

0.1 Stolz 定理

0.1.1 数列 Stolz 定理

定理 0.1 (Stolz 定理)

(a): 设 x_n 是严格递增数列且满足 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = +\infty$, 则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{y_n}{x_n} \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{y_n}{x_n} \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n}.$$

(b): 设 x_n 是严格递减数列且满足 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} y_n = 0$, 则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{y_n}{x_n} \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{y_n}{x_n} \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n}.$$

(c): 分别在 (a), (b) 的条件基础上, 若还有 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n}$ 存在或者为确定符号的 ∞ , 则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{y_n}{x_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n}. \quad (1)$$

注 注意 (c) 由 (a), (b) 是显然的, 且只有 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n}$ 存在或者为确定符号的 ∞ 时才(1)式成立. 他和我们的洛必达法则有一定的相似程度. 即 **Stolz 定理** 是离散的洛必达法则.

证明 我们仅证明 x_n 是严格递增数列且满足 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = +\infty$ 和 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n} < \infty$ 时有

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{y_n}{x_n} \leq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n}. \quad (2)$$

记 $A \triangleq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n}$, 由上极限定义我们知道对任何 $\varepsilon > 0$, 存在 $N \in \mathbb{N}$, 使得 $\frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n} \leq A + \varepsilon, \forall n \geq N$.

利用 x_n 严格递增时, 成立 $y_{n+1} - y_n \leq (A + \varepsilon)(x_{n+1} - x_n), n \geq N$, 然后求和得

$$\sum_{j=N}^{n-1} (y_{j+1} - y_j) \leq (A + \varepsilon) \sum_{j=N}^{n-1} (x_{j+1} - x_j), \forall n \geq N + 1.$$

即

$$y_n - y_N \leq (A + \varepsilon)(x_n - x_N), \forall n \geq N + 1.$$

令 $n \rightarrow +\infty$, 取上极限就得

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{y_n}{x_n} = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{y_n}{x_n} - \frac{y_N}{x_N}}{1 - \frac{x_N}{x_n}} = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{y_n - y_N}{x_n - x_N} \leq A + \varepsilon.$$

由 ε 任意性得到式(2).

□

命题 0.1

设 $\{a_n\}$ 为一个数列, p 为固定的正整数. 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} (a_{n+p} - a_n) = \lambda$, 其中 λ 为常数, 证明:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{n} = \frac{\lambda}{p}.$$

证明 考虑 $\left\{ \frac{a_n}{n} \right\}$ 的 p 个互不相交的子列 $\left\{ \frac{a_{np+k}}{np+k} \right\}, k = 0, 1, 2, \dots, p-1$. 由条件可得, 对 $\forall k \in [0, p-1] \cap \mathbb{N}$, 都有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (a_{(n+1)p+k} - a_{np+k}) = \lim_{n \rightarrow \infty} (a_{n+p} - a_n) = \lambda.$$

从而由 Stolz 定理可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{np+k}}{np+k} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{(n+1)p+k} - a_{np+k}}{(n+1)p+k - [np+k]} = \frac{\lambda}{p}.$$

于是由命题??可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{n} = \frac{\lambda}{p}.$$

□

命题 0.2 (Cauchy 命题)

若 $\lim_{n \rightarrow \infty} y_n$ 存在或者为确定符号的 ∞ , 则有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{y_1 + y_2 + \cdots + y_n}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} y_n.$$

♠

 **笔记** 这个命题说明Stolz 定理是一种有效的把求和消去的降阶方法.

证明 容易由Stolz 定理的 (a) 直接得出.

□

定理 0.2 (反向 Stolz 定理/反向 Cauchy 命题)


对某个 $C > 0$, 如果有 $n(a_n - a_{n-1}) \geq -C, \forall n \geq 2$, 且


$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_1 + a_2 + \cdots + a_n}{n} = a \in \mathbb{R},$$

则我们有

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

♥

 **笔记** 反向 Stolz 定理本身是习题, 作为定理去应用的机会非常少.

 **笔记** 不妨设 $a = 0$, 记

$$b_1 = a_1, b_n = a_n - a_{n-1}, \forall n \geq 2, S_n = a_1 + a_2 + \cdots + a_n.$$

证明的想法是用 S_n, S_m 来表示 a_n, m 是一个待定的自然数. 即由

$$S_{n+m} = S_n + ma_n + mb_{n+1} + (m-1)b_{n+2} + \cdots + b_{n+m}$$

推出

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{S_{n+m} - S_n}{m} - \frac{mb_{n+1} + (m-1)b_{n+2} + \cdots + b_{n+m}}{m} \\ &\leq \frac{|S_{n+m}| + |S_n|}{m} + \frac{1}{m} \left[m \frac{C}{n+1} + (m-1) \frac{C}{n+2} + \cdots + \frac{C}{n+m} \right]. \end{aligned}$$

然后想办法取合适的 m 即可.

证明 不妨设 $a = 0$, 记

$$b_1 = a_1, b_n = a_n - a_{n-1}, \forall n \geq 2, S_n = a_1 + a_2 + \cdots + a_n.$$

我们有 $b_n \geq -\frac{C}{n}$.

对任何 $\varepsilon \in (0, 1)$, 存在 $N \in \mathbb{N}$, 使得 $|S_n| \leq n\varepsilon, \forall n \geq N$, 于是当 $n \geq N$, 有

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{S_{n+[n\sqrt{\varepsilon}]} - S_n}{[n\sqrt{\varepsilon}]} - \frac{1}{[n\sqrt{\varepsilon}]} \left([n\sqrt{\varepsilon}]b_{n+1} + ([n\sqrt{\varepsilon}] - 1)b_{n+2} + \cdots + b_{n+[n\sqrt{\varepsilon}]} \right) \\ &\leq \frac{|S_{n+[n\sqrt{\varepsilon}]}| + |S_n|}{[n\sqrt{\varepsilon}]} + \frac{1}{[n\sqrt{\varepsilon}]} \left([n\sqrt{\varepsilon}] \frac{C}{n+1} + ([n\sqrt{\varepsilon}] - 1) \frac{C}{n+2} + \cdots + \frac{C}{n+[n\sqrt{\varepsilon}]} \right) \\ &\leq \frac{|S_{n+[n\sqrt{\varepsilon}]}| + |S_n|}{[n\sqrt{\varepsilon}]} + \frac{1}{[n\sqrt{\varepsilon}]} \left([n\sqrt{\varepsilon}] \frac{C}{n} + ([n\sqrt{\varepsilon}] - 1) \frac{C}{n} + \cdots + \frac{C}{n} \right) \\ &= \frac{|S_{n+[n\sqrt{\varepsilon}]}| + |S_n|}{[n\sqrt{\varepsilon}]} + \frac{[n\sqrt{\varepsilon}] + 1}{2n} C \\ &\leq \frac{2n\varepsilon}{[n\sqrt{\varepsilon}]} + \frac{[n\sqrt{\varepsilon}] + 1}{2n} C + \varepsilon, \end{aligned} \tag{3}$$

于是我们得到

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} a_n \leq 2\sqrt{\varepsilon} + \frac{C}{2}\sqrt{\varepsilon} + \varepsilon.$$

另外一方面, 当 $n \geq \frac{N}{1-\sqrt{\varepsilon}} > N$, 有 $n - [n\sqrt{\varepsilon}] \geq n(1-\sqrt{\varepsilon}) \geq N$, 因此

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{S_n - S_{n-[n\sqrt{\varepsilon}]}}{[n\sqrt{\varepsilon}]} + \frac{([n\sqrt{\varepsilon}] - 1)b_n + ([n\sqrt{\varepsilon}] - 2)b_{n-1} + \cdots + b_{n-[n\sqrt{\varepsilon}]+2}}{[n\sqrt{\varepsilon}]} \\ &\geq \frac{S_n - S_{n-[n\sqrt{\varepsilon}]}}{[n\sqrt{\varepsilon}]} - \frac{([n\sqrt{\varepsilon}] - 1)\frac{C}{n} + ([n\sqrt{\varepsilon}] - 2)\frac{C}{n} + \cdots + \frac{C}{n-[n\sqrt{\varepsilon}]+2}}{[n\sqrt{\varepsilon}]} \\ &\geq \frac{S_n - S_{n-[n\sqrt{\varepsilon}]}}{[n\sqrt{\varepsilon}]} - \frac{C}{(n - [n\sqrt{\varepsilon}])[n\sqrt{\varepsilon}]} (([n\sqrt{\varepsilon}] - 1) + ([n\sqrt{\varepsilon}] - 2) + \cdots + 1) \\ &\geq -\frac{|S_n| + |S_{n-[n\sqrt{\varepsilon}]}|}{[n\sqrt{\varepsilon}]} - \frac{C[n\sqrt{\varepsilon}] - 1}{2n - [n\sqrt{\varepsilon}]} \\ &\geq -\frac{2n\varepsilon}{[n\sqrt{\varepsilon}]} - \frac{C[n\sqrt{\varepsilon}] - 1}{2n - [n\sqrt{\varepsilon}]} + \varepsilon, \end{aligned} \quad (4)$$

于是我们得到

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \geq -2\sqrt{\varepsilon} - \frac{C}{2} \frac{\sqrt{\varepsilon}}{1-\sqrt{\varepsilon}} + \varepsilon.$$

由 ε 任意性即得

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

□

命题 0.3

若 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = l \in \mathbb{R} \cup \{+\infty\} \cup \{-\infty\}$ 且 $a_n > 0$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} = l$.

