

文章编号 1004-924X(2011)07-1677-09

# 基于蝴蝶模型的星载嵌入式软件测试策划

陈佳豫<sup>1</sup>, 孔德柱<sup>1,2\*</sup>, 刘金国<sup>1</sup>, 周怀得<sup>1</sup>, 赵莹<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**为降低星载嵌入式软件测试风险,提高软件的研制效率,给出了一种星载嵌入式软件测试策划方法,并利用该方法策划了基于蝴蝶模型的星载相机嵌入式软件的测试。首先,介绍了蝴蝶模型,针对星载嵌入式软件的特点,在蝴蝶模型测试过程的思想基础上,给出基于星载嵌入式软件的测试策划方法,并分析了方法的优点;然后,以某星载相机嵌入式软件为例,应用该方法对软件研制的整个过程进行了测试策划;最后,对测试结果进行了分析。实验结果表明,采用该方法进行星载嵌入式软件测试策划,能够发现和避免约 80% 的需求错误和缺陷、60% 的设计错误和缺陷,从而降低软件测试风险,缩短软件研制的周期,提高星载嵌入式软件的可靠性。

**关键词:**软件测试;星载嵌入式软件;测试策划;蝴蝶模型

**中图分类号:** TP311.52 **文献标识码:** A **doi:**10.3788/OPE.20111907.1677

## On-board embedded software test planning based on butterfly model

CHEN Jia-yu<sup>1</sup>, KONG De-zhu<sup>1,2\*</sup>, LIU Jin-guo<sup>1</sup>, ZHOU Huai-de<sup>1</sup>, ZHAO Ying<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*  
*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: shangguanren8405@sina.com*

**Abstract:** In order to reduce the testing risk of an on-board embedded software and improve software developing efficiency, an on-board embedded software test planning method was proposed to plan the whole test process based on a butterfly model. Firstly, the principle of butterfly model was introduced. According to the characteristics of on-board embedded software, the on-board embedded software test planning method was put forward on the basis of the butterfly model test principle, and the advantages of the method were analyzed. Then, by taking an on-board camera embedded software for example, the software development process was planned with this method. Finally, the test results were analyzed. The results indicate that this method could discover and avoid requirement and defect errors about 80 percent and design and defect errors about 60 percent. Therefore, it can reduce software testing risk, shorten software development cycles, and improve the reliability of on-board em-

bedded software.

**Key words:** software test; on-board embedded software; test planning; butterfly model

## 1 引言

随着星载嵌入式软件开发规模和复杂程度不断增加,在软件工程的实施过程中,软件质量缺陷不可避免。另外,星载嵌入式软件开发过程经历了需求分析、设计、编码等阶段,表现在程序中的错误,并不一定是编码所引起的,很可能是设计阶段,甚至是需求分析阶段的问题引起的。因此在星载嵌入式软件的整个开发过程中,为了尽可能多地避免错误的发生,开发出高质量的星载软件产品,积极有效地实施软件测试,加强对软件测试工作的组织和管理显得尤为重要<sup>[1-3]</sup>。

和其它的软件测试一样,对星载嵌入式软件进行测试的目的是为了对质量或可接受性做出判断,以及发现问题。软件的质量是设计、管理、生产出来的,测试使质量可信。星载嵌入式软件测试过程模型——“蝴蝶模型”,不仅完整体现了整个星载软件的开发和测试过程,而且支持迭代及变更,在尽早发现软、硬件设计中的缺陷,缩短软件研制的周期,降低软、硬件的成本,提高软件的可靠性等方面,都有着明显的优点<sup>[4-6]</sup>。本文将基于蝴蝶模型的测试过程,给出一种星载嵌入式软件测试策划方法,利用其对星载嵌入式软件进行需求测试、设计测试、编码测试、单元测试、组装测试、确认测试、系统测试和验收测试,完成对星载嵌入式软件整个测试过程的策划,并对测试结果进行分析,验证它的可行性和有效性。

## 2 蝴蝶测试过程模型简介<sup>[4]</sup>

软件测试过程是一种抽象的模型,它与开发活动有机结合,定义软件测试的流程和方法。图 1 为蝴蝶模型示意图。图中“蝴蝶左翅膀”代表软件开发过程的各个阶段,按照时间顺序从上至下;“蝴蝶右翅膀”代表的是与之相对应的软件测试过程的各个阶段,其特点为:

