

Linear Algebra Done Right 6A

1. 证明:如果 $v_1, \dots, v_m \in V$, 那么

$$\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \langle v_j, v_k \rangle \geq 0$$

Proof.

我们有

$$\begin{aligned} \|v_1 + \dots + v_m\|^2 &= \sum_{j=1}^m \|v_j\|^2 + 2 \sum_{j,k \in \{1, \dots, m\}, j \neq k} \langle v_j, v_k \rangle \\ &= \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \langle v_j, v_k \rangle \end{aligned}$$

于是

$$\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \langle v_j, v_k \rangle = \|v_1 + \dots + v_m\|^2 \geq 0$$

2. 设 $S \in \mathcal{L}(V)$, 定义 $\langle \cdot, \cdot \rangle_S$ 为

$$\langle u, v \rangle_S = \langle Su, Sv \rangle$$

对所有 $u, v \in V$ 成立. 试证明: $\langle \cdot, \cdot \rangle_S$ 是 V 上的内积, 当且仅当 S 是单射.

Proof.

我们有

$$\langle \cdot, \cdot \rangle_S \text{ 是内积} \Leftrightarrow \langle v, v \rangle_S = 0 \text{ 当且仅当 } v = \mathbf{0} \Leftrightarrow \langle Sv, Sv \rangle = 0 \text{ 当且仅当 } Sv = \mathbf{0} \Leftrightarrow \text{null } S = \{\mathbf{0}\} \Leftrightarrow S \text{ 是单射}$$

3. 证明下列命题.

(1) 证明: 将 \mathbb{R}^2 中的有序对 $((x_1, x_2), (y_1, y_2))$ 映射到 $|x_1 y_1| + |x_2 y_2|$ 的函数不是 \mathbb{R}^2 上的内积.

(2) 证明: 将 \mathbb{R}^3 中的有序对 $((x_1, x_2, x_3), (y_1, y_2, y_3))$ 映射到 $x_1 y_1 + x_3 y_3$ 的函数不是 \mathbb{R}^3 上的内积.

Proof.

(1) 令 $u = (1, 0), v = (-1, 0), w = (1, 0)$, 于是

$$f(u, w) = 1 \quad f(v, w) = 1 \quad f(u + v, w) = 0$$

于是 $f(u+v, w) \neq f(u, w) + f(v, w)$, 因而这映射 f 不满足第一位上的可加性, 不是 \mathbb{R}^2 上的内积.

(2) 令 $v = (0, 1, 0)$, 则 $g(v, v) = 0$, 而 $v \neq \mathbf{0}$, 因而这映射 g 不满足定性, 不是 \mathbb{R}^3 上的内积.

4. 设 $T \in \mathcal{L}(V)$ 使得 $\|Tv\| \leq \|v\|$ 对任意 $v \in V$ 成立. 试证明: $T - \sqrt{2}I$ 是单射.

Proof.

若 $T - \sqrt{2}I$ 不是单射, 则存在 $v \in V$ 且 $v \neq \mathbf{0}$ 使得 $Tv = \sqrt{2}v$. 于是

$$\|Tv\| = \|\sqrt{2}v\| = \sqrt{2}\|v\| > \|v\|$$

这与题设矛盾, 从而 $T - \sqrt{2}I$ 是单射.

5. 设 V 是实内积空间. 证明下列命题.

(1) 证明: $\langle u+v, u-v \rangle = \|u\|^2 - \|v\|^2$ 对任意 $u, v \in V$ 成立.

(2) 证明: 若 $u, v \in V$ 满足 $\|u\| = \|v\|$, 那么 $u+v$ 正交于 $u-v$.

(3) 证明: 菱形的对角线相互垂直.

Proof.

(1) 我们有

$$\begin{aligned}\langle u+v, u-v \rangle &= \langle u, u-v \rangle + \langle v, u-v \rangle \\ &= \langle u, u \rangle - \langle u, v \rangle + \langle v, u \rangle - \langle v, v \rangle \\ &= \langle u, u \rangle - \langle v, v \rangle \\ &= \|u\|^2 - \|v\|^2\end{aligned}$$

(2) 我们有

$$\|u\| = \|v\| \Rightarrow \langle u+v, u-v \rangle = 0 \Rightarrow u+v \perp u-v$$

(3) 令 $V = \mathbb{R}^2$, 考虑菱形 $ABCD$, 令 $u = \overrightarrow{BA}$, $v = \overrightarrow{BC}$, 则有 $u+v = \overrightarrow{BD}$, $u-v = \overrightarrow{CA}$.

由于 $BA = BC$, 则 $\|u\| = \|v\|$, 由(2)可知 \overrightarrow{BD} 和 \overrightarrow{CA} 正交, 因而 $BD \perp AC$, 命题得证.

6. 设 $u, v \in V$, 试证明: $\langle u, v \rangle = 0$ 当且仅当对任意 $a \in \mathbb{F}$ 都有 $\|u\| \leq \|u + av\|$.

Proof.

\Rightarrow : 对任意 $a \in \mathbb{F}$ 有 $\langle u, av \rangle = \bar{a} \langle u, v \rangle = 0$, 于是 u 和 av 正交. 于是

$$\|u + av\|^2 = \|u\|^2 + \|av\|^2 \geq \|u\|^2$$

于是 $\|u\| \leq \|u + av\|$.

\Leftarrow : 考虑 u 的正交分解, 取 $c = \frac{\langle u, v \rangle}{\|v\|^2}$. 取 $w = u - cv$, 则 $\langle w, v \rangle = 0$. 于是

$$\|u + cv\|^2 = \|w\|^2 = \|u\|^2 - \|cv\|^2 = \|u\|^2 - c^2\|v\|^2 \geq \|u\|^2$$

于是 $c = 0$, 因而 $\langle u, v \rangle = \langle w, v \rangle = 0$.

