

# 微积分基础教程

(Calculus Fundamentals)

您的姓名

2025 年 11 月 25 日

## 版权信息

本书仅提供电子版，固定版式。

版权所有 © 2025 by 您的姓名。保留一切权利。

# 前言

自牛顿与莱布尼茨独立创设微积分(1660–1680年代)以来,这门“变化的数学”已走过三个半世纪。三百年间,微积分从“计算变化率”演化为“描述一切可微结构”的元语言:数学不再只是工具,它已经从一门关于量的科学,演变为一门关于模式、结构和形式推理的宏大体系。

现代微积分以其严谨性而闻名,但其基石——极限的 $\varepsilon - \delta$ 定义和由此构建的标准分析体系,正在向哲学化甚至宗教化方向发展:非直观性、逻辑严重形式化,过度僵化、挑战常识,和现实严重脱节正在演变成数学空想主义。

有鉴于此,格洛克以极度自下而上的方式重新思考整个微积分体系,成功建立可视化的格洛克代数空间,可视化范围从 $(-\infty^\infty, \infty^\infty)$ 每一个数都可见,并将 $\infty, \varepsilon$ 定义为未解析数,分别表示无穷大和无穷小,突然之间,一切都变得如此简单,并由此带来以下颠覆性的数学结果:

极限被重新定义,简单而直观,极限的计算只是简单的数学计算,洛必达法则不再必要,神秘性已全部消失。

开闭区间被重新描述,无穷小的数值化定义使开区间基本消失,在极限状态下都是闭区间。

连续性、间断点等相关理论已消失,基本只保留描述性概念和常识。

数列与极限的收敛相关内容是为了传统趋近极限的表述,而无穷大和无穷小不再是一个趋近的概念,这部分内容已经没有意义。因此只保留数列的通项公式并作为统一的函数对待。

导数不再是一个莱布尼兹定义的神秘符号 $\frac{d}{dx}F(x)$ ,现在只是一个重新定义的点 $x$ 位置的点微分的商,即 $dF(x)/dx$ ,和小学的除法运算没有什么不同,更强调计算结果是瞬时变化率或几何图形上的斜率。



图 1: 另一张图片, 位于右侧



图 2: 示例插图: 函数的几何图形展示

积分被重新定义, 删除积分定理等内容, 重新定义积分为微分的逆运算。具体变化为点积分简称为积分取代不定积分, 保留定积分并重新命名为区间积分对应区间微分。

自然常数  $e$  被重新定义为  $e = (1 + \varepsilon)^\infty$ , 清晰而直观, 并拓展为自然常数序列  $e_n = (1 + n\varepsilon)^\infty$ , 使其不再具有神秘性。

定义和定理中的函数只进行最小化覆盖, 即只包含一个定义域区间, 消除传统定义和定理的繁杂限制条件, 简单而清晰。

然而, 更严肃而重要的思考是, 我们为什么要接受数学基础/数理逻辑/集合论/数学分析这些所谓的数学家小圈子理论, 无论对于普通人还是科研人员既看不懂也没有任何实用价值。回归常识和简单, 我们真的需要数学家小圈子给我们解释为什么  $1 + 1 = 2$  吗?

考德·格洛克

2025 年 11 月

### 重要提示

请确保您已安装 tcolorbox 宏包。

## 风险提示

不要在数学环境中使用  
换行，请改用 align 或 split 环境。



# 目录

<b>第一章 格洛克代数空间</b>	<b>1</b>
1.1 初步理解无穷大和无穷小 . . . . .	1
1.2 格洛克代数空间 . . . . .	2
1.3 无穷大和无穷小的定义 . . . . .	4
1.4 极限的概念 . . . . .	8
<b>第二章 函数和极限</b>	<b>9</b>
2.1 理解函数 . . . . .	9
2.2 函数的极限 . . . . .	11



# 第一章 格洛克代数空间

本章首先从常识入手理解无穷大和无穷小，并得出基本的运算法则。在此基础上实现格洛克代数空间。最后给出无穷大和无穷小的正式定义和运算（规则）列表。

## 1.1 初步理解无穷大和无穷小

自微积分诞生以来，如何阐释、理解无穷大和无穷小以及由此引出的函数的极限一直是问题的核心，所以让我们以此为切入点，开始问题的探索。

### 格洛克：无穷大和无穷小的直观理解

无穷大和无穷小是具有特殊作用的两个数，分别用  $\infty, \varepsilon$  表示，对于  $\infty$ ，所有实数都是它的无穷小；对于  $\varepsilon$ ，所有实数都是它的无穷大。

由此产生如下运算法则：对于任意实数  $C$

$$\infty + C = \infty$$

$$\varepsilon + C = C$$

这是基于  $\infty, \varepsilon$  本身的直观语义得出的。更进一步，基于数的性质，我们得到：

$$C_1\infty + C_2 = C_1 \left( \infty + \frac{C_2}{C_1} \right) = C_1\infty$$

$$C_1\varepsilon + C_2 = C_1 \left( \varepsilon + \frac{C_2}{C_1} \right) = C_2$$

$$C_1\infty^2 + C_2\infty = \infty(C_1\infty + C_2) = C_1\infty^2$$

$$C_1\varepsilon^2 + C_2\varepsilon = \varepsilon(C_1\varepsilon + C_2) = C_2\varepsilon$$

这和 200 多年来的传统解释完全不同，甚至相反。传统解释中并不认为无穷大和无穷小是数，因此不能直接进行数学运算，强调它是一个无限趋近的“动态”过程，因此理解起来要困难复杂得多。

格洛克的直观解释如果可以成立，会使微积分学变得简单而清晰，这就需要建立一个直观而简单的可视化代数模型来阐释其合理性。

## 1.2 格洛克代数空间

### 格洛克代数环轴

和传统的实数数轴不同，格洛克数轴是一个圆环，圆环长度固定为  $\infty$ ，并将其分割为相等的  $\infty$  段，每段长度为 1，将数轴逆时针依次标注  $0, 1, 2, \dots$ ，顺时针标注为  $-1, -2, \dots$ ，这样我们就得到了一个覆盖  $(-\infty, \infty)$  数字空间的环形数轴。



图 1.1: 格洛克代数环轴

下图是格洛克环轴展开后的样子，在数轴的右端标注的是单位刻度的长度量级  $\infty^0 = 1$ ，因此称为格洛克 0 阶数轴。

$$0 \boxed{1 \ 2 \ 3} \dots \boxed{-2 \ -1} \ \infty^0$$

图 1.2: 格洛克 0 阶数轴

需要注意的是， $\infty, -\infty$  和原点 0 重合，这意味着数值大小达到  $\infty$  时需要进位，以表示  $\infty$  量级或更大的数。基于同样的原理，我们还需要量级更小的单位，即  $\varepsilon$ ，用来进位到格洛克 0 阶数轴。

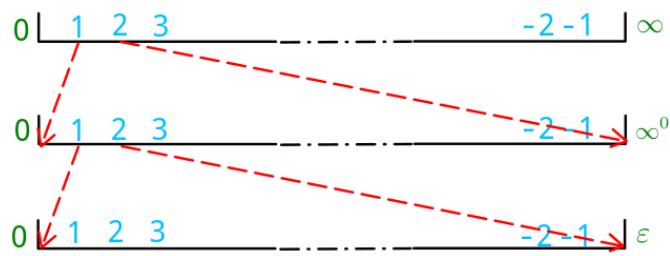


图 1.3: 宏空间和微空间

$\infty$  以及更大的量级称为格洛克宏空间，对应的， $\varepsilon$  以及更小的量级称为格洛克微空间，图 1.3 表示了格洛克宏空间 1 轴，格洛克 0 轴和格洛克微空间 1 轴。

宏空间 1 轴覆盖区间  $[0, \infty^2)$ , 单位刻度大小为  $1\infty$ , 将 1 单位刻度放大  $\infty$  倍, 得到格洛克 0 轴。

格洛克 0 轴覆盖区间  $[0, \infty)$ , 单位刻度大小为 1, 将 1 单位刻度放大  $\infty$  倍, 得到微空间 1 轴。

微空间 1 轴覆盖区间  $[0, 1)$ , 单位刻度大小为  $\frac{1}{\infty}$ , 即  $1\varepsilon$ 。

将宏空间和微空间以同样的方式分别向上和向下延展, 形成完整的格洛克代数空间。

### 宏空间和微空间

这是一个相对的概念, 如  $\infty^{n+1}$  是  $\infty^n$  的宏空间,  $\infty^n$  是  $\infty^{n+1}$  的微空间;  $\varepsilon^n$  是  $\varepsilon^{n+1}$  的宏空间,  $\varepsilon^{n+1}$  是  $\varepsilon^n$  的微空间。

宏空间是微空间的无穷大, 微空间是宏空间的无穷小。

### 格洛克代数空间

完整格洛克代数空间如图 1.4 所示。

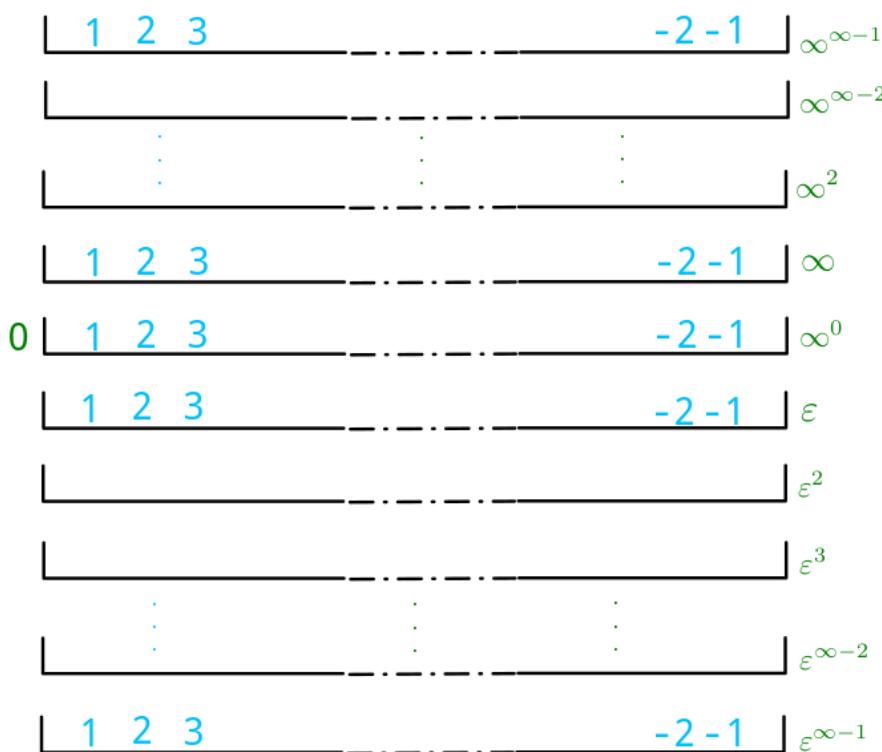


图 1.4: 格洛克代数空间

由于指数进位回  $0, \infty^\infty$  和  $\varepsilon^\infty$  回归原点 0, 图中未予显示。

格洛克代数空间最大覆盖范围  $[0, \infty^\infty)$ , 最小单位刻度  $1\varepsilon^{\infty-1}$ , 可以满足任何数值的可视化标注。

需要注意的是，由于所有实数都是 $\infty$ 的无穷小，正数 $C$ 只能标注在任一轴的最左侧的相对无穷小区间；同样的，负数 $-C$ 只能标注在最右侧的相对无穷小区间。

**例 1.2.1.** 在格洛克代数空间上标注：

$$(1) a = 0.5\infty + 1, \quad (2) b = 2\infty - 2, \quad (3) c = a + b.$$

解：

$$\begin{aligned} c &= a + b \\ &= (0.5\infty + 1) + (2\infty - 2) \\ &= (0.5\infty + 2\infty) + (1 - 2) \\ &= 2.5\infty - 1 \end{aligned}$$

$a, b, c$  如图 1.5 所示。

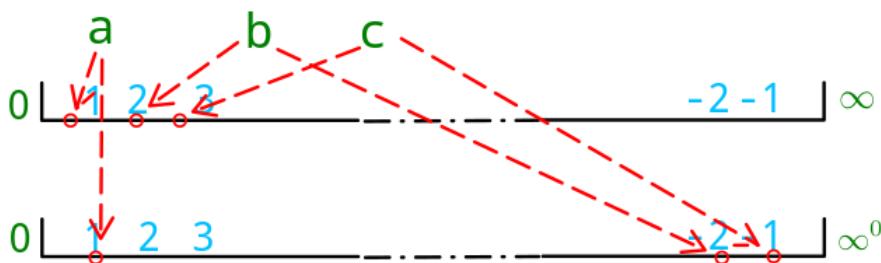


图 1.5: 数值标注

### 1.3 无穷大和无穷小的定义

经过前面两节关于无穷大和无穷小的讨论和格洛克代数空间的形成，下面给出无穷大和无穷小的正式定义。

**定义 1.1. 无穷大和无穷小**

设 $\infty, \varepsilon$ 是未解析数 (*unsolved number*)， $\infty$ 是正整数，表示无穷大， $\varepsilon$ 表示无穷小。

#### 性质列表

- (1)  $\infty, \varepsilon$ 互为倒数，即 $\infty \cdot \varepsilon = 1$ 。
- (2) 对于任意实数 $C$ ，整数 $n$ ， $\infty^{n+1} + C\infty^n = \infty^{n+1}$ ， $\varepsilon^n + C\varepsilon^{n+1} = \varepsilon^n$ 。
- (3)  $\varepsilon$ 是最小的正数， $-\varepsilon$ 是最大的负数， $0^+ = \varepsilon$ ， $0^- = -\varepsilon$ 。
- (4) 对于任意实数 $C$ ， $C^+ = C + \varepsilon$ ， $C^- = C - \varepsilon$ 。

(5) 对于  $n > 1$  有,  $\log_n \infty < \sqrt[n]{\infty} < \infty < \infty^n < n^\infty < \infty!$ 。

(6) 等效重定义。如果关于  $\infty$  的表达式  $g(\infty)$  的值仍是无穷大, 那么  $\infty$  可以重新定义为  $g(\infty)$ , 记作:  $\infty \leftarrow g(\infty), \varepsilon \leftarrow \frac{1}{g(\infty)}$ 。

性质 (1) 对无穷大和无穷小的关系进行了标准化, 使得数学属性更加清晰, 高阶无穷大和无穷小的比较和转换变成了数学计算, 而不是逻辑分析。

对于性质 (2), 当  $n = 0$  时有

$$\infty + C = \infty \quad (1.1)$$

$$1 + C\varepsilon = 1 \quad (1.2)$$

将 (1.1) 两边同时减去  $\infty$ , 将 (1.2) 两边同时减去 1, 得到

$$C = 0 \quad (1.3)$$

$$C\varepsilon = 0 \quad (1.4)$$

(1.3) 说明在格洛克宏空间 1 轴 (1 阶无穷大) 的视角来看, 无论  $C$  多么大, 都是  $\infty$  的无穷小, 格洛克宏空间 1 轴上的值都为 0; (1.4) 说明了在格洛克 0 轴 (实数轴) 的视角来看, 无论  $n$  多么大,  $n\varepsilon$  都是无穷小, 在格洛克 0 轴上的值都为 0。这也是后续章节进行极限计算时的正确结果。

性质 (2) 本质上是将本章第一节关于无穷大和无穷小的运算规则进行了合并。

性质 (3) 可以合并到性质 (4), 分开是为了突出 0 的特殊性。 $C^+$  表示实数  $C$  右侧最靠近它的数,  $C^-$  表示  $C$  左侧最靠近它的数。这可以用格洛克微空间展开的术语进行理解。

### 格洛克微空间展开

对于展开点  $C$ , 取单位长度区间  $[C, C + 1]$  并放大  $\infty$  倍数, 当我们将  $C$  点与微空间 1 轴的 0 对齐, 将会“看到”最靠近  $C$  右侧的坐标刻度是  $1\varepsilon$ 。类似地, 取单位长度区间  $[C - 1, C]$  并放大  $\infty$  倍数, 将  $C - 1$  点与微空间 1 轴的 0 对齐, 将会“看到”最靠近  $C$  左侧的坐标刻度是  $-1\varepsilon$ 。如图 1.6 所示。

事实上, 我们也可以指定  $C^+ = C + n\varepsilon$ ,  $C^- = C - n\varepsilon$ , 结果也是正确的。从格洛克 0 轴 (或实数轴) 的角度来看, 无论我们指定靠近  $C$  的距离是多么小, 无论是百万分之一还是千万分之一, 都是  $n\varepsilon$  的无穷大。

性质 (5) 明确了不等式的各项位于不同阶的格洛克宏空间, 不等式的左侧都是

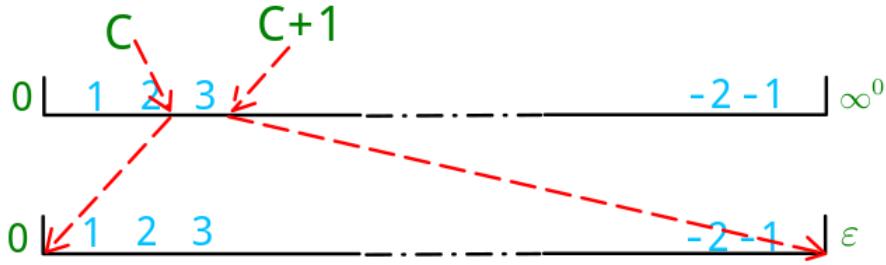


图 1.6: 格洛克微空间展开

右侧的无穷小，体现了如下运算规则：

$$\begin{aligned}
 & \log_n \infty + \sqrt[n]{\infty} + \infty + \infty^n + n^\infty + \infty! \\
 &= \sqrt[n]{\infty} + \infty + \infty^n + n^\infty + \infty! \\
 &= \infty + \infty^n + n^\infty + \infty! \\
 &= \infty^n + n^\infty + \infty! \\
 &= n^\infty + \infty! \\
 &= \infty!
 \end{aligned}$$

虽然不等式的每一项都是无穷大，但它们的增长速度比值都达到了无穷大的量级，这可以由函数图形进行直观的观察，这里略去繁琐的证明过程。

关于性质 (6)，传统的无穷大和无穷小并没有明确的等阶划分，事实上覆盖了整个格洛克代数空间。通过等效重定义，我们可以得到一个明确的计算结果。如

$$\begin{aligned}
 f(\infty) &= \log_n \infty \\
 &= \log_n n^\infty \quad (\infty \leftarrow n^\infty) \\
 &= \infty
 \end{aligned}$$

观察对数函数的图形，它是一个增长异常缓慢的函数，因此  $\log_n \infty$  是一个非常低阶的无穷大，通过等效重定义，我们得到了一个明确的无穷大结果，本质上我们改变了无穷大在宏空间的位置，但没有改变传统无穷大的结果，这在极限计算时很有用。

