

# 2025 年秋组会讲义“外三角范畴”

张陈成

2025 年秋

最后更新于 2025 年 9 月 14 日.

## 目录

<b>1</b>	<b>正合范畴与三角范畴拾遗</b>	<b>3</b>
1.1	正合范畴	3
1.2	三角范畴	5
1.3	同伦的推出拉回	8
<b>2</b>	<b>初探外三角范畴</b>	<b>12</b>
2.1	基本定义	12
2.2	六项正合列	14
2.3	五项正合列的推论	16
2.4	扩张提升引理	18
<b>3</b>	<b>图表定理</b>	<b>20</b>
3.1	双 deflation (inflation) 的拉回 (推出)	20
3.2	同伦的推出拉回方块	23
3.3	弱幂等完备	27
3.4	九引理	29
<b>4</b>	<b>特殊的外三角范畴</b>	<b>32</b>
4.1	正合范畴是外三角范畴	32
4.2	三角范畴是外三角范畴	34
4.3	自等价 + 外三角范畴 = 三角范畴	34
4.4	理想商	35
<b>5</b>	<b>Hovey 对应</b>	<b>40</b>
5.1	余挠对	40
5.2	遗传余挠对	44
5.3	态射观点	47
5.4	模型结构	50
5.5	Hovey 孪生余挠对	52

5.6 相容闭模型结构 $\rightarrow$ Hovey 孪生余挠对 .....	53
5.7 Hovey 孪生余挠对 $\rightarrow$ 相容闭模型结构 .....	54

## 1 正合范畴与三角范畴拾遗

### 1.1 正合范畴

短正合列 (下简称 **ses**) 是同调代数的基本研究对象, 正合范畴研究了一般加法范畴上的短正合列理论.

**定义 1.1.1.** (Quillen 的正合范畴). 正合范畴  $(\mathcal{C}, \mathcal{E})$  的基本资料是加法范畴  $\mathcal{C}$  与一族映射图  $\mathcal{E}$ .  $\mathcal{E}$  中对象称为  $\mathcal{C}$  中的**短正合列 (ses)**, 形如

$$0 \rightarrow X \xrightarrow{i} Y \xrightarrow{p} Z \rightarrow 0, \quad (1.1.1)$$

其中  $i = \ker p$ , 称  $i$  为**容许单态射**;  $p = \operatorname{cok} i$ , 称  $p$  为**容许满态射**. 正合范畴  $(\mathcal{C}, \mathcal{E})$  需满足以下公理:

EX0 对任意对象  $X$ , 恒等映射  $\operatorname{id}_X$  是容许单态射;

EX0' 对任意对象  $X$ , 恒等映射  $\operatorname{id}_X$  是容许满态射;

EX1 容许单态射在复合下封闭;

EX1' 容许满态射在复合下封闭;

EX2 容许单态射  $X \rightarrow Y$  对任意态射  $X \rightarrow Z$  有推出, 且  $Z \rightarrow Y \sqcup_X Z$  仍为容许单态射;

EX2' 容许满态射  $B \rightarrow C$  对任意态射  $A \rightarrow C$  有拉回, 且  $B \times^C A \rightarrow A$  仍为容许满态射.

**备注 1.1.2.** 实际上, EX2 与 EX2' 构造的交换方块是推出拉回方块. 更精细的表述见**定理 1.3.8**.

**引理 1.1.3.**  $\mathcal{E}$  对直和封闭. 此处的直和指二元双积  $\oplus$ , 后不重复解释.

**证明.** 由于  $\oplus$  保持核与余核, 下只需说明容许单态射对直和封闭. 给定 **ses**  $A \xrightarrow{i} B \xrightarrow{p} C$  与  $D \xrightarrow{j} E \xrightarrow{q} F$ . 容易检验以下是推出方块:

$$\begin{array}{ccc} B & \xrightarrow{\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}} & B \oplus E \\ p \downarrow & & \downarrow \begin{pmatrix} p & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ C & \dashrightarrow & C \oplus E \\ & \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} & \end{array} \quad \begin{array}{ccc} E & \xrightarrow{\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}} & C \oplus E \\ q \downarrow & & \downarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & q \end{pmatrix} \\ F & \dashrightarrow & C \oplus F \\ & \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} & \end{array} \quad (1.1.2)$$

由 EX2' 与 EX1',  $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & q \end{pmatrix}$  是容许满态射, 其核是  $\begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & j \end{pmatrix}$ . 证毕.  $\square$

**推论 1.1.4.** 任意可裂 **ses** 含于  $\mathcal{E}$ .

**例子 1.1.5.** 有时假定正合范畴的扩张类是局部本质小的. 换言之, 对任意对象  $X, Z$ , 形如  $0 \rightarrow X \rightarrow ? \rightarrow Z \rightarrow 0$  的 **ses** 的同构类是一个集合. 正合范畴满足这一假定, 若以下任意一则条件成立,

1.  $\mathcal{C}$  有足够投射对象, 或足够内射对象. (由维数移动.)
2.  $\mathcal{C}$  是本质小的, 即所有态射构成集合. (显然.)
3.  $\mathcal{C}$  中对象可遗忘作集合, 态射可遗忘作映射, 且遗忘函子保持核 (例如, 遗忘是右伴随). 对任意基数  $\kappa$ , 基数为  $\kappa$  的对象构成本质小范畴. 模范畴复形范畴的常见正合结构满足这一假定.

**证明.** 给定  $X$  与  $Z$ , 则扩张项  $E$  满足  $|E/X| \simeq |Z|$ . 由于所有基数不超过  $|X| \cdot |Z|$  的对象构成本质小范畴, 故所有形如  $0 \rightarrow X \rightarrow ? \rightarrow Z \rightarrow 0$  的 **ses** 构成本质小范畴.  $\square$

**命题 1.1.6.** 正合范畴的反范畴是正合范畴.

证明. 公理  $\text{EX}n$  ( $\text{EX}n'$ ) 的在反范畴中的表述是  $\text{EX}n'$  ( $\text{EX}n$ ), 故成立.  $\square$

后文提及的“对偶可证”是基于反范畴的考量.

备注 1.1.7. 正合范畴的一般理论见 [Büh10] 与 [Kel96], 一些较有意义计算与反例参阅 [BK14].

正合范畴是特殊的外三角范畴. 由于正合范畴的部分主要结论 (如“六项长正合列”) 可从外三角范畴者退化得到, 此节无需提及这类结论. 以下两则正合范畴的重要结论被推广作外三角范畴定义的一部分, 应当给出证明. 第一则结论是  $\text{Ext}^1$  具有双函子性.

**定理 1.1.8.** 假定例 1.1.5.  $\text{Ext}^1 : \mathcal{C}^{\text{op}} \times \mathcal{C} \rightarrow \mathbf{Ab}$  将一组对象  $(Z, X)$  对应至“所有形如  $0 \rightarrow X \rightarrow ? \rightarrow Z \rightarrow 0$  的 ses”的同构类. 对任意态射  $f : X \rightarrow X'$ ,  $\text{Ext}^1(Z, f)$  将短正合列  $\theta$  对应至  $\theta'$ , 机理是

$$\begin{array}{ccccccc} \theta & 0 & \longrightarrow & X & \longrightarrow & E & \longrightarrow & Z & \longrightarrow & 0 \\ \text{Ext}^1(f, Z) \downarrow & & & f \downarrow & \text{PO} & \downarrow & & \parallel & & \\ \theta' & 0 & \longrightarrow & X' & \dashrightarrow & F & \dashrightarrow & Z & \longrightarrow & 0 \end{array} \quad (1.1.3)$$

对  $g' : Z \rightarrow Z'$ , 可以通过拉回对偶地定义  $\text{Ext}^1(g', X) : \text{Ext}^1(Z', X) \rightarrow \text{Ext}^1(Z, X)$ . 今断言, 这是加法双函子, 其加法结构与 Baer 和匹配.

证明. 扩张的一般理论参阅 [Mit65] 章节 VII. 注意: Mitchell 通过 Baer 和证明  $\text{Ext}^1$  的双函子性; 为消解循环论证的疑虑, 以下直截了当地说明双函子性, 即证明如下引理.

引理 1.1.9. 对 ses  $\tau : 0 \rightarrow X \rightarrow M \rightarrow Z' \rightarrow 0$ , 态射  $f : X \rightarrow X'$  与  $g : Z \rightarrow Z'$ , 总有

$$\text{Ext}^1(g, X')(\text{Ext}^1(Z', f)(\tau)) = \text{Ext}^1(Z, f)(\text{Ext}^1(g, X)(\tau)). \quad (1.1.4)$$

方便起见, 将上式记作  $g^* f_* \tau = f_* g^* \tau$ .

以下证明  $f_* : g^* \tau \mapsto g^* f_* \tau$ , 即, 存在  $\varphi : G \rightarrow F$  使得下图中  $b'' = x' \circ \varphi$ , 且  $\star$  是推出:

$$\begin{array}{ccccccc} g^* f_* \tau & 0 & \longrightarrow & X' & \xrightarrow{y} & F & \xrightarrow{x'} & Z & \longrightarrow & 0 \\ \uparrow & & & \uparrow f & \star & \uparrow \varphi & & \parallel & & \\ g^* \tau & 0 & \longrightarrow & X & \xrightarrow{z} & G & \xrightarrow{b''} & Z & \longrightarrow & 0 \\ \uparrow & & & \parallel & & \downarrow g'' & \text{PB} & \downarrow g & & \\ \tau & 0 & \longrightarrow & X & \xrightarrow{a} & M & \xrightarrow{b} & Z' & \longrightarrow & 0 \\ \downarrow & & & \downarrow f & \text{PO} & \downarrow f' & & \parallel & & \\ f_* \tau & 0 & \longrightarrow & X' & \xrightarrow{a'} & E & \xrightarrow{x} & Z' & \longrightarrow & 0 \\ \downarrow & & & \parallel & & \uparrow g' & \text{PB} & \uparrow g & & \\ g^* f_* \tau & 0 & \longrightarrow & X' & \xrightarrow{y} & F & \xrightarrow{x'} & Z & \longrightarrow & 0 \end{array} \quad (1.1.5)$$

$\varphi$  由红, 蓝两组复合态射及右下方的拉回方块决定. 两组复合态射即

$$G \xrightarrow{f' \circ g''} E \xrightarrow{x} Z', \quad G \xrightarrow{b''} Z \xrightarrow{g} Z'. \quad (1.1.6)$$

由拉回的泛性质, 存在唯一的  $\varphi$  使得  $x' \circ \varphi = b''$  且  $f' \circ g'' = g' \circ \varphi$ . 因此右上方块交换. 为说明  $\star$  的交换性, 只需验证  $y \circ f$  与  $\varphi \circ z$  均是如下拉回问题的解  $\mathfrak{X}$ :

$$x \circ g' \circ \mathfrak{X} = g \circ x' \circ \mathfrak{X}. \quad (1.1.7)$$

自行追图较阅读连等式更为快捷, 遂略去检验过程. 由  $\text{cok } y \simeq \text{cok } z$ , 故  $\star$  是推出.  $\square$

备注 1.1.10. 实际上, 定理 1.1.8 的证明并不依赖于例 1.1.5. 如 [Mit65] 的章节 VII 所示,  $\text{Ext}^1(Z, X)$  可以取作 “Abel 类”. 若读者熟悉公理集合论, 大多数结论可推广至 “Abel 类”.

为规避过多技术性的细节, 本文一向承认例 1.1.5, 正如承认范畴的  $\text{Hom}$ -类是集合.

第二则结论是 Noether 同构. 为精简记号, 通常作如下约定.

记号 1.1.11. 使用  $\rightarrow$  ( $\twoheadrightarrow$ ) 表示容许单态射 (容许满态射). 例如, 正合范畴的 ses 形如  $X \rightarrow Y \rightarrow Z$ .

定理 1.1.12. 假定容许单态射  $i$  与  $j$  可复合作  $j \circ i$ , 则有三条 ses 作成的交换图:

$$\begin{array}{ccccc}
 X & \xrightarrow{i} & Y & \xrightarrow{p} & Z \\
 \parallel & & \downarrow j & & \downarrow j' \\
 X & \xrightarrow{j \circ i} & A & \xrightarrow{r} & W \\
 & & \downarrow q & & \downarrow q' \\
 & & B & \xlongequal{\quad} & B
 \end{array} \quad (1.1.8)$$

余核的反性质诱导了  $j'$  与  $q'$ . 今断言  $Z \xrightarrow{j'} W \xrightarrow{q'} B$  也是 ses.

证明. 右上方方块是推出拉回. 依照 EX2,  $j'$  是容许单态射, 从而嵌入某一 ses  $Z \xrightarrow{j'} W \xrightarrow{q''} B'$ . 依照推出方块,  $\text{cok } j \simeq \text{cok } j'$ , 从而  $q'$  与  $q''$  相差左复合一个同构. 这说明题设所示的态射序列是 ses.  $\square$

备注 1.1.13. 若记上述  $Z := Y/X$ ,  $W := A/X$ , 则 Noether 同构可表述为  $\frac{A/X}{Y/X} \simeq \frac{A}{Y}$ . 这是 Noether 同构的初始形态.

## 1.2 三角范畴

外三角是正合范畴与三角范畴的共同推广. 试回顾三角范畴的定义.

定义 1.2.1. 三角范畴由资料  $(\mathcal{C}, \Sigma, \mathcal{E})$  描述. 其中,

1.  $\mathcal{C}$  是加法范畴,
2.  $\Sigma : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C}$  是范畴的自等价, 称作平移函子,
3.  $\mathcal{E} = \{X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z \xrightarrow{w} \Sigma X\}$  是  $\mathcal{C}$  中好三角组成的类.

约定两则术语:

1. (三角射). 两个好三角间的态射描述作三元组  $(\alpha, \beta, \gamma)$ , 使得下图交换 (横行是好三角):

$$\begin{array}{ccccccc}
 X & \xrightarrow{u} & Y & \xrightarrow{v} & Z & \xrightarrow{w} & \Sigma X \\
 \downarrow \alpha & & \downarrow \beta & & \downarrow \gamma & & \downarrow \Sigma \alpha \\
 A & \xrightarrow{i} & B & \xrightarrow{j} & C & \xrightarrow{k} & \Sigma A
 \end{array} \quad (1.2.1)$$

2. (旋转). 下图中, 中行是好三角, 首 (尾) 行是其逆 (顺) 时针旋转:

$$\Sigma^{-1}Z \xrightarrow{-\Sigma^{-1}w} X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z \quad (\text{逆})$$

$$X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z \xrightarrow{w} \Sigma X \quad (1.2.2)$$

$$Y \xrightarrow{v} Z \xrightarrow{w} \Sigma X \xrightarrow{-\Sigma u} \Sigma Y \quad (\text{顺})$$

特别地, 好三角类满足以下公理:

TR1-1  $\mathcal{E}$  关于同构封闭. 具体地, 若式 (1.2.1) 是  $\mathcal{C}$  中通常的交换图, 且  $\alpha, \beta, \gamma$  都是同构, 则上行是好三角当且仅当下行是好三角;

TR1-2 任意态射  $u$  可嵌入某一好三角  $X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z \xrightarrow{w} \Sigma X$ ;

TR1-3 对任意对象  $X$ , 平凡三角  $0 \rightarrow X \xrightarrow{\text{id}_X} X \rightarrow 0$  是好三角;

TR2 好三角关于顺时针旋转封闭;

TR3 假定式 (1.2.1) 的上行与下行是好三角, 若图中仅存在  $\alpha$  与  $\beta$  使得  $\beta \circ u = i \circ \alpha$ , 则一定存在某一  $\gamma$  使得上图交换;

TR4 若下图中  $r_1, r_2$  与  $c_2$  均为好三角, 则存在虚线所示的好三角  $c_3$  使得所有方块交换:

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & c_2 & & c_3 & & \\
 r_1 & X & \xrightarrow{u} & Y & \xrightarrow{v} & W & \xrightarrow{w} \Sigma X \\
 & \parallel & & \downarrow a & & \downarrow & \parallel \\
 r_2 & X & \xrightarrow{x} & Z & \xrightarrow{y} & R & \xrightarrow{z} \Sigma X \\
 & & & \downarrow b & & \downarrow & \downarrow \Sigma u \\
 & & & S & \xlongequal{\quad} & S & \xrightarrow{c} \Sigma Y \\
 & & & \downarrow c & & \downarrow & \\
 & & & \Sigma Y & \xrightarrow{\Sigma v} & \Sigma W & 
 \end{array} . \quad (1.2.3)$$

备注 1.2.2. 关于三角范畴的定义见 [Ver96] 或 [Nee01]. 更通俗的读物是 [Mur07] 或 [May01]. 特别地, [May01] 指出 TR3 可由其余公理推出.

以下从正合范畴的视角“粗浅地”解释三角范畴; 诚然, 更好的工具是外三角范畴.

例子 1.2.3. 给定好三角  $X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z \xrightarrow{w} \Sigma X$ . 若将  $X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z$  类比作 ses, 则  $w \in \text{Ext}^1(Z, X)$  描述了扩张元. 特别地,  $\text{Ext}(Z, X) := (Z, \Sigma X)$ . TR1-1, TR1-2, TR3 类似核与余核泛性质的推论. TR1-3 即 Ex0. TR4 类似 Noether 同构.

命题 1.2.4. 以下是预三角范畴的直接推论 (无需 TR4). 证明细节见通常的教材.

1. (TR3 的加强). TR3 即是说, 给定式 (1.2.1) 中的  $\alpha$  与  $\beta$  使得图交换, 则有  $\gamma$  使得图交换. 实际上, 若给定  $\alpha, \beta, \gamma$  中任意两者使得图交换, 则一定存在第三者使得图交换.

证明. 依照 TR2 与自然同构  $(\Sigma(?), \Sigma(-)) \simeq (?, -)$  即得. □

2. (长正合列). 对任意好三角  $X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z \xrightarrow{w} \Sigma X$ , 有上同调函子的长正合列

$$\cdots \rightarrow (-, \Sigma^{-1}Z) \rightarrow (-, X) \rightarrow (-, Y) \rightarrow (-, Z) \rightarrow (-, \Sigma X) \rightarrow \cdots, \quad (1.2.4)$$

以及同调函子的长正合列

$$\cdots \rightarrow (\Sigma X, -) \rightarrow (Z, -) \rightarrow (Y, -) \rightarrow (X, -) \rightarrow (\Sigma^{-1}Z, -) \rightarrow \cdots. \quad (1.2.5)$$

3. (长正合列的推论). 若式 (1.2.1) 中  $\alpha, \beta$  与  $\gamma$  中有两者为同构, 则第三者也是同构.

证明. 以上同调函子为例, 下证明对任意  $A$ , 总有  $\ker(A, v) = \text{im}(A, u)$ . 给定  $\beta: A \rightarrow Y$ ,

$$\begin{array}{ccccccc} A & \xlongequal{\quad} & A & \longrightarrow & 0 & \longrightarrow & \Sigma A \\ \downarrow \alpha & & \downarrow \beta & & \downarrow \gamma & & \downarrow \Sigma \alpha \\ X & \xrightarrow{u} & Y & \xrightarrow{v} & Z & \xrightarrow{w} & \Sigma X \end{array} \quad (1.2.6)$$

若存在  $\alpha$  使得图交换, 则存在  $\gamma$  使得图交换. 因此  $\ker(A, v) \supseteq \text{im}(A, u)$ . 倒置  $\gamma$  与  $\alpha$  的选取顺序, 得  $\ker(A, v) \subseteq \text{im}(A, u)$ , 从正合列在  $(-, Y)$  处正合. 该正合列通过 TR2 右延, 通过 TR2 以及自然同构  $(\Sigma(?), \Sigma(-)) \simeq (?, -)$  左延.  $\square$

4. 好三角的直和也是好三角;

证明. 对  $i = 1, 2$ , 记好三角  $X_i \xrightarrow{u_i} Y_i \xrightarrow{v_i} Z_i \xrightarrow{w_i} \Sigma X_i$ . 记直和嵌入的好三角  $X_1 \oplus X_2 \xrightarrow{u_1 \oplus u_2} Y_1 \oplus Y_2 \xrightarrow{(a \ b)} Z_0 \xrightarrow{(c \ d)} \Sigma(X_1 \oplus X_2)$ . 由直和的泛性质构造交换图

$$\begin{array}{ccccccc} X_1 \oplus X_2 & \xrightarrow{u_1 \oplus u_2} & Y_1 \oplus Y_2 & \xrightarrow{v_1 \oplus v_2} & Z_1 \oplus Z_2 & \xrightarrow{w_1 \oplus w_2} & \Sigma X_1 \oplus \Sigma X_2 \\ \parallel & & \parallel & & \downarrow (i \ j) & & \parallel \\ X_1 \oplus X_2 & \xrightarrow{u_1 \oplus u_2} & Y_1 \oplus Y_2 & \xrightarrow{(a \ b)} & Z_0 & \xrightarrow{(c \ d)} & \Sigma X_1 \oplus \Sigma X_2 \end{array} \quad (1.2.7)$$

对所有对象与态射取米田嵌入  $E \mapsto (-, E)$ , 上下两行均是长正合列. 由五引理,  $(-, (i \ j))$  是自然同构. 由米田引理,  $(i \ j)$  是同构.  $\square$

5. (TR3 的特殊情形). 沿用交换图式 (1.2.1). 若  $\alpha, \beta$  与  $\gamma$  两者为同构, 则第三者必为同构.

证明. 对所有对象与态射取米田嵌入  $E \mapsto (-, E)$ . 由长正合列与五引理,  $(-, \alpha), (-, \beta)$  与  $(-, \gamma)$  均是自然同构. 最后由依照米田引理完成证明.  $\square$

6. (TR1-2 的加强). 任意态射可以以任意位置嵌入某一好三角; 若选定该位置, 则其嵌入的好三角在同构意义下唯一.

证明. 依照 TR2 与自然同构  $(\Sigma(?), \Sigma(-)) \simeq (?, -)$ , 态射的嵌入位置可以任意选定. 由上一条“TR3 的特殊情形”, 态射嵌入的好三角在同构意义下唯一.  $\square$

7. (TR2 的类似结论). 好三角关于逆时针旋转封闭. 顺 (逆) 时针旋转定义作式 (1.2.2).

证明. 选定好三角  $X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z \xrightarrow{w} \Sigma X$ . 下图上行是  $-\Sigma^{-1}w$  嵌入的好三角, 下行是逆时针旋转:

$$\begin{array}{ccccccc} \Sigma^{-1}Z & \xrightarrow{-\Sigma^{-1}w} & X & \xrightarrow{u'} & Y' & \xrightarrow{v'} & Z \\ \parallel & & \parallel & & \downarrow \varphi & & \parallel \\ \Sigma^{-1}Z & \xrightarrow{-\Sigma^{-1}w} & X & \xrightarrow{u} & Y & \xrightarrow{v} & Z \end{array} \quad (1.2.8)$$

下解释  $\varphi$  的选取方式. 对上下两行作顺时针旋转, 得好三角的交换图, 由“TR3 的加强”可得  $\varphi$  使得图交换. 由“TR3 的特殊情形”,  $\varphi$  是同构.  $\square$

**命题 1.2.5.** 对预三角范畴 (无需 TR4) 中的态射  $f$ , 以下命题等价:

1.  $f$  存在核;
2.  $f$  存在余核;
3.  $f$  在前后复合同构的意义下形如  $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} : X \oplus A \rightarrow Y \oplus A$ .

仅需证明 (1  $\rightarrow$  3). 反方向是显然的. 对 (2  $\leftrightarrow$  3) 的证明是对偶的.

证明. 记  $i : K \rightarrow U$  是  $f : U \rightarrow V$  的核. 记好三角  $R \xrightarrow{r} K \xrightarrow{i} U \xrightarrow{s} \Sigma R$ , 由长正合列知  $\text{im}(-, r) = \ker(-, i) = 0$ . 从而  $r$  是零态射. 下图说明  $i$  是可裂单态射:

$$\begin{array}{ccccccc} R & \xrightarrow{r} & K & \xrightarrow{i} & U & \xrightarrow{s} & \Sigma R \\ \downarrow & & \parallel & & \downarrow p & & \downarrow \\ 0 & \longrightarrow & K & \xlongequal{\quad} & K & \longrightarrow & 0 \end{array} \quad (1.2.9)$$

将  $i$  嵌入好三角  $K \xrightarrow{i} U \xrightarrow{q} C \xrightarrow{z} \Sigma K$ . 由“TR3 的特殊情形”, 得同构的好三角

$$\begin{array}{ccccccc} K & \xrightarrow{i} & U & \xrightarrow{s} & C & \longrightarrow & \Sigma K \\ \parallel & & \downarrow \begin{pmatrix} p \\ s \end{pmatrix} & & \parallel & & \parallel \\ K & \xrightarrow{\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}} & K \oplus C & \xrightarrow{\begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix}} & C & \longrightarrow & \Sigma K \end{array} \quad (1.2.10)$$

这说明  $f$  形如  $K \oplus C \xrightarrow{(0 \ \varphi)} V$ , 其中  $\varphi$  是单态射. 同样的论证说明  $\varphi$  是可裂单, 且由直和关系  $V \simeq L \oplus D$ . 此时,  $f$  形如  $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} C \oplus K \rightarrow D \oplus L$ .  $\square$

推论 1.2.6. 给定好三角  $X \xrightarrow{u} Y \xrightarrow{v} Z \xrightarrow{w} \Sigma X$ , 则以下命题等价: (1)  $u$  是单态射; (2)  $u$  是可裂单态射; (3)  $v$  是满态射; (4)  $v$  是可裂满态射;  $w = 0$ . 特别地, 所有可裂单 (满) 都有相应的直和项, 即定义 3.3.1 定义的弱幂等完备性.

例子 1.2.7. 以下是一些注意事项.

1.  $\Sigma$  是范畴自等价, 这并不意味着  $\Sigma X \simeq X$ .
2. TR3 中补全的态射的方式未必唯一.

### 1.3 同伦的推出拉回

本节所述的“同伦的推出拉回”在外三角范畴的图表定理中大有作用. 以下给出一侧预加范畴中的观察.

例子 1.3.1. 给定预加范畴  $\mathcal{A}$  中的交换方块 (左), 以及其诱导的复形 (右):

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{f} & Y \\ h \downarrow & & \downarrow g \\ Z & \xrightarrow{l} & W \end{array} \quad 0 \longrightarrow X \xrightarrow{\begin{pmatrix} f \\ h \end{pmatrix}} Y \oplus Z \xrightarrow{\begin{pmatrix} g & -l \end{pmatrix}} W \longrightarrow 0 \quad (1.3.1)$$

以下是一则转述定义即得的引理.

引理 1.3.2. 左图是拉回 (推出), 当且仅当右图左正合 (右正合).

称某交换方块是拉回 (推出), 若相应的态射方程存在唯一的解. 倘若去除唯一性, 则称该交换方块是弱拉回 (弱推出). 以下是一则转述定义即得的引理.



引理 1.3.3. 左图是弱拉回, 当且仅当以下是函子的正合列:

$$(-, X) \xrightarrow{(f)_*} (-, Y) \oplus (-, Z) \xrightarrow{(g-l)_*} (-, W). \quad (1.3.2)$$

左图是弱推出, 当且仅当以下是函子的正合列:

$$(W, -) \xrightarrow{(g-l)^*} (Y, -) \oplus (Z, -) \xrightarrow{(f_h)^*} (X, -). \quad (1.3.3)$$

命题 1.3.4. 由正合范畴的 Noether 同构, 容许单态射  $X \rightarrow Y$  与容许满态射  $X \rightarrow Z$  的推出是推出拉回方块. 特别地, 这一推出拉回方块诱导的 ses 是正合范畴的 ses.

证明. 只需证明, 若  $i: A \rightarrow B$  是容许单态射, 则对任意  $f: A \rightarrow C$ ,  $(\begin{smallmatrix} i \\ f \end{smallmatrix})$  也是容许单态射. 以下证明一则更强的引理.

引理 1.3.5. 若  $q \circ p$  是容许单态射,  $q$  是容许满态射, 则  $p$  是容许单态射.

证明. 对态射  $q$  与  $q \circ p$  使用 Noether 同构, 得以下交换图:

$$\begin{array}{ccccc} X & & A & \xlongequal{\quad} & A \\ & \searrow s & \downarrow & \downarrow p & \downarrow i \\ & & F & \xrightarrow{p'} & E & \twoheadrightarrow & Z \\ & \searrow 1_X & \downarrow \lambda & \square & \downarrow q & & \parallel \\ & & X & \xrightarrow{q \circ p} & Y & \twoheadrightarrow & Z \end{array} \quad (1.3.4)$$

最左纵列的短正合列可裂. 考虑可裂 ses  $X \xrightarrow{s} F \twoheadrightarrow A$  知  $s$  是容许单态射. 由蓝线所示的拉回问题, 得  $p = p' \circ s$  是容许单态射的复合, 故  $p$  也是容许单态射.  $\square$

注意, 以上引理的证明未使用弱幂等完备的假定.  $\square$

定义 1.3.6. (正合范畴中同伦的推出拉回). 称交换图是正合范畴中同伦的推出拉回方块, 若其诱导的链复形是正合范畴的 ses.

例子 1.3.7. 将 Abel 范畴与所有 ses 作成正合范畴, 则推出拉回方块必然是同伦的推出拉回方块.

