

# 微积分和数学分析引论

第二卷 第一分册

R. 柯朗 F. 约翰 著

科学出版社

# 微积分和数学分析引论

第二卷 第一分册

R. 柯朗 F. 约翰 著

林建祥 刘婉如 朱德威 等译

冷生明 校

科学出版社

1985

## 内 容 简 介

柯朗等著《微积分和数学分析引论》分两卷,第一卷为一元情形,第二卷为多元情形。

汉译本第一卷分两册出版,第二卷分三册出版。

本书是第二卷第一分册,包括前三章。第一章详论多元函数及其导数,包括线性微分型及其积分,补充了数学分析中最基本的概念的严密证明;第二章在线性代数方面为现代数学分析的基础准备了充分的材料;第三章叙述多元微分学的发展及应用,包括隐函数存在定理的严密证明,多元变换与映射的基本理论,曲线、曲面的微分几何基础知识以及外微分型等基本概念。原书有练习解答,分别编入各分册。

译者(按内容顺序):邵士敏、周建莹、张锦炎(第一章),刘婉如(第二章),林建祥、张顺燕、朱德威(第三章),林源渠(解答)。

读者对象为高等学校理工科师生与工程技术人员。

R. Courant F. John

INTRODUCTION TO CALCULUS AND ANALYSIS

Volume 1

John Wiley and Sons, Inc.

### 微积分和数学分析引论

#### 第二卷 第一分册

R. 柯朗 F. 约翰 著

林建祥 刘婉如 朱德威 等译

冷生明 校

责任编辑 刘嘉善

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1985年8月第一版 开本:850×1168 1/32

1985年8月第一次印刷 印张:14 1/2

印数:0001—9,000 字数:380,000

统一书号:13031·2948

本社书号:4007·13-1

定价:4.10元

## 序 言

R. 柯朗的《微积分 (Differential and Integral Calculus)》, 卷一和卷二, 获得了巨大的成功, 引导了几代数学家进入高等数学的领域. 整套书阐发了这样一条富有教益的道理: 真正有意义的数学是由直观想象与演绎推理相结合而创造出来的. 在准备本修订版的过程中, 著者们力图保持原著所特有的这两种思维方式的合理结合. 虽然 R. 柯朗未能亲眼看到这第二卷的修订本的出版, 但是在柯朗博士于 1972 年 1 月去世之前, 所有主要的修改内容都已经由著者们商量出一致的意见并草拟了纲要.

从一开始, 著者们就清楚地理解到, 阐述多元函数的第二卷应当比第一卷作更大的修改. 特别是, 似乎最好用与一维空间中的积分法同样程度的严密性和普遍性来处理高维空间中的积分法的所有基本定理. 另外, 若干具有根本重要性的新概念和新论题, 它们在著者们看来, 是属于数学分析引论的.

本卷末尾较短的几章(六、七、八)(分别讲微分方程、变分法、复变函数的), 仅作了较小的改动. 在本卷的主体部分(第一至第五章)中, 我们尽量保存了原来的体系, 各章的主题都在不同的水平上按大体上平行的两条线索进行阐述: 一条是较多地基于直观论证的非正式引述, 一条是为后续的严密证明打基础的、对于应用的讨论.

原来的第一章中所讲的线性代数的材料, 看来已不足以作为扩展了的微积分结构的基础. 因此, 这一章(现在的第二章)完全重写了, 现在讲述了所需要的  $n$  阶的行列式、矩阵、多线性型、格拉姆行列式、线性流形等的一切性质.

