




普通高等教育“十五”国家级规划教材

大学数学基础教程(三)

线性代数与空间解析几何

张志让 刘启宽

 高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

大学数学基础教程(三)

线性代数与空间解析几何

张志让 刘启宽

高等教育出版社

内容提要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,根据新世纪科技人才对数学素质的要求,针对当前高等院校的教学实际,选择合理的教材内容与体系结构。本书安排由浅入深的内容次序以及简捷、直观的理论体系;几何与代数的内容有机结合;强调矩阵初等变换的突出作用;把数学建模的思想与方法渗透到教材内容中去,注重应用背景及应用实例的介绍。教材易教易学,有利于学生数学素质的培养。

本书的内容包括:矩阵,线性方程组与矩阵初等变换,行列式,空间解析几何与向量运算, n 维向量空间,特征值与特征向量,向量空间的正交性以及二次型等八章;各章配有适量的习题,第三章、第四章及第八章末附有应用实例,书末附有习题答案。

本书可供一般高等院校理工科非数学类专业使用,也可以供其他院校相近专业使用。

图书在版编目(CIP)数据

线性代数与空间解析几何/张志让,刘启宽. —北京:高等教育出版社,2004.4

大学数学基础教程(三)

ISBN 7-04-014394-1

I. 线... II. ①张... ②刘... III. ①线性代数-高等学校-教材②空间几何:解析几何-高等学校-教材
IV. ①O151.2②O182.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第015176号

策划编辑 李艳薇 责任编辑 李陶 封面设计 刘晓翔 责任绘图 黄建英
版式设计 史新薇 责任校对 杨雪莲 责任印制 杨明

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-82028899		http://www.hep.com.cn
经 销	新华书店北京发行所		
印 刷	北京机工印刷厂		
开 本	787×960 1/16	版 次	2004年4月第1版
印 张	13 75	印 次	2004年4月第1次印刷
字 数	240 000	定 价	14.90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

《大学数学基础教程》编辑委员会

主 编 张志让

副主编 王宝富 魏贵民 谢云荪 李小明

编 委 (以姓氏笔画为序)

刘启宽 杨 韧 钮 海 胡 灿 谢祥俊

前 言

《线性代数与空间解析几何》是普通高等教育“十五”国家级规划教材《大学数学基础教程》的分册之一。本书介绍线性代数与空间解析几何的基本知识，内容包括：矩阵，线性方程组与矩阵初等变换，行列式，空间解析几何与向量运算， n 维向量空间，特征值与特征向量，向量空间的正交性以及二次型等八章；各章配有适量的习题，第三章、第四章及第八章末附有应用实例，书末附有习题答案。本书教学学时数约 50 学时。

本书根据新世纪科技人才对数学素质的要求，针对当前高等院校的教学实际，选择合理的教材内容与体系结构。本书编者总结多年来的教学实践及教学改革的经验，同时吸收国内外优秀教材的长处，对传统的线性代数与空间解析几何的内容及体系作了较大幅度的调整。本书主要特色体现在：

一、抓住课程本质，选择合理的教材内容与体系结构

在保证教材内容科学性的前提下，本书安排由浅入深的内容次序以及简捷、直观的理论体系；从线性方程组解的三种不同情况出发，直观地建立了相关的定理，大大地降低了向量线性相关性研究的抽象性与复杂性；根据需要构造一些新的引理与定理，不少定理的证明也是很简便的。几何与代数内容的有机结合，使从三维向量空间到 n 维向量空间的过渡更为自然；同时在空间解析几何部分构造的一些新的例子，成为向量线性相关性及向量空间的正交性等抽象概念的很好的引例。

二、强调矩阵初等变换的突出作用

本书在第二章就介绍矩阵初等变换的概念以及利用它们对矩阵进行消元的一般程序，建立了几个关于它们的性质的定理，并且在尽可能多的场合，反复使用矩阵初等变换来解决相关的计算问题，使它成为贯穿全书的计算工具。同时，不少依赖于矩阵初等变换的理论推导，也显得非常直观、易于理解。