- (1) 蝴蝶模型的测试伴随着整个软件开发周期,测试与开发是同步进行的;
- (2) 支持部分迭代和变更调整,适用于嵌入

式软件与硬件并行交互进行的开发方式;

(3) 满足双向对应关系,包括横向的测试阶段和开发过程对应关系,及纵向的检验与定义关系;

(4) 各个阶段的开发与测试活动没有时间先后之分,它并不强调软件的开发阶段一定要在对应的测试阶段之前开始。

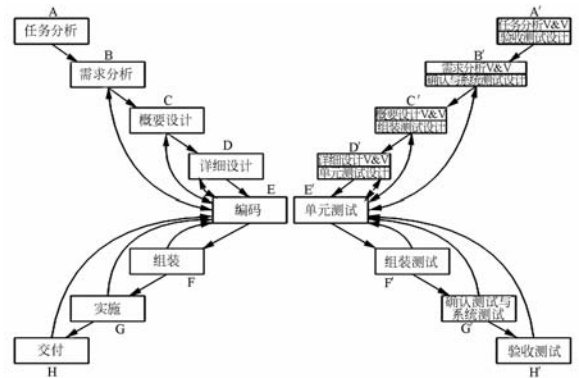


图 1 蝴蝶模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of butterfly model

## 3 星载嵌入式软件测试策划

### 3.1 基于星载嵌入式软件的测试策划方法

测试驱动开发是极限编程的重要特点,它以测试作为开发过程的中心,用不断地测试推动代码的开发<sup>[7]</sup>。基于星载嵌入式软件与硬件联系非常紧密,及高可靠性、高安全性要求的特点,本文采取边开发边测试的策略,在蝴蝶模型的测试过程思想基础上,结合测试驱动开发的方法,给出一种基于星载嵌入式软件的测试策划方法,如图 2 所示,它可表示为:

- (1) 粗糙的测试程序。在编写文档或代码时,对于不确定的某部分,先进行一个简单的测试方案的设计,写一个不能工作的测试程序,一开始这个测试程序甚至不能编译。
- (2) 可运行的测试程序。尽快让这个测试程序工作。因为测试可以通过,意味着相关功能的实现。
- (3) 重构优化的测试程序。消除在让测试程序工作的过程中产生的重复设计,优化设计结构。

对代码进行重构,并保证测试通过;重构就是在不改变外部行为的条件下对现有工作代码进行修改的过程。换言之,就是对如何做而不是做什么进行修改,重构的目的是改善和优化内部结构。

(4)循环完成所有不确定部分的测试验证工作。从第一步开始测试(编写文档或代码)一部分,随后编写文档或代码(测试)一部分,如此循环往复,完成所有不确定部分的测试验证工作。

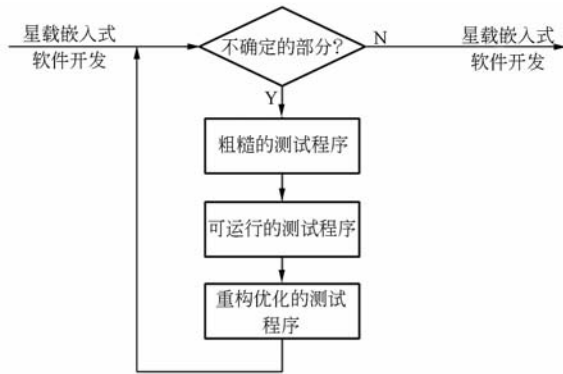


图2 星载嵌入式软件测试策划方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of on-board embedded software test planning method

可见,基于星载嵌入式软件测试的策划方法是从测试的角度来验证、推导、确认设计;同时有效地利用编写测试程序和设计测试用例来检验文档及程序代码编写的每一步,实现软件开发过程的“小步快走”,以测试带动整个星载软件的开发过程。因此,它与通常意义上的测试技术不同之处在于其不仅是一种测试技术,也是一种质量控制方法,总的来说,具有以下优点:

(1)可以促使软件研制人员进一步明确型号产品软件的需求。

软件需求向来都是星载软件开发过程中最不易明确描述的易变项。研制人员最不愿到了开发后期还要修改代码中的函数及其接口,而发生这种事的原因就是代码的使用需求没有很好的描述。基于星载嵌入式软件的测试策划方法就是通过编写测试代码和测试用例,在需求分析阶段就先考虑代码的使用需求(包括功能、过程、接口等),并进行执行验证。而且,这种从使用角度对代码的设计通常更符合后期开发的需求,对代码内聚性的提高和复用都非常有益。因此这种测试策划方法的实现过程也是一种代码设计过程。

