

机动性雷达液压系统可靠性分析*

赵新舟, 丁玉海, 陈世荣

(南京电子技术研究所, 江苏 南京 210039)

摘要:现代战争对机动性雷达液压系统的无故障工作能力提出了很高的要求,为了评估液压系统工作可靠性水平,文中以某机动性雷达为例,详细阐述了液压系统的工作原理和组成,划分出7个功能模块子系统,建立了系统的可靠性框图和数学模型,并根据该模型,对系统进行了可靠度计算,给出了可靠度仿真曲线和分析结果,最后,提出了提高液压系统可靠性的几种有效方法,对机动性雷达液压系统的可靠性设计具有重要的借鉴意义。

关键词:机动性雷达; 液压系统; 可靠性模型; 可靠度

中图分类号: TN956 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-5300(2013)02-0031-03

Reliability Analysis of Hydraulic System for Mobile Radar

ZHAO Xin-zhou, DING Yu-hai, CHEN Shi-rong

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: The high reliability of hydraulic system for mobile radar is required in the modern war. To estimate the system reliability, this paper describes the principle and composition of the hydraulic system in detail of a mobile radar which is divided into seven subsystems. The reliability block diagram and mathematic model are established. The reliability is calculated based on this model and the reliability results and simulating curves are analyzed in this paper. Some effective methods of improving the reliability of hydraulic system are put forward, which can be applied to the reliability design of the hydraulic system for mobile radar.

Key words: mobile radar; hydraulic system; reliability model; reliability

引言

在现代战争中,机动性雷达面对低空突防、巡航导弹及反辐射导弹等多重快速打击能力时,具有较强的生存能力和战斗力,因而受到了各国军事装备研制部门的高度重视。天线快速架撤时间是衡量雷达机动性的一项重要量化指标,而液压系统因其具有承载能力强、功率大、体积小、工作平稳、易于自动化等优点而在天线快速架撤技术中得到广泛应用。随着微电子技术的迅猛发展,电液伺服和数字式液压系统的应用越来越广泛,系统自动化程度和复杂性也不断提高,对系统的可靠性和无故障率要求也将更高。因此,对机动性雷达架撤液压系统进行可靠性研究,不断提高其可靠性水平是摆在我们面前的一项重要任务^[1]。

天线架撤液压系统可靠性研究包括可靠性设

计、可靠性预测、可靠性分析、可靠性试验等多个方面。文中利用系统可靠性分析技术对某雷达天线车液压系统的可靠性进行了计算与仿真,以提升系统可靠性水平,实现雷达液压系统全寿命周期设计和良好的经济效益。

1 液压系统的组成及工作原理

1.1 系统的组成及工作原理

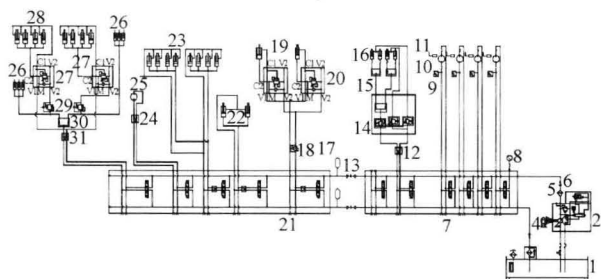
某机动性雷达天线车液压系统按功能可分为液压动力站、天线车调平、天线举升、天线边块折叠及锁紧、天线旋转、天线锁紧及副天线折叠共7个子系统。系统的工作原理如图1所示。

1.2 子系统的功能及组成

液压动力站为各执行子系统提供动力源,主要包括变量液压泵、油箱组件、溢流阀、电机、过滤器、单向

* 收稿日期:2012-11-16

阀及压力表;天线车调平系统实现天线装载平台的自动调平,主要包括控制阀组、压力传感器、液压马达、旋转编码器、液压锁、单向平衡阀、分集流阀及蛙腿油缸;天线举升系统实现天线工作与运输状态的转换,主要包括控制阀组、顺序阀、单向平衡阀及举升油缸;天线边块折叠及锁紧系统实现天线边块的展开和收藏,主要包括控制阀组、液压锁、分集流阀、顺序阀、单向平衡阀、折叠油缸及锁紧油缸;天线旋转系统实现天线阵面的 $\pm 90^\circ$ 旋转,主要包括控制阀组、液压锁及旋转马达;天线锁紧系统实现主天线工作状态锁紧和运输状态解锁,主要包括控制阀组、液压锁及锁紧油缸;副天线折叠实现副天线工作与运输状态的转换,主要包括控制阀组、液压锁及折叠油缸。



