

南开大学公共数学系列教材

高等数学 习题课讲义

(第三版)
上册

薛运华 赵志勇 编著

$$A(x) = \int_a^x f(t) dt$$

$$\frac{dA(x)}{dx} = f(x)$$

南开大学出版社

南开大学公共数学系列教材

高等数学学习题课讲义(上)

(第三版)

薛运华 赵志勇 编著

本书编委会：周迈 赵志勇 薛运华 薛锋

南开大学出版社
天津

图书在版编目(CIP)数据

高等数学学习题课讲义. 上 / 薛运华, 赵志勇编著.
—3 版. —天津: 南开大学出版社, 2016.9
南开大学公共数学系列教材
ISBN 978-7-310-05201-1

I. ①高… II. ①薛… ②赵… III. ①高等数学—高等学校—教学参考资料 IV. ①O13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 206901 号

版权所有 侵权必究

南开大学出版社出版发行

出版人: 刘立松

地址: 天津市南开区卫津路 94 号 邮政编码: 300071

营销部电话: (022)23508339 23500755

营销部传真: (022)23508542 邮购部电话: (022)23502200

*

天津午阳印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 3 版 2016 年 9 月第 1 次印刷
230×170 毫米 16 开本 15.25 印张 2 插页 277 千字

定价: 30.00 元

如遇图书印装质量问题, 请与本社营销部联系调换, 电话: (022)23507125

总序

高等数学是南开大学非数学类专业本科生必修的校级公共基础课。由于各个学科门类的情况差异较大,该课程又形成了包含多个层次多个类别的体系结构。层次不同,类别不同,教学目标和教学要求也就有所不同,课程内容的深度与宽度也就有所不同,自然所使用的教材也应有所不同。

教材建设是课程建设的一个重要方面,属于基础性建设。时代在前进,教材也应适时更新而不能一劳永逸。因此,教材建设是一项持续的不可能有“句号”的工作。

20世纪80年代以来,南开大学的老师们就陆续编写出版了面向物理类、经济管理类和人文类等多种高等数学教材。其中,如《文科数学基础》一书作为“十五”国家级规划教材由高等教育出版社于2003年出版,经过几年的使用取得较好收效。这些教材为南开的数学教学作出了重要贡献,也为公共数学教材建设奠定了基础,积累了经验。

21世纪是一个崭新的世纪。随着新世纪的到来,人们似乎对数学也有了一个崭新的认识:数学不仅是工具,更是一种素养,一种能力,一种文化。已故数学大师陈省身先生在其晚年为将中国建设成为数学大国乃至最终成为数学强国而殚精竭虑。他尤其对大学生们寄予厚望。他不仅关心着数学专业的学生,也以他那博大胸怀关心着非数学专业的莘莘学子。2004年他挥毫为天津市大学生数学竞赛题字,并与获奖学生合影留念。这也是老一辈数学家对我们的激励与鞭策。另一方面,近年来一大批与数学交叉的新兴学科如金融数学、生物数学等不断涌现。这也对我们的数学教育和数学教学提出了许多新要求。而作为课程基础建设的教材建设自当及时跟进。现在呈现在读者面前的便是南开大学公共数学系列教材。

本套教材的规划和出版得到了南开大学教务处、南开大学数学科学学院和南开大学出版社的高度重视、悉心指导和大力支持。此项工作是南开大学新世纪教学改革项目“公共数学课程建设改革与实践”的重要内容之一。编委会的各位老师为组织、规划和编写本套教材付出了不少心血。此

外,还有很多热心的老师和同学给我们提出了很多很好的建议。对来自方方面面的关心、支持和帮助,我们在这里一并表示衷心感谢。

由于我们的水平有限,缺点和不足在所难免,诚望读者批评指正。

南开大学公共数学系列教材编委会

2006年6月

再版前言

为提升学习能力和教学效果,我校自2014年开始了“高等数学”课程的教学改革,以学生为本,贯彻“讲一练二考三”的教学理念,压缩讲授学时,增加学生的练习量,逐步形成学生自主学习为主的局面。为此,高等数学教学部也已在编写新的教材,相应配套的习题课讲义也做了相应的修订。

