

非交换几何选讲

曲豆豆 码字
南七技校福利社 五道口分社
2019 年 4 月 14 日
第 01-8 稿



图：雾气朦胧的安徽合肥大蜀山森林公园
拍摄于 2014.5.31 - 10: 44

在五道口也要红专并进、理实交融呀～

目录

1	Hochschild 理论	4
1.1	结合代数的双模、余中心	4
1.2	Hochschild 同调	8
1.3	Hochschild 上同调	13
1.4	约化 Bar 复形	19
1.5	Connes 复形 $C_{\bullet}^{\lambda}(A)$	25
1.6	循环双复形 $CC_{\bullet\bullet}(A)$	28
1.7	Connes 算子 \mathcal{B}	32
1.8	循环同调的计算	37
1.9	循环上同调	43
2	乘积	46
2.1	分次模与 Koszul 符号法则	46
2.2	分次代数与分次李代数	51
2.3	余代数与分次余代数	58
2.4	多重切向量场与 Schouten-Nijenhuis 括号	61
2.5	Shuffle 乘积	66
2.6	Cup 乘积与 Gerstenhaber 括号（部分细节待补）	71
2.7	结合性	75
3	间奏：形变量子化	77
3.1	泊松几何与辛几何	77
3.2	形变量子化与 Moyal 星积	83
3.3	重要例子：李代数的对偶	89
3.4	Kontsevich 量子化公式	92
4	量子场论的背景	100
4.1	Grassmann 变量与 BV 算子	100
4.2	从一维 Gauss 积分到费曼图	107
4.3	重整化群流算子	118

4.4	n 维 Gauss 积分	123
4.5	无穷维情形初探: ϕ^4 -场论	128
4.6	dGBV 代数	135
4.7	同伦重整化	140

第 1 章 Hochschild 理论

“读论文就是将非人话翻译成人话的过程，写论文就是将人话写成非人话的过程。”

“我写的公式也不一定对。。。但基本上是对的，up to sign”

1.1 结合代数的双模、余中心

我们需要代数拓扑、同调代数、基础范畴论的预备知识，并且采用同调代数的标准术语、记号，诸如链复形、上同调、导出函子等等。首先介绍基本的记号与概念。

在本课，我们给定一个特征 0 的含幺交换环 K （例如一个域），考虑含幺结合 K -代数 A （注意 A 未必是交换代数），并且 A 作为交换环 K 上的模是投射模（projective module）。 A 的 K -代数结构给出如下 K -模同态：

$$\begin{aligned} A \otimes_K A &\rightarrow A \\ (a_1, a_2) &\mapsto a_1 a_2 \end{aligned}$$

由 A 的结合性， $(a_1 a_2) a_3 = a_1 (a_2 a_3)$ 对 A 中任意元素 a_1, a_2, a_3 成立。

对于含幺结合 K -代数 A ，回顾 A 的反代数（opposite algebra） A^{op} 。反代数 A^{op} 作为 K -模与 A 完全相同，记号如下：

$$\begin{aligned} \text{id} : A &\rightarrow A^{\text{op}} \\ x &\mapsto x^{\text{op}} \end{aligned}$$

但是 A^{op} 具有与 A “相反”的乘法，具体地，对于 A^{op} 中的元素 $x^{\text{op}}, y^{\text{op}}$ ，成立

$$x^{\text{op}} y^{\text{op}} := (yx)^{\text{op}}$$

定义 1.1.1.（包络代数）

对于含幺结合 K -代数 A ，我们定义 K -代数 A^e 为

$$A^e := A \otimes_K A^{\text{op}}$$

即 A 与 A^{op} 的 K -代数张量积。称 A^e 为 A 的包络代数（enveloping algebra）。

容易验证对于任何两个含么结合 K -代数 A, B , 总有

$$(A \otimes_K B)^{\text{op}} = A^{\text{op}} \otimes_K B^{\text{op}}$$

从而容易得到

$$(A^{\text{op}})^e = (A^e)^{\text{op}}$$

对于 K -代数 A , 回顾双 A -模 (A -bimodule) 的概念如下:

定义 1.1.2. 对于 K -代数 A , 双 A -模是指如下资料:

(1) K -模 M ;

(2) A 在 M 上的左、右 K -线性作用,

并且满足相容性: $(a.m).b = a.(m.b)$ 对任意 $m \in M$ 以及 $a, b \in A$ 成立。

例如, A 本身自然有双 A -模结构, A 在其上的左、右作用即为左乘、右乘。再比如 K -模张量积 $A \otimes_K A$ 具有如下双 A -模结构:

$$b.(a_1 \otimes a_2) := (ba_1) \otimes a_2$$

$$(a_1 \otimes a_2).b := a_1 \otimes (a_2b)$$

其中 $a_1, a_2, b \in A$.

再比如, 对于 K -代数 A , 考虑其对偶

$$A^* := \text{Hom}(A, K)$$

则 A^* 具有以下的双 A -模结构: 对任意 $a, x \in A$ 以及 $f \in A^*$,

$$\begin{cases} (a.f)(x) := f(xa) \\ (f.a)(x) := f(ax) \end{cases}$$

容易验证这的确使得 A^* 为双 A -模。

我们不再回顾左模、右模的概念了, 也不去回顾右模与左模的平衡张量积。

性质 1.1.3. 设 M 为双 A -模,

(1) M 可自然地视为左 A^e -模:

$$(a_1 \otimes a_2^{\text{op}}).m = a_1.m.a_2$$

(2) M 可自然地视为右 A^e -模:

$$m.(a_1 \otimes a_2^{\text{op}}) = a_2.m.a_1$$

反之, 左 (右) A^e -模也可视为双 A -模。

证明. 容易验证。 □

特别地如果 M, N 都是双 A -模, 那么考虑平衡张量积 $M \otimes_{A^e} N$, 它的双 A -模结构具体如下:

$$a.(m \otimes n) = (a.m) \otimes n = m \otimes (n.a)$$

$$(m \otimes n).b = m \otimes (n.b) = (b.m) \otimes n$$

对于任何 $m \in M, n \in N, a, b \in A$ 成立。

定义 1.1.4. (余中心 *cocenter*) 对于双 A -模 M , 称双 A -模

$$M \otimes_{A^e} A$$

为 M 的余中心 (*cocenter*)。

容易看出, 对任意的 $m \in M, a \in A$, 在余中心 $M \otimes_{A^e} A$ 当中, 成立

$$(m.a) \otimes 1 = m \otimes (a.1) = m \otimes a = m \otimes (1.a) = (a.m) \otimes 1$$

从而 $(m.a - a.m) \otimes 1 = 0$. 事实上, M 的余中心具有如下结构:

性质 1.1.5. 对于双 A -模 M , 则有如下双 A -模同构

$$M \otimes_{A^e} A \cong M / \{(m.a - a.m) | a \in A, m \in M\}$$

证明. 考虑如下的双 A -模链复形

$$\partial_{\bullet} : A \otimes A \otimes A \rightarrow A \otimes A \rightarrow A \rightarrow 0$$

其中

$$\partial : a_1 \otimes a_2 \otimes a_3 \mapsto a_1 a_2 \otimes a_3 - a_1 \otimes a_2 a_3$$

$$a_1 \otimes a_2 \mapsto a_1 a_2$$

容易验证 $\partial^2=0$ (由 A 的结合性), 从而 ∂_{\bullet} 为双 A -模链复形。并且显然 $\partial : A \otimes A \rightarrow A$ 是满同态。

断言链复形 ∂_\bullet 为正合 (exact) 的。事实上, ∂_\bullet 到其自身的恒等链映射与零链映射是链同伦的。我们构造如下的链同伦 h_\bullet :

$$\begin{aligned} h : a_1 &\mapsto 1 \otimes a_1 \\ a_1 \otimes a_2 &\mapsto 1 \otimes a_1 \otimes a_2 \end{aligned}$$

容易验证, 对于任意的 $\varphi = a_1 \otimes a_2 \in A \otimes A$, 成立

$$\begin{aligned} (\partial h + h \partial) \varphi &= (\partial h + h \partial)(a_1 \otimes a_2) \\ &= \partial(1 \otimes a_1 \otimes a_2) + h(a_1 a_2) \\ &= a_1 \otimes a_2 - 1 \otimes a_1 a_2 + 1 \otimes a_1 a_2 \\ &= a_1 \otimes a_2 = \varphi \end{aligned}$$

从而对于 $\varphi \in A \otimes A$, 如果 $\partial \varphi = 0$, 那么

$$\varphi = (\partial h + h \partial) \varphi = \partial(h \varphi)$$

这说明链复形 ∂_\bullet 在 $A \otimes A$ 处正合, 因此 ∂_\bullet 是正合的。

接下来, 将函子 $M \otimes_{A^e} -$ 作用于链复形 ∂_\bullet , 得到如下的双 A -模链复形:

$$M \otimes_{A^e} \partial_\bullet : M \otimes A \rightarrow M \rightarrow M \otimes_{A^e} A \rightarrow 0$$

由张量函子的右正合性, 上述链复形也是正合的。其中注意到双 A -模同构

$$\begin{aligned} M \otimes_{A^e} (A \otimes A \otimes A) &\cong M \otimes A \\ m \otimes (a_1 \otimes a_2 \otimes a_3) &\mapsto (a_3.m.a_1) \otimes a_2 \end{aligned}$$

以及双 A -模同构

$$\begin{aligned} M \otimes_{A^e} (A \otimes A) &\cong M \\ m \otimes (a_1 \otimes a_2) &\mapsto a_2.m.a_1 \end{aligned}$$

于是正合列 $M \otimes_{A^e} \partial_\bullet$ 的边界映射有如下具体表达式:

$$\begin{aligned} M \otimes_{A^e} \partial : M \otimes A &\rightarrow M \\ m \otimes A &\mapsto m.a - a.m \end{aligned}$$

从而由正合性, 易知

$$M \otimes_{A^e} A \cong M / \{(m.a - a.m) | a \in A, m \in M\}$$

□

可见, M 的余中心无非是商掉 M 当中“非交换的部分”所得到的“交换的部分”, 如此望文生义。例如, 如果 A 为交换 K -代数, 那么 A 本身作为双 A -模, 其余中心为 A 本身。

1.2 Hochschild 同调

定义 1.2.1. (*Hochschild* 同调)

对于双 A -模 M , 以及非负整数 n , 记

$$H_n(A, M) := \text{Tor}_n^{A^e}(M, A)$$

称为 M 的第 n 个 *Hochschild* 同调。特别地, 我们记

$$\text{HH}_n(A) := H_n(A, A)$$

由定义以及导出函子的基础知识, 容易知道双 A -模 M 的第 0 个 Hochschild 同调

$$H_0(A, M) = M \otimes_{A^e} A = M / \{(m.a - a.m) | a \in A, m \in M\}$$

正是 M 的余中心。注意 Hochschild 同调一般并不是环, 仅仅能保证它是双 A -模。

具体地, 由导出函子的定义, 我们采用投射消解 (projective resolution) 来计算 Hochschild 同调。若双 A -模链复形

$$P_\bullet \rightarrow A := \dots \rightarrow P_3 \rightarrow P_2 \rightarrow P_1 \rightarrow P_0 \rightarrow A \rightarrow 0$$

为双 A -模 A 的投射消解 (正合, 并且每个 $P_i (i \geq 0)$ 作为 K -模是投射的), 那么

$$H_n(A, M) \cong H_n(M \otimes_{A^e} P_\bullet)$$

由同调代数的事实, 它与投射消解 P_\bullet 的选取无关。

事实上 Hochschild 同调可以与空间上的微分形式类比。作为一个具体计算例子, 我们考虑 \mathbb{C} 上的 n 元多项式代数

$$A := \mathbb{C}[x^1, x^2, \dots, x^n]$$

注意到 A 作为 \mathbb{C} -代数是交换的, 从而 $A = A^{\text{op}}$. 我们记

$$A^{\text{op}} = \mathbb{C}[y^1, y^2, \dots, y^n] \quad A^e = \mathbb{C}[x^1, x^2, \dots, x^n; y^1, y^2, \dots, y^n]$$

性质 1.2.2. 考虑 \mathbb{C} -代数 $A := \mathbb{C}[x^1, x^2, \dots, x^n]$, 则其第 k 个 *Hochschild* 同调

$$\text{HH}_k(A) \cong \Omega_A^k := A \otimes \bigwedge^k (\mathbb{C}^n)$$

是以 A 为系数的 k -形式。

证明. 我们给出 A 的投射消解, 比如众所周知的 Koszul 消解

$$\mathcal{K}_A \rightarrow A \rightarrow 0$$

具体地, 引入 n 个新的独立变元 $\eta^1, \eta^2, \dots, \eta^n$ (视为复线性空间 \mathbb{C}^n 的一组基), 考虑环

$$\mathcal{K} := \frac{A^e[\eta^1, \eta^2, \dots, \eta^n]}{\{(\eta^i \eta^j + \eta^j \eta^i) | i \neq j\}} = A^e \otimes \bigwedge^*(\mathbb{C}^n)$$

为以 A^e 为系数的外代数。

注意 \mathcal{K} 有自然的分次:

$$\deg \eta^i = 1 \quad \deg x^i = \deg y^i = \deg 1 = 0$$

记 \mathcal{K}_l 为 \mathcal{K} 的 l 次分量 ($0 \leq l \leq n$), 即

$$\mathcal{K}_l = \bigoplus_{1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_l \leq n} A^e \eta^{i_1} \wedge \eta^{i_2} \wedge \dots \wedge \eta^{i_l} = A^e \otimes \bigwedge^l(\mathbb{C}^n)$$

此时 $K = \mathbb{C}$ 是域, 因此 \mathcal{K} (作为 K -模, 即复线性空间) 的投射性显然。我们定义 Koszul 复形 $(\mathcal{K}_A, \partial)$ 如下:

$$\mathcal{K}_A : \dots \xrightarrow{\partial} \mathcal{K}_n \xrightarrow{\partial} \mathcal{K}_{n-1} \xrightarrow{\partial} \dots \xrightarrow{\partial} \mathcal{K}_1 \xrightarrow{\partial} \mathcal{K}_0$$

其中边缘算子 ∂ (首先是 A^e -模同态) 满足

$$\partial \eta^i = x^i - y^i$$

以及与外微分相同的莱布尼茨法则: 对任意 $\omega \in \mathcal{K}$, 成立

$$\partial(\eta^i \wedge \omega) = \partial \eta^i \wedge \omega - \eta^i \wedge \partial \omega$$

再考虑连接映射

$$\begin{aligned} \varepsilon : \mathcal{K}_0 = A^e &\rightarrow A \\ x^i &\mapsto x^i \\ y^i &\mapsto x^i \end{aligned}$$

则众所周知, Koszul 复形

$$\mathcal{K}_A \xrightarrow{\varepsilon} A \rightarrow 0$$

为 A 的投射消解 (证明从略)。我们以此计算 $\mathrm{HH}^\bullet(A)$ 。我们注意到以下两个简单事实:

其一: 对任何 $1 \leq l \leq n$, 成立双 A -模同构

$$A \otimes_{A^e} \mathcal{K}_l = A \otimes_{A^e} A^e \otimes \bigwedge^l(\mathbb{C}^n) \cong A \otimes \bigwedge^l(\mathbb{C}^n)$$

其二：函子 $A \otimes_{A^e} -$ 作用于 Koszul 复形 \mathcal{K}_A 之后，成立

$$A \otimes_{A^e} \partial = 0$$

这是因为，对于任意 $f \in A$ ，在 $A \otimes_{A^e} A^e$ 当中总成立

$$f \otimes x^i = x^i f \otimes 1 = f x^i \otimes 1 = f \otimes (x^i)^{\text{op}} = f \otimes y^i$$

因此

$$f \otimes (x^i - y^i) = 0 \in A \otimes_{A^e} A^e$$

从而由 ∂ 的定义，容易看出 $A \otimes_{A^e} \partial = 0$.

综上两方面，直接计算之，

$$\begin{aligned} \text{HH}_k(A) &= H_k(A \otimes_{A^e}^L A) \\ &= H_k(A \otimes_{A^e} \mathcal{K}_A) \\ &= A \otimes_{A^e} \mathcal{K}_k \\ &= A \otimes \bigwedge^k(\mathbb{C}^n) \\ &= \Omega_A^k \end{aligned}$$

从而得证。 □

事实上对于一般的含么结合 K -代数 A ， $\text{HH}_\bullet(A)$ 扮演了“微分形式”的角色。这是 Hochschild 同调的一种几何解释。

对于一般的 A ， A 作为双 A -模，由一种典范的投射消解，称之为 **Bar-复形**：

定义 1.2.3. (*Bar-复形*)

对于含么结合 K -代数 A ，定义以下双 A -模链复形

$$\cdots \rightarrow B_2 A \xrightarrow{b} B_1 A \xrightarrow{b} B_0 A \xrightarrow{b} A \rightarrow 0$$

如下：

$$B_n A := A \otimes A^{\otimes n} \otimes A \quad (n \geq 0)$$

$$b : a_0 \otimes a_1 \otimes \cdots \otimes a_n \mapsto \sum_{k=0}^{n-1} (-1)^k a_0 \otimes a_1 \otimes \cdots \otimes (a_k a_{k+1}) \otimes \cdots \otimes a_n$$

称之为 **Bar-复形**。

首先容易验证 $b^2 = 0$, 从而 $B_\bullet A \xrightarrow{b} A \rightarrow 0$ 确实是链复形。对于 $n \geq 1$, 具体验证如下:

$$\begin{aligned}
b^2(a_0 \otimes a_1 \otimes \dots \otimes a_n) &= b \left(\sum_{k=0}^{n-1} (-1)^k a_0 \otimes a_1 \otimes \dots \otimes (a_k a_{k+1}) \otimes \dots \otimes a_n \right) \\
&= \sum_{k=0}^{n-1} (-1)^k b(a_0 \otimes a_1 \otimes \dots \otimes (a_k a_{k+1}) \otimes \dots \otimes a_n) \\
&= \sum_{k=0}^{n-1} (-1)^k \left[\sum_{l=0}^{k-2} (-1)^l a_0 \otimes \dots \otimes (a_l a_{l+1}) \otimes \dots \otimes (a_k a_{k+1}) \otimes \dots \otimes a_n \right. \\
&\quad + (-1)^{k-1} a_0 \otimes \dots \otimes (a_{k-1} a_k a_{k+1}) \otimes \dots \otimes a_n \\
&\quad + (-1)^k a_0 \otimes \dots \otimes (a_k a_{k+1} a_{k+2}) \otimes \dots \otimes a_n \\
&\quad \left. - \sum_{l=k+2}^{n-1} (-1)^l a_0 \otimes \dots \otimes (a_k a_{k+1}) \otimes \dots \otimes (a_l a_{l+1}) \otimes \dots \otimes a_n \right] \\
&= \sum_{\substack{0 \leq k < l \leq n-1 \\ l-k \geq 2}} \left(-(-1)^{k+l} + (-1)^{k+l} \right) a_0 \otimes \dots \otimes (a_k a_{k+1}) \otimes \dots \otimes (a_l a_{l+1}) \otimes \dots \otimes a_n \\
&\quad + \sum_{0 \leq k \leq n-2} \left((-1)^{2k+1} + (-1)^{2k} \right) a_0 \otimes \dots \otimes (a_k a_{k+1} a_{k+2}) \otimes \dots \otimes a_n \\
&= 0
\end{aligned}$$

从而验证完毕。

我们可以把 $a_0 \otimes \dots \otimes a_n$ 想象为直线上依次排列的 $n+1$ 个质点, 将算子 b 想象为相邻质点两两“碰撞”。

性质 1.2.4. 记号同之前, 则 Bar -复形

$$B_\bullet A \rightarrow A \rightarrow 0$$

是 A 的投射消解。

证明. 对任意 $n \geq 0$, $B_n A = A \otimes A^{\otimes n} \otimes A$ 是投射 K -模 (这是因为由最初的假定, A 是投射 K -模, 从而其张量积也投射) 于是我们只需再验证该链复形是正合的。

为此, 我们构造链同伦

$$\begin{aligned}
h : B_{n-2} A &\rightarrow B_{n-1} A \quad (n \geq 1, B_{-1} A = A) \\
a_0 \otimes \dots \otimes a_n &\mapsto 1 \otimes a_0 \otimes \dots \otimes a_n
\end{aligned}$$

只需验证 $hb + bh = 1$, 之后与性质 1.1.5 的证明类似。

注意到对于任意 $n \geq 0$, 成立

$$bh(a_0 \otimes \dots \otimes a_n) = b(1 \otimes a_0 \otimes \dots \otimes a_n)$$

$$\begin{aligned}
&= a_0 \otimes \dots \otimes a_n - \sum_{k=0}^{n-1} 1 \otimes a_0 \otimes \dots \otimes (a_k a_{k+1}) \otimes \dots \otimes a_n \\
&= a_0 \otimes \dots \otimes a_n - 1 \otimes b(a_0 \otimes \dots \otimes a_n) \\
&= (1 - hb)a_0 \otimes \dots \otimes a_n
\end{aligned}$$

因此 $bh + hb = 1$ ，证毕。 □

定义 1.2.5. 设 M 为双 A -模，定义 **Hochschild 链复形**

$$C_\bullet(A, M) := M \otimes_{A^e} B_\bullet A$$

$$\dots M \otimes A^{\otimes 3} \rightarrow M \otimes A^{\otimes 2} \rightarrow M \otimes A \rightarrow M$$

方便起见，该链复形的边缘算子仍记作 b 。

则易知 M 的 Hochschild 同调无非是 Hochschild 链复形的同调：

$$H_n(A, M) = H_n(C_\bullet(A, M))$$

注意到有双 A -模同构

$$C_n(A, M) = M \otimes_{A^e} (A \otimes A^{\otimes n} \otimes A) \cong M \otimes A^{\otimes n}$$

在此同构意义下，容易验证 $C_\bullet(A, M)$ 的边缘算子 b 有如下显示表达：

对任意 $m \in M$ ，以及 $a_1, a_2, \dots, a_n \in A$ ，成立

$$\begin{aligned}
b(m \otimes (a_1 \otimes \dots \otimes a_n)) &= m \otimes_{A^e} (b(1 \otimes a_1 \otimes \dots \otimes a_n \otimes 1)) \\
&= m \otimes_{A^e} [a_1 \otimes \dots \otimes a_n \otimes 1 \\
&\quad + \sum_{k=1}^{n-1} (-1)^k 1 \otimes a_1 \otimes \dots \otimes (a_k a_{k+1}) \otimes \dots \otimes a_n \otimes 1 \\
&\quad + (-1)^n 1 \otimes a_1 \otimes \dots \otimes a_n] \\
&= (m \cdot a_1) \otimes a_2 \otimes \dots \otimes a_n \\
&\quad + \sum_{k=1}^{n-1} (-1)^k m \otimes a_1 \otimes \dots \otimes (a_k a_{k+1}) \otimes \dots \otimes a_n \\
&\quad + (-1)^n (a_n \cdot m) \otimes a_1 \otimes \dots \otimes a_{n-1}
\end{aligned}$$

Hochschild 链复形的边缘算子的显式表达与 Bar-复形非常相似，从上式最右边的前两项可以看出；区别在于上式最右边的第三项。

注记 1.2.6. (*Hochschild* 同调的函子性) 若 $\varphi: A \rightarrow B$ 为 K -代数同态，那么 φ 自然诱导 K -模同态

$$\varphi: \text{HH}_\bullet(A) \rightarrow \text{HH}_\bullet(B)$$

自行去定义何为 K -代数同态。此注记表明, HH_\bullet 其实是从 K -代数范畴到 K -模范畴的一个函子。

1.3 Hochschild 上同调

对于双 A -模 M , 既然我们已经考虑余中心 $M \otimes_A A$, 那么我们自然也会去考虑 $\mathrm{Hom}_{A^e}(A, M)$. 我们称双 A -模 $\mathrm{Hom}_{A^e}(A, M)$ 为 M 的导出中心 (derived center)。

性质 1.3.1. (导出中心的结构) 对于双 A -模 M , 则有双 A -模同构

$$\mathrm{Hom}_{A^e}(A, M) \cong \{m \in M \mid a.m - m.a = 0 \ \forall a \in A\}$$

容易验证 $\{m \in M \mid a.m - m.a = 0 \ \forall a \in A\}$ 为 M 的双 A -子模。粗俗地说, 该子模由“与 A 中所有元素交换”的元素构成, 故谓之“中心”。

证明. 对于任意的 $\varphi \in \mathrm{Hom}_{A^e}(A, M)$ 以及 $a \in A$, 则 $\varphi(a)$ 的取值由 $\varphi(1)$ 完全决定:

$$\varphi(a) = \varphi(a.1) = a.\varphi(1)$$

而另一方面,

$$\varphi(a) = \varphi(1.a) = \varphi(1).a$$

从而有 $a.\varphi(1) = \varphi(1).a$. 于是我们可以构造如下双 A -模同态:

$$\begin{aligned} \mathrm{Hom}_{A^e}(A, M) &\rightarrow \{m \in M \mid a.m - m.a = 0 \ \forall a \in A\} \\ \varphi &\mapsto \varphi(1) \end{aligned}$$

容易验证该模同态为同构。证毕。 □

然后我们考虑 $\mathrm{Hom}(-, M)$ 的导出函子, 自然地去定义如下:

定义 1.3.2. (*Hochschild* 上同调)

对于双 A -模 M , 以及 $n \geq 0$, 定义 M 的第 n 个 *Hochschild* 上同调

$$H^n(A, M) = \mathrm{Ext}_{A^e}^n(A, M)$$

特别地, 我们记

$$H^n(A) = \mathrm{Ext}_{A^e}^n(A, A)$$

由定义知, M 的第 0 个 Hochschild 上同调为 $\text{Hom}_{A^e}(A, M)$, 是 M 的导出中心。回顾 Bar-复形, 我们考虑如下的 **Hochschild 上链复形**

$$C^\bullet(A, M) = \text{Hom}_{A^e}(B_\bullet A, M)$$

该上链复形的微分算子 ∂ 由 Bar-复形 $B_\bullet A$ 的边缘算子 b 所诱导。则 M 的 Hochschild 上同调满足

$$H^n(A, M) = H^n(C^\bullet(A, M), \partial) = H^n(\text{Hom}_{A^e}(B_\bullet A, M), \partial)$$

注意有自然的双 A -模同构

$$C^n(A, M) = \text{Hom}_{A^e}(A \otimes A^{\otimes n} \otimes A, M) \cong \text{Hom}(A^{\otimes n}, M)$$

(即取值于 M 的 n 重 K -线性映射) 于是对于任意的 $\varphi \in C^n(A, M) = \text{Hom}(A^{\otimes n}, M)$, 容易知道 $\partial\varphi \in \text{Hom}(A^{\otimes n+1}, M)$ 具有如下显式表达: 对任意 $a_0, a_1, \dots, a_m \in A$,

$$\begin{aligned} \partial\varphi(a_0, a_1, \dots, a_n) &= a_0 \cdot \varphi(a_1, a_2, \dots, a_n) \\ &\quad - \sum_{k=0}^{n-1} (-1)^k \varphi(a_0, \dots, (a_k a_{k+1}), \dots, a_n) \\ &\quad - (-1)^n \varphi(a_0, a_1, \dots, a_{n-1}) \cdot a_n \end{aligned}$$

接下来讨论 Hochschild 上同调的几何意义。我们已经知道第 0 个 Hochschild 上同调为 M 的导出中心; 现在我们看 $H^1(A, M)$, 我们将发现它是 A 的取值于 M 的外导子。

回顾导子 (derivation) 的概念如下:

定义 1.3.3. (导子) 对于双 A -模 M , K -线性映射

$$D : A \rightarrow M$$

称为 A 的取值于 M 的导子 (derivation), 如果对任意的 $a_1, a_2 \in A$, 成立

$$D(a_1 a_2) = D(a_1) \cdot a_2 + a_1 \cdot D(a_2)$$

对于 $m \in M$ 我们定义

$$\begin{aligned} \text{ad}_m : A &\rightarrow M \\ a &\mapsto [m, a] := m \cdot a - a \cdot m \end{aligned}$$

则容易验证 ad_m 为 A 的取值于 M 的导子, 称形如这样的导子为**内导子** (inner derivation)。

我们记

$$\text{Der}(A, M) := \{D : A \rightarrow M \mid D \text{ 为导子}\}$$

$$\text{Inn}(A, M) := \{\text{ad}_m \mid m \in M\} \subseteq \text{Der}(A, M)$$

注意 $\text{Inn}(A, M)$ 与 $\text{Der}(A, M)$ 都有显然的 K -模结构，且前者是后者的 K -子模。

性质 1.3.4. ($H^1(A, M)$ 的结构)

对于双 A -模 M ，成立

$$H^1(A, M) \cong \frac{\text{Der}(A, M)}{\text{Inn}(A, M)}$$

我们称上式右边的集合当中的元素为 A 的取值于 M 的**外导子** (outer derivation)。

证明. 只需考虑 Hochschild 上链复形

$$C^0(A, M) \xrightarrow{\partial^0} C^1(A, M) \xrightarrow{\partial^1} C^2(A, M) \rightarrow \cdots$$

我们只需具体计算之。对于 $\varphi \in C^1(A, M) \cong \text{Hom}(A, M)$ ，则 $\partial^1 \varphi \in C^2(A, M) \cong \text{Hom}(A^{\otimes 2}, M)$ 满足：对任意 $a_1, a_2 \in A$ ，成立

$$\partial^1 \varphi(a_1, a_2) = a_1 \cdot \varphi(a_2) - \varphi(a_1 a_2) + \varphi(a_1) \cdot a_2$$

可见 $\varphi \in \ker \partial^1$ 当且仅当 $\varphi \in \text{Der}(A, M)$ 。也就是说 $\ker \partial^1 = \text{Der}(A, M)$ 。

另一方面，对于 $m \in C^0(A, M) \cong M$ ，以及 $a \in A$ ，成立

$$(\partial^0 m)(a) = a \cdot m - m \cdot a = -\text{ad}_m(a)$$

因此 $\ker \partial^0 \cong \text{Inn}(A, M)$ 。从而

$$H^1(A, M) = \frac{\ker \partial^1}{\text{Im } \partial^0} \cong \frac{\text{Der}(A, M)}{\text{Inn}(A, M)}$$

□

特别地，当 $M = A$ 时，

$$\text{HH}^1(A) = \text{Der}(A, A) / \text{Inn}(A, A)$$

注意到 $\text{Der}(A, A)$ 上面还有更多的结构：对于 $\forall D_1, D_2 \in \text{Der}(A, A)$ ，定义

$$[D_1, D_2] := D_1 \circ D_2 - D_2 \circ D_1 : A \rightarrow A$$

容易验证 $[D_1, D_2]$ 仍然为 A 的导子，并且 $[-, -]$ 为 $\text{Der}(A, A)$ 上的李括号 (Lie bracket)。

另外容易验证

$$[\text{Der}(A, A), \text{Inn}(A, A)] \subseteq \text{Inn}(A, A)$$

具体地, 对于 $D \in \text{Der}(A, A)$ 以及 $m \in M$, 成立

$$[D, \text{ad}_m] = \text{ad}_{D(m)}$$

也就是说 $\text{Inn}(A, A)$ 是 $\text{Der}(A, A)$ 的理想。于是 $[-, -]$ 诱导了 $\text{HH}^1(A) = \frac{\text{Der}(A, A)}{\text{Inn}(A, A)}$ 上的李括号结构。

如果 A 是交换 K -代数, 则 $\text{Inn}(A, A) = 0$ 。于是

$$\text{HH}^1(A) \cong \text{Der}(A, A)$$

可被认为是“切向量场”(此时 A 被认为是“函数环”)。

我们再去考虑 $H^2(A, M)$. 对于任意的

$$\varphi \in C^2(A, M) = \text{Hom}(A^{\otimes 2}, M)$$

则对 $a_0, a_1, a_2 \in A$, 成立

$$\partial\varphi(a_0, a_1, a_2) = a_0 \cdot \varphi(a_1, a_2) - \varphi(a_0 a_1, a_2) + \varphi(a_0, a_1 a_2) - \varphi(a_0, a_1) \cdot a_2$$

引理 1.3.5. 对于双 A -模 M , 以及 $\varphi \in C^2(A, M) = \text{Hom}(A^{\otimes 2}, M)$, 我们令

$$\hat{A} := A \oplus M$$

并赋以如下的 K -代数结构: 对于任意 $a_1, a_2 \in A$ 以及 $m_1, m_2 \in M$, 规定 \hat{A} 的乘法 $\hat{\bullet}_\varphi$ 为

$$(a_1 \oplus m_1) \hat{\bullet}_\varphi (a_2 \oplus m_2) := a_1 a_2 \oplus [a_1 \cdot m_2 + m_1 \cdot a_2 + \varphi(a_1, a_2)]$$

那么 $(\hat{A}, \hat{\bullet}_\varphi)$ 为结合代数, 当且仅当 $\partial\varphi = 0$.

证明. 这是简单的计算验证。对于任意的 $a_0, a_1, a_2 \in A$ 以及 $m_0, m_1, m_2 \in M$, 直接计算之,

$$\begin{aligned} & [(a_0 \oplus m_0) \hat{\bullet}_\varphi (a_1 \oplus m_1)] \hat{\bullet}_\varphi (a_2 \oplus m_2) \\ &= a_0 a_1 a_2 \oplus [a_0 a_1 \cdot m_2 + a_0 \cdot m_1 \cdot a_2 + m_0 \cdot a_1 a_2 + \varphi(a_0, a_1) \cdot a_2 + \varphi(a_0 a_1, a_2)] \end{aligned}$$

以及

$$\begin{aligned} & (a_0 \oplus m_0) \hat{\bullet}_\varphi [(a_1 \oplus m_1) \hat{\bullet}_\varphi (a_2 \oplus m_2)] \\ &= a_0 a_1 a_2 \oplus [a_0 a_1 \cdot m_2 + a_0 \cdot m_1 \cdot a_2 + m_0 \cdot a_1 a_2 + a_0 \cdot \varphi(a_1, a_2) + \varphi(a_0, a_1 a_2)] \end{aligned}$$

因此 $\hat{\bullet}_\varphi$ 满足结合性, 当且仅当

$$\varphi(a_0, a_1) \cdot a_2 + \varphi(a_0 a_1, a_2) = a_0 \cdot \varphi(a_1, a_2) + \varphi(a_0, a_1 a_2)$$

而此式等价于 $\partial\varphi = 0$. □

注意到在 \hat{A} 当中, 对任意的 $m_1, m_2 \in M$, 以及任意 $\varphi \in C^2(A, M)$, 总有 $m_1 \hat{\bullet}_\varphi m_2 = 0$. 于是我们不妨将 “ $A \oplus M$ ” 当中的 “ M ” 理解为 “一阶小量”。我们考虑 $\varphi = 0$ 时 $\hat{A}_0 := A \oplus M$ 的代数结构

$$(a_1 \oplus m_1) \bullet (a_2 \oplus m_2) := a_1 a_2 \oplus (a_1 \cdot m_2 + m_1 \cdot a_2)$$

显然 (\hat{A}_0, \bullet) 为结合代数。若 $\partial\varphi = 0$, 则结合代数 $(\hat{A}, \hat{\bullet}_\varphi)$ 为 (\hat{A}_0, \bullet) 的一阶形变, 而 φ 为其 “形变参数”。

从而 M 的第 2 个 Hochschild 上同调

$$H^2(A, M) \cong \frac{\{\varphi | (\hat{A}, \hat{\bullet}_\varphi) \text{ 是结合代数}\}}{\text{Im}(\partial : C^1(A, M) \rightarrow C^2(A, M))}$$

商掉的东西 ($\text{Im } \partial$) 为形如以下的一类特殊的一阶形变:

$$\begin{aligned} \varphi_f : A \otimes A &\rightarrow M \\ a_1 \otimes a_2 &\mapsto a_1 \cdot f(a_2) + f(a_1) \cdot a_2 - f(a_1 a_2) \end{aligned}$$

其中 $f \in C^1(A, M) = \text{Hom}(A, M)$, $\varphi_f = \partial f$.

Hochschild 上同调与 Hochschild 同调两者之间有如下自然的配对:

定义 1.3.6. 设 M, N 为双 A -模, 则自然有如下配对:

$$C^n(A, M) \otimes C_n(A, N) \rightarrow N \otimes_{A^e} M$$

定义为: 对任意 $f \in C^n(A, M) = \text{Hom}(A^{\otimes n}, M)$ 以及任意 $y \otimes a_1 \otimes \cdots \otimes a_n \in C_n(A, N) = N \otimes A^{\otimes n}$, 有

$$(f, y \otimes a_1 \otimes \cdots \otimes a_n) \mapsto y \otimes f(a_1, \dots, a_n) \in N \otimes_{A^e} M$$

其中任意 $y \in N$, 以及 $a_1, \dots, a_n \in A$.

容易验证, 该配对自然诱导了

$$H^n(A, M) \otimes H_n(A, N) \rightarrow N \otimes_{A^e} M$$

这是容易发现的 (先限制, 再下降, 下降的良好性容易说明。)

特别地, 当 $M = A, N = A^*$ (其中 $A^* := \text{Hom}(A, K)$) 时, 我们有双线性函数

$$H^n(A, A) \otimes H_n(A, A^*) \rightarrow A^* \otimes_{A^e} A \xrightarrow{\text{ev}} K$$

我们考察一个 Hochschild 上同调的具体算例。

性质 1.3.7. 若 $A = \mathbb{C}[x^1, \dots, x^n]$ 为 \mathbb{C} 上的 n 元多项式环, 则

$$\mathrm{HH}^k(A) \cong \mathrm{Hom}\left(\bigwedge^k(\mathbb{C}^n), A\right)$$

证明. 对于这个特例, 采用 Koszul 复形计算更佳简便. 有关记号同性质 1.2.2 的证明过程. 考虑 Koszul 复形

$$\mathcal{K}_A : \dots \xrightarrow{\partial} A^e \otimes \bigwedge^{k+1}(\mathbb{C}^n) \xrightarrow{\partial} A^e \otimes \bigwedge^k(\mathbb{C}^n) \xrightarrow{\partial} A^e \otimes \bigwedge^{k-1}(\mathbb{C}^n) \xrightarrow{\partial} \dots$$

然后将函子 $\mathrm{Hom}_{A^e}(-, A)$ 作用于之上. 注意到有 \mathbb{C} -线性同构

$$\begin{aligned} & \mathrm{Hom}_{A^e}\left(A^e \otimes \bigwedge^k(\mathbb{C}^n), A\right) \\ & \cong \mathrm{Hom}\left(\bigwedge^k(\mathbb{C}^n), \mathrm{Hom}_{A^e}(A^e, A)\right) \\ & \cong \mathrm{Hom}\left(\bigwedge^k(\mathbb{C}^n), A\right) \end{aligned}$$

此外再注意到, 上链复形 $\mathrm{Hom}_{A^e}(\mathcal{K}_A, A)$ 的微分算子 $d := \mathrm{Hom}_{A^e}(\partial, A) = 0$. 这是因为对于 $\varphi \in \mathrm{Hom}_{A^e}\left(A^e \otimes \bigwedge^k(\mathbb{C}^n), A\right)$, $\omega \in \bigwedge^{k+1}(\mathbb{C}^n)$ 以及 $f \in A^e$, 成立

$$d\varphi(f \otimes \omega) = \varphi(\partial(f \otimes \omega))$$

回顾 Koszul 复形边缘算子运算规则

$$\partial : \eta^i \mapsto x^i - y^i \in A^e$$

又由于 φ 为 A^e -模同态, 从而对于任意 $\tilde{\omega} \in \bigwedge^k(\mathbb{C}^n)$, 成立

$$\varphi(x^i \otimes \tilde{\omega}) = x^i \cdot \varphi(1 \otimes \tilde{\omega}) = \varphi(1 \otimes \tilde{\omega}) \cdot x^i = \varphi((x^i)^{\mathrm{op}} \otimes \tilde{\omega}) = \varphi(y^i \otimes \tilde{\omega})$$

也就是说 $\varphi((x^i - y^i) \otimes \tilde{\omega}) = 0$. 由此可见 $d = 0$. 综上可知

$$\mathrm{HH}^k(A) \cong \mathrm{Hom}\left(\bigwedge^k(\mathbb{C}^n), A\right)$$

□

注意到 $\mathrm{Hom}\left(\bigwedge^k(\mathbb{C}^n), A\right)$ 之中的元素形如

$$\sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n} f_{i_1 \dots i_k} \partial_{i_1} \wedge \dots \wedge \partial_{i_k}$$

回顾 $\mathrm{HH}_\bullet(A)$ 中的元素可被认为是“微分形式”, 可见 $\mathrm{HH}^\bullet(A)$ 中的元素则是“多重切向量场”。

1.4 约化 Bar 复形

如果 $K \hookrightarrow A$ 为嵌入, 那么我们可以更加方便地计算 Hochschild (上) 同调:

定义 1.4.1. (约化 Bar-复形) (*reduced Bar-complex*)

对于 K -代数 A , 如果 $K \hookrightarrow A$, 那么考虑 K -模

$$\bar{A} := A/K$$

我们定义如下的约化 Bar-复形 $(\bar{B}_\bullet A, b)$:

$$\bar{B}_n A := A \otimes \bar{A}^{\otimes n} \otimes A \quad \forall i \geq 0$$

边缘算子 $b: \bar{B}_n A \rightarrow \bar{B}_{n-1} A$ 如下定义:

$$\begin{aligned} b(a_0 \otimes (\bar{a}_1 \otimes \cdots \otimes \bar{a}_n) \otimes a_{n+1}) &:= (a_0 a_1) \otimes (\bar{a}_2 \otimes \cdots \otimes \bar{a}_n) \otimes a_{n+1} \\ &+ \sum_{i=1}^{n-1} (-1)^i a_0 \otimes (\bar{a}_1 \otimes \cdots \otimes (\bar{a}_i \bar{a}_{i+1}) \otimes \cdots \otimes \bar{a}_n) \otimes a_{n+1} \\ &+ (-1)^n a_0 \otimes (\bar{a}_1 \otimes \cdots \otimes \bar{a}_{n-1}) \otimes (a_n a_{n+1}) \end{aligned}$$

注意到 $\bar{B}_\bullet A$ 是 $B_\bullet A$ 的商模:

$$\bar{B}_n A = \frac{B_n A}{\{a_0 \otimes (a_1 \otimes \cdots \otimes a_{i-1} \otimes 1 \otimes a_{i+1} \otimes \cdots \otimes a_n) \otimes a_{n+1}\}}$$

容易发现约化 Bar-复形的“ b ”正是 Bar-复形的 b . 但是我们要验证 b 的良好性, 即与代表元选取无关. 这是容易验证的. 于是我们得到以下链复形:

$$\bar{B}_\bullet A \rightarrow A \rightarrow 0$$

与之前 Bar-复形完全类似, 我们容易验证此复形也是正合的. 只需构造同伦算子

$$\begin{aligned} h: \bar{B}_{n-1} A &\rightarrow \bar{B}_n A \\ a_0 \otimes (\bar{a}_1 \otimes \cdots \otimes \bar{a}_{n-1}) \otimes a_n &\mapsto 1 \otimes (\bar{a}_0 \otimes \bar{a}_1 \otimes \cdots \otimes \bar{a}_n) \otimes a_{n+1} \end{aligned}$$

验证 $bh + hb = 1$ 即可。

定义 1.4.2. (约化 Hochschild (上) 链复形)

对于双 A -模 M ，我们令

$$\begin{aligned}\overline{C}_\bullet(A, M) &:= M \otimes_{A^e} \overline{B}_\bullet A \cong M \otimes \overline{A}^{\otimes \bullet} \\ \overline{C}^\bullet(A, M) &:= \operatorname{Hom}_{A^e}(\overline{B}_\bullet A, M) \cong \operatorname{Hom}(\overline{A}^{\otimes \bullet}, M)\end{aligned}$$

称之为关于 M 的约化 Hochschild (上) 链复形。

事实上，约化 Hochschild (上) 链复形的 (上) 同调自然同构于 Hochschild (上) 同调——这是由以下代数引理保证的：

引理 1.4.3. 条件同上，则商映射

$$\pi_\bullet : C_\bullet(A, M) \rightarrow \overline{C}_\bullet(A, M)$$

所诱导的链映射

$$\pi_\bullet : (C_\bullet(A, M), d) \rightarrow (\overline{C}_\bullet(A, M), d)$$

为拟同构。

证明. 注意链映射 π_\bullet 为满态射，只需再证明其核复形

$$\ker \pi_\bullet$$

是正合的即可。我们承认之（似乎不太好证）。 \square

注意上述引理也适用于 Hochschild 上链复形的情形，完全类似，不再赘述。从而我们立刻有如下推论：

推论 1.4.4. 对于 K -代数 A ，如果 $K \hookrightarrow A$ 为嵌入，则有自然同构：

$$\begin{aligned}H_\bullet(A, M) &\cong H_\bullet(\overline{C}_\bullet(A, M)) \\ H^\bullet(A, M) &\cong H^\bullet(\overline{C}^\bullet(A, M))\end{aligned}$$

关于 (约化) Bar-复形，我们还有另一种理解方式：关于 A 的 (约化) Bar-复形是 A 与某个微分分次代数的自由乘积。

定义 1.4.5. (微分分次代数)

\mathbb{Z} -分次 K -代数

$$A := \bigoplus_{n \in \mathbb{Z}} A_n$$

称为微分分次代数 (differential graded algebra), 若它配以 K -线性算子 $d: A \rightarrow A$, 并且满足:

$$\begin{cases} d(A_n) \subseteq A_{n+1} & \forall n \in \mathbb{Z} \\ d^2 = 0 \\ d(\alpha\beta) = (d\alpha)\beta + (-1)^{\deg \alpha} \alpha(d\beta) & \forall \alpha, \beta \in A, \text{ 并且 } \alpha \text{ 是齐次元} \end{cases}$$

“ \mathbb{Z} -分次 K -代数”的定义将在后文 (定义2.2.1) 介绍。(其实大家都明白)

对于微分分次代数 (A, d) , 由于 A 的分次以及 $d^2 = 0$, 从而自然有上链复形

$$\cdots \rightarrow A_{-1} \xrightarrow{d} A_0 \xrightarrow{d} A_1 \rightarrow \cdots$$

我们将此上链复形也记为 (A, d) .

微分分次代数最直接的例子是, 对于光滑流形 X , 考虑 $A := \Omega^\bullet(X)$ 为 X 上的微分形式。 A 上的乘法即为微分形式的外积 \wedge , 微分结构即为外微分 d .

