



04 期

2024年

FANG ZHEN TIAN DI

仿真天地

主办：中国仿真学会

- 从数值计算到仿真软件——探索复杂系统设计的奥秘
—— 不确定性系统分析与仿真专委会
- 高速公路交通仿真
—— 交通建模与仿真专委会
- 自然环境如何影响传感器工作以及如何利用
仿真模型研究复杂背景中的目标精准探测
—— 环境建模仿真专委会

从数值计算到仿真软件
——探索复杂系统设计的奥秘
——不确定性系统分析与仿真专委会

高速公路交通仿真
——交通建模与仿真专委会

自然环境如何影响传感器工作以及如何利用仿真模型研究复杂背景中的目标精准探测
——环境建模仿真专委会

从数值计算到仿真软件 ——探索复杂系统设计的奥秘

不确定性系统分析与仿真专委会

一、引言

数值计算，作为数学的一个分支，专注于利用计算机求解数学问题的方法。当面对复杂的数学模型或方程组，无法通过解析方法直接得到精确解时，数值计算便成为解决问题的关键。它通过一系列近似算法，如迭代法、差分法、有限元法等，将连续问题离散化，进而估算出问题的数值解。数值计算的应用覆盖了几乎所有的科学技术领域，从物理学的偏微分方程求解，到经济学的模型预测，无所不包。

仿真是通过建立模型来模仿真实世界系统的运行状态。它不仅仅依赖于数值计算，还融入了系统理论、计算机科学和特定领域的专业知识。仿真分为多种类型，包括物理仿真、计算机仿真等，其中计算机仿真尤为重要。计算机仿真通过数值计算技术，将复杂的物理、化学、经济等系统转化为数学模型，在虚拟环境中模拟其行为和性能，从而预测系统在不同条件下的响应。系统仿真采用计算机辅助方法，用于模拟和分析复杂系统的行为。通过构建数学模型，用户用模型模拟系统在虚拟计算机环境中的运行，以使用户优化设计、分析性能和预测系统行为。

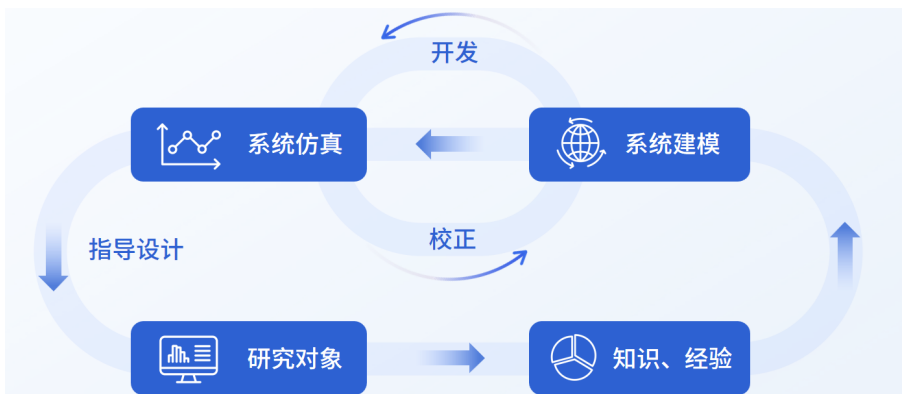


图 1 仿真建模全流程

二、仿真技术的复杂性及其挑战和仿真软件在其中的重要性

在科技日新月异的今天，仿真技术已成为众多领域，如工程设计、生物医学、经济预测等不可或缺的工具。然而，仿真过程中的复杂性及其带来的挑战不容忽视。我们将从三个方面详细展开这一话题。

1) 仿真过程中需要考虑的多种因素和变量

仿真，作为一个模拟真实世界系统的过程，必须考虑众多因素和变量。这些因素和变量不仅种类繁多，而且往往相互影响，形成一个错综复杂的网络。例如，在进行气候模型仿真时，我们需要考虑温度、湿度、风向、气压等多种自然因素，同时还需要考虑人类活动如工业排放、农业活动等对气候的影响。而在电路设计中，电流、电压、电阻、电容、电感等都是必须纳入考虑的变量。

更为复杂的是，这些因素和变量往往不是孤立存在的，它们之间可能存在着微妙的相互关联和反馈机制。这就要求我们在进行仿真时，不仅要考虑单个因素或变量，还要深入理解它们之间的相互关系，以及如何共同作用于整个系统。

2) 将实际问题抽象为线框图的重要性

面对如此复杂的仿真需求，如何有效地组织和表示这些因素和变量就显得尤为重要。线框图，作为一种简洁明了的视觉表示工具，能够帮助我们更好地理解和分析系统。通过线框图，我们可以清晰地看到各个组件之间的关系，以及信息或能量是如何在系统内流动的。

