代数同构视角下的离散 Fourier 变换

多项式环、求值插值与相似对角化

sun123zxy

2024-05-13

目录

目录

Fourier 变换及其卷积性质

- Fourier 变换：将给定函数 f 映为函数 $\mathcal{F}[f]$：

$$\mathcal{F}[f](\lambda) := \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\, e^{-\mathrm{i}\lambda t}\, \mathrm{d}t$$

- 定义函数 f 和 g 的卷积

$$(f * g)(\lambda) := \int_{-\infty}^{\infty} f(\lambda - x) g(x)\, \mathrm{d}x$$

则 Fourier 变换将两个函数的卷积化为逐点乘积，即

$$\mathcal{F}[f * g] = \mathcal{F}[f]\mathcal{F}[g]$$

复数域上的 DFT 及其卷积性质

- 离散 *Fourier* 变换（Discrete Fourier Transform, DFT）：线性空间 $\mathbb{C}^n \to \mathbb{C}^n$ 上的线性变换 F，将向量 $\boldsymbol{a} = (a_0, a_1, \ldots, a_{n-1})^{\mathrm{T}} \in \mathbb{C}^n$ 映为 $F\boldsymbol{a}$，其第 i 个分量如下所示

$$(F\boldsymbol{a})_i := \sum_{k=0}^{n-1} \omega_n^{ik} a_i$$

这里分量下标从 0 开始计数，$\omega_n := e^{2\pi \mathrm{i}/n}$ 是 $\mathbb{C}$ 上的一个 n 次本原单位根.

- 相仿的卷积性：两个向量 $\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b} \in \mathbb{C}^n$ 的循环卷积定义为

$$(\boldsymbol{a} * \boldsymbol{b})_k := \sum_{i+j=k \pmod n} a_i b_j$$

则 DFT 将两个向量的循环卷积化为逐项乘积 $\times$，即

$$F(\boldsymbol{a} * \boldsymbol{b}) = (F\boldsymbol{a}) \times (F\boldsymbol{b})$$

矩阵表示

在 $\mathbb{C}^n$ 的自然基下，变换 F 有矩阵表示

$$F = \left(\omega_n^{ij}\right)_{(i,j)\in n\times n} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \omega_n & \dots & \omega_n^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega_n^{n-1} & \dots & \omega_n^{(n-1)(n-1)} \end{pmatrix}$$

- 卷积性：系数为全体复平面 n 次单位根的可逆 Vandermonde 矩阵
- 正交性：适当单位化后为酉矩阵

问题[1]

- DFT 化卷为乘的本质？
  - 我们给出一大类具备卷积性的线性映射的构造，DFT 将作为特例推出.
- 如何从代数角度理解 DFT？
  - 两个视角：多项式环、矩阵代数
  - 两种表现：求值插值、相似对角化
  - 一致观点：保加法、保数乘、保乘法的代数同构
- DFT 是否是唯一一类化卷为乘的变换？作为底层结构的 $\mathbb{C}$ 是否可以放宽？
  - 工程上复数乘法运算较慢且具有浮点误差，更换底层代数结构具有实际意义．例如，被称为数论变换（number theoretic transforms, NTT）的 DFT 变种就将 $\mathbb{C}$ 替换为有限域 $\mathbb{F}_p$ 而同时保留了其卷积性质.
  - 我们将其 DFT 扩展至任意整环并证明特定含义下的唯一性.

[1] Agarwal and Burrus [AB75]; Nicholson [Nic71]; Fürer [Für09]; Amiot [Ami16]; Baraquin and Ratier [BR23]

目录

目录

$\mathbb{C}[x]$ 与循环卷积

设不超过 $n-1$ 次的多项式 $f(x)=\sum_{k=0}^{n-1} a_k x^k$，$g(x)=\sum_{k=0}^{n-1} b_k x^k$. 二者的多项式乘积由 *Cauchy 乘积*给出

$$f(x)g(x)=\sum_{i=0}^{n-1} a_i x^i \sum_{j=0}^{n-1} b_j x^j=\sum_{k=0}^{2n-2} x^k \sum_{i+j=k} a_i b_j$$

