

空气动力学和水动力学测试技术 及仪表的新发展 (II)

J. Paulon

法国国家航空航天研究局

5 温度测量

同压力测量一样，测量流体温度及输运该流体管道的管壁温度，一般来说也是必不可少的。为此，多年来就有一些使人满意的，安全可靠的测量设备。然而，当新方法有了发展的时候，新问题的出现，就必须修改现有设备。

5.1 电阻探头 法国电力公司通用技术局 (EDF-DTG) 利用老式电阻探头(铂电阻)发展了一种适用于槽道或管道中水温测量的专用自动数字式量热计^[33]。这种仪器以电脉冲形式输出信号，它很适合于把数据收集在能够进行自动处理的存储器中，或者应用于具有显示功能的远距离传输。工作原理建立在 100Ω 铂电阻探头的使用上。铂电阻放入 Wheatstone 电桥中，把电阻并连在串连电阻的对面分路上，以使桥路平衡。

这些电阻之间处于二进制关系，它们由脉冲发生器起动的二进制计算机转接。

因此，电桥不平衡的微电压，随输入的脉冲数据线性地变化，当达到平衡时，脉冲发生器停止工作。因此该仪器发射出的脉冲数与探头电阻的变化即与温度成正比。

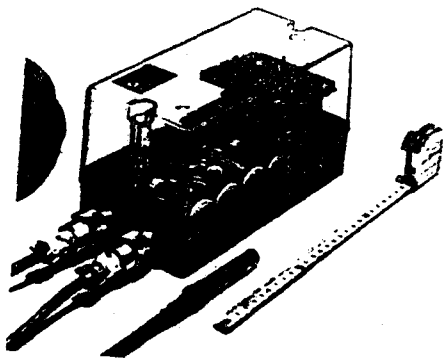


图 36 电阻探头数字式量热计

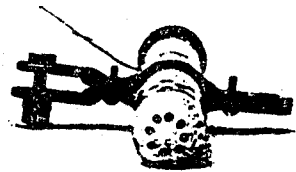


图 37 “鲑鱼”探头

该仪器分为两类：①如图36所示的盒式顺序数字磁记录仪的量热计，目的在于监视给定点上的温度变化；②“鲑鱼”数字式量热计（图37给出一个实例），目的是确定一段水流和渠道的温度图。这类量热计的其中一种称为“4线”型量热计，它是为了使电阻探头具有互

换性，在其基础上发展起来的一种新型量热计。其特性综合于表 9 中。

表 9 法国电力公司通用技术局电阻探头特性

测量范围	0°C—40°C
灵敏度	0.1°C
精度	在测量范围内 0.3°C
工作温度	-30°C—+50°C
输出信号	逻辑编码或脉冲至 2.5 kHz
响应时间	0—250ms
连接电缆	50m

5.2 薄膜传感器 由于需要精确估计涡轮机叶栅的热交换，法国航空航天研究局研制了薄膜温度传感器^[4,34]。它们来源于前面提到的压力薄膜传感器的发展，是基于存在于两种金属接头上的热电效应。两种金属以薄层沉积在电介质基座上并部分地互相重叠，如图38所示。

在两个薄膜温度计之间放置一绝缘层，即可做成一个适用于稳态工况下对流传热的梯度通量计（图39）。

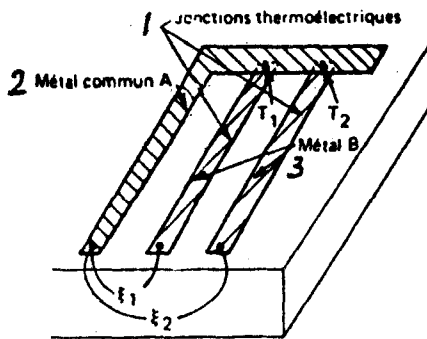


图 38 薄膜温度传感器原理图
1 温差热电偶接头 2 公用金属片A 3 金属片B

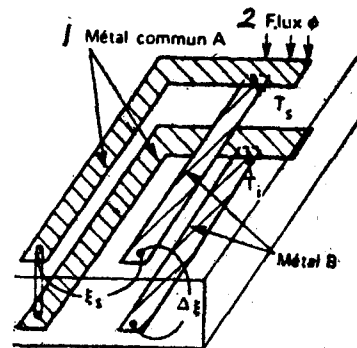


图 39 薄膜热通量计原理图
1 公用金属片A 2 通量 φ 3 金属片B

我们提醒一下，这类传感器的制作，与薄膜压力传感器的制作相同，不需特殊加工。应该指出，铜-镍热电偶是用真空蒸发制成，而铬-康铜热电偶是用阴极溅射法制成。表 10 综合了薄膜热电偶的特性。

表 10 薄膜温度传感器的特性及其同老式热电偶的比较

热 电 偶 特 性		铜-镍		铬-康铜	
		丝	膜	丝	膜
系 数	a, μVK^{-1}	21.89	15	58.7	36.9
	b, μVK^{-1}	1.54×10^{-4}	3.18×10^{-2}	8.62×10^{-2}	10.2×10^{-2}
0 至 $100\mu\text{VK}^{-1}$ 的特 征线斜率		23.2	17.6	62.4	45.3
a 的偏差, %		—	±10	±0.5	±15

如表10所指出，薄膜热电偶的灵敏度低于相同材料的丝式热电偶的灵敏度；另一方面，生产这一支薄膜传感器到生产另一支，其灵敏度是不相同的。

薄膜热电偶的特点可归纳为两点：①必须标定；②必须保护好薄层和实心丝的连接点。

我们从这类传感器的应用观点举出实例：NACA65系列对称翼型的吹风试验。在翼型上沿弦长装有28支薄膜热流计。试验的目的在于精确估计气体-翼型传热系数。图40给出理论计算和实验结果比较。可以看出，表征传热特性的 Stanton 数的估计值在层流时与实验结果符合很好。

第三种类型的薄膜热传感器已研制出来。它是一种分析气流边界层的传感器（图41），是由沉积在 Kapton 片上的随温度而变化的金属电阻膜构成。

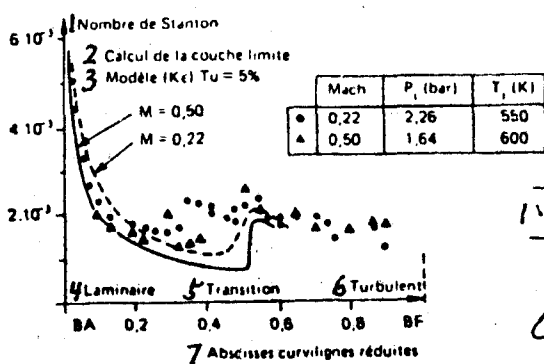


图 40 气体与沿翼型弦长之间传热系数的理论值与测量结果的比较
1 Stanton数 2 边界层计算 3 模型 4 层流
5 转换 6 湍流 7 约简曲线横坐标

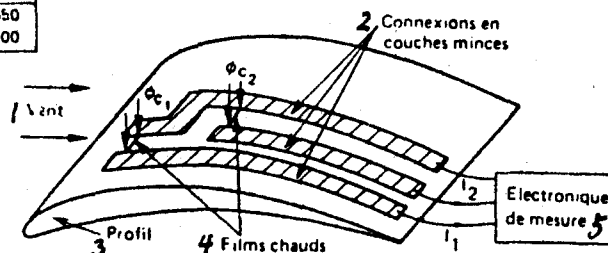


图 41 分析边界层的探测器
1 气流 2 连接薄层 3 翼型 4 热膜
5 测量电子线路

电阻膜被 Joule 效应加热并稳定在一个确定的温度上。有流动时，电阻膜由于对流而被冷却。当边界层的厚度减小时，对流传热将减小。为使电阻膜维持在一个恒定的温度上，需给膜输入功率，功率值就给出边界层厚度的信息。还可以估计出边界层的湍流度。

