

文章编号 1004-924X(2008)09-1654-06

星载嵌入式软件测试过程模型的研究

陈佳豫^{1,2}, 邢忠宝¹, 刘金国¹, 孔德柱^{1,2}, 徐 东¹

(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: 针对星载嵌入式软件的特点, 在 W 模型和 X 模型的基础上, 给出了一种适用于星载嵌入式软件测试过程的模型—蝴蝶模型。该模型不仅完整体现了对整个开发活动的测试, 而且支持迭代及变更, 尤其适用于星载嵌入式软件的研制需要经历多个周期的特点, 在尽早发现卫星型号产品软、硬件设计缺陷, 缩短星载嵌入式软件研制的周期, 降低软、硬件的成本, 提高星载嵌入式软件的可靠性等方面都有着明显的优点, 适用于星载嵌入式软件研制的整个过程。

关键词: 星载嵌入式软件; 测试过程模型; W 模型; X 模型; 蝴蝶模型

中图分类号: TP311; V475 **文献标识码:** A

Research on on-board embedded software testing process model

CHEN Jia-yu^{1,2}, XING Zhong-bao¹, LIU Jin-guo¹, KONG De-zhu^{1,2}, XU Dong¹

(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*)

Abstract: In view of the features of an on-board embedded software, an on-board embedded software testing process model, butterfly model based on W model and X model, is proposed. This new model not only reflects the test for entire development activities, but also supports iteration and alteration. Especially, it is suitable for the characteristic that on-board embedded software development process needs multiple cycles. This on-board embedded software testing process model has many advantages in finding the design defects of software and hardware at early stage for satellite products, shortening the development cycle of on-board embedded software, reducing the costs of software and hardware and effectively improving the reliability of on-board embedded software, and it is suitable for the whole development process of on-board embedded software.

Key words: on-board embedded software; software testing process model; W model; X model; butterfly model

1 引言

随着近年来空间技术的蓬勃发展以及计算机技术的飞速发展,计算机软件在航天系统中担负起越来越多的任务,扮演着越来越重要的角色。由于卫星等航天工程不仅涉及大量的投入,而且担负着重要的使命,因此运行其上的星载嵌入式软件必须具备非常高的可靠性和安全性。在这种情况下,星载嵌入式软件的质量直接决定了整个卫星型号产品的质量,它已成为航天系统质量的重要构成因素。软件开发过程的质量决定了软件的质量。作为开发过程的一部分,测试过程的质量将直接影响测试结果的准确性和有效性,并最终影响软件的质量。就目前发展来看,在星载嵌入式软件的研制过程中,按照科学有效的软件测试过程模型进行开发,已成为确保高精度、高投入和长寿命卫星型号产品能够按照高可靠性要求顺利完成的必备条件。近年来,随着测试过程管理技术的发展,测试专家通过实践总结出了很多很好的测试过程模型。这些模型抽象了测试活动,并与开发活动有机结合,是保证软件质量的重要基础。本文通过对几种经典的软件测试过程模型进行分析和研究,针对星载嵌入式软件的特点,结合当前研制开发星载嵌入式软件的实践,给出了一种基于星载嵌入式软件的测试过程模型——“蝴蝶模型”。

2 软件测试过程模型

软件测试过程是一种抽象的模型,它可与开发活动有机地结合,定义软件测试的流程和方法。有代表性的软件测试过程模型主要包括以下几种:

2.1 V 模型^[1-2]

V 模型最早是由 Paul Rook 在 20 世纪 80 年代后期提出的,是最具代表性的测试过程模型。

如图 1 所示,V 模型是软件开发瀑布模型的变种,它反映了测试活动与分析设计的关系,从左到右描述了基本的开发过程和测试行为,明确地标明了测试工程中存在不同类型的测试,并清楚地描述了这些测试阶段和开发过程期间各阶段的对应关系。

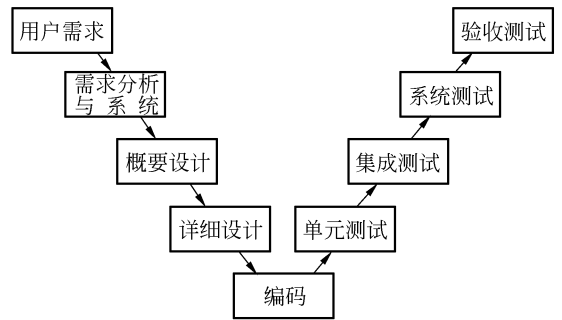


图 1 V 模型示意图

Fig. 1 Diagram of V model

V 模型的局限性在于它仅仅把测试作为在编码之后的一个阶段,是针对程序进行的寻找错误的活动,而忽视了测试活动对需求分析、系统设计等活动的验证和确认的功能。

2.2 W 模型^[3-4]

W 模型由 Evolutif 公司提出,相对于 V 模型,W 模型增加了软件各开发阶段中应同步进行的验证和确认活动。如图 2 所示,W 模型由两个 V 字型模型组成,分别代表测试与开发过程,图中明确表示出了测试与开发的并行关系。

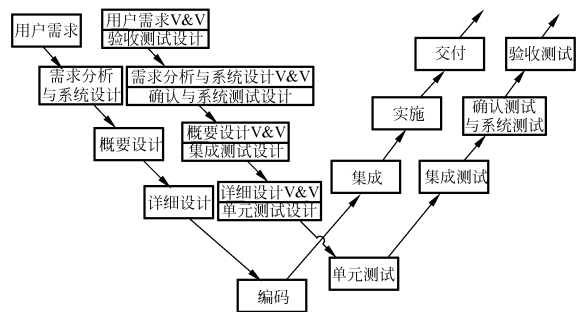


图 2 W 模型示意图

Fig. 2 Diagram of W model

W 模型的局限性在于,它将软件的开发视为需求、设计、编码等一系列串行的活动;同时,测试和开发活动也保持着一种线性的前后关系,上一阶段完全结束,才可正式开始下一个阶段工作,从而无法支持迭代、自发性以及变更调整。

2.3 X 模型^[5]

该模型的基本思想是由 Marick 提出的。Robin F. Goldsmith 将其重新组织,形成了“X 模型”。

如图 3 所示,X 模型左边描述的是针对单独

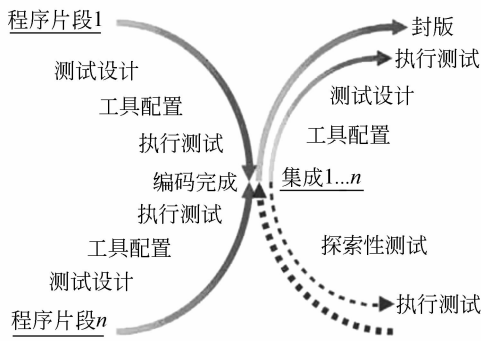


图 3 X 模型示意图

Fig. 3 Diagram of X model

程序片段所进行的相互分离的编码和测试,此后将进行频繁的交流,通过集成最终合成为可执行的程序。对这些可执行程序进行测试,通过集成测试的成品(右上半部分)可以进行封版并提交给用户,也可以作为更大规模和范围内集成的一部分。多根并行的曲线表示变更可以在各个部分发生。另外,X模型还定位了不进行事先计划的探索性测试(右下方),这往往能帮助有经验的测试人员在测试计划之外发现更多的软件错误。

由此可见 X 模型弥补了 W 模型不支持迭代及变更调整的不足,但它的局限性在于没有体现对需求、设计等活动的测试过程。

除上述几种常见模型外,还有 H 模型^[4]、前置测试模型^[6]等测试过程模型。H 模型明确指出测试的独立性,其基本思想为只要某个测试达到准备就绪点,测试执行活动就可以开展^[4]。前置测试模型体现了开发与测试的结合,要求对每一个交付内容进行测试^[6]。

上述模型都针对其他模型的缺点提出了一些修正意见,但本身均存在局限性。因此,在星载嵌入式软件的研制过程中,必须依据星载嵌入式软件的特点,从上述模型中抽象出符合实际现状的测试过程理念,得到基于星载嵌入式软件的测试过程模型,以达到提高星载软件可靠性的目的。

3 星载嵌入式软件的特点

与普通软件不同,星载嵌入式软件通常为实时嵌入式软件,需要在非通用的软件平台上运行,具有高可靠性和高安全性的要求,因此星载嵌入式软件具有以下特点:

(1) 星载嵌入式软件和硬件联系非常紧密,其研制的整个过程都是软硬件并行交互进行。嵌入式软件与所属的计算机系统有很强的耦合性。软件的实现细节和计算机系统结构、I/O 端口设置、与计算机系统相连的外部设备乃至这些设备的输出信号特性都有关系。这种运行平台的特殊性给嵌入式软件的开发和测试都带来极大困难^[7]。

(2) 星载嵌入式软件对实时性要求高,这给软件测试带来的约束是不仅要验证功能的正确性,还要验证时序的正确性,这极大地增加了星载嵌入式软件测试的工作量和难度^[7]。

(3) 星载嵌入式软件涉及的分系统多,而且对可靠性和安全性的要求非常高^[8],测试的规模大、涉及面宽、环境复杂。

(4) 星载嵌入式软件的研制需要经历多个周期。

如图 4 所示,星载嵌入式软件产品的研制通常包括模样、初样和正样 3 个阶段。初样阶段还需进一步划分为电性产品研制阶段和鉴定产品研制阶段。每一个研制阶段均需要按照软件工程化的要求经历一个完整的周期。

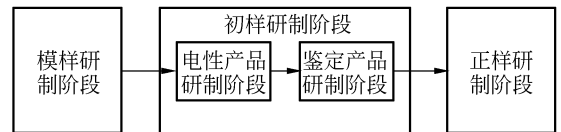


图 4 星载嵌入式软件产品研制阶段

Fig. 4 Development stages of on-board embedded software product

4 基于星载嵌入式软件的测试过程模型

4.1 单个研制阶段的测试过程模型

针对星载嵌入式软件的特点,在 W 模型和 X 模型的基础上,给出了一种基于星载嵌入式软件单个研制阶段的测试过程模型——“蝴蝶模型”,如图 5 所示。

图中“蝴蝶左翅膀”代表的是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

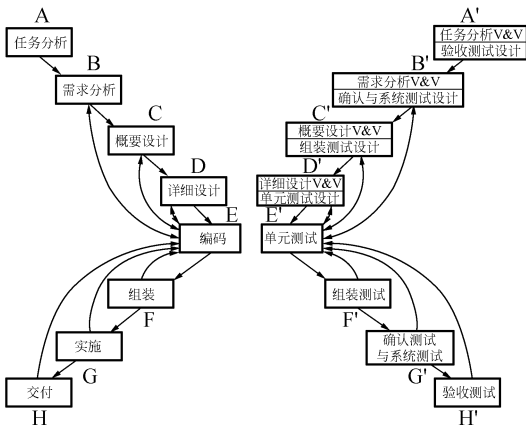


图 5 蝴蝶模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of butterfly model

段,右翅上部描述的是对应开发过程的各个验证和确认及测试设计阶段,右翅中下部为对应开发过程的各个测试阶段。

从图中可以看出,蝴蝶模型具有以下几个特点:

(1) 蝴蝶模型的测试伴随着整个软件开发周期,并且除 A' 阶段,其他各个测试阶段均伴随着不同程度的单元测试。

针对星载嵌入式软件与硬件联系非常紧密及高可靠性要求的特点,蝴蝶模型除任务分析阶段外,其他阶段均可进行不同程度的编码工作,因此与之对应的各测试阶段均可包括不同程度的单元测试活动。图中 B、C、D 阶段与 E 阶段之间以及对应的 B'、C'、D' 阶段与 E' 阶段之间的关系均为双向可逆关系,表示在需求和设计阶段可反复多次地进行有针对性的编码及单元测试工作。图中 F、G、H 阶段以及对应的 F'、G'、H' 阶段,在进入 E 阶段或 E' 阶段后,必须顺序执行后续各个阶段的工作。

可见与 W 模型相似,蝴蝶模型的测试对象不仅仅是程序,任务分析、需求分析、设计等同样要测试,即测试与开发是同步进行的。在此基础上,蝴蝶模型增加了随时进行编码验证的功能,这将更有利于尽早地发现卫星型号产品硬件设计与软件设计是否合理,以及嵌入式软件是否能合理匹配硬件等问题,以降低软、硬件的成本,缩短研制的周期。

(2) 蝴蝶模型支持部分迭代和变更调整。

根据星载嵌入式软件的任务书经评审通过

后,在当前周期内不进行更改的特点,如图 5 所示,模型的 A 阶段不支持迭代和变更调整,而其他阶段,由于均可进行不同程度的编码工作,因此蝴蝶模型可以在后续阶段发现前阶段中的缺陷时,及时按照软件工程化的要求,对相关的文档或代码进行变更调整,且该变更可根据实际情况迭代多次。例如,在 D 阶段的文档初稿完成后,经 D' 阶段进行验证和确认时,通过开发人员进入 E 阶段编码验证后,若发现需求存在缺陷,可以首先由 E 阶段转入 B 阶段修改需求,然后再进入 C 阶段、D 阶段……。整个迭代变更过程必须按照软件工程化的要求严格受控,否则随意的更改将会使研制过程走向失败。

可见蝴蝶模型吸取了 X 模型支持迭代和变更调整的优点,弥补了 W 模型的不足,适用于嵌入式软件与硬件并行交互进行的开发方式。

(3) 蝴蝶模型满足双向的对应关系。

如图 6 所示,具有同种对应关系的各个阶段由同一种颜色标出,并用带有双向箭头的虚线表示其两两对应的关系。以最外层的 A、A'、H、H' 4 个阶段为例,横向 A 与 A'、H 与 H' 之间体现的是测试阶段 A'、H' 和开发过程中 A、H 阶段的对应关系;纵向 A 与 H、A' 与 H' 之间的关系是 H (H') 阶段检验的内容,是 A (A') 阶段中定义的,反之 A (A') 阶段中定义的内容经由 H (H') 阶段检验。可见蝴蝶模型不仅在开发过程和测试过程的各个阶段之间满足横向一一对应关系,在开发过程内部和测试过程内部也满足纵向的对应关系。

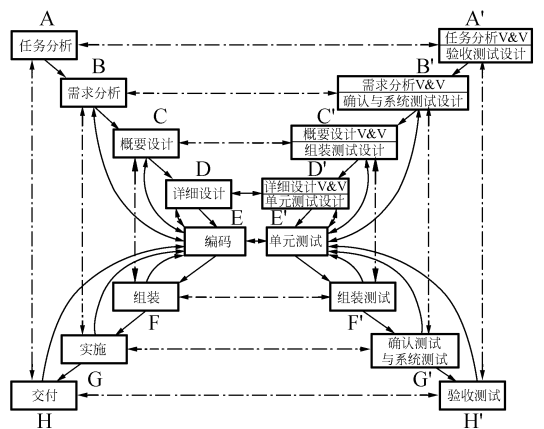


图 6 蝴蝶模型对应关系图

Fig. 6 Corresponding relation diagram of butterfly model

由图中可以看出,蝴蝶模型的这种对称结构更有利于体现各阶段之间相互对应的关系。

4.2 星载嵌入式软件全测试过程模型

根据星载嵌入式软件的研制需要经历多个周期的特点,在图 5 的基础上,给出一种如图 7 所示“完整的蝴蝶模型”—星载嵌入式软件全测试过程模型。

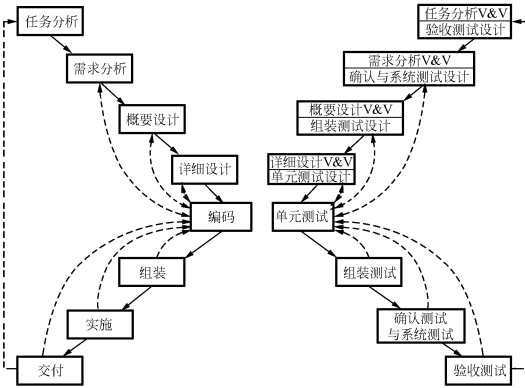


图 7 完整的蝴蝶模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of complete butterfly model

图中虚线部分为相对单个研制阶段蝴蝶模型改动的部分。其中从软件开发过程 and 对应测试过程的结束阶段反馈至开始阶段的两根连线,表示多个软件研制周期之间的迭代关系。由于整个迭代过程在正样研制阶段完成后随之结束,因此采用虚线连接。另外,由于星载嵌入式软件的研制在经历模样和电性产品研制阶段后,需求、设计和编码等通常不会有太大变更,因此图中各开发阶段与编码阶段之间以及各测试阶段与单元测试之间的连线也均采用虚线连接。表示在相应阶段经过验证或测试后,不一定均进行编码及单元测试工作。

由此可见,完整的蝴蝶模型在具备蝴蝶模型的 3 大特点的基础上,进一步增加了适应星载嵌入式软件需要多个周期的独特功能,适用于星载嵌入式软件研制的整个过程。

4.3 模型使用和实施

将完整的蝴蝶模型应用于某星载相机嵌入式软件的研制工作中,其具体使用和实施的过程如下:

4.3.1 模样研制阶段

通过分析工程总体对模样产品的任务要求编

写软件研制任务书,经验收和确认后,编写验收测试设计文档。相关文档经评审通过后,进入下一阶段。

在软件的需求分析、概要设计和详细设计阶段完成相应的文档初稿后,测试人员在对文档进行验证和确认过程中,部分需求或设计的内容需要软件开发人员与进行硬件要求分析或设计的人员协调搭建硬件环境,编写实验程序进行验证。并根据验证结果对软、硬件相关文档进行修改。因此,此时的测试活动还包括与编码相对应的单元测试。经过多次修改文档、编码验证……迭代过程后,生成文档的最终版本,经确认、评审后,进入下一个阶段。若在软件设计阶段经编码验证发现软件需求规格说明书存在缺陷,可提出需求变更申请,获得批准后,从编码阶段转入需求分析阶段修改相关文档,通过评审后,再进入设计阶段修改相应设计,然后再进行设计文档的验证和确认、编写相关测试设计文档等工作。

