

考虑结构多失效模式的电动舵机系统可靠性预计

周凌, 章家保, 李艳辉, 韩景壮

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 针对以往试验中出现多种模式的结构失效现象,在对新型舵机系统进行可靠性预计时,有必要在传统电子学预计基础上,加入多失效模式下结构可靠性预计。首先,采用专家评分分配法将系统可靠性指标分配到相应模块与组件,然后由元器件计数法、均值一次二阶矩法分别得到电子学部分与各失效模式下结构部分的可靠性指标,进而得到系统的可靠性指标。从预计结果看出,设计方案达到总体分配到舵机系统的可靠性指标要求,在考虑滚珠丝杆机构多失效模式下的可靠度要低于其他电子学部分,与以往试验中结构失效多于电子学部分的现象较为吻合。

关键词: 导弹; 电动舵机; 可靠性预计; 多失效模式; 结构可靠性

中图分类号: V421.6; TB114.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)11-0075-04

System Reliability Prediction of Electromechanical Actuator Under Structure Multi-Failure Mode

ZHOU Ling, ZHANG Jia-bao, LI Yan-hui, HAN Jing-zhuang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In view of the multiple structure failure modes appeared previously in experiments, we added a structure reliability prediction under multi-failure mode based on the traditional electronics prediction when implementing system reliability prediction to a new type actuator system. Firstly, the Expert Grading Allocation Method was used to allocate system reliability index to the corresponding modules and components. Then, the reliability index of electronic components was obtained by Component Counting Method, and the structure reliability index under each failure mode was obtained by FOSM method. Thus the system reliability index was obtained. The prediction results show that: 1) The reliability indexes of design scheme achieve the requirement of reliability index allocated for the missile; and 2) The reliability index of ball bearing screw under multi-failure mode is lower than that of the other electronics modules, which is consistent with the previous failure phenomenon in experiments.

Key words: missile; electromechanical actuator; reliability prediction; multi-failure mode; structure reliability

0 引言

当前武器装备的可靠性越来越受重视,作为导弹上重要设备的电动舵机分系统,其工作是否可靠决定了导弹执行任务的成败,因而有必要对新型舵机系统在方案阶段就进行可靠性建模、分配与预计,通过定量分析准确度量其可靠性水平,以判断是否达到总体分

配的可靠性指标要求。

目前,对电动舵机系统的研究方向主要集中在系统模型辨识^[1]、非线性模型的参数辨识^[2]以及现代控制算法在电动舵机上的应用等方面^[3],但对其进行可靠性评估的研究较少,并且在可靠性预计中考虑机械结构可靠性的研究更少。文献[4]对谐波齿轮电动舵机进行可靠性预计时考虑了各零件复合疲劳应力下的可靠性,对滚珠丝杆电动舵机可靠性预计时只考虑了其疲劳可靠度^[5],未考虑在多种失效模式下的可靠度计算。

针对以往试验过程中电动舵机系统出现滚珠丝杆机构失效且呈现多种失效模式的现象,本文不仅进行电子学系统的可靠性预计,并且在滚珠丝杆的屈曲、

收稿日期:2014-01-10

修回日期:2014-03-15

基金项目:国家自然科学基金(51305421);吉林省科技发展计划(20140520137JH)