更重要的是，线框图能够帮助我们从复杂的实际问题中抽取出关键信息，忽略那些对仿真结果影响较小的细节，从而简化问题。这种抽象能力在进行大规模、复杂系统的仿真时尤为重要，因为它可以帮助我们聚焦于主要矛盾，提高仿真的效率和准确性。

3) 仿真中嵌入参数和基础数学模型的必要性

仿真过程中，仅仅有线框图是不够的，我们还需要在模型中嵌入具体的参数和数学方程来精确描述系统的动态行为。这些参数可能包括物理常数、材料属性、环境条件等，而数学模型则用于描述这些参数如何相互作用并影响系统的整体表现。

例如，在机械系统仿真中，我们可能需要考虑材料的弹性模量、密度、泊松比等参数，并使用力学方程来描述这些参数如何影响机械部件的应力和变形。在经济学仿真中，我们可能需要考虑供需关系、价格弹性、消费者偏好等参数，并使用经济模型来预测市场变化。

面对仿真技术的复杂性及其带来的挑战，仿真软件的重要性日益凸显。一个好的仿真软件能够集成多个领域的专家知识和工程师的工作，提供一个统一的平台，使得各领域专家能够高

效地进行协作和交流。通过仿真软件，我们可以更精确地描述系统的动态行为，更准确地预测系统的性能，从而为实际问题的解决提供有力的支持。

同时，仿真软件还能够实现数值结果的可视化，使得复杂的仿真结果变得直观易懂。这不仅有助于我们更好地理解和分析仿真结果，还便于团队进行进一步的分析和优化。

三、仿真软件的出现与应用

仿真软件的发展历程可以追溯到 50 年代中期，它与仿真应用、算法、计算机和建模等技术紧密相连，共同推动了仿真技术的进步。随着技术的不断发展，仿真软件的功能日益强大，为各行各业的用户提供了切实可行的解决方案。在工程设计领域，仿真软件的作用尤为突出。它可以帮助工程师验证产品设计的可行性和稳定性，通过模拟产品在不同工况下的性能表现，及时发现潜在问题和缺陷，从而提升产品质量和可靠性。同时，仿真软件还能优化设计方案，通过模拟比较不同设计，找到性能最佳、成本最低的设计方案。这不仅提升了产品的性能和效率，还降低了成本，缩短了产品开发周期。

在众多仿真软件中，MATLAB 的 Simulink、ANSYS 和 COMSOL Multiphysics 等是主流的选择。MATLAB/Simulink 以其强大的控制系统和信号处理功能，为用户提供了直观的图形界面，支持多种模型的建立，广泛应用于控制系统设计、信号处理以及通信系统设计等领域。而 ANSYS 作为一款大型通用有限元分析软件，在结构、流体、电场、磁场和声场分析方面表现出色，被广泛应用于核工业、铁道、石油化工、航空航天和机械制造等多个领域。COMSOL Multiphysics 则以其基于有限元方法的多物理场仿真能力，能够模拟和分析不同物理场之间的相互作用，深受科学研究、工程设计和产品开发等领域的喜爱。北太天元 / 北太真元北太天元作为国内首款具有完全自主知识产权的科学计算软件，在突破并实现内核根技术后，已形成一种解释性编程语言，并通过科学计算能力支持各领域推进的人才培养与科技发展，为国产软件提供真正意义上的底层计算引擎与环境，也为国家填补该领域的空白，其核心能力是一站式的科学计算与系统仿真开发环境。这些仿真软件的出现，极大地推动了工程设计领域的发展和进步。

四、船舶领域的仿真应用

1) 基于 PI 控制的船舶运动模拟仿真分析

船舶在航行中因受到海浪、海风及海流等海洋环境扰动的作用，不可避免地产生横摇运动。剧烈的摇摆将对船舶产生一系列有害的影响。减摇鳍装置是减小船舶横摇最有效的设备之一。

通过控制鳍的运动，可以使鳍产生对抗海浪的稳定力矩，达到减小横摇的目的。在分析随机海浪的波能谱和船舶的受力情况的基础上，建立随机海浪模型和船舶运动模型。用 PI 控制方法实现减摇鳍的控制，并对海浪的波倾角和船舶的横摇角进行仿真。

