

数学分析

下册

华东师范大学数学系 编

高等教育出版社

北京2001

内容简介

本书是教育部“高等师范教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是面向 21 世纪教材和普通高等教育“九五”国家教委重点教材,本书第一版在 1987 年国家教委举办的全国优秀教材评选中获全国优秀奖。

本书内容包括数项级数、函数列与函数项级数、幂级数、傅里叶级数、隐函数、多元函数微积分学、流形上微积分学初阶等。

本书可作为高等师范院校或其他类型院校数学专业的教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

数学分析.下册 华东师范大学数学系编.—3 版.—北京:高等教育出版社,2001

ISBN 7 - 04 - 009443 - 6

.数... .华... .数学分析 - 高等学校 - 教材
.017

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 07930 号

责任编辑 高尚华 封面设计 张楠 责任绘图 郝林
版式设计 马静如 责任校对 康晓燕 责任印制

数学分析 下册 第三版
华东师范大学数学系 编

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号 邮政编码 100009
电 话 010 - 64054588 传 真 010 - 64014048
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷

开 本 787 × 960 1 16 版 次 1981 年 6 月第 1 版
印 张 23.5 年 月第 3 版
字 数 430 000 印 次 年 月第 次印刷
定 价 19.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

目 录

第十二章 数项级数.....	1
§ 1 级数的收敛性	1
§ 2 正项级数	6
一 正项级数收敛性的一般判别原则	6
二 比式判别法和根式判别法	8
三 积分判别法.....	12
* 四 拉贝判别法.....	14
§ 3 一般项级数	17
一 交错级数.....	17
二 绝对收敛级数及其性质.....	18
三 阿贝耳判别法和狄利克雷判别法.....	22
第十三章 函数列与函数项级数	26
§ 1 一致收敛性	26
一 函数列及其一致收敛性.....	26
二 函数项级数及其一致收敛性.....	30
三 函数项级数的一致收敛性判别法.....	32
§ 2 一致收敛函数列与函数项级数的性质	36
第十四章 幂级数	44
§ 1 幂级数	44
一 幂级数的收敛区间.....	44
二 幂级数的性质.....	47
三 幂级数的运算.....	49
§ 2 函数的幂级数展开	52
一 泰勒级数.....	52
二 初等函数的幂级数展开式.....	53
* § 3 复变量的指数函数·欧拉公式	58
第十五章 傅里叶级数	62
§ 1 傅里叶级数	62
一 三角级数·正交函数系	62
二 以 2 为周期的函数的傅里叶级数	64

三	收敛定理.....	65
§ 2	以 $2l$ 为周期的函数的展开式	71
一	以 $2l$ 为周期的函数的傅里叶级数	71
二	偶函数与奇函数的傅里叶级数.....	72
§ 3	收敛定理的证明	78
第十六章	多元函数的极限与连续	85
§ 1	平面点集与多元函数	85
一	平面点集.....	85
二	R^2 上的完备性定理	88
三	二元函数.....	90
四	n 元函数.....	91
§ 2	二元函数的极限	93
一	二元函数的极限.....	93
二	累次极限.....	97
§ 3	二元函数的连续性	100
一	二元函数的连续性概念	100
二	有界闭域上连续函数的性质	102
第十七章	多元函数微分学	107
§ 1	可微性	107
一	可微性与全微分	107
二	偏导数	108
三	可微性条件	110
四	可微性几何意义及应用	112
§ 2	复合函数微分法	118
一	复合函数的求导法则	118
二	复合函数的全微分	122
§ 3	方向导数与梯度	124
§ 4	泰勒公式与极值问题	127
一	高阶偏导数	127
二	中值定理和泰勒公式	133
三	极值问题	136
第十八章	隐函数定理及其应用	144
§ 1	隐函数	144
一	隐函数概念	144
二	隐函数存在性条件的分析	145
三	隐函数定理	146
四	隐函数求导举例	149