首先,在选题上,参考近年来研究生入学考试高等数学科目真题,全国、天津市大学生数学竞赛题目以及南开大学“高等数学”课程教学题目,对知识点进行适当取舍,使内容跟得上时代要求。其次,适当增加一些题目形式,增强学生练习的兴趣,并加深对知识点的理解。最后,适当增加C组练习和综合练习的难度,以满足学有余力同学的更高要求。

本书可作为习题课选题及学生课下练习和考试复习的参考资料。书中对于课的安排主要是基于知识点的分布。根据大纲要求,每一课建议授课2课时。有的课讲解和选题较多,在使用本书时,可以根据题型和知识点适当选择部分题目。

在此次修订时,尽量修正了上一版的一些不当之处,但在增添新的题目时,不免又引入不当之处。如果读者发现,可以和本书作者联系: yhxue@nankai.edu.cn,我们会在下一版时修正。

感谢南开大学出版社的莫建来、杨丰坡、李力夫编辑及高等数学教学部周迈主任和薛锋副主任为本书再版做出的努力!

编 者

2016年7月

第一版前言

鉴于大学非数学类专业对数学素质要求愈来愈高,“高等数学”课程的教学越来越受到高校的重视。习题课作为“高等数学”的重要辅助课程,在帮助学生深入理解课程内容、熟练掌握并灵活运用所学数学方法方面起着非常大的作用。多年的教学实践证明,习题课是整个教学活动中一个不可缺少的重要环节。南开大学数学科学学院高等数学教学部历来重视习题课建设,并且得到了全校各有关学院的领导和同学们的大力支持和帮助。任课的教师们坚持规范与创新并重,从而使习题课教学的水平逐年提高,其效果也日益明显。作者把习题课教学中的一些经验和想法整理编辑成册,诚望同行批评指正。

本书上册包括极限与连续、导数与微分、不定积分、定积分及其应用等内容,全书的结构采取专题“课”的形式,适合于每周两个课时的习题课教学安排。

在每个专题“课”中,“本课重点内容提示”部分归纳基础理论,深入剖析重点难点,升华数学思想,力图使读者对相关知识有更加深入透彻的把握和理解。“精讲例题与分析”部分选择了一定数量且题型比较广泛的典型例题。讲解中注重体现严谨的数学逻辑思维,详尽地阐释解题的方法和技巧,并将各类相似题型加以联系比较,旨在帮助读者通过习题训练,在掌握常用的数学方法和技巧的过程中对基础知识融会贯通、灵活运用。“课外练习”部分选取了不同难度的练习题,由易到难,由浅入深,由单一到综合,适合于不同基础的同学使用,体现了分类教学的理念。五个“综合训练”适合读者对知识掌握程度的自我测评。

本书所选的习题,一部分来源于南开大学高等数学课程的课堂和习题课教学,另一部分来源于近年硕士研究生入学考试以及天津市大学生数学竞赛的真题。

本书可作为非数学类专业的高等数学习题课用书或课外辅导的教师参考用书,可作为学生课下同步练习或期末复习用书,也可作为考研复习或

者自学者的学习资料。

本书分上、下两册，上册由薛运华编写，下册由赵志勇编写。张效成教授、薛峰老师在本书的策划方面给了很多中肯的意见，并且张效成教授仔细审阅了初稿。对来自各个方面的帮助我们表示由衷的感谢。

由于编者的水平有限，书中难免疏漏之处，望读者批评指正。

编者

于南开园

目 录

第一课 函数的性质与数列极限的概念	1
1.1 本课重点内容提示	1
1.2 精讲例题与分析	3
1.2.1 基本习题讲解	3
1.2.2 拓展习题讲解	4
1.3 课外练习	6
第二课 数列收敛的判别方法	8
2.1 本课重点内容提示	8
2.2 精讲例题与分析	10
2.2.1 基本习题讲解	10
2.2.2 拓展习题讲解	12
2.3 课外练习	15
第三课 区间套定理、函数极限的定义	18
3.1 本课重点内容提示	18
3.2 精讲例题与分析	21
3.2.1 基本习题讲解	21
3.2.2 拓展习题讲解	22
3.3 课外练习	24
第四课 函数极限的性质及其运算	25
4.1 本课重点内容提示	25
4.2 精讲例题与分析	29
4.2.1 基本习题讲解	29
4.2.2 拓展习题讲解	30
4.3 课外练习	32

