

Gorenstein 同调理论

张陈成

2025 年秋

最后更新于 2025 年 12 月 6 日.

目录

1 阅读笔记: Proper classes and Gorensteinness in extriangulated categories	2
1.1 带真类的外三角范畴	2
1.2 ξ -同调代数	4
1.3 $\mathcal{GP}(\xi)$ 的结构	7
1.4 $\mathcal{GP}(\xi)$ -投射维数	10
1.5 Hovey 四元组	13
2 阅读笔记: Complete cohomology for extriangulated categories	14
2.1 ξ -上投射分解	14
2.2 投射维数与生成子范畴	17
2.3 完全上同调	18

1 阅读笔记: Proper classes and Gorensteinness in extriangulated categories

文章见 [HZZ20].

1.1 带真类的外三角范畴

本章节介绍真类 ξ 的定义, 并使用图表定理简单证明了 定理 1.1.5.

记号 1.1.1. 记 $(\mathcal{C}, \mathbb{E}, \mathfrak{s})$ 为外三角范畴.

定义 1.1.2 (真类). 称 ξ 是 \mathbb{E} -三角组成的真类, 若满足以下条件:

P1 ξ 对双积与同构封闭, 且包含所有可裂的 \mathbb{E} -三角.

P2 ξ 对基变换和余积变换封闭. 对下图所示的 \mathbb{E} -三角射, 若中间行属于 ξ , 则上下行也属于 ξ :

$$\begin{array}{ccccc} X & \xrightarrow{f'} & Y' & \xrightarrow{g'} & Z' \\ \parallel & & \downarrow \gamma' & & \downarrow \gamma \\ X & \xrightarrow{f} & Y & \xrightarrow{g} & Z \\ \downarrow \alpha & & \downarrow \alpha' & & \parallel \\ X'' & \xrightarrow{f''} & Y'' & \xrightarrow{g''} & Z \end{array} \quad \begin{array}{l} \dashrightarrow \gamma^*\delta \\ \dashrightarrow \delta \\ \dashrightarrow \alpha_*\delta \end{array} \quad (1.1.1)$$

P3 ξ 饱和: 给定 δ_1 与 δ_2 实现的“拉回”

$$\begin{array}{ccccc} \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ \cdot & \dashrightarrow \delta'_1 & \cdot & \dashrightarrow \delta_1 & \cdot \\ \parallel & & \downarrow & & \downarrow \\ \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot \\ \downarrow \delta'_2 & & \downarrow \delta_2 & & \downarrow \end{array} \quad (1.1.2)$$

若 δ_2 与 δ'_1 的实现属于 ξ , 则 δ_1 的实现也属于 ξ .

备注 1.1.3. 定义 1.1.2 中的“真类 (proper class)”无关集合论中的“真类”概念.

记号 1.1.4. 方便起见, 将 ξ 中三角标注作橘色 (■). 引入 ξ -三角, ξ -扩张元, ξ -单射, ξ -满射等名称.

定理 1.1.5. 假定外三角的类 ξ 对同构封闭, 则 ξ 是真类当且仅当 $(\mathcal{C}, \mathbb{E}_\xi, \mathfrak{s}_\xi)$ 是外三角范畴. 此处

1. $\mathbb{E}_\xi(Z, X)$ 是 $\mathbb{E}(Z, X)$ 中的 ξ -扩张元;
2. \mathfrak{s}_ξ 即 \mathfrak{s} 在 \mathbb{E}_ξ 上的限制.

证明. 方便起见, 将外三角范畴 $(\mathcal{C}, \mathbb{E}, \mathfrak{s})$ 与带特定结构的加法范畴 $(\mathcal{C}, \mathbb{E}_\xi, \mathfrak{s})$ 分别称作大范畴与小范畴.

(\leftarrow). 假定小范畴是外三角范畴, 下证 ξ 是真类. P1 与 P2 由 \mathbb{E}_ξ 的加法双函子性保证. P3 证明如下. 假定式 (1.1.2) 中 δ'_1, δ_2 是 ξ -扩张元, 由 P2 知 δ'_2 也是 ξ -扩张元. 由图表定理, δ_1 可在小范畴中直接构造.

(\rightarrow). ET1, ET2, ET3, ET3^{op} 显然成立. 只需验证 ET4 与 ET4^{op}.

1. (ET4 的验证). 给定 ξ -单射 s 与 f 的复合, 在大范畴中作同伦的 ET4 图

$$\begin{array}{ccccc}
 X & \xrightarrow{f} & Y & \xrightarrow{g} & Z \\
 \parallel & & \downarrow s & \square & \downarrow m \\
 X & \dashrightarrow & A & \dashrightarrow & B \\
 & & \downarrow t & & \downarrow n \\
 C & \xlongequal{\quad} & C & & \\
 & & \downarrow \eta & & \downarrow \kappa
 \end{array} \quad . \quad (1.1.3)$$

直接地, $\kappa = g_*\eta$ 与 $n^*\eta = f_*\varepsilon$ 都是 ξ -扩张元. 在大范畴中作“拉回”:

$$\begin{array}{ccccc}
 Y & \xlongequal{\quad} & Y & & \\
 \downarrow (1) & & \downarrow (g_s) & & \\
 X & \xrightarrow{(f_0)} & Y \oplus A & \xrightarrow{g \oplus 1_A} & Z \oplus A \xrightarrow{\delta \oplus 0} \\
 \parallel & & \downarrow (0,1) & & \downarrow (-m,p) \\
 X & \xrightarrow{sf} & A & \xrightarrow{p} & B \dashrightarrow \\
 & & \downarrow 0 & & \downarrow n^*\eta
 \end{array} \quad . \quad (1.1.4)$$

由 P3 得 $X \xrightarrow{sf} A \xrightarrow{p} Y \dashrightarrow$ 是 ξ -三角.

2. (ET4^{op} 的验证). 给定 ξ -满射 n 与 p 的复合, 在大范畴中作同伦的 ET4^{op} 图

$$\begin{array}{ccccc}
 X & \dashrightarrow & Y & \dashrightarrow & Z \\
 \parallel & & \downarrow s & \square & \downarrow m \\
 X & \xrightarrow{i} & A & \xrightarrow{p} & B \dashrightarrow \\
 & & \downarrow np & & \downarrow n \\
 C & \xlongequal{\quad} & C & & \\
 & & \downarrow \eta & & \downarrow \kappa
 \end{array} \quad . \quad (1.1.5)$$

直接地, $\delta = m^*\varepsilon$ 与 $n^*\eta = f_*\varepsilon$ 都是 ξ -扩张元. 在大范畴中作“拉回”:

$$\begin{array}{ccccc}
 Z & \xlongequal{\quad} & Z & & \\
 \downarrow m & & \downarrow f_*\varepsilon & & \\
 Y & \xrightarrow{(s_{-g})} & A \oplus Z & \xrightarrow{(p,m)} & B \dashrightarrow \\
 \parallel & & \downarrow (1,0) & & \downarrow n \\
 Y & \xrightarrow{s} & A & \xrightarrow{np} & C \dashrightarrow \\
 & & \downarrow 0 & & \downarrow \kappa
 \end{array} \quad . \quad (1.1.6)$$

由 P3 得 $Y \xrightarrow{s} A \xrightarrow{np} C \dashrightarrow$ 是 ξ -三角.

□

命题 1.1.6. 若 $(\mathcal{C}, \mathbb{E}, \mathfrak{s})$ 弱幂等完备, 则 $(\mathcal{C}, \mathbb{E}_\xi, \mathfrak{s}_\xi)$ 亦然.

证明. 即证, 若 $(\begin{smallmatrix} i \\ 0 \end{smallmatrix}) : A \rightarrow B \oplus C$ 是 ξ -单射, 则 i 是 ξ -单射. 由 WIC 条件, i 是 \mathbb{E} -单射, 从而有交换图

$$\begin{array}{ccccc} A & \xrightarrow{i} & B & \xrightarrow{p} & M' \dashrightarrow^{\delta'} \\ \parallel & & \downarrow (\begin{smallmatrix} 1 \\ 0 \end{smallmatrix}) & & \downarrow \gamma \\ A & \xrightarrow{(\begin{smallmatrix} i \\ 0 \end{smallmatrix})} & B \oplus C & \xrightarrow{\quad} & M \dashrightarrow^{\delta} \end{array} . \quad (1.1.7)$$

由 ET3 构造 γ . 此时 $\delta' = \gamma^* \delta$ 是 ξ -扩张元, 因此 i 是 ξ -单射. \square

1.2 ξ -同调代数

记号 1.2.1. 往后假定范畴弱幂等完备. 取定真类 ξ .

定义 1.2.2 (ξ -投射对象). 称 X 是 ξ -投射对象, 若对一切 ξ -三角 $A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{g} C \dashrightarrow^{\delta}$, 有短正合列

$$0 \rightarrow (X, A) \xrightarrow{(X, f)} (X, B) \xrightarrow{(X, g)} (X, C) \rightarrow 0. \quad (1.2.1)$$

备注 1.2.3. 传统的相对同调代数仅要求 $(X, -)$ 映 ξ -满射为满射, 对单射不设要求.

记号 1.2.4. 记 $\mathcal{P}(\xi)$ 是 ξ -投射对象构成的类.

