

文章编号: 1000-8055(2007)12-2124-10

柱塞泵保持架滑靴安装孔的设计及尺寸计算

史培林¹, 张 婷², 高 懿²

(1. 西安航空动力控制公司, 西安 710077; 2. 清华大学 机械工程系, 北京 100084)

摘 要: 在对柱塞泵运动深入分析的基础上, 运用坐标变换法和轨迹投影法, 使用 MATLAB 软件, 提出了保持架滑靴安装孔尺寸的形成原因及设计计算方法. 该方法的优点是: 所有的计算公式都为完整的理论计算公式, 没有量的取舍; 所有的计算结果都为实解, 保证了所得的计算结果为真实的理论值. 而且一次计算可以得到滑靴安装孔尺寸设计的所有数据. 仿真结果表明: 设计方法和尺寸计算是正确的.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 柱塞泵; 滑靴安装孔; 设计计算

中图分类号: V233.2⁺2

文献标识码: A

Design and dimensional calculation of mounting holes of slipping shoe in piston pump

SHI Pei lin¹, ZHANG Ting², GAO Yi²

(1. Xi'an Aero-Engine Controls Company, Xi'an, 710077, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on in-depth analysis of the operation of piston pump with the methods of coordinate conversion and track projection via the help of MATLAB software, the dimensional formation of mounting holes in the holder slipping shoe were presented, and the design and calculation methods were developed, which has the following advantages: all formulas are calculated by integrated theory, no rounding numbers are required; all outputs are accurate solutions, ensuring that all the outputs are real theoretical values; all dimensional design parameters of mounting holes in slipping shoe can be obtained in one calculation process. The simulation results indicate that the design method and dimensional calculation are correct.

Key words: aerospace propulsion system; piston pump; slipping shoe mounting hole; design calculating

柱塞泵在航空动力装置中有着广泛的应用. 柱塞泵的保持架滑靴安装孔的设计在许多文献中都有论述文献[1], 但缺少最新的非圆形结构形式的计算. 本文运用坐标变换法和轨迹投影法的方法, 推导出保持架滑靴安装孔设计计算的新公式, 并运用运动仿真分析, 验证了其正确性和可靠性.

1 滑靴安装孔的结构形式和主要尺寸

1.1 滑靴安装孔的结构形式

斜盘式轴向柱塞泵由柱塞、转子、保持架(亦称返回盘)、滑靴、分油盘、调节活塞等组成.

在斜盘式轴向柱塞泵工作过程中, 保持架的

收稿日期: 2006-11-22; 修订日期: 2007-01-29

作者简介: 史培林(1948), 男, 陕西汉中, 中航一集团西安航空动力控制公司第二设计研究所副所长, 主要从事航空发动机燃油控制系统数字化设计、分析、仿真的应用研究.

主要作用是压紧滑靴, 使滑靴表面与斜盘工作面均匀贴合, 从而拉动柱塞在转子柱塞腔中做往复运动, 完成吸油和排油的全过程。

保持架滑靴安装孔有圆形和非圆形等多种形式。沿保持架径向为短轴、切向为长轴的“豆形”孔为最新的非圆形结构形式(如图 1 所示)。

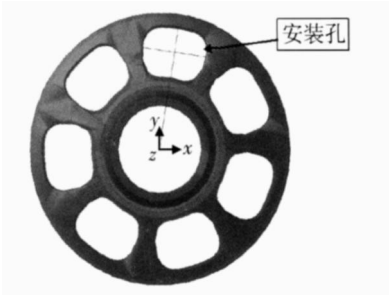


图 1 保持架滑靴安装孔示意图

Fig 1 Sketch of mounting holes of holder

1.2 滑靴安装孔设计的主要尺寸

保持架滑靴安装孔的设计主要是确定(如图 2 所示):

- 滑靴安装孔分布圆半径 R_t ;
- 滑靴安装孔中心线与保持架中心线夹角 θ_t ;
- 滑靴安装孔切向尺寸 d_0 ;
- 滑靴安装孔径向尺寸 d_1 、 d_2 。

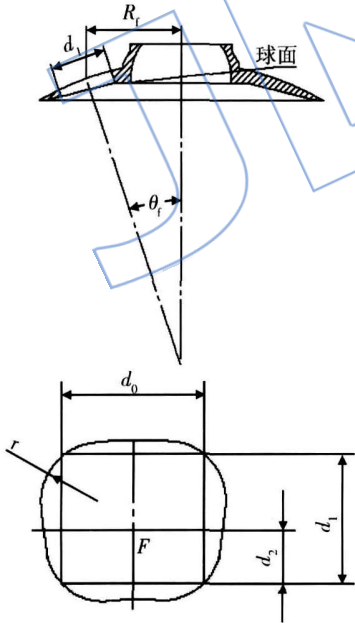


图 2 保持架滑靴安装孔主要尺寸

Fig 2 Main dimension mounting holes of holder

2 对象点和参考点的选取

2.1 几何参数及坐标系的建立

柱塞泵启动时, 转子带动柱塞及滑靴沿转子

中心轴转动, 由于滑靴安装在保持架安装孔中, 则此时滑靴带动保持架转动。当柱塞泵运转平稳后, 可认为保持架以恒定转速(即转子转速)绕转子中心轴转动。现以保持架球形支座中心 O_3 与斜盘转轴中心 A 重合的结构为例, 从理论计算的角度, 来分析保持架滑靴安装孔的形成原因及滑靴运动轨迹的计算方法(如图 3 所示)。