§ 2 隐函数组	152
一 隐函数组概念	152
二 隐函数组定理	152
三 反函数组与坐标变换	154
§ 3 几何应用	159
一 平面曲线的切线与法线	159
二 空间曲线的切线与法平面	159
三 曲面的切平面与法线	162
§ 4 条件极值	164
第十九章 含参量积分	172
§ 1 含参量正常积分	172
§ 2 含参量反常积分	179
一 一致收敛性及其判别法	179
二 含参量反常积分的性质	184
§ 3 欧拉积分	190
一 函数	190
二 函数	192
三 函数与 函数之间的关系	194
第二十章 曲线积分	197
§ 1 第一型曲线积分	197
一 第一型曲线积分的定义	197
二 第一型曲线积分的计算	198
§ 2 第二型曲线积分	202
一 第二型曲线积分的定义	202
二 第二型曲线积分的计算	204
* 三 两类曲线积分的联系	208
第二十一章 重积分	211
§ 1 二重积分概念	211
一 平面图形的面积	211
二 二重积分的定义及其存在性	213
三 二重积分的性质	216
§ 2 直角坐标系下二重积分的计算	218
§ 3 格林公式·曲线积分与路线的无关性	224
一 格林公式	224
二 曲线积分与路线的无关性	227
§ 4 二重积分的变量变换	233
一 二重积分的变量变换公式	233

二	用极坐标计算二重积分	237
§ 5	三重积分	243
一	三重积分的概念	243
二	化三重积分为累次积分	244
三	三重积分换元法	247
§ 6	重积分的应用	252
一	曲面的面积	252
二	重心	255
三	转动惯量	256
四	引力	258
* § 7	n 重积分	260
* § 8	反常二重积分	266
一	无界区域上的二重积分	266
二	无界函数的二重积分	271
* § 9	在一般条件下重积分变量变换公式的证明	272
第二十二章	曲面积分	280
§ 1	第一型曲面积分	280
一	第一型曲面积分的概念	280
二	第一型曲面积分的计算	280
§ 2	第二型曲面积分	283
一	曲面的侧	283
二	第二型曲面积分概念	284
三	第二型曲面积分的计算	286
* 四	两类曲面积分的联系	288
§ 3	高斯公式与斯托克斯公式	290
一	高斯公式	290
二	斯托克斯公式	292
* § 4	场论初步	297
一	场的概念	297
二	梯度场	298
三	散度场	299
四	旋度场	301
五	管量场与有势场	303
* 第二十三章	流形上微积分学初阶	307
§ 1	n 维欧氏空间与向量函数	307
一	n 维欧氏空间	307
二	向量函数	309

三 向量函数的极限与连续	310
§ 2 向量函数的微分	313
一 可微性与可微条件	313
二 可微函数的性质	317
三 黑赛矩阵与极值	320
§ 3 反函数定理和隐函数定理	323
一 反函数定理	323
二 隐函数定理	326
三 拉格朗日乘数法	329
§ 4 外积、微分形式与一般斯托克斯公式	331
一 从定积分和二重积分变换公式谈起	331
二 向量的外积及它与相应行列式的关系	332
三 外积与微分形式	332
四 微分形式的外微分	334
五 雅可比行列式符号的几何意义(二维情况)	334
六 用外积来理解多重积分的变量变换公式	335
七 行列式符号的几何解释	336
八 一般的斯托克斯公式	338
习题答案	342
索 引	361
人名索引	365

第十二章 数项级数

§ 1 级数的收敛性

读者已经在初等数学中知道:有限个实数 u_1, u_2, \dots, u_n 相加,其结果是一个实数.本章将讨论“无限个实数相加”所可能出现的情形及其特征.例如,在第二章提到《庄子·天下篇》“一尺之棰,日取其半,万世不竭”的例中,把每天截下那一部分的长度“加”起来:

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{2^3} + \dots + \frac{1}{2^n} + \dots,$$

这就是“无限个数相加”的一个例子.从直观上可以看到,它的和是 1.再如下面由“无限个数相加”的表达式

$$1 + (-1) + 1 + (-1) + \dots$$

中,如果将它写作

$$(1 - 1) + (1 - 1) + (1 - 1) + \dots = 0 + 0 + 0 + \dots,$$

其结果无疑是 0,如写作

$$1 + [(-1) + 1] + [(-1) + 1] + \dots = 1 + 0 + 0 + 0 + \dots,$$

其结果则是 1,因此两个结果完全不同.由此提出这样的问题:“无限个数相加”是否存在“和”;如果存在,“和”等于什么?可见,“无限个数相加”不能简单地引用有限个数相加的概念,而需建立它本身严格的理论.

定义 1 给定一个数列 $\{u_n\}$,对它的各项依次用“+”号连接起来的表达式

$$u_1 + u_2 + \dots + u_n + \dots \quad (1)$$

称为数项级数或无穷级数(也常简称级数),其中 u_n 称为数项级数(1)的通项.

数项级数(1)也常写作: $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 或简单写作 $\sum u_n$.

数项级数(1)的前 n 项之和,记为

$$S_n = \sum_{k=1}^n u_k = u_1 + u_2 + \dots + u_n, \quad (2)$$

称它为数项级数(1)的第 n 个部分和,也简称部分和.

定义 2 若数项级数(1)的部分和数列 $\{S_n\}$ 收敛于 S (即 $\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = S$),则称

数项级数(1)收敛,称 S 为数项级数(1)的和,记作

$$S = u_1 + u_2 + \dots + u_n + \dots \text{ 或 } S = \sum_{n=1}^{\infty} u_n.$$

若 $\{S_n\}$ 是发散数列,则称数项级数(1)发散.

例 1 讨论等比级数(也称为几何级数)

$$a + aq + aq^2 + \dots + aq^n + \dots \quad (3)$$

的收敛性($a \neq 0$).

解 $q \neq 1$ 时,级数(3)的第 n 个部分和

$$S_n = a + aq + \dots + aq^{n-1} = a \cdot \frac{1 - q^n}{1 - q}.$$

因此,

(i) 当 $|q| < 1$ 时, $\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = \lim_{n \rightarrow \infty} a \cdot \frac{1 - q^n}{1 - q} = \frac{a}{1 - q}$. 此时级数(3)收敛,其和为

$$\frac{a}{1 - q}.$$

(ii) 当 $|q| > 1$ 时, $\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = \infty$, 级数(3)发散.

(iii) 当 $q = 1$ 时, $S_n = na$, 级数发散.

当 $q = -1$ 时, $S_{2k} = 0$, $S_{2k+1} = a$, $k = 0, 1, 2, \dots$, 级数发散.

总之, $|q| < 1$ 时,级数(3)收敛; $|q| \geq 1$ 时,级数(3)发散.

例 2 讨论数项级数

$$\frac{1}{1 \cdot 2} + \frac{1}{2 \cdot 3} + \dots + \frac{1}{n(n+1)} + \dots \quad (4)$$

的收敛性.

解 级数(4)的第 n 个部分和

$$\begin{aligned} S_n &= \frac{1}{1 \cdot 2} + \frac{1}{2 \cdot 3} + \dots + \frac{1}{n(n+1)} \\ &= 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \\ &= 1 - \frac{1}{n+1}. \end{aligned}$$

由于

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = \lim_{n \rightarrow \infty} 1 - \frac{1}{n+1} = 1,$$

因此级数(4)收敛,且

$$\frac{1}{1 \cdot 2} + \frac{1}{2 \cdot 3} + \dots + \frac{1}{n(n+1)} + \dots = 1.$$

由于级数(1)的收敛或发散(简称敛散性),是由它的部分和数列 $\{S_n\}$ 来确

定,因而也可把级数(1)作为数列 $\{S_n\}$ 的另一种表现形式.反之,任给一个数列 $\{a_n\}$,如果把它看作某一数项级数的部分和数列,则这个数项级数就是

$$u_n = a_1 + (a_2 - a_1) + (a_3 - a_2) + \dots + (a_n - a_{n-1}) + \dots \quad (5)$$

这时数列 $\{a_n\}$ 与级数(5)具有相同的敛散性,且当 $\{a_n\}$ 收敛时,其极限值就是级数(5)的和.