现在的第一章包括了线性微分型及其积分的所有基本性质. 这就为读者提供了阅读第三章(第 3.6 节)新添的高阶外微分型的

预备知识。现在的第三章中还新添了一个关于隐函数定理的利用逐次逼近法的证明，一个关于临界点的个数和二维向量场的指数的讨论。

在第四和第五章中，对重积分的基本性质作了大量的增补。这里面临着一个大大家熟知的困难：展布在一个流形 $M$ 上的积分，很容易通过把 $M$ 适当划分成小片来定义，却必需证明它不依赖于特殊的分划。这由系统地使用约当可测集类的有限交性质和单位分划而解决了。为了使应用拓扑学上的复杂性减少到最低限度，我们只考虑了光滑地嵌入于欧氏空间中的流形。另外，对流形的“定向”的概念也作了详细的研讨，这是要讨论外微分型的积分及其可加性所必需的。在这个基础上我们给出了 $n$ 维空间中的散度定理和司铎克斯定理的证明。在第四章关于傅立叶积分的一节(第4.13节)里，还新添了关于巴色瓦恒等式和傅立叶重积分的论述。

在这一卷的准备过程中，最珍贵的是，著者们能不断得到两位朋友慷慨的帮助，一位是 Carnegie-Mellon 大学的 Albert A. Blank 教授，一位是 Negev 大学的 Alan Solomon 教授。在几乎每一页上都有着他们的批评、改正、建议的痕迹。他们还为一卷准备了练习题和问题。

我们感谢 K. O. Friedrichs 教授和 Donald Ludwig 教授的建设性的宝贵建议，还感谢 John Wiley and Sons 公司及其编辑部的不断鼓励和帮助。

F. 约翰

纽约，1973年9月

# 目 录

序言	i
第一章 多元函数及其导数	1
1.1 平面和空间的点和点集	1
a. 点的序列: 收敛性 (1) b. 平面上的点集 (3) c. 集合的边界, 闭集与开集 (6) d. 闭包作为极限点的集合 (8) e. 空间的点与点集 (9)	
练习 1.1	10
问题 1.1	11
1.2 几个自变量的函数	11
a. 函数及其定义域 (11) b. 最简单的函数 (12) c. 函数的几何表示法 (13)	
练习 1.2	15
1.3 连续性	17
a. 定义 (17) b. 多元函数的极限概念 (19) c. 无穷小函数的阶 (22)	
练习 1.3	24
问题 1.3	27
1.4 函数的偏导数	27
a. 定义, 几何表示 (27)	
练习 1.4 a	31
问题 1.4 a	33
b. 例 (33) c. 偏导数的连续性与存在性 (35)	
练习 1.4c	36
d. 微分次序的改变 (37)	
练习 1.4 d	40
问题 1.4 d	40
1.5 函数的全微分及其几何意义	41
a. 可微性的概念 (41)	

练习 1.5 a .....	43
问题 1.5 a .....	44
b. 方向导数 (44)	
练习 1.5 b .....	46
c. 可微性的几何解释. 切平面 (47)	
练习 1.5 c .....	49
d. 函数的微分 (50)	
练习 1.5 d .....	53
e. 在误差计算方面的应用 (53)	
练习 1.5 e .....	54
1.6 函数的函数(复合函数)与新自变量的引入 .....	55
a. 复合函数. 链式法则 (55)	
练习 1.6 a .....	59
问题 1.6 a .....	60
b. 例 (61) c. 自变量的替换 (62)	
练习 1.6 c .....	65
问题 1.6 c .....	66
1.7 多元函数的中值定理与泰勒定理 .....	66
a. 关于用多项式作近似的预备知识 (66)	
练习 1.7 a .....	67
b. 中值定理 (68)	
练习 1.7 b .....	69
问题 1.7 b .....	70
c. 多个自变量的泰勒定理 (70)	
练习 1.7 c .....	72
问题 1.7 c .....	73
1.8 依赖于参量的函数的积分 .....	74
a. 例和定义 (74) b. 积分关于参量的连续性和可微性 (76)	
练习 1.8 b .....	81
c. 积分(次序)的互换. 函数的光滑化 (82)	
1.9 微分与线积分 .....	(84)