5.3 红外线 红外摄影机分为两大类：①定量探测和光机扫描（最常使用的）红外摄影：分辨率为每线100来点和半帧上100条线，可进行温度的精确测量；②热电探测和电子扫描（很少使用）红外摄影：因为性能低，它只能用于材料的质量检查。

视频信号的数值化和图象处理有了很大发展。校准、从辐射传递的简化方程出发的温度换算、经过滤波的图象分析、阈值、伪彩色编码、图象的分离和平均等等的软件，已被摄影机生产者商品化了。目前的趋势是把它们同 IBM PC 微机兼容的信息系统联系起来。

线分析仪也大量出现了：单点探测器和单个光机扫描可以获得直到100Hz 频率每条线有上100个点的信息。这些仪器最初是为生产过程（冶金，造纸，焊缝检查，……）中的红外检测而研制的。信号的利用和采集是使用装在微机中的软件完成的。

在红外高温计范围内，光导纤维的应用使得有可能测量隐藏的或很难直接观察到的目标发出的辐射通量。光纤尤其是透明的光纤（氟化玻璃纤维，硫化物玻璃纤维）在红外技术中的应用是目前正在研究的课题。

5.4 光导纤维 光纤的出现给诸如燃烧室中的高温测量和电子技术领域中遇到的测量

带来有效方法^[36]，这是因为光纤具有耐高温、绝热、对干扰不敏感和尺寸小的特点。

已用四种原理制作了仪器：①用收集光线进行测量的仪器，已有市售（例如 Photonetics）；②通过光致发光来测量温度的仪器，已有三种产品商品化了（瑞典的 ASEA，美国的 LUXTRON，日本的 OMRON）；③用限于低温（0℃—100℃）的光导变化进行测量；④通过光的吸收和散射变化的原理制作的测量仪，市场上已有出售。

还应当指出，在探测沿光纤的热点的可能性方面出现了美好的前景。

5.5 反 Stokes 相干 Raman 散射 Maker 和 Terhune 于 1965 年，在芳香液体中第一次对反 Stokes 相干 Raman 散射 (DRASC) 现象作了观察。后来，它被主要用于光谱，特别是固体的光谱的研究。70年代初，利用这种 Raman 散射无干扰地进行化学分析的思想在法国航空航天研究局萌生了。稍后，在那里第一次进行了火焰温度及浓度的测量。这些可行性的证明，促使该方法在法国航空航天研究局得到迅速发展。从1975年起，这种方法也在世界各主要的燃烧研究实验室发展起来。

如今，这方面的内容总结起来就很丰富了。各种各样通常是开创性的实验由于这项技术的应用都作得很好。特别是，在燃烧器和燃烧室研究方面取得了大量有实际意义的结果。最初，为化学反应介质的热力学诊断而研制的仪表具有很广阔的应用范围：等离子体、光化学、分子束的研究，以及纯气体的 Raman 光谱分析。分辨率的高增益和 DRASC 所允许的采集速度使谱线分析变为容易得多。实际上，所有透明介质（液体和固体）都可以研究。为了所有这些应用，已经研制出一种仪表。这种仪表得到法国航空航天研究局的许可，由 SOPRA 集团生产。商业上，它可自由处理，从现在起有三台样机在法国和国外投入使用。

6 液体高度测量

至于水位高度的测量，有基于压力测量的或利用浮标或超声波的各种等级的仪表。

最近，Artémis 研制了一种集成电路电容的测量仪^[31]。这种仪器输出与液体沿探头的水平高度成比例的电流信号，以便远距离测量和记录。

用振幅和频率跟随一种液体的自由表面的运动，同样可测量两种液体的分界面的高度。按照下述的大量用途有各种不同的探头模型：水工实验室；研究中心；物理模型；试验平台；在工业、工地、河流和港口等等场所的测量。

表 11 给出了水工实验室用的 L 型探头的特性。

表 11 L 型探头的特性

测量范围	在 5 个等级中，对于 $\pm 10\text{pF}$ 至 10000pF ，负荷 $\leq 700\Omega$ 时 $\pm 10\text{mA}$
通带	0—100Hz， 0—10Hz， 0—1Hz， 0—0.1Hz
电源	10/14V 直流或 20/30 直流、交流
探头	直径 0.2mm，长度可调节，校准与温度和盐度无关

另一方面，进行 Ariane 火箭燃料箱中的燃料高度的测量必须校准超声波仪，测量超声波从一个传感器到液面往返所需的时间（图 42）。

压力传感器尤其是有限容量压力传感器性能的改进，使得有可能发展精度接近于 10^{-3} 的静水位计。

法国电力公司通用技术局用市售的压力传感器制作了一台这种设备 (Druck, Sedcmc)。传感器为一小尺寸的柱体。它包含对密闭容器容量敏感而与变流器电压-电流相关的组件。

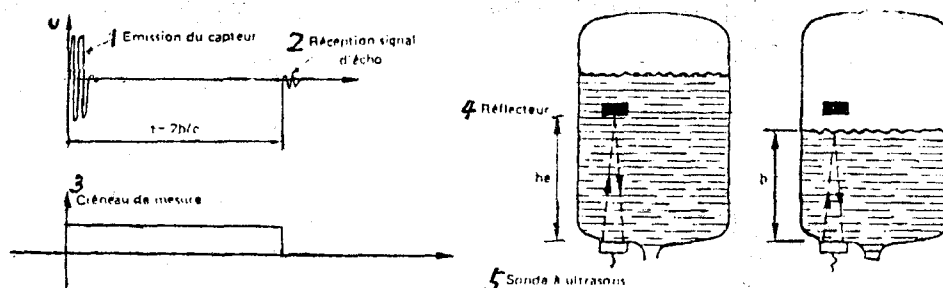


图 42 Ariane 运载火箭燃料高度的超声测量

1 传感器发射信号 2 接收的回波信号 3 测量的矩形脉冲波 4 反射器 5 超声探头

水位是靠放在电缆中的一根毛细管引出得到。

这套全密封装置固定在一根管子与测点位置同高度的端头上，管子插入装有过滤网的套管中，这样可使传感器浸没在水中和精确定位。在离测点很远的地方（直到 1km 远），仅需两根导线就可进行测量，而不受电源回路中电阻器接线端子的限制。

