

同伦代数

G.Li

目录

第零章 前言	5
第一章 单纯对象	7
1.1 单纯集和单纯复形	7
1.2 泛单纯集	11
1.2.1 Yoneda引理	11
1.2.2 伴随函子	13
1.3 几何实现	17
1.4 小范畴的神经	18
1.5 子单纯集	21
1.6 拓扑构造	24
1.7 单纯同伦群	24
第二章 模型范畴	25
2.1 模型范畴的定义与性质I	25
2.2 拓扑空间	26
2.2.1 第一个模型结构	26
2.2.2 小对象论断	31
2.2.3 第二个模型结构	32
2.3 模型范畴的定义与性质II	33
2.3.1 封闭性	33
2.3.2 同伦与同伦等价	36
2.3.3 Quillen对	43
2.4 链复形	44
2.5 单纯集	44
2.6 同伦范畴和导出函子	45
2.6.1 同伦范畴	45
2.6.2 导出函子	49
第三章 单纯代数	53
3.1 单纯模的同伦群	53

3.2	Dold-Kan对应	55
3.3	单纯消解	55

第零章 前言

给定一个范畴 \mathcal{C} ，并且假定 \mathcal{C} 中有一族特殊的被称为弱等价(weak equivalence)的态射 W ，这族态射包含了一定程度上逆特别不好的“同构”，甚至没有逆的却和同构行为非常相似的态射. 这样的一个范畴被称为同伦范畴(homotopical category)，其中一个弱等价通常表示为 $X \xrightarrow{\sim} Y$. 通常情况下，范畴 \mathcal{C} 中的弱等价被定义为“可以被某个函子取逆”的态射，比如

1. 所有拓扑空间范畴 \mathbf{Top} 中诱导所有同伦群同构的连续映射，即弱同伦等价，此时函子为 $\pi_* : \mathbf{Top} \rightarrow \mathbf{GradedSet}$ （第0个同伦群不是群，只是一个集合）.
2. Abel范畴 \mathcal{A} 上所有上链复形范畴 $\mathbf{Com}^\bullet(\mathcal{A})$ 中的拟同构，此时函子为 $H^* : \mathbf{Com}^\bullet(\mathcal{A}) \rightarrow \mathbf{GradedAb}$.

拓扑上，通常把弱同伦等价的空间的全体称为一个同伦型(homotopy type)，在范畴 \mathbf{Top} 中可以看作由某个代数不变量 $\pi_*(X)$ 给出的某种等价关系. 通常人们处理同伦型的范畴是拓扑空间的同伦范畴(homotopy category of topological spaces)，它定义为

但在这个范畴中，弱同伦等价是形式上可逆的——这启发了处理这一类问题的第一步，范畴的局部化.

第一章 单纯对象

1.1 单纯集和单纯复形

设 n 是任意一个自然数.定义 $[n]$ 是有 $n+1$ 个对象的小范畴,且其中的箭头是序列 $\{0 \rightarrow 1 \rightarrow \cdots \rightarrow n\}$.设 Δ 是所有 $[n]$ 组成的范畴,态射是 $[n]$ 到 $[m]$ 的函子.这个范畴有非常具体的描述:定义 $[n]'$ 是 $n+1$ 元的全序集,其元素记为 $\{0 \leq 1 \leq \cdots \leq n\}$.设 Δ' 是所有 $[n]'$ 组成的范畴,态射是 $[n]'$ 到 $[m]'$ 的保序映射,即 $f: [n]' \rightarrow [m]'$ 满足 $i \leq j$ 必有 $f(i) \leq f(j)$.证明 Δ' 是一个范畴,且存在一个范畴的同构 $\Delta' \rightarrow \Delta$.于是我们无意区分两个范畴,都称为单纯范畴(simplicial category)或者全序范畴(ordering category),也无意区分两个范畴不同的对象.注意到

$$d_{n+1}^i : [n] \rightarrow [n+1]$$

$$k \mapsto \begin{cases} k, & k < i \\ k+1, & k \geq i. \end{cases}$$

$$\begin{array}{ccccccccccc} 0 & \longrightarrow & 1 & \longrightarrow & \cdots & \longrightarrow & i-1 & \longrightarrow & i & \longrightarrow & \cdots & \longrightarrow & n \\ \downarrow & & \downarrow & & & & \downarrow & & \searrow & & & & \searrow \\ 0 & \longrightarrow & 1 & \longrightarrow & \cdots & \longrightarrow & i-1 & \longrightarrow & i & \longrightarrow & i+1 & \longrightarrow & \cdots & \longrightarrow & n+1 \end{array}$$

和

$$s_n^i : [n+1] \rightarrow [n]$$

$$k \mapsto \begin{cases} k, & k \leq i \\ k-1, & k > i. \end{cases}$$

$$\begin{array}{ccccccccccc} 0 & \longrightarrow & 1 & \longrightarrow & \cdots & \longrightarrow & i-1 & \longrightarrow & i & \longrightarrow & i+1 & \longrightarrow & \cdots & \longrightarrow & n+1 \\ \downarrow & & \downarrow & & & & \downarrow & & \downarrow & \swarrow & & & & & \swarrow \\ 0 & \longrightarrow & 1 & \longrightarrow & \cdots & \longrightarrow & i-1 & \longrightarrow & i & \longrightarrow & \cdots & \longrightarrow & n \end{array}$$

都是范畴 Δ 中的态射,且满足

$$\begin{aligned} d_{[n+1]}^j d_{[n]}^i &= d_{[n+1]}^i d_{[n]}^{j-1}, & \forall i < j \\ s_{[n]}^j s_{[n+1]}^i &= s_{[n]}^i s_{[n+1]}^{j+1}, & \forall i \leq j \\ s_{[n]}^j d_{[n+1]}^i &= d_{[n]}^i s_{[n-1]}^{j-1}, & \forall i < j \\ s_{[n]}^j d_{[n+1]}^i &= \text{id}_{[n]}, & i = j \text{ 或 } i = j+1 \\ s_{[n]}^j d_{[n+1]}^i &= d_{[n]}^{i-1} s_{[n-1]}^j, & \forall i > j+1. \end{aligned}$$

其中, d^i 称为第 i 个对偶面映射(coface map), s^i 称为第 i 个对偶退化映射(codegeneracy map). Δ 中所有的态射都可以由 d^i 和 s^j 生成.更准确地说, 任意 $f \in \text{hom}_{\Delta}([n], [m])$ 有唯一的分解

$$f = d^{i_1} \circ \dots \circ d^{i_r} \circ s^{j_1} \circ \dots \circ s^{j_s},$$

其中 $m = n + r - s$, $i_1 < \dots < i_r$ 且 $j_1 < \dots < j_s$.

定义. 一个单纯集(simplicial set)是一个反变函子 $X : \Delta^{\circ} \rightarrow \mathbf{Set}$.更一般地, 范畴 \mathcal{C} 中的一个单纯对象(simplicial object)是反变函子 $X : \Delta^{\circ} \rightarrow \mathcal{C}$.对偶地, 可以定义上单纯对象(cosimplicial object)是协变函子 $Y : \Delta \rightarrow \mathcal{C}$.

对单纯集 X , 一般我们用 X_n 来表示集合 $X([n])$, 且其中的元素称为 n 单形(n -simplices).若 n 单形 $x \in X_n$ 满足存在 $y \in X_{n-1}$ 使得 $X(s^j)(y) = x$, 则称 x 是退化的(degenerate).我们用 \mathbf{sSet} 表示所有单纯集组成的范畴, 其中对象间的态射是 $X \Rightarrow Y$ 的自然态射, 具体来说, 是对每个 n 都有一个集合间的态射 $f_n : X_n \rightarrow Y_n$, 在 Δ 的作用下保持不动.

对于一个单纯集 X , 一般我们采用记号 $d_i := X(d^i) : X_{n+1} \rightarrow X_n$ 和 $s_j := X(s^j) : X_n \rightarrow X_{n+1}$, 称为面映射和退化映射.

$$X_0 \xleftarrow{d^0} X_1 \xrightarrow{s^1} X_2 \xrightarrow{\pi_2} \dots$$

练习1.1. 设 X 是单纯集, 记

$$X_n^{\text{deg}} := \bigcup_{j=0}^{n-1} s_j(X_{n-1})$$

为 n 单形中的所有退化元素.求证

$$X_n^{\text{deg}} = \bigcup_{\substack{f: [n] \rightarrow [k] \\ f \neq \text{id}}} X(f)(X_k).$$

例1.1. 设 \mathcal{C} 是一个小范畴, 那么我们可以自然地定义一个单纯集 NC , 称为范畴 \mathcal{C} 的神经(nerve), 其中 NC_0 是集合 $\text{ob } \mathcal{C}$, NC_1 是集合 $\text{mor } \mathcal{C}$, 对任意 $n > 1$ 定义

$$NC_n := \{(f_n, \dots, f_1) \mid f_i \in \text{mor } \mathcal{C} \text{ 且 } f_i \text{ 与 } f_{i+1} \text{ 可复合为 } f_{i+1}f_i, \forall 1 \leq i \leq n\}.$$

通常, 我们用相连的箭头

$$A_0 \xrightarrow{f_1} A_1 \xrightarrow{f_2} \dots \xrightarrow{f_n} A_n$$

来表示 NC_n 中的元素.这样当 $1 < i < n$ 我们有自然的面映射

$$\begin{aligned} d_i : NC_n &\rightarrow NC_{n-1} \\ (f_n, \dots, f_i, f_{i-1}, \dots, f_1) &\mapsto (f_n, \dots, f_i f_{i-1}, \dots, f_1), \end{aligned}$$

当 $i = 0, n$ 时, 我们分别舍弃 A_0 和 A_n .退化映射 $s_i : NC_n \rightarrow NC_{n+1}$ 是简单的, 只要在第 i 项和第 $i+1$ 项之间加一个 A_i , 取为 $A_i \xrightarrow{\text{id}} A_i \xrightarrow{f_{i+1}} A_{i+1}$.之后我们会对范畴的神经进行更详细的讨论.

例1.2. 拓扑上, 我们有一个上单纯集 $\Delta : \mathbf{\Delta} \rightarrow \mathbf{Top}$, 事实上这个函子是我们定义单纯范畴的最初启发. 考虑函子 Δ 将 $[n]$ 映到标准 n 单形

$$\Delta_n = \{(x_0, \dots, x_n) \in \mathbf{R}^{n+1} \mid x_0 + \dots + x_n = 1, x_i \geq 0\},$$

对偶面映射 $d^i : \Delta_{n-1} \rightarrow \Delta_n$ 定义为将 Δ_{n-1} 映为第 i 个坐标为 0 的面, 即 $(x_0, \dots, x_{i-1}, x_i, \dots, x_{n-1}) \mapsto (x_0, \dots, x_{i-1}, 0, x_i, \dots, x_{n-1})$.

对偶退化映射 $s^i : \Delta_{n+1} \rightarrow \Delta_n$ 将坐标 x_i 与 x_{i+1} 相加, 即 $(x_0, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_{n+1}) \mapsto (x_0, \dots, x_i + x_{i+1}, \dots, x_{n+1})$.

设 X 是拓扑空间, 这样就可以定义的单纯集 SX , 其中 $(SX)_n$ 是所有连续映射 $\Delta^n \rightarrow X$, 面映射

$$d_i : (SX)_{n+1} \rightarrow (SX)_n$$

将 $f : \Delta_{n+1} \rightarrow X$ 映到 $f \circ d^i : \Delta_n \rightarrow X$, 退化映射

$$s_j : (SX)_{n-1} \rightarrow (SX)_n$$

将 $f : \Delta_{n-1} \rightarrow X$ 映到 $f \circ s^j : \Delta_n \rightarrow X$. SX 被称为空间 X 的奇异复形(total singular complex), 通常它给出了拓扑空间的奇异同调.

给定 $[n]$ 的一个非空子集 σ , 定义 Δ_σ 为 Δ^n 中 $\{e_i\}_{i \in \sigma}$ 的凸包(convex hull), 即

$$\Delta_\sigma := \left\{ \sum_{i \in \sigma} a_i e_i \mid \sum_{i \in \sigma} a_i = 1, a_i \geq 0, \forall i \in \sigma \right\} \subseteq \Delta^n,$$

我们称 Δ_σ 为 Δ 的 σ 面(σ -face). \mathbf{R}^n 中同胚于 Δ_n 中有限多个 σ 面的并的子空间称为多面体(polyhedron). 对于一个多面体 P , 我们可以把它表达为不同的 σ 面的并, 每一个这样的同胚被称为 P 的一个三角剖分(triangulation).

在拓扑中, 对于一个空间我们会考虑它对应的单纯剖分, 这样的单纯剖分通常被称为单纯复形. 非拓扑的情形下同样可以定义单纯复形, 这样定义的单纯复形对应于一个拓扑空间的单纯剖分:

定义. 设 V 是一个集合, 则 V 上的单纯复形(simplicial complex) X 是 V 的一个非空有限子集族, 满足 X 在取子集作用下闭, 即

$$\forall \sigma \in X, \emptyset \neq \tau \subseteq \sigma \Rightarrow \tau \in X.$$

引理1.1. 对于集合 V 上的单纯复形 X , 如下构造的 $|X|$ 是一个拓扑空间, 且具有被 X 描述的单纯剖分:

取定 \mathbf{R} 线性空间 $\mathbb{V} := \text{span}_{\mathbf{R}} V$, 对任意 $\sigma \in X$, 令 Δ_σ 是由 $\sigma \subseteq V$ 生成的凸包. 那么

$$|X| := \bigcup_{\sigma \in X} \Delta_\sigma \subseteq \mathbb{V}$$

与 $K := \{i_\sigma : \Delta_\sigma \rightarrow |X|\}$ 构成一个拓扑单纯剖分, 其中 $i_\sigma : \Delta_\sigma \rightarrow |X|$ 是自然的嵌入.

反过来, 任意给定拓扑空间 X 的单纯剖分 K

单纯复形并不具有非常好的性质, 比如单纯复形的商并不一定是单纯复形. 但是每一个单纯复形都对应一个单纯集, 且我们能利用这个单纯集重新构造之前的单纯复形. 这意味着, 单纯集可以看作单纯复形的自然推广.

定义. 给定全序集合 V 上的单纯复形 X , 我们可以定义它对应的单纯集 $SS_*(X)$, 其中

$$SS_n(X) := \{(v_0, \dots, v_n) \mid \{v_0, \dots, v_n\} \in X\},$$

对任意 Δ 中的态射 $f: [m] \rightarrow [n]$, 定义

$$\begin{aligned} SS(f) : SS_n(X) &\rightarrow SS_m(X) \\ (v_0, \dots, v_n) &\mapsto (v_{f(0)}, \dots, v_{f(n)}). \end{aligned}$$

若单纯集 X 是某个单纯复形 K 对应的单纯集, 则称它是多面体的(polyhedral).

练习1.2. 这里我们要验证单纯复形可以完全地由它对应的单纯集给出, 因而单纯集是更广泛的概念. 考虑习题1.1中的定义, 验证

$$SS_*(X)^{\text{nondeg}} \cong X.$$

练习1.3. 在引理1.1中我们证明了抽象单纯复形和拓扑单纯复形的一一对应. 在拓扑中有一个比单纯复形广泛一点的概念拟单纯复形(semi-simplicial complex), 定义为

在本小节最后我们引入循环范畴(cyclic category) Δ_C , 其中 Δ_C 的对象同于 Δ , 而 Δ_C 的态射由 $d_{[n]}^i : [n] \rightarrow [n+1], s_{[n+1]}^j : [n+1] \rightarrow [n]$ 和 $\tau_n : [n] \rightarrow [n]$ 生成, 满足三类关系: (i) $d_{[n]}^i, s_{[n+1]}^j$ 之间的关系同于 Δ ; (ii) $\tau_{n+1} \circ d_{[n]}^i = d_{[n]}^{i-1} \circ \tau_n$ 和 $\tau_{n+1} \circ d_{[n]}^0 = d_{[n]}^n$, $\tau_n \circ s_{[n+1]}^j = s_{[n]}^{j-1} \circ \tau_{n+1}$ 和 $\tau_n \circ s_{[n+1]}^0 = s_{[n]}^n \circ \tau_{n+1}^2$; (iii) $\tau_n^{n+1} = \text{id}_{[n]}$. 下面的定理叙述了两个范畴之间的关系.

定理1.1. Δ_C 是 Δ 的(非满)子范畴, 且满足

1. $\text{Aut}_{\Delta_C}([n]) \cong \mathbb{Z}/(n+1)\mathbb{Z}$.
2. 任意 Δ_C 中的态射 $f \in \text{hom}_{\Delta_C}([n], [m])$ 都可以写成如下分解 $f = \varphi \circ \gamma$, 其中 $\varphi \in \text{hom}_{\Delta}([n], [m])$ 且 $\gamma \in \text{Aut}_{\Delta_C}([n])$.

例1.3 (要检查方向). 定义函子 $\Delta_C^\circ \rightarrow \mathbf{Set}$, 将对象 $[n]$ 映到 $\text{Aut}_{\Delta_C^\circ}([n]) = \mathbb{Z}/(n+1)\mathbb{Z}$, 任取 $a \in \text{hom}_{\Delta_C}([n], [m])$ 和 $g \in \text{Aut}_{\Delta_C}([n])$, 由刚刚的唯一分解, $f = g \circ a$ 存在唯一的分解 $f = \varphi \circ \gamma$ 满足 $\varphi \in \text{hom}_{\Delta}([n], [m])$ 且 $\gamma \in \text{Aut}_{\Delta_C}([n])$, 记 $g^*(a) = \varphi, a^*(g) = \gamma$. 于是对于任意给定的 $g \in \text{Aut}_{\Delta_C^\circ}([n])$, 我们有

$$\begin{aligned} g^* : \text{hom}_{\Delta_C^\circ}([n], [m]) &\rightarrow \text{hom}_{\Delta_C^\circ}([n], [m]) \\ a &\mapsto g^*(a) \end{aligned}$$

和任意给定的 $a \in \text{hom}_{\Delta_C^\circ}([n], [m])$,

$$\begin{aligned} a^* : \text{Aut}_{\Delta_C^\circ}([n]) &\rightarrow \text{Aut}_{\Delta_C^\circ}([n]) \\ g &\mapsto a^*(g). \end{aligned}$$

练习1.4. 求证任意单纯集 X_*, Y_* 的积存在.

Proof. 定义单纯集 $(X \times Y)_*$ 满足

$$(X \times Y)_n := X_n \times Y_n,$$

且

这样只要验证 $(X \times Y)_*$ 满足相应的泛性质即可. □

练习1.5. 求证对任意拓扑空间 X , 存在自然的积分映射

1.2 泛单纯集

在涉及具体的构造前, 我们先讨论一部分形式化的定义以及结果.

