第5讲：空间解析几何综述（summarize）

(一) 坐标系的平移与旋转

例1、设有二次曲面Σ：$4x^2+25y^2+4z^2-16x-50y-16z-43=0$

(1). 指出Σ是何种二次曲面？

(2). 将Σ上述的一般式化成参数式.

解(1)、配方得：$4(x-2)^2+25(y-1)^2+4(z-2)^2=100$ 即

$$\frac{(x-2)^2}{5^2}+\frac{(y-1)^2}{2^2}+\frac{(z-2)^2}{5^2}=1 \qquad (*_1)$$

Σ是中心在$M_0(2,1,2)$的旋转椭球面.

若令$\begin{cases} x-2=x' \\ y-1=y' \\ z-2=z' \end{cases}$，$M_0=O'$，即是将坐标系的原点移

到椭球面的中心M_0处、记作O'，就得到经过平行移动的

坐标系$O'-x'y'z'$. 在新坐标系下、旋转椭球面Σ化为

$$\frac{x'^2}{5^2}+\frac{y'^2}{2^2}+\frac{z'^2}{5^2}=1 \text{ 或 } \left(\frac{x'}{5}\right)^2+\left(\frac{y'}{2}\right)^2+\left(\frac{z'}{5}\right)^2=1 \qquad (*_2)$$

解(2)：若令$\begin{cases} \frac{x'}{5}=\sin\theta\cos\varphi \\ \frac{y'}{2}=\sin\theta\sin\varphi \\ \frac{z'}{5}=\cos\theta \end{cases}$，则$\begin{cases} x'=5\sin\theta\cos\varphi & \theta\in[0,\pi] \\ y'=2\sin\theta\sin\varphi & \varphi\in[0,2\pi] \\ z'=5\cos\theta \end{cases}$. $(*_3)$

即 $\begin{cases} x-2=5\sin\theta\cos\varphi \\ y-1=2\sin\theta\sin\varphi \\ z-2=5\cos\theta \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x=2+5\sin\theta\cos\varphi \\ y=1+2\sin\theta\sin\varphi \\ z=2+5\cos\theta \end{cases}$ $\theta\in[0,\pi]$，$\varphi\in[0,2\pi]$ (式4)

(式3)是Σ在球坐标系中的参数式，(式4)则是它老坐标系中的参数式

注(1)：曲面Σ的参数式都是双参数的，但参数式不唯一。例如，

$\begin{cases} x'=5\cos\theta\cos\varphi \\ y'=2\cos\theta\sin\varphi \\ z'=5\sin\theta \end{cases}$ 即 $\begin{cases} x=2+5\cos\theta\cos\varphi \\ y=1+2\cos\theta\sin\varphi \\ z=2+5\sin\theta \end{cases}$ $\theta\in[-\frac{\pi}{2},\frac{\pi}{2}]$，$\varphi\in[-\pi,\pi]$ (式5)

