

基于 GO 法的电动静液作动器可靠性分析

金霞^{*1,2}, 段富海¹

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 朝阳师范高等专科学校, 辽宁 朝阳 122000)

摘要: 采用与故障树分析(FTA)对比法,研究了电动静液作动器(EHA)系统基于 GO 法的可靠性分析与安全评估方法,阐述了 GO 法的具体分析步骤,构建了 EHA 系统的 GO 图模型,分别利用 GO 法和 FTA 法对 EHA 系统进行了可靠性定量分析,并将结果对比,验证了 GO 法在 EHA 系统可靠性分析和安全评价中的可用性与正确性。

关键词: 电动静液作动器;可靠性分析;GO 法;FTA 法

中图分类号: TB114.3 **文献标志码:** A

0 引言

机载作动系统是飞机操纵与控制系统的的重要组成部分和内回路,控制着飞机升降舵、副翼、方向舵、扰流板、减速板、前缘缝翼等的动作与位置,对实现飞行姿态和飞行轨迹控制起着决定性作用.它一旦出现故障将有可能造成重大的安全事故^[1-2].所以,从控制增稳操纵系统发展到电传操纵系统,再发展到光传操纵系统,关键问题是作动系统的安全性及可靠性问题.

电动静液作动器(electro hydrostatic actuator, EHA)的先进性已经在 F-18、F-35 等战斗机及 A340、A380、Boeing787 等民用飞机中得到验证^[3-5].EHA 是一个由驱动电路、电机、泵、液压回路、作动缸等组成的一种高性能的闭合液压传动作动系统,是飞机先进作动器的典型代表^[6].其内部包含了电流和液流,有提前、成功、失败等多种状态,是一个有复杂时序的机电液一体化典型系统,是一个组成部件多、技术复杂、知识密集型的综合化高技术产品.

按照美军标 MIL-F-9490D 标准的规定,要使电传操纵系统具有与不可逆助力操纵系统相当的安全可靠性,其可靠性指标应为 $1.0 \times 10^{-7}/\text{h}$ 左右^[7].但是,根据目前电子元件可靠性水平,单通

道 EHA 系统的故障率约为 $1.0 \times 10^{-4}/\text{h}$ ^[8],所以国内外飞机 EHA 系统都采用了余度设计.文献[2]的进一步研究表明,EHA 的余度受操纵方式、元件的失效模式、失效率和设计所涵盖错误等的严重影响,并且这种靠增加余度来提高系统可靠性的方法是以增加系统复杂程度、增加起飞重量和牺牲性能为代价的.因此分析 EHA 的可靠性具有复杂性,且在实际航空工程中,EHA 的可靠性验证困难,故进一步分析和研究提高 EHA 的可靠性方法具有重大意义.

GO 法是美国军方用于分析武器系统安全性和可靠性的一种有效方法.近年来随着计算机的发展,GO 法逐步得到完善,更适合于分析多状态、有时序系统的可靠性,能够有效地避免利用故障树分析(fault tree analysis, FTA)法分析复杂系统可靠性时建树困难、建模一致性差等缺点.本文尝试应用 GO 法定量解决 EHA 可靠性分析计算问题.

1 利用 GO 法分析 EHA 系统可靠性

1.1 GO 法定量分析步骤

GO 法定量分析是经过系统分析和建模,以成功为导向用 GO 图来描述系统,然后依照 GO

图的信号流序列,以 GO 法操作符的运算规则为基础,通过状态组合法或概率公式法进行系统的状态概率计算的过程^[9].

1.2 EHA 系统分析

如图 1 所示,EHA 系统通过数字控制器和功率控制器组成的控制驱动电路,控制永磁直流无刷电机的转速,通过电机带动高速双向定量柱塞泵旋转,继而控制泵输出到作动筒的高压油的流量,以容积调速方式完成对作动筒位置的精准控制.