作者简介:周凌(1984—),男,安徽黄山人,博士,副研究员,研究方向为飞行器可靠性工程。

转速、拉伸强度、静载、动载校核基础上计算其多失效模式下的结构可靠度,进而得到更加准确的舵机系统可靠度。

1 可靠性模型建立

先根据新型电动舵机系统的组成建立可靠性模型,图 1 为舵机系统的组成示意图。

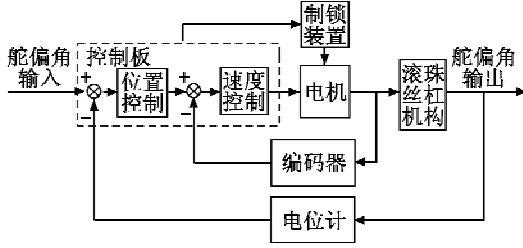


图 1 电动舵机系统组成图

Fig.1 Structure diagram of electromechanical rudder system

由图 1 可知,电动舵机系统由控制板、电位计、制锁装置、电机、编码器、滚珠丝杆机构组成,它们之间为串联关系,图 2 所示为舵机系统的可靠性框图。

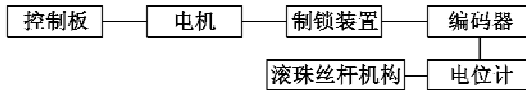


图 2 舵机系统可靠性框图

Fig.2 Reliability diagram of rudder system

2 可靠性指标分配

导弹总体分配到电动舵机分系统的可靠性指标为 0.9960,下文采用评分分配法将 0.9960 分配到下一级的组件或模块。

评分分配法是设计专家依据自己的经验,对各组成部分的复杂度、技术成熟度、使用环境条件、工作时间 4 个方面进行打分,然后由加权公式分配得到各组成部分的可靠度,评分原则见文献[6],这里不再赘述,各组成部分分配得到的可靠度算式为

$$R_i \approx 1 - (1 - R_s)c_i \tag{1}$$

式中: R_i 为分配给每个组件或模块的可靠度; R_s 为舵机系统要求的可靠度; c_i 为第 i 个组件或模块的评分系数。 c_i 表达式为

$$c_i = \frac{w_i}{w} \tag{2}$$

式中: w_i 为第 i 个组成部分的评分数值; w 为舵机系统的总评分数值。其中, w_i 的表达式为

$$w_i = \prod_{j=1}^4 r_{ij} \tag{3}$$

式中: r_{ij} 为第 i 个组成部分的第 j 个因素的评分数值, j 取 1 为复杂度,2 为技术成熟度,3 为使用环境条件,4

为工作时间。其中, w 的表达式为

$$w = \sum_{i=1}^n w_i \tag{4}$$

表 1 给出了电动舵机各组成部分专家评分结果与分配得到的可靠度要求。

表 1 可靠性指标分配表

Table 1 Reliability index assignment list

名称	复杂度 r_{d1}	技术成熟水平 r_{t2}	环境条件 r_{e3}	工作时间 r_{t4}	可靠度 $R_i = 1 - 0.0040c_i$
控制板	10	2	4	10	0.9990
电位计	5	3	4	10	0.9993
制锁装置	5	2	4	10	0.9995
电机	6	1	4	10	0.9997
编码器	5	1	4	10	0.9998
滚珠丝杆机构	7	3	5	10	0.9987

$$w = \sum_{i=1}^6 w_i = 800 + 600 + 400 + 240 + 200 + 1050 = 3290 \quad \prod_{i=1}^6 R_i = 0.9960$$

在可靠性指标分配之后,进行舵机系统可靠性指标预计,验证预计值是否满足分配的指标要求。

3 可靠性指标预计

从图 2 可以看出,电动舵机系统由电子学模块与滚珠丝杆机构组成,因而,在得到舵机系统可靠性指标之前需先分别对电子学模块与滚珠丝杆机构进行可靠性预计。

3.1 电子学模块可靠性预计

目前对电子产品的可靠性评估有仿真估算^[7]、试验验证^[8]或仿真与试验验证相结合的方法^[9],但在新型舵机的方案设计阶段,由于不具备试验样机、缺乏仿真输入所需的描述随机变量分布的统计数据和元器件的电应力数据,因而,采用 GJB 299C 元器件计数法预计舵机电子学模块的可靠性指标^[10]。

新型电动舵机系统主要经历室外测试(GF2,累积工作时间 120 min),导弹发射(ML,工作时间 100 ms),导弹飞行(MF,工作时间 10 min)3 个典型环境阶段。表 2~表 4 给出了舵机电子学模块在上述 3 个典型环境下的失效率预计值(控制板只给出了总失效率,未给出元器件详细预计列表)。