该装置所达到的精度为 10m 水深时误差约 1cm^[38]。

法国电力公司通用技术局利用超声传感器研制一种仪器来测量水厂的水位（水厂的上游和下游的水平面）。仪器固定在吊杆上而放在水平面上方的空中。测量距该水平面的距离，其方法是测定传感器发射的声波到水平面和固定目标以及反射的往返经历时间。该仪器的精度约为 ±5mm。

7 水质测量

除有必要控制饮用水质量之外，还必须用下面三小节所列举的各种方法来测定由于工业废水和废弃物所引起的江河、海洋的污染。

7.1 浊度 液体的浑浊是由于液体中存在微粒而引起的。因此，它只能用各种不同的方法^[39]尤其是前述的光学方法进行测量。

自从有了 Jackson 蜡烛浊度计以来，铂丝法或乳香点滴法有了重大进展。

光散射浊度计基于以下原理：将一束光照射装有含悬浮物液体的透明小瓶时，不论从哪一个角度观察这个小瓶都可以观察到液体的浑浊。入射光碰到一个微粒时，就会在所有的方向上散射，其散射光是粒子数目的函数。

如果我们分析 90° 的散射光，就可得到一种叫做散射浊度计的仪表。

按照粒子的尺度（粒子直径与光源波长之比），光散射的角度分布有明显的变化。

为连续测量起见，大多数浊度计都建立在图 43a 所示的原理基础上。不过此系统需考虑光源的偏移、窗口的污染和二次散射。为了修正这些误差，已研制出一个光源的双光束浊度计（图 43b）。

仅有中心散射光才能被探测器接收，浊度由与反射光信号有关的测量信号给出。

另外，这类仪器装配了考虑到某些特殊问题如水泡和污染物的特殊装置。

浊度的测量单位有许多种，最常用的是每升水中含 SiO₂ 的 mg 值或二氧化硅的 ppm 值。

目前，市场上已有多种不同原理的仪器出售，我们可举出一个例子，即最初测量总浊度（溶质浓度和悬浮物浓度）的装置，它可精确到 10^{-1}g/l 的量级。

它的工作原理是让流体在一根构成音叉元件的管子里流动，探测出系统的共振频率变化，这种变化直接与总浊度相关。

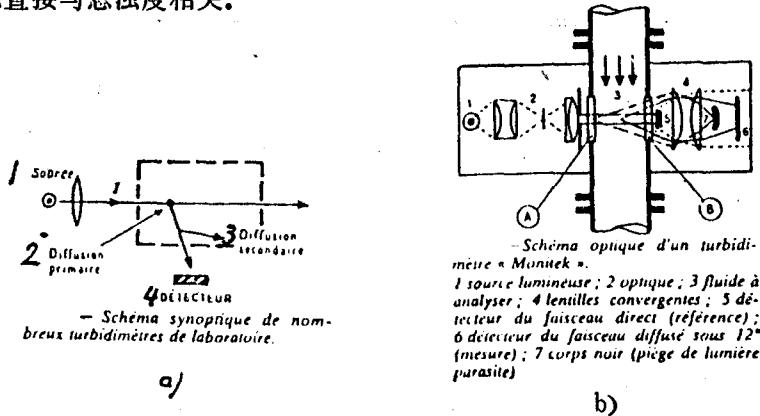


图 43 浊度计原理示意图

- a) 实验室许多浊度计示意图
 1 光源 2 一次散射 3 二次散射 4 探测器
- b) Monitek 浊度计光路示意图
 1 光源 2 光束 3 要分析的流体 4 会聚棱镜
 5 定向光束（参考）检测器 6 12° 散射光束（测量）检测器 7 黑体（干扰光阱）

表12概括了若干目前市场上可自由选购的各种原理的仪表。

这类仪表有各种各样的用途：饮用水的监测；啤酒质量的检查；植物油的检查；酒的检查；锅炉用水的检查；造纸用水的监测；城市废水的监测；煤油检查。

表 12 市售浊度计一览表

制造厂商	原 理	制造厂商	原 理
Degremont	光 散 射	Walton	
Thermanalyse	用共振频率测量密度	Automation	不 透 光 性
Instrulab	共 振	Industrie	
C. E. M.	光 散 射	Industel	不 透 光 性
Kontron	光 吸 收	Fabre	光 吸 水
Soptel	光 散 射	Bestobell	
Safas	分光光度计	Mobrey	
Wilson	光 散 射	C. E. A.	光 子 散 射

7.2 河水 为了法国电力公司的需要，已建立一些控制站并装备在某些核电厂里^[40]。这些控制站由三个溶解氧电导率和 pH 值测量系统和一个温度测量系统构成。

工作原理是：四个传感器和一台循环泵装在一个浮筒上（图44），电导率和 pH 值传感器安放在一个循环腔里，循环腔固定在与浮筒相连的密封盒内；温度和溶解氧传感器放在测量舱里。

测量信号由电缆传输，电缆布置在包括发射机、指示器和记录的仪表柜所在的地方。

测量以 300Hz 方波信号供电的两个石墨电极之间的液体的电阻来确定电导率。测量范围为 0 至 1000 μ s/cm。

用两个专用电极测量 pH 值：一个玻璃电极有一个厚壳，另一个作为参考的电极可用半固体的氯化钾 (KCl)。电解集结点是硬木制成的小圆片，它仅能使离子扩散。高阻抗和低阻抗信号被放大后送至发射机。

测量标度按位置分为 6 至 11 或 5 至 10。

用装在桥路一臂上的摄氏零度时为 100 Ω 的铂电阻进行温度测量。测量标度为 0 $^{\circ}$ C 至 50 $^{\circ}$ C。

溶解氧的测量是一种极谱的测量；氧气扩散穿越聚四氟乙烯薄膜而进入金阴极和浸在电解液 (KCl 2M) 里的银阳极组成的测量单元。测量范围为 0 至 20mg/l。

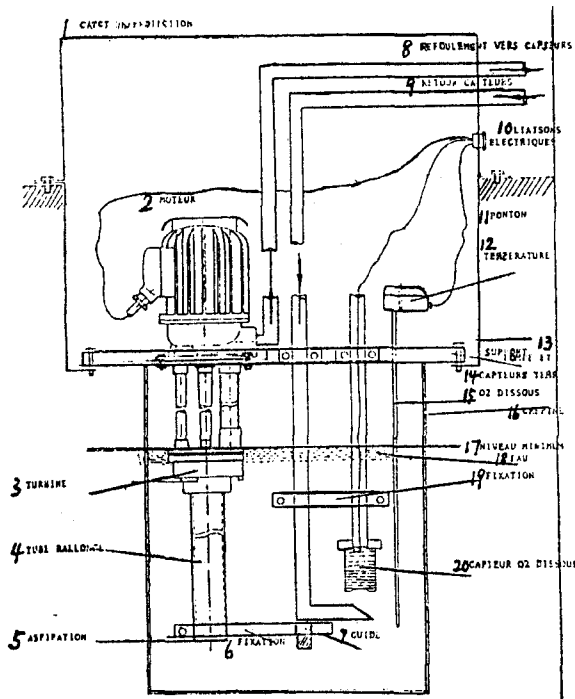


图 44 河水监测站 (测量电导率、溶解氧、pH 和温度)