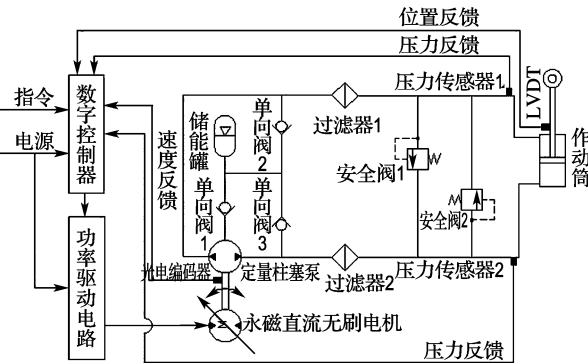


图 1 EHA 结构原理图

Fig. 1 The schematic diagram of EHA

储能罐通过单向阀向油路供油,使系统压力不低于储能罐中的压力,并防止油液中产生气穴现象. 泵的回油可通过单向阀流回储能罐进行. 安全阀用于限制系统中过高的压力. 速度反馈、压力反馈、位置反馈用于对系统的实时监测与控制.

由图 1 可知,该系统是一个既含有液流又含有电流的多状态、有时序、多反馈的复杂机电液一体化系统. 对该系统的分析结果见表 1.

本文用到的某 EHA 主要技术参数见表 2.

表 1 系统分析结果

Tab. 1 Results of systematic analysis

分析项目	分析结果
系统结构	见图 1
系统功能	实现对液压杆位置的精准控制
系统输入	指令、电源
系统输出	液压杆位置
系统成功准则	作动杆按要求位移

1.3 GO 图模型的建立

根据系统中各部件的功能及 GO 法中 17 种操作符的特点,将 EHA 原理图 1 翻译成 GO 图^[9],如图 2 所示. 将图 2 中所有元件与 GO 法操作符的对应关系列于表 3 中.

表 2 EHA 相关参数

Tab. 2 The parameters of EHA

技术参数	数值
电源电压/V	270
电机功率/kW	10
作动筒位移量/mm	±20
泵的排量/(L·r ⁻¹)	1×10 ⁻³
泵的额定转速/(r·min ⁻¹)	10 000
作动筒活塞有效面积/m ²	1.83×10 ⁻³
负载力/kN	10
溢流阀设定压力/MPa	15
液压油弹性模量/Pa	6.86×10 ⁸
可靠度指标	大于 0.999 75