▲

证明 由 Stolz 定理可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\frac{\ln a_n}{n}} \xrightarrow{\text{Stolz 定理}} \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\frac{\ln a_{n+1} - \ln a_n}{n+1 - n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = l.$$

□

命题 0.4

若 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} = l \in \mathbb{R}, a_n > 0$, 并且对某个 $C > 0$, 如果有 $n(a_n - a_{n-1}) \geq -C, \forall n \geq 2$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = l$.

▲

证明 由反向 Stolz 定理可得


$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\ln a_{n+1} - \ln a_n} \xrightarrow{\text{反向 Stolz 定理}} \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\frac{\sum_{k=0}^n (\ln a_{k+1} - \ln a_k)}{n+1 - n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\frac{\ln a_n - \ln a_0}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\frac{\ln a_n}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} = l.$$

□

0.1.1.1 利用 Stolz 定理求数列极限

例题 0.1 计算

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln n}{\ln \sum_{k=1}^n k^{2020}}.$$

 **笔记** 本题计算过程中使用了 Lagrange 中值定理, 只是过程省略了而已 (以后这种过程都会省略).

证明 由Stolz 定理可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln n}{\ln \sum_{k=1}^n k^{2020}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln(n+1) - \ln n}{\ln \sum_{k=1}^{n+1} k^{2020} - \ln \sum_{k=1}^n k^{2020}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln(1 + \frac{1}{n})}{\ln \frac{\sum_{k=1}^{n+1} k^{2020}}{\sum_{k=1}^n k^{2020}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n}}{\ln(1 + \frac{(n+1)^{2020}}{\sum_{k=1}^n k^{2020}})}.$$

又由Stolz 定理可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+1)^{2020}}{\sum_{k=1}^n k^{2020}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+2)^{2020} - (n+1)^{2020}}{(n+1)^{2020}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2020 \cdot n^{2019}}{(n+1)^{2020}} = 0.$$

于是再利用Stolz 定理可得


$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n}}{\ln(1 + \frac{(n+1)^{2020}}{\sum_{k=1}^n k^{2020}})} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n}}{\frac{(n+1)^{2020}}{\sum_{k=1}^n k^{2020}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n k^{2020}}{n \cdot (n+1)^{2020}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n k^{2020}}{n^{2021}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+1)^{2020}}{(n+1)^{2021} - n^{2021}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+1)^{2020}}{2021 \cdot n^{2020}} = \frac{1}{2021}. \end{aligned}$$

$$\text{故 } \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln n}{\ln \sum_{k=1}^n k^{2020}} = \frac{1}{2021}.$$

□

例题 0.2

- (1) 计算极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \frac{1}{k}}{\ln n}$.
- (2) 证明下述极限存在 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \ln n \right)$.
- (3) 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \ln n - \gamma \right)$.

 **笔记** 注意, $\gamma \triangleq \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \ln n \right) \approx 0.577 \dots$ 是没有初等表达式的, 我们只能规定为一个数字, 这个数字叫做欧拉常数, 截至目前, 人类甚至都不知道 γ 会不会是一个分数.

解

- (1) 直接由Stolz 定理可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \frac{1}{k}}{\ln n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n+1}}{\ln(n+1) - \ln n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n+1}}{\frac{1}{n}} = 1.$$

- (2) 记 $c_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \ln n$, 则

$$\begin{aligned} c_{n+1} - c_n &= \frac{1}{n+1} + \ln n - \ln(n+1) = \frac{1}{n+1} - \ln \left(1 + \frac{1}{n} \right) \\ &= \frac{1}{n+1} - \left[\frac{1}{n} + O\left(\frac{1}{n^2}\right) \right] = -\frac{1}{n(n+1)} + O\left(\frac{1}{n^2}\right) \\ &= O\left(\frac{1}{n^2}\right), n \rightarrow +\infty. \end{aligned}$$

从而存在常数 $C > 0$, 使得 $|c_{n+1} - c_n| \leq \frac{C}{n^2}$, 又因为 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{C}{n^2}$ 收敛, 所以由比较原则可知 $\sum_{n=1}^{\infty} |c_{n+1} - c_n|$ 也收敛.

由于数列级数绝对收敛一定条件收敛, 因此 $\sum_{n=1}^{\infty} (c_{n+1} - c_n)$ 也收敛, 即 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n (c_{k+1} - c_k) = \lim_{n \rightarrow \infty} (c_{n+1} - c_1)$

存在. 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} c_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \ln n \right)$ 也存在.

(3) 由 Stolz 定理可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \ln n - \gamma \right) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} - \ln n - \gamma}{\frac{1}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n+1} - \ln \left(1 + \frac{1}{n} \right)}{\frac{1}{n+1} - \frac{1}{n}} \\ \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\left(\frac{1}{n+1} - \frac{1}{n} \right) n^2} \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} n^2 \left[\frac{1}{n+1} - \ln \left(1 + \frac{1}{n} \right) \right] &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{-\frac{1}{n(n+1)}} \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} n^2 \left[\frac{1}{n+1} - \ln \left(1 + \frac{1}{n} \right) \right] \\ &= - \lim_{n \rightarrow \infty} n^2 \left[\frac{1}{n+1} - \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{2n^2} + o\left(\frac{1}{n^2}\right) \right) \right] = \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

因此我们得到了调和级数的渐进估计:

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = \ln n + \gamma + \frac{1}{2n} + o\left(\frac{1}{n}\right), n \rightarrow \infty.$$

□

例题 0.3 计算

1. $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt[n]{n!}}{n}$;
2. $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sqrt[n+1]{(n+1)!} - \sqrt[n]{n!} \right)$.

证明

1. 由 Stolz 定理可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt[n]{n!}}{n} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{e^{\frac{\sum_{k=1}^n \ln k}{n}}}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\frac{\sum_{k=1}^n \ln k}{n} - \ln n} = e^{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \ln k - n \ln n}{n}} \\ &= e^{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln(n+1) - (n+1) \ln(n+1) + n \ln n}{1}} = e^{\lim_{n \rightarrow \infty} n \ln \frac{n+1}{n}} \\ &= e^{\lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\frac{n}{n+1} - 1 \right)} = e^{-1}. \end{aligned}$$

2. 注意到

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

由上一小题可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt[n]{n!}}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{e^{\frac{\sum_{k=1}^n \ln k}{n}}}{n} = e^{-1}.$$

故 $e^{\frac{\sum_{k=1}^n \ln k}{n}} \sim \frac{n}{e}, n \rightarrow \infty$. 并且

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\sum_{k=1}^{n+1} \ln k}{n+1} - \frac{\sum_{k=1}^n \ln k}{n} \right) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \sum_{k=1}^{n+1} \ln k - (n+1) \sum_{k=1}^n \ln k}{n(n+1)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \ln(n+1) - \sum_{k=1}^n \ln k}{n(n+1)} \\ &= - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \ln k}{n(n+1)} \stackrel{\text{Stolz 定理}}{=} - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\ln n}{2(n+1)} = 0. \end{aligned}$$

因此


$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sqrt[n+1]{(n+1)!} - \sqrt[n]{n!} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{\frac{\sum_{k=1}^n \ln k}{n}} \left(e^{\frac{\sum_{k=1}^{n+1} \ln k}{n+1} - \frac{\sum_{k=1}^n \ln k}{n}} - 1 \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{e} \cdot \left(\frac{\sum_{k=1}^{n+1} \ln k}{n+1} - \frac{\sum_{k=1}^n \ln k}{n} \right)$$

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

□

例题 0.4 计算

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

 **笔记** 注意到, 分子求和时, 不是单纯的 $\sum_{k=0}^{n+1} \ln C_n^k - \sum_{k=0}^n \ln C_n^k$, 而是 $\sum_{k=0}^{n+1} \ln C_{n+1}^k - \sum_{k=0}^n \ln C_n^k$.