a. 线性微分型 (84) b. 线性微分型的线积分 (87)	
练习 1.9 b .....	93
c. 线积分对端点的相关性 (93)	
1.10 线性微分型的可积性的基本定理 .....	96
a. 全微分的积分 (96) b. 线积分只依赖于端点的必要条件 (97)	
c. 可积条件的不足 (99) d. 单连通集 (102) e. 基本定理 (105)	
附录 .....	107
A. 1 多维空间的聚点原理及其应用 .....	107
a. 聚点原理 (107) b. 柯西收敛准则, 紧性 (109) c. 海涅-波瑞耳覆盖定理 (110) d. 海涅-波瑞耳定理在开集所包含的闭集上的应用 (111)	
A. 2 连续函数的基本性质 .....	113
A. 3 点集论的基本概念 .....	114
a. 集合与子集合 (114) b. 集合的并与交 (116) c. 应用于平面上的点集 (119)	
A. 4 齐次函数 .....	120
<b>第二章 向量、矩阵与线性变换 .....</b>	<b>123</b>
2.1 向量的运算 .....	123
a. 向量的定义 (123) b. 向量的几何表示 (125) c. 向量的长度, 方向夹角 (127) d. 向量的数量积 (131) e. 超平面方程的向量形式 (133) f. 向量的线性相关与线性方程组 (136)	
练习 2.1 .....	141
2.2 矩阵与线性变换 .....	143
a. 基的变换, 线性空间 (143) b. 矩阵 (146) c. 矩阵的运算 (150) d. 方阵, 逆阵, 正交阵 (152)	
练习 2.2 .....	157
2.3 行列式 .....	159
a. 二阶与三阶行列式 (159) b. 向量的线性型与多线性型 (162)	
c. 多线性交替型, 行列式的定义 (166) d. 行列式的主要性质 (169) e. 行列式对线性方程组的应用 (173)	
练习 2.3 .....	175



2.4 行列式的几何解释 .....	178
a. 向量积与三维空间中平行六面体的体积 (178) b. 行列式关于一列的展开式. 高维向量积 (186) c. 高维空间中的平行四边形的面积与平行多面体的体积 (188) d. $n$ 维空间中平行多面体的定向 (193) e. 平面与超平面的定向 (197) f. 线性变换下平行多面体体积的改变(199)	
练习 2.4 .....	200
2.5 分析中的向量概念 .....	202
a. 向量场 (202) b. 数量场的梯度 (203) c. 向量场的散度和旋度 (206) d. 向量族. 在空间曲线论和质点运动中的应用(209)	
练习 2.5 .....	212
<b>第三章 微分学的发展和应</b> .....	<b>217</b>
3.1 隐函数 .....	217
a. 一般说明 (217)	
练习 3.1 a .....	218
b. 几何解释 (218)	
练习 3.1 b .....	220
c. 隐函数定理 (220)	
练习 3.1 c .....	224
d. 隐函数定理的证明 (224)	
练习 3.1 d .....	227
e. 多于两个自变量的隐函数定理 (228)	
练习 3.1 e .....	229
3.2 用隐函数形式表出的曲线与曲面 .....	230
a. 用隐函数形式表出的平面曲线 (230)	
练习 3.2 a .....	234
b. 曲线的奇点 (235)	
练习 3.2 b .....	237
c. 曲面的隐函数表示法 (238)	
练习 3.2 c .....	240
3.3 函数组、变换与映射 .....	241

a. 一般说明 (241)	
练习 3.3 a .....	246
b. 曲线坐标 (246)	
练习 3.3 b .....	249
c. 推广到多于两个变量的情形 (249)	
练习 3.3 c .....	252
d. 反函数的微商公式 (252)	
练习 3.3 d .....	255
e. 映射的符号乘积 (258)	
练习 3.3 e .....	261
f. 关于变换及隐函数组的逆的一般定理. 分解成素映射 (262)	
练习 3.3 f .....	267
g. 用逐次逼近法迭代构造逆映射 (267)	
练习 3.3 g .....	273
h. 函数的相依性 (273)	
练习 3.3 h .....	275
i. 结束语 (275)	
练习 3.3 i .....	277
3.4 应用 .....	278
a. 曲面理论的要素 (278)	
练习 3.4 a .....	287
b. 一般保角变换 (288)	
练习 3.4 b .....	290
3.5 曲线族, 曲面族, 以及它们的包络 .....	291
a. 一般说明 (291)	
练习 3.5 a .....	292
b. 单参量曲线的包络 (293)	
练习 3.5 b .....	296
c. 例 (296)	
练习 3.5 c .....	302
d. 曲面族的包络 (301)	