(2)基于星载嵌入式软件的测试策划方法,可

以进一步明确设计。

进行软件概要设计和详细设计是软件开发过程中的一项重要工作,尤其对于可靠性、安全性要求非常高的星载软件的研制,更要进行完备细致的设计工作。基于星载嵌入式软件的测试策划方法,采用测试优先的开发过程,首先针对设计过程中不确定部分设计测试用例来验证设计,以使设计中的逻辑缺陷凸显出来,及时避免可能由此造成的重复开发及代码修改。同时,采用该方法还能揭示设计中模糊的部分。因为如果不能针对软件设计的内容勾画出如何进行测试验证,设计人员也很可能难以确定设计的正确性。

(3)基于星载嵌入式软件的测试策划方法,可以减少测试风险。

在单元测试、组装测试、确认和系统测试阶段,传统的软件开发方法一般会把风险分配到每一阶段的测试上,由于没有对比,因此每一项测试都成了高风险。基于星载嵌入式软件的测试策划方法可以区分风险的优先级别,优先创建并测试高风险的部分,这样可以帮助软件研制人员在付出额外劳动之前就能定位问题所在,减少测试风险。例如若A,B,C三个功能模块中A,B和C,B和C之间的集成会产生最大的风险,那么B和C功能模块应该首先创建并优先进行测试。原因在于在B和C中发现的问题可能会影响到A,所以在对A进行开发之前发现这些问题有助于避免A中某些部分的重写。而按照传统的测试理论,它们的开发与测试应该是按顺序进行,但这样就会导致效率低且风险高。因此,星载嵌入式软件测试策划方法可以基于软件中每个部分的特殊性来排定开发和测试的计划,指导软件的研制,并帮助研制人员预见到常见突发事件(传统项目和测试计划往往会忽视多达75%的突发事件)。

(4)基于星载嵌入式软件的测试策划方法,可以提高效率、减轻工作量。

传统的软件开发工作中,往往是在编码基本全部结束后,再进行单元测试。而且很多时候限于实际情况,对单元测试的重视不够,经常是在集成以后才进行认真的测试,这时修改的代价已相当大。而基于星载嵌入式软件的测试策划方法,研制人员在需求和设计阶段提前编写了测试代码和测试用例,在编码阶段可以借鉴或直接使用,这样在编写测试代码上花费的成本,会在后续的开

发过程中得到回报。两相权衡,编写测试代码和用例的代价其实不高。因此,它是一个具有提高软件代码质量,保障开发效率,减少测试风险等优点的测试策划方法。

### 3.2 基于蝴蝶模型的星载嵌入式软件测试策划

下面我们基于蝴蝶模型的测试过程,利用星载嵌入式软件测试策划方法,以某星载相机嵌入式软件为例,对软件研制的整个过程进行测试策划。

按照蝴蝶模型,星载相机嵌入式软件的测试工作是贯穿于软件开发全过程的。概括起来可分为以下 4 项活动<sup>[8]</sup>。其各个软件开发阶段的测试活动分布情况,如表 1 所示。

(1)测试策划:确定需要测试的内容及要求,提出测试方法,确定测试需求,制定测试计划。

(2)测试设计与实现:分析、选取和设计测试用例;获取测试资源,建立测试环境。

(3)测试执行:执行测试用例,获取测试结果;分析并判定测试结果,采取相应措施。

(4)测试总结:评估测试效果和被测软件项,描述测试状态,完成软件测试报告,并通过评审。

表 1 星载相机嵌入式软件生存期各阶段应完成测试工作

开发阶段	单元测试	组装测试	确认与系统测试	验收测试
任务分析	无	无	无	策划
需求分析	可能执行	无	策划	无
概要设计	可能执行	策划	测试设计与实现	无
详细设计	策划/ 可能执行	测试设计与实现	测试设计与实现	无
编码和单元测试	测试设计与实现/执行/总结	测试设计与实现	测试设计与实现	无
组装测试	可能测试设计与实现/可能执行	测试设计与实现/执行/总结	测试设计与实现	无
确认与系统测试	可能测试设计与实现/可能执行	可能测试设计与实现/可能执行	测试设计与实现/执行/总结	无
验收测试	可能测试设计与实现/可能执行	可能测试设计与实现/可能执行	可能测试设计与实现/可能执行	执行/总结

