DOI: 10.3901/JME.2020.04.218

FAST 液压促动器过滤系统*

雷 政^{1,2,3} 王启明^{1,3} 甘恒谦^{1,3} 朱 明^{1,3} 姜 鹏^{1,3}

(1. 中国科学院国家天文台 北京 100101;
2. 中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 101408;
3. 中国科学院 FAST 重点实验室 北京 100101)

摘要: 500 m 口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter aperture spherical radio telescope, FAST)促动器液压系没有过滤设计,随着运行时间的增长,设备的油液清洁度等级普遍超过设计许用范围,对其可靠性和使用寿命构成严重影响。针对该问题,提出液压系统动态平衡过滤概念,建立促动器液压系统污染控制数学模型,结合促动器现有条件设计了外挂式过滤系统方案。Matlab 软件仿真显示,安装外挂式过滤系统后,液压促动器经 10 次工作循环达到动态平衡,油液清洁度等级为 NAS6 级。样机试验表明,理论和试验结果一致性较好,验证了污染控制模型建立的准确性和外挂式过滤系统方案的有效性。通过理论分析与试验相结合的方法,为 FAST 液压促动器油液污染问题处理提供了一种有效的外挂式过滤系统解决方案,也为类似液压系统油液污染控制研究提供参考。

关键词: 促动器; 动态平衡; 数学模型; 油液污染控制; 可靠性和寿命

中图分类号: TH137

Filtration System for Hydraulic Actuators of FAST

LEI Zheng^{1,2,3} WANG Qiming^{1,3} GAN Hengqian^{1,3} ZHU Ming^{1,3} JIANG Peng^{1,3}

(1. National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101;
2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408;
3. CAS Key Laboratory of FAST, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract: There is not filtration design of actuators of (Five-hundred-meter aperture spherical radio telescope, FAST). With the working time increasing, most of oil contamination level of hydraulic actuators of FAST is exceed allowable values, and the reliability and lifetime of actuators are cut down. To solve the problem, the principle of dynamic balance of oil filtration is proposed. The mathematical model of contamination control for hydraulic system is established, and the solution of hung outside filtration system for hydraulic actuators is designed. The model is simulated by Matlab. The results show that the dynamic balance state of actuator can be attained by 10 times working after the hung outside filtration system installed, and the oil of NAS6 can be achieved at the same time. The test of prototypes is completed, and the results of simulation and test agree with each other very well. The effectively of the solution for actuators is proved to improve the grade of hydraulic oil, and the mathematical model is proved to be correct. An effective solution is provided to solve the problem of actuator of FAST by the method of combination theoretical analysis and test. Meanwhile, it can be used as the reference for similar research of hydraulic pollution control.

Key words: actuators; dynamic balance; mathematical model; contamination control of oil; reliability and lifetime

0 前言

500 m 口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter aperture spherical radio telescope, FAST)被誉为“中国天眼”,是世界上口径最大、灵敏度最高的单口径

球面射电望远镜^[1]。

望远镜反射面由 4 450 块反射面单元组成,依靠 2 225 台液压促动器(以下简称促动器)联合驱动实现反射面变形^[2-3]。每台促动器影响 6 块反射面单元位置,因此促动器群的可靠运行对保障望远镜正常调试和运行非常重要^[4-5]。

促动器是一个低压、低速、小排量、高精度的液压设备,负载形式为单向受拉。其油箱容量为 6.3 L,

* 国家自然科学基金(11673040)和国家自然科学基金青年基金(11603045, 11803053)资助项目。20190225 收到初稿,20191031 收到修改稿

是典型的小油箱封闭式液压系统。促动器分布于望远镜反射面下方,具有数量多、分布广、可达性差等特点,设备维护难度大^[6]。

由于促动器液压系统没有设计过滤环节,装配残余和出厂试验过程产生的污染物在设备运行过程中形成恶性循环,导致油液清洁度等级急速降低。经检测,FAST 大部分促动器油液清洁度等级已普遍超过设计允用等级范围(NAS9)。望远镜在调试运行过程已发生数十起因油液污染引起的齿轮泵磨损、单向阀卡滞等失效故障,且失效数量有增长趋势。经验表明,液压系统有 75%以上故障是由油液清洁度等级降低导致^[7-8]。因此改善促动器油液清洁度对提高设备的可靠性和使用寿命具有重要意义。