7. 设 $u, v \in V$. 试证明: $\|au + bv\| = \|bu + av\|$ 对任意 $a, b \in \mathbb{R}$ 成立, 当且仅当 $\|u\| = \|v\|$.

Proof.

\Rightarrow : 取 $a = 1, b = 0$ 即有 $\|u\| = \|v\|$.

\Leftarrow : 当 $\|u\| = \|v\|$ 时, 我们有

$$\begin{aligned}\|au + bv\|^2 &= \langle au + bv, au + bv \rangle \\ &= a^2\|u\|^2 + b^2\|v\|^2 + 2ab\langle u, v \rangle \\ &= a^2\|v\|^2 + b^2\|u\|^2 + 2ab\langle u, v \rangle \\ &= \langle bu + av, bu + av \rangle \\ &= \|bu + av\|^2\end{aligned}$$

于是 $\|au + bv\| = \|bu + av\|$.

8. 设 $a, b, c, x, y \in \mathbb{R}$ 且 $a^2 + b^2 + c^2 + x^2 + y^2 \leq 1$. 试证明: $a + b + c + 4x + 9y \leq 10$.

Proof.

我们有

$$(a + b + c + 4x + 9y)^2 \leq (a^2 + b^2 + c^2 + x^2 + y^2)(1^2 + 1^2 + 1^2 + 4^2 + 9^2) \leq 100$$

两边开平方即得

$$a + b + c + 4x + 9y \leq 10$$

9. 设 $u, v \in V, \|u\| = \|v\| = \langle u, v \rangle = 1$. 试证明: $u = v$.

Proof.

据Cauchy-Schwarz不等式, $|\langle u, v \rangle| \leq \|u\| \|v\|$ 当且仅当 $u = \lambda v, \lambda \in \mathbb{F}$ 时成立.

又 $1 = \langle u, v \rangle = \langle v, \lambda v \rangle = \lambda \|v\|^2 = \lambda$, 于是 $\lambda = 1$, 即 $u = v$.

10. 设 $u, v \in V, \|u\| < 1$ 且 $\|v\| < 1$. 试证明

$$\sqrt{1 - \|u\|^2} \sqrt{1 - \|v\|^2} \leq 1 - |\langle u, v \rangle|$$

Proof.

我们有

$$(\|u\| - \|v\|)^2 \geq 0$$

于是

$$\|u\|^2 + \|v\|^2 \geq 2\|u\| \|v\|$$

变形可得

$$(1 - \|u\|^2)(1 - \|v\|^2) \leq (1 - \|u\| \|v\|)^2$$

而 $\|u\|, \|v\| < 1$, 于是

$$\sqrt{1 - \|u\|^2} \sqrt{1 - \|v\|^2} \leq 1 - \|u\| \|v\|$$

据Cauchy-Schwarz不等式有

$$|\langle u, v \rangle| \leq \|u\| \|v\|$$

于是

$$\sqrt{1 - \|u\|^2} \sqrt{1 - \|v\|^2} \leq 1 - |\langle u, v \rangle|$$

11. 求向量 $u, v \in \mathbb{R}^2$ 使得 u 是 $(1, 3)$ 的标量倍, v 正交于 $(1, 3)$, 且 $u + v = (1, 2)$.

Solution.

考虑 $(1, 2)$ 在 $(1, 3)$ 上的正交分解 $(1, 2) = c(1, 3) + w$, 其中 $c = \frac{\langle (1, 2), (1, 3) \rangle}{\|(1, 3)\|^2} = \frac{7}{10}$.

于是令 $u = \left(\frac{7}{10}, \frac{21}{10}\right), v = \left(\frac{3}{10}, -\frac{1}{10}\right)$.

12. 设 $a, b, c, d \in \mathbb{R}^*$.

(1) 试证明: $(a + b + c + d) \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} + \frac{1}{d} \right) \geq 16$.

(2) 求上述不等式的取等条件.

Solution.

(1) 令 $u = (\sqrt{a}, \sqrt{b}, \sqrt{c}, \sqrt{d})$, $v = \left(\sqrt{\frac{1}{a}}, \sqrt{\frac{1}{b}}, \sqrt{\frac{1}{c}}, \sqrt{\frac{1}{d}} \right)$. 据Cauchy-Schwarz不等式有

$$|\langle u, v \rangle| \leq \|u\| \|v\|$$

即

$$4 \leq \sqrt{a+b+c+d} \cdot \sqrt{\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} + \frac{1}{d}}$$

两边平方即得

$$(a+b+c+d) \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} + \frac{1}{d} \right) \geq 16$$

(2) 据Cauchy-Schwarz不等式的取等条件, 当且仅当 $u = \lambda v$ 时取等, 即 $a = b = c = d$.

13. 证明: 如果 $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{R}$, 那么

$$\left(\frac{a_1 + \dots + a_n}{n} \right)^2 \leq \frac{a_1^2 + \dots + a_n^2}{n}$$

Proof.

据Cauchy-Schwarz不等式有

$$\left(\frac{a_1 + \dots + a_n}{n} \right)^2 \leq \left(n \cdot \frac{1}{n^2} \right) (a_1^2 + \dots + a_n^2) = \frac{a_1^2 + \dots + a_n^2}{n}$$

于是命题得证.

14. 设 $v \in V$ 且 $v \neq \mathbf{0}$. 试证明: 如果 $u \in V$ 且 $\|u\| = 1$, 那么

$$\left\| v - \frac{v}{\|v\|} \right\| \leq \|v - u\|$$

当且仅当 $u = \frac{v}{\|v\|}$ 时等号成立.