基于级数与数列的这种关系,读者不难根据数列极限的性质推出下面有关级数的一些定理.

定理 12.1 (级数收敛的柯西准则) 级数(1)收敛的充要条件是:任给正数 ϵ ,总存在正整数 N ,使得当 $m > N$ 以及对任意的正整数 p ,都有

$$|u_{m+1} + u_{m+2} + \dots + u_{m+p}| < \epsilon. \quad (6)$$

根据定理 12.1,我们立刻可写出级数(1)发散的充要条件:存在某正数 ϵ_0 ,对任何正整数 N ,总存在正整数 $m_0 (> N)$ 和 p_0 ,有

$$|u_{m_0+1} + u_{m_0+2} + \dots + u_{m_0+p_0}| \geq \epsilon_0. \quad (7)$$

由定理 12.1 立即可得如下推论,它是级数收敛的一个必要条件.

推论 若级数(1)收敛,则

$$\lim_n u_n = 0.$$

例 3 讨论调和级数

$$1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} + \dots$$

的敛散性.

解 这里调和级数显然满足推论的结论,即

$$\lim_n u_n = \lim_n \frac{1}{n} = 0.$$

但令 $p = m$ 时,有

$$\begin{aligned} |u_{m+1} + u_{m+2} + \dots + u_{2m}| &= \left| \frac{1}{m+1} + \frac{1}{m+2} + \dots + \frac{1}{2m} \right| \\ &= \left| \frac{1}{2m} + \frac{1}{2m} + \dots + \frac{1}{2m} \right| \\ &= \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

因此,取 $\epsilon_0 = \frac{1}{2}$,对任何正整数 N ,只要 $m > N$ 和 $p = m$ 就有(7)式成立.所以调和级数是发散的.

例 4 应用级数收敛的柯西准则证明级数 $\frac{1}{n^2}$ 收敛.

证 由于

$$\begin{aligned}
 & |u_{m+1} + u_{m+2} + \dots + u_{m+p}| \\
 &= \frac{1}{(m+1)^2} + \frac{1}{(m+2)^2} + \dots + \frac{1}{(m+p)^2} \\
 &< \frac{1}{m(m+1)} + \frac{1}{(m+1)(m+2)} + \dots + \frac{1}{(m+p-1)(m+p)} \\
 &= \frac{1}{m} - \frac{1}{m+p} \\
 &< \frac{1}{m},
 \end{aligned}$$

因此,对任给正数 ϵ , 取 $N = \frac{1}{\epsilon}$, 使当 $m > N$ 及对任意正整数 p , 由上式就有

$$|u_{m+1} + u_{m+2} + \dots + u_{m+p}| < \frac{1}{m} < \epsilon.$$

依定理 12.1 推得级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2}$ 是收敛的.

定理 12.2 若级数 $\sum u_n$ 与 $\sum v_n$ 都收敛, 则对任意常数 c, d , 级数 $\sum (cu_n + dv_n)$ 亦收敛, 且

$$(cu_n + dv_n) = c u_n + d v_n.$$

由定理 12.1, 级数 $\sum u_n$ 的敛散性取决于: 对任给正数 ϵ , 是否存在充分大的正数 N , 使得当 $n > N$ 及对任意正整数 p 恒有 (6) 式成立. 由此可见, 一个级数是否收敛与级数前面有限项的取值无关. 从而我们可得到以下定理.

定理 12.3 去掉、增加或改变级数的有限个项并不改变级数的敛散性.

由此定理知道, 若级数 $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ 收敛, 其和为 S , 则级数

$$u_{n+1} + u_{n+2} + \dots \quad (8)$$

也收敛, 且其和 $R_n = S - S_n$. (8) 式称为级数 $\sum u_n$ 的第 n 个余项 (或简称余项), 它表示以部分和 S_n 代替 S 时所产生的误差.

定理 12.4 在收敛级数的项中任意加括号, 既不改变级数的收敛性, 也不改变它的和.

证 设 $\sum u_n$ 为收敛级数, 其和为 S . 记

$$v_1 = u_1 + \dots + u_{n_1}, v_2 = u_{n_1+1} + \dots + u_{n_2}, \dots,$$

$$v_k = u_{n_{k-1}+1} + \dots + u_{n_k}, \dots$$

现在证明 $\sum u_n$ 加括号后的级数 $\sum_{k=1}^{\infty} (u_{n_{k-1}+1} + \dots + u_{n_k}) = \sum_{k=1}^{\infty} v_k$ 也收敛, 且其和也是 S . 事实上, 设 $\{S_n\}$ 为收敛级数 $\sum u_n$ 的部分和数列, 则级数 $\sum v_k$ 的部分和

数列 $\{S_{n_k}\}$ 是 $\{S_n\}$ 的一个子列. 由于 $\{S_n\}$ 收敛, 且 $\lim_n S_n = S$. 故由子列性质, $\{S_{n_k}\}$ 也收敛, 且 $\lim_k S_{n_k} = S$, 即级数 $\sum v_k$ 收敛, 且它的和也等于 S .

注意: 从级数加括号后的收敛, 不能推断它在未加括号前也收敛. 例如

$$(1 - 1) + (1 - 1) + \dots + (1 - 1) + \dots = 0 + 0 + 0 + \dots = 0$$

收敛, 但级数

$$1 - 1 + 1 - 1 + \dots$$

却是发散的.

习 题

1. 证明下列级数的收敛性, 并求其和数:

$$(1) \frac{1}{1 \cdot 6} + \frac{1}{6 \cdot 11} + \frac{1}{11 \cdot 16} + \dots + \frac{1}{(5n-4)(5n+1)} + \dots;$$

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

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

$$(4) \sum_{n=1}^{\infty} (n+2 - 2^{n+1} + n);$$

$$(5) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n-1}{2^n}.$$

2. 证明: 若级数 $\sum u_n$ 发散, $c \neq 0$, 则 $\sum cu_n$ 也发散.

3. 设级数 $\sum u_n$ 与 $\sum v_n$ 都发散, 试问 $\sum (u_n + v_n)$ 一定发散吗? 又若 u_n 与 v_n ($n=1, 2, \dots$) 都是非负数, 则能得出什么结论?

4. 证明: 若数列 $\{a_n\}$ 收敛于 a , 则级数 $\sum_{n=1}^{\infty} (a_n - a_{n+1}) = a_1 - a$.

5. 证明: 若数列 $\{b_n\}$ 有 $\lim_n b_n = l$, 则

(1) 级数 $\sum (b_{n+1} - b_n)$ 发散;

(2) 当 $b_n \neq 0$ 时, 级数 $\sum \left(\frac{1}{b_n} - \frac{1}{b_{n+1}} \right) = \frac{1}{b_1}$.

6. 应用第 4, 5 题的结果求下列级数的和:

$$(1) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(a+n-1)(a+n)};$$

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

$$(3) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{(n^2+1)[(n+1)^2+1]}.$$

7. 应用柯西准则判别下列级数的敛散性:

$$(1) \sum \frac{\sin 2^n}{2^n}; \quad (2) \sum \frac{(-1)^{n-1} n^2}{2n^2+1};$$

$$(3) \sum \frac{(-1)^n}{n}; \quad (4) \sum \frac{1}{n+n^2}.$$

8. 证明级数 u_n 收敛的充要条件是:任给正数 ϵ , 存在某正整数 N , 对一切 $n > N$ 总有

$$|u_N + u_{N+1} + \dots + u_n| < \epsilon.$$

9. 举例说明:若级数 u_n 对每个固定的 p 满足条件

$$\lim_n (u_{n+1} + \dots + u_{n+p}) = 0,$$

此级数仍可能不收敛.

