

普通高等教育“十三五”规划教材
全国高等医药院校规划教材

医药高等数学

第5版

严云良 郑洁钢 主编



科学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材
全国高等医药院校规划教材

医药高等数学

第 5 版

严云良 郑洁钢 主编

周永治 主审

科学出版社

北京

●版权所有 侵权必究●

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303(打假办)

内 容 简 介

本书为普通高等教育“十三五”规划教材,由全国16所中医院校长期从事数学教学工作的教师联合编写.全书分10章,包括一元函数微积分、空间解析几何、多元函数微积分、微分方程与无穷级数等.编写中既注意了数学学科本身的科学性与系统性,同时又注意了它在中医药学科里的应用.全书文字简洁、内容精炼、由浅入深,章后有习题,书后附有答案.

本书可供医药院校各专业、各层次的学生使用,也可作为医药工作者学习高等数学的参考书.

图书在版编目(CIP)数据

医药高等数学 / 严云良,郑洁钢主编. —5版. —北京:科学出版社,2015
普通高等教育“十三五”规划教材·全国高等医药院校规划教材
ISBN 978-7-03-046167-4

I. 医… II. ①严…②郑… III. 医用数学-高等数学-医学院校-教材
IV. ①R311 ②O13

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第258180号

责任编辑:刘亚 曹丽英/责任校对:李影
责任印制:肖兴/封面设计:大器设计工作室

版权所有,违者必究。未经本社许可,数字图书馆不得使用

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>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016年1月第 五 版 印张:17 1/2

2016年1月第三十四次印刷 字数:406 000

定价:39.80元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《医药高等数学》(第5版)编写人员

主 编 严云良 郑洁钢

副主编 汪旭升 曹 敏 邵建华 吕佳萍

赵聪俐 汪春华 傅 爽 陈丽君

主 审 周永治

编 委 (按姓氏笔画排序)

王亚云 安徽中医药大学

王蕴华 天津中医药大学

卞 丽 湖北中医药大学

石 莹 南京中医药大学

吕佳萍 南京中医药大学

严云良 浙江中医药大学

杨文国 南京中医药大学

李孝生 贵阳中医学院

李晓红 浙江中医药大学

汪旭升 广西中医药大学

汪春华 安徽中医药大学

沈宗山 云南中医学院

陈丽君 湖北中医药大学

陈素玲 山东中医药大学

邵建华 上海中医药大学

武京君 山东中医药大学

尚德泉 甘肃中医学院

易 颖 广州中医药大学

郑洁钢 湖南中医药大学

赵文峰 河南中医药大学

赵 莹 上海中医药大学

赵聪俐 天津中医药大学

郝 涛 山东中医药大学

胡灵芝 陕西中医药大学

洪全兴 福建中医药大学

高敏艳 天津中医药大学

黄爱武 湖南中医药大学

曹 敏 贵阳中医学院

崔志伟 湖北中医药大学

覃 洁 广西中医药大学

傅 爽 山东中医药大学

第 5 版编写说明

《医药高等数学》《医药数理统计》《医药数学实验》是全国 19 所中医院校联合编写的科学出版社 2001 年 4 月出版的数学系列教材。相继,2004 年 8 月《医药高等数学》《医药数理统计》第 2 版出版,同时由《医药数学实验》转换的《医药高等数学学习辅导》《医药数理统计学习辅导》第 1 版出版(辅导教材比配套的理论教材推迟一版);2009 年 5 月出版第 3 版理论教材与第 2 版辅导教材;2012 年 5 月出版第 4 版理论教材与第 3 版辅导教材(2012 年的教材为“十二五”规划教材)。该套教材自 2001 年出版以来,发行面广,发行量大,在中医院校受到广大师生的欢迎。编写组根据科学出版社对普通高等教育规划教材的具体要求,对前版教材进行全面的分析、总结,认真进行修改、补充,编写成“十三五”规划教材(第 5 版的《医药高等数学》《医药数理统计》与第 4 版的《医药高等数学学习辅导》《医药数理统计学习辅导》)。该配套教材将更适应医药院校的医药类、管理类、信息类、人文类等专业的需要,定于 2016 年 1 月由科学出版社正式出版。

《医药高等数学》全书共 10 章,包括一元函数微积分、空间解析几何、多元函数微积分、微分方程、无穷级数等内容。教材编写中注意了与中学数学的衔接;在不影响数学学科本身的系统性、完整性前提下,各章还列举了一定数量的医药学科的例题,使其更具有医药院校教材的特色。本教材每章后有习题,书后有习题解答,另外还配有辅导教材《医药高等数学学习辅导》。本教材授课需 90~100 学时,不同专业根据需要可对加“*”号的内容有所选择。课时偏少的专业还可重点讲授前五章的一元函数微积分与第九章的微分方程的内容。

