
第 1 章

概 论

1.1 仿真科学与技术发展的历程

仿真科学与技术是以建模和计算理论为基础,根据研究对象和研究目的,建立研究对象的系统模型,并以计算机系统、物理效应设备及仿真器为分析工具,对所研究的对象进行分析、设计、运行和评估的一门综合性交叉学科,已经成为与理论研究、实验研究并列的人类认识世界的重要方法,在航空航天、先进制造、生物医学、能源、交通、军事等关键领域,发挥着不可或缺的重要作用。

仿真技术几乎是伴随着计算机技术产生和发展的。由于仿真技术以模型构建为基础,为了突出建模的重要性,建模和仿真通常一起出现,即 modeling & simulation,缩写为 M&S。它的发展经历了如下阶段。

(1) 仿真技术的初级阶段。第二次世界大战后期,国外有关火炮控制与飞行控制动力学系统的研究孕育了仿真科学与技术。从 20 世纪 40 年代到 60 年代,国外相继研制成功了通用电子模拟计算机和混合模拟计算机,仿真技术在导弹和宇宙飞船姿态及轨道动力学研究、阿波罗登月计划及核电站中都得到了应用。由于仿真技术采用的工具是通用电子模拟计算机和混合模拟计算机,所以又称为模拟仿真阶段。

(2) 仿真技术的发展阶段。20 世纪 70 年代,随着数字仿真机的诞生,仿真科学与技术不但在军事领域迅速发展,而且应用到许多工业领域,比如培训飞行员的飞机训练模拟器、电站操作人员的仿真系统、汽车驾驶模拟器,以及复杂工业过程的仿真系统等,并相继出现了一些从事仿真设备和仿真系统开发的专业化公司,使仿真科学与技术进入了数字仿真阶段。

(3) 仿真技术的成熟阶段。20 世纪 90 年代,系统仿真的对象更加复杂,规模越来越大,在需求牵引和计算机网络技术的推动下,分布式仿真技术得到发展。为了更好地实现信息与仿真资源的共享,促进仿真系统的互操作和重用,在聚合级仿真、分布式交互仿真、并行交互仿真的基础上,仿真科学与技术开始向高层体系结

构(high level architecture, HLA)方向发展,以实现多种类型仿真系统之间的互操作和仿真模型组件的重用。

(4) 复杂系统仿真技术发展的新阶段。20 世纪末期和 21 世纪初期,对众多领域复杂性问题进行科学研究的广泛需求进一步推动了仿真技术的发展。在计算机、网络、多媒体、数据处理、控制理论及系统工程等技术的发展与支持下,仿真科学与技术逐渐发展成为应用领域广泛的新兴交叉学科。

在实际应用方面,仿真技术最初主要应用于航空航天、原子反应堆等工程投资大、周期长、危险性高、实际系统试验难以实现的少数领域,后来逐步发展到电力、石油、化工、冶金、机械等主要工业部门,并进一步扩大至社会系统、经济系统、交通运输系统、生态系统等非工程系统领域。

我国仿真技术研究与应用的非常迅速。20 世纪 50 年代,在运动控制领域最早采用基于方程建模和模拟计算机的数学仿真,同时自行研制的三轴模拟转台等半实物仿真试验开始应用于飞机、导弹等重要产品的工程研制中。20 世纪 70 年代,我国训练仿真器获得了迅速发展,自行设计的飞行仿真器、舰艇仿真器、火电机组培训仿真系统、化工过程培训仿真系统、机车培训仿真器、坦克训练仿真器等相继研制成功,在操作人员培训方面起到了极大的作用。20 世纪 80 年代,我国建设了一批高水平的半实物仿真系统,如鱼雷仿真系统、制导导弹仿真系统、歼击机操纵仿真系统等,在武器研制方面发挥了重要作用。20 世纪 90 年代,我国开始对分布式交互仿真、战场对抗仿真、虚拟现实仿真、复杂系统协同仿真等先进仿真技术进行研究,其在军事、工程、制造领域获得了广泛的应用。

仿真科学与技术是在系统科学、控制科学、计算机科学等学科中孕育并在实际应用推动中发展而来,形成了独立的理论方法和技术体系。

目前,仿真科学与技术是世界发达国家十分重视的一门高新技术。例如,美国 2018 年 12 月修订生效的新版高等教育法,专门将建模和仿真作为一项重要内容列入其中,并使用大量篇幅阐明政府和社会应如何推动建模和仿真技术在大学教育中的普及。而在工业领域,建模和仿真也一直发挥着不可替代的作用。我国仿真科学与技术专业人才匮乏,鉴于仿真技术对于智能制造时代未来工业领域的重要性,应鼓励有条件的院校设立仿真学科或开设仿真技术类课程,积极培养仿真领域的专业人才,加快我国自主可控仿真软件的发展步伐,适应我国未来工业和社会领域对仿真科学与技术各类应用领域的发展需求。