1.2.1 Yoneda引理

范畴理论中最重要的工具之一就是Yoneda引理. 我们记 $\hat{\mathcal{C}}$ 为范畴 $\mathbf{Funct}(\mathcal{C}^\circ, \mathbf{Set})$, $h_B := \text{hom}_{\mathcal{C}}(-, B)$, 那么Yoneda引理表述如下:

定理1.2 (Yoneda). 对任意局部小范畴 \mathcal{C} 和函子 $F : \mathcal{C}^\circ \rightarrow \mathbf{Set}$, 存在关于 F 和 \mathcal{C} 都自然的同构

$$\varphi : \text{hom}_{\hat{\mathcal{C}}}(h_B, F) \cong F(B).$$

作为推论, 当 $F = h_D$ 时, 自然同构为

$$\text{hom}_{\mathcal{C}}(B, D) = \text{hom}_{\hat{\mathcal{C}}}(h_B, h_D),$$

其中映射将态射 $f : B_1 \rightarrow B_2$ 映到 $h(f) = \text{hom}_{\mathcal{C}}(f, D)$. 考虑函子

$$h : \mathcal{C} \rightarrow \hat{\mathcal{C}}$$

$$B \mapsto \text{hom}_{\mathcal{C}}(-, B)$$

$$(f : B_1 \rightarrow B_2) \mapsto h(f),$$

Yoneda引理说明这是一个满忠实的函子, 我们称其为Yoneda函子.

注意到任意一个单纯集是一个到集合范畴的函子, 故我们可以对其应用Yoneda引理. 由定义显然有 $\hat{\Delta} = \mathbf{sSet}$. 考虑 $h_{[n]} := \text{hom}_{\Delta}(-, [n])$, 这些函子都是单纯集, 具体说来, 我们需要确定面映射和退化映射: 面映射 $d_i : h_{[n]}([k]) \rightarrow h_{[n]}([k-1])$ 是 \mathbf{Set} 中 d^i 的前置复合, 即

$$d_i : h_{[n]}([k]) \rightarrow h_{[n]}([k-1]) = \{[k] \xrightarrow{f} [n]\} \mapsto \{[k-1] \xrightarrow{d^i} [k] \xrightarrow{f} [n]\},$$

类似地退化映射 s_i 是 \mathbf{Set} 中 s^i 的前置复合. 同时, Yoneda函子的满忠实性说明

$$\text{hom}_{\Delta}([k], [n]) \cong \text{hom}_{\mathbf{sSet}}(h_{[k]}, h_{[n]}),$$

即 $h_{[k]}$ 到 $h_{[n]}$ 的所有自然变换由 Δ 中的态射 $[k] \rightarrow [n]$ 所决定, 因此所有的 $h_{[n]}$ 在一起组成一个上单纯集.

定义. 单纯集

$$h_{[n]} := \text{hom}_{\Delta}(-, [n])$$

被称为标准 n 单形(standard n -simplex), 我们也记为 $\Delta^{[n]}$ (上标的原因如前所述, 所有的 $h_{[n]}$ 在一起组成一个上单纯集).

例1.4. 我们具体地写出来单纯集 $h_{[n]}$.按定义 $h_{[n]}([k]) := \text{hom}_{\Delta}([k], [n])$, 是所有 $[k]$ 到 $[n]$ 的保序映射的全体, 任意一个映射 $a : [k] \rightarrow [n]$ 给出了有序组 (a_0, \dots, a_k) , 满足 $0 \leq a_0 \leq a_1 \leq \dots \leq a_k \leq n$, 因此

$$h_{[n]}([k]) = \{(a_0, \dots, a_k) \mid 0 \leq a_0 \leq a_1 \leq \dots \leq a_k \leq n\}.$$

给定态射 $f : [k] \rightarrow [l]$, 它给出了

$$\begin{aligned} h_{[n]}(f) : h_{[n]}([l]) &\rightarrow h_{[n]}([k]) \\ (a_0, \dots, a_l) &\mapsto (a_{f(0)}, \dots, a_{f(k)}), \end{aligned}$$

特别地这给出了 $h_{[n]}$ 中的面映射

$$\begin{aligned} d_i^{[k]} : h_{[n]}([k]) &\rightarrow h_{[n]}([k-1]) \\ (a_0, \dots, a_k) &\mapsto (a_0, \dots, \hat{a}_i, \dots, a_k) \end{aligned}$$

和退化映射

$$\begin{aligned} s_j^{[k]} : h_{[n]}([k]) &\rightarrow h_{[n]}([k+1]) \\ (a_0, \dots, a_k) &\mapsto (a_0, \dots, a_j, a_j, a_{j+1}, \dots, a_k). \end{aligned}$$

引理1.2. 设 X 是单纯集, 函子

$$\begin{aligned} \mathbf{sSet} &\rightarrow \mathbf{Set} \\ X &\mapsto X([n]) \end{aligned}$$

是可表的, 其代表是标准 n 单形 $\Delta^{[n]}$.

如果我们考虑更一般情形的Yoneda引理, 我们有自然同构

$$\text{hom}_{\mathbf{sSet}}(\Delta^{[n]}, X) \cong X([n]).$$

于是任意给定一个 n 单形 $x \in X([n])$, 我们有一个自然变换

$$\Delta^{[n]} \Rightarrow X$$

与之对应, 而它在面映射下的象 $d_i(x) \in X([n-1])$ 则对应于自然态射

$$\Delta^{[n-1]} \xrightarrow{d^i} \Delta^{[n]} \Rightarrow X.$$

命题1.3 (稠密性定理). 令 $\int X$ 是单纯集 X 的元素范畴, 则以 $\int X$ 为图的余极限满足

$$\operatorname{colim}_{x \in X_n} \Delta^{[n]} \cong X.$$

1.2.2 伴随函子

作为泛单纯集的应用, 本小节我们将会给出一种通用的构造特定左右伴随的方式, 它将会给出后面用到的很多例子伴随性的证明, 并将它们用同一个框架描述.

设 \mathcal{D} 是任意上完备 (即任意图为小范畴的余极限都存在) 的局部小范畴, L 是协变函子 $\mathcal{D} \rightarrow \mathbf{sSet}$, 我们希望构造一对左右伴随函子 $L : \mathbf{sSet} \rightleftarrows \mathcal{D} : R$ 并考虑它们的性质. 由定义, 我们有关于 $X \in \operatorname{ob} \mathbf{sSet}$ 和 $B \in \operatorname{ob} \mathcal{D}$ 都自然的同构

$$\operatorname{hom}_{\mathcal{D}}(L(X), B) \cong \operatorname{hom}_{\mathbf{sSet}}(X, R(B)).$$

任意给定协变函子 $F : \Delta \rightarrow \mathcal{D}$, 由函子 F 我们可以如下构造右伴随函子 R , 任意给定 \mathcal{D} 中的对象 B , $R(B)$ 是单纯集, 所有的 n 单形构成集合

$$R(B)_n := \operatorname{hom}_{\mathcal{D}}(F([n]), B),$$

且面映射和边缘映射分别定义为

$$d_i^{[n]} := \operatorname{hom}_{\mathcal{D}}(F(d_{[n]}^i), B)$$

和

$$s_j^{[n]} := \operatorname{hom}_{\mathcal{D}}(F(s_{[n]}^j), B),$$

根据 F 和 hom 的函子性, d_i 与 s_j 满足相应的关系, 因此 $R(B)$ 是单纯集, 即

$$R(B) = \operatorname{hom}_{\mathcal{D}}(F(-), B).$$

于是给定 \mathcal{D} 中的态射 $f : B \rightarrow D$, 那么单纯集之间的态射 $R(f) : R(B) \rightarrow R(D)$ 定义为 $\operatorname{hom}_{\mathcal{D}}(F(-), f)$.

这样构造的函子 R 存在一个左伴随 $L : \mathbf{sSet} \rightarrow \mathcal{D}$, 定义为 $F : \Delta \rightarrow \mathcal{D}$ 沿 Yoneda 嵌入 $\Delta \hookrightarrow \mathbf{sSet}$ 的左 Kan 扩张:

$$\begin{array}{ccc} \Delta & \xrightarrow{F} & \mathcal{D} \\ & \searrow y \quad \downarrow & \nearrow L \\ & \mathbf{sSet} & \end{array}.$$

我们尝试具体地把函子 L 写出来:

首先介绍一个概念余终止 (coend), 它是一个特殊的余极限 (更一般地可以对一个二函子取余极限, 这里是一个特殊的情形). 任意给定集合 S 和 \mathcal{D} 中的对象 B , 定义它们的余指数 (copower) (或称为张量积 (tensor)) 为

$$S \otimes B := \coprod_{s \in S} B,$$

于是特别地, 对单纯集 X 和自然数 m, n , 可以构造

$$X_m \otimes F([n]).$$

给定 Δ 中的态射 $f : [n] \rightarrow [m]$, 自然地由 F 诱导了态射

$$f_* : X_m \otimes F([n]) \rightarrow X_m \otimes F([m]),$$

同时由 X 诱导了态射

$$f^* : X_m \otimes F([n]) \rightarrow X_n \otimes F([n]).$$

这给出了下图

$$\begin{array}{ccc} X_m \otimes F([n]) & \xrightarrow{f_*} & X_m \otimes F([m]) \\ f^* \downarrow & & \downarrow \\ X_n \otimes F([n]) & \dashrightarrow & \cdot, \end{array}$$

当 f 取遍 $\text{mor } \Delta$ 时, 以上给出了

$$\coprod_{f:[n] \rightarrow [m]} X_m \otimes F([n]) \xrightleftharpoons[f_*]{f^*} \coprod_{[n]} X_n \otimes F([n]),$$

此时, 该图的余等值子 coeq 被称为余终止(coend), 记为

$$\int^{[n]} X \otimes F.$$

于是, 定义函子 $L : \mathbf{sSet} \rightarrow \mathcal{D}$ 为

$$L(X) := \int^{[n]} X \otimes F,$$

且对于单纯集之间的态射 $f : X \rightarrow Y$, 态射

$$Lf : X \rightarrow Y$$

由余极限的函子性给出.

定理1.4. 如上构造的函子对 $L : \mathbf{sSet} \rightleftarrows \mathcal{D} : R$ 是伴随函子对.

Proof. 考虑

$$L(\Delta^{[k]}) = \int^{[n]} \Delta^{[k]} \otimes F,$$

按定义它是余等值子

$$\coprod_{f:[n] \rightarrow [m]} \Delta^{[k]}([m]) \otimes F([n]) \xrightleftharpoons[f_*]{f^*} \coprod_{[n]} \Delta^{[k]}([n]) \otimes F([n]).$$

同时存在下图

$$\begin{array}{ccc} \Delta^{[k]}([m]) \otimes F([n]) & \xrightarrow{f_*} & \Delta^{[k]}([m]) \otimes F([m]) \\ f^* \downarrow & & \downarrow \\ \Delta^{[k]}([n]) \otimes F([n]) & \longrightarrow & F([k]), \end{array}$$

其中映射 $\Delta^{[k]}([n]) \otimes F([n]) \rightarrow F([k])$ 是 $\coprod_{g \in \Delta^{[k]}([n])}$

任取 $X \in \text{ob } \mathbf{sSet}$ 和 $B \in \text{ob } \mathcal{D}$, 根据第一小节的讨论

$$\text{hom}_{\mathbf{sSet}}(\Delta^{[n]}, R(B)) \cong R(B)_n := \text{hom}_{\mathcal{D}}(F([n]), B),$$

这样直接根据刚刚的证明

$$\text{hom}_{\mathcal{D}}(L(\Delta^{[n]}), B) \cong \text{hom}_{\mathbf{sSet}}(\Delta^{[n]}, R(B))$$

成立且是自然的, 再根据稠密性定理1.3, 任意的单纯集 X 都是余极限

$$\text{colim}_{x \in X_n} \Delta^{[n]} \cong X,$$

函子 L 的构造 (也是一个余极限) 说明它与余极限交换, 因此

$$\begin{aligned} \text{hom}_{\mathcal{D}}(L(X), B) &\cong \text{hom}_{\mathcal{D}}(L(\text{colim}_{x \in X_n} \Delta^{[n]}), B) \\ &\cong \text{colim}_{x \in X_n} \text{hom}_{\mathcal{D}}(L(\Delta^{[n]}), B) \\ &\cong \text{colim}_{x \in X_n} \text{hom}_{\mathbf{sSet}}(\Delta^{[n]}, R(B)) \cong \text{hom}_{\mathbf{sSet}}(X, R(B)). \end{aligned}$$

这里的每一步同构都是自然的, 于是伴随性得证. □

练习1.6. 用Yoneda引理证明

$$L(\Delta^{[k]}) = \int^{[n]} \Delta^{[k]} \otimes F = F([n]).$$

事实上, 我们完全可以将伴随函子的自然同构写出来. 给定一个单纯集的态射

$$\eta \in \text{hom}_{\mathbf{sSet}}(X, R(B))$$

给出了集合间的映射 $\eta_n : X_n \rightarrow R(B)_n = \text{hom}_{\mathcal{D}}(F([n]), B)$, 而利用它可以得到态射

$$\tilde{\eta}_n : X_n \otimes F([n]) \rightarrow B,$$

定义为 $\coprod_{x \in X_n} \eta_n(x)$. 一方面, 根据 η 的自然性有交换图

$$\begin{array}{ccc} X_m & \xrightarrow{\eta_m} & \text{hom}_{\mathcal{D}}(F([m]), B) \\ X(f) \downarrow & & \downarrow (F(f))^* \\ X_n & \xrightarrow{\eta_n} & \text{hom}_{\mathcal{D}}(F([n]), B), \end{array}$$

对应于给定 $f : [n] \rightarrow [m]$ 的交换图

$$\begin{array}{ccc} X_m \otimes F([n]) & \xrightarrow{f_*} & X_m \otimes F([m]) \\ f^* \downarrow & & \downarrow \tilde{\eta}_m \\ X_n \otimes F([n]) & \xrightarrow{\tilde{\eta}_n} & B, \end{array}$$

根据余终止的定义, 这给出了态射 $\eta^b \in \text{hom}_{\mathcal{D}}(L(X), B)$.

另一方面, 给定态射 $h \in \text{hom}_{\mathcal{D}}(L(X), B)$, 记余终止 $L(X)$ 诱导的态射 $X_n \otimes F([n]) \rightarrow L(X)$ 为 ξ_n , 那么给定 $f: [n] \rightarrow [m]$, 余终止的定义直接诱导了交换图

$$\begin{array}{ccc} X_m \otimes F([n]) & \xrightarrow{f_*} & X_m \otimes F([m]) \\ f^* \downarrow & & \downarrow h \circ \xi_m \\ X_n \otimes F([n]) & \xrightarrow{h \circ \xi_n} & B, \end{array}$$

进而上一段的对应将 $\{h \circ \xi_n\}_{[n] \in \Delta}$ 对应到一族态射 $\{h_n^\sharp: X_n \rightarrow R(B)_n = \text{hom}_{\mathcal{D}}(F([n]), B)\}_{[n] \in \Delta}$, 且上面的交换图意味着

$$\begin{array}{ccc} X_m & \xrightarrow{h_m^\sharp} & \text{hom}_{\mathcal{D}}(F([m]), B) \\ X(f) \downarrow & & \downarrow (F(f))^* \\ X_n & \xrightarrow{h_n^\sharp} & \text{hom}_{\mathcal{D}}(F([n]), B) \end{array}$$

是交换的, 因此 h^\sharp 是自然变换.

注意到两个对应实质是两个交换图的对应, 因而二者互逆, 这给出了伴随性的证明.

例1.5. 定义函子

$$\begin{aligned} F: \Delta &\rightarrow \mathbf{Top} \\ [n] &\mapsto \Delta^n, \end{aligned}$$

其中 Δ^n 是标准 n 单形, 于是它给出的右伴随函子恰是奇异单纯集 $S_*: \mathbf{Top} \rightarrow \mathbf{sSet}$ (例1.2). 同时由于张量积 $X_n \otimes F([m])$ 此时是将 X_n 看作具有离散拓扑的拓扑空间的乘积 $X_n \times F([m])$, 因此依据前面的讨论, 如下定义函子

$$|X| := \int^{[n]} X \otimes F = \text{coeq} \left(\coprod_{f: [n] \rightarrow [m]} X_m \otimes F([n]) \rightrightarrows_{f_*} \coprod_{[n]} X_n \otimes F([n]) \right)$$

是 S_* 的左伴随函子, 被称为几何实现 (geometric realization), 下一节我们将详细讨论这个构造.

例1.6. 借助以上讨论, 我们来证明 \mathbf{sSet} 是笛卡尔闭的, 即对任意单纯集 Y , 存在函子 $- \times Y: \mathbf{sSet} \rightarrow \mathbf{sSet}$ 的右伴随. 事实上, 这对于所有小范畴上的预层 (即到 \mathbf{Set} 的函子) 组成的范畴都成立.

对于给定的单纯集 Y , 考虑函子

$$\begin{aligned} F: \Delta &\rightarrow \mathbf{sSet} \\ [n] &\mapsto \Delta^{[n]} \times Y \\ f &\mapsto f \times \text{id}_Y. \end{aligned}$$

之前我们讨论过, L 是 F 沿的 Yoneda 嵌入的左 Kan 扩张, 而这里, F 是 Yoneda 嵌入和 $- \times Y$ 的复合, 因此直接根据定义, $L = - \times Y$.

另一方面, 它的右伴随也是容易写出来的, 通常它记为 $[Y, -]$ 或者 $-^Y$, 定义为

$$[Y, Z]_n := \text{hom}_{\mathbf{sSet}}(\Delta^{[n]} \times Y, Z),$$

且面映射和退化映射分别为

$$\begin{aligned} d_i^{[n]} : [Y, Z]_n &\rightarrow [Y, Z]_{n-1} \\ f &\mapsto (d_{[n-1]}^i \times \text{id}_Y) \circ f \end{aligned}$$

和

$$\begin{aligned} s_i^{[n]} : [Y, Z]_n &\rightarrow [Y, Z]_{n+1} \\ f &\mapsto (s_{[n+1]}^i \times \text{id}_Y) \circ f. \end{aligned}$$

这样我们得到了想要的伴随

$$\text{hom}_{\mathbf{sSet}}(X \times Y, Z) \cong \text{hom}_{\mathbf{sSet}}(X, [Y, Z]),$$

即 \mathbf{sSet} 是笛卡尔闭的.

练习1.7. 考虑所有群胚的范畴到小范畴的嵌入 $F : \mathbf{Gpd} \rightarrow \mathbf{Cat}$, 证明它给出了一对伴随函子

$$\Pi_1 : \mathbf{sSet} \rightleftarrows \mathbf{Cat} : N,$$

其中 Π_1 是取单纯集的基本群胚.

练习1.8. 将本节中的证明推广, 证明任意给定小范畴 \mathcal{C} 和余完备的范畴 \mathcal{D} , 存在一一对应

$$\mathbf{Func}(\mathcal{C}, \mathcal{D}) \rightleftarrows \mathbf{Adj}(\hat{\mathcal{C}}, \mathcal{D}),$$

其中

1.3 几何实现

之前稠密性定理(命题1.3)说明每个单纯集都是一个余极限, 注意这个余极限是在范畴 \mathbf{sSet} 中取得的. 如果我们在其他的范畴中取这个余极限会得到其他我们想要的对象, 有时候这些对象会更加容易理解和计算:

定义. 给定单纯集 X , 称

$$|X| := \text{colim}_{x \in X_n} |\Delta^{[n]}|$$

为 X 的几何实现(geometric realization), 其中 $|\Delta^{[n]}|$ 是标准 n 单形 Δ^n .