我们可以适当修改微分分次代数的定义, 将条件 “ $d(A_n) \subseteq A_{n+1}$ ” 改为 “ $d(A_n) \subseteq A_{n-1}$ ”, 此时的微分算子我们习惯记为 “ ∂ ”. 对于这样的微分分次代数 (A, ∂) , 它可以被视为链复形。

例子 1.4.6. 我们考虑如下 K -代数:

$$A := K[\varepsilon] := K \oplus K\varepsilon \oplus K\varepsilon^2 \oplus \cdots$$

其中 ε 为形式变量, 并且规定 $\deg \varepsilon = 1$, 由此诱导出 $K[\varepsilon]$ 的分次结构。其微分算子 ∂_ε 由以下诱导:

$$\partial_\varepsilon(1) = 0 \quad \partial_\varepsilon(\varepsilon) = 1$$

注意 $\deg \varepsilon = 1$, 按照微分代数的定义可计算出

$$\partial_\varepsilon(\varepsilon^2) = \partial_\varepsilon(\varepsilon)\varepsilon + (-1)^{\deg \varepsilon} \varepsilon \partial_\varepsilon(\varepsilon) = \varepsilon - \varepsilon = 0$$

一般地, 对于非负整数 n 我们有

$$\partial_\varepsilon(\varepsilon^n) = \begin{cases} 0 & n \text{ 为偶数} \\ \varepsilon^{n-1} & n \text{ 为奇数} \end{cases}$$

从而链复形 $(K[\varepsilon], \partial_\varepsilon)$:

$$\cdots \rightarrow K\varepsilon^4 \xrightarrow{0} K\varepsilon^3 \xrightarrow{1} K\varepsilon^2 \xrightarrow{0} K\varepsilon \xrightarrow{1} K \rightarrow 0$$

是正合的。其中 $1 : K\varepsilon^{2n+1} \rightarrow K\varepsilon^{2n}$ 将 ε^{2n+1} 映为 ε^{2n} 。

众所周知，对于两个 K -代数 A, B ，我们可以谈论它们的自由乘积（free product） $A * B$ 。若 $A = \bigoplus_{i \in \mathbb{Z}} A_n$ 是微分分次代数，其微分算子为 d ，则容易知道 $A * B$ 自然也有微分分次代数结构：

$$\begin{cases} \deg b = 0 & \forall b \in B \\ \deg a = n & \forall a \in A_n \subseteq A \\ db = 0 & \forall b \in B \end{cases}$$

容易知道 $A * B$ 中的 N 次齐次元必形如以下元素的有限和：

$$b_1 a_1 b_2 a_2 \cdots b_m a_m b_{m+1} \quad (b_i \in B, a_i \in A_{n_i}, \sum_{i=1}^m n_i = N)$$

性质 1.4.7. 对于 K -代数 A ，则有链复形的同构

$$(B_\bullet A \rightarrow A, b) \cong (A * K[\varepsilon], \partial_\varepsilon)$$

其中 $(K[\varepsilon], \partial_\varepsilon)$ 为例子 1.4.6 当中的微分分次代数，视为链复形；同构映射为

$$\begin{aligned} \varphi_n : B_n A &\rightarrow (A * K[\varepsilon])_n \\ a_0 \otimes (a_1 \otimes \cdots \otimes a_n) \otimes a_{n+1} &\mapsto a_0 \varepsilon a_1 \varepsilon a_2 \cdots \varepsilon a_n \varepsilon a_{n+1} \end{aligned}$$

这给出了 Bar-复形的另一种理解方式。

证明. 容易验证 φ_n 为 K -模同构，且逆映射 φ_n^{-1} 由以下诱导：

$$\varepsilon^n \mapsto \underbrace{1 \varepsilon 1 \varepsilon 1 \cdots 1 \varepsilon 1}_{n \uparrow \varepsilon}$$

然后只需验证 $\varphi_\bullet : (B_\bullet \rightarrow A, b) \rightarrow (A * K[\varepsilon], \partial_\varepsilon)$ ：是链映射，也就是要验证交换关系 $\varphi \circ b = \partial_\varepsilon \circ \varphi$

$$\begin{array}{ccc} B_n A & \xrightarrow{b} & B_{n-1} A \\ \downarrow \varphi & & \downarrow \varphi \\ (K[\varepsilon] * A)_n & \xrightarrow{\partial_\varepsilon} & (K[\varepsilon] * A)_{n-1} \end{array}$$

而这容易验证，验证如下：

$$\begin{aligned} &\varphi \circ b(a_0 \otimes a_1 \otimes \cdots \otimes a_n \otimes a_{n+1}) \\ &= \varphi \left(\sum_{k=0}^n (-1)^k a_0 \otimes \cdots \otimes (a_k a_{k+1}) \otimes \cdots \otimes a_{n+1} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{k=0}^n (-1)^k a_0 \varepsilon a_1 \varepsilon \cdots \varepsilon a_{n+1} \\
&= \partial_\varepsilon (a_0 \varepsilon a_1 \varepsilon \cdots a_n \varepsilon a_{n+1}) \\
&= \partial_\varepsilon \circ \varphi(a_0 \otimes a_1 \otimes \cdots \otimes a_n \otimes a_{n+1})
\end{aligned}$$

□

我们还可以考虑 $(K[\varepsilon], \partial_\varepsilon)$ 的商代数 $K[\varepsilon]/\varepsilon^2$, 易知 $(K[\varepsilon]/\varepsilon^2, \partial_\varepsilon)$ 也构成微分分次代数, 从而也通过微分算子 ∂_ε 视为链复形。在此代数中, $\varepsilon^2 = 0$ 。

类似地, 我们可以给出约化 Bar-复形的另一种理解方式:

性质 1.4.8. 对于 K -代数 A , 则有链复形同构

$$(\bar{B}_\bullet A \rightarrow A, b) \cong (A * K[\varepsilon]/\varepsilon^2, \partial_\varepsilon)$$

只需注意到 $A * K[\varepsilon]/\varepsilon^2$ 当中的 n 次齐次元必形如以下元素的有限和:

$$a_0 \varepsilon a_1 \varepsilon \cdots a_n \varepsilon a_{n+1} \quad (a_i \in A)$$

证明. 完全类似。事实上此链复形同构映射由 $\varphi_n : B_n A \rightarrow (A * K[\varepsilon])_n$ 诱导, 其良定性由下式保证: 对任意 $1 \leq i \leq n$,

$$\begin{aligned}
&\varphi_n(a_0 \otimes \cdots \otimes a_{i-1} \otimes 1 \otimes a_{i+1} \otimes \cdots \otimes a_{n+1}) \\
&= a_0 \varepsilon a_1 \cdots a_{i-1} \varepsilon 1 \varepsilon a_{i+1} \cdots \varepsilon a_{n+1} \\
&= a_0 \varepsilon a_1 \cdots a_{i-1} 1 \varepsilon^2 a_{i+1} \cdots \varepsilon a_{n+1} \\
&= 0 \pmod{\varepsilon^2}
\end{aligned}$$

□

本节最后简单介绍以下 Hochschild (上) 同调与其它常见的 (上) 同调理论的关系。

例子 1.4.9. (群的上同调)

设 G 是一个群, $M \in \text{Rep}(G)$ 为群 G 的一个左 K -表示, 则有 G -模链复形

$$0 \rightarrow M \xrightarrow{\delta} C^1(G, M) \xrightarrow{\delta} C^2(G, M) \xrightarrow{\delta} \cdots$$

其中

$$C^n(G, M) := \text{Hom}(G^n, M) = \{f : G^n \rightarrow M\}$$

并且微分算子 δ 满足

$$\begin{cases} \delta(m)(g) = g \cdot m - m \\ (\delta f)(g_0, g_1, \dots, g_n) = g_0 \cdot f(g_1, g_2, \dots, g_n) \\ \quad - \sum_{k=1}^{n-1} (-1)^k f(g_1, \dots, g_k g_{k+1}, \dots, g_n) \\ \quad - (-1)^n f(g_0, g_1, \dots, g_{n-1}) \end{cases}$$

容易验证 $\delta^2=0$. 此链复形的上同调

$$H^\bullet(G, M) := H^\bullet(C^\bullet(G, M), \delta)$$

称之为群的上同调 (*group cohomology*)

由 δ 的表达式容易看出, 群的上同调与 Hochschild 上同调有以下关系:

性质 1.4.10. 设 G 是一个群, M 为群 G 的一个左 K -模, 考虑群代数 $A := K[G]$, 于是 M 自然有左 A -模结构。那么有同构:

$$H^\bullet(G, M) \cong H^\bullet(K[G], M)$$

其中左边为群 G 关于 M 的上同调, 右边为群代数 $K[G]$ 关于 M 的 *Hochschild* 上同调。

注意 M 仅仅是左 $K[G]$ -模, 并没有双 $K[G]$ -模结构呀, 怎么谈论 Hochschild 上同调?

(强行规定 G 在 M 上的右作用恒为 1, 通过 K -线性扩张得到 $K[G]$ 在 M 的右作用, 这样就得到 M 的双 $K[G]$ -模结构了。)

证明. 注意到 $\text{Hom}(G^n, M)$ 中的元素可以自然地 K -线性延拓为 $\text{Hom}(K[G]^n, M)$ 中的元素, 这给出它们之间的同构。然后注意到 $A = K[G]$ 的 Hochschild 上链复形的微分算子的显式表达式, (见定义 1.3.2 的下方) 它与群上同调相应的上链复形的微分算子显式表达式 “相同”。细节从略。 \square

若熟悉李代数同调, 我们可以将李代数同调与其泛包络代数的 Hochschild 同调联系起来:

例子 1.4.11. (李代数同调) 对于李代数 \mathfrak{g} , M 为李代数 \mathfrak{g} 的一个左 K -模。令 $A := \mathcal{U}(\mathfrak{g})$ 为 \mathfrak{g} 的泛包络代数, 则 A 自然有左 A -模结构。(再通过某种 “比较平凡” 的方式给出右作用? 与上例类似?) 则有同构

$$H_\bullet(\mathcal{U}(\mathfrak{g}), M) \cong H_\bullet^{\text{Lie}}(\mathfrak{g}, M)$$

其中左边是 A 关于 M 的 *Hochschild* 同调, 右边是李代数同调。

并没有在此叙述李代数同调的定义。留给感兴趣者。此处从略。

事实上, 也可以考虑群的同调、李代数上同调, 它们也有对应的 Hochschild 同调、上同调。

1.5 Connes 复形 $C_\bullet^\lambda(A)$

与之前一样，我们仍假设 K 为特征零的含么交换环， A 为 K -代数，且作为 K -模是投射的。不过，在从本节开始我们再新增一条假定：

$$\mathbb{Q} \hookrightarrow K$$

也就是说，有理数域能够嵌入到 K 中。（事实上，任何特征零的域都满足此假定。）

回顾对于 K -代数 A ，若 A 交换，则其 Hochschild 同调 $\mathrm{HH}_\bullet(A)$ 可以被理解为“空间” A 上的“微分形式”。本节我们进一步研究 $\mathrm{HH}_\bullet(A)$ 。

记号 1.5.1. 对于 K -代数 A ，双 A -模 $M = A$ 。考虑其 Hochschild 链复形 $C_\bullet(A) := C_\bullet(A, A)$ ：

$$C_n(A) := C_n(A, A) \cong A^{\otimes n+1}$$

(回顾定义 1.2.5). 我们考虑群 $\mathbb{Z}/(n+1)\mathbb{Z}$ 在 $C_n(A)$ 上的如下左 K -作用：记 $\mathbb{Z}/(n+1)\mathbb{Z}$ 的生成元为 λ ，则

$$\begin{aligned} \lambda : C_n(A) &\rightarrow C_n(A) \\ a_0 \otimes a_1 \otimes \cdots \otimes a_n &\mapsto (-1)^n a_n \otimes a_0 \otimes \cdots \otimes a_{n-1} \end{aligned}$$

考虑 $C_n(A)$ 模掉此群作用，所得的商 K -模记为

$$C_n^\lambda(A) := C_n(A)/(1 - \lambda)$$

其中的元素称之为循环余不变量 (cyclic co-invariant)。

容易验证，

$$\lambda^{n+1} a_0 \otimes a_1 \otimes \cdots \otimes a_n = (-1)^{n(n+1)} a_0 \otimes a_1 \otimes \cdots \otimes a_n = a_0 \otimes a_1 \otimes \cdots \otimes a_n$$

即 $\lambda^{n+1} = \mathrm{id}$. 可见这的确是 $\mathbb{Z}/(n+1)\mathbb{Z}$ 的作用。

回顾 Bar-复形，我们可以直观地视为“直线上依次排列质点，相邻两两碰撞”；而在这里，商掉 λ 循环作用后，直观地更像是“圆周上排列质点”。

我们将说明，Hochschild 链复形 $C_\bullet(A)$ 的边缘算子 b ，沿商映射 $C_\bullet(A) \twoheadrightarrow C_\bullet^\lambda(A)$ 下降，诱导了 $C_\bullet^\lambda(A)$ 的链复形结构（称之为 Connes 复形）。

引理 1.5.2. 对于 K -代数 A ，我们定义算子 $b' : C_\bullet(A) \rightarrow C_{\bullet-1}(A)$ 如下：

$$b' : C_n(A) \rightarrow C_{n-1}(A)$$

$$a_0 \otimes a_1 \otimes \cdots \otimes a_n \mapsto \sum_{k=0}^{n-1} (-1)^k a_0 \otimes \cdots \otimes (a_k a_{k+1}) \otimes \cdots \otimes a_n$$

则成立:

(1) $b' \circ b' = 0$,

(2) 对任意 $n \geq 1$, 则以下图表交换:

$$\begin{array}{ccc} C_n(A) & \xrightarrow{b'} & C_{n-1}(A) \\ \downarrow 1-\lambda & & \downarrow 1-\lambda \\ C_n(A) & \xrightarrow{b} & C_{n-1}(A) \end{array}$$

证明. 注意到有同构 $C_n(A) \cong B_n A (\cong A^{\otimes n+1})$, 其中 $B_\bullet A$ 为 Bar-复形; 容易看出这里定义的 b' 在此同构下, 正是 Bar 复形当中的边缘算子, 从而 $b' \circ b' = 0$, 也就是说 $(C_\bullet(A), b')$ 是一个链复形, 并且同构于 Bar-复形 $(B_\bullet A, b)$. (这里有轻微的记号混用: Bar-复形 $(B_\bullet A, b)$ 当中的 “ b ” 并不是本引理当中 Hochschild 链复形 $(C_\bullet(A), b)$ 当中的 “ b ”, 前者在此是临时记号.)

我们再来看 (2). 回顾 $b: C_n(A) \rightarrow C_{n-1}(A)$ 的显式表达式 (见定义 1.2.5 的下方, 并且令其中 $M = a$ 以及 $m = a_0$) (注意此图中的 b 与 b' 并不是同一个映射, 它们的具体表达式相差一项), 直接验算之:

$$\begin{aligned} & (1-\lambda) \circ b'(a_0 \otimes a_1 \otimes \cdots \otimes a_n) \\ = & (1-\lambda) \left(\sum_{k=0}^{n-1} (-1)^k a_0 \otimes \cdots \otimes (a_k a_{k+1}) \otimes \cdots \otimes a_n \right) \\ = & \sum_{k=0}^{n-1} (-1)^k a_0 \otimes \cdots \otimes (a_k a_{k+1}) \otimes \cdots \otimes a_n \\ & + \sum_{k=0}^{n-2} (-1)^{k+n} a_n \otimes a_0 \otimes \cdots \otimes (a_k a_{k+1}) \otimes \cdots \otimes a_{n-1} \\ & - (a_{n-1} a_n) \otimes a_0 \otimes \cdots \otimes a_{n-2} \\ = & b(a_0 \otimes a_1 \otimes \cdots \otimes a_n) - (-1)^n (a_n a_0) \otimes a_1 \otimes \cdots \otimes a_{n-1} \\ & + (-1)^n \sum_{k=0}^{n-1} (-1)^k a_n \otimes a_0 \otimes \cdots \otimes (a_k a_{k+1}) \otimes \cdots \otimes a_{n-1} \\ & - (a_{n-1} a_n) \otimes a_0 \otimes \cdots \otimes a_{n-2} \\ = & b(a_0 \otimes a_1 \otimes \cdots \otimes a_n - (-1)^n a_n \otimes a_0 \otimes \cdots \otimes a_{n-1}) \\ = & b \circ (1-\lambda)(a_0 \otimes a_1 \otimes \cdots \otimes a_n) \end{aligned}$$

也就是说,

$$(1-\lambda) \circ b' = b \circ (1-\lambda)$$

从而此图表交换，证毕。 □

此图表的交换关系也可改写为

$$[b, \lambda] = (1 - \lambda) \circ (b - b')$$

其中 $[b, \lambda] := b \circ \lambda - \lambda \circ b$.

此引理给出了链复形 $(C_\bullet(A), b')$ 与 $(C_\bullet(A), b)$ 之间的链映射：

$$(1 - \lambda)_\bullet : (C_\bullet(A), b') \rightarrow (C_\bullet(A), b)$$

然而注意到

$$C_n^\lambda(A) := C_n(A) / (1 - \lambda)_n = \text{coker}(1 - \lambda)_n$$

于是我们（在由 K -模链复形构成范畴当中）考虑链映射 $(1 - \lambda)_\bullet$ 的余核，这给出了 $C_\bullet^\lambda(A)$ 的链复形结构：

定义 1.5.3. (*Connes 复形*) 对于 K -代数 A ，考虑链映射

$$(1 - \lambda)_\bullet : (C_\bullet(A), b') \rightarrow (C_\bullet(A), b)$$

的余核链复形

$$(C_\bullet^\lambda(A), b^\lambda) := \text{coker}[(1 - \lambda)_\bullet]$$

称其为 **Connes 复形**。并且记

$$H_\bullet^\lambda(A) := H_\bullet(C_\bullet^\lambda(A))$$

称之为 A 的循环同调 (*cyclic homology*) .

也就是说，有如下的交换图表：

$$\begin{array}{ccccccc} \cdots & \longrightarrow & C_{n+1} & \xrightarrow{b'} & C_n & \xrightarrow{b'} & C_{n-1} \longrightarrow \cdots \\ & & \downarrow 1-\lambda & & \downarrow 1-\lambda & & \downarrow 1-\lambda \\ \cdots & \longrightarrow & C_{n+1} & \xrightarrow{b} & C_n & \xrightarrow{b} & C_{n-1} \longrightarrow \cdots \\ & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ \cdots & \longrightarrow & C_{n+1}^\lambda & \xrightarrow{b^\lambda} & C_n^\lambda & \xrightarrow{b^\lambda} & C_{n-1}^\lambda \longrightarrow \cdots \\ & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ & & 0 & & 0 & & 0 \end{array}$$

此交换图表每一横行都为链复形，其中第三横行为 Connes 复形；每一列都是右短正合的。并且容易知道：Connes 复形的边缘算子 b^λ 正是 Hochschild 链复形的边缘算子 b 沿商映射 $C_\bullet(A) \twoheadrightarrow C_\bullet^\lambda(A)$ 的下降。

1.6 循环双复形 $CC_{\bullet\bullet}(A)$

引理 1.6.1. (平均算子) 对于任意 K -代数 A , 以及 $n \geq 0$, 引入平均算子 $\mathcal{N}: C_n(A) \rightarrow C_n(A)$:

$$\mathcal{N} := 1 + \lambda + \lambda^2 + \cdots + \lambda^n$$

则此算子满足以下性质:

$$(1) \quad b'\mathcal{N} = \mathcal{N}b$$

(2) $(1 - \lambda)\mathcal{N} = \mathcal{N}(1 - \lambda) = 0$. 此外, 如果有理数域 $\mathbb{Q} \hookrightarrow K$, 那么对于任意 $n \geq 0$, 以下链复形是正合的:

$$\cdots \rightarrow C_n(A) \xrightarrow{\mathcal{N}} C_n(A) \xrightarrow{1-\lambda} C_n(A) \xrightarrow{\mathcal{N}} C_n(A) \xrightarrow{1-\lambda} C_n(A) \rightarrow C_n^\lambda(A) \rightarrow 0$$

证明. (1) 任意固定 $n \geq 1$, 为了区分算子在不同空间的作用, 我们采用临时记号

$$\begin{cases} \lambda: C_n(A) \rightarrow C_n(A) \\ \bar{\lambda}: C_{n-1}(A) \rightarrow C_{n-1}(A) \end{cases} \quad \begin{cases} \mathcal{N} := 1 + \lambda + \cdots + \lambda^n \\ \bar{\mathcal{N}} := 1 + \bar{\lambda} + \cdots + \bar{\lambda}^{n-1} \end{cases}$$

则在此记号下我们需要证 $b'\mathcal{N} = \bar{\mathcal{N}}b$.

定义缩并算子

$$\begin{aligned} s: C_n(A) &\rightarrow C_{n-1}(A) \\ a_0 \otimes a_1 \otimes \cdots \otimes a_n &\mapsto (a_0 a_1) \otimes \cdots \otimes a_n \end{aligned}$$

则容易验证 (稍微注意一下正负号, 确实都是正号)

$$b = \sum_{k=0}^n \bar{\lambda}^k s \lambda^{-k} \quad b' = \sum_{k=0}^{n-1} \bar{\lambda}^k s \lambda^{-k}$$

于是有

$$b'\mathcal{N} = \left(\sum_{k=0}^{n-1} \bar{\lambda}^k s \lambda^{-k} \right) \left(\sum_{l=0}^n \lambda^l \right) = \sum_{\substack{0 \leq k \leq n-1 \\ 0 \leq l \leq n}} \bar{\lambda}^k s \lambda^l$$

同理也有

$$\bar{\mathcal{N}}b = \sum_{\substack{0 \leq k \leq n-1 \\ 0 \leq l \leq n}} \bar{\lambda}^k s \lambda^l$$

从而 $b'\mathcal{N} = \bar{\mathcal{N}}b$.

(2) 给定 $n \geq 0$, 注意到 $\lambda^{n+1} = 1$, 从而

$$(1 - \lambda)\mathcal{N} = (1 - \lambda)(1 + \lambda + \cdots + \lambda^n) = 1 - \lambda^{n+1} = 0$$

同理 $\mathcal{N}(1 - \lambda) = 0$. 因此该图表是链复形, 只需再验证正合性。

现在假设 \mathbb{Q} 是 K 的子环。我们构造如下链同伦:

$$\begin{array}{ccccccc} \cdots & \longrightarrow & C_n(A) & \xrightarrow{\mathcal{N}} & C_n(A) & \xrightarrow{1-\lambda} & C_n(A) & \xrightarrow{\mathcal{N}} & C_n(A) & \longrightarrow & \cdots \\ & & \downarrow \text{id} & \nearrow g & \downarrow \text{id} & \nearrow f & \downarrow \text{id} & \nearrow g & \downarrow \text{id} & & \\ \cdots & \longrightarrow & C_n(A) & \xrightarrow{\mathcal{N}} & C_n(A) & \xrightarrow{1-\lambda} & C_n(A) & \xrightarrow{\mathcal{N}} & C_n(A) & \longrightarrow & \cdots \end{array}$$

其中 $f, g: C_n(A) \rightarrow C_n(A)$ 定义为

$$\begin{cases} f := \frac{1}{n+1}(\lambda^{n-1} + 2\lambda^{n-2} + 3\lambda^{n-3} + \cdots + n) \\ g := \frac{1}{n+1} \end{cases}$$

(利用了 $\mathbb{Q} \hookrightarrow K$) 则容易验证

$$f(1 - \lambda) + \mathcal{N}g = g\mathcal{N} + (1 - \lambda)f = 1$$

从而证毕。 □

特别地, 当 K 为域时 (注意我们总假定 $\text{char } K = 0$) 成立正合性。链同伦 f, g 的构造来自于 (关于变元 λ 的多项式的) 欧几里得辗转相除法。

由此引理, 我们可构造出如下的循环双复形 (cyclic bicomplex), 记为 $CC_{\bullet\bullet}(A)$:

$$\begin{array}{ccccccc} \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \downarrow b & & \downarrow -b' & & \downarrow b & & \downarrow -b' \\ C_2(A) & \xleftarrow{1-\lambda} & C_2(A) & \xleftarrow{\mathcal{N}} & C_2(A) & \xleftarrow{1-\lambda} & C_2(A) \xleftarrow{\quad} \cdots \\ \downarrow b & & \downarrow -b' & & \downarrow b & & \downarrow -b' \\ C_1(A) & \xleftarrow{1-\lambda} & C_1(A) & \xleftarrow{\mathcal{N}} & C_1(A) & \xleftarrow{1-\lambda} & C_1(A) \xleftarrow{\quad} \cdots \\ \downarrow b & & \downarrow -b' & & \downarrow b & & \downarrow -b' \\ C_0(A) & \xleftarrow{1-\lambda} & C_0(A) & \xleftarrow{\mathcal{N}} & C_0(A) & \xleftarrow{1-\lambda} & C_0(A) \xleftarrow{\quad} \cdots \end{array}$$

其中对于任意 $p, q \geq 0$, $CC_{p,q}(A) = C_p(A)$ 为该图表的从下往上第 p 行, 从左往右第 q 列的节点; 此图表的偶数列与奇数列 $(C_{\bullet}(A), b)$ 与 $(C_{\bullet}(A), -b')$ 交替。并且注意到, 此图表不是交换的, 而是对于其中每一个方框都满足反交换性。

我们回顾一些同调代数工具:

定义 1.6.2. (双复形的全复形)

对于任意的含么交换环 K (这里暂时不必假定 $\text{char } K = 0$), 以及 K -模双复形 $(A_{\bullet\bullet}, d, \partial)$:

$$\begin{array}{ccccccc}
 & \vdots & & \vdots & & \vdots & \\
 & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & \\
 & A_{2,0} & \xleftarrow{\partial_{2,1}} & A_{2,1} & \xleftarrow{\partial_{2,2}} & A_{2,2} & \xleftarrow{\quad} \cdots \\
 & \downarrow d_{2,0} & & \downarrow d_{2,1} & & \downarrow d_{2,2} & \\
 & A_{1,0} & \xleftarrow{\partial_{1,1}} & A_{1,1} & \xleftarrow{\partial_{1,2}} & A_{1,2} & \xleftarrow{\quad} \cdots \\
 & \downarrow d_{1,0} & & \downarrow d_{1,1} & & \downarrow d_{1,2} & \\
 & A_{0,0} & \xleftarrow{\partial_{0,1}} & A_{0,1} & \xleftarrow{\partial_{0,2}} & A_{0,2} & \xleftarrow{\quad} \cdots
 \end{array}$$

即:

$$\begin{cases} d_{p,q} : A_{p,q} \rightarrow A_{p-1,q} \\ \partial_{p,q} : A_{p,q} \rightarrow A_{p,q-1} \end{cases}$$

使得该图表每一行、每一列都是链复形, 并且满足反交换关系

$$\partial_{p-1,q} \circ d_{p,q} + d_{p,q-1} \circ \partial_{p,q} = 0$$

则我们定义双复形 $A_{\bullet\bullet}$ 的全复形 (total complex) $(\text{Tot}_{\bullet}(A_{\bullet\bullet}), d)$ 如下:

$$\begin{cases} \text{Tot}_n(A_{\bullet\bullet}) := \bigoplus_{p+q=n} A_{p,q} \\ d_n := \sum_{p+q=n} (d_{p,q} + \partial_{p,q}) \end{cases}$$

对于两个双复形 $A_{\bullet\bullet}$ 与 $A'_{\bullet\bullet}$, 我们可以去定义双复形之间的态射 $f_{\bullet\bullet} : A_{\bullet\bullet} \rightarrow A'_{\bullet\bullet}$, 进而考虑双复形范畴。双复形的态射自然诱导了相应的全复形之间的链映射, 也就是说 Tot 具有函子性。我们还有以下同调代数工具:

引理 1.6.3. 设 $f_{\bullet\bullet} : A_{\bullet\bullet} \rightarrow A'_{\bullet\bullet}$ 为双复形之间的态射。如果对于任意 $n \geq 0$, 链映射

$$f_{n,\bullet} : A_{n,\bullet} \rightarrow A'_{n,\bullet}$$

为拟同构 (quasi-isomorphism), (即它诱导的任意阶同调对象之间的态射均为同构), 那么链映射

$$\text{Tot}_{\bullet}(f_{\bullet\bullet}) : \text{Tot}_{\bullet}(A_{\bullet\bullet}) \rightarrow \text{Tot}_{\bullet}(A'_{\bullet\bullet})$$

也为拟同构。

证明. 同调代数工具, 承认之. \square

我们回到循环双复形 $CC_{\bullet\bullet}(A)$. 由上述同调代数工具, 我们可以给出循环同调 $H_{\bullet}^{\lambda}(A) := H_{\bullet}(C_{\bullet}^{\lambda}(A))$ 的另一种定义:

定理 1.6.4. 对于 K -代数 A , 假设 $\mathbb{Q} \hookrightarrow K$, 记

$$HC_{\bullet}(A) := H_{\bullet}(\text{Tot}_{\bullet}(CC_{\bullet\bullet}(A)))$$

为 A 的循环双复形的全复形的同调, 那么有自然的同构

$$HC_{\bullet}(A) \cong H_{\bullet}^{\lambda}(A)$$

证明. 对于循环双复形 $CC_{\bullet\bullet}(A)$, 我们再考虑另一个双复形 $CC'_{\bullet\bullet}(A)$ 如下:

$$\begin{array}{ccccccc} & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ C_2^{\lambda}(A) & \leftarrow & 0 & \leftarrow & 0 & \leftarrow & 0 & \leftarrow \dots \\ & \downarrow b_2^{\lambda} & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ C_1^{\lambda}(A) & \leftarrow & 0 & \leftarrow & 0 & \leftarrow & 0 & \leftarrow \dots \\ & \downarrow b_1^{\lambda} & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ C_0^{\lambda}(A) & \leftarrow & 0 & \leftarrow & 0 & \leftarrow & 0 & \leftarrow \dots \end{array}$$

考虑双复形之间的态射

$$f_{\bullet\bullet} : CC_{\bullet\bullet}(A) \rightarrow CC'_{\bullet\bullet}(A)$$

其中 $f_{n,0} : C_n(A) \rightarrow C_n^{\lambda}(A)$ 为商映射. 由引理1.6.1 知 $CC_{\bullet\bullet}(A)$ 的每一行都是正合的, 从而容易验证 $f_{\bullet\bullet}$ 满足引理 1.6.3 的使用条件, 因此我们有同构

$$H_{\bullet}(\text{Tot}_{\bullet}(CC_{\bullet\bullet}(A))) \cong H_{\bullet}(\text{Tot}_{\bullet}(CC'_{\bullet\bullet}(A)))$$

上式左边, 由定义, 即为 $HC_{\bullet}(A)$; 而再注意到 $\text{Tot}_{\bullet}(CC'_{\bullet\bullet})$ 正是 Connes 复形 C_{\bullet}^{λ} , 从而上式右边为循环同调 $H_{\bullet}^{\lambda}(A)$. \square

也就是说, 循环同调 (Connes 复形的同调) 自然同构于循环双复形的全复形的同调。

1.7 Connes 算子 β

我们将给出循环同调的更多等价定义方式，并计算一些具体例子。本节均假定 $\mathbb{Q} \hookrightarrow K$ （甚至直接把 K 当成特征零的域）。我们需要更多的同调代数工具：

引理 1.7.1.（杀掉可缩复形）

对于 K -模链复形

$$\cdots \rightarrow A_{n+1} \oplus B_{n+1} \xrightarrow{d} A_n \oplus B_n \xrightarrow{d} A_{n-1} \oplus B_{n-1} \rightarrow \cdots$$

其中

$$d = \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix}$$

并且 (B_\bullet, δ) 是可缩链复形，其同伦逆

$$h : B_\bullet \rightarrow B_{\bullet+1}$$

使得 $h\delta + \delta h = 1$. 那么下述图表交换：

$$\begin{array}{ccccccc} \cdots & \longrightarrow & A_{n+1} & \xrightarrow{\alpha - \beta h \gamma} & A_n & \xrightarrow{\alpha - \beta h \gamma} & A_{n-1} \longrightarrow \cdots \\ & & \downarrow \varphi & & \downarrow \varphi & & \downarrow \varphi \\ \cdots & \longrightarrow & A_{n+1} \oplus B_{n+1} & \xrightarrow{d} & A_n \oplus B_n & \xrightarrow{d} & A_{n-1} \oplus B_{n-1} \longrightarrow \cdots \end{array}$$

并且此图表的每一行都为链复形，并且链映射

$$\varphi := \begin{pmatrix} 1 \\ -h\gamma \end{pmatrix}$$

为拟同构。

证明. 注意到 $\delta^2 = 0$ ，以及

$$0 = d^2 = \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix}^2 = \begin{pmatrix} \alpha^2 + \beta\gamma & \alpha\beta + \beta\gamma \\ \gamma\alpha + \delta\gamma & \gamma\beta + \delta^2 \end{pmatrix}$$

从而我们有

$$\begin{cases} \alpha^2 &= -\beta\gamma \\ \alpha\beta &= -\beta\delta \\ \gamma\alpha &= -\delta\gamma \\ \gamma\beta &= 0 \end{cases}$$

再注意到 $h\delta + \delta h = 1$ ，直接计算验证可知 φ_\bullet 的确为链复形之间的链映射。细节略。

再注意链映射

$$\varphi_\bullet : (A_\bullet, \alpha - \beta h \gamma) \rightarrow (A_\bullet \oplus B_\bullet, d)$$

为单射，并且其余核

$$\text{coker } \varphi_\bullet \cong (B_\bullet, \delta)$$

是正合的，因此 φ_\bullet 为拟同构。 \square

这个引理的功能是，如果给定的链复形 $(A_\bullet \oplus B_\bullet, d)$ 当中“含有正合的部分” (B_\bullet, δ) ，那我们可以把这个“正合的部分”剔除掉，得到一个“不那么冗余”的链复形 $(A_\bullet, \alpha - \beta h \delta)$ ，并且此复形与原来的复形的各阶同调自然同构。

我们将此引理用于循环双复形 $CC_{\bullet\bullet}(A)$ 的全复形 $\text{Tot}_\bullet(CC_{\bullet\bullet}(A))$ 上。回顾 $CC_{\bullet\bullet}(A)$ 为如下双复形：

$$\begin{array}{ccccccc} \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \downarrow b & & \downarrow -b' & & \downarrow b & & \downarrow -b' \\ C_2(A) & \xleftarrow{1-\lambda} & C_2(A) & \xleftarrow{\mathcal{N}} & C_2(A) & \xleftarrow{1-\lambda} & C_2(A) \xleftarrow{\dots} \\ \downarrow b & & \downarrow -b' & & \downarrow b & & \downarrow -b' \\ C_1(A) & \xleftarrow{1-\lambda} & C_1(A) & \xleftarrow{\mathcal{N}} & C_1(A) & \xleftarrow{1-\lambda} & C_1(A) \xleftarrow{\dots} \\ \downarrow b & & \downarrow -b' & & \downarrow b & & \downarrow -b' \\ C_0(A) & \xleftarrow{1-\lambda} & C_0(A) & \xleftarrow{\mathcal{N}} & C_0(A) & \xleftarrow{1-\lambda} & C_0(A) \xleftarrow{\dots} \end{array}$$

注意到该双复形的第偶数列 Hochschild 链复形（链映射 b ），第奇数列 Bar-复形（链映射 $-b'$ ）。注意 Bar-复形是正合的，并且有同伦逆

$$h : C_n(A) \rightarrow C_{n+1}(A) \quad (1.1)$$

$$a_0 \otimes a_1 \otimes \dots \otimes a_n \mapsto 1 \otimes a_0 \otimes a_1 \otimes \dots \otimes a_n \quad (1.2)$$

使得 $b'h + hb' = 1$ 。

现在，注意到

$$\begin{aligned} \text{Tot}_n(CC_{\bullet\bullet}(A)) &= \left(\bigoplus_{\substack{p+q=n \\ q \text{ 为偶数}}} CC_{p,q}(A) \right) \oplus \left(\bigoplus_{\substack{p+q=n \\ q \text{ 为奇数}}} CC_{p,q}(A) \right) \\ &=: X_n \oplus Y_n \end{aligned}$$

也就是说，我们把循环双复形 $CC_{\bullet\bullet}(A)$ 的全复形 $(\text{Tot}_\bullet(CC_{\bullet\bullet}(A)), d)$ 写为：

$$\dots \rightarrow X_{n+1} \oplus Y_{n+1} \xrightarrow{d} X_n \oplus Y_n \xrightarrow{d} X_{n-1} \oplus Y_{n-1} \rightarrow \dots$$

边缘算子矩阵 $d = \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix}$ 留给读者。但是要注意 (Y_\bullet, δ) 的正合性是由 Bar-复形 $(C_\bullet(A), -b')$ 的正合性所诱导的； δ 也存在同伦逆，仍记为 h 。

综上，对 $\text{Tot}_\bullet(CC_{\bullet\bullet}(A))$ 使用引理1.7.1，我们得到以下结果：

性质 1.7.2. 对于 K -代数 A ，考虑以下双复形 $B_{\bullet\bullet}(A)$ ：

$$\begin{array}{ccccc}
 \vdots & & \vdots & & \vdots \\
 \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 A^{\otimes 3} & \xleftarrow{B} & A^{\otimes 2} & \xleftarrow{B} & A \\
 \downarrow b & & \downarrow b & & \\
 A^{\otimes 2} & \xleftarrow{B} & A & & \\
 \downarrow b & & & & \\
 A & & & &
 \end{array}$$

此图表的最左下角为第 0 行 0 列，右下角空白处都为 0，具体地，

$$B_{p,q}(A) = \begin{cases} CC_{p-q,2q}(A) & p \geq q \\ 0 & p < q \end{cases}$$

（也就是说， $B_{\bullet\bullet}$ 的结点是由将循环双复形 $CC_{\bullet\bullet}(A)$ 的第奇数列（Bar-复形）都删掉，再将原来第 $2l$ 列整体向左、上各平移 l 格所得）其中 **Connes 算子** $B : C_n(A) \rightarrow C_{n+1}(A)$ 定义为以下的复合：

$$\begin{array}{ccccc}
 C_{n+1}(A) & \xleftarrow{1-\lambda} & C_{n+1}(A) & \xleftarrow{\mathcal{N}} & C_{n+1}(A) \\
 \downarrow b & & \uparrow h \downarrow -b' & & \downarrow b \\
 C_n(A) & \xleftarrow{1-\lambda} & C_n(A) & \xleftarrow{\mathcal{N}} & C_n(A)
 \end{array}$$

$$B := (1 - \lambda)h\mathcal{N}$$

那么，存在自然的双复形单同态

$$B_{\bullet\bullet}(A) \hookrightarrow CC_{\bullet\bullet}(A)$$

并且其诱导的全复形的链映射

$$\text{Tot}_\bullet(B_{\bullet\bullet}(A)) \hookrightarrow \text{Tot}_\bullet(CC_{\bullet\bullet}(A))$$

为拟同构。

证明. 只需注意到

$$\mathrm{Tot}_n(\mathcal{B}_{\bullet\bullet}) = \left(\bigoplus_{\substack{p+q=n \\ q \text{ 为偶数}}} \mathrm{CC}_{p,q}(A) \right) \hookrightarrow \mathrm{Tot}_n(\mathrm{CC}_{\bullet\bullet}(A))$$

直接使用引理1.7.1, 细节从略。但是要验证 $\mathcal{B}_{\bullet\bullet}(A)$ 的确是双复形, 即需要验证反交换关系

$$\mathcal{B} \circ b + b \circ \mathcal{B}$$

而这是容易的, 验证如下:

$$\begin{aligned} \mathcal{B} \circ b &= (1 - \lambda)h\mathcal{N}b = (1 - \lambda)hb'\mathcal{N} \\ &= (1 - \lambda)(1 - b'h)\mathcal{N} = (1 - \lambda)\mathcal{N} - (1 - \lambda)b'h\mathcal{N} \\ &= -b(1 - \lambda)h\mathcal{N} = -b \circ \mathcal{B} \end{aligned}$$

从而证毕。 □

于是我们得到循环同调的又一等价定义:

$$H_{\bullet}^{\lambda}(A) \cong H_{\bullet}(\mathrm{Tot}_{\bullet}(\mathcal{B}_{\bullet\bullet}))$$

我们可以将链复形 $\mathrm{Tot}_{\bullet}(\mathcal{B}_{\bullet\bullet})$ 适当改写, 使得形式更加美观:

性质 1.7.3. 对于 K -代数 A , 以及形式变元 u , 考虑如下链复形:

$$(\mathrm{CC}_{\bullet}(A), b + u\mathcal{B})$$

其中

$$\mathrm{CC}_n(A) := (\mathrm{C}_{\bullet}(A)[u^{-1}])_n := \bigoplus_{k=0}^{\infty} u^{-k} \mathrm{C}_{n-2k}(A)$$

(注意这是有限直和) 换句话说, 我们给定以下分次

$$\deg(b) = -1, \quad \deg(B) = 1, \quad \deg(u) = -2$$

那么此链复形的同调自然同构于循环同调:

$$H_{\bullet}(\mathrm{CC}_{\bullet}(A), b + u\mathcal{B}) \cong H_{\bullet}^{\lambda}(A)$$

证明. 这个几乎显然。注意到

$$\mathrm{Tot}_n(\mathcal{B}_{\bullet\bullet}(A)) = \bigoplus_{k=0}^{\infty} \mathcal{B}_{n-k,k}(A) = \bigoplus_{k=0}^{\infty} \mathrm{C}_{n-2k}(A)$$

$$CC_n(A) = \bigoplus_{k=0}^{\infty} u^{-k} C_{n-2k}(A)$$

于是有自然的链复形同构

$$\begin{aligned} \text{Tot}_{\bullet}(\mathcal{B}_{\bullet\bullet}(A)) &\rightarrow CC_{\bullet}(A) \\ \mathcal{B}_{n-k,k}(A) &\mapsto u^{-k} C_{n-2k}(A) \end{aligned}$$

容易验证此对应也保持相应的边缘算子。证毕。 \square

注意，我们还可以考虑 $(CC_{\bullet}(A), b)$ ，它与 $(CC_{\bullet}(A), b + u\mathcal{B})$ 具有不同的边缘算子：前者的同调我们早已知道是 Hochschild 同调，而后者的同调为循环同调。

注记 1.7.4. (复几何的背景)

对于复流形 X ，它作为光滑流形，有外微分算子 d ；再注意到它的复结构，有算子 $\bar{\partial}$ ——前者代表拓扑，而后代表复几何。它们之间有关系

$$d = \bar{\partial} + \partial$$

并且满足

$$\partial^2 = \bar{\partial}^2 = 0 \quad \partial\bar{\partial} + \bar{\partial}\partial = 0$$

我们考虑以下“拓扑与复几何之间的桥梁”：

$$d_u := \bar{\partial} + u\partial$$

称此算子为霍奇滤链 (Hodge filtration)，其中 $0 \leq u \leq 1$ 。注意 d_u 满足稳定性条件 $d_u^2 = 0$ ，即 $\bar{\partial}$ 与 d 的“过渡”的任何一个“中间状态”都仍为外微分算子。

所以，似乎可以如下粗暴地对应？

复几何	非交换几何
复流形 X	K -代数 A
Ω_X^{\bullet}	$CC_{\bullet}(A)$
$\bar{\partial}$	b
∂	$u\mathcal{B}$
d	$b + u\mathcal{B}$
$H_{\text{DR}}^{\bullet}(X)$	$H_{\bullet}^{\lambda}(A)$
$H_{\bar{\partial}}^{\bullet}(X)$	$HH_{\bullet}(A)$

这格表格似乎不太对吧，应该是 Hochschild 同调 $HH_{\bullet}(A)$ 对应于“非交换版本的”微分形式 Ω^{\bullet} ，从之前的例子能看出来。

定义 1.7.5. (周期循环同调与负循环同调) 对于 K -代数 A , 与 $CC_{\bullet}(A)$ 类似, 我们还可以去定义以下:

(1) 定义周期循环复形 (periodic cyclic complex)

$$CC_{\bullet}^{\text{per}}(A) := (C_{\bullet}(A)((u)), b + uB)$$

该复形的同调

$$HC_{\bullet}^{\text{per}}(A) := H_{\bullet}(CC_{\bullet}^{\text{per}}(A), b + uB)$$

称之为周期循环同调 (periodic cyclic homology)。

(2) 定义负循环复形 (negative cyclic complex)

$$CC_{\bullet}^{-}(A) := (C_{\bullet}(A)[[u]], b + uB)$$

该复形的同调

$$HC_{\bullet}^{-}(A) := H_{\bullet}(CC_{\bullet}^{-}(A), b + uB)$$

称之为负循环同调 (negative cyclic homology)。

注意上述定义当中的 “ $[[u]]$ ” 是指关于形式变元 u 的形式幂级数, 而 “ $((u))$ ” 为关于 u 的 Laurent 级数。由定义, 显然有

$$CC_{\bullet}(A) \cong CC_{\bullet}^{\text{per}}(A) / CC_{\bullet}^{-}(A)$$

至此, 我们定义出了 $CC_{\bullet}(A), CC_{\bullet}^{\text{per}}(A)$ 以及 $CC_{\bullet}^{-}(A)$ 。事实上, 这三者都有深刻的物理背景, 见下表:

非交换几何中的对象	几何、物理背景	几何、物理背景
$CC_{\bullet}^{\text{per}}(A)$	open-closed string states	de-Rham cohomology
$CC_{\bullet}(A)$	open string states	gauge theory
$CC_{\bullet}^{-}(A)$	closed string states	gravity

其中特别注意, 周期循环同调是 de-Rham 上同调的 “非交换版本”, 我们将在后文举例说明。

1.8 循环同调的计算

回顾约化 Bar-复形 $\bar{B}_{\bullet}(A)$ (见定义1.4.1), 我们可以类似地通过约化 Bar-复形来构造类似的 “循环双复形”: 在 $K \hookrightarrow A$ 的条件下, 考虑约化 Hochschild 链复形

$$\bar{C}_n(A) := \bar{C}_n(A, A) \cong A \otimes \bar{A}^{\otimes n}$$

类似去定义循环算子 $\lambda: \overline{C}_n(A) \rightarrow \overline{C}_n(A)$ ，其显式表达式与非约化情形完全相同；以及平均算子

$$\mathcal{N}: \overline{C}_n(A, A) \cong A \otimes \overline{A}^{\otimes n}$$

可惜是错的，类似于此前的 λ, \mathcal{N} 并不良定。比如

$$0 = \lambda(0) = \lambda(a_0 \otimes \overline{1}) = -1 \otimes \overline{\lambda} \neq 0$$

但是，Connes 算子 $\mathcal{B}: \overline{C}_n(A) \rightarrow \overline{C}_{n+1}(A)$ 是有意义的，运算规则与非约化情形完全相同，具体地，

$$\begin{aligned} \mathcal{B}(a_0 \otimes \overline{a_1} \otimes \cdots \otimes \overline{a_n}) &= \widetilde{(1-\lambda)} h \widetilde{\mathcal{N}}(a_0 \otimes \overline{a_1} \otimes \cdots \otimes \overline{a_n}) \\ &= \widetilde{(1-\lambda)} h \left(\sum_{k=0}^n (-1)^{n(n+1-k)} a_k \otimes \overline{a_{k+1}} \otimes \cdots \otimes \overline{a_n} \otimes \overline{a_0} \otimes \cdots \otimes \overline{a_{k-1}} \right) \\ &= \widetilde{(1-\lambda)} \left(\sum_{k=0}^n (-1)^{n(n+1-k)} 1 \otimes \overline{a_k} \otimes \overline{a_{k+1}} \otimes \cdots \otimes \overline{a_n} \otimes \overline{a_0} \otimes \cdots \otimes \overline{a_{k-1}} \right) \\ &= \sum_{k=0}^n (-1)^{nk} 1 \otimes \overline{a_k} \otimes \overline{a_{k+1}} \otimes \cdots \otimes \overline{a_n} \otimes \overline{a_0} \otimes \cdots \otimes \overline{a_{k-1}} \end{aligned}$$

其中 $a_{-1} := a_n$.

