

激光测速的物理学原理

仇九子

(武警部队学院 廊坊 065000)

激光测速是继激光器出现以后发展起来的一门集物理、电子学和计算机知识于一体的现代科学技术。利用激光测速仪可测量物体的线速度。将激光陀螺仪安装在飞机、导弹、潜艇等运载器上,可监测运载器在航行中的转动角速度,从而准确掌握它们的航向。本文简要介绍激光测速的物理学原理。

一、用激光测量线速度的原理

1. 参考光束型测速仪

参考光束型测速仪是利用光的多普勒效应测量速度的,其基本原理如图1所示。A为激光器,B为待测物体,D为光电接收器。其中,A和D被固定在惯性系中,B相对于A以速度 u 运动。

在某一时刻,由激光器A向物体B发射一束频率为 ν_0 的激光。由光的多普勒效应可知,在 u 远小于光速的情况下,物体B接收到的激光频率 ν' 近似为

$$\nu' = (1 - u \cos \theta_1 / c) \nu_0 \quad (1)$$

式中, c 为光速, θ_1 为 u 与 AB 连线的夹角。

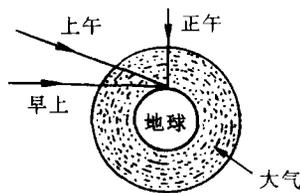


图 1

气分子对光的散射引起的。因为蓝光波长为 4400\AA ,红光波长为 7200\AA ,所以蓝色光较红色光散射得多,由此很容易解释晴朗天空的蓝色。在大气污染较重的地区,之所以很难看到蓝色的天空,一方面由于大气中烟尘的微小颗粒对光的散射减弱了光强,另一方面蓝光又被这些烟尘散射,天空由此呈灰青色。至于日出日落时太阳为什么是红色的,除了由于太阳光通过

物体B在接收到激光的同时,向周围空间发射频率为 ν' 的散射光。同样,由光的多普勒效应,光电接收器D接收到的散射光频率 ν 为

$$\begin{aligned} \nu &= (1 - u \cos \theta_2 / c) \nu' \\ &= (1 - u \cos \theta_2 / c) (1 - u \cos \theta_1 / c) \nu_0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中, θ_2 为 u 与 DB 连线的夹角。

在实际应用中,通常将A和D安装在一起,故而有 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ 。则(2)式略去二次项,近似为

$$\nu = (1 - 2u \cos \theta / c) \nu_0 \quad (3)$$

则激光器出射激光的频率 ν_0 与光电接收器

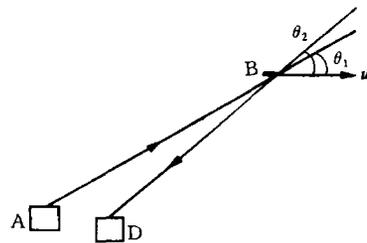


图 1

较厚的大气层(约为中午的70~80倍,如图1所示)而受到更厉害的散射之外,还由于靠近地球表面的空气中的烟尘小颗粒也对其产生强烈的散射。因为波长较短的紫光大部分被散射掉了,剩下的红光占优势,所以在早晨或黄昏时我们看到的太阳是红色的。由图1我们还清楚地看到,正午日光所走过的路径较短,仅有很少的蓝光和紫光被散射,因此太阳仍呈白色。但在大气污染较重的地区,由于烟尘微粒的强烈散射,所以正午太阳泛红色。

蓝天中的白云及朝霞晚霞的产生是由于空气中凝结的小水滴(其线度远大于可见光波长)能对可见光以相同的光强反射或漫射散开。因此,云仍是白色的,但远方云漫射的白光经远距离的大气层散射达到观察者时呈彩色。

接收到的散射光的频率 ν 的差值 $\Delta\nu$ 为

$$\Delta\nu = \nu_0 - \nu = 2u\cos\theta \cdot \nu_0 / c \quad (4)$$

由(4)式可知,只要测出 $\Delta\nu$ 值,就可以算出 u 的大小.