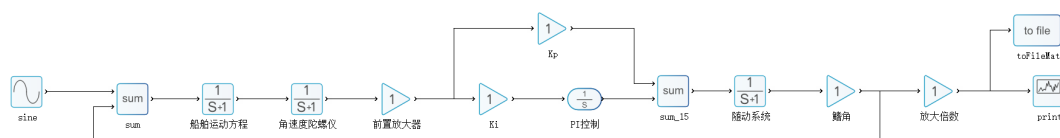


图 2 船舶运动学模型

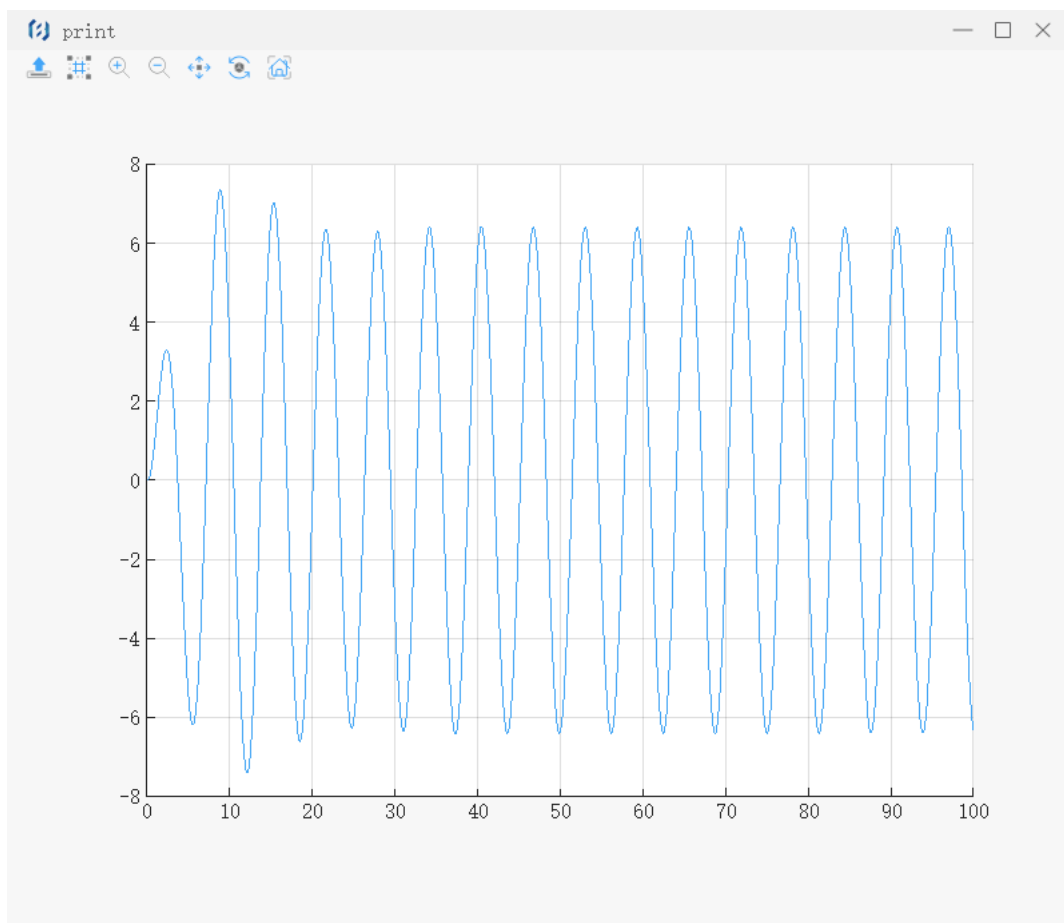


图 3 船舶横摇角曲线

2) 船载稳定性分析

在航行过程中，海面上海浪以及船舶自身（例如舵、螺旋桨）等因素对船舶产生影响，会

导致船舶出现复杂的摇摆运动。这种摇摆运动及其产生的动力效应在一定程度上会降低船舶的实用和航海性能。船舶的纵摇和横摇运动是船舶坐标系的六个自由度中对船舶摇摆运动影响最大的，因此，建立精确船舶运动数学模型，从而对船舶纵横摇运动进行抑制和预报，具有重要的理论意义。船舶摇摆运动主要是由海面上海浪运动引起的，因此需要建立船舶受理想状态海浪扰动的数学模型，为船舶纵横摇模型的建立及控制研究提供必备条件。

