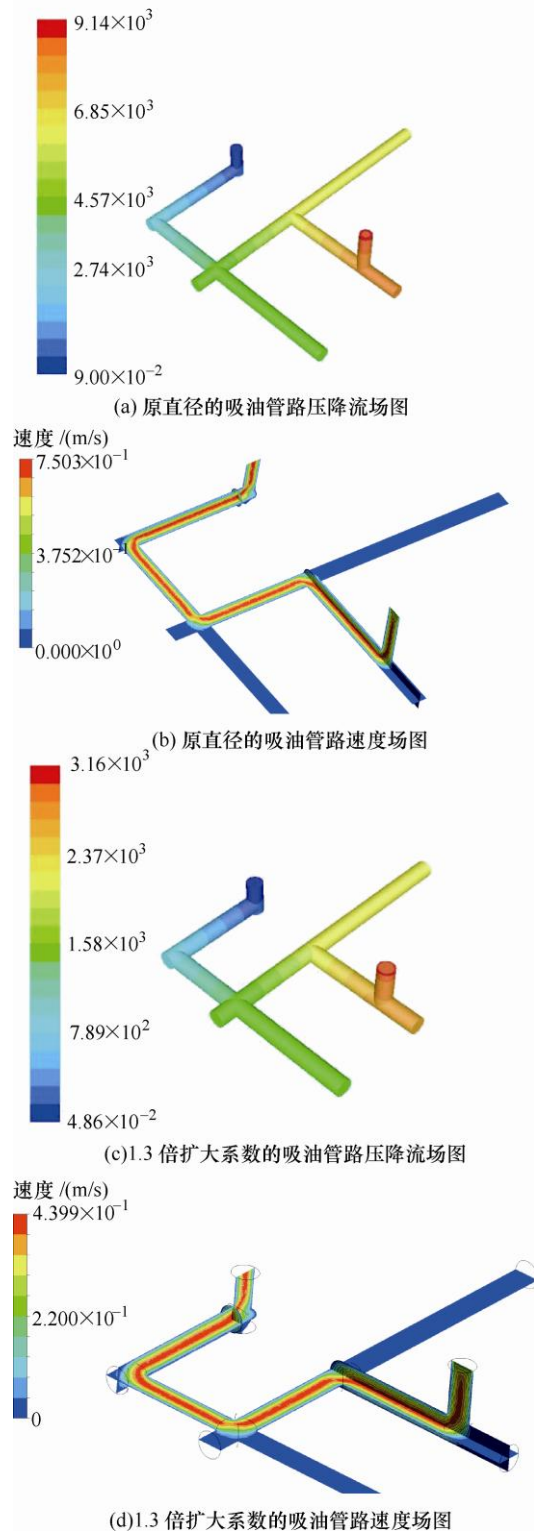


图 6 不同管路扩大系数下的压力场与速度场

表 1 不同管路扩大系数下的管路压降与最大速度表

管路扩大系数	1	1.1	1.2	1.3	1.4
吸油管路压降/ Pa	10 400	6 613	4 613	3 646	2 545
最大流速/(m/s)	0.75	0.61	0.52	0.44	0.38

表 1 说明当选择管路扩大系数为 1.3 时, 管路压降从 10 400 Pa 下降到 3 646 Pa, 最大速度从 0.75 m/s 下降到 0.44 m/s, 满足了泵吸油口的要求, 验证了可靠性优化设计方案的可行性。

2 FAST 液压促动器液压系统管路可靠性增长试验

在 FAST 液压促动器可靠性优化设计后, 制定持续有效的可靠性试验计划与步骤, 对 FAST 液压促动器试验样机进行可靠性增长试验。

2.1 液压系统管路可靠性增长试验计划

2.1.1 FAST 液压促动器试验样机初始 MTBF 确定

FAST 液压促动器试验样机在进行可靠性试验时, 累积试验总时间 120 h 时出现振动噪声现象, 据此可以确定试验样机的初始可靠性水平 $\theta_i=120$ h。

