

1 R-Module Con

Định nghĩa.

Cho R là vành giao hoán, M là R -module. Tập hợp $N \subseteq M$ gọi là R -module con nếu:

1. $0_M \in N$ (chứa phần tử không)
2. $\forall x, y \in N : x + y \in N$ (đóng dưới phép cộng)
3. $\forall r \in R, x \in N : r \cdot x \in N$ (đóng dưới tác động vô hướng)

1.1 Ví dụ 1: Các bội số nguyên

Ví dụ. Cho $R = \mathbb{Z}$, $M = \mathbb{Z}$, $n \in \mathbb{Z}$. Chứng minh: $N = n\mathbb{Z}$ là module con.

Chứng minh:

1. $0 = n \cdot 0 \in N \checkmark$
2. Với $nk_1, nk_2 \in N$: $nk_1 + nk_2 = n(k_1 + k_2) \in N \checkmark$
3. Với $m \in \mathbb{Z}, nk \in N$: $m(nk) = n(mk) \in N \checkmark$

1.2 Ví dụ 2: Không phải module con

Ví dụ. Cho $R = k[x, y]$, $M = k[x, y]$. Xét N không là module con.

Chứng minh:

Vì $x, y \in M$ nhưng $x + y \notin N$. \times

1.3 Ví dụ 3: Annihilator

Ví dụ. Cho M là R -module. Định nghĩa:

$$\text{Ann}(M) = \{r \in R \mid r \cdot m = 0, \forall m \in M\}$$

Chứng minh: $\text{Ann}(M)$ là R -module con của R .

Chứng minh:

1. $0 \cdot m = 0$ với mọi $m \in M$, nên $0 \in \text{Ann}(M) \checkmark$
2. Với $r_1, r_2 \in \text{Ann}(M)$: $(r_1 + r_2) \cdot m = 0$, nên $r_1 + r_2 \in \text{Ann}(M) \checkmark$
3. Với $a \in R, r \in \text{Ann}(M)$: $(ar) \cdot m = 0$, nên $ar \in \text{Ann}(M) \checkmark$

1.4 Các tính chất cơ bản

Mệnh đề 1. Giao của các R -module con là R -module con.

Chứng minh:

Cho họ các module con của M . Đặt $N = \bigcap_{\{i \in I\}} N_i$.

1. $0_M \in N \checkmark$
2. Với $x, y \in N$: $x + y \in N \checkmark$
3. Tương tự cho tính đóng dưới tác động của $R \checkmark$

Mệnh đề 2. Module con sinh bởi tập $S \subseteq M$ là tập tất cả các tổng hữu hạn $\sum_{\{i=1\}}^n r_i s_i$ với $r_i \in R, s_i \in S$.

1.5 Định lý đẳng cấu

Định lý. Cho $\varphi : X \xrightarrow{\varphi} M$ là module đồng cấu với $\ker(\varphi) = A$. Khi đó:

$$\frac{X}{A} \cong \text{im}(\varphi)$$

Chứng minh:

Bước 1: Xây dựng ánh xạ

Định nghĩa $\bar{\varphi} : \frac{X}{A} \xrightarrow{\bar{\varphi}} M$ bởi $\bar{\varphi}(x + A) = \varphi(x)$.

Bước 2: Được định nghĩa tốt

Nếu $x + A = y + A$ thì $x - y \in A$, nên $\varphi(x) = \varphi(y) \checkmark$

Bước 3: Đồng cấu

Tính cộng tính: $\bar{\varphi}((x + A) + (y + A)) = \bar{\varphi}(x + A) + \bar{\varphi}(y + A) \checkmark$

Bước 4: Đơn cấu

$\bar{\varphi}(x + A) = 0 \Rightarrow x \in A \Rightarrow x + A = 0_{\{\frac{X}{A}\}} \checkmark$

Bước 5: Toàn cấu

Với mọi $m \in \text{im}(\varphi)$, tồn tại x sao cho $\bar{\varphi}(x + A) = m \checkmark$

1.6 Dãy khớp

Định nghĩa. Dãy các module đồng cấu

$$\dots \rightarrow A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{g} C \rightarrow \dots$$

được gọi là **khớp** nếu $\text{im}(f) = \ker(g)$ tại mỗi vị trí.

1.6.1 Dãy khớp ngắn

Định nghĩa. Dãy khớp ngắn là:

$$0 \rightarrow N \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} P \rightarrow 0$$

Tính chất: f đơn cấu, g toàn cấu, $\text{im}(f) = \ker(g)$

1.6.2 Dãy khớp cho giao và tổng

Định lý. Cho N, P là các R -module con của M . Tồn tại dãy khớp:

$$0 \rightarrow N \cap P \xrightarrow{\varphi} N \times P \xrightarrow{\psi} N + P \rightarrow 0$$

với $\varphi(x) = (x, x)$ và $\psi(y, z) = y - z$.

Kiểm tra khớp:

Tại $N \cap P$: φ đơn cấu vì $\varphi(x) = (0, 0) \Rightarrow x = 0$ ✓

Tại $N \times P$: $\text{im}(\varphi) = \ker(\psi)$ vì $\psi(\varphi(x)) = 0$ ✓

Tại $N + P$: ψ toàn cấu vì với $w = y + z$ có $\psi(y, -z) = w$ ✓

1.7 Tích tensor

Định nghĩa. Cho R là vành giao hoán, M, N là R -module. Tích tensor $M \otimes_R N$ là module thương với tính phổ dụng.