性质 1.8.1. 对于 K -代数 A ，假设 $K \hookrightarrow A$ ，则有如下双复形 $\overline{B}_{\bullet\bullet}(A)$:

$$\begin{array}{ccccc} \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ A \otimes \overline{A}^{\otimes 2} & \xleftarrow{\mathcal{B}} & A \otimes \overline{A} & \xleftarrow{\mathcal{B}} & A \\ \downarrow b & & \downarrow b & & \\ A \otimes \overline{A} & \xleftarrow{\mathcal{B}} & A & & \\ \downarrow b & & & & \\ A & & & & \end{array}$$

记此双复形的全复形为 $\overline{CC}_{\bullet}(A) := \text{Tot}_{\bullet}(\overline{B}_{\bullet\bullet}(A))$ ，则有自然同构

$$H_{\bullet}^{\lambda}(A) \cong H_{\bullet}(\overline{CC}_{\bullet}(A))$$

也就是说，在 $K \hookrightarrow A$ 的条件下，我们可以用约化版本的双复形来计算循环同调。

证明. 考虑商映射 $\pi_{\bullet} : C_{\bullet}(A, A) \rightarrow \overline{C}_{\bullet}(A, A)$ 自然诱导的双复形同态

$$\pi_{\bullet\bullet} : \mathcal{B}_{\bullet\bullet}(A) \rightarrow \overline{\mathcal{B}}_{\bullet\bullet}(A)$$

注意 $\pi_{\bullet\bullet}$ 限制在双复形的每一列上, 都为相应链复形的拟同构 (这里使用了引理 1.4.3), 因此根据引理 1.6.3, 其诱导的全复形之间的同态

$$\text{Tot}_{\bullet}(\mathcal{B}_{\bullet\bullet}(A)) \rightarrow \text{Tot}_{\bullet}(\overline{\mathcal{B}}_{\bullet\bullet}(A))$$

为拟同构。再注意性质 1.7.2, 上式左边的同调即为循环同调, 从而证毕。 \square

与非约化情形类似, 我们也可以

$$\text{Tot}_{\bullet}(\overline{\mathcal{B}}_{\bullet\bullet}(A)) \cong \overline{C}_{\bullet}(A)[u^{-1}], b + u\mathcal{B}$$

甚至去定义“约化周期循环同调”、“约化负循环同调”, 此处不再赘述。

本节接下来给出循环同调的一些典型的计算实例。

例子 1.8.2. 对于环 K , 设 K -代数 $A = K$, 那么其循环同调

$$H_n^{\lambda}(K) \cong \begin{cases} K & n \text{ 为偶数} \\ 0 & n \text{ 为奇数} \end{cases}$$

我们早已具体计算出 $K[x^1, x^2, \dots, x^n]$ 的 Hochschild 同调, 特别地 $\text{HH}_{\bullet}(K)$ 只有第零个是非平凡的 (同构于 K), 其余都为 0. 不过, $H_{\bullet}^{\lambda}(K)$ 与 $\text{HH}_{\bullet}(K)$ 并不相同。

证明. 我们采用最简便的方法去计算, 当然采用约化循环双复形啦。在本例中,

$$\overline{A} = K/K = 0$$

从而双复形 $\overline{\mathcal{B}}_{\bullet\bullet}(K)$ 为以下:

$$\begin{array}{ccccccc} & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ 0 & \longleftarrow & 0 & \longleftarrow & 0 & \longleftarrow & K \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \\ 0 & \longleftarrow & 0 & \longleftarrow & K & & \\ \downarrow & & \downarrow & & & & \\ 0 & \longleftarrow & K & & & & \\ \downarrow & & & & & & \\ K & & & & & & \end{array}$$

其全复形 $\overline{\text{CC}}_{\bullet}(K)$ 为以下

$$\cdots \rightarrow 0 \xrightarrow{0} K \xrightarrow{0} 0 \xrightarrow{0} K$$

从而易求循环同调。 \square

当然我们也可以按照循环同调最原始的定义去计算，其实也不难算，如下：

另一种计算方式. 直接计算。此时，

$$C_n(K) \cong K^{\otimes n+1} \cong K$$

我们记其生成元

$$\varepsilon_n := \underbrace{1 \otimes 1 \otimes \cdots \otimes 1}_{n+1 \text{ 个}} \in C_n(K)$$

容易验证算子 b 与算子 λ 的作用

$$b(\varepsilon_n) = \begin{cases} \varepsilon_{n-1} & n \text{ 为偶数} \\ 0 & n \text{ 为奇数} \end{cases} \quad \lambda(\varepsilon_n) = \begin{cases} \varepsilon_n & n \text{ 为偶数} \\ -\varepsilon_n & n \text{ 为奇数} \end{cases}$$

因此，易知 Connes 复形 $C_\bullet^\lambda(K) := C_\bullet K / (1 - \lambda)$ 具体如下：

$$\cdots \rightarrow 0 \xrightarrow{0} K \xrightarrow{0} 0 \xrightarrow{0} K$$

对它取同调，即得循环同调。 □

接下来，考虑 $A = K[x^1, x^2, \dots, x^n]$ 为 n 元多项式环的情形，我们企图取计算 A 的循环同调。注意在之前我们已经使用 Koszul 复形求出了 $A = K[x^1, x^2, \dots, x^n]$ 的 Hochschild 同调。

引理 1.8.3. 设 $A = K[x^1, x^2, \dots, x^n]$ 为 n 元多项式环，考虑微分形式代数 $\Omega_A^\bullet := K[x^1, \dots, x^n; dx^1, \dots, dx^n]$ ，注意 Ω_A^\bullet 上有外积运算 \wedge 与外微分运算 d 。考虑以下 K -模同态

$$\begin{aligned} \Phi: \overline{C}_p(A) &\rightarrow \Omega_A^p \\ a_0 \otimes \overline{a_1} \otimes \cdots \otimes \overline{a_p} &\mapsto \frac{1}{p!} a_0 da_1 \wedge da_2 \wedge \cdots \wedge da_p \end{aligned}$$

则 Φ 是良定的，并且成立：

$$\begin{cases} \Phi \circ b = 0 \\ \Phi \circ B = d \circ \Phi \end{cases}$$

其中 $b: \overline{C}_p(A) \rightarrow \overline{C}_{p-1}(A)$ 为约化 Hochschild 复形的边缘算子， $B: \overline{C}_{p-1}(A) \rightarrow \overline{C}_p(A)$ 为约化的 Connes 算子。

证明. Φ 的良定性，即 \overline{A} 中元素与代表元选取无关。而此代表元选取至多相差“常数项”（即 K 中元素），它在外微分 d 的作用下为零。因此 Φ 良定。

我们来验证 $\Phi \circ b = 0$ 。暴力验证如下：

$$\Phi \circ b(a_0 \otimes \overline{a_1} \otimes \cdots \otimes \overline{a_n})$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{p!} \left(a_0 a_1 da_2 \wedge \cdots \wedge da_p + \sum_{k=1}^{p-1} (-1)^k a_0 da_1 \wedge \cdots \wedge d(a_k a_{k+1}) \wedge \cdots \wedge da_p \right. \\
&\quad \left. + (-1)^p a_0 a_p da_1 \wedge \cdots \wedge da_{p-1} \right) \\
&= \frac{1}{p!} \left(a_0 a_1 da_2 \wedge \cdots \wedge da_p + \sum_{k=1}^{p-1} (-1)^k a_0 a_k da_1 \wedge \cdots \wedge \widehat{da_k} \wedge \cdots \wedge da_p \right. \\
&\quad \left. + \sum_{k=1}^{p-1} (-1)^k a_0 a_{k+1} da_1 \wedge \cdots \wedge \widehat{da_{k+1}} \wedge \cdots \wedge da_p + (-1)^p a_0 a_p da_1 \wedge \cdots \wedge da_{p-1} \right) \\
&= 0
\end{aligned}$$

第二个等式 $\Phi \circ \mathcal{B} = d \circ \Phi$ 也容易直接验证：一方面，

$$\begin{aligned}
&\Phi \circ \mathcal{B}(a_0 \otimes \overline{a_1} \otimes \cdots \otimes \overline{a_n}) \\
&= \sum_{k=0}^p \frac{(-1)^{pk}}{(p+1)!} (da_k \wedge da_{k+1} \wedge \cdots \wedge da_p) \wedge (da_0 \wedge da_1 \wedge \cdots \wedge da_{k-1}) \\
&= \frac{1}{p!} da_0 \wedge da_1 \wedge \cdots \wedge da_n
\end{aligned}$$

而另一方面，

$$d \circ \Phi(a_0 \otimes \overline{a_1} \otimes \cdots \otimes \overline{a_p}) = \frac{1}{p!} d(a_0 da_1 \wedge \cdots \wedge da_p) = \frac{1}{p!} da_0 \wedge da_1 \wedge \cdots \wedge da_p$$

从而得证。 □

由此引理，我们即可去计算 $A := K[x^1, x^2, \dots, x^n]$ 的循环同调。

性质 1.8.4. 对于 $A := K[x^1, x^2, \dots, x^n]$ ，则其循环同调

$$H_n^\lambda(A) \cong \begin{cases} (\Omega_A^n / d\Omega_A^{n-1}) \oplus K & n \text{ 为偶数} \\ \Omega_A^n / d\Omega_A^{n-1} & n \text{ 为奇数} \end{cases}$$

证明. 事实上, 刚才的引理 1.8.3 表明, Φ 诱导以下两个双复形之间的态射:

$$\begin{array}{ccc}
 \vdots & \vdots & \vdots \\
 \downarrow & \downarrow & \downarrow \\
 \overline{C}_2(A) & \xleftarrow{\mathcal{B}} \overline{C}_1(A) & \xleftarrow{\mathcal{B}} \overline{C}_0(A) \\
 \downarrow b & & \downarrow b \\
 \overline{C}_1(A) & \xleftarrow{\mathcal{B}} \overline{C}_0(A) & \\
 \downarrow b & & \\
 \overline{C}_0(A) & &
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccc}
 \vdots & \vdots & \vdots \\
 \downarrow & \downarrow & \downarrow \\
 \Omega_A^2 & \xleftarrow{d} \Omega_A^1 & \xleftarrow{d} \Omega_A^0 \\
 \downarrow 0 & & \downarrow 0 \\
 \Omega_A^1 & \xleftarrow{d} \Omega_A^0 & \\
 \downarrow 0 & & \\
 \Omega_A^0 & &
 \end{array}$$

(按村儿里的规矩, 此处应该有立方交换图)

其中左边为 $\overline{\mathcal{B}}_{\bullet\bullet}(A)$, 而右边的每一行均为 de-Rham 上链复形, 每一列的边缘算子都为零。注意到 Φ 是满射, 以及我们早已用 Koszul 复形得到的

$$H_n(\overline{\mathcal{C}}_{\bullet}(A)) \cong \mathrm{HH}_n(A) \cong \Omega_A^n \cong H_n(\Omega_A^{\bullet}, 0)$$

从而双复形同态 Φ 限制在每一列上都为拟同构, 于是由引理 1.6.3, 立刻知道

$$\Phi : \mathrm{Tot}_{\bullet}(\overline{\mathcal{B}}_{\bullet\bullet}(A), b, \mathcal{B}) \rightarrow \mathrm{Tot}_{\bullet}(\Omega_A^{\bullet}, 0, d)$$

为拟同构。上式左边的同调即为 A 的循环同调, 而右边的同调可以直接计算。只需要注意到 (Poincare 引理) de-Rham 复形

$$\dots \xrightarrow{d} \Omega^{\bullet}(A) \xrightarrow{d} \Omega^{\bullet}(A) \xrightarrow{d} \Omega^{\bullet}(A) \rightarrow 0$$

的 (上) 同调满足

$$H^n(\Omega_A^{\bullet}, d) = \begin{cases} K & n = 0 \\ 0 & n > 0 \end{cases}$$

因此容易计算出

$$H_n^{\lambda}(A) \cong \begin{cases} (\Omega_A^n / d\Omega_A^{n-1}) \oplus K & n \text{ 为偶数} \\ \Omega_A^n / d\Omega_A^{n-1} & n \text{ 为奇数} \end{cases}$$

□

注记 1.8.5. 容易知道, Connes 算子

$$\mathcal{B} : \overline{C}_n(A) \rightarrow \overline{C}_{n+1}(A)$$

在 $\ker b$ 上的限制, 可以下降为 Hochschild 同调之间的同态

$$\mathcal{B} : \mathrm{HH}_n(A) \rightarrow \mathrm{HH}_{n+1}(A)$$

Hochschild 同调扮演的角色相当于微分形式，而此时 Connes 算子扮演的则是外微分。

注记 1.8.6. 双复形满同态

$$\Phi : (\overline{\mathcal{B}}_{\bullet\bullet}(A), b, \mathcal{B}) \twoheadrightarrow (\Omega_A^\bullet, 0, d)$$

其实是可裂 (*split*) 的。具体地，存在双复形同态

$$\begin{aligned} \eta : \Omega^\bullet(A) &\rightarrow \overline{\mathcal{C}}_\bullet(A) \\ a_0 da_1 \wedge da_2 \wedge \cdots \wedge da_p &\mapsto \sum_{\sigma \in S_p} (-1)^{\text{sgn } \sigma} a_0 \otimes a_{\sigma(1)} \otimes \cdots \otimes a_{\sigma(p)} \end{aligned}$$

使得 $\Phi \circ \eta = \text{id}$.

容易验证 (简单的组合技巧) η 的确诱导了双复形同态

$$\eta : (\Omega_A^\bullet, 0, d) \rightarrow (\overline{\mathcal{B}}_{\bullet\bullet}(A), b, \mathcal{B})$$

1.9 循环上同调

本章最后，简单介绍一下循环上同调 (Cyclic cohomology)。对于双 A -模 M ，回顾我们之前已经介绍的 Hochschild 上链复形

$$C^n(A, M) := \text{Hom}(A^{\otimes n}, M)$$

特别地，当 $M = A$ 时，我们给出以下记号：

记号 1.9.1. 对于 K -代数 A ，以及 $n \geq 0$ ，我们记 *Hochschild* 上链复形

$$C^n(A) := C^n(A, A) \cong \text{Hom}(A^{\otimes n}, A) \cong \text{Hom}(A^{\otimes n+1}, K)$$

并且将该 *Hochschild* 上链复形的微分算子记为 b^* 。

我们此前考虑同构 $C_n(A) \cong A^{\otimes n+1}$ ，而 Hochschild 上链复形 $C^n(A) \cong \text{Hom}(A^{\otimes n+1}, K)$ 恰为其对偶；微分算子 b^* 的作用即为 b 的对偶：即对任意 $f \in C^n(A) \cong \text{Hom}(A^{\otimes n+1}, K)$ 以及 $\omega \in A^{\otimes n+2} \cong C_{n+1}(A)$ ，成立

$$(b^* f)(\omega) = f(b(\omega))$$

与循环余不变量对偶，我们可以谈论循环不变量：

定义 1.9.2. (循环不变量)

对于 $f \in C^n(A)$, 称 f 为循环不变量 (cyclic invariant), 如果对任意的 $a_0, \dots, a_n \in A$, 成立

$$f(a_0, a_1, \dots, a_n) = (-1)^n f(a_n, a_0, \dots, a_{n-1})$$

记 $C^n(A)$ 当中的循环不变量之全体为 $C_\lambda^n(A)$.

容易验证 $b^*(C_\lambda^n(A)) \subseteq C_\lambda^{n+1}(A)$, 从而 $(C_\lambda^\bullet(A), b^*)$ 为 $(C^\bullet(A), b^*)$ 的子复形。(不必暴力验证了, 由循环余不变量对偶过去就行) 看图说话即可:

$$\begin{array}{ccccccc}
 \cdots & \longrightarrow & C_n(A) & \xrightarrow{b'} & C_{n-1}(A) & \longrightarrow & \cdots \\
 & & \downarrow 1-\lambda & & \downarrow 1-\lambda & & \\
 \cdots & \longrightarrow & C_n(A) & \xrightarrow{b} & C_{n-1}(A) & \longrightarrow & \cdots \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & \\
 \cdots & \longrightarrow & C_n^\lambda(A) & \longrightarrow & C_{n-1}^\lambda(A) & \longrightarrow & \cdots \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & \\
 & & 0 & & 0 & &
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccccccc}
 \cdots & \longleftarrow & C^n(A) & \xleftarrow{b'^*} & C^{n-1}(A) & \longleftarrow & \cdots \\
 & & \uparrow 1-\lambda^* & & \uparrow 1-\lambda^* & & \\
 \cdots & \longleftarrow & C^n(A) & \xleftarrow{b^*} & C^{n-1}(A) & \longleftarrow & \cdots \\
 & & \uparrow & & \uparrow & & \\
 \cdots & \longleftarrow & C_\lambda^n(A) & \longleftarrow & C_\lambda^{n-1}(A) & \longleftarrow & \cdots \\
 & & \uparrow & & \uparrow & & \\
 & & 0 & & 0 & &
 \end{array}$$

左图我们早已熟悉, 注意它的每一列都是右正合的。将反变左正合函子 $\text{Hom}(-, K)$ 作用于左图即得到右图, 右图的每一列都是左正合的。

定义 1.9.3. (循环上同调) 对于 K -代数 A 定义 A 的循环上同调 (cyclic cohomology)

$$H_\lambda^\bullet(A) := \text{HC}^\bullet(A) := H^\bullet(C_\lambda^\bullet(A), d^*)$$

作为例子, 我们具体计算一下第零个循环上同调。

例子 1.9.4. 对于 K -代数 A , 则有

$$H_\lambda^0(A) = \{f \in \text{Hom}(A, K) \mid \forall x, y \in A, f(xy) = f(yx)\}$$

证明. 直接计算即可。只需考虑 Hochschild 上链复形

$$0 \rightarrow C_\lambda^0(A) \xrightarrow{b^*} C_\lambda^1(A) \xrightarrow{b^*} C_\lambda^2(A) \rightarrow \cdots$$

易知 $C_\lambda^0(A) = C^0(A) = \text{Hom}(A, K)$, 从而

$$H_\lambda^0(A) = \ker(b^* : C^0(A) \rightarrow C^1(A))$$

对于 $f \in \text{Hom}(A, K)$, 若 $b^*f = 0$, 则对于任意 $x, y \in A$, 有

$$0 = (b^*f)(x, y) = f(b(x \otimes y)) = f(xy - yx) = f(xy) - f(yx)$$

从而可知

$$H_\lambda^0(A) = \{f \in \text{Hom}(A, K) | \forall x, y \in A, f(xy) = f(yx)\}$$

□

像 $H_\lambda^0(A)$ 当中的线性算子那样, 满足

$$f(xy) = f(yx) \quad (\forall x, y \in A)$$

的线性算子称之为**迹算子**。

高阶的循环上同调可被认为是“导出的”迹算子。

第 2 章 乘积

2.1 分次模与 Koszul 符号法则

本节我们集中起来澄清一些关于分次模、分次代数的概念，并且力图阐明分次代数中出现的正负号。这里的“分次”如不加说明，指的都是 \mathbb{Z} -分次。

首先我们考虑分次 K -模。

定义 2.1.1. (分次 K -模范畴)

(1) 称 K -模 M 为 $(\mathbb{Z}-)$ 分次 K -模 (*graded K -module*), 若 M 具有如下分次结构:

$$M = \bigoplus_{k \in \mathbb{Z}} M_k$$

(2) 若 M, N 为分次 K -模, 称 K -模同态 $f: M \rightarrow N$ 为次数为 d 的齐次 K -模同态, 若对于任意 $n \in \mathbb{Z}$, 成立

$$f(M_n) \subseteq N_{n+d}$$

对于分次代数, 我们可以定义齐次元, 以及齐次元的次数, 不再赘述。对于齐次元 $a \in A$, 将 a 的次数记为 $\deg a$, 或者简记为 $|a|$.

平凡的例子: 通常的 K -模自然有分次 K -模结构——只需将该模中的任何元素都认为是 0 次齐次元。

我们还可以谈论以分次 K -模为对象的范畴:

记号 2.1.2. (分次 K -模范畴) 对于分次 K -模 M, N , 对任意 $d \in \mathbb{Z}$, 记

$$\mathrm{Hom}(M, N)_d := \bigoplus_{n \in \mathbb{Z}} \mathrm{Hom}(M_n, N_{n+d})$$

即次数为 d 的分次 K 模同态之全体。再记

$$\mathrm{Hom}(M, N) := \bigoplus_{d \in \mathbb{Z}} \mathrm{Hom}(M, N)_d$$

称这里面的元素为分次 K -模同态。

我们考虑如下分次 K -模范畴，记为 $\text{Mod}_K^{\mathbb{Z}}$ ：

- (1) $\text{Obj} =$ 全体分次 K -模；
- (2) $\text{Mor}(M, N) = \text{Hom}(M, N)$ 为分次 K -模同态。

注意对任何分次 K -模 M, N ， $\text{Hom}(M, N)$ 自然有分次 K -模结构，其中的 d 次齐次元即为 M 到 N 的次数为 d 的齐次同态。

对于两个分次 K -模，它们作为 K -模的张量积，也有自然的分次结构：

定义 2.1.3. (分次 K -模的张量积) 对于分次 K -模 M, N ，则张量积 $M \otimes N$ 自然有如下分次结构：

$$M \otimes N = \bigoplus_{k \in \mathbb{Z}} (M \otimes N)_k$$

其中

$$(M \otimes N)_k := \bigoplus_{\substack{p, q \in \mathbb{Z} \\ p+q=k}} M_p \otimes N_q$$

容易验证这给出了 $M \otimes N$ 的分次 K -模结构。

定义 2.1.4. 对于分次 K -模 M, N ，定义如下分次 K -模同态：

$$\begin{aligned} \tau : M \otimes N &\rightarrow N \otimes M \\ x \otimes y &\mapsto (-1)^{\deg x \deg y} y \otimes x \end{aligned}$$

其中 x, y 分别为 M, N 中的任意的齐次元。

这是一个次数为 0 的齐次 K -模同构，称之为分次对合自同构。注意这里的正负号。

记号 2.1.5. (*Koszul* 符号法则)

设 M, M', N, N' 均为分次 K -模，则自然有如下的分次 K -模同态：

$$\begin{aligned} \text{Hom}(M, N) \otimes \text{Hom}(M', N') &\rightarrow \text{Hom}(M \otimes M', N \otimes N') \\ (f \otimes g)(m \otimes m') &:= (-1)^{\deg g \deg m} f(m) \otimes g(m') \end{aligned}$$

其中 f, g, m, m' 分别为 $\text{Hom}(M, N), \text{Hom}(M', N'), M, M'$ 当中的任意齐次元。

依然注意正负号。以后我们总是默认 $f \otimes g$ 在 $m \otimes m'$ 上如此作用。

我们还可以定义分次 K -模的对偶模（与通常的对偶模仍然在正负号上有些区别）：

定义 2.1.6.（分次对偶模）对于分次 K -模 M ，定义

$$M^* := \bigoplus_{n \in \mathbb{Z}} M_n^*$$

其中

$$M_n^* := \text{Hom}(M_{-n}, \mathbb{Z})$$

易知 M^* 具有分次 K -模结构，并且有自然的配对

$$M_n^* \times M_{-n} \rightarrow K$$

注记 2.1.7.（分次 K -模上链复形）对于分次 K -模 C ，以及 $d \in \text{Hom}(C, C)_1$ ，即次数为 1 的齐次同态。如果 $d \circ d = 0$ ，则自然有 K -模上链复形：

$$\cdots \rightarrow C_{-1} \xrightarrow{d} C_0 \xrightarrow{d} C_1 \xrightarrow{d} C_2 \rightarrow \cdots$$

这是我们在同调代数当中早已熟知的。我们以后就将上链复形与带有 d 的分次 K -模等同。本节我们采用上链复形的语言（即 $\deg d = 1$ ），链复形（ $\deg \partial = -1$ ）的情形完全类似。

这里讲到的“上链复形”，与通常同调代数当中的上链复形在各种操作上都会可能相差正负号；为了区分，我们称这里的“上链复形”为“分次上链复形”。

我们还可以考虑分次上链复形 (C_\bullet, d) 的分次对偶，仍为分次上链复形：

$$\cdots \rightarrow C_{-1}^* \xrightarrow{d^*} C_0^* \xrightarrow{d^*} C_1^* \xrightarrow{d^*} C_2^* \rightarrow \cdots$$

定义 2.1.8.（分次上链复形的平移）对于分次 K -模上链复形 (C_\bullet, d) ，定义分次上链复形 $(C_\bullet[1], d_{[1]})$ 如下：

$$(C_\bullet[1])_n := C_{n+1}$$

并且微分算子 $d_{[1]}$ 使得下图交换：

$$\begin{array}{ccc} (C[1])_n & \xrightarrow{d_{[1]}} & (C[1])_{n+1} \\ \parallel & & \parallel \\ C_{n+1} & \xrightarrow{-d} & C_{n+2} \end{array}$$

注意 $d_{[1]}$ 当中的负号。类似地，对任意 $l \in \mathbb{Z}$ ，可以去定义 l -平移 $(C[l]_{\bullet}, d_{[l]})$ ，特别注意符号

$$d_{[l]} = (-1)^l d$$

对于一般的分次 K -模，我们也可以考虑其平移，这无非是重新规定齐次元的次数。

定义 2.1.9. (分次上链复形的张量积)

对于分次上链复形 (C_{\bullet}, d_C) 与 (D_{\bullet}, d_D) ，定义 $(C \otimes D)_{\bullet}$ 的分次上链复形结构 d 如下：

$$\begin{aligned} d : C_p \otimes D_q &\rightarrow C_{p+1} \otimes D_q \oplus C_p \otimes D_{q+1} \\ d &= d_C \otimes 1 + (-1)^p 1 \otimes d_D \end{aligned}$$

仍然要注意正负号。容易验证 $d \circ d = 0$ ，从而 $((C \otimes D)_{\bullet}, d)$ 确实为分次上链复形。对于分次 K -模，我们仍可以谈论对称张量、反对称张量：

定义 2.1.10. 设 V 为分次 K -模，对任意 $m \geq 0$ ，

(1) 定义 m 阶超对称张量空间如下：

$$\text{Sym}^m(V) = V^{\otimes m} / \sim$$

其中等价关系 \sim 由以下生成：对任意齐次元 $\alpha, \beta \in V$ ，

$$\alpha \otimes \beta \sim (-1)^{\deg \alpha \deg \beta} \beta \otimes \alpha$$

(2) 定义 m 阶超反称张量空间如下：

$$\bigwedge^m(V) := V^{\otimes m} / \sim$$

其中等价关系 \sim 由以下生成：对任意齐次元 $\alpha, \beta \in V$ ，

$$\alpha \otimes \beta \sim -(-1)^{\deg \alpha \deg \beta} \beta \otimes \alpha$$

若 $V = V_0$ 为通常的 K -模，则 $\text{Sym}^n(V_0)$ 与 $\bigwedge^n(V_0)$ 即为通常的对称张量、外张量。对于分次 K -模 V ，以及任意的 $m \geq 0$ ， $\text{Sym}^m(V)$ 有以下自然的分次 K -模结构：

$$\text{Sym}^m(V) = \bigoplus_{d \in \mathbb{Z}} [\text{Sym}^m(V)]_d$$

$$[\mathrm{Sym}^m(V)]_d := \mathrm{span}_K \left\{ v_1 \odot v_2 \odot \cdots \odot v_m \mid \sum_{i=1}^m \deg v_i = d \right\}$$

超反称张量空间 $\wedge^m(V)$ 也有完全类似的分次 K -模结构。

回顾分次 K -模的平移，以下结果十分重要：

性质 2.1.11. 对于分次 K -模 V ，以及任意 $n \geq 0$ ，则有分次 K -模同构：

$$\mathrm{Sym}^n(V[1]) \cong (\wedge^n(V))[n]$$

证明. 对于任意 $d \in \mathbb{Z}$ ，首先看看它们的齐次分量 $(\mathrm{Sym}^n(V[1]))_d$ 与 $((\wedge^n(V))[n])_d$ 中的元素具有何种形式。我们用 v_1, \dots, v_n 表示 V 中的 d_1, \dots, d_n 次齐次元，根据定义容易验证

$$(\mathrm{Sym}^n(V[1]))_d = \mathrm{span}_K \{ v_1 \odot v_2 \odot \cdots \odot v_n \mid d_1 + d_2 + \cdots + d_n = n + d \}$$

$$((\wedge^n(V))[n])_d = \mathrm{span}_K \{ v_1 \wedge v_2 \wedge \cdots \wedge v_n \mid d_1 + d_2 + \cdots + d_n = n + d \}$$

从而它们都为 $(V^{\otimes n})_{n+d}$ 的商模。

考虑 K -模自同构

$$\begin{aligned} \Phi_{n,d} : (V^{\otimes n})_{n+d} &\rightarrow (V^{\otimes n})_{n+d} \\ v_1 \otimes v_2 \otimes \cdots \otimes v_n &\mapsto (-1)^{d_1+2d_2+\cdots+nd_n} v_1 \otimes v_2 \otimes \cdots \otimes v_n \end{aligned}$$

断言该自同构 $\Phi_{n,d}$ 诱导了模同构

$$\begin{aligned} \varphi_{n,d} : (\mathrm{Sym}^n(V[1]))_d &\rightarrow ((\wedge^n(V))[n])_d \\ v_1 \odot v_2 \odot \cdots \odot v_n &\mapsto (-1)^{d_1+2d_2+\cdots+nd_n} v_1 \wedge v_2 \wedge \cdots \wedge v_n \end{aligned}$$

为此，只需要验证 $\varphi_{n,d}$ 的良好性（与代表元选取无关）。若 $\varphi_{n,d}$ 良定，则容易构造其逆映射，进而命题得证。

特别注意， $\mathrm{Sym}^n(V[1])$ 作为 $V^{\otimes n}$ 的商模，商掉的等价关系由

$$x \otimes y \sim (-1)^{(\deg x - 1)(\deg y - 1)} y \otimes x$$

生成，这直接由定义验证（**要特别小心**）；而 $(\wedge^n(V))[n]$ 作为 $V^{\otimes n}$ 的商模，商掉的等价关系由

$$x \otimes y \sim -(-1)^{\deg x \deg y} y \otimes x$$

生成。于是只需验证对任意 $1 \leq l \leq n_1$ ，成立

$$\Phi_{n,d} \left(\cdots (v_l \otimes v_{l+1} - (-1)^{(d_l-1)(d_{l+1}-1)} v_{l+1} \otimes v_l) \cdots \right)$$

$$\begin{aligned}
&= (-1)^{\sum_{i=1}^n id_i} \left(\cdots (v_l \otimes v_{l+1} - (-1)^{(d_l-1)(d_{l+1}-1)-d_{l+1}+d_l} v_{l+1} \otimes v_l) \cdots \right) \\
&= (-1)^{\sum_{i=1}^n id_i} \left(\cdots (v_l \otimes v_{l+1} + (-1)^{d_l d_{l+1}} v_{l+1} \otimes v_l) \cdots \right) \\
&\equiv 0 \in ((\bigwedge^n(V))[n])_d
\end{aligned}$$

□

2.2 分次代数与分次李代数

定义 2.2.1. (分次结合代数) 对于结合 K -代数 A :

(1) 称 A 为 $(\mathbb{Z}-)$ 分次结合代数 (associative graded algebra), 若 A 具有分次 K -模结构:

$$A = \bigoplus_{n \in \mathbb{Z}} A_n$$

并且与乘法相容: 对任意 $k, l \in \mathbb{Z}$, 有

$$A_k \cdot A_l \subseteq A_{k+l}$$

(2) 若 A 为分次结合代数, 称 A 为分次交换代数, 若 A 还满足以下分次交换性: 对任意 $a_k \in A_k, a_l \in A_l$,

$$a_k \cdot a_l = (-1)^{kl} a_l \cdot a_k$$

特别注意分次交换性的正负号。分次交换代数的典型例子是, 光滑流形 X 上的微分形式 Ω_X^\bullet , 配以外积运算 \wedge 。

不过注意, 多项式代数 $K[x^1, \dots, x^n]$ 自然有分次结构, 是分次代数, 但它不满足分次交换性。
(仅仅是“交换的分次代数” 23333)

定义 2.2.2. (分次李代数)

K -代数 $(\mathfrak{g}, [\cdot, \cdot])$ 称为分次李代数 (graded Lie algebra), 或者李超代数 (Lie super algebra), 如果以下满足:

(1) \mathfrak{g} 具有分次 $\mathfrak{g} = \bigoplus_{k \in \mathbb{Z}} \mathfrak{g}_k$, 使得对任意 $k, l \in \mathbb{Z}$, 成立

$$[\mathfrak{g}_k, \mathfrak{g}_l] \subseteq \mathfrak{g}_{k+l}$$

(2) 乘法 $[\cdot, \cdot]: \mathfrak{g} \times \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}$ 满足如下分次反交换性: 对 A 中任意齐次元 a, b , 成立

$$[a, b] = -(-1)^{\deg a \deg b} [b, a]$$

(3) 对于 A 中任何齐次元 a, b, c , 成立如下分次雅可比恒等式:

$$(-1)^{\deg b \deg c} [c, [a, b]] + (-1)^{\deg c \deg a} [a, [b, c]] + (-1)^{\deg a \deg b} [b, [c, a]] = 0$$

我们可以将“分次”(graded)与“超”(super)进行同义词替换, 比如“分次雅可比恒等式”也可以称为“超雅可比恒等式”, “分次交换性”可以称为“超交换性”等等, 甚至将“分次线性空间”称为“超空间”。

容易验证, 超雅可比恒等式也可以改写为:

$$[c, [a, b]] = [c, [a, b]] + (-1)^{\deg a \deg c} [a, [c, b]]$$

也容易验证, 对于李超代数 $(A, [\cdot, \cdot])$, 则 $[\cdot, \cdot]$ 在 A 的零次分量 A_0 的限制, 给出了 A_0 的李代数结构。回顾李代数的情形, 李括号的雅可比恒等式反映了某种导子性质; 而李超代数完全类似, 上述超雅可比恒等式其实表明某种“超导子”性质。

记号 2.2.3. 为了省事, 我们引入一个记号约定: 对于分次代数或者分次李代数 (以及后文将介绍的分次模), 若 a 为其次元, 我们简记

$$(-1)^a := (-1)^{\deg a}$$

也就是说, (-1) 的幂次当中出现齐次元的次数时, 省略“deg”。

例如, 李超代数的超雅可比恒等式可简记为

$$(-1)^{bc} [c, [a, b]] + (-1)^{ca} [a, [b, c]] + (-1)^{ab} [b, [c, a]] = 0$$

或者

$$[c, [a, b]] = [c, [a, b]] + (-1)^{ac} [a, [c, b]]$$

引理 2.2.4. (分次结合代数诱导分次李代数)

设 (A, \cdot) 为分次结合代数, 则其乘法自然诱导出 A 的分次李代数结构如下: 定义

$$\begin{aligned} [\cdot, \cdot] : A \times A &\rightarrow A \\ [a, b] &:= a \cdot b - (-1)^{ab} b \cdot a \end{aligned}$$

其中任意 $a, b \in A$ 为齐次元。则 $(A, [\cdot, \cdot])$ 构成分次李代数, 并且与 (A, \cdot) 具有相同的分次。

这与由通常的结合代数通过“对易子”得到李代数的方式类似，不过要稍微注意正负号。
证明. 直接暴力验证即可，从略。注意这里的

$$(-1)^{ab} := (-1)^{\deg a \deg b} = (-1)^{ba}$$

为偷懒的记号。 □

我们可以考虑以分次 K -代数的范畴：

定义 2.2.5. (分次结合代数范畴)

我们定义如下的分次结合 K -代数范畴，记为 $\text{Ass-}\mathbf{alg}_K^{\mathbb{Z}}$ ：

- (1) $\text{Obj} =$ 全体分次结合 K -代数；
- (2) Mor : 对任意两个分次结合 K -代数 A, B ,

$$\text{Hom}(A, B) := \bigoplus_{n \in \mathbb{Z}} (\text{Hom}(A, B))_n$$

其中

$$(\text{Hom}(A, B))_n := \{f \text{ 为 } K\text{-代数同态} \mid f(A_d) \subseteq B_{d+n} \forall d \in \mathbb{Z}\}$$

$(\text{Hom}(A, B))_n$ 当中的元素称之为 n 次齐次 K -代数同态。

类似地，考虑分次交换代数范畴，它是分次结合代数范畴的全子范畴，记为

$$\text{Commu-}\mathbf{alg}_K^{\mathbb{Z}}$$

定义 2.2.6. (分次双 A -模)

设 $A = \bigoplus_{n \in \mathbb{Z}} A_n$ 为分次结合 K -代数， M 为双 A -模，称 M 为分次双 A -模，若 M 配以分次 K -模结构

$$M = \bigoplus_{n \in \mathbb{Z}} M_n$$

并且与 A 的模作用相容：对任意 $p, q \in \mathbb{Z}$,

$$A_p \cdot M_q \subseteq M_{p+q}$$

$$M_p \cdot A_q \subseteq M_{p+q}$$

然后对于两个分次双 A -模 M, N ，也可以定义何为“分次双 A -模同态”，并且从 M 到 N 的分次双 A -模同态之全体，亦有自然的分次双 A -模结构。

特别地，对于分次 K -代数 A ， A 自身有自然的分次双 A -模结构。

定义 2.2.7. (导子) 对于分次 K -代数 A ，以及分次双 A -模 M ，称 K -线性同态

$$D : A \rightarrow M$$

为 A 的一个取值于 M 的导子，若对 A 中的任何齐次元 a, b ，成立

$$D(ab) = D(a).b + (-1)^a a.D(b)$$

我们将 A 的取值于 M 的导子之全体记为 $\text{Der}_0(A, M)$ 。

这个定义当中并没有用到 M 的分次。事实上对于一般的双 A -模 M ，我们都可以如此谈论 $\text{Der}_0(A, M)$ 。

导子的作用可以用如下交换图描述：

$$\begin{array}{ccc} A \otimes A & \xrightarrow{m} & A \\ \downarrow 1 \otimes D + D \otimes 1 & & \downarrow D \\ A \otimes M \oplus M \otimes A & \xrightarrow{m} & M \end{array}$$

其中 m 表示 A 中的乘法，然后特别注意 $1 \otimes D$ 以及 $D \otimes 1$ 在 $A \otimes A$ 上的作用服从 **Koszul** 符号法则（回顾记号 2.1.5）。

定义 2.2.8. (超导子)

对于分次 K 代数 A 以及 $d \in \mathbb{Z}$ ，称次数为 d 的分次 K -模同态

$$D : A \rightarrow A$$

为次数为 d 的超导子，若满足如下的超莱布尼茨法则：对 A 中任何齐次元 a, b ，成立

$$D(ab) = D(a)b + (-1)^{d \cdot \deg a} aD(b)$$

记次数为 d 的超导子之全体为 $\text{Der}(A, A)_d$ ，并且记

$$\text{Der}(A, A) := \bigoplus_{d \in \mathbb{Z}} \text{Der}(A, A)_d$$

易知 $\text{Der}(A, A)$ 有自然的分次 K -模结构。超导子 D 的作用可由如下交换图来描述：

$$\begin{array}{ccc} A \otimes A & \xrightarrow{D \otimes 1 + 1 \otimes D} & A \otimes A \\ \downarrow m & & \downarrow m \\ A & \xrightarrow{D} & A \end{array}$$

注记 2.2.9. (微分分次代数) 对于 K -代数 A ，以及次数为 1 的超导子 $d \in \text{Der}(A, A)_1$ ，如果 $d^2 = 0$ ，则 (A, d) 正是我们在之前 (见定义 1.4.5) 定义的分次微分代数。

分次微分代数 (A, d) 自然可视为分次上链复形。当然我们也可以考虑次数为 -1 的超导子，亦可定义出类似版本的分次微分代数 (不过我们更推荐使用上链复形的语言)。

引理 2.2.10. (由超导子构成的李超代数)

对于分次 K -代数 A ，若 $D_1, D_2 \in \text{Der}(A, A)$ 为齐次的超导子，定义

$$[D_1, D_2] := D_1 \circ D_2 - (-1)^{D_1 D_2} D_2 \circ D_1$$

则 $[D_1, D_2]$ 是次数为 $\deg D_1 + \deg D_2$ 的超导子。从而我们定义了

$$[,] : \text{Der}(A, A) \times \text{Der}(A, A) \rightarrow \text{Der}(A, A)$$

使得 $(\text{Der}(A, A), [,])$ 为李超代数。

证明. 对于齐次超导子 D_1, D_2 ，只需要验证 $[D_1, D_2]$ 仍然是超导子，然后由引理 2.2.4 即可知 $(\text{Der}(A, A), [,])$ 为李超代数。

暴力验证之 (还是写一下过程吧)，对 A 中任意齐次元 a_1, a_2 ，有

$$\begin{aligned} [D_1, D_2](a_1 a_2) &= (D_1 D_2 - (-1)^{D_1 D_2} D_2 D_1)(a_1 a_2) \\ &= D_1(D_2(a_1)a_2 + (-1)^{a_1 D_2} a_1 D_2(a_2)) \\ &\quad - (-1)^{D_1 D_2} D_2(D_1(a_1)a_2 + (-1)^{a_1 D_1} a_1 D_1(a_2)) \\ &= D_1 D_2(a_1)a_2 + (-1)^{D_1(a_1+D_2)} D_2(a_1)D_1(a_2) \\ &\quad + (-1)^{a_1 D_2} [D_1(a_1)D_2(a_2) + (-1)^{a_1 D_1} a_1 D_1 D_2(a_2)] \\ &\quad - (-1)^{D_1 D_2} [D_2 D_1(a_1)a_2 + (-1)^{D_2(D_1+a_1)} D_1(a_1)D_2(a_2) \\ &\quad + (-1)^{a_1 D_1} (D_2(a_1)D_1(a_2) + (-1)^{D_2 a_1} a_1 D_2 D_1(a_2))] \\ &= [D_1 D_2 - (-1)^{D_1 D_2} D_2 D_1](a_1)a_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (-1)^{a_1(D_1+D_2)} a_2 [D_1 D_2 - (-1)^{D_1 D_2} D_2 D_1] (a_2) \\
& = [D_1, D_2] (a_1) a_2 + (-1)^{a_1(D_1+D_2)} a_1 [D_1, D_2] (a_2)
\end{aligned}$$

可见 $[D_1, D_2]$ 确实是次数为 $(\deg D_1 + \deg D_2)$ 的超导子，证毕。 \square

最后简要介绍一下函子性：我们有遗忘函子

$$\begin{aligned}
\text{Ass-}\mathbf{alg}_K^{\mathbb{Z}} & \rightarrow \mathbf{Mod}_K^{\mathbb{Z}} \\
\text{Commu-}\mathbf{alg}_K^{\mathbb{Z}} & \rightarrow \mathbf{Mod}_K^{\mathbb{Z}}
\end{aligned}$$

我们考虑该函子的左伴随“自由分次结合代数”以及“自由分次交换代数”，即范畴论当中的“普遍真理”（呵呵呵呵呵呵）：

自由是遗忘的左伴随

定义 2.2.11. （张量代数 or 自由分次结合代数）

设 V 为分次 K -模，定义分次 K -模

$$T(V) := \bigoplus_{n \geq 0} V^{\otimes n}$$

其中 $V^{\otimes 0} := K$ ；并且张量积“ \otimes ”给出了 $T(V)$ 的乘法结构：

$$(v_1 \otimes \cdots \otimes v_p) \otimes (v_{p+1} \otimes \cdots \otimes v_{p+q}) = v_1 \otimes \cdots \otimes v_{p+q}$$

从而使得 $(T(V), \otimes)$ 为分次结合代数，称之为由 V 生成的自由分次结合代数。

这的确是一种非常“自由”的构造方式。并且容易验证 T 的函子性：

$$\begin{aligned}
T : \mathbf{Mod}_K^{\mathbb{Z}} & \rightarrow \mathbf{Ass-}\mathbf{alg}_K^{\mathbb{Z}} \\
V & \mapsto T(V)
\end{aligned}$$

同样，我们可以考虑自由生成的分次交换代数：

定义 2.2.12. （自由分次交换代数）

设 V 为分次 K -模，定义分次 K -模

$$\text{Sym}(V) := \bigoplus_{n \geq 0} \text{Sym}^n(V)$$

其中 $\text{Sym}^0(V) := K$ ；并且对称张量积 “ \odot ” 给出了 $\text{Sym}(V)$ 的乘法结构：

$$(v_1 \odot \cdots \odot v_p) \odot (v_{p+1} \odot \cdots \odot v_{p+q}) = v_1 \odot \cdots \odot v_{p+q}$$

从而使得 $(\text{Sym}(V), \odot)$ 为分次结合代数，称之为由 V 生成的自由分次交换代数。

也容易验证 Sym 的函子性：

$$\begin{aligned} \text{Sym} : \text{Mod}_K^{\mathbb{Z}} &\rightarrow \text{Commu-alg}_K^{\mathbb{Z}} \\ V &\mapsto \text{Sym}(V) \end{aligned}$$

性质 2.2.13. (伴随对) 对于任意分次 K -模 V ，以及分次结合 K -代数 A 、分次交换 K -代数 B ，注意 A, B 首先是分次 K -模：

(1) 存在 (关于 V, A) 自然的一一对应

$$\text{Hom}_{\text{Mod}_K^{\mathbb{Z}}}(V, A) \cong \text{Hom}_{\text{Ass-alg}_K^{\mathbb{Z}}}(T(V), A)$$

(2) 存在 (关于 V, B) 自然的一一对应

$$\text{Hom}_{\text{Mod}_K^{\mathbb{Z}}}(V, B) \cong \text{Hom}_{\text{Commu-alg}_K^{\mathbb{Z}}}(\text{Sym}(V), B)$$

证明. 易证，从略。 □

用范畴论的语言，此性质表明，函子 T 与 Sym 分别为相应的遗忘函子的左伴随。或者还可以表述为如下泛性质，看图即可：

$$\begin{array}{ccc} V & \xrightarrow{\quad} & T(V) \\ & \searrow \forall f & \downarrow \exists! \\ & & A \end{array} \qquad \begin{array}{ccc} V & \xrightarrow{\quad} & \text{Sym}(V) \\ & \searrow \forall f & \downarrow \exists! \\ & & B \end{array}$$

性质 2.2.14. 设 V 为分次 K -模， M 为 K -模，则有一一对应

$$\text{Der}_0(T(V), M) \cong \text{Hom}_K(V, M)$$

证明. 这个也几乎显然，从略。 □

2.3 余代数与分次余代数

首先简要回顾一下余代数 (co-algebra) 的概念。对于 K -代数 A , A 上的乘法 $m: A \otimes A \rightarrow A$ 的结合性可用如下交换图来描述:

$$\begin{array}{ccc}
 A \otimes A \otimes A & \xrightarrow{m \otimes 1} & A \otimes A \\
 \downarrow 1 \otimes m & & \downarrow m \\
 A \otimes A & \xrightarrow{m} & A
 \end{array}$$

将上述图表中的箭头全部反向, 即得到余结合律的概念: 对于 K -模 A , 以及 K -模同态 $\Delta: A \rightarrow A \otimes A$, 若以下图表交换

$$\begin{array}{ccc}
 A & \xrightarrow{\Delta} & A \otimes A \\
 \downarrow \Delta & & \downarrow \Delta \otimes 1 \\
 A \otimes A & \xrightarrow{1 \otimes \Delta} & A \otimes A \otimes A
 \end{array}$$

则称 Δ 满足余结合律, 运算 “ Δ ” 称为余乘 (co-product). 类似地我们可以谈论余交换律, 乘法 $m: A \otimes A \rightarrow A$ 与余乘 $\Delta: A \rightarrow A \otimes A$ 的交换律、余交换律分别由以下交换图表描述:

$$\begin{array}{ccc}
 A \otimes A & \xrightarrow{\tau} & A \otimes A \\
 \searrow m & & \swarrow m \\
 & A &
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{ccc}
 A \otimes A & \xleftarrow{\tau} & A \otimes A \\
 \swarrow \Delta & & \searrow \Delta \\
 & A &
 \end{array}$$

其中 $\tau: x \otimes y \mapsto y \otimes x$ 为 $A \otimes A$ 的对合自同构。

对于 K -代数 A , 我们总是假定 A 含幺。事实上, 存在唯一的 K -代数同态

$$i: K \rightarrow A$$

而 A 的幺元 $1 \in A$ 即为 $1 \in K$ 在该同态下的像。在此意义下, 我们不妨重新定义什么是 A 的幺元: 称 K -模同态 $i: K \rightarrow A$ 为 A 的幺元, 如果以下图表交换:

$$\begin{array}{ccccc}
 & & A & & \\
 & \nearrow \cong & \uparrow m & \nwarrow \cong & \\
 K \otimes A & \xrightarrow{i \otimes 1} & A \otimes A & \xleftarrow{1 \otimes i} & A \otimes K
 \end{array}$$