参加本版教材编写的有以下院校:贵阳中医学院、广西中医药大学、云南中医学院、广州中医药大学、湖南中医药大学、湖北中医药大学、福建中医药大学、上海中医药大学、浙江中医药大学、安徽中医药大学、南京中医药大学、山东中医药大学、天津中医药大学、甘肃中医学院、陕西中医药大学、河南中医药大学。

本教材编写过程中得到许多同行专家的关心与支持,在此一并表示感谢。

本教材尚有不足之处,恳请读者与同行批评指正。

编者

2015 年 11 月

目 录

第5版编写说明

第一章 函数与极限

§ 1-1 函数	(1)	§ 1-3 极限存在定理与两个重要 极限	(16)
1-1.1 函数的概念	(1)	1-3.1 极限存在定理	(16)
1-1.2 分段函数、反函数、复合函数	(3)	1-3.2 两个重要极限	(16)
1-1.3 初等函数	(5)	§ 1-4 函数的连续性	(18)
§ 1-2 函数的极限	(7)	1-4.1 函数的增量	(18)
1-2.1 数列的极限	(7)	1-4.2 函数的连续与间断	(19)
1-2.2 函数的极限	(9)	1-4.3 初等函数的连续性	(21)
1-2.3 无穷小量与无穷大量	(12)	习题一	(22)
1-2.4 函数极限的运算	(13)		

第二章 导数与微分

§ 2-1 导数的概念	(26)	2-2.5 由参数方程所确定的函数的 求导法则	(39)
2-1.1 导数的定义	(26)	2-2.6 高阶导数	(40)
2-1.2 函数连续性与可导性的关系	(29)	§ 2-3 微分概念	(41)
2-1.3 几个基本初等函数的导数	(29)	2-3.1 微分的定义及几何意义	(41)
§ 2-2 求导法则	(31)	2-3.2 微分的求法、微分形式不变 性	(42)
2-2.1 导数的四则运算法则	(31)	§ 2-4 微分的应用	(43)
2-2.2 反函数的求导法则	(33)	2-4.1 近似计算	(43)
2-2.3 复合函数的求导法则	(35)	2-4.2 误差估计	(45)
2-2.4 隐函数的求导法则	(37)	习题二	(46)

第三章 导数的应用

§ 3-1 中值定理	(49)	3-2.3 其他未定型极限的求法	(53)
§ 3-2 洛必达法则	(52)	§ 3-3 函数性态的研究	(53)
3-2.1 两个无穷小量之比的极限	(52)	3-3.1 函数的增减性和极值	(54)
3-2.2 两个无穷大量之比的极限	(52)	3-3.2 曲线的凹凸与拐点	(57)
		3-3.3 曲线的渐近线	(59)
		3-3.4 函数图形的描绘	(61)

习题三 (63)

第四章 不定积分

§ 4-1 不定积分的概念与性质 ... (66)	§ 4-3 两种积分法 (70)
4-1.1 原函数 (66)	4-3.1 换元积分法 (70)
4-1.2 不定积分的概念 (66)	4-3.2 分部积分法 (77)
4-1.3 不定积分的几何意义 (67)	* § 4-4 有理函数与三角函数有理
4-1.4 不定积分的简单性质 (67)	式的积分 (81)
§ 4-2 不定积分的基本公式 (68)	4-4.1 有理函数的积分 (81)
4-2.1 基本公式 (68)	4-4.2 三角函数有理式的积分 ... (83)
4-2.2 直接积分法 (69)	习题四 (85)

第五章 定积分及其应用

§ 5-1 定积分的概念 (88)	5-4.2 旋转体的体积 (99)
5-1.1 两个实际问题 (88)	* 5-4.3 平面曲线的弧长 (100)
5-1.2 定积分的概念 (89)	5-4.4 函数在区间上的平均值 ... (102)
§ 5-2 定积分的简单性质 (91)	5-4.5 变力所做的功 (102)
§ 5-3 定积分的计算 (93)	5-4.6 液体的静压力 (104)
5-3.1 牛顿-莱布尼茨公式 (93)	§ 5-5 广义积分和 Γ 函数 (105)
5-3.2 定积分的换元积分法和分部 积分法 (94)	5-5.1 广义积分 (105)
§ 5-4 定积分的应用 (96)	5-5.2 Γ 函数 (107)
5-4.1 平面图形的面积 (97)	习题五 (108)

第六章 空间解析几何

§ 6-1 空间直角坐标系 (111)	6-3.1 空间平面及其方程 (120)
6-1.1 空间直角坐标系 (111)	6-3.2 空间直线及其方程 (123)
6-1.2 空间两点间的距离 (112)	§ 6-4 空间的曲面与曲线 (126)
§ 6-2 向量代数 (113)	6-4.1 空间曲面及其方程 (126)
6-2.1 向量及其坐标表示 (113)	6-4.2 二次曲面 (126)
6-2.2 向量的数量积 (117)	6-4.3 空间曲线及其方程 (131)
6-2.3 向量的向量积 (118)	习题六 (132)
§ 6-3 空间的平面与直线 (120)	