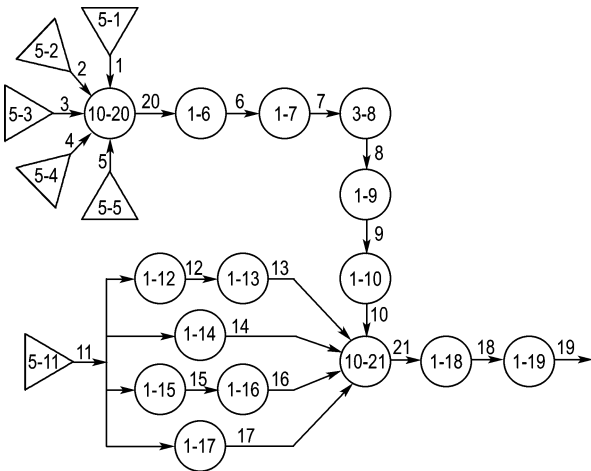


图 2 EHA 系统 GO 图

Fig. 2 GO chart of EHA

表 3 EHA 系统操作符数据

Tab. 3 The operators of EHA

操作符编号	操作符类型	操作符名称	状态概率		
			状态值 0	状态值 1	状态值 2
1	5	电源	0	X_{1-1}	$X_{1-2} = 1 - X_{1-1} = 26$
2	5	压力反馈	0	X_{2-1}	$X_{2-2} = 1 - X_{2-1} = 0.5$
3	5	指令信号	0	X_{3-1}	$X_{3-2} = 1 - X_{3-1} = 13$
4	5	位置反馈	0	X_{4-1}	$X_{4-2} = 1 - X_{4-1} = 0.4$
5	5	光电编码器	0	X_{5-1}	$X_{5-2} = 1 - X_{5-1} = 11.8$
6	1	数字控制器	0	X_{6-1}	$X_{6-2} = 1 - X_{6-1} = 2.1$
7	1	功率驱动电路	0	X_{7-1}	$X_{7-2} = 1 - X_{7-1} = 96$
8	3	电机	$X_{8-0} = 12$	X_{8-1}	$X_{8-2} = 1 - X_{8-0} - X_{8-1} = 15$
9	1	单向阀 1	0	X_{9-1}	$X_{9-2} = 1 - X_{9-1} = 1.27$
10	1	定量泵	0	X_{10-1}	$X_{10-2} = 1 - X_{10-1} = 12$
11	5	油箱	0	X_{11-1}	$X_{11-2} = 1 - X_{11-1} = 0.35$
12	1	单向阀 2	0	X_{12-1}	$X_{12-2} = 1 - X_{12-1} = 1.27$
13	1	过滤器 1	0	X_{13-1}	$X_{13-2} = 1 - X_{13-1} = 8$
14	1	安全阀 1	0	X_{14-1}	$X_{14-2} = 1 - X_{14-1} = 3.8$
15	1	单向阀 3	0	X_{15-1}	$X_{15-2} = 1 - X_{15-1} = 1.27$
16	1	过滤器 2	0	X_{16-1}	$X_{16-2} = 1 - X_{16-1} = 8$
17	1	安全阀 2	0	X_{17-1}	$X_{17-2} = 1 - X_{17-1} = 3.8$
18	1	管道	0	X_{18-1}	$X_{18-2} = 1 - X_{18-1} = 0.24$
19	1	液压缸	0	X_{19-1}	$X_{19-2} = 1 - X_{19-1} = 0.4$
20	10	与门			
21	10	与门			

表 3 中状态值 0 表示该元部件为提前状态(如电机由于线路短路等原因引起的提前启动状态),状态值 1 表示该元部件为成功状态,状态值 2 表示该元部件为故障状态. X_{i0} 表示该元部件处于提前状态的概率; X_{i1} 表示该元部件处于成功状态的概率; X_{i2} 表示该元部件处于故障状态的概率. 元部件处于故障状态的概率也就是该元部件的失效率 λ ,其含义为该部件在单位时间内发生失效的概率,也即该部件在规定条件下和规定时间内,丧失规定功能的概率.

1.4 GO 运算

根据 GO 法的概率公式定量分析算法^[9],计算出图 2 中关键信号流的表达式如下:

(1) 信号流 20

$$\begin{aligned} A_{r20}(0) &= \prod_{i=1}^5 A_{s20}(0) = 0 \\ A_{r20}(1) &= \prod_{i=1}^5 A_{s20}(1) = \prod_{i=1}^5 X_{i1} \\ P_{r20}(0) &= A_{r20}(0) = 0 \\ P_{r20}(1) &= A_{r20}(1) - A_{r20}(0) = \prod_{i=1}^5 X_{i1} \end{aligned}$$

(2) 信号流 8

$$\begin{aligned} P_{r8}(0) &= P_{c8}(0) + P_{s8}(0) \cdot P_{c8}(1) = X_{8-0} \\ P_{r8}(1) &= P_{s8}(1) \cdot P_{c8}(1) = \prod_{i=1}^8 X_{i1} \\ A_{r8}(0) &= P_{c8}(0) + A_{s8}(0) \cdot P_{c8}(1) = X_{8-0} \\ A_{r8}(1) &= P_{c8}(0) + A_{s8}(1) \cdot P_{c8}(1) = \\ &X_{8-0} + \prod_{i=1}^8 X_{i1} \end{aligned}$$

(3) 信号流 10

$$\begin{aligned} P_{r10}(0) &= P_{s10}(0) \cdot P_{c10}(1) = X_{8-0} X_9 X_{10} \\ P_{r10}(1) &= P_{s10}(1) \cdot P_{c10}(1) = \prod_{i=1}^{10} X_{i1} \\ A_{r10}(0) &= A_{s10}(0) \cdot P_{c10}(1) = \\ &X_{8-0} X_{9-1} X_{10-1} \\ A_{r10}(1) &= A_{s10}(1) \cdot P_{c10}(1) = \\ &(X_{8-0} X_{9-1} + \prod_{i=1}^9 X_{i1}) X_{10-1} \end{aligned}$$