将以上图表的箭头全部反向，则得到余么元（co-unit）的概念：对于配以余乘 Δ 的 K -模 A ，称 K -模同态 $\varepsilon: A \rightarrow K$ 为关于 Δ 的余么元，如果以下图表交换：

$$\begin{array}{ccccc}
 & & A & & \\
 & \nearrow \cong & \downarrow \Delta & \nwarrow \cong & \\
 K \otimes A & \xleftarrow{\varepsilon \otimes 1} & A \otimes A & \xrightarrow{1 \otimes \varepsilon} & A \otimes K
 \end{array}$$

对于 K -模 A ，若 A 配以（满足余结合律的）余乘 Δ ，以及关于该余乘的余么元 $\varepsilon: A \rightarrow K$ ，则称 (A, Δ, ε) 为 K -余代数。

若 (A, Δ_A) 与 (B, Δ_B) 都为 K -余代数，称 K -模同态 $\varphi: A \rightarrow B$ 为 K -余代数同态，如果对任意 $x \in A$ ，成立

$$\Delta_B(\varphi(x)) = \varphi(\Delta_A(x))$$

注记 2.3.1. 若 (A, Δ) 为 K -余代数，考虑对偶映射 $\Delta^*: (A \otimes A)^* \rightarrow A^*$ ，则 (A^*, Δ^*) 具有如下 K -代数结构：

$$A^* \otimes A^* \rightarrow (A \otimes A)^* \xrightarrow{\Delta^*} A^*$$

用反变函子 $\text{Hom}(-, K)$ 翻转余代数图表的箭头而已；但是要注意，对一个代数取对偶，未必能得到余代数。也就是说，某种意义上余代数比代数包含更多的信息。

现在我们谈论余代数的分次版本。

定义 2.3.2. （分次余代数）

设 $A = \bigoplus_{k \in \mathbb{Z}} A_k$ 为分次 K -模， $\Delta: A \rightarrow A \otimes A$ 为 A 的余乘（满足余结合律），称 (A, Δ) 为分次余代数（graded co-algebra），若 Δ 与 A 的分次满足以下相容性：任意 $k \in \mathbb{Z}$ ，

$$\Delta(A_k) \subseteq (A \otimes A)_k$$

我们自然也可以谈论 Δ 的分次余交换性，见下述交换图（与非分次情形完全一样）：

$$\begin{array}{ccc}
 A \otimes A & \xleftarrow{\tau} & A \otimes A \\
 & \nearrow \Delta & \nwarrow \Delta \\
 & A &
 \end{array}$$

不过要注意，这里的 τ 为分次对合自同构（见定义2.1.4），服从 Koszul 符号法则：

$$\tau: x \otimes y \mapsto (-1)^{xy} y \otimes x$$

定义 2.3.3. (余超导子)

对于分次 K -余代数 A , 以及 $d \in \mathbb{Z}$, 称次数为 d 的分次 K -模同态 $\delta: A \rightarrow A$ 为 d 次齐次余超导子, 若以下图表交换

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\delta} & A \\ \Delta \downarrow & & \downarrow \Delta \\ A \otimes A & \xrightarrow{\delta \otimes 1 + 1 \otimes \delta} & A \otimes A \end{array}$$

即满足“余莱布尼茨法则”。

注意到上述图表默认 Koszul 符号法则。记 A 的 d 次齐次余超导子之全体为 $\text{Coder}(A)_d$, 以及

$$\text{Coder}(A) := \bigoplus_{d \in \mathbb{Z}} \text{Coder}(A)_d$$

称其中的元素为余超导子。与超导子类似, 余超导子之全体也有李超代数结构:

性质 2.3.4. 对于 K -余代数 A , 以及齐次余超导子 $D_1, D_2 \in \text{Coder}(A)$, 定义

$$[D_1, D_2] := D_1 \circ D_2 - (-1)^{D_1 D_2} D_2 \circ D_1$$

则 $[D_1, D_2] \in \text{Coder}(A)$, 进而 $(\text{Coder}(A), [,])$ 构成李超代数。

证明. 与分次代数的超导子完全类似, 直接验证即可, 从略。 □

有了余超导子, 可以相应地去定义微分分次余代数 (differential graded co-algebra):

定义 2.3.5. (微分分次余代数) 对于 K -余代数 A , 以及满足 $\delta^2 = 0$ 的 1 次齐次余超导子 δ , 则称 (A, δ) 为微分分次余代数。

类似地, 微分分次余代数自然可以视为分次上链复形。

注记 2.3.6. ((co-)augmentation)

- (1) 对于 K -代数 A , 我们把从 A 到 K 的 K -模同态称为 *augmentation*;
- (2) 对于 K -余代数 A , 我们把从 K 到 A 的 K -模同态称为 *co-augmentation*

与“么元”的箭头刚好相反。笔者建议将 augmentation 意译为“赋值”。

重要例子 2.3.7. 设 V 为分次 K -模, 考虑张量代数 $T(V) : \bigoplus_{n \geq 0} V^{\otimes n}$, 定义

$$\begin{aligned} \Delta : T(V) &\rightarrow T(V) \otimes T(V) \\ v_1 \otimes \cdots \otimes v_n &\mapsto \sum_{i=0}^n (v_1 \otimes \cdots \otimes v_i) \otimes (v_{i+1} \otimes \cdots \otimes v_n) \end{aligned}$$

则 $(T(V), \Delta)$ 构成余代数。

容易验证如此 Δ 满足余结合律:

$$\begin{aligned} &(\Delta \otimes 1) \circ \Delta(v_1 \otimes \cdots \otimes v_n) \\ &= \sum_{0 \leq i \leq j \leq n} (a_1 \otimes \cdots \otimes a_i) \otimes (a_{i+1} \otimes \cdots \otimes a_j) \otimes (a_{j+1} \otimes \cdots \otimes a_n) \\ &= (1 \otimes \Delta) \circ \Delta(v_1 \otimes \cdots \otimes v_n) \end{aligned}$$

并且配以余么元 ε :

$$\varepsilon|_{V^{\otimes n}} = \begin{cases} 0 & \text{如果 } n > 0 \\ \text{id}_K & \text{如果 } n = 0 \end{cases}$$

注记 2.3.8. $T(V)$ 还有另一个余乘结构 $\overline{\Delta}$

$$\overline{\Delta}(v_1 \otimes \cdots \otimes v_n) := \sum_{i=1}^{n-1} (v_1 \otimes \cdots \otimes v_i) \otimes (v_{i+1} \otimes \cdots \otimes v_n)$$

这也是容易验证的。不过这个余乘结构不存在余么元。

2.4 多重切向量场与 Schouten-Nijenhuis 括号

众所周知, 对于光滑流形 X , X 上的微分形式 Ω_X^\bullet 配以外积 \wedge 构成分次交换代数 (若再考虑外微分 d , 还有微分分次代数结构)。本节我们介绍另一重要的经典例子: 光滑流形上的多重切向量场, 并给出其上的李超代数结构: Schouten-Nijenhuis 括号。

定义 2.4.1. (多重切向量场) 对于光滑流形 X , 称 X 的切丛的外积丛 $\wedge^*(TX)$ 的截面为多重切向量场 (polyvector field)。并且记

$$PV_X := \Gamma(X, \wedge^*(TX))$$

为多重切向量场之全体。

PV_X 有显然的 $C^\infty(X)$ -模结构。与微分形式类似, 容易定义 PV_X 上的外积 \wedge , 使得 (PV_X, \wedge) 为分次交换 $C^\infty(X)$ -代数, 其分次由以下给出:

$$PV_X = \bigoplus_{k \geq 0} PV_X^k$$

其中 PV_X^k 中的元素形如

$$\xi_1 \wedge \xi_2 \wedge \cdots \wedge \xi_k$$

的 $C^\infty(X)$ -线性组合, 其中 ξ_i 为 X 上的光滑切向量场。称 PV_X^k 中的元素为 k -向量。

回顾 X 的切向量场的李括号 $[\cdot, \cdot]$ 运算, 这给出了切向量场的李代数结构; 接下来我们企图将李括号运算延拓到多重切向量场上, 从而得到 $PV_X[1]$ 的李超代数结构。(注意这里要平移一下分次, 使得把切向量场视为零次元。)

定义 2.4.2. (*Schouten-Nijenhuis* 括号)

对于光滑流形 X , 定义 PV_X 上的 \mathbb{R} -双线性映射

$$\begin{aligned} \{\cdot, \cdot\} : PV_X^p \times PV_X^q &\rightarrow PV_X^{p+q-1} \\ \{f, g\} &= 0 \\ \{f, \xi\} &= (-1)^p \{\xi, f\} = \sum_{k=1}^p (-1)^k \xi_k(f) (\cdots \wedge \widehat{\xi_k} \wedge \cdots) \\ \{\xi, \eta\} &= \sum_{\substack{1 \leq i \leq p \\ 1 \leq j \leq q}} (-1)^{i+j} [\xi_i, \eta_j] \wedge (\cdots \wedge \widehat{\xi_i} \wedge \cdots) \wedge (\cdots \wedge \widehat{\eta_j} \wedge \cdots) \end{aligned}$$

其中任意 $f, g \in C^\infty(X) = PV_X^0$ 以及

$$\xi = \xi_1 \wedge \cdots \wedge \xi_p \quad \eta = \eta_1 \wedge \cdots \wedge \eta_q$$

我们需要验证 $\{\cdot, \cdot\}$ 的良好性: 与 ξ, η 的代表元的选取无关。这只需暴力验证即可。从略。

性质 2.4.3. (*Schouten-Nijenhuis* 括号的性质)

对于光滑流形 X , 则 $(PV_X, \{\cdot, \cdot\})$ 满足如下性质:

(1) 若 $\xi, \eta \in PV_X^1$ 为通常的切向量场, 则

$$\{\xi, \eta\} = [\xi, \eta]$$

(2) 对任意 $p, q \geq 0$, 任意 $\xi \in PV_X^p$ 以及 $\eta \in PV_X^q$, 成立

$$\{\xi, \eta\} = -(-1)^{(p-1)(q-1)} \{\eta, \xi\}$$

(3) 对任意 $p, q, r \geq 0$, 任意 $\xi \in \text{PV}_X^p$ 以及 $\eta \in \text{PV}_X^q, \phi \in \text{PV}_X^r$, 成立

$$\{\xi, \eta \wedge \phi\} = \{\xi, \eta\} \wedge \phi + (-1)^{(p-1)q} \eta \wedge \{\xi, \phi\}$$

证明. (1)(2) 容易验证, 从略; (3) 暴力验证, 建议使用数学归纳法. 从略. \square

事实上, 这三条性质可作为 Schouten-Nijenhuis 括号的公理: 满足此性质的括号如果存在, 只能如此定义. 例如, 对任意的 $f \in \text{PV}_X^0 = C^\infty(X)$, 以及 $\xi, \eta \in \text{PV}_X^1$, 如果 $\{, \}$ 满足上述三条性质, 那么

$$\{\eta, f\xi\} = \{\eta, f \wedge \xi\} = \{\eta, f\}\xi + (-1)^{(1-1)\times 0} f\{\eta, \xi\} = \{\eta, f\}\xi + f[\eta, \xi]$$

但另一方面, 又有

$$\{\eta, f\xi\} = [\eta, f\xi] = \eta(f)\xi + f[\eta, \xi]$$

比较两式, 从而必有

$$\{\eta, f\} = \eta(f)$$

再反复使用超莱布尼茨法则 (3) 以及超反称性 (2), 即可得到 $\{, \}$ 的完整定义.

性质 2.4.4. 对于光滑流形 X , Schouten-Nijenhuis 括号 $\{, \}$ 满足如下超雅可比恒等式: 对任意 $p, q, r \geq 0$ 以及任意 $\xi \in \text{PV}_X^p, \eta \in \text{PV}_X^q, \phi \in \text{PV}_X^r$, 成立

$$\{\xi, \{\eta, \phi\}\} = \{\{\xi, \eta\}, \phi\} + (-1)^{(p-1)(q-1)} \{\eta, \{\xi, \phi\}\}$$

从而 $(\text{PV}_X[1], \{, \})$ 构成李超代数.

证明. 我们打算详细写出过程. 在证明的过程中, 我们将反复使用性质 2.4.3. 对任意的 $p, q, r > 0$, 任取

$$\xi = \xi_1 \wedge \cdots \wedge \xi_p \in \text{PV}_X^p$$

$$\eta = \eta_1 \wedge \cdots \wedge \eta_q \in \text{PV}_X^q$$

$$\phi = \phi_1 \wedge \cdots \wedge \phi_r \in \text{PV}_X^r$$

$$f, g, h \in \text{PV}_X^0 = C^\infty(X)$$

为方便书写, 我们引入如下记号:

$$\overline{\xi_i} := \xi_1 \wedge \cdots \wedge \widehat{\xi_i} \wedge \cdots \wedge \xi_p \quad \forall 1 \leq i \leq p$$

$$\overline{\eta_j} := \eta_1 \wedge \cdots \wedge \widehat{\eta_j} \wedge \cdots \wedge \eta_q \quad \forall 1 \leq j \leq q$$

$$\overline{\phi_k} := \phi_1 \wedge \cdots \wedge \widehat{\phi_k} \wedge \cdots \wedge \phi_r \quad \forall 1 \leq k \leq r$$

我们将对 p 归纳。

预备情形：若 $p = q = r = 0$ ，则结论平凡。若 p, q, r 当中恰有两个为 0，不妨 $p = q = 0$ ，此时 $r > 0$ ，从而任取 $f, g \in \text{PV}_X^0$ 以及 $\phi \in \text{PV}_X^r$ ，此时的超雅可比恒等式为

$$\{f, \{g, \phi\}\} + \{g, \{f, \phi\}\} = 0$$

注意到

$$\{f, \phi\} = \sum_{k=1}^r (-1)^k \phi_k(f) \overline{\phi_k}$$

从而有

$$\begin{aligned} \{f, \{g, \phi\}\} &= \{f, \sum_{k=1}^r (-1)^k \phi_k(g) \overline{\phi_k}\} \\ &= \sum_{k=1}^r \phi_k(g) \left(\sum_{j < k} (-1)^j \phi_j(f) \overline{\phi_{jk}} + \sum_{j > k} (-1)^{j+1} \phi_j(f) \overline{\phi_{kj}} \right) \\ &= \sum_{1 \leq i < j \leq r} (-1)^{i+j} [\phi_i(g) \phi_j(f) - \phi_j(g) \phi_i(f)] \overline{\phi_{ij}} \end{aligned}$$

其中对于 $j < k$ ，简写记号

$$\overline{\phi_{jk}} := \cdots \wedge \widehat{\phi_j} \wedge \cdots \wedge \widehat{\phi_k} \wedge \cdots$$

注意观察上式关于 f, g 的反对称性，容易发现 $\{f, \{g, \phi\}\} = -\{g, \{f, \phi\}\}$ ，从而证毕。

于是，我们在接下来的证明中，不妨 p, q, r 当中为零的至多只有一个。

p 的起始步：现在开始对 p 归纳，首先考虑起始步 $p = 0$ 。由之前讨论，不妨 $q, r > 0$ 。任取 $f \in \text{PV}_X^0$ ，只需证

$$\{f, \{\eta, \phi\}\} = \{\{f, \eta\}, \phi\} + (-1)^{q-1} \{\eta, \{f, \phi\}\} \quad (*)$$

暴力展开验证之，注意到

$$\begin{aligned} \{f, \{\eta, \phi\}\} &= \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^r (-1)^{j+k} \{f, [\eta_j, \phi_k] \wedge \overline{\eta_j} \wedge \overline{\phi_k}\} \\ &= - \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^r (-1)^{j+k} [\eta_j, \phi_k](f) \overline{\eta_j} \wedge \overline{\phi_k} \\ &\quad - \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^r (-1)^{j+k} [\eta_j, \phi_k] \wedge \{f, \overline{\eta_j} \wedge \overline{\phi_k}\} \end{aligned}$$

再打开 $(*)$ 的右边：

$$\begin{aligned} \{\{f, \eta\}, \phi\} &= \sum_{j=1}^q (-1)^j \{\eta_j(f) \overline{\eta_j}, \phi\} \\ &= \sum_{j=1}^q (-1)^j \left[(-1)^{(q-1)(r-1)} \{\eta_j(f), \phi\} \wedge \overline{\eta_j} + \eta_j(f) \{\overline{\eta_j}, \phi\} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^r (-1)^{j+k} \phi_k(\eta_j(f)) \bar{\eta}_j \wedge \bar{\phi}_k \\
&\quad + \sum_{j=1}^q (-1)^j \eta_j(f) \{\bar{\eta}_j, \phi\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(-1)^{q-1} \{\eta, \{f, \phi\}\} &= (-1)^{q-1} \sum_{k=1}^r (-1)^k \{\eta, \phi_k(f) \bar{\phi}_k\} \\
&= (-1)^{q-1} \sum_{k=1}^r (-1)^k \left[\{\eta, \phi_k(f)\} \wedge \bar{\phi}_k + (-1)^{q-1} \phi_k(f) \{\eta, \bar{\phi}_k\} \right] \\
&= - \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^r (-1)^{j+k} \eta_j(\phi_k(f)) \bar{\eta}_j \wedge \bar{\phi}_k \\
&\quad + \sum_{k=1}^r (-1)^k \phi_k(f) \{\eta, \bar{\phi}_k\}
\end{aligned}$$

因此有

$$\begin{aligned}
\{\{f, \eta\}, \phi\} + (-1)^{q-1} \{\eta, \{f, \phi\}\} &= \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^r (-1)^{j+k} (\phi_k(\eta_j(f)) - \eta_j(\phi_k(f))) \bar{\eta}_j \wedge \bar{\phi}_k \\
&\quad + \sum_{j=1}^q (-1)^j \eta_j(f) \{\bar{\eta}_j, \phi\} + \sum_{k=1}^r (-1)^k \phi_k(f) \{\eta, \bar{\phi}_k\} \\
&= - \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^r (-1)^{j+k} [\eta_j, \phi_k](f) \bar{\eta}_j \wedge \bar{\phi}_k \\
&\quad + \sum_{j=1}^q (-1)^j \eta_j(f) \{\bar{\eta}_j, \phi\} + \sum_{k=1}^r (-1)^k \phi_k(f) \{\eta, \bar{\phi}_k\}
\end{aligned}$$

与 (*) 式比较, 只需要再验证恒等式

$$- \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^r (-1)^{j+k} [\eta_j, \phi_k] \wedge \{f, \bar{\eta}_j \wedge \bar{\phi}_k\} = \sum_{j=1}^q (-1)^j \eta_j(f) \{\bar{\eta}_j, \phi\} + \sum_{k=1}^r (-1)^k \phi_k(f) \{\eta, \bar{\phi}_k\}$$

即可。而这只需将式子中的 Schouten-Nijenhuis 括号暴力展开, 并且适当更改求和指标即可, 从略。(不太想写了, 打字好累 2333)

p 的归纳步: 如果该命题对 p 成立, 则考虑

$$\zeta' := \zeta_0 \wedge \zeta \in \mathbf{PV}_X^{p+1}$$

其中任意 $\zeta_0 \in \mathbf{PV}_X^0$. 我们只需证

$$\{\zeta', \{\eta, \phi\}\} = \{\{\zeta', \eta\}, \phi\} + (-1)^{p(q-1)} \{\eta, \{\zeta', \phi\}\} \quad (**)$$

注意反复使用 $\{, \}$ 的超反对称性、超莱布尼茨法则，以及关于 p 的归纳假设，我们简单（但暴力）验证如下：

$$\begin{aligned}
 (**) \text{ 左边} &= \{\xi_0 \wedge \xi, \{\eta, \phi\}\} \\
 &= (-1)^p \xi \wedge \{\xi_0, \{\eta, \phi\}\} + \xi_0 \wedge \{\xi, \{\eta, \phi\}\} \\
 &= (-1)^p \xi \wedge \left(\{\{\xi_0, \eta\}, \phi\} + \{\eta, \{\xi_0, \phi\}\} \right) \\
 &\quad + \xi_0 \wedge \left(\{\{\xi, \eta\}, \phi\} + (-1)^{(p-1)(q-1)} \{\eta, \{\xi, \phi\}\} \right)
 \end{aligned}$$

其中最后一步等号用到了归纳假设。再看 $(**)$ 右边，需要格外小心正负号：

$$\begin{aligned}
 (**) \text{ 右边} &= (-1)^{p(q-1)+(p+q-1)(r-1)} \{\phi, \{\eta, \xi_0 \wedge \xi\}\} - (-1)^{p(q-1)+p(r-1)} \{\eta, \{\phi, \xi_0 \wedge \xi\}\} \\
 &= (-1)^{p(q-1)+(p+q-1)(r-1)} \left\{ \phi, \eta, \xi_0 \wedge \xi + (-1)^{q-1} \xi_0 \wedge \{\eta, \xi\} \right\} \\
 &\quad - (-1)^{p(q+r)} \left\{ \eta, \{\phi, \xi_0\} \wedge \xi + (-1)^{r-1} \xi_0 \wedge \{\phi, \xi\} \right\} \\
 &= (-1)^{p(q-1)+(p+q-1)(r-1)} \\
 &\quad \left[\{\phi, \{\eta, \xi_0\}\} \wedge \xi + (-1)^{(r-1)q} \{\eta, \xi_0\} \wedge \{\phi, \xi\} \right. \\
 &\quad \left. + (-1)^{q-1} (\{\phi, \xi_0\} \wedge \{\eta, \xi\} + (-1)^{r-1} \xi_0 \wedge \{\phi, \{\eta, \xi\}\}) \right] \\
 &\quad - (-1)^{p(q+r)} \left[\{\eta, \{\phi, \xi_0\}\} \wedge \xi + (-1)^{(q-1)r} \{\phi, \xi_0\} \wedge \{\eta, \xi\} \right. \\
 &\quad \left. + (-1)^{r-1} (\{\eta, \xi_0\} \wedge \{\phi, \xi\} + (-1)^{q-1} \xi_0 \wedge \{\eta, \{\phi, \xi\}\}) \right] \\
 &= (-1)^p \xi \wedge \left(\{\{\xi_0, \eta\}, \phi\} + \{\eta, \{\xi_0, \phi\}\} \right) \\
 &\quad + \xi_0 \wedge \left(\{\{\xi, \eta\}, \phi\} + (-1)^{(p-1)(q-1)} \{\eta, \{\xi, \phi\}\} \right) \\
 &= (**) \text{ 左边}
 \end{aligned}$$

从而 $(**)$ 两边相等，归纳完毕。 \square

归纳步当中主要是在验证正负号。

由于 Schouten-Nijenhuis 括号是切向量场李括号的“推广”，我们在以后更喜欢将它们都记作 “[,]”（而 “{,}” 在以后常用来表示泊松括号）。

2.5 Shuffle 乘积

对于 $n \geq 1$ ，我们记 S_n 为 n 元对称群。

定义 2.5.1. $((p, q)\text{-Shuffle})$

对于正整数 p, q , 称 $\sigma \in S_{p+q}$ 为一个 p, q -*Shuffle*, 如果满足

$$\sigma(1) < \sigma(2) < \dots < \sigma(p)$$

$$\sigma(p+1) < \sigma(p+2) < \dots < \sigma(q)$$

全体 (p, q) -*Shuffle* 构成的集合记为 $\text{Sh}_{p,q}$.

笔者建议将“Shuffle”意译为“洗牌”——因为 $\text{Sh}_{p,q}$ 中的置换，好比将 $p+q$ 张扑克牌分为 p 张、 q 张两组来洗牌。

容易知道，集合 $\text{Sh}_{p,q}$ 的元素个数为

$$\frac{(p+q)!}{p!q!}$$

回到 Hochschild 链复形。我们已经知道， $\text{HH}_\bullet(A)$ 是通常的光滑流形的微分形式 Ω_X^\bullet 的非交换版本。而对于微分形式 Ω_X^\bullet ，其上有外积 \wedge 使之构成分次交换代数；我们也企图去定义非交换版本的外积。

定义 2.5.2. (*Shuffle* 乘积)

设 A, A' 为 K -代数， M, M' 分别为双 A, A' -模，我们定义如下的运算 \times ，称之为 *Shuffle* 乘积：

$$\begin{aligned} C_p(A, M) \times C_q(A', M') &\rightarrow C_{p+q}(A \otimes A', M \otimes M') \\ (m, a_1, \dots, a_p) \times (m', a'_1, \dots, a'_q) &\mapsto \sum_{\sigma \in \text{Sh}_{p,q}} (-1)^{|\sigma|} (m \otimes m', \sigma(a_1, \dots, a_p, a'_1, \dots, a'_q)) \end{aligned}$$

其中 $|\sigma| := \text{sgn } \sigma$ 为置换的符号， $(m, a_1, \dots, a_n) := m \otimes a_1 \otimes \dots \otimes a_n$ 为简单的记法；并且置换群 S_{p+q} 在 $A^{\otimes(p+q)}$ 上的作用为

$$\sigma(a_1, \dots, a'_q) := (a_{\sigma^{-1}(1)}, \dots, a_{\sigma^{-1}(q')})$$

注意在这里，群 S_{p+q} 在 $A^{\otimes(p+q)}$ 上的作用方式，下角标中出现的是“ σ^{-1} ”，如此规定是为了保证 S_{p+q} 的作用是左作用。

还要注意一点， A, A' 以及 M, M' 并不被假定有分次结构， $A \otimes A'$ 在 $M \otimes M'$ 上的模作用是通常的

$$(a \otimes a').(m \otimes m') = (a.m) \otimes (a'.m')$$

右模作用也类似，并不会出正负号，Koszul 符号法则在此平凡。

还要注意,

$$C_{p+q}(A \otimes A', M \otimes M') \cong (M \otimes M') \otimes (A \otimes A')^{\otimes(p+q)}$$

之中元素 “ $(m \otimes m', a_1, \dots, a_p, a'_1, \dots, a'_q)$ ” 里面的 “ a_i ” 应该是 $a_i \otimes 1 \in A \otimes A'$, 以及 “ a'_j ” 应该是 $1 \otimes a'_j \in A \otimes A'$.

还要注意 $A \otimes A'$ 的乘法满足 $a_i a'_j = a'_j a_i$ 交换。

性质 2.5.3. (*Shuffle* 乘积与 *Hochschild* 边缘算子相容)

记号同上, 则对于任意 $x \in C_p(A, M)$, $y \in C_q(A', M')$, 成立

$$b(x \times y) = b(x) \times y + (-1)^{\deg x} x \times b(y)$$

其中 $b: C_\bullet \rightarrow C_{\bullet-1}$ 为相应 *Hochschild* 链复形各自的边缘算子。

证明. 当然是暴力验证了, 我们尽可能使用简练的记号. 令

$$x = m \otimes (a_1, \dots, a_p)$$

$$y = m' \otimes (a'_1, \dots, a'_q)$$

首先看 $b(x \times y)$, 我们按张量缩并的位置, 以及 $A \otimes A'$ 当中的 “元素类型” (形如 $1 \otimes A'$ 或是 $A \otimes 1$) 来分类, 强行将它打开:

$$\begin{aligned} b(x \times y) &= b \sum_{\sigma \in \text{Sh}_{p,q}} (-1)^{|\sigma|} (m \otimes m') \otimes \sigma(a_1, \dots, a_p, a'_1, \dots, a'_q) \\ &= (m \cdot a_1 \otimes m') \otimes \sum_{\sigma \in \text{Sh}_{p-1,q}} (-1)^{|\sigma|} \sigma(a_2, \dots, a_p, a'_1, \dots, a'_q) \\ &\quad + (m \otimes m' \cdot a'_1) \otimes \sum_{\sigma \in \text{Sh}_{p,q-1}} (-1)^{|\sigma|+p} \sigma(a_1, \dots, a_p, a'_2, \dots, a'_q) \\ &\quad + \sum_{i=1}^{p+q-1} (-1)^i (m \otimes m') \otimes \left[\sum_{\substack{1 \leq \alpha < \beta \leq p \\ \sigma \in \text{Sh}_{p-2,q}}} (-1)^{|\sigma|+\alpha+\beta-1} \sigma(\dots, \underbrace{(a_\alpha a_\beta)}_{\text{第 } i, i+1 \text{ 个}}, \dots) \right. \\ &\quad + \sum_{\substack{1 \leq \alpha \leq p, 1 \leq \gamma \leq q \\ \sigma \in \text{Sh}_{p-1,q-1}}} (-1)^{|\sigma|+\alpha+\gamma+p-1} \sigma(\dots, \underbrace{(a_\alpha a'_\gamma)}_{\text{第 } i, i+1 \text{ 个}}, \dots) \\ &\quad + \sum_{\substack{1 \leq \alpha \leq p, 1 \leq \gamma \leq q \\ \sigma \in \text{Sh}_{p-1,q-1}}} (-1)^{|\sigma|+\alpha+\gamma+p} \sigma(\dots, \underbrace{(a'_\gamma a_\alpha)}_{\text{第 } i, i+1 \text{ 个}}, \dots) \\ &\quad \left. + \sum_{\substack{1 \leq \gamma < \delta \leq q \\ \sigma \in \text{Sh}_{p,q-2}}} (-1)^{|\sigma|+(\gamma+p)+(\delta+p)-1} \sigma(\dots, \underbrace{(a'_\gamma a'_\delta)}_{\text{第 } i, i+1 \text{ 个}}, \dots) \right] \\ &\quad + (-1)^{p+q} (a_n \cdot m \otimes m') \sum_{\sigma \in \text{Sh}_{p-1,q}} (-1)^{|\sigma|+q} (a_1, \dots, a_{p-1}, a'_1, \dots, a'_q) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +(-1)^{p+q}(m \otimes a'_n.m') \sum_{\sigma \in \text{Sh}_{p,q-1}} (-1)^{|\sigma|}(a_1, \dots, a_p, a'_1, \dots, a'_{q-1}) \\
= & [m.a_1 \otimes (a_2, \dots, a_p)] \times y + (-1)^p x \times [m'.a'_1 \otimes (a'_2, \dots, a'_q)] \\
& + \left(\sum_{i=1}^{p-1} (-1)^i m \otimes (a_1, \dots, a_i a_{i+1}, \dots, a_p) \right) \times y \\
& + (-1)^p x \times \left(\sum_{i=1}^{q-1} (-1)^i m' \otimes (a'_1, \dots, a'_i a'_{i+1}, \dots, a'_q) \right) \\
& + (-1)^p [a_p.m \otimes (a_1, \dots, a_{p-1})] \times y + (-1)^{p+q} x \times [a'_q.m' \otimes (a'_1, \dots, a'_{q-1})] \\
= & b(x) \times y + (-1)^p x \times b(y)
\end{aligned}$$

从而证毕。 \square

推论 2.5.4. 对于 K -代数 A, A' , 若 M, M' 分别为双 A, A' -模, 则 *Shuffle* 乘积诱导了链映射:

$$C_{\bullet}(A, M) \otimes C_{\bullet}(A', M') \xrightarrow{\sim} C_{\bullet}(A \otimes A', M \otimes M')$$

并且该链映射诱导了 *Hochschild* 同调的同态

$$H_{\bullet}(A, M) \otimes H_{\bullet}(A', M') \xrightarrow{\sim} H_{\bullet}(A \otimes A', M \otimes M')$$

证明. 仅仅是将

$$b(x \times y) = b(x) \times y + (-1)^{\deg x} x \times b(y)$$

换了一种说法. 注意链复形张量积

$$C_{\bullet}(A, M) \otimes C_{\bullet}(A', M')$$

的边缘算子服从与定义 2.1.9 类似的规则. *Shuffle* 乘积在 *Hochschild* 同调的下降的良好性也易证. \square

特别地, 当 $M = A, M' = A'$ 时 *Shuffle* 乘积诱导了同态:

$$\text{HH}_{\bullet}(A) \otimes \text{HH}_{\bullet}(A') \xrightarrow{\sim} \text{HH}_{\bullet}(A \otimes A')$$

定理 2.5.5. (*Künneth* 公式)

如果 K -代数 A, A' 作为 K -模都是平坦的, 那么 *Shuffle* 乘积诱导的 *Hochschild* 同调之间的同态

$$\text{HH}_{\bullet}(A) \otimes \text{HH}_{\bullet}(A') \xrightarrow{\sim} \text{HH}_{\bullet}(A \otimes A')$$

为同构。

证明. 代数拓扑中的标准证明。从略。 □

注意我们总是假定 A, A' 是投射 K -模, 从而自然满足平坦性。

性质 2.5.6. 若 K -代数 A 是交换的, 则 *Shuffle* 乘积诱导了 $\mathrm{HH}_\bullet(A)$ 的 K -代数结构, 并且 $(\mathrm{HH}_\bullet(A), \times)$ 是分次交换的。

这就回到了通常交换的情形了。事实上 *Shuffle* 乘积的几何意义为微分形式的外积。

证明. 对于任意的 K -代数 A , 注意张量积 $A \otimes A$ 也有 K -代数结构。断言:

$$\begin{aligned}\pi: A \otimes A &\rightarrow A \\ a \otimes b &\mapsto ab\end{aligned}$$

为 K -代数同态当且仅当 A 是交换代数。于是当 A 交换时, 考虑 K -代数同态 $A \otimes A \xrightarrow{\pi} A$, 由 Hochschild 同调的函子性, 该同态诱导了

$$\mathrm{HH}_\bullet(A \otimes A) \xrightarrow{\mathrm{HH}_\bullet(\pi)} \mathrm{HH}_\bullet(A)$$

再注意 *Shuffle* 乘积诱导

$$\mathrm{HH}_\bullet(A) \otimes \mathrm{HH}_\bullet(A) \xrightarrow{\times} \mathrm{HH}_\bullet(A \otimes A)$$

将上述两个同态复合, 即得到分次 K -代数 $(\mathrm{HH}_\bullet(A), \times)$ 。

容易验证此代数为分次交换的, 验证如下: 对任意 $p, q \geq 0$ 以及 $a_0, a_1, \dots, a_p \in A$, $a'_0, a'_1, \dots, a'_q \in A$, 有

$$\begin{aligned}& [a_0 \otimes (a_1, \dots, a_p)] \times [a'_0 \otimes (a'_1, \dots, a'_q)] \\&= (a_0 a'_0) \otimes \sum_{\sigma \in \mathrm{Sh}_{p,q}} (-1)^{|\sigma|} \sigma(a_1, \dots, a_p; a'_1, \dots, a'_q) \\&= (a'_0 \otimes a_0) \otimes \sum_{\sigma \in \mathrm{Sh}_{q,p}} (-1)^{|\sigma|+pq} \sigma(a'_1, \dots, a'_q; a_1, \dots, a_p) \\&= (-1)^{pq} [a'_0 \otimes (a'_1, \dots, a'_q)] \times [a_0 \otimes (a_1, \dots, a_p)]\end{aligned}$$

从而分次交换。 □

性质 2.5.7. (*Shuffle* 乘积是非交换版本的外积)

若 $A = K[x^1, \dots, x^n]$ 为多项式代数, 则有 K -代数同构

$$(\mathrm{HH}_\bullet(A), \times) \cong (\Omega_A^\bullet, \wedge)$$

证明. 回顾性质1.8.4当中的双复形同态

$$\Phi : (\overline{\mathcal{B}}_{\bullet\bullet}(A), b, \mathcal{B}) \rightarrow (\Omega_A^\bullet, 0, d)$$

首先, 容易验证 Shuffle 乘积可下降至

$$\overline{\mathcal{C}}_\bullet(A) \otimes \overline{\mathcal{C}}_\bullet(A) \xrightarrow{\sim} \overline{\mathcal{C}}_\bullet(A)$$

从而我们只需要验证对于任意 $x \in \overline{\mathcal{C}}_p(A)$ 以及 $y \in \overline{\mathcal{C}}_q(A)$, 成立

$$\Phi(x \times y) = \Phi(x) \wedge \Phi(y)$$

对任意的 $p, q \geq 0$, 以及 $x = a_0 \otimes (\overline{a}_1, \dots, \overline{a}_p) \in \overline{\mathcal{C}}_p(A)$, $y = a'_0 \otimes (\overline{a}'_1, \dots, \overline{a}'_q) \in \overline{\mathcal{C}}_q(A)$, 从而

$$\begin{aligned} \Phi(x \times y) &= \Phi \left(a_0 a'_0 \otimes \sum_{\sigma \in \text{Sh}_{p,q}} (-1)^{|\sigma|} \sigma(\overline{a}_1, \dots, \overline{a}_p; \overline{a}'_1, \dots, \overline{a}'_q) \right) \\ &= \frac{1}{(p+q)!} a_0 a'_0 \sum_{\sigma \in \text{Sh}_{p,q}} (-1)^{|\sigma|} \sigma(\mathrm{d}a_1 \wedge \dots \wedge \mathrm{d}a_p \wedge \mathrm{d}a'_1 \wedge \dots \wedge \mathrm{d}a'_q) \\ &= \frac{1}{p!q!} a_0 a'_0 \mathrm{d}a_1 \wedge \dots \wedge \mathrm{d}a_p \wedge \mathrm{d}a'_1 \wedge \dots \wedge \mathrm{d}a'_q \\ \Phi(x) \wedge \Phi(y) &= \left(\frac{1}{p!} a_0 \mathrm{d}a_1 \wedge \dots \wedge \mathrm{d}a_p \right) \wedge \left(\frac{1}{q!} a'_0 \mathrm{d}a'_1 \wedge \dots \wedge \mathrm{d}a'_q \right) \\ &= \frac{1}{p!q!} a_0 a'_0 \mathrm{d}a_1 \wedge \dots \wedge \mathrm{d}a_p \wedge \mathrm{d}a'_1 \wedge \dots \wedge \mathrm{d}a'_q \end{aligned}$$

从而得证。 □

2.6 Cup 乘积与 Gerstenhaber 括号（部分细节待补）

对于 K -代数 A , 回顾 Hochschild 上链复形

$$C^\bullet(A) := C^\bullet(A, A) = \bigoplus_{p \geq 0} C^p(A, A)$$

我们将介绍 $C^\bullet(A)$ 上的代数结构: cup 乘积。

定义 2.6.1. (*Cup* 乘积)

设 A 为 K -代数, 定义 **cup** 乘积

$$\cup : C^\bullet(A) \otimes C^\bullet(A) \rightarrow C^\bullet(A)$$

如下: 对任意的 $f \in C^p(A)$, $g \in C^q(A)$,

$$\begin{aligned} f \cup g &\in C^{p+q}(A) \\ (f \cup g)(a_1, \dots, a_p; a_{p+1}, \dots, a_{p+q}) &= f(a_1, \dots, a_p) g(a_{p+1}, \dots, a_{p+q}) \end{aligned}$$

我们已经知道，Hochschild 上同调是“非交换版本的多重切向量场”。注意多重切向量场具有外积运算，而 cup 乘积则是“非交换版本的外积”。我们将去说明这一点。

性质 2.6.2. (*cup* 乘积与 Hochschild 微分的相容性)

对于 K -代数 A ，任意 $f, g \in C^\bullet(A)$ ，成立

$$\partial(f \cup g) = (\partial f) \cup g + (-1)^{\deg f} f \cup \partial g$$

证明. 暴力验证之。任取 $a_0, a_1, \dots, a_{p+q} \in A$ ，成立

$$\begin{aligned} & [(\partial f) \cup g + (-1)^p f \cup (\partial g)](a_0 \cdots a_{p+q}) \\ = & a_0 f(a_1 \cdots a_p) g(a_{p+1} \cdots a_{p+q}) \\ & - \sum_{k=0}^{p-1} (-1)^k f(\cdots a_k a_{k+1} \cdots) g(a_{p+1} \cdots a_{p+q}) \\ & - (-1)^p f(a_0 \cdots a_{p-1}) a_p g(a_{p+1} \cdots a_{p+q}) \\ & + (-1)^p f(a_0 \cdots a_{p-1}) a_p g(a_{p+1} \cdots a_{p+q}) \\ & - (-1)^p \sum_{l=0}^{q-1} f(a_0 \cdots a_{p-1}) g(\cdots a_{p+l} a_{p+l+1} \cdots) \\ & - (-1)^{p+q} f(a_0 \cdots a_{p-1}) g(a_p \cdots a_{p+q-1}) a_{p+q} \\ = & a_0 (f \cup g)(a_1 \cdots a_{p+q}) \\ & - \sum_{k=0}^{p+q-1} (-1)^k (f \cup g)(\cdots a_k a_{k+1} \cdots) \\ & - (-1)^{p+q} (f \cup g)(a_0 \cdots a_{p+q-1}) a_{p+q} \\ = & \partial(f \cup g)(a_0 \cdots a_{p+q}) \end{aligned}$$

从而证毕。 □

推论 2.6.3. *cup* 乘积诱导了如下同态：

$$\mathrm{HH}^p(A) \times \mathrm{HH}^q(A) \xrightarrow{\cup} \mathrm{HH}^{p+q}(A)$$

证明. 易验证良定性，几乎显然。 □

容易验证如此的 *cup* 乘积是结合的（之前 Shuffle 乘积的结合性也可直接看出来），于是我们得到分次结合 K -代数 $(\mathrm{HH}^\bullet(A), \cup)$ 。事实上，该 K -代数是分次交换的，这从 *cup* 乘积当中很难看出来（似乎非常不显然），我们下一节给出证明。

注记 2.6.4. 我们已经知道, *Hochschild* 上同调是“非交换版本的多重切向量场”; 而 *cup* 乘积即为“多重切向量场的外积”的非交换版本。具体地, 若 $A = K[x^1, \dots, x^n]$ 为多项式环, 则有 K -代数同构

$$(\mathrm{HH}^\bullet(A), \cup) \cong (\mathrm{PV}_A, \wedge)$$

我们知道, PV_X 上不仅有外积结构, 还有 Schouten-Nijenhuis 括号; 我们也要给出后者的非交换版本, 使得 $\mathrm{HH}^\bullet(A)$ 为 Gerstenhaber 代数:

定义 2.6.5. (*Gerstenhaber* 代数)

设 (A, \cdot) 为分次交换 K -代数, $A = \bigoplus_{k \in \mathbb{Z}} A^k$ 为其分次, 并配以 K -双线性映射

$$\{, \} : A^p \otimes A^q \rightarrow A^{p+q-1}$$

称 $(A, \cdot, \{, \})$ 为 **Gerstenhaber** 代数, 若 $\{, \}$ 满足以下公理:

- (1) (A, \cdot) 为分次结合代数;
- (2) $(A[1], \{, \})$ 为李超代数;
- (3) 相容性: 对 A 中的任意齐次元 x, y, z , 成立

$$\{x, yz\} = \{x, y\}z + (-1)^{(x-1)y}y\{x, z\}$$

例如光滑流形 X 上 $(\mathrm{PV}_X, \wedge, \{, \})$, 即多重切向量场、外积、Schouten-Nijenhuis 括号, 构成 Gerstenhaber 代数。

Gerstenhaber 代数在物理学中常被称为“经典 BV 代数” (classical BV algebra)。

定义 2.6.6. (*Gerstenhaber* 乘积)

对于 K -代数 A , 定义 $C^\bullet(A)$ 上的 K -双线性运算

$$\circ : C^p(A) \times C^q(A) \rightarrow C^{p+q-1}(A)$$

如下: 对任意 $a_1, a_2, \dots, a_{p+q-1} \in A$, 以及 $f \in C^p(A), g \in C^q(A)$,

$$(f \circ g)(a_1 \cdots a_{p+q-1}) := \sum_{i=1}^p (-1)^{(i-1)(q-1)} f(-a_{i-1}, g(a_i \cdots a_{i+q-1}), a_{i+q} \cdots)$$

运算“ \circ ”称为 **Gerstenhaber** 乘积。

性质 2.6.7. 对任意 $f \in C^p(A), g \in C^q(A)$, 成立

$$\partial(f \circ g) - (\partial f) \circ g - (-1)^{p-1} f \circ \partial g = \pm[(f \cup g) - (-1)^{pq}(g \cup f)]$$

证明. purple 非常暴力的计算验证, 等号右边的符号暂时没算清。从略。 \square

以后抽空补上。上述等式的右边为 “the failure of \circ being a chain map measured by the commutativity of cup product” .

(虽说上述等式右边的正负号暂时没算清楚) 但此结果已经暂时足够用了:

推论 2.6.8. 对于 K -代数 A , $(\mathrm{HH}^\bullet(A), \cup)$ 是分次交换的。

证明. 利用性质2.6.7, 几乎显然。 \square

$(\mathrm{HH}^\bullet(A), \cup)$ 的分次交换性是一个十分深刻的结论。

定义 2.6.9. (*Gerstenhaber* 括号)

$$\{f, g\} = f \circ g - (-1)^{(f-1)(g-1)} g \circ f$$

性质 2.6.10. 对于任意 $f, g \in C^\bullet(A)$ 为齐次元, 成立

$$\partial\{f, g\} = \{\partial f, g\} \pm \{f, \partial g\}$$

证明. (待补) \square

于是, Gerstenhaber 括号 $\{, \}$ 可下降到 $\mathrm{HH}^\bullet(A)$ 上, 这是非交换版本的 Schouten-Nijenhuis 括号。

性质 2.6.11. 对于 K -代数 A , $(\mathrm{HH}^\bullet(A), \cup, \{, \})$ 构成 *Gerstenhaber* 代数。

证明. (待补) \square

2.7 结合性

用 Gerstenhaber 括号，可以给出乘法结合性的另一种描述：对于 K -代数 A ，考虑 A 的乘法结构

$$m : A \otimes A \rightarrow A$$

从而 m 自然视为 $C^2(A)$ 中的元素。

引理 2.7.1. 对于 K -模 A ，以及 A 上的乘法结构

$$m : A \otimes A \rightarrow A$$

那么 m 满足结合律当且仅当 $\{m, m\} = 0$ 。其中 $\{, \}$ 为 $C^\bullet(A)$ 上的 Gerstenhaber 括号。

证明. 直接验证。注意到

$$\{m, m\} = m \circ m - (-1)^{(2-1)(2-1)} m \circ m = 2m \circ m$$

其中 “ \circ ” 为 Gerstenhaber 乘积。于是对任意的 $a_1, a_2, a_3 \in A$ ，都有

$$\begin{aligned} (m \circ m)(a_1, a_2, a_3) &= m(m(a_1, a_2), a_3) - m(a_1, m(a_2, a_3)) \\ &= (a_1 a_2) a_3 - a_1 (a_2 a_3) \end{aligned}$$

因此 $\{m, m\} = 0$ 当且仅当 m 结合。 □

事实上，Hochschild 上链复形 $C^\bullet(A)$ 的微分算子 ∂ 也可以用 Gerstenhaber 括号来描述：

引理 2.7.2. 设 A 为 K -代数，其乘法为

$$m : A \otimes A \rightarrow A$$

考虑 A 的 Hochschild 上链复形 $(C^\bullet(A), \partial)$ ，则有

$$\partial = \{-, m\}$$

证明. 给定 $q \geq 0$ ，对于任意的 $f \in C^q(A)$ ，只需要验证 $\partial f = \{f, m\}$ ，其中 $\{, \}$ 为 Gerstenhaber 括号。任取 $a_0, a_1, \dots, a_q \in A$ ，一方面我们早已知道

$$\partial f(a_0, a_1, \dots, a_q) = a_0 f(a_1, \dots, a_q) - \sum_{k=1}^{q-1} (-1)^k f(a_0, \dots, (a_k a_{k+1}), \dots, a_q) - (-1)^q f(a_0, a_1, \dots, a_{q-1}) a_q$$

另一方面, $\{f, m\} = f \circ m - (-1)^{q-1} m \circ f$, 从而

$$\begin{aligned}
\{f, m\}(a_0, a_1, \dots, a_q) &= (f \circ m)(a_0, a_1, \dots, a_q) - (-1)^{q-1} (m \circ f)(a_0, a_1, \dots, a_q) \\
&= \sum_{k=0}^{q-1} (-1)^{k-1} f(a_0, \dots, m(a_k a_{k+1}), \dots, a_n) \\
&\quad - (-1)^{q-1} [m(f(a_0, \dots, a_{q-1}), a_q) + (-1)^q m(a_0, f(a_1, \dots, a_q))] \\
&= a_0 f(a_1, \dots, a_q) - \sum_{k=1}^{q-1} (-1)^k f(a_0, \dots, (a_k a_{k+1}), \dots, a_q) - (-1)^q f(a_0, a_1, \dots, a_{q-1}) a_q
\end{aligned}$$

因此 $\partial f = \{f, m\}$, 得证。 □

第3章 间奏：形变量子化

本章开始，正式搞一些事情。经典力学与量子力学的框架众所周知，大致如下：

	经典力学	量子力学
相空间	辛流形 (X, ω)	希尔伯特空间 \mathcal{H}
观测量	光滑函数	厄密特算子
演化方程	$\frac{df}{dt} = \{H, f\}$	$\frac{dA_t}{dt} = \frac{i}{\hbar} [\hat{H}, A_t]$

我们将利用结合代数的 Hochschild（上）同调，以及 A_∞ 方法，来证明 Kontsevich 的 Formality theorem.