利用基于星载嵌入式软件测试策划方法,对星载相机软件各开发阶段的测试活动进行策划,如表 2。限于篇幅,这里仅选取与本文测试策划方法相关的测试对象、测试内容及方法进行说明。

表 2 星载相机嵌入式软件的测试策划

Tab.2 Test planning of on-board camera embedded software

测试阶段	测试对象	测试内容及方法
任务测试	软件研制任务书、验收测试计划	制定软件研制任务书和验收测试计划,策划对产品的验收测试。对软件研制任务书和验收测试计划进行确认和评审。
需求测试	实验测试程序、软件需求规格说明、确认与系统测试计划	利用基于星载嵌入式软件的测试策划方法,对于尚不明确的需求,编写实验测试代码和测试用例,进行单元测试,完成对需求的验证;利用文档审查技术,对需求规格说明进行确认 <sup>[9]</sup> ;编写并确认软件确认与系统测试计划;评审。
设计测试	实验测试程序、概要设计和详细设计说明、组装和单元测试计划。若更动需求还包括对应测试对象。	包括概要设计阶段和详细设计阶段:利用基于星载嵌入式软件的测试策划方法,对于尚不明确的设计,编写实验测试代码和测试用例,进行单元测试,完成对设计的验证;若需求中内容需要变动,利用星载嵌入式软件测试策划方法,完成对变动部分需求的验证及文档的修改确认;利用文档审查技术,对设计进行确认;编写测试计划;评审。
单元测试	(1)在编码全部完成后的软件单元测试阶段:软件单元(包括实验测试程序)、单元测试计划、单元测试说明和测试报告。若更动需求、设计还包括对应测试对象; (2)在需求和设计阶段:实验测试程序。	利用基于星载嵌入式软件的测试策划方法,将单元测试与编码同行。 (1)编码全部完成后的软件单元测试阶段:建立单元测试环境,按照测试计划编写测试说明;对软件单元进行静态测试 <sup>[9]</sup> ;准备测试用程序,进行单元测试,对于软件单元的实现错误,进行回归测试,直至通过;编写单元测试报告;若需求、设计中内容需要变动,利用基于星载嵌入式软件的测试策划方法,完成对变动部分的验证及对应文档的修改确认;对单元测试计划、测试说明、测试报告进行总结、确认、评审。 (2)需求和设计阶段的单元测试:对实验测试程序进行静态测试;准备测试用程序;建立测试环境,执行测试用例,对需求或设计中不确定部分进行测试;对于软件单元的实现错误,将软件更改完毕后,进行回归测试,直至通过。

续表

测试阶段	测试对象	测试内容及方法
组装测试	软件部件的组装过程、软件部件、组装测试计划、组装测试说明及组装测试报告。若更动代码、需求、设计还包括对应测试对象。	建立组装测试环境,按照测试计划编写测试说明;执行软件组装测试用例,验证软件部件的组装过程和组装方法。若需求、设计中内容需要变动,利用基于星载嵌入式软件测试策划方法,完成对变动部分的验证及对应文档的修改确认;对于软件的实现错误,修改后进行单元回归测试、组装回归测试,直至通过;编写组装测试报告;对组装测试计划、测试说明、测试报告进行确认、评审。
确认与系统测试	软件配置项、完整集成的计算机系统、确认测试计划、确认测试说明和测试报告、系统测试计划、系统测试说明和测试报告。若更动代码、需求、设计还包括对应测试对象。	确认测试:建立确认测试环境,按照确认测试计划编写测试说明;执行测试用例,测试整个软件配置项是否达到需求中定义的全部功能和性能要求 <sup>[10]</sup> ;系统测试:按照系统测试计划编写系统测试说明。将软件、硬件和环境连起进行全面测试,执行系统测试用例,检查被测软件同需求是否相符。若需求、设计中内容需要变动,利用基于星载嵌入式软件测试策划方法,完成对变动部分的验证及对应文档的修改确认;对于软件的实现错误,修改后按照蝴蝶模型进行顺序回归测试,直至通过;编写测试报告;对确认和系统测试计划、测试说明、测试报告进行确认、评审。
验收测试	(1)模样研制阶段:软件需求规格说明; (2)初样和正样研制阶段:整个星载相机软件产品、验收测试计划、测试说明、测试报告。若更动代码、需求、设计还包括对应测试对象	(1)模样阶段:验收软件需求和接口关系,确定技术方案的可行性和有效性。若发现错误,按照蝴蝶模型进行相关阶段文档、代码的修改及测试。生成需求规格说明确定版本。 (2)初样和正样阶段:按照验收测试计划编写测试说明;执行测试用例,进行全面测试,检查软件同任务书是否相符。若需求、设计中内容需要变动,利用星载嵌入式软件测试策划方法,完成对变动部分的验证及对应文档的修改确认;对于软件的实现错误,修改后按照蝴蝶模型进行顺序回归测试,直至通过;编写测试报告;对验收测试计划、测试说明、测试报告进行确认、评审,交付软件产品。

