§4.16 各种测速形式的传感器性能比较及其发展方向

1．速度测量类型

(1) 以物体机械运动形式分类

(*a*) 移动速度(线速度)

(*b*) 转动速度(角速度)

(2) 按速度测量的参考基准分类

(*a*) 绝对速度。以惯性参考系或地面作参考。如绝对振动速度、宇宙飞船速度、汽车速度等。

(*b*) 相对速度。以某一运动物作为参考。如桥梁两端相对振动或变形速度，机床主轴相对床身运动速度，管道中气体、液体、粉体的流速，飞机相对于空气的空速等。

(*c*) 速度与波速之比。物体运动速度或波源速度与波速之比。如空气动力学和航空学中的马赫数测量等。

当然这种划分虽不是绝对的，但是这种划分对于传感器力学模型的建立、结构设计、标定方法等都有所裨益。

(3) 按速度的数值特征分类

(*a*) 平均速度(或平均速率)

(*b*) 瞬时速度(或瞬时速率)

在工程测试中，有时速度的方向不太重要，或是已知的。如轧钢带速等。而主要感兴趣的是速度的量值大小即速率。有些场合则要求指出速度的方向和量值。如导弹飞行速度、飞机升降速度、精密位移工作台移动速度等。

为了较精确地了解物体的运动状态，通常需要连续测量各个时刻的瞬时速度即速度的时间历程，以便精确积算物体的位移或确定其在空间的坐标位置，以及实时提供速度反馈控制信号(如 $P.I.D$ 控制系统)。有时则只需测出某些特殊时刻的瞬时速度。如平锻锤打击锻件前、后瞬间的速度，弹丸出口初速，材料冲击试验中落锤接触试件瞬间的速度等。

当用统计方法比较和计算运动快慢或流量时，或速度变化不大时，常采用测量平均速度的方法。如车、船行驶的平均速度，管路和阀门内的液、气流的平均流速，管道内粉体大量

粒子的平均速度等。

(4) 按速度信号获取的方法分类

(a) 直接将运动速度变换为输出信号。如动圈式、电磁式测速传感器，交直流测速发电机等。它们直接将速度转换成模拟电压信号。多普勒式测速时，传感器将速度转换成脉冲频率。

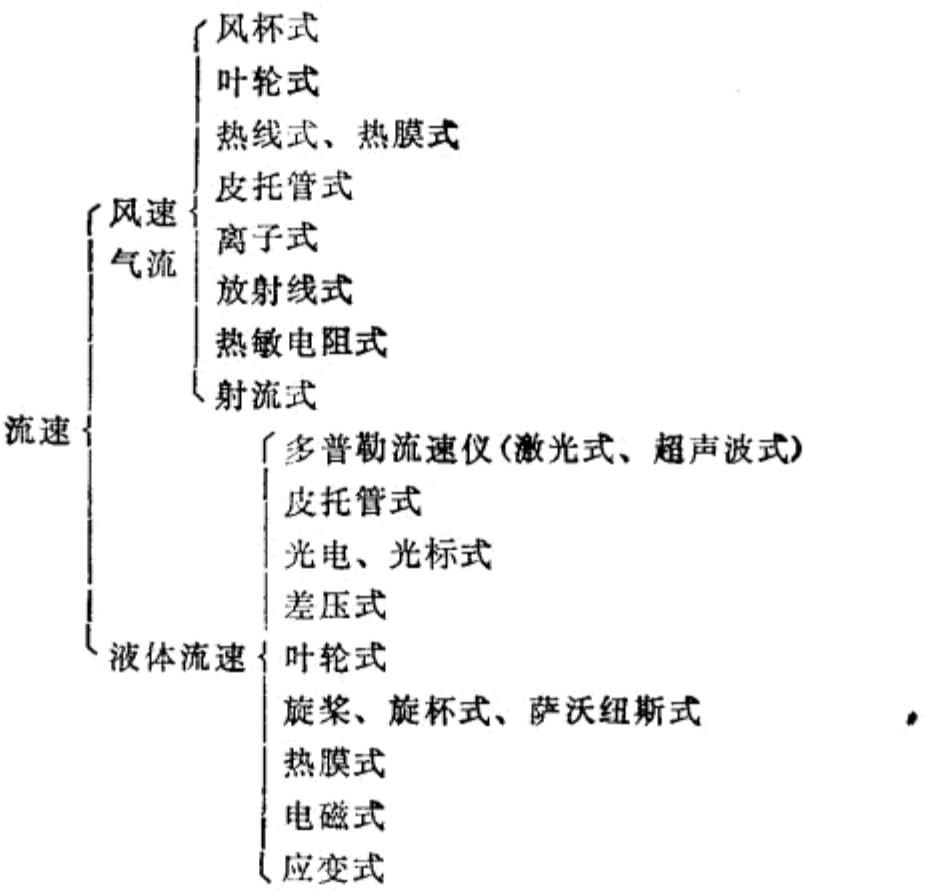
(b) 用物体运动的位移时间历程进行微分运算而获得速度时间历程。它基本上是采用位移传感器和微分器。其好处是不必制作专门的速度传感器，缺点是微分运算会加强高频干扰信号。如在运动物体上附加某些特殊或等距标记(如凸、凹槽齿、黑白条纹等)，采用位移传感器获取脉冲信号，用测试脉冲频率的方法来进行测速，这也是一种常用方法。这种方法常用的位移传感器有电涡流、电容、电感等。