Proof.

我们有

$$||v - u||^2 - (||v|| - ||u||)^2 = 2\langle v, u \rangle + 2||u||||v|| \geq 0$$

即

$$|||v|| - ||u||| \leq ||v - u||^2$$

当且仅当 v, u 成标量倍关系时等式成立,即 $u = \frac{v}{||v||}$ 或 $u = -\frac{v}{||v||}$ 时等号成立.

我们有

$$\left|1 - \frac{1}{||v||}\right| < 1 + \frac{1}{||v||}$$

于是

$$\min ||v - u|| = \left\|v - \frac{v}{||v||}\right\|$$

命题得证.

15. 设 $u, v \in \mathbb{R}^2$ 且 $u, v \neq \mathbf{0}$,试证明:

$$\langle u, v \rangle = ||u||||v|| \cos \theta$$

其中 θ 为向量 u, v 的夹角.

Proof.

对于 $u, v, u - v$ 构成的三角形使用余弦定理,则有

$$\cos \theta = \frac{||u||^2 + ||v||^2 - ||u - v||^2}{2||u||||v||}$$

而

$$||u - v||^2 = ||u||^2 + ||v||^2 - 2\langle u, v \rangle$$

代入上式有

$$\cos \theta = \frac{\langle u, v \rangle}{||u||||v||}$$

变形可得

$$\langle u, v \rangle = ||u||||v|| \cos \theta$$

于是命题得证.

16. \mathbb{R}^2 和 \mathbb{R}^3 中向量的夹角可以用几何方法定义,然而对于更高维的空间 \mathbb{R}^n 中的几何则并不明晰. 因此,定义 $x, y \in \mathbb{R}^n$ 的夹角 θ 为

$$\arccos \frac{\langle x, y \rangle}{||x||||y||}$$

这一定义的动机来源于 \mathbb{R}^2 和 \mathbb{R}^3 中夹角的几何意义.试解释:证明这一定义的成立需要用到Cauchy-Schwarz不等式.

Solution.

为保证arccos函数有意义,这一定义的成立至少要求

$$-1 \leq \frac{\langle x, y \rangle}{\|x\| \|y\|} \leq 1$$

即

$$|\langle x, y \rangle| \leq \|x\| \|y\|$$

这就需要用到Cauchy-Schwarz不等式.

17. 试证明:对于任意 $a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n \in \mathbb{R}$,都有

$$\left(\sum_{k=1}^n a_k b_k \right)^2 \leq \left(\sum_{k=1}^n k a_k^2 \right) \left(\sum_{k=1}^n \frac{b_k^2}{k} \right)$$

Proof.

令 $u = (a_1, \sqrt{2}a_2, \dots, \sqrt{n}a_n)$, $v = \left(b_1, \frac{b_2}{\sqrt{2}}, \dots, \frac{b_n}{\sqrt{n}}\right)$.据Cauchy-Schwarz不等式有

$$|\langle u, v \rangle|^2 \leq \|u\|^2 \|v\|^2$$

即

$$\left(\sum_{k=1}^n a_k b_k \right)^2 \leq \left(\sum_{k=1}^n k a_k^2 \right) \left(\sum_{k=1}^n \frac{b_k^2}{k} \right)$$

18. 设函数 $f(x) : [1, +\infty) \rightarrow [0, +\infty)$ 连续.

(1) 试证明:

$$\left(\int_1^{+\infty} f(x) dx \right)^2 \leq \int_1^{+\infty} x^2 (f(x))^2 dx$$

(2) 试给出上述不等式两边均有限且取等时 $f(x)$ 满足的条件.

Proof.

(1) 考虑 $\mathbb{R}^{[1,t]}$ 上的内积

$$\langle u, v \rangle = \int_1^t uv$$

据Cauchy-Schwarz不等式有

$$\left(\int_1^t uv \right)^2 \leq \left(\int_1^t u^2 \right) \left(\int_1^t v^2 \right)$$

于是

$$\left(\int_1^t f(x) dx \right)^2 = \left(\int_1^t \frac{x}{x} f(x) dx \right) \leq \left(\int_1^t x^2 (f(x))^2 dx \right) \left(\int_1^t \frac{1}{x^2} dx \right) = \left(\int_1^t x^2 (f(x))^2 dx \right) \left(1 - \frac{1}{t} \right)$$

而 $\lim_{t \rightarrow +\infty} \left(1 - \frac{1}{t} \right) = 1$, 又 $f(x)$ 非负, 于是

$$\left(\int_1^{+\infty} f(x) dx \right)^2 \leq \int_1^{+\infty} x^2 (f(x))^2 dx$$

(2) 当且仅当 $xf(x)$ 是 $\frac{1}{x}$ 的标量倍, 即 $f(x) = \frac{\lambda}{x^2}$, 其中 $\lambda \in \mathbb{R}^*$. 此时

$$\left(\int_1^{+\infty} f(x) dx \right)^2 = \int_1^{+\infty} x^2 (f(x))^2 dx = \lambda^2$$

19. 设 v_1, \dots, v_n 是 V 的一个基, 且 $T \in \mathcal{L}(V)$. 试证明: 如果 λ 是 T 的特征值, 那么

$$|\lambda|^2 \leq \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n |\mathcal{M}(T)_{j,k}|^2$$

Proof.