第七章 多元函数微分学

§ 7-1 多元函数的概念 (135)	7-1.1 多元函数的概念 (135)
---------------------------	---------------------------

7-1.2 二元函数的极限 …… (137)	应用 …… (144)
7-1.3 二元函数的连续性 …… (138)	§ 7-4 多元复合函数与隐函数的
§ 7-2 多元函数的偏导数 …… (139)	微分法 …… (145)
7-2.1 偏导数的概念与计算 …… (139)	7-4.1 连锁法则 …… (145)
7-2.2 偏导数的几何意义 …… (141)	7-4.2 隐函数的微分法 …… (148)
7-2.3 偏导数与连续的关系 …… (141)	7-4.3 全微分形式不变性 …… (149)
7-2.4 高阶偏导数 …… (141)	§ 7-5 多元函数的极值 …… (150)
§ 7-3 多元函数的全微分及其应	7-5.1 多元函数的极值 …… (150)
用 …… (143)	7-5.2 多元函数的最值 …… (152)
7-3.1 全增量与全微分的概念 …… (143)	7-5.3 多元函数的条件极值 …… (153)
7-3.2 全微分在近似计算上的	习题七 …… (155)

第八章 多元函数积分学

§ 8-1 二重积分的概念及简单性	8-3.2 对弧长的曲线积分的计算
质 …… (158)	…………… (172)
8-1.1 二重积分的概念 …… (158)	§ 8-4 对坐标的曲线积分 …… (174)
8-1.2 二重积分的简单性质 …… (160)	8-4.1 对坐标的曲线积分的概念
§ 8-2 二重积分的计算 …… (161)	及简单性质 …… (174)
8-2.1 直角坐标系中二重积分的	8-4.2 对坐标的曲线积分的计算
计算方法 …… (161)	…………… (176)
8-2.2 利用极坐标计算二重积分	§ 8-5 格林公式及其应用 …… (179)
…………… (167)	8-5.1 格林公式 …… (179)
* § 8-3 对弧长的曲线积分 …… (171)	8-5.2 曲线积分与路径无关的
8-3.1 对弧长的曲线积分的概念	条件 …… (182)
及其简单性质 …… (171)	习题八 …… (185)

第九章 微分方程

§ 9-1 基本概念 …… (188)	9-4.2 $y''=f(x, y')$ 型的二阶微分
9-1.1 实例 …… (188)	方程 …… (199)
9-1.2 微分方程及其阶 …… (189)	9-4.3 $y''=f(y, y')$ 型的二阶微分
9-1.3 微分方程的解 …… (189)	方程 …… (200)
§ 9-2 可分离变量的微分方程	§ 9-5 二阶常系数线性微分方程
…………… (190)	…………… (201)
§ 9-3 一阶线性微分方程 …… (194)	9-5.1 二阶线性微分方程的解的
§ 9-4 可降阶的二阶微分方程 …… (198)	结构 …… (201)
9-4.1 $y''=f(x)$ 型的二阶微分方	9-5.2 二阶常系数线性齐次微分
程 …… (199)	方程的解法 …… (203)

9-5.3 二阶常系数线性非齐次 方程的解法	(206)	9-6.2 拉氏变换的基本性质 ...	(211)
* § 9-6 拉普拉斯变换	(208)	9-6.3 拉氏逆变换	(212)
9-6.1 拉普拉斯变换的基本概念	(209)	9-6.4 利用拉氏变换解微分方程的 初值问题	(214)
		习题九	(217)

第十章 无穷级数

§ 10-1 常数项级数的概念及性质	(220)	10-3.3 幂级数的运算	(234)
10-1.1 常数项级数的概念	(220)	§ 10-4 函数的幂级数展开及其 应用	(235)
10-1.2 无穷级数的基本性质	(221)	10-4.1 泰勒公式与泰勒级数	(235)
§ 10-2 常数项级数的敛散性	(224)	10-4.2 函数的幂级数展开	(237)
10-2.1 正项级数及其审敛法	(224)	10-4.3 函数展成幂级数的应用	(239)
10-2.2 任意项级数	(228)	* § 10-5 傅里叶级数	(243)
10-2.3 交错级数及其审敛法	(229)	10-5.1 三角级数	(244)
§ 10-3 幂级数	(230)	10-5.2 三角函数系的正交性	(244)
10-3.1 函数项级数的概念	(230)	10-5.3 函数展开成傅里叶级数	(245)
10-3.2 幂级数及其收敛性	(231)	习题十	(251)
习题答案			(253)

第一章

函数与极限

高等数学是研究变量的一门科学,它的主要研究对象是函数.极限方法是高等数学的基础,它从方法论上突出地表现了高等数学不同于初等数学的特点.本章将介绍函数和极限的基本概念,建立极限的运算法则,给出函数连续性的定义及性质.

