http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0444

GO-FLOW 法在飞机 EHA 可靠性分析中的应用

兰雪，段富海*，桑勇

（大连理工大学 机械工程学院，大连 116023）

摘 要：应用 GO-FLOW 法分析了飞机电静液作动器(EHA)的可靠性。首先在 EHA 单元功能合理划分的基础上，建立了 EHA 的 GO-FLOW 可靠性分析模型，采用布尔代数求解描述反馈环的布尔方程，解决了 GO-FLOW 图不允许存在循环的难题；其次进行了 GO-FLOW 运算，得到 EHA 系统在各时间点的可靠度；再次与 GO 法的结果比较，验证了 GO-FLOW 法的可行性和准确性；最后通过 MATLAB 曲线拟合，得到系统可靠度随时间的变化规律，以便及时对系统进行检修和维护。结果表明 GO-FLOW 法只需一次运算，就可得到系统在各时间点的可靠度，在减小计算复杂度方面较 GO 法有优势。

关 键 词：电静液作动器(EHA)；GO-FLOW 法；GO 法；布尔代数；可靠性分析
中图分类号：TB114.3
文献标识码：A **文章编号**：1001-5965(2017)06-1264-07

航空科技的持续快速进步，促进了机载作动系统的迅速革新，北京航空航天大学王占林和付永领教授一直致力于研究集成作动系统[1-2]。电静液作动器(Electro-Hydrostatic Actuator，EHA)作为集成作动系统的典型代表，具有集成化程度高、轻量化和安全性好等优点，其先进性已经在F-18、F-35 等战斗机和 A380、B787 等飞机上得到了验证。EHA 是飞机操纵与控制系统的关键组成部分，对飞机飞行姿态和飞行轨迹控制起决定性作用，其稳健性和可靠性直接影响飞机的安全性，美国空军飞机曾经发生过多起由于作动系统故障导致的严重事故，因此研究 EHA 的可靠性对降低飞机飞行故障率和提升飞行安全性具有重大意义。而 EHA 是一个多状态、有时序、多反馈、状态随时间变化的复杂机电液控集成一体化系统，其可靠性分析具有挑战性，故需寻求一种有效且准确的 EHA 可靠性分析方法。

在系统可靠性分析中，故障树分析(FTA)是一种最常用的有效方法。然而，FTA 有一定的局限性，对复杂系统的建树相当困难，特别是对有多重状态、有信号反馈和有时序功能变化的系统，FTA 可能变得更为复杂[3]。GO 法是一种几乎与 FTA 同时产生的可靠性分析方法，对于多状态、有时序的系统，尤其是有实际物流的系统更为合适，但不易处理有多重状态改变和有复杂时序的系统[4]。在 GO 法的基础上，日本 Matsuoka 和 Kobayashi 两位学者开发了一种新的系统可靠性分析方法——GO-FLOW 法[5]，不仅解决了 FTA 建树困难的问题，而且相比于 GO 法，计算复杂度降低，更适用于有时序、有阶段性任务和状态随时间变化的复杂系统[6]。金霞和段富海[7]应用 GO 法分析了飞机 EHA 的可靠性；Hashim 等[8]应用 GO-FLOW 法分析了压水堆 AP1000 冷却系统的可靠性；武光江等[9]应用 GO-FLOW 法分析了可维修系统的可靠性。

本文应用 GO-FLOW 法分析飞机 EHA 的可

收稿日期：2016-05-24；**录用日期**：2016-06-24；**网络出版时间**：2016-11-23 09:11
网络出版地址：www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20161123.0911.001.html
基金项目：航空科学基金（20150863003）
* **通讯作者**：E-mail：duanfh@dlut.edu.cn

引用格式：*兰雪，段富海，桑勇. GO-FLOW 法在飞机 EHA 可靠性分析中的应用[J]. 北京航空航天大学学报，2017，43(6)：1264-1270. LAN X，DUAN F H，SANG Y. Application of GO-FLOW methodology in reliability analysis of aircraft EHA [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2017，43(6)：1264-1270 (in Chinese).*

靠性。按照 EHA 结构原理图建立 GO-FLOW 模型,针对 GO-FLOW 图不允许存在循环的难题,采用一种新的解决方案,即用布尔代数求解描述反馈环的布尔方程,准确表示 EHA 系统的反馈信号。通过 MATLAB 运算和曲线拟合,得到系统在各时间点的可靠度以及随时间的变化规律。

1　EHA 系统分析

EHA 系统通常由控制器、电机驱动模块、270 V 直流无刷电机、双向定量泵、储能罐及辅助液压阀组、作动筒等组成[10],结构原理如图 1 所示。

EHA 工作过程中,控制器和伺服驱动模块接受上位机的指令,驱动直流无刷电机转动,电机带动双向定量泵作旋转运动,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的控制。储能罐通过单向阀为系统进行补油增压,保持系统的最低压力,并防止油液中发生气穴现象,定量泵通过单向阀回油到储能罐。过滤器用来过滤液压油中的杂质,保证系统液压管道和其他设备的正常运行。

