

文章编号: 2095-4980(2013)04-0567-05

## 基于 SysML 的飞控系统模型重用技术

张 昕, 曹云峰, 庄丽奎, 王 彪, 王西超, 王 平

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

**摘 要:** 针对飞控系统建模中的模型重用问题, 改进面向虚拟样机的系统分析和描述方法, 提出一种基于系统工程建模语言(SysML)组件(BSC)的飞行控制系统虚拟样机模型重用方法, 即“部件、结构; 行为、过程”(US-BP)方法; 以某型四旋翼无人机为例, 说明了飞控系统虚拟样机支持模型重用的实现方式, 即基于 SysML 组件与 Simulink 组件的仿真设计与实现方法。本文为飞控系统建模与仿真领域中的模型重用提供了重要的技术途径。

**关键词:** 飞控系统; 模型重用; 系统建模语言; 基于组件方法

**中图分类号:** TN964

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201304.0567

## Model reuse technology of the flight control system based on SysML

ZHANG Xin, CAO Yun-feng, ZHUANG Li-kui, WANG Biao, WANG Xi-chao, WANG Ping

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China)

**Abstract:** A new model reuse method of flight control system virtual prototype is proposed Based on the Systems Modeling Language(SysML) Components(BSC), namely US-BP(Unit, Structure; Behavior, Process) method, which can improve the methods of virtual prototype-oriented system analysis and description. Taking a certain type of four-rotor UAV as example, the implementation of the flight control system virtual prototype supporting model reuse is described—the simulation, design and implementation are based on SysML components and Simulink components simultaneously. It provides an important technology for the model reuse in the modeling and simulation of the flight control system.

**Key words:** flight control system; model reuse; Systems Modeling Language; component-based approach

飞控系统是典型的复杂系统, 在建模中充分利用已开发的模型资源可以使飞控设计人员最大限度共享建模开发成果, 大幅降低开发成本。飞控系统模型广度上涉及多个领域、多个学科, 类型上又涉及连续模型和离散模型。以 SysML 设计飞控系统, 能够增强飞控系统工程师和其他领域、学科之间关于飞控系统需求和设计的有效通信, 充分满足飞控系统工程对功能分析和结构分解的复杂需求。为了解决面向对象建模语言模型重用问题, 国外现在比较流行的是采用基于组件的方法。文献[1]提出了基于软件的组件特征建模方法, 文献[2]描述了基于统一建模语言(Unified Modeling Language, UML)的嵌入式系统特征模型拓扑结构, 文献[3]在 UML 类图基础上扩展了 2 个特殊类, 明确了适应工业标准的基于组件系统(Component-Based System, CBS)。文献[4]研究了如何使用外部分析工具核查 UML 组件的结构和一些非功能属性, 重点研究了组件的接口类属性的分析方法。文献[5]为了使模型提供者和用户更有效地测试软件组件, 引入了对象约束语言(Object Constraint Language, OCL), 以 OCL 描述用例场景为例说明此方法对 UML 模型重用效率的提高。

以上方法或者扩展了 UML 相关功能类属性, 或者扩展了非功能类属性, 有效提高了面向对象设计建模中模型的重用效率。然而这些方法描述的重用级别均停留在软件设计重用的层面, 在满足飞控系统建模仿真对典型物理部件结构分解、行为描述等的需求方面存在不足。

为实现飞控系统建模过程中 US-BP 不同粒度、不同性质的模型重用, 本文提出了一种基于 SysML 的仿真组件重配实现模型重用的方法, 并建立了系统部件库, 最后以模型四旋翼无人机为例进行说明, 给出具体的模型重用实现方法。

收稿日期: 2012-10-09; 修回日期: 2012-11-09

基金项目: 航空基金资助项目(20110752055)

## 1 系统建模语言 SysML

SysML<sup>[6-8]</sup>是对象管理组织 OMG 及国际系统工程学会 INCOSE 为满足系统工程领域建模需要,在对 UML2.0 的子集进行重用和扩展的基础上,提出的一种新的系统建模语言。