§ 1-1 函 数

1-1.1 函数的概念

一、常量与变量

在观察和研究某一变化过程时,会遇到各种各样的量,如温度、时间、路程、重量、体积、血压、物价、利率等.其中有的量在过程中不变化,也就是保持一定的数值,这种量叫做常量;还有一些量在过程中是变化着的,也就是可以取不同的数值,这种量叫做变量.

常量与变量的划分是相对的,它依赖于研究问题的场合,同一个量在某种场合下是常量,在另一种场合下则可能为变量.例如,重力加速度在地球表面一个不大的范围内是常量,在一个广大的范围内就是变量.

也有这种情况,某些量在整个过程中是变化的,但在过程的某一阶段可以看做常量.例如,人的身高在一天内看成常量,商品的价格在短期内看成是常量.

二、函数的概念

在自然现象和现实生活中,在某一变化过程中同时牵涉到几个变量,它们通常不是孤立的,而是遵循一定的规律相互依赖又相互制约地变化的,如下面的例子.

例 1 球的体积 V 与半径 R 之间有关系式 $V = \frac{4}{3}\pi R^3$, 当 R 取 $(0, +\infty)$ 中的任一个值时,按照这个关系可以唯一地确定 V 的一个值与之对应.

例 2 气象台气温记录仪所记下的某一天 24 小时内的气温曲线如图 1-1 所示,横坐标 t 表示时刻,纵坐标 T 表示气温.这条曲线表示了时间 t 和气温 T 之间的关系.对于 $[0, 24]$ 上的任一个值 t_0 ,通过图像可以唯一地确定该时刻的气温 T_0 .

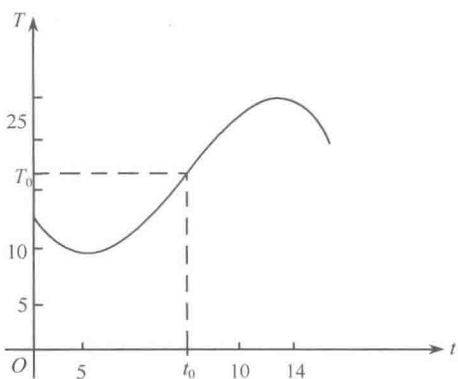


图 1-1

上面的两个例子,虽然实际意义各有不同,变量间的对应关系也是用不同方式表达的,但它们都表达了两个变量之间的相依关系.当其中一个变

量在某范围内每取一个数值时,按照一定的规律(对应的法则),另一变量就有唯一确定的值与之对应.由此,可以抽象出函数的定义.

定义 1 设有两个变量 x 和 y , D 为一非空数集,如果对于 D 内每个数 x ,变量 y 按一定的法则 f 总有唯一确定的数值与之对应,则称 y 是 x 的函数.记作

$$y = f(x)$$

数集 D 称为该函数的定义域, x 叫做自变量, y 叫做因变量,自变量取 x_0 时的函数值记成 $f(x_0)$ 或 $y|_{x=x_0}$,全体函数值的集合

$$M = \{y \mid y = f(x), x \in D\} \quad (1-1)$$

称为函数的值域.

函数的定义中,涉及定义域、对应法则和值域三个因素.很明显,只要定义域和对应法则确定了,值域也就随之确定.因此,定义域和对应法则是确定函数的两个要素.例如, $y = \ln x^3$ 与 $y = 3 \ln x$,两要素都相同,所以是同一函数;而 $y = \frac{x^2-1}{x-1}$ 与 $y = x+1$,因定义域不同,不是同一函数.

三、函数的表示法

常用的函数表示法有:解析法(公式法)、列表法、图像法.

1. 解析法

用数学运算式子来表示变量间关系的方法,称为解析法(公式法),如例 1 是用解析法表示的函数.用解析法表示函数便于计算和理论分析,在高等数学中讨论的函数,大都用这种方法表示.

2. 列表法

列表法即把一系列自变量的值及其对应的函数值列成一个表格来表示函数关系,如对数表、三角函数表等.列表法使用方便,可以不用计算直接从表上读出函数值.

3. 图像法

图像法用坐标平面内的图形(一般是曲线)表示变量间的函数关系,如例 2 中的函数关系.图像法的优点是直观、形象、函数特征一目了然,对研究有一定的启发性.

在实际问题中,上述三种方法常结合应用.

四、函数的基本性质

1. 函数的有界性

设函数 $f(x)$ 在区间 I 上有定义,若存在一个正数 M ,使得当 $x \in I$ 时,恒有

$$|f(x)| \leq M$$

成立,则称函数 $f(x)$ 在 I 上有界,如果这样的正数 M 不存在,则称 $f(x)$ 在 I 上无界.如果函数 $f(x)$ 在其定义域内有界,则称 $f(x)$ 为有界函数.

例如, $y = \sin x$ 在定义域 $(-\infty, +\infty)$ 内是有界的,因而是有界函数.而 $y = \frac{1}{x}$ 在区间 $(0, 1)$ 内是无界的.

显然,如果函数 $y = f(x)$ 在区间 I 上有界,则它的图形在 I 上必介于平行线 $y = \pm M$ 之间.

