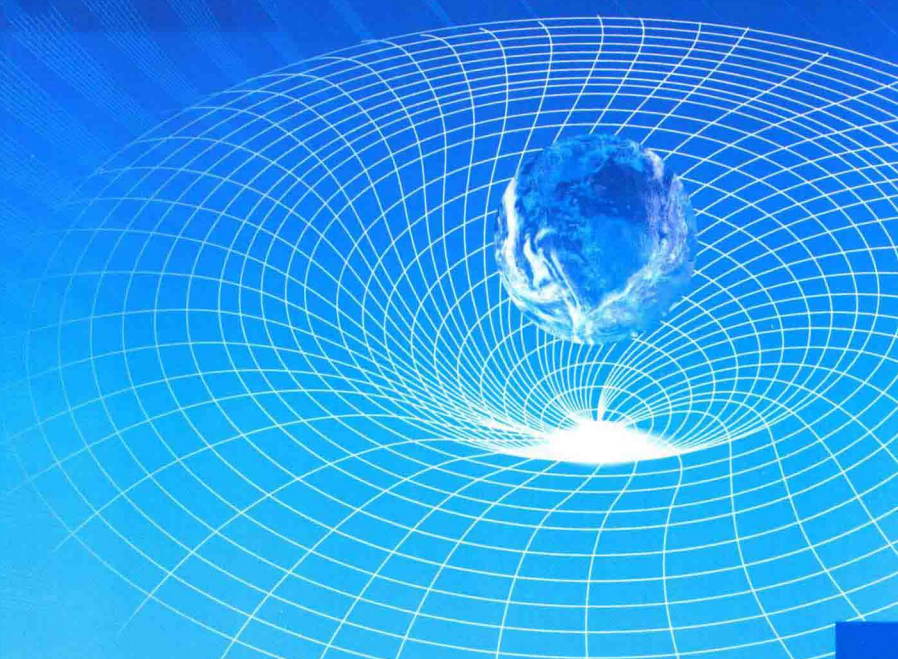




普通高等教育“十三五”规划教材



北京市高等教育精品教材



微积分

第二版

(下册)

刘迎东 © 编



科学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材
北京市高等教育精品教材

微 积 分

(下册)

(第二版)

刘迎东 编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书对传统的微积分内容的写作次序作了较大调整,贯彻把数学建模思想融入大学数学基础课程教学的想法,强调微分的概念和应用,叙述精炼,选材及示例经典,习题丰富,并且很多例题提倡“一题多解”.本书分上、下两册,本部分是下册,下册内容是多元函数微积分学和无穷级数,包括多元函数微分法及其应用、重积分、曲线积分与曲面积分和无穷级数等内容.书中还附有二维码,读者可以扫码观看讲课视频学习课程.

本书适合作大学工科各专业微积分或高等数学教材或参考书,也可供相关的科技人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

微积分.下册/刘迎东编.—2版.—北京:科学出版社,2017.8
普通高等教育“十三五”规划教材·北京市高等教育精品教材
ISBN 978-7-03-053756-0

I. ①微… II. ①刘… III. ①微积分-高等学校-教材 IV. ①O172

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 138729 号

责任编辑:张中兴 / 责任校对:张凤琴
责任印制:白 洋 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 8 月第 二 版 印张:17 1/2

2017 年 8 月第九次印刷 字数:353 000

定价:37.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

目 录

第 8 章 多元函数微分法及其应用	1
8.1 多元函数的基本概念	1
8.1.1 平面点集	1
8.1.2 多元函数概念	2
8.1.3 多元函数的极限	5
8.1.4 多元函数的连续性	7
习题 8.1	9
8.2 偏导数	11
8.2.1 偏导数的定义及其算法	11
8.2.2 高阶偏导数	14
习题 8.2	16
8.3 全微分	18
8.3.1 全微分的定义	18
8.3.2 全微分在近似计算中的应用	21
习题 8.3	23
8.4 多元复合函数的求导法则	24
8.4.1 复合函数微分法	24
8.4.2 一阶全微分形式的不变性	28
习题 8.4	29
8.5 隐函数的求导公式	32
8.5.1 一个方程的情形	32
8.5.2 方程组的情形	35
习题 8.5	37
8.6 多元函数微分学的几何应用	39
8.6.1 空间曲线的切线与法平面	39
8.6.2 曲面的切平面与法线	42
习题 8.6	45
8.7 方向导数与梯度	46
8.7.1 方向导数	46
8.7.2 梯度	48

习题 8.7	53
8.8 多元函数的极值及其求法	54
8.8.1 多元函数的极值及最大值、最小值	54
8.8.2 条件极值 拉格朗日乘子法	58
习题 8.8	62
8.9 最小二乘法	64
第 9 章 重积分	69
9.1 二重积分的概念与性质	69
9.1.1 二重积分的概念	69
9.1.2 二重积分的性质	71
习题 9.1	72
9.2 二重积分的计算法	73
9.2.1 利用直角坐标计算二重积分	73
9.2.2 用极坐标计算二重积分	78
9.2.3 二重积分的换元法	81
习题 9.2	85
9.3 三重积分	90
9.3.1 三重积分的概念	90
9.3.2 三重积分的计算	91
习题 9.3	97
9.4 重积分的应用	100
9.4.1 曲面的面积	100
9.4.2 质心	104
9.4.3 转动惯量	106
9.4.4 引力	107
习题 9.4	108
第 10 章 曲线积分与曲面积分	111
10.1 第一型曲线积分	111
10.1.1 第一型曲线积分的概念和基本性质	111
10.1.2 第一型曲线积分的计算	113
习题 10.1	115
10.2 第二型曲线积分	116
10.2.1 第二型曲线积分的概念和基本性质	116
10.2.2 第二型曲线积分的计算	119
10.2.3 两类曲线积分之间的联系	122

习题 10.2	123
10.3 格林公式及其应用	126
10.3.1 格林公式	126
10.3.2 平面上曲线积分与路径无关的条件	131
10.3.3 全微分方程	136
习题 10.3	137
10.4 第一型曲面积分	140
10.4.1 第一型曲面积分的概念	140
10.4.2 第一型曲面积分的计算	142
习题 10.4	143
10.5 第二型曲面积分	144
10.5.1 第二型曲面积分的概念和性质	144
10.5.2 第二型曲面积分的计算	148
习题 10.5	150
10.6 高斯公式 通量与散度	152
10.6.1 高斯公式	152
10.6.2 沿任意闭曲面的曲面积分为零的条件	156
10.6.3 通量与散度	156
习题 10.6	159
10.7 斯托克斯公式 环流量与旋度	161
10.7.1 斯托克斯公式	161
10.7.2 空间曲线积分与路径无关的条件	165
10.7.3 环流量与旋度	166
习题 10.7	168
第 11 章 无穷级数	169
11.1 常数项级数的概念和性质	169
11.1.1 常数项级数的概念	169
11.1.2 级数的基本性质	172
11.1.3 柯西收敛原理(柯西准则)	175
习题 11.1	176
11.2 常数项级数的审敛法	177
11.2.1 正项级数及其审敛法	177
11.2.2 交错级数及其审敛法	187
11.2.3 绝对收敛与条件收敛	188
11.2.4 绝对收敛级数的性质	191

习题 11.2	194
11.3 幂级数.....	197
11.3.1 函数项级数的概念	197
11.3.2 幂级数及其收敛性	198
11.3.3 幂级数的运算	203
习题 11.3	207
11.4 函数展开成幂级数.....	209
习题 11.4	217
11.5 函数的幂级数展开式的应用.....	218
11.5.1 近似计算	218
11.5.2 微分方程的幂级数解法	222
11.5.3 欧拉公式	224
习题 11.5	225
11.6 傅里叶级数.....	226
11.6.1 三角级数 三角函数系的正交性	226
11.6.2 函数展开成傅里叶级数	228
11.6.3 正弦级数和余弦级数	234
习题 11.6	240
11.7 一般周期函数的傅里叶级数.....	242
习题 11.7	248
习题答案.....	250

第 8 章 多元函数微分法及其应用

在此以前,本书讨论的函数都是只依赖于一个自变量的函数,即一元函数.但是,在许多问题中,经常会遇到多个自变量的情形,因此需要研究多元函数.

多元函数微分学是一元函数微分学的推广和发展,这两者既有许多类似之处,又有不少本质差别.这里着重讨论二元函数,因为从一元函数发展到二元函数,许多方法和结论有着本质的不同,但是从二元函数到三元函数或更多元函数,却没有重大差别.

8.1 多元函数的基本概念

8.1.1 平面点集

当在平面上引入了一个直角坐标系后,平面上的点 P 与有序二元实数组 (x, y) 之间就建立了一一对应关系.于是,常把有序实数组 (x, y) 与平面上的点 P 看成是等同的.这种建立了坐标系的平面称为坐标平面.

设 $P_0(x_0, y_0)$ 是 xOy 平面上的一个点, δ 是某一正数.与点 $P_0(x_0, y_0)$ 距离小于 δ 的点 $P(x, y)$ 的全体,称为点 P_0 的 δ 邻域,记作 $U(P_0, \delta)$,即

$$U(P_0, \delta) = \{P \mid |PP_0| < \delta\},$$

也就是

$$U(P_0, \delta) = \{(x, y) \mid \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} < \delta\}.$$

点 P_0 的去心 δ 邻域,记作 $\dot{U}(P_0, \delta)$,即

$$\dot{U}(P_0, \delta) = \{P \mid 0 < |PP_0| < \delta\}.$$

在几何上, $U(P_0, \delta)$ 就是 xOy 平面上以点 $P_0(x_0, y_0)$ 为中心、 $\delta > 0$ 为半径的圆内部的点 $P(x, y)$ 的全体.

如果不需要强调邻域的半径 δ ,则用 $U(P_0)$ 表示点 P_0 的某个邻域,点 P_0 的去心邻域记作 $\dot{U}(P_0)$.

任意一点 $P \in \mathbf{R}^2$ 与任意一个点集 $E \subset \mathbf{R}^2$ 之间必有以下三种关系中的一种:

(1) 内点 如果存在点 P 的某个邻域 $U(P)$,使得 $U(P) \subset E$,则称 P 为 E 的内点(如图 8.1 中, P_1 为 E 的内点);

(2) 外点 如果存在点 P 的某个邻域 $U(P)$,使得 $U(P) \cap E = \emptyset$,则称 P 为 E 的外点(如图 8.1 中, P_2 为 E 的外点);

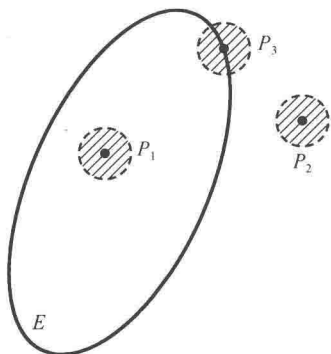


图 8.1

(3) **边界点** 如果点 P 的任一邻域内既含有属于 E 的点,又含有不属于 E 的点,则称 P 为 E 的边界点(如图 8.1 中, P_3 为 E 的边界点).

E 的边界点的全体,称为 E 的边界,记作 ∂E .

E 的内点必属于 E ; E 的外点必不属于 E ; 而 E 的边界点既可能属于 E ,也可能不属于 E .

任意一点 $P \in \mathbb{R}^2$ 与任意一个点集 $E \subset \mathbb{R}^2$ 之间也可以用另外一种关系来刻画,即聚点.

聚点 如果对于任意给定的 $\delta > 0$, 点 P 的去心邻域 $\dot{U}(P, \delta)$ 内总有 E 中的点,则称 P 是 E 的聚点.

点集 E 的聚点 P 本身,可以属于 E ,也可以不属于 E .

例如,设平面点集

$$E = \{(x, y) \mid 1 \leq x^2 + y^2 < 2\}.$$

满足 $1 < x^2 + y^2 < 2$ 的一切点 (x, y) 都是 E 的内点; 满足 $x^2 + y^2 = 1$ 的一切点 (x, y) 都是 E 的边界点,它们都属于 E ; 满足 $x^2 + y^2 = 2$ 的一切点 (x, y) 也都是 E 的边界点,它们都不属于 E ; 点集 E 以及它的边界 ∂E 上的一切点都是 E 的聚点.

下面再定义一些平面点集的概念.

开集 如果点集 E 的点都是 E 的内点,则称 E 为开集.

闭集 如果点集 E 的边界 $\partial E \subset E$, 则称 E 为闭集.

例如,集合 $\{(x, y) \mid 1 < x^2 + y^2 < 2\}$ 是开集; 集合 $\{(x, y) \mid 1 \leq x^2 + y^2 \leq 2\}$ 是闭集; 而集合 $\{(x, y) \mid 1 \leq x^2 + y^2 < 2\}$ 既非开集,也非闭集.

连通集 如果点集 E 内任何两点,都可用折线连接起来,且该折线上的点都属于 E ,则称 E 为连通集.

区域(或开区域) 连通的开集称为区域(或开区域).

闭区域 开区域连同其边界一起所构成的点集称为闭区域.

例如,集合 $\{(x, y) \mid 1 < x^2 + y^2 < 2\}$ 是区域; 而集合 $\{(x, y) \mid 1 \leq x^2 + y^2 \leq 2\}$ 是闭区域.

有界集 对于平面点集 E , 如果存在某一正数 r , 使得

$$E \subset U(O, r),$$

其中 O 是坐标原点,则称 E 为有界集.

无界集 一个集合如果不是有界集,就称这集合为无界集.

例如,集合 $\{(x, y) \mid 1 \leq x^2 + y^2 \leq 2\}$ 是有界闭区域; 集合 $\{(x, y) \mid x + y > 0\}$ 是无界开区域,集合 $\{(x, y) \mid x + y \geq 0\}$ 是无界闭区域.

8.1.2 多元函数概念

在很多自然现象以及实际问题中,经常会遇到多个变量之间的依赖关系,举例

如下:

例 8.1 一定质量的理想气体,其压强 p 和容积 V 以及热力学温度 T 之间满足关系式(称为气态方程)

$$p = \frac{RT}{V}, \quad T > T_0, V > 0, R \text{ 是摩尔气体常数.}$$

当 T, V 的值分别给定时,按照这个关系式, p 就有一个确定的值与它们对应.

例 8.2 设 R 是电阻 R_1, R_2 并联后的总电阻,由电学知道,它们之间具有关系

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad R_1 > 0, R_2 > 0.$$

当 R_1, R_2 取定后, R 的值就唯一确定了.

由上面两个例子,可以归纳出二元函数的定义.

定义 8.1 设 D 是 $\mathbf{R}^2$ 的一个非空子集,若按照某个对应法则 f ,对任意一个 $(x, y) \in D$,都存在唯一的数 $z \in \mathbf{R}$ 与之对应,则称 $f: D \rightarrow \mathbf{R}$ 为定义在 D 上的二元函数,通常记为

$$z = f(x, y), \quad (x, y) \in D$$

或

$$z = f(P), \quad P \in D,$$

其中点集 D 称为该函数的定义域, x, y 称为自变量; z 称为因变量. 函数值 $f(x, y)$ 的全体构成的集合称为函数 f 的值域,记作 $f(D)$,即

$$f(D) = \{z \mid z = f(x, y), (x, y) \in D\}.$$

类似地,可以定义三元函数 $u = f(x, y, z), (x, y, z) \in D$ 以及三元以上的函数.

当 $n=1$ 时, n 元函数就是一元函数. 当 $n \geq 2$ 时, n 元函数统称为多元函数.



多元函数的概念

关于多元函数的定义域,与一元函数相类似,我们作如下约定:一般在讨论用算式表达的多元函数 $u = f(P)$ 时,就以使这个算式有意义的变元 P 所组成的点集为这个多元函数的自然定义域.

在空间直角坐标系 $Oxyz$ 中,对于 D 中的每一点 $P(x, y)$,依照函数关系 $z = f(x, y)$,有空间中一点 M 与之对应, M 的坐标为 $(x, y, f(x, y))$. 在空间中,点 M 的全体称为函数 $z = f(x, y)$ 的图形. 一般说来,它是一张曲面,任何一条平行于 z 轴且通过区域 D 的直线与它都有且只有一个交点(图 8.2).

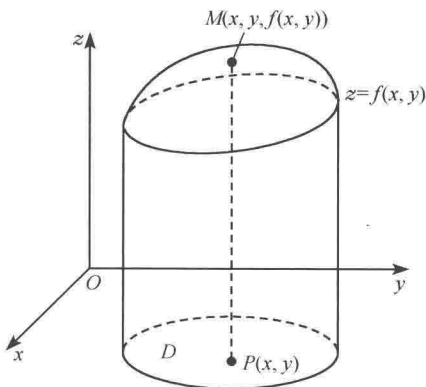


图 8.2

例 8.3 求函数 $z = \sqrt{1-x^2-y^2}$ 的定义域, 并作函数的图形.

解 定义域为 $\{(x, y) \mid x^2 + y^2 \leq 1\}$ (图 8.3). 函数的图形是上半球面 (图 8.4).

例 8.4 研究函数 $z = x^2 + y^2$ 的定义域和图形.

解 定义域为整个 xOy 平面. 函数的图形是旋转抛物面.

对于一般的二元函数 $z = f(x, y)$, 其图形往往难以画出. 在实际工作中, 有时利用“等值线”来了解函数的图形. 可用函数值 $z = \text{常数}$ (即一组与水平面平行的平面) 去截曲面 $z = f(x, y)$, 所得到的截痕是一组平面曲线, 把它们投影到 xOy 平面上, 就是等值线, 或称等高线 (图 8.5, 图 8.6).

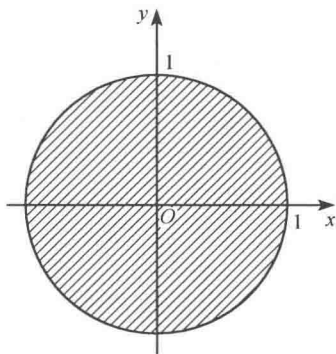


图 8.3

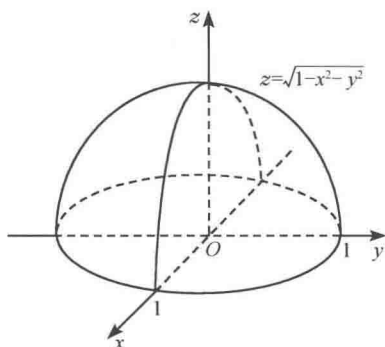


图 8.4

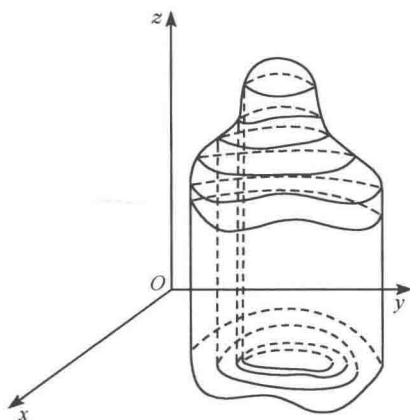


图 8.5

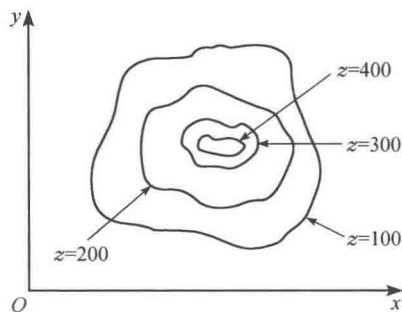


图 8.6

8.1.3 多元函数的极限

先讨论二元函数 $z=f(x,y)$ 当 $(x,y)\rightarrow(x_0,y_0)$, 即 $P(x,y)\rightarrow P_0(x_0,y_0)$ 时的极限.

这里 $P\rightarrow P_0$ 表示点 P 以任何方式趋于点 P_0 , 也就是点 P 与点 P_0 间的距离趋于零, 即

$$|PP_0| = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \rightarrow 0.$$

如果在 $P(x,y)\rightarrow P_0(x_0,y_0)$ 的过程中, 对应的函数值 $f(x,y)$ 无限接近于一个确定的常数 A , 就说 A 是函数 $f(x,y)$ 当 $(x,y)\rightarrow(x_0,y_0)$ 时的极限.

定义 8.2 设二元函数 $f(P)=f(x,y)$ 的定义域为 D , $P_0(x_0,y_0)$ 是 D 的聚点. 如果存在常数 A , 对于任意给定的正数 ϵ , 总存在正数 δ , 使得当点 $P(x,y)\in D\cap\dot{U}(P_0,\delta)$ 时, 都有

$$|f(P)-A| = |f(x,y)-A| < \epsilon$$

成立, 就称常数 A 为函数 $f(x,y)$ 当 $(x,y)\rightarrow(x_0,y_0)$ 时的极限, 记作

$$\lim_{(x,y)\rightarrow(x_0,y_0)} f(x,y) = A \quad \text{或} \quad f(x,y) \rightarrow A ((x,y) \rightarrow (x_0,y_0)),$$

也记作

$$\lim_{P\rightarrow P_0} f(P) = A \quad \text{或} \quad f(P) \rightarrow A (P \rightarrow P_0).$$

为了区别于一元函数的极限, 把二元函数的极限叫做二重极限.

例 8.5 设 $f(x,y) = (x^2+y^2)\cos\frac{1}{x^2+y^2}$, 求证 $\lim_{(x,y)\rightarrow(0,0)} f(x,y) = 0$.

证 因为

$$|f(x,y) - 0| = \left| (x^2+y^2)\cos\frac{1}{x^2+y^2} - 0 \right| \leq x^2+y^2,$$

可见, $\forall \epsilon > 0$, 取 $\delta = \sqrt{\epsilon}$, 则当

$$0 < \sqrt{(x-0)^2 + (y-0)^2} < \delta,$$

即 $P(x,y) \in D \cap \dot{U}(O, \delta)$ 时, 总有

$$|f(x,y) - 0| < \epsilon$$

成立, 所以

$$\lim_{(x,y)\rightarrow(0,0)} f(x,y) = 0.$$

必须注意, 所谓二重极限存在, 是指 $P(x,y)$ 以任何方式趋于 $P_0(x_0,y_0)$ 时, $f(x,y)$ 都无限接近于 A . 因此, 如果 $P(x,y)$ 以某一特殊方式, 如沿着一条定直线或定曲线趋于 $P_0(x_0,y_0)$ 时, 即使 $f(x,y)$ 无限接近于某一确定值, 仍然不能由此断定函数的极限存在. 但是反过来, 如果当 $P(x,y)$ 以不同方式趋于 $P_0(x_0,y_0)$ 时, $f(x,y)$ 趋于不同的值, 就可以断定这函数的极限不存在.



多元函数的极限

例 8.6 证明:函数 $f(x, y) = \frac{xy}{x^2 + y^2}$ 在点 $(0, 0)$ 处的极限不存在.

证 点 (x, y) 沿直线 $y = kx$ 趋向于点 $(0, 0)$ 时, 有

$$\lim_{\substack{y=kx \\ (x,y) \rightarrow (0,0)}} \frac{xy}{x^2 + y^2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{kx^2}{x^2 + k^2 x^2} = \frac{k}{1 + k^2}.$$

当 k 不同时, 此极限值显然不同, 因此该函数在点 $(0, 0)$ 的极限不存在.

例 8.7 证明:函数 $f(x, y) = \sin \frac{y}{x^2}$ 在点 $(0, 0)$ 处的极限不存在.

证 点 (x, y) 沿直线 $y = x$ 趋向于点 $(0, 0)$ 时, 有

$$\sin \frac{y}{x^2} = \sin \frac{1}{x},$$

而 $\lim_{x \rightarrow 0} \sin \frac{1}{x}$ 不存在, 因此 $f(x, y) = \sin \frac{y}{x^2}$ 在点 $(0, 0)$ 的极限不存在.

例 8.8 证明:函数 $f(x, y) = \frac{x^2 y}{x^4 + y^2}$ 当点 (x, y) 沿任一直线趋于点 $(0, 0)$ 时, 极限都为 0, 但 $f(x, y)$ 在点 $(0, 0)$ 处没有极限.

证 对任意实数 k , 显然有

$$\lim_{\substack{y=kx \\ x \rightarrow 0}} f(x, y) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{kx}{x^2 + k^2} = 0,$$

它表明, 点 (x, y) 沿除 y 轴以外的过原点的任一直线趋于点 $(0, 0)$ 时, 极限都为 0. 另外

$$\lim_{\substack{x=0 \\ y \rightarrow 0}} f(x, y) = \lim_{y \rightarrow 0} 0 = 0,$$

即点 (x, y) 沿 y 轴趋于点 $(0, 0)$ 时, $f(x, y)$ 的极限也为 0. 这说明, 函数 $f(x, y) = \frac{x^2 y}{x^4 + y^2}$ 当点 (x, y) 沿任一直线趋于点 $(0, 0)$ 时, 极限都为 0. 但是

$$\lim_{\substack{y=x^2 \\ x \rightarrow 0}} f(x, y) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^4}{x^4 + x^4} = \frac{1}{2},$$

所以, $f(x, y)$ 在点 $(0, 0)$ 处没有极限.

以上关于二元函数的极限概念, 可相应地推广到 n 元函数 $u = f(P) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 上去.

关于多元函数的极限运算, 有与一元函数类似的运算法则.

例 8.9 求 $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,1)} \frac{\sin(xy)}{x}$.

解

$$\lim_{(x,y) \rightarrow (0,1)} \frac{\sin(xy)}{x} = \lim_{(x,y) \rightarrow (0,1)} \left[\frac{\sin(xy)}{xy} \cdot y \right] = \lim_{xy \rightarrow 0} \frac{\sin(xy)}{xy} \cdot \lim_{y \rightarrow 1} y$$

$$= 1 \cdot 1 = 1.$$

若 x_0 与 y_0 有一个或两个是 ∞ 或 $\pm\infty$, 则有类似的极限定义及其运算定理.

例 8.10 求极限 $I = \lim_{\substack{x \rightarrow +\infty \\ y \rightarrow +\infty}} (x^2 + y^2) e^{-(x+y)}.$

解 易知, 若一元函数 $f(x)$ 的极限存在, 且 $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = A$, 则把 $f(x)$ 看成关于 x, y 的二元函数时, 其极限也存在, 且

$$\lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ y \rightarrow y_0}} f(x) = A.$$

由极限的四则运算法得

$$\begin{aligned} I &= \lim_{\substack{x \rightarrow +\infty \\ y \rightarrow +\infty}} [x^2 e^{-x} e^{-y} + y^2 e^{-x} e^{-y}] \\ &= \lim_{\substack{x \rightarrow +\infty \\ y \rightarrow +\infty}} x^2 e^{-x} \cdot \lim_{\substack{x \rightarrow +\infty \\ y \rightarrow +\infty}} e^{-y} + \lim_{\substack{x \rightarrow +\infty \\ y \rightarrow +\infty}} y^2 e^{-y} \cdot \lim_{\substack{x \rightarrow +\infty \\ y \rightarrow +\infty}} e^{-x} \\ &= 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 = 0. \end{aligned}$$

8.1.4 多元函数的连续性

定义 8.3 设二元函数 $f(P) = f(x, y)$ 的定义域为 D , $P_0(x_0, y_0)$ 为 D 的聚点, 且 $P_0 \in D$. 如果

$$\lim_{(x, y) \rightarrow (x_0, y_0)} f(x, y) = f(x_0, y_0),$$

则称函数 $f(x, y)$ 在点 $P_0(x_0, y_0)$ 连续.

设函数 $f(x, y)$ 在 D 上有定义, D 内的每一点都是函数定义域的聚点. 如果函数 $f(x, y)$ 在 D 的每一点都连续, 就称函数 $f(x, y)$ 在 D 上连续, 或者称 $f(x, y)$ 是 D 上的连续函数.

以上关于二元函数的连续性概念, 可相应地推广到 n 元函数 $f(P)$ 上去.

例 8.11 设

$$f(x, y) = \begin{cases} xy \ln(x^2 + y^2), & x^2 + y^2 \neq 0, \\ 0, & x^2 + y^2 = 0, \end{cases}$$

证明: $f(x, y)$ 在点 $(0, 0)$ 处连续.

证 令 $x = r \cos \theta, y = r \sin \theta$. 当 $(x, y) \rightarrow (0, 0)$ 时, 显然有 $r = \sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow 0$, 于是

$$\lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 0}} f(x, y) = \lim_{r \rightarrow 0} r^2 \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot \ln r^2 = 0 = f(0, 0),$$

所以 $f(x, y)$ 在点 $(0, 0)$ 处连续.

由于若一元函数 $f(x)$ 的极限存在: $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = A$, 则把 $f(x)$ 看成 x, y 的二元函数时, 其极限也存在, 且

$$\lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ y \rightarrow y_0}} f(x) = A.$$

所以,如果把一元连续函数看成二元函数或者二元以上的多元函数,它们在各自的定义域内都是连续的.特别地,一元基本初等函数看成二元函数或者二元以上的多元函数时,它们在各自的定义域内都是连续的.

定义 8.4 设函数 $f(x, y)$ 的定义域为 D , $P_0(x_0, y_0)$ 为 D 的聚点,如果函数 $f(x, y)$ 在点 $P_0(x_0, y_0)$ 不连续,则称 $P_0(x_0, y_0)$ 为函数 $f(x, y)$ 的间断点.

例如, $(0, 0)$ 为函数

$$f(x, y) = \begin{cases} \frac{xy}{x^2 + y^2}, & x^2 + y^2 \neq 0, \\ 0, & x^2 + y^2 = 0 \end{cases}$$

的间断点.

一元函数中关于极限的运算法则,对于多元函数仍然适用.根据多元函数的极限运算法则,可以证明多元连续函数的和、差、积仍为连续函数;连续函数的商在分母不为零处仍连续;多元连续函数的复合函数也是连续函数.

多元初等函数是指可用一个式子表示的多元函数,这个式子是由常数及具有不同自变量的一元基本初等函数经过有限次的四则运算和复合运算而得到的.

根据连续函数的和、差、积、商的连续性以及连续函数的复合函数的连续性,再利用基本初等函数的连续性,可得如下结论:

一切多元初等函数在其定义区域内是连续的.所谓定义区域是指包含在定义域内的区域或闭区域.

由多元初等函数的连续性,如果要求它在点 P_0 处的极限,而该点又在此函数的定义区域内,则极限值就是函数在该点的函数值,即

$$\lim_{P \rightarrow P_0} f(P) = f(P_0).$$

例 8.12 求极限

$$I = \lim_{\substack{x \rightarrow 2 \\ y \rightarrow 1}} \frac{\ln x + y^2 \sin xy}{e^y \sin(x^2 + y^2)}.$$

解

$$I = \frac{\ln 2 + 1^2 \sin(2 \cdot 1)}{e^1 \sin(2^2 + 1^2)} = \frac{\ln 2 + \sin 2}{e \sin 5}.$$

例 8.13 求极限 $\lim_{(x, y) \rightarrow (0, 0)} \frac{\sqrt{xy+1}-1}{xy}$.

解



多元函数的
连续性

$$\begin{aligned}\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{\sqrt{xy+1}-1}{xy} &= \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{xy+1-1}{xy(\sqrt{xy+1}+1)} \\ &= \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{1}{\sqrt{xy+1}+1} = \frac{1}{2}.\end{aligned}$$

最后列举一些有界闭区域上多元连续函数的好的性质.

性质 8.1 (有界性与最大值最小值定理) 在有界闭区域 D 上的多元连续函数, 存在最大值和最小值, 因而有界.

性质 8.2 (介值定理) 在有界闭区域 D 上的多元连续函数必取得介于最大值和最小值之间的任何值.

习题 8.1

1. 判定下列平面点集中哪些是开集、闭集、区域、有界集、无界集? 并分别指出它们的聚点所成的点集(称为**导集**)和边界.

- (1) $\{(x, y) | x \neq 0, y \neq 0\}$; (2) $\{(x, y) | 1 < x^2 + y^2 \leq 4\}$;
(3) $\{(x, y) | y > x^2\}$; (4) $\{(x, y) | x^2 + (y-1)^2 \geq 1\} \cap \{(x, y) | x^2 + (y-2)^2 \leq 4\}$.

2. 已知函数 $f(x, y) = x^2 + y^2 - xy \tan \frac{x}{y}$, 试求 $f(tx, ty)$.

3. 试证函数 $F(x, y) = \ln x \cdot \ln y$ 满足关系式

$$F(xy, uv) = F(x, u) + F(x, v) + F(y, u) + F(y, v).$$

4. 已知函数 $f(u, v, w) = u^w + w^{\mu+v}$, 试求 $f(x+y, x-y, xy)$.