10. 设级数 u_n 满足:加括号后级数 $\sum_{k=1}^{\infty} (u_{n_k+1} + \dots + u_{n_{k+1}})$ 收敛 ($n_1 = 0$), 且在同一括号中的 $u_{n_k+1}, u_{n_k+2}, \dots, u_{n_{k+1}}$ 符号相同, 证明 u_n 亦收敛.

§2 正项级数

一 正项级数收敛性的一般判别原则

若数项级数各项的符号都相同, 则称它为同号级数. 对于同号级数, 只须研究各项都是由正数组成的级数——称为正项级数. 如果级数的各项都是负数, 则它乘以 -1 后就得到一个正项级数, 它们具有相同的敛散性.

定理 12.5 正项级数 u_n 收敛的充要条件是:部分和数列 $\{S_n\}$ 有界, 即存在某正数 M , 对一切正整数 n 有 $S_n < M$.

证 由于 $u_i > 0 (i = 1, 2, \dots)$, 所以 $\{S_n\}$ 是递增数列. 而单调数列收敛的充要条件是该数列有界(单调有界定理(定理 2.9)). 这就证得本定理的结论.

定理 12.6(比较原则) 设 u_n 和 v_n 是两个正项级数, 如果存在某正数 N , 对一切 $n > N$ 都有

$$u_n \leq v_n, \quad (1)$$

则

(i) 若级数 v_n 收敛, 则级数 u_n 也收敛;

(ii) 若级数 u_n 发散, 则级数 v_n 也发散.

证 因为改变级数的有限项并不影响原有级数的敛散性, 因此不妨设不等式(1)对一切正整数都成立.

现分别以 S_n 和 S_n 记级数 u_n 与 v_n 的部分和. 由(1)式推得, 对一切正整数 n , 都有

$$S_n \leq S_n \quad (2)$$

若 v_n 收敛, 即 $\lim_n S_n$ 存在, 则由(2)式对一切 n 有 $S_n \leq \lim_n S_n$, 即正项级数

u_n 的部分和数列 $\{S_n\}$ 有界, 由定理 12.5 级数 u_n 收敛. 这就证明了(i); (ii) 为(i)的逆否命题, 自然成立.

例 1 考察 $\frac{1}{n^2 - n + 1}$ 的收敛性.

解 由于当 $n \geq 2$ 时, 有

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

因为正项级数 $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{(n-1)^2}$ 收敛 (§1 例 4), 故由定理 12.6 和 12.3, 级数

$\sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^2 - n + 1}$ 也收敛.

在实际使用上, 比较原则的下述极限形式通常更为方便.

推论 设

$$u_1 + u_2 + \dots + u_n + \dots, \quad (3)$$

$$v_1 + v_2 + \dots + v_n + \dots \quad (4)$$

是两个正项级数, 若

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_n}{v_n} = l, \quad (5)$$

则

(i) 当 $0 < l < +\infty$ 时, 级数(3)、(4)同时收敛或同时发散;

(ii) 当 $l = 0$ 且级数(4)收敛时, 级数(3)也收敛;

(iii) 当 $l = +\infty$ 且级数(4)发散时, 级数(3)也发散.

证 由(5), 对任给正数 ϵ , 存在某正数 N , 当 $n > N$ 时, 恒有

$$\left| \frac{u_n}{v_n} - l \right| < \epsilon$$

或

$$(l - \epsilon)v_n < u_n < (l + \epsilon)v_n. \quad (6)$$

由定理 12.6 及(6)式推得, 当 $0 < l < +\infty$ (这里设 $\epsilon < l$) 时, 级数(3)与(4)同时收敛或同时发散. 这就证得(i).

