



# 本科毕业设计(论文)



题 目: 湖南工商大学学位论文

学生姓名: 罗明贵

学 号: 2123020028

专 业: 人工智能

班 级: 智能 2101 班

指导老师: 王海东 教授

计算机学院

2024 年 12 月

## 湖南工商大学本科毕业设计诚信声明

本人郑重声明：所呈交的本科毕业设计是本人在指导老师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，成果不存在知识产权争议，除文中已经注明引用的内容外，本设计不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本设计做出重要贡献的个人和集体均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名:罗明贵

日期:2024年12月26日

## 摘要

随着人工智能和自动驾驶技术的迅猛发展，传统的测试与验证方法已无法满足复杂多变的驾驶环境需求。数字孪生技术作为一种新兴的仿真手段，通过构建与现实世界相对应的虚拟模型，为自动驾驶系统提供了高效、安全的测试平台。数字孪生能够实时反映物理实体的状态，支持对车辆动态、环境变化等多方面的精准模拟，从而为自动驾驶算法的训练与优化提供丰富的数据支持。强化学习作为一种自我学习的智能算法，能够在不断变化的环境中优化决策过程。将数字孪生与强化学习相结合，不仅可以加速自动驾驶系统的开发与验证，还能提升其在复杂场景下的适应能力和安全性。研究基于数字孪生的自动驾驶强化学习仿真系统具有重要的理论意义和实际应用价值。

本文旨在探讨基于数字孪生的自动驾驶强化学习仿真系统的设计与实现。随着自动驾驶技术的快速发展，传统的测试与验证方法已无法满足日益复杂的驾驶环境和多样化的驾驶场景需求。数字孪生技术作为一种新兴的仿真手段，通过构建与现实世界相对应的虚拟模型，为自动驾驶系统提供了一个高效、安全的测试平台。本文首先回顾了自动驾驶技术的发展历程，分析了数字孪生的基本概念及其在自动驾驶领域的应用潜力。深入探讨了强化学习的基本原理及其在自动驾驶中的重要性，强调了通过强化学习算法优化自动驾驶决策的必要性。

在此基础上，本文提出了一种结合数字孪生与强化学习的仿真系统框架，详细描述了系统的架构设计、功能模块及实现过程。通过构建一个真实环境的数字孪生模型，系统能够在虚拟环境中进行大量的驾驶场景仿真，进而加速强化学习的训练过程。实验结果表明，该系统在提高自动驾驶决策的准确性与稳定性方面具有显著优势。本文还讨论了系统在实际应用中的挑战与未来发展方向，指出了数据稀缺、收敛性等问题的解决方案，为后续研究提供了参考。基于数字孪生的自动驾驶强化学习仿真系统不仅为自动驾驶技术的验证与优化提供了新的思路，也为相关领域的研究者提供了有价值的实践经验。

**关键词：**数字孪生 自动驾驶 强化学习 仿真系统 决策优化

## ABSTRACT

With the rapid development of artificial intelligence and autonomous driving technology, traditional testing and validation methods can no longer meet the demands of complex and variable driving environments. Digital twin technology, as an emerging simulation method, provides an efficient and safe testing platform for autonomous driving systems by constructing virtual models that correspond to the real world. Digital twins can reflect the state of physical entities in real-time, supporting precise simulations of various aspects such as vehicle dynamics and environmental changes, thereby providing rich data support for the training and optimization of autonomous driving algorithms. Reinforcement learning, as a self-learning intelligent algorithm, can optimize decision-making processes in constantly changing environments. Combining digital twins with reinforcement learning can not only accelerate the development and validation of autonomous driving systems but also enhance their adaptability and safety in complex scenarios. Researching a digital twin-based reinforcement learning simulation system for autonomous driving has significant theoretical significance and practical application value.

This article aims to explore the design and implementation of a digital twin-based reinforcement learning simulation system for autonomous driving. With the rapid development of autonomous driving technology, traditional testing and validation methods can no longer meet the increasingly complex driving environments and diverse driving scenarios. Digital twin technology, as an emerging simulation method, provides an efficient and safe testing platform for autonomous driving systems by constructing virtual models corresponding to the real world. This article first reviews the development history of autonomous driving technology, analyzes the basic concepts of digital twins and their application potential in the field of autonomous driving. It delves into the basic principles of reinforcement learning and its importance in autonomous driving, emphasizing the necessity of optimizing autonomous driving decisions through reinforcement learning algorithms.