## 4 测试结果及分析

按照上述基于蝴蝶模型的星载相机嵌入式软件测试策划过程,进行某星载测绘相机控制软件的研制。对模样、初样电性产品研制阶段和鉴定

产品研制阶段的测试结果汇总分别如表3、表4、表5所示。表中各个测试结果的含义为在行所代表各个测试阶段,测试出的各个研制子阶段的文档及软件代码中的错误和缺陷的数量。表中标为灰色的数据,代表所对应当前阶段的测试结果;“-”代表对应测试阶段未进行相应测试。

表3 星载相机嵌入式软件模样研制阶段测试结果汇总表

Tab. 3 Test results of testing product development stage for on-board camera embedded software

测试阶段	任务分析		需求分析		设计		软件实现		组装		实施		交付	
	错误数	缺陷数	错误数	缺陷数	错误数	缺陷数	错误数	缺陷数	错误数	缺陷数	错误数	缺陷数	错误数	缺陷数
1	任务测试	2	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	需求测试	0	2	15	26	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	设计测试	0	1	9	15	14	25	—	—	—	—	—	—	—
	小计	10		65		39		—	—	—	—	—	—	—
2	单元测试	0	1	4	5	7	10	20	15	—	—	—	—	—
	组装测试	0	0	2	1	4	3	12	7	12	7	—	—	—
	确认与系统测试	0	0	1	1	2	3	6	10	2	0	6	10	—
	验收测试	0	0	0	0	0	1	2	2	0	0	0	0	2
小计	1		14		30		74		21		16		4	
合计	11		79		69		74		21		16		4	

表 4 星载相机嵌入式软件初样电性产品研制阶段测试结果汇总表

Tab. 4 Test results of primary only electronic product development stage for on-board camera embedded software

测试阶段	任务分析		需求分析		设计		软件实现		组装		实施		交付	
	错误数	缺陷数	错误数	缺陷数	错误数	缺陷数	错误数	缺陷数	错误数	缺陷数	错误数	缺陷数	错误数	缺陷数
1	任务测试	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	需求测试	0	1	8	15	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	设计测试	0	1	4	8	10	18	—	—	—	—	—	—	—
	小 计	4		35		28		—		—		—		—
2	单元测试	0	0	2	3	4	8	10	10	—	—	—	—	—
	组装测试	0	0	0	1	2	2	7	5	7	5	—	—	—
	确认与系统测试	0	0	0	1	1	2	5	10	2	0	5	10	—
	验收测试	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	1
	小 计	0		7		20		50		14		15		3
合 计	4		42		48		50		14		15		3	

表 5 星载相机嵌入式软件初样鉴定产品研制阶段测试结果汇总表

Tab. 5 Test results of primary identification product development stage for on-board camera embedded software

测试阶段	任务分析		需求分析		设计		软件实现		组装		实施		交付	
	错误数	缺陷数	错误数	缺陷数	错误数	缺陷数	错误数	缺陷数	错误数	缺陷数	错误数	缺陷数	错误数	缺陷数
1	任务测试	0	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	需求测试	0	0	4	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	设计测试	0	1	3	5	8	11	—	—	—	—	—	—	—
	小 计	2		18		19		—		—		—		—
2	单元测试	0	0	1	2	3	5	8	7	—	—	—	—	—
	组装测试	0	0	0	1	1	2	5	3	5	3	—	—	—
	确认与系统测试	0	0	0	0	0	2	5	8	2	0	4	10	—
	验收测试	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
	小 计	0		4		13		36		10		14		1
合 计	2		22		32		36		10		14		1	