组合数的定义和性质可以参考 Binomial Coefficient.


结论 $C_a^b = \frac{a}{b} C_{a-1}^{b-1}$.

解 由 Stolz 定理可得

$$\begin{aligned}
\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \ln C_n^k}{n^2} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^{n+1} \ln C_{n+1}^k - \sum_{k=1}^n \ln C_n^k}{n^2 - (n-1)^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^{n+1} \ln C_{n+1}^k - \sum_{k=1}^n \ln C_n^k}{2n} \\
&= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \ln C_{n+1}^k - \sum_{k=1}^n \ln C_n^k}{2n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \ln \left(\frac{n+1}{k} C_n^{k-1} \right) - \sum_{k=1}^n \ln C_n^k}{2n} \\
&= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \ln(n+1) - \sum_{k=1}^n \ln k + \sum_{k=1}^n (\ln C_n^{k-1} - \ln C_n^k)}{2n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \ln(n+1) - \sum_{k=1}^n \ln k - (\ln C_n^0 - \ln C_n^n)}{2n} \\
&= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \ln(n+1) - \sum_{k=1}^n \ln k}{2n} = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+1) \ln(n+2) - n \ln(n+1) - \ln(n+1)}{1} \\
&= \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} (n+1) \ln \frac{n+2}{n+1} = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} (n+1) \left(\frac{n+2}{n+1} - 1 \right) = \frac{1}{2}.
\end{aligned}$$

□

例题 0.5 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \frac{n+1}{2^k(n+1-k)}$

 **笔记** 倒序求和与顺序求和相等!(看到 $n+1-k$, 就应该想到倒序求和)

解 由 Stolz 公式可得

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

□

例题 0.6 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} n(H_n - \ln n - \gamma)$, 其中 γ 为欧拉常数, $H_n = 1 + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{n}$.

证明

$$\begin{aligned}
\lim_{n \rightarrow \infty} n(H_n - \ln n - \gamma) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{H_n - \ln n - \gamma}{\frac{1}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{H_{n+1} - H_n - \ln(n+1) + \ln n}{\frac{1}{n+1} - \frac{1}{n}} \\
&= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n+1} - \ln(1 + \frac{1}{n})}{-\frac{1}{n^2}} = \lim_{n \rightarrow \infty} n^2 \left(\ln(1 + \frac{1}{n}) - \frac{1}{n+1} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} n^2 \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{2n^2} - \frac{1}{n+1} \right) = \frac{1}{2}
\end{aligned}$$

□

注 类似的, 你可以继续计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(n(H_n - \ln n - \gamma) - \frac{1}{2} \right)$, 并且仅用 Stolz 公式就能证明存在一列 c_1, \dots, c_k 使得

$$H_n = \ln n + \gamma + \frac{c_1}{n} + \frac{c_2}{n^2} + \dots + \frac{c_k}{n^k} + O\left(\frac{1}{n^{k+1}}\right), n \rightarrow \infty.$$

例题 0.7 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sqrt{1 + \frac{k}{n}}$.

笔记 这题也可以凑定积分定义是显然的.

证明

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

□

命题 0.5

设 $\alpha \in (0, 1)$, 证明

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^\alpha} = \frac{n^{1-\alpha}}{1-\alpha} + o(n^{1-\alpha}).$$

▲

证明 由 Stolz 公式可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{k=1}^n \frac{1}{k^\alpha}}{n^{1-\alpha}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{(n+1)^\alpha}}{(n+1)^{1-\alpha} - n^{1-\alpha}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^\alpha \cdot (1-\alpha)n^{-\alpha}} = \frac{1}{1-\alpha}.$$

□

0.1.1.2 利用 Stolz 定理求抽象数列极限

例题 0.8 设 $x_1 > 0, x_{n+1} = x_n + \frac{1}{x_n \sqrt{n}}$, 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} n^{-\frac{1}{4}} x_n$.

证明 归纳易证 x_n 单调递增, 如果 x_n 有界则设 $x_n \leq A < \infty$, 代入条件可知 $x_{n+1} - x_n = \frac{1}{\sqrt{n}x_n} \geq \frac{1}{A\sqrt{n}}$, 从而

$x_{n+1} = \sum_{k=1}^n (x_{k+1} - x_k) \geq \sum_{k=1}^n \frac{1}{A\sqrt{k}}$. 而这个不等式右边发散, 故 x_n 也发散, 矛盾. 所以 x_n 单调递增趋于无穷, 下面用

Stolz 公式求极限

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n^2}{\sqrt{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_{n+1}^2 - x_n^2}{\frac{1}{2\sqrt{n}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(x_{n+1} - x_n)(x_{n+1} + x_n)}{\frac{1}{2\sqrt{n}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{x_n \sqrt{n}} \left(2x_n + \frac{1}{x_n \sqrt{n}} \right)}{\frac{1}{2\sqrt{n}}} = 2 \lim_{n \rightarrow \infty} \left(2 + \frac{1}{x_n^2 \sqrt{n}} \right) = 4.$$

因此所求的极限是 2.

□

注

1. 直接用 Stolz 会做不出来:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n}{n^{\frac{1}{4}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_{n+1} - x_n}{\frac{1}{4}n^{-\frac{3}{4}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{4\frac{1}{x_n \sqrt{n}}}{n^{-\frac{3}{4}}} = 4 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{-\frac{1}{4}}}{x_n}.$$

设 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n}{n^{\frac{1}{4}}} = A$, 则由上式可得 $A = \frac{4}{A}$, 解得 $A = 2$.

但是注意我们事先并没有论证上式最后一个极限存在, 所以不满足 Stolz 定理的条件, 这导致前面的等号都不一定成立. 因此不可以“解方程”得到所求极限为 2.

2. 上述证明中最后一步求原式平方的极限而不求其他次方的极限的原因: 我们也可以待定系数自己探索出数

列的阶并算出这样的结果, 待定 $a, b > 0$, 则由 Stolz 定理可得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n^a}{n^b} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_{n+1}^a - x_n^a}{bn^{b-1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(x_n + \frac{1}{x_n \sqrt{n}}\right)^a - x_n^a}{bn^{b-1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n^a \left(\left(1 + \frac{1}{x_n^2 \sqrt{n}}\right)^a - 1\right)}{bn^{b-1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n^a \frac{a}{x_n^2 \sqrt{n}}}{bn^{b-1}} = \frac{a}{b} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n^{a-2}}{n^{b-\frac{1}{2}}}.$$

我们希望上式最后一个极限能够直接算出具体的数, 因此令 $a = 2, b = \frac{1}{2}$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n^a}{n^b} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n^2}{\sqrt{n}} = \frac{a}{b} = 4$. 故

实际书写中我们只需要利用 Stolz 定理求出 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n^2}{\sqrt{n}}$ 即可.

类似题目的最后一步求的极限式都是通过这种待定系数的方式得到的, 并不是靠猜.

例题 0.9 设 $0 < x_0 < y_0 < \frac{\pi}{2}$, $x_{n+1} = \sin x_n$, $y_{n+1} = \sin y_n$ ($n \geq 0$). 证明: $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{x_n}{y_n} = 1$.

证明 因为 $x_{n+1} = \sin x_n < x_n$ ($n \geq 0$), 所以数列 $\{x_n\}$ 严格递减有下界. 设 $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = a$, 则 $\sin a = a$, 于是 $a = 0$, 即 $\lim_{n \rightarrow +\infty} x_n = 0$. 同理, $\lim_{n \rightarrow +\infty} y_n = 0$.