相比于 UML, SysML 在以下方面进行了改进<sup>[9]</sup>: 1) SysML 的基本单元块(block)替代了 UML 基本单元类(class),与此相对应,UML 中的类图、对象图和复合结构图被 SysML 的块定义图和内部块图代替,前者用于描述系统之间的关联,后者用于定义系统内部结构; 2) UML 端口(port)被重命名为标准端口(standport),并新增加了流端口(flowport),前者用于实现消息传递,后者实现信号等实体流传输; 3) 增加了需求图 and 参数图,需求图描述需求之间以及需求与系统设计元素之间的关联,便于设计追溯,实现需求的形式化表达,参数图用于建立各种系统属性之间的参数关联,表征系统参数变化对系统总体功能、性能的影响。

## 2 SysML 表示的飞控系统虚拟样机

### 2.1 典型飞行控制系统的组成

为了便于对 SysML 模型封装成用户需求级的部件达到重用目的,需要对飞行控制系统的组成结构进行划分,典型的飞行控制系统包括以下基本组成部分:

1) 测量部件,是飞行控制系统的信息来源,用来测量飞行控制所需要的飞机运动参数,例如,常用的垂直陀螺仪、航向陀螺仪、速率陀螺以及加速度计等。

2) 信号处理部件,主要负责将测量部件的测量信号加以处理,形成符合控制要求的信号和飞行自动控制规律,例如,机载计算机等设备。所谓的飞行自动控制规律,是指自动控制器的输出信号与输入信号之间的动态关系,即自动控制器的静态和动态特性的数学表达式。

3) 放大部件,用来将信号处理部件的输出信号进行必要的放大处理,以便驱动执行机构。

4) 执行机构部件,根据放大部件的输出信号驱动舵面偏转,例如,常用的电动伺服舵机和液压伺服舵机等。

### 2.2 基于 SysML 的飞控系统虚拟样机

SysML 语言从系统总体功能和性能的角度描述系统,并且能够将多领域模型集成到一起。本文设计的飞行控制系统由离散模型和连续模型构成,其中代表离散模型的 SysML 设计原型描述系统的功能和行为,代表连续模型的 Simulink 设计原型描述系统的结构和组成。图 1 给出了本文设计的飞控系统 SysML 静态结构图,其中领导决策层在 rhapsody 中设计,其状态图描述飞机飞控系统的功能和行为,流端口负责与飞控系统进行数据交换;其他 5 个块包含典型飞控系统的物理部件和控制对象,其中传感器、控制器、信号放大器和电机分别代表 2.1 节所提的测量部件、信号处理部件、放大部件和执行机构部件。特别地,电机部件又分为定子和转子,定子和转子作为本文部件设计的单元层。这些块先在 Simulink 中设计,然后导入到 SysML 模型中。SysML 提供了将 Simulink 模型集成到 SysML 的机制,图 2 描述了 SysML 模型代码与 Simulink 模型代码的集成原理,图中 SysML 模型与 Simulink 模型之间的交互(双向虚线)通过 SysML 模型代码调用 Simulink 生成的模型代码(双向实线)来实现。

