

张景中 / 主编

走进 教育数学

Go to Educational Mathematics

几何新方法和新体系

几何证题无定法的时代结束了！

张景中 / 著



科学出版社

www.sciencep.com

“十一五”国家重点图书出版规划项目

走进教育数学

Go to Educational Mathematics

几何新方法和新体系

张景中 / 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书分上下两篇. 上篇通俗地阐述了作者所开创的几何解题的“消点法”. 用这个方法可以机械地判定所谓“等式型可构造几何命题”的真假. 命题成立时还能够产生人容易检验和理解的证明, 即可读证明. 书中先引入作者所发展的系统面积方法的两个基本工具, 即共边定理和共角定理. 接着在共边定理的基础上把面积方法算法化, 系统地建立了面积消点方法. 此外还进一步指出, 消点不限于面积法, 在全角法、三角法、向量法以及复数法的基础上也能建立消点法. 下篇则对几何公理体系提出了新的见解, 指出传统的欧几里得公理体系和希尔伯特公理体系的不足, 并提出一个与面积法相适应的平面几何公理体系, 证明了这个体系和希尔伯特公理体系的等价性.

本书可供中学数学教师、师范院校数学教师、数学爱好者、数学奥林匹克工作者和参赛者以及数学研究工作者参考.

图书在版编目(CIP)数据

几何新方法和新体系 / 张景中著. —北京: 科学出版社, 2009
(走进教育数学/张景中主编)

ISBN 978-7-03-025042-1

I. 几… II. 张… III. 几何学—教学研究 IV. O18-4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 120429 号

丛书策划: 李 敏

责任编辑: 李 敏 / 责任校对: 陈玉凤

责任印制: 钱玉芬 / 整体设计: 黄华斌

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 8 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2009 年 8 月第一次印刷 印张: 17 1/4

印数: 1—6 000 字数: 300 000

定价: 35.00 元

如有印装质量问题, 我社负责调换

《走进教育数学》丛书编委会

主 编 张景中

委 员 (按汉语拼音排序)

李尚志 林 群 沈文选 谈祥柏

王鹏远 张奠宙 张景中 朱华伟

总 序

看到本丛书，多数人会问这样的问题：

“什么是教育数学？”

“教育数学和数学教育有何不同？”

简单说，改造数学使之更适宜于教学和学习，是教育数学为自己提出的任务。

把学数学比作吃核桃。核桃仁美味而富有营养，但要砸开才能吃到它。有些核桃，外壳与核桃仁紧密相依，成都人形象地叫它们“夹米子核桃”，如若砸不得法，砸开了还很难吃到。数学教育要研究的，就是如何砸核桃吃核桃。教育数学呢，则要研究改良核桃的品种，让核桃更美味，更营养，更容易砸开吃净。

“教育数学”的提法，最早出现在笔者 1989 年所写的《从数学教育到教育数学》中。其实，教育数学的活动早已有之，如欧几里得著《几何原本》，柯西写《分析教程》，都是教育数学的经典之作。

数学教育有很多世界公认的难点，如初等数学里的几何和三角，高等数学里面的微积分，都比较难学。为了对付这些难点，

很多数学老师、数学教育专家前赴后继，做了大量的研究，写了很多的著作，进行了广泛的教学实践。多年实践，几番改革，还是觉得太难，不得不“忍痛割爱”，少学或者不学。教育数学则从另一个角度看问题：这些难点的产生，是不是因为前人留下来的知识组织得不够好，不适于数学的教与学？能不能优化数学，改良数学，让数学知识变得更容易学习呢？

知识的组织方式和学习的难易有密切的联系。英语中 12 个月的名字：January, February, ……。背单词要花点工夫吧？如果改良一下：一月就叫 Monthone，二月就叫 Monthtwo，等等，马上就能理解，就能记住，学起来就容易多了。生活的语言如此，科学的语言——数学——何尝不是这样呢？