1.2 计算机仿真技术的特点

计算机仿真技术是以计算机为工具,以相似原理、信息技术及各种相关领域技术为基础,根据系统试验的目的建立系统模型,并在不同条件下对模型进行动态运行试验的一门综合性技术。计算机仿真成本低、效率高,应用领域越来越广泛,目

前已成为复杂系统设计、分析、测试、评估、研制和技能训练的重要手段。

在计算机仿真中,尽管其系统模型的建立方法与数学方法中模型的建立原则基本相同,但随后还需要设计仿真模型、编制仿真程序并实施仿真试验,借助计算机软件平台进行高性能的模型求解运算和仿真系统逻辑判断,从而获得系统仿真的结果。早期的仿真手段主要是物理仿真(或称实物模拟),采用的模型是物理模型或实物试验模型,但若为仿真系统构造物理模型,尤其是对于复杂系统而言,则构造难度大、周期长,投资也较高。此外,通过物理模型做试验,很难修改其中的参数,而改变系统结构就更加困难。

随着计算机软硬件技术的发展,现阶段的计算机仿真技术以计算机为基础设备,在网络、多媒体等技术支持下,通过友好的人机界面构造计算机仿真系统。计算机仿真的目的在于:在系统研制前的规划、设计、分析和评估阶段,通过系统建模与仿真分析可以评价系统某些方面的性能,分析系统各部分或各分系统之间的相互影响,以及某些关键参数对系统整体性能的影响,从中比较各种设计方案,以获取最优结果。

计算机仿真以建模理论和数值计算为基础,可不受时空限制,利用模型和高性能计算技术,实现对物理系统的性能分析和设计评估。计算机仿真具有如下特点。

(1) 模型参数多次调整。仿真系统的模型参数可根据系统分析的实际需要进行多次调整、设置,以获取复杂系统在各种不同参数条件下的仿真分析结果。计算机仿真可通过改变模型参数获取最佳性能分析结果,无须依赖物理样机进行反复修改。

(2) 仿真环境虚拟化。计算机仿真具有数字化、虚拟化、协同化的技术特点,便于协作,在同一产品模型上进行异地协同工作。同时,可以利用虚拟现实技术,在多维信息空间上创建一个虚拟环境,使仿真系统具有沉浸感和真实感。

(3) 仿真结果直观展示。借助计算机软件工具,计算机仿真的结果可通过图形图像进行直观展现。而仿真结果的准确性主要取决于模型的合理性和仿真计算的精度,根据仿真计算的结果,人们可以在较短时间内获取研究对象和研究方案评估的合理性。

(4) 仿真实验过程成本低、实验分析结果充分。由于计算机仿真是在计算机虚拟环境下模拟现实系统的运行过程,可以任意进行参数调整,通过仿真实验可得到大量的复杂系统性能分析数据和曲线,其优点体现为仿真实验过程低成本,实验方案调整灵活,实验分析结果充分。

下列情形更适合采用基于模型的计算机仿真。

(1) 系统尚处于研制和设计阶段,实际的系统尚未真正建立,此时无法进行实际系统的试验。有时即使已经具备了实际系统,在实际系统中做试验可能会破坏系统的结构或无法复原,且在实际系统中做试验时,一般需要设置不同的外部约束条件,进行多次反复试验,才能获得不同条件下的试验结果,带来试验时间过长且

试验费用过高的后果。

(2) 对于复杂系统而言,为了获得整体性能的最优化,通常需要对系统的结构和参数反复进行修改和调整,而复杂工程系统的试验过程时间跨度较长,如果希望在较短时间内观测到系统的演化过程及某些重要参数对系统性能的影响,则可通过计算机仿真人为控制系统仿真时间的长短。

(3) 有些复杂工程系统试验难度大、危险性高(如载人航天飞行器),有些非工程系统难以直接进行试验研究(如社会、经济系统),有些系统对于人类可望而不可即、更难在实际环境中试验(如天体系统),而计算机仿真试验则可在给定的边界条件下,推演出此类系统的变化趋势,为人们提供比较可靠的依据。

