

徐森林，薛春华 编  
《数学分析》题解

西海岸民工

2024 年 11 月



# 目 录

第一章 数列极限	1
1.1 数列极限的概念	1
1.1.1 练习题	1
1.1.2 思考题	7
1.2 数列极限的基本性质	11
1.2.1 练习题	11
1.2.2 思考题	16
1.3 实数理论, 实数连续性命题	16
1.3.1 练习题	16
1.3.2 思考题	16
1.4 Cauchy 收敛准则 (原理), 单调数列的极限, 数 $e = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$	16
1.4.1 练习题	16
1.4.2 思考题	24
1.5 上极限与下极限	27
1.5.1 练习题	27
1.5.2 思考题	29
1.6 Stolz 公式	29
1.6.1 练习题	29
1.6.2 思考题	31
1.7 复习题 1	32
索 引	41
参考文献	41
后 记	43



# 第一章 数列极限

## 1.1 数列极限的概念

### 1.1.1 练习题

1. 用数列极限定义证明:

$$(1) \lim_{n \rightarrow +\infty} 0.\underbrace{99 \cdots 9}_n = 1;$$

证明. 对于  $\forall \varepsilon > 0$ , 取  $N = \left[ \frac{-\ln \varepsilon}{\ln 10} \right] + 1$ , 当  $n > N$  时,

$$\left| 0.\underbrace{99 \cdots 9}_n - 1 \right| = \frac{1}{10^n} < \varepsilon.$$

所以,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} 0.\underbrace{99 \cdots 9}_n = 1.$$

□

$$(2) \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{3n+4}{7n-3} = \frac{3}{7};$$

证明. 对于  $\forall \varepsilon > 0$ , 取  $N = \left[ \frac{6}{\varepsilon} \right] + 1$ , 当  $n > N$  时,

$$\left| \frac{3n+4}{7n-3} - \frac{3}{7} \right| = \frac{37}{7(7n-3)} < \frac{37}{7n} < \frac{6}{n} < \varepsilon$$

所以,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{3n+4}{7n-3} = \frac{3}{7}.$$

□

$$(3) \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{5n+6}{n^2-n-1000} = 0;$$

证明. 对于  $\forall \varepsilon > 0$ , 取  $N = \max\{50, \left[ \frac{12}{\varepsilon} \right] + 1\}$ , 当  $n > N$  时,

$$\frac{1}{2}n^2 - n - 1000 > 1$$

且

$$\left| \frac{5n+6}{n^2-n-1000} - 0 \right| < \frac{5n+6}{\frac{1}{2}n^2 + (\frac{1}{2}n^2 - n - 1000)} < \frac{6n}{\frac{1}{2}n^2} < \frac{12}{n} < \varepsilon$$

所以,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{5n+6}{n^2-n-1000} = 0.$$

□

$$(4) \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{8}{2^n + 5} = 0;$$

**证明.** 对于  $\forall \varepsilon > 0$ , 取  $N = \left[ \frac{-\ln \varepsilon}{\ln 2} \right] + 4$ , 当  $n > N$  时,

$$\left| \frac{8}{2^n + 5} - 0 \right| < \frac{8}{2^n} = \frac{1}{2^{n-3}} < \varepsilon$$

所以,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{8}{2^n + 5} = 0.$$

□

$$(5) \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\sin n!}{n^{1/2}} = 0;$$

**证明.** 对于  $\forall \varepsilon > 0$ , 取  $N = \left[ \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)^2 \right] + 1$ , 当  $n > N$  时,

$$\left| \frac{\sin n!}{n^{1/2}} - 0 \right| < \frac{1}{n^{1/2}} < \varepsilon$$

所以,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\sin n!}{n^{1/2}} = 0.$$

□

$$(6) \lim_{n \rightarrow +\infty} (\sqrt{n+2} - \sqrt{n-2}) = 0;$$

**证明.** 对于  $\forall \varepsilon > 0$ , 取  $N = \max\{2, \left[ \left( \frac{4}{\varepsilon} \right)^2 \right] + 1\}$ , 当  $n > N$  时,

$$|\sqrt{n+2} - \sqrt{n-2}| = \frac{4}{\sqrt{n+2} + \sqrt{n-2}} < \frac{4}{\sqrt{n}} < \varepsilon$$

所以,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} (\sqrt{n+2} - \sqrt{n-2}) = 0.$$

□

$$(7) \lim_{n \rightarrow +\infty} (\sqrt[3]{n+2} - \sqrt[3]{n-2}) = 0;$$

**证明.** 对于  $\forall \varepsilon > 0$ , 取  $N = \max\{2, \left[ \sqrt{\left( \frac{4}{\varepsilon} \right)^3} \right]\}$ , 当  $n > N$  时,

$$\begin{aligned} |\sqrt[3]{n+2} - \sqrt[3]{n-2}| &= \frac{4}{\sqrt[3]{(n+2)^2} + \sqrt[3]{(n+2)(n-2)} + \sqrt[3]{(n-2)^2}} \\ &< \frac{4}{\sqrt[3]{(n+2)^2}} \\ &< \varepsilon \end{aligned}$$

所以,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} (\sqrt[3]{n+2} - \sqrt[3]{n-2}) = 0.$$

□

$$(8) \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n^{3/2} \arctan n}{1+n^2} = 0;$$

**证明.** 对于  $\forall \varepsilon > 0$ , 取  $N = \left[ \left( \frac{\pi}{2\varepsilon} \right)^2 \right] + 1$ , 当  $n > N$  时,

$$\left| \frac{n^{3/2} \arctan n}{1+n^2} \right| < \frac{\frac{\pi}{2} n^{3/2}}{n^2} < \frac{\pi/2}{\sqrt{n}} < \varepsilon$$

所以,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n^{3/2} \arctan n}{1+n^2} = 0.$$

□

$$(9) \lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = 1, \text{ 其中 } a_n = \begin{cases} \frac{n-1}{n}, n \text{ 为偶数}, \\ \frac{\sqrt{n^2+n}}{n}, n \text{ 为奇数}; \end{cases}$$

**证明.** 对于  $\forall \varepsilon > 0$ , 取  $N = \left[ \frac{1}{\varepsilon} \right] + 1$ , 当  $n > N$  时,

$$\begin{aligned} |a_n - 1| &< \begin{cases} \frac{1}{n}, n \text{ 为偶数}, \\ \frac{1}{\sqrt{n^2+n}+n}, n \text{ 为奇数} \end{cases} \\ &< \frac{1}{n} \\ &< \varepsilon \end{aligned}$$

所以,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = 1.$$

□

$$(10) \lim_{n \rightarrow +\infty} (n^3 - 4n - 5) = +\infty.$$

**证明.** 对于  $\forall A > 0$ , 取  $N = \max\{5, \left[ \sqrt[3]{2A} \right] + 1\}$ , 当  $n > N$  时,

$$1 - \frac{4}{n^2} - \frac{5}{n^3} > 1 - \frac{9}{n^2} > \frac{1}{2}$$

且

$$n^3 - 4n - 5 = n^3 \left( 1 - \frac{4}{n^2} - \frac{5}{n^3} \right) > \frac{1}{2} n^3 > A$$

所以,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} (n^3 - 4n - 5) = +\infty.$$

□

**2. 设**  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$ , **证明:**  $\forall k \in \mathbb{N}$ , 有  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_{n+k} = a$ .

**证明.** 我们分以下几种情况证明此命题:

(1) 当  $a \in \mathbb{R}$  时. 由于  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$ , 对  $\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N}$ , 当  $n > N$  时, 有  $|a_n - a| < \varepsilon$ . 显然  $n+k > n > N$ , 从而  $|a_{n+k} - a| < \varepsilon$ . 即  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_{n+k} = a$ .

(2) 当  $a$  是  $+\infty$  时。由于  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = +\infty$ , 对  $\forall A > 0, \exists N \in \mathbb{N}$ , 当  $n > N$  时,  $a_n > A$ . 显然  $n+k > n > N$ , 从而  $a_{n+k} > A$ . 即  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_{n+k} = +\infty$ .

(3) 当  $a$  是  $-\infty$  时。由于  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = -\infty$ , 对  $\forall A < 0, \exists N \in \mathbb{N}$ , 当  $n > N$  时,  $a_n < A$ . 显然  $n+k > n > N$ , 从而  $a_{n+k} < A$ . 即  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_{n+k} = -\infty$ .

□

3. 设  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$ , 证明  $\lim_{n \rightarrow +\infty} |a_n| = |a|$ : 举例说明, 这个命题的逆命题不真。

证明. 我们只证明  $a$  是有限实数的情况。当  $a$  是  $+\infty$  和  $-\infty$  时也成立。由极限的定义有: 对  $\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N}$ , 当  $n > N$  时,

$$|a_n - a| < \varepsilon.$$

从而

$$||a_n| - |a|| < |a_n - a| < \varepsilon.$$

所以

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} |a_n| = |a|.$$

如果我们取  $a_n = (-1)^n$ , 则  $|a_n| = 1$ , 从而  $\lim_{n \rightarrow +\infty} |a_n| = 1 \neq 0$ . 但是很显然  $a_n$  是发散的。

□

4. 设  $x_n \leq a \leq y_n, n \in \mathbb{N}$ , 且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (y_n - x_n) = 0$ . 证明:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} y_n = a$$

证明.  $\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N}$ , s.t.  $y_n - x_n = |y_n - x_n| < \varepsilon$ . 从而

$$|y_n - a| = y_n - a = y_n - x_n + x_n - a < y_n - x_n < \varepsilon.$$

即  $\lim_{n \rightarrow +\infty} y_n = a$ .  
同理可证

$$-\varepsilon < x_n - y_n < x_n - a < 0 < \varepsilon.$$

即  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = a$ .

□

5. 设  $\{a_n\}$  为一个收敛数列。证明: 数列  $\{a_n\}$  中或者有最大的数, 或者有最小的数。举出两者都有的例子; 再举出只有一个的例子。

证明. 假设  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$ , 我们分以下几种情况讨论:

(1) 如果  $a_n = a, \forall n \in \mathbb{N}$ . 此时, 数列  $\{a_n\}$  既有最小值也有最大值, 且相等

(2) 如果  $\exists n_0 \in \mathbb{N}$ , 使得  $a_{n_0} \neq a$ . 不妨假设  $a_{n_0} < a$ . 对于  $\varepsilon = \frac{a - a_{n_0}}{2}, \exists N \in \mathbb{N}, N > n_0$  使得  $a_n - a > a - \varepsilon = \frac{a + a_{n_0}}{2} > a_{n_0}, \forall n > N$ . 取

$$m = \min\{a_1, a_2, \dots, a_N\}.$$

我们有:

$$(a) \quad m \in \{a_n\}_{n=1}^{+\infty},$$



(b)  $a_n \geq m, \forall n$ .

即,  $m$  是数列  $\{a_n\}$  的最小值.

如果  $a_{n_0} > a$ . 我们可以证明  $\{a_n\}$  有最大值.

考虑下列收敛数列:

- (1) 如果  $a_n = \frac{1}{n}$ , 则该数列有最大值  $a_n \leq a_1 = 1$ , 没有最小值.
- (2) 如果  $a_n = -\frac{1}{n}$ , 该数列有最小值  $-1 = a_1 \leq a_n$ , 没有最大值.
- (3) 如果  $a_n = (-1)^n \frac{1}{n}$ , 则  $-1 = a_1 \leq a_n \leq a_2 = \frac{1}{2}$

□

6. 证明下列数列发散:

- (1)  $\{n^{(-1)^n}\}$

**证明.** 该数列发散, 因为:

$$0 = \lim_{n \rightarrow +\infty} (2n-1)^{(-1)^{2n-1}} \neq \lim_{n \rightarrow +\infty} (2n)^{(-1)^{2n}} = +\infty$$

□

- (2)  $\{\cos n\}$

**证明.** 取两个整数子列  $\{k_n\}, \{l_n\}$  使得

- (a)  $k_n \in (2m\pi - \frac{\pi}{6}, 2m\pi + \frac{\pi}{6})$ ,
- (b)  $l_n \in (2m\pi + \frac{5\pi}{6}, (2m+1)\pi + \frac{\pi}{6})$ .

显然, 我们有

- (a)  $\cos k_n \in (\frac{\sqrt{3}}{2}, 1], \forall n$ ,
- (b)  $\cos l_n \in [-1, -\frac{\sqrt{3}}{2}), \forall n$ .

因此,  $\{\cos n\}$  是发散的。

□

7. 证明: 数列  $\{a_n\}$  收敛  $\Leftrightarrow$  三个数列  $\{a_{3k-2}\}, \{a_{3k-1}\}, \{a_{3k}\}$  都收敛且有相同的极限。

**证明.**  $(\Rightarrow)$  由定理 1.1.2, 收敛数列的子列也收敛, 且极限相同。

$(\Leftarrow)$  假设三个子列的极限都是  $a$ 。由极限的定义, 对于  $\forall \varepsilon > 0$ ,

- (1)  $\exists N_1 \in \mathbb{N}$ , 使得  $|a_{3k-2} - a| < \varepsilon, \forall k > N_1$ ,
- (2)  $\exists N_2 \in \mathbb{N}$ , 使得  $|a_{3k-1} - a| < \varepsilon, \forall k > N_2$ ,
- (3)  $\exists N_3 \in \mathbb{N}$ , 使得  $|a_{3k} - a| < \varepsilon, \forall k > N_3$ 。

取  $N = 3 \max\{N_1, N_2, N_3\}$ , 我们有

$$|a_n - a| < \varepsilon, \forall n > N,$$

即  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$ .

□

注 1. 这个命题对于  $a = +\infty, -\infty, \infty$  也成立。

注 2. 对于  $\forall p \in \mathbb{N}$ ,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a \Leftrightarrow \lim_{k \rightarrow +\infty} a_{pk-p+1} = \lim_{k \rightarrow +\infty} a_{pk-p+2} = \cdots = \lim_{k \rightarrow +\infty} a_{pk} = a.$$

8. 设  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (a_n - a_{n-1}) = d$ . 证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_n}{n} = d$ .