本文针对促动器油液清洁度等级普遍超标问题,提出液压系统动态平衡过滤概念、建立液压系统污染控制数学模型、设计外挂式过滤系统,并通过试验验证为 FAST 提供促动器油液污染问题解决方案,以实现设备可靠性、维护性和使用寿命的提高,保障望远镜长期稳定运行。

1 液压系统动态平衡过滤概念

液压系统过滤设计根据位置不同,可分为吸油过滤、压油过滤、回油过滤和旁路过滤等基本过滤形式,实际应用时可一种或多种组合使用^[9]。

传统过滤设计通常是针对系统中某一段油路或某个元件进行。如在油泵前端设计过滤器,以阻挡污染物进入液压系统;在精密液压元件(如同服阀、比例阀等)进油端设计过滤,提高介质的清洁度等级,以提高元件寿命。

液压系统动态平衡过滤是将过滤对象扩展为液压系统中的全部油液,使系统污染物的产生速率与污染物的过滤速率达到动态平衡状态。动态平衡过滤设计主要关注系统污染物的产生速率,其设计准则如下:达到动态平衡后,系统油液清洁度需要满足系统所有元件的使用要求。用 N 表示液压系统中污染物的浓度,则动态平衡设计准则为

$$N_{\infty} \leq [N] \quad (1)$$

式中, N_{∞} 为液压系统达到动态平衡时的浓度; $[N]$ 为液压系统设计浓度。

为提高过滤效率及动态平衡的稳定性,动态平衡过滤设计过滤位置应在系统流量最大油路上,但滤芯是易损件,设计时也需要兼顾其维护性。

2 FAST 促动器油液污染模型

2.1 促动器参数

促动器设计行程 1.2 m, 最大速度 3 mm/s, 活塞杆直径 40 mm, 油缸内径 90 mm。正常工作时具有换源和跟踪两种工况,时间占比为 1:4,其中换源速度 1.6 mm/s,跟踪平均速度 0.8 mm/s,工作行程 0.96 m。综合各种观测模式,液压系统每年工作时间约 4 800 h。促动器液压系统原理如图 1 所示。

图 1 促动器液压系统原理

1. 电机 2. 双向齿轮泵 3. 溢流阀 4. 电磁阀 5. 液控单向阀
6. 单向阀 7. 压力传感器 8. 快换接头 9. 液压缸
10. 位置传感器 11. 油箱 12. 节流阀

电机正转时,油液经单向阀 6.2、双向齿轮泵 2、液控单向阀 5 进入油缸 9 的有杆腔,推动活塞杆缩回;电机反转时,油液经液控单向阀 5、双向齿轮泵 2、溢流阀 3.1、单向阀 6.4 回到油箱 11,此时活塞杆在外负载作用下伸出。

2.2 促动器油液污染数学模型

液压油污染物包括气体、液体和固体三类,其中最主要且危害最大的是固体污染物^[7-8]。对促动器液压系统做如下假设^[10-12]:① 外界入侵污染物和系统内各元件产生污染物的速率 R_i 为常数;② 油箱中污染物实时均匀分布;③ 液压系统内泄漏量和外泄漏量均为零;④ 忽略液压管道和元件中的容积;⑤ 促动器匀速运动。

此外,促动器往复运行时油液流经的元件有部分重复,为方便计算,将伸出时和缩回时分别看作两条不同油路。且促动器无杆腔与油箱连通,计算时将无杆腔当为油箱。油液经过的每个元件都是污染物产生源,按促动器伸出和缩回过程中油液的流经顺序,累计包含 8 个元件。当初始位置为活塞杆

