



数学分析原理

第一卷 第一分册

Г. М. 菲赫金哥尔茨著



高等教育出版社



数 学 分 析 原 理

第一卷 第一分册

Г. М. 菲赫金哥尔茨著

吴亲仁 陆秀丽 译

高 等 教 育 出 版 社

高等学校教学用书



数学分析原理

第一卷 第二分册

I. M. 菲赫金哥尔茨著

丁寿田译

高等教育出版社

本书系根据苏联国立技术理论书籍出版社 (Государственное издательство технико-теоретической литературы) 出版的菲赫金哥尔茨 (Г. М. Фихтенгольц) 著“数学分析原理” (Основы математического анализа) 第一卷 1956 年版译出。原书经苏联高等教育部审定为综合大学数学力学系和数学物理系教科书以及师范学院数学物理系教学参考书。

全书共二卷，第一卷中译本分二分册出版。第一分册的内容是：实数、单变量的函数、极限论、单变量的连续函数、单变量函数的微分法、微分学的基本定理、应用导数来研究函数、多元函数、多元函数的微分学共九章。

数学分析原理

第一卷 第一分册

Г. М. Фихтенгольц 著

吴亲仁 陆秀群 译

高等教育出版社出版 北京宣武门内大街 27 号

(北京市书刊出版业营业许可出字第 051 号)

京华印书局印装 新华书店发行

统一书号 13010·605 开本 850×1168 $1/32$ 印张 9 $10/16$

字数 227,000 印数 00001—12,000 定价 (6) 1.10

1959 年 6 月第 1 版 1959 年 6 月北京第 1 次印刷

本书系根据苏联国立技术理论书籍出版社 (Государственное издательство технико-теоретической литературы) 出版的菲赫金哥尔茨 (Г. М. Фихтенгольц) 著“数学分析原理” (Основы математического анализа) 第一卷 1957 年第三版译出。原书经苏联高等教育部审定为综合大学数学力学系和数学物理系教科书以及师范学院数学物理系教学参考书。

全书共二卷，第一卷中译本分二分册出版。第二分册的内容是：单变量函数的不定积分、定积分、近似积分法以及定积分在几何与物理等方面的应用，最后还附添一章数学分析基本概念发展简史。

数 学 分 析 原 理

第一卷·第二分册

Г. М. 菲赫金哥尔茨著

丁 寿 田 译

高等教育出版社出版 北京宣武门内永恩寺 7 号

(北京市书刊出版业营业许可出字第 034 号)

外文印刷厂印装 新华书店发行

统一书号 13010·750 开本 830×1168¹/₃₂ 印张 57¹/₃

字数 130,000 印数 0001—1,5000 定价 (6) 半 0.55

1960 年 4 月第 1 版 1960 年 4 月北京第 1 次印刷

序 言

“数学分析原理”是作为大学数学系一二年級学生的分析教科书而編写的;因此也就把书分成两卷。在編写本书时,广泛地采用了我的三卷本“微积分学教程”的材料;但为了要使本书接近于正式的数学分析教学大綱与講課的实际可能性,我已把这三卷中包含的材料加以精簡与修改。

我給自己定下的任务是这样的:

1. 我認为在数学分析原理中主要的一个任务是要做到叙述上的系統性与在可能範圍內的严格性。为了使給予学生的知識有一定的系統,我認为对于教科书來說,材料的叙述有必要按照邏輯的順序。

虽然如此,但教本这样的編排仍然使講課者在个别的地方——从教授法着眼——有可能放弃严格的系統性(也許,甚至使他更容易获得这种可能)。例如,我自己在講課中通常把那种对于初学者困难的东西,如实数理論、收敛性原理或者連續函数的性質都稍稍拖后。

2. 同时,数学分析教程对于学生來說,不應該只是一連串的“定义”与“定理”,而應該是行动的指南。必須教会学生把这些定理应用到实际中去,帮助他們掌握分析的計算工具。虽然这个任务大部分是落到分析的习题課上,可是随着理論材料的叙述,我也按照需要采用了一些例题;例题为数虽不多,但却是为了培养学生能自觉地做习题而选择的。