(c) 用物体运动的加速度时间历程进行积分运算而获得速度信号。这种方法特别是在运动物体周围不易获得位移和速度测量参考物时尤为优越。如空间飞行器的惯性制导系统都采用此法。因为加速度是在运动物体上不借助于外界参考物就能测量的唯一参量。其缺点是积分运算器的漂移误差和积累，以及低频干扰分量的加强。

2．速度测量方法

将机械运动速度及流速的主要测试方法归纳如下：

- 机械运动速度
  - 转速
    - 测速发电机：直流、交流
    - 离心式转速仪
    - 频闪测速仪
    - 数字脉冲频率法
      - 示速器圆盘
      - 光码盘
      - 光栅
      - 圆形感应同步器
      - 磁电式传感器
      - 电涡流传感器
      - 电容式传感器
      - 磁敏电阻
      - 光电式
      - 霍尔开关式
    - 空间滤波器
    - 角速度陀螺
      - 转子速率陀螺
      - 压电陀螺
      - 激光陀螺
      - 光纤陀螺
  - 线速度
    - 动圈式
    - 电磁式
    - 多普勒效应测速(激光测速、测速雷达等)
    - 相关测速
    - 空间滤波器
    - 数字脉冲式
      - 码尺
      - 直线光栅
      - 直线感应同步器
      - 磁栅
      - 电涡流式
      - 电容式
    - 差动变压器式



3．各种测速形式的传感器性能比较及其发展方向

(1) 电感式　它是利用电磁感应原理，有动圈式、动铁式及可变磁阻式不同结构。

动圈式可以测绝对速度(如动圈式绝对振动速度传感器)，也可测相对速度。一般特点是结构简单可靠，灵敏度高，传感器输出阻抗低。其缺点是测量距离较短，仅在几毫米至几十毫米范围内，传感器的体积、重量大。动圈式和动铁式常用于振动速度测量，灵敏度为300～600mV/cms^{-1}。

可变磁阻式的体积小，灵敏度低，是非接触式测速。其输出灵敏度随间隙而变化，输入输出是非线性关系。永磁体对被测铁磁物的吸力较大，影响被测系统原始状态。多用于转速测量，输出转速脉冲信号。

(2) 电涡流式、电容式　它们是利用在被测物上设置等距标记，如凸齿、凹坑，以测量线速度和转速。传感器的结构简单，体积小，可靠性好。

(3) 光电式　它是利用挡光盘或反光黑白条纹，以输出脉冲，选用精确时钟，测速精度高。制作某种特殊标记线，还可从脉冲形状上判断移动或转动方向，或提供转轴位置的信号。光电传感器及数显仪器的结构简单，体积小，测转速范围宽。它们广泛作为便携式光电转速计使用。

光码尺或码盘直接输出位移或转角的数字编码，便于和计算机联接处理。配以精确时钟，测速精度高。但传感器较复杂，价格较高。它常用于计算机自动控制系统。如精密转台中提供角度和速率反馈信号。显然能精确测量位移的光栅(圆光栅和直线光栅)传感器以及磁栅、容栅、感应同步器等，它们通过测脉冲频率都能测量转速和线速度。其测量精度较高，电子线路较复杂。

(4) 多普勒测速　它是利用波源和目标之间的相对移动速度与多普勒频移成正比的原理。这种测速方法广泛用于多普勒雷达、近程或远程测量飞行器和移动目标的速度，探测水下目标的活动，测量物体大行程移动的线速度或带状物连续移动的线速度。其测速范围宽。如双频激光(或双路声光调制式)测速系统达0～16m/s。这些测速装置比较复杂，成本较高。但随着激光、光纤及光、电集成技术的发展，其测速领域会不断扩大。微型雷达速度计已有

商品出售。

(5) 相关测速 在物体运动过程中，以某种方式(如光电、地磁场等信号)获取有一定时间差的两个随机信号，利用它们互相关函数的特性而测定其平均速度。将其中先出现的信号自动延迟，当到达某一延迟时间 τ_0 时，二信号波形完全一致。此时其互相关函数出现极值。采用极性相关器和极值调节器以求取延迟时间 τ_0，经运算处理可直接测出速度。在测量2.5m/s的钢带速度时，精度可达 0.1%。测量飞机地速在 120 英里/小时时，精度可达 0.5%。

