



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

高等代数

Advanced Algebra

(第二版)

黄廷祝 主编

何军华 李永彬 编

高等教育出版社



数字课程网站

网址：<http://abook.hep.com.cn/46400>

<http://abook.hep.edu.cn/46400>

数字课程账号 使用说明详见书内郑重声明页

ISBN 978-7-04-046400-9



9 787040 464009 >

定价 41.90 元

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

高等代数

Gaodeng Daishu

(第二版)

黄廷祝 主编

何军华 李永彬 编

高等教育出版社·北京

内容提要

本书是作者在多年教学实践和研究的基础上,吸取若干国内外教材的优点,创新教材内容体系和教学方法编写而成的,理论体系的处理更加科学、简洁,易教易学。全书主要内容包括代数理论的预备知识、矩阵及其初等变换、行列式、 n 维向量空间、多项式、线性空间、线性变换、Jordan 标准形与 λ -矩阵、欧氏空间、二次型与双线性函数等。

本书可作为高等学校数学类专业高等代数课程的教材或教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

高等代数 / 黄廷祝主编; 何军华, 李永彬编. --2
版. --北京: 高等教育出版社, 2016.9
ISBN 978-7-04-046400-9

I. ①高… II. ①黄… ②何… ③李… III. ①高等代
数-高等学校-教材 IV. ①O15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 206032 号

策划编辑 兰莹莹 责任编辑 兰莹莹 封面设计 张志奇 版式设计 马敬茹
插图绘制 尹文军 责任校对 吕红颖 责任印制 耿 轩

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	北京市大天乐投资管理有限公司		http://www.hepmall.com
开 本	787mm×960mm 1/16		http://www.hepmall.cn
印 张	24.75	版 次	2012 年 1 月第 1 版
字 数	440 千字		2016 年 9 月第 2 版
购书热线	010-58581118	印 次	2016 年 9 月第 1 次印刷
咨询电话	400-810-0598	定 价	41.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 46400-00

第一版前言

“高等代数”是高等学校数学类专业最主要的基础课程之一。本书是作者在多年教学实践和研究的基础上，吸取若干国内外教材的优点，创新教材内容体系和教学方法编写而成的，出版之前曾作为讲义在电子科技大学数学科学学院试用。

本书特点举例如下：

“高等代数”历来是学生感到困难的课程。为此，作者对教材内容体系和有关内容的处理进行了创新，采用了一些简便方法，使得学生能够较容易地用有限的课时，对重点与难点内容有深刻的理解和掌握，兼顾了科学性与可读性。例如：对于难以理解的抽象的线性空间概念，本书采用与从特殊到一般相吻合的认识过程，采用循序渐进、不断过渡的方式，而不是直接定义抽象的线性空间概念。为此，从第一章就强调矩阵线性运算的八条法则，到第三章建立 n 维向量空间 F^n 与子空间以及相应的基、维数和坐标的概念，进而过渡到第五章一般抽象的线性空间概念，使得学生易于理解和掌握，同时也体现了数学研究中不断抽象、扩张和一般化的数学思想与精神。

在第 0 章中，我们预先介绍了集合上的等价关系与代数系统（尤其是加群）等概念，并在其他章节中，通过具体实例多次运用这些非常有用的抽象概念。例如，矩阵的等价、相抵与合同关系，向量组的等价，多项式的相伴以及线性空间的同构等都是等价关系；矩阵的加法，多项式的加法以及向量的加法等都能构成相应的加群。在此基础上，我们在第五章中采用加群来简化线性空间的定义，并充分借助“同构”思想将第三章中具体的 n 维向量空间的主要概念与性质过渡到一般数域上的线性空间上。

在第一章就引出初等变换的方法，并在其后的计算与证明过程中有意识地反复使用，有利于计算过程与计算格式的程序化，同时使系列重要结论推导简单和便于理解。例如，在第一章就将方阵可逆与齐次线性方程组只有零解、非齐次线性方程组有惟一解、矩阵相抵于单位矩阵、可表示为有限个初等矩阵的乘积等的等价关系建立起来，这使得学生更易深刻理解、把握不同概念的内在联系和统一性。

