

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.07.025

## 无人机数据采集仿真接口的实现

李诚<sup>1</sup>, 李滚<sup>1</sup>, 何晓波<sup>2</sup>, 刘强<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学空天科学技术研究院, 成都 610054; 2. 成都飞机设计研究所, 成都 610041)

**摘要:** 数据采集接口是无人机飞控半物理仿真中必不可少的部分。详细叙述数据采集仿真接口的实现, 重点介绍编写接口 S-Function 与 tlc 的方法, 并给出数据采集接口在无人机飞控半物理仿真中的应用。实践表明: 该数据采集接口可成功应用于无人机飞控半物理仿真, 降低了仿真难度, 并且在仿真代码的质量、使用内存、运行速度等多方面具有比较优势。

**关键词:** 数据采集; 飞控; 半物理仿真; S-Function; tlc

**中图分类号:** TJ8   **文献标志码:** A

## Implementation of UAV Data Acquisition Interface

Li Cheng<sup>1</sup>, Li Gun<sup>1</sup>, He Xiaobo<sup>2</sup>, Liu Qiang<sup>1</sup>

(1. Institute of Aviation Weather Science & Technology, University of Electronics Science & Technology of China, Chengdu 610054, China; 2. Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The interface of data acquisition is an essential part of semi-physical simulation of UAV's flight control system. In this paper, implementation of the interface of data acquisition is described in detail, S-Function and tlc are mainly introduced, and the application in the simulation of UAV flight control system is given. The practice shows this implementation can apply to flight control system successfully, reduce the difficulties in simulation, and have comparative advantages in some parts such as quality of simulation code, memory, and running speed.

**Key words:** data acquisition; flight control system; semi-physical simulation; S-Function; tlc

### 0 引言

基于 Simulink 可视化建模与 RTW 自动代码产生的快速原型化仿真方式是一种自动化程度较高的仿真方式, 已在复杂系统半物理仿真中有了一定的应用。复杂系统半物理仿真离不开数据采集接口, 原因有二<sup>[1-3]</sup>: 其一, 复杂系统中必然存在系统内部各部分之间、系统与系统外部的数据通信; 其二, 若复杂系统中有难以建模的部分或被控对象, 可以在仿真中采用实物, 实物与数字部分之间由数据交互联系在一起构成整个仿真模型。

然而, Simulink 提供的内置仿真模块不包括数据采集模块, 可借助 Simulink 扩展机制 S-Function, 实现数据采集仿真模块<sup>[4-6]</sup>。但是, 目前的多数应用没有抽象出一个通用数据采集接口, 也没有提供产生代码时所需的 tlc 文件, 造成大量重复劳动, 同时产生的代码也是效率最低的。为高效地解决无人机飞控半物理仿真中的数据采集问题, 在深入研究 S-Function 与目标语言编译器机制的基础上, 笔者给出了数据采集接口的通用实现方式。

### 1 系统函数与目标语言编译器概述

系统函数 (System Function, S-Function) 是 Matlab 提供的扩展 Simulink 的开放式接口。在系统建模过程中出现以下情况时, 必须采用 S-Function 实现自定义功能模块, 包括: 保护系统中具有创造性的部分、重用以前编写的代码、使用 Matlab 丰富的可视化资源或工具箱、调用操作系统资源等。

目标语言编译器 (target language compiler) 是使用 RTW 自动产生系统模型代码的核心。目标语言编译器所能识别的模板语言, 可用来将模型“翻译”成个性化的代码。提供自定义模块的 tlc 文件能使得代码更加精简、高效、可读。

### 2 仿真模块的实现方式

#### 2.1 模块的工作方式及其数学描述

分析数据采集的工作过程, 基本上是以初始化硬件、发送数据或接收数据、关闭硬件的工作方式进行。由此, 数据采集仿真模块的工作方式可以抽象为: 初始化阶段—工作阶段—结束阶段。