很多人认为，现在小学、中学到大学里所学的数学，从算术、几何、代数、三角到微积分，都是几百年前甚至几千年前创造出来的数学。这些数学的最基本的部分，普遍认为是经过千锤百炼，相当成熟了。对于这样的数学内容，除了选择取舍，除了教学法的加工之外，还有优化改革的余地吗？

但事情还可以换个角度看。这些进入了课堂的数学，是在不同的年代，不同的地方，由不同的人，为不同的目的而创造出来的，而且其中很多不是为了教学的目的而创造出来的。难道它们会自然而然地配合默契，适宜于教学和学习吗？

看来，这主要不是一个理论问题，而是一个实践问题。

走进教育数学，看看教育数学在做什么，有助于回答这类问题。

随便翻翻这几本书，就能了解教育数学领域里近 20 年来做了哪些工作。从已有的结果看到，教育数学有事可做，而且能做更多的事情。

比如微积分教学的改革，这是在世界范围内被广为关注的事。丛书中有两本专讲微积分，主要还不是讲教学方法，而是讲改革微积分本身。

由牛顿和莱布尼茨创建的微积分，是第一代的微积分。这是

说不清楚的微积分. 创建者说不清楚, 使用微积分解决问题的数学家也说不清楚. 原理虽然说不清楚, 应用仍然在蓬勃发展. 微积分在说不清楚的情形下发展了 130 多年.

柯西和魏尔斯特拉斯等建立了严谨的极限理论, 巩固了微积分的基础, 形成了第二代的微积分. 数学家把微积分说清楚了. 但是由于概念和推理繁琐迂回, 对于绝大多数学习高等数学的人来说, 是听不明白的微积分. 微积分在多数学习者听不明白的情形下, 又发展了 170 多年, 直到今天.

第三代的微积分, 是正在创建发展的新一代的微积分. 人们希望微积分不但严谨, 而且直观易懂, 简易明快. 让学习者用较少的时间和精力就能够明白其原理, 不但知其然而且知其所以然. 不但数学家说得清楚, 而且非数学专业的多数学子也能听得明白.

第一代微积分和第二代微积分, 在具体计算方法上基本相同; 不同的是对原理的说明, 前者说不清楚, 后者说清楚了.

第三代微积分和前两代微积分, 在具体计算方法上也没有不同; 不同的仍是对原理的说明.

几十年来, 国内外都有人从事第三代微积分的研究以至教学实践. 这方面的努力, 已经有了显著的成效. 在我国, 林群院士近 10 年来在此方向做了大量的工作. 本丛书中的《微积分快餐》, 就是他在此领域的代表作.

古今中外, 通俗地介绍微积分的读物极多, 但能够兼顾严谨与浅显直观的几乎没有. 《微积分快餐》做到了. 一张图, 一个不等式, 几行文字, 浓缩了微积分的精华. 作者将微积分讲得轻松活泼、简单明了而且严谨自封, 让读者在品尝快餐的过程中进入了高等数学的殿堂.

丛书中还有一本《直来直去的微积分》, 是笔者学习微积分的心得. 书中从“瞬时速度有时比平均速度大, 有时比平均速度小”这个平凡的陈述出发, 不用极限和实数, “微分不微, 积分不积”, 直截了当地建立了微积分基础理论. 书中概念与《微积

分快餐》中的逻辑等价而呈现形式不尽相同，殊途同归，显示出第三代微积分的丰富多彩。

回顾历史，牛顿和拉格朗日都曾撰写著作，致力于建立不用极限也不用无穷小的微积分，或证明微积分的方法，但没有成功。我国数学大师华罗庚所撰写的《高等数学引论》中，也曾刻意求新，不用中值定理或实数理论而寻求直接证明“导数正则函数增”这个具有广泛应用的微积分基本命题，可惜也没有达到目的。

前辈泰斗是我们的先驱。教育数学的进展实现了先驱们简化微积分理论的愿望。

iv 两本关于微积分的书，都专注于基本思想和基本概念的改革。基本思想、基本概念，以及在此基础上建立的基本定理和公式，是这门数学的筋骨。数学不能只有筋骨，还要有血有肉。中国高等教育学会教育数学专业委员会理事长、全国名师李尚志教授的最新力作《数学的神韵》，是有血有肉、丰满生动的教育数学。书中的大量精彩实例可能是你我熟悉的老故事，而作者却能推陈出新，用新的视角和方法处理老问题，找出事物之间的联系，发现不同中的相同，揭示隐藏的规律。幽默的场景，诙谐的语言，使人在轻松阅读中领略神韵，识破玄机。看看这些标题，“简单见神韵”、“无招胜有招”、“茅台换矿泉”、“凌波微步微积分”，可以想见作者的功力非同一般！特别值得一提的是，书中对微积分的精辟见解，如用代数观点演绎无穷小等，适用于第一代、第二代和第三代微积分的教学与学习，望读者留意体味。

练武功的上乘境界是“无招胜有招”，但武功仍要从一招一式入门。解数学题也是如此。著名数学家和数学教育家项武义先生说，教数学要教给学生“大巧”，要教学生“运用之妙，存乎一心”，以不变应万变，不讲或少讲只能对付一个或几个题目的“小巧”。我想所谓“无招胜有招”的境界，就是“大巧”吧！但是，小巧固不足取，大巧也确实太难。对于大多数学子，还要重视有章可循的招式，由小到大，以小御大，小题做大，小中见

大. 朱华伟教授和钱展望教授的《数学解题策略》, 踏踏实实地从一招一式一题一法着手, 探秘发微, 系统地阐述数学解题法门, 是引领读者登堂入室之作. 作者是数学奥林匹克领域的专家. 数学奥林匹克讲究题目出新, 不落老套. 我看了这本书里的不少例题, 看不出有哪些似曾相识, 真不知道他是从哪里搜罗来的!

朱华伟教授还为本丛书写了一本《从数学竞赛到竞赛数学》. 竞赛数学当然就是奥林匹克数学. 华伟教授认为, 竞赛数学是教育数学的一部分. 这个看法是言之成理的. 数学要解题, 要发现问题、创造方法. 年复一年进行的数学竞赛活动, 不断地为数学问题的宝库注入新鲜血液, 常常把学术形态的数学成果转化为可能用于教学的形态. 早期的国际数学奥林匹克试题, 有不少进入了数学教材, 成为例题和习题. 竞赛数学与教育数学的关系, 于此可见一斑.

写到这里, 忍不住要为数学竞赛说几句话. 有一阵子, 媒体上出现不少讨伐数学竞赛的声音, 有的教育专家甚至认为数学竞赛之害甚于黄赌毒. 我看了有关报道后第一个想法是, 中国现在值得反对的事情不少, 论轻重缓急还远远轮不到反对数学竞赛吧. 再仔细读这些反对数学竞赛的意见, 可以看出来, 他们反对的实际上是某些为牟利而又误人子弟的数学竞赛培训. 就数学竞赛本身而言, 是面向青少年中很小一部分数学爱好者而组织的活动. 这些热心参与数学竞赛的数学爱好者 (还有不少数学爱好者参与其他活动, 例如青少年创新发明活动、数学建模活动、近年来设立的丘成桐中学数学奖), 估计不超过约两亿中小学生的百分之五. 从一方面讲, 数学竞赛培训活动过热产生的消极影响, 和升学考试体制以及教育资源分配过分集中等多种因素有关, 这笔账不能算在数学竞赛头上; 从另一方面看, 大学招生和数学竞赛挂钩, 也正说明了数学竞赛活动的成功因而得到认可. 对于青少年的课外兴趣活动, 积极的对策不应当是限制堵塞, 而是开源分流. 发展多种课外活动, 让更多的青少年各得其所, 把各种活动都办得像数学竞赛这样成功并且被认可, 数学竞赛培训活动过

热的问题自然就化解或缓解了。

回到前面的话题。上面说到“大巧”和“小巧”，自然想到还有“中巧”。大巧法无定法，小巧一题一法。中巧呢，则希望用一个方法解出一类题目。也就是说，把数学问题分门别类，一类一类地寻求可以机械执行的方法，即算法。中国古代的《九章算术》，就贯穿了分类解题寻求算法的思想。中小学里学习四则算术、代数方程，大学里学习求导数，学的多是机械的算法。但是，自古以来几何命题的证明却千变万化，法无定法。为了找寻几何证题的一般规律，从欧几里得、笛卡儿到希尔伯特，前赴后继，孜孜以求。我国最高科技奖获得者、著名数学家吴文俊院士指出，希尔伯特是第一个发现了几何证明机械化算法的人。在《几何基础》这部名著中，希尔伯特对于只涉及关联性质的这类几何命题，给出了机械化的判定算法。由于受时代的局限性，希尔伯特这一学术成果并不为太多人所知。直到1977年，吴文俊先生提出了一个新的方法，可以机械地判定初等几何中等式型命题的真假。这一成果在国际上被称为“吴方法”，它在几何定理机器证明领域中掀起了一个高潮，使这个自动推理中最不成功的部分变成了最成功的部分。

吴方法和后来提出的多种几何定理机器证明的算法，都不能给出人们易于检验和理解的证明，即所谓可读证明。国内外的专家一度认为，机器证明的本质在于“用量的复杂克服质的困难”，所以不可能机械地产生可读证明。

笔者基于1974年在新疆教初中时指导学生解决几何问题的心得，总结出用面积关系解题的规律。在这些规律的基础上，1992年提出消点算法，和周咸青、高小山两位教授合作，创建了可构造等式型几何定理可读证明自动生成的理论和方法，并在计算机上实现。最近在网上看到，面积消点法也多次在国外的不同的系统中实现了。本丛书中的《几何新方法和新体系》，包括了面积消点法的通俗阐述，以及笔者提出的一个有关面积方法的公理系统，由冷拓同志协助笔者整理成书。教育数学研究的副产

品解决了机器证明领域中的难题，对笔者而言实属侥幸。

基于对数学教育的兴趣，笔者从1974年以来，在30多年间持续地探讨面积解题的规律，想把几何变容易一些。后来发现，国内外的中学数学教材里，已经把几何证明删得差不多了。于是“迷途知返”，把三角作为研究的重点。数学教材无论如何改革，三角总是删不掉的吧。本丛书中的《一线串通的初等数学》，讲的是如何在小学数学知识的基础上建立三角，以三角的发展引出代数工具并探索几何，把三者串在一起的思路。

在《一线串通的初等数学》中没有提到向量。其实，向量早已下放到中学，与传统的初等数学为伍了。在上海的数学教材里甚至在初中就开始讲向量。讲了向量，自然想试试用向量解决几何问题，看看向量解题有没有优越性。可惜在教材里和刊物上出现的许多向量例题中，方法略嫌繁琐，反而不如传统的几何方法简捷优美。如何用向量法解几何题？能不能在大量的几何问题的解决过程中体现向量解题的优越性？这自然是教育数学应当关心的一个问题。为此，本丛书推出一本《绕来绕去的向量法》。书中用大量实例说明，如果掌握了向量解题的要领，在许多情形下，向量法比纯几何方法或者坐标法干得更漂亮。这要领，除了向量的基本性质，关键就是“回路法”。绕来绕去，就是回路之意。回路法是笔者的经验谈，没有考证前人是否已有过，更没有上升为算法。书稿主要由彭翥成同志执笔，绝大多数例子，也是他采集加工的。

谈起中国的数学科普，谈祥柏的名字几乎无人不知。老先生年近八旬，从事数学科普创作超过半个世纪，出书50多种，文章逾千篇。对于数学的执著和一生的爱，洋溢于他为本丛书所写的《数学不了情》的字里行间。哪怕仅仅信手翻上几页，哪怕是对数学知之不多的中小学生，也会被一个个精彩算例所显示的数学之美和数学之奇深深吸引。书中涉及的数学知识似乎不多不深，所蕴含的哲理却足以使读者掩卷遐想。例如，书中揭示出高等代数的对称、均衡与和谐，展现了古老学科的青春；书中提到

海峡两岸的数学爱好者发现了千百年来从无数学者、名人的眼皮底下滑过去的“自然数高次方的不变特性”，这些生动活泼的素材，兼有冰冷的思考与火热的激情，无论读者偏文偏理，均会有所收益。

沈文选教授长期从事中学数学研究、初等数学研究、奥林匹克数学研究和教育数学的研究。他的《走进教育数学》和本丛书同名，是一本从学术理论角度探索教育数学的著作。在书中他试图诠释“教育数学”的概念，探究“教育数学”的思想源头与内涵；提出“整合创新优化”、“返璞归真优化”等优化数学的方法和手段；并提供了丰富的案例。笔者原来杜撰出“教育数学”的概念，虽然有些实例，但却凌乱无序，不成系统。经过文选教授的旁征博引，诠释论证，居然有了粗具规模的体系框架，有点学科模样了。这确是意外的收获。

浏览着这风格不同并且内容迥异的10本书，教育数学领域的现状历历在目。这是一个开放求新的园地，一个蓬勃发展的领域。在这里耕耘劳作的人们，想的是教育，做的是数学，为教育而研究数学，通过丰富发展数学而推进教育。在这里大家都做自己想做的事，提出新定义新概念，建立新方法新体系，发掘新问题新技巧，寻求新思路新趣味，凡此种种，无不是为教育而做数学。

为教育而做数学，做出了些结果，出了这套书，这仅仅是开始。真正重要的是进入教材，进入课堂，产生实效，让千千万万学子受益，进而推动社会发展，造福人类。这才是作者们和出版者的大期望。切望海内外同道者和不同道者指正批评，相与切磋，共求真知，为数学教育的进步贡献力量。



2009年7月

前言

平面几何历史悠久，其中的问题千变万化、丰富多彩。历史上一些杰出的数学家，为寻求能够解决大量几何问题的通用方法，进行了持续的探究。

公元前约 300 年，欧几里得将当时人们所掌握的相当丰富却杂乱无章的几何知识熔于一炉，写成流传千古的《几何原本》（欧几里得，2005）。《几何原本》从一组公理出发，将数百个几何命题井然有序地展现出来，并且形成了以全等三角形和相似三角形为主干的几何解题基本模式。这是寻求能够解决大量几何问题的通用方法的早期的成果。

以全等三角形和相似三角形为主干的几何解题基本模式流传至今，依然为大家所学所用，是数学爱好者喜闻乐见的基本的几何方法。但这种模式的具体应用却因题而异，有赖于巧思而无常规可循。

17 世纪,笛卡儿创立了坐标方法.用坐标方法可以把千变万化的几何问题化为比较有章可循的代数问题.这是数学家寻求解决几何问题的通用方法的又一重大进展.但是,化成了代数问题,并不等于就能够按部就班地解决.如何处理几何问题转化出来的代数问题,仍需努力.

跨 19 世纪、20 世纪的数学家希尔伯特,在他的名著《几何基础》(希尔伯特,1987)中,曾经给出了解决一类几何问题的通用方法.吴文俊院士指出,这是第一个解决几何问题的机械化算法.可惜希尔伯特的方法适用范围太小,只能处理涉及关联性质的命题.

计算机出现后,更多数学家研究几何解题的通用方法,特别是可以用计算机实现的方法.直到 1977 年,吴文俊院士在《中国科学》杂志上发表了题为“初等几何判定问题与机械化证明”的论文(吴文俊,1997),这个领域才有了大的突破.1988 年,周咸青在他的专著(Chou, 1988)中用吴先生的方法检验了 500 多条非平凡的几何定理.吴方法在国际上获得高度评价.在吴先生卓越成果的影响下,作者于 1986 年开始投身于机器证明的研究.

使用吴方法,大量的等式型几何命题可以在很短的时间内被判定是否成立.但不能给出容易理解和检验的证明,即所谓“可读证明”.在 1992 年之前,专家们普遍认为用计算机自动生成几何定理的可读证明是不可能的.

