

# 激光与光电子学进展

## 系统工程方法及其在先进半导体装备领域的应用

戈峰<sup>1</sup>, 许智磊<sup>2</sup>, 何乐<sup>3</sup>, 杨晓峰<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>复旦大学工程与应用技术研究院, 上海 200433;

<sup>2</sup>上海交通大学清源研究院, 上海 200240;

<sup>3</sup>上海微电子装备(集团)股份有限公司, 上海 201203;

<sup>4</sup>复旦大学微电子学院专用集成电路与系统国家重点实验室, 上海 200433

**摘要** 系统工程方法在国内外以航空航天、国防科技和船舶工程等为代表的复杂设备系统的研发中发挥了重要作用。针对以光刻机为代表的先进半导体装备的研发, 发展和提升以正向设计引领、以系统工程方法为指导的自主创新和设计制造一体化能力显得尤其重要。从系统工程的起源着手, 介绍了系统工程的常见方法, 并以半导体装备领域的应用为背景重点介绍了系统工程的工具链和基于模型的系统工程(MBSE)的部分关键技术。最后对系统工程方法, 特别是对 MBSE 方法在我国半导体装备行业中的应用前景作了展望。

**关键词** 光学设计与制造; 系统工程; 基于模型的系统工程; 半导体装备; 信息物理系统

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0922026

## Systems Engineering Methods and Their Applications in Field of Advanced Semiconductor Equipment

Shu Feng<sup>1</sup>, Xu Zhilei<sup>2</sup>, He Le<sup>3</sup>, Yang Xiaofeng<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Academy for Engineering and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China;

<sup>2</sup>Qingyuan Research Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

<sup>3</sup>Shanghai Micro Electronics Equipment (Group) Co., Ltd., Shanghai 201203, China;

<sup>4</sup>State Key Laboratory of ASIC and System, School of Microelectronics, Fudan University, Shanghai, 200433, China

**Abstract** Systems engineering methods have played an important role in the research and development of complex equipment and systems represented by aerospace, defense technology, and ship engineering at home and abroad. For the research and development of advanced semiconductor equipment such as lithography machines, it is particularly important to develop independent innovation and integrated design and manufacturing capabilities led by forward design and guided by systems engineering methods. Starting from the origin of systems engineering, this paper gives a survey of the common methods of systems engineering, and focuses on the related systems engineering tool chains and key technologies of model-based systems engineering with the applications in the field of semiconductor equipment as the background. Finally, this paper looks forward to the application prospects of systems engineering methods, especially model-based systems engineering methods, in domestic semiconductor equipment industry.

收稿日期: 2022-01-25; 修回日期: 2022-03-10; 录用日期: 2022-03-14

基金项目: 中央引导地方科技发展资金(YDZX20203100004302)

通信作者: \*xf\_yang@fudan.edu.cn

**Key words** optical design and fabrication; systems engineering; model-based systems engineering; semiconductor equipment; cyber-physical system

## 1 引言

近年来,在日趋复杂的国际政治和经济大背景下,世界各国均意识到制造业是国民经济的主体,是强国之本,更是产业供应链安全性和竞争力的重要保障。由此,国际制造业领域的竞争日益激烈。从总体规模来看,我国制造业已居世界第一位,但我国多数制造企业在国际产业链分工中仍处于相对低技术含量和低附加值环节。高端装备制造产业是带动整个装备制造产业升级的重要引擎,是我国实现从“制造大国”到“制造强国”战略性转变的基础。

目前,我国在高端装备领域的国产化率仍然较低。以半导体装备为例,目前国内主要的 12 寸晶圆产线装备的整体国产化率不足 15%。按半导体设备的类型来看,光刻、涂胶显影、离子注入、量测、化学气相沉积(CVD)等设备的国产化率均不足 5%;物理气相沉积(PVD)设备整体国产化率近 15%;化学机械抛光(CMP)、刻蚀、清洗、热处理等工艺设备的国产化率约 20%;去胶设备的国产化率最高,接近 70%<sup>[1]</sup>。

半导体是现代信息社会的基石。从 20 世纪 70~80 年代的 3~10  $\mu\text{m}$ ,半导体工艺发展至目前最先进的 5 nm 及以下的工艺制程,装备的进步起着决定性的作用。半导体制造工艺复杂且对设备精密度要求极高,整个制造流程需要几百甚至上千道工序,所需设备种类相当广泛。以半导体制造的核心装备光刻机为例,该设备的研发涉及光学、机械、电子、软件、自动化控制、力学、化学等众多学科;设备内部构造极为复杂,当前最先进的极紫外光刻机由多达 10 万个零部件组成<sup>[2-3]</sup>。总的来说,高端半导体装备研发的复杂性体现在:1) 涉及的学科种类繁多,需要各个专业的科学家和工程师协同有效工作;2) 系统由众多分系统组成,且分系统之间及分系统下属的组件之间的交互复杂度呈指数级增长,系统软件代码数量随之成倍增加;3) 系统性能指标极为苛刻,有些甚至逼近物理理论极限,导致关键技术验证的成本大幅增加,且试错成本高昂。

系统工程方法是复杂系统研发的有效工具。第二次世界大战期间,美国在利用核裂变反应来研

制原子弹的“曼哈顿计划”中,系统工程方法的使用大大缩短了这一巨大工程所耗的时间,同时这一工程的成功极大地促进了二战后系统工程理论的发展。钱学森等<sup>[4]</sup>基于中国航天的成功经验进行总结,指出系统工程是组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法,在社会经济各个领域均有广阔的应用前景。

近半个多世纪来,传统的系统工程方法在国内外航空航天、国防科技、汽车制造、船舶工程和医疗设备等复杂系统的研发中发挥了重要作用。随着系统的复杂度进一步提升,系统工程方法在人类大型工程的实践中不断演进。基于模型的系统工程(MBSE)方法经过近 10 年的发展,在国外包括高端半导体装备在内的工业界已经开始获得应用。相比传统的系统工程,MBSE 利用模型描述系统,从而充分发挥模型优势,提升系统信息表述的一致性,从而大幅提升研发效率和质量。本文将从系统工程的起源和常见方法着手,重点介绍国外先进半导体装备厂商近年来采用的系统工程工具链及 MBSE 的相关关键技术。最后对系统工程方法在我国高端半导体装备研发中的应用作出建议和展望。