阻尼旁通阀起故障安全隔离的作用,安全阀防止作动筒的两腔内压力过高。速度、压力和位移传感器将系统的相关参数反馈给控制器,形成闭环回路,用于对系统的实时控制和监测[11]。

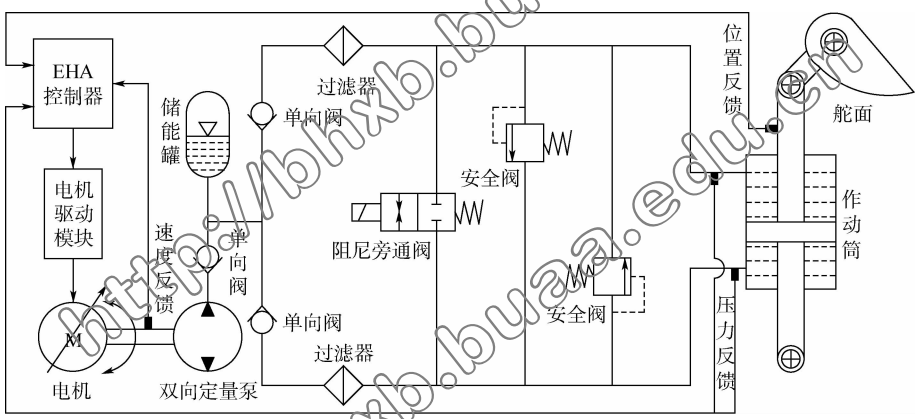


图 1　EHA 系统结构原理图[10]

Fig. 1　Structural schematic diagram of EHA system[10]

2　GO-FLOW 法分析 EHA 可靠性

GO-FLOW 法的主要分析过程包括建立 GO-FLOW 模型和完成定量计算。作动杆部件按照控制指令要求输出相应位移代表 EHA 系统成功工作,结合模型图和运算规则计算系统成功工作的概率,即系统的可靠度。

2.1　求解 EHA 反馈环

在 EHA 系统结构图中,闭环反馈回路为系统提供了实时准确的监测和控制。但是 GO-FLOW 图不允许有循环,若不能合理地求解反馈环,就不能准确地评估系统的可靠性,因此不能保证充分或最佳使用系统性能。通常,采用信号发生器简单替代反馈信号,但该方法必然会带来误差,影响可靠性分析精度。到目前为止,在求解反馈回路方面已经做了很多尝试,Matsuoka [12]提出了一个打破 GO-FLOW 分析逻辑回路的方法,Vaurio [13]也提出了一种递归的方法,但对于反馈回路的一般解决方法还没有给出明确的表示。本文采用布尔代数求解描述反馈环的布尔方程[14],准确表示 EHA 系统的反馈信号,提高了可靠性分析精度。

EHA 带有反馈环的部分系统结构如图 2 所示。

以 A 部件为例,将 t 时刻成功输出的事件集合表示为 A_qA_s,其中 A_q 代表 A 部件成功起动的事件集合,A_s 代表 A 部件的全部状态集合,其余部件的表示方法同 A 部件。$X(=B_{out})$ 和 $Y(=E_{out})$ 分别表示 B 和 E 部件的成功输出事件集合,那么布尔关系式可表示为

$$Y = C_qC_sD_qD_sE_qE_sX \tag{1}$$

已知,X 为 B' 部件的输入信号,Y 为 E' 和 E'' 部件的输入信号。同时,A、B'、E'、E'' 部件的输出信号是或门(OR)的输入信号,所以或门的输出信号经过 B 部件后得到 X 的表达式为

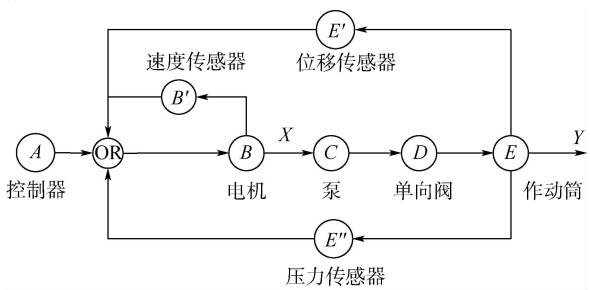


图 2　EHA 带有反馈环的结构图

Fig. 2　EHA structure diagram with feedback loops

http://bhxb.buaa.edu.cn

$$X=[A_qA_s+B'_qB'_sX+(E'_qE'_s+E''_qE''_s)Y]B_qB_s \quad (2)$$

整理式(1)和式(2)得

$$X=A_qA_sB_qB_s+B_qB_sB'_qB'_sX+B_qB_sC_qC_sD_qD_sE_qE_s(E'_qE'_s+E''_qE''_s)X \quad (3)$$

