

# 基于设计特性覆盖的测试性定量分析方法

石君友, 王璐, 李海伟, 王风武

(北京航空航天大学可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 针对目前测试性分析基于故障分析的现状, 提出了一种基于系统结构、性能、功能的测试性定量分析方法。定义了系统设计特性覆盖测试模型, 系统结构、功能、性能及测试关联模型, 性能覆盖率、功能覆盖率、结构覆盖率的定量计算模型。建立了基于设计特性覆盖的测试性定量分析流程, 主要包括系统基本信息建立、信息间直接关联关系生成, 测试覆盖率定量计算及测试未覆盖项分析。以某飞机舵机系统为例进行了应用, 结果验证了方法的可行性和有效性。

**关键词:** 测试性; 性能覆盖率; 功能覆盖率; 结构覆盖率; 测试性分析

**中图分类号:** TN 06

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.02.38

## Quantitative analysis of system testability based on design characteristics

SHI Jun-you, WANG Lu, LI Hai-wei, WANG Feng-wu

(School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Aiming at the situation that current testability analysis methods are based on failure analysis, a quantitative testability analysis method based on system structure, performance and function is proposed. Mathematical definitions of this method are established, including the test set of system design characteristics, the direct relationship set among system function sets, performance sets, structure sets and test sets. Performance coverage rate, function coverage rate, and unit coverage rate are also defined. The engineering operation flow of this method is established, which includes establishing basic information, generating direct relationship between the information, calculating of test coverage rate, analyzing the design characteristics of terms which are not tested. A plane's servo system is taken as an example for the engineering application, which shows that this method is feasible and effective.

**Keywords:** testability; performance coverage rate; function coverage rate; unit coverage rate; testability analysis

## 0 引言

测试性作为系统和设备的一种便于测试和诊断的重要设计特性<sup>[1]</sup>, 在提高执行任务的可靠性<sup>[2]</sup>与安全性, 提高系统可用性<sup>[3]</sup>, 减少系统使用保障费用<sup>[4]</sup>等方面具有显著效果, 现已大量应用于现代航空航天和武器系统中<sup>[5-7]</sup>。

目前, 在测试性试验阶段, 文献<sup>[8]</sup>中提出单元覆盖充分性度量和准则、功能覆盖充分性度量和准则、测试覆盖充分性度量和准则来综合评价测试性试验样本集的充分程度, 为指导样本选取提供了参考依据。在软件测试方面, 共有 10 余种测试覆盖率指标<sup>[9-10]</sup>来度量软件测试充分程度。在测试性设计<sup>[11]</sup>工程应用中, 传统的测试性是以系统的故障作为对象进行测试, 并采用故障检测率和故障隔离率<sup>[12]</sup>来度量 and 评价各种类型测试对系统故障的测试覆盖能力<sup>[13-15]</sup>。在工程实际中, 针对故障测试覆盖情况的分析和

改进工作具有很大的不便性, 主要体现在两个方面, 第一是对故障的分析处理需要复杂的可靠性专业知识和工作来支持; 第二是工程设计人员在系统设计时, 直接面对的是系统的性能参数、功能、结构, 而不是故障, 由于二者之间没有直接的相关关系, 因此工程设计人员不能根据故障测试覆盖情况直观地知道测试在系统性能参数、功能或者结构覆盖方面的具体覆盖情况和不足, 不便于开展相应的改进工作。

针对这一问题, 本文提出根据系统的测试配置, 直接分析出测试对系统结构、功能和性能参数的覆盖程度, 定量评价测试覆盖能力, 从而发现测试设计不足, 为改进设计提供参考。