表 2 GF2 环境电子学模块预计表

Table 2 Prediction list of electronic module at GF2 phase

名称	预计依据	数量	失效率/ ($10^{-6} \cdot h^{-1}$)	失效率分布
控制板	299C 进口件计数法	1	23.5636	0.7703
电位计	299C 计数法	1	6.7432	0.2204
制锁装置	299C 进口件计数法	1	0.2100	0.0069
电机	299C 进口件计数法	1	0.0500	0.0016
编码器	299C 进口件计数法	1	0.0240	0.0008

表 3 ML 环境电子学模块预计表

Table 3 Prediction list of electronic module at ML phase

名称	预计依据	数量	失效率/ (10 ⁻⁶ ·h ⁻¹)	失效率 分布
控制板	299C 进口件计数法	1	126.3916	0.7598
电位计	299C 计数法	1	37.3070	0.2243
制锁装置	299C 进口件计数法	1	1.9689	0.0118
电机	299C 进口件计数法	1	0.4325	0.0026
编码器	299C 进口件计数法	1	0.2496	0.0015

表 4 MF 环境电子学模块预计表

Table 4 Prediction list of electronic module at MF phase

名称	预计依据	数量	失效率/ (10 ⁻⁶ ·h ⁻¹)	失效率 分布
控制板	299C 进口件计数法	1	61.4550	0.7993
电位计	299C 计数法	1	14.0781	0.1831
制锁装置	299C 进口件计数法	1	0.9843	0.0128
电机	299C 进口件计数法	1	0.2200	0.0029
编码器	299C 进口件计数法	1	0.1500	0.0019

从预计的结果可以看出,控制板的失效率最高,在各环境下占电子学模块总失效率的分布值最大,这是由于控制板的元器件种类与数量相对其他电子学模块较多造成的,失效率分布情况与可靠性指标分配的结果一致,说明指标分配是合理的。

得到各电子学模块在各环境条件下的失效率,则可由下式求解其可靠度

$$R_{电} = R_{GF2} R_{ML} R_{MF} = e^{-\lambda_{GF2} t} e^{-\lambda_{ML} t} e^{-\lambda_{MF} t} \quad (5)$$

电子学模块可靠度计算值如表 5 所示。

表 5 电子学模块可靠度

Table 5 Reliability degree of electronic modules

名称	$\lambda_i/10^{-6}$			$R_{电}$
	GF2	ML	MF	
控制板	47.1272	0.0035	10.2425	0.99994
电位计	13.4864	0.0010	2.3463	0.99998
制锁装置	0.4200	5.4692E-5	0.1641	0.9999994
电机	0.1000	1.2014E-5	0.0367	0.9999999
编码器	0.0480	6.9333E-6	0.0250	0.99999993

3.2 多失效模式结构系统可靠性预计

针对滚珠丝杠机构可能出现的屈曲、转速、拉伸、静载、动载等多种失效模式,先建立各失效模式下的安全余量方程^[11]。

1) 屈曲安全余量方程 M_1 。

$$M_1 = c \frac{d_0^4}{l^2} \times 10^4 - \frac{(M_h + M_j) \times 1.5}{i_2} \quad (6)$$

式中: c 为与丝杠支承方式有关的临界载荷系数; d_0 为丝杠的公称直径; l 为丝杠的支承距离; M_h 为铰链力矩; M_j 为惯性力矩; i_2 为曲柄滑块机构减速比。

2) 转速安全余量方程 M_2 。

$$M_2 = f \frac{d_0}{l^2} \times 10^7 - n_{max} \quad (7)$$

式中: f 为与丝杠支承方式有关的临界转速系数; n_{max} 为丝杠的最大转速。

3) 拉伸安全余量方程 M_3 。

$$M_3 = [\sigma] \frac{\pi d_1^2}{4} - \frac{(M_h + M_j) \times 1.5}{i_2} \quad (8)$$