2. 函数的奇偶性

设函数 $f(x)$ 的定义域为对称区间 $(-L, L)$ (也可以是 $[-L, L], (+\infty, +\infty)$),如对于定义

域的任一 x 都满足

$$f(-x) = -f(x) \quad (\text{或 } f(-x) = f(x))$$

则称函数 $f(x)$ 为奇函数(或偶函数), 否则称为非奇非偶函数.

例如, 函数 $f(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$ 为偶函数, $f(x) = x^3 + \sin x$ 为奇函数, 而 $f(x) = e^x$ 是非奇非偶函数.

偶函数的图形关于 y 轴对称, 奇函数的图形关于原点对称.

3. 函数的单调性

设函数 $f(x)$ 在区间 I 上有定义, 如果对于区间 I 上任意两点 x_1, x_2 , 当 $x_1 < x_2$ 时, 有

$$f(x_1) < f(x_2) \quad (\text{或 } f(x_1) > f(x_2))$$

则称函数 $f(x)$ 在区间 I 上单调增加(或单调减少).

例如, 函数 $y = x^2$ 在 $(-\infty, 0]$ 上单调减少, 而在 $[0, +\infty)$ 上单调增加.

单调增加函数和单调减少函数统称为单调函数.

4. 函数的周期性

设有函数 $f(x)$, 如果存在一个不为零的数 T , 使得对于定义域的任一实数 x , 都有

$$f(x+T) = f(x)$$

则称函数 $f(x)$ 为周期函数, T 为函数的周期, 通常我们说周期函数的周期指的是最小正周期.

例如, 函数 $\sin x, \cos x$ 都是以 2π 为周期的函数, 而 $\tan x, \cot x$ 的周期为 π .

1-1.2 分段函数、反函数、复合函数

一、分段函数

在实际问题中, 经常会遇到一个函数在其定义域内的不同区间上用不同解析式表示的情形. 例如, 脉冲发生器产生一个如图 1-2 所示的三角波, 它的电压 u 与时间 t 的关系为

$$u(t) = \begin{cases} \frac{3}{2}t, & 0 \leq t < 10 \\ -\frac{3}{2}(t-20), & 10 \leq t \leq 20 \end{cases}$$

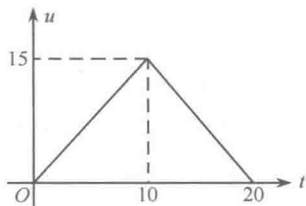


图 1-2

它表示了在不同时间区间内电压变化的不同规律.

如果一个函数在其定义域的不同区间上用不同的解析式表示, 则称这种形式的函数为分段函数, 必须注意, 虽然分段函数在其自变量变化的不同范围内有不同的表达式, 但它只是一个函数.

例如, 函数

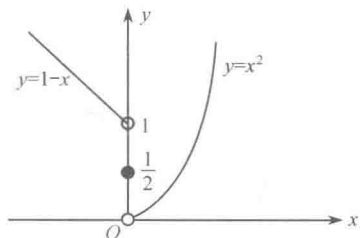


图 1-3

$$f(x) = \begin{cases} x^2, & x > 0 \\ \frac{1}{2}, & x = 0 \\ 1-x, & x < 0 \end{cases}$$

的图形如图 1-3 所示. 它的定义域为 $(-\infty, +\infty)$, 当自变量取 $(0, +\infty)$ 内的数值时, 对应的函数值由 $y = x^2$ 确定, 当自变量取 $(-\infty, 0)$ 内的数值时, 函数值由 $y = 1 - x$ 确定, 如 $f(-1) = 2, f(1) = 1, f(0) = \frac{1}{2}$.

分段函数的分段点有其特殊意义,讨论函数在分段点上的极限、连续性、可导性时务请注意.

二、反函数

在研究两个变量间的关系时,常根据实际问题的需要选定其中一个变量为自变量,另一个就是因变量.例如,自由落体运动中,如考虑下落距离 S 随下落时间 t 的变化规律,则有 $S = \frac{1}{2}gt^2$. 有时需反过来考虑问题,已知下落距离,求下落时间 t ,则从 $S = \frac{1}{2}gt^2$ 解出 t ,得 $t =$

$\sqrt{\frac{2S}{g}}$. 此时, t 是 S 的函数,称前者为直接函数,后者为反函数. 一般地,有如下定义.

定义 2 设函数 $y=f(x)$ 的定义域为 D , 值域为 M . 如对于任意的 $y \in M$, 有唯一的 $x \in D$, 使得 $f(x) = y$, 则变量 x 是变量 y 的函数, 其对应法则记作 f^{-1} . 这个定义在 M 上的函数 $x=f^{-1}(y)$, 称它为函数 $y=f(x)$ 的反函数, 而 $y=f(x)$ 称为直接函数.