对于(ii), 当 $l = 0$ 时, 由(6)式右半部分及比较原则可得: 若级数(4)收敛, 则级数(3)也收敛.

对于(iii), 若 $l = +\infty$, 即对任给的正数 M , 存在相应的正数 N , 当 $n > N$ 时, 都有

$$\frac{u_n}{v_n} > M$$

或

$$u_n > Mv_n.$$

于是由比较原则知道,若级数(4)发散,则级数(3)也发散.

例 2 级数

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

是收敛的,因为

$$\lim_n \frac{\frac{1}{2^n - n}}{\frac{1}{2^n}} = \lim_n \frac{2^n}{2^n - n} = \lim_n \frac{1}{1 - \frac{n}{2^n}} = 1$$

以及等比级数 $\frac{1}{2^n}$ 收敛,所以根据推论,级数 $\frac{1}{2^n - n}$ 也收敛.

例 3 级数

$$\sin \frac{1}{n} = \sin 1 + \sin \frac{1}{2} + \dots + \sin \frac{1}{n} + \dots$$

是发散的.因为

$$\lim_n \frac{\sin \frac{1}{n}}{\frac{1}{n}} = 1,$$

根据推论以及调和级数 $\frac{1}{n}$ 发散,所以级数 $\sin \frac{1}{n}$ 也发散.

二 比式判别法和根式判别法

根据比较原则,可以利用已知收敛或者发散级数作为比较对象来判别其他级数的敛散性.本段所介绍的两个方法是以等比级数作为比较对象而得到的.

定理 12.7(达朗贝尔判别法,或称比式判别法) 设 u_n 为正项级数,且存在某正整数 N_0 及常数 $q(0 < q < 1)$.

(i) 若对一切 $n > N_0$,成立不等式

$$\frac{u_{n+1}}{u_n} < q, \quad (7)$$

则级数 u_n 收敛.

(ii) 若对一切 $n > N_0$,成立不等式

$$\frac{u_{n+1}}{u_n} > 1, \quad (8)$$

则级数 u_n 发散.

证 (i) 不妨设不等式(7)对一切 $n \geq 1$ 成立,于是有

$$\frac{u_2}{u_1} < q, \frac{u_3}{u_2} < q, \dots, \frac{u_n}{u_{n-1}} < q, \dots$$

把前 $n - 1$ 个不等式按项相乘后,得到

$$\frac{u_2}{u_1} \cdot \frac{u_3}{u_2} \cdot \dots \cdot \frac{u_n}{u_{n-1}} = q^{n-1}$$

或者

$$u_n = u_1 q^{n-1}.$$

由于当 $0 < q < 1$ 时, 等比级数 $\sum_{n=1}^{\infty} q^{n-1}$ 收敛, 根据比较原则及上述不等式可推得级数 $\sum u_n$ 收敛.

(ii) 由于 $n > N_0$ 时成立不等式(8), 即有

$$u_{n+1} > u_n > u_{N_0}.$$

于是当 $n \rightarrow \infty$ 时, u_n 的极限不可能为零. 由定理 12.1 推论知级数 $\sum u_n$ 是发散的.

推论 1(比式判别法的极限形式) 若 $\sum u_n$ 为正项级数, 且

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_{n+1}}{u_n} = q, \quad (9)$$

则

(i) 当 $q < 1$ 时, 级数 $\sum u_n$ 收敛;

(ii) 当 $q > 1$ 或 $q = +\infty$ 时, 级数 $\sum u_n$ 发散.

证 由(9)式, 对任意取定的正数 $\epsilon (< |1 - q|)$, 存在正数 N , 当 $n > N$ 时, 都有

$$q - \epsilon < \frac{u_{n+1}}{u_n} < q + \epsilon.$$

当 $q < 1$ 时, 取 ϵ 使 $q + \epsilon < 1$, 由上述不等式的右半部分及定理 12.7 的(i), 推得级数 $\sum u_n$ 是收敛的.

若 $q > 1$, 则取 ϵ 使 $q - \epsilon > 1$, 由上述不等式的左半部分及定理 12.7 的(ii), 推得级数 $\sum u_n$ 是发散的.

若 $q = +\infty$, 则存在 N , 当 $n > N$ 时有

$$\frac{u_{n+1}}{u_n} > 1,$$

所以这时级数 $\sum u_n$ 是发散的.

例 4 级数

$$\frac{2}{1} + \frac{2 \cdot 5}{1 \cdot 5} + \frac{2 \cdot 5 \cdot 8}{1 \cdot 5 \cdot 9} + \dots + \frac{2 \cdot 5 \cdot 8 \dots [2 + 3(n-1)]}{1 \cdot 5 \cdot 9 \dots [1 + 4(n-1)]} + \dots,$$

由于

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_{n+1}}{u_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2 + 3n}{1 + 4n} = \frac{3}{4} < 1,$$

根据推论 1 级数是收敛的.

例 5 讨论级数 $\sum nx^{n-1}$ ($x > 0$) 的敛散性.

解 因为

$$\frac{u_{n+1}}{u_n} = \frac{(n+1)x^n}{nx^{n-1}} = x \cdot \frac{n+1}{n} \quad (n \geq 1),$$

根据推论 1, 当 $0 < x < 1$ 时级数收敛; 当 $x > 1$ 时级数发散; 而当 $x = 1$ 时, 所考察的级数是 $\sum n$, 它显然也是发散的.

若(9)中 $q = 1$, 这时用比式判别法不能对级数的敛散性作出判断, 因为它可能是收敛的, 也可能是发散的. 例如级数 $\sum \frac{1}{n^2}$ 和 $\sum \frac{1}{n}$, 它们的比式极限都是

$$\frac{u_{n+1}}{u_n} = 1 \quad (n \geq 1),$$

但 $\sum \frac{1}{n^2}$ 是收敛的 (§ 1 例 4), 而 $\sum \frac{1}{n}$ 却是发散的 (§ 1 例 3).

若某级数的(9)式的极限不存在, 则可应用上、下极限来判别.

推论 2 设 $\sum u_n$ 为正项级数.

(i) 若 $\overline{\lim}_n \frac{u_{n+1}}{u_n} = q < 1$, 则级数收敛;

(ii) 若 $\underline{\lim}_n \frac{u_{n+1}}{u_n} = q > 1$, 则级数发散.

对本推论读者可仿照推论 1 的方法证明.

例 6 研究级数

$$1 + b + bc + b^2c + b^2c^2 + \dots + b^n c^{n-1} + b^n c^n + \dots \quad (10)$$

的敛散性, 其中 $0 < b < c$.

解 由于

$$\frac{u_{n+1}}{u_n} = \begin{cases} b, & n \text{ 为奇数,} \\ c, & n \text{ 为偶数,} \end{cases}$$

故有

$$\overline{\lim}_n \frac{u_{n+1}}{u_n} = c, \quad \underline{\lim}_n \frac{u_{n+1}}{u_n} = b,$$

于是, 当 $c < 1$ 时, 级数(10)收敛; 当 $b > 1$ 时, 级数(10)发散; 但当 $b < 1 < c$ 时, 比式判别法无法判断级数(10)的敛散性.

定理 12.8 (柯西判别法, 或称根式判别法) 设 $\sum u_n$ 为正项级数, 且存在某正数 N_0 及正常数 l ,

(i) 若对一切 $n > N_0$, 成立不等式

$$\sqrt[n]{u_n} \leq l < 1, \quad (11)$$

则级数 $\sum u_n$ 收敛;