令 $\boldsymbol{a}:=(a_0,a_1,\ldots,a_{n-1})^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{b}:=(b_0,b_1,\ldots,b_{n-1})^{\mathrm{T}}$，回顾循环卷积定义

$$(\boldsymbol{a}*\boldsymbol{b})_k:=\sum_{i+j=k \pmod n} a_i b_j$$

可见 Cauchy 乘积与循环卷积尚有区别. 稍加改动，若在模 x^n-1 的意义下——即商环 $\mathbb{C}[x]/(x^n-1)$ 中计算，则二者相合:

$$f(x)g(x)=\sum_{k=0}^{n-1} x^k \sum_{i+j=k \pmod n} a_i b_j \pmod{x^n-1}$$

$\mathbb{C}[x]$ 与复数域 DFT

DFT 亦有在 $\mathbb{C}[x]$ 上的表示. 给定 $\mathbf{a} := (a_0, a_1, \ldots, a_{n-1})^{\mathrm{T}} \in \mathbb{C}^n$，其对应多项式 $f(x) = \sum_{k=0}^{n-1} a_k x^k$ 次数不超过 $n-1$ 次，则

$$(F\mathbf{a})_i = \sum_{k=0}^{n-1} \omega_n^{ik} \mathbf{a}_i = \sum_{k=0}^{n-1} \mathbf{a}_i (\omega_n^i)^k = f(\omega_n^i)$$

恰为 $f(x)$ 分别在 n 个 $\mathbb{C}$ 上 n 次单位根处多点求值的结果.

- 可逆性：n 点唯一确定一个不超过 $n-1$ 次的多项式（*Lagrange* 插值）
- 线性性：$(af+bg)(\omega_n^i) = af(\omega_n^i) + bg(\omega_n^i)$
- 卷积性：将取模乘法化为点值逐项相乘，再次与 $\mathbb{C}^n$ 上的表现相合

$$F(\mathbf{a} * \mathbf{b}) = (F\mathbf{a}) \times (F\mathbf{b})$$
$$(fg)(\omega_n^i) = f(\omega_n^i) g(\omega_n^i)$$

小结

- $\mathbb{C}^n$ 与 $\mathbb{C}[x]$ 视角下的 DFT:
  - $\mathbb{C}^n$: 作为以单位根为参数的 Vandermonde 矩阵, DFT 是 $\mathbb{C}^n$ 上的可逆线性变换, 将向量间的循环卷积 $*$ 化为逐项乘积 $\times$.
  - $\mathbb{C}[x]$: 作为单位根处的多点求值插值, DFT 在全体不超过 $n-1$ 次的多项式和 $\mathbb{C}^n$ 间建立起线性同构关系, 将多项式乘积化为函数值逐点乘积.
- 化卷为乘, 就是把多项式环上的取模乘法变为 $\mathbb{C}^n$ 上的逐项乘积, DFT 保持了两个代数结构间的乘法.
  - $\mathbb{C}[x]$ 作为环结构乘法自然, 在多项式环上刻画 DFT 较在 $\mathbb{C}^n$ 上强行定义循环卷积具有优越性.

目录

代数、代数同构与直积

- 整环：无零因子交换幺环
- 设 R 是一整环，若 $(A,+,\times)$ 为一环且配备了与乘法 $\times$ 相容的 R-数乘 $\cdot$，则称 A 是一 R-代数，不至混淆时简称代数.
  - 整环 R 自身也可视为一个代数.
- 我们将 R^n 理解为作为代数的 R 的直积，即 $R^n = R \times R \times \cdots \times R$. 直积的加法、数乘和乘法均在逐项意义下定义.
- 保持代数间加法、数乘和乘法的双射被称为代数同构.

几个观察与整环的优势

- 关于引例的若干观察：
  - DFT 是 $\mathbb{C}[x]/(x^n-1)\to R^n$ 的一个代数同构，具体做法是在单位根处多点求值插值
  - 求值插值在任意 n 个不同位置进行即可，单位根不是本质要求
  - 商环 $\mathbb{C}[x]/(x^n-1)$ 带来了与循环卷积对应的多项式取模乘法，还蕴含着“不超过 $n-1$ 次”为求值插值带来的单与满
  - 第一同构定理：设 $f\colon R\to S$ 是环同态，则 f 诱导出环同构 $R/\operatorname{Ker} f\cong\operatorname{Im} f$
- 选取整环作为底层代数结构的理由：
  - 交换：确保求值操作是同态
  - 保留环上整除的结构和多项式根与因子的关系（带余除法、余式定理）
  - 在唯一性证明中发挥作用

商环到直积的代数同构

下面固定 R 是一整环．令 C 是 R 的一有限子集，由若干不同一次多项式乘积 $\prod_{c\in C}(x-c)$ 生成的 $R[x]$ 上的理想记为 $\left(\prod_{c\in C}(x-c)\right)$.

用记号 R^C 代表全体 C 上的 R 值函数构成的集合．R^C 与其上定义的函数逐点加法、数乘和乘法构成一个代数，自然也与 R^n 代数同构.