基于布尔代数 $A_sA_s=A_s$,$1+A_s=1$ 的运算思想,解式(3)布尔方程得到

$$X=A_qA_sB_qB_s+m_1B_qB_sB'_qB'_s+m_2B_qB_sC_qC_sD_qD_sE_qE_s(E'_qE'_s+E''_qE''_s) \quad (4)$$

式中:m_1 和 m_2 是任意布尔元素。

GO-FLOW 法以成功为导向,系统所有部件在 t 时刻成功起动,因此 $A_s=B_s=C_s=D_s=E_s=B'_s=E'_s=E''_s=1.0$,即

$$X=A_qB_q+m_1B_qB'_q+m_2B_qC_qD_qE_q(E'_q+E''_q) \quad (5)$$

由图 2 可推导出在建立反馈环后,E 部件成功输出的事件集合 X 的表达式为

$$X=A_qB_q+A_qB_qB'_q+A_qB_qC_qD_qE_q(E'_q+E''_q) \quad (6)$$

比较式(5)和式(6),可得到 m_1 和 m_2 的表达式:$m_1=A_q$,$m_2=A_q$。因此获得 $X(=B_{out})$ 和 $Y(=E_{out})$ 的表达式分别为

$$B_{out}=A_qA_sB_qB_s+A_qB_qB_sB'_qB'_s+A_qB_qB_sC_qC_sD_qD_sE_qE_s(E'_qE'_s+E''_qE''_s) \quad (7)$$

$$E_{out}=A_qA_sB_qB_sC_qC_sD_qD_sE_qE_s+A_qB_qB_sB'_qB'_sC_qC_sD_qD_sE_qE_s+A_qB_qB_sC_qC_sD_qD_sE_qE_s(E'_qE'_s+E''_qE''_s) \quad (8)$$

式中:第 1 部分代表主路作用;第 2 部分代表 B-B' 环结构作用;第 3 部分代表 B-C-D-E-E' 和 B-C-D-E-E'' 环结构作用,翻译成 GO-FLOW 模型如图 3 所示。

2.2 构建 EHA 的 GO-FLOW 模型

GO-FLOW 模型主要由操作符和信号流两部分组成[15]。结合 EHA 结构模型图 1 和求解反馈环模型图 3,在单元功能合理划分的基础上,建立 EHA 系统 GO-FLOW 模型如图 4 所示。

电源信号、控制信号和油液进入信号可用类型 25 信号发生器操作符输出。电机和定量泵都是有激励信号才能让输入信号导通的部件,可用类型 26 操作符表示,导通信号可用类型 25 操作符输出,同时考虑部件会随着运行而失效,因此增加类型 35 操作符表示失效概率随时间的变化,工作时间间隔信号也用类型 25 操作符输出。控制器、传感器、单向阀、过滤器、安全阀和作动筒都可看作两状态元件,所以可用类型 21 两状态操作符和类型 35 随时间失效操作符表示。图 4 中操作符符号水平线上的数字表示操作符的类型,水平线下的数字表示操作符的编号,信号线上的数字表示信号流的编号。图中,信号 39 是系统的最终输出信号。

为能更好地说明 GO-FLOW 法在处理阶段性任务的应用,定义 EHA 系统中 4 个时间点:

时间点 1 是系统初始时间点,即系统尚未开始任何动作。

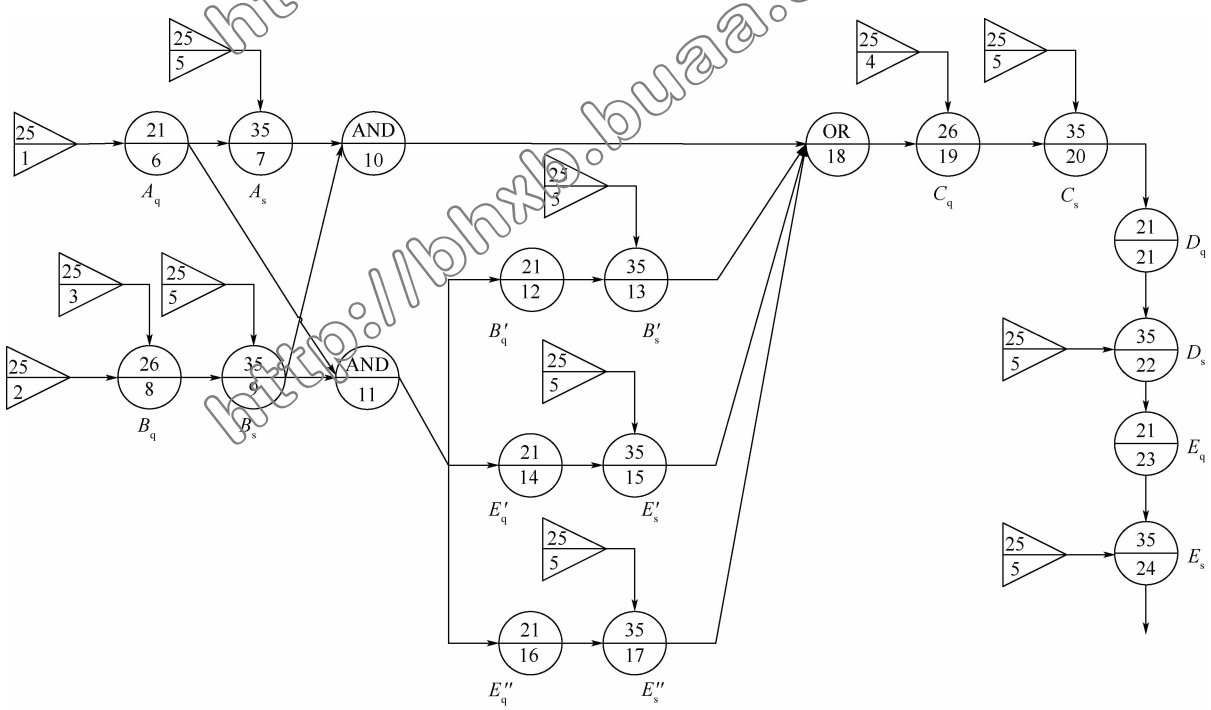


图 3 求解反馈环的 GO-FLOW 图

Fig. 3 GO-FLOW chart of solving feedback loops

http://bhxb.buaa.edu.cn

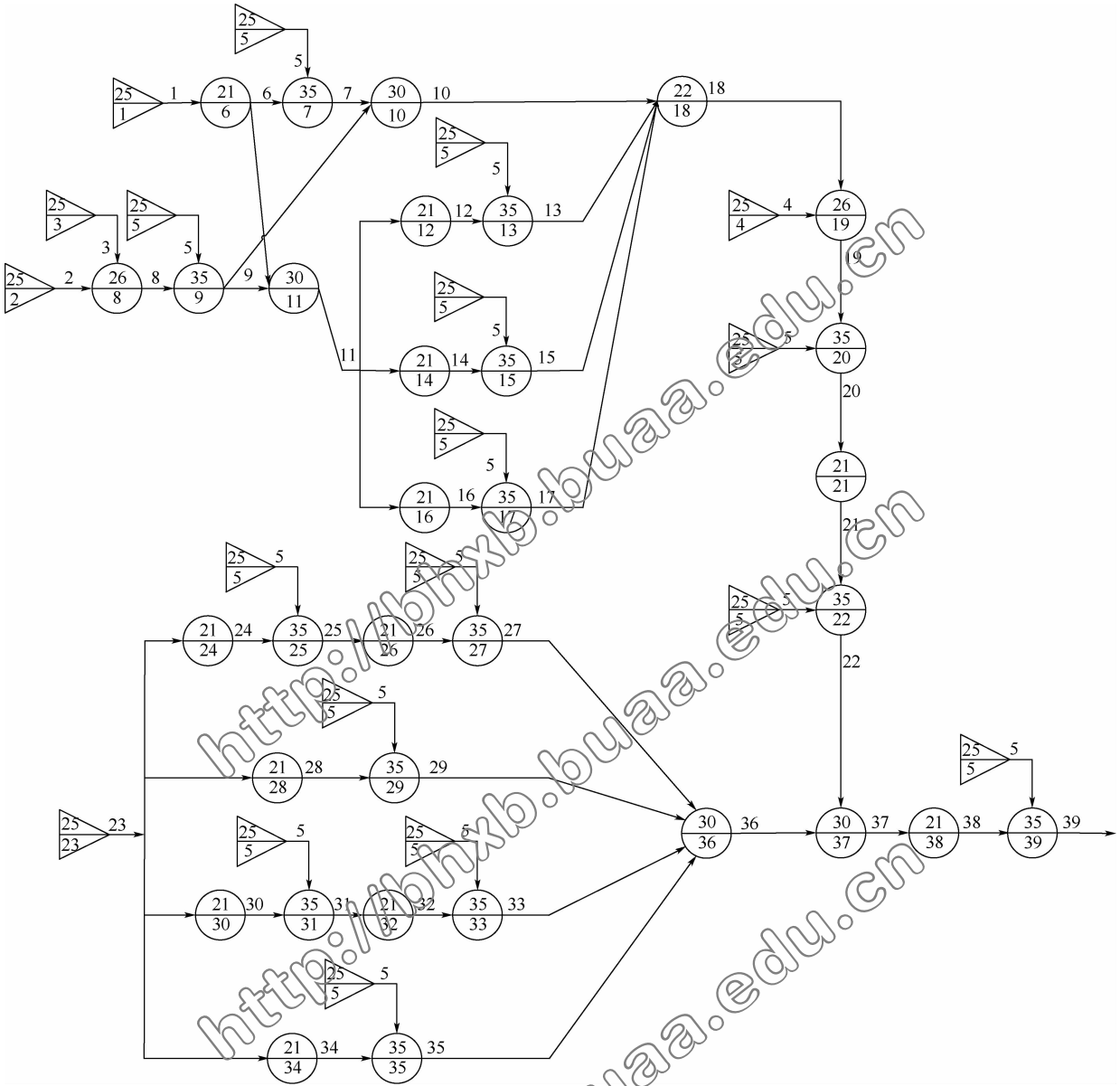


图 4　EHA 系统的 GO-FLOW 图

Fig. 4　GO-FLOW chart of EHA system

时间点 2 是控制器信号控制电机,电机开始工作,是实际时间的 0 时刻。

时间点 3 是电机驱动泵运转的时刻,与时间点 2 相差无几,这里可以忽略,系统开始工作。

时间点 4 是时间点 3 之后的 300 h。

表 1 列出了各操作符类型、参数和含义[7],其中:$R(t)$为 t 时刻操作符的输出信号;P_p 为部件提前起动的概率;P_g 为部件正常工作的概率;λ 为部件运行失效的概率。

2.3　GO-FLOW 可靠性运算

GO-FLOW 法在确定成功准则和定义时间点后,从信号发生器开始,沿信号线序列,按运算规则,逐个对操作符计算,直到得到最终输出信号在各时间点的"强度",即系统的可靠性。图 4 中关键信号流的表达式如下,其中 $I_i(t)$ 表示信号 i 在时间点 t 的强度。

1) 信号流 18:或门

首先,由于信号 13、15、17 都是在信号 11 存在的条件下才存在,它们的强度计算式中都包含信号 11 的强度,信号 11 是它们的共有信号,对共有信号进行修正后[16],得到信号 13、15、17 或门运算强度 $I'_{11}(t)$ 为

$$I'_{11}(t)=I_{13}(t)+I_{15}(t)+I_{17}(t)-\frac{I_{13}(t)\cdot I_{15}(t)}{I_{11}(t)}-\frac{I_{15}(t)\cdot I_{17}(t)}{I_{11}(t)}-\frac{I_{13}(t)\cdot I_{17}(t)}{I_{11}(t)}+\frac{I_{13}(t)\cdot I_{15}(t)\cdot I_{17}(t)}{I^2_{11}(t)} \tag{9}$$

$I'_{11}(1)=0.000\,00$, $I'_{11}(2)=0.999\,97$

$I'_{11}(3)=0.999\,97$, $I'_{11}(4)=0.995\,48$

再将信号 10 与信号 13、15、17 或门运算结果

http://bhxb.buaa.edu.cn