也是例1中的椭球面Σ的参数式表示。

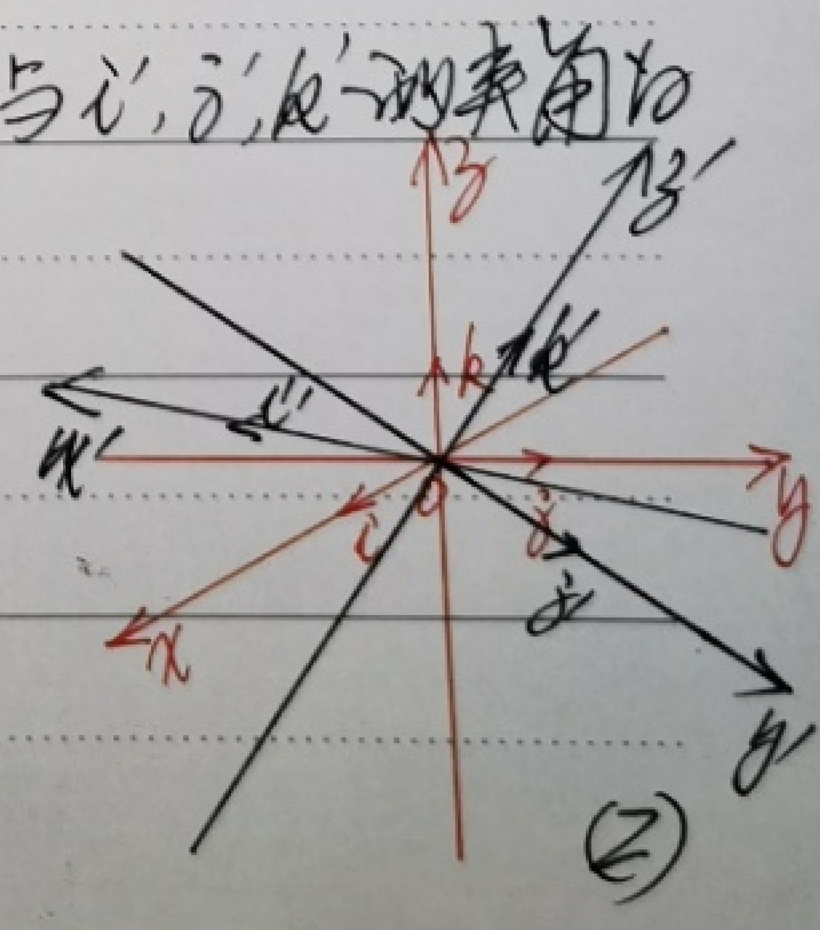
例2. 设有二次曲面Σ：$xy=z$. (式6)

(1). 指出Σ是何种二次曲面？ (2) 求Σ的参数式。

解(1)：若保持坐标系的原点不动，让坐标系进行旋转变换，设 $O-xyz$ 坐标系中，基向量为 $\vec{i},\vec{j},\vec{k}$，在 $O-x'y'z'$ 坐标系中，基向量为 $\vec{i'},\vec{j'},\vec{k'}$ 且 $\vec{i},\vec{j},\vec{k}$ 与 $\vec{i'},\vec{j'},\vec{k'}$ 的夹角如下表所示：

	$\vec{i}$	$\vec{j}$	$\vec{k}$
$\vec{i'}$	α_1	β_1	γ_1
$\vec{j'}$	α_2	β_2	γ_2
$\vec{k'}$	α_3	β_3	γ_3

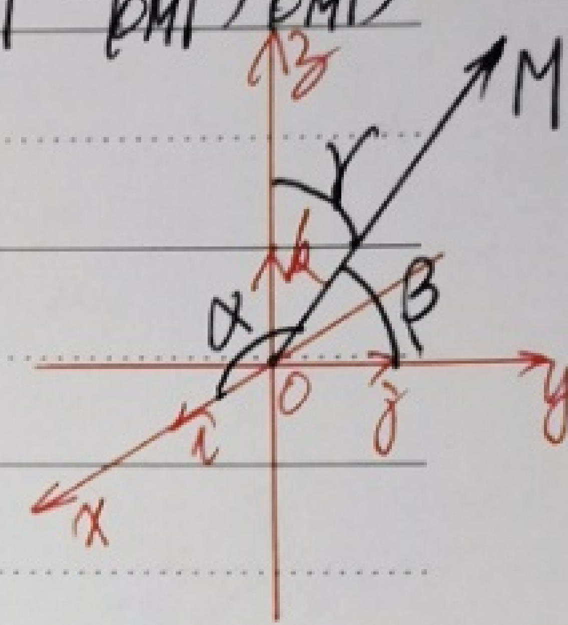
表(I)



(2)

设 $\overrightarrow{OM}=(a,b,c)\neq 0$ 则 $\overrightarrow{OM}^0=\frac{\overrightarrow{OM}}{|\overrightarrow{OM}|}=\left(\frac{a}{|\overrightarrow{OM}|},\frac{b}{|\overrightarrow{OM}|},\frac{c}{|\overrightarrow{OM}|}\right)$

$=(\cos\alpha,\cos\beta,\cos\gamma)=\cos\alpha\, i+\cos\beta\, j+\cos\gamma\, k$



即单位向量 $\overrightarrow{OM}^0$ 可用它的三个方向余弦作为坐标. 由表(I)可知

$$\begin{cases} i'=\cos\alpha_1 i+\cos\beta_1 j+\cos\gamma_1 k \\ j'=\cos\alpha_2 i+\cos\beta_2 j+\cos\gamma_2 k \\ k'=\cos\alpha_3 i+\cos\beta_3 j+\cos\gamma_3 k \end{cases} \quad (※7)$$