全部伸出时,可将促动器液压系统作图 2 所示简化。

图 2 FAST 促动器液压系统污染物生成及过滤系统简图

1. 油箱 2. 污染物产生源 3. 过滤器

促动器完成一个往复循环后,液压系统中某尺寸颗粒污染物数应满足如下平衡关系

$$N_1 V = N_0 (V - q) + \frac{\sum_{i=1}^8 R_i T + N_0 q}{\beta} \quad (2)$$

式中 V ——促动器油箱中的油液总体积(mL);

N_0 ——油箱中大于某尺寸颗粒污染物的原始浓度(颗/mL);

N_1 ——一个循环后油箱中大于某尺寸颗粒污染物的浓度(颗/mL);

q ——参与一个往复行程的油液总体积(mL);

T ——半个循环的时间(min);

R_i ——第 i 个污染源大于某尺寸颗粒污染物的入侵速率, $i=1, 2, \dots, 8$ (颗/min);

β ——过滤器的过滤比。

按式(2)关系进行迭代,当促动器完成 n 个往复循环后,油液中大于某尺寸的颗粒污染物浓度满足

$$N_n = N_0 a^n + b \sum_{k=0}^{n-1} a^k \quad (3)$$

$$a = 1 - \frac{q(\beta - 1)}{\beta V} \quad (4)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^8 R_i T}{\beta V} \quad (5)$$

(1) 当系统中没有过滤设计,即 $\beta=1$ 时,液压系统中某尺寸颗粒污染物的浓度

$$N_n = N_0 + n \frac{\sum_{i=1}^8 R_i T}{V} \quad (6)$$

从式(6)中可以看出,促动器液压系统中没有过滤设计时,液压系统颗粒污染物随运行时间呈线性增加。污染速率与液压元件污染物生产速率成正比,与系统总油量成反比。

(2) 当系统中增加过滤设计后,由 $(\beta - 1) / \beta < 1$ 、 $q / V < 1$ 可得 $a < 1$ 。此时 $a^\infty = 0$, $\sum_{k=0}^{\infty} a^k = 1 / (1 - a)$ 。若促动器液压系统经过 n 次循环后达到动态平衡,

则油液中某尺寸颗粒污染物的浓度

$$N_\infty = \frac{b}{1 - a} = \frac{\sum_{i=1}^8 R_i T}{q(\beta - 1)} \quad (7)$$

从式(7)可以看出,达到动态平衡后油液中的颗粒污染物浓度除与液压元件污染物生产速率相关外,还与过滤器过滤比和参与循环的油液量有关。

3 促动器过滤系统方案设计

3.1 外挂过滤系统方案

根据动态平衡理论,利用促动器现有条件,将过滤位置设计在促动器回油油路末端,并将过滤器悬挂于促动器外部。

具体实现方式如下:利用促动器阀块上溢流阀 YL3 的安装孔,设计转接头将油路 I 延至促动器外,并将油路 II 封堵。在阀块外部,设计外挂过滤组件,油液通过外挂过滤组件过滤后,由促动器油箱注油口回到油箱。液压原理如图 3 所示。

图 3 外挂式过滤系统方案原理

1. 溢流阀 YF 2. 过滤器 GL 3. 单向阀 DF 4. 压差表

图 3 中,溢流阀 YL 调定开启压力与原方案中溢流阀 YL3 一致,保证原系统功能不受影响;单向阀 DF 作为旁通阀,保障滤芯安全;压差表显示过滤器两端压力差,表征滤芯状态。

将油路引出促动器,在原设备外部进行过滤后回到油箱,既可以实现过滤功能,也不需要原促动器零部件进行加工改造,可操作性强。同时外挂式过滤器,滤芯监测和更换方便,维护性好。

3.2 滤芯选择设计

滤芯是过滤性能的关键,滤芯选择的参数包括滤芯类型、过滤精度、过滤比、纳垢容量、允许压降、通油能力等^[13]。外挂过滤组件在回油路上,压降不做特殊要求,为保证过滤效果和使用寿命,方案选用国外某公司专利纤维和树脂工艺材质滤芯。