Ký hiệu: $m \otimes n$ là ánh của cặp (m, n) trong module thương.

1.7.1 Tính chất cơ bản

Mệnh đề 1. Ánh xạ $\varphi : M \times N \xrightarrow{\varphi} M \otimes_R N$ định bởi $\varphi(m, n) = m \otimes n$ là song tuyến tính:

- $(m_1 + m_2) \otimes n = m_1 \otimes n + m_2 \otimes n$
- $m \otimes (n_1 + n_2) = m \otimes n_1 + m \otimes n_2$
- $(r \cdot m) \otimes n = m \otimes (r \cdot n) = r \cdot (m \otimes n)$

Mệnh đề 2 (Tính phổ dụng). Cho $f : M \times N \xrightarrow{f} P$ song tuyến tính. Tồn tại duy nhất đồng cấu $\bar{f} : M \otimes_R N \xrightarrow{\bar{f}} P$ sao cho $\bar{f}(m \otimes n) = f(m, n)$.

1.7.2 Ví dụ

Ví dụ 1: $\mathbb{Z} \otimes_{\mathbb{Z}} \mathbb{Z} \cong \mathbb{Z}$

Ví dụ 2: $M \otimes_R R \cong M$

Ví dụ 3: Từ dãy khorp 0 → N → M → P → 0, ta có dãy:

$$N \otimes_R Q \xrightarrow{f} M \otimes_R Q \xrightarrow{g} P \otimes_R Q$$

(chỉ khorp tại $M \otimes_R Q$ trong trường hợp tổng quát - liên quan đến khái niệm “flatness”)

1.8 Bài tập

1.8.1 Bài 2.1

Bài tập 2.1

Cho dãy khorp ngắn:

$$0 \rightarrow N \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} P \rightarrow 0$$

trong đó N, P là các R -môđun hữu hạn sinh. Chứng minh rằng M là R -môđun hữu hạn sinh.

Chứng minh:

Gọi $N = \langle n_1, n_2, \dots, n_k \rangle$ và $P = \langle p_1, p_2, \dots, p_l \rangle$.

Giả sử $m \in M$, suy ra $g(m) \in P$.

Tồn tại $a_i \in R$ sao cho $g(m) = \sum_{\{i=1\}}^l a_i p_i$.

Vì g là toàn cầu nên tồn tại $m_i \in M$ sao cho $p_i = g(m_i)$. Do đó:

$$g(m) = \sum_{\{i=1\}}^l a_i g(m_i) = g\left(\sum_{\{i=1\}}^l a_i m_i\right)$$

suy ra $m - \sum_{\{i=1\}}^l a_i m_i \in \ker(g) = \text{im}(f)$.

Vì thế tồn tại $n \in N$ sao cho $m - \sum_{\{i=1\}}^l a_i m_i = f(n)$.

Do $n \in N$ nên tồn tại $b_j \in R$ sao cho $n = \sum_{\{j=1\}}^k b_j n_j$.

$$\begin{aligned} \text{Vì vậy: } m &= \sum_{\{i=1\}}^l a_i m_i + f\left(\sum_{\{j=1\}}^k b_j n_j\right) = \sum_{\{i=1\}}^l a_i m_i + \\ &\quad \sum_{\{j=1\}}^k b_j f(n_j) \end{aligned}$$

Nên $M = \langle m_1, m_2, \dots, m_l, f(n_1), f(n_2), \dots, f(n_k) \rangle$ ✓

1.8.2 Bài 2.2

Bài tập 2.2

Cho dãy khớp:

$$A \xrightarrow{f} B \xrightarrow{g} C \xrightarrow{h} D$$

Chứng minh rằng các phát biểu sau là tương đương:

- (a) f là toàn cầu.
- (b) g là đồng cấu không.
- (c) h là đơn cấu.

Chứng minh:

Bước 1: $(a) \Rightarrow (b)$

Với mọi $b \in B$, tồn tại $a \in A$ sao cho $f(a) = b$ (vì f toàn cầu).

Nên $gf(a) = g(b) = 0$ (từ tính khớp tại B : $\text{im}(f) = \ker(g)$).

Vì b tùy ý, ta có $g = 0$. ✓

Bước 2: $(b) \Rightarrow (c)$

Với mọi $c \in \ker(h)$. Do tính khớp tại C : $\ker(h) = \text{im}(g)$, nên tồn tại $b \in B$ sao cho $c = g(b)$.

Nhưng $g = 0$ (giả thiết (b)), nên $c = 0$.

Vì thế $\ker(h) = \{0\}$, tức là h đơn cấu. ✓

Bước 3: $(c) \Rightarrow (a)$

Với mọi $b \in B$, suy ra $g(b) \in \text{im}(g) = \ker(h)$.

Vì h đơn cấu (giả thiết (c)), nên $\ker(h) = \{0\}$, suy ra $g(b) = 0$.

Do đó $b \in \ker(g) = \text{im}(f)$, nên tồn tại $a \in A$ sao cho $b = f(a)$.

Tức là f toàn cầu. ✓