备注 1.2.5. 其对余积(若存在)与缩回封闭. $\mathcal{P}(\xi)$ 显然是 $(\mathcal{C}, \mathbb{E}_\xi, \mathfrak{s}_\xi)$ 的外三角子范畴, 且是半单 Abel 范畴; 但是 $\mathcal{P}(\xi)$ 未必是 $(\mathcal{C}, \mathbb{E}, \mathfrak{s})$ 的外三角子范畴.

记号 1.2.6. 假定外三角范畴有足够的 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射对象. 即是说, 对任意对象 A 都存在 ξ -三角 $K \xrightarrow{f} P \xrightarrow{g} A \dashrightarrow^{\delta}$ 使得 P 是 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射对象.

命题 1.2.7. $\mathcal{P}(\xi)$ -投射预盖恰好是 $\mathcal{P}(\xi)$ 出发的 ξ -满射.

证明. 任取 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射预盖 $q : Q \rightarrow A$. 存在 ξ -三角 $K \xrightarrow{f} P \xrightarrow{g} A \dashrightarrow^{\delta}$. 由投射预盖的定义, g 经 q 分解. 由 WIC, q 是 ξ -满射. 反之, 设 $q : Q \rightarrow A$ 是 $\mathcal{P}(\xi)$ 出发的 ξ -满射. 由定义知 $(-, q)$ 映 $\mathcal{P}(\xi)$ 为满射, 从而 q 是 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射预盖. \square

下一引理说明 ξ -三角与 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射对象通过某种“垂直配对”决定彼此.

命题 1.2.8. 假定范畴有足够的 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射对象. 则 \mathbb{E} -三角 $X \xrightarrow{f} Y \xrightarrow{g} Z \dashrightarrow^{\delta}$ 是 ξ -三角, 当且仅当对所有 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射对象 P 都有短正合列

$$0 \rightarrow (P, X) \xrightarrow{(P, f)} (P, Y) \xrightarrow{(P, g)} (P, Z) \rightarrow 0. \quad (1.2.2)$$

证明. 仅证明 (\leftarrow) 部分. 给定 \mathbb{E} -三角 $X \xrightarrow{f} Y \xrightarrow{g} Z \dashrightarrow^{\delta}$. 由范畴有足够的 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射对象, 作交换图

$$\begin{array}{ccccc} K & \xlongequal{\quad} & K & & \\ \downarrow & & \downarrow & & \\ X & \dashrightarrow & X \oplus P & \dashrightarrow & P \dashrightarrow \\ \parallel & & \downarrow & & \downarrow \\ X & \xrightarrow{f} & Y & \xrightarrow{g} & Z \dashrightarrow^{\delta} \end{array} . \quad (1.2.3)$$

可裂短正合列是 ξ -三角. 由 P3, $X \xrightarrow{f} Y \xrightarrow{g} Z \dashrightarrow^{\delta}$ 是 ξ -三角. \square

记号 1.2.9. 假定范畴有足够的 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射对象. 此时可以定义投射分解与维数.

定义 1.2.10 ($\mathcal{P}(\xi)$ -投射维数 pd_ξ). 约定 $\mathcal{P}(\xi)$ 中对象的 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射维数为 0. 归纳地, 称 $pd_\xi M \leq n+1$, 若存在 ξ -三角 $K \xrightarrow{f} P \xrightarrow{g} M \dashrightarrow$ 使得 $P \in \mathcal{P}(\xi)$ 且 $pd_\xi K \leq n$. 称 $pd_\xi M = n$, 若有 $pd_\xi M \leq n$, 但没有 $pd_\xi M \leq n-1$.

引理 1.2.11. 对 $P \in \mathcal{P}(\xi)$, 总有 $pd_\xi M = pd_\xi(M \oplus P)$.

证明. 记命题 $\mathfrak{M}(n)$ 为 “ $pd_\xi M = pd_\xi(M \oplus P)$ 对 $pd_\xi M = n$ 成立”, 证明 $\{\mathfrak{M}(n)\}_{n \in \mathbb{N} \cup \{\infty\}}$. 由定义知 $\mathfrak{M}(0)$ 成立. 假定 $\mathfrak{M}(\leq n)$ 成立. 今任取 $pd_\xi M = n+1$.

1. 一方面, $pd_\xi(M \oplus P) \leq n+1$. 取 ξ -三角 $K \xrightarrow{f} Q \xrightarrow{g} M \dashrightarrow$ 使得 $Q \in \mathcal{P}(\xi)$ 且 $pd_\xi K \leq n$. 则有 ξ -三角 $K \xrightarrow{(f_0)} Q \oplus P \xrightarrow{(g,0)} M \oplus P \dashrightarrow$.
2. 另一方面, $pd_\xi(M \oplus P) \not\leq n$. 假定 $pd_\xi(M \oplus P) \leq n$. 取 ξ -三角 $K' \xrightarrow{f'} Q' \xrightarrow{g'} M \oplus P \dashrightarrow$ 使得 $Q' \in \mathcal{P}(\xi)$ 且 $pd_\xi K' \leq (n-1)$. 作交换图

$$\begin{array}{ccccc}
 & P & \xlongequal{\quad} & P & \\
 & \downarrow & & \downarrow & \\
 K' & \xrightarrow{f'} & Q' & \xrightarrow{g'} & M \oplus P \xrightarrow{\delta'} \\
 \parallel & & \downarrow & & \downarrow \\
 K' & \dashrightarrow & E & \dashrightarrow & M \dashrightarrow \varepsilon \\
 & \downarrow 0 & & \downarrow 0 &
 \end{array} \tag{1.2.4}$$

此处 E 是 Q' 的直和项. 由底行得 $pd_\xi M \leq n$, 矛盾.

最后证明 $\mathfrak{M}(\infty)$. 实际上, 以上第二步说明 $pd_\xi(M \oplus P) \geq pd_\xi M$, 从而得证. \square

备注 1.2.12. 投射维数的归纳定义无关 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射模的选取. 可使用若松技巧证明, 假定有 ξ -三角

$$K_1 \xrightarrow{f_1} P_1 \xrightarrow{g_1} X \dashrightarrow, \quad K_2 \xrightarrow{f_2} P_2 \xrightarrow{g_2} X \dashrightarrow, \tag{1.2.5}$$

两者在 X 处的拉回是两条可裂的 ξ -三角, 从而 $K_1 \oplus P_2 \cong K_2 \oplus P_1$. 依照 引理 1.2.11 得 $pd_\xi K_1 = pd_\xi K_2$. 这一备注是为了说明 命题 1.2.17.

定义 1.2.13 (完全 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射分解). 给定双边无界复形 $X_\bullet = [\cdots X_1 \xrightarrow{d_1} X_0 \xrightarrow{d_0} X_{-1} \rightarrow \cdots]$.

- 称 X_\bullet 是 ξ -正合的, 若存在分解 $d_n = g_{n-1} f_n$ 使得每个 $K_{n+1} \xrightarrow{g_n} X_n \xrightarrow{f_n} K_n \dashrightarrow$ 是 ξ -三角.
- 称 \mathbb{E} -三角 $X \xrightarrow{f} Y \xrightarrow{g} Z \dashrightarrow$ 是 $(-, \mathcal{W})$ 正合的, 若对任意 $W \in \mathcal{W}$, 有短正合列

$$0 \rightarrow (Z, W) \xrightarrow{(g,W)} (Y, W) \xrightarrow{(f,W)} (X, W) \rightarrow 0. \tag{1.2.6}$$

- 称 X_\bullet 是完全 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射分解, 若 $X_n \in \mathcal{P}(\xi)$, X_\bullet 是 ξ -正合的, 且每一 $K_{n+1} \xrightarrow{g_n} X_n \xrightarrow{f_n} K_n \dashrightarrow$ 是 $(-, \mathcal{P}(\xi))$ -正合的.

可以定义对偶地定义完全 ξ -内射分解.

备注 1.2.14. 在原文中, 默认 $(-, \mathcal{W})$ -正合的 \mathbb{E} -三角(复形)是 ξ -三角(复形).

备注 1.2.15. 给定完全 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射分解 X_\bullet , 态射 $d = gf$ 的选取未必唯一, 即 ξ -三角的拆解未必唯一. 然而, (P, X_\bullet) 的满-单分解是唯一的, 即 ξ -三角在 $(\mathcal{P}(\xi), -)$ 下的像唯一. 鉴于外三角范畴缺乏函子的满-单分解, $\mathcal{GP}(\xi)$ 更宜被定义为“能被中项为 $\mathcal{P}(\xi)$ 的 $(-, \mathcal{P}(\xi))$ -正合 \mathbb{E} -三角双边无界延拓”.

记号 1.2.16. 方便起见, 称一个 \mathbb{E} -单射 (\mathbb{E} -满射, 或扩张元) 是 $(-, \mathcal{W})$ 正合的, 若其所在的 \mathbb{E} -三角是 $(-, \mathcal{W})$ 正合的.

命题 1.2.17 ($\mathcal{P}(\xi)$ -投射维数的等价定义). $pd_\xi M \leq n$, 当且仅当对任意 ξ -正合复形

$$K_n \xrightarrow{d_n} P_{n-1} \xrightarrow{d_{n-1}} \cdots \xrightarrow{d_1} P_0 \xrightarrow{d_0} M \quad (P_i \in \mathcal{P}(\xi)), \quad (1.2.7)$$

总有 $K_n \in \mathcal{P}(\xi)$.