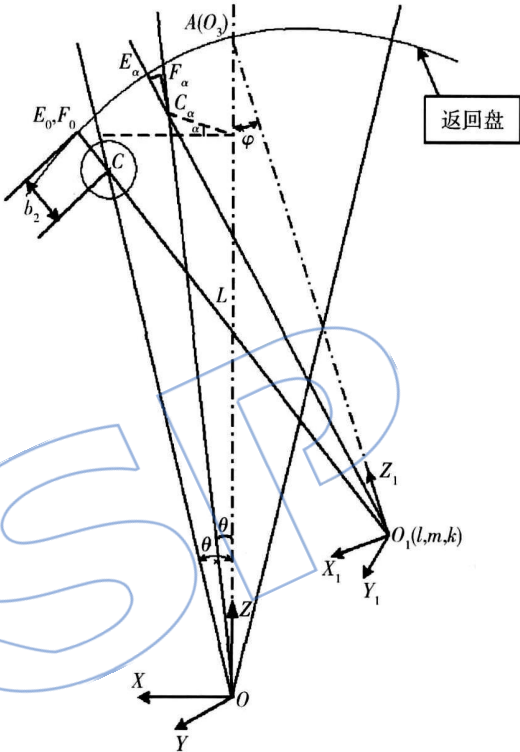


图 3 滑靴与保持架运动分析示意图

Fig 3 Movement analysis of slipping shoe and holder

2.1.1 符号及几何参数

2.1.1.1 符号

- O —— 原点, 柱塞轴线与转子轴线的交点, 即柱塞锥顶点;
- O_1 —— 斜盘球面中心, 也是保持架球面中心;
- A —— 斜盘旋转中心;
- O_3 —— 保持架球形支座中心(与 A 点重合);
- C —— 柱塞球头中心。

2.1.1.2 几何参数

- a —— 柱塞锥顶点 O 至斜盘旋转中心 A 的距离, 即 $a = \overline{OA}$;
- c —— 斜盘球面中心 O_1 至斜盘旋转中心 A 的距离, 即 $c = \overline{O_1A}$;
- L —— 斜盘球面中心 O_1 至柱塞球头中心 C 的距离, 即 $L = \overline{O_1C}$;

b_2 —— 柱塞球头中心 C 点至滑靴下表面圆心的距离;
 φ —— 斜盘转角;
 θ —— 柱塞轴线与转子轴线的夹角;
 α —— 转子顺时针旋转的角度, 下死点位置时 $\alpha = 0^\circ$, 上死点位置时 $\alpha = 180^\circ$.

2.1.2 坐标系

分别以 O 点和 O_1 点为原点, 建立大地直角坐标系, 与大地固结.

2.1.2.1 $O(X, Y, Z)$ 直角坐标系

原点 —— 柱塞锥顶点 O ;
 Z 坐标轴 —— 转子轴线, 指向斜盘方向为正;
 X 坐标轴 —— 在起始平面上, 过原点 O 垂直于 Z 轴, 朝向下死点方向为正;
 Y 坐标轴 —— 过原点 O 垂直于起始平面, 朝排油一侧方向为正.

2.1.2.2 $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 直角坐标系

原点 —— 保持架球面中心 O_1 ;
 Z_1 坐标轴 —— 保持架球面中心 O_1 与斜盘旋转中心 $A(O_3)$ 的连线, 由 O_1 指向 A 方向为正;
 X_1 坐标轴 —— 在起始平面上, 过原点 O_1 垂直于 Z_1 轴, 朝向下死点方向为正;
 Y_1 坐标轴 —— 过原点 O_1 垂直于起始平面, 朝排油一侧方向为正.

2.1.2.3 坐标系的坐标转换

设 O_1 点在 $O(X, Y, Z)$ 坐标系下的坐标为 (l, m, k) (如图 4 所示)

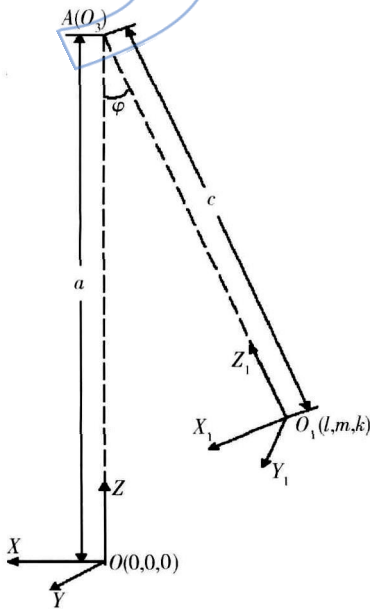


图 4 坐标系的坐标转换

Fig 4 Transformation of Coordinates

则

$$\begin{cases} l = -c \cdot \sin \varphi \\ m = 0 \\ k = a - c \cdot \cos \varphi \end{cases} \quad (1)$$

(斜盘倾角变化时, O_1 点始终在 XOZ 平面内, 所以 $m = 0$).

$O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 坐标系相对于 $O(X, Y, Z)$ 坐标系统 Y 轴逆时针旋转了 φ 角, 设空间中任意一点 A 在 $O(X, Y, Z)$ 坐标系下的坐标为 (X, Y, Z) , 在 $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 坐标系下的坐标为 (X_1, Y_1, Z_1) , 则具有如下坐标转换关系

$$\begin{cases} X = Z_1 \cdot \sin \varphi + X_1 \cdot \cos \varphi + l \\ Y = Y_1 \\ Z = Z_1 \cdot \cos \varphi - X_1 \cdot \sin \varphi + k \end{cases}$$

且

$$\begin{cases} X_1 = (X - l) \cdot \cos \varphi - (Z - k) \cdot \sin \varphi \\ Y_1 = Y \\ Z_1 = (X - l) \cdot \sin \varphi + (Z - k) \cdot \cos \varphi \end{cases} \quad (2)$$

2.2 对象点和参考点的选取

分别在柱塞球头和滑靴上选取 C, E 作为研究对象点, 在保持架上选取 F 点为参考点 (如图 3 所示). 其中:

C —— 固结在柱塞球头球心上, 滑靴的旋转中心, C_α 表示转子相对于起始平面顺时针转过 α 角度时 C 点所在的空间位置点;

E —— 固结在滑靴上, 滑靴与保持架接触面的中心点, E_α 表示转子相对于起始平面顺时针转过 α 角度时 E 点所在的空间位置点;

F —— 固结在保持架上, 作为研究滑靴在保持架上相对运动的参考点. 其初始位置与 E_0 重合的点, F_α 表示转子相对于起始平面顺时针转过 α 角度时 F 点所在的空间位置点.

需要注意的是, F 点固结在保持架上, 以与转子相同的转速围绕转子中心轴转动. F 点在保持架上的位置由 E 点起始位置 E_0 点决定, 即 F 点是保持架上初始位置 F_0 与 E_0 重合的点.

3 转子转过 α 角度时, 各对象点和参考点的坐标

转子相对于起始平面顺时针转过 α 角度 ($0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$) 时, C, E, F 点也随之改变位置, 下面分别求在绝对坐标系中 $C_\alpha, E_\alpha, F_\alpha$ 的坐标.

3.1 转子转过 α 角度时, C 点坐标

在 $O(X, Y, Z)$ 坐标系中求 C_α 坐标 (如图 5 所示).

首先, C 点为柱塞球头球心, 在转子转动过程

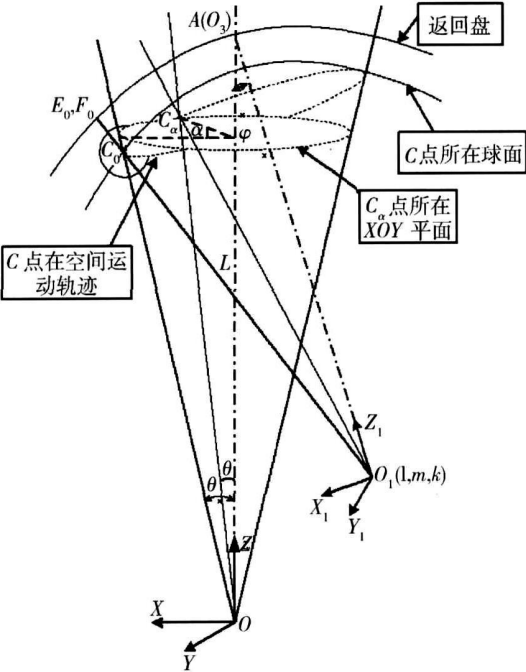


图 5 C 点空间位置示意图
Fig 5 Sketch of C point spacial position

中始终在柱塞中心线所在锥面上,即 C 点在以 OA 为旋转轴线,母线过原点 O 与 OA 夹角为 θ 的锥面上,则 $Z_c = \cot \theta \cdot \sqrt{X_c^2 + Y_c^2}$.

其次, C 点为滑靴的旋转中心,在转子转动过程中始终在滑靴的轴线上,即 C 点在以 O_1 点为球心,半径为 L 的球面上,则 $(X_c - l)^2 + (Y_c - m)^2 + (Z_c - k)^2 = L^2, (m = 0)$.

同时, C 点与柱塞一起在转子的带动下绕转子中轴线转过 α 角度,则 C_α 点的 X, Y 坐标满足如下关系

当 $\alpha \neq 90^\circ$ 且 $\alpha \neq 270^\circ$ 时, $\tan \alpha = -\frac{Y_c}{X_c}$;

当 $\alpha = 90^\circ$ 时, $X_c = 0$ 且 $Y_c < 0$;

当 $\alpha = 270^\circ$ 时, $X_c = 0$ 且 $Y_c > 0$.

由此可得方程组

$$\begin{cases} \alpha \neq 90^\circ \text{ \& \; } \alpha \neq 270^\circ: \\ \begin{cases} Z_c = \cot \theta \cdot \sqrt{X_c^2 + Y_c^2} \\ (X_c - l)^2 + (Y_c)^2 + (Z_c - k)^2 = L^2, \\ \tan \alpha = -\frac{Y_c}{X_c} \end{cases} \\ \alpha = 90^\circ \text{ or } \alpha = 270^\circ: \\ \begin{cases} Z_c = \cot \theta \cdot \sqrt{X_c^2 + Y_c^2} \\ (X_c - l)^2 + (Y_c)^2 + (Z_c - k)^2 = L^2 \\ X_c = 0 \end{cases} \end{cases}$$

解此方程组,得转子相对于起始平面顺时针转过 α 角度($0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$)时, C 点在绝对坐标系

$O(X, Y, Z)$ 中 $C_\alpha(X_c, Y_c, Z_c)$ 点的坐标为

$$\begin{cases} Z_c = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2 \cdot a} \\ X_c = \tan \theta \cdot \cos \alpha \cdot Z_c \quad (0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ), \\ Y_c = -\tan \theta \cdot \sin \alpha \cdot Z_c \end{cases}$$

其中

$$\begin{cases} a = 1 + \tan^2 \theta \\ b = -2(\tan \theta \cdot \cos \alpha \cdot l + k) \\ c = l^2 + k^2 - L^2 \end{cases} \quad (3)$$

3.2 转子转过 α 角度时, E 点坐标

分别在 $O(X, Y, Z)$ 坐标系及 $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 坐标系中求 E_α 坐标(如图 6 所示).

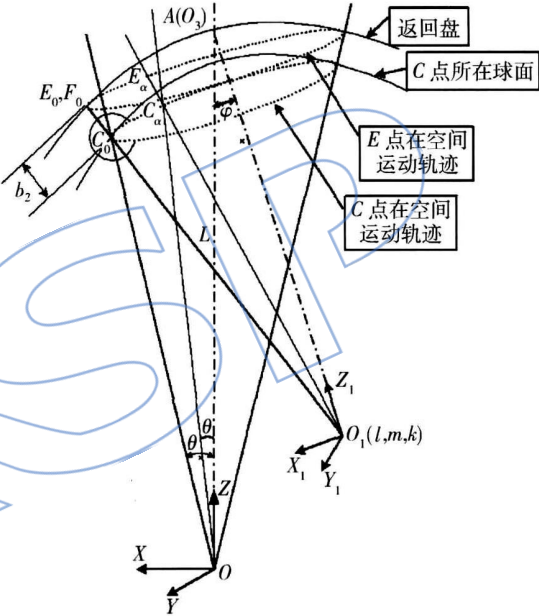


图 6 E 点空间位置示意图
Fig 6 Sketch of E point spacial position

E 点固结在滑靴上,是滑靴与保持架接触面的中心点,则 E 点必然在滑靴的轴线上,而 C 点是滑靴的转动中心,则 C 点也在滑靴的轴线上.即 E 点在以 O_1 点为球心,半径为 $(L + b_2)$ 的球面上,且 E, C, O_1 三点共线.

由于 E, C, O_1 三点共线,且 $EO_1 = (L + b_2)$; $CO_1 = L$; $O_1(l, m = 0, k)$

于是,转子相对于起始平面顺时针转过 α 角度($0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$)时, E 点在绝对坐标系 $O(X, Y, Z)$ 中 $E_\alpha(X_E, Y_E, Z_E)$ 点的坐标为

$$\begin{cases} X_E = \frac{L + b_2}{L}(X_c - l) + l \\ Y_E = \frac{L + b_2}{L} \cdot Y_c \\ Z_E = \frac{L + b_2}{L}(Z_c - k) + k \end{cases}$$

其中, X_C, Y_C, Z_C 由公式(3)求得. (4)

根据公式(2)坐标变换公式, 可以求得 E 点在绝对坐标系 $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 中点 $E_a(X_{E1}, Y_{E1}, Z_{E1})$ 的坐标为

$$\begin{cases} X_{E1} = (X_E - l) \cdot \cos \varphi - (Z_E - k) \cdot \sin \varphi = \\ \frac{L + b_2}{L} [(X_C - l) \cdot \cos \varphi - (Z_C - k) \cdot \sin \varphi] \\ Y_{E1} = Y_E = \frac{L + b_2}{L} \cdot Y_C \\ Z_{E1} = (X_E - l) \cdot \sin \varphi + (Z_E - k) \cdot \cos \varphi = \\ \frac{L + b_2}{L} [(X_C - l) \cdot \sin \varphi + (Z_C - k) \cdot \cos \varphi] \end{cases} \quad (5)$$

其中, X_C, Y_C, Z_C 由公式(3)求得.

3.3 转子转过 α 角度时, F 点坐标

分别在 $O(X, Y, Z)$ 坐标系及 $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 坐标系中求 F_a 坐标.

3.3.1 F 点的初始坐标

在设计过程中 F 点应是保持架上的固定点, 即 F 点在保持架上的位置不随斜盘倾角的变化而变化. 所以应选择 $\varphi = 0^\circ$ 时的 F 点为保持架安装孔尺寸设计的参考点, $0^\circ \leq \varphi \leq 17^\circ$ 时的计算都以此参考点为准(如图 7 所示).

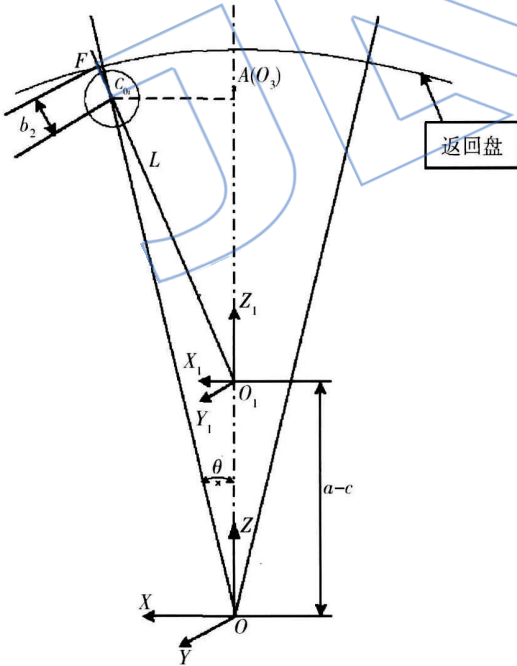


图 7 F 点初始坐标示意图

Fig. 7 Sketch of F point initial spacial position

(1) 求 $\varphi = 0^\circ$ 时 C 点的初始坐标

取 $\alpha = 0^\circ$, 设 $\varphi = 0^\circ$ 时 C 点的初始坐标为 $C_{0i}(X_{C_{0i}}, Y_{C_{0i}}, Z_{C_{0i}})$, 则有:

$$\begin{cases} \tan \theta = \frac{X_{C_{0i}}}{Z_{C_{0i}}} \\ Y_{C_{0i}} = 0 \\ \sqrt{X_{C_{0i}}^2 + (Z_{C_{0i}} - (a - c))^2} = L \end{cases}$$

消去 $X_{C_{0i}}$ 得到: $(\tan \theta \cdot Z)^2 + (Z_{C_{0i}} - (a - c))^2 = L^2$, 此二次方程可化为如下形式

$$AZ_{C_{0i}}^2 + BZ_{C_{0i}} + C = 0,$$

其中
$$\begin{cases} A = 1 + \tan^2 \theta \\ B = -2(a - c) \\ C = (a - c)^2 - L^2 \end{cases}$$

则
$$Z_{C_{0i}} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2 \cdot A}$$

在 MATLAB 中求解此二次方程, 根据几何关系, 应略去 $Z_{C_{0i}}$ 值较小的根(即略去 $Z_{C_{0i}} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2 \cdot A}$), 则可以求得 $\varphi = 0^\circ$ 时 C 点的初始坐标

$$\begin{cases} Z_{C_{0i}} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2 \cdot A} \\ Y_{C_{0i}} = 0 \\ X_{C_{0i}} = \tan \theta \cdot Z_{C_{0i}} \end{cases} \quad (6)$$

其中
$$\begin{cases} A = 1 + \tan^2 \theta \\ B = -2(a - c) \\ C = (a - c)^2 - L^2 \end{cases}$$

(2) 求 F 点在 $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 中的初始坐标
由于 F, C_{0i}, O_1 三点共线, 则根据几何关系, 可得 F 点在 $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 中的初始坐标为

$$F(X_{F10}, Y_{F10}, Z_{F10}) \begin{cases} X_{F10} = \frac{L + b_2}{L} X_{C_{0i}} \\ Y_{F10} = 0 \\ Z_{F10} = \frac{L + b_2}{L} [Z_{C_{0i}} - (a - c)] \end{cases} \quad (7)$$

其中 $X_{C_{0i}}, Y_{C_{0i}}, Z_{C_{0i}}$ 由(6)式求得

3.3.2 转子转过 α 角度时, F 点坐标

F 点作为固结在保持架上的参考点, $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 坐标系中, 它围绕保持架中心轴 O_1A 做圆周运动. 同时, 由于保持架以恒定转速(即转子转速)绕转子中心轴转动, 则当转子转过 α 角度时, 在 $O(X, Y, Z)$ 坐标系中, F 点绕转子中心轴 OA 转过 α 角度(如图 8 所示).

当转子绕中心轴顺时针转过 α 角度时, 设 F 点在 $O(X, Y, Z)$ 坐标系及 $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 坐标系中的坐标分别为 $F_a(X_F, Y_F, Z_F)$, $F_a(X_{F1}, Y_{F1},$

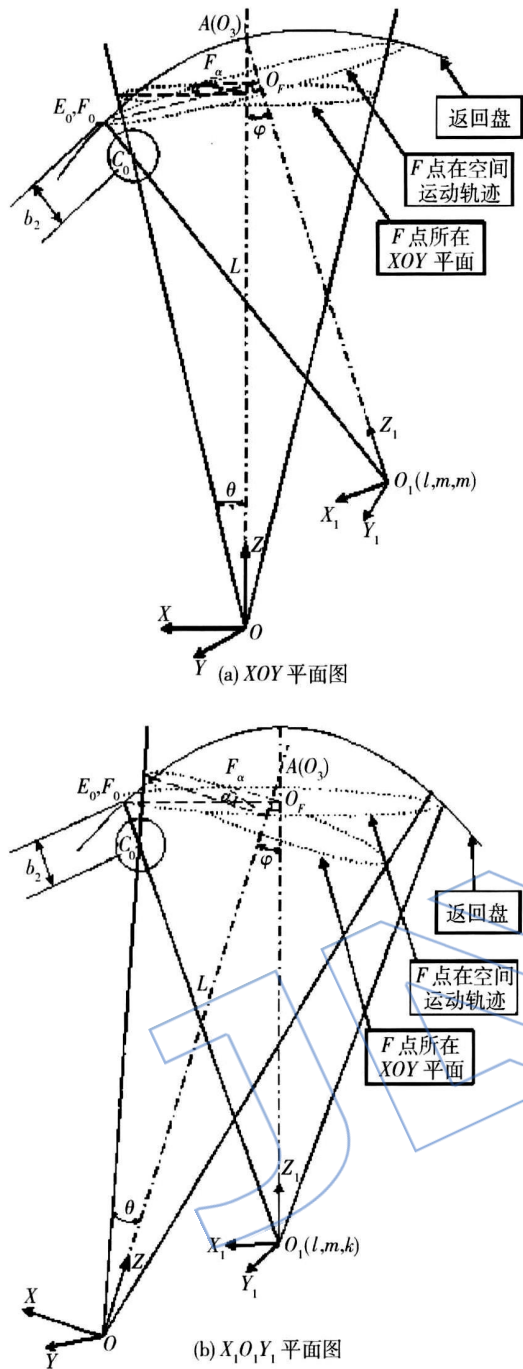


图 8 F 点空间位置示意图

Fig 8 Sketch of F point spatial position

Z_{F1}), 则

(1) 在 $O(X, Y, Z)$ 坐标系中
F 点绕转子中心轴 OA 转过 α 角度

$$\left\{ \begin{array}{l} \tan \alpha = -\frac{Y_F}{X_F} \quad (\alpha \neq 90^\circ \text{ \& \; } \alpha \neq 270^\circ) \\ X_F = 0, Y_F < 0 \quad (\alpha = 90^\circ) \\ X_F = 0, Y_F > 0 \quad (\alpha = 270^\circ) \end{array} \right. \quad (8)$$

(2) 在 $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 坐标系中
F 点绕保持架中心轴 O_1A 做圆周运动

$$\left\{ \begin{array}{l} X_F^2 + Y_F^2 = X_{F10}^2 + Y_{F10}^2 = X_{F10}^2 \\ Z_{F1} = Z_{F10} \end{array} \right. \quad (9)$$

(3) F 点坐标转换

$$\left\{ \begin{array}{l} X_{F1} = (X_F - l) \cdot \cos \varphi - (Z_F - k) \cdot \sin \varphi \\ Y_{F1} = Y_F \\ Z_{F1} = (X_F - l) \cdot \sin \varphi + (Z_F - k) \cdot \cos \varphi \end{array} \right. \quad (10)$$

根据 (8), (9), (10) 三式, 可以求出转子相对于起始平面顺时针转过 α 角度 ($0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$) 时, F 点在绝对坐标系 $O(X, Y, Z)$ 及 $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 中的坐标 $F_a(X_F, Y_F, Z_F)$ 、 $F_a(X_{F1}, Y_{F1}, Z_{F1})$ 为

当 $\alpha < 90^\circ$ & $\alpha > 270^\circ$ 时

$$\left\{ \begin{array}{l} X_F = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2 \cdot a}, \\ X_{F1} = (X_F - Z_{F10} \cdot \sin \varphi - l) / \cos \varphi \\ Y_F = Y_{F1} = -\tan \alpha \cdot X_F \\ Z_F = \frac{Z_{F10} - (X_F - l) \cdot \sin \varphi}{\cos \varphi} + k, \\ Z_{F1} = Z_{F10} \end{array} \right.$$

当 $90^\circ < \alpha < 270^\circ$ 时

$$\left\{ \begin{array}{l} X_F = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2 \cdot a}, \\ X_{F1} = (X_F - Z_{F10} \cdot \sin \varphi - l) / \cos \varphi \\ Y_F = Y_{F1} = -\tan \alpha \cdot X_F \\ Z_F = \frac{Z_{F10} - (X_F - l) \cdot \sin \varphi}{\cos \varphi} + k, \\ Z_{F1} = Z_{F10} \end{array} \right. \quad (11)$$

当 $\alpha = 90^\circ$ 时

$$\left\{ \begin{array}{l} X_F = 0, \\ X_{F1} = (-Z_{F10} \cdot \sin \varphi - l) / \cos \varphi \\ Y_F = Y_{F1} = \\ \sqrt{X_{F10}^2 - [(-Z_{F10} \cdot \sin \varphi - l) / \cos \varphi]^2} \\ Z_F = \frac{Z_{F10} + l \cdot \sin \varphi}{\cos \varphi} + k, \\ Z_{F1} = Z_{F10} \end{array} \right.$$

当 $\alpha = 270^\circ$ 时

$$\left\{ \begin{array}{l} X_F = \\ 0, X_{F1} = (-Z_{F10} \cdot \sin \varphi - l) / \cos \varphi \\ Y_F = Y_{F1} = \\ \sqrt{X_{F10}^2 - [(-Z_{F10} \cdot \sin \varphi - l) / \cos \varphi]^2} \\ Z_F = \frac{Z_{F10} + l \cdot \sin \varphi}{\cos \varphi} + k, \\ Z_{F1} = Z_{F10} \end{array} \right.$$

其中 $a = \frac{1}{\cos^2 \alpha} (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \varphi)$

$$b = -2 \cdot (\sin \varphi \cdot Z_{F10} + l)$$
$$c = (\sin \varphi \cdot Z_{F10} + l)^2 - \cos^2 \varphi \cdot X_{F10}^2$$

以上 4 式组成公式(11).

4 EF 点的相对运动

由上文可知, F 点是固结在保持架上的参考点, 则 F 点相对于保持架是静止的. 而 E 点为滑靴与保持架接触面的中心点, 则 E 点在保持架表面运动. 而 F 点与 E 点的起始位置($\alpha=0^\circ$)重合, 则研究一个周期内 E 点相对于 F 点的相对运动关系, 即可得到滑靴相对于保持架的相对运动关系.

4.1 在 $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 坐标系中 EF 点的相对运动

当转子相对于起始平面顺时针转过 α 角度($0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$)时, 由(7)(11)式可分别求得 E, F 点在 $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 固定坐标系中的坐标 $F_a(X_{E1}, Y_{E1}, Z_{E1})$ 和 $F_a(X_{F1}, Y_{F1}, Z_{F1})$.

在 MATLAB 中编写. m 文件(注: 为了计算需要, 在编写 matlab. m 文件时, 赋予了已知设计参数的值, 下同), 可以划出当斜盘倾角为 15° 时, E, F 两点在 $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 坐标系中的运动轨迹, 如图 9 所示.

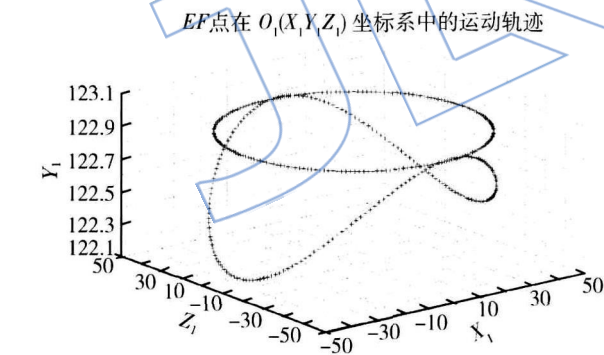


图 9 EF 点在 $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 坐标系中的运动轨迹(15°)

Fig. 9 EF points movement track in $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ coordinates(15°)

由此可见, E 相对于 F 点具有相对运动, 即滑靴相对于保持架具有相对运动, 这一相对运动决定了在设计保持架安装孔尺寸时, 一方面要保证滑靴能顺利安装在保持架上, 即安装孔尺寸必须大于滑靴底座(穿过安装孔部分)的尺寸; 另一方面要保证滑靴在保持架上的相对运动, 即保证在转子稳定转动过程中, 滑靴能在安装孔内自由滑动且不与安装孔发生干涉.

4.2 以 F 点为参考点时 E 点的运动

为满足如上设计要求, 需要研究当以 F 点为参考点时, E 点的运动情况. 为此, 在 F 点上建立参考坐标系 $F(X_2, Y_2, Z_2)$ 及 $F(X_3, Y_3, Z_3)$ (如图 10 所示).

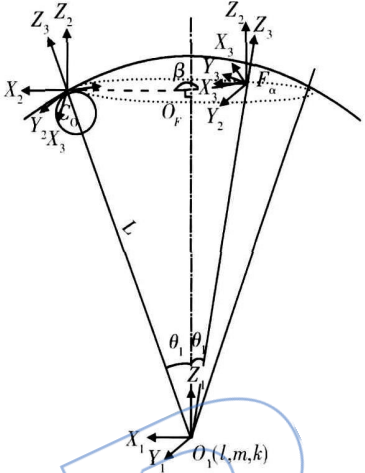


图 10 $F(X_2, Y_2, Z_2)$ 及 $F(X_3, Y_3, Z_3)$ 参考坐标系

Fig 10 $F(X_2, Y_2, Z_2)$ and $F(X_3, Y_3, Z_3)$

referenced coordinates

- 原点 —— F 点;
- Z_2 坐标轴 —— 过原点 F , 始终与 $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 坐标系中 Z_1 轴平行切同向;
- X_2 坐标轴 —— 过原点 F , 始终与 $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 坐标系中 X_1 轴平行切同向;
- Y_2 坐标轴 —— 过原点 F , 始终与 $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 坐标系中 Y_1 轴平行切同向;
- Z_3 坐标轴 —— 保持架球面中心 O_1 与 F 点的连线, 由 O_1 指向 F 方向为正;
- Y_3 坐标轴 —— 在 AO_1F 平面上, 过原点 F 垂直于 Z_3 轴, 朝向 AO_1 轴方向为正;
- X_3 坐标轴 —— 过原点 F 垂直于 Y_3FZ_3 面, 背向转子转动一侧方向为正.

4.2.1 E 点在 $F(X_2, Y_2, Z_2)$ 坐标系中的坐标及相对运动

由 $F(X_2, Y_2, Z_2)$ 坐标系的定义可知, F 点为此坐标系的原点, 其三个坐标轴与 $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 坐标系的三个坐标轴平行切同向, 即 $F(X_2, Y_2, Z_2)$ 为 $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 的平移坐标系. 根据坐标转换公式, 可得 E 点在 $F(X_2, Y_2, Z_2)$ 坐标系中的坐标 $E_a(X_{E2}, Y_{E2}, Z_{E2})$ 为

$$E_a(X_{E2}, Y_{E2}, Z_{E2}) : \begin{cases} X_{E2} = X_{E1} - X_{F1} \\ Y_{E2} = Y_{E1} - Y_{F1} \\ Z_{E2} = Z_{E1} - Z_{F1} \end{cases} \quad (12)$$

在 MATLAB 中编写. m 文件, 可以划出当斜盘倾角为 15° 时, E 点在 $F(X_2, Y_2, Z_2)$ 坐标系中的运动轨迹. 将此三维运动轨迹投影到 X_2FY_2 平面中, 得到的轨迹如图 11 所示.

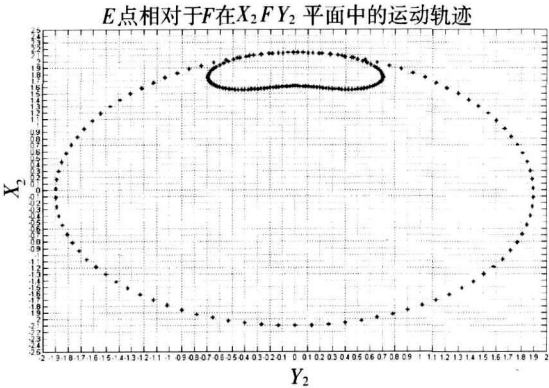


图 11 E 点相对于 F 点在 X_2FY_2 平面中的运动轨迹(15°)

Fig. 11 E point movement track relative F point in X_2FY_2 plane (15°)

4.2.2 E 点在 $F(X_3, Y_3, Z_3)$ 坐标系中的坐标及相对运动

为了研究保持架安装孔的尺寸, 必须在研究 E 点相对于 F 点在保持架径向及切向的运动范围. 为此, 在 F 点建立 $F(X_3, Y_3, Z_3)$ 坐标系.

由坐标系 $F(X_3, Y_3, Z_3)$ 的定义可知, 此坐标系以 F 点为原点, 围绕 O_1A 轴旋转, 且 Z_3 轴永远通过 O_1 点, Y_3 轴永远在 AO_1F 平面上.

下面求坐标系 $F(X_2, Y_2, Z_2)$ 及 $F(X_3, Y_3, Z_3)$ 间的坐标转换关系.

(1) 由于 F 点是保持架上的固定点, 它在 $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 坐标系中围绕 O_1A 轴旋转, 则 O_1F 与 O_1A 的夹角 θ_1 为定值: 且 $\sin \theta_1 = \frac{X_{F10}}{L + b_2}$, $\cos$

$$\theta_1 = \frac{Z_{F10}}{L + b_2}$$

(2) 设 F_a 与 F_0 在 $X_1O_1Y_1$ 平面上绕 O_1A 的夹角为 β , 则 $\sin \beta = -\frac{Y_{F1}}{X_{F10}}$, $\cos \beta = \frac{X_{F1}}{X_{F10}}$

(3) 在 F_a 点, 从坐标系 $F(X_2, Y_2, Z_2)$ 转换到 $F(X_3, Y_3, Z_3)$ 坐标系需要经历如下步骤:

- 绕 Z_2 轴顺时针旋转 β 角;
- 绕 Y_2 轴逆时针旋转 θ_1 角;
- 绕 Z_2 轴逆时针旋转 90° 角.

设空间中任意一点 A 在 $F(X_2, Y_2, Z_2)$ 坐标系中的坐标为 $A(X_2, Y_2, Z_2)$, 在 $F(X_3, Y_3, Z_3)$ 坐标系中的坐标为 $A(X_3, Y_3, Z_3)$, 则有如下坐标转换关系

$$\begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix}$$

由此可得 E 点在 $F(X_3, Y_3, Z_3)$ 坐标系中的坐标 $E_a(X_{E3}, Y_{E3}, Z_{E3})$ 为

$$\begin{bmatrix} X_{E3} \\ Y_{E3} \\ Z_{E3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{E2} \\ Y_{E2} \\ Z_{E2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

在 MATLAB 中编写. m 文件, 可以划出当斜盘倾角为 15° 时, E 点在 $F(X_3, Y_3, Z_3)$ 坐标系中的运动轨迹. 将此三维运动轨迹投影到 X_3FY_3 平面中, 得到的轨迹如图 12 所示.

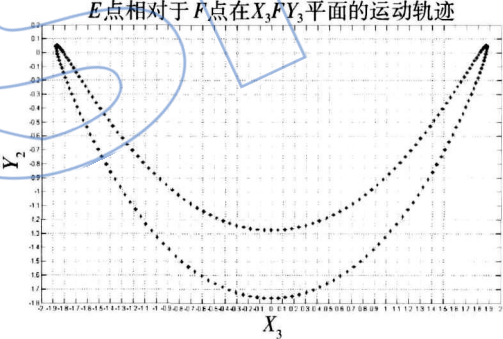


图 12 E 点相对于 F 点在 X_3FY_3 平面中的运动轨迹(15°)

Fig. 12 E point movement track relative F point in X_3FY_3 plane(15°)

由 $F(X_3, Y_3, Z_3)$ 坐标系的定义可知, X_3FY_3 平面是过 F 点与保持架球面相切的平面, X_3, Y_3 轴分别指向保持架的切向和径向方向. 则图 12 所示轨迹即为 E 点在保持架球面过 F 点的切面上的投影的轨迹, 其中 X_3 方向指向保持架的切向, Y_3 方向指向保持架径向. 由图 12 测得, 当斜盘倾角为 15° 时, E 点在保持架切向的运动范围为 $[-1.9, 1.9]$, 在保持架径向的运动范围为 $[-1.8, 0.05]$, 即 E 点在 (切向 $\times$ 径向 = 3.8×1.85) 的范围内运动.

5 滑靴安装孔主要尺寸的设计

根据上文分析可知, 当斜盘倾角为 φ 时, 滑靴

相对与保持架表面有相对运动,保持架安装孔的设计便由此相对运动所决定.

在设计保持架安装孔尺寸时,为了保证滑靴在安装孔内自由滑动且不与安装孔发生干涉,则设安装孔的尺寸如图 13 设计. 其中 X_{F10} , θ_1 决定了 F 点(即安装孔参考点)在保持架上的位置, d_1 , d_2 决定了安装孔的径向尺寸, d_0 决定了安装孔的切向尺寸.

安装孔设计的理论尺寸为(其中 d 为滑靴与保持架接触圆的直径):

(1) 滑靴安装孔分布圆半径 R_f

$R_f = X_{F10}$, 由(7)式计算求得;

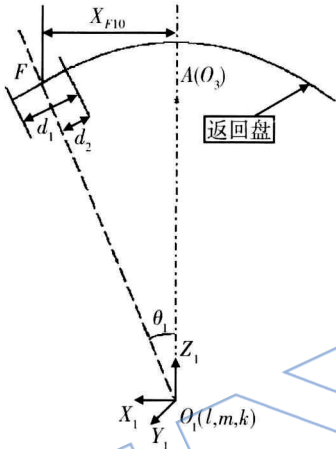


图 13 保持架安装孔的尺寸设计

Fig. 13 Dimensional calculation of mounting holes of holder

(2) 滑靴安装孔中心线与保持架中心线夹角 θ

$$\theta = \theta_1 = \arcsin \frac{X_{F10}}{L + b_2}, X_{F10} \text{ 由 (7) 式计算求得, } L, b_2 \text{ 为已知参数;}$$

(3) 滑靴安装孔切向尺寸(长轴) d_0

$d_0 = \max(X_{E3}) - \min(X_{E3}) + d$, X_{E3} 由轨迹投影法求得, 即 E 点相对于 F 点在 X_3FY_3 平面中的投影, d 为滑靴颈部直径(已知参数);

(4) 滑靴安装孔径向尺寸(短轴) d_1, d_2

$$d_1 = \max(Y_{E3}) - \min(Y_{E3}) + d$$
$$d_2 = \max(Y_{E3}) + d/2$$

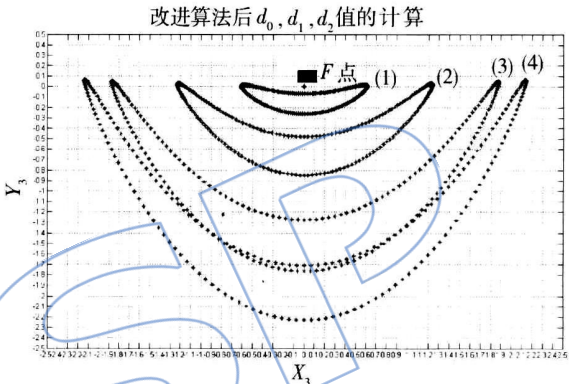
Y_{E3} 由轨迹投影法求得, 即 E 点相对于 F 点在 X_3FY_3 平面中的投影, d 为滑靴颈部直径(已知参数).

下例为某型柱塞泵保持架滑靴安装孔主要尺寸的计算, 根据 E 点相对于 F 点在 X_3FY_3 平面中的运动轨迹, 可以求出斜盘倾角为 $0^\circ \leq \varphi \leq 17^\circ$ 时, 安装孔的设计尺寸(如下表 1 及图 14 所示).

表 1 某型柱塞泵滑靴安装孔设计尺寸计算

Table 1 Design dimensional calculation of mounting holes of holder slipping shoe of X type piston pump

参考点设计参数			
X_{F10}/mm	42.3	$\theta_1/(^\circ)$	19.0
斜盘转角 $\varphi/(^\circ)$	d_0/mm	d_1/mm	d_2/mm
0	$0 + d$	$0 + d$	$0 + d/2$
5	$1.2 + d$	$0.3 + d$	$0.01 + d/2$
10	$2.5 + d$	$0.9 + d$	$0.03 + d/2$
15	$3.8 + d$	$1.3 + d$	$0.05 + d/2$
17	$4.3 + d$	$2.3 + d$	$0.08 + d/2$



(图中 F 点为 $\varphi = 0^\circ$ 时轨迹; (1) 轨迹为 $\varphi = 5^\circ$ 时轨迹; (2) 为 $\varphi = 10^\circ$ 时轨迹; (3) 为 $\varphi = 15^\circ$ 时轨迹; (4) 为 $\varphi = 17^\circ$ 时轨迹.)

图 14 d_0, d_1, d_2 值的计算

Fig. 14 Calculation of d_0, d_1, d_2 value

由于 $\varphi = 17^\circ$ 时轨迹包络线的范围最大, 则理论设计的滑靴安装孔尺寸见表 2

表 2 某型柱塞泵滑靴安装孔理论设计尺寸

Table 2 Theory dimensional calculation of mounting holes

X_{F10}/mm	42.3	$\theta_1/(^\circ)$	19.0
d_0/mm	$4.3 + d$	d_1/mm	$2.3 + d$
d_2/mm	$0.08 + d/2$	$(d = *)$	

以上滑靴安装孔尺寸, 未考虑径向和切向间隙. 在实际工程应用时, 应加上间隙尺寸(一般取径向 1 mm, 切向 1~2 mm).

6 运动仿真分析验证

前述保持架滑靴安装孔设计理论计算方法的正确性, 可以用运动仿真分析来进行验证.

(1) 在 UGNX 中建立柱塞泵的三维模型, 在其运动分析模块(Motion)中创建连杆(Links)、运动付(Joints)及运动驱动(Motion).



图 15 参考坐标系定义

Fig 15 Definition of referenced coordinates

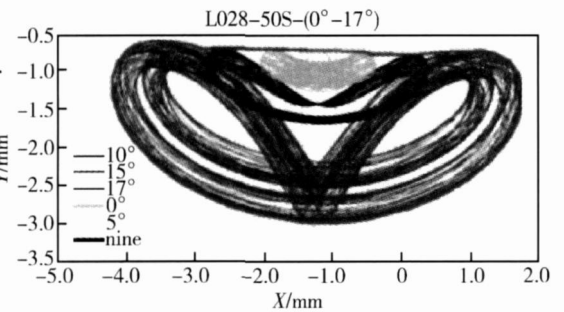


图 16 滑靴参考点 L025ref 在斜盘倾角从 0° 到 17° 50 个周期运动轨迹

Fig 16 50 cycles movement track of slipping shoes reference point L025ref from 0° to 17° of swash plate

- (2) 将 UGNX 中的柱塞泵运动分析方案导入 Adams 中, 建立柱塞泵运动学仿真模型.
- (3) 设定滑靴相对于保持架运动的参考点及参考坐标系, 见图 15.
- (4) 对柱塞泵进行运动仿真, 图 16 为斜盘倾角从 0° 到 17° 时滑靴相对于保持架的运动轨迹 (50 个周期).
- 仿真结果表明: 保持架滑靴安装孔的设计及尺寸计算方法是正确的.

7 结 论

本文从理论计算的角度, 分析了柱塞泵保持架滑靴安装孔尺寸的形成原因及设计计算方法, 并用运动仿真分析, 验证了其正确性和可行性. 本方法虽然只研究了一个柱塞在一个运动周期的运动情况, 但柱塞的多少并不影响计算的方法和结果. 此计算方法虽然推导过程稍显复杂, 但用 MATLAB 软件编写好计算程序后, 一次计算可以得到滑靴安装孔尺寸设计的所有数据.

参考文献:

[1] 曾俊英主编. 航空动力装置控制: 元件部分[M]. 北京: 航空工业出版社, 1995.