现设点 ~~Q(x,y,z)~~ 在 $O-xyz$ 中的坐标为 $Q(x,y,z)$，在 $O-x'y'z'$ 中为 $Q(x',y',z')$，则 $\overrightarrow{OQ}=xi+yj+zk=x'i'+y'j'+z'k'$

$=x'(\cos\alpha_1 i+\cos\beta_1 j+\cos\gamma_1 k)+y'(\cos\alpha_2 i+\cos\beta_2 j+\cos\gamma_2 k)+z'(\cos\alpha_3 i+\cos\beta_3 j+\cos\gamma_3 k)$

$=(x'\cos\alpha_1+y'\cos\alpha_2+z'\cos\alpha_3)i+(x'\cos\beta_1+y'\cos\beta_2+z'\cos\beta_3)j+(x'\cos\gamma_1+y'\cos\gamma_2+z'\cos\gamma_3)k$

$$\Leftrightarrow\begin{cases} x=x'\cos\alpha_1+y'\cos\alpha_2+z'\cos\alpha_3 \\ y=x'\cos\beta_1+y'\cos\beta_2+z'\cos\beta_3 \\ z=x'\cos\gamma_1+y'\cos\gamma_2+z'\cos\gamma_3. \end{cases} \quad (※8)$$

若令 $X=\begin{pmatrix}x\\y\\z\end{pmatrix}$，$A=\begin{pmatrix}\cos\alpha_1 & \cos\alpha_2 & \cos\alpha_3\\ \cos\beta_1 & \cos\beta_2 & \cos\beta_3\\ \cos\gamma_1 & \cos\gamma_2 & \cos\gamma_3\end{pmatrix}$，$X'=\begin{pmatrix}x'\\y'\\z'\end{pmatrix}$ 是三个矩阵.

则(※8)为 $X=AX'$ 或 $X'=A^{-1}X$ (※9)

其中A的各行各列都是单位向量且两两行(列)正交.

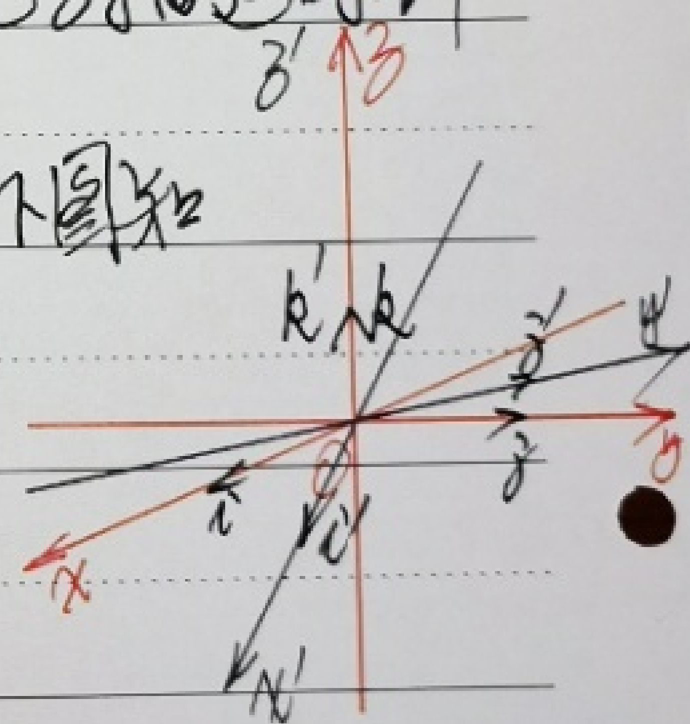
在线性代数中，称A这样的矩阵为正交矩阵.

称(4.8)或(4.9)为正交线性变换，简称正交变换.

不难验证，正交矩阵A满足：$A^T=A^{-1}$ 或 $AA^T=E=\begin{pmatrix}1&0&0&\cdots&0\\0&1&0&\cdots&0\\ \vdots&&&&\vdots\\0&0&0&\cdots&1\end{pmatrix}$

即几何中的旋转或物理中刚体的旋转，在代数中对应正交变换。(4.8)表明了旋转后，若坐标x,y,z与新坐标x',y',z'之间的对应关系是正交变换关系。

若保持oz轴不变，让xoy坐标平面绕z轴逆时针旋转$\frac{\pi}{4}$，得新坐标系$o-x'y'z'$，则从下图知



	i	j	k
i'	$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/2$
j'	$3\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/2$
k'	$\pi/2$	$\pi/2$	0

依(4.8)有：

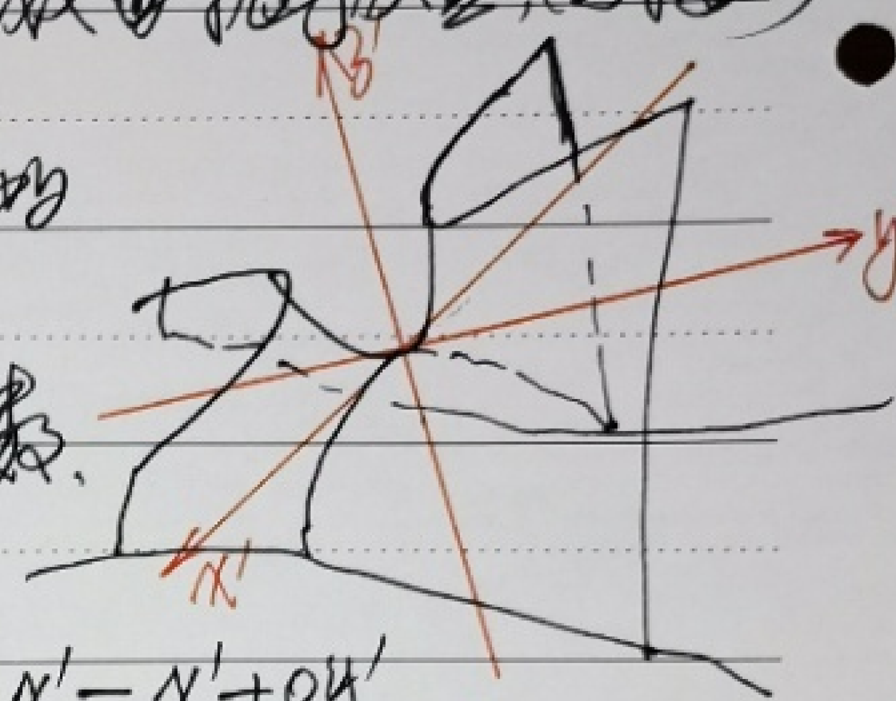
$$\begin{cases} x=x'\cos\frac{\pi}{4}+y'\cos\frac{3\pi}{4}+z'\cos\frac{\pi}{2}=\frac{\sqrt{2}}{2}(x'-y') \\ y=x'\cos\frac{\pi}{4}+y'\cos\frac{\pi}{4}+z'\cos\frac{\pi}{2}=\frac{\sqrt{2}}{2}(x'+y') \\ z=x'\cos\frac{\pi}{2}+y'\cos\frac{\pi}{2}+z'\cos 0=z' \end{cases} \quad (4.10)$$

利用正交变换(4.10)可将Σ：$xy=z$化为：

$\frac{\sqrt{2}}{2}(x'-y')\frac{\sqrt{2}}{2}(x'+y')=z'$ 即 $z'=\frac{1}{2}(x'^2-y'^2)=\frac{x'^2}{(\sqrt{2})^2}-\frac{y'^2}{(\sqrt{2})^2}$ (4).

在新坐标系 $O-x'y'$ 系中，Σ是双曲抛物面，(马鞍面)

例(2). $\Sigma: xy=z$ 在老坐标系中的



参数式为 $\begin{cases} x = x+0y \\ y = 0x+y \\ z = xy \end{cases}$，$x, y$ 为参数。

Σ在新坐标系中的参数式为：$\begin{cases} x' = x'+0y' \\ y' = 0x'+y' \\ z = \frac{1}{2}(x'^2-y'^2) \end{cases}$，$x', y'$ 为参数。

(三) 柱面坐标系与球面坐标系；

$\begin{cases} x = r\cos\theta, & \theta\in[0,2\pi] \\ y = r\sin\theta, & r\in[0,+\infty) \\ z = z, & z\in(-\infty,+\infty) \end{cases}$ (公式1)

