

## 第四节

## 函数展开成幂级数

两类问题：在收敛域内

$$\text{幂级数 } \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \xrightleftharpoons[\text{展 开}]{\text{求 和}} \text{和函数 } S(x)$$

本节内容：

一、泰勒 ( Taylor ) 级数

二、函数展开成幂级数



# 一、泰勒 ( Taylor ) 级数

复习:  $f(x)$  的  $n$  阶泰勒公式

若函数  $f(x)$  在  $x_0$  的某邻域内具有  $n+1$  阶导数, 则在该邻域内有:

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x - x_0)^2$$

$$+ \cdots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(x - x_0)^n + R_n(x)$$

其中  $R_n(x) = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}(x - x_0)^{n+1}$  ( $\xi$  在  $x$  与  $x_0$  之间)

称为拉格朗日余项.



HIGHER EDUCATION PRESS

若函数  $f(x)$  在  $x_0$  的某邻域内具有任意阶导数, 则称

$$f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x - x_0)^2 + \cdots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(x - x_0)^n + \cdots$$

为  $f(x)$  的泰勒级数.

当  $x_0 = 0$  时, 泰勒级数又称为麦克劳林级数.

待解决的问题 :

- 1) 对此级数, 它的收敛域是什么 ?
- 2) 在收敛域上, 和函数是否为  $f(x)$  ?



**定理1.** 设函数  $f(x)$  在点  $x_0$  的某一邻域  $U(x_0)$  内具有各阶导数, 则  $f(x)$  在该邻域内能展开成泰勒级数的充要条件是  $f(x)$  的泰勒公式余项满足:  $\lim_{n \rightarrow \infty} R_n(x) = 0$ .

证明:  $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!} (x - x_0)^n, \quad x \in U(x_0)$

$$\begin{array}{c} \uparrow \text{令 } S_{n+1}(x) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} (x - x_0)^k \\ \downarrow f(x) = S_{n+1}(x) + R_n(x) \end{array}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} R_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} [f(x) - S_{n+1}(x)] = 0, \quad x \in U(x_0)$$



**定理2.** 若  $f(x)$  能展成  $x$  的幂级数, 则这种展开式是唯一的, 且与它的麦克劳林级数相同.

证: 设  $f(x)$  所展成的幂级数为

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n + \cdots, \quad x \in (-R, R)$$

则

$$a_0 = f(0)$$

$$f'(x) = a_1 + 2a_2x + \cdots + na_nx^{n-1} + \cdots; \quad a_1 = f'(0)$$

$$f''(x) = 2!a_2 + \cdots + n(n-1)a_nx^{n-2} + \cdots; \quad a_2 = \frac{1}{2!}f''(0)$$

.....

...

$$f^{(n)}(x) = n!a_n + \cdots; \quad a_n = \frac{1}{n!}f^{(n)}(0)$$

.....

...

显然结论成立.



## 二、函数展开成幂级数

展开方法  $\left\{ \begin{array}{l} \text{直接展开法} — \text{利用泰勒公式} \\ \text{间接展开法} — \text{利用已知其级数展开式的函数展开} \end{array} \right.$

### 1. 直接展开法

由泰勒级数理论可知, 函数  $f(x)$  展开成幂级数的步骤如下:

第一步 求函数及其各阶导数在  $x = 0$  处的值;

第二步 写出麦克劳林级数, 并求出其收敛半径  $R$ ;

第三步 判别在收敛区间  $(-R, R)$  内  $\lim_{n \rightarrow \infty} R_n(x)$  是否为 0.



**例1.** 将函数  $f(x) = e^x$  展开成  $x$  的幂级数.

**解:**  $\because f^{(n)}(x) = e^x$ ,  $f^{(n)}(0) = 1$  ( $n = 0, 1, \dots$ ), 故得级数

$$1 + x + \frac{1}{2!}x^2 + \frac{1}{3!}x^3 + \cdots + \frac{1}{n!}x^n + \cdots$$

其收敛半径为  $R = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n!} \sqrt[n]{\frac{1}{(n+1)!}} = +\infty$

对任何有限数  $x$ , 其余项满足

$$|R_n(x)| = \left| \frac{e^\xi}{(n+1)!} x^{n+1} \right| < e^{|x|} \frac{|x|^{n+1}}{(n+1)!} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

( $\xi$  在 0 与  $x$  之间)

故  $e^x = 1 + x + \frac{1}{2!}x^2 + \frac{1}{3!}x^3 + \cdots + \frac{1}{n!}x^n + \cdots$ ,  $x \in (-\infty, +\infty)$



**例2.** 将  $f(x) = \sin x$  展开成  $x$  的幂级数.

**解:**  $\because f^{(n)}(x) = \sin(x + n \cdot \frac{\pi}{2})$

$$\therefore f^{(n)}(0) = \begin{cases} 0, & n = 2k \\ (-1)^k, & n = 2k+1 \end{cases} \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

得级数:  $x - \frac{1}{3!}x^3 + \frac{1}{5!}x^5 - \dots + (-1)^{n-1} \frac{1}{(2n-1)!}x^{2n-1} + \dots$

其收敛半径为  $R = +\infty$ , 对任何有限数  $x$ , 其余项满足

$$|R_n(x)| = \left| \frac{\sin(\xi + (n+1)\frac{\pi}{2})}{(n+1)!} x^{n+1} \right| < \frac{|x|^{n+1}}{(n+1)!} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

$\therefore \sin x = x - \frac{1}{3!}x^3 + \frac{1}{5!}x^5 - \dots + (-1)^{n-1} \frac{1}{(2n-1)!}x^{2n-1} + \dots$

$$x \in (-\infty, +\infty)$$



$$\sin x = x - \frac{1}{3!}x^3 + \frac{1}{5!}x^5 - \cdots + (-1)^{n-1} \frac{1}{(2n-1)!}x^{2n-1} + \cdots$$
$$x \in (-\infty, +\infty)$$

对上式两边求导可推出：

$$\cos x = 1 - \frac{1}{2!}x^2 + \frac{1}{4!}x^4 - \cdots + (-1)^{n-1} \frac{1}{(2n)!}x^{2n} + \cdots$$
$$x \in (-\infty, +\infty)$$

**例3.** 将函数  $f(x) = (1+x)^m$  展开成  $x$  的幂级数, 其中  $m$  为任意常数.

**解:** 易求出  $f(0) = 1, f'(0) = m, f''(0) = m(m-1),$

$$f^{(n)}(0) = m(m-1)(m-2)\cdots(m-n+1), \dots$$

于是得 级数  $1 + mx + \frac{m(m-1)}{2!}x^2 + \cdots$   
 $+ \frac{m(m-1)\cdots(m-n+1)}{n!}x^n + \cdots$

由于  $R = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_n}{a_{n+1}} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{n+1}{m-n} \right| = 1$

因此对任意常数  $m$ , 级数在开区间  $(-1, 1)$  内收敛.

为避免研究余项, 设此级数的和函数为  $F(x)$ ,  $-1 < x < 1$

则  $F(x) = 1 + mx + \frac{m(m-1)}{2!}x^2 + \dots$

$$+ \frac{m(m-1)\cdots(m-n+1)}{n!}x^n + \dots$$

$$F'(x) = m \left[ 1 + \frac{m-1}{1}x + \dots + \frac{(m-1)\cdots(m-n+1)}{(n-1)!}x^{n-1} + \dots \right]$$

$$(1+x)F'(x) = mF(x), \quad F(0) = 1$$

推导

$$\int_0^x \frac{F'(x)}{F(x)} dx = \int_0^x \frac{m}{1+x} dx$$

$$\downarrow \quad \ln F(x) - \ln F(0) = m \ln(1+x)$$

$$F(x) = (1+x)^m$$



HIGHER EDUCATION PRESS



推导



目录



上页



下页



返回



结束

由此得

$$(1+x)^m = 1 + mx + \frac{m(m-1)}{2!}x^2 + \cdots + \frac{m(m-1)\cdots(m-n+1)}{n!}x^n + \cdots$$
$$(-1 < x < 1)$$

称为二项展开式.

说明:

- (1) 在  $x=\pm 1$  处的收敛性与  $m$  有关.
- (2) 当  $m$  为正整数时, 级数为  $x$  的  $m$  次多项式, 上式就是代数学中的二项式定理.



对应  $m = \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, -1$  的二项展开式分别为

$$\sqrt{1+x} = 1 + \frac{1}{2}x - \frac{1}{2 \cdot 4}x^2 + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4 \cdot 6}x^3 - \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 8}x^4 + \dots$$
$$(-1 \leq x \leq 1)$$

$$\frac{1}{\sqrt{1+x}} = 1 - \frac{1}{2}x + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}x^2 - \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}x^3 + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7}{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 8}x^4 - \dots$$
$$(-1 < x \leq 1)$$

$$\frac{1}{1+x} = 1 - x + x^2 - x^3 + \dots + (-1)^n x^n + \dots$$
$$(-1 < x < 1)$$



$$\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + \dots + x^n + \dots$$
$$(-1 < x < 1)$$



### 例3 附注

$$F'(x) = m \left[ 1 + \frac{m-1}{1} x + \frac{(m-1)(m-2)}{2!} x^2 + \cdots + \frac{(m-1)\cdots(m-n)}{n!} x^n + \cdots \right]$$

$$xF'(x) = m \left[ x + \frac{m-1}{1} x^2 + \cdots + \frac{(m-1)\cdots(m-n+1)}{(n-1)!} x^n + \cdots \right]$$

$$(1+x)F'(x) = m \left[ 1 + mx + \frac{m(m-1)}{2!} x^2 + \cdots + \frac{m(m-1)\cdots(m-n+1)}{n!} x^n + \cdots \right] = m F(x)$$



## 2. 间接展开法

利用一些已知的函数展开式及幂级数的运算性质，将所给函数展开成幂级数.

**例4.** 将函数  $\frac{1}{1+x^2}$  展开成  $x$  的幂级数.

**解：**因为

$$\frac{1}{1+x} = 1 - x + x^2 - \cdots + (-1)^n x^n + \cdots \quad (-1 < x < 1)$$

把  $x$  换成  $x^2$ ，得

$$\frac{1}{1+x^2} = 1 - x^2 + x^4 + \cdots + (-1)^n x^{2n} + \cdots \quad (-1 < x < 1)$$



**例5.** 将函数  $f(x) = \ln(1+x)$  展开成  $x$  的幂级数.

解:  $f'(x) = \frac{1}{1+x} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^n \quad (-1 < x < 1)$

从 0 到  $x$  积分, 得

$$\ln(1+x) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \int_0^x x^n dx = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n+1} x^{n+1}, \quad -1 < x \leq 1$$

上式右端的幂级数在  $x = 1$  收敛, 而  $\ln(1+x)$  在  $x = 1$  有定义且连续, 所以展开式对  $x = 1$  也是成立的, 于是收敛域为  $-1 < x \leq 1$ .

---

利用此题可得

$$\ln 2 = 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \cdots + (-1)^n \frac{1}{n+1} + \cdots$$



**例6.** 将  $\sin x$  展成  $x - \frac{\pi}{4}$  的幂级数.

解:  $\sin x = \sin\left[\frac{\pi}{4} + (x - \frac{\pi}{4})\right]$

$$= \sin \frac{\pi}{4} \cos(x - \frac{\pi}{4}) + \cos \frac{\pi}{4} \sin(x - \frac{\pi}{4})$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \cos(x - \frac{\pi}{4}) + \sin(x - \frac{\pi}{4}) \right]$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \left( 1 - \frac{1}{2!} \left( x - \frac{\pi}{4} \right)^2 + \frac{1}{4!} \left( x - \frac{\pi}{4} \right)^4 - \dots \right) \right.$$

$$\left. + \left( \left( x - \frac{\pi}{4} \right) - \frac{1}{3!} \left( x - \frac{\pi}{4} \right)^3 + \frac{1}{5!} \left( x - \frac{\pi}{4} \right)^5 - \dots \right) \right]$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ 1 + \left( x - \frac{\pi}{4} \right) - \frac{1}{2!} \left( x - \frac{\pi}{4} \right)^2 - \frac{1}{3!} \left( x - \frac{\pi}{4} \right)^3 + \dots \right]$$

$$(-\infty < x < +\infty)$$



**例7.** 将  $\frac{1}{x^2 + 4x + 3}$  展成  $x - 1$  的幂级数.

解:  $\frac{1}{x^2 + 4x + 3} = \frac{1}{(x+1)(x+3)} = \frac{1}{2(1+x)} - \frac{1}{2(3+x)}$