证明.

$$\frac{a_n - a_1}{n} = \frac{(a_n - a_{n-1}) + (a_{n-1} - a_{n-2}) + \cdots + (a_2 - a_1)}{n}.$$

由例 1.1.15 知:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_n - a_1}{n} = d.$$

由于  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_1}{n} = 0$ , 易知

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_n}{n} = d.$$

□

9. 设  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$ . 用  $\varepsilon - N$  法,  $A - N$  法证明:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_1 + 2a_2 + \cdots + na_n}{n^2} = \frac{a}{2}, (a \text{ 为实数 } +\infty, -\infty).$$

证明. 我们只证  $a$  为实数的情形. 其他的情况证明类似. 由极限的定义, 对于  $\varepsilon > 0$ ,  $\exists N_0 \in \mathbb{N}$ , 使得

$$|a_n - a| < \frac{\varepsilon}{3}, \forall n > N_0.$$

$$\begin{aligned} & \left| \frac{a_1 + 2a_2 + \cdots + na_n}{n^2} - \frac{a}{2} \right| \\ &= \left| \frac{(a_1 - a) + 2(a_2 - a) + \cdots + n(a_n - a)}{n^2} + \frac{n(n+1)}{2n^2}a - \frac{a}{2} \right| \\ &< \left| \frac{(a_1 - a) + 2(a_2 - a) + \cdots + n(a_n - a)}{n^2} \right| + \frac{a}{2n} \\ &< \left| \frac{(a_1 - a) + 2(a_2 - a) + \cdots + N_0(a_{N_0} - a)}{n^2} \right| + \frac{(N_0 + 1 + n)(n - N_0)}{2n^2} \frac{\varepsilon}{3} + \frac{a}{2n}. \end{aligned}$$

取  $N_1 \in \mathbb{N}$ , 使得

$$\left| \frac{(a_1 - a) + 2(a_2 - a) + \cdots + N_0(a_{N_0} - a)}{n^2} \right| < \frac{\varepsilon}{3}, \forall n > N_1.$$

取  $N_2 \in \mathbb{N}$ , 使得

$$\frac{a}{2n} < \frac{\varepsilon}{3}, \forall n > N_2.$$

取  $N_3 \in \mathbb{N}$ , 使得

$$\frac{(N_0 + 1 + n)(n - N_0)}{2n^2} \frac{\varepsilon}{3} < \frac{\varepsilon}{3}, \forall n > N_3.$$

最后, 取  $N = \max\{N_0, N_1, N_2, N_3\}$ ,  $\forall n > N$ , 我们有

$$\left| \frac{a_1 + 2a_2 + \cdots + na_n}{n^2} - \frac{a}{2} \right| < \varepsilon.$$

即

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_1 + 2a_2 + \cdots + na_n}{n^2} = \frac{a}{2}.$$

□

## 1.1.2 思考题

10. 设  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$ ,  $|q| < 1$ . 用  $\varepsilon - N$  法证明:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} (a_n + a_{n-1}q + \cdots + a_1q^{n-1}) = \frac{a}{1-q}.$$

证明. 对于  $\forall \varepsilon > 0$ , 由  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$ , 则存在整数  $M > 0$  和  $N_0 \in \mathbb{N}$  使得

$$|a_n - a| < M, \forall n \in \mathbb{N},$$

$$|a_n - a| < \frac{(1-|q|)\varepsilon}{3}, \forall n > N_0.$$

我们知道, 当  $|q| < 1$  时,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} q^n = 0$ . 于是  $\exists N_1 \in \mathbb{N}$  使得

$$|q^{n-k}| < \max \left\{ \frac{1}{3MN_0}, \frac{1-|q|}{3(|a|+1)} \right\} \varepsilon, \forall n > N_1, k = 0, 1, 2, \cdots, N_0.$$

我们现在取  $N = \max\{N_0, N_1\}$ . 对任意的  $n > N$  时, 有

$$\begin{aligned} & \left| (a_n + a_{n-1}q + \cdots + a_1q^{n-1}) - \frac{a}{1-q} \right| \\ &= \left| (a_n + a_{n-1}q + \cdots + a_1q^{n-1}) - a \frac{1-q^n}{1-q} + \frac{aq^n}{1-q} \right| \\ &< |(a_n - a) + (a_{n-1} - a)q + \cdots + (a_1 - a)q^{n-1}| + \frac{|a||q|^n}{|1-q|} \\ &< \frac{(1-|q|)\varepsilon}{3} (1 + |q| + \cdots + |q|^{n-N_0}) + \left( MN_0 + \frac{a}{1-|q|} \right) \max \left\{ \frac{1}{3MN_0}, \frac{1-|q|}{3(|a|+1)} \right\} \varepsilon \\ &< \varepsilon. \end{aligned}$$

$$\text{即, } \lim_{n \rightarrow +\infty} (a_n + a_{n-1}q + \cdots + a_1q^{n-1}) = \frac{a}{1-q}.$$

□

11. 设  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$ ,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = b$ . 用  $\varepsilon - N$  法证明:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_0b_n + a_1b_{n-1} + \cdots + a_{n-1}b_1 + a_nb_0}{n} = ab.$$

证明. 首先我们证明命题在  $b = 0$  时成立。

(1) 由于  $\{a_n\}$  收敛, 则  $\exists M > 0$  使得  $|a_n| < M, \forall n \in \mathbb{N}$ .

(2) 对于  $\forall \varepsilon > 0$ , 由于  $\{b_n\}$  收敛到 0, 则  $\exists N_0 \in \mathbb{N}$  使得  $|b_n| < \frac{\varepsilon}{2M}, \forall n > N_0$ .

(3) 由于  $|a_n| < M$ , 对上述的  $\varepsilon > 0$ ,  $\exists N_1 \in \mathbb{N}$  使得

$$\left| \frac{a_{n-N_0}b_{N_0} + a_{n-N_0+1}b_{N_0-1} + \cdots + a_nb_0}{n} \right| < \frac{\varepsilon}{2}.$$

取  $N = \max\{N_0, N_1\}$ , 对于上述的  $\varepsilon > 0$ , 当  $n > N$ , 有

$$\begin{aligned} & \left| \frac{a_0b_n + a_1b_{n-1} + \cdots + a_{n-1}b_1 + a_nb_0}{n} \right| \\ &< \left| \frac{a_0b_n + a_1b_{n-1} + \cdots + a_{n-N_0-1}b_{N_0+1}}{n} \right| + \left| \frac{a_{n-N_0}b_{N_0} + a_{n-N_0+1}b_{N_0-1} + \cdots + a_nb_0}{n} \right| \\ &< \frac{\varepsilon}{2M} \frac{(n-N_0)M}{n} + \frac{\varepsilon}{2} \\ &< \varepsilon. \end{aligned}$$

即

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_0 b_n + a_1 b_{n-1} + \cdots + a_{n-1} b_1 + a_n b_0}{n} = 0.$$

下面证明命题在  $b \neq 0$  时也成立。

(1) 由于  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$  收敛, 则  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (a_n - a)b = 0$ . 由此可知

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{(a_0 - a)b + (a_1 - a)b + \cdots + (a_{n-1} - a)b + (a_n - a)b}{n} = 0.$$

(2) 由于  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$  和  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (b_n - b) = 0$ , 则

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_0(b_n - b) + a_1(b_{n-1} - b) + \cdots + a_{n-1}(b_1 - b) + a_n(b_n - b)}{n} = 0.$$

(3)

$$\begin{aligned} & \left| \frac{a_0 b_n + a_1 b_{n-1} + \cdots + a_{n-1} b_1 + a_n b_0}{n} - ab \right| \\ &= \left| \frac{a_0(b_n - b) + a_1(b_{n-1} - b) + \cdots + a_n(b_0 - b)}{n} + \frac{(a_0 - a)b + (a_1 - a)b + \cdots + (a_n - a)b}{n} \right| \end{aligned}$$

(4) 对于  $\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N}$ , 使得当  $n > N$  时,

$$\begin{aligned} & \left| \frac{a_0(b_n - b) + a_1(b_{n-1} - b) + \cdots + a_n(b_0 - b)}{n} \right| < \frac{\varepsilon}{2}, \\ & \left| \frac{(a_0 - a)b + (a_1 - a)b + \cdots + (a_n - a)b}{n} \right| < \frac{\varepsilon}{2}. \end{aligned}$$

从而

$$\left| \frac{a_0 b_n + a_1 b_{n-1} + \cdots + a_{n-1} b_1 + a_n b_0}{n} - ab \right| < \varepsilon.$$

即

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_0 b_n + a_1 b_{n-1} + \cdots + a_{n-1} b_1 + a_n b_0}{n} = ab.$$

□

**12.** 设  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a, b_n \geq 0 (n \in \mathbb{N}), \lim_{n \rightarrow +\infty} (b_1 + b_2 + \cdots + b_n) = S$ . 证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (a_n b_1 + a_{n-1} b_2 + \cdots + a_1 b_n) = aS$ .

**证明.** 我们分以下步骤证明该命题。

(1) 首先我们证明  $\lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = 0$ .

(2)

$$\begin{aligned} & |(a_n b_1 + a_{n-1} b_2 + \cdots + a_1 b_n) - aS| \\ &= |(a_n b_1 + a_{n-1} b_2 + \cdots + a_1 b_n) - a(b_1 + b_2 + \cdots + b_n) + a(b_1 + b_2 + \cdots + b_n - S)| \\ &< |(a_n - a)b_1 + (a_{n-1} - a)b_2 + \cdots + (a_1 - a)b_n| + |a| |(b_1 + b_2 + \cdots + b_n) - S| \end{aligned}$$

由  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$  和  $\lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = 0$  得知

$$|(a_n - a)b_1 + (a_{n-1} - a)b_2 + \cdots + (a_1 - a)b_n| < \frac{\varepsilon}{2}.$$

由  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (b_1 + b_2 + \cdots + b_n) = S$  可得知

$$|a| |(b_1 + b_2 + \cdots + b_n) - S| < \frac{\varepsilon}{2}.$$

综上,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} (a_n b_1 + a_{n-1} b_2 + \cdots + a_1 b_n) = aS.$$

□

注 3. 这题里的条件  $b_m \geq 0 (n \in \mathbb{N})$  不是必须的。只要  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (|b_1| + |b_2| + \cdots + |b_n|) = S$  就够了。

注 4. 这题是第 10 题的推广。如果  $b_n = q^{n-1}, 0 < q < 1$ , 则

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} (b_1 + b_2 + \cdots + b_n) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1 - q^n}{1 - q} = \frac{1}{1 - q}.$$

由这题的结论, 第 10 题得证。

13. (Toeplitz 定理) 设  $n, k \in \mathbb{N}$ ,  $t_{nk} \geq 0$  且  $\sum_{k=1}^n t_{nk} = 1$ ,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} t_{nk} = 0$ 。如果  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$ , 证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n t_{nk} a_k = a$ 。说明例 1.1.15 为 Toeplitz 定理的特殊情形。

证明. 对于  $\forall \varepsilon > 0$ , 我们有:

(1)  $\exists N_0 \in \mathbb{N}$ , 当  $n > N_0$  时,  $|a_n - a| < \frac{\varepsilon}{2}$ 。

(2) 我们取  $M = \max\{|a_1 - a|, |a_2 - a|, \cdots, |a_{N_0} - a|\}$ 。

(3) 对于  $l \in \mathbb{N}, 1 \leq l \leq N_0$ , 存在  $N_l \in \mathbb{N}$  使得  $t_{nl} < \frac{\varepsilon}{2N_0 M}, \forall n > N_l$ 。

(4) 取  $N = \max\{N_0, N_1, \cdots, N_{N_0}\}$ , 当  $n > N$  时, 我们有:

$$\begin{aligned} & \left| \sum_{k=1}^n t_{nk} a_k - a \right| \\ &= \sum_{k=1}^{N_0} t_{nk} |(a_k - a)| + \sum_{k=N_0+1}^n t_{nk} |(a_k - a)| \\ &< \sum_{k=1}^{N_0} \frac{\varepsilon}{2N_0 M} M + \sum_{k=N_0+1}^n t_{nk} \frac{\varepsilon}{2} \\ &= \varepsilon \end{aligned}$$

所以

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^n t_{nk} a_k = a.$$

如果我们取  $b_{nk} = \frac{1}{n}$ , 则例 1.1.15 就可以由这题得证。

□

14. 设  $a, b, c$  为三个给定的实数, 令  $a_0 = a, b_0 = b, c_0 = c$ , 并归纳定义

$$\begin{cases} a_n = \frac{b_{n-1} + c_{n-1}}{2}, \\ b_n = \frac{a_{n-1} + c_{n-1}}{2}, \\ c_n = \frac{a_{n-1} + b_{n-1}}{2}, \end{cases} \quad n = 1, 2, \cdots$$

证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} c_n = \frac{a + b + c}{3}$ 。

证明. 我们通过以下结论去证明该命题:

(1)  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (a_n + b_n + c_n) = a + b + c$ . 这是因为  $a_n + b_n + c_n = a_{n-1} + b_{n-1} + c_{n-1} = \cdots = a + b + c$ .

(2)  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (a_n - b_n) = 0$ ,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (a_n - c_n) = 0$ ,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (c_n - b_n) = 0$ . 这是因为

$$a_n - b_n = \left(-\frac{1}{2}\right)(a_{n-1} - b_{n-1}) = \cdots = \left(-\frac{1}{2}\right)^n (a - b),$$

$$a_n - c_n = \left(-\frac{1}{2}\right)(a_{n-1} - c_{n-1}) = \cdots = \left(-\frac{1}{2}\right)^n (a - c),$$

$$c_n - b_n = \left(-\frac{1}{2}\right)(c_{n-1} - b_{n-1}) = \cdots = \left(-\frac{1}{2}\right)^n (c - b).$$

(3)

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} 3a_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} (a_n + b_n + c_n + (a_n - b_n) + (a_n - c_n)) = a + b + c,$$

从而,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = \frac{a + b + c}{3}.$$

(4) 同理可证,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} c_n = \frac{a + b + c}{3}$ .

□

15. 设  $a_1, a_2$  为实数, 令

$$a_n = pa_{n-1} + qa_{n-2}, n = 3, 4, 5, \cdots,$$

其中  $p > 0, q > 0, p + q = 1$ . 证明: 数列  $\{a_n\}$  收敛, 且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = \frac{a_2 + a_1 q}{1 + q}$ .

证明. 由递推公式, 我们可以证明

$$a_n - a_{n-1} = (-q)^{n-2} (a_2 - a_1), \forall n \geq 3.$$

由此我们可以得出  $a_n$  的通项公式

$$a_n = a_2 + \sum_{k=1}^{n-2} (-q)^k (a_2 - a_1) = a_2 - \frac{q + (-q)^{n-1}}{1 + q} (a_2 - a_1).$$

从而,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a_2 - \frac{q}{1 + q} (a_2 - a_1) = \frac{a_2 + qa_1}{1 + q}.$$

□

16. 设数列  $\{a_n\}, \{b_n\}, \{c_n\}$  满足  $a_1 > 0, 4 \leq b_n \leq 5, 4 \leq c_n \leq 5$ ,

$$a_n = \frac{\sqrt{b_n^2 + c_n^2}}{b_n + c_n} a_{n-1}$$

证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = 0$ .

证明. 由通项公式定义有

$$0 \leq a_n \leq \frac{5\sqrt{2}}{8} a_{n-1} \leq \cdots \leq \left(\frac{5\sqrt{2}}{8}\right)^{n-1} a_1.$$

由  $\frac{5\sqrt{2}}{8} < 1$  知  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = 0$ .

□

## 1.2 数列极限的基本性质

## 1.2.1 练习题

1. 应用数列极限的基本性质求下列极限:

$$(1) \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{4n^2 - n + 5}{3n^2 - 2n - 7}$$

$$\text{解. } \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{4n^2 - n + 5}{3n^2 - 2n - 7} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{4 - 1/n + 5/n^2}{3 - 2/n - 7/n^2} = 4/3$$

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

$$\text{解. } \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{3^n + (-2)^n}{3^{n+1} + (-2)^{n+1}} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1 + (-2/3)^n}{3 + (-2)(-2/3)^n} = 1/3$$

$$(3) \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{\frac{1}{n}}$$

$$\text{解. } 1 = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{\sqrt[n]{2}} \leq \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{\frac{1}{n}} \leq 1. \text{ 于是 } \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{\frac{1}{n}} = 1.$$

$$(4) \lim_{n \rightarrow +\infty} (2 \sin^2 n + \cos^2 n)^{\frac{1}{n}}$$

$$\text{解. } 1 \leq \lim_{n \rightarrow +\infty} (2 \sin^2 n + \cos^2 n)^{\frac{1}{n}} \leq \lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{2} \leq 1. \text{ 于是 } \lim_{n \rightarrow +\infty} (2 \sin^2 n + \cos^2 n)^{\frac{1}{n}} = 1.$$

$$(5) \lim_{n \rightarrow +\infty} (\arctan n)^{\frac{1}{n}}$$

$$\text{解. } 1 \leq \lim_{n \rightarrow +\infty} (\arctan n)^{\frac{1}{n}} \leq \lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{\frac{\pi}{2}} \leq 1. \text{ 于是 } \lim_{n \rightarrow +\infty} (\arctan n)^{\frac{1}{n}} = 1.$$

$$(6) \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1 + a + \cdots + a^{n-1}}{1 + b + \cdots + b^{n-1}}, |a| < 1, |b| < 1$$

$$\text{解. } \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1 + a + \cdots + a^{n-1}}{1 + b + \cdots + b^{n-1}} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\frac{1 - a^n}{1 - a}\right) \left(\frac{1 - b}{1 - b^n}\right) = \frac{1 - b}{1 - a}.$$

$$(7) \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{1 \cdot 2} + \frac{1}{2 \cdot 3} + \cdots + \frac{1}{n(n+1)}\right)$$

$$\text{解. } \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{1 \cdot 2} + \frac{1}{2 \cdot 3} + \cdots + \frac{1}{n(n+1)}\right) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 - \frac{1}{n+1}\right) = 1$$

$$(8) \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 - \frac{1}{2^2}\right) \left(1 - \frac{1}{3^2}\right) \cdots \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

$$\text{解. } \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 - \frac{1}{2^2}\right) \left(1 - \frac{1}{3^2}\right) \cdots \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 - \frac{1}{2}\right) \left(1 + \frac{1}{n}\right) = \frac{1}{2}$$

$$(9) \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{2} + \frac{3}{2^2} + \cdots + \frac{2n-1}{2^n}\right)$$

解. 记

$$S_n = \frac{1}{2} + \frac{3}{2^2} + \cdots + \frac{2n-1}{2^n},$$

则

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

于是

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}S_n &= \frac{1}{2} + \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \cdots + \frac{1}{2^{n-1}} \right) - \frac{2n-1}{2^{n+1}} \\ &= \frac{3}{2} - \frac{1}{2^{n-1}} - \frac{2n-1}{2^{n+1}}\end{aligned}$$

从而

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \left( \frac{1}{2} + \frac{3}{2^2} + \cdots + \frac{2n-1}{2^n} \right) = 3.$$

$$(10) \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} \left( 1 - \frac{1}{1+2} \right) \left( 1 - \frac{1}{1+2+3} \right) + \cdots + \left( 1 - \frac{1}{1+2+\cdots+n} \right)$$

解.  $1 - \frac{1}{1+2+\cdots+k} = \frac{(k-1)(k+2)}{k(k+1)}$ . 从而

$$\begin{aligned}&\left( 1 - \frac{1}{1+2} \right) \left( 1 - \frac{1}{1+2+3} \right) + \cdots + \left( 1 - \frac{1}{1+2+\cdots+n} \right) \\ &= \frac{1 \cdot 4}{2 \cdot 3} \frac{2 \cdot 5}{3 \cdot 4} \cdots \frac{(n-1) \cdot (n+2)}{n \cdot (n+1)}\end{aligned}$$

分子的  $2n$  项的积: 奇数项的积是  $(n-1)!$ , 偶数项的积是  $\frac{1}{2 \cdot 3}(n+2)!$ .

分母的  $2n$  项的积: 奇数项的积是  $n!$ , 偶数项的积是  $\frac{1}{2}(n+1)!$ .

于是  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \left( 1 - \frac{1}{1+2} \right) \left( 1 - \frac{1}{1+2+3} \right) + \cdots + \left( 1 - \frac{1}{1+2+\cdots+n} \right) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n+2}{3n} = \frac{1}{3}$ .

$$(11) \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} \left[ \frac{1^2}{n^3} + \frac{3^2}{n^3} + \cdots + \frac{(2n-1)^2}{n^3} \right]$$

解.

$$\sum_{k=1}^n (2k-1)^2 = \sum_{k=1}^{2n} k^2 - 4 \sum_{k=1}^n k^2 = \frac{8n^3 - 2n}{6}.$$

于是

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \left[ \frac{1^2}{n^3} + \frac{3^2}{n^3} + \cdots + \frac{(2n-1)^2}{n^3} \right] = \frac{4}{3}.$$

$$(12) \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} (1+x)(1+x^2)(1+x^4) \cdots (1+x^{2^{n-1}})$$

解.  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (1+x)(1+x^2)(1+x^4) \cdots (1+x^{2^{n-1}}) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1-x^{2^n}}{1-x} = \frac{1}{1-x}$ .

$$(13) \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} (\sqrt{n+2} - 2\sqrt{n+1} + \sqrt{n})$$

解.

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} (\sqrt{n+2} - 2\sqrt{n+1} + \sqrt{n}) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left( \frac{1}{\sqrt{n+2} + \sqrt{n+1}} - \frac{1}{\sqrt{n+1} + \sqrt{n}} \right) = 0.$$

2. 设  $a_n > 0$ ,  $n \in \mathbb{N}$ ,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = a$ . 应用例 1.2.6 证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{a_n} = a$ .



证明.

$$\sqrt[n]{a_n} = \sqrt[n]{\frac{a_n}{a_{n-1}} \cdot \frac{a_{n-1}}{a_{n-2}} \cdots \frac{a_2}{a_1}} \cdot \sqrt[n]{a_1}$$

于是  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{a_n} = a$ . □

3. 设  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$ . 应用夹逼定理证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{[na_n]}{n} = a$ , 其中  $[x]$  表示不超过的最大整数.

证明.

$$a = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{na_n - 1}{n} \leq \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{[na_n]}{n} \leq \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{na_n}{n} = a.$$

□

4. 设  $a_n \neq 0$  且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = r > 1$ . 证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = \infty$ .

证明. 取  $\varepsilon = \frac{r-1}{2}$ . 由极限的定义, 存在  $N \in \mathbb{N}$  使得  $\left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| > r - \varepsilon = \frac{r+1}{2} > 1$ . 于是

$$|a_n| > \left( \frac{r+1}{2} \right)^{n-N} |a_N|.$$

即  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = \infty$ . □

5. (1) 应用数学归纳法或  $\frac{2k-1}{2k} < \frac{2k}{2k+1}$  证明不等式:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdots \frac{2n-1}{2n} < \frac{1}{\sqrt{2n+1}}.$$

证明. 记  $S_n = \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdots \frac{2n-1}{2n}$ . 利用不等式  $\frac{2k-1}{2k} < \frac{2k}{2k+1}$ , 我们有

$$S_n < \frac{2}{3} \cdot \frac{4}{5} \cdots \frac{2n}{2n+1} = \frac{1}{S_n(2n+1)}.$$

于是  $S_n < \frac{1}{\sqrt{2n+1}}$  □

(2) 证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdots \frac{2n-1}{2n} \right) = 0$

证明.

$$0 < \lim_{n \rightarrow +\infty} \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdots \frac{2n-1}{2n} \right) \leq \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{\sqrt{2n+1}} = 0.$$

□

6. 设  $a_n > 0 (n \in \mathbb{N})$  且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a > 0$ . 应用夹逼定理证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{a_n} = 1$

证明. 由于  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a > 0$ , 我们有一下结论:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_n}{n} = 0, \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n} = 0.$$

同时, 我们有

$$\begin{aligned}
 1 &= \lim_{n \rightarrow +\infty} \left( \frac{1}{\left(1 + 1 + \cdots + 1 + \frac{1}{a_n}\right)/n} \right) \\
 &= \left( \frac{1}{\lim_{n \rightarrow +\infty} \left( n - 1 + \frac{1}{a_n} \right) / n} \right) \\
 &\leq \lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{a_n} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{1 \cdot 1 \cdots 1 \cdot a_n} \\
 &\leq \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{(1 + 1 + \cdots + 1 + a_n)}{n} \\
 &= \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{(n - 1 + a_n)}{n} \\
 &= 1.
 \end{aligned}$$

□

7. 证明  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\sum_{k=1}^n k!}{n!} = 1$ :  $\left( \text{提示: } 1 + \frac{1}{n} \leq \frac{\sum_{k=1}^n k!}{n!} \leq 1 + \frac{2}{n} \right)$

证明.

$$\begin{aligned}
 1 + \frac{1}{n} &= \frac{(n-1)! + n!}{n!} \\
 &< \frac{\sum_{k=1}^n k!}{n!} \\
 &< \frac{(n-1)(n-2)! + (n-1)! + n!}{n!} \\
 &= 1 + \frac{1}{n} + \frac{n-1}{n \cdot (n-1)} \\
 &= 1 + \frac{2}{n}
 \end{aligned}$$

于是  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\sum_{k=1}^n k!}{n!} = 1$ 。

□

8. 设  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$ ,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = b$ 。记

$$S_n = \max\{a_n, b_n\}, \quad T_n = \min\{a_n, b_n\}, \quad n = 1, 2, \cdots$$

应用  $\varepsilon - N$  法 (分  $a < b$ ,  $a > b$ ,  $a = b$ ) 或  $\max\{a_n, b_n\} = \frac{1}{2}(a_n + b_n + |a_n - b_n|)$  与  $\min\{a_n, b_n\} = \frac{1}{2}(a_n + b_n - |a_n - b_n|)$ , 证明:

$$(1) \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} S_n = \max\{a, b\}; \quad (2) \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} T_n = \min\{a, b\}.$$

证明. 显然我们有

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} |a_n - b_n| = |a - b|.$$

由此可知:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} S_n = \frac{1}{2}(a+b+|a-b|) = \max\{a, b\},$$

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} T_n = \frac{1}{2}(a+b-|a-b|) = \min\{a, b\}.$$

□

9. 应用例 1.1.7 与例 1.1.15 证明:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1 + \sqrt{2} + \sqrt[3]{3} + \cdots + \sqrt[n]{n}}{n} = 1.$$

证明. 取  $a_n = \sqrt[n]{n}$ , 显然

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = 1.$$

于是

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1 + \sqrt{2} + \sqrt[3]{3} + \cdots + \sqrt[n]{n}}{n} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_1 + a_2 + \cdots + a_n}{n} = 1.$$

□

10. 证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \left( \sin \frac{\ln 2}{2} + \sin \frac{\ln 3}{3} + \cdots + \sin \frac{\ln n}{n} \right) = 1$

证明. 考虑数列  $\sqrt[n]{n}$ . 这个数列在  $n=3$  是取得最大值且  $\sqrt[n+1]{n+1} < \sqrt[n]{n}, \forall n \geq 3$ . 这就是说数列  $\{\sin \frac{\ln n}{n}\}$  在  $n=3$  时取得最大值且

$$\sin \frac{\ln(n+1)}{n+1} < \sin \frac{\ln n}{n}, \forall n \geq 3.$$

从而,

$$\left( \sin \frac{\ln 3}{3} \right)^{\frac{1}{n}} < \left( \sin \frac{\ln 2}{2} + \sin \frac{\ln 3}{3} + \cdots + \sin \frac{\ln n}{n} \right)^{\frac{1}{n}} < \left( (n-1) \sin \frac{\ln 3}{3} \right)^{\frac{1}{n}}.$$

由于

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \left( \sin \frac{\ln 3}{3} \right)^{\frac{1}{n}} = 1, \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} \left( (n-1) \sin \frac{\ln 3}{3} \right)^{\frac{1}{n}} = 1,$$

我们有

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \left( \sin \frac{\ln 2}{2} + \sin \frac{\ln 3}{3} + \cdots + \sin \frac{\ln n}{n} \right) = 1.$$

□

11. 证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=n^2}^{(n+1)^2} \frac{1}{\sqrt{k}} = 2.$

证明.

$$\frac{2n+2}{n+1} = \sum_{k=n^2}^{(n+1)^2} \frac{1}{\sqrt{(n+1)^2}} \leq \sum_{k=n^2}^{(n+1)^2} \frac{1}{\sqrt{k}} \leq \sum_{k=n^2}^{(n+1)^2} \frac{1}{\sqrt{n^2}} = \frac{2n+2}{n}.$$

由夹逼定理,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=n^2}^{(n+1)^2} \frac{1}{\sqrt{k}} = 2.$

□

## 1.2.2 思考题

12. 用  $p(n)$  表示能整除  $n$  的素数的个数。证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{p(n)}{n} = 0$ .

证明. 假设  $n = p_1^{m_1} p_2^{m_2} \cdots p_l^{m_l}$ , 其中  $p_1 < p_2 < \cdots < p_l$  是互异的素数,  $m_k \geq 1, k = 1, 2, \cdots, l$ . 这里  $l = p(n)$ .

$$\ln n = \sum_{k=1}^l m_k \ln p_k \geq \sum_{k=1}^{p(n)} \ln 2 = p(n) \ln 2.$$

因此

$$0 \leq \frac{p(n)}{n} \leq \frac{\ln n}{n \ln 2}.$$

由夹逼定理可知,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{p(n)}{n} = 0$ . □

13. 设  $x_n = \sum_{k=1}^n \left( \sqrt{1 + \frac{k}{n^2}} - 1 \right)$ . 证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = \frac{1}{4}$ .

证明.

$$\begin{aligned} \frac{n(n+1)}{2n^2 \left( \sqrt{1 + \frac{1}{n}} + 1 \right)} &= \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{n}} + 1} \sum_{k=1}^n \frac{k}{n^2} \\ &< \sum_{k=1}^n \frac{\frac{k}{n^2}}{\sqrt{1 + \frac{k}{n^2}} + 1} \\ &= \sum_{k=1}^n \left( \sqrt{1 + \frac{k}{n^2}} - 1 \right) \\ &< \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \frac{k}{n^2} \\ &= \frac{n(n+1)}{4n^2}. \end{aligned}$$

由夹逼定理可知,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = \frac{1}{4}$ . □

## 1.3 实数理论, 实数连续性命题

## 1.3.1 练习题

## 1.3.2 思考题

## 1.4 Cauchy 收敛准则 (原理), 单调数列的极限, 数

$$e = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left( 1 + \frac{1}{n} \right)^n$$

## 1.4.1 练习题

1. 证明下列数列收敛:

$$(1) \left( 1 - \frac{1}{2} \right) \left( 1 - \frac{1}{2^2} \right) \cdots \left( 1 - \frac{1}{2^n} \right), n \in \mathbb{N};$$

1.4 CAUCHY 收敛准则 (原理), 单调数列的极限, 数  $e = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$  17

**证明.** 记  $S_n = \left(1 - \frac{1}{2}\right) \left(1 - \frac{1}{2^2}\right) \cdots \left(1 - \frac{1}{2^n}\right)$ , 我们有  $S_{n+1} = S_n \left(1 - \frac{1}{2^{n+1}}\right) < S_n$ . 很显然  $S_n > 0, \forall n \in \mathbb{N}$ . 由实数连续性命题 (二) 可知,  $S_n$  收敛.  $\square$

$$(2) \frac{10}{1} \cdot \frac{11}{3} \cdots \frac{n+9}{2n-1}, n \in \mathbb{N}.$$

**证明.** 记  $S_n = \frac{10}{1} \cdot \frac{11}{3} \cdots \frac{n+9}{2n-1}$ . 当  $n > 10$  时,  $\frac{n+9}{2n-1} < 1$ . 即  $S_{n+1} < S_n, \forall n \in \mathbb{N}, n > 10$ . 另一方面  $S_n > 0, \forall n \in \mathbb{N}$ . 由实数连续性命题 (二) 可知,  $S_n$  收敛.  $\square$

2. 设  $0 < a_n < 1$  且  $a_{n+1}(1 - a_n) \geq \frac{1}{4}, n \in \mathbb{N}$ . 证明:  $\{a_n\}$  收敛, 且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = \frac{1}{2}$ .

**证明.** 考虑函数  $f(x) = (1 - x)x, x \in (0, 1)$ , 我们有

$$f(x) > 0, f(x) \leq \frac{1}{4}, x \in (0, 1).$$

所以  $\frac{a_{n+1}}{a_n} \geq \frac{1}{4(1 - a_n)a_n} \geq 1$ , 即  $a_n$  是单调递增的函数. 由实数连续性命题 (二) 可知,  $a_n$  收敛.

由递推公式可知,  $\frac{1}{4} \geq a(1 - a) \geq \frac{1}{4}$ . 所以  $a = \frac{1}{2}$ , 即  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = \frac{1}{2}$ .  $\square$

3. 给定两正数  $x_0 = a$  与  $y_0 = b$ , 归纳定义

$$x_n = \sqrt{x_{n-1}y_{n-1}}, \quad y_n = \frac{x_{n-1} + y_{n-1}}{2},$$

$n = 1, 2, \cdots$ . 证明: 数列  $\{x_n\}$  与  $\{y_n\}$  收敛, 且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} y_n$ , 并称此极限为  $a$  与  $b$  的算术-几何平均数.

**证明.** 由算术-几何平均不等式知:  $x_n \leq y_n, \forall n \in \mathbb{N}$ . 于是:

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= \sqrt{x_n y_n} \geq \sqrt{x_n x_n} = x_n, \quad \forall n = 1, 2, \cdots, \\ y_{n+1} &= \frac{x_n + y_n}{2} \leq \frac{y_n + y_n}{2} = y_n, \quad \forall n = 1, 2, \cdots. \end{aligned}$$

于是

$$a = x_0 \leq x_1 \leq \cdots \leq x_n \leq \cdots \leq y_n \leq y_1 \leq y_0 = b.$$

令  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = A, \lim_{n \rightarrow +\infty} y_n = B$ . 由递推公式可知:  $A = \sqrt{AB}$ , 从而  $A = B$ .  $\square$

4.  $\forall n \in \mathbb{N}$ , 用  $x_n$  表示方程  $x + x^2 + \cdots + x^n = 1$  在闭区间  $[0, 1]$  上的根, 求极限  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n$ .

**解.** 设  $f_n(x) = x + x^2 + \cdots + x^n - 1$  对于给定的  $n \in \mathbb{N}$ ,  $f_n(x)$  在  $[0, 1]$  是单调增函数, 所以  $f_n(x)$  只会有唯一的根  $x_n$ . 由于

$$f_{n+1}(x_{n+1}) = 0 < f_n(x_n) + x_n^{n+1} = f_{n+1}(x_n),$$

所以

$$x_{n+1} \leq x_n, \forall n \in \mathbb{N}.$$

由实数连续性命题 (二) 可知,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n$  存在. 由于  $\frac{x_n - x_n^{n+1}}{1 - x_n} = 1$  知,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = \frac{1}{2}$ .

5. 设  $c > 0, x_1 = \sqrt{c}, x_2 = \sqrt{c + \sqrt{c}}, x_{n+1} = \sqrt{c + x_n}$ . 证明: 数列  $\{x_n\}$  收敛, 且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = \frac{1 + \sqrt{1 + 4c}}{2}$ .

**证明.** 我们用归纳法证明  $x_n \leq \frac{1 + \sqrt{1 + 4c}}{2}, \forall n \in \mathbb{N}$ .

$$(1) \quad x_1 = \sqrt{c} < \frac{1 + \sqrt{1 + 4c}}{2}.$$

$$(2) \quad \text{假设 } x_k < \frac{1 + \sqrt{1 + 4c}}{2}. \text{ 我们证明 } x_{k+1} < \frac{1 + \sqrt{1 + 4c}}{2}.$$

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \sqrt{c + x_k} \\ &< \sqrt{c + \frac{1 + \sqrt{1 + 4c}}{2}} \\ &= \sqrt{\frac{4c + 2 + 2\sqrt{1 + 4c}}{4}} \\ &= \frac{1 + \sqrt{1 + 4c}}{2}. \end{aligned}$$

现在考虑函数  $f(x) = c + x - x^2$ 。很显然

$$f(x) > 0, \quad x \in \left(0, \frac{1 + \sqrt{1 + 4c}}{2}\right).$$

于是

$$x_{n+1}^2 - x_n^2 = c + x_n - x_n^2 > 0.$$

即  $\{x_n\}$  是单调递增的数列。由实数连续性命题 (二) 可知, 数列  $\{x_n\}$  收敛. 设  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = a$ . 对递归公式取极限得  $a = \sqrt{c + a}$ . 从而

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = a = \frac{1 + \sqrt{1 + 4c}}{2}.$$

□

**6.** 设  $x_1 = c > 0$ , 令  $x_{n+1} = c + \frac{1}{x_n}$ ,  $n \in \mathbb{N}$ . 求极限  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n$ .

**解.** 由递推公式, 我们有

$$x_{n+1} - x_n = \frac{x_{n-1} - x_n}{x_n \cdot x_{n-1}}.$$

下面我们证明:

$$(1) \quad x_{2k-1} < x_{2k+1}, \quad \forall k \in \mathbb{N};$$

$$(2) \quad x_{2k} > x_{2(k+1)}, \quad \forall k \in \mathbb{N}.$$

$$x_n - x_{n-2} = \frac{x_{n-3} - x_{n-1}}{x_{n-1} \cdot x_{n-3}} = \frac{x_{n-2} - x_{n-4}}{x_{n-1} \cdot x_{n-2} \cdot x_{n-3} \cdot x_{n-4}}.$$

由于  $x_3 - x_1 = \frac{1}{x_2} > 0$ , 从而知 (1) 成立. 由于  $x_4 - x_2 = \frac{x_1 - x_3}{x_1 \cdot x_3} < 0$ , 从而知 (2) 成立.

另一方面:

$$x_{2k} - x_1 = c + \frac{1}{x_{2k-1}} - c = \frac{1}{x_{2k-1}} > 0, \quad \forall k \in \mathbb{N};$$

$$x_{2k+1} - x_2 = c + \frac{1}{x_{2k}} - c - \frac{1}{x_1} = \frac{x_1 - x_{2k}}{x_1 \cdot x_{2k}} < 0, \quad \forall k \in \mathbb{N}.$$

由实数连续性命题 (二) 可知, 奇数列和偶数列都是收敛子列. 假设

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} x_{2k-1} = a, \quad \lim_{k \rightarrow +\infty} x_{2k} = b.$$

由递推公式, 我们有

$$x_{2k+1} = c + \frac{1}{c + \frac{1}{x_{2k-1}}} \Rightarrow a^2 - ac - 1 = 0 \Rightarrow a = \frac{c + \sqrt{c^2 + 4}}{2},$$

$$x_{2k+2} = c + \frac{1}{c + \frac{1}{x_{2k}}} \Rightarrow b^2 - bc - 1 = 0 \Rightarrow b = \frac{c + \sqrt{c^2 + 4}}{2}.$$

即,  $\{x_n\}$  收敛, 且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = \frac{c + \sqrt{c^2 + 4}}{2}$ .

7. 证明:  $\sqrt{1 + \sqrt{1 + \sqrt{1 + \cdots}}} = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \cdots}}$

证明. 第一个等式是题 5 的特例:  $c = 1$ . 第二个等式是题 6 的特例:  $c = 1$ . □

8. 设  $c > 0$ ,  $a_1 = \frac{c}{2}$ ,  $a_{n+1} = \frac{c}{2} + \frac{a_n^2}{2}$ ,  $n = 1, 2, \cdots$ . 证明:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = \begin{cases} 1 - \sqrt{1 - c}, & 0 < c \leq 1, \\ +\infty, & c > 1. \end{cases}$$

证明. 当  $c > 1$  时, 由递推公式可知,

$$a_{n+1} \geq 2\sqrt{\frac{c}{2} \frac{a_n^2}{2}} = \sqrt{c} a_n \geq \cdots \geq c^{\frac{n}{2}} a_1.$$

所以

$$+\infty \geq \lim_{n \rightarrow +\infty} a_n \geq \lim_{n \rightarrow +\infty} (c^{\frac{n}{2}} a_1) = +\infty.$$

当  $0 < c \leq 1$  时, 我们可以证明数列  $\{a_n\}$  是单调递增有界。

(1)  $a_1 = \frac{c}{2} < 1 - \sqrt{1 - c}$ .

(2) 设  $a_k < 1 - \sqrt{1 - c}$ . 下面我们证明  $a_{k+1} \geq a_k$  且  $a_{k+1} < 1 - \sqrt{1 - c}$ .

$$a_{k+1} = \frac{c}{2} + \frac{a_k^2}{2} < \frac{c}{2} + \frac{1}{2} (1 - \sqrt{1 - c})^2 = 1 - \sqrt{1 - c}.$$

考察函数  $f(x) = x^2 - 2x + c$ .

$$f(x) > 0, \quad x \in (-\infty, 1 - \sqrt{1 - c}).$$

因此

$$a_{k+1} - a_k = \frac{1}{2}(a_k^2 - 2a_k + c) > 0.$$

即  $\{a_n\}$  是单调增的数列. 由实数连续性命题 (二) 可知,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n$  存在. 设极限为  $a$ , 则  $a = \frac{c}{2} + \frac{a^2}{2} \Rightarrow a = 1 - \sqrt{1 - c}$ .

□

9. 设数列  $\{a_n\}$  单调增,  $\{b_n\}$  单调减, 且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (a_n - b_n) = 0$ . 证明:  $\{a_n\}$  与  $\{b_n\}$  都收敛, 且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} b_n$ .

**证明.** 很显然  $\{a_n - b_n\}$  是单调增. 又由于  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (a_n - b_n) = 0$ , 可知  $a_n \leq b_n, \forall n \in \mathbb{N}$ , 从而

$$a_1 \leq a_2 \leq \cdots \leq a_n \leq \cdots \leq b_n \leq \cdots \leq b_2 \leq b_1.$$

由实数连续性命题 (二) 可知,  $\{a_n\}$  与  $\{b_n\}$  都收敛. 再由  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (a_n - b_n) = 0$  知,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} b_n$ .  $\square$

**10.** 设数列  $\{a_n\}$  满足: 存在正数  $M$ ,  $\forall n \in \mathbb{N}$ , 有

$$A_n = |a_2 - a_1| + |a_3 - a_2| + |a_n - a_{n-1}| \leq M.$$

**证明:** 数列  $\{a_n\}$  与  $\{A_n\}$  都收敛.

**证明.** 很显然数列  $\{A_n\}$  是单调增有界数列, 由实数连续性命题 (二) 可知,  $\{A_n\}$  是收敛的.

$$\{A_n\} \text{收敛} \Rightarrow \{A_n\} \text{是 Cauchy 列} \Rightarrow \{a_n\} \text{是 Cauchy 列} \Rightarrow \{a_n\} \text{收敛}.$$

$\square$

**11.** 应用 Cauchy 收敛准则证明下列数列收敛:

$$(1) x_n = \frac{\cos 1!}{1 \cdot 2} + \frac{\cos 2!}{2 \cdot 3} + \cdots + \frac{\cos n!}{n \cdot (n+1)};$$

**证明.**

$$|a_{n+p} - a_n| = \left| \frac{\cos(n+1)!}{(n+1) \cdot (n+2)} + \cdots + \frac{\cos(n+p)!}{(n+p) \cdot (n+p+1)} \right| \leq \frac{1}{n+1} - \frac{1}{n+p+1} < \frac{1}{n+1}.$$

即  $\{x_n\}$  是 Cauchy 列, 从而收敛.  $\square$

$$(2) x_n = 1 + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \cdots + \frac{1}{n^2};$$

**证明.**

$$|x_{n+p} - x_n| = \frac{1}{(n+1)^2} + \frac{1}{(n+2)^2} + \cdots + \frac{1}{(n+p)^2} < \frac{1}{n} - \frac{1}{n+p} < \frac{1}{n}.$$

即  $\{x_n\}$  是 Cauchy 列, 从而收敛.  $\square$

$$(3) x_n = \frac{\arctan 1}{1(1 + \cos 1!)} + \frac{\arctan 2}{2(2 + \cos 2!)} + \cdots + \frac{\arctan n}{n(n + \cos n!)}.$$

**证明.**

$$\begin{aligned} |x_{n+p} - x_n| &= \left| \frac{\arctan(n+1)}{(n+1)((n+1) + \cos(n+1)!)} + \cdots + \frac{\arctan(n+p)}{(n+p)((n+p) + \cos(n+p)!)} \right| \\ &< \frac{\pi}{2} \left( \frac{1}{n(n+1)} + \cdots + \frac{1}{(n+p-1)(n+p)} \right) \\ &= \frac{\pi}{2} \left( \frac{1}{n} - \frac{1}{n+p} \right) \\ &< \frac{\pi}{2n}. \end{aligned}$$

即  $\{x_n\}$  是 Cauchy 列, 从而收敛.  $\square$

**12.** 应用  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = e$  与  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^n = e^{-1}$ , 求下列极限:



$$(1) \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{1}{n-3}\right)^n;$$

$$\text{解. } \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{1}{n-3}\right)^n = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{1}{n-3}\right)^{(n-3)\frac{n}{n-3}} = e.$$

$$(2) \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 - \frac{1}{n-2}\right)^n;$$

$$\text{解. } \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 - \frac{1}{n-2}\right)^n = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 - \frac{1}{n-2}\right)^{(-n+2)\frac{n}{-n+2}} = e^{-1}.$$

$$(3) \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\frac{1+n}{2+n}\right)^n;$$

$$\text{证明. } \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\frac{1+n}{2+n}\right)^n = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 - \frac{1}{2+n}\right)^{(-2-n)\frac{n}{-2-n}} = e^{-1}. \quad \square$$

$$(4) \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{1}{2n^2}\right)^{4n^2};$$

$$\text{证明. } \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{1}{2n^2}\right)^{4n^2} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\left(1 + \frac{1}{2n^2}\right)^{2n^2}\right)^2 = e^2. \quad \square$$

$$(5) \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{3}{n}\right)^n.$$

$$\text{证明. } \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{3}{n}\right)^n = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\left(1 + \frac{3}{n}\right)^{\frac{n}{3}}\right)^3 = e^3. \quad \square$$

13.  $\forall n \in \mathbb{N}$ , 证明:

$$(1) 0 < e - \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n < \frac{3}{n}$$

证明. 由不等式  $\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n < e < \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1}$  可知:

$$0 < e - \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n < \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1} - \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n \frac{1}{n} < \frac{3}{n}.$$

$\square$

$$(2) \lim_{n \rightarrow +\infty} \left[e - \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n\right] = 0.$$

证明. 由 (1) 和夹逼原理, 可知  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \left[e - \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n\right] = 0$ .  $\square$

14. 设  $\alpha < 1$ , 证明:

$$(1) 0 < n^\alpha \left[e - \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n\right] < \frac{e}{n^{1-\alpha}}.$$

证明. 由不等式  $(1 + \frac{1}{n})^n < e < (1 + \frac{1}{n})^{n+1}$  可知:

$$\begin{aligned} 0 &< n^\alpha \left[ e - \left( 1 + \frac{1}{n} \right)^n \right] \\ &< n^\alpha \left[ \left( 1 + \frac{1}{n} \right)^{n+1} - \left( 1 + \frac{1}{n} \right)^n \right] \\ &= n^\alpha \left[ \left( 1 + \frac{1}{n} \right)^n \frac{1}{n} \right] \\ &< \frac{e}{n^{1-\alpha}}. \end{aligned}$$

□

$$(2) \lim_{n \rightarrow +\infty} n^\alpha \left[ e - \left( 1 + \frac{1}{n} \right)^n \right] = 0.$$

证明. 由 (1) 和夹逼原理可知,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} n^\alpha \left[ e - \left( 1 + \frac{1}{n} \right)^n \right] = 0$ .

□

15. (1) 设  $0 < a < b$ ,  $\forall n \in \mathbb{N}$ . 证明:

$$b^{n+1} - a^{n+1} < (n+1)b^n(b-a),$$

$$a^{n+1} > b^n[(n+1)a - nb];$$

证明.

$$b^{n+1} - a^{n+1} = (b-a)(b^n + b^{n-1}a + \cdots + a^n) < (n+1)b^n(b-a).$$

由此式可知:

$$a^{n+1} > b^{n+1} - (n+1)b^n(b-a) = b^n[b - (n+1)b + (n+1)a] = b^n[(n+1)a - nb].$$

□

(2) 在 (1) 中, 令  $a = 1 + \frac{1}{n+1}$ ,  $b = 1 + \frac{1}{n}$  推出  $(1 + \frac{1}{n})^n$  为严格增的数列;

证明. 将  $a = 1 + \frac{1}{n+1}$ ,  $b = 1 + \frac{1}{n}$  代入 (1) 中的第二式, 可知

$$\left( 1 + \frac{1}{n+1} \right)^{n+1} > \left( 1 + \frac{1}{n} \right)^n \left[ (n+1) \left( 1 + \frac{1}{n+1} \right) - n \left( 1 + \frac{1}{n} \right) \right] = \left( 1 + \frac{1}{n} \right)^n.$$

□

(3) 在 (1) 中, 令  $a = 1$ ,  $b = 1 + \frac{1}{2n}$  推出当  $n$  为偶数时, 有  $(1 + \frac{1}{n})^n < 4$ ; 由此得到  $\forall n \in \mathbb{N}$ , 有  $(1 + \frac{1}{n})^n < 4$ , 即 4 为该数列的上界, 从而  $(1 + \frac{1}{n})^n$  收敛。

证明. 将  $a = 1$ ,  $b = 1 + \frac{1}{2n}$  代入 (1) 的第二个不等式, 我们有:

$$1 \geq \left( 1 + \frac{1}{2n} \right)^n \left[ (n+1) - n \left( 1 + \frac{1}{2n} \right) \right],$$

即

$$\left( 1 + \frac{1}{2n} \right)^n \leq 2 \Rightarrow \left( 1 + \frac{1}{2n} \right)^{2n} \leq 4.$$

由于  $(1 + \frac{1}{n})^n$  是单调递增的, 我们可知,  $(1 + \frac{1}{n})^n \leq 4, \forall n \in \mathbb{N}$ .

□

16. 应用不等式  $b^{n+1} - a^{n+1} > (n+1)a^n(b-a)$ ,  $0 < a < b$ , 证明: 数列  $\left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1}$  是严格单减的, 并由此推出  $\left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1}$  为有界数列。

证明.

$$b^{n+1} - a^{n+1} = (b-a)(b^n + b^{n-1}a + \cdots + a^n) > (n+1)a^n(b-a).$$

即

$$b^{n+1} > a^n[(n+1)b - na].$$

取  $a = 1 + \frac{1}{n+1}$ ,  $b = 1 + \frac{1}{n}$ , 我们有

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1} &> \left(1 + \frac{1}{n+1}\right)^n \left[ (n+1) \frac{n+1}{n} - n \frac{n+2}{n+1} \right] \\ &= \left(1 + \frac{1}{n+1}\right)^n \left( \frac{n^2 + 3n + 1}{n(n+1)} \right) \\ &= \left(1 + \frac{1}{n+1}\right)^{n+2} \left[ \frac{n^2 + 3n + 1}{n(n+1)} \cdot \left(\frac{n+1}{n+2}\right)^2 \right] \\ &= \left(1 + \frac{1}{n+1}\right)^{n+2} \left( \frac{n^3 + 4n^2 + 4n + 1}{n^3 + 4n^2 + 4n} \right) \\ &> \left(1 + \frac{1}{n+1}\right)^{n+2} \end{aligned}$$

由此可见  $\left\{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1}\right\}$  是严格单调减, 且有界。 □

17. 证明:  $\left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1} < \frac{3}{n} + \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n, \forall n \in \mathbb{N}$ .

证明.

$$\left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n+1} - \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n \left(1 + \frac{1}{n} - 1\right) < \frac{3}{n}, \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

□

18. 设  $\{a_n\}$  为有界数列。记

$$\bar{a}_n = \sup\{a_n, a_{n+1}, \cdots\}, \quad \underline{a}_n = \inf\{a_n, a_{n+1}, \cdots\}.$$

证明:

(1)  $\forall n \in \mathbb{N}$ , 有  $\bar{a}_n \geq \underline{a}_n$ ;

证明. 这是显然的。  $\bar{a}_n \geq a_n \geq \underline{a}_n, \forall n \in \mathbb{N}$ . □

(2)  $\{\bar{a}_n\}$  为单调减有界数列;  $\{\underline{a}_n\}$  为单调增有界数列, 且  $\forall n, m \in \mathbb{N}$ , 有  $\bar{a}_n \geq \underline{a}_m$ ;

证明. 由  $\bar{a}_n$  和  $\underline{a}_n$  的定义可知,

$$\bar{a}_n = \max\{a_n, \bar{a}_{n+1}\}, \quad \underline{a}_n = \min\{a_n, \underline{a}_{n+1}\}.$$

由此可见  $\{\bar{a}_n\}$  是单调减,  $\{\underline{a}_n\}$  是单调增, 且

$$\underline{a}_1 \leq \underline{a}_2 \leq \cdots \leq \underline{a}_n \leq \cdots \leq \bar{a}_n \leq \cdots \leq \bar{a}_2 \leq \bar{a}_1.$$

由于数列  $\{a_n\}$  是有界数列, 故  $\underline{a}_1$  和  $\bar{a}_1$  都是有界数。命题得证。 □

(3) 设  $\bar{a} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \bar{a}_n$ ,  $\underline{a} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \underline{a}_n$ , 则  $\bar{a} \geq \underline{a}$ ;

**证明.** 应用定理 1.2.5, 这个命题就可以得证。  $\square$

(4)  $\{a_n\}$  收敛  $\Leftrightarrow \bar{a} = \underline{a}$ .

**证明.** (反证法) 假设  $\bar{a} > \underline{a}$ . 对于  $\forall \varepsilon > 0, \varepsilon < \frac{\bar{a}-\underline{a}}{3}$ , 存在  $N \in \mathbb{N}$ , 当  $n > N$  有

$$\underline{a}_n < \underline{a} + \varepsilon < \underline{a} + \frac{\bar{a}-\underline{a}}{3} < \bar{a} - \frac{\bar{a}-\underline{a}}{3} < \bar{a} - \varepsilon < \bar{a}_n.$$

于是在  $\{a_n\}$  存在两个子列  $\{a_{k_n}\}$  和  $\{a_{l_n}\}$  使得

$$a_{k_n} < \underline{a} + \frac{\bar{a}-\underline{a}}{3} < \bar{a} - \frac{\bar{a}-\underline{a}}{3} < a_{l_n}, \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

从而  $\{a_n\}$  发散。矛盾。  $\square$

### 1.4.2 思考题

**19.** 设  $a_1 \geq 0$ ,  $a_{n+1} = \frac{3(1+a_n)}{3+a_n}$ ,  $n = 1, 2, \dots$ . 证明:  $\{a_n\}$  收敛, 且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = \sqrt{3}$ .

**证明.** 首先我们证明, 如果  $a_n < \sqrt{3}$ , 则  $a_{n+1} > a_n$ . 如果  $a_n > \sqrt{3}$ , 则  $a_{n+1} < a_n$ .

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{3+3a_n}{3a_n+a_n^2}.$$

于是我们有

$$(1) \quad a_n < \sqrt{3} \Rightarrow 3+3a_n > 3a_n+a_n^2 \Rightarrow a_{n+1} > a_n;$$

$$(2) \quad a_n > \sqrt{3} \Rightarrow 3+3a_n < 3a_n+a_n^2 \Rightarrow a_{n+1} < a_n;$$

$$(3) \quad a_n = \sqrt{3} \Rightarrow 3+3a_n = 3a_n+a_n^2 \Rightarrow a_{n+1} = a_n.$$

基于以上的计算, 不管  $a_1$  取何值, 我们都有

$$|a_{n+1} - \sqrt{3}| = \left| \frac{3+3a_n-3\sqrt{3}-\sqrt{3}a_n}{a_n+3} \right| = \left| \frac{(3-\sqrt{3})(a_n-\sqrt{3})}{a_n+3} \right| < \left( \frac{3-\sqrt{3}}{3} \right) |a_n - \sqrt{3}|.$$

因为  $\frac{3-\sqrt{3}}{3} < 1$ , 所以  $(a_n - \sqrt{3}) \rightarrow 0 \Rightarrow a_n \rightarrow \sqrt{3}$ .  $\square$

**20.** 设  $a > 0$ ,  $x_1 > 0$ ,  $x_{n+1} = \frac{x_n(x_n^2+3a)}{3x_n^2+a}$ ,  $n = 1, 2, \dots$ . 证明:  $\{x_n\}$  收敛, 且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = \sqrt{a}$

**证明.** 这题和上一题类似。我们计算

$$x_{n+1} - x_n = \frac{2x_n(\sqrt{a}-x_n)(\sqrt{a}+x_n)}{3x_n^2+a},$$

所以:

(1) 如果  $x_1 \leq \sqrt{a}$ , 则  $\{x_n\}$  是单调增且有上界  $\sqrt{a}$  的数列;

(2) 如果  $x_1 > \sqrt{a}$ , 则  $\{x_n\}$  是单调减且有下界  $\sqrt{a}$  的数列;

无论那种情况发生, 由实数连续性命题 (二) 可知,  $\{x_n\}$  收敛, 且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = \sqrt{a}$ 。

对于以上两种情况我们可以分别用数学归纳法讨论:

(1): 当  $x_1 \leq \sqrt{a}$  时:

$$x_2 - x_1 \geq 0 \Rightarrow x_2 \geq x_1 \text{ 且 } x_2 - \sqrt{a} = \frac{(x_1 - \sqrt{a})^3}{3x_1^2 + a} \leq 0 \Rightarrow x_2 \leq \sqrt{a}.$$

假设  $n = k$  时也有  $x_k \geq x_{k-1}$  且  $x_k \leq \sqrt{a}$ 。

现证  $n = k + 1$  时也有这些。 $x_{k+1} \geq x_k$  是显然的。 $x_{k+1} - \sqrt{a} = \frac{(x_k - \sqrt{a})^3}{3x_k^2 + a} \leq 0 \Rightarrow x_{k+1} \leq \sqrt{a}$ 。

(2): 当  $x_1 > \sqrt{a}$  时:

$$x_2 - x_1 < 0 \Rightarrow x_2 < x_1 \text{ 且 } x_2 - \sqrt{a} = \frac{(x_1 - \sqrt{a})^3}{3x_1^2 + a} > 0 \Rightarrow x_2 > \sqrt{a}.$$

假设  $n = k$  时也有  $x_k < x_{k-1}$  且  $x_k > \sqrt{a}$ 。

现证  $n = k + 1$  时也有这些。 $x_{k+1} < x_k$  是显然的。 $x_{k+1} - \sqrt{a} = \frac{(x_k - \sqrt{a})^3}{3x_k^2 + a} > 0 \Rightarrow x_{k+1} > \sqrt{a}$ 。□

**21.** 设  $a > 0$ ,  $x_1 = \sqrt[3]{a}$ ,  $x_n = \sqrt[3]{ax_{n-1}}$  ( $n > 1$ )。证明:  $\{x_n\}$  收敛, 且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = \sqrt{a}$

**证明.** 我们只需要证明:

(1) 如果  $a \geq 1$ , 则数列  $\{x_n\}$  是单调递增, 且有上界  $\sqrt{a}$ 。

(2) 如果  $a < 1$ , 则数列  $\{x_n\}$  是单调递减, 且有下界  $\sqrt{a}$ 。

无论上述那种情况发生, 由实数连续性命题 (二) 可知,  $\{x_n\}$  收敛, 且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = \sqrt{a}$ 。

$$x_n - x_{n-1} = \frac{x_{n-1}(\sqrt{a} - x_{n-1})(\sqrt{a} + x_{n-1})}{(\sqrt[3]{ax_{n-1}})^2 + \sqrt[3]{ax_{n-1}}x_{n-1} + x_{n-1}^2}.$$

(1): 当  $a \geq 1$  时:

$$\sqrt[3]{a} \leq \sqrt{a}.$$

当  $n = 2$  时,  $\sqrt{a} - x_1 = \sqrt{a} - \sqrt[3]{a} \geq 0 \Rightarrow x_2 - x_1 \geq 0$  且  $x_2 = \sqrt[3]{ax_1} \leq \sqrt[3]{a\sqrt{a}} = \sqrt{a}$ 。

假设  $n = k$  时,  $x_k \geq x_{k-1}$  且  $x_k \leq \sqrt{a}$ 。

由归纳法可得,  $n = k + 1$  时有,  $x_{k+1} \geq x_k$  且  $x_{k+1} \leq \sqrt{a}$ 。

(2): 当  $a < 1$  时:

$$\sqrt[3]{a} > \sqrt{a}.$$

当  $n = 2$  时,  $\sqrt{a} - x_1 = \sqrt{a} - \sqrt[3]{a} < 0 \Rightarrow x_2 - x_1 < 0$  且  $x_2 = \sqrt[3]{ax_1} > \sqrt[3]{a\sqrt{a}} = \sqrt{a}$ 。

假设  $n = k$  时,  $x_k < x_{k-1}$  且  $x_k > \sqrt{a}$ 。

由归纳法可得,  $n = k + 1$  时有,  $x_{k+1} < x_k$  且  $x_{k+1} > \sqrt{a}$ 。□

**22.** 设  $0 < a_1 < b_1 < c_1$ 。令

$$a_{n+1} = \frac{3}{\frac{1}{a_n} + \frac{1}{b_n} + \frac{1}{c_n}}, \quad b_{n+1} = \sqrt[3]{a_n b_n c_n}, \quad c_{n+1} = \frac{a_n + b_n + c_n}{3}$$

**证明:**  $\{a_n\}$ ,  $\{b_n\}$ ,  $\{c_n\}$  收敛于同一实数。

**证明.** 由定义可知

$$0 < a_1 < a_n \leq b_n \leq c_n < c_1, \quad \forall n > 1.$$

于是  $\{a_n\}$  单调增,  $\{c_n\}$  单调减。由实数连续性命题 (二) 可知, 数列  $\{a_n\}$ ,  $\{c_n\}$  收敛。设  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$ ,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} c_n = c$ 。易知,

$$0 < a_1 \leq a \leq c \leq c_1.$$

因为  $b_n = 3c_{n+1} - a_n - c_n$  可知, 数列  $\{b_n\}$  收敛. 设  $\lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = b$ . 显然  $a \leq b \leq c$ , 且

$$a = \frac{3}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c}}, \quad b = \sqrt[3]{abc}, \quad c = \frac{a+b+c}{3}$$

解方程组可得知  $a = b = c$ . □

**23.** 设  $a_n > 0$ ,  $S_n = a_1 + \cdots + a_n$ ,  $T_n = \frac{a_1}{S_1} + \cdots + \frac{a_n}{S_n}$ , 且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} S_n = +\infty$ . 证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} T_n = +\infty$ .

**证明.** 由于  $S_n \rightarrow +\infty$ , 我们可以找到一个子列  $\{n_k\}$  使得

$$\frac{S_{n_{k-1}}}{S_{n_k}} < \frac{1}{2}, \quad \forall k \in \mathbb{N}.$$

现在我们计算  $T_{n_k}$ :

$$\begin{aligned} T_{n_k} &= \left( \frac{a_1}{S_1} + \cdots + \frac{a_{n_1}}{S_{n_1}} \right) + \left( \frac{a_{n_1+1}}{S_{n_1+1}} + \cdots + \frac{a_{n_2}}{S_{n_2}} \right) + \cdots + \left( \frac{a_{n_{k-1}+1}}{S_{n_{k-1}+1}} + \cdots + \frac{a_{n_k}}{S_{n_k}} \right) \\ &> \left( \frac{a_1}{S_{n_1}} + \cdots + \frac{a_{n_1}}{S_{n_1}} \right) + \left( \frac{a_{n_1+1}}{S_{n_2}} + \cdots + \frac{a_{n_2}}{S_{n_2}} \right) + \cdots + \left( \frac{a_{n_{k-1}+1}}{S_{n_k}} + \cdots + \frac{a_{n_k}}{S_{n_k}} \right) \\ &= \frac{S_{n_1} - 0}{S_{n_1}} + \frac{S_{n_2} - S_1}{S_{n_2}} + \cdots + \frac{S_{n_k} - S_{n_{k-1}}}{S_{n_k}} \\ &> \frac{k}{2}. \end{aligned}$$

即:  $\lim_{k \rightarrow +\infty} T_{n_k} = +\infty$ . 因为  $T_n$  是单调增的数列, 从而  $\lim_{n \rightarrow +\infty} T_n = +\infty$ . 命题得证. □

**24.** 设  $a_1 = 1$ ,  $a_{n+1} = \frac{1}{1+a_n}$ ,  $n = 1, 2, \cdots$ . 证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$ .

**证明.** 我们只需证明  $\left| a_n - \frac{\sqrt{5}-1}{2} \right|$  收敛于 0.

$$\begin{aligned} \left| a_{n+1} - \frac{\sqrt{5}-1}{2} \right| &= \left| \frac{3 - \sqrt{5} - (\sqrt{5}-1)a_n}{2(1+a_n)} \right| \\ &= \left| \frac{-(\sqrt{5}-1) \left( a_n - \frac{\sqrt{5}-1}{2} \right)}{2(1+a_n)} \right| \\ &< \left| \frac{\sqrt{5}-1}{2} \right| \cdot \left| a_n - \frac{\sqrt{5}-1}{2} \right|. \end{aligned}$$

由此可见,  $\left\{ \left| a_n - \frac{\sqrt{5}-1}{2} \right| \right\}$  收敛于 0. □

**25.** 设  $a_n \geq 0$ ,  $S_n = \sum_{k=1}^n a_k$  收敛于  $S$ . 证明:  $b_n = (1+a_1)(1+a_2)\cdots(1+a_n)$  收敛.

**证明.** 很显然,  $\{b_n\}$  是单调增数列. 下面我们证明  $\{b_n\}$  是有界数列. 由于  $a_n \geq 0$  且  $S_n \rightarrow S$ , 则  $S_n$  是单调增的收敛于  $S$ . 从而

$$\sum_{k=1}^n a_k < S, \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

另一方面,

$$b_n \leq \left( \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (1 + a_k) \right)^n \leq \left( 1 + \frac{S}{n} \right)^n.$$

数列  $\left\{ \left( 1 + \frac{S}{n} \right)^n \right\}$  是单调增的, 且

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \left( 1 + \frac{S}{n} \right)^n = e^S.$$

于是

$$b_n \leq e^S, \forall n \in \mathbb{N}.$$

由实数连续性命题 (二) 可知, 数列  $\{b_n\}$  是收敛数列。 □

## 1.5 上极限与下极限

### 1.5.1 练习题

1. 求  $\varliminf_{n \rightarrow +\infty} a_n$  与  $\varlimsup_{n \rightarrow +\infty} a_n$ :

$$(1) a_n = \frac{(-1)^n}{n} + \frac{1 + (-1)^n}{2};$$

$$\text{解. } \varliminf_{n \rightarrow +\infty} a_n = 0, \quad \varlimsup_{n \rightarrow +\infty} a_n = 1.$$

$$(2) a_n = n^{(-1)^n};$$

$$\text{解. } \varliminf_{n \rightarrow +\infty} a_n = 0, \quad \varlimsup_{n \rightarrow +\infty} a_n = +\infty.$$

$$(3) a_n = [1 + 2^{(-1)^n n}]^{\frac{1}{n}};$$

$$\text{解. } \varliminf_{n \rightarrow +\infty} a_n = 1, \quad \varlimsup_{n \rightarrow +\infty} a_n = 2.$$

$$(4) a_n = \frac{n^2}{1+n^2} \cos \frac{2n\pi}{3};$$

$$\text{解. } \varliminf_{n \rightarrow +\infty} a_n = -\frac{1}{2}, \quad \varlimsup_{n \rightarrow +\infty} a_n = 1.$$

$$(5) a_n = \frac{n^2+1}{n^2} \sin \frac{\pi}{n};$$

$$\text{解. } \varliminf_{n \rightarrow +\infty} a_n = 0, \quad \varlimsup_{n \rightarrow +\infty} a_n = 0.$$

$$(6) a_n = \sqrt[n]{\left| \cos \frac{n\pi}{3} \right|};$$

$$\text{解. } \varliminf_{n \rightarrow +\infty} a_n = 1, \quad \varlimsup_{n \rightarrow +\infty} a_n = 1.$$

$$(7) a_n = \begin{cases} 0, & n \text{ 为奇数,} \\ \frac{n}{\sqrt[n]{n!}}, & n \text{ 为偶数.} \end{cases}$$

$$\text{解. } \varliminf_{n \rightarrow +\infty} a_n = 0, \quad \varlimsup_{n \rightarrow +\infty} a_n = e.$$

2. 证明下面各式当两端有意义时成立:

$$(1) \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} a_n + \lim_{n \rightarrow +\infty} b_n \leq \lim_{n \rightarrow +\infty} (a_n + b_n) \leq \lim_{n \rightarrow +\infty} a_n + \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} b_n,$$

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n + \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} b_n \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} (a_n + b_n) \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n + \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} b_n$$

**证明.** 有上, 下极限的定义, 我们可以得到两个简单的无需证明的事实: 对于任何数列  $\{a_n\}$ ,  $\{a_{n_k}\}$  是一个任意一个子列, 则

$$(a) \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} a_n \leq \lim_{k \rightarrow +\infty} a_{n_k}$$

$$(b) \quad \overline{\lim}_{k \rightarrow +\infty} a_{n_k} \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n$$

我们取子列  $\{a_{n_k} + b_{n_k}\}$  使得

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} (a_{n_k} + b_{n_k}) = \lim_{n \rightarrow +\infty} (a_n + b_n).$$

再在子列  $\{a_{n_k}\}$  中取子列  $\{a_{n_{k_l}}\}$  使得

$$\lim_{l \rightarrow +\infty} a_{n_{k_l}} = \lim_{k \rightarrow +\infty} a_{n_k} \geq \lim_{n \rightarrow +\infty} a_n.$$

对于子列  $\{b_{n_{k_l}}\}$ , 我们会有

$$\lim_{l \rightarrow +\infty} b_{n_{k_l}} \geq \lim_{k \rightarrow +\infty} b_{n_k} \geq \lim_{n \rightarrow +\infty} b_n.$$

从而

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow +\infty} a_n + \lim_{n \rightarrow +\infty} b_n &\leq \lim_{l \rightarrow +\infty} a_{n_{k_l}} + \lim_{l \rightarrow +\infty} b_{n_{k_l}} \\ &= \lim_{l \rightarrow +\infty} (a_{n_{k_l}} + b_{n_{k_l}}) \\ &= \lim_{k \rightarrow +\infty} (a_{n_k} + b_{n_k}) \\ &= \lim_{n \rightarrow +\infty} (a_n + b_n). \end{aligned}$$

取子列  $\{a_{n_k}\}$ , 使得

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} a_{n_k} = \lim_{n \rightarrow +\infty} a_n.$$

考虑子列  $\{a_{n_k} + b_{n_k}\}$ , 在其中取子列  $\{a_{n_{k_l}} + b_{n_{k_l}}\}$ , 使得

$$\lim_{l \rightarrow +\infty} (a_{n_{k_l}} + b_{n_{k_l}}) = \lim_{k \rightarrow +\infty} (a_{n_k} + b_{n_k}) \geq \lim_{n \rightarrow +\infty} (a_n + b_n).$$

对于同样下标的子列  $\{b_{n_{k_l}}\}$ , 我们有

$$\lim_{l \rightarrow +\infty} b_{n_{k_l}} \leq \overline{\lim}_{k \rightarrow +\infty} b_{n_k} \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} b_n.$$

由此可见

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow +\infty} (a_n + b_n) &\leq \lim_{l \rightarrow +\infty} (a_{n_{k_l}} + b_{n_{k_l}}) \\ &= \lim_{l \rightarrow +\infty} a_{n_{k_l}} + \lim_{l \rightarrow +\infty} b_{n_{k_l}} \\ &\leq \lim_{k \rightarrow +\infty} a_{n_k} + \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} b_n \\ &= \lim_{n \rightarrow +\infty} a_n + \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} b_n \end{aligned}$$



下面我们用类似的办法证明第二式亦成立。取子列  $\{a_{n_k} + b_{n_k}\}$ , 使得

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} (a_{n_k} + b_{n_k}) = \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} (a_n + b_n).$$

取子列  $\{b_{n_{k_l}}\}$  使得

$$\lim_{l \rightarrow +\infty} b_{n_{k_l}} = \overline{\lim}_{k \rightarrow +\infty} b_{n_k} \geq \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} b_n.$$

对于子列  $\{a_{n_{k_l}}\}$ , 我们有

$$\lim_{l \rightarrow +\infty} a_{n_{k_l}} \geq \underline{\lim}_{k \rightarrow +\infty} a_{n_k} \geq \underline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n.$$

于是

$$\underline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n + \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} b_n \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} (a_n + b_n).$$

另一方面

$$\lim_{l \rightarrow +\infty} a_{n_{k_l}} \leq \overline{\lim}_{k \rightarrow +\infty} a_{n_k} \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n.$$

所以

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} (a_n + b_n) \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n + \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} b_n.$$

□

(2) 设  $\lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = b$ , 则

$$\begin{aligned} \underline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} (a_n + b_n) &= \underline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n + b, \\ \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} (a_n + b_n) &= \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} a_n + b \end{aligned}$$

证明. 这题是上面一题的直接应用。

□

(3)

### 1.5.2 思考题

## 1.6 Stolz 公式

### 1.6.1 练习题

1. 设  $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$  为组合数。应用 Stolz 公式证明:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\sum_{k=0}^n \ln C_n^k}{n^2} = \frac{1}{2}.$$

证明. 我们先计算

$$\ln C_n^k + \ln C_n^{n-k} = 2 \ln n! - 2 \ln k! - 2 \ln (n-k)!, \quad \forall k \leq n.$$

所以

$$\sum_{k=0}^n \ln C_n^k = n \ln n! - 2 \sum_{k=0}^n \ln k!.$$

设  $x_n = n^2, y_n = \sum_{k=0}^n \ln C_n^k$ , 于是

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\sum_{k=0}^n \ln C_n^k}{n^2} &\stackrel{\text{Stolz 公式}}{=} \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{(n-1) \ln n - \ln n!}{2n-1} \\ &= \lim_{n \rightarrow +\infty} \left( \ln \frac{n}{\sqrt[n]{n!}} \cdot \frac{n}{2n-1} \right) + \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\ln n}{2n-1} \\ &= \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

命题得证 □

2. 应用 Stolz 公式证明:

$$(1) \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\sum_{k=1}^n \sqrt{k}}{n^{\frac{3}{2}}} = \frac{2}{3};$$

证明. 设  $y_n = \sum_{k=1}^n \sqrt{k}, x_n = n^{\frac{3}{2}}$ , 则

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\sum_{k=1}^n \sqrt{k}}{n^{\frac{3}{2}}} &\stackrel{\text{Stolz 公式}}{=} \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\sqrt{n}}{n^{\frac{3}{2}} - (n-1)^{\frac{3}{2}}} \\ &= \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\sqrt{n}(\sqrt{n^3} + \sqrt{(n-1)^3})}{n^3 - (n-1)^3} \\ &= \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n^2 \left(1 + \sqrt{(1 - \frac{1}{n})^3}\right)}{3n^2 - 3n + 1} \\ &= \frac{2}{3}. \end{aligned}$$

□

$$(2) \lim_{n \rightarrow +\infty} n \left[ \frac{\sum_{k=1}^n \sqrt{k}}{n^{\frac{3}{2}}} - \frac{2}{3} \right] = \frac{1}{2}.$$

证明. 我们设  $y_n = 3 \sum_{k=1}^n \sqrt{k} - 2n^{\frac{3}{2}}$ ,  $x_n = 3\sqrt{n}$ . 于是

$$\begin{aligned} \frac{y_n - y_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} &= \frac{3\sqrt{n} - 2n^{\frac{3}{2}} + 2(n-1)^{\frac{3}{2}}}{3(\sqrt{n} - \sqrt{n-1})} \\ &= \frac{3\sqrt{n}(\sqrt{n^3} + \sqrt{(n-1)^3}) - 6n^2 + 6n - 2}{3(\sqrt{n} - \sqrt{n-1})(\sqrt{n^3} + \sqrt{(n-1)^3})} \\ &= \frac{3n^2(\sqrt{(1-1/n)^3} - 1) + 6n - 2}{3(\sqrt{n} - \sqrt{n-1})(\sqrt{n^3} + \sqrt{(n-1)^3})} \\ &= \frac{-9n + 9 - 3/n + (6n-2)(\sqrt{(1-1/n)^3} + 1)}{3(\sqrt{n} - \sqrt{n-1})(\sqrt{n^3} + \sqrt{(n-1)^3})(\sqrt{(1-1/n)^3} + 1)} \\ &= \frac{(-9n + 9 - 3/n + (6n-2)(\sqrt{(1-1/n)^3} + 1))(\sqrt{n} + \sqrt{n-1})}{3(\sqrt{n^3} + \sqrt{(n-1)^3})(\sqrt{(1-1/n)^3} + 1)} \\ &= \frac{n^{\frac{3}{2}}(-9 + 9/n - 3/n^2 + (6-2/n)(\sqrt{(1-1/n)^3} + 1))(1 + \sqrt{1-1/n})}{3n^{\frac{3}{2}}(1 + \sqrt{(1-1/n)^3})(\sqrt{(1-1/n)^3} + 1)} \end{aligned}$$

于是:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} n \left[ \frac{\sum_{k=1}^n \sqrt{k}}{n^{\frac{3}{2}}} - \frac{2}{3} \right] \stackrel{\text{Stolz 公式}}{=} \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{y_n - y_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} = \frac{1}{2}.$$

命题得证  $\square$

### 1.6.2 思考题

3. 设  $0 < x_1 < 1$ ,  $x_{n+1} = x_n(1 - x_n)$ ,  $n = 1, 2, \dots$ . 证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} nx_n = 1$ . 进而设  $0 < x_1 \leq \frac{1}{q}$ , 其中  $0 < q \leq 1$ , 并且  $x_{n+1} = x_n(1 - qx_n)$ ,  $n \in \mathbb{N}$ . 证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} nx_n = \frac{1}{q}$ .

证明. 如果我们能证明  $\{x_n\}$  单调减且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = 0$ , 则

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow +\infty} nx_n &\stackrel{\text{Stolz 公式}}{=} \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n - (n-1)}{\frac{1}{x_n} - \frac{1}{x_{n-1}}} \\ &= \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{x_{n-1}(1 - qx_{n-1})}{qx_{n-1}} \\ &= \frac{1}{q}. \end{aligned}$$

下面我们证明  $\{x_n\}$  单调减且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = 0$ . 由于  $x_n - x_{n-1} = -qx_{n-1}^2, \forall n \in \mathbb{N}$  可知,  $\{x_n\}$  是单调减的. 很明显  $x_n > 0, \forall n \in \mathbb{N}$ . 由实数连续性命题 (二) 可知,  $\{x_n\}$  是收敛的. 设  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = a$ , 则  $a = a(1 - qa) \Rightarrow qa^2 = 0 \Rightarrow a = 0$ . 命题得证.  $\square$

4. 由 Toeplitz 定理导出  $\frac{\infty}{\infty}$  型的 Stolz 公式。

证明. 取

$$t_{nk} = \frac{x_k - x_{k-1}}{x_n - x_0}, \quad \forall k = 1, 2, \dots, n.$$

(1) 由于  $\{x_n\}$  是单调增数列,  $t_{nk} > 0$ .

(2) 因为  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = +\infty$ ,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} t_{nk} = 0$ .

$$(3) \sum_{k=1}^n t_{nk} = \frac{x_n - x_0}{x_n - x_0} = 1.$$

由 Toeplitz 定理可知

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{y_n}{x_n} &= \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{y_0}{x_n} + \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{x_n - x_0}{x_n} \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{y_n - y_0}{x_n - x_0} \\ &= \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{x_{k+1} - x_k}{x_n - x_0} \cdot \frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k} \\ &= \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^{n-1} t_{nk} \frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k} \\ &\stackrel{\text{Toeplitz 公式}}{=} \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{y_n - y_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} = a. \end{aligned}$$

命题得证. □

5. 设数列  $\{a_n\}$  满足  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n \sum_{i=1}^n a_i^2 = 1$ . 证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[3]{3na_n} = 1$ .

## 1.7 复习题 1

1. 设  $a_0 = 1, a_{n+1} = a_n + \frac{1}{a_n}, n = 0, 1, 2, \dots$ . 证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_n}{\sqrt{2n}} = 1$ .

证明. 由递归定义,

$$a_{n-1}^2 + 2 < a_{n-1}^2 + \frac{1}{a_{n-1}^2} + 2 < a_n^2, \quad \forall n > 1 \Rightarrow a_n^2 \geq 2 * (n-1) + a_1^2 = 2n-1.$$

于是

$$0 \leq \frac{1}{a_n^2} < \frac{1}{2n-1}, \forall n > 1 \Rightarrow \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{a_n^2} = 0.$$

算术平均

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\frac{1}{a_1^2} + \frac{1}{a_2^2} + \dots + \frac{1}{a_n^2}}{n} = 0.$$

现在计算

$$\begin{aligned} \frac{a_n^2}{2n} &= \frac{2n-1}{2n} + \frac{\frac{1}{a_1^2} + \frac{1}{a_2^2} + \dots + \frac{1}{a_{n-1}^2}}{2n} \\ &= \frac{2n-1}{2n} + \frac{\frac{1}{a_1^2} + \frac{1}{a_2^2} + \dots + \frac{1}{a_{n-1}^2}}{n-1} \cdot \frac{n-1}{2n} \end{aligned}$$

由此可知

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_n^2}{2n} = 1 \Rightarrow \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_n}{\sqrt{2n}} = 1.$$

命题得证. □

2. 设  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} y_n = 0$ , 并且存在常数  $K$  使得  $\forall n \in \mathbb{N}$ , 有

$$|y_1| + |y_2| + \dots + |y_n| \leq K.$$

令

$$z_n = x_1 y_n + x_2 y_{n-1} + \cdots + x_n y_1, \quad n \in \mathbb{N}.$$

证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} z_n = 0$ .

证明. 由于  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = 0$ , 存在  $M > 0$  使得  $|a_n| < M, \forall n \in \mathbb{N}$ .

对  $\forall \varepsilon > 0$ , 存在  $N_1 \in \mathbb{N}$ , 当  $n > N_1$  时有

$$|x_n| < \frac{\varepsilon}{2K}, \quad \forall n > N_1.$$

设  $s_n = \sum_{k=1}^n |y_k|$ . 很显然  $\{s_n\}$  是一个收敛数列. 于是, 存在  $N_2 \in \mathbb{N}$ , 当  $n > N_2$  时有

$$s_n - s_{n-N_1} < \frac{\varepsilon}{2MN_1}.$$

综上,

$$\begin{aligned} |z_n| &= |x_1 y_n + x_2 y_{n-1} + \cdots + x_n y_1| \\ &< |x_1 y_n + x_2 y_{n-1} + \cdots + x_{N_1} y_{n-N_1+1}| + |x_{N_1+1} y_{n-N_1} + x_{N_1+2} y_{n-N_1-1} + \cdots + x_n y_1| \\ &< MN_1(s_n - s_{n-N_1}) + \frac{\varepsilon}{2K}(|y_1| + |y_2| + \cdots + |y_{n-N_1}|) \\ &< MN_1 \frac{\varepsilon}{2MN_1} + K \frac{\varepsilon}{2K} \\ &= \varepsilon \end{aligned}$$

命题得证. □

3. 设数列  $\{a_n\}$  与  $\{b_n\}$  满足:

(1)  $b_n > 0, b_0 + b_1 + \cdots + b_n \rightarrow +\infty (n \rightarrow +\infty)$ ;

(2)  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_n}{b_n} = s$ .

应用 Toeplitz 定理证明:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_0 + a_1 + \cdots + a_n}{b_0 + b_1 + \cdots + b_n} = s.$$

证明. 在这题里我们可以取

$$t_{nk} = \frac{b_k}{b_0 + b_1 + b_2 + \cdots + b_n}.$$

(1)  $t_{nk} > 0, \forall n > 0, k = 0, 2, \cdots, n$ ;

(2) 给定  $n, \sum_{k=0}^n t_{nk} = 1$ ;

(3) 由于  $b_0 + b_1 + \cdots + b_n \rightarrow +\infty (n \rightarrow +\infty)$ , 给定  $k, \lim_{n \rightarrow +\infty} t_{nk} = 0$ ;

于是

$$\frac{a_0 + a_1 + \cdots + a_n}{b_0 + b_1 + \cdots + b_n} = \sum_{k=0}^n t_{nk} \frac{a_k}{b_k}.$$

由 Toeplitz 定理, 命题可以得证. □

4. 设  $p_k > 0, k = 1, 2, \cdots$ , 且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{p_n}{p_1 + p_2 + \cdots + p_n} = 0, \lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$ . 证明:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{p_1 a_n + p_2 a_{n-1} + \cdots + p_n a_1}{p_1 + p_2 + \cdots + p_n} = a.$$

**证明.** 对于给定的正整数  $k > 0$ , 我们可以证明  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{p_{n-k}}{p_1 + p_2 + \cdots + p_n} = 0$ . 这是因为

$$0 \leq \frac{p_{n-k}}{p_1 + p_2 + \cdots + p_n} < \frac{p_{n-k}}{p_1 + p_2 + \cdots + p_{n-k}}.$$

夹逼定理说明  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{p_{n-k}}{p_1 + p_2 + \cdots + p_n} = 0$ .

下面我们就可以用极限的定义来证明命题了. 对于  $\forall \varepsilon > 0$ , 存在  $N_0$ , 当  $n > N_0$  时有

$$|a_n - a| < \frac{\varepsilon}{2}.$$

设  $M = \max\{|a_0 - a|, |a_1 - a|, \cdots, |a_{N_0} - a|\}$ .

对于每一个  $k, 1 \leq k \leq N_0$ , 存在  $N_k$ , 当  $n > N_k$  时有,

$$\frac{p_{n-k-1}}{p_1 + p_2 + \cdots + p_n} \leq \frac{\varepsilon}{2MN_0}.$$

取  $N = \max\{N_0, N_1, \cdots, N_{N_0}\}$ , 当  $n > N$  时

$$\begin{aligned} \left| \frac{p_1 a_n + p_2 a_{n-1} + \cdots + p_n a_1}{p_1 + p_2 + \cdots + p_n} - a \right| &= \left| \frac{p_1(a_n - a) + p_2(a_{n-1} - a) + \cdots + p_n(a_1 - a)}{p_1 + p_2 + \cdots + p_n} \right| \\ &< \sum_{k=1}^{N_0} \frac{p_{n-k-1} |a_k - a|}{p_1 + p_2 + \cdots + p_n} + \frac{p_1 + p_2 + \cdots + p_{n-N_0}}{p_1 + p_2 + \cdots + p_n} \cdot \frac{\varepsilon}{2} \\ &< \sum_{k=1}^{N_0} \frac{M\varepsilon}{2MN_0} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon. \end{aligned}$$

命题得证. □

**5.** 设  $\{a_n\}$  为单调增的数列, 令  $\sigma_n = \frac{a_1 + a_2 + \cdots + a_n}{n}$ , 如果  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sigma_n = a$ , 证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$ . 若“单调增”的条件删去, 结论是否成立.

**证明.** 存在  $N > 0$ , 当  $n > N$  时,  $\sigma_n < a + 1$ . 于是

$$\frac{a_1}{2} + \frac{a_n}{2} < \sigma_{2n} < a + 1.$$

从而

$$a_n < 2 \left( a + 1 - \frac{a_1}{2} \right).$$

单调增有上界的数列是收敛数列. 即  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n$  存在. 设  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = b$ , 由例 1.1.15 可知,

$$b = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sigma_n = a.$$

如果  $\{a_n\}$  不是单调增的, 结论不成立. 例如  $a_n = (-1)^n$ ,  $\sigma_n = 0$  或  $-\frac{1}{n}$ . 所以  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sigma_n = 0$ . 但是  $\{a_n\}$  不收敛. □

**6.** 设  $\{S_n\}$  为数列,  $a_n = S_n - S_{n-1}, \sigma_n = \frac{S_0 + S_1 + \cdots + S_n}{n+1}$ . 如果  $\lim_{n \rightarrow +\infty} na_n = 0$  且  $\{\sigma_n\}$  收敛, 证明  $\{S_n\}$  也收敛, 且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} S_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sigma_n$ .

**证明.** □

**7.** 设数列  $\{x_n\}$  满足:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (x_n - x_{n-2}) = 0$ . 证明  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{x_n - x_{n-1}}{n} = 0$ .

**证明.** 如果我们能证明  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{(-1)^n (x_n - x_{n-1})}{n} = 0$ , 则命题得证。

通过简单的计算, 我们有

$$(-1)^n (x_n - x_{n-1}) = \sum_{k=1}^{n-2} (-1)^k (x_{k+2} - x_k) + x_2 - x_1.$$

由于  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (-1)^n (x_n - x_{n-2}) = 0$ , 可知

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\sum_{k=1}^{n-2} (-1)^k (x_{k+2} - x_k)}{n-2} = 0.$$

于是

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{(-1)^n (x_n - x_{n-1})}{n} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\sum_{k=1}^{n-2} (-1)^k (x_{k+2} - x_k)}{n-2} \cdot \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n-2}{n} + \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{x_2 - x_1}{n} = 0.$$

□

8. 设  $u_0, u_1, \dots$  为满足  $u_n = \sum_{k=1}^{\infty} u_{n+k}^2 (n = 0, 1, 2, \dots)$  的实数列, 且  $\sum_{k=1}^{\infty} u_n$  收敛。证明  $\forall k \in \mathbb{N}$ , 有  $u_k = 0$ 。

9. 设  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$  证明  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^n C_n^k a_k = a$

**证明.** 取  $t_{nk} = \frac{1}{2^n} C_n^k$ , 我们有

$$(1) \quad t_{nk} > 0 \text{ 且 } \sum_{k=0}^n t_{nk} = \frac{1}{2^n} (1+1)^n = 1;$$

(2) 很容易验证  $\lim_{n \rightarrow +\infty} t_{nk} = 0$ . 因为  $2^n = (1+1)^n > C_n^{k+1}$ , 从而

$$0 \leq t_{nk} \leq \frac{C_n^k}{C_n^{k+1}} = \frac{k+1}{n-k}.$$

由夹逼定理,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} t_{nk} = 0$ 。

由 Toeplitz 定理知,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{2^n} \sum_{k=0}^n C_n^k a_k = a$ 。

□

10. 给定实数  $a_0, a_1$ , 并令

$$a_n = \frac{a_{n-1} + a_{n-2}}{2}, \quad n = 2, 3, \dots$$

**证明:** 数列  $\{a_n\}$  收敛, 且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = \frac{a_0 + 2a_1}{3}$

**证明.** 由递归公式有:

$$a_n - a_{n-1} = \left(-\frac{1}{2}\right) (a_{n-1} - a_{n-2}) = \dots = \left(-\frac{1}{2}\right)^{n-1} (a_1 - a_0).$$

于是:

$$\begin{aligned} a_n - a_0 &= (a_n - a_{n-1}) + (a_{n-1} - a_{n-2}) + \cdots + (a_1 - a_0) \\ &= \left(-\frac{1}{2}\right)^{n-1} (a_1 - a_0) + \left(-\frac{1}{2}\right)^{n-2} (a_1 - a_0) + \cdots + (a_1 - a_0) \\ &= \frac{1 - \left(-\frac{1}{2}\right)^n}{1 + \frac{1}{2}} (a_1 - a_0) \end{aligned}$$

$$\text{从而 } \lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a_0 + \lim_{n \rightarrow +\infty} \left( \frac{1 - \left(-\frac{1}{2}\right)^n}{1 + \frac{1}{2}} (a_1 - a_0) \right) = a_0 + \frac{2}{3} (a_1 - a_0) = \frac{a_0 + 2a_1}{3}.$$

□

11. 设  $x_1, x_2, \cdots, x_n$  为任意给定的实数。令

$$x_i^{(1)} = \frac{x_i + x_{i+1}}{2}, \quad i = 1, 2, \cdots, n,$$

其中  $x_{n+1}$  应理解为  $x_1$ . 归纳定义

$$x_i^{(k)} = \frac{x_i^{(k-1)} + x_{i+1}^{(k-1)}}{2}, \quad i = 1, 2, \cdots, n,$$

$x_{n+1}^{(k-1)}$  应理解为  $x_1^{(k-1)}$ ,  $k = 2, 3, \cdots$ . 证明:

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} x_i^{(k)} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n}, \quad \forall i = 1, 2, \cdots, n.$$

12. 设  $\{a_n\}$  为一个数列, 且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (a_{n+1} - a_n) = l$ . 证明:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_n}{n} = l; \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\sum_{k=1}^n a_k}{n^2} = \frac{l}{2}.$$

证明.

$$a_n = (a_n - a_{n-1}) + (a_{n-1} - a_{n-2}) + \cdots + (a_2 - a_1) + a_1.$$

由于  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (a_{n+1} - a_n) = l$ , 易知

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_n}{n} = l.$$

现在计算

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n a_k - na_1 &= \sum_{k=2}^n (a_k - a_1) \\ &= \sum_{k=2}^n \sum_{l=1}^{k-1} (a_{l+1} - a_l) \\ &= \sum_{l=1}^{n-1} (n-l)(a_{l+1} - a_l) \end{aligned}$$

如果取  $t_{nk} = \frac{2(n-k)}{(n-1)n}$ , 则

$$(1) \quad t_{nk} \geq 0, \forall n \in \mathbb{N}, k = 1, 2, \cdots, n \text{ 且 } \sum_{k=1}^n t_{nk} = \sum_{k=1}^n \frac{2(n-k)}{(n-1)n} = 1;$$

$$(2) \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} t_{nk} = 0, \quad \forall k.$$



由 Toeplitz 定理可知

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\sum_{k=1}^n a_k - na_1}{(n-1)n} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{2(n-k)}{(n-1)n} \frac{a_{k+1} - a_k}{2} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=1}^{n-1} t_{nk} \frac{a_{k+1} - a_k}{2} = \frac{l}{2}.$$

从而

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\sum_{k=1}^n a_k}{n^2} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\sum_{k=1}^n a_k - na_1}{(n-1)n} \cdot \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{(n-1)n}{n^2} + \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_1}{n} = \frac{l}{2}.$$

命题得证。 □

13. 设  $x_1 \in [0, 1]$ ,  $\forall n \geq 2$ , 令

$$x_n = \begin{cases} \frac{1}{2}x_{n-1}, & n \text{ 为偶数,} \\ \frac{1+x_{n-1}}{2}, & n \text{ 为奇数.} \end{cases}$$

证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_{2k} = \frac{1}{3}$ ;  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_{2k+1} = \frac{2}{3}$ .

证明. 由递推公式可知

$$\begin{aligned} x_{2k} &= \frac{1}{2} \left( \frac{1+x_{2(k-1)}}{2} \right) \\ &= \frac{1}{4} + \frac{1}{4}x_{2(k-1)} \\ &= \sum_{l=1}^{k-1} \left( \frac{1}{4} \right)^l + \left( \frac{1}{4} \right)^{k-1} x_2 \\ &= \frac{1}{3} - \frac{4}{3} \left( \frac{1}{4} \right)^k + \left( \frac{1}{4} \right)^{k-1} x_2. \end{aligned}$$

因此  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_{2k} = \frac{1}{3}$ .

$$x_{2k+1} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4}x_{2(k-1)+1} = \frac{1}{2} \sum_{l=0}^{k-1} \left( \frac{1}{4} \right)^l + \left( \frac{1}{4} \right)^k x_1 = \frac{2}{3} - \frac{2}{3} \left( \frac{1}{4} \right)^k + \left( \frac{1}{4} \right)^k x_1.$$

因此  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_{2k+1} = \frac{2}{3}$ . □

14. 定初始值  $a_0$ , 并递推定义

$$a_n = 2^{n-1} - 3a_{n-1}, \quad n = 1, 2, \dots$$

求  $a_0$  的所有可能的值, 使得数列  $\{a_n\}$  是严格增的。

解. 考虑数列  $\left\{ \frac{a_n}{3^n} \right\}$ . 显然

$$\frac{a_n}{3^n} = \frac{2^{n-1}}{3^n} - \frac{a_{n-1}}{3^{n-1}}$$

15. 设  $c > 0$ ,  $a_1 = \frac{c}{2}$ ,  $a_{n+1} = \frac{c}{2} + \frac{a_n^2}{2}$ ,  $n = 1, 2, \dots$ . 证明:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = \begin{cases} 1 - \sqrt{1-c}, & 0 < c \leq 1, \\ +\infty, & c > 1. \end{cases}$$

试问: 当时  $-3 \leq c < 0$ , 数列  $\{a_n\}$  的收敛性如何?

**证明.** 现证  $c > 1$  的情形:

$$a_n \geq \sqrt{ca_{n-1}^2} = \sqrt{c}a_{n-1} \geq \cdots \geq (\sqrt{c})^{n-1}a_1.$$

由于  $\lim_{n \rightarrow +\infty} (\sqrt{c})^{n-1} = +\infty$ ,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = +\infty$ . 命题得证.

现在  $c \leq 1$  的情形:

(1) 考虑函数  $f(x) = x^2 - 2x + c$ . 当  $x \in (1 - \sqrt{1-c}, 1 + \sqrt{1-c})$ ,  $f(x) < 0$  且  $\min_{x \in \mathbb{R}} f(x) = -1 + c$ .

(2) 很显然  $a_1 = \frac{c}{2} \in (1 - \sqrt{1-c}, 1 + \sqrt{1-c})$ . 于是  $a_2 - a_1 = \frac{1}{2}f(a_1) < 0 \Rightarrow a_2 < a_1$ .

$$a_1^2 \in (2 - c - 2\sqrt{1-c}, 2 - c + 2\sqrt{1-c}) \Rightarrow a_2 = \frac{c}{2} + \frac{a_1^2}{2} \in (1 - \sqrt{1-c}, 1 + \sqrt{1-c}).$$

(3) 假设  $n = k$  时,  $a_k \leq a_{k-1}$  且  $a_k \in (1 - \sqrt{1-c}, 1 + \sqrt{1-c})$ . 显然我们有  $a_{k+1} \leq a_k$ ,  $a_{k+1} \in (1 - \sqrt{1-c}, 1 + \sqrt{1-c})$ .

综上,

$$a_{n+1} \leq a_n, \quad a_n \geq 1 - \sqrt{1-c}, \quad \forall n.$$

于是  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = 1 - \sqrt{1-c}$ .

现考虑  $-3 \leq c < 0$  的情形.

□

**16.** 数列  $\{u_n\}$  定义如下:  $u_1 = b, u_{n+1} = u_n^2 + (1 - 2a)u_n + a^2, n \in \mathbb{N}$ . 问:  $a, b$  为何值时  $\{u_n\}$  收敛, 并求出其极限值.

**17.** 设  $A > 0, 0 < y_0 < A^{-1}, y_{n+1} = y_n(2 - Ay_n), n \in \mathbb{N}$ . 证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} y_n = A^{-1}$ .

**证明.** 如果我们能证明  $0 < y_n < A^{-1}, \forall n \in \mathbb{N}$ , 则

$$\frac{y_{n+1}}{y_n} = 2 - Ay_n \geq 2 - AA^{-1} = 1 \Rightarrow y_{n+1} \geq y_n.$$

从而  $\{y_n\}$  是单调递增有上界的数列. 故收敛, 且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} y_n = A^{-1}$ .

下面我们就证明  $y_n < A^{-1}, \forall n \in \mathbb{N}$ . 考虑函数  $f(x) = x(2 - Ax)$ . 显然该函数在  $x = A^{-1}$  是取得最大值. 即  $f(x) < A^{-1}, \forall x \in \mathbb{R}$ . 由于  $0 < y_1 < A^{-1}$ , 由归纳法,  $0 < y_n < A^{-1}, \forall n \in \mathbb{N}$ . □

**18.** 设数列  $\{a_n\}$  满足  $(2 - a_n)a_{n+1} = 1$ . 证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = 1$ .

**证明.**

□

**19.** 设数列  $\{a_n\}$  满足不等式  $0 \leq a_k \leq 100a_n (n \leq k \leq 2n, n = 1, 2, \dots)$ , 且无穷级数  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$  收敛.

证明  $\lim_{n \rightarrow +\infty} na_n = 0$

**20.** 证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{1}{n^2}\right) \left(1 + \frac{2}{n^2}\right) \cdots \left(1 + \frac{n}{n^2}\right) = e^{\frac{1}{2}}$

**证明.** 通过简单计算, 我们可以得知

$$\left(1 + \frac{n}{2n^2}\right)^2 \leq \left(1 + \frac{k}{n^2}\right) \left(1 + \frac{n-k+1}{n^2}\right), \quad \forall k \leq \frac{n}{2}, k \in \mathbb{N}.$$

由此可见

$$\left(1 + \frac{n}{2n^2}\right)^n < \left(1 + \frac{1}{n^2}\right) \left(1 + \frac{2}{n^2}\right) \cdots \left(1 + \frac{n}{n^2}\right).$$

另一方面

$$\left(1 + \frac{1}{n^2}\right) \left(1 + \frac{2}{n^2}\right) \cdots \left(1 + \frac{n}{n^2}\right) \leq \left(\frac{\sum_{k=1}^n \left(1 + \frac{k}{n^2}\right)}{n}\right)^n = \left(1 + \frac{(n+1)}{2n^2}\right)^n.$$

很显然

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{n}{2n^2}\right)^n = e^{\frac{1}{2}},$$

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{(n+1)}{2n^2}\right)^n = e^{\frac{1}{2}}.$$

由夹逼定理, 命题得证. □

**21.** 设  $a_1 > b_1 > 0$ , 令

$$a_n = \frac{a_{n-1} + b_{n-1}}{2}, \quad b_n = \frac{2a_{n-1}b_{n-1}}{a_{n-1} + b_{n-1}}, \quad n = 2, 3, \dots.$$

证明: 数列  $\{a_n\}$  与  $\{b_n\}$  都收敛, 且  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = \sqrt{a_1 b_1}$ .

**证明.** 很显然

$$b_n \leq \sqrt{a_{n-1} b_{n-1}} \leq a_n, \quad \forall n = 2, 3, \dots.$$

于是

$$a_n = \frac{a_{n-1} + b_{n-1}}{2} \leq \frac{a_{n-1} + a_{n-1}}{2} = a_{n-1},$$

$$b_n - b_{n-1} = \frac{(a_{n-1} - b_{n-1}) \cdot b_{n-1}}{a_{n-1} + b_{n-1}} \geq 0 \Rightarrow b_n \geq b_{n-1}.$$

所以

$$b_1 \leq b_2 \leq \cdots \leq b_n \leq \cdots \leq a_n \leq \cdots \leq a_2 \leq a_1.$$

由实数连续性命题 (二) 可知,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n$  和  $\lim_{n \rightarrow +\infty} b_n$  都存在。

设  $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = a$ ,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = b$ ,

$$a_n b_n = a_{n-1} b_{n-1} = \cdots = a_1 b_1 \Rightarrow ab = a_1 b_1.$$

$$a_n = \frac{a_{n-1} + b_{n-1}}{2} \Rightarrow a = \frac{a + b}{2} \Rightarrow a = b.$$

于是  $a = b = \sqrt{a_1 b_1}$ . □

**22.** 当  $n \geq 3$  时, 证明:

$$\sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} - \frac{3}{2n} < \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n < \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!}.$$

**23.** 设  $a_1 = 1, a_n = n(a_{n-1} + 1), n = 2, 3, \dots$ , 且

$$x_n = \prod_{k=1}^n \left(1 + \frac{1}{a_k}\right).$$

求  $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n$  (其中  $\prod_{k=1}^n$  表示从  $k=1$  到  $k=n$  的连乘积).

**解.**

24. 设  $H_n = 1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}$ ,  $n \in \mathbb{N}$ , 用  $K_n$  表示使得  $H_k \geq n$  的最小下标, 求  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{K_{n+1}}{K_n}$

解.

25. 设  $y_0 \geq 2, y_n = y_{n-1}^2 - 2 (n \in \mathbb{N})$ ,

$$S_n = \frac{1}{y_0} + \frac{1}{y_0 y_1} + \cdots + \frac{1}{y_0 y_1 \cdots y_n}.$$

证明:  $\lim_{n \rightarrow +\infty} S_n = \frac{y_0 - \sqrt{y_0^2 - 4}}{2}.$

证明. 首先

$$y_n - y_{n-1} = y_{n-1}^2 - y_{n-1} - 2 = (y_{n-1} - 2)(y_{n-1} + 1).$$

由于  $y_0 \geq 2$ , 由数学归纳法, 我们可知

$$y_n \geq y_{n-1} \geq 2, \forall n \in \mathbb{N}.$$

由此可见

$$S_n \geq S_{n-1}, \forall n \in \mathbb{N}.$$

另一方面, 由于

$$\frac{1}{y_0 y_1 \cdots y_n} < \frac{1}{2^{n+1}},$$

可知

$$S_n \leq 1 - \frac{1}{2^{n+1}}, \forall n = 0, 1, \cdots.$$

由此可见,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} S_n$  存在。

假设  $\lim_{n \rightarrow +\infty} S_n = a.$

□

## 参考文献

[徐薛] 徐森林, 薛春华编著《数学分析》, 清华大学出版社, 2005.



## 后 记