（待完善）

3.1 泊松几何与辛几何

本节简要回顾一下泊松几何。

定义 3.1.1. （泊松括号）

设 X 为光滑流形， $\{, \} : C^\infty(X) \times C^\infty(X) \rightarrow C^\infty(X)$ 为 \mathbb{R} -双线性映射。称 $\{, \}$ 为 X 上的泊松括号 (Poisson bracket)，如果 $\{, \}$ 满足：对任意 $f, g, h \in C^\infty(X)$ ，成立

(1) 反对称性：

$$\{f, g\} = -\{g, f\}$$

(2) Jacobi 恒等式：

$$\{f, \{g, h\}\} + \{g, \{h, f\}\} + \{h, \{f, g\}\} = 0$$

(3) Leibnitz 法则：

$$\{f, gh\} = \{f, g\}h + g\{f, h\}$$

泊松括号的定义的 (1) (2) 表明 $(C^\infty(X), \{, \})$ 为李代数，而 (3) 表明对任意 $f \in C^\infty(X)$ ，映射

$$X_f : C^\infty(X) \rightarrow C^\infty(X)$$

$$g \mapsto \{f, g\}$$

为导子, 从而 X_f 为 X 上的光滑切向量场, 在局部坐标下形如 $X_f = X_f^i \frac{\partial}{\partial u^i}$. 于是有

$$\{f, g\} = X_f^i \frac{\partial g}{\partial u^i}$$

但又注意到 $\{f, g\} = -\{g, f\}$ 以及切向量场 X_g , 从而易知泊松括号 $\{, \}$ 在局部坐标 (u^i) 下的表达式必形如

$$\{f, g\} = P^{ij} \frac{\partial f}{\partial u^i} \frac{\partial g}{\partial u^j}$$

并且容易验证:

引理 3.1.2. 设 $\{, \}$ 为光滑流形 X 上的泊松括号, 并且在局部坐标 (u^i) 下的表达式为

$$\{f, g\} = P^{ij} \frac{\partial f}{\partial u^i} \frac{\partial g}{\partial u^j}$$

那么对任意指标 i, j, k , 成立

$$\begin{aligned} P^{ij} &= -P^{ji} \\ P^{is} \frac{\partial P^{jk}}{\partial u^s} + P^{js} \frac{\partial P^{ki}}{\partial u^s} + P^{ks} \frac{\partial P^{ij}}{\partial u^s} &= 0 \end{aligned}$$

证明. 容易验证 $P^{ij} = -P^{ji}$ 等价于泊松括号的反对称性 $\{f, g\} = -\{g, f\}$, 这是因为对任意光滑函数 f, g , 局部上有

$$P^{ij} \frac{\partial f}{\partial u^i} \frac{\partial g}{\partial u^j} = \{f, g\} = -\{g, f\} = -P^{ji} \frac{\partial g}{\partial u^i} \frac{\partial f}{\partial u^j} = -P^{ji} \frac{\partial f}{\partial u^i} \frac{\partial g}{\partial u^j}$$

从而 $(P^{ij} + P^{ji}) \frac{\partial f}{\partial u^i} \frac{\partial g}{\partial u^j} = 0$, 因此由 f, g 的任意性, 有 $P^{ij} = -P^{ji}$.

再看第二个式子. 事实上它等价于泊松括号的雅可比恒等式. 对任意 $f, g, h \in C^\infty(X)$, 局部坐标下有

$$\begin{aligned} \{f, \{g, h\}\} &= \{f, P^{ij} \frac{\partial g}{\partial u^i} \frac{\partial h}{\partial u^j}\} \\ &= P^{kl} \frac{\partial f}{\partial u^k} \frac{\partial P^{ij}}{\partial u^l} \frac{\partial g}{\partial u^i} \frac{\partial h}{\partial u^j} + P^{ij} P^{kl} \frac{\partial f}{\partial u^k} \left(\frac{\partial^2 g}{\partial u^i \partial u^l} \frac{\partial h}{\partial u^j} + \frac{\partial^2 h}{\partial u^j \partial u^l} \frac{\partial g}{\partial u^i} \right) \end{aligned}$$

将 f, g, h 轮换再相加, 适当更改求和指标, 合并整理得

$$\begin{aligned} &\{f, \{g, h\}\} + \{g, \{h, f\}\} + \{h, \{f, g\}\} \\ &= \frac{\partial f}{\partial u^i} \frac{\partial g}{\partial u^j} \frac{\partial h}{\partial u^k} \left(P^{is} \frac{\partial P^{jk}}{\partial u^s} + P^{js} \frac{\partial P^{ki}}{\partial u^s} + P^{ks} \frac{\partial P^{ij}}{\partial u^s} \right) + P^{kl} (P^{ij} + P^{ji}) \frac{\partial f}{\partial u^k} \frac{\partial^2 g}{\partial u^i \partial u^l} \frac{\partial h}{\partial u^j} \end{aligned}$$

$$+P^{kl}(P^{ij}+P^{ji})\frac{\partial g}{\partial u^k}\frac{\partial^2 h}{\partial u^i\partial u^l}\frac{\partial f}{\partial u^j}+P^{kl}(P^{ij}+P^{ji})\frac{\partial h}{\partial u^k}\frac{\partial^2 f}{\partial u^i\partial u^l}\frac{\partial g}{\partial u^j}$$

注意到 $P^{ij} = -P^{ji}$ ，以及 f, g, h 的任意性，从而有

$$P^{is}\frac{\partial P^{jk}}{\partial u^s}+P^{js}\frac{\partial P^{ki}}{\partial u^s}+P^{ks}\frac{\partial P^{ij}}{\partial u^s}=0$$

得证。 □

我们可以使用张量的语言来描述泊松括号结构：

定义 3.1.3. (泊松张量) 对于光滑流形 X ，以及 $P \in \text{PV}_X^2$ 为 2-切向量场，在局部坐标下表达式为

$$P = P^{ij}\frac{\partial}{\partial u^i} \wedge \frac{\partial}{\partial u^j}$$

其中 $P^{ij} = -P^{ji}$. 称 P 为泊松张量 (Poisson tensor)，如果 P 在局部坐标下满足如下雅可比恒等式：

$$P^{is}\frac{\partial P^{jk}}{\partial u^s}+P^{js}\frac{\partial P^{ki}}{\partial u^s}+P^{ks}\frac{\partial P^{ij}}{\partial u^s}=0$$

容易看出泊松括号与泊松张量的一一对应关系：对于泊松括号 $\{, \}$ ，若局部上有 $\{f, g\} = P^{ij}\frac{\partial f}{\partial u^i}\frac{\partial g}{\partial u^j}$ ，则考虑泊松张量

$$P := \frac{1}{2}P^{ij}\frac{\partial}{\partial u^i} \wedge \frac{\partial}{\partial u^j}$$

反过来，由泊松张量也能得到泊松括号。并且容易知道

$$\{f, g\} = \langle P, df \wedge dg \rangle$$

事实上泊松张量的雅可比恒等式可以用 Schouten-Nijenhuis 括号等价刻画：

性质 3.1.4. 对于光滑流形 X ，以及 $P \in \text{PV}_X^2$ ，则 P 为泊松张量当且仅当

$$[P, P] = 0$$

其中 $[\cdot, \cdot]$ 为 Schouten-Nijenhuis 括号 (见定义 2.4.2)。

证明. 局部坐标下验证。取局部坐标 (u^i) ，令 $P = P^{ij}\frac{\partial}{\partial u^i} \wedge \frac{\partial}{\partial u^j}$ ，则有

$$[P, P] = [(P^{ij}\frac{\partial}{\partial u^i}) \wedge \frac{\partial}{\partial u^j}, (P^{kl}\frac{\partial}{\partial u^k}) \wedge \frac{\partial}{\partial u^l}]$$

$$\begin{aligned}
&= [P^{ij} \frac{\partial}{\partial u^i}, P^{kl} \frac{\partial}{\partial u^k}] \wedge \frac{\partial}{\partial u^j} \wedge \frac{\partial}{\partial u^l} - [P^{ij} \frac{\partial}{\partial u^i}, \frac{\partial}{\partial u^l}] \wedge \frac{\partial}{\partial u^j} \wedge P^{kl} \frac{\partial}{\partial u^k} \\
&\quad - [\frac{\partial}{\partial u^j}, P^{kl} \frac{\partial}{\partial u^k}] \wedge P^{ij} \frac{\partial}{\partial u^i} \wedge \frac{\partial}{\partial u^l} + [\frac{\partial}{\partial u^j}, \frac{\partial}{\partial u^l}] \wedge P^{ij} \frac{\partial}{\partial u^i} \wedge P^{kl} \frac{\partial}{\partial u^k}
\end{aligned}$$

上式右端共有四项，首先注意最后一项

$$[\frac{\partial}{\partial u^j}, \frac{\partial}{\partial u^l}] \wedge P^{ij} \frac{\partial}{\partial u^i} \wedge P^{kl} \frac{\partial}{\partial u^k} = P^{ij} P^{kl} \delta_{jl} \frac{\partial}{\partial u^j} \wedge \frac{\partial}{\partial u^i} \wedge \frac{\partial}{\partial u^k} = \sum_{j=1}^n P^{ij} P^{kj} \frac{\partial}{\partial u^j} \wedge \frac{\partial}{\partial u^i} \wedge \frac{\partial}{\partial u^k} = 0$$

最后一个等号是因为指标 i, k 的（反）对称性；从而暴力展开，注意利用 $P^{ij} = -P^{ji}$ 以及适当更改求和指标，有

$$\begin{aligned}
[P, P] &= [P^{ij} \frac{\partial}{\partial u^i}, P^{kl} \frac{\partial}{\partial u^k}] \wedge \frac{\partial}{\partial u^j} \wedge \frac{\partial}{\partial u^l} \\
&\quad - [P^{ij} \frac{\partial}{\partial u^i}, \frac{\partial}{\partial u^l}] \wedge \frac{\partial}{\partial u^j} \wedge P^{kl} \frac{\partial}{\partial u^k} - [\frac{\partial}{\partial u^j}, P^{kl} \frac{\partial}{\partial u^k}] \wedge P^{ij} \frac{\partial}{\partial u^i} \wedge \frac{\partial}{\partial u^l} \\
&= P^{ij} \frac{\partial P^{kl}}{\partial u^l} \frac{\partial}{\partial u^i} \wedge \frac{\partial}{\partial u^j} \wedge \frac{\partial}{\partial u^l} - P^{kl} \frac{\partial P^{ij}}{\partial u^k} \frac{\partial}{\partial u^i} \wedge \frac{\partial}{\partial u^j} \wedge \frac{\partial}{\partial u^l} \\
&\quad + P^{kl} \frac{\partial P^{ij}}{\partial u^l} \frac{\partial}{\partial u^i} \wedge \frac{\partial}{\partial u^j} \wedge \frac{\partial}{\partial u^k} - P^{ij} \frac{\partial P^{kl}}{\partial u^j} \frac{\partial}{\partial u^i} \wedge \frac{\partial}{\partial u^l} \wedge \frac{\partial}{\partial u^k} \\
&= \left(-P^{sj} \frac{\partial P^{ki}}{\partial u^s} - P^{sk} \frac{\partial P^{ij}}{\partial u^s} + P^{ks} \frac{\partial P^{ij}}{\partial u^s} - P^{js} \frac{\partial P^{ik}}{\partial u^s} \right) \frac{\partial}{\partial u^i} \wedge \frac{\partial}{\partial u^j} \wedge \frac{\partial}{\partial u^k} \\
&= -4P^{sj} \frac{\partial P^{ki}}{\partial u^s} \frac{\partial}{\partial u^i} \wedge \frac{\partial}{\partial u^j} \wedge \frac{\partial}{\partial u^k} \\
&= -8 \sum_{i < j < k} \left(P^{sj} \frac{\partial P^{ki}}{\partial u^s} + P^{sk} \frac{\partial P^{ij}}{\partial u^s} + P^{si} \frac{\partial P^{jk}}{\partial u^s} \right) \frac{\partial}{\partial u^i} \wedge \frac{\partial}{\partial u^j} \wedge \frac{\partial}{\partial u^k}
\end{aligned}$$

可见 $[P, P] = 0$ 当且仅当雅可比恒等式成立，证毕。 \square

于是我们自然地引入泊松流形的概念：

定义 3.1.5. （泊松流形）

泊松流形（Poisson manifold）是指二元组 (X, P) ，其中 X 为光滑流形， $P \in \text{PV}_X^2$ 满足 $[P, P] = 0$.

众所周知，这是经典力学的几何模型。接下来看一些泊松流形的例子：

重要例子 3.1.6. （由辛结构诱导的泊松结构）

设 (X, ω) 为辛流形，其中辛形式

$$\omega = \frac{1}{2} \omega_{ij} dx^i \wedge dx^j$$

满足 $d\omega = 0$ ，并且使得系数矩阵 $(\omega_{ij})_{1 \leq i, j \leq n}$ 在 X 上处处可逆、反对称。那么辛结构 ω 自然诱导泊松结构

$$\omega^{-1} := \frac{1}{2} \omega^{ij} \partial_i \wedge \partial_j$$

其中矩阵 $(\omega^{ij}) := (\omega_{ij})^{-1}$ 。

证明. 我们只需验证雅可比恒等式

$$\omega^{is} \frac{\partial \omega^{jk}}{\partial u^s} + \omega^{js} \frac{\partial \omega^{ki}}{\partial u^s} + \omega^{ks} \frac{\partial \omega^{ij}}{\partial u^s} = 0$$

一方面注意到逆矩阵求导公式 $\frac{\partial \omega^{-1}}{\partial u^s} = -\omega^{-1} \frac{\partial \omega}{\partial u^s} \omega^{-1}$ ，从而有

$$\omega^{is} \frac{\partial \omega^{jk}}{\partial u^s} = -\omega^{is} \omega^{jm} \omega^{nk} \frac{\partial \omega_{mn}}{\partial u^s}$$

对 i, j, k 轮换求和，有

$$\omega^{is} \frac{\partial \omega^{jk}}{\partial u^s} + \omega^{js} \frac{\partial \omega^{ki}}{\partial u^s} + \omega^{ks} \frac{\partial \omega^{ij}}{\partial u^s} = \omega^{is} \omega^{jm} \omega^{kn} \left(\frac{\partial \omega_{mn}}{\partial u^s} + \frac{\partial \omega_{ns}}{\partial u^m} + \frac{\partial \omega_{sm}}{\partial u^n} \right)$$

另一方面，由于 $d\omega = 0$ ，从而有

$$\begin{aligned} 0 &= d(\omega_{ij} dx^i \wedge dx^j) \\ &= \frac{\partial \omega_{ij}}{\partial u^k} dx^i \wedge dx^j \wedge dx^k \\ &= \sum_{i < j < k} 2 \left(\frac{\partial \omega_{ij}}{\partial u^k} + \frac{\partial \omega_{jk}}{\partial u^i} + \frac{\partial \omega_{ki}}{\partial u^j} \right) dx^i \wedge dx^j \wedge dx^k \end{aligned}$$

因此有

$$\frac{\partial \omega_{ij}}{\partial u^k} + \frac{\partial \omega_{jk}}{\partial u^i} + \frac{\partial \omega_{ki}}{\partial u^j} = 0$$

综上两方面，证毕。 \square

众所周知，这个例子来自经典力学。事实上，此泊松结构有如下不依赖局部坐标的表达方式：对任意 $f \in C^\infty(X)$ ，存在唯一的切向量场 X_f 使得

$$df + i_{X_f}(\omega) = 0$$

称此 X_f 为 f 的哈密顿向量场。于是，对于任意的 $f, g \in C^\infty(X)$ ，辛结构 ω 诱导的泊松括号满足

$$\{f, g\} = \omega(X_f, X_g)$$

以上是我们在经典力学中熟知的。下一个例子更“接近”经典力学：

重要例子 3.1.7. (光滑流形余切丛上的典范辛结构)

设 M 为 n 维光滑流形, $X := T^*M$ 为 X 的余切丛, 则定义 X 上的典范 1-形式 $\theta \in \Omega_X^1$ 为:

$$\theta|_{(x,p)}(v, \xi) := \langle p, v \rangle$$

其中 $(x, p) \in X$, $(v, \xi) \in T_{(x,p)}(X)$, 以及 $v \in T_x M$. 记 X 上的 2-形式

$$\omega := -d\theta$$

称 ω 为 T^*M 上的典范辛形式。

考虑 $X = T^*M$ 的局部坐标 $(x^1, x^2, \dots, x^n; p_1, p_2, \dots, p_n)$, 其中 x^i 为 M 上的局部坐标。则容易知道典范 1-形式 θ 与典范辛形式 ω 在该局部坐标下的表达式分别为

$$\begin{aligned}\theta &= \sum_{i=1}^n p_i dx^i \\ \omega &= \sum_{i=1}^n dx^i \wedge dp_i\end{aligned}$$

上述 ω 给出了余切丛 T^*M 的辛流形结构, 该辛结构诱导泊松结构, 于是我们可以谈论 $X = T^*M$ 上的泊松括号。

注记 3.1.8. 记号承上, 则存在典范的线性同态

$$\begin{aligned}\varphi: \Gamma(M, TM) &\rightarrow C^\infty(X) \\ \varphi(\eta)|_{(x,p)} &= \langle p, \eta \rangle\end{aligned}$$

即, 通过“非常自然的方式”, 将底流形 M 上的切向量场视为余切丛 $X = T^*M$ 上的光滑函数。该线性同态可以自然延拓到切丛的对称张量丛的截面上:

$$\varphi: \Gamma(M, \text{Sym}(TM)) \rightarrow C^\infty(X)$$

无非是“函数的相乘”而已。

性质 3.1.9. 设 M 为光滑流形, 考虑 $X = T^*M$ 上的典范辛结构, $\varphi: \Gamma(M, TM) \rightarrow C^\infty(X)$ 同上, 则对 M 的任意的切向量场 f, g , 成立

$$\varphi([f, g]) = -\{\varphi(f), \varphi(g)\}$$

其中左边 “[,]” 为 M 上的切向量场的李括号, 右边 $\{, \}$ 为辛流形 X 上的泊松括号。

证明. 局部坐标下验证. 取 X 的局部坐标 $(x^1, \dots, x^n; p_1, \dots, p_n)$, 记

$$f = f^i \frac{\partial}{\partial x^i}, \quad g = g^i \frac{\partial}{\partial x^i}$$

则容易知道

$$\varphi(f) = f^i(x) p_i, \quad \varphi(g) = g^i(x) p_i$$

注意 X 上的泊松张量

$$P = \frac{\partial}{\partial x^i} \wedge \frac{\partial}{\partial p_i}$$

因此有

$$\begin{aligned} \{\varphi(f), \varphi(g)\} &= \left\langle \frac{\partial}{\partial x^s} \wedge \frac{\partial}{\partial p_s}, d\varphi(f) \wedge d\varphi(g) \right\rangle \\ &= \left(g^s \frac{\partial f^i}{\partial x^s} - f^s \frac{\partial g^i}{\partial x^s} \right) p_i \end{aligned}$$

而另一方面,

$$[f, g] = \left(f^s \frac{\partial g^i}{\partial x^s} - g^s \frac{\partial f^i}{\partial x^s} \right) \frac{\partial}{\partial x^i} \implies \varphi([f, g]) = \left(f^s \frac{\partial g^i}{\partial x^s} - g^s \frac{\partial f^i}{\partial x^s} \right) p_i$$

从而 $\varphi([f, g]) = -\{\varphi(f), \varphi(g)\}$, 得证。 □

3.2 形变量子化与 Moyal 星积

我们开始讨论形变量子化。 (此处应该写几句 introduction)

定义 3.2.1. (星积)

对于泊松流形 (X, P) , 称 $\mathbb{R}[[\hbar]]$ -双线性映射

$$\begin{aligned} C^\infty(X)[[\hbar]] \times C^\infty(X)[[\hbar]] &\rightarrow C^\infty(X)[[\hbar]] \\ f \star g &\mapsto \sum_{k \geq 0} C_k(f, g) \hbar^k \end{aligned}$$

为 (X, P) 上的星积 (star product), 如果 \star 是结合的, 并且对任意 $f, g \in C^\infty(X)$, 以下成立:

(1) $\hbar \rightarrow 0$ 时退化为通常的函数乘法:

$$f \star g = fg \mod \hbar$$

(2) \star 的“一阶非交换性”由泊松括号给出:

$$f \star g - g \star f = \hbar \{f, g\} \mod \hbar^2$$

(3) 对于每个 $k \geq 0$, C_k 为双微分算子:

$$C_k(f, g) = \sum_{\max\{l, m\}=k} C_k^{i_1 \dots i_l j_1 \dots j_m} (\partial_{i_1} \dots \partial_{i_l} f) (\partial_{j_1} \dots \partial_{j_m} g)$$

其中系数 $C_k^{i_1 \dots i_l j_1 \dots j_m} \in C^\infty(X)$.

此时, 也称 $(C^\infty(X), \star)$ 为 (X, P) 的形变量子化 (deformation quantization)。

这里的 \hbar 为形式变元 (物理背景为普朗克常量, 这是心照不宣的)。由定义容易知道, 对任意 $f \in C^\infty(X)$, 成立

$$1 \star f = f \star 1 = f$$

其中 $1 \in C^\infty(X)$ 为值恒为 1 的常值函数。

此外, 容易知道双微分算子

$$C_0(f, g) = fg$$

以及我们不妨

$$C_1(f, g) = \{f, g\}$$

一个基本的问题是, 任给一个泊松流形 (X, P) , 它的形变量子化是否一定存在? 答案是肯定的, Kontsevich 用非交换几何的工具给出了证明——这也是我们在后文要详细介绍的。对于辛流形的特殊情况, 形变量子化的存在性相对比较容易证明, 据说辛流形的形变量子化与 Atiyah-Singer 指标定理有联系。

我们先来看一些例子:

重要例子 3.2.2. (*Moyal* 乘积) 设 $X = \mathbb{R}^n$, 并配以泊松张量

$$P = P^{ij} \frac{\partial}{\partial x^i} \wedge \frac{\partial}{\partial x^j}$$

其中 P^{ij} 皆为常数, 则我们定义如下乘积: 对任意 $f, g \in C^\infty(X)$,

$$(f \star g)(x) := e^{\hbar P^{ij} \frac{\partial}{\partial y_i} \frac{\partial}{\partial z_j}} f(y) g(z) \Big|_{y=z=x}$$

则 \star 给出了 (X, P) 的形变量子化。

把算子指数打开, 该星积 \star 的定义式可以显式地写为

$$f \star g = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\hbar^k}{k!} \sum_{\substack{i_1, \dots, i_k \\ j_1, \dots, j_k}} P^{i_1 j_1} P^{i_2 j_2} \dots P^{i_k j_k} (\partial_{i_1} \partial_{i_2} \dots \partial_{i_k} f) (\partial_{j_1} \partial_{j_2} \dots \partial_{j_k} g)$$

容易验证如此定义的 \star 满足

$$f \star g = fg + \frac{\hbar}{2}\{f, g\} + o(\hbar)$$

我们只需要再验证 \star 满足结合律，证明如下：

证明. 直接将 $(f \star g) \star h$ 暴力展开，对任意 $m \geq 0$ ，计算 \hbar^m 的系数。

为书写方便，引入一些记号：我们常用 $I = (i_1, i_2, \dots, i_s)$ 来表示长度为 s 的多重指标，其中 i_1, \dots, i_s 取值于 $\{1, 2, \dots, n\}$ ，它们之中允许相同、计次序。设多重指标 $|I| = |J| = s$ ，其中 $I = (i_1, \dots, i_s)$ 以及 $J = (j_1, \dots, j_s)$ ，则对于 $f \in C^\infty(X)$ ，我们记

$$\partial_I(f) := \partial_{i_1} \cdots \partial_{i_s} f$$

$$P^{I;J} := P^{i_1 j_1} P^{i_2 j_2} \cdots P^{i_s j_s}$$

以及，对于任意两个多重指标 $|S| = s$ 以及 $|T| = t$ （允许 $s \neq t$ ），则记 ST 为 S 与 T 的顺次连接（文字乘法），其长度为 $s+t$ 。对于多重指标 S ，视它为序列，则可以考虑其子列 S' ，记为 $S' \subseteq S$ 。

在此记号下， \star 的显式表达式为

$$f \star g = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\hbar^k}{k!} \sum_{|I|=|J|=k} P^{I;J} (\partial_I f) (\partial_J g)$$

现在，我们直接计算 $(f \star g) \star h$ 的 \hbar^m -系数，计算过程中会反复用到“算两次”的组合技巧：

$$\begin{aligned} [(f \star g) \star h]_m &= \sum_{l=0}^m ((f \star g)_l \star h)_{m-l} \\ &= \sum_{l=0}^m \frac{1}{l!} \sum_{|I|=|J|=l} P^{I;J} ((\partial_I f \partial_J g) \star h)_{m-l} \\ &= \sum_{l=0}^m \frac{1}{l!(m-l)!} \sum_{|I|=|J|=l} \sum_{|R|=|S|=m-l} P^{IR;JS} \partial_R (\partial_I f \partial_J g) (\partial_S h) \\ &= \sum_{l=0}^m \frac{1}{l!(m-l)!} \sum_{|I|=|J|=l} \sum_{|R|=m-l} \sum_{\substack{R_1 \subseteq R \\ R_2 := R \setminus R_1}} (\partial_{IR_1} f) (\partial_{JR_2} g) \sum_{|S|=m-l} P^{IR;JS} (\partial_S h) \\ &= \sum_{l=0}^m \frac{1}{l!(m-l)!} \sum_{|I|=|J|=l} \sum_{u+v=m-l} \sum_{\substack{|R_1|=u \\ |R_2|=v}} \frac{(m-l)!}{u!v!} (\partial_{IR_1} f) (\partial_{JR_2} g) \sum_{|S|=m-l} P^{IR;JS} (\partial_S h) \\ &= \sum_{\substack{0 \leq i, k \leq m \\ i+k \geq m}} \frac{1}{(m-i)!(i+k-m)!(m-k)!} \sum_{\substack{|I|=i \\ |K|=k}} \sum_{\substack{|J_1|=m-k \\ |J_2|=m-i}} P^{IJ_2;J_1K} (\partial_I f) (\partial_{J_1 J_2} g) (\partial_K h) \end{aligned}$$

容易观察出上式关于 f, h 的对称性：

$$[(f \star g) \star h]_m = (-1)^m [(h \star g) \star f]_m$$

此外也容易验证（也是从显式表达式直接看出来）

$$(f \star g)_m = (-1)^m (g \star f)_m$$

从而有

$$\begin{aligned}
[(f \star g) \star h]_m &= (-1)^m [(h \star g) \star f]_m \\
&= (-1)^m \sum_{l=0}^m [(h \star g)_l \star f]_{m-l} \\
&= (-1)^m \sum_{l=0}^m (-1)^{m-l} (-1)^l [f \star (g \star h)]_{m-l} \\
&= [f \star (g \star h)]_m
\end{aligned}$$

从而证毕。 □

(似乎有更简单的方法? 某些算子指数的性质直接秒掉?)

特别地, 考虑经典力学“位置-动量”的经典情形:

例子 3.2.3. (*Moyal-Weyl* 代数)

设 $X = \mathbb{R}^{2n}$ 为偶数维线性空间, 坐标函数记为 $\{x^1, \dots, x^n; p_1, \dots, p_n\}$, 配以标准的泊松结构

$$P = \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x^i} \wedge \frac{\partial}{\partial p_i}$$

则 *Moyal* 星积 \star 给出了

$$A := \mathbb{R}[x^1, \dots, x^n; p_1, \dots, p_n; \hbar]$$

上的 *Weyl* 代数结构 $\star: A \times A \rightarrow A$.

例如, 在此情形下, 容易计算出

$$x^i \star p_j = x^i p_j + \frac{1}{2} \hbar \delta_j^i$$

事实上, 星积 \star 可以抽象为如下的代数版本 (不一定要局限于辛流形上的函数):

定义 3.2.4. (代数版本的形变量子化)

设 $(A, \cdot, \{, \})$ 为泊松代数 (*Poisson algebra*), 即 (A, \cdot) 为含么交换结合 K -代数, $(A, \{, \})$ 为李代数, 并且满足莱布尼茨法则

$$\{f, gh\} = \{f, g\}h + g\{f, h\}$$

称 $K[[\hbar]]$ -双线性映射

$$\star: A[[\hbar]] \times A[[\hbar]] \rightarrow A[[\hbar]]$$

为 $(A, \cdot, \{, \})$ 的形变量子化, 如果 \star 满足结合性, 以及对任意 $f, g \in A$,

$$f \star g = fg + \frac{\hbar}{2} \{f, g\} + o(\hbar)$$

明显地, A 的几何背景为辛流形上的光滑函数环。

记号 3.2.5. 设 M 为光滑流形, $X = T^*M$ 为 M 的余切丛, 配以典范辛结构

$$\omega = \sum dx^i \wedge dp_i$$

我们记

$$\mathcal{O}(X) = \Gamma(M, \text{Sym}(TM))$$

注意 $\mathcal{O}(X)$ 中的元素可视为 X 上的光滑函数 (见注记 3.1.8), 它配以 X 上的泊松括号构成泊松代数。我们考虑 $(\mathcal{O}(X), \{, \})$ 的形变量子化。

(这里有坑待填)

D_X differential operator on X . \exists filtration by its order

$$D_X^{(0)} \subseteq D_X^{(1)} \subseteq \dots \subseteq D_X^{(m)} \dots$$

(consists of $\sum A^{i_1 \dots i_k} \partial_{i_1} \dots \partial_{i_k}$)

Check:

$$[D_X^{(m)}, D_X^{(n)}] \subseteq D_X^{(m+n-1)}$$

$$D_X^{(m)} \circ D_X^{(n)} \subseteq D_X^{(m+n)}$$

(D_X, \circ) is associative

$$D_X^{\hbar} := \bigoplus_{m \geq 0} D_X^{(k)} \hbar^m \subseteq D_X[\hbar]$$

is a $\mathbb{R}[\hbar]$ -module

HW: what is k in Def above????

(such that D_X^{\hbar} can be understood as a Deformation Quantization of $(\mathcal{O}(X), \{, \})$ over ring $\mathbb{R}[\hbar]$.)

我们再看一个重要例子:

重要例子 3.2.6. (环面泊松代数)

考虑如下的 \mathbb{R} -代数

$$e^V := \text{span}_{\mathbb{R}} \{e^v | v = (v^1, \dots, v^n) \in \mathbb{Z}^n\}$$

并且定义乘法

$$e^{v_1} e^{v_2} = e^{v_1 + v_2}$$

则 (e^V, \cdot) 为含么交换结合 \mathbb{R} -代数。令 ω 为 \mathbb{R}^n 上的一个反对称双线性型，定义

$$\begin{aligned}\{, \} : e^V \times e^V &\rightarrow e^V \\ \{e^{v_1}, e^{v_2}\} &\mapsto \omega(v_1, v_2)e^{v_1+v_2}\end{aligned}$$

则 $(e^V, \cdot, \{, \})$ 构成泊松代数。

证明。只需验证 $\{, \}$ 的雅可比恒等式与莱布尼茨法则。对任意 $x, y, z \in \mathbb{Z}^n$ ，有

$$\begin{aligned}\{e^x, e^y e^z\} &= \{e^x, e^{y+z}\} \\ &= \omega(x, y+z)e^{x+y+z} \\ &= \omega(x, y)e^{x+y}e^z + \omega(x, z)e^{x+z}e^y \\ &= \{e^x, e^y\}e^z + e^y\{e^x, e^z\}\end{aligned}$$

从而莱布尼茨法则成立。再看雅可比恒等式：

$$\begin{aligned}\{\{e^x, e^y\}, e^z\} &= \omega(x, y)\{e^{x+y}, e^z\} \\ &= \omega(x, y)\omega(x+y, z)e^{x+y+z} \\ &= [\omega(x, y)\omega(y, z) - \omega(z, x)\omega(x, y)]e^{x+y+z}\end{aligned}$$

之后对 x, y, z 轮换求和，立刻得到。 □

注意到这里的 ω 可以是退化的。考虑标准环面

$$T^n := \{(z_1, z_2, \dots, z_n) \in \mathbb{C}^n \mid |z_i| = 1\}$$

则注意到 e^V 中的元素可以通过以下方式视为 T^n 上的光滑函数：

$$\begin{aligned}e^V &\hookrightarrow C^\infty(T^n) \\ v = (v_1, v_2, \dots, v_n) &\mapsto z_1^{v_1} z_2^{v_2} \cdots z_n^{v_n}\end{aligned}$$

容易知道 e^V 在函数空间 $C^\infty(T^n)$ 当中稠密，这是傅里叶展开的标准技术。

我们考虑泊松代数 $(e^V, \{, \})$ 的形变量子化：

性质 3.2.7. (量子环面)

记号承上，记 \hbar 为形式变元，定义 $\mathbb{R}[[\hbar]]$ -双线性映射

$$\begin{aligned}\star : e^V[[\hbar]] \times e^V[[\hbar]] &\rightarrow e^V[[\hbar]] \\ e^x \star e^y &:= e^{\hbar\omega(x, y)} e^{x+y}\end{aligned}$$

则 $(e^V[[\hbar]], \star)$ 为 $(e^V, \{, \})$ 的形变量子化。

证明. 这几乎是显然的。首先对任意 $x, y, z \in \mathbb{Z}^n$, 有

$$(e^x \star e^y) \star e^z = e^{\hbar\omega(x,y)} e^{x+y} \star e^z = e^{\hbar(\omega(x,y) + \omega(x+y,z))} e^{x+y+z}$$

再直接验证 $e^x \star (e^y \star e^z)$ 即可证明结合性。

另一方面,

$$\begin{aligned} e^x \star e^y &= e^{\hbar\omega(x,y)} e^{x+y} \\ &= e^{x+y} + \frac{1}{2} \hbar \omega(x,y) e^{x+y} + o(\hbar) \\ &= e^x e^y + \frac{1}{2} \hbar \{e^x, e^y\} + o(\hbar) \end{aligned}$$

从而证毕。 □

3.3 重要例子：李代数的对偶

本节给出泊松流形的重要例子：有限维李代数的对偶空间上的典范泊松结构——并且探讨其形变量子化。

重要例子 3.3.1. (李代数的对偶)

设 $(\mathfrak{g}, [\cdot, \cdot])$ 为 (有限维) 李代数, 考虑 $X := \mathfrak{g}^*$ 为其对偶, 取 $\{e^1, e^2, \dots, e^n\}$ 为 \mathfrak{g} 的一组基, $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 为 \mathfrak{g}^* 当中相应的对偶基。用 X^i 来表示 $X = \mathfrak{g}^*$ 中的点在基 $\{e_i\}$ 下的坐标。记李代数 \mathfrak{g} 的结构常数为

$$[e^i, e^j] = C_k^{ij} e^k$$

那么我们给出 $X = \mathfrak{g}^*$ 的泊松张量如下:

$$P_{\mathfrak{g}} = \frac{1}{2} X^k C_k^{ij} e_i \wedge e_j$$

则 $(X, P_{\mathfrak{g}})$ 为泊松流形。

证明. 先考虑 P 的良定性。事实上, 上述泊松张量可以内蕴地写成如下: 对任意 $\xi \in X = \mathfrak{g}^*$, 以及 $f, g \in C^\infty(\mathfrak{g}^*)$,

$$\{f, g\}_{P_{\mathfrak{g}}}(\xi) = \xi([df, dg])$$

其中 $df \in T_{\xi}^* \mathfrak{g}^* \cong (\mathfrak{g}^*)^* \cong \mathfrak{g}$. 局部坐标下, 记 $\xi = X^i e_i$, 则

$$\begin{aligned} \xi([df, dg]) &= \left\langle X^i e_i, \left[\frac{\partial f}{\partial X^j} e^j, \frac{\partial g}{\partial X^k} e^k \right] \right\rangle \\ &= X^i C_k^{ij} \frac{\partial f}{\partial X^i} \frac{\partial g}{\partial X^j} \end{aligned}$$

另一方面也容易验证上式右边也与以下相等：

$$\left\langle \frac{1}{2} X^k C_k^{ij} e_i \wedge e_j, df \wedge dg \right\rangle$$

于是 $P_{\mathfrak{g}}$ 良定（与局部坐标选取无关）。接下来验证它的确为泊松张量，局部坐标下暴力验证即可：注意到

$$P_{\mathfrak{g}}^{is} \frac{\partial P_{\mathfrak{g}}^{jk}}{\partial X^s} = P_{\mathfrak{g}}^{is} \frac{\partial}{\partial X^s} (X^t C_t^{jk}) = X^l C_l^{is} C_s^{jk}$$

其中注意结构常数 C_k^{ij} 作为 X 上的函数，是常值的。对 i, j, k 轮换相加，有

$$P_{\mathfrak{g}}^{is} \frac{\partial P_{\mathfrak{g}}^{jk}}{\partial X^s} + P_{\mathfrak{g}}^{js} \frac{\partial P_{\mathfrak{g}}^{ki}}{\partial X^s} + P_{\mathfrak{g}}^{ks} \frac{\partial P_{\mathfrak{g}}^{ij}}{\partial X^s} = X^l (C_l^{is} C_s^{jk} + C_l^{js} C_s^{ki} + C_l^{ks} C_s^{ij}) = 0$$

其中第二个等号是因为李代数 \mathfrak{g} 的雅可比恒等式。从而证毕。 \square

如此通过李代数对偶得到的泊松流形称为线性泊松流形。容易知道， $(P_{\mathfrak{g}}^{ij})$ 可逆当且仅当 $P_{\mathfrak{g}}$ 可由 X 上的辛结构诱导。

此外注意到， \mathfrak{g} 中的向量 v 自然视为 $X = \mathfrak{g}^*$ 上的线性函数：对任意 $\xi \in X = \mathfrak{g}^*$,

$$v(\xi) := \langle \xi, v \rangle$$

在此意义下， \mathfrak{g} 的基向量 e^i 即为 X 上的坐标函数 X^i 。

性质 3.3.2. 对于有限维李代数 \mathfrak{g} ，任意 $u, v \in \mathfrak{g}$ 视为 X 上的线性函数，则泊松括号满足

$$\{u, v\}_{P_{\mathfrak{g}}} = [u, v]$$

其中右端 $[,]$ 为 \mathfrak{g} 中的李括号。

证明. 用泊松张量 $P_{\mathfrak{g}}$ 的内蕴定义

$$\{f, g\}_{P_{\mathfrak{g}}}(\xi) = \xi([f, g])$$

来看，是显然的。 \square

接下来再看另一个重要例子：李代数对偶 \mathfrak{g}^* （见例子3.3.1）的形变量子化。我们引入量子包络代数：

定义 3.3.3. (量子包络代数)

设 \mathfrak{g} 为 (有限维) 李代数, 我们定义 \mathfrak{g} 的量子包络代数 (quantum enveloping algebra) $\mathcal{U}_\hbar(\mathfrak{g})$ 如下:

$$\mathcal{U}_\hbar(\mathfrak{g}) := \bigoplus_{k \geq 0} \mathfrak{g}^{\otimes k}[[\hbar]] / \sim$$

其中关系 \sim 为以下生成的理想:

$$a \otimes b - b \otimes a = \hbar[a, b]$$

这里的 \hbar 依然是形式变元。注意到若 $\hbar = 0$ 时, 得到的是对称张量代数 $\text{Sym}(\mathfrak{g})$; $\hbar = 1$ 时则为熟知的泛包络代数 $\mathcal{U}(\mathfrak{g})$.

关于量子包络代数 $\mathcal{U}_\hbar(\mathfrak{g})$, 有以下 **PBW 定理**, 我们述而不证:

性质 3.3.4. (量子包络代数的 PBW 定理)

对于李代数 \mathfrak{g} , 则以下映射为线性双射:

$$\begin{aligned} \Phi : \text{Sym}(\mathfrak{g})[[\hbar]] &\rightarrow \mathcal{U}_\hbar(\mathfrak{g}) \\ x_1 \otimes \cdots \otimes x_k &\mapsto \frac{1}{k!} \sum_{\sigma \in S_k} x_{\sigma(1)} \otimes \cdots \otimes x_{\sigma(k)} \end{aligned}$$

证明. Φ 的良好性显然, 双射性的证明从略。 □

注意量子包络代数 $\mathcal{U}_\hbar(\mathfrak{g})$ 的乘法结构由张量运算 \otimes 给出, 考虑 PBW 定理中的 Φ , 则 $\Phi^*(\otimes)$ 给出了 $\text{Sym}(\mathfrak{g})[[\hbar]]$ 的乘法结构, 易知该乘法是结合的 (需要 check, 不过比较容易), 并且与 $\text{Sym}(\mathfrak{g})[[\hbar]]$ 上通常的乘法 (张量运算 \otimes) 不同。我们将结合代数 $(\text{Sym}(\mathfrak{g})[[\hbar]], \Phi^*(\otimes))$ 记作 $\mathcal{O}(X)[[\hbar]]$, 其中 $X = \mathfrak{g}^*$ 为李代数 \mathfrak{g} 的辛流形。

注意到 $\mathfrak{g} \cong (\mathfrak{g}^*)^*$ 中的元素可视为 $X = \mathfrak{g}^*$ 上的线性函数, 于是 $\text{Sym}(\mathfrak{g})$ 中的元素为 X 中的多项式函数, 这也是我们将 $\text{Sym}(\mathfrak{g})$ 记为 $\mathcal{O}(X)$ 的原因。我们只考虑 $X = \mathfrak{g}^*$ 上的多项式函数。

重要例子 3.3.5. (李代数对偶 \mathfrak{g}^* 的形变量子化)

对于 (有限维) 李代数 \mathfrak{g} , 记号承上, 则 $\mathcal{O}(X)[[\hbar]]$ 为泊松流形 $(X, P_\mathfrak{g})$ 的形变量子化, 其星积为 $\Phi^{-1}(\otimes)$.

证明. 记 $\star := \Phi^*(\otimes)$, 首先 \star 的结合性容易验证: 对于任意的 $x, y, z \in \text{Sym}(\mathfrak{g})$, 则

$$(x \star y) \star z = \Phi^{-1}(\Phi(x) \otimes \Phi(y)) \star z = \Phi^{-1}((\Phi(x) \otimes \Phi(y)) \otimes \Phi(z))$$

从而由 $(\mathcal{U}_\hbar(\mathfrak{g}), \otimes)$ 的结合性, 立得 \star 的结合性。

接下来只需验证对任意 $x, y \in \text{Sym}(\mathfrak{g})$, 成立

$$x \star y = xy + \frac{\hbar}{2} \{x, y\}_{P_{\mathfrak{g}}} + o(\hbar)$$

现在对于任意 $x, y \in \text{Sym}(\mathfrak{g})$, 不妨

$$x = x_1 x_2 \cdots x_p \quad y = y_1 y_2 \cdots y_q$$

(对称张量积省略之, 无非是函数的乘法) 我们先考虑 $p = q = 1$ 的简单情形。此时

$$\begin{aligned} x \star y &= \Phi^{-1}(x \otimes y) \\ &= \Phi^{-1} \left(\frac{x \otimes y + y \otimes x}{2} + \frac{x \otimes y - y \otimes x}{2} \right) \\ &= xy + \Phi^{-1} \left(\frac{\hbar[x, y]}{2} \right) \\ &= xy + \frac{\hbar}{2} \{x, y\}_{P_{\mathfrak{g}}} \end{aligned}$$

从而得证 (其中最后一个等式利用了性质 3.3.2)。

接下来看一般情形。一般情形待补 估计还是暴力组合恒等式

□

3.4 Kontsevich 量子化公式

本节我们介绍 Kontsevich 的著名结果: 任何泊松流形 (X, P) 都存在形变量子化; 并且星积 \star 可以显式地构造出。我们只介绍结果 (星积 \star 的具体构造), 暂不给出证明。

为描述 Kontsevich 的量子化公式, 我们需要一些图论组合的准备:

定义 3.4.1. (带标记的有向图)

(1) 带标记的有向图是指形如 $(\Gamma_0, \Gamma_1, \varepsilon)$ 的三元组, 其中 Γ_0, Γ_1 为任意集合, $\varepsilon: \Gamma_1 \rightarrow \Gamma_0 \times \Gamma_0$.