定理 1.3.8. (正合范畴的同伦推出拉回方块). 以下五类是正合范畴的同伦推出拉回方块:

$$\begin{array}{cccc} \begin{array}{ccc} \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot \\ \downarrow & & \downarrow \\ \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot \end{array} & \begin{array}{ccc} \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot \\ \downarrow & & \downarrow \\ \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot \end{array} & \begin{array}{ccc} \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot \\ \downarrow & & \downarrow \\ \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot \end{array} & \begin{array}{ccc} \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot \\ \downarrow & & \downarrow \\ \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot \end{array} \\ \text{PO} & \text{PO} & \text{PB} & \text{PB} \end{array} \quad (1.3.5)$$

证明. 使用引理: 若  $i$  是容许单态射 ( $p$  是容许满态射), 则  $(\begin{smallmatrix} i \\ p \end{smallmatrix})$  是容许单态射 ( $(p?)$  是容许满态射).  $\square$

定义 1.3.9. (三角范畴中同伦的推出拉回). 称交换图是三角范畴中同伦的推出拉回方块, 若其诱导的三项链复形是三角范畴中好三角前三项.

满足 TR1-TR3 的加法范畴称作预三角范畴. 对预三角范畴, 下给出一则八面体公理的等价公理, 更多等价公理 (不包括以下) 可参阅 [Nee91].

**定理 1.3.10.** 预三角范畴是三角范畴, 当且仅当其满足如下等价公理.

1. 八面体公理.

2. 给定红色处态射  $a_1$  与  $b_1$ , 则可以补全下图中的三个好三角与一处三角射:

$$\begin{array}{ccccccc}
 X & \xrightarrow{\begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix}} & Y_2 \oplus Y_1 & \xrightarrow{(b_2 - a_2)} & Z & \xrightarrow{\mu\lambda} & \Sigma X \\
 \textcolor{red}{X} & \xrightarrow{\textcolor{red}{a_1}} & \textcolor{red}{Y_2} & \longrightarrow & W & \xrightarrow{\mu} & \Sigma X \\
 \downarrow \textcolor{red}{b_1} & & \downarrow b_2 & & \parallel & & \downarrow \Sigma b_1 \\
 \textcolor{red}{Y_1} & \xrightarrow{a_2} & Z & \xrightarrow{\lambda} & W & \longrightarrow & \Sigma Y_1
 \end{array} \quad (1.3.6)$$

3. 给定红色个好三角, 同伦推出拉回方块, 以及第一行的好三角. 此时存在  $\mu\lambda = \delta$  使得下图包含三个好三角与一处三角射:

$$\begin{array}{ccccccc}
 X & \xrightarrow{\begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix}} & Y_2 \oplus Y_1 & \xrightarrow{(b_2 - a_2)} & Z & \xrightarrow{\delta} & \Sigma X \\
 \textcolor{red}{X} & \xrightarrow{\textcolor{red}{a_1}} & \textcolor{red}{Y_2} & \longrightarrow & W & \xrightarrow{\mu} & \Sigma X \\
 \downarrow \textcolor{red}{b_1} & & \downarrow \textcolor{red}{b_2} & & \parallel & & \downarrow \Sigma b_1 \\
 \textcolor{red}{Y_1} & \xrightarrow{\textcolor{red}{a_2}} & Z & \xrightarrow{\lambda} & W & \longrightarrow & \Sigma Y_1
 \end{array} \quad (1.3.7)$$

证明. (1  $\rightarrow$  2). 若给定  $a_1$  与  $b_2$ , 则八面体公理 (下图上) 诱导了三角射 (下图下):

$$\begin{array}{ccccccc}
 \textcolor{red}{X} & \xrightarrow{\begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix}} & \textcolor{red}{Y_2} \oplus \textcolor{red}{Y_1} & \xrightarrow{(b_2, -a_2)} & Z & \xrightarrow{\mu\lambda} & \Sigma X \\
 \parallel & & \downarrow \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} & & \downarrow \lambda & & \parallel \\
 X & \xrightarrow{a_1} & Y_2 & \xrightarrow{\lambda b_2} & W & \xrightarrow{\mu} & \Sigma X \\
 & & \downarrow 0 & & \downarrow t & & \downarrow (\Sigma a_1) \\
 & & \Sigma Y_1 & \xrightarrow{=} & \Sigma Y_1 & \xrightarrow{\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}} & \Sigma Y_2 \oplus \Sigma Y_1 \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & \\
 & & \Sigma Y_2 \oplus \Sigma Y_1 & \longrightarrow & \Sigma Z & & 
 \end{array} \quad (1.3.8)$$

$$\begin{array}{ccccccc}
 \textcolor{red}{X} & \xrightarrow{\textcolor{red}{a_1}} & \textcolor{red}{Y_2} & \xrightarrow{\lambda b_2} & W & \xrightarrow{\mu} & \Sigma X \\
 \downarrow \textcolor{red}{b_1} & & \downarrow b_2 & & \parallel & & \downarrow \Sigma b_1 \\
 \textcolor{red}{Y_1} & \xrightarrow{a_2} & Z & \xrightarrow{\lambda} & W & \xrightarrow{t} & \Sigma Y_1
 \end{array}$$

此处省略校验过程.

(2  $\rightarrow$  1). 沿用 (1  $\rightarrow$  2) 中构造即可.

(3 → 1). 依照题设补全四个好三角

$$\begin{array}{ccccccc}
 \Sigma^{-1}W & \xrightarrow{-\Sigma^{-1}\mu} & X & \xrightarrow{a_1} & Y_2 & \xrightarrow{\lambda b_2} & W \\
 \parallel & & \downarrow b_1 & \blacksquare & \downarrow b_2 & & \parallel \\
 \Sigma^{-1}W & \xrightarrow{-b_1(\Sigma^{-1}\mu)} & Y_1 & \xrightarrow{a_2} & Z & \xrightarrow{\lambda} & W \\
 & & \downarrow la_2 & & \downarrow l & ? & \downarrow -\mu \\
 & & L & \xlongequal{\quad} & L & \xrightarrow{k} & \Sigma X \\
 & & \downarrow k & & \downarrow (\Sigma a_1)k & & \\
 & & \Sigma X & \xrightarrow{\Sigma a_1} & \Sigma Y_2 & & 
 \end{array} \quad (1.3.9)$$

由同伦推出拉回方块  $\blacksquare$ , 上图除绿色方块  $?$  处均交换. 依照 3 的题设,

$$X \xrightarrow{\begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix}} Y_2 \oplus Y_1 \xrightarrow{(-b_2 \ a_2)} Z \xrightarrow{kl} \Sigma X \quad (1.3.10)$$

与

$$X \xrightarrow{\begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix}} Y_2 \oplus Y_1 \xrightarrow{(b_2 \ -a_2)} Z \xrightarrow{\mu\lambda} \Sigma X \quad (1.3.11)$$

均是好三角. 同时  $\mu\lambda = \delta = -kl$ .

(1 → 3). 沿用 (1 → 2) 中构造即可. □

备注 1.3.11. 特别地, 八面体公理中的方块  $\star$  是同伦推出拉回.

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & c_2 & & c_3 & & \\
 r_1 & X & \xrightarrow{u} & Y & \xrightarrow{v} & W & \xrightarrow{w} \Sigma X \\
 & \parallel & & \downarrow a & \star & \downarrow & \parallel \\
 r_2 & X & \xrightarrow{x} & Z & \xrightarrow{y} & R & \xrightarrow{z} \Sigma X \\
 & & & \downarrow b & & \downarrow & \downarrow \Sigma u \\
 & & & S & \xlongequal{\quad} & S & \xrightarrow{c} \Sigma Y \\
 & & & \downarrow c & & \downarrow & \\
 & & & \Sigma Y & \xrightarrow{\Sigma v} & \Sigma W & 
 \end{array} \quad (1.3.12)$$

特别地, 考虑以下三角射

$$\begin{array}{ccccccc}
 \cdot & \longrightarrow & \cdot & \longrightarrow & \cdot & \longrightarrow & \cdot \\
 \parallel & & \downarrow \alpha & & \downarrow \beta & & \parallel \\
 \cdot & \longrightarrow & \cdot & \longrightarrow & \cdot & \longrightarrow & \cdot
 \end{array}, \quad (1.3.13)$$

则存在  $\beta$  使得中间方块为同伦的推出拉回. 由八面体公理即证.

**例子 1.3.12.** 仍将好三角的第三项态射“视作”ses 代表的扩张元, 则有三角射

$$\begin{array}{ccccccc}
 \cdot & \longrightarrow & \cdot & \longrightarrow & \cdot & \xrightarrow{\delta} & \cdot \\
 \downarrow f & & \downarrow & & \parallel & & \downarrow \Sigma f \\
 \cdot & \longrightarrow & \cdot & \longrightarrow & \cdot & \xrightarrow{f_*\delta} & \cdot \\
 & & & & & & \\
 \cdot & \longrightarrow & \cdot & \longrightarrow & \cdot & \xrightarrow{g^*\varepsilon} & \cdot \\
 \parallel & & \downarrow & & \downarrow g & & \parallel \\
 \cdot & \longrightarrow & \cdot & \longrightarrow & \cdot & \xrightarrow{\varepsilon} & \cdot
 \end{array} \quad (1.3.14)$$

以上, “ses 的推出拉回”由态射复合简练地描述:

$$(\Sigma f) \circ \delta = f_*\delta, \quad \varepsilon \circ g = g^*\varepsilon. \quad (1.3.15)$$

## 2 初探外三角范畴

### 2.1 基本定义

外三角范畴的第一手资料是 [NP19].

**定义 2.1.1.** (外三角范畴的基本资料). 外三角范畴描述作三元组  $(\mathcal{C}, \mathbb{E}, \mathfrak{s})$ . 其中  $\mathcal{C}$  是加法范畴, 配有双函子

$$\mathbb{E} : \mathcal{C}^{\text{op}} \times \mathcal{C} \rightarrow \mathbf{Ab}. \quad (2.1.1)$$

Abel 群的  $\mathbb{E}(Z, X)$  中元素称作扩张元, 记作  $(X, \delta, Z)$ , 通常简写作  $\delta$ .

记函子范畴  $\mathcal{C}' := \mathcal{C}^{1 \rightarrow 2 \rightarrow 3}$ , 定义  $\mathcal{C}'$  上的等价关系  $\simeq$  如式 (2.1.2):

$$\begin{array}{ccccc} X & \longrightarrow & F & \longrightarrow & Z \\ \parallel & & \simeq \downarrow \varphi & & \parallel \\ X & \longrightarrow & E & \longrightarrow & Z \end{array} \quad \varphi \text{ 是同构}. \quad (2.1.2)$$

定义“类的映射” $\mathfrak{s}$  如下:

$$\mathfrak{s} : \mathbb{E}(Z, X) \rightarrow \mathcal{C}' / \simeq, \quad \delta \mapsto [X \xrightarrow{a} Y \xrightarrow{b} Z], \quad (2.1.3)$$

以上明确了  $(\mathcal{C}, \mathbb{E}, \mathfrak{s})$  的类型. 方便起见, 引入以下记号.

**定义 2.1.2.** (推出与拉回). 记  $f_* : \mathbb{E}(X, f)$ . 一个兴许更好的理解方式是,  $f_*$  是一族自然变换,  $\mathbb{E}(X, f)$  即  $(f_*)_X$ . 对偶地记  $g^* := \mathbb{E}(g, Z)$ .

下面给出外三角范畴的公理.

**定义 2.1.3.** (外三角范畴的公理). 设  $(\mathcal{C}, \mathbb{E}, \mathfrak{s})$  如上. 称其为外三角范畴, 若满足以下公理.

ET1  $\mathbb{E}$  是加法双函子. 双函子性即  $f_* g^* = g^* f_*$ , 可对比定理 1.1.8 阅读.

ET2-1 显然商函子  $\mathcal{C}^{1 \rightarrow 2 \rightarrow 3} \rightarrow \mathcal{C}'$  保持直和. 今约定  $\mathfrak{s}$  满足如下两则性质:

- (a) 若  $\mathfrak{s}(\delta)$  属于可裂 ses 所在的类, 则必有  $\delta = 0$ ;
- (b)  $\mathfrak{s}(\delta \oplus \delta') = \mathfrak{s}(\delta) \oplus \mathfrak{s}(\delta')$ . 其中,  $\delta \in \mathbb{E}(Z, X)$ ,  $\delta' \in \mathbb{E}(Z', X')$ , 以及

$$(\delta \oplus \delta') \in \mathbb{E}(Z, X) \oplus \mathbb{E}(Z', X') \subseteq \mathbb{E}(Z \oplus Z', X \oplus X'). \quad (2.1.4)$$

ET2-2 若有扩张元的等式  $f_* \delta = g^* \delta'$ , 则存在虚线处态射使得右图交换:

$$\begin{array}{ccccc} \mathbb{E}(Z, X) & & \delta & & \mathfrak{s}(\delta) : X \longrightarrow F \longrightarrow Z \\ \downarrow f_* & & \downarrow & & \downarrow f \quad \quad \quad \downarrow h \quad \quad \quad \downarrow g \\ \mathbb{E}(Z, X') & & f_* \delta = g^* \delta' & & X' \longrightarrow E \longrightarrow Z' \\ \uparrow g^* & & \uparrow & & \uparrow \mathfrak{s}(\delta') : \\ \mathbb{E}(Z', X') & & \delta' & & \end{array} \quad (2.1.5)$$

ET3 若存在  $a$  与  $b$  使得下图左侧方块交换, 则存在  $c$  使得  $c^* \eta = a_* \delta$ , 同时下图交换

$$\begin{array}{ccccc} \mathfrak{s}(\delta) : & X & \longrightarrow & F & \longrightarrow & Z \\ & \downarrow a & & \downarrow b & & \downarrow c \\ \mathfrak{s}(\eta) : & X' & \longrightarrow & E & \longrightarrow & Z' \end{array} \quad (2.1.6)$$

ET3' 对偶地, 若存在  $b$  与  $c$  使得下图右侧方块交换, 则存在  $a$  使得  $c^*\eta = a_*\delta$ , 同时下图交换

$$\begin{array}{ccccc} \mathfrak{s}(\delta) & : & X & \longrightarrow & F & \longrightarrow & Z \\ & & \downarrow a & & \downarrow b & & \downarrow c \\ \mathfrak{s}(\eta) & : & X' & \longrightarrow & E & \longrightarrow & Z' \end{array} \quad (2.1.7)$$

ET4 任给定以下  $T$  形图, 则可以补全虚线所示的  $\vdash$  形图使得下图交换,

$$\begin{array}{ccccc} & & \mathfrak{s}(\eta) & & \mathfrak{s}(\eta') \\ & & \cdots & & \cdots \\ \mathfrak{s}(\delta) & : & A & \xrightarrow{x} & B & \xrightarrow{y} & C \\ & & \parallel & & \downarrow z & & \downarrow u \\ \mathfrak{s}(\delta') & : & A & \dashrightarrow^{zx} & D & \dashrightarrow^v & F \\ & & & & \downarrow wv & & \downarrow w \\ & & & & E & \xlongequal{\quad} & E \end{array} \quad (2.1.8)$$

同时  $u^*\delta' = \delta$ ,  $y_*\eta = \eta'$ , 以及  $x_*\delta' = w^*\eta$ .

ET4' 对调式 (2.1.8) 中虚线箭头与实线箭头, 其表述与 ET4 对偶.

定义 2.1.4. (外三角范畴的术语). 以下是外三角范畴的通用术语.

1. 称  $\mathfrak{s}(\delta)$  为扩张元  $\delta$  的**加法实现** (简称**实现**). “加法”的含义见 ET2-1, “实现”的含义见 ET2-2. 即便扩张元的实现是一个等价类, 本文也使用“实现”指代该等价类中的任意代表元, 这通常不会引起矛盾.
2. 若  $X \xrightarrow{x} Y \xrightarrow{y} Z$  是扩张元  $\delta$  的加法实现, 则记作

$$A \xrightarrow{x} B \xrightarrow{y} C \dashrightarrow^{\delta} \quad (2.1.9)$$

图中虚箭头  $\dashrightarrow^{\delta}$  用于标记加法实现对应的扩张元, 并非确指的态射. 称  $x$  是  **$\mathbb{E}$ -inflation** (简称 **inflation**),  $y$  是  **$\mathbb{E}$ -deflation** (简称 **deflation**). 以上序列是  **$\mathbb{E}$ -三角** 或  **$\mathbb{E}$ -conflation** (简称 **conflation**). 若同时涉及正合范畴与外三角范畴, 本文使用“正合范畴的 inflation/deflation/conflation”这一全称指代正合范畴中的相应概念.

3. 回顾式 (2.1.5). 称  $(f, g) : \delta \rightarrow \delta'$  是**扩张元的态射**, 若  $f_*\delta = g^*\delta'$ . 称  $(f, h, g)$  是实现之间的态射, 若  $(f, g)$  是扩张元的态射且式 (2.1.5) 交换.
4. 扩张元的推出与拉回诱导了实现的“推出”与“拉回”. 类似三角范畴的余积变换与积变换, 实现的“推出”与“拉回”未必是范畴中的推出与拉回. 方便起见, 我们仍称之为**推出**与**拉回**. 外三角范畴的图表定理通常不涉及范畴意义下的推出与拉回.

我们类比三角范畴与正合范畴, 解释上述公理的动机如下.

例子 2.1.5. ET2-2, ET3 与 ET3' 涉及两处交换方块和一处扩张元的态射, 姑且“视作”三个交换方块. 这三条公理类似三角范畴中三角射的“二推三”准则. ET4 (ET4') 类似正合范畴中的 Noether 同构, 其包含三个交换方块与三个恒等式, “对应” (见例 1.3.12) 三角范畴 TR4 中的六个交换方块.

**命题 2.1.6.** Conflation 关于同构封闭.

证明. 假定以下交换图的首行是  $\delta$  的实现,  $\alpha, \beta$  与  $\gamma$  是同构:

$$\begin{array}{ccccc} A & \xrightarrow{f} & B & \xrightarrow{g} & C \xrightarrow{\delta} \\ \downarrow \alpha & & \downarrow \beta & & \downarrow \gamma \\ A' & \xrightarrow{f'} & B' & \xrightarrow{g'} & C' \end{array} . \quad (2.1.10)$$

任取  $\delta' := (\gamma^{-1})^* \alpha_* \delta$  的实现. 考虑扩张元的态射  $(\alpha, \gamma) : \delta \rightarrow \delta'$ , 依照 **ET2-1** 补全实现之间的态射  $(\alpha, \beta', \gamma)$ . 由于  $\beta' \circ \beta^{-1}$  是同构, 依照  $C'$  的构造可知上图下行也是  $\delta'$  的实现.  $\square$

**定理 2.1.7.** 外三角范畴的反范畴也是外三角范畴.

证明. 容易验证.  $\square$

## 2.2 六项正合列

本节解释 conflation 诱导的六项正合列.

**定理 2.2.1.** (加法充实的米田引理). 假定  $\mathcal{C}$  是加法范畴,  $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathbf{Ab}$  是加法函子. 对任意  $X \in \mathcal{C}$ , 存在以下 Abel 群的自然同构:

$$F(X) \simeq ((X, -), F(-))_{\text{Funct}(\mathcal{C}, \mathbf{Ab})}, \quad a \mapsto [f \mapsto F(f)(a)], \quad \theta_X(1_X) \leftarrow \theta. \quad (2.2.1)$$

假定  $G : \mathcal{C}^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Ab}$  是反变加法函子. 对任意  $X \in \mathcal{C}$ , 存在以下 Abel 群的自然同构:

$$G(X) \simeq ((-, X), G(-))_{\text{Funct}(\mathcal{C}^{\text{op}}, \mathbf{Ab})}, \quad b \mapsto [f \mapsto G(f)(b)], \quad \psi_X(1_X) \leftarrow \psi. \quad (2.2.2)$$

证明. 熟知. 例如可查阅 [Kel82] 的 2.1 章节.  $\square$

依照 [Yon60] 中隐约显现的动机, 米田引理的初衷或许是为了解释短正合列诱导长正合列时的连接态射. 我们将这一观点提炼作以下定义.

**定义 2.2.2.** ( $\delta_{\#}$  与  $\delta^{\#}$ ). 给定 conflation

$$A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{g} C \dashrightarrow \quad (2.2.3)$$

定义自然变换  $\delta_{\#} : (-, C) \rightarrow \mathbb{E}(-, A)$ ,  $g \mapsto \delta_{\#}(g) := g^* \delta$ . 依照米田引理, 这对应  $\delta \in \mathbb{E}(A, C)$ .

定义自然变换  $\delta^{\#} : (A, -) \rightarrow \mathbb{E}(C, -)$ ,  $f \mapsto \delta^{\#}(f) := f_* \delta$ . 依照米田引理, 这对应  $\delta \in \mathbb{E}(A, C)$ .

**备注 2.2.3.** 下标  $\delta_{\#}$  表示扩张元“被拉回”, 上标  $\delta^{\#}$  表示扩张元“被推出”. 在书写长正合列时, 我们会发现这一角标朝向的合理性.

**定理 2.2.4.** (五项正合列). 由公理 **ET1-ET3**, 以下是函子的正合列:

$$(C, -) \xrightarrow{- \circ g} (B, -) \xrightarrow{- \circ f} (A, -) \xrightarrow{\delta^{\#}} \mathbb{E}(C, -) \xrightarrow{g^*} \mathbb{E}(B, -) \quad (2.2.4)$$

换言之, 以上序列在中间三点正合.

证明.  $((B, -)$  处的正合性). 任意选定  $X$ , 试观察下图:

$$\begin{array}{ccccccc} A & \xrightarrow{f} & B & \xrightarrow{g} & C & \dashrightarrow^{\delta} & \\ \downarrow \alpha & & \downarrow \beta & & \downarrow \gamma & & \\ 0 & \longrightarrow & X & \xlongequal{\quad} & X & \dashrightarrow^0 & \end{array} \quad (2.2.5)$$

假定  $\beta \in \ker(f, X)$ . 由 ET3, 存在  $\gamma$  使得上图交换, 因此  $\beta \in \operatorname{im}(g, X)$ . 反之, 若  $\beta = \gamma \circ g$ , 则依照 ET3,  $\beta \circ f = 0$ , 故  $\beta \in \ker(f, X)$ . 因此  $\ker(f, X) = \operatorname{im}(g, X)$ .

$((A, -)$  处的正合性). 下证明  $\delta^\sharp \circ (- \circ f) = 0$ . 以下交换图表明  $f_*\delta = (1_C)^*0 = 0$ :

$$\begin{array}{ccccccc} A & \xrightarrow{f} & B & \xrightarrow{g} & C & \dashrightarrow^{\delta} & \\ \downarrow f & & \downarrow \binom{1}{g} & & \parallel & & \\ B & \xrightarrow{\binom{1}{0}} & B \oplus C & \xrightarrow{(0 \ 1)} & C & \dashrightarrow^0 & \end{array} \quad (2.2.6)$$

任取  $h: A \rightarrow X$ , 得

$$\delta^\sharp \circ (h \circ f) = (hf)_*\delta = h_*(f_*\delta) = 0. \quad (2.2.7)$$

反之, 若  $\delta^\sharp(h) = h_*\delta = 0$ , 则有如下实现的态射

$$\begin{array}{ccccccc} A & \xrightarrow{f} & B & \xrightarrow{g} & C & \dashrightarrow^{\delta} & \\ \downarrow h & & \downarrow \binom{a}{b} & & \parallel & & \\ X & \xrightarrow{\binom{1}{0}} & X \oplus C & \xrightarrow{(0 \ 1)} & C & \dashrightarrow^0 & \end{array} \quad (2.2.8)$$

解得  $h = a \circ f$ , 从而  $h \in \operatorname{im}(- \circ f)$ . 综上,  $\ker \delta^\sharp = \operatorname{im}(- \circ f)$ .

$(\mathbb{E}(C, -)$  处的正合性). 下证明  $g^* \circ \delta^\sharp = 0$ . 类似式 (2.2.6) 的推导, 得  $g^*\delta = 0$ . 反之, 若  $\eta \in \ker g^* \subseteq \mathbb{E}(C, X)$ , 则存在  $q$  使得下图中  $g = b \circ q$ :

$$\begin{array}{ccccccc} A & \xrightarrow{f} & B & \xrightarrow{g} & C & \dashrightarrow^{\delta} & \\ \downarrow \vdots & & \downarrow q & & \parallel & & \\ X & \xrightarrow{a} & F & \xrightarrow{b} & C & \dashrightarrow^{\eta} & \\ \parallel & & \uparrow (p \ q) & & \uparrow g & & \\ X & \xrightarrow{\binom{1}{0}} & X \oplus B & \xrightarrow{(0 \ 1)} & B & \dashrightarrow^0 & \end{array} \quad (2.2.9)$$

依照 ET3, 得  $\eta$  是  $\delta$  的推出. 综上,  $\ker g^* = \operatorname{im} \delta^\sharp$ . □

依照外三角范畴的反范畴也是外三角范畴, 我们得到如下对偶的定理.

**定理 2.2.5.** (五项正合列). 由公理 ET1-ET3, 以下是函子的正合列:

$$(-, A) \xrightarrow{f \circ -} (-, B) \xrightarrow{g \circ -} (-, C) \xrightarrow{\delta^\sharp} \mathbb{E}(-, A) \xrightarrow{f^*} \mathbb{E}(-, B) \quad (2.2.10)$$

证明. 证明略. □

ET4 (ET4') 公理将以上五项正合列延长为六项.

**定理 2.2.6.** (六项正合列). 由公理 ET1-ET4, 以下是函子的正合列:

$$(C, -) \xrightarrow{- \circ g} (B, -) \xrightarrow{- \circ f} (A, -) \xrightarrow{\delta^\sharp} \mathbb{E}(C, -) \xrightarrow{g^*} \mathbb{E}(B, -) \xrightarrow{f^*} \mathbb{E}(A, -) \quad (2.2.11)$$

换言之, 以上序列在中间四点正合.

证明. 我们仅证明  $\mathbb{E}(B, -)$  处的正合性. 函子性表明  $f^* \circ g^* = (g \circ f)^* = 0$ . 任取  $\eta \in \ker f^* \subseteq \mathbb{E}(B, X)$ , 依照 ET4' 构造下图:

$$\begin{array}{ccccc}
 X & \xrightarrow{\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}} & A \oplus X & \xrightarrow{(1 \ 0)} & A & \xrightarrow{0} & \\
 \parallel & & \downarrow (x \ y) & & \downarrow f & & \\
 X & \xrightarrow{a} & E & \xrightarrow{b} & B & \xrightarrow{\eta} & \\
 & & \downarrow & & \downarrow g & & \\
 & & C & \xlongequal{\quad} & C & & \\
 & & \downarrow \varepsilon & & \downarrow \delta & & 
 \end{array} . \quad (2.2.12)$$

计算得

$$\eta = (0 \ 1)_* \left( \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}_* \eta \right) = (0 \ 1)_* (g^* \varepsilon) = g^* ((0 \ 1)_* \varepsilon) \in \operatorname{im} g^*. \quad (2.2.13)$$

综上,  $\ker f^* = \operatorname{im} g^*$ . □

依照外三角范畴的反范畴也是外三角范畴, 我们得到如下对偶的定理.

**定理 2.2.7.** (六项正合列). 由公理 ET1-ET4, 以下是函子的正合列:

$$(-, A) \xrightarrow{f \circ -} (-, B) \xrightarrow{g \circ -} (-, C) \xrightarrow{\delta_\#} \mathbb{E}(-, A) \xrightarrow{f^*} \mathbb{E}(-, B) \xrightarrow{g^*} \mathbb{E}(-, C) \quad (2.2.14)$$

证明. 证明略. □

## 2.3 五项正合列的推论

本小节中给出五项正合列若干推论, 所有命题无需 ET4 或 ET4'. 任取 conflation

$$A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{g} C \xrightarrow{\delta} . \quad (2.3.1)$$

**命题 2.3.1.** Conflation 中, 态射复合为 0.

**命题 2.3.2.**  $g$  是  $f$  的弱余核, 即,  $\ker(- \circ f) = \operatorname{im}(- \circ g)$ ; 对偶地  $f$  是  $g$  的弱核, 即,  $\ker(g \circ -) = \operatorname{im}(f \circ -)$ .

**命题 2.3.3.**  $g$  是单态射, 当且仅当  $f$  是零态射, 亦当且仅当  $g$  是可裂单.

证明.  $g$  单即  $(g \circ -)$  单, 亦即  $(f \circ -) = 0$ , 亦即  $f$  零, 亦即  $(- \circ f) = 0$ , 亦即  $(- \circ g)$  满, 亦即  $g$  可裂单. 此处涉及一则简单的引理.

**引理 2.3.4.** 给定任意范畴中的态射  $g$ .  $(g \circ -) = \operatorname{Hom}(-, g)$  是函子的满射, 当且仅当  $g$  是可裂单态射.

证明. 若  $g : A \rightarrow B$  是可裂满, 则  $(g \circ -)$  有右逆元, 故满. 反之, 若  $(g \circ -)$  满, 则  $(1_B) \in \operatorname{Hom}(g, B)$ , 即存在  $h : A \rightarrow B$  使得  $g \circ h = 1_B$ , 故  $g$  可裂满. □

□

对偶地, 有如下命题.

**命题 2.3.5.**  $f$  是满态射, 当且仅当  $g$  是零态射, 亦当且仅当  $f$  是可裂满.



证明. 略.  $\square$

备注 2.3.6. 由于  $\mathcal{C}$  未必弱幂等完备, 单的 deflation 未必是 inflation. 三角范畴中, 单态射必然是可裂单. 正合范畴中, 单的容许满态射是同构. 对偶表述略.

回顾例 2.1.5, 公理 ET2-2, ET3 与 ET3' 可统一作“二推三”准则.

定理 2.3.7. 给定实现之间的态射

$$\begin{array}{ccccccc} X & \xrightarrow{f} & Y & \xrightarrow{g} & Z & \xrightarrow{\delta} & \\ \downarrow \alpha & & \downarrow \beta & & \downarrow \gamma & & \\ X' & \xrightarrow{f'} & Y' & \xrightarrow{g'} & Z' & \xrightarrow{\delta'} & \end{array} . \quad (2.3.2)$$

若  $\alpha, \beta$  与  $\gamma$  中两者为同构, 则第三者亦为同构.

