

矩阵论

Matrix Theory

方保镕 周继东 李医民 编著

Fang Baorong Zhou Jidong Li Yimin



清华大学出版社



Springer

0151.21
25D

矩阵论

Matrix Theory

方保镕 周继东 李医民 编著
Fang Baorong Zhou Jidong Li Yimin

SAX95/09



清华大学出版社
北京



Springer

内 容 简 介

本书比较全面、系统地介绍了矩阵的基本理论、方法及其应用。全书分上、下两篇,共10章,分别介绍了线性空间与线性算子,内积空间与等积变换, λ 矩阵与若尔当标准形,赋范线性空间与矩阵范数,矩阵的微积分运算及其应用,广义逆矩阵及其应用,矩阵的分解,矩阵的克罗内克积、阿达马积与反积,几类特殊矩阵(如:非负矩阵与正矩阵、循环矩阵与素矩阵、随机矩阵和双随机矩阵、单调矩阵、M矩阵与H矩阵、T矩阵与汉克尔矩阵等),辛空间与辛矩阵等内容。各章均配有一定数量的习题。附录中还给出了几套模拟自测试题。为了方便读者学习和参考,本书备有一张光盘,其中包含各章习题详解和模拟考试自测试题的解答提示等,供读者选用。

本书可作为理工科大学各专业研究生的学位课程教材,也可作为理工科和师范类院校高年级本科生的选修课教材,并可供有关专业的教师和工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13901104297 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

矩阵论/方保铭,周继东,李医民编著. —北京:清华大学出版社,2004.11

ISBN 7-302-09208-7

I. 矩… II. ①方… ②周… ③李… III. 矩阵—理论—高等学校—教材 IV. O151.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 082081 号



出 版 者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 客户服务:010-62776969

组稿编辑:陈朝晖

文稿编辑:王海燕

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×230 印张:26 字数:532千字

版 次:2004年11月第1版 2004年11月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-09208-7/O·389

印 数:1~5000

定 价:39.00元(含光盘)

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103 或(010)62795704

随着科学技术的迅速发展,古典的线性代数知识已不能满足现代科技的需要,矩阵的理论和方法业已成为现代科技领域必不可少的工具。诸如数值分析、优化理论、微分方程、概率统计、控制论、力学、电子学、网络等学科领域都与矩阵理论有着密切的联系,甚至在经济管理、金融、保险、社会科学等领域,矩阵理论和方法也有着十分重要的应用。当今电子计算机及计算技术的迅速发展为矩阵理论的应用开辟了更广阔的前景。因此,学习和掌握矩阵的基本理论和方法,对于工科研究生来说是必不可少的。目前,全国的工科院校已普遍把“矩阵论”作为研究生的必修课。为此,1989年我们根据国家教委制定的工科研究生学习“矩阵论”课程的基本要求编写了这本教材,并于1993年和1999年由河海大学出版社正式出版,在部分高校讲授过多年。为使本书适应新世纪的要求,这次又对本书进行了充实更新,并对内容作了精心的处理。

本书内容分上、下篇,共10章,比较全面、系统地介绍了矩阵的基本理论、方法及其应用。第1章与第2章重点介绍线性空间与线性算子、内积空间与等积变换等,这部分内容既是线性代数知识的推广和深化,又是矩阵几何理论的基础,熟练掌握和深刻理解它们对后面内容的学习乃至将来正确处理实际问题有很大的作用。第3章至第5章主要介绍 λ 矩阵与若尔当标准形、赋范线性空间与矩阵范数、矩阵的微积分运算及其应用。这些内容是矩阵理论研究、矩阵计算及应用中不可缺少的工具和手段。以上5章内容均为1991年国家教育委员会工科研究生数学课程教学指导小组对“矩阵论”课程所制定的基本要求,故本书把它们放入上篇,约为2~3学分(讲授36~54学时)。考虑到矩阵理论的完整性、系统性,又能反映最新进展,同时为满足某些专业多学时教学的需要,本书的下篇安排有:第6章介绍广义逆矩阵及其应用;第7章介绍矩阵的因子分解;第8章介绍几类特殊矩阵,诸如非负矩阵与正矩阵、素矩阵与循环矩阵、随机矩阵和双随机矩阵、单调矩阵、 M 矩阵与 H 矩阵、 T 矩阵与汉克尔矩阵等;第9章介绍矩阵的克罗内克积、阿达马积与反(Fan)积;第10章介绍辛空间与辛矩阵,这部分内容反映学科的前沿,有着广阔的应用前景,这在同类教材中是独有的。本书每章精选了一定数量的习题。考虑到矩阵论课程的理论性强,概念比较抽象,且有独特的思维方式和解题技巧,有些读者在

做这些习题时可能会感到比较困难,为使这部分读者更好地掌握这门课程的教学内容,我们特意提供一张光盘,其中包含本书各章习题详解和模拟考试自测试题解答等,供读者选用。目录中带*号的内容可用于选学或自学。

本书引入新概念时,既重视几何理论,又兼顾应用背景或具体应用;既有系统性,适合全面阅读(多学时),又具有可分性,便于选读(少学时);既注重取材得当(涵盖多种特殊矩阵与特殊运算法则),又能够面向前沿,反映最新进展(如辛空间、辛变换)。本书的编排由浅入深,阅读本书只需具备高等数学和线性代数的基本知识。

作者诚挚地感谢王能超教授,他仔细审阅了全部书稿,并提出了不少有益的建议。参与本书第10章编写工作的还有王如云教授,同时要感谢冯康教授、汪道柳研究员对第10章编写工作的指导和帮助。

本书可作为理工科大学各专业研究生的学位课程教材,也可作为理工科和师范类院校高年级本科生的选修课教材,并可供有关专业的教师和工程技术人员参考。

由于编著者水平有限,书中如有不妥乃至谬误之处,祈望读者批评指正。

编著者

CONTENTS

目 录

前言	I
----------	---

上 篇

第 1 章 线性空间上的线性算子	3
1.1 线性空间	3
1.1.1 线性空间的定义及基本性质	3
1.1.2 基、维数与坐标	8
1.1.3 线性子空间	15
习题 1.1	21
1.2 线性算子及其矩阵	24
1.2.1 线性空间上的线性算子	24
1.2.2 同构算子与线性空间同构	27
1.2.3 线性算子的矩阵表示	29
1.2.4 线性算子的运算	31
1.2.5 线性变换与方阵	34
1.2.6 线性变换的特征值问题	42
1.2.7 线性变换的不变子空间	54
习题 1.2	56
第 2 章 内积空间上的等积变换	62
2.1 内积空间	62
2.1.1 内积与欧几里得空间	63
2.1.2 酉空间介绍	73
习题 2.1	74
2.2 等积变换及其矩阵	77
2.2.1 正交变换与正交矩阵	78
2.2.2 两类常用的正交变换及其矩阵	85

* 2.2.3 酉变换与酉矩阵介绍	95
* 2.2.4 正交投影变换与正交投影矩阵	96
习题 2.2	101
* 2.3 埃尔米特变换及其矩阵	103
2.3.1 对称变换与埃尔米特变换	103
2.3.2 埃尔米特正定、半正定矩阵	106
2.3.3 矩阵不等式	109
2.3.4 埃尔米特矩阵特征值的性质	111
2.3.5 一般的复正定矩阵	114
2.3.6 正规矩阵	115
习题 2.3	117
第 3 章 λ 矩阵与若尔当标准形	119
3.1 λ 矩阵	119
3.1.1 λ 矩阵的概念	119
3.1.2 λ 矩阵在相抵下的标准形	122
3.1.3 不变因子与初等因子	124
3.2 若尔当标准形	136
3.2.1 数字矩阵化为相似的若尔当标准形	136
3.2.2 若尔当标准形的应用	147
3.3 凯莱-哈密顿定理与最小多项式	149
习题 3	155
第 4 章 赋范线性空间与矩阵范数	158
4.1 赋范线性空间	158
4.1.1 向量的范数	158
4.1.2 向量范数的性质	165
习题 4.1	167
4.2 矩阵的范数	168
4.2.1 矩阵范数的定义与性质	168
4.2.2 算子范数	170
4.2.3 谱范数的性质和谱半径	176
习题 4.2	179
4.3 摄动分析与矩阵的条件数	180

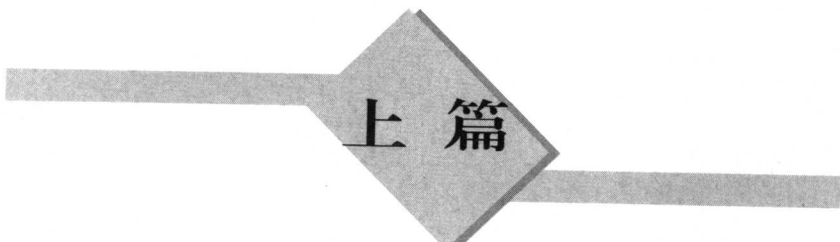
4.3.1 病态方程组与病态矩阵	181
4.3.2 矩阵的条件数	181
* 4.3.3 矩阵特征值的摄动分析	185
习题 4.3	189
第 5 章 矩阵分析及其应用	192
5.1 向量序列和矩阵序列的极限	192
5.1.1 向量序列的极限	192
5.1.2 矩阵序列的极限	194
5.2 矩阵级数与矩阵函数	198
5.2.1 矩阵级数	198
5.2.2 矩阵函数	206
5.3 函数矩阵的微分和积分	216
5.3.1 函数矩阵对实变量的导数	217
5.3.2 函数矩阵特殊的导数	221
5.3.3 矩阵的全微分	226
5.3.4 函数矩阵的积分	228
* 5.4 矩阵微分方程	229
5.4.1 常系数齐次线性微分方程组的解	229
5.4.2 常系数非齐次线性微分方程组的解	236
5.4.3 n 阶常系数微分方程的解	239
习题 5	244

下 篇

第 6 章 广义逆矩阵及其应用	251
6.1 矩阵的几种广义逆	251
6.1.1 广义逆矩阵的基本概念	251
6.1.2 减号逆 A^-	252
6.1.3 自反减号逆 A_r^-	256
6.1.4 最小范数广义逆 A_m^-	262
6.1.5 最小二乘广义逆 A_l^-	265
6.1.6 加号逆 A^+	267

6.2	广义逆在解线性方程组中的应用	273
6.2.1	线性方程组求解问题的提法	274
6.2.2	相容方程组的通解与 A^-	274
6.2.3	相容方程组的极小范数解与 A_m^-	277
6.2.4	矛盾方程组的最小二乘解与 A_l^-	281
6.2.5	线性方程组的极小最小二乘解与 A^+	286
习题 6		288
第 7 章	矩阵分解	291
7.1	矩阵的三角分解	291
7.1.1	消元过程的矩阵描述	291
7.1.2	矩阵的三角分解	295
7.1.3	常用的三角分解公式	300
7.2	矩阵的 QR(正交三角)分解	306
7.2.1	QR 分解的概念	306
7.2.2	QR 分解的实际求法	309
7.3	矩阵的最大秩分解	316
7.4	奇异值分解与谱分解	320
7.4.1	矩阵的奇异值分解	320
7.4.2	单纯矩阵的谱分解	324
习题 7		326
第 8 章	几类特殊矩阵	330
8.1	非负矩阵	330
8.1.1	非负矩阵与正矩阵	330
8.1.2	不可约非负矩阵	336
8.1.3	素矩阵与循环矩阵	342
8.2	随机矩阵与双随机矩阵	343
8.3	单调矩阵	346
8.4	M 矩阵与 H 矩阵	348
8.4.1	M 矩阵	348
8.4.2	H 矩阵	353
8.5	T 矩阵与汉克尔矩阵	354
习题 8		357

第 9 章 矩阵的特殊积及其应用	358
9.1 克罗内克积	358
9.1.1 克罗内克积的概念	358
9.1.2 克罗内克积的性质	359
9.2 阿达马积	364
9.3 反积及非负矩阵的阿达马积	366
9.4 克罗内克积应用举例	366
9.4.1 矩阵的拉直	367
9.4.2 线性矩阵方程的解	368
习题 9	370
第 10 章 辛空间与辛变换简介	371
10.1 反对称双线性函数与辛空间	372
10.1.1 反对称双线性函数	372
10.1.2 线性函数的外积	372
10.1.3 辛空间的定义	373
10.2 子空间的反对称正交补	374
10.2.1 反对称正交补	374
10.2.2 几种特殊的子空间	378
10.2.3 辛空间的性质	379
10.2.4 辛基	379
10.3 辛变换与辛矩阵	380
10.3.1 辛变换及其矩阵	380
10.3.2 辛变换的特征值	383
10.4 辛对合	385
习题 10	390
附录 模拟考试自测试题(共十套)	391
参考书目	403



上 篇

- 第 1 章 线性空间上的线性算子
- 第 2 章 内积空间上的等积变换
- 第 3 章 λ 矩阵与若尔当标准形
- 第 4 章 赋范线性空间与矩阵范数
- 第 5 章 矩阵分析及其应用

第

1

章

线性空间上的线性算子

线性空间与线性算子(特殊情形为线性变换)是学习矩阵论时经常用到的两个基本概念,它们是研究物理、力学中满足叠加原理的系统的数学模型.线性空间是对集合的元素在线性运算方面所表现的共性加以概括而形成的新概念,线性算子(线性变换)则是用来研究线性空间之间关系的主要工具.然而,比较抽象的线性空间上的线性算子又可用具体的矩阵来处理,因此,本章先从线性空间上的线性算子入手,突出矩阵与它们的联系.所有论述是在假定读者已经具备线性代数初步知识的基础上进行的,这里所讨论的内容既是已有线性代数知识的深化,也是本书的基础.

1.1 线性空间

1.1.1 线性空间的定义及基本性质

1. 数环与数域

每一个数学概念都有其适用范围,线性空间的概念与在什么范围内取数有直接的关系,为了准确地叙述和理解线性空间这个数学概念,首先引入数域的概念.

定义 1.1 设 Z 为非空数集且其中任何两个相同或互异的数之和、差与积仍属于 Z (即数集关于加、减、乘法运算封闭),则称 Z 是一个数环.

只含一个 0 的数集 $Z = \{0\}$ 显然是个数环.

根据数环的定义有:

- (1) 任何数环 Z 必含有 0. 因为若 $a \in Z$, 则 $a - a = 0 \in Z$;
- (2) 若 $a \in Z$, 则 $-a \in Z$. 因为 $0 - a = -a \in Z$.

由此可知, $Z = \{0\}$ 是最小的数环.

定义 1.2 如果 P 是至少含有两个互异数的数环,并且其中任何两个数 a 与 b 之商 ($b \neq 0$) 仍属于 P (换言之,数集关于四则运算都封闭),则说 P 是一个数域.

根据数域的定义有:

(1) 任何数域 P 中必含有 0 与 1, 因为 P 中至少有一个数 $a \neq 0$, 而 $a/a = 1 \in P$.

(2) 若 $a \neq 0$, 则 $1/a = a^{-1} \in P$.

全体整数(包括 0)组成一个数环, 全体有理数组成一个数域, 并且是最小的数域, 因为数中至少含有 0 与 1, 由 0 与 1 通过和、差、积运算形成整数环, 再加上商运算即形成有理数域, 记为 $\mathbb{Q}$.

全体实数组成一个数域, 叫做实数域, 记为 $\mathbb{R}$.

全体复数组成一个数域, 叫做复数域, 记为 $\mathbb{C}$.

读者可以验证, 形如 $a + b\sqrt{2}$ (其中 a, b 为有理数) 的数的全体也构成一个数域, 并且它包含了有理数域.

2. 线性空间

线性空间是线性代数中 n 维向量空间概念的抽象和推广. 为了便于理解这个抽象概念, 我们先回顾 n 维向量空间中的向量在加法及数与向量的乘法方面的运算性质, 然后再把具有同样运算性质的一切集合, 抽象概括为线性空间.

在 n 维向量空间

$$K^n = \{\alpha = (a_1, a_2, \dots, a_n) \mid a_i \in \mathbb{R} \text{ 或 } a_i \in \mathbb{C}\}$$

中, 向量 α 是有序数组, 且对向量的加法及数与向量乘法是封闭的(指运算结果都仍是 K^n 中的向量), 且满足如下 8 条性质(设 α, β, γ 都是 n 维向量, λ, μ 是常数):

- (1) $\alpha + \beta = \beta + \alpha$ (加法交换律);
- (2) $(\alpha + \beta) + \gamma = \alpha + (\beta + \gamma)$ (加法结合律);
- (3) $\alpha + 0 = \alpha$ (存在零向量 0);
- (4) $\alpha + (-\alpha) = 0$ (存在负向量 $-\alpha$);
- (5) $\lambda(\alpha + \beta) = \lambda\alpha + \lambda\beta$ (数因子分配律);
- (6) $(\lambda + \mu)\alpha = \lambda\alpha + \mu\alpha$ (分配律);
- (7) $\lambda(\mu\alpha) = (\lambda\mu)\alpha$ (数因子结合律);
- (8) $1 \cdot \alpha = \alpha$.

值得指出的是, 要研究的集合已远远超出了 n 维向量空间 K^n 的范围, 元素不一定是有序数组, 但集合中元素的加法及数与元素的乘法运算, 却具有 K^n 中相应的性质. 我们先看如下几个熟悉的例子.

例 1.1 以实数为系数, 次数不超过 n 的一元多项式的全体(包括 0)记作

$$P[x]_n = \{a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0 \mid a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0 \in \mathbb{R}\}.$$

按多项式相加及乘常数的规则, 则 $P[x]_n$ 对这两种运算是封闭的, 因为若 $f(x) \in P[x]_n, g(x) \in P[x]_n$, 则 $f(x) + g(x) \in P[x]_n$; 若 $k \in \mathbb{R}$, 则 $kf(x) \in P[x]_n$, 且易验证对

$P[x]_n$ 的这两种运算, 也有如 K^n 中所述的 8 条性质.

例 1.2 常系数二阶齐次线性微分方程

$$y'' - 3y' + 2y = 0$$

的解的集合

$$Y = \{ae^{2x} + be^x \mid a, b \in \mathbb{R}\}.$$

对于函数的加法及数与函数乘法两种运算也是封闭的, 因为若 $y_1 = a_1e^{2x} + b_1e^x \in Y$, $y_2 = a_2e^{2x} + b_2e^x \in Y$, 则 $y_1 + y_2 = (a_1 + a_2)e^{2x} + (b_1 + b_2)e^x \in Y$; 当 $k \in \mathbb{R}$ 时, 则 $ky_1 = ka_1e^{2x} + kb_1e^x \in Y$, 且满足如 K^n 中所述的 8 条性质.

例 1.3 在所有 n 阶实矩阵的集合 $\mathbb{R}^{n \times n}$ 中, 如果 $A, B \in \mathbb{R}^{n \times n}$, 则 $A + B \in \mathbb{R}^{n \times n}$; 如果 $k \in \mathbb{R}$, 则 $kA \in \mathbb{R}^{n \times n}$. 即集合对于这两种运算是封闭的, 且也都满足如 K^n 中所述的 8 条性质.

此外, 在数学、力学及其他学科中, 还有如例 1.1~例 1.3 的大量这样的集合. 因此, 有必要不考虑集合的具体内容的涵义来研究这类集合的公共性质, 并把这类集合概括成一个数学名词, 于是就有如下的线性空间的概念.

定义 1.3 设 V 是一个非空集合, P 是一个数域. 如果 V 满足如下两个条件:

1. 在 V 中定义一个封闭的加法运算, 即当 $x, y \in V$ 时, 有惟一的和 $x + y \in V$, 并且加法运算满足 4 条性质:

(1) $x + y = y + x$ (交换律);

(2) $x + (y + z) = (x + y) + z$ (结合律);

(3) 存在零元素 $0 \in V$, 对于 V 中任何一个元素 x 都有 $x + 0 = x$;

(4) 存在负元素, 即对任一元素 $x \in V$, 存在有一元素 $y \in V$, 使 $x + y = 0$, 且称 y 为 x 的负元素, 记为 $-x$, 于是有 $x + (-x) = 0$.

2. 在 V 中定义一个封闭的数乘运算(数与元素的乘法), 即当 $x \in V, \lambda \in P$ 时, 有惟一的 $\lambda x \in V$, 且数乘运算满足 4 条性质:

(5) $(\lambda + \mu)x = \lambda x + \mu x$ (分配律);

(6) $\lambda(x + y) = \lambda x + \lambda y$ (数因子分配律);

(7) $\lambda(\mu x) = (\lambda\mu)x$ (结合律);

(8) $1 \cdot x = x$.

其中 x, y, z 表示 V 中的任意元素; λ, μ 是数域 P 中任意数; 1 是数域 P 中的单位数;

这时, 我们说 V 是数域 P 上的线性空间. 不管 V 的元素如何, 当 P 为实数域 $\mathbb{R}$ 时, 则称 V 为实线性空间; 当 P 为复数域 $\mathbb{C}$ 时, 就称 V 为复线性空间.

通常我们把 V 中满足 8 条性质且为封闭的加法及数乘两种运算, 统称线性运算. 简言之, 凡定义了线性运算的集合, 就称线性空间. 因此, 线性运算是线性空间的本质, 它反映了集合中元素之间的某种代数结构. 当仅研究集合的代数结构时, 便抽象出线性空间的

概念.

下面列举一些线性空间的例子.

在 K^n 中, 所有实 n 维向量的集合 $\mathbb{R}^n$ 是实数域 $\mathbb{R}$ 上的线性空间; 所有复 n 维向量的集合 $\mathbb{C}^n$ 是复数域 $\mathbb{C}$ 上的线性空间. 作为特例, 几何空间全体向量组成的集合 $\mathbb{R}^2$ 或 $\mathbb{R}^3$ 是实数域 $\mathbb{R}$ 上的线性空间.

例 1.1~例 1.3 中的集合, 在其各自的加法及数乘运算的定义下, 都构成实数域 $\mathbb{R}$ 上的线性空间. 我们称例 1.3 所给的线性空间 $\mathbb{R}^{n \times n}$ 为矩阵空间.

此外, 检验集合是否构成线性空间, 逐条检验运算是否为线性运算是至关重要的. 例如, 次数等于 $n(n \geq 1)$ 的多项式的集合, 关于通常的多项式加法与数乘运算是不能构成线性空间的. 因为两个 n 次多项式的和可能不是 n 次多项式, 如当 $n > 1$ 时, $f(x) = x^n + x$, $g(x) = -x^n + 1$, 则 $f(x) + g(x) = x + 1$ 就不属于原来的集合, 亦即对加法运算不封闭, 故不是线性空间. 还要注意, 检验线性运算不能只检验对运算的封闭性, 特别是当定义加法及数乘运算不是通常意义下的运算时, 则应仔细检验其余 8 条性质.

下面再举一个不是线性空间的例子.

例 1.4 平面上全体向量组成的集合, 对于通常意义下的向量加法和如下定义的数乘

$$k \cdot \alpha = 0,$$

虽然对两种运算都封闭, 但因 $1 \cdot \alpha = 0$, 不满足运算性质 (8), 即定义的运算不是线性运算, 所以不是线性空间.

一般地说, 同一个集合, 若定义两种不同的线性运算, 就构成不同的线性空间; 若定义的运算不是线性运算, 也就不能构成线性空间. 所以, 线性空间的概念是集合与运算二者的结合. 为了对线性空间的理解更具有一般性, 请看下面的线性空间所表现的代数结构.

例 1.5 设 $\mathbb{R}^+$ 为所有正实数组成的数集, 其加法及数乘运算定义为

$$\begin{aligned} a \oplus b &= ab, & a, b &\in \mathbb{R}^+, \\ k \circ a &= a^k, & k &\in \mathbb{R}, \quad a \in \mathbb{R}^+. \end{aligned}$$

证明 $\mathbb{R}^+$ 是 $\mathbb{R}$ 上的线性空间.

证明 实际上要验证 10 条:

对加法封闭: 设 $a, b \in \mathbb{R}^+$, 则有 $a \oplus b = ab \in \mathbb{R}^+$;

对数乘封闭: 设 $k \in \mathbb{R}, a \in \mathbb{R}^+$, $k \circ a = a^k \in \mathbb{R}^+$;

1. $a \oplus b = ab = ba = b \oplus a$;

2. $(a \oplus b) \oplus c = (ab) \oplus c = (ab)c = a(bc) = a \oplus (b \oplus c)$;

3. 1 是零元素, 因为 $a \oplus 1 = a \cdot 1 = a$;

4. a 的负元素是 $1/a$, 因为 $a \oplus 1/a = a \cdot 1/a = 1$;

$$5. k \circ (a \oplus b) = k \circ (ab) = (ab)^k = a^k b^k = (k \circ a) \oplus (k \circ b);$$

$$6. (\lambda + \mu) \circ a = a^{\lambda + \mu} = a^\lambda \oplus a^\mu = (\lambda \circ a) \oplus (\mu \circ a);$$

$$7. \lambda \circ (\mu \circ a) = \lambda \circ a^\mu = (a^\mu)^\lambda = a^{\lambda \mu} = (\lambda \mu) \circ a;$$

$$8. 1 \circ a = a^1 = a.$$

因此, $\mathbb{R}^+$ 是实线性空间.

线性空间还是物理、力学中满足叠加原理的系统的数学模型, 请看下例.

例 1.6 考察一根梁因受载荷而产生变形的问
题(见图 1.1). 设所考察的情况都在弹性范围之内
(我们不妨设应变与应力总是成比例的, 而在实际
应用时结论只适用于小应变的情况).

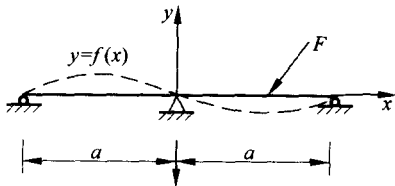


图 1.1 梁的挠度曲线

设支点没有位移, 则挠度曲线是在区间 $[-a, a]$ 上的连续函数, 且有

$$f(-a) = 0, \quad f(0) = 0, \quad f(a) = 0.$$

考查所有这样的挠度曲线(函数形式)的集合:

$$D = \{f \mid f \in C^2[-a, a], \quad f(-a) = 0, \quad f(0) = 0, \quad f(a) = 0\},$$

这里 $C^2[-a, a]$ 表示所有在区间 $[-a, a]$ 上有二阶连续导数的函数的集合.

设荷载 F_1 产生挠度曲线 $y = f_1(x)$, F_2 产生挠度曲线 $y = f_2(x)$, 由叠加原理知: F_1 与 F_2 同时作用, 则产生的挠度曲线为 $y = f_1(x) + f_2(x)$, 这正是函数的加法.

这种加法显然是封闭的, 且满足线性空间定义前 4 条性质(0 就是恒等于零的函数——对应于零荷载; 与 f 相反的元素就是 $-f$, 它对应于反方向的荷载).

如果荷载 F_1 是 F_2 的 k 倍, 即 $F_1 = kF_2$, 则

$$f_1(x) = kf_2(x), \quad \text{即} \quad f_1 = kf_2.$$

这正是常数与函数的乘法, 它也是封闭的, 且满足线性空间定义后 4 条性质, 所以挠度曲线的集合 D 构成一个线性空间.

总之, 在各种不同的领域都可以举出许多线性空间的例子. 正因为线性空间是 n 维向量空间的抽象和推广, 所以为了几何直观, 有时我们又把线性空间叫做向量空间. 但这里的向量不一定是有序数组, 而是广义的向量, 它可以是以数学对象(如函数、矩阵等)为向量, 也可以是以物理对象(如力、速度等)为向量.

3. 线性空间的基本性质

根据线性空间的定义, 可以推证线性空间的下述性质:

性质 1 线性空间的零元素是惟一的.

事实上, 如果 $\mathbf{0}_1, \mathbf{0}_2$ 是线性空间 V 中的两个零元素, 则根据定义有

$$\mathbf{0}_1 = \mathbf{0}_1 + \mathbf{0}_2 = \mathbf{0}_2 + \mathbf{0}_1 = \mathbf{0}_2.$$