定理1.5. 下列函子对

$$|-| : \mathbf{sSet} \rightleftarrows \mathbf{Top} : S$$

是伴随函子, 即存在自然的同构

$$\text{hom}_{\mathbf{Top}}(|X|, Y) \cong \text{hom}_{\mathbf{sSet}}(X, SY).$$

Proof. 根据定义和余极限的性质

$$\mathrm{hom}_{\mathbf{Top}}(|X|, Y) :=$$

□

注意到例1.5中的构造也是函子 S_* 的左伴随函子, 因此根据伴随函子的唯一性, 有

推论1.5.1. 本节中的定义与例1.5中几何实现的定义是自然同胚的.

定理1.6. 对任意单纯集 X , $|X|$ 是 CW 复形.

Proof.

□

例1.7. 在拓扑中, 一个单纯复形的三角剖分是一个重要的工具, 我们考虑定义单纯剖分函子

范畴 \mathbf{Top} 一个重要的性质是集合 $\mathrm{hom}_{\mathbf{Top}}$ 上有自然的结构使得集合是一个拓扑空间, 且

$$\mathrm{hom}_{\mathbf{Top}}(X \times Y, Z) \cong \mathrm{hom}_{\mathbf{Top}}(X, \underline{\mathrm{hom}}_{\mathbf{Top}}(Y, Z))$$

是一个自然同构. 伴随函子对 $(|-|, S)$ 的存在提示这样的行为很可能也出现在范畴 \mathbf{sSet} 中:

定义. 给定单纯集 X_*, Y_* , 它们的态射复形 (映射空间) (function complex, mapping space) 定义为

$$\underline{\mathrm{hom}}_{\mathbf{sSet}}(X, Y)_n := \mathrm{hom}_{\mathbf{sSet}}(X_* \times \Delta^{[n]}, Y),$$

面映射和退化映射

定义. \mathbf{sSet}_0

1.4 小范畴的神经

这一节我们详细讨论小范畴的神经. 在非特别指出的情形下, 本小节 \mathcal{C} 都代表一个小范畴. 回顾例1.1中的定义, 单纯集 NC 的全体 n 单形 NC_n 包含有可连续复合的 n 个态射, 记为 (f_n, \dots, f_1) . 面映射 $d_i^{[n]}$ 将

$$A_0 \xrightarrow{f_1} \dots \xrightarrow{f_{i-2}} A_{i-1} \xrightarrow{f_{i-1}} A_i \xrightarrow{f_i} A_{i+1} \xrightarrow{f_{i+1}} \dots \xrightarrow{f_n} A_n$$

映到

$$A_0 \xrightarrow{f_1} \dots \xrightarrow{f_{i-2}} A_{i-1} \xrightarrow{f_i \circ f_{i-1}} A_{i+1} \xrightarrow{f_{i+1}} \dots \xrightarrow{f_n} A_n,$$

且在 $i = 0, n$ 时映射舍弃 A_i 和相连的映射. 类似地退化映射 $s_j^{[n]}$ 将

$$A_0 \xrightarrow{f_1} \dots \xrightarrow{f_{i-2}} A_{i-1} \xrightarrow{f_{i-1}} A_i \xrightarrow{f_i} A_{i+1} \xrightarrow{f_{i+1}} \dots \xrightarrow{f_n} A_n$$

映到

$$A_0 \xrightarrow{f_1} \cdots \xrightarrow{f_{j-2}} A_{j-1} \xrightarrow{f_{j-1}} A_j \xrightarrow{f_j} A_j \xrightarrow{f_j} A_{j+1} \xrightarrow{f_{j+1}} \cdots \xrightarrow{f_n} A_n.$$

例1.8. 考虑范畴 $[n]$, 我们来求出它的神经.

事实上, 还可以用1.2.2节中的内容构造神经函子. 令嵌入函子 $F: \Delta \rightarrow \mathbf{Cat}$ 为

$$[n] \mapsto [n],$$

其中 $[n]$ 分别代表范畴 Δ 中的对象和(小)范畴 $[n]$. 那么1.2.2节中的构造给出

$$NC_n := \text{hom}_{\mathbf{Cat}}([n], \mathcal{C}),$$

这恰好是刚刚我们的定义.

同时, 神经函子 $N: \mathbf{Cat} \rightarrow \mathbf{sSet}$ 应当有左伴随函子, 一般记为 $\mathbf{Cat} \leftarrow \mathbf{sSet} : \tau_1$, 如下我们具体地写出来: 给定单纯集 X , 那么范畴 $\tau_1(X)$ 的对象是

$$\text{ob } \tau_1(X) := X_0,$$

$\tau_1(X)$ 的所有态射是 X_1 中元素生成的全体(因为“复合”后可能不在 X_1 中, 因此要用类似于自由群生成的方式进行生成), $s_0: X_0 \rightarrow X_1$ 给出了单位态射, $d_0, d_1: X_1 \rightarrow X_0$ 分别给出了定义域和余定义域, 并商去下列等价关系: 若存在 $x \in X_2$ 使得 $d_2(x) = f, d_0(x) = g, d_1(x) = h$, 那么 $h = gf$, 用交换图来表示为

$$\begin{array}{ccc} 0 & \xrightarrow{h} & 2 \\ & \searrow f & \nearrow g \\ & 1 & \end{array}.$$

由于构造中的生成, 这自然是一个范畴.

练习1.9. 证明 τ_1 是 N 的左伴随函子. 进一步证明 $\tau_1 \circ N = \text{id}$.

例1.9. 设 G 是群, 那么 \mathbf{BG} 是一个只有一个小对象的小范畴. 由于 $\text{mor } \mathbf{BG} = G$, 故 $N\mathbf{BG}_n = G^n$. 注意到 \mathbf{BG} 中态射的复合是群乘法, 于是

$$d_i: G^n \rightarrow G^{n-1}$$

$$(g_1, \cdots, g_n) \mapsto \begin{cases} (g_2, \cdots, g_n) & i = 0 \\ (g_1, \cdots, g_i g_{i+1}, \cdots, g_n) & 0 < i < n \\ (g_1, \cdots, g_{n-1}) & i = n \end{cases}$$

(注意到这里函子 \mathbf{B} 对复合的方式产生了影响, 因此角标产生了变化) 和

$$s_j: G^n \rightarrow G^{n+1}$$

$$(g_1, \cdots, g_n) \mapsto (g_1, \cdots, g_{j-1}, 1, g_j, \cdots, g_n).$$

注意到这里的映射恰是群上同调所需要的映射.

另一方面, 我们还有构造 \mathbf{EG} , 其中 $\text{ob } \mathbf{EG} = G$, $\text{hom}_{\mathbf{EG}}(g, h) = \{x \in G \mid xg = h\} = \{hg^{-1}\}$ 且态射的复合是群乘法.

二者之间有如下的关系:

1. 存在自然的单纯集投影

$$p: \mathbf{NEG} \rightarrow \mathbf{NBG}$$

$$(g_0, \dots, g_n) \mapsto (g_0 g_n^{-1}, \dots, g_{n-1} g_n^{-1}).$$

2. G 在 \mathbf{NEG} 上有右作用

$$(g_0, \dots, g_n) \cdot g = (g_0 g, \dots, g_n g),$$

于是有交换图

$$\begin{array}{ccc} \mathbf{NEG} & \xrightarrow{p_*} & \mathbf{NBG} \\ & \searrow & \nearrow \\ & \mathbf{NEG}/G & \end{array}$$

这是最简单的单纯 G 主从的例子:

$$\mathbf{NEG} \times \mathbf{NBG} \rightarrow \mathbf{NBG}$$

$$((g_0, \dots, g_n), (h_1, \dots, h_n)) \mapsto (g_0 h_1 g_1^{-1}, \dots, g_{n-1} h_n g_n^{-1}).$$

上面的例子给出了

例1.10. 设 X 是拓扑空间, $\mathcal{U} = \{U_i\}_{i \in I}$ 是 X 的一个开覆盖.

练习1.10. X good covering $X \simeq ||$.

例1.11 (Borel构造). 设群 G 作用在集合 X 上, 我们可以构造该作用的广群 (groupoid, 这是一个范畴不是一个群) $G \circ X$: 其中 $\text{ob } G \circ X = X$, $\text{hom}_{G \circ X}(x, y) = \{g \in G \mid gx = y\}$ 且态射的复合是群乘法. 于是 $NG \circ X_n = G^n \times X$, 面映射和退化映射分别为

$$d_i: G^n \times X \rightarrow G^{n-1} \times X$$

$$(g_1, \dots, g_n, x) \mapsto \begin{cases} (g_2, \dots, g_n, x) & i = 0 \\ (g_1, \dots, g_i g_{i+1}, \dots, g_n, x) & 0 < i < n \\ (g_1, \dots, g_{n-1}, g_n x) & i = n \end{cases}$$

和

$$s_j: G^n \times X \rightarrow G^{n+1} \times X$$

$$(g_1, \dots, g_n, x) \mapsto (g_1, \dots, g_{j-1}, 1, g_j, \dots, g_n, x).$$

注意 $\mathbf{NBG} \cong NG \circ \{*\}$ 且 $\mathbf{NEG} \cong NG \circ G$.

例1.12. 设 \mathcal{C} 是一个小范畴, $X: \mathcal{C} \rightarrow \mathbf{Set}$ 是协变函子, 于是 X 的元素范畴 $\int X$ 是小范畴. 若 $\eta: X_1 \Rightarrow X_2$ 是自然变换, 则我们可以构造一个函子

$$\int \eta: \int X_1 \rightarrow \int X_2,$$

将对象 (A, x) 映到 $(A, \eta_A(x))$, 将态射 $(f: A \rightarrow B, \varphi)$ 映到 $(f, \eta_B(\varphi))$. 这样对于任意的函子 X , 我们有

$$\mathcal{C} \xrightarrow{X} \mathbf{Cat} \xrightarrow{N} \mathbf{sSet} \xrightarrow{|\cdot|} \mathbf{Top}.$$

事实上, τ_1 不仅是做伴随函子, 而且它是 N 的左逆, 这意味着函子 N 是满忠实的, 因此 N 诱导了 \mathbf{Cat} 到像的等价, 于是可以引入如下自然存在且非常重要的问题: N 的像范畴是什么, 即给定一个单纯集 X , 它是否一定是某个小范畴的神经? 如果不一定, 在何时我们可以断定 X 是一个小范畴的神经? 这个问题我们留到下一节回答, 这需要更多的工具来进行讨论.

1.5 子单纯集

在完成了许多关于单纯集的讨论, 一个自然的想法是我们希望研究单纯集的子结构. 按照代数中通常对于子结构的定义, 比较自然的, 若 Y 是单纯集 X 的子单纯集, 那么对于每个自然数 n , Y_n 都需要是 X_n 的子集, 并且我们希望 Y 所给定态射都是完全由 X 给定的态射决定——对任意 $f: [n] \rightarrow [m]$, $X(f)$ 在 Y_n 的限制就是 $Y(f)$. 后一个条件就是在说范畴 Δ 作用在 Y 上是封闭的. 通常, 我们并不直接给出一个单纯子集, 一般情况下我们给出一族称为生成元(generator)的态射, 称包含它们的最小 X 的子单纯集为这族态射生成的子单纯集.

定义. 给定自然数 $0 \leq i \leq n$, 标准 n 单形 $\Delta^{[n]}$ 由 $d_{[n-1]}^i: \Delta^{[n-1]} \rightarrow \Delta^{[n]}$ 生成的子集被称为 $\Delta^{[n]}$ 的第 i 面(i -th face), 记为 $\partial_i \Delta^{[n]}$, 即

$$\partial_i \Delta^{[n]} := \Delta^{[n-1]} \xrightarrow{d_{[n-1]}^i} \Delta^{[n]}.$$

例1.13. 具体来说, 根据例1.4, 我们可以具体地写出 $\partial_i \Delta^{[n]}$. 由之前的讨论

$$\Delta^{[n]}([k]) = \{(a_0, \dots, a_k) \mid 0 \leq a_0 \leq a_1 \leq \dots \leq a_k \leq n\},$$

并且

$$\begin{aligned} d_{[n-1]}^i: \Delta^{[n-1]} &\rightarrow \Delta^{[n]} \\ (a_0, \dots, a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, \dots, a_k) &\mapsto (a_0, \dots, a_{i-1}, a_i + 1, a_{i+1} + 1, \dots, a_k + 1), \end{aligned}$$

于是

几何上, n 单形的第 i 面就是标号为 i 的点相对的第 i 个坐标为0的面. 如果我们将所有的面组合起来, 几何上这是一个 n 维球面, 对单纯集的这样操作将得到单纯球面:

定义. 标准 n 单形 $\Delta^{[n]}$ 由 $\{d_{[n-1]}^i: \Delta^{[n-1]} \rightarrow \Delta^{[n]} \mid 0 \leq i \leq n\}$ 生成的子单纯集称为标准单纯 n 球面(standard simplicial n -sphere), 记为 $\partial \Delta^{[n]}$, 即

$$\partial \Delta^{[n]} = \bigcup_{0 \leq i \leq n} \partial_i \Delta^{[n]}.$$

练习1.11. 求证:

$$1. \partial \Delta^{[n]} = \operatorname{colim}_{\Delta^{[n-2]} \xrightarrow{d_{[n-1]}^i} \Delta^{[n-1]}} \Delta^{[n-1]} \xrightarrow{d_{[n]}^i} \Delta^{[n]}.$$

2. 任取 $k < n$, 则 $\partial\Delta^{[n]}([k]) = \text{hom}_\Delta([k], [n])$.

更一般地, 单纯集 X 的单纯 n 球面是单纯集间的映射 $\partial\Delta^{[n]} \rightarrow X$. 如果几何球面去掉一个面, 我们将得到一个可缩的有界闭集. 对应到单纯集则是

定义. 标准 n 单形 $\Delta^{[n]}$ 由 $\{d_{[n]}^i : \Delta^{[n-1]} \rightarrow \Delta^{[n]} \mid 0 \leq i \leq n, i \neq k\}$ 生成的子单纯集称为标准单纯角 (standard simplicial horn), 记为 $\Lambda_k^{[n]}$, 即

$$\Lambda_k^{[n]} = \bigcup_{0 \leq i \leq n, i \neq k} \partial_i \Delta^{[n]}.$$

例1.14. 考虑 $\Delta^{[0]}$

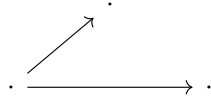
练习1.12. 求证:

$$1. \Lambda_k^{[n]} = \text{colim}_{\Delta^{[n-2]} \xrightarrow{d_{[n-1]}^i} \Delta^{[n-1]}} \Delta^{[n-1]} \xrightarrow{d_{[n]}^i} \Delta^{[n]}.$$

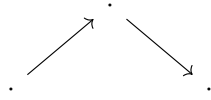
2. 任取 $j < n-1$, 则 $\Lambda_k^{[n]}([j]) = \text{hom}_\Delta([j], [n])$, 且 $\Lambda_k^{[n]}([n-1]) = \text{hom}_\Delta([n-1], [n]) - \{d^k\}$.

更一般地, 单纯集 X 的单纯角是单纯集间的映射 $\Lambda_k^{[n]} \rightarrow X$ (引理??). 值得注意的是, 对任意的自然数 n 和 $0 \leq k \leq n$ 我们有自然的嵌入映射 $\Lambda_k^{[n]} \hookrightarrow \partial\Delta^{[n]}$. 这样我们可以引入一个关于单纯集的特殊性质——角填充 (horn filling), 我们特别关心具有一定角填充性质的单纯集.

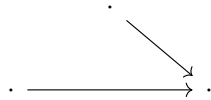
例1.15. 考虑 $\Delta^{[2]}$ 左逆



复合



右逆



定义. 单纯集 X 若具有角填充性质, 即对任意自然数 n 和 $0 \leq k \leq n$, 给定单纯映射 $f : \Lambda_k^{[n]} \rightarrow X$, 存在 (但不要求唯一) $\tilde{f} : \partial\Delta^{[n]} \rightarrow X$ 使得图

$$\begin{array}{ccc} \Lambda_k^{[n]} & \xrightarrow{f} & X \\ \downarrow & \nearrow \tilde{f} & \\ \Delta^{[n]} & & \end{array}$$

交换, 则称 X 为 Kan 复形 (Kan complex).

例1.16. 设 \mathcal{G} 是群胚, 我们来说明 $N\mathcal{G}$ 是Kan复形.

命题1.7. 若 X 是拓扑空间, 则它的奇异复形 SX (例1.2) 是Kan复形.

Proof.

□

命题1.8. 任意单纯群是Kan复形.

这个命题将会在之后证明.同时, Kan复形在同伦理论当中有重要的作用.

定理1.9. 若 X 是Kan复形, 那么 $|X|$ 是

回到本节最初的问题,

定理1.10. 单纯集 X_* 是某个给定小范畴 \mathcal{C} 的神经当且仅当它具有唯一的内角提升.

定义. 单纯集 X 若具有内角填充性质, 即对任意自然数 n 和 $0 < k < n$, 给定单纯映射 $f: \Lambda_k^{[n]} \rightarrow X$, 存在 (但不要求唯一) $\tilde{f}: \Delta^{[n]} \rightarrow X$ 使得图

$$\begin{array}{ccc} \Lambda_k^{[n]} & \xrightarrow{f} & X \\ \downarrow & \nearrow \tilde{f} & \\ \Delta^{[n]} & & \end{array}$$

交换, 则称 X 为拟范畴(quasi-category)或无穷范畴(infinity category, ∞ -category).

我们从另一个角度来考虑, 设 \mathcal{C} 是一个范畴, $M \subseteq \text{mor } \mathcal{C}$ 是一类 \mathcal{C} 的态射, 若态射 $f: A \rightarrow B$ 满足对任意 M 中的态射 $g: C \rightarrow D$, 都存在态射 $h: C \rightarrow A$ 和 $k: D \rightarrow B$ 使得有态射 $\varphi: D \rightarrow A$ 满足交换图

$$\begin{array}{ccc} A & \xleftarrow{h} & C \\ \downarrow f & \nwarrow \varphi & \downarrow g \\ B & \xleftarrow{k} & D, \end{array}$$

则称 f 具有右对于 M 的右提升性质(right lifting property with respect to M).于是, 无穷范畴的定义是说单纯集 X 满足它关于单点单纯集 $*$ 的投影对于内角包含态射 $i_{[n]}^k: \Lambda_{[n]}^k \hookrightarrow \Delta_{[n]}, 0 < k < n$ 有右提升性质.而 $i_{[n]}^k$ 诱导了

$$\begin{array}{ccc}
\mathrm{hom}_{\mathbf{sSet}}(\Delta_{[n]}, X) & \longrightarrow & \mathrm{hom}_{\mathbf{sSet}}(\Lambda_{[n]}^k, X) \\
\cong \downarrow & & \downarrow = \\
X([n]) = X_n & \xrightarrow{(i_{[n]}^k)^*} & \Lambda_{[n]}^k(X),
\end{array}$$

定义又等价于诱导的 $(i_{[n]}^k)^*$ 是满射.