考虑 V 上的内积

$$\langle a_1 v_1 + \dots + a_n v_n, b_1 v_1 + \dots + b_n v_n \rangle = a_1 \overline{b_1} + \dots + a_n \overline{b_n}$$

考虑 T 的特征向量 $v := a_1 v_1 + \dots + a_n v_n$ 使得 $Tv = \lambda v$, 则有

$$Tv = \sum_{k=1}^n a_k T v_k = \sum_{k=1}^n \left(a_k \sum_{j=1}^n \mathcal{M}(T)_{j,k} v_j \right) = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{k=1}^n a_k \mathcal{M}(T)_{j,k} \right) v_j$$

于是

$$\|Tv\|^2 = \sum_{j=1}^n \left| \sum_{k=1}^n a_k \mathcal{M}(T)_{j,k} \right|^2$$

又因为 $\|Tv\|^2 = |\lambda|^2\|v\|^2$,于是

$$|\lambda|^2 = \frac{\sum_{j=1}^n \left| \sum_{k=1}^n a_k \mathcal{M}(T)_{j,k} \right|^2}{\|v\|^2} = \frac{\sum_{j=1}^n \left| \sum_{k=1}^n a_k \mathcal{M}(T)_{j,k} \right|^2}{\sum_{k=1}^n |a_k|^2}$$

据Cauchy-Schwarz不等式,对于任意 $j \in \{1, \dots, n\}$ 有

$$\left| \sum_{k=1}^n a_k \mathcal{M}(T)_{j,k} \right|^2 \leq \left(\sum_{k=1}^n |a_k|^2 \right) \left(\sum_{k=1}^n |\mathcal{M}(T)_{j,k}|^2 \right)$$

于是

$$|\lambda|^2 \leq \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n |\mathcal{M}(T)_{j,k}|^2$$

20. 试证明:如果 $u, v \in V$,那么 $|||u|| - ||v||| \leq ||u - v||$.

Proof.

我们有

$$\|u - v\|^2 - (||u|| - ||v||)^2 = 2\langle u, v \rangle + 2||u|| ||v|| \geq 0$$

即

$$|||u|| - ||v||| \leq \|u - v\|$$

当且仅当 v, u 成标量倍关系时等式成立.

21. 设 $u, v \in V$ 使得

$$\|u\| = 3 \quad \|u + v\| = 4 \quad \|u - v\| = 6$$

求 $\|v\|$.

Solution.

根据平行四边形不等式有

$$4^2 + 6^2 = 2(3^2 + \|v\|^2)$$

于是 $\|v\| = \sqrt{17}$.

22. 试证明:如果 $u, v \in V$,那么

$$\|u + v\| \|u - v\| \leq \|u\|^2 + \|v\|^2$$

Proof.

我们有

$$\begin{aligned} & (\|u\|^2 + \|v\|^2)^2 - (\|u + v\| \|u - v\|)^2 \\ &= (\|u\|^2 + \|v\|^2)^2 - \|u + v\|^2 \|u - v\|^2 \\ &= (\|u\|^2 + \|v\|^2)^2 - (\|u\|^2 + \|v\|^2 + 2|\langle u, v \rangle|) (\|u\|^2 + \|v\|^2 - 2|\langle u, v \rangle|) \\ &= (\|u\|^2 + \|v\|^2)^2 - (\|u\|^2 + \|v\|^2)^2 + 4|\langle u, v \rangle|^2 \\ &= 4|\langle u, v \rangle|^2 \geq 0 \end{aligned}$$

即

$$(\|u + v\| \|u - v\|)^2 \leq (\|u\|^2 + \|v\|^2)^2$$

两边开平方即得

$$\|u + v\| \|u - v\| \leq \|u\|^2 + \|v\|^2$$

23. 设 $v_1, \dots, v_m \in V$ 使得对任意 $k \in \{1, \dots, m\}$ 都有 $\|v_k\| \leq 1$.试证明:存在 $a_1, \dots, a_m \in \{-1, 1\}$ 使得

$$\|a_1 v_1 + \dots + a_m v_m\| \leq \sqrt{m}$$

Proof.

对 m 使用归纳法.当 $m = 1$ 时,命题的成立是显然的,因为 $\|v_1\| \leq 1$.

现在假设 $m > 1$,且命题对所有小于 m 的正整数均成立.令 $v = a_1 v_1 + \dots + a_{m-1} v_{m-1}$,于是 $\|v\| \leq \sqrt{m-1}$.

我们有

$$\|v + a_m v_m\|^2 = \|v\|^2 + \|v_m\|^2 + 2a_m \langle v, v_m \rangle = m + 2a_m \langle v, v_m \rangle$$

若 $\langle v, v_m \rangle \geq 0$,则令 $a_m = -1$,否则令 $a_m = 1$,则有

$$\|v + a_m v_m\|^2 \leq m$$

两边开平方即得

$$\|v + a_m v_m\| = \|a_1 v_1 + \dots + a_m v_m\| \leq \sqrt{m}$$

归纳可知命题成立.

24. 证明或给出一反例:如果 $\|\cdot\|$ 是与 \mathbb{R}^2 上的一内积关联的范数,那么存在 $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ 使得 $\|(x, y)\| \neq \max\{|x|, |y|\}$.

Proof.

如果对于任意 $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ 都有 $\|(x, y)\| = \max\{|x|, |y|\}$,不妨令 $f((x, y)) = \max\{|x|, |y|\}$.

令 $u = (1, 0), v = (1, 1)$,则有

$$f^2(u+v) + f^2(u-v) = 5 \neq 4 = 2(f^2(u) + f^2(v))$$

于是这定义不满足范数的性质.于是对于任意 \mathbb{R}^2 上的范数,总存在 $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ 使得 $\|(x, y)\| \neq \max\{|x|, |y|\}$.

25. 设 $p > 0$.试证明: \mathbb{R}^2 上存在一内积,使得与其关联的范数由下式给出:

$$\|(x, y)\| = (|x|^p + |y|^p)^{\frac{1}{p}}, \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2$$

当且仅当 $p = 2$.