On this basis, the article proposes a simulation system framework that combines digital twins and reinforcement learning, detailing the system's architectural design, functional modules, and implementation process. By constructing a digital twin model of a real environment, the system can simulate a large number of driving scenarios in a virtual environment, thereby accelerating the reinforcement learning training process. Experimental results show that the

system has significant advantages in improving the accuracy and stability of autonomous driving decisions. The article also discusses the challenges and future development directions of the system in practical applications, pointing out solutions to issues such as data scarcity and convergence, providing references for subsequent research. The digital twin-based reinforcement learning simulation system for autonomous driving not only offers new ideas for the validation and optimization of autonomous driving technology but also provides valuable practical experience for researchers in related fields.

**Key words:** Digital Twin Autonomous Driving Reinforcement Learning Simulation System; Decision Optimization

# 目录

<b>第 1 章 绪论</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景及意义 . . . . .	1
1.1.1 自动驾驶技术的发展历程 . . . . .	1
1.1.2 数字孪生技术的概念与应用 . . . . .	2
1.1.3 强化学习在自动驾驶中的重要性用 . . . . .	3
1.2 文献综述 . . . . .	3
1.2.1 国内研究现状 . . . . .	3
1.2.2 国外研究现状 . . . . .	4
<b>第 2 章 图表示例</b>	<b>6</b>
2.1 图片与布局 . . . . .	6
2.1.1 插图 . . . . .	6
2.1.2 横向布局 . . . . .	6
2.2 纵向布局 . . . . .	7
2.3 竖排多图横排布局 . . . . .	7
2.4 横排多图竖排布局 . . . . .	7
<b>第 3 章 表格插入示例</b>	<b>9</b>
<b>第 4 章 公式插入示例</b>	<b>10</b>
<b>第 5 章 引用文献标注</b>	<b>11</b>
5.1 顺序编码 . . . . .	11
5.2 获取 BibTeX 格式索引 . . . . .	11
5.3 参考文献插入示例 . . . . .	11
<b>致谢</b>	<b>12</b>
<b>附录 A 附录代码</b>	<b>13</b>
A.1 堆溢出检测算法 . . . . .	13
A.2 KMP 算法 C++ 描述 . . . . .	13
<b>附录 B 康托尔辩辞录：数学的自由与制约</b>	<b>16</b>
<b>参考文献</b>	<b>13</b>

# 第1章 绪论

## 1.1 研究背景及意义

### 1.1.1 自动驾驶技术的发展历程

自动驾驶技术的发展历程可以追溯到 20 世纪中叶，随着计算机科学、传感器技术以及控制理论的不断进步，自动驾驶逐渐从理论研究走向实际应用。早期的自动驾驶研究主要集中在简单的路径跟踪和基本的环境感知上，这些技术虽然在当时具有一定的前瞻性，但由于计算能力和传感器精度的限制，实际应用效果并不理想。赵岑等指出，随着人工智能和大数据技术的引入，自动驾驶的智能化水平显著提升，使得车辆能够在复杂环境中进行自主决策，从而推动了整个行业的快速发展。进入 21 世纪，深度学习的快速发展为自动驾驶技术带来了新的机遇。基于深度学习的端到端自动驾驶系统能够实现更高效的决策与控制，极大地推动了行业的进步。这种方法通过大规模的数据训练，使得自动驾驶系统能够在多种驾驶场景中进行有效的学习和适应，显著提高了自动驾驶的安全性和可靠性。随着科技的迅猛发展，自动驾驶技术逐渐成为交通运输领域的研究热点。近年来，数字孪生技术的兴起为自动驾驶系统的开发与优化提供了新的思路和方法。数字孪生是指通过虚拟模型实时反映物理实体的状态和行为，能够在仿真环境中进行多种场景的测试与验证。这一技术的应用，不仅可以降低实际测试中的风险和成本，还能加速自动驾驶算法的迭代与优化。

在自动驾驶的研发过程中，强化学习作为一种重要的机器学习方法，能够通过与环境的交互不断提升系统的决策能力。传统的强化学习往往依赖于大量的真实数据和复杂的环境模拟，这在实际操作中面临诸多挑战。基于数字孪生的自动驾驶强化学习仿真系统，能够提供一个高度真实且可控的虚拟环境，使得研究人员可以在不同的交通场景和复杂情况下进行训练，从而提高算法的鲁棒性和适应性。