证明. 若  $\alpha$  与  $\beta$  是同构, 则有五项正合列间的交换图

$$\begin{array}{ccccccc} (-, X) & \xrightarrow{f \circ -} & (-, Y) & \xrightarrow{g \circ -} & (-, Z) & \xrightarrow{\delta_{\#}} & \mathbb{E}(-, X) \xrightarrow{f_*} \mathbb{E}(-, Y) \\ \downarrow \alpha \circ - & & \downarrow \beta \circ - & & \downarrow \gamma \circ - & & \downarrow \alpha_* & & \downarrow \beta_* \\ (-, X') & \xrightarrow{f' \circ -} & (-, Y') & \xrightarrow{g' \circ -} & (-, Z') & \xrightarrow{\delta'_{\#}} & \mathbb{E}(-, X') \xrightarrow{f'_*} \mathbb{E}(-, Y') \end{array} . \quad (2.3.3)$$

依照五引理,  $\gamma \circ -$  也是同构, 故  $\gamma$  亦为同构.

若  $\alpha$  和  $\gamma$  是同构, 则以上  $\beta \circ -$  是函子的满态射, 因此  $\beta$  可裂满. 另一方向的五项长正合列表明  $- \circ \beta$  是函子的满态射, 因此  $\beta$  可裂单. 综上,  $\beta$  是同构.  $\square$

定理 2.3.8. 在同构意义下, inflation (deflation) 嵌入唯一的 conflation.

证明. 上一定理的推论.  $\square$

备注 2.3.9. “对称”地看, 扩张元的实现在同构意义下也是唯一的.

ET4 公理由两处 conflation 生成四处 conflation. 依照 inflation (deflation) 的唯一嵌入, 我们有如下结果.

命题 2.3.10. (严格 ET4). 给定下图实线部分的三处 deflation

$$\begin{array}{ccccc} A & \xrightarrow{x} & B & \xrightarrow{y} & C \dashrightarrow^{\delta} \\ \parallel & & \downarrow z & & \downarrow u \\ A & \xrightarrow{zx} & D & \xrightarrow{v} & F \dashrightarrow^{\delta'} \\ & & \downarrow q & & \downarrow w \\ & & E & \xlongequal{\quad} & E \\ & & \downarrow \eta & & \downarrow \eta' \end{array} , \quad (2.3.4)$$

存在虚线所示的 conflation  $\eta'$  使得上图交换, 且 ET4 中的三个恒等式成立.

证明. 若依照 ET4 选取  $D \xrightarrow{v'} F'$ , 则存在同构  $\varphi: F \simeq F'$  使得  $v' = \varphi \circ v$ . 往后从略.  $\square$

命题 2.3.11. 对偶地, 有严格 ET4' 引理. 表述与证明略.

## 2.4 扩张提升引理

以下是一则实用的引理.

**定理 2.4.1.** 假定  $\mathbb{E}(C, K) = 0$ , 以下是 conflation 间的交换图:

$$\begin{array}{ccccccc} X & \xrightarrow{i} & Y & \xrightarrow{p} & C & \xrightarrow{\delta} & \\ f \downarrow & & \downarrow g & & & & \\ K & \xrightarrow{j} & A & \xrightarrow{q} & B & \xrightarrow{\varepsilon} & \end{array} \quad . \quad (2.4.1)$$

则存在  $s : Y \rightarrow A$  使得  $q \circ s = j$  且  $s \circ i = f$ .

证明. 转述命题如下: 若一组态射  $(f, g)$  满足  $q \circ f = g \circ i$ , 则存在“公共的原像”, 即下图中的  $s$ :

$$\begin{array}{ccc} s \dashrightarrow & & g \\ \downarrow \scriptstyle f & \begin{array}{ccc} (Y, A) & \xrightarrow{(Y, q)} & (Y, B) \\ (i, A) \downarrow & & \downarrow (i, B) \\ (X, A) & \xrightarrow{(X, q)} & (X, B) \end{array} & \downarrow \\ f \dashrightarrow & & q \circ f = g \circ i \end{array} \quad . \quad (2.4.2)$$

依照长正合列式 (2.2.11) 与式 (2.2.14), 构造以下列正合的双复形 (未标注处均为 0):

$$\begin{array}{ccccccc} \ker_1 & \longrightarrow & \ker_2 & \longrightarrow & \ker_3 & \longrightarrow & \ker_4 \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ (C, K) & \xrightarrow{(C, j)} & (C, A) & \xrightarrow{(C, q)} & (C, B) & \xrightarrow{\varepsilon_{\#}} & \mathbb{E}(C, K) \\ \downarrow (p, K) & & \downarrow (p, A) & & \downarrow (p, B) & & \downarrow p^* \\ (Y, K) & \xrightarrow{(Y, j)} & (Y, A) & \xrightarrow{(Y, q)} & (Y, B) & \xrightarrow{\varepsilon_{\#}} & \mathbb{E}(Y, K) \\ \downarrow (i, K) & & \downarrow (i, A) & & \downarrow (i, B) & & \downarrow i^* \\ (X, K) & \xrightarrow{(X, j)} & (X, A) & \xrightarrow{(X, q)} & (X, B) & \xrightarrow{\varepsilon_{\#}} & \mathbb{E}(X, K) \\ \downarrow \delta^{\#} & & \downarrow \delta^{\#} & & \downarrow \delta^{\#} & & \downarrow \text{PO} \\ \mathbb{E}(C, K) & \xrightarrow{j_*} & \mathbb{E}(C, A) & \xrightarrow{q_*} & \mathbb{E}(C, B) & \longrightarrow & T \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ \text{coker}_1 & \longrightarrow & \text{coker}_2 & \longrightarrow & \text{coker}_3 & \xlongequal{\quad} & \text{coker}_3 \end{array} \quad . \quad (2.4.3)$$

其相应的全复形依然是正合的. 我们将添加负号的态射标红, 并带入  $\mathbb{E}(C, K)$ , 得下图

$$\begin{array}{ccccccc}
 \ker_1 & \longrightarrow & \ker_2 & \longrightarrow & \ker_3 & & \\
 \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \\
 (C, K) & \xrightarrow{(C, j)} & (C, A) & \xrightarrow{(C, q)} & (C, B) & \longrightarrow & 0 \\
 \downarrow \textcolor{red}{-(p, K)} & & \downarrow (p, A) & & \downarrow \textcolor{red}{-(p, B)} & & \downarrow \\
 (Y, K) & \xrightarrow{(Y, j)} & (Y, A) & \xrightarrow{(Y, q)} & (Y, B) & \xrightarrow{\varepsilon_{\sharp}} & \mathbb{E}(Y, K) \\
 \downarrow \textcolor{red}{-(i, K)} & & \downarrow (i, A) & & \downarrow \textcolor{red}{-(i, B)} & & \downarrow i^* \\
 (X, K) & \xrightarrow{(X, j)} & (X, A) & \xrightarrow{(X, q)} & (X, B) & \xrightarrow{\varepsilon_{\sharp}} & \mathbb{E}(X, K) \\
 \downarrow & & \downarrow \delta^{\sharp} & & \downarrow \textcolor{red}{-\delta^{\sharp}} & & \downarrow \\
 0 & \longrightarrow & \mathbb{E}(C, A) & \xrightarrow{q_*} & \mathbb{E}(C, B) & \longrightarrow & T \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 & & \text{coker}_2 & \longrightarrow & \text{coker}_3 & \xlongequal{\quad} & \text{coker}_3
 \end{array} \quad (2.4.4)$$

计算  $(f; g) \in (X, A) \oplus (Y, B)$  的微分:

1.  $(X, q)(f) - (i, B)(g) = q \circ f - g \circ i = 0$ .
2. 由  $q_*(\delta^{\sharp}(f)) = \delta^{\sharp}(q \circ f) = \delta^{\sharp}(g \circ i) = 0$ , 得  $\delta^{\sharp}(f) = 0$ .
3. 由  $i^*(\varepsilon_{\sharp}(g)) = \varepsilon_{\sharp}(g \circ i) = \varepsilon_{\sharp}(q \circ f) = 0$ , 得  $\varepsilon_{\sharp}(g) = 0$ .

由全复形正合,  $(f; g)$  存在原像  $(a; b; c) \in (X, K) \oplus (Y, A) \oplus (C, B)$ . 由于  $(i, K)$  与  $(C, q)$  是满射, 易知  $(f; g)$  存在形如  $(0; s; 0)$  的原像.  $s$  即为所求.  $\square$

备注 2.4.2. 扩张提升引理依赖六项正合列, 因此对预三角范畴与正合范畴适用.

备注 2.4.3. 短文 [Che18] 从导出范畴的视角给出定理 2.4.1 的证明.

### 3 图表定理

#### 3.1 双 deflation (inflation) 的拉回 (推出)

ET4 刻画了 conflation 关于 deflation 的推出; ET4' 刻画了或关于 inflation 的拉回. 依照正合范畴中的经验 (定理 1.3.8), conflation 关于 inflation 的拉回或 deflation 的推出也应诱导出四处 conflation. 本小节将分析这一事实.

**定理 3.1.1.** (双 deflation 的拉回). 对  $i \in \{1, 2\}$ , 取  $\delta_i \in \mathbb{E}(C, A_i)$ . 此时有四处 conflation 作成的交换图

$$\begin{array}{ccccc}
 & & A_2 & \xlongequal{\quad} & A_2 \\
 & & \downarrow m_2 & & \downarrow x_2 \\
 A_1 & \xrightarrow{m_1} & M & \xrightarrow{\lambda_2} & B_2 \xrightarrow{(y_2)^*\delta_1} \\
 \parallel & & \downarrow \lambda_1 & & \downarrow y_2 \\
 A_1 & \xrightarrow{x_1} & B_1 & \xrightarrow{y_1} & C \xrightarrow{\delta_1} \\
 & & \downarrow (y_1)^*\delta_2 & & \downarrow \delta_2
 \end{array} \quad . \quad (3.1.1)$$

特别地, 有等式  $(m_1)_*\delta_1 + (m_2)_*\delta_2 = 0$ .

证明. 引入以下 conflation  $\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}^*(\delta_1 \oplus \delta_2) \in \mathbb{E}(C, A_1 \oplus A_2)$ :

$$\begin{array}{ccccc}
 A_1 \oplus A_2 & \xrightarrow{m} & M & \xrightarrow{k} & C \xrightarrow{\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}^*(\delta_1 \oplus \delta_2)} \\
 \parallel & & \downarrow & & \downarrow \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \\
 A_1 \oplus A_2 & \xrightarrow{x_1 \oplus x_2} & B_1 \oplus B_2 & \xrightarrow{y_1 \oplus y_2} & C \oplus C \xrightarrow{\delta_1 \oplus \delta_2}
 \end{array} \quad . \quad (3.1.2)$$

记  $(e_1, e_2, p_1, p_2)$  是直和  $A_1 \oplus A_2$  中的结构态射. 由 ET4 (ET4'), 得以下交换图

$$\begin{array}{ccccc}
 A_1 & \xrightarrow{e_1} & A_1 \oplus A_2 & \xrightarrow{p_2} & A_2 \\
 \parallel & & \downarrow m & & \downarrow x_2 \\
 A_1 & \xrightarrow{m_1} & M & \xrightarrow{\lambda_2} & B_2 \\
 & & \downarrow k & & \downarrow y_2 \\
 & & C & \xlongequal{\quad} & C \\
 & & \downarrow \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}^*(\delta_1 \oplus \delta_2) & & \downarrow \delta_2
 \end{array} \quad \begin{array}{ccccc}
 & & A_2 & \xlongequal{\quad} & A_2 \\
 & & \downarrow e_2 & & \downarrow m_2 \\
 A_1 \oplus A_2 & \xrightarrow{m} & M & \xrightarrow{k} & C \xrightarrow{\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}^*(\delta_1 \oplus \delta_2)} \\
 p_1 \downarrow & & \downarrow \lambda_1 & & \parallel \\
 A_1 & \xrightarrow{x_1} & B_1 & \xrightarrow{y_1} & C \xrightarrow{\delta_1}
 \end{array} \quad . \quad (3.1.3)$$

删减部分态射, 拼接以下两图即可:

$$\begin{array}{ccccc}
 & & A_2 & \xlongequal{\quad} & A_2 \\
 & & \downarrow m_2 & & \downarrow x_2 \\
 A_1 & \xrightarrow{m_1} & M & \xrightarrow{\lambda_2} & B_2 \\
 & & \downarrow k & & \downarrow y_2 \\
 & & C & \xlongequal{\quad} & C \\
 & & \downarrow \delta_2 & & 
 \end{array} \quad \begin{array}{ccccc}
 & & A_2 & & \\
 & & \downarrow m_2 & & \\
 A_1 & \xrightarrow{m_1} & M & & \\
 \parallel & & \downarrow \lambda_1 & & \\
 A_1 & \xrightarrow{x_1} & B_1 & \xrightarrow{y_1} & C \xrightarrow{\delta_1}
 \end{array} \quad . \quad (3.1.4)$$

最后一处等式解释如下:

$$(m_1)_*\delta_1 + (m_2)_*\delta_2 = (m_1p_1 + m_2p_2)_*\left(\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}\right)^*(\delta_1 \oplus \delta_2) \quad (3.1.5)$$

$$= \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}\right)^* m_*(\delta_1 \oplus \delta_2) = m_*\left(\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}\right)^*(\delta_1 \oplus \delta_2) = 0. \quad (3.1.6)$$

□

**定理 3.1.2.** (双 inflation 的拉回). 表述与证明略.

备注 3.1.3. 将双 deflation 的拉回与双 inflation 的推出写作下图:

此时, 左图与右图分别蕴含等式

$$l_1^*\delta_1 + l_2^*\delta_2 = 0, \quad (r_1)_*\epsilon_1 + (r_2)_*\epsilon_2 = 0. \quad (3.1.8)$$

以上定理存在一则实用的变体.

**定理 3.1.4.** (双 deflation 拉回的变体). 给定 conflation  $\delta_1, \epsilon$  与  $\eta$  使得下图实线方块交换:

此时存在虚线所示  $\delta_2$  使得上图交换, 同时  $(y_1)^*\delta_2 = \eta$ ,  $(y_2)^*\delta_1 = \epsilon$ , 以及  $(m_1)_*\delta_1 + (m_2)_*\delta_2 = 0$ .

证明. 对 deflation 的复合  $y_1 \circ \lambda_1$  使用 ET4', 得下图:

此处  $(x_1)^*\eta = (m_1)^*(\lambda_1)^*\eta = 0$ . 由  $\lambda_1(s - m_1) = 0$ , 故存在  $l: A_1 \rightarrow A_2$  使得  $(s - m_1) = m_2 \circ l$ . 下通过严格 ET4 (命题 2.3.10) 定义  $\delta_2$ :

$$\begin{array}{ccccc}
 A_1 & \xlongequal{\quad} & A_1 & & \\
 \downarrow \begin{pmatrix} 1 \\ -l \end{pmatrix} & & \downarrow m_1 & & \\
 A_1 \oplus A_2 & \xrightarrow{(s, m_2)} & M & \xrightarrow{y_1 \lambda_1} & C \dashrightarrow^{\kappa} \\
 \downarrow (l \ 1) & & \downarrow \lambda_2 & & \parallel \\
 A_2 & \dashrightarrow^{x_2} & B_2 & \dashrightarrow^{y_2} & C \dashrightarrow^{\delta_2} \\
 \downarrow 0 & & \downarrow \varepsilon & & 
 \end{array} . \quad (3.1.11)$$

使得左下方块交换的唯一态射是  $\lambda_2 \circ m_2 = x_2$ . 由以上交换图, 式 (3.1.9) 中的所有方块交换. 下检验扩张元的等式:

1.  $(y_1)^*\delta_2 = (y_1)^*(l \ 1)_*\kappa = (l \ 1)_*(y_1)^*\kappa = (l \ 1)_*(e_2)^*\eta = \eta$ ;
2.  $(y_2)^*\delta_1 = (y_2)^*(p_1)_*\kappa = (p_1)_*(y_2)^*\kappa = (p_1)_*\begin{pmatrix} 1 \\ -l \end{pmatrix}_*\varepsilon = \varepsilon$ ;
3.  $(m_1)_*\delta_1 + (m_2)_*\delta_2 = (m_1)_*(p_1)_*\kappa + (m_2)_*(l \ 1)_*\kappa = (s, m_2)_*\kappa = 0$ .

综上,  $\delta_2$  即为所求. □

在 Abel 范畴中, 定理 3.1.1 与命题 2.3.10 是蛇引理的退化形式.

**定理 3.1.5.** 给定 Abel 范畴中可复合的态射  $f \circ g$ , 则有六项正合序列

$$0 \rightarrow \ker g \rightarrow \ker(f \circ g) \rightarrow \ker f \xrightarrow{\delta} \operatorname{cok} g \rightarrow \operatorname{cok}(f \circ g) \rightarrow \operatorname{cok} f \rightarrow 0. \quad (3.1.12)$$

记  $\cap (+)$  为两个子对象的拉回 (拉回的一次导出极限).  $\delta$  的满-单分解是

$$\frac{\ker f}{\ker(f \circ g)} \twoheadrightarrow \frac{\ker f}{\operatorname{im} g \cap \ker f} \simeq \frac{\operatorname{im} g + \ker f}{\operatorname{im} g} \twoheadrightarrow \operatorname{cok} g. \quad (3.1.13)$$

证明. 见一般的同调代数教材. 基于蝶螈定理的证明见 [Wis11]. 在正合范畴中的推广见 [RZ21]. □

**例子 3.1.6.** 命题 2.3.10 对应如下 Abel 范畴中 ses 的交换图:

$$\begin{array}{ccccc}
 \cdot & \xrightarrow{f} & \cdot & \twoheadrightarrow & \text{"cok } f" \dashrightarrow^{\delta_f} \\
 \parallel & & \downarrow g & & \downarrow \\
 \cdot & \xrightarrow{g \circ f} & \cdot & \twoheadrightarrow & \text{"cok } g \circ f" \dashrightarrow^{\delta_{g \circ f}} \\
 & & \downarrow & & \downarrow \\
 & & \text{"cok } g" \xlongequal{\quad} \text{"cok } g" & & \\
 & & \downarrow \delta_g & & \downarrow \delta_c
 \end{array} . \quad (3.1.14)$$

**例子 3.1.7.** 定理 3.1.1 对应如下 Abel 范畴中 ses 的交换图:

$$\begin{array}{ccccc}
 & & \text{"ker } g" \xlongequal{\quad} \text{"ker } g" & & \\
 & & \downarrow & & \downarrow \\
 \cdot & \xrightarrow{f} & \cdot & \twoheadrightarrow & \text{"cok } f" \dashrightarrow^{\delta_f} \\
 \parallel & & \downarrow g & & \downarrow \\
 \cdot & \xrightarrow{g \circ f} & \cdot & \twoheadrightarrow & \text{"cok } g \circ f" \dashrightarrow^{\delta_{g \circ f}} \\
 & & \downarrow \delta_g & & \downarrow \delta_c
 \end{array} . \quad (3.1.15)$$

为了在外三角范畴中推广 **定理 1.3.8**, 我们先熟悉几类同伦的推出拉回方块.

### 3.2 同伦的推出拉回方块

本节是 **定理 1.3.8** 在外三角范畴中的推广.

**定理 3.2.1.** (同伦的推出拉回方块 I). 任给定扩张元的态射  $(\lambda, 1) : \delta \rightarrow \lambda_*\delta$ , 存在  $w$  使得下图交换, 同时左侧是同伦的推出拉回方块:

$$\begin{array}{ccccc} X & \xrightarrow{a} & Y & \xrightarrow{b} & Z \dashrightarrow^{\delta} \\ \downarrow \lambda & & \downarrow w & & \parallel \\ A & \xrightarrow{x} & B & \xrightarrow{y} & Z \dashrightarrow^{\lambda_*\delta} \end{array} . \quad (3.2.1)$$

特别地, 左侧同伦的推出拉回方块对应如下 **conflation**:

$$X \xrightarrow{\begin{pmatrix} \lambda \\ a \end{pmatrix}} A \oplus Y \xrightarrow{(-x, w)} B \dashrightarrow^{y^*\delta} . \quad (3.2.2)$$

证明. 考虑  $b$  与  $y$  给出的双 **deflation** 的拉回 (**定理 3.1.1**), 得下图:

$$\begin{array}{ccccc} & & X & \xlongequal{\quad} & X \\ & & \downarrow \begin{pmatrix} \lambda' \\ a \end{pmatrix} & & \downarrow a \\ A & \xrightarrow{\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}} & A \oplus Y & \xrightarrow{(0 \ 1)} & Y \dashrightarrow^0 \\ \parallel & & \downarrow (x, -w') & & \downarrow b \\ A & \xrightarrow{x} & B & \xrightarrow{y} & Z \dashrightarrow^{\lambda_*\delta} \\ & & \downarrow y^*\delta & & \downarrow \delta \end{array} . \quad (3.2.3)$$

依照式 (3.1.8), 得

$$0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}_* (\lambda_*\delta) + \begin{pmatrix} \lambda' \\ a \end{pmatrix}_* \delta = \begin{pmatrix} \lambda + \lambda' \\ a \end{pmatrix}_* \delta. \quad (3.2.4)$$

由长正合列 (式 (2.2.11)),  $(\lambda + \lambda')$  通过  $a$  分解得到  $l$ . 具体地,

$$(\lambda + \lambda') = X \xrightarrow{a} Y \xrightarrow{l} A. \quad (3.2.5)$$

遂有同构的态射序列:

$$\begin{array}{ccccc} X & \xrightarrow{\begin{pmatrix} \lambda' \\ a \end{pmatrix}} & A \oplus Y & \xrightarrow{(x, -w')} & B \dashrightarrow^{y^*\delta} \\ \parallel & & \downarrow \begin{pmatrix} -1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} & & \parallel \\ X & \xrightarrow{\begin{pmatrix} \lambda' \\ a \end{pmatrix}} & A \oplus Y & \xrightarrow{(-x, w)} & B \end{array} . \quad (3.2.6)$$

因此, 上图下方的态射列也是  $y^*\delta$  的实现. 这完成了证明.  $\square$

**定理 3.2.2.** (同伦的推出拉回方块 I'). 上一定理的对偶表述. 此处仅给出关键的交换图:

$$\begin{array}{ccccc} X & \xrightarrow{a} & Y & \xrightarrow{b} & Z \dashrightarrow^{\mu^*\delta} \\ \parallel & & \downarrow u & & \downarrow \mu \\ X & \xrightarrow{x} & B & \xrightarrow{y} & C \dashrightarrow^{\delta} \end{array} . \quad (3.2.7)$$

$$Y \xrightarrow{\begin{pmatrix} u \\ -b \end{pmatrix}} B \oplus Z \xrightarrow{(y \ \mu)} C \dashrightarrow^{a_*\delta}$$

**定理 3.2.3.** (同伦的推出拉回方块 II). 任给定任意态射  $w$  使得下图右侧方块交换.

$$\begin{array}{ccccc} X & \xrightarrow{a} & Y & \xrightarrow{b} & Z \dashrightarrow^{\delta} \\ \downarrow \lambda & & \downarrow w & & \parallel \\ A & \xrightarrow{x} & B & \xrightarrow{y} & Z \dashrightarrow^{\varepsilon} \end{array} . \quad (3.2.8)$$

则存在态射  $\lambda$  使得上图交换,  $\varepsilon = \lambda_* \delta$ . 同时, 左侧是同伦的推出拉回方块, 对应以下 **conflation**:

$$X \xrightarrow{\begin{pmatrix} \lambda \\ a \end{pmatrix}} A \oplus Y \xrightarrow{(-x, w)} B \dashrightarrow^{y^* \delta} . \quad (3.2.9)$$

证明. 依照 **ET3'** 任意取定  $\lambda' : X \rightarrow A$ . 对扩张元的态射  $(\lambda', 1_Z)$ , 依照 **定理 3.2.1** 取  $w' : Y \rightarrow B$  使得下图交换 (共计四个  $2 \times 2$  方块):

$$\begin{array}{ccccc} X & \xrightarrow{a} & Y & \xrightarrow{b} & Z \dashrightarrow^{\delta} \\ \downarrow \lambda' & & \downarrow w & \downarrow w' & \parallel \\ A & \xrightarrow{x} & B & \xrightarrow{y} & Z \dashrightarrow^{\varepsilon} \end{array} . \quad (3.2.10)$$

同时, 如下是同伦的推出拉回方块诱导的 **conflation**:

$$X \xrightarrow{\begin{pmatrix} \lambda' \\ a \end{pmatrix}} A \oplus Y \xrightarrow{(-x, w')} B \dashrightarrow^{y^* \delta} . \quad (3.2.11)$$

由  $y \circ (w - w') = 0$ , 依照长正合列 (式 (2.2.14)) 取  $(w - w') = x \circ l$ . 考虑同构

$$\begin{array}{ccccc} X & \xrightarrow{\begin{pmatrix} \lambda' \\ a \end{pmatrix}} & A \oplus Y & \xrightarrow{(-x, w')} & B \dashrightarrow^{y^* \delta} \\ \parallel & & \downarrow \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} & & \parallel \\ X & \xrightarrow{\begin{pmatrix} \lambda \\ a \end{pmatrix}} & A \oplus Y & \xrightarrow{(-x, w)} & B \end{array} , \quad (3.2.12)$$

其下行也是  $y^* \delta$  的实现. 这完成了证明. □

**定理 3.2.4.** (同伦的推出拉回方块 II'). 上一定理的对偶表述. 此处仅给出关键的交换图:

$$\begin{array}{ccccc} X & \xrightarrow{a} & Y & \xrightarrow{b} & Z \dashrightarrow^{\mu^* \delta} \\ \parallel & & \downarrow u & & \downarrow \mu \\ X & \xrightarrow{x} & B & \xrightarrow{y} & C \dashrightarrow^{\delta} \end{array} . \quad (3.2.13)$$

$$Y \xrightarrow{\begin{pmatrix} u \\ -b \end{pmatrix}} B \oplus Z \xrightarrow{(y, \mu)} C \dashrightarrow^{a_* \delta}$$

**定理 3.2.5.** (同伦的推出拉回方块 III). **ET4** (**ET4'**) 公理中的方块  $\star$  是同伦的推出拉回方块:

$$\begin{array}{ccccc} X & \xrightarrow{f} & Y & \xrightarrow{g} & Z \dashrightarrow^{\delta_{r1}} \\ \parallel & & \downarrow \alpha & \star & \downarrow r \\ X & \xrightarrow{p} & W & \xrightarrow{q} & M \dashrightarrow^{\delta_{r2}} \\ & & \downarrow \beta & & \downarrow s \\ & & K & = & K \\ & & \downarrow \delta_{c1} & & \downarrow \delta_{c2} \end{array} . \quad (3.2.14)$$

$\star$  诱导的 **conflation** 如 **定理 3.2.2** 所示.



证明. 将证明分作两步.

引理 3.2.6.  $\star$  是弱推出方块.

证明. 任意取定等式  $n \circ g = m \circ \alpha$ , 如下图所示:

$$\begin{array}{ccccccc}
 X & \xrightarrow{f} & Y & \xrightarrow{g} & Z & \xrightarrow{\delta_{r1}} & \\
 \parallel & & \downarrow \alpha & & \downarrow r & & \\
 X & \xrightarrow{p} & W & \xrightarrow{q} & M & \xrightarrow{\delta_{r2}} & \\
 & & \downarrow \beta & & \downarrow s & & \\
 & & K & = & K & & \\
 & & \downarrow \delta_{c1} & & \downarrow \delta_{c2} & & \\
 & & & & & & T
 \end{array}
 \quad (3.2.15)$$

(Note: In the original image, there are additional dashed arrows:  $n$  from  $Z$  to  $T$ ,  $m$  from  $M$  to  $T$ , and a curved dashed arrow from  $Z$  to  $M$  labeled  $n$  and  $m$ .)

注意到  $0 = (m\alpha)_*\delta_{c1} = n_*g_*\delta_{c1} = n_*\delta_{c2}$ , 故  $n$  通过  $r$  分解. 记  $l \circ r = n$ . 由于

$$(m - l \circ q) \circ \alpha = m \circ \alpha - l \circ q \circ \alpha = n \circ g - l \circ r \circ g = 0, \quad (3.2.16)$$

从而  $(m - l \circ q)$  经  $\beta$  分解, 记  $(m - l \circ q) = \lambda \circ \beta$ . 上述态射的来源与去向如下:

$$\begin{array}{ccccccc}
 X & \xrightarrow{f} & Y & \xrightarrow{g} & Z & \xrightarrow{\delta_{r1}} & \\
 \parallel & & \downarrow \alpha & & \downarrow r & & \\
 X & \xrightarrow{p} & W & \xrightarrow{q} & M & \xrightarrow{\delta_{r2}} & \\
 & & \downarrow \beta & & \downarrow s & & \\
 & & K & = & K & & \\
 & & \downarrow \delta_{c1} & & \downarrow \delta_{c2} & & \\
 & & & & & & T
 \end{array}
 \quad (3.2.17)$$

(Note: In the original image, there are additional dashed arrows:  $l$  from  $Z$  to  $T$ ,  $m$  from  $M$  to  $T$ ,  $\lambda$  from  $K$  to  $T$ , and a curved dashed arrow from  $Z$  to  $M$  labeled  $l$  and  $m$ .)

今断言弱推出问题的解是  $l - \lambda \circ s$ . 验证得

1.  $(l - \lambda \circ s) \circ r = l \circ r = n$ ;
2.  $(l - \lambda \circ s) \circ q = l \circ q - \lambda \circ \beta = m$ .

