

全国第二届气动实验非接触测量 学术交流会论文集

(下)

1984年10月

杭 州

全国第二届气动实验非接触测量学术交流会报告 C 册目录

编号	作 者	题 目
C01	顾世杰	气动实验中温度测量发展概况
C02	张昭文	图象判读在气动实验研究中的应用
C03	王光麟	热幅射系数测定仪
C04	王致春(2人)	弹道靶幅射计的设计
C05	葛学真	幅射计研制及其在弹道靶幅射测量及模型探测中的应用
C06	曹尔妍(2人)	激光干涉测量高温气体温度
C07	赵 钐	LTE 假定和光测系统实验分辨率
C08	叶希超(2人)	室温 $\sim 1006^{\circ}\text{K}$ 温度下的振动温度测量标定
C09	叶希超	室温 $\sim 1000^{\circ}\text{K}$ 温度标定室
C10	韩隆恒	氩壁稳电弧光源结构参数的工程计算
C11	顾界杰(3人)	3550 K 高频加热黑体炉 60
C12	励立基	光电探测器在自由飞弹道靶上的应用
C13	梁金寿(4人)	矩形电弧射流电子密度分布的光谱探测
C14	"	激光 Raman 光谱在气动实验中的应用介绍
C15	"	介绍一种直接测量紊流起伏的新方法

编号	作者	题目
C16	周来福	关于幅射测温法的几个问题
C17	罗显华	压缩管内总塞运动的微波测量
C18	黄满	8 mm 变频式微波干涉仪
C19	马森龙	非接触测温仪表的选择和使用
C20	梁金寿(4人)	检测激光喇曼光谱的新型仪器——共焦球面 F—P 干涉仪
C21	"	圆体发动机火焰温度的初步探测
C22	刘世培	在各种火焰射流中的 CARS 诊断术

张 昭 文

北京空气动力研究所

摘 要

本文叙述了图象判读和处理在高速摄影、热图照片、全息粒子照相、干涉图定量计算方面的应用。着重介绍立体图象判读的技术。最后概述了判读系统配置的考虑。

一、引 言

非接触测量不会扰动流场，这对气动实验研究显然非常有利。但测量结果大都是底片或照片形式，做为定量测量手段在数据处理上还存在着相当的困难。首先，被测物理量与反映灰度变化的照片之间的关联不明显；其次测量对象由过去的一维发展到二维甚至三维；另外大的信息容量还带来高速运算和大量存贮数据的问题，因此用人眼或简单的量测工具已不满足要求，这只能维持一种定性和主观的判断。随着计算机和图象处理技术的迅速发展，上述问题已逐步得到解决，可以说非接触测量的定量处理目前已进入实用化阶段。

气动实验的非接触测量和流场显示给判读技术带来各种特殊的要求。如：

立体判读

动片分析

象质改善和清晰化

测量、估值和识别

判读技术从图象数据输入—予处理—测量分析是一个完整的图象加工和读取过程。它属于图象处理的一个分支。计算机辅助的图象处理再配合专门的图象输入外设可以满足不同的判读要求。

二、判 读 实 例

1 运动物体的坐标判读

风洞中一些研究运动物体的实验。如自由飞测力测动导。粒子示踪试验。要求通过高速摄影底片判读得到与时间有关的距离、速度、方向、力、力矩等参数。传统的做法是作平面运动假定。这与空间粒子的实际状况有时很不一致。因此立体判读的要求就越来越多地被提出来。

以示踪试验为例。用两台不同方向的高速摄影机拍得的两张照片（图1）。要求通过空间坐标变换还原成空间实体坐标。

首先要使两幅投影照片在坐标上、方向上和时间上一致起来。这是平面上的坐标变换问题（图2）

$$\left. \begin{aligned} x' &= x_T - x_{A1} \\ y' &= y_T - y_{A1} \\ x &= x' \cot \alpha - y' \sin \alpha \\ y &= (y' + x \sin \alpha) / \cos \alpha \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\text{式中 } \alpha = \tan^{-1}[(x_{A2} - x_{A1}) / (y_{A2} - y_{A1})]$$

A_1 、 A_2 是风洞上的校准标记。利用它们可以使数据被校准到实体尺寸。

两路快速率可能不相同。为使两组数据列时间上同步。其中一组数据要相对时间轴用线性内插的办法使两组达到完全同步。

现考虑空间点的投影变换。引入一个均匀坐标系。其中一个空间坐标点可表示为一个行矢量 $[X, y, Z, 1]$ 或 $[h_x, h_y, h_z, h]$ 。h — 比例系数。该点由一个三维空间向另一个三维空间变换。最后投影到一个平面上的关系是

$$[X, y, Z, 1][T] = [x', y', z', H]$$

其中 $[T]$ 是 4×4 的变换矩阵 $[T] = [T'] [T'']$ 。 $[T']$ 是空间变换矩阵。由相机的位置和角度决定。 $[T'']$ 为投影变换阵 (如 $Z = 0$)

$$[T'] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} \end{bmatrix}$$

$$[T''] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

因此

$$[T] = [T'] [T'] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & 0 & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & 0 & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & 0 & T_{34} \\ T_{41} & T_{42} & 0 & T_{44} \end{bmatrix} \quad (2)$$

完整的空间变换可写成

$$\begin{aligned} [X, y, Z, 1] \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & 0 & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & 0 & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & 0 & T_{34} \\ T_{41} & T_{42} & 0 & T_{44} \end{bmatrix} &= [x', y', 0, H] \\ &= H(u, v, 0, 1) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $u = x' / H$, $v = y' / H$

即在投影底片上的坐标值。

如果已知两张照片的 u , v 和 $[T]$, 就可反求粒子的空间坐标。

由(3)式写出下列方程组

$$T_{11}x + T_{21}y + T_{31}Z + T_{41} = Hu \quad (4)$$

$$T_{12}x + T_{22}y + T_{32}Z + T_{42} = Hv \quad (5)$$

$$T_{14}x + T_{24}y + T_{34}Z + T_{44} = H \quad (6)$$

将(5)代入(4)(5)得

$$\begin{aligned} (T_{11} - T_{14}u)x + (T_{21} - T_{24}u)y + (T_{31} - T_{34}u)Z \\ + (T_{41} + T_{44}u) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$(T_{12}-T_{14}V)x+(T_{22}-T_{24}V)y+(T_{32}-T_{34}V)z \\ + (T_{42}-T_{44}V)=0 \quad (8)$$

代入两组已知的 $u, V, [T]$ 值有

$$\left\{ \begin{array}{l} (T_{11}^1-T_{14}^1u^1)x+(T_{21}^1-T_{24}^1u^1)y+(T_{31}^1-T_{34}^1u^1)z \\ \quad + (T_{41}^1-T_{44}^1u^1)=0 \\ (T_{12}^1-T_{14}^1V^1)x+(T_{22}^1-T_{24}^1V^1)y+(T_{32}^1-T_{34}^1V^1)z \\ \quad + (T_{42}^1-T_{44}^1V^1)=0 \\ (T_{11}^2-T_{14}^2u^2)x+(T_{21}^2-T_{24}^2u^2)y+(T_{31}^2-T_{34}^2u^2)z \\ \quad + (T_{41}^2-T_{44}^2u^2)=0 \\ (T_{12}^2-T_{14}^2V^2)x+(T_{22}^2-T_{24}^2V^2)y+(T_{32}^2-T_{34}^2V^2)z \\ \quad + (T_{42}^2-T_{44}^2V^2)=0 \end{array} \right. \quad (9)$$

式中 1, 2 上标表示二张底片。

将(9)式写出矩阵形式

$$[A][x]=[B] \quad (10)$$

式中

$$[A]=\begin{bmatrix} T_{11}^1-T_{14}^1u^1 & T_{21}^1-T_{24}^1u^1 & T_{31}^1-T_{34}^1u^1 \\ T_{12}^1-T_{14}^1V^1 & T_{22}^1-T_{24}^1V^1 & T_{32}^1-T_{34}^1V^1 \\ T_{11}^2-T_{14}^2u^2 & T_{21}^2-T_{24}^2u^2 & T_{31}^2-T_{34}^2u^2 \\ T_{12}^2-T_{14}^2V^2 & T_{22}^2-T_{24}^2V^2 & T_{32}^2-T_{34}^2V^2 \end{bmatrix}$$

$$[x]=\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$[B] = \begin{pmatrix} T_{44}^1 u^1 - T_{41}^1 \\ T_{44}^1 v^1 - T_{42}^1 \\ T_{44}^2 u^2 - T_{41}^2 \\ T_{44}^2 v^2 - T_{42}^2 \end{pmatrix}$$

(10) 式等式两边左乘 $[A]^T$ 匹配矩阵维数得

$$[A]^T [A] [X] = [A]^T [B] \quad (11)$$

式中 $[A]^T [A]$ 是方阵。维数也适合于 $[B]$ 。因此得到粒子空间坐标解

$$[X] = ([A]^T [A])^{-1} [A]^T [B] \quad (12)$$

如果相机位置和角度不便测量也可用已知特定点空间坐标的办法将 $[T]$ 标定出来。

2 热图判读

特殊形状飞行器模型（如航天飞机）的风洞热试验往往要测量大面积的表面热分布。这通常用涂料或红外照相的手段实现。以相变涂料为例。试验时。模型插入气流。表面上相变涂料的“熔化线”反映着特定温度值的等温线。将它的坐标与试验历程时间一齐代入热传导方程。可求解热传导系数在模型表面的分布。并由此得到转换区和热点的位置（图3）。

这里。由于相机视角和模型空间形状的影响。判读底片上尺寸与模型表面的实际尺寸有差别。它们之间仍然是空间坐标变换关系。只是对象由点变成线和面。下面是处理步骤。

< 1 > 模型表面的栅格点由模型轴系变换到照相机轴系，再投影到底片平面 (u, v) 上。

栅格点在 x 轴的正交平面内沿模型表面分布，因此每排点的 x 坐标值相同（图 4），相机焦点位置和方向，以及各栅格点在模型坐标系中的位置可以量测得到。按前述点变换的同样办法实行变换。

< 2 > 在 (u, v) 平面上将判读得到的“熔化线”与栅格点重迭。

重迭为平面坐标变换问题（图 5）

$$\begin{aligned} u &= (S \cos \beta) y_T + (S \sin \beta) x_T + C \\ &= A y_T + B x_T + C \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} v &= (S \cos \beta) x_T - (S \sin \beta) y_T + D \\ &= A x_T - B y_T + D \end{aligned} \quad (14)$$

式中 S 为比例系数 $A B C D$ 均未知。需利用两个与“熔化线”一同判读的参考点 P_{TR1}, P_{TR2} 。它们模型轴系坐标已知为 $(x_{mR1}, y_{mR1}, z_{mR1}) (x_{mR2}, y_{mR2}, z_{mR2})$ 同样利用 < 1 > 步的空间投影变换得到两组底片投影 $(u_{R1}, v_{R1}) (u_{R2}, v_{R2})$ 代入 < 13 > < 14 >

$$\begin{aligned} u_{R1} &= A y_{TR1} + B x_{TR1} + C \\ v_{R1} &= A x_{TR1} - B y_{TR1} + D \\ u_{R2} &= A y_{TR2} + B x_{TR2} + C \\ v_{R2} &= A x_{TR2} - B y_{TR2} + D \end{aligned} \quad (15)$$

联解(15) 求出 A, B, C, D, 于是可完成“熔化线”上任何点的变换, 而“熔化线”也就适合在模型表面栅格点的投影上了。

<3> 已知栅格点的空间坐标和它与“熔化线”的相对位置用内插法求“熔化线”的空间坐标。

在 (u, v) 平面上, 对“熔化线”上的某一点找四个相邻的栅格点, 使

$$\sqrt{(u_p - u_i)^2 + (v_p - v_i)^2} \quad (16)$$

为最小。栅格点的最初设置决定了找出的四点, 两两 x_m 坐标相等。因此熔化线上的这点就处在四栅格点形成的四边形中(图6)。

用内插法决定 x_m, y_m, z_m (模型轴系: 坐标)

$$x_m = x_{12} + (x_{34} - x_{12})W_x \quad (\text{图6a}) \quad (17)$$

$$W_x = (v_p - v_{12}) / (v_{34} - v_{12}) \quad (\text{图6b})$$

$$v_{12} = v_1 + (v_2 - v_1)W_{u12} \quad (\text{图6c})$$

$$v_{34} = v_3 + (v_4 - v_3)W_{u34}$$

$$W_{u12} = (u_p - u_1) / (u_2 - u_1) \quad (\text{图6d})$$

$$W_{u34} = (u_p - u_3) / (u_4 - u_3)$$

$$y_m = y_{12} + (y_{34} - y_{12})W_x$$

$$y_{12} = y_{m1} + (y_{m2} - y_{m1})W_{u12}$$

$$y_{34} = y_{m3} + (y_{m4} - y_{m3})W_{u34}$$

代入化简

$$y_m = y_{m1}(1 - W_{u12})(1 - W_x) + y_{m2}(W_{u12})(1 - W_x)$$

002-2

$$+Y_{m3}(W_x)(1-W_{u34})+Y_{m4}(W_x)(W_{u34}) \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{同理 } Z_m = & Z_{m1}(1-W_{u12})(1-W_x) + Z_{m2}(W_{u12})(1-W_x) \\ & + Z_{m3}(W_x)(1-W_{u34}) + Z_{m4}(W_x)(W_{u34}) \end{aligned} \quad (19)$$

判读过程中,为了准确读取“熔化线”坐标,还需用到背景补偿和边缘增强的处理。

3 粒子场全息底片的判读

在粒子侵蚀试验中用全息方法在风洞里拍摄粒子和水珠能兼顾分辨力和景深两个方面。做到三维粒子场的瞬时冻结。判读时,全息底片在三维平动台上由计算机控制作复盖采样空间的扫描。通过摄像机接收将空间信息转化为序列的视频信号。要求从中读出粒子尺寸、形状系数、数密度、大小分布和速度等粒子参数。这种三维空间的显微判读用人眼做很容易产生疲劳,因此一般采用半自动或自动的方式。

对于数密度大的粒子场,上述两种办法都会发生困难。因此需要引用体视学的原理。靠二维平面的统计测量,经过几何关系变换,获得三维的“平均”信息。当然,为了在要求的一定置信水平下有较小的置信区间,必须用较大的测量量,这点正利用了图像分析仪器的设备能力。

以球粒子为例。如果要从截面上测量出粒子空间尺寸分布通常要用到概率概念 P_d ,即直径为 D 的粒子在截面上截出直径为 d 圆的概率(图7),当微圆直径在 $d \sim d + \Delta d$ 之间,概率为:

$$P = \frac{2\Delta h}{D} = \frac{(D^2 - d^2)^{\frac{1}{2}} - [D^2 - (d + \Delta d)^2]^{\frac{1}{2}}}{D} \quad (20)$$

对于多尺寸的球粒子系统，第 i 组尺寸球截出尺寸为第 j 组圆的概率是：

$$P_{j,i} = \frac{(N_A)_{j,i}}{(N_A)_i} = \frac{(N_A)_{j,i}}{\sum_j (N_A)_{j,i}} \quad (21)$$

式中 $(N_A)_{j,i}$ 是在单位截面上截第 i 组粒子，截出尺寸为 j 组的截函数

$(N_A)_i = \sum_j (N_A)_{j,i}$ 是第 i 组粒子在单位截面上被截出的所有截函数，再代入下式就可以把平面信息与空间信息关联起来。

$$(N_V)_i = (N_A)_i / D_i = \frac{(N_A)_{j,i}}{P_{j,i} D_i} = \frac{1}{D_i} \sum_j (N_A)_{j,i} \quad (22)$$

如果考察的粒子数目足够多，则可认为截面上截出的最大直径就是空间最大粒子的直径，以此直径为第 1 组。根据一定的直径分割往下分组，则第一组被截圆只有第一组粒子才能截出来

$$(N_A)_{1,1} = (N_A)_1$$

$$\sum_j (N_A)_{j,1} = \frac{(N_A)_{1,1}}{P_{1,1}} = \frac{(N_A)_1}{P_{1,1}} \quad (23)$$

第二组截圆只有第一、二组粒子才能截出

$$(N_A)_2 = (N_A)_{2,1} + (N_A)_{2,2}$$

$$(N_A)_{2,1} = \sum_j (N_A)_{j,1} P_{2,1} = \frac{P_{2,1}}{P_{1,1}} (N_A)_1$$

$$(N_A)_{2,2} = (N_A)_2 - (N_A)_{2,1} = (N_A)_2 - \frac{P_{2,1}}{P_{1,1}} (N_A)_1$$

$$\sum_j (N_A)_{j,2} = (N_A)_{2,2} / P_{2,2} \quad (24)$$

这样算下去。将算得的 $\sum_j (N_A)_{j,1}$ 、 $\sum_j (N_A)_{j,2}$ 、 $\sum_j (N_A)_{j,3}$

.....全部代入(22)就可实现由平面测量值($\mathbb{R}_A$)算出空间粒子的六小分布值($\mathbb{R}_V$)；

4 流场干涉照片的定量计算

具有有限条纹的流场干涉照片中流场密度与条纹偏移有关。因此定量计算的输入数据是沿读取截面的条纹偏移数分布。用计算机自动输入数据的步骤是：定读取截面、条纹编号、沿截面读取条纹偏移值、条纹偏移分布曲线的处理、求解密度值。

现简述读数前后的处理过程

<1>精确地确定干涉条纹的中心

由于照明不均匀和背景噪声所造成的条纹粗细、亮暗不匀、局部断线会给读数带来困难。必须首先进行亮度均匀化、断点连接、细化和平滑的予处理。可以选择一些现成的增强和去噪声手段。如灰度变换、直方图均衡、同态滤波和局部平均等办法。

对于有限的条纹要达到高精度的条纹偏移数判读，还要在读取点附近用内插加密的办法。

<2>条纹偏移分布曲线的处理

首先相对背景条纹的微小偏移进行读数校正。然后是坐标正则化、读数点的曲线拟合。为减少数值计算误差，模型空间用假想线连接起来。这样可得到一根连续平滑的条纹偏移曲线。

三、判 读 设 备

以上这些判读工作都需用计算机辅助。可以说。现在的判读设备已不是最早用人眼加笔的概念。也不是简单的投影读数装置。而是一种有智能、能判读也能分析处理的图象处理系统。它能使判读视野开阔。精度和速度提高。可以做一些人力所不及的工作。

1. 计算能力的合理配置

图象的固有信息量很大。这对计算机的存贮和运算部分都是个沉重的负担。如果测量精度还要求高。那设备就很昂贵。这一直是涉及计算机处理图象能否实用的问题。目前解决的办法是用不同计算机分工不同的计算内容：如图象运算常用的乘加运算和快速变换。它要求并列运算和高效率存取。这可以用阵列式处理器。它包括高速入/出。灰值图象存贮。地址控制和微程序的阵列处理器。因为它即是多运算器（乘加硬件）并列运算。又整幅地存贮图象。提高了管理效能。因此运算速度很快。称为流水线操作；还有点映射运算（用于灰值变换和伪彩色编码）可以用ROM做成表格。通过查表来执行一般的数值和逻辑运算还是由通用计算机承担。它还兼管系统的管理。这种配置能使小计算机发挥出类似大计算机的能力。

2 人一机交互式系统

虽然人工应付不了极大的判读处理工作量。但计算机却始终不能完全取代人的判别能力。判读问题越复杂。这一点也越突出；另外。自动处理一般要做充分的准备工作。因此人一机交互方式就显得优越。

交互工具是带显示器的光笔。跟踪球和数字图形板。其中以图形

板最好，它具有较高的精度，即可输入又可执行控制，通常有一些交互软件支持它的工作。如：标记、动点、轮廓输入、时间间隔、动线迭加等。

在立体判读过程中，物体同一时刻不同投影的两张底片输入时（要在不同时间分别输入）往往容易受空间关系或背景图象的混淆而弄错。这时可借助动线迭加的交互功能把第一次输入的视线通过计算投影到第二个投影面上并画出一条参考线。这就限定第二次输入点必定在这根线上，从而帮助人做出正确判断。

3 输入输出设备

判读处理一般是图象输入、数据输出，因此应侧重输入设备的建立。静片输入设备有平板式显微密度计、搬象机和飞点扫描装置；动片、动象输入装置有动片分析器、录象机、视象盘等，对它们的要求是能停片（停象）、单帧放、变速放、正反放和帧数显示。一般商品达不到这种要求。

输出设备起码要有高分辨彩色显示和能反映灰级的点阵式打印。顺便提一点，如果配有智能显示终端和从数据集生成图象的功能，则系统也能做计算机辅助流场显示（CAFFV）方面的工作，这是定量判读的逆过程。可以显示常规流场显示得不到的流动模型，如用热线风速仪经过计算机作条件采样得到的湍流数据（集平均、相关、功率谱），以时空三维坐标表示出来，还有做为大计算机数值解得到的振

和界面的瞬时流线和等速度线显示等。

4. 软件

当前图象系统一般以软件处理为主，软件决定着整个系统的性能。软件是分层结构的，即采用硬件内核—操作系统—语言—功能词汇（菜单）—应用程序这种从里到外的结构形式。菜单部分代表着系统的基本能力。软件灵活性主要表现在用户自编程序的可能和难易，这与系统结构和菜单有关。

作为判读处理软件应具备的基本功能是：

测量：坐标、几何参数、灰值参数的测量及测后的运算、统计。

估值：统计分析、分布分析、立体分析

校正： α 校正、阴影补偿、几何校正

增强：边缘、纹理增强、各种滤波

交互图象编辑：图象加工、测量和存贮

显示：迭加、伪彩色

灰值图和二值图运算

基本运算

实用程序

四、结 束 语

判读处理作为非接触测量的最终环节，其效果往往与整个测量过程密切相关。测量中引入的噪声和畸变，判读时要化很大气力也不易