- 1 保护罩 2 马达 3 涡轮 4 延长管 5 吸液
- 6 固定装置 7 导向件 8 从传感器排水
- 9 反回传感器 10 电子线路连接 11 浮筒 12 温度
- 13 支架 14 泵和温度传感器 15 溶解氧
- 16 过滤网 17 最低水位 18 水 19 固定装置
- 20 溶解氧传感器

测量数据由自动电位记录仪记录，并存储起来以便以后处理。

7.3 生物量 一般来说，无论在海洋或淡水和咸水中植物浮游生物的生物量，都是通过测量叶绿素的浓度 a 来确定的。

所谓降解指数能说明叶绿素 a 的部分降解^[41]，以及跟踪浮游植物随时间和空间的变化。

在水流中的藻类和细菌的生物量如同净化站中淤泥生物量一样，可以用提取每个活细胞内三磷酸腺苷 (ATP) 并测定其含量进行估计^[42]。最近，Nancy 水文研究所正瞄准一个能用不同过滤法分别测量藻类的 ATP 和细菌的 ATP 方法。

这一测量生物量的方法由法国电力公司作了实验，结果是令人满意的，图45给出一个实

例：确定空气冷却器中杀死微生物的处理效率的实验结果。

把人工支架放在有空气冷却器的循环水中，测量沉淀物的 ATP 可以检查氯气对 沾污管道和冷却器的生物污垢的作用。如图 45 所示，ATP 率在最初 2 小时减小很快，这对应于最大的处理效率。

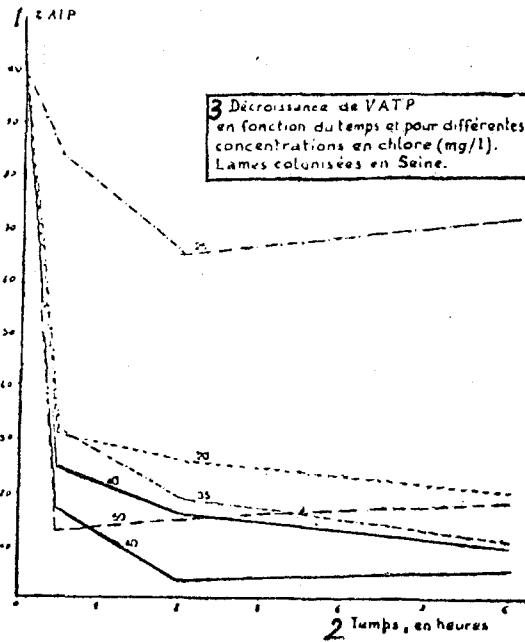


图 45 三磷酸腺苷随着时间的增加而减少
1 三磷酸腺苷 (%) 2 时间 (小时) 3 对于不同的氯气浓度 (mg/l), ATP 随时间增加而减少的情况。薄片置于 Seine 河中

8 二 相 流

在二相流中，可单独进行一个参量的测量或集中几个参量如粒子的尺度和速度同时进行测量。我们将把所有测量方法收集于本节。即使可能碰到以前曾叙述过的一些方法，但我们还是认为把方法集中在一起为好。

8.1 粒度测量方法 法国研究中心 (CNRS) 从 1967 年至 1977 年就开始收集有关此课题的图书和文章，特别是最近 P. Hamelin 对此作了调研^[43]。

8.1.1 全息摄影是用于确定雾滴、气溶胶中的液体或固体微粒尺度的光学方法之一。

法国电力公司瞄准这一技术^[44]。它能一次记录，构成物体的三维图象。

在有粒子如均匀介质中悬浮的小水滴的情况下，使用图 46 所示的线路图；首先全息摄影记录 (46a)，然后绘制图象 (46b)，由此图象得到水滴的尺度。

此技术可同时确定速度。只要在同一底片上在两个不同时刻进行全息摄影就够了；借助于接近于 2.5 至 50 μ s 的两次脉冲的红宝石脉冲激光器，这是很容易实现的。

本方法有许多优点：绘制空间图象；直接测量；光学上简单；高分辨率；大容量的分析；尽可能相对高的速度。

然而，当涉及远距离、背景噪声、粒子密度、光学质量和读数分析相对缓慢时，它有一些局限性和必须遵从的条件，

此方法成功地应用于下述不同条件：消防水龙射流；翼型上水膜的分离；机械喷射雾化；气动喷射雾化。

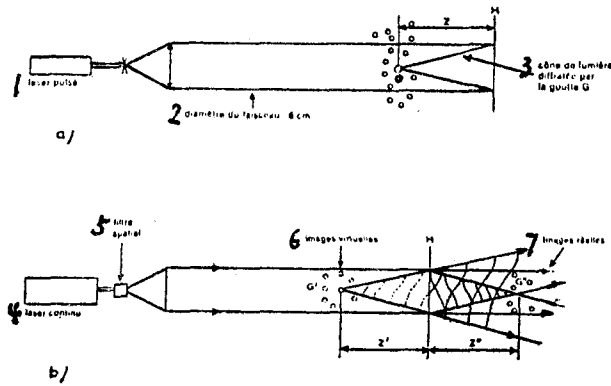


图 46 全息摄影原理示意图
1 脉冲激光 2 光束直径6cm 3 水水滴G衍射的锥形光束 4 连续激光
5 空间过滤 6 虚象 7 实象

8.1.2 另一种测量液滴尺度的光学方法是建立在光束穿过小雾滴时的强度衰减基础上的。在群体散布的情况下，强度衰减由下式给出：

$$\frac{I}{I_0} = \exp\left[-\sum_i n r_i^2 n(r_i) K(r_i, \lambda) L\right]$$

其中 $n(r_i)$ 是半径为 r_i 的液滴数， $K(r_i, d) = K(2\pi r_i / \lambda)$ 是 Penndorf 吸收系数。

对于计算所求粒度分布，上述表达式是不够的，还需要利用几个波长所得到的信息。大量测量所使用的波长就能得到更高的精度。

8.1.3 第三种光学方法是建立在光衍射的基础上。我们研究单色平面波碰到各向同性和均匀球的衍射。在透镜聚焦平面上所得到的衍射图形（即球的 Fourier 变换），只与障碍物的几何形状有关而与其性质无关。我们得到明亮和阴影相间的环状图象，其强度从中心向外逐渐减小。这种图象称为 Airy 函数。