□

依照定理 3.2.4, 存在  $r' : Z \rightarrow M$  使得  $(r', g, \alpha, q)$  构成同伦推出拉回方块. 记态射  $l$  与  $m$  为两个弱推出方块相互分解所得, 如下图所示:

$$\begin{array}{ccccccc}
 X & \xrightarrow{f} & Y & \xrightarrow{g} & Z & \xrightarrow{\delta_{r1}} & \\
 \parallel & & \downarrow \alpha & & \downarrow r & & \\
 X & \xrightarrow{p} & W & \xrightarrow{q} & M & \xrightarrow{\delta_{r2}} & \\
 & & \downarrow \beta & & \downarrow s & & \\
 & & K & = & K & & \\
 & & \downarrow \delta_{c1} & & \downarrow \delta_{c2} & & \\
 & & & & & & M
 \end{array}
 \quad (3.2.18)$$

(Note: In the original image, there are additional dashed arrows:  $r'$  from  $Z$  to  $M$ ,  $l$  from  $Z$  to  $M$ ,  $m$  from  $M$  to  $M$ , and a curved dashed arrow from  $Z$  to  $M$  labeled  $l$  and  $m$ .)

显然  $(1_Z, m \circ l, 1_K)$  与  $(1_W, 1_{Z \oplus W}, l \circ m)$  是都是 conflation 的自同态. 依照定理 2.3.7,  $l$  与  $m$  都是同构. 由 conflation 对同构封闭 (命题 2.1.6),  $\star$  也是同伦的推出拉回方块. □

**定理 3.2.7.** (同伦的推出拉回方块 IV). 双 deflation 拉回所得的方块  $\star$  是同伦的推出拉回方块

$$\begin{array}{ccccc}
 & A_2 & \xlongequal{\quad} & A_2 & \\
 & \downarrow m_2 & & \downarrow x_2 & \\
 A_1 & \xrightarrow{m_1} & M & \xrightarrow{\lambda_2} & B_2 \xrightarrow{(y_2)^*\delta_1} \\
 \parallel & & \downarrow \lambda_1 & \star & \downarrow y_2 \\
 A_1 & \xrightarrow{x_1} & B_1 & \xrightarrow{y_1} & C \xrightarrow{\delta_1} \\
 & & \downarrow (y_1)^*\delta_2 & & \downarrow \delta_2
 \end{array} . \quad (3.2.19)$$

如定理 3.2.2 所示, 方块  $\star$  诱导了 conflation

$$M \xrightarrow{\begin{pmatrix} \lambda_1 \\ -\lambda_2 \end{pmatrix}} B_1 \oplus B_2 \xrightarrow{(y_1, y'_2)} C \xrightarrow{m_1^*(\delta_1)} . \quad (3.2.20)$$

证明. 类似定理 3.2.5 的证明,  $\star$  是弱拉回方块. 同时存在  $\lambda'_1 : M \rightarrow B_1$  使得  $(y_2)^*\delta_1$  与  $\delta_1$  满足定理 3.2.2 的条件. 由于弱拉回方块与同伦的推出拉回方块相互分解, 以及定理 2.3.7,  $\star$  同构于同伦的推出拉回方块. 由 conflation 对同构封闭 (命题 2.1.6),  $\star$  也是同伦的推出拉回方块.  $\square$

**定理 3.2.8.** (同伦推出拉回方块 IV'). 双 inflation 推出所得的方块  $\star$  是同伦的推出拉回方块, 具体表述略. 此处仅给出关键的交换图:

$$\begin{array}{ccccc}
 A & \xrightarrow{x_1} & B_1 & \xrightarrow{y_1} & C_1 \xrightarrow{\delta_1} \\
 \downarrow x_2 & & \downarrow m_2 & & \parallel \\
 B_2 & \xrightarrow{m_1} & M & \xrightarrow{\mu_1} & C_1 \xrightarrow{(x_2)^*\delta_1} \\
 \downarrow y_2 & & \downarrow \mu_2 & & \\
 C_2 & \xlongequal{\quad} & C_2 & & \\
 \downarrow \delta_2 & & \downarrow (x_1)_*\delta_2 & &
 \end{array} . \quad (3.2.21)$$

$$A \xrightarrow{\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}} B_1 \oplus B_2 \xrightarrow{\begin{pmatrix} m_2 & -m_1 \end{pmatrix}} M \xrightarrow{(\mu_1)^*\delta_1} .$$

以下强化部分外三角范畴的公理.

**命题 3.2.9.** (ET2-2 的强化表述). 假定  $(\alpha, \gamma) : \delta \rightarrow \eta$  是扩张元的态射, 则存在分解  $\delta \xrightarrow{(\alpha, 1)} \varepsilon \xrightarrow{(1, \gamma)} \eta$ , 且  $\star$  是同伦的推出拉回方块:

$$\begin{array}{ccccc}
 \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot \xrightarrow{\delta} \\
 \downarrow \alpha & \star & \downarrow \beta_1 & & \parallel \\
 \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot \xrightarrow{\eta} \\
 \parallel & & \downarrow \beta_2 & \star & \downarrow \gamma \\
 \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot \xrightarrow{\varepsilon}
 \end{array} . \quad (3.2.22)$$

证明. 取中间行为  $\eta = \alpha_*\delta = \gamma_*\varepsilon$  的实现. 依定理 3.2.1 与定理 3.2.2 构造两处  $\beta_1$  与  $\beta_2$  即可.  $\square$

**命题 3.2.10.** (ET3 的强化表述). 假定态射  $\alpha, \beta$  与两处 inflation 作成交换方块. 存在分解  $\beta = \beta_2 \circ \beta_1$  与态射  $\gamma$ , 使得式 (3.2.22) 是扩张元的态射, 且  $\star$  是同伦的推出拉回方块.

证明. 取  $\eta = \alpha_*\delta$ , 依照定理 3.2.1 构造  $\beta_1$  与  $\beta_2$ . 由于同伦的推出拉回方块是弱推出, 故  $\beta$  经  $\beta_1$  分解得  $\beta_2$ . 最后使用定理 3.2.4 构造  $\gamma$  即可.  $\square$

**命题 3.2.11.** (ET3' 的强化表述). 这是上一定理的对偶表述, 最终效果如式 (3.2.22) 所示.

### 3.3 弱幂等完备

依照 [Büh10] 的第七章, 正合范畴中许多“理应成立的简单结论”依赖弱幂等完备性. 例如, 若所有可裂单 (可裂满) 都是容许单态射 (容许满态射), 则正合范畴是弱幂等完备的. 以下给出弱幂等完备在一般加法范畴中的定义.

**定义 3.3.1.** (弱幂等完备). 称加法范畴  $\mathcal{A}$  是弱幂等完备的, 若其满足以下等价条件:

1. 任意可裂满态射  $p: X \rightarrow C$  存在核;
2. 任意可裂单态射  $i: K \rightarrow X$  存在余核.

证明. 以下仅证明  $(1 \rightarrow 2)$ , 另一方向在反范畴中得证. 对任意可裂单态射  $i: K \rightarrow X$ , 取可裂满态射  $q: X \rightarrow K$  使得  $q \circ i = 1_K$ . 记  $q$  的核是  $j: C \rightarrow X$ , 则  $(1_X - i \circ q)$  通过  $j$  分解:

$$\begin{array}{ccccc} & & X & & \\ & \swarrow p & \downarrow (1_X - i \circ q) & & \\ C & \xrightarrow{j} & X & \xrightarrow{q} & K \\ & & \nwarrow i & & \end{array} \quad (3.3.1)$$

容易验证  $j = j \circ p \circ j$  与  $j \circ p \circ i = 0$ . 消除单态射  $j$  得  $p \circ j = 1_C$  与  $p \circ i = 0$ . 结合  $q \circ i = 1_K$  与  $q \circ j = 0$ , 得同构  $\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix}: X \hookrightarrow C \oplus K: (j \ i)$ .  $\square$

弱幂等完备的又一等价定义基于形变收缩.

**定义 3.3.2.** (形变收缩). 称对象  $X$  是  $Y$  的形变收缩, 若存在可裂单态射  $X \rightarrow Y$ .

**命题 3.3.3.** 加法范畴  $\mathcal{A}$  是弱幂等完备的, 当且仅当任意形变收缩是直和项.

证明. 容易.  $\square$

**备注 3.3.4.** 预三角范畴自动是弱幂等完备的 (推论 1.2.6).

**例子 3.3.5.** (幂等完备, 也称 Karoubi 性质). 称加法范畴是幂等完备的, 若所有幂等态射有核与余核. 这一定义比弱幂等完备强, 例如以下两则例子.

- 记  $\mathcal{A}$  是有限维实线性空间范畴, 加法全子范畴  $\mathcal{B}$  包含一切维数为偶数 (含 0) 的线性空间. 显然  $\mathcal{B}$  是弱幂等完备的, 但不幂等完备.
- 记  $\mathbf{Free}_R$  是自由右  $R$ -模构成的范畴. 今视之  $\mathbf{Mod}_R$  的全子范畴, 则容易验证
  - 包含  $\mathbf{Free}_R$  的最小 (范畴等价意义下) 的弱幂等完备范畴是所有稳定投射模构成的范畴;
  - 包含  $\mathbf{Free}_R$  的最小 (范畴等价意义下) 的幂等完备范畴是所有投射模构成的范畴.

三角范畴一般不是幂等完备的, 除非承认某些在特殊条件 (例如三角范畴有可数积或可数余积, 再如 [LC07]). 三角范畴的幂等完备化的一般理论见 [BS01], 正合范畴的幂等完备化见 [Büh10] 的第六章.

此小节中, 我们仅讨论外三角范畴的弱幂等完备性, 暂不理睬幂等完备性. 以下引理 3.3.6, 引理 3.3.7, 推论 3.3.8 与推论 3.3.9 无需弱幂等完备性, 推论 3.3.9 指出弱幂等完备的关键作用是“消除赘余的零态射”.

**引理 3.3.6.** 外三角范畴中, 若  $q \circ p$  是 inflation,  $q$  是 deflation, 则  $p$  是 inflation.

证明. 证明同引理 1.3.5, 将 “Noether 同构” 替换作 “ET4’ 公理” 即可. 定理 3.2.5 表明  $\square$  是同伦的推出拉回方块, 故  $s$  存在.  $\square$

引理 3.3.7. 外三角范畴中, 若  $j \circ i$  是 deflation,  $i$  是 inflation, 则  $j$  是 deflation.

证明. 上一引理的对偶.  $\square$

以下是两则常用的推论.

推论 3.3.8. 若  $i$  是 inflation, 则  $\begin{pmatrix} i \\ f \end{pmatrix}$  也是 inflation. 若  $p$  是 deflation, 则  $(p \ f)$  也是 deflation.

证明. 由  $(1 \ 0) \circ \begin{pmatrix} i \\ f \end{pmatrix} = i$  是 inflation,  $(1 \ 0)$  是 deflation, 引理 3.3.6 表明  $\begin{pmatrix} i \\ f \end{pmatrix}$  是 inflation. 后一论断对偶.  $\square$

推论 3.3.9. 若  $X \xrightarrow{p} Y \xrightarrow{q} Z$  是 inflation, 则  $\begin{pmatrix} p \\ 0 \end{pmatrix} : Y \oplus Z$  亦然.

证明. 推论 3.3.8 表明  $\begin{pmatrix} p \\ -q \circ p \end{pmatrix}$  是 inflation. 左复合同构  $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ q & 1 \end{pmatrix}$ , 得  $\begin{pmatrix} p \\ 0 \end{pmatrix}$ . 命题 2.1.6 表明  $\begin{pmatrix} p \\ 0 \end{pmatrix}$  是 inflation.  $\square$

以下给出外三角范畴弱幂等完备的若干等价定义.

定理 3.3.10. 称外三角范畴弱幂等完备, 若满足如下等价定义.

1. 若  $i : A \rightarrow C$  可裂单, 则  $i$  有余核  $B$ , 且  $i$  分解作  $A \xrightarrow{\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}} A \oplus B \simeq C$ ;
2. 若  $\begin{pmatrix} i \\ 0 \end{pmatrix}$  是 inflation, 则  $i$  也是 inflation;
3. 若  $\begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & j \end{pmatrix}$  是 inflation, 则  $i$  与  $j$  也都是 inflation;
4. 若  $f \circ i$  是 inflation, 则  $i$  也是 inflation;
5. inflation 的形变收缩仍是 inflation (态射的形变收缩即作为态射范畴中对象的形变收缩).

我们略去五个对偶的定义. 定义 1 与 1’ 的等价性见定义 3.3.1.

证明. 我们先证明  $(2 \leftrightarrow 4)$ .

1.  $(2 \leftarrow 4)$ . 若  $\begin{pmatrix} i \\ 0 \end{pmatrix}$  是 inflation, 则  $i = (1 \ 0) \circ \begin{pmatrix} i \\ 0 \end{pmatrix}$  是 inflation.
2.  $(2 \rightarrow 4)$ . 若  $f \circ i$  是 inflation, 推论 3.3.9 表明  $\begin{pmatrix} i \\ 0 \end{pmatrix}$  也是 inflation. 由假设,  $i$  是 inflation.

继而证明  $(1 \leftrightarrow 4)$ .

1.  $(1 \rightarrow 4)$ . 只需证明  $(1 \rightarrow 2)$ . 若  $\begin{pmatrix} i \\ 0 \end{pmatrix}$  是 inflation, 取相应的 conflation  $\delta$ . 依照长正合列 (式 (2.2.11)) 取分解所得的态射  $\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$  如下:

$$\begin{array}{ccccccc}
 X & \xrightarrow{\begin{pmatrix} i \\ 0 \end{pmatrix}} & Y \oplus Z & \xrightarrow{(s \ t)} & W & \overset{\delta}{\dashrightarrow} & \\
 & \searrow 0 & \downarrow \begin{pmatrix} s & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} & & \swarrow \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} & & \\
 & & W \oplus Z & & & & 
 \end{array} . \quad (3.3.2)$$

注意到  $b \circ t = 1_Z$ . 由题设,  $b$  是以  $Z$  为像的可裂满, 不妨将 deflation 写作  $\begin{pmatrix} s_1 & 0 \\ s_2 & 1 \end{pmatrix} : Y \oplus Z \rightarrow Y \oplus Q$ . 依照定理 3.1.4 构造交换图

$$\begin{array}{ccccc}
 & & Z & \xlongequal{\quad} & Z \\
 & & \downarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} & & \downarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\
 X & \xrightarrow{\begin{pmatrix} i \\ 0 \end{pmatrix}} & Y \oplus Z & \xrightarrow{\begin{pmatrix} s_1 & 0 \\ s_2 & 1 \end{pmatrix}} & Q \oplus Z \\
 \parallel & & \downarrow (1,0) & & \downarrow (1,0) \\
 X & \dashrightarrow & Z & \dashrightarrow & Q
 \end{array} \quad (3.3.3)$$

左下方的 inflation 是  $i = (1 \ 0) \circ \begin{pmatrix} i \\ 0 \end{pmatrix}$ .

2.  $(4 \rightarrow 1)$ . 若  $f \circ i$  恒等, 则  $i$  是 inflation. 因此所有可裂单都是 inflation.

再证明  $(2 \leftrightarrow 3)$ .  $(3 \rightarrow 2)$ . 令  $j$  是零态射即可.  $(2 \rightarrow 3)$ . 若  $\begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & j \end{pmatrix}$  是 inflation, 则 inflation 的复合  $\begin{pmatrix} i \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & j \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  也是 inflation.

最后证明  $(3 \leftrightarrow 5)$ .  $(5 \rightarrow 3)$ . 显然.  $(3 \rightarrow 5)$ . 以上证明了 1, 2, 3 与 4 彼此等价. 往证 1 与 4 共同推导出 5. 若  $f'$  是 inflation  $f$  的形变收缩, 则存在可裂单  $i$  与  $j$  使得  $fi = jf'$ . 由 1,  $i$  是 inflation, 从而  $fi = jf'$  是 inflation. 由 4, 以及  $j$  是 inflation, 得  $f'$  是 inflation.  $\square$

### 3.4 九引理

假定外三角范畴弱幂等完备, 本小节将证明九引理 ( $3 \times 3$  引理) 在外三角范畴中类似物.

**定理 3.4.1.** (九引理). 假定外三角范畴弱幂等完备. 给定以下四条 conflation 的交换图

$$\begin{array}{ccccccc}
 A_1 & \xrightarrow{f_A} & A_2 & \xrightarrow{g_A} & A_3 & \dashrightarrow^{\delta_A} & \\
 & & \downarrow i_2 & & \downarrow i_3 & & \\
 B_1 & \xrightarrow{f_B} & B_2 & \xrightarrow{g_B} & B_3 & \dashrightarrow^{\delta_B} & \\
 & & \downarrow p_2 & & \downarrow p_3 & & \\
 & & C_2 & & C_3 & & \\
 & & \vdots \varepsilon_2 & & \vdots \varepsilon_3 & & \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & 
 \end{array} \quad (3.4.1)$$

存在  $\delta_C$  与  $\varepsilon_1$  使得下图交换, 且所有相邻行与列都是实现间的态射:

$$\begin{array}{ccccccc}
 A_1 & \xrightarrow{f_A} & A_2 & \xrightarrow{g_A} & A_3 & \dashrightarrow^{\delta_A} & \\
 \downarrow i_1 & & \downarrow i_2 & & \downarrow i_3 & & \\
 B_1 & \xrightarrow{f_B} & B_2 & \xrightarrow{g_B} & B_3 & \dashrightarrow^{\delta_B} & \\
 \downarrow p_1 & & \downarrow p_2 & & \downarrow p_3 & & \\
 C_1 & \xrightarrow{f_C} & C_2 & \xrightarrow{g_C} & C_3 & \dashrightarrow^{\delta_C} & \\
 \vdots \varepsilon_1 & & \vdots \varepsilon_2 & & \vdots \varepsilon_3 & & \\
 \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & 
 \end{array} \quad (3.4.2)$$

证明. 由 ET4, 取  $E, x$  与  $y$  如下:

$$\begin{array}{ccccc}
 A_1 & \xrightarrow{f_A} & A_2 & \xrightarrow{g_A} & A_3 & \xrightarrow{\delta_A} \\
 \parallel & & \downarrow i_2 & & \downarrow y & \\
 A_1 & \xrightarrow{i_2 f_A} & B_2 & \xrightarrow{x} & E & \xrightarrow{\eta} \\
 & & \downarrow p_2 & & \downarrow z & \\
 & & C_2 & = & C_2 & \\
 & & \downarrow \varepsilon_2 & & \downarrow (g_A)_* \varepsilon_2 &
 \end{array} . \quad (3.4.3)$$

方块  $(g_A, y, i_2, x)$  是同伦的推出拉回方块, 特别地, 这是弱推出. 此时存在  $\varphi$  使得下图交换:

$$\begin{array}{ccc}
 A_2 & \xrightarrow{g_A} & A_3 \\
 \downarrow i_2 & & \downarrow y \\
 B_2 & \xrightarrow{x} & E
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \downarrow i_3 \\
 \square \\
 \downarrow \varphi \\
 \triangle \\
 \downarrow g_B
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 B_3 \\
 \\
 \\
 \\
 \end{array} . \quad (3.4.4)$$

由定理 3.3.10 第四条的对偶,  $\varphi$  是 deflation. 对  $\triangle$  与  $\square$  分别使用 ET4' 与定理 3.1.4, 得下图:

$$\begin{array}{ccccc}
 A_1 & = & A_1 & & A_3 & = & A_3 \\
 \downarrow i_1 & & \downarrow i_2 f_A & & \downarrow y & & \downarrow i_3 \\
 B_1 & \xrightarrow{f_B} & B_2 & \xrightarrow{g_B} & B_3 & \xrightarrow{\delta_B} & \\
 \downarrow p_1 & & \downarrow x & \triangle & \parallel & & \\
 C_1 & \xrightarrow{\psi} & E & \xrightarrow{\varphi} & B_3 & \xrightarrow{(p_1)_* \delta_B} & \\
 \downarrow \varepsilon_1 & & \downarrow \eta & & & &
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{ccccc}
 C_1 & \xrightarrow{\psi} & E & \xrightarrow{\varphi} & B_3 & \xrightarrow{(p_1)_* \delta_B} \\
 \parallel & & \downarrow z & & \downarrow p_3 & \\
 C_1 & \xrightarrow{f_C} & C_2 & \xrightarrow{g_C} & C_3 & \xrightarrow{\delta_C} \\
 & & \downarrow (g_A)_* \varepsilon_2 & & \downarrow \varepsilon_3 &
 \end{array} . \quad (3.4.5)$$

今断言式 (3.4.5) 即为所求. 显然式 (3.4.2) 中四个方块交换, 下检验扩张元的等式:

1.  $(f_A)_* \varepsilon_1 = (f_A)_* \psi^* \eta = \psi^* (f_A)_* \eta = \psi^* z^* \varepsilon_2 = (z \circ \psi)^* \varepsilon_2 = (f_C)^* \varepsilon_2$ ;
2. 式 (3.4.5) 直接给出  $(g_A)_* \varepsilon_2 = (g_C)^* \varepsilon_3$ ;
3.  $(i_1)_* \delta_A = (i_1)_* y^* \eta = y^* (i_1)_* \eta = y^* \varphi^* \delta_B = (\varphi \circ y)^* \delta_B = (i_3)^* \delta_B$ ;
4. 式 (3.4.5) 直接给出  $(p_1)_* \delta_B = (p_3)^* \delta_C$ .

□

九引理即 conflation 的“四推六”, 以下“五推六”变体无需弱幂等完备性.

定理 3.4.2. 给定以下五条 conflation 的交换图, 使得  $(g_A)_* \varepsilon_2 = (g_C)^* \varepsilon_3$ :

$$\begin{array}{ccccc}
 A_1 & \xrightarrow{f_A} & A_2 & \xrightarrow{g_A} & A_3 & \xrightarrow{\delta_A} \\
 & & \downarrow i_2 & & \downarrow i_3 & \\
 B_1 & \xrightarrow{f_B} & B_2 & \xrightarrow{g_B} & B_3 & \xrightarrow{\delta_B} \\
 & & \downarrow p_2 & & \downarrow p_3 & \\
 C_1 & \xrightarrow{f_C} & C_2 & \xrightarrow{g_C} & C_3 & \xrightarrow{\delta_C} \\
 & & \downarrow \varepsilon_2 & & \downarrow \varepsilon_3 &
 \end{array} . \quad (3.4.6)$$

存在  $\varepsilon_1$  使得下图交换, 且所有相邻行与列都是实现间的态射:

$$\begin{array}{ccccc}
 A_1 & \xrightarrow{f_A} & A_2 & \xrightarrow{g_A} & A_3 & \xrightarrow{\delta_A} \\
 \downarrow i_1 & & \downarrow i_2 & & \downarrow i_3 & \\
 B_1 & \xrightarrow{f_B} & B_2 & \xrightarrow{g_B} & B_3 & \xrightarrow{\delta_B} \\
 \downarrow p_1 & & \downarrow p_2 & & \downarrow p_3 & \\
 C_1 & \xrightarrow{f_C} & C_2 & \xrightarrow{g_C} & C_3 & \xrightarrow{\delta_C} \\
 \downarrow \varepsilon_1 & & \downarrow \varepsilon_2 & & \downarrow \varepsilon_3 & 
 \end{array} . \quad (3.4.7)$$

证明. 将  $(g_A, g_C) : \varepsilon_2 \rightarrow \varepsilon_3$  拆解如下:

$$\begin{array}{ccccc}
 A_2 & \xrightarrow{g_A} & A_3 & \xrightarrow{=} & A_3 & \xrightarrow{\delta_A} \\
 \downarrow i_2 & & \downarrow i_2 & & \downarrow i_3 & \\
 B_2 & \xrightarrow{x} & E & \xrightarrow{\varphi} & B_3 & \xrightarrow{\delta_B} \\
 \downarrow p_2 & & \downarrow z & & \downarrow p_3 & \\
 C_2 & \xrightarrow{=} & C_2 & \xrightarrow{g_C} & C_3 & \xrightarrow{\delta_C} \\
 \downarrow \varepsilon_2 & & \downarrow & & \downarrow \varepsilon_3 & 
 \end{array} . \quad (3.4.8)$$

由 ET4 与定理 3.2.5, 左上方块是同伦的推出拉回. 由定理 3.1.1 与定理 3.2.7, 右下方块是同伦的推出拉回. 由  $(g_A)_* \varepsilon_2 = (g_C)^* \varepsilon_3$ , 不妨假定两处方块交于  $E$ . 特别地,  $\varphi$  是 deflation.

往后证明同定理 3.4.1. 需要注意, 式 (3.4.8) 蕴含了式 (3.4.5) 的右图此处仅需通过命题 2.3.10 构造式 (3.4.5) 的左图. 最后验证扩张元的等式即可.  $\square$

## 4 特殊的外三角范畴

### 4.1 正合范畴是外三角范畴

正合范畴定义见定义 1.1.1, 本节假定  $\text{Ext}^1$  的取值是集合 (例 1.1.5).

**例子 4.1.1.** (正合范畴视作外三角范畴). 给定正合范畴  $(\mathcal{C}, \mathcal{E})$ , 我们定义基本资料 (定义 2.1.1).

$$1. \mathbb{E} := \text{Ext}^1 : \mathcal{C}^{\text{op}} \times \mathcal{C} \rightarrow \mathbf{Ab};$$

$$2. \text{若 } \text{ses } 0 \rightarrow A \xrightarrow{i} B \xrightarrow{p} C \rightarrow 0 \text{ 对应同构类 } \delta \in \mathbb{E}(C, A), \text{ 则记 } A \xrightarrow{i} B \xrightarrow{p} C \in \mathfrak{s}(\delta).$$

下证明  $(\mathcal{C}, \mathbb{E}, \mathfrak{s})$  是外三角范畴.

**引理 4.1.2.** 沿用例 4.1.1 的表述. 实现之间的同态  $(\alpha, \beta, \gamma) : \delta \rightarrow \varepsilon$  满足  $\alpha_*\delta = \gamma^*\varepsilon$ .

**证明.** 这是 Baer 和的基本性质 (或 Yoneda 群的定义) 的定义. 细节见 [Mit65] 的章节 VII. □

**命题 4.1.3.** 例 4.1.1 定义的  $(\mathcal{C}, \mathbb{E}, \mathfrak{s})$  满足 ET1.

**证明.** 由定理 1.1.8,  $\mathbb{E} := \text{Ext}^1$  是加法双函子. □

**命题 4.1.4.** 例 4.1.1 定义的  $(\mathcal{C}, \mathbb{E}, \mathfrak{s})$  满足 ET2.

**证明.** 我们说明  $\mathfrak{s}$  是一个加法实现. 检验 ET2-1 如下.

1. 若  $\delta$  对应  $X \rightarrow F \rightarrow Z$ , 则一切式 (2.1.2) 中所示的同构的态射链也是  $\delta$  的实现. 反之亦然.
2. 正合范畴的 ses 包含所有可裂 ses, 且可裂 ses 对应  $\text{Ext}^1$  的零元. 反之亦然.
3. 正合范畴的 ses 对直和封闭.  $\mathfrak{s}$  与直和交换.

继而检验 ET2-2. 给定  $f_*\delta = g^*\varepsilon$ . 下求解提升问题:

$$\begin{array}{ccccc} A \xrightarrow{i} B & \xrightarrow{p} & C & \xrightarrow{\delta} & \\ \downarrow f & \downarrow & \downarrow g & & \\ X \xrightarrow{j} Y & \xrightarrow{q} & Z & \xrightarrow{\varepsilon} & \end{array} \quad \begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{jf} & Y \\ i \downarrow & \nearrow & \downarrow q \\ B & \xrightarrow{gp} & Z \end{array} \quad (4.1.1)$$

依照定理 2.4.1 中构造, 得正合列的交换图

$$\begin{array}{ccccccc} (C, X) & \xrightarrow{p^*} & (B, X) & \xrightarrow{i^*} & (A, X) & \xrightarrow{\delta^\#} & \text{Ext}^1(C, X) \\ \downarrow j_* & & \downarrow j_* & & \downarrow j_* & & \downarrow j_* \\ (C, Y) & \xrightarrow{p^*} & (B, Y) & \xrightarrow{i^*} & (A, Y) & \xrightarrow{\delta^\#} & \text{Ext}^1(C, Y) \\ \downarrow q_* & & \downarrow q_* & & \downarrow q_* & & \downarrow q_* \\ (C, Z) & \xrightarrow{p^*} & (B, Z) & \xrightarrow{i^*} & (A, Z) & \xrightarrow{\delta^\#} & \text{Ext}^1(C, Z) \\ \downarrow \varepsilon_\# & & \downarrow \varepsilon_\# & & \downarrow \varepsilon_\# & & \\ \text{Ext}^1(C, X) & \xrightarrow{p^*} & \text{Ext}^1(B, X) & \xrightarrow{i^*} & \text{Ext}^1(A, X) & & \end{array} \quad (4.1.2)$$



容易计算  $(0; gp; jf; 0)$  的微分为 0, 从而存在原像  $(a; b; c)$ . 注意到  $a \in \ker \varepsilon_{\sharp} = \operatorname{im} q_*$ , 类似的计算表明  $b \in \operatorname{im} i^*$ . 此时存在  $(s; t) \in (C, Y) \oplus (B, X)$  使得

$$d(s; t) + (a; b; c) = (0; b'; 0). \quad (4.1.3)$$

上式右侧的微分为  $d(a; b; c) = (0; gp; jf; 0)$ ,  $b' : B \rightarrow Y$  即为所求.  $\square$

**命题 4.1.5.** 例 4.1.1 定义的  $(\mathcal{C}, \mathbb{E}, \mathfrak{s})$  满足 ET3 (ET3').

证明. 式 (2.1.6) 虚线处态射由核 (余核) 的泛性质给出. 扩张元态射的等式由引理 4.1.2 检验.  $\square$

**命题 4.1.6.** 例 4.1.1 定义的  $(\mathcal{C}, \mathbb{E}, \mathfrak{s})$  满足 ET4 (ET4').

证明. 由定理 1.1.12 (及其对偶表述) 得 conflation 的交换图.

$$\begin{array}{ccccccc} X & \xrightarrow{i} & Y & \xrightarrow{p} & Z & \dashrightarrow & \\ \parallel & & \downarrow j & & \downarrow j' & & \\ X & \xrightarrow{j \circ i} & A & \dashrightarrow & W & \dashrightarrow & \\ & & \downarrow q & & \downarrow q' & & \\ & & B & \xlongequal{\quad} & B & & \\ & & \downarrow \varepsilon & & \downarrow \varepsilon' & & \end{array} \quad (4.1.4)$$

特别地, 右上角同伦的推出拉回方块对应  $i_* \delta' = (q')^* \varepsilon$ . 扩张元态射的等式由引理 4.1.2 检验.  $\square$

**定理 4.1.7.** 沿用例 4.1.1 的表述.  $(\mathcal{C}, \mathbb{E}, \mathfrak{s})$  是外三角范畴.

证明. 由上述命题.  $\square$

另一方面, 我们给出一则外三角范畴是正合范畴的充要条件.