2.1.2 FAST 液压促动器试验样机可靠性增长率估计

广泛的可靠性增长试验的实践表明, 新研制的复杂产品, 增长率通常在 0.3~0.6。美国电气工程师 Duane 研究的航空液压机械装置的可靠性增长率约为 0.5^[13]。根据 Duane 在航空设备液压机械装置可靠性增长的研究经验及 FAST 液压促动器和航空装置的液压系统比较相似, 并且针对故障现象进行的可靠性优化设计, 因此预估 FAST 液压促动器试验样机增长率 m 为 0.5。

2.1.3 FAST 液压促动器试验样机可靠性增长模型及试验总时间估计。

FAST 试验样机改造前的 $\theta_i=120$ h, 根据现场促动器运行 2 年之后个别促动器出现类似可靠性试验中的问题, 而促动器设计的最高使用寿命为 10 年, 因此在相同应力条件下, 必须使得样机的瞬时平均无故障时间(简称 MTBF)增长 5 倍以上, 故取液压促动器样机的可靠性增长目标 MTBF, θ_f 为 700 h。

需要的总试验时间 t_f 为

$$t_f = t_i \left(\frac{(1-m)\theta_f}{\theta_i} \right)^{1/m} = 1020.8333 \quad (1)$$

式中, t_i 为可靠性试验总时间。

因此, 为了使样机的瞬时 MTBF 达到 700 h, 还需要进行 900 h 以上的可靠性增长试验。

根据预估参数得到其可靠性增长计划的数学模型为

$$\theta_t = \begin{cases} \theta_i = 120 & 0 \leq t \leq 120 \\ \theta_t = \theta_i \left(\frac{t}{\theta_i} \right)^m \frac{1}{1-m} = & \\ 21.9088 \times t^{0.5} & t > 120 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\theta(t)$ 为 t 时刻的瞬时 MTBF。

根据上述 FAST 液压促动器试验样机可靠性增长预估模型, 绘制其在直线与双对数坐标下的曲线如图 7、8 所示。

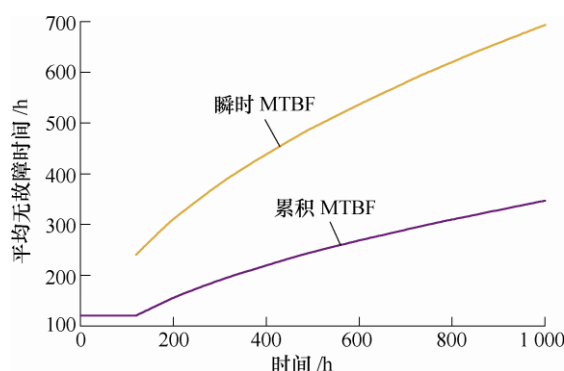


图 7 直线坐标下可靠性增长预测曲线

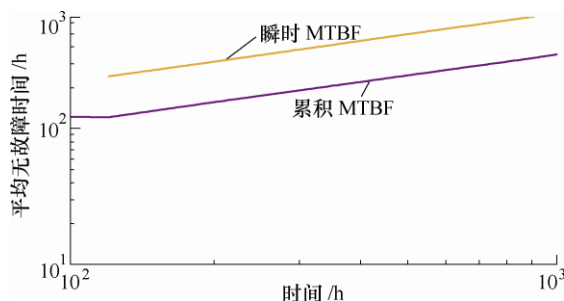


图 8 双对数坐标下可靠性增长预测曲线

2.2 液压系统管路可靠性增长试验

2.2.1 FAST 液压促动器试验样机可靠性增长试验过程及效果

按照天文台动作要求, 采用与可靠性试验阶段相同的负载条件以及运行条件, 按照可靠性增长计划, 在平均温度为 18 ℃ 左右, 湿度 30% 左右的环境中累积进行 20 h 左右位置调整试验, 20 h 左右三角循环试验, 220 h 左右正弦循环试验, 250 h 左右有源保压试验, 500 h 左右无源保压试验, 总可靠性增长试验时间 1 000 h 以上。