(1) 柱面坐标系：空间 R^3 中任一点 $Q(x,y,z)$ 都可看作是

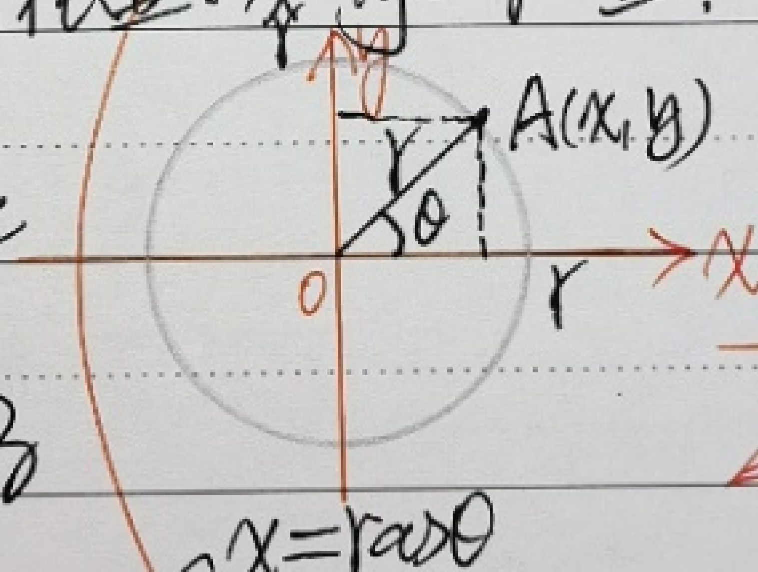
在半径为 r 的某个圆柱面：$x^2+y^2=r^2$ 上。

而圆柱面 $x^2+y^2=r^2$ 上

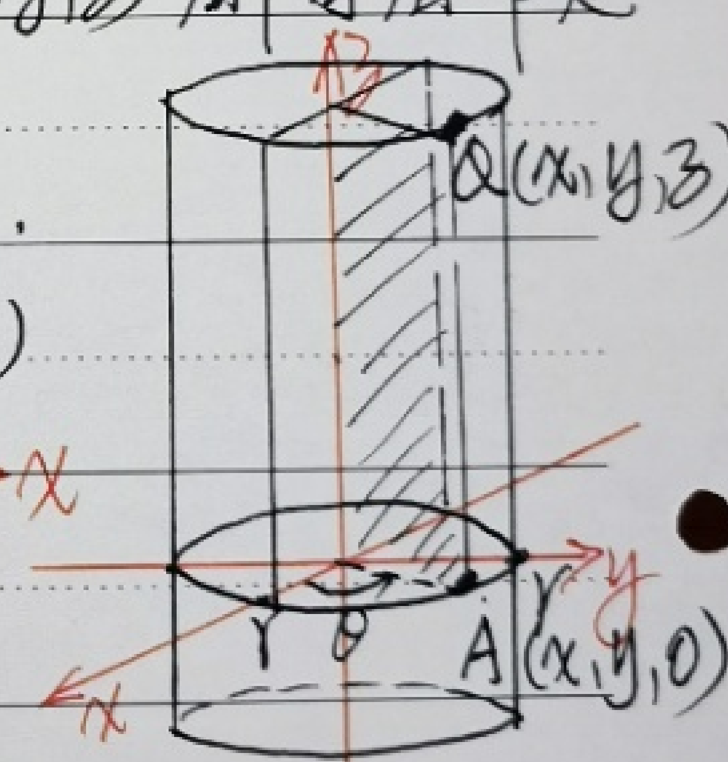
的点，都可用 r, θ, z

这三个参数组表示，

称 (r,θ,z) 为点Q的柱面坐标。



$\begin{cases} x = r\cos\theta \\ y = r\sin\theta \end{cases}$

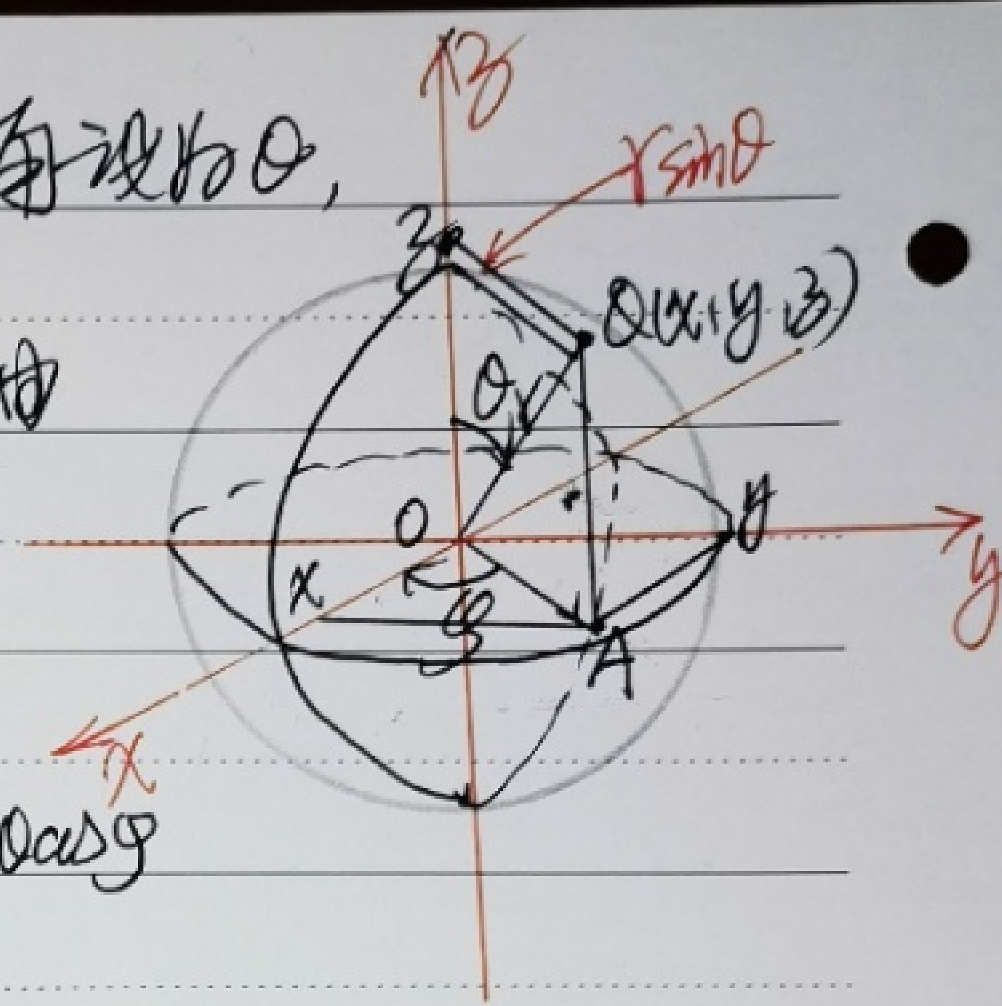


$A(r\cos\theta, r\sin\theta, 0) \longrightarrow$

$Q(r\cos\theta, r\sin\theta, z)$

(2). 球面坐标系：空间中任一点 $Q(x,y,z)$ 都位于某个

半径为 r 的球面Σ上：$x^2+y^2+z^2=r^2$，$(r\geq 0)$



$|\overrightarrow{OQ}|=r$，$\overrightarrow{OQ}$与Oz轴正向的夹角设为θ，

$\overrightarrow{OQ}$在xOy平面中的投影$\overrightarrow{OA}$与Ox轴

正向的夹角为φ，$\begin{cases}0\le\theta\le\pi\\0\le\varphi\le2\pi\end{cases}$

则$|\overrightarrow{OA}|=r\sin\theta$，$\Rightarrow x=|\overrightarrow{OA}|\cos\varphi=r\sin\theta\cos\varphi$

$y=|\overrightarrow{OA}|\sin\varphi=r\sin\theta\sin\varphi$，而$z=r\cos\theta$，

称(θ,φ,r)或(r,θ,φ)为球面坐标，球面坐标r,θ,φ

与直角坐标x,y,z之间的转换关系为$\begin{cases}x=r\sin\theta\cos\varphi\\y=r\sin\theta\sin\varphi\\z=r\cos\theta\end{cases}$，$\theta\in[0,\pi]$，$\varphi\in[0,2\pi]$，$r\in[0,+\infty)$ (式12)

直角坐标系下的球面方程：

$\Sigma: x^2+y^2+z^2=R^2$ 在柱面坐标系下：$\begin{cases}x=r\cos\theta\\y=r\sin\theta\\z=z\end{cases}$

化成$\Sigma: r^2+z^2=R^2$，在球面坐标系下：

$\begin{cases}x=r\sin\theta\cos\varphi\\y=r\sin\theta\sin\varphi\\z=r\cos\theta\end{cases}$下，化为：$x^2+y^2+z^2=r^2=R^2$ 即$\Sigma: r=R$.

