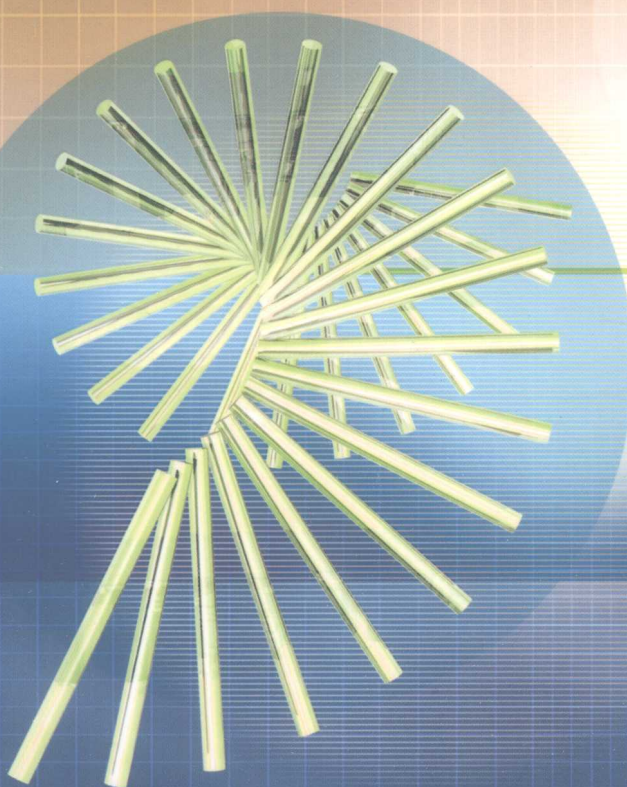




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学数学 ——线性代数

(第二版)



吉林大学数学学院
陈殿友 术洪亮 戴天时 主编



高等教育出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学数学——线性代数

(第二版)

吉林大学数学学院

陈殿友 术洪亮 戴天时 主编

高等教育出版社

内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材《大学数学》系列教材之一。内容包括：矩阵的运算与初等变换，方阵的行列式，可逆矩阵，线性方程组与向量组的线性相关性，方阵的特征值、特征向量与相似化简，二次型与对称矩阵，线性空间与线性变换，书后附习题参考答案。

本书可供高等学校非数学类理工科各专业学生选用，也可供工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学数学. 线性代数 / 陈殿友, 术洪亮, 戴天时主编.
2 版. —北京: 高等教育出版社, 2009. 7
ISBN 978 - 7 - 04 - 027255 - 0

I. 大… II. ①陈…②术…③戴… III. ①高等
数学 - 高等学校 - 教材 ②线性代数 - 高等学校 - 教
材 IV. O13 O151.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 077721 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	咨询电话	400 - 810 - 0598
邮政编码	100120	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010 - 58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landaco.com.cn
印 刷	国防工业出版社印刷厂	畅想教育	http://www.widedu.com
		版 次	2004 年 7 月第 1 版
开 本	787 × 960 1/16		2009 年 7 月第 2 版
印 张	17.75	印 次	2009 年 7 月第 1 次印刷
字 数	320 000	定 价	19.40 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 27255 - 00

《大学数学》系列教材编委会

主 任 李辉来

副主任 陈殿友 李忠范

编 委 (以姓氏笔画为序)

王国铭 王树岩 白 岩 术洪亮

孙 毅 李忠范 李辉来 陈殿友

赵建华 郭 华 高文森 戴天时

第二版前言

《大学数学》系列教材面世已经 5 年了,在此期间,有不少高校同行在使用本系列教材的过程中提出了许多宝贵意见,结合过去的 5 年我们使用本系列教材的教学实践经验和近几年大学数学课程改革的一些新动态,编委会决定对本系列教材进行修订、完善。新版列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