**定理 4.1.8.** 外三角范畴  $(\mathcal{C}, \mathbb{E}, \mathfrak{s})$  诱导的二元组  $(\mathcal{C}, \{\text{conflation}\})$  是正合范畴, 当且仅当所有 inflation 是单态射, 且所有 deflation 是满态射.

证明.  $(\rightarrow)$  是显然的. 下证明  $(\leftarrow)$ , 即验证定义 EX's.

1. EX0 与 EX0' 显然成立, 可裂短正合列必然是 conflation.
2. EX1 与 EX1' 由 ET4 (ET4') 证得. 容易发现, ET4 (ET4') 的推论是 inflation (deflation) 关于合成闭.
3. EX2 与 EX2' 对偶, 下仅证明 EX2. 由定理 3.2.1, 任意 inflation  $A \rightarrow B$  与任意态射  $A \rightarrow X$  可补全作同伦的推出拉回方块, 且 inflation 的对边仍是 inflation. 由 inflation 是单态射, 所有弱拉回问题的解唯一; 由 deflation 是满态射, 所有弱推出问题的解唯一. 这说明上述同伦的推出拉回方块就是范畴意义下的推出拉回方块.

$\square$

## 4.2 三角范畴是外三角范畴

三角范畴的定义见定义 1.2.1.

**例子 4.2.1.** (三角范畴视作外三角范畴). 给定三角范畴  $(\mathcal{C}, \Sigma, \mathcal{E})$ , 我们定义基本资料 (定义 2.1.1).

1.  $\mathbb{E} := (-, \Sigma(?))_{\mathcal{C}} : \mathcal{C}^{\text{op}} \times \mathcal{C} \rightarrow \mathbf{Ab}$ ;
2. 给定好三角  $\triangle : A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{g} C \xrightarrow{h} \Sigma A$ , 记  $\triangle \in \mathfrak{s}(h)$ .

**定理 4.2.2.** 例 4.2.1 中定义的  $(\mathcal{C}, \mathbb{E}, \mathfrak{s})$  是外三角范畴.

证明. (ET1). 显然  $\mathbb{E}$  是双函子. (ET2-1). 依照 TR1-3,  $\mathfrak{s}$  是态射到同构类的对应. 试回顾两则三角范畴的基本事实:

1.  $X \rightarrow Y \rightarrow Z \xrightarrow{s} \Sigma X$  的前三项是可裂短正合列, 当且仅当  $s = 0$  (推论 1.2.6).
2. 命题 1.2.4 第四条表明好三角对直和封闭, 且  $\mathfrak{s}$  与直和交换.

(ET2-2), (ET3) 与 (ET3') 是命题 1.2.4 第一条的直接推论.

(ET4) 与 (ET4') 是 TR4 的直接推论. □

## 4.3 自等价 + 外三角范畴 = 三角范畴

本小节给出外三角范畴是三角范畴的一个充分条件.

**例子 4.3.1.** (带自等价的外三角范畴). 假定外三角范畴  $(\mathcal{C}, \mathbb{E}, \mathfrak{s})$  配有自等价  $\Sigma$ , 使得  $\mathbb{E}(-, ?) := (-, \Sigma?)$ . 此时, conflation  $A \xrightarrow{i} B \xrightarrow{p} C \xrightarrow{\delta} \Sigma A$  的  $\delta$  项是一个具体的态射, 形如  $\delta : C \rightarrow \Sigma A$ .

**例子 4.3.2.** (1 的实现). 考虑以下特殊的扩张元:

$$1_{\Sigma X} \in (\Sigma X, \Sigma X) =: \mathbb{E}(\Sigma X, X) \ni \eta_X. \quad (4.3.1)$$

取实现  $X \xrightarrow{i} E_X \xrightarrow{p} \Sigma X \xrightarrow{\eta_X} (\Sigma X)$ , 则有长正合列

$$(-, X) \xrightarrow{i \circ -} (-, E_X) \xrightarrow{p \circ -} (-, \Sigma X) \xrightarrow{(\eta_X)_{\sharp} = \text{id}} (-, \Sigma X) \rightarrow \cdots. \quad (4.3.2)$$

从而  $p = 0$ . 对偶地, 反变函子的长正合列表明  $i = 0$ . 因此  $E_X = 0$ . 我们得到一类特殊的 conflation

$$X \rightarrowtail 0 \twoheadrightarrow \Sigma X \dashrightarrow^{\eta_X} (\Sigma X). \quad (4.3.3)$$

**定理 4.3.3.** 例 4.3.1 中的外三角范畴是三角范畴, 平移函子即自等价  $\Sigma$ , 好三角即 conflation 所在的四项态射序列.

证明. 我们验证 TR1-1, TR1-2, TR1-3', TR2, TR3 与 TR4. 此处

TR1-3' 任意态射  $h$  可嵌入某一好三角  $X \xrightarrow{f} Y \xrightarrow{g} Z \xrightarrow{h} \Sigma X$ .

除去 TR2, 剩余公理的检验都是显然的. 以下构造  $X \xrightarrow{f} Y \xrightarrow{g} Z \xrightarrow{h} \Sigma X$  的顺时针旋转. 依照定理 3.1.2 构造双 inflation 的推出:

$$\begin{array}{ccccccc}
 X & \xrightarrow{f} & Y & \xrightarrow{g} & Z & \xrightarrow{\delta} & (\Sigma X) \\
 \downarrow & & \downarrow & & \parallel & & \downarrow (0) \\
 0 & \xrightarrow{\quad} & Z & \xrightarrow{\quad} & Z & \xrightarrow{0} & (0) \\
 \downarrow & & \downarrow w & & & & \\
 \Sigma X & \xrightarrow{\quad} & \Sigma X & & & & \\
 \downarrow \eta_X & & \downarrow f_* \eta_X & & & & \\
 (\Sigma X) & \xrightarrow{(\Sigma f)} & (\Sigma Y) & & & & 
 \end{array} . \tag{4.3.4}$$

以上, 第二横行取作标准的可裂 conflation, 第二纵列受制于第二横行. 由式 (3.1.8) 得

$$0 = (1_Z)^* \delta + w^* \eta_X = \delta \circ 1_Z + 1_{\Sigma X} \circ w = \delta + w. \tag{4.3.5}$$

因此, 第二纵列所示的 conflation 是  $Y \xrightarrow{g} Z \xrightarrow{\delta} \Sigma X \xrightarrow{\Sigma f} (\Sigma Y)$ . 通过适当的同构调整符号, 我们得到顺时针旋转的构造.  $\square$

## 4.4 理想商

Happel 定理 ([Hap88], 章节 1.2) 指出 Frobenius 正合范畴的商范畴是三角范畴. 鉴于正合范畴与三角范畴都是外三角范畴, Happel 定理给出“由外三角范畴创造外三角范畴”的一般方式.

我们定义外三角范畴的投射对象与 Frobenius 外三角范畴.

**定义 4.4.1.** (投射对象) 称  $P$  是外三角范畴的投射对象, 若其满足以下等价定义.

1. 对任意 deflation  $p, (P, p)$  是满射.
2. 任意形如  $A \rightarrow B \rightarrow P \dashrightarrow$  的 conflation 是可裂的.
3.  $\mathbb{E}(P, -) = 0$ .

证明. 依照实现的定义,  $(2 \leftrightarrow 3)$  是显然的. 长正合列式 (2.2.11) 给出了  $(3 \rightarrow 1)$ . 考虑  $1_P$  的分解, 得  $(1 \rightarrow 2)$ .  $\square$

**备注 4.4.2.** 以上定义的“投射对象”理应严谨表述作“相对投射对象”. 基于类似定义 2.1.4 第四条的考量, 使用“投射对象”一词通常不会引起歧义.

**定义 4.4.3.** (理想). 称全子加法范畴  $\mathcal{B} \subseteq \mathcal{C}$  是外三角范畴的理想, 若  $\mathcal{B}$  中任意对象既是投射对象, 又是内射对象. 显然  $0 \in \mathcal{B}$ , 且投射 (对象) 关于直和封闭, 因此  $\mathcal{B}$  是良定义的. 任意外三角范畴都有 0 理想.

**定理 4.4.4.** (理想商). 取定理想  $\mathcal{B} \subseteq \mathcal{C}$ , 则加法商范畴  $\mathcal{C}/\mathcal{B}$  具有由  $(\mathcal{C}, \mathbb{E}, \mathfrak{s})$  诱导的外三角范畴结构.

1. 依照惯例, 假定  $\mathcal{C}/\mathcal{B}$  与  $\mathcal{C}$  有相同的对象类. 对态射  $f \in \mathcal{C}$ , 记  $[f] \in \mathcal{C}/\mathcal{B}$  为商范畴中相应的态射.  $[f] = [f']$  当且仅当  $(f - f')$  通过  $\mathcal{B}$  中某一对象分解.
2. (加法商的泛性质). 一般地, 若加法函子  $F: \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{D}$  映加法全子范畴  $\mathcal{A}' \subseteq \mathcal{A}$  至零对象, 则  $F$  通过  $\mathcal{A} \rightarrow (\mathcal{A}/\mathcal{A}')$  唯一地分解. 具体地, 该函子与  $F$  在对象层面取值相同; 对每个 Hom-群, 泛性质唯一决定了  $[f] \mapsto Ff$ . 此处不必疑虑范畴的“同构”与“等价”之别.

证明. 以下检验外三角范畴的公理.

(ET1). 由  $\mathbb{E} : \mathcal{C}^{\text{op}} \times \mathcal{B} \rightarrow 0$  与  $\mathbb{E} : \mathcal{B}^{\text{op}} \times \mathcal{C} \rightarrow 0$ , 以下是良定义的双边加法函子

$$\mathbb{E}' : (\mathcal{C}/\mathcal{B})^{\text{op}} \times (\mathcal{C}/\mathcal{B}) \rightarrow \mathbf{Ab}, \quad (X, Y) \mapsto \mathbb{E}(X, Y). \quad (4.4.1)$$

下验证这是双函子, 即  $[g]^*[f]_*\delta = [f]_*[d]^*\delta$ . 依照加法商的泛性质, 所有  $[\cdot]$  括号可以去除; 换言之,  $f$  的“作用”就是  $[f]$  的“作用”. 从而等式成立.

(ET2-1). 若  $A \xrightarrow{i} B \xrightarrow{p} C \in \mathfrak{s}(\delta)$ , 则记  $A \xrightarrow{[i]} B \xrightarrow{[p]} C \in \mathfrak{s}'(\delta)$ . 尽管扩张元在商范畴中的实现“有更多选择余地”,  $\mathcal{C}$  中不同的扩张元在  $\mathcal{C}/\mathcal{B}$  中仍旧不同. 加法商的泛性质仅涉及加法函子, 从而 ET2-1 得证.

(ET2-2). 给定  $f_*\delta = g^*\eta$  与  $\mathcal{C}/\mathcal{B}$  中的交换图, 得

$$\begin{array}{ccccc} X & \xrightarrow{[a]} & Y & \xrightarrow{[b]} & Z \dashrightarrow^{\delta} \\ \downarrow [f] & & & & \downarrow [g] \\ A & \xrightarrow{[x]} & B & \xrightarrow{[y]} & C \dashrightarrow^{\eta} \end{array} \quad (4.4.2)$$

不妨假定上下两行删去  $[\cdot]$  后是  $\mathcal{C}$  中的 **conflation**. 以上交换图在去除  $[\cdot]$  后合成为 0, 故交换. 依照外三角范畴  $\mathcal{C}$  的 ET2-2 公理, 构造  $\varphi : Y \rightarrow B$ ,  $[\varphi]$  即为所求.

(ET3). 假定下图在  $\mathcal{C}/\mathcal{B}$  中交换, 且两横行删去  $[\cdot]$  后是  $\mathcal{C}$  中的 **conflation**:

$$\begin{array}{ccccc} X & \xrightarrow{[a]} & Y & \xrightarrow{[b]} & Z \dashrightarrow^{\delta} \\ \downarrow [f] & & \downarrow [h] & & \\ A & \xrightarrow{[x]} & B & \xrightarrow{[y]} & C \dashrightarrow^{\eta} \end{array} \quad (4.4.3)$$

记  $xf - ha$  经  $P \in \mathcal{B}$  分解. 推论 3.3.8 表明  $\binom{a}{i}$  是 **inflation**, 此时  $\mathcal{C}$  中交换图:

$$\begin{array}{ccccc} X & \xrightarrow{\binom{a}{i}} & Y \oplus P & \xrightarrow{b'} & Z' \dashrightarrow^{\delta'} \\ \downarrow f & & \downarrow (h \ j) & & \downarrow \lambda \\ A & \xrightarrow{x} & B & \xrightarrow{y} & C \dashrightarrow^{\eta} \end{array} \quad (4.4.4)$$

对  $\delta$  与  $\delta'$  使用定理 3.1.4, 得下图 (内射对象  $P$  出发的 **inflation** 可裂):

$$\begin{array}{ccccc} & & P & \xlongequal{\quad} & P \\ & & \downarrow \binom{0}{1} & & \downarrow \binom{0}{1} \\ X & \xrightarrow{\binom{a}{i}} & Y \oplus P & \xrightarrow{\binom{b}{k} \ 0} & Z \oplus P \dashrightarrow^{\delta'} \\ \parallel & & \downarrow (1 \ 0) & & \downarrow (1 \ 0) \\ X & \xrightarrow{a} & Y & \xrightarrow{b} & Z \dashrightarrow^{\delta} \end{array} \quad (4.4.5)$$

特别地,  $[\binom{1}{0}]^*\delta' = \delta$ . 结合式 (4.4.4) 与式 (4.4.5), 取  $[\lambda \circ \binom{1}{0}] : Z \rightarrow C$  即可.

(ET4). ET4 的题设不涉及交换图. 因此可以将  $\mathcal{C}/\mathcal{B}$  的题设视作  $\mathcal{C}$  的题设, 再将  $\mathcal{C}$  中结论取  $[\cdot]$  即可.  $\square$

称  $\mathcal{C}$  有足够投射 (内射) 对象, 若任意对象  $X$  配有 **deflation**  $P \twoheadrightarrow X$  (**inflation**  $X \hookrightarrow I$ ), 其中  $P(I)$  是投射 (内射) 对象.

**定义 4.4.5.** (Frobenius 外三角范畴). 称外三角范畴  $(\mathcal{C}, \mathbb{E}, \mathfrak{s})$  是 Frobenius 的, 若  $\mathcal{C}$  既有足够的投射对象, 又有足够的内射对象, 且投射对象与内射对象相同.

**定理 4.4.6.** (外三角范畴的 Happel 定理). 设  $(\mathcal{C}, \mathbb{E}, \mathfrak{s})$  是 Frobenius 外三角范畴, 记  $\mathcal{B}$  是所有投射对象构成的理想. 此时, 定理 4.4.4 给出商范畴  $\mathcal{C}/\mathcal{B}$  是三角范畴.

证明. 依照定理 4.3.3, 只需构造自等价  $\Sigma$  使得有自然同构  $\mathbb{E}(-, (?)) \simeq (-, \Sigma(?))$ . 在范畴  $\mathcal{C}$  中, 我们对所有对象  $X$  取定 conflation  $\delta_X$ , 并对所有态射  $f: X \rightarrow Y$  取定 conflation 间的态射:

$$\begin{array}{ccccc} X & \xrightarrow{i_X} & I_X & \xrightarrow{p_X} & C_X & \xrightarrow{\delta_X} \\ \downarrow f & & \downarrow I_f & & \downarrow C_f & \\ Y & \xrightarrow{i_Y} & I_Y & \xrightarrow{p_Y} & C_Y & \xrightarrow{\delta_Y} \end{array} \quad (4.4.6)$$

以上  $I_f$  由内射对象的提升性取定,  $C_f$  由 ET3 取定. 显然,  $? \mapsto C_?$  通常不是  $\mathcal{C}$  中的函子; 直觉上看, 这诱导了  $\mathcal{C}/\mathcal{B}$  中的加法自函子. 我们将这一证明拆解作如下几步.

步骤 0 (选定骨架  $\mathcal{C}/\mathcal{B} \rightarrow \mathcal{K}$ ). 考虑复合  $\mathcal{C} \xrightarrow{C} \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C}/\mathcal{B}$ . 为避免对象相差一个同构, 我们依照类的选择公理取定  $\mathcal{C}/\mathcal{B}$  的骨架  $\mathcal{K}$  (同构类的代表元所在的全子范畴), 并记对应的全忠实函子  $[\cdot]: \mathcal{C}/\mathcal{B} \rightarrow \mathcal{K}$ . 态射层面, 复合  $\mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C}/\mathcal{B} \rightarrow \mathcal{K}$  将  $f$  对应至  $[[f]]$ , 往后简略地记作  $[f]$ .

步骤 1 (检验函子  $\mathcal{C} \xrightarrow{C} \mathcal{C} \xrightarrow{[\cdot]} \mathcal{K}$ ). 我们检验恒等律与复合律.

(a) (恒等律). 不妨约定式 (4.4.6) 中  $I_{1_X} := 1_{I_X}$ ,  $C_{1_X} := 1_{C_X}$ . 这不会引起矛盾.

(b) (复合律). 考虑以下  $\mathcal{C}$  中交换图

$$\begin{array}{ccccc} X & \xrightarrow{i_X} & I_X & \xrightarrow{p_X} & C_X & \xrightarrow{\delta_X} \\ \downarrow f & & \downarrow I_f & & \downarrow C_f & \\ Y & \xrightarrow{i_Y} & I_Y & \xrightarrow{p_Y} & C_Y & \xrightarrow{\delta_Y} \\ \downarrow g & & \downarrow I_g & & \downarrow C_g & \\ Z & \xrightarrow{i_Z} & I_Z & \xrightarrow{p_Z} & C_Z & \xrightarrow{\delta_Z} \end{array} \quad (4.4.7)$$

往证  $[C_g] \circ [C_f] = [C_{g \circ f}]$ . 实际上, 只需证明以下命题.

引理 4.4.7. 沿用以上  $\delta_X$  与  $\delta_Z$  的实现. 假定对  $k = 1, 2$ , 以下是  $\mathcal{C}$  中 conflation 的态射:

$$\begin{array}{ccccc} X & \xrightarrow{i_X} & I_X & \xrightarrow{p_X} & C_X & \xrightarrow{\delta_X} \\ \downarrow h & & \downarrow l_k & & \downarrow q_k & \\ Z & \xrightarrow{i_Z} & I_Z & \xrightarrow{p_Z} & C_Z & \xrightarrow{\delta_Z} \end{array} \quad (4.4.8)$$

此时  $[q_1] = [q_2]$ .

证明. 由  $(\delta_Z)_\#(q_1 - q_2) = (\delta_X)^\#(h - h) = 0$  与长正合列 (式 (2.2.11)), 得  $(q_1 - q_2)$  通过投射对象  $I_Z$  分解. 从而  $[q_1] = [q_2]$ .  $\square$

步骤 2 (证明函子  $\mathcal{C} \xrightarrow{[C]} \mathcal{K}$  是加法函子). 对加法范畴间的函子而言, 加法函子就是保持直和的函子 (证明熟知, 如 [Cre21]). 由于  $\mathcal{C}/\mathcal{B} \rightarrow \mathcal{K}$  是加法函子, 故仅需证明  $[C_X \oplus C_Y] = [C_{X \oplus Y}]$ . 任取 conflation 间的态射  $(1, n, q)$  与  $(1, m, p)$ , 如下所示:

$$\begin{array}{ccccccc} X \oplus Y & \xrightarrow{i_X \oplus i_Y} & I_X \oplus I_Y & \xrightarrow{p_X \oplus p_Y} & C_X \oplus C_Y & \xrightarrow{\delta_X \oplus \delta_Y} \\ \parallel & & \uparrow n \quad \downarrow m & & \uparrow q \quad \downarrow p & \\ X \oplus Y & \xrightarrow{i_Z} & I_{X \oplus Y} & \xrightarrow{p_Z} & C_{X \oplus Y} & \xrightarrow{\delta_{X \oplus Y}} \end{array} \quad (4.4.9)$$

依照引理 4.4.7,  $[pq] = [1_{C_{X \oplus Y}}]$  与  $[qp] = [1_{C_{X \oplus Y}}]$ .

步骤3 (证明加法函子  $\mathcal{C} \xrightarrow{[C]} \mathcal{K}$  诱导了  $\mathcal{K}$  的自函子). 不妨约定对一切投射对象  $P$ , 式 (4.4.6) 中均有  $I_P = P$  与  $C_P = 0$ . 这不会引起任何矛盾. 我们得到诱导的函子  $\mathcal{C}/\mathcal{B} \xrightarrow{[C]} \mathcal{K}$ . 对任意范畴等价  $\mathcal{K} \rightarrow \mathcal{C}/\mathcal{B}$ , 复合  $[C]$  所得的自函子是唯一的, 记作  $\Sigma$ .

步骤4 (对外三角范畴  $\mathcal{K}$ , 有函子的自然同构  $\mathbb{E}'(Z, X) \simeq (Z, \Sigma X)$ ). 我们将同构选取如下:

$$\begin{array}{ccccc} Z \hookrightarrow E & \xrightarrow{g} & X & \dashrightarrow^{\varepsilon} & \\ \parallel & \downarrow \lambda & \downarrow \varphi & & \\ Z \xrightarrow{i_Z} I_Z & \xrightarrow{p_Z} & C_Z & \dashrightarrow^{\delta_Z} & \end{array} \quad \begin{array}{ccc} [\varepsilon] & & [\varphi^* \delta_Z] \\ \downarrow & 1:1 & \uparrow \\ [\varphi] & & [\varphi] \end{array} . \quad (4.4.10)$$

对以上  $\delta \in \mathbb{E}(C, A)$ , 记  $[\delta] \in \mathbb{E}([C], [A])$ . 由引理 4.4.7, ET3 诱导的  $[\varepsilon] \mapsto [\varphi]$  无关  $\lambda$  与  $\varphi$  的选取. 显然  $[\varepsilon] \mapsto [\varphi] \mapsto [\varphi^* \delta_Z]$  与  $[\varphi] \mapsto [\varphi^* \delta_Z] \mapsto [\varphi']$  是恒等. 最后验证函子性.

(a) (后项). 下图给出  $[\alpha_* \varepsilon] = [(C_\alpha)^* \varphi^* \delta_{Z'}] = [(C_\alpha)^* \alpha_* \delta_Z]$ :

$$\begin{array}{ccccc} Z' \hookrightarrow E' & \xrightarrow{g} & X & \dashrightarrow^{\alpha_* \varepsilon} & \\ \alpha \uparrow & \uparrow & \parallel & & \\ Z \hookrightarrow E & \xrightarrow{g} & X & \dashrightarrow^{\varepsilon} & \\ \parallel & \downarrow \lambda & \downarrow \varphi & & \\ Z \xrightarrow{i_Z} I_Z & \xrightarrow{p_Z} & C_Z & \dashrightarrow^{\delta_Z} & \\ \downarrow \alpha & \downarrow I_\alpha & \downarrow C_\alpha & & \\ Z' \xrightarrow{i_{Z'}} I_{Z'} & \xrightarrow{p_{Z'}} & C_{Z'} & \dashrightarrow^{\delta_{Z'}} & \end{array} . \quad (4.4.11)$$

因此, 扩张元  $[\alpha_* \varepsilon]$  对应态射  $[C_\alpha] \circ [\varphi]$ , 此处  $[C_\alpha]$  即  $\Sigma[\alpha]$ .

(b) (前项). 由下图,  $[\gamma^* \varepsilon]$  对应的态射是  $[\varphi] \circ [\gamma]$ :

$$\begin{array}{ccccc} Z \hookrightarrow F & \xrightarrow{g} & X' & \dashrightarrow^{\gamma^* \varepsilon} & \\ \parallel & \downarrow & \downarrow \gamma & & \\ Z \hookrightarrow E & \xrightarrow{g} & X & \dashrightarrow^{\varepsilon} & \\ \parallel & \downarrow \lambda & \downarrow \varphi & & \\ Z \xrightarrow{i_Z} I_Z & \xrightarrow{p_Z} & C_Z & \dashrightarrow^{\delta_Z} & \end{array} . \quad (4.4.12)$$

往证  $\Sigma$  是范畴等价. 可以同理构造  $\mathcal{K}$  的自函子  $\Omega([X]) = [K_X]$ , 其中  $K^X \xrightarrow{j^X} P^X \xrightarrow{q^X} X \xrightarrow{\kappa^X}$ . 下证明  $\Sigma\Omega$  与  $\Omega\Sigma$  是恒同函子. 对前者, 考虑定理 3.1.1:

$$\begin{array}{ccccc} K^X \xrightarrow{j^X} P^X & \xrightarrow{q^X} & X & \xrightarrow{\kappa^X} & \\ \downarrow i_{K^X} & \downarrow & \parallel & & \\ I_{K^X} \xrightarrow{} EX & \xrightarrow{s^X} & X & & \\ \downarrow p_{K^X} & \downarrow t_X & & & \\ C_{K^X} & = & C_{K^X} & & \\ \downarrow \delta_{K^X} & & & & \end{array} . \quad (4.4.13)$$

由于  $P^X$  与  $I_{K^X}$  是投射对象,  $[s^X]$  与  $[t_X]$  是  $\mathcal{K}$  中的恒同态射, 得同构  $\theta_X : [X] \simeq [C_{K^X}] = \Sigma\Omega[X]$ .

态射层面, 对任意  $f : X \rightarrow Y$ , 对  $Y$  作式 (4.4.13). 取定态射  $K^f, P^f$ , 与  $I_{K^f}$ , 由同伦推出拉回方块与

ET3 (ET3') 构造  $Ef$ , 继而由 ET3 构造  $\overline{C_{Kf}} : C_{K^X} \rightarrow C_{K^Y}$  与  $\bar{f} : X \rightarrow Y$ . 由引理 4.4.7, 得  $[\bar{f}] = [f]$  且  $[\overline{C_{Kf}}] = [C_{Kf}]$ . 此时,

$$\Sigma\Omega[f] \circ \theta_X = [C_{Kf}] \circ [t_X] \circ [s^X]^{-1} \quad (4.4.14)$$

$$= [t_Y] \circ [Ef] \circ [s^X]^{-1} \quad (4.4.15)$$

$$= [t_Y] \circ [s^Y]^{-1} \circ [f] = \theta_Y \circ [f]. \quad (4.4.16)$$

□

以下是 Happel 定理的一些推论.

推论 4.4.8. 外三角范畴  $\mathcal{C}$  是三角范畴, 当且仅当所有态射都是 inflation, 且都是 deflation.

证明. ( $\rightarrow$ ) 方向由 TR1-3 与 TR2 即得. 下证明 ( $\leftarrow$ ) 方向. 若所有态射都是 inflation, 则  $X \rightarrow 0$  均是 inflation. 若  $\mathcal{C}$  有内射对象, 则内射对象不为非零对象; 另一方面, 容易检验零对象确实是内射对象. 对偶地,  $\mathcal{C}$  的投射对象恰好是零对象. 这说明  $\mathcal{C}$  是 Frobenius 范畴. 由定理 4.4.6,  $\mathcal{C}/0 = \mathcal{C}$  的骨架是三角范畴, 从而  $\mathcal{C}$  是三角范畴. □

## 5 Hovey 对应

### 5.1 余挠对

余挠对是一门庞大的理论, 本章节仅罗列一些基本定义与结论. 以下选定外三角范畴  $(\mathcal{C}, \mathbb{E}, \mathfrak{s})$ .

**定义 5.1.1.** ( $\mathbb{E}$ -垂直). 称两个对象类  $\mathcal{X}$  与  $\mathcal{Y}$  是  $\mathbb{E}$ -垂直的 (下简称垂直), 若对任意  $X \in \mathcal{X}$  与  $Y \in \mathcal{Y}$ , 总有  $\mathbb{E}(X, Y) = 0$ . 我们引入以下记号:

1. 若  $\mathcal{X}$  与  $\mathcal{Y}$  垂直, 则记作  $\mathcal{X} \perp \mathcal{Y}$ ;
2. 记右垂直类  $\mathcal{X}^\perp := \{Y \mid \mathbb{E}(X, Y) = 0\}$ ;
3. 记左垂直类  ${}^\perp\mathcal{Y} := \{X \mid \mathbb{E}(X, Y) = 0\}$ .

简便起见, 约定  $\{M\}^\perp = M^\perp$ .

再引入几则 conflation 决定的类的运算.

