

# 数学讲义

LeeStars

2025.07.10

## 目录

1 序言	1
2 必须知识	2
2.1 集合/集合论	2
2.2 数集/数域	3
3 关于平面几何的扩展	3
3.1 关于证明	3
3.2 关于矩形、菱形和正方形	4
3.3 关于平面几何	4

## 1 序言

数学这门课程，本身就是一个无穷无尽的知识库，一个人穷尽一生也无法将其完全理解、领会。但是，从小学到中学，从初中到高中，我们经历的是一次又一次对数学体系的重构，对数学概念的剖析和再定义。初中数学的重点更加侧重于“数形结合”等思维的培养上，但是现在却越来越习惯于公式化地做题。这显然是不利于数学这门自然科学的学习的。

举一个最简单的例子：初中的课程，包括数的划分、函数、几何等等，是严格局限在课本定义和定理范围内的。但是，有没有人可以问出：“为什么要这样划分数字？”“这样的划分是否合理？”“函数能不能反映更多事物之间的关系？”“函数只能有一个自变量吗？”“三角形的内角和一定是  $180^\circ$  吗？”等等诸如此类的问题？

于是，借一位我很尊敬的助教的话：“我们要以一种‘高观点’来解决低问题。”所谓“高观点”，是从一个知识点的根本出发，一步一步推导出表象，解释“为什么”和“凭什么”的合理性问题。

奈何本人学识浅薄，只能以我目前掌握的知识，尽可能架构出一套完整的知识体系（当然是以高中知识为基础）。

高中数学的一大任务就是对初中的概念进行“再定义”，通过“集合论”这一近代数学的基石，让所有概念通过“集合”这一概念来定义。再辅以向量、导数等工具，使之自洽。所以，我将尽可能将初、高中的知识串联在一条主线上，考虑每个概念、定义从何而来、为何而来，在这个过程中补充必要的知识点。

最后，我希望你，无论是谁，都可以保留这最原初的、对数学之美最本质的热爱，坚持下去。哪怕你以后所学的专业、从事的职业和数学毫无关系，你在其中获得的思想、观点乃至你的审美，都在潜移默化地改变着你。

愿这集全人类智慧的学科能够至少对你产生一点点影响。

## 2 必须知识

### 2.1 集合/集合论

先简要介绍一下集合论的基本概念：

**定义 1 (集合论)** 集合论是研究“集合”这一基本对象的一个分支。

**定义 2 (集合)** 集合，简称集，是指具有某种特定性质的具体的或抽象的对象汇总而成的集体。通常用大写字母表示。

集合具有确定性、互异性和无序性。

(以下仅方便记忆，非标准描述。下文中如果不强调定义或定理，均为非正式描述。)

- 确定性：元素与集合的关系一定是“属于”或“不属于”，不存在模棱两可的关系；
- 互异性：同一集合内元素不重复；
- 无序性：同一集合内元素顺序不重要。

先来介绍一个特殊的集合——空集（没有元素的集合）： $\phi$

然后看看怎么表示一个集合：

- 例举法：将集合中的每个元素都写出来，放在大括号里，以逗号分隔。  
例如：光的三原色 {红，蓝，绿}，1 到 10 以内的质数 {2, 3, 5, 7}
- 描述法：明确指出元素及其性质。  
例如：直线  $y=2x+1$  图像上所有的点  $\{(x,y)|y=2x+1\}$
- 图像法（Venn 图法），即用 Venn 图来表示集合及其之间的关系。
- 区间法：专用于数集，便于划分。
- 符号法：特殊集合。

接下来考虑集合中的元素与集合、集合与集合的关系：

集合中的元素与集合的关系分为属于 ( $\in$ ) 和不属于 ( $\notin$ )。(若元素在右而集合在左，则符号反向。) 顾名思义，这一关系即反映元素是否存在于该集合中。

集合与集合的关系有包含/包含于 ( $\supseteq / \subseteq$ ) 和真包含/真包含于。

**定义 3 (子集)** 若  $\forall x \in A$ ，都有  $x \in B$ ，则称  $A$  是  $B$  的一个子集。记为  $A \subseteq B$ 。

**定义 4 (真子集)** 若  $\forall x \in A$ ，都有  $x \in B$ ，且  $\exists x \in B$ ，有  $x \notin A$ ，则称  $A$  是  $B$  的一个真子集。记为  $A \subsetneq B$

至于集合的运算、补集、交集、并集乃至容斥原理，暂时不做介绍。(如果再补充的话那就在这之后补吧)

集合是一种抽象的结构，虽然我们后面接触到的集合几乎全部都是数集，但这不代表集合内的元素不能是其他东西。如果在一个集合中定义好各种运算和封闭性，还可以构造出相应的“群”、“环”和“域”等概念，乃至推广到线性空间。

而从计算机科学（我的专业）来看，无论是数据的布尔运算、位运算还是信息的存储、读取，同样离不开集合论的表达；用集合的形式及其之间的关系来表示其他领域的知识，正是集合论作为近代数学基石的体现

接下来，我们将进一步讨论各种数集，这不仅是会重构一次数的定义，也将引申出一个由小学至高中贯穿始终的数学思路：“扩域”。

## 2.2 数集/数域

从小学至今，我们研究的数字从正整数  $\mathbb{Z}^+$ ，到整数  $\mathbb{Z}$ ，到有理数  $\mathbb{Q}$ ，再到实数  $\mathbb{R}$ ……后者总是包含前者，从集合的角度来看，就像是我们一次又一次地跳出原有的集合，然后进入/扩大到一个范围更大的集合。我称之为“扩域”，意为“数域/数集的扩大”。