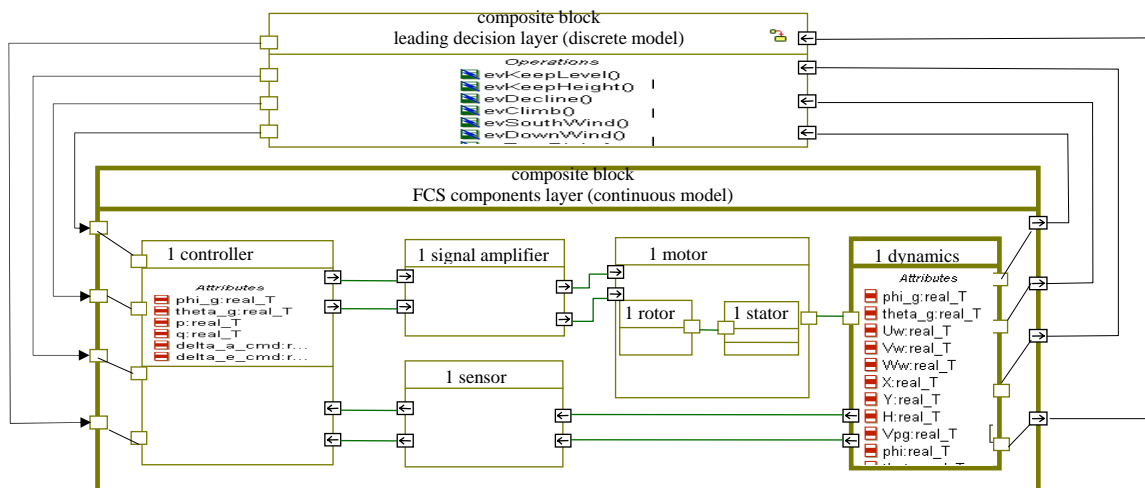


Fig.1 Static structure of a certain type of UAV flight control system based on SysML

图 1 某型无人机飞控系统 SysML 静态结构图

### 3 基于 SysML 的仿真组件重配方法研究

飞控系统模型设计仿真的过程中,对部件重用的需求很大。文献[10]从 UML 的设计元素出发,提出一种基于包配置文件(sbs)的重用方法,显然这种方法只能重用底层的 UML 图例<sup>[11]</sup>,并不能满足传统部件重用需求。因此,图 3 给出了基于 SysML 的飞控系统部件级重用平台的设计原理。用户首先提出重用部件的需求,与 MFC 界面进行交互。SysML 中建立了满足用户需求的部件库,每个部件又按照部件的物理结构划分成元子模型,元子模型为最小单位,不可再分。以重用电机部件为例, SysML 设计了 2 种电机型号,每种电机又分为定子和转子,图示定子和转子为 SysML 最小单位元,所有的元子以 SysML 描述,并封装在构造块中。SysML 需求管理器分析用户重用需求,将需求请求传递给 MFC 平台,以 vc 代码修改 SysML 建模工具为系统模型产生的组件配置文件,从而调用 SysML 设计的模型库。从图中可以看出,如何修改组件配置文件成为了该方法的关键问题。为了解决上述问题,表 1 列出了 rhapsody 组件配置文件的一些代码结构。SysML 代码生成和仿真是以块为基本单位,在组件配置文件中配置相应的 Elements 及其成员代码生成需要的部件级模型代码;配置相应的实例化块(构造块)范围,达到仿真时调用相应部件的要求。Elements 与 Configs 成员中有 3 个用到的参数: `_filename`, `_name` 和 `_id`。`_filename` 描述了该模块在 rhapsody 所属包的名称, `_name` 描述了该模块的名称, `_id` 比较特殊,它是该模块所属包的描述文件对其自动配置的参数,一旦模块被拖放到静态结构图上, `_id` 就会自动生成。

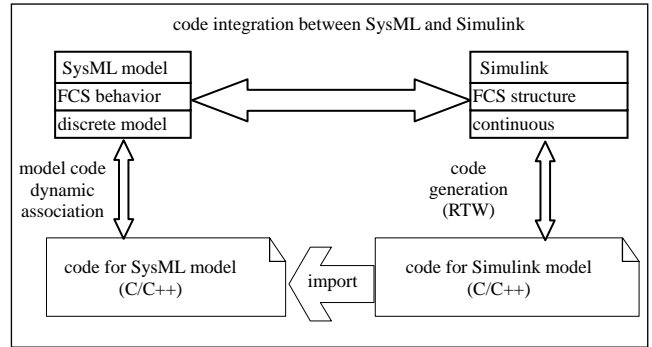


Fig.2 Code integration between SysML and Simulink  
图 2 SysML 与 Simulink 代码集成

### 4 SysML 模型重用平台实例

以某型四旋翼无人机飞控系统为对象,在 Simulink 中设计了其飞控系统的五大部件的数学模型:控制器、电机、飞机动力学模型、传感器和信号放大器。然后,将 Simulink 模型集成到 SysML 模型中。其中,以对电机部件的重用需求为例,在 SysML 模型中设计出 2 种电机部件,每种电机部件以构造块封装起来。