另外, 由 $0 < x_0 < y_0 < \frac{\pi}{2}$ 可以推得 $0 < x_n < y_n < \frac{\pi}{2}$ ($n \geq 0$). 取正整数 ℓ 使得 $y_\ell < x_0$, 则 $y_\ell < x_0 < y_0$, 从而对任意的正整数 n 有

$$y_{n+\ell} < x_n < y_n$$

进而

$$\frac{y_{n+\ell}}{y_n} < \frac{x_n}{y_n} < 1$$

注意到 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{y_{n+\ell}}{y_n} = 1$, 由夹逼准则即得 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{x_n}{y_n} = 1$.


□

注 事实上, 通过待定系数, 利用 Stolz 公式做形式计算可以得到 x_n 的阶. 待定 $\alpha, \beta > 0$, 由 Stolz 公式可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} n^\beta x_n^\alpha &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^\beta}{\frac{1}{x_n^\alpha}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\beta n^{\beta-1}}{\frac{1}{\sin^\alpha x_n} - \frac{1}{x_n^\alpha}} \\ &= \beta \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{\beta-1} x_n^\alpha \sin^\alpha x_n}{x_n^\alpha - \sin^\alpha x_n} = \beta \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{\beta-1} x_n^{2\alpha}}{x_n^\alpha - (x_n - \frac{1}{6}x_n^3 + o(x_n^3))^\alpha} \\ &= \beta \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{\beta-1} x_n^{2\alpha}}{C_1^\alpha x_n^{\alpha-1} \cdot \frac{1}{6}x_n^3 + o(x_n^{\alpha+2})} = \frac{6\beta}{\alpha} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^{\beta-1}}{x_n^{2-\alpha} + o(x_n^{2-\alpha})}. \end{aligned}$$

于是取 $\alpha = 2, \beta = 1$, 可得 $\lim_{n \rightarrow \infty} n x_n^2 = \frac{6 \cdot 1}{2} = 3$. 同理可得 $\lim_{n \rightarrow \infty} n y_n^2 = 3$. 故 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt{n} x_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt{n} y_n = \sqrt{3}$.

例题 0.10 设 $k \geq 2, a_0 > 0, a_{n+1} = a_n + \frac{1}{\sqrt[k]{a_n}}$, 求极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{k+1}}{n^k}$.

 **笔记** 这题很容易能猜出要先对原极限开 k 次方再用 Stolz 定理求解.

实际上, 我们也可以同 **例题 0.8** 一样, 待定系数自己探索出数列的阶并算出这样的结果, 待定 $a, b > 0$, 则由 Stolz 定理可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{a(k+1)}}{n^{bk}} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}^{a(k+1)} - a_n^{a(k+1)}}{bk n^{bk-1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(a_n + a_n^{-\frac{1}{k}}\right)^{a(k+1)} - a_n^{a(k+1)}}{bk n^{bk-1}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{a(k+1)} \left[\left(1 + a_n^{-\frac{1}{k}-1}\right)^{a(k+1)} - 1\right]}{bk n^{bk-1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{a(k+1) \frac{1}{k}+1}}{bk n^{bk-1}} = \frac{k+1}{bk^2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{a(k+1)-\frac{k+1}{k}}}{n^{bk-1}}. \end{aligned}$$

我们希望上式最后一个极限能够直接算出具体的数值, 因此令 $a = b = \frac{1}{k}$, 于是 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{a(k+1)}}{n^{bk}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{1+\frac{1}{k}}}{n} =$

$\frac{k+1}{\frac{1}{k}k^2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{\frac{k+1}{k}-\frac{k+1}{k}}}{n^{\frac{k}{k}-1}} = \frac{k+1}{k}$. 故实际书写中我们只需要利用 Stolz 定理求出 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{1+\frac{1}{k}}}{n}$ 即可.

证明 归纳易证 a_n 单调递增, 假设 a_n 有界, 则由单调有界定理可知, a_n 收敛, 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = A < \infty$. 则由递推条件可

得, $A = A + \frac{1}{\sqrt[k]{A}}$, 无解, 矛盾. 于是 a_n 单调递增且无上界, 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = +\infty$. 根据 Stolz 公式有

$$\begin{aligned}\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{1+\frac{1}{k}}}{n} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(a_{n+1}^{1+\frac{1}{k}} - a_n^{1+\frac{1}{k}} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\left(a_n + a_n^{-\frac{1}{k}} \right)^{1+\frac{1}{k}} - a_n^{1+\frac{1}{k}} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n^{1+\frac{1}{k}} \left(\left(1 + a_n^{-\frac{1}{k}-1} \right)^{1+\frac{1}{k}} - 1 \right) \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} x^{1+\frac{1}{k}} \left(\left(1 + x^{-(1+\frac{1}{k})} \right)^{1+\frac{1}{k}} - 1 \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} x^{1+\frac{1}{k}} \left(1 + \frac{1}{k} \right) x^{-(1+\frac{1}{k})} = 1 + \frac{1}{k}\end{aligned}$$

因此所求极限是 $\left(1 + \frac{1}{k} \right)^k$.

□

注 如果题目没给出需要求的极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^{k+1}}{n^k}$, 而是问求 a_n 的渐近展开式 (只展开一项), 那么我们就需要待定系数自己探索 a_n 的阶. 待定 $\alpha > 0$, 由二项式定理得到

$$\begin{aligned}a_{n+1}^\alpha &= \left(a_n + \frac{1}{\sqrt[k]{a_n}} \right)^\alpha = a_n^\alpha + \alpha a_n^{\alpha-1} \frac{1}{\sqrt[k]{a_n}} + o \left(a_n^{\alpha-1-\frac{1}{k}} \right) \\ \Rightarrow a_{n+1}^\alpha &\approx a_n^\alpha + \alpha a_n^{\alpha-1-\frac{1}{k}} \Rightarrow a_{n+1}^\alpha - a_n^\alpha \approx \alpha a_n^{\alpha-1-\frac{1}{k}}.\end{aligned}$$

从而令 $\alpha = 1 + \frac{1}{k}$, 则

$$a_{n+1}^{1+\frac{1}{k}} - a_n^{1+\frac{1}{k}} \approx \alpha a_n^{\alpha-1-\frac{1}{k}} = \alpha a_n^\alpha = \alpha n^\alpha = \frac{k+1}{k} n^\alpha.$$

这样就能写出 a_n 渐近展开式的第一项, 即 $a_n = \left(\frac{kn}{k+1} \right)^{1+\frac{1}{k}} + o \left(n^{1+\frac{1}{k}} \right)$.

例题 0.11 设 k 为正整数, 正数列 $\{x_n\}$ 满足 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n(x_1^k + x_2^k + \cdots + x_n^k) = 1$, 证明: $\lim_{n \rightarrow \infty} nx_n^{k+1} = \frac{1}{k+1}$.

证明 设 $S_n = x_1^k + x_2^k + \cdots + x_n^k$, 则 S_n 单调递增. 如果 S_n 有界, 则 x_n 趋于零, $x_n S_n \rightarrow 0$, 这与已知条件矛盾, 所以 S_n 单调递增趋于正无穷, 进一步结合条件可知 x_n 趋于零. 注意到

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_{n+1} S_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_{n+1} S_{n+1} S_n}{S_{n+1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{S_n}{S_{n+1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{1 + \frac{x_{n+1}}{S_{n+1}}} = 1.$$

下面运用等价无穷小替换和 Stolz 公式来求极限:

$$\begin{aligned}\lim_{n \rightarrow \infty} nx_n^{k+1} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{nx_{n+1}^{k+1} S_n^{k+1}}{S_n^{k+1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{S_n^{k+1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{S_{n+1}^{k+1} - S_n^{k+1}} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{(S_{n+1} - S_n)(S_{n+1}^k + S_{n+1}^{k-1} S_n + \cdots + S_{n+1} S_n^{k-1} + S_n^k)} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{x_{n+1}^k (S_{n+1}^k + S_{n+1}^{k-1} S_n + \cdots + S_{n+1} S_n^{k-1} + S_n^k)} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{(x_{n+1} S_{n+1})^k + (x_{n+1} S_{n+1})^{k-1} (x_{n+1} S_n) + \cdots + (x_{n+1} S_{n+1})(x_{n+1} S_n)^{k-1} + (x_{n+1} S_n)^k} \\ &= \frac{1}{k+1}.\end{aligned}$$

□

例题 0.12 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \sum_{k=1}^n a_k^2 = 1$, 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} a_n$.

解 因为 $\left\{ \sum_{k=1}^n a_k^2 \right\}$ 单调递增, 故由单调有界定理可知, $\left\{ \sum_{k=1}^n a_k^2 \right\}$ 的极限要么为有限数, 要么为 $+\infty$. 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n a_k^2 =$

$c < \infty$, 则由级数收敛知 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$, 于是 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \sum_{k=1}^n a_k^2 = 0 \neq 1$ 矛盾! 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n a_k^2 = +\infty$. 从而

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} a_n \sum_{k=1}^n a_k^2 \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sum_{k=1}^n a_k^2} = 0.$$

并且由 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \sum_{k=1}^n a_k^2 = 1$ 可知 $a_n \sim \frac{1}{\sum_{k=1}^n a_k^2}, n \rightarrow \infty$. 于是

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{na_n^3} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(\sum_{k=1}^n a_k^2\right)^3}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\left(\sum_{k=1}^{n+1} a_k^2\right)^3 - \left(\sum_{k=1}^n a_k^2\right)^3 \right] \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\left(a_{n+1}^2 + \sum_{k=1}^n a_k^2\right)^3 - \left(\sum_{k=1}^n a_k^2\right)^3 \right] \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n a_k^2\right)^3 \left[\left(\frac{a_{n+1}^2}{\sum_{k=1}^n a_k^2} + 1\right)^3 - 1 \right] \end{aligned}$$

又由于 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}^2}{\sum_{k=1}^n a_k^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} a_{n+1}^2 a_n = 0$, 因此由 Taylor 公式可知 $\left(\frac{a_{n+1}^2}{\sum_{k=1}^n a_k^2} + 1\right)^3 - 1 \sim \frac{3a_{n+1}^2}{\sum_{k=1}^n a_k^2}, n \rightarrow \infty$. 从而上式可化为

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{na_n^3} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n a_k^2\right)^3 \left[\left(\frac{a_{n+1}^2}{\sum_{k=1}^n a_k^2} + 1\right)^3 - 1 \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^n a_k^2\right)^3 \frac{3a_{n+1}^2}{\sum_{k=1}^n a_k^2} \\ &= 3 \lim_{n \rightarrow \infty} a_{n+1}^2 \left(\sum_{k=1}^n a_k^2\right)^2 = 3 \lim_{n \rightarrow \infty} a_{n+1}^2 \left(\sum_{k=1}^{n+1} a_k^2 - a_{n+1}^2\right)^2 \\ &= 3 \lim_{n \rightarrow \infty} \left[a_{n+1}^2 \left(\sum_{k=1}^{n+1} a_k^2\right)^2 - 2a_{n+1}^4 \sum_{k=1}^{n+1} a_k^2 + a_{n+1}^6 \right] \\ &= 3 + 0 + 0 = 3. \end{aligned}$$

因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[3]{na_n} = \frac{1}{\sqrt[3]{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{na_n^3}}} = \frac{1}{\sqrt[3]{3}}$.

□

例题 0.13

1. 设 $x_{n+1} = \ln(1+x_n), n=1, 2, \dots, x_1 > 0$, 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n(nx_n - 2)}{\ln n}$.
2. 设 $x_{n+1} = \sin x_n, n=1, 2, \dots, x_1 \in (0, \pi)$, 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{\ln n} (1 - \sqrt{\frac{n}{3}} x_n)$.
3. 设 $x_1 = 1, x_{n+1} = x_n + \frac{1}{x_n}, n=1, 2, \dots$, 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2n}(x_n - \sqrt{2n})}{\ln n}$.

解

1. 由 $\ln(1+x) \leq x, \forall x \in \mathbb{R}$ 可知 $x_{n+1} \leq x_n, \forall n \in \mathbb{N}$. 并且 $x_1 > 0$, 假设 $x_n > 0$, 则 $x_{n+1} = \ln(1+x_n) > 0$. 从而由数学归纳法, 可知 $x_n > 0, \forall n \in \mathbb{N}$. 于是由单调有界定理, 可知数列 $\{x_n\}$ 收敛. 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a \geq 0$. 对 $x_{n+1} = \ln(1+x_n)$ 两边同时令 $n \rightarrow \infty$, 可得

$$a = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \ln(1+x_n) = \ln(1+a).$$

故 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a = 0$. 进而, 由 Stolz 定理可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{nx_n} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{x_n}}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{x_{n+1}} - \frac{1}{x_n} \right) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{\ln(1+x_n)} - \frac{1}{x_n} \right) = \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\ln(1+x)} - \frac{1}{x} \right) \end{aligned}$$

$$= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x - \ln(1+x)}{x \ln(1+x)} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x - \left(x - \frac{x^2}{2} + o(x^2)\right)}{x^2} = \frac{1}{2}.$$

因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} nx_n = 2$. 即 $x_n \sim \frac{2}{n}, n \rightarrow \infty$.
因而, 再结合 Stolz 定理可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n(nx_n - 2)}{\ln n} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{nx_n \left(n - \frac{2}{x_n}\right)}{\ln n} = 2 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n - \frac{2}{x_n}}{\ln n} \\ &= 2 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 + \frac{2}{x_n} - \frac{2}{x_{n+1}}}{\ln \left(1 + \frac{1}{n}\right)} = 2 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 + \frac{2}{x_n} - \frac{2}{x_{n+1}}}{\frac{1}{n}} \\ &= 2 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 + \frac{2}{x_n} - \frac{2}{\ln(1+x_n)}}{\frac{x_n}{2}} = 4 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 + \frac{2}{x} - \frac{2}{\ln(1+x)}}{x} \\ &= 4 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{(x+2) \ln(1+x) - 2x}{x^2 \ln(1+x)} = 4 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{(x+2) \left(x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} + o(x^3)\right) - 2x}{x^3} \\ &= 4 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{-\frac{x^3}{2} + \frac{2x^3}{3} + o(x^3)}{x^3} = \frac{2}{3}. \end{aligned}$$

实际上, 由上述计算我们可以得到 x_n 在 $n \rightarrow \infty$ 时的渐进估计:

$$\begin{aligned} \frac{n(nx_n - 2)}{\ln n} &= \frac{2}{3} + o(1) \Rightarrow nx_n - 2 = \frac{2 \ln n}{3n} + o\left(\frac{\ln n}{n}\right) \\ &\Rightarrow x_n = \frac{2}{n} + \frac{2 \ln n}{3n^2} + o\left(\frac{\ln n}{n^2}\right), n \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

2. 由 $\sin x \leq x, \forall x \in \mathbb{R}$ 可知 $x_{n+1} \leq x_n, \forall n \in \mathbb{N}$. 又由于 $0 < x_1 < \pi$ 及 $0 < x_{n+1} = \sin x_n < 1, \forall n \in \mathbb{N}$, 故归纳可得 $0 \leq x_n \leq 1, \forall n \geq 2$. 因此 $\{x_n\}$ 极限存在, 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a < \infty$. 从而对 $x_{n+1} = \sin x_n$ 两边同时令 $n \rightarrow \infty$ 可得

$$a = \lim_{n \rightarrow \infty} x_{n+1} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sin x_n = \sin a.$$

故 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a = 0$. 于是由 Stolz 定理可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3}{nx_n^2} &= 3 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{x_n^2}}{n} = 3 \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{x_{n+1}^2} - \frac{1}{x_n^2} \right) = 3 \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{\sin^2 x_n} - \frac{1}{x_n^2} \right) \\ &= 3 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2 - \sin^2 x}{x^2 \sin^2 x} = 3 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2 - \left(x - \frac{x^3}{3!} + o(x^3)\right)^2}{x^4} \\ &= 3 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{x^4}{3} + o(x^4)}{x^4} = 1. \end{aligned}$$

因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{n}{3}} x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{\frac{3}{nx_n^2}}} = 1, \lim_{n \rightarrow \infty} nx_n^2 = 3$. 即 $x_n \sim \sqrt{\frac{3}{n}}, n \rightarrow \infty$. 进而, 再结合 Stolz 定理可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{\ln n} \left(1 - \sqrt{\frac{n}{3}} x_n\right) &\stackrel{\text{平方差公式/有理化}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \left(1 - \frac{n}{3} x_n^2\right)}{\ln n \left(1 + \sqrt{\frac{n}{3}} x_n\right)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{nx_n^2 \left(\frac{1}{x_n^2} - \frac{n}{3}\right)}{\ln n \left(1 + \sqrt{\frac{n}{3}} x_n\right)} \\ &= \frac{3}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{x_n^2} - \frac{n}{3}}{\ln n} = \frac{3}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{x_{n+1}^2} - \frac{1}{x_n^2} - \frac{1}{3}}{\ln \left(1 + \frac{1}{n}\right)} \\ &= \frac{3}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{\sin^2 x_n} - \frac{1}{x_n^2} - \frac{1}{3}}{\frac{1}{n}} = \frac{3}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{\sin^2 x_n} - \frac{1}{x_n^2} - \frac{1}{3}}{\frac{x_n^2}{3}} \\ &= \frac{9}{2} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{\sin^2 x} - \frac{1}{x^2} - \frac{1}{3}}{x^2} = \frac{9}{2} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2 - \sin^2 x - \frac{1}{3} x^2 \sin^2 x}{x^4 \sin^2 x} \\ &= \frac{9}{2} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2 - \left(x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + o(x^5)\right)^2 - \frac{1}{3} x^2 \left(x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + o(x^5)\right)^2}{x^6} \end{aligned}$$

$$= \frac{9}{2} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{-\frac{x^6}{36} - \frac{x^6}{60} + \frac{x^6}{9} + o(x^6)}{x^6} = \frac{3}{10}.$$

(最后几步的计算除了用 Taylor 展开也可以用洛朗展开计算, 即先用长除法算出 $\frac{1}{\sin^2 x} = \frac{1}{x^2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{15}x^2 + o(x^2)$, 再直接带入计算得到结果, 实际上利用洛朗展开计算更加简便.)

3. 由条件可知 $x_{n+1} = x_n + \frac{1}{x_n} \geq x_n, \forall n \in \mathbb{N}$. 又 $x_1 = 1 > 0$, 故归纳可得 $x_n > 0, \forall n \in \mathbb{N}$. 由单调有界定理可知数列 $\{x_n\}$ 的极限要么是 $+\infty$, 要么是有限数. 假设 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a < \infty$, 则对 $x_{n+1} = x_n + \frac{1}{x_n}$ 两边同时令 $n \rightarrow \infty$, 可得 $a = a + \frac{1}{a} \Rightarrow \frac{1}{a} = 0$ 矛盾. 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = +\infty$. 于是由 Stolz 定理可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n}{\sqrt{n}} &= \sqrt{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n^2}{n}} = \sqrt{\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_{n+1}^2 - x_n^2}{n+1 - n}} = \sqrt{\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\left(x_n + \frac{1}{x_n} \right)^2 - x_n^2 \right)} \\ &= \sqrt{\lim_{n \rightarrow \infty} \left(2 + \frac{1}{x_n^2} \right)} = \sqrt{2}. \end{aligned}$$

因此 $x_n \sim \sqrt{2n}, n \rightarrow \infty$. 从而 $x_n + \sqrt{2n} \sim 2\sqrt{2n}, n \rightarrow \infty$. 再结合 Stolz 定理可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2n}(x_n - \sqrt{2n})}{\ln n} &\stackrel{\text{平方差公式/有理化}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2n}(x_n^2 - 2n)}{(x_n + \sqrt{2n}) \ln n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2n}(x_n^2 - 2n)}{2\sqrt{2n} \ln n} \\ &= \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_n^2 - 2n}{\ln n} = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{x_{n+1}^2 - x_n^2 - 2}{\ln(n+1) - \ln n} \\ &= \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(x_n + \frac{1}{x_n} \right)^2 - x_n^2 - 2}{\frac{1}{n}} = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left(x_n + \frac{1}{x_n} \right)^2 - x_n^2 - 2}{\frac{2}{x_n^2}} \\ &= \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{2}{x_n^2}}{\frac{2}{x_n^2}} = \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

□

例题 0.14 讨论级数 $\sum_{n=1}^{\infty} v_n^s$ 的敛散性, 其中 $v_1 = \sin x > 0, v_{n+1} = \sin v_n (n = 1, 2, \dots)$.

证明 由条件可知 $v_{n+1} = \sin v_n \leq v_n, \forall n \in \mathbb{N}$. 故 $\{v_n\}$ 递减且有下界 0. 因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} v_n = a \in [0, +\infty)$, 从而对 $v_{n+1} = \sin v_n$ 两边取极限得

$$a = \sin a \implies a = 0.$$

由 Stolz 公式得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} n v_n^2 &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{1}{v_{n+1}^2} - \frac{1}{v_n^2}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{v_n^2 v_{n+1}^2}{v_n^2 - v_{n+1}^2} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{v_n^2 \sin^2 v_n}{v_n^2 - \sin^2 v_n} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x^2 \sin^2 x}{x^2 - \sin^2 x} \\ &= \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x^4}{x^2 - \left(x - \frac{x^3}{6} + o(x^3) \right)^2} \\ &= \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{x^4}{\frac{x^4}{3} + o(x^4)} = 3. \end{aligned}$$

故

$$v_n^2 \sim \frac{3}{n} \implies v_n \sim \sqrt{\frac{3}{n}}, \quad n \rightarrow \infty.$$

又 $\sum_{n=1}^{\infty} \left(\sqrt{\frac{3}{n}} \right)^s = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{3}{n} \right)^{\frac{s}{2}}$ 当且仅当 $s > 2$ 时收敛, $s \leq 2$ 时发散. 故 $\sum_{n=1}^{\infty} v_n^s$ 当且仅当 $s > 2$ 时收敛, $s \leq 2$ 时发散.

□

例题 0.15 设 $a_1 = 1, a_{n+1} = a_n + \frac{1}{S_n}, S_n = \sum_{k=1}^n a_k$, 计算 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{\sqrt{\ln n}}$.

解 由于 $a_{n+1} = a_n + \frac{1}{S_n}, \forall n \in \mathbb{N}$, 并且 $a_1 > 0$, 故由数学归纳法可知 $a_n > 0, \forall n \in \mathbb{N}$. 又 $a_2 = a_1 + a_1 > a_1$, 再根据递推式, 可以归纳得到数列 $\{a_n\}$ 单调递增. 因此, 数列 $\{a_n\}$ 要么 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a < \infty$, 要么 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = +\infty$. 由条件可知

$a_{n+1} - a_n = \frac{1}{S_n} \geq \frac{1}{na_1} = \frac{1}{n}, \forall n \in \mathbb{N}$. 从而对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 都有

$$a_n = a_n - a_{n-1} + a_{n-1} - a_{n-2} + \cdots + a_2 - a_1 \geq \frac{1}{n-1} + \frac{1}{n-2} + \cdots + 1 = \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{k}.$$

而 $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{k} = +\infty$, 故 $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = +\infty$. 于是由 Stolz 定理, 可知

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^2}{\ln n} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}^2 - a_n^2}{\ln(1 + \frac{1}{n})} = \lim_{n \rightarrow \infty} n(a_{n+1}^2 - a_n^2) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} n \left[\left(a_n + \frac{1}{S_n} \right)^2 - a_n^2 \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\frac{2a_n}{S_n} + \frac{1}{S_n^2} \right). \end{aligned}$$

根据 Stolz 定理, 可得

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{S_n^2} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{a_{n+1}^2} = 0; \\ \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{na_n}{S_n} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+1)a_{n+1} - na_n}{a_{n+1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[n+1 - \frac{na_n}{a_{n+1}} \right]. \end{aligned}$$

由递推公式, 可得对 $\forall n \in \mathbb{N}$, 有

$$\begin{aligned} 1 &= n+1 - n \leq n+1 - \frac{na_n}{a_{n+1}} = n+1 - \frac{na_n}{a_n + \frac{1}{S_n}} = 1 + \frac{\frac{n}{a_n S_n}}{1 + \frac{1}{a_n S_n}} \\ &= 1 + \frac{n}{1 + a_n S_n} \leq 1 + \frac{n}{1 + a_1 S_n} = 1 + \frac{n}{1 + S_n}. \end{aligned}$$

又由 Stolz 定理, 可得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{1 + S_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{a_{n+1}} = 0$. 故由夹逼准则可知, $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{na_n}{S_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[n+1 - \frac{na_n}{a_{n+1}} \right] = 1$. 于是

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n^2}{\ln n} = \lim_{n \rightarrow \infty} n \left(\frac{2a_n}{S_n} + \frac{1}{S_n^2} \right) = 2 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{na_n}{S_n} + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{S_n^2} = 2 + 0 = 2.$$

因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{\sqrt{\ln n}} = \sqrt{2}$.