5. 求下列函数的定义域:

- (1) $z = \ln(y^2 - 2x + 1)$; (2) $z = \frac{1}{\sqrt{x+y}} + \frac{1}{\sqrt{x-y}}$;
(3) $z = \sqrt{x-\sqrt{y}}$; (4) $z = \ln(y-x) + \frac{\sqrt{x}}{\sqrt{1-x^2-y^2}}$;
(5) $u = \sqrt{R^2 - x^2 - y^2 - z^2} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2 - r^2}} \quad (R > r > 0)$;
(6) $u = \arccos \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}$; (7) $z = \sqrt{x} + \sqrt{y}$;
(8) $z = \ln(-x-y)$; (9) $z = \arcsin \frac{x^2 + y^2}{4} + \arccos \frac{1}{x^2 + y^2}$;
(10) $z = \arcsin \frac{y}{x}$; (11) $u = \ln(z^2 - x^2 - y^2)$.

6. 求下列各极限:

- (1) $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,1)} \frac{1-xy}{x^2+y^2}$; (2) $\lim_{(x,y) \rightarrow (1,0)} \frac{\ln(x+e^y)}{\sqrt{x^2+y^2}}$;

- (3) $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{2 - \sqrt{xy+4}}{xy}$; (4) $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{xy}{\sqrt{2-e^{xy}}-1}$;
 (5) $\lim_{(x,y) \rightarrow (2,0)} \frac{\tan(xy)}{y}$; (6) $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{1 - \cos(x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2)e^{x^2 y^2}}$;
 (7) $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{xy}{\sqrt{xy+1}-1}$; (8) $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,a)} \frac{\sin xy}{x}$;
 (9) $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} (x+y) \sin \frac{1}{x} \cos \frac{1}{y}$; (10) $\lim_{\substack{x \rightarrow \infty \\ y \rightarrow \infty}} \frac{1+x^2+y^2}{x^2+y^2}$;
 (11) $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{x^3+y^3}{x^2+y^2}$; (12) $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{\sin(x^3+y^3)}{x^2+y^2}$;
 (13) $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} (x^2+y^2)^{x^2 y^2}$; (14) $\lim_{(x,y) \rightarrow (1,0)} \frac{\ln(x+e^y)}{\sqrt{x^2+y^2}}$;
 (15) $\lim_{(x,y,z) \rightarrow (0,1,2)} e^{yz} \sin\left(\frac{\pi}{4} yz\right)$; (16) $\lim_{(x,y) \rightarrow (1,2)} \frac{3xy+x^2 y^2}{x+y}$.

7. 证明下列极限不存在:

- (1) $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{x+y}{x-y}$; (2) $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{x^2 y^2}{x^2 y^2 + (x-y)^2}$;
 (3) $\lim_{\substack{x \rightarrow +\infty \\ y \rightarrow +\infty}} \left(1 + \frac{1}{x}\right)^{\frac{x^2}{x+y}}$; (4) $f(x,y) = \frac{x^2+y^2}{x^2+y^2+(x-y)^2}$ 在 $(0,0)$ 点;
 (5) $f(x,y) = \begin{cases} \frac{x-y}{x+y}, & y \neq -x, \\ 0, & y = -x \end{cases}$ 在 $(0,0)$ 点.

8. 函数 $z = \frac{y^2+2x}{y^2-2x}$ 在何处是间断的?

9. 证明 $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{xy}{\sqrt{x^2+y^2}} = 0$.

10. 设 $F(x,y) = f(x)$, $f(x)$ 在 x_0 处连续, 证明: 对任意 $y_0 \in \mathbf{R}$, $F(x,y)$ 在 (x_0, y_0) 处连续.

11. 求函数 $f(x,y) = \frac{\sqrt{4x-y^2}}{\ln(1-x^2-y^2)}$ 的定义域, 并求 $\lim_{(x,y) \rightarrow (\frac{1}{2}, 0)} f(x,y)$.

12. 证明: 极限 $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{xy^2}{x^2+y^4}$ 不存在.

13. 证明 $f(x,y)$ 在区域 D 上连续, 则 $|f(x,y)|$ 在区域 D 上连续.

14. 设 $\bar{D}$ 是平面上的有界闭区域, $P_0(x_0, y_0)$ 为 $\bar{D}$ 外一点. 证明: 在 $\bar{D}$ 内一定存在一点与 P_0 最近, 也存在一点与 P_0 最远.

15. 如果在区域 D 内, 函数 $f(x,y)$ 对变量 x 是连续, 而对变量 y 满足利普希茨条件, 即存在常数 k , 对 $\forall (x, y_1), (x, y_2) \in D$, 有

$$|f(x, y_1) - f(x, y_2)| \leq k |y_1 - y_2|,$$

则函数 $f(x,y)$ 在区域 D 内是二元连续的.