收稿日期: 2012-02-10; 修回日期: 2012-03-30

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助“复杂环境下高空高速长航时无人机多源传感器导航数据融合关键技术研究”(ZYGX2009J087)

作者简介: 李诚(1987—), 男, 四川人, 在读研究生, 从事检测技术及其自动化装置研究。

每一个 Simulink 基本仿真模块都包括了 4 个基本要素：输入  $u$ 、状态  $x$ 、输出  $y$  以及仿真时间  $t$ 。状态  $x$  可以是离散的、连续的或混合的。但文中所研究的数据采集仿真模块在工作时不存在状态量  $x$ ，对其描述就可以统一简化为：

$$y = F_o(t, u) \tag{1}$$

### 2.2 模块的实现语言

实现仿真模块可以采用 M、C、C++、Ada、Fortran 等多种语言。但 C/C++语言在目前国内的使用情况、使用范围、第三方支持情况等都具有极大优势。同时，在仿真模块的产品级层面，使用 C/C++语言也基本上是不二之选。如：在嵌入式应用中代码更高效、需要二次开发时更加方便、继承以往代码更加容易等；因此，一般选择 C/C++语言作为仿真模块的实现语言。

### 2.3 模块的实现方式

实现数据采集仿真模块就是要实现模块图形化封装 mdl 文件、功能实体 S-Function、代码产生 tlc 文件。实现 mdl 文件通过在 simulink 中简单的可视化操作即可；而实现 S-Function、tlc 文件用到了较多库并且机制则较复杂，如图 1 所示。

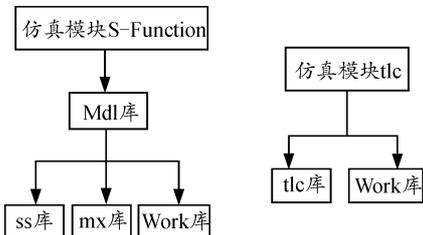


图 1 仿真模块 S-Function 与 tlc 的实现

在实现模块 S-Function 时，主体框架由 mdl 回调函数库搭建，指明其与 Simulink 模型解算器的交互规则。在回调函数体中，采用 ss 仿真结构接口库设置或获取模块基本信息；采用 mx 外部接口库来处理仿真参数；使用以 work 库为基类的派生类库实现模块核心任务。

在实现模块 tlc 文件时，采用 tlc 模板语言控制模块代码产生流程与获取代码中用到的模块信息，并直接嵌入 C/C++语言风格的核心任务算法。

## 3 数据采集模块的实现

通过研究 S-Function 与 TLC 机制，实现数据采集模块虽然较为复杂，却可以抽象出一个具有普遍意义的方式。基于此方式，可以实现各种数据采集接口。

### 3.1 模块接口的设计

模块接口分为模块输入输出与参数 2 大部分。对于数据采集模块，输入输出接口的数目及其信号类型，由数据采集卡的实际参数确定；参数接口除仿真周期与仿真偏移时间外，还应包括用以区分同类型数据采集卡的卡号。

### 3.2 核心算法类的基类实现

由数据采集模块的工作方式可以设计一个核心算法的抽象基类 work，此类有 3 个纯虚成员函数 Init、work、ter，分别用于初始化、正常工作、结束工作。当需要编写某采集卡模块的核心算法时，只需从此基类派生出具体的子类，并重载上述 3 个函数分别实现：打开采集卡及完成其他初始工作、接收或发送数据、关闭采集卡。

### 3.3 S-Function 的实现

S-Function 是一个以 C/C++语言实现的 cpp 文件，按照功能可划分为注释、基本头、用户头、回调体、基本尾 5 大部分，重点在实现功能的回调体。

注释部分用以清楚地描述文件功能、文件版本、作者创作时间等信息，便于管理文件。

基本头部分格式是固定的，只含有三行语句，分别描述了 S-Function 的名称、S-Function 的级别、包含 simstruc.h 头文件。S-Function 的名称与实现文件必须一致，无后缀；S-Function 的级别采用默认的 2 级。

