

代数

JoJo

jojoid@duck.com

目录

1 初等数论	3
1.1 自然数	3
1.2 整数	3
1.3 线性丢番图方程	4
2 初探范畴论	5
2.1 范畴与态射	5
2.2 泛性质	6
3 初探群论	11
3.1 群	11
3.2 阶	11
3.3 群的例子	12
3.3.1 对称群	12
3.3.2 二面体群	12
3.3.3 循环群	12
3.4 群范畴 \mathbf{Grp}	13
3.5 交换群范畴 \mathbf{Ab}	14
3.6 群同态	15
3.6.1 例子	15
3.6.2 同态与阶	16
3.6.3 群同构	16
3.6.4 交换群的同态	16
3.7 自由群	17
3.7.1 泛性质	17
3.7.2 具体构造	17
3.7.3 自由交换群	19
3.8 子群	21
3.8.1 定义和例子	21
3.8.2 单态射	24
3.9 商群	25
3.9.1 商群	25
3.9.2 正规子群	26
3.9.3 陪集	26

1 初等数论

1.1 自然数

定义 1.1 Peano 公理

1. $0 \in \mathbb{N}$
2. $\text{suc} : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}_+$
3. suc 是单射
4. $\forall N \subset \mathbb{N}. 0 \in N \wedge (\forall n \in N. \text{suc}(n) \in N) \Rightarrow N = \mathbb{N}.$

定理 1.1 强归纳法

$$\forall N \subset \mathbb{N}. 0 \in N \wedge (\forall n \in \mathbb{N}. \{0, \dots, n\} \subset N \Rightarrow \text{suc}(n) \in N) \Rightarrow N = \mathbb{N}.$$

命题 1.1 存在无限多的质数.

1.2 整数

定义 1.2 同余

设 $n \in \mathbb{Z}_+$. 定义 \mathbb{Z} 上的二元关系

$$_ \equiv _ \pmod{n} : \mathbb{Z} \times \mathbb{Z} \rightarrow \mathbf{Propo}, (a, b) \mapsto n \mid (a - b)$$

命题 1.2 给定正整数 n , $_ \equiv _ \pmod{n}$ 是等价关系.

定义 1.3 设 $n \in \mathbb{N}_+$. 定义函数

$$[_]_n : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/(_ \equiv _ \pmod{n}), a \mapsto [a]_n := \text{等价类 } \{b \in \mathbb{Z} \mid b \equiv a \pmod{n}\}.$$

定义集合

$$\mathbb{Z}/n\mathbb{Z} := \mathbb{Z}/(_ \equiv _ \pmod{n}) = \{[0]_n, \dots, [n-1]_n\}.$$

定义 $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ 上的加法

$$+ : \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}, ([a]_n, [b]_n) \mapsto [a]_n + [b]_n := [a + b]_n.$$

命题 1.3 $\forall a, b \in \mathbb{Z}. a \equiv a' \pmod{n} \wedge b \equiv b' \pmod{n} \Rightarrow (a + b) \equiv (a + b)' \pmod{n}.$

命题 1.4 $\forall a, b \in \mathbb{Z}. a \equiv b \pmod{n} \Leftrightarrow [a]_n = [b]_n.$

推论 1.1 $\forall a, a', b, b' \in \mathbb{Z}. [a]_n = [a']_n \wedge [b]_n = [b']_n \Rightarrow [a]_n + [b]_n = [a']_n + [b']_n.$

定义 1.4 模运算

定义二元函数

$$_ \text{mod} _ : \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}_+ \rightarrow \mathbb{Z}, (a, n) \mapsto a \bmod n := r,$$

其中 r 是唯一使得

$$[r]_n = [a]_n \wedge r \in \{0, \dots, n-1\}$$

成立的整数.

命题 1.5 $\forall n \in \mathbb{Z}_+. 0 \bmod n = 0$

定义 1.5 欧几里得算法 (求最高公因子 (*highest common factor*))

```

let hcf(a : Int, b : Int_pos) :=
  if a mod b = 0
  then b
  else
    hcf(b, a mod b)

```

命题 1.6 $\forall b \in \mathbb{Z}_+. \text{hcf}(0, b) = b$

定理 1.2

$$\forall a \in \mathbb{Z}, b \in \mathbb{Z}_+ \exists x, y \in \mathbb{Z}. xa + yb = \text{hcf}(a, b)$$

1.3 线性丢番图方程

推论 1.2 Bézout 定理

$$\forall a, c \in \mathbb{Z}, b \in \mathbb{Z}_+. (\exists x, y \in \mathbb{Z}. ax + by = c) \Leftrightarrow \text{hcf}(a, b) \mid c$$

引理 1.1 $\forall p \in \mathbb{P}, a, b \in \mathbb{Z}. p \mid ab \Rightarrow p \mid a \vee p \mid b$

定理 1.3 算术基本定理

$\forall n \in \mathbb{Z}_{\geq 2}. n$ 能唯一地表示成质数的乘积 (不考虑顺序).

命题 1.7 $\forall m \in \mathbb{Z}, n \in \mathbb{Z}_+. \text{hcf}(m, n) \cdot \text{lcm}(m, n) = |mn|$, 其中 lcm 是最低公倍数 (*lowest common multiple*).

2 初探范畴论

2.1 范畴与态射

定义 2.1 一个范畴 \mathcal{C} 系指以下资料:

1. 集合 $\text{Obj}(\mathcal{C})$, 其元素称作 \mathcal{C} 的**对象**;
2. 对于每对对象 A 和 B , 给定一个集合 $A \rightarrow B$, 其元素称作 \mathcal{C} 的**态射**, 满足:

$$\forall A, B, C, D \in \text{Obj}(\mathcal{C}). \neg(A = C \wedge B = D) \Rightarrow (A \rightarrow B) \cap (C \rightarrow D) = \emptyset;$$

3. 对于每个对象 A , 给定一个态射 $1_A : A \rightarrow A$, 称为 A 到自身的**恒等态射**;
4. 对于任意 $A, B, C \in \text{Obj}(\mathcal{C})$, 给定态射间的**合成映射**

$$(A \rightarrow B) \times (B \rightarrow C) \rightarrow (A \rightarrow C), (f, g) \mapsto g \circ f,$$

满足:

$$(i) \forall f : A \rightarrow B, g : B \rightarrow C, h : C \rightarrow D. (h \circ g) \circ f = h \circ (g \circ f),$$

$$(ii) \forall A, B \in \text{Obj}(\mathcal{C}), f : A \rightarrow B. f \circ 1_A = f = 1_B \circ f.$$

定义 2.2 对于任意范畴 \mathcal{C} , 其**反范畴** \mathcal{C}^{op} 定义如下:

1. $\text{Obj}(\mathcal{C}^{op}) := \text{Obj}(\mathcal{C})$;
2. $\forall A, B \in \text{Obj}(\mathcal{C}^{op}). A \rightarrow B := (B \rightarrow A)_{\mathcal{C}}$;
3. $\forall f : A \rightarrow B, g : B \rightarrow C. g \circ f := (f \circ g)_{\mathcal{C}}$.