函数取决于它的定义域和对应规则,与用什么字母表示自变量与因变量无关,而习惯上,常以 x 表示自变量, y 表示因变量,于是 $y=f(x)$ 的反函数 $x=f^{-1}(y)$ 也可写成 $y=f^{-1}(x)$.

不难发现,函数 $y=f(x)$ 的定义域和值域分别是它反函数 $y=f^{-1}(x)$ 的值域和定义域.

可以证明:单调函数存在反函数.

例 3 求函数 $y=x^2, x \in [0, +\infty)$ 的反函数.

解 由 $y=x^2, x \in [0, +\infty)$ 解得 $x=\sqrt{y}, y \geq 0$. 于是 $y=x^2, x \in [0, +\infty)$ 的反函数为 $y=\sqrt{x}, x \in [0, +\infty)$.

应当注意,函数 $y=x^2, x \in (-\infty, +\infty)$ 不存在反函数.

一般地,函数 $y=f(x)$ 与它的反函数 $y=f^{-1}(x)$ 在同一坐标系内的图像关于直线 $y=x$ 对称.

三、复合函数

在实际问题中,经常遇到两个变量之间的联系不是直接的,即因变量不直接依赖于自变量,而是通过另一个变量联系起来.

例如,有质量为 m 的物体,以初速度 v_0 竖直上抛,由物理学知其动能 E 是速度 v 的函数

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

而速度 v 在不计空气阻力时又为 $v=v_0-gt$, g 是重力加速度,因此 E 通过 v 成为 t 的函数

$$E = \frac{1}{2}m(v_0 - gt)^2$$

它是由函数 $E = \frac{1}{2}mv^2$ 和 $v=v_0-gt$ 复合而成的复合函数. 一般地,有

定义 3 设 y 是 u 的函数 $y=f(u)$, 而 u 又是 x 的函数 $u=\varphi(x)$, 如果 x 在 $\varphi(x)$ 的定义域或其一部分上取值时,对应的 u 值使 $y=f(u)$ 有定义,则 y 通过 u 和 x 建立了函数关系

$$y = f(u) = f(\varphi(x))$$

称为由函数 $y=f(u)$ 与 $u=\varphi(x)$ 复合而成的复合函数,并把 u 叫做中间变量, $f(u)$ 叫外层函数, $\varphi(x)$ 叫内层函数.

例 4 求下列函数的复合函数:

(1) $y=1-u^2$ 与 $u=\log_a x$;

(2) $y = \sqrt{1-u^2}$ 与 $u = 2^x$;

(3) $y = \arcsin u$ 与 $u = \sqrt{2+x^2}$;

(4) $f(x) = \frac{x}{1-2x}$, 求 $f(f(x))$.

解 (1) 因对于任意 $x > 0$, $u = \log_a x \in (-\infty, \infty)$, 它对于 $y = 1 - u^2$ 有意义, 所以复合函数为 $y = 1 - \log_a^2 x$, $x \in (0, \infty)$.

(2) 因当 x 在 $(-\infty, 0]$ 上变化时, $u = 2^x \in (0, 1]$, 它对于 $y = \sqrt{1-u^2}$ 有意义, 所以复合函数为 $y = \sqrt{1-4^x}$, $x \in (-\infty, 0]$.

(3) 无论 x 取什么值, $u = \sqrt{2+x^2} \geq \sqrt{2}$, 此时 u 值对 $y = \arcsin u$ 没有意义 ($u = \sqrt{2+x^2}$ 的值域与 $y = \arcsin u$ 的定义域的交集是空集), 故 $y = \arcsin u$ 与 $u = \sqrt{2+x^2}$ 不能复合成复合函数.

(4) 因

$$f(x) = \frac{x}{1-2x}$$

所以

$$f(f(x)) = \frac{f(x)}{1-2f(x)} = \frac{\frac{x}{1-2x}}{1-2\frac{x}{1-2x}} = \frac{x}{1-4x}, \quad x \neq \frac{1}{2}, \frac{1}{4}$$

从上面的例子可看出, 两个函数的复合是有条件的, 当且仅当 $u = \varphi(x)$ 的值域与 $y = f(u)$ 的定义域有非空的交集, 如例 4(1)、(2)、(4) 中 $y = f(u)$ 的定义域与 $u = \varphi(x)$ 的值域的交集非空, 可以复合, 而(3)中, 交集是空集, 故不能复合. 一般来讲, $y = f(\varphi(x))$ 的定义域比 $u = \varphi(x)$ 的定义域要小.

上面讲的是两个函数的复合, 也可以是三个及三个以上函数的复合, 设有 $y = f(u)$, $u = \varphi(v)$, $v = \psi(x)$ 三个函数, 如满足复合的条件, 则可得复合函数 $y = f(\varphi(\psi(x)))$.

我们不仅要学会把若干个简单的函数“复合”成一个复合函数, 还要善于把一个复合函数“分解”为若干个简单函数. 这种分解技术在后面微积分运算中经常用到. “分解”过程与“复合”过程正好相反, 它是一个从外到里的分解过程.