四旋翼飞行器忽略附加小扰动的运动方程<sup>[12]</sup>:

$$\begin{aligned}
 m\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}, \\
 \mathbf{x} &= [x, y, z, p, q, r, \theta, \phi, \psi]^T \\
 \mathbf{u} &= [u_1, u_2, u_3, u_4]^T
 \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $m$  为四旋翼飞行器的质量;  $A, B$  表示状态量矩阵;  $x, y, z$  代表四旋翼飞行器的位置量;  $p, q, r$  分别代表滚转角速率,俯仰角速率,偏航角速率;  $\phi, \theta, \psi$  分别代表四旋翼飞行器的滚转角,俯仰角,偏航角;  $u$  分别代表四旋翼飞行器的 4 个输入量;上标 T 表示矩阵转置。

表 1 SysML 模型组件配置文件部分代码结构

Table1 Part of code structure for SysML model components configuration files

components configuration extended type	related with SysML	member type
elements	define code generation range of SysML blocks	<code>_filename</code> package name belongs <code>_name</code> SysML block name <code>_id</code> SysML block diagram id
configs	define the block range of instantiation	<code>_filename</code> package name belongs <code>_name</code> SysML block name <code>_id</code> SysML block diagram id

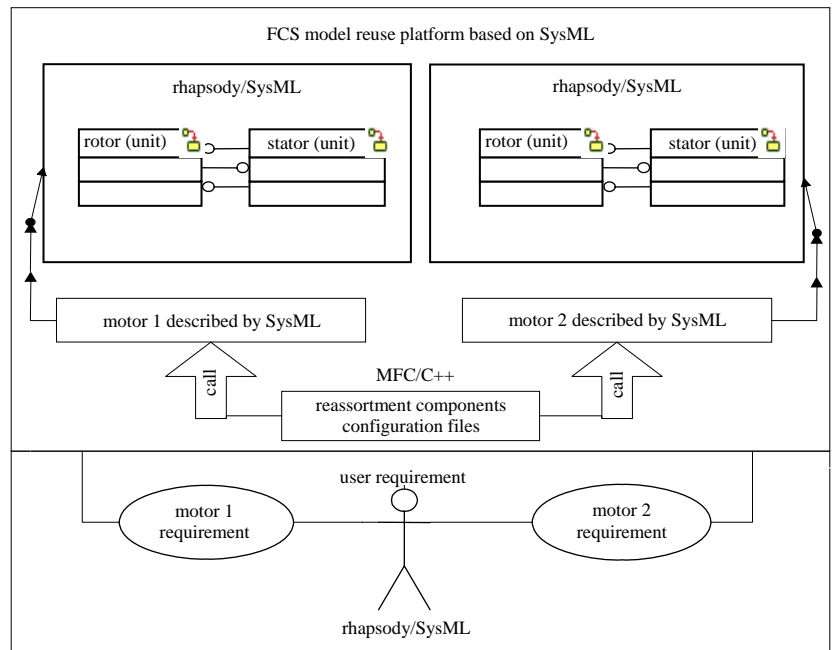


Fig.3 Principle of FCS component level reuse platform based on SysML

图 3 基于 SysML 的飞控系统部件级重用平台原理

直流电机的数学模型可近似为惯性环节。近似的惯性环节可表示为：

$$\frac{\omega_m(s)}{u(s)} = \frac{k}{T_m s + 1} \quad (2)$$

式中： $T_m$  为惯性时间常数； $k$  为开环增益； $\omega_m(s)$  为电机转速； $u(s)$  为电压。对于电机部件 1，这里设定  $k=2\ 000$ ，而电机部件 2 设定为  $4\ 000$ 。用户根据需求选择电机部件型号，启动 vc 面板验证仿真结果，调用 Matlab 引擎绘制参数曲线。图 4 为基于 SysML 飞控系统部件运行状态图，其中红色的状态表示该部件正在运行，而绿色的状态表示该部件没有加入仿真，可以看出图 4 默认选择电机 1、六自由度动力学模型、信号放大器、控制器和传感器部件组成飞行控制系统的连续模型进行仿真。当 vc 界面发生需求变化时，状态会从电机 1 跳转到电机 2，预示着自动更换了部件。图 5 给出不同电机时飞机飞行姿态角的曲线示意图。飞控系统输入条件相同时，当电机模型的开环增益增大，电机 2 的上升时间由  $50\text{ ms}$  降低到  $30\text{ ms}$ ，快速提高；在  $120\text{ ms}$  之后基本上收敛于给定值，相比电机 1 的  $160\text{ ms}$ ，其精确性提高；但是由于开环增益过大，可以看出电机 2 的飞机模型飞行姿态角在  $30\text{ ms}$  与  $100\text{ ms}$  之间有过多的振荡，稳定性相比电机 1 降低很多。仿真曲线与预期的结果一致，模块置换成功。