数集这部分没什么要讲的，就是将同一类数字放在一起，作为一个集合，然后给他起一个名字就行了。我们需要考虑的是，到底是什么促使我们一次又一次地扩大概念。从正整数到整数，我们经历了“负数”；从整数到有理数，我们经历了“分数”；从有理数到实数，我们经历了“无理数”；包括加入高中后，从实数集  $\mathbb{R}$  到全数集/复数集  $\mathbb{C}$ ，我们会经历“复数/虚数”。

那么，这些让我们扩大数集的概念又从何而来？“负数”来自人类对盈亏的理解，需要负数来表示亏损；“分数”来自于对不可分之划分，来表示均分后的结果；“无理数”来自勾股定理后对斜边长度的质疑，以此表示非平方数的开方；以及“复数”，诞生于三次方程的求根过程，而保证了二次方程一定有两个根，是不可开方数之开方，以契合所谓“代数基本定理”。

**定理 1 (代数基本定理)** 任何复系数一元  $n$  次多项式方程在复数域上至少有一根，并由此推出， $n$  次复系数多项式方程在复数域内有且只有  $n$  个根（重根按重数计算）。

虽然写在纸上仅寥寥几句，但在数学史上，却是人类几千年经验和思想的集合。这一部分借鉴了我的数学史课老师的讲义，但是，我们一定要知道这些东西从何而来。高中时我特别喜欢记数学史和化学史，前人的思路、方法同样值得我们学习。剩下的也就没什么要讲的了。

## 3 关于平面几何的扩展

这一部分是对《特殊平行四边形》这一章的扩展。

### 3.1 关于证明

证明题无非三种方法：由因及果、由果溯因、两向夹逼。

由因及果是初中接触最多的方法，从题目给出的，或者暗示的信息条件来一步一步推导出需要求证的命题。这个过程需要的是长时间使用后产生的条件反射和经验，以及逆向思维主导的对证明过程充分性的验证。

由果溯因则是反向推导，常见的就是反证法，即通过否定结论来推出条件的不可避免的矛盾。这个过程之所以合理，是因为存在“原命题和逆否命题是等价命题”这一约束。（该约束证明详见罗素公理体系）

两向夹逼则是两者的结合，其过程是试图找出一个良好的中间态，达到“条件  $\rightarrow$  中间态  $\leftarrow$  待证明命题”的效果。实际上这个过程非常复杂，因为这个过程不仅要求题目条件是中间态的充分条

件，还一定程度上要求中间态与结论等价。不过好在初中的逻辑关系几乎全是充分必要条件的推导，所以暂时不需要关注。

### 3.2 关于矩形、菱形和正方形

这三个图形的特点及其关系无需赘述，不过，我们可以通过上文“集合”的视角重新审视它们。我们可以将“所有的平行四边形”、“所有的矩形”、“所有的菱形”和“所有的正方形”视为四个集合，分别记为： $\mathbb{P}$ (parallelogram)、 $\mathbb{R}$ (rectangle)、 $\mathbb{L}$ (lozenge) 和  $\mathbb{S}$ (square)，则会有如下关系：

- $\mathbb{S} \subsetneq \mathbb{R} \subsetneq \mathbb{P}$
- $\mathbb{S} \subsetneq \mathbb{L} \subsetneq \mathbb{P}$

从这个视角来看，证明过程相当于缩小集合的过程，通过已知条件来一点一点缩小范围。（当然，这几个符号是我现想的，绝对不是实际符号，实际上也没有标准符号。）

### 3.3 关于平面几何

如你所见，现有的所有证明其实都是在平面上进行。平面几何大多不难，但是可以出的非常复杂。这一点尤其体现在每年全国高中生数学联赛（B 卷）省级赛 B 部分的第一题。出现多条辅助线、辅助圆都是家常便饭。当然，初中的题目简直就是标准流程，做多了以后，哪个条件需要怎么处理都是一目了然的。

辅助线多见于对现有条件的加以利用，例如：知道中点后很大概率要做中位线来使用中位线定理；证明面积关系大概率要做出高线或延长底边来找到等量关系。这算是一种长期积累的经验。

平面几何的关系在高中的立体几何中同样成立，因为它们同属于所谓“欧几里得空间”：

**定义 5 (欧几里得空间)** 有限维实内积空间即称为欧几里得空间。

维度有限、可度量、限制在实数范围就是其特点。 $n$  维的欧几里得空间记为  $\mathbb{R}^n$ ，初中的研究范围就是  $\mathbb{R}^2$ ，而高中就是  $\mathbb{R}^3$ 。

除此之外的空间统称“非欧空间”，其中并不遵循欧几里得的五大公理，自然现在所学的定理、规律也无法使用。举一个最简单的例子：你能找出内角和  $270^\circ$  的三角形吗？

**定理 2 (欧几里得五条公理)** 这五条公理（注：与 5 条公设不同）记录在《几何原本》上，第五条至今仍存在争议：

- 过相异两点，能作且只能作一直线。（直线公理）
- 线段可以任意地延长。
- 以任一点为圆心、任意长为半径，可作一圆。（圆公理）
- 凡是直角都相等。（角公理）
- 两直线被第三条直线所截，如果同侧两内角和小于两个直角，则两直线则会在该侧相交。

实际上，欧几里得几何体系还有 5 条公设、23 个定义等内容，而且有相当多的概念没有给出定义，不同版本之间表述也各不相同。