双叶双曲面$\Sigma: x^2-y^2-z^2=1$在柱面坐标系中化为

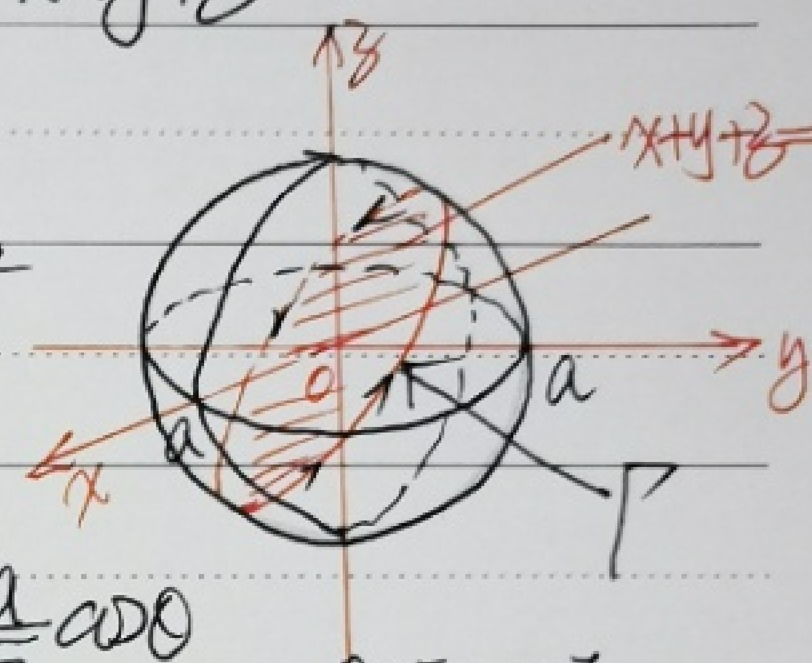
$r^2\cos2\theta-z^2=1$，在球面坐标系中化为：$2x^2-(x^2+y^2+z^2)=1$

即$2(r\sin\theta\cos\varphi)^2-r^2=1\Leftrightarrow r^2(2\sin^2\theta\cos^2\varphi-1)=1$.

(三) 空间曲线 Γ: $\begin{cases} F(x,y,z)=0 \\ G(x,y,z)=0 \end{cases}$ 的参数式表示：

例1. 将空间 $\mathbb{R}^3$ 中的大圆周 Γ: $\begin{cases} x^2+y^2+z^2-a^2=0 \quad (a>0) \\ x+y+z=0 \end{cases}$

化成参数式：



解：从 $z=-(x+y) \Longrightarrow x^2+y^2+(-(x+y))^2=a^2$

$\Longrightarrow x^2+xy+y^2=\frac{a^2}{2} \Longrightarrow$

$\left(x+\frac{y}{2}\right)^2+\left(\frac{\sqrt{3}}{2}y\right)^2=\left(\frac{a}{\sqrt{2}}\right)^2$ 令 $\begin{cases} x+\frac{y}{2}=\frac{a}{\sqrt{2}}\cos\theta \\ \frac{\sqrt{3}}{2}y=\frac{a}{\sqrt{2}}\sin\theta \end{cases}$, $\theta\in[0,2\pi]$.

则 $y=\frac{2}{\sqrt{6}}a\sin\theta \Longrightarrow x=\frac{a}{\sqrt{6}}(\sqrt{3}\cos\theta-\sin\theta) \Longrightarrow z=-(x+y)=\frac{-a}{\sqrt{6}}(\sqrt{3}\cos\theta+\sin\theta)$

即空中圆周 Γ 的参数式为 $\begin{cases} x=\frac{a}{\sqrt{6}}(\sqrt{3}\cos\theta-\sin\theta) \\ y=\frac{2}{\sqrt{6}}a\sin\theta \\ z=\frac{-a}{\sqrt{6}}(\sqrt{3}\cos\theta+\sin\theta) \end{cases}$, $\theta\in[0,2\pi]$.