命题

多项式商环 $R[x]/\left(\prod_{c\in C}(x-c)\right)$ 与代数直积 R^C 代数同构.

$$\begin{tikzcd}
R[x] \arrow[r, "\varphi"] \arrow[d] & R^C \\
R[x]/\left(\prod_{c\in C}(x-c)\right) \arrow[ur, dashed, "\bar{\varphi}"] &
\end{tikzcd}$$

图: 命题 1 构造示意图

构造

考察 $R[x]$ 到 R^C 上的代数同态 $\varphi : f \mapsto (C \ni x \mapsto f(x))$，其含义为在每一 $c \in C$ 处对多项式 f 进行求值.

- φ 的核:

$$\operatorname{Ker} \varphi = \{f \in R[x] : f(C) = \{0\}\} = \left(\prod_{c \in C} (x - c)\right)$$

- φ 的像: 对每个 $c \in C$ 对应的理想 $(x - c)$ 应用中国剩余定理就有 $\operatorname{Im} \varphi = R^C$.

  故由第一同构定理，φ 诱导的

$$\bar{\varphi} : R[x] / \left(\prod_{c \in C} (x - c)\right) \to R^C$$

是一同构映射.

DFT：代数同构的特例

作为上一定理的特例，DFT 在单位根处求值插值．若 ω_n 为内嵌于 R 的某一 n 阶循环（乘法）群的生成元，则称其为 R 上的 n 次本原单位根.

推论

若 R 上存在 n 次本原单位根 ω_n，则多项式

$$x^n - 1 = \prod_{k=0}^{n-1} (x - \omega_n^k)$$

故 $R[x]/(x^n - 1)$ 与 R^n 代数同构．我们便称二者间的代数同构为 R 上的 n 点 *DFT*.

目录

全体代数同构的结构

$$\begin{tikzcd} R[x]/(m(x)) \arrow[r, "\bar{\varphi}"] & R^n \arrow[loop right, dashed, "?"] \end{tikzcd}$$

图

已经建立 $R[x]/(m(x)) \to R^n$ 的同构关系，这里 $m(x)$ 是若干不同一次因式的乘积. 但这种同构或不止一种. 为研究其是否在某种意义下具有唯一性，需研究全体同构 $\mathrm{Iso}(R[x]/(m(x)), R^n)$ 的结构. 该问题化归为研究 R^n 上全体自同构 $\mathrm{Aut}(R^n)$ 的结构.

命题

设 $\mathcal{A}$ 是一与 R^n 同构的任一代数. 固定代数同构 $\varphi : \mathcal{A} \to R^n$，则任一 $\mathcal{A} \to R^n$ 的代数同构 f 都具有形式 $f = p\varphi$，这里 $p \in \mathrm{Aut}(R^n)$.

R^n 上的自同构

设 $\mathbf{e}_1, \ldots, \mathbf{e}_n$ 是 R^n 上的自然基，设 $\sigma \in S_n$ 是有限集 $\{0, 1, \ldots, n-1\}$ 上的一个置换. 定义 R^n 上由置换 σ 诱导的模自同构

$$P_\sigma : \mathbf{e}_k \mapsto \mathbf{e}_{\sigma(k)}$$

容易验证 P_σ 保持逐项乘法，因此它也是 R^n 上的代数自同构.

下面的引理刻画了 R^n 上代数自同构的形式.

引理

全体 P_σ 构成 R^n 上全体代数自同构，即

$$\mathrm{Aut}(R^n) = \{P_\sigma : \sigma \in S_n\}$$

只需证对任意 R^n 上任意代数自同构 P，其都可被某一置换 $\sigma \in S_n$ 诱导得到．不妨考察 P 在 R^n 自然基下的矩阵表示 $(p_{i,j})_{(i,j)\in n\times n}$．则

$$P(\boldsymbol{e}_i) \times P(\boldsymbol{e}_i) = P(\boldsymbol{e}_i \times \boldsymbol{e}_i) = P(\boldsymbol{e}_i)$$

可分行写为对 $k = 0, 1, \ldots, n-1$，都有 $p_{k,i}^2 = p_{k,i}$，因为 R 是整环，故 $p_{k,i}$ 为 0 或 1，即矩阵各元素只能取 0 或 1．又对 $i \neq j$ 将

$$P(\boldsymbol{e}_i) \times P(\boldsymbol{e}_j) = P(\boldsymbol{e}_i \times \boldsymbol{e}_j) = P(\boldsymbol{0}) = \boldsymbol{0}$$

分行写开，得对 $k = 0, 1, \ldots, n-1$，都有 $p_{k,i}p_{k,j} = 0$．于是（由 R 是整环）矩阵任一行至多只能由一个 1．假如存在第 k 行全为 0，则 $\mathbf{e}_k \notin \operatorname{Im} P$，与 P 作为自同构的满性矛盾，故 P 的矩阵表示每行有且只有一个 1，其余为 0． P 的某两行亦不能完全相同，否则（由鸽巢原理）矩阵某列一定全为 0，与 P 作为自同构的单性矛盾．因此 P 的矩阵表示是一个置换矩阵，即 P 由一置换诱导．

DFT 的唯一性

推论

设 f 是任一 R 上的 n 点 *DFT*，则任何 R 上的 n 点 *DFT* g 都具有形式 $g = P_\sigma f$，这里 f 是一事先固定的 n 点 *DFT*.