3. 大家知道,数学分析無論在数学本身方面或在相近的知識領域方面有着何等奇妙的与多种多样的应用;学生以后将会时常

碰到它們。可是关于数学分析与其他数学部門，以及与实际需要相联系的这种思想，那末在研究分析原理时就应该为学生所通曉。正因为如此，所以一有可能，我就引进了分析在几何上、在力学上以及在物理上与工程上的应用的例题。

4. 关于把分析計算一直算到求出数字的結果的問題，在原則上与实用上有着同样的重要性。因为只有在最簡單的情况下，分析上的問題才有“准确的”解或“有限形状的”解，所以使学生熟悉近似方法的运用与学会作出近似公式都有其重要性。在本书中也注意到了这一点。

5. 关于叙述本身方面，我想作少許說明。首先要提到的是极限概念，它在分析的基本概念中占有主要的地位，并且以各种形式出現而貫串着全部教程。这种情况向我們提出了一項任务，那就是要建立各种形式的极限的統一概念。这不仅在原則上是重要的，而且在实际上也是必須的，为的是避免时常要从新建立极限的理論。要达到这个目的，有两条途徑：或者一开始就給出“有序变量”的最一般的极限定义（例如，跟着沙都諾夫斯基与摩尔-史密斯那样去做），或者把各种极限归結为最簡單的情形——在編号数列上变化着的变量的极限。第一种观点对初学者是不易了解的，所以我采用了第二种观点：每一种新形式的极限定义首先都用序列的极限給出，然后才用“ ϵ - δ 語言”給出。

6. 还要指出叙述上的一个細节：在第二卷中，讲到曲綫积分与曲面积分时，我提出了“第一型”的曲綫积分与曲面积分（恰好与沿无定向的区域的普通积分及二重积分相似）和“第二型”的这些积分（其中相似之处已經局部地失去了）之間的区别。根据多次的經驗，我深信这样的区分有助于更好的了解，并且也便于应用。

7. 在对教学大綱所作的为数不多的补充中，我把椭圆积分（这是在实际上常遇到的）簡要介紹到书內，并且有些时候提出了

一些恰好要引用橢圓积分的問題。使得那種由于解答一些簡單問題養成起來的有害錯覺——仿佛認為分析計算的一些結果一定是“初等式子”，從此消滅！

8. 在本書中各個地方，讀者可找到帶有數學史性質的說明。並且第一卷是以“數學分析基本觀念發展史概述”結尾的，而在第二卷末載出了“數學分析進一步發展的概述”。當然，這一切決不是用來代替學生以後在一般的“數學史”教程中所要熟悉的數學分析的历史。如果在上面提到的前一概述中涉及到概念本身的來源，那末帶有歷史意義的說明就在於使讀者至少了解分析學历史中最重要的事件在年代上一般的次序。

我現在要把和剛才所說的密切有關的事直接告訴讀者——學生。那就是，書中敘述的次序是按照現代對於數學的嚴格性的要求安排的，這種要求是在長時間內形成起來的，因此，敘述的次序自然和數學分析在历史上的發展所經過的道路有所不同。如馬克思所說：“……正如一切科學的历史進程一樣，在摸到它們的真正出發點之前，總先走過許多彎路。科學不同於其他建築師，它不只畫出空中樓閣，而且在它打下地基之前，先造出房屋的各層。”^①

讀者一開始研究分析學時就會遇到與此類似的情況：本書第一章講述“實數”，第三章講述“極限論”，從第五章起才開始微分學與積分學的系統的敘述。

在历史上的次序恰恰是與此相反的：微分學與積分學起源於十七世紀，而在十八世紀發現了很多重要的應用，有了進一步的發展；在十九世紀初，極限論才成為數學分析的基础，至於用來論證最精密的極限論原理的實數理論，它的明晰概念一直到十九世紀後半期才建立起來。