**定义 5.1.2.** 假定  $\mathcal{X}$  与  $\mathcal{Y}$  是任意 (非空的) 对象类. 定义如下运算.

1.  $\text{Cone}(\mathcal{X}, \mathcal{Y}) := \{Z \mid \text{存在 } X \in \mathcal{X} \text{ 与 } Y \in \mathcal{Y}, \text{ 使得有 conflation } X \rightrightarrows Y \twoheadrightarrow Z\}$ ;
2.  $\text{coCone}(\mathcal{X}, \mathcal{Y}) := \{W \mid \text{存在 } X \in \mathcal{X} \text{ 与 } Y \in \mathcal{Y}, \text{ 使得有 conflation } W \rightrightarrows X \twoheadrightarrow Y\}$ ;
3.  $\mathcal{X} * \mathcal{Y} := \{E \mid \text{存在 } X \in \mathcal{X} \text{ 与 } Y \in \mathcal{Y}, \text{ 使得有 conflation } X \rightrightarrows E \twoheadrightarrow Y\}$ .

**例子 5.1.3.** 若  $\mathcal{X} \perp \mathcal{Y}$ , 则  $\mathcal{X} * \mathcal{Y} = \mathcal{X} \oplus \mathcal{Y}$ .

我们将 ET4 系列公理转化作如下引理.

**引理 5.1.4.** 对任意对象类  $\mathcal{X}, \mathcal{Y}$ , 与  $\mathcal{Z}$ , 有如下等式.

1.  $\text{Cone}(\mathcal{X}, \text{Cone}(\mathcal{Y}, \mathcal{Z})) = \text{Cone}(\mathcal{Y} * \mathcal{X}, \mathcal{Z})$ ;
2.  $\text{coCone}(\text{coCone}(\mathcal{X}, \mathcal{Y}), \mathcal{Z}) = \text{coCone}(\mathcal{X}, \mathcal{Z} * \mathcal{Y})$ ;
3.  $\text{Cone}(\mathcal{X}, \text{coCone}(\mathcal{Y}, \mathcal{Z})) = \text{coCone}(\text{Cone}(\mathcal{X}, \mathcal{Y}), \mathcal{Z})$ ;
4.  $\mathcal{X} * (\mathcal{Y} * \mathcal{Z}) = (\mathcal{X} * \mathcal{Y}) * \mathcal{Z}$ .

**证明.** 先证明 (1). 观察下图. 若  $M \in \text{Cone}(\mathcal{X}, \text{Cone}(\mathcal{Y}, \mathcal{Z}))$ , 则  $M$  由实线所示的  $\delta_i$  决定. 依照 ET4',  $M$  由虚线所示的  $\varepsilon_j$  决定. 因此  $M \in \text{Cone}(\mathcal{Y} * \mathcal{X}, \mathcal{Z})$ . 对偶地, 依照 ET4, 虚线所示的 conflation 决定实所示者.

$$\begin{array}{ccccc}
 Y & \xrightarrow{\quad} & F & \xrightarrow{\quad} & X & \xrightarrow{\varepsilon_1} \\
 \parallel & & \downarrow & & \downarrow & \\
 Y & \xrightarrow{\quad} & Z & \xrightarrow{\quad} & E & \xrightarrow{\delta_1} \\
 & & \downarrow & & \downarrow & \\
 & & M & = & M & \\
 & & \downarrow \varepsilon_2 & & \downarrow \delta_2 & 
 \end{array} . \tag{5.1.1}$$



(2) 是 (1) 在反范畴中的对偶. 证明 (3) ((4)) 所需的交换图分别是下图左 (右).

$$\begin{array}{ccc}
 X \xrightarrow{\quad} E \twoheadrightarrow M \dashrightarrow & & X \dashrightarrow E \dashrightarrow Y \dashrightarrow \\
 \parallel & \downarrow & \downarrow \\
 X \dashrightarrow Y \dashrightarrow F \dashrightarrow & & X \xrightarrow{\quad} M \twoheadrightarrow F \dashrightarrow \\
 \downarrow & & \downarrow \\
 Z \equiv Z & & Z \equiv Z \\
 \downarrow & & \downarrow
 \end{array} . \quad (5.1.2)$$

实线决出的  $M$  位于左式, 虚线决出的  $M$  位于右式. 由 ET4 与 ET4' 可证两者互相推导.  $\square$

结合 定理 3.1.1, 得如下引理.

引理 5.1.5. 给定任意对象类  $\mathcal{X}, \mathcal{Y}$  与  $\mathcal{Z}$ , 有以下包含关系.

1.  $\text{coCone}(\mathcal{X}, \mathcal{Z}) * \mathcal{Y} \subseteq \text{coCone}(\mathcal{X} * \mathcal{Y}, \mathcal{Z}) \supseteq \text{coCone}(\mathcal{Y}, \text{Cone}(\mathcal{X}, \mathcal{Z}))$ ;
2.  $\mathcal{Y} * \text{Cone}(\mathcal{X}, \mathcal{Z}) \subseteq \text{Cone}(\mathcal{X}, \mathcal{Y} * \mathcal{Z}) \supseteq \text{Cone}(\text{coCone}(\mathcal{X}, \mathcal{Z}), \mathcal{Y})$ .

证明. 下证明 (1). 左式对应下图 (左) 蓝实线, 右式对应下图 (右) 红实线, 中式对应虚线:

$$\begin{array}{ccc}
 & Y \equiv Y & A \xrightarrow{\quad} Y \xrightarrow{\quad} M \\
 & \downarrow & \downarrow \\
 X \dashrightarrow F \dashrightarrow M & & X \dashrightarrow B \dashrightarrow M \\
 \parallel & \downarrow & \downarrow \\
 X \xrightarrow{\quad} Z \xrightarrow{\quad} E & & Z \equiv Z
 \end{array} . \quad (5.1.3)$$

由 定理 3.1.1, 实线决定虚线; 反之, 虚线未必能决定实线. 上述包含通常无法改作等号. (2) 是 (1) 在反范畴中的对偶结论, 证明从略.  $\square$

**定义 5.1.6.** (余挠对). 称两个对象类  $(\mathcal{U}, \mathcal{V})$  构成余挠对, 若  $\mathcal{U}^\perp = \mathcal{V}$ , 且  $\mathcal{U} = {}^\perp \mathcal{V}$ .

备注 5.1.7. 余挠对  $(\mathcal{U}, \mathcal{V})$  中两组对象类的顺序固定. 注意到  $\mathbb{E}(\mathcal{U}, \mathcal{V}) = 0$ .

引理 5.1.8. 对任意对象类  $\mathcal{X}$ .

1.  $({}^\perp \mathcal{X}, ({}^\perp \mathcal{X})^\perp)$  是余挠对, 称作  $\mathcal{X}$  生成的余挠对;
2.  $({}^\perp(\mathcal{X}^\perp), \mathcal{X}^\perp)$  是余挠对, 称作  $\mathcal{X}$  余生成的余挠对.

证明. 依照 Galois 连接, 得  $({}^\perp(\mathcal{X}^\perp))^\perp = \mathcal{X}^\perp$ , 以及  ${}^\perp(({}^\perp \mathcal{X})^\perp) = {}^\perp \mathcal{X}$ . 证明细节从略.  $\square$

引理 5.1.9. 假定  $(\mathcal{U}, \mathcal{V})$  是余挠对, 则有如下结论:

1.  $\mathcal{U}$  与  $\mathcal{V}$  关于形变收缩 (定义 3.3.2) 封闭 (特别地, 关于直和项封闭);
2.  $\mathcal{U}$  与  $\mathcal{V}$  关于扩张封闭 (特别地, 关于直和封闭).

证明. 仅看  $\mathcal{U}$ . (1). 记  $U_0 \xrightarrow{i} U \xrightarrow{p} U_0$  复合为恒等,  $U \in \mathcal{U}$ , 则有恒等自然变换

$$\mathbb{E}(U_0, (-)_{\mathcal{V}}) \xrightarrow{p^*} \mathbb{E}(U, (-)_{\mathcal{V}}) \xrightarrow{i^*} \mathbb{E}(U_0, (-)_{\mathcal{V}}). \quad (5.1.4)$$

这一恒等自然变换通过零函子  $\mathbb{E}(U, (-)|_{\mathcal{V}}$  分解, 从而  $U_0 \in {}^{\perp}\mathcal{V} = \mathcal{U}$ .

(2). 任取 conflation  $U \rightarrowtail W \twoheadrightarrow U' \dashrightarrow (U, U' \in \mathcal{U})$ . 将长正合列 (式 (2.2.14)) 限制在  $\mathcal{V}$  上, 得

$$0 = \mathbb{E}(U', (-)|_{\mathcal{V}}) \rightarrow \mathbb{E}(W, (-)|_{\mathcal{V}}) \rightarrow \mathbb{E}(U, (-)|_{\mathcal{V}}) = 0. \quad (5.1.5)$$

因此,  $\mathbb{E}(W, (-)|_{\mathcal{V}}) = 0$ , 即  $W \in {}^{\perp}\mathcal{V} = \mathcal{U}$ .  $\square$

为较自然地引入完备余挠对, 我们介绍以下定义.

**定义 5.1.10.** (预盖, 右逼近). 给定范畴中的对象类  $\mathcal{X}$ . 对象  $M$  的一个  $\mathcal{X}$ -预盖 (或称右  $\mathcal{X}$ -逼近) 是指一个态射  $p: M^X \rightarrow M$  ( $M^X \in \mathcal{X}$ ), 使得以下等价表述成立:

- (态射语言). 对任意  $q: X \rightarrow M$  ( $X \in \mathcal{X}$ ), 存在  $q': X \rightarrow M^X$ , 使得  $p \circ q' = q$ .
- (函子语言).  $\text{Hom}_{\mathcal{X}}(-, M^X) \xrightarrow{p \circ -} \text{Hom}_{\mathcal{C}}((-)|_{\mathcal{X}}, M)$  是函子范畴  $\text{Funct}(\mathcal{X}^{\text{op}}, \mathbf{Ab})$  的满态射.

余挠对给出一类特殊的预盖.

**引理 5.1.11.** 假定  $\mathcal{U} \perp \mathcal{V}$ . 若存在  $U \in \mathcal{U}$  与  $V \in \mathcal{V}$  使得有 conflation  $V \xrightarrow{i} U \xrightarrow{p} C \xrightarrow{\delta} \rightarrow$ , 则  $p$  是  $\mathcal{U}$ -预盖. 以此类方法构造的预盖称作**特殊预盖**.

**证明.** 将长正合列 (式 (2.2.14)) 限制在  $\mathcal{U}$  上, 得

$$((-)|_{\mathcal{U}}, V) \xrightarrow{i \circ -} ((-)|_{\mathcal{U}}, U) \xrightarrow{p \circ -} ((-)|_{\mathcal{U}}, C) \xrightarrow{\delta_{\sharp}} \mathbb{E}((-), V) = 0. \quad (5.1.6)$$

因此, 以上  $p \circ -$  是满态射,  $p$  满足定义 5.1.10 的函子定义式.  $\square$

对偶地, 可以定义预包 (左逼近) 与特殊预包 (特殊右逼近). 给定余挠对  $(\mathcal{U}, \mathcal{V})$ . 任取  $M$  的特殊预盖 (若存在), 记相应的 conflation 为

$$M^V \rightarrowtail M^U \twoheadrightarrow M \dashrightarrow; \quad (5.1.7)$$

任取  $M$  的特殊预包 (若存在), 记相应的 conflation 为

$$M \rightarrowtail M_V \twoheadrightarrow M_U \dashrightarrow. \quad (5.1.8)$$

**定义 5.1.12.** (完备余挠对). 称余挠对  $(\mathcal{U}, \mathcal{V})$  是**完备的**, 若所有对象均有特殊预盖和特殊预包, 即

$$\text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{U}) = \mathcal{C} = \text{coCone}(\mathcal{V}, \mathcal{U}). \quad (5.1.9)$$

给定  $\mathcal{U} \perp \mathcal{V}$ , 通常难以直接检验  $\mathcal{U}^{\perp} = \mathcal{V}$ . 若加入特殊预包 (预盖) 的条件, 则可以基本克服这一困难.

**引理 5.1.13.** 给定  $\mathcal{U} \perp \mathcal{V}$ , 并假定  $\mathcal{U}$  与  $\mathcal{V}$  对直和项封闭. 此时有

$$\text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{U}) = \mathcal{C} \implies \mathcal{U} = {}^{\perp}\mathcal{V}, \quad (5.1.10)$$

对偶地有

$$\text{coCone}(\mathcal{V}, \mathcal{U}) = \mathcal{C} \implies \mathcal{V} = \mathcal{U}^{\perp}. \quad (5.1.11)$$

**证明.** 仅证明第一式, 第二式对偶可证. 将任意  $X \in {}^{\perp}\mathcal{V}$  写作 conflation  $V \rightarrowtail U \twoheadrightarrow X$ , 由于  $\mathbb{E}(X, V) = 0$ , 这一 conflation 可裂. 由  $\mathcal{U}$  关于直和项封闭, 得  $X \in \mathcal{U}$ .  $\square$

备注 5.1.14. 特别地, 引理 5.1.13 关于直和项封闭的假定不可缺少. 例如, 取  $(\mathcal{U}, \mathcal{V})$  是模范畴的余挠对. 给定对象类  $\mathcal{X}$  与基数  $\kappa$ , 定义  $\mathcal{X}^\kappa = \{\prod_\kappa X \mid X \in \mathcal{X}\}$ . 由直积是正合函子, 得  $\mathcal{U}^\kappa \perp \mathcal{V}^\kappa$ . 假定  $\mathcal{U}$  与  $\mathcal{V}$  中存在基数不超过  $\kappa_0$  的非零对象, 则对任意无限基数  $\kappa > \kappa_0$ , 总有真包含  $\mathcal{U}^\kappa \subset \mathcal{U}$  与  $\mathcal{V}^\kappa \subset \mathcal{V}$ . 依照 Eilenburg 位移技巧 (如 [Bas63]), 垂直对  $(\mathcal{U}^\kappa, \mathcal{V}^\kappa)$  满足引理 5.1.13 的题设, 但不构成余挠对.

定理 5.1.15. (若松技巧). 余挠对  $(\mathcal{U}, \mathcal{V})$  是完备的, 当且仅当以下两点成立:

1. 所有对象有特殊预盖;
2. 对任意对象  $X$ , 存在 inflation  $X \rightarrow V$ , 其中  $V \in \mathcal{V}$ .

证明. 先说明任意对象  $X$  存在特殊预包. 先由 (2) 构造  $\delta$ , 再由 (1) 构造  $\varepsilon$ . 依照定理 3.1.1 作交换图:

$$\begin{array}{ccccc}
 & M^V & \xlongequal{\quad} & M^V & \\
 & \downarrow & & \downarrow & \\
 X & \rightarrow & E & \twoheadrightarrow & M^U \dashrightarrow^{\delta'} \\
 \parallel & & \downarrow & & \downarrow \\
 X & \rightarrow & V & \twoheadrightarrow & M \dashrightarrow^{\delta} \\
 & & \downarrow \varepsilon' & & \downarrow \varepsilon
 \end{array} . \quad (5.1.12)$$

由  $\mathcal{V}$  关于扩张封闭, 得  $E \in \mathcal{V}$ . □

记  $\omega := \mathcal{U} \cap \mathcal{V}$  为一类特殊的自垂直对象.

引理 5.1.16. 对任意  $U \in \mathcal{U}$  与  $V \in \mathcal{V}$ , 任意态射  $f: U \rightarrow V$  通过  $\omega$  中对象分解.

证明. 取 inflation  $i: U \rightarrow U_V$ . 长正合列表明  $(i, V)$  满, 故  $f$  通过  $U_V$  分解. 显然  $U_V \in \mathcal{U} \cap \mathcal{V} = \omega$ . □

预盖和预包通常不唯一,  $(-)_V$  与  $(-)^U$  更无法称作函子; 但  $\mathcal{C}/\omega$  是函子. 实际上, 有以下更精细的结论.

定理 5.1.17. 全子加法范畴的嵌入  $(\mathcal{U}/\omega) \rightarrow (\mathcal{C}/\omega)$  具有有伴随  $(-)^U$ .

证明. 对所有对象取定 conflation  $M^V \xrightarrow{i} M^U \xrightarrow{p} M \dashrightarrow$ . 下证明自然同构

$$(- \circ p) : \text{Hom}_{\mathcal{U}/\omega}(U, M^U) \simeq \text{Hom}_{\mathcal{C}/\omega}(U, M). \quad (5.1.13)$$

由正合列  $(U, M^U) \rightarrow (U, M) \rightarrow \mathbb{E}(U, M^V) = 0$ , 得  $(U, M^U) \rightarrow (U, M)$  满, 这在加法商范畴中也是满射. 下只需证明对任意  $f: U \rightarrow M^U$ ,  $[pf] = 0$  蕴含  $[f] = 0$ . 记  $pf$  通过  $W \in \omega$  分解. 由  $\mathbb{E}(W, M^V) = 0$ , 存在  $s$  使得  $\circ$  所在的三角交换:

$$\begin{array}{ccccc}
 & U & \xrightarrow{a} & W & \\
 & \downarrow f & & \downarrow b & \\
 M^V & \xrightarrow{i} & M^U & \xrightarrow{p} & M \dashrightarrow
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \nearrow s \\
 \searrow p \\
 \circ
 \end{array} . \quad (5.1.14)$$

此时  $p(sa - f) = 0$ . 由长正合列,  $(sa - f)$  通过  $i$  分解. 再由引理 5.1.16,  $(sa - f)$  通过  $\omega$  中对象分解. 由于  $sa$  已通过  $W \in \omega$  分解, 故  $f$  通过  $\omega$  中对象分解. 因此  $[f] = 0$ . □

备注 5.1.18. 对偶可证, 全子加法范畴的嵌入  $\mathcal{V}/\omega \rightarrow \mathcal{C}/\omega$  存在左伴随. 综合以上结果得

$$\begin{array}{ccccc}
 \mathcal{U}/\omega & \xrightarrow{\text{全子范畴}} & \mathcal{C}/\omega & \xrightarrow{(-)_V} & \mathcal{V}/\omega \\
 \leftarrow \perp & & \leftarrow \perp & & \\
 & \xleftarrow{(-)^U} & & \xleftarrow{\text{全子范畴}} &
 \end{array} . \quad (5.1.15)$$

## 5.2 遗传余挠对

(投射对象,  $\mathcal{C}$ ) 与  $(\mathcal{C}$ , 内射对象) 是特殊的余挠对, 这类余挠对满足一些额外性质.

**定义 5.2.1.** (完备余挠对). 称余挠对  $(\mathcal{U}, \mathcal{V})$  是**遗传的**, 若  $\mathcal{U}$  是消解的, 且  $\mathcal{V}$  是余消解的.

1. 称全子范畴  $\mathcal{U} \subseteq \mathcal{C}$  是**消解的**, 若  $\mathcal{U}$  包含一切投射对象且  $\text{coCone}(\mathcal{U}, \mathcal{U}) = \mathcal{U}$ ;
2. 称全子范畴  $\mathcal{V} \subseteq \mathcal{C}$  是**余消解的**, 若  $\mathcal{V}$  包含一切内射对象且  $\text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{V}) = \mathcal{V}$ .

对余挠对而言,  $\mathcal{U}(\mathcal{V})$  自动包含所有投射对象 (内射对象).

**备注 5.2.2.** 若  $0 \in \mathcal{X}$ , 则不必区分  $\text{Cone}(\mathcal{X}, \mathcal{X}) \subseteq \mathcal{X}$  与  $\text{Cone}(\mathcal{X}, \mathcal{X}) = \mathcal{X}$ . 关于  $\text{coCone}$  与  $*$  的等式同理.

**备注 5.2.3.** 依照经验, 通常讨论的遗传余挠对往往也是完备的. 当然, 这并非推论. 若  $\mathcal{C}$  不具有足够投射对象, 则 (投射对象,  $\mathcal{C}$ ) 是遗传但非完备的.

给定完备余挠对  $(\mathcal{U}, \mathcal{V})$ . 引理 5.1.16 说明  $\text{Hom}_{\mathcal{C}/\omega}(\mathcal{U}/\omega, \mathcal{V}/\omega) = 0$ .

**命题 5.2.4.** 类似定理 5.1.15, 我们给出遗传的单边判准. 假定  $(\mathcal{U}, \mathcal{V})$  是完备余挠对, 则以下六点等价:

1.  $\mathcal{V}$  是余消解的;
2.  $\mathcal{U}$  是消解的;
3.  $\ker \text{Hom}_{\mathcal{C}/\omega}(\mathcal{U}/\omega, -) = \mathcal{V}/\omega$ ;
4.  $\ker \text{Hom}_{\mathcal{C}/\omega}(-, \mathcal{V}/\omega) = \mathcal{U}/\omega$ .
5. 对  $V \twoheadrightarrow \cdot \xrightarrow{p} \cdot$ ,  $\mathbb{E}(\mathcal{U}, p)$  是同构;
6. 对  $\cdot \xrightarrow{i} \cdot \twoheadrightarrow U$ ,  $\mathbb{E}(i, \mathcal{V})$  是同构.

**证明.** (2  $\rightarrow$  1). 对任意 conflation  $V_1 \twoheadrightarrow V_2 \twoheadrightarrow X$ , 往证  $X \in \mathcal{V}$ , 也就是任意 conflation  $X \twoheadrightarrow A \twoheadrightarrow U$  可裂. 依照 TR4' 构造下图

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & A^V & \xlongequal{\quad} & A^V & & \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & \\
 & & W & \twoheadrightarrow & A^U & \dashrightarrow & U \dashrightarrow \cdot \\
 & \swarrow & \downarrow q & & \downarrow & & \parallel \\
 V_2 & \twoheadrightarrow & X & \twoheadrightarrow & A & \twoheadrightarrow & U \dashrightarrow
 \end{array} \quad (5.2.1)$$

由  $\mathcal{U}$  是消解的, 得  $W \in \mathcal{U}$ . 由  $\mathbb{E}(W, V_1) = 0$ , 得  $q$  关于  $V_2 \twoheadrightarrow X$  分解. 从而  $q_*\delta = 0$ . 这说明 conflation  $X \twoheadrightarrow A \twoheadrightarrow U$  可裂. (1  $\rightarrow$  2) 是对偶的.

(3  $\rightarrow$  1). 任取 conflation  $V_1 \twoheadrightarrow V_2 \twoheadrightarrow X$ ,  $U \in \mathcal{U}$  以及任意态射  $f: U \rightarrow X$ . 由  $\mathbb{E}(U, V_1) = 0$ , 故  $f$  通过  $V_2$  分解, 从而通过某一  $\omega$  中对象分解 (引理 5.1.16).

(1  $\rightarrow$  3). 给定  $X$  使得任意  $U \twoheadrightarrow X$  通过  $\omega$  分解, 下证明  $X \in \mathcal{V}$ . 依照 ET4 作下图

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & X^V & \xlongequal{\quad} & X^V & & \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & \\
 & & X^U & \twoheadrightarrow & (X^U)_V & \twoheadrightarrow & (X^U)_U \dashrightarrow \cdot \\
 & \swarrow & \downarrow q & & \downarrow & & \parallel \\
 W & \dashrightarrow & X & \dashrightarrow & E & \dashrightarrow & (X^U)_U \dashrightarrow
 \end{array} \quad (5.2.2)$$

由构造,  $(X^U)_V \in \omega$ . 由  $\mathcal{V}$  余消解, 得  $E \in \mathcal{V}$ . 由假定,  $q$  通过某一  $W \in \omega$  分解, 从而  $q_*\delta = 0$ . 这说明  $X$  是  $E$  的直和项, 从而  $X \in \mathcal{V}$ .

(2  $\leftrightarrow$  4) 的证明是对偶的.

(5  $\rightarrow$  1). 对任意 conflation  $V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow X$ ,  $\mathbb{E}((-)|_{\mathcal{U}}, V_2)$  是零函子, 当且仅当  $\mathbb{E}((-)|_{\mathcal{U}}, X) = 0$ .

(1  $\rightarrow$  5). 给定 conflation  $V \rightarrow A \xrightarrow{p} B$ . 对任意  $U \in \mathcal{U}$ , 长正合列给出

$$0 = \mathbb{E}(U, V) \rightarrow \mathbb{E}(U, A) \xrightarrow{\mathbb{E}(U, p)} \mathbb{E}(U, B). \quad (5.2.3)$$

从而  $\mathbb{E}(U, p)$  单. 下证明任意  $\delta \in \mathbb{E}(U, B)$  都有  $\mathbb{E}(U, A)$  中的原像. 由 ET4 作下图前三行:

$$\begin{array}{ccccccc} V & \xlongequal{\quad} & V & & & & \\ \downarrow & & \downarrow & & & & \\ A & \rightarrow & A_V & \twoheadrightarrow & A_U & \dashrightarrow^{\eta} & \\ \downarrow p & & \downarrow & & \parallel & & \\ B & \dashrightarrow & F & \dashrightarrow & A_U & \dashrightarrow^{\varepsilon} & \\ \parallel & & \uparrow \beta & & \uparrow \gamma & & \\ B & \rightarrow & E & \twoheadrightarrow & U & \dashrightarrow^{\delta} & \end{array} \quad (5.2.4)$$

由  $\mathcal{V}$  余消解, 故  $F \in \mathcal{V}$ , 从而存在  $\beta$  使得下两行交换. 由 ET3 构造  $\gamma$ , 则

$$\delta = \gamma^* \varepsilon = \gamma^* p_* \eta = p_*(\gamma^* \eta) \in \text{im } p_*. \quad (5.2.5)$$

□

**定义 5.2.5.** (余挠三元组). 称  $(\mathcal{T}, \mathcal{U}, \mathcal{V})$  是余挠三元组, 若  $(\mathcal{T}, \mathcal{U})$  与  $(\mathcal{U}, \mathcal{V})$  均为余挠对. 称余挠三元组是完备的 (遗传的), 若其对应的两个余挠对均是完备的 (遗传的).

**引理 5.2.6.** 给定完备的余挠三元组  $(\mathcal{T}, \mathcal{U}, \mathcal{V})$ . 这一三元组是遗传的, 当且仅当  $\mathcal{U}$  是  $\mathcal{C}$  的厚子范畴.

**证明.** 若  $\mathcal{U}$  是厚子范畴, 则  $\text{Cone}(\mathcal{U}, \mathcal{U}) = \mathcal{U}$ . 依照单边定义命题 5.2.4, 得  $(\mathcal{T}, \mathcal{U})$  是遗传完备的余挠对. 对偶地, 由  $\text{coCone}(\mathcal{U}, \mathcal{U}) = \mathcal{U}$  知  $(\mathcal{U}, \mathcal{V})$  也是遗传完备的余挠对.

反之, 若以上是遗传完备的余挠三元组, 则  $\mathcal{U}$  是消解且余消解的. 由

$$\mathcal{U} * \mathcal{U} = \mathcal{U}, \quad \text{Cone}(\mathcal{U}, \mathcal{U}) = \mathcal{U}, \quad \text{coCone}(\mathcal{U}, \mathcal{U}) = \mathcal{U}, \quad \mathcal{U} \text{ 对直和项封闭}, \quad (5.2.6)$$

知  $\mathcal{U}$  是  $\mathcal{C}$  的厚子范畴. □

遗传完备的余挠三元组有一些精彩的性质.

**定理 5.2.7.** 给定遗传完备的余挠三元组  $(\mathcal{T}, \mathcal{U}, \mathcal{V})$ , 恰好有

$$\mathcal{T} \cap \mathcal{U} = \text{投射对象}, \quad \mathcal{U} \cap \mathcal{V} = \text{内射对象}. \quad (5.2.7)$$

**证明.** 下证明任意  $P \in \mathcal{T} \cap \mathcal{U}$  是投射对象, 即任意 conflation  $A \rightarrow B \rightarrow P$  可裂. 由 ET4' 构造下图

$$\begin{array}{ccccc} B^V & \xlongequal{\quad} & B^V & & \\ \downarrow & & \downarrow & & \\ E & \dashrightarrow & B^U & \dashrightarrow & P \\ \downarrow & & \downarrow & & \parallel \\ A & \rightarrow & B & \twoheadrightarrow & P \end{array} \quad (5.2.8)$$

由  $P \in \mathcal{U}$ , 以及  $\mathcal{U}$  是厚子范畴, 得  $E \in \mathcal{U}$ . 由  $\mathbb{E}(P, E) = 0$ , 底行 conflation 可裂. 对偶地可证  $\mathcal{U} \cap \mathcal{V}$  恰是内射对象. □

推论 5.2.8. 若 Frobenius 范畴  $(\mathcal{C}, \mathcal{P})$  存在遗传完备的余挠三元组  $(\mathcal{T}, \mathcal{U}, \mathcal{V})$ , 则全子范畴的包含  $\mathcal{U}/\mathcal{P} \rightarrow \mathcal{C}/\mathcal{P}$  存在左右伴随 (备注 5.1.18).

推论 5.2.9. 若范畴存在遗传完备的余挠三元组, 则该范畴有足够的投射对象与内射对象.

证明. 对一切  $T \in \mathcal{T}$ , 总有特殊的投射预盖  $T^U \twoheadrightarrow T$ . 对一切  $V \in \mathcal{V}$ , 总有特殊的内射预包  $V \hookrightarrow V_U$ . 对  $U \in \mathcal{U}$ , 总有特殊的投射预包  $U \hookrightarrow U_T$  和特殊的内射预盖  $U^V \twoheadrightarrow U$ . 特别地, 对任意对象  $X$  存在投射预盖 (下图左) 与内射预包 (下图右):

$$\begin{array}{ccc}
 (X^T)^V \hookrightarrow (X^T)^V \oplus X^U \twoheadrightarrow X^U & X \xlongequal{\quad} X & \\
 \parallel & \downarrow & \downarrow \\
 (X^T)^V \hookrightarrow (X^T)^U \twoheadrightarrow X^T & X_V \hookrightarrow (X_V)_U \twoheadrightarrow (X_V)_T & \\
 & \downarrow & \downarrow \\
 & X \xlongequal{\quad} X & X_U \hookrightarrow X_U \oplus (X_V)_T \twoheadrightarrow (X_V)_T
 \end{array} \quad (5.2.9)$$

□

推论 5.2.10.  $\mathcal{C}$  是 Frobenius 外三角范畴, 当且仅当存在余挠四元组.