定义 2.3 称 \mathcal{C}' 是 \mathcal{C} 的**子范畴**, 如果

1. $\text{Obj}(\mathcal{C}') \subset \text{Obj}(\mathcal{C})$;
2. $\forall A, B \in \text{Obj}(\mathcal{C}'). A \rightarrow B \subset (A \rightarrow B)_{\mathcal{C}}$;
3. $\forall f : A \rightarrow B, g : B \rightarrow C. g \circ f := (g \circ f)_{\mathcal{C}}$;
4. 恒等态射同 \mathcal{C} .

如果 $\forall A, B \in \text{Obj}(\mathcal{C}'). A \rightarrow B = (A \rightarrow B)_{\mathcal{C}}$, 则称 \mathcal{C}' 是 \mathcal{C} 的**全子范畴**.

定义 2.4 对于态射 $f : A \rightarrow B$, 若存在 $g : B \rightarrow A$ 使得 $g \circ f = 1_A, f \circ g = 1_B$, 则称 f 是**同构** (或称可逆, 写作 $f : A \xrightarrow{\sim} B$), 而 g 则称为 f 的**逆**.

命题 2.1 态射 f 有左逆 g_1 和右逆 $g_2 \Rightarrow f$ 有唯一的逆 $f^{-1} = g_1 = g_2$.

命题 2.2 每个恒等态射都是同构, 且是自己的逆.

命题 2.3 f 是同构 $\Rightarrow f^{-1}$ 是同构 $\wedge (f^{-1})^{-1} = f$.

命题 2.4 $f: A \rightarrow B, g: B \rightarrow A$ 是两个同构 $\Rightarrow g \circ f$ 是同构 $\wedge (g \circ f)^{-1} = f^{-1} \circ g^{-1}$

定义 2.5 若一个范畴 \mathcal{C} 中的所有态射都可逆, 则称之为**群胚**.

定义 2.6 设 A, B 是范畴 \mathcal{C} 中的对象, $f: A \rightarrow B$ 为态射.

1. f 是**单态射**, $:\Leftrightarrow \forall X \in \mathcal{C}, g, h: X \rightarrow A. g \neq h \Rightarrow f \circ g \neq f \circ h$ (即满足左消去律);
2. f 是**满态射**, $:\Leftrightarrow \forall X \in \mathcal{C}, g, h: B \rightarrow X. g \neq h \Rightarrow g \circ f \neq h \circ f$ (即满足右消去律).

命题 2.5 f 左 (右) 可逆 $\Rightarrow f$ 是单 (满) 态射.

命题 2.6 单 (满) 态射的合成是单 (满) 态射.

2.2 泛性质

定义 2.7 范畴 \mathcal{C} 中的对象 A 称为**始对象**, 如果对所有对象 X , 集合 $A \rightarrow X$ 是单点集. 类似的, 称 A 为**终对象**, 如果对所有对象 X , 集合 $X \rightarrow A$ 是单点集. 若 A 是始对象或终对象, 则称之为**端对象**. 若 A 既是始对象又是终对象, 则称之为**零对象**.

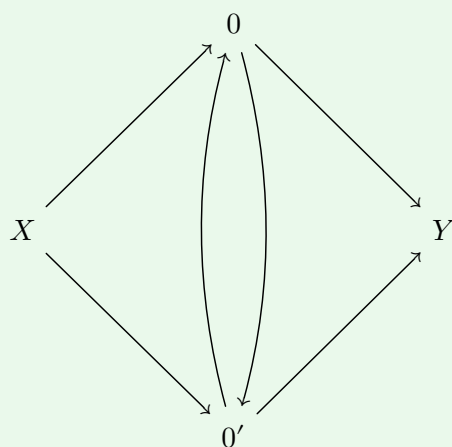
命题 2.7 设 A, A' 为 \mathcal{C} 的始对象, 则存在唯一的同构 $A \xrightarrow{\sim} A'$. 同样的性质对终对象也成立.

命题 2.8 设 A 为 \mathcal{C} 的始对象, $B \in \mathcal{C}$. 则 $A \simeq B \Leftrightarrow B$ 是 \mathcal{C} 的始对象. 同样的性质对终对象也成立.

定义 2.8 设 \mathcal{C} 中有零对象, 记作 0 . 对任意 $X, Y \in \mathcal{C}$ 定义**零态射** $0: X \rightarrow Y$ 为 $X \rightarrow 0 \rightarrow Y$ 的合成

命题 2.9 零态射从左右合成任何态射仍是零态射.

命题 2.10 零态射的定义无关零对象的选取：若 $0, 0'$ 都是零对象，则出入 $0, 0'$ 的箭头都是唯一的，即下图交换



命题 2.11 \emptyset 是 **Set** 的唯一的始对象。

定义 2.9 设 \mathcal{C} 是一个范畴， $*$ 是 \mathcal{C} 的终对象。

定义 \mathcal{C}^* ：

$$\text{Obj}(\mathcal{C}^*) := \{f : * \rightarrow X \mid X \in \mathcal{C}\},$$

$$\forall f : * \rightarrow X, g : * \rightarrow Y. f \rightarrow g := \{\sigma : X \rightarrow Y \mid \sigma \circ f = g\}.$$

\mathcal{C}^* 的对象称为有点对象。

定义 2.10 一个构造满足一个泛性质 \Leftrightarrow 它能被视为一个范畴的端对象。

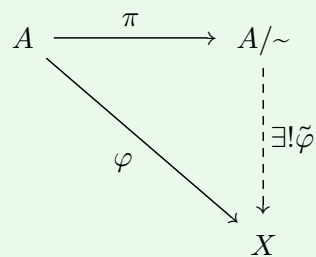
定义 2.11 **Set**/ \sim

设 \sim 是集合 A 上的一个等价关系。定义范畴 **Set**/ \sim ：

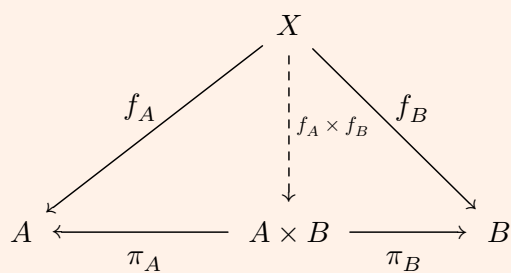
$$\text{Obj}(\mathbf{Set}/\sim) := \{(X, \varphi) \mid X \in \text{Obj}(\mathbf{Set}), \varphi : (A \rightarrow X)_{\mathbf{Set}}, \forall a, b \in A. a \sim b \Rightarrow \varphi(a) = \varphi(b)\},$$

$$(X_1, \varphi_1) \rightarrow (X_2, \varphi_2) := \{\sigma : (X_1 \rightarrow X_2)_{\mathbf{Set}} \mid \sigma \circ \varphi_1 = \varphi_2\}.$$

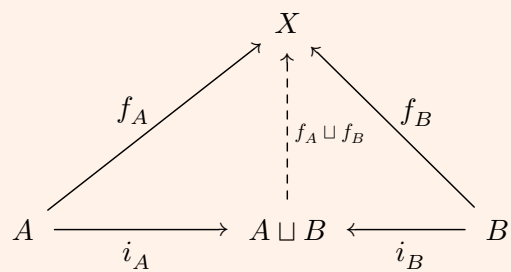
命题 2.12 设 $\pi : A \rightarrow A/\sim, x \mapsto [x]$. 则 $(A/\sim, \pi)$ 是 \mathbf{Set}/\sim 的始对象, 如下图:



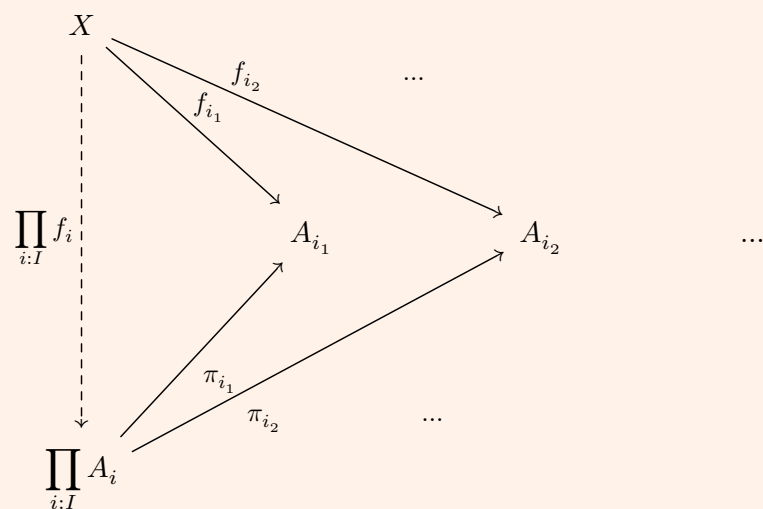
定义 2.12 设 $A, B \in \mathcal{C}$. A 和 B 的积 $A \times B$ (若存在则) 定义如下



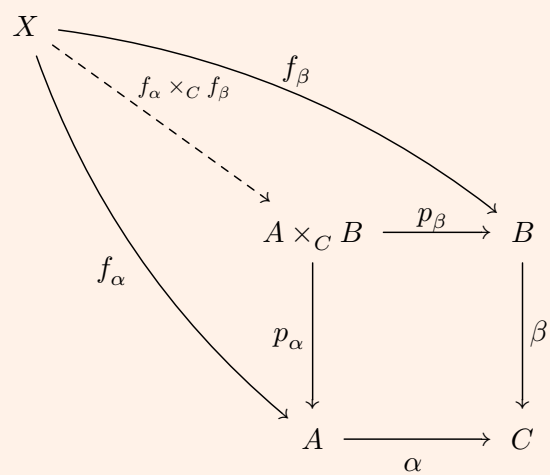
定义 2.13 余积



定义 2.14 积



定义 2.15 拉回



命题 2.13 设 \mathcal{C} 是一个范畴, $G \times G$ 和 $H \times H$ 是 \mathcal{C} 中的积. 则有

$$\begin{array}{ccc}
 G & \xrightarrow{\varphi} & H \\
 \uparrow \pi_G & \nearrow \varphi \circ \pi_G & \uparrow \pi_G \\
 G \times G & \xrightarrow{\exists! \varphi \times \varphi} & H \times H \\
 \downarrow \pi_G & \searrow \varphi \circ \pi_G & \downarrow \pi_G \\
 G & \xrightarrow{\varphi} & H
 \end{array}$$

命题 2.14 设 \mathcal{C} 是一个范畴, $G \times G, H \times H, K \times K$ 是 \mathcal{C} 中的积, 且有态射 $G \xrightarrow{\varphi} H \xrightarrow{\psi} K$. 则 $(\psi \circ \varphi) \times (\psi \circ \varphi) = (\psi \times \psi) \circ (\varphi \times \varphi)$.

命题 3.7 $\forall g \in G. |g| \leq |G|.$

命题 3.8 $g \in G$ 有有限阶 $\Rightarrow \forall m \in \mathbb{N}. g^m$ 有有限阶 $\wedge |g^m| = \frac{\text{lcm}(m, |g|)}{m} = |g_{\frac{|g|}{\text{hcf}(m, |g|)}}|.$

命题 3.9 $g \cdot h = h \cdot g \Rightarrow |g \cdot h|$ 整除 $\text{lcm}(|g|, |h|).$

命题 3.10 $(\forall g \in G. |g| = 2) \Rightarrow G$ 是交换的.

命题 3.11 $\forall g, h \in G. |g \cdot h| = |h \cdot g|.$

命题 3.12 $g \cdot h = h \cdot g \wedge |g|$ 和 $|h|$ 互质 $\Rightarrow |g \cdot h| = |g| \cdot |h|.$

命题 3.13 设 G 是一个交换群, $g \in G$ 有有限阶且 $\forall h \in G. h$ 有有限阶 $\Rightarrow |h| \leq |g|.$ 则 $\forall h \in G. h$ 有有限阶 $\Rightarrow |h|$ 整除 $|g|.$

3.3 群的例子

3.3.1 对称群

定义 3.5 设 $A \in \text{Set}. A$ 的对称群 S_A 定义为群 $(\text{Aut}_{\text{Set}}(A), \circ).$

命题 3.14 $|S_n| = n!.$

命题 3.15 $|S_0| = |S_1| = 1.$

命题 3.16 $\forall n \geq 3. S_n$ 是非交换的.

命题 3.17 $\forall d \in \{0, \dots, n\} \exists \sigma \in S_n. |\sigma| = d.$

命题 3.18 $\forall n \in \mathbb{N}_+ \exists \sigma \in S_{\mathbb{N}}. |\sigma| = n.$

3.3.2 二面体群

定义 3.6 一个对称是一个保持结构的变换.

定义 3.7 一个正 n 边形有 $2n$ 个不同的对称: n 个旋转对称和 n 个反射对称. 相应的旋转和反射组成了二面体群 $D_{2n}.$

3.3.3 循环群

定义 3.8 一个群 G 是循环的 $:\Leftrightarrow \exists a \in G \forall b \in G \exists m \in \mathbb{Z}$ 使得 b 可以表示为 a^m , 即 $G = \{a^m \mid m \in \mathbb{Z}\}.$ 其中 a 被称为 G 的一个生成元.

命题 3.19 设 G 是 n 阶循环群, a 是 G 的一个生成元. 则 $G = \{a^0 = e, a, a^2, \dots, a^{n-1}\}.$

定义 3.9 无限循环群

称群 G 是无限循环群当且仅当 $G \cong (\mathbb{Z}, +)$.

显然无限循环群也是循环群.

命题 3.20 设 G 是一个 n 阶群. 则 G 是循环的 $\Leftrightarrow \exists g \in G. |g| = n$.

命题 3.21 \mathbb{Z} 和 $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ 都是循环群, 它们的生成元分别是 1 和 $[1]_n$.

命题 3.22 $\forall m \in \mathbb{Z}, n \in \mathbb{Z}_+. |[m]_n| = \frac{n}{\text{hcf}(m, n)}$.

推论 3.1 $\forall m \in \mathbb{Z}, n \in \mathbb{Z}_+. [m]_n$ 生成 $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \Leftrightarrow \text{hcf}(m, n) = 1$.

定义 3.10 整数模 n 乘法群

$$(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^* := \{[m]_n \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \mid [m]_n \text{ 生成 } \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}\},$$

$$\cdot : (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^* \times (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^* \rightarrow (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*, ([a]_n, [b]_n) \mapsto [a]_n \cdot [b]_n := [ab]_n.$$

引理 3.1 $\forall a, a', b, b' \in \mathbb{Z}. [a]_n = [a']_n \wedge [b]_n = [b']_n \Rightarrow [a]_n \cdot [b]_n = [a']_n \cdot [b']_n$.

命题 3.23 $((\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*, \cdot)$ 是群.

3.4 群范畴 Grp

定义 3.11 集合函数 $\varphi : G \rightarrow H$ 是一个群同态 \Leftrightarrow

图

$$\begin{array}{ccc} G \times G & \xrightarrow{\varphi \times \varphi} & H \times H \\ \downarrow \cdot_G & & \downarrow \cdot_H \\ G & \xrightarrow{\varphi} & H \end{array}$$

交换, 即 $\varphi(a \cdot b) = \varphi(a) \cdot \varphi(b)$.

定义 3.12 群范畴 Grp

$$\text{Obj}(\mathbf{Grp}) := \{\text{所有群}\},$$

$$\forall G, H \in \text{Obj}(\mathbf{Grp}). G \rightarrow H := \{\text{从 } G \text{ 到 } H \text{ 的群同态}\}.$$

定义 3.13 设 $G \in \mathbf{Grp}$. 定义函数 $\iota_G : G \rightarrow G, g \mapsto g^{-1}$.

命题 3.24 设 $\varphi : G \rightarrow H$ 是一个群同态. 则

1. $\varphi(e_G) = e_H$;

2. 图

$$\begin{array}{ccc} G & \xrightarrow{\varphi} & H \\ \downarrow \iota_G & & \downarrow \iota_H \\ G & \xrightarrow{\varphi} & H \end{array}$$

交换.

命题 3.25 平凡群 $\{e\}$ 是 \mathbf{Grp} 的零对象.

定义 3.14 给定群 G 和 H , 它们的直积 $G \times H$ 系如下资料:

1. 下层集合: 集合 G 和 H 的积 $G \times H$;

2. 二元运算: $\cdot : (G \times H) \times (G \times H) \rightarrow G \times H, (g_1, h_1) \cdot (g_2, h_2) := (g_1 g_2, h_1 h_2)$.

命题 3.26 一个直积是一个群, 且自然投影

$$G \xleftarrow{\pi_G} G \times H \xrightarrow{\pi_H} H$$

是群同态.

命题 3.27 群 G 和 H 的直积 $G \times H$ 是范畴 \mathbf{Grp} 中的积.

3.5 交换群范畴 \mathbf{Ab}

定义 3.15 交换群范畴 \mathbf{Ab}

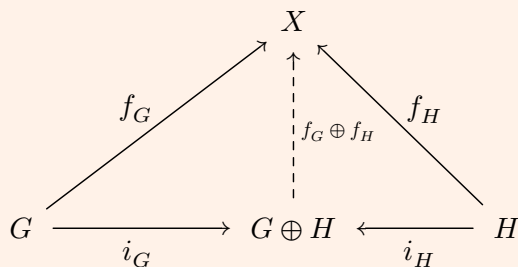
$$\mathbf{Obj}(\mathbf{Ab}) := \{G \in \mathbf{Obj}(\mathbf{Grp}) \mid G \text{ 是交换的}\},$$

$$\forall G, H \in \mathbf{Obj}(\mathbf{Ab}), G \rightarrow H := (G \rightarrow H)_{\mathbf{Grp}}.$$

命题 3.28 平凡群是 \mathbf{Ab} 的零对象.

命题 3.29 群 G 和 H 的直积 $G \times H$ 同时是范畴 \mathbf{Ab} 中的积和余积.

定义 3.16 作为余积时, 群 G 和 H 的直积 $G \times H$ 被称为它们的**直和**, 并记为 $G \oplus H$, 如下图所示



其中,

$$i_G : G \rightarrow G \oplus H, g \mapsto (g, e_H),$$

$$i_H : H \rightarrow G \oplus H, h \mapsto (e_G, h).$$

3.6 群同态

3.6.1 例子

定义 3.17 设 G 和 H 是群. 定义**平凡态射** $\sigma : G \rightarrow H, g \mapsto e_H$. 显然, 平凡态射一定存在.

定义 3.18 设 \mathcal{C} 是一个范畴, $A \in \mathcal{C}$. 群 G 在 A 上的一个**作用**是一个群同态 $\sigma : G \rightarrow \text{Aut}_{\mathcal{C}}(A)$.

例子 3.2 设 a, b, c 是某个正三角形的三个顶点. 我们知道 $S_3 = \text{Aut}_{\text{Set}}\{a, b, c\}$, 且有群同态 $\sigma : D_{2,3} \rightarrow S_3$. 我们称“群 $D_{2,3}$ 作用于正三角形的顶点”.

定义 3.19 设 G 是一个群, g 是 G 的一个元素. 定义**指数映射** $\varepsilon_g : \mathbb{Z} \rightarrow G, m \mapsto g^m$.

命题 3.30 $\varepsilon_g(a+b) = \varepsilon_g(a) \cdot \varepsilon_g(b)$, 也就是说, 指数映射 ε_g 是一个群同态.

命题 3.31 设 $a \in \mathbb{Z}$. 则指数映射 $\varepsilon_a : \mathbb{Z} \rightarrow \langle a \rangle, m \mapsto a^m$ 是一个群同构.

定义 3.20 给定正整数 n , 定义群同态

$$\pi_n : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}, a \mapsto \varepsilon_{[1]_n}(a) = a[1]_n = [a]_n.$$

命题 3.32 $m \mid n \Rightarrow$ 存在一个群同态 $\pi_m^n : \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ 使得图

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{Z} & & \\ \pi_n \downarrow & \searrow \pi_m & \\ \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} & \xrightarrow{\pi_m^n} & \mathbb{Z}/m\mathbb{Z} \end{array}$$

交换, 即 $\pi_m^n([a]_n) = [a]_m$.

3.6.2 同态与阶

命题 3.33 设 $\varphi : G \rightarrow H$ 为一个群同态, $g \in G$ 是一个有有限阶的元素. 则 $|\varphi(g)|$ 整除 $|g|$.

3.6.3 群同构

定义 3.21 一个群同构 $\varphi : G \rightarrow H$ 是 **Grp** 中的一个同构.

命题 3.34 设 $\varphi : G \rightarrow H$ 为一个群同态. 则 φ 是一个群同构 $\Leftrightarrow \varphi$ 是一个双射.

命题 3.35 设 $\varphi : G \rightarrow H$ 是一个群同构. 则

1. $\forall g \in G. |\varphi(g)| = |g|$;
2. G 是交换的 $\Leftrightarrow H$ 是交换的.

命题 3.36 n 阶循环群 $\cong (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}, +)$; 无限循环群 $\cong (\mathbb{Z}, +)$.

命题 3.37 群 $(\mathbb{Z}, +) \not\cong$ 群 $(\mathbb{Q}, +)$.

命题 3.38 函数 $\exp : (\mathbb{R}, +) \rightarrow (\mathbb{R}_{>0}, \cdot), x \mapsto e^x$ 是群同构.

命题 3.39 群 $(\mathbb{Q}, +) \not\cong$ 群 $(\mathbb{Q}_{>0}, \cdot)$.

3.6.4 交换群的同态

命题 3.40 设 G 和 H 是两个交换群, 定义二元函数

$$\begin{aligned} + : (G \rightarrow H)_{\text{Ab}} \times (G \rightarrow H)_{\text{Ab}} &\rightarrow (G \rightarrow H)_{\text{Set}}, \\ (\varphi, \psi) &\mapsto \varphi + \psi, (\varphi + \psi)(g) := \varphi(g) + \psi(g). \end{aligned}$$

则 $(G \rightarrow H)_{\text{Ab}}$ 对 $+$ 封闭, 且 $((G \rightarrow H)_{\text{Ab}}, +) \in \mathbf{Ab}$.

命题 3.41 设 A 是一个集合, H 是一个交换群. 则 $((A \rightarrow H)_{\text{Set}}, +) \in \mathbf{Ab}$.

命题 3.42 设 G 是一个群. 则

1. 函数 $g \mapsto g^{-1} : G \rightarrow G$ 是一个群同构 $\Leftrightarrow G$ 是交换的;
2. 函数 $g \mapsto g^2 : G \rightarrow G$ 是一个群同态 $\Leftrightarrow G$ 是交换的.

命题 3.43 交换群经过群同态输出的像是交换群.

3.7 自由群

3.7.1 泛性质

定义 3.22 自由群

给定集合 S , 定义范畴 \mathcal{F}_S :

$$\text{Obj}(\mathcal{F}_S) := \{(G, \iota) \mid G \in \text{Obj}(\mathbf{Grp}), \iota : (S \rightarrow G)_{\text{Set}}\},$$

$$(G_1, \iota_1) \rightarrow (G_2, \iota_2) := \{\varphi : (G_1 \rightarrow G_2)_{\mathbf{Grp}} \mid \varphi \circ \iota_1 = \iota_2\}.$$

$$\begin{array}{ccc} S & \xrightarrow{\iota_1} & G_1 \\ & \searrow \iota_2 & \downarrow \varphi \\ & & G_2 \end{array}$$

集合 S 上的自由群 $F(S)$ 定义为 \mathcal{F}_S 中的始对象(如果存在的话;后面我们会证明它一定存在)

$$\begin{array}{ccc} S & \xrightarrow{\iota} & F(S) \\ & \searrow f & \downarrow \varphi \\ & & G \end{array}$$

命题 3.44 给定集合 S 和平凡群 $\{e\}$, 则 $\{e\}$ 是范畴 \mathcal{F}_S 的终对象.

3.7.2 具体构造

定义 3.23 对于任何集合 S , 如果我们把它的元素当作字符, 则可称其为一个字符集.

定义 3.24 对于任何字符 a , 定义其逆字符为字符 a^{-1} .

一个字符集 S 的所有字符的逆字符的集合记为 S^{-1} .

定义 3.25 一个字符集 S 上的所有字符串的集合定义如下

1. 如果 $S = \emptyset$, 则 $S^* := \{\text{空字符串}\}$;
2. 如果 S 非空, 则 $S^* := \{\text{空字符串}\} \cup \{a_1 \dots a_n \mid n \in \mathbb{N}_+, a_i \in S\}$.

约定 3.1 1. 对于任何字符 a , 我们可以把 $(a^{-1})^{-1}$ 化简为 a ;

2. 对于任何字符串 x , 其中形如 aa^{-1} 或 $a^{-1}a$ 的部分都能化简为空字符串;
3. 我们不区分字符以及字符串的化简前后的形式.

定义 3.26 自由群

设 S 是一个字符集, $T = S \cup S^{-1}$.

定义 T^* 上的乘法:

$$\cdot : T^* \times T^* \rightarrow T^*, (x, y) \mapsto xy,$$

即字符串连接.

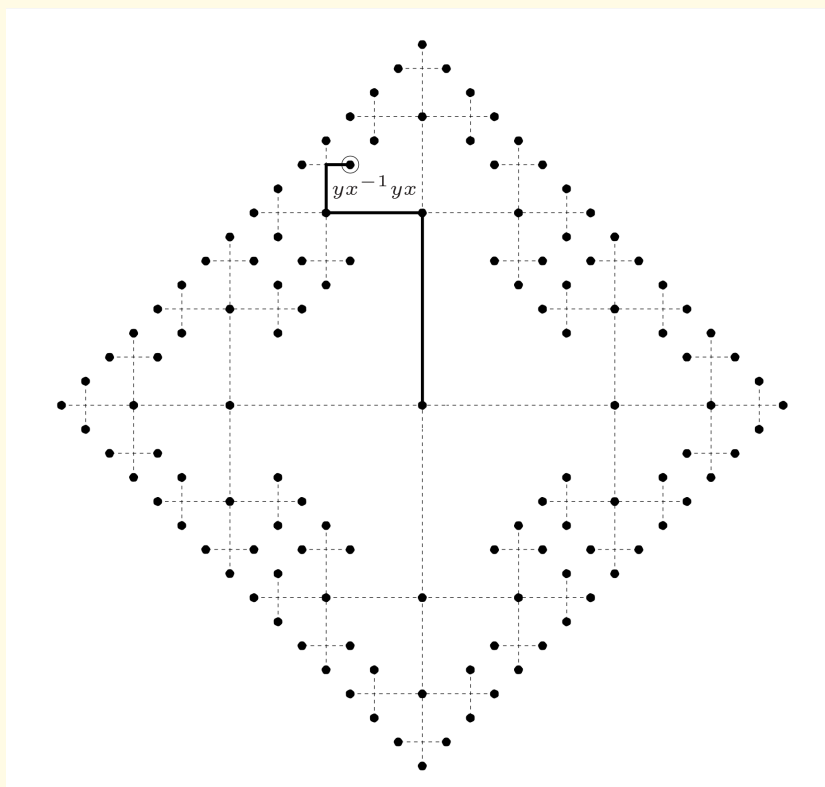
显然, (T^*, \cdot) 构成一个群结构(乘法符合结合律; 有么元, 即空字符串; 每个字符串都有逆元), 称该群为集合 S 生成的自由群.

命题 3.45 设 S 是一个集合, F_S 是它生成的自由群, 函数 $\iota : S \rightarrow F_S, 'a' \mapsto 'a'$. 则 (F_S, ι) 满足 S 上的自由群的泛性质.

命题 3.46 $F(\emptyset)$ 是平凡群.

命题 3.47 $F(\{*\}) \cong$ 无限循环群 $\cong (\mathbb{Z}, +)$.

例子 3.3 二元集 $\{x, y\}$ 生成的自由群的 Cayley 图



3.7.3 自由交换群

定义 3.27 自由交换群

给定集合 S , 定义范畴 $\mathcal{F}_S^{\text{Ab}}$:

$$\text{Obj}(\mathcal{F}_S^{\text{Ab}}) := \{(G, \iota) \mid G \in \text{Obj}(\mathbf{Ab}), \iota: (S \rightarrow G)_{\text{Set}}\},$$

$$(G_1, \iota_1) \rightarrow (G_2, \iota_2) := \{\varphi: (G_1 \rightarrow G_2)_{\mathbf{Ab}} \mid \varphi \circ \iota_1 = \iota_2\}.$$

$$\begin{array}{ccc} S & \xrightarrow{\iota_1} & G_1 \\ & \searrow \iota_2 & \downarrow \varphi \\ & & G_2 \end{array}$$

集合 S 上的自由交换群 $F^{\text{Ab}}(S)$ 定义为 $\mathcal{F}_S^{\text{Ab}}$ 中的始对象 (如果存在的话; 后面我们会证明它一定存在)。

$$\begin{array}{ccc} S & \xrightarrow{\iota} & F^{\text{Ab}}(S) \\ & \searrow f & \downarrow \varphi \\ & & G \end{array}$$

定义 3.28 $\mathbb{Z}^{\oplus n}$

设 $n \in \mathbb{N}$. 定义 $\mathbb{Z}^{\oplus n}$

1. $\mathbb{Z}^{\oplus 0} := \{\text{空元组}\}$, 令其为平凡群;

2. 如果 $n > 0$, 则 $\mathbb{Z}^{\oplus n} := \underbrace{\mathbb{Z} \oplus \dots \oplus \mathbb{Z}}_{n \text{ 次}}$, 并定义其上二元运算 $+: \mathbb{Z}^{\oplus n} \times \mathbb{Z}^{\oplus n} \rightarrow \mathbb{Z}^{\oplus n}$, $(x_1, \dots, x_n) + (y_1, \dots, y_n) := (x_1 + y_1, \dots, x_n + y_n)$.

显然, 这构成一个群.

命题 3.48 1. 设函数 $\iota: \emptyset \rightarrow \mathbb{Z}^{\oplus 0}$. 则 $(\mathbb{Z}^{\oplus 0}, \iota)$ 满足 \emptyset 上的自由交换群的泛性质.

2. 设 $n \in \mathbb{N}_+$, $S = \{1, \dots, n\}$, 函数 $\iota: S \rightarrow \mathbb{Z}^{\oplus n}, i \mapsto \left(0, \dots, 0, \underset{\text{第 } i \text{ 位}}{1}, 0, \dots, 0\right)$. 则 $(\mathbb{Z}^{\oplus n}, \iota)$ 满足 S 上的自由交换群的泛性质.

定义 3.29 $H^{\oplus S}$

设 S 是一个集合, $(H, +)$ 是一个交换群.

$$H^{\oplus S} := \left\{ \alpha : (S \rightarrow H)_{\text{Set}} \mid \{s \in S \mid \alpha(s) \neq e_H\} \text{ 是有限集} \right\}$$

显然 $(H^{\oplus S}, +)$ 是交换群.

命题 3.49 设 S 是一个集合, 函数 $\iota : S \rightarrow \mathbb{Z}^{\oplus S}, \iota(s) := (x \in S) \mapsto \begin{cases} 1, & x=s \\ 0, & x \neq s \end{cases}$. 则 $(\mathbb{Z}^{\oplus S}, \iota)$ 满足 S 上的自由交换群的泛性质.

3.8 子群

3.8.1 定义和例子

定义 3.30 子群

设 (G, \cdot) 和 (H, \cdot) 是群, 且它们的下层集合间有关系 $H \subset G$.

(H, \cdot) 是 (G, \cdot) 的一个子群 \Leftrightarrow 包含函数 $i : H \hookrightarrow G$ 是一个群同态.

命题 3.50 设 (G, \cdot) 是一个群, H 是 G 的一个非空子集. 则 (H, \cdot) 是 (G, \cdot) 的一个子群 $\Leftrightarrow \forall a, b \in H. ab^{-1} \in H$.

引理 3.2 如果 $\{H_\alpha\}_{\alpha \in A}$ 是群 G 的一族子群, 则 $\bigcap_{\alpha \in A} H_\alpha$ 是 G 的一个子群.

引理 3.3 设 $\varphi : G \rightarrow G'$ 是一个群同态, H' 是 G' 的一个子群. 则 $\varphi^{-1}(H')$ 是 G 的一个子群.

定义 3.31 核

群同态 $\varphi : G \rightarrow G'$ 的核定义为:

$$\ker \varphi := \varphi^{-1}(e_{G'}).$$

命题 3.51 设 $\varphi : G \rightarrow G'$ 是一个群同态. 那么

1. $\ker \varphi$ 是 G 的一个子群.
2. 对于 G' 的任何子群 H' , $\varphi^{-1}(H')$ 是 G 的一个子群.
3. 对于 G 的任何子群 H , $\varphi(H)$ 是 G' 的一个子群.

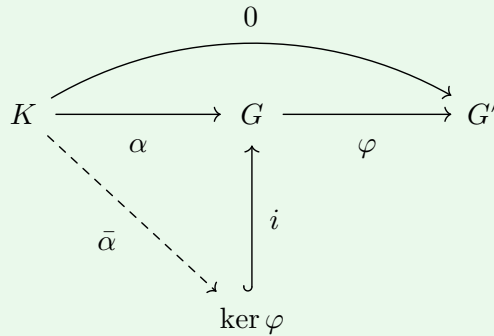
命题 3.52 设 $\varphi: G \rightarrow G'$ 是一个群同态. 定义一个范畴 \mathcal{C} :

$$\text{Obj}(\mathcal{C}) := \{(K, \alpha) \mid K \in \text{Obj}(\mathbf{Grp}), \alpha: (K \rightarrow G)_{\mathbf{Grp}}, \alpha(K) \subset \ker \varphi\},$$

$$(K, \alpha) \rightarrow (L, \beta) := \{\gamma: (K \rightarrow L)_{\mathbf{Grp}} \mid \alpha = \beta \circ \gamma\}.$$

设 $i: \ker \varphi \rightarrow G$ 是包含映射.

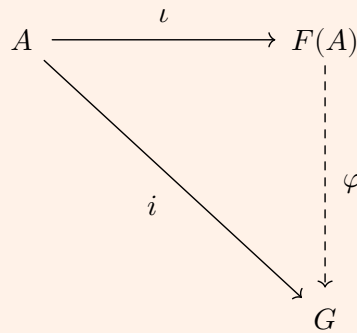
则 $(\ker \varphi, i)$ 是范畴 \mathcal{C} 的终对象, 如下图:



定义 3.32 生成子群

第 1 种定义:

如果 A 是群 G 的一个子集, $i: A \rightarrow G$ 是包含映射, $(F(A), \iota)$ 满足 A 上的自由群的泛性质, 那么我们有一个唯一的群同态 $\varphi: F(A) \rightarrow G$ 使得下图交换



我们称 $\varphi(F(A))$ 为群 G 中由子集 A 生成的子群, 记为 $\langle A \rangle$.

第 2 种定义:

定义 $\langle A \rangle$ 的元素为具有以下形式的对象:

$$a_1 a_2 \dots a_n,$$

其中每个 a_i 是 A 中的元素, 或 A 中的元素的逆, 或 G 的幺元.

第 3 种定义:

$$\langle A \rangle := \bigcap \{G \text{ 的包含 } A \text{ 的子群}\}.$$

命题 3.53 设 A 是交换群 G 的一个子集, $i: A \rightarrow G$ 是包含映射, $(F(A), \iota_1)$ 和 $(F^{\text{Ab}}(A), \iota_2)$ 分别是范畴 \mathcal{F}_A 和 $\mathcal{F}_A^{\text{Ab}}$ 的始对象, $\varphi_1: (F(A), \iota_1) \rightarrow (G, i)$, $\varphi_2: (F^{\text{Ab}}(A), \iota_2) \rightarrow (G, i)$, $\varphi_3: (F(A), \iota_1) \rightarrow (F^{\text{Ab}}(A), \iota_2)$. 那么我们有

$$\varphi_2 \circ \varphi_3 = \varphi_1.$$

命题 3.54 设 A 是交换群 G 的一个子集, $i: A \rightarrow G$ 是包含映射, $(F^{\text{Ab}}(A), \iota)$ 是范畴 $\mathcal{F}_A^{\text{Ab}}$ 的始对象, 下图交换:

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\iota} & F^{\text{Ab}}(A) \\ & \searrow i & \downarrow \varphi \\ & & G \end{array}$$

那么, $\varphi(F^{\text{Ab}}(A))$ 是群 G 中由子集 A 生成的子群.

定义 3.33 称一个群 G 是**有限生成的**, 当且仅当存在有限子集 $A \subset G$ 使得 $G = \langle A \rangle$.

命题 3.55 对于任意循环群 G , 都存在 $g \in G$ 使得 $G = \langle g \rangle$.

命题 3.56 设 G 是一个群. 则以下 2 个命题等价:

1. G 是有限生成的.
2. 存在满群同态 $F(\{1, \dots, n\}) \twoheadrightarrow G$ ($n \geq 0$).

命题 3.57 设 G 是一个交换群. 则以下 2 个命题等价:

1. G 是有限生成的.
2. 存在满群同态 $F(\{1, \dots, n\}) \twoheadrightarrow G$ ($n \geq 0$).
3. 存在满群同态 $F^{\text{Ab}}(\{1, \dots, n\}) \twoheadrightarrow G$ ($n \geq 0$).

命题 3.58 设 $A = \{ '1', \dots, 'n' \}$ ($n \geq 0$), G 是一个群且 $|G| \geq n$, $\varphi: F(A) \rightarrow G$ 是一个满群同态. 那么 $|\varphi(\{ '1', \dots, 'n' \})|$ **不一定** 等于 n .

命题 3.59 设 $A = \{ 1, \dots, n \}$ ($n \geq 0$), G 是一个交换群且 $|G| \geq n$, $\varphi: F^{\text{Ab}}(A) \rightarrow G$ 是一个满群同态. 那么 $|\varphi(\{ (1, 0, \dots, 0), (0, 1, \dots, 0), \dots, (0, 0, \dots, 1) \})|$ **不一定** 等于 n .

定义 3.34 设 $d \in \mathbb{Z}$. 我们定义

$$d\mathbb{Z} := \{ m \in \mathbb{Z} \mid m \text{ 是 } d \text{ 的整数倍} \}.$$

命题 3.60 设 G 是 $(\mathbb{Z}, +)$ 的一个子群. 那么存在 $d \in \mathbb{Z}$ 使得 $G = d\mathbb{Z}$.

命题 3.61

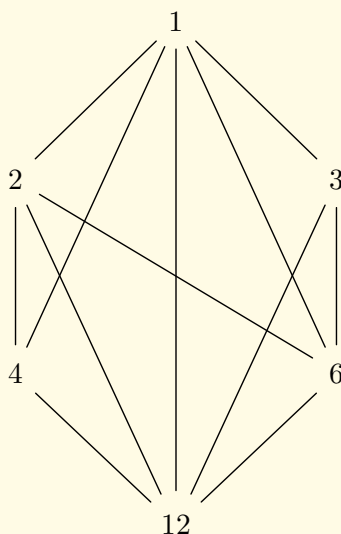
1. n 阶循环群 $\cong (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}, +)$;
2. $F(\{*\}) \cong$ 无限循环群 $\cong (\mathbb{Z}, +)$ 的所有非平凡子群.
3. 从 n 阶循环群到无限循环群的群同态有且只有平凡同态.

命题 3.62 $F(\{*\})$ 的任何子群都是自由群.

命题 3.63 设 G 是某个 n 阶循环群的一个子群. 那么存在 n 的因子 d , 使得 G 是由 $[d]_n$ 生成的 n/d 阶循环群.

命题 3.64 如果 d_1, d_2 都整除 n , 且 d_1 整除 d_2 , 那么 $\langle [d_1]_n \rangle \supset \langle [d_2]_n \rangle$.

例子 3.4 上个命题中的整除关系和包含关系分别构成了一个格结构, 且这两个格是同构的. 以 12 阶循环群为例, 我们有下图所示的格:



命题 3.65 设 G 是一个群, $g \in G$. 则指数映射 $\varepsilon_g : \mathbb{Z} \rightarrow G$ 的像是一个循环群.

3.8.2 单态射

命题 3.66 设 $\varphi : (G \rightarrow G')_{\text{Grp}}$. 则以下命题等价:

1. φ 是单态射;
2. $\ker \varphi = \{e_G\}$;
3. φ 是单射.

命题 3.67 设 $\varphi : (G \rightarrow G')_{\text{Grp}}$. 则 φ 是单态射 $\Rightarrow \varphi$ 有左逆.

3.9 商群

3.9.1 商群

定义 3.35 兼容

设 $G \in \mathbf{Grp}$, \sim 是 G 上的一个等价关系.

如果该关系满足:

$$\forall a, a' \in G. (a \sim a') \Rightarrow \forall g \in G. (ga \sim ga') \wedge (ag \sim a'g),$$

那么我们称在群 G 中, 等价关系 \sim **兼容** 于群结构.

定义 3.36 商群

设 $G \in \mathbf{Grp}$, \sim 是 G 上的一个兼容的等价关系.

那么我们可以定义二元运算 $\cdot: (G/\sim) \times (G/\sim) \rightarrow (G/\sim)$,

$$[a] \cdot [b] := [ab].$$

显然这使得 (G/\sim) 成为一个群. 我们称群 (G/\sim) 是群 G 关于等价关系 \sim 的**商群**.

定义 3.37 \mathbf{Grp}/\sim

设 $G \in \mathbf{Grp}$, \sim 是 G 上的一个兼容的等价关系.

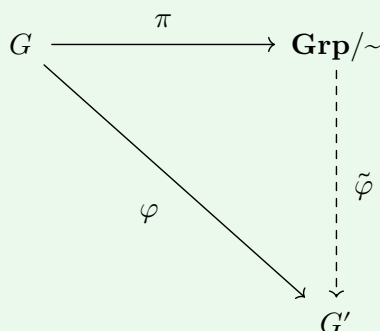
定义范畴 \mathbf{Grp}/\sim :

$$\mathbf{Obj}(\mathbf{Grp}/\sim) := \left\{ (G', \varphi) \mid G' \in \mathbf{Obj}(\mathbf{Grp}), \varphi: (G \rightarrow G')_{\mathbf{Grp}}, \forall a, b \in G. a \sim b \Rightarrow \varphi(a) = \varphi(b) \right\},$$

$$(G_1, \varphi_1) \rightarrow (G_2, \varphi_2) := \left\{ \sigma: (G_1 \rightarrow G_2)_{\mathbf{Grp}} \mid \sigma \circ \varphi_1 = \varphi_2 \right\}.$$

命题 3.68 设 $G \in \mathbf{Grp}$, \sim 是 G 上的一个兼容的等价关系, $\pi: G \rightarrow G/\sim, x \mapsto [x]$.

则 $(G/\sim, \pi)$ 是 \mathbf{Grp}/\sim 的始对象, 如下图:



命题 3.69 给定集合 A , 设 $(F(A), \iota_1)$ 和 $(F^{\text{Ab}}(A), \iota_2)$ 分别是范畴 \mathcal{F}_A 和 $\mathcal{F}_A^{\text{Ab}}$ 的始对象. 定义 $F(A)$ 上的一个等价关系:

$$\sim : F(A) \times F(A) \rightarrow \mathbf{Propo},$$

$a \sim b : \Leftrightarrow$ 字符串 a 和 b 中的字符种类和数量相同, 唯一可能的不同是字符的顺序.

则我们有:

1. \sim 兼容于 $F(A)$ 的群结构.
2. 存在同构 $\alpha : F^{\text{Ab}}(A) \xrightarrow{\sim} F(A)/\sim$ 使得下图交换:

$$\begin{array}{ccccc}
 A & \xrightarrow{\iota_1} & F(A) & \xrightarrow{\pi} & F(A)/\sim \\
 & \searrow \iota_2 & \downarrow \varphi & \nearrow \alpha & \\
 & & F^{\text{Ab}}(A) & &
 \end{array}$$

3.9.2 正规子群

定义 3.38 正规子群

称群 G 的一个子群 N 是**正规的**, 当且仅当

$$\forall g \in G. gNg^{-1} \subset N.$$

命题 3.70 交换群的任何子群都是正规的.

引理 3.4 设 $\varphi : (G \rightarrow G')_{\mathbf{Grp}}$. 则 $\ker \varphi$ 是 G 的正规子群.

3.9.3 陪集