



合肥工业大学

HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

复变函数与积分变换

张神星 (合肥工业大学)

办公室: 翡翠科教楼 B1810 东

Email: zhangshenxing@hfut.edu.cn

课件地址: <http://faculty.hfut.edu.cn/zhangshenxing>

002 班 (电气) 课程信息

- 课时: 共 10 周 40 课时, 从 2025-09-09 到 2025-11-13
- 期末考试在课程结束后两周左右



002 班 (电气)QQ 群: **1002019981**
入群答案 **1400261B**



教材: 《复变函数与积分变换》

003 班 (自动化) 课程信息

- 课时: 共 10 周 40 课时, 从 2025-09-09 到 2025-11-13
- 期末考试在课程结束后两周左右



003 班 (自动化)QQ 群:
1006453495
入群答案 **1400261B**



教材: 《复变函数与积分变换》

成绩构成

期末考试 50 分

期末卷面需要达到 45 分才计算总评分数, 45 分以下直接不及格.

作业 15 分

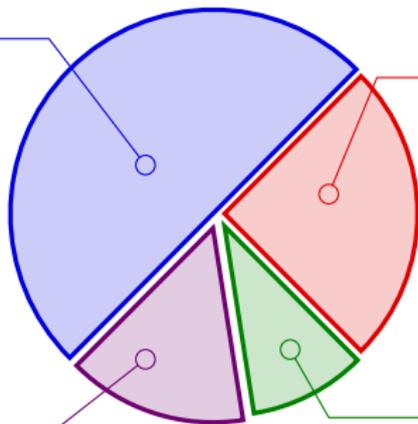
作业通过超星发布和提交, 约两周交一次. **作业必须按时提交, 不允许补交.**

课堂测验 25 分

课堂测验共 3 次, 取最高的两次平均. 测验范围和时间会提前通知. **测验时在教室内作答, 否则按未考处理.**

其它 10 分

完成超星各个章节的任务点和主观研讨题.

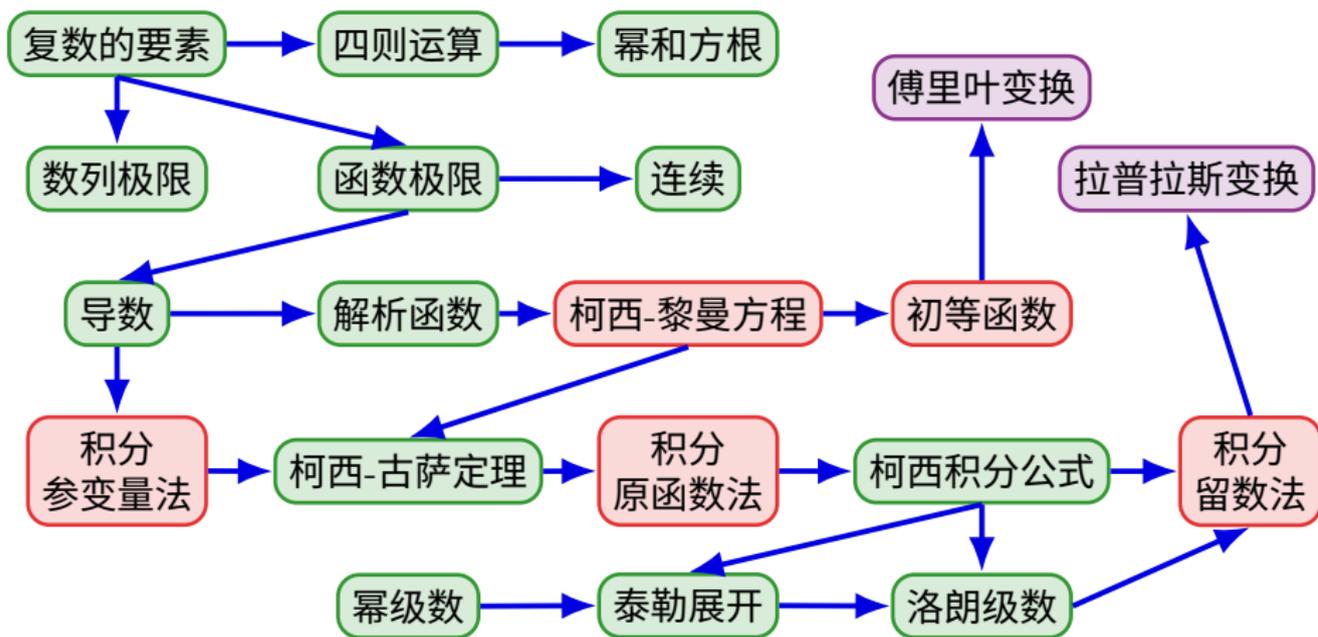


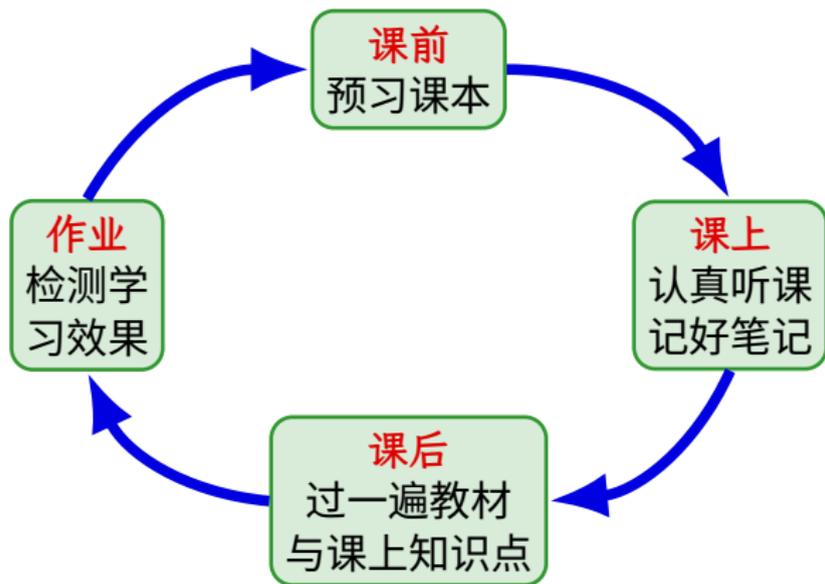
复变函数的应用非常广泛, 它包括:

- **数学**中的代数、数论、几何、分析、动力系统……
- **物理学**中流体力学、材料力学、电磁学、光学、量子力学……
- **信息学、电子学、电气工程**……

可以说复变函数应用之广, 在大学数学课程中仅次于高等数学和线性代数.

课程内容关系





第一章 复数与复变函数

第一节 复数及其代数运算

复数起源于多项式方程的求根问题. 考虑一元二次方程 $x^2 + bx + c = 0$. 配方可得

$$\left(x + \frac{b}{2}\right)^2 = \frac{b^2 - 4c}{4}.$$

于是得到求根公式 $x = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2}$, 其中 $\Delta = b^2 - 4c$.

- (1) 当 $\Delta > 0$ 时, 有两个不同的实根;
- (2) 当 $\Delta = 0$ 时, 有一个二重的实根;
- (3) 当 $\Delta < 0$ 时, 无实根.

可以看出, 在一元二次方程中, 我们可以舍去包含**负数开方**的解. 然而在一元三次方程中, 即便只考虑实数根也会不可避免地引入负数开方.

例. 解方程 $x^3 + 6x - 20 = 0$.

解答. 设 $x = u + v$, 那么

$$u^3 + v^3 + 3uv(u + v) + 6(u + v) - 20 = 0.$$

我们希望

$$u^3 + v^3 = 20, \quad uv = -2.$$

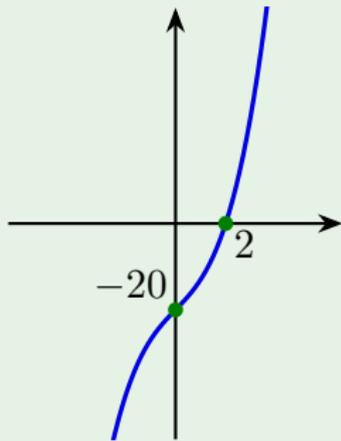
那么 u^3, v^3 满足一元二次方程

$$X^2 - 20X - 8 = 0.$$

解得

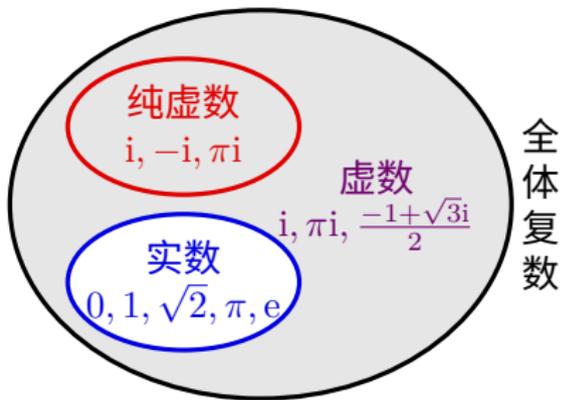
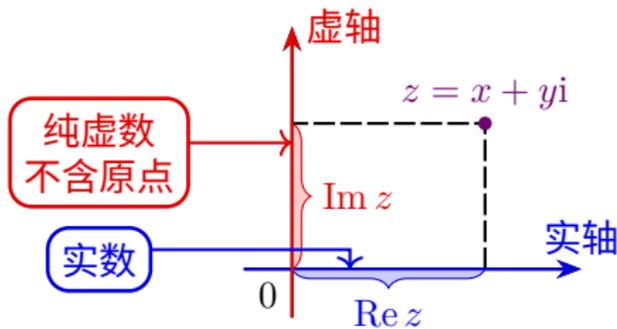
$$u^3 = 10 \pm \sqrt{108} = (1 \pm \sqrt{3})^3.$$

所以 $u = 1 \pm \sqrt{3}, v = 1 \mp \sqrt{3}. x = u + v = 2$.



实部和虚部, 虚数和纯虚数

- x, y 轴分别对应复平面的**实轴**和**虚轴**.
- 称 $z = x + yi$ 中 $x = \operatorname{Re} z$ 为 z 的**实部**; $y = \operatorname{Im} z$ 为 z 的**虚部**.
- 当虚部 $\operatorname{Im} z = 0$ 时, z 为实数, 它落在实轴上.
 - 不是实数的复数是**虚数**.
- 当实部 $\operatorname{Re} z = 0$ 且 $z \neq 0$ 时, z 为**纯虚数**, 它落在虚轴上.



共轭复数的定义和性质

定义. 称 z 在复平面关于实轴的对称点为它的**共轭复数** \bar{z} . 换言之,
 $\overline{x + yi} = x - yi$.

从定义出发, 不难验证共轭复数满足如下性质:

- (1) z 是 \bar{z} 的共轭复数. 共轭是一种对合
 - (2) $\overline{z_1 \pm z_2} = \bar{z}_1 \pm \bar{z}_2$, $\overline{z_1 \cdot z_2} = \bar{z}_1 \cdot \bar{z}_2$, $\overline{\left(\frac{z_1}{z_2}\right)} = \frac{\bar{z}_1}{\bar{z}_2}$. 和四则运算交换
 - (3) $z\bar{z} = (\operatorname{Re} z)^2 + (\operatorname{Im} z)^2$.
 - (4) $z + \bar{z} = 2 \operatorname{Re} z$, $z - \bar{z} = 2i \operatorname{Im} z$. x, y 和 z, \bar{z} 可相互表示
 - (5) $z = \bar{z} \iff z$ 是实数;
 $z = -\bar{z} \iff z$ 是纯虚数或 $z = 0$. 判断实数和纯虚数
- 使用共轭复数进行计算和证明, 往往比直接使用 x, y 的形式更简单.

练习. z 关于虚轴的对称点是 $-\bar{z}$.

例题：共轭复数判断实数

例. 设 $z = x + yi$ 是虚数. 证明: $x^2 + y^2 = 1$ 当且仅当 $z + \frac{1}{z}$ 是实数.

证明. $z + \frac{1}{z}$ 是实数等价于

$$z + \frac{1}{z} = \overline{\left(z + \frac{1}{z}\right)} = \bar{z} + \frac{1}{\bar{z}},$$

等价于

$$z - \bar{z} = \frac{1}{\bar{z}} - \frac{1}{z} = \frac{z - \bar{z}}{z\bar{z}}, \quad (z - \bar{z})(z\bar{z} - 1) = 0.$$

由 z 是虚数可知 $z \neq \bar{z}$. 故上述等式等价于 $z\bar{z} = 1$, 即 $x^2 + y^2 = 1$. □

例题：复数的代数计算

例. 设 $z_1 = 5 - 5i, z_2 = -3 + 4i$, 求 $\overline{\left(\frac{z_1}{z_2}\right)}$.

解答.

$$\begin{aligned}\frac{z_1}{z_2} &= \frac{5 - 5i}{-3 + 4i} = \frac{(5 - 5i)(-3 - 4i)}{(-3)^2 + 4^2} \\ &= \frac{(-15 - 20) + (-20 + 15)i}{25} = -\frac{7}{5} - \frac{1}{5}i,\end{aligned}$$

因此 $\overline{\left(\frac{z_1}{z_2}\right)} = -\frac{7}{5} + \frac{1}{5}i$.

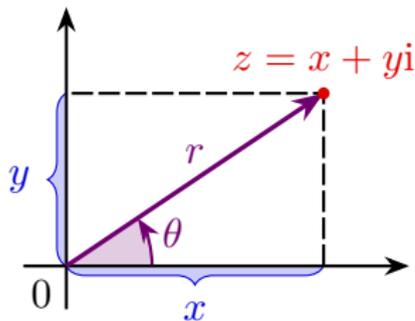
第二节 复数的三角形形式与指数形式

复数的极坐标形式

由平面的极坐标表示, 我们可以得到复数的另一种表示方式. 以 0 为极点, 正实轴为极轴, 逆时针为极角方向可以定义出复平面上的极坐标系.

定义.

- (1) 称 r 为 z 的模, 记为 $|z| = r$.
- (2) 称 θ 为 z 的辐角, 记为 $\text{Arg } z = \theta$. 约定 0 的辐角没有定义.



$$x = r \cos \theta, \quad y = r \sin \theta,$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

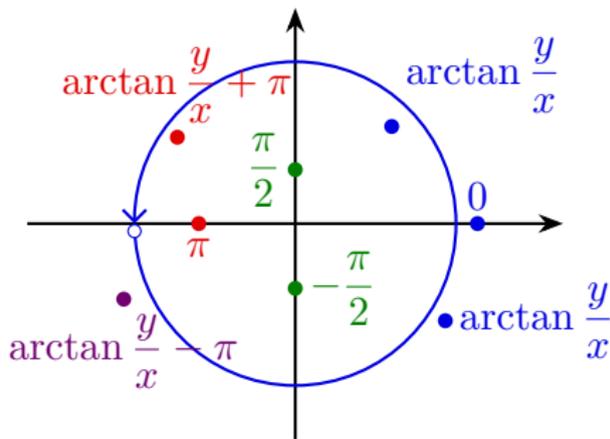
辐角主值

任意非零复数 z 都有无穷多个辐角. 称其中位于 $(-\pi, \pi]$ 的那个辐角为**辐角主值**或**主辐角**, 记作 $\arg z$. 那么

$$\operatorname{Arg} z = \arg z + 2k\pi, k \in \mathbb{Z}.$$

注意 $\arg \bar{z} = -\arg z$ **未必成立**, 当且仅当 z 不是负实数和 0 时该等式成立.

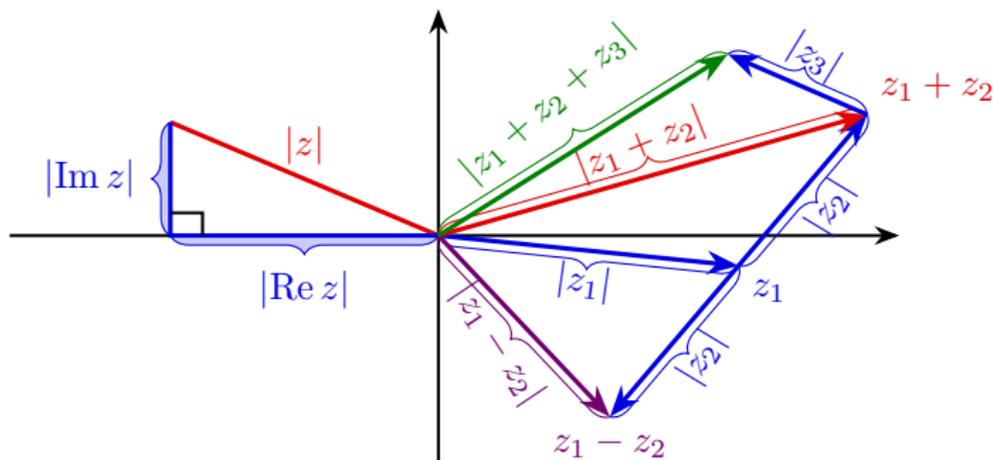
$$\arg z = \begin{cases} \arctan \frac{y}{x}, & x > 0; \\ \arctan \frac{y}{x} + \pi, & x < 0, y \geq 0; \\ \arctan \frac{y}{x} - \pi, & x < 0, y < 0; \\ \frac{\pi}{2}, & x = 0, y > 0; \\ -\frac{\pi}{2}, & x = 0, y < 0. \end{cases}$$



复数模的性质

复数的模满足如下性质

- (1) $z\bar{z} = |z|^2 = |\bar{z}|^2$;
- (2) $|\operatorname{Re} z|, |\operatorname{Im} z| \leq |z| \leq |\operatorname{Re} z| + |\operatorname{Im} z|$;
- (3) $||z_1| - |z_2|| \leq |z_1 \pm z_2| \leq |z_1| + |z_2|$;
- (4) $|z_1 + z_2 + \cdots + z_n| \leq |z_1| + |z_2| + \cdots + |z_n|$.



例题：共轭复数解决模的等式

例. 证明

$$(1) |z_1 z_2| = |z_1 \bar{z}_2| = |z_1| \cdot |z_2|;$$

$$(2) |z_1 + z_2|^2 = |z_1|^2 + |z_2|^2 + 2 \operatorname{Re}(z_1 \bar{z}_2).$$

证明.

(1) 因为

$$|z_1 z_2|^2 = z_1 z_2 \cdot \overline{z_1 z_2} = z_1 \bar{z}_1 \cdot z_2 \bar{z}_2 = |z_1|^2 \cdot |z_2|^2,$$

所以 $|z_1 z_2| = |z_1| \cdot |z_2|$. 因此 $|z_1 \bar{z}_2| = |z_1| \cdot |\bar{z}_2| = |z_1| \cdot |z_2|$.

(2) 因为

$$\text{左边} = (z_1 + z_2)(\bar{z}_1 + \bar{z}_2) = z_1 \bar{z}_1 + z_2 \bar{z}_2 + z_1 \bar{z}_2 + \bar{z}_1 z_2,$$

$$\text{右边} = z_1 \bar{z}_1 + z_2 \bar{z}_2 + z_1 \bar{z}_2 + \overline{z_1 \bar{z}_2},$$

而 $\overline{z_1 \bar{z}_2} = \bar{z}_1 z_2$, 所以两侧相等. □

复数的三角和指数形式

由 $x = r \cos \theta, y = r \sin \theta$ 可得

复数的三角形式.

$$z = r(\cos \theta + i \sin \theta).$$

定义 $e^{i\theta} = \exp(i\theta) := \cos \theta + i \sin \theta$ (欧拉恒等式). 那么我们得到

复数的指数形式.

$$z = r e^{i\theta} = r \exp(i\theta).$$

这两种形式的等价的, 指数形式可以认为是三角形式的一种缩写方式. 求复数的三角和指数形式的**关键在于计算模和辐角**.

例题：求复数的三角和指数形式

例. 将 $z = -\sqrt{12} - 2i$ 化成三角形式和指数形式.

解答. $r = |z| = \sqrt{12 + 4} = 4$. 由于 z 在第三象限, 因此

$$\arg z = \arctan \frac{-2}{-\sqrt{12}} - \pi = \frac{\pi}{6} - \pi = -\frac{5\pi}{6}.$$

故

$$z = 4 \left[\cos\left(-\frac{5\pi}{6}\right) + i \sin\left(-\frac{5\pi}{6}\right) \right] = 4e^{-\frac{5\pi i}{6}}.$$

例题：求复数的三角和指数形式

例. 将 $z = \sin \frac{\pi}{5} + i \cos \frac{\pi}{5}$ 化成三角形式和指数形式.

解答. $r = |z| = 1$. 由于 z 在第一象限, 因此

$$\arg z = \arctan \frac{\cos(\pi/5)}{\sin(\pi/5)} = \arctan \cot \frac{\pi}{5} = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{5} = \frac{3\pi}{10}.$$

$$z = \cos \frac{3\pi}{10} + i \sin \frac{3\pi}{10} = e^{\frac{3\pi i}{10}}.$$

求复数的三角或指数形式时, 只需取一个辐角就可以了, 不要求必须是辐角主值.

例题：求复数的三角和指数形式

另解.

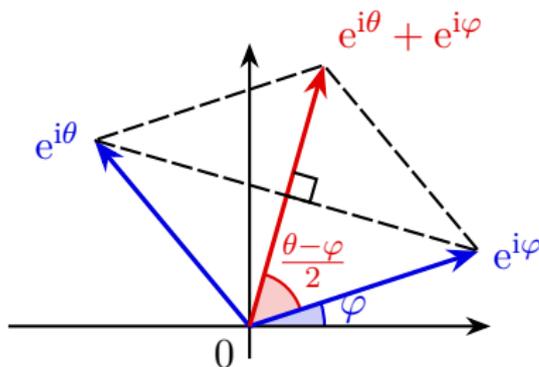
$$\begin{aligned} z &= \sin \frac{\pi}{5} + i \cos \frac{\pi}{5} = \cos \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{5} \right) + i \sin \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{5} \right) \\ &= \cos \frac{3\pi}{10} + i \sin \frac{3\pi}{10} = e^{\frac{3\pi i}{10}}. \end{aligned}$$

练习. 将 $z = \sqrt{3} - 3i$ 化成三角形式和指数形式.

答案. $z = 2\sqrt{3} \left[\cos \left(-\frac{\pi}{3} \right) + i \sin \left(-\frac{\pi}{3} \right) \right] = 2\sqrt{3} e^{-\frac{\pi i}{3}}$, 写成 $\frac{5\pi}{3}$ 也可以.

两个模相等的复数之和的三角和指数形式形式较为简单.

$$e^{i\theta} + e^{i\varphi} = 2 \cos \frac{\theta - \varphi}{2} e^{\frac{\theta + \varphi}{2} i}.$$



例. 若 $|z| = 1$, $\arg z = \theta$, 则 $z + 1 = 2 \cos \frac{\theta}{2} e^{\frac{\theta}{2} i}$.