式中: $[\sigma]$ 为丝杠的许用拉伸应力; d_1 为丝杠的内径。

4) 静载安全余量方程 M_4 。

$$M_4 = C_{0a} - f_d \frac{(M_h + M_j) \times 1.5}{i_2} \quad (9)$$

式中: C_{0a} 为额定静载荷; f_d 为静态安全系数。

5) 动载安全余量方程 M_5 。

$$M_5 = C_a - F_m f_w \sqrt[3]{60 n_m L_k} \times 10^{-2} \quad (10)$$

式中: C_a 为额定动载荷; F_m 为当量载荷; f_w 为载荷系数; n_m 为当量转速; L_k 为使用寿命。

然后计算在各失效模式下的可靠性指标 β 。表 6 列出安全余量方程中正态分布随机变量的均值与标准差。

表 6 均值与标准差

Table 6 Mean value and standard deviation

名称	均值 μ	标准差 σ
c	20.3	1.2586
$M_h/(N \cdot m)$	10.6	0.8667
f	21.9	0.7300
n_{max}/min^{-1}	9000	300
$[\sigma]/\text{MPa}$	147	9.1140
C_{0a}/N	2116.8	70.56
C_a/N	1035.9	34.53
F_m/N	148	4.9333

从式(6)~(10)可以看出,上述安全余量方程均为随机变量的线性函数,则可得到滚珠丝杠在各失效模式下的可靠性指标 β 。

1) 屈曲可靠性指标 β_1 为

$$\beta_1 = \frac{-6.3 + 1.706 \times 10^4 \mu_c - 75 \mu_{M_h}}{\sqrt{(1.706 \times 10^4)^2 \sigma_c^2 + 75^2 \sigma_{M_h}^2}} = 16.0916 \quad (11)$$

2) 转速可靠性指标 β_2 为

$$\beta_2 = \frac{3.3 \times 10^4 \mu_f - \mu_{n_{max}}}{\sqrt{(3.3 \times 10^4)^2 \sigma_f^2 + \sigma_{n_{max}}^2}} = 29.6241 \quad (12)$$

3) 拉伸可靠性指标 β_3 为

$$\beta_3 = \frac{-6.3 + 40.715 \mu_{[\sigma]} - 75 \mu_{M_h}}{\sqrt{(40.715)^2 \sigma_{[\sigma]}^2 + 75^2 \sigma_{M_h}^2}} = 13.7601 \quad (13)$$

4) 静载可靠性指标 β_4 为

$$\beta_4 = \frac{-12.6 + \mu_{C_{0a}} - 150 \mu_{M_h}}{\sqrt{\sigma_{C_{0a}}^2 + 150^2 \sigma_{M_h}^2}} = 3.4762 \quad (14)$$

5) 动载可靠性指标 β_5 为

$$\beta_5 = \frac{\mu_{C_a} - 0.8434 \mu_{F_m}}{\sqrt{\sigma_{C_a}^2 + 0.8434^2 \sigma_{F_m}^2}} = 26.1956 \quad (15)$$

对于滚珠丝杠机构,以上任一种结构的失效形式

均不允许,故其为串联关系,滚珠丝杆结构系统可靠度为^[12]

$$R_{S3} = \prod_{i=1}^5 \Phi(\beta_i) = 0.9997。 \quad (16)$$

3.3 舵机系统可靠性预计

在分别得到电子学模块和滚珠丝杆机构部分的可靠性指标之后,即可得到电动舵机串联系统的可靠性指标,如表7所示。

表7 舵机系统可靠性分配与预计值
Table 7 Assigned and predicted value

随机变量	分配值	预计值
控制板	0.9990	0.99994
电位计	0.9993	0.99998
制锁装置	0.9995	0.9999994
电机	0.9997	0.9999999
编码器	0.9998	0.99999993
滚珠丝杆机构	0.9987	0.9997
电动舵机系统	0.9960	0.9996

可以看出,电动舵机系统及其各组成部分的可靠性指标预计值均达到了导弹总体分配的可靠性指标要求。

另外,滚珠丝杆机构可靠度的分配值与预计值均要低于其他电子学模块,这与以往机电产品可靠性预计时经常忽略结构可靠度预计不同,这是因为:1) 电动舵机的电子学元器件种类与数量相对其他机电产品较少;2) 随着工业水平的提升,目前元器件的成熟度较高,失效率较以往有很大程度降低;3) 滚珠丝杆机构由于存在原材料、制造、装配工艺等因素影响的随机干扰,且在以往试验中出现多种模式的结构失效问题,因而,在舵机系统可靠性预计时考虑多失效模式下的滚珠丝杆机构的可靠性是必要的。