用户头部分应指出实现任务使用的头文件、指出编译器链接到相应的库、宏定义获取模块输入参数，及其他需要使用的宏、typedef、类型定义等。对于数据采集模块，此部分应包括最大可同时打开该类型采集卡的数目、存储当前被打开采集卡句柄的数组、通过宏定义获取采集模块输入参数、指出核心算法实现类。

回调体部分是实现仿真模块功能的主体部分，实现流程如图 2。

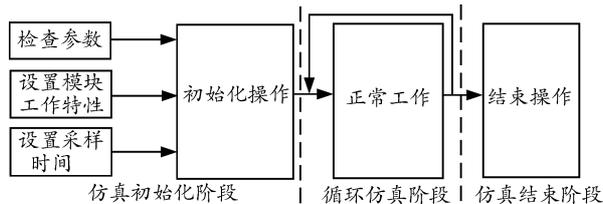


图 2 采集卡仿真模块工作流程

由于数据采集仿真模块的数学描述式可以简化为式 (1)，故回调体中回调函数只须包括

mdlCheckParameters、mdlInitializeSizes、mdlInitializeSampleTimes、mdlStart、mdlOutputs、mdlTerminate, 其余用于设置默认模块属性的回调可选使用。

实现此部分时, 在 mdlCheckParameters 中使用 mx 外部接口库校验参数; 在 mdlInitializeSizes 中, 必须通过函数 ssSetNumSFcnParams、ssSetNumInputPorts、ssSetNumOutputPorts、ssSetNumSampleTimes 分别设置模块参数、输入、输出、采样时间的个数, 必须使用 ssSetNumPWork 设置一个指针空间保存核心算法对象的指针, 以及设置输入/输出的尺寸及其数据类型、输入直馈属性有效; 在 mdlStart 中, 通过 new 创建一个 work 子类的算法对象指针并保存在指针空间中, 并通过指针调用 init 函数进行初始化工作; 在 mdlOutputs 中, 分别使用 ssGetInputPortRealSignal、ssGetOutputPortRealSignal 来获取输入输出信号地址并通过指针调用 work 函数进行正常工作; 在 mdlTerminate 中, 通过指针调用 ter 函数进行结束工作, 并通过 delete 销毁对象指针。

基本尾部分格式唯一, 将 simulik.c 以及 cg\_sfuns.h 包括进来。前者提供了与 simulink 接口所需函数, 后者提供了代码生成所需的函数。

### 3.4 模块的封装与 S-Function 编译

对 S-Function 文件稍作修改, 就可以实现各种数据采集卡的仿真功能了。但是, 要被 Simulink 所识别并能在系统模型仿真中使用, 还需要封装模块图形化接口与编译模块 S-Function。

仿真模块的封装就是要制作一个模块, 使得在仿真中能够定位到 S-Function 编译后的 mex 文件实现自定义功能, 以及在系统模型中提供模块接口的操作接口。在一个 S-Function 通用模块中, 设置模块的 S-Function Name 为 S-Function 文件名, 在 S-Function parameters 中输入模块工作参数, 通过 Mask S-Function 为用户制作录入参数的界面。

通过 mex 命令编译模块 S-Function 文件后, 产生了一个与 S-Function 文件同名但后缀为 mex\* 的文件, 才可以被 Simulink 识别并用于在系统模型中实现仿真功能。在此操作中, 需安装好编译器及设置好路径。

### 3.5 tlc 文件的实现

由于 tlc 文件具有自身的语法、使用 tlc 函数获取模块特征与相应的模块 S-Function 的设置密切相

关、tlc 文件调试困难等原因, 造成了 tlc 文件的复杂。故在已有之应用中基本上没有使用 tlc 文件, 这仅是 RTW 中效率最低的非内联代码产生方式, 一般不能满足无人机飞控仿真系统的要求。因此, 需提供用于内联代码的 tlc 文件用于代码产生。

tlc 文件的名称与相应的 S-Function 名称一致, 但后缀不同。tlc 文件分为 3 大部分: 代码生成控制头、代码用户头生成部分、模块核心功能代码生成部分。