定理1.11 (Joyal). 设 $\mathbf{QuasiCat}$ 是 \mathbf{sSet} 中由无穷范畴组成的满子范畴, 那么 $\mathbf{QuasiCat}$ 上有自然的模型范畴结构.

例1.17. 设 \mathcal{C} 是任意局部小? 范畴, 则它的神经 NC 是一个无穷范畴. 并且, 这样得到的无穷范畴具有特别的性质——它的内角填充都是唯一的, 或者说之前讨论的映射 $(i_{[n]}^k)^*$ 是单射.

1.6 拓扑构造

定义. 给定单纯集的态射 $f, g : X_* \rightarrow Y_*$, 那么一个 f 到 g 的单纯同伦(simplicial homotopy)是单纯态射

$$H : K \times \Delta^{[1]} \rightarrow L,$$

满足如下是交换图:

$$\begin{array}{ccccc}
& & L & & \\
& \nearrow f & \uparrow H & \nwarrow g & \\
X_* \times \Delta^{[0]} & \xrightarrow{\mathrm{id}_X \times d^{[0]}} & X_* \times \Delta^{[1]} & \xleftarrow{\mathrm{id}_Y \times d^{[0]}} & X_* \times \Delta^{[0]}.
\end{array}$$

1.7 单纯同伦群

第二章 模型范畴

2.1 模型范畴的定义与性质I

定义. 设 \mathcal{M} 是范畴, 我们有 \mathcal{M} 中的态射族 W, Fib 和 Cof , 分别被称为弱等价 (weak equivalence, $\xrightarrow{\sim}$)、纤维 (fibration, \twoheadrightarrow) 和余纤维 (cofibration, \hookrightarrow) 满足:

MC1. \mathcal{M} 是 (有限) 完备和余完备的,

MC2. f, g 和 $g \circ f$ 中任意两个是弱等价则第三个也是弱等价,

MC3. 若态射 f 是 g 的收缩¹, 则若 g 属于态射族 W, Fib 或 Cof , 则 f 也属于相同的态射族,

MC4. 任给定交换图

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{g} & E \\ i \downarrow & \nearrow h & \downarrow p \\ X & \xrightarrow{f} & B, \end{array}$$

其中 i 是余纤维 p 是纤维, 且要么 i 要么 p 是一个弱等价, 则存在提升 $h : C \rightarrow B$ 使整个图交换,

MC5. 任意 \mathcal{M} 中的态射 $f : A \rightarrow B$ 都有分解 $f = q \circ i = p \circ j$, 其中 p, q 是纤维, i, j 是余纤维, i, p 是弱等价,

则称范畴 \mathcal{M} 是模型范畴(model category).

若 p 既是纤维又是弱等价, 则称 p 是零调纤维(acyclic fibration)或平凡纤维(trivial fibration), 对偶地若 i 既是余纤维又是弱等价, 则称 p 是零调余纤维(acyclic cofibration)或平凡余纤维(trivial cofibration).

由于模型范畴 \mathcal{M} 是 (有限) 完备和余完备的, 故存在始对象 \emptyset 和终对象 $\{*\}$. 若 \mathcal{M} 中的对象 A 满足 $\emptyset \rightarrow A$ 是余纤维, 则称 A 是余纤维对象(cofibrant object), 对偶地, 若 \mathcal{M} 中的对象 B 满足 $B \rightarrow \{*\}$ 是纤维, 则称 B 是纤维对象(fibrant object).

例2.1. 给定模型范畴 \mathcal{M} , $A \in \text{ob } \mathcal{M}$ 是给定的对象, 那么 $\mathcal{M}/_A$ 有自然的模型结构.

例2.2. 给定模型范畴 \mathcal{M} , 那么范畴 $\text{mor } \mathcal{M}$ 有自然的模型结构.

例2.3. 给定范畴 $I = \{1 \leftarrow 0 \rightarrow 2\}$, 那么 $\text{Funct}(I, \mathcal{M})$ 存在一个模型结构, 使得 $\text{Funct}(I, \mathcal{M})$ 中的态射 $\eta : F \Rightarrow$

G 是弱等价当且仅当 η_i 对任意 $i \in \text{ob } I$ 是弱等价, 且 η 是余纤维当且仅当 η_0 是余纤维且诱导的

$$F(1) \coprod_{F(0)} G(0) \rightarrow G(1), F(2) \coprod_{F(0)} G(0) \rightarrow G(2)$$

是 \mathcal{M} 中的余纤维.

我们将用接下来的整节给出一个模型范畴的例子, 并且借此说明模型范畴一定程度上处理了我们关注的同伦问题.

2.2 拓扑空间

2.2.1 第一个模型结构

定义. 给定拓扑空间的连续映射 $i: A \rightarrow X$, 若它满足同伦扩张性质(homotopy extension property, HEP), 即对任意的 $f: X \rightarrow Y$, 若存在同伦 $H: A \times I \rightarrow Y$ 使得图

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{i_0} & A \times I \\ \downarrow i & \nearrow H & \downarrow i \times \text{id} \\ & Y & \\ & \nwarrow \tilde{H} & \\ X & \xrightarrow{i_0} & X \times I \end{array}$$

是交换的, 其中 $i_0(x) = (x, 0)$, 那么存在同伦 $\tilde{H}: X \times I \rightarrow Y$ 是 H 的扩张, 即 \tilde{H} 与整幅图交换, 则称映射 i 是余纤维(cofibration).

通常情况下, \tilde{H} 的存在不是唯一的, 我们也不要求有唯一性. 考虑到 \mathbf{Top} 是笛卡尔闭的, 即对任意(紧生成、弱Hausdorff)的拓扑空间 Y, Z , 存在 $\text{hom}_{\mathbf{Top}}(Y, Z)$ 上的自然的拓扑结构, 记为 $\text{Map}(Y, Z)$, 满足

$$\text{hom}_{\mathbf{Top}}(X \times Y, Z) \cong \text{hom}_{\mathbf{Top}}(X, \text{Map}(Y, Z))$$

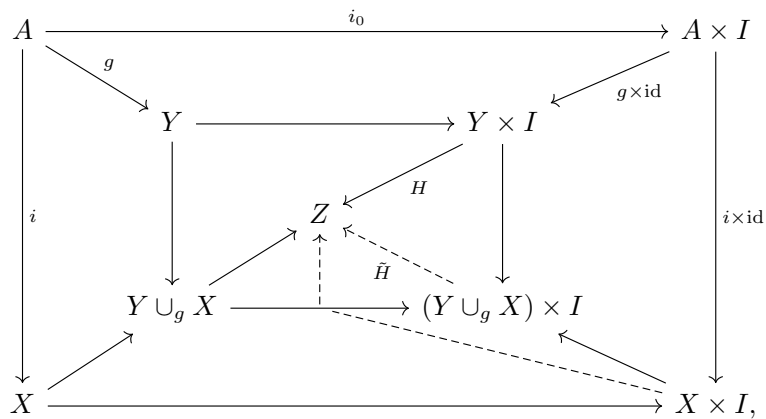
是一个自然同构. 于是上图在这个自然同构下等价于交换图

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{H} & \text{Map}(I, Y) \\ \downarrow i & \nearrow \tilde{H} & \downarrow p_0 \\ X & \xrightarrow{f} & Y \end{array}$$

中 \tilde{H} 的存在性.

引理2.1. 若 $i: A \rightarrow X$ 是余纤维, $g: A \rightarrow Y$ 是任意映射, 那么 g 诱导的映射 $Y \rightarrow Y \cup_g X$ 也是余纤维.

Proof. 注意到 $(Y \cup_g X) \times I \cong (Y \times I) \cup_{g \times \text{id}} (X \times I)$, 考虑交换图



由于左侧方块

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{i} & X \\ \downarrow g & & \downarrow \\ Y & \longrightarrow & Y \cup_g X \end{array}$$

是推出, 右侧方块

$$\begin{array}{ccc} A \times I & \xrightarrow{i} & X \times I \\ \downarrow g & & \downarrow \\ Y \times I & \longrightarrow & (Y \cup_g X) \times I \end{array}$$

也是推出图. 由于 $i: A \rightarrow X$ 是余纤维, 因此存在 $X \times I \dashrightarrow Z$ 与整幅图交换, 这样由于 $(Y \cup_g X) \times I$ 是推出存在 $\tilde{H}: (Y \cup_g X) \times I \dashrightarrow Z$ 是 H 的提升. \square

定义. 给定连续映射 $f: X \rightarrow Y$, 则 f 的映射柱(mapping cylinder)是拓扑空间

$$Mf := Y \cup_f (X \times I),$$

其中 f 按照给定的映射定义在 $X \times \{0\}$ 上.

事实上, 按定义 Mf 是推出

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{i_0} & X \times I \\ f \downarrow & & \downarrow \\ Y & \longrightarrow & Mf, \end{array}$$

因而连续映射的映射柱可以帮助检验一个连续映射是否是余纤维. 考虑如下交换图

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{i_0} & A \times I \\ \downarrow i & \nearrow Mi & \downarrow i \times \text{id} \\ X & \xrightarrow{i_0} & X \times I, \end{array}$$

(Note: A dashed arrow labeled r also points from $X \times I$ to Mi in the original diagram.)

如果存在使得图交换的连续映射 $r : X \times I \rightarrow Mi$, 那么对任意的 Y 满足

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{i_0} & A \times I \\ i \downarrow & & \downarrow \\ X & \xrightarrow{f} & Y, \end{array}$$

映射柱的泛性质给出唯一的连续映射 $Mi \rightarrow Y$, 与 r 的复合是想要的同伦. 反过来, 若 i 是余纤维, 取 r 是余纤维定义给出的映射.

另一方面, 任意给定的连续映射 $f : X \rightarrow Y$ 都有分解

$$X \xrightarrow{j} Mf \xrightarrow{r} Y,$$

其中 $j : x \mapsto (x, 1)$, $r : Mf \rightarrow Y$ 满足 $r : y \mapsto y, (x, s) \mapsto f(x)$. 记 $i : Y \rightarrow Mf$ 是自然的包含, 那么 $r \circ i = \text{id}_Y$, 且 $H : Mf \times I \rightarrow Mf, (y, t) \mapsto y, ((x, s), t) \mapsto (x, (1-t)s)$ 给出了同伦 $\text{id}_{Mf} \simeq i \circ r$.

引理2.2. 如上讨论的映射 $j : X \rightarrow Mf$ 是余纤维.

Proof.

□

事实上, 连续映射 $f : X \rightarrow Y$ 的映射柱 Mf 满足这样的性质有更深刻的原因, 这部分我们会作为同伦余极限进行讨论.

练习2.1. 若嵌入映射 $i : A \rightarrow X$ 是余纤维, 且 A 是可缩的, 求证商映射 $q : X \rightarrow A$ 是同伦等价.

练习2.2. 给定余纤维 $i : A \rightarrow X$, $f : X \rightarrow X$ 满足 $f \circ i = i$, 且 f 是同伦等价. 求证存在 $g : X \rightarrow X$ 满足 $g \circ i = i$ 且 $g \circ f \simeq \text{id}(\text{rel } A)$, $f \circ g \simeq \text{id}(\text{rel } A)$.

Proof.

□

与如上对偶地, 有纤维的概念, 它的性质几乎完全对偶于余纤维:

定义. 给定拓扑空间的连续映射 $p : E \rightarrow B$, 若它满足同伦提升性质(homotopy lifting property, HLP), 即对任意的 $f : Y \rightarrow E$, 若存在同伦 $H : Y \times I \rightarrow B$ (同样记为 $H : Y \rightarrow B^I$) 使得图

$$\begin{array}{ccc} E & \xleftarrow{p_0} & E^I \\ \downarrow p & \swarrow f & \nearrow \tilde{H} \\ & Y & \\ & \searrow H & \\ B & \xleftarrow{p_0} & B^I \end{array} \quad \begin{array}{c} \downarrow i \times \text{id} \end{array}$$

是交换的, 其中 $p_0(\gamma) = \gamma(0)$, 则称映射 p 是纤维(fibration).

上面的这个自然同构下等价于交换图

$$\begin{array}{ccc}
 Y & \xrightarrow{f} & E \\
 i_0 \downarrow & \tilde{H} \nearrow & \downarrow p \\
 Y \times I & \xrightarrow{H} & B,
 \end{array}$$

中 \tilde{H} 的存在性.同样地, 我们有

引理2.3. 若 $p: E \rightarrow B$ 是纤维, $g: Y \rightarrow B$ 是任意映射, 那么 g 诱导的映射 $Y \times_B E \rightarrow Y$ 也是纤维.

引理2.3和2.1说明了余纤维关于推出封闭, 纤维关于拉回封闭, 事实上这是模型范畴一般正确的结论, 我们将在引理2.4中证明一般的结果.

然而, 这并不是范畴 \mathbf{Top} 上唯一可能的模型结构, 为做区别, 称这里定义的余纤维是Hurewicz余纤维, 纤维是Hurewicz纤维. 范畴 \mathbf{Top} 中的Hurewicz余纤维和Hurewicz纤维都是非空的, 例如CW子复形诱导的映射 $A \hookrightarrow X$ 是余纤维, 当 B 是仿紧拓扑空间时 B 上的纤维丛是纤维.

定义. 给定连续映射 $p: E \rightarrow B$, 定义它的道路空间(mapping path space)是

$$Np := E \times_p B^I = \{(x, \gamma) \mid \gamma(0) = p(x)\} \subseteq E \times B^I.$$

明显地 Np 是拉回

$$\begin{array}{ccc}
 Np & \longrightarrow & B^I \\
 \downarrow & & \downarrow p_0 \\
 E & \xrightarrow{p} & B,
 \end{array}$$

因而连续映射的道路空间可以帮助检验一个连续映射是否是纤维, 即若图中

$$\begin{array}{ccccc}
 E & & \xleftarrow{p_0} & & E^I \\
 \downarrow p & \swarrow & & \searrow & \downarrow i \times \text{id} \\
 & Np & & & \\
 & \searrow & & \swarrow & \\
 B & & \xleftarrow{p_0} & & B^I
 \end{array}$$

$Np \dashrightarrow E^I$ 存在则 p 是纤维.

引理2.4. 若 $i: A \rightarrow X$ 是纤维且 B 是空间, 则诱导的映射

$$B^i: B^X \rightarrow B^A$$

是纤维.

Proof. 首先注意到

$$\begin{aligned}
 B^{Mi} &= \text{Map}(Mi, B) = \text{Map}(\text{colim}(X \leftarrow A \xrightarrow{i_0} A \times I), B) \\
 &= \lim(\text{Map}(X, B) \rightarrow \text{Map}(A, B) \xleftarrow{i_0^*} \text{Map}(A \times I, B)) \\
 &= \lim(\text{Map}(X, B) \rightarrow \text{Map}(A, B) \xleftarrow{i_0^*} \text{Map}(A, B^I)) \\
 &= \lim(B^X \rightarrow B^A \xleftarrow{i_0^*} (B^A)^I) = NB^i.
 \end{aligned}$$

考虑收缩映射 $r : X \times I \rightarrow Mi$, 那么

$$B^r : NB^i \cong B^{Mi} \rightarrow B^{X \times I} \cong (B^X)^I$$

给出了想要的提升. □

同时, 对任意的连续映射 $f : X \rightarrow Y$, 可以找到分解

$$X \xrightarrow{\iota} Nf \xrightarrow{q} Y,$$

其中 $\iota : x \mapsto (x, \text{const}_{f(x)})$, $\text{const}_{f(x)}$ 是在点 $f(x)$ 上的常值路径, $q : (x, \gamma) \mapsto \gamma(1)$. 于是

$$q(\iota(x)) = q(x, \text{const}_{f(x)}) = f(x).$$

令 $\pi : Nf \rightarrow X$ 是自然的投影 $(x, \gamma) \mapsto x$, 那么 $\pi \circ \iota = \text{id}_X$, 且存在形变收缩

$$\begin{aligned}
 H : Nf \times I &\rightarrow Nf \\
 ((x, \gamma), t) &\mapsto (x, \gamma_t),
 \end{aligned}$$

其中 $\gamma_t(s) = \gamma((1-t)s)$, 这给出了 $\text{id}_{Nf} \simeq \iota \circ \pi$.

引理2.5. 如上讨论的映射 $q : Nf \rightarrow Y$ 是纤维.

Proof. 任意给定范畴 **Top** 中的交换图

$$\begin{array}{ccc}
 A & \xrightarrow{g} & Np \\
 i_0 \downarrow & \tilde{H} \nearrow & \downarrow q \\
 A \times I & \xrightarrow{H} & Y,
 \end{array}$$

我们需要构造同伦提升 \tilde{H} . 记 $g : a \mapsto (g_1(a), g_2(a))$ 和

$$\gamma_{(a,t)}(s) = \begin{cases} g_2(a)(s + st) & \text{if } 0 \leq s \leq \frac{1}{1+t} \\ H(a, s + st - 1) & \text{if } \frac{1}{1+t} \leq s \leq 1, \end{cases}$$

令

$$\tilde{H}(a, t) = (g_1(a), \gamma_{(a,t)}),$$

那么根据

$$q \circ \tilde{H}(a, t) = q(g_1(a), \gamma_{(a,t)})(1) = H(a, t)$$

可知 \tilde{H} 是所要的提升. □

这样，我们可以叙述第一个具体的模型结构的结果了：

定理2.1. 在范畴 \mathbf{Top} 上存在模型结构，满足

1. 弱等价是同伦等价，即映射 $f : X \rightarrow Y$ 满足存在 $g : Y \rightarrow X$ ，使得 $f \circ g \simeq \text{id}_Y, g \circ f \simeq \text{id}_X$ ，
2. 纤维是所有的Hurewicz纤维，
3. 余纤维是所有的Hurewicz余纤维.

Proof.

□

2.2.2 小对象论断

设 κ 是一个regular cardinal，若集合 S 的cardinality小于 κ ，则称 S 是 κ 小的(κ -small).对于小范畴 \mathcal{C} ，若所有对象的全体组成的集合是 κ 小的，则称 \mathcal{C} 是 κ 小的.

但是，我们需要讨论到不是 κ 小的范畴，甚至不是小的范畴，逻辑上解决这个问题的工具叫做Grothendieck宇宙(Grothendieck universe)，但对它的讨论并不是必须的，我们始终假定存在一个强不可得的(strongly inaccessible)cardinality.

定义. 给定regular cardinality κ 和偏序集 J ，若对于任意 κ 小的 J 的子集 J_0 ，集合 J 都包含 J_0 的一个上界，则称 J 是 κ 可滤的(κ -filtered).