相关测速可以采用非接触方式，而且不需在被测目标物上作任何特殊标记，即可测量高温物体的运动速度(如热轧钢带)。测量车辆行驶速度时，不受车轮打滑影响。测量船舶和飞机的运行速度时，基本上不受水流及气流速度的影响。相关测速是一种很有发展前途的测速技术，国外已用于测轧钢带速，飞机地速，靶速等。

从原理上可知，相关测速要有两套特性相同的传感器。这是很难完全达到的。另外还要给出已知的标定距离 l。通常距离愈大，精度愈高，但测量装置所占空间也愈大。而且 l 太大会削弱 $u_1(t)$、$u_2(t)$ 的相关性。特别是测管路内粉粒流速时，如 l 过长，二测点处粉粒密度状况变化就增大，反而降低了测速精度。因此，l 必须折中选取。测出的 v_a 是平均速率，l 愈小，v_a 越接近瞬时速度。

(6) 空间滤波器测速 它是采用对空间频率具有一定选择性的栅格式空间滤波器，将相对移动背景的随机光强变化转换成窄带随机信号，其中心频率正比于相对运动速度。从而将移动速度的测量转换成为频率的测量。可以采用相关法测频或采用频率一电压转换器。

这种传感器可以测直线速度，也可以测转速。而且在测量目标上不需作任何标记，只利用目标表面的自然不规则性。这与相关测速法类似。和相关法明显不同的是它无需设置两个距离分开而特性相同的测量传感器，只需在一处测量即可，减小了整个测试装置的尺寸及安装上的困难。

空间滤波器测速是一种非接触式测速方法。早在四十年代初，就用于航空摄影中作为 V/H(速度/高度)传感器，对照相机曝光进行精确的速度修正，以保证图像清晰度。经过几十年的不断研究和发展，近年来国外已出现测量汽车行驶速度的空间滤波器传感器和仪器商品。国内有关部门正在积极地进行研究。

(7) 速度陀螺仪 机电式角速度陀螺仪，电位器输出。这种速度陀螺传感器的测速精度不高，并有机械回转部件和轴承件，寿命较短，加上精度要求较高。

压电式速度陀螺具有各种结构形式。如振梁式、双晶片式、圆管型等。用压电振动体代替陀螺转子、框架等传统部件，工作寿命长，能承受恶劣环境影响。圆管型结构简单，可靠性高，成本低，特别适于批量生产，应用在精度要求不太高的稳定系统中。

激光陀螺是新型的陀螺仪，它在国外发展已比较成熟，国内也做了大量研制工作。它没有转子回转件，无摩擦，不受重力加速度影响，可瞬时启动，具有数字输出，可方便地与计算机配合。测角速度范围大，理论上可达 10^{-6}～2000 度/时。承受振动能力强。主要用于惯性导航系统。

光纤陀螺是最近引起国内外很大兴趣的新的研究方向。它没有活动部件，没有非线性效应和低转速时激光陀螺的"死区"，可以制成性能/价格比较高的传感器件。目前还处在研制阶段。

(8) 风速传感器 多用热线式风速仪，由于热丝热惯性小，响应速度快。要求直流供电或高频供电($f>100$kHz)。缺点是气流速与传感器输出之间为非线性关系，需要线性化处理。

风轮式风速仪，多用于气象、轻工等部门，精度较低。

激光多普勒流速仪(*LDV*)，可直接测量透明管中流体的流速和风速，精度较高。但设备复杂。为了判别流向，现已采用双频频移式激光流速仪。激光多普勒流速仪广泛应用在流体力学、生物医学、空气动力学等方面，以测量流速、流场、血流等。随着光纤传感技术、声光、电光调制技术的发展，激光 *LDV* 有着宽阔的开发和应用前途。

动压式空速传感器，常用皮托管等。多用于飞机的空速、马赫数测量以及风洞风速、热工学的风速测量。当空速较低时，精确度较高。在超音速时，由于冲击波的影响，要根据马赫数作必要的修正。

不透明管中流速可采用差压式、电磁转换脉冲频率的涡轮式等。涡轮式精度高，量程范围宽，灵敏，耐高压，结构小巧，电信号输出装置与流体无接触。缺点是涡轮轴易磨损，使用 2000～3000 小时就要更换转子轴承。

