

# Mathematics 数学分析教程 上册

许绍溥 姜东平 编 著



南京大学出版社

# Mathematics

# 数学分析教程

## 上册

许绍溥 姜东平 编 著



南京大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

数学分析教程. 上册 / 许绍溥, 姜东平编著. -- 2  
版. -- 南京: 南京大学出版社, 2013. 11  
ISBN 978 - 7 - 305 - 12226 - 2

I. ①数… II. ①许… ②姜… III. ①数学分析-高  
等学校-教材 IV. ①O17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 226882 号

出版发行 南京大学出版社  
社 址 南京市汉口路 22 号 邮 编 210093  
网 址 <http://www.NjupCo.com>  
出 版 人 左 健

书 名 数学分析教程(上册)  
编 著 许绍溥 姜东平  
责任编辑 马冀冀 吴 华 编辑热线 025 - 83596997

照 排 江苏南大印刷厂  
印 刷 丹阳市兴华印刷厂  
开 本 880×1230 1/32 印张 21 字数 527 千  
版 次 2013 年 11 月第 2 版 2013 年 11 月第 1 次印刷  
印 数 1~2 000  
ISBN 978 - 7 - 305 - 12226 - 2  
定 价 42.00 元

发行热线 025 - 83594756 83686452  
电子邮箱 [Press@NjupCo.com](mailto:Press@NjupCo.com)  
[Sales@NjupCo.com](mailto:Sales@NjupCo.com)(市场部)

---

\* 版权所有, 侵权必究

\* 凡购买南大版图书, 如有印装质量问题, 请与所购  
图书销售部门联系调换

## 内容提要

《数学分析教程》第一版在南京大学数学系连续使用了近二十年. 本书第二版我们对全书作了详细修订. 全书概念准确, 论证严谨, 文字浅显易懂, 便于自学. 丰富多彩的例题与多层次的习题大大加强了传统的分析技巧的训练, 同时又注意适当引进近代分析的概念. 本书可作为综合性大学、师范院校数学系各专业的教材, 也可作为其他对数学要求较高的专业的教材或教学参考书, 还可作为高等学校数学教师以及其他数学工作者参考用书以及研究生入学考试的复习用书.

全书分上下两册出版. 上册共 9 章, 包括极限理论、一元函数微积分、多元函数及其微分学. 下册共 10 章, 包括级数理论、傅里叶级数、反常积分与含参变量积分、线积分、面积分与重积分、不变函数与 RS 积分、场论等.

## 编者的话

《数学分析教程》第一版在南京大学数学系连续使用了近二十年. 本书第二版我们对全书作了详细修订. 考虑到本教材是为数学系各专业编写的基础课教材, 在修订过程中, 编者力求做到:

使读者获得广博而坚实的分析基础. 为此, 不但对数列的极限、实数系的基本定理、函数的一致连续性、欧几里得空间的基本性质、向量值函数、函数项级数和含参变量积分、一致收敛性等部分作了适当的加强, 而且还增加了连续性的拓扑学定义、上下连续和霍尔德连续以及凸函数的性质. 此外, 在第 18 章增加了围变函数和 RS 积分的内容, 这不但使得傅里叶级数的某些定理叙述得更为完美, 证明更为简单, 而且还为实变函数论中的 LS 积分打下了基础. 在第 6 章增加了一节“简单的微分方程”, 这既可以增加不定积分的训练, 又可以使后续的常微分方程课得以删去过于简单的内容.

对各种概念的叙述准确严谨, 全书的论证严密, 具有科学性、逻辑性. 例如, 在极限理论中一开始就给出了极限的严格定义, 并由此展开数学分析的全部内容. 极限及连续性的理论都一次完成, 而不采用一度流行过的先方法后理论的两步走方案. 在阐述定积分概念时, 特别强调指出定积分这一极限过程与函数的极限、数列的极限以及级数求和的不同, 并指出在可积性确认以后又可把积分和的极限看成数列的极限. 在论证由方程组所定义的隐函数时, 增加了关于唯一性的几行文字, 避免了不少教材普遍存在的一个疏漏.