表 1 EHA 系统的操作符数据

Table 1 Operator data of EHA system

编号	类型	参数	含义
1	25	$R(1)=0, R(t)=1(t\neq 1)$	电源信号
2	25	$R(1)=0, R(t)=1(t\neq 1)$	控制指令信号
3	25	$R(2)=1, R(t)=0(t\neq 2)$	电机运行信号
4	25	$R(3)=1, R(t)=0(t\neq 3)$	泵运转信号
5	25	$R(4)=300\,\mathrm{h}, R(t)=0(t\neq 4)$	时间间隔信号
23	25	$R(1)=0, R(t)=1(t\neq 1)$	油液信号
6,7	21,35	$P_g=0.999\,997\,9$, $\lambda=2.1\times10^{-6}/\mathrm{h}$	控制器
8,9	26,35	$P_p=12.0\times10^{-6}$, $P_g=0.999\,973\,0$, $\lambda=15.0\times10^{-6}/\mathrm{h}$	电机
10,11	30		与门
12,13	21,35	$P_g=0.999\,999\,5$, $\lambda=0.5\times10^{-6}/\mathrm{h}$	速度传感器
14,15	21,35	$P_g=0.999\,999\,5$, $\lambda=0.5\times10^{-6}/\mathrm{h}$	位移传感器
16,17	21,35	$P_g=0.999\,999\,5$, $\lambda=0.5\times10^{-6}/\mathrm{h}$	压力传感器
18	22		或门
19,20	26,35	$P_p=0.0, P_g=0.999\,988\,0$, $\lambda=12.0\times10^{-6}/\mathrm{h}$	泵
21,24,30	21	$P_g=0.999\,998\,8$	单向阀
22,25,31	35	$\lambda=1.27\times10^{-6}/\mathrm{h}$	单向阀
26,32	21	$P_g=0.999\,992\,0$	过滤器
27,33	35	$\lambda=8.0\times10^{-6}/\mathrm{h}$	过滤器
28,34	21	$P_g=0.999\,996\,2$	安全阀
29,35	35	$\lambda=3.8\times10^{-6}/\mathrm{h}$	安全阀
36,37	30		与门
38,39	21,35	$P_g=0.999\,999\,6$, $\lambda=0.4\times10^{-6}/\mathrm{h}$	作动筒