第三节 三角和指数形式在计算中的运用

三角和指数形式在复数的乘法、除法和幂次计算中非常有用。

定理. 设

$$z_1 = r_1(\cos \theta_1 + i \sin \theta_1) = r_1 e^{i\theta_1},$$

$$z_2 = r_2(\cos \theta_2 + i \sin \theta_2) = r_2 e^{i\theta_2} \neq 0,$$

则

$$z_1 z_2 = r_1 r_2 [\cos(\theta_1 + \theta_2) + i \sin(\theta_1 + \theta_2)] = r_1 r_2 e^{i(\theta_1 + \theta_2)},$$

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{r_1}{r_2} [\cos(\theta_1 - \theta_2) + i \sin(\theta_1 - \theta_2)] = \frac{r_1}{r_2} e^{i(\theta_1 - \theta_2)}.$$

换言之,

$$|z_1 z_2| = |z_1| \cdot |z_2|, \quad \left| \frac{z_1}{z_2} \right| = \frac{|z_1|}{|z_2|},$$

$$\operatorname{Arg}(z_1 z_2) = \operatorname{Arg} z_1 + \operatorname{Arg} z_2, \quad \operatorname{Arg}\left(\frac{z_1}{z_2}\right) = \operatorname{Arg} z_1 - \operatorname{Arg} z_2.$$

多值函数相等是指两边所能取到的值构成的集合相等. 注意上述等式中 Arg 不能换成 arg , 也就是说

$$\operatorname{arg}(z_1 z_2) = \operatorname{arg} z_1 + \operatorname{arg} z_2, \quad \operatorname{arg}\left(\frac{z_1}{z_2}\right) = \operatorname{arg} z_1 - \operatorname{arg} z_2$$

未必成立. 这是因为 $\operatorname{arg} z_1 \pm \operatorname{arg} z_2$ 有可能不落在区间 $(-\pi, \pi]$ 上. 当且仅当等式右侧落在区间 $(-\pi, \pi]$ 内时才成立, 否则等式两侧会相差 $\pm 2\pi$.

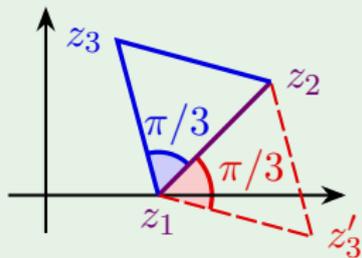
例题：复数解决平面几何问题

例. 已知正三角形的两个顶点为 $z_1 = 1$ 和 $z_2 = 2 + i$, 求它的另一个顶点.

解答. 由于 $\overline{z_1 z_3}$ 为 $\overline{z_1 z_2}$ 顺时针或逆时针旋转 $\frac{\pi}{3}$, 因此

$$\begin{aligned} z_3 - z_1 &= (z_2 - z_1)e^{\pm \frac{\pi i}{3}} = (1 + i)\left(\frac{1}{2} \pm \frac{\sqrt{3}}{2}i\right) \\ &= \frac{1 - \sqrt{3}}{2} + \frac{1 + \sqrt{3}}{2}i \quad \text{或} \quad \frac{1 + \sqrt{3}}{2} + \frac{1 - \sqrt{3}}{2}i, \end{aligned}$$

$$z_3 = \frac{3 - \sqrt{3}}{2} + \frac{1 + \sqrt{3}}{2}i \quad \text{或} \quad \frac{3 + \sqrt{3}}{2} + \frac{1 - \sqrt{3}}{2}i.$$



例题：复数解决平面几何问题

例. 设 AD 是 $\triangle ABC$ 的角平分线, 证明 $\frac{AB}{AC} = \frac{DB}{DC}$.

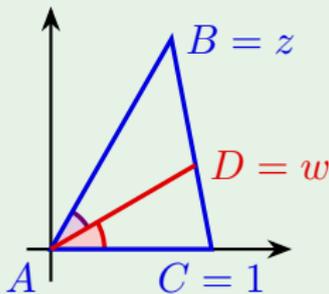
证明. 不妨设 $A = 0$, $B = z$, $C = 1$, $D = w$.
 设

$$\lambda = \frac{DC}{BC} = \frac{w-1}{z-1} \in (0, 1).$$

那么

$$w = 1 + \lambda(z-1) = \lambda z + (1-\lambda).$$

由于 $\angle BAD = \angle DAC$, 根据复数乘法的几何意义, $\frac{z-0}{w-0}$ 是 $\frac{w-0}{1-0}$ 的正实数倍.



对棣莫弗公式左侧进行二项式展开可以得到

$$\cos(2\theta) = 2 \cos^2 \theta - 1,$$

$$\cos(3\theta) = 4 \cos^3 \theta - 3 \cos \theta,$$

$$\cos(4\theta) = 8 \cos^4 \theta - 8 \cos^2 \theta + 1,$$

$$\cos(5\theta) = 16 \cos^5 \theta - 20 \cos^3 \theta + 5 \cos \theta.$$

一般地, 可以证明 $\cos n\theta$ 是 $\cos \theta$ 的 n 次多项式, 这个多项式

$$g_n(T) = 2^{n-1}T^n - n2^{n-3}T^{n-2} + \dots$$

叫做**切比雪夫多项式**. 它在计算数学的逼近理论中有着重要作用.

复数的乘幂可用于计算三角函数有关的式子.

例. 计算 $I = \sin \frac{\pi}{5} \sin \frac{2\pi}{5} \sin \frac{3\pi}{5} \sin \frac{4\pi}{5}$.

解答. 设 $z = e^{\frac{2\pi i}{5}}$. 那么

$$\begin{aligned} I &= \frac{z^2 - z^3}{2i} \cdot \frac{z^4 - z}{2i} \cdot \frac{z - z^4}{2i} \cdot \frac{z^3 - z^2}{2i} \\ &= \frac{1}{16} [5 - (1 + z + z^2 + z^3 + z^4)] = \frac{5}{16}. \end{aligned}$$

我们利用复数乘幂公式来计算复数 z 的 n 次方根 $\sqrt[n]{z}$. 设

$$w^n = z = re^{i\theta} \neq 0, \quad w = \rho e^{i\varphi},$$

则

$$w^n = \rho^n (\cos n\varphi + i \sin n\varphi) = r(\cos \theta + i \sin \theta).$$

比较两边的模可知

$$\rho^n = r, \quad \rho = \sqrt[n]{r}.$$

为了避免记号冲突, 当 r 是正实数时, $\sqrt[n]{r}$ 默认表示 r 的唯一的 n 次正实根, 称之为**算术根**. 由于 $n\varphi$ 和 θ 的正弦和余弦均相等, 因此存在整数 k 使得

$$n\varphi = \theta + 2k\pi, \quad \varphi = \frac{\theta + 2k\pi}{n}.$$

故

$$w = w_k = \sqrt[n]{r} \exp\left(\frac{\theta + 2k\pi}{n}i\right).$$

不难看出, $w_k = w_{k+n}$, 而 w_0, w_1, \dots, w_{n-1} 两两不同. 因此只需取 $k = 0, 1, \dots, n-1$.

复数的方根. 任意一个非零复数 z 的 n 次方根有 n 个值:

$$\sqrt[n]{z} = \sqrt[n]{r} \exp\left(\frac{\theta + 2k\pi}{n}i\right) = \sqrt[n]{r} \left(\cos \frac{\theta + 2k\pi}{n} + i \sin \frac{\theta + 2k\pi}{n} \right),$$

其中 $k = 0, 1, \dots, n-1$.

这些根的模都相等, 且 w_k 和 w_{k+1} 辐角相差 $\frac{2\pi}{n}$. 因此它们是以原点为中心, $\sqrt[n]{r}$ 为半径的圆的内接正 n 边形的顶点.

典型例题: 复数方根的计算

例. 求 $\sqrt[4]{1+i}$.

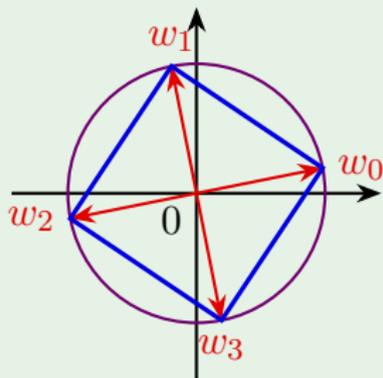
解答. 由于 $1+i = \sqrt{2} \exp\left(\frac{\pi i}{4}\right)$, 因此

$$\sqrt[4]{1+i} = \sqrt[8]{2} \exp \frac{(\frac{\pi}{4} + 2k\pi)i}{4}, \quad k = 0, 1, 2, 3.$$

于是该方根所有值为

$$w_0 = \sqrt[8]{2} e^{\frac{\pi i}{16}}, \quad w_1 = \sqrt[8]{2} e^{\frac{9\pi i}{16}},$$

$$w_2 = \sqrt[8]{2} e^{\frac{17\pi i}{16}}, \quad w_3 = \sqrt[8]{2} e^{\frac{25\pi i}{16}}.$$



现在我们来求三次方程 $x^3 + px + q = 0$ 的根, $p \neq 0$. 回顾求根公式:

$$x = u + v, \quad u^3 = -\frac{q}{2} + \sqrt{\Delta}, \quad uv = -\frac{p}{3}, \quad \Delta = \frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}.$$

(1) 若 $\Delta > 0$, 设 $\omega = e^{\frac{2\pi i}{3}}$, 设实数 α 满足 $\alpha^3 = -\frac{q}{2} + \sqrt{\Delta}$, 则

$$u = \alpha, \alpha\omega, \alpha\omega^2, \quad x = \alpha - \frac{p}{3\alpha}, \quad \alpha\omega - \frac{p}{3\alpha}\omega^2, \quad \alpha\omega^2 - \frac{p}{3\alpha}\omega.$$

容易证明后两个根都是虚数.

(2) 若 $\Delta \leq 0$, 则 $p < 0$, $|u|^2 = -\frac{p}{3} > 0$. 从而 $v = \bar{u}$. 设

$\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\Delta}} = u_1, u_2, u_3$, 则我们得到 3 个实根

$$x = u_1 + \bar{u}_1, \quad u_2 + \bar{u}_2, \quad u_3 + \bar{u}_3.$$

不难验证, 若有重根则 $\Delta = 0$.

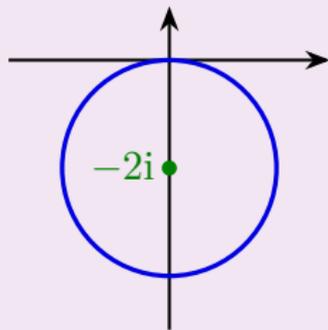
第四节 曲线和区域

例题：复数方程表圆

很多的平面图形能用复数形式的方程来表示. 这种表示方程有些时候会显得更加直观和易于理解.

例. $|z + 2i| = 2$. 该方程表示与 $-2i$ 的距离为 2 的点全体, 即圆心为 $-2i$ 半径为 2 的圆.

一般的圆方程为 $|z - z_0| = R$, 其中 z_0 是圆心, R 是半径.



例题：复数方程表平面图形

练习. $z^2 + \bar{z}^2 = 1$ 和 $z^2 - \bar{z}^2 = i$ 分别表示什么图形？

答案. 双曲线 $x^2 - y^2 = \frac{1}{2}$ 和双曲线 $xy = \frac{1}{4}$.

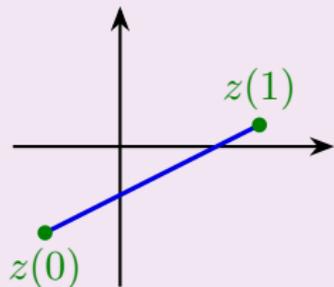
例题：连续曲线

例. 圆 $|z - z_0| = R$ 的参数方程: $z = z_0 + Re^{i\theta}$, $\theta \in [0, 2\pi]$.

例. 直线段

$$z(t) = z_0 + (z_1 - z_0)t, \quad t \in [0, 1],$$

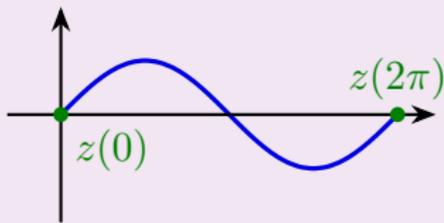
其中 z_0, z_1 为两个端点. 它是简单曲线.



例. 正弦函数曲线段

$$z(t) = t + i \sin t, \quad t \in [0, 2\pi]$$

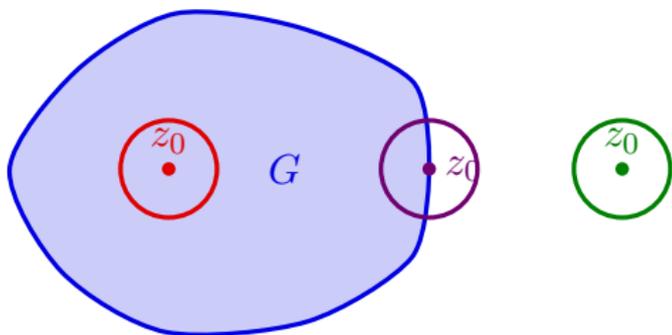
是简单曲线.



设 G 是复平面的一个子集, $z_0 \in \mathbb{C}$. 它们的位置关系有三种可能:

- (1) 若存在 z_0 的一个邻域 U 完全包含在 G 中, 则称 z_0 是 G 的一个**内点**.
- (2) 若存在 z_0 的一个邻域 U 完全不包含在 G 中, 则称 z_0 是 G 的一个**外点**.
- (3) 若 z_0 既不是内点也不是外点, 则称 z_0 是 G 的一个**边界点**.

内点都属于 G , 外点都不属于 G , 而边界点则都有可能. 这类比于区间的端点和区间的关系.



定义.

- (1) 若 G 的所有点都是内点, 也就是说, G 的边界点都不属于它, 称 G 是一个**开集**.
- (2) 若 G 的所有边界点都属于 G , 称 G 是一个**闭集**.

G 是一个闭集当且仅当它的补集是开集.

例如

$$|z - z_0| < R, \quad 1 < \operatorname{Re} z < 3, \quad \frac{\pi}{4} < \arg z < \frac{3\pi}{4}$$

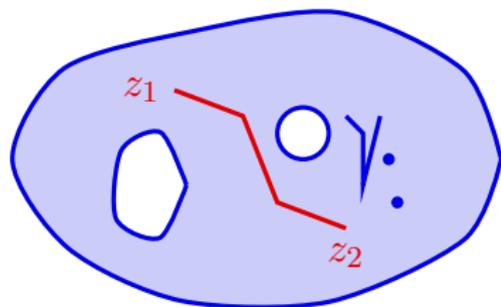
都是开集. 直观上看: 开集往往由 $>$, $<$ 的不等式给出, 闭集往往由 \geq , \leq 的不等式给出. 不过注意这并不是绝对的.

若 D 可以被包含在某个开圆盘 $U(0, R)$ 中, 则称它是**有界**的. 否则称它是**无界**的.

定义. 若开集 D 的任意两个点之间都可以用一条完全包含在 D 中的折线连接起来, 则称 D 是一个**区域**. 也就是说, 区域是连通的开集.

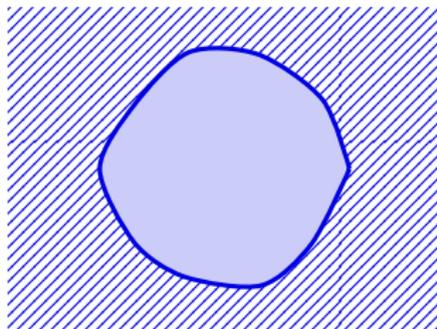
观察右侧图案, 阴影部分 (不包含线条部分) 中任意两点可用折线连接, 因此它是一个区域. 这些线条和点构成了它的边界.

区域和它的边界一起构成了**闭区域**, 记作 \bar{D} . 它是一个闭集.



注意数学中边界的概念与日常所说的边界是两码事. 例如区域 $|z| > 1$ 的边界是 $|z| = 1$, 其闭区域是 $|z| \geq 1$.

闭路 C 把复平面划分成了两个区域, 一个有界一个无界. 分别称这两个区域是 C 的**内部**和**外部**. C 是它们的公共边界.

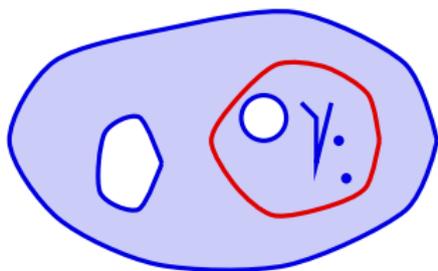


单连通区域和多连通区域

在前面所说的几个常见区域的例子中, 我们在区域中画一条闭路. 除了圆环域之外, 闭路的内部仍然包含在这个区域内.

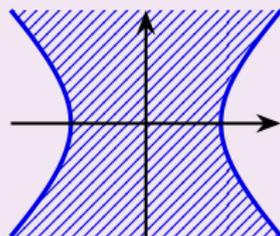
定义. 若区域 D 中的任一闭路的内部都包含在 D 中, 则称 D 是**单连通区域**. 否则称之为**多连通区域**.

单连通区域内的任一闭路可以“连续地变形”成一个点. 这也等价于: 设 l_0, l_1 是从 A 到 B 的两条连续曲线, 则 l_0 可以连续地变形为 l_1 且保持端点不动.

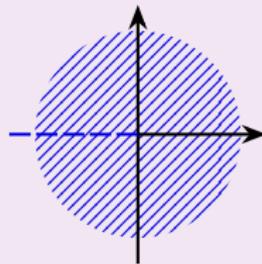


典型例题：区域的特性

例. $\operatorname{Re}(z^2) < 1$. 设 $z = x + yi$, 则 $\operatorname{Re}(z^2) = x^2 - y^2 < 1$. 这是无界的单连通区域.



例. $\arg z \neq \pi$. 即角状区域 $-\pi < \arg z < \pi$. 这是无界的单连通区域.



第五节 复变函数

复变函数的定义

所谓的**映射**, 就是两个集合之间的一种对应 $f: A \rightarrow B$, 使得对于每一个 $a \in A$, 有一个唯一确定的 $b = f(a)$ 与之对应.

- (1) 当 A 和 B 都是实数集合的子集时, 它就是一个实变函数.
- (2) 当 A 和 B 都是复数集合的子集时, 它就是一个**复变函数**.

例. $f(z) = \operatorname{Re} z, \arg z, |z|, z^n$ (n 为整数), $\frac{z+1}{z^2+1}$ 都是复变函数.

定义. 称 A 为函数 f 的**定义域**, 称 $\{w = f(z) \mid z \in A\}$ 为它的**值域**.

上述函数的定义域和值域分别是什么?

多值复变函数

在复变函数理论中, 我们常常会遇到多值的复变函数, 也就是说一个 $z \in A$ 可能有多个 w 与之对应. 例如 $\text{Arg } z$, $\sqrt[n]{z}$ 等.

为了方便研究, 我们常常需要对每一个 z , 选取固定的一个 $f(z)$ 的值. 这样我们得到了这个多值函数的一个单值分支.

例. $\arg z$ 是无穷多值函数 $\text{Arg } z$ 的一个单值分支.

在考虑多值的情况下, 复变函数总有反函数. 若 f 和 f^{-1} 都是单值的, 则称 f 是一一对应.

例. $f(z) = z^n$ 的反函数就是 $f^{-1}(w) = \sqrt[n]{w}$. 当 $n = \pm 1$ 时, f 是一一对应.

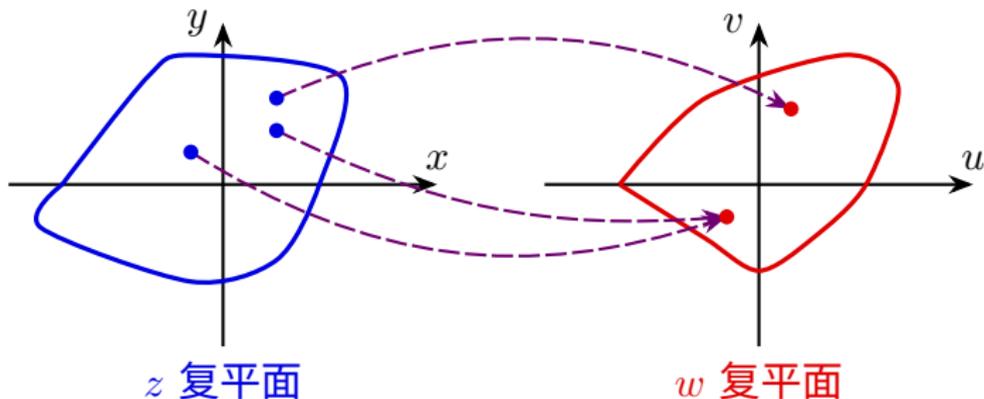
若无特别声明, 本课程中复变函数总是指单值的复变函数.

变换

大部分复变函数的图像无法在三维空间中表示出来. 为了直观理解和研究, 我们用两个复平面 (z 复平面和 w 复平面) 之间的**变换**(也叫**映射**、**映照**) 来表示这种对应关系. 注意到 w 的实部和虚部可以看作 z 的实部和虚部的函数, 即

$$w = u + iv = u(x, y) + iv(x, y)$$

的实部和虚部是两个二元实变函数.



第六节 极限和连续性

类似于实数的情形, 我们可以定义复数列和复变函数的极限.
我们先来看数列极限的定义.

定义. 设 $\{z_n\}_{n \geq 1}$ 是一个复数列. 若存在复数 z 满足对任意 $\varepsilon > 0$, 存在 N 使得当 $n \geq N$ 时, $|z_n - z| < \varepsilon$, 则称 z 是数列 $\{z_n\}$ 的极限, 记作 $\lim_{n \rightarrow \infty} z_n = z$.

此时称**极限存在**或**数列收敛**. 若不存在这样的 z , 则称**极限不存在**或**数列发散**.

可以看出, $\lim_{n \rightarrow \infty} z_n = z$ 等价于实极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} |z_n - z| = 0$.

由于复数列极限的定义和实数列极限的定义在形式上完全相同, 因此类似地, 极限的四则运算法则对于复数列也是成立的.

定理. 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} z_n = z$, $\lim_{n \rightarrow \infty} w_n = w$, 则

$$(1) \lim_{n \rightarrow \infty} (z_n \pm w_n) = z \pm w;$$

$$(2) \lim_{n \rightarrow \infty} z_n w_n = zw;$$

$$(3) \text{ 当 } w \neq 0 \text{ 时, } \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{z_n}{w_n} = \frac{z}{w}.$$

数列极限的定义可以用邻域的语言重新表述为:

定义. $\lim_{n \rightarrow \infty} z_n = z$ 是指: 对 z 的任意 δ 邻域 U , 存在 N 使得当 $n \geq N$ 时, $z_n \in U$.

若 $\lim_{n \rightarrow \infty} |z_n| = +\infty$, 我们将其记为 $\lim_{n \rightarrow \infty} z_n = \infty$. 这也等价于: 对任意 $X > 0$, 存在 N 使得当 $n \geq N$ 时, $|z_n| > X$.

我们能不能也用邻域的语言来描述 $\lim_{n \rightarrow \infty} z_n = \infty$ 呢? 我们将介绍复球面的概念, 它是复数的一种几何表示方式且自然地包含无穷远点 ∞ . 这种思想是在黎曼研究多值复变函数时引入的.

若约定 $|\infty| = +\infty$, 则分别称

$$U(\infty, X) = \{z \in \mathbb{C}^* : |z| > X\}, \quad \mathring{U}(\infty, X) = \{z \in \mathbb{C} : |z| > X\}$$

为 ∞ 的 X 邻域和去心 X 邻域. 这样, 前述极限可统一表述为: 若对 $z \in \mathbb{C}^*$ 的任意 δ 邻域 U , 存在 N 使得当 $n \geq N$ 时, $z_n \in U$, 则记

$$\lim_{n \rightarrow \infty} z_n = z.$$

朴素地看, 复球面上任意一点可以定义 δ 邻域为与其距离小于 δ 的所有点. 特别地, ∞ 的邻域通过前面所说的对应关系, 可以对应到扩充复平面上 ∞ 的一个邻域. 所以在复球面上, 普通复数和 ∞ 的邻域具有同等地位.

类似于复数列情形, 极限的四则运算法则对于复变函数也是成立的.

定理. 设 $\lim_{z \rightarrow z_0} f(z) = A$, $\lim_{z \rightarrow z_0} g(z) = B$, 则

(1) $\lim_{z \rightarrow z_0} (f \pm g)(z) = A \pm B$;

(2) $\lim_{z \rightarrow z_0} (fg)(z) = AB$;

(3) 当 $B \neq 0$ 时, $\lim_{z \rightarrow z_0} \left(\frac{f}{g}\right)(z) = \frac{A}{B}$.

和数列极限类似, 我们有下述定理:

定理. 设 $f(z) = u(x, y) + iv(x, y)$, $z_0 = x_0 + y_0i$, $A = u_0 + v_0i$, 则

$$\lim_{z \rightarrow z_0} f(z) = A \iff \lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ y \rightarrow y_0}} u(x, y) = u_0, \quad \lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ y \rightarrow y_0}} v(x, y) = v_0.$$

该定理表明: 研究复变函数极限, 只需研究其实部、虚部两个二元实函数的极限.

在学习了复变函数的导数后, 我们也可以使用等价无穷小替换、洛必达法则等工具来计算极限.

例题: 判断函数极限是否存在

例. 证明: 当 $z \rightarrow 0$ 时, 函数 $f(z) = \frac{\operatorname{Re} z}{|z|}$ 的极限不存在.

证明. 令 $z = x + yi$, 则 $f(z) = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}$. 因此

$$u(x, y) = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad v(x, y) = 0.$$

当 z 在实轴原点两侧分别趋向于 0 时, $u(x, y) \rightarrow \pm 1$. 因此 $\lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 0}} u(x, y)$ 不存在, 从而 $\lim_{z \rightarrow z_0} f(z)$ 不存在. □

第二章 解析函数

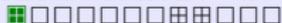
第一节 解析函数的概念

由于 \mathbb{C} 和 \mathbb{R} 一样是域, 因此我们可以像一元实变函数一样去定义复变函数的导数和微分.

定义. 设 $w = f(z)$ 的定义域是区域 D , $z_0 \in D$. 若极限

$$\lim_{z \rightarrow z_0} \frac{f(z) - f(z_0)}{z - z_0} = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{f(z_0 + \Delta z) - f(z_0)}{\Delta z}$$

存在, 则称 $f(z)$ 在 z_0 **可导**. 这个极限值称为 $f(z)$ 在 z_0 的**导数**, 记作 $f'(z_0)$. 若 $f(z)$ 在区域 D 内处处可导, 称 $f(z)$ **在 D 内可导**.



例题：线性函数的不可导性

例. 函数 $f(z) = x + 2yi$ 在哪些点处可导?

解答. 由定义可知

$$\begin{aligned} f'(z) &= \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{f(z + \Delta z) - f(z)}{\Delta z} \\ &= \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{(x + \Delta x) + 2(y + \Delta y)i - (x + 2yi)}{\Delta z} \\ &= \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\Delta x + 2 \Delta yi}{\Delta x + \Delta yi}. \end{aligned}$$

当 $\Delta x = 0, \Delta y \rightarrow 0$ 时, 上式 $\rightarrow 2$; 当 $\Delta y = 0, \Delta x \rightarrow 0$ 时, 上式 $\rightarrow 1$. 因此该极限不存在, $f(z)$ 处处不可导.

由上述求导法则, 不难知道:

定理.

- (1) 在 z_0 处可导的两个函数 $f(z)$, $g(z)$ 之和、差、积、商 ($g(z_0) \neq 0$) 仍然在 z_0 处可导.
- (2) 若函数 $g(z)$ 在 z_0 处可导, 函数 $f(w)$ 在 $g(z_0)$ 处可导, 则 $f[g(z)]$ 在 z_0 处可导.

由此可知, 多项式函数处处可导, 有理函数在其定义域内处处可导, 且二者导数形式和单变量实函数情形类似.

例题：利用求导运算法则计算导数

例. 求 $f(z) = \frac{z^2 + 3}{z + 1}$ 的导数.

解答. 由于

$$f(z) = z - 1 + \frac{4}{z + 1},$$

因此

$$f'(z) = 1 - \frac{4}{(z + 1)^2}.$$

定理. 若 $f(z)$ 在 z_0 可导, 则 $f(z)$ 在 z_0 连续.

该定理的证明和单变量实函数情形完全相同.

证明. 设 $\Delta w = f(z_0 + \Delta z) - f(z_0)$, 则

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \Delta w = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\Delta w}{\Delta z} \cdot \Delta z = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\Delta w}{\Delta z} \cdot \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \Delta z = f'(z_0) \cdot 0 = 0,$$

从而 $f(z)$ 在 z_0 处连续.



复变函数的微分也和单变量实函数情形类似.

定义. 若存在常数 A 使得函数 $w = f(z)$ 满足

$$\Delta w = f(z_0 + \Delta z) - f(z_0) = A \Delta z + o(\Delta z),$$

其中 $o(\Delta z)$ 表示 Δz 的高阶无穷小量, 则称 $f(z)$ 在 z_0 处可微, 称 $A \Delta z$ 为 $f(z)$ 在 z_0 的微分, 记作 $dw = A \Delta z$.

和一元实变函数情形一样, 复变函数的可微和可导是等价的, 且 $dw = f'(z_0) \Delta z, dz = \Delta z$. 故

$$dw = f'(z_0) dz, \quad f'(z_0) = \frac{dw}{dz}.$$

定义.

- (1) 若函数 $f(z)$ 在 z_0 的一个邻域内处处可导, 则称 $f(z)$ 在 z_0 解析.
- (2) 若 $f(z)$ 在区域 D 内处处解析, 则称 $f(z)$ 在 D 内解析, 或称 $f(z)$ 是 D 内的一个解析函数.
- (3) 若 $f(z)$ 在 z_0 不解析, 则称 z_0 为 $f(z)$ 的一个奇点.

在一点解析蕴含在这点可导, 反之未必. 无定义、不连续、不可导、可导但不解析, 都会导致奇点的产生. 不过, 若 z_0 是 $f(z)$ 定义域的外点, 即存在 z_0 的邻域与 $f(z)$ 定义域交集为空集, 这种情形不甚有趣, 因此我们不考虑这类奇点.

在区域 D 内解析和在 D 内可导是等价的. 这是因为任意 $z_0 \in D$ 均存在一个包含在 D 内的邻域.

例题：解析与可导的关系

由于一个点的邻域也是一个开集, 因此若 $f(z)$ 在 z_0 处解析, 则 $f(z)$ 在 z_0 的一个邻域内处处可导, 从而在该邻域内解析. 因此 $f(z)$ 解析点全体是一个开集, 它是可导点集合的内点构成的集合.

练习. 函数 $f(z)$ 在点 z_0 处解析是 $f(z)$ 在该点可导的(A).

(A) 充分非必要条件

(B) 必要非充分条件

(C) 充要条件

(D) 既非充分也非必要条件

答案. 解析要求在 z_0 的一个邻域内都可导才行.

例题：函数的解析性

例. 研究函数 $f(z) = |z|^2$ 的解析性.

解答. 注意到

$$\frac{f(z + \Delta z) - f(z)}{\Delta z} = \frac{(z + \Delta z)(\bar{z} + \overline{\Delta z}) - z\bar{z}}{\Delta z} = \bar{z} + \overline{\Delta z} + z \frac{\Delta x - \Delta yi}{\Delta x + \Delta yi}.$$

- 若 $z = 0$, 则当 $\Delta z \rightarrow 0$ 时该式极限为 0.
- 若 $z \neq 0$, 则当 $\Delta y = 0, \Delta x \rightarrow 0$ 时该式极限为 $\bar{z} + z$;

当 $\Delta x = 0, \Delta y \rightarrow 0$ 时该式极限为 $\bar{z} - z$. 因此此时极限不存在. 故 $f(z)$ 仅在 $z = 0$ 处可导, 从而处处不解析.

解析函数的四则运算和复合

定理.

- (1) 在 z_0 处解析的两个函数 $f(z)$, $g(z)$ 之和、差、积、商 ($g(z_0) \neq 0$) 仍然在 z_0 处解析.
- (2) 若函数 $g(z)$ 在 z_0 处解析, 函数 $f(w)$ 在 $g(z_0)$ 处解析, 则 $f[g(z)]$ 在 z_0 处解析.

定理.

- (1) 在 D 内解析的两个函数 $f(z)$, $g(z)$ 之和、差、积、商仍然在 D (作商时需要去掉 $g(z) = 0$ 的点) 内解析.
- (2) 若函数 $g(z)$ 在 D 内解析且像均落在 D' 中, 函数 $f(w)$ 在 D' 内解析, 则 $f[g(z)]$ 在 D 内解析.

由此可知, 多项式函数处处解析. 有理函数在其定义域内处处解析, 分母的零点是它的奇点.

第二节 函数解析的充要条件

通过对一些简单函数的分析, 我们发现可导的函数往往可以直接表达为 z 的函数的形式, 而不解析的往往包含 x, y, \bar{z} 等内容.

这种现象并不是偶然的. 我们来研究二元实变量函数的可微性与复变函数可导的关系.

为了简便我们用 u_x, u_y, v_x, v_y 等记号表示偏导数.

设 $f = u + iv$ 在 z 处可导, $f'(z) = a + bi$, 则

$$\Delta u + i \Delta v = \Delta f = (a + bi)(\Delta x + i \Delta y) + o(\Delta z).$$

展开可知

$$\Delta u = a \Delta x - b \Delta y + o(\Delta z),$$

$$\Delta v = b \Delta x + a \Delta y + o(\Delta z).$$

由于 $o(\Delta z) = o(|\Delta z|) = o(\sqrt{x^2 + y^2})$, 因此 u, v 可微且
 $u_x = v_y = a, v_x = -u_y = b$.

反过来, 假设 u, v 可微且 $u_x = v_y, v_x = -u_y$. 由全微分公式

$$\Delta u = u_x \Delta x + u_y \Delta y + o(\Delta z) = u_x \Delta x - v_x \Delta y + o(\Delta z),$$

$$\Delta v = v_x \Delta x + v_y \Delta y + o(\Delta z) = v_x \Delta x + u_x \Delta y + o(\Delta z),$$

$$\Delta f = \Delta(u + iv) = (u_x + iv_x) \Delta x + (-v_x + iu_x) \Delta y + o(\Delta z)$$

$$= (u_x + iv_x) \Delta(x + iy) + o(\Delta z)$$

$$= (u_x + iv_x) \Delta z + o(\Delta z).$$

故 $f(z)$ 在 z 处可导, 且 $f'(z) = u_x + iv_x = v_y - iu_y$.

由此得到

柯西-黎曼定理. $f(z)$ 在 z 可导当且仅当在 z 点 u, v 可微且满足柯西-黎曼方程 (简称为 **C-R 方程**):

$$u_x = v_y, \quad v_x = -u_y.$$

此时

$$f'(z) = u_x + iv_x = v_y - iu_y.$$

需要注意的是: 柯西-黎曼定理中的**可微性**和 **C-R 方程**缺一不可.



注意到 $x = \frac{1}{2}z + \frac{1}{2}\bar{z}$, $y = -\frac{i}{2}z + \frac{i}{2}\bar{z}$. 仿照着二元实函数偏导数在变量替换下的变换规则, 定义 f 对 z 和 \bar{z} 的偏导数为

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial z} = \frac{\partial x}{\partial z} \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial z} \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{1}{2} \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{i}{2} \frac{\partial f}{\partial y}, \\ \frac{\partial f}{\partial \bar{z}} = \frac{\partial x}{\partial \bar{z}} \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial \bar{z}} \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{1}{2} \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{i}{2} \frac{\partial f}{\partial y}. \end{cases}$$

若把 z, \bar{z} 看成独立变量, 那么

- 当 f 在 z 处可导时, $df = f' dz$.
- 当 f 关于 z, \bar{z} 可微时 (即 u, v 可微), $df = \frac{\partial f}{\partial z} dz + \frac{\partial f}{\partial \bar{z}} d\bar{z}$.

所以 f 在 z 处可导当且仅当 u, v 可微且 $\frac{\partial f}{\partial \bar{z}} = 0$, 此时 $f'(z) = \frac{\partial f}{\partial z}$. 这也解释了为何含有 x, y, \bar{z} 形式的函数往往不可导, 而可导的函数往往可以直接表达为 z 的形式.

由于二元函数的偏导数均连续蕴含可微, 因此我们有:

定理.

- (1) 若 u_x, u_y, v_x, v_y 在 z 处连续, 且满足 C-R 方程, 则 $f(z)$ 在 z 可导.
- (2) 若 u_x, u_y, v_x, v_y 在区域 D 上处处连续, 且满足 C-R 方程, 则 $f(z)$ 在 D 上可导 (从而解析).

这些连续性要求也可以换成 $\frac{\partial f}{\partial z}, \frac{\partial f}{\partial \bar{z}}$ 的连续性.

例. 函数 $f(z) = \bar{z}$ 在何处可导, 在何处解析?

解答. 由 $u = x, v = -y$ 可知

$$\begin{aligned}u_x &= 1, & u_y &= 0, \\v_x &= 0, & v_y &= -1.\end{aligned}$$

因为 $u_x = 1 \neq v_y = -1$, 所以该函数处处不可导, 处处不解析.

也可由 $\frac{\partial f}{\partial \bar{z}} = 1 \neq 0$ 看出.

典型例题: 利用 C-R 方程判断可导和解析

例. 函数 $f(z) = e^x(\cos y + i \sin y)$ 在何处可导, 在何处解析?

解答. 由 $u = e^x \cos y, v = e^x \sin y$ 可知

$$\begin{aligned} u_x &= e^x \cos y, & u_y &= -e^x \sin y, \\ v_x &= e^x \sin y, & v_y &= e^x \cos y. \end{aligned}$$

因此该函数处处可导, 处处解析, 且

$$f'(z) = u_x + i v_x = e^x(\cos y + i \sin y) = f(z).$$

实际上, 这个函数就是复变量的指数函数 e^z .

典型例题: 利用 C-R 方程判断可导和解析

练习. 函数(A)在 $z = 0$ 处不可导.

(A) $2x + 3yi$

(B) $2x^2 + 3y^2i$

(C) $e^x \cos y + ie^x \sin y$

(D) $x^2 - xyi$

答案. 根据 C-R 方程可知对于 A, $u_x(0) = 2 \neq v_y(0) = 3$. 对于 BD, 各个偏导数在 0 处取值都是 0. C 则是处处都可导.

例题：利用 C-R 方程判断可导和解析

例. 设函数 $f(z) = (x^2 + axy + by^2) + i(cx^2 + dxy + y^2)$ 在复平面内处处解析. 求实常数 a, b, c, d 以及 $f'(z)$.

解答. 由于

$$\begin{aligned} u_x &= 2x + ay, & u_y &= ax + 2by, \\ v_x &= 2cx + dy, & v_y &= dx + 2y, \end{aligned}$$

因此

$$\begin{aligned} 2x + ay &= dx + 2y, & ax + 2by &= -(2cx + dy), \\ a &= d = 2, & b &= c = -1, \end{aligned}$$

$$f'(z) = u_x + iv_x = 2x + 2y + i(-2x + 2y) = (2 - 2i)z.$$

例. 若 $f(z)$ 解析且 $f'(z)$ 处处非零, 则曲线族 $u(x, y) = c_1$ 和曲线族 $v(x, y) = c_2$ 互相正交.

证明. 由于 $f'(z) = u_x - iu_y$, 因此 u_x, u_y 不全为零. 对 $u(x, y) = c_1$ 使用隐函数求导法则得

$$u_x dx + u_y dy = 0,$$

从而 $\mathbf{u} = (u_y, -u_x)$ 是该曲线在 z 处的非零切向量. 同理 $\mathbf{v} = (v_y, -v_x)$ 是 $v(x, y) = c_2$ 在 z 处的非零切向量. 由于

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = u_y v_y + u_x v_x = u_y u_x - u_x u_y = 0,$$

因此这两个切向量 \mathbf{u}, \mathbf{v} 正交, 从而曲线正交. □

当 $f'(z_0) \neq 0$ 时, 经过 z_0 的两条曲线 C_1, C_2 的夹角和它们的像 $f(C_1), f(C_2)$ 在 $f(z_0)$ 处的夹角总是相同的. 这种性质被称为**保角性**.

这是因为 $df = f'(z_0) dz$. 局部来看 f 把 z_0 附近的点以 z_0 为中心放缩 $f'(z_0)$ 倍并逆时针旋转 $\arg f'(z_0)$. 由 w 复平面上曲线族 $u = c_1, v = c_2$ 正交可知上述例题成立.

第三节 初等函数

我们将实变函数中的初等函数推广到复变函数. 多项式函数和有理函数的解析性质已经介绍过, 这里不再重复. 现在我们来定义指数函数.

指数函数有多种等价的定义方式:

- (1) $\exp z = e^x(\cos y + i \sin y)$ (欧拉恒等式);
- (2) $\exp z = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{z}{n}\right)^n$ (极限定义);
- (3) $\exp z = 1 + z + \frac{z^2}{2!} + \frac{z^3}{3!} + \cdots = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n \frac{z^k}{k!}$ (级数定义);
- (4) $\exp z$ 是唯一的一个处处解析的函数, 使得当 $z = x \in \mathbb{R}$ 时, $\exp z = e^x$ (e^x 的解析延拓).

我们来证明(1)和(2)等价.

$$\begin{aligned}\lim_{n \rightarrow \infty} \left| 1 + \frac{z}{n} \right|^n &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{2x}{n} + \frac{x^2 + y^2}{n^2} \right)^{\frac{n}{2}} \quad (1^\infty \text{ 型不定式}) \\ &= \exp \left(\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{2} \left(\frac{2x}{n} + \frac{x^2 + y^2}{n^2} \right) \right) = e^x.\end{aligned}$$

不妨设 $n > |z|$, 这样 $1 + \frac{z}{n}$ 落在右半平面,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n \arg \left(1 + \frac{z}{n} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} n \arctan \frac{y}{n+x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{ny}{n+x} = y.$$

故 $\exp z = e^x (\cos y + i \sin y)$.

对数函数 $\text{Ln } z$ 定义为指数函数 $\exp z$ 的反函数. 为什么我们用大写的 Ln 呢? 在复变函数中, 很多函数是多值函数. 为了便于研究, 我们会固定它的一个单值分支. 我们将多值的这个开头字母大写, 而对应的单值的则是开头字母小写. 例如 $\text{Arg } z$ 和 $\arg z$.

设 $z \neq 0, e^w = z = re^{i\theta} = e^{\ln r + i\theta}$, 则

$$w = \ln r + i\theta + 2k\pi i, \quad k \in \mathbb{Z}.$$

幂函数的性质: a 为整数时

定义.

(1) 设 $a \neq 0$, $z \neq 0$, 定义幂函数

$$w = z^a = e^{a \operatorname{Ln} z} = \exp[a \ln|z| + ia(\arg z + 2k\pi)], \quad k \in \mathbb{Z}.$$

(2) 幂函数的主值为

$$w = e^{a \ln z} = \exp(a \ln|z| + ia \arg z).$$

根据 a 的不同, 这个函数有着不同的性质.

当 a 为整数时, 因为 $e^{2ak\pi i} = 1$, 所以 $w = z^a$ 是单值的. 此时 z^a 就是我们之前定义的乘幂.

当 a 是非负整数时, z^a 在复平面上解析; 当 a 是负整数时, z^a 在 $\mathbb{C} - \{0\}$ 上解析.

典型例题: 解三角函数方程

另解. 由 $\sin z = 2$ 可知

$$\cos z = \sqrt{1 - \sin^2 z} = \pm\sqrt{3}i.$$

于是 $e^{iz} = \cos z + i \sin z = (2 \pm \sqrt{3})i$,

$$z = -i \operatorname{Ln}[(2 \pm \sqrt{3})i] = \left(2k + \frac{1}{2}\right)\pi \pm i \ln(2 + \sqrt{3}), \quad k \in \mathbb{Z}.$$

对于任意 z , 总存在 θ 使得

$$\operatorname{Arcsin} z = \left(2k + \frac{1}{2}\right)\pi \pm \theta,$$

$$\operatorname{Arccos} z = 2k\pi \pm \theta,$$

$$\operatorname{Arctan} z = k\pi + \theta, \quad (z \neq \pm i).$$

当 $z = x > 1$ 时,

$$\begin{aligned}
 3g(z) - \ln(x-1) &= 2 \operatorname{Re}[\zeta \ln(x-\zeta)] \\
 &= 2 \operatorname{Re}\left[\frac{-1+\sqrt{3}i}{2} \ln\left(x - \frac{-1+\sqrt{3}i}{2}\right)\right] \\
 &= 2 \operatorname{Re}\left(\frac{-1+\sqrt{3}i}{2} \left(\ln \sqrt{x^2+x+1} - i \operatorname{arccot} \frac{2x+1}{\sqrt{3}}\right)\right) \\
 &= \ln \sqrt{x^2+x+1} + \sqrt{3} \operatorname{arccot} \frac{2x+1}{\sqrt{3}}.
 \end{aligned}$$

于是我们得到当 $x > 1$ 时,

$$g(x) = \frac{1}{3} \ln|x-1| - \frac{1}{6} \ln(x^2+x+1) + \frac{\sqrt{3}}{3} \operatorname{arccot} \frac{2x+1}{\sqrt{3}}.$$

可以看出对于实数 $x < 1$, 上式的导数也等于 $f(x)$, 从而 $f(x)$ 的不定积分为 $g(x) + C$, $C \in \mathbb{R}$.

第三章 复变函数的积分

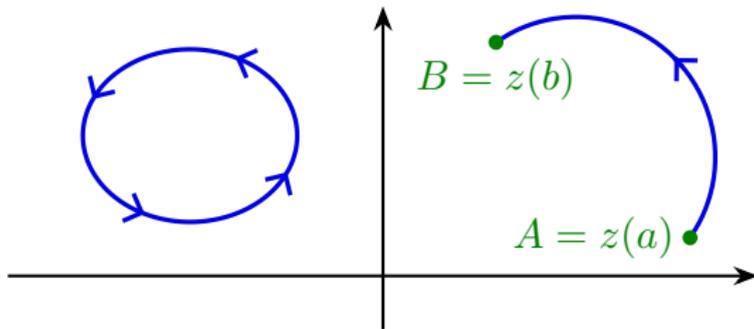
第一节 复变函数积分的概念

有向曲线

设 C 是平面上一条光滑或逐段光滑的连续曲线, 也就是说它的参数方程 $z = z(t), a \leq t \leq b$ 除去有限个点之外都有非零导数. 这里 $z'(t) = x'(t) + iy'(t)$.

固定它的一个方向, 称为**正方向**, 则我们得到一条**有向曲线**. 和这条曲线方向相反的记作 C^- , 它的方向被称为该曲线**负方向**.

对于闭路, 它的**正方向总是指逆时针方向**, 负方向总是指顺时针方向. 以后我们不加说明的话**默认是正方向**.



所谓的复变函数积分, 本质上仍然是第二类曲线积分. 设复变函数

$$w = f(z) = u(x, y) + iv(x, y)$$

定义在区域 D 内, 有向曲线 C 包含在 D 中. 形式地展开

$$f(z) dz = (u + iv)(dx + i dy) = (u dx - v dy) + i(u dy + v dx).$$

定义. 若下述右侧两个线积分均存在, 则定义

$$\int_C f(z) dz = \int_C (u dx - v dy) + i \int_C (v dx + u dy)$$

为 $f(z)$ 沿曲线 C 的积分.

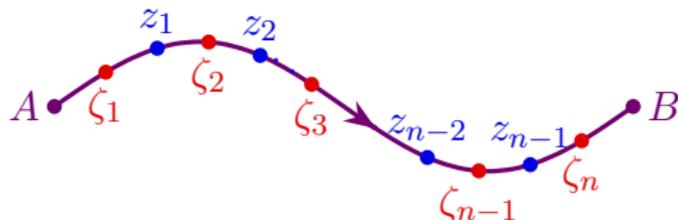
复变函数积分: 黎曼积分定义

当然, 我们也可以像线积分那样通过分割来定义. 在曲线 C 上依次选择分点 $z_0 = A, z_1, \dots, z_{n-1}, z_n = B$. 然后在每一段弧上任取

$\zeta_k \in \widehat{z_{k-1}z_k}$ 并作和式

$$S_n = \sum_{k=1}^n f(\zeta_k) \Delta z_k, \quad \Delta z_k = z_k - z_{k-1}.$$

然后称 $n \rightarrow \infty$, 分割的最大弧长 $\rightarrow 0$ 时 S_n 的极限为复变函数积分. 这二者是等价的.



若 C 是闭路, 则该积分记为 $\oint_C f(z) dz$. 此时该积分不依赖端点的选取.

若 C 是实轴上的区间 $[a, b]$ 且 $f(z) = u(x)$, 则

$$\int_C f(z) dz = \int_a^b f(z) dz = \int_a^b u(x) dx$$

就是黎曼积分.

根据线积分的存在性条件可知:

定理. 若 $f(z)$ 在 D 内连续, C 是光滑曲线, 则 $\int_C f(z) dz$ 总存在.

线积分中诸如变量替换等技巧可以照搬过来使用. 设

$$C : z(t) = x(t) + iy(t), \quad a \leq t \leq b$$

是一条光滑有向曲线, 且正方向为 t 增加的方向, 则
 $dz = z'(t) dt = (x'(t) + iy'(t)) dt$.

积分计算方法 I: 参变量法.

$$\int_C f(z) dz = \int_a^b f(z(t)) z'(t) dt.$$

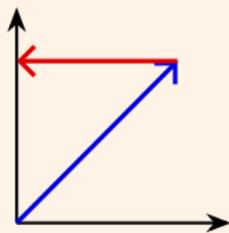
若 C 的正方向是从 $z(b)$ 到 $z(a)$, 则需要交换右侧积分的上下限.

若 C 是逐段光滑的, 则相应的积分就是各段的积分之和. 以后我们只考虑逐段光滑曲线上的连续函数的积分.

典型例题：计算复变函数沿曲线的积分

可以看出, 即便起点和终点相同, 沿不同路径 $f(z) = \operatorname{Re} z$ 的积分也可能不同. 而 $f(z) = z$ 的积分则只和起点和终点位置有关, 与路径无关. 原因在于 $f(z) = z$ 是处处解析的, 我们会在下一节解释为何如此.

练习. 求 $\int_C \operatorname{Im} z dz = \underline{-\frac{1}{2} + \frac{i}{2}}$, 其中 C 是从原点沿 $y = x$ 到点 $1 + i$ 再到 i 的折线段.



例题：计算复变函数沿圆周的积分

例. 求 $\oint_{|z-z_0|=r} \frac{dz}{(z-z_0)^{n+1}}$, 其中 n 为整数.

解答. $C: |z-z_0|=r$ 的参数方程为 $z = z_0 + re^{i\theta}, 0 \leq \theta \leq 2\pi$. 于是 $dz = ire^{i\theta} d\theta$.

$$\begin{aligned} \oint_C \frac{dz}{(z-z_0)^{n+1}} &= \int_0^{2\pi} i(re^{i\theta})^{-n} d\theta = ir^{-n} \int_0^{2\pi} e^{-in\theta} d\theta \\ &= ir^{-n} \int_0^{2\pi} (\cos(n\theta) + i \sin(n\theta)) d\theta = \begin{cases} 2\pi i, & \text{若 } n = 0; \\ 0, & \text{若 } n \neq 0. \end{cases} \end{aligned}$$

这个积分以后经常用到, 它的特点是积分值与圆周的圆心和半径都无关.

定理 (线性性质).

$$(1) \int_C f(z) dz = - \int_{C^-} f(z) dz.$$

$$(2) \int_C kf(z) dz = k \int_C f(z) dz.$$

$$(3) \int_C [f(z) \pm g(z)] dz = \int_C f(z) dz \pm \int_C g(z) dz.$$

长大不等式. 设有向曲线 C 的长度为 L , $f(z)$ 在 C 上满足 $|f(z)| \leq M$, 则

$$\left| \int_C f(z) dz \right| \leq \int_C |f(z)| ds \leq ML.$$

证明. 对 $\left| \sum_{k=1}^n f(\zeta_k) \Delta z_k \right| \leq \sum_{k=1}^n |f(\zeta_k) \Delta z_k| \leq \sum_{k=1}^n |f(\zeta_k)| \Delta s_k \leq$

$M \sum_{k=1}^n \Delta s_k$ 取极限即可. □

长大不等式常常用于证明等式: 估算一个积分和一个具体的数值之差不超过任意给定的 ε , 从而得到二者相等.

注意到: 若被积函数 $f(z)$ 在 C 上的点都连续, 那么 $|f(z)|$ 是 C 的参变量 $t \in [a, b]$ 的连续函数, 从而有界, 即存在 M 使得

$$|f(z)| \leq M, \forall z \in C$$

小圆弧引理. 设函数 $f(z)$ 满足 $\lim_{z \rightarrow a} (z - a)f(z) = k$. 那么对于闭路

$$C_r : z = a + re^{i\theta}, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2,$$

有

$$\lim_{r \rightarrow 0} \int_{C_r} f(z) dz = ik(\theta_2 - \theta_1).$$

特别地, 若 $C_r : |z - a| = r$, 则上述极限为 $2k\pi i$.

类似地, 若 $\lim_{z \rightarrow \infty} z f(z) = k$, 则有大圆弧引理.

大圆弧引理. 设函数 $f(z)$ 满足 $\lim_{z \rightarrow \infty} z f(z) = k$. 那么对于闭路

$$C_R : z = Re^{i\theta}, \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2,$$

有

$$\lim_{R \rightarrow +\infty} \int_{C_R} f(z) dz = ik(\theta_2 - \theta_1).$$

上述结论中实际上只需要 $f(z)$ 在 $\theta_1 \leq \text{Arg } z \leq \theta_2$ 范围内的极限满足相应条件即可. 此外, 实际应用中遇到的常常是 $k = 0$ 的情形.

第二节 柯西-古萨定理和复合闭路定理

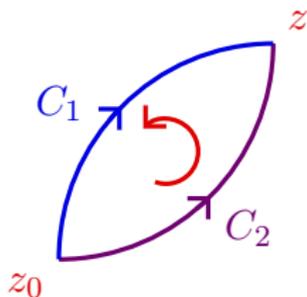
积分路径无关与闭路积分

观察下方的两条曲线 C_1, C_2 . 设 $C = C_1^- + C_2$. 可以看出

$$\int_{C_1} f(z) dz = \int_{C_2} f(z) dz \iff \oint_C f(z) dz = \int_{C_2} f(z) dz - \int_{C_1} f(z) dz = 0.$$

所以 $f(z)$ 的积分只与起点终点有关 $\iff f(z)$ 绕任意闭路的积分为零.

这里, 若闭合曲线 C 不是闭路 (有自相交的点), 也可以拆分为一些闭路的并.



上一节中我们计算了 $f(z) = z, \operatorname{Re} z, \frac{1}{z - z_0}$ 的积分. 其中

- $f(z) = z$ 处处解析, 积分只与起点终点有关 (闭路积分为零);
- $f(z) = \frac{1}{z - z_0}$ 有奇点 z_0 , 沿绕 z_0 闭路的积分非零;
- $f(z) = \operatorname{Re} z$ 处处不解析, 积分与路径有关 (闭路积分可能非零).

由此可见函数沿闭路积分为零, 与函数在闭路内部是否解析有关.

设 C 是一条闭路, D 是其内部区域. 设 $f(z)$ 在闭区域 $\bar{D} = D \cup C$ 上解析, 即存在区域 $B \supseteq \bar{D}$ 使得 $f(z)$ 在 B 上解析.

为了简便假设 $f'(z)$ 连续, 则

$$\begin{aligned} \oint_C f(z) dz &= \oint_C (u dx - v dy) + i \oint_C (v dx + u dy) \\ &\stackrel{\text{格林公式}}{=} - \iint_D (v_x + u_y) dx dy + i \iint_D (u_x - v_y) dx dy \\ &\stackrel{\text{C-R 方程}}{=} 0. \end{aligned}$$

也可以从

$$\oint_C f(z) dz = - \iint_D \frac{\partial f}{\partial \bar{z}} dz d\bar{z} = 0$$

看出.

柯西-古萨定理. 设 $f(z)$ 在闭路 C 上连续, C 内部解析, 则 $\oint_C f(z) dz = 0$.

推论. 设 $f(z)$ 在单连通区域 D 内解析, C 是 D 内一条闭合曲线, 则 $\int_C f(z) dz = 0$.

这里的闭合曲线可以不是闭路.

例题: 柯西-古萨定理计算积分

例. 求 $\oint_C \frac{1}{z(z^2+1)} dz$, 其中 $C: |z-i| = \frac{1}{2}$.

解答. 注意到

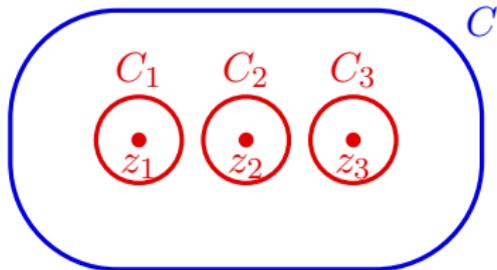
$$\frac{1}{z(z^2+1)} = \frac{1}{z} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{z+i} + \frac{1}{z-i} \right).$$

由于 $\frac{1}{z}, \frac{1}{z+i}$ 在 $|z-i| \leq \frac{1}{2}$ 上解析, 因此由柯西-古萨定理

$$\oint_C \frac{1}{z} dz = \oint_C \frac{1}{z+i} dz = 0,$$

$$\oint_C \frac{1}{z(z^2+1)} dz = -\frac{1}{2} \oint_C \frac{1}{z-i} dz = -\pi i.$$

在实际应用中, 若被积函数 $f(z)$ 在 (复合) 闭路 C 的内部有有限多个奇点 z_1, \dots, z_k . 那么我们可以在 C 内部 (围成的区域) 构造闭路 C_1, \dots, C_k , 使得每个 C_j 内部只包含一个奇点 z_j . 这样, 内部含多个奇点的情形就可以化成内部只含一个奇点的情形. 最后将这些闭路上的积分相加即可.

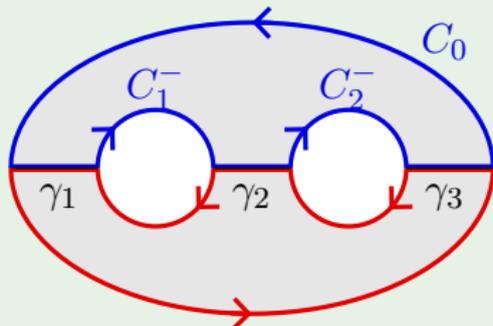


复合闭路定理

证明. 以曲线 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{n+1}$ 把 C_0, C_1, \dots, C_n 连接起来, 则它们把区域 D 分成了两个单连通区域 D_1, D_2 . 对 D_1 和 D_2 的边界应用柯西-古萨定理并相加, 则 γ_i 对应的部分正好相互抵消, 因此

$$\oint_{C_0} f(z) dz - \oint_{C_1} f(z) dz - \dots - \oint_{C_n} f(z) dz = 0.$$

于是定理得证. □



例题：复合闭路定理的应用

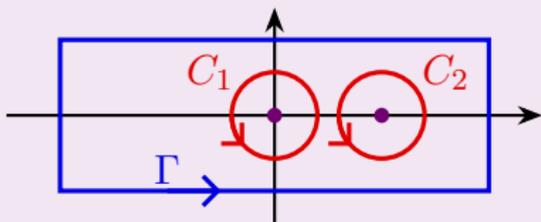
同理, 由复合闭路定理和上一节的结论可知当 a 在 C 的内部且 $n = -1$ 时积分为 $2\pi i$.

定理. 当 a 在 C 的内部时,

$$\oint_C \frac{dz}{(z-a)^{n+1}} = \begin{cases} 2\pi i, & n = 0; \\ 0, & n \neq 0. \end{cases}$$

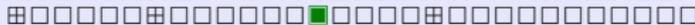
例题：复合闭路定理的应用

例. 求 $\oint_{\Gamma} \frac{2z-1}{z^2-z} dz$, 其中 Γ 是由 $2 \pm i, -2 \pm i$ 形成的矩形闭路.



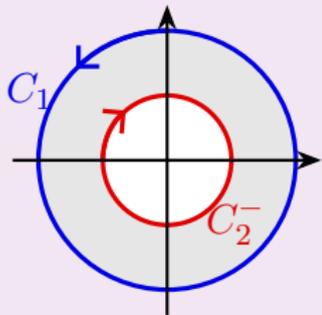
解答. 函数 $\frac{2z-1}{z^2-z}$ 在 Γ 内有两个奇点 $z=0, 1$. 设 C_1, C_2 如图所示, 由复合闭路定理

$$\begin{aligned} \oint_{\Gamma} \frac{2z-1}{z^2-z} dz &= \oint_{C_1} \frac{2z-1}{z^2-z} dz + \oint_{C_2} \frac{2z-1}{z^2-z} dz \\ &= \oint_{C_1} \frac{1}{z} dz + \oint_{C_1} \frac{1}{z-1} dz + \oint_{C_2} \frac{1}{z} dz + \oint_{C_2} \frac{1}{z-1} dz \\ &= 2\pi i + 0 + 0 + 2\pi i = 4\pi i. \end{aligned}$$



例题：复合闭路定理的应用

例. 求 $\oint_{\Gamma} \frac{e^z}{z} dz$, 其中 $\Gamma = C_1 + C_2^-$, $C_1 : |z| = 2, C_2 : |z| = 1$.



解答. 函数 $\frac{e^z}{z}$ 在 C_1, C_2 围城的圆环域内解析. 由复合闭路定理可知

$$\oint_{\Gamma} \frac{e^z}{z} dz = 0.$$

例. 设 $f(z) = \frac{p(z)}{q(z)}$ 是一个有理函数, 其中 p, q 的次数分别是 m, n . 证明:
若 $f(z)$ 的所有奇点都在闭路 C 的内部, 则

$$\oint_C f(z) dz = \begin{cases} 0, & \text{若 } n - m \geq 2, \\ 2\pi ia/b, & \text{若 } n - m = 1, \end{cases}$$

其中 a, b 分别是 $p(z), q(z)$ 的最高次项系数.

证明. 设 $C_R: |z| = R$. 注意到

$$\lim_{z \rightarrow \infty} z f(z) = \begin{cases} 0, & \text{若 } n - m \geq 2, \\ a/b, & \text{若 } n - m = 1, \end{cases}$$

于是由大圆弧引理可知

$$\lim_{R \rightarrow +\infty} \oint_{C_R} f(z) dz = \begin{cases} 0, & \text{若 } n - m \geq 2, \\ 2\pi i a/b, & \text{若 } n - m = 1. \end{cases}$$

由连续变形定理可知, 当 R 充分大使得 $f(z)$ 的所有奇点都在 C_R 的内部时,

$$\oint_C f(z) dz = \oint_{C_R} f(z) dz$$

恒成立, 由此命题得证. □

例题：有理函数绕闭路积分

注意闭路 C 内部必须包含 $f(z)$ 的所有奇点上述结论方可成立. 若 $m \geq n$, 则我们可将 $f(z)$ 写成一个多项式和上述形式有理函数之和.

练习. $\oint_{|z|=2} \frac{z^2}{(2z+1)(z^2+1)} dz = \underline{\pi i}$.

设有向曲线 $C : z = z(t), a \leq t \leq b$ 起于 $z_1 = z(a)$ 终于 $z_2 = z(b)$.
若存在 C 上的解析函数 $F(z)$ 使得 $F'(z) = f(z)$, 则

$$\int_C f(z) dz = \int_a^b f(z(t)) z'(t) dt$$

$$= F(z(t)) \Big|_a^b = F(z_2) - F(z_1).$$

这就是**牛顿-莱布尼兹公式**. 我们把 $F(z)$ 称为 $f(z)$ 的一个**原函数**. 特别地, 若 C 是闭路, 则 $\oint_C f(z) dz = 0$.

例如对于整数 $n \neq 0$, 当 a 在闭路 C 的内部时,

$$f(z) = \frac{1}{(z-a)^{n+1}}$$

在 C 上有原函数 $F(z) = -\frac{1}{n(z-a)^n}$. 从而 $\oint_C f(z) dz = 0$. 于是我们再次证明了该积分结论的 $n \neq 0$ 情形.

但需要注意 $\frac{1}{z-a}$ 在 C 上并没有原函数, 因为 $\ln(z-a)$ 在 C 上有奇点.

由于 $f(z)$ 解析, 因此连续. $\forall \varepsilon > 0, \exists \Delta > 0$ 使得当 $|\zeta - z| < \Delta$ 时, z 落在 K 中且 $|f(\zeta) - f(z)| < \varepsilon$. 当 $|\Delta z| < \Delta$ 时, 由长大不等式

$$\begin{aligned} \left| \frac{F(z + \Delta z) - F(z)}{\Delta z} - f(z) \right| &= \left| \int_z^{z+\Delta z} \frac{f(\zeta) - f(z)}{\Delta z} d\zeta \right| \\ &\leq \frac{\varepsilon}{|\Delta z|} \cdot |\Delta z| = \varepsilon. \end{aligned}$$

由于 ε 是任意的, 因此

$$f'(z) = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{F(z + \Delta z) - F(z)}{\Delta z} = F'(z). \quad \square$$

积分计算方法 II: 原函数法. 设 $f(z)$ 在单连通区域 D 上解析, z_1 至 z_2 的积分路径落在 D 内, 则

$$\int_{z_1}^{z_2} f(z) dz = F(z) \Big|_{z_1}^{z_2} = F(z_2) - F(z_1),$$

其中 $F(z)$ 是 $f(z)$ 的一个原函数.

由于导函数为 0 的函数只能是常值函数, 因此

$$F(z) = \int_{z_0}^z f(z) dz + C.$$

我们称之为 $f(z)$ 的**不定积分**, 记为 $\int f(z) dz$.

复变函数和实变函数的牛顿-莱布尼兹定理的差异在哪呢? 复变情形要求是**单连通区域上解析函数**, 实变情形要求是**闭区间上连续函数**.

典型例题: 利用原函数求积分

例. 求 $\int_{z_0}^{z_1} z dz$.

解答. 由于 $f(z) = z$ 处处解析, 且 $\int z dz = \frac{1}{2}z^2 + C$, 因此

$$\int_{z_0}^{z_1} z dz = \frac{1}{2}z^2 \Big|_{z_0}^{z_1} = \frac{1}{2}(z_1^2 - z_0^2).$$

因此之前的例子中 $\int_0^{3+4i} z dz = -\frac{7}{2} + 12i$, 无论从 0 到 $3 + 4i$ 的路径如何.

典型例题: 利用原函数求积分

例. 求 $\int_0^{\pi i} z \cos z^2 dz$.

解答. 由于 $f(z) = z \cos z^2$ 处处解析, 且

$$\int z \cos z^2 dz = \frac{1}{2} \int \cos z^2 dz^2 = \frac{1}{2} \sin z^2 + C,$$

因此

$$\int_0^{\pi i} z \cos z^2 dz = \frac{1}{2} \sin z^2 \Big|_0^{\pi i} = -\frac{1}{2} \sin \pi^2.$$

这里我们使用了**凑微分法**.

典型例题: 利用原函数求积分

例. 求 $\int_0^i z \cos z dz$.

解答. 由于 $f(z) = z \cos z$ 处处解析, 且

$$\int z \cos z dz = \int z d(\sin z) = z \sin z - \int \sin z dz = z \sin z + \cos z + C,$$

因此

$$\int_0^i z \cos z dz = (z \sin z + \cos z) \Big|_0^i = i \sin i + \cos i - 1 = e^{-1} - 1.$$

这里我们使用了分部积分法.

典型例题: 利用原函数求积分

例. 求 $\int_C (2z^2 + 8z + 1) dz$, 其中 C 是摆线 $\begin{cases} x = a(\theta - \sin \theta), \\ y = a(1 - \cos \theta), \end{cases} 0 \leq \theta \leq 2\pi$.

解答. 由于 $f(z) = 2z^2 + 8z + 1$ 处处解析, 因此

$$\text{原积分} = \int_0^{2\pi a} (2z^2 + 8z + 1) dz = \left(\frac{2}{3}z^3 + 4z^2 + z \right) \Big|_0^{2\pi a} = \frac{16}{3}\pi^3 a^3 + 16\pi^2 a^2 + 2\pi a$$

典型例题: 利用原函数求积分

例. 设 C 为沿着 $|z|=1$ 从 1 到 i 的逆时针圆弧, 求 $\int_C \frac{\ln(z+1)}{z+1} dz$.

解答. 函数 $f(z) = \frac{\ln(z+1)}{z+1}$ 在单连通区域 $\operatorname{Re} z > -1$ 内解析.

$$\int \frac{\ln(z+1)}{z+1} dz = \int \ln(z+1) d(\ln(z+1)) = \frac{1}{2} \ln^2(z+1) + C.$$

因此

$$\begin{aligned} \int_C \frac{\ln(z+1)}{z+1} dz &= \frac{1}{2} \ln^2(z+1) \Big|_1^i = \frac{1}{2} (\ln^2(1+i) - \ln^2 2) \\ &= \frac{1}{2} \left(\left(\ln \sqrt{2} + \frac{\pi}{4}i \right)^2 - \ln^2 2 \right) = -\frac{\pi^2}{32} - \frac{3}{8} \ln^2 2 + \frac{\pi \ln 2}{8} i. \end{aligned}$$

第三节 柯西积分公式

柯西-古萨定理是解析函数理论的基础,但在很多情形下它由柯西积分公式表现.

柯西积分公式. 设

- 函数 $f(z)$ 在 (复合) 闭路 C 及其内部 (围成的区域) D 解析,
- $z_0 \in D$,

则

$$f(z_0) = \frac{1}{2\pi i} \oint_C \frac{f(z)}{z - z_0} dz.$$

若 $z_0 \notin \bar{D}$, 由柯西-古萨定理, 右侧的积分是 0.

解析函数可以用一个积分

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \oint_C \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta, \quad z \in D$$

来表示, 这是研究解析函数理论的强有力工具.

解析函数在闭路 C 内部的取值完全由它在 C 上的值所确定. 这也是解析函数的特征之一. 特别地, 解析函数在圆心处的值等于它在圆周上的平均值. 设 $z = z_0 + Re^{i\theta}$, 则 $dz = iRe^{i\theta} d\theta$,

$$f(z_0) = \frac{1}{2\pi i} \oint_C \frac{f(z)}{z - z_0} dz = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(z_0 + Re^{i\theta}) d\theta.$$

证明. 由连续性可知, $\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0$ 使得当 $|z - z_0| \leq \delta$ 时, $z \in D$ 且 $|f(z) - f(z_0)| < \varepsilon$. 设 $\Gamma: |z - z_0| = \delta$, 则

$$\begin{aligned} \left| \oint_C \frac{f(z)}{z - z_0} dz - 2\pi i f(z_0) \right| &\stackrel{\text{复合闭路定理}}{=} \left| \oint_{\Gamma} \frac{f(z)}{z - z_0} dz - 2\pi i f(z_0) \right| \\ &= \left| \oint_{\Gamma} \frac{f(z)}{z - z_0} dz - \oint_{\Gamma} \frac{f(z_0)}{z - z_0} dz \right| = \left| \oint_{\Gamma} \frac{f(z) - f(z_0)}{z - z_0} dz \right| \\ &\leq \frac{\varepsilon}{\delta} \cdot 2\pi\delta = 2\pi\varepsilon. \end{aligned}$$

由 ε 的任意性可知

$$\oint_C \frac{f(z)}{z - z_0} dz = 2\pi i f(z_0). \quad \square$$

典型例题: 柯西积分公式的应用

可以看出, 当被积函数分子解析而分母形如 $z - z_0$ 时, 绕闭路的积分可以使用柯西积分公式计算.

例. 求 $\oint_{|z|=4} \frac{\sin z}{z} dz$.

解答. 函数 $\sin z$ 处处解析. 取 $f(z) = \sin z, z_0 = 0$ 并应用柯西积分公式得

$$\oint_{|z|=4} \frac{\sin z}{z} dz = 2\pi i \sin z|_{z=0} = 0.$$

典型例题: 柯西积分公式的应用

例. 设 $f(z) = \oint_{|\zeta|=\sqrt{3}} \frac{3\zeta^2 + 7\zeta + 1}{\zeta - z} d\zeta$, 求 $f'(1+i)$.

解答. 当 $|z| < \sqrt{3}$ 时, 由柯西积分公式得

$$f(z) = \oint_{|\zeta|=\sqrt{3}} \frac{3\zeta^2 + 7\zeta + 1}{\zeta - z} d\zeta = 2\pi i (3\zeta^2 + 7\zeta + 1)|_{\zeta=z} = 2\pi i (3z^2 + 7z + 1).$$

因此 $f'(z) = 2\pi i (6z + 7)$,

$$f'(1+i) = 2\pi i (13 + 6i) = -12\pi + 26\pi i.$$

注意当 $|z| > \sqrt{3}$ 时, $f(z) \equiv 0$.

高阶导数的柯西积分公式

解析函数可以由它的积分所表示. 不仅如此, 通过积分表示, 还可以说明**解析函数是任意阶可导的**.

柯西积分公式. 设函数 $f(z)$ 在闭路或复合闭路 C 及其内部 D 解析, 则对任意 $z_0 \in D$,

$$f^{(n)}(z_0) = \frac{n!}{2\pi i} \oint_C \frac{f(z)}{(z - z_0)^{n+1}} dz.$$

假如 $f(z)$ 有泰勒展开

$$f(z) = f(z_0) + f'(z_0)(z - z_0) + \cdots + \frac{f^{(n)}(z_0)}{n!}(z - z_0)^n + \cdots$$

那么由 $\oint_C \frac{dz}{(z - z_0)^n}$ 的性质可知上述公式右侧应当为 $f^{(n)}(z_0)$.

证明. 先证明 $n = 1$ 的情形. 设 δ 为 z_0 到 C 的最短距离. 当 $|h| < \delta$ 时, $z_0 + h \in D$. 由柯西积分公式,

$$f(z_0) = \frac{1}{2\pi i} \oint_C \frac{f(z)}{z - z_0} dz, \quad f(z_0 + h) = \frac{1}{2\pi i} \oint_C \frac{f(z)}{z - z_0 - h} dz.$$

两式相减得到

$$\frac{f(z_0 + h) - f(z_0)}{h} = \frac{1}{2\pi i} \oint_C \frac{f(z)}{(z - z_0)(z - z_0 - h)} dz.$$

当 $h \rightarrow 0$ 时, 左边的极限是 $f'(z_0)$. 因此我们只需要证明右边的极限等于

$$\frac{1}{2\pi i} \oint_C \frac{f(z)}{(z - z_0)^2} dz.$$

$$\text{二者之差} = \frac{1}{2\pi i} \oint_C \frac{hf(z)}{(z-z_0)^2(z-z_0-h)} dz.$$

由于 $f(z)$ 在 C 上连续, 故存在 M 使得 $|f(z)| \leq M$. 注意到 $z \in C$, $|z-z_0| \geq \delta$, $|z-z_0-h| \geq \delta-|h|$. 由长大不等式,

$$\left| \oint_C \frac{hf(z)}{(z-z_0)^2(z-z_0-h)} dz \right| \leq \frac{M|h|}{\delta^2(\delta-|h|)} \cdot L,$$

其中 L 是闭路 C 的长度. 当 $h \rightarrow 0$ 时, 它的极限为 0, 因此 $n=1$ 情形得证.

对于一般的 n , 我们通过归纳法将 $f^{(n)}(z_0)$ 和 $f^{(n)}(z_0+h)$ 表达为积分形式. 比较 $\frac{f^{(n)}(z_0+h) - f^{(n)}(z_0)}{h}$ 与积分公式右侧之差, 并利用长大不等式证明 $h \rightarrow 0$ 时, 差趋于零. 具体过程见教材. \square

典型例题: 使用高阶导数的柯西积分公式计算积分

例. 求 $\oint_{|z|=1} z^n e^z dz$, 其中 n 是整数.

解答.

(1) 当 $n \geq 0$ 时, $z^n e^z$ 处处解析. 由柯西-古萨定理,

$$\oint_{|z|=1} z^n e^z dz = 0.$$

(2) 当 $n \leq -1$ 时, e^z 处处解析. 由柯西积分公式,

$$\oint_{|z|=1} z^n e^z dz = \frac{2\pi i}{(-n-1)!} (e^z)^{(-n-1)} \Big|_{z=0} = \frac{2\pi i}{(-n-1)!}.$$

典型例题: 使用高阶导数的柯西积分公式计算积分

例. 求 $\oint_{|z-3|=2} \frac{1}{(z-2)^2 z^3} dz$ 和 $\oint_{|z-1|=3} \frac{1}{(z-2)^2 z^3} dz$.

解答.

(1) $\frac{1}{(z-2)^2 z^3}$ 在 $|z-3| < 2$ 的奇点为 $z=2$. 由柯西积分公式,

$$\oint_{|z-3|=2} \frac{1}{(z-2)^2 z^3} dz = \frac{2\pi i}{1!} \left(\frac{1}{z^3} \right)' \Big|_{z=2} = -\frac{3\pi i}{8}.$$

(2) $\frac{1}{(z-2)^2 z^3}$ 在 $|z-1| < 3$ 的奇点为 $z=0, 2$. 取 C_1, C_2 为以 $0, 2$ 为圆心的分离圆周.

$$\begin{aligned} \oint_{|z-1|=3} \frac{1}{(z-2)^2 z^3} dz &= \oint_{C_1} \frac{1}{(z-2)^2 z^3} dz + \oint_{C_2} \frac{1}{(z-2)^2 z^3} dz \\ &= \frac{2\pi i}{2!} \left(\frac{1}{(z-2)^2} \right)'' \Big|_{z=0} + \frac{2\pi i}{1!} \left(\frac{1}{z^3} \right)' \Big|_{z=2} = 0. \end{aligned}$$

练习. $\oint_{|z-2i|=3} \frac{1}{z^2(z-i)} dz = \underline{0}$.

例 (莫累拉定理). 设 $f(z)$ 在单连通区域 D 内连续, 且对于 D 中任意闭路 C 都有 $\oint_C f(z) dz = 0$, 则 $f(z)$ 在 D 内解析.

证明. 由题设可知 $f(z)$ 的积分与路径无关. 固定 $z_0 \in D$, 则

$$F(z) = \int_{z_0}^z f(z) dz$$

定义了 D 内的一个函数. 类似于原函数的证明可知 $F'(z) = f(z)$. 故 $f(z)$ 作为解析函数 $F(z)$ 的导数也是解析的. \square

第四节 解析函数与调和函数的关系

调和函数是一类重要的二元实变函数, 它和解析函数有着紧密的联系. 为了简便, 我们用 u_{xx}, u_{yy} 来表示二阶偏导数.

定义. 若二元实变函数 $u(x, y)$ 在区域 D 内有二阶连续偏导数, 且满足拉普拉斯方程

$$\Delta u := u_{xx} + u_{yy} = 0,$$

则称 $u(x, y)$ 是 D 内的调和函数.

定理. 区域 D 内解析函数 $f(z)$ 的实部和虚部都是调和函数.

证明. 设 $f(z) = u(x, y) + iv(x, y)$, 则 u, v 存在偏导数且

$$f'(z) = u_x + iv_x = v_y - iu_y.$$

由于 $f(z)$ 任意阶可导, 因此 u, v 存在任意阶偏导数. 由 $C-R$ 方程 $u_x = v_y, u_y = -v_x$ 可知

$$\Delta u = u_{xx} + u_{yy} = v_{yx} - v_{xy} = 0,$$

$$\Delta v = v_{xx} + v_{yy} = -u_{yx} + u_{xy} = 0. \quad \square$$

反过来, 调和函数是否一定是某个解析函数的实部或虚部呢? 对于单连通的情形, 答案是肯定的.

若 $u + iv$ 是区域 D 内的解析函数, 则我们称 v 是 u 的**共轭调和函数**. 换言之 $u_x = v_y, u_y = -v_x$. 显然 $-u$ 是 v 的共轭调和函数.

定理. 设 $u(x, y)$ 是单连通区域 D 内的调和函数, 则线积分

$$v(x, y) = \int_{(x_0, y_0)}^{(x, y)} -u_y dx + u_x dy + C$$

是 u 的共轭调和函数.

由此可知, 区域 D 上的调和函数在 $z \in D$ 的一个邻域内是一解析函数的实部, 从而在该邻域内具有任意阶连续偏导数. 而 z 的任取的, 因此**调和函数总具有任意阶连续偏导数**.

若 D 是多连通区域, 则未必存在共轭调和函数. 例如 $\ln(x^2 + y^2)$ 是复平面去掉原点上的调和函数, 但它并不是某个解析函数的实部. 事实上, 它是 $2 \operatorname{Ln} z$ 的实部.

在实际计算中, 我们**一般不用线积分**来得到共轭调和函数, 而是采用下述两种办法:

偏积分法. 通过 $v_y = u_x$ 解得 $v = \varphi(x, y) + \psi(x)$, 其中 $\psi(x)$ 待定. 再代入 $u_y = -v_x$ 中解出 $\psi(x)$.

不定积分法. 对 $f'(z) = u_x - iu_y = v_y + iv_x$ 求不定积分得到 $f(z)$.

典型例题: 求共轭调和函数和相应的解析函数

例. 证明 $u(x, y) = y^3 - 3x^2y$ 是调和函数, 并求其共轭调和函数以及由它们构成的解析函数.

解答. 由 $u_x = -6xy, u_y = 3y^2 - 3x^2$ 可知

$$u_{xx} + u_{yy} = -6y + 6y = 0,$$

故 u 是调和函数.

由 $v_y = u_x = -6xy$ 得 $v = -3xy^2 + \psi(x)$.

由 $v_x = -u_y = 3x^2 - 3y^2$ 得 $\psi'(x) = 3x^2, \psi(x) = x^3 + C$.

故 $v(x, y) = -3xy^2 + x^3 + C$,

$$f(z) = u + iv = y^3 - 3x^2y + i(-3xy^2 + x^3 + C) = i(x + iy)^3 + iC = i(z^3 + C), C \in \mathbb{R}$$

典型例题: 求共轭调和函数和相应的解析函数

当解析函数 $f(z)$ 是 x, y 的多项式形式时, $f(z)$ 本身一定是 z 的多项式. 于是将 x 全部换成 z , y 全部换成 0 就是 $f(z)$. 即使 $f(z)$ 不是 x, y 的多项式形式, 这种替换方式很多时候也奏效.

在上例中我们也可由另一种方法计算得到:

$$f'(z) = u_x - iu_y = -6xy - i(3y^2 - 3x^2) = 3iz^2.$$

因此 $f(z) = iz^3 + C$.

典型例题: 求共轭调和函数和相应的解析函数

例. 求解析函数 $f(z)$ 使得它的虚部为

$$v(x, y) = e^x(y \cos y + x \sin y) + x + y.$$

解答. 由 $u_x = v_y = e^x(\cos y - y \sin y + x \cos y) + 1$ 得

$$u = e^x(x \cos y - y \sin y) + x + \psi(y).$$

由 $u_y = -v_x = -e^x(y \cos y + x \sin y + \sin y) - 1$ 得

$$\psi'(y) = -1, \quad \psi(y) = -y + C.$$

故

$$\begin{aligned} f(z) &= u + iv = e^x(x \cos y - y \sin y) + x - y + C + i[e^x(y \cos y + x \sin y) + x + y] \\ &= ze^z + (1 + i)z + C, \quad C \in \mathbb{R}. \end{aligned}$$

典型例题: 求共轭调和函数和相应的解析函数

也可由

$$\begin{aligned}f'(z) &= v_y + iv_x \\&= e^x(\cos y - y \sin y + x \cos y) + 1 + i(e^x(y \cos y + x \sin y + \sin y) + 1) \\&= (z + 1)e^z + 1 + i.\end{aligned}$$

得 $f(z) = ze^z + (1 + i)z + C$.

练习. 证明 $u(x, y) = x^3 - 6x^2y - 3xy^2 + 2y^3$ 是调和函数并求它的共轭调和函数.

答案. $v(x, y) = 2x^3 + 3x^2y - 6xy^2 - y^3 + C$.

显然 $u + iv = (1 + 2i)z^3 + iC$.

第四章 级数

第一节 复数项级数

复数域上的级数与实数域上的级数并无本质差别.

定义.

(1) 设 $\{z_n\}_{n \geq 1}$ 是复数列. 表达式 $\sum_{n=1}^{\infty} z_n$ 称为复数项**无穷级数**.

(2) 称 $s_n := z_1 + z_2 + \cdots + z_n$ 为该级数的**部分和**.

(3) 若部分和数列 $\{s_n\}_{n \geq 1}$ 极限存在, 则称 $\sum_{n=1}^{\infty} z_n$ **收敛**, 并记

$\sum_{n=1}^{\infty} z_n = \lim_{n \rightarrow \infty} s_n$ 为它的**和**. 否则称该级数**发散**.

若 $\sum_{n=1}^{\infty} z_n = A$ 收敛, 则 $z_n = s_n - s_{n-1} \rightarrow A - A = 0$. 因此 $z_n \rightarrow 0$

是 $\sum_{n=1}^{\infty} z_n$ **收敛的必要条件**.

复数项级数敛散性的判定

定理. $\sum_{n=1}^{\infty} z_n = a + bi$ 当且仅当 $\sum_{n=1}^{\infty} x_n = a, \sum_{n=1}^{\infty} y_n = b.$

证明. 设部分和

$$\sigma_n = x_1 + x_2 + \cdots + x_n, \quad \tau_n = y_1 + y_2 + \cdots + y_n.$$

则

$$s_n = z_1 + z_2 + \cdots + z_n = \sigma_n + i\tau_n.$$

由复数项的敛散性判定条件可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} s_n = a + bi \iff \lim_{n \rightarrow \infty} \sigma_n = a, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \tau_n = b.$$

于是命题得证. □

复数项级数敛散性的判定

定理. 若实数项级数 $\sum_{n=1}^{\infty} |z_n|$ 收敛, 则 $\sum_{n=1}^{\infty} z_n$ 也收敛, 且 $\left| \sum_{n=1}^{\infty} z_n \right| \leq \sum_{n=1}^{\infty} |z_n|$.

证明. 因为 $|x_n|, |y_n| \leq |z_n|$, 由比较判别法可知实数项级数 $\sum_{n=1}^{\infty} x_n, \sum_{n=1}^{\infty} y_n$

绝对收敛, 从而收敛. 故 $\sum_{n=1}^{\infty} z_n$ 也收敛.

由三角不等式可知 $\left| \sum_{k=1}^n z_k \right| \leq \sum_{k=1}^n |z_k|$. 两边同时取极限即得级数的不等式关系

$$\left| \sum_{n=1}^{\infty} z_n \right| = \left| \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n z_k \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \sum_{k=1}^n z_k \right| \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n |z_k| = \sum_{n=1}^{\infty} |z_n|,$$

其中第二个等式是因为绝对值函数 $|z|$ 连续. □

绝对收敛和条件收敛

定义. 若级数 $\sum_{n=1}^{\infty} |z_n|$ 收敛, 则称 $\sum_{n=1}^{\infty} z_n$ **绝对收敛**. 称收敛但不绝对收敛的级数**条件收敛**.

绝对收敛的复级数各项可以任意重排次序而不改变其绝对收敛性, 且不改变其和. 一般的级数重排有限项不改变其敛散性与和, 但若重排无限项则可能会改变其敛散性与和.

定理. $\sum_{n=1}^{\infty} z_n$ 绝对收敛当且仅当它的实部和虚部级数都绝对收敛.

证明. 必要性由前一定理的证明已经知道, 充分性由 $|z_n| \leq |x_n| + |y_n|$ 加上正项级数可重排得到. □

绝对收敛和条件收敛的判定

		实部级数		
		发散	条件收敛	绝对收敛
虚部级数	发散	发散	发散	发散
	条件收敛	发散	条件收敛	条件收敛
	绝对收敛	发散	条件收敛	绝对收敛

思考. 什么时候 $\left| \sum_{n=1}^{\infty} z_n \right| = \sum_{n=1}^{\infty} |z_n|$? 当且仅当非零的 z_n 的辐角全都相同时成立.

典型例题：判断级数的敛散性

例. 级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1+i^n}{n}$ 发散、条件收敛、还是绝对收敛？

解答. 由于实部级数

$$\sum_{n=1}^{\infty} x_n = 1 + \frac{1}{3} + \frac{2}{4} + \frac{1}{5} + \frac{1}{7} + \frac{2}{8} + \cdots = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$$

发散, 所以该级数发散.

它的虚部级数是一个交错级数, 从而是条件收敛的.

典型例题：判断级数的敛散性

例. 级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{i^n}{n}$ 发散、条件收敛、还是绝对收敛？

解答. 因为它的实部和虚部级数

$$\sum_{n=1}^{\infty} x_n = -\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{6} - \frac{1}{8} + \cdots$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} y_n = 1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + \cdots$$

均条件收敛，所以原级数条件收敛。

典型例题: 判断级数的敛散性

练习. 级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{(-1)^n}{n} + \frac{i}{2^n} \right)$ 发散、条件收敛、还是绝对收敛?

答案. 实部级数条件收敛, 虚部级数绝对收敛, 所以该级数条件收敛.

级数敛散性判别法

由正项级数的相应审敛法可以得到:

- (1) **达朗贝尔判别法 (比值法)**: $\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{z_{n+1}}{z_n} \right|$ (假设存在);
- (2) **柯西判别法 (根式法)**: $\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|z_n|}$ (假设存在);
- (3) **柯西-阿达马判别法**: $\lambda = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|z_n|}$ (子数列中极限的最大值).

- 当 $\lambda < 1$ 时, $\sum_{n=0}^{\infty} z_n$ 绝对收敛.
- 当 $\lambda > 1$ 时, $\sum_{n=0}^{\infty} z_n$ 发散.
- 当 $\lambda = 1$ 时, 无法使用该方法判断敛散性.

其证明是通过将该级数与相应的等比级数做比较得到的.

典型例题: 判断级数的敛散性

例. 级数 $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(8i)^n}{n!}$ 发散、条件收敛、还是绝对收敛?

解答. 因为 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{z_{n+1}}{z_n} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{8}{n+1} = 0$, 所以该级数绝对收敛.

实际上, 它的实部和虚部级数分别为

$$1 - \frac{8^2}{2!} + \frac{8^4}{4!} - \cdots = \cos 8, \quad 8 - \frac{8^3}{3!} + \frac{8^5}{5!} - \cdots = \sin 8,$$

因此

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(8i)^n}{n!} = \cos 8 + i \sin 8 = e^{8i}.$$

第二节 幂级数

复变函数级数与实变量函数级数也是类似的.

定义.

- (1) 设 $\{f_n(z)\}_{n \geq 1}$ 是一个复变函数列, 其中每一项都在区域 D 上有定义. 表达式 $\sum_{n=1}^{\infty} f_n(z)$ 称为**复变函数项级数**.
- (2) 对于 $z_0 \in D$, 若级数 $\sum_{n=1}^{\infty} f_n(z_0)$ 收敛, 则称 $\sum_{n=1}^{\infty} f_n(z)$ 在 z_0 处收敛, 相应级数的值称为它的**和**.
- (3) 若 $\sum_{n=1}^{\infty} f_n(z)$ 在 D 上处处收敛, 则它的和是一个函数, 称为**和函数**.
- (4) 称形如 $\sum_{n=0}^{\infty} c_n(z-a)^n$ 的函数项级数为**幂级数**.

我们只需要考虑 $a = 0$ 情形的幂级数, 因为二者的收敛范围与和函数只是差一个平移.

阿贝尔定理.

- (1) 若 $\sum_{n=0}^{\infty} c_n z^n$ 在 $z_0 \neq 0$ 处收敛, 那么对任意 $|z| < |z_0|$ 的 z , 该级数必绝对收敛.
- (2) 若 $\sum_{n=0}^{\infty} c_n z^n$ 在 $z_0 \neq 0$ 处发散, 那么对任意 $|z| > |z_0|$ 的 z , 该级数必发散.

例题：收敛半径的计算

例. 求幂级数 $\sum_{n=0}^{\infty} z^n = 1 + z + z^2 + \dots$ 的收敛半径与和函数.

解答. 若幂级数收敛, 则由 $z^n \rightarrow 0$ 可知 $|z| < 1$. 当 $|z| < 1$ 时, 和函数为

$$\lim_{n \rightarrow \infty} s_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 - z^{n+1}}{1 - z} = \frac{1}{1 - z}.$$

因此收敛半径为 1.

由正项级数的相应判别法容易得到公式 $R = \frac{1}{r}$, 其中

(1) 达朗贝尔公式 (比值法): $r = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{c_{n+1}}{c_n} \right|$ (假设存在);

(2) 柯西公式 (根式法): $r = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|c_n|}$ (假设存在);

(3) 柯西-阿达马公式: $r = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|c_n|}$.

若 $r = 0$ 或 $+\infty$, 则 $R = +\infty$ 或 0 .

典型例题：收敛半径的计算

例. 求幂级数 $\sum_{n=0}^{\infty} \cos(in)z^n$ 的收敛半径.

解答. 我们有 $c_n = \cos(in) = \frac{e^n + e^{-n}}{2}$. 由

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{c_{n+1}}{c_n} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{e^{n+1} + e^{-n-1}}{e^n + e^{-n}} = e \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 + e^{-2n-2}}{1 + e^{-2n}} = e$$

可知收敛半径为 $1/e$.

练习. 幂级数 $\sum_{n=0}^{\infty} (1+i)^n z^n$ 的收敛半径为 $\underline{\sqrt{2}/2}$.

定理. 设幂级数

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n z^n, |z| < R_1, \quad g(z) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n z^n, |z| < R_2.$$

那么当 $|z| < R = \min\{R_1, R_2\}$ 时,

$$(f \pm g)(z) = \sum_{n=0}^{\infty} (a_n \pm b_n) z^n, \quad (fg)(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^n a_k b_{n-k} \right) z^n.$$

当 f, g 的收敛半径相同时, $f \pm g$ 或 fg 的收敛半径可以比 f, g 的大.

例题：幂级数展开

例. 把函数 $\frac{1}{z-b}$ 表成形如 $\sum_{n=0}^{\infty} c_n(z-a)^n$ 的幂级数, 其中 $a \neq b$.

解答.

$$\frac{1}{z-b} = \frac{1}{(z-a) - (b-a)} = \frac{1}{a-b} \cdot \frac{1}{1 - \frac{z-a}{b-a}}.$$

当 $|z-a| < |b-a|$ 时, $\frac{1}{z-b} = \frac{1}{a-b} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{z-a}{b-a}\right)^n$, 即

$$\frac{1}{z-b} = - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(z-a)^n}{(b-a)^{n+1}}, \quad |z-a| < |b-a|.$$

典型例题: 幂级数的收敛半径与和函数

例. 求幂级数 $\sum_{n=0}^{\infty} (n+1)z^n$ 的收敛半径与和函数.

解答. 由 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{c_{n+1}}{c_n} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n+2}{n+1} = 1$ 可知收敛半径为 1. 当 $|z| < 1$ 时,

$$\sum_{n=0}^{\infty} z^{n+1} = \frac{z}{1-z} = -1 - \frac{1}{z-1},$$

因此

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+1)z^n = \left(-\frac{1}{z-1} \right)' = \frac{1}{(z-1)^2}, \quad |z| < 1.$$

通过对

$$1 + \lambda z + \lambda^2 z^2 + \cdots = \frac{1}{1 - \lambda z}$$

两边求 k 阶导数可得

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+k) \cdots (n+2)(n+1) \lambda^n z^n = \frac{k!}{(1-\lambda z)^{k+1}}.$$

因此若 $p(n)$ 是次数为 $m-1$ 的多项式, 那么

$$\sum_{n=0}^{\infty} p(n) \lambda^n z^n = \frac{P(z)}{(1-\lambda z)^m},$$

其中 P 是多项式.

一般地, 若幂级数的系数形如

$$c_n = p_1(n)\lambda_1^n + \cdots + p_k(n)\lambda_k^n,$$

则和函数一定是形如

$$\sum_{n=0}^{\infty} c_n z^n = \frac{P(z)}{(1 - \lambda_1 z)^{m_1} \cdots (1 - \lambda_k z)^{m_k}}$$

的有理函数, 其中 $m_j = \deg p_j + 1$. 反过来这样的分式展开成幂级数的系数也一定有上述形式, 至多有有限多项例外. 这可以帮助我们进行计算的验证.

练习. 求幂级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^n}{n}$ 的收敛半径与和函数.

答案. 收敛半径为 1, 和函数为 $-\ln(1 - z)$.

例题：函数项级数的积分

例. 求 $\oint_{|z|=\frac{1}{2}} \left(\sum_{n=-1}^{\infty} z^n \right) dz$.

解答. 由于 $\sum_{n=0}^{\infty} z^n$ 在 $|z| < 1$ 收敛, 它的和函数解析. 因此

$$\begin{aligned} \oint_{|z|=\frac{1}{2}} \left(\sum_{n=-1}^{\infty} z^n \right) dz &= \oint_{|z|=\frac{1}{2}} \frac{1}{z} dz + \oint_{|z|=\frac{1}{2}} \left(\sum_{n=0}^{\infty} z^n \right) dz \\ &= 2\pi i + 0 = 2\pi i. \end{aligned}$$

第三节 泰勒级数

我们知道, 幂级数在它的收敛域内的和函数是一个解析函数. 反过来, 解析函数是不是也一定可以在一点展开成幂级数呢? 也就是说是否存在**泰勒级数**展开?

在高等数学中我们知道, 一个函数即使在一点附近无限次可导, 它的泰勒级数也未必收敛到原函数. 例如

$$f(x) = \begin{cases} e^{-x^{-2}}, & x \neq 0, \\ 0, & x = 0. \end{cases}$$

它处处可导, 但是它在 0 处的各阶导数都是 0. 因此它的泰勒级数是 0, 余项恒为 $f(x)$. 除 0 外它的泰勒级数均不收敛到原函数.

而即使是泰勒级数能收敛到原函数的情形, 它成立的范围也很难从函数本身读出. 例如

$$\frac{1}{1+x} = 1 - x + x^2 - x^3 + \cdots, \quad |x| < 1.$$

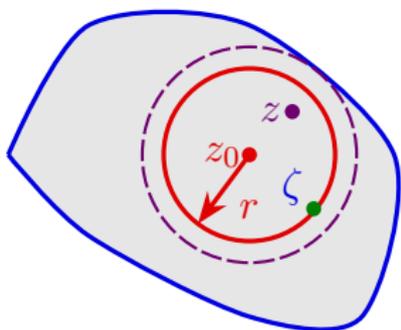
这可以从 $x = -1$ 是奇点看出. 而

$$\frac{1}{1+x^2} = 1 - x^2 + x^4 - x^6 + \cdots, \quad |x| < 1$$

却并没有奇点. 为什么它的麦克劳林级数成立的开区间也是 $(-1, 1)$? 这个问题在本节可以得到回答.

设函数 $f(z)$ 在区域 D 解析, $z_0 \in D$. 设 $|z - z_0|$ 小于 z_0 到 D 边界的距离 d , 则存在 $|z - z_0| < r < d$. 设 $K: |\zeta - z_0| = r$, 则 K 和它的内部包含在 D 中. 由于 $\left| \frac{z - z_0}{\zeta - z_0} \right| < 1$, 因此

$$\frac{1}{\zeta - z} = \frac{1}{\zeta - z_0} \cdot \frac{1}{1 - \frac{z - z_0}{\zeta - z_0}} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(z - z_0)^n}{(\zeta - z_0)^{n+1}}.$$



故

$$\begin{aligned}
 f(z) &= \frac{1}{2\pi i} \oint_K \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta = \frac{1}{2\pi i} \oint_K f(\zeta) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(z - z_0)^n}{(\zeta - z_0)^{n+1}} d\zeta \\
 &= \sum_{n=0}^{N-1} \left(\frac{1}{2\pi i} \oint_K \frac{f(\zeta) d\zeta}{(\zeta - z_0)^{n+1}} \right) (z - z_0)^n + R_N(z), \\
 &= \sum_{n=0}^{N-1} \frac{f^{(n)}(z_0)}{n!} (z - z_0)^n + R_N(z),
 \end{aligned}$$

其中

$$R_N(z) = \frac{1}{2\pi i} \oint_K f(\zeta) \left(\sum_{n=N}^{\infty} \frac{(z - z_0)^n}{(\zeta - z_0)^{n+1}} \right) d\zeta = \frac{1}{2\pi i} \oint_K \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} \cdot \left(\frac{z - z_0}{\zeta - z_0} \right)^N d\zeta.$$

由于 $f(\zeta)$ 在 $D \supseteq K$ 上解析, 从而在 K 上连续且有界. 设 $|f(\zeta)| \leq M, \zeta \in K$, 那么

$$\begin{aligned} |R_N(z)| &\leq \frac{1}{2\pi} \oint_K \left| \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} \cdot \left(\frac{z - z_0}{\zeta - z_0} \right)^N \right| ds \\ &\leq \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{M}{r - |z - z_0|} \cdot \left| \frac{z - z_0}{\zeta - z_0} \right|^N \cdot 2\pi r \rightarrow 0 \quad (N \rightarrow \infty). \end{aligned}$$

故

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(z_0)}{n!} (z - z_0)^n, \quad |z - z_0| < d.$$

幂级数展开的唯一性

对于 $f(z) = \frac{1}{1+z^2}$, 它的奇点为 $\pm i$, 所以它的麦克劳林展开成立的半径是 1. 这就解释了为什么函数 $f(x) = \frac{1}{1+x^2}$ 的麦克劳林展开成立的开区间是 $(-1, 1)$.

若 $f(z)$ 在 z_0 附近展开为 $\sum_{n=0}^{\infty} c_n(z-z_0)^n$, 则由幂级数的逐项求导性质可知

$$f^{(n)}(z_0) = \sum_{k=n}^{\infty} c_k k(k-1)\cdots(k-n+1)(z-z_0)^{k-n} \Big|_{z=z_0} = n!c_n.$$

所以**解析函数的幂级数展开是唯一的**. 由此, 解析函数的泰勒展开不仅可以**直接求出各阶导数得到**, 也可以**利用幂级数的运算法则得到**.

解析函数的泰勒展开还说明了幂级数的和函数无论怎样扩充定义域, 它在**收敛圆周上一定有奇点**. 否则它就可以在一个半径更大的圆域上泰勒展开成该幂级数.

典型例题: 泰勒展开的计算

例. 由 e^z 的泰勒展开可得

$$\begin{aligned}\sin z &= \frac{e^{iz} - e^{-iz}}{2i} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(iz)^n - (-iz)^n}{2i \cdot n!} \\ &= z - \frac{z^3}{3!} + \frac{z^5}{5!} - \cdots = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{z^{2n+1}}{(2n+1)!}, \quad \forall z.\end{aligned}$$

这里, 因为 $\sin z$ 是奇函数, 所以它的麦克劳林展开只有奇数幂次项, 没有偶数幂次项.

典型例题: 泰勒展开的计算

例. 本例中幂函数均取主值. $f(z) = (1+z)^\alpha$ 在去掉射线 $z = x \leq -1$ 的区域内解析. 由于

$$\begin{aligned}f^{(n)}(0) &= \alpha(\alpha-1)\cdots(\alpha-n+1)(1+z)^{\alpha-n}\Big|_{z=0} \\ &= \alpha(\alpha-1)\cdots(\alpha-n+1).\end{aligned}$$

因此

$$\begin{aligned}(1+z)^\alpha &= 1 + \alpha z + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2}z^2 + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{3!}z^3 + \cdots \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha(\alpha-1)\cdots(\alpha-n+1)}{n!}z^n, \quad |z| < 1.\end{aligned}$$

典型例题: 泰勒展开的计算

例. 求 $\frac{1}{3z-2}$ 的麦克劳林展开.

解答. 由于 $\frac{1}{3z-2}$ 的奇点为 $z = \frac{2}{3}$, 因此它在 $|z| < \frac{2}{3}$ 内解析. 此时

$$\begin{aligned}
\frac{1}{3z-2} &= -\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{3z}{2}} = -\frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{3z}{2}\right)^n \\
&= -\sum_{n=0}^{\infty} \frac{3^n}{2^{n+1}} z^n, \quad |z| < \frac{2}{3}.
\end{aligned}$$

典型例题: 泰勒展开的计算

练习. 求 $\frac{1}{1-3z+2z^2}$ 的麦克劳林展开.

答案.

$$\frac{1}{1-3z+2z^2} = \frac{2}{1-2z} - \frac{1}{1-z} = \sum_{n=0}^{\infty} (2^{n+1} - 1)z^n, \quad |z| < \frac{1}{2}.$$

第四节 洛朗级数

双边幂级数

若解析函数 $f(z)$ 在 z_0 处解析, 那么在 z_0 处可以展开成泰勒级数.
若 $f(z)$ 在 z_0 处不解析呢? 此时 $f(z)$ 一定不能展开成 $z - z_0$ 的幂级数, 然而它却可能可以展开为**双边幂级数**

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n(z - z_0)^n = \underbrace{\sum_{n=1}^{\infty} c_{-n}(z - z_0)^{-n}}_{\text{负幂次部分}} + \underbrace{\sum_{n=0}^{\infty} c_n(z - z_0)^n}_{\text{非负幂次部分}}.$$

例如

$$\frac{1}{z^2(1-z)} = \frac{1}{z^2} + \frac{1}{z} + 1 + z + z^2 + \cdots, \quad 0 < |z| < 1.$$

双边幂级数的非负幂次部分也叫**解析部分**, 负幂次部分也叫**主要部分**.

双边幂级数的敛散性

为了保证双边幂级数的收敛范围有一个好的性质以便于我们使用，我们对它的敛散性作如下定义：

定义. 若双边幂级数的非负幂次部分和负幂次部分作为函数项级数都收敛，则我们称这个双边幂级数**收敛**。否则我们称之为**发散**。

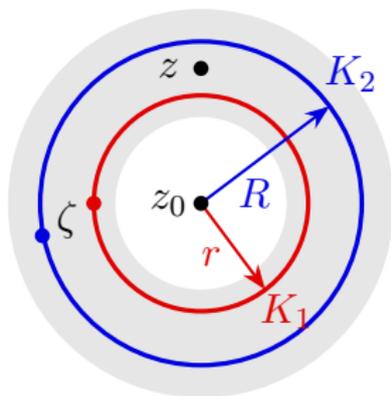
注意双边幂级数的敛散性不能像幂级数那样通过部分和形成的数列的极限来定义，因为使用不同的部分和选取方式会影响到极限的数值。

考虑一般情形下的洛朗展开. 设 $f(z)$ 在圆环域 $R_1 < |z - z_0| < R_2$ 内解析. 设

$$K_1 : |z - z_0| = r, \quad K_2 : |z - z_0| = R, \quad R_1 < r < R < R_2.$$

对于 $r < |z - z_0| < R$, 对复合闭路 $K_2 + K_1^-$ 应用柯西积分公式,

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \oint_{K_2} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta - \frac{1}{2\pi i} \oint_{K_1} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta.$$



和泰勒级数的推导类似,

$$\frac{1}{2\pi i} \oint_{K_2} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta = \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{1}{2\pi i} \oint_{K_2} \frac{f(\zeta) d\zeta}{(\zeta - z_0)^{n+1}} \right] (z - z_0)^n$$

可以表达为幂级数的形式. 对于 $\zeta \in K_1$, 由 $\left| \frac{\zeta - z_0}{z - z_0} \right| < 1$ 可得

$$-\frac{1}{\zeta - z} = \frac{1}{z - z_0} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\zeta - z_0}{z - z_0}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(z - z_0)^{-n}}{(\zeta - z_0)^{-n+1}},$$

$$-\frac{1}{2\pi i} \oint_{K_1} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta = \frac{1}{2\pi i} \oint_{K_1} f(\zeta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(z - z_0)^{-n}}{(\zeta - z_0)^{-n+1}} d\zeta.$$

令

$$\begin{aligned}
 R_N(z) &= \frac{1}{2\pi i} \oint_{K_1} f(\zeta) \sum_{n=N}^{\infty} \frac{(z-z_0)^{-n}}{(\zeta-z_0)^{-n+1}} d\zeta \\
 &= \frac{1}{2\pi i} \oint_{K_1} \frac{f(\zeta)}{z-\zeta} \cdot \left(\frac{\zeta-z_0}{z-z_0}\right)^{N-1} d\zeta.
 \end{aligned}$$

由于 $f(\zeta)$ 在 $D \supseteq K_1$ 上解析, 从而在 K_1 上连续且有界. 设 $|f(\zeta)| \leq M, \zeta \in K_1$, 那么

$$\begin{aligned}
 |R_N(z)| &\leq \frac{1}{2\pi} \oint_{K_1} \left| \frac{f(\zeta)}{z-\zeta} \cdot \left(\frac{\zeta-z_0}{z-z_0}\right)^{N-1} \right| ds \\
 &\leq \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{M}{|z-z_0|-r} \cdot \left| \frac{\zeta-z_0}{z-z_0} \right|^{N-1} \cdot 2\pi r \rightarrow 0 \quad (N \rightarrow \infty).
 \end{aligned}$$

故

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{1}{2\pi i} \oint_{K_2} \frac{f(\zeta) d\zeta}{(\zeta - z_0)^{n+1}} \right] (z - z_0)^n + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{2\pi i} \oint_{K_1} \frac{f(\zeta) d\zeta}{(\zeta - z_0)^{-n+1}} \right] (z - z_0)^{-n},$$

其中 $r < |z - z_0| < R$. 由复合闭路定理, K_1, K_2 可以换成任意一条在圆环域内绕 z_0 的闭路 C . 从而我们得到 $f(z)$ 在以 z_0 为圆心的圆环域的洛朗展开

$$f(z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left[\frac{1}{2\pi i} \oint_C \frac{f(\zeta) d\zeta}{(\zeta - z_0)^{n+1}} \right] (z - z_0)^n,$$

其中 $R_1 < |z - z_0| < R_2$.

典型例题：求洛朗展开

例. 将 $f(z) = \frac{e^z - 1}{z^2}$ 展开为以 0 为中心的洛朗级数.

由于 $f(z)$ 只有 0 这个奇点, 因此 $f(z)$ 在 $0 < |z| < +\infty$ 解析. 我们先使用直接法解答.

解答.

$$c_n = \frac{1}{2\pi i} \oint_C \frac{e^z - 1}{z^{n+3}} dz = \begin{cases} \frac{(e^z - 1)^{(n+2)} \Big|_{z=0}}{(n+2)!} = \frac{1}{(n+2)!}, & n \geq -3; \\ (e^z - 1)(0) = 0, & n = -2; \\ 0, & n \leq -1. \end{cases}$$

$$\text{故 } f(z) = \frac{1}{z} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(n+2)!} z^n.$$

另解.

$$\frac{e^z - 1}{z^2} = \frac{1}{z^2} \left(z + \frac{z^2}{2!} + \frac{z^3}{3!} + \cdots \right) = \frac{1}{z} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(n+2)!} z^n.$$

例. 在下列圆环域中把 $f(z) = \frac{1}{(z-1)(z-2)}$ 展开为洛朗级数.

(1) $0 < |z| < 1;$

(2) $1 < |z| < 2;$

(3) $2 < |z| < +\infty.$

解答. 由于 $f(z)$ 的奇点为 $z=1, 2$, 因此在这些圆环域内 $f(z)$ 解析. 我们有

$$f(z) = \frac{1}{z-2} - \frac{1}{z-1}.$$

典型例题: 求洛朗展开

(1) 由于 $|z| < 1, \left|\frac{z}{2}\right| < 1$, 因此

$$\begin{aligned}f(z) &= -\frac{1}{2-z} + \frac{1}{1-z} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1-\frac{z}{2}} + \frac{1}{1-z} \\&= -\frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{z}{2}\right)^n + \sum_{n=0}^{\infty} z^n = \sum_{n=0}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{2^{n+1}}\right) z^n \\&= \frac{1}{2} + \frac{3}{4}z + \frac{7}{8}z^2 + \dots\end{aligned}$$

(3) 由于 $\left|\frac{1}{z}\right| < 1$, $\left|\frac{2}{z}\right| < 1$, 因此

$$\begin{aligned} f(z) &= \frac{1}{1-z} - \frac{1}{2-z} = -\frac{1}{z} \cdot \frac{1}{1-\frac{1}{z}} + \frac{1}{z} \cdot \frac{1}{1-\frac{2}{z}} \\ &= -\frac{1}{z} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{z}\right)^n + \frac{1}{z} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{2}{z}\right)^n = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2^n - 1}{z^{n+1}} \\ &= \frac{1}{z^2} + \frac{3}{z^3} + \frac{7}{z^4} + \cdots \end{aligned}$$

典型例题：求洛朗展开

例. 将函数 $f(z) = \frac{z+1}{(z-1)^2}$ 在圆环域 $0 < |z| < 1$ 内展开成洛朗级数.

解答.

$$f(z) = \frac{z-1+2}{(z-1)^2} = \frac{1}{z-1} + \frac{2}{(z-1)^2}.$$

$$\frac{1}{1-z} = \sum_{n=0}^{\infty} z^n, \quad \frac{1}{(1-z)^2} = \sum_{n=1}^{\infty} n z^{n-1} = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) z^n,$$

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} (2(n+1) - 1) z^n = \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) z^n.$$

求有理函数洛朗展开的步骤

可以看出, 有理函数的洛朗展开通常需要将其分解成部分分式 $\frac{1}{(z-a)^m}$ 的线性组合. 根据 z 所处的圆环域, 选取 $\frac{z-z_0}{a-z_0}$ 和 $\frac{a-z_0}{z-z_0}$ 中模小于 1 的数作为公比来求得 $\frac{1}{z-a}$ 的洛朗展开. 然后对其求 $m-1$ 阶导, 最后合并相同幂次项的系数.

洛朗展开的一些特点可以帮助我们检验计算的正确性.

- 若 $f(z)$ 在 $|z-z_0| < R_2$ 内解析, 则 $f(z)$ 可以展开为泰勒级数. 由唯一性可知泰勒级数等于洛朗级数, 因此**此处洛朗展开一定没有负幂次项**.
- 若有理函数 (分子分母没有公共零点) 在圆周 $|z-z_0| = R_1 > 0$ 和 $|z-z_0| = R_2 > 0$ 上都有奇点, 则在圆环域 $R_1 < |z-z_0| < R_2$ 上的洛朗展开一定有无穷多负幂次和无穷多正幂次项.
- 有理函数在解析区域 $0 < |z-z_0| < r$ 的洛朗展开最多只有有限多负幂次项, 且最低负幂次是 $z-z_0$ 在分母因式分解中出现的次数; 在解析区域 $R < |z-z_0| < +\infty$ 的洛朗展开最多只有有限多正幂次项, 且最高正幂次是分子次数减去分母次数.

有理函数 $f(z)$ 在圆环域 $r < |z| < R$ 内的洛朗展开总形如

$$f(z) = P(z) + \sum_{n \geq 0} a_n z^n + \sum_{n < 0} b_n z^n,$$

其中 $P(z)$ 只有有限多项, a_n 和 b_n 是形如 $p(n)\lambda^{-n}$ 的线性组合, λ 是奇点, $\deg p + 1$ 是 λ 在 $f(z)$ 分母出现重数, 其中 $|\lambda| \geq R$ 的那些项出现在 a_n 中, 而 $|\lambda| \leq r$ 的那些项出现在 b_n 中. 不仅如此, 从 $f(z)$ 在任一圆环域上的展开可以得到其它圆环域上的展开, 只需要将需要变化求和范围的那些项 n 的求和范围变化, 系数变号.

例如在 $0 < |z| < 1$ 内,

$$f(z) = \frac{120}{(z-1)(z^2-4)(z^2-9)} = \sum_{n \geq 0} \left(-5 + \frac{2}{(-2)^{n+1}} + \frac{6}{2^{n+1}} - \frac{1}{(-3)^{n+1}} - \frac{2}{3^{n+1}} \right) z^n$$

那么在 $2 < |z| < 3$ 内洛朗展开需要变动奇点 $1, \pm 2$ 对应的项:

$$f(z) = \sum_{n \geq 0} \left(-\frac{1}{(-3)^{n+1}} - \frac{2}{3^{n+1}} \right) z^n + \sum_{n \leq -1} \left(5 - \frac{2}{(-2)^{n+1}} - \frac{6}{2^{n+1}} \right) z^n.$$

感兴趣的同学可阅读课本相应部分.

典型例题: 求洛朗展开

练习. 将函数 $f(z) = \frac{z+1}{(z-1)^2}$ 在圆环域 $1 < |z| < +\infty$ 内展开成洛朗级数.

答案.

$$\frac{1}{z-1} = \frac{1}{z} \cdot \frac{1}{1-\frac{1}{z}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{z^n}, \quad -\frac{1}{(z-1)^2} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-n}{z^{n+1}} = -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n-1}{z^n},$$

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2(n-1)+1}{z^n} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n-1}{z^n}.$$

此即 $-\sum_{n \leq -1} (2n+1)z^n$.

注意到当 $n = -1$ 时, 洛朗级数的系数

$$c_{-1} = \frac{1}{2\pi i} \oint_C f(\zeta) d\zeta,$$

因此洛朗展开可以用来帮助计算函数的积分, 这便引出了**留数**的概念.

例. 求 $\oint_{|z|=1} \frac{z}{\sin z^2} dz$.

解答. 注意到闭路 $|z|=1$ 落在 $0 < |z| < \sqrt{\pi}$ 内. 我们在这个圆环域内求 $f(z) = \frac{z}{\sin z^2}$ 的洛朗展开.

$$f(z) = \frac{z}{\sin z^2} = \frac{z}{z^2 - \frac{z^6}{3!} + \frac{z^{10}}{5!} + \dots} = \frac{1}{z} + \frac{z^3}{6} + \dots$$

故 $\oint_C f(z) dz = 2\pi i c_{-1} = 2\pi i$.

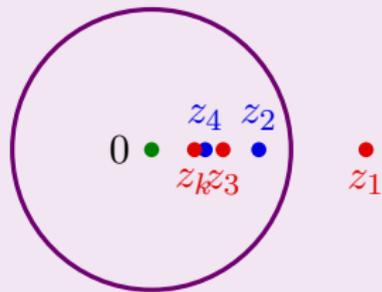
第五节 孤立奇点

我们根据奇点附近洛朗展开的形式来对其进行分类, 以便后面分类计算留数.

例. 考虑函数

$$f(z) = \frac{1}{\sin(1/z)}.$$

显然 $0, z_k = \frac{1}{k\pi}$ 是奇点, k 是非零整数. 因为 $\lim_{k \rightarrow +\infty} z_k = 0$, 所以 0 的任何一个去心邻域内都有奇点. 此时无法选取一个圆环域 $0 < |z| < \delta$ 作 $f(z)$ 的洛朗展开, 因此我们不考虑这类奇点.



定义. 若 z_0 是 $f(z)$ 的一个奇点, 且 z_0 的某个邻域内没有其它奇点, 则称 z_0 是 $f(z)$ 的一个**孤立奇点**.

例.

(1) $z = 0$ 是 $e^{\frac{1}{z}}, \frac{\sin z}{z}$ 的孤立奇点.

(2) $z = -1$ 是 $\frac{1}{z(z+1)}$ 的孤立奇点.

(3) $z = 0$ 不是 $\frac{1}{\sin(1/z)}$ 的孤立奇点.

若 $f(z)$ 只有有限多个奇点, 则这些奇点都是孤立奇点.

孤立奇点的分类

若 $f(z)$ 在孤立奇点 z_0 的去心邻域 $0 < |z - z_0| < \delta$ 内解析, 则可以作 $f(z)$ 的洛朗展开. 根据该洛朗级数主要部分的项数, 我们可以将孤立奇点分为三种:

孤立奇点类型	洛朗级数特点	$\lim_{z \rightarrow z_0} f(z)$
可去奇点	没有主要部分	存在
m 阶极点	主要部分只有有限项非零 最低次为 $-m$ 次	∞
本性奇点	主要部分有无限项非零	不存在且不为 ∞

例题: 可去奇点

例.

$$f(z) = \frac{\sin z}{z} = 1 - \frac{z^2}{3!} + \frac{z^4}{5!} + \cdots$$

没有负幂次项, 因此 0 是可去奇点.

也可以从 $\lim_{z \rightarrow 0} z f(z) = \sin 0 = 0$ 看出.

例.

$$f(z) = \frac{e^z - 1}{z} = 1 + \frac{z}{2!} + \frac{z^2}{3!} + \cdots$$

没有负幂次项, 因此 0 是可去奇点.

也可以从 $\lim_{z \rightarrow 0} z f(z) = e^0 - 1 = 0$ 看出.

由于可去奇点的性质比较简单,本性奇点的性质较为复杂,我们主要关心的是极点的情形.

定义. 若 $f(z)$ 在孤立奇点 z_0 的去心邻域的洛朗级数主要部分只有有限多项非零, 即

$$f(z) = \frac{c_{-m}}{(z - z_0)^m} + \cdots + c_0 + c_1(z - z_0) + \cdots, \quad 0 < |z - z_0| < \delta,$$

其中 $c_{-m} \neq 0, m \geq 1$, 则称 z_0 是 $f(z)$ 的 m 阶极点或 m 级极点.

令

$$g(z) = c_{-m} + c_{-m+1}(z - z_0) + c_{-m+2}(z - z_0)^2 + \cdots,$$

则 $g(z)$ 在 z_0 解析且非零, 且

$$f(z) = \frac{g(z)}{(z - z_0)^m}, 0 < |z - z_0| < \delta.$$

定理.

- (1) z_0 是 $f(z)$ 的 m 阶极点 $\iff \lim_{z \rightarrow z_0} (z - z_0)^m f(z)$ 存在且非零.
- (2) z_0 是 $f(z)$ 的极点 $\iff \lim_{z \rightarrow z_0} f(z) = \infty$.

典型例题: 函数的极点

例. $f(z) = \frac{3z + 2}{z^2(z + 2)}$, 由于 $\lim_{z \rightarrow 0} z^2 f(z) = 1$, 因此 0 是二阶极点. 同理 -2 是一阶极点.

练习. 求 $f(z) = \frac{1}{z^3 - z^2 - z + 1}$ 的奇点, 并指出极点的阶.

答案. -1 是一阶极点, 1 是二阶极点.

定义. 若 $f(z)$ 在孤立奇点 z_0 的去心邻域的洛朗级数主要部分有无限多项非零, 则称 z_0 是 $f(z)$ 的**本性奇点**.

例. 由于 $e^{\frac{1}{z}} = 1 + \frac{1}{z} + \frac{1}{2z^2} + \cdots$, 因此 0 是本性奇点.

定理. z_0 是 $f(z)$ 的本性奇点 $\iff \lim_{z \rightarrow z_0} f(z)$ 不存在也不是 ∞ .

事实上我们有**皮卡大定理**: 对于本性奇点 z_0 的任何一个去心邻域, $f(z)$ 的像取遍所有复数, 至多有一个取不到.

我们来研究极点与零点的联系, 并给出极点的阶的计算方法.

定义. 若 $f(z)$ 在解析点 z_0 处的泰勒级数最低次项幂次是 $m \geq 1$, 即

$$f(z) = c_m(z - z_0)^m + c_{m+1}(z - z_0)^{m+1} + \cdots, \quad 0 < |z - z_0| < \delta,$$

其中 $c_m \neq 0$, 则称 z_0 是 $f(z)$ 的 m 阶零点.

此时 $f(z) = (z - z_0)^m g(z)$, $g(z)$ 在 z_0 解析且 $g(z_0) \neq 0$.

定理. 设 $f(z)$ 在 z_0 解析. z_0 是 m 阶零点 $\iff \lim_{z \rightarrow z_0} (z - z_0)^{-m} f(z)$ 存在

$$\iff f(z_0) = f'(z_0) = \cdots = f^{(m-1)}(z_0) = 0, \quad f^{(m)}(z_0) \neq 0.$$

例题：函数的零点

例. $f(z) = z(z-1)^3$ 有一阶零点 0 和三阶零点 1.

例. $f(z) = \sin z^5 - z^5$. 由于

$$f(z) = -\frac{z^{15}}{3!} + \frac{z^{25}}{5!} + \cdots$$

因此 0 是 15 阶零点.

定理. 非零的解析函数的零点总是孤立的.

证明. 设 $f(z)$ 是区域 D 上的非零解析函数, $z_0 \in D$ 是 $f(z)$ 的一个零点. 由于 $f(z)$ 不恒为零, 因此存在 $m \geq 1$ 使得在 z_0 的一个邻域内 $f(z) = (z - z_0)^m g(z)$, $g(z)$ 在 z_0 处解析且非零.

对于 $\varepsilon = \frac{1}{2}|g(z_0)|$, 存在 $\delta > 0$ 使得当 $z \in \overset{\circ}{U}(z_0, \delta) \subseteq D$ 时, $|g(z) - g(z_0)| < \varepsilon$. 从而 $g(z) \neq 0, f(z) \neq 0$. □

若解析函数 $f(z)$ 满足对任意实数 $x, f(x) = e^x$, 那么所有实数都是解析函数 $f(z) - e^z$ 的零点, 从而 $f(z) \equiv e^z$.

下面我们给出分式的奇点和分子分母零点的联系.

命题. 若 z_0 是 f 的 m 阶零点 (若解析且不是零点取 $m = 0$), g 的 n 阶零点, 则 z_0 是 fg 的 $m + n$ 阶零点.

命题. 设 z_0 是 f 的 m 阶零点 (若解析且不是零点取 $m = 0$), g 的 n 阶零点.

(1) 若 $m \geq n$, 则 z_0 是 $\frac{f(z)}{g(z)}$ 的可去奇点.

(2) 若 $m < n$, 则 z_0 是 $\frac{f(z)}{g(z)}$ 的 $n - m$ 阶极点.

典型例题: 函数的极点

例. $z = 0$ 是函数 $f(z) = \frac{e^z - 1}{z^2}$ 的(A).

- (A) 一阶极点 (B) 二阶极点 (C) 三阶极点 (D) 四阶极点

解答. 由于

$$e^z - 1 = z + \frac{z^2}{2!} + \frac{z^3}{3!} + \cdots,$$

所以 0 是 $e^z - 1$ 的一阶零点. 因此 0 是一阶极点.

典型例题: 函数的极点

例. $z = 0$ 是 $f(z) = \frac{(e^z - 1)^3 z^2}{\sin z^7}$ 的几阶极点?

解答. 0 是分子的五阶零点, 分母的七阶零点. 因此 0 是二阶极点.

例. 函数 $f(z) = \frac{(z - 5) \sin z}{(z - 1)^2 z^2 (z + 1)^3}$ 有怎样的奇点, 并指出极点的阶.

解答. 1 是二阶极点, 0 是一阶极点, -1 是三阶极点.

练习. 函数 $f(z) = \frac{z^2 + 4\pi^2}{z^3(e^z - 1)}$ 有哪些什么类型的奇点, 并指出极点的阶.

答案.

- $z = 2k\pi i$ 是一阶极点, $k \neq 0, \pm 1$.
- $z = 0$ 是四阶极点.
- $z = \pm 2\pi i$ 是可去奇点.

第五章 留数

第一节 留数

定义. 设 z_0 为 $f(z)$ 的孤立奇点, $f(z)$ 在它的某个去心邻域内的洛朗展开为

$$f(z) = \cdots + \frac{c_{-1}}{z - z_0} + c_0 + c_1(z - z_0) + \cdots .$$

称

$$\text{Res}[f(z), z_0] := c_{-1} = \frac{1}{2\pi i} \oint_C f(z) dz$$

为函数 $f(z)$ 在 z_0 的留数, 其中 C 为该去心邻域中绕 z_0 的一条闭路.

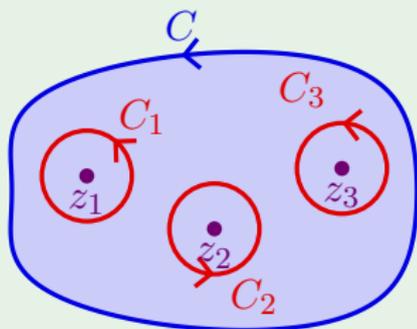
可以看出, 知道留数之后可以用来计算积分.

复变函数积分计算方法 III: 留数定理. 若 $f(z)$ 在闭路 C 上解析, 在 C 内部的奇点为 z_1, z_2, \dots, z_n , 则

$$\oint_C f(z) dz = 2\pi i \sum_{k=1}^n \operatorname{Res}[f(z), z_k].$$

证明. 由复合闭路定理,

$$\begin{aligned} \oint_C f(z) dz &= \sum_{k=1}^n \oint_{C_k} f(z) dz \\ &= 2\pi i \sum_{k=1}^n \operatorname{Res}[f(z), z_k]. \quad \square \end{aligned}$$



设 z_0 为 $f(z)$ 的极点.

留数计算公式 I. 若 z_0 是 $\leq m$ 阶极点或可去奇点, 那么

$$\operatorname{Res}[f(z), z_0] = \frac{1}{(m-1)!} \lim_{z \rightarrow z_0} [(z - z_0)^m f(z)]^{(m-1)}.$$

留数计算公式 II. 若 z_0 是一阶极点或可去奇点, 那么

$$\operatorname{Res}[f(z), z_0] = \lim_{z \rightarrow z_0} (z - z_0)f(z).$$

证明. 设

$$f(z) = c_{-m}(z - z_0)^{-m} + \cdots + c_{-1}(z - z_0)^{-1} + c_0 + \cdots,$$

$$g(z) = c_{-m} + \cdots + c_{-1}(z - z_0)^{m-1} + c_0(z - z_0)^m + \cdots,$$

则 $g(z) = (z - z_0)^m f(z)$. 由泰勒展开系数与函数导数的关系可知

$$\text{Res}[f(z), z_0] = c_{-1} = \frac{1}{(m-1)!} g^{(m-1)}(z_0). \quad \square$$

典型例题: 留数的计算

例. 求 $\operatorname{Res}\left[\frac{z - \sin z}{z^6}, 0\right]$.

解答. 因为 $z = 0$ 是 $z - \sin z$ 的三阶零点, 所以是 $\frac{z - \sin z}{z^6}$ 的三阶极点.
若用公式

$$\operatorname{Res}\left[\frac{z - \sin z}{z^6}, 0\right] = \frac{1}{2!} \lim_{z \rightarrow 0} \left(\frac{z - \sin z}{z^3}\right)''$$

计算会很繁琐.

$$\operatorname{Res}\left[\frac{z - \sin z}{z^6}, 0\right] = \frac{1}{5!} \lim_{z \rightarrow 0} (z - \sin z)^{(5)} = \frac{1}{5!} \lim_{z \rightarrow 0} (-\cos z) = -\frac{1}{120}.$$

练习. 求 $\operatorname{Res}\left[\frac{e^z - 1}{z^5}, 0\right] = \underline{1/24}$.

典型例题: 留数的计算

例. 求 $\text{Res} \left[\frac{z}{z^8 - 1}, \frac{1+i}{\sqrt{2}} \right]$.

解答. 由于 $z = \frac{1+i}{\sqrt{2}}$ 是分母的 1 阶零点, 因此

$$\text{Res} \left[\frac{z}{z^8 - 1}, \frac{1+i}{\sqrt{2}} \right] = \frac{z}{(z^8 - 1)'} \Big|_{z=\frac{1+i}{\sqrt{2}}} = \frac{z}{8z^7} \Big|_{z=\frac{1+i}{\sqrt{2}}} = \frac{i}{8}.$$

例题：留数的应用

例. 计算积分 $\oint_{|z|=2} \frac{e^z}{z(z-1)^2} dz$.

解答. $f(z) = \frac{e^z}{z(z-1)^2}$ 在 $|z| < 2$ 内有奇点 $z = 0, 1$.

$$\operatorname{Res}[f(z), 0] = \lim_{z \rightarrow 0} \frac{e^z}{(z-1)^2} = 1,$$

$$\operatorname{Res}[f(z), 1] = \lim_{z \rightarrow 1} \left(\frac{e^z}{z} \right)' = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{e^z(z-1)}{z^2} = 0,$$

$$\oint_{|z|=2} \frac{e^z}{z(z-1)^2} dz = 2\pi i [\operatorname{Res}[f(z), 0] + \operatorname{Res}[f(z), 1]] = 2\pi i.$$

定义. 设 $f(z)$ 在某个圆环域 $R < |z| < +\infty$ 内解析, 且洛朗展开为

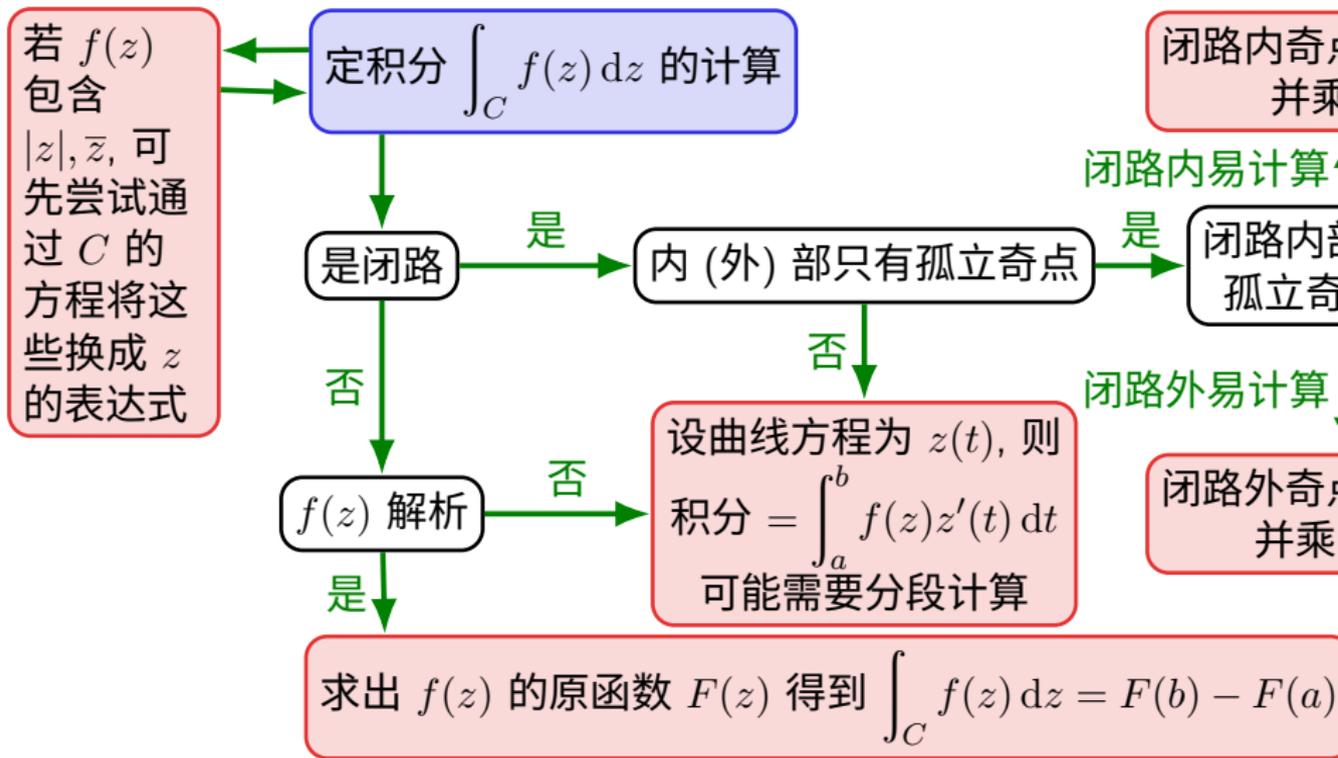
$$f(z) = \cdots + c_{-1}z^{-1} + c_0 + c_1z + \cdots$$

称

$$\operatorname{Res}[f(z), \infty] := -c_{-1} = \frac{1}{2\pi i} \oint_{C^-} f(z) dz$$

为函数 $f(z)$ 在 ∞ 的留数, 其中 C 为该圆环域中绕 0 的一条闭路.

积分的计算方法汇总



第二节 留数的应用

三角函数的有理函数的积分

本节中我们将对若干种在实变中难以计算的定积分和广义积分使用复变函数和留数的技巧进行计算. 相应计算公式会在考试中按需提供.

考虑 $\int_0^{2\pi} R(\cos \theta, \sin \theta) d\theta$, 其中 R 是一个有理函数. 令 $z = e^{i\theta}$, 则 $dz = iz d\theta$,

$$\cos \theta = \frac{1}{2} \left(z + \frac{1}{z} \right) = \frac{z^2 + 1}{2z}, \quad \sin \theta = \frac{1}{2i} \left(z - \frac{1}{z} \right) = \frac{z^2 - 1}{2iz},$$

$$\int_0^{2\pi} R(\cos \theta, \sin \theta) d\theta = \oint_{|z|=1} R\left(\frac{z^2 + 1}{2z}, \frac{z^2 - 1}{2iz}\right) \frac{1}{iz} dz.$$

由于被积函数是一个有理函数, 它的积分可以由 $|z| < 1$ 内奇点留数得到.

例题: 有理函数的广义积分

例. 求 $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dx}{(x^2 + a^2)^3}, a > 0.$

解答. $f(z) = \frac{1}{(z^2 + a^2)^3}$ 在上半平面内的奇点为 $ai.$

$$\begin{aligned}\text{Res}[f(z), ai] &= \frac{1}{2!} \lim_{z \rightarrow ai} \left[\frac{1}{(z + ai)^3} \right]'' \\ &= \frac{1}{2} \lim_{z \rightarrow ai} \frac{12}{(z + ai)^5} = \frac{3}{16a^5 i},\end{aligned}$$

故

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dx}{(x^2 + a^2)^3} = 2\pi i \text{Res}[f(z), ai] = \frac{3\pi}{8a^5}.$$

例题: 有理函数与正弦、余弦之积的广义积分

例. 求 $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos x \, dx}{(x^2 + a^2)^2}, a > 0.$

解答. $f(z) = \frac{e^{iz}}{(z^2 + a^2)^2}$ 在上半平面内的奇点为 ai ,

$$\text{Res}[f(z), ai] = \lim_{z \rightarrow ai} \left[\frac{e^{iz}}{(z + ai)^2} \right]' = -\frac{e^{-a}(a+1)i}{4a^3}.$$

故

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{ix} \, dx}{(x^2 + a^2)^2} = 2\pi i \text{Res}[f(z), ai] = \frac{\pi e^{-a}(a+1)}{2a^3},$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos x \, dx}{(x^2 + a^2)^2} = \frac{\pi e^{-a}(a+1)}{2a^3}.$$

定理. 设实数 p 不是整数, $f(x)$ 是一个有理函数, 分母没有正实根, 且满足

$$\lim_{x \rightarrow 0} x^{p+1} f(x) = 0, \quad \lim_{x \rightarrow \infty} x^{p+1} f(x) = 0,$$

则

$$\int_0^{+\infty} f(x) x^p dx = -\frac{\pi}{\sin p\pi} \sum_a \operatorname{Res}[e^{p \ln(-z)} f(z), a],$$

其中 a 取遍 $f(z)$ 的非零奇点.

例题：含幂函数的积分

例. 计算 $\int_0^{+\infty} \frac{x^p}{x(x+1)} dx, 0 < p < 1.$

解答. 设

$$f(z) = \frac{e^{p \ln(-z)}}{z(z+1)},$$

则 $f(z)$ 在正实轴和零以外的奇点为 $a = -1$, 且

$$\operatorname{Res}[f(z), -1] = \lim_{z \rightarrow -1} \frac{e^{p \ln(-z)}}{z} = -e^{p \ln 1} = -1.$$

因此

$$\int_0^{+\infty} \frac{x^p}{x(x+1)} dx = \frac{\pi}{\sin p\pi}.$$

定理. 设 $f(x)$ 是一个有理函数, 分母没有正实根, 且分母至少比分子高 2 次, 则

$$\int_0^{+\infty} f(x) \ln x dx = -\frac{1}{2} \sum_a \operatorname{Res}[\ln^2(-z)f(z), a],$$

其中 a 取遍 $f(z)$ 的奇点.

由于二者互为共轭, 二者之和为

$$2 \operatorname{Re} \left(\frac{1}{2i} \left(\frac{1}{2} \ln 2 - \frac{3\pi i}{4} \right)^2 \right) = -\frac{3\pi}{4} \ln 2.$$

因此

$$I = \frac{3\pi}{8} \ln 2.$$

第七章 积分变换

第一节 傅里叶变换

在学习指数和对数的时候, 我们了解到利用对数可以将乘除、幂次转化为加减、乘除.

例. 计算 12345×67890 .

解答. 通过查对数表得到

$$\ln 12345 \approx 9.4210, \quad \ln 67890 \approx 11.1256.$$

将二者相加并通过反查对数表得到原值

$$12345 \times 67890 \approx \exp(20.5466) \approx 8.3806 \times 10^8.$$

而对于函数而言, 我们常常要解函数的方程.

例. 解微分方程

$$\begin{cases} y'' + y = t, \\ y(0) = y'(0) = 0. \end{cases}$$

解答. 我们希望能找到一种函数的**变换** \mathcal{L} , 使得它可以把函数的微分和积分变成代数运算, 计算之后通过**反变换** \mathcal{L}^{-1} 求得原来的解.

这个变换最常见的就是我们将要介绍的**傅里叶变换**和**拉普拉斯变换**.

周期函数的傅里叶级数展开

为了引入傅里叶变换, 我们回顾下傅里叶级数.

考虑定义在 $(-\infty, +\infty)$ 上周期为 $T > 0$ 的函数 $f(t)$. 例如

$$1, \sin \omega t, \cos \omega t, \sin 2\omega t, \cos 2\omega t, \sin 3\omega t, \cos 3\omega t, \dots$$

的周期都是 T , 其中 $\omega = \frac{2\pi}{T}$. 类似于线性组合的概念, 我们希望将 f 表达为上述函数的线性叠加. 若 $f(t)$ 在 $\left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right]$ 上满足狄利克雷条件:

- 间断点只有有限多个, 且均为第一类间断点;
- 只有有限个极值点,

则我们有傅里叶级数展开:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t).$$

当 t 是间断点时, 傅里叶级数的左侧需改为 $\frac{f(t+) + f(t-)}{2}$.

我们来将其改写为复指数形式. 由

$$\cos x = \frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2}, \quad \sin x = \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i}$$

可知 $f(t)$ 的傅里叶级数可以表示为函数 $e^{in\omega t}$ 的线性叠加

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n e^{in\omega t}.$$

现在我们来计算这个线性叠加的系数.

对于定义在 $(-\infty, +\infty)$ 上周期为 $T > 0$ 的复值函数 f, g , 定义内积

$$(f, g) := \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \bar{g}(t) dt.$$

那么

$$(e^{im\omega t}, e^{in\omega t}) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} e^{i(m-n)\omega t} dt = \begin{cases} 1, & m = n \\ 0, & m \neq n. \end{cases}$$

所以

$$\dots, e^{-2i\omega t}, e^{-i\omega t}, 1, e^{i\omega t}, e^{2i\omega t}, \dots$$

是一组标准正交基. 于是

$$c_n = (f, e^{in\omega t}) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-in\omega t} dt,$$

我们得到周期函数**傅里叶级数的复指数形式**:

$$f(t) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(\tau) e^{-in\omega\tau} d\tau \right] e^{in\omega t}.$$

例题：帕塞瓦尔恒等式的应用

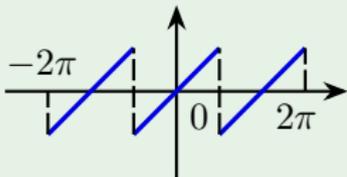
例. 计算 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2}$.

解答. 设 $f(t)$ 是一个周期为 2π 的函数, 且当 $t \in [-\pi, \pi)$ 时 $f(t) = t$. 当 $n \neq 0$ 时,

$$c_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} t e^{-int} dt = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{it}{n} + \frac{1}{n^2} \right) e^{-int} \Big|_{-\pi}^{\pi} = \frac{(-1)^n i}{n}.$$

$$c_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} t dt = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{t^2}{2} \Big|_{-\pi}^{\pi} = 0.$$

$$\begin{aligned} \text{因此 } \sum_{n \neq 0} \frac{1}{n^2} &= (f, f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} t^2 dt = \\ \frac{\pi^2}{3}, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} &= \frac{\pi^2}{6}. \end{aligned}$$



从傅里叶级数到傅里叶积分公式

对于一般的函数 $f(t)$, 它未必是周期的. 此时它无法像前面的情形一样, 表达成可数多个函数

$$\dots, e^{-2i\omega t}, e^{-i\omega t}, 1, e^{i\omega t}, e^{2i\omega t}, \dots$$

的线性叠加, 而是**所有的** $e^{i\omega t}, \omega \in (-\infty, +\infty)$ **的叠加**. 这种叠加的“系数”应当是无穷小方可, 而求和应当改为积分. 所以, 若记 $e^{i\omega t}$ 的“系数”为函数 $\frac{1}{2\pi}F(\omega)$, 则

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} dt.$$

从傅里叶级数到傅里叶积分公式

我们来从傅里叶级数形式地推导出函数 $F(\omega)$. 考虑 $f(t)$ 它在 $\left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right]$ 上的限制, 并向两边扩展成一个周期函数 $f_T(t)$. 设

$$\omega_n = n\omega, \quad \Delta\omega_n = \omega_n - \omega_{n-1} = \omega,$$

则

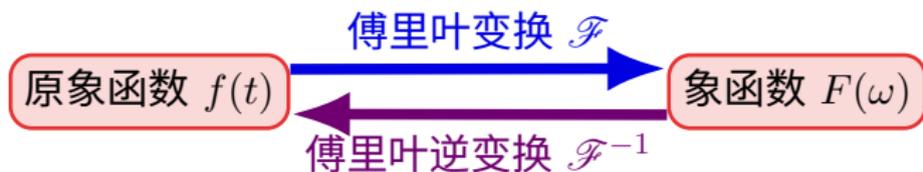
$$\begin{aligned} f(t) &= \lim_{T \rightarrow +\infty} f_T(t) \\ &= \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(\tau) e^{-i\omega_n \tau} d\tau \right] e^{i\omega_n t} \\ &= \frac{1}{2\pi} \lim_{\Delta\omega_n \rightarrow 0} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(\tau) e^{-i\omega_n \tau} d\tau \right] e^{i\omega_n t} \Delta\omega_n \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) e^{-i\omega \tau} d\tau \right] e^{i\omega t} d\omega. \end{aligned}$$

傅里叶积分定理

傅里叶积分定理. 若 $f(t)$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 上绝对可积, 且在任一有限区间上满足狄利克雷条件, 则

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt.$$

对于 $f(t)$ 的间断点左边需要改成 $\frac{f(t+) + f(t-)}{2}$.



若 $f(t)$ 表示随时间 t 变化的函数, 那么 $F(\omega)$ 表示的是频率 ω 的函数, 所以傅里叶变换是时域到频域的转换.

傅里叶积分公式有一些变化形式. 例如:

$$\begin{aligned}
 f(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right] e^{i\omega t} d\omega \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) e^{i\omega(t-\tau)} d\tau d\omega \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\underbrace{\int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \cos \omega(t-\tau) d\tau}_{\omega \text{ 的偶函数}} + i \underbrace{\int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \sin \omega(t-\tau) d\tau}_{\omega \text{ 的奇函数}} \right] d\omega \\
 &= \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) \cos \omega(t-\tau) d\tau \right] d\omega.
 \end{aligned}$$

此即傅里叶积分公式的三角形式.

若 $f(t)$ 是偶函数, 则 $f(t) \cos \omega t$ 是偶函数, $f(t) \sin \omega t$ 是奇函数,

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt = 2 \int_0^{+\infty} f(t) \cos \omega t dt$$

也是偶函数, 从而得到傅里叶余弦积分公式:

$$f(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{+\infty} \left[\int_0^{+\infty} f(\tau) \cos \omega \tau d\tau \right] \cos \omega t d\omega.$$

类似地, 若 $f(t)$ 是奇函数, 则 $F(\omega) = 2i \int_0^{+\infty} f(t) \sin \omega t dt$ 也是奇函数, 且有傅里叶正弦积分公式:

$$f(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{+\infty} \left[\int_0^{+\infty} f(\tau) \sin \omega \tau d\tau \right] \sin \omega t d\omega.$$

例题：求傅里叶变换

由傅里叶积分公式

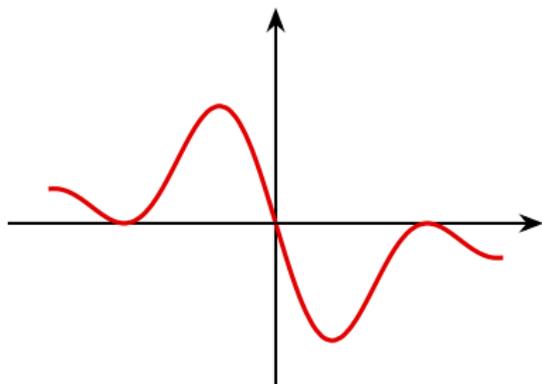
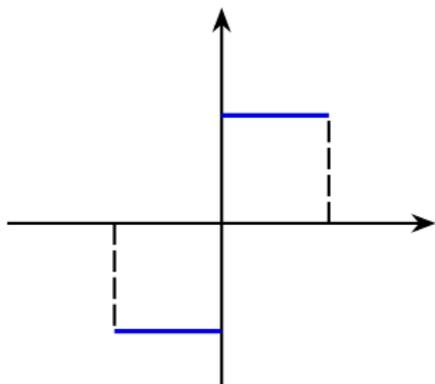
$$\begin{aligned} f(t) &= \mathcal{F}^{-1}[F(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin \omega}{\omega} (\cos \omega t + i \sin \omega t) d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{\sin \omega \cos \omega t}{\omega} d\omega. \end{aligned}$$

当 $t = \pm 1$ 时, 左侧应替换为 $\frac{f(t+) + f(t-)}{2} = \frac{1}{4}$. 由此可得

$$\int_0^{+\infty} \frac{\sin \omega \cos \omega t}{\omega} d\omega = \begin{cases} \pi/2, & |t| < 1, \\ \pi/4, & |t| = 1, \\ 0, & |t| > 1. \end{cases}$$

特别地, 可以得到狄利克雷积分 $\int_0^{+\infty} \frac{\sin \omega}{\omega} d\omega = \frac{\pi}{2}$.

例题：求傅里叶变换



$$\text{类似可得 } \int_0^{+\infty} \frac{(1 - \cos \omega) \sin \omega t}{\omega} d\omega = \begin{cases} \pi/2, & 0 < t < 1, \\ \pi/4, & t = 1, \\ 0, & t > 1. \end{cases}$$

傅里叶变换存在的条件是比较苛刻的. 例如常值函数 $f(t) = 1$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 上不是可积的, 所以它没有傅里叶变换, 这很影响我们使用傅里叶变换. 为此我们引入广义函数的概念.

设 \mathcal{S} 是由一些“非常好”的函数 (光滑速降函数) 形成的线性空间. 从一个 (局部可积缓增) 函数 $\lambda(t)$ 出发, 我们可以定义一个线性映射 $\mathcal{S} \rightarrow \mathbb{R}$:

$$\langle \lambda, f \rangle := \int_{-\infty}^{+\infty} \lambda(t)f(t) dt.$$

这个线性映射基本上确定了 $\lambda(t)$ 本身.

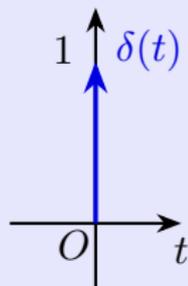
广义函数 (分布) 就是指一个线性映射 $\mathcal{S} \rightarrow \mathbb{R}$. 为了和普通函数类比, 也可将广义函数表为上述积分形式 (并不是真的积分):

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \lambda(t)f(t) dt.$$

这里的 $\lambda(t)$ 并不表示一个真正的函数.

定义. 狄拉克 δ 函数是指广义函数

$$\langle \delta, f \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) f(t) dt = f(0).$$



设 $\delta_\varepsilon(t) = \begin{cases} 1/\varepsilon, & 0 \leq t \leq \varepsilon, \\ 0, & \text{其它情形,} \end{cases}$ 则

$$\langle \delta_\varepsilon, f \rangle = \frac{1}{\varepsilon} \int_0^\varepsilon f(t) dt = f(\xi), \quad \xi \in (0, \varepsilon).$$

当 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时, 右侧就趋于 $f(0)$. 因此 δ 可以看成 δ_ε 的“弱极限”. 基于此, 我们通常用长度为 1 的有向线段来表示它.

对于广义函数 λ , 我们可以形式地定义 $\lambda(at), \lambda'$:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \lambda(at) f(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \lambda(t) \cdot \frac{1}{|a|} f\left(\frac{t}{a}\right) dt,$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \lambda'(t) f(t) dt = - \int_{-\infty}^{+\infty} \lambda(t) f'(t) dt.$$

由此可知

- $\langle \delta^{(n)}, f \rangle = (-1)^n f^{(n)}(0)$, 其中 $f(t)$ 是光滑函数.
- $\delta(at) = \frac{1}{|a|} \delta(t)$. 特别地 $\delta(t) = \delta(-t)$.
- $u'(t) = \delta(t)$, 其中 $u(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0, \\ 0, & t < 0 \end{cases}$ 是单位阶跃函数.

傅里叶变换的性质: 位移性质

证明.

$$\begin{aligned}\mathcal{F}[f(t-t_0)] &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(t-t_0)e^{-i\omega t} dt \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega(t+t_0)} dt = e^{-i\omega t_0} F(\omega).\end{aligned}$$

逆变换情形类似可得.



由此可得

$$\mathcal{F}[\delta(t-t_0)] = e^{-i\omega t_0}, \quad \mathcal{F}^{-1}[\delta(\omega-\omega_0)] = \frac{1}{2\pi} e^{i\omega_0 t}.$$

与 δ 函数有关的傅里叶变换汇总.

- (1) $\mathcal{F}[\delta(t)] = 1, \mathcal{F}[\delta(t - t_0)] = e^{-i\omega t_0};$
- (2) $\mathcal{F}[1] = 2\pi\delta(\omega), \mathcal{F}[e^{i\omega_0 t}] = 2\pi\delta(\omega - \omega_0);$
- (3) $\mathcal{F}[\sin \omega_0 t] = i\pi[\delta(\omega + \omega_0) - \delta(\omega - \omega_0)];$
- (4) $\mathcal{F}[\cos \omega_0 t] = \pi[\delta(\omega + \omega_0) + \delta(\omega - \omega_0)];$
- (5) $\mathcal{F}[u(t)] = \frac{1}{i\omega} + \pi\delta(\omega).$

乘积定理. 若 $\mathcal{F}[f(t)] = F(\omega)$, $\mathcal{F}[g(t)] = G(\omega)$, 则

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\overline{g(t)} dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega)\overline{G(\omega)} d\omega.$$

特别地,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(\omega)|^2 d\omega.$$

此即 $(F, G) = 2\pi(f, g)$. 这表明 $\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\mathcal{F}$ 是正交变换.

例题：乘积定理的应用

例. 计算 $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin^4 x}{x^2} dx$.

解答. 由于

$$f(t) = \begin{cases} 1, & t \in (0, 1), \\ -1, & t \in (-1, 0), \\ 0, & \text{其它情形.} \end{cases}$$

的傅里叶变换为 $F(\omega) = -2i \frac{1 - \cos \omega}{\omega}$. 因此

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin^4 x}{x^2} dx &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1 - \cos 2x}{2x} \right)^2 d(2x) = \frac{1}{8} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(\omega)|^2 d\omega \\ &= \frac{1}{8} \cdot 2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{\pi}{4} \int_{-1}^1 dt = \frac{\pi}{2}. \end{aligned}$$

定理. $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} f(n) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} F(2\pi n)$, 间断点处需修改为左右极限平均值.

证明. 考虑 $g(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} f(t+n)$ 的傅里叶展开:

$$\begin{aligned} \int_0^1 g(t)e^{-2\pi int} dt &= \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \int_0^1 f(t+m)e^{-2\pi int} dt \\ &= \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \int_m^{m+1} f(t)e^{-2\pi int} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-2\pi int} dt = F(2\pi n). \end{aligned}$$

因此 $g(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} F(2\pi n)e^{2\pi int}$. 令 $t=0$ 即得. □

例题：泊松求和公式的应用

例. 为了计算 $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{n^2+1}$, 考虑

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi + i\omega} + \frac{1}{2\pi - i\omega} = \frac{4\pi}{4\pi^2 + \omega^2}$$

的傅里叶逆变换

$$f(t) = \mathcal{F}^{-1}[F(\omega)] = e^{-2\pi t \operatorname{sgn}(t)}.$$

于是

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{n^2+1} = \pi \sum_{n=-\infty}^{+\infty} F(2\pi n) = \pi \sum_{n=-\infty}^{+\infty} f(n) = \pi \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-2\pi n} \right) = \frac{\pi}{\operatorname{th} \pi}$$

例. 求 $I = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin \omega}{\omega} \cdot \frac{\sin(\omega/3)}{\omega/3} d\omega.$

解答. 设 $F(\omega) = \frac{\sin \omega}{\omega}, G(\omega) = \frac{\sin(\omega/3)}{\omega/3}$, 则

$$\mathcal{F}^{-1}[FG] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega)G(\omega)e^{i\omega t} d\omega,$$

$$\mathcal{F}^{-1}[FG](0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega)G(\omega) d\omega = \frac{1}{2\pi} I.$$

例题：卷积的应用

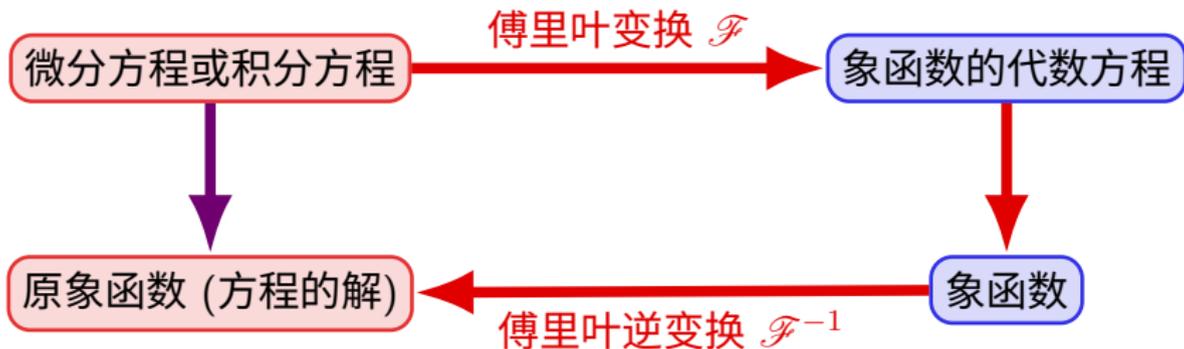
我们之前计算过

$$\mathcal{F}^{-1}[F(\omega)] = f(t) = \begin{cases} 1/2, & |t| < 1, \\ 1/4, & |t| = 1, \\ 0, & |t| > 1. \end{cases}$$

所以 $\mathcal{F}^{-1}[G(\omega)] = g(t) = 3f(3t)$,

$$\begin{aligned} \mathcal{F}^{-1}[FG](0) &= (f * g)(0) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(-t)g(t) dt = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 g(t) dt = \frac{1}{2}, \end{aligned}$$

故 $I = 2\pi \mathcal{F}^{-1}[FG](0) = \pi$.



例题：使用傅里叶变换解微积分方程

例. 解方程 $y''(t) - y(t) = 0$.

解答. 设 $\mathcal{F}[y] = Y$, 则

$$\mathcal{F}[y''(t) - y(t)] = [(i\omega)^2 - 1]Y(\omega) = 0,$$

$$Y(\omega) = 0, \quad y(t) = \mathcal{F}^{-1}[Y(\omega)] = 0.$$

显然这是不对的, 该方程的解应该是 $y(t) = C_1 e^t + C_2 e^{-t}$.

原因在于使用傅里叶变换要求函数是绝对可积的, 而 e^t, e^{-t} 并不满足该条件. 我们需要一个对函数限制更少的积分变换来解决此类方程, 例如拉普拉斯变换.

第二节 拉普拉斯变换

傅里叶变换对函数要求过高, 这使得在很多时候无法应用它, 或者要引入复杂的广义函数. 对于一般的 $\varphi(t)$, 为了让它绝对可积, 我们考虑

$$\varphi(t)u(t)e^{-\beta t}, \quad \beta > 0.$$

它的傅里叶变换为

$$\mathcal{F}[\varphi(t)u(t)e^{-\beta t}] = \int_0^{+\infty} \varphi(t)e^{-(\beta+i\omega)t} dt = \int_0^{+\infty} \varphi(t)e^{-st} dt,$$

其中 $s = \beta + i\omega$. 这样的积分在我们遇到的多数情形都是存在的, 只要选择充分大的 $\beta = \operatorname{Re} s$. 我们称之为 $\varphi(t)$ 的拉普拉斯变换 $\mathcal{L}[\varphi]$.

例题：求拉普拉斯变换

例. 求 $\mathcal{L}[e^{kt}]$.

解答.

$$\begin{aligned}\mathcal{L}[e^{kt}] &= \int_0^{+\infty} e^{kt} e^{-st} dt \\ &= \int_0^{+\infty} e^{-(s-k)t} dt = -\frac{1}{s-k} e^{-(s-k)t} \Big|_0^{+\infty} \\ &= \frac{1}{s-k}, \quad \operatorname{Re} s > \operatorname{Re} k.\end{aligned}$$

即 $\mathcal{L}[e^{kt}] = \frac{1}{s-k}$. 特别地 $\mathcal{L}[1] = \frac{1}{s}$.

和傅里叶变换类似, 拉普拉斯变换也有着各种性质. 我们不加证明地列出它们.

拉普拉斯变换的性质.

- (线性性质) $\mathcal{L}[\alpha f + \beta g] = \alpha F + \beta G$, $\mathcal{L}^{-1}[\alpha F + \beta G] = \alpha f + \beta g$.
- (积分性质) $\mathcal{L}\left[\int_0^t f(\tau) d\tau\right] = \frac{1}{s}F(s)$.
- (乘多项式性质) $\mathcal{L}[tf(t)] = -F'(s)$, $\mathcal{L}[t^k f(t)] = (-1)^k F^{(k)}(s)$.
- (延迟性质) $\mathcal{L}[f(t - t_0)] = e^{-st_0} F(s)$, $t_0 \geq 0$.
- (位移性质) $\mathcal{L}[e^{s_0 t} f(t)] = F(s - s_0)$.

微分性质.

$$\mathcal{L}[f'(t)] = sF(s) - f(0),$$

$$\mathcal{L}[f''(t)] = s^2F(s) - sf(0) - f'(0).$$

从拉普拉斯变换的微分性质可以看出, 拉普拉斯变换可以将微分方程转化为代数方程, 从而可用于解微分方程.

例题：求拉普拉斯变换

例. 求 $\mathcal{L}[t^m e^{kt}]$, 其中 m 是正整数.

解答. 由 $\mathcal{L}[t^m] = \frac{m!}{s^{m+1}}$ 可知

$$\mathcal{L}[t^m e^{kt}] = \frac{m!}{(s - k)^{m+1}}.$$

拉普拉斯逆变换可以由如下定理给出

拉普拉斯逆变换定理. 设 $F(s)$ 的所有奇点为 s_1, \dots, s_k , 且 $\lim_{z \rightarrow \infty} F(z) = 0$, 则

$$\mathcal{L}^{-1}[F(s)] = \sum_{k=1}^n \operatorname{Res} [F(s)e^{st}, s_k].$$

不过我们只要求掌握如何利用常见函数的拉普拉斯变换来计算逆变换.

例题：求拉普拉斯逆变换

另解. 设 $F(s) = \frac{a}{s} + \frac{b}{s-1} + \frac{c}{(s-1)^2}$, 则

$$a = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s) = \frac{1}{(s-1)^2} \Big|_{s=0} = 1,$$

$$b = \lim_{s \rightarrow 1} ((s-1)^2 F(s))' = \left(\frac{1}{s} \right)' \Big|_{s=1} = -\frac{1}{s^2} \Big|_{s=1} = -1,$$

$$c = \lim_{s \rightarrow 1} (s-1)^2 F(s) = \frac{1}{s} \Big|_{s=1} = 1.$$

$$\text{故 } \mathcal{L}^{-1}[F(s)] = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{1}{s} - \frac{1}{s-1} + \frac{1}{(s-1)^2} \right] = 1 + (t-1)e^t.$$

例题：使用拉普拉斯变换解微分方程

例. 解微分方程
$$\begin{cases} y'' + 2y = \sin t, \\ y(0) = 0, \quad y'(0) = 2. \end{cases}$$

解答. 设 $\mathcal{L}[y] = Y$, 则 $\mathcal{L}[y''] = s^2Y - sy(0) - y'(0) = s^2Y - 2$, 因此

$$s^2Y - 2 + 2Y = \mathcal{L}[\sin t] = \frac{1}{s^2 + 1},$$

$$Y(s) = \frac{2}{s^2 + 2} + \frac{1}{(s^2 + 1)(s^2 + 2)} = \frac{1}{s^2 + 1} + \frac{1}{s^2 + 2},$$

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s^2 + 1}\right] + \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s^2 + 2}\right] = \sin t + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin(\sqrt{2}t).$$

Temporary page!

\LaTeX was unable to guess the total number of pages correctly. There was some unprocessed data that should have been added to the document, so this extra page has been added to receive it.

If you rerun the document (without altering it) this surplus will go away, because \LaTeX now knows how many pages to expect for the document.