加强传统的分析技巧的训练. 为此, 选择了大量具有启发性、典型性的例题, 并注意一题多解, 前后呼应. 其次, 精心选择了一整套

习题, 安排在每节后面的是理解概念掌握基本方法所必备的, 其中虽也有些较为困难, 但为数不多. 每章后面的总习题, 大部分都有一定的难度, 需要适当的技巧. 它要求读者融会贯通所学到的数学分析知识, 有时还涉及平行学科的有关内容, 这些题目在类型上既有广泛性又有代表性, 对于立志报考硕士生的读者是有所裨益的.

有广泛的适应性, 易教易学. 在证明比较困难的定理时, 往往先进行适当的分析, 以诱导读者的思路. 对于较难的例题, 在给出解法的同时, 指出思想方法, 讲清来龙去脉. 对于容易模糊的概念, 反复强调, 不厌其烦. 全部习题, 书末都附有答案, 难题还给出提示.

所有这一切, 都是编者所着意追求的, 但由于水平所限, 力不从心之处在所难免, 热切希望得到同行以及广大读者的批评指正.

还需着重指出的是, 本书对于实数理论的处理, 采用的是逻辑学的方法, 这与当前全国流行的种种教材完全不同. 编者认为, 这对于读者在后继课中理解函数空间的扩张是有好处的.

考虑到当今中学的教材内容, 本书不再专门叙述函数概念以及集合的基础知识, 这无论对于使用本书的学生、教师, 还是用本书来自学的读者都不会产生不便.

全书共 19 章, 240 学时可以讲完, 对部分要求较低的读者以及学时不够充裕的教师, 实数理论、上下连续、霍尔德连续、RS 积分以及微分形式及其积分等内容可部分删去, 这不会给整个教学过程带来困难.

本书是编者长期从事数学分析教学工作的结晶. 第 1~5 章、第 6~9 章分别由许绍溥、姜东平执笔, 第 10~16 章以及第 17 章 17.1~17.4 由宋国柱执笔, 第 18~19 章以及第 17 章 17.5 由任福贤执笔.

本书第二版的出版与发行得到了南京大学出版社的大力支持, 编者谨此一并表示衷心的感谢.

## 内容提要

《数学分析教程》第一版在南京大学数学系连续使用了近二十年. 本书第二版我们对全书作了详细修订. 全书概念准确, 论证严谨, 文字浅显易懂, 便于自学. 丰富多彩的例题与多层次的习题大大加强了传统的分析技巧的训练, 同时又注意适当引进近代分析的概念. 本书可作为综合性大学、师范院校数学系各专业的教材, 也可作为其他对数学要求较高的专业的教材或教学参考书, 还可作为高等学校数学教师以及其他数学工作者参考用书以及研究生入学考试的复习用书.

全书分上下两册出版. 上册共 9 章, 包括极限理论、一元函数微积分、多元函数及其微分学. 下册共 10 章, 包括级数理论、傅里叶级数、反常积分与含参变量积分、线积分、面积分与重积分、围变函数与 RS 积分、场论等.

# 目 录

## 第 1 章 极 限 理 论

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 1.1 数列的极限 .....                        | 1   |
| 1.1.1 数列极限的定义 .....                    | 1   |
| 1.1.2 无穷小量·无穷大量 .....                  | 8   |
| 1.1.3 收敛数列的性质及运算 .....                 | 15  |
| 1.1.4 夹逼法则 .....                       | 25  |
| 1.1.5 施笃兹定理 .....                      | 28  |
| 1.1.6 上确界·下确界·单调数列的极限 .....            | 31  |
| 1.1.7 数 $e$ .....                      | 38  |
| 习题 .....                               | 42  |
| 1.2 函数的极限 .....                        | 48  |
| 1.2.1 函数极限的定义 .....                    | 48  |
| 1.2.2 函数极限的性质 .....                    | 61  |
| 1.2.3 无穷大(小)的比较· $o, O, O^*$ 的运算 ..... | 70  |
| 1.2.4 单侧极限·单调有界法则 .....                | 78  |
| 1.2.5 常用极限·求极限时常用的等式、不等式 .....         | 81  |
| 习题 .....                               | 82  |
| 1.3 实数系的基本定理 .....                     | 86  |
| 1.3.1 区间套定理 .....                      | 86  |
| 1.3.2 聚点存在定理·子数列收敛定理 .....             | 91  |
| 1.3.3 上极限·下极限 .....                    | 94  |
| 1.3.4 收敛准则 .....                       | 107 |