4 结束语

从对电动舵机系统的可靠性指标分配与预计结果可以得出以下结论:

1) 电动舵机系统及其组成的预计值均超过了分配值,达到了导弹总体分配的可靠性指标要求;

2) 在对滚珠丝杆机构进行可靠性预计时,分别得到屈曲、转速、拉伸、静载、动载等各失效模式下的可靠性指标,进而得到多失效模式下结构串联系统的可靠度,更贴近实际工况要求;

3) 滚珠丝杆机构的可靠度低于其他电子学模块,因而有必要在电动舵机系统可靠性预计时考虑多失效模式下的滚珠丝杆机构的可靠性。

在进行滚珠丝杆机构的可靠度计算时仍存在一些不足,如只考虑了滚珠丝杆,未考虑曲柄、联轴器与输出轴等其他机械结构;安全余量方程建立的基础是经验公式,未在较为精确的有限元分析基础上进行可靠

度计算,这些需在以后的研究工作中进一步改进。

参考文献

- [1] 章家保,刘慧,贾宏光,等. 电动舵机伺服系统的模型辨识及其校正[J]. 光学精密工程,2008,16(10):1971-1976.
ZHANG J B, LIU H, JIA H G, et al. Model identification and corrector design for servo system of electromechanical actuator[J]. Optics Precision Engineering, 2008, 16(10): 1971-1976.
- [2] 肖前进,贾宏光,章家保,等. 电动舵机伺服系统非线性辨识及补偿[J]. 光学精密工程,2013,21(8):2038-2047.
XIAO Q J, JIA H G, ZHANG J B, et al. Identification and compensation of nonlinearity for electromechanical actuator servo system [J]. Optics Precision Engineering, 2013, 21(8):2038-2047.
- [3] 张明月,章家保,丁同超,等. 电动舵机速度环改进自抗扰控制研究[J]. 计算机测量与控制,2013,21(9):2457-2460.
ZHANG M Y, ZHANG J B, DING T C, et al. Controller design of speed loop of EMA based on improved ADRC[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(9): 2457-2460.
- [4] 陈瑜. BTT 导弹电动舵机系统的可行性与可靠性分析[J]. 战术导弹控制技术,2003(2):38-40.
CHEN Y. Analysis of the feasibility and reliability of electromechanical actuator for BTT missile[J]. Control Technology of Tactical Missile, 2003(2):38-40.
- [5] 陈瑜. 导弹电动舵机系统的可靠性设计和预测[J]. 航天控制,1994,2(3):37-43.
CHEN Y. The reliability design and prediction of electrodynamic rudder system of missile [J]. Aerospace Control, 1994, 2(3):37-43.
- [6] 龚庆祥. 型号可靠性工程手册[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
GONG Q X. Type reliability engineering handbook [M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2007.
- [7] 晁代宏,马静,陈淑英,等. 基于性能退化的卫星用光纤陀螺可靠性评估[J]. 红外与激光工程,2011,40(9):1763-1767.
CHAO D H, MA J, CHEN S Y, et al. Reliability assessment of FOGs used for satellite from degradation data[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(9):1763-1767.
- [8] 刘大福,吴礼刚,徐国森,等. 长波光导 HgCdTe 红外探测器的可靠性[J]. 红外与激光工程,2006,42(5):1322-1329.

(下转第 105 页)

- LIU B X, CHANG G, GE T M. A model construction military airlift power demand[J]. Journal of Academy of Military Traffic, 2002, 4(2):55-58.
- [3] 孟冲,宋华文,陈柏松. 基于 0-1 整数线性规划的军事空运装载优化算法[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(3):500-505.
- MENG C, SONG H W, CHEN B S. Optimization algorithm of military airlift loading based on 0-1 integer linear programming[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(3):500-505.
- [4] MOGEAU M, BES C. Optimization of aircraft container loading[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(1):140-150.
- [5] HEIDELBERG K R, PARNELL G S, AMES J E IV. Automated air load planning [J]. Naval Research Logistics, 1999:654-658.
- [6] 刘宁君,王立新,潘文俊. 运输机群货物装载方案生成方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(6):751-755.
- LIU N J, WANG L X, PAN W J. Optimal method of transport aircraft fleet cargo loading[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(6):751-755.
- [7] 邱贞玮. 大型运输机与战略投送能力建设[J]. 航空世界, 2013(4):10-12.
- QIU Z W. Large transport aircraft and strategic project construction[J]. Aviation World, 2013(4):10-12.
- [8] 张克举,孙波,刘天宝. 航空兵成建制空运转场集约化装载方案研究[J]. 科技视界, 2012(28):76-77.
- ZHANG K J, SUN B, LIU T B. A research on transport aircraft demand and configuration model for aviation regiment transportation[J]. Science & Technology Vision, 2012(28):76-77.
- [9] 袁媛,樊治平,刘洋. 突发事件应急救援人员的派遣模型研究[J]. 中国管理科学, 2013, 21(2):152-156.
- YUAN Y, FAN Z P, LIU Y. Study on the model for the assignment of rescue workers in emergency rescue[J]. Chinese Journal of Management Science, 2013, 21(2):152-156.
- [10] 张最良. 军事战略运筹分析方法[M]. 北京:军事科学出版社, 2009:266-269.
- ZHANG Z L. Methods for conducting military strategic operational analysis [M]. Beijing: Military Science Press, 2009:266-269.

(上接第 78 页)

- LIU D F, WU L G, XU G S, et al. Reliability of long-wavelength PC HgCdTe IR detectors [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 42(5):1322-1329.
- [9] 范广宇,龚海梅,李言谨,等. 红外焦平面器件温度循环可靠性研究[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4):607-610.
- FAN G Y, GONG H M, LI Y J, et al. Temperature-cycling-reliability of IRFPA device[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(4):607-610.
- [10] 中国人民解放军总装备部. GJB/Z 299C-2006 电子设备可靠性预计手册[S]. 北京:总装备部军标出版发行部, 2007.
- General Armament Department of PLA. GJB/Z 299C-2006 Reliability prediction handbook for electronic equipment [S]. Beijing: Military Standard Publication Dep of GAD, 2007.
- [11] 王善,何健. 导弹结构可靠性[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2002.
- WANG S, HE J. Missile structure reliability [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2002.
- [12] 安伟光,蔡荫林,陈卫东. 随机结构系统可靠性分析与优化设计[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2005.
- AN W G, CAI Y L, CHEN W D. Reliability analysis and optimization design of random structure system [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2005.

(上接第 87 页)

- RONG H F, YU C F. FPGA validation based on embryonic arrays fault tolerance system[J]. Journal of Fudan University: Natural Science, 2006, 45(1):127-130.
- [5] 赵倩,俞承芳. 胚胎阵列容错系统中单细胞替换的实现[J]. 复旦学报:自然科学版, 2006, 45(4):550-554.
- ZHAO Q, YU C F. Realization of cell-elimination in fault tolerance system with embryonic array[J]. Journal of Fudan University: Natural Science, 2006, 45(4):550-554.
- [6] 王南天,钱彦岭,李岳,等. 胚胎型在线自修复 FIR 滤波器研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6):1385-1391.
- WANG N T, QIAN Y L, LI Y, et al. Study of embryonic type on-line self-healing FIR filters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(6):1385-1391.
- [7] 徐佳庆,窦勇,吕启,等. 电子组织:一种具有自适应能力的可重构仿生硬件结构[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(9):2005-2017.
- XU J Q, DOU Y, LÜ Q, et al. eTissue: an adaptive reconfigurable bio-inspired hardware architecture[J]. Journal of Computer Research and Development, 2012, 49(9):2005-2017.