(4) 信号流 21

$$\begin{aligned} A_{r21}(0) &= A_{s10}(0) \cdot A_{s13}(0) \cdot A_{s14}(0) \cdot \\ &A_{s16}(0) \cdot A_{s17}(0) = 0 \\ A_{r21}(1) &= A_{s10}(1) \cdot A_{s13}(1) \cdot A_{s14}(1) \cdot \\ &A_{s16}(1) \cdot A_{s17}(1)/A_{s11}^3 = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &X_{8-0} \prod_{i=9}^{17} X_{i1} + \prod_{i=1}^{17} X_{i1} \\ P_{r21}(0) &= A_{r21}(0) = 0 \\ P_{r21}(1) &= A_{r21}(1) - A_{r21}(0) = \\ &X_{8-0} \prod_{i=9}^{17} X_{i1} + \prod_{i=1}^{17} X_{i1} \\ (5) \text{ 信号流 } 19 \\ P_{r19}(0) &= P_{s19}(0) \cdot P_{c19}(1) = 0 \\ P_{r19}(1) &= P_{s19}(1) \cdot P_{c19}(1) = \\ &\left(X_{8-0} + \prod_{i=1}^8 X_{i1}\right) \prod_{i=9}^{19} X_{i1} \quad (1) \\ A_{r19}(0) &= A_{s19}(0) \cdot P_{c19}(1) = 0 \\ A_{r19}(1) &= A_{s19}(1) \cdot P_{c19}(1) = \\ &\left(X_{8-0} + \prod_{i=1}^8 X_{i1}\right) \prod_{i=9}^{19} X_{i1} \end{aligned}$$

式中: $P_{rj}(i)$ 为信号流 j 的输入状态 i 的概率; $P_{sj}(i)$ 为信号流 j 的输出状态 i 的概率; $P_{cj}(i)$ 为操作符 j 的状态 i 的概率; $A_{sj}(i)$ 为信号流 j 的输出状态 i 的累计概率; $A_{rj}(i)$ 为信号流 j 的输入状态 i 的累计概率; X_{ij} 为操作符 j 的状态概率.

由 GO 图可知,信号流 19 为系统的输出信号,所以式(1)的计算结果为 EHA 的成功概率,即可靠度指标.故 EHA 成功完成任务的概率为

$$P = \left(X_{8-0} + \prod_{i=1}^8 X_{i1}\right) \prod_{i=9}^{19} X_{i1} \quad (2)$$

由式(2)可见,EHA 成功完成任务的概率 P 与各部件的成功状态概率(即各部件处于状态 1 的概率) $X_{i1}(i=1,2,\cdots,19)$ 基本成正比的关系.

2 基于 FTA 的 EHA 系统可靠性分析

利用 FTA 法分析以上 EHA 系统,以作动杆位置错误为顶事件,建立故障树如图 3 所示.由故障树顶事件的计算方法可得

$$\begin{aligned} \lambda_D &= 1 - (1 - \lambda_1)(1 - \lambda_2)(1 - \lambda_3)(1 - \lambda_4) \times \\ &(1 - \lambda_5)(1 - \lambda_6) \\ \lambda_C &= 1 - (1 - \lambda_D)(1 - \lambda_7)(1 - \lambda_8) \\ \lambda_B &= 1 - (1 - \lambda_C)(1 - \lambda_9)(1 - \lambda_{10})(1 - \lambda_{11}) \\ \lambda_A &= 1 - (1 - \lambda_B)(1 - \lambda_{12})(1 - \lambda_{13}) \times \\ &(1 - \lambda_{14})(1 - \lambda_{15})(1 - \lambda_{16})(1 - \lambda_{17}) \times \\ &(1 - \lambda_{18}) \\ \lambda_T &= 1 - (1 - \lambda_A)(1 - \lambda_{19}) \end{aligned}$$

整理得

$$\lambda_T = 1 - \prod_{i=1}^{19} (1 - \lambda_i) \quad (3)$$

式中： λ_i 为第 i 个事件发生的概率； λ_T 为顶事件发生的概率，即作动杆位置错误的概率，故作动杆位置正确的概率为

$$P_T = 1 - \lambda_T = \prod_{i=1}^{19} (1 - \lambda_i) = \prod_{i=1}^{19} P_i \quad (4)$$

式中： P_i 为第 i 事件不发生的概率； P_T 为作动杆位置正确的概率。

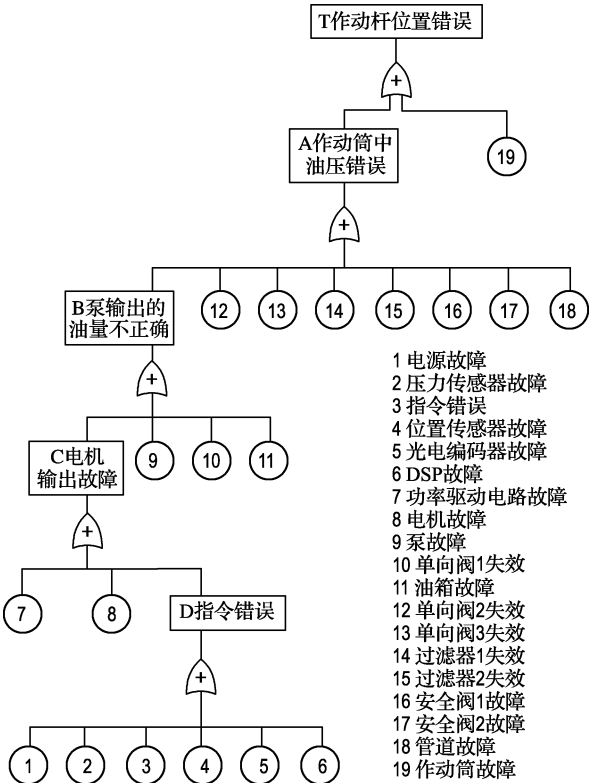


图 3 EHA 系统作动杆位置错误故障树

Fig. 3 The fault tree of EHA for operating rod position error

3 算 例

在图 1 所示的 EHA 系统中，根据文献[10]设定各个操作符的失效率 λ 如表 3，将表 3 数据分别代入式(2)和(4)，可得到 GO 法分析结果：系统的成功概率 $P=0.999\ 794\ 817\ 5$ ，系统失效率 $\lambda=1-P=2.051\ 825\times 10^{-4}$ ；FTA 分析结果：系统成功概率 $P_T=0.999\ 794\ 815\ 7$ ，失效率 $\lambda_T=1-P_T=2.051\ 843\times 10^{-4}$ 。

从以上计算结果可以看出，两种分析方法计算结果非常相近，所得可靠性结论基本一致，说明基于 GO 法的可靠性分析方法是可行的与正确的。两种方法所得结果并不完全相等，说明两种分

析方法的计算精度是有差别的。

4 两种分析方法的对比

(1)GO 法和 FTA 法都是利用图形来描述系统，然后在此基础上分析系统可靠性和评价风险。但 GO 图比 FTA 图简单，更加类似原理图，更易于检查与核对；GO 法的计算比 FTA 法的计算复杂。

(2)GO 法和 FTA 法的分析过程是有差异的。

GO 法计算的 EHA 系统成功概率为

$$P = \left(X_{8-0} + \prod_{i=1}^8 X_{i-1} \right) \prod_{i=9}^{19} X_{i-1} = X_{8-0} \cdot \prod_{i=9}^{19} X_{i-1} + \prod_{i=1}^{19} X_{i-1} = P_0 + P_1$$

