

本科计算机教育中数理逻辑课程改革浅析

庄朝晖¹, 赵致琢^{1,2}

(1. 厦门大学计算机与信息学院计算机科学系, 福建 厦门 361005;

2. 仰恩大学计算机与信息学院计算机科学系, 福建 泉州 362014)

【摘要】 本文回顾和整理了数理逻辑在计算机科学诞生和发展过程中引擎式的重要作用, 强调了数理逻辑在计算机科学中的基础性地位和作用, 以及笔者在本科教育中开设数理逻辑课程改革的探索。本科教育中该课程分为两种模式: 一种侧重于形式主义, 特点是简洁、易于机器实现; 另一种侧重于构造主义, 特点是自然、直观, 符合人类推理思维过程。笔者在数理逻辑课程的教学过程中注意历史和人物的介绍, 结合生活的逻辑实例, 进行启发式的教育, 课余鼓励学生结合编译工具完成经典逻辑的自动化判定程序。从十年的教学实践来看, 数理逻辑教育取得了优良的教学成果。

【关键词】 计算机本科教育; 数理逻辑; 教学方法

【中图分类号】 G642.0 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 2095-5065 (2013) 12-0059-06

0 引言

数理逻辑在计算机科学的诞生过程中起着关键的引擎作用, 并且在计算机科学后来的发展中也一直发挥着重要的推动作用。因此, “数理逻辑基础”课程成为本科计算机教育中的一门重要课程, 对于后续专业课程的展开有基础性的奠基作用, 同时具有在一系列学科基础、主流、重要方向开展探

收稿日期: 2013-12-5

作者简介: 庄朝晖 (1976—), 男, 福建南安人, 硕士, 讲师, 主要研究领域为逻辑与认知, 长期从事数理逻辑基础课程的教学;

赵致琢 (1957—), 男, 上海人, 博士, 教授, 主要研究领域为计算模型与分布式计算、逻辑程序设计基础、计算机科学教育, 长期从事数理逻辑基础课程的教学。

基金项目: 本文的工作得到福建省计算机专业人才培养创新实验区(厦门大学)、福建省计算机科学与技术特色专业(厦门大学, 仰恩大学)、福建省本科重点学科专业(仰恩大学, 计算机科学与技术)、仰恩大学教学与科研基金等项目的经费支持。

索, 研究学问, 创新知识, 开发技术, 开展高水平科学研究时的支撑作用。本文简要回顾了数理逻辑在计算机科学发展中的作用, 然后介绍在本科教育中的数理逻辑课程的实施情况。

1 数理逻辑在计算机学科中的作用

中文的“逻辑”音译自英文的logic, 英文的logic又来源于希腊文logos。logos一般翻译为“罗格斯”, 接近于中文里的“道”, 本意是自然和真理的意思, 又延伸出言谈与规则的意思。在言谈和辩论中, 东西方文明各自独立地发展出古希腊逻辑学、墨子名学和印度因明学。当代的逻辑学主要来源于古希腊逻辑学, 特别是亚里士多德的三段论推理。

17世纪, 德国思想家莱布尼兹提出了一种

“通用计算”的思想，使用计算来代替思考，将人类的各种推理和辩论，甚至哲学和伦理问题，表达成符号形式，然后通过符号推理和计算得到的结果，来解决人类之间的争执。他说：“万一发生争执，正好像两个会计员之间无须乎有辩论，两个哲学家也不需要辩论。因为他们只要拿起石笔，在石板前坐下来，彼此说一声（假如愿意，有朋友作证）‘我们来算算’也就行了。”^[1] 莱布尼兹提出的通用计算思想，对于后来数理逻辑的符号推理和计算机科学的数字计算都有重大的影响。

19世纪末，德国思想家弗雷格在《概念文字》^[2]中提出了命题逻辑和谓词逻辑的演算系统，后世称之为经典逻辑系统。这就是数理逻辑的开始。这本书被普遍认为是亚里士多德之后在逻辑学领域最重要的出版物，弗雷格开发他的形式逻辑的动机类似于莱布尼兹对“通用计算”的渴望。后来，英国思想家罗素和怀特海在《数学原理》（*Principia mathematica*）一书中，对于弗雷格的逻辑系统进行了丰富和完善。

弗雷格和罗素尝试使用逻辑来表达集合论和数学，在此过程中罗素发现了著名的“罗素悖论”。罗素悖论揭示，人们对于集合论的直观理解存在矛盾，这直接导致了第三次数学危机。为了应对这次数学危机，数学家大致提出了三种方法：罗素的逻辑主义、布劳维尔的构造主义和希尔伯特的形式主义。其中，布劳维尔的构造主义认为，经典数学中的构造成分是可可靠的，非构造成分则不一定可靠。这种构造的思想影响到后来计算机科学的构造特征。

为了了解构造和计算的本质，数学家们提出了各种计算模型：厄布朗（Herbrand）和哥德尔（Gödel）提出了一阶谓词理论，邱奇（Church）和克林（Kleene）提出了Lambda演算，图灵（Turing）提出了图灵机。有趣的是，这些形式和风格各异的计算模型最后被证明都是计算等价的，也等价于一阶算术 N 上的可表达性。所以，人类直观理解的计算，就被解释为Lambda演算或者图灵机可计算，这就是著名的邱奇—图灵命题（The Church-Turing Thesis）。这是人类至今对于

计算的理解。在这些计算模型中，图灵机以其直观性和易实现性，成为后来电子计算机的理论模型。

回顾历史可以发现，数理逻辑的发展推动着计算机科学的出现，这方面的详细历史可以参阅美国当代逻辑学家戴维斯的《逻辑的引擎》一书^[3]。

计算机科学诞生之后，数理逻辑的发展一直持续地推动着计算机科学相关领域的发展。人工智能创始人McCarthy、倡议程序正确性证明的Dijkstra、程序验证理论先驱Floyd、公理语义学创始人Hoare、指称语义学创始人Scott等学者，都主要（或部分）是由于他们在与计算机相关的数理逻辑领域的研究成果而获得图灵奖。

赵致琢教授在《计算科学导论》中认为：数理逻辑和代数是计算科学的主要基础^[4]。数理逻辑在计算科学中的基础作用主要有以下几个方面。

第一，从计算模型和可计算性的研究来看，可计算函数和可计算谓词（一种能够判定其真值的断言或逻辑公式）是等价的，相互之间可以转化。作为一种数学形式系统，图灵机及其与它等价的计算模型的逻辑基础是坚实的。人工智能领域的一个重要方向就是基于逻辑的人工智能。

第二，在实际计算机的设计与制造中，使用数字逻辑技术实现计算机的各种运算的理论基础是代数和布尔代数。布尔代数只是在形式演算方面使用了代数的方法，其内容的实质仍然是逻辑。

第三，从计算机程序设计语言方面考查，语言的理论基础是形式语言、自动机与形式语义学。而形式语言、自动机和形式语义学所采用的主要研究思想和方法来源于数理逻辑和代数。此外，在语言的语义研究中，4种语义学方法最终可归结为代数和逻辑的方法。而且，程序的语义及其正确性的理论基础仍然是数理逻辑，或进一步的模型论。

第四，在计算机体系结构的研究中，像容错计算机系统、Transputer计算机、阵列式向量计算机、可变结构的计算机系统结构及其计算模型等都直接或间接与逻辑、代数密不可分。如容错计算机的重要基础之一是多值逻辑，Transputer计算机的理论基础是CSP理论，阵列式向量计算机必须以向量运算为基础，可变结构的计算机系统结

构及其计算模型主要采用逻辑与代数的方法。

第五，所有的计算机程序中，算法必须是构造性的，数据结构必须是离散化的，这些特征都来源于数理逻辑与代数的构造性和离散化。此外，迄今为止，程序的语义及其正确性的理论基础仍然是数理逻辑，或进一步的模型论。

第六，对于具有复杂个体和复杂结构的计算问题，有必要利用和发展泛代数和高等逻辑理论，将它们应用于这些复杂和新兴的研究领域。

2 数理逻辑课程教学内容

“数理逻辑基础”是计算机科学与技术专业的核心基础课程，也是学科重点专业基础课程之一，属于教学计划中的必修课程。数理逻辑和代数是计算机科学最重要的数学基础。“数理逻辑基础”课程的先修课程包括：计算科学导论、高等数学（或数学分析、微分方程）、线性代数（或高等代数）、集合论与图论、近世代数，要求学生事先在数学分析和逻辑推理上有充分的训练。“数理逻辑基础”课程的后继课程包括：人工智能、计算理论、高等逻辑、形式语义学、非经典逻辑、容错计算、计算机代数、算法理论、可信计算、计算语言学等本科高年级课程和研究生课程，直接涉及的相关计算机学科研究领域包括：非单调逻辑、模型检测与诊断、信念修正、辩论推理、计算语言学、溯因推理和安全协议的可靠性验证等。

历史上，数理逻辑在发展中受不同数学学派的影响甚深，形成了不同的逻辑学派。各逻辑学派在表达数理逻辑基础内容时，在对内容的选材和表达形式方面存在很大不同，考虑到对计算机科学学科影响较大的是形式主义逻辑学派和直觉主义逻辑学派，因此，课程教学大纲在制定时划分为两个模式。其中，第一模式介绍基于形式主义逻辑学派的数理逻辑基础内容，第二模式介绍基于直觉主义逻辑学派的数理逻辑基础内容。第一模式使用的教材是《数学家的逻辑》（Hamilton，著；骆如枫，陈慕昌，译）^[5]，也可以直接使用原版英文教材*Logic for*

mathematicians。第二模式使用的教材是《数理逻辑基础》（胡世华，陆钟万，著）^[6]。

本课程的教学任务是，以基础数学、计算机科学、科学哲学和人的日常生活为广泛的背景，从形式主义或直觉主义的观点，介绍作为数学基础分支之一的数理逻辑基础知识，帮助学生掌握数理逻辑基础最基本的知识，为今后逐步实现理性层面上的思维方式的数学化打下坚实的基础，为后续课程提供必要的数理逻辑基础。

配合课程的教学，学生应理论联系实际，理论指导实践，通过规范地完成大量“数理逻辑基础”课程习题，进一步巩固所学的相关书本知识，在知识、能力和素质上得到进一步的提高，逐步实现思维方式的数学化。

“数理逻辑基础”课程内容的重点涉及经典逻辑的内容，包括数理逻辑发展概要、命题逻辑系统、一阶谓词逻辑系统、逻辑演算的系统特征、逻辑系统的公理化体系、逻辑系统的系统特征等。通过课程让学生感悟和体会直觉主义学派的科学观，了解形式主义学派的科学观，使学生能够运用这些知识以数理逻辑的观点在经典逻辑范围内解决一些描述、计算和自动推理问题，能够掌握认识一个形式系统的方式与方法。同时，结合科学方法论或学科方法论的内容，能够初步理性地认识一些科学思想方法和数学证明方法的形式化表达形式，使自己的思维过程更加严密，能够逐步实现理性层面上的思维方式的数学化，为后续课程提供必要的数理逻辑基础。此外，逻辑系统也是一种语言，有自己的语法和语义。采用语言的方式介绍逻辑，有利于在方法论方面建立逻辑与语言、逻辑与程序设计、逻辑与计算机科学之间的有机联系。

本课程第一模式的教学内容主要包括以下知识点：命题逻辑的非形式演算、命题逻辑的形式演算L系统、一阶谓词逻辑的非形式演算、一阶谓词逻辑的形式演算K系统、归结原理及其完备性、直觉主义逻辑的介绍、数学系统、相容性与模型、哥德尔不完备性定理。

本课程第二模式的教学内容主要包括以下知识点：数理逻辑概述、命题逻辑、一阶谓词逻辑

辑、逻辑演算的系统特征、逻辑系统的可靠性与完备性、重言式系统、构造性逻辑基础、形式数学系统、哥德尔不完备性定理。

此外，课程还设有可选的数理逻辑与计算机科学的专题介绍：数理逻辑的发展、数理逻辑与计算理论、数理逻辑与算法、数理逻辑与程序设计语言、数理逻辑与程序设计、数理逻辑与人工智能、数理逻辑与计算机硬件系统、数理逻辑与其他分支学科。

3 数理逻辑课程教学方法

数理逻辑是用数学的方法研究思维结构、推理或逻辑问题，特别地，它是研究数学中推理问题的科学。数理逻辑是许多现代科学技术的重要基础。这是因为，一方面，从计算机科学产生之日起，数理逻辑就与代数一起成为学科的两块最重要的基石，对整个学科的发展产生了深远的影响；另一方面，作为逻辑学研究的一个方面，数理逻辑不仅是数学的一个分支，成为数学基础的重要研究内容，又是形式逻辑、科学哲学、人工智能、数字系统与集成电路、语言学、理论科学等诸多学科的重要基础。

由于计算机科学的内涵覆盖了应用数学、逻辑学、科学哲学、人工智能、数字系统与集成电路、语言学等诸多学科的大量内容，因此，开设“数理逻辑基础”课程，讲授内容就不应该仅仅局限于以支撑逻辑推理作为主要目的，毕竟在语言处理中，形式语义学方法和思维结构的哲学研究都广泛使用数理逻辑的方法。当然，作为本科生的教学内容，“数理逻辑基础”的教学内容应该主要围绕经典数理逻辑的内容展开。

在这种认识的基础上，本课程教学的主要特点将是形式化和抽象化，内容既有抽象的形式化描述、严格的理论证明，又有很强的构造性与算法描述特点，这对教与学双方都提出了较高的要求。为了保证教学质量，教学中需要注意以下事项。

(1) 研究思维结构和推理。人们关心的问题是前提和结论之间是否存在一种逻辑推理关系，

如果存在这样一种关系，那么，按照什么方法，在前提为真的情况下，可以推出结论为真。数理逻辑课程教学中要训练学生把握论证中的推理结构，并且表达成符号的形式。

(2) 在数理逻辑中，要分清楚语法和语义两个层面。在语法层面上，逻辑演算为了研究前提和结论之间的形式推理关系而构造的形式系统，具有表示研究对象和对研究对象进行变形的一系列规则，属于形式语言语法的范畴。在语义层面上，需要构造一套证明方法来支持推理过程的正确性证明。推理过程的正确性证明属于形式语言语义的范畴。语法和语义两者之间在建立了相应的联系之后，相互之间可以转化，即语法证明可以用语义证明来表达，语义证明可以用语法证明来表达，这是由经典逻辑的可靠性和完备性所保证的。

(3) 从1930年始，邱奇用Lambda演算表达的递归函数论和后来马丁·戴维斯发展的可计算性理论的内容都表明，可以建立传统计算与谓词逻辑之间的关系，使计算可以用逻辑推理来表达，逻辑推理也可以用计算来表达，并且适当修改和扩充函数取值的论域，传统的计算与推理之间可以实现相互转换。因此，Lambda演算和带类型的Lambda演算在20世纪后期发展很快，推动了计算机科学向纵深发展。建立这样的概念和认识，可为“可计算性与计算复杂性”课程提供必要的基础。

(4) 数理逻辑作为形式逻辑数学化的方面，与思维结构和科学哲学的科学方法论之间存在密切关系。因此，在教学中，应该尽可能在逻辑、逻辑演绎推理的严密性、科学研究方法论的逻辑基础之间建立有机的联系，使学生了解科学思想方法的严密性和科学研究的哲学基础等内容，培养学生今后能够结合自己从事的学科特点，产生理性思考的能力。

(5) 基于形式主义逻辑学派的第一模式，在课程讲授中应强调形式化和公理化的方法，帮助读者更好地理解形式主义逻辑学派的科学观。此外，简要介绍直觉主义逻辑学派对公理化思想方法的处理，以及直觉主义逻辑体系；并简要比较两种逻辑学派的思想方法和逻辑体系。

(6) 基于直觉主义逻辑学派的第二模式，

在课程讲授中应尽可能对一些重要的、基本的概念、公式和结论，给予直观的、直觉主义逻辑的解释，以帮助读者更好地理解直觉主义逻辑学派的科学观。对基于形式主义逻辑学派的公理化思想方法，以及逻辑系统的公理化体系，可以结合重言式系统给予简要的介绍；带构造性证明的自然演绎系统是体现直觉主义逻辑学派思想的一阶逻辑系统的一个范例，这就要求介绍逻辑系统时在自然演绎系统的基础上引入构造性证明。

(7) 对哥德尔不完备性定理，可以根据学生的实际水平视学时数和教学进度来决定是否讲授。数理逻辑与计算机科学的专题介绍，可以根据具体的情况选择不同的内容和学时数。

(8) 鼓励教师结合学科范型（也称范式），将学科方法论的内容融入教学过程之中，以帮助建立与“数理逻辑基础”课程内容相关的科学的思想方法。

本课程的课外教学内容和形式主要由学生读书，任课教师辅导、答疑、批改作业、实践环节等几部分构成，要求学生在有时间的情况下，尽可能完成教材中所有的习题。学生应在任课教师的帮助下，认真听课，反复思考，完成大量作业，在学习中反复进行阅读、思考、做习题，通过阅读、思考、做习题、分析、联想、概括、归纳、总结等多种有效的方式方法，比较全面、准确地掌握课程的主要内容和教学重点。

课程对学生作业的质量要求是正确、简洁和规范。做题正确，意味着学生必须掌握基本概念、基本原理、基本方法、基本技术等课程的基本知识，基本知识不掌握，就很难正确回答问题，这是对学生知识水平和解决问题能力的考核。做题简洁和规范，意味着在正确解题的情况下，不应该存在“拖泥带水”和“东拉西扯”的问题，可反映出学生在这方面是否训练有素，是对学生素质的考核。

“数理逻辑基础”课程的作业量大，并有相当的难度。不经过一定数量习题的练习，想比较深入地掌握其主要内容是困难的。而且本课程之后，学生还将学习一些重要的专业基础课程和专业课程，这些课程也有相当的难度。因此，没有较好的数理

逻辑的知识基础，学习这些课程将是困难的。关键是学生要将过去所学习的知识与本门课程所学的知识建立起联系，用心思考、体会，融会贯通，才能从根本上把握课程的要点，体会数理逻辑知识体系的博大精深和内容的精妙之处。

在多年的数理逻辑教学中，笔者总结出以下几点教学经验。

(1) 介绍数理逻辑和计算机科学的相关发展史、相关的人物生平和贡献，比如亚里士多德、弗雷格、罗素、哥德尔、图灵等人，这样有助于培养学生的专业感情和探索兴趣，也有助于学生更全面地把握学科的发展。

(2) 在教学中结合具体的生活实例，了解逻辑在日常生活中的应用，理解数理逻辑是自然语言中逻辑推理的形式化、符号化，这样有助于培养学生学以致用，能够将理论知识应用于实际的生活世界的能力。

(3) 在教学中强调启发式教育，不是将书本的知识直接灌输到学生的大脑中，而是以问题作为线索，面向问题，分析问题，解决问题，引导学生主动思考和参与互动，这样有助于培养学生的独立思考能力、解决问题的能力 and 创新思维能力。

(4) 虽然本门课程是理论课程，但笔者也鼓励学生去做实验。学生基于词法分析器生成工具 Lex 和生成语法分析器 Yacc，完成了命题公式的范式化、命题公式的自动判定、一阶逻辑公式的前束范式化等实验。通过理论与实践的结合，学生更进一步理解了理论知识，也掌握了将理论知识应用到实践中的技术方法。

4 结语

厦门大学近十年来一直坚持开设“数理逻辑基础”课程。从十年的教学实践来看，数理逻辑教育取得了良好的教学成果，一大批毕业生继续深造，在攻读研究生学位时，处于相对的优势地位，其中，有一部分学生已经做出了高水平的科研成果。学生通过该课程的学习，加深了对于计

(下接第94页)

3.4 纠正错误观念，培养竞争意识

目前，少数民族学生对计算机的学习普遍缺乏主动性^[7]。从客观上来说，是因为教师教学方法落后、教学过程缺乏吸引力，不能调动学生学习积极性，学生不爱学；主观上则是因为新疆少数民族学生没有充分认识到计算机知识的重要性和必要性，缺乏求知欲，也缺乏足够的竞争意识，在计算机学科学习过程中不愿吃苦、不愿尽力。笔者认为，教师在教学过程中应不断强调和灌输自学能力对个人的成长与发展的重要性的思想，尤其是在人类知识更新换代如此之快的时代，只有具备足够的自学能力才能坦然面对当前的就业形势和面临的各种挑战。

4 结语

新疆少数民族工科非计算机专业学生学习计算机课程具有重要的现实意义，应给予充分的重视。在计算机课程教学中，既要考虑少数民族学生特点及课程特点，重视学生及专业差异性，因材施教；同时也要合理安排课程设置，精炼课程

内容，加强实践环节，使得课堂教学质量和效果得到提高，实现教学目标。

【参考文献】

- [1] 单博炜，陈晓飞，郭兰英．包含少数民族学生的计算机专业的教学思路探讨[J]．教育教学论坛，2012（2）：249-250．
- [2] 陈峦，马小洁，姜波，等．新疆少数民族工科专业的计算机课程教学研究[J]．教育与教学研究，2009（24）：62-65．
- [3] 吴福环．新疆少数民族高等教育的现状与发展对策[J]．新疆社会科学，2003（6）：68-73．
- [4] 王润云．计算机基础课程教学改革与实践[J]．教育发展研究，2003（2）：90-91．
- [5] 张玉琴．计算机信息技术的教学手段和教学方法改革的探索[J]．中国科教创新导刊，2008（19）：158．
- [6] 马小晶，胡中华．针对新疆地区高校少数民族学生工科教学方法初探[J]．山东电力高等专科学校学报[J]．2002，15（3）：56-59．
- [7] 林旺．在教学实践中提高少数民族大学生计算机的应用能力和自学能力[J]．民族教育研究，2006，17（4）：21-24．

（上接第63页）

算机学科的理解，掌握了数理逻辑的分析工具，为后续相关课程打下了可靠的基础，也为逻辑相关的科学研究做好了充分的知识储备。

【参考文献】

- [1] 罗素，著；张作成，编译．西方哲学史[M]．北京：北京出版社，2007．
- [2] 弗雷格．概念文字：一种模仿算术语言构造的纯思维的形式语言[G]//弗雷格哲学论著选辑[M]．北京：

商务印书馆，1994．

- [3] 马丁·戴维斯，著；张卜天，译．逻辑的引擎[M]．长沙：湖南科学技术出版社，2005．
- [4] 赵致琢．计算科学导论[M]．北京：科学出版社，1998．
- [5] A.G.Hamilton，著；骆如枫，陈慕昌，译．数学家的逻辑[M]．北京：商务印书馆，1989．
- [6] 胡世华，陆钟万．数理逻辑基础（上，下册）[M]．北京：科学出版社，1981．