练习 3.5 d .....	306
3.6 交错微分型 .....	308
a. 交错微分型的定义 (308)	
练习 3.6 a .....	310
b. 微分型的和与积 (311)	
练习 3.6 b .....	312
c. 微分型的外微商 (313)	
练习 3.6 c .....	316
d. 任意坐标系中的外微分型 (317)	
练习 3.6 d .....	326
3.7 最大与最小 .....	326
a. 必要条件 (326) b. 例 (329)	
练习 3.7 b .....	331
c. 带有附加条件的最大与最小 (332)	
练习 3.7 c .....	336
d. 最简单情形下不定乘法法的证明 (336)	
练习 3.7 d .....	338
e. 不定乘法法的推广 (339)	
练习 3.7 e .....	342
f. 例 (343)	
练习 3.7 f .....	346
附录 .....	348
A.1 极值的充分条件 .....	348
练习 A. 1 .....	353
A.2 临界点的个数与向量场的指数 .....	355
练习 A. 2 .....	362
A.3 平面曲线的奇点 .....	362
练习 A. 3 .....	365
A.4 曲面的奇点 .....	365
练习 A. 4 .....	365
A.5 流体运动的欧拉表示法与拉格朗日表示法之间的	

联系.....	366
练习 A. 5 .....	367
A.6 闭曲线的切线表示法与周长不等式 .....	367
练习 A. 6 .....	369
解答.....	370

# 第一章 多元函数及其导数

在第一卷中曾讨论过的极限、连续、导数和积分等概念，同样也是二元或多元函数的基本概念。然而，有很多在一元函数理论中并不存在的新的现象，必须在多维中加以讨论。通常一个定理只要对于两个变量的函数可以证明它，那么在证明中不需要作任何本质的改变，就容易推广到多于两个变量的函数中去。因此，在以后的论述中我们常限于讨论两个变量的函数，其中各种关系都比较容易用几何图形来显示，而只当由此得到一些另外的见解时，才对三个或更多个变量的函数加以讨论；所得结果也同样可以作简单的几何学的解释。

## 1.1 平面和空间的点和点集

### a. 点的序列：收敛性

在一个笛卡儿平面坐标系中，一对有顺序的数值  $(x, y)$  在几何上可以用一个点  $P$  来表示，这个点的坐标为  $x$  和  $y$ 。两点  $P = (x, y)$  与  $P' = (x', y')$  之间的距离可以由公式

$$\overline{PP'} = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}$$

求得。这是欧几里得几何学的基本公式。我们利用距离的概念可以定义一个点的邻域。一个点  $C = (\alpha, \beta)$  的  $\varepsilon$  邻域是由所有那些与  $C$  的距离小于  $\varepsilon$  的点  $P = (x, y)$  构成的；从几何学上说，这是一个以  $C$  为中心、以  $\varepsilon$  为半径的圆盘<sup>1)</sup>，它可用不等式

$$(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 < \varepsilon$$

---

1) 平常所用的“圆”这个词，是指一条曲线还是指由它所界的区域，是含糊不清的。我们根据实际流行的说法，把“圆”只用于曲线，而把“圆形区域”或“圆盘”用于二维区域。同样，在空间中我们把“球面”（即球形曲面）与它所界的三维立体“球体”区别开来。

来描述.

我们考虑无穷的点序列

$$P_1 = (x_1, y_1), P_2 = (x_2, y_2), \dots, P_n = (x_n, y_n), \dots$$

例如  $P_n = (n, n^2)$  定义了一个序列, 其中所有的点都在抛物线  $y = x^2$  上. 一序列中的点并不一定都不相同. 例如, 无穷序列  $P_n = (2, (-1)^n)$  只有两个不同的元素.