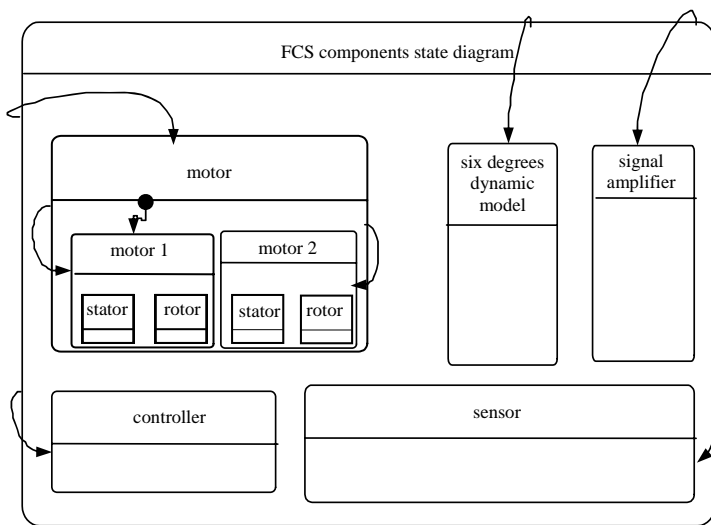


Fig.4 States of FCS components based on SysML  
图 4 基于 SysML 飞控系统部件状态

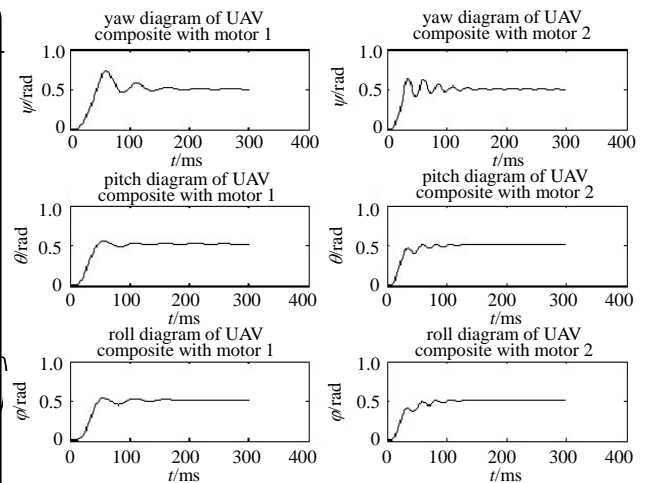


Fig.5 Contrast of four autogyro flight attitude angles with different motors  
图 5 不同电机四旋翼飞机飞行姿态角曲线对比

## 5 结论

本文研究了一种基于 SysML 的飞控系统模型重用方法，从设计重用和仿真重用 2 个层次搭建模型重用平台，为飞行控制系统虚拟样机建模与仿真提供了重要的技术途径。该方法具有以下特点：

1) 分别以 SysML 语言描述飞行控制系统虚拟样机内部结构并建立系统部件库，C++ 语言描述仿真实际涉及的系统部件集，2 种语言混合编程，将飞控系统的设计模型与仿真模型分离，模型设计人员与系统仿真人员既共享了模型开发资源，又可以在各自熟悉的领域环境测试飞控系统虚拟样机性能。

2) SysML 代码与 Simulink 代码的集成为飞控系统虚拟样机模型结构与典型物理部件对应提供途径，构造类分层封装描述物理部件的 SysML 元模型，并对外暴露部件的属性参数与接口信息，对物理部件的再分层加深了对飞控系统典型部件重用粒度。

3) 通过外部设计工具对需要重用的 SysML 组件进行关联配置，将 SysML 设计元彻底规划到后台，前台设计的友好交互界面为飞控系统仿真用户提供所见即所得的仿真平台。

### 参考文献：

- [1] Stewart D B, Volpe R A, Khosla P K. Integration of real-time software modules for reconfiguration sensor-based control systems[C]// Proceedings of International Symposium on Intelligent Robotics (ISIR'93). Bangalore, India: [s.n.], 1993: 489-496.
- [2] Zha X F, Sebti F, Sudarsan R, et al. Analysis and evaluation for STEP-based electro-mechanical assemblies: an integrated fuzzy AHP approach[C]// Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference. Salt Lake City, Utah: [s.n.], 2004: 553-562.

- [3] Mahmood S,Lai R. RE-UML:An Extension to UML for Specifying Component-Based Software System[C]// 20th Australian Software Engineering Conference ASWEC 2009. Gold Coast, QLD:Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Computer Society, 2009:220-228.
- [4] Kmimech M,Bhiri M T,Aniorte P. Checking Component Assembly in Acme: An Approach Applied on UML 2.0 Components Model[C]// Fourth International Conference on Software Engineering Advances, ICSEA '09. Porto:[s.n.], 2009:494-499.
- [5] Zhou Chuansheng. Research on UML State Diagram Based Component Test System[C]// 2010 International Conference on Computational Aspects of Social Networks. Taiyuan:Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Computer Society, 2010.
- [6] OMG. OMG SysML specification v1.1[OL/R]. <http://www.SysMLforum.com/docs/specs/OMGSysML-v1.1-08-11-01.pdf>.
- [7] James A Constantine,Senay Solak. SysML modeling of off-the-shelf-option acquisition for risk mitigation in military programs[J]. Systems Engineering, 2010,13(1):80-94.
- [8] 王西超,曹云峰,丁萌,等. 元对象机制驱动的复杂系统开放式顶层建模[J]. 电子科技大学学报, 2012,41(4):482-490. (WANG Xichao,CAO Yunfeng,DING Meng,et al. Complex System Open ended Top-Level Modeling Driven by Meta Object Facility[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2012,41(4):482-490.)
- [9] 刘兴华,曹云峰,王彪,等. 基于 SysML 与 Simulink 的飞控系统概念样机设计[J]. 电子科技大学学报, 2011,40(6):887-891. (LIU Xinghua,CAO Yunfeng,WANG Biao,et al. Flight Control System Conceptual Prototype Design Based on SysML and Simulink[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011,40(6):887-891.)
- [10] 周在华,曹云峰,庄丽奎,等. 数字化工程中面向系统重用的信息提取[J]. 信息与电子工程, 2012,10(4):520-523. (ZHOU Zaihua,CAO Yunfeng,ZHUANG Likui,et al. Information extraction in digital project for system reusability[J]. Information and Electronic Engineering, 2012,10(4):520-523.)
- [11] 薛振伟,吴志杰,杨德成. UML2.0 对模型驱动架构的支持[J]. 信息与电子工程, 2007,5(4):296-300. (XUE Zhenwei,WU Zhijie,YANG Decheng. Study on Support to Model Driven Architecture of UML 2.0[J]. Information and Electronic Engineering, 2007,5(4):296-300.)
- [12] 李俊,李运堂. 四旋翼飞行器的动力学建模及 PID 控制[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2012,31(1):114-117. (LI Jun,LI Yuntang. Modeling and PID control for a quadrotor[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2012,31(1):114-117.)

#### 作者简介:



张 昕(1987-),男,安徽省滁州市人,在读硕士研究生,主要研究方向为数字化技术。  
email:p40614029@126.com.

曹云峰(1964-),男,浙江省湖州市人,博士,教授,主要研究方向为飞行控制、计算机视觉和数字化设计与虚拟样机研究。

庄丽奎(1963-),女,南京市人,博士,助理研究员,主要从事无人机飞行控制与导航研究工作。

王 彪(1975-),男,辽宁省铁岭市人,副教授,主要从事飞行控制、计算机视觉、精确制导等研究工作。

王西超(1982-),男,郑州市人,在读博士研究生,主要从事数字化技术研究工作。

王 平(1983-),男,江西省乐平市人,在读硕士研究生,主要从事无人机导航与制导技术研究工作。