|                    |     |
|--------------------|-----|
| 1.3.5 有限覆盖定理 ..... | 111 |
| 习题 .....           | 114 |
| 第1章总习题 .....       | 117 |

## 第2章 一元连续函数

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 2.1 连续·间断 .....             | 119 |
| 2.1.1 连续函数的概念 .....         | 119 |
| 2.1.2 初等函数的连续性 .....        | 123 |
| 2.1.3 单方连续·间断 .....         | 127 |
| 2.1.4 利用连续性求极限 .....        | 131 |
| 习题 .....                    | 136 |
| 2.2 连续函数的性质 .....           | 140 |
| 2.2.1 有界性定理·最大值、最小值定理 ..... | 140 |
| 2.2.2 零点定理·介值定理 .....       | 142 |
| 2.2.3 一致连续 .....            | 144 |
| 2.2.4 一致连续函数之例 .....        | 149 |
| 习题 .....                    | 152 |
| 第2章总习题 .....                | 154 |

## 第3章 导数·微分

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 3.1 一阶导数·一阶微分 .....           | 156 |
| 3.1.1 导数的概念 .....             | 156 |
| 3.1.2 导数的运算 .....             | 161 |
| 3.1.3 求导数之例 .....             | 172 |
| 3.1.4 单方导数·间断的导函数 .....       | 176 |
| 3.1.5 微分的概念 .....             | 182 |
| * 3.1.6 上半连续·下半连续·霍尔德连续 ..... | 186 |
| 习题 .....                      | 190 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 3.2 高阶导数·高阶微分 .....               | 195 |
| 3.2.1 高阶导数 .....                  | 195 |
| 3.2.2 高阶微分 .....                  | 201 |
| 3.2.3 参变量方程所定义的函数·隐函数的导数及微分 ..... | 203 |
| 习题 .....                          | 206 |
| 第3章总习题 .....                      | 207 |

|       |                     |     |
|-------|---------------------|-----|
| 4.1   | 微分学基本定理 .....       | 209 |
| 4.1.1 | 费马定理·罗尔定理 .....     | 209 |
| 4.1.2 | 中值定理 .....          | 213 |
| 4.1.3 | 不定式的定值 .....        | 217 |
|       | 习题 .....            | 225 |
| 4.2   | 泰勒公式 .....          | 228 |
| 4.2.1 | 泰勒公式及其余项 .....      | 228 |
| 4.2.2 | 初等函数的泰勒公式 .....     | 236 |
|       | 习题 .....            | 241 |
| 4.3   | 函数的局部性质·整体性质 .....  | 242 |
| 4.3.1 | 函数上升、下降的判别法 .....   | 242 |
| 4.3.2 | 函数的极值、最大值、最小值 ..... | 246 |
| 4.3.3 | 凸函数·函数的拐点 .....     | 251 |
| 4.3.4 | 函数的图形 .....         | 258 |
|       | 习题 .....            | 267 |
| 第4章   | 总习题 .....           | 269 |