近年来，自动驾驶技术的应用逐渐扩展到商用领域，通过分析智能自动驾驶无人机的技术进展，为这一领域的创新为传统交通运输方式带来了颠覆性的变革。无人机的自动驾驶技术不仅提升了物流效率，还在应急救援、环境监测等领域展现了广泛的应用潜力。强化学习作为一种重要的机器学习方法，逐渐被应用于自动驾驶决策中。研究者研究了基于强化学习的无信号交叉口自动驾驶决策，指出该方法能够有效提高车辆在复杂交通场景中的决策能力，尤其是在动态变化的环境中。通过探讨多源数据在自动驾驶技术风险识别中的应用，突出强调了数据驱动方法在提升自动驾驶安全性方面的重要性。总的来看，自动驾驶技术的发展历程是一个不断融合多学科知识、不断创新的过程，未来将继续朝着更高的智能化和安全性方向迈进，推动交通运输领域的革命性变革。

### 1.1.2 数字孪生技术的概念与应用

“孪生”的概念起源于美国国家航空航天局的“阿波罗计划”，即构建两个相同的航天飞行器，其中一个发射到太空执行任务，另一个留在地球上用于反映太空中航天器在任务期间的工作状态，从而辅助工程师分析处理太空中出现的紧急事件。当然，这里的两个航天器都是真实存在的物理实体。“数字孪生”初始的概念模型是于2002年10月由迈克尔·格里弗斯（Michael Grieves）博士在美国制造工程协会管理论坛上所提出。而到2009年，美国空军相关实验室明确提出带有数字孪生的概念：“机身数字孪生（Airframe Digital Twin）”。在2010年，美国国家航空航天局（NASA）在《建模、仿真、信息技术和处理》和《材料、结构、机械系统和制造》两份技术路线图中正式开始使用数字孪生（Digital Twin）这一名称。

数字孪生，又称为数字双生、虚拟双生或数据双生，是一种将物理实体在数字空间中进行模拟、复制和优化的技术，数字孪生就是通过数据和算法，将现实世界中的物体、系统或过程进行虚拟化，从而实现对其进行实时监控、预测和优化的目标。数字孪生技术是一种通过虚拟模型与现实世界进行实时交互的创新技术，近年来在多个领域得到了广泛应用，尤其是在自动驾驶领域。数字孪生能够有效提升自动驾驶系统的测试与验证效率。通过构建与现实环境相对应的虚拟模型，开发者可以在安全的环境中进行多样化的场景模拟与测试，从而降低实际道路测试所带来的风险和不确定性。这种技术的应用不仅能够节省时间和成本，还能确保系统在各种复杂情况下的稳定性与可靠性。

数字孪生技术在自动驾驶中的应用，不仅可以优化车辆的动态性能，还能提升环境感知的准确性，从而增强自动驾驶系统的整体安全性。在复杂的交通环境中，车辆需要实时处理大量信息，数字孪生技术的引入使得这一过程变得更加高效和可靠。同时，得益于物联网、大数据、云计算、人工智能等新一代信息技术的发展，数字孪生的实施已逐渐成为可能。现阶段，除了航空航天领域，数字孪生还被应用于电力、船舶、城市管理、农业、建筑、制造、石油天然气、健康医疗、环境保护等行业，如上图所示。特别是在智能制造领域，数字孪生被认为是一种实现制造信息世界与物理世界交互融合的有效手段。许多著名企业（如空客、洛克希德马丁、西门子等）与组织（如Gartner、德勤、中国科协智能制造协会）对数字孪生给予了高度重视，并且开始探索基于数字孪生的智能生产新模式。通过利用数字孪生技术进行自动驾驶控制系统的测试，可以大幅降低实际道路测试的风险，确保系统在各种复杂情况下的稳定性与可靠性。数字孪生与深度学习的结合，为自动驾驶技术的发展提供了新的思路。通过实时数据反馈与模型更新，能够不断优化驾驶决策过程，使得自动驾驶系统在面对复杂交通场景时更加灵活应对。唐作进指出，数字孪生技术在感知决策联合系统中的应用，能够实现对环境的全面理解，从而提升自动驾驶的智能化水平。数字孪生在预测任务中的应用，也能够帮助自动驾驶系统更好地应对复杂的交通场景，提高决策的准确性。

