

举例说明线性变换是(1,1)型张量

小圆滚滚

1 引言

天问，

人和动物的本质区别是制作和使用工具

人与AI的本质区别是人会基于兴趣有关联的主动探索和提问

什么是张量？

张量（Tensor）是一个在数学和物理学中广泛使用的概念，它是一种多维数组，可以用来表示和处理多维数据。张量是向量和矩阵的推广，可以有任意数量的维度，每个维度可以有不同的长度。

在最简单的情况下，一个零阶张量是一个标量（scalar），即一个单独的数。一个一阶张量是一个向量（vector），它是一维数组。一个二阶张量是一个矩阵（matrix），它是二维数组。更高阶的张量可以有三个或更多的维度，例如一个三阶张量可以表示为一个三维数组。

张量在许多领域都有应用，包括线性代数、微分几何、广义相对论、量子力学和机器学习等。在机器学习中，张量是深度学习框架（如TensorFlow和PyTorch）中的基本数据结构，用于表示和处理数据。

张量的运算包括加法、减法、乘法（点积、外积、矩阵乘法等）、转置、逆运算等。这些运算在处理多维数据时非常有用，可以用来表示和解决复杂的问题。

个人理解：

在任意个数的维度空间，在变化（时间上或者空间上）趋近于无穷小的时候，都可以用线性变化来进来时。此时每一种变化，都可以描述成一种状态变成另一种状态，这个状态我们用向量来表示。向量的维度与空间的维度数一致（或冗余）。变化的过程可以用一个满秩矩阵左乘当前向量来研究过程的组合。矩阵中的每一列就是构成新的状态的一个分量的运算方法。是分量的系数。将分量与系数相乘再相加得到新的分量。这种运算法则造成新旧状态的一一对应。并且这种函数矩阵也是唯一的。接下来我们重说向量。每个状态都可以表示成向量空间中确定的坐标系原点到坐标的一根有方向有大小的，可平移的箭头。因为可以利用平行四边形法则对其进行各种角度的分量和相加，所以有了线性变换的可视化表达。基于这些运算法则。向上推广到多维空间，只能通过代数计算、只能通过数组物理存储。而无法再用几何展现。0阶张量就是数，1阶张量就是向量（箭头），二阶张量就是可以利用指标进行逆变和协变累计的线性运算。其中协变用到的对偶空间、余向量是向量、向量空间的逆过程。

问题

0阶张量是一个标量，1阶张量是一个向量，2阶张量是一个矩阵，3阶张量是一个三维数组，以此类推。那么矩阵的秩、数组的元素数，并不一定被限制到指定的数量对吗？

是的，您的理解是正确的。张量的阶数（或秩）指的是它的维度数量，而每个维度的大小（即该维度上的元素数量）可以是任意正整数。这意味着：

1. **0阶张量（标量）**：没有维度，只有一个元素，即一个单独的数值。

2. **1阶张量（向量）**：有一个维度，可以是任意长度的一维数组。例如，一个向量可以有2个元素，也可以有100个元素，这取决于具体的应用和上下文。

3. **2阶张量（矩阵）**：有两个维度，可以是任意大小的二维数组。一个矩阵可以是2x2的，也可以是100x200的，或者任何其他尺寸，只要行数和列数是正整数。

4. **3阶张量（三维数组）**：有三个维度，可以是任意大小的三维数组。例如，一个3阶张量可以是3x3x3的，也可以是10x20x30的，或者任何其他尺寸。

以此类推，更高阶的张量也可以有任意数量的维度，每个维度上也可以有任意数量的元素。这种灵活性使得张量能够表示和处理各种复杂和高维的数据结构。

需要注意的是，虽然张量的维度和每个维度的大小可以是任意的，但在具体的应用中，通常会根据问题的需求和计算资源的限制来选择合适的维度和大小。例如，在机器学习中，神经网络的输入和输出张量的大小需要与网络结构和数据集相匹配。在物理学中，张量的大小和维度需要与物理问题的空间维度和对称性相适应。

2 举例说明线性变换是(1,1)型张量

2.1 线性变换的定义

线性变换 T 是从一个向量空间 V 到另一个向量空间 W 的映射，满足以下两个条件：

1. $T(u + v) = T(u) + T(v)$ 对于所有 $u, v \in V$
2. $T(cu) = cT(u)$ 对于所有 $u \in V$ 和标量 c