## 5.1 实数的公理系统 ..... 271

|       |                                |     |
|-------|--------------------------------|-----|
| 5.1.1 | 数的发展过程 .....                   | 271 |
| 5.1.2 | 实数的公理系统 .....                  | 272 |
|       | 习题 .....                       | 277 |
| 5.2   | 康托尔的实数模型 .....                 | 278 |
| 5.2.1 | 实数的定义 .....                    | 278 |
| 5.2.2 | $\mathbf{R}_c$ 上的四则运算 .....    | 283 |
| 5.2.3 | $\mathbf{R}_c$ 上的次序 .....      | 290 |
| 5.2.4 | $\mathbf{R}_c$ 上的绝对值与不等式 ..... | 294 |
| 5.2.5 | $\mathbf{R}_c$ 上的极限 .....      | 296 |
|       | 习题 .....                       | 304 |
| 5.3   | 实数的其他模型 .....                  | 305 |
| 5.3.1 | $p$ 进制法简介 .....                | 305 |
| 5.3.2 | 狄德金分划法简介 .....                 | 306 |
| 5.3.3 | 连分数法简介 .....                   | 308 |
| 5.3.4 | 实数系是最大的阿基米德有序域 .....           | 309 |
|       | 习题 .....                       | 310 |
|       | 第5章总习题 .....                   | 311 |

## 第6章 不定积分

|       |                   |     |
|-------|-------------------|-----|
| 6.1   | 不定积分·原函数 .....    | 312 |
|       | 习题 .....          | 317 |
| 6.2   | 换元积分法·分部积分法 ..... | 318 |
| 6.2.1 | 换元积分法 .....       | 318 |
| 6.2.2 | 分部积分法 .....       | 323 |
|       | 习题 .....          | 327 |
| 6.3   | 有理函数的积分 .....     | 330 |
|       | 习题 .....          | 339 |
| 6.4   | 三角函数有理式的积分 .....  | 340 |

|                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 习题 .....                                                                                                                           | 343 |
| 6.5 某些无理函数的积分 .....                                                                                                                | 345 |
| 6.5.1 $\int R\left(x, \left(\frac{ax+b}{cx+d}\right)^r, \dots, \left(\frac{ax+b}{cx+d}\right)^s\right) dx (ad-bc \neq 0)$<br>..... | 345 |
| 6.5.2 $\int x^r (a+bx^s)^p dx$ .....                                                                                               | 346 |
| 6.5.3 $\int R(x, \sqrt{ax^2+bx+c}) dx$ .....                                                                                       | 348 |
| 习题 .....                                                                                                                           | 351 |
| 6.6 几种不能表示成初等函数的积分 .....                                                                                                           | 352 |
| 6.7 简单的微分方程 .....                                                                                                                  | 354 |
| 6.7.1 基本概念 .....                                                                                                                   | 354 |
| 6.7.2 可分离变量的一阶方程 .....                                                                                                             | 355 |
| 6.7.3 可化为变量分离的一阶方程 .....                                                                                                           | 359 |
| 6.7.4 一阶线性方程 .....                                                                                                                 | 363 |
| 6.7.5 二阶常系数线性方程 .....                                                                                                              | 367 |
| 习题 .....                                                                                                                           | 371 |
| 第6章总习题 .....                                                                                                                       | 372 |

## 第7章 定 积 分

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 7.1 定积分及其存在条件 .....  | 375 |
| 7.1.1 定积分的概念 .....   | 375 |
| 7.1.2 定积分的存在条件 ..... | 379 |
| 习题 .....             | 383 |
| 7.2 几类可积函数 .....     | 384 |
| 习题 .....             | 388 |
| 7.3 定积分的性质 .....     | 390 |
| 习题 .....             | 396 |

|       |                     |     |
|-------|---------------------|-----|
| 7.4   | 定积分的计算 .....        | 397 |
| 7.4.1 | 微积分基本公式 .....       | 397 |
| 7.4.2 | 定积分的换元法 .....       | 403 |
| 7.4.3 | 定积分的分部积分法 .....     | 405 |
|       | 习题 .....            | 414 |
| 7.5   | 定积分的近似计算 .....      | 416 |
| 7.5.1 | 梯形公式 .....          | 417 |
| 7.5.2 | 抛物线公式 .....         | 417 |
|       | 习题 .....            | 420 |
| 7.6   | 定积分的应用 .....        | 421 |
| 7.6.1 | 平面图形的面积 .....       | 421 |
| 7.6.2 | 截面面积为已知的立体的体积 ..... | 428 |
| 7.6.3 | 曲线的弧长 .....         | 432 |
| 7.6.4 | 旋转面的面积 .....        | 440 |
| 7.6.5 | 力学量和物理量的计算 .....    | 444 |
|       | 习题 .....            | 449 |
| 第7章   | 总习题 .....           | 452 |

## 第8章 多元函数

|       |                |     |
|-------|----------------|-----|
| 8.1   | 欧几里得空间 .....   | 456 |
| 8.1.1 | 基本概念 .....     | 456 |
| 8.1.2 | 基本性质 .....     | 460 |
| 8.1.3 | 几个基本定理 .....   | 465 |
|       | 习题 .....       | 471 |
| 8.2   | 多元函数及其极限 ..... | 473 |
| 8.2.1 | 多元函数 .....     | 473 |
| 8.2.2 | 极限 .....       | 474 |
| 8.2.3 | 累次极限 .....     | 478 |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 习题 .....             | 482 |
| 8.3 多元函数的连续性 .....   | 483 |
| 8.3.1 连续函数及其运算 ..... | 483 |
| 8.3.2 连续函数的性质 .....  | 485 |
| 习题 .....             | 489 |
| 8.4 向量值函数 .....      | 491 |
| 8.4.1 基本概念 .....     | 491 |
| 8.4.2 极限 .....       | 494 |
| 8.4.3 连续性 .....      | 496 |
| 习题 .....             | 498 |
| 第 8 章总习题 .....       | 498 |

## 第 9 章 多元函数的微分学

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 9.1 偏导数·全微分 .....        | 500 |
| 9.1.1 偏导数 .....          | 500 |
| 9.1.2 全微分 .....          | 504 |
| 9.1.3 链锁法则 .....         | 509 |
| 9.1.4 一阶全微分的形式的不变性 ..... | 515 |
| 习题 .....                 | 518 |
| 9.2 高阶偏导数·高阶全微分 .....    | 521 |
| 9.2.1 高阶偏导数 .....        | 521 |
| 9.2.2 高阶全微分 .....        | 530 |
| 9.2.3 泰勒公式 .....         | 533 |
| 习题 .....                 | 538 |
| 9.3 向量值函数的导数与可微性 .....   | 541 |
| 9.3.1 向量值函数的偏导数 .....    | 541 |
| 9.3.2 可微性 .....          | 545 |
| 9.3.3 链锁法则 .....         | 547 |

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 习题                 | 551 |
| 9.4 隐函数及其微分法       | 553 |
| 9.4.1 问题的提出        | 553 |
| 9.4.2 纯量值隐函数       | 554 |
| 9.4.3 向量值隐函数       | 561 |
| 习题                 | 574 |
| 9.5 函数相关·函数独立      | 577 |
| 9.5.1 基本概念         | 577 |
| 9.5.2 函数独立的判定      | 578 |
| 习题                 | 583 |
| 9.6 微分学的应用         | 584 |
| 9.6.1 空间曲线的切线与法平面  | 584 |
| 9.6.2 曲面的切平面与法线    | 589 |
| 9.6.3 平面曲线的曲率      | 595 |
| 9.6.4 多元函数的极值      | 598 |
| 9.6.5 最大值·最小值      | 605 |
| 9.6.6 条件极值·拉格朗日乘数法 | 609 |
| 习题                 | 615 |
| 第9章总习题             | 618 |
| 习题答案与提示            | 621 |
| 参考文献               | 657 |

# 第1章 极限理论

极限理论是数学分析中的最基本理论之一,它是初等数学与高等数学的分水岭,整个数学分析可以说就是研究形形色色的极限.本章介绍数列的极限、函数的极限、实数系的基本定理.此外,还引进了上极限、下极限的概念,这对处理某些极限问题会带来方便.

## 1.1 数列的极限

### 1.1.1 数列极限的定义

在中学数学教材中已经指出:数列是一个定义域为自然数集(记为 $\mathbf{N}$ )的函数,即自变量从小到大依次取自然数时,相对应的一系列有顺序的函数值.它也可看成一个 $\mathbf{N} \rightarrow \mathbf{R}$ 的映射(其中 $\mathbf{R}$ 记所有实数的集合).

数列的一般形式可以写成为

$$x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n, \cdots$$

其中 $x_n$ 称为数列的第 $n$ 项,或者称为通项.为书写简单起见,把上面的数列简单记为 $\{x_n\}$ .当它和通项不会发生混淆时也记为 $x_n$ .

数列和集合是有差别的.其一为数列中的元素(即项)是有一定次序的,而集合中的元素是没有次序的;其二为数列中各元素可以相同,而集合中各元素是不同的.所以有时将数列 $\{x_n\}$ 称为集合 $\{x_n\}$ 时,就约定该集合是由数列中所有互不相同的项为元素所组成的集合.



对于一个 $\{x_n\}$ 来说,当 $n$ 无限增大时,对应的值 $x_n$ 可能是毫无规律的,但也有一类数列,当 $n$ 无限增大时, $x_n$ 趋近于某一个定数 $a$ ,这种趋近过程可以是多种多样的,比如 $x_n$ 的值随 $n$ 的增加而增加,而且不断向 $a$ 靠近; $x_n$ 的值随 $n$ 的增加而减少,而且不断向 $a$ 靠近; $x_n$ 的值随 $n$ 增加而减小,而且不断向 $a$ 靠近; $x_n$ 的值随 $n$ 增加时而大于 $a$ 时而小于 $a$ ,但不断向 $a$ 靠近;当 $n$ 无限增大时, $x_n$ 可以不等于 $a$ ,也可以等于 $a$ ,或者可以有无穷多项等于 $a$ ,甚至可以每一项都等于 $a$ .怎样用数学的语言来描述“ $n$ 无限增大时, $x_n$ 趋近于 $a$ ”呢?也即怎样用客观的尺度来衡量“无限增大”及“趋近于”呢?这就是我们下面要讲的“极限的 $\epsilon-N$ 定义”.

对于数列 $\{x_n\}$ ,如果存在一个实数 $a$ ,无论预先指定多么小的正数 $\epsilon$ ,都能在数列中找到一项 $x_N$ ,使得这一项后面的所有项与 $a$ 的差的绝对值都小于 $\epsilon$ ,这时就把实数 $a$ 叫做数列 $\{x_n\}$ 的极限.

我们用简单的数学语言概括成下面的定义.

**定义( $\epsilon-N$ )**  $\{x_n\}$ 是已知数列, $a$ 为已知实数,如果对任给 $\epsilon>0$ ,存在 $N\in\mathbf{N}$ ,当 $n\in\mathbf{N}$ 且 $n>N$ 时,就有

$$|x_n - a| < \epsilon, \quad (1.1)$$

则称当 $n\rightarrow\infty$ 时, $\{x_n\}$ 有极限 $a$ ,也可称当 $n\rightarrow\infty$ 时, $\{x_n\}$ 收敛于 $a$ ,或趋于 $a$ ,记为

$$\lim_{n\rightarrow\infty} x_n = a,$$

或

$$\text{当 } n\rightarrow\infty \text{ 时, } x_n\rightarrow a,$$

及

$$x_n\rightarrow a \quad (n\rightarrow\infty).$$

其中 $\lim$ 是 $\text{limit}$ (极限)的缩写.

有了收敛的概念后,有必要在这里提一下它的反面——发散.

**定义(发散)** 若 $\{x_n\}$ 不以任何实数为极限,就称 $\{x_n\}$ 是发散数列,简称 $\{x_n\}$ 发散.