**例 1.3.1.** 数列用符号  $\{f(n)\}$  表示，其中  $f(n)$  是通项公式。如果  $n \rightarrow \infty$ ,  $f(n) = C$  那么数列是收敛的；如果  $n \rightarrow \infty$ ,  $f(n) = \infty$  那么数列是发散的；否则数列既不收敛也不发散。

判断下列数列的收敛性：

- (1)  $\{(-1)^n \frac{1}{n}\}$  (2)  $\{(-1)^n \frac{n+1}{n}\}$  (3)  $\{n - \frac{1}{n}\}$

解：

(1)

$$\begin{aligned}f(n) &= (-1)^n \frac{1}{n} \\f(\infty) &= (-1)^\infty \frac{1}{\infty} \\f(\infty) &= (-1)^\infty \varepsilon\end{aligned}$$

$f(\infty) = \varepsilon = 0$ , 如果  $\infty$  为偶数;  $f(\infty) = -\varepsilon = 0$ , 如果  $\infty$  为奇数。

综合奇偶两种情况,  $f(\infty) = 0$ , 数列收敛。

(2)

$$\begin{aligned}f(n) &= (-1)^n \frac{n+1}{n} \\f(\infty) &= (-1)^\infty \frac{\infty+1}{\infty} \\f(\infty) &= (-1)^\infty \frac{\infty}{\infty} \\f(\infty) &= (-1)^\infty\end{aligned}$$

数列在 1 和 -1 之间来回振荡, 既不收敛也不发散。

(3)

$$\begin{aligned}f(n) &= n - \frac{1}{n} \\f(\infty) &= \infty - \frac{1}{\infty} \\f(\infty) &= \infty - \varepsilon \\f(\infty) &= \infty\end{aligned}$$

数列发散。

通过上面的例子可以看出, 关于无穷大和无穷小的计算完全符合数学运算法则, 比传统的基于数学分析的形式化方法简单而清晰。

**例 1.3.2.**

$$\begin{aligned}
f(\infty) &= \frac{\sqrt{\infty + 3}}{\infty} \\
&= \frac{\sqrt{(\infty^2 - 3) + 3}}{\infty^2 - 3} \quad (\infty \leftarrow \infty^2 - 3) \\
&= \frac{\infty}{\infty^2} \\
&= \frac{1}{\infty} \\
&= \varepsilon \\
&= 0
\end{aligned}$$

通过等效重定义，我们精确计算出了表达式的结果，无需进行繁琐的形式化数学分析。

**格洛克观点**

格洛克代数空间的建立可以使我们抛弃传统的基于语言的数学逻辑，转而专注于简单精确的数学计算。后续章节我们将会看到微积分学是多么的简单，大量晦涩的定义、定理将被抛弃，一切变得如此不可思议。

**例 1.3.3.** 求函数  $f(x) = \frac{\sqrt{x-4}}{x-5}$  的定义域。

## 1.4 极限的概念

**定义 1.2** (极限的  $\epsilon - \delta$  定义). 对于函数  $f(x)$ ，如果存在实数  $L$ ，使得对任意给定的  $\epsilon > 0$ ，都存在  $\delta > 0$ ，当  $0 < |x - a| < \delta$  时，有  $|f(x) - L| < \epsilon$ ，则称  $L$  为函数  $f(x)$  在点  $a$  处的极限，记为  $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = L$ 。

设函数  $f(x)$  在点  $x_0$  的某个去心邻域内有定义。如果存在一个实数  $L$ ，使得：对于任意给定的正数  $\epsilon$  (无论它多么小)，总存在一个正数  $\delta$  (它通常依赖于  $\epsilon$ )，使得当  $x$  满足  $0 < |x - x_0| < \delta$  时，都有  $|f(x) - L| < \epsilon$  成立。  
则称  $L$  是函数  $f(x)$  当  $x$  趋近于  $x_0$  时的极限，记作：

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = L$$

**定理 1.1** (极限的四则运算). 设  $\lim_{x \rightarrow a} f(x)$  和  $\lim_{x \rightarrow a} g(x)$  都存在，则有：

$$\begin{aligned}
\lim_{x \rightarrow a} [f(x) \pm g(x)] &= \lim_{x \rightarrow a} f(x) \pm \lim_{x \rightarrow a} g(x) \\
\lim_{x \rightarrow a} [f(x)g(x)] &= \lim_{x \rightarrow a} f(x) \cdot \lim_{x \rightarrow a} g(x) \\
\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)} &= \frac{\lim_{x \rightarrow a} f(x)}{\lim_{x \rightarrow a} g(x)}, \quad \text{其中 } \lim_{x \rightarrow a} g(x) \neq 0
\end{aligned}$$

# 第二章 函数和极限

函数是数学中一个核心概念，它描述了变量之间的一种对应关系。简单来说，函数将一个输入值（自变量）映射到一个输出值（因变量）。函数的概念起源于 17 世纪的莱布尼茨和牛顿，用于描述物理现象，如运动和变化。

传统的函数表示是一种泛化的表示，试图包容一切，解决一切问题，自变量和函数值（因变量）之间的关系抽象成规则，试图解决一切假想中的问题；因此在描述定义、定理时需要晦涩的前提限制条件，并形成抽象的形式化定义。本文或格洛克描述的函数只有一种，自变量和函数值之间的关系由自变量表达式确定，保持具体而简单。

极限是微积分的基础概念，它描述了函数在某个点附近的行为，即使函数在该点未定义或不连续。极限的概念由柯西和魏尔斯特拉斯在 19 世纪正式化，用于处理无穷小和无穷大。

基于格洛克代数空间，定义域的区间和函数的连续性进行了重新表述，极限概念被重新定义，一切变得简单而直观。

## 2.1 理解函数

函数是数学中描述对应关系的一种基本且非常重要的概念。通常写作  $y = f(x)$ 。

### 函数的关键特点

唯一性对应 (Uniqueness)：对于定义域内的每一个输入值  $x$ ，函数都只能对应一个唯一的输出值  $f(x)$ 。

定义域 (Domain)：所有允许的输入值  $x$  的集合。

例如，在函数  $f(x) = \frac{1}{x}$  中， $x$  不能为 0，所以定义域是除 0 以外的所有实数。

值域 (Range)：值域是实际输出值的集合。

函数的输入输出关系通过自变量表达式来描述，通常有几何图形来对应表示。例如函数  $f(x) = x^2 + 1$ ，在几何图形上表现为抛物线。

### 定义域区间

函数的定义域通常是数轴上的一个或多个连续的数值范围，因此我们常用区间符号来表示它。

圆括号  $(a, b)$  表示不包含端点（开区间）。表示  $a < x < b$ ，以及区间边界是  $\infty$  或  $-\infty$  的情况。

方括号  $[a, b]$  表示包含端点（闭区间）。表示  $a \leq x \leq b$ 。

### 开区间转换为闭区间

依据格洛克无穷大和无穷小定义的性质 (4)，有

$$(a, b) \Rightarrow [a + \varepsilon, b - \varepsilon] \quad (a, \infty) \Rightarrow [a + \varepsilon, \infty)$$

$\infty$  既可以理解为开区间也可以理解为闭区间，根据具体的问题进行不同的理解。

### 分段函数

分段函数将定义域分成若干互不相交的子区间，并在每个子区间上定义一个子函数。

分段函数常用大括号表示，例如：

$$f(x) = |x| = \begin{cases} -x, & \text{if } x < 0 \\ x, & \text{if } x \geq 0 \end{cases}$$

$$f(x) = \frac{1}{x} = \begin{cases} \frac{1}{x}, & \text{if } x < 0 \\ \frac{1}{x}, & \text{if } x > 0 \end{cases}$$

$$f(x) = \begin{cases} x^2 + 1, & \text{if } x < 1 \\ 3x - 1, & \text{if } x \geq 1 \end{cases}$$

还有一些常见的特殊分段函数：

阶跃函数 (Step Function)：分段函数由常数函数组成。例如，单位阶跃函数 (Unit Step Function)。

分段线性函数 (Piecewise Linear Function)：分段函数由线段（线性函数）组成。

通过以上讨论，我们现在可以明确：**函数的概念和性质总是作用于单一定义域区间。**

### 复合函数

复合函数本质上是自变量的函数（表达式）变换并受到变换函数的额外约束。例如复合函数  $f(g(x))$ ，我们可以理解为函数  $f(y)$ ，并通过  $y = g(x)$  变换得到的。事实上，函数变换更常见，因此不作为一个单独的函数分类提出。

## 2.2 函数的极限

函数极限是微积分中的一个基本概念，它描述了一个函数在自变量（输入值）接近某一给定值时，它的函数值（输出值）所表现出的趋势。

### 函数极限的直观理解

- (1) 函数  $f(x)$  在  $x$  趋近于  $a$  时的极限是  $L$ ，记作  $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = L$ 。
- (2) 当  $x$  无限地接近  $a$  (但不等于  $a$ ) 时，函数值  $f(x)$  会无限地接近一个确定的值  $L$ 。
- (3)  $f(x)$  在  $x = a$  处是否有定义，以及  $f(a)$  的值是多少，并不影响  $\lim_{x \rightarrow a} f(x)$  的结果。极限关注的是趋近过程，而非终点的值。

从上面直觉出发，逐渐演变完善了极限的  $\epsilon - \delta$  定义。 $\epsilon - \delta$  定义为极限提供了逻辑严密性，但代价是牺牲了直觉性、增加了学习难度和操作复杂性。

格洛克采用逆向思维，并以可视化的格洛克代数空间和无穷大无穷小的定义作为逻辑支撑，给出极限的定义：

**定义 2.1** (函数的极限). 对于函数  $f(x)$ ,  $x \rightarrow a \iff x = a \pm \varepsilon$ , 函数  $f(x)$  在  $x$  趋近于  $a$  时的极限

- (1)  $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = f(a \pm \varepsilon) = f(a)$ , 如果  $a$  位于定义域区间内。
- (2)  $\lim_{x \rightarrow a^+} f(x) = f(a + \varepsilon)$ , 如果  $a$  位于定义域区间左边界。
- (3)  $\lim_{x \rightarrow a^-} f(x) = f(a - \varepsilon)$ , 如果  $a$  位于定义域区间右边界。

对于 (2) 和 (3)，如果  $a$  是闭区间边界，极限值应用  $f(a)$  仍然成立。

格洛克将传统极限的动态趋近描述转换成了静态描述，因为在格洛克微空间“看到了”最接近  $a$  的极限位置。由此不再需要晦涩难解的逻辑推理描述，简单直接地进行极限计算。

### 极限的 $\epsilon - \delta$ 定义

设函数  $f(x)$  在点  $x_0$  的某个去心邻域内有定义。如果存在一个实数  $L$ ，使得：

对于任意给定的正数  $\epsilon$  (无论它多么小)，总存在一个正数  $\delta$  (它通常依赖于  $\epsilon$ )，使得当  $x$  满足  $0 < |x - x_0| < \delta$  时，都有  $|f(x) - L| < \epsilon$  成立。

则称  $L$  是函数  $f(x)$  当  $x$  趋近于  $x_0$  时的极限，记作：

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = L$$

函数  $f(x)$  在点  $x_0$  处的导数定义为：

$$f'(x_0) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x}$$

导数表示函数在某点变化率的精确度量。