

# 基于遗传算法的自动驾驶仪测试性分析

邵俊宇, 张宏军, 吴振锋, 梁旗

(上海机电工程研究所, 上海 201109)

**摘要:** 为了提高导弹自动驾驶仪故障测试与诊断的快速性与准确性, 提出了一种基于遗传算法的自动驾驶仪测试性分析方法; 此方法通过分析和解决遗传算法应用于故障测试优选时的难点, 以测试时间最短为优化目标, 得到了故障测试策略的优化方法, 在满足测试覆盖性要求的同时, 能达到最佳的优化效果; 在获得最优测试策略后, 利用故障测试获得的知识, 简化故障与测试间的相关性矩阵, 加快了故障诊断的速度; 最终获得了故障测试与诊断一体化的方法; 实验结果表明, 该方法能有效提高故障测试与诊断的速度, 并且易于实现。

**关键词:** 遗传算法; 自动驾驶仪; 故障测试; 故障诊断

## Analysis of Autopilot Testability Based on Genetic Algorithm

Shao Junyu, Zhang Hongjun, Wu Zhenfeng, Liang Qi

(Shanghai Eletro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency and accuracy of fault test and diagnosis on missile autopilot, a method based on the genetic algorithm was put forward to analyze the testability of autopilot. Through analyzing and solving the problem on how to make genetic algorithm apply to the optimization of test items, and taking the shortest test time as the optimization goal, this method got the best fault test strategy. The strategy could achieve the best optimization and meet the requirement of test coverage. Then the knowledge got from fault test was used to simplify the dependency matrix between fault and test, and the diagnosis speed was increased. Finally a method that combines fault test and fault diagnosis was got. The experiment result shows that the method can increase the speed of fault test and diagnosis. At the same time, the method is easy to implement.

**Keywords:** genetic algorithm; autopilot; fault test; fault diagnosis

## 0 引言

导弹武器的战斗性能主要体现为作战反应时间、飞行速度、有效射程、突防能力、命中概率及破坏效能等方面。缩短作战反应时间则是打赢未来信息化战争, 提高导弹生存能力的关键, 而导弹武器的作战反应时间主要取决于导弹武器自身的机动性能, 测试设备的自动化程度, 以及测试过程中故障诊断所需时间。导弹武器是一个复杂、庞大的系统, 任何一个环节的缺陷都有可能造成任务的失败, 因此, 如何提高导弹测试的高效性和准确性, 如何实现导弹武器系统的故障快速测试与诊断, 对缩短作战反应时间, 提高导弹生存能力和任务成功率, 打赢未来信息化战争至关重要。

本文以测试覆盖率和测试速度为优化目标, 提出了基于遗传算法的自动驾驶仪故障测试策略构建方法; 以往对诊断算法的研究基本都是脱离故障检测的, 本文在测试的基础上构建诊断方法, 最终形成“一次测试, 二次诊断”的故障测试与诊断一体化解决方案, 以提高故障测试与诊断的准确性与高效性。

## 1 故障测试与诊断方法概述

测试性分析一般以故障与测试间相关性矩阵为模型, 故障与测试间的相关性矩阵记<sup>[1]</sup>为

$$FT = \begin{matrix} & T_1 & T_2 & \cdots & T_n \\ \begin{matrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} ft_{11} & ft_{12} & \cdots & ft_{1n} \\ ft_{21} & ft_{22} & \cdots & ft_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ ft_{m1} & ft_{m2} & \cdots & ft_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

其中:  $ft_{ij}$  为布尔变量, 如果  $ft_{ij} = 1$  表示测试  $t_j$  可以检测到故障  $f_i$ ;  $ft_{ij} = 0$  表示测试  $t_j$  不能检测到故障  $f_i$ 。矩阵第  $i$  行矢量  $F_i = [ft_{i1}, ft_{i2}, \dots, ft_{in}]$  描述了故障  $f_i$  发生时全部测试的输出结果, 可视为故障  $f_i$  的故障征兆; 第  $j$  列矢量  $T_j = [ft_{1j}, ft_{2j}, \dots, ft_{mj}]^T$  描述了测试  $t_j$  可以检测到的所有故障, 可反映  $t_j$  的故障检测能力。