证明. 由定义归纳得 (\leftarrow). 由 备注 1.2.12 得 (\rightarrow). \square

定义 1.2.18 (ξ -Gorenstein 投射). 对于完全 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射分解 P_\bullet , 记 K -项为 ξ -Gorenstein 投射对象. 记作 $\mathcal{GP}(\xi)$. 可以对偶地定义 ξ -Gorenstein 内射对象, 记作 $\mathcal{GI}(\xi)$.

引理 1.2.19. 给定 \mathbb{E} -三角 $A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{g} C \xrightarrow{\delta}$. 其 $(-, \mathcal{W})$ -正合, 当且仅当 (g, \mathcal{W}) 与 $\mathbb{E}(g, \mathcal{W})$ 总是单的.

证明. 考虑五项长正合列

$$(C, W) \xrightarrow{(g, W)} (B, W) \xrightarrow{(f, W)} (A, W) \xrightarrow{\delta^\sharp} \mathbb{E}(C, W) \xrightarrow{g^*} \mathbb{E}(B, W). \quad (1.2.8)$$

\mathbb{E} -三角是 $(-, \mathcal{W})$ -正合的, 当且仅当 (g, W) 单且 (f, W) 满. 注意到 (f, W) 满当且仅当 g^* 单. \square

记号 1.2.20. 往后将交换图中 $\mathcal{GP}(\xi)$ 中对象标注为紫色 (■), 将 $(-, \mathcal{W})$ 正合 \mathbb{E} -三角标注为红色 (■), 将待定的 \mathbb{E} -三角标注为蓝色 (■). 定理 1.1.5 已证明 $(\mathcal{C}, \mathbb{E}_\xi, \mathfrak{s}_\xi)$ 是外三角范畴, 故无需强调对 ξ -三角的橘色标记 (■).

备注 1.2.21. $(-, \mathcal{W})$ -正合 \mathbb{E} -三角的图表定理, 相当于满态射的图表定理.

命题 1.2.22. 若 ε 是 $(-, \mathcal{W})$ -正合的, 则任意 $\lambda_* \delta$ 亦然.

$$\begin{array}{ccccc} \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot & \xrightarrow{f} & \cdot & \xrightarrow{\varepsilon} \\ \downarrow \lambda & & \downarrow & & \parallel & \\ \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot & \xrightarrow{f'} & \cdot & \xrightarrow{\lambda_* \varepsilon} \end{array} \quad (1.2.9)$$

证明. $\lambda_* \delta$ 是 ξ -扩张元. 由 引理 1.2.19, 只需证 (f', \mathcal{W}) 与 $\mathbb{E}(f', \mathcal{W})$ 单. 由 (f, \mathcal{W}) 与 $\mathbb{E}(f, \mathcal{W})$ 单, 证毕. \square

命题 1.2.23. 若 δ 与 ε 是 $(-, \mathcal{W})$ -正合的, 则 ε' 亦然.

$$\begin{array}{ccccc} \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot & \xrightarrow{\delta'} \\ \parallel & & \downarrow g & & \downarrow f & \\ \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot & \xrightarrow{g} & \cdot & \xrightarrow{\delta} \\ \downarrow g f & & \parallel & & \downarrow \varepsilon' & \\ \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot & \xrightarrow{\varepsilon} & \cdot & \end{array} \quad (1.2.10)$$

证明. 由定理 1.1.5, 上图是 $(\mathcal{C}, \mathbb{E}_\xi, \mathfrak{s}_\xi)$ 中的交换图. 由引理 1.2.19, 只需证明 (gf, \mathcal{W}) 与 $\mathbb{E}(gf, \mathcal{W})$ 单. 由假设, $(g, \mathcal{W}), \mathbb{E}(g, \mathcal{W}), (f, \mathcal{W})$ 与 $\mathbb{E}(f, \mathcal{W})$ 单. 因此 (gf, \mathcal{W}) 与 $\mathbb{E}(gf, \mathcal{W})$ 单. \square

命题 1.2.24. 若 δ' 与 ε 是 $(-, \mathcal{W})$ -正合的, 则 δ 亦然.

$$\begin{array}{ccccc} & \xlongequal{\quad} & & \xlongequal{\quad} & \\ \downarrow & & f & & \downarrow \delta' \\ \xrightarrow{\quad} & \xrightarrow{\quad} & \xrightarrow{\quad} & \xrightarrow{\quad} & \\ \parallel & \downarrow & f' & \downarrow g & \downarrow \delta \\ \xrightarrow{\quad} & \xrightarrow{\quad} & \xrightarrow{\quad} & \xrightarrow{\quad} & \\ \downarrow \varepsilon' & & \downarrow \varepsilon & & \end{array} \quad (1.2.11)$$

证明. (细节从略). 所有三角都是 ξ -三角. 若 gf “满”, 则 f' “满”.

定理 1.2.25. 给定 ξ -三角 $A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{g} C \xrightarrow{\delta}$. 若 $C \in \mathcal{GP}(\xi)$, 则该三角是 $(-, \mathcal{P}(\xi))$ -正合的.

证明. 由 C 的定义作

$$\begin{array}{ccccc} K & \xlongequal{\quad} & K & & \\ \downarrow & & \downarrow i & & \\ A & \xrightarrow{\quad} & A \oplus P & \xrightarrow{\quad} & P \xrightarrow{0} \\ \parallel & & \downarrow & & \downarrow p \\ A & \xrightarrow{f} & B & \xrightarrow{g} & C \xrightarrow{\delta} \\ & & \downarrow \varepsilon' & & \downarrow \varepsilon \end{array} \quad (1.2.12)$$

依照 命题 1.2.23, δ $(-, \mathcal{P}(\xi))$ -正合的.

定理 1.2.26. 假定存在六个 \mathbb{E} -三角使得下图四个方块交换 (不要求扩张元间的态射):

$$\begin{array}{ccc} \cdot & \longrightarrow & \cdot \longrightarrow \cdot \dashrightarrow \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ \cdot & \longrightarrow & \cdot \longrightarrow \cdot \dashrightarrow \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ \cdot & \longrightarrow & \cdot \longrightarrow \cdot \dashrightarrow \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \end{array} \quad (1.2.13)$$

若任意五个 \mathbb{E} -三角是 $(-, \mathcal{W})$ 正合的, 则第六个三角亦然.

证明. 对上图作用 $(-, \mathcal{W})$, 得五个短正合列与一个中间项正合的态射序列. 依照 Abel 范畴的 3×3 -引理求解即可. \square

1.3 $\mathcal{GP}(\xi)$ 的结构

本节证明 $\mathcal{GP}(\xi)$ 是消解的加法子范畴, 其对直和项封闭.

引理 1.3.1. $\mathcal{GP}(\xi)$ 中对象对 $\mathcal{P}(\xi)$ 中直和项的消去封闭. 即, 若 $P \in \mathcal{P}(\xi), P \oplus G \in \mathcal{GP}(\xi)$, 则 $G \in \mathcal{GP}(\xi)$.

证明. 取 $P \oplus G$ 的完全 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射分解

$$\cdots \longrightarrow Q_0 \longrightarrow Q_1 \longrightarrow \cdots$$

$$\begin{array}{ccccc} & \searrow & & \nearrow & \\ & K_0 & & P \oplus G & \\ & \downarrow & & \downarrow & \\ & K_2 & & & \end{array} \quad (1.3.1)$$

下证明 G 嵌入某一完全 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射分解.

1. (向左延伸). 作以下 ξ -三角的交换图

$$\begin{array}{ccccccc} K_0 & \xrightarrow{\text{-----}} & P' & \xrightarrow{\text{-----}} & G & \xrightarrow{\text{-----}} & \\ \parallel & & \downarrow & & \downarrow & & \\ K_0 & \xrightarrow{\text{---}} & Q_0 & \xrightarrow{\text{---}} & P \oplus G & \xrightarrow{\text{---}} & \\ & & \downarrow & & \downarrow & & \\ & P & \xlongequal{\quad\quad\quad} & P & & & \\ & \downarrow & & \downarrow & & & \\ & 0 & & & & & \end{array} \quad (1.3.2)$$

由定理 1.2.26, 第一行是 $(-, \mathcal{P}(\xi))$ -正合的.

2. (向右延伸). 作以下 ξ -三角的交换图, 这两个 \mathbb{E} -三角也是 $(-, \mathcal{P}(\xi))$ -正合的:

$$\begin{array}{ccccccc} P \oplus G & \xrightarrow{(f_1, f_2)} & Q_1 & \xrightarrow{g} & K_2 & \xrightarrow{\text{-----}} & \\ \downarrow (1,0) & \square & \downarrow (l_m) & & \parallel & & \\ P & \xrightarrow{\left(\begin{smallmatrix} 1 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)} & P \oplus K_2 & \xrightarrow{(0,1)} & K_2 & \xrightarrow{\text{---}} & \\ & & & & & & \end{array} \quad (1.3.3)$$

此时有 $(-, \mathcal{P}(\xi))$ -正合三角的交换图,

$$\begin{array}{ccccccc} G & \xrightarrow{\text{-----}} & Q_1 & \xrightarrow{\text{-----}} & P \oplus K_2 & \xrightarrow{\text{-----}} & \\ \downarrow (0,1) & & \downarrow (0,1) & & \parallel & & \\ P \oplus G & \xrightarrow{\left(\begin{smallmatrix} 1 & 0 \\ f_1 & f_2 \end{smallmatrix}\right)} & P \oplus Q_1 & \xrightarrow{\left(\begin{smallmatrix} 1 & l \\ 0 & m \end{smallmatrix}\right)} & P \oplus K_2 & \xrightarrow{\text{-----}} & \\ \downarrow (1,0) & & \downarrow (1,0) & & & & \\ P & \xlongequal{\quad\quad\quad} & P & & & & \\ \downarrow & & \downarrow & & & & \end{array} \quad (1.3.4)$$

由定理 1.2.26, 第一行是 $(-, \mathcal{P}(\xi))$ -正合的.