2.2 张量的定义

张量是多线性映射，可以看作是向量和余向量的多线性组合。一个 (r, s) 型张量 T 是一个映射，它接受 r 个余向量和 s 个向量作为输入，并输出一个标量。

2.3 (1,1)型张量的定义

一个(1,1)型张量 T 是一个映射，它接受一个余向量 ω 和一个向量 v 作为输入，并输出一个标量。可以表示为：

$$T(\omega, v)$$

2.4 线性变换与(1,1)型张量的关系

线性变换 $T : V \rightarrow V$ 可以看作是一个(1,1)型张量。具体来说，对于任意向量 $v \in V$ 和余向量 $\omega \in V^*$ （其中 V^* 是 V 的对偶空间），我们可以定义：

$$T(\omega, v) = \omega(T(v))$$

这里， $T(v)$ 是线性变换 T 对向量 v 的作用，得到一个新的向量。然后，余向量 ω 作用于这个新向量，得到一个标量。

2.5 举例说明

考虑一个二维向量空间 V ，基向量为 $\{e_1, e_2\}$ ，对偶基为 $\{e^1, e^2\}$ 。定义一个线性变换 $T : V \rightarrow V$ 如下：

$$T(e_1) = 2e_1 + 3e_2$$

$$T(e_2) = 4e_1 + 5e_2$$

现在，我们来验证 T 作为(1,1)型张量的性质。对于任意向量 $v = v^1e_1 + v^2e_2$ 和余向量 $\omega = \omega_1e^1 + \omega_2e^2$ ，我们有：

$$T(v) = T(v^1e_1 + v^2e_2) = v^1T(e_1) + v^2T(e_2) = v^1(2e_1 + 3e_2) + v^2(4e_1 + 5e_2) = (2v^1 + 4v^2)e_1 + (3v^1 + 5v^2)e_2$$

然后，余向量 ω 作用于 $T(v)$ ：

$$\omega(T(v)) = (\omega_1e^1 + \omega_2e^2)((2v^1 + 4v^2)e_1 + (3v^1 + 5v^2)e_2) = \omega_1(2v^1 + 4v^2) + \omega_2(3v^1 + 5v^2)$$

因此，线性变换 T 作为(1,1)型张量可以表示为：

$$T(\omega, v) = \omega_1(2v^1 + 4v^2) + \omega_2(3v^1 + 5v^2)$$

2.6 T 为什么可以输入一个参数又可以输入两个参数

在数学中，特别是在线性代数和张量分析中，符号 T 可以用来表示不同的概念，具体取决于上下文。在我们讨论线性变换和(1,1)型张量时， T 可以表示两种不同的映射：

1. ****线性变换****：当 T 表示线性变换时，它是一个从向量空间 V 到向量空间 V 的映射，通常表示为 $T : V \rightarrow V$ 。在这种情况下， T 只接受一个参数，即一个向量 $v \in V$ ，并返回另一个向量 $T(v) \in V$ 。

2. **** (1,1)型张量****：当 T 表示(1,1)型张量时，它是一个双线性映射，通常表示为 $T : V^* \times V \rightarrow \mathbb{R}$ （其中 V^* 是 V 的对偶空间，即所有从 V 到 \mathbb{R} 的线性泛函的集合）。在这种情况下， T 接受两个参数，即一个余向量 $\omega \in V^*$ 和一个向量 $v \in V$ ，并返回一个标量 $T(\omega, v)$ 。

在给定的关系 $T(\omega, v) = \omega(T(v))$ 中， T 既表示线性变换又表示(1,1)型张量。这种表示上的重载是数学中常见的，因为它允许我们以更紧凑和一致的方式表达概念。上下文通常足以区分 T 的两种用法。

总结一下， T 可以输入一个参数或两个参数，这取决于它是在表示线性变换还是(1,1)型张量。在线性变换的上下文中， T 只接受一个向量参数；在(1,1)型张量的上下文中， T 接受一个余向量和一个向量参数。