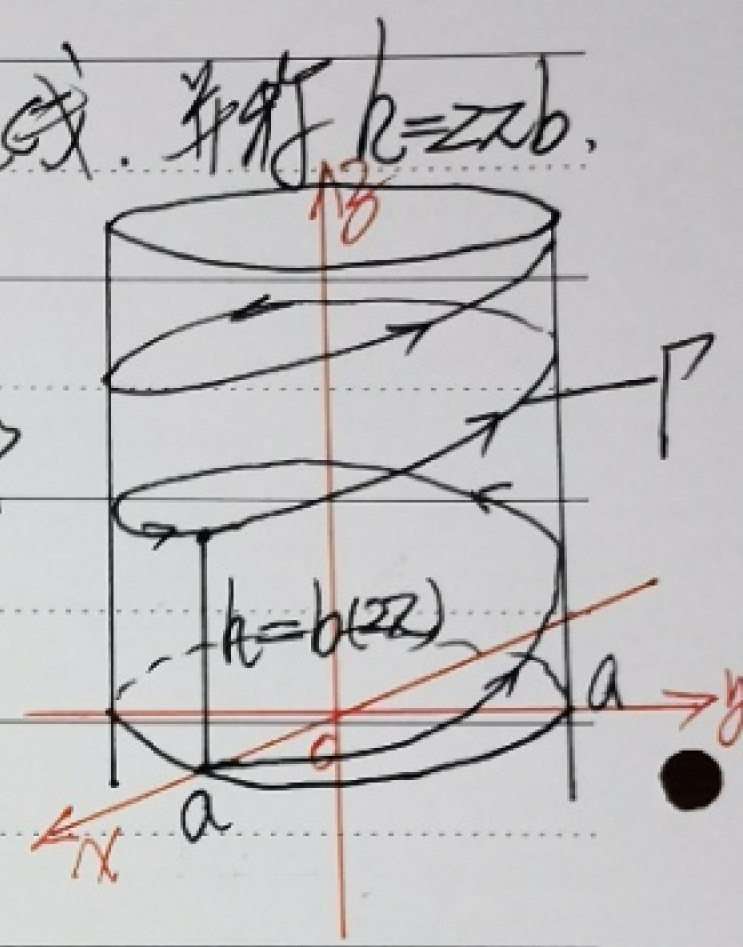
若将 x 视为参数，则从 $\begin{cases} F(x,y,z)=0 \\ G(x,y,z)=0 \end{cases}$ 可解出 $\begin{cases} x=x \\ y=y(x) \\ z=z(x) \end{cases}$, $x\in I$.

例2. 空间的直线 Γ: $\begin{cases} x+y+z+5=0 \\ x-y-2z-1=0 \end{cases} \Longleftrightarrow \begin{cases} y+z=-x-5 \\ -y-2z=-x+1 \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} x=x \\ y=-3x-9 \\ z=2x+4 \end{cases}$

注：空间的曲线 Γ 的参数式中只有一个参数，且 Γ 的参数式表示不唯一。

例3. $\Gamma:\begin{cases} x=a\cos\theta \\ y=a\sin\theta \\ z=b\theta \end{cases}$, ($\theta\in[0,+\infty)$ $a>0, b>0$ 为常数)

所表示的空间光滑曲线，称之为螺旋线。并称 $h=2\pi b$ 为一个螺距。



此题中，$x^2+y^2=a^2$，因此 Γ 上的点都在圆柱面 $x^2+y^2=a^2$ 上，而从 $z=b\theta \Rightarrow z'_\theta=b$，即质点在作圆周运动的同时，如果向上作匀速运动，则综合的结果是沿螺旋线的运动。

无论是在物理中，还是在几何中，参数θ增加的方向被认定为曲线 Γ 的正向。相反的方向是 Γ 的负向。

(四)作业：Ex8.4/ 1; 2; 4/(4),(5),(6),(10); 8; 9; 11.