在组装、实施和交付阶段,测试人员分别按照在之前阶段完成的相应测试设计文档进行测试后,软件开发人员根据测试结果对程序代码进行相应修改。修改完成后,重新顺序进行编码的后续阶段的工作;测试活动也从单元测试进入组装测试等后续测试阶段进行的相应回归测试。

当模样产品交付之后,星载相机软件的研制工作进入初样研制阶段。

4.3.2 初样研制阶段

首先进行电性产品阶段软件的研制。根据本阶段工程总体的任务要求编写电性产品软件研制任务书和验收测试设计文档,通过评审后,结合模样研制阶段发现的问题和积累的经验,进行更合理的需求分析和设计,在此过程中,针对本研制阶段新增加的功能,与相关硬件要求分析或设计的人员协调搭建硬件环境,编写实验程序进行验证。最后完成组装、实施和交付阶段及其对应的测试阶段的工作。经过本阶段后,星载嵌入式软件全部功能均已验证并实现。

接下来进入鉴定产品软件的研制阶段。由于本阶段一般不会提出新的任务,因此在电性产品软件的基础上,将任务书和验收测试设计文档通过评审后,根据需要仅部分调整从电性阶段继承下来的需求、设计和相关测试文档,通常不需进行验证性的编码工作,设计完成后进入编码阶段,针

对调整的部分对继承的代码进行少量修改,然后进行组装、实施、交付及相应测试阶段的工作。

4.3.3 正样研制阶段

本阶段实施的过程与初样中鉴定产品软件的研制过程类似,在鉴定产品软件的基础上,按照蝴蝶模型的时间流程顺序执行8个开发阶段和测试阶段,通常不对软件的需求和设计进行更改,主要工作集中在测试部分。如果发现软件缺陷,更改代码,再进行相应的回归测试。当正样产品交付之后,整个星载嵌入式软件的研制过程结束。

5 结 论

本文给出了一种新的软件测试过程模型—蝴蝶模型。

该模型不仅完整体现了整个星载嵌入式软件的开发和测试过程,并支持迭代及变更。将该模型应用于实际的星载嵌入式软件的研制工作中,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。尤其适用于星载嵌入式软件的研制需要经历多个周期的特点。随着该模型在星载嵌入式软件研制中的深入应用,今后的研究将围绕如何提高模型对迭代和变更进行更合理的控制深入展开,最终使得星载嵌入式软件研制的过程逐步深入,层层细化,循序逼近理想系统。

参考文献:

- [1] PAUL E. Controlling software projects[J]. *IEE Software Engineering Journal*, 1986,1(1): 7-16.
- [2] GOLDSMITH R F, GRAHAM D. *The Forgotten Phase*[R]. Software Development, 2002.
- [3] PAUL G. *Methods & Tools* [M]. Systeme Evolutif Ltd., 2000:23-25.
- [4] 杨静波,田悦峰. 软件测试过程管理实践[OL]. <http://www.51testing.com/html/69/1301.html>, 3, 2006.
YANG J B, TIAN Y F. *Software testing process management in practice*[OL]. <http://www.51testing.com/html/69/1301.html>, March, 2006. (in Chinese)
- [5] GOLDSMITH R. *This or That, V or X*[R]. Software Development, 2002:43-45.
- [6] GOLDSMITH R F, GRAHAM D. *Proactive Testing*[R]. Software Development, 2002.
- [7] 李如豹. 航天型号软件测试的计划技术研究[D]. 北京:北京工业大学, 2003.
LI R B. *Research on technology of avionics software test planning*[D]. Beijing, Beijing Polytechnic University, 2003. (in Chinese)
- [8] 李积慧,韩双丽,王家骥,等. 空间相机的热分析与热控制技术[J]. *光学精密工程*, 1999,7(6): 36-41.
LI J H, HAN SH L, WANG J Q, *et al.*. Thermal analysis and thermal control techniques of space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999,7(6): 36-41. (in Chinese)

作者简介:陈佳豫(1977—),女,博士研究生,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

导师简介:邢忠宝(1943—),男,研究员,副总工程师,博士生导师,主要从事软件工程、计算机控制系统、专用控制系统等方面的研究。