通过进一步探讨了数字孪生在无信号灯十字路口的决策控制中的重要性，可以看出其在复杂交通环境中的应用潜力。数字孪生技术为自动驾驶系统提供了一个动态的反馈机制，使得系统能够在不断变化的环境中保持高效的运行状态。数字孪生技术在自动驾

驶领域的应用前景广阔，能够有效提升系统的安全性与智能化水平，为未来的交通系统发展提供了重要的技术支持。

### 1.1.3 强化学习在自动驾驶中的重要性用

在自动驾驶技术的迅猛发展过程中，强化学习作为一种重要的机器学习方法，逐渐展现出其独特的优势与潜力。深度强化学习通过与环境的持续交互，能够有效学习到最优策略，从而在复杂多变的驾驶场景中做出实时决策。这一特性使得自动驾驶系统具备了更高的适应性和灵活性，能够应对各种突发情况和复杂交通状况。采用端到端的深度强化学习方法，可以显著简化传统自动驾驶系统中的多个模块，提升系统的整体性能，尤其是在动态环境下的表现更为突出。这种方法不仅提高了决策的效率，还降低了系统的复杂性，使得自动驾驶技术的应用更加广泛。

基于深度强化学习的自动驾驶系统能够通过不断的自我学习和优化，逐步提高决策的准确性和安全性。这种自我学习的能力使得系统能够在真实世界中不断适应新的挑战，增强了其在实际应用中的可靠性。在此背景下，通过探讨了强化学习在自动驾驶算法中的具体应用，认为其能够有效应对复杂的交通状况，提升车辆的自主驾驶能力，进而推动自动驾驶技术的进一步发展。

并且通过强化学习的训练，自动驾驶系统能够在模拟环境中进行大量实验，积累丰富的经验，从而优化决策过程。这种基于经验的学习方式，使得系统在面对未知环境时，能够更加从容应对。数字孪生技术的引入为强化学习提供了更为真实的仿真环境，使得学习过程更加高效和可靠，为自动驾驶系统的训练提供了坚实的基础。结合虚拟现实技术与强化学习，可以进一步提升自动驾驶系统的训练效果，为未来的实际应用奠定坚实的基础。这些研究表明，强化学习在自动驾驶中的重要性不仅体现在提升决策能力上，更在于为系统的持续优化和适应复杂环境提供了强有力的支持。

## 1.2 文献综述

### 1.2.1 国内研究现状

近年来，随着自动驾驶技术的迅猛发展，国内学者对数字孪生在自动驾驶领域的应用进行了广泛而深入的研究。基于数字孪生的汽车自动驾驶仿真测试方法能够有效提升测试的安全性与效率，为自动驾驶系统的验证提供了新的思路和方法。这种方法不仅能够模拟真实的驾驶环境，还能在虚拟空间中进行多种场景的测试，从而降低实际测试中的风险和成本。通过探讨数字孪生的虚拟仿真系统，强调其在复杂驾驶环境下的应用潜力，认为数字孪生技术能够为自动驾驶提供更为真实的测试环境，进而提升系统的可靠性和适应性。学者李佳新等人在其研究中探讨了深度强化学习在自动驾驶决策中的应用，提出了一种新型的决策框架，能够有效提高自动驾驶系统的智能化水平。通过关注于端到端免模型深度强化学习的应用，强调了该方法在复杂交通环境中的优势，能够实现更为灵活的驾驶策略。

