

基于模型驱动的机载嵌入式软件应用

王文全, 宋科璞, 王 勇, 谢 卫

(飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要:传统的软件开发方法已无法应对机载嵌入式软件开发面临的严峻挑战, 基于模型驱动的软件开发方法将业务模型和软件实现平台分离, 有效地提高了机载嵌入式软件开发效率。文中对两种机载嵌入式软件设计方法进行了比较, 以基于 SCADA 平台实现的自动飞行控制系统的自动驾驶仪模式控制软件为例, 并对 SCADA 自动生成代码与手工编写代码的执行效率进行了比较, 证明前者更优, 验证了基于模型驱动开发的软件设计方法能有效地提高机载嵌入式软件的开发效率。

关键词:模型驱动; 机载嵌入式软件; SCADA

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2013)08-0145-04

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2013.08.037

Airborne Embedded Software Application Based on MDA

WANG Wen-quan, SONG Ke-pu, WANG Yong, XIE Wei

(Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: The traditional software development technique has been unable to cope with the serious challenges the airborne embedded software faces, while the MDA (Modal Driven Architecture) techniques separate the business models and the software environment, and effectively improve the efficiency of airborne embedded software development. Compare the two airborne embedded software design methods and use the autopilot flight control system's autopilot mode control software as a example, compare the efficiency of SCADA code and man-made code to verify the MDA can greatly improve the efficiency of airborne embedded software development.

Key words: MDA; airborne embedded software; SCADA

0 引 言

随着我国航空工业的发展, 机载软件的复杂程度越来越高, 机载嵌入式软件开发面临着严峻的挑战: 软件的开发周期逐渐缩短, 软件质量的要求逐渐提高。传统的机载嵌入式软件设计方法软件生命周期长、开发成本高^[1], 已经无法满足当前机载嵌入式软件开发的需求。基于模型驱动的软件设计方法改变了传统的机载嵌入式软件开发模式: 基于模型驱动的机载嵌入式软件设计方法以模型为核心^[2], 机载嵌入式软件系统的建模驱动了整个软件的开发过程。基于模型驱动的机载嵌入式软件开发方法将业务模型和实现平台分离^[3], 使业务模型能在不同的实现平台中得以复用, 有效地提高了机载嵌入式软件的开发效率和软件质量。

文中首先对传统的机载嵌入式软件开发方法和基

于模型驱动的机载嵌入式软件开发方法进行比较和分析。然后以基于 SCADA 平台实现的自动飞行控制系统的自动驾驶仪模式控制软件为例验证了基于模型驱动开发的软件设计方法能有效提高机载嵌入式软件的开发效率。

1 两种软件设计方法的比较

传统的机载嵌入式软件设计方法的开发流程包含需求分析、概要设计、详细设计、编码实现、单元测试、集成测试和系统测试等七个阶段^[4], 如图 1 所示。优质高效的软件编码是整个软件开发过程的最终产物: 前三个软件开发活动的目标是保证软件编码正确地实现了所有用户方需求并满足性能要求; 而后三个测试活动的目标是发现软件编码中的错误, 提高软件质量。

收稿日期: 2012-10-31

修回日期: 2013-02-01

网络出版时间: 2013-04-22

基金项目: 中国航空基金项目 (20100718004)

作者简介: 王文全 (1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为导航、制导与控制, 嵌入式飞行控制软件; 宋科璞, 研究员, 研究方向为导航、制导与控制。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20130422.1727.050.html>

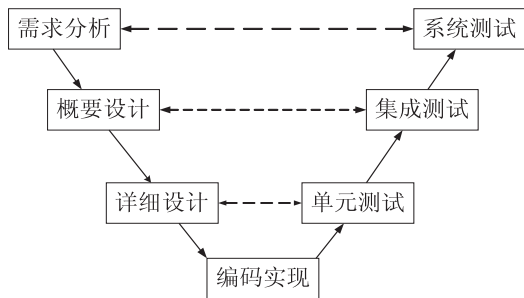


图 1 传统的 V 型软件开发流程

然而,传统的机载嵌入式软件设计方法存在以下缺陷:

1)重复描述:业务需求通过自然语言进行描述,而且各级软件活动对业务需求的描述存在差异,使得错误率增加;

2)手写编码:手写代码的质量受限于具体编程人员的水平,而且人工编码的高错误率加重了软件测试的负担;

3)修改错误代价高昂:需求分析和软件设计错误往往都是在软件开发过程的后期才被发现,解决这些错误的代价十分高昂。

基于模型驱动的软件设计方法采用标准模型表述方法和标准建模方法来详细描述信息系统^[3]。基于模型驱动模型包括:计算无关模型(CIM)、平台无关模型(PIM)、平台特定模型(PSM)和实现相关模型(ISM)。计算无关模型从纯业务的角度描述特定领域所面临的问题及系统需求,又称为领域模型;平台无关模型为系统的结构和功能提供形式化的规范,不关心系统的具体实现和技术细节;平台相关模型和实现相关模型针对系统具体的实现平台。各层之间的模型转换是基于模型驱动的软件设计的核心^[5],转换是按照变换定义从源模型到目标模型的自动生成^[6],文献[2,3]与文献[5~8]对模型转换方法进行了详细的描述和研究。

基于模型驱动的软件设计方法的开发流程如图 2 所示,需求分析阶段根据需求捕获的需求文档从业务逻辑的角度建立平台无关模型(PIM),概要设计和详细设计阶段将采用的模型转换技术和自动代码生成技术转换为平台相关模型(PSM)^[7],最后在第三方工具的支持下生成解决域的应用代码。PIM 到 PSM 的转换以及最终应用代码的生成一般由第三方工具(SCADE、MATLAB/Simulink 等)完成。基于模型驱动的软件设计方法相较于传统的软件设计方法省略了编码实现和单元测试两个软件活动,大大提高了软件的开发效率^[8]。

与传统的机载嵌入式软件设计方法相比,基于模型驱动的机载嵌入式软件设计方法有如下优点:

1)使用模型对业务需求进行描述,优于自然语言描述,避免了需求描述的歧义;

2)代码自动生成,省去了编码过程,避免了人工编写代码可能引入的错误,提高了软件生产率;

3)业务模型和实现技术和平台分离,提高了软件的可移植性和复用性。

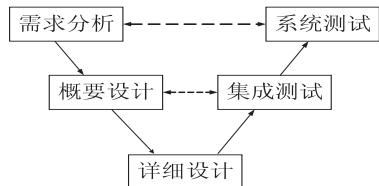


图 2 基于模型驱动的软件开发流程

2 基于模型驱动方法的嵌入式应用

2.1 SCAD 简介

SCADE 是一种基于模型驱动的软件开发环境,运用了正确构建(correct by construction)的概念,覆盖了软件开发过程从需求分析、系统建模、模型验证到代码自动生成的整个阶段^[9]。SCADE 采用标准的图形化方式建模,通过对模型进行模拟仿真和严格数学定义的形式验证保证了系统模型的正确性和安全性,并提供自动代码生成工具 Coder Generator 自动生成直接面向工程的代码。SCADE 开发环境保证了系统需求和软件代码的高度同步,提高了软件生产率和软件安全性。

LUSTRE 语言是 SCAD 软件开发的基础,它是一种同步编程语言,适用于反应系统^[10]。LUSTRE 语言的两个基本概念是反应系统和并发性^[11],这两个特性使 SCAD 能方便地使用时间操作符构成一种时间演算系统,准确刻画动态系统的行为,并能确定任务的运行时限,准确描述系统的并行行为。反应系统指系统当前的输出可能影响未来的输入,大部分实时嵌入式系统属于反应系统。并发性指反应系统在瞬态内响应外部输入,反应系统的连续两次响应之间没有时间上的重叠。SCADE 图形化模型首先转换成 LUSTRE 语言,然后进行模型验证和自动代码生成。文献[10]对 SCAD 软件开发方法做了深入介绍。

文中以基于 SCAD 平台实现的自动飞行控制系统的自动驾驶仪模态控制软件为例,并通过对两种软件开发方法生成的代码执行效率进行了对比,验证了基于模型驱动的软件设计方法能提高机载嵌入式软件的开发效率并保证了软件质量。

2.2 需求建模

自动驾驶仪是一个典型的反馈控制系统,由敏感元件(传感器)、放大计算装置与舵机构成,它的主要功能是代替驾驶员控制飞机的飞行。自动驾驶仪与飞

机组成一个回路,这个回路的主要功能是稳定飞机的姿态,即稳定飞机的角运动^[12]。敏感元件(传感器)用来测量飞机的姿态角,放大计算装置对各敏感元件的测量信号进行综合计算。

自动驾驶仪的工作原理:飞行器一旦偏离原始飞行状态,敏感元件(传感器)感知测量飞行器的偏转矢量并输出相应信号,然后经放大、计算处理输出控制指令操纵执行机构(舵机),驱使控制面(舵面)相应偏转。因为自动驾驶仪系统是负反馈连接的,所以自动驾驶仪操纵飞行器向原始状态运动。当飞行器回到原始状态时,敏感元件(传感器)的输出信号为零,执行机构及其控制面也回到原始位置,飞行器处于原始飞行状态。

自动驾驶仪有俯仰、横滚和航向三个控制通道^[12],自动驾驶仪通过稳定和控制飞机的姿态和速率等信息使飞行器处于不同的模式:姿态(俯仰角、横滚角)保持、航向保持、自动改平和高度保持等。自动驾驶仪模式控制软件的功能就是根据当前飞行器的飞行姿态、速率和驾驶员指令对飞行器进行控制,实现飞行器在各个模式之间的切换。

SCADE 针对业务需求的离散量变化和连续量变化提供了三套建模机制:数据流图、平面状态机、安全状态机。数据流图采用面向过程的思想描述系统;平面状态机描述简单的状态逻辑切换;安全状态机引入顺序优先级、层次、并行的状态结构控制和形式化方法,适用于反应系统的建模。自动驾驶仪模式之间的转换通过状态机实现,自动驾驶仪控制律的相关计算通过数据流图实现。图 3 为自动驾驶仪接通逻辑判断模块的 SCADE 模型,输入信号包括飞行器各传感器系统信息、自动驾驶仪接通逻辑相关的机载信号,输出信号为自动驾驶仪的工作状态(是否接通)。图 4 为自动控制状态切换的 SCADE 模型,各模式之间的切换条件根据各飞行器的飞行特性有所差异。

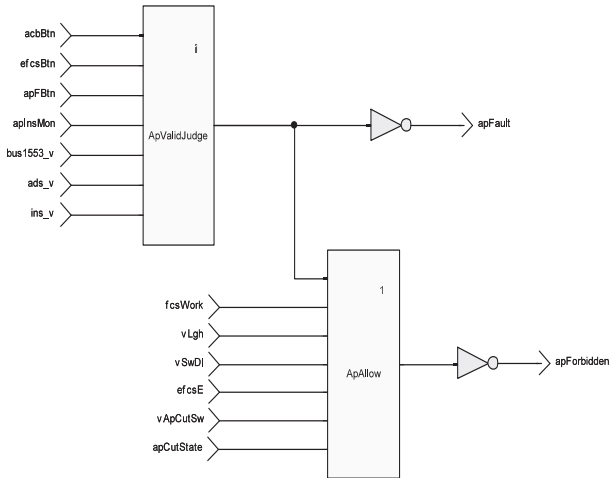


图 3 AP 接通判断

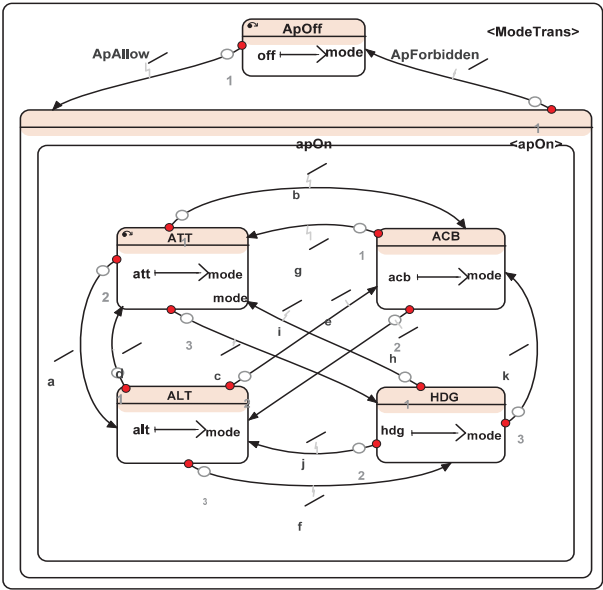


图 4 AP 自动驾驶仪模式切换

2.3 模型验证

SCADE 需求建模阶段建立的系统模型对应基于模型驱动软件设计方法中的平台无关性模型。模型建立之后,SCADE 图形化模型转换为 LUSTRE 语言,然后对模型进行检查以发现在模型建立过程中引入的语义矛盾或错误。模型检查正确后,通过 SCADE 的测试脚本工具设计测试数据对模型进行模拟仿真和形式化验证,以保证模型的正确性和安全性。图 5 是自动控制模式切换的 SCADE 模型对应的模拟仿真结果,横轴对应 SCADE 的仿真步数,纵轴对应自动驾驶仪模式的输出信息。

图 5 自动控制模式切换的模拟仿真

2.4 代码自动生成及效率测试

经过模型检验保证了 SCADE 模型的正确性和安全性后,下一步的工作就是对 SCADE 自动代码生成工具进行配置,选择相应的目标系统应用平台,最后使用 SCADE 的 Coder Generator 自动生成应用域的高质量机载嵌入式软件标准 C 编码。这一过程对应于基于模型驱动软件设计方法中的平台无关模型到平台相关模型及最后的自动代码生成。基于 SCADE 自动代码生

成器 Coder Generator 生成的代码满足安全关键嵌入式系统的约束,具有平台无关性、结构化设计、可读性和可追踪性强、静态内存分配、无指针计算、无递归结构、程序执行时间有限、代码规模最小和效率最优的特点。

SCADE 自动生成的代码不能自动运行,通过在 VC6.0 环境中建立测试工程并同时包含 SCADE 自动生成代码和手工编码,新建 MIAN 入口函数并利用时钟函数分别统计 SCADE 自动生成代码和手工编写代码执行一定步数的耗时,并对两者的执行效率进行了比较,结果如表 1 所示。

表 1 SCADE 代码与人工编码效率对比

Steps	SCADE code	MM code
0.2 million	47ms	56ms
1 million	239ms	257ms
4 million	891ms	930ms
20 million	4026ms	4323ms

由表 1 看出,SCADE 代码的执行效率略优于人工编码的执行效率。

3 结束语

文中对传统的机载嵌入式软件设计方法和基于模型驱动的机载嵌入式软件设计方法进行了概述和对比,并以基于 SCADE 平台实现的自动驾驶仪模式控制软件为例对基于模型驱动的软件设计方法进行了验证。与传统的机载嵌入式软件设计方法相比,基于模型驱动的机载嵌入式软件设计方法将业务模型和实现平台分离,保证了业务逻辑的平台无关性,提高了业务模型的复用性。文中的自动飞行控制软件模型已经在多个机载软件在多种硬件平台得到了应用。同时由于第三方开发工具(SCADE、Simulink 等)的支持,基于模型驱动的嵌入式软件设计方法省略了传统软件开发过

程的编码和单元测试等软件活动,自动生成的代码满足机载嵌入式软件的设计要求,大大地提高了机载嵌入式软件的开发效率。由此可见,基于模型驱动的机载嵌入式软件设计方法是未来机载嵌入式软件开发的趋势。

参考文献:

[1] Northrop L. Ultra-large-scale Systems: The Software Challenge of the Future [D]. USA: Carnegie Mellon University, 2006.

[2] 侯金奎,万建成,王帅强. 一种支持 MDA 的模型转换方法[J]. 计算机工程,2007,33(12):31-33.

[3] 黄书强. 基于模型驱动的软件开发模式研究[J]. 微电子学与计算机,2009,26(4):234-236.

[4] 林成文. 机载软件图形化设计与自动代码生成研究[D]. 西安:西北工业大学,2006.

[5] 王安军. 基于模型驱动的嵌入式控制软件开发中的模型转换方法研究[D]. 重庆:重庆邮电大学,2011.

[6] 王学斌,吴泉斌,史殿习. 模型驱动架构中的模型转换方法[J]. 计算机工程与科学,2006,28(11):133-135.

[7] 戚铁林,李亚芬,王 普. MDA 模型转换平台中模型转换方法的研究[J]. 计算机工程与设计,2011,32(1):202-205.

[8] 孙宏旭,邢 薇,陶 林. 基于有限状态机的模型转换方法的研究[J]. 计算机技术与发展,2012,22(2):10-13.

[9] Berry G. The Constructive Semantics of Pure Esterel Draft V3 [M]. [s. l.]:Esterel Technologies,1999.

[10] 胡刚伟,李振水,高亚奎. SCADE 软件开发方法研究[J]. 系统仿真学报,2009,20(S):286-288.

[11] Camus J L, Dion B. Efficient Development of Airborne Software with SCADE Suite [M]. [s. l.]:Esterel Technologies, 2003.

[12] 申安玉,申学仁,李云保. 自动飞行控制系统[M]. 北京:国防工业出版社,2003.

(上接第 117 页)

参考文献:

[1] Inventra MPC132 32Bit 33/66MHz PCI Peripheral Core with CARDBUS Support [M]. [s. l.]:[s. n.],2003.

[2] Ghose K,Kamble M B. Reducing power in superscalar processor caches using subbanking, multiple line buffers and bit-line segmentation[C]//Proc. of the International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISL PED'99). New York:[s. n.],1999:70-75.

[3] Aly R E,Nallamilli B R,Bayoumi M A. Variable-way set associative cache design for embedded system applications [C]//Proc. of the 46th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS'03). USA:[s. n.], 2003:1435-1438.

[4] Hennessy J L,Patterson D A. Computer architecture:a quanti-

tative approach [M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2007.

[5] 王念旭. DSP 基础与应用系统设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002.

[6] 田 泽. 嵌入式系统开发与应用教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006.

[7] 刘有耀. 基于 ASIC 的 PCI 总线控制器的设计与实现[D]. 西安:西安科技大学,2003.

[8] 闫福鑫,许志宏,刘佑宝. PCI 总线从接口的设计与验证[J]. 计算机技术与发展,2012,22(8):233-236.

[9] 齐培红. PCI-to-PCI 桥 IP 核设计与实现[D]. 北京:首都师范大学,2009.

[10] 范小虎. 基于 FPGA 的 PCI 接口软硬件协同设计及其应用 [D]. 济南:济南大学,2011.

基于模型驱动的机载嵌入式软件应用

作者：[王文全](#)，[宋科璞](#)，[王勇](#)，[谢卫](#)，[WANG Wen-quan](#)，[SONG Ke-pu](#)，[WANG Yong](#)，[XIE Wei](#)

作者单位：[飞行自动控制研究所, 陕西 西安, 710065](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

ISTIC

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：2013(8)

本文链接：http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201308037.aspx