向量组的线性相关性、矩阵的秩与向量组的秩、线性方程组解的结构中若干个重要定理采用一系列等价命题的叙述与证明方法，使其内在关系揭示得更

加深刻、清晰，证明过程更加简洁、易懂，易于掌握一系列重要概念的内在联系和统一性。

紧接伴随矩阵的方法处理逆矩阵的计算之后，我们给出 Cramer 法则的理论证明，相比通常证法，更加简明易懂。

我们同时给出矩阵与线性变换的特征值与特征向量的定义，并以讨论矩阵情形为主，辅以计算范例，这样便于学生较迅速并深刻理解概念的内涵以及二者之间的关系。充分结合之前对实对称矩阵性质的详尽讨论，使得最后一章有关二次型的相关理论与方法变得更加容易理解和掌握。

本书第一章至第三章由黄廷祝编写，第六章至第九章由何军华编写，第〇章、第四章至第五章由李永彬编写。全书由黄廷祝统稿并定稿。谢云荪教授对全书进行了仔细地审定与修改，电子科技大学数学科学学院的教师们也对本书提出了许多宝贵的修改意见，在此致以衷心的感谢。

借此机会，向多年来对于我们工作给予关心、支持的高等教育出版社数学分社、教育部高等学校数学基础课程教学指导分委员会的专家们致以诚挚谢意。

限于编者水平，疏漏之处恳请同行与读者批评指正。

编者

2011年6月于成都

目 录

第〇章 预备知识	1
§ 0.1 连加、连乘与数学归纳法	1
一、连加号 Σ	1
二、连乘号 Π	2
三、数学归纳法	3
习题 0.1	4
§ 0.2 映射、变换	4
习题 0.2	7
§ 0.3 等价关系、群与域的概念	8
一、等价关系	8
二、代数系统	8
三、群的概念	9
四、域的概念、数域	10
习题 0.3	10
§ 0.4 整数的算术	11
一、 \mathbf{Z} 上的带余除法	11
二、最大公因子	12
三、算术基本定理	14
习题 0.4	14
第一章 矩阵及其初等变换	15
§ 1.1 矩阵及其运算	15
一、矩阵的概念	15
二、矩阵的线性运算	17
三、矩阵的乘法	20
四、矩阵的转置	27
习题 1.1	30
§ 1.2 Gauss 消元法与矩阵的初等变换	32
一、Gauss 消元法	33
二、矩阵的初等变换	35

三、初等矩阵·····	40
习题 1.2 ·····	44
§ 1.3 逆矩阵 ·····	45
一、逆矩阵的概念与性质·····	45
二、用行初等变换求逆矩阵·····	49
习题 1.3 ·····	54
§ 1.4 分块矩阵 ·····	55
习题 1.4 ·····	61
复习题一·····	63
第二章 行列式 ·····	66
§ 2.1 n 阶行列式的定义 ·····	66
习题 2.1 ·····	71
§ 2.2 行列式的性质与计算 ·····	71
一、行列式的性质·····	71
二、行列式的计算·····	77
三、方阵乘积的行列式·····	82
习题 2.2 ·····	84
§ 2.3 Laplace 展开定理 ·····	86
习题 2.3 ·····	90
§ 2.4 分块矩阵的初等变换 ·····	91
习题 2.4 ·····	94
§ 2.5 矩阵的逆与行列式 ·····	94
习题 2.5 ·····	99
§ 2.6 矩阵的秩·····	100
一、矩阵秩的概念 ·····	100
二、矩阵秩的计算 ·····	101
三、矩阵秩的性质 ·····	104
习题 2.6 ·····	107
复习题二 ·····	108
第三章 n 维向量空间 ·····	112
§ 3.1 n 维向量空间的概念 ·····	112
一、 n 维向量空间的概念 ·····	112
二、 F^n 的子空间 ·····	115
习题 3.1 ·····	118
§ 3.2 向量组的线性相关性·····	118

一、向量组的线性组合	118
二、向量组的线性相关性	121
习题 3.2	129
§ 3.3 向量组的秩与极大无关组	130
一、向量组的秩与极大无关组的概念	130
二、 F^n 的基、维数与坐标	135
习题 3.3	136
§ 3.4 线性方程组解的结构	137
一、齐次线性方程组	137
二、非齐次线性方程组	144
习题 3.4	152
复习题三	154
第四章 多项式	158
§ 4.1 一元多项式	158
一、一元多项式	158
二、多项式的运算	158
三、一元多项式函数	160
习题 4.1	161
§ 4.2 带余除法与整除关系	162
一、带余除法	162
二、整除的性质	164
习题 4.2	165
§ 4.3 多项式的最大公因式	166
一、多项式的最大公因式	166
二、多项式互素	169
习题 4.3	172
§ 4.4 因式分解定理	172
一、不可约多项式	173
二、因式分解定理	174
习题 4.4	176
§ 4.5 重因式	177
习题 4.5	179
§ 4.6 多项式的根与重根	179
习题 4.6	182
§ 4.7 复系数与实系数多项式的因式分解	182
习题 4.7	185

§ 4.8 有理系数多项式	185
一、本原多项式	186
二、整系数多项式的有理根	188
三、有理数域上不可约多项式的判别方法	189
习题 4.8	191
§ 4.9 多元多项式	191
习题 4.9	194
§ 4.10 对称多项式	195
习题 4.10	198
复习题四	198
第五章 线性空间	201
§ 5.1 线性空间的定义与性质	201
一、线性空间的定义	201
二、线性空间的简单性质	202
习题 5.1	203
§ 5.2 线性空间的同构	204
习题 5.2	208
§ 5.3 基变换与坐标变换	209
一、过渡矩阵	209
二、坐标变换	211
习题 5.3	214
§ 5.4 线性子空间的交与和	215
一、线性子空间的性质	215
二、子空间的交	217
三、子空间的和	218
习题 5.4	220
§ 5.5 线性子空间的直和	222
习题 5.5	226
复习题五	226
第六章 线性变换	229
§ 6.1 线性映射	229
一、线性映射的概念	229
二、线性映射的性质	230
三、线性映射的矩阵表示	232
四、线性映射的运算	234

习题 6.1	235
§ 6.2 线性映射的像与核	237
一、像与核的概念和性质	237
二、线性同构	238
三、核与像的计算	239
四、核与像的维数关系	241
习题 6.2	242
§ 6.3 线性变换	243
一、定义与性质	243
二、可逆线性变换	244
三、线性变换的运算与矩阵	245
四、线性变换在不同基下矩阵的关系	248
习题 6.3	248
§ 6.4 特征值与特征向量	250
一、方阵与线性变换的特征值	250
二、特征值与特征向量的计算	251
三、Hamilton-Cayley 定理	259
习题 6.4	260
§ 6.5 相似对角化	261
一、问题的提出	261
二、矩阵的相似	262
三、矩阵的相似对角化	263
习题 6.5	272
§ 6.6 不变子空间	273
一、 \mathcal{A} -不变子空间	273
二、 \mathcal{A} -子空间分解	275
习题 6.6	276
§ 6.7 对偶空间	276
一、对偶空间	276
二、二重对偶	278
习题 6.7	279
复习题六	279
第七章 Jordan 标准形与 λ-矩阵	282
§ 7.1 最小多项式	282
一、最小多项式的概念和性质	282
二、最小多项式的计算	283

习题 7.1	287
§ 7.2 Jordan-Chevalley 分解	288
一、幂零与半单	288
二、中国剩余定理	289
三、Jordan-Chevalley 分解	291
习题 7.2	294
§ 7.3 循环不变子空间与 Jordan 标准形	294
一、循环不变子空间	294
二、幂零线性变换的 Jordan 标准形	296
三、复线性空间上一般线性变换的 Jordan 标准形	298
习题 7.3	298
§ 7.4 λ -矩阵	299
一、 λ -矩阵的定义和性质	299
二、 λ -矩阵的相抵标准形	300
三、相抵标准形的惟一性	303
习题 7.4	306
§ 7.5 矩阵的相似性判定与有理标准形	306
一、方阵的相似与 λ -矩阵的相抵	306
二、矩阵的有理标准形	308
习题 7.5	310
§ 7.6 初等因子与 Jordan 标准形	311
一、初等因子	311
二、初等因子组的计算	312
三、Jordan 标准形	314
四、Jordan 标准形的应用举例	316
习题 7.6	318
复习题七	318
第八章 欧氏空间	320
§ 8.1 内积与欧氏空间	320
一、定义与实例	320
二、Cauchy 不等式	322
三、度量矩阵	323
习题 8.1	326
§ 8.2 标准正交基	327
一、标准正交基	327
二、Gram-Schmidt 过程	328

三、正交矩阵	330
四、欧氏空间上的同构	332
习题 8.2	333
§ 8.3 正交变换与正交补	334
一、正交变换	334
二、正交补	337
三、正交投影与最小二乘解	339
习题 8.3	341
§ 8.4 实对称矩阵的标准形	342
一、实对称矩阵	342
二、对称变换	343
习题 8.4	346
* § 8.5 酉空间简介	347
复习题八	349
第九章 二次型与双线性函数	351
§ 9.1 二次型	351
一、二次型的定义	351
二、可逆线性替换	352
习题 9.1	354
§ 9.2 标准形与规范形	354
一、配方法	354
二、规范形及其惟一性	358
习题 9.2	361
§ 9.3 正定二次型	362
一、正交线性替换化实二次型为标准形	362
二、正定二次型与正定矩阵	363
三、正定矩阵与欧氏空间的度量矩阵	368
四、负定、半正定、半负定与不定二次型	369
习题 9.3	371
§ 9.4 双线性函数	371
一、双线性函数	371
二、非退化双线性函数	373
三、对称与反称双线性函数	374
习题 9.4	377
复习题九	377

第〇章 预备知识

§ 0.1 连加、连乘与数学归纳法

一、连加号 Σ

在数学运算中，我们经常会遇到多个数的求和，比如 $a_1 + a_2 + \cdots + a_n$ ，为了书写方便，我们将求和简单地记为 $\sum_{i=1}^n a_i$ ，其中 Σ 是连加符号，其上标与下标表示求和的范围。因此 $\sum_{i=1}^n a_i$ 也可以写成 $\sum_{j=1}^n a_j$ 或者 $\sum_{1 \leq k \leq n} a_k$ 。

下面给出一些应用连加符号简化书写的例子。

例 1 序列 $b_1, b_2, \dots, b_p, \dots, b_q, \dots$ 中从第 p 项到第 q 项的和 $b_p + b_{p+1} + \cdots + b_q$ ，用连加号可以写成 $\sum_{i=p}^q b_i$ 或 $\sum_{p \leq i \leq q} b_i$ 。

例 2 对例 1 中的序列， $\sum_{i=0}^k b_{2i+1}$ 表示第 1 项到第 $2k+1$ 项中所有奇数项的和，即

$$\sum_{i=0}^k b_{2i+1} = b_1 + b_3 + \cdots + b_{2k+1}.$$

利用数的加法交换律以及乘法对加法的分配律，显然有下面的等式：

$$\begin{aligned} \lambda(a_1 + a_2 + \cdots + a_n) &= \lambda a_1 + \lambda a_2 + \cdots + \lambda a_n, \\ (a_1 + b_1) + (a_2 + b_2) + \cdots + (a_n + b_n) &= (a_1 + a_2 + \cdots + a_n) + \\ &\quad (b_1 + b_2 + \cdots + b_n). \end{aligned}$$

将上面的两个等式用连加号写出来，就是

$$\lambda \sum_{i=1}^n a_i = \sum_{i=1}^n \lambda a_i, \quad \sum_{i=1}^n (a_i + b_i) = \sum_{i=1}^n a_i + \sum_{i=1}^n b_i.$$

在实际应用中，可能会出现两个、三个甚至更多个连加号在一起的情况。比如 mn 个数构成的表：

$$\begin{array}{cccc}
 a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\
 a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\
 \vdots & \vdots & & \vdots \\
 a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn}
 \end{array}$$

第 1 行, 第 2 行, \dots , 第 m 行各数之和用连加号来表示, 分别为

$$\sum_{j=1}^n a_{1j}, \sum_{j=1}^n a_{2j}, \dots, \sum_{j=1}^n a_{mj}.$$

然后, 再将这些数求和, 即

$$\sum_{j=1}^n a_{1j} + \sum_{j=1}^n a_{2j} + \cdots + \sum_{j=1}^n a_{mj},$$

用连加号书写, 就是 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij}$, 实际上是表中全部 mn 个数的总和. 当然, 我们也可以先按列求和, 而后将各列的和相加而求得总和. 因此, 我们有

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m a_{ij}.$$

二、连乘号 \prod

与连加号类似, 我们可以使用连乘号 \prod 将 n 个数 a_1, a_2, \dots, a_n 之积 $a_1 a_2 \cdots a_n$ 简单地记为

$$\prod_{i=1}^n a_i.$$

类似地, 也可以有多重连乘号, 例如 mn 个数构成的表

$$\begin{array}{cccc}
 a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\
 a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\
 \vdots & \vdots & & \vdots \\
 a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn}
 \end{array}$$

中所有数的积, 可表示为 $\prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^n a_{ij}$ 或者 $\prod_{j=1}^n \prod_{i=1}^m a_{ij}$.

例 3 $\prod_{1 \leq i < j \leq n} (a_j - a_i)$ 表示所有满足 $i < j$ 的因子 $a_j - a_i$ 的乘积, 即

$$\begin{aligned}
 \prod_{1 \leq i < j \leq n} (a_j - a_i) &= (a_2 - a_1)(a_3 - a_1) \cdots (a_n - a_1) \\
 &\quad (a_3 - a_2) \cdots (a_n - a_2) \\
 &\quad \dots \dots \dots \\
 &\quad (a_n - a_{n-1}).
 \end{aligned}$$

三、数学归纳法

我们约定将所有正整数所构成的集合记为 \mathbf{N}^+ 或 \mathbf{Z}^+ , 即 $\mathbf{N}^+ = \{1, 2, 3, \dots\}$. 正整数集合的最本质属性是所谓的归纳原理(或称为归纳公理).

归纳原理 设 S 为 \mathbf{N}^+ 的子集, 而且满足:

- (1) $1 \in S$;
- (2) 如果 $n \in S$, 则 $n + 1 \in S$;

那么 $S = \mathbf{N}^+$.

上面给出的归纳原理实际上就是我们在中学中常用的数学归纳法的基础.

定理 1(数学归纳法) 设 $P(n)$ 是关于正整数集合 \mathbf{N}^+ 的一个命题. 如果

- (1) 当 $n = 1$ 时, 命题 $P(1)$ 成立;
- (2) 由 $P(n)$ ($n \in \mathbf{N}^+$) 成立可推出 $P(n + 1)$ 成立.

那么 $P(n)$ 对所有正整数 n 都成立.

证 用 S 表示使得 $P(n)$ 成立的所有正整数所组成的集合, 即 $S = \{n \in \mathbf{N}^+ \mid P(n) \text{ 成立}\}$. 由条件(1)知 $1 \in S$; 若 $n \in S$, 则 $P(n)$ 成立, 由条件(2)知 $P(n + 1)$ 成立, 于是有 $n + 1 \in S$. 所以由归纳原理知 $S = \mathbf{N}^+$, 也就是说, $P(n)$ 对所有正整数 n 都成立.

利用正整数的归纳原理, 容易推出数学中经常使用的最小数原理.

定理 2(最小数原理) 正整数集 \mathbf{N}^+ 的任一非空子集都有一个最小数.

证 设 T 是 \mathbf{N}^+ 的一个非空子集, 任取 $k \in T$, 则集合

$$T_k = T \cap \{1, 2, \dots, k\} = \{t \in T \mid t \leq k\}$$

是有限集, 于是 T_k 有最小数 m , 显然 $m \in T$, 易见 m 也是 T 的最小数.

注 上面的证明过程中似乎没有用到归纳原理, 可是我们应用了小于或等于 k 的正整数集合可以写成 $\{1, 2, \dots, k\}$ 的事实, 而实际上这一事实(通常也称正整数满足良序公理)与正整数的归纳原理是等价的.

由最小数原理, 我们可以证明下面的定理.

定理 3(第二数学归纳法) 设 $P(n)$ 是关于正整数集合 \mathbf{N}^+ 的一个命题. 如果

- (1) 当 $n = 1$ 时, $P(1)$ 成立;
- (2) 如果对小于 n 的一切正整数 k 都成立 $P(k)$ 可推出 $P(n)$ 成立.

那么 $P(n)$ 对所有正整数 n 都成立.

证 用 S 记使得 $P(n)$ 不成立的所有正整数所组成的集合, 那么 S 是 \mathbf{N}^+ 的子集. 我们只需证 S 是空集即可.

用反证法. 如果 $S \neq \emptyset$, 那么由最小数原理知 S 中有某个最小数 a , 也就是说 a 是使得 $P(n)$ 不成立的最小的数. 由条件(1)知 $P(1)$ 成立, 因此 $a \neq 1$. 由 a 选取的最小性知, 对小于 a 的一切正整数 k 都成立 $P(k)$, 于是由条件(2)知 $P(a)$ 成立, 这与 a 的选取矛盾.

最后, 我们介绍一种与正整数相关的定义方式.

归纳定义(归纳构造法) 如果某个与正整数 n 有关的量 $\varphi(n)$ 是用 $\varphi(m)$ ($m < n$) 来定义的, 这种定义方法称为**归纳定义**.

例 4 设 a 是一个数, a 的正整数方幂定义可以用关系式

$$a^1 = a, \quad a^n = a^{n-1} \cdot a$$

来归纳定义.

归纳定义在高等代数以及其他数学分支中经常用到, 其合理性可由完全归纳原理所保证.

习 题 0.1

1. 证明: $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2$.

2. 计算 $\prod_{k=0}^{99} e^{2k+1}$.

3. 设 T 是一个由一些整数构成的集合.

(1) 如果 T 中有正整数, 证明 T 中必有最小的正整数;

(2) 如果 T 中有负整数, 证明 T 中必有最大的负整数.

4. (双重数学归纳法) 设 $P(m, n)$ 是关于正整数 m, n 的命题. 如果

(1) $P(1, 1)$ 成立;

(2) 由 $P(m, n)$ 成立可以推出 $P(m, n+1), P(m+1, n)$ 都成立.

证明 $P(m, n)$ 对所有正整数 m, n 都成立.

5. 用数学归纳法证明: 对于任意正整数 n ,

$$(\cos \alpha + i \sin \alpha)^n = \cos n\alpha + i \sin n\alpha.$$

§ 0.2 映射、变换

中学数学中, 大家已学习过了集合论的基础, 本节我们讨论集合之间的一种特殊关系, 即映射. 映射与函数的概念在数学中扮演着中心的角色.

定义 1 设 A 和 B 是两个非空集合, 所谓集合 A 到集合 B 的一个映射就是指一个法则 σ , A 中每一个元(素) a 在法则 σ 之下惟一对应于 B 中某个元 b , 并