作为推论，n 点 DFT 共有 $n!$ 种. 这一结果的显著性在于，只要不计求值得到的 n 个点值在 R^n 上的排列顺序，DFT 是唯一满足卷积性质的可逆线性映射.

目录

我们建立了

$$\begin{tikzcd} R[x]/(m(x)) \arrow[r, "\bar{\varphi}"] & R^n \arrow[loop right, "P_\sigma"] \end{tikzcd}$$

图

这一交换图可以继续扩展．将视角从多项式环转向矩阵代数，我们将看到，DFT 不仅是多项式环上的求值插值，更体现为矩阵代数上的相似对角化．

简单起见，下面只考察代数闭域的情况，并用域的常用记号 K 替代 R.

相似对角化

设 C 是域 K 上的 n 阶可对角化矩阵，特征值两两不同．设其特征多项式（或最小多项式）为 $m(x)$，Λ 为其对角化得到的矩阵．$K[C]$ 和 $K[\Lambda]$ 分别是矩阵 C 和 Λ 在 $K^{n\times n}$ 上生成的代数．

$$
\begin{tikzcd}
K[x]/(m(x)) \arrow[r, "\bar{\varphi}"] \arrow[d, dashed, "?"] & K^n \arrow[loop right, "P_\sigma"] \arrow[d, "\mathrm{diag}"] \\
K[C] \arrow[r, "\text{diagonalization}"] & K[\Lambda]
\end{tikzcd}
$$

图

对角化 C 的矩阵也同时对角化了 $K[C]$ 中的任意矩阵．若设这一对角化矩阵为 F，则 $A \mapsto F^{-1}AF$ 便规定了一个 $K[C] \to K[\Lambda]$ 的代数同构．K^n 与 $K[\Lambda]$ 的代数同构是平凡的．下面来建立 $K[x]/m(x)$ 与 $K[C]$ 间的联系．

命题

设 C 是域 K 上的 n 阶矩阵，$m(x)$ 是其最小多项式，则 $K[x]/m(x)$ 与 $K[C]$ 代数同构.

仍然考察 $K[x] \to K[C]$ 自然的“代入” $\psi : f \mapsto f(C)$. C 的全体零化多项式恰为 $m(x)$ 生成的 $K[x]$ 上的理想，因此 $\operatorname{Ker}\psi = (m(x))$. ψ 的满射性平凡. 用第一同构定理就得到结论.

$$\begin{tikzcd}
K[x] \arrow[rr, "\psi"] \arrow[d] & & K[C] \\
K[x]/\left(m(x)\right) \arrow[urr, dashed, "\bar{\psi}"] & &
\end{tikzcd}$$

图: 命题 3 证明示意图

友矩阵

为显式刻画上述对角化过程，我们选取一类特殊的矩阵[2]作为 C 进行研究：

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 1 \\ -c_0 & -c_1 & -c_2 & \dots & -c_{n-1} \end{pmatrix}$$

C 被称为首一多项式 $m(x) = x^n + c_{n-1}x^{n-1} + \cdots + c_0$ 的友矩阵 (companion matrix).

- 直接计算，C 的特征多项式恰为 $m(x)$.
- 直接验证，$(1, \lambda, \dots, \lambda^{n-1})^{\mathrm{T}}$ 是其特征值 λ 的一个特征向量.

[2]这类矩阵在高阶常系数线性 ODE 和常系数齐次线性递推中也有重要应用.

友矩阵的最小多项式

命题

C 的最小多项式也恰为 $m(x)$. 等价地，友矩阵的特征多项式与最小多项式相同.