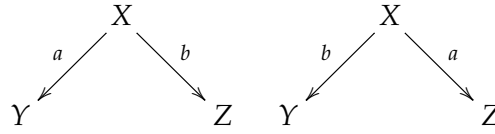
(2) 对于带标记的有向图 $\Gamma = (\Gamma_0, \Gamma_1, \varepsilon)$, 我们称 Γ_0 为 Γ 的顶点集, Γ_1 为 Γ 的边集; 对于 $e \in \Gamma_1$, 定义

$$s(e) := \pi_1 \circ \varepsilon(e)$$

$$t(e) := \pi_2 \circ \varepsilon(e)$$

分别称之为 e 的始点 (source) 与终点 (tail), 其中 $\pi_1, \pi_2: \Gamma_0 \times \Gamma_0 \rightarrow \Gamma_0$ 为典范的投影映射。

组合意义明显，但要注意它与图论当中的“有向图”有细微区别。例如对于 $\Gamma_0 = \{X, Y, Z\}$, $\Gamma_1 = \{a, b\}$ ，以下两个图



并不相同（它们的 ε 不相同）。

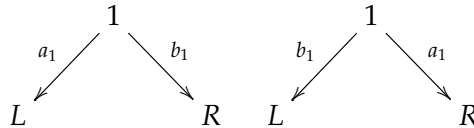
我们再引入一些图论的概念。对于 $e \in \Gamma_1$ ，如果 $s(e) = t(e)$ ，则称 e 为闭路（loop）；对于 $e_1, e_2 \in \Gamma_1$ ，如果 $s(e_1) = s(e_2)$ 并且 $t(e_1) = t(e_2)$ ，则称 Γ_0 的子集 e_1, e_2 为双箭头（double arrow）。类似地可以定义“多箭头”。

记号 3.4.2. 对于非负整数 n ，我们记 G_n 为满足以下条件的带标记的有向图 $\Gamma = (\Gamma_0, \Gamma_1, \varepsilon)$ 构成的集合：

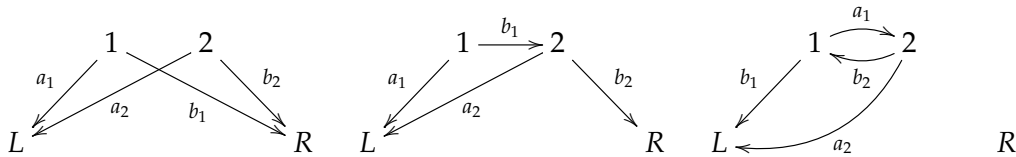
- (1) $\Gamma_0 = \{1, 2, \dots, n\} \sqcup \{L, R\}$ ，其中 L, R 为形式变元；
- (2) $\Gamma_1 = \{a_1, \dots, a_n; b_1, \dots, b_n\}$ ，并且对任意 $q \leq i \leq n$ ，都有 $s(a_i) = s(b_i) = i$ ；
- (3) 图 Γ 当中不含有回路，不含有双箭头。

例如，集合 G_0 当中只有一个元素 $(\Gamma_0, \Gamma_1, \varepsilon)$ ，其中 $\Gamma_0 = \{L, R\}$ ， $\Gamma_1 = \emptyset$ ， $\varepsilon = \emptyset$ ；也就是说，只有 L, R 两个顶点，没有边。

再比如，集合 G_1 当中有两个元素，如下：



再例如，以下三个带标记的有向图都是 G_2 当中的元素：



容易知道 G_2 当中有 $(3 \times 2)^2 = 36$ 个元素，在此不一一列举。一般地， G_n 的元素个数为

$$|G_n| = [n(n+1)]^n$$

现在，考虑泊松流形 (X, P) ，其中泊松张量 P 再局部坐标下为

$$P = P^{ij} \frac{\partial}{\partial u^i} \wedge \frac{\partial}{\partial u^j}$$

给定 $\Gamma \in G_n$ ，我们定义如下的 n 阶双微分算子：

定义 3.4.3. 对于 N 维泊松流形 (X, P) , 以及 $\Gamma \in G_n$, 定义 $C^\infty(X)$ 上的 n 阶双微分算子

$$B_\Gamma : C^\infty(X) \times C^\infty(X) \rightarrow C^\infty(X)$$

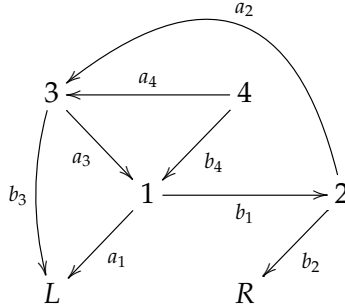
如下: 对任意 $f, g \in C^\infty(X)$, 在局部坐标下,

$$B_\Gamma(f, g) = \left[\prod_{k=1}^n \left(\prod_{\{m|t(a_m)=k\}} \partial_{a_m} \prod_{\{l|t(a_l)=k\}} \partial_{b_l} P^{a_k b_k} \right) \right] \left(\prod_{\{m|t(a_m)=L\}} \partial_{a_m} \prod_{\{l|t(b_l)=L\}} \partial_{b_l} f \right) \left(\prod_{\{m|t(a_m)=R\}} \partial_{a_m} \prod_{\{l|t(b_l)=R\}} \partial_{b_l} g \right)$$

这个公式的表述方式不太像人话。粗俗地说, 图 Γ 的顶点 $m \in \{1, 2, \dots, m\}$ 被视为泊松张量的分量 $P^{a_m b_m}$, 图 Γ 的边 (Γ_1) 中的元素视为张量求和指标。如果有一条边 a_l (切转: b_l) 指向顶点 m , 那么我们对 $P^{a_m b_m}$ 求偏导 ∂_{a_l} (切转: ∂_{b_l}); 如果有边 a_m 指向顶点 L , 那么我们对函数 $f \in C^\infty(X)$ 求偏导 $\partial_{a_m} \dots$

我们不妨举例说明一下:

例子 3.4.4. 考虑带标记的有向图 $\Gamma \in G_4$ 如下:



那么双微分算子 B_Γ 的表达式为: 对任意 $f, g \in C^\infty(X)$,

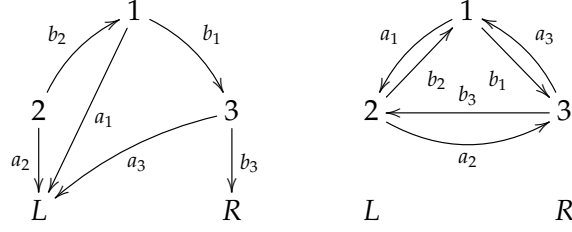
$$B_\Gamma(f, g) = (\partial_{a_3} P^{a_1 b_1}) (\partial_{b_1} \partial_{b_4} P^{a_2 b_2}) (\partial_{a_2} \partial_{a_4} P^{a_3 b_3}) (P^{a_4 b_4}) (\partial_{a_1} \partial_{b_3} f) (\partial_{b_2} g)$$

注意上式右边服从爱因斯坦求和约定, $a_1, \dots, a_4; b_1, \dots, b_4$ 为求和指标。

具体的操作如下: 首先看顶点 1, 考察哪些箭头 (边) 指向 1, 发现只有箭头 a_3 指向 1, 于是写下字符串 “ $(\partial_{a_3} P^{a_1 b_1})$ ”; 之后考察顶点 2, 发现 b_2, b_4 指向该点, 于是紧接着写下字符串 “ $(\partial_{b_1} \partial_{b_4} P^{a_2 b_2})$ ”……之后一直这么做下去, 注意到顶点 L, R 分别对应 f, g 。

再举一例:

例子 3.4.5. 设带标记的有向图 $\Gamma, \Gamma' \in G_3$ 依次为如下:



则对于 $f, g \in C^\infty(X)$, 有

$$\begin{aligned} B_\Gamma(f, g) &= (\partial_{b_2} P^{a_1 b_1})(P^{a_2 b_2})(\partial_{b_1} P^{a_3 b_3})(\partial_{a_1} \partial_{a_2} \partial_{a_3} f)(\partial_{b_3} g) \\ B_{\Gamma'}(f, g) &= (\partial_{b_2} \partial_{a_3} P^{a_1 b_1})(\partial_{b_3} \partial_{a_1} P^{a_2 b_2})(\partial_{b_1} \partial_{a_2} P^{a_3 b_3}) f g \end{aligned}$$

通过上述例子, 我们已熟悉了双微分算子 B_Γ 的定义。不过, 距离完整介绍 Kontsevich 形变量子化公式, 还有较长的路要走。事实上, Kontsevich 构造的星积 \star 形如

$$f \star g = \sum_{n=0}^{\infty} \hbar^n \left(\sum_{\Gamma \in G_n} \omega_\Gamma B_\Gamma(f, g) \right)$$

其中 $\omega_\Gamma \in \mathbb{R}$ 为系数, 其具体定义即将被介绍。

记号 3.4.6. 考虑双曲平面 (hyperbolic plane) $\mathbb{H} := \{z \in \mathbb{C} \mid \text{Im } z \geq 0\}$, 配以标准的双曲度量

$$ds^2 = \frac{dx^2 + dy^2}{y^2}$$

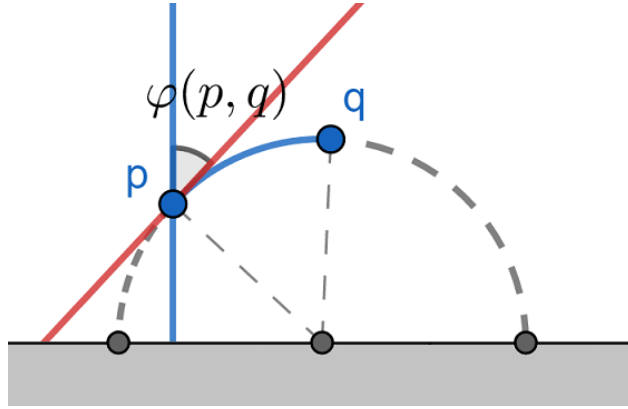
对于任意 $p \neq q \in \mathbb{H}$, 我们记 $\ell(p, q)$ 为 \mathbb{H} 上由 p 到 q 的测地线; 再记 $\varphi(p, q)$ 为测地线 $\ell(p, q)$ 到 $\ell(p, \infty)$ 的夹角。

众所周知, 双曲平面上的测地线必形如垂直于 x 轴的直线, 或者圆心位于 x 轴的上半圆弧。对于 $p, q \in \mathbb{H}$, 夹角 $\varphi(p, q)$ 的示意图下图。

事实上, 由初等平面几何容易给出 $\varphi(p, q)$ 的显式表达式:

$$\varphi(p, q) = \arg \left(\frac{q - \bar{p}}{q - p} \right)$$

以上出现的夹角、辐角可以取任意的分支。



图：测地线 $\ell(p, q)$ 、 $\ell(p, \infty)$ ，以及夹角 $\varphi(p, q)$ 。

记号 3.4.7. 对于 $n \geq 0$ ，定义

$$\text{Conf}_n(\mathbb{H}) := \{(p_1, \dots, p_n) \in \mathbb{H} \mid p_i \neq p_j, \forall i \neq j\}$$

则 $\text{Conf}_n(\mathbb{H})$ 有自然的 $2n$ 维光滑流形结构 (\mathbb{R}^{2n} 的开子流形)。

对于图 $\Gamma = (\Gamma_0, \Gamma_1, \varepsilon) \in G_n$ ，以及 $e \in \Gamma_1$ ，定义流形 $\text{Conf}_n(\mathbb{H})$ 上的光滑函数 φ_e 如下：

$$\begin{aligned} \varphi_e : \text{Conf}_n(\mathbb{H}) &\rightarrow \mathbb{R} \\ (p_1, \dots, p_n) &\mapsto \varphi(p_{s(e)}, p_{t(e)}) \end{aligned}$$

其中特别规定 $p_L = 0 \in \overline{\mathbb{H}}$ ，以及 $p_R = 1 \in \overline{\mathbb{H}}$

粗俗地说，对于图 $\Gamma \in G_n$ ， $\text{Conf}_n(\mathbb{H})$ 当中的一个元素 p 可以视为“将图 Γ 嵌入双曲平面 \mathbb{H} 的一种方式”：图 Γ 的“一般顶点”的位置由 p 给出，“特殊顶点” L, R 分别位于 $0, 1$ ；图 Γ 当中的边对应于 \mathbb{H} 中的测地线。此时， φ_e 可以认为是边 e 的“倾斜角”。

定义 3.4.8. 对于图 $\Gamma \in G_n$ ，定义

$$\omega_\Gamma = \frac{1}{n!(2\pi)^{2n}} \int_{\text{Conf}_n(\mathbb{H})} \bigwedge_{i=1}^n (d\varphi_{a_i} \wedge d\varphi_{b_i})$$

这是 $2n$ -形式在 $2n$ -维流形上的积分。但需要验证此积分的收敛性，这里从略。注意积分号前的系数 $\frac{1}{n!(2\pi)^{2n}}$ 是精心挑选的，我们稍后给出解释。

现在，我们可以完整地陈述以下定理：

定理 3.4.9. (Kontsevich)

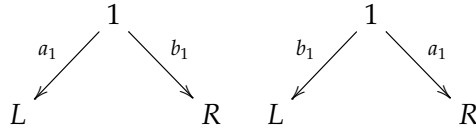
任意的泊松流形 (X, P) 都存在形变量子化, 并且星积可以由以下公式显式给出:

$$f \star g = \sum_{n=0}^{\infty} \hbar^n \left(\sum_{\Gamma \in G_n} \omega_{\Gamma} B_{\Gamma}(f, g) \right)$$

在此述而不证。构造如此星积 \star 的动机、想法, 来自于量子场论等物理背景, 我们在后文会介绍之。

例子 3.4.10. (ω_{Γ} 最基本的显式计算)

我们考虑简单 (但重要的) 情形: $\Gamma, \Gamma' \in G_1$ 分别为如下:



那么有

$$\omega_{\Gamma} = \frac{1}{2}, \quad \omega_{\Gamma'} = -\frac{1}{2}$$

证明. 我们只要求 ω_{Γ} , 而注意到 Γ 与 Γ' 的区别仅仅是两条边对换, 从而倾斜角 $\varphi_{\Gamma, a_1} = \varphi_{\Gamma', b_1}$, $\varphi_{\Gamma, b_1} = \varphi_{\Gamma', a_1}$, 再由外积的反对称性, 容易观察到 $\omega_{\Gamma} = -\omega_{\Gamma'}$.

现在计算 ω_{Γ} . 此时 $n = 1$, $\text{Conf}_1(\mathbb{H}) \cong H$, 对任意的 $z = x + iy \in \mathbb{H} \cong \text{Conf}_1(\mathbb{H})$, 由初等几何容易知道

$$\begin{aligned} \varphi_{a_1}(z) &= -2 \arg z \\ \varphi_{b_1}(z) &= -2 \arg(z - 1) \end{aligned}$$

(允许相差 2π 的整数倍, 这无所谓) 从而

$$d\varphi_{a_1}(z) = -2d \arctan\left(\frac{y}{x}\right) = -2 \frac{x dy - y dx}{x^2 + y^2}$$

同理

$$d\varphi_{b_1}(z) = -2 \frac{(x-1)dy - ydx}{(x-1)^2 + y^2}$$

因此有

$$\begin{aligned} \omega_{\Gamma} &= \frac{1}{1!(2\pi)^{2 \times 1}} \int_{\text{Conf}_1(\mathbb{H})} d\varphi_{a_1} \wedge d\varphi_{b_1} \\ &= \frac{1}{4\pi^2} \int_{\mathbb{H}} \frac{4y}{(x^2 + y^2)((x-1)^2 + y^2)} dx \wedge dy \\ &= \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\pi} \sin \theta d\theta \int_0^{\infty} \frac{1}{r^2 - 2r \cos \theta + 1} dr \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{\pi^2} \int_0^\pi (\pi - \theta) d\theta = \frac{1}{2}$$

□

注记 3.4.11. 事实上, 如果泊松张量的分量 P^{ij} 在局部上是常值的, 那么 *Kontsevich* 给出的量子化公式刚好是 *Moyal* 星积 (见例子 3.2.2), 从而 *Kontsevich* 量子化 \star_K 是 *Moyal* 星积 \star_M 的推广。回顾我们此前已经给出了 *Moyal* 星积的显式表达式

$$f \star_M g = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\hbar^k}{k!} \sum_{|I|=|J|=k} P^{IJ} (\partial_I f) (\partial_J g)$$

证明. 我们来考察 P^{ij} 为常数的情形。对于 $n \geq 0$, 以及 $\Gamma \in G_n$, 注意到如果 Γ 当中有箭头不指向 L 且不指向 R , 则双微分算子 B_Γ 当中含有对 P^{ij} 求导的项, 因此 $B_\Gamma = 0$, 对 \star_K 没有贡献。从而我们只需要考虑 G_n 的子集

$$\widetilde{G}_n := \{\Gamma \in G_n \mid t(a_i) \in \{L, R\}, \forall 1 \leq i \leq n\}$$

即, \widetilde{G}_n 当中的图具有性质: 每个箭头都指向 L 或者 R ; 并且容易知道 \widetilde{G}_n 当中有 2^n 个元素。现在,

$$f \star_K g = \sum_{n=0}^{\infty} \hbar^n \sum_{\Gamma \in \widetilde{G}_n} \omega_\Gamma B_\Gamma(f, g)$$

再注意到, 对于任意 $\Gamma, \Gamma' \in \widetilde{G}_n$, 都有

$$\omega_\Gamma B_\Gamma = \omega_{\Gamma'} B_{\Gamma'}$$

这是由于两个 1- 形式的外积具有反交换性, 以及泊松张量分量 P^{ij} 关于指标的反对称性。从而我们不妨取 \widetilde{G}_n 中的代表元 $\Gamma^n \in \widetilde{G}_n \subseteq G_n$, 其中 Γ^n 满足: 所有的边 a_i 都指向 L , 所有的边 b_i 都指向 R . 从而

$$\begin{aligned} f \star_K g &= \sum_{n=0}^{\infty} \hbar^n 2^n \omega_{\Gamma^n} B_{\Gamma^n}(f, g) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \hbar^n 2^n \omega_{\Gamma^n} (P^{a_1 b_1} \cdots P^{a_n b_n}) (\partial_{a_1} \cdots \partial_{a_n} f) (\partial_{b_1} \cdots \partial_{b_n} g) \end{aligned}$$

最后再注意到

$$\begin{aligned} \omega_{\Gamma^n} &= \frac{1}{n! (2\pi)^{2n}} \int_{\mathbb{H}^n} \bigwedge_{i=1}^n (d\varphi_{a_i}(z_i) \wedge d\varphi_{b_i}(z_i)) \\ &= \frac{1}{n! (2\pi)^{2n}} \prod_{i=1}^n \left(\int_{\mathbb{H}} d\varphi_{a_i}(z_i) \wedge d\varphi_{b_i}(z_i) \right) \\ &= \frac{(2\pi^2)^n}{n! (2\pi)^{2n}} = \frac{1}{n! 2^n} \end{aligned}$$

因此 Kontsevich 量子化 \star_K 满足

$$\begin{aligned} f \star_K g &= \sum_{n=0}^{\infty} \hbar^n 2^n \frac{1}{n! 2^n} (P^{a_1 b_1} \dots P^{a_n b_n}) (\partial_{a_1} \dots \partial_{a_n} f) (\partial_{b_1} \dots \partial_{b_n} g) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\hbar^n}{n!} (P^{a_1 b_1} \dots P^{a_n b_n}) (\partial_{a_1} \dots \partial_{a_n} f) (\partial_{b_1} \dots \partial_{b_n} g) \end{aligned}$$

这正是 Moyal 乘积的表达式。

□

第4章 量子场论的背景

现在我们开始逐渐去理解 Kontsevich 的形变量子化的构造；为此需要一些量子场论（quantum field theory，简称 QFT）背景知识。

4.1 Grassmann 变量与 BV 算子

大致地说（并非严格的数学表述），一个物理系统包括以下要素：**场空间**（space of fields） \mathcal{E} 与**作用量**（action functional） \mathcal{S} ，其中场空间 \mathcal{E} 通常为无穷维空间，作用量

$$\mathcal{S} : \mathcal{E} \rightarrow \mathbb{C}$$

为场空间 \mathcal{E} 上的函数。

在经典物理中，态的演化常用变分的临界来描述态的演化：

$$\text{Crit}(\mathcal{S}) = \{\delta\mathcal{S} = 0\}$$

上式中的 $\text{Crit}(\mathcal{S})$ 称为 \mathcal{S} 的 critical locus， δ 为某个变分导数。

而在量子物理中，态的演化与积分

$$\int_{\mathcal{E}} \mathcal{O} e^{i\mathcal{S}/\hbar}$$

有关，其中 \mathcal{O} 为 \mathcal{E} 上的函数，称之为**观测量**（observable）；上述积分称之为“**路径积分**”（path integral）。

不过要注意， \mathcal{E} 是无穷维空间，在 \mathcal{E} 上面积分是说不清道不明的事情；我们至今还未完全搞明白此积分的严格定义。我们在本讲义只谈论“数学上的事情”，数学上暂时没说清楚的东西避而不谈。

例子 4.1.1. 作为场空间 \mathcal{E} 的例子，以下是近代物理中的常见对象：

标量场论	$\mathcal{S} =$ 流形 X 上的全体光滑函数
规范理论	$\mathcal{S} =$ 向量丛 $E \rightarrow X$ 上的全体联络
σ -模型	$\mathcal{S} =$ 流形 σ 与 X 之间的全体光滑映射
引力理论	$\mathcal{S} =$ 流形 X 上的全体黎曼度量

我们再举一些作用量 \mathcal{S} 的例子：

例子 4.1.2. (作用量)

(1) 在标量场论 $\mathcal{E} = C^\infty(X)$ 中, 对于 X 上的光滑函数 $\varphi \in \mathcal{E}$, 定义

$$\mathcal{S}[\varphi] = \int_X |\nabla \varphi|^2$$

称之为能量泛函。

(2) 在规范理论当中, 对于 $A \in \mathcal{E}$ 为向量丛 $E \rightarrow X$ 上的联络, 记其曲率张量为

$$F_A := dA + \frac{1}{2}[A, A]$$

定义如下的杨-米尔斯泛函 (Yang-Mills functional)

$$\text{YM}[A] := \int_X F_A \wedge *F_A$$

一个重要的问题是, 如何去构造路径积分

$$\int_{\mathcal{E}} \theta e^{i\mathcal{S}/\hbar}$$

我们介绍 **BV 方法** (Batalin-Vilkovisky method), 其主要思想是用同调理论来解释测度论。

我们来考察有限维的情形。设 X 为 n 维紧致定向流形, $\Omega \in \Omega_X^n$ 为 X 上的一个体积形式, 则 X 上的紧支光滑函数 f 关于该体积形式的积分可以视为如下:

$$\begin{aligned} \int_X : C_c^\infty(X) &\rightarrow \mathbb{R} \\ f &\mapsto \int_X f \Omega \end{aligned}$$

我们考虑

$$\Omega_c(X) := \bigoplus_{p \geq 0} \Omega_c^p(X)$$

为紧支的微分形式, 以及 $d : \Omega_c^p(X) \rightarrow \Omega_c^{p+1}(X)$ 为 de Rham 外微分。众所周知,

$$H^n(\Omega_c^\bullet(X), d) \cong \mathbb{R}$$

此式可以给出积分 \int_X 的同调解释:

$$\begin{aligned} \int_X : C_c^\infty(X) &\rightarrow \mathbb{R} \\ f &\mapsto [f\Omega] \in H^n(\Omega_c^\bullet(X), d) \cong \mathbb{R} \end{aligned}$$

粗俗地说, 我们把求 f 关于体积形式 Ω 的积分视为取 $f\Omega$ 的同调类; 在此意义下, de Rham 复形 (Ω_c^\bullet, d) 扮演了“测度”的角色。

在物理上我们常要面对无穷维空间, 于是在此意义下, 我们需要关心 $n \rightarrow \infty$ 时, $H^n(X)$ 是何物。这是难以说清楚的, 我们不妨换一个角度来看。

定义 4.1.3. 设 X 为 n 维紧致定向流形, Ω 为 X 上的一个体积形式, 则有 Ω 诱导了多重切向量场 $PV^\bullet(X)$ 与微分形式 Ω_X^\bullet 之间的 C^∞ -线性同构

$$\begin{aligned}\Gamma_\Omega : PV^k(X) &\rightarrow \Omega_X^{n-k} \\ V &\mapsto V \lrcorner \Omega\end{aligned}$$

其中 $V \lrcorner \Omega$ 为 V 关于 Ω 的缩并.

在局部坐标下, 若 $\Omega = dx^1 \wedge dx^2 \cdots \wedge dx^n$,

$$V = \partial_{i_1} \wedge \partial_{i_2} \wedge \cdots \wedge \partial_{i_k}$$

为多重切向量场, 其中指标 $i_1 < i_2 < \cdots < i_k$, 则容易知道

$$\Gamma_\Omega(V) = V \lrcorner \Omega = (-1)^{(i_1-1)+(i_2-1)+\cdots+(i_k-1)} \cdots \wedge \widehat{dx^{i_1}} \wedge \cdots \wedge \widehat{dx^{i_k}} \wedge \cdots$$

例子 4.1.4.

$$(\partial_2 \wedge \partial_3) \lrcorner (dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 \wedge dx^4) = -dx^1 \wedge dx^4$$

以此为例, 缩并的运算规则可以理解为: ∂_i 向右移动与 dx^i 相遇而湮灭, 其中在 ∂_i 移动的过程中穿过几个对象 (∂_j 或者 dx^j) 就改变几次正负号 (这符合 Koszul 符号法则的 “精神”).

例如, 如果 $\Omega = e^{f(x)} dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 \wedge dx^4$, 则

$$\Gamma_\Omega(\partial_2 \wedge \partial_3) = e^{f(x)} dx^1 \wedge dx^4$$

再比如, 对于体积形式 Ω 本身, 有

$$\Gamma_\Omega^{-1}(\Omega) = 1$$

也就是说 $1 \in PV^0(X)$ 对应于 $\Omega \in \Omega_X^n$.

当 $V \in PV^1(X)$ 为切向量场时, $V \lrcorner \Omega = i_V(\Omega)$ 就是我们熟悉的内乘运算。

注记 4.1.5. (多重切向量场的内乘) 类似于关于切向量场 X 的内乘算子 $i_X : \Omega_X^\bullet \rightarrow \Omega_X^{\bullet-1}$, 我们也可以考虑多重切向量场 $V \in PV^p(X)$ 的内乘

$$i_V : \Omega_X^\bullet \rightarrow \Omega_X^{\bullet-p}$$

使得对任意 $\omega \in \Omega_X^r$ ($r \geq p$), 以及任意 $W \in PV^{r-p}(X)$, 成立

$$\langle i_V(\omega), W \rangle = \langle \omega, V \wedge W \rangle$$

特别注意，对于多重切向量场 $V \in \text{PV}^\bullet(X)$ 以及体积形式 Ω ，一般来说

$$V \lrcorner \Omega \neq i_V(\Omega)$$

它们两者之间会相差一些奇怪的正负号。我们这里的 $\text{PV}^k(X)$ 与 Ω_X^{n-k} 的对应是通过缩并实现的，而不是内乘。

定义 4.1.6. (BV 算子)

对于 n 维光滑定向流形 X ，设 $\Omega \in \Omega_X^n$ 为 X 上的一个体积形式，定义算子 $\Delta_\Omega : \text{PV}^k(X) \rightarrow \text{PV}^{k-1}(X)$ ，使得下图交换：

$$\begin{array}{ccc} \text{PV}^k(X) & \xrightarrow{\Delta_\Omega} & \text{PV}^{k-1}(X) \\ \Gamma_\Omega \parallel & & \Gamma_\Omega \parallel \\ \Omega_X^{n-k} & \xrightarrow{d} & \Omega_X^{n-k+1} \end{array}$$

称 Δ_Ω 为 **BV 算子** (Batalin-Vilkovisky operator)。

无非是将 de Rham 上链复形 (Ω_X^\bullet, d) 通过体积形式同构为上链复形 $(\text{PV}^\bullet(X), \Delta_\Omega)$ ，其实没干什么事情。特别注意我们规定 $\text{PV}^k(X)$ 的次数为 $-k$ ，使得 Δ_Ω 是次数为 1 的微分算子（而不被看作边缘算子）。

注意到此时有上同调群的同构

$$H^n(\Omega_X^\bullet, d) \cong H^0(\text{PV}^\bullet(X), \Delta_\Omega)$$

回顾我们对积分 $\int_X f \Omega$ 的同调解释，从而有

$$\int_X : f \mapsto [f] \in H^0(\text{PV}^\bullet(X), \Delta_\Omega)$$

也就是说我们可以把求函数 f 关于体积形式 Ω 的积分转化成取 f 在 $(\text{PV}^\bullet(X), \Delta_\Omega)$ 的第零个同调类。这样的好处是，容易向维数 $n \rightarrow \infty$ 的情形推广，毕竟无论维数 n 如何升高，我们取的总是第零个同调。

不过这样的代价是，问题转化为“如何构造无穷维空间上的 BV 算子”。

注记 4.1.7. (广义散度)

事实上，如果 $v \in \text{PV}^1(X)$ 为 X 上的切向量场，则

$$\Delta_\Omega(v) = \text{div}_\Omega(v)$$

正是我们熟悉的关于体积形式 Ω 的散度。

于是我们也俗称 BV 算子为多重切向量场的“广义散度”。

为了书写方便，我们引入一套高效的语言：Grassmann 变量。

记号 4.1.8. (*Grassmann* 变量)

对于 n 维流形 X ，以及 X 的局部坐标卡 $U \subseteq X$ ，我们考虑分次交换 \mathbb{R} -代数

$$C^\infty(U) \otimes \text{Free}\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\} / \sim$$

其中生成关系 \sim 为由 $\{\theta_i\theta_j + \theta_j\theta_i | 1 \leq i, j \leq n\}$ 生成的理想。其中分次结构由

$$\deg \theta_i = -1 \quad \forall 1 \leq i \leq n$$

给出。

容易发现，无非是将 $PV^\bullet(U)$ 当中的 ∂_i 重新写为 θ_i ，从而局部上

$$PV^\bullet(U) = C^\infty(U)[\theta_1, \dots, \theta_n]$$

换句话说， X 上的多重切向量场（局部上）可以写为关于局部坐标 x^1, \dots, x^n 以及 Grassmann 变量的函数

$$\mu = \mu(x^1, \dots, x^n; \theta_1, \dots, \theta_n) \in PV^\bullet(X)$$

这里的 Grassmann 变量 θ_i 是不是 Dubrovnik-Zhang 可积系统里面的“超变量”？

定义 4.1.9. 对于流形 X ，局部坐标下我们定义 -1 阶超导子

$$\frac{\partial}{\partial \theta_i} : PV^\bullet(X) \rightarrow PV^\bullet(X)$$

使得成立

$$\frac{\partial}{\partial \theta_i} f(x^1, \dots, x^n) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial \theta_i} \theta_j = \delta_j^i$$

$\frac{\partial}{\partial \theta_i}$ 服从 -1 阶超导子的超莱布尼茨法则，即对任意 $f, g \in PV^\bullet(X)$ 为齐次元，成立

$$\frac{\partial}{\partial \theta_i} (fg) = \frac{\partial f}{\partial \theta_i} g + (-1)^{\deg f} f \frac{\partial g}{\partial \theta_i}$$

容易验证，超导子 $\frac{\partial}{\partial \theta_i}$ 满足关系

$$\frac{\partial}{\partial \theta_i} \frac{\partial}{\partial \theta_j} = -\frac{\partial}{\partial \theta_j} \frac{\partial}{\partial \theta_i}$$

对任意 $1 \leq i, j \leq n$ 成立。特别地, $\left(\frac{\partial}{\partial \theta_i}\right)^2 = 0$.

性质 4.1.10. (*BV 算子的 Grassmann 变量表达式*)

对于定向流形 X , 设体积形式

$$\Omega = e^{f(x)} dx^1 \wedge \cdots \wedge dx^n$$

则关于 Ω 的 *BV* 算子 Δ_Ω 在 *Grassmann* 变量的意义下具有表达式

$$\Delta_\Omega = \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial \theta_i} + \frac{\partial f}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial \theta_i}$$

证明. 直接验证之。对于任意

$$V = \mu(x^1, \dots, x^n) \theta_{i_1} \cdots \theta_{i_k} \in PV^k(X)$$

则有

$$\begin{aligned} \Delta_\Omega V &= \Gamma_\Omega^{-1} \circ d \circ \Gamma_\Omega(V) \\ &= \Gamma_\Omega^{-1} \circ d \left[(-1)^{(i_1-1)+\cdots+(i_k-k)} \mu e^f \widehat{dx^{i_1}} \wedge \cdots \wedge \widehat{dx^{i_k}} \right] \\ &= (-1)^{(i_1-1)+\cdots+(i_k-k)} \Gamma_\Omega^{-1} \left[\left(\frac{\partial \mu}{\partial x^i} + \mu \frac{\partial f}{\partial x^i} \right) e^f \sum_{l=1}^k (-1)^{i_l-1} \widehat{dx^{i_1}} \wedge \cdots \wedge dx^{i_l} \wedge \cdots \wedge \widehat{dx^{i_k}} \right] \\ &= \left(\frac{\partial \mu}{\partial x^i} + \mu \frac{\partial f}{\partial x^i} \right) \sum_{l=1}^k (-1)^{l-1} \theta_{i_1} \cdots \widehat{\theta_{i_l}} \cdots \theta_{i_k} \\ &= \left[\frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial \theta_i} + \frac{\partial f}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial \theta_i} \right] (V) \end{aligned}$$

从而证毕。 □

注意到 *BV* 算子的表达式

$$\Delta_\Omega = \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial \theta_i} + \frac{\partial f}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial \theta_i}$$

长得像二阶微分算子, 甚至很像拉普拉斯算子—— Δ_Ω 因此也被称为 **奇拉普拉斯算子** (odd Laplacian)。

性质 4.1.11. 设 X 为定向流形, $\Omega = e^{f(x)} dx^1 \wedge \cdots \wedge dx^n$ 为 X 的一个体积形式, Δ_Ω 为关于 Ω 的 *BV* 算子。定义

$$\{, \} : PV^\bullet(X) \times PV^\bullet(X) \rightarrow PV^\bullet(X)$$

$$\{\alpha, \beta\} := \Delta_{\Omega}(\alpha \wedge \beta) - (\Delta_{\Omega}\alpha) \wedge \beta - (-1)^{|\alpha|} \alpha \wedge \Delta_{\Omega}\beta$$

即, “ Δ 成为超导子的代价”。那么 $\{, \}$ 不依赖于体积形式 Ω 的选取。

证明. 直接验证即可。对任意 $\alpha \in \text{PV}^p(X)$ 以及 $\beta \in \text{PV}^q(X)$, 成立

$$\begin{aligned} \Delta_{\Omega}(\alpha \wedge \beta) &= \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial \theta_i} (\alpha \wedge \beta) + \frac{\partial f}{\partial x^j} \frac{\partial}{\partial \theta_j} (\alpha \wedge \beta) \\ &= \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \theta_i} \wedge \beta + (-1)^p \alpha \wedge \frac{\partial \beta}{\partial \theta_i} \right) + \frac{\partial f}{\partial x^i} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \theta_i} \wedge \beta + (-1)^p \alpha \wedge \frac{\partial \beta}{\partial \theta_i} \right) \\ &= \frac{\partial^2 \alpha}{\partial x^i \partial \theta_i} \wedge \beta + \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_i} \wedge \frac{\partial \beta}{\partial x^i} + (-1)^p \frac{\partial \alpha}{\partial x^i} \wedge \frac{\partial \beta}{\partial \theta_i} \\ &\quad + (-1)^p \alpha \wedge \frac{\partial^2 \beta}{\partial x^i \partial \theta_i} + \frac{\partial f}{\partial x^i} \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_i} \wedge \beta + (-1)^p \frac{\partial f}{\partial x^i} \alpha \wedge \frac{\partial \beta}{\partial \theta_i} \\ &= (\Delta_{\Omega}\alpha) \wedge \beta + (-1)^p \alpha \wedge (\Delta_{\Omega}\beta) \\ &\quad + \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_i} \wedge \frac{\partial \beta}{\partial x^i} + (-1)^p \frac{\partial \alpha}{\partial x^i} \wedge \frac{\partial \beta}{\partial \theta_i} \end{aligned}$$

从而得到

$$\{\alpha, \beta\} = \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_i} \wedge \frac{\partial \beta}{\partial x^i} + (-1)^p \frac{\partial \alpha}{\partial x^i} \wedge \frac{\partial \beta}{\partial \theta_i}$$

从而与 Ω 的选取无关。 \square

我们之前也见过类似的运算: Schouten-Nijenhuis 括号 (见定义2.4.2); 而这里的 $\{, \}$ 是 “另一个版本的 Schouten-Nijenhuis 括号”:

引理 4.1.12. 定义 4.1.11 中的括号

$$\{, \} : \text{PV}^p(X) \times \text{PV}^q(X) \rightarrow \text{PV}^{p+q-1}(X)$$

满足性质: 对任意 $\alpha \in \text{PV}^p(X), \beta \in \text{PV}^q(X), \gamma \in \text{PV}^r(X)$, 成立:

(1) 超反交换性

$$\{\alpha, \beta\} = (-1)^{pq} \{\beta, \alpha\}$$

(2) 超莱布尼茨法则

$$\{\alpha, \beta \wedge \gamma\} = \{\alpha, \beta\} \wedge \gamma + (-1)^{(p-1)q} \beta \wedge \{\alpha, \gamma\}$$

(3) 若 $p = q = 1$, 则 $\{, \}$ 退化为切向量场李括号:

$$\{\alpha, \beta\} = [\alpha, \beta]$$

注意超反交换性 (1) 与性质 2.4.3 的 (2) 在正负号上有所出入。

证明. 使用表达式

$$\{\alpha, \beta\} = \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_i} \wedge \frac{\partial \beta}{\partial x^i} + (-1)^p \frac{\partial \alpha}{\partial x^i} \wedge \frac{\partial \beta}{\partial \theta_i} \quad (*)$$

直接验证即可, 并不困难。对于 $\alpha \in \text{PV}^p(X)$, $\beta \in \text{PV}^q(X)$ 以及 $\gamma \in \text{PV}^r(X)$, 有

$$\begin{aligned} \{\alpha, \beta\} &= \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_i} \wedge \frac{\partial \beta}{\partial x^i} + (-1)^p \frac{\partial \alpha}{\partial x^i} \wedge \frac{\partial \beta}{\partial \theta_i} \\ &= (-1)^{(p-1)q} \frac{\partial \beta}{\partial x^i} \wedge \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_i} + (-1)^{p+p(q-1)} \frac{\partial \beta}{\partial \theta_i} \wedge \frac{\partial \alpha}{\partial x^i} \\ &= (-1)^{pq} \left(\frac{\partial \beta}{\partial \theta_i} \wedge \frac{\partial \alpha}{\partial x^i} + (-1)^q \frac{\partial \beta}{\partial x^i} \wedge \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_i} \right) \\ &= (-1)^{pq} \{\beta, \alpha\} \end{aligned}$$

于是超反交换性成立; 再看超莱布尼茨法则,

$$\begin{aligned} \{\alpha, \beta \wedge \gamma\} &= \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_i} \wedge \frac{\partial}{\partial x^i} (\beta \wedge \gamma) + (-1)^p \frac{\partial \alpha}{\partial x^i} \wedge \frac{\partial}{\partial \theta_i} (\beta \wedge \gamma) \\ &= \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_i} \wedge \left(\frac{\partial \beta}{\partial x^i} \wedge \gamma + \beta \wedge \frac{\partial \gamma}{\partial x^i} \right) + (-1)^p \frac{\partial \alpha}{\partial x^i} \wedge \left(\frac{\partial \beta}{\partial \theta_i} \wedge \gamma + (-1)^q \beta \wedge \frac{\partial \gamma}{\partial \theta_i} \right) \\ &= \{\alpha, \beta\} \wedge \gamma + (-1)^{q(p-1)} \beta \wedge \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_i} \wedge \frac{\partial \gamma}{\partial x^i} + (-1)^{pq+p+q} \beta \wedge \frac{\partial \alpha}{\partial x^i} \wedge \frac{\partial \gamma}{\partial \theta_i} \\ &= \{\alpha, \beta\} \wedge \gamma + (-1)^{(p-1)q} \beta \wedge \{\alpha, \gamma\} \end{aligned}$$

而 (3) 是更加容易验证的, 从略。 □

可以体会到 Grassmann 变量 θ_i 以及超导子 $\frac{\partial}{\partial \theta_i}$ 在张量计算上的优越性: 将本该必然面对的数学归纳法、组合恒等式转化为直接的暴力计算。

注记 4.1.13. 回顾之前定义的 *Schouten-Nijenhuis* 括号 (见性质 2.4.3)。而这里的 “ $\{, \}$ ” 与之相差一些奇怪的正负号。我们只需适当调整之:

$$\{\alpha, \beta\} := -(-1)^{|\alpha|} \left(\triangle_{\Omega}(\alpha \wedge \beta) - (\triangle_{\Omega} \alpha) \wedge \beta - (-1)^{|\alpha|} \alpha \wedge \triangle_{\Omega} \beta \right)$$

则容易验证如此的括号满足性质 2.4.3。

4.2 从一维 Gauss 积分到费曼图

首先我们考察一个 BV 算子的例子:

重要例子 4.2.1. 考虑一维流形 $X = \mathbb{R}$, 体积形式

$$\Omega := \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx$$

则 BV 算子

$$\Delta_\Omega = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \theta} - x \frac{\partial}{\partial \theta}$$

特别地, 我们得到

$$\int_{\mathbb{R}} x^k \Omega = \begin{cases} 0 & x = 2k+1 \\ (2k-1)!! & x = 2k \end{cases}$$

证明. 注意

$$\Omega = e^{-\frac{1}{2}(x^2 - \log 2\pi)} dx$$

从而由性质 4.1.10, 直接写出

$$\Delta_\Omega = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \theta} - x \frac{\partial}{\partial \theta}$$

注意到积分的 (上) 同调解释

$$\begin{aligned} \int_X : C^\infty &\rightarrow H^0(\mathrm{PV}^\bullet(X), \Delta_\Omega) \cong \mathbb{R} \\ g &\mapsto [g] \end{aligned}$$

而注意到对任意 $x^k \theta \in \mathrm{PV}^1(X)$, 在 $H^0(\mathrm{PV}^\bullet(X), \Delta_\Omega)$ 当中成立

$$0 = [\Delta_\Omega x^k \theta] = \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \theta} - x \frac{\partial}{\partial \theta} \right) [x^k \theta] = k[x^{k-1}] - x^{k+1}$$

因此对任意 $k \geq 0$, 成立

$$[x^{k+2}] = (k+1)[x^k]$$

递推得

$$[x^n] = \begin{cases} (2k-1)!![1] & n = 2k \\ (2k)!![x] & n = 2k+1 \end{cases}$$

最后注意到

$$\int_{\mathbb{R}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx = 1 \quad \int_{\mathbb{R}} \frac{x}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx = 0$$

从而完。 □

引理 4.2.2. 条件接上，仍考虑体积形式

$$\Omega := \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx$$

定义算子 $\mathcal{U} : \mathbb{R}[x, \theta] \rightarrow \mathbb{R}[x, \theta]$ 为

$$\mathcal{U} := e^{\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \theta}}$$

则 BV 算子 \triangle_Ω 满足

$$\triangle_\Omega = \mathcal{U}^{-1}(-x \frac{\partial}{\partial \theta}) \mathcal{U}$$

证明. 注意到众所周知的公式

$$e^A B e^{-A} = e^{\text{ad}_A} B$$

特别地，在这里

$$A = -\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x}, \quad B = -x \frac{\partial}{\partial \theta}$$

注意到

$$[A, B] = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x}, x \frac{\partial}{\partial \theta} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \theta}$$

进而

$$[A, [A, B]] = -\frac{1}{2} \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \theta} \right] = 0$$

于是

$$\begin{aligned} \mathcal{U}^{-1}(-x \frac{\partial}{\partial \theta}) \mathcal{U} &= x^A B e^{-A} = e^{\text{ad}_A} B \\ &= B + [A, B] = -x \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \theta} = \triangle_\Omega \end{aligned}$$

从而得证。 □

此引理表明，有如下的交换图表：

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{R}[x, \theta] & \xrightarrow{\triangle_\Omega} & \mathbb{R}[x] \\ \downarrow \mathcal{U} & & \downarrow \mathcal{U} \\ \mathbb{R}[x, \theta] & \xrightarrow{-x \frac{\partial}{\partial \theta}} & \mathbb{R}[x] \end{array}$$

以及 \mathcal{U} 诱导上同调群的同构

$$\mathcal{U} : H^0(\mathbb{R}[x, \theta], \triangle_\Omega) \xrightarrow{\sim} H^0(\mathbb{R}[x, \theta], -x \frac{\partial}{\partial \theta})$$

性质 4.2.3. 条件承上，则对于任意的多项式函数 $g \in \mathbb{R}[x]$ ，成立

$$\int_{\mathbb{R}} g \Omega = e^{-\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x}} \Big|_{x=0} g$$

证明. 只需要考虑 $[\mathcal{U}(g)] \in H^0(\mathbb{R}[x, \theta], -x \frac{\partial}{\partial \theta})$ 。注意到对任意 $k \geq 0$,

$$-x \frac{\partial}{\partial \theta} (x^k \theta) = -x^{k+1}$$

也就是说在 $H^0(\mathbb{R}[x, \theta], -x \frac{\partial}{\partial \theta})$ 当中, $[x^k] = 0$ 对任意 $k \geq 1$ 成立, 从而

$$[\mathcal{U}(g)] = \mathcal{U}(g)(0) = e^{-\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x}} \Big|_{x=0} g$$

从而易得。 □

这个性质将求积分转化为求导, 大大简化运算。(与复变函数的留数定理异曲同工?)

更一般地, 容易证明对任意 $g \in \mathbb{R}[x]$

$$\int_{\mathbb{R}} g(x+a) \Omega = e^{\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x}} \Big|_{x=a} g(x)$$

重要例子 4.2.4. 现在我们考虑积分

$$\int_{\mathbb{R}} e^{\left(-\frac{1}{2}x^2 + \frac{\lambda}{3!}(x+a)^3\right)/\hbar} \frac{dx}{\sqrt{2\pi\hbar}}$$

其中 $\lambda, a \in \mathbb{R}$, 在这里体积形式 $\Omega = e^{-\frac{1}{2}x^2/\hbar} \frac{dx}{\sqrt{2\pi\hbar}}$.