原则上，此种方法只是对于大小为 5 至 10 倍照射光波长的较大尺寸粒子有效。否则，必须应用通常的 Mie 理论。实际上应用这种技术有两个方法：一个个粒子的计数法；总和方法。

第一个方法适用于低浓度粒子，但测量时间较长，需精确校准。此外还必须已知速度。

第二个方法适于实时测量。它使用简单，标定方便，并可用于高浓度粒子的情况。然而，其数学处理复杂，得到的绝对值浓度不大精确（参看 Cilas 粒度计）。

8.1.4 第四种光学方法建立在由粒子衍射所获得的频谱分析基础上。表示为频率函数的散射强度的测量，在计算之后得到衍射粒子的平均尺度和密度。如果尺度的分布不超过平均尺度的 30%，这种方法就能给出恰当的结果。测量时间需用 1 分钟。最后，实验粒子直径的最低界限为 $0.2\mu\text{m}$

8.1.5 第五种光学方法在于利用激光测速仪。基本思想是利用交替的 Doppler 信号并把它同粒子尺度联系起来。另一方面，此方法假定，只有单个粒子穿越测量体积。这就是说，粒子的浓度是有限的^[43,45]。这种技术得到了充分发展且具有许多变种。

8.1.6 最后一种光学方法即阴影法，是把激光直接或通过光学滤波引向光电管。光强由下列表达式给出：

$$I_2 = I_0 \exp(-2r^2/r_0^2)$$

一个很小的光栅安置在光电管的对面，只接收光速的一部分： $r < r_0$ 。

当光电管接收如此限定范围的整个光束时，我们可以适当地调整它的输出至饱和度以下。

只要接收器离粒子相当远或粒子直径大于波长，则光衍射或非衍射的粒子的到达实际上堵塞入射光。

为避免信号的饱和，光束直径应该大于粒子的直径。此方法测量迅速。

8.1.7 除以上这些光学方法外，还有一个测定泡尺度的声学方法。此方法是建立在频率为 20kHz 至 200kHz 之间声波衰减和色散基础上的。

在 0.5ms 间发射一个正弦波列，然后在示波器上收到回声。

此方法对于有限浓度是有效的，可在泡径为 30 μ m 至 800 μ m 的介质中进行测量。

最大缺点是：粒子并不一定通过波束中心。这就是说，一般只能测量尺度很小的粒子。

8.1.8 最后，我们提一下一种称为量热学的方法。使用电子量热探头（对于湿蒸汽的测量）能使蒸汽干燥；已知消耗功率时，就能从理论上推算出浓度。

法国电力公司使用这一技术进行了各种实验^[46]。

8.2 气泡速度 法国电力公司把激光测速技术应用于二相流的研究，在含有高浓度氢气泡的液态钾流中测定了气泡的速度^[47]。这些气泡直径的变化范围为 4 至 120 μ m，对于很小的粒子，其浓度达到 10⁸/cm³，速度可测到 mm/s 的量级。

最近，法国电力公司还发展了这一方法^[48]。

同样，可用此方法测量水流中大尺度（直径约 5mm）的空气泡速度^[49]。关于前述的散

射干涉法应用，干涉法改善了信噪比，但在现在的情况下，由气泡再发射的光绝大部分是向前的。

实验台的采集系统使得可用计算机存储传送来的“频率”信息并即时或待以后处理。

对于这类二相流应用了一些信号处理的特殊方法。用热膜测量也获得了很好的印证。

8.3 浓度

8.3.1 生存率 法国电力公司已着手用光纤探头测定置于二相流的管束中的一个相的生存

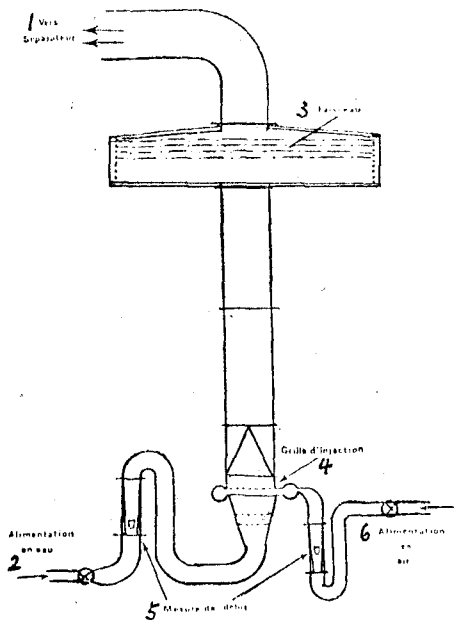


图 47 试验弯管示意图

1 分离器 2 供水 3 管束 4 注入栅
5 流量测量 6 供空气

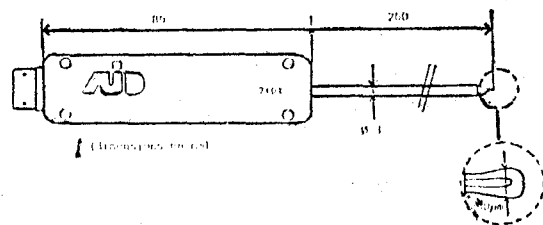


图 48 光纤探头示意图

1 尺寸 (mm)

率^[49]。一个相相对于另一个相的生存率的测量将逼近于两相之间的滑移速度。在图47所示的试验弯管上借助于图48所示的光纤探头进行了这种测量。这种探头的工作原理是基于在光入射和两种介质的折射率的某些条件下光线在屈光面上的反射特性。

探头由环状光纤组成。光在一端发射出去。当介质是空气时，光不发生折射，而沿着环状光纤传播，便于在另一端探测。

输出电压在空气中为5V，在水中为0V。

此探头已用于对不同流量截面的管路中、渠道上游处和管束中的测量。

因此可强调指出：流动的两相之间有值得注意的流动结构，使得在流出的平板上出现两个区域（图49）；管束的存在不改变截面上的积分量。

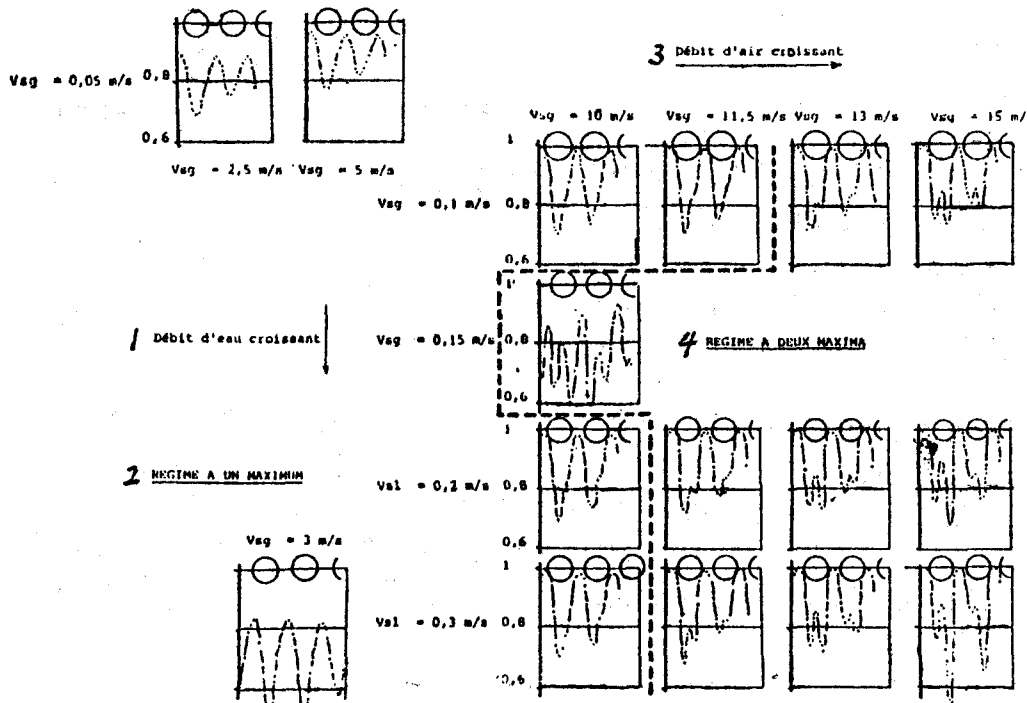


图 49 生存率随空气和水的流量的变化
1 水流量增加 2 一个最大的状态 3 空气流量增加 4 两个最大的状态

8.3.2 空隙率 如图50所示，二相流可能表现出三种极端流型：均匀流；分层流；“柱塞”流。

我们最感兴趣的是处在何种情况。有一个经典测量方法：“ γ 射线照相法”（用 γ 射线的吸收法进行测量），但它对空隙率的时间和空间脉动是很敏感的。

一种“2 能量”的 γ 射线照相的新技术在法国电力公司研制出来了^[50]，并用于图51所示的二相流泵试验台上的测量，

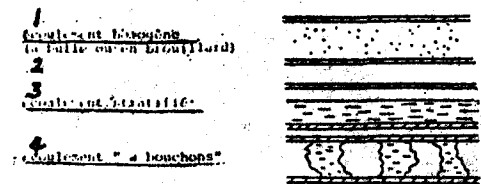


图 50 二相流的可能流型
1,2 均匀流（气泡或雾滴） 3 分层流 4 “柱塞”流

试验从15至20秒逐步进行,对压力、次数和温度作平均,然后利用这些平均量来估计以100KeV和40KeV表示线性的空隙率以及实际的空隙率。

因此,我们可以指出,明显地存在着具有很大的脉动(柱塞流型)作用和非常均匀的状态。

还有另一种测量空隙率的方法^[51]。它是通过稀释不挥发的放射性示踪剂进行测量的一种方法。把这种示踪剂连续地注入测量段的上游,它很容易同流体混合,在气体相出现之前首先直接测量单位体积的放射性。这是一种参考测量。然后,测量实验段流体体积的放射性,就可以得到空隙率。

上述两种方法各有其优缺点,可以期望在可能的测量中相应地使用这两种方法。

如果只能使用一种方法,那么 γ 射线照相法将适用于低于90%的空隙率,而稀释法适用于超过90%的空隙率的情况(假定忽略滑移)。

法国电力公司正在研究一个用 γ 射线断层摄影术来测定管道内空隙率空间分布的方法。

同样,必须使用被Grenoble的AID和Marly-le-Roi研制的二相光学探头。其测量原理是建立在设置于流动中的光纤末端上光反射系数的变化的基础上。浸在液体中光纤的末端反射的光比在空气中的少。这种效应可以鉴别在光纤末端的介质的相,探测出蒸汽泡的通过,确定液体管道中光纤附近气泡的比例。综合每个探头测量的数据就可以得出流动的整个空隙率。

8.4 大气测量 生产电力的大型热电厂的热量排放对大气有影响,预测和鉴别这种影响是很重要的。因此,需要铅直和水平测量某些参数:温度,湿度,水的含量,液滴大小,

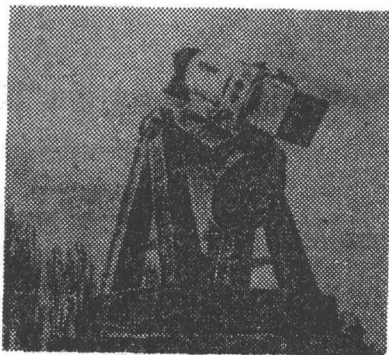


图 52 激光雷达外观

图52给出这种仪器的外观,

• 412 •

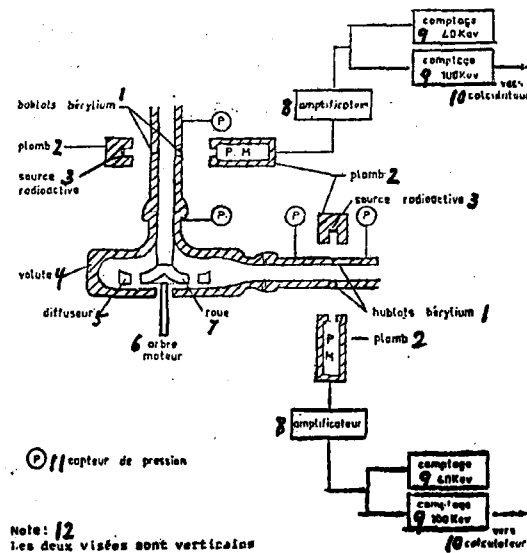


图 51 “2 能量” γ 射线照相法测量试验台
1 铍窗 2 铅 3 放射源 4 蜗壳 5 扩散器
6 驱动轴 7 叶轮 8 放大器 9 计数 10 通入计算机 11 压力传感器 12 注: 两个观测均为铅直的

空气速度和太阳辐射。表13所示的用于这种测量的装置是相当经典的。

研究大气冷凝缕流的另一种方法是激光雷达^[52]。这台仪器包括一个能发射20ns的脉冲激光,其最大频率为20Hz。直径为30cm的望远镜收集激光通道上的水滴及气溶胶散射的光子。一个快速分析器每50ns就能将来自光探测器的电信号校准并使其数值化。这些数值信号通过微机记录在软盘上。微机在测量周期内完全处于运行状态;转盘位置方位角运动和结果显示。

地图绘制可能要要进行几十分钟,

表 13 测量的参数和相应装置的特性

	传 感 器	测 量 的 参 数	测 量 范 围
温 度	Rosemount	温度 (参考)	$\pm 40^{\circ}\text{C}$
	INAG 快速探头	温度 (快脉动)	$\pm 2^{\circ}\text{C}$
水/蒸汽含量	Cambridge	露点 (参考)	$\pm 50^{\circ}\text{C}$
	Bendix (hygristor)	相对湿度	5—95%
	Lyman α	水/蒸汽含量(快脉动)	0—20g/m ³
水的总含量	通过液态水蒸汽的 Lyman α (INAG系统)	水的总含量 (蒸汽+液体)	0—20g/m ³
液态水含量	Johnson Williams	液 态 水	0—6g/m ³
液 滴 粒 度	Knollenberg FSSP 100 OAP 200X	按尺度大小的液滴数	分 15 级 0.5—8 μm 1—16 μm 2—32 μm 2—47 μm 20—300 μm
风速的平均分量	SAGEM MGC 30	姿态角度 (横滚和俯仰)	$\pm 15^{\circ}$ $\pm 45^{\circ}$
	Girouettes	风的相对入射角	$\pm 20^{\circ}$
	Crouzet Schlumberger	静 压 压 差	0—1100mb 0—50 mb
	Doppler 雷达	速 度 (地面)	0—500 m/s
风 速 脉 动	热线 INAG	速度的快速脉动	45—100m/s
辐 射	压力计和 辐 射 计	直接或相对辐射通量	0—1500W/m ² 0—750 W/m ²

9 显 示

在空气和水中经常使用的各种不同的显示方法，可获得精确的流动情况并构成对建立数学模型必不可少的物理图案。这些方法虽早已熟知，但我们认为略为回顾一下不是没有好处的^[53]。我们可列举一些显示方法：绒毛或丝线；在壁面上涂油或某些物质以显示二次流；

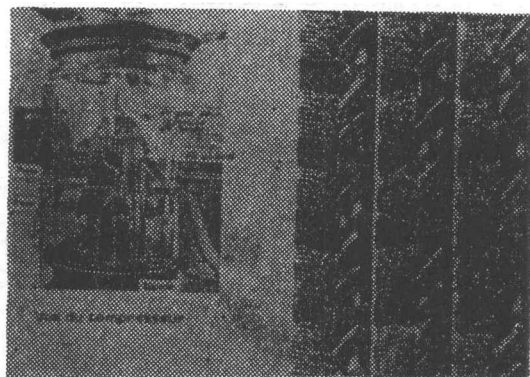


图 53 烟线显示 (旋转分离流状态)
1 压缩机

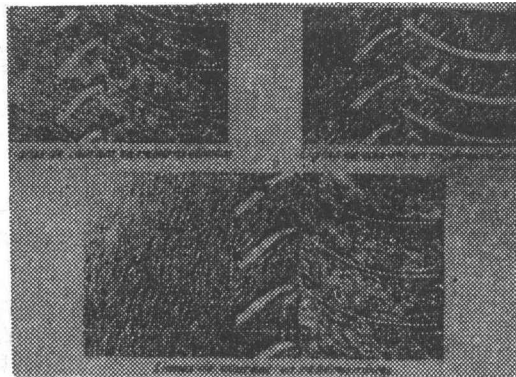


图 54 微粒显示运动叶栅中流动状态 (水力学相似)
1 绝对坐标中流线 2 相对坐标中流线

随边界层状态或温度高低发生变化的某些化学物品；烟线，图53给出应用此法显示轴流风机中旋转流动的实例；固体微粒（hcstafon，铝粉，塑料小球），图54就是该方法用于亚声速运动叶栅中流动的显示（水力学相似）的例子；颜色线，图55给出了应用实例，水力学相似显示了透平固定叶栅近壁处的二次流动；空气泡，显示流线和分离（图56）；由水电解得到的氢气泡或氧气泡，其释放可局部化和灵活调整。

同时对于显示某些现象必不可少的照明技术也取得了新的进展。这就是应用激光获得比用灯泡和光学系统得到的老式片光源更薄更强的片光。



图 55 用颜色线显示透平固定叶栅的二次流
(水力学相似)

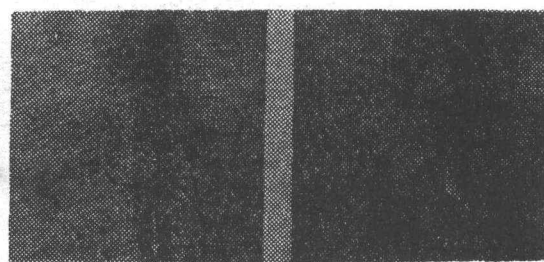


图 56 用空气泡显示轴流压缩机内的流动
(水力学相似)

10 数据的传输、采集和处理

至此，我们已考察了如上所述的测量方法或测量的参数以及获得这些信息的方法。在旋转机械中，相对流动的测量总是感兴趣的。这需用探头或旋转测量的仪表并提出了关于信息传输的问题。

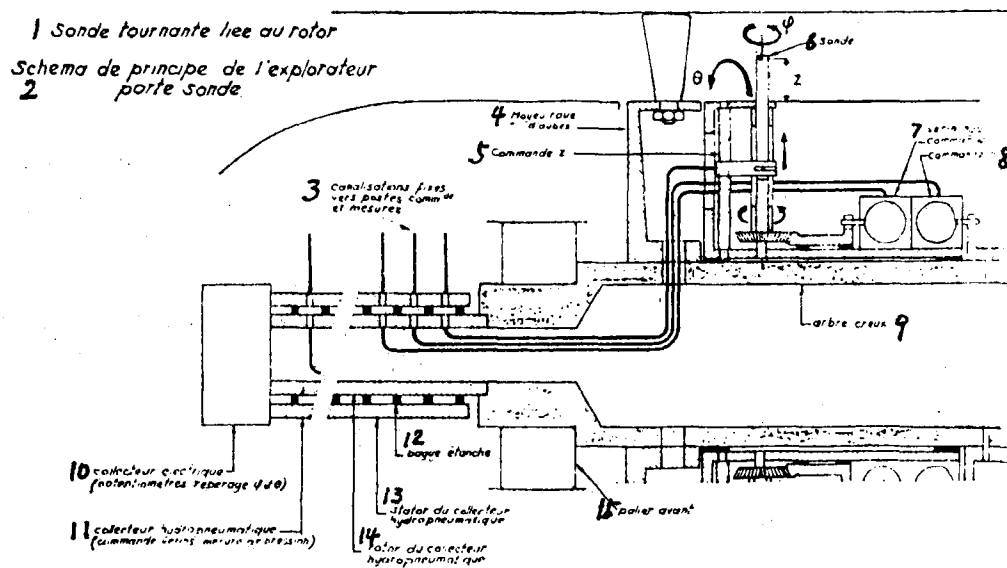


图 57 旋转探头的探测装置

- 1 与转子相连的旋转探头 2 带探头的探测原理图 3 通向控制台和测量的固定管道
4 叶轮毂 5 控制z 6 探头 7 千斤顶控制 8 控制 9 空心轴 10 电力式收集器
(电位计定位 φ 和 θ) 11 液压-空气式收集器(千斤顶控制, 压力测量) 12 密封圈
13 液压-空气式收集器定子 14 液压-空气式收集器转子 15 前支座

为此，过去几年发展了各种方法，我们将匆促地回顾一下这些方法。

①使用旋转探头的探测装置^[7]，其原理如图57所示；

②传输动叶片上压力测量的压力涡轮转换器^[8,9]（图58）；

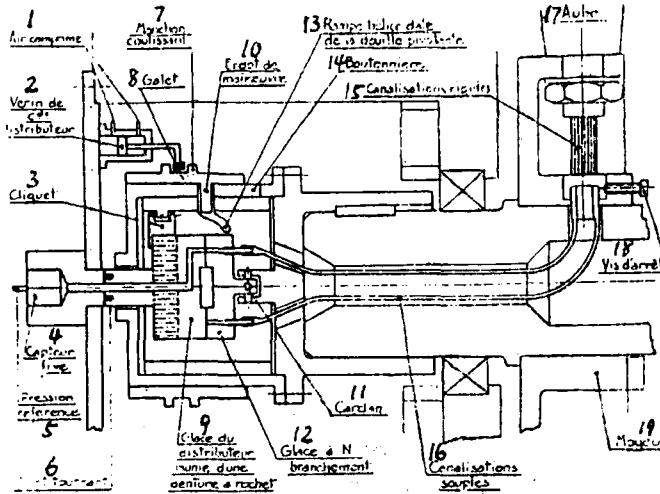


图 58 压力涡轮转换器

③电刷或水银旋转接触器，图59给出一个实例^[54]；

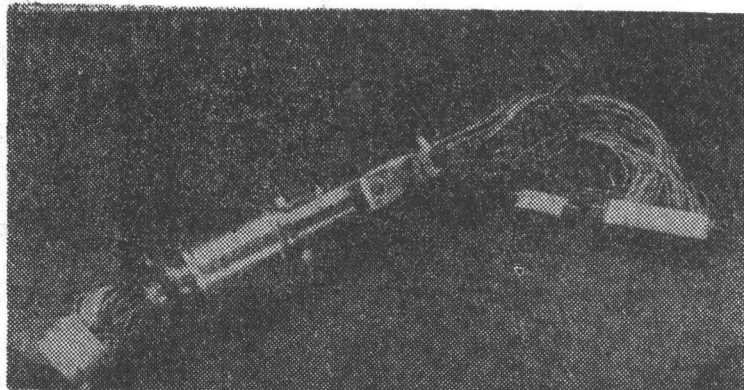


图 59 电刷接触器一例

④遥测装置^[54]，图60为原理简图；

⑤图61所示原理的“波萝”形发射机^[55]；

⑥旋转扫描阀^[56]，其原理如图62所示。

几种遥测装置已在法国电力公司通用技术局研制出来^[57]。

关于数据采集和处理，这是一个超出本文范围的极为广泛的问题。工业上有许多考虑迫切应用的解决方法：多种手段、水平、通带、存储方式、所希望的处理方式，等等。

可以指出，几个系统的实例前面已经提到，其他例子在某些参考文献中已有叙述。

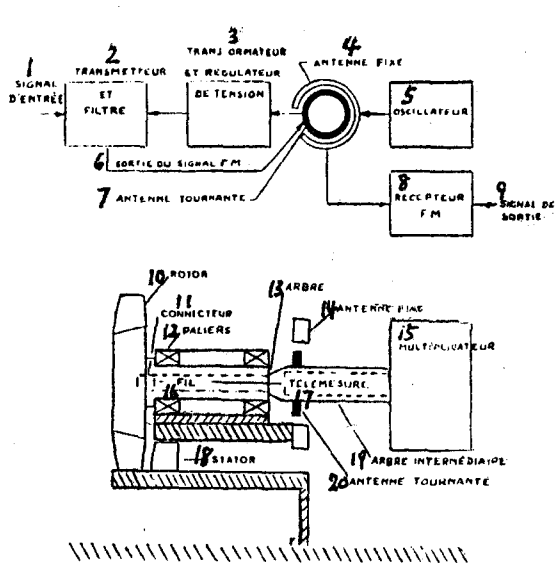


图 60 遥测装置原理图

- 1 信号输入 2 发射机和滤波 3 变压器和电压调节器
 4 固定天线 5 发生器 6 信号FM输出 7 旋转天线
 8 FM接收器 9 信号输出 10 转子 11 连接器 12 轴承
 13 轴 14 固定天线 15 倍增器 16 导线 17 遥测
 18 定子 19 中间轴 20 旋转天线

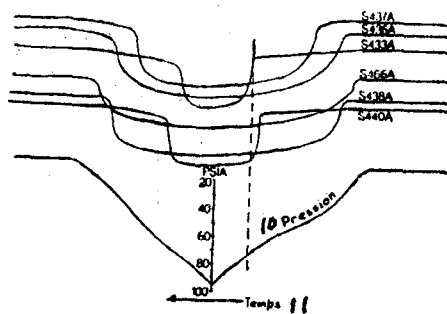
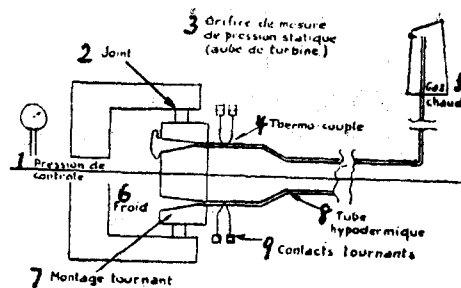


图 61 “波”形发射机原理图及典型信号

- 1 控制压力 2 接头 3 静压测孔 (透平叶片)
 4 热电偶 5 热气体 6 冷却 7 转动装配
 8 皮下管 9 旋转触点 10 压力 11 时间

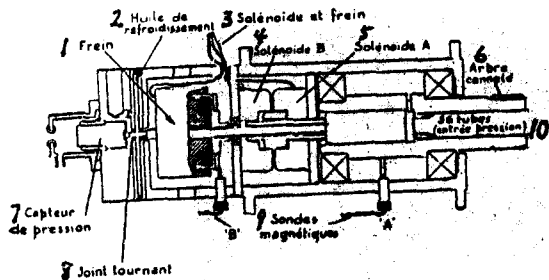


图 62 旋转扫描阀

- 1 制动器 2 冷却液 3 制动线圈 4 线圈 B
 5 线圈 A 6 带槽轴 7 压力传感器 8 旋转接头
 9 磁探头 10 36根管子 (压力进口)

11 结 论

由于受到某些专业范围的限制,对最近几年来发展的测量方法的回顾是非常不完全的。同样,为了不过分地夸大,在设备的性能、应用的限制和随意使用方面都未触及到。

然而,本文表明,研究者、实验室工作者和工业家们在利用各种各样的研究方法以便更好更细致地了解空气和水的流动现象,这正是本文所追求的目标。

这些方法中的某些是特别有用的,但一般来说也是非常昂贵的。重要的是要很好制定试验项目的规划,以便尽可能合理地完全确定所要达到的目标及其有关的测量方法。

参 考 文 献 (57篇, 略)

鄂学全译自: *La Houille Blanche*, 42, 6 (1987): 411—445.

(董务民校) (略有删节)