等价地，我们研究 C^{T} 的最小多项式. 注意到如下事实：

$$C^{\mathrm{T}}\mathbf{e}_i = \begin{cases} \mathbf{e}_{i+1} & i = 0, 1, \ldots, n-2 \\ -\sum_{k=0}^{n-1} c_k \mathbf{e}_k & i = n-1 \end{cases}$$

考察任意不超过 $n-1$ 次的 C^{T} 的零化多项式 $f(x) := \sum_{k=0}^{n-1} a_k x^k$，有

$$\mathbf{0} = f(C^{\mathrm{T}})\mathbf{e}_0 = \sum_{k=0}^{n-1} a_k (C^{\mathrm{T}})^k \mathbf{e}_0 = \sum_{k=0}^{n-1} a_k \mathbf{e}_k$$

因此 $a_k = 0$ 对所有 k 成立，即 $f = 0$. 这说明 C^{T} 的（非零）零化多项式次数至少为 n. 再用零化多项式和最小多项式的整除关系就得到结论.

上述命题的逆命题在相似意义下成立.

命题

若矩阵的特征多项式与最小多项式相同，则它与其特征多项式对应的友矩阵相似.

可在 Jordan 标准型下理解. 此时每个特征值对应的 Jordan 块有且只有一个.

当友矩阵 C 可对角化时，其最小多项式可分解为不同一次因式的乘积. 又其最小多项式与特征多项式相同，故其必有 n 个两两不同的特征值 $\lambda_0, \lambda_1, \ldots, \lambda_{n-1}$. 结合上述命题可以看到，我们特殊地取 C 为友矩阵做研究是不失一般性的.

友矩阵对角化的显式表达

前面已经得到友矩阵特征向量的形式，因此 Vandermonde 矩阵

$$F = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_0 & \lambda_1 & \dots & \lambda_{n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_0^{n-1} & \lambda_1^{n-1} & \dots & \lambda_{n-1}^{n-1} \end{pmatrix}$$

正是将 C 对角化的矩阵.

$$F^{-1}CF = \Lambda = \mathrm{diag}(\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{n-1})$$

注意到 $K[C]$ 也被对角化 C 的矩阵同时对角化，故 $A \mapsto F^{-1}AF$ 确为 $K[C] \to K[\Lambda]$ 的代数同构，与先前的关于对角化的讨论结果一致.

循环矩阵的对角化

特别地，若取

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

它是基本循环矩阵，对应最小多项式 $m(x) = x^n - 1$. C 生成的代数 $K[C]$ 即 $K^{n \times n}$ 上的全体循环矩阵. 此时 DFT 体现为利用 DFT 矩阵

$$F = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \omega_n & \dots & \omega_n^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega_n^{n-1} & \dots & \omega_n^{(n-1)(n-1)} \end{pmatrix}$$

对循环矩阵进行对角化的过程.

结语

以刻画 DFT 的卷积性质为目标，以代数同构为构造手段，我们为理解 DFT 的代数含义提供了两个视角：

- DFT 是多项式商环上的多点求值插值
- DFT 是矩阵代数上的相似对角化

可见 DFT 背后的代数理论非常丰富，不失为联系起本科阶段代数课程的有趣实例，亦体现出代数工具与视角在工程实践中的强大效用.

$$\begin{tikzcd}
K[x]/(m(x)) \arrow[r, "\bar{\varphi}"] \arrow[d, "\bar{\psi}"] & K^n \arrow[loop right, "P_\sigma"] \arrow[d, "\mathrm{diag}"] \\
K[C] \arrow[r, "\text{diagonalization}"] & K[\Lambda]
\end{tikzcd}$$

图

参考文献 I

[AB75] R.C. Agarwal and C.S. Burrus. "Number theoretic transforms to implement fast digital convolution". In: *Proceedings of the IEEE* 63.4 (Apr. 1975), pp. 550–560. ISSN: 1558-2256. DOI: 10.1109/PROC.1975.9791.

[Ami16] Emmanuel Amiot. *Music Through Fourier Space*. Computational Music Science. Cham: Springer International Publishing, 2016. ISBN: 978-3-319-45580-8 978-3-319-45581-5. DOI: 10.1007/978-3-319-45581-5.

[BR23] Isabelle Baraquin and Nicolas Ratier. "Uniqueness of the discrete Fourier transform". In: *Signal Processing* 209 (Aug. 2023), p. 109041. ISSN: 0165-1684. DOI: 10.1016/j.sigpro.2023.109041.

参考文献 II

[Für09] Martin Fürer. "Faster Integer Multiplication". In: *SIAM Journal on Computing* 39.3 (Jan. 2009), pp. 979–1005. ISSN: 0097-5397. DOI: 10.1137/070711761.

[Nic71] Peter J. Nicholson. "Algebraic theory of finite fourier transforms". In: *Journal of Computer and System Sciences* 5.5 (Oct. 1971), pp. 524–547. ISSN: 0022-0000. DOI: 10.1016/S0022-0000(71)80014-4.