给定范畴 \mathcal{C} 满足其中的所有小的余极限都存在，且 J 是一个 κ 可滤的偏序集， A 是 \mathcal{C} 中的对象.设 $D : J \rightarrow \mathcal{C}$ 是图， $Y = \text{colim}_J D$ 是图的余极限，那么存在诱导的态射

$$\varphi : \text{colim}_J \text{hom}_{\mathcal{C}}(X, D(j)) \rightarrow \text{hom}_{\mathcal{C}}(X, \text{colim}_J D).$$

若对象 A 满足对任意的 κ 可滤的偏序集 J 和任意 J 给出的图 $D : J \rightarrow \mathcal{C}$ ，如上的态射 φ 都是双射，则称对象 A 是 κ 紧的(κ -compact).若存在regular cardinality κ 使得 A 是 κ 紧的，则称对象 A 是小的(small).

定义. 给定范畴 \mathcal{C} 满足

1. \mathcal{C} 中所有小的余极限都存在，
2. 存在 \mathcal{C} 中对象组成的集合 S ，使得 \mathcal{C} 中所有的对象都是 S 中对象的余极限，
3. \mathcal{C} 中的对象都是小的，
4. 对任意对象 $A, B \in \text{ob } \mathcal{C}$ ， $\text{hom}_{\mathcal{C}}(A, B)$ 是小的，

则称范畴 \mathcal{C} 是可表的(presentable).

Quillen在研究代数拓扑时遇到了一类问题, 它们统称为提升问题. 给定范畴 C 中的一族态射 S , 记 ${}^\square S$ 为所有相对于 S 有左提升性质的 C 中态射的全体, 记 S^\square 为所有相对于 S 有右提升性质的 C 中态射的全体. 显然 $S \subseteq ({}^\square S)^\square$, 并且 $({}^\square S)^\square$ 满足

定义. 给定范畴 C 使得 C 中所有小的余极限都存在, S 是 C 中的一族态射, 满足

1. S 关于推出是封闭的,
2. S 关于超限复合是封闭的,
3. S 关于取收缩是封闭的,

则称 S 是弱饱和的(weakly saturated).

定理2.2 (Small object argument). 给定可表的范畴 C 和一族 C 中的态射 $A_0 = \{f_i : A_i \rightarrow B_i\}_{i \in I}$, 对自然数 n , 记 NC_n 是所有从线性范畴 $\{n \rightarrow n-1 \rightarrow \cdots \rightarrow 1 \rightarrow 0\}$ 到 C 的函子组成的范畴. 那么存在函子

$$F : NC_1 \rightarrow NC_2,$$

满足

1. F 将态射 $h : X \rightarrow Z$ 映到图

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{h} & Z \\ & \searrow f & \nearrow g \\ & Y, & \end{array}$$

其中 f 在 A_0 生成的弱饱和态射族中, g 对 A_0 有右提升性质.

Proof.

□

2.2.3 第二个模型结构

除去第一小节介绍的模型结构, \mathbf{Top} 上还存在其他的模型结构, 一般而言这个模型结构

定理2.3. 在范畴 \mathbf{Top} 上存在模型结构, 满足

1. 弱等价是弱同伦等价, 即映射 $f : X \rightarrow Y$ 满足诱导的 $\pi_i(f) : \pi_i(X) \rightarrow \pi_i(Y)$ 对所有的 i 都是同构,
2. 纤维是所有的Serre纤维,
3. 余纤维是胞腔粘贴映射的收缩.

在这个模型结构中，所有的拓扑空间都是纤维对象，更重要的，它强调了CW复形的特殊地位：余纤维对象恰是CW复形的收缩。

Proof.

□

2.3 模型范畴的定义与性质II

这一节我们将继续探索模型范畴的一般性质，在之前一节例子中这些都有良好的拓扑含义。

2.3.1 封闭性

更准确地讲，上一节定义的模型范畴是闭模型范畴(closed model category)，它在下述意义下是闭的，即零调纤维（对应的零调余纤维）和余纤维（对应的纤维）相互决定：

引理2.6. 设 \mathcal{M} 是模型范畴，那么如下论断成立：

1. 映射 $i : A \rightarrow X$ 是余纤维当且仅当它对所有的零调纤维满足左提升性质.或者形式化地写为 $\text{Cof} = \text{LLP}(\text{Fib} \cap W)$ ，其中LLP表示满足所有左提升性质 (*left lifting property*) 的态射全体.
2. 映射 $i : A \rightarrow X$ 是零调余纤维当且仅当它对所有的纤维满足左提升性质.
3. 映射 $p : E \rightarrow B$ 是纤维当且仅当它对所有的零调余纤维满足右提升性质.
4. 映射 $p : E \rightarrow B$ 是零调纤维当且仅当它对所有的余纤维满足右提升性质.

Proof. 1. 设 $i : A \hookrightarrow X$ 是给定的余纤维， $p : E \xrightarrow{\sim} B$ 是给定的零调纤维，且有交换图

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{g} & E \\ i \downarrow & & \downarrow p \\ X & \xrightarrow{f} & B, \end{array}$$

那么自然由定义，存在 $h : X \dashrightarrow E$ 与图交换，因此 $\text{Cof} \subseteq \text{LLP}(\text{Fib} \cap W)$.反过来，若给定映射 $i : A \rightarrow X$ ，满足对任意零调纤维有左提升性质，那么有交换图

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{j} & E \\ i \downarrow & \nearrow k & \downarrow p \\ X & \xrightarrow{\text{id}} & X, \end{array}$$

其中 $A \hookrightarrow E \twoheadrightarrow B$ 是 $A \rightarrow X$ 按照MC5进行的分解，且 p 是零调纤维，这意味着 i 是收缩

$$\begin{array}{ccccc} A & \xrightarrow{\text{id}} & A & \xrightarrow{\text{id}} & A \\ \downarrow i & & \downarrow j & & \downarrow i \\ X & \xrightarrow{k} & E & \xrightarrow{p} & X, \end{array}$$

于是根据MC3), i 也是余纤维.

2. 仿照上一部分的定义, 其中分解 $A \hookrightarrow E \twoheadrightarrow B$ 要求 $j: A \hookrightarrow E$ 是零调余纤维即可. 剩余部分的证明可以完全对偶地完成. \square

引理2.6自然地推出

命题2.4. 在一个模型范畴中,

1. 余纤维和零调余纤维都对复合和推出封闭, 特别地, 任意同构都是余纤维.
2. 纤维和零调纤维都对复合和拉回封闭, 特别地, 任意同构都是纤维.

Proof. 1. 设 $i: A \rightarrow X$ 是纤维, $f: A \rightarrow Y$ 是任意态射, 于是有交换图

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{f} & Y \\ i \downarrow & & \downarrow \\ X & \longrightarrow & X \amalg_A Y, \end{array}$$

根据引理2.6, 只需要证明 $Y \rightarrow X \amalg_A Y$ 对所有的零调纤维具有左提升性质即可. 任给定的交换图

$$\begin{array}{ccccc} A & \xrightarrow{f} & Y & \longrightarrow & E \\ i \downarrow & & \downarrow \tilde{h} & \nearrow & \downarrow p \\ X & \longrightarrow & X \amalg_A Y & \longrightarrow & B, \end{array}$$

满足 $p: E \twoheadrightarrow B$ 是零调余纤维, 于是存在提升 $\tilde{h}: X \rightarrow E$ 与图交换. 注意到 $X \amalg_A Y$ 是推出, 因此根据泛性质存在 $h: X \amalg_A Y \rightarrow E$, 这就是所要的提升.

给定余纤维 $i: A \rightarrow X, j: X \rightarrow Y$, 对任意的零调纤维 $E \twoheadrightarrow B$, 考虑交换图

$$\begin{array}{ccc} A & \longrightarrow & E \\ i \downarrow & \nearrow & \downarrow p \\ X & & \\ j \downarrow & \nearrow & \\ Y & \longrightarrow & B, \end{array}$$

由于 $i: A \rightarrow X$ 是余纤维, 因此存在对于 $A \rightarrow E$ 和 $X \rightarrow Y \rightarrow B$ 的提升 $X \dashrightarrow E$ 使得图交换, 再由于 $j: X \rightarrow Y$ 是余纤维, 存在对于 $X \dashrightarrow E$ 和 $Y \rightarrow B$ 的提升 $Y \dashrightarrow E$ 使得图交换, 因此证明了 $j \circ i$ 对 $p: E \twoheadrightarrow B$ 有左提升性质, 因此 $j \circ i$ 是余纤维.

其余部分的证明完全类似. \square

注意到以上命题中任意一条对弱等价都不成立. 但实际情况下有些模型范畴对弱等价也有好的推出和拉回的性质, 于是

定义. 给定模型范畴 \mathcal{M} , 若 \mathcal{M} 中的弱等价沿余纤维的推出也是弱等价, 则称 \mathcal{M} 是左正规的(left proper), 对偶地若 \mathcal{M} 中的弱等价沿纤维的拉回也是弱等价, 则称 \mathcal{M} 是右正规的(right proper). 若 \mathcal{M} 同时左右正规, 则称 \mathcal{M} 是正规的(proper).

回到一般的理论中, 事实上, Quillen最初对模型范畴的定义并不是这里的定义, 最开始的定义不包含MC3)三个态射族对取收缩的封闭性 (注意到这一条在封闭性的证明中起到核心的作用), 对应的最初的定义多了命题2.4及其对偶所述的条件, 根据前面的证明, 这是封闭性的推论, 因此为强调有时会称本章刚开始定义的模型范畴为闭模型范畴(closed model category). 虽然这样按Quillen最初定义的模型范畴更一般一点, 但通常我们见到的都是闭模型范畴, 在之后提到模型范畴时我们也指闭模型范畴.

练习2.3. 证明所有同构的全体满足6选2.

Proof.

□

练习2.4. 给定一族态射 $\{i_\lambda : A_\lambda \rightarrow X\}_{\lambda \in \Lambda}$ 且 $\coprod_{\lambda \in \Lambda} A_\lambda$ 存在, 求证 $\{i_\lambda : A_\lambda \rightarrow X\}_{\lambda \in \Lambda}$ 中的每个态射都是 (零调) 余纤维当且仅当诱导的

$$\coprod_{\lambda \in \Lambda} i_\lambda : \coprod_{\lambda \in \Lambda} A_\lambda \rightarrow X$$

是 (零调) 余纤维.

Proof. 由于后面内容使用到零调余纤维的情形, 我们这里证明这个结论, 余纤维的证明完全相同.

□

定义. 给定模型范畴 \mathcal{M} 和其中的对象 A , (MC5)说明典范态射 $\emptyset \rightarrow A$ 有分解 $\emptyset \hookrightarrow QA \xrightarrow{\sim} A$, 其中 $\emptyset \hookrightarrow QA$ 是余纤维, $QA \xrightarrow{\sim} A$ 是零调纤维, 称 QA 是 A 的余纤维替代(cofibrant replacement).

任给定 $f : X \rightarrow Y$, 我们可以找到 X, Y 的余纤维替代 QX, QY , 于是有交换图

$$\begin{array}{ccc} QX & & QY \\ \downarrow & & \downarrow \\ X & \xrightarrow{f} & Y, \end{array}$$

转化为

$$\begin{array}{ccccc} \emptyset & \xrightarrow{\quad} & & & QY \\ & \searrow & Qf & \nearrow & \downarrow \\ \emptyset & \xrightarrow{\sim} & QX & \xrightarrow{f} & X \xrightarrow{f} Y \end{array}$$

后根据(MC4), 存在 $Qf : QX \dashrightarrow QY$ 使得图是交换的, 称 Qf (也记为 \tilde{f}) 是 f 的余纤维提升(cofibrant lifting).

对偶地, 对任意 \mathcal{M} 中的对象 X , 典范态射 $X \rightarrow \{*\}$ 有分解 $X \xrightarrow{\sim} RX \rightarrow \{*\}$, 其中 $X \xrightarrow{\sim} RX$ 是零调余纤维, $RX \rightarrow \{*\}$ 是纤维, RX 称为 X 的纤维替代, 且任意态射 $f : X \rightarrow Y$ 也有纤维提升 $Rf : RX \dashrightarrow RY$

$$\begin{array}{ccccc}
X & \longrightarrow & Y & \longrightarrow & RY \\
\downarrow \sim & & \nearrow Rf & & \downarrow \\
RX & \longrightarrow & & & \{*\}.
\end{array}$$

练习2.5. 若模型范畴 \mathcal{M} 中的对象 X 是纤维对象, 那么它的余纤维替代 QX 同时是纤维对象和余纤维对象.

2.3.2 同伦与同伦等价

我们建立模型范畴的语言就是为了讨论同伦关系, 因此在模型范畴中探讨合适的同伦的定义是必要的, 这里的定义与 \mathbf{Top} 中的同伦基本是相同的, 但一般的模型范畴中同伦分左右, 而在 \mathbf{Top} 中左右同伦是相同的.

定义. 设 \mathcal{M} 是模型范畴, A 是 \mathcal{M} 中的对象. 对余对角线 $\nabla : A \amalg A \rightarrow A$, CM5说明它可以分解为

$$\begin{array}{ccc}
A \amalg A & & \\
i_0 + i_1 \downarrow & \searrow \nabla & \\
A \times I & \xrightarrow{\sim} & A,
\end{array}$$

其中 $i_0 + i_1 : A \amalg A \rightarrow A \times I$ 是余纤维, $A \times I \rightarrow A$ 是零调纤维, 称 $A \times I$ 是对象 A 的柱对象(cylinder object). 给定两个态射 $f, g : A \rightrightarrows B$, 若存在 A 的柱对象到 B 的态射 H 满足图

$$\begin{array}{ccc}
A \amalg A & & \\
i_0 + i_1 \downarrow & \searrow f+g & \\
A \times I & \xrightarrow{H} & B,
\end{array}$$

交换, 则称 f 左同伦于(left homotopic to) g , 记为 $f \simeq_l g$, $H : f \Rightarrow g$ 是 f, g 的左同伦(left homotopy), 意味着 $\iota_0 \circ (i_0 + i_1) \circ H = f, \iota_1 \circ (i_0 + i_1) \circ H = g$.

由于MC5)中保证的分解并不一定具有函子性, 因此也不能保证柱对象的存在具有函子性. 注意在以上定义中, $A \times I$ 并不表示两个对象的积, $i_0 + i_1$ 也不表示两个态射的和, 它们只是存在的某个对象和态射的记号. 事实上, 通常我们称这样的柱对象是非常好的(very good cylinder object), 之后会有在非模型范畴中关于柱对象的讨论, 相应地定义也会有一定的弱化

1. 若余对角线 $\nabla : A \amalg A \rightarrow A$ 有分解 $A \amalg A \xrightarrow{i_0 + i_1} A \times I \rightarrow A$, 满足 $i_0 + i_1$ 是余纤维且 $A \times I \rightarrow A$ 是弱等价, 则称 $A \times I$ 是好的柱对象(good cylinder object),
2. 若分解 $A \amalg A \xrightarrow{i_0 + i_1} A \times I \rightarrow A$ 只满足 $A \times I \rightarrow A$ 是弱等价, 则称 $A \times I$ 是柱对象(cylinder object).

同样地, 如上定义的左同伦是非常好的左同伦, 这因为分解的对象 $A \times I$ 是非常好的柱对象; 当分解的对象 $A \times I$ 是好的柱对象或者柱对象时, 相应的左同伦被称为好的左同伦和左同伦. 我们始终用记号 $f \simeq_l g$ 表示态射 f 与 g 左同伦.

按定义, 存在交换图

$$\begin{array}{ccc}
\emptyset & \longrightarrow & A \\
\downarrow & & \downarrow \iota_0 \\
A & \xrightarrow{\iota_1} & A \amalg A,
\end{array}$$

与 $i_0 + i_1$ 的复合给出了 $A \rightrightarrows A \amalg A \rightarrow A \times I$, 两个态射分别记为 i_0, i_1 .

引理2.7. 若 A 是模型范畴 \mathcal{M} 中的余纤维对象, $A \times I$ 是一个好的柱对象, 那么 $i_0, i_1 : A \rightarrow A \times I$ 是零调余纤维.

Proof. 根据假设, 交换图中

$$\begin{array}{ccc} \emptyset & \longrightarrow & A \\ \downarrow & & \downarrow \iota_0 \\ A & \xrightarrow{\iota_1} & A \amalg A \end{array}$$

$\emptyset \rightarrow A$ 是余纤维, 上图中的 ι_0, ι_1 都是余纤维, 而 $A \times I$ 是好的柱对象, $i_0 + i_1$ 也是余纤维, 于是 $i_0, i_1 : A \rightarrow A \times I$ 是余纤维的复合, 因此也是余纤维.

另一方面, 复合 $A \xrightarrow{\iota_0} A \amalg A \xrightarrow{i_0+i_1} A \times I \rightarrow A = A \xrightarrow{\iota_0} A \amalg A \xrightarrow{\nabla} A = \text{id}$, 注意到 $A \times I \rightarrow A$ 是弱等价, 由MC2), $i_0 : A \rightarrow A \times I$ 是零调余纤维. 对 i_1 的证明完全相同. \square

引理直接说明了若 $f \simeq_l g$, 那么 f 是弱等价当且仅当 g 是弱等价. 这是因为, $H \circ i_0 : A \rightarrow A \amalg A \rightarrow A \times I = A \rightarrow A \amalg A \rightarrow B = f$, 同理 $H \circ i_1 = g$, 而引理说明 i_0, i_1 都是弱等价, 因此按照MC2), f 是弱等价当且仅当 H 是弱等价, 当且仅当 g 是弱等价.

引理2.8. 若态射 $f \simeq_l g : A \rightarrow X$, 那么存在好的左同伦 $H : f \Rightarrow g$. 如果 X 还是纤维对象, 那么存在非常好的左同伦 $H : f \Rightarrow g$.

Proof. 设 $H : A \times I \rightarrow X$ 是左同伦 $f \simeq_l g$, 根据MC5)态射 $A \amalg A \xrightarrow{i_0+i_1} A \times I$ 有分解

$$\begin{array}{ccc} A \amalg A & & \\ j_0+j_1 \downarrow & \searrow i_0+i_1 & \searrow \nabla \\ A \times J & \xrightarrow{\sim} & A \times I \xrightarrow{\sim} A, \end{array}$$

其中 $j_0 + j_1$ 是余纤维, 因此 $A \times J$ 是一个好的柱对象 ($A \times I \rightarrow A$ 不一定是纤维), 因此

$$f + g = H \circ (i_0 + i_1) = H \circ (A \times J \rightarrow A \times I) \circ (j_0 + j_1),$$

即 $H \circ (A \times J \rightarrow A \times I)$ 是一个好的同伦.

再假设 X 是纤维对象, 根据前一部分的证明假定 $H : f \Rightarrow g$ 是一个好的左同伦 $A \times I \rightarrow X$. 由MC5), 存在 $A \times I \rightarrow A$ 的分解

$$\begin{array}{ccc} A \amalg A & & \\ i_0+i_1 \downarrow & \searrow \nabla & \\ A \times I & \xrightarrow{\sim} & A, \\ j \downarrow & \nearrow \sim & \\ A \times J & & \end{array}$$

其中 $jA \times I \rightarrow A \times J$ 是余纤维, $A \times J \rightarrow A$ 是零调纤维, MC2) 说明 j 也是弱等价. 记 $j_0 + j_1 = j \circ (i_0 + i_1)$, 因此 $A \times I$ 是一个很好的柱对象. 考虑交换图

$$\begin{array}{ccc} A \times I & \xrightarrow{H} & X \\ \downarrow j & \nearrow \text{dashed} & \downarrow \\ A \times J & \longrightarrow & \{*\}, \end{array}$$

MC4) 说明存在提升 $A \times J \dashrightarrow X$, 这即是我们想要的同伦. □

引理的前半部分说明存在左同伦 $H : f \Rightarrow g$ 当且仅当存在好的左同伦 $H' : f \Rightarrow g$, 左同伦关系完全可以用好的左同伦的存在性来定义.

命题2.5. 给定 \mathcal{M} 中的纤维对象 X 和 $f \simeq_l g : B \rightarrow X$, $h : A \rightarrow B$ 是任意态射, 那么 $f \circ h \simeq_l g \circ h$.

Proof. 假设 $H : B \times J \rightarrow X$ 是非常好的左同伦 $f \Rightarrow g$, 其中 $B \times J$ 是一个非常好的柱对象. 取 A 的一个好的柱对象 $A \times I$, 那么有交换图

$$\begin{array}{ccccc} A \amalg A & \xrightarrow{h \amalg h} & B \amalg B & \longrightarrow & B \times J \\ \downarrow & & & \nearrow \text{dashed} & \downarrow \\ A \times I & \longrightarrow & A & \xrightarrow{h} & B, \end{array}$$

根据 MC4) 存在提升 $K : A \times I \dashrightarrow B \times J$, 于是交换性说明态射 $H \circ K : A \times I \rightarrow B \times J \rightarrow X$ 满足

$$(H \circ K) \circ i_0 = H \circ j_0 = f, (H \circ K) \circ i_1 = H \circ j_1 = g,$$

是所要的同伦. □

命题2.6. 若 A 是 \mathcal{M} 中的余纤维对象, 那么 \simeq_l 是 $\text{hom}_{\mathcal{M}}(A, X)$ 上的等价关系.

Proof. 自反性: 由于 A 是自身的柱对象, 于是交换图

$$\begin{array}{ccc} A \amalg A & & \\ \nabla \downarrow & \searrow f & \\ A & \xrightarrow{f} & B \end{array}$$

给出了想要的同伦.

对称性: 考虑 $\iota_1 + \iota_0 : A \amalg A \rightarrow A \amalg A$ (即换序态射), 注意到 $(f + g)(\iota_1 + \iota_0) = g + f$, 这说明若 $f \simeq_l g$ 那么 $g \simeq_l f$.

传递性: 假设 $f \simeq_l g, g \simeq_l h$, 取定好的同伦 $H : A \times I \rightarrow X, K : A \times J \rightarrow X$ (即 $H : f \Rightarrow g$ 和 $K : g \Rightarrow h$), 考虑推出图

$$\begin{array}{ccc}
 A & \xrightarrow{i_1} & A \times I \\
 j_0 \downarrow & & \downarrow i \\
 A \times J & \xrightarrow{j} & A \times IJ
 \end{array}$$

(选择 i_1, j_0 的原因是二者与相应同伦的复合都是 g)，由引理2.7， i_1, j_0 都是零调余纤维，再根据命题2.4， $A \rightarrow A \times IJ$ 是零调余纤维.另一方面， $A \xrightarrow{i_1} A \times I \xrightarrow{\sim} A = A \xrightarrow{j_0} A \times I \xrightarrow{\sim} A = \text{id}_A$ ，根据推出的泛性质

$$\begin{array}{ccc}
 A & \xrightarrow{i_1} & A \times I \\
 j_0 \downarrow & & \downarrow i \\
 A \times J & \xrightarrow{j} & A \times IJ
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \nearrow \sim \\
 \searrow \sim
 \end{array}
 \rightarrow A$$

存在 $A \times IJ \twoheadrightarrow A$ ，由MC2)这是一个弱等价.同时，习题2.4说明 $i_1 + j_0 : A \amalg A \rightarrow A \times IJ$ 是零调余纤维，因此 $A \times IJ$ 是一个好的柱对象.再次根据推出的泛性质

$$\begin{array}{ccc}
 A & \xrightarrow{i_1} & A \times I \\
 j_0 \downarrow & & \downarrow i \\
 A \times J & \xrightarrow{j} & A \times IJ
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \nearrow H \\
 \searrow K
 \end{array}
 \rightarrow X$$

存在由同伦 H, K 诱导的态射 $HK : A \times IJ \rightarrow X$ ，注意到

$$HK \circ (i \circ i_0) = (HK \circ i) \circ i_0 = H \circ i_0 = f$$

且

$$HK \circ (j \circ j_1) = (HK \circ j) \circ j_1 = H \circ j_1 = h,$$

这就是我们想要的同伦 $HK : f \Rightarrow h$. □

以上的结果提示，当 A 是余纤维对象的时候，可以定义商集 $[A, X]_l := \text{hom}_{\mathcal{M}}(A, X) / \simeq_l$ (或记为 $\pi^l(A, X)$)，它是 $\text{hom}_{\mathcal{M}}(A, X)$ 中所有等价类的全体.当 A 不是余纤维对象的时候，也可以定义 $[A, X]_l$ 是由左同伦生成的等价类的全体.

引理2.9. 设模型范畴 \mathcal{M} 中的余纤维对象 A ， $p : E \rightarrow B$ 是零调纤维，那么

$$\begin{aligned}
 p_* : [A, E]_l &\rightarrow [A, B]_l \\
 [f] &\mapsto [p \circ f]
 \end{aligned}$$

给出了集合间的双射.

Proof. 首先验证映射是良定义的. 给定 $f, g : A \rightarrow E$, $H : f \Rightarrow g$ 是左同伦 $A \times I \rightarrow E$, 那么 $p \circ H : p \circ f \Rightarrow p \circ g$ 是左同伦 $A \times I \rightarrow E \rightarrow B$, 因此 $[p \circ f] = [p \circ g]$.

接下来验证 p_* 是满射. 取定 $[h] \in [A, B]_l$, 那么有交换图

$$\begin{array}{ccc} \emptyset & \longrightarrow & E \\ \downarrow & & \downarrow p \\ A & \xrightarrow{h} & B, \end{array}$$

MC4) 说明存在提升 $f : A \rightarrow E$, 交换性说明 $p \circ f = h$, 即 $[h] = [p \circ f] = p_*([f])$.

最后说明 p_* 是单射. 假设 $f, g \in \text{hom}_{\mathcal{M}}(A, E)$ 满足 $p_*(f) = p_*(g)$, 于是可以找到 (好的) 左同伦 $H : p \circ f \Rightarrow p \circ g$, 于是有交换图

$$\begin{array}{ccc} A \amalg A & \xrightarrow{f+g} & E \\ \downarrow & \nearrow & \downarrow p \\ A \times I & \xrightarrow{H} & B, \end{array}$$

根据 MC4) 存在提升 $K : A \times I \dashrightarrow E$, 这即是要找到同伦 $K : f \Rightarrow g$. □

命题 2.7. 给定模型范畴 \mathcal{M} 中纤维对象 X , 那么 \mathcal{M} 中的复合诱导了映射

$$\begin{aligned} [A, B]_l \times [B, X]_l &\rightarrow [A, X]_l \\ ([f], [g]) &\mapsto [g \circ f]. \end{aligned}$$

Proof. 我们这里并未假定 B 是余纤维的, 因此 $[B, X]_l$ 中的等价关系并不完全由左同伦给出. 但是, 只需要证明若 $f \simeq_l h : A \rightarrow B$ 且 $g \simeq_l k : B \rightarrow X$, 那么 $g \circ f$ 和 $k \circ h$ 是同一等价类即可. 由命题 2.5, $g \circ h \simeq_l k \circ h$. 另一方面, 设 $H : f \Rightarrow h$ 是给定的左同伦, 那么 $g \circ H : A \times I \rightarrow B \rightarrow X$ 给出了同伦 $g \circ h \simeq_l g \circ f$. □

对偶地

定义. 设 \mathcal{M} 是模型范畴, B 是 \mathcal{M} 中的对象. 于是对角线 $\Delta : B \rightarrow B \amalg B$ 可以分解为

$$\begin{array}{ccc} & & B^I \\ & \nearrow \sim & \downarrow (p_0, p_1) \\ B & \xrightarrow{\Delta} & B \amalg B, \end{array}$$

其中 $B \rightarrow B^I$ 是零调余纤维, $(p_0, p_1) : B^I \rightarrow B \amalg B$ 是纤维, 称 B^I 是对象 B 的路径对象 (path object). 给定两个态射 $f, g : A \rightrightarrows B$, 若存在 A 到 B 的路径对象的态射 H 满足图

$$\begin{array}{ccc} & & B^I \\ & \nearrow H & \downarrow (p_0, p_1) \\ A & \xrightarrow{(f, g)} & B \amalg B, \end{array}$$

交换, 则称 f 右同伦于 g , H 是 f, g 的右同伦 (right homotopy).

相应地路径对象也有对偶的性质, 也有好的和非常好的右同伦, 也可以定义 $[A, X]_r$. 我们这里不再罗列, 它们的证明也与之之前关于柱对象和左同伦的证明相同. 然而, 这里我们更愿意讨论左同伦和右同伦之间的关系:

命题2.8. 给定模型范畴 \mathcal{M} 中的态射 $f, g : A \rightarrow X$, 那么

1. 若 A 是余纤维对象且 $f \simeq_l g$, 那么 $f \simeq_r g$,
2. 若 A 是纤维对象且 $f \simeq_r g$, 那么 $f \simeq_l g$.

Proof. 由于两个结论互为对偶, 我们这里只证明1. 设 $H : A \times I \rightarrow X$ 是给定的左同伦, 且 $A \times I$ 是一个好的柱对象满足复合 $A \amalg A \xrightarrow{i_0+i_1} A \times I \xrightarrow{j} A$ 是余对角态射 $\nabla : A \amalg A \rightarrow A$. 于是此时 $i_0 : A \rightarrow A \times I$ 是零调余纤维. 取定 X 的一个好的路径对象 X^I , 记 $\Delta : X \rightarrow X \amalg X$ 的分解为 $X \xrightarrow{q} X^I \xrightarrow{(p_0, p_1)} X \amalg X$, 于是MC4)说明交换图

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{q \circ f} & X^I \\ i_0 \downarrow & \nearrow K & \downarrow (p_0, p_1) \\ A \times I & \xrightarrow{(f \circ j, H)} & X \amalg X \end{array}$$

存在提升 $K : A \times I \dashrightarrow X^I$, 这样只要说明 $K \circ i_1$ 是需要的右同伦即可. 注意到

$$p_0 \circ (K \circ i_1) = (p_0 \circ K) \circ i_0 = f \circ j \circ i_1 = f$$

且

$$p_1 \circ (K \circ i_1) = (p_1 \circ K) \circ i_1 = H \circ i_1 = g,$$

这完成了验证. □

通常情况下, 同一组态射的不同同伦可能由不同的柱对象给出, 但命题2.8事实上说明

推论2.8.1. 命题2.8中的结论等价于

特别地, 当模型范畴 \mathcal{M} 中的对象 X, Y 同时都是纤维对象和余纤维对象的时候, 左右同伦都给出 $\text{hom}_{\mathcal{M}}(X, Y)$ 上的等价关系, 且 $f, g : X \rightarrow Y$ 的左同伦等价等价于右同伦等价. 此时, 记同伦等价 $f \simeq g$, $[X, Y] := \text{hom}_{\mathcal{M}}(X, Y) / \simeq$.

例2.4. 在范畴 \mathbf{Top} 中,

下面的定理可以看作是抽象版本的Whitehead定理, 在范畴 \mathbf{Top} 中恰是经典的Whitehead定理:

定理2.9. 设 $f : A \rightarrow B$ 是模型范畴 \mathcal{M} 中的态射, 且 A, B 同时是纤维对象和余纤维对象, 那么 f 是弱等价当且仅当 f 存在同伦逆, 即存在 $g : B \rightarrow A$ 满足 $g \circ f \simeq \text{id}_A, f \circ g \simeq \text{id}_B$.

Proof. 首先假设 $f : A \rightarrow B$ 是弱等价. 于是MC5)说明存在分解

$$A \xrightarrow{i} X \xrightarrow{p} B,$$

其中 $i : A \rightarrow X$ 是零调余纤维, $p : X \rightarrow B$ 是纤维, 那么MC2)说明 p 也是弱等价. 由于 A 是纤维对象, 交换图

$$\begin{array}{ccc}
A & \xrightarrow{\text{id}} & A \\
i \downarrow & \nearrow r & \downarrow \\
X & \longrightarrow & \{*\}
\end{array}$$

存在提升 $r : X \dashrightarrow A$ 满足 $r \circ i = \text{id}_A$. 由引理2.9的对偶, i 给出了双射

$$\begin{aligned}
i^* : [X, X]_r &\rightarrow [A, X]_r \\
[g] &\mapsto [g \circ i],
\end{aligned}$$

同时 $i^*([i \circ r]) = [i \circ r \circ i] = [i]$, 于是双射说明 $[i \circ r] = [\text{id}]$. 对偶地由于 B 是余纤维对象,

$$\begin{array}{ccc}
\emptyset & \longrightarrow & X \\
\downarrow & \nearrow s & \downarrow p \\
B & \xrightarrow{\text{id}} & B,
\end{array}$$

存在提升 $s : B \dashrightarrow X$ 满足 $p \circ s = \text{id}_B$. 由引理2.9, p 给出了双射

$$\begin{aligned}
p_* : [B, X]_l &\rightarrow [B, B]_l \\
[f] &\mapsto [p \circ f],
\end{aligned}$$

同时 $p_*([s \circ p]) = [p \circ s \circ p] = [p]$, 于是双射说明 $[s \circ p] = [\text{id}_X]$. 这样, 取 $g : B \rightarrow A = r \circ s$, 那么

$$g \circ f = (r \circ s) \circ (p \circ i) = r \circ (s \circ p) \circ i \simeq r \circ i = \text{id}_A$$

且

$$f \circ g = (p \circ i) \circ (r \circ s) = p \circ (i \circ r) \circ s \simeq p \circ s = \text{id}_B$$

于是 g 是 f 的同伦逆.

另一方面, 假定 $f : A \rightarrow B$ 存在同伦逆 $g : B \rightarrow A$, $H : A \times I \rightarrow B$ 是 (左) 同伦 $f \circ g \simeq_l \text{id}_B$. 再次由MC5)说明存在分解

$$\begin{array}{ccccc}
\emptyset & & & & \\
\downarrow & \searrow & & & \\
A & \xrightarrow{i} & X & \xrightarrow{p} & B \\
& & \searrow & \downarrow & \\
& & & \{*\} &
\end{array}$$

其中 $i : A \rightarrow X$ 是零调余纤维, $p : X \rightarrow B$ 是纤维, 那么命题2.4说明 X 也同时是纤维对象和余纤维对象, 并且根据MC2)只需要说明 p 是弱等价. 根据MC4)交换图

$$\begin{array}{ccc}
B & \xrightarrow{i \circ g} & X \\
i_0 \downarrow & \nearrow K & \downarrow p \\
B \times I & \xrightarrow{H} & B
\end{array}$$

存在提升 $K : B \times I \rightarrow X$. 令 $s := K \circ i_1 : B \rightarrow B \times I \rightarrow X$, 那么 $p \circ s = p \circ K \circ i_1 = H \circ i_1 = \text{id}_B$. 注意到 $i : A \rightarrow X$ 是零调余纤维, 前面的讨论说明它有同伦逆 $r : X \rightarrow A$, 因此

$$p = p \circ \text{id}_X \simeq p \circ i \circ r = f \circ r,$$

同时 $K : B \times I \rightarrow X$ 给出了同伦 $i \circ g \simeq_l s$, 合起来

$$s \circ p \simeq i \circ g \circ p \simeq i \circ g \circ f \circ r \simeq i \circ \text{id}_A \circ r \simeq \text{id}_X.$$

根据引理2.7之后的讨论, $s \circ p$ 是一个弱等价. 进而交换图

$$\begin{array}{ccccc} X & \xrightarrow{\text{id}} & X & \xrightarrow{\text{id}} & X \\ \downarrow p & & \downarrow s \circ p & & \downarrow p \\ B & \xrightarrow{s} & X & \xrightarrow{p} & B \end{array}$$

说明 p 是 $s \circ p$ 的收缩, 因此 p 也是弱等价. □

2.3.3 Quillen对

引理2.10. 给定模型范畴 \mathcal{M}, \mathcal{N} 和伴随函子对

$$F : \mathcal{M} \rightleftarrows \mathcal{N} : G,$$

则如下条件等价:

1. 函子 F 将 \mathcal{M} 中的余纤维映为 \mathcal{N} 中的余纤维, 将 \mathcal{M} 中的零调余纤维映为 \mathcal{N} 中的零调余纤维;
2. 函子 G 将 \mathcal{N} 中的纤维映为 \mathcal{M} 中的纤维, 将 \mathcal{N} 中的零调纤维映为 \mathcal{M} 中的零调纤维;
3. 函子 F 将 \mathcal{M} 中的余纤维映为 \mathcal{N} 中的余纤维, G 将 \mathcal{N} 中的纤维映为 \mathcal{M} 中的纤维.

Proof. □

定义. 设 \mathcal{M}, \mathcal{N} 是模型范畴, 若伴随函子对

$$F : \mathcal{M} \rightleftarrows \mathcal{N} : G$$

满足引理2.10中的任意条件, 则称 (F, G) 是Quillen对(Quillen pair).

引理2.11. 给定Quillen对 $F : \mathcal{M} \rightleftarrows \mathcal{N} : G$, 那么若 $f : A \rightarrow B$ 是 \mathcal{M} 中余纤维对象之间的弱等价, 那么 $F(f)$ 是 \mathcal{N} 中的弱等价, 对偶地若 $g : X \rightarrow Y$ 是 \mathcal{N} 中余纤维对象之间的弱等价, 那么 $G(g)$ 是 \mathcal{M} 中的弱等价.

Proof. □

例2.5. 考虑函子对

$$|-| : \mathbf{sSet} \rightleftarrows \mathbf{Top} : S$$

定义. 给定模型范畴 \mathcal{M}, \mathcal{N} 和伴随函子对

$$F : \mathcal{M} \rightleftarrows \mathcal{N} : G$$

是Quillen对, A 是 \mathcal{M} 中的余纤维对象, X 是 \mathcal{N} 中的纤维对象, 且 \mathcal{M} 中的态射

$$f^\# : A \rightarrow G(X)$$

是弱等价当且仅当它的伴随

$$f^\flat : F(A) \rightarrow X$$

是弱等价, 则称 (F, G) 是Quillen等价(Quillen equivalence).