① 馬克思“政治經濟學批判”中譯本，1955年人民出版社出版，第30頁。

这部书总结了我在列宁格勒大学教数学分析的多年经验。希望它对苏联青年将会是有用的。

格·馬·費赫金哥尔茨

第一卷第一分册目录

序言	1
----	---

第一章 实数

§ 1. 实数集合及其有序化	1
1. 前言	1
2. 无理数定义	2
3. 实数集合的有序化	5
4. 实数的无尽十进小数的表示法	7
5. 实数集合的連續性	9
6. 数集合的界	11
§ 2. 实数的四则运算	14
7. 实数的和的定义及其性质	14
8. 对称数·绝对值	15
9. 实数的积的定义及其性质	17
§ 3. 实数的其他性质及其应用	19
10. 根的存在性·具有有理指数的乘幂	19
11. 具有任何实数的乘幂	20
12. 对数	22
13. 线段的测量	23

第二章 单变量的函数

§ 1. 函数概念	26
14. 变量	26
15. 变量的变域	27
16. 变量間的函数关系·例题	28
17. 函数概念的定义	29
18. 函数的解析表示法	32
19. 函数的图形	34
20. 以自然数为变元的函数	36
21. 历史的附注	38
§ 2. 几类最重要的函数	40
22. 初等函数	40

23. 反函数的概念	43
24. 反三角函数	45
25. 函数的迭置·結束語	49

第三章 极限論

§ 1. 函数的极限	51
26. 历史的說明	51
27. 数的序列	51
28. 序列的极限定义	53
29. 无穷小量	54
30. 例	56
31. 无穷大量	59
32. 函数的极限定义	61
33. 函数的极限的另一定义	63
34. 例	65
35. 单侧极限	71
§ 2. 关于极限的定理	72
36. 具有有限的极限的自然数变元的函数的性质	72
37. 推广到任意变量的函数情形	74
38. 在等式与不等式中取极限	76
39. 关于无穷小量的预备定理	78
40. 变量的算术运算	79
41. 未定式	81
42. 推广到任意变量的函数情形	84
43. 例	85
§ 3. 单调函数	89
44. 自然数变元的单调函数的极限	89
45. 例	91
46. 关于区間套的预备定理	93
47. 在一般情形下单调函数的	

极限	94
§ 4. 数 e	96
48. 数 e 看作序列的极限	96
49. 数 e 的近似算法	98
50. 数 e 的基本公式 · 自然对数	100
§ 5. 收敛原理	102
51. 部分序列	102
52. 以自然数为变元的函数其有限的极限的存在条件	105
53. 任何变元的函数具有有限极限的存在条件	107
§ 6. 无穷小量与无穷大量的分类	108
54. 无穷小量的比较	108
55. 无穷小量的尺度	110
56. 等价的无穷小量	111
57. 无穷小量的主部的分离	113
58. 应用问题	114
59. 无穷大量的分类	115
第四章 单变量的连续函数	117
§ 1. 函数的连续性(与间断点)	117
60. 函数在一点处的连续性的定义	117
61. 单调函数的连续性的条件	119
62. 连续函数的算术运算	121
63. 初等函数的连续性	121
64. 连续函数的迭置	123
65. 几个极限的计算	124
66. 幂-指数表达式	126
67. 间断点的分类 · 例子	127
§ 2. 连续函数的性质	129
68. 关于函数取零值的定理	129
69. 应用于解方程	132
70. 关于中间值的定理	132
71. 反函数的存在性	134
72. 关于函数的有界性的定理	136

73. 函数的最大值与最小值	137
74. 一致连续性的概念	139
75. 关于一致连续性的定理	141
第五章 单变量函数的微分法	143
§ 1. 导数及其计算	143
76. 动点速度的计算问题	143
77. 作曲线的切线的问题	145
78. 导数的定义	147
79. 计算导数的例	151
80. 反函数的导数	154
81. 导数公式汇集	156
82. 函数增量的公式	157
83. 计算导数的几个最简单法则	158
84. 复合函数的导数	160
85. 例	162
86. 单侧导数	164
87. 无穷导数	165
88. 特殊情况的例子	166
§ 2. 微分	167
89. 微分的定义	167
90. 可微性与导数存在之间的关系	168
91. 微分的基本公式及法则	170
92. 微分形式的不变性	172
93. 微分作为近似公式的来源	173
94. 微分在估计误差中的应用	174
§ 3. 高阶导数及高阶微分	176
95. 高阶导数的定义	176
96. 任意阶导数的普遍公式	178
97. 莱布尼兹公式	180
98. 高阶微分	182
99. 高阶微分形式不变性的破坏	183
第六章 微分学的基本定理	186
§ 1. 中值定理	186
100. 费马定理	186

