

气动实验 非接触测量会议 文选

第一分册



气动实验非接触测量会议文选
共 三 册

编辑出版者	气动实验非接触式测量 会议文选编辑组
印刷者	中国人民解放军 89950 部队印刷所

(内部刊物)

目 录

在气动实验非接触式测量会议上的总结发言	庄逢甘(1)
红外照相方法图示表面温度分布的测量技术	安保合 杜春祥(15)
快速红外分光计的研制及应用	七机部七〇一所 刘世培(22)
高温光谱测量	七机部七〇一所 梁金寿(30)
HW-1 红外测温仪研制	四川大学无线电系红外科研组 马代兴 陶德元(39)
SE 08-2 短波红外辐射计的校验	七机部五〇五所 王英鉴(49)
用于测量尾流光辐射特性的辐射亮度计	七机部五〇五所五室二组(55)
辐射计的研制与调试	中国人民解放军 89955 部队 陈达权 秦亚萍 施凤英(61)
用热电探测器测量气体辐射的初步试验	中国人民解放军 89955 部队 204 辐射课题组(75)
烧蚀试验模型辐射热流测量	中国人民解放军 89955 部队 顾世杰 付国义 张启仁(81)
应用红外辐射和吸收光谱测量火焰温度分布	上海工业自动化仪表研究所 中国人民解放军第三研究院卅一所(94)
火球表面温度的亮度测量法	邬舒富(101)
用光谱线反转法测量正激波后气体的温度	中国科学院力学研究所 曹重华 李正坤 崔季平(107)
液晶在空气动力学实验中的应用——测量附面层转换区	北京 7201 信箱(112)
基准高温光电比较仪简介	中国计量科学研究院 温度室(121)
利用微波双频衰减原理测量火箭喷焰温度	七机部 44 所 周在杞(132)
HWSS 双色测温仪	1411 所 华欣春(137)
WBH-71 型红外比色温度计	上海激光技术研究所 徐顺潮 朱邦鉴 石晓风(144)
WFH-60 型红外辐射温度计及其理论曲线	上海工业自动化仪表研究所(156)

在气动实验非接触式测量会议上的总结发言

(一九七八年十月二十日)

庄 逢 甘

同志们：

我的发言分三个部分，先讲概况，再讲会议成果，最后讲点个人看法。

(一)

我们的“气动实验非接触式测量会议”，经过十天的紧张活动，今天就要结束了。参加这次大会的有属于一机部、二机部、三机部、四机部、五机部、七机部、八机总局、中国科学院、中国计量科学院、高等院校、国防科委系统等56个单位，共250名正式和列席代表。这是继去年十二月份在成都召开的“风洞实验数据测量与处理自动化技术经验交流会”之后的又一次盛会。在非接触式气动测试领域里召开这样大规模的会议，在我国还是第一次。

我们这次会议能顺利召开，是和以下三方面的重要因素分不开的：第一，因为有华主席、党中央的正确领导；第二，有国防科委领导和机关的直接关怀和帮助；第三，有有关科研战线上广大同志们的迫切要求。

为了召开这次会议，许多同志付出了大量的辛勤劳动，特别是科委情报所和89950部队组成的调查组的同志们，从今年三月份开始，先后到二机部九院、三机部六院、四机部十院、十四院、七机部七〇一所、八机总局、中国科学院计划局、力学所等全国各地八十多个单位，召开了大小上百次的座谈会，听取意见，研究办法。参加会议的同志为了赶写技术报告化费了很多心血，进行了艰苦的脑力劳动。为印发这些报告各单位的打字员也付出了艰巨的劳动。

在会议筹备过程中，国防科委领导机关曾作过多次具体指示，国防科委付主任钱学森同志对会议作了批示，指出：

1. 看了125篇报告都很分散，要写一篇关于气动实验测试技术要求及发展方向的报告。
2. 会期十三天左右，分组会安排六天，力求125篇报告都能讲一讲，可分四个组进行。
3. 关于会议的目的，除了一般技术交流外，争取得到三个具体成果：

① 进一步明确各种测量技术的发展方向, 商议任务分工, 协商安排一些研制任务;

② 为了加强联系及时交流情况, 争取成立非接触式测量技术的学术性组织;

③ 编辑出版会议录。

我们的这次会议就是遵照上级领导的指示精神, 充分反映了广大科研人员的意愿, 为促进我国气动实验非接触式测量技术的更快发展而召开的。会议取得了预期的效果。

(二)

会议分三个阶段进行, 现在分别谈一下会议的收获。

第一阶段

会议第一阶段, 由国防科委科技部付部长吴宝光同志致开幕词, 明确了大会的任务和目的, 89956 部队陈传尧同志代表 89950 部队作了对气动实验中采用非接触测量方法意见的报告; 大会组织了对 89950 部队所属风洞实验设备的参观, 使大家对会议要解决的具体问题有了一些感性认识。

通过参观, 代表们看到了我国当前气动实验的基本情况, 都为我们有了这样比较配套的各种类型的风洞试验设备而受到鼓舞; 可是另一方面, 也看到了停留在五、六十年代水平的测试设备状况, 大家都为落后的测试技术不能适应气动实验要求, 甚至许多风洞尚无测试手段感到内疚。代表同志们感慨地说, 过去由于保密, 研制单位不能真正了解使用情况, 研制出来的东西不好用, 而且周期也很长。有的代表说, 由于保密关系, 不想去粘边, 也不敢去粘边。还有的代表说, 过去研究出一种新技术不知用于何处, 根本不了解气动实验领域对各种测试技术尚有这样多的要求。