## 1 测试性定量分析原理

### 1.1 系统设计特性分类

进行测试的目的是为了确定产品是否处于正常可用状

态,因此进行测试性定量分析时,可以选择的设计特性如图 1 所示。

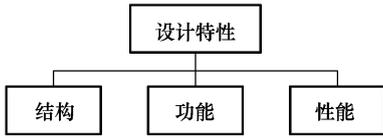


图 1 设计特性分类

(1) 结构

产品的每个组成单元是否正常是判定产品是否正常的基础,能否对产品的所有组成单元进行完整的测试是确认产品正常可用的必要途径。系统的结构是有层次关系的,其划分方法有多种,如分系统、外场可更换单元(line replaceable unit, LRU)、车间可更换单元(shop replaceable unit, SRU)、元部件,或者组件、分组件、板件、元部件、元器件等。

(2) 功能

使用产品的目的是因为产品能够完成所需的功能,能否对产品的所有功能进行完整的测试是确认产品正常可用的重要途径。

(3) 性能

产品的性能参数是否在规定范围之内是确保产品顺利完成规定任务的关键,能否对产品的所有性能参数进行完整的测试关系到能否为用户提供最优性能的服务。

1.2 基于设计特性覆盖的测试性定量分析原理

系统具有特定的属性,对系统进行测试时,系统特性的一部分也同时被测试。基于设计特性覆盖的测试性定量分析方法,通过考虑系统结构、功能、性能参数与测试项之间的关联关系得知测试项覆盖到的特性,根据系统原有的特性和测试覆盖的特性,可以计算出系统的性能覆盖率、功能覆盖率及结构覆盖率,从而实现对系统的结构特性、功能特性和性能特性的测试覆盖程度进行定量分析,其组成要素包括:对象、测试、设计特性、覆盖特性、性能覆盖率、功能覆盖率及结构覆盖率,如图 2 所示。

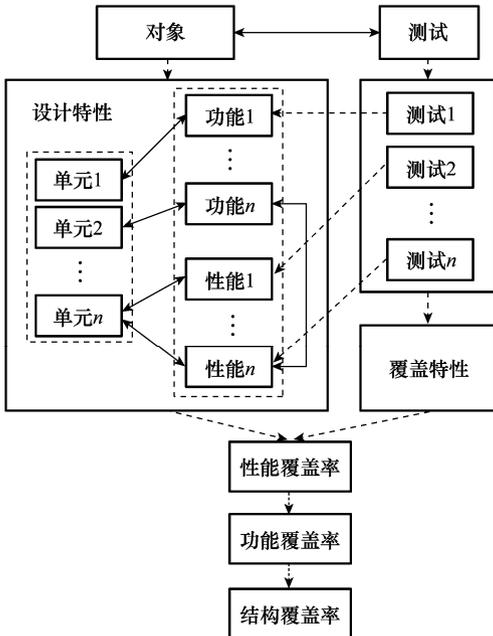


图 2 测试性定量分析原理

2 测试性定量分析方法的数学定义

定义 1 系统设计特性覆盖测试模型。定义如下四元组:

$$M = (U, F, P, T) \quad (1)$$

式中, $M$ 表示系统设计特性覆盖测试模型; $U$ 表示非空有限的系统结构集合, $U = \{u_k | k = 1 \sim K\}$ , $u_k$ 表示系统结构划分中特定层次位置的第  $k$  个结构单元, $K$ 为结构单元的数量; $F$ 表示非空有限的系统功能集合, $F = \{f_k | k = 1 \sim M\}$ , $f_k$ 表示系统的第  $k$  个功能项, $M$ 为系统功能项的数量; $P$ 表示非空有限的系统性能参数集合, $P = \{p_k | k = 1 \sim Q\}$ , $p_k$ 表示系统的第  $k$  个性能参数, $p = (p_n, p_w)$ , $p_n$ 表示性能参数的名字, $p_w$ 表示性能参数的标称值范围, $Q$ 为系统性能参数的数量; $T$ 表示非空有限的系统测试集合, $T = \{t_k | k = 1 \sim R\}$ , $t_k$ 表示系统的第  $k$  个测试项, $t = (t_n, t_l)$ , $t_n$ 表示测试项的名字, $t_l$ 表示测试项的类型,测试类型根据系统具体情况确定, $R$ 为系统测试项的数量。

定义 2 系统结构、功能、性能及测试关联模型。定义如下五元组:

$$M_R = (R_{U-F}, R_{F-P}, R_{U-P}, R_{P-T}, R_{F-T}) \quad (2)$$

式中, $M_R$ 表示系统结构、功能、性能及测试关联模型; $R_{U-F}$ 表示结构与功能直接关联关系集合, $R_{U-F} = \{(u_{k1}, f_{k2}) | u_{k1} \in U, f_{k2} \in F, k1 \leq K, k2 \leq M\}$ ;  $R_{F-P}$ 表示功能与性能参数直接关联关系集合, $R_{F-P} = \{(f_{k1}, p_{k2}) | f_{k1} \in F, p_{k2} \in P, k1 \leq M, k2 \leq Q\}$ ;  $R_{U-P}$ 表示结构与性能参数直接关联关系集合, $R_{U-P} = \{(u_{k1}, p_{k3}) | u_{k1} \in U, p_{k3} \in \{P \setminus \{p_{k2}\}\}, k1 \leq K, k2 \leq Q, k3 \leq Q\}$ ;  $R_{P-T}$ 表示性能参数与测试直接关联关系集合, $R_{P-T} = \{(p_{k1}, t_{k2}) | p_{k1} \in P, t_{k2} \in T, k1 \leq Q, k2 \leq R\}$ ;  $R_{F-T}$ 表示功能与测试直接关联关系集合, $R_{F-T} = \{(f_{k1}, t_{k3}) | f_{k1} \in F, t_{k3} \in \{T \setminus \{t_{k2}\}\}, k1 \leq M, k2 \leq R, k3 \leq R\}$ 。

定义 3 性能覆盖率。性能覆盖率(performance coverage rate, PCR)是指在产品性能特性的特定层次的性能参数集合中,规定级别的测试集可以测试到的性能参数比率。PCR 的计算模型定义为

$$\gamma_{PC} = \frac{|P'_L|}{|P_L|} \times 100\% \quad (3)$$

式中, $\gamma_{PC}$ 表示系统 PCR; $P_L$ 表示特定性能层次的性能参数集合, $|P_L|$ 表示集合  $P_L$  的基数; $P'_L$ 表示测试覆盖的特定性能层次的性能参数集合,即  $P'_L = \{p'_k | \exists t_k \in T \text{ s. t. } (p'_k, t_k) \in R_{P-T}\}$ , $|P'_L|$ 表示集合  $P'_L$  的基数。

定义 4 功能覆盖率。功能覆盖率(function coverage rate, FCR)是指在产品功能特性的特定层次的功能集合中,规定级别的测试集可以测试到的功能比率。FCR 的计算模型定义为

$$\gamma_{FC} = \frac{|F'_L|}{|F_L|} \times 100\% \quad (4)$$

式中,  $\gamma_{FC}$  表示系统 FCR;  $F_L$  表示功能特定层的功能项集合,  $|F_L|$  表示集合  $F_L$  的基数;  $F'_L$  表示测试集覆盖的功能特定层的功能项集合, 即  $F'_L = \{f'_k | \exists t_k \in T, p_k \in P \text{ s. t. } (p_k, t_k) \in R_{P-T}, (f'_k, p_k) \in R_{F-P}\} \cup \{f'_k | \exists t_k \in T \text{ s. t. } (f'_k, t_k) \in R_{F-T}\}$ ,  $|F'_L|$  表示集合  $F'_L$  的基数。

**定义 5** 结构覆盖率。结构覆盖率(unit coverage rate, UCR)是指在产品结构特性的特定层次的单元集合中, 规定级别的测试集可以测试到的单元比率。UCR 的计算模型定义为

$$\gamma_{UC} = \frac{|U'_L|}{|U_L|} \times 100\% \quad (5)$$

式中,  $\gamma_{UC}$  表示系统 UCR;  $U_L$  表示结构特定层的单元集合,  $|U_L|$

表示集合  $U_L$  的基数;  $U'_L$  表示测试集覆盖的结构特定层单元集合,  $U'_L = \{u'_k | \exists t_k \in T, p_k \in P \text{ s. t. } (p_k, t_k) \in R_{P-T}, (u'_k, p_k) \in R_{U-P}\} \cup \{u'_k | \exists f_k \in F, t_k \in T \text{ s. t. } (f_k, t_k) \in R_{F-T}, (u'_k, f_k) \in R_{U-F}\} \cup \{u'_k | \exists t_k \in T, p_k \in P, f_k \in F \text{ s. t. } (p_k, t_k) \in R_{P-T}, (f_k, p_k) \in R_{F-P}, (u'_k, f_k) \in R_{U-F}\}$ ,  $|U'_L|$  表示集合  $U'_L$  的基数。

### 3 测试性定量分析流程

基于设计特性覆盖的测试性定量分析流程如图 3 所示, 包括 3 个步骤: 建立系统基本信息, 建立基本信息间的直接关联关系、性能覆盖率、功能覆盖率、结构覆盖率的定量计算以及测试未覆盖项分析。

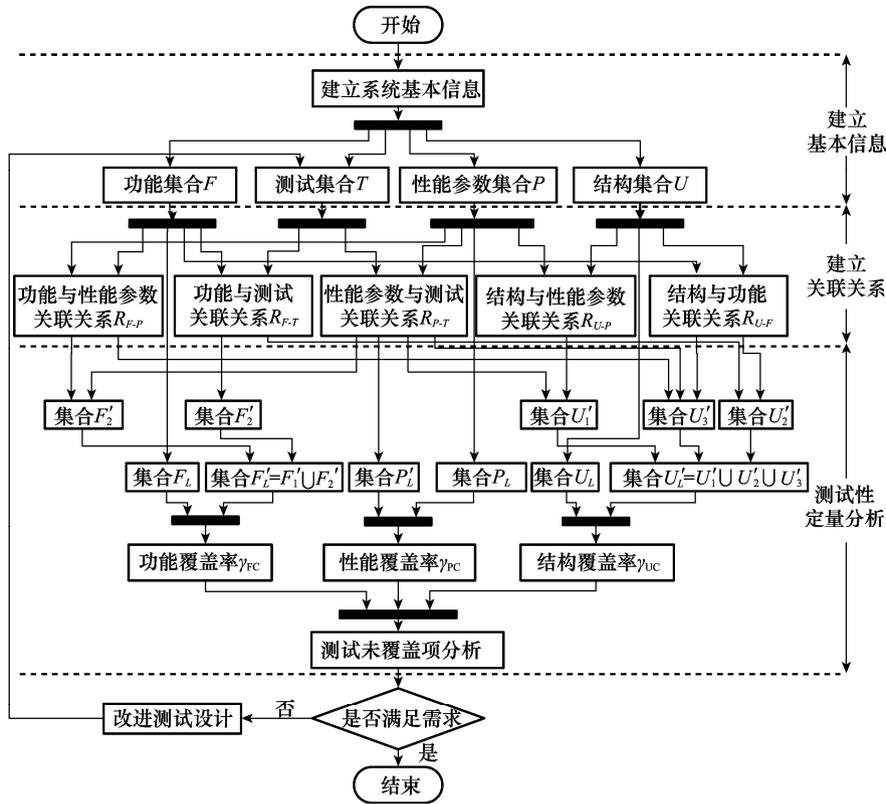


图 3 基于设计特性覆盖的测试性定量分析流程图

#### 3.1 建立系统结构、功能、性能参数和测试基本信息

(1) 根据系统结构设计资料, 确定系统的实际结构层次划分, 选定进行测试性定量分析的结构层次位置, 并进一步确定出该层次位置的所有结构单元, 记录其名称, 建立系统的结构集合  $U$ 。

(2) 根据系统的功能设计资料分析出系统应具备的各级功能, 记录各功能项的名称, 建立系统功能集合  $F$ 。

(3) 根据系统的性能设计资料记录各性能参数的名称和标称值范围, 建立系统性能参数集合  $P$ 。

(4) 系统的测试项按不同的划分原则可划分为不同的

测试类型, 如按测试手段的不同可以划分为机内测试 (built-in test, BIT)、外部自动测试 (automatic test equipment, ATE) 和人工测试等类型; 按测试场景的不同可以划分为内场测试、外场测试等类型。根据系统的测试设计资料, 确定系统的测试类型, 选定进行测试覆盖定量分析的测试类型, 并进一步确定出各类测试的所有测试项, 记录各类型中各测试项的名称, 建立系统的测试集合  $T$ 。

#### 3.2 建立系统基本信息间的直接关联关系

建立系统基本信息的直接关联关系的流程如图 4 所示。

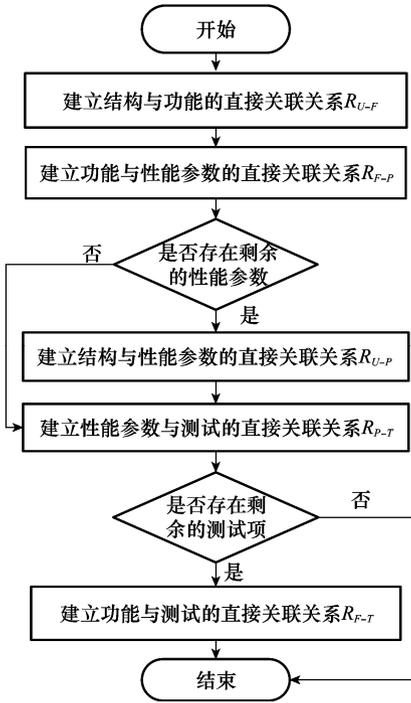


图 4 建立基本信息直接关联关系流程图

(1) 如果一个结构单元参与了一个功能项的实现,则该结构单元和该功能项之间存在直接关联关系。根据这一原则,建立结构与功能的直接关联关系  $R_{U-F}$ 。

(2) 如果一个功能项包含性能参数,则该功能和该性能参数之间存在直接关联关系;如果一个功能项是否受影响性能参数的量值,则该功能和该性能参数之间存在直接关联关系。根据这一原则,建立功能与性能参数的直接关联关系  $R_{F-P}$ 。

(3) 对于已经与功能建立了直接关联关系的性能参数,不再建立与结构的直接关联关系;对于剩余的性能参数,如果一个结构单元对一个性能参数的变化有影响,则该结构单元和该性能参数之间存在直接关联关系。根据这一原则,建立结构与性能参数的直接关联关系  $R_{U-P}$ 。

(4) 如果在一个测试项执行中,一个性能参数的量值能够被测试,则该性能参数和该测试项之间存在直接关联关系。根据这一原则,建立性能参数与测试的直接关联关系  $R_{P-T}$ 。

(5) 对于已经与性能参数建立直接关联关系的测试项,不再建立与功能的直接关联关系;对于剩余的测试项,如果在一个测试项执行中,一个功能项被测试到,则该功能项和该测试项之间存在直接关联关系。根据以上原则,建立功能与测试的直接关联关系  $R_{F-T}$ 。

### 3.3 基于设计特性的测试性定量分析

#### 3.3.1 测试覆盖率定量计算

在建立了系统基本信息和关联关系的基础上,可以进行性能覆盖率、功能覆盖率和结构覆盖率的计算,为发现和分析测试未覆盖设计特性提供数据支持。

(1) 性能覆盖率的计算

根据系统的性能参数集合  $P$ 、性能参数与测试直接关联关系集合  $R_{P-T}$ ,依据指定的测试类型,确定出特定性能层次的性能参数集合  $P_L$  和该测试类型所有测试项关联的性能参数集合  $P'_L$ ,由定义 3 计算出系统的 PCR。

#### (2) 功能覆盖率的计算

根据系统的性能参数集合  $F$ 、功能与性能参数直接关联关系集合  $R_{F-P}$ 、性能参数与测试直接关联关系  $R_{P-T}$ 、功能与测试直接关联关系集合  $R_{F-T}$ ,依据指定的测试类型,确定出特定功能层次的功能项集合  $F_L$  和该测试类型所有测试项间接关联的功能项集合  $F'_L$ ,由定义 4 计算出系统的 PCR。

#### (3) 结构覆盖率的计算

根据系统的结构集合  $U$ 、结构与性能参数直接关联关系集合  $R_{U-P}$ 、性能参数与测试直接关联关系  $R_{P-T}$ 、结构与功能直接关联关系集合  $R_{U-F}$ 、功能与测试直接关联关系  $R_{F-T}$ 、功能与性能参数直接关联关系集合  $R_{F-P}$ 、依据指定的测试类型,确定出特定结构层次的单元集合  $U_L$  和该测试类型所有测试项间接关联的结构单元集合  $U'_L$ ,由定义 5 计算出系统的结构覆盖率。

#### 3.3.2 测试性未覆盖项分析

根据测试覆盖的定量分析,可以得到各类测试对系统性能参数、功能、结构的覆盖程度,在此基础上分析出测试没有覆盖的具体设计特性。

在后续迭代设计工作中,应考虑改进必要性、实施难度、改进费用等主客观因素,来决定是否开展测试设计改进,以进一步提高性能覆盖率、功能覆盖率和结构覆盖率。确有需要进行改进的,在改进测试设计后,可开展新一轮测试性定量分析。

## 4 应用举例

某型飞机的舵机系统是飞机制导控制系统的关键组成部分,其功能是在飞机飞行时,根据飞控系统的 4 个指令信号,使 4 个舵面形成与指令信号成比例的舵偏角,控制飞机的飞行姿态。根据该飞机的测试性要求,需要对舵机系统进行测试覆盖分析,以完善系统的测试性设计。

通过对该系统结构设计方案进行分析,确定该系统的结构层次如图 5 所示,其中最下层是系统的 SRU。

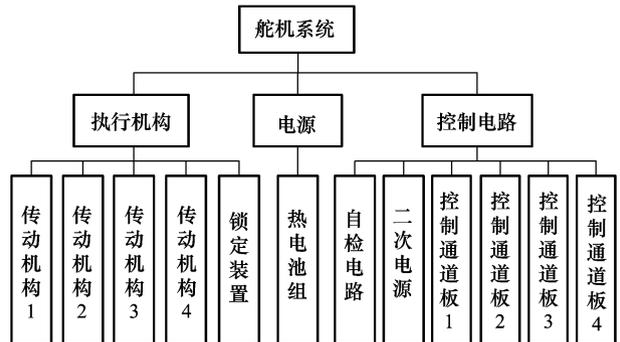


图 5 系统的结构层次图

### 4.1 建立飞机舵机系统的基本信息集合

(1) 选定 SRU 作为分析的结构层次,确定结构单元集合  $U$ ,共有 12 个 SRU 级结构单元(详细表略)。

(2) 根据该舵机的工作方案,舵机在功能组成上仅有一个层次,即一级功能;确定该舵机的一级功能集合  $F$ ,共有 20 个一级功能(详细表略)。

(3) 根据舵机的设计说明书和任务说明书,为保证舵机的正常运行,确定在使用过程中舵机所应该达到的性能指标参数集合  $P$ ,共有 8 个性能参数(详细表略)。

(4) 用为舵机设计的测试项目构建测试集合  $T$ ,共有 28 个测试项目(详细表略)。

### 4.2 建立飞机舵机系统基本信息间的直接关联关系

(1) 建立飞机舵机系统结构与功能的直接关联关系  $R_{U-F}$ (详细表略)。

(2) 建立飞机舵机系统功能项与性能参数之间的直接关联关系  $R_{F-P}$ ,如表 1 所示。

表 1 舵机功能-性能关联关系表

功能编号	功能名称	性能参数编号	性能参数名称
F001	综放校正 1	P002	空载零偏
		P005	标准状态传递系数
F002	综放校正 2	P002	空载零偏
		P005	标准状态传递系数
F003	综放校正 3	P002	空载零偏
		P005	标准状态传递系数
F004	综放校正 4	P002	空载零偏
		P005	标准状态传递系数
F005	功率放大 1 (功率放大 2、3、4)	P002	空载零偏
F006		P003	空载角速度
F007	功能自检	P004	标准状态力矩
F008		P005	标准状态传递系数
F015	变速调节 1 (变速调节 2、3、4)	P001	自检时间
F009		P005	标准状态传递系数
F010	控制信号接收	P008	舵偏角为基准值时的相位滞后
F011		P006	空载时标准转角
F012	舵偏角输出	P005	标准状态传递系数
F016		P006	空载时标准转角
F017			

(3) 建立飞机舵机系统结构与性能参数的直接关联关系  $R_{U-P}$ (详细表略)。

(4) 建立飞机舵机系统性能参数与测试的直接关联关系  $R_{P-T}$ ,如表 2 所示。

(5) 建立飞机舵机系统功能与测试的直接关联关系  $R_{F-T}$ ,如表 3 所示。

表 2 舵机性能参数-测试关联关系表

性能参数编号	性能参数名称	测试编号	测试名称
P002	空载零偏	T005	空载零偏 1
		T006	空载零偏 2
		T007	空载零偏 3
		T008	空载零偏 4
P003	空载角速度	T009	空载角速度 1
		T010	空载角速度 2
		T011	空载角速度 3
		T012	空载角速度 4
P004	标准状态力矩	T013	标准状态通道 1 力矩测试
		T014	标准状态通道 2 力矩测试
		T015	标准状态通道 3 力矩测试
		T016	标准状态通道 4 力矩测试
P005	标准状态传递系数	T001	1 通道舵偏角测试
		T002	2 通道舵偏角测试
		T003	3 通道舵偏角测试
		T004	4 通道舵偏角测试
		T025	通道 1 反馈测试
		T026	通道 2 反馈测试
		T027	通道 3 反馈测试
		T028	通道 4 反馈测试
P006	空载时标准转角	T001	1 通道舵偏角测试
		T002	2 通道舵偏角测试
		T003	3 通道舵偏角测试
		T004	4 通道舵偏角测试
P007	解锁时间	T020	开通操作测试
		T024	控制信号测试

表 3 舵机功能-测试关联关系表

性能参数编号	性能参数名称	测试编号	测试名称
F013	正压供电	T019	正负电压测试
F014	负压供电	T019	正负电压测试
F015	功能自检	T018	自检时间测试
		T021	自检电压测试
F020	舵机自供电	T017	自供电测试
		T022	供电电压测试
		T023	自供电切换测试

### 4.3 定量分析基于设计特性的测试性

#### 4.3.1 基于设计特性的测试性定量计算

根据已建立的该飞机舵机系统的设计特性、测试集合已经它们之间的关联关系,按流程进行测试性定量计算,结果如表 4 所示。

表4 测试性定量分析应用示例

	性能覆盖率	功能覆盖率	结构覆盖率
设计特性	$ P_L =8$	$ F_L =20$	$ U_L =12$
和测试关联的特性	$ P'_L =6$	$ F'_L =18$	$ U'_L =11$
测试性定量分析	$\gamma_{PC}=75\%$	$\gamma_{FC}=90\%$	$\gamma_{UC}=91.67\%$

#### 4.3.2 测试未覆盖项分析

由表4可知,性能覆盖率为75%、功能覆盖率为90%、结构覆盖率为91.67%。进一步分析出测试未覆盖的设计特性,如表5所示。在后续迭代设计工作中,应根据必要性和实施难度开展测试设计改进,以进一步提高性能覆盖率、功能覆盖率和结构覆盖率。

表5 测试性未覆盖项分析示例

测试未覆盖的特性类型	特性编号	特性名称
性能参数	P001	自检时间
	P008	舵偏角为基准值时的相位滞后
功能项	F018	解锁信号指示
	F019	舵面锁定
结构单元	U010	锁定装置

## 5 结论

本文提出的基于系统设计特性的测试性定量分析方法突破了现有基于故障的测试性分析模式,能够在设计阶段分析出测试对系统结构、功能和性能参数的覆盖程度,定量评价测试覆盖能力,使设计人员直接得到测试性在系统结构、功能、性能参数覆盖上的设计不足,借此改进设计。本方法计算过程较为复杂,还需要进一步设计开发辅助软件以实现自动化操作。

### 参考文献:

[1] 石君友,龚晶晶. BIT综合表示模型研究[J]. 航空学报,2010,31(7):1475-1480. (Shi J Y, Gong J J. Study on model for BIT integrated expression[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010,31(7):1475-1480.)

[2] 马存宝,王彦文,史浩山,等. 机载电子设备BIT优化设计技术研究[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(9):2271-2279. (Ma C B, Wang Y W, Shi H S, et al. Study on BIT optimization design of airborne electronic equipment[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009,31(9):2271-2279.)

[3] Drees R, Young N. Role of BIT in support system maintenance and availability[J]. *Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2004,19(8):3-7.

[4] Ungar L. Testability design prevents harm[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2010,25(3):35-43.

[5] Ma X F, Huang W H, Zhang J Z. Built-in test system for submarine-launched missile model[C]// *Proc. of the 1st International Conference on Pervasive Computing, Signal Processing and Applications*, 2010:1268-1272.

[6] Dietmar K, Roman A, Robert W. Analysis of a built-in test architecture for direct-conversion SiGe millimeter-wave receiver frontends[C]// *Proc. of the Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2010:944-948.

[7] Zhang X Z, Sheng W. Design and implementation of an embedded diagnosis system for radar built-in test equipment[C]// *Proc. of the 1st International Symposium on Intelligence Information Processing and Trusted Computing*, 2010:173-176.

[8] 石君友,康锐,田仲. 基于信息模型的测试性试验样本集充分性研究[J]. 北京航空航天大学学报,2005,31(8):874-878. (Shi J Y, Kang R, Tian Z. Study on sufficiency of sample set in testability demonstration based on information model [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005,31(8):874-878.)

[9] Wang S, Ji Y D, Yang S Y. A stochastic combinatorial optimization model for test sequence optimization [R]. Sanya: IEEE Press, 2010,5(9):1424-1434.

[10] 安金霞,王国庆,李树芳,等. 基于多维度覆盖率的软件测试动态评价方法[J]. 软件学报,2010,21(9):2135-2147. (An J X, Wang G Q, Li S F, et al. Dynamic evaluation method based multi-dimensional test coverage for software testing[J]. *Journal of Software*, 2010,21(9):2135-2147.)

[11] Pecht M, Dube M, Natishan M, et al. Evaluation of built-in test[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2001,37(1):266-271.

[12] Liu D D, Li Y H, Zeng C H. The fault injection system applied to laboratory's test validation of FDR and FIR[C]// *Proc. of the 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety*, 2009:893-897.

[13] 王红敏,高勇,杨媛. GPS基带芯片中存储器的可测性设计[J]. 电子器件,2009,32(2):306-310. (Wang H M, Gao Y, Yang Y. Design for testability of memory in GPS baseband chip[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2009,32(2):306-310.)

[14] Zhang X J, Wang D Z, Jiang T M, et al. A research on BIT single-fault threshold value setting approach based on ROC[C]// *Proc. of the International Conference on Communications and Intelligence Information Security*, 2010:36-39.

[15] Antoni M. Formal validation method for computerized railway interlocking systems[C]// *Proc. of International Conference on Computers & Industrial Engineering*, 2009:1532-1541.