作者出于对数学教育的兴趣,自 1974 年以来,长期关注面积方法.正是对面积方法的研究,促使作者在 1988 年形成了教育数学的思想(张景中,曹培生,2005).1992 年

作者应周咸青邀请访美时，将面积方法发展为消点法 (Zhang et al., 1992)，实现了用计算机自动生成几何定理的可读证明。

这一工作也是作者承担攀登计划项目“机器证明及其应用”的研究成果的一部分。此项目首席专家吴文俊院士对此工作给以极大的鼓励和支持。书中的消点法，正是在吴消元法的启发之下产生的。作者在此对吴先生表示崇高的敬意和衷心的感谢。

消点法适用于构造性等式型几何命题的判定，判定为真时就生成可读的证明。常见的绝大多数几何定理属于构造性等式型几何命题类。在专著 (Chou et al., 1994) 中详细地阐述了消点法，并列举了近 500 条用消点法证明的几何定理，其中多数附有计算机自动生成的证明。仅仅根据这些简捷优美的证明，很难判断是计算机生成的还是人想出来的。

本书上篇是消点法的通俗而简要的介绍。消点法可以用计算机实现，也可以用笔在纸上进行。书中绝大多数例题，都曾在计算机上运行过，其结果与书中所写大体相同。基本方法和不少例题取自作者和在这一研究工作的合作者周咸青、高小山共同完成的英文研究报告。作者谨向周、高两位先生致以诚挚的感谢。

本书的下篇，转向对几何公理体系的探讨。作者希望建立一个和面积法以至于和消点法有更紧密联系的公理体系。

从数学教育的观点和实用的目的看，几何学不一定要从公理出发。正如吴文俊先生所说：“中国古代的几何学，

没有公理体系，但是有原理。例如，出入相补原理等等。中学几何课上，讲公理不如讲原理，例如三角形全等的条件，就是一个原理。我们选择若干原理，将几何内容串起来，比公理系统要好。一部经典力学，就是从三大定律（三个原理）推演而来。也有人认为，从原理出发不严格，使用公理体系才能做到严格，这是唬人骗人。”（吴文俊，2009）

确实，人们往往夸大了几何公理的作用。几何的力量不在于公理而在于方法。说欧几里得从几条公理出发建立起严整的体系，是相对于他之前的工作而言。如果真正靠他的公理，不靠直观，不靠前人积累的技巧和方法，《几何原本》的逻辑推理是很难展开的。在《几何原本》中尽管力图实践公理化的思想，实际上漏洞颇多。希尔伯特的《几何基础》，虽然实现了欧几里得公理体系的严谨化，但又失之繁琐，以至于没有谁愿意在他的“基础”上去重建几何的大厦。这一名著推动了数学中公理化的思潮，对几何的发展却没有起很大的作用。两千多年来，尽管有许多大师——欧几里得、笛卡儿、希尔伯特以至柯尔莫哥洛夫等为之辛勤地工作，但欧几里得几何的水平，从方法论的角度看，仍然停留在四则杂题的阶段。教几何的老师，说不清学了这些几何知识究竟能够解决些什么样的问题，是因为书上说不清，因为几何学家本来就说不清。这个从教育的角度或方法论的角度看来大问题，靠研究公理是无法解决的。

正因为如此，本书上篇致力于发展新方法，致力于

把初等几何从小学四则杂题的水平发展到代数方程的阶段。下篇关于公理体系的研讨，相对来说不如上篇重要，不过是适应传统兴趣的一些探索。

本书的写法，主要不是展示作者所得的结论，而是力图重现作者的思维过程，吸引读者一同思考和讨论。对几何公理体系有兴趣的读者不难看到，书中提出的新的公理体系，由于和先进的方法紧密联系，比起以前的体系，有明显的优越性。

书中的内容主要是作者近 20 年的新成果，不够成熟、完善之处在所难免，诚望指正。从纯学术的观点看，读者还能从中发现或发掘出有研究价值的问题，进一步发展这方面的工作，这更是作者的期望。



2009 年 3 月 3 日