1.3 仿真技术在产品开发与制造过程中的应用

仿真技术在复杂产品的规划、设计、分析、制造及运行等各个阶段,都发挥着重要的作用。

1) 仿真技术在产品设计与开发中的应用

复杂产品开发过程通常可以被分解为概念设计、初步设计和详细设计等若干阶段。在每个阶段,仿真技术均可提供强有力的支持。例如,在可行性论证阶段,可以对各种方案进行比较分析,发现不同方案的优缺点。在系统设计阶段,设计人员可以利用仿真技术建立系统模型,进行模型试验、模型简化和优化设计。系统设计中经常涉及新的设备、部件或控制装置,此时可以利用仿真技术进行分系统仿真试验,即系统的一部分采用实际部件,另一部分采用模型,这样可以事先在仿真系统上进行细致的分系统试验,避免由于新的子系统接入对原有系统造成影响,大大节省实际系统的调试时间,提高系统投入的一次成功率。

仿真技术是验证和优化产品设计的重要手段。在产品设计阶段,设计人员在建立三维数字化模型的基础上,利用仿真技术进行虚拟产品开发,如整机的动力学分析、运动部件的运动学分析、关键零件的热力学分析等,开展模型试验分析和优化设计。随着产品复杂程度的不断提高,利用仿真与虚拟现实技术,在高性能计算机及高速网络的支持下,通过模型模拟和预测产品功能、性能及可加工性等方面存在的问题。计算机仿真技术为产品的设计和开发提供了强有力的工具和手段,已经逐步从局部应用扩展到全面的系统应用。

2) 仿真技术在复杂系统分析中的应用

复杂产品开发是一项复杂的系统工程。在实际工程应用中,若要对复杂系统进行分析,就需要对系统进行试验,通过试验了解系统的结构性能及其内部发生的活动变化,从而实现对系统的正确评估。通常有两种试验方案:一种是直接在实际系统上进行试验,如飞机试飞、机车试车、汽车路试等,通过试验发现设计或制造中的技术或工艺问题,以便在正式投产或系统投入运行之前进行改进;另一种是

根据实际系统构造模型,再对模型进行仿真试验和系统分析。

尽管在实际系统上进行试验在许多情况下是不可或缺的,但由于以下原因,仿真试验与分析方法的应用变得越来越普遍:在实际系统上进行试验会破坏系统的正常运行;由于受各种客观条件的限制,实际系统难以按预期的要求改变参数,或者满足不了所需的试验条件;在实际系统上进行试验时,很难保证每次的试验条件都相同,这也给系统方案优劣性的判断和评价带来困难;试验后原有系统无法复原,或试验时间过长、费用过高等。

3) 仿真技术在产品制造过程中的应用

在制造过程中,借助计算机仿真技术实现数字化虚拟制造,在产品的设计阶段就可以对整机进行可制造性分析、生产线仿真、数控加工过程仿真等,设计人员可使用虚拟的制造环境进行基于数字化模型的设计、加工、装配、操作等检验,而不依赖于传统原型样机的反复修改。例如,在数控加工环节,数控机床程序正式使用前需进行刀具轨迹检验,对于复杂的加工过程还需进行进一步的精确检验。利用数控加工仿真工具可模拟真实的机床加工过程,对整个加工过程中运动的物体进行碰撞检测,从而发现加工程序中的错误,还能及时估算加工时间,以便制订详细的生产计划。

4) 仿真技术在复杂产品虚拟样机开发中的应用

目前,单领域仿真在产品设计中被广泛采用,并研发出了很多成熟的单领域仿真软件,这些软件已广泛应用于产品开发过程,比如有限元分析、多体动力学、控制分析、生产过程等,可分别对动力学、热力学、控制系统和生产线等过程进行仿真分析。产品复杂性的提高使多领域协同仿真技术开始受到企业关注。仿真技术在产品设计过程中的应用变得越来越广泛而深入,正在由单点单领域仿真向覆盖产品全生命周期的多领域协同仿真发展,虚拟样机(virtual prototyping, VP)技术正是这一发展趋势的典型代表。

虚拟样机是产品多领域数字化模型的集合体,包含真实产品的所有关键特征。基于虚拟样机的产品设计过程可以开发和展示产品的各种方案,评估用户的需求,提前对产品的被接受程度进行检查,提高产品设计的自由度;快速方便地将工程师的想法展示给用户,在产品开发早期测试产品的功能;减小出现重大设计错误的可能性;利用虚拟样机进行产品全方位的测试和评估,可以避免重复建立物理样机。图 1-1 为虚拟样机的三个组成要素:仿真模型、CAD 模型和虚拟环境模型。