这次修订的指导思想是:1. 保持原书风格与特色,力求叙述简洁明了,把基础知识尽可能地交待透彻。2. 在加强理论知识系统性的同时,尽可能突出数学思想方法的讲授,删繁就简。3. 突出数学应用的广泛性,提高数学技术应用的深度和技巧。

本书第二版在第一版的基础上,本着注重理工科需要,贴近教学实际的原则,删去了第一版教材中第九章欧氏空间和第八章的 §3 线性空间的不变子空间等部分。将第七章与第八章合并为一章:线性空间与线性变换。其余部分也做了修改和完善,使得内容编排和例题习题搭配更为合理,文字叙述及理论推导更加准确。

参加第二版修订的有陈殿友(第一、二、三章)、术洪亮(第四、五章)、戴天时(第六、七章)。

在本书的修订过程中,得到了吉林大学数学学院和高等教育出版社数学分社的大力支持和帮助,吴晓俐女士承担本系列教材修订的编务工作,任长宇完成了排版工作,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中的错误和不当之处,敬请读者批评指正。

《大学数学》系列教材编委会

2009 年 1 月

第一版前言

《大学数学》系列教材是普通高等教育“十五”国家级规划教材。本系列教材共四册：《微积分》(上、下)、《线性代数》和《随机数学》。

本系列教材的编写体现了时代的特点。本着加强基础、强化应用、整体优化、注重后效的原则，力争做到科学性、系统性和可行性的统一，使传授数学知识和培养数学素养得到了较好的结合。

本系列教材是在吸取国内外同类教材的精华，借鉴近几年我国出版的一批“面向 21 世纪课程教材”成功经验，结合在吉林大学公共数学教学教研的具体实践，针对非数学类理工科大学生的特点编写的。

本系列教材内容充实，可作为高等学校非数学类理工科各专业的教材或教学参考书。在教材体系与内容的编排上，认真考虑了不同专业、不同学时的授课对象的需求，对数学要求较高的物理、计算机、电子等专业原则上可讲授本教材的全部内容，其他专业可以在不带“*”号的内容中，根据实际需要选择适当的章节讲授。每章后面所配备的习题分成两类，其中(A)类是体现教学基本要求的习题；(B)类是对基本内容提升、扩展以及综合运用有关知识的习题。较难的题在题号前用“△”号做了标注。与教材中“*”号内容相应的习题用“*”号做了标注。本书的最后给出了习题参考答案或提示，供读者参考。

本册《线性代数》的一至四章由陈殿友编写，五至九章由戴天时编写。

在《大学数学》系列教材的编写过程中，得到了吉林大学教务处的大力支持。数学学院尹景学教授为本套教材初稿的版面设计、软件培训提供了悉心的技术指导；公共数学教学与研究中心副主任吴晓俐女士承担了本系列教材初稿的编务工作；研究生王军林、孙鹏、任长宇、李明、柯长海、吴刚、姜政毅及湖北大学郑巧仙老师完成了本系列教材初稿的排版制图工作，在此一并致谢。作者要特别感谢高等教育出版社高等理科分社的领导和编辑们，他们对本系列教材的编辑出版工作给予了精心指导和大力支持。

由于我们水平所限，书中的错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正，以期不断完善。

《大学数学》系列教材编委会

2004 年 5 月

目 录

第一章 矩阵的运算与初等变换	1
§1 矩阵与向量的概念	1
1.1 矩阵的概念	1
1.2 向量的概念	3
习题 1.1.	4
§2 矩阵的运算	4
2.1 矩阵加法	4
2.2 数乘矩阵	5
2.3 矩阵乘法	6
2.4 矩阵的转置	10
习题 1.2.	12
§3 分块矩阵及矩阵的分块运算	14
3.1 矩阵的分块加法运算	15
3.2 矩阵的分块数乘运算	16
3.3 矩阵的分块乘法运算	16
3.4 分块矩阵的转置	18
习题 1.3.	18
§4 几种特殊矩阵	19
4.1 对角矩阵	19
4.2 上(下)三角形矩阵	21
4.3 对称矩阵	22
4.4 反称矩阵	22
4.5 分块对角矩阵	23
习题 1.4.	25
§5 矩阵的初等变换	25
5.1 引例	26
5.2 矩阵的初等变换	27
5.3 初等矩阵	30
习题 1.5.	32

第二章 方阵的行列式	34
§1 n 阶行列式的定义	34
1.1 n 阶行列式的引出	34
1.2 全排列及其逆序数	36
1.3 n 阶行列式的定义	38
习题 2.1.	41
§2 方阵行列式的性质	42
习题 2.2.	47
§3 展开定理与行列式的计算	48
3.1 余子式和代数余子式	49
3.2 行列式按一行(列)展开定理.	49
3.3 Laplace 定理.	56
习题 2.3.	59
第三章 可逆矩阵	62
§1 可逆矩阵的定义与性质	62
1.1 可逆矩阵的概念	62
1.2 可逆矩阵的性质	63
习题 3.1.	64
§2 方阵可逆的充要条件与逆矩阵计算.	65
习题 3.2.	71
§3 矩阵的秩	73
习题 3.3.	77
第四章 线性方程组与向量组的线性相关性	79
§1 消元法与线性方程组的相容性	79
1.1 线性方程组的相容性与 Cramer 法则.	79
1.2 用消元法解线性方程组	82
习题 4.1.	85
§2 向量组的线性相关性	87
2.1 n 维向量.	87
2.2 向量组的线性相关性	87
习题 4.2.	94
§3 向量组的秩 矩阵的行秩与列秩.	95
3.1 向量组的秩.	95
3.2 矩阵的行秩与列秩	97
习题 4.3.	100

§4 线性方程组解的结构	102
4.1 齐次线性方程组解的结构	102
4.2 非齐次线性方程组解的结构	108
习题 4.4.	111
第五章 方阵的特征值、特征向量与相似化简.	114
§1 数域 多项式的根	114
1.1 数域	114
1.2 多项式的根与标准分解式	115
习题 5.1.	117
§2 方阵的特征值与特征向量	117
习题 5.2.	123
§3 方阵相似于对角矩阵的条件	125
3.1 相似矩阵及其性质	125
3.2 方阵的相似对角化	127
习题 5.3.	133
§4 正交矩阵	134
4.1 实向量的内积与长度	134
4.2 正交向量组.	136
4.3 正交矩阵与正交变换	139
4.4 共轭矩阵.	140
*4.5 H- 矩阵与酉矩阵.	141
习题 5.4.	142
§5 实对称矩阵的相似对角化	143
5.1 实对称矩阵特征值与特征向量的性质	143
5.2 用正交变换实现实对称矩阵的相似对角化.	144
习题 5.5.	153
*§6 Jordan 标准形简介.	155
6.1 多项式矩阵及其初等变换	155
6.2 矩阵的 Jordan 标准形	157
*习题 5.6.	164
第六章 二次型与对称矩阵.	166
§1 二次型及其矩阵	166
习题 6.1.	170

§2	二次型的标准形	170
	2.1 用正交变换化实二次型为标准形	171
	2.2 用配方法化二次型为标准形	174
	习题 6.2.	176
§3	合同变换与二次型的规范形	177
	3.1 合同变换法	177
	3.2 实二次型的规范形	181
	*3.3 复二次型的规范形	183
	*3.4 实二次型规范形惟一性的证明	185
	习题 6.3.	186
§4	实二次型的分类 正定二次型	187
	4.1 实二次型的分类	187
	4.2 正定二次型与正定矩阵	188
	*4.3 负定、半正定与半负定二次型	191
	习题 6.4.	192
第七章 线性空间与线性变换		194
§1	线性空间及其子空间	194
	1.1 线性空间的定义	194
	1.2 线性空间的基本性质	198
	1.3 线性空间的子空间	199
	*1.4 子空间的交与和	201
	习题 7.1.	203
§2	基与维数	205
	习题 7.2.	211
§3	坐标与坐标变换	212
	3.1 向量的坐标	212
	3.2 基变换与坐标变换	216
	习题 7.3.	220
§4	线性变换及其性质	221
	4.1 变换及其运算	221
	4.2 线性变换及其性质	223
	习题 7.4.	226
§5	线性变换与矩阵的对应关系	228
	5.1 线性变换的矩阵	228
	5.2 线性变换与矩阵的对应关系	232
	*5.3 线性变换的特征值与特征向量	237
	习题 7.5.	239

习题参考答案.....	241
参考文献.....	268

第一章 矩阵的运算与初等变换

矩阵是数学中最重要的基本概念之一,是代数学研究的主要对象,也是数学很多分支研究及应用的重要工具,它贯穿于线性代数的各个部分.在很多领域中的一些数量关系都可以用矩阵来描述.

本章主要介绍矩阵的概念、性质和运算.把向量视为特殊的矩阵,自然地引进向量概念及其线性运算.还将介绍矩阵的初等变换及分块矩阵等相关知识,为后面的学习打下扎实的理论基础.

§1 矩阵与向量的概念

1.1 矩阵的概念

考察线性方程组

$$\begin{cases} x_1 - x_2 + 2x_3 = 1, \\ 2x_1 + 3x_2 + x_3 = 2, \\ x_1 - 2x_2 - 3x_3 = 4, \end{cases}$$

它由三个方程所组成,每个方程中含有三个未知量 x_1, x_2, x_3 .今隐去三个方程中未知量 x_1, x_2, x_3 和等号“=”,分离出各未知量的系数和常数项,上述线性方程组可简化成如下数表

$$\begin{array}{cccc} 1 & -1 & 2 & 1 \\ 2 & 3 & 1 & 2 \\ 1 & -2 & -3 & 4 \end{array}$$

在已知约定未知量 x_1, x_2, x_3 的情况下,上面的数表可完全代表上述的线性方程组,而且形式更简洁明了.数表中的横排称为行,竖排称为列.称上述数表为 3 行 4 列的矩阵.一般地,我们有如下定义.

定义 1.1 由 $m \times n$ 个数排成 m 行 n 列的数表

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

叫做 m 行 n 列的矩阵, 或称 $m \times n$ 矩阵. 通常用大写字母 A 或 $A_{m \times n}$ 表示. 有时也记为

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

其中 a_{ij} 称为矩阵 A 的第 i 行第 j 列的元素, 简称 (i, j) 元. 元素为实数的矩阵称为实矩阵. 元素为复数的矩阵称为复矩阵. 本书中的矩阵除特别声明外, 都指实矩阵.

若 A 和 B 都是 m 行 n 列的矩阵, 则称 A, B 为同型矩阵.

若两个矩阵同型, 并且对应元素相等, 即对 $A = (a_{ij})_{m \times n}$, $B = (b_{ij})_{m \times n}$ 有

$$a_{ij} = b_{ij}, \quad i = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n,$$

则称 A 与 B 相等, 记为 $A = B$.

$m \times n$ 个元素全为零的矩阵称为零矩阵, 记作 O .

当 $m = 1$ 时, 称 $A_{m \times n}$ 为行矩阵.

当 $n = 1$ 时, 称 $A_{m \times n}$ 为列矩阵.

当 $m = n$ 时, 称 A 为 n 阶方阵, 并将 $A_{n \times n}$ 简记为 A_n (一阶方阵等同于构成它的元素).

矩阵的理论具有广泛的应用, 很多数量关系都可以用矩阵来刻画.

例 1.1 某公司对四名应聘人员进行三项素质考评的百分制成绩可用矩阵

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \end{bmatrix}$$

表示, 其中 a_{ij} 为第 i 名应聘者的第 j 种素质考评的成绩.

公司中甲、乙两类岗位对各项素质要求的权重系数也可用矩阵

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \end{bmatrix}$$

表示, 其中 b_{ij} 为第 j 类岗位对第 i 种素质要求的权重系数 (这时一般要求

$$\sum_{i=1}^3 b_{i1} = \sum_{i=1}^3 b_{i2} = 1).$$

1.2 向量的概念

定义 1.2 n 行 1 列的矩阵称为 n 维列向量. 1 行 n 列的矩阵称为 n 维行向量, n 维列向量与 n 维行向量统称为 n 维向量, 简称向量. 常用来表示向量的记号有 $\alpha, \beta, \gamma, x, y, z$ 等.

例如,

$$\alpha = (1, 2, 3)$$

是一个 3 维行向量, 而

$$\beta = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}$$

是一个 n 维列向量.

向量是特殊的矩阵, 即一行或一列的矩阵. 因此, 按矩阵相等和零矩阵的定义, 可得两个向量相等和零向量的概念, 零向量记作 0 . n 维向量实质上是一个 n 元有序数组, 它的第 i 个元素又称为向量的第 i 个分量.

第 i 个分量为 1, 其余分量均为 0 的 n 维列向量称为一个 n 维基本列向量.

$$e_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, e_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \dots, e_n = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

是互不相同的 n 个 n 维基本列向量. 类似地,

$$f_1 = (1, 0, \dots, 0), f_2 = (0, 1, \dots, 0), \dots, f_n = (0, 0, \dots, 1)$$

是 n 个不同的 n 维基本行向量. 二者统称 n 维基本向量组.

显然, n 个 n 维基本列向量 (或 n 维基本行向量) 可排成一个 n 阶方阵

$$E_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}.$$

我们称 E_n 为 n 阶单位矩阵, 简记为 E . 该方阵的特点是: 从左上角到右下角的直线 (叫做主对角线) 上的元素都是 1, 其他的元素都是 0. 即单位矩阵 E 的 (i, j) 元为

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当 } i = j, \\ 0, & \text{当 } i \neq j. \end{cases}$$

习题 1.1

(A)

1. 某纺织品公司所属 3 家服装厂为其生产衬衣、长裤和外套. 设一卷布在一厂可生产 20 件衬衣、10 条长裤和 5 件外套, 而二厂与三厂生产量分别为 4, 18, 7 和 2, 5, 16, 试用矩阵来表示该公司生产这三种服装的情况.

2. 设甲省两个城市 a_1, a_2 和乙省三个城市 b_1, b_2, b_3 的交通路线如图 1 所示, 而乙省三城市 b_1, b_2, b_3 与丙省两城市 c_1, c_2 的交通路线如图 2 所示, 其中每条线上的数字表示联结该两城市的不同道路的总数.

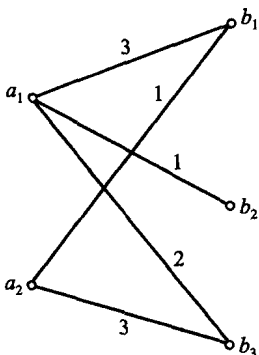


图 1

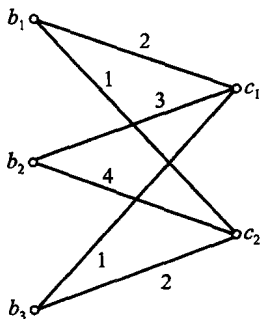


图 2

试用矩阵表示甲、乙两省及乙、丙两省城市间的通路信息.

§2 矩阵的运算

2.1 矩阵加法

定义 2.1 设有两个 $m \times n$ 矩阵 $A = (a_{ij}), B = (b_{ij})$, 那么矩阵 A 与 B 的和记作 $A + B$, 规定为

$$A + B = \begin{bmatrix} a_{11} + b_{11} & a_{12} + b_{12} & \cdots & a_{1n} + b_{1n} \\ a_{21} + b_{21} & a_{22} + b_{22} & \cdots & a_{2n} + b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} + b_{m1} & a_{m2} + b_{m2} & \cdots & a_{mn} + b_{mn} \end{bmatrix}.$$

必须注意: 只有同型矩阵才能相加, 且它们的和仍是与它们同型的矩阵. 设矩阵 $A = (a_{ij})$, 记

$$-A = (-a_{ij}),$$

则称 $-A$ 为矩阵 A 的负矩阵. 显然有

$$A + (-A) = O.$$

两个同型矩阵的减法定义为

$$A - B = A + (-B).$$

不难验证, 矩阵加法满足下列运算规律 (设 A, B, C 都是 $m \times n$ 矩阵):

- i) $A + B = B + A$;
- ii) $(A + B) + C = A + (B + C)$;
- iii) $A + O = A$, 其中 O 是与 A 同型的零矩阵.

例 2.1 设矩阵

$$A = \begin{bmatrix} x & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -1 & y \\ 2 & 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 2 & 1 \end{bmatrix},$$

且 $A + B = C$, 求 x, y .

解 由于 $A + B = C$, 即

$$\begin{bmatrix} x-1 & -1+y \\ 2 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

所以 $x = 2, y = 0$.

2.2 数乘矩阵

定义 2.2 数 λ 与矩阵 A 的乘积记作 λA 或 $A\lambda$, 规定

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

即数乘矩阵 A 等于用这个数 λ 遍乘矩阵 A 的每一个元素.

数乘矩阵满足下列运算规律 (设 A, B 均为 $m \times n$ 矩阵, λ, μ 为数):

- i) $\lambda(\mu A) = (\lambda\mu)A$;
- ii) $(\lambda + \mu)A = \lambda A + \mu A$;
- iii) $\lambda(A + B) = \lambda A + \lambda B$;
- iv) $(-1)A = -A$.

通常我们把矩阵加法和数乘这两种运算统称为矩阵的线性运算.

例 2.2 设矩阵

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 2 \\ 2 & 3 & -1 & 2 \\ -1 & 2 & 1 & 3 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -2 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 0 & 2 & 1 \end{bmatrix},$$

求 $3A - 2B$.

解 由定义 2.2, 有

$$3A = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 3 & 6 \\ 6 & 9 & -3 & 6 \\ -3 & 6 & 3 & 9 \end{bmatrix}, \quad 2B = \begin{bmatrix} -4 & 2 & 0 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \\ 6 & 0 & 4 & 2 \end{bmatrix},$$

故

$$3A - 2B = \begin{bmatrix} 7 & -2 & 3 & 4 \\ 4 & 7 & -5 & 4 \\ -9 & 6 & -1 & 7 \end{bmatrix}.$$

2.3 矩阵乘法

在给出矩阵的乘法定义之前, 我们先给出两个特殊矩阵之间的一种“对乘加”运算法则: 设 x 为 $1 \times n$ 矩阵, y 为 $n \times 1$ 矩阵, 规定 x 与 y 的乘积为

$$\begin{aligned} xy &= (x_1, x_2, \dots, x_n) \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \\ &= x_1y_1 + x_2y_2 + \dots + x_ny_n. \end{aligned}$$

称此运算为行矩阵 x 与列矩阵 y 的“对乘加”法则.

定义 2.3 设 $A = (a_{ij})$ 是一个 $m \times n$ 矩阵, $B = (b_{ij})$ 是一个 $n \times p$ 矩阵, 那么规定矩阵 A 与 B 的乘积是一个 $m \times p$ 矩阵 $C = (c_{ij})$, 其中 c_{ij} 就是 A 的第 i 行与 B 的第 j 列的“对乘加”, 即

$$\begin{aligned} c_{ij} &= a_{i1}b_{1j} + a_{i2}b_{2j} + \dots + a_{in}b_{nj} \\ &= \sum_{k=1}^n a_{ik}b_{kj}, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, p. \end{aligned}$$

并把此乘积矩阵记作

$$C = AB.$$