各种形式的速度传感器的主要技术性能汇总列于表 4.16.1 中。

表 4.13.1　　各种形式的速度传感器的主要技术性能表

原　理		量　程	精　度	线　性	分辨率或灵敏度	优　　点	缺　　点
磁电式动圈		±1～±15mm	≤10%		600mV/cm·s	中频响应好（10～500 *Hz*），灵敏度好，可测绝对运动和相对运动。	尺寸、重量较大
复合式	电涡流	电涡流传感器2mm	5%	±5%	8V/mm	可同时测出轴的绝对运动，相对运动，壳体绝对运动。涡流传感器频响范围宽，0～10*kHz*。	尺寸、重量较大
	磁电式	磁电式传感器0.8mm		±3%	500mV/cm/s		
转子陀螺		±30～120°/s	＜±2°/s	0.6～2°/s			
压电陀螺	振梁	±5～7200°/s	短期漂移＜0.001°/s 长期漂移＜0.01。/*h*	1%（满度）	0.001°/s	稳定可靠性好，适用于恶劣环境。	
	双晶片	±30～±300°/s	2%	0.1%（满度）	0.04°/s	寿命长，响应快，线性好，价廉，可抑制振动和加速度干扰。	
	圆管型	±60%	长期漂移＜0.02°/s	0.3%		结构简单，易批量生产，成本低，可靠性好。	
光纤陀螺			稳定性 0.03～0.04°/*h*			没有活动部件，性能价格比高。	

续表

原理		量程	精度	线性	分辨率或灵敏度	优点	缺点
风速测量	电晕离子式	1～20m/s	21m/s			无机械磨损，惯性小，灵敏度高。	传感器不能在混有导电介质的气体中使用
	射线离子式	0～20m/s				灵敏度高，能很快反应风速方向变化，能感受不同风向的风速的横向风量。	
	热敏电阻式	低速档：0.04～3m/s 高速档：2.5～3m/s	±4%		反应时间3～10s	频响好，稍加改装，可测瞬时风速。	性能不稳定，测头分散性大，标定及读出系统复杂
	热线式	0～20m/s	<1m/s		滞后<5s	灵敏度高，结构简单，体积小，测量范围大，响应快，对介质不敏感，性能稳定。	
流速测量	旋桨式	0.02～4m/s				使用方便，适于在清水中使用。	旋桨体积大，对水的扰动较大。水质较差时，影响测量准确性
	萨沃纽斯转子	3m/s	1%		0.02m/s	使用海水中，精度高体积大	体积大
	热膜式	1～20m/s				测量范围大，灵敏度高，探针体积小，可测紊流边界层流速	为接触式测量，对流场有干扰
相关测量						非接触测量	
空间滤波器		1.5～250 km/s	±0.2% 总和 ±0.5%	±0.2%		无需二套特性完全相同的传感器	
测速发电机		20～400 转/分		0.2～0.5%		结构简单，性能稳定，输出信号大	
示速器圆盘		25×10^4 转/分				结构简单，可测高转速，易于编码和计算机接口	
差动变压器测速		±(10～200)mm/s				漂移小	测低速
离心式转速表		20000转/分	1～2%			结构简单，不受电磁干扰	不易远传测速

参 考 文 献

〔1〕《非电量的电测量》(中译本)，〔苏〕诺维茨基主编，机械工业出版社，1983年12月，第一版。

〔2〕《工程师物理学》(中译本)，〔英〕丹尼斯·埃尔韦尔、安东尼·波因顿著，天津科学技术出版社，1983年7月，第一版。

〔3〕《水声学》，汪德昭、尚尔昌著，科学出版社，1981年4月，第一版。

〔4〕《流量测量手册》(中译本)，〔日〕川田裕郎、小宫勤一、山崎弘郎，计量出版社，1982年。

〔5〕《电机工程手册》，第八卷，机械工程手册、电机工程手册编辑委员会编，机械工业出版社，1982年8月，第一版。

〔6〕《*Measurement Systems*》, *Ernest O. Doebelin*, 1975, (*Revised Edition*)。

〔7〕《惯性元件试验》，〔英〕*W·G·*登哈德，国防工业出版社，1978年。

〔8〕《陀螺仪漂移测试原理及其测试技术》，胡恒章，国防工业出版社，1981年。

〔9〕《航空工业科技词典(飞行试验与测试技术)》，国防工业出版社，1982年。

〔10〕《工程测试与检测仪表》，〔英〕*L. F.* 亚当斯著，邓延光译，机械工业出版社，1980年。

〔11〕《检出器てちの应用》，〔日〕杉田　稔著，日刊工业新闻社。

〔12〕《信号分析与相关技术》，徐秉铮、欧阳景正，科学出版社，1981年。

〔13〕《光学纤维传感器》，徐同举，《电测与仪表》编辑部，1981年8月。

〔14〕《激光》(杂志)，沈熊、廖湖声，第九卷，第十期。

〔15〕《力学学报》，沈熊、廖湖声，1982年，第五期。