通过研究深度学习与深度强化学习结合的关键技术，我们可以发现这种结合能够显著提升自动驾驶系统的感知与决策能力。学者何竟等人提出了一种基于深度强化学习的智能决策算法，强调了算法在动态环境下的适应性和实时性。探讨了自主无人系统的驾驶策略，提出了一种新的强化学习框架，能够有效应对复杂的驾驶场景。在研究中分析深度强化学习在自动驾驶决策控制中的应用，提出了一种基于模型的强化学习方法，能够提高决策的准确性和安全性。学者李文娜等研究了自动驾驶汽车闯红灯预警的数字孪生道路测试，强调了数字孪生技术在提升自动驾驶安全性方面的重要作用。仿真测试在自动驾驶系统开发中至关重要，能够有效降低开发成本和风险。国内研究者通过综述自动驾驶汽车感知系统的仿真研究，指出数字孪生技术在感知系统优化中的关键作用。通过研究自动驾驶汽车在闯红灯情况下的预警机制，提出数字孪生技术进行道路测试可以显著提高系统的反应能力和决策准确性。这一研究为自动驾驶系统的安全性提供了重要的理论支持和实践依据。分析仿真测试在自动驾驶系统开发中的重要性，认为通过仿真可以有效降低开发成本和时间，提高系统的可靠性和稳定性，进而加速自动驾驶技术的落地与应用。

国内研究者通过综述自动驾驶汽车感知系统的仿真研究，指出数字孪生技术在感知系统优化中的关键作用，能够提升自动驾驶的环境感知能力和反应速度，为自动驾驶的智能化发展奠定了基础。国内研究者研究设计了一种基于转鼓/制动试验平台的自动驾驶整车虚拟仿真测试系统，强调了数字孪生在整车测试中的应用价值，展示了其在实际工程中的可行性和有效性。数字孪生技术正在汽车行业加速应用，尤其是在智能工厂和自动驾驶领域，展现出广阔的前景和发展潜力。数字孪生技术在自动驾驶测试领域的应用研究正逐渐深入，为未来的技术发展奠定了坚实的基础。国内在数字孪生与自动驾驶结合的研究上已取得了一定的进展，但仍需进一步探索与实践，以应对日益复杂的驾驶环境和技术挑战。

### 1.2.2 国外研究现状

在国外，自动驾驶技术的研究与应用已经取得了显著进展，尤其是在数字孪生和强化学习的结合方面。许多知名科技公司和研究机构积极投入资源，探索如何利用数字孪生技术来提升自动驾驶系统的性能和安全性。特斯拉、谷歌的 Waymo 以及 Uber 等公司，均在其自动驾驶平台中应用了先进的仿真技术，以应对复杂的交通环境和多样化的驾驶场景。除此以外，许多国际知名高校和研究机构，如麻省理工学院、斯坦福大学和卡内基梅隆大学等，均在这一领域开展了深入的研究。数字孪生技术的引入，使得研究者能够在虚拟环境中创建与现实世界高度一致的模型，从而为自动驾驶系统的开发和测试提供了强有力的支持。

在数字孪生的研究中，国外学者提出了多种构建与应用模型。MIT 的研究团队开发了一种基于数字孪生的城市交通仿真平台，能够实时反映城市交通流量和车辆行为。这一平台不仅为自动驾驶算法的测试提供了真实的环境数据，还为城市交通管理提供了决策支持。斯坦福大学的研究者们也在探索数字孪生在自动驾驶中的应用，重点关注如何

通过高保真度的仿真环境来优化车辆的决策过程。

强化学习在自动驾驶领域的应用同样备受关注。国外的研究者们通过设计复杂的奖励机制和状态空间，推动了强化学习算法在自动驾驶决策中的应用。加州大学伯克利分校的研究小组提出了一种基于深度强化学习的自动驾驶模型，通过与数字孪生环境的交互，显著提升了车辆在复杂场景下的自主决策能力。该模型在多种仿真测试中表现出色，展示了强化学习在动态环境中的适应性和灵活性。国外的研究者们还通过构建复杂的仿真环境，利用深度强化学习算法来优化自动驾驶决策。DeepMind 和 OpenAI 等机构在强化学习算法的创新上取得了显著成果，他们的研究不仅推动了人工智能的发展，也为自动驾驶技术的进步提供了新的思路。许多企业，如特斯拉、谷歌的 Waymo 和 Uber 等，纷纷投入巨资进行自动驾驶技术的研发，利用数字孪生技术进行实时数据分析和模型优化，以提高自动驾驶系统的安全性和可靠性。