□

0.1.2 函数 Stolz 定理

定理 0.3 (函数 Stolz 定理)

设 $T > 0, f, g: [0, +\infty) \rightarrow \mathbb{R}$ 是内闭有界函数.

(1) 设 $g(x+T) > g(x)$, 若有 $\lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = +\infty$ 且

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x+T) - f(x)}{g(x+T) - g(x)} = A \in \mathbb{R} \cup \{-\infty, +\infty\}.$$

则有

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)} = A.$$

(2) 设 $0 < g(x+T) < g(x)$, 若有

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = 0,$$

且

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x+T) - f(x)}{g(x+T) - g(x)} = A \in \mathbb{R} \cup \{-\infty, +\infty\}.$$

则有

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)} = A.$$



注 考试中, 如果要用函数 Stolz 定理, 不要直接证明这个抽象的版本 (直接证明这个定理太繁琐). 而是根据具体问题, 利用夹逼准则和数列 Stolz 定理进行证明. 具体可见 **例题 0.16**.

证明 我们仅考虑 $A \in \mathbb{R}$, 其余情况类似, 为了书写方便, 我们不妨设 $A = 0$, 否则用 $f - Ag$ 代替 f 即可. 不妨设 $T = 1$, 否则用 $f(Tx)$ 代替 f 即可.

(1) 对任何 $\varepsilon > 0$, 由条件知存在某个 $X \in \mathbb{N}$, 使得对任何 $x > X$ 都有

$$|f(x+1) - f(x)| < \varepsilon[g(x+1) - g(x)], g(x) > 0. \quad (5)$$

于是对 $\forall x > X$, 利用(5)式, 我们有

$$\begin{aligned} \left| \frac{f(x)}{g(x)} \right| &= \left| \frac{\sum_{k=1}^{[x]-X} [f(x-k+1) - f(x-k)]}{g(x)} + \frac{f(x-[x]+X)}{g(x)} \right| \\ &\leq \left| \frac{\sum_{k=1}^{[x]-X} [f(x-k+1) - f(x-k)]}{g(x)} \right| + \left| \frac{f(x-[x]+X)}{g(x)} \right| \\ &\stackrel{(5) \text{ 式}}{\leq} \varepsilon \frac{\sum_{k=1}^{[x]-X} [g(x-k+1) - g(x-k)]}{|g(x)|} + \left| \frac{f(x-[x]+X)}{g(x)} \right| \\ &= \varepsilon \frac{g(x) - g(x-[x]+X)}{|g(x)|} + \left| \frac{f(x-[x]+X)}{g(x)} \right| \\ &\stackrel{g>0}{\leq} \varepsilon + \left| \frac{f(x-[x]+X)}{g(x)} \right|. \end{aligned}$$

于是利用 f 在 $[X, X+1]$ 有界及 $X \leq x - [x] + X < X+1$, 我们有

$$\overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} \left| \frac{f(x)}{g(x)} \right| \leq \varepsilon,$$

由 ε 任意性即得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{g(x)} = 0.$$

这就完成了证明.

(2) 任何 $\varepsilon > 0$, 由条件可知存在某个 $X \in \mathbb{N}$, 使得对任何 $x > X$ 都有

$$|f(x+1) - f(x)| < \varepsilon[g(x) - g(x+1)]. \quad (6)$$

于是对 $\forall x > X, \forall n \in \mathbb{N}$, 利用(6)可得

$$\begin{aligned} \left| \frac{f(x)}{g(x)} \right| &= \left| \frac{\sum_{k=1}^n [f(x+k-1) - f(x+k)] + f(x+n)}{g(x)} \right| \\ &\leq \frac{\sum_{k=1}^n |f(x+k-1) - f(x+k)|}{g(x)} + \frac{|f(x+n)|}{g(x)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\leq \varepsilon \frac{\sum_{k=1}^n [g(x+k-1) - g(x+k)]}{g(x)} + \frac{|f(x+n)|}{g(x)} \\
&= \varepsilon \frac{g(x) - g(x+n)}{g(x)} + \frac{|f(x+n)|}{g(x)} \\
&\leq \varepsilon + \frac{|f(x+n)|}{g(x)}.
\end{aligned}$$

再利用 $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = 0$ 得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|f(x+n)|}{g(x)} = 0 \Rightarrow \left| \frac{f(x)}{g(x)} \right| \leq \varepsilon, \forall x > X.$$


从而结论得证. □

例题 0.16

(1) 设 $\alpha > -1$, 计算 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x t^\alpha |\sin t| dt}{x^{\alpha+1}}.$

(2) 计算 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln x}.$

(3) 计算 $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} \int_0^x (t - [t]) dt$, 这里 $[\cdot]$ 表示向下取整函数.

 **笔记** 虽然这个几个问题的思路都是函数 Stolz 定理, 但是注意在考试中我们不能直接使用这个定理, 需要我们结合具体问题给出这个定理的证明. 具体可见下述证明.

注 第 (1) 题如果直接洛必达得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x t^\alpha |\sin t| dt}{x^{\alpha+1}} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{|\sin x|}{\alpha+1} \text{ 不存在,}$$

因此无法运用洛必达, 但也无法判断原本的极限, 而需要其他方法确定其极限.

证明

(1) **直接使用函数 Stolz 定理:** 由函数 Stolz 定理、Lagrange 中值定理和积分中值定理可知

$$\begin{aligned}
\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x t^\alpha |\sin t| dt}{x^{\alpha+1}} &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^{x+\pi} t^\alpha |\sin t| dt - \int_0^x t^\alpha |\sin t| dt}{(x+\pi)^{\alpha+1} - x^{\alpha+1}} \\
&\stackrel{\text{Lagrange 中值定理}}{=} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_x^{x+\pi} t^\alpha |\sin t| dt}{\pi(\alpha+1)x^\alpha} \stackrel{\text{积分中值定理}}{=} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\theta_x^\alpha \int_x^{x+\pi} |\sin t| dt}{\pi(\alpha+1)x^\alpha},
\end{aligned}$$

其中 $x \leq \theta_x \leq x+\pi$. 从而 $\theta_x \sim x, x \rightarrow +\infty$. 于是

$$\begin{aligned}
\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x t^\alpha |\sin t| dt}{x^{\alpha+1}} &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\theta_x^\alpha \int_x^{x+\pi} |\sin t| dt}{\pi(\alpha+1)x^\alpha} = \frac{1}{\pi(\alpha+1)} \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_x^{x+\pi} |\sin t| dt \\
&\stackrel{\text{定理??}}{=} \frac{1}{\pi(\alpha+1)} \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_0^\pi |\sin t| dt = \frac{2}{\pi(\alpha+1)}.
\end{aligned}$$

不直接使用函数 Stolz 定理(考试中的书写): 对 $\forall x \in (0, +\infty)$, 存在唯一的 $n \in \mathbb{N}$, 使得 $n\pi \leq x \leq (n+1)\pi$. 故

$$\frac{\int_0^{n\pi} t^\alpha |\sin t| dt}{[(n+1)\pi]^{\alpha+1}} \leq \frac{\int_0^x t^\alpha |\sin t| dt}{x^{\alpha+1}} \leq \frac{\int_0^{(n+1)\pi} t^\alpha |\sin t| dt}{(n\pi)^{\alpha+1}}, \forall x \in [0, +\infty). \quad (7)$$

又由数列 Stolz 定理、Lagrange 中值定理和积分中值定理可知

$$\begin{aligned}
\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^{(n+1)\pi} t^\alpha |\sin t| dt}{(n\pi)^{\alpha+1}} &\stackrel{\text{Stolz 定理}}{=} \frac{1}{\pi^{\alpha+1}} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_{n\pi}^{(n+1)\pi} t^\alpha |\sin t| dt}{(n+1)^{\alpha+1} - n^{\alpha+1}} \\
&\stackrel{\text{Lagrange 中值定理}}{=} \frac{1}{\pi^{\alpha+1}} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(n\pi)^\alpha \int_{n\pi}^{(n+1)\pi} |\sin t| dt}{(\alpha+1)n^{\alpha+1}} = \frac{2}{\pi(\alpha+1)}, \\
\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^{n\pi} t^\alpha |\sin t| dt}{[(n+1)\pi]^{\alpha+1}} &\stackrel{\text{Stolz 定理}}{=} \frac{1}{\pi^{\alpha+1}} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_{(n-1)\pi}^{n\pi} t^\alpha |\sin t| dt}{(n+1)^{\alpha+1} - n^{\alpha+1}}
\end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{\text{积分中值定理}}{\text{Lagrange 中值定理}} \frac{1}{\pi^{\alpha+1}} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(n\pi)^\alpha \int_{(n-1)\pi}^{n\pi} |\sin t| dt}{(\alpha+1)n^{\alpha+1}} = \frac{2}{\pi(\alpha+1)}. \quad (9)$$