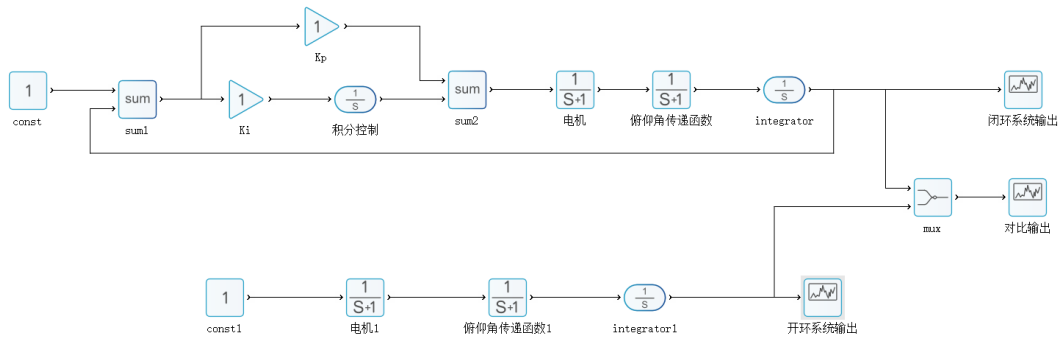


图 4 船舶稳定性 PI 控制模型

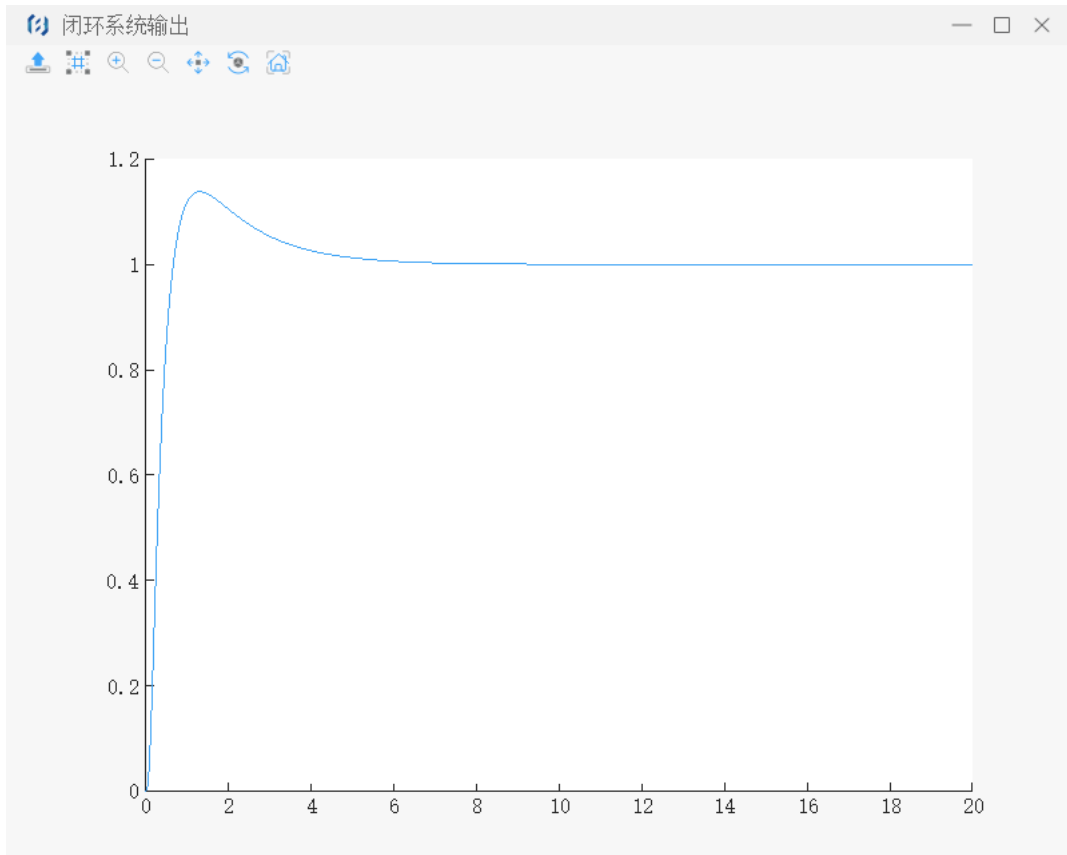


图 5 船舶俯仰角曲线

五、结论与展望

数值计算与仿真在现代工程设计中的重要性不言而喻，它们通过计算机模型模拟真实世界的物理过程和系统行为，为工程师们提供了一个验证设计、预测产品性能并优化设计的强大工具。这种技术的便捷性和高效性体现在其集成的操作环境，使得工程师能够快速构建模型、设置参数并获取精确结果，大大降低了技术门槛，并提升了设计迭代的速度。展望未来，随着智能化、多物理场耦合仿真、云计算大数据技术以及虚拟现实技术的融合与发展，仿真技术将进一步实现突破，为工程设计带来更加全面、高效和沉浸式的体验，有力推动科技创新与产业升级。