如前所述,测试的依据是需求规格说明书和设计文档。如果需求和设计有错误,由于在追踪需求和设计错误的过程中,会导致开发过程相互纠缠和重复劳动,以致测试质量难以保证,修改代价非常大。因此下面以对需求和设计部分的测试为例,对模样、初样电性产品和鉴定产品研制阶段的测试结果进行分析:

#### (1) 对需求的测试结果分析

对表 3~表 5 中数据进行统计,星载相机嵌入式软件在模样、初样电性和初样鉴定产品研制阶段软件编码实现之前,测试出的需求部分的错误和缺陷数依次为 65,35 和 18 个;在软件编码实现之后,经测试发现的需求部分的错误和缺陷数分别为 14,7 和 4 个。由此绘制星载相机软件在模样、初样电性和初样鉴定产品研制阶段对应的

需求错误和缺陷分布情况饼图,如图 3 所示。

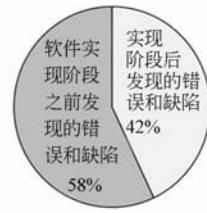
#### (2) 对设计的测试结果分析

同理对表 3~表 5 中星载相机嵌入式软件在模样、初样电性和初样鉴定产品研制阶段的测试数据进行统计。在软件编码实现之前,经测试发现的设计部分的错误和缺陷数分别为 39,28 和 19 个;在软件编码实现之后,测试出的设计部分的错误和缺陷依次为 30,20 和 13 个。其各阶段对应的设计错误和缺陷分布情况,如图 4 所示。

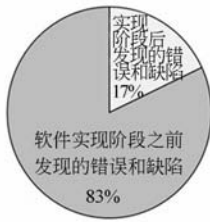
由图 3 和图 4 可以观察到,进行基于蝴蝶模型的星载相机嵌入式软件测试策划,具体实施测试时利用通用的测试方法和星载嵌入式软件的测试策划方法,可以在软件编码实现之前发现约 80%的需求错误及缺陷,约 60%设计错误及缺陷。



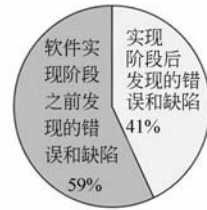
(a) 模样阶段  
(a) Test stage



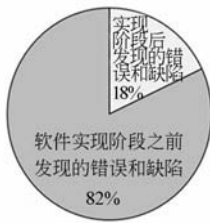
(b) 初样电性阶段  
(b) Primary only electronic product stage



(b) 初样电性阶段  
(b) Primary only electronic product stage



(c) 初样鉴定阶段  
(c) Primary identification product stage



(c) 初样鉴定阶段  
(c) Primary identification product stage

图 3 星载相机软件研制需求错误和缺陷分布饼图  
Fig. 3 Pie charts of requirement errors and defect distributions for on-board embedded software development



(a) 模样阶段  
(a) Test stage

图 4 星载相机软件研制设计错误和缺陷分布饼图  
Fig. 4 Pie charts of design errors and defect distributions for on-board embedded software development

## 5 结 论

本文给出了一种基于星载嵌入式软件测试策划方法,它可以促使软件研制人员进一步明确型号产品软件的需求和设计,减少测试风险,提高效率、减轻工作量。以某星载相机嵌入式软件为例,对软件研制的整个过程进行了测试策划。实践证明,该方法能够在软件编码实现之前发现约 80% 的需求错误及缺陷,约 60% 设计错误及缺陷,是一种缺陷预防的有效方式。与传统的软件测试策略相比,后者只针对软件产品而开展,找到缺陷之后再加以改正和修补,是一种“亡羊补牢”的测试方式;而本文的测试策划方法则是针对开发全过程所开展的软件测试,它注重根据测试数据的统计分析结果来判断软件产品的未来质量趋势,并提前予以控制和预防,属于“防患于未然”的测试方式。因此,不仅可以有效降低星载软件产品的测试风险,还能够提前对软件产品缺陷进行规避,缩短对缺陷的反馈周期和整个项目的开发周期,从而大大降低软件研制费用,提高软件产品可靠性,适用于星载嵌入式软件产品的研制。

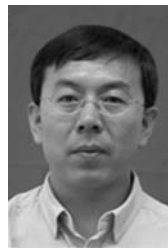
## 参考文献:

- [1] ROGER S P. *Software Engineering: A Practitioner's Approach* [M]. 7th ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2009.
- [2] MICHAEL R L. *Handbook of Software Reliability Engineering* [M]. New York: IEEE Computer Society Press and Computing McGraw-Hill, 1996.
- [3] 安全霞, 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 SH F, *et al.*. Dynamic evaluation method based multi-dimensional test coverage for software testing [J]. *Journal of Software*, 2010, 21(9): 2135-2147. (in Chinese)
- [4] 陈佳豫, 邢忠宝, 刘金国, 等. 星载嵌入式软件测试过程模型的研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1654-1659.  
CHEN J Y, XING ZH B, LIU J G, *et al.*. Research on on-board embedded software testing process model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1654-1659. (in Chinese)
- [5] 丁锐, 朱星际, 田林. 基于并行工程的航空嵌入式软件测试过程研究[J]. 航空计算技术, 2009, 39(4): 98-100.  
DING R, ZHU X J, TIAN L. Research on concurrent engineering based avionics software testing [J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2009, 39(4): 98-100. (in Chinese)
- [6] 魏颖, 张波, 李丽, 等. 基于体系结构的软件可靠性评估[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 485-490.  
WEI Y, ZHANG B, LI L, *et al.*. Architecture-based software reliability evaluation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 485-490. (in Chinese)
- [7] 杜源. 软件测试技术的应用及其发展趋势[D]. 成都: 四川大学, 2005.  
DU Y. *Software testing technology application and development trend* [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005. (in Chinese)
- [8] 王丽, 赵卢霞, 李红卫, 等. 嵌入式软件测试工程化研究与实践[J]. 计算机应用, 2009, 29(12): 192-194.  
WANG L, ZHAO L X, LI H W, *et al.*. Study and practice of embedded software testing in engineering [J]. *Journal of Computer Applications*, 2009, 29(12): 192-194. (in Chinese)
- [9] 宫云战. 软件测试[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.  
GONG Y ZH. *Software Testing* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [10] 王俊杰, 沈湘衡, 张波, 等. 环境参数与状态参数融合的测试用例集约简方法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1678-1685.  
WANG J J, SHEN X H, ZHANG B, *et al.*. Optimal test suite generation methods based on fusion of environment and state parameters [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1678-1685. (in Chinese)

## 作者简介:



陈佳豫(1977—),女,吉林长春人,博士,助理研究员,2006年于吉林大学获得硕士学位,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事软件工程、计算机控制等方面的研究。E-mail: jiayu\_ya@163.com



刘金国(1968—),男,吉林蛟河人,研究员,主要从事空间遥感与图像处理方面的研究。E-mail: liujg@ciomp.ac.cn



周怀得(1975—),男,四川射洪人,博士,副研究员,2004年于吉林大学获得硕士学位,2007年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事传感器成像和数字图像处理方面的研究。E-mail: gjszhd@sohu.com



赵莹(1978—),女,吉林长春人,博士,副研究员,2005年于东北师范大学获得硕士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事数字图像处理及软件工程等方面的研究。E-mail: zhaoying-mails@sina.com

通讯作者:



孔德柱(1980—),男,黑龙江肇东人,助理研究员,2004年于吉林大学获得学士学位,主要从事航天器电子学设计、航天器软件设计、基于FPGA的SOPC开发等方面的研究。E-mail: shang-guanren8405@sina.com

## ●下期预告

# 复合薄膜磁致伸缩系数求解及悬臂梁结构优化

王福吉,贾振元,刘巍,赵显嵩

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室,辽宁大连116024)

为了实现对超磁致伸缩薄膜(GMF)磁机耦合转化关系的分析,建立了超磁致伸缩薄膜磁致伸缩系数的求解模型,对模型的建立过程、推演机理及仿真结果进行了研究。通过对复合超磁致伸缩薄膜变形进行合理的简化,以单层超磁致伸缩薄膜的磁致伸缩系数表达式为基础,推演得出了复合GMF的磁致伸缩系数表达式。以具有正负磁致伸缩效应的复合GMF为研究对象,利用推演得出的复合超磁致伸缩薄膜的磁致伸缩系数表达式,讨论了磁致伸缩镀层厚度对悬臂梁式GMF自由端挠度的影响规律。研究表明:在镀层总厚度一定时,正磁致伸缩材料层与负磁致伸缩材料层厚度比为2.3时,不论是Cu基薄膜还是PI基薄膜,其变形能力均达到最大值,从而实现正负复合薄膜悬臂梁的结构优化。