很多文献研究对故障测试的优化方法展开了研究, 其中文献 [2] 提出了一种较好的优化方法。该方法基于相关性矩阵选择故障测试点, 简单易用, 可以在测试覆盖率达到 100% 的情况下使得可靠性和测试费用得到优化。但是这种方法得到的是局部最优解, 而不是全局最优解。假设某系统相关性矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

若系统各组成单元的可靠性相同, 各测试的费用相同, 使用文献 [2] 的方法, 选择的测试点为  $T_1, T_2, T_3$ , 需要测试 3 次; 而最优的测试点为  $T_4, T_5$ , 只需要测试两次。此方

收稿日期: 2014-11-04; 修回日期: 2015-01-09。

作者简介: 邵俊宇(1990-), 男, 江苏省泰州市人, 硕士研究生, 主要从事导弹故障诊断方向的研究。

张宏军(1976-), 男, 黑龙江佳木斯人, 研究员, 硕士研究生导师, 主要从事测试系统总体设计、故障诊断等方向的研究。

法不能得到全局最优解的原因在于，每一个测试点的选择都会影响到下一步测试点的选择，每一步的最优不能保证全局的最优。针对这种情况，必须对所有的测试点选择组合都进行考虑，这是一个 NP-难问题，可采用遗传算法进行求解。

对于故障诊断方法的研究，文献 [2] 提出了一种隔离用测试点的选择方法，能以较少的隔离步骤隔离测试点。但是，很多时候故障的测试与诊断并不是孤立的，一般自动驾驶仪在检测出故障后就会需要进行故障诊断，如果可以利用故障测试中检测到的故障知识辅助诊断，就可以大大缩短诊断时间。

## 2 自动驾驶仪故障测试和诊断方法研究

### 2.1 基于遗传算法的故障测试优化

故障测试的目标就是检测系统中是否存在故障。这里以测试时间最短为优化目标，同时使得故障检测覆盖率达到 100%。遗传算法作为一种通用方法，可应用于很多领域，已在测试性优化分配中得到应用<sup>[3]</sup>，但是使用遗传算法进行故障测试时间优化的研究并不多，原因在于：

- 1) 对于某些系统，某些关键部件的测试项目是必须进行测试的，不能用于优化；
- 2) 故障测试有覆盖性的要求，染色体经过交叉与变异之后不满足此要求的可能性很大，甚至所有的新染色体都不满足，如果去除不满足的染色体，算法很难进行下去；
- 3) 对于以测试时间最短为优化目标的情况，如果某些测试可以同时进行，遗传算法需要考虑到这种情况才成正确优化。

结合自动驾驶仪的特性，给出以下解决方案：

- 1) 自动驾驶仪测试中，电源模块和弹上计算机的故障会引起不可预知的后果，必须先进行测试，预先选择这两个故障的测试点，并在相关性矩阵中删除这个两个故障所在的行与其对应测试点所在的列，用于遗传算法的优化；
- 2) 对于不满足故障测试覆盖性要求的染色体不进行删除，而是改进适应度评估方法，降低不满足要求的染色体的适应度，使得此染色体被选中的概率降低；
- 3) 驾驶仪测试中，有些测试是可以同时进行的，如，由于数据采集设备的快速性，可分时复用，采集滚动回路数据时，四个舵的舵电压可以同时采集。以时间最短为优化目标时，把可以同时进行的测试对对应的元素进行布尔加运算，合并成一列，再进行优化。

设经过处理后的相关性矩阵为  $FT$ ，遗传算法的关键之一是选择有效的染色体对解编码。建立染色体为：

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \tag{3}$$

其中：  $x_1, x_2, \dots, x_n \in \{0, 1\}$ ，  $n$  表示测试点总个数。编码  $x_i = 1$  表示选择测试点  $T_i$ ，否则表示不选择该测试点。

设各测试花费的时间为：

$$C = [c_1, c_2, \dots, c_n] \tag{4}$$

其中：  $c_1, c_2, \dots, c_n > 0$ ，  $c_i$  表示测试  $T_i$  的测试时间。可计算选择的测试点的总时间  $Cost$  为：

$$Cost = X \times C^T \tag{5}$$

算法需要判断染色体是否满足故障覆盖性要求。如果满足式 (6)，则故障覆盖率达到 100%。

$$\bigcap FT \times X^T = 1 \tag{6}$$

式 (6) 表示把选择的测试列向量对应的元素作布尔加法，

再把得到的列向量所有的元素作布尔乘法，如果此时结果为 1 则满足覆盖率为 100% 的要求，否则不满足。如果不满足，在剩余的测试中选择测试，使得染色体中的测试与选择的测试组合后可以满足覆盖性要求，设选择测试的总时间为  $Cost'$ 。