$$= \frac{1}{4\left(1 + \frac{x-1}{2}\right)} - \frac{1}{8\left(1 + \frac{x-1}{4}\right)}$$

$$(|x-1| < 2)$$

$$= \frac{1}{4} \left[ 1 - \frac{x-1}{2} + \frac{(x-1)^2}{2^2} + \cdots + (-1)^n \frac{(x-1)^n}{2^n} + \cdots \right]$$

$$- \frac{1}{8} \left[ 1 - \frac{x-1}{4} + \frac{(x-1)^2}{4^2} + \cdots + (-1)^n \frac{(x-1)^n}{4^n} + \cdots \right]$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left( \frac{1}{2^{n+2}} - \frac{1}{2^{2n+3}} \right) (x-1)^n \quad (-1 < x < 3)$$



# 内容小结

## 1. 函数的幂级数展开法

(1) 直接展开法 — 利用泰勒公式；

(2) 间接展开法 — 利用幂级数的性质及已知展开式的函数 .

## 2. 常用函数的幂级数展开式

- $e^x = 1 + x + \frac{1}{2!}x^2 + \cdots + \frac{1}{n!}x^n + \cdots, \quad x \in (-\infty, +\infty)$
- $\ln(1+x) = x - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{3}x^3 - \frac{1}{4}x^4 + \cdots + \frac{(-1)^n}{n+1}x^{n+1} + \cdots \quad x \in (-1, +1]$



- $\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \cdots + (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} + \cdots$   
 $x \in (-\infty, +\infty)$
- $\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \cdots + (-1)^n \frac{x^{2n}}{(2n)!} + \cdots$   
 $x \in (-\infty, +\infty)$
- $(1+x)^m = 1 + mx + \frac{m(m-1)}{2!} x^2 + \cdots$   
 $+ \frac{m(m-1)\cdots(m-n+1)}{n!} x^n + \cdots \quad x \in (-1, 1)$

当  $m = -1$  时

$$\frac{1}{1+x} = 1 - x + x^2 - x^3 + \cdots + (-1)^n x^n + \cdots, \quad x \in (-1, 1)$$



## 思考与练习

1. 函数  $f(x)$  在  $x_0$  处 “有泰勒级数” 与 “能展成泰勒级数” 有何不同？

提示：后者必需证明  $\lim_{n \rightarrow \infty} R_n(x) = 0$ , 前者无此要求.

2. 如何求  $y = \sin^2 x$  的幂级数？

提示：

$$y = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2x) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{(2n)!} (2x)^{2n}$$
$$= -\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{4^n}{(2n)!} x^{2n}, \quad x \in (-\infty, +\infty)$$



## 备用题 1. 将下列函数展开成 $x$ 的幂级数

$$f(x) = \arctan \frac{1+x}{1-x}$$

解:  $f'(x) = \frac{1}{1+x^2} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^{2n}, \quad x \in (-1, 1)$

$$\therefore f(x) - f(0) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \int_0^x t^{2n} dt = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} x^{2n+1}$$

$x = \pm 1$  时, 此级数条件收敛,  $f(0) = \frac{\pi}{4}$ , 因此

$$f(x) = \frac{\pi}{4} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} x^{2n+1}, \quad x \in [-1, 1]$$



2. 将  $f(x) = \ln(2 + x - 3x^2)$  在  $x = 0$  处展为幂级数.

解:  $f(x) = \ln(1 - x) + \ln 2 + \ln\left(1 + \frac{3}{2}x\right)$

$$\ln(1 - x) = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n} \quad (-1 \leq x < 1)$$

$$\ln\left(1 + \frac{3}{2}x\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n} \left(\frac{3}{2}x\right)^n \quad \left(-\frac{2}{3} < x \leq \frac{2}{3}\right)$$

因此 
$$f(x) = \ln 2 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n} \left(\frac{3}{2}x\right)^n$$
$$= \ln 2 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left[1 + \left(-\frac{3}{2}\right)^n\right] x^n \quad \left(-\frac{2}{3} < x \leq \frac{2}{3}\right)$$