因此,方案中滤芯选择主要考虑通流量、过滤精度、过滤比和纳垢容量等参数。

(1) 精度。滑阀配合间隙尺寸通常较其它种类液压元件间隙小,而尺寸小于 16 mm 的低压滑阀配合间隙为 0.005~0.025 mm^[14]。促动器所用元件为通用元件,且尺寸小于 16 mm,因此选择 5 μm 过滤精度滤芯。

(2) 过滤比。将式(6)代入式(7)可得滤芯过滤比计算公式

$$\beta \geq \frac{\sum_{i=1}^8 R_i T}{q[N]} + 1 \quad (8)$$

促动器许用最低油液清洁度等级为 NAS9 级,为提高其可靠性,设计工作时油液清洁度等级为 NAS6 级。参照 NAS 1638-2001 标准, NAS6 级液压油中污染物如表 1 所示。按表中数据计算,尺寸大于 5 μm 的颗粒污染物浓度为 $[N]=194.62$ 颗/mL。

表 1 100MI NAS6 级油液颗粒物分布

颗粒物尺寸/μm	5~15	15~25	25~50	50~100	>100
颗粒物数目/颗	16 000	2 850	506	90	16

液压元件颗粒物产生与系统油液清洁度、流量、油压和元件尺寸等因素有关,系统油液清洁度越差、流量越大、油压越高、元件尺寸越大,其颗粒物产生率就越大。钻井液压系统与促动器相比,其应用环境更恶劣、系统流量和液压元件尺寸更大、系统油压更高。参考文献[10]中其表 5 数据,预估促动器污染物产生速率为 $\sum_{i=1}^8 R_i = 7.675 \times 10^6$ 颗/min。

根据促动器参数计算,完成一个行程所需时间 $T = 20$ min,一次循环油液体积 $q = 4\,900.9$ mL。将数据代入式(8)得到 $\beta \geq 162$ 。

(3) 纳垢容量。计算颗粒污染物质量时做如下假设:① 所有颗粒物均为金属颗粒;② 颗粒物均为球体;③ 每个尺寸阶段的颗粒尺寸取该阶段的平均值。则油液的颗粒污染物密度为

$$\rho = \frac{7.86 \times 4\pi}{3} \times \sum n_i D_i^3 \times 10^{-13} \quad (9)$$

式中 D ——颗粒直径;

n ——颗粒数。

将表 1 数据代入式(9)可得 NAS6 级油液的颗粒污染物密度为 $\rho = 0.52 \times 10^{-3}$ g/L。设计滤芯更换周期为 1 年,根据促动器参数计算一年流经滤芯的总体积为 $V = 76\,239$ L。由密度和体积,易计算促动器液压系统一年产生的污染物总质量 $M = 35.49$ g。

综上,选取某公司 HC9020FCP8Z 型号滤芯,其技术参数如表 2 所示。

表 2 HC9020FCP8Z 滤芯技术参数(ISO 6889)

名称	过滤精度	过滤比	长度	通流能力	纳污能力
参数	5 μm	$\geq 1\,000$	207 mm	1 000 L/min	36 g

4 仿真与试验

4.1 模型仿真

将所选滤芯和促动器参数代入式(3)和式(4)得 $a = 0.510\,49$, $b = 15.350\,2$,分别以低于 NAS8 级的油液清洁度等级作为初始值进行仿真。各等级液压油颗粒浓度见表 3。

表 3 各等级液压油颗粒浓度(NAS1638 标准)

等级	NAS13	NAS12	NAS11	NAS10	NAS9
浓度颗/mL	24 911.7	12 455.84	6 227.92	3 113.96	1 556.98

将 a 、 b 值代入式(3),用 Matlab 软件对模型进行仿真得到油污染控制曲线如图 4 所示。

图 4 促动器液压油污染控制曲线

仿真结果显示:增加过滤后,随着循环次数的增加,油液中污染物急速减少;10 个循环后液压系统达到动态平衡状态,油液清洁度等级为 NAS6 级,达到设计效果。

4.2 样机试验

随机选取三台促动器进行试验。

试验步骤:① 将促动器油液充分搅动;② 检测油液中颗粒污染物初始浓度;③ 安装外挂过滤系统;④ 控制促动器往复循环运行,每完成一个往复循环记录一次油液中颗粒物的浓度。