Proof.

令 $f(x, y) = (|x|^p + |y|^p)^{\frac{1}{p}}, u = (1, 0), v = (0, 1)$,则有

$$f^2(u+v) + f^2(u-v) = 2 \cdot 2^{\frac{2}{p}}$$

$$f^2(u) + f^2(v) = 2$$

由平行四边形等式可得

$$2 \cdot 2^{\frac{2}{p}} = 2 \cdot 2$$

于是 $2^{\frac{2}{p}} = 2$,即 $p = 2$.

26. 设 V 是实内积空间,试证明:对任意 $u, v \in V$,有

$$\langle u, v \rangle = \frac{\|u+v\|^2 - \|u-v\|^2}{4}$$

Proof.

我们有

$$||u+v||^2 = \langle u+v, u+v \rangle = \langle u, u \rangle + \langle u, v \rangle + \langle v, u \rangle + \langle v, v \rangle$$

同理有

$$||u-v||^2 = \langle u-v, u-v \rangle = \langle u, u \rangle - \langle u, v \rangle - \langle v, u \rangle - \langle v, v \rangle$$

在实内积空间上有

$$\langle u, v \rangle = \langle v, u \rangle$$

于是将两式相减可得

$$||u+v||^2 - ||u-v||^2 = 4\langle u, v \rangle$$

整理可得

$$\langle u, v \rangle = \frac{||u+v||^2 - ||u-v||^2}{4}$$

27. 设 V 是复内积空间,试证明:对任意 $u, v \in V$,有

$$\langle u, v \rangle = \frac{||u+v||^2 - ||u-v||^2 + ||u+iv||^2 i - ||u-iv||^2 i}{4}$$

Proof.

我们有

$$||u+v||^2 = ||u||^2 + ||v||^2 + \langle u, v \rangle + \langle v, u \rangle$$

同理有

$$||u-v||^2 = ||u||^2 + ||v||^2 - \langle u, v \rangle - \langle v, u \rangle$$

$$||u+iv||^2 = ||u||^2 + ||v||^2 - i\langle u, v \rangle + i\langle v, u \rangle$$

$$||u-iv||^2 = ||u||^2 + ||v||^2 + i\langle u, v \rangle - i\langle v, u \rangle$$

在复内积空间上有

$$\langle v, u \rangle = \overline{\langle u, v \rangle}$$

于是

$$\begin{aligned} & ||u+v||^2 - ||u-v||^2 + ||u+iv||^2 i - ||u-iv||^2 i \\ &= (2\langle u, v \rangle + 2\langle v, u \rangle) + (i\langle u, v \rangle - i\langle v, u \rangle + i\langle u, v \rangle - i\langle v, u \rangle) \\ &= 4\langle u, v \rangle \end{aligned}$$

整理可得

$$\langle u, v \rangle = \frac{\|u + v\|^2 - \|u - v\|^2 + \|u + iv\|^2 i - \|u - iv\|^2 i}{4}$$

28. 设向量空间 U 上的范数是这样的一个函数

$$\|\cdot\| : U \rightarrow [0, +\infty)$$

其满足如下性质.

(1) $\|u\| = 0$ 当且仅当 $u = \mathbf{0}$.

(2) $\|\alpha u\| = |\alpha| \|u\|$ 对任意 $\alpha \in \mathbb{F}$ 和任意 $u \in U$ 成立.

(3) $\|u + v\| \leq \|u\| + \|v\|$ 对任意 $u, v \in U$ 成立.

证明:如果 $\|\cdot\|$ 满足平行四边形等式,那么 U 上存在一内积 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 使得对任意 $u \in U$ 有 $\|u\| = \sqrt{\langle u, u \rangle}$.

Proof.

若 U 是实向量空间,那么定义 U 上的内积 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 为

$$\langle u, v \rangle = \frac{\|u + v\|^2 - \|u - v\|^2}{4}$$

首先有

$$\langle u, u \rangle = \frac{\|2u\|^2}{4} = \|u\|^2$$

于是这一定义满足

$$\|u\| = \sqrt{\langle u, u \rangle}$$

我们现在来证明这定义是满足内积的性质的.

(1) 正性:对于任意 $u \in U$,都有 $\langle u, u \rangle = \|u\|^2 \geq 0$.

(2) 定性: $\langle u, u \rangle = \|u\|^2 = 0$ 当且仅当 $\|u\| = 0$,即当且仅当 $u = \mathbf{0}$.

(3) 共轭对称性:我们有

$$\langle u, v \rangle = \frac{\|u + v\|^2 - \|u - v\|^2}{4} = \frac{\|v + u\|^2 - \|v - u\|^2}{4} = \langle v, u \rangle$$

(4) 第一位上的可加性:对于任意 $u, v, w \in U$,有

$$\|v + 2w\|^2 + \|v\|^2 = 2\|v + w\|^2 + 2\|w\|^2$$

$$\|v - 2w\|^2 + \|v\|^2 = 2\|v - w\|^2 + 2\|w\|^2$$

上述两式相减可得

$$||v + 2w||^2 - ||v - 2w||^2 = 2||v + w||^2 - 2||v - w||^2$$

再次运用平行四边形定理可得

$$2||u + v + w||^2 + 2||u - w||^2 = ||v + 2u||^2 + ||v + 2w||^2$$

$$2||u + v - w||^2 + 2||u + w||^2 = ||v + 2u||^2 + ||v - 2w||^2$$

两式相减,结合前面的推导可得

$$||u + v + w||^2 - ||u + v - w||^2 + ||u - w||^2 - ||u + w||^2 = ||v + w||^2 - ||v - w||^2$$

即

$$\frac{||u + v + w||^2 - ||u + v - w||^2}{4} = \frac{||u + w||^2 - ||u - w||^2}{4} + \frac{||v + w||^2 - ||v - w||^2}{4}$$

即

$$\langle u + v, w \rangle = \langle u, w \rangle + \langle v, w \rangle$$

于是这内积满足可加性.

(5) 第一位上的齐次性:我们首先证明对于任意 $n \in \mathbb{Z}$.对于任意 $u, v \in U$ 有 $\langle nu, v \rangle = n \langle u, v \rangle$.

为此,采取归纳法.当 $n = 1$ 时,命题的成立是显然的.

现在假设 $n > 1$,且命题对所有小于 n 的正整数都成立.于是

$$\langle nu, v \rangle = \langle (n-1)u + u, v \rangle = \langle (n-1)u, v \rangle + \langle u, v \rangle = (n-1) \langle u, v \rangle + \langle u, v \rangle = n \langle u, v \rangle$$

而 $n = 0$ 时有

$$\langle 0u, v \rangle = \langle \mathbf{0}, v \rangle = 0 = 0 \langle u, v \rangle$$

对于任意负整数 n ,有

$$\langle nu, v \rangle = \frac{||v - (-nu)||^2 - ||v + (-nu)||^2}{4} = -n \langle -u, v \rangle = n \langle u, v \rangle$$

当 $n \neq 0$ 时,有

$$n \left\langle \frac{1}{n}u, v \right\rangle = \sum_{k=1}^n \left\langle \frac{1}{n}u, v \right\rangle = \left\langle \sum_{k=1}^n \frac{1}{n}u, v \right\rangle = \langle u, v \rangle$$

于是

$$\left\langle \frac{1}{n}u, v \right\rangle = \frac{1}{n} \langle u, v \rangle$$

于是对于任意 $\frac{p}{q} \in \mathbb{Q} : p, q \in \mathbb{Z}$ 有

$$\left\langle \frac{p}{q}u, v \right\rangle = p \left\langle \frac{1}{q}u, v \right\rangle = \frac{p}{q} \langle u, v \rangle$$

对于任意 $r \in \mathbb{R}/\mathbb{Q}$, 总存在有理序列 $\{r_k\}_{k=1}^{\infty}$ 满足 $\lim_{k \rightarrow \infty} r_k = r$.

又根据三角不等式, 不难推出 $\|\cdot\|$ 是 $U \rightarrow \mathbb{R}$ 的连续函数. 我们有

$$\begin{aligned} r \langle u, v \rangle &= \lim_{k \rightarrow \infty} r_k \langle u, v \rangle \\ &= \lim_{k \rightarrow \infty} \langle r_k u, v \rangle \\ &= \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\|r_k u + v\|^2 - \|r_k u - v\|^2}{4} \\ &= \frac{\|ru + v\|^2 - \|ru - v\|^2}{4} \\ &= \langle ru, v \rangle \end{aligned}$$

综上所述, 对于任意 $u, v \in U$ 和任意 $\lambda \in \mathbb{R}$, 都有 $\langle \lambda u, v \rangle = \lambda \langle u, v \rangle$. 于是这内积满足齐次性.

因此这内积的定义是成立的.

若 U 是复向空间, 那么定义 U 上的内积 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 为

$$\langle u, v \rangle = \frac{\|u + v\|^2 - \|u - v\|^2 + \|u + iv\|^2 i - \|u - iv\|^2 i}{4}$$

如此证明, 过程是相似的, 在此不再赘述.

综上可知命题成立.

29. 设 V_1, \dots, V_m 是内积空间, 试证明等式

$$\langle (u_1, \dots, u_m), (v_1, \dots, v_m) \rangle = \langle u_1, v_1 \rangle + \dots + \langle u_m, v_m \rangle$$

定义了 $V_1 \times \dots \times V_m$ 上的一个内积.

Proof.

我们逐条证明这定义符合内积的性质.

(1) **正性:** 对于任意 v_1, \dots, v_m 满足 $v_k \in V_k$, 有

$$\langle (v_1, \dots, v_m), (v_1, \dots, v_m) \rangle = \langle v_1, v_1 \rangle + \dots + \langle v_m, v_m \rangle \geq 0$$

(2) **定性:** 我们有

$$\begin{aligned} \langle (v_1, \dots, v_m), (v_1, \dots, v_m) \rangle &= 0 \Leftrightarrow \langle v_1, v_1 \rangle + \dots + \langle v_m, v_m \rangle = 0 \\ &\Leftrightarrow \langle v_1, v_1 \rangle = \dots = \langle v_m, v_m \rangle = 0 \\ &\Leftrightarrow v_1 = \dots = v_m = \mathbf{0} \\ &\Leftrightarrow (v_1, \dots, v_m) = \mathbf{0} \end{aligned}$$

(3) 第一位上的可加性:对于任意 $v_1, \dots, v_m, u_1, \dots, u_m, w_1, \dots, w_m$ 满足 $u_k, v_k, w_k \in V_k$,我们有

$$\begin{aligned}
 & \langle (u_1, \dots, u_m) + (v_1, \dots, v_m), w_1, \dots, w_m \rangle \\
 &= \langle (u_1 + v_1, \dots, u_m + v_m), w_1, \dots, w_m \rangle \\
 &= \langle u_1 + v_1, w_1 \rangle + \dots + \langle u_m + v_m, w_m \rangle \\
 &= \langle u_1, w_1 \rangle + \langle v_1, w_1 \rangle + \dots + \langle u_m, w_m \rangle + \langle v_m, w_m \rangle \\
 &= \langle u_1, w_1 \rangle + \dots + \langle u_m, w_m \rangle + \langle v_1, w_1 \rangle + \dots + \langle v_m, w_m \rangle \\
 &= \langle (u_1, \dots, u_m), (w_1, \dots, w_m) \rangle + \langle (v_1, \dots, v_m), (w_1, \dots, w_m) \rangle
 \end{aligned}$$

(4) 第一位上的齐次性:对于任意 $\lambda \in \mathbb{F}$,任意 $u_1, \dots, u_m, v_1, \dots, v_m$ 满足 $u_k, v_k \in V_k$,我们有

$$\begin{aligned}
 \langle \lambda(u_1, \dots, u_m), (v_1, \dots, v_m) \rangle &= \langle (\lambda u_1, \dots, \lambda u_m), (v_1, \dots, v_m) \rangle \\
 &= \langle \lambda u_1, v_1 \rangle + \dots + \langle \lambda u_m, v_m \rangle \\
 &= \lambda (\langle u_1, v_1 \rangle + \dots + \langle u_m, v_m \rangle) \\
 &= \lambda \langle (u_1, \dots, u_m), (v_1, \dots, v_m) \rangle
 \end{aligned}$$

(5) 共轭对称性:对于任意 $u_1, \dots, u_m, v_1, \dots, v_m$ 满足 $u_k, v_k \in V_k$,我们有

$$\begin{aligned}
 \langle (v_1, \dots, v_m), (u_1, \dots, u_m) \rangle &= \langle v_1, u_1 \rangle + \dots + \langle v_m, u_m \rangle \\
 &= \overline{\langle u_1, v_1 \rangle} + \dots + \overline{\langle u_m, v_m \rangle} \\
 &= \overline{\langle u_1, v_1 \rangle + \dots + \langle u_m, v_m \rangle} \\
 &= \overline{\langle (u_1, \dots, u_m), (v_1, \dots, v_m) \rangle}
 \end{aligned}$$

于是这定义满足内积的性质,因而是 $V_1 \times \dots \times V_m$ 上的内积.

30. 设 V 是实内积空间.对于 $u, v, w, x \in V$,定义

$$\langle u + iv, w + ix \rangle_{\mathbb{C}} = \langle u, w \rangle + \langle v, x \rangle + (\langle v, w \rangle - \langle u, x \rangle) i$$

(1) 试证明: $\langle \cdot, \cdot \rangle_{\mathbb{C}}$ 使 $V_{\mathbb{C}}$ 成为复内积空间.

(2) 试证明:如果 $u, v \in V$,那么

$$\langle u, v \rangle_{\mathbb{C}} = \langle u, v \rangle \quad \text{且} \quad \|u + iv\|_{\mathbb{C}}^2 = \|u\|^2 + \|v\|^2$$

Proof.

(1) 只需依次证明这定义满足内积的性质即可,在此不再赘述.

(2) 我们有

$$\begin{aligned}\langle u, v \rangle_{\mathbb{C}} &= \langle u, v \rangle + \langle \mathbf{0}, \mathbf{0} \rangle + (\langle \mathbf{0}, v \rangle - \langle u, \mathbf{0} \rangle) \mathbf{i} \\ &= \langle u, v \rangle + 0 + (0 - 0) \mathbf{i} \\ &= \langle u, v \rangle\end{aligned}$$

又

$$\begin{aligned}\|u + \mathbf{i}v\|_{\mathbb{C}}^2 &= \langle u + \mathbf{i}v, u + \mathbf{i}v \rangle \\ &= \langle u, u \rangle + \langle v, v \rangle + (\langle v, u \rangle - \langle u, v \rangle) \mathbf{i} \\ &= \|u\|^2 + \|v\|^2\end{aligned}$$

于是命题得证.

31. 设 V 是内积空间,试证明:对于任意 $u, v, w \in V$,有

$$\left\| w - \frac{1}{2}(u + v) \right\|^2 = \frac{\|w - u\|^2 + \|w - v\|^2}{2} - \frac{\|u - v\|^2}{4}$$

Proof.

根据平行四边形等式有

$$\|u + v - 2w\|^2 + \|u - v\|^2 = 2\|u - w\|^2 + 2\|v - w\|^2$$

移项后两边除以4即可得到欲证等式.

32. 设 E 是 V 的子集,满足对任意 $u, v \in E$ 都有 $\frac{1}{2}(u + v) \in E$.令 $w \in V$,试证明:至多存在一个 $u \in E$ 使得

$$\|w - u\| \leq \|w - x\|$$

对所有 $x \in E$ 成立.

Proof.

如果存在 $u, v \in E$ 满足题意且 $u \neq v$,那么 $\frac{1}{2}(u + v) \in E$.根据6A.31可得

$$\begin{aligned}\left\| w - \frac{1}{2}(u + v) \right\|^2 &= \frac{\|w - u\|^2 + \|w - v\|^2}{2} - \frac{\|u - v\|^2}{4} \\ &= \|w - u\|^2 - \frac{\|u - v\|^2}{4} \\ &< \|w - u\|^2\end{aligned}$$

这就推出了矛盾,于是命题得证.

33. 设 f, g 是 $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ 的可微函数.

(1) 试证明:

$$(\langle f(t), g(t) \rangle)' = \langle f'(t), g(t) \rangle + \langle f(t), g'(t) \rangle$$

(2) 设 $c > 0$, 且 $\|f(t)\| = c$ 对任意 $t \in \mathbb{R}$ 成立. 试证明: $\langle f'(t), f(t) \rangle = 0$ 对任意 $t \in \mathbb{R}$ 成立.

(3) 用几何的方式, 从 \mathbb{R}^n 中以原点为球心的球上一曲线的切向量这一角度解释上一问的结果.