虚拟样机技术是一种基于产品模型的数字化设计方法,是各领域 CAX/DFX 技术的发展和延伸。在多个产品开发组协同设计环境中,分布在不同地点、不同部门的专业人员围绕逼真的虚拟原型,从不同角度、不同需求出发,对虚拟原型进行测试、仿真和评价,并进行改进和完善。采用虚拟样机可以代替物理样机对产品进行创新设计、测试和评估,以确保在产品设计的早期消除设计隐患,提高产品设计质量,缩短产品开发时间,提高面向客户和市场需求的能力。复杂产品的虚拟

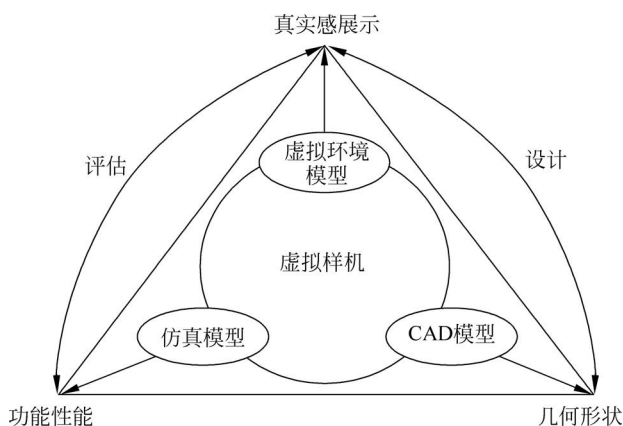


图 1-1 虚拟样机的组成要素

样机开发模式如图 1-2 所示,虚拟样机技术正成为企业有效研究、设计复杂产品的重要手段。

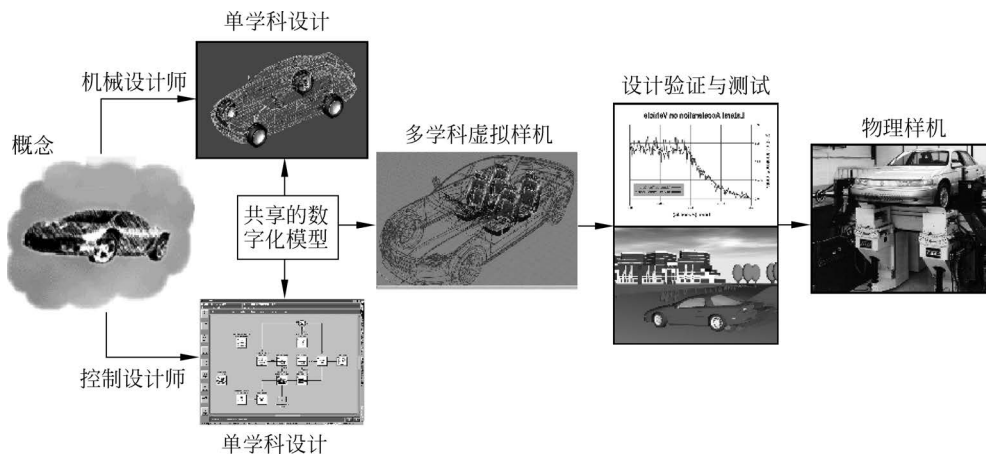


图 1-2 复杂产品的虚拟样机开发模式

5) 仿真技术在复杂系统操作训练中的应用

一般情况下,凡是需要熟练人员进行操作、控制、管理与决策的实际系统,都需要对这些人员进行训练、教育与技能培养。早期的训练大多是在实际系统或设备上进行的。随着系统规模的扩大、复杂程度的提升及造价的日益提升,训练过程中必须避免因操作不当引起的系统破坏。为解决这些问题,需要建立这样的系统,使其既能模拟实际系统的工作状况和运行环境,又能避免采用实际系统可能带来的危险性及高昂代价,这就是操作训练仿真系统。

操作训练仿真系统是利用计算机并通过运动设备、操纵设备、显示设备、仪器仪表等复现所模拟的对象行为,并模拟与之适应的工作环境,从而成为训练操纵、

控制或管理这类对象的专门人员的模拟系统。例如,用于电厂运行人员操作训练的电厂训练仿真器,用于飞机起落和飞行训练的飞行模拟器。

由此可见,仿真技术在复杂产品开发中的应用越来越广泛。但我们应该认识到,仿真结果很大程度上取决于仿真模型的精度,建立真正能够取代物理样机的仿真模型,需要经验和积累;在某些领域,由于认知水平有限,无法建立实用的仿真模型。大多数仿真软件虽然功能强大,但要求具备较强的专业知识。目前,专业仿真人员的匮乏限制了仿真应用的推广。仿真技术若能够真正在产品设计中发挥作用,为企业带来可观的经济效益,需要在长期使用中积累丰富的仿真模型和技术经验。

1.4 系统仿真的热点问题与发展趋势

仿真技术在许多复杂工程系统的分析和设计中逐渐成为不可缺少的工具。进入 21 世纪以来,仿真技术已逐步形成了一套综合性的理论和技术体系,正向着以“数字化、虚拟化、网络化、智能化、服务化、普适化”为特征的方向发展。

1) CPS 环境下制造系统建模与仿真

智能制造是当今制造业的发展趋势和产业升级的主要途径。近年来,5G 技术、物联网、云计算、大数据、人工智能等正在推进新一轮信息产业的技术发展,人类社会将迎来以大连接、大数据和智能计算为特征的智能时代,为智能制造提供了基础条件和发展空间。

CPS 将成为先进制造业的核心支撑技术。CPS 的目标是实现物理世界和信息世界的交互融合,通过大数据分析、人工智能等新一代信息技术在虚拟环境中的仿真分析和性能预测,驱动物理世界的优化运行。在智能制造领域,CPS 通过构建一个与实物制造过程相对应的虚拟制造系统,实现产品研发、设计、试验、制造、服务的虚拟仿真,由传统生产制造过程以“试错法”为主体的方式提升为基于数字仿真的方式,以优化制造过程。在 CPS 技术与系统的支持下,以数据驱动、软件定义、平台支撑更好地支撑物理系统的实际制造过程,无论是产品、设备,还是工艺流程,都将以数字孪生的形态出现,虚拟仿真在制造过程中的应用将涵盖复杂产品的设计研发、制造过程及服务运营的全流程。

近年来,炙手可热的“数字孪生”技术背后的核心问题之一是建模与仿真技术。数字孪生体是指计算机虚拟空间存在的与物理实体完全等价的信息模型,可以基于数字孪生体对物理实体进行仿真分析和优化。它充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据,集成多学科、多物理量、多尺度的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,从而反映相应实体装备的全生命周期过程,建模与仿真是其关键的支撑技术。智能制造中的数字化、网络化和智能化是实体制造和虚拟制造的数字孪生和虚实融合。

2) 网络化仿真技术

网络化仿真技术泛指以现代网络技术为支撑实现复杂系统的模型构建、仿真运行、试验验证、分析评估等活动的一类技术。它起始于分布交互仿真技术,经历了 SIM-NET、DIS、ALSP 和 HLA 等几个典型发展阶段。随着仿真需求、系统建模和各种仿真支撑技术,特别是 Internet、Web Service、网格计算等网络技术的发展,其技术内涵和应用模式也得到不断地丰富和扩展。

网格技术的核心是解决网络上各种资源(如计算资源、存储资源、软件资源、数据资源等)的动态共享与协同应用。网格与仿真的结合为各类仿真应用对仿真资源的获取、使用和管理提供了巨大空间。同时,它以新的理念和方法为仿真领域中诸多挑战性难题的解决提供了技术支撑,如仿真应用的协同开发,仿真运行的协调、安全和容错,模型和服务的发现机制,仿真资源管理机制,资源监控和负载均衡等。

3) 基于 Agent 的仿真

20 世纪 90 年代 Agent 技术被提出,它已成为计算机与人工智能领域研究的热点。人们普遍认为,Agent 具有自治性、社会性、反应性。自治性是指 Agent 的行为是主动和自发的,或至少有一种这样的行为,Agent 有其自身的目标或意图,能对自身的行为做出规划。社会性是指单个 Agent 的行为必须遵循和符合 Agent 的社会规则,并能通过某种交互语言以合适的方式进行 Agent 之间的交互与合作。反应性是指 Agent 能感知其所处的环境,包括物理系统、人机交互或其他 Agent,并能及时做出响应。Agent 具有某种程度的智能,这是其区别于计算机领域“对象”概念的主要特点。

在仿真领域,面向 Agent 的仿真是研究热点之一,特别是基于多 Agent 系统(multi-agent system, MAS)的仿真被广泛应用于复杂系统的仿真中。