2.4 链复形

任意给定一个Abel范畴 \mathcal{A} , 经典的同调代数给出了关于 $\mathbf{Com}_{\geq 0}(\mathcal{A})$ 的结果,

定理2.10. 在范畴 $\mathbf{Com}_{\geq 0}(\mathcal{A})$ 上存在(投射)模型结构满足

1. 弱等价定义为拟同构,
2. 余纤维 $\{i_n : X_n \rightarrow Y_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ 定义为对任意的 n , f_n 是单同态且余核是投射对象,
3. 纤维 $\{p_n : X_n \rightarrow Y_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ 定义为对任意的 n , f_n 是满同态.

例2.6. 我们考虑这个模型范畴的左同伦.

2.5 单纯集

定理2.11 (Quillen). 在范畴 \mathbf{sSet} 上存在模型范畴结构满足

1. 弱等价定义为Quillen弱等价,
2. Cof包含所有的单态射, 即每层都是单态射,
3. Fib包含所有的Kan纤维化.

注意到定理2.11所给的纤维对象恰好是Kan复形.

定理2.12. 定理2.11所给的模型结构是余纤维生成的.

定义.

定理2.13 (Joyal). 在范畴 \mathbf{sSet} 上存在模型范畴结构满足

1. 弱等价定义为 *Joyal* 弱等价,
2. Cof 包含所有的单态射, 即每层都是单态射,
3. Fib 包含所有的.

注意到定理2.13所给的纤维对象恰好是拟范畴.

2.6 同伦范畴和导出函子

2.6.1 同伦范畴

引理2.12. 模型范畴 \mathcal{M} 中态射 $f : X \rightarrow Y$ 的余纤维提升 $Qf : QX \rightarrow QY$ 左同伦下或者右同伦下只依赖于 f , 并且 Qf 是弱等价当且仅当 f 是弱等价. 若 Y 还是纤维对象, 则余纤维提升 $Qf : QX \rightarrow QY$ 左同伦下或者右同伦下只依赖于 f 的**同伦等价类**.

Proof. 考虑 Qf 的定义图

$$\begin{array}{ccc} \emptyset & \xrightarrow{\quad} & QY \\ \downarrow & \nearrow Qf & \downarrow p_Y \\ QX & \xrightarrow{p_X} X & \xrightarrow{f} Y, \end{array}$$

引理2.9说明 $p_Y : QY \rightarrow Y$ 诱导了双射

$$\begin{aligned} (p_Y)_* : [QX, QY]_l &\rightarrow [QX, Y]_l \\ [Qf] &\mapsto [p_Y \circ Qf] = [f \circ p_X], \end{aligned}$$

这意味着 $[Qf]$ 只依赖于 f . 由于 QX 是余纤维对象, 再根据命题2.8, Qf 的左同伦类是右同伦类, 于是同伦类仅依赖于 f .

弱等价这部分是MC2)的直接推论.最后根据命题2.7, 当 Y 是纤维对象的时候, $(p_Y)_*([Qf]) = [f \circ p_X] = [f] \cdot [p_X]$, 只取决于 $[f]$. \square

对偶地, 纤维替代所给出的纤维提升也是“同伦下唯一的”.

引理2.12说明 id_X 的提升 $Q\text{id}_X$ 左(右)同伦于 id_{QX} , 同样地考虑 $f: X \rightarrow Y, g: Y \rightarrow Z$, 那么有 $Q(g \circ f): QX \rightarrow QZ$ 和 $Qg \circ Qf: QX \rightarrow QY \rightarrow QZ$, 引理同样说明了 $Q(g \circ f) \simeq Qg \circ Qf$.

另一方面, 当取到 X 的余纤维替代 QX 后, 还可以进一步找到 QX 的纤维替代 RQX , 相应地有提升 RQf .值得注意的是, 不同的纤维替代和余纤维替代并不改变对应的提升:

引理2.13. 给定模型范畴 \mathcal{M} , 设 Q_1X 和 Q_2X 是 X 的余纤维替代, Q_1Y 和 Q_2Y 是 Y 的余纤维替代, Q_1Z 和 Q_2Z 是 Z 的余纤维替代, 那么存在 $t_X: Q_1X \rightarrow Q_2X$, 对任意 $f: X \rightarrow Y, g: Y \rightarrow Z$, 下图

$$\begin{array}{ccccc} Q_2X & \xrightarrow{Q_2f} & Q_2Y & \xrightarrow{Q_2g} & Q_2Z \\ \downarrow t_X & & \downarrow t_Y & & \downarrow t_Z \\ Q_1X & \xrightarrow{Q_1f} & Q_1Y & \xrightarrow{Q_1g} & Q_1Z \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ X & \xrightarrow{f} & Y & \xrightarrow{g} & Z \end{array}$$

交换, t_X 与 $Q_1X \rightarrow X$ 的复合恰好是 $Q_2X \rightarrow X$, 并且这诱导了双射

$$[Q_2X, Q_2Y]_l \rightarrow [Q_1X, Q_1Y]_l.$$

Proof. 考虑交换图

$$\begin{array}{ccc} \emptyset & \xrightarrow{\quad} & Q_2X \\ \downarrow & \nearrow t_X & \downarrow p_2 \\ Q_1X & \xrightarrow{p_1} X \xrightarrow{\text{id}_X} & X \end{array}$$

于是MC4)说明存在提升 $t_X: Q_1X \rightarrow Q_2X$, 且 t_X 与 $Q_1X \rightarrow X$ 的复合恰好是 $Q_2X \rightarrow X$.由于 p_1, p_2 同时都是零调余纤维, 根据MC2), t_X 是弱等价. \square

引理2.13和它的对偶说明给定模型范畴中的对象 X, Y , 集合 $[RQX, RQY]$ 不依赖于纤维替代和余纤维替代的选取, 并且不同选取之间的同构与复合是相容的, 因此余纤维替代和纤维替代的选择并不影响余纤维和纤维提升, 不影响同伦等价类及其复合, 因此当选定对象的余纤维和纤维提升后, 提升在同伦等价类下有比较好的函子性.在之后的讨论中, 给定对象 A, X , 我们用 QA 表示 A 的选定的余纤维提升, RX 表示 X 的选定的纤维提升.若 A 是余纤维对象, 取 $QA = A$, 对偶地若 X 是纤维对象取 $RX = X$, 并且 $\text{Rid}_A = \text{id}_{RA}, Q\text{id}_X = \text{id}_{QX}$.

定义. 给定模型范畴 \mathcal{M} , 它对应的同伦范畴(homotopy category) $\text{Ho } \mathcal{M}$ 满足

1. $\text{ob}(\text{Ho } \mathcal{M}) = \text{ob } \mathcal{M}$,

$$2. \operatorname{hom}_{\operatorname{Ho} \mathcal{M}}(X, Y) = [RQX, RQY],$$

3. 复合由 \mathcal{M} 中的复合诱导:

$$\begin{aligned} [Y, Z] \times [X, Y] &\rightarrow [X, Z] \\ ([g], [f]) &\mapsto [g \circ f]. \end{aligned}$$

引理2.13说明如此定义的 $\operatorname{hom}_{\operatorname{Ho} \mathcal{M}}(X, Y)$ 与余纤维替代和纤维替代的选取无关, 命题2.7说明这是一个范畴. 同伦范畴的构造事实上使我们可以非常方便地讨论原来模型范畴中的弱等价:

命题2.14. 给定模型范畴 \mathcal{M} , 存在自然的函子 $\gamma: \mathcal{M} \rightarrow \operatorname{Ho} \mathcal{M}$, 满足任意态射 $f: A \rightarrow B$ 是弱等价当且仅当 $\gamma(f)$ 是 $\operatorname{Ho} \mathcal{M}$ 中的同构.

Proof. 如下定义

$$\begin{aligned} \gamma: \mathcal{M} &\rightarrow \operatorname{Ho} \mathcal{M} \\ X &\mapsto X \\ (f: X \rightarrow Y) &\mapsto [RQf] \in [RQX, RQY], \end{aligned}$$

我们需要验证这是一个函子. 按照前一段关于替代选取的讨论, $\gamma(\operatorname{id}_X) = \operatorname{id}_{\gamma(X)}$,

若 $f: X \rightarrow Y$ 是 \mathcal{M} 中的弱等价, 那么引理2.12说明 $RQf: RQX \rightarrow RQY$ 也是弱等价, 于是Whitehead定理(定理2.9)说明 RQf 存在同伦逆, 这意味着 $\gamma(f) = [RQf]$ 在 $[RQX, RQY]$ 中的逆存在, 因此是同构. 反过来 $\gamma(f)$ 可逆等价于 RQf 的同伦逆存在, 如上相同使用Whitehead定理和引理2.12, f 是一个弱等价. \square

$$\begin{array}{ccccc} X & \longrightarrow & QX & \longleftarrow & RQX \\ \downarrow f & & \downarrow Qf & & \downarrow RQf \\ Y & \longrightarrow & QY & \longleftarrow & RQY \end{array}$$

引理2.14. 给定模型范畴 \mathcal{M} 和函子 $F: \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{D}$, 且 F 将 \mathcal{M} 中的弱等价映为 \mathcal{D} 中的同构, 那么若 \mathcal{M} 中的态射 $f, g: A \rightarrow B$ 满足 $f \simeq_l g$ 或 $f \simeq_r g$, 则 $F(f) = F(g)$.

Proof. 我们这里只证明 $f \simeq_l g$ 的情形, 假定 $H: A \times I \rightarrow X$ 是一个好的左同伦 $H: f \Rightarrow g$, 交换图

$$\begin{array}{ccc} A \amalg A & & \\ i_0 + i_1 \downarrow & \searrow \nabla & \\ A \times I & \xrightarrow[\sim]{w} & A \end{array}$$

给出 $w \circ i_0 = w \circ i_1 = \text{id}_A$, 因此 $F(w) \circ F(i_0) = F(w) \circ F(i_1)$. 注意到 w 是弱等价, 因此 $F(w)$ 是同构因此 $F(i_0) = F(i_1)$. 于是

$$F(f) = F(H \circ i_0) = F(H) \circ F(i_0) = F(H) \circ F(i_1) = F(H \circ i_1) = F(g),$$

即是要证的. □

命题2.15. 给定模型范畴 \mathcal{M} , 同伦范畴中的态射集 $\text{hom}_{\text{Ho } \mathcal{M}}(X, Y)$ 由 γ 的像和弱等价的像的形式逆生成.

特别地, 给定余纤维对象 A 和纤维对象 X , 那么函子 γ 诱导了满射 $\text{hom}_{\mathcal{M}}(A, X) \rightarrow \text{hom}_{\mathcal{M}}(A, X)$, 并且这诱导了 $[A, X] \cong \text{hom}_{\text{Ho } \mathcal{M}}(A, X)$.

Proof. 考虑

$$\begin{array}{ccccc} & & RQX & & \\ & i_{QX} \nearrow & & \searrow & \\ \emptyset & \longrightarrow & QX & & \{*\} \\ & p_X \searrow & & \nearrow & \\ & & X & & \end{array}$$

由于 i_{QX}, p_X 都是弱等价, $\gamma(i_{QX}) \circ \gamma(p_X)^{-1}$ 给出了 $\text{Ho } \mathcal{M}$ 中的同构 $X \xrightarrow{\cong} RQX$. 于是, 对于任意的对象 $X, Y \in \text{ob } \mathcal{M}$, 函子 γ 诱导了满射

$$\text{hom}_{\mathcal{M}}(X, Y) \rightarrow \text{hom}_{\text{Ho } \mathcal{M}}(X, Y),$$

于是任意 $\text{Ho } \mathcal{M}$ 中的态射 $f: X \rightarrow Y$, 存在 $g \in \text{hom}_{\mathcal{M}}(X, Y)$ 使得

$$f = \gamma(p_Y) \gamma(i_{QY})^{-1} \gamma(g) \gamma(i_{QX}) \gamma(p_X)^{-1},$$

这是第一部分.

根据命题2.14和引理2.14, 函子 γ 诱导了映射 $[A, X] \rightarrow \text{hom}_{\text{Ho } \mathcal{M}}(A, X)$, 且有交换图

$$\begin{array}{ccc} [RA, QX] & \longrightarrow & [A, X] \\ \downarrow \gamma & & \downarrow \gamma \\ \text{hom}_{\text{Ho } \mathcal{M}}(RA, QX) & \longrightarrow & \text{hom}_{\text{Ho } \mathcal{M}}(A, X), \end{array}$$

其中水平的映射由 (i_A, p_X) 诱导. 之前的证明说明了下层的映射是双射, 根据引理2.9, 上层的映射是双射, 左侧的 γ 事实上是定义, 因此右侧是双射. □

推论2.15.1. 设 $F, G: \text{Ho } \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{D}$ 是两个给定的函子, $\eta: F \circ \gamma \Rightarrow G \circ \gamma$ 是自然变换, 那么 η 也给出了自然变换 $F \Rightarrow G$.

Proof. □

下面的定理

定理2.16. 给定模型范畴 \mathcal{M} 和函子 $F : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{D}$, 若 F 将 \mathcal{M} 中的弱等价映为 \mathcal{D} 中的同构, 那么存在唯一的函子 $\tilde{F} : \text{Ho } \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{D}$ 使得 $F = \tilde{F} \circ \gamma$.

Proof. 首先证明唯一性. 由于 $\text{Ho } \mathcal{M}$ 与 \mathcal{M} 有相同的对象, 因此在对象层面上 \tilde{F} 与 F 相同. 注意到命题2.15说明任意 $f \in \text{hom}_{\text{Ho } \mathcal{M}}(X, Y)$ 可以写成

$$f = \gamma(p_Y)\gamma(i_{Q_Y})^{-1}\gamma(g)\gamma(i_{Q_X})\gamma(p_X)^{-1},$$

其中 $g \in \text{hom}_{\mathcal{M}}(X, Y)$ 满足 $RQg = f$, 那么

$$\begin{aligned} \tilde{F}(f) &= \tilde{F}(\gamma(p_Y)\gamma(i_{Q_Y})^{-1}\gamma(g)\gamma(i_{Q_X})\gamma(p_X)^{-1}) \\ &= \tilde{F}(\gamma(p_Y))\tilde{F}(\gamma(i_{Q_Y})^{-1})\tilde{F}(\gamma(g))\tilde{F}(\gamma(i_{Q_X}))\tilde{F}(\gamma(p_X)^{-1}) \\ &= F(p_Y)F(i_{Q_Y})^{-1}F(g)F(i_{Q_X})F(p_X)^{-1}, \end{aligned}$$

因此 \tilde{F} 是唯一确定的.

再来证明存在性. 如上唯一性的证明给出了一个构造, 还需要证明这样是良定义的并且给出一个函子. 注意到引理2.12及其对偶说明 f 仅取决于 g 的同伦等价类, 并且引理2.14说明相同的等价类在 F 下给出相同的像, 因此如上良定义的. 若 $f = \text{id}_A$, 取 $g = \text{id}_A$, 那么显然 $\tilde{F}(f) = F(p_A)F(i_{Q_A})^{-1}F(g)F(i_{Q_A})F(p_A)^{-1} = \text{id}_A$. 给定 $A \xrightarrow{f_1} B \xrightarrow{f_2} C$, 引理2.13说明存在 $A \xrightarrow{g_1} B \xrightarrow{g_2} C$ 使得 $RQg_1 = f_1, RQg_2 = f_2$. 于是

$$\begin{aligned} \tilde{F}(f_2 \circ f_1) &= F(p_C)F(i_{Q_C})^{-1}F(g_2 \circ g_1)F(i_{Q_A})F(p_A)^{-1} \\ &= F(p_C)F(i_{Q_C})^{-1}F(g_2)F(i_{Q_B})F(p_B)^{-1}F(p_B)F(i_{Q_B})^{-1}F(g_1)F(i_{Q_A})F(p_A)^{-1} \\ &= \tilde{F}(f_2) \circ \tilde{F}(f_1), \end{aligned}$$

这样 \tilde{F} 是一个函子. □

2.6.2 导出函子

定义. 给定模型范畴 \mathcal{M} 和范畴间的函子 $F : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{D}$, 若存在函子 $LF : \text{Ho } \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{D}$ 和自然态射 $\eta : LF \circ \gamma_{\mathcal{M}} \Rightarrow F$

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{M} & \xrightarrow{F} & \mathcal{D} \\ \gamma_{\mathcal{M}} \downarrow & \nearrow \eta & \nearrow LF \\ \text{Ho } \mathcal{M} & & \end{array}$$

满足对任意的函子 $H : \text{Ho } \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{N}$ 和自然变换 $\xi : H \circ \gamma_{\mathcal{M}} \Rightarrow F$, 存在唯一的 $\delta : H \Rightarrow LF$, 使得下图

$$\begin{array}{ccc} H \circ \gamma_{\mathcal{M}} & \xrightarrow{\xi} & F \\ \delta \circ \gamma_{\mathcal{M}} \searrow & & \nearrow \eta \\ & LF \circ \gamma_{\mathcal{M}} & \end{array}$$

交换, 则称 LF 是函子 F 的导出函子(derived functor).

引理2.15. 给定模型范畴 \mathcal{M} 和函子 $F : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{D}$, 满足对任意 \mathcal{M} 中余纤维对象间的零调余纤维被映为同构, 那么对任意 \mathcal{M} 中的余纤维对象 A, B 和态射 $f, g : A \rightarrow B$, 若 $f \simeq_r g$, 则 $F(f) = F(g)$.

Proof. 根据引理2.8的对偶, 存在右同伦 $H : A \rightarrow B^I$ 满足 B^I 是一个非常好的道路对象, 使得 $H : f \Rightarrow g$. 于是 $c : B \hookrightarrow B^I$ 是一个零调余纤维, 由于 B 是余纤维对象, B^I 也是余纤维对象. 这样, 以上的假设说明 $F(c)$ 是一个同构. 注意到 $p_0 \circ c = p_1 \circ c = \text{id}_B$, 因此 $F(p_0) \circ F(c) = F(p_1) \circ F(c)$, 消去 $F(c)$ 后 $F(p_0) = F(p_1)$, 于是 $F(f) = F(p_0 \circ H) = F(p_0) \circ F(H) = F(p_1) \circ F(H) = F(p_1 \circ H) = F(g)$. \square

命题2.17. 给定模型范畴 \mathcal{M} 和函子 $F : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{D}$, 使得 F 将余纤维对象间的弱等价映为同构, 那么 F 的导出函子 $(\mathbf{L}F, \eta)$ 存在, 且对任意 \mathcal{M} 中的余纤维对象 A , $\eta_A : \mathbf{L}F(A) \rightarrow F(A)$ 是同构.

