

# 五自由度气动探针校准机构的误差分析与补偿

姜安林, 宋代平, 李宁, 陈长松

(重庆大学机械工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 为了满足探针校准过程中的高精度要求, 采用摄动误差补偿法对一套五自由度气动探针校准机构的误差进行补偿。基于该探针校准机构运动学的正逆解, 利用微分法建立探针校准机构误差模型并得到其末端位姿误差计算式, 再采用摄动法对其末端位姿误差进行补偿并详细阐述了该方法的误差补偿步骤。以五自由度气动探针校准机构的偏航和俯仰两个角度姿态为例进行误差补偿试验, 证明了该补偿方法的有效性, 为后续机构的调试提供了理论基础。

**关键词:** 五自由度; 气动探针校准机构; 误差分析与补偿; 摄动法

**中图分类号:** TP24; TP202

## Error Analysis and Compensation of Five-DOF Pneumatic Probe Calibration Mechanism

JIANG Anlin, SONG Daiping, LI Ning, CHEN Changsong

(Mechanical Engineering School, Chongqing University, Chongqing 400044)

**Abstract:** In order to satisfy the requirement of high precision in the process of probe calibration, the perturbation error compensation method is used to compensate the error of the five-degree-of-freedom pneumatic probe calibration mechanism. Based on the forward and inverse kinematics of the probe calibration mechanism, the error model of the probe calibration mechanism is established by differential method, and the calculation formula of the terminal position and attitude errors is obtained. Then the terminal position and attitude errors is compensated by perturbation method, and the error compensation steps of the method are described in detail. Taking the yaw and pitch attitude of the five-degree-of-freedom pneumatic probe calibration mechanism as an example, the error compensation experiment is carried out, which Error Analysis and Compensation Error Analysis and Compensation of Five-DOF Pneumatic Probe Calibration Mechanism of Five-DOF Pneumatic Probe Calibration Mechanism improves the effectiveness of the compensation method. This method provides a theoretical basis for the debugging of the follow-up mechanism.

**Key words:** five degree of freedom; pneumatic probe calibration mechanism; error analysis and compensation; perturbation method.

## 0 引言

在航空发动机内部流动测量的过程中, 由于其结构紧凑、内部流动复杂, 空间狭小, 流动非定常等特点, 造成对其内部流动的测量十分困难。传统的气动探针测量方法具有直观、简便、成本低廉、测量准确度和性价比高的优点, 长期以来, 一直是航空发动机内流研究与实验首选的测量手段。气动探针种类有单点总压/总温探针、梳状总压/总温探针、耙状总压

**作者简介:** 姜安林 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为机械设计及理论

**通信联系人:** 宋代平 (1978—), 男, 副教授, 主要研究方向为机械设计理论与方法. E-mail: songdp@cqu.edu.cn

探针、附面层探针、单点静压探针、三孔/五孔探针等<sup>[1][2]</sup>。因此,满足各类气动探针校准需求,建立高效实用的气动探针校准设备,并对气动探针校准技术开展相关研究就成为开展航空发动机内流试验和基础研究的前提保障。

随着社会的发展,光学仪器、机器人、测量装置、计算装置和远距离控制装置等精密机械和仪器对机构精确度的要求越来越高,对机构进行误差分析变得越来越重要<sup>[3]</sup>。目前机构静态误差分析的常用方法有矩阵法、矢量法、直接微分法、蒙特卡罗法和转换机构法等<sup>[4-8]</sup>。在探针校准的过程中,要求探针顶点端面与喷管出口截面严格平行,而探针机构在制造、安装的过程中难以保证其绝对的高精度。因此,必须对探针机构进行误差分析,确定各项误差因素对探针末端姿态的影响程度,从而把握机构精度的重点和方向,为机构的误差补偿提供可靠的依据<sup>[9]</sup>。

本文针对一种自主研发的五自由度气动探针校准机构,基于该探针校准机构的运动学正逆解,以微分法建立了误差模型,并以摄动误差补偿法进行误差补偿以及进行补偿试验。

## 1 运动学正解

五自由度气动探针校准机构(以下简称“探针机构”)是一个空间开链机构,其包含三个移动副和两个转动副,其机构如图1所示。 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 机构为移动副,偏航( $\beta$ )和俯仰( $\alpha$ )机构为转动副,其中三个移动副主要保证探针顶点能在一定空间内移动,而转动副保证探针机构末端满足一定的姿态要求。根据连杆运动学参数法(D-H参数)法建立探针机构各连体坐标系,如图2所示,其中坐标系 $\{0\}$ 在底部两导轨对称中心处,坐标系 $\{1\}$ 、 $\{2\}$ 、 $\{3\}$ 、 $\{4\}$ 建立在各关节轴线交点处,坐标系 $\{5\}$ 建立在探针机构顶点端面处。各坐标系的建立原则为:关节 $i$ 的 $z_i$ 轴位于关节 $i+1$ 的轴线上;关节 $i$ 的 $x_i$ 轴在 $z_i$ 和 $z_{i+1}$ 的公共法线上并指向 $z_{i+1}$ ,同时原点为公法线与 $z_{i+1}$ 的交点; $y_i$ 轴由坐标系右手法则确定。

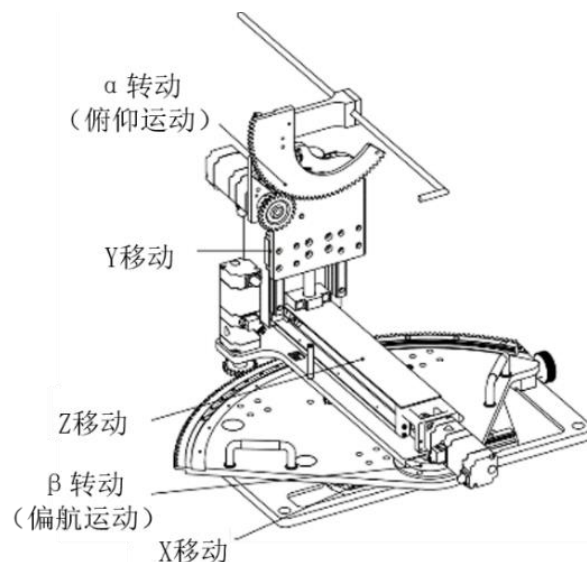


图1 五自由度气动探针校准机构

Fig.1 5-DOF Pneumatic Probe Calibration Mechanism

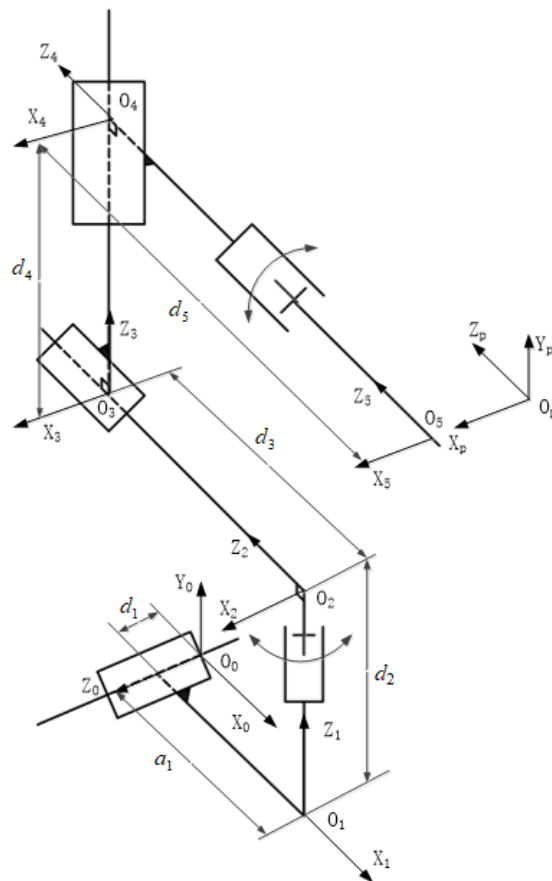


图2 探针机构 D-H 坐标系

Fig.2 The D-H coordinate system of probe mechanical

图中： $a_i$  为两关节轴线  $i$  与  $i+1$  之间的公垂线长度； $\alpha_i$  为相邻两关节轴线  $i$  与  $i+1$  之间的夹角； $\theta_i$  为两个公垂线  $a_{i-1}$  与  $a_i$  之间的夹角； $d_i$  为相邻两关节公垂线  $a_{i-1}$  与  $a_i$  之间的距离。

根据图 2 所示结构参数和运动变量，其 D-H 参数如表 1 所示。

表 1 连杆参数变量

Table.1 The parameters of Links

连杆 $i$	$\theta_i / \text{rad}$	$\alpha_i / \text{rad}$	$a_i / \text{mm}$	$d_i / \text{mm}$	范围
1	0	$-\pi/2$	$a_1$	$d_1$	0~60mm
2	$\theta_2$	$\pi/2$	0	$d_2$	$45^\circ \sim +45^\circ$
3	0	$-\pi/2$	0	$d_3$	0~300mm
4	0	$\pi/2$	0	$d_4$	50~+50mm
5	$\theta_5$	0	0	$d_5$	$-45^\circ \sim +45^\circ$

表中： $d_1$ 、 $\theta_2$ 、 $d_3$ 、 $d_4$ 、 $\theta_5$  为机构的驱动量， $a_1$ 、 $d_2$ 、 $d_5$  为定值。

根据表 1 中各关节的 D-H 参数，得到相邻连杆的变换矩阵  ${}^{i-1}_i A$  如下：

$${}^0_1 A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}^1_2 A = \begin{bmatrix} -s_2 & 0 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & 0 & s_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}^2_3 A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}^3_4 A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}^4_5 A = \begin{bmatrix} c_5 & -s_5 & 0 & 0 \\ s_5 & c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： ${}^{i-1}_i A$  为连杆坐标系  $o_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$  到坐标系  $o_i x_i y_i z_i$  的变换矩阵， $c_i$ 、 $s_i$  分别代表  $\cos \theta_i$ 、 $\sin \theta_i$ 。

将(1)各连杆变换矩阵依次相乘，可得到：

$${}^0T_5 = {}^0A_1A_2A_3A_4A_5A = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  ${}^0T_5$  为探针机构基座坐标系到探针夹具坐标系之间的总变换矩阵;  $n = [n_x \ n_y \ n_z]$ 、 $o = [o_x \ o_y \ o_z]$ 、 $a = [a_x \ a_y \ a_z]$  为探针机构的姿态矩阵,  $p = [p_x \ p_y \ p_z]$  为探针机构的位置矩阵, 且有:

$$\begin{aligned} n_x &= -s_2c_5, n_y = s_5, n_z = c_5c_2 \\ o_x &= s_2s_5, o_y = c_5, o_z = -c_2s_5 \\ a_x &= -c_2, a_y = 0, a_z = -s_2 \\ p_x &= a_1 - d_3c_2 - d_5c_2; \\ p_y &= d_2 + d_4; \\ p_z &= d_1 - d_3s_2 - d_5s_2 \end{aligned} \quad (3)$$

上述 D-H 变换得到的是探针机构基坐标系到探针夹具坐标系的转换矩阵, 而气动探针校准试验最终需要获得的是探针顶点端面在基坐标系中的位姿, 所以还需要建立探针端面坐标系  $o_px_py_pz_p$ , 如图 2 所示, 但由于所有探针的规格不尽相同, 尺寸相差很大, 但其测量方位都大体相同, 因此在建立坐标系时, 只有其位置发生变化, 而姿态角不会变化。根据坐标系之间的关系, 可得到:

$${}^5A_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_1 \\ 0 & 1 & 0 & y_1 \\ 0 & 0 & 1 & z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  ${}^5A_p$  为探针端面坐标系  $o_px_py_pz_p$  到探针夹具坐标系 {5} 的转换矩阵,  $x_1$ 、 $y_1$ 、 $z_1$  为坐标系  $o_px_py_pz_p$  原点相对坐标系 {5} 原点的位置变化值。

由式 (2) 和式 (3) 得到探针顶点端面相对于基坐标系的变换矩阵为:

$${}^0T_p = {}^0A_1A_2A_3A_4A_5A_pA = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x + x_1 \\ n_y & o_y & a_y & p_y + y_1 \\ n_z & o_z & a_z & p_z + z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  ${}^0T_p$  为坐标系  $o_px_py_pz_p$  到基坐标系之间的总变换矩阵。

## 2 运动学逆解

当探针顶点端面的位姿已知时, 即姿态矩阵  $n$ 、 $o$ 、 $a$  和位置向量  $p$  已知, 因此有位姿矩阵  ${}^0T_p$  也已知, 将式(5)两端同时左乘  ${}^0A_1^{-1}$ , 右乘  ${}^5A_p^{-1}$ , 得:

$${}^0A_1^{-1}{}^0T_p{}^5A_p^{-1} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x - a_1 - a_xz - n_xx - o_xy \\ -n_z & -o_z & -a_z & d_1 - p_z + a_zz + n_zx + o_zy \\ n_y & o_y & a_y & p_y - a_yz - n_yx - o_yy \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

并由运动学正解可求得坐标系  $o_1x_1y_1z_1$  到坐标系 {5} 的变换矩阵:

$${}^1T_5 = {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 A = \begin{bmatrix} -s_2c_5 & s_2s_5 & -c_2 & -d_3c_2 - d_5c_2 \\ -c_5c_2 & s_5c_2 & s_2 & d_3s_2 + d_5s_2 \\ s_5 & c_5 & 0 & d_2 + d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

将式(6)与式(7)中对应元素一一对应, 得:

$$\theta_2 = \text{atan2}(-a_z, -a_x) \quad (8)$$

$$\theta_5 = \text{atan2}(n_y, o_y) \quad (9)$$

$$d_3 = -(p_x - a_1 - a_x z - n_x x - o_x y) / c_2 - d_5 \quad (10)$$

$$d_4 = p_y - a_y z - n_y x - o_y y - d_2 \quad (1)$$

$$d_1 = d_3 s_2 + d_5 s_2 + p_z - a_z z - n_z x - o_z y \quad (2)$$

式中:  $c_2 = -a_x$ ;  $s_2 = -a_z$

至此, 探针机构运动学 5 个运动变量 $\{d_1, \theta_2, d_3, d_4, \theta_5\}$ 全部求出。从式(8)-式(12)可以看出, 探针机构的两个转角的角位移只与模型的姿态有关, 而线位移既跟模型的位置有关也与模型的姿态有关。由于在实际工作中, 各运动变量在一定的取值范围内, 因此可以唯一确定位姿和运动变量的对应关系。

### 3 建立误差模型

探针机构在对探针进行姿态调整过程中, 由于各构件的加工误差、机械传动误差、机构负载的变化等都将导致连杆之间的结构参数和运动参数发生变化, 从而导致探针机构末端位姿态发生变化<sup>[10]</sup>。

探针机构的位姿误差模型表达式为:

$$\Delta Q \approx \sum_{i=1}^5 \frac{\partial Q}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \sum_{i=1}^5 \frac{\partial Q}{\partial d_i} \Delta d_i + \sum_{i=1}^5 \frac{\partial Q}{\partial a_i} \Delta a_i + \sum_{i=1}^5 \frac{\partial Q}{\partial \alpha_i} \Delta \alpha_i \quad (3)$$

式中:  $Q = [x \ y \ z \ \beta \ \alpha]$  为探针机构的位姿,  $\Delta \theta_i, \Delta d_i, \Delta a_i, \Delta \alpha_i$  为各关节的参数误差。

由于探针机构的各个位姿都是由  ${}^{i-1}A$  矩阵相乘得到, 那么对  $Q$  的求导, 实际上是对各个  ${}^{i-1}A$  求导, 而矩阵  ${}^{i-1}A$  对各个参数的偏导数为:

$$\frac{\partial {}^{i-1}A}{\partial Q_{i1}} = \begin{bmatrix} -s\theta_i & -c\theta_i c\alpha_i & c\theta_i s\alpha_i & -a_i s\theta_i \\ c\theta_i & -s\theta_i c\alpha_i & s\theta_i s\alpha_i & a_i c\theta_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\frac{\partial {}^{i-1}A}{\partial Q_{i2}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\frac{\partial {}^{i-1}A}{\partial Q_{i3}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & c\theta_i \\ 0 & 0 & 0 & s\theta_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\frac{\partial {}^{i-1}A}{\partial Q_{i4}} = \begin{bmatrix} 0 & s\theta_i s\alpha_i & s\theta_i c\alpha_i & 0 \\ 0 & -c\theta_i s\alpha_i & -c\theta_i c\alpha_i & 0 \\ 0 & c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中:  $Q_{ij} (j=1,2,3,4)$  分别表示  $\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i$

由式(2)可知探针机构末端位姿对各个参数  $\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i$  的偏导数可以表示为:

$$\frac{\partial {}^5T}{\partial Q_{ij}} = {}^0A \cdots \frac{{}^{i-1}A}{\partial Q_{ij}} \cdots {}^4A = \begin{bmatrix} n'_x & o'_x & a'_x & p'_x \\ n'_y & o'_y & a'_y & p'_y \\ n'_z & o'_z & a'_z & p'_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

125 式中:  $i=1、2、3、4、5$ ;  $j=1、2、3、4$ 。

对比式(2)和式(18)可知, 探针机构末端的位姿坐标与参数的偏导数可表示为:

$$\frac{\partial p}{\partial Q_{ij}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_x}{\partial Q_{ij}} & \frac{\partial p_y}{\partial Q_{ij}} & \frac{\partial p_z}{\partial Q_{ij}} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} p'_x & p'_y & p'_z \end{bmatrix}^T \quad (19)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial Q_{ij}} = \frac{n_z n'_x - n'_z n_x}{n_z^2 + n_x^2} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial Q_{ij}} = \frac{[n'_y(n_x c \beta - n_z s \beta) - n_y(n'_x c \beta - n'_z s \beta - n_z \beta' c \beta - n_x \beta' s \beta)]}{(n_x c \beta - n_z s \beta)^2 + n_y^2} \quad (7)$$

130 式中:  $p$  为探针机构末端位置坐标,  $\beta$  为探针机构的偏航姿态值,  $\alpha$  为探针机构的俯仰姿态值。

通过求得各末端姿态矩阵对各杆件参数的偏导数矩阵, 可以进一步求得式(19)、式(20)和式(21)中所需参数, 并结合式(13)可以求得末端位姿误差。

## 4 误差补偿理论

### 4.1 误差补偿原理

135 假设机构在  $P$  点时, 其各关节的输入变量为  $\{q_1 \ q_2 \ \cdots \ q_n\}$ ,  $T_0^n(p)$  为探针机构在  $P$  点时的理想位姿, 而由于机构在制造安装的过程中存在误差导致探针机构在  $P$  的实际位姿为:

$$T_0^n(p) + \Delta P \quad (8)$$

式中:  $\Delta P$  为机构末端位姿的误差值。

140 为了修正探针机构的末端位姿, 可以通过在各关节中输入一个变化量  $\{\Delta q_1 \ \Delta q_2 \ \cdots \ \Delta q_n\}$  让其在末端产生  $-\Delta P$  的摄动量去抵消掉机构产生的  $\Delta P$ , 从而使机构回到所需要的实际位姿。

### 4.2 误差补偿步骤

145 假设探针机构在某个位姿其各关节的输入变量为  $\{d_1 \ \theta_2 \ d_3 \ d_4 \ \theta_5\}$ , 在多因素的影响下探针机构末端误差为  $\Delta P$ 。此时给各关节加上附加变量  $\{\Delta d_1 \ \Delta \theta_2 \ \Delta d_3 \ \Delta d_4 \ \Delta \theta_5\}$  在探针机构的末端产生摄动位姿  $\overline{\Delta P}$ , 如果摄动位姿  $\overline{\Delta P}$  能够抵消掉原来的误差值, 即  $\overline{\Delta P} + \Delta P = 0$ , 那么就完成了误差补偿的目的。根据 3 节中关于误差的计算公式可以知道, 在探针机构的各关节上产生附加运动  $\{\Delta d_1 \ \Delta \theta_2 \ \Delta d_3 \ \Delta d_4 \ \Delta \theta_5\}$  后, 其末端产生的微小摄动位姿为:

$$\overline{\Delta P} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \beta \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} = G \cdot \begin{bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta d_3 \\ \Delta d_4 \\ \Delta \theta_5 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:  $G$  为探针机构的误差补偿矩阵, 其表达式为:

150

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial d_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x}{\partial d_3} & \frac{\partial x}{\partial d_4} & \frac{\partial x}{\partial \theta_5} \\ \frac{\partial y}{\partial d_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y}{\partial d_3} & \frac{\partial y}{\partial d_4} & \frac{\partial y}{\partial \theta_5} \\ \frac{\partial z}{\partial d_1} & \frac{\partial z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial z}{\partial d_3} & \frac{\partial z}{\partial d_4} & \frac{\partial z}{\partial \theta_5} \\ \frac{\partial \beta}{\partial d_1} & \frac{\partial \beta}{\partial \theta_2} & \frac{\partial \beta}{\partial d_3} & \frac{\partial \beta}{\partial d_4} & \frac{\partial \beta}{\partial \theta_5} \\ \frac{\partial \alpha}{\partial d_1} & \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_2} & \frac{\partial \alpha}{\partial d_3} & \frac{\partial \alpha}{\partial d_4} & \frac{\partial \alpha}{\partial \theta_5} \end{bmatrix} \quad (10)$$

然而机构的误差很多,要想一次就能获得理想位姿是不可能的,需要采用逐步逼近的方法使其达到理想的位姿,具体实施步骤如下:

155

① 在某一位姿,由探针机构的运动学正解求出该位姿的理想位姿为 $T$ ,则 $T$ 表达为 $T = [x \ y \ z \ \beta \ \alpha]^T$ ,由公式(13)可以求出探针机构在该位置的综合误差为

$$T = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ \Delta \beta \ \Delta \alpha]^T;$$

② 取 $\Delta T = -\Delta T$ ,由(23)可以求出各关节的补偿量 $\{\Delta d_1 \ \Delta \theta_2 \ \Delta d_3 \ \Delta d_4 \ \Delta \theta_5\}$ ,则补偿后的各关节的运动量为 $\{d_1 + \Delta d_1 \ \theta_2 + \Delta \theta_2 \ d_3 + \Delta d_3 \ d_4 + \Delta d_4 \ \theta_5 + \Delta \theta_5\}$ ;

③ 用补偿后的各关节的运动量,根据公式(13)可以求出探针机构的末端位置 $T' = [x' \ y' \ z' \ \beta' \ \alpha']^T$ 和探针机构的末端综合误差 $\Delta T'$ ;

160

④ 令 $\varepsilon = T' + \Delta T' - T = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \varepsilon_\beta \ \varepsilon_\alpha]$ 为探针机构末端的输出误差;

⑤ 取 $\theta = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2 + \varepsilon_\beta^2 + \varepsilon_\alpha^2}$ ,取一定的阈值 $\varepsilon_0$ ,判断是否 $\theta < \varepsilon_0$ ,若不符合继续从第二步开始算,使 $\Delta T = -\varepsilon$ ,若符合则结束计算。

## 5 误差补偿试验

165

为了验证摄动误差补偿法的有效性,根据前两节所述的误差补偿的原理和步骤,在MATLAB中随机抽取10个姿态(假设位置误差均为0)进行误差补偿试验,试验结果如表2所示。

表2 探针机构末端位置误差补偿前后结果

Table.2 The result of terminal position error of probe mechanism after compensation

位姿 序号	末端姿态误差 (rad)			
	$\Delta \beta$		$\Delta \alpha$	
	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后
1	0.0014	0.0001768	0.000503	0.00017541
2	0.00070468	0.00017466	0.002074	0.0001737
3	0.0010584	0.00017574	0.000598	0.00017571
4	0.00084842	0.0001751	0.0003782	0.0001749
5	0.000989	0.00017553	0.0016135	0.00017538
6	0.000972	0.00017557	0.0020657	0.0001753
7	0.000982	0.00017555	0.0014576	0.00017546
8	0.00097523	0.00017556	0.0007067	0.00017553



续表 2:

位姿 序号	末端姿态误差 (rad)			
	$\Delta\beta$		$\Delta\alpha$	
	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后
9	0.00094054	0.00017543	0.0009315	0.00017544
10	0.0009359	0.00017535	0.0006235	0.0001754

将表 2 中得到的探针机构末端位置误差补偿后结果绘制成图 3、图 4 的误差曲线图。

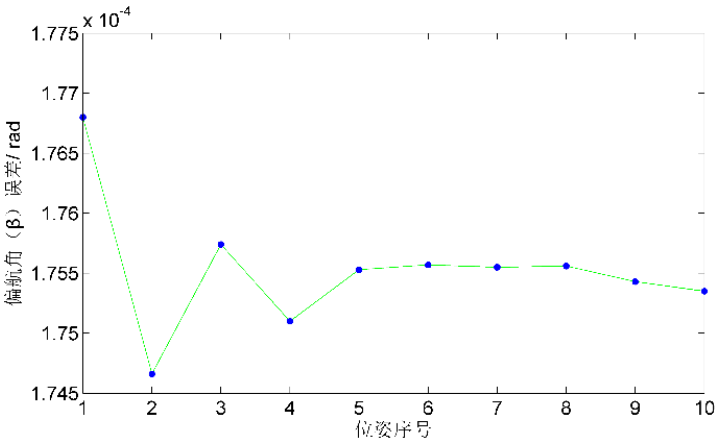


图 3 补偿后  $\beta$  角度误差  
Fig.3 Beta angle error after compensation

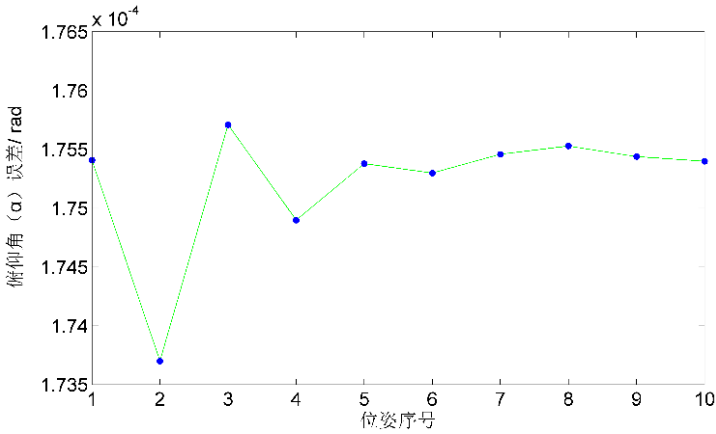


图 4 补偿后  $\alpha$  角度误差  
Fig.4 Alpha angle error after compensation

通过上述误差补偿试验的计算结果可知,补偿后探针机构末端的静态位置误差和补偿前相比有了明显的减小,说明上述误差补偿方法具有很好的效果。在数据迭代的过程中,由于此探针机构要求的精度不是很高,本次误差补偿试验只进行了 1 次迭代,如若要进一步减小误差,可以通过多次循环迭代,直到达到所需要的精度为止。

## 6 结论

本文给出了五自由度气动探针校准机构的运动学模型,通过各构件连体坐标系间的相对位姿关系,采用 D-H 模型确定了运动学正问题与逆问题模型,并以此为基础,通过微分法建立了探针机构的静态误差模型。本文以摄动误差补偿法对探针机构各姿态的误差进行补偿,



185 并详细介绍了其具体实施过程,最终以误差试验的方式证明了摄动误差补偿法的有效性,为后续机构的制造、安装以及调试提供了理论基础。

#### [参考文献] (References)

- [1] 王涛,李飞行.五孔探针结构和校准[J].现代机械,2012(4):19-22.
- [2] 韩少冰.叶尖小翼控制压气机叶顶间隙流动的研究[D].大连:大连海事大学,2013.
- 190 [3] 王娜.3UPS-PU 并联机构运动及可靠性特性研究[D].重庆:重庆大学,2016.
- [4] 焦国太,冯永和,王峰.多因素影响下的机器人综合位置误差分析方法 [J].应用基础与工程科学学报,2004,12(4): 435-442.
- [5] Freeman J M, Ford D G. Automated error anslysis of serial manipulators and servo heads[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2003, 217(9): 1077-1084.
- 195 [6] 石则昌,刘深厚.机构精确度[M].北京:高等教育出版社,1995.
- [7] Wu W, Rao S S. Uncertainty analysis and allocation of joint tolerances in robot manipulators based on interval analysis[J]. Reliability Engineering and Safety, 2007, 92(1):54-64.
- [8] 勃鲁也维奇.机构精确度[M].上海:上海科学技术出版社,1994.
- [9] 马强.6-PRRS 并联机器人误差分析与标定研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- 200 [10] 温瑞.六自由度测量机器人误差分析与仿真[D].西安:西安理工大学,2008.