4) 数据与 AI 技术驱动的智能仿真

随着工业互联网的不断应用,以大数据分析为基础的技术发展将给工业领域带来显著变化。新一代信息技术促使制造业迈向数据驱动的新阶段,使工业生产全流程、全产业链、产品全生命周期的数据可以获取、分析和使用,更多地基于事实与数据进行决策。人工智能(artificial intelligence, AI)由不同的领域分支组成,如机器学习、计算机视觉等,其研究对象包括机器人、语言识别、图像识别、自然语言处理和专家系统等。目前, AI 中的“智能”仍然是以数据驱动的,机器系统获得智能的方式是依靠大数据和智能算法。

在仿真领域,大数据问题一直存在,在整个仿真运行的迭代计算过程中,每一步都可能涉及将上一步的计算结果转换为下一步的仿真输入。大数据驱动下的建模与仿真基于数据建模、模型修改、模型校验与确认等的技术。仿真大数据的处理技术涉及大数据的表示方法、多源异构数据融合技术、数据挖掘与分析技术、大数据的可视化技术等。此外,大数据促进了仿真方法的发展,大数据的智能搜索、去

冗降噪、聚类分析、特征挖掘技术,将大数据变为小数据,有利于理解复杂系统的不确定性、适应性、涌现性,进而有助于复杂系统的建模与仿真方法学的发展。

5) 基于普适计算技术的普适化仿真

普适计算技术是将计算技术与通信技术、数字媒体技术相融合的技术,它提供一种全新的计算模式。其目标是使计算和通信构成的信息空间与人们生活的物理空间融合为智能化空间,在这个智能化空间中人们可以随时随地透明地获得计算和信息服务。

在仿真系统中引入普适计算技术,是将计算机软硬件、通信软硬件、各类传感器、设备、模拟器紧密集成,实现将仿真空间与物理空间结合的一种新仿真模式,其重要意义是实现仿真进入实际系统,无缝嵌入我们生活的日常事务中。当前,普适仿真相关的重要研究内容涉及融合基于 Web 的分布仿真技术、网格计算技术、普适计算技术的先进普适仿真体系结构,仿真空间和物理空间的协调管理和集成技术,基于普适计算的普适仿真自组织性、自适应性和高度容错性,以及普适仿真应用技术等。

有专家认为,融合普适计算技术、网格计算技术与 Web Service 技术的“普适化仿真技术”将推动现代建模与仿真技术的研究、开发与应用进入一个新的发展阶段。

第 2 章

系统仿真基础

2.1 系统仿真的技术基础

相似原理是系统仿真的基础。仿真以相似原理、系统建模、数值计算、信息技术及其应用领域的有关专业知识为基础,建立实际系统的模型,以计算机和各种物理效应设备为工具,利用系统模型对真实或设想的系统进行分析研究的过程。系统仿真本质上是依据所研究对象的相似性原理,人为建立某种形式的相似模型,以对该系统进行模拟与分析。

仿真方法具有显著的系统学、数学、计算机科学背景。正如约翰·L.卡斯蒂(John L. Casti)所指出的,“仿真涉及三个世界:真实世界、数学世界和计算世界”。通常而言,组成系统仿真的三个要素是:系统、模型和计算机。如图 2-1 所示,系统是我们所研究和关注的对象,模型是对该研究对象系统特性的抽象描述,仿真则是通过计算机工具对模型进行实验分析的过程。而将这三个要素结合在一起的三个活动是:系统建模、模型程序化、仿真实验与分析。

相似理论的基本原理为相似模型的建立提供了理论基础。仿真方法将研究对象视为一个系统,并基于系统之间的相似性建立系统模型,并通过模型分析研究系统。仿真模型与被仿真系统之间应具有较高的相似性,使系统仿真更精确、高效和可信。这些原理应贯穿于整个仿真过程,即在系统建模和仿真的各个阶段始终要基于相似特性进行定性或定量分析,在此基础上形成一套具有可操作性的工程化方法与技术。

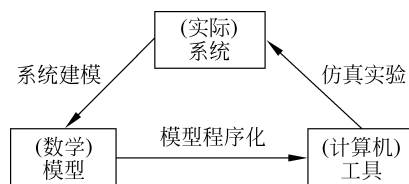


图 2-1 系统仿真的基本原理

1. 定义被仿真系统

定义被仿真系统主要是明确系统仿真的目的,建立仿真对象的描述框架,即建