如果能找到一个圆盘, 它包含所有的  $P_n$ , 也就是说, 如果存在一个点  $Q$  与一个数  $M$ , 使得对所有的  $n$  都有  $\overline{P_n Q} < M$ , 那末我们说序列  $P_1, P_2, \dots$  是有界的. 例如序列  $P_n = (1/n, 1/n^2)$  是有界的, 而序列  $(n, n^2)$  是无界的.

与序列有关的最重要的概念是收敛的概念. 我们说, 一个点序列  $P_1, P_2, \dots$  收敛到一个点  $Q$ , 或

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P_n = Q,$$

是指距离  $\overline{P_n Q}$  收敛到零. 这样,  $\lim_{n \rightarrow \infty} P_n = Q$  就意味着对于每一个  $\varepsilon > 0$ , 都必然存在一个数  $N$ , 使对于所有  $n > N$ ,  $P_n$  都在  $Q$  的  $\varepsilon$  邻域内<sup>1)</sup>.

举一个例. 对于由  $P_n = (e^{-n/4} \cos n, e^{-n/4} \sin n)$  定义的点序列, 我们有  $\lim_{n \rightarrow \infty} P_n = (0, 0) = Q$ , 因为, 在这里

$$\overline{P_n Q} = e^{-n/4} \rightarrow 0 \quad \text{当 } n \rightarrow \infty.$$

我们指出,  $P_n$  是沿着极坐标方程为  $r = e^{-\theta/4}$  的对数螺线趋于原点  $Q$  的(见图 1.1).

点序列  $P_n = (x_n, y_n)$  收敛到点  $Q = (a, b)$  意味着, 两个数序列  $x_n$  与  $y_n$  分别收敛, 且

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} y_n = b.$$

诚然,  $\overline{P_n Q}$  很小隐含着  $x_n - a$  与  $y_n - b$  都很小, 因为

$$|x_n - a| \leq \overline{P_n Q}, \quad |y_n - b| \leq \overline{P_n Q};$$

1) 等价地说, 任何一个以  $Q$  为中心的圆盘, 除有限个  $P_n$  外, 它包含所有的  $P_n$ . 我们也常用记法表示成: 当  $n \rightarrow \infty$  时  $P_n \rightarrow Q$ .

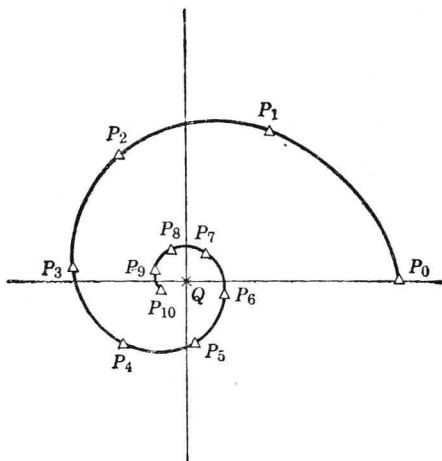


图 1.1 收敛序列  $P_n$

反之

$$\overline{P_n Q} = \sqrt{(x_n - a)^2 + (y_n - b)^2} \leq |x_n - a| + |y_n - b|,$$

从而当  $x_n \rightarrow a$  与  $y_n \rightarrow b$  时有  $\overline{P_n Q} \rightarrow 0$ .

如同数序列的情形一样，我们可以利用柯西的内在收敛判别法来证明一个点序列收敛，而不需要知道它的极限值。这个判别法，在两维中宣言：一个点序列  $P_n = (x_n, y_n)$  是收敛的必要充分条件是，对每一个  $\varepsilon > 0$ ，不等式  $\overline{P_n P_m} < \varepsilon$  对大于适当的值  $N = N(\varepsilon)$  的所有  $n, m$  都成立。其证明可以对两个序列  $x_n$  与  $y_n$  中的每一个运用数序列的柯西收敛判别法来推得。

## b. 平面上的点集

在讨论单变量  $x$  的函数时，我们常允许  $x$  在一个“区间”内变化，区间可以是闭的或开的，可以是有界的或无界的，而对于高维空间中的函数所可能取的区域而言，必需考虑更多种类的集合，并且必需引进描述这些种类集合的简单性质的一些术语。在平面中我们通常考虑的可以是曲线也可以是二维区域。平面曲线在第一卷