1. 油箱组件; 2. 变量液压泵; 3. 溢流阀; 4. 电机;
5. 过滤器; 6. 单向阀; 7. 控制阀组; 8. 压力表;
9. 压力传感器; 10. 调平液压马达; 11. 旋转编码器;
12. 液压锁; 13. 快速接头; 14. 单向平衡阀; 15. 分集流阀;
16. 蛙腿油缸; 17. 蓄能器; 18. 顺序阀; 19. 举升油缸;
20. 单向平衡阀; 21. 控制阀组; 22. 副天线折叠油缸;
23. 天线锁紧油缸; 24. 液压锁; 25. 旋转马达;
26. 运输锁紧油缸; 27. 单向平衡阀; 28. 边块折叠油缸;
29. 顺序阀; 30. 分集流阀; 31. 液压锁

图1 某机动性雷达液压系统工作原理

2 液压系统可靠性框图及数学模型

2.1 液压系统可靠性框图

液压系统典型的可靠性模型主要有串联系统、并联系统、贮备系统、表决系统及组合系统。该雷达液压系统可靠性模型属于串联与表决的组合系统^[2]。根据该雷达液压系统原理图,建立各子系统的逻辑关系,可得到系统可靠性框图,如图2所示。

2.2 液压系统可靠性模型

系统中任意一个元件失效都会使整个系统失效称为串联系统。设各元件的失效互相独立,则由 n 个元件组成的串联系统的可靠度为^[2]

$$R_s(t) = R_1(t) R_2(t) \cdots R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

式中: R_s 为串联系统的可靠度; $R_i(t)$ 为元件 i 的可靠度; t 为工作时间。

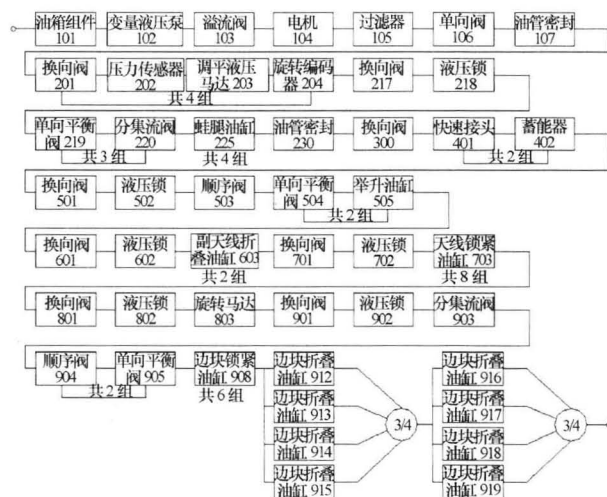


图2 某机动性雷达液压系统可靠性框图

系统中至少有 k 个元件正常工作时,系统就能正常工作称为 n 中取 k ($1 \leq k \leq n$) 表决系统。由 n 个相同元件组成且相互独立的表决系统可靠度为^[2]

$$R_s(t) = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} R_i(t) (1 - R_i(t))^{n-i}$$

系统可靠性模型可等效为7个子系统的串联系统模型。雷达天线车液压系统在整个寿命期内,其失效率与时间关系可用“浴盆曲线”表示。在正常工作阶段,失效率为一常数 λ ,寿命分布函数采用指数分布,可靠度函数为^[2]

$$R(t) = \int_t^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt = e^{-\lambda t}$$

因此,系统可靠度为

$$R_s(t) = R_1(t) R_2(t) \cdots R_7(t) = e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot e^{-\lambda_3 t} \cdot e^{-\lambda_4 t} \cdot e^{-\lambda_5 t} \cdot (4e^{-3\lambda_6 t} - 3e^{-4\lambda_6 t})^2$$

3 液压系统可靠性分析

3.1 液压元件可靠度的确定

液压元件的工作失效率为^[3]