此式中的 “ $-\frac{1}{2}x^2$ ” 在物理上可以认为是 “自由能”, 三次项 $\frac{\lambda}{3!}(x+a)^3$ 则为 “相互作用能”。相互作用能的存在, 使得此积分发散。

处理该积分有两种常见方式: 其一是将它视为复平面上的积分, 并且重新规定积分路径 (这会出现 Airy 函数); 或者考察它的 ($\hbar \rightarrow 0$ 的) 渐近展开

$$\sum_{n \geq 0} \frac{1}{n!} \int_{\mathbb{R}} \left(\frac{\lambda(x+a)^3}{3!\hbar} \right)^n e^{-\frac{1}{2}x^2/\hbar} \frac{dx}{\sqrt{2\pi\hbar}}$$

在此我们选择后者, 将 $e^{-\frac{1}{2}x^2/\hbar}$ 展开, 被积函数展开后的每一项

$$\frac{1}{n!} \int_{\mathbb{R}} \left(\frac{\lambda(x+a)^3}{3!\hbar} \right)^n e^{-\frac{1}{2}x^2/\hbar} \frac{dx}{\sqrt{2\pi\hbar}}$$

都可以使用同调的方法计算（与之前的例子完全类似）：直接套用性质4.1.10，此时的 BV 算子为 $\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \theta} - \frac{x}{\hbar} \frac{\partial}{\partial \theta}$ ，其实不妨相差常数倍，令

$$\Delta_{\Omega} := \hbar \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \theta} - x \frac{\partial}{\partial \theta}$$

并且令

$$\mathcal{U}_{\hbar} := e^{\frac{\hbar}{2} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x}}$$

则与之前完全类似，有

$$\Delta_{\Omega} = \mathcal{U}_{\hbar}^{-1} \circ \left(-x \frac{\partial}{\partial \theta} \right) \circ \mathcal{U}_{\hbar}$$

从而易知

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}} e^{\left(-\frac{1}{2}x^2 + \frac{\lambda}{3!}(x+a)^3\right)/\hbar} \frac{dx}{\sqrt{2\pi\hbar}} &\sim \sum_{m \geq 0} \frac{1}{m!} \int_{\mathbb{R}} \left(\frac{\lambda(x+a)^3}{3!\hbar} \right)^m e^{-\frac{1}{2}x^2/\hbar} \frac{dx}{\sqrt{2\pi\hbar}} \\ &= \sum_{m \geq 0} \frac{1}{m!} e^{\frac{1}{2}\hbar \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x}} \left(\frac{\lambda x^3}{3!\hbar} \right)^m \Big|_{x=a} \\ &= \sum_{k, m \geq 0} \frac{1}{k!} \frac{1}{m!} \left(\frac{1}{2} \hbar \partial_a^2 \right)^k \left(\frac{\lambda a^3}{3!\hbar} \right)^m \end{aligned}$$

上式最右端具有组合意义，我们接下来详细说明。记 $\mathcal{P} := \frac{1}{2} \hbar \partial_a^2$ 称之为**传播子**（propagator），再记 $\mathcal{I}(a) := \frac{\lambda a^3}{3!}$ 为“相互作用能”，则上式为

$$\int_{\mathbb{R}} e^{\left(-\frac{1}{2}x^2 + \frac{\lambda}{3!}(x+a)^3\right)/\hbar} \frac{dx}{\sqrt{2\pi\hbar}} \sim \sum_{k, m \geq 0} \frac{1}{k!} \frac{1}{m!} \mathcal{P}^k \left(\frac{\mathcal{I}(a)}{\hbar} \right)^m$$

我们先来观察 $k = 1$ 的情形，看看 $\mathcal{P}\mathcal{I}^m(a)$ 是什么东西。记 $\mathcal{P}_s = \mathcal{P}_t := \sqrt{\hbar/2} \partial_a$ ，则有

$$\mathcal{P} = \mathcal{P}_t \mathcal{P}_s$$

再令 $\mathcal{I}_1 = \mathcal{I}_2 = \cdots = \mathcal{I}_m := \mathcal{I}$ ，则

$$\begin{aligned} \mathcal{P}\mathcal{I}^m(a) &= \mathcal{P}_t \mathcal{P}_s (\mathcal{I}_1(a) \mathcal{I}_2(a) \cdots \mathcal{I}_m(a)) \\ &= \mathcal{P}_t \left(\sum_{u=1}^m \mathcal{I}_1(a) \cdots \mathcal{P}_s \mathcal{I}_u(a) \cdots \mathcal{I}_m(a) \right) \\ &= \left(\sum_{1 \leq u < v \leq m} \mathcal{I}_1(a) \cdots \mathcal{P}_s \mathcal{I}_u(a) \cdots \mathcal{P}_t \mathcal{I}_v(a) \cdots \mathcal{I}_m(a) \right. \\ &\quad + \sum_{1 \leq u \leq m} \mathcal{I}_1(a) \cdots \mathcal{P}_t \mathcal{P}_s \mathcal{I}_u(a) \cdots \mathcal{I}_m(a) \\ &\quad \left. + \sum_{1 \leq v < u \leq m} \mathcal{I}_1(a) \cdots \mathcal{P}_t \mathcal{I}_v(a) \cdots \mathcal{P}_s \mathcal{I}_u(a) \cdots \mathcal{I}_m(a) \right) \end{aligned}$$

我们将 $\mathcal{I}_1, \dots, \mathcal{I}_m$ 视为 m 个“顶点”，将

$$\mathcal{I}_1(a) \cdots \mathcal{P}_s \mathcal{I}_u(a) \cdots \mathcal{P}_t \mathcal{I}_v(a) \cdots \mathcal{I}_m(a)$$

视为从“顶点” u 出发，到“顶点” v 的“有向边”，则上式可以粗俗地说成“对所有的 m 个顶点、1 条边的图求和”。类似地，考虑

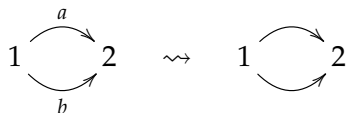
$$\mathcal{P}^k \mathcal{I}^m(a) = \underbrace{\mathcal{P} \cdots \mathcal{P}}_k \underbrace{\mathcal{I}(a) \cdots \mathcal{I}(a)}_m$$

然后类似地展开，得到“对所有 m 个顶点、 k 条边的图求和”。

我们将以上严格表述之，然后得到**费曼图展开公式**。我们之前在介绍 Kontsevich 量子化公式的时候引入了“带标记的有向图”的概念（见定义3.4.1）。在这里，我们允许出现回路（即，始点与终点相同的有向边），也允许出现“多箭头”（即从某个点出发到某个点的边可能不止一条）。但是我们要求顶点集与边集都是有限集。

记号 4.2.5.（带标记的有向图的有向底图）对于带标记的有向图 $\Gamma = (\Gamma_0, \Gamma_1, \varepsilon)$ ，则 Γ 可以遗忘为图论当中通常的多重有向图，后者称为前者的**有向底图**，记为 $\underline{\Gamma}$ 。

遗忘的方式为“将边的名称去掉”。此操作是显然的，例如



我们更习惯将带标记的有向图 Γ 的顶点集记为 V ，边集记为 E （原来使用的记号 Γ_0, Γ_1 废止）。对于有限集 V, E ，定义集合

$$\mathcal{G}_{V,E} := \{\text{以 } V \text{ 为顶点集，以 } E \text{ 为边集的全体带标记的有向图之全体}\}$$

则容易构造一一对应 $\mathcal{G}_{V,E} \cong \{\varepsilon : E \rightarrow V \times V\}$ 。

定义 4.2.6.（置换群 $S_V \times S_E$ 在集合 $\mathcal{G}_{V,E}$ 上的作用）

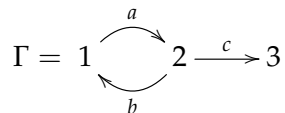
对于有限集合 V, E ，定义群 $S_V \times S_E$ 在集合 $\mathcal{G}_{V,E}$ 上的作用如下：对 $\mathcal{G}_{V,E}$ 中的任意元素 $\varepsilon : E \rightarrow V \times V$ ，以及置换 $\sigma \in S_V, \tau \in S_E$ ，令

$$(\sigma, \tau) \cdot \varepsilon = (\sigma \times \sigma) \circ \varepsilon \circ \tau^{-1}$$

其中

$$\begin{aligned} \sigma \times \sigma : V \times V &\rightarrow V \times V \\ (v_1, v_2) &\mapsto (\sigma(v_1), \sigma(v_2)) \end{aligned}$$

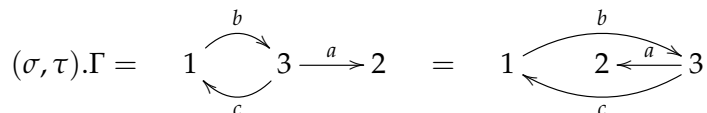
讲人话，无非是将带标记的有向图的各项点、各边的名称重新排列一下。例如， $V = \{1, 2, 3\}$, $E = \{a, b, c\}$ ，带标记的有向图



考虑置换

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix} \quad \tau = \begin{pmatrix} a & b & c \\ b & c & a \end{pmatrix}$$

则有

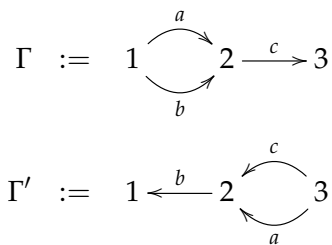


以下性质显然成立：

引理 4.2.7. 对于有限集合 V, E ，以及 $\Gamma, \Gamma' \in \mathcal{G}_{V,E}$ ，则它们的有向底图（作为多重有向图）同构，当且仅当它们位于群 $S_V \times S_E$ 在 $\mathcal{G}_{V,E}$ 作用的同一个轨道上。

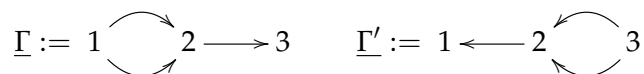
也就是说，群 $S_V \times S_E$ 作用的轨道类，无非是有向底图的同构类。

例子 4.2.8. 考虑如下两个带标记的有向图



则显然 $\Gamma \neq \Gamma'$ 。

考虑它们的有向底图



则 $\underline{\Gamma} \neq \underline{\Gamma}'$ ；但是它们作为多重有向图是同构的。

例子 4.2.9. ($|V| = 3, |E| = 2$ 的轨道类)

令 $V = \{1, 2, 3\}, E = \{a, b\}$, 我们给出 $S_V \times S_E$ 在 $\mathcal{G}_{V,E}$ 作用的轨道类如下:

轨道类	轨道长度
$\bullet \longrightarrow \bullet \longrightarrow \bullet$	12
$\bullet \longrightarrow \bullet \longleftarrow \bullet$	6
$\bullet \longleftarrow \bullet \longrightarrow \bullet$	6
$[\bullet] \longrightarrow \bullet \quad \bullet$	12
$[\bullet] \longleftarrow \bullet \quad \bullet$	12
$[\bullet] \quad \bullet \longrightarrow \bullet$	12
$\bullet \begin{array}{c} \longrightarrow \\ \longleftarrow \end{array} \bullet \quad \bullet$	6
$\bullet \begin{array}{c} \longrightarrow \\ \longleftarrow \end{array} \bullet \quad \bullet$	6
$[[\bullet]] \quad \bullet \quad \bullet$	3
$[\bullet] \quad [\bullet] \quad \bullet$	6

这里用有向底图的同构类来表示轨道类。表格中的方括号的含义是，以方括号内的顶点为端点的一条闭路（即从该点出发指向自己的箭头）；嵌套两层方括号就是两条闭路，以此类推。

不要忘记，我们引入这些图论概念，是为了描述求导运算。

记号 4.2.10. (费曼规则) (*Feynman's rule*)

对于带标记的有向图 $\Gamma = (V, E, \varepsilon)$, 定义

$$w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I}(a)) := \prod_{v \in V} \frac{\mathcal{P}_s^{S(v)} \mathcal{P}_t^{T(v)} \mathcal{I}(a)}{\hbar} = \hbar^{-|V|} \prod_{v \in V} \mathcal{P}_s^{S(v)} \mathcal{P}_t^{T(v)} \mathcal{I}(a)$$

其中 $\mathcal{P} := \frac{1}{2} \hbar \partial_a^2$ 为传播子, $\mathcal{P}_s = \mathcal{P}_t := \sqrt{\hbar/2} \partial_a$, $\mathcal{I}(a) := \frac{\lambda a^3}{3!}$ 为“相互作用能”。并且对于顶点 $v \in V$,

$$S(v) := |\{e \in E | s(e) = v\}|$$

$$T(v) := |\{e \in E | t(e) = v\}|$$

分别为顶点 v 的出度与入度。

翻译成成人话，对于带标记的有向图（实际上多重有向图足矣，边的名称没贡献） Γ ，我们按照

如下规则给该图赋值：首先对图 Γ 的每一个顶点赋值，“有几条边经过此点，就求几次导”；然后将所有顶点的数值相乘。

例子 4.2.11. 注意到这里的 $\mathcal{I}(a) = \frac{\lambda a^3}{3!}$ 为关于 a 的三次多项式，而 $\mathcal{P}_s = \mathcal{P}_t$ 为一阶微分算子，从而如果图 Γ 的某个顶点的度数（入度与出度之和）大于三，那么 $w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I}) = 0$

因此，我们只需要考虑每个顶点的度数都不超过 3 的图，这些 Γ 才能使得 $w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I})$ 取值非平凡。

引理 4.2.12.

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}} e^{\left(-\frac{1}{2}x^2 + \frac{\lambda}{3!}(x+a)^3\right)/\hbar} \frac{dx}{\sqrt{2\pi\hbar}} &\sim \sum_{k,m \geq 0} \frac{1}{k!} \frac{1}{m!} \left(\frac{1}{2}\hbar \partial_a^2\right)^k \left(\frac{\lambda a^3}{3!\hbar}\right)^m \\ &= \sum_{k,m \geq 0} \frac{1}{k!} \frac{1}{m!} \sum_{\Gamma \in \mathcal{G}_{m,k}} w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I}) \end{aligned}$$

其中 $\mathcal{G}_{m,k} := \mathcal{G}_{\{v_1, \dots, v_m\}, \{e_1, \dots, e_k\}}$ ，视为 m 个顶点、 k 条边的带标记的有向图之全体。

此式的等号显然成立，仅仅是换了一种说法。

我们将给出因子 $\frac{1}{k!} \frac{1}{m!}$ 的组合解释。注意到置换群 $S_m \times S_k$ 在 $\mathcal{G}_{m,k}$ 的作用，其轨道之全体记为 $\underline{\mathcal{G}}_{m,k}$ ，则由之前的论述， $\underline{\mathcal{G}}_{m,k}$ 可被视为 m 个顶点、 k 条边的多重有向图之全体。再注意多重有向图也可按照费曼规则赋值（甚至多重无向图也可以）。

定义 4.2.13. （带标记的有向图的自同构群）

对于带标记的有向图 $\Gamma \in \mathcal{G}_{m,k}$ ，定义其自同构群

$$\text{Aut}(\Gamma) := \{\varphi \in S_m \times S_k \mid \varphi.\Gamma = \Gamma\}$$

其实就是群 $S_m \times S_k$ 在 Γ 处的稳定子群。

对于多重有向图 $\underline{\Gamma} \in \underline{\mathcal{G}}_{m,k}$ ，则 $\underline{\Gamma}$ 可视为 $S_m \times_k$ 在 $\mathcal{G}_{m,k}$ 作用的一条轨道，该轨道的长度记作 $\ell(\underline{\Gamma})$ ；而对于带标记的有向图 Γ ，记 $\ell(\Gamma)$ 为 Γ 所在轨道的长度。则由群论的轨道计数知，

$$\begin{aligned} m^{2k} = |\mathcal{G}_{m,k}| &= \sum_{\underline{\Gamma} \in \underline{\mathcal{G}}_{m,k}} \ell(\underline{\Gamma}) \\ m!k! = |S_m \times S_k| &= \ell(\Gamma) |\text{Aut}(\Gamma)| \quad (\forall \Gamma \in \mathcal{G}_{m,k}) \end{aligned}$$

而对于多重有向图 $\underline{\Gamma}$ ，我们不去定义它的自同构群，但是注意到

$$|\text{Aut}(\underline{\Gamma})| := |\text{Aut}(\Gamma)|$$

是良定的，与代表元的选取无关，因为同一轨道的不同元素的稳定子群共轭。

综上所述，我们得到了如下费曼图公式：

定理 4.2.14. (费曼图公式) (*Feynman diagram formula*)

记号同上，则有

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}} e^{\left(-\frac{1}{2}x^2 + \frac{\lambda}{3!}(x+a)^3\right)/\hbar} \frac{dx}{\sqrt{2\pi\hbar}} &\sim \sum_{k,m \geq 0} \sum_{\Gamma \in \underline{\mathcal{G}}_{k,m}} \frac{w_{\Gamma}(\mathcal{P}, \mathcal{I})}{|\text{Aut}(\Gamma)|} \\ &= \sum_{\substack{\Gamma \text{ 取遍} \\ \text{多重有向图}}} \frac{w_{\Gamma}(\mathcal{P}, \mathcal{I})}{|\text{Aut}(\Gamma)|} \end{aligned}$$

证明. 这是显然的，只需要注意到

$$\begin{aligned} \frac{1}{k!} \frac{1}{m!} \sum_{\Gamma \in \mathcal{G}_{m,k}} w_{\Gamma}(\mathcal{P}, \mathcal{I}) &= \frac{1}{|S_k \times S_m|} \sum_{\Gamma \in \underline{\mathcal{G}}_{m,k}} \ell(\Gamma) w_{\Gamma}(\mathcal{P}, \mathcal{I}) \\ &= \sum_{\Gamma \in \underline{\mathcal{G}}_{m,k}} \frac{\ell(\Gamma) w_{\Gamma}(\mathcal{P}, \mathcal{I})}{\ell(\Gamma) |\text{Aut}(\Gamma)|} = \sum_{\Gamma \in \underline{\mathcal{G}}_{m,k}} \frac{w_{\Gamma}(\mathcal{P}, \mathcal{I})}{|\text{Aut}(\Gamma)|} \end{aligned}$$

□

注意到我们公式中的图 Γ 可以有很多“连通分支”，若进一步将连通分支“分解”之，费曼图公式可以写得更加紧凑。

记号 4.2.15. (1) 多重有向图 Γ 可自然地遗忘为多重(无向)图 $\hat{\Gamma}$ ，后者称为前者的**无向底图**。对于带标记的有向图，类似定义其无向底图(先遗忘为多重有向图)。

(2) 称带标记的有向图(或者多重有向图)是**连通的**，如果其无向底图连通。

(3) 对于多重有向图 Γ ，自行定义其**连通分支**。注意连通分支依然是多重有向图。

对于两个多重有向图 Γ 与 Γ' ，自行定义它们的**无交并** $\Gamma \sqcup \Gamma'$ (常简记为 $\Gamma\Gamma'$ ，这仍然是一个多重有向图)。容易知道，对任何多重有向图 Γ ， Γ 可被唯一分解为其连通分支的无交并：

$$\Gamma \cong \Gamma_1^{d_1} \Gamma_2^{d_2} \cdots \Gamma_l^{d_l}$$

其中 $\Gamma_1, \dots, \Gamma_l$ 为 Γ 的互不同构的连通分支， $d_i \geq 1$ ，

$$\Gamma_i^{d_i} := \underbrace{\Gamma_i \Gamma_i \cdots \Gamma_i}_{d_i \text{ 个}}$$

引理 4.2.16. 记号、条件承上，如果

$$\Gamma \cong \Gamma_1^{d_1} \Gamma_2^{d_2} \cdots \Gamma_l^{d_l}$$

则多重有向图 Γ 的自同构群阶数满足：

$$|\text{Aut}(\Gamma)| = \left(\prod_{i=1}^l |\text{Aut}(\Gamma_i)|^{d_i} \right) \left(\prod_{i=1}^l d_i! \right)$$

证明大意. 不妨将 Γ 视为带标记的有向图（任取一个代表元即可），且 $\Gamma \in \mathcal{G}_{m,k}$. 一方面，易证上式的“ \geq ”，构造即可。另一方面，我们要说明 $|\text{Aut}(\Gamma)|$ 中的元素“只有这些”，细节从略。[真的仅仅是限于篇幅...](#) \square

定理 4.2.17. （费曼图公式：指数形式）

记号承上，则成立

$$\int_{\mathbb{R}} e^{\left(-\frac{1}{2}x^2 + \frac{\lambda}{3!}(x+a)^3\right)/\hbar} \frac{dx}{\sqrt{2\pi\hbar}} \sim \sum_{\substack{\Gamma \text{ 取遍} \\ \text{多重有向图}}} \frac{w_{\Gamma}(\mathcal{P}, \mathcal{I})}{|\text{Aut}(\Gamma)|} = \exp \left(\sum_{\substack{\Gamma \text{ 取遍} \\ \text{连通的多重有向图}}} \frac{w_{\Gamma}(\mathcal{P}, \mathcal{I})}{|\text{Aut}(\Gamma)|} \right)$$

其中等号右边的“exp”为按照指数运算规则形式地展开。

证明. 只需验证上式中的等号。

$$\begin{aligned} \sum_{\substack{\Gamma \text{ 取遍} \\ \text{多重有向图}}} \frac{w_{\Gamma}(\mathcal{P}, \mathcal{I})}{|\text{Aut}(\Gamma)|} &= \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{\gamma=0}^{\infty} \left(\sum_{\substack{d_1, \dots, d_r \geq 1 \\ d_1 + \dots + d_r = \gamma}} \sum_{\substack{\Gamma_1, \dots, \Gamma_r \text{ 连通} \\ \text{互不同构}}} \frac{w_{\Gamma_1^{d_1} \dots \Gamma_r^{d_r}}(\mathcal{P}, \mathcal{I})}{|\text{Aut}(\Gamma_1^{d_1} \dots \Gamma_r^{d_r})|} \right) \\ &= \sum_{\gamma=0}^{\infty} \sum_{r=0}^{\infty} \left(\sum_{\substack{d_1, \dots, d_r \geq 1 \\ d_1 + \dots + d_r = \gamma}} \sum_{\substack{\Gamma_1, \dots, \Gamma_r \text{ 连通} \\ \text{互不同构}}} \frac{1}{d_1!} \cdots \frac{1}{d_r!} \prod_{j=1}^r \left(\frac{w_{\Gamma_j}(\mathcal{P}, \mathcal{I})}{|\text{Aut}(\Gamma_j)|} \right)^{d_j} \right) \\ &= \sum_{\gamma=0}^{\infty} \frac{1}{\gamma!} \left(\sum_{\substack{\Gamma \text{ 取遍} \\ \text{连通的多重有向图}}} \frac{w_{\Gamma}(\mathcal{P}, \mathcal{I})}{|\text{Aut}(\Gamma)|} \right)^{\gamma} \\ &= \exp \left(\sum_{\substack{\Gamma \text{ 取遍} \\ \text{连通的多重有向图}}} \frac{w_{\Gamma}(\mathcal{P}, \mathcal{I})}{|\text{Aut}(\Gamma)|} \right) \end{aligned}$$

\square

4.3 重整化群流算子

我们已通过 BV 上同调给出了渐近展开

$$\int_{\mathbb{R}} e^{(\frac{1}{2}x^2 + \frac{\lambda(x+a)^3}{3!})/\hbar} \frac{dx}{\sqrt{2\pi\hbar}} \sim e^{\frac{\hbar}{2}\partial_a^2} e^{\frac{\lambda(x+a)^3}{3!\hbar}}$$

并给出了组合解释——费曼图展开。若令

$$w(\mathcal{P}, \mathcal{I}) := \hbar \sum_{\substack{\Gamma \text{ 取遍} \\ \text{连通的多重有向图}}} \frac{w_{\Gamma}(\mathcal{P}, I)}{|\text{Aut}(\Gamma)|}$$

则有指数型费曼图公式

$$e^{w(\mathcal{P}, \mathcal{I})/\hbar} = e^{\mathcal{P}} e^{\mathcal{I}/\hbar}$$

其中 $\mathcal{P} = \frac{1}{2}\hbar\partial^2$ 为传播子。

上式中的“相互作用项” $\mathcal{I}(x) = \frac{\lambda x^3}{3!}$ 可以如下推广之：

记号 4.3.1. 记空间

$$\mathbb{R}[x][[\hbar]]^+ := x^3\mathbb{R}[x] \oplus \hbar\mathbb{R}[x][[\hbar]] \subseteq \mathbb{R}[x][[\hbar]]$$

对于 $\mathcal{I} \in \mathbb{R}[x][[\hbar]]$ ，称 \mathcal{I} 为相互作用能。

任取 $\mathcal{I} \in \mathbb{R}[x][[\hbar]]^+$ ，以及带标记的有向图（或者多重有向图） $\Gamma = (V, E, \varepsilon)$ ，我们可类似地按照费曼规则（详见记号4.2.10）给图 Γ 赋值：

$$w_{\Gamma}(\mathcal{P}, \mathcal{I}) := \hbar^{-|V|} \prod_{v \in V} \mathcal{P}_s^{S(v)} \mathcal{P}_t^{T(v)} \mathcal{I}(a) \in \mathbb{R}[x][[\hbar]]^+$$

其中 $\mathcal{P} = \frac{1}{2}\hbar\partial_x^2$ 为传播子。

接下来，我们要将费曼图推广。对于相互作用能 $\mathcal{I} \in \mathbb{R}[x][[\hbar]]^+$ ，令

$$\mathcal{I} = \sum_{k=3}^{\infty} \mathcal{I}'_k x^k$$

其中 $\mathcal{I}'_k \in \mathbb{R}[[\hbar]]$ 为形式幂级数。记 $\mathcal{I}_k := \mathcal{I}'_k x^k$ ，于是 \mathcal{I} 被分解为 $\mathcal{I} = \sum_{k=3}^{\infty} \mathcal{I}_k$ 。

一方面我们早已知道

$$\int_{\mathbb{R}} e^{(\frac{1}{2}x^2 + \mathcal{I}(x+a))/\hbar} \frac{dx}{\sqrt{2\pi\hbar}} \sim e^{\frac{\hbar}{2}\partial_a^2} e^{\mathcal{I}(a)/\hbar}$$

之后直接将右边展开，得到费曼图解释。但另一方面我们还可以如此展开：

$$e^{\frac{\hbar}{2}\partial_a^2} e^{\mathcal{I}(a)/\hbar} = e^{\frac{\hbar}{2}\partial_a^2} e^{\frac{1}{\hbar} \sum_{k=3}^{\infty} \mathcal{I}_k(a)}$$

$$\begin{aligned}
&= e^{\frac{\hbar}{2}\partial_a^2} \sum_{q=0}^{\infty} \frac{1}{q!} \left(\frac{1}{\hbar} \sum_{k=3}^{\infty} \mathcal{I}_k(a) \right)^q \\
&= e^{\frac{\hbar}{2}\partial_a^2} \left(\sum_{r=0}^{\infty} \sum_{\substack{3 \leq k_1 < \dots < k_r \\ d_1, \dots, d_r \geq 0}} \frac{\hbar^{-(d_1+\dots+d_r)}}{d_1! \cdots d_r!} \prod_{j=1}^r \mathcal{I}_{k_j}^{d_j}(a) \right)
\end{aligned}$$

观察上式，仍将微分算子级数 $e^{\frac{\hbar}{2}\partial_a^2}$ 理解为“添加有向边”；而括号里的一长串也有组合解释——带权的顶点集。给“带权的顶点集”顺次添加“有向边”，就得到比“带标记的有向图的顶点集 V ”更为复杂的组合结构。大致地说，以前我们给图的所有顶点都赋以相同的 $\mathcal{I}(a)$ ，但是现在给图的不同顶点赋以不同的 $\mathcal{I}_k(a)$ 。

定义 4.3.2. (顶点带权的带标记的有向图)

顶点带权的带标记的有向图是指如下资料：

$$(V, E, \varepsilon, W, \varphi)$$

并且满足：

- (1) (V, E, ε) 为带标记的有向图；
- (2) W 为集合，映射 $\varphi: V \rightarrow W$ 为满射。

我们称 W 为权集，在这里我们只考虑 $W \subseteq \{\mathcal{I}_3, \mathcal{I}_4, \dots\} \subseteq \mathbb{R}[x][[\hbar]]^+$ 的情形。

我们可以按照加权的类型对顶点带权的带标记的有向图分类。比如，如果图 Γ 有 d_1 个顶点赋以权 \mathcal{I}_{k_1} ， d_2 个顶点赋以权 \mathcal{I}_{k_2} ， \dots ， d_r 个顶点赋以权 \mathcal{I}_{k_r} ，则称该图为“ $\mathcal{I}_{k_1}^{d_1} \cdots \mathcal{I}_{k_r}^{d_r}$ 型”的。

考虑顶点集为 V ，边集为 E ，且类型为 $\mathcal{I}_{k_1}^{d_1} \cdots \mathcal{I}_{k_r}^{d_r}$ 的图之全体，姑且暂时记作 $\mathcal{G}_{V, E; \mathcal{I}_{k_1}^{d_1} \cdots \mathcal{I}_{k_r}^{d_r}}$ 。注意到总是成立

$$|V| = \sum_{i=1}^r d_i$$

考虑置换群 $S_V \times S_E$ 的子群

$$S_{V, E; \mathcal{I}_{k_1}^{d_1} \cdots \mathcal{I}_{k_r}^{d_r}} := (S_{d_1} \times \cdots \times S_{d_r}) \times S_E$$

在 $\mathcal{G}_{V, E; \mathcal{I}_{k_1}^{d_1} \cdots \mathcal{I}_{k_r}^{d_r}}$ 上的作用。其规则与不加权的情形类似，但是要注意只有所带的权相同的顶点之间才可以置换。

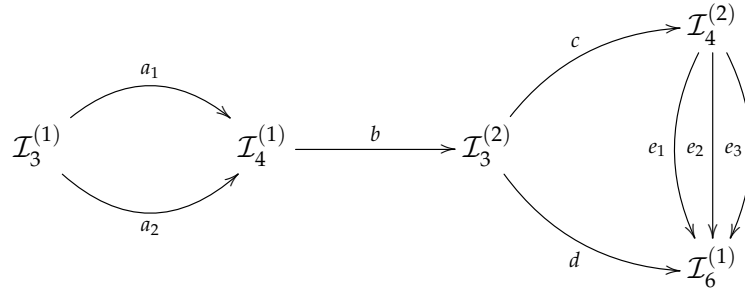
于是对于 $\Gamma = (V, E, \varepsilon, W, \varphi)$ ，类似去定义其自同构群 $\text{Aut}(\Gamma)$ ，该自同构群是 $S_{V, E; \mathcal{I}_{k_1}^{d_1} \cdots \mathcal{I}_{k_r}^{d_r}}$ 的子群（该群在该图上作用的稳定子群）。

同样可以考虑群 $S_{V, E; \mathcal{I}_{k_1}^{d_1} \cdots \mathcal{I}_{k_r}^{d_r}}$ 在 $\mathcal{G}_{V, E; \mathcal{I}_{k_1}^{d_1} \cdots \mathcal{I}_{k_r}^{d_r}}$ 上的作用的轨道；另一方面考虑遗忘

$$\left(\begin{array}{c} \text{顶点带权的} \\ \text{带标记的有向图} \end{array} \right) \xrightarrow{\text{遗忘}} \left(\begin{array}{c} \text{顶点带权的} \\ \text{多重有向图} \end{array} \right) \xrightarrow{\text{遗忘}} \left(\begin{array}{c} \text{顶点带权的} \\ \text{多重图} \end{array} \right)$$

设 Γ 为顶点带权的多重图，自行按照费曼规则去定义 $w_\Gamma(\mathcal{P})$.

例子 4.3.3. 考虑如下的顶点带权的带标记的有向图 Γ 如下：



其顶点集、边集分别为

$$V = \{I_3^{(1)}, I_3^{(2)}; I_4^{(1)}, I_4^{(2)}; I_6^{(1)}\}$$

$$E = \{a_1, a_2, b, c, d, e_1, e_2, e_3\}$$

并且顶点 $I_k^{(l)}$ 赋权 I_k .

对于传播子 $\mathcal{P} = \frac{1}{2}\hbar\partial_x^2$ ，此图按照费曼规则的赋值为

$$w_\Gamma(\mathcal{P}) = \left(\frac{1}{2}\hbar\right)^{|E|} \hbar^{-|V|} (\partial_x^2 I_3^{(1)}) (\partial_x^3 I_3^{(2)}) (\partial_x^3 I_4^{(1)}) (\partial_x^4 I_4^{(2)}) (\partial_x^4 I_6^{(1)})$$

其中 $I_k^{(l)} := I_k$. 还可以考察其自同构群，容易知道

$$|\text{Aut}(\Gamma)| = 2! \times 3! = 12$$

$\text{Aut}(\Gamma)$ 由边 a_1, a_2 之间的置换，以及 e_1, e_2, e_3 之间的置换生成，不含有顶点之间的置换。

我们不难得到顶点加权版本的费曼图展开公式：

性质 4.3.4. 设 $\mathcal{I} = \sum_{k=3}^{\infty} I_k \in \mathbb{R}[x][[\hbar]]^+$ ，以及传播子 $\mathcal{P} = \frac{1}{2}\hbar\partial_x^2$ ，记

$$\mathcal{W} = \{I_3, I_4, \dots\}$$

则成立渐近展开式

$$\int_{\mathbb{R}} e^{(-\frac{1}{2}x^2 + \mathcal{I}(x+a)) / \hbar} \frac{dx}{\sqrt{2\pi\hbar}} \sim \sum_{\substack{\Gamma \text{ 取遍} \\ \text{多重有向图}}} \frac{w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I})}{|\text{Aut}(\Gamma)|} = \exp \left(\sum_{\substack{\Gamma \text{ 取遍} \\ \text{连通的多重有向图}}} \frac{w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I})}{|\text{Aut}(\Gamma)|} \right)$$

$$= \sum_{\substack{\Gamma: \text{ 顶点带权} \\ \text{权集} \subseteq \mathcal{W}}} \frac{w_\Gamma(\mathcal{P})}{|\text{Aut}(\Gamma)|} = \exp \left(\sum_{\substack{\Gamma: \text{ 连通, 顶点带权} \\ \text{权集} \subseteq \mathcal{W}}} \frac{w_\Gamma(\mathcal{P})}{|\text{Aut}(\Gamma)|} \right)$$

证明. 与“顶点不带权”(严格地说应该是, 所有顶点带相同的权)的情形完全类似, 不再赘述。但是要注意上式最右边两项, 求和号下是对轨道等价类求和, 每条轨道出一个代表即可。□

有了以上准备工作, 我们即可引入重整化群流算子。以下是本节主要结果:

定理 4.3.5. 对于传播子 $\mathcal{P} = \frac{1}{2}\hbar\partial_x^2$, 以及 $\mathcal{I} \in \mathbb{R}[x][[\hbar]]^+$, 定义

$$w(\mathcal{P}, \mathcal{I}) := \hbar \sum_{\substack{\Gamma \text{ 取遍} \\ \text{连通的多重有向图}}} \frac{w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I})}{|\text{Aut}(\Gamma)|}$$

那么算子

$$\begin{aligned} w(\mathcal{P}, -) : \mathbb{R}[x][[\hbar]]^+ &\rightarrow \mathbb{R}[x][[\hbar]]^+ \\ \mathcal{I} &\mapsto w(\mathcal{P}, \mathcal{I}) \end{aligned}$$

是良定的, 并且具有逆算子 $w(-\mathcal{P}, -)$. 该算子称为重整化群流算子 (renormalization group flow operator)。

证明. 任取 $\mathcal{I} \in \mathbb{R}[x][[\hbar]]^+$, 则有

$$w(\mathcal{P}, \mathcal{I}) = \hbar \sum_{\substack{\Gamma \text{ 取遍} \\ \text{连通的多重有向图}}} \frac{w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I})}{|\text{Aut}(\Gamma)|} = \sum_{\substack{G \in \mathbb{Z} \\ D \geq 0}} \lambda_{G,D} \hbar^G x^D$$

其中 $\lambda_{G,D} \in \mathbb{R}$. 为证明良定性, 我们需要说明 $\lambda_{G,D}$ 满足以下三点:

- (1) 若 $G < 0$, 则 $\lambda_{G,D} = 0$;
- (2) $\lambda_{0,0} = \lambda_{0,1} = \lambda_{0,2} = 0$;
- (3) 对任意 $G \geq 0$, 使得 $\lambda_{G,D}$ 非零的 D 至多有限个。

Step1: 考虑 \mathcal{I} 的分解

$$\mathcal{I} = \sum_{k,g \geq 0} I_{k,g} \hbar^g$$

其中 $I_{k,g} \in \mathbb{R}[x]$ 并且次数为 k (或者 $I_{k,g} = 0$)。则容易验证, 如果 $I_{k,g} \neq 0$, 那么必有

$$2g - 2 + k \geq 0$$

并且等号成立当且仅当 $g = 1, k = 0$.

记集合 $\mathcal{W} := \{I_{k,g} | k, g \geq 0\}$, 则由顶点带权版本的费曼图展开 (性质4.3.4), 可知

$$w(\mathcal{P}, \mathcal{I}) = \hbar \sum_{\substack{\Gamma \text{ 取遍} \\ \text{连通的多重有向图}}} \frac{w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I})}{|\text{Aut}(\Gamma)|} = \hbar \sum_{\substack{\Gamma: \text{连通, 顶点带权} \\ \text{权集} \subseteq \mathcal{W}}} \frac{w_\Gamma(\mathcal{P})}{|\text{Aut}(\Gamma)|}$$

Step2:于是, 我们有

$$\sum_{\substack{G \in \mathbb{Z} \\ D \geq 0}} \lambda_{G,D} \hbar^G x^D = \hbar \sum_{\substack{\Gamma: \text{连通, 顶点带权} \\ \text{权集} \subseteq \mathcal{W}}} \frac{w_{\Gamma}(\mathcal{P})}{|\text{Aut}(\Gamma)|}$$

我们使用此式来比较系数, 研究 $\lambda_{G,D}$ 的性质, 从而给出良定性的证明。

任意固定一个顶点带权的带标记的有向图 (的轨道等价类) Γ , 以及 $G \in \mathbb{Z}, D \in \mathbb{N}$, 使得

$$\hbar w_{\Gamma}(\mathcal{P}) = C \hbar^G x^D \neq 0$$

其中 $C \in \mathbb{R}$ 为常数 (“吸收”了 $|\text{Aut}(\Gamma)|^{-1}$ 以及 “顶点处的系数”)。记 Γ 的顶点、边的个数分别为 V, E 。

记 $n_{k,g}$ 为图 Γ 的赋以权 $\mathcal{I}_{k,g}$ 的顶点的个数, 则有等式

$$V = \sum_{k,g \geq 0} n_{k,g} \quad (1)$$

此外, 直接用费曼规则展开 $w_{\Gamma}(\mathcal{P})$ 来计数 \hbar 与 x 的次数, 有

$$G - 1 = E - V + \sum_{k,g \geq 0} g n_{k,g} \quad (2)$$

$$D = \sum_{k,g \geq 0} k n_{k,g} - 2E \quad (3)$$

结合上述 (1)(2)(3) 式, 我们有

$$\begin{aligned} 2G + D - 2 &= 2E - 2V + 2 \sum_{k,g \geq 0} g n_{k,g} + D \\ &= \sum_{k,g \geq 0} k n_{k,g} - 2 \sum_{k,g \geq 0} n_{k,g} + 2 \sum_{k,g \geq 0} g n_{k,g} \\ &= \sum_{k,g \geq 0} (2g - 2 + k) n_{k,g} \\ &\geq 0 \end{aligned}$$

等号成立当且仅当 $G = 1, D = 0$, 并且只有 $n_{0,1} \neq 0$. 此时图 Γ 只有一个点, 没有边, 并且该点的权形如 $\mathcal{I}_{0,1} \hbar$, 其中 $\mathcal{I}_{0,1} \in \mathbb{R}^{\times}$.

step3:我们再利用一下 Γ 的连通性。由连通性可知顶点个数 V 与边的个数 E 满足

$$E \geq V - 1$$

再结合 (2) 式, 可知 $G \geq 0$. 也就是说, 不会出现 \hbar 的负幂次; 并且如果 $G = 0$, 则由 Step2 的结论 $2G + D - 2 \geq 0$ (以及取等条件), 知 $D \geq 3$.

综上所述, 对任意的连通的顶点带权的带标记的有向图 (的轨道等价类) Γ ,

$$w_{\Gamma}(\mathcal{P}) \in \mathbb{R}[x][[\hbar]]^+$$

现在, 令 Γ 取遍所有的连通的顶点带权的带标记的有向图 (的轨道等价类), 对于给定的 $G, D \geq 0$, 考虑

$$\sum_{\substack{\Gamma \text{ 连通, 顶点带权} \\ \text{权集} \subseteq \mathcal{W}}} \frac{w_{\Gamma}(\mathcal{P})}{|\text{Aut}(\Gamma)|}$$

对系数 $\lambda_{G,D}$ 的贡献。

对于**连通**图 Γ , 断言: 如果 $w_{\Gamma}(\mathcal{P}) \neq 0$, 并且 Γ 的顶点个数 ≥ 2 , 那么 $n_{0,1} = 0$, 也就是说 Γ 的任何顶点都不可能赋以权 $\mathcal{I}_{0,1}$ 。原因很简单, 这是因为如果某个顶点赋以权 $\mathcal{I}_{0,1}$, 注意 Γ 的连通性, 该顶点必有边连接。然而 $\mathcal{I}_{0,1}$ 关于 x 的次数为 0, 于是 $\partial_x \mathcal{I}_{0,1} = 0$ 。因此按照费曼规则计算之, $w_{\Gamma}(\mathcal{P}) = 0$, 矛盾。

因此, 若连通图 Γ (不妨顶点个数 ≥ 2 , 顶点个数为 1 的稍后单独讨论) 使得

$$\hbar w_{\Gamma}(\mathcal{P}) = C \hbar^G x^D \neq 0$$

则有

$$2G + D - 2 = \sum_{\substack{k,g \geq 0 \\ n_{k,g} \neq 0}} (2g + 2 - k) n_{k,g} \geq \sum_{\substack{k,g \geq 0 \\ n_{k,g} \neq 0}} n_{k,g} = V$$

(注意 $2g - 2 + k \geq 0$ 但是等号取不到) 从而顶点个数 V 有上界

$$V \leq 2G + D - 2$$

因此对系数 $\lambda_{G,D}$ 有贡献的连通图 Γ 至多有限多个 (单独讨论一下顶点个数 $V = 1$ 的情形, 直接费曼规则计算之, 从略) 因此 $\lambda_{G,D} \in \mathbb{R}$. 良定性证毕。

Step4:至此, 我们已有算子

$$\begin{aligned} w(\mathcal{P}, -) : \mathbb{R}[x][[h]]^+ &\rightarrow \mathbb{R}[x][[h]]^+ \\ \mathcal{I} &\mapsto w(\mathcal{P}, \mathcal{I}) \end{aligned}$$

断言 $w(\mathcal{P}, -)$ 可逆, 且逆算子为 $w(-\mathcal{P}, -)$. 这个几乎显然, 只需注意费曼图展开公式

$$e^{w(\mathcal{P}, \mathcal{I})/\hbar} = e^{\mathcal{P}} e^{\mathcal{I}/\hbar}$$

从而有

$$e^{w(-\mathcal{P}, w(\mathcal{P}, \mathcal{I}))/\hbar} = e^{-\mathcal{P}} e^{w(\mathcal{P}, \mathcal{I})/\hbar} = e^{-\mathcal{P}} e^{\mathcal{P}} e^{\mathcal{I}/\hbar} = e^{\mathcal{I}/\hbar}$$

因此 $w(-\mathcal{P}, w(\mathcal{P}, \mathcal{I})) = \mathcal{I}$. 另一边同理, 从而证毕。 \square

4.4 n 维 Gauss 积分

回顾之前若干节。我们已经熟悉了一维情形, 即通过 BV 上同调给出积分

$$\int_{\mathbb{R}} e^{(-\frac{1}{2}x^2 + \mathcal{I}(x+a))/\hbar} \frac{dx}{\sqrt{2\pi\hbar}} \quad (*)$$

的渐近展开，其中相互作用能

$$\mathcal{I}(x) = \sum_{k,g} \hbar^g \in \mathbb{R}[x][[\hbar]]^+$$

我们引入了一种有向图，每个顶点都赋以 $\mathcal{I}(x)$ ，每条有向边都赋以微分算子 $\frac{1}{2}\hbar\partial_x \otimes \partial_x$ ；依照费曼规则给这样的图赋值，进而给出了积分 (*) 的渐近展开——费曼图公式。此外，我们通过更精细的组合技巧，即图的顶点可以赋予不同的 $\mathcal{I}_{k,g}$ ，引入了重整化群流算子。

本节探讨更加一般的有限维情形，类似于“多元正态分布”。

重要例子 4.4.1. 我们考察积分

$$\int_{\mathbb{R}^n} e^{(-\frac{1}{2}Q(x) + \mathcal{I}(x+a))/\hbar} \bigwedge_{i=1}^n \frac{dx^i}{\sqrt{2\pi\hbar}}$$

其中 $x = (x^1, \dots, x^n) \in \mathbb{R}^n$ ， $Q(x) := Q_{ij}x^i x^j$ 为二次函数，二次型矩阵 (Q_{ij}) 对称、严格正定、常值；相互作用能 $\mathcal{I}(x) \in \mathbb{R}[x^1, \dots, x^n][[\hbar]]^+$ ，其中

$$\mathbb{R}[x^1, \dots, x^n][[\hbar]]^+ := \left(\bigoplus_{1 \leq i \leq j \leq k \leq n} x^i x^j x^k \mathbb{R}[x^1, \dots, x^n][[\hbar]] \right) \oplus \hbar \mathbb{R}[x^1, \dots, x^n][[\hbar]]$$

与之前完全类似，我们先考察 BV 上同调。在这里，体积形式为

$$\Omega = e^{-\frac{1}{2\hbar}Q(x)} \bigwedge_{i=1}^n \frac{dx^i}{\sqrt{2\pi\hbar}}$$

需要注意在这里

$$\int_{\mathbb{R}^n} \Omega = \frac{1}{\sqrt{\det Q}}$$

考察 BV 算子，由性质 4.1.10 直接写出

$$\begin{aligned} \Delta'_\Omega &= \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial \theta_i} - \frac{1}{2\hbar} \frac{\partial}{\partial x^i} (Q_{kl} x^k x^l) \frac{\partial}{\partial \theta_i} \\ &= \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial \theta_i} - \frac{1}{\hbar} Q_{ik} x^k \frac{\partial}{\partial \theta_i} \end{aligned}$$

不妨相差常数倍（不会影响同调），令 BV 算子

$$\Delta_\Omega := \hbar \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial \theta_i} - Q_{ik} x^k \frac{\partial}{\partial \theta_i}$$

引理 4.4.2. 记号承上, 令传播子

$$\mathcal{P} = \frac{1}{2}\hbar Q^{ij} \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial x^j}$$

其中 (Q^{ij}) 为 (Q_{ij}) 的逆矩阵。记 $\mathcal{U} = e^{\mathcal{P}}$, 则成立

$$\Delta_{\Omega} = \mathcal{U}^{-1} \left(-Q_{ij} x^i \frac{\partial}{\partial \theta_j} \right) \mathcal{U}$$

证明. 与一维情形完全类似。容易验证

$$[\mathcal{P}, -Q_{ij} x^i \frac{\partial}{\partial \theta_j}] = -\frac{1}{2}\hbar Q^{ij} Q_{kl} \left[\frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial x^j}, x^l \frac{\partial}{\partial \theta_k} \right] = -\hbar \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial \theta_i}$$

$$[\mathcal{P}, [\mathcal{P}, -Q_{ij} x^i \frac{\partial}{\partial \theta_j}]] = [\mathcal{P}, -\hbar \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial \theta_i}] = 0$$

从而有

$$\begin{aligned} \mathcal{U}^{-1} \left(-Q_{ij} x^i \frac{\partial}{\partial \theta_j} \right) \mathcal{U} &= \exp(\text{ad}_{-\mathcal{P}}) \left(-Q_{ij} x^i \frac{\partial}{\partial \theta_j} \right) \\ &= -Q_{ij} x^i \frac{\partial}{\partial \theta_j} - [\mathcal{P}, -Q_{ij} x^i \frac{\partial}{\partial \theta_j}] \\ &= \hbar \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial \theta_i} - Q_{ij} x^i \frac{\partial}{\partial \theta_j} = \Delta_{\Omega} \end{aligned}$$

□

注意 \mathcal{U} 显然可逆, 从而 \mathcal{U} 诱导了上链复形的同构:

$$\mathcal{U} : (\text{PV}_{\mathbb{R}^n}^{\bullet}, \Delta_{\Omega}) \xrightarrow{\sim} (\text{PV}_{\mathbb{R}^n}^{\bullet}, -Q_{ij} x^i \frac{\partial}{\partial \theta_j})$$

与一维情形类似, 容易验证在 $H^0(\text{PV}_{\mathbb{R}^n}^{\bullet}, -Q_{ij} x^i \frac{\partial}{\partial \theta_j})$ 当中, $[(x^1)^{d_1} (x^2)^{d_2} \cdots (x^n)^{d_n}] = 0$ (如果 d_1, \dots, d_n 不全为零)——这只需注意到

$$-Q_{ij} x^i \frac{\partial}{\partial \theta_j} (-Q^{kl} \theta_k) = x^l$$

从而易知成立如下的渐近展开:

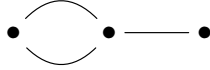
性质 4.4.3. 记号承上, 则有

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^n} e^{(-\frac{1}{2}Q(x) + \mathcal{I}(x+a))/\hbar} \bigwedge_{i=1}^n \frac{dx^i}{\sqrt{2\pi\hbar}} &\sim e^{\frac{1}{2}\hbar Q^{ij} \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial x^j} \mathcal{I}(x)/\hbar} \Big|_{x=a} \int_{\mathbb{R}^n} \Omega \\ &= \frac{1}{\sqrt{\det Q}} e^{\frac{1}{2}\hbar Q^{ij} \frac{\partial}{\partial a^i} \frac{\partial}{\partial a^j} \mathcal{I}(a)/\hbar} \end{aligned}$$

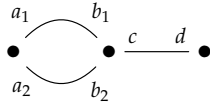
我们仿照一维情形，给出上式的费曼图解释。与一维情形不同的是，传播子 $\mathcal{P} = \frac{1}{2}\hbar Q^{ij} \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial x^j}$ 更加复杂，为此我们需要稍微推广一下费曼规则。

给定相互作用能 $\mathcal{I} \in \mathbb{R}[x^1, \dots, x^n][[\hbar]]^+$ ，以及传播子 $\mathcal{P} = \frac{1}{2}\hbar Q^{ij} \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial x^j}$ ，我们企图给多重图（带标记的有向图的遗忘）赋值。我们通过例子来说明费曼规则。