适应度函数定义为：

$$fit = \begin{cases} \frac{1}{Cost}; \gamma = 100\% \\ \frac{1}{Cost + Cost' \times 2}; \gamma < 100\% \end{cases} \tag{7}$$

然后使用遗传算法求取最优的测试点，遗传算法的框图如图 1 所示。

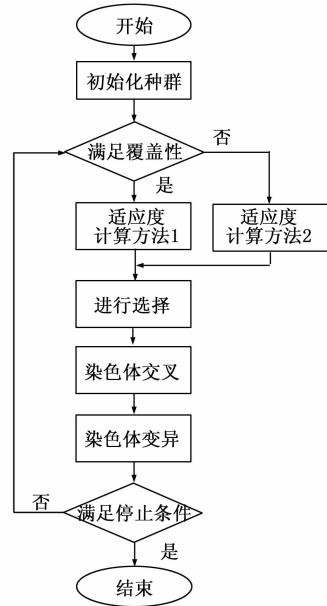


图 1 遗传算法运算框图

种群的规模一般与染色体编码长度有关，初始种群应随机选取。算法运行时，应使交叉概率较大，而变异概率较小。

交叉方法采用双亲双子法<sup>[4]</sup>。确定双亲后，该方法以一个随机位把位之后的所有基因对换，对换后形成两个后代，考虑如下两个染色体。

父代 A: (1 0 0 | 1 0 0)

父代 B: (0 1 0 | 0 1 0)

交叉后的子代为：

子代 A: (1 0 0 | 0 1 0)

子代 B: (0 1 0 | 1 0 0)

停止条件为连续多次最优值不发生变化。通过遗传算法的优化，可以选择出最优的测试项目，以最快时间完成故障测试。

### 2.2 自动驾驶仪测试性建模分析

系统检测出故障后，需定位故障的位置。由于已经有了检测时产生的信息，此时的诊断并不是孤立的诊断，需要利用检测信息辅助诊断，减少诊断的时间。

假设故障测试使用的测试点为  $T_1, T_2, \dots, T_i$ ，测试点  $T_1, T_2, \dots, T_{i-1}$  均未检测到故障，测试点  $T_i$  检测到故障。这说明测试点  $T_1, T_2, \dots, T_{i-1}$  所有列向量中数值为 1 的元素所在的行

对应的“故障”均未发生故障, 故障发生在测试点  $T_i$  列向量中数值为 1 的元素对应的“故障”中。可利用此信息简化相关性矩阵, 减少故障诊断所用的时间。简化相关性矩阵的步骤如下。

STEP 1: 对于未检测到故障的测试点  $T_1; T_2; \dots, T_{i-1}$ , 在相关性矩阵中依次删除这些测试点所在的列, 以及这些列中为“1”的元素所在的行。

STEP 2: 在剩余的相关性矩阵中, 如果  $T_i$  只有一个元素值为 1, 则故障就是该元素所在列对应的故障, 结束流程; 如果值为 1 的元素不止一列, 则进入 STEP 3。

STEP 3: 删除  $T_i$  这一列和  $T_i$  中值为 0 的元素所在的行。

STEP 4: 完成操作后, 在剩余矩阵中删除元素都是 0 的行和列, 得到利用故障测试知识简化的相关性矩阵。

STEP 5: 利用故障诊断算法, 如文献 [2] 中的故障诊断算法, 完成故障诊断。

由于利用了检测时得到的信息, 可以大大减少诊断步骤。

### 3 应用实例

自动驾驶仪是导弹系统的核心之一, 由弹上计算机、电源模块、陀螺仪、加速度计、舵系统等模块组成<sup>[5]</sup>。自动驾驶仪的测试和诊断复杂, 为了提高自动驾驶仪的测试效率, 采用“一次测试, 二次诊断”的方法。先检测系统是否有故障, 如有故障, 就根据检测的知识简化相关性矩阵, 减少诊断时间。这里假设自动驾驶仪故障与测试间的相关性矩阵如表 1 所示, 每一步测试时间都设为“1”, 测试时间最短即为测试与诊断的步骤最少。