2.7 T 作为(0,2)型张量可以表示为？是二次型吗？为什么是两个协变

一个(0,2)型张量 T 可以表示为一个双线性映射，它接受两个向量作为参数并返回一个标量。在数学符号中，一个(0,2)型张量 T 可以表示为：

$$T : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$$

这里， V 是一个向量空间， \mathbb{R} 是实数集。 T 的双线性意味着对于任何向量 $u, v, w \in V$ 和任何标量 $a, b \in \mathbb{R}$ ，以下性质成立：

1. ****加法性****:

$$T(u + v, w) = T(u, w) + T(v, w)$$

$$T(u, v + w) = T(u, v) + T(u, w)$$

2. ****齐次性****:

$$T(au, v) = aT(u, v)$$

$$T(u, bv) = bT(u, v)$$

在坐标表示中, 如果 $\{e_i\}$ 是 V 的一个基, 那么(0,2)型张量 T 可以用一个矩阵 $[T_{ij}]$ 来表示, 其中 $T_{ij} = T(e_i, e_j)$ 。对于任何向量 $u = u^i e_i$ 和 $v = v^j e_j$ (这里使用了爱因斯坦求和约定), $T(u, v)$ 可以计算为:

$$T(u, v) = T(u^i e_i, v^j e_j) = u^i v^j T(e_i, e_j) = u^i v^j T_{ij}$$

因此, (0,2)型张量 T 可以用矩阵 $[T_{ij}]$ 来表示, 这个矩阵的元素由 T 在基向量上的作用确定。

2.7.1 与二次型的关系

二次型是一个特殊的(0,2)型张量, 它满足对称性, 即对于所有的向量 $u, v \in V$, 有 $T(u, v) = T(v, u)$ 。因此, 二次型可以表示为:

$$Q(v) = T(v, v)$$

其中 T 是一个对称的(0,2)型张量。二次型 Q 是一个从向量空间 V 到实数集 \mathbb{R} 的映射, 它接受一个向量 v 并返回一个标量 $Q(v)$ 。

2.7.2 为什么是两个协变

(0,2)型张量被称为两个协变, 因为它有两个协变指标。在张量的表示中, 协变指标通常写在下标位置, 而逆变指标写在上标位置。对于(0,2)型张量 T , 它的坐标表示为 T_{ij} , 其中 i 和 j 都是协变指标。

协变指标意味着当基向量发生变化时, 张量的坐标会按照基向量的逆变换来变化。具体来说, 如果基向量从 $\{e_i\}$ 变换到 $\{e'_i\}$, 其中 $e'_i = A_i^j e_j$ (A_i^j 是变换矩阵), 那么张量的坐标 T_{ij} 会变换为 T'_{ij} , 其中:

$$T'_{ij} = A_i^k A_j^l T_{kl}$$

这表明, (0,2)型张量的两个指标都是协变的, 因此它被称为两个协变。

2.8 什么是余向量

2.8.1 余向量的定义

余向量 (Covector) 是向量空间的^{对偶空间}中的元素。对于一个向量空间 V , 其对偶空间 V^* 是所有从 V 到标量域 (通常是实数 \mathbb{R} 或复数 \mathbb{C}) 的线性映射的集合。因此, 余向量可以看作是将向量映射到标量的线性函数。

2.8.2 余向量的表示

如果 V 是一个 n -维向量空间, 且 $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 是 V 的一组基, 那么 V^* 也是一组 n -维向量空间, 其对偶基 $\{e^1, e^2, \dots, e^n\}$ 满足:

$$e^i(e_j) = \delta_j^i$$

其中 δ_j^i 是克罗内克符号, 当 $i = j$ 时为 1, 否则为 0。

2.8.3 余向量的运算

余向量之间的运算包括加法和数乘, 它们与向量空间中的运算类似。对于余向量 $\omega, \eta \in V^*$, $v \in V$ 和标量 c , 定义如下:

- 加法:

$$(\omega + \eta)(v) = \omega(v) + \eta(v)$$

- 数乘:

$$(c\omega)(v) = c(\omega(v))$$

这里 $\omega(v)$ 和 $\eta(v)$ 是标量, c 是标量乘法, 所以 $c(\omega(v))$ 也是标量。

2.8.4 余向量与向量的关系

余向量和向量之间可以通过内积 (点积) 来相互作用。对于向量 $v \in V$ 和余向量 $\omega \in V^*$, 内积定义为:

$$\langle \omega, v \rangle = \omega(v)$$

这将余向量 ω 和向量 v 映射到一个标量。

2.8.5 余向量在坐标系中的表示

在坐标系中, 向量 $v \in V$ 可以表示为 $v = v^i e_i$, 其中 v^i 是向量的分量。类似地, 余向量 $\omega \in V^*$ 可以表示为 $\omega = \omega_i e^i$, 其中 ω_i 是余向量的分量。内积可以表示为:

$$\langle \omega, v \rangle = \omega_i v^i$$

最终答案

余向量是向量空间的对偶空间中的元素, 是将向量映射到标量的线性函数。

2.9 请对上述余向量的加法定义进行解释

2.9.1 余向量的加法定义

余向量的加法定义是将两个余向量 ω 和 η 相加, 得到一个新的余向量 $\omega + \eta$ 。这个新的余向量 $\omega + \eta$ 作用于任意向量 v 的结果, 等于 ω 和 η 分别作用于 v 的结果之和。

数学上表示为:

$$(\omega + \eta)(v) = \omega(v) + \eta(v)$$

2.9.2 详细解释

- ****余向量****: 余向量是向量空间 V 的对偶空间 V^* 中的元素, 它们是将向量映射到标量的线性函数。
- ****加法****: 余向量的加法是定义在对偶空间 V^* 上的运算。对于两个余向量 ω 和 η , 它们的和 $\omega + \eta$ 也是一个余向量。
- ****作用于向量****: 当 $\omega + \eta$ 作用于任意向量 $v \in V$ 时, 结果是一个标量。这个标量等于 ω 作用于 v 的结果加上 η 作用于 v 的结果。

2.9.3 例子

假设我们有一个二维向量空间 V , 其基向量为 $\{e_1, e_2\}$ 。对应的对偶基为 $\{e^1, e^2\}$ 。定义两个余向量 ω 和 η 如下:

$$\omega = 2e^1 + 3e^2$$

$$\eta = 4e^1 + 5e^2$$

对于任意向量 $v = v^1e_1 + v^2e_2$, 我们有:

$$\omega(v) = (2e^1 + 3e^2)(v^1e_1 + v^2e_2) = 2v^1 + 3v^2$$

$$\eta(v) = (4e^1 + 5e^2)(v^1e_1 + v^2e_2) = 4v^1 + 5v^2$$

余向量 $\omega + \eta$ 为:

$$\omega + \eta = (2e^1 + 3e^2) + (4e^1 + 5e^2) = (2 + 4)e^1 + (3 + 5)e^2 = 6e^1 + 8e^2$$

当 $\omega + \eta$ 作用于 v 时, 结果为:

$$(\omega + \eta)(v) = (6e^1 + 8e^2)(v^1e_1 + v^2e_2) = 6v^1 + 8v^2$$

这与 $\omega(v) + \eta(v)$ 的结果相同:

$$\omega(v) + \eta(v) = (2v^1 + 3v^2) + (4v^1 + 5v^2) = 6v^1 + 8v^2$$

最终答案

$$\boxed{(\omega + \eta)(v) = \omega(v) + \eta(v)}$$

3 那么向量是将向量映射到标量的线性函数吗

3.1 向量的定义

向量是向量空间中的元素。在数学和物理学中, 向量通常表示具有大小和方向的量。向量空间 V 是一个集合, 其中的元素可以进行加法和数乘运算, 并满足一定的公理。

3.2 线性函数的定义

线性函数是从一个向量空间 V 到标量域(通常是实数 \mathbb{R} 或复数 \mathbb{C})的映射, 满足以下两个条件:

1. $f(u + v) = f(u) + f(v)$ 对于所有 $u, v \in V$
2. $f(cu) = cf(u)$ 对于所有 $u \in V$ 和标量 c