第五课 连续函数的概念及性质	34
5.1 本课重点内容提示	34
5.2 精讲例题与分析	35
5.2.1 基本习题讲解	35
5.2.2 拓展习题讲解	37
5.3 课外练习	38
第六课 闭区间上连续函数的性质、一致连续	40
6.1 本课重点内容提示	40
6.2 精讲例题与分析	41
6.2.1 基本习题讲解	41
6.2.2 拓展习题讲解	43
6.3 课外练习	44
综合训练一 函数与极限部分	46
第七课 导数的定义及其基本运算	48
7.1 本课重点内容提示	48
7.2 精讲例题与分析	51
7.2.1 基本习题讲解	51
7.2.2 拓展习题讲解	55
7.3 课外练习	57
第八课 复合函数、隐函数的导数、高阶导数	60
8.1 本课重点内容提示	60
8.2 精讲例题与分析	62
8.2.1 基本习题讲解	62
8.2.2 拓展习题讲解	63
8.3 课外练习	65
第九课 一元函数的微分及其形式不变性	67
9.1 本课重点内容提示	67
9.2 精讲例题与分析	68
9.2.1 基本习题讲解	68
9.2.2 拓展习题讲解	69

9.3	课外练习	70
第十课	微分中值定理	71
10.1	本课重点内容提示	71
10.2	精讲例题与分析	72
10.2.1	基本习题讲解	72
10.2.2	拓展习题讲解	74
10.3	课外练习	75
第十一课	L'Hospital 法则、Taylor 公式	78
11.1	本课重点内容提示	78
11.2	精讲例题与分析	82
11.2.1	基本习题讲解	82
11.2.2	拓展习题讲解	84
11.3	课外练习	86
第十二课	利用导数求函数的性质(I)	89
12.1	本课重点内容提示	89
12.2	精讲例题与分析	91
12.2.1	基本习题讲解	91
12.2.2	拓展习题讲解	92
12.3	课外练习	95
第十三课	利用导数求函数的性质(II)	97
13.1	本课重点内容提示	97
13.2	精讲例题与分析	98
13.2.1	基本习题讲解	98
13.2.2	拓展习题讲解	99
13.3	课外练习	102
综合训练二	导数与微分部分	103
第十四课	不定积分(I)	106
14.1	本课重点内容提示	106
14.2	精讲例题与分析	107
14.2.1	基本习题讲解	107
14.2.2	拓展习题讲解	109

14.3	课外练习	112
第十五课	不定积分(II)	114
15.1	本课重点内容提示	114
15.2	精讲例题与分析	115
15.2.1	基本习题讲解	115
15.2.2	拓展习题讲解	118
15.3	课外练习	121
综合训练三	不定积分部分	122
第十六课	定积分的定义及性质	123
16.1	本课重点内容提示	123
16.2	精讲例题与分析	126
16.2.1	基本习题讲解	126
16.2.2	拓展习题讲解	127
16.3	课外练习	130
第十七课	定积分的计算、近似计算	132
17.1	本课重点内容提示	132
17.2	精讲例题与分析	136
17.2.1	基本习题讲解	136
17.2.2	拓展习题讲解	138
17.3	课外练习	146
第十八课	定积分的应用	148
18.1	本课重点内容提示	148
18.2	精讲例题与分析	149
18.2.1	基本习题讲解	149
18.2.2	拓展习题讲解	151
18.3	课外练习	154
综合训练四	定积分部分	156
综合训练五	期末练习	159
附录A	三角函数变换公式	165
附录B	基本导数公式	166

附录C 基本积分公式	167
附录D 基本函数在 $x = 0$ 的Taylor展开公式	168
附录E 课外练习答案与提示	169
E.1 第一课答案	169
E.2 第二课答案	171
E.3 第三课答案	174
E.4 第四课答案	176
E.5 第五课答案	178
E.6 第六课答案	179
E.7 综合训练一答案	182
E.8 第七课答案	183
E.9 第八课答案	186
E.10 第九课答案	187
E.11 第十课答案	188
E.12 第十一课答案	190
E.13 第十二课答案	195
E.14 第十三课答案	197
E.15 综合训练二答案	199
E.16 第十四课答案	202
E.17 第十五课答案	206
E.18 综合训练三答案	209
E.19 第十六课答案	212
E.20 第十七课答案	214
E.21 第十八课答案	221
E.22 综合训练四答案	221
E.23 综合训练五答案	224
参考文献	230

第一课 函数的性质与数列极限的概念

1.1 本课重点内容提示

1. 函数的性质(定义域、值域、奇偶性、增减性、单调性、周期性、反函数等内容)的复习和总结. 除了高中所学习的初等函数外, 再介绍几个初等函数和几个常用的非初等函数.