第四章中已广泛地讨论过。通常它们可以用“非参数”形式的一个函数  $y = f(x)$  给出，或者用“参数”形式的一对函数  $x = \phi(t)$ ,  $y = \psi(t)$  给出，或者用一个隐式方程  $F(x, y) = 0$  给出(在第三章中我们将更多地讲到隐式表示法)。

除曲线之外，我们还有组成一个区域的二维点集。这个区域可以是整个  $xy$  平面，或者是由一简单闭曲线围成的一部分平面(在这种情况下，形成一个单连通区域如图 1.2 所示)，或者是由几个这类曲线围成的一部分平面。在后一种情况下，我们称之为多连通区域，边界曲线的数目就叫做连通数；例如图 1.3 就表示一个三连通区域。一个平面集合也可以是全然不连通的<sup>1)</sup>，而是由几个分离部分组成的(图 1.4)。

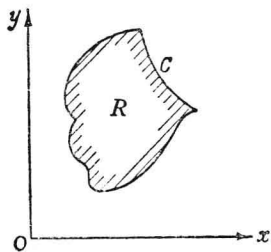


图 1.2 单连通区域

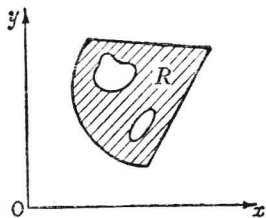


图 1.3 三连通区域

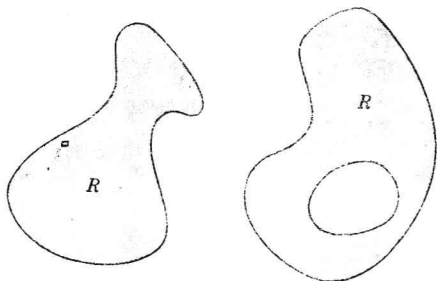


图 1.4 非连通区域

1) “连通”的确切定义见第 102 页。



一般说来,要考虑的区域的边界曲线都是逐段光滑的,亦即每一个这样的曲线是由有限个弧组成的,每一段弧上所有的点,包括端点在内,都有一个连续转动的切线. 因此,这样的曲线至多也只有有限个角.

在绝大多数情况下,我们用一个或多个不等式来描述一个区域,而在边界的一些部分保持等号. 有两种最重要的区域形式是经常遇到的;一个是矩形区域(其各边平行于坐标轴),一个是圆盘. 矩形区域(图 1.5)是由这样一些点 $(x, y)$ 构成的,它们的坐标满足不等式

$$a < x < b, \quad c < y < d;$$

每一个坐标限制在一个确定的区间上,并且点 $(x, y)$ 在一个矩形内部变化. 我们这里定义的矩形区域是开的;就是说它不包含它的边界.

把定义该区域的一个或几个不等式改为等式,并且允许(但不是必需的)其余的不等式中有等号,这样就得到边界曲线. 例如

$$x = a, \quad c \leq y \leq d$$

定义了矩形的一条边. 把所有的边界点加到该集合中去,就得到闭矩形,它由下面的不等式来描述:

$$a \leq x \leq b, \quad c \leq y \leq d.$$

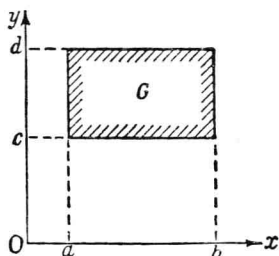


图 1.5 矩形区域

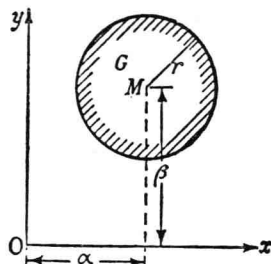


图 1.6 圆盘

如前面所见那样,中心为 $(\alpha, \beta)$ 、半径为 $r$ 的圆盘(图 1.6),可由下面这不等式给出: