

高等学校教材

高等数学

(第二版)

下册

同济大学数学教研室 主编

高等教育出版社

本书第二版是由同济大学数学教研室,参照1980年高等学校工科数学教材编审委员会审订的《高等数学教学大纲》修订而成的。下册内容中,凡大纲上加星号及双星号部分如原教本未编入的,一律补充进去;大纲上未载部分,如二重积分换元法增写了雅可比公式,增写了含参变量的积分等等。修订者对原教本的部分内容还作了适当的修改,习题也改换和更新了不少。本书第一版中的线性代数、概率论两章,参照《工程数学教学大纲》修订后,各用《工程数学——线性代数》、《工程数学——概率论》等名义出版单行本。

本书下册修订稿仍由陆子芬教授任主审,高等学校工科数学教材编审委员会委托陆庆乐编委任复审。

本书分上、下册出版。下册内容为多元函数微分法及其应用、重积分、曲线积分与曲面积分、无穷级数、微分方程,书末还附有习题答案。

本书说理浅显,叙述详细,例题较多,便于教学,可作为高等工业院校教材,也可作为工程技术人员的自学用书。

责任编辑 丁鹤龄

本书原由人民教育出版社出版。1983年3月9日,上级同意恢复“高等教育出版社”,本书今后改用高等教育出版社名义继续印行。

高等学校教材
高等数学
(第二版)
下 册

同济大学数学教研室 主编

高等教育出版社出版
四川省新华书店重庆发行所发行
重庆新华印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 13.125 字数 316,000

1978年10月第1版

1982年5月第2版 1983年8月第3次印刷

印数 197,501—277,500

书号 13010·0821 定价 1.00 元

目 录

第八章 多元函数微分法及其应用	1
第一节 多元函数的基本概念	1
一、多元函数概念(1) 二、二元函数的极限(5) 三、二元函数的连续性(8) 习题8-1(11)	
第二节 偏导数	12
一、偏导数的定义及其算法(12) 二、高阶偏导数(16) 习题8-2(19)	
第三节 全微分及其应用	20
一、全微分的定义(20) *二、全微分在近似计算中的应用(24) 习题8-3(27)	
第四节 多元复合函数的求导法则	28
习题8-4(33)	
第五节 隐函数的求导公式	34
一、一个方程的情形(34) *二、方程组的情形(37) 习题8-5(40)	
第六节 偏导数的几何应用	41
一、空间曲线的切线与法平面(41) 二、曲面的切平面与法线(45) 习题8-6(48)	
第七节 方向导数与梯度	49
一、方向导数(49) *二、梯度(51) 习题8-7(56)	
第八节 多元函数的极值及其求法	56
一、多元函数的极值及最大值、最小值(56) 二、条件极值 拉格朗日乘数法(62) 习题8-8(65)	
第九节 二元函数的泰勒公式	66
一、二元函数的泰勒公式(66) *二、极值充分条件的证明(71) 习题8-9(73)	
*第十节 最小二乘法	73
习题8-10(80)	
第九章 重积分	81
第一节 二重积分的概念与性质	81

一、二重积分的概念(81)	二、二重积分的性质(85)	习题 9-1(87)
第二节 二重积分的计算法		88
一、利用直角坐标计算二重积分(88)	习题 9-2(1)(96)	二、利用极坐标计算二重积分(98)
习题 9-2(2)(104)	*三、二重积分的换元法(106)	*习题 9-2(3)(111)
第三节 二重积分的应用		112
一、曲面的面积(113)	二、平面薄片的重心(116)	三、平面薄片的转动惯量(118)
习题 9-3(119)		
第四节 三重积分的概念及其计算法		120
习题 9-4(124)		
第五节 利用柱面坐标和球面坐标计算三重积分		125
一、利用柱面坐标计算三重积分(125)	二、利用球面坐标计算三重积分(127)	习题 9-5(132)
*第六节 含参变量的积分		133
*习题 9-6(140)		
第十章 曲线积分与曲面积分		141
第一节 曲线积分的概念与性质		141
一、对弧长的曲线积分的概念(141)	二、对坐标的曲线积分的概念(143)	三、曲线积分的性质(146)
习题 10-1(147)		
第二节 曲线积分的计算法		148
一、对弧长的曲线积分的计算法(148)	二、对坐标的曲线积分的计算法(152)	三、两类曲线积分之间的联系(157)
习题 10-2(159)		
第三节 格林公式及其应用		161
一、格林公式(161)	二、平面上曲线积分与路径无关的条件(164)	三、二元函数的全微分求积(167)
习题 10-3(171)		
第四节 曲面积分的概念与性质		173
一、对面积的曲面积分(173)	二、对坐标的曲面积分(174)	三、曲面积分的性质(179)
习题 10-4(179)		
第五节 曲面积分的计算法		180
一、对面积的曲面积分的计算法(180)	二、对坐标的曲面积分的计算法(184)	三、两类曲面积分之间的联系(186)
习题 10-5(187)		
*第六节 高斯公式 通量与散度		189
一、高斯公式(189)	二、沿任意闭曲面的曲面积分为零的条件(193)	三、通量与散度(94)
*习题 10-6(197)		

*第七节 斯托克斯公式 环流量与旋度198

- 一、斯托克斯公式(198) 二、空间曲线积分与路径无关的条件(202)
三、环流量与旋度(203) *习题 10-7(206)

第十一章 无穷级数207

第一节 常数项级数的概念和性质207

- 一、常数项级数的概念(207) 二、无穷级数的基本性质(210) 三、级数收敛的必要条件(213) *四、柯西审敛原理(214) 习题 11-1(215)

第二节 常数项级数的审敛法217

- 一、正项级数及其审敛法(217) 二、交错级数及其审敛法(224)
三、绝对收敛与条件收敛(225) 习题 11-2(231)

*第三节 广义积分的审敛法 Γ -函数232

- 一、广义积分的审敛法(232) 二、 Γ -函数(238) *习题 11-3(240)

第四节 幂级数241

- 一、函数项级数的一般概念(241) 二、幂级数及其收敛性(242)
三、幂级数的运算(247) 习题 11-4(250)

第五节 函数展开成幂级数251

- 一、泰勒级数(251) 二、函数展开成幂级数(253) 习题 11-5(260)

第六节 函数的幂级数展开式的应用260

- 一、近似计算(260) 二、欧拉公式(265) 习题 11-6(267)

*第七节 函数项级数的一致收敛性及一致收敛级数的基本性质268

- 一、函数项级数的一致收敛性(268) 二、一致收敛级数的基本性质(272)
*习题 11-7(277)

第八节 傅立叶级数278

- 一、三角级数 三角函数系的正交性(278) 二、函数展开成傅立叶级数(281) 习题 11-8(289)

第九节 正弦级数和余弦级数239

- 一、奇函数和偶函数的傅立叶级数(289) 二、函数展开成正弦级数或余弦级数(294) 习题 11-9(296)

第十节 周期为 $2l$ 的周期函数的傅立叶级数296

习题 11-10(300)

*第十一节 傅立叶级数的复数形式300

*习题 11-11(303)

第十二章 微分方程305

第一节 微分方程的基本概念	305
习题 12-1 (310)	
第二节 可分离变量的微分方程	311
习题 12-2 (318)	
第三节 齐次方程	319
一、齐次方程 (319) *二、可化为齐次的方程 (323) 习题 12-3 (325)	
第四节 一阶线性微分方程	326
一、线性方程 (326) 二、贝努利方程 (330) 习题 12-4 (331)	
第五节 全微分方程	332
习题 12-5 (335)	
*第六节 欧拉-柯西近似法	336
*习题 12-6 (339)	
第七节 可降阶的高阶微分方程	340
一、 $y^{(n)}=f(x)$ 型的微分方程 (340) 二、 $y''=f(x, y')$ 型的微分方程 (342) 三、 $y''=f(y, y')$ 型的微分方程 (346) 习题 12-7 (349)	
第八节 高阶线性微分方程及其解的结构	350
一、二阶线性微分方程举例 (350) 二、线性微分方程的解的结构 (353) 习题 12-8 (356)	
第九节 二阶常系数齐次线性微分方程	357
习题 12-9 (367)	
第十节 二阶常系数非齐次线性微分方程	368
一、 $f(x)=e^{\lambda x}P_m(x)$ 型 (369) 二、 $f(x)=e^{\lambda x}[P_1(x)\cos\omega x + P_2(x)\sin\omega x]$ 型 (372) 习题 12-10 (376)	
*第十一节 欧拉方程	377
*习题 12-11 (379)	
*第十二节 微分方程的幂级数解法举例	379
*习题 12-12 (384)	
*第十三节 常系数线性微分方程组解法举例	384
*习题 12-13 (387)	

第八章 多元函数微分法及其应用

上册中我们讨论的都是只有一个自变量的函数, 这种函数叫做一元函数. 但通常我们所研究的问题往往牵涉到多方面的因素, 反映到数学上, 就是一个变量依赖于多个变量的情形. 这就提出了多元函数以及多元函数的微分和积分问题. 本章将在一元函数微分学的基础上, 讨论多元函数的微分法及其应用. 讨论中我们以二元函数为主, 因为从一元函数到二元函数会产生新的问题, 而从二元函数到二元以上的多元函数则可以类推.

第一节 多元函数的基本概念

一、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 1 圆柱体的体积 V 和它的底半径 r 、高 h 之间具有关系

$$V = \pi r^2 h.$$

这里, V 是随着 r 、 h 的变化而变化的, 当 r 、 h 在一定范围 ($r > 0$, $h > 0$) 内取定一对值时, V 的对应值就随之确定.

例 2 一定量的理想气体的压强 p 、体积 V 和绝对温度 T 之间具有关系

$$p = \frac{RT}{V},$$

其中 R 为常数. 这里, p 是随着 V 、 T 的变化而变化的, 当 V 、 T 在一定范围 ($V > 0$, $T > 0^\circ K$) 内取定一对值时, p 的对应值就随之确定.

例 3 设 R 是电阻 R_1 、 R_2 并联后的总电阻, 根据电学知道, 它们之间具有关系

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

这里, R 是随着 R_1 、 R_2 的变化而变化的, 当 R_1 、 R_2 在一定范围 ($R_1 > 0$, $R_2 > 0$) 内取定一对值时, R 的对应值就随之确定.

上面三个例子的具体意义虽各不相同, 但它们却有一个共同的性质, 抽出这些共性就可得出以下二元函数的定义.

定义 1 设有变量 x 、 y 和 z . 如果当变量 x 、 y 在一定范围内任意取定一对值时, 量 z 按照一定的法则, 总有确定的数值和它们对应, 则 z 叫做 x 、 y 的二元函数, 记作

$$z = f(x, y) \quad \text{或} \quad z = z(x, y),$$

其中变量 x 、 y 叫做自变量, 而 z 也叫做因变量. 自变量 x 、 y 的变化范围叫做函数的定义域.

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

例如, 长方体体积 V 是它的长 a 、宽 b 和高 c 的函数

$$V = abc;$$

电流通过电阻时所作的功 P 是电阻 R 、电流 I 和时间 t 的函数

$$P = I^2 R t;$$

等等.

二元以及二元以上的函数统称为多元函数.

如同我们用 x 轴上的点来表示数值 x 一样, 我们可用 xOy 平面上的点 $P(x, y)$ 来表示一对有序数组 x, y . 于是函数 $z = f(x, y)$ 也可简记为 $z = f(P)$, 而称 z 为点 P 的函数. 类似地, 可用空间内的一点 $P(x, y, z)$ 来表示有序数组 x, y, z . 函数 $u = f(x, y, z)$ 也就可简记为 $u = f(P)$, 等等.

关于函数的定义域,与一元函数相类似,我们作如下约定:在一般地讨论用算式表达的二元函数 $z=f(x, y)$ 时,就以使这个算式有确定值的自变量 x, y 的变化范围所确定的点集(具有某种性质的点的全体)为这个函数的定义域. 例如,函数 $z=\ln(x+y)$ 的定义域为适合 $x+y>0$ 的点的全体,它是一个平面点集,其中的点 (x, y) 具有性质: $x+y>0$, 我们把它简记为 $\{(x, y) | x+y>0\}$ (图 8-1). 又如,函数 $z=\arcsin(x^2+y^2)$ 的定义域为适合 $x^2+y^2\leq 1$ 的点的全体,即平面点集 $\{(x, y) | x^2+y^2\leq 1\}$ (图 8-2).

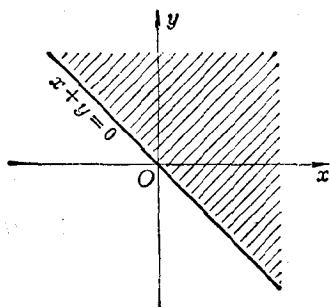


图 8-1

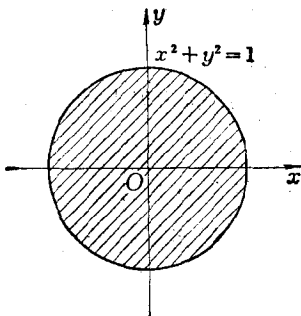


图 8-2

常见的二元函数的定义域是平面上的一个区域. 为了确切地说明区域的概念,我们引入以下一些定义.

以 $P_0(x_0, y_0)$ 为中心、 $\delta>0$ 为半径的圆的内部的点的全体,即平面点集 $\{(x, y) | (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 < \delta^2\}$, 称为点 P_0 的 δ 邻域,记为 $N(P_0, \delta)$.

设 E 为平面上的一个点集,如果点 P 属于 E , 且存在某个邻域,使这邻域中的点都属于 E , 则称 P 为集合 E 的内点 (图 8-3).

如果集合 E 的点都是 E 的内点, 则称 E 为开集. 例如,集合 $E_1 = \{(x, y) | 1 < x^2 + y^2 < 4\}$ 中每个点都是 E_1 的内点,故 E_1 为开集.

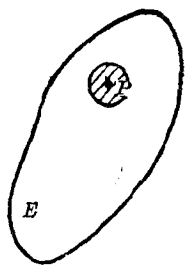


图 8-3

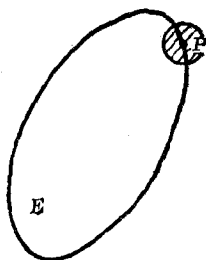


图 8-4

如果点 P 的任意一个邻域中都有属于 E 的点,也有不属于 E 的点(P 可以属于 E ,也可以不属于 E),则称 P 为 E 的边界点(图 8-4). E 的边界点的全体称为 E 的边界.例如,在上例中 E_1 的边界是圆周 $x^2+y^2=1$ 和 $x^2+y^2=4$.

如果集合 D 是开集,且对于 D 中任意二点,都可以用完全落在 D 内的折线连接起来(称 D 的这种性质为连通性),则称 D 为区域或开区域.换句话说,区域是连通的开集.例如, $\{(x, y) | x+y>0\}$, $\{(x, y) | 1<x^2+y^2<4\}$ 都是区域.

区域连同它的边界一起,称为闭区域.例如, $\{(x, y) | x+y\geq 0\}$, $\{(x, y) | 1\leq x^2+y^2\leq 4\}$ 都是闭区域.

以后在不需要区分开区域和闭区域时,我们统称它们为区域,并用字母 D 表示.

如果点集 E 可以被包含在一个以原点为中心的圆内,则称 E 为有界点集,否则称为无界点集.例如, $\{(x, y) | 1\leq x^2+y^2\leq 4\}$ 是有界闭区域, $\{(x, y) | x+y>0\}$ 是无界开区域.

上述关于平面点集的内点、邻域、开集、区域、闭区域等概念可以完全类似地推广到空间点集的情形.

我们曾利用平面直角坐标系来表示一元函数 $y=f(x)$ 的图形,一般说来,它是平面上的一条曲线.对于二元函数 $z=f(x, y)$,

我们可以利用空间直角坐标系来表示它的图形. 设函数 $z=f(x, y)$ 的定义域为 xOy 坐标面上某一区域 D , 对于 D 中的每一点 $P(x, y)$, 在空间可以作出一点 $M(x, y, f(x, y))$ 与它对应. 当点 $P(x, y)$ 在 D 中变动时, 点 $M(x, y, f(x, y))$ 就在空间相应地变动, 一般说来, 它的轨迹是一个曲面 (图 8-5). 这个曲面就称为二元函数 $z=f(x, y)$ 的图形. 因此, 二元函数可用一个曲面作为它的几何表示.