(1) 双曲函数(初等函数)

双曲正弦函数:

$$\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}, x \in \mathbb{R}.$$

双曲余弦函数:

$$\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}, x \in \mathbb{R}.$$

双曲正切函数:

$$\tanh x = \frac{\sinh x}{\cosh x} = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}, x \in \mathbb{R}.$$

双曲余切函数:

$$\coth x = \frac{\cosh x}{\sinh x} = \frac{e^x + e^{-x}}{e^x - e^{-x}}, x \neq 0.$$

(2) 几个常用的非初等函数

取整函数:

$$y = [x].$$

其函数值为不超过 x 的最大整数.

符号函数:

$$y = \operatorname{Sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x = 0, \\ -1, & x < 0. \end{cases}$$

Dirichlet 函数:

$$D(x) = \begin{cases} 1, & x \text{ 为有理数}, \\ 0, & x \text{ 为无理数}. \end{cases}$$

Riemann函数:

$$R(x) = \begin{cases} \frac{1}{n}, & \text{若 } x = \frac{m}{n}, \text{ 其中 } m \in \mathbb{Z}, n \in \mathbb{N}, m \text{ 和 } n \text{ 互质,} \\ 0, & \text{若 } x \text{ 为无理数.} \end{cases}$$

2. 充分理解数列的极限的定义, 即 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$ 的分析定义:

$\forall \varepsilon > 0$, $\exists$ 自然数 N (依赖于 ε), 当 $n > N$ 时, 均有 $|x_n - a| < \varepsilon$.

(1) ε 为任意正数, 是衡量 x_n 与 a 的逼近程度的阈限值. 可以看出, 虽然 ε 为任意正数, 但是只有当 ε 充分小时, 才能刻画 x_n 以 a 为极限的意义.

(2) N 与 ε 有关系, N 有最小值, 但是其选取不唯一.

3. 利用 $\varepsilon - N$ 语言证明数列的极限的存在性, 关键是将 $|x_n - a|$ 适当放大, 找到自然数 N , N 的表达式越简单越好, 没有必要找到的 N 总是满足 $|x_n - a| < \varepsilon$ 的最小的自然数. 例如, 用 $\varepsilon - N$ 语言证明下面数列的极限:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3n^2 - 8}{5n^2 - 6n + 1} = \frac{3}{5}. \quad (1-1)$$

本题的目的是要从 $|x_n - a| < \varepsilon$ 找到自然数 N , 因此

$$\left| \frac{3n^2 - 8}{5n^2 - 6n + 1} - \frac{3}{5} \right| = \left| \frac{18n - 43}{5(5n^2 - 6n + 1)} \right| \leq \left| \frac{18n}{5n^2 - 6n} \right| \leq \frac{18n}{n^2} = \frac{18}{n} < \varepsilon,$$

从而取 $N = \max \{[18/\varepsilon], 2\}$, 当 $n > N$ 时, 必有

$$\left| \frac{3n^2 - 8}{5n^2 - 6n + 1} - \frac{3}{5} \right| < \varepsilon. \quad (1-2)$$

这里可以看出, 直接从式(1-2)求出的 N 是满足该不等式的最小的自然数, 但是表达式会比较麻烦, 可以将其适当放大, 在放大的过程中应当注意放大的条件, 例如在本题放大的过程中, 使用了 $18n - 43 > 0$ 及 $5n^2 - 6n > 0$ 这两个条件, 只需 $n > 2$ 就可满足, 因此就知道上面的 N 那样取值的原因了. 这样的 N 可能不是最小的, 但是表达式比较简单, 也满足数列的极限的定义的要求.

4. 理解数列 $\{x_n\}$ 不以 a 为极限的分析表述.

存在某个 $\varepsilon_0 > 0$, 对于任意的正整数 N , 总存在一项 $x_n (n > N)$, 使得

$$|x_n - a| \geq \varepsilon_0.$$

5. 数列 $\{x_n\}$ 没有极限、数列 $\{x_n\}$ 无界、数列 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = +\infty$ 是三

个不同的概念, 其分析定义是不同的, 在学习的过程中应当注意区分.

数列 $\{x_n\}$ 没有极限: 若数列 $\{x_n\}$ 不以任何实数 a 为极限.

数列 $\{x_n\}$ 无界: 对于任何实数 $M > 0$, 均存在 n (依赖于 M), 使得

$$|x_n| > M.$$

数列 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = +\infty$: 若对于任何实数 $M > 0$, 存在 N (依赖于 M), 当 $n > N$ 时, 都有

$$x_n > M.$$

注 从定义可以看出, 数列 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = +\infty$ 是数列 $\{x_n\}$ 无界的一种特殊情形.

6. 掌握三个重要极限的证明方法, 并将结论作为求数列极限的基础.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = 1; \lim_{n \rightarrow \infty} q^n = 0, \text{ 其中 } |q| < 1; \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a} = 1 \ (a > 0).$$

1.2 精讲例题与分析

1.2.1 基本习题讲解

例 1.1 证明: $y = x - [x]$ 为周期函数, 并求出它的最小正周期.

证明 $[x]$ 表示不超过 x 的最大整数. 设周期为 T , 则:

$$x - [x] = x + T - [x + T],$$

得

$$T = [x + T] - [x].$$

可得到 T 为任意整数, 故最小正周期为 1.

例 1.2 证明: 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$, 则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} |x_n| = |a|.$$

并举例说明: 若 $\lim_{n \rightarrow \infty} |x_n| = |a|$, 则 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$ 未必成立.

证明 由 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$ 知, 任意的正数 $\varepsilon > 0$, $\exists$ 自然数 N , 使得对于一切 $n > N$, 恒有

$$|x_n - a| < \varepsilon,$$

又由于

$$||x_n| - |a|| \leq |x_n - a| < \varepsilon,$$

所以就有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} |x_n| = |a|.$$

设 $x_n = (-1)^n$, 有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} |x_n| = 1,$$

而极限 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} (-1)^n$ 不存在.

注 若 $a = 0$, 二者是否等价呢?

1.2.2 拓展习题讲解

例 1.3 给出函数 $f(x)$ 在区间 (a, b) 内有界、数列 $\{x_n\}$ 有界的定义.

解 $f(x)$ 在区间 (a, b) 内有界, 即存在 $M > 0$, 使得对任意 $x \in (a, b)$ 都有

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

数列 $\{x_n\}$ 有界, 即存在实数 $M > 0$, 对于任意的自然数 n , 均有

$$|x_n| \leq M.$$

例 1.4 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$ 的定义与下面的叙述是否等价?

(1) $\forall \varepsilon > 0, \exists N$, 当 $n > N$ 时, 恒有 $|x_n - a| < \varepsilon$.

解 是, 由定义可以得到.

(2) $\forall \varepsilon > 0, \exists N$, 当 $n > N$ 时, 恒有 $|x_n - a| < M\varepsilon$. (其中 M 是与 ε 无关的正数.)

解 是.

(3) $\forall \varepsilon > 0$, 满足 $|x_n - a| \geq \varepsilon$ 的 n 至多有有限多个.

解 是.

(4) $\forall \varepsilon > 0$, 满足 $|x_n - a| < \varepsilon$ 的 n 有无限多个.

解 否. 如数列 $x_{2n} = 1, x_{2n-1} = \frac{1}{n}$ 满足条件, 但是该数列发散.

(5) $\exists N, \forall \varepsilon > 0$, 当 $n > N$ 时, 恒有 $|x_n - a| < \varepsilon$.

解 否, 是 $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$ 的充分条件, 但非必要条件.

(6) 任意的正整数 m , 存在 $N, \forall n > N, |x_n - a| < \frac{1}{m}$ 均成立.

解 是.

(7) $\forall 0 < \varepsilon < 10^{-10}, \exists N$, 当 $n > N$ 时, 恒有 $|x_n - a| < \varepsilon$.

解 是.