101. 罗尔定理	187
102. 有限增量定理	189
103. 导数的极限	191
104. 有限增量定理的推广	192
§ 2. 戴劳公式	193
105. 多项式的戴劳公式	193
106. 任意函数的展开式	195
107. 余项的其他形式	199
108. 已得的公式在初等函数 上的应用	202
109. 近似公式·例	204

第七章 应用导数来研究函数

§ 1. 函数的变化过程的研究	207
110. 函数为常数的条件	207
111. 函数为单调的条件	208
112. 极大及极小·必要条件	210
113. 第一法则	211
114. 第二法则	214
115. 函数的作图	215
116. 例	216
117. 高阶导数的应用	219
§ 2. 函数的最大值及最小值	221
118. 最大值及最小值的求法	221
119. 问题	222
§ 3. 未定式的定值法	224
120. $\frac{0}{0}$ 型未定式	224
121. $\frac{\infty}{\infty}$ 型未定式	227
122. 其他类型的未定式	229

第八章 多元函数

§ 1. 基本概念	232
123. 变量之间的函数关系·例	232
124. 二元函数及其定义区域	233
125. m 维算术空间	236
126. m 维空间中的区域举例	239
127. 开区域及闭区域的一般	

定义	241
128. m 元函数	243
129. 多元函数的极限	244
130. 例	247
131. 累次极限	248
§ 2. 连续函数	251
132. 多元函数的连续性及间断	251
133. 连续函数的运算	253
134. 关于函数取零值的定理	254
135. 波尔察诺-维尔斯特拉斯 辅助定理	256
136. 关于函数有界性的定理	257
137. 一致连续性	258

第九章 多元函数的微分学

§ 1. 多元函数的导数与微分	261
138. 偏导数	261
139. 函数的全增量	262
140. 复合函数的导数	265
141. 例	267
142. 全微分	268
143. 一阶微分形式的不变性	270
144. 全微分在近似计算中的 应用	272
145. 齐次函数	274
§ 2. 高阶导数和微分	277
146. 高阶导数	277
147. 关于混合导数的定理	278
148. 高阶微分	281
149. 复合函数的微分	283
150. 戴劳公式	285
§ 3. 极值、最大与最小值	287
151. 多元函数的极值·必要 条件	287
152. 静止点的研究(二元函数的 情况)	288
153. 函数的最大与最小值 例子	292
154. 问题	294

第一卷第二分册目录

第十章 原函数(不定积分).....299

§ 1. 不定积分及其最简单的算法

.....299

155. 原函数概念(及不定积分概念)

.....299

156. 积分与求面积问题.....302

157. 基本积分表.....305

158. 最简单的积分法则.....306

159. 例.....308

160. 变量替换积分法.....309

161. 例.....312

162. 分部积分法.....314

163. 例.....315

§ 2. 有理式的积分.....318

164. 有限形式积分法问题的提出.....318

165. 简单分数及其积分.....319

166. 真分式的积分.....321

167. 奥斯脱罗格拉德斯基的积

分有理部分分出法.....323

§ 3. 某些模式的积分法.....327

168. $R(x, \sqrt{\frac{\alpha x + \beta}{\gamma x + \delta}})$ 型模式

的积分法.....327

169. 二项式微分的积分法.....328

170. $R(x, \sqrt{ax^2 + bx + c})$ 型模式

的积分法·欧拉氏替换法.....330

§ 4. 含有三角函数及指数函数的

式子的积分法.....335

171. 微分式 $R(\sin x, \cos x) dx$

的积分法.....335

172. 其他情形概述.....339

§ 5. 椭圆积分.....340

173. 定义.....340

174. 化为典式.....341

第十一章 定积分.....343

§ 1. 定积分定义及存在条件.....343

175. 解决面积问题的另一途径.....343

176. 定义.....345

177. 达布和.....346

178. 积分存在条件.....349

179. 可积函数类别.....351

§ 2. 定积分性质.....353

180. 依有向区间的积分.....353

181. 可用等式表出的性质.....354

182. 可用不等式表出的性质.....356

183. 定积分作为上限的函数.....360

§ 3. 定积分的计算及变换.....363

184. 用积分和的计算.....363

185. 积分学基本公式.....365

186. 定积分中变数替换公式.....366

187. 定积分的分部积分法.....368

188. 瓦里斯公式.....370

§ 4. 积分的近似计算.....371

189. 梯形公式.....371

190. 抛物线公式.....373

191. 近似公式的余项.....376

192. 例.....379

第十二章 积分学的几何应用及

力学应用.....381

§ 1. 面积及体积	381
193. 面积概念的定義. 可求积区	
域	381
194. 面积的可加性	383
195. 面积作为极限	384
196. 以积分表出面积	385
197. 体积概念的定義及其性質	390
198. 以积分表出体积	392
§ 2. 弧长	398
199. 弧长概念的定義	398
200. 輔助定理	401
201. 以积分表出弧长	402
202. 变弧及其微分	406
203. 空間曲綫的弧长	408
§ 3. 力学及物理上的数量的計算	408
204. 定积分应用程式	408
205. 迴轉面面积	411
206. 曲綫的静力矩及重心的求法	414
207. 平面图形的静力矩及重心的求法	417
208. 力功	419

第十三章 微分学的一些几何

应用	421
§ 1. 切綫及切面	421
209. 平面曲綫的解析表出法	421
210. 平面曲綫的切綫	423
211. 切綫的正方向	427
212. 空間曲綫	429
213. 曲面的切面	434
§ 2. 平面曲綫的曲率	434
214. 圓向, 拐点	434

215. 曲率概念	436
216. 曲率圓及曲率半徑	440

第十四章 数学分析基本观念

发生簡史

§ 1. 微积分前史	443
217. 十七世紀与无穷小分析	443
218. 不可分素方法	443
219. 不可分素学說的进一步发展	446
220. 求最大及最小(极大极小)	
切綫作法	449
221. 借助运动学想法来作切綫	451
222. 切綫作法問題与求积問題	
的互逆性	452
223. 以前的总结	453
§ 2. 依薩克·牛頓	454
224. 流数計算法	454
225. 流数計算法的逆計算法;	
求积	457
226. 牛頓的“原理”及极限理論	
的萌芽	460
227. 牛頓的奠基問題	460
§ 3. 萊卜尼茲	461
228. 建立新計算法的初步	461
229. 最先刊行的微分学著作	462
230. 最先刊行的积分学著作	464
231. 萊卜尼茲的其他著作, 学派的建立	465
232. 萊卜尼茲的奠基問題	466
233. 結尾語	467

第一章 实数

§ 1. 实数集合及其有序化

1. 前言 从中学教程中讀者已熟悉有理数及其性質。同时由于初等数学的需要,有理数域的擴張也就成为必要了。事实上,在有理数中甚至連正整数(自然数)往往都沒有根,如 $\sqrt{2}$ 就是一个例子,这就是說,没有一个其平方能等于2的有理分数 $\frac{p}{q}$ (p 与 q 是两个自然数)存在。

要証明这一点,我們用反証法:假定有这样的分数 $\frac{p}{q}$ 存在,使得 $\left(\frac{p}{q}\right)^2=2$ 。我們可設这个分数是既約的,也就是說, p 与 q 无公因子。因为 $p^2=2q^2$,所以 p 是偶数: $p=2r$ (r 是整数),因而, q 是奇数。用 p 的表达式来代替 p ,得 $q^2=2r^2$,由此推得 q 是偶数。所得到的这个矛盾就証明了我們的論断。

与此同时,假若我們所討論的只是含有理数的数域,那末在几何中显然就不是所有的綫段都能有长度。事实上,考慮边为单位长度的正方形。它的对角綫不能有有理长度 $\frac{p}{q}$,因为如若不然,则由毕达哥拉斯定理,这个长度的平方就应等于2,但我們已知这是不可能的。

在本章中我們的任务是要擴張有理数的数域,把具有新的性質的数——无理数加入到这領域中来。

在数学实践中含有根式表达式的无理数,事实上早在中世紀已开始出現,不过沒有把它看作是实在的数。十七世紀由笛卡儿①所創立的坐标方

① 笛卡儿(1596—1650)是法国的著名哲学家与科学家。

法,又以新的方法提出了用数来表达几何量的問題。在这种影响下无理数与有理数同样是数的观念逐漸地成熟起来;这种观念在牛頓的“普遍算术”(1707)①中所下的(正)数的定义里面有了透辟的叙述:

“我們所理解的数,与其說它是单位的集合,不如說它是任何一个量与另一个由我們取来作单位的同类量的抽象比”。

这时整数与分数表达和单位可通約的量,而无理数表达着和单位不可通約的量。

在十七世紀萌芽而在整个十八世紀蓬勃发展着的数学分析,长时期內满足于这个定义,但是它是与算术格格不入的,并且仍然不能揭露出扩大了的数量域的最重要的性質——連續性(参考后面第5段)。在十八世紀末与十九世紀初数学方面兴起了批判的潮流,提出了数学分析的基本概念要有正确的定义以及它的基本命題要有严格的証明。这种要求也就很快地使得根据无理数的純粹的算术定义来建立在邏輯上沒有錯誤的无理数論变成了必要的事情。在十九世紀的七十年代里,有关这方面的理論已經建立了几种,它們在形式上各不相同而实质上是一样的。所有这些理論与有理数的各种无穷集合联系起来,定义了无理数。

2. 无理数定义 我們仿效狄台金②来叙述无理数理論。这种理論的基础归于有理数域內的分割的概念。考虑把全部有理数的集合分成的两个非空的(即确实至少包含一个数的)集合 A, A' ; 換句話說,我們假定

1° 每一个有理数在而且只在 A 与 A' 两个集合的一个中。

如果下面的条件也能滿足,我們就称这种分法为分割:

2° 集合 A 中每一数 a 小于集合 A' 中每一个数 a' 。

集合 A 叫做分割的下类,集合 A' 叫做上类。分割用 $A|A'$ 表示。

由分割的定义推知,凡小于下类中的数 a 的有理数,也属于下

① 有俄文譯本:“Всеобщая арифметика или книга об арифметических синтезе и анализе”(АН СССР, 1948); 参考第8頁。

② 狄台金(Richard Dedekind)(1831—1916)是德国的数学家。

类。同样，凡大于上类中的数 a' 的有理数也属于上类。

例題 1) 把 A 定义为所有一切满足不等式 $a < 1$ 的有理数 a 的集合，而把使 $a' \geq 1$ 的全部有理数 a' 归入集合 A' 。

不难檢驗，这样一来我們就确实得到一个分割。数 1 属于 A' 类并且显然是其中最小的数。另一方面，在 A 类中沒有最大的数；因为，不論我們取 A 中怎样的数 a ，我們总可以在 a 与 1 之間指出一个有理数 a_1 ，因而， a_1 大于 a 而且也属于 A 类。

2) 把所有小于或等于 1 的有理数 $a \leq 1$ 归入下类 A ；所有大于 1 的有理数 $a' > 1$ 归入上类 A' 。

这也是一个分割，并且这时在上类中沒有最小的数，而在下类中有最大的数(就是 1)。

3) 把一切使 $a^2 < 2$ 者的正有理数 a ，零，以及一切負有理数都归入 A 类，而把一切使 $a'^2 > 2$ 者的正有理数 a' 归入 A' 类。

不难証实，我們又得到一个分割。这时在 A 类中既无最大的数，在 A' 类中也无最小的数。这两个論断中，我們可取第一个为例加以証明(第二个可同样地証明)。設 a 是 A 类中的任一正数(这时 $a^2 < 2$)。我們要指出，可以选得这样的正数 n ，使得

$$\left(a + \frac{1}{n}\right)^2 < 2,$$

这就是說， $a + \frac{1}{n}$ 也要属于 A 类。

这一不等式与下面的不等式是等价的：

$$a^2 + \frac{2a}{n} + \frac{1}{n^2} < 2,$$

$$\frac{2a}{n} + \frac{1}{n^2} < 2 - a^2.$$

如果 n 满足不等式 $\frac{2a+1}{n} < 2 - a^2$ ，則最后这个不等式成立；
为此，只要取