证明.  $(\rightarrow)$ . 取  $\mathcal{P}$  为投射对象类, 则  $(\mathcal{C}, \mathcal{P}, \mathcal{C}, \mathcal{P})$  是余挠四元组.

$(\leftarrow)$ . 若由余挠四元组  $(\mathcal{X}, \mathcal{Y}, \mathcal{Z}, \mathcal{W})$ , 则  $\mathcal{Y} \cap \mathcal{Z}$  恰是投射对象, 也恰是内射对象 (定理 5.2.7). 依照推论 5.2.9, 知  $\mathcal{C}$  有足够的投射对象与内射对象, 从而是 Frobenius 外三角范畴. □

以下引理给出  $\mathcal{T}$  与  $\mathcal{V}$  的联系.

引理 5.2.11. 给定遗传完备的余挠三元组  $(\mathcal{T}, \mathcal{U}, \mathcal{V})$ .  $X \in \mathcal{T}$  当且仅当其满足以下性质.

- 对任意  $\mathcal{V}$ -预包对应的 conflation  $M \xrightarrow{i} V \xrightarrow{p} N$ , 任意态射  $X \rightarrow N$  经  $p$  分解.

证明.  $(\rightarrow)$  方向. 作以下 conflation 的交换图, 其中  $\lambda$  由预包的定义选取, 取  $\mu$  使得  $\star$  是同伦的推出拉回方块 (细节见定理 3.2.1):

$$\begin{array}{ccccc}
 M & \xrightarrow{i} & V & \xrightarrow{p} & N \\
 \parallel & & \downarrow \lambda & \star & \downarrow \mu \\
 M & \xrightarrow{j} & M_V & \xrightarrow{q} & M_U
 \end{array} \quad (5.2.10)$$

任取  $X \in \mathcal{T}$  与态射  $f: X \rightarrow N$ . 结合引理 5.1.16 与定理 5.2.7, 复合态射  $X \xrightarrow{f} N \xrightarrow{\mu} M_U$  通过某一投射对象  $P$  分解, 记作  $X \xrightarrow{a} P \xrightarrow{b} M_U$ . 由投射对象的提升性作态射  $c$ , 再有弱拉回的性质作态射  $g$ :

$$\begin{array}{ccccc}
 & & & & X \\
 & & & \swarrow g & \downarrow a \\
 M & \xrightarrow{i} & V & \xrightarrow{p} & N \\
 \parallel & & \downarrow \lambda & & \downarrow \mu \\
 M & \xrightarrow{j} & M_V & \xrightarrow{q} & M_U \\
 & & & \swarrow c & \downarrow b \\
 & & & & P
 \end{array} \quad (5.2.11)$$

$g$  即为所求.

$(\leftarrow)$  方向. 若  $X$  满足上述性质, 下只需证明一切  $U \hookrightarrow E \twoheadrightarrow X$  可裂. 先取  $U$  的特殊预包  $\delta$ , 其中  $U_V \in$

$\mathcal{U} \cap \mathcal{V}$  是内射对象. 任取分解  $\lambda$ , 依照 ET3 取  $\mu$ , 得以下 **conflation** 的拉回:

$$\begin{array}{ccccc} U & \rightarrowtail & E & \twoheadrightarrow & X \\ \parallel & & \downarrow \lambda & & \downarrow \mu \\ U & \xrightarrow{i} & U_V & \twoheadrightarrow & U_U \\ & & & & \dashrightarrow \delta \end{array} \quad (5.2.12)$$

由  $\delta$  是特殊预包, 依照假定知  $\mu$  通过  $p$  分解. 因此  $\mu^* \delta = 0$ .  $\square$

### 5.3 态射观点

一些经验表明, 研究态射比研究对象更为方便. 例如, 定理 2.4.1 是  $\mathbb{E}$ -垂直关系在态射层面的推广. 若不涉及 **conflation** 或  $\mathbb{E}$ -函子, 此处的范畴是一般的加法范畴.

**定义 5.3.1.** (态射的弱垂直关系). 称态射  $f$  与  $g$  是弱垂直的, 若对任意交换方块 (下图左), 总存在虚线态射使得下图右交换:

$$\begin{array}{ccc} \cdot & \longrightarrow & \cdot \\ f \downarrow & & \downarrow g \\ \cdot & \longrightarrow & \cdot \end{array} \quad \begin{array}{ccc} \cdot & \longrightarrow & \cdot \\ f \downarrow & \nearrow & \downarrow g \\ \cdot & \longrightarrow & \cdot \end{array} \quad (5.3.1)$$

常用的记号是  $f \pitchfork g$ , 或  $f \boxtimes g$ .

备注 5.3.2. 之所以称之弱垂直, 是因为虚线处态射不必唯一. 弱垂直理论详见 [Joy08] 的附录 D.

**定义 5.3.3.** (弱垂直对). 态射类  $(\mathcal{C}, \mathcal{F})$  是弱垂直对, 若  $\mathcal{C}^\pitchfork = \mathcal{F}$ , 且  $\mathcal{C} = {}^\pitchfork \mathcal{F}$ . 类似引理 5.1.8 定义

1.  $({}^\pitchfork \mathcal{S}, ({}^\pitchfork \mathcal{S})^\pitchfork)$  是由  $\mathcal{S}$  生成的 (也称纤维地生成的) 弱垂直对;
2.  $(({}^\pitchfork (\mathcal{S}^\pitchfork), \mathcal{S}^\pitchfork)$  是由  $\mathcal{S}$  余生成的 (也称余纤维地生成的) 弱垂直对.

良定义性由 Galois 连接保证.

**命题 5.3.4.** (伴随提升). 假定  $F \dashv G$  是伴随函子, 则  $(Ff) \pitchfork g$  当且仅当  $f \pitchfork (Gg)$ .

证明. 从式 (2.4.2) 的视角转述命题即可. 自然同构不影响“公共的原像”之选取.  $\square$

引理 5.3.5. 给定态射类  $\mathcal{S}$ , 以下是一些基本事实.

1.  ${}^\pitchfork \mathcal{S}$  包含一切同构, 同时在复合同构的意义下封闭.
2.  ${}^\pitchfork \mathcal{S}$  对形变收缩 (态射的形变收缩见定理 3.3.10) 封闭.

证明. 假定  $f \pitchfork g$ ,  $f'$  是  $f$  的形变收缩. 任取定交换方块  $\square : (\alpha, \beta) : f' \Rightarrow g$ . 由  $f \pitchfork g$ , 取  $s$  使得  $gs = \beta q$  且  $sf = \alpha p$ :

$$\begin{array}{ccccccc} \cdot & \xrightarrow{i} & \cdot & \xrightarrow{p} & \cdot & \xrightarrow{\alpha} & \cdot \\ \downarrow f' & & \downarrow f & \nearrow s & \downarrow f' & & \downarrow g \\ \cdot & \xrightarrow{j} & \cdot & \xrightarrow{q} & \cdot & \xrightarrow{\beta} & \cdot \end{array} \quad (5.3.2)$$

今断言  $sj$  给出交换方块  $\square$  的提升. 检验得  $(sj)f' = sfi = \alpha pi = \alpha$ , 且  $g(sj) = \beta qj = \beta$ .  $\square$

3.  ${}^\pitchfork \mathcal{S}$  对范畴的推出 (若存在) 封闭.

证明. 假定  $f \pitchfork g$ , 且  $f'$  是  $f$  关于  $m$  的任意推出. 下证明交换方块  $\square : (\alpha, \beta) : f' \Rightarrow g$  有提升  $t$ :

$$\begin{array}{ccccc} \cdot & \xrightarrow{m} & \cdot & \xrightarrow{\alpha} & \cdot \\ \downarrow f & \searrow s & \downarrow f' & \nearrow t & \downarrow g \\ \cdot & \xrightarrow{n} & \cdot & \xrightarrow{\beta} & \cdot \end{array} \quad (5.3.3)$$

取  $s$  为  $f \pitchfork g$  对应的提升态射, 由推出的泛性质取  $t$  使得  $tf' = \alpha$  且  $tn = s$ . 为说明  $gt = \beta$ , 只需在右侧复合推出诱导的满态射  $(nf')$  即可.  $\square$

#### 4. $\pitchfork \mathcal{S}$ 对任意余积 (若存在) 封闭.

证明. 给定一族  $f_i \pitchfork g$ . 由命题 5.3.4, 以下提升问题等价:

$$\begin{array}{ccc} \coprod_{i \in I} X_i & \xrightarrow{\alpha} & A \\ \coprod_{i \in I} f_i \downarrow & \nearrow & \downarrow g \\ \coprod_{i \in I} Y_i & \xrightarrow{\beta} & B \end{array} \quad \begin{array}{ccc} (X_i)_{i \in I} & \xrightarrow{(\alpha \circ e_i)_{i \in I}} & (A)_{i \in I} \\ (f_i)_{i \in I} \downarrow & \nearrow & \downarrow (g)_{i \in I} \\ (Y_i)_{i \in I} & \xrightarrow{(\beta \circ e_i)_{i \in I}} & (B)_{i \in I} \end{array} \quad (5.3.4)$$

右图所示的  $(X_i)_{i \in I}$  与  $(Y_i)_{i \in I}$  是离散范畴, 从而提升态射  $(s_i)_{i \in I}$  可逐次构造.  $\square$

#### 5. $\pitchfork \mathcal{S}$ 对超限复合 (若存在) 封闭.

证明. 取定序数  $\alpha$  与函子  $(X, f) : \alpha \rightarrow \mathcal{C}$ . 此时  $(X, f)$  对应图

$$X_0 \xrightarrow{f_{1,0}} X_1 \xrightarrow{f_{2,1}} X_2 \xrightarrow{f_{3,2}} \cdots \xrightarrow{f_{\beta+1,\beta}} X_{\beta+1} \rightarrow \cdots \quad (5.3.5)$$

称之超限复合, 若对极限序数  $\gamma \in \alpha$  (若存在) 总有  $\varinjlim_{\beta \in \gamma} X_\beta = X_\gamma$ .

不妨假定  $\alpha$  是极限序数, 且恒有  $f_\bullet \pitchfork g$ . 下证明  $f_{\alpha,0} : X_0 \rightarrow \varinjlim_{\beta \in \alpha} X_\beta$  也属于  $\pitchfork g$ . 显然恒等态射的超限复合是恒等, 不妨记  $X_0 = \varinjlim_{\beta \in \alpha} (X_0)_\beta$ . 以下两个提升问题是等价的:

$$\begin{array}{ccc} \varinjlim_{\beta \in \alpha} (X_0)_\beta & \xrightarrow{p} & A \\ \varinjlim_{\beta \in \alpha} (f_{\beta,0}) \downarrow & \nearrow & \downarrow g \\ \varinjlim_{\beta \in \alpha} X_\beta & \xrightarrow{q} & B \end{array} \quad \begin{array}{ccc} (X_0)_{\beta \in \alpha} & \xrightarrow{(p \circ e_i)_{i \in I}} & (A)_{i \in I} \\ (f_{\beta,0})_{\beta \in \alpha} \downarrow & \nearrow & \downarrow (g)_{i \in I} \\ (Y_\beta)_{\beta \in I} & \xrightarrow{(q \circ e_i)_{i \in I}} & (B)_{i \in I} \end{array} \quad (5.3.6)$$

以下对右图归纳地构造  $s_\beta$ .

(a) 若  $\beta = 0$ , 则  $f_{\beta,0} = 1_{X_0}$ . 取  $s_0 := \alpha \circ e_0$  即可.

(b) 若  $s_\beta$  被构造, 下构造  $s_{\beta+1} : t_\beta \circ f_{\beta+1,\beta}$  如下图所示:

$$\begin{array}{ccccc} X_0 & \xrightarrow{s_0} & & \nearrow & A \\ f_{\beta,0} \downarrow & & & \nearrow s_\beta & \downarrow g \\ X_\beta & \xrightarrow{f_{\beta+1,\beta}} & X_{\beta+1} & \xrightarrow{s_{\beta+1}} & B \end{array} \quad (5.3.7)$$

(c) 若  $\beta$  是极限序数, 且  $(s_\bullet)_{<\beta}$  均被构造, 则下图是交换图的滤过极限, 从而显然交换:

$$\begin{array}{ccc} (X_0)_{<\beta} & \xrightarrow{(s_0)_{<\beta}} & (A)_{<\beta} \\ (f_{-,0})_{<\beta} \downarrow & \nearrow s_{<\beta} & \downarrow (g)_{<\beta} \\ (X)_{<\beta} & \xrightarrow{(q \circ e)_{<\beta}} & (B)_{<\beta} \end{array} \quad (5.3.8)$$



□

**例子 5.3.6.** 考虑范畴向态射范畴的两种嵌入  $X \mapsto (0 \rightarrow X)$  与  $X \mapsto (X \rightarrow 0)$ . 给定余挠对  $(\mathcal{U}, \mathcal{V})$ , 取  $(0 \rightarrow \mathcal{U})$  余生成的弱垂直对  $({}^\perp((0 \rightarrow \mathcal{U})^\perp), (0 \rightarrow \mathcal{U})^\perp)$ . 此时有如下结论.

1. 给定 conflation  $V \xrightarrow{i} B \xrightarrow{p} C$ ,  $V \in \mathcal{V}$ , 则  $p \in (0 \rightarrow \mathcal{U})^\perp$ . 由长正合列式 (2.2.11) 容易验证.
2. 若  $(X \rightarrow 0) \in {}^\perp((0 \rightarrow \mathcal{U})^\perp)$ , 则  $X \in \mathcal{U}$ .

证明. 对  $X$  构造特殊预盖  $X^V \rightarrow X^U \rightarrow X$ . 由上一条, 以下提升问题有解:

$$\begin{array}{ccccc} & & 0 & \longrightarrow & X \\ & & \downarrow & \swarrow & \parallel \\ X^V & \longrightarrow & X^U & \twoheadrightarrow & X \end{array} \quad (5.3.9)$$

这说明 conflation 可裂, 从而  $X \in \mathcal{U}$ . □

这说明, 余挠对理论可以“无损地”嵌入弱垂直对理论中.

**备注 5.3.7.** 容易发现, 所有形如  $(Y \rightarrow 0)$  的态射属于  $(0 \rightarrow \mathcal{U})^\perp$ , 这一态射类的关键信息蕴含在 inflation 的 coCone-项中. 将余生成关系改作生成关系, 则有对偶的结论.

**推论 5.3.8.** 由例 5.3.6 与引理 5.3.5,  $\mathcal{U}$  对任意余积 (若存在) 封闭.

**备注 5.3.9.** 弱垂直理论的更多“计算规则”见 [JT06], 这在涉及幺半范畴或单纯集方法时尤为有用.

**定义 5.3.10.** (弱分解系统). 弱分解系统 (下简称 **WFS**) 是一个垂直对  $(\mathcal{C}, \mathcal{F})$ , 使得范畴中所有态射可表示为  $p \circ i \in \mathcal{F} \circ \mathcal{C}$ .

依照经验, 直接计算  $\mathcal{C}^\perp$  往往是不切实际的. 以下是更常用的等价定义.

**命题 5.3.11.**  $(\mathcal{C}, \mathcal{F})$  是 WFS 当且仅当下列条件成立.

1.  $\mathcal{C}$  与  $\mathcal{F}$  对形变收缩封闭.
2.  $\mathcal{C} \pitchfork \mathcal{F}$  是一对弱垂直的态射.
3. 范畴中所有态射可表示为  $p \circ i \in \mathcal{F} \circ \mathcal{C}$

证明.  $(\rightarrow)$  方向是显然的. 下证明  $(\leftarrow)$  方向. 对  $f \pitchfork \mathcal{F}$ , 任取分解  $f = p \circ i$ . 弱垂直性给出分解  $s$  (下图左), 从而  $f$  是  $i$  的形变收缩 (下图右):

$$\begin{array}{ccc} \begin{array}{ccc} \cdot & \xrightarrow{i} & \cdot \\ \downarrow f & \nearrow s & \downarrow p \\ \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot \end{array} & \begin{array}{ccccc} \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot \\ \downarrow f & & \downarrow i & & \downarrow f \\ \cdot & \xrightarrow{s} & \cdot & \xrightarrow{p} & \cdot \end{array} \end{array} \quad (5.3.10)$$

□

## 5.4 模型结构

模型结构理论的综述与多数经典文献可在 [Hov07] 中找到. 以下谈论的模型结构都是闭模型结构. 我们使用  $\mathcal{A}$  表示全范畴. 若不涉及 conflation 或  $\mathbb{E}$ -函子, 此处的范畴是含有零对象的范畴.

**定义 5.4.1.** 范畴  $\mathcal{C}$  上的闭模型结构是指三个态射类  $(\text{Cofib}, \text{Weq}, \text{Fib})$ , 满足如下定义:

1.  $(\text{Cofib}, \text{Fib} \cap \text{Weq})$  与  $(\text{Cofib} \cap \text{Weq}, \text{Fib})$  是 WFS;
2. 对任意可复合的态射  $f, g$  与  $g \circ f$ . 若两者属于  $\text{Weq}$ , 则第三者也属于  $\text{Weq}$ ;
3.  $\text{Weq}$  对形变收缩封闭.

**命题 5.4.2.** 若范畴存在推出, 或者存在拉回, 则定义 5.4.1 的前两条蕴含第三条.

证明. 这一证明基于命题 5.7.7 的思路. 假定范畴存在拉回, 则引理 5.3.5 的第三条说明  $\text{TFib}$  与  $\text{Fib}$  对拉回封闭. 此时, 式 (5.7.10) 中的方块  $\square$  是交换的, 故弱等价  $w$  存在形变收缩  $a' \in \text{Cofib}$ . 命题 5.7.7 的后续步骤说明  $a' \in \text{TCofib}$ .  $\square$

**定义 5.4.3.** 我们规范一些术语. 以下是五类基本态射.

- $\text{Cofib}, \text{Weq}$  与  $\text{Fib}$  三类态射分别称作余纤维, 弱等价与纤维.
- 记  $\text{TCofib} := \text{Cofib} \cap \text{Weq}$  为平凡纤维,  $\text{TFib} := \text{Fib} \cap \text{Weq}$  为平凡余纤维.

以下是五类基本对象.

- $X$  称作余纤维对象, 若  $0 \rightarrow X \in \text{Cofib}$ . 记作  $X \in \mathcal{C}$ .
- $X$  称作纤维对象, 若  $X \rightarrow 0 \in \text{Fib}$ . 记作  $X \in \mathcal{F}$ .
- $X$  称作平凡余纤维对象, 若  $0 \rightarrow X \in \text{TCofib}$ . 记作  $X \in \text{TC}$ .
- $X$  称作平凡纤维对象, 若  $X \rightarrow 0 \in \text{TFib}$ . 记作  $X \in \text{TF}$ .
- $X$  称作平凡对象, 若  $0 \rightarrow X \in \text{Weq}$ . 记作  $X \in \mathcal{W}$ .

直接地,  $\text{TC} = \mathcal{C} \cap \mathcal{W}$ ,  $\text{TF} = \mathcal{F} \cap \mathcal{W}$ .

方便起见, 有时使用以下等价定义.

**命题 5.4.4.** 态射类  $(\text{Cofib}, \text{Weq}, \text{Fib})$  构成闭模型结构, 当且仅当以下成立.

**CM1** 对任意复合态射  $g \circ f$ , 若  $(f, g, gf)$  中其中两者属于  $\text{Weq}$ , 则第三者亦属于  $\text{Weq}$ .

**CM2** 三类态射对形变收缩封闭.

**CM3** 存在两组提升关系  $\text{Cofib} \pitchfork (\text{Weq} \cap \text{Fib})$  与  $(\text{TCofib} \cap \text{Weq}) \pitchfork \text{Fib}$ .

**CM4** 范畴中所有态射可表示为  $p \circ i \in (\text{Weq} \cap \text{Fib}) \circ \text{Cofib}$  与  $p' \circ i' \in \text{Fib} \circ (\text{TCofib} \cap \text{Weq})$ .

证明. 定义 5.4.1 的第二条即 CM1. 定义 5.4.1 的第一条等价于 CM2-4 (命题 5.3.11).  $\square$

备注 5.4.5. 定义 5.4.1 以对偶为先, 性质为后; 命题 5.4.4 以性质为先, 对偶为后.

引理 5.4.6. 以下是一些直接的推论.

1.  $\mathcal{W}$  中对象之间的态射必是  $\text{Weq}$ .

证明. 对  $X, Y \in \mathcal{W}$ ,  $0 \rightarrow X$  与  $0 \rightarrow Y$  属于  $\text{Weq}$ . 由 **CM1** 可知  $X \rightarrow Y$  也属于  $\text{Weq}$ .  $\square$

2.  $\text{Weq} = \text{TFib} \circ \text{TCofib}$ .

证明. 由  $\text{Weq} = \text{Fib} \circ \text{TCofib}$  与 **CM1** 得证.  $\square$

3. 若存在  $W \in \mathcal{W}$  与  $f: X \rightarrow W$ , 使得  $f \in \text{Weq}$ , 则  $X \in \mathcal{W}$ . 对偶表述略.

4. 模型结构的态射范畴也是模型结构, 态射范畴的  $\text{Cofib}(\text{Weq}, \text{Fib})$  是  $\text{Cofib}^\rightarrow(\text{Weq}^\rightarrow, \text{Fib}^\rightarrow)$ . 更一般地, 部分模型的函子范畴也是模型范畴, 见 [Ree73].

证明. **CM1** 与 **CM2** 是直接的. 下验证 **CM3** (的一侧), 取  $(i, i) \in \text{Cofib}^\rightarrow$  与  $(p, p) \in (\text{Weq} \cap \text{Fib})^\rightarrow$  的交换方块, 存在以下虚线所示的态射使得所有胞腔交换:

$$\begin{array}{ccccc}
 & & m & & \\
 F_1 & \xleftarrow{\quad} & C_1 & \xrightarrow{f} & C'_1 & \xrightarrow{\quad} & F'_1 \\
 \downarrow p & \swarrow & \downarrow i & \searrow & \downarrow i' & \swarrow & \downarrow p' \\
 F_2 & \xleftarrow{\quad} & C_2 & \xrightarrow{g} & C'_2 & \xrightarrow{\quad} & F'_2 \\
 & & n & & 
 \end{array} \quad (5.4.1)$$

最后验证 **CM4** (的一侧). 对任意态射范畴的态射  $(\alpha, \beta)$ , 取分解  $i, i' \in \text{Cofib}$  与  $p, p' \in \text{Weq} \cap \text{Fib}$ . 由原模型结构的 **CM3**, 存在虚线处态射使得下图交换:

$$\begin{array}{ccccc}
 & & \alpha & & \\
 \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot \\
 \downarrow & \xrightarrow{i} & \cdot & \xrightarrow{p} & \cdot \\
 \downarrow & \xrightarrow{i'} & \cdot & \xrightarrow{p'} & \cdot \\
 & & \beta & & 
 \end{array} \quad (5.4.2)$$

$\square$

**例子 5.4.7.** (代换). 引入模型结构的一大动机是构造局部化. 试回忆 ([GZ67]) 分式给出的局部化范畴  $\mathcal{C} \rightarrow S^{-1}\mathcal{C}$ , 局部化范畴中的态射  $X \rightarrow Y$  本质上拆解作  $X \hookrightarrow X' \rightarrow Y$ . 换言之, 先使用“同构”代换  $X$  为  $X'$ , 使得  $X'$  至  $Y$  的态射能被直接描述.

类似地, 模型范畴中的  $S$ -态射类是  $\text{Weq}$ . 对任意对象  $X$ , 对  $0 \rightarrow X$  与  $X \rightarrow 0$  使用 **CM4** 得

$$0 \xrightarrow{\text{Cofib}} F \xrightarrow{\text{TCofib}} X, \quad X \xrightarrow{\text{TFib}} C \xrightarrow{\text{Fib}} 0. \quad (5.4.3)$$

换言之, 任意对象  $X$  可被代换为余纤维对象  $F$  或纤维对象  $C$ .

## 5.5 Hovey 孪生余挠对

本小节取定外三角范畴  $(\mathcal{A}, \mathbb{E}, \mathfrak{s})$ .

**定义 5.5.1.** (Hovey 孪生余挠对). 考虑两个完备余挠对  $(\mathcal{S}, \mathcal{S}^\perp)$  与  $({}^\perp\mathcal{V}, \mathcal{V})$ . 称资料  $(\mathcal{S}, \mathcal{S}^\perp; {}^\perp\mathcal{V}, \mathcal{V})$  为 **Hovey 孪生余挠对**, 若  $\mathcal{S} \perp \mathcal{V}$ , 且  $\text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{S}) = \text{coCone}(\mathcal{V}, \mathcal{S})$ .

**备注 5.5.2.** 将 Hovey 孪生余挠对记作  $(\mathcal{S}, \mathcal{T}; \mathcal{U}, \mathcal{V})$ , 则  $\mathcal{S} \subseteq \mathcal{U}$ , 且  $\mathcal{V} \subseteq \mathcal{T}$ .

**备注 5.5.3.** 有时将  $\text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{S})$  记作  $\mathcal{N}$ , 称  $(\mathcal{S}^\perp, \mathcal{N}, {}^\perp\mathcal{V})$  为 **Hovey 三元组**.

以下引理给出一种由 Hovey 三元组复原 Hovey 孪生余挠对的直接方法.

**引理 5.5.4.** 给定 Hovey 孪生余挠对  $(\mathcal{S}, \mathcal{S}^\perp; {}^\perp\mathcal{V}, \mathcal{V})$ , 有以下等式

$$\mathcal{S} = {}^\perp\mathcal{V} \cap \text{coCone}(\mathcal{V}, \mathcal{S}), \quad \mathcal{V} = \mathcal{S}^\perp \cap \text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{S}) \quad (5.5.1)$$

**证明.** 仅证明前一等式. ( $\subseteq$  方向). 由  $\mathcal{S} = {}^\perp\mathcal{V}$  与  $\mathcal{S} = \text{coCone}(\mathcal{V}, \mathcal{S})$ , 得证.

( $\supseteq$  方向). 任取  $X \in {}^\perp\mathcal{V} \cap \text{coCone}(\mathcal{V}, \mathcal{S})$ , 则有 conflation  $V \rightarrowtail S \twoheadrightarrow X$ . 由  $\mathbb{E}(X, V) = 0$ , 这一 conflation 可裂. 从而  $X$  是  $S$  的直和项, 故  $X \in \mathcal{S}$ .  $\square$

**推论 5.5.5.** 作为推论,  ${}^\perp\mathcal{V} \cap \mathcal{V} = {}^\perp\mathcal{V} \cap \mathcal{N} \cap \mathcal{S}^\perp = \mathcal{S} \cap \mathcal{S}^\perp$ .

**定理 5.5.6.**  $\mathcal{N}$  是厚子范畴, 从而也是外三角范畴.

**证明.** 先说明  $\mathcal{N}$  对直和项封闭. 实际上,  $\mathcal{N}$  对形变收缩封闭. 任取 conflation  $V \rightarrowtail S \twoheadrightarrow N \xrightarrow{\delta} N'$  与形变收缩  $N'$ , 得以下交换图:

$$\begin{array}{ccccc} V & \rightarrowtail & S' & \twoheadrightarrow & N' & \xrightarrow{i^*\delta} & \\ \parallel & & \downarrow & & \downarrow i & & \\ V & \rightarrowtail & S & \twoheadrightarrow & N & \xrightarrow{\delta} & \\ \parallel & & \downarrow & & \downarrow p & & \\ V & \rightarrowtail & S' & \twoheadrightarrow & N' & \xrightarrow{i^*\delta} & \end{array} \quad (5.5.2)$$

复合态射  $S' \rightarrow S \rightarrow S'$  必是同构 (**定理 2.3.7**), 从而  $S'$  是  $S$  的形变收缩. 因此  $S' \in \mathcal{S}$ , 故  $N' \in \mathcal{N}$ .

(证明  $\text{Cone}(\mathcal{N}, \mathcal{N}) \subseteq \mathcal{N}$ ). 依照引理 5.1.4, 总有

$$\text{Cone}(\mathcal{N}, \mathcal{N}) = \text{Cone}(\mathcal{N}, \text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{S})) = \text{Cone}(\mathcal{V} * \mathcal{N}, \mathcal{S}). \quad (5.5.3)$$

依照引理 5.1.5, 得

$$\mathcal{V} * \mathcal{N} = \mathcal{V} * \text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{S}) \subseteq \text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{V} * \mathcal{S}) = \text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{V} \oplus \mathcal{S}) \subseteq \text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{N}). \quad (5.5.4)$$

将式 (5.5.4) 代入式 (5.5.3), 得

$$\text{Cone}(\mathcal{N}, \mathcal{N}) \subseteq \text{Cone}(\text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{N}), \mathcal{S}) = \text{Cone}(\text{Cone}(\mathcal{V}, \text{coCone}(\mathcal{V}, \mathcal{S})), \mathcal{S}) \quad (5.5.5)$$

$$= \text{Cone}(\text{Cone}(\mathcal{V} * \mathcal{V}, \mathcal{S}), \mathcal{S}) = \text{Cone}(\text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{S}), \mathcal{S}) \quad (5.5.6)$$

$$= \text{Cone}(\text{coCone}(\mathcal{V}, \mathcal{S}), \mathcal{S}) \subseteq \text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{S} * \mathcal{S}) = \mathcal{N}. \quad (5.5.7)$$

(证明  $\text{coCone}(\mathcal{N}, \mathcal{N}) \subseteq \mathcal{N}$ ). 证明对偶, 从略.