试验要求:① 试验过程中往复行程为 1.2 m;② 往复运行速度为 1.6 mm/s。

试验情况如图 5 所示,试验结果如表 4 所示。

图 5 促动器外挂过滤系统试验

1. 在线颗粒检测仪 2. 外挂过滤系统 3. 促动器 4. 试验台

表 4 外挂过滤系统试验结果

颗/mL

促动器 编号	初始 浓度	往复 1 次	往复 2 次	往复 3 次	往复 4 次	往复 5 次	往复 6 次	往复 7 次	往复 8 次	往复 9 次	往复 10 次
1#	1 939.9	722.8	546.9	312.2	229.232	171.001	146.4	115.866	113.001	102.233	108.666
2#	4 514.566	1 632.599	644.2	367.2	243.966	217.833	178.167	115	85.466	71.967	60.1
3#	2 508.334	1 519.167	691.634	324.167	294.7	240.434	238.433	256.601	136.033	125.467	93.033

4.3 仿真与试验对比

将污染模型初始值设为实际油液颗粒污染物浓度数据, 仿真结果与试验结果对比如图 6 所示。

图 6 促动器外挂过滤系统试验与理论对比结果

从图 6 可以看出, 试验曲线与理论曲线基本一致。试验曲线前半段处于理论曲线下方, 分析其原因因为试验时促动器是满行程循环, 而仿真采用的是工作行程循环, 因此试验过滤效果优于理论曲线。

5 结论

针对 FAST 望远镜液压促动器油液清洁度等级普遍超标问题, 本文做了以下工作。

(1) 对液压系统油液污染控制, 提出了液压系统动态平衡过滤概念。

(2) 按油液流经顺序对促动器液压系统进行了简化, 并根据简化系统建立了促动器液压系统污染控制数学模型。

(3) 设计了 FAST 促动器外挂式过滤系统方案,

三台样机促动器的初始油液清洁度等级分别是 1#促动器 NAS9 级、2#促动器 NAS10 级、3#促动器 NAS9 级。安装外挂过滤系统后, 完成 10 次循环后, 所有油液清洁度等级均为 NAS6 级, 达到设计效果, 如表 4 所示。其中, 1#、2#促动器往复循环 6 次, 油液清洁度等级已达到 NAS6 级水平。3#促动器第 4 次和第 7 次循环数据相对有偏差, 分析原因是试验过程中 2 次加油导致。

并通过 Matlab 软件仿真和样机试验数据对比, 验证了该设计方案的有效性和污染控制数学模型建立的正确性。

(4) 通过仿真和试验对比的研究方法, 为促动器油液污染问题提供了一种有效解决方案。液压系统动态平衡过滤概念和液压系统污染控制数学模型可为类似液压系统污染控制研究提供参考。