## 2 系统工程的起源和方法

### 2.1 系统工程的起源和定义

“系统工程”一词最早可以追溯到 20 世纪 40 年代。在美国贝尔实验室工作的莫利纳和在丹麦哥本哈根电话公司工作的厄朗将系统研发工作分为规划、研究、开发、应用和通用工程等 5 个阶段,这是系统工程阶段划分的雏形<sup>[5]</sup>。1942 年,美国启动“曼哈顿计划”,当时,该工程负责人格罗夫斯和奥本海默应用了系统工程的思路和方法,集中了当时一大批优秀的核科学家及 10 万人的工程师团队,历时 3 年,于 1945 年 7 月成功进行了世界上第一次核爆炸实验,并按计划制造出两颗原子弹,整个工程取得圆满成功。系统工程的运用大大缩短了这一复杂工程的所耗时间,同时为世人积累了宝贵的系统工程经验<sup>[6]</sup>。

另一个著名的系统工程实施案例是美国的“阿波罗登月计划”,该项计划于 1961 年启动,历时 11 年,

在高峰时期参加工程的企业达到 2 万家,大学和科研机构近 300 家,总人数超过 30 万人。美国国家航空航天局(NASA)在整个组织管理过程中采用了系统工程的科学方法,按预定目标第一次把人送到了月球<sup>[7]</sup>。自此,系统工程受到了世界各国的高度重视,被广泛应用到技术工程、自然科学乃至社会科学的各个领域。

1957 年,美国的古德和麦克霍尔合作出版了第一本完整的系统工程教科书《系统工程》<sup>[8]</sup>。1962 年,美国工程师霍尔出版了《系统工程方法论》一书,其内容涉及系统环境、系统要素、系统理论、系统技术、系统数学等方面。在我国,钱学森等<sup>[4]</sup>在 1978 年 9 月发表的《组织管理的技术——系统工程》一文中,基于中国航天事业的成功实践,对系统的概念、内涵、应用前景等进行了分析,开创了系统科学这一新兴学科,堪称系统工程“中国学派”的奠基之作。钱学森系统工程论运用各种组织管理技术,使系统的整体与局部之间的关系协调和相互配合,实现总体的最优运行。

系统工程国际委员会(INCOSE)发布了《系统工程与系统定义》,系统工程被定义为一种跨学科和综合的方法,对系统的组成要素、组织结构、信息流、控制机构等进行分析研究,可以使用系统的原理和概念以及科学、技术和管理方法使工程系统成功实现、使用和退出。这个定义强调了系统工程是跨学科的综合方法,突出了系统工程的实质是一种“使能”的方法<sup>[9]</sup>。

### 2.2 霍尔模型

1969 年,霍尔<sup>[10]</sup>在其论著的基础上,进一步提出了由时间维、逻辑维和知识维组成的“三维结构”系统工程的霍尔模型(图 1),美国国防部于 1974 年正式发布了基于霍尔模型的系统工程标准 MIL-STD-499A<sup>[11]</sup>。

霍尔模型中的时间维表示系统工程活动按时间顺序排列的全过程,分为规划、方案、研制、生产、运行、更新 6 个阶段。逻辑维表示每一个时间阶段内所要进行的工作内容和应该遵循的思维程序,包括明确问题、选择目标、系统综合、系统分析、方案优化、做出决策和付诸实施 7 个步骤。运用系统工程知识,把 6 个时间阶段和 7 个逻辑步骤结合起来,便形成霍尔管理矩阵:矩阵中时间维的每一阶段与逻辑维的每一步骤所对应的点代表着一项具体的工程管理活动。三维结构中的知识维是指在研发

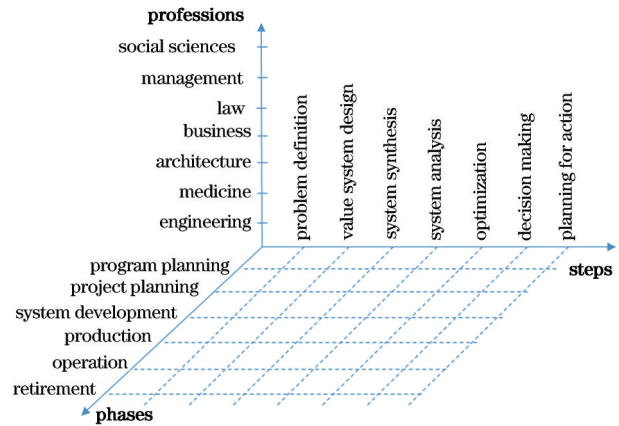


图 1 霍尔系统工程模型的三维结构<sup>[10]</sup>

Fig. 1 Three-dimensional structure of Hall systems engineering model<sup>[10]</sup>

系统所需的各种专业知识,包括工程技术、管理科学、社会科学、环境科学、法律经济等领域的知识。

以霍尔模型为代表的传统系统工程方法在西方各国的航空航天和国防军工行业,以及中国航天行业都发挥了巨大的作用。但是,随着系统复杂程度的迅速提升,传统的霍尔模型也遇到了巨大挑战。

### 2.3 瀑布模型和 V 模型

瀑布模型(Waterfall model)是在 20 世纪 70 年代就开始流行的系统开发过程管理的框架(图 2),特别是在软件工程领域得到了广泛的应用。瀑布模型将系统生命周期划分为需求分析、需求定义、概要设计、详细设计、系统实现、系统测试、验收测试和运行维护等 8 个基本步骤,并且规定了这些步骤自上而