代码生成控制头部分主要是提供后续算法使用的自定义或系统的 tlc 库文件, 以及指明一些控制整个模块代码生成的指令。对数据采集模块, 应该在此头部分, 使用指令 %implements 指出 c 语言为模块生成的目标代码语言; 使用指令 %realformat 指出变量的计数方式, 是不失精度的最少位方式; 使用指令 %include 与 %addincludepath 分别指出模板文件后面两部分使用到的 tlc 库文件、库文件路径; 其他一些对控制代码产生有影响的操作, 如通过 %\*record 指令处理模型 rtw 文件的记录。

代码用户头生成部分主要是通过 tlc 指定的 BlockTypeSetup 控制函数来将模块实现需要的一些声明、定义、预编译等信息写入到目标代码头部相应位置。对数据采集模块, 通常应该在 BlockTypeSetup 函数体内部使用 LibAddToCommonIncludes 函数包含实现任务使用的头文件; 使用 LibSetSourceFileSection 函数在 UserTop(源文件顶部)处添加编译器链接到相应库的代码; 其他的需要使用的宏、typedef、类型定义等, 分别使用 LibCacheDefine、LibCacheTypedefs、LibCacheExtern 函数来添加相应代码。

模块核心功能代码生成部分是模块目标 tlc 文件中最重要核心算法实现部分。对于数据采集模块, 此部分分为 3 个函数: Start 函数、Outputs 函数、Terminate 函数, 3 个函数的功能分别是将对应的模块 S-Function 中的 mdlStart、mdlOutputs、mdlTerminate 回调功能实现代码产生到相应的目标代码中。其中涉及到的模块信息, 通过 tlc 函数获得, 如函数 LibBlockInputSignal 可得到模块输入; 如果要控制代码生成的流程, 使用来 %switch、%if 等来实现; 其余如 work 算法库的使用等, 可以直接内嵌目标语言。

## 4 应用

图 3 所示为数据采集仿真模块在飞行控制系统

半物理仿真中的应用。飞机模型由运行控制算法的控制主机来控制。控制主机通过 DO 采集卡发送指令给飞机模型，并通过 AD 采集卡接收飞机模型状态信息；飞机模型通过 DA 采集卡传送状态给控制主机，并通过 DI 采集卡接收控制指令。因此，在控制主机上，数据采集仿真模块将放置在飞控仿真模型，并与相应的指令与状态信号相连，完成发送指令、接收状态的任务。

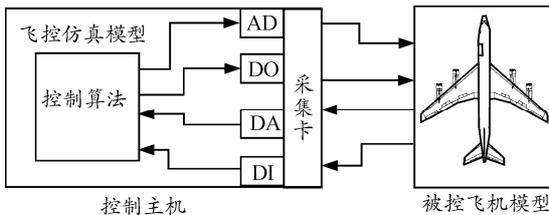


图 3 数据采集模块在飞控仿真中的应用

在此应用中，提供了数据采集接口的 S-Function，可以直接在模型中运行，达到信息交互的任务，以验证控制算法的准确性欲可靠度；提供了数据采集接口的 tlc 文件，就可在验证无误后，由模型产生出代码，脱离 Simulink 来运行控制算法或进一步开发。

### 5 结束语

通过研究数据采集卡工作方式、S-Function 与

\*\*\*\*\*

(上接第 87 页)