参 考 文 献

- [1] NAN Rendong. Five hundred meter aperture spherical radio telescope (FAST)[J]. Science in China: Series G: Physics Mechanics & Astronomy, 2006, 49(2): 129-148.
- [2] 薛建兴, 王启明, 古学东, 等. 500 m 口径球面射电望远镜瞬时抛物面拟合精度的预估与改善[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 2051-2059.
- [3] XUE Jianxing, WANG Qiming, GU Xuedong, et al. Estimation and improvement for fitting accuracy of instantaneous parabolic reflector in FAST[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 2051-2059.
- [4] 王启明, 高原, 朱明, 等. 500 米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.
- [5] WANG Qiming, GAO Yuan, ZHU Ming, et al. Key performance analysis of five-hundred-meter aperture spherical radio telescope reflective surface hydraulic actuator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(2): 183-191.
- [6] ZHU Ming, WANG Qiming, LEI Zheng, et al. Research for reliability of the actuator of FAST reflector based on FMECA[J]. International Conference on Reliability, 2015, 1(1): 623-627.
- [7] 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(11): 1561-1566.
- [6] 薛建兴, 雷政, 古学东, 等. 故障促动器快速拆换机构设计与研究[J]. *天文研究与技术*, 2015, 12(1): 102-108.
XUE Jianxing, LEI Zheng, GU Xuedong, et al. A study of a design of a mechanism for rapidly dismounting and assembling a faulty FAST actuator[J]. *Astronomical Research and Technology*, 2015, 12(1): 102-108.
- [7] 姚成玉, 赵静一, 张齐生, 等. 工液压油污染检测技术的评述[J]. *润滑与密封*, 2006, 10(1): 196-199.
YAO Chengyu, ZHAO Jingyi, ZHANG Qisheng, et al. Research on contamination monitoring technology in hydraulic fluid[J]. *Lubrication AND Ineering*, 2006, 10(1): 196-199.
- [8] 封艳秋. 液压污染控制技术的现状和发展[J]. *煤矿机械*, 2011, 23(1): 1-3.
FENG Yanqiu. Situation and development on technology of hydraulic contamination control[J]. *Coal Mine Machinery*, 2011, 23(1): 1-3.
- [9] 涂群章, 龚烈航, 王强, 等. 液压污染控制系统建模[J]. *中国机械工程*, 2001, 12(6): 629-631.
TU Qunzhang, GONG Liehang, WANG Qiang, et al. The model of hydraulic pollution control system[J]. *China Mechanical Engineering*, 2001, 12(6): 629-631.
- [10] 于建华. 掘进机液压系统污染控制数学模型的研究[J]. *煤矿机械*, 2014, 35(8): 55-58.
YU Jianhua. Study on Mathematical model of contamination control for hydraulic system of roadhead[J]. *Coal Mine Machinery*, 2014, 35(8): 55-58.
- [11] 刘清友, 唐洋, 谢冲, 等. 气体钻井液压系统污染物方
程及过滤装置[J]. *四川大学学报*, 2014, 46(2): 153-159.
LIU Qingyou, TANG Yang, XIE Chong, et al. Gas drilling fluid pressure system contaminants and filter equations[J]. *Journal of Sichuan University*, 2014, 46(2): 153-159.
- [12] 吴勇. 液压系统中油液污染控制方程的研究[J]. *煤炭学报*, 1995, 20(6): 647-652.
WU Yong. Equation for controlling contamination of hydraulic fluid in the hydraulic system[J]. *Journal of China Coal Society*, 1995, 20(6): 647-652.
- [13] 龚建华. 液压系统安装中冲洗滤芯的选择[J]. *安装*, 2010, 10(1): 42-44.
GONG Jianhua. Selection of washing filter element in installation of hydraulic system[J]. *Installation*, 2010, 10(1): 42-44.
- [14] 范家辉, 郑长松, 张小强, 等. 含污染颗粒液压滑阀不同间隙的流场与泄漏研究[J]. *润滑与密封*, 2016, 41(9): 16-21.
FAN Jiahui, ZHENG Changsong, ZHANG Xiaoqiang, et al. Study on flow field and leakage of different clearance hydraulic spool valve with polluted particles[J]. *Lubrication Engineering*, 2016, 41(9): 16-21.

作者简介: 雷政, 男, 1988 年出生, 博士研究生, 工程师。主要研究方向为机械设计、液压传动、可靠性工程。

E-mail: leizheng@nao.cas.cn

王启明, 男, 1961 年出生, 博士, 研究员。主要研究方向为天文技术与方法、机械制造、串并联机器人和机械结构动态特性分析。

E-mail: qimingwang@nao.cas.cn

甘恒谦, 男, 1978 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为射电天文技术方法, 接收机前端设计。

E-mail: ghq@nao.cas.cn

朱明, 男, 1985 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为结构健康监测, 可靠性工程。

E-mail: zhuming@nao.cas.cn

姜鹏(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士, 研究员。主要研究方向为工程力学、大型射电望远镜技术。

E-mail: pjjiang@bao.ac.cn