国外的研究还强调了多智能体系统在自动驾驶中的重要性。通过数字孪生技术，研究者能够模拟多个自动驾驶车辆在同一环境中的交互行为，从而为强化学习算法提供更为丰富的训练数据。值得注意的是，国外的研究还注重多智能体系统的协同学习，通过模拟多个自动驾驶车辆在复杂交通环境中的互动，探索如何提高整体交通效率和安全性。这些研究不仅为自动驾驶技术的实际应用提供了理论基础，也为未来的智能交通系统奠定了坚实的基础。国外在基于数字孪生的自动驾驶强化学习仿真系统的研究中，已经取得了显著的进展，值得我们深入学习和借鉴。这种多智能体的仿真环境不仅提高了算法的鲁棒性，还为未来的智能交通系统提供了新的思路。国外在数字孪生与强化学习结合的自动驾驶研究中，已形成了一定的理论基础和实践经验，为推动自动驾驶技术的进一步发展奠定了坚实的基础。

## 第 2 章 图表示例

### 2.1 图片与布局

#### 2.1.1 插图

图片可以通过`\includegraphics` 指令插入，我们建议模板使用者将文章所需插入的图片源问卷放置在 `images` 目录中，另外，矢量图片应使用 PDF 格式，位图照片则应使用 JPG 格式（`LaTeX` 不支持 TIFF 格式）。具有透明背景的栅格图可以使用 PNG 格式。

下面是一个简单的插图示例。



图 2-1 插图示例

如果一个图由多个分图（子图）组成，应通过 (a),(b),(c) 进行标识并附注在分图（子图下方）。目前子图标识不居中问题没有解决，预计下个版本修复。

#### 2.1.2 横向布局

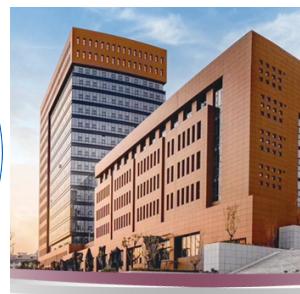
模板提供常见的图片布局，比如单图布局2-1，另外还有横排布局如下：



(a) test



(b) test



(c) test



(d) test

图 2-2 图片横排布局示例

## 2.2 纵向布局

纵向布局如图2-3



(a) test



(b) test

图 2-3 图片纵向布局示例

## 2.3 坚排多图横排布局



(a) aaa

(b) bbb

图 2-4 图片坚排多图横排布局

竖排多图横排布局如图2-4所示。注意看 (a)、(b) 编号与图关系

## 2.4 横排多图竖排布局

潮涌湘江阔，鹏翔天地宽。湖南工商大学正以习近平新时代中国特色社会主义思想为指引，秉持“新工科+新商科+新文科”与理科融合发展的思路，努力形成一流的理念、一流的目标、一流的标准、一流的品质、一流的机制，打造创新工商、人文工商、艺术工商、体育工商、数智工商、绿色工商、幸福工商，建设读书求知的好园地，乘高等教育改革奋进的东风，朝着创新型一流工商大学的愿景扬帆远航。

横排多图竖排布局如图2-5所示。注意看 (a)、(b) 编号与图关系。



图 2-5 图片横排多图竖排布局

## 第3章 表格插入示例

表3-1 学校文件里对表格的要求不是很高，不过按照学术论文的一般规范，表格为三线表。

	A	B	C	D	E
1	212	414	4	23	fgw
2	212	414	v	23	fgw
3	212	414	vfwe	23	嗯
4	212	414	4fwe	23	嗯
5	af2	4vx	4	23	fgw
6	af2	4vx	4	23	fgw
7	212	414	4	23	fgw

表格如表3-1所示，**latex** 表格技巧很多，这里不再详细介绍。

潮涌湘江阔，鹏翔天地宽。湖南工商大学正以习近平新时代中国特色社会主义思想为指引，秉持“新工科+新商科+新文科”与理科融合发展的思路，努力形成一流的理念、一流的目标、一流的标准、一流的品质、一流的机制，打造创新工商、人文工商、艺术工商、体育工商、数智工商、绿色工商、幸福工商，建设读书求知的好园地，乘高等教育改革奋进的东风，朝着创新型一流工商大学的愿景扬帆远航。

## 第4章 公式插入示例

潮涌湘江阔，鹏翔天地宽。湖南工商大学正以习近平新时代中国特色社会主义思想为指引，秉持“新工科+新商科+新文科”与理科融合发展的思路，努力形成一流的理念、一流的目标、一流的标准、一流的品质、一流的机制，打造创新工商、人文工商、艺术工商、体育工商、数智工商、绿色工商、幸福工商，建设读书求知的好园地，乘高等教育改革奋进的东风，朝着创新型一流工商大学的愿景扬帆远航。