可靠性优化设计前累计总试验 120 h 与可靠性优化设计后累计总试验 1 000 h 的低速对比如图 9 所示。

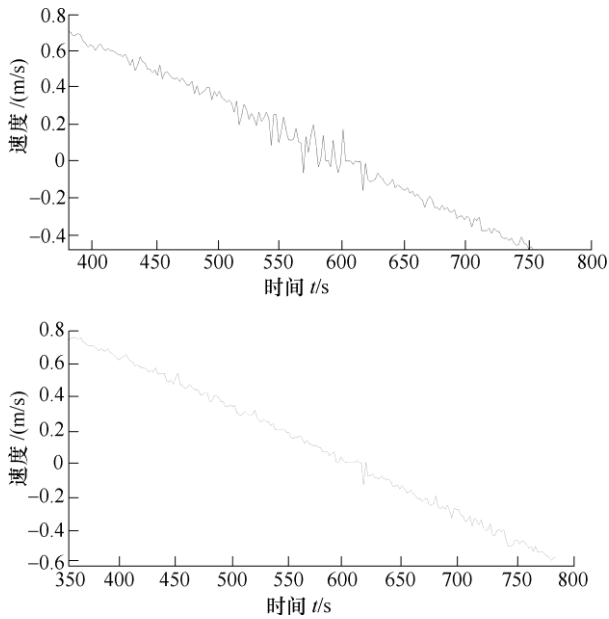


图 9 与可靠性优化设计前后低速波动对比图

从图 9 可以得出, 可靠性优化设计后 FAST 液压促动器试验样机的低速稳定性得到了很大提高, 并且振动噪声现象在 500 h 以上不出现故障现象, 证明本次可靠性优化设计的可行性, 为下一步建立可靠性增长模型提供了基础数据。

2.2.2 FAST 液压促动器 B 类实效统计

可靠性增长试验过程中共出现 3 次 B 类实效(B 类失效为需要纠正的那类系统性失效), 进行纠正后再进行可靠性增长试验, 可靠性增长试验中总试验时间的 B 类失效累积失效数据如表 2 所示。

表 2 样机总试验时间累积失效数据表

总试验时间 T/h	失效次数 $N(t)$	平均无故障时间 $[T/N(t)]/h$
104	1	104
264	2	132
501	3	167
1000	3	333.3333

3 FAST 液压促动器液压系统管路可靠性增长模型

依据 FAST 液压促动器试验样机累积失效数据, 通过最小二乘法在双对数坐标下, 将累积 MTBF 与可靠性增长试验时间 t 进行线性拟合得到 FAST 液压促动器试验样机的可靠性增长数学模型, 利用 ASMAA 模型对其在时间截止时的可靠性增长趋势、拟合度、置信区间进行验证和统计估计。

3.1 Duane 模型的最小二乘法参数求解

根据 B 类失效统计表, 得出 FAST 液压促动器试验样机可靠性增长试验的 Duane 模型最小二乘法

故障统计数据见表 3。

表 3 FAST 液压促动器总试验时间的 Duane 模型
最小二乘法故障统计数据表

序号	故障次数 $N(t_j)$	出现故障时间 t_j/h	$\ln t_j$	$(\ln t_j)^2$
1	1	104	4.6444	21.570 4
2	2	264	5.5759	31.091 2
3	3	501	6.2166	38.646 2
4	3	1 000	6.9078	47.717 1
累加			23.3447	139.024 9
1	1	104	4.644 4	21.570 4
2	2	132	4.882 8	27.226 3
3	3	167	5.118 0	31.816 6
4	3	333.333 3	5.809 1	40.128 1
累加			20.454 3	120.741 4