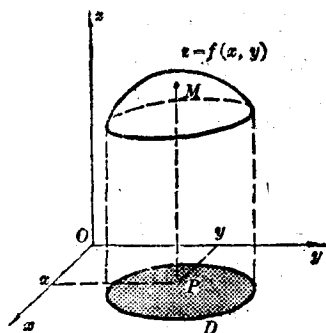


图 8-5

例如, 由空间解析几何知道, 线性函数

$$z=ax+by+c$$

的图形是一个平面; 由方程

$$x^2+y^2+z^2=a^2$$

所确定的函数 $z=f(x, y)$ 的图形是球心在原点、半径为 a 的球面. 它的定义域是圆形闭区域 $D=\{(x, y) \mid x^2+y^2 \leq a^2\}$. 在 D 的内部任一点 (x, y) 处, 这函数有两个对应值, 一个为 $\sqrt{a^2-x^2-y^2}$, 另一个为 $-\sqrt{a^2-x^2-y^2}$. 因此, 这是多值函数. 取正值的一个表示上半球面, 取负值的一个表示下半球面. 以后除了对二元函数 $z=f(x, y)$ 另作声明外, 总假定它是单值的; 如果遇到多值函数, 我们可以把它拆成几个单值函数后再分别加以讨论.

二、二元函数的极限

现在来讨论二元函数 $z=f(x, y)$ 当自变量 $x \rightarrow x_0$, $y \rightarrow y_0$, 即点 $P(x, y) \rightarrow P_0(x_0, y_0)$ 时的极限定义.

设函数 $z=f(x, y)$ 在点 $P_0(x_0, y_0)$ 的某一邻域内有定义(点

P_0 可以除外), $P(x, y)$ 是该邻域内异于 P_0 的任意一点. 如果当点 P 以任何方式趋近于点 P_0 时, 函数的对应值 $f(x, y)$ 趋近于一个确定的常数 A , 我们就说, A 是函数 $z=f(x, y)$ 当 $x \rightarrow x_0, y \rightarrow y_0$ 时的极限, 记作

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

或 $f(x, y) \rightarrow A \quad (x \rightarrow x_0, y \rightarrow y_0),$

在这里, 我们注意到点 $P(x, y)$ 趋近于点 $P_0(x_0, y_0)$, 就是它们之间的距离趋于零, 即

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

因此上述极限记号也可记作

$$f(x, y) \rightarrow A \quad (\rho \rightarrow 0).$$

类似于一元函数极限的“ ε - δ ”定义, 上述极限也可用“ ε - δ ”的方式定义如下.

定义 2 设函数 $z=f(x, y)$ 在点 $P_0(x_0, y_0)$ 的某一邻域内有定义(点 P_0 可以除外), 如果对于每一个任意给定的正数 ε , 总存在一个正数 δ , 使得对于适合不等式

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

的一切点 $P(x, y)$, 都有

$$|f(x, y) - A| < \varepsilon \quad (1)$$

成立, 则称 A 为函数 $z=f(x, y)$ 当 $x \rightarrow x_0, y \rightarrow y_0$ 时的极限①.

利用点的邻域概念, 上述极限定义也可描述为: 对于点 A 的任何邻域 $(A-\varepsilon, A+\varepsilon)$, 总存在点 P_0 的 δ 邻域 $N(P_0, \delta)$, 使这个邻域内不与 P_0 重合的任意一点 P 的函数值 $f(P)=f(x, y)$,

① 如果函数 $z=f(x, y)$ 在 P_0 的任一邻域中除 P_0 外, 尚不属于函数的定义域 D 的点, 但又总有异于 P_0 的属于 D 的点, 则只要对 D 内适合不等式 $0 < |PP_0| < \delta$ 的点 P , 有不等式(1)成立, 便称函数 $f(P)$ 当 $P \rightarrow P_0$ 时的极限为 A . 在后面讨论函数的连续性及函数的偏导数等问题时, 对上述这类点的情形, 也作类似的规定, 不再说明.

都落在 A 的 ε 邻域内. 从几何上来说, 就是在 P_0 的 δ 邻域内 (P_0 可以除外), 函数 $z=f(x, y)$ 的图形将位于两个平行平面 $z=A-\varepsilon$ 和 $z=A+\varepsilon$ 之间.

利用点函数的概念, 上述极限定义可用与一元函数的极限完全相同的形式来描述: 对于任意给定的正数 ε , 总存在一个正数 δ , 使当 $0 < |PP_0| < \delta$ 时, 都有 $|f(P) - A| < \varepsilon$ 成立. 这一形式的极限定义, 对二元以上的函数也完全适用.

为了区别于一元函数的极限, 我们把上述二元函数的极限叫做二重极限.

例 4 设 $f(x, y) = (x^2 + y^2) \sin \frac{1}{x^2 + y^2} \quad (x^2 + y^2 \neq 0)$,

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

证 因为

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

可见, 对任给 $\varepsilon > 0$, 取 $\delta = \sqrt{\varepsilon}$, 则当 $0 < \sqrt{(x-0)^2 + (y-0)^2} < \delta$ 时, 总有

$$\left| (x^2 + y^2) \sin \frac{1}{x^2 + y^2} - 0 \right| < \varepsilon$$

成立, 所以

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

我们必须注意, 所谓二重极限存在, 是指 $P(x, y)$ 以任何方式趋近于 $P_0(x_0, y_0)$ 时, 函数都无限接近于 A . 因此, 如果 $P(x, y)$ 以某一特殊方式, 例如沿着一条定直线或定曲线趋近于 $P_0(x_0, y_0)$ 时, 即使函数无限接近于某一确定值, 我们还不能由此断定函数的极限存在. 但是反过来, 如果当 $P(x, y)$ 以不同方式趋近于 $P_0(x_0, y_0)$ 时, 函数趋近于不同的值, 那末就可以断定这函数的极限不存在. 下面用例子来说明这种情形.

考察函数

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

显然, 当点 $P(x, y)$ 沿 x 轴趋近于点 $(0, 0)$ 时,

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

又当点 $P(x, y)$ 沿 y 轴趋近于点 $(0, 0)$ 时,

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

虽然点 $P(x, y)$ 以上述两种特殊方式(沿 x 轴或沿 y 轴)趋近于原点时函数的极限存在并且相等, 但是极限 $\lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 0}} f(x, y)$ 并不存在.

这是因为当点 $P(x, y)$ 沿着直线 $y=kx$ 趋近于点 $(0, 0)$ 时, 有

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

显然它是随着 k 的不同而改变的.

三、二元函数的连续性

明白了极限的概念, 就不难讨论二元函数的连续性问题. 设函数 $z=f(x, y)$ 在区域 D 内有定义, $P_0(x_0, y_0)$ 是 D 的一个内点, $P(x, y)$ 是在 D 内而且是 P_0 的一个邻域内的任意点, 我们给出二元函数在点 P_0 为连续的定义如下:

定义 3 如果当 $x \rightarrow x_0, y \rightarrow y_0$ 时, 函数的极限存在, 且等于它在点 $P_0(x_0, y_0)$ 处的函数值, 即

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

那末就称函数 $z=f(x, y)$ 在点 P_0 处连续.

换句话说, 如果当点 $P(x, y)$ 与点 $P_0(x_0, y_0)$ 的距离趋于零时, 差值 $f(x, y) - f(x_0, y_0)$ 也趋近于零, 那末二元函数在点 P_0 是

连续的。

采用“ ε - δ ”的方式以及利用点的邻域概念来描述函数 $z = f(x, y)$ 在点 P_0 处连续的定义, 读者可自行给出。

如果二元函数在区域 D 内各点都连续, 那末就称函数在 D 内连续。二元连续函数的图形是一个无孔隙、无裂缝的曲面。例如连续函数

$$z = \sqrt{1 - x^2 - y^2} \quad (x^2 + y^2 \leq 1)$$

的图形是球心在原点、半径等于 1 的上半球面。

函数的不连续点称为间断点。上面已经讨论过的函数

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

当 $x \rightarrow 0, y \rightarrow 0$ 时的极限不存在, 所以点 $(0, 0)$ 是函数的一个间断点。二元函数的间断点可以形成一条曲线, 例如函数

$$z = \sin \frac{1}{x^2 + y^2 - 1}$$

在圆周 $x^2 + y^2 = 1$ 上没有定义, 所以该圆周上各点都是间断点。

类似地可给出二元以上的函数在某点是连续的定义, 在此不再赘述。

与闭区间上一元连续函数的性质相类似, 在有界闭区域上多元连续函数也有如下性质。

性质 1 (最大值和最小值定理) 在有界闭区域 D 上的多元连续函数, 在该区域上至少取得它的最大值和最小值各一次。这就是说, 在 D 上至少有一点 P_1 及一点 P_2 , 使得 $f(P_1)$ 为最大值而 $f(P_2)$ 为最小值:

$$f(P_2) \leq f(P) \leq f(P_1) \quad (\text{点 } P \text{ 在 } D \text{ 上}).$$

性质 2 (介值定理) 在有界闭区域上的多元连续函数, 如果取得两个不同的函数值, 则它在该区域上取得介于这两个值之间

的任何值至少一次。特殊地，如果 μ 是在函数的最小值 m 和最大值 M 之间的一个数，则在 D 上至少有一点 Q ，使得 $f(Q) = \mu$ 。

***性质 3(一致连续性定理)** 在有界闭区域上的多元连续函数必定在该区域上一致连续。这就是说，若 $f(P)$ 在有界闭区域 D 上连续，那末对于任意给定的正数 ε ，总存在一个正数 δ ，使得对于区域 D 上的任意二点 P_1, P_2 ，只要当 $|P_1 P_2| < \delta$ 时，都有

$$|f(P_1) - f(P_2)| < \varepsilon$$

成立。

我们指出：一元函数中关于极限的运算法则，对于多元函数仍然适用；根据极限运算法则，可以证明多元连续函数的和、差、积均为连续函数；在分母不为零处，连续函数的商是连续函数；多元连续函数的复合函数也是连续函数。

与一元的初等函数相类似，多元初等函数也是可由一个式子所表示的函数，而这个式子是由含多个自变量(如 x, y 等)的基本初等函数经过有限次的四则运算和复合步骤所构成的。例如，

$$\frac{x+x^2-y^2}{1+x^2}, \sin(x+y), e^{x+y} \cdot \ln(1+x^2+y^2) \text{ 等都是多元初等函数。}$$

根据上面指出的连续函数的和、差、积、商的连续性以及连续函数的复合函数的连续性，我们进一步可得如下结论：

一切多元初等函数在其定义区域内是连续的。

由多元初等函数的连续性，如要找它在一点 P_0 处的极限值，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

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

例如 $\lim_{\substack{x \rightarrow 2 \\ y \rightarrow 1}} (x^2 - 2xy + 3y^2) = 2^2 - 2 \cdot 2 \cdot 1 + 3 \cdot 1^2 = 3,$

$$\lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow \frac{1}{2}}} \arcsin \sqrt{x^2 + y^2} = \arcsin \sqrt{\frac{1}{4}} = \frac{\pi}{6}.$$

习 题 8-1

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

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

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

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

4. 求下列各函数的定义域:

$$(1) z = \ln(y^2 - 2x + 1); \quad (2) z = \frac{1}{\sqrt{x+y}} + \frac{1}{\sqrt{x-y}};$$

$$(3) z = \frac{\sqrt{4x-y^2}}{\ln(1-x^2-y^2)}; \quad (4) u = \frac{1}{\sqrt{x}} + \frac{1}{\sqrt{y}} + \frac{1}{\sqrt{z}};$$

$$(5) z = \sqrt{x - \sqrt{y}}; \quad (6) z = \ln(y-x) + \frac{\sqrt{x}}{\sqrt{1-x^2-y^2}};$$

$$(7) u = \sqrt{R^2 - x^2 - y^2 - z^2} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2 - r^2}} \quad (R > r > 0);$$

$$(8) u = \arccos \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}.$$

5. 求下列各极限:

$$(1) \lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 1}} \frac{1-xy}{x^2+y^2}; \quad (2) \lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 0}} \frac{1}{x^2+y^2};$$

$$(3) \lim_{\substack{x \rightarrow \infty \\ y \rightarrow \infty}} \frac{1}{x^2+y^2}; \quad (4) \lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 0}} \frac{2 - \sqrt{xy+4}}{xy};$$

$$(5) \lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 0}} \frac{xy}{\sqrt{xy+1}-1}; \quad (6) \lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 0}} \frac{\sin xy}{x};$$

$$(7) \lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 0}} \frac{1 - \cos(x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2)x^2y^2}.$$

6. 证明 $\lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 0}} \frac{xy}{\sqrt{x^2 + y^2}} = 0$.

7. 证明下列极限不存在:

$$(1) \lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 0}} \frac{x+y}{x-y}; \quad (2) \lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 0}} \frac{x^2y^2}{x^2y^2 + (x-y)^2}.$$