FTA 法计算的 EHA 系统成功概率为

$$P_T = \prod_{i=1}^{19} P_i = \prod_{i=1}^{19} (1 - \lambda_i)$$

造成差异的原因是在 GO 法中，考虑了电机在实际工作中可能会由于短路等情况发生提前动作情况，对应的系统产生动作的概率为 $P' = P -$

$P_T = X_{8-0} \cdot \left[1 - \prod_{i=1}^7 (1 - X_{i-2}) \right] = 1.8 \times 10^{-9}$ 。而 FTA 法只能考虑事件的两种状态，故在 FTA 法中只考虑了电机的成功运行和故障两种状态。因此 GO 法考虑因素更全面。

5 结 论

(1)探讨了 GO 法在 EHA 系统可靠性定量评价分析中的应用问题。将 GO 法分析结果与 FTA 法分析结果相比较，得到了基本一致的结果，从而验证了 GO 法在 EHA 系统可靠性分析中的可行性与正确性。

(2)GO 模型可以表征多种状态，这与实际工作状况更加相符，故 GO 法计算的可靠度信息更加精确。

(3)从计算结果来看，EHA 作动系统的成功率基本与各部件的成功率成正比，因此对于故障率相对较高的部件，在系统设计时应采用余度设计。

参考文献：

[1] 章卫国,李爱军,李广文,等. 现代飞行控制系统设

- 计[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2009.
- ZHANG Wei-guo, LI Ai-jun, LI Guang-wen, *et al.* **Modern Flight Control System Design** [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2009. (in Chinese)
- [2] Gadsden S A, Habibi S. Aerodynamic flutter and flight surface actuation [C] // **ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition**. Seattle:ASME, 2007.
- [3] Charrier J J, Kulshreshtha A. Electric actuation for flight & engine control system; evolution, current trends & future challenges [C] // **45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit**. Reno: AIAA, 2007.
- [4] Alstrom R B, Ahmadi G, Boltt E, *et al.* The effect of rate limited actuator dynamics on the adaptive control of a nonlinear aeroservoelastic (ASE) system [C] // **52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference**. Reston:AIAA, 2011.
- [5] Bauer C, Lagadec K, Bes C, *et al.* Flight control system architecture optimization for fly-by-wire airliners [J]. **Journal of Guidance, Control, and Dynamics**, 2007, **30**(4):1023-1029.
- [6] Gadsden S A, Song Y, McCullough K R, *et al.* Friction fault detection of an electrohydrostatic actuator [C] // **ASME 2011 Dynamic Systems and Control Conference and Bath/ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control**. Arlington:ASME, 2011.
- [7] Habibi S R, Burton R. Parameter identification for a high-performance hydrostatic actuation system using the variable structure filter concept [J]. **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, 2007, **129**(2):229-235.
- [8] 徐浩军,刘东亮,孟捷,等. 基于系统仿真的飞行安全评估理论与方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2011.
- XU Hao-jun, LIU Dong-liang, MENG Jie, *et al.* **Flight Safety Evaluation Theories and Methods Based on System Simulation** [M]. Beijing:National Defence Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [9] 沈祖培,黄祥瑞. GO 法原理及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- SHEN Zu-pei, HUANG Xiang-rui. **Principle and Application of GO Methodology** [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [10] 马继明,付永领. 一体化电液作动器容错结构设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, **33**(8):920-924.
- MA Ji-ming, FU Yong-ling. Fault tolerant architecture design of EHA [J]. **Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics**, 2007, **33**(8):920-924. (in Chinese)

Reliability analysis of electro hydrostatic actuator based on GO methodology

JIN Xia^{*1,2}, DUAN Fu-hai¹

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Chaoyang Teachers College, Chaoyang 122000, China)

Abstract: Using the method of comparing with fault tree analysis (FTA), the reliability analysis and safety evaluation method of electro hydrostatic actuator (EHA) is studied based on GO methodology. Analytical procedure and GO drawing are presented in details. Quantitatively EHA system reliability analysis is conducted by GO methodology and FTA method respectively. The results of two kinds of methods above mentioned are compared. It is verified that GO methodology is available and corrective for analysis and evaluation of EHA system reliability.

Key words: electro hydrostatic actuator (EHA); reliability analysis; GO methodology; FTA method