### 2.3 软硬件调试

采用列扫描方式对显示字符进行扫描，以便缩短 MCU 中断服务的次数，加快 MCU 主程序运行速度。为避免画面出现抖动、闪烁，软件设计时，尽量调整中断服务程序的中断时间，使其每次扫描的时间足够短，一般满足整个显示画面的扫描频率在 80~100 Hz 范围内。显示的亮度可通过电路中的电阻  $R_0 \sim R_7$  进行调节，一般  $R_0 \sim R_7$  可取 470  $\Omega$ 。电流放大电路 2 可采用 ULN2003，电流放大电路 1 则可采用 KID65783AP。

由于家电产品控制器的生产量巨大，对设计成本非常敏感，常采用低价格的 MCU 作为控制器主芯片。笔者在设计空调控制器时需要的端口较多，而低价格的单片机能提供的 I/O 口很少，因而还采用了 74HC595 进行端口扩展。在调试过程中，发现显示屏有些字符随机点亮，不受控制，通过示波器同时查询 LED 各行、列管脚信号，发现有个别的信号在输出下一组端口数据瞬间有重叠现象，瞬间造成显示混乱。为此，在 LED 扫描输出中断服务程序

目标语言编译器机制，给出了数据采集接口通用的实现方式，并成功实现了多种数据采集卡。目前，使用此方式实现的数据采集模块在国内多个型号的无人机飞控仿真中得以成功地应用，并且在代码质量、使用内存、代码运行速度、开发速度等多方面具有比较优势。此外，使用 rtw 的 CAPI 接口进行二次开发，还可以做到参数可调、信号可读写；还可以用来开发任意具有三段式工作方式仿真模块。

### 参考文献:

- [1] 董敏周, 孙力, 阎杰. 导弹飞控系统快速控制原型开发及半实物仿真系统方案研究[J]. 计算机测量与控制, 2009, 19(4): 703-705.
- [2] 李志学, 朱纪洪, 等. 大闭环半物理飞行实时仿真系统研究[J]. 微计算机信息, 2007, 29(28): 194-195.
- [3] 吴成富, 段晓军, 等. 基于 Matlab 和 VxWorks 的无人机飞控系统半物理仿真平台研究[J]. 西北工业大学学报, 2005, 54(3): 337-340.
- [4] 张丹, 李壮辉. 基于 SIMULINK 的数据采集模块的设计与实现[J]. 上饶师范学院学报, 2009, 31(6): 97-101.
- [5] 厉明, 纪勇, 等. 基于快速仿真原型的飞行器半物理仿真系统[J]. 光学精密工程, 2008, 44(10): 1949-1955.
- [6] Rabbath C A, Desira H A. COTS solution for the distributed flight simulation of an F-14 squadron[R]. Canada: AIAA-2001-4130, 2001.

入口处放置“P0=~0, P1=0”语句，关掉显示屏，在中断服务程序末尾处再根据程序运行结果重新输出显示信号，按这种方式控制，显示恢复正常。这一原理已在空调产品控制器多个产品的显示屏设计上大量运用，使用效果很好，所设计的产品已投入大批量生产。

### 3 结论

LED 采用矩阵连接方式<sup>[4]</sup>后，可大大减小所需要的单片机输出端口数，解决了普通单片机由于端口数较少、一般不带 LCD 控制逻辑电路，给使用带来不便的问题，降低了设计成本，效果理想。

### 参考文献:

- [1] Texas Instruments DATA SHEET. ULN2003A.PDF [EB/OL]. [2010-11-24]. [http://www.icpdf.com/PdfView.asp?id=362870\\_614966](http://www.icpdf.com/PdfView.asp?id=362870_614966).
- [2] SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA.KID65783AP/AF.PDF [EB/OL]. [2010-11-24]. [http://www.icpdf.com/PdfView.asp?id=815020\\_603120](http://www.icpdf.com/PdfView.asp?id=815020_603120).
- [3] 移位寄存器 74HC595 中文资料[EB/OL]. [2010-11-24]. <http://www.dz3w.com/info/cmos/0083302.html>.
- [4] 宋小力. 一类矩阵乘积秩的恒等式及应用[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(3): 135.