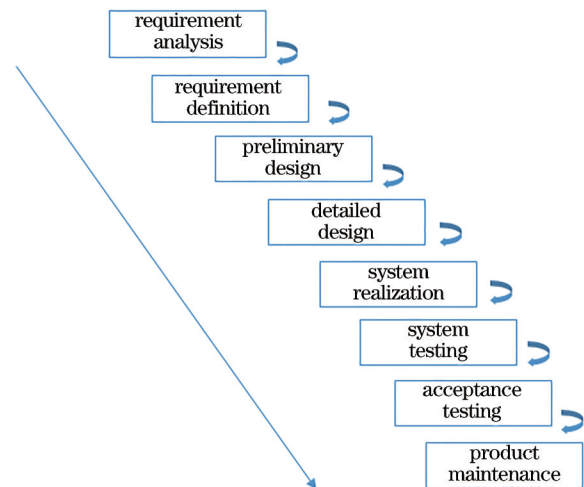


图 2 瀑布模型

Fig. 2 Waterfall model



下、相互衔接的固定次序,如同瀑布流水,逐级下落。该模型核心思想是按工序将问题简化,将设计与功能实现分开,便于分工协作,即采用结构化的分析与设计方法将逻辑实现与物理实现分开<sup>[12]</sup>。瀑布模型为项目提供了按阶段划分的检查点,严格规定了在上一阶段的任务完成且文档提交评审通过之后,才能启动下一阶段的研究任务,适用于需求清晰且固定的小型系统或者系统组件的研发。

V 模型(Vee model)是在瀑布模型的基础上提出的(图 3),它将系统设计和系统集成通过测试彼此关联,强调了测试在系统工程各个阶段中的作用<sup>[12]</sup>。V 模型的左侧强调自上而下的系统需求和定义,以及系统、分系统和组件的分层设计,底部是系

统实现;V 模型的右侧则是自下而上的组件、分系统到整机系统的逐级测试、验证直至系统交付。在每一级的测试中,都要参考规范体系和需求文档,以保证组件、分系统和整机系统能够满足体系规范和需求。V 模型的形状准确地表达了从系统设计到系统集成的研发过程,使系统工程的过程变得可视化和易于管理。Forsberg 等<sup>[13]</sup>在 V 模型的基础上又提出了系统工程的双 V 模型,包括架构 V 部分和实体 V 部分。架构 V 模型侧重系统架构的完善,实体 V 模型则关注系统架构的实体元素的实现。相比 V 模型,双 V 模型强调并发机会与风险管理,更加重视在开发过程中进行持续验证,进一步强调通过验证解决问题,突出了系统集成、验证与确认规划。

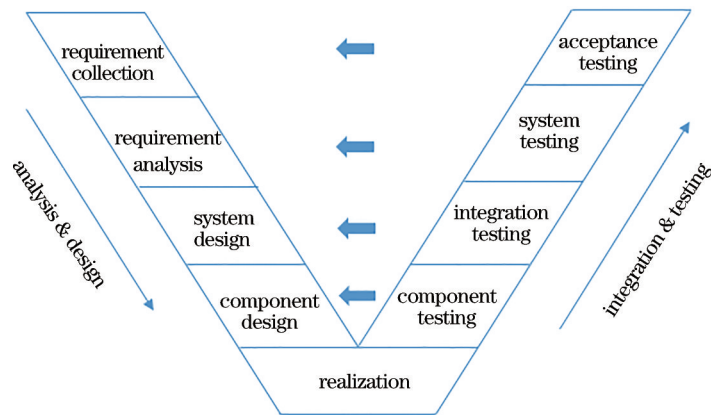


图 3 V 模型<sup>[12]</sup>

Fig. 3 Vee model<sup>[12]</sup>

## 2.4 螺旋模型

螺旋模型(Spiral model)<sup>[14]</sup>是一种风险驱动的系统工程方法(图 4),其最大特点是引入了其他模型不具备的风险分析,即在每个工程阶段之前都必须首先进行风险评估,从而兼顾了快速原型的迭代以及瀑布模型和 V 模型的系统化与严格监控。螺旋模型沿着螺线进行若干次迭代,沿着 4 个象限分别进行以下活动:1) 制定计划:确定目标,明晰限制条件并制定实施方案;2) 风险分析:评估分析方案,评定如何识别和消除风险;3) 项目实施:进行开发和验证;4) 客户评估:评价开发工作,提出修正建议,制定下一步计划。应用螺旋模型是反复进行的,每次都要经历一些阶段,研制出一个原型,在进入下一阶段前进行风险评估。螺旋模型适合于大型的、系统级的工程应用。

## 2.5 MBSE 方法

INCOSE 在《系统工程 2020 年愿景》中正式提出了 MBSE 的定义<sup>[15]</sup>:MBSE 是建模方法的形式化

应用,以使建模方法支持系统要求、设计、分析、验证和确认等活动,这些活动从概念性设计阶段开始,持续贯穿到设计开发以及后来的所有寿命周期阶段(图 5)。INCOSE 在统一建模语言(UML)的基础上,开发出了适用于描述工程系统的系统建模语言的(SysML)。

在传统的系统工程方法中,活动产出是一系列基于自然语言的文档,比如用户的需求、设计方案和测试结果等。因此,传统的系统工程是“基于文档的系统工程”(DBSE)。在 DBSE 模式下,各个学科的工程参与人员需要把项目的需求报告、设计报告、分析报告、测试报告中的工程系统的信息整合关联在一起,且在需求变更时及时更新文档。针对日益庞杂的系统而言,这带来了一系列的严峻问题:1) 工程信息分散于各个文档,难以保证完整性、时效性和一致性;2) 需求变更时,文档内容需要及时变更,工作量大、维护成本高昂。3) 传统系文档难以描述复杂、动态的过程,经常产生歧义和误解。