进行或门运算,信号 6 和 9 是它们的共有信号,因此信号流 18 的强度为

$$I_{18}(t)=I_{10}(t)+I'_{11}(t)-\frac{I_{10}(t)\cdot I'_{11}(t)}{I_6(t)\cdot I_9(t)} \tag{10}$$

$I_{18}(1)=0.000\,00$, $I_{18}(2)=0.999\,97$

$I_{18}(3)=0.999\,97$, $I_{18}(4)=0.995\,48$

2) 信号流 36:与门

$$I_{36}(t)=I_{27}(t)\cdot I_{29}(t)\cdot I_{33}(t)\cdot I_{35}(t)/I_{23}^3(t) \tag{11}$$

$I_{36}(1)=0.000\,00$, $I_{36}(2)=0.999\,83$

$I_{36}(3)=0.999\,83$, $I_{36}(4)=0.992\,02$

3) 信号流 38

$$I_{38}(t)=I_{37}(t)\cdot P_g \tag{12}$$

$I_{38}(1)=0.000\,00$, $I_{38}(2)=0.000\,00$

$I_{38}(3)=0.999\,79$, $I_{38}(4)=0.983\,60$

4) 信号流 39

$$I_{39}(t)=I_{38}(t)\cdot \exp\left\{-\lambda\sum_{k\leqslant t}I_5(k)\cdot\min[1.0, I_{38}(k)/I_{38}(t)]\right\} \tag{13}$$

因为 $I_5(1)=I_5(2)=I_5(3)=0.0$,得到

$I_{39}(1)=I_{38}(1)=0.000\,00$

$I_{39}(2)=I_{38}(2)=0.000\,00$

$I_{39}(3)=I_{38}(3)=0.999\,79$

因为 $I_5(4)=300.0$,得到

$I_{39}(4)=I_{38}(4)\cdot\exp(-\lambda I_5(4)\times1.0)=0.983\,48$

所有操作符计算完成后,得到了 EHA 系统输出信号流 22、36、39 在所有时间点的强度,如表 2 所示。

表 2 EHA 系统输出信号的强度

Table 2 Output signal intensity of EHA system

操作符编号	操作符类型	输出信号在各时间点的强度			
		1	2	3	4
22	35	0.000 00	0.000 00	0.999 96	0.991 51
36	30	0.000 00	0.999 83	0.999 83	0.992 02
39	35	0.000 00	0.000 00	0.999 79	0.983 48

3 与 GO 法比较

利用 GO 法分析上述 EHA 系统,同样地,根据系统原理图,用 GO 法相应操作符表示系统部件,用 GO 法信号流表示系统的输入和输出以及部件之间的关联,并应用 2.1 节求解反馈环的方法,建立系统 GO 模型如图 5 所示。

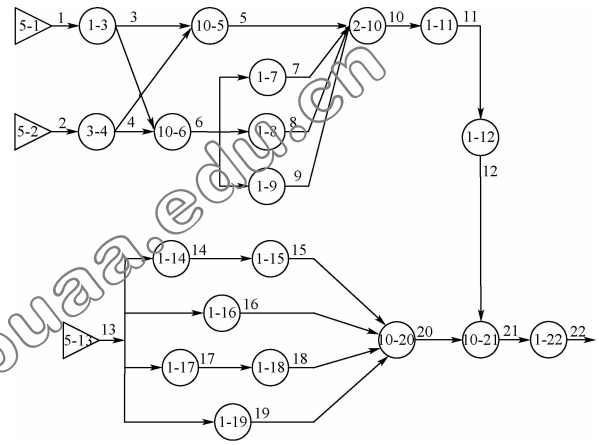


图 5 EHA 系统 GO 图

Fig. 5 GO chart of EHA system

系统有 3 个状态:提前状态、成功状态和故障状态。根据表 1 所列的状态概率,所有操作符按照 GO 法运算规则计算完成后,得到了 EHA 系统输出信号流 22 各个状态的概率,提前状态概率 $P_p=0.000\,00$,成功状态概率 $P=0.999\,787\,315\,8$,故障状态概率 $\lambda=1-P_p-P=2.126\,842\times10^{-4}$。