事实正是如此。由于“四人帮”的干扰破坏, 使我们的气动实验非接触式测量技术处于闭关自守, 固步自封, 打乱仗的状态, 与国外相比差距很大, 就是连国内的一些先进技术和科研成果也未能很好吸取和引用。再加上缺乏统一的全面的严密的发展规划, 而是一种自发的“小炉匠”式的经营方式, 结果浪费了人力和物力, 也浪费了时间, 十多年来成效不多。因此, 我们一定要改变这种局面。

通过第一阶段的会议活动, 大家一致认为必须加强使用单位与研制单位的密切结合; 必须加强同行业单位之间的相互协作; 必须加强经常的技术交流和成果推广; 也必须加强国外新技术新设备及必要的专利的引进。

第二阶段

会议的第二阶段, 是进行广泛的学术交流活动。提交会议的报告共有 133 篇, 在大会上报告了 9 篇, 分组会上报告了 107 篇, 在三个学科的讨论会上报告了 10 篇。

会议按照专业和测量对象相结合的原则分成四个组:

第一组 流场显示组

交流了关于激光全息照相、激光高速摄影、电子束显示、辉光放电显示、彩色纹

影、激光器及光电元件等研制及应用方面的技术报告共 30 篇。

通过这方面的技术交流, 我们有以下收获:

(1) 认为气动实验的流场显示, 应用激光全息技术可以使时间的分辨率从常规的微秒量级提高到毫微秒量级, 从而提高流场观测的清晰度。

(2) 许多同志在报告和讨论中, 对高温、低密度多孔壁等特殊流场观测提出了方案性的意见。

(3) 交流了各单位进行的彩色流场显示的研究工作。

大家对科学院力学所的关于对流场显示的展望, 89956 部队的双全息照相, 中国科技大学的夹层全息, 浙大、天大、西安光机所的高速全息以及 89953 部队的彩色纹影等报告, 由于各有其独到之处, 所以都很感兴趣。

尽管脉冲激光全息技术应用于风洞还仅仅处于初步试验阶段, 但从目前已有的几种流场显示手段看, 只有它有希望解决三维流场问题。仅就这一点来说, 激光全息技术的发展是很有价值的。

存在的问题:

(1) 目前不论是常规或非常规的流场显示手段, 都还只停留在定性阶段, 不能作定量分析。这是值得引起注意的问题, 今后应该加强。就是常规的流场显示定性工作也要进一步完善。

(2) 国内红宝石激光器没有专门单位生产, 激光器等元器件不过关。作为激光器的鉴定技术不完善, 因此, 严重影响了激光全息技术的研制和使用。

(3) 迫切需要解决激光全息的图象判读数据处理问题, 应尽快组织人力归口研制。

第二组 温度测量组

交流了有关光谱法(光电法、摄谱法、散射法)、液晶、热电探测器、热成像以及温度标定等方面的技术报告共 34 篇。

引起大家注意的有:

如长春光机所的红外干涉光谱仪, 它跳出了一般用棱镜和光栅分光的办法, 而是造成干涉图象用频谱分析, 计算机算出整个付立叶分布, 找出幅度频率的对应关系。

又如 89955 部队在高温激波管、自由飞弹道靶中用电光法进行了微秒级测温的尝试, 在快速(微秒级)测量领域里迈出了第一步。

又如七机部七〇一所的红外分光光度计能在较短的时间(1~3 秒)把辐射体的能谱分布记录下来, 对高温辐射的特性的测量起了一定的作用。

还有上海光机所的 WBH-71 红外比色高温计, 工业用高温光谱仪等的介绍, 对风洞中烧蚀表面温度的测量是有用的。

另外, 上海技术物理所、四机部一四一所研制的医用热象仪, 测温范围 0~50℃, 温度分辨率小于等于 0.2℃, 帧时 6 秒。大家都很有趣, 希望能扩大温度范围, 每秒能完成多帧以解决将热成像技术应用于风洞试验的大面积温度分布测量。南航介绍了喇曼散射的应用, 利用它来测量非平衡流场的温度以及组元密度。这些都是值得注意的动向。

目前存在的问题是：

(1) 由于气动试验的要求，急需解决温度的动态测量问题。

(2) 对各种热辐射材料的辐射系数的测量以及其它辐射特性（如反射系数、吸收系数等）的测量在国内都还处于一种非常分散薄弱的状态，迫切需要对各种材料特别是各种烧蚀材料进行辐射特性的测量并出版手册。

第三组 测速、测振、测电子密度组

交流了有关激光测速、测振以及电子密度等方面的技术报告共 23 篇。

大家一致认为，把激光测速技术引用到气动实验中是很有意义的。许多科研和教学单位的代表介绍了他们研制和使用方面的经验，对今后的气动实验提供了良好的基础。

如国防科技大学系统介绍了激光测速仪的基本原理与发展概况。天津大学介绍了他们自己研制的仪器和实验情况。南航对 55L-90 数据处理系统的分析作了介绍。这些都引起了大家极大的兴趣。

目前存在的问题是：

(1) 不论是外国引进的还是我国自己研制的激光测速仪，目前都不能满足气动实验的要求，国产已有的激光测速仪速度只能达到每秒 0—40 米，而我们需要测每秒几百米上千米的速度。

目前国内有几十个单位研究这方面的工作，但彼此都不够通气，因此发展也不快。因此代表们一致呼吁要组织对引进的激光测速仪资料的复印工作，要求组织激光测速技术学习班，需要加强这方面的基础理论研究工作，并希望能把引进的激光测速仪解剖一台进行研究，真正把技术学到手。大家说得对，引进是重要，但如何用好就更重要。

(2) 元器件也有问题，如氩离子激光器、法珀罗、分光元件、声光调制器能否引进国外技术专利，设法自己独立生产，这样才能从根本上解决问题。

关于等离子体电子密度测量“诊断技术”的研究，全国从事这方面工作的单位几乎都参加了这次会议，对等离子体的几种“诊断方法”，如激光法，微波法中的极化干涉法、条纹干涉法、双频道法等都有技术报告。各单位在不同频段上采用了不同的方法，都得到了诊断的结果（照片），彼此之间交流了经验，互通了情况。但为了解决电磁波通过等离子体的所谓“通讯中断”问题，还需进一步做些工作。

第四组 高速摄影组

交流了有关高速摄影技术及其应用、闪光光源等方面的技术报告共 20 篇。

从报告中了解到目前国内研制的高速摄影机，基本上可以满足大部分气动实验测量的要求。但尚需根据各类风洞的不同要求对其进行改进、配套和提高。讨论中，西安光机所的同志提了很多的积极意见。

通过小组讨论大家认为：

(1) 高速纹影摄影技术在国外已广泛应用。在我国气动实验中也应进一步推广，如对风洞试验的快速变攻角的流场观测等。

(2) 哈工大关于对“风洞窗玻璃对摄影象质量及位移测量精度的影响”报告，对风洞设计及对气动实验的测量都有一定的现实意义。

(3) 遥测技术在风洞试验中的应用是值得注意的一个新动向, 因为通过一次吹风试验可以同时得到压力、热流和运动轨迹的多种数据。这种遥测技术与自由飞试验技术的结合, 在国外已有十多年的历史了, 而我们目前尚未开展。

存在的问题是:

(1) 对用作高速摄影照明的目前国产的激光光源与氙灯光源及火花光源相比, 还有不少缺点, 一般人都愿选用后两种, 而这两种也并未完善, 需要解决脉宽为一微秒、频率为五千到一万次/秒的连续闪光数百次的高频闪光光源。

(2) 风洞试验单位迫切要求解决高速摄影底片判读与处理问题。

目前在激波风洞、超音速风洞上作自由飞试验, 两个星期左右的几十次试验的底片, 只能用最原始的工具显微镜一张张的判读, 几个月才判读完, 既费时又费力。

(3) 对高速摄影的“电影再现”和“倒放”技术需要进一步发展, 这对气动实验如对激波系的分布, 粒子云试验的激波振荡, 烧蚀现象的再现等都有其现实意义。

会议还组织了对激光全息定量分析、图象判读和高温计量三个学科的讨论会。大家都很受启发。

我国气动实验测试技术, 从无到有, 水平从低往高, 经过了十几年的发展, 取得了一定的成绩, 而这些成绩之所以能够取得, 是与全国各部门特别是科学院、大专院校、各工业部的积极支持和大力协作分不开的, 他们对许多技术问题的探讨和解决是起到了带头作用的。从提供大会的报告情况完全可以说明这一点。

不足之处是, 由于报告很多, 内容又极为广泛丰富, 虽然大会安排的时间并不算太短, 但仍感到很紧张, 不能对每篇报告进行仔细的讨论和学习。

总之, 通过 100 多篇技术报告的交流, 充分反映了代表们的思想是活跃的, 大家都能畅所欲言, 各抒己见, 已开始恢复了毛主席一贯倡导的“百家争鸣、百花齐放”那样一种令人欣喜的气象。我们今后还要不断加强这方面的技术交流工作, 因为只有经过各种不同意见的讨论, 才能互相取长补短, 明辨是非, 消除谬误, 少犯错误, 少走弯路, 得到共同的提高。也只有这样, 才能把我们的事业办得更好些。

第三阶段

会议的第三阶段是在第二阶段学术交流的基础上进行的, 为了进一步明确当前气动实验的非接触式测量技术的发展方向、技术途径特别是结合当前风洞试验的实际需要, 进行了讨论。

结合这次会议的技术交流, 有三机部、科学院力学所、89950 部队、七机部七〇一所等单位共提出了 63 个研制项目的要求, 按参数进行了分组讨论, 明确了大部分的技术指标。气氛极其热烈, 大家提出了许多好意见、好办法。

(1) 如对高温低密度、跨音速风洞的开孔壁和发动机射流管等特殊流场显示一直没有很好解决, 而在这次会上, 大家都帮助出主意、想办法, 明确了解决问题的具体技术途径。

(2) 如三机部六院六〇八所提出了多年不能解决的发动机涡轮盘温度测量问题, 经过大家研究, 提出了简易可行的具体办法。

(3) 大家急切盼望解决的图象判读与处理问题, 经过大家讨论, 初步明确了具体技术途径。国防科技大学与西安光机所的同志都提出了积极的建设性意见。

(4) 对高速摄影机问题, 虽然我国过去对各种相机进行过研制, 但都未定型及小批量生产。目前使用方拿不到产品。西安光机所同志表示愿意协助解决对高速相机的改进、配套和提高工作。

(5) 大家对各种元器件进行了讨论, 互通了情况, 互通了消息, 真正起到了交流作用。如高温涂层、滤色片等我国都有厂家生产, 而我们都不知道, 消息相当闭塞。

通过这一阶段的讨论, 对我们提出的各种气动实验测试技术问题及方案, 进行了广泛的群众性论证和研究, 这在过去还是少有的。

总之, 通过使用单位与研制单位的相互情况介绍, 初步明确了以下三个方面的问题:

(1) 对气动实验非接触式测量技术的发展方向进行了探讨, 有了一个基本的概念。

(2) 初步明确了气动实验单位对非接触式测试技术的主攻目标, 基本上统一了思想, 沟通了情况。

(3) 使用单位对研制单位有了进一步的了解, 为今后落实安排任务打下了基础。

大会第三阶段讨论的意义在于, 通过讨论加快气动非接触测量技术研究, 带动整个气动测量技术, 使我们今后早点、快点、好点、多点拿出我们的成果, 以保证我们社会主义事业的顺利发展, 这是一个很重要的问题。华主席党中央要求我们加快实现四个现代化的步伐, 为此也提出了一系列的方针、政策和组织措施。中央指出: 这是一场根本改变我国经济和技术落后面貌、进一步巩固无产阶级专政的伟大革命。这场革命会大幅度地改变目前落后的生产力, 就必然要多方面地改变生产关系、改变上层建筑、改变各方面的管理方式, 使之适应现代化大经济的需要。为此就必须大力加强专业化。那种打乱仗, 重复分散式的搞法, 那种固步自封、喜新弃旧、一拥而上, 一轰而散的作法就必然大大浪费人力、物力和时间, 因此, 我们必须清除林彪、“四人帮”在人们思想上造成的混乱和束缚, 打破小生产的狭隘眼界和习惯, 克服骄傲自满、固步自封、因循守旧、无所作为等保守思想。组织起来, 团结起来, 互通情况, 取长补短, 以便多快好省地拿出成果。

也就是为此, 大会决定成立“气动实验测试技术交流网”, 立即由国防科委情报所负责进行筹备。

大会决定出版“气动实验非接触式测量技术会议”的技术报告的文献选编。

(三)

下面就“气动实验非接触式测量技术的一些问题”讲一讲自己的看法。

1. 要应用近代物理与电子计算技术的成就, 大力发展实验空气动力学

在美国以查普曼为代表的一批艾姆斯研究中心的科学家, 曾经宣称计算空气动力学将要代替风洞实验, 然而在他们的文章于一九七五年发表以后, 建立各种类型高雷诺数的低速风洞、跨音速风洞及高超音速风洞的计划仍在积极进行。与此同时实验空气动力学

继续以更快的速度发展着。这首先表现在新型测试设备和计算技术的发展对实验空气动力学的巨大冲击。它已从过去常规的测力测压等试验发展到细致流场结构的测量,更深入地了解物理图案,流动机理,一面提供理论计算所需要的模型,一面提出新概念直接为型号研制服务。风洞试验所需处理的数据量增长了好几个量级。非常有趣的是,我们所研究的空气动力学一般当然是属于宏观范畴,但是测试设备的近期进展,尤其是本次会议讨论的非接触测量,很多是与在宏观系统中所观察到的量子效应有关的,如荧光、半导体器件、激光、光谱学等。另外超高速数字采样技术和微处理机已逐步代替繁琐的用示波器记录,再用人工判读照相底板的处理办法。这不仅是为了加快试验速度,而且它使我们对过去不可能测量的参数能进行测量了。英国帝国大学航空系已有每秒四百万字节的采样装置,这样利用电子束技术已经可以测得低密度激波管中正激波区域的密度剖面,还可以测得炮风洞中平板高超音速湍流边界层密度脉动的互相关系数。

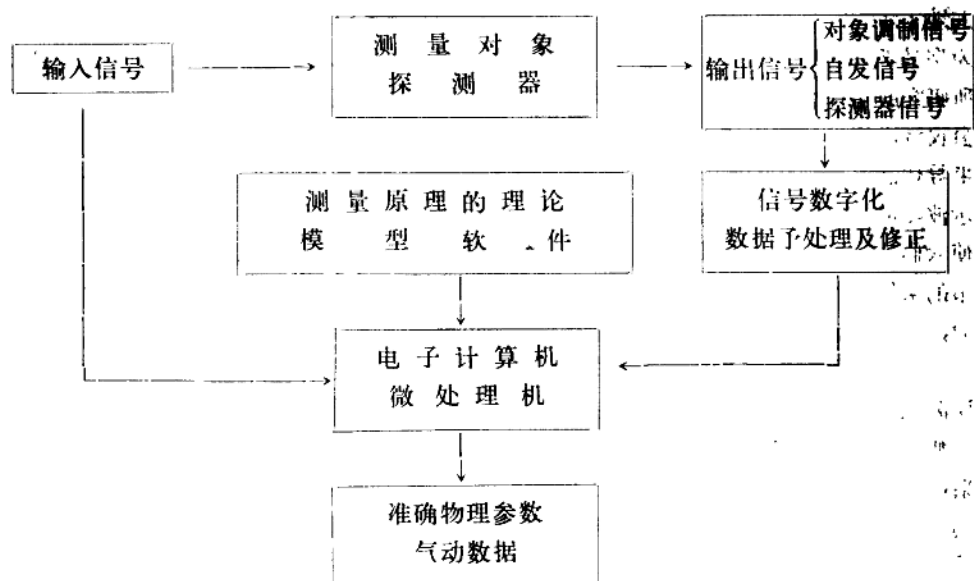
一般说来,为了得到一个测量对象的物理参数,我们可以用一个或多个信号,例如让激光通过测量的区域,然后用敏感器(元件)sensor记录激光通过后的信息,这包括光的振幅、频率与相位分布;在某些场合测量对象有自发信号可供利用,例如高温气体的辐射;多数情况下我们需要在测量对象内部配置传感器(探测器、探头),通过它与测量对象的相互作用,输出或经过转换器,(transducer)输出信号再记录计算出所要的物理参数。关键的问题是如何从这些输出的信号中把所需要的物理参数求出来。信号中往往带有各种噪音(声、光、电、热),这种噪音我们是不需要的,我们要把噪音从正确的信号中分离出来。这是一种重要的数据处理的技术。再一种是测量原理性质的,例如用热线测量湍流脉动,就需要了解热线与流场相互作用的模型,根据这个模型的分析才能得出低速流动中的湍流速度脉动。再用全息干涉测三元密度场问题,在简单情况可认为光是直线行进的,但在壁面附近,或密度梯度较大的地方,就需要考虑光作为电磁波的实际传播情况,包括衍射,这些是根据测量原理理论模型的计算,还要考虑到实验条件与理论模型的具体差别,风洞中洞壁干扰与支架修正,这是常规风洞中大家都熟悉的修正项目。对于热线来说理论上采用了二元模型,热线必须有一定长度,即使这样两端也有热损失,但我们是希望测量点的速度脉动及其频谱,所以对于热线的长度要加以修正使之更符合实际实验所要达到的目的。在上述这两个方面,只有广泛地运用计算技术,这对近代实验科学可以说是一个革命,对实验空气动力学尤其是这样。上面的讨论可归结为下页的框图。

作为非接触气动测量的一个主要方面,是应用光学测量,激光的发展为进行细观的流场测量提供了十分有利的条件,尤其在定量化一方面。这里不妨回顾一下激光与物质相互作用的情况,看一看在实验空气动力学的领域中对激光应用的潜力作一估计。

激光与物质相互作用的研究属于量子力学范畴。经典地讲,当激光碰到气体分子或其它粒子时有三种相互作用的情况:弹性散射,非弹性散射和共振散射。

对于弹性散射,光子能量不变。当散射质点尺寸比入射激光波长小得多,且该波长远离任何吸收线时,此种散射就是熟知的瑞利散射(Rayleigh Scattering),它的散射截面 σ_R 与波长的四次方成反比而与质点体积的平方成正比。如果散射全部是瑞利型式,

则通过散射面积的测量就能得到质点数密度。随着质点增大, 散射面积随波长的变化逐步变弱。当质点尺寸比波长要大时, 散射截面即与波长无关, 此即所谓米散射



(Mie Scattering), 散射截面 σ_M 与质点的大小和分布有关。利用这一特点, 我们可以设法测出质点的浓度甚至是大小的分布。

这里还应当提到通常的色散现象或光的折射率。对于处在第 j 能级电子状态的分子, 折射率 n_j 为

$$n_j - 1 = \frac{N_j e^2}{2\pi C^2 m_e} \left\{ \sum_{k>j} \frac{f_{jk} \lambda_{jk}^2 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_{jk}^2} - \sum_{i<j} \frac{f_{ji} \lambda_{ji}^2 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_{ji}^2} \right\}$$

N_j 为 j 状态数密度, e 为电子电荷, m_e 为电子质量, f_{jk}, f_{ji} 和 $\lambda_{jk}, \lambda_{ji}$ 为相应的振子强度和共振波长。振子强度的计算是一个量子力学问题, 但光学方法亦可用来实验确定 f 数。当然这里的波长 λ 应远离各共振波长, 以避免吸收效应。

再补充一句, 如果散射质点是运动的, 那么就有大家都知道的多普勒效应。

在非弹性散射方面又可分成下面两种。一种是散射波长有一定的改变, 另一种是共振吸收重新发射的情况。第一种情况包括汤姆逊散射, 光子与电子作用时, 一部分能量给了电子, 使得光频率有所改变, 它的微分散射截面 σ_T 为

$$\sigma_T = \frac{r_0^2 (1 + \cos^2 \theta)}{2}$$

式中 r_0 为经典电子半径, $r_0 = 0.28178 \times 10^{-14}$ 米, 可以应用汤姆逊散射进行电子密度的测量。但更为重要的和发展得很迅速的是喇曼散射, 此时激光频率的变化, 是散射物质的特性, 而与激光原来的频率无关。通常散射质点吸收入射光子一部分能量, 其余的作为一个较低频的光重新辐射出去, 所观察到的谱线叫斯托克斯线。对于高温气体, 有

时能观察到频率高于入射激光的喇曼频率, 这些谱线叫反斯托克斯线。经典地讲, 喇曼效应是由于一个正弦振动频率为 ν 的电场与分子的极性频率为 ν_i 的相互作用, 这将产生一系列频率 $\nu - \nu_i$ 和 $\nu + \nu_i$, 喇曼散射截面 σ_{Raman} 为

$$\sigma_{Raman} \sim \frac{\nu_i^4}{1 - \exp \frac{h\nu_i}{kT}}$$

这量一般很小, 在常温下对氮 $\sigma_{Raman N_2} \sim 3 \times 10^{-34}$ 米²/球面度。所以只有在强激光发现后, 喇曼散射作为测量手段才获得实际应用。利用它, 可以判别组成成分、浓度和温度。

对于共振吸收散射, 只有当入射辐射频率与分子的吸收线或带重合时才发生。这时分子先跃迁到高能级状态, 然后继之以松弛过程, 发射荧光、吸收谱线带与分子能级图的详细结构有关, 它是分子的特性。由于共振效应, 共振散射截面(它与跃迁的振子强度 f 数有关) 要比瑞利散射截面大得多, 要大 10^8 到 10^{10} 倍。

这就启发我们考虑一种共振喇曼散射, 选择入射频率接近一个分子的电子状态跃迁频率 ν_1 , 则

$$\sigma_{共振} \sim \sigma_{非共振} \frac{\nu_1^2}{(\nu - \nu_1)^2 + \left(\frac{\Delta\nu}{2}\right)^2}$$

$\Delta\nu$ 为电子跃迁的线宽度。

应当指出在光波频率与共振频率接近时, 折射率就成为复数, 且在低于共振频率一边实数部分有一高峰。利用这一特点例如用钠光照、钠蒸汽可以获得较高的密度分辨率。

归纳一下每个质点散射截面的大小, 在通常情况下其量级(单位为米²/球面度)为:

σ_R	10^{-31}
σ_M	10^{-7} 对 $10\mu m$ 直径质点
	10^{-13} 对 $0.1\mu m$ 直径质点
σ_T	10^{-29}
σ_{Raman} (转动、振动)	10^{-31}
$\sigma_{共振荧光}$	10^{-20}
$\sigma_{共振喇曼}$	10^{-26}

上面只是指出了在气动测量中与激光有关的部分物理现象。我们可以利用这些现象和原理来进行气体速度、温度、密度、化学成份和粒子大小及分布等的测量工作。这方面还有很大的应用潜力。我们举激光应用作为一个例子, 为的是强调我们应该从近代物理的发展中吸取有用的东西来发展气动实验技术。非接触测量中相当一部分运用波束技术, 涉及到大量光学信息的传播与处理。现代的光学工程已进一步发展成光子学(Photonics), 这和电子计算技术结合将给实验空气动力学的研究带来崭新的局面。当然这需要我们搞实验空气动力学的, 搞测试技术计算机软件的和搞测试设备硬件的同志共

同努力。

2. 非接触测量有广泛应用的前途,但也有局限性,要用其所长,不要取其所短

我们大家都有这样的看法,气动测量工作是气动力工作中一个最薄弱的环节。但是,究竟薄弱在那里?当然首先我们会想到我们缺乏测试仪器,这是最薄弱的。这次会上有同志提到有了测试仪器并不等于解决了测试技术,并且提出要开展测试技术的理论研究工作。这里我顺便引用一下美国李普曼教授一九七六年在法国法德联合研究所召开的在流体流动研究中非接触式测量应用的会议上一段发言。他说,在这次会议上我们经常听到的一种提法是,这里是测试仪器,我们能用它来做什么,而不是这里有一个气动力问题,我们应当用怎样的测试技术来解决它。我想这两类问题我们都要考虑,但主要是考虑后一个问题,我们首先应该关心气动力问题。会上就有同志提出倒底有什么气动力问题,非要用非接触测量(例如全息术)来解决。

这些问题都是应该值得注意值得深思的问题。

以流场观测为例,是不是每次都要用全息干涉呢?对于生产性试验和一般低速风洞试验,我看这样做的必要性不大,事实上目前烟风洞所提供的拍摄流谱的照片如翼梢旋涡等结构,要比现有全息在一般风洞中照出来的看得更清楚。所以一些经过实践行之有效的办法要继续推广发展,象水风洞中流场观察的氢气泡技术等都可以进一步考虑。目前这些手段主要是定性的,但用一般照相就可给我们提供比较直观的形象。

下面我们再举几个具体的例子作进一步的分析。

(1) 为了测速是不是都要用激光测速仪?

以测量机翼尾流为例。七七年在英国皇家航空研究院看到他们研究机翼尾流的装置,他们用的是五孔、九孔探头。探头可以转动以测出气流的方位角 α 和 β 以及同时测出静压与总压。探头放在移测架上。此架有三个平动自由度,由步进电机带动,由计算机控制将探头移到空间的不同位置上。在每一横截面上画出等总压线,就勾划出了该截面的旋涡图形,作图也是用计算机完成的。实验的目的是为了更好地研究尾翼的位置和气动布局。他们只是用激光定位,定出起点的准确位置,而没有用激光测速。大家知道一套激光多普勒测速仪要好几万美金,常规的皮托管和测压仪器要便宜得多。

问题还不仅在投资多少。人们可以设想用激光测速仪来代替皮托管,现在我们对此做些分析。首先我们要考虑精度问题。从原理上讲激光测速是目前直接测量速度的几乎唯一的手段。皮托管是通过压力间接测量的。但是激光测速精度较低,目前最好的达百分之一,还有很多附加条件;而皮托管只要压力值够准,其精度可达千分之二。当湍流度较高时,激光测速的精度还要降低。即使我们假设粒子的速度能跟上湍流的脉动,例如若粒子尺度很小,比方说 0.5μ ,那末它大约可跟上 50KHZ 的频率变化。我们还要注意到,按粒子数取平均值与按时间取平均值结果是不一样的。一般说来这种速度偏差对最后数据处理的结果有直接影响。粒子滞后和速度偏差对某些情况可能不重要,但在有些情况就是个严重问题。通常计算粒子滞后是假设有某一频率的振荡速度扰动,列出粒子运动的方程,求出粒子能可靠地跟随的最大频率。但是湍流不能这样分解处理。湍流脉动不是振荡式而是涡旋式的。振荡式的平均结果是使粒子处于平均位置,具有平均速

度。涡旋式则产生漂移。如果我们有一个旋涡，粒子由于离心力而最终离开旋涡核心，那里就将没有粒子，也就没有激光输出的信号。这对机翼附近的流场还好说，因为那里的旋涡核心多少还可看成是定常的，然而对于大攻角地空导弹，旋涡本身是非定常的，并且到处移动，这个问题就不太好办了。顺便说一下在很靠近壁面附近有时激光测速仪也得不出信号来。这可能是由于衍射的影响。为了研究层流底层和湍流猝发的细致结构，用热线有困难，激光测速也不理想。

用激光测速仪有它的优越性。由于我们对飞行器要求高性能高机动能力，我们需要对分离流动进行仔细的研究。用激光测速仪测分离流动流场是一个好办法。因为如果采用热线风速仪等测速度，那末连气流方向也无法判别清楚。当然如果采用摩擦力元件，可以判别出分离点，但在流场中就不行。我们感兴趣的分离流动有低速大攻角分离区，前缘分离涡区，前向与后向台阶的分离区，跨音速激波与边界层分离干扰区，都可用激光测速仪进行广泛的测量。由于激波的存在，粒子速度变化有较大的滞后，跟不上气流速度的突变，所以在激波邻近的区域还要用别种测量手段加以补充。

激光测速仪适宜于用来测量旋翼的速度场绕叶栅的流场，因为在旋转系统中如果不采用非接触测量的办法，而在气流中放进传感器，测量结果是难于修正的。

激光测速仪可以适用于研究有引射的边界层。一般说来，研究高速湍流边界层时，采用激光测速是有利的。它能直接测量速度的脉动，用热线风速仪则密度、温度和速度的脉动都混在一起。

上面提到了粒子滞后给激光速度测量带来了限制，但是如果我们能控制粒子的大小，那末不同大小粒子所测出来的湍流脉动速度可以用来研究大尺度的相干结构。

(2) 是不是非要用全息干涉？

从目前情况看，从全息干涉图再现出来的阴影、纹影与干涉图象，往往没有直接用普通阴影仪、纹影仪与 M—Z 干涉仪照出来的相片清楚。全息干涉的一个最大好处是，很短时间照下来以后可以慢慢地细致地加以分析。事实上较简便的阴影仪照的阴影图反而比更贵重的纹影仪照的纹影有时更清楚，如激波、边界层及尾流等。主要看我们研究的目的性，例如用阴影仪还可研究湍流密度脉动相关。纹影仪也可以改进，搞成彩色的，一个简单的办法是采用多色滤光片代替刀口，这样根据颜色分布就可以判断密度增加或减少的方向。可见如果用全息干涉仅仅是为了得到二元定性的图象，那就完全没有发挥它的优点。采用全息干涉的重要目的就是为了解决三元流场的定性和进一步解决定量问题。为此就应该解决大视场角问题以便在 360° 内各个不同的角度再现。关于定量，如果认为光的折射与衍射可以忽略不计，导出的积分方程还是比较简单的。目前国外二元及轴对称有攻角的情况已得到解决。我们要首先解决这些较简单的问题同时带动图象处理技术和有关计算机应用软件的发展。全息干涉图的处理是一个很重要的课题。目前在国内还是手工计数，既不够准确又很费时。在一些密度变化大的区域，如强激波、高温边界层、高熵层等区和物体表面，要考虑折射以至衍射的影响，并加以修正。

(3) 电子束技术是不是有更多的用途？

对于低密度的气流流场，阴影仪和纹影仪的灵敏度就不够了，例如当密度与试验段

宽度乘积小于 10^{-4} 克/厘米² 时, 我们可以采用高压放电的辉光显示办法, 将模型作为阳极, 风洞壁某一部分作阴极。但是这种办法只能由光的强度和波长(色)的变化定性地作些判断, 所以又发展了电子束技术。实际上从电子加速到通过碰撞使分子达到高能级状态, 然后发出荧光的机理是相同的。电子束是一种贵重设备, 我们要很好研究它在气动测量中的应用, 不能仅把它作为流场显示的设备。对于某一荧光谱线的强度 I , 我们有如下与数密度和温度的关系:

$$I = \frac{C_1 n}{1 + C_2 n Q(T) \left(\frac{8}{\pi} RT \right)^{\frac{1}{2}}}$$

式中 n 为分子数密度, T 为温度, $Q(T)$ 为总碰撞淬熄截面, 此时设电子束电流与加速电势均为常数。如果分母中第二项很小, 可见强度与数密度成比例。事实上如果温度不高, 即使 $n = 0(10^{18})$ 上面这个方程基本上是线性的, 密度的变化直接反映在光强度的变化上, 时间常数几乎是零。用它来测密度脉动, 要比用热线风速仪测速度脉动的反应要快得很多。这样即使脉冲式风洞如炮风洞中, 都可以获得足够多的可靠的湍流脉动数值。有趣的是在较高温高密度情况, 光强度反映的是温度变化。一般情况下强度是密度和温度的函数, 正象热线风速仪不仅是反映速度脉动一样。但是, 这里我们可以对两条谱线强度进行测量就可以将速度和温度单独求出来。当然这里讨论的是比较理想的情况, 这里有很多二次效应没有考虑, 上面提到的公式也是在静态下得出的, 而在气流中有速度存在更重要的是有密度梯度或接近固体表面时, 都需要我们进一步做很多工作。从气动力上来讲, 直接测量密度脉动是很有意义的, 目前已有少量测量。结果表明, 在高超音速湍流边界层中, 密度脉动是一个大量, 象凡德雷斯特一九五一年所提出的湍流模型就不能适用于这一情况。

如果我们对谱线的强度搞清楚, 那末我们就可以测定转动温度和振动温度, 这对于研究低密度非平衡流是有用的。利用多谱勒位移和多普勒加宽可以测量气流速度和平动温度。当然应当再强调一下, 应用这些原理进行实际的测量工作是要付出很大很细致的并且是创造性的劳动的。

(4) 风洞模型自由飞技术和常规天平

高速摄影和图象处理技术的发展使得风洞模型自由飞技术得到日益广泛的应用。它本身是一个非接触式的, 它尤其适用于研究外挂物气动干扰的研究。法国宇航院为了研究外挂物气动力专门研制了测外挂物气动力的六分力天平, 并且可用计算机控制外挂物的攻角 α 和侧滑角 β , 在试验过程中可根据模型受力的情况, 通过运动方程算出并将模型移到相应的位置继续进行气动力测量。现在这一设备已正式投产。但是这种装置设计加工很复杂, 单是整个系统的调试就化了约三年时间, 这套装置一个实质性的缺点是支架干扰的影响仍然存在, 这在跨音速范围更是严重问题, 这恰好是自由飞的优点。所以如果采用动力相似或部分动力相似模型, 将模型在风洞中投放, 采用三个方向高速同步照相以获得模型的位置与姿态。通过多次重复试验可取得大量的模型重心位置和 α 、 β 及滚动角 γ 随离散时间变化的函数。通过优化准则和统计的办法, 例如对运动方程利用

最佳的微分拟合就能把静态与动态的气动导数全部求出来，而不仅仅是象六分力天平那样只能测静态气动力。

事实上还有很多例子，如在尾流区打开降落伞、尾旋试验等都可以发挥高速照相的优点。这里的图象判别当然比简单的一维情况要复杂得多，读下来的数据还要根据情况作予先处理，光学修正。这里只是说自由飞技术应用的潜力应该充分利用。

(5) 对随控布局飞行品质的研究

这是近期飞机空气动力学研究的一个重要方面，如研究主动控制抑制颤振可以应用差分激光全息或激光多普勒效应测机翼的振动，给出信号操纵控制面。这样可以进行亚临界试验，通过振动实时分析，在发生颤振以前就可以停止试验，一方面避免危险性，一方面可以缩短吹风时间。

上面只是举几个例子说明近代物理和计算技术的发展对实验空气动力学所起的部分作用，同时注意发挥每种手段的长处。

3. 发动群众，进一步解放思想，充分利用非接触式测量的优点，勇于实践，在实践中不断发现问题，深入进行使用研究使其不断完善，赶超世界先进水平

(1) 要开展新参数的测量研究

为了提供理论计算的模型必须对流动机理、流动现象作细观的研究，需要而可能测量的参数种类越来越广。有些是对老参数新测量方法的研究。下面以利用激光为例考虑若干重要的参数测量。

开发涡旋运动的研究直接进行旋度的测量。激光测速仪可直接测出沿某一方向设为 x 方向的速度 u ，用光学的办法同时在离该点在 y 方向为 Δy 一点上的速度，我们可得到 $\frac{\partial u}{\partial y}$ 。类似可测得 $\frac{\partial v}{\partial x}$ ，这样我们就可得出旋度的一个分量

$$\xi_z = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}$$

李普曼 1976 年就提出了上述设想，目前尚未见到有系统的测量结果发表。

利用激光的喇曼效应测出一点的瞬时温度，同时用激光测速仪测出该点的瞬时速度，这样我们便可得到速度温度相关系数如 $\overline{v'T'}$ ，这对于我们研究湍流传热是非常重要的。

应用激光测速仪可以获得很多以前用热线风速仪测得的各种自相关，互相关，如湍流的雷诺应力和各种频谱，三元或多元关联函数，这里牵涉的问题只是正确地处理激光输出信号。

(2) 要在测试技术中采用新材料新工艺

非接触测量多数采用电磁波束，理论上讲可包括全部波段，可见光、红外、热辐射甚至 X 光与 γ 射线。关键是要将各种光的信号记录下来。当然可以用照相记录，但是它反映的非线性关系和不能实时处理是很大的缺点，所以需发展新型的纪录材料。这次会上提到了光导热塑料，特别是上海硅酸盐所研制的电光晶体，它是一种掺铁的铌酸锂，它能实时记录和读出，衍射效率高（可接近百分之百）分辨率可达每毫米四千对线，可反复使用多次。有很高的存贮密度及角度选择性，能完成深部多影线存贮。目前这种材

料只能用于氩离子激光器。在红外及远红外可以应用热电探测器，采用热释电材料如钽酸锂、铌酸锶钡等。

对于温度的反映还可以提到液晶，这在国外已有商品出售。

光导纤维的应用也应引起我们的注意。利用光导纤维消光敏感器与热线风速仪结合可以测量速度与浓度关联。

(3) 要发展专门的数据处理应用软件，并且结合特殊的采样技术

例如近十年来发展的湍流测量中的条件取样，为了消除噪声干扰的锁相位技术或所谓相关技术。不过近来发现很多半导体器件、激光器件等的噪声功率谱，在低频时跟频率的几次方成反比，这就使得锁相位技术的应用受到限制，这样就需要研究专门的数字滤波亦即用计算机专门软件的办法来取得真实的信号和需要测量的参数。

非接触测量在实验空气动力学中的应用潜力是很大的。当前我们和国外水平的差距表现在四个方面：测试设备的精度低，元器件的可靠性差，缺少必要的数据库系统，尤其重要的是实验空气动力学的研究工作开展得很不够，几年来都偏重于型号的生产性试验，正由于实验研究没有深入搞，型号试验分析工作也就有很大的局限性。

上面谈了一些个人意见。关于下一步工作，我基本同意 89950 部队和到会同志讨论的意见。重点是开展光学（包括红外光谱技术），尤其是激光技术在流场和飞行器模型参数测量中的应用。要加强定量分析工作，对记录下来的模型轮廓，流场的阴影、纹影、干涉全息图形，光频率及光敏元件反映的灰度，热敏元件反映的温度分布等，进行自动判读和处理以给出精确可靠的数据。具体说有：三维流场的定量研究，同时加强常规流场的观察；模型自由飞测定静动导数技术；激光多普勒测速仪的应用；热成像的研究等。

总之，这次大会的收获是很多的，达到了预期的目的和要求。

同志们，我们的会议就要结束了，希望代表们能把会议的精神带回去，为了壮大我们的国防事业，为了早日实现四个现代化，预祝同志们在各自的工作岗位上大力协同，取得丰硕成果。让我们高举毛泽东思想伟大红旗，在以华主席为首的党中央领导下，团结起来，努力奋斗吧！