3.3 向量与线性函数的区别

向量和线性函数是不同的概念：

- ****向量****：向量是向量空间中的元素，可以进行向量加法和数乘运算。
- ****线性函数****：线性函数是将向量映射到标量的映射，满足线性性质。

3.4 余向量与线性函数的关系

余向量是向量空间的 V 的对偶空间中的元素，它们是将向量映射到标量的线性函数。因此，余向量是线性函数的一种特殊形式。

3.5 向量与余向量的相互作用

向量和余向量可以通过内积（点积）相互作用，得到一个标量。对于向量 $v \in V$ 和余向量 $\omega \in V^*$ ，内积定义为：

$$\langle \omega, v \rangle = \omega(v)$$

这将余向量 ω 和向量 v 映射到一个标量。

最终答案

向量不是将向量映射到标量的线性函数，而是向量空间中的元素。

4 余向量和向量的点积是什么？等于什么？

4.1 点积的定义

在向量空间中，点积（或内积）是将两个向量结合起来，得到一个标量的运算。对于向量 \mathbf{u} 和 \mathbf{v} ，点积通常表示为：

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

在欧几里得空间中，点积可以用向量的分量表示为：

$$\langle \mathbf{u}, \mathbf{v} \rangle = u_1v_1 + u_2v_2 + \dots + u_nv_n$$

其中 u_i 和 v_i 是向量 \mathbf{u} 和 \mathbf{v} 的分量。

4.2 余向量与向量的关系

余向量是向量空间的 V 的对偶空间中的元素，它们是将向量映射到标量的线性函数。对于一个余向量 $\omega \in V^*$ 和一个向量 $\mathbf{v} \in V$ ，余向量 ω 作用于向量 \mathbf{v} 的结果定义为：

$$\omega(\mathbf{v})$$

这个结果是一个标量。

4.3 余向量和向量的点积

在某种意义上，余向量和向量的“点积”可以理解为余向量作用于向量的结果。具体来说，余向量 ω 和向量 \mathbf{v} 的点积（或内积）可以表示为：

$$\langle \omega, \mathbf{v} \rangle = \omega(\mathbf{v})$$

这实际上是余向量 ω 作用于向量 \mathbf{v} 的结果，得到一个标量。

4.4 例子

假设我们有一个二维向量空间 V ，其基向量为 $\{e_1, e_2\}$ ，对应的对偶基为 $\{e^1, e^2\}$ 。
定义一个余向量：

$$\omega = 3e^1 + 4e^2$$

定义一个向量：

$$\mathbf{v} = v^1 e_1 + v^2 e_2$$

那么余向量 ω 作用于向量 \mathbf{v} 的结果为：

$$\langle \omega, \mathbf{v} \rangle = \omega(\mathbf{v}) = \omega(v^1 e_1 + v^2 e_2) = 3v^1 + 4v^2$$

最终答案

余向量和向量的点积等于余向量作用于向量的结果，即 $\langle \omega, \mathbf{v} \rangle = \omega(\mathbf{v})$ ，得到一个标量。

5 在斜角坐标系下演示点积

在斜角坐标系（Oblique Coordinate System）中，坐标轴不是互相垂直的，因此点积（内积）的定义会有所不同。在这种情况下，两个向量的点积不再是它们对应分量乘积的简单和，而需要考虑坐标轴之间的夹角。

假设我们有一个三维斜角坐标系，其基向量为 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$ ，它们之间的夹角不是90度。设 \mathbf{a}_1 和 \mathbf{a}_2 之间的夹角为 α ， \mathbf{a}_2 和 \mathbf{a}_3 之间的夹角为 β ， \mathbf{a}_3 和 \mathbf{a}_1 之间的夹角为 γ 。

5.1 定义斜角坐标系中的点积

对于任意两个向量 \mathbf{u} 和 \mathbf{v} ，在斜角坐标系中可以表示为：

$$\mathbf{u} = u_1 \mathbf{a}_1 + u_2 \mathbf{a}_2 + u_3 \mathbf{a}_3$$

$$\mathbf{v} = v_1 \mathbf{a}_1 + v_2 \mathbf{a}_2 + v_3 \mathbf{a}_3$$

点积 $\mathbf{u} \cdot \mathbf{v}$ 定义为：

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = u_1 v_1 (\mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{a}_1) + u_1 v_2 (\mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{a}_2) + u_1 v_3 (\mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{a}_3) +$$

$$u_2 v_1 (\mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{a}_1) + u_2 v_2 (\mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{a}_2) + u_2 v_3 (\mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{a}_3) +$$

$$u_3v_1(\mathbf{a}_3 \cdot \mathbf{a}_1) + u_3v_2(\mathbf{a}_3 \cdot \mathbf{a}_2) + u_3v_3(\mathbf{a}_3 \cdot \mathbf{a}_3)$$