□

引理 1.3.2. 对任意 $G \in \mathcal{GP}(\xi)$, 任取 $P, Q \in \mathcal{P}(\xi)$ 使得有 ξ -三角

$$G \xrightarrow{i} P \xrightarrow{p} G' \xrightarrow{\delta}, \quad G'' \xrightarrow{j} Q \xrightarrow{q} G \xrightarrow{\varepsilon}. \quad (1.3.5)$$

则 $G', G'' \in \mathcal{GP}(\xi)$.

证明. 考虑 备注 1.2.12. 以及 $\mathcal{GP}(\xi)$ 中对象对 $\mathcal{P}(\xi)$ -中直和项的消去封闭 (引理 1.3.1). □

定理 1.3.3. 给定 ξ -三角 $A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{g} C \xrightarrow{\delta}$, 其中 $C \in \mathcal{GP}(\xi)$. 此时 $A \in \mathcal{GP}(\xi)$ 当且仅当 $B \in \mathcal{GP}(\xi)$.

证明. 假定 $A \in \mathcal{GP}(\xi)$. 下图 $(i_A; i_C)$ 是扩张元的态射. 由 WIC-free 的 3×3 -引理得 ξ -三角的交换图

$$\begin{array}{ccccccc}
 A & \xrightarrow{f} & B & \xrightarrow{g} & C & \dashrightarrow \delta \\
 \downarrow i_A & & \downarrow (i_{Cg})^s & & \downarrow i_C & & \\
 P_A & \xrightarrow{(1,0)} & P_A \oplus P_C & \xrightarrow{(0,1)} & P_C & \dashrightarrow 0 \\
 \downarrow p_A & & \downarrow (f'p_A, t) & & \downarrow p_C & & \\
 A' & \dashrightarrow f' & B' & \dashrightarrow g' & C' & \dashrightarrow \delta' \\
 \downarrow \varepsilon_A & & \downarrow \varepsilon_B & & \downarrow \varepsilon_C & &
 \end{array} . \quad (1.3.6)$$

由 定理 1.2.25, 上图除 ε_B 外的五个扩张元都是 $(-, \mathcal{P}(\xi))$ -正合的. 定理 1.2.26 说明中间列 $(-, \mathcal{P}(\xi))$ 正合. 这说明 B 可以通过中项为 $\mathcal{P}(\xi)$ 的 $\mathcal{P}(\xi)$ -正合 \mathbb{E} -三角向右扩张. 对偶地, B 可以同样地向左扩张. 这构造了 $\mathcal{P}(\xi)$ -正合的完全 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射分解.

假定 $B \in \mathcal{GP}(\xi)$, 作 $(-, \mathcal{P}(\xi))$ -正合三角 $B \rightarrow Q_B \rightarrow B'' \dashrightarrow$, 其中 $Q_B \in \mathcal{P}(\xi)$. ET4 给出下图:

$$\begin{array}{ccccc}
 A & \xrightarrow{f} & B & \xrightarrow{g} & C \dashrightarrow \delta \\
 \parallel & & \downarrow & & \downarrow \\
 A & \dashrightarrow & Q_B & \dashrightarrow & E \dashrightarrow \delta'' \\
 & & \downarrow & & \downarrow \\
 B'' & \equiv & B'' & & \\
 \downarrow \varepsilon & & \downarrow \varepsilon' & &
 \end{array} . \quad (1.3.7)$$

已证 $\mathcal{GP}(\xi)$ 扩张闭, 故 $E \in \mathcal{GP}(\xi)$. 因此 δ'' 是 $(-, \mathcal{P}(\xi))$ -正合的. 引理 1.3.2 说明 $A \in \mathcal{GP}(\xi)$. \square

命题 1.3.4. $\mathcal{GP}(\xi)$ 对直和项封闭.

证明. 假定 $H \oplus H' \in \mathcal{GP}(\xi)$, 作下图

$$\begin{array}{ccccc}
 H & \equiv & H & & \\
 \downarrow & & \downarrow & & \\
 H \oplus H' & \xrightarrow{\quad} & P & \longrightarrow & G \dashrightarrow \\
 \downarrow & & \downarrow & & \parallel \\
 H' & \xrightarrow{\quad} & M & \longrightarrow & G \dashrightarrow \\
 \downarrow & & \downarrow & &
 \end{array} . \quad (1.3.8)$$

由 3×3 引理知所有三角 $(-, \mathcal{P}(\xi))$ -正合. 由同样构造得 $(-, \mathcal{P}(\xi))$ -正合 ξ -三角 $H' \rightarrow P \rightarrow M' \dashrightarrow$. 由 $H' \oplus H \rightarrow P \oplus P \rightarrow M \oplus M' \dashrightarrow$ 是 $(-, \mathcal{P}(\xi))$ -正合的, 从而 M 是 $\mathcal{GP}(\xi)$ 的直和项. 由 命题 1.2.24, 指向 $\mathcal{GP}(\xi)$ 直和项的 ξ -三角也是 $(-, \mathcal{P}(\xi))$ -正合的. 存在 $(-, \mathcal{P}(\xi))$ -正合的 ξ -三角 $L \rightarrow Q \rightarrow H \dashrightarrow$ 使得 L 是 $\mathcal{GP}(\xi)$ 的直和项.

综上, $\mathcal{GP}(\xi)$ 的直和项可向左且向右扩张为 $(-, \mathcal{P}(\xi))$ -正合的 ξ -三角, 中间项是 $\mathcal{P}(\xi)$. 这说明 $\mathcal{GP}(\xi)$ 对直和项封闭. \square

推论 1.3.5. 给定 ξ -三角 $A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{g} C \dashrightarrow \delta$. 若 $A, B \in \mathcal{GP}(\xi)$, 则 $C \in \mathcal{GP}(\xi)$ 当且仅当 \mathbb{E} -三角是 $(-, \mathcal{P}(\xi))$ -正合的.

证明. 由 定理 1.2.25 可知必要性 (\rightarrow 方向). 对充分性 (\leftarrow 方向), 若 \mathbb{E} -三角是 $\mathcal{P}(\xi)$ -正合的, 则其关于 $A \rightarrow P_A$ 的推出是总可裂短正合列. 作 ξ -三角的交换图:

$$\begin{array}{ccccccc}
 A & \longrightarrow & B & \longrightarrow & C & \dashrightarrow & \\
 \downarrow & & \downarrow & & \parallel & & \\
 P_A & \dashrightarrow & P_A \oplus C & \dashrightarrow & C & \dashrightarrow & \\
 \downarrow & & \downarrow & & & & \\
 A' & \xlongequal{\quad} & A' & & & & \\
 \downarrow & & \downarrow & & & &
 \end{array} \quad (1.3.9)$$

由 定理 1.3.3 知 $P_A \oplus C \in \mathcal{GP}(\xi)$, 再由 引理 1.3.1 得 $C \in \mathcal{GP}(\xi)$. \square

1.4 $\mathcal{GP}(\xi)$ -投射维数

本小节在外三角范畴中类推经典 Gorenstein 同调维数的相关定理.

定义 1.4.1 ($\mathcal{GP}(\xi)$ -投射维数). 约定 $\mathcal{GP}(\xi)$ 中对象的 $\mathcal{GP}(\xi)$ -投射维数为 0. 归纳地, 称 $\mathcal{Gpd}_\xi M \leq n+1$, 若存在 ξ -三角 $K \xrightarrow{f} G \xrightarrow{g} M \dashrightarrow$ 使得 $G \in \mathcal{GP}(\xi)$ 且 $\mathcal{Gpd}_\xi K \leq n$. 称 $\mathcal{Gpd}_\xi M = n$ 若 $\mathcal{Gpd}_\xi M \leq n$ 且不满足 $\mathcal{Gpd}_\xi M \leq n-1$.

引理 1.4.2 (维数移动). 使用 G 表示 $\mathcal{GP}(\xi)$ 中的某个元素. 以下三个命题对 $n \geq 0$ 成立:

$\mathfrak{A}(n)$ 对 ξ -三角 $A \rightarrow G \rightarrow C \dashrightarrow$, 若 $\mathcal{Gpd}_\xi C = n+1$, 则 $\mathcal{Gpd}_\xi A = n$.

$\mathfrak{B}(n)$ 对 ξ -三角 $A \rightarrow B \rightarrow G \dashrightarrow$, 若 $\mathcal{Gpd}_\xi A = n$, 则 $\mathcal{Gpd}_\xi B = n$.

$\mathfrak{C}(n)$ 对 ξ -三角 $A \rightarrow B \rightarrow G \dashrightarrow$, 若 $\mathcal{Gpd}_\xi B = n$, 则 $\mathcal{Gpd}_\xi A = n$.

证明. 使用数学归纳法证明. 由 定理 1.3.3, $\mathfrak{B}(0)$ 与 $\mathfrak{C}(0)$ 成立. 下证明 $\mathfrak{A}(0)$. 存在 $G', G'' \in \mathcal{GP}(\xi)$ 使得

$$\begin{array}{ccccccc}
 G' & \xlongequal{\quad} & G' & & & & \\
 \downarrow & & \downarrow & & & & \\
 A & \dashrightarrow & E & \dashrightarrow & G'' & \dashrightarrow & \\
 \parallel & & \downarrow & & \downarrow & & \\
 A & \longrightarrow & G & \longrightarrow & C & \dashrightarrow & \\
 \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & &
 \end{array} \quad (1.4.1)$$

由 定理 1.3.3, $E \in \mathcal{GP}(\xi)$, 进而 $A \in \mathcal{GP}(\xi)$.

• (归纳: $\mathfrak{B}(n+1) \wedge \mathfrak{C}(n+1) \rightarrow \mathfrak{A}(n+1)$). 考虑

$$\begin{array}{ccccc}
 C' & \xlongequal{\quad} & C' & & \mathcal{Gpd}_\xi C' = n+1 \\
 \downarrow & & \downarrow & & \\
 A & \dashrightarrow & E & \dashrightarrow & G'' \dashrightarrow \\
 \parallel & & \downarrow & & \downarrow \\
 A & \longrightarrow & G & \longrightarrow & C \dashrightarrow & \mathcal{Gpd}_\xi C = n+2 \\
 \downarrow & & \downarrow & & \downarrow &
 \end{array} \quad (1.4.2)$$

由 $\mathfrak{B}(n+1)$, 得 $\mathcal{Gpd}_\xi E = n+1$. 由 $\mathfrak{A}(n+1)$, 得 $\mathcal{Gpd}_\xi A = n+1$.

- (归纳: $\mathfrak{A}(n) \wedge \mathfrak{B}(n) \rightarrow \mathfrak{B}(n+1)$). 由 WIC-free 的 3×3 -引理作得下图

$$\begin{array}{ccccc}
 A' & \xrightarrow{\quad} & B' & \xrightarrow{\quad} & G' \\
 \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 G'' & \xrightarrow{\quad} & G'' \oplus P & \xrightarrow{\quad} & P \xrightarrow{0} \\
 \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 A & \xrightarrow{\quad} & B & \xrightarrow{\quad} & G \\
 \downarrow & & \downarrow & & \downarrow
 \end{array} \quad \begin{array}{l} \mathcal{Gpd}_\xi A' = n \\ \mathcal{Gpd}_\xi A = n+1 \end{array} \quad (1.4.3)$$

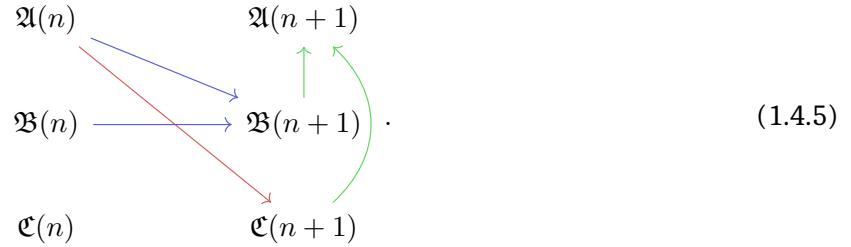
由 $\mathfrak{B}(n)$ 知 $\mathcal{Gpd}_\xi B' = n$. 由 $\mathfrak{A}(n)$ 知 $\mathcal{Gpd}_\xi B = n+1$.

- (归纳: $\mathfrak{A}(n) \rightarrow \mathfrak{C}(n+1)$). 考虑

$$\begin{array}{ccccc}
 B' & \xlongequal{\quad} & B' & & \mathcal{Gpd}_\xi B' = n \\
 \downarrow & & \downarrow & & \\
 H & \xrightarrow{\quad} & G' & \xrightarrow{\quad} & G \\
 \downarrow & & \downarrow & & \parallel \\
 A & \xrightarrow{\quad} & B & \xrightarrow{\quad} & G \\
 \downarrow & & \downarrow & & \downarrow
 \end{array} \quad \begin{array}{l} \mathcal{Gpd}_\xi B = n+1 \end{array} \quad (1.4.4)$$

由 定理 1.3.3 得 $H \in \mathcal{GP}$. 由 $\mathfrak{A}(n)$ 知 $\mathcal{Gpd}_\xi A = n+1$.

归纳图示:



□

推论 1.4.3. 对 ξ -三角 $A \rightarrow G \rightarrow C \dashrightarrow$, 若 $\mathcal{Gpd}_\xi A = n+1$, 则 $\mathcal{Gpd}_\xi A = n+2$.

证明. 假定 $\mathcal{Gpd}_\xi A = n+1$. 由定义, $\mathcal{Gpd}_\xi C \leq n+2$. 由 $\mathfrak{A}(n)$ 知只能有 $\mathcal{Gpd}_\xi C = n+2$. □

推论 1.4.4 (\mathcal{Gpd}_ξ 的等价定义). $\mathcal{Gpd}_\xi M \leq n$ 当且仅当对任意 ξ -正合复形

$$K_n \xrightarrow{d_n} P_{n-1} \xrightarrow{d_{n-1}} \cdots \xrightarrow{d_1} P_0 \xrightarrow{d_0} M \quad (P_i \in \mathcal{P}(\xi)), \quad (1.4.6)$$

总有 $K_n \in \mathcal{GP}(\xi)$.

证明. (\rightarrow). 依照 $\mathcal{P}(\xi) \subseteq \mathcal{GP}(\xi)$ 与维数移位. (\leftarrow). 取如上所述的 M . 依照定义, $\mathcal{Gpd}_\xi M \leq n$. □

推论 1.4.5. 若 $pd_\xi M < \infty$, 则 $pd_\xi M = \mathcal{Gpd}_\xi M$.

记号 1.4.6. 给定 $I \subseteq (\mathbb{N} \cup \{\infty\})$.

- 记 $\mathcal{P}(\xi)$ 是 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射对象, $\widetilde{\mathcal{P}(\xi)}$ 是 pd_{ξ} 有限的对象, $\mathcal{P}(\xi)^I$ 是 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射维数在 I 中的对象.
- 记 $\mathcal{GP}(\xi)$ 是 $\mathcal{GP}(\xi)$ -投射对象, $\widetilde{\mathcal{GP}(\xi)}$ 是 $\mathcal{GP}(\xi)$ -投射维数有限的对象, $\mathcal{GP}(\xi)^I$ 是 $\mathcal{GP}(\xi)$ -投射维数在 I 内的对象.

命题 1.4.7. $\mathbb{E}_{\xi}(\mathcal{GP}(\xi), \widetilde{\mathcal{P}(\xi)}) = 0$.

证明. 只需证明 $\mathbb{E}_{\xi}(\mathcal{GP}(\xi), \mathcal{P}(\xi)^{\leq n}) = 0$ 对一切 $n \geq 0$ 成立. 由 定理 1.3.3 知 $n = 0$ 时显然成立. 假定 $\mathbb{E}_{\xi}(\mathcal{GP}(\xi), \mathcal{P}(\xi)^{\leq n}) = 0$ 成立, 下证明 $\mathbb{E}_{\xi}(\mathcal{GP}(\xi), \mathcal{P}(\xi)^{\leq n+1}) = 0$. 取定

$$N \xrightarrow{f} P \xrightarrow{g} M \dashrightarrow, \quad pd_{\xi} N = n, \quad P \in \mathcal{P}(\xi), \quad pd_{\xi} M = n + 1, \quad (1.4.7)$$

以及 $(-, \mathcal{P})$ -正合 \mathbb{E} -三角

$$G' \xrightarrow{i} Q \xrightarrow{p} G \dashrightarrow, \quad G', G \in \mathcal{GP}(\xi), \quad Q \in \mathcal{P}(\xi). \quad (1.4.8)$$

此时有正合列的交换图 (■ 色对象是零 Abel 群):

$$\begin{array}{ccccccc} (Q, P) & \longrightarrow & (Q, M) & \longrightarrow & \mathbb{E}_{\xi}(Q, N) \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ (G', P) & \xrightarrow{(G', g)} & (G', M) & \longrightarrow & \mathbb{E}_{\xi}(G', N) \\ \downarrow & & \downarrow ((\delta_{\xi})^{\sharp})_M & & . \\ \mathbb{E}_{\xi}(G, P) & \longrightarrow & \mathbb{E}_{\xi}(G, M) & & \\ \downarrow & & \downarrow & & \\ \mathbb{E}_{\xi}(Q, M) & & & & \end{array} \quad (1.4.9)$$

由于 $((\delta_{\xi})^{\sharp})_M \circ (G', g)$ 是零态射, 且 (G', g) 是满态射, 故 $((\delta_{\xi})^{\sharp})_M = 0$. 由长正合列, 得 $\mathbb{E}_{\xi}(G, M) = 0$. \square

命题 1.4.8. 完全投射分解是 $(-, \widetilde{\mathcal{P}(\xi)})$ -正合的.

证明. 由定义, 完全投射分解是 $(-, \mathcal{P}(\xi))$ -正合的. 假定是 $(-, \mathcal{P}(\xi)^{\leq n})$ -正合的, 下证明其 $(-, \mathcal{P}(\xi)^{\leq n+1})$ 正合. 沿用 命题 1.4.7 中记号, 得正合列的交换图

$$\begin{array}{ccccccc} (G, N) & \xrightarrow{(p, N)} & (Q, N) & \longrightarrow & (G', N) & \longrightarrow & \mathbb{E}_{\xi}(G, N) \\ \downarrow (G, f) & & \downarrow (Q, f) & & \downarrow (G', f) & & \downarrow \\ (G, P) & \xrightarrow{(p, P)} & (Q, P) & \longrightarrow & (G', P) & \longrightarrow & \mathbb{E}_{\xi}(G, P) \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ (G, M) & \longrightarrow & (Q, M) & \longrightarrow & (G', M) & \longrightarrow & \mathbb{E}_{\xi}(G, M) \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ \mathbb{E}_{\xi}(G, N) & \longrightarrow & \mathbb{E}_{\xi}(Q, N) & \longrightarrow & \mathbb{E}_{\xi}(G', N) & & . \end{array} \quad (1.4.10)$$

由态射合成, (G, f) -单. 对 $G' \rightarrow P' \rightarrow G'' \dashrightarrow$ 作同样的交换图, 得 (G', f) -单. 上图包含五条短正合列, 由 3×3 引理得第六条短正合列, 这完成了归纳假设. \square

推论 1.4.9. 由维数移动知 $\widetilde{\mathcal{P}(\xi)}$ 是厚子范畴. 所有 $\widetilde{\mathcal{P}(\xi)}$ 中的 \mathbb{E} -三角都是 $(\mathcal{GP}(\xi), -)$ -正合的.

命题 1.4.10. 给定 ξ -三角 $A \rightarrow B \rightarrow C \dashrightarrow$, 其中 $C \in \mathcal{GP}(\xi)$. 定理 1.2.25 证明了该 \mathbb{E} -三角是 $(-, \mathcal{P}(\xi))$ -正合的. 实际上, 该 \mathbb{E} -三角也是 $(-, \widetilde{\mathcal{P}(\xi)})$ -正合的.

证明. 依照与 定理 1.2.25 一致的证明思路, 只需说明完全投射分解 $(-, \widetilde{\mathcal{P}(\xi)})$ -正合, 即上一命题. \square

1.5 Hovey 四元组

引理 1.5.1. 约定 $\mathcal{P}(\xi)^{-1} = \{0\}$. 对 $n \geq 0$, 有如下等式:

$$\mathcal{GP}(\xi)^{\leq n} \subseteq \text{Cone}(\mathcal{P}(\xi)^{\leq n-1}, \mathcal{GP}(\xi)), \quad \mathcal{GP}(\xi)^{\leq n} \subseteq \text{coCone}(\mathcal{P}(\xi)^{\leq n}, \mathcal{GP}(\xi)). \quad (1.5.1)$$

证明. 下归纳证明. 上述命题对 $\mathcal{GP}(\xi)^{\leq 0} = \mathcal{GP}(\xi)$ 显然成立. 假定上述命题对 $\mathcal{GP}(\xi)^n$ 成立, 下证明其对 $\mathcal{GP}(\xi)^{n+1}$ 成立.

1. (前式). 取定 $M \in \mathcal{GP}(\xi)^{\leq n+1}$, 则存在 ξ -三角的交换图

$$\begin{array}{ccccccc} L & \longrightarrow & P & \longrightarrow & M & \dashrightarrow & \mathcal{Gpd}_\xi M = n+1 \\ \downarrow & & \downarrow & & \parallel & & . \\ A & \dashrightarrow & H & \dashrightarrow & M & \dashrightarrow & \mathcal{Gpd}_\xi L = n \\ \downarrow & & \downarrow & & & & . \\ G & \xlongequal{\quad} & G & & & & \mathcal{pd}_\xi A \leq n \\ \downarrow & & \downarrow & & & & \end{array} \quad (1.5.2)$$

因此 $\mathcal{GP}(\xi)^{\leq n+1} \subseteq \text{Cone}(\mathcal{P}(\xi)^{\leq n}, \mathcal{GP}(\xi))$.

2. (后式). 对上述 M , 作下图:

$$\begin{array}{ccccccc} L & \longrightarrow & P & \longrightarrow & M & \dashrightarrow & \mathcal{Gpd}_\xi M = n+1 \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & . \\ A & \dashrightarrow & P \oplus Q & \dashrightarrow & N & \dashrightarrow & \mathcal{Gpd}_\xi L = n \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & . \\ G & \longrightarrow & Q & \longrightarrow & G' & \dashrightarrow & \mathcal{pd}_\xi A \leq n \\ \downarrow & & \downarrow 0 & & \downarrow & & \end{array} \quad (1.5.3)$$

由维数移动, $\mathcal{pd}_\xi N \leq n+1$. 因此 $\mathcal{GP}(\xi)^{\leq n+1} \subseteq \text{coCone}(\mathcal{P}(\xi)^{\leq n+1}, \mathcal{GP}(\xi))$.

\square

推论 1.5.2. 若 $(\mathcal{C}, \mathbb{E}_\xi, \mathfrak{s}_\xi)$ 中所有对象有有限 Gorenstein 投射维数, 则 $(\mathcal{GP}(\xi), \widetilde{\mathcal{P}(\xi)})$ 是完备余挠对.

定理 1.5.3. $((\mathcal{P}(\xi), \mathcal{C}), (\mathcal{GP}(\xi), \widetilde{\mathcal{P}(\xi)}))$ 是 Hovey 四元组.

证明. 已证这是两个余挠对. 容易验证

$$\text{Cone}(\widetilde{\mathcal{P}(\xi)}, \mathcal{P}(\xi)) = \text{coCone}(\widetilde{\mathcal{P}(\xi)}, \mathcal{P}(\xi)) = \widetilde{\mathcal{P}(\xi)}. \quad (1.5.4)$$

从而这是 Hovey 四元组. \square

推论 1.5.4. 若 $(\mathcal{C}, \mathbb{E}_\xi, \mathfrak{s}_\xi)$ 的 Gorenstein 投射维数 $\leq n$, 则 $\widetilde{\mathcal{P}(\xi)} = \mathcal{P}(\xi)^{\leq n}$. 此时 $((\mathcal{P}(\xi), \mathcal{C}), (\mathcal{GP}(\xi), \widetilde{\mathcal{P}(\xi)}))$ 是 Hovey 四元组.

2 阅读笔记: Complete cohomology for extriangulated categories

文章见 [HZZZ21].

2.1 ξ -上投射分解

记号 2.1.1. 假定 $(\mathcal{C}, \mathbb{E}_\xi, \mathfrak{s}_\xi)$ 有足够投射. 记 X 的投射分解为链复形 P_X .

定义 2.1.2 (上有界复形的 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射分解). 给定上有界复形

$$M : \cdots \rightarrow M_2 \xrightarrow{d_1} M_1 \xrightarrow{d_0} M_0 \rightarrow 0. \quad (2.1.1)$$

称 $\varphi : P \rightarrow M$ 是一个投射分解, 若链映射 φ 的每一项是 ξ -满射, P 是取值 $\mathcal{P}(\xi)$ 中复形, 且 $\text{Cone}(\varphi)$ 是 ξ -正合复形.

命题 2.1.3. 上有界复形的投射分解总是存在的.

证明. 归纳地构造 P :

$$\begin{array}{ccccccc} & & P_2 & & P_1 & & P_0 \\ & & \swarrow g_3 \quad \searrow p_2 & & \swarrow g_2 \quad \searrow p_1 & & \swarrow g_1 \quad \searrow p_0 \\ \cdots & \diamond & K_2 & \diamond & K_1 & \diamond & K_0 \\ & \nwarrow q_3 \quad \nearrow f_2 & \nwarrow q_2 \quad \nearrow f_1 & \nwarrow q_1 \quad \nearrow f_0 & & & \\ & \cdots & M_3 & M_2 & M_1 & & M_0 \\ & \xrightarrow{d_3} & \xrightarrow{d_2} & \xrightarrow{d_1} & \xrightarrow{d_0} & & \end{array}. \quad (2.1.2)$$

假定构造了 $K_{\leq n}, g_{\leq n}, q_{\leq n}, p_{\leq n}$ 与 $f_{\leq n}$. 取同伦方块

$$\begin{array}{ccccc} L_n & \xrightarrow{i_n} & P_n & \xrightarrow{p_n} & K_n \dashrightarrow \delta_n \\ \parallel & & \uparrow g_{n+1} & \square & \uparrow f_n \\ L_n & \xrightarrow{j_n} & K_{n+1} & \dashrightarrow q_{n+1} & M_{n+1} \xrightarrow{(f_n)^*\delta_n} \\ & & & & K_{n+1} \xrightarrow{\left(\begin{smallmatrix} g_{n+1} \\ -q_{n+1} \end{smallmatrix}\right)} P_n \oplus M_{n+1} \xrightarrow{(p_n, f_n)} K_n \dashrightarrow \xrightarrow{(j_n)^*\delta_n} \end{array}. \quad (2.1.3)$$

由于 $f_n \circ d_{n+1}$ 与 $0 \circ p_n$ 都是 $M_{n+2} \rightarrow K_n$ 的零态射, 从而存在 $f_{n+1} : M_{n+2} \rightarrow K_{n+1}$ 使得 $d_{n+1} = q_{n+1} \circ f_{n+1}$ 且 $g_{n+1} f_{n+1} = 0$. 往复归纳即可:

$$\begin{array}{ccccccc} \cdots & P_{n+2} & & P_{n+1} & & P_n & \cdots \\ & \searrow p_{n+2} \quad \nearrow g_{n+2} & & \searrow p_{n+1} \quad \nearrow g_{n+1} & & \searrow p_n & \\ & K_{n+2} & \diamond & K_{n+1} & \diamond & K_n & \cdots \\ & \nearrow f_{n+2} \quad \searrow 0 & \nearrow q_{n+2} \quad \searrow f_{n+1} & \nearrow q_{n+1} \quad \searrow f_n & & & \cdots \\ \cdots & M_{n+3} & \xrightarrow{d_2} & M_{n+2} & \xrightarrow{d_{n+1}} & M_{n+1} & \cdots \end{array}. \quad (2.1.4)$$

容易检验映射锥是 ξ -正合复形:

$$\begin{array}{ccccccc} \cdots & \longrightarrow P_2 \oplus M_1 & \xrightarrow{\begin{pmatrix} g_2 p_2 & 0 \\ -q_2 p_2 & -d_2 \end{pmatrix}} & P_1 \oplus M_2 & \xrightarrow{\begin{pmatrix} g_1 p_1 & 0 \\ -q_1 p_1 & -d_1 \end{pmatrix}} & P_0 \oplus M_1 & \longrightarrow 0 \oplus M_0 \\ & \searrow (p_2, f_2) & & \nearrow (\frac{g_2}{-q_2}) & & \nearrow (\frac{g_1}{-q_1}) & \\ & K_2 & & K_1 & & K_0 & \\ & \nearrow (0, 1) & & \nearrow (1, 0) & & \nearrow (0, 1) & \end{array}. \quad (2.1.5)$$

□

备注 2.1.4. 依照同伦方块的可分裂性, 式 (2.1.2) 可进一步地拆解作下图:

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & \ddots & & & & \\
 & & \searrow & & & & \\
 \dots & \xrightarrow{g_{4,4}} & P_3 & & & & \\
 & \square & \downarrow \overline{p_3} & & & & \\
 \dots & \xrightarrow{g_{4,3}} & K_{3,3} & \xrightarrow{g_{3,3}} & P_2 & & \\
 & \square & \downarrow q_{3,3} & \square & \downarrow \overline{p_2} & & \\
 \dots & \xrightarrow{g_{4,2}} & K_{3,2} & \xrightarrow{g_{3,2}} & K_{2,2} & \xrightarrow{g_{2,2}} & P_1 \\
 & \square & \downarrow q_{3,2} & \square & \downarrow q_{2,2} & \square & \downarrow \overline{p_1} \\
 \dots & \xrightarrow{g_{4,1}} & K_{3,1} & \xrightarrow{g_{3,1}} & K_{2,1} & \xrightarrow{g_{2,1}} & K_{1,1} \xrightarrow{g_{1,1}} P_0 \\
 & \square & \downarrow q_{3,1} & \square & \downarrow q_{2,1} & \square & \downarrow q_{1,1} \square \quad \downarrow \overline{p_0} \\
 \dots & \xrightarrow{d_3^M} & M_3 & \xrightarrow{d_2^M} & M_2 & \xrightarrow{d_1^M} & M_1 \xrightarrow{d_0^M} M_0
 \end{array} \quad (2.1.6)$$

以上所有 \square 是同伦方块. 注意, 同伦方块的横向或纵向合成也是同伦方块.

命题 2.1.5. 取定投射分解. 上有界复形的态射 $\varphi : M \rightarrow N$, 诱导了 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射复形的链映射 $\pi : P \rightarrow Q$. 该链映射在同伦意义下唯一.

证明. 以下竖向态射是 ξ -满的. 斜向态射 $K_{i,j} \rightarrow L_{i,j}$ 由同伦方块的泛性质诱导, ψ_i 由 $\mathcal{P}(\xi)$ -投射对象的性质给出:

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & \dots & \xrightarrow{g_{4,4}} & P_3 & & \\
 & & \searrow & & \downarrow \psi_3 & & \\
 & & \dots & \xrightarrow{g'_{4,4}} & Q_3 & & \\
 & & \downarrow & & \downarrow \overline{p_3} & & \\
 & & \dots & \xrightarrow{g_{4,3}} & K_{3,3} & \xrightarrow{g_{3,3}} & P_2 \\
 & & \searrow & & \downarrow \overline{p'_3} & & \searrow \psi_2 \\
 & & \dots & \xrightarrow{g'_{4,3}} & L_{3,3} & \xrightarrow{g'_{3,3}} & Q_2 \\
 & & \downarrow & & \downarrow \overline{p_2} & & \downarrow \\
 & & \dots & \xrightarrow{g_{4,2}} & K_{3,2} & \xrightarrow{g_{3,2}} & K_{2,2} \\
 & & \searrow & & \downarrow q'_{3,3} & & \searrow \psi_1 \\
 & & \dots & \xrightarrow{g'_{4,2}} & L_{3,2} & \xrightarrow{g'_{3,2}} & L_{2,2} \\
 & & \downarrow & & \downarrow q_{2,2} & & \downarrow \\
 & & \dots & \xrightarrow{g_{4,1}} & K_{3,1} & \xrightarrow{g_{3,1}} & K_{2,1} \\
 & & \searrow & & \downarrow q'_{3,2} & & \searrow \psi_0 \\
 & & \dots & \xrightarrow{g'_{4,1}} & L_{3,1} & \xrightarrow{g'_{3,1}} & L_{2,1} \\
 & & \downarrow & & \downarrow q_{2,1} & & \downarrow \\
 & & \dots & \xrightarrow{d_3^M} & M_3 & \xrightarrow{d_2^M} & M_2 \\
 & & \searrow & & \downarrow q'_{3,1} & & \searrow \varphi_3 \\
 & & \dots & \xrightarrow{d_3^N} & N_3 & \xrightarrow{d_2^N} & N_2 \\
 & & \downarrow & & \downarrow d_2^N & & \downarrow \\
 & & \dots & & N_2 & \xrightarrow{d_1^N} & N_1 \\
 & & & & \downarrow d_1^N & & \downarrow \\
 & & & & \dots & \xrightarrow{d_0^N} & N_0
 \end{array} \quad (2.1.7)$$

若 ψ' 是另一组链映射. 下归纳地构造 $\psi - \psi' = sd + ds$.

1. (构造 s_0). 注意到 $p'_0 \circ (\psi_0 - \psi'_0) = 0$. 依长正合类以及 P_0 的提升性构造

$$\begin{array}{ccccc} Q_1 & \xleftarrow{s_0} & P_0 & & \\ \overline{p'_1} \downarrow & \swarrow t_0 & \downarrow (\begin{smallmatrix} \psi_0 - \psi'_0 \\ 0 \end{smallmatrix}) & & \\ L_{1,1} & \xleftarrow{\left(\begin{smallmatrix} g'_{1,1} \\ -q'_{1,1} \end{smallmatrix}\right)} & Q_0 \oplus N_1 & \xrightarrow{(p'_0, d_0^N)} & N_0 \dashrightarrow \end{array} \quad (2.1.8)$$

此时 $(\psi_0 - \psi'_0) = (g'_{1,1} \overline{p'_1}) s_0$.

2. (构造 s_1). 只需证明 $(\psi_1 - \psi'_1 - s_0(g_{1,1} \overline{p_1}))$ 被 $g'_{2,2} \overline{p'_2}$ 分解. 由上一步的经验, 只需证明 $(\psi_1 - \psi'_1 - s_0(g_{1,1} \overline{p_1}))$ 复合 $Q_1 \rightarrow N_1$ 后为 0. 直接地

$$q'_{1,1} \overline{p'_1} s_0(g_{1,1} \overline{p_1}) = q'_{1,1} t_0(g_{1,1} \overline{p_1}) = 0(g_{1,1} \overline{p_1}) = 0. \quad (2.1.9)$$

另一方面, $(q'_{1,1} \overline{p'_1})(\psi_1 - \psi'_1) = 0$ 是显然的.

3. (构造 s_k). 只需证明 $(\psi_k - \psi'_k - s_{k-1}(g_{k,1} \overline{p_k}))$ 被 $g'_{k+1,k+1} \overline{p'_{k+1}}$ 分解. 由上一步的经验, 只需证明 $(\psi_k - \psi'_k - s_{k-1}(g_{k,1} \overline{p_k}))$ 复合 $Q_k \rightarrow N_k$ 后为 0. 直接地

$$q'_{k,1} \cdots q'_{k,k} \overline{p'_k} s_{k-1}(g_{k,1} \overline{p_k}) = q'_{k,1} \cdots q'_{k,k} t_{k-1}(g_{k,1} \overline{p_k}) = 0(g_{k,1} \overline{p_k}) = 0. \quad (2.1.10)$$

另一方面, $(q'_{k,1} \cdots q'_{k,k} \overline{p'_k})(\psi_k - \psi'_k) = 0$ 是显然的.

□

推论 2.1.6. 假定 $p : P \rightarrow X$ 与 $q : Q \rightarrow X$ 是上有界复形的投射分解. 则存在链映射 $\alpha : P \rightarrow Q$ 与 $\beta : Q \rightarrow X$ 使得 $q\alpha = p$ 且 $p\beta = q$. 特别地, (α, β) 是同伦等价.

证明. 由 命题 2.1.5 知 $\alpha\beta$ 与 $\beta\alpha$ 同伦于恒等链映射.

□

例子 2.1.7 (轴复形的投射分解). 特别地, $M \in \mathcal{C}$ 的 ξ -投射分解形如

$$\cdots \rightarrow P_2 \xrightarrow{d_1} P_1 \xrightarrow{d_0} P_0 \xrightarrow{p} M \rightarrow 0, \quad (2.1.11)$$

其中各 P_i 是 ξ -投射对象, 且有 ξ -三角

$$K_{i+1} \xrightarrow{g_i} P_i \xrightarrow{p_{i-1}} K_i \dashrightarrow \quad (2.1.12)$$

满足 $d_i = g_i p_i$, $K_0 = M$ 与 $p_0 = p$. 由此可见, 轴复形的投射分解是唯一的, 且任意两个投射分解之间存在唯一的同伦等价.

定义 2.1.8 (Hom-复形). 记 \mathcal{C} 中的两个复形为 M 与 N . 定义 Hom-复形 $\mathcal{HOM}(M, N)$ 为如下复形:

1. 对象: 对于每个整数 n , 令

$$\mathcal{HOM}(M, N)_n = \prod_{k \in \mathbb{Z}} \text{Hom}_{\mathcal{C}}(M_k, N_{k+n}). \quad (2.1.13)$$

2. 微分: 对于每个 $f = (f_k)_{k \in \mathbb{Z}} \in \mathcal{HOM}(M, N)_n$, 其中 $f_k : M_k \rightarrow N_{k+n}$, 定义微分如下:

$$d_n^{\mathcal{HOM}(M, N)}(f) = d_{k+n}^N f_k - (-1)^n f_{k-1} d_k^M. \quad (2.1.14)$$

简单地说, 若 f 齐次, 则 $d^{\mathcal{HOM}(M, N)}(f) = [d, f] = d^N f - (-1)^{|f|} f d^M$.

定义 2.1.9 ($\xi\text{ext}_{\mathcal{P}(\xi)}$ -函子). 假定 M 是上有界投射复形, 定义

$$\xi\text{ext}_{\mathcal{P}(\xi)}^{\bullet}(M, N) := H^{\bullet}(\mathcal{HOM}(P(M), N)). \quad (2.1.15)$$

以上 $P(M) \rightarrow M$ 是 ξ -投射分解. 该定义与 ξ -投射分解的选取无关 (命题 2.1.5).

命题 2.1.10. 假定 M 是上有界投射复形, 若 N 是 ξ -正合复形

$$\begin{array}{ccccccc} \cdots & \longrightarrow & N_{k+1} & \xrightarrow{d_k^N} & N_k & \xrightarrow{d_{k-1}^N} & N_{k-1} \longrightarrow \cdots \\ & \nearrow & \searrow p_{k+1} & \nearrow i_k & \searrow p_k & \nearrow i_{k-1} & \searrow \\ & \cdots & L_{k+1} & & L_k & & \cdots \end{array}. \quad (2.1.16)$$

则 $\xi\text{ext}_{\mathcal{P}(\xi)}^n(M, N) = 0$ 恒成立.

证明. 只需证明 $\mathcal{HOM}(P(M), N)$ 无环. 不失一般性地, 只需证明 $H_0(\mathcal{HOM}(P(M), N)) = 0$, 即链映射 $\varphi : P(M) \rightarrow N$ 必零伦. 下归纳地构造 $s_k : P_k \rightarrow N_{k+1}$ 使得 $\varphi = sd + ds$.

1. (s_0). 由 $i_{-1}p_0\varphi_0 = 0$ 以及 (P_0, i_{-1}) 单, 得 $p_0\varphi_0 = 0$, 从而存在 s_0 使得 $i_1s_0 = \varphi_0$:

$$\begin{array}{ccccc} & P_0 & \longrightarrow & 0 & \\ & \downarrow s_0 & \swarrow \varphi_0 & \downarrow & \\ L_1 & \xrightarrow{i_1} & N_0 & \xrightarrow{p_0} & L_0 \xrightarrow{i_{-1}} N_{-1} \end{array}. \quad (2.1.17)$$

2. (s_k). 假定已构造出 $s_{<k}$ 使得 $\varphi_{<k} = sd + ds$. 此时

$$d_{k-1}^N(\varphi_k - s_{k-1}d_{k-1}^P) = (\varphi_{k-1} - d_{k-1}^Ns_{k-1})d_{k-1}^P = s_{k-2}d_{k-2}^Pd_{k-1}^P = 0. \quad (2.1.18)$$

由 (P, i_{k-1}) 单, 故 $p_k(\varphi_k - s_{k-1}d_{k-1}^P) = 0$, 从而存在 s_k 使得 $i_k s_k = \varphi_k - s_{k-1}d_{k-1}^P$. 归纳构造完毕.

□

命题 2.1.11. 假若 M 与 N 都是上有界复形, 则

$$\xi\text{ext}_{\mathcal{P}(\xi)}^{\bullet}(M, N) \cong H^{\bullet}(\mathcal{HOM}(P(M), P(N))). \quad (2.1.19)$$

其中, $P(M) \rightarrow M$ 与 $P(N) \rightarrow N$ 是上有界复形的任意 ξ -投射分解.

证明. 只需证明 $p_N : P(N) \rightarrow N$ 诱导的态射 $(p_N \circ -) : \mathcal{HOM}(P(M), P(N)) \rightarrow \mathcal{HOM}(P(M), N)$ 是拟同构. 注意到

$$\text{Cone}((p_N) \circ -) \cong \mathcal{HOM}(P(M), \text{Cone}(p_N)). \quad (2.1.20)$$

由 命题 2.1.10, 上式的上同调全为零, 故 $(p_N \circ -)$ 是拟同构. □

2.2 投射维数与生成子范畴

定义 2.2.1 (生成子范畴). 称 $\mathcal{P}(\xi)$ 是“生成的”, 若对 $M \in \mathcal{C}$,

$$M = 0 \iff (-, M) : \mathcal{P}(\xi) \rightarrow 0. \quad (2.2.1)$$

命题 2.2.2. 若 $\mathcal{P}(\xi)$ 是生成的, 则对 $M \in \mathcal{C}$, $\xi\text{ext}_{\mathcal{P}}^{>n}(M, -) = 0$ 当且仅当 $pd_{\xi}M \leq n$.

证明. □

2.3 完全上同调

定义 2.3.1 (上有界态射). 给定复形 M 与 N . 记 $\overline{\mathcal{HOM}}(M, N)$ 为上有界态射构成的子复形, 即 $f = (f_k)_{k \in \mathbb{Z}} \in \overline{\mathcal{HOM}}(M, N)$ 若对一切 k 均有

$$f_k(M_i) = 0, \quad \forall i \gg 0. \quad (2.3.1)$$

备注 2.3.2. 简单地说, 上有界态射的每一分次均能零化复形的足够高分支.

例子 2.3.3. 若 $P(M)$ 或 $P(N)$ 下有界, 则 $\mathcal{HOM}(M, N) = \overline{\mathcal{HOM}}(M, N)$.

定义 2.3.4 (ξ -完全复形). 记 $\widetilde{\mathcal{HOM}}(-, ?) := \mathcal{HOM}(-, ?)/\overline{\mathcal{HOM}}(-, ?)$.

定义 2.3.5. 假定 $P(M) \rightarrow M$ 与 $P(N) \rightarrow N$ 是上有界复形的投射分解. 定义三类上同调

1. $\xi\text{ext}_P^\bullet(M, N) := H^\bullet(\mathcal{HOM}(P(M), N))$;
2. $\overline{\xi\text{ext}}_P^\bullet(M, N) := H^\bullet(\overline{\mathcal{HOM}}(P(M), N))$;
3. $\widetilde{\xi\text{ext}}_P^\bullet(M, N) := H^\bullet(\widetilde{\mathcal{HOM}}(P(M), N))$.

备注 2.3.6. 这三类上同调可定义在 Hom-复形 $\mathcal{HOM}(P(M), P(N))$ 上, 见 命题 2.1.11. 这些定义投射分解的选取无关, 见 命题 2.1.5.

参考文献

- [HZZ20] Jiangsheng Hu, Dongdong Zhang, and Panyue Zhou. Proper classes and Gorensteinness in ex-triangulated categories. *Journal of Algebra*, 551:23–60, June 2020. [doi:10.1016/j.jalgebra.2019.12.028](https://doi.org/10.1016/j.jalgebra.2019.12.028).
- [HZZZ21] Jiangsheng Hu, Dongdong Zhang, Tiwei Zhao, and Panyue Zhou. Complete cohomology for extriangulated categories. *Algebra Colloquium*, 28(04):701–720, 2021. [arXiv:https://doi.org/10.1142/S1005386721000547](https://arxiv.org/abs/10.1142/S1005386721000547), doi:10.1142/S1005386721000547.