公式插入示例如公式(4.1)所示。

$$\gamma_x = \begin{cases} 0, & \text{if } |x| \leq \delta \\ x, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.1)$$

# 第 5 章 引用文献标注

文献标注和索引的处理一直是学术写作的一个麻烦事，特别是在 word 环境下。`latex` 中我们只需要编辑（或直接获取）BibTeX 格式索引文件然后在正文中使用`\cite` `\citet` 等指令进行引用标注就可以。下面介绍在文章中引用指令的具体使用方法。

## 5.1 顺序编码

根据学校要求，参考文献标注用中括号上标形式进行标注。使用方式与效果如下表所展示

<code>\cite{knuth1984texbook}</code>	⇒ <b>knuth1984texbook</b>
<code>\citet{knuth1984texbook}</code>	⇒ <b>knuth1984texbook&lt;empty c</b>
<code>\citep{knuth1984texbook}</code>	⇒ <b>knuth1984texbook</b>
<code>\cite{knuth1984texbook, lamport1994latex}</code>	⇒ <b>knuth1984texbook, lamport1994latex</b>

## 5.2 获取 BibTeX 格式索引

获取参考文献的 BibTeX 格式索引有两种方式

- 通过 Google Scholar 或者百度学术等学术文献搜索引擎获取，自行编辑.bib 文件
- 通过 Zotero 等学术文献整理软件，添加所有的引用文献至库中，导出对应的.bib 文件

编译带参考文献的文章时，我们需要两次编译过程。我们提供了对应的自动化脚本，以及配合 vscode latex 插件的任务流程，帮助模板使用者进行编译。

## 5.3 参考文献插入示例

LaTeX<sup>lamport1994latex</sup> 插入参考文献最方便的方式是使用 `bibliography{pritchard1969statistical}`，大多数出版商的论文页面<sup>lamport1994latex,pritchard1969statistical</sup>都会有导出 bib 格式参考文献的链接，把每个文献的 bib 放入“`hutbthesis_main.bib`”，然后用 `bibkey` 即可插入参考文献。

潮涌湘江阔，鹏翔天地宽。湖南工商大学正以习近平新时代中国特色社会主义思想为指引，秉持“新工科 + 新商科 + 新文科”与理科融合发展的思路，努力形成一流的理念、一流的目标、一流的标准、一流的品质、一流的机制，打造创新工商、人文工商、艺术工商、体育工商、数智工商、绿色工商、幸福工商，建设读书求知的好园地，乘高等教育改革奋进的东风，朝着创新型一流工商大学的愿景扬帆远航。

## 致谢

感谢制作出中南大学本科学位论文 LaTeX 模板的 edwardzcn。

感谢制作出中南大学博士学位论文 LaTeX 模板的郭大侠 @CSGrandeur。

感谢添加本科学位论文样式支持的 @BlurryLight。

感谢帮助重构项目并进行测试的 @burst-bao 以及为独立使用 LaTeX 进行毕业论文写作提供宝贵经验的 16 级的姜析阅学长。

感谢 CTeX-kit 提供了 LaTeX 的中文支持。

感谢上海交通大学学位论文 LaTeX 模板的维护者们 @sjtug 和清华大学学位论文 LaTeX 模板的维护者们 @tuna 给予的宝贵设计经验。

感谢所有为模板贡献过代码的同学们！

## 附录 A 附录代码

附录部分用于存放这里用来存放不适合放置在正文的大篇幅内容、典型如代码、图纸、完整数学证明过程等内容。

### A.1 堆溢出检测算法

---

#### 算法 A.1 堆溢出检测算法

---

- 1: **if**  $\beta \in \mathbb{N}^* \wedge \Delta_\beta = \Delta_{\beta-1} \wedge \beta < S$  **then**
  - 2:   正常写入
  - 3: **else if**  $\beta \in \mathbb{N}^* \wedge \Delta_\beta \neq \Delta_{\beta-1} \wedge \beta \geq S$  **then**
  - 4:   发生堆溢出
  - 5: **end if**
- 