(证明  $\mathcal{N} * \mathcal{N} \subseteq \mathcal{N}$ ). 由引理 5.1.4 与引理 5.1.5, 得

$$\mathcal{N} * \mathcal{N} = \mathcal{N} * \text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{S}) \subseteq \text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{N} * \mathcal{S}) \quad (5.5.8)$$

$$= \text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{N}) = \text{Cone}(\mathcal{V}, \text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{S})) \quad (5.5.9)$$

$$= \text{Cone}(\mathcal{V} * \mathcal{V}, \mathcal{S}) = \mathcal{N}. \quad (5.5.10)$$

不难发现, 上述  $\subseteq$  均可取为等号. 直接地,

$$\text{Cone}(\mathcal{N}, \mathcal{N}) = \text{coCone}(\mathcal{N}, \mathcal{N}) = \mathcal{N} * \mathcal{N} = \mathcal{N}. \quad (5.5.11)$$

□

推论 5.5.7. 以上证明步骤暗藏等式  $\text{Cone}(\mathcal{N}, \mathcal{S}) = \mathcal{N} = \text{coCone}(\mathcal{V}, \mathcal{N})$ .

## 5.6 相容闭模型结构 $\rightarrow$ Hovey 孪生余挠对

Hovey 孪生余挠对由一对特殊的闭模型结构诱导, 称作相同闭模型结构.

**定义 5.6.1.** (相容闭模型结构). 称闭模型结构是**相容的**, 若存在四个对象类  $(\mathcal{S}, \mathcal{T}; \mathcal{U}, \mathcal{V})$ . 使得:

1.  $f \in \text{Cofib}$ , 当且仅当  $f$  是 **inflation**, 且有 **conflation**  $\cdot \xrightarrow{f} \cdot \rightarrow U$ , 其中  $U \in \mathcal{U}$ ;
2.  $f \in \text{TCofib}$ , 当且仅当  $f$  是 **inflation**, 且有 **conflation**  $\cdot \xrightarrow{f} \cdot \rightarrow S$ , 其中  $S \in \mathcal{S}$ ;
3.  $g \in \text{Fib}$ , 当且仅当  $g$  是 **deflation**, 且有 **conflation**  $T \rightarrow \cdot \xrightarrow{g} \cdot$ , 其中  $T \in \mathcal{T}$ ;
4.  $g \in \text{TFib}$ , 当且仅当  $g$  是 **deflation**, 且有 **conflation**  $V \rightarrow \cdot \xrightarrow{g} \cdot$ , 其中  $V \in \mathcal{V}$ .

特别地, 引理 5.4.6 第二条说明  $\text{Weq} = \text{TFib} \circ \text{TCofib}$ .

**例子 5.6.2.** 直接地, 闭相容模型结构中  $(\mathcal{S}, \mathcal{T}; \mathcal{U}, \mathcal{V}) = (\text{TC}, \mathcal{F}; \mathcal{C}, \text{TF})$ .

**例子 5.6.3.** 式 (5.4.3) 给出任意对象  $X$  的四种分解

$$\begin{array}{ccc} & \text{TCofib} & 0 \\ & \swarrow & \downarrow \\ T \rightarrow V & \xrightarrow{\text{Fib}} & X \\ & \searrow & \\ & & 0 \end{array} \quad \begin{array}{ccc} 0 & \xleftarrow{\text{TFib}} & \\ \uparrow & & \\ X \rightarrow S & \xrightarrow{\text{Cofib}} & U \\ & \searrow & \\ & & 0 \end{array} \quad (5.6.1)$$

$$\begin{array}{ccc} V \rightarrow T & \xrightarrow{\text{TFib}} & X \\ & \swarrow & \uparrow \\ & & 0 \end{array} \quad \begin{array}{ccc} X \rightarrow U & \xrightarrow{\text{TCofib}} & S \\ \downarrow & & \uparrow \\ 0 & \xleftarrow{\text{Fib}} & \end{array}$$

**定理 5.6.4.** 给定相容闭模型结构的资料  $(\mathcal{S}, \mathcal{T}; \mathcal{U}, \mathcal{V})$ , 则这是 Hovey 孪生余挠对.

**证明.** 将证明拆解作以下几步.

1. (证明垂直关系). 定理 2.4.1 与 CM3 说明  $\mathcal{S} \perp \mathcal{T}, \mathcal{U} \perp \mathcal{V}$ . 特别地,  $\mathcal{S} \perp \mathcal{V}$ .
2. (证明  $(\mathcal{U}, \mathcal{V})$  与  $(\mathcal{S}, \mathcal{T})$  是完备余挠对). 以  $(\mathcal{U}, \mathcal{V})$  为例. 由引理 5.1.13, 只需说明  $\text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{U})$  是全范畴, 且  $\mathcal{U}$  对直和项封闭. 另一方向对偶.

(a) ( $\mathcal{U}$  对直和项封闭). 取  $X \xrightarrow{f} Y \rightarrow U$  与形变收缩  $U_0 \xrightarrow{i} U \xrightarrow{p} U_0$ . 依照与式 (5.5.3) 类似的构造, 得 conflation  $X \xrightarrow{f_0} Y_0 \rightarrow U_0$ . 其中,  $f_0$  是  $f$  的形变收缩, 因此属于  $\text{Cofib}$  (CM2). 根据定义,  $U_0 \in \mathcal{U}$ .

(b) ( $\text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{U})$  是全范畴). 见式 (5.6.1).

3. (证明  $\text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{S}) = \text{coCone}(\mathcal{V}, \mathcal{S})$ ). 先观察到以下两条事实.

(a) 若  $X \in \text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{S})$ , 则有 conflation  $V \rightarrow S \rightarrow X$ . 此处的 inflation 与 deflation 均是弱等价, 从而合成态射  $0 \rightarrow V \rightarrow S \rightarrow X$  也是弱等价.

(b) 假定  $0 \rightarrow X$  是弱等价, 将这一态射分解作  $0 \xrightarrow{\text{TCofib}} S \xrightarrow{\text{TFib}} X$ . 考虑  $S \xrightarrow{\text{TFib}} X$  所在的 conflation, 得  $X \in \text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{S})$ .

因此,  $X \in \text{Cone}(\mathcal{V}, \mathcal{S})$  当且仅当  $0 \rightarrow X$  是弱等价, 亦当且仅当  $X \rightarrow 0$  是弱等价 (CM 1). 依照对偶命题, 这当且仅当  $X \in \text{coCone}(\mathcal{V}, \mathcal{S})$ .

□

## 5.7 Hovey 孪生余挠对 $\rightarrow$ 相容闭模型结构

今选定 Hovey 孪生余挠对  $(\mathcal{S}, \mathcal{T}; \mathcal{U}, \mathcal{V})$ , 这组资料确定了 (定义 5.6.1) 四组态射 ( $\text{Cofib}$ ,  $\text{TFib}$ ,  $\text{FibTCofib}$ ), 以及复合所得的  $\text{Weq} := \text{TFib} \circ \text{TCofib}$ . 我们希望这是相容闭模型结构.

备注 5.7.1. 通常地, 假定范畴的对象与态射存在某类“相容”的性质. 若态射的性质被形变收缩保持, 则对象的性质也被形变收缩保持; 反之未必. 例如, 在证明相同闭模型结构诱导 Hovey 孪生余挠对时, 可以轻易证明四个对象类关于形变收缩封闭; 反之, 若通过 Hovey 孪生余挠对推导相同闭模型结构时, 我们甚至难以断言恒等态射的形变收缩未必是 deflation.

以下假定外三角范畴  $\mathcal{A}$  是弱幂等完备的, 具体性质见定理 3.3.10. 同时, 可以使用九引理 (定理 3.4.1).

命题 5.7.2. CM3 成立, 即,  $\text{Cofib} \cap \text{TFib}$  且  $\text{TCofib} \cap \text{Fib}$ .

证明. 依照定理 2.4.1 得提升态射.

□

命题 5.7.3. CM4 成立, 即, 任意态射能分解作  $\text{TFib} \circ \text{Cofib}$  与  $\text{Fib} \circ \text{TCofib}$ .

证明. 下证明任意态射  $f : X \rightarrow Y$  分解作  $\text{TFib} \circ \text{Cofib}$ , 另一分解对偶. 取 inflation  $i : X \rightarrow X_V$ , 推论 3.3.8 表明  $(i_f) : X \oplus X_V \oplus Y$  也是 inflation. 依照定理 3.1.1 构造下图

$$\begin{array}{ccccc}
 & & Z^V & \xlongequal{\quad} & Z^V \\
 & & \downarrow & & \downarrow \\
 X & \xrightarrow{\text{Cofib}} & E & \dashrightarrow & Z^U \\
 \parallel & & \downarrow \text{TFib} & & \downarrow \\
 X & \xrightarrow{(i_f)} & X_V \oplus Y & \twoheadrightarrow & Z \\
 \downarrow f & & \swarrow (0 \ 1) \in \text{TFib} & & \\
 Y & & & & 
 \end{array} \quad (5.7.1)$$

复合态射  $X \rightarrow E \rightarrow X_V \oplus Y \rightarrow Y$  即  $f$ .

□

CM1 与 CM2 的证明需要一些准备工作.

引理 5.7.4. 选定任意态射类  $\mathfrak{S} \in \{\text{Cofib}, \text{TCofib}, \text{Fib}, \text{TFib}\}$ .  $\mathfrak{S}$  对合成封闭.

证明. 以  $\mathfrak{S} = \text{Cofib}$  为例, 剩余命题的证明类似. 记  $i, i' \in \text{Cofib}$ , 其中  $i \circ i'$  可复合. 由 ET4 构造下图

$$\begin{array}{ccccc}
 \cdot & \xrightarrow{i'} & \cdot & \twoheadrightarrow & U' \\
 \parallel & & \downarrow i & & \downarrow \\
 \cdot & \xrightarrow{i \circ i'} & \cdot & \dashrightarrow & W \\
 & & \downarrow & & \downarrow \\
 & & U & \equiv & U
 \end{array} \quad (5.7.2)$$

依照定义,  $U, U' \in \mathcal{U}$ . 从而  $W \in \mathcal{U} * \mathcal{U} = \mathcal{U}$ . 依照定义,  $i \circ i' \in \text{Cofib}$ . □

引理 5.7.5.  $\text{Weq}$  对合成封闭.

证明. 弱等价必然形如  $\text{TFib} \circ \text{TCofib}$ . 为证明两个弱等价的合成仍是弱等价, 只需证明  $\text{TCofib} \circ \text{TFib} \subseteq \text{Weq}$ . 今取定复合态射  $ip$ , 其中  $i \in \text{TCofib}$  与  $p \in \text{TFib}$ . 按照 CM4 (命题 5.7.3) 将  $ip$  分解作  $\text{Fib} \circ \text{TCofib}$ , 依照定理 3.4.1 作交换图

$$\begin{array}{ccccc}
 V & \xrightarrow{\quad} & \cdot & \xrightarrow[p]{\text{TFib}} & \cdot \\
 \downarrow & & \downarrow \text{TCofib} & j & \downarrow i \text{ TCofib} \\
 T & \xrightarrow{\quad} & \cdot & \xrightarrow[\text{Fib}]{f} & \cdot \\
 \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 L & \dashrightarrow & S_1 & \dashrightarrow & S_2
 \end{array} \quad (5.7.3)$$

由  $\mathcal{S}, \mathcal{V} \subseteq \mathcal{N}$ , 以及  $\mathcal{N}$  是厚子范畴 (定理 5.5.6), 得  $T \in \mathcal{N} \cap \mathcal{T} = \mathcal{V}$  (式 (5.5.1)). □

命题 5.7.6. CM1 成立, 即, 对任意复合态射  $g \circ f$ , 若  $(f, g, gf)$  中其中两者属于  $\text{Weq}$ , 则第三者亦属于  $\text{Weq}$ .

证明. 引理 5.7.5 说明  $\text{Weq}$  对合成封闭. 下证明, 若  $g$  与  $gf$  属于  $\text{Weq}$ , 则  $f$  亦属于  $\text{Weq}$ . 另一对偶命题的表述与证明从略.

依照 CM4 (命题 5.7.3), 将  $f$  分解作  $\text{TFib} \circ \text{Cofib}$ . 将弱等价  $gf$  与  $f$  分解作  $\text{TFib} \circ \text{TCofib}$ , 整合得到下图:

$$\begin{array}{ccccc}
 A & \xrightarrow{\text{Cofib}} & X & \xrightarrow{\text{TFib}} & B \\
 \downarrow \text{TCofib} & & \downarrow f & & \downarrow \text{TCofib} \\
 & & & & Y \\
 & & & & \downarrow \text{TFib} \\
 H & \xrightarrow{\text{TFib}} & & & C
 \end{array} \quad (5.7.4)$$

往证上图中的  $A \rightarrow X$  是  $\text{TCofib}$  即可. 将复合所得的弱等价  $X \rightarrow B \rightarrow Y \rightarrow C$  分解作  $\text{TFib} \circ \text{TCofib}$ , 得下图中“五边形的黑色外框”所示交换图:

$$\begin{array}{ccccc}
 & & X & & \\
 & \swarrow \text{Cofib} & & \searrow \text{TCofib} & \\
 A & & & & M \\
 \downarrow \text{TCofib} & & \downarrow \text{Cofib} & & \downarrow \text{TFib} \\
 & & E & \xrightarrow{\text{Cofib}} & F \\
 & & \downarrow \text{TFib} & & \downarrow \text{TFib} \\
 H & \xrightarrow{\text{TFib}} & & & C
 \end{array} \quad (5.7.5)$$

上图内部染色箭头解释如下:

1. (蓝色箭头). 依照命题 5.7.2 作提升态射  $X \rightarrow H$ , 并将之分解作  $\text{TFib} \circ \text{Cofib}$ , 再取复合态射  $A \rightarrow E$ , 得上图的蓝色部分. 蓝色箭头即  $A \rightarrow E, X \rightarrow E$  与  $E \rightarrow X$ .
2. (红色箭头). 依照命题 5.7.2 作提升态射  $E \rightarrow M$ , 并将之分解作  $\text{TFib} \circ \text{Cofib}$ , 再取复合态射  $X \rightarrow F$ , 得上图的红色部分. 红色箭头即  $X \rightarrow F, E \rightarrow F$  与  $F \rightarrow M$ .

往后依照指标  $\{n\}_{n=1}^5$  所示的顺序, 依次证明各箭头是弱等价. 即证,

1, 3 若  $(f, g, gf) \in (\text{Cofib}, \text{TFib}, \text{TCofib})$ , 则  $f \in \text{TCofib}$ .

2 若  $(f, g, gf) \in (\text{Cofib}, \text{TFib}, \text{TFib})$ , 则  $f \in \text{TCofib}$ .

4, 5 若  $(f, g, gf) \in (\text{Cofib}, \text{TCofib}, \text{TCofib})$ , 则  $f \in \text{TCofib}$ .

先证明 (1, 3). 由定理 3.1.4 构造 conflation 的交换图:

$$\begin{array}{ccccc}
 & & V & \xlongequal{\quad} & V \\
 & & \downarrow & & \downarrow \\
 \cdot & \xrightarrow{\text{Cofib}} & \cdot & \twoheadrightarrow & U \\
 \parallel & & \downarrow \text{TFib} & & \downarrow \\
 \cdot & \xrightarrow{\text{TCofib}} & \cdot & \twoheadrightarrow & S
 \end{array} \quad (5.7.6)$$

由定理 5.5.6 与式 (5.5.1) 得  $U \in \mathcal{U} \cap \mathcal{N} = \mathcal{S}$ . 从而上图中的  $\text{Cofib}$  是  $\text{TCofib}$ .

(2) 与 (4, 5) 的证明是类似的. 只需证明以下左, 右两图中  $U \in \mathcal{N}$  即可:

$$\begin{array}{ccc}
 V' \xrightarrow{\quad} V \twoheadrightarrow U & & \cdot \xrightarrow{\text{Cofib}} \cdot \twoheadrightarrow U \\
 \downarrow & \downarrow & \parallel \\
 \cdot \xrightarrow{\text{Cofib}} \cdot \twoheadrightarrow U & & \cdot \xrightarrow{\text{TCofib}} \cdot \twoheadrightarrow S \\
 \downarrow \text{TFib} & \downarrow \text{TFib} & \downarrow \\
 \cdot \xlongequal{\quad} \cdot & & S' \xlongequal{\quad} S'
 \end{array} \quad (5.7.7)$$

□

**命题 5.7.7.** CM2 成立, 即,  $\text{Cofib}$ ,  $\text{Fib}$  与  $\text{Weq}$  对形变收缩封闭.

证明. 先证明  $\text{Cofib}$  对形变收缩封闭. 对  $\text{Fib}$  的证明是对偶的. 依照弱幂等完备性,  $\text{Cofib}$  的形变收缩仍是  $\text{Cofib}$  (定理 3.3.10). 记  $f \in \text{Cofib}$ , 对应扩张元  $\delta$ , 其形变收缩是  $f'$ , 对应扩张元  $\delta'$ . 依照 ET3 构造 conflation 的态射:

$$\begin{array}{ccccc}
 \cdot & \xrightarrow{f'} & \cdot & \xrightarrow{g'} & W \xrightarrow{\delta'} \cdot \\
 \downarrow i & & \downarrow j & & \downarrow a \\
 \cdot & \xrightarrow{f} & \cdot & \xrightarrow{g} & U \xrightarrow{\delta} \cdot \\
 \downarrow p & & \downarrow q & & \downarrow b \\
 \cdot & \xrightarrow{f'} & \cdot & \xrightarrow{g'} & W \xrightarrow{\delta'} \cdot
 \end{array} \quad (5.7.8)$$



由定理 2.3.7,  $b \circ a$  是同构, 从而  $W$  是  $U$  的形变收缩. 因此  $W \in \mathcal{U}$ . 依照定义,  $f' \in \text{Cofib}$ .

最后证明  $\text{Weq}$  对形变收缩封闭. 假定  $g \in \text{Weq}$  有形变收缩  $g'$ , 并将  $g'$  分解作  $\text{TFib} \circ \text{Cofib}$ , 得下图:

$$\begin{array}{ccccc}
 X' & \xrightarrow{i_X} & X & \xrightarrow{p_X} & X' \\
 \downarrow a' & & \downarrow g & & \downarrow a' \\
 Y' & & & & Y' \\
 \downarrow c' & & \downarrow g' & & \downarrow c' \\
 Z' & \xrightarrow{i_Z} & Z & \xrightarrow{p_Z} & Z'
 \end{array} \quad (5.7.9)$$

往证  $a' \in \text{TCofib}$ . 由定理 3.2.2 构造同伦的推出拉回方块  $\square$ :

$$\begin{array}{ccccc}
 X' & \xrightarrow{i_X} & X & \xrightarrow{p_X} & X' \\
 \downarrow a' & \boxtimes & \downarrow w & \circlearrowleft & \downarrow a' \\
 Y' & \xrightarrow{j_Y} & F & \xrightarrow{q_Y} & Y' \\
 \downarrow c' & \circlearrowright & \downarrow f & \square & \downarrow c' \\
 Z' & \xrightarrow{i_Z} & Z & \xrightarrow{p_Z} & Z'
 \end{array} \quad (5.7.10)$$

记 conflation  $V \xrightarrow{x} F \xrightarrow{f} Z$ . 定理 3.2.2 的构造表明  $f \in \text{TFib}$ . 任取两组弱拉回问题的解:

1. (态射  $w: X \dashrightarrow F$ ). 考虑  $X \xrightarrow{g} Z \xrightarrow{p_Z} Z'$  与  $X \xrightarrow{p_X} X' \xrightarrow{g'} Z'$ ;
2. (态射  $j_Y: Y' \dashrightarrow F$ ). 考虑  $Y' \xrightarrow{c'} Z' \xrightarrow{i_Z} Z \xrightarrow{p_Z} Z'$  与  $Y' \xrightarrow{c'} Z' \xrightarrow{i_Z} Z \xrightarrow{p_Z} Z'$ .

上图  $\circlearrowleft$  交换, 但  $\boxtimes$  未必交换. 取  $\boxtimes$  的“缺陷” ( $w \circ i_X - j_Y \circ a'$ ), 则

$$f \circ (w \circ i_X - j_Y \circ a') = g \circ i_X - i_Z \circ c' \circ a' = 0. \quad (5.7.11)$$

由长正合列, 记  $(w \circ i_X - j_Y \circ a') = x \circ \tilde{l}$ , 以及  $l = \tilde{l} \circ p_X$ , 如下图所示:

$$\begin{array}{ccccc}
 & & l & & \\
 & \nearrow & & \searrow & \\
 X & \xrightarrow{p_X} & X' & \xrightarrow{i_X} & X \\
 & \downarrow a' & \boxtimes & \downarrow w & \\
 Y' & \xrightarrow{j_Y} & F & \xrightarrow{q_Y} & Y' \\
 & \downarrow c' & \downarrow f & & \\
 & Z & & & 
 \end{array} \quad (5.7.12)$$

可以发现,  $q_Y \circ x \circ l = q_Y \circ (w \circ i_X - j_Y \circ a') \circ p_X = 0$ . 此时可验证下图交换:

$$\begin{array}{ccccc}
 X' & \xrightarrow{\begin{pmatrix} i_X \\ l \circ i_X \end{pmatrix}} & X \oplus V & \xrightarrow{(p_X \ 0)} & X' \\
 a' \downarrow & & \begin{pmatrix} w \ x \\ -l \ 1 \end{pmatrix} \downarrow & & a' \downarrow \\
 Y' & \xrightarrow{\begin{pmatrix} j_Y \\ 0 \end{pmatrix}} & F \oplus V & \xrightarrow{(q_Y \ -q_Y \circ x)} & Y'
 \end{array} \quad (5.7.13)$$

验证细节如下:

1. (左方块).  $\begin{pmatrix} w \ x \\ -l \ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_X \\ l \circ i_X \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} j_Y \\ 0 \end{pmatrix} \circ a' = \begin{pmatrix} w \circ i_X + x \circ l \circ i_X \\ -l \circ i_X + l \circ i_X \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} j_Y \circ a' \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (w \circ i_X - j_Y \circ a') + x \circ l \\ 0 \end{pmatrix} = 0$ ;
2. (右方块).  $q_Y \circ (1 \ -x) \begin{pmatrix} w \ x \\ -l \ 1 \end{pmatrix} - a' \circ (p_X \ 0) = q_Y \circ (w + x \circ l \ 0) - a' \circ (p_X \ 0) = 0$

下证明  $\begin{pmatrix} w & x \\ -l & 1 \end{pmatrix} \in \text{Weq}$ .

引理 5.7.8.  $\begin{pmatrix} w & x \\ -l & 1 \end{pmatrix} \in \text{Weq}$ .

证明. 反复利用命题 5.7.6 即可. 由  $g = fw$  与  $f, g \in \text{Weq}$ , 得  $w \in \text{Weq}$ . 由  $V \rightarrow 0$  是平凡纤维, 得  $0 \rightarrow 0$  与  $V \rightarrow 0$  是弱等价, 从而  $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} : X \rightarrow X \oplus V$  与  $(1 \ 0) : F \oplus V \rightarrow F$  都是弱等价.

由  $(1 \ 0) \circ \begin{pmatrix} w & x \\ -l & 1 \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = w$ , 得证.  $\square$

这说明  $a' \in \text{Cofib}$  是弱等价  $\begin{pmatrix} w & x \\ -l & 1 \end{pmatrix}$  的形变收缩. 将  $\begin{pmatrix} w & x \\ -l & 1 \end{pmatrix}$  分解作  $\text{TCofib} \circ \text{TFib}$ , 由 CM3 (命题 5.7.2) 取提升态射  $s$ , 得下图:

$$\begin{array}{ccccc}
 X' & \xrightarrow{\begin{pmatrix} i_X \\ l \circ i_X \end{pmatrix}} & X \oplus V & \xrightarrow{(p_X \ 0)} & X' \\
 \downarrow a' & & \downarrow \text{TCofib} & & \downarrow a' \\
 & \nearrow s & \bullet & & \\
 Y' & \xrightarrow{\begin{pmatrix} j_Y \\ 0 \end{pmatrix}} & F \oplus V & \xrightarrow{(q_Y \ -q_Y \circ x)} & Y'
 \end{array} \quad (5.7.14)$$

这说明  $a'$  是  $\text{TCofib}$  的形变收缩. 仿照 “ $\text{Cofib}$  对形变收缩封闭” 的证明, 得  $\text{TCofib}$  对形变收缩封闭. 因此  $a' \in \text{TCofib}$ .  $\square$

## 参考文献

- [Bas63] Hyman Bass. Big projective modules are free. *Illinois Journal of Mathematics*, 7(1):24–31, March 1963. doi:10.1215/ijm/1255637479.
- [BK14] Theo Bühler and Matthias Kunzer. Some elementary considerations in exact categories, July 2014. URL: <https://pnp.mathematik.uni-stuttgart.de/lexmath/kuenzer/excounter.pdf>.
- [BS01] Paul Balmer and Marco Schlichting. Idempotent Completion of Triangulated Categories. *Journal of Algebra*, 236(2):819–834, February 2001. doi:10.1006/jabr.2000.8529.
- [Büh10] Theo Bühler. Exact categories. *Expositiones Mathematicae*, 28(1):1–69, January 2010. doi:10.1016/j.exmath.2009.04.004.
- [Che18] Xiao-Wu Chen. The Extension-lifting Lemma via Two-term Complexes, November 2018. URL: <http://home.ustc.edu.cn/~xwchen/USTC%20Algebra%20Notes%20Archiv/The%20Extension-Lifting%20lemma%20via%20two-term%20complexes.pdf>.
- [Cre21] Richard Crew. Homological Algebra Lecture 6, 2021.
- [GZ67] Peter Gabriel and Michel Zisman. *Calculus of Fractions and Homotopy Theory*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1967. doi:10.1007/978-3-642-85844-4.
- [Hap88] Dieter Happel. *Triangulated Categories in the Representation of Finite Dimensional Algebras*. Cambridge University Press, 1 edition, February 1988. doi:10.1017/CB09780511629228.
- [Hov07] Mark Hovey. *Model Categories*. American Mathematical Soc., 2007. URL: [https://www.nzdr.ru/data/media/biblio/kolxoz/M/MA/MAct/Hovey%20M.%20Model%20categories%20\(LN,%20Wesleyan%20U.,%201998\)\(213s\)\\_MAct\\_.pdf](https://www.nzdr.ru/data/media/biblio/kolxoz/M/MA/MAct/Hovey%20M.%20Model%20categories%20(LN,%20Wesleyan%20U.,%201998)(213s)_MAct_.pdf).
- [Joy08] André Joyal. The theory of quasi-categories and its applications. 2008. URL: <https://ncatlab.org/nlab/files/JoyalTheoryOfQuasiCategories.pdf>.
- [JT06] Andre Joyal and Myles Tierney. Quasi-categories vs Segal spaces, November 2006. arXiv:math/0607820, doi:10.48550/arXiv.math/0607820.
- [Kel82] Gregory M. Kelly. *Basic Concepts of Enriched Category Theory*. Number 64 in London Mathematical Society Lecture Note Series. Cambridge University Press, Cambridge ; New York, 1982. URL: <http://www.tac.mta.ca/tac/reprints/articles/10/tr10abs.html>.
- [Kel96] Bernhard Keller. Derived Categories and Their Uses. In *Handbook of Algebra*, volume 1, pages 671–701. Elsevier, 1996. doi:10.1016/S1570-7954(96)80023-4.
- [LC07] Jue Le and Xiao-Wu Chen. Karoubianness of a triangulated category. *Journal of Algebra*, 310(1):452–457, April 2007. doi:10.1016/j.jalgebra.2006.11.027.
- [May01] John P. May. The axioms for triangulated categories, 2001. URL: <https://www.math.uchicago.edu/~may/MISC/Triangulate.pdf>.

- [Mit65] Barry Mitchell. *Theory of Categories*. Academic Press, 1965. URL: <https://webhomes.maths.ed.ac.uk/~v1ranick/papers/mitchell.pdf>.
- [Mur07] Daniel Murfet. Triangulated categories part i, April 2007. URL: <http://therisingsea.org/notes/TriangulatedCategories.pdf>.
- [Nee91] Amnon Neeman. Some new axioms for triangulated categories. *Journal of Algebra*, 139(1):221–255, May 1991. doi:10.1016/0021-8693(91)90292-G.
- [Nee01] Amnon Neeman. *Triangulated Categories*. Number no. 148 in Annals of Mathematics Studies. Princeton University Press, Princeton, 2001. URL: <https://homepage.mi-ras.ru/~akuznet/homalg/Neeman%20Triangulated%20categories.pdf>.
- [NP19] Hiroyuki Nakaoka and Yann Palu. Extriangulated categories, Hovey twin cotorsion pairs and model structures. *Cahiers de topologie et géométrie différentielle catégoriques*, LX(2):117–193, 2019. arXiv title "Mutation via Hovey twin cotorsion pairs and model structures in extriangulated categories". URL: <https://hal.science/hal-02136919>.
- [Ree73] Christopher L. Reedy. Homotopy theory of model categories. 1973. URL: <https://math.mit.edu/~psh/reedy.pdf>.
- [RZ21] Shi Rong and Pu Zhang. Strong version of Snake Lemma in exact categories. *Homology, Homotopy and Applications*, 23(2):151–163, 2021. doi:10.4310/HHA.2021.v23.n2.a9.
- [Ver96] Jean-Louis Verdier. *Des catégories dérivées des catégories abéliennes*. Number 239 in Astérisque. Société mathématique de France, 1996. URL: [https://www.numdam.org/item/AST\\_1996\\_\\_239\\_\\_R1\\_0/](https://www.numdam.org/item/AST_1996__239__R1_0/).
- [Wis11] Jonathan Wise. A A Non-elementary Proof of the Snake Lemma, 2011. URL: <https://ncatlab.org/nlab/files/Wise-SnakeLemma.pdf>.
- [Yon60] Nobuo Yoneda. On Ext and exact sequences. *J. Fac. Sci. Univ. Tokyo Sect. I*, 8:507–576, 1960. URL: <https://mathscinet.ams.org/mathscinet/article?mr=225854>.