又因为 $n\pi \leq x \leq (n+1)\pi, \forall x \in (0, +\infty)$, 所以 $n \rightarrow +\infty$ 等价于 $x \rightarrow +\infty$. 于是利用(7)(8)(9)式, 由夹逼准则可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x t^\alpha |\sin t| dt}{x^{\alpha+1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^x t^\alpha |\sin t| dt}{x^{\alpha+1}} = \frac{2}{\pi(\alpha+1)}.$$

(2) 直接使用函数 Stolz 定理: 由函数 Stolz 定理、Lagrange 中值定理和积分中值定理可知

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln x} &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^{x+\pi} \frac{|\sin t|}{t} dt - \int_0^x \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln(x+\pi) - \ln x} \stackrel{\text{Lagrange 中值定理}}{=} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_x^{x+\pi} \frac{|\sin t|}{t} dt}{\frac{\pi}{x}} \\ &\stackrel{\text{积分中值定理}}{=} \frac{1}{\pi} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x}{\theta_x} \int_x^{x+\pi} |\sin t| dt \stackrel{\text{定理??}}{=} \frac{1}{\pi} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x}{\theta_x} \int_0^\pi |\sin t| dt = \frac{2}{\pi} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x}{\theta_x}. \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $x \leq \theta_x \leq x+\pi$. 从而 $\theta_x \sim x, x \rightarrow +\infty$. 再结合(10)式可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln x} = \frac{2}{\pi} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x}{\theta_x} = \frac{2}{\pi}.$$

不直接使用函数 Stolz 定理(考试中的书写): 对 $\forall x \in (0, +\infty)$, 存在唯一的 $n \in \mathbb{N}$, 使得 $n\pi \leq x \leq (n+1)\pi$. 故

$$\frac{\int_0^{n\pi} \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln((n+1)\pi)} \leq \frac{\int_0^x \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln x} \leq \frac{\int_0^{(n+1)\pi} \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln(n\pi)}, \forall x > 0. \quad (11)$$

又由数列 Stolz 定理和积分中值定理可知

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^{(n+1)\pi} \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln(n\pi)} &\stackrel{\text{Stolz 定理}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_{n\pi}^{(n+1)\pi} \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln(n\pi) - \ln((n-1)\pi)} \\ &\stackrel{\text{积分中值定理}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n\pi} \int_{n\pi}^{(n+1)\pi} |\sin t| dt}{\ln(1 + \frac{1}{n-1})} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2(n-1)}{n\pi} = \frac{2}{\pi}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^{n\pi} \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln((n+1)\pi)} &\stackrel{\text{Stolz 定理}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_{n\pi}^{(n+1)\pi} \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln((n+2)\pi) - \ln((n+1)\pi)} \\ &\stackrel{\text{积分中值定理}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n\pi} \int_{n\pi}^{(n+1)\pi} |\sin t| dt}{\ln(1 + \frac{1}{n+1})} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2(n+1)}{n\pi} = \frac{2}{\pi}. \end{aligned} \quad (13)$$

又因为 $n\pi \leq x \leq (n+1)\pi, \forall x \in (0, +\infty)$, 所以 $n \rightarrow +\infty$ 等价于 $x \rightarrow +\infty$. 于是利用(11)(12)(13)式, 由夹逼准则可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^x \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^x \frac{|\sin t|}{t} dt}{\ln x} = \frac{2}{\pi}.$$

(3) 直接使用函数 Stolz 定理: 注意到 $t - [t]$ 是 \mathbb{R} 上周期为 1 的非负函数, 故由函数 Stolz 定理可知

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} \int_0^x (t - [t]) dt &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\int_0^{x+1} (t - [t]) dt - \int_0^x (t - [t]) dt}{x+1-x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_x^{x+1} (t - [t]) dt \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_x^{x+1} (t - [t]) dt \stackrel{\text{定理??}}{=} \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_0^1 (t - [t]) dt = \lim_{x \rightarrow +\infty} \int_0^1 t dt = \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

不直接使用函数 Stolz 定理(考试中的书写): 对 $\forall x \in (0, +\infty)$, 存在唯一的 $n \in \mathbb{N}$, 使得 $n \leq x \leq n+1$. 故

$$\frac{\int_0^n (t - [t]) dt}{n+1} \leq \frac{1}{x} \int_0^x (t - [t]) dt \leq \frac{\int_0^{n+1} (t - [t]) dt}{n}, \forall x > 0. \quad (14)$$

又由数列 Stolz 定理可知

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^{n+1} (t - [t]) dt}{n} \stackrel{\text{Stolz 定理}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_n^{n+1} (t - [t]) dt}{\int_n^{n+1} 1 dt} = \int_0^1 (t - [t]) dt = \int_0^1 t dt = 1, \quad (15)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_0^n (t - [t]) dt}{n+1} \stackrel{\text{Stolz 定理}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\int_{n-1}^n (t - [t]) dt}{\int_{n-1}^n 1 dt} = \int_0^1 (t - [t]) dt = \int_0^1 t dt = 1. \quad (16)$$

又因为 $n \leq x \leq n+1, \forall x \in (0, +\infty)$, 所以 $n \rightarrow +\infty$ 等价于 $x \rightarrow +\infty$. 于是利用(14)(15)(16)式, 由夹逼准则可得

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} \int_0^x (t - [t]) dt = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{x} \int_0^x (t - [t]) dt = 1.$$

□

例题 0.17 设 φ 是 \mathbb{R} 上内闭黎曼可积且周期为 $T > 0$ 的函数, 计算

$$\lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{\ln \lambda} \int_0^T \frac{\varphi(\lambda x)}{x} dx \right),$$

其中 $\int_0^T \frac{\varphi(\lambda x)}{x} dx$ 在 $\lambda \in (0, +\infty)$ 收敛.

注 因为 $x = 0$ 是 $\int_0^T \frac{1}{x} dx$ 的奇点, 所以不能直接用 Riemann 引理计算.(这里也难以实现去奇点再使用 Riemann 引理的操作)

解 由函数 Stolz 定理知

$$\begin{aligned} \lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{\ln \lambda} \int_0^T \frac{\varphi(\lambda x)}{x} dx \right) &= \lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{\ln \lambda} \int_0^{\lambda T} \frac{\varphi(x)}{x} dx \right) = \lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{\ln \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right)} \int_{\lambda T}^{(\lambda+1)T} \frac{\varphi(x)}{x} dx \right) \\ &= \lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \lambda \int_0^T \frac{\varphi(x + \lambda T)}{x + \lambda T} dx = \lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \int_0^T \frac{\lambda}{x + \lambda T} \varphi(x) dx. \end{aligned}$$

注意到

$$\begin{aligned} \overline{\lim}_{\lambda \rightarrow +\infty} \left(\int_0^T \frac{\lambda}{x + \lambda T} \varphi(x) dx - \frac{1}{T} \int_0^T \varphi(x) dx \right) &\leq \overline{\lim}_{\lambda \rightarrow +\infty} \int_0^T \frac{x}{T(x + \lambda T)} \varphi(x) dx \\ &\leq \overline{\lim}_{\lambda \rightarrow +\infty} \int_0^T \frac{x}{\lambda T^2} \varphi(x) dx \leq \frac{1}{T^2} \overline{\lim}_{\lambda \rightarrow +\infty} \frac{1}{\lambda} \int_0^T x |\varphi(x)| dx = 0. \end{aligned}$$

故

$$\lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{\ln \lambda} \int_0^T \frac{\varphi(\lambda x)}{x} dx \right) = \lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \int_0^T \frac{\lambda}{x + \lambda T} \varphi(x) dx = \frac{1}{T} \int_0^T \varphi(x) dx.$$

□