Proof.

(1) 设 $f_1, \dots, f_n, g_1, \dots, g_n$ 使得对任意 $t \in \mathbb{R}$ 有

$$f(t) = (f_1(t), \dots, f_n(t)) \quad g(t) = (g_1(t), \dots, g_n(t))$$

于是

$$\langle f(t), g(t) \rangle = (f_1(t)g_1(t), \dots, f_n(t)g_n(t))$$

又对于任意 $k \in \{1, \dots, n\}$ 有

$$(f_k(t)g_k(t))' = f'_k(t)g_k(t) + f_k(t)g'_k(t)$$

于是

$$\begin{aligned} (\langle f(t), g(t) \rangle)' &= ((f_1(t)g_1(t), \dots, f_n(t)g_n(t)))' \\ &= (f'_1(t)g_1(t) + f_1(t)g'_1(t), \dots, f'_n(t)g_n(t) + f_n(t)g'_n(t)) \\ &= (f'_1(t)g_1(t), \dots, f'_n(t)g_n(t)) + (f_1(t)g'_1(t), \dots, f_n(t)g'_n(t)) \\ &= \langle f'(t), g(t) \rangle + \langle f(t), g'(t) \rangle \end{aligned}$$

于是命题得证.

(2) 我们有

$$c^2 = \|f(t)\|^2 = \langle f(t), f(t) \rangle$$

于是

$$0 = (\langle f(t), f(t) \rangle)' = \langle f(t), f'(t) \rangle + \langle f'(t), f(t) \rangle = 2 \langle f'(t), f(t) \rangle$$

于是

$$\langle f'(t), f(t) \rangle = 0$$

于是命题得证.

(3) 当曲线恒在球面上时, 其切向量一定在球面的切面上, 于是一定与该曲线正交.

34. 证明阿波罗尼斯恒等式成立:在三边长为 a, b, c 的三角形中,令 d 为 c 对应边上的中线长度,则有

$$a^2 + b^2 = \frac{1}{2}c^2 + 2d^2$$

Proof.

令 $\triangle ABC$ 中 $AB = c, AC = b, BC = a, \overrightarrow{AB} = u, \overrightarrow{AC} = v$.于是

$$||u + v||^2 + ||u - v||^2 = 2||u||^2 + 2||v||^2$$

即

$$(2d)^2 + c^2 = 2a^2 + 2b^2$$

整理可得

$$a^2 + b^2 = \frac{1}{2}c^2 + 2d^2$$

35. 取定一正整数 n . \mathbb{R}^n 上的二阶可微实值函数 p 的Laplace算子 Δp 是 \mathbb{R}^n 上的函数,定义为

$$\Delta p = \frac{\partial^2 p}{\partial x_1^2} + \cdots + \frac{\partial^2 p}{\partial x_n^2}$$

如果 $\Delta p = 0$,则称 p 是调和的.

\mathbb{R}^n 上的多项式是形如 $x_1^{m_1} \cdots x_n^{m_n}$ 的函数的线性组合(其系数在 \mathbb{R} 中),其中 m_1, \cdots, m_n 是非负整数.

设 q 是 \mathbb{R}^n 上的多项式.试证明: \mathbb{R}^n 上存在一调和多项式 p ,使得 $p(x) = q(x)$ 对任意满足 $||x|| = 1$ 的 $x \in \mathbb{R}^n$ 都成立.

提示:对于 \mathbb{R}^n 上的调和函数 p ,若 $p(x) = 0$ 对所有满足 $||x|| = 1$ 的 $x \in \mathbb{R}^n$ 成立,那么 $p = 0$.

Proof.

在说明问题之前,我们先做一些定义.

令多项式 p 的次数 $\deg p$ 为形如 $x_1^{m_1} \cdots x_n^{m_n}$ 的所有项各中 m_k 的最大值.

定义 $\mathcal{P}_m(\mathbb{R}^n)$ 为所有次数不高于 m 的 \mathbb{R}^n 上的多项式的集合.不难验证 $\mathcal{P}_m(\mathbb{R}^n)$ 是向量空间.

根据Laplace算子的定义,当 $\deg p \geq 2$ 时, $\deg \Delta p = \deg p - 2$.又因为

$$1 - ||x||^2 = 1 - x_1^2 - \cdots - x_n^2$$

于是 $\deg \Delta ((1 - ||x||^2) r) = \deg r + 2 - 2 = \deg r$.

设 $m = \deg q$,定义映射 $T \in \mathcal{L}(\mathcal{P}_m(\mathbb{R}^n))$ 为 $Tr = \Delta ((1 - ||x||^2) r)$.不难验证 T 是线性映射.

现在我们来证明 T 是单射.考虑 $r \in \mathcal{P}_m(\mathbb{R}^n)$ 使得 $Tr = 0$,即 $\Delta ((1 - ||x||^2) r) = 0$.

又因为对于所有满足 $\|x\| = 1$ 的 $x \in \mathbb{R}^n$ 都有 $(1 - \|x\|^2)r = 0$,于是根据题意可知 $(1 - \|x\|^2)r = \mathbf{0}$.
从而 $\text{null } T = \{\mathbf{0}\}$,于是 T 是满射.因此,存在 $r \in \mathcal{P}_m(\mathbb{R}^n)$ 使得 $Tr = \Delta(-q)$.令 $p = q + (1 - \|x\|^2)r$,则有

$$\Delta p = \Delta q + Tr = \mathbf{0}$$

于是存在这样的调和多项式 p 使得 $p(x) = q(x)$ 对所有满足 $\|x\| = 1$ 的 $x \in \mathbb{R}^n$ 都成立.