$$\lambda = \lambda_0 \cdot K \cdot D$$

式中: λ_0 为基本失效率,是元器件在标准试验条件下测得的数据; K 为环境因子; D 为综合考虑液压元件应用、测试和验收情况而得到的降额因子。

有些液压部件的失效率还需结合其可靠性模型计算结果来确定,如液压泵可采用应力-强度干涉模型计算其磨损、疲劳失效率。雷达液压系统元件基本失效率见表1。

表1 液压元件的基本失效率 λ_0 $10^{-6}h$

名称	上限	平均	下限
油箱组件	2.52	1.5	0.48
液压泵	24.4	10	0.2
溢流阀	14.1	5.7	3.27
电机	0.58	0.3	0.11
过滤器	0.8	0.3	0.045
单向阀	8.1	5	2.2
软管和接头	2.01	0.03	0.012
换向阀	19.7	11	2.27
压力传感器	7.8	4	0.135
调平液压马达	7.15	4.3	1.45
旋转变压器	4.5	1	0.08
液压锁	24	8.1	2.3
单向平衡阀	25	13.5	8.4
分集流阀	30	15	2
快速接头	2.01	0.1	0.012
蛙腿油缸	0.12	0.008	0.005
蓄能器	19.3	7.2	0.4
顺序阀	8.1	4.6	2.1
举升油缸	0.12	0.008	0.005
副天线折叠油缸	0.5	0.02	0.005
天线锁紧油缸	0.12	0.008	0.005
旋转马达	7.15	4.3	1.45
边块锁紧油缸	0.12	0.008	0.005
边块折叠油缸	0.4	0.01	0.005

3.2 雷达液压系统可靠度计算

该雷达天线架撤一次液压系统工作总时间 t 为 12.5 min, 液压各子系统工作时间 t 分配为: 液压动力站 12.5 min, 天线车调平 6 min ($0.48t$), 天线举升 4 min ($0.32t$), 天线边块折叠及锁紧 1 min ($0.08t$), 天线旋转 0.7 min ($0.08t$), 天线锁紧 0.3 min ($0.024t$), 副天线折叠 0.5 min ($0.04t$)。取 $K=10$, $D=0.7$, 经计算, 各子系统可靠度为

$$R_1(t) = e^{-KD\lambda_{01}t_1} = e^{-172.2t \times 10^{-6}}$$

$$R_2(t) = e^{-KD\lambda_{02}t_2} = e^{-628.9t \times 10^{-6}}$$

$$R_3(t) = e^{-KD\lambda_{03}t_3} = e^{-146.3t \times 10^{-6}}$$

$$R_4(t) = e^{-KD\lambda_{04}t_4} = e^{-40t \times 10^{-6}} (4e^{-0.12t \times 10^{-6}} - 3e^{-0.16t \times 10^{-6}})^2$$

$$R_5(t) = e^{-KD\lambda_{05}t_5} = e^{-13.3t \times 10^{-6}}$$

$$R_6(t) = e^{-KD\lambda_{06}t_6} = e^{-3.4t \times 10^{-6}}$$

$$R_7(t) = e^{-KD\lambda_{07}t_7} = e^{-5.5t \times 10^{-6}}$$

因此, 雷达液压系统可靠度为

$$R_s(t) = e^{-1009.6t \times 10^{-6}} (4e^{-0.12t \times 10^{-6}} - 3e^{-0.16t \times 10^{-6}})^2$$

系统平均无故障工作时间为

$$MTBF = \int_0^{\infty} R_s(t) dt = 990 (h)$$

采用 MATLAB 进行可靠性仿真^[4], 各子系统可靠度曲线如图 3 所示, 雷达液压系统可靠度曲线如图 4 所示。

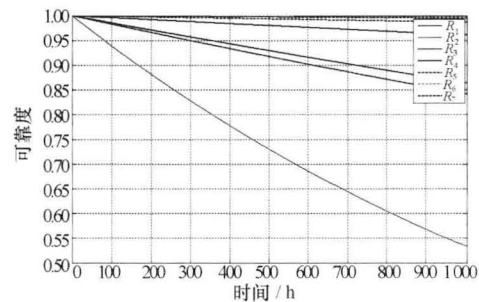


图3 各子系统可靠度曲线

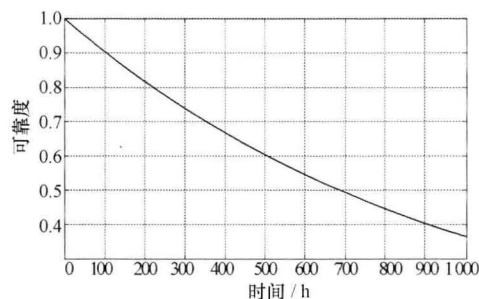


图4 雷达液压系统可靠度曲线

由图 2 可知, 天线车调平子系统包含的液压元件多, 工作时间长, 其可靠度最低, 边块折叠锁紧系统采用表决系统后, 油缸组可靠度高于串联系统, 天线锁紧和副天线折叠可靠度最高。

根据指标要求, 液压系统可靠度最低不小于 0.9, 因此雷达液压系统工作 100 h 需要进行维护保养, 系统无故障工作时间 990 h 能满足系统 20 年寿命的可靠性指标要求。

4 结束语

机动性雷达液压系统可靠性建模和仿真计算结果表明, 液压系统多属于串联系统, 各种阀组、软管和接头、液压缸较多, 系统可靠度受液压系统复杂程度影响大。为进一步提高系统可靠度, 还需要采取以下措施:

- 1) 提高使用频数多或关键路径上的重要元件可靠度;
- 2) 在满足功能要求的前提下, 简化系统设计, 减少串联环节和元件数量;
- 3) 采用冗余或表决系统, 提高关键子系统可靠性;
- 4) 加强雷达液压系统装配和使用过程的污染防护与控制;

(下转第 40 页)

参考文献

- [1] NAGATUMA H. Development of an emergency medical video multiplexing transport system(EMTS): aiming at the nation-wide prehospital care in ambulance [J]. Journal of Medical System, 2003, 27(3): 225-232.
- [2] 李丽娟,刁天喜,王松俊. 美军非战争军事行动医疗后送[J]. 解放军医院管理杂志, 2010, 17(4): 381-382.
- [3] 宋保维. 系统可靠性设计与分析[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.
- [4] 卢明银,徐人平. 系统可靠性[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [5] SANDBORN P A, PECHT M G. Introduction to special section on electronic systems prognostics and health management[J]. Microelectronics Reliability, 2007, 47(12): 1847-1848.
- [6] SANDBORN P A, WILKINSON C. A maintenance planning and business case development model for the application of prognostics and health management(PHM) to electronic systems[J]. Microelectronics Reliability, 2007, 47(12): 1889-1901.
- [7] SCARF P A. On the application of mathematical models in maintenance [J]. European Journal of Operational Research, 1997, 99(3): 493-506.
- [8] 常俊杰,叶舒. 基于冗余技术的车载网络系统可靠性设计[J]. 指挥信息系统与技术, 2012, 3(2): 49-53.
- [9] 巴海涛,汤扣林,许锐锋. 计维修指挥信息系统可靠性设计[J]. 指挥信息系统与技术, 2010, 1(4): 32-37.

白芳(1979-),女,博士,工程师,主要研究方向为系统集成设计及健康管理研究。

赵亚维(1962-),男,研究员高工,主要研究方向为军、民用机动式指控系统电子设备系统集成。

周远远(1977-),男,高级工程师,主要研究方向为系统集成设计。

(上接第33页)

5) 进行环境应力筛选试验和可靠性增长试验,以改正设计和制造中的缺陷,提高液压系统可靠性;

6) 联合伺服控制系统进行整机架撤可靠性分析,进一步提高雷达机动系统的可靠性水平。

参考文献

- [1] 程登元,赵德昌. 地面高机动雷达液压系统研究[J]. 电子机械工程, 2007, 23(4): 37-40.
- [2] 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.
- [3] O'CONNOR P D T. Practical reliability engineering[M].

李莉,译. 北京: 电子工业出版社, 2005.

- [4] 尚涛,谢龙汉,杜如虚. MATLAB 工程计算及分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.

赵新舟(1974-),男,硕士,高级工程师,主要从事地面雷达结构总体设计工作。

丁玉海(1975-),男,硕士,高级工程师,主要从事地面雷达结构总体设计工作。

陈世荣(1979-),男,博士,工程师,主要从事地面雷达结构总体设计工作。

(上接第36页)

形式对其进行了模拟。在缝隙波导真实件模态试验验证的基础上,对波导管进行参数化建模,进而迭代求解出截面尺寸。

通过对比发现,2种波导的外形尺寸、接口、倒角、壁厚、游离效果、表面热特性参数完全一样。其质量特性、转动惯量偏差为5%,振动基频偏差为2%,热变形偏差为0.23%,完全满足结构星的振动试验、热平衡试验、热变形试验以及低温错位展开试验要求,同时大大缩短了加工周期、降低生产成本。

参考文献

- [1] 王志刚,杨听广,汪伟. 星载 SAR 微带天线和波导裂缝天线的结构设计[J]. 电子机械工程, 2011, 27(3): 40-43.
- [2] 王大镇,冯培锋,赵清亮,等. 航天铝基复合材料零部件

超精密加工技术研究[J]. 宇航学报, 2006, 27(6): 1341-1346.

- [3] BERMAN A, WEI F. Automated dynamic analytical model improvement[R]. Washington, USA: NASA NASA-3452, 1981.

- [4] CHA P D, GU W. Model updating using an incomplete set of experimental modes[J]. Journal of Sound & Vibration, 2000, 233(4): 587-600.

- [5] 胡海岩. 机械振动基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.

汪奕(1975-),男,高级工程师,主要从事天线微波结构设计工作。

孙为民(1981-),男,博士,工程师,主要从事天线阵面结构设计工作。