第 04 周作业解答

练习 1. 设 $A=\begin{pmatrix} 1 & -4 & 2 \\ -1 & 4 & -2 \end{pmatrix}$，$B=\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -1 & 3 \\ 5 & -2 \end{pmatrix}$，$C=\begin{pmatrix} 2 & 2 \\ 1 & -1 \\ 1 & -3 \end{pmatrix}$，计算 $B+C$，AB，BA，AC，CA 和 $A(2B-3C)$。

解

$$B+C=\begin{pmatrix} 3 & 4 \\ 0 & 2 \\ 6 & -5 \end{pmatrix},\qquad AB=\begin{pmatrix} 15 & -14 \\ -15 & 14 \end{pmatrix},\qquad BA=\begin{pmatrix} -1 & 4 & -2 \\ -4 & 16 & -8 \\ 7 & -28 & 14 \end{pmatrix}$$

$$AC=\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix},\qquad CA=\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 2 & -8 & 4 \\ 4 & -16 & 8 \end{pmatrix},\qquad A(2B-3C)=\begin{pmatrix} 30 & -28 \\ -30 & 28 \end{pmatrix}$$

练习 2. 设 $A=\begin{pmatrix} 2 & 1 & 4 \\ -3 & 0 & 2 \end{pmatrix}$，计算 AA^T 及 A^TA。

解

$$AA^T=\begin{pmatrix} 2 & 1 & 4 \\ -3 & 0 & 2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 2 & -3 \\ 1 & 0 \\ 4 & 2 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 21 & 2 \\ 2 & 13 \end{pmatrix}$$

$$A^TA=\begin{pmatrix} 2 & -3 \\ 1 & 0 \\ 4 & 2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 2 & 1 & 4 \\ -3 & 0 & 2 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 13 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 4 \\ 2 & 4 & 20 \end{pmatrix}$$

练习 3. 若 $A=\begin{pmatrix} 1 & -2 \\ -2 & 5 \end{pmatrix}$ 和 $AB=\begin{pmatrix} -1 & 2 & -1 \\ 6 & -9 & 3 \end{pmatrix}$，求 B。

解由题意知：

$$\begin{pmatrix} 1 & -2 \\ -2 & 5 \end{pmatrix}B=\begin{pmatrix} -1 & 2 & -1 \\ 6 & -9 & 3 \end{pmatrix}$$

所以

$$B=\begin{pmatrix} 1 & -2 \\ -2 & 5 \end{pmatrix}^{-1}\cdot\begin{pmatrix} -1 & 2 & -1 \\ 6 & -9 & 3 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 5 & 2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} -1 & 2 & -1 \\ 6 & -9 & 3 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 7 & -8 & 1 \\ 4 & -5 & 1 \end{pmatrix}$$

以下是附加题，做出来的同学下次课交，可以加分。注意解答过程要详细。

练习 4. （关于纠错码）在这个练习中，我们不使用实数，而使用二进制数字 0 和 1。在这种数字系统中，加法、减法、乘法定义为：$1+1=0$，$1+0=1$，$0-1=1$，$1\cdot 1=1$，$0\cdot 1=0$ 等等。用 $\mathbb{F}$ 表示这种数字系统，即 $\mathbb{F}=\{0,1\}$。（题外话，实数系统则记为 $\mathbb{R}$。）

把分量均为 $\mathbb{F}$ 中的 0 和 1 的 n 维向量的全体，定义为 $\mathbb{F}^n$。不难知道，$\mathbb{F}^n$ 只包含 2^n 个向量。在信息通信中，$\mathbb{F}^8$ 中的一个向量就是一个字节（byte）。例如，向量

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

就是一个字节。

计算机中信息储存的形式是 0 和 1 的字符串。例如

$$\cdots 101100011110010010101110 \cdots$$

通常把该字符串以 8 个数字为一段加以断开。例如上述字符串就断开成：

$$\cdots \bigm| 10110001 \bigm| 11100100 \bigm| 10101110 \bigm| \cdots$$

这样，每一段的 8 个数字正好构成 1 个字节，也就是 $\mathbb{F}^8$ 中的一个向量。通信时，每次传输 1 字节的信息。

通信的过程有时会出错，例如，把字节 10110001 发送出去，但接受方可能收到的是字节 10110101。那么，有没有一种办法，让接收方**自行**判断收到的字节是否正确？这是有的，其中一种办法是采用“纠错码”。这种方法会涉及到线性代数中矩阵的乘积。以上就是本题的背景和说明。

下面介绍纠错码时，我们假设字符串是以 4 个数字为一段进行断开，而不是通常的 8 个数字。这样做是为了叙述简单。

首先给出一些定义。定义矩阵

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

该矩阵称为 Hamming 矩阵。定义 $\mathbb{F}^7$ 中四个向量：

$$v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad v_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad v_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad v_4 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

验证：乘积 Hv_1, Hv_2, Hv_3, Hv_4 均为 $\mathbb{F}^3$ 中的零向量。

定义矩阵

$$M = (v_1, v_2, v_3, v_4).$$

（即：矩阵 M 为 7×4 矩阵，各列依次为：v_1, v_2, v_3, v_4）则上述所验证的结论说明 $HM = O$。

现在假设 Coco 要发送信息 $u \in \mathbb{F}^4$ 给 Cici。纠错码的办法是：

1. 首先 Coco 计算乘积 $v := Mu$。（注意 $v \in \mathbb{F}^7$。）**验证**：v 的后四位数字正好就是 u。

2. 然后，Coco 把 v 发送给 Cici。（注意不是发送原信息 u。）

3. 假设 Cici 收到的信息是 $w \in \mathbb{F}^7$。（如果 $w \neq v$，则说明发送过程出错。但 Cici 现在还不知道收到的 w 究竟有错没错。）

4. 假设传输过程信息**最多出错一个数字**。例如，假设发送的是 $v = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$，那么收到的可能是 $w = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$（第 2 位数字出错）或者 $w = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$（第 6 位数字出错）等等，但不可能收到 $w = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$（第 2，6 位数字同时出错）。

4. Cici 开始验证了：计算乘积 Hw。请你**验证**：如果 $Hw = 0$，则说明传输过程没错，即 $w = u$。这时 w 的后 4 位数字正好就是原信息 u。如果 $Hw \neq 0$，则说明传输过程出错，即 $w \neq v$。

5. 即便传输过程出错，也是有办法在错误中把原信息恢复出来。请你以这个例子想一想：假设收到 $w = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$，那么原信息 u 是什么?

最后，想一想“纠错码”体现在哪里?

提示原信息 $u = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$。注意到 $Hw = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \neq 0$，说明 w 是错误信息。注意到 $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ 是 H 的第 5 列，说明 w 的第 5 位数字出错。所以发送的信息是 $v = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$。由于 v 的后 4 位数字为 u，所以 $u = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$。

一般地，如果 $Hw = 0$，则说明 $w = v$，接收到的信息没有错。如果 $Hw \neq 0$，则 $w \neq v$，接收到的信息有误，这时：Hw 一定等于 H 的某一列，如果是第 i 列，则 w 的第 i 位数字出错。