假设在双对数坐标下, 可靠性增长试验数据点与可靠性增长 Duane 数学模型的差值为 ε_j , 通过残差平方和与偏导公式可得

$$\frac{\partial}{\partial \ln a} \sum_{j=1}^n \varepsilon_j^2 = 0$$

$$\Rightarrow \sum_{j=1}^n (\ln \theta_c(t_j) + \ln a - m \ln t_j) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial m} \sum_{j=1}^n \varepsilon_j^2 = 0$$

$$\Rightarrow \sum_{j=1}^n (\ln \theta_c(t_j) + \ln a - m \ln t_j) \ln t_j = 0 \quad (4)$$

式中, a 为可靠性增长曲线的尺度参数。

解上述的方程可得 m 、 a 的最小二乘法估计 \hat{m} 和 \hat{a} 分别为

$$\hat{m} = \frac{n \sum_{j=1}^n \ln \theta_c(t_j) \ln t_j - \left(\sum_{j=1}^n \ln \theta_c(t_j) \right) \left(\sum_{j=1}^n \ln t_j \right)}{n \sum_{j=1}^n (\ln t_j)^2 - \left(\sum_{j=1}^n \ln t_j \right)^2} \times$$

$$\left(\sum_{j=1}^n \ln t_j \right) = 0.4913 \quad (5)$$

$$\hat{a} = \exp \left\{ \frac{1}{n} \left(\hat{m} \sum_{j=1}^n \ln t_j - \sum_{j=1}^n \ln \theta_c(t_j) \right) \right\} = 0.1058 \quad (6)$$

从而得到 FAST 液压促动器试验样机总试验时间的可靠性增长 Duane 模型为。

$$\hat{\theta}(t) = 18.5803 \times t^{0.4913} \quad (7)$$

式中, $\hat{\theta}(t)$ 为 t 时刻的瞬时 MTBF。则其可靠性增长曲线如图 10、11 所示。

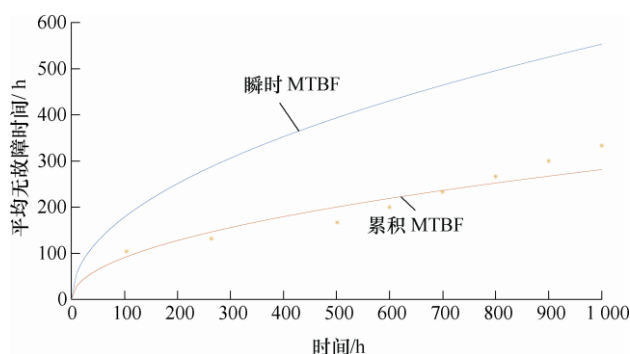


图 10 直角坐标下的可靠性增长曲线

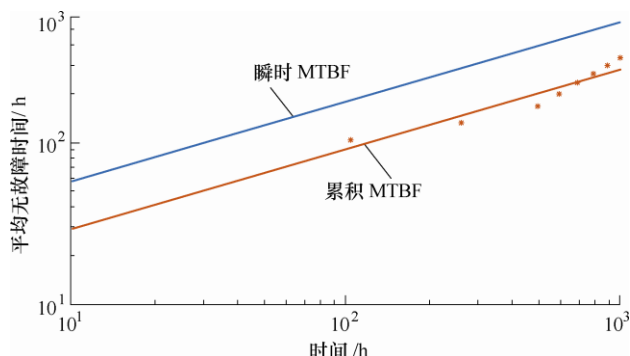


图 11 对数坐标下的可靠性增长曲线

3.2 FAST 液压促动器在单台产品试验截止条件下的 ASMAA 模型无偏差估计

在 Duane 模型的基础上, ASMAA 模型假设可修产品在开发期内的失效次数 $N(t)$ 是具有均值函数 $EN(t) = at^b$ 以及瞬时强度 $\lambda(t) = dEN(t)/dt = abt^{b-1}$ 的非齐次 Poisson, 则

$$\theta(t) = \frac{T^{1-b}}{ab} \quad (8)$$

式中, b 、 T 分别代表现状参数与可靠性增长总时间。

由以上假设及极大似然函数可得形状参数的极大似然估计值 \hat{b} 为

$$\hat{b} = n / \sum_{j=1}^n \ln \frac{T}{t_j} = 0.6999 \quad (9)$$

式中, n 代表故障次数。

因为 $0 < b < 1$, 说明 FAST 液压促动器试验样机可靠性还在增长之中, 需要进一步研究。

由 ASMAA 模型中的无偏差估计定理^[13]可得

$$E\left(\frac{n-1}{n} \hat{b} \mid N(T) = n\right) = b \quad (10)$$

由式(10)可得形状参数和尺度参数 b 的无偏差估计值 \bar{b} 和 \bar{a} 分别为

$$\bar{b} = (n-1) / \sum_{j=1}^n \ln \frac{T}{t_j} = 0.4669 \quad (11)$$

$$\bar{a} = n / T^{\bar{b}} \quad (12)$$

根据 \bar{b} 和 \bar{a} 的值得到 1 000 h 时 FAST 液压促动

器试验样机的无偏差估计 $\bar{\theta}_{(1000)}$ 为

$$\bar{\theta}(1000) = 713.9287 \quad (13)$$

3.3 ASMAA 模型下完全数据时的趋势检验

试验中失效次数较少, 应采用 χ^2 检验法检验可靠性增长趋势, 过程如下所示。

计算检验统计量 χ^2

$$\chi^2 = \frac{2(M-1)}{\bar{b}} = 8.5671 \quad (14)$$

式中, M 代表拟合优度检验参数, $M=n$ 。

取显著水平为 0.4, 查 χ^2 分布的分位数表得到双侧临界值

$$\chi_{\alpha/2}^2(2M) = 3.07 \quad (15)$$

$$\chi_{1-\alpha/2}^2(2M) = 8.56 \quad (16)$$

可靠性增长趋势的判定

因为

$$\chi^2 = 8.5671 > \chi_{\alpha/2}^2(2M) = 3.07 \quad (17)$$

$$\chi^2 = 8.5671 > \chi_{1-\alpha/2}^2(2M) = 8.56 \quad (18)$$

则样机在显著水平为 0.2 时有显著的可靠性增长趋势, 应该继续进行可靠性增长分析。

3.4 ASMAA 模型下完全数据时的拟合优度检验

采用 Cramér-Von Mises 拟合优度检验方法, 具体的检验步骤如下。

(1) 拟合优度检验统计量 $C^2(M)$

$$C^2(M) = \frac{1}{12M} + \sum_{j=1}^M \left[\left(\frac{t_j}{T} \right)^{\bar{b}} - \frac{2j-1}{2M} \right]^2 = 0.0738 \quad (19)$$

(2) $C^2(M)$ 的临界值。取 $\alpha=0.2$, 根据 ASMAA 给出的可得 $C^2(M)$ 的临界值表可得

$$C^2(M, 0.25) = 0.121 \quad (20)$$

(3) 判断样机的试验数据能不能用 Duane-crow 模型进行统计估计。

$$C^2(M) = 0.0738 < C^2(M, 0.2) = 0.121 \quad (21)$$

则能用 Duane-crow 模型进行统计估计。

3.5 ASMAA 模型下完全数据时的形状参数区间估计

验证了试验样机的数据能用 ASMAA 模型进行统计估计后, 根据其模型的估计方法得到形状参数 b 的估计区间 $[b_L, b_U]$ 为

$$b_L = \frac{\bar{b}}{2(n-1)} \chi_{1-\gamma/2}^2(2n) = 0.2573 \quad (22)$$

$$b_U = \frac{\bar{b}}{2(n-1)} \chi_{1+\gamma/2}^2(2n) = 1.2424 \quad (23)$$

同时据 ASMAA 模型参数推理方法得到置信水平为 0.8 时, 试验样机在可靠性增长时间截止时的形状参数 b 的单边置信上限 b'_u 为

$$b'_u = \frac{\bar{b}}{2(n-1)} \chi^2_{\gamma}(2n) = 0.9989 \quad (24)$$

因为 $b'_u < 1$, 表明在可靠性增长试验时间截止时 FAST 液压促动器试验样机处于可靠性增长之中, 需对其瞬时 MTBF 的区间进行估计。

3.6 ASMAA 模型下完全数据试验截止时的瞬时 MTBF 区间估计

取置信水平为 0.8, 根据 ASMAA 模型给出的 ASMAA 模型时间截止区间估计系数 $[\pi_1, \pi_2]$ 表, 可得 $\pi_1=0.222$, $\pi_2=4.217$ 。

根据 ASMAA 给出的定理, 对于时间截止的可靠性增长试验, 在一定置信水平下的非随机化置信区间 $[\theta_L, \theta_U]$ 。

$$\theta_L = \pi_1 \bar{\theta}(T) \quad (25)$$

$$\theta_U = \pi_2 \bar{\theta}(T) \quad (26)$$

得到, 1 000 h 时的瞬时 MTBF 的置信区间 $[\theta_L, \theta_U]$ 为

$$\theta_L = \pi_1 \bar{\theta}(T) = 158.4923 \quad (27)$$

$$\theta_U = \pi_2 \bar{\theta}(T) = 3\,010.6373 \quad (28)$$

即

$$[\theta_L, \theta_U] = [158.4923, 3\,010.6373] \quad (29)$$

根据无偏差估计得到的结果得到 1 000 h 时瞬时 MTBF 在置信水平为 0.8 时的置信区间 $[\bar{\theta}_L, \bar{\theta}_U]$ 的修正结果为

$$[\bar{\theta}_L, \bar{\theta}_U] = [713.9287, 3\,010.6373] \quad (30)$$

4 结论

通过对 FAST 液压促动器故障的可靠性分析, 采用试验方法找出故障原因, 进行可靠性优化设计及可靠性增长试验, 得到以下结论。

(1) 液压系统管路可靠性优化设计是正确可行的。FAST 液压促动器试验样机液压系统管路可靠性优化前试验的累积 MTBF 为 120 h, 可靠性优化设计后可靠性增长试验的累积 MTBF 增大到 500 h 以上, 基于 Duane 模型由最小二乘法在双对数坐标下线性回归得到: 1 000 h 内的瞬时 MTBF 可靠性增长模型为 $\hat{\theta}(t) = 18.5803 \times t^{0.4913}$ 。

(2) 液压系统管路可靠性优化设计后的可靠性增长试验可以用 ASMAA 模型进行统计和估计: FAST 液压促动器试验样机在 1 000 h 的瞬时 MTBF

的无偏差估计为 713.928 7 h; 可靠性增长 ASMAA 模型的形状参数 b 的区间估计为 $[0.2573, 1.2424]$; 瞬时 MTBF 在置信度为 80% 时的置信区间为 $[713.9287, 3\,010.6373]$ 。FAST 液压促动器试验样机在可靠性增长试验截止之时还处在可靠性增长之中, 瞬时 MTBF 可达到 3 010 h 以上, 为 FAST 主动反射面的长期可靠性运行提供了理论依据。

(3) FAST 液压促动器液压系统管路可靠性增长研究为后续促动器整机可靠性增长和促动器群可靠性增长研究提供参考。

参 考 文 献

- [1] 王启明, 高原, 薛建兴, 等. 500m 口径球面射电望远镜反射面液压促动器关键性能分析[J]. 机械工程学报, 2017, 53(2): 183-191.
WANG Qiming, GAO Yuan, XUE Jianxing, et al. Key performance analysis of five-hundred-meter aperture spherical radio telescope reflective surface hydraulic actuator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(2): 183-191.
- [2] 辑骏. 面向 FAST 工程主动反射面系统的液压促动器研制及性能分析[D]. 天津: 天津大学, 2016.
JI Jun. Development and performance analysis of the hydraulic actuator used in the active reflector system of the FAST project[D]. Tianjing: Tianjing University, 2016.
- [3] 张立民, 孙永威, 周帆. 基于 AMSAA 模型的弹上电子设备可靠性增长试验研究[J]. 计算机与数字工程, 2010, 38(2): 18-21, 74.
ZHANG Limin, SUN Yongwei, ZHOU Fan. Research of reliability growth and reliability growth test for guided missile avionics based on AMSAA model[J]. Computer & Digital Engineering, 2010, 38(2): 18-21, 74.
- [4] 郭建英, 孙永全, 于春雨, 等. 复杂机电系统可靠性预测的若干理论与方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(14): 1-13.
GUO Jianying, SUN Yongquan, YU Chunyu, et al. Some theory and method for complex electromechanical system reliability prediction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(14): 1-13.
- [5] 朱曦全. 航天产品的可靠性增长试验方法[J]. 导弹与航天运载技术, 2006(1): 58-61.
Zhu Xiquan. Reliability growth test method for space product[J]. Missile and Space Vehicle, 2006(1): 58-61.
- [6] 阳红成, 苏小光. 电子产品研制阶段可靠性增长试验研究[J]. 国外电子元器件, 2006(12): 32-35.
YANG Hongcheng, SU Xiaoguang. Research of reliability growth and reliability growth test of electronic products in development stage[J]. Foreign Electronic Components,

- 2006(12): 32-35.
- [7] 刘琦, 武小悦. 复杂系统可靠性增长试验评价的集成分析模型[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(8): 1477-1483.
LIU Qi, WU Xiaoyue. Integrated analysis model for reliability growth test evaluation of complex system[J]. Systems Engineering-Theory and Practice, 2010, 30(8): 1477-1483.
- [8] 赵静一, 姚成玉. 液压系统可靠性工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
ZHAO Jingyi, YAO Chengyu. Reliability engineering of hydraulic system[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [9] 陈东宁, 姚成玉. 基于模糊贝叶斯网络的多态系统可靠性分析及在液压系统中的应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(16): 175-183.
CHEN Dongning, YAO Chengyu. Reliability analysis of multi-state system based on fuzzy bayesian networks and application in hydraulic system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(16): 175-183.
- [10] ZHU Ming, ZHAO Jingyi, WANG Qiming. Reliability evaluation of key hydraulic components for actuators of FAST based on small sample test[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2017(18): 1561-1566.
- [11] 高原, 王启明, 薛建兴, 等. FAST 液压促动器仿真分析与试验研究[J]. 液压与气动, 2015(12): 54-58.
GAO Yuan, WANG Qiming, XUE Jianxin, et al. Simulation and experiment of FAST hydraulic actuator[J]. Hydraulic and Pneumatic, 2015(12): 54-58.
- [12] 朱明, 赵静一, 王启明, 等. FAST 液压促动器关键元件并行节能型加速寿命试验台的研制[J]. 液压与气动, 2015(5): 10-13, 57.
ZHU Ming, ZHAO Jingyi, WANG Qiming, et al. Parallel energy-saving accelerate lifetime test platform for key components of hydraulic actuators of FAST[J]. Hydraulic and Pneumatic, 2015(5): 10-13, 57.
- [13] 梅文华. 可靠性增长试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
MEI Wenhua. Reliability growth test[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.

作者简介: 蔡伟(通信作者), 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为电液控制系统创新设计及可靠性。