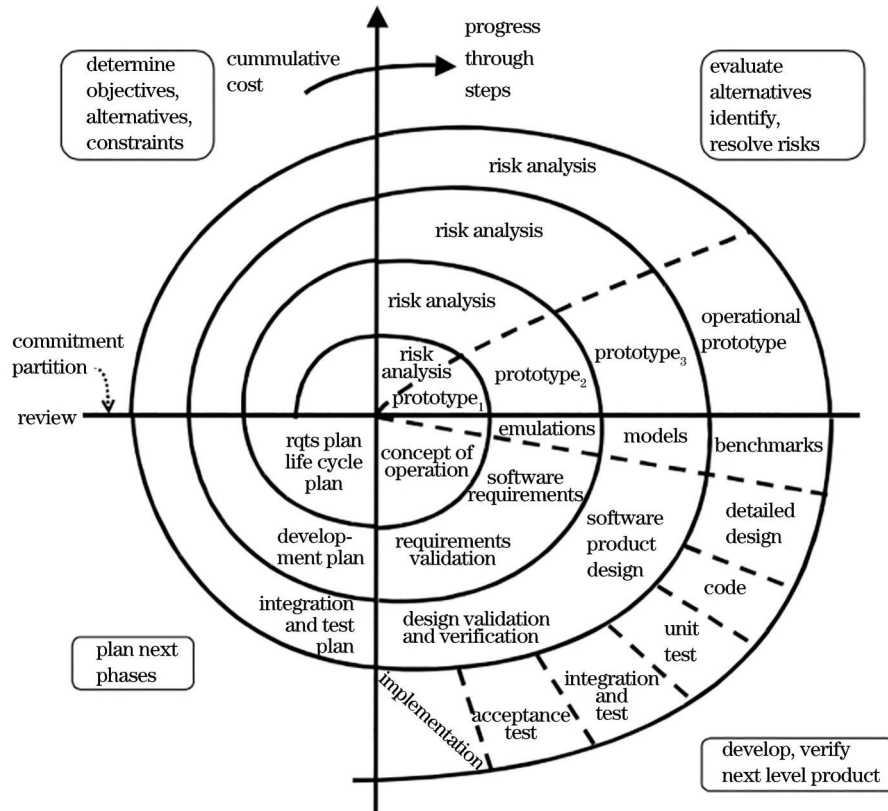


图 4 螺旋模型<sup>[14]</sup>

Fig. 4 Spiral model<sup>[14]</sup>

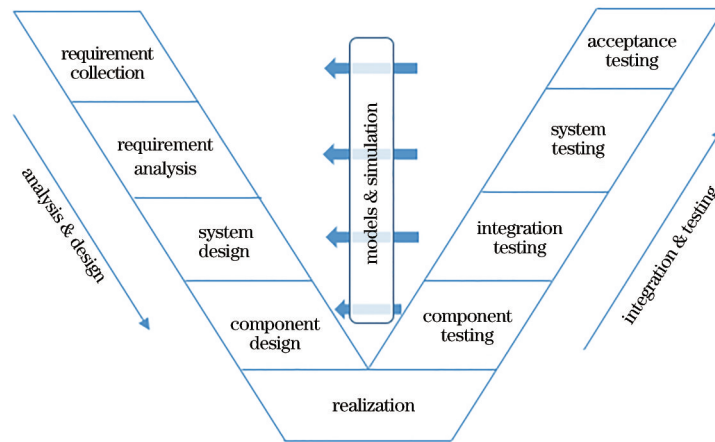


图 5 MBSE方法<sup>[15]</sup>

Fig. 5 Model-based systems engineering method<sup>[15]</sup>

MBSE采用模型的表达方法来描述系统的整个生命周期过程中需求、设计、分析、验证和确认等活动。相对于DBSE的系统工程方法,主要优势体现在以下方面:

1) 系统设计的一体化。由于系统模型的建立涵盖系统的整个生命周期,包括系统的需求、设计、分析、验证和确认等活动,可以提供一个完整、一致的并可追溯的系统设计,从而保证系统设计的一体

化,避免各组成部分间的设计冲突,降低风险。

2) 通过模型和仿真手段对设计进行先期验证和 multidisciplinary协同优化设计能力。传统的系统工程方法主要依赖实物验证,验证周期长,且待在实物阶段后的设计修正成本极高。MBSE是一种形式化的方法,用于支持与复杂系统的开发相关的需求,在早期就进行系统的验证和确认,可以大大降低风险,减少设计更改的周期和费用。

3) 信息表示的无二义性。文字的描述经常会因人而异,系统模型可以准确统一地描述系统的功能、详细规范与设计,提高项目管理人员、设计人员和开发人员之间理解的一致性。

4) 提升沟通交流的效率。随着系统的规模和复杂程度的提高,DBSE的各种文档变得越来越多,而MBSE的图形化模型更加直观、无歧义,有利于协调工作部门之间的沟通与提升交流效率。

经过近10年的发展,MBSE在国外半导体装备行业已经开始应用,尤其是在航空航天领域,已经获得了广泛的应用<sup>[16-17]</sup>。波音公司构建了以任务和需求定义、逻辑和功能集成、功能和逻辑架构设计为核心的覆盖从运行概念到需求到设计到生产的产品全生命周期的MBSE过程。空客公司在A350系列飞机的开发中全面采用MBSE,通过逐层细化需求并进行功能分析和设计综合,不仅实现了顶层系统需求分解与确认,也实现了向供应商、分包商的需求分配和管理。洛克希德·马丁公司采用MBSE来统一进行需求管理和系统架构模型,构建了完整的基于MBSE的开发环境。在航空发动机行业,普惠公司采用MBSE方法,在发动机整机系统中进行功能逻辑建模,通过对发动机的行为、逻辑进行分析,基于逻辑架构对需求进行分解和分配,并确保需求捕获正确且完整。NASA也已经通过MBSE方法,有效管理复杂的系统、提升项目的经济可承受性、缩减开发时间,以及提升系统整体

的质量水平。近年来,MBSE在我国也已成为研究的热点,并逐渐开始被应用于航空航天、核工业、汽车制造等领域<sup>[18]</sup>。

## 4 模型化的系统工程工具链及关键技术

本节将以先进半导体装备的研发为应用背景,重点介绍模型化的系统工程工具链及相关的关键技术。

### 4.1 控制架构参考模型

半导体装备的运动控制系统的复杂度极高。以光刻机的工件台为例,通常由几十个伺服控制器和几千个过程控制任务组成(图6),而任务之间的依赖项可以达到上万项。为了更高效地研制复杂伺服控制系统,荷兰的ASML公司根据控制架构参考模型(CARM)来描述控制逻辑以及抽象化计算硬件资源<sup>[19]</sup>。CARM系统的核心依赖于一套领域特定语言(DSL),并且通过专门研发的集成开发环境(IDE),用形式化的方法描述:1)基于复杂的伺服网络、传感器和执行器的控制逻辑;2)异构高性能计算平台;3)控制逻辑和计算平台部署的映射关系。在CARM提供的IDE中,工程师首先对控制系统进行建模,通过形式化方法对模型进行逻辑验证,并把模型部署到仿真环境中进行性能验证,最后通过自动代码生成功能把经过验证的模型直接生成可执行的代码整合到整机系统中。