其中， $\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{a}_j$ 是基向量 \mathbf{a}_i 和 \mathbf{a}_j 的点积，可以用它们之间的夹角来表示：

$$\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{a}_j = |\mathbf{a}_i||\mathbf{a}_j| \cos(\theta_{ij})$$

如果 $i = j$ ，则 $\theta_{ij} = 0$ ，所以 $\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{a}_i = |\mathbf{a}_i|^2$ 。

5.2 演示

假设基向量的长度都为1（单位向量），则 $\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{a}_i = 1$ 。如果 α, β, γ 分别是 \mathbf{a}_1 和 \mathbf{a}_2 ， \mathbf{a}_2 和 \mathbf{a}_3 ， \mathbf{a}_3 和 \mathbf{a}_1 之间的夹角，那么点积可以简化为：

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = u_1v_1 + u_2v_2 + u_3v_3 +$$

$$(u_1v_2 + u_2v_1) \cos(\alpha) + (u_2v_3 + u_3v_2) \cos(\beta) + (u_3v_1 + u_1v_3) \cos(\gamma)$$

这个表达式考虑了斜角坐标系中向量之间的夹角，从而正确计算了点积。

最终答案

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = u_1v_1 + u_2v_2 + u_3v_3 + (u_1v_2 + u_2v_1) \cos(\alpha) + (u_2v_3 + u_3v_2) \cos(\beta) + (u_3v_1 + u_1v_3) \cos(\gamma)$$

6 在斜角坐标系下向量和余向量的点积

在斜角坐标系中，向量和余向量的点积（内积）可以通过以下方式来定义和计算。

6.1 斜角坐标系中向量和余向量的点积定义

在斜角坐标系中，向量 \mathbf{v} 和余向量 ω 的点积定义为余向量 ω 作用于向量 \mathbf{v} 的结果，即 $\omega(\mathbf{v})$ 。这与在直角坐标系中的定义是一致的，但在斜角坐标系中，我们需要考虑坐标轴之间的夹角。

6.2 斜角坐标系中点积的计算

对于斜角坐标系中的两个向量 $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ 和 $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ ，它们之间的点积可以通过以下公式计算：

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_i v_j g_{ij}$$

其中， g_{ij} 是斜角坐标系中的度量张量，它反映了坐标轴之间的夹角和尺度。对于斜角坐标系中的二维情况，点积的公式可以简化为：

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = u_1v_1 + u_2v_2 + 2u_1v_2 \cos(\theta)$$

这里， θ 是两个坐标轴之间的夹角。

6.3 余向量和向量的点积

对于余向量 ω 和向量 \mathbf{v} 的点积，我们可以直接应用上述点积的定义。如果余向量 ω 在斜角坐标系中的表示为 $\omega = \omega_1 e^1 + \omega_2 e^2 + \dots + \omega_n e^n$ ，其中 e^i 是对偶基向量，那么点积可以表示为：

$$\omega(\mathbf{v}) = \sum_{i=1}^n \omega_i v^i$$

这里， ω_i 是余向量 ω 的分量， v^i 是向量 \mathbf{v} 的分量。

最终答案

在斜角坐标系中，向量和余向量的点积是通过考虑坐标轴之间的夹角和尺度来定义和计算的，这与直角坐标系中的定义有所不同。点积的结果是一个标量，表示余向量对向量的作用结果。

7 为什么在斜角坐标系中，向量和余向量的点积（内积）没有cos项

在斜角坐标系中，向量和余向量的点积（内积）实际上确实包含了余弦项，这是因为点积的定义涉及到向量之间的夹角。在斜角坐标系中，坐标轴不是互相垂直的，因此两个向量的点积需要考虑它们之间的夹角。以下是详细的解释：

1. **点积的一般定义**：在任何坐标系中，两个向量 \mathbf{u} 和 \mathbf{v} 的点积可以定义为：

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = |\mathbf{u}| |\mathbf{v}| \cos(\theta)$$

其中 $|\mathbf{u}|$ 和 $|\mathbf{v}|$ 分别是向量 \mathbf{u} 和 \mathbf{v} 的模， θ 是它们之间的夹角。

2. **斜角坐标系中的点积**：在斜角坐标系中，基向量之间的夹角不是90度，因此两个向量的点积需要考虑这些夹角。如果 $\mathbf{u} = u_1 \mathbf{a}_1 + u_2 \mathbf{a}_2 + \dots + u_n \mathbf{a}_n$ 和 $\mathbf{v} = v_1 \mathbf{a}_1 + v_2 \mathbf{a}_2 + \dots + v_n \mathbf{a}_n$ 是斜角坐标系中的两个向量，那么它们的点积可以表示为：

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_i v_j g_{ij}$$

其中 g_{ij} 是度量张量，它反映了坐标轴之间的夹角和尺度。对于斜角坐标系中的二维情况，点积的公式可以简化为：

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = u_1 v_1 + u_2 v_2 + (u_1 v_2 + u_2 v_1) \cos(\theta)$$

这里， θ 是两个坐标轴之间的夹角。

3. **余向量和向量的点积**：对于余向量 ω 和向量 \mathbf{v} 的点积，我们可以直接应用上述点积的定义。如果余向量 ω 在斜角坐标系中的表示为 $\omega = \omega_1 e^1 + \omega_2 e^2 + \dots + \omega_n e^n$ ，其中 e^i 是对偶基向量，那么点积可以表示为：

$$\omega(\mathbf{v}) = \sum_{i=1}^n \omega_i v^i$$

这里， ω_i 是余向量 ω 的分量， v^i 是向量 \mathbf{v} 的分量。这个表达式中隐含了基向量之间的夹角，因为对偶基向量 e^i 和基向量 \mathbf{a}_j 之间的关系涉及到了这些夹角。

最终答案

因此，在斜角坐标系中，向量和余向量的点积（内积）确实包含了余弦项，这个余弦项反映了坐标轴之间的夹角。

8 推导 $\omega = \omega_1 e^1 + \omega_2 e^2 + \dots + \omega_n e^n$

8.1 余向量的定义

余向量是向量空间 V 的对偶空间 V^* 中的元素。对偶空间 V^* 是所有从 V 到标量域（通常是实数 \mathbb{R} 或复数 \mathbb{C} ）的线性映射的集合。

8.2 对偶基的定义

假设 V 是一个 n -维向量空间，且 $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 是 V 的一组基。那么 V^* 也是一组 n -维向量空间，其对偶基 $\{e^1, e^2, \dots, e^n\}$ 满足：

$$e^i(e_j) = \delta_j^i$$

其中 δ_j^i 是克罗内克符号，当 $i = j$ 时为 1，否则为 0。

8.3 余向量的表示

对于任意余向量 $\omega \in V^*$ ，我们可以用对偶基 $\{e^1, e^2, \dots, e^n\}$ 来表示它。设 ω 在对偶基下的分量为 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ ，则：

$$\omega = \omega_1 e^1 + \omega_2 e^2 + \dots + \omega_n e^n$$

8.4 推导过程

为了找到余向量 ω 在对偶基下的分量 ω_i ，我们可以利用对偶基的性质。对于任意基向量 e_j ，我们有：

$$\omega(e_j) = (\omega_1 e^1 + \omega_2 e^2 + \dots + \omega_n e^n)(e_j)$$

根据对偶基的性质 $e^i(e_j) = \delta_j^i$ ，上式可以简化为：

$$\omega(e_j) = \omega_1 e^1(e_j) + \omega_2 e^2(e_j) + \dots + \omega_n e^n(e_j) = \omega_j$$

因此，余向量 ω 在对偶基下的分量 ω_i 可以通过 $\omega(e_i)$ 得到：

$$\omega_i = \omega(e_i)$$

8.5 最终表示

所以，余向量 ω 可以表示为：

$$\omega = \omega_1 e^1 + \omega_2 e^2 + \dots + \omega_n e^n$$

其中 $\omega_i = \omega(e_i)$ 。

最终答案

$$\omega = \omega_1 e^1 + \omega_2 e^2 + \dots + \omega_n e^n$$