三、把数学建模的思想与方法渗透到教材内容中去，强调数学知识的应用

本书注重应用背景及应用实例的介绍，以培养学生应用数学知识解决实际问题的意识与能力。

四、选择适当的教学定位

本书适应高等教育从“精英教育”到“大众化教育”过渡的需要，主要针对一般高等学校的教学实际，选择适当的教学内容（特别是在例题及习题方面）。

总之，本书教学定位适当；理论体系构思新颖，结构合理，科学性强；强

调数学知识的应用；文字通俗易懂，教材内容安排深入浅出，可读性与可施教性强。

本书的第一、二、三、四、五章由张志让(成都信息工程学院)执笔，第六、七、八章由刘启宽(成都信息工程学院)执笔。《大学数学基础教程》编委会的全体成员对本书进行了初审，提出了不少修改意见。本书由中国科技大学数学系李尚志教授及电子科技大学应用数学学院谢云荪教授主审，他们认真地审阅了全书，并提出了重要的修改意见，谨向他们表示衷心的感谢。在编写本书的过程中，我们得到高等教育出版社对本书的关心和支持，也得到成都信息工程学院计算科学系的同事们的不少帮助，在此一并致谢。

虽然我们努力使本书成为一本具有新意又便于教学的教材，但由于缺乏经验而且水平有限，书中一定会有不少不尽人意的地方，恳请各位专家及读者提出宝贵意见。

编 者

2003年11月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581698/58581879/58581877

传 真：(010) 82086060

E - mail：dd@hep.com.cn 或 chenrong@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街 4 号

高等教育出版社法律事务部

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)64014089 64054601 64054588

目 录

第一章 矩阵

§ 1 矩阵的概念	1
一、引例	1
二、矩阵的定义	2
三、特殊矩阵	3
习题一	4
§ 2 矩阵的运算	5
一、矩阵的线性运算	5
二、矩阵的乘法	7
三、矩阵的转置	12
四、矩阵的逆	14
习题二	16
§ 3 分块矩阵及其运算	18
一、分块矩阵的概念	18
二、分块矩阵的运算	19
习题三	22

第二章 线性方程组与矩阵初等变换

§ 1 线性方程组及高斯消元法	24
一、引例	24
二、线性方程组	25
三、高斯消元法	26
四、利用矩阵初等行变换解线性方程组	28
五、矩阵的初等列变换	37
习题一	38
§ 2 初等矩阵	39
一、初等矩阵的概念	39
二、初等矩阵与矩阵初等变换	41
三、逆矩阵定理	41

四、利用矩阵初等变换求矩阵的逆	42
习题二	45

第三章 行列式

§ 1 n 阶行列式的定义	46
一、二阶和三阶行列式	46
二、全排列及其奇偶性	48
三、 n 阶行列式的定义	49
四、行列式按行(列)展开	51
习题一	54
§ 2 行列式的性质与计算	54
一、行列式的性质	54
二、行列式的计算	56
习题二	60
§ 3 行列式与矩阵的逆	61
一、伴随矩阵与矩阵的逆	61
二、行列式的乘法定理	63
三、克拉默法则	64
习题三	66
§ 4 矩阵的秩	67
一、矩阵秩的概念	67
二、矩阵秩的计算	68
习题四	71
§ 5 应用实例	71
实例一 电路分析中支路电流问题	71
实例二 职工轮训	72

第四章 空间解析几何与向量运算

§ 1 空间直角坐标系与向量	73
一、空间直角坐标系	73
二、向量及其线性运算	74
三、向量的分解与向量的坐标	79
习题一	84
§ 2 向量的乘法	84

一、向量的数量积	84
二、向量的向量积	87
三、向量的混合积	89
习题二	91
§ 3 平面	92
一、平面的方程	92
二、两平面间的位置关系	96
习题三	98
§ 4 空间直线	98
一、空间直线的方程	98
二、空间两直线间的位置关系	101
三、空间直线与平面间的位置关系	102
习题四	104
§ 5 曲面与空间曲线	105
一、曲面及其方程	105
二、柱面、锥面、旋转曲面	106
三、二次曲面	109
四、空间曲线及其方程	114
五、空间曲线在坐标面上的投影	115
习题五	117
§ 6 应用实例	118
实例一 液体流量的计算	118
实例二 地形测量中点的位置的确定	118

第五章 n 维向量空间

§ 1 向量与向量空间	120
一、三维向量空间	120
二、 n 维向量	121
三、向量空间及其子空间	122
习题一	123
§ 2 向量组的线性相关性	124
一、向量组的线性组合	124
二、向量组的线性相关性	127
习题二	133

§ 3 向量组的秩	133
一、向量组的秩与极大无关组	133
二、向量组极大无关组的性质	136
三、向量空间的基、维数与向量的坐标	137
四、过渡矩阵与坐标变换	140
习题三	143
§ 4 线性方程组解的结构	144
一、齐次线性方程组解的结构	145
二、非齐次线性方程组解的结构	149
习题四	151

第六章 特征值与特征向量

§ 1 特征值与特征向量	153
一、特征值与特征向量的概念及性质	153
二、特征值与特征向量的计算	154
习题一	159
§ 2 相似矩阵与矩阵的对角化	159
一、矩阵相似的概念与性质	159
二、矩阵的相似对角化	161
习题二	164

第七章 向量空间的正交性

§ 1 向量空间的内积	165
一、引例(三维向量的内积)	165
二、向量的内积及其性质	165
三、向量的正交性	166
四、施密特正交化过程	167
五、正交矩阵	169
习题一	171
§ 2 实对称矩阵的对角化	171
一、实对称矩阵的特征值与特征向量	171
二、实对称矩阵的对角化	172
习题二	175

第八章 二次型

§ 1 二次型	176
一、二次型的概念	176
二、二次型的矩阵表示	177
习题一	178
§ 2 二次型的标准形	178
一、二次型的标准形	178
二、用正交变换法化二次型为标准形	180
三、用拉格朗日配方法化二次型为标准形	182
四、二次曲面的化简	185
习题二	186
§ 3 正定二次型	186
一、正定二次型的概念	186
二、正定二次型的判定	187
习题三	189
§ 4 应用实例	190
实例一 隐性连锁基因问题	190
实例二 最小二乘法	191

习题答案

193

参考文献

205

第一章

矩 阵

矩阵是线性代数的主要研究对象之一，它在数学、物理学，工程技术以及社会科学等领域都有广泛的应用。本章主要介绍矩阵及其运算。

§ 1 矩阵的概念

一、引例

某计算机公司有三个销售门市部，销售四种计算机。它在某月内的销售情况如下表所示：

表 1.1

单位：台

销 售 门 市 部	计算机数	1	2	3	4
	1	150	200	100	0
2	170	300	50	210	
3	320	160	10	230	

如果我们用 a_{ij} ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3, 4$) 表示第 i 个门市部销售第 j 种计算机的数量 (如 $a_{14} = 0, a_{23} = 50, a_{32} = 160$ 等)，那么我们就可以把上述的计算机销售情况表简化成一个 3 行 4 列的矩形数表

$$\begin{pmatrix} 150 & 200 & 100 & 0 \\ 170 & 300 & 50 & 210 \\ 320 & 160 & 10 & 230 \end{pmatrix}.$$

一般地，如果问题所牵涉的数据是以表格形式出现的，那么这些数据常常用这种简化的数表来表示。

二、矩阵的定义

定义 1 由 $m \times n$ 个数排成的 m 行 n 列的矩形数表

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

称为一个 m 行 n 列矩阵, 简称 $m \times n$ 矩阵. 这 $m \times n$ 个数称为矩阵 A 的元素, 其中 a_{ij} 表示矩阵 A 的第 i 行第 j 列元素.

元素是实数的矩阵称为实矩阵, 元素是复数的矩阵称为复矩阵. 本书中的矩阵都指实矩阵. (1.1) 式可以简记为

$$A = (a_{ij})_{m \times n} \text{ 或 } A = (a_{ij}),$$

$m \times n$ 矩阵 A 也记作 $A_{m \times n}$. 例如

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 & 1 \\ 2 & 3 & 4 & 5 \\ 0 & 1 & 3 & 4 \end{pmatrix}$$

是一个 3×4 矩阵.

由 m 个关于 n 个未知量 x_1, x_2, \dots, x_n 的一次方程组成的方程组

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2, \\ \dots\dots\dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n = b_m \end{cases} \quad (1.2)$$

称为线性方程组. 线性方程组 (1.2) 的未知量的系数 a_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$) 可以组成一个 $m \times n$ 矩阵

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix},$$

称为方程组 (1.2) 的系数矩阵. 矩阵 A 添加方程组 (1.2) 的常数列, 就得到一个 $m \times (n+1)$ 矩阵

$$B = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} & b_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} & b_m \end{pmatrix},$$

称为方程组(1.2)的增广矩阵. 反之, 如果已知一个线性方程组的增广矩阵, 那么我们就可以写出这个方程组.

例 1 写出下列线性方程组的系数矩阵 A 及增广矩阵 B

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 & - 3x_4 = 1, \\ 5x_1 - 3x_2 + 4x_3 + 7x_4 = 0, \\ x_1 + 6x_2 & + 8x_4 = 3. \end{cases}$$

解 该方程组的系数矩阵及增广矩阵分别是

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & -3 \\ 5 & -3 & 4 & 7 \\ 1 & 6 & 0 & 8 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & -3 & 1 \\ 5 & -3 & 4 & 7 & 0 \\ 1 & 6 & 0 & 8 & 3 \end{pmatrix}.$$

两个矩阵的行数相等, 列数也相等, 就称它们是同型矩阵. 如果 $m \times n$ 矩阵 $A = (a_{ij})$ 与 $B = (b_{ij})$ 是同型矩阵, 并且它们的对应元素相等, 即

$$a_{ij} = b_{ij} (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n),$$

那么就称矩阵 A 与矩阵 B 相等, 记作 $A = B$.

三、特殊矩阵

下面我们列举几种常见的特殊类型的矩阵.

只有一行的矩阵

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$$

称为行矩阵, 又称为行向量; 只有一列的矩阵

$$B = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}$$

称为列矩阵, 又称为列向量.

元素都是零的矩阵称为零矩阵, 记作 O 或者 $O_{m \times n}$. 注意: 不同型的零矩阵是不同的.

行数与列数相同的矩阵 $A_{n \times n}$ 称为 n 阶矩阵(或称为 n 阶方阵), 简记为 A_n . 一个 n 阶矩阵的左上角与右下角之间的连线称为它的主对角线.

主对角线上全为 1, 其余位置上全为零的 n 阶矩阵称为单位矩阵, 记作 I 或者 I_n , 即

$$I = I_n = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix}_{n \times n}.$$

主对角线下方的元素全为零的矩阵称为上三角形矩阵；类似地，主对角线上方的元素全为零的矩阵称为下三角形矩阵。例如，矩阵

$$\begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$$

及矩阵

$$\begin{pmatrix} a & 0 & 0 \\ b & d & 0 \\ c & e & f \end{pmatrix}$$

分别是上三角形矩阵与下三角形矩阵。

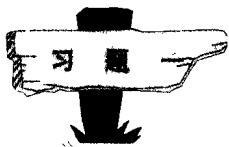
特别地，只有主对角线上才有可能有非零元素(其余位置上的元素全为零)的矩阵称为对角矩阵。例如，矩阵

$$\begin{pmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{pmatrix}$$

及矩阵

$$\begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}$$

都是对角矩阵。



1. 设有 A、B、C 三类商品，它们去年和今年的价格如下表所示：

单位：元

价 格 商品	年 份	
	去 年	今 年
A	100	200
B	90	50
C	120	150

试用矩阵表示上述表格。

2. 写出下列线性方程组的系数矩阵与增广矩阵。

$$(1) \begin{cases} 2x - 3y = 1, \\ x - 2y = 0; \end{cases}$$

$$(2) \begin{cases} x - 3z = 0, \\ 2x + 3y + z = 2, \\ 3x + 2y = 5. \end{cases}$$

3. 写出矩阵 $A = ((-1)^{i+j})_{2 \times 3}$ 的完全形式.

4. 写出既是上三角形矩阵, 又是下三角形矩阵的 3 阶矩阵的一般形式.

§ 2 矩阵的运算

本节介绍矩阵的线性运算、矩阵的乘法以及矩阵的求逆等矩阵运算及其运算规律.

一、矩阵的线性运算

在 § 1 的引例中, 如果三个门市部销售四种计算机(单位:台)在某两个月内的销售情况矩阵分别为

$$A = \begin{pmatrix} 150 & 200 & 100 & 0 \\ 170 & 300 & 50 & 210 \\ 320 & 160 & 10 & 230 \end{pmatrix}$$

及

$$B = \begin{pmatrix} 100 & 300 & 90 & 10 \\ 130 & 200 & 250 & 200 \\ 280 & 150 & 100 & 170 \end{pmatrix},$$

那么, 在这两个月内三个门市部销售四种计算机的销售情况可以由矩阵

$$C = \begin{pmatrix} 250 & 500 & 190 & 10 \\ 300 & 500 & 300 & 410 \\ 600 & 310 & 110 & 400 \end{pmatrix}$$

表示, 其中矩阵 C 的第 i 行第 j 列 ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3, 4$) 元素恰好是矩阵 A 与 B 的第 i 行第 j 列元素之和.

定义 2 设有两个 $m \times n$ 矩阵 $A = (a_{ij})$ 与 $B = (b_{ij})$, 那么 $m \times n$ 矩阵

$$C = \begin{pmatrix} a_{11} + b_{11} & a_{12} + b_{12} & \cdots & a_{1n} + b_{1n} \\ a_{21} + b_{21} & a_{22} + b_{22} & \cdots & a_{2n} + b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} + b_{m1} & a_{m2} + b_{m2} & \cdots & a_{mn} + b_{mn} \end{pmatrix}$$

称为矩阵 A 与 B 的和, 记作 $C = A + B$.