例 5 写出下列函数的复合过程:

(1) $y = \sqrt{1-x}$; (2) $y = \sqrt[3]{\cos(x^2+1)}$;

(3) $y = \sin(e^{x-1})$; (4) $y = \left(\ln \tan \frac{x}{2}\right)^2$.

解 (1) $y = \sqrt{1-x}$ 可看成由 $y = \sqrt{u}$, $u = 1-x$ 复合而成.

(2) $y = \sqrt[3]{\cos(x^2+1)}$ 可看成由 $y = \sqrt[3]{u}$, $u = \cos v$, $v = x^2+1$ 复合而成.

(3) $y = \sin(e^{x-1})$ 可看成由 $y = \sin u$, $u = e^v$, $v = x-1$ 复合而成.

(4) $y = \left(\ln \tan \frac{x}{2}\right)^2$ 可看成由 $y = u^2$, $u = \ln v$, $v = \tan w$, $w = \frac{x}{2}$ 复合而成.

1-1.3 初等函数

一、基本初等函数

在中学已学过幂函数、指数函数、对数函数、三角函数和反三角函数, 这些函数统称为基本初等函数, 为复习和应用的方便, 将其归纳成表 1-1.

表 1-1

类别及解析式		定义域	值域	图形
幂函数 $y=x^{\alpha}$	$\alpha > 0$ α 次抛物线	因 α 而异, 但 $[0, +\infty)$ 是公共定义域	因 α 而异, 但 $[0, +\infty)$ 是公共值域	<p>(在第一象限内)</p>
	$\alpha < 0$ 令 $\alpha = -m (m > 0)$ $y = x^{-m} = \frac{1}{x^m}$, m 次双曲线	公共定义域为 $(0, +\infty)$	公共值域为 $(0, +\infty)$	
指数函数 $y=a^x (a>0, a\neq 1)$		$(-\infty, +\infty)$	$(0, +\infty)$	
对数函数 $y=\log_a x (a>0, a\neq 1)$		$(0, +\infty)$	$(-\infty, +\infty)$	
三角函数 正弦函数 $y=\sin x$ 余弦函数 $y=\cos x$ 正切函数 $y=\tan x$ 余切函数 $y=\cot x$	$(-\infty, +\infty)$ $(-\infty, +\infty)$ $x \neq n\pi + \frac{\pi}{2}$ $x \neq n\pi$ $(n=0, \pm 1, \dots)$	$[-1, 1]$ $[-1, 1]$ $(-\infty, +\infty)$ $(-\infty, +\infty)$		
反三角函数 反正弦函数 $y=\arcsin x$ 反余弦函数 $y=\arccos x$ 反正切函数 $y=\arctan x$ 反余切函数 $y=\text{arccot } x$	$[-1, 1]$ $[-1, 1]$ $(-\infty, +\infty)$ $(-\infty, +\infty)$	$[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ $[0, \pi]$ $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ $(0, \pi)$		

二、初等函数

定义 4 由常数和基本初等函数经过有限次四则运算以及有限次复合运算所构成的能用一个式子表示的函数,称为初等函数.

例如, $y=x^2+e^x-\ln 4$, $y=\arcsin \frac{1}{x^2}+5$, $y=\tan x-\sqrt{x} \cdot \sin x^2$, $s=\sqrt[3]{\cos^2}$, ... 都是初等函数, 而

$$y = \sqrt{x + \sqrt{x + \sqrt{x + \cdots}}}, \quad y = \begin{cases} x+1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ x^2-1, & x < 0 \end{cases}$$

$$y = \arcsin(2+e^x), \quad y = 1-x + \frac{x^2}{2!} - \cdots + \frac{(-x)^{n-1}}{(n-1)!} + \cdots$$

都不是初等函数. 因为 $y = \sqrt{x + \sqrt{x + \sqrt{x + \cdots}}}$ 是经无数次加法、开方运算得到的,

$$y = \begin{cases} x+1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ x^2-1, & x < 0 \end{cases}$$

不是由一个式子表示的, $y = \arcsin(2+e^x)$ 不是函数, $y = 1-x + \frac{x^2}{2!} - \cdots + \frac{(-x)^{n-1}}{(n-1)!} + \cdots$ 是经无数次四则运算得到的. 今后讨论的函数绝大多数是初等函数.

§ 1-2 函数的极限

函数是高等数学研究的主要对象, 而极限则是高等数学的重要工具. 极限是研究当自变量按某种方式变化时, 相应地因变量将按怎样的方式变化的问题. 高等数学中许多重要概念都与极限有关, 如连续、导数、定积分、二重积分、曲线积分、级数等.

下面先介绍数列和函数极限的概念, 再介绍极限的计算.