表 1 自动驾驶仪故障与测试间相关性矩阵

	t1	...	t20	t21	t22	t23	...	t31	t32
F1	1	...	0	0	0	0	...	0	0
F2	0	...	0	0	0	0	...	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
F9	0	...	0	1	1	0	...	1	0
F10	0	...	0	1	1	0	...	1	0
F11	0	...	1	1	1	1	...	1	1
F12	0	...	1	1	1	1	...	1	1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
F31	0	...	0	0	0	0	...	1	0
F32	0	...	0	0	0	0	...	0	1

为了防止在电压或弹上计算机故障时进行的操作对导弹造成损伤, 先进行“电压检测”和“计算机自检”。根据 2.1 节的方法优选测试项目, 先删除“电源模块故障”和“计算机故障”两行, 以及“电压检测”和“计算机自检”两列; 再把可同时检测的测试项目合并为“舵系统测试”, “滚动回路测试”, “俯仰回路测试”和“偏航回路测试”; 最后使用改进的适应度函数进行遗传算法优化, 可得到最优的测试项目为“电压检测”, “计算机自检”, “滚动回路测试”, “俯仰回路测试”和“偏航回路测试”。可以看出, 不论发生什么故障, 最多 5 步就可以检测出来, 避免了盲目进行所有测试项目的测试。

假设进行“电压检测”测试时检测到故障, 由于“电压检测”测试点仅对应一个故障, 根据 2.2 节提出的诊断方法, 则

不需要再增加任何诊断测试点, 就可以诊断出故障为“电压模块”故障。

下面考虑更加复杂的情况, 假设在进行“电压检测”和“计算机自检”没有发现故障, 在进行“滚动回路测试”项目时发现其中的“1 舵滚动弹道检测”测试发现故障, 根据 2.2 节的诊断方法, 简化后的相关性矩阵如表 2 所示。

表 2 简化后的相关性矩阵

	t14	t17	t21	t22	t23	t24	t27	t30
F14	1	0	1	0	0	1	1	1
F17	0	1	1	0	0	1	1	1
F21	0	0	1	0	0	0	0	0
F23	0	0	1	1	1	0	0	0

此时相关性矩阵已大大简化, 可选用合适的故障诊断方法进行故障诊断。如选择文献 [2] 的故障诊断方法, 最多只需要进行两次诊断就可以定位故障。如果孤立地进行故障诊断, 就要从表 1 给出的矩阵开始分析, 花费大量时间。此简化方法大大简化了相关性矩阵, 缩短了诊断时间。

### 4 结论

针对遗传算法在测试时间优化上存在的问题, 提出了基于遗传算法的自动驾驶仪测试性分析方法, 此方法解决了遗传算法应用于故障测试时间优化的难点, 可以构建最优的故障测试策略, 优选后的测试项目可使测试时间达到最短; 再利用测试获得的知识简化故障与测试间的相关性矩阵, 缩短故障诊断的时间, 由此构建了故障测试与诊断一体化的解决方案, 有效提高了测试与诊断的效率。

#### 参考文献:

[1] 邱静, 刘冠军, 等. 装备测试性建模与设计技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.  
 [2] 蒋俊荣, 黄考利, 吕晓明, 等. 基于混合诊断模型的诊断设计优化方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (6): 1287-1289.  
 [3] 王宝龙, 黄考利, 苏林, 等. 基于遗传算法的复杂电子装备测试性优化分配 [J]. 计算机测量与控制, 2007, 15 (7): 925-928.  
 [4] 邢文训. 现代优化计算方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.  
 [5] 李岩, 杨洪柱. 防空导弹测试技术与遥测系统应用设计 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 1995.

#### 更正

2015 年 3 期文章《汽车恒速下坡用水力缓速器控制策略研究》中, 第二作者罗卫东信息更改如下:

通讯作者: 罗卫东 (1962-), 男, 贵州习水人, 教授, 硕士生导师, 主要从事机械工程学科方向的研究。