对称群与置换的符号：一个更初等的构造

约定 1. 设 $n \in \mathbb{Z}_+$. 记 $N := \{1, \cdots, n\}$.

定义 1. 所有 N 到 N 的双射构成一个有限集，在此集合上赋予映射的复合运算就得到一个 $n!$ 阶有限群，记为对称群 $\mathcal{S}_n$.

对称群是非常重要的一类群，它的元素叫做置换. 可以用“符号”刻画一个置换的基本性质：我们希望找到一个非平凡的群同态 $\rho\colon \mathcal{S}_n \to \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$，因为商群 $\mathcal{S}_n/\ker(\rho) \cong \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ 的元素等势，它将 $\mathcal{S}_n$ 分为数量相等的两类. 注意，对于一般的群 G，这样的同态 $G \to \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ 可能不唯一，考虑 $G = \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ 即可. 当然我们将证明在二阶以上对称群情形下此同态存在且唯一.

约定 2. 我们指出加法群 $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ 与乘法群 $\{\pm 1\}$ 存在唯一同构，以下将不区分二者.

第一种构造

笔者初学时, 对符号的定义方式是从置换的循环分解入手的. 命循环 $(a_1 \cdots a_n)$ 之“长度”为 $n-1$，对于置换 τ，将其表为循环之积，它的长度 $l(\tau)$ 等于各循环长度之和. 取符号 $\rho(\tau) = (-1)^{l(\tau)}$. 由于循环型的唯一性，该映射良定. 通过将循环进一步分解为对换，容易验证它满足线性.

对于这种虽然较繁琐但可称经典的定义, 我们不做过多讨论. 写作本文的动机源于学习另一种较为简洁的方法时的一些困惑.

第二种构造

李文威老师在《代数学方法：卷一》中采取如下进路（这里稍作无伤大雅的改动）:

考虑 $\mathcal{S}_n$ 对 $\mathbb{Z}^n$ 的作用 $\sigma(x_1, \cdots, x_n) = (x_{\sigma(1)}, \cdots, x_{\sigma(n)})$. 由于 $x \in \mathbb{Z}^n$ 本质上是映射 $x\colon N \to Z,\quad i \mapsto x_i$，所以我们有简洁的表述 $\sigma(x) = x \circ \sigma$. 结合律表为 $\sigma(\tau(x)) = x \circ \tau \circ \sigma = x \circ (\tau\sigma)$，所以这其实是个右乘作用.

考虑函数

$$\Delta\colon \mathbb{Z}^n \to \mathbb{Z},$$

$$(x_1, \cdots, x_n) \mapsto \prod_{1 \le i < j \le n} (x_i - x_j),$$

我们断言（原文作“易见”）存在 $\rho(\sigma) = \pm 1$ 使得 $\Delta \circ \sigma = \rho(\sigma)\Delta$，于是线性可顺理成章推出. 问题在于，是否真的显然? 确实，σ 的作用相当于调换了某些 x_i 与 x_j 在减号两边的位置，然而这就足够么? 若要严格证明，似乎要用上归纳法了. 甚至, 为什么能对这个由未定元组成的表达式进行一系列操作, 也是一个有待商榷的问题.

一番冥思苦想后发现，Δ 其实是个 n 元反对称多项式，可看作 n 元多项式环 $\mathbb{Z}(X_1, \cdots, X_n)$ 中的元素，σ 自然地作用在此环上．由于多项式环上的运算律继承自 $\mathbb{Z}$，我们现在可以“逐项提取”负号从而把 $\sigma(\Delta)$ 整理为形如 $(-1)^m\Delta$ 的形式（我们最后给出的构造就受到这个 m 的启发）．最后，由于多项式环的整性（这也继承自 $\mathbb{Z}$），$(-1)^m\Delta = (-1)^{m'}\Delta$ 蕴含 $(-1)^m = (-1)^{m'}$，于是符号映射良定.

多项式环的引入已经超出了群论的范围，它的性质也绝非显然的．因此，希望在不牺牲以上构造简明性的基础上，使用较为初等（实际上只用到集合论）的语言给出一套对于符号的定义.

第三种构造

这种构造是我自己想出来的，但前人应该早已提出过了．想法其实很朴素，某种意义上说是上述两种思路的融合；严格证明却不大轻松.

约定 3. 记 $K = \{(i,j) \in N^2 \mid i < j\}$，$K' = \{(j,i) \in N^2 \mid i < j\}$.

K 与 K' 显然不交．方便起见，我们说 K 中的序偶是正序的，而 K' 中序偶是倒序的.

约定 4. 设 $\mathcal{P}(N)$ 是 N 的幂集．命 $\mathcal{P}(N)$ 中全部二元集构成 Q.

显然 Q 的元素形如 $\{i,j\}$ $(i \neq j)$.

定义 2. 称 $\iota\colon K \cup K' \to Q, \quad (i,j) \mapsto \{i,j\}$ 为遗忘映射.

我们不难注意到 ι 是满射，且它在 K 或 K' 上的限制都是双射.

定义 3. 称 $\theta\colon Q \to K, \quad \{i,j\} \mapsto (i,j) \quad (i<j)$ 为排序映射.

容易验证 θ 是 $\iota|_K$ 的逆.

定义 4. 对于 $\sigma \in \mathcal{S}_n$，它自然诱导出映射

$$\overline{\sigma}\colon K \cup K' \to K \cup K', \quad (i,j) \mapsto (\sigma(i), \sigma(j))$$

$\overline{\sigma}$ 是双射，因为 $\overline{\sigma^{-1}}$ 是它的逆.

现在进入正题．我们仍需定义许多顺手的记号.

约定 5. 对于 $\sigma \in \mathcal{S}_n$，记 $A_\sigma \coloneqq \overline{\sigma}(K) \cap K$，$B_\sigma \coloneqq \overline{\sigma}(K) \cap K'$，$C_\sigma \coloneqq \overline{\sigma^{-1}}(B_\sigma)$.

换言之，B_σ 就是 σ 作用在 K 上之后，“因相对位置遭到扰动而溢出 K 的那些序偶”．现在回顾 Δ 的结构，可知 $|B_\sigma|$ 就是“被调换先后顺序的项的数目”，我们由此作出正式的定义.

定义 5. $\rho : \sigma \mapsto (-1)^{|B_\sigma|}$ 是 $\mathcal{S}_n$ 到 $\{\pm 1\}$ 的映射，$\rho(\sigma)$ 称为 σ 的符号.

采用此进路的好处是 $|B_\sigma|$ 当然是一个完全唯一确定的值，于是自然良定．棘手之处在于验证群同态的线性.

以下用到一些简单的集合运算律，如 $f(A\cup B)=f(A)\cup f(B)$，$(A\cap B)^c=A^c\cup B^c$. 当 f 为双射时还有 $f(A\cap B)=f(A)\cap f(B)$.

引理. 对于 σ，$\tau\in\mathcal{S}_n$，有 $|B_{\sigma\tau}|\equiv|B_\sigma|+|B_\tau|\mod 2$.

证明. 考察集合 $B_{\sigma\tau}=\overline{\sigma\tau}(K)\cap K'$.

在等式两侧作用双射 $\overline{\sigma^{-1}}$ 得到

$$\overline{\sigma^{-1}}(B_{\sigma\tau})=\overline{\tau}(K)\cap\overline{\sigma^{-1}}(K'),$$

命 $D:=\overline{\sigma^{-1}}(K')$. 将 $\overline{\tau}(K)$ 写为不交并 $\overline{\tau}(K)=A_\tau+B_\tau$ 得到

$$\overline{\sigma^{-1}}(B_{\sigma\tau})=A_\tau\cap D+B_\tau\cap D.$$

对于 $A_\tau\cap D=A_\tau\cap(K\cap D)$，注意到

$$C_\sigma=\overline{\sigma^{-1}}(\overline{\sigma}(K)\cap K')=K\cap\overline{\sigma^{-1}}(K')=K\cap D,$$

于是有 $A_\tau\cap D=A_\tau\cap C_\sigma$.

对于 $B_\tau\cap D=B_\tau\cap(K'\cap D)$，利用双射 $\iota':=\iota|_{K'}$ 将其嵌入 Q 得到

$$\iota'(B_\tau\cap(K'\cap D))=\iota'(B_\tau)\cap\iota'(K'\cap\overline{\sigma^{-1}}(K')).$$

命 $\varphi:=\overline{\sigma^{-1}}$. 今断言:

$$E':=\iota|_{K'}(K'\cap\varphi(K'))=\iota|_K(K\cap\varphi(K))=:E,$$

这是因为 E' 中元素都形如 $(j,i)\in K'$ 在 $\iota'\circ\varphi$ 下的像 $x=\{\sigma^{-1}(j),\sigma^{-1}(i)\}$（尽管不是所有的像都在 E' 中），其中 $j>i$ 且 $\sigma^{-1}(j)>\sigma^{-1}(i)$.

显而易见 $i<j$ 且 $\sigma^{-1}(i)<\sigma^{-1}(j)$，则 $\varphi(i,j)\in K$，于是 x 也是 $(i,j)\in K$ 在 $\iota|_K\circ\varphi$ 下的像，证得 $E'\subset E$，反向包含同理.

于是我们得到

$$\iota'(B_\tau\cap(K'\cap D))=\iota'(B_\tau)\cap\iota|_K(K\cap\overline{\sigma^{-1}}(K)),$$

继续在两侧作用双射 θ 就将 K' 嵌入到 K 中（这实际上是一个取“镜像”的过程），记 B_τ 的“镜像”为 $\hat{B}_\tau:=\theta(\iota'(B_\tau))$，得到

$$\theta\circ\iota'(B_\tau\cap(K'\cap D))=\hat{B}_\tau\cap\overline{\sigma^{-1}}(K).$$

不难验证不交并分解 $K+K'=\overline{\sigma^{-1}}(K)+\overline{\sigma^{-1}}(K')$，故 $D^c=\overline{\sigma^{-1}}(K')^c=\overline{\sigma^{-1}}(K)$. 现在考虑 C_σ 于 $K+K'$ 中的补集

$$C_\sigma^c=(K\cap D)^c=K'\cup\overline{\sigma^{-1}}(K),$$

所以

$$\hat{B}_\tau \cap \overline{\sigma^{-1}}(K) = \hat{B}_\tau \cap (K' \cup \overline{\sigma^{-1}}(K)) = \hat{B}_\tau \cap C_\sigma^c = \hat{B}_\tau \backslash C_\sigma.$$

最后，我们来证明有不交并分解 $K = A_\tau + \hat{B}_\tau$．考虑 ι 在 $\overline{\tau}(K) = A_\tau + B_\tau$ 上的限制 ι_τ，不难验证 $\overline{\tau} \circ \theta$ 是它的逆，故它是双射，$\iota_\tau(A_\tau) + \iota_\tau(B_\tau) = Q$．在等式两侧作用双射 θ 即为所求.

现在收尾．因双射不改变集合的基数，不交并的基数保持加法，基于以上结果写出连等式

$$|B_{\sigma\tau}| = |\overline{\sigma^{-1}}(B_{\sigma\tau})| = |A_\tau \cap C_\sigma| + |B_\tau \cap D|,$$

我们分别计算：

$$|A_\tau \cap C_\sigma| = |(K \backslash \hat{B}_\tau) \cap C_\sigma| = |C_\sigma \backslash \hat{B}_\tau| = |C_\sigma| - |\hat{B}_\tau \cap C_\sigma|,$$

$$|B_\tau \cap D| = |\theta \circ \iota'(B_\tau \cap D)| = |\hat{B}_\tau \backslash \overline{\sigma^{-1}}(K)| = |\hat{B}_\tau \backslash C_\sigma| = |\hat{B}_\tau| - |\hat{B}_\tau \cap C_\sigma|.$$

易知 $|C_\sigma| = |B_\sigma|$，$|\hat{B}_\tau| = |B_\tau|$，两式相加立得

$$|B_{\sigma\tau}| = |B_\sigma| + |B_\tau| - 2|\hat{B}_\tau \cap C_\sigma| \equiv |B_\sigma| + |B_\tau| \mod 2.$$

证毕. □

以上引理说明 ρ 确实是群同态．$n = 1$ 时，它只能是平凡的．$n \geq 2$ 时，设对换 $\pi = (1 \quad 2) \in \mathcal{S}_n$，算得 $B_\pi = \{(2,1)\}$，$\rho(\pi) = -1$，故 ρ 非平凡.

我们还须说明唯一性．这必须先证得对称群由对换生成，而对换都是共轭的，这些铺垫在此略去.

定理. $n \geq 2$ 时，非平凡同态 $\rho\colon \mathcal{S}_n \to \{\pm 1\}$ 存在且唯一.

证明. 存在性已证.

我们知道对换 $\tau_i = (i \quad i+1)$ $(1 \leq i < n)$ 共轭，借由群 $\{\pm 1\}$ 的交换性有

$$\rho(\tau_i) = \rho(\sigma_i \pi \sigma_i^{-1}) = \rho(\sigma_i)\rho(\pi)\rho(\sigma_i)^{-1} = \rho(\pi).$$

由于 $\mathcal{S}_n$ 由对换 τ_i 生成，则任取置换 σ，它可表为 $\sigma = \tau_{i_1} \cdots \tau_{i_{l(\sigma)}}$，从而

$$\rho(\sigma) = \rho(\tau_{i_1} \cdots \tau_{i_{l(\sigma)}}) = (\rho(\pi))^{l(\sigma)}.$$

故 ρ 完全由 $\rho(\pi)$ 刻画．若 $\rho(\pi) = 1$ 这无非是平凡同态；当 $\rho(\pi) = -1$ 时这就是我们构造的同态. □

注意这里不需要提前证明 $l(\sigma)$ 的奇偶性是确定的，相反，这是此定理的直接推论.