Proof. 首先我们构造相应的导出函子. \square

定义. 给定模型范畴间的函子 $F : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{N}$, 若存在函子 $\mathbf{L}F : \text{Ho } \mathcal{M} \rightarrow \text{Ho } \mathcal{N}$ 和自然态射 $\eta : \mathbf{L}F \circ \gamma_{\mathcal{M}} \Rightarrow \gamma_{\mathcal{N}} \circ F$

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{M} & \xrightarrow{F} & \mathcal{N} \\ \gamma_{\mathcal{M}} \downarrow & \nearrow \eta & \downarrow \gamma_{\mathcal{N}} \\ \text{Ho } \mathcal{M} & \xrightarrow{\mathbf{L}F} & \text{Ho } \mathcal{N}, \end{array}$$

满足对任意的函子 $H : \text{Ho } \mathcal{M} \rightarrow \text{Ho } \mathcal{N}$ 和自然变换 $\xi : H \circ \gamma_{\mathcal{M}} \Rightarrow \gamma_{\mathcal{N}} \circ F$, 存在唯一的 $\delta : H \Rightarrow \mathbf{L}F$, 使得下图

$$\begin{array}{ccc} H \circ \gamma_{\mathcal{M}} & \xrightarrow{\xi} & \gamma_{\mathcal{N}} \circ F \\ \delta \circ \gamma_{\mathcal{M}} \dashrightarrow & & \nearrow \eta \\ & \mathbf{L}F \circ \gamma_{\mathcal{M}} & \end{array}$$

交换, 则称 $\mathbf{L}F$ 是函子 F 的全导出函子(total derived functor).

事实上, 导出函子是Kan扩张.

定理2.18 (Quillen). 给定Quillen对 $F : \mathcal{M} \rightleftarrows \mathcal{N} : G$, 那么 F 的左导出函子 $\mathbf{L}F$ 和 G 的右导出函子 $\mathbf{R}G$ 都存在, 且

$$\mathbf{L}F : \text{Ho } \mathcal{M} \rightleftarrows \text{Ho } \mathcal{N} : \mathbf{R}G$$

是伴随函子对. 其中, 对任意 $X \in \text{Ho } \mathcal{M}$ 和 $f \in \text{hom}_{\text{Ho } \mathcal{M}}(X, Y)$,

$$\mathbf{L}F(X) = \gamma F(QX), \quad \mathbf{L}F(f) = \gamma F(Qf),$$

其中 QX 是 X 的余纤维消解, Qf 是 f 的余纤维提升.

引理2.16 (Brown). 若模型范畴间的函子 $F : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{N}$ 将 \mathcal{M} 中余纤维对象间的零调余纤维映为弱等价, 则 F 将纤维对象间的弱等价映为弱等价, 此时 F 的全左导出函子 $\mathbf{L}F$ 存在, 且与定理2.18中的定义一致.

Proof.

□

命题2.19. 给定左正规的模型范畴 \mathcal{M} , $f : A \hookrightarrow X$ 是余纤维, 且 A 是 \mathcal{M} 中的余纤维对象, 那么对任意 $g : A \rightarrow Y$, g 沿 f 的同伦推出与 g 沿 f 的推出在 $\mathrm{Ho} \mathcal{M}$ 中同构.

例2.7.

第三章 单纯代数

3.1 单纯模的同伦群

如同先前的定义，给定一个交换环 R ，一个单纯环是函子

$$A_* : \Delta^\circ \rightarrow R\text{-}\mathbf{Algebras},$$

具体来说，这个函子给定了一族 R 代数 $A_n = A([n])$ ，且存在 R 代数同态

$$d_i^{[n]} : A_n \rightarrow A_{n-1}$$

和

$$s_j^{[n]} : A_n \rightarrow A_{n+1}$$

满足相应的单纯关系.

例3.1. 任意给定一个交换环 R ，我们有自然存在的单纯 R 代数 $s(R)_*$ ，其中对任意 n ， $s(R)_n := R$ ， $d_i^{[n]} = s_j^{[n]} = \text{id}_R$.

定义. 给定单纯代数 A_* ，则一个 A_* 模(A_* -module)是一个单纯对象 V_* ，其中 $V([n])$ 是一个 A_n 模，存在同态

$$d_i^{[n]} : V_n \rightarrow V_{n-1}$$

和

$$s_j^{[n]} : V_n \rightarrow V_{n+1}$$

满足相应的单纯关系，且与 A_* 的单纯结构相容，具体说来，对于任意 $a \in A_n$ 和 $v \in V_n$ ， $d_i^{V[n]}(av) = d_i^{A[n]}(a)d_i^{V[n]}(v)$ 且 $s_j^{V[n]}(av) = s_j^{A[n]}(a)s_j^{V[n]}(v)$.

例3.2. 类似于例3.1，任意给定一个 R 模 V ，都存在自然的单纯 $s(R)_*$ 模 $S(V)_*$ ，其中对任意 n ， $s(V)_n := V$ ， $d_i^{[n]} = s_j^{[n]} = \text{id}_V$.

考虑给定一个单纯 $s(R)_*$ 模 V_* ，我们有一个 R 模复形 $N(V_*)$.

$$N(V_*)_n := \begin{cases} 0 & n \leq 0 \\ \bigcap_{i=1}^n \text{Ker } d_i^{[n]} & n \geq 1 \end{cases},$$

且边缘映射 $\partial_n := d_0^{[n]}$. 这个复形称为 V_* 的正规化(normalization). (另一种正规化的构造我们还可以考虑取前 n 项核的交集, 边缘映射取最后一个面映射.)

除了正规化还存在其他的方法, 对一个给定的单纯 $s(R)_*$ 模 V_* , 还可以构造一个对应的 R 模复形 V_\bullet , 满足 $V_n = V_n$, 边缘映射

$$\partial_n := \sum_{i=0}^n (-1)^i d_i^{[n]}.$$

虽然两种方式给出的链并不相同, 但这两个链是拟等价的——它们具有相同的同调.

引理3.1. 设 R 是交换环, 给定一个单纯 $s(R)_*$ 模 V_* , 那么

$$H_n(V_\bullet) \cong H_n(N(V_*)_\bullet)$$

对所有 n 成立, 我们称这个群为 V_* 的第 n 阶同伦群(*the n -th homotopy group*), 记为 $\pi_n(V_*)$.

Proof. 我们将证明

$$V_\bullet \cong N(V_*)_\bullet \oplus X_\bullet,$$

其中 X_\bullet 是一个零调单纯 $s(R)_*$ 模, 于是引理自然是该结论的推论. □

练习3.1. 设 R 是交换环, S 是 R 代数, 那么 $N(s(S)) = S$.

练习3.2. 给定交换环 R 和单纯 R 代数 A_* , 且设 V_* 是单纯 A_* 模. 证明 $N(V_*)_n, \text{Ker } \partial_n, \text{Im } \partial_{n+1}$ 都是 V_n 的 A_n 子模.

定义. 单纯 R 代数间的态射(morphism) $\varphi_* : A_* \rightarrow B_*$ 是一族态射 $\varphi_n : A_n \rightarrow B_n$, 满足

$$\begin{array}{ccc} A_n & \xrightarrow{d_i^{A_n}} & A_{n-1} \\ \varphi_n \downarrow & & \downarrow \varphi_{n-1} \\ B_n & \xrightarrow{d_i^{B_n}} & B_{n-1}. \end{array}$$

和

$$\begin{array}{ccc} A_n & \xrightarrow{s_j^{A_n}} & A_{n+1} \\ \varphi_n \downarrow & & \downarrow \varphi_{n+1} \\ B_n & \xrightarrow{s_j^{B_n}} & B_{n+1}. \end{array}$$

对于任意 i, j 都成立.

若 $\varphi_* : A_* \rightarrow B_*$ 是单纯代数之间的态射, 那么我们有自然的 R 模的态射

$$\pi_*(\varphi) : \pi_*(A) \rightarrow \pi_*(B),$$

或者更准确地说 π 是一个函子 $s(R - \mathbf{Algebras}) \rightarrow R - \mathbf{Mod}$.

若 $\varphi_* : A_* \rightarrow B_*$ 诱导的 R 模态射 $\pi_*(\varphi)$ 都是同构, 则称 φ 是弱等价(weak equivalence).

定义. 给定交换环 R 和单纯 R 代数 A_* , V_*, W_* 是 A_* 模, 定义 A_* 模 $V_* \otimes_{A_*} W_*$ 满足

$$(V_* \otimes_{A_*} W_*)_n := V_n \otimes_{A_n} W_n$$

对任意 $n \geq 0$ 都成立, 且面映射和退化映射分别由 V_*, W_* 诱导. 称 $V_* \otimes_{A_*} W_*$ 为 V_* 与 W_* 的张量积(tensor product).

3.2 Dold-Kan对应

3.3 单纯消解

定义. 给定交换环 R 和单纯 R 代数 A_* , 且 $X = \{X_n\}_{n \geq 0}$ 是一族未定元. 若单纯 R 代数 $A[X]_*$ 满足

1. $A[X]_n$ 是 $A_n[X_n]$, 即 A_n 上的以 X_n 为未定元的多项式环,
2. 对任意的 j, n , $s_j^{A[X]_n}(X_n) \subseteq X_{n+1}$,
3. 嵌入映射 $A_* \hookrightarrow A[X]_*$ 是单纯 R 代数同态,

则称 $A[X]_*$ 是 A_* 的自由单纯扩张(free simplicial extension).

引理3.2. 若 R 是交换环, A_* 是单纯 R 代数, P_* 是 A_* 的自由单纯扩张, 若 $\varphi : A_* \rightarrow B_*$ 是单纯态射, 则 $B_* \otimes_{A_*} P_*$ 是 B_* 的自由单纯扩张.

命题3.1. 单纯 R 代数间的态射 $\varphi_* : A_* \rightarrow B_*$ 是余纤维当且仅当它是某个自由扩张的收缩.

定义. 设 $\varphi : A_* \rightarrow B_*$ 是单纯 R 代数的态射, 那么 φ 的一个单纯消解(simplicial resolution)是如下一个分解

$$A_* \hookrightarrow P_* \xrightarrow{\psi} B_*$$

满足复合是 φ , $A_* \hookrightarrow P_*$ 是 A_* 的自由单纯扩张, ψ 是单纯满态射, 且是一个弱等价. 通常, 我们也称 P_* 是 B_* 在 A_* 上的单纯消解(simplicial resolution of B_* over A_*).

定理3.2. 若 R 是交换环, A_*, B_*, C_* 是单纯 R 代数, P_* 是 A_* 的自由单纯扩张, 若 $\varphi : A_* \rightarrow B_*$ 是单纯态射, $\psi : B_* \rightarrow C_*$ 是满态射且是弱等价, 那么存在提升 $\kappa : P_* \rightarrow B_*$ 使得下图

$$\begin{array}{ccc} A_* & \xrightarrow{\varphi} & B_* \\ \downarrow & \nearrow \kappa & \downarrow \psi \\ P_* & \longrightarrow & C_* \end{array}$$

交换.

给定一个单纯消解 $A_* \hookrightarrow P_*$, 我们可以构造

$$A[X, X]_* := A[X]_* \otimes_{A_*} A[X]_*,$$

这个单纯 R 代数.它在如下意义是具有函子性的: 给定单纯代数的态射

$$\varphi, \psi : A[X]_* \rightarrow B_*,$$

我们可以构造新的单纯态射

$$\begin{aligned} \varphi \otimes \psi : A[X, X]_* &\rightarrow B_* \\ x \otimes y &\mapsto \varphi(x)\psi(y). \end{aligned}$$

定义. 给定交换环 R 、单纯 R 代数 A_* 和单纯消解 $A_* \hookrightarrow A[X]_*$, 设 $A[X, X, Y]_*$ 是 $A[X]_*$ 在 $A[X, X]_*$ 上的单纯消解, 则称 $A[X, X, Y]_*$ 是 A_* 代数 $A[X]_*$ 的柱对象(cylinder object).若给定的态射 $\varphi, \psi : A[X]_* \rightarrow B_*$ 可以构造交换图

$$\begin{array}{ccc} A[X, X]_* & \hookrightarrow & A[X, X, Y]_* \\ & \searrow \varphi \otimes \psi & \downarrow \\ & & B_* \end{array}$$

则称 φ 和 ψ 同伦(homotopic), 记为 $\varphi \simeq \psi$.

这里同伦的定义完全同于拓扑中同伦的定义—— R 代数范畴中的余积就是张量积, 因而这个图恰好对应于拓扑空间组成范畴的同伦的定义图.

定理3.3 (提升的唯一性).

推论3.3.1 (消解的唯一性).

练习3.3. 这个习题证明对于任意单纯 R 代数 A_* , 存在它的自由扩张.

任取正自然数 n , 令 $w \in A_{n-1}$ 满足它在 $N(A_*)_{n-1}$ 是闭链, 即 $d_0^{[n-1]}(w) = 0$

我们来具体构造任意给定单纯 R 代数 $f : A_* \rightarrow B_*$ 的单纯消解. 具体的想法是这样的:

定义. 设 R 是环, 对于集合 S , 记 $R[S]$ 为 S 中元素生成的 R 多项式环. 给定环同态 $f : R \rightarrow S$, 令 $P_0 := R[S]$, 且当 $n \geq 1$ 时,

$$P_n := R[P_{n-1}].$$

定义 s 称 P_* 为 $f : R \rightarrow S$ 的标准消解(standard resolution).

例3.3. 给定 R 代数 $\varphi : R[x] \rightarrow R, x \mapsto 0$, 将它自然地看为单纯代数的同态, 那么如下构造的复形给出了 f 的单纯消解: 令

$$P_n := R[x] \otimes_R \left(\bigotimes_{i=1}^n R[x] \right),$$

记 P_n 在 $R[x]$ 的生成元为 $x_{n,1} = 1 \otimes x \otimes \cdots \otimes 1, \dots, x_{n,n} = 1 \otimes 1 \otimes \cdots \otimes x$. 构造面映射和退化映射分别为

$$d_i^{[n]}(f(x) \otimes g_1(x) \otimes \cdots \otimes g_n(x)) := \begin{cases} f(x)g_1(x) \otimes \cdots \otimes g_n(x) & i = 0 \\ f(x) \otimes g_1(x) \otimes \cdots \otimes g_i(x)g_{i+1}(x) \otimes \cdots \otimes g_n(x) & 1 \leq i \leq n-1 \\ f(x)\varphi(g_n(x)) \otimes g_1(x) \otimes \cdots \otimes g_{n-1}(x) & i = n \end{cases}$$

和

$$s_i^{[n]}(f(x) \otimes g_1(x) \otimes \cdots \otimes g_n(x)) := \begin{cases} f(x) \otimes 1 \otimes g_1(x) \otimes \cdots \otimes g_n(x) & i = 0 \\ f(x) \otimes g_1(x) \otimes \cdots \otimes g_i(x) \otimes 1 \otimes g_{i+1}(x) \otimes \cdots \otimes g_n(x) & 1 \leq i \leq n-1 \\ f(x) \otimes g_1(x) \otimes \cdots \otimes g_n(x) \otimes 1 & i = n, \end{cases}$$

不难看出这是一个单纯 R 代数, 是 $R[x]$ 的单纯扩张. 接下来验证这是一个单纯消解, 即要验证 $P_* \rightarrow R$ 是弱等价.

构造如下 $R[x]$ 模复形 $K(x)$:

$$R[x] \xleftarrow{x} R[x] \leftarrow 0,$$

我们要验证这个复形与 P_* 同伦. 考虑

$$\begin{array}{ccccc} R[x] & \xleftarrow{x} & R[x] & \xleftarrow{\quad} & 0 \\ \text{id} \downarrow & & \downarrow x \otimes - & & \downarrow \\ R[x] & \xleftarrow{\quad} & P_1 & \xleftarrow{\quad} & P_2, \end{array}$$

练习3.4. 设 R 是交换环, $A \rightarrow B, C \rightarrow D$ 是 R 代数同态, 且 A, B 作为 R 模是平坦的. 求证若 P_*, Q_* 是 $A \rightarrow B$ 和 $C \rightarrow D$ 的单纯消解, 那么 $P_* \otimes_R Q_*$ 是 $A \otimes_R C \rightarrow B \otimes_R D$ 的单纯消解.

例3.4. 设 r 是交换环 R 的非零因子, $S := R/(r)$ 且 $p: R \rightarrow S$ 是自然投射. 考虑交换图

$$\begin{array}{ccc} R[x] & \xrightarrow{x \mapsto 0} & R \\ x \mapsto r \downarrow & & \downarrow \\ R & \longrightarrow & S = R \otimes_{R[x]} R, \end{array}$$

这是因为 $\text{Ker}(x \mapsto 0) = (x)$, $\text{Ker}(x \mapsto r) = (x - r)$, 于是

$$R \otimes_{R[x]} R = R[x]/((x - r) + (x)) = R/(r) = S.$$

设 P_* 是 $R[x] \xrightarrow{x \mapsto 0} R$ 的单纯消解, 令

$$\begin{array}{ccc} R[x] & \longrightarrow & P_* \\ x \mapsto r \downarrow & & \downarrow \\ R & \longrightarrow & Q_* := R \otimes_{R[x]} P_*, \end{array}$$

根据基变换 Q_* 是 R 的自由扩张. 对

$$R[x] \rightarrow P_* \rightarrow R$$

做函子 $R \otimes_{R[x]} -$, 其中 $R[x] \rightarrow R$ 定义为 $x \mapsto r$, 那么有态射

$$R \rightarrow Q_* \rightarrow S,$$

于是 Q_* 是 $R \rightarrow S$ 的单纯消解.

我们具体将 Q_* 写出来. 按照定义,

$$\begin{aligned} Q_n &:= R \otimes_{R[x]} P_n = R \otimes_{R[x]} R[x, x_1, \dots, x_n] = R[x]/(x - r) \otimes_{R[x]} R[x, x_1, \dots, x_n] \\ &= R[x, x_1, \dots, x_n]/(x - r) = R[x_1, \dots, x_n], \end{aligned}$$

并且

$$d_i^{[n]}: Q_n \rightarrow Q_{n-1} = \text{id} \otimes d_i^{[n]}$$

将 $t \otimes f(x) \otimes g(x_1, \dots, x_n)$ 映到

$$\begin{cases} f(x)g_1(x) \otimes \dots \otimes g_n(x) & i = 0 \\ f(x) \otimes g_1(x) \otimes \dots \otimes g_i(x)g_{i+1}(x) \otimes \dots \otimes g_n(x) & 1 \leq i \leq n-1 \\ f(x)\varphi(g_n(x)) \otimes g_1(x) \otimes \dots \otimes g_{n-1}(x) & i = n \end{cases}$$

由于 P_* 的正规化同伦于

$$0 \leftarrow R[x] \xleftarrow{x} R[x] \leftarrow 0,$$

故 Q_* 的正规化同伦于

$$0 \leftarrow R \xleftarrow{r} R \leftarrow 0,$$

于是 $\pi_0(Q_*) = S$, $\pi_1(Q_*) = (0 : r) = 0$.

命题3.4. 若 R 是交换环, S 是 R 代数, M 是 R 模, $R \hookrightarrow P_* \rightarrow S$ 是单纯消解, 那么

$$\pi_n(P_* \otimes_R M) \cong \mathrm{Tor}_n^R(S, M).$$