### A.2 KMP 算法 C++ 描述

```
const int maxn=2e5+5;
int nt[maxn];
int aa[maxn], bb[maxn];
int a[maxn], b[maxn];
int n;
//参数为模板串和next数组
//字符串均从下标0开始
void kmpGetNext(int *s, int *Next)
{
    Next[0]=0;
    //    int len=strlen(s);
    for( int i=1, j=0; i<n; i++)
    {
        while( j&&s[i]!=s[j]) j=Next[j];
        if( s[i]==s[j]) j++;
        Next[i+1]=j;
    }
    //    Next[len]=0;
}
```

```
int kmp( int *ss , int *s , int *Next)
{
    kmpGetNext(s , Next);
    // 调试输出 Next 数组
    // int len=strlen(s);
    // for( int i=0;i<=n; i++)
    //     cout<<Next[i]<<" ";
    // cout<<endl;

    // int ans=0;
    // int len1=strlen(ss);
    // int len2=strlen(s);
    for( int i=0,j=0;i<2*n; i++) // 倍长
    {
        while( j&&ss[ i%n ]!=s[ j ]) j=Next[ j ];
        if( ss[ i%n ]==s[ j ]) j++;
        if( j==n ){
            return 1;
        }
    }

    return 0;
}

int main( void )
{
    while( cin>>n)
    {
        memset(a,0 , sizeof(a));
        memset(b,0 , sizeof(b));
        rep( i , 0 , n) cin>>aa[ i ];
        rep( i , 0 , n) cin>>bb[ i ];
        sort(aa , aa+n);
        sort(bb , bb+n);
        rep( i , 0 , n-1){
            a[ i ]=aa[ i+1 ]-aa[ i ];
            b[ i ]=bb[ i+1 ]-bb[ i ];
        }
    }
}
```

```
a[n-1]=360000+aa[0]-aa[n-1];
//      rep(i,0,n) cout<<a[i]<<" ";
//      cout<<endl;
b[n-1]=360000+bb[0]-bb[n-1];
//      rep(i,0,n) cout<<b[i]<<" ";
//      cout<<endl;
if(kmp(a,b,nt))
    cout<<"possible"<<endl;
else cout<<"impossible"<<endl;
}
return 0;
}
```

## 附录 B 康托尔辩辞录：数学的自由与制约

（录自康托尔：《一般集合论基础》，1883）

数学在其发展中是完全自由的，它只受下述自明的关注所制约，即它的概念既要内在地不存在矛盾，还要参与确定与此前形成的，已经存在着地和已被证明地概念之关系（借助定义贯穿起来）。特别地，在引入新数时，数学只遵循：在给出它们地定义时使之具有某种确定性，并且在某些情况下，使之与老数有某种关系，在特定地场合中这种关系一定会使它们（新数和老数）互相区别开来，只要一个数满足这些条件，数学只能而且必须把它看作是存在的和实在的东西，这正是我……关于为什么必须把有理数、无理数和复数看作与有限正整数一样是实在的所建议的理由。

我相信，没有必要害怕，许多人是害怕，这些原则含有对于科学的危险，一方面，实行造出新数的自由必须服从所设计的条件，但这些条件给任意性留下的活动空间是非常小的。而且，每一数学概念在其自身之中也带有必要的矫正物；如果它没有收获也不合适（它的无用很快就会表明这一点），那么它将由于没有成功而被丢弃。另一方面，在我看来，对于数学研究工作的任何多余的限制只会随之而带来更大的危险，由于实际上并没有任何理由可说明它是由科学的本质推断出来的，它的危险就更大了，而数学的本质恰恰在于它的自由。

如果高斯、柯西、阿贝尔、雅可比、狄利克雷、魏尔斯特拉斯、埃尔米特和黎曼总是被束缚而拿他们的新想法去臣服于形而上学的控制，那么，我们今日就不可能为现代函数论的雄伟建筑而高兴，现代函数论的设计和矗立是完全自由的，毫无短视的瞬间目的……。如果福克斯、庞加莱和其他许多杰出的智者受外来影响所包围和限制，我们就会见不到他们带给微分方程论的巨大的推动，还有，如果枯莫尔不是斗胆地（大有成效者）把所谓的“理想”数引入数论，我们今天也无从去羡慕钦佩克罗内克和戴德金在代数和算术上十分重要和杰出的工作。

因此，如已说明的，数学是要脱离形而上学的桎梏而完全自由地发展 …