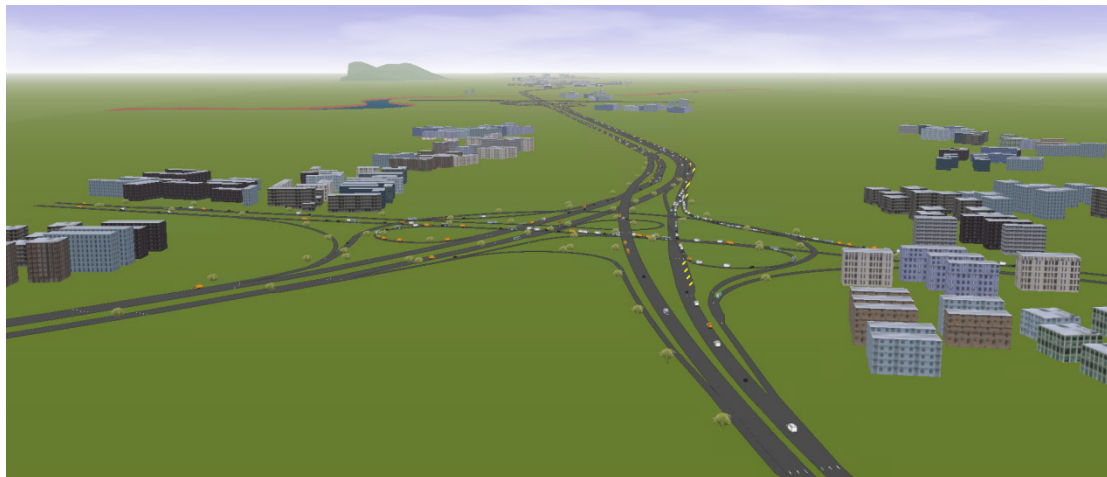
高速公路交通仿真

交通建模与仿真专委会

20 世纪 80 年代末以来，我国高速公路从无到有，持续高速发展，取得了世界瞩目的成就。截止 2023 年末，我国高速公路里程已达 18.36 万公里，位居世界第一。高速公路的快速发展大幅提升了综合交通快速网服务效率，为经济健康运行和社会全面发展提供了重要支撑。然而，伴随而来的是车辆保有量急剧增加、交通拥堵严重、交通事故频发等一系列挑战，这些交通问题在高速公路系统中也日益凸显。传统粗放式的高速公路交通管理方式已难以满足当前及未来发展我国智能化高速公路发展的需要，目前迫切需要借助先进的科技手段，为高速公路的精细化管理与智能决策提供有力支持。随着交通工程技术和计算机技术的成熟与发展，交通仿真作为一种先进的交通工具，已在高速公路研究领域中扮演着不可或缺的角色。

1、概念

高速公路交通仿真是通过计算机技术构建高速公路道路交通系统数字模型，包括高速公路道路及设施模型、交通出行需求模型、交通管理与控制模型，以及考虑人、车、路、环境等因素的驾驶行为模型，进而通过模拟和重现高速公路交通流的时间、空间变化，为交通分析、交通设计、管理和决策提供科学依据。



2、技术要点

高速公路交通仿真是一个源于现实、逼近现实、高于现实、用于现实的技术手段，复杂且精细。其中，高速公路交通仿真建模依据实际的高速公路交通场景搭建并校准，还原出模拟现实的高速公路交通数字系统，需严格遵守交通仿真建模技术标准，是高速公路交通仿真及应用的基础。

高速公路交通仿真模型的搭建覆盖高速公路交通系统核心要素，主要包含道路结构、基础设施和交通管控等三个方面。其中，道路结构主要包括道路线形、拓扑关系、车道数、车道属性、高程等基础信息，实现高速公路几何形态和物理环境的搭建；基础设施主要包括道路标志标线、隔离护栏、视线诱导标、情报板、电子警察、检测器等交通安全设施及路侧设备，通过模拟设施设备的功能及交互作用，还原出设施设备对高速公路整体交通流的引导及个体车辆行为的影响；交通管控方案包括收费站收费模式、车道限速、应急车道放行管控、匝道管控等交通管理措施，通过定义不同的交通管理策略和规则，在模型中还原高速公路车辆通行规律。

3、高速公路交通仿真实战应用

仿真模型搭建完成后，便可以投入实际应用，为管理者开展交通流分析、方案决策提供支持。高速公路交通仿真可以支撑交通态势分析、占道施工管理、应急事件处置、交通拥堵治理等实战业务。

（1）交通态势分析

在接入高速公路实时交通流量、管控方案、交通事件等动态交通数据的情况下，结合流量预测算法，高速公路交通仿真可以推演未来的交通运行时空演变，进而支持排队长度、安全风险等指标的分析及整体态势的评价，工作人员可根据分析结果提前做好预案。

（2）占道施工管理

获取高速公路基础交通数据后，高速公路交通仿真可以模拟占道施工围蔽场景及车辆行为，推演施工围蔽导致的交通影响，支持管理人员评价施工交通组织的合理性、可执行性，辅助施工方案审批、施工交通组织优化等工作。



(3) 应急事件处置

当高速公路发生应急事件时，结合交通事件基本信息及实时 / 历史车流等数据，可开展高速公路交通事件仿真，推演事件的交通影响等级，为一线人员选择应急预案提供参考。同时，高速公路交通仿真可以为应急处置方案的验证提供虚拟环境，提前评估方案的下发条件及疏导效果，提高应急处置效率。

(4) 交通拥堵治理

当发生交通拥堵时，高速公路交通仿真支持分析拥堵成因、预测拥堵等级，协助管理人员精准选择管控方案，快速疏解拥堵。同理，高速公路交通仿真可以模拟出不同成因的交通拥堵场景，为管控措施研判、建立拥堵疏解措施库提供技术支撑。

以高速公路日常养护管理为例，对于流量大、货车占比高的高速公路，日常养护施工频次很高，施工管理工作量大，引入高速公路交通仿真技术可有效解决当前普遍存在的施工审批凭经验、施工组织不明确等问题，提高施工审批的工作效率及审批科学性，保障施工安全。

在施工作业的前一天，施工单位将占道施工交通组织方案上报至交警、路政进行审批，运用高速公路交通仿真快速分析上报的施工交通组织方案，评估施工拥堵风险、安全风险等，交警、路政可依据风险等级快速判断是否允许施工通过审批。施工进场前，监控中心工作人员可根据交通仿真评估结论及当前的路况、天气情况等信息，判断是否允许施工进场，并提出交通组织优化建议。施工开始后，监控中心工作人员可根据仿真评估的风险等级对施工进行排序，有侧重地监控施工，监督施工围蔽是否符合要求、优化建议是否落实等。同时，启动高速公路实时

交通仿真进行交通态势分析，预测未来短时交通时空演变，做好主动管控。

4、结语

随着数字化、智能化进程的持续推进，高速公路交通系统与信息技术的融合更加紧密，管理决策也日益向智能化手段转变，这种趋势不管在技术层面还是应用层面，给高速公路交通仿真均带来了不同程度的挑战。为了有效应对交通系统的复杂性与多变性，高速公路交通仿真技术必须紧密贴合实际业务需求，同时突破传统仿真存在的技术瓶颈，做到仿真效率高、模型准确度高、业务流程简单，即“快速、准确、易用”，才能真正解决用户的痛点，进而助力高速公路交通管理智能化进程。

自然环境如何影响传感器工作以及如何利用仿真模型研究复杂背景中的目标精准探测

环境建模仿真专委会

自然环境对传感器工作的影响至关重要，尤其在光学和雷达传感器的应用中。光学传感器易受环境光干扰和大气传输效应的影响，导致目标图像模糊，难以识别。合成孔径雷达能够穿透云雾等视觉障碍，但地海背景对目标电磁特性的干扰仍不可忽视。为解决复杂背景中的目标精准探测问题，对于光学传感器而言，通过仿真建模手段，可以生成特定观测场景的光学传感器图像，实现复杂背景抑制，提升目标精准探测能力。对于雷达传感器而言，可以通过电磁仿真构建完备的雷达图像数据集，基于深度学习方法完成目标识别。相关研究不仅可以为复杂背景下的目标探测提供解决方案，也有利于进一步深入研究自然环境特性。

由传感器及其数据处理技术构建的智能感知系统是空天地海协同信息网络的“眼睛”，是实现复杂场景中目标精准探测的主要途经。传感器及其信息处理技术在无人汽车自动驾驶、高分辨率对地观测、空间目标探测等应用领域发挥着至关重要的作用。

由于待探测目标总处于自然环境当中，对于光学传感器来说，其探测过程不可避免地受到环境光干扰或是大气传输效应等因素的影响，获取到的目标影像模糊，难以直接从背景图像当中辨识目标。相较于光学系统，合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar, SAR）发射的电磁波可以穿透诸多视觉障碍，如云、雨和烟雾，受光照、气象条件影响相对较小，有助于识别和分类目标。但在实际应用中，SAR对目标进行成像时，地海背景对目标体的电磁特性的影响是不可忽视的，地（海）面散射对目标探测具有较强的干扰作用。因此本文将分别阐述自然环境对不同传感器工作的影响以及如何利用仿真模型解决复杂背景中的目标精准探测问题。

为了消除自然环境对光学传感器探测结果的影响，现今主流的思路是收集多平台、多视角、多种类（不限于光学）传感器的探测图像，形成大规模观测数据集，进而采用深度学习或数据挖掘等计算机数据分析技术，从数据关联关系的角度建立经验预测模型，回答目标精准探测面临的复杂背景抑制问题。然而，复杂自然环境（尤其是气象条件）的空时变化过程存在随机扰动，

深度学习和大数据方法预估的复杂背景图像缺少空时相关性，在目标精准探测任务中的适用性和稳定性仍有待实例验证。另一种更具有可解释性的技术路线是：先采用计算仿真模型对光学传感器观测数据进行特征提取，建立不同光学传感器数据所映射场景物理特征的时间、空间、谱段关联性，通过历史数据和仿真模型复现自然现象的发生和演化过程，完成对已有光学传感器数据的信息提取，预估场景物理特征的变化趋势，依据映射关系预测自然背景图像，进而实现复杂背景抑制和目标精准探测。

上述方案的优点在于过程可解释、可复现，对自然现象的发生和演化过程的理解程度及仿真逼真度，直接决定复杂背景的抑制效果及目标探测的准确度。随着自然环境特性仿真建模技术的发展，前沿研究中正积极探索环境仿真模型与实测数据相结合的光学传感器信息处理新方法，通过“先解构再重构”光学传感器自然背景图像，为图像对比度增强和目标精准探测提供新方法。2023年于 Nature 发表的热辅助探测与测距 HADAR 系统^[1]，是采用仿真模型实时处理光学传感器实测图像的应用示例。系统采用热红外（多/高）光谱传感器数据对实测场景图像进行分类，通过比对实测类别与数据库中典型物体的发射率，反演环境光照环境及物体表面温度，完成场景解构。随后采用仿真模型生成无模糊（抑制背景后）的高清晰场景重构图像，并采用已有车辆目标探测识别算法处理重构图像，证明了采用清晰重构图像能够实现更加精准的车辆目标探测。然而，云、雨、雾等地球大气现象的辐射特性较地球地物更为复杂多变，能否在星载光学传感器图像处理中融合仿真模型及其数据，仍旧取决于复杂大气现象量化表征的准确程度，在基于光学传感器的空天目标精准探测中的应用仍需要进一步探索。

对于雷达传感器来说，由于其受气象条件影响小，主要受地形地貌影响，因此成像结果在空时变化过程中较为稳定。相较于光学图像，雷达图像的空时稳定性为深度学习方法提供了较好的基础。另一方面，获取光学图像的大规模观测数据集需要投入较大的人力、财力和时间，且结果往往受到设备水平等诸多因素的影响，构建完备数据集较为困难。而雷达图像主要是目标电磁散射特性的直观体现，随着计算电磁学的飞速发展，采用电磁仿真方法获取目标与地海背景的复合散射回波并进行 SAR 成像仿真，具有低成本、高效率的优势，可以为深度学习方法提供良好的数据基础。

基于电磁仿真的方法探究自然环境对 SAR 成像的影响，其关键在于两点：其一为构建背景环境的电磁散射模型，其二为构建 SAR 成像仿真系统。在构建地海背景的电磁散射模型时，应考虑到不同背景的几何属性与介电属性。具体而言，几何属性描述了地海背景的起伏程度、起伏频率，如图 1 所示为海岛的几何模型。介电属性描述了介质对电磁波的反射能力，与地海环境的物质组成有关：土壤一般主要由水分、沙子及黏土等物质组成；沙地地表一般由砂粒及

水分构成；沥青混凝土主要由沥青、骨料、气体构成；海水的介电参数与它的温度、盐度等属性有关。已有相关研究^[2]根据各地貌的物质组成情况，构建了对应的介电参数模型。对海岛几何模型其赋予介电属性即得到电磁散射模型。

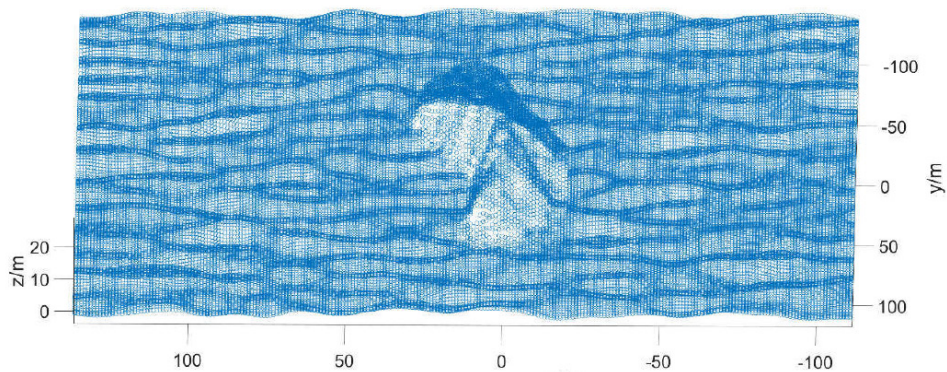


图 1 海岛几何模型^[3]

在构建 SAR 成像模型时，主要包括雷达模型、目标模型与成像空间模型的构建，电磁散射仿真后得到目标散射回波，最后基于成像算法对回波成像得到 SAR 仿真图像。得到的海岛背景下的舰船目标 SAR 图像如图 2(a) 所示，经过图像增强后如图 (b) 所示。基于以上方法可以构建各类自然场景下的 SAR 图像数据集，利用深度学习的目标识别方法能够为雷达传感器精准探测复杂背景中目标提供有效的解决手段^[5]。

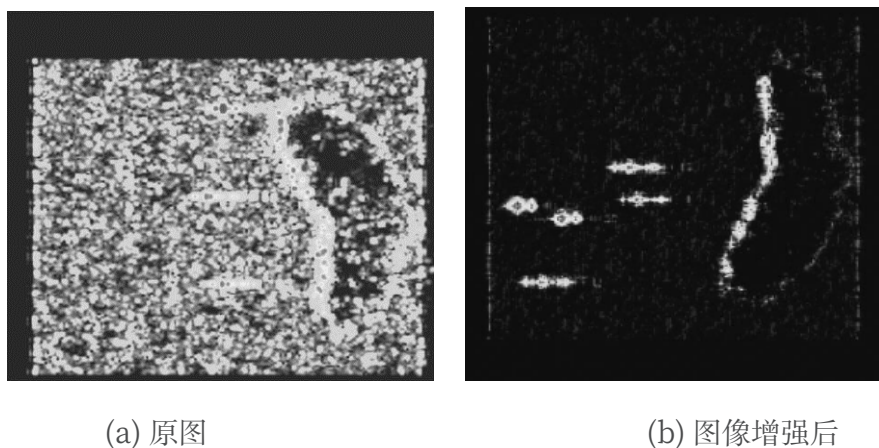


图 2 复杂背景下的目标 SAR 图像^[4]

基于仿真方法探究自然环境对 SAR 成像的影响是一种行之有效的手段，但仍然存在着一些问题有待解决，目前研究较少考虑到实际环境的复杂性。比如，地面上是否覆盖植被以及植被的疏密程度，因此可以考虑计算含植被地面上方复杂目标的电磁散射。另一方面，对海面目

标的复合散射问题的研究中,大多数研究模拟的是线性海面,没有考虑海面的非线性因素如泡沫、卷浪以及破碎等问题。实际海面情况十分复杂,除了风因素以外,大气压变化、天体引力、海水不同水层的密度差和海底地震等均对海浪的形态产生影响^[6],建立更为全面的动态海面模型具有挑战性和研究意义^[7]。

探究自然环境对不同传感器的影响并构建相应的仿真模型,不仅可以提升复杂背景中目标精准探测能力,也为研究自然环境提供了新视角。一方面,基于光学传感器数据反演地球自然环境的物理特性参数,为研究地球自然环境的变化过程及发展趋势提供遥感数据支撑,有利于准确预测自然现象的发生和演化过程。另一方面,基于电磁仿真研究自然环境的电磁散射特性,可以用于分析来自地、海环境中的回波信息,进一步分析地(海)面的介电属性、地(海)面的起伏程度、地面的湿度、温度以及含盐量等相关信息,这对环境监管、农业生产、海洋捕捞业等领域有着重要的实际应用价值。

参考文献:

- [1] Bao, F., Wang, X., Sureshbabu, S.H. et al. Heat-assisted detection and ranging. *Nature* 619, 743–748 (2023).
- [2] 肖俊鑫. 典型地貌地表的电磁散射建模及其成像研究 [D]. 西安电子科技大学, 2021.
- [3] 彭琪翔. 三维海面目标电磁散射及成像技术研究 [D]. 西华大学, 2023.
- [4] 何之媛. 基于电磁散射的目标识别与检测相关问题研究 [D]. 西安电子科技大学, 2022.
- [5] 单敬喆, 曲晓杰, 晁坤, 许小剑. 基于改进 SBR 技术的地面目标 SAR 图像快速生成技术 [J]. *电波科学学报*, 2024, 39(2): 322-331.
- [6] 张肖肖. 复杂海况海面及目标复合电磁散射特性与影响因素研究 [D]. 西安电子科技大学, 2018.
- [7] J. Shan, C. Lu and X. Xu. Simulation and analysis of radar signatures for objects floating on time-evolving sea surface [C]. *IET International Radar Conference (IET IRC 2020)*, Chengdu, 2020, 128-132.