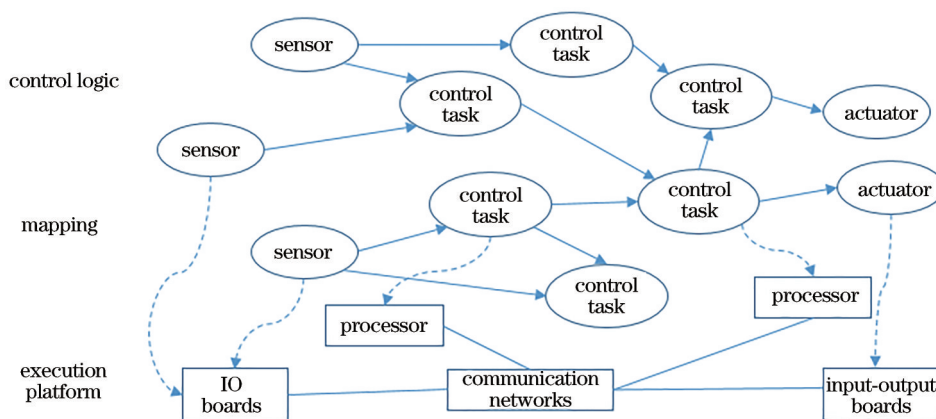


图6 伺服控制应用示例

Fig. 6 Servo control example

### 4.2 模型化集成与测试

模型化集成与测试(MBI&T)是基于ASML公司发起的Tangram项目(图7)而开发的面向系统集成和测试的工具链<sup>[20]</sup>。该项目是ASML联合

TNO、埃因霍温理工大学和代尔夫特理工大学等荷兰科研院所及高校共同参与的科研项目,旨在降低光刻机的系统集成和测试成本,缩短交付周期及提高产品质量。模型化集成方法旨在通过模型及早



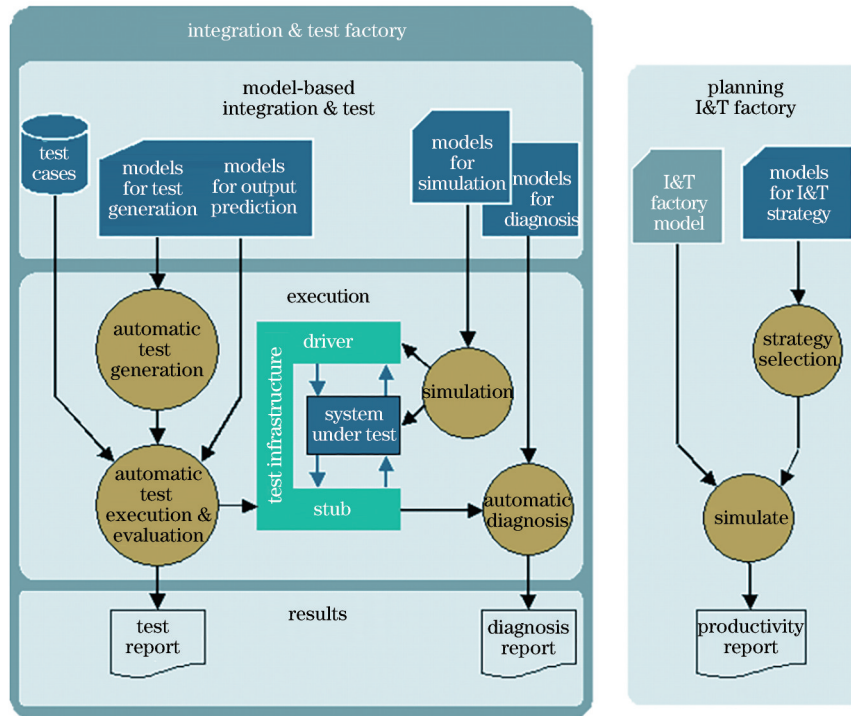


图 7 Tangram 项目的系统集成和测试方法<sup>[20]</sup>

Fig. 7 System integration and testing of Tangram project<sup>[20]</sup>

发现系统的潜在问题,从而达到缩短关键路径的目的。

在 MBI&T 中,不同类型的模型用于处理不同类型的系统集成和测试任务:组件行为的模型用于仿真、模型化集成、测试和诊断等;过程模型用于分析和优化系统集成和测试流程;故障模型对可能出现的系统故障进行模拟。通过给尚待开发的系统组件建立模型,许多系统属性已经可以在模型上进行分析,而无需等到所有组件实现后才开始集成和测试工作。如果模型是形式化的,即用形式化语言

表示语义和精确定义的语义,那么模型属性甚至可以用数学来证明其精确性。

### 4.3 Uppaal

Uppaal 是一个用于建模、模拟实时系统的建立和验证的集成工具环境(图 8),由瑞典乌普萨拉大学和丹麦奥尔堡大学联合开发<sup>[21]</sup>。该工具的典型应用领域包括实时控制器和通信协议,特别是针对实时性要求高的应用。Uppaal 由 3 个主要部分组成:描述语言、仿真环境和模型检查工具。描述语言是一种基于简单数据类型(例如有界整数、数组

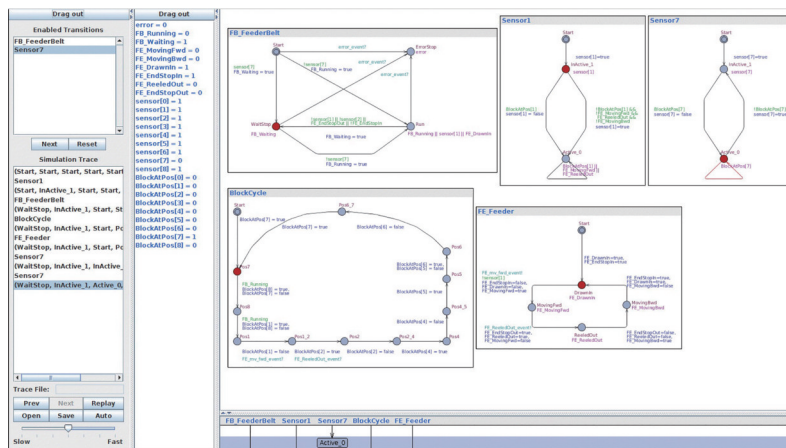


图 8 Uppaal 的系统仿真环境<sup>[21]</sup>

Fig. 8 System simulation environment of Uppaal<sup>[21]</sup>

等)的保护性的命令语言,用于建模或者描述系统行为。仿真环境是一个验证工具,可以核检在早期设计(或建模)阶段的系统动态执行情况,提供了一种系统设计早期阶段的低成本的故障检测方法。模型检查工具是通过探索系统的状态空间来分析系统的设计约束。Uppaal的两个主要设计标准是效率和易用性。例如,Uppaal模型检查工具中使用的动态搜索技术可以有效提高模型检查的效率。另外,Uppaal模型检查工具可以自动生成一个诊断跟踪文件,提高了建模和调试的效率。

#### 4.4 IBM Rational Rhapsody

IBM Rational Rhapsody 是基于 UML/SysML 的模型驱动开发集成环境,专注于嵌入式和实时系统,是 IBM Harmony SE 的支撑工具链<sup>[22]</sup>。Rhapsody 提供一个符合工业标准的图形化软件开发环境;实现从系统设计到软件设计的无缝连接;支持对软件需求分析、概要设计、详细设计的图形化描述和分析验证;自动生成高效的嵌入式代码;自动按照规定的格式和要求生成设计文档,从而保证文档与生成代码的一致性;在软件开发各阶段支持软件测试。

在 Harmony 方法论中,V 模型包含需求分析、系统功能分析、设计综合、软件分析及设计、软件实现以及与之相对应的单元测试、模块集成及测试、系统集成及测试、系统验收测试。Harmony 将整个 V 模型阶段划分为两个松耦合的部分:1) Harmony for Systems Engineering:需求分析、系统功能分析、设计综合;2) Harmony for Embedded Real Time Development:软件相关的分析、设计、实现及相应的验证。

#### 4.5 TrueTime

TrueTime 是瑞典隆德大学开发的基于 Matlab/Simulink 的提供多任务实时内核和网络模型的嵌入式控制系统仿真的工具<sup>[23]</sup>。在 TrueTime 中,控制器及相关软件组件被结构化成任务和中断处理器程序,并通过 Matlab 或 C++ 代码实现。TrueTime 用于评估闭环控制性能,例如任务调度策略、处理器速度、网络控制中的各种有线或无线网络协议等。TrueTime 也可以用作纯调度模拟器,用于测试任务调度策略和网络协议,也可用于收集各种执行统计信息(如输入输出延迟)和各种调度事件。

#### 4.6 模型化系统工程方法的关键技术

##### 4.6.1 DSL

DSL 指的是针对特定领域而设计的语言,与之

相对的是我们日常所使用的通用语言,如 C++, Java, Fortran 等。通用语言一般可用来编写任意的程序,但 DSL 专门用于描述特定领域的任务,例如结构化查询语言(SQL)可以看作针对数据查询的 DSL。每种 DSL 一般只擅长描述它所针对的那个领域,而不适用于其他用途,但是对于它所针对的那个领域,则具有非常强大而贴切的描述能力<sup>[24]</sup>。

DSL 可以在语法和类型系统上做出限制,使得用户只能描述出规范的程序,避免代码中的错误。其次,DSL 的原语和构造抽象出自特定领域的固定范式,所以对于领域内的问题和解决方案有着高度凝练的抽象能力和强大的描述能力。例如针对画结构图的问题,dot 文件提供了非常简洁的语法来画图。图 9 左边的代码描述了一个有向图,然后 GraphViz 通过解释这个语法,可以生成不同格式、不同风格的图片。而如果想用通用语言如 C++ 来做到同样的事情,则至少需要定义一些数据结构描述有向图,并调用一些绘图函数库来绘制图片。

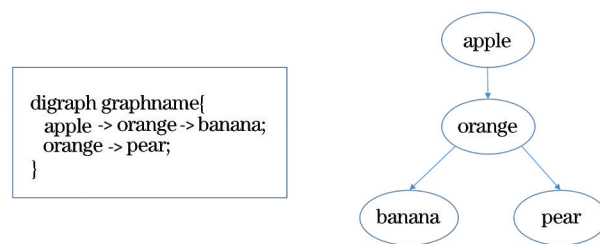


图 9 DSL 示例

Fig. 9 Example of DSL

DSL 特别适用于 MBSE 中解决复杂系统设计中的信息沟通和一致性问题。在复杂系统设计中,通常存在不同的角色。例如半导体装备的设计过程中,存在光学、机械、电子、物理、计算机等诸多特定领域的专家,DSL 可以让领域专家直接使用自己比较熟悉的术语来描述整个系统模型。同时,DSL 是一种严格描述、没有歧义的语言,所以不会产生自然语言交流中经常出现的信息畸变现象,便于不同的专家之间进行交流。另外,领域专家用 DSL 来描述的模型一经确立,就可以直接用于模型分析、系统模拟、形式化验证等各个环节,甚至包括最终代码生成,可以直接部署到运行环境中。这是因为对于同一个 DSL,可以设计不同的解释器和编译器,给它赋予不同的语义,从而保证了各个环节使用模型的一致性。

##### 4.6.2 形式化方法

形式化方法是指在系统的设计过程中,用严格



的数学方法进行系统的规范定义、分析验证以及实现的方法<sup>[25]</sup>。形式化方法通过运用数学方法对模型进行分析和使用计算机进行自动验证,往往能够捕捉到系统设计和实现中隐藏的逻辑错误,而这些错误往往不容易用传统方法(例如纸面上的推导证明或是基于用例或者随机模拟的测试方法)找到。因此,形式化方法可以有效提高复杂系统的可靠性和安全性。形式化方法包括规范和验证两个关键步骤:1) 形式化规范:运用 DSL 对于系统所要满足的性质进行无歧义的严格的数学描述。借助这种形式化的规范,可以在系统设计阶段理清复杂的逻辑关系;2) 形式化验证:一旦所设计的系统已经被形式化规范所描述,就可以用特定的方法和技术,自动或者半自动地验证这个系统确实可以满足所需要的性质。

形式化验证可以采用多种自动定理证明工具,如 Coq<sup>[26]</sup>、Lean<sup>[27]</sup>等等。这些工具可以证明简单的定理、验证定理的语义,并为验证更复杂的证明提供帮助。除了自动化定理证明之外,还可以从多种其他角度来验证一个形式化系统的性质。例如模型检验可以验证复杂并行和分布式系统的正确性(特别是时序相关的性质),常用的工具有 Uppaal<sup>[21]</sup>、TLA<sup>[28]</sup>、SPIN<sup>[29]</sup>、NuSMV<sup>[30]</sup>等;符号执行可以验证具有复杂逻辑的程序的安全性;抽象解释和其他各种程序分析技术在不同的精确度下对系统进行形式化分析,以验证程序在不同侧面的正确性。

#### 4.6.3 代码自动生成

代码自动生成指的是从某种高级语言的描述生成其对应的低级语言的代码的过程。例如,C++ 编译器可以看成从 C++ 语言到汇编语言的代码生成的工具。一般来说,代码生成涉及到解析、翻译和优化等步骤。

解析是指将高级语言的描述(文字或者图形)读取到代码生成器的内存中,并转存为某些内部的数据结构,如抽象语法树等,以便进行下一步的操作。这些内部数据结构有时也被称为中间表示。有很多工具可以进行解析,如 Bison<sup>[31]</sup>、Yacc<sup>[32]</sup>、ANTLR<sup>[33]</sup>等。翻译是把解析过的中间表示赋予语义信息,也就是对应到低级语言的过程。通常,这一步骤是和具体的语义和低层次语言的规则高度相关的。优化是指通过一系列语义等价变换,生成更加优化(执行更快、占用内存更小等)的低层代码

的技术。通常,优化可以发生在代码生成的各个阶段,即中间表示阶段可以发生优化,到了低级语言后也可以进行优化。通用的优化方法有常数传递、公用子表达式消去等。

不同于通用编译器,针对 DSL 的代码生成往往会引入针对特定领域的具体优化,这些优化可以利用领域中的一些高层次信息,达到通用优化无法做到的性能。例如矩阵乘法满足结合性,进而如果看到一串矩阵连续乘法,则可以采用动态规划的方法,灵活安排进行乘法的顺序,从而减少运算量,可能达到数个数量级的性能提升,而这种性能提升是通用编译优化无法做到的。

#### 4.6.4 数字孪生

数字孪生也被称为数字双胞胎和数字化映射,是指充分利用物理模型、传感器、运行历史等数据,集成多学科、多尺度的仿真过程,在虚拟空间中对物理实体完成镜像,从而反映相对应的产品的全生命周期过程<sup>[34]</sup>。在实施 MBSE 的过程中,产生的物理及数学模型为数字孪生的发展奠定了基础。可以说,数字孪生是在基于模型的定义(MBD)的技术基础上发展起来的。Grieves 给出了数字孪生的 3 个组成部分:物理空间的实体产品、虚拟空间的虚拟产品、物理空间和虚拟空间之间的数据和信息交互接口。

美国国防部最早提出利用数字孪生技术,用于航空航天飞行器的健康维护与保障。近年来,美国和德国等先进工业国家纷纷提出了信息物理系统(CPS)<sup>[35]</sup>,作为先进制造业的核心支撑技术。通过大数据、云计算和人工智能等新一代信息技术在虚拟世界的仿真分析和预测,以最优的结果驱动物理世界的运行,从而实现物理世界和信息世界的交互融合。数字孪生技术连通信息世界与物理世界,是实现产品生命周期模块化和智能化的关键使能技术,也是 CPS 实现的重要技术手段。

## 5 系统工程方法在半导体装备领域的应用展望

近年来,以半导体装备为代表的我国先进制造装备行业在国家政策扶持和资本助力下,正以前所未有的速度迅猛发展。对于复杂装备和产品,基于逆向工程的跟踪和研仿已变得越来越不可行。发展和提升以正向设计引领、以系统工程方法为指导的自主创新和设计制造一体化能力,从而摆脱先进装备行业的“卡脖子”困境,是我国先进制造装备产

业的必经之路。

以光刻机为代表的先进半导体装备的技术指标高、系统复杂度大,其研发需要光、机、电、控、软等跨学科的综合性的研发团队协作共同完成。系统工程方法的合理应用可以有效提升半导体设备研发的效率。传统的系统工程方法是把逻辑设计转化为物理实体系统。近年来,随着 CPS、数字孪生技术的发展和成熟,系统工程正朝着 MBSE 的方向快速演进。通过对物理实体系统进行虚拟化,基于模型的逻辑设计可以在虚拟空间系统中进行低成本快速迭代和验证,同时对物理实体系统的设计进一步产生反馈。国内的半导体设备研发企业在实践过程中已经逐渐意识到了系统工程方法在复杂工程中的重要性。借鉴国外在系统工程、特别是近年来在 MBSE 领域的研究成果和先进经验,有助于大幅提升我国半导体装备企业的研发效率。