由表 2 列出的 GO-FLOW 法分析结果可知,系统在开始工作时刻的可靠度为 0.999 787 316 1,由于系统部件会随时间失效,所以随着时间的推移,系统可靠度降低,在工作 300 h 后的可靠度为 0.983 482 232 9。根据 GO 法分析结果可知,系统处于成功状态的概率,即系统的可靠度为

http://bhxb.buaa.edu.cn

0.999 787 315 8。由于本文 GO 法的分析过程未考虑系统部件状态的变化,所以 GO 法可靠度计算结果等同于 GO-FLOW 法开始工作时刻的可靠度,可见两种方法的计算结果差异非常小,基本吻合。GO 法已经成熟,其可行性已得到充分验证,因此,GO-FLOW 可靠性分析方法是可行的,其结果是准确的,并且相比于 GO 法,GO-FLOW 法只需一次运算,就可得到系统在各时间点的可靠度。而两种方法的计算结果又不完全相等,因为两种方法的基本概念和算法有差异,所以导致两种方法的计算结果有一定的差别。

4　系统可靠度的变化规律

为了能更直观地了解 EHA 系统工作时可靠度的变化规律,在时间点 3 和时间点 4 之间以 50 h 为间隔插入 5 个时间点,因时间点 2 是实际时间的 0 时刻,而时间点 3 与时间点 2 相差无几,这里可以忽略,因此将时间点 3 看成 0 时刻,计算从 0 开始到 300 h 各时间点操作符 22、36、39 的输出信号强度,如表 3 所示。

由表 3 可直观得到 EHA 系统从开始工作后每隔 50 h 各信号强度的变化规律,随着系统各部件的顺序动作和时间的推移,系统的信号强度随时间降低。为了更形象地描述这个规律,运用 MATLAB 对表中信号流 39 的强度进行线性拟合,得到系统可靠度变化规律如图 6 所示。

表 3　EHA 系统各时间点输出信号的强度

Table 3　Output signal intensity of EHA system at each time point

时间/h	信号强度		
	操作符 22	操作符 36	操作符 39
0	0.999 96	0.999 83	0.999 79
50	0.998 55	0.998 52	0.997 05
100	0.997 13	0.997 22	0.994 32
150	0.995 73	0.995 92	0.991 60
200	0.994 32	0.994 62	0.988 89
250	0.992 92	0.993 32	0.986 18
300	0.991 51	0.992 02	0.983 48

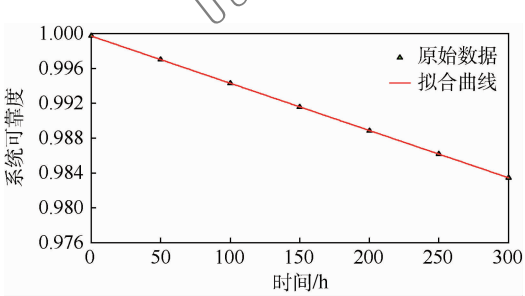


图 6　EHA 系统可靠度变化规律

Fig. 6　System reliability changing rule of EHA

MATLAB 拟合得到曲线的函数表达式为 $R(t) = -5.435\,70 \times 10^{-5} t + 0.999\,77$。由该表达式可以快速而准确地计算出 EHA 系统在任意时刻的工作可靠度,以便及时对系统进行检修和维护。

5　结　论

1) 研究了 GO-FLOW 法在 EHA 系统可靠性分析中的应用。采用布尔代数求解描述反馈环的布尔方程,解决了模型中不允许存在循环的难题,并将计算结果与 GO 法的结果相比较,验证了 GO-FLOW 法的可行性与准确性,得到了系统在各时间点的可靠度以及随时间的变化规律,便于及时对系统进行检修和维护。

2) 充分挖掘了 GO-FLOW 法分析系统可靠性的优势,只需进行一次运算,就可得到系统最终信号在所有时间点的强度,完成对有复杂运行时序且状态随时间变化的系统可靠性分析。若采用 GO 法对大型的复杂系统进行分析计算,由于需要庞大的内存支持,往往难以获取最终信号存在概率的精确值。因此,GO-FLOW 法能凭借其独特的优势为可靠性工程的深入研究提供重要支持。

参考文献 (References)

[1] 李军,付永领,王占林.机载电静液作动系统的发展现状与关键技术研究[J].航空制造技术,2005(11):73-77.
LI J, FU Y L, WANG Z L. Present development status and key technology research of airborne electro-hydrostatic actuation system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005(11):73-77(in Chinese).

[2] 付永领,邵云滨,齐海涛,等.集成电动静液作动系统理论与技术[J].液压与气动,2015(5):1-9.
FU Y L, SHAO Y B, QI H T, et al. Integrated electro-hydrostatic actuator system: Theory and technology[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015(5):1-9(in Chinese).

[3] WANG Y Y, ZHOU J J, CHEN W G. Assessment method for the reliability of power transformer based on fault-tree analysis[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3):514-520.

[4] 沈祖培,黄祥瑞. GO 法原理及应用[M].北京:清华大学出版社,2004:57-168.
SHEN Z P, HUANG X R. Principle and application of GO methodology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004:57-168(in Chinese).

[5] MATSUOKA T, KOBAYASHI M. GO-FLOW: A new reliability analysis methodology[J]. Nuclear Science & Engineering the Journal of the American Nuclear Society, 1988, 98(1):64-78.

[6] 林洁. GO-FLOW 原理及其计算机辅助技术[D].长沙:国防科学技术大学,2003:9-35.
LIN J. Research on the principles and the computer aided technology of the GO-FLOW[D]. Changsha: National University of

http://bhxb.buaa.edu.cn

Defense Technology,2003:9-35(in Chinese).
[7] 金霞,段富海. 基于 GO 法的电动静液作动器可靠性分析[J]. 大连理工大学学报,2013,53(6):846-850.
JIN X, DUAN F H. Reliability analysis on electro hydrostatic actuator based on GO methodology[J]. Journal of Dalian University of Technology,2013,53(6):846-850(in Chinese).
[8] HASHIM M, YOSHIKAWA H, MATSUOKA T, et al. Quantitative dynamic reliability evaluation of AP1000 passive safety systems by using FMEA and GO-FLOW methodology[J]. Journal of Nuclear Science & Technology,2014,54(4):526-542.
[9] 武光江,王勇,尚彦龙,等. 基于 GO-FLOW 方法的可维修系统可靠性分析[J]. 核动力工程,2012,33(2):25-29.
WU G J, WANG Y, SHANG Y L, et al. Reliability analysis of repairable system based on GO-FLOW methodology[J]. Nuclear Power Engineering,2012,33(2):25-29(in Chinese).
[10] KANG R, JIAO Z, WANG S, et al. Design and simulation of electro-hydrostatic actuator with a built-in power regulator[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2009,22(6):700-706.
[11] 赵静静. 基于 GO 法的电静液作动器可靠性研究[D]. 大连:大连理工大学,2014:3-4.
ZHAO J J. Reliability analysis on electro hydrostatic actuator based on GO methodology[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2014:3-4(in Chinese).
[12] MATSUOKA T. A method to solve logical loops in the GO-FLOW methodology[C]// Proceedings of PSAM—V, International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, Osaka,2000, the International Association for PSAM. London: Springer,2000:1461-1465.
[13] VAURIO J K. A recursive method for breaking complex logic loops in Boolean system models[J]. Reliability Engineering and System Safety,2007,92(10):1473-1475.
[14] MATSUOKA T. An exact method for solving logical loops in reliability analysis[J]. Reliability Engineering and System Safety,2009,94(8):1282-1288.
[15] YU J, YU S, SONG Y M, et al. Application of GO-FLOW methodology to the reliability evaluation in CNC machine tools[J]. Advanced Materials Research,2013,694-697:1833-1837.
[16] 林洁,颜兆林,龚时雨,等. GO-FLOW 方法及其改进的精确算法[J]. 系统工程与电子技术,2005,27(1):193-196.
LIN J, YAN Z L, GONG S Y, et al. GO-FLOW methodology and improved exact algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics,2005,27(1):193-196(in Chinese).

作者简介:

兰雪 女,硕士研究生。主要研究方向:系统可靠性分析与评估。

段富海 男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:系统可靠性分析与评估。

桑勇 男,博士,副教授,硕士生导师。主要研究方向:机电液一体化系统。

Application of GO-FLOW methodology in reliability analysis of aircraft EHA

LAN Xue, DUAN Fuhai*, SANG Yong

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: The GO-FLOW methodology is applied in the reliability analysis of aircraft electro-hydrostatic actuator (EHA). Firstly, based on the reasonable division of unit function, GO-FLOW reliability analysis model of EHA was established. In order to solve the difficult problem that GO-FLOW chart cannot contain feedback loops, Boolean algebra was used to solve the Boolean equations that describe the feedback loops. Secondly, the GO-FLOW calculation was finished and the system reliability at each time point was obtained. Thirdly, compared with the results of GO methodology, the feasibility and accuracy of GO-FLOW methodology were clearly verified. Finally, the system reliability changing rule with time was obtained through the MATLAB curve fitting so that the system can be repaired and maintained timely. The results show that the GO-FLOW methodology can easily obtain the system reliability at each time point with only one operation and has more advantages than GO methodology in reducing computational complexity.

Keywords: electro-hydraulic actuator (EHA); GO-FLOW methodology; GO methodology; Boolean algebra; reliability analysis

Received: 2016-05-24; **Accepted**: 2016-06-24; **Published online**: 2016-11-23 09:11

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20161123.0911.001.html

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (20150863003)

* **Corresponding author**. E-mail: duanfh@dlut.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn