
范畴论笔记

引言

基础知识

范畴与态射

范畴由来

习题1

对于范畴的进一步讨论

习题2

函子

函子的定义

习题3

自然变换与函子的同构

习题4

范畴之间的等价与同构

习题5

函子范畴

习题6

泛性质

可表函子

伴随函子

极限

完备性

符号索引

范畴论笔记

引言

本文为范畴论基础知识的笔记，原书为李文威老师的[《代数学方法-基础架构》](#)

第二章内容，本文将以定义来源推导的方式重构范畴论基础体系。

本文重心不为Grothendieck宇宙，于是将会忽略一些对于 U 范畴的讨论.

图片部分采用李文威老师书内原图，部分为自己做的交换图表.

以下为李文威老师对于范畴学基础的介绍:

概括地说，范畴是由对象以及其间的态射组成的数学结构，从对象 X 到对象 Y 的态射 f 习惯使用箭头来表述

$$X \xrightarrow{f} Y \tag{1}$$

而函子可以视为范畴间保持箭头结构的某种“映射”，函子之间的关系由自然变换描述。

范畴论的特色在于重视关联甚于数学对象本身(在可表函子一节会讲述数学对象也可以表述成所有打到其上的态射)，并以同构代替严格等式，最明显的例证是代数学中无处不在的泛性质。

基础知识

基础知识包含：范畴与态射、函子与自然变换、范畴等价与范畴同构以及函子范畴，为范畴论最基础的部分。

范畴与态射

范畴由来

在学习范畴之前应当先对于范畴进行定义，范畴是一种研究结构的结构的数学工具，我们若要研究结构的结构，就需要研究结构的作用对象以及结构的性质。

我们解刨两个“麻雀”来管中窥豹研究结构的结构：

1. 群与集合的区别，我们发现在群没有被代数运算所约束构成代数系统时，其无非就是一个集合，既然要研究结构的结构，就需要从结构内部作用对象之间的关系研究起，群相比起集合，两个群之间的关系为群同态，即映射需要满足同态性质(若 f 为群 G 到 G' 的群同态，则对于 $a, b \in G$ ，我们有 $f(a)f(b) = f(ab)$)这种映射保持了群的结构性质，而集合之间的映射可以不遵守这样一个性质，故可以得到一个结论：态射反映了结构的性质。

2. 考虑所有群组成的集合 Grp 和所有 Abel 群组成的集合 Ab ，显然有 $Ab \subset Grp$ ，而它们内部保持结构的态射均为群同态，所以可以得到第二个结论：对象限制了结构的范围。(或许有更好的词进行描述)

于是可以得到以下结论：如果我们要研究结构的结构，就需要从对象和态射(保持结构的映射)入手，即通过研究结构内部对象之间的关系(态射)，结构的对象来研究结构。

于是自然可以得到范畴的定义如下：

定义：一个范畴 C 系指以下资料

1. 集合 $Ob(C)$ ，其元素称为 C 的**对象**。
2. 集合 $Mor(C)$ ，其元素称作 C 的**态射**，配上一对映射 $Mor(C) \xrightarrow{s} Ob(C) \xleftarrow{t} Mor(C)$ (标准写法为

$Ob(C) \xleftarrow{s} Mor(C) \xrightarrow{t} Ob(C)$ ，此处为了简写写成这种格式)，其中 s 和 t 分别给出态射的来源($f \in Mor(C)$ 若 $f: X \rightarrow Y$ ，则有 $s(f) = X$ 和目标(从前文可知 $t(f) = Y$)。对于 $X, Y \in Ob(C)$ ，一般习惯记 $Hom_C(X, Y) := s^{-1}(X) \cap t^{-1}(Y)$ (即所有由 X 中打出的映射的集合与所有打向 Y 的集合所构成的交集，即所有从 X 打向 Y 的映射所构成的集合)或简记为 $Hom(X, Y)$ ，称为 Hom -集，其元素称为从 X 到 Y 的态射。

3. 对每个对象 X 给定元素 $id_X \in Hom_C(X, X)$ 称为 X 到自身的**恒等态射**。

对于任意地 $X, Y, Z \in Ob(C)$ ，给定态射之间的**合成映射**

$$\circ: Hom_C(Y, Z) \times Hom_C(X, Y) \rightarrow Hom_C(X, Z) \\ (f, g) \mapsto f \circ g$$

不至混淆时常将 $f \circ g$ 简记为 fg 。它满足

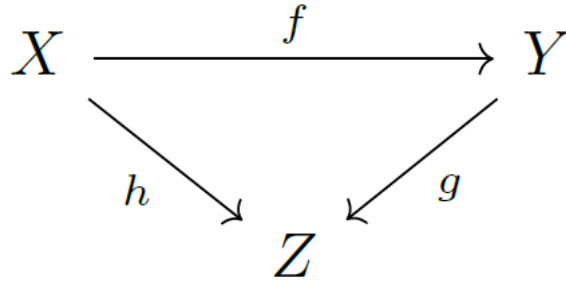
- 结合律: 对于给定态射 $h, g, f \in Mor(C)$ 若合成的 $f(gh)$ 和 $(fg)h$ 都有定义，则 $f(gh) = (fg)h$ 故两边可以同时简写为 $f \circ g \circ h$ ，或 fgh
- 对于任意态射 $f \in Hom_C(X, Y)$ ，有

$$f \circ id_X = f = id_Y \circ f$$

不难发现, 范畴 C 有以下特性:

1. 注意到 id_X 被其性质所唯一确定. 对象集和态射集合皆为空集的范畴称为**空范畴**, 记为 $\mathbf{0}$.
2. 一般也将 $f \in Hom_C(X, Y)$ 写作 $f: X \rightarrow Y$ 或 $X \xrightarrow{f} Y$, 故态射有时又叫**箭头**. 态射的合成对应于箭头的头尾衔接. 图表加箭头是讨论范畴的方便语言. 其中最常用的是交换图表的概念, “交换”指箭头合成的殊途同归.

以下是一个交换图表的例子



上图中的交换性等价于 $gf = h$. 态射的名称(如 f, g 等等)如自明或不重要, 常从图表中省去.

3. 对于态射 $f: X \rightarrow Y$, 若存在 $g: Y \rightarrow X$ 使得 $fg = id_X$, $gf = id_Y$, 则称 f 是**同构**(或可逆, 写作 $f: X \xrightarrow{\sim} Y$), 而 g 称为 f 的逆, 从恒等态射的性质易知逆若存在则唯一. 从 X 到 Y 的同构集记作 $Isom_C(X, Y)$.

4. 记 $End_C(X) := Hom_C(X, X)$, $Aut_C := Isom_C(X, X)$, 分别称作 X 的自同态集和自同构集.

既然有范畴, 我们可以试图类比集合与子集、群与子群、线性空间与子空间等概念得到子范畴的概念, 即子范畴的对象集和态射集均为原范畴的子集, 并且保持恒等态射, 此外来源与目标映射以及态射的合成均由原范畴限制而来.

于是可以得到子范畴的严格定义如下

定义: 称 C' 是范畴 C 的子范畴, 如果

1. $Ob(C') \subset Ob(C)$;
2. $Mor(C') \subset Mor(C)$, 并保持恒等态射;
3. 来源/目标映射 $Mor(C') \xrightarrow{s} Ob(C') \xleftarrow{t}$ 是由 C 限制而来.
4. C' 中态射的合成也是由 C 限制而来.

不难发现, 有些子范畴可以全盘继承原范畴在两个对象之间的所有态射, 即

$Hom_{C'}(X, Y) = Hom_C(X, Y)$, 这类范畴我们称为**全子范畴**.

习题1

1. 预序集等同于任意一对对象 (X, Y) 之间至多有一个态射 $f: X \rightarrow Y$ 的范畴: 对于预序集 (P, \leq) , 定义范畴使其对象集为 P , 而存在态射 $p \rightarrow p'$ 当且仅当 $p \leq p'$, 此时这样的态射唯一.

试根据有限序数 $(0 := \emptyset, \alpha + 1 := \alpha \sqcup \alpha, \sqcup$ 表示无交并) 地递归定义得到一个序数 n 为对象集的范畴, 并且讨论 0 和 1 地特殊性.

提示: 任意 $n \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ 可以视为全序集 $\{0, \dots, n-1\}$ 其结构(忽略恒等态射)可以表为 $0 \rightarrow 1 \rightarrow \dots \rightarrow (n-1)$, 对于 $0 = \emptyset$, 即为空范畴 0 , 而 1 仅包含 1 个对象以及 1 个态射 (id_1) (1 给出的范畴将在泛性质以及逗号范畴处得到广泛运用)

2. 试给出以所有集合为对象所给出的范畴 \mathbf{Set} , 所有群为对象集所给出的范畴 \mathbf{Grp} , 所有交换群为对象集所给出的范畴 \mathbf{Ab} , 域 \mathbb{k} 上所有线性空间为对象集所给出的范畴 $\mathbf{Vect}(\mathbb{k})$, (将以有限维线性空间所给出的范畴记为 $\mathbf{Vect}_f(\mathbb{k})$, f 应代表 finite, 即有限)

3. 是否存在某个范畴, 其态射只有恒等态射.

提示: 定义离散范畴 $\mathbf{Disc}(S)$, 使得其对象集为 S , 而任意 $x, y \in S, x \neq y$ 有 $\mathbf{Hom}_{\mathbf{Disc}(S)}(x, y) = \emptyset$, 并且使 $\mathbf{Hom}_C(x, x) = \{id_x\}$, 即我们所需要的范畴。

4. 范畴除了对象以外, 其态射是否可以类似于映射的单满射一样得到一些共同的性质, 比如是否可逆?

提示: 欲知后事如何, 且听下回分解: **对于范畴的进一步讨论.**

对于范畴的进一步讨论

既定义范畴与子范畴的概念, 接下来应当对于范畴的内部进行讨论, 对于对象不需要进行特殊划分(因其抛去所有结构后就为一个集合), 对于态射由集合中映射的单满性可以得到态射的单满性:

对于范畴 C , 取 $X, Y, Z \in \mathbf{Ob}(C)$, $f \in \mathbf{Hom}_C(X, Y)$

1. 若 f 为映射单射, 则对于 $a, b \in X$, 有: 若 $a = b$ 则有 $f(a) = f(b)$.

于是对于 $g, h \in \mathbf{Hom}_C(Z, X)$ 有若 $g(z) \neq h(z) (z \in Z)$, 则有 $f(g(z)) \neq f(h(z))$, 且若 $f(g(z)) = f(h(z))$, 则必然有 $h(z) = g(z)$, 于是可以得到 $fg = fh \Leftrightarrow g = h$, 若 f 为映射满射不一定可以得到这个结论, 并且若 f 不为单射则必然无法得到这个结论

于是推广到态射上(由于态射都是映射, 于是可以进行推广)可以得出: 若 f 为单态射, 则必有 $fg = fh \Leftrightarrow g = h$, 称满足这种条件为满足**左消去律**.

2. 若 f 为映射满射, 则对于 $\forall y \in Y, \exists x \in X, f(x) = y$

于是对于 $g, h \in \mathbf{Hom}_C(Y, Z)$ 有若 $g(y) \neq h(y) (y \in Y)$, 则有 $g(f(x)) \neq h(f(x))$, 且若对于所有的 $x \in X$ 均有 $g(f(x)) = h(f(x))$, 则有 $g = h$, 于是可以得到 $gf = hf \Leftrightarrow g = h$, 若 f 为映射单射不一定可以得到这个结论, 并且若 f 不为满射则必然无法得到这个结论 ($\exists y \in Y, \nexists x \in X, f(x) = y$, 若有 $gf = hf$ 未必有 $g = h$)

于是推广到态射上可以得出: 若 f 为满态射, 则必有 $gf = hf \Leftrightarrow g = h$, 称满足这种条件为满足**右消去律**.

如果存在 g 使得 $gf = id_X$, 则称 f 左可逆并且称 g 是 f 的一个左逆, 并且 f 为一个单态射, 此时也称 f 为一个**截面**(或者嵌入); 类似地若 $fg = id_Y$ 则称 f 右可逆并且 g 是一个右逆, 并且 f 是一个满态射, 此时也称 f 为一个**收缩**. 一个态射**可逆**当且仅当其左右皆可逆。

通过对于态射集以及群的概念进行讨论,发现若范畴 C 态射集为 G , G 为群, C 只有一个对象 x ,于是有 $End(x) = G$,即范畴 C 中所有的态射均可逆。若范畴 C' 只有一个对象 S ,则 $End(S)$ 为一个含么半群(不一定可逆),态射的合成规定为含么半群的代数运算。

于是可以推出以下概念:则若一个范畴 C 中的所有态射均可逆,则称 C 为广群。

习题2

1. 有时候我们需要反向地研究范畴(即在相同的作用范围下具有相反的性质),我们称反向地范畴为对偶范畴或者反范畴,记为 C^{op} ,试定义 C^{op}

提示:

相同的作用范围即作用对象相同,即 $Ob(C^{op}) = Ob(C)$

相反的性质及对于态射集有 $Hom_C(X, Y) = Hom_{C^{op}}(Y, X)$,对于 $X, Y \in Ob(C)$.

虽然性质相反,但是对于恒等映射并无影响。

但是对于映射的合成具有影响,若 $f \in Hom_{C^{op}}(Y, Z) = Hom_C(Z, Y)$,

$g \in Hom_{C^{op}}(X, Y) = Hom_C(Y, X)$,在原范畴中的合成

$g \circ f \in Hom_C(Z, X) = Hom_{C^{op}}(X, Z) = f \circ^{op} g$.

并且有性质: $(C^{op})^{op} = C$.

2. 试定义基本广群(拓扑概念,先了解道路合成以及道路的同伦)

提示: 自己看书,太麻烦了,懒得抄

3. 证明:对于范畴中的态射 f ,下述两两条件等价:

1. f 为收缩单态射

2. f 为嵌入满态射

3. f 为同构

并且举例说明双态射未必为同构

提示: 证明显然,举例:考虑序数2范畴,有 $f: 0 \rightarrow 1$,由于只有2个元素,并且态射为 $\{id_0, id_1, f\}$,于是显然有 f 为双态射,但是无法找出 f 的左逆或者右逆

4. 试探索范畴之间是否可以具有态射,如果有,又该如何定义?

欲知后事如何,且听下回分解: **函子**

函子

函子的定义

既然要研究结构的结构，从前文已经得知态射反映了结构的性质，于是对于结构的结构的性质也需要利用态射来进行反映，这就可以推导出**函子**概念，即范畴之间的态射。

那么如何去定义函子这个概念呢？通过对于子范畴以及习题2第1题对于反范畴的定义可以得知，需要对于对象集与态射集分别进行考虑，对于对象集应为对象之间的映射，态射集也应当为态射间的映射(需要注意来源与目标映射，恒等映射)，并且需要保持原结构的性质不变(保持原映射的合成成为变换后两个映射的合成)。

于是不难得到以下定义

定义(**函子**): 设 C', C 为范畴. 一个函子 $F : C' \rightarrow C$ 意谓以下资料:

1. 对象之间的映射 $F : Ob(C') \rightarrow Ob(C)$
2. 态射之间的映射 $F : Mor(C') \rightarrow Mor(C)$, 需要满足以下条件
 - F 与来源和目标映射相交换(即 $sF = Fs, tF = Ft$), 等价的说法是对于每个 $X, Y \in Ob(C')$ 皆有映射 $F : Hom_{C'}(X, Y) \rightarrow Hom_C(FX, FY)$ (等价性留作习题, 提示: 对于 $Hom_C(FX, FY) = s^{-1}(FX) \cap t^{-1}(FY)$ 以及 $Hom_{C'}(X, Y) = s^{-1}(X) \cap t^{-1}(Y)$ 进行讨论即可)
 - $F(g \circ f) = F(g) \circ F(f)$ (保持结构性性质不变), $F(id_X) = id_{FX}$

与态射的合成相似, 对于 $F : C_1 \rightarrow C_2, G : C_2 \rightarrow C_3$, 可以定义合成函子 $G \circ F : C_1 \rightarrow C_3$: 取合成映射

$$\begin{aligned} Ob(C_1) &\xrightarrow{F} Ob(C_2) \xrightarrow{G} Ob(C_3), \\ Mor(C_1) &\xrightarrow{F} Mor(C_2) \xrightarrow{G} Mor(C_3). \end{aligned}$$

常称 F 为从 C' 到 C 的共变函子(也称为协变函子), 而称形如 $F : (C')^{op} \rightarrow C$ 的函子为反变函子.

注记: 从 C' 到 C 和从 $(C')^{op}$ 到 C^{op} 的函子是一回事. 为资区分, 对于函子 $F : C' \rightarrow C$, 反范畴间的相应函子记为 $F^{op} : (C')^{op} \rightarrow C^{op}$.

由于态射具有单满性, 我们来探讨是否函子也一样具有单满性, 但是由于函子同时作用于对象集与态射集, 所以需要对于对象集和态射集分别进行考虑, 自然也就不止一个单满性, 故需要进一步讨论:

对于对象集, 由于范畴的作用对象范围往往具有很大的差异, 并且一个范畴的对象之间可能存在同构关系(比如群同构), 于是对于范畴对象集的同构类进行讨论更符合我们的诉求(在后文的范畴等价中也会体现)

设 F 为范畴 C' 到 C 的函子

将范畴的对象集中所有的同构类(由于同构关系为等价关系, 于是可以对于对象集以同构关系取商集)取代表元所组成的集合称为**本质**. 若函子对于本质为满射, 即对于 C 中任意一个对象都与某个 FX 同构, $X \in C'$, 称满足这种特性的函子为**本质满**(essentially surjective)函子.

对于范畴的态射集进行讨论, 由于函子在态射集上的作用为

$X, Y \in Ob(C'), F : Hom_{C'}(X, Y) \rightarrow Hom_C(FX, FY)$ 。讨论函子在态射集合上的单满性就需要对于上式进行讨论。

若 $F : Hom_{C'}(X, Y) \rightarrow Hom_C(FX, FY)$ 为单射(即 $\forall f, g \in Hom_{C'}(X, Y)$, 若 $Ff = Fg$ 有 $f = g$), 称满足这种特性的函子为**忠实**(faithful)函子, 即函子具有忠实性(对于 Hom 集元素忠实)

若 $F : Hom_{C'}(X, Y) \rightarrow Hom_C(FX, FY)$ 为满射(即 $\forall g \in Hom_C(FX, FY), \exists f \in Hom_{C'}(X, Y)$, $Ff = g$), 称满足这种特性的函子为**全**(full)函子(可以完全填满映射后的 Hom 集)

此外还有一些其他的函子性质

称 F 是一个**嵌入**(embedding), 若它在态射层面是单射, 即对于任意态射 f, g 有 $Ff = Fg$ 蕴含 $f = g$ (即对于对象集也为单射)。不难验证嵌入等价于忠实并且对于对象而言是单射(见习题反例)。

接下来研究几个经典的例子:

1. 子范畴 $C' \subset C$ 给出一个包含函子 $\iota : C' \hookrightarrow C$, 将 $X \in Ob(C')$ 映射至 $X \in Ob(C)$, 对于态射同样如此, 显然包含函子为嵌入函子, 并且常常忠实而非全, 若包含函子为全函子, 则需 C' 为一个全子范畴.
2. 由于之前所述任意结构(比如群, 环, 域)在忽略其代数运算所赋予的结构后均为一个普通的集合, 于是根据这个思路可以得到一个**忘却函子**, 即遗忘掉部分(或全部)自身结构使其变为另一个相对较弱的结构的函子, 对于群范畴 Grp 中的任意一个群 G 总是可以遗忘 G 的群结构而视其为一个集合 $S \in Ob(\text{Set})$, 群同态同样可以视为集合间的映射, 不难看出这类函子忠实而非全(集合映射不一定满足群同态).
3. **对偶函子**: 考虑域 \mathbb{k} 上的向量空间范畴 $\text{Vect}(\mathbb{k})$. 对于任意的 \mathbb{k} -向量空间 V , 定义其对偶空间

$$V^\vee := Hom_{\mathbb{k}}(V, \mathbb{k}) = \{\mathbb{k} - \text{线性映射 } V \rightarrow \mathbb{k}\} \quad (2)$$

任一线性映射 $f : V_1 \rightarrow V_2$, 诱导对偶空间的反向映射

$$\begin{aligned} f^\vee : V_2^\vee &\rightarrow V_1^\vee \\ [\lambda : V_2 \rightarrow \mathbb{k}] &\mapsto \lambda \circ f \end{aligned} \quad (3)$$

显然有 $D : V \mapsto V^\vee, f \mapsto f^\vee$ 定义了函子 $D : \text{Vect}(\mathbb{k})^{op} \rightarrow \text{Vect}(\mathbb{k})$, 可以验证是忠实的(习题). 根据[注记](#)可知, 我们有合成函子 $DD^{op} : \text{Vect}(\mathbb{k}) \rightarrow \text{Vect}(\mathbb{k})$, 将 D 限制于有限维向量空间即可得到函子 $D : \text{Vect}_f(\mathbb{k})^{op} \rightarrow \text{Vect}_f(\mathbb{k})$ 和 $DD^{op} : \text{Vect}_f(\mathbb{k}) \rightarrow \text{Vect}_f(\mathbb{k})$, 分别称为对偶和双对偶函子.

习题3

1. 验证对于每个 $X, Y \in Ob(C')$ 皆有映射 $F : Hom_{C'}(X, Y) \rightarrow Hom_C(FX, FY)$ 等价于 $sF = Fs$, $tF = Ft$, 其中 $F : C' \rightarrow C$

提示: [前文](#)已经给出

2. 验证[对偶函子](#)是忠实函子

提示: $D: V \mapsto V^\vee, f \mapsto f^\vee$ 中对于 $f, g \in \text{Hom}_{\text{Vect}(\mathbb{K})}(V_1, V_2)$, 若 $Df = Dg$, 则有 $[\lambda: V_2 \rightarrow \mathbb{K}] \mapsto \lambda \circ f = [\lambda: V_2 \rightarrow \mathbb{K}] \mapsto \lambda \circ g$, 即 $f = g$. 即在 Hom 集上 D 为单射, 即 D 为忠实函子.

3. 对于群 G , 定义导出子群 G_{der} 为子集 $\{xyx^{-1}y^{-1} : x, y \in G\}$ 生成的正规子群.

1. 验证商群 G/G_{der} 为 Abel 群, 称作 G 的 Abel 化.

2. 对于任意群同态 $\psi: G \rightarrow H$, 从定义可以看出 $\psi(G_{\text{der}}) \subset H_{\text{der}}$, 因此 ψ 诱导出 Abel 群的同态 $\bar{\psi}: G/G_{\text{der}} \rightarrow H/H_{\text{der}}$. 容易验证 $G \mapsto G/G_{\text{der}}, \psi \mapsto \bar{\psi}$ 定义了 Abel 化函子 $\text{Grp} \rightarrow \text{Ab}$. 验证 Abel 化函子不是忠实函子

提示: G 到 H 和 H/H_{der} 的群同态在 Abel 化后相等.

4. 函子之间是否能够相互转化? 如果能相互转化, 该如何进行?

提示: 欲知后事如何, 且听下回分解: **自然变换与函子的同构**.

自然变换与函子的同构

不难发现函子也具有一定的结构性质(反映范畴的结构), 于是可以研究来源和目标相同的函子与函子之间的关系, 这两个函子之间可以相互转换, 由于函子的表达依赖于态射集与对象集, 并且态射是连接对象的方法, 于是不难得出如果需要建立函子之间的转换方式, 需要从对象和两个对象间的态射入手, 对于 $F, G: C' \rightarrow C, X \in \text{Ob}(C')$, 从 F 到 G 的转换即为 $f \in \text{Hom}_C(FX, GX)$, 让 X 遍历 C' 的全体对象则可以得到函子之间态射的定义.

定义(自然变换, 函子间的态射): 函子 $F, G: C' \rightarrow C$ 之间的自然变换 θ 是一族态射

$$\theta_X \in \text{Hom}_C(FX, GX), X \in \text{Ob}(C') \quad (4)$$

使得下图对所有 C' 中的态射 $f: X \rightarrow Y$ 交换

$$\begin{array}{ccc} FX & \xrightarrow{\theta_X} & GX \\ Ff \downarrow & & \downarrow Gf \\ FY & \xrightarrow{\theta_Y} & GY. \end{array}$$

上述自然变换写作 $\theta: F \rightarrow G$ 或者图解为

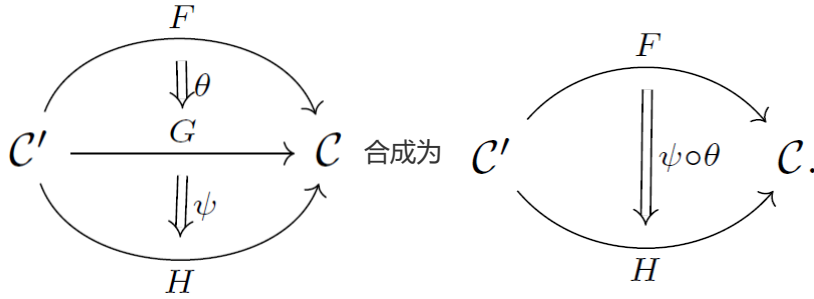
$$\begin{array}{ccc} & F & \\ \curvearrowright & \Downarrow \theta & \curvearrowleft \\ C' & & C. \\ \curvearrowleft & G & \end{array}$$

上述带有双箭头 \Rightarrow 的图表有时候也称为2-胞腔, 一种兴许有益的看法是设想 θ 为从 F 到 G 的一个同伦($\theta = \theta(\cdot, t); \theta(\cdot, 0) = F(\cdot), \theta(\cdot, 1) = G(\cdot)$).

约定: 我们也将自然变换 $\theta: F \rightarrow G$ 称为从函子 F 到 G 的态射. 实用中经常会省略严格的范畴论框架, 只说态射 $\theta_X: FX \rightarrow GX$ 是典范的, 自然的, 或称其满足函子性. 实践中经常把自然同构写成等号 $=$.

考虑范畴中态射的合成, 易得自然变换为函子之间的态射同样可以进行合成, 具体合成方式分为纵横两个方面.

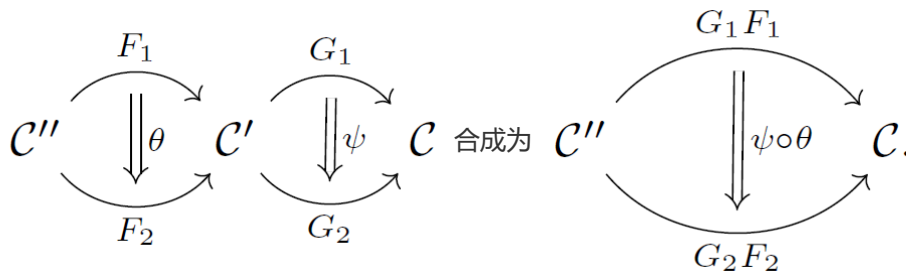
- 纵合成: 考虑 C' 到 C 的三个函子间的态射 $\theta: F \rightarrow G, \psi: G \rightarrow H$. 纵合成即为纵向合成, 纵合成 $\psi \circ \theta$ 定义为 $\{\psi_X \circ \theta_X: X \in Ob(C')\}$, 图解:



- 考虑函子 $C'' \xrightarrow{F_1} C' \xrightarrow{G_1} C$ 及态射 $\theta: F_1 \rightarrow F_2, \psi: G_1 \rightarrow G_2$. 今将定义横合成 $\psi \circ \theta: G_1 \circ F_1 \rightarrow G_2 \circ F_2$. 首先注意到对所有的 $X \in OB(C'')$, 根据 ψ 的自然性, 图表

$$\begin{array}{ccc} G_1 F_1(X) & \xrightarrow{\psi_{F_1 X}} & G_2 F_1(X) \\ G_1(\theta_X) \downarrow & & \downarrow G_2(\theta_X) \\ G_1 F_2(X) & \xrightarrow{\psi_{F_2 X}} & G_2 F_2(X) \end{array}$$

交换. 对角合成 \searrow 记作 $(\psi \circ \theta)_X: G_1 F_1(X) \rightarrow G_2 F_2(X)$, 此即所求的横合成. 图解



- 横合成还有下述特例. 请端详

$$\begin{array}{ccccc} \mathcal{C}_1 & \xrightarrow{H} & \mathcal{C}_2 & \begin{array}{c} \xrightarrow{F} \\ \Downarrow \theta \\ \xrightarrow{G} \end{array} & \mathcal{C}_3 & \xrightarrow{K} & \mathcal{C}_4. \end{array}$$

先看左三项: 我们将以 $\theta H : FH \rightarrow GH$ 简记横合成 $\theta \circ id_H$; 具体地说,

$(\theta H)_X = \theta_{HX} : FH(X) \rightarrow GH(X)$; 类似地对于右三项: 记 $K\theta : KF \rightarrow KG$ 为横合成 $id_K \circ \theta$, 我们有 $(K\theta)_X : KF(X) \rightarrow KG(X)$.

我们用同一个符号 \circ 来表示纵横合成.

至目前为止我们只讲述了纵横合成的定义, 但是并没有说明自然变换在经过纵横合成之后是否还是自然变换以及其是否服从结合律, 接下来我们验证纵横合成后仍为自然变换并且服从结合律:

横合成:

◦ 定义合理性

沿用之前的符号, 对于 \mathcal{C}'' 中的态射 $f : X \rightarrow Y$, 考虑源于之前的交换图表

$$\begin{array}{ccccc} G_1 F_1(X) & \xrightarrow{G_1 \theta_X} & G_1 F_2(X) & \xrightarrow{\psi_{F_2 X}} & G_2 F_2(X) \\ G_1 F_1 f \downarrow & & \downarrow G_1 F_2 f & & \downarrow G_2 F_2 f \\ G_1 F_1(Y) & \xrightarrow{G_1 \theta_Y} & G_1 F_2(Y) & \xrightarrow{\psi_{F_2 Y}} & G_2 F_2(Y). \end{array}$$

依照定义可知, 水平方向按照箭头合成后上下分别是 $(\psi \circ \theta)_X$ 和 $(\psi \circ \theta)_Y$. 因为 θ 是自然变换而 G_1 是函子, 左方块交换; 由于 ψ 是自然变换, 右方块交换. 将箭头分段作合成, 可知整个大方块交换, 此即 $\psi \circ \theta$ 所需性质.

◦ 结合律

考虑函子间的态射

$$\begin{array}{ccccc} \mathcal{C}''' & \begin{array}{c} \xrightarrow{F_1} \\ \Downarrow \theta \\ \xrightarrow{F_2} \end{array} & \mathcal{C}'' & \begin{array}{c} \xrightarrow{G_1} \\ \Downarrow \psi \\ \xrightarrow{G_2} \end{array} & \mathcal{C}' & \begin{array}{c} \xrightarrow{H_1} \\ \Downarrow \phi \\ \xrightarrow{H_2} \end{array} & \mathcal{C}. \end{array}$$

对于 $\forall X \in Ob(\mathcal{C}'')$, 考虑图表

$$\begin{array}{ccccc}
 & & H_1 G_2 F_2(X) & & \\
 & \nearrow & & \searrow & \\
 H_1 G_1 F_1(X) & \longrightarrow & H_1 G_2 F_1(X) & & H_2 G_2 F_2(X) \\
 & \searrow & & \nearrow & \\
 & & H_2 G_2 F_1(X) & &
 \end{array}$$

施 ψ 的自然性于 $G_2 F_1(X) \rightarrow G_2 F_2(X)$ 可知菱形部分交换.按照上半部分的合成给出 $(\phi \circ (\psi \circ \theta))_X$ 按照下半部分合成给出 $((\phi \circ \psi) \circ \theta)_X$; 由于图表交换, 可知横合成满足结合律.

纵合成:

- 定义合理性

沿用之前的符号, 对于

$$\begin{array}{ccccc}
 F(X) & \xrightarrow{\theta_X} & G(X) & \xrightarrow{\psi_X} & H(X) \\
 \downarrow Ff & & \downarrow Gf & & \downarrow Hf \\
 F(Y) & \xrightarrow{\theta_Y} & G(Y) & \xrightarrow{\psi_Y} & H(Y)
 \end{array}$$

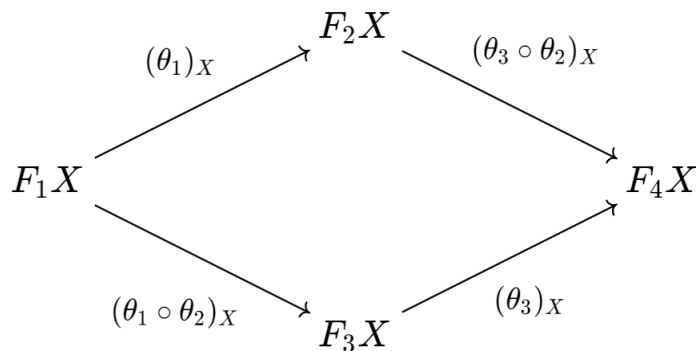
依照定义可知, 水平方向按照箭头合成后上下分别是 $(\psi \circ \theta)_X$ 和 $(\psi \circ \theta)_Y$, 因 θ 是自然变换而 F, G 是函子, 于是左方块交换, 同理, 右方块交换, 于是有态射的定义合理.

- 结合律

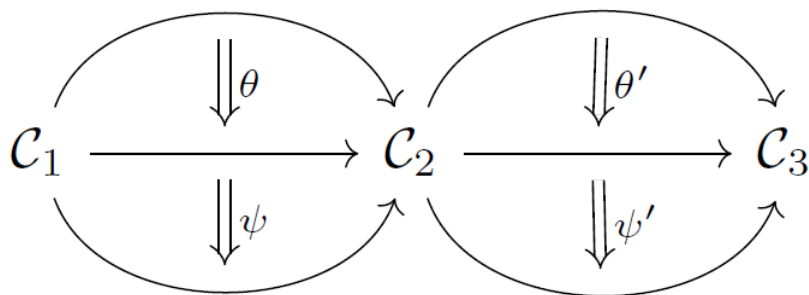
考虑函子间的态射

$$\begin{array}{ccc}
 & F_1 & \\
 & \curvearrowright & \\
 C' & \begin{array}{c} \Downarrow \theta_1 \\ F_2 \\ \Downarrow \theta_2 \\ F_3 \\ \Downarrow \theta_3 \\ F_4 \end{array} & C \\
 & \curvearrowleft &
 \end{array}$$

对于 $\forall X \in Ob(C')$ 考虑图表



由于图表交换可知 $(\theta_1 \circ (\theta_2 \circ \theta_3))_X = ((\theta_1 \circ \theta_2) \circ \theta_3)_X$.即纵合成满足结合律
同理易证对于图表



以下的互换律成立

$$\underset{\text{纵}}{(\psi' \circ \theta')} \circ \underset{\text{横}}{(\psi \circ \theta)} = \underset{\text{横}}{(\psi' \circ \psi)} \circ \underset{\text{纵}}{(\theta' \circ \theta)} \quad (5)$$

以上的证明留作习题.

在自然变换中我们将函子视为对象，于是自然可以定义函子到自身的恒等态射.

对于 $F : C' \rightarrow C$ 定义其恒等态射如下 $id_F : F \rightarrow F$.

即有 id_F 的概念，自然可以以态射的可逆性对于自然变换这个函子之间的态射进行推广.从而得到逆的概念，若对于一个自然变换 $\theta : F_1 \rightarrow F_2$ ，若其可逆，依据[态射可逆的定义](#)自然就存在一个自然变换 $\psi : F_2 \rightarrow F_1$ 使得 $\psi \circ \theta = id_{F_1}$ 同时有 $\theta \circ \psi = id_{F_2}$.由于 id_{F_1} 与 id_{F_2} 具有唯一性，故一个自然变换**若可逆必然唯一**，于是可以将其记为 θ^{-1} ，它可以被理解为在范畴 C' 的对象集中逐点地取逆： $(\theta^{-1})_X := (\theta_X)^{-1} : F_2 X \xrightarrow{\sim} F_1 X$.同理可证自然变换 θ 可逆当且仅当每个 θ_X 均可逆.

我们称这样的 θ 为函子之间的同构(类似于群同构为一个使两个群同构的态射一样).

函子间同构 $\theta : F_1 \xrightarrow{\sim} F_2$ 的等价说法是称 $\theta_X : F_1 X \xrightarrow{\sim} F_2 X$ 对于变元 X 是**自然同构**或**典范同构**.

习题4

1. 证明前文所述的[互换律](#).

提示：仿照证明纵横合成结合律的交换图表即可.

2. 证明:自然变换 θ 可逆当且仅当每个 θ_X 均可逆.

提示: 由前文立即得到.

3. 证明:函子间同构 $\theta : F_1 \rightarrow F_2$ 的等价说法是称 $\theta_X : F_1 X \xrightarrow{\sim} F_2 X$ 对于变元 X 是**自然同构**或**典范同构**.

提示: 由2可以直接推出.

4. 试探索范畴之间是否也可以得到一个同构和等价关系.

提示: 欲知后事如何, 且听下回分解: **范畴之间的同构与等价**.

5. 试探索两个范畴间的函子是否能给出一个全新的范畴

提示: 欲知后事如何, 且听下下回分解: **函子范畴**.

范畴之间的等价与同构

根据函子之间同构以及同构的概念, 由于函子是范畴之间的态射, 于是可以推广出范畴同构的概念:

若函子 $F : C_1 \rightarrow C_2$ 为范畴之间的同构, 则存在函子 $G : C_2 \rightarrow C_1$ 使得对于任意的 $X_1, X_2 \in Ob(C_1), Y_1, Y_2 \in Ob(C_2)$ 有: $GF X_i = X_i, FGY_i = Y_i (i \in \{1, 2\})$, 对于态射集自然有 $Hom_{C_1}(GF X_1, GF X_2) = Hom_{C_1}(X_1, X_2)$, 让 X_i, Y_i 遍历所有对象集的元素, 则有 $FG = id_{C_2}$ 且 $GF = id_{C_1}$.称 G 是 F 的逆.

那么范畴同构到函子上会是如何表达的呢?

由于 F, G 为函子 $id_{C_i}, i \in \{1, 2\}$ 也为函子, 于是不难得到这两组函子均严格相等(FG 与 id_{C_2} 严格相等并且 GF 与 id_{C_1} 严格相等, 而不仅仅是同构.但是正如引言所述, 在范畴中一般以同构来代替严格等式, 于是需要探究当这两组函子均以同构的形式存在时的情况.当两组函子同构时, 有 $\psi : GF \xrightarrow{\sim} id_{C_1}$ 并且存在 $\theta : FG \xrightarrow{\sim} id_{C_2}$, 这个时候 G 不能称为是 F 的逆, 只能称为是 F 的拟逆(函子间的同构下放到范畴层次为等价, 自然就不是同构的逆了), 称 G 为 F 的拟逆函子. F 称为 C_1 到 C_2 的范畴等价.

由于 id_{C_i} 具有唯一性, 函子的逆只有一个, 但是拟逆可以有多个, 接下来先对拟逆进行讨论:

设 G, G' 均为 $F : C_1 \rightarrow C_2$ 的拟逆, 接下来我们研究拟逆之间的关系, 有 $G'FG = (G'F)G = G'(FG)$, 再由 $\psi' : G'F \xrightarrow{\sim} id_{C_1}, \theta : FG \xrightarrow{\sim} id_{C_2}$, 于是可以得到 $G' \xleftarrow[\sim]{\psi' \circ id_G} (G'F)G = G'(FG) \xrightarrow[\sim]{id_{G'} \circ \theta} G$,

进行合成(同构的合成还是同构)得到 $G \xrightarrow{\sim} G'$.发现拟逆函子之间相差一个同构, 即拟逆函子在相差一个同构的情况下是唯一的(泛性质).

接下来我们对范畴的等价进行讨论:

设 C_1 和 C_2 为两个范畴, $F : C_1 \xrightarrow{\sim} C_2$ 为范畴等价, 取其拟逆 $G : C_2 \xrightarrow{\sim} C_1$ 和自然变换 $GF \xrightarrow{\sim} id_{C_1}$, $FG \xrightarrow{\sim} id_{C_2}$.

1. 对象集上

对于 C_2 中任意对象 Z 有 $\phi_Z : F(GZ) \xrightarrow{\sim} Z$ 于是对于 F 有 F 本质满, 对于 C_1 中的任意对象 K 有 $\psi_K : G(FK) \xrightarrow{\sim} K$ 得到 G 也本质满, 于是不难得出一个结论: 范畴的等价必为本质满函子.

2. 但是范畴的等价不止为本质满这一条性质, 接下来对于态射集中对象之间的态射进行讨论:

对于对象 $X, Y \in Ob(C_1)$, $f \in Hom_{C_1}(X, Y)$, 有

$$Hom(X, Y) \xrightarrow{F} Hom(FX, FY) \xrightarrow{G} Hom(GF(X), GF(Y)) \xrightarrow{\sim} Hom(X, Y)$$

$$f \longmapsto Ff \longmapsto GF(f) \longmapsto \psi_Y GF(f) \psi_X^{-1}$$

$\psi_Y GF(f) \psi_X^{-1}$ 合成为恒等映射, 于是有 $GF \xrightarrow{\sim} id_{C_1}$, 即 F 左可逆, G 右可逆. 调换 G, F 角色, 取 $X', Y' \in Ob(C_2)$ 有

$$Hom(X', Y') \xrightarrow{G} Hom(GX', GY') \xrightarrow{F} Hom(FGX', FGY') \xrightarrow{(\phi_X^{-1})^*(\phi_Y)_*} Hom(X', Y')$$

$$f' \longmapsto Gf' \longmapsto FGf' \longmapsto \phi_Y GFf' \phi_X^{-1}$$

$\phi_Y FGf' \phi_X^{-1}$ 合成为恒等态射, 于是有 $FG \xrightarrow{\sim} id_{C_2}$, 即 F 右可逆, G 左可逆. (注记: $(\phi_Y)_*$ 以及 $(\phi_X^{-1})^*$ 为态射 ϕ_Y 做推出与对态射 ϕ_X^{-1} 做拉回, 拉回和推出是我们对于两个对象间的态射集进行转化时的利器, 在**函子范畴**中我们会对拉回与推出进行定义, 见函子范畴的[Hom函子](#).)

于是 F 与 G 均可逆, 即 F 与 G 均为全忠实函子.

自此我们得到范畴等价均为全忠实, 本质满函子.

由于范畴等价为本质满函子, 于是对于本质类而言**范畴等价必为满射**, 于是不妨在每一个本质类中取一个代表元进行研究, 于是可以得到范畴 C 的一个子范畴 C' 使 C 中每个对象 X 都存在同构 $X \xrightarrow{\sim} Y \in Ob(C')$, 而且此 $Y \in Ob(C')$ 是唯一的. 由于范畴等价的全忠实函子, 于是对子范畴 C' 取为全子范畴更符合我们的需要. 称这一类范畴为骨架.

不难发现, 对于任意范畴都有一副骨架(尚未证明), 有些范畴自身就是骨架, 这类范畴称为骨架范畴.

接下来对于骨架和骨架范畴上的范畴等价进行讨论.

1. 先证明任何范畴 C 都有一副骨架 C'

使用选择公理在 $Ob(C)$ 的每个同构类中选取一个代表元, 由这些代表元构成的全子范畴记作 C' .

即任何范畴都有一副骨架

选择公理: ZFC公理体系中的一条公理, 其内容为: 设集合 X 的每个元素皆非空, 则存在函数 $g : X \rightarrow \bigcup X$ 使得 $\forall x \in X, g(x) \in x$. 另外集合论中我们认为任何元素都为集合, 一般将 X 视为一族非空的集合, 选择函数 $g(x) \in x$ 即意味着从每个集合 $x \in X$ 中挑出一个元素, 在本次证明中 X 可以视为前文所述的**本质类构成的商集**

2. 其包含函子是等价

于是由选择公理可以在 $Hom_C(X, \kappa X)$ 中选出 [同构](#) $\theta_X : X \xrightarrow{\sim} \kappa(X)$. 其中 $\kappa(X) \in Ob(C')$, 不妨假设对于每个 $X \in Ob(C')$ 都有 $\theta_X = id_X$ (也可以视为一种规定), 则存在[唯一一种](#)方法使得 $\kappa : Ob(C) \rightarrow Ob(C')$ 延拓为函子并使得 $\theta : id_C \xrightarrow{\sim} \iota\kappa$: 置

$$\kappa f := \theta_Y \circ f \circ \theta_X^{-1} \in Hom_{C'}(\kappa(X), \kappa(Y)), \quad f \in Hom_C(X, Y) \quad (6)$$

另一方面, 由于 $\kappa\iota = id_{C'}$, 因此由范畴等价的定义知包含函子是等价, 而 κ 是 ι 的拟逆函子.

3. 接下来观察骨架范畴间的等价

设 C_1, C_2 为骨架范畴, $F : C_1 \xrightarrow{\sim} C_2$ 是范畴间的等价.

由[前文](#)可知 F 是全忠实, 本质满函子. 对任意 C_2 中的对象 Z 都有 $FX \simeq Z, X \in Ob(C_1)$, 由[骨架范畴](#)的定义可知 $Z = FX$, 这样的 X 也是唯一的, 于是有 $FX \simeq FX'$ 蕴含 $X \simeq X'$, 于是 F 在对象集上为双射, 即在对象集上 F 可以找到一个逆 G 使得 $GF = id_{C_1}$ 并且 $FG = id_{C_2}$. 即 F 为范畴间的同构.

得到以下结论:

引理: 任意范畴 C 总有一副骨架 C' 且包含函子 $\iota : C' \hookrightarrow C$ 是范畴等价. 骨架范畴间的范畴等价(只需要全忠实本质满即可)是同构.

接下来由骨架范畴与原范畴之间的关系可知对于[前文](#)中的 C_1 和 C_2 分别取骨架范畴 C'_1 和 C'_2 , 取包含函子 $\iota_i : C'_i \hookrightarrow C_i$ 及其拟逆函子 $\kappa_i, i \in \{1, 2\}$.

函子 $F' := \kappa_2 \circ F \circ \iota_1 : C'_1 \rightarrow C'_2$ 仍为全忠实, 本质满函子, 由[引理](#)可以得到 F' 为 C'_1 到 C'_2 的同构. 于是可以对其取逆得到 $F'^{-1} : C'_2 \rightarrow C'_1$, 再将 F'^{-1} 转移为原范畴间的函子, 构造 $G := \iota_1 \circ F'^{-1} \circ \kappa_2$. 则有

$$\begin{aligned} GF &= \iota_1 F'^{-1} \kappa_2 F \simeq \iota_1 F'^{-1} \underbrace{\kappa_2 F \iota_1}_{=F'} \kappa_1 = \iota_1 \kappa_1 \simeq id_{C_1} \\ FG &= F \iota_1 F'^{-1} \kappa_2 \simeq \iota_2 \underbrace{\kappa_2 F \iota_1}_{=F'} F'^{-1} \kappa_2 = \iota_2 \kappa_2 \simeq id_{C_2} \end{aligned}$$

使用自然变换的横合成可以得知 F 为范畴之间的等价.

于是得到以下定理:

定理: 对于函子 $F : C_1 \rightarrow C_2$, 以下叙述等价:

1. F 是范畴等价
2. F 是全忠实本质满函子

习题5

1. 考虑某域 \mathbb{k} 上的向量空间范畴 $Vect(\mathbb{k})$ 及其子范畴 $Vect_f(\mathbb{k})$. [前文](#) 已经定义了双对偶函子. 对于任意向量空间 V 都有求值映射

$$\begin{aligned} ev : V &\rightarrow DD^{op}V = (V^\vee)^\vee \\ v &\mapsto [\lambda \mapsto \lambda(v)] \end{aligned} \quad (7)$$

试证明: $\text{ev} : V \hookrightarrow DD^{\text{op}}V$ 并且在得知以下结论(ev 为双射当且仅当有限维的情况下)证明 $D : \text{Vect}_f(\mathbb{k})^{\text{op}} \rightarrow \text{Vect}_f(\mathbb{k})$ 是范畴间的等价, D^{op} 是它的拟逆.

提示:

对于任意线性映射 $f : V \rightarrow W$ 从 f^\vee 的定义不难得到

$$\begin{array}{ccc} V & \xrightarrow{\text{ev}} & DD^{\text{op}}V \\ f \downarrow & & \downarrow DD^{\text{op}}f \\ W & \xrightarrow{\text{ev}} & DD^{\text{op}}W \end{array}$$

交换, 即证明 $\text{ev} : id \mapsto DD^{\text{op}}$ 为单射.

第二步使用双射的性质并结合定理即可证明

2. 选定域 \mathbb{k} , 定义范畴 Mat 如下: 其对象是 $Z_{\geq 0}$, 任意对象 $n, m \in Z_{\geq 0}$, 定义 $\text{Hom}(n, m) := M_{m \times n}(\mathbb{k})$ 为域 \mathbb{k} 上的全体 $m \times n$ 矩阵 $A = (a_{ij})_{1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n}$ 缩成集合, 约定 $M_{0 \times n}(\mathbb{k}) = M_{m \times 0}(\mathbb{k}) := \{0\}$. 态射的合成定义为

$$\begin{aligned} \text{Hom}(n, m) \times \text{Hom}(m, k) &\rightarrow \text{Hom}(n, k) \\ (A, B) &\mapsto BA \end{aligned} \quad (8)$$

定义函子 $F : \text{Mat} \rightarrow \text{Vect}_f(\mathbb{k})$ 如下: 置 $F(n) = \mathbb{k}^{\oplus n} := M_{n \times 1}(\mathbb{k})$, 而对于 $A \in \text{Hom}(n, m)$, 线性映射 $FA : \mathbb{k}^{\oplus n} \rightarrow \mathbb{k}^{\oplus m}$ 是矩阵乘法 $v \mapsto Av$, 试证明 F 是范畴等价.

提示: 留意到 $F : \text{Hom}(n, m) \rightarrow \text{Hom}_{\mathbb{k}}(\mathbb{k}^{\otimes n}, \mathbb{k}^{\otimes m})$, 证明其为双射, 再由 $V \simeq \mathbb{k}^{\oplus \dim V}$ 可知 F 全忠实本质满.

这一切只是虚张声势的线性代数

3. 设 $A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{g} C \xrightarrow{h} D$ 是任意范畴中的态射. 证明若 $A \xrightarrow{gf} C$ 与 $B \xrightarrow{hg} D$ 皆为同构, 则 f, g, h 均为同构

提示: 利用范畴同构的定义以及函子的左右逆确定 f, g, h 均为双射, 进而证明 f, g, h 皆为同构.

4. 同构具有重要意义, 那么在一个范畴中, 是否可以定义一些特殊的对象(考虑对象之间的态射), 使其在最多相差一个同构的意义下是唯一的, 如果有, 我们该如何去定义这些对象.

提示: 欲知后事如何, 请听下章分解: 泛性质.

5. 范畴等价 $FG \xrightarrow{\sim} id_{C_2}$ 并且 $GF \xrightarrow{\sim} id_{C_1}$, 那么是否可以对其进行拓展延伸, 只看 $GF \rightarrow id_{C_1}$ 的部分, 对于具有这种自然变换(余单位)以及其反向变换(单位)进行讨论, 是否能够构造出一个函子同构 $\phi : Hom_{C_2}(F(\cdot), \cdot) \xrightarrow{\sim} Hom_{C_1}(\cdot, G(\cdot))$.

提示: 欲知后事如何, 请听下下章分解: **伴随函子**.

函子范畴

在自然变换中, 我们将函子视为变换的对象, 并且对于自然变换的纵合成有纵合成后自然变换仍为自然变换, 即纵合成后的自然变换仍为函子间的态射. 于是对于范畴 C_1 和范畴 C_2 , 可以对两个范畴间的全部函子进行讨论, 任两个函子 $F, G : C_1 \rightarrow C_2$, 其间的态射为自然变换 $\theta : F \rightarrow G$, 由自然变换的纵合成定义其态射合成. 接下来我们验证这样的定义是否可以构成一个范畴.

定义一个范畴 $Fct(C_1, C_2)$, 其对象集 $Ob(Fct(C_1, C_2))$ 为从 C_1 到 C_2 的所有函子, 于是自然可以推出函子之间的关系为自然变换, 即函子之间的态射.

对于 $Hom_{Fct(C_1, C_2)}(F, G)$ 可知其包含所有对于 C_1 中的任意对象 X , 形如 $\theta_X \in Hom_{C_2}(FX, GX)$ 的自然变换. 于是由于自然变换的纵合成仍为自然变换, 可以定义态射之间的合成为纵合成, 即对于 $F, G, H \in Ob(Fct(C_1, C_2))$ 有 $\phi \in Hom(F, G), \psi \in Hom(G, H)$, 于是 $\psi \circ \phi : F \rightarrow H$, 注意到 $(\psi \circ \phi)_X \in Hom(FX, HX)$, 即 ψ_X 可以诱导 $Hom(FX, GX) \rightarrow Hom(FX, HX)$, 其方式为对于 $\phi_X \in Hom(FX, GX)$, $\phi_X \mapsto \psi_X \circ \phi_X$, 即对于态射进行"推出", 同理对于 $\theta_X : Hom(KX, FX)$ 可以诱导出 $Hom(FX, GX) \rightarrow Hom(KX, FX)$, 其方式为 $\phi_X \mapsto \phi_X \circ \theta_X$, 即对于态射进行"拉回".

于是如果需要验证态射之间的纵合成作为态射的合成是合理的, 就需要验证"拉回"与"推出"是合理的.

可以发现拉回与推出都是对 Hom 集上的操作, 于是如果能够定义一个范畴 C 中由对象集到 Hom 集(由于 Hom 集本质上就是一个集合, 这无非是一个从范畴 C 到集合范畴 Set 的函子). 它将 $X, Y \in Ob(C)$, $(X, Y) \mapsto Hom_C(X, Y)$, 即其形式为 $C^{op} \times C \rightarrow Set$. 可知这是一个类似于二元运算的"二元函子", 需要先定义"二元函子"具有合理性, 观察二元运算 $A \times B \rightarrow C$, 有 $a \in A, b \in B, c \in C$, 二元运算使 $(a, b) \mapsto c$, 而左边的笛卡尔积本质上也为一个集合, 二元运算本质上也为一个映射. 于是定义"二元函子"具备合理性就需要证明二元函子本质上是两个范畴间的函子, 即 $C_1 \times C_2$ 为一个范畴, 若 C_1, C_2 为范畴.

仿照笛卡尔积的定义可以得到范畴之间的积的定义, 同理仿照余积的定义可以得到范畴之间的余积定义.

笛卡尔积:

对于一族集合 $\{X_i : i \in I\}$ 及其指标集 I , 可以定义一个新集合使其元素为映射 $\{f : I \rightarrow \bigcup_{i \in I} X_i : f(i) \in X_i\}$. 不难发现这个新集合中每一个元素都有 $f(i) \in X_i$, 即(当 $I = \{1, 2, \dots, n\}$ 时)每个元素都可以写成 $(x_1, x_2, \dots, x_n), x_i \in X_i, i \in I$. 即这个新集合可以写成 $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$, 于是当 I 为无穷集合时可以写成 $\prod_{i \in I} X_i$.

于是在本次证明中, 先对于范畴的对象集进行考虑, 这无非是一族集合组成的笛卡尔积.

再由对象集推广至态射集, 对于两族对象 $\{X_i : i \in I\}$ 和 $\{Y_i : i \in I\}$ 间的所有态射(以 (X_i, Y_i) 为一对进行考虑), 依照 i 的顺序进行定义即可得到范畴的积中两个对象间的态射集为

$Hom_{\prod_{i \in I} C_i}((X_i)_i, (Y_i)_i) := \prod_{i \in I} Hom_{C_i}(X_i, Y_i)$. 其中 $(X_i)_i := \prod_{i \in I} X_i$, 由于下面定义为书上定义, 不便进行修改, 便在注记中进行解释.

余积:

余积在极限中会进行详细讨论，在目前章节只是由范畴的积顺带推出其定义。

余积其实就是无交并，在范畴中先对于对象集进行无交并处理得到余积范畴的对象集。

由于为无交并，于是不属于同一个原范畴的两个对象之间并没有交集，即 Hom 集为空。

定义：设 I 为一个集合(指标集)，而 $\{C_i : i \in I\}$ 为一族范畴。

1. 积范畴 $\prod_{i \in I} C_i$ 定义如下：

$$\begin{aligned} Ob(\prod_{i \in I} C_i) &:= \prod_{i \in I} Ob(C_i) \\ Hom_{\prod_{i \in I} C_i}((X_i)_i, (Y_i)_i) &:= \prod_{i \in I} Hom_{C_i}(X_i, Y_i) \end{aligned} \quad (9)$$

我们以 $(X_i)_i$ 来表示 $\prod_{i \in I} C_i$ 中的元素，态射的合成是逐个分量定义的。

2. 余积(又名无交并)范畴 $\coprod_{i \in I} C_i$ 定义如下：

$$\begin{aligned} Ob(\coprod_{i \in I} C_i) &:= \coprod_{i \in I} Ob(C_i) \\ Hom_{\coprod_{i \in I} C_i}(X_j, X_k) &:= \begin{cases} Hom_{C_j}(X_j, X_k), & j = k \\ \emptyset, & j \neq k \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

其中对每个 $j \in I$ 有 $X_j \in Ob(C_j)$ 。态射的合成是在各个 C_i 中各别定义的。

自此得到了积范畴定义的合理性，仿照笛卡尔积的投影映射，自然可以推出投影函子 $\mathbf{pr}_j : \prod_{i \in I} C_i \rightarrow C_j$ 。它将 $(X_i)_i$ 映至 X_j ，在态射层面也是类似地投影到 j 分量。

同理可以定义一族包含函子 $\iota_j : C_j \rightarrow \prod_{i \in I} C_i$ ，将 C_j 以自明的方式嵌入全子范畴。

特别地，取 I 为有限集自然就可以定义 $C_1 \times C_2 \times \cdots \times C_n$ 和 $C_1 \sqcup C_2 \sqcup \cdots \sqcup C_n$ ，既然范畴的积也为范畴，于是自然可以导出二元函子(仿照二元运算)与多元函子(仿照多元运算)的定义。

由[前文](#)的讨论可知二元函子和多元函子本质上就是一个积范畴到一个范畴的函子，类似于二元运算和多元运算。

定义：形如 $F : C_1 \times C_2 \rightarrow C$ 的函子称为二元函子，多元函子 $C_1 \times C_2 \times \cdots \times C_n \rightarrow C$ 的定义类似。

于是可以继续对于[前文](#)的工作进行延伸。将 (X, Y) 映射至 $Hom_C(X, Y) \in Ob(\mathbf{Set})$ 的函子是一个二元函子 $C^{op} \times C \rightarrow \mathbf{Set}$ 。由二元函子的定义可知这个函子的定义合理，即得到 Hom 函子的定义(重要，以后的很多定理都需要由这里的思想推出)。

定义(**Hom函子**)：给定范畴 C ，则 $(X, Y) \mapsto Hom_C(X, Y)$ 定义了二元函子

$$Hom_C : C^{op} \times C \rightarrow \mathbf{Set} \quad (11)$$

诚然， C 中任一对态射 $f : X' \rightarrow X$ 和 $g : Y \rightarrow Y'$ 诱导出

$$\begin{aligned} Hom_C(X, Y) &\rightarrow Hom_C(X', Y') \\ \phi &\mapsto g\phi f \end{aligned} \quad (12)$$

有时也说这是态射 ϕ 对 f 做**拉回**，对 g 做**推出**。拉回与推出习惯使用符号 $f^*\phi = \phi f$ 和 $g_*\phi = g\phi$ 进行表示。

于是可以知道 $\text{Fct}(C_1, C_2)$ 范畴中以自然变换的纵合成作为态射合成的定义是合理的.再以函子到自身恒等的自然变换作为恒等态射, 即可验证本节开头所述的定义可以构成一个范畴.

于是可以定义函子范畴的概念

定义(函子范畴): 设 C_1 和 C_2 是两个 U 范畴(U 范畴需要用到Grothendieck宇宙的知识, 不过在此处只是为了让积范畴也为 U 范畴, 于是视为普通范畴即可), 定义其函子范畴 $\text{Fct}(C_1, C_2)$: 其对象是 C_1 到 C_2 的函子, 任两个对象 F, G 之间的态射是自然变换 $\theta : F \rightarrow G$; 态射 $\theta : F \rightarrow G$ 和态射 $\psi : G \rightarrow H$ 的合成是自然变换的纵合成 $\psi \circ \theta : F \rightarrow H$. 有时候也把 $\text{Fct}(C_1, C_2)$ 写成 $C_1^{C_2}$.

既然有原范畴的函子 $F, G : C_1 \rightarrow C_2$.

于是考虑其反范畴, 同样有 $F^{op}, G^{op} : C_1^{op} \rightarrow C_2^{op}$, 易见自然变换 $\varphi : F \rightarrow G$ 在反范畴中倒转为 $\varphi^{op} : G^{op} \rightarrow F^{op}$. 而且 $(\varphi^{op})^{op} = \varphi$.

接下来我们对此进行证明:

对于反函子范畴 $\text{Fct}(C_1, C_2)^{op}$ 有其对象集与原函子范畴无异, 即 $F, G : C_1 \rightarrow C_2$ 仍为 $\text{Fct}(C_1, C_2)^{op}$ 的对象, 在原范畴中有 $\varphi F = G$, 即有 $\varphi \in \text{Hom}_{\text{Fct}(C_1, C_2)}(F, G) = \text{Hom}_{\text{Fct}(C_1, C_2)^{op}}(G, F)$.

对于 $\text{Fct}(C_1^{op}, C_2^{op})$, 其对象集为所有由 C_1^{op} 到 C_2^{op} 的函子, 由于作用在原范畴之间和作用在反范畴之间的函子是一回事, 于是有 $F = F^{op} : C_1^{op} \rightarrow C_2^{op} \in \text{Ob}(\text{Fct}(C_1^{op}, C_2^{op}))$. 即 $\text{Ob}(\text{Fct}(C_1^{op}, C_2^{op})) = \text{Ob}(\text{Fct}(C_1, C_2)^{op})$, 对其中两个对象所组成的 Hom 集有 $\varphi^{op} \in \text{Hom}_{\text{Fct}(C_1^{op}, C_2^{op})}(G^{op}, F^{op})$. 有 $\varphi^{op} : G^{op} \rightarrow F^{op}$.

可以做这两个函子范畴之间的函子 ψ

$$\begin{array}{ccc} \psi : \text{Fct}(C_1^{op}, C_2^{op}) & \rightarrow & \text{Fct}(C_1, C_2)^{op} \\ F^{op} & \mapsto & F \\ \varphi^{op} & \mapsto & \varphi \end{array} \quad (13)$$

有函子在对象集上为双射, 并且 $\psi : \text{Hom}_{\text{Fct}(C_1^{op}, C_2^{op})}(G^{op}, F^{op}) \rightarrow \text{Hom}_{\text{Fct}(C_1, C_2)^{op}}(G, F)$ 对两个对象集之间的态射也为双射, 于是可由上一节的定理知 ψ 为两个函子范畴之间的同构, 即 $\text{Fct}(C_1, C_2)^{op} \simeq \text{Fct}(C_1^{op}, C_2^{op})$, $\varphi \mapsto \varphi^{op}$. 重复同构得到 $\text{Fct}(C_1^{op}, C_2^{op})^{op} \simeq \text{Fct}(C_1, C_2)$, $\varphi^{op} \mapsto (\varphi^{op})^{op}$. 不难得出 $(\varphi^{op})^{op} \simeq \varphi$. 考虑 id_F 的唯一性得到 $(\varphi^{op})^{op} = \varphi$.

既已经得到函子可以构成范畴, 于是对于一个单独的函子 $F : C_1 \rightarrow C_2$ 可以进行分析.

根据对于范畴态射可逆的讨论以及广群可以对于 F 的自同态么半群 $\text{End}(F)$ 和自同构群 $\text{Aut}(F)$ 进行考虑.

首先对于一个范畴的恒等函子 id_C , 对其自同态么半群 $\text{End}(\text{id}_C)$ 进行考虑, 它无非是一族自同态

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{\psi_X} & X \\ f \downarrow & & \downarrow f \\ Y & \xrightarrow{\psi_Y} & Y \end{array} \quad \text{对于每个 } f : X \rightarrow Y \text{ 都交换.}$$

注意自同态 $X \rightarrow X$ 不一定唯一, 因 X 为对象可以看做某个集合. 我们称 $\text{End}(\text{id}_C)$ 为范畴 C 中心 $Z(C)$.

习题6

1. 证明:考虑集合 I , 取 $\mathcal{I} := \text{Disc}(I)$, 证明对于任意集合 C 皆有范畴同构 $C^{\mathcal{I}} \simeq \prod_{i \in I} C$.

提示:由积范畴定义以及离散范畴定义显然得出

2. 证明: 中心 $Z(C)$ 对二元计算 \circ 总是交换的.

提示: 对于给定的 $\theta, \psi \in Z(C)$, 对于定义中的交换图表令 $f = \theta, X = Y$, 由于图表交换可得到 $(\theta \circ \psi)_X = (\psi \circ \theta)_X$.

3. 证明: 范畴等价 $F : C_1 \rightarrow C_2$ 诱导中心同构 $Z(C_1) \simeq Z(C_2)$.

显然.

4. Hom 函子具有可表示范畴 C 中两个对象从 X 到 Y 的全部态射的功能, 那么是否可以构造一个函子使其能够表示所有打向 X 的态射, 这个函子与 X 又有什么关系呢.

提示: 欲知后事如何, 且听下下章分解: **可表函子**.

泛性质

可表函子

伴随函子

极限

符号索引

LaTeX符号：

符号	意义	LaTeX 写法
\exists	存在	<code>\exists</code>
\forall	任意	<code>\forall</code>
\cdot	泛指对象	<code>\cdot</code>
$(\cdot)^{-1}$	对某个对象(态射)求逆	<code>(\cdot)^{-1}</code>
$(\cdot)^{op}$	对于 \cdot 取对偶	<code>(\cdot)^{op}</code>
$\overset{s}{\underset{t}{\rightrightarrows}}$	有 s 和 t 两个映射	<code>\xrightarrow[t]{s}</code>
id	恒等态射	<code>id</code>
$X \overset{f}{\rightarrow} Y$	表示 f 将 X 映射至 Y	<code>X \xrightarrow{f} Y</code>
$!\exists$	存在唯一的	<code>!\exists</code>
\rightarrow	表示态射作用主体之间的态射	<code>\to</code>
\mapsto	表示态射作用元之间的态射，表示态射的具体形式	<code>\mapsto</code>
\hookrightarrow	单射	<code>\hookrightarrow</code>
$[a \mapsto b]$	将 a 映射成 b 的映射	<code>[a \mapsto b]</code>
ev	求值函子	<code>\text{ev}</code>
$\prod_{i \in I}$	对一族指标集为 I 的范畴(或其他结构)做笛卡尔积	<code>\prod_{i \in I}</code>
$\coprod_{i \in I}$	对一族指标集为 I 的范畴做余积	<code>\coprod_{i \in I}</code>
\times	对两个对象之间进行笛卡尔积	<code>\times</code>
\sqcup	对两个对象取无交并	<code>\sqcup</code>
$(\cdot)^*$	对 \cdot 做拉回	<code>(\cdot)^*</code>
$(\cdot)_*$	对 \cdot 做推出	<code>(\cdot)_*</code>
\mathbb{k}	指域 \mathbb{k}	<code>\mathbb{k}</code>
\mathcal{I}	指集合 I 构成的离散范畴	<code>\mathcal{I}</code>

符号	意义	$LaTeX$ 写法

未完待续