### 参 考 文 献

- [1] 中国银行证券. 12 英寸半导体工艺设备国产化[R/OL]. 2021 年 7 月 22 日. [https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3\\_AP202107231505536821\\_1.pdf](https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202107231505536821_1.pdf). Bank of China Securities. Domestication of 12-inch semiconductor process equipment[R/OL]. July 22, 2017. [https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3\\_AP202107231505536821\\_1.pdf](https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202107231505536821_1.pdf).
- [2] 王向朝,戴凤钊. 集成电路与光刻机[M]. 北京: 科学出版社, 2020. Wang X Z, Dai F Z. Integrated circuit and lithographic tool[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [3] Bakshi V. EUV lithography[M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE, 2018.
- [4] 钱学森,许国志,王寿云. 组织管理的技术: 系统工程[J]. 上海理工大学学报, 2011, 33(6): 520-525. Qian X S, Xu G Z, Wang S Y. The technology of organization management: systems engineering[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2011, 33(6): 520-525.
- [5] Schlager K J. Systems engineering-key to modern development[J]. IRE Transactions on Engineering Management, 1956, EM-3(3): 64-66.
- [6] 郝勇,范君晖. 系统工程方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007. Hao Y, Fan J H. Systems engineering methods and applications[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [7] 张义芳. 美国阿波罗计划组织管理经验及对我国的启示[J]. 世界科技研究与发展, 2012, 34(6): 1046-1050. Zhang Y F. Apollo program management: lessons for China's large-scale S & T programs[J]. World Sci-Tech R&D, 2012, 34(6): 1046-1050.
- [8] Goode H H, Machol R E. Systems engineering[M]. New York: McGraw-Hill, 1957.
- [9] INCOSE systems engineering handbook: a guide for system life cycle processes and activities[M]. 4th ed. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2015.
- [10] Hall A D. Three-dimensional morphology of systems engineering[M]//Rapp F. Contributions to a philosophy of technology. Theory and decision library. Dordrecht: Springer, 1974, 5:174-186.
- [11] Fisher J. Systems engineering for commercial space programs[J]. INCOSE International Symposium, 1992, 2(1): 225-230.
- [12] Balaji S, Murugaiyan M. Waterfall vs v-model vs agile: a comparative study on SDLC[J]. International Journal of Information Technology and Business Management, 2012, 2(1): 26-29.
- [13] Forsberg K, Mooz H, Cotterman H. Visualizing project management[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [14] Boehm B W. A spiral model of software development and enhancement[J]. Computer, 1988, 21(5):61-72.
- [15] INCOSE. Systems engineering vision[R/OL]. September, 2007. [http://www.cose.org/media/upload/SEVision2020\\_20071003\\_v2\\_03.pdf](http://www.cose.org/media/upload/SEVision2020_20071003_v2_03.pdf).
- [16] 赵献民. 基于模型系统的系统设计[J]. 科技导报, 2019, 37(7): 44-48. Zhao X M. System design based on model system[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(7): 44-48.
- [17] 郭宇,臧睿,周璐莎,等. 基于模型的系统工程在航空发动机控制设计中的应用[J]. 科技导报, 2019, 37(7): 96-101. Guo Y, Zang R, Zhou L S, et al. Application of model-based systems engineering to aero engine control design[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(7): 96-101.
- [18] 鲁金直,王国新,郑新华,等. 基于模型系统工程中国应用调查[J]. 科技导报, 2018, 36(20): 57-66. Lu J Z, Wang G X, Zheng X H, et al. Model-based systems engineering application investigation in China [J]. Science & Technology Review, 2018, 36(20): 57-66.
- [19] Schifferers R R H, Alberts W, Voeten J P M. Model-based specification, analysis and synthesis of

- servo controllers for lithoscanners[C]//MPM'12: Proceedings of the 6th International Workshop on Multi-Paradigm Modeling, October 1-5, 2012, Innsbruck, Austria. New York: ACM Press, 2012: 55-60.
- [20] Tretmans J. Tangram: model-based integration and testing of complex high-tech systems[M]. Eindhoven: Embedded Systems Institute, 2007.
- [21] Behrmann G, David A, Larsen K G. A tutorial on UPPAAL[M]//Bernardo M, Corradini F. Formal methods for the design of real-time systems. Lecture notes in computer science. Heidelberg: Springer, 2004, 3185: 200-236.
- [22] IBM engineering systems design rhapsody[EB/OL]. [2021-06-08]. <https://www.ibm.com/products/systems-design-rhapsody>.
- [23] Cervin A, Henriksson D, Lincoln B, et al. How does control timing affect performance? Analysis and simulation of timing using Jitterbug and TrueTime [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2003, 23(3): 16-30.
- [24] Fowler M. Domain specific languages[M]. Boston: Addison-Wesley, 2010.
- [25] O' Regan G. Concise guide to formal methods: theory, fundamentals and industry applications[M]. Cham: Springer, 2017.
- [26] The Coq Development Team (Project TypiCal). The Coq proof assistant reference manual[EB/OL]. [2021-05-03]. <https://coq.inria.fr/distrib/current/refman/>.
- [27] Leonardo M, Soonho K, Jeremy A, et al. The lean theorem prover (system description)[C]. International Conference on Automated Deduction (CADE), 2015: 378-388.
- [28] Lampert L. Specifying concurrent systems with TLA<sup>+</sup>[M]//Broy M, Steinbrüggen R. NATO science series, III: computer and systems sciences. Amsterdam: IOS Press, 2000: 183-247.
- [29] Holzmann G J. The SPIN model checker: primer and reference manual[M]. Boston: Addison-Wesley, 2004.
- [30] Cimatti A, Clarke E, Giunchiglia F, et al. NUSMV: a new symbolic model checker[J]. International Journal on Software Tools for Technology Transfer, 2000, 2(4): 410-425.
- [31] Levine J. Flex & bison: text processing tools[M]. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc., 2009.
- [32] Levine J. Lex & YACC[M]. Sebastopol: O'Reilly & Associates, 1992.
- [33] Parr T J, Quong R W. ANTLR: a predicated-LL(k) parser generator[J]. Software: Practice and Experience, 1995, 25(7): 789-810.
- [34] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索 [J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.  
Tao F, Liu W R, Liu J H, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.
- [35] Baheti R, Gill H. Cyber-physical systems[J]. The Impact of Control Technology, 2011, 12(1): 161-166.