例子 4.4.4. 若多重图 Γ 如下：



则首先给每一条边的两端添加标记（文字），得到：



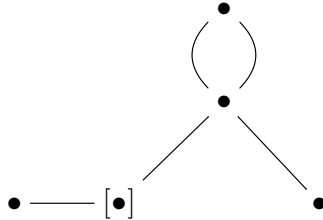
然后直接写出

$$w_{\Gamma}(\mathcal{P}, \mathcal{I}) := \left(\frac{1}{2}\hbar Q^{i_1 j_1} \right) \left(\frac{1}{2}\hbar Q^{i_2 j_2} \right) \left(\frac{1}{2}\hbar Q^{cd} \right) \left(\partial_{a_1} \partial_{a_2} \frac{\mathcal{I}}{\hbar} \right) \left(\partial_{b_1} \partial_{b_2} \partial_c \frac{\mathcal{I}}{\hbar} \right) \left(\partial_d \frac{\mathcal{I}}{\hbar} \right)$$

这里的文字 a_1, a_2, b_1, b_2, c, d 视为从 1 到 n 的求和指标，服从爱因斯坦求和约定。

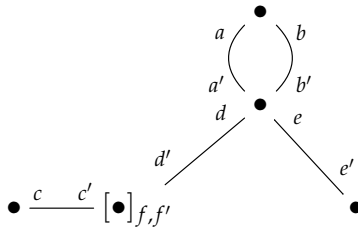
显然如此定义的 $w_{\Gamma}(\mathcal{P}, \mathcal{I})$ 与边两端的标记文字选取无关（只要保证这些文字两两不同）。对于带标记的有向图 $\Gamma = (V, E, \varepsilon)$ ，我们当然也能给它赋值 $w_{\Gamma}(\mathcal{P}, \mathcal{I})$ ，只需要将 Γ 遗忘为多重图。我们再看一个例子：

例子 4.4.5. 考虑如下多重图 Γ ：



该图的顶点数 $V = 5$ ，边数 $E = 6$ ，特别注意方括号代表一条闭路（即起始点与终点相同）。我们来考察 $w_{\Gamma}(\mathcal{P}, \mathcal{I})$

解. 一样地，首先给每条边的两端标记文字：



从而从图中直接读出

$$w_{\Gamma}(\mathcal{P}, \mathcal{I}) = \left(\frac{1}{2}\hbar\right)^E \hbar^{-V} Q^{aa'} Q^{bb'} Q^{cc'} Q^{dd'} Q^{ee'} Q^{ff'} \\ (\partial_a \partial_b \mathcal{I}) (\partial_{a'} \partial_{b'} \partial_{c'} \partial_{d'} \mathcal{I}) (\partial_{e'} \mathcal{I}) (\partial_{c'} \partial_{a'} \partial_f \partial_{f'} \mathcal{I}) (\partial_{e'} \mathcal{I})$$

□

通过以上两例，不难总结出**费曼规则**。与一维情形完全类似，也有费曼图展开公式：

定理 4.4.6.（费曼图公式： n 维情形）记号承上，则有渐近展开式

$$\int_{\mathbb{R}^n} e^{(-\frac{1}{2}Q(x) + \mathcal{I}(x+a))/\hbar} \bigwedge_{i=1}^n \frac{dx^i}{\sqrt{2\pi\hbar}} \sim \frac{1}{\sqrt{\det Q}} \left(e^{\frac{1}{2}\hbar Q^{ij} \frac{\partial}{\partial a^i} \frac{\partial}{\partial a^j} \mathcal{I}(a)/\hbar} \right) \\ = \frac{1}{\sqrt{\det Q}} \sum_{\substack{\Gamma \text{ 取遍} \\ \text{多重有向图}}} \frac{w_{\Gamma}(\mathcal{P}, \mathcal{I})}{|\text{Aut}(\Gamma)|} \\ = \frac{1}{\sqrt{\det Q}} \exp \left(\sum_{\substack{\Gamma \text{ 取遍} \\ \text{连通的多重有向图}}} \frac{w_{\Gamma}(\mathcal{P}, \mathcal{I})}{|\text{Aut}(\Gamma)|} \right)$$

证明. 与定理4.2.17的证明完全相同，从略。

□

与一维情形类似，我们也可以引入重整化群流算子：

定理 4.4.7.（重整化群流算子： n 维情形）

对于传播子 $\mathcal{P} = \frac{1}{2}\hbar Q^{ij} \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial x^j}$ ，以及相互作用能 $\mathcal{I} \in \mathbb{R}[x^1, \dots, x^n][[\hbar]]^+$ ，令

$$w(\mathcal{P}, \mathcal{I}) := \sum_{\substack{\Gamma \text{ 取遍} \\ \text{连通的多重有向图}}} \frac{w_{\Gamma}(\mathcal{P}, \mathcal{I})}{|\text{Aut}(\Gamma)|}$$

则算子

$$w(\mathcal{P}, -) : \mathbb{R}[x^1, \dots, x^n][[\hbar]]^+ \rightarrow \mathbb{R}[x^1, \dots, x^n][[\hbar]]^+$$

是良定的，并且具有逆算子 $w(-\mathcal{P}, -)$ 。

证明. 与一维情形（定理4.3.5）完全类似，引入顶点带权的带标记的有向图。从略。

□

4.5 无穷维情形初探： ϕ^4 -场论

现在，我们试图类比 n 维 Gauss 积分，讨论无穷维的量子场论，定义路径积分 $\int_{\mathcal{E}} e^{S[\phi]/\hbar} [D\phi]$. 本节谈论 \mathbb{R}^d 标量场论的一种情形：

重要例子 4.5.1. 对于 $d \geq 3$ ，考虑场空间

$$\mathcal{E} = C_c^\infty(\mathbb{R}^d)$$

即 \mathbb{R}^d 上的紧支、光滑函数之全体。定义 \mathcal{E} 上泛函 $S: \mathcal{E} \rightarrow \mathbb{R}$ 如下：

$$S[\phi] = \frac{1}{2} \int_{\mathbb{R}^d} |\nabla \phi|^2 + \frac{\lambda}{4!} \int_{\mathbb{R}^d} \phi^4$$

对于 $\phi \in \mathcal{E}$ ，我们希望定义出路径积分

$$\int_{\mathcal{E}} e^{-S[\phi]/\hbar} [D\phi]$$

首先注意到

$$\int_{\mathbb{R}^d} |\nabla \phi|^2 = \int_{\mathbb{R}^d} \phi D\phi$$

其中 $D = -\sum_{i=1}^d \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial x^i}$ 为 Laplace 算子（注意负号）。

不难将此无穷维情形与之前的 n 维情形类比如下：

n 维	无限维
\mathbb{R}^n	$\mathcal{E} = C_c^\infty(\mathbb{R}^d)$
$x_i, 1 \leq i \leq n$	$\varphi(x), x \in \mathbb{R}^d$
$\sum_{i=1}^n$	$\int_{\mathbb{R}^d} dx$
$x^i Q_{ij} x^j$	$\int_{\mathbb{R}^d} \phi D\phi$
$\mathcal{I}(x)$	$\frac{\lambda}{4!} \int_{\mathbb{R}^d} \phi^4$

有一种想法是，我们将 \mathbb{R}^n 视为

$$\mathbb{R}^n = C^\infty(\mathbb{R}^d \text{ 当中的 } n \text{ 个点})$$

之后令 “ $n \rightarrow \infty$ ”，取 \mathbb{R}^d 的一个“均匀”、稠密的点集，从而达到无限维。这在物理上叫做“格点场论”。

在有限维情形，我们有传播子 $\mathcal{P} := \frac{1}{2} \hbar Q^{ij} \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial x^j}$ ，我们希望得到它的无限维版本。注意 (Q_{ij}) 的无限维版本是 Laplace 算子 D ；于是为了得到 (Q^{ij}) 的无限维版本，自然需要考虑 Laplace 算子 D 的“逆”。幸运的是，分析学在这方面给我们足够支持。

引理 4.5.2. (*Laplace* 算子的格林函数)

对于 $d \geq 3$, 记 S_d 为 d 维单位球体的表面积, 考虑 $\mathbb{R}^d \setminus \{0\}$ 上的函数

$$G(x) := \frac{1}{(d-2)S_d} \frac{1}{|x|^{d-2}}$$

则成立

$$DG(x) = \delta(x)$$

其中 $\delta(x)$ 为 *Dirac delta*-广义函数, *Laplace* 算子 D 视为对广义函数求导。

这是偏微分方程当中众所周知的结果。若我们再令

$$G(x, y) := G(x - y)$$

则对任意 $f \in C_c^\infty(\mathbb{R}^d)$ 以及任意 $x \in \mathbb{R}^d$, 成立

$$f(x) = \int_{\mathbb{R}^d} G(x, y) (Df)(y) dy$$

容易看出, 算子

$$\begin{aligned} G : C_c^\infty(\mathbb{R}^d) &\rightarrow C_c^\infty(\mathbb{R}^d) \\ f &\mapsto \left(x \mapsto \int_{\mathbb{R}^d} G(x, y) f(y) dy \right) \end{aligned}$$

是 *Laplace* 算子 D 的“逆算子”, “矩阵元” $G(x, y)$ 类比于有限维情形的 Q^{ij} .

现在, 我们考虑 $d = 4$ 的情形, 即 $\mathcal{E} = C_c^\infty(\mathbb{R}^4)$, 作用量 \mathcal{S} 为

$$\begin{aligned} \mathcal{S}[\phi] &= \int_{\mathbb{R}^4} \frac{1}{2} \phi D\phi + \frac{\lambda}{4!} \int_{\mathbb{R}^4} \phi^4 \\ &:= Q(\phi) + \mathcal{I}(\phi) \end{aligned}$$

此时, Green 函数

$$G(x, y) = \frac{1}{2S_4} \frac{1}{|x - y|^2} = \frac{15}{64\pi^2} \frac{1}{|x - y|^2}$$

我们定义“传播子”

$$\mathcal{P}'' := \frac{1}{2} \hbar D(x, y) \partial_\phi^2$$

并且模仿有限维情形取定义路径积分:

定义 4.5.3. 对于 $\mathcal{E} = C_c^\infty(\mathbb{R}^4)$, 定义

$$\int_{\mathcal{E}} e^{-S[\phi]/\hbar} [D\phi]'' = \frac{1}{\sqrt{\det Q}} \exp \left(\sum_{\substack{\Gamma \text{ 连通} \\ \text{连通的多重有向图}}} \frac{\omega_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I})}{|\text{Aut}(\Gamma)|} \right)$$

其中 “ $\frac{1}{\sqrt{\det Q}}$ ” 为某个非零常数, $w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I})$ 的含义我们将稍后举例说明。

这里的 $w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I})$ 服从如下的费曼规则:

记号 4.5.4. 对于 $\phi \in C_c^\infty(\mathbb{R}^4)$, 以及连通的多重有向图 Γ , 记 Γ 的顶点集 $V = \{v_1, \dots, v_m\}$, 边集为 E , 顶点 v_i 的度数 (入度 + 出度) 为 d_i , 则定义

$$w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I}) = \left(\frac{1}{2}\hbar\right)^{|E|} \hbar^{-|V|} \prod_{i=1}^m \left(\frac{\lambda}{(4-d_i)!} \int_{\mathbb{R}^4} \phi^{4-d_i}(x_i) dx_i \right) \prod_{e \in E} G(x_{s(e)}, x_{t(e)})$$

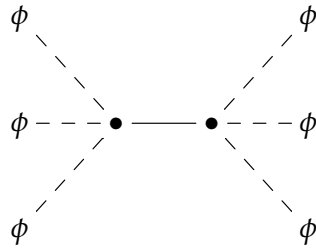
特别规定, 如果图 Γ 的某个顶点度数大于 4, 则 $w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I}) = 0$. 其中映射

$$s, t: E \rightarrow \{1, 2, \dots, m\}$$

将边 $e \in E$ 分别映为其始点、终点的下指标。

其实对于多重图 Γ 也完全可以定义 $w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I})$, 边的定向对 $w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I})$ 的结果没有贡献。不过我们需要注意, $G(x, y) \propto \frac{1}{|x-y|^2}$, 当 x, y 非常接近时 G 趋近于无穷, 正是所谓紫外发散 (ultra-violet divergence) 现象。于是对于积分 $w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I})$, 我们需要考虑收敛性。

例子 4.5.5. 考虑多重图 Γ 为如下:

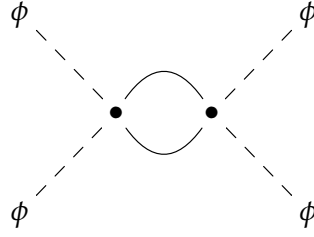


该图有两个顶点、一条边 (虚线无视之), 则在相差常数倍意义下,

$$\begin{aligned} w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I}) &\propto \lambda^2 \int_{\mathbb{R}^4} dx \int_{\mathbb{R}^4} dy \phi^3(x) \phi^3(y) G(x, y) \\ &\propto \lambda^2 \int_{\mathbb{R}^4} dx \int_{\mathbb{R}^4} \phi^3(x) \phi^3(x+y) \frac{1}{|y|^2} dy \end{aligned}$$

容易看出积分 $w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I})$ 此时是收敛的。

例子 4.5.6. 再考察另一个多重给有向图 Γ 如下:



该图 Γ 有两个顶点、两条边。此时，在相差常数倍意义下，

$$\begin{aligned} w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I}) &\propto \lambda^2 \int_{\mathbb{R}^4 \times \mathbb{R}^4} \phi^2(x) \phi^2(y) G^2(x, y) dx dy \\ &\propto \lambda^2 \int_{\mathbb{R}^4 \times \mathbb{R}^4} \phi^2(x) \phi^2(y) \frac{1}{|x - y|^4} dx dy \\ &= \lambda^2 \int_{\mathbb{R}^4} \phi^2(x) dx \int_{\mathbb{R}^4} \phi^2(x + y) \frac{1}{|y|^4} dy \end{aligned}$$

容易看出此积分发散。

此外，如果图 Γ 当中有闭路，即某条边的始点与终点相同，则 $w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I})$ 也不是良好定义，这是更坏的情形。产生如此紫外发散的原因是边太多（“能量太高”）。

对于一种特殊的情形——树状图， w_Γ 一定是良好定义的：

性质 4.5.7. 记号承上，如果连通图 Γ 是树形图（即，顶点数 = 边数 + 1），则积分 $w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I})$ 收敛。

证明. 对 Γ 的顶点个数 $|V|$ 归纳。 $|V| = 2$ 的情形已经得证，见例子4.5.5.

现在，给定 $m \geq 2$ ，若对于任何顶点个数为 m 的树状图 Γ' ， $w_{\Gamma'}(\mathcal{P}, \mathcal{I})$ 都收敛，则任意给定树状图 Γ 使得顶点个数为 $m + 1$. 由图论知识，必存在 Γ 的度为 1 的顶点（树叶），且从 Γ 当中去掉该顶点及其连接的边之后所得的图仍为树形图。

记顶点 v_0 为树 Γ 的一片树叶， Γ 的其余 m 个顶点记为 v_1, v_2, \dots, v_m ，不妨 v_1 与 v_0 相邻，记顶点 v_1 的度数为 $d_1 \geq 1$. 记 Γ 去掉 v_0 及其连接的边所得到的图为 Γ' ，则 Γ' 是以 v_1, \dots, v_n 为顶点的树。由归纳假设，积分

$$w_{\Gamma'}(\mathcal{P}, \mathcal{I}) \propto \lambda^m \int_{(\mathbb{R}^4)^m} \phi^{d_1}(x_1) F(x_1, \dots, x_m) dx_1 \cdots dx_m$$

收敛（读者自行按费曼规则补全 $F(x_1, \dots, x_m)$ 的定义）。从而

$$w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I}) \propto \lambda^{m+1} \int_{\mathbb{R}^4} \phi^3(x_0) dx_0 \int_{(\mathbb{R}^4)^m} G(x_0, x_1) \phi^{d_1-1}(x_1) F(x_1, \dots, x_n) dx_1 \cdots dx_m$$

$$\propto \lambda^{m+1} \int_{(\mathbb{R}^4)^m} \phi^{d_1-1}(x_1) F(x_1, \dots, x_n) dx_1 \cdots dx_m \int_{\mathbb{R}^4} \phi^3(x_1 + x_0) \frac{1}{|x_0|^2} dx_0$$

从而易知收敛。(要利用 ϕ 的紧支性)。

□

一般来说, $w_\Gamma(\mathcal{P}, \mathcal{I})$ 是发散的。在量子场论中采用**重整化** (renormalization) 的手段处理这种紫外发散。下面介绍重整化的想法。首先从 Laplace 算子 D 的“逆算子”说起。注意到

$$D^{-1} = \int_0^\infty e^{-tD} dt$$

这里的 e^{-tD} 为**热算子** (heat operator), 我们有偏微分方程当中众所周知的如下结果:

引理 4.5.8. (热核与热方程)

记 D 为 \mathbb{R}^d 中的 Laplace 算子。对于 $t > 0$, 定义 $\mathbb{R}^d \times \mathbb{R}_+$ 上的函数

$$h_t(x) = \frac{1}{(4\pi t)^{d/2}} e^{-\frac{|x|^2}{4t}}$$

称该函数为 \mathbb{R}^d 上的**热核** (heat kernel), 则以下性质成立:

(1) 热算子 e^{-tD} 可由热核表示: 对任意 $\phi \in C_c^\infty(\mathbb{R}^d)$,

$$(e^{-tD}\phi)(x) = \int_{\mathbb{R}^d} h_t(x-y)\phi(y)dy$$

(2) 热核满足如下热方程:

$$(\partial_t + D)h_t(x) = 0$$

(3) 恒等逼近:

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} h_t(x) = \delta(x)$$

(4) 半群性质: 对任意 $t_1, t_2 > 0$, 以及 $x, y \in \mathbb{R}^d$,

$$\int_{\mathbb{R}^d} h_{t_1}(x-z)h_{t_2}(z-y)dz = h_{t_1+t_2}(x-y)$$

此外容易知道 Green 函数 G 满足

$$G(x, y) = \int_0^\infty h_t(x-y)dt$$

记号 4.5.9. (正则化传播子)

引入**截断参数** (cut-off parameters)

$$0 < \varepsilon < L < +\infty$$

定义 $\mathbb{R}^d \times \mathbb{R}^d$ 上的光滑函数

$$P_\varepsilon^L(x, y) := \int_\varepsilon^L h_t(x, y) dt$$

称之为正则化传播子 (*regularized propagator*)。

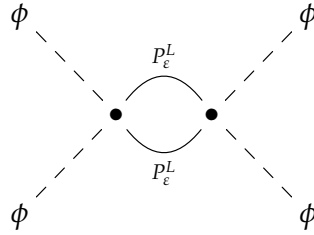
这里的参数 ε 称为紫外截断 (ultra-violet cut-off), L 称为红外截断 (infrared cut-off)。

重整化的基本想法是, 将原先的传播子当中的 $G(x, y)$ 替换为 $P_\varepsilon^L(x, y)$, 然后分析 $\varepsilon \rightarrow 0, L \rightarrow \infty$ 时 $w_\Gamma(\mathcal{P}_\varepsilon^L, \mathcal{I})$ 的行为。

特别地, 当 $d = 4$ 时,

$$P_\varepsilon^L(x, y) = \int_\varepsilon^L h_t(x - y) dt = \int_\varepsilon^L \frac{1}{(4\pi t)^2} e^{-\frac{|x-y|^2}{4t}} dt$$

例子 4.5.10. 再看例子 4.5.6, 即图 Γ 为如下:



对于截断参数 $\varepsilon < L$, 试计算 $w_\Gamma(\mathcal{P}_\varepsilon^L, \mathcal{I})$.

解. 直接计算之,

$$\begin{aligned} w_\Gamma(\mathcal{P}_\varepsilon^L, \mathcal{I}) &\propto \lambda^2 \int_{\mathbb{R}^4 \times \mathbb{R}^4} \phi^2(x) \phi^2(y) P_\varepsilon^L(x, y)^2 dx dy \\ &= \lambda^2 \int_{\mathbb{R}^4} dx \int_{\mathbb{R}^4} \phi^2(x) \phi^2(x+y) dy \int_\varepsilon^L \int_\varepsilon^L \frac{dt_1}{(4\pi t_1)^2} \frac{dt_2}{(4\pi t_2)^2} e^{-\frac{|y|^2}{4t_1}} e^{-\frac{|y|^2}{4t_2}} \end{aligned}$$

使用 Taylor 展开, 令

$$\phi^2(x) \phi^2(x+y) =: \phi^4(x) + R(x, y)$$

由于函数 Φ 是紧支的, 从而存在常数 $C > 0$, 使得对任意 $x, y \in \mathbb{R}^4$, 成立

$$|R(x, y)| \leq C|y|$$

从而对每个 $x \in \mathbb{R}^4$,

$$\limsup_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \int_{\mathbb{R}^4} |R(x, y)| dy \int_\varepsilon^\infty \int_\varepsilon^\infty \frac{dt_1}{(4\pi t_1)^2} \frac{dt_2}{(4\pi t_2)^2} e^{-\frac{|y|^2}{4t_1}} e^{-\frac{|y|^2}{4t_2}} \leq C' \int_{\mathbb{R}^4} \frac{|y|}{|y|^4} dy < +\infty$$

因此有

$$\begin{aligned}
w_{\Gamma}(\mathcal{P}_{\varepsilon}^L, \mathcal{I}) &\propto \lambda^2 \int_{\mathbb{R}^4} \phi^4(x) dx \int_{\mathbb{R}^4} dy \int_{\varepsilon}^L \int_{\varepsilon}^L \frac{dt_1}{(4\pi t_1)^2} \frac{dt_2}{(4\pi t_2)^2} e^{-\frac{|y|^2}{4t_1}} e^{-\frac{|y|^2}{4t_2}} \\
&\quad + (\varepsilon \rightarrow 0 \text{ 时的收敛项}) \\
&= \lambda^2 \int_{\mathbb{R}^4} \phi^4(x) dx \int_{\varepsilon}^L \int_{\varepsilon}^L \frac{dt_1}{(4\pi t_1)^2} \frac{dt_2}{(4\pi t_2)^2} \int_{\mathbb{R}^4} e^{-\frac{|y|^2}{4t_1} - \frac{|y|^2}{4t_2}} dy \\
&\quad + (\varepsilon \rightarrow 0 \text{ 时的收敛项}) \\
&= \lambda^2 \int_{\mathbb{R}^4} \phi^4(x) dx \int_{\varepsilon}^L \int_{\varepsilon}^L \frac{dt_1}{(4\pi t_1)^2} \frac{dt_2}{(4\pi t_2)^2} \frac{(2\pi)^2}{(\frac{1}{2t_1} + \frac{1}{2t_2})^2} \\
&\quad + (\varepsilon \rightarrow 0 \text{ 时的收敛项}) \\
&= \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2} \int_{\mathbb{R}^4} \phi^4(x) dx \int_{\varepsilon}^L \int_{\varepsilon}^L \frac{dt_1 dt_2}{(t_1 + t_2)^2} \\
&\quad + (\varepsilon \rightarrow 0 \text{ 时的收敛项}) \\
&= -\frac{\lambda^2 \log \varepsilon}{(4\pi)^2} \int_{\mathbb{R}^4} \phi(x)^4 dx \\
&\quad + (\varepsilon \rightarrow 0 \text{ 时的收敛项})
\end{aligned}$$

□

不过要注意 $L \rightarrow \infty$ 的时候积分 $\int_{\varepsilon}^L \int_{\varepsilon}^L \frac{dt_1 dt_2}{(t_1 + t_2)^2}$ 也是发散的，即“红外发散”。为处理 $\varepsilon \rightarrow 0$ 的发散，我们对相互作用能进行量子修正：令

$$\mathcal{I}^{CT}(\varepsilon) := \frac{\hbar \lambda^2 \log \varepsilon}{(4\pi)^2} \int_{\mathbb{R}^4} \phi^4 dx$$

$$\begin{aligned}
\mathcal{S} &\mapsto \mathcal{S} + \mathcal{I}^{CT}(\varepsilon) \\
&= \frac{1}{2} \int \phi D \phi + \frac{\lambda}{4!} \phi^4 dx + \frac{\hbar \lambda^2 \log \varepsilon}{(4\pi)^2} \int \phi^4 dx
\end{aligned}$$

一般地，在量子物理中，关于 $\varepsilon \rightarrow 0$ 的量子修正，有如下定理：

定理 4.5.11. 记号承上，则存在关于 ε 的函数

$$\lambda(\varepsilon) = \lambda + \hbar \frac{\lambda^2 \log \varepsilon}{(4\pi)^2} + \cdots = \lambda + \sum_{g \geq 1} \hbar^g G_g(\lambda, \varepsilon)$$

使得极限

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \sum_{\substack{\Gamma \text{ 取遍} \\ \text{多重有向图}}} \frac{\omega_P(P_{\varepsilon}^L, \mathcal{I}^{\varepsilon})}{|\text{Aut}(\Gamma)|}$$

存在, 其中

$$\mathcal{I}^\varepsilon := \frac{\lambda(\varepsilon)}{4!} \int_{\mathbb{R}^4} \phi(x)^4 dx$$

证明. 比较困难, 从略。 □

4.6 dGBV 代数

我们讨论一些代数结构。

定义 4.6.1. (*dGBV 代数*) (*differential Gerstenhaber-Batalin-Vilkovisky algebra*)

- (1) \mathcal{A} is a graded commutative algebra with product.
- (2) $Q : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}$ is a graded derivation of degree 1.
- (3) $\Delta : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}$ is a "2-nd differential operator" (BV operator), such that $\deg \Delta = 1, \Delta^2 = 0$.
- (4) $[Q, \Delta] := Q \circ \Delta + (-1)^{1+1} \Delta \circ Q = 0$

we define the BV-bracket

$$\{\alpha, \beta\} := \Delta(\alpha\beta) - (\Delta\alpha)\beta - (-1)^\alpha \alpha \Delta\beta$$

This bracket, has degree 1, satisfies:

- (1) graded Jacobi identity
- (2) Leibniz rule...
- (BV-algebra...)(similar as Gerstenhaber algebra)

例子 4.6.2. M is a manifold with volume form Ω ,

$$\mathcal{A} := \text{PV}^\bullet(M) \text{ with wedge product } \wedge$$

$$\Delta := \text{divergence operator with } \Omega$$

$$Q = 0$$

in local coordinate, $\Omega = e^f d^n x$,

$$\Delta = \sum_i \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial \theta_i} - \sum_i \frac{\partial f}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial \theta_i}$$

例子 4.6.3. Let X be a complex manifold of complex dimension d ,

$$\Omega \in H^0(X, K_X)$$

is a holomorphic volume form(nowhere vanishing),where $K_X := \bigwedge^d T_X^{1,0}$

Then (X, Ω) is called a CY manifold(Calabi-Yau).

$$\mathrm{PV}^{p,q}(X) := \Omega^{p,q}(X, \bigwedge^p T_X^{1,0}) \xrightarrow{\lrcorner \Omega} \Omega^{d-p,q}(X)$$

$$\bar{\partial} : \mathrm{PV}^{p,q} \rightarrow \mathrm{PV}^{p,q-1}$$

$$\Delta : \mathrm{PV}^{p,q} \rightarrow \mathrm{PV}^{p-1,q}$$

Then we have a DGBV:

$$\mathcal{A} := \mathrm{PV}^{\bullet,\bullet}(X)$$

$$Q := \bar{\partial}$$

$$\Delta = \text{divergence}$$

(Hodge theory, deformation theory)

$$\deg \mathrm{PV}^{p,q}(X) = q - p$$

定义 4.6.4. Let (\mathcal{A}, Q, Δ) be a DGBV. $I_0 \in \mathcal{A}_0$ (i.e. degree=0) is said to satisfy classical master equation(CME), if

$$QI_0 + \frac{1}{2}\{I_0, I_0\} = 0$$

(这个方程长得有点像联络，而且是曲率为 0 的那种)

$$Q + \{I_0, -\} \curvearrowright \mathcal{A}$$

this operator acts as a differential, i.e.

$$(Q + \{I_0, -\})^2 = 0$$

(check, need to use Jacobi identity, HW)

This bracket is also called "odd Poisson structure"...

Fact: any action functional with gauge symmetry leads to a solution of CME. (What the fuck is "gauge symmetry"?)

(quantum version)

$$I = I_0 + I_1\hbar + I_2\hbar^2 \in \mathcal{A}[[\hbar]]$$

is said to satisfy Quantum master equation, if

$$QI + \hbar\Delta I + \frac{1}{2}\{I, I\} = 0$$

(when $\hbar \rightarrow 0$, go back to "classical")

(比较 \hbar 各项系数, 有无穷多个方程)

HW:

$$\text{QMF} \iff (Q + \hbar\Delta)e^{I/\hbar} = 0$$

i.e. , $e^{I/\hbar}$ is the analogue of "closed differential form".

$$\rightsquigarrow \int e^{I/\hbar} \quad \text{in Physis: Quantum gauge symmetry}$$

(某种意义上下的不变的测度)

$$\xrightarrow{?} \int \alpha e^{I/\hbar} =: \langle \alpha \rangle$$

co-relator function

classical observable

$$Obs^{cl} := H^0(\mathcal{A}, Q + \{I, -\})$$

(is called classical BRST)

quantum observable

$$Obs^q = H^0(\mathcal{A}[[\hbar]], Q + \hbar\Delta + \{I, -\})$$

if $\alpha \in Obs^q$, then

$$(Q + \hbar\Delta)\alpha + \{I, \alpha\} = 0 \iff (Q + \hbar\Delta)(\alpha e^{I/\hbar}) = 0$$

(i.e. $\alpha e^{I/\hbar}$ is a "closed form")

例子 4.6.5. (from singularity theory)

$$\mathcal{A} := \mathbb{C}[z^i, \theta_i]$$

where $\deg \theta_i = -1$ (super variable).

$$f : \mathbb{C}^n \rightarrow \mathbb{C}$$

is a polynomial, such that $f(z)$ has a isolated singularity at $z = 0$,

$$\text{Crit}(f) = \{z \in \mathbb{C}^n | \partial_i f(z) = 0\}$$

then $\text{Crit}(f) = \{0\}$.

Then ,there is a DGBV:

$$Q = 0$$

$$\Delta = \sum_i \frac{\partial}{\partial z^i} \frac{\partial}{\partial \theta_i}$$

and f solves CME: $\{f, f\} = 0$ (trivial...), and also satisfies QMF: $\Delta e^{f/\hbar} = 0$.

then , the classical observable

$$Obs^{cl} = H^0(\mathcal{A}, \{f, -\}) = \text{Koszul resolution of } \text{Crit}(f) = \mathbb{C}[z^i]/(\partial_i f)$$

is called "Milnor ring", parametrizing deformations of f . This Milnor ring is an Artinian ring (so, of finite length),

$$\mu := \dim_{\mathbb{C}} \mathbb{C}[z^i]/(\partial_i f)$$

is called Milnor ring..

例子 4.6.6. $f(z) = z^{n+1}, (A_n\text{-singularity})$,

$$Jac(f) = \mathbb{C}[z]/z^n$$

$$\mu = n$$

Check:

$$Obs^q \cong \Omega_{holo}^n[[\hbar]]/(\hbar d + df \wedge)$$

called (formal) Brieshorn lattice.

Obs^q describes complex oscillatory integral.

Rmk: Singularity leads to a mixed Hodge theory.

\hbar =Hodge filtration.

QFT is a ∞ -dimensional version of Hodge theory.

(-1)-symplectic geometry(BV-formalism)

Toy model: Consider (V, Q, ω) , where (V, Q) is a finite dimensional complex,

$$Q : V \rightarrow V, Q^2 = 0$$

$$\omega : \bigwedge^2 V \rightarrow \mathbb{C}$$

symplectic pair(non-degenerate) of degree -1 . And ω is compactible with Q :

$$Q(\omega) = 0 \iff \omega(Q(-), -) + \omega(-, Q(-)) = 0$$

(V, Q, ω) is called degree (-1) -symplectic space.

We can construct a DGBV algebra

$$\mathcal{A} = \mathcal{O}(v) = \prod_{n \geq 0} \text{Sym}^n(V^*)$$

Q is the induced derivation on \mathcal{A} . (Eg:

$$(QI)(\alpha_1 \otimes \cdots \otimes \alpha_n) = \sum_i \pm I(\alpha_1, \dots, \hat{\alpha}_i, \dots, \alpha_n)$$

)

$\omega : V^* \cong V[1]$, example: $\omega = dx^i \wedge d\theta_i$.

$$\omega \in \bigwedge^2(V^*) \longleftarrow \bigwedge^2(V[1]) = \text{Sym}^2(V)[2]$$

$K = \omega^{-1} \in \text{Sym}^2(V)$, $\deg(K) = 1$ is the Poisson kernel of ω .

locally,

$$\begin{aligned} \omega &= dx^i \wedge d\theta_i \\ K &= \frac{\partial}{\partial x^i} \otimes \frac{\partial}{\partial \theta_i} + \frac{\partial}{\partial \theta_i} \otimes \frac{\partial}{\partial x^i} \end{aligned}$$

We define the BV operator

$$\begin{aligned} \Delta_K : \mathcal{O}(V) &\rightarrow \mathcal{O}(V) \\ \text{Sym}^n(V^*) &\rightarrow \text{Sym}^{n-2}(V^*) \end{aligned}$$

by contracting with $K \in \text{Sym}^2(V)$.

Explicitly

$$\Delta_K(\alpha_1 \otimes \dots \otimes \alpha_n) = \sum_{i,j} \pm \langle K, \alpha_i, \alpha_j \rangle \alpha_1 \otimes \dots \hat{\alpha}_i \dots \hat{\alpha}_j \dots \otimes \alpha_n$$

性质 4.6.7. (HW)

$$(\mathcal{A} = \mathcal{O}(V), Q, \Delta_K)$$

is a DGBV algebra.

eg: $\mathcal{A} = \mathbb{C}[x^i, \theta_i]$, $\omega = dx^i \wedge d\theta_i$, and

$$\Delta_K = \frac{\partial}{\partial x^i} \frac{\partial}{\partial \theta_i}$$

QFT case

$$V, Q \rightsquigarrow \mathcal{E}^\bullet = \Gamma(X, E^\bullet)$$

smooth section of some graded bundle E^\bullet .

$$\dots \xrightarrow{Q} \mathcal{E}^{-1} \xrightarrow{Q} \mathcal{E}^0 \xrightarrow{Q} \mathcal{E}^1 \rightarrow \dots$$

Q is a differential operator, $Q^2 = 0$. (∞ -dimension)

$\omega \rightsquigarrow$ local (-1) -symplectic pair

$$\omega(\alpha, \beta) = \int_X \langle \alpha, \beta \rangle, \quad \alpha, \beta \in \mathcal{E}$$

$K = \omega^{-1} = \delta$ -function supported on $X \subseteq X \times X$. (UV-divergence)

$V^* \rightarrow \mathcal{E}^*$ is distribution...

$\Delta_K \curvearrowright$ Distribution is ill-defined!

4.7 同伦重整化

Homotopic renormalization II (-1) -symplectic geometry.

Toy model $(V, Q, \omega), (V, Q)$ finite dimensional complex. $\omega : \wedge^2 V \rightarrow \mathbb{C}$ non-degenerated, of degree -1 .

$K = \omega^{-1}$ Poisson kernel, $\deg K = 1$,

$$K \in \text{Sym}^2(V) \quad (!!!)$$

so,

$$\Delta_K \curvearrowright \mathcal{O}(V) = \prod_n \text{Sym}^n(V^*)$$

$$\text{Sym}^n(V^*) \rightarrow \text{Sym}^{n-2}(V^*)$$

Δ_K : BV operator, $\Delta_K^2 = 0$.

$\Rightarrow \text{DGBV} : (\mathcal{O}(V), Q, \Delta_K)$.

Example: $\mathcal{O}(V) \rightsquigarrow \text{PV}(X)$.

CME:

$$QI_0 + \frac{1}{2}\{I_0, I_0\} = 0$$

QME:

$$QI_0 + \hbar \Delta I + \frac{1}{2}\{I_0, I_0\} = 0$$

Today: QFT case. Vector space $V \rightsquigarrow \mathcal{E}^\bullet = \Gamma(X, E^\bullet)$, smooth of graded vector bundles on X .

Differential $Q \rightsquigarrow$

$$\xrightarrow{Q} \mathcal{E}^{-1} \xrightarrow{Q} \mathcal{E}^0 \xrightarrow{Q} \mathcal{E}^1 \xrightarrow{Q} \dots$$

where Q is a differential operator ($Q^2 = 0$).

Assume (\mathcal{E}^\bullet, Q) is an **elliptic** complex. (我们不讲什么叫“椭圆”的, 也不讲椭圆算子、PDE的结果). For example, $Q = d$ be de-Rham differential.

Fact: $H^\bullet(\mathcal{E}, Q)$ is of finite dimension.

$\omega \rightsquigarrow \omega$: local (-1) -symplectic,

$$\omega(\alpha, \beta) = \int_X \langle \alpha, \beta \rangle$$

where

$$\langle, \rangle : E^\bullet \otimes E^\bullet \rightarrow \text{Dens}_X$$

where "Dens" is the "density line bundle"(if X is orientable. $\text{Dens}_X = \bigwedge^n T_X^*$)

such that

$$\omega(\alpha, \beta) = -(-1)^{|\alpha||\beta|}$$

non-degenerate: $\omega(\alpha, -) = 0 \iff \alpha = 0$

Q-compactible: $\omega(Q(-), -) + \omega(-, Q(-)) = 0$.

Then, we get a structure

$$(\mathcal{E}, Q, \omega)$$

∞ -dimensional (-1) -symplectic space.

例子 4.7.1. (*Chern-Simons Theory*)

Let X be a 3-dim manifold. \mathfrak{g} is a Lie algebra with Killing pair Tr . $\mathcal{E} = \Omega^\bullet(X, \mathfrak{g})[1]$, $Q = d$.

$$\Omega(\alpha, \beta) = \int_X \text{Tr}(\alpha, \beta)$$

for $\alpha, \beta \in \mathcal{E}$. $\deg(\omega) = -1$.

(The degree $\deg \Omega^k := k - 1$ is called "ghost number"... 鬼数?!)

DGBV:

(1)

$$V^* \rightsquigarrow \mathcal{E}^* = \text{distribution}$$

(有拓扑, 要取连续的对偶)。

(2)

$$V^* \otimes V^* \rightsquigarrow \mathcal{E}^* \hat{\otimes} \mathcal{E}^* = \text{complete tensor product}$$

(EG:

$$C^\infty(X) \hat{\otimes} C^\infty(X) = C^\infty(X \times X)$$

) 这些泛函分析里都有。。。

distributions on $X \times X \iff$ dual of $\mathcal{E} \hat{\otimes} \mathcal{E}$.

so,

$$\text{Sym}^2(\mathcal{E}^*)$$

is defined. (S_2 -invariant distribution on $X \times X$)

$\rightsquigarrow \text{Sym}^n(\mathcal{E}^*)$: S_n -invariant distributions on $\underbrace{X \times \cdots \times X}_n$.

$\rightsquigarrow \mathcal{O}(\mathcal{E}) = \prod_n \text{Sym}^n(\mathcal{E}^*)$ is defined. (graded commutative algebra)

$Q : \mathcal{E} \rightarrow \mathcal{E}$ induces $Q : \mathcal{E}^* \rightarrow \mathcal{E}^*$, and then induces derivation $Q \curvearrowright \mathcal{O}(\mathcal{E})$.

$$K \in \omega^{-1} \notin \text{Sym}^2(\mathcal{E})$$

but K is a distribution...

$$s(x) = \int \langle K(x, y), s(y) \rangle dy$$

$K(x, y)$ is δ -function, supported on $X \subseteq X \times X$.

$$\Delta_K : \mathcal{O}(\mathcal{E}) \rightarrow \mathcal{O}(\mathcal{E})$$

but

$$\Delta : \text{Sym}^n(\mathcal{E}^*) \rightarrow \text{Sym}^{n-2}(\mathcal{E}^*)$$

is ill-defined(两个广义函数无法配对) 这个不良定义，即“紫外发散”。(UV-problem)

处理此紫外发散的方式：重整化。

So, we introduce "homotopic renormalization"(Costello)!

Assume (\mathcal{E}, Q) is elliptic complex, (e.g. $Q = d, \bar{\partial} \dots$) By the regularity of elliptic operator,

$$H^\bullet(\text{distribution}, Q) = H^\bullet(\text{smooth}, Q)$$

$K_0 := \omega^{-1}$ is a distribution,

$$Q(K) := (Q \otimes 1 + 1 \otimes Q)K = 0$$

(by compatibility of ω with Q .)

by regularity, we have

$$K_0 = K_r + Q(P_r)$$

(in PDE, it is called "Paramatrix")

where $K_r \in \text{Sym}^2(\mathcal{E})$ is smooth. and P_r is a (singular) distributional section.

K_r is smooth, $Q(K_r) = 0$.

(PDE 与同伦论联系密切，就好比微积分和线性代数联系密切)

$$\Delta_{K_r} : \text{Sym}^n(\mathcal{E}^*) \rightarrow \text{Sym}^{n-2}(\mathcal{E}^*)$$

contracting with the smooth $K_r \in \text{Sym}^2(\mathcal{E})$.

$$[\Delta_{K_r}, Q] = 0$$

so,

$$(\mathcal{O}(\mathcal{E}), Q, \Delta_{K_r})$$

is a DGBV algebra. (r -regularized DGBV)

Now, if

$$K_0 = K_r + QP_r = K_{r'} + QP_{r'}$$

2 ways to ... So,

$$K_{r'} - K_r = QP_{r'}$$

($P_r^{r'} := P_{r'} = P_r$) Notices that $QP_{r'}$ is smooth, then by regularity of elliptic operator, $P_r^{r'}$ is smooth.

Denote

$$\Delta_{K_r} = \frac{\partial}{\partial K_r}$$

contracting with K_r , 2^{nd} order.

$$\partial_{P_r^{r'}} = \frac{\partial}{\partial P_r^{r'}} \curvearrowright \mathcal{O}(\mathcal{E})$$

contracting with $P_r^{r'} \in \text{Sym}^2(\mathcal{E})$. $\deg(P_r^{r'}) = 0$.

引理 4.7.2.

$$[Q, \partial_{P_r^{r'}}] = \Delta_K - \Delta_{K'}$$

证明. Homework. □

推论 4.7.3.

$$(Q + \hbar \Delta_{r'}) e^{\hbar \partial_{P_r^{r'}}} = e^{\hbar \partial_{P_r^{r'}}} (Q + \hbar \Delta_r)$$

as operators acting on $\mathcal{O}(\mathcal{E})$.

"proof". Using the formula

$$e^A B e^{-A} = e^{\text{ad}_A} B$$

□

定义 4.7.4. $\mathcal{O}(\mathcal{E}), Q, \Delta_r = \Delta_{K_i}$ regularized DGBV, $\mathcal{I}[r] \in \mathcal{O}(\mathcal{E})[[\hbar]]$ is said to satisfy r -effective QME, if

$$(Q + \hbar \Delta_r) e^{\mathcal{I}[r]/\hbar} = 0$$

性质 4.7.5. Let $\mathcal{I}[r]$ be a r -effective solution of QME, defined $\mathcal{I}[r']$ by

$$e^{\mathcal{I}[r']/\hbar} = e^{\hbar\partial_{r'}} e^{\mathcal{I}[r]/\hbar}$$

Then $\mathcal{I}[r']$ also satisfies QME.

证明.

□

定义 4.7.6. An effective solution of QME is defined by a family

$$\{\mathcal{I}[r] \in \mathcal{O}(\mathcal{E})[[\hbar]]\}$$

satisfying the following properties:

- (1) $(Q + \hbar\Delta_r)e^{\mathcal{I}[r]/\hbar} = 0$ for all r (QME)
- (2) $e^{\mathcal{I}[r']/\hbar} = e^{\hbar\partial_{r'}} e^{\mathcal{I}[r]/\hbar}$ (called Homotopic RG flow equation)

In practice, Introduce metric on E . Q^* is the adjoint of Q ,

$$\square = [Q, Q^*] = QQ^* + Q^*Q$$

is the Laplacian.

for $t \geq 0$, K_t the heat kernel for $e^{t\square}$. K_0 =delta-function, K_t smooth for $t > 0$.

$$K_t - K_0 = \int_0^t [Q, Q^*] e^{-t\square} dt = [Q, \int_0^t Q^* e^{-u\square} du]$$

P_0^t be the kernel of $\int_0^t Q^* e^{-u\square} du$

$$P_0^t = (Q^* \otimes 1) \int_0^t K_u du$$

$$K_t - K_0 = Q(P_0^t)$$

Define the regularized propagator

$$P_\varepsilon^L = \int_\varepsilon^L (Q^* \otimes 1) K_u du$$

$$K_\varepsilon - K_L = Q(P_\varepsilon^L)$$

术语索引

- action functional 作用量, 100
augmentation, 60
Bar-复形, 10
Batalin-Vilkovisky operator BV 算子, 103
classical BV algebra 经典 BV 代数, 73
co-algebra 余代数, 58
co-product 余乘, 58
co-unit 余幺元, 59
cocenter 余中心, 6
Connes' complex Connes 复形, 27
Connes' operator Connes 算子, 34
critical locus, 100
cup product, 71
cyclic bicomplex 循环双复形, 29
cyclic co-invariant 循环余不变量, 25
cyclic cohomology 循环上同调, 44
cyclic homology 循环同调, 27
cyclic invariant 循环不变量, 44
deformation quantization 形变量子化, 84
derivation 导子, 14
derived center 导出中心, 13
differential graded algebra 微分分次代数, 21
differential graded co-algebra 微分分次余代数, 60
enveloping algebra, 4
exact 正合, 7
Feynman's rule 费曼规则, 114
Gerstenhaber algebra, 73
Gerstenhaber product, 73
graded K -module 分次 K -模, 46
graded algebra 分次代数, 51
graded co-algebra 分次余代数, 59
graded Lie algebra 分次李代数, 51
group cohomology 群的上同调, 24
Hamiltonian 哈密顿量, 77
heat kernel 热核, 132
heat operator 热算子, 132
Hochschild 同调, 8
Hochschild 上同调, 13
Hochschild 上链复形, 14
Hochschild 链复形, 12
Hodge filtration 霍奇滤链, 36
infrared cut-off 红外截断, 133
inner derivation 内导子, 14
Lie bracket 李括号, 15
Lie super algebra 李超代数, 51
Moyal product, 84
negative cyclic complex 负循环复形, 37
observable 观测量, 77, 100
odd Laplacian 奇拉普拉斯算子, 105
opposite algebra 反代数, 4
outer derivation 外导子, 15
path integral 路径积分, 100
periodic cyclic complex 周期循环复形, 37
phase space 相空间, 77

Poisson algebra 泊松代数, 86
 Poisson bracket 泊松括号, 77
 Poisson manifold 泊松流形, 80
 Poisson tensor 泊松张量, 79
 polyvector field 多重切向量场, 61
 projective module 投射模, 4
 projective resolution 投射消解, 8
 propagator 传播子, 111

 quantum enveloping algebra 量子包络代数, 91
 quantum field theory 量子场论, 100
 quasi-isomorphism 拟同构, 30

 reduced Bar-complex 约化 Bar-复形, 19
 regularized propagator 正则化传播子, 133
 renormalization group flow operator 重整化群
 流算子, 121
 renormalization 重整化, 132

 Schouten-Nijenhuis 括号, 62
 shuffle product, 67
 space of fields 场空间, 100
 star product 星积, 83
 symplectic manifold 辛流形, 77

 total complex 全复形, 30

 ultra-violet cut-off 紫外截断, 133
 ultra-violet divergence 紫外发散, 130

 Yang-Mills functional 杨-米尔斯泛函, 101