doi: 10.7690/bgzdh.2019.10.007

# 基于七孔探针的手持式流场测试与显示技术

宋　晋，徐　圣，张卫国，陈　闯，刘忠华
（中国空气动力研究与发展中心低速空气动力研究所，四川 绵阳 622672）

**摘要**：为快速方便地获取流场信息，研究一种基于七孔探针的流场测试与显示技术。通过探针获取流场速度信息，由 Optotrak 系统获取探针的位置和姿态信息，进而通过数学工具的插值，将流场进行图形化显示，并利用该技术在风洞中开展测试实验。实验结果表明：该技术装置结构简单，使用灵活，可快速地获取流场信息，为流场的测试提供一种新的方法和思路。

**关键词**：流场；七孔探针；Optotrak 系统
**中图分类号**：TP391.41　　**文献标志码**：A

# Handheld Flow Field Test and Display Technology Based on 7-Hole Probe

Song Jin, Xu Sheng, Zhang Weiguo, Chen Chuang, Liu Zhonghua
(*Low Speed Aerodynamics Institute*, *China Aerodynamics Research & Development Center*, *Mianyang* 622672, *China*)

**Abstract:** In order to obtain flow field information quickly, a kind of technology based on 7-hole probe is designed. It obtains the velocity of the flow field by the probe, and gets the position and attitude of the probe by the Optotrak system, and then the flow field can be graphically displayed by the interpolation of the mathematical tool. The experiment was carried out in wind tunnel. The result shows the device is simple in structure and flexible in use. It can acquire flow field information, and it provides a new method and thought for flow field test.

**Keywords:** flow field; 7-hole probe; Optotrak system

## 0　引言

流动测量与显示作为研究飞行器气动性能的重要途径，尽管流场测量已步入复杂而昂贵的光、电设备测量时代，例如激光多普勒测速仪、粒子图像测速仪、热线风速仪等，但在某些测量场合下，特别是测量平均速度，多孔压力探针仍是主要选择之一[1-2]。在 3 维测量的情况下，一个经过仔细设计、精良制造、严格校准的七孔探针，测速精度及其稳定性可超过 3 维热线；因此，七孔探针往往作为测量速度压力优先考虑的技术手段，被广泛用于风洞试验模型周围及其后面尾迹的复杂流动的定量测量[3]，尤其在大流动角复杂流场测量方面：如钝体尾迹复杂流动测量、前体涡、边条涡、大后掠角机翼的前缘涡、翼尖涡、后体涡的定量测量方面，有着良好的应用背景。但在操作过程中，一般需要将多支探针安装在移测架上使用，并且在初始安装时还需要调节探针水平。针对使用中存在的不便，笔者研究了一种基于七孔探针的实验技术，仅采用一支探针，由人工手持的方法，即可实现局部流场的快速测试与显示。

## 1　系统组成

该技术的系统硬件主要由一支七孔探针与 Optotrak 系统组成。如图 1 所示，Optotrak 系统是一种基于立体视觉测量原理的光电设备，其传感器由 3 个线阵 CCD 摄像头组成。在精确标定后，按两两正交的方式构成 2 个独立的平面直角坐标系，由此合成 3 维直角坐标系，而 3 个 CCD 摄像头的交汇视场即为系统的有效测量区域。Optotrak 系统标记点发出特定频率的近红外光，由 CCD 摄像头捕捉标记点发出的近红外光，可以计算得到标记点的空间 3 维坐标[4-6]。如图 2 所示，七孔探针内置 7 个动态压力传感器，以及相应的机械和电子连接器件，使压力信息转换成模拟电压信号，直接由数采系统采集。在七孔探针上加装一个目标靶，在目标靶上安装 6 个 Optotrak 标记点，结构如图 3 所示，通过这些标记点的合理布局和数学计算，即可获取探针姿态及触点 3 维坐标。该系统中七孔探针用于采集流场压力并转化为速度信息，Optotrak 系统用于获取探针姿态及位置信息。

**收稿日期**：2019-06-01；**修回日期**：2019-06-26
**作者简介**：宋　晋（1983—），男，陕西人，硕士，工程师，从事低速风洞测控技术研究。E-mail: songjin0131@sina.com。

图 1　Optotrak 系统

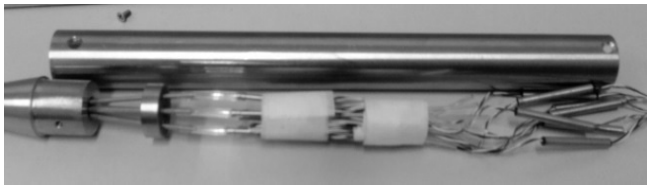

图 2　七孔探针内部结构

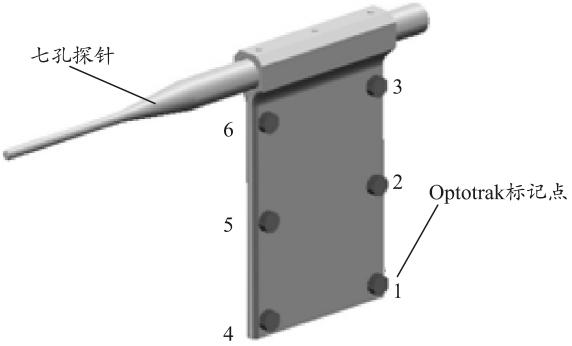


图 3　安装 Optotrak 标记点的探针

## 2　测量方法

要得到流场中某点的速度信息，需要通过七孔探针的压力信息进行解算。由于得到的速度矢量是流场相对于探针的，因此，还需要获取此时探针姿态，将速度矢量转换到风洞坐标系中。如果要获取一个区域的流场信息，除了压力和探针姿态数据，同时还要得到探针触点在风洞坐标系中坐标值。压力信息可由七孔探针直接获取，而探针的姿态及触点坐标则需要通过 Optotrak 系统跟踪目标靶上的标记点来实现；因此，测量的关键问题即为如何获取探针的姿态及触点坐标。

### 2.1　探针触点坐标测量方法

探针目标靶针上各标记点之间的位置关系已知，令目标靶上 1 号标记点为原点，1 号指向 4 号为 $X$ 轴正方向，1 号指向 3 号为 $Y$ 轴正方向，右手定则确定 $Z$ 轴方向，建立探针体轴坐标系 $O_bX_bY_bZ_b$，则各标记点的体轴坐标值已知，记为 $(x_i, y_i, z_i)(i=1,2,\cdots,6)$。

使用 Optotrak 系统可得到探针目标靶上各标记点在 Optotrak 默认坐标系下的 3 维坐标，记为 $(X_i, Y_i, Z_i)(i=1,2,\cdots,n)$。设探针体轴坐标系与 Optotrak 默认坐标系转换关系(旋转平移矩阵)为：

$$\boldsymbol{C}_{bc}=\begin{bmatrix} R_{bc} & T_{bc} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}。\tag{1}$$

则有

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} R_{bc} & T_{bc} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}。\tag{2}$$

在进行标定时，使探针触点固定在某一位置不动，探针系统绕其触点转动，得到不同姿态时标记点的坐标

$(X_i^{(j)}, Y_i^{(j)}, Z_i^{(j)})(i=1,2,\cdots,6; j\text{为位置计数})$。

当探针系统处于任意姿态时，式(2)成立。由于旋转平移矩阵共 12 个未知数，每个标记点可以提供 3 个方程；因此，一般情况下需要至少 4 个标记点才能完全确定旋转平移矩阵。由于本系统中目标靶上的标记点在同一平面内，则可令 $z_i=0(i=1,2,\cdots,6)$，此时旋转平移矩阵共 9 个未知数，即

$$\boldsymbol{C}_{bc}=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}。\tag{3}$$

最少使用 3 个标记点即可完全确定。笔者设计使用 6 个标记点，目的是用于最优化处理，有利于提高结果精度。

设触点在探针体轴坐标系的坐标为 $(x_0, y_0, z_0)$，按上述方法计算得到的各个位置的旋转平移矩阵为 $\boldsymbol{C}_{bc}^{(j)}$。当探针绕触点转动时，触点在 Optotrak 默认坐标系下的 3 维坐标不变，则有

$$\boldsymbol{C}_{bc}^{(1)}\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix}=\boldsymbol{C}_{bc}^{(2)}\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix}=\cdots=\boldsymbol{C}_{bc}^{(j)}\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix}。\tag{4}$$

使用最小二乘法解此超定线性方程组，可得到触点在体轴坐标系下的坐标 $(x_0, y_0, z_0)$。

由于触点在探针体轴坐标系下的坐标已知，只要获取体轴坐标系到风洞坐标系的转换矩阵，即可得到触点在风洞坐标系下的坐标值。

建立风洞坐标系的方法如下：将探针置于风洞试验段中心，通过水平尺和铅垂线的辅助，使目标靶上 1 号指向 4 号标记代表风洞坐标系 $X$ 轴正向，使 1 号指向 3 号标记代表风洞坐标系 $Y$ 轴正向，$Z$ 轴由右手坐标系确定，并将 1 号点所在位置设置为风洞坐标系原点。

目标靶上标记点的体轴坐标系值已知，且标记点在风洞坐标系下的坐标可由 Optotrak 系统直接获取，由此可建立体轴坐标系到风洞坐标下的转换关系，Optotrak 坐标系到风洞坐标系的转换矩阵记为 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{cw}}$，则有：

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{cw}} = \begin{bmatrix} R_{\mathrm{cw}} & T_{\mathrm{cw}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \tag{5}$$

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_{\mathrm{cw}} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}。 \tag{6}$$

将 6 个标记点在体轴坐标系和风洞坐标系下的坐标值代入式(6)即可解出 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{cw}}$，可计算出触点在风洞坐标系下的坐标 $(X_0, Y_0, Z_0)$ 为：

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_{\mathrm{cw}} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix}。 \tag{7}$$

### 2.2　探针姿态测量方法

在体轴坐标系 $X$ 轴正向上任取一点 $P(X_{\mathrm{p}},0,0)$，其在风洞坐标系的坐标为

$$\begin{bmatrix} x'_{\mathrm{p}} \\ y'_{\mathrm{p}} \\ z'_{\mathrm{p}} \end{bmatrix} = R_{\mathrm{cw}} \begin{bmatrix} x_{\mathrm{p}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}。 \tag{8}$$

体轴坐标系 $X$ 轴与水平面夹角即俯仰角 $\theta$[7]：

$$\theta = \arcsin(y'^2_{\mathrm{p}} / |OP|); \tag{9}$$

$$|OP| = \sqrt{x'^2_{\mathrm{p}} + y'^2_{\mathrm{p}} + z'^2_{\mathrm{p}}}。 \tag{10}$$

定义点 $P$ 在水平面上的投影为 $Q(x'_{\mathrm{p}}, 0, z'_{\mathrm{p}})$，则 $OP$ 在水平面的投影 $OQ$ 与风洞坐标系 $X$ 轴的夹角即偏航角 $\psi$ 为：

$$\psi = \arccos(x'_{\mathrm{p}} / |OQ|); \tag{11}$$

$$|OQ| = \sqrt{x'^2_{\mathrm{p}} + z'^2_{\mathrm{p}}}。 \tag{12}$$

在体轴坐标系 $Y$ 轴正向上任取一点 $M(0, y_{\mathrm{m}}, 0)$，其在风洞坐标系下的坐标为：

$$\begin{bmatrix} x'_{\mathrm{m}} \\ y'_{\mathrm{m}} \\ z'_{\mathrm{m}} \end{bmatrix} = R_{\mathrm{cw}} \begin{bmatrix} 0 \\ y_{\mathrm{m}} \\ 0 \end{bmatrix}。 \tag{13}$$

$OM$ 的方程为

$$\frac{x}{x'_{\mathrm{m}}} = \frac{y}{y'_{\mathrm{m}}} = \frac{z}{z'_{\mathrm{m}}}。 \tag{14}$$

体轴坐标系纵向对称面的方程为

$$-z'_{\mathrm{p}} x + x'_{\mathrm{p}} z = 0。 \tag{15}$$

根据直线和平面夹角的方程求解方法，可得 $OM$ 与纵向对称面的夹角即滚转角

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{\left|-z'_{\mathrm{p}} x'_{\mathrm{m}} + x'_{\mathrm{p}} z'_{\mathrm{m}}\right|}{\sqrt{x'^2_{\mathrm{p}} + z'^2_{\mathrm{p}}}\sqrt{x'^2_{\mathrm{m}} + y'^2_{\mathrm{m}} + z'^2_{\mathrm{m}}}}\right)。 \tag{16}$$

至此，可以得到探针触点在风洞坐标系的坐标 $(X_0, Y_0, Z_0)$ 以及探针在风洞坐标系下的姿态角 $\theta, \psi, \gamma$。

## 3　数据处理方法

根据七孔探针的数据处理方法获得探针的总压 $p_{o\mathrm{L}}$、静压 $p_{\infty\mathrm{L}}$，以及气流相对于探针的迎角 $\alpha$ 和侧滑角 $\beta$。由此可得到风速

$$v = \sqrt{2(p_{o\mathrm{L}} - p_{\infty\mathrm{L}}) / \rho}。 \tag{17}$$

其中 $\rho$ 为空气密度，则气流相对于探针体轴坐标系的 3 个速度分量为：

$$\begin{aligned} u &= v\cos(\alpha)\cos(\beta), \\ v &= v\cos(\beta)\sin(\beta), \\ w &= v\sin(\beta)。 \end{aligned} \tag{18}$$

由于探针相对于风洞坐标系的姿态通过角度 $\theta, \psi, \gamma$ 描述，因此需将速度分量转换到相对于风洞坐标系下。令：

$$\boldsymbol{v}_0 = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}; \tag{19}$$

$$\boldsymbol{R}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma) & \sin(\gamma) \\ 0 & -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix}; \tag{20}$$

$$\boldsymbol{R}_2=\begin{bmatrix}\cos(\psi) & 0 & -\sin(\psi)\\ 0 & 1 & 0\\ \sin(\psi) & 0 & \cos(\psi)\end{bmatrix};\tag{21}$$

$$\boldsymbol{R}_3=\begin{bmatrix}\cos(\theta) & \sin(\theta) & 0\\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}。\tag{22}$$

则有

$$\boldsymbol{v}_1=\begin{bmatrix}u_1\\ v_1\\ w_1\end{bmatrix}=\boldsymbol{R}_3\times\boldsymbol{R}_2\times\boldsymbol{R}_1\times\boldsymbol{v}_0。\tag{23}$$

式中 $\boldsymbol{v}_1$ 为气流相对于风洞坐标系的速度矢量。至此，对于待测空间中的每一点均可获取相对于风洞坐标系的速度矢量，由于探针触点在风洞坐标系的 3 维坐标已获取，通过位置信息与对应速度矢量即可调用 Matlab 工具绘制出待测区域的流场分布情况。

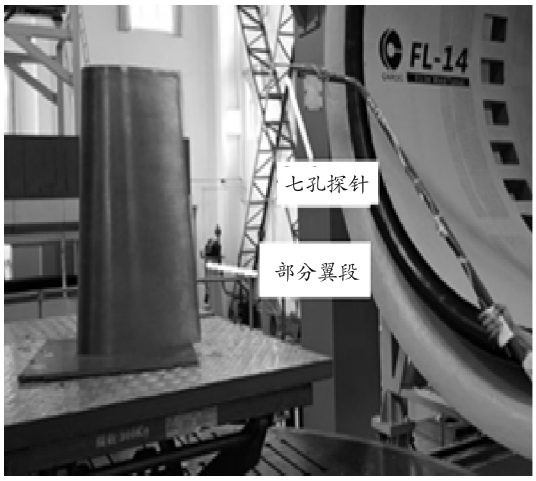


图 4　风洞实验现场

## 5　结束语

笔者研发的流场测试与显示技术由探针获取压力信息，由 Optotrak 系统获取探针姿态及触点位置，进而计算并绘制出测试区域的流场情况，实现了对测试区域的流场可视化效果。相比于传统的流场测试设备，该技术具有装置结构简单、使用方便的特点，为流场的测试提供了一种新的方法和思路。

## 4　实验验证

在中国空气动力研究与发展中心低速所 FL-14 风洞中开展流场测试实验，实验风速 20 m/s。将探针与目标靶固定好，并安装在一根支杆上，如图 4 所示，由人工手持支杆，将探针伸入风洞中待测区域，在风洞实验段来流方向的一个截面(风洞坐标系的 *YZ* 平面)局部区域做缓慢扫描运动。为验证该技术的正确性，需采用大致形态已知的流场进行测试。实验中采用部分翼段作为模型，翼段尖部沿来流方向在后部产生翼尖涡的流场特性，因此，可用来对该技术进行测试验证。Optotrak 系统与探针压力数采系统同步采集，采集频率为 2 Hz，采集时间约 3 min。通过探针压力计算出流场速度，再结合 Optotrak 系统获取的位置及姿态信息，可通过 Matlab 计算出该区域的速度矢量分布并绘制出流场形态如图 5 所示，图中反映出明显的涡状流场，与预期形态一致。

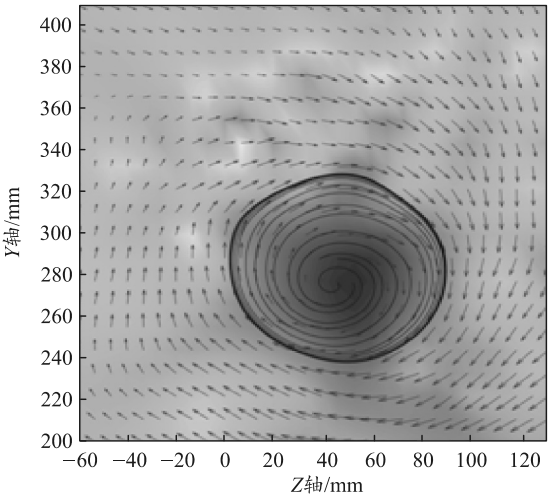


图 5　速度、涡量分布

## 参考文献：

[1] 李少泽. 气动探针在飞行测控中的应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015: 2-5.

[2] 王蕾. 七孔探针风洞实验技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010: 1-3.

[3] 孙明太, 章尧卿, 李鹏, 等. 某型反潜直升机腹部流场飞行测量研究[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1467-1471.

[4] NDI. Optotrak Certus User Guide[G]. Canada, 2009.

[5] 宋晋, 马军, 蒋敏, 等. Optotrak 系统在风洞模型变形与姿态测量中的应用研究[J]. 传感器微系统, 2011, 30(12): 65-67.

[6] 唐亮, 杨振华, 谢艳, 等. Optotrak 光学跟踪测量仪在风洞迎角测量的应用[J]. 兵工自动化, 2015, 34(3): 68-70.

[7] 顾艺, 岑飞, 温渝昌, 等. 基于非接触测量技术的低速风洞连续扫描试验技术研究[J]. 实验流体力学, 2013, 27(5): 98-103.