1-2.1 数列的极限

按自然数的顺序编号而排成一列的无穷多个数

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

称为数列, 记作 $\{x_n\}$, 其中每一个数称为数列的项, 第 n 项 x_n 称为数列的通项或一般项, 下面举几个数列的例子.

$$1, -\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, -\frac{1}{4}, \cdots, (-1)^{n+1} \frac{1}{n}, \cdots \quad (1-2)$$

$$0, \frac{3}{2}, \frac{2}{3}, \frac{5}{4}, \cdots, \frac{n+(-1)^n}{n}, \cdots \quad (1-3)$$

$$0.3, 0.33, 0.333, \cdots, \overbrace{0.33\cdots 3}^{n\text{个}}, \cdots \quad (1-4)$$

$$1, -1, 1, -1, \cdots, (-1)^{n+1}, \cdots \quad (1-5)$$

$$2, 4, 8, \cdots, 2^n, \cdots \quad (1-6)$$

都是数列的例子, 它们的通项分别为

$$(-1)^{n+1} \frac{1}{n}, \quad \frac{n+(-1)^n}{n}, \quad \overbrace{0.33\cdots 3}^{n\text{个}}, \quad (-1)^{n+1}, \quad 2^n$$

考查数列当 n 变化时, x_n 的变化情况, 容易看出, 当 n 无限增大(记作 $n \rightarrow \infty$) 时, 不同数列

的变化情况是有所不同的,当 $n \rightarrow \infty$ 时,其中有的数列的 x_n 能与某一个常数 a 无限接近,如数列(1-2),当 $n \rightarrow \infty$ 时, x_n 和 0 无限接近;同样,对于数列(1-3),当 $n \rightarrow \infty$ 时, $\frac{n+(-1)^n}{n}$ 无限接近于 1;还有数列(1-4),当 $n \rightarrow \infty$ 时, $0.\overbrace{33\cdots 3}^n$ 无限接近于 $\frac{1}{3}$;而数列(1-5),当 n 增大时, x_n 在 1 和 -1 间无限次跳动,既不趋向于 1,也不趋向于 -1;数列(1-6),随 n 增大, x_n 也不断增大,但不和任何一个常数接近. 数列(1-2)、(1-3)、(1-4)反映了一类数列的某种共同特性,即对于数列 $\{x_n\}$,存在一个常数 a ,随着 n 的无限增大, x_n 无限地接近 a . 这也就是说要使得 x_n 与 a 的差的绝对值任意地小,只要 n 充分地大便可. 因此,给出数列极限的定义如下:

定义 1 若对于预先给定的任意小的正数 ϵ ,总存在一个正整数 N ,使得当 $n > N$ 时,不等式

$$|x_n - a| < \epsilon \quad (a \text{ 是一个确定常数})$$

成立,则称 a 为数列 $\{x_n\}$ 当 $n \rightarrow \infty$ 时的极限,记为

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a \quad \text{或} \quad x_n \rightarrow a (n \rightarrow \infty)$$

这时我们说数列是收敛的. 否则数列是发散的.

定义 1 中的正整数 N 是与预先给定的正数 ϵ 有关的,当 ϵ 减小时,一般地说, N 将会相应地增大.

例 1 证明数列 $\left\{\frac{n}{n+1}\right\}$ 的极限是 1.

证

$$|x_n - a| = \left| \frac{n}{n+1} - 1 \right| = \frac{1}{n+1}$$

对于预先给的任意小的正数 ϵ ,为使 $|x_n - a| = \frac{1}{n+1} < \epsilon$,只需

$$n > \frac{1}{\epsilon} - 1$$

若取正整数 $N = \left[\frac{1}{\epsilon} - 1 \right]$ (不超过 $\frac{1}{\epsilon} - 1$ 的最大整数),则当 $n > N$ 时,必有

$$|x_n - a| = \left| \frac{n}{n+1} - 1 \right| = \frac{1}{n+1} < \epsilon$$

于是由数列极限的定义知 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{n+1} = 1$.

下面是收敛数列的两个基本定理.

定理 1(唯一性) 收敛数列只有一个极限.

证 用反证法,设数列 $\{x_n\}$ 存在两个相异的极限 a, b (不妨设 $a < b$). 因为 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$, 故对正数 $\epsilon = \frac{b-a}{2}$, 存在正整数 N_1 , 使得当 $n > N_1$ 时, 恒有不等式 $|x_n - a| < \epsilon$ 成立.

同理, 因为 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = b$, 对于上述的正数 $\epsilon = \frac{b-a}{2}$, 总存在正整数 N_2 , 使得当 $n > N_2$ 时, 恒有不等式 $|x_n - b| < \epsilon$ 成立.

现在取 $N = \max\{N_1, N_2\}$, 则当 $n > N$ 时, 恒有 $|a - b| = |(a - x_n) - (b - x_n)| \leq |x_n - a| + |x_n - b| < 2\epsilon = |a - b|$. 这是不可能的. 证毕.

定理 2(有界性) 收敛数列 $\{x_n\}$ 一定有界.

证 设 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$, 由定义知, 若取 $\epsilon = 1$, 则存在正整数 N , 使得当 $n > N$ 时, 有 $|x_n - a| < 1$, 即