$\Delta\nu$ 的测量方法是:用分光片从激光器的出射光束中分出一小束激光射 λ 光电接收器 D,使其与光电接收器接收到的散射光发生干涉,形成拍频.用光电接收器测量出拍频的频率(等于 $\Delta\nu$)就可以确定两束光的频差 $\Delta\nu$.

利用上述原理制成的测速仪叫参考光束型测速仪.用这种测速仪可测量运动方向已知的物体的瞬时速度;在运动方向未知时,能测量运动物体的视线速度,即速度 u 在 AB 连线方向的分速度.

2. 双散射光束型流速仪

双散射光束型流速仪是另一种利用光的多

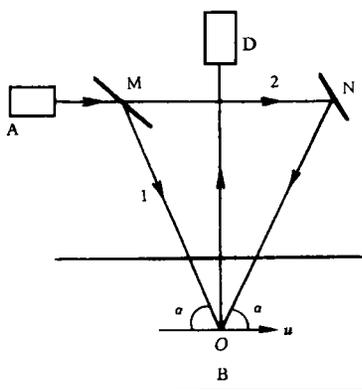


图 2

普勒效应测量物体速度的装置,其基本原理如图 2 所示.由激光器 A 出射的光束被半透半反镜 M 分为两束,光束 1 直接射向流体 B 中的 O 点,光束 2 经全反射镜 N 反射后也射向 O 点.由(1)式可知,光束 1 和光束 2 被 O 点处流体中的杂质微粒散射的散射光频率分别为

$$\nu_1' = (1 - u\cos\alpha / v) \nu_0$$

$$\nu_2' = (1 + u\cos\alpha / v) \nu_0$$

式中, v 为光在流体中的传播速度.由(2)式可知,由于光电接收器 D 与 O 点的连线垂直于流体速度 u 的方向,光电接收器 D 接收到的两散射光的频率分别为

$$\nu_1 = \nu_1' = (1 - u\cos\alpha / v) \nu_0$$

$$\nu_2 = \nu_2' = (1 + u\cos\alpha / v) \nu_0$$

则光电接收器接收到的两散射光的频率差为

$$\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1 = 2u\nu_0\cos\alpha / v \quad (5)$$

所以,只要用光电接收器测出 $\Delta\nu$ 值,就可计算出流体的速度 u .

利用这一原理制造的测速仪叫双散射光束型流速仪.用这种测速仪,通过改变 α 角可测量任意高度的风速.

3. 激光定位型测速仪

激光定位型测速仪是通过用激光测定运动物体在不同时刻的空间坐标来确定运动物体的速度的.其基本原理是:将激光器和光电接收器固定在位于坐标原点的转动装置上,在 t 时刻,用激光器瞄准运动物体发射一束激光.激光束到达物体后经物体散射,一部分散射光将由原路返回.用光电接收器测出激光束的往返时间,并由光的传播速度和往返时间计算出物体到原点的距离.然后,由转动装置测出激光束与三个坐标轴的夹角,从而确定 t 时刻物体的空间坐标.同样,也可测出 $t + \Delta t$ 时刻物体的空间坐标.则由物体在两时刻的空间坐标,就可计算出物体在 t 到 $t + \Delta t$ 时间间隔内的平均速度.利用这种测速仪可同时测量速度的大小和方向,但不能测量瞬时速度.

二、用激光测量角速度的原理

角速度是利用光的萨甘纳克效应(Sagnac Effect)进行测量的.如图 3 所示,一束激光被分为两束,分别从环形光路的 A 点开始沿相反方向绕环形光路行进.如果环路相对于惯性系静止,这两束光绕行一周后将同时到达 A 点,两束光的光程、相位以及固定于环上的接收器接收到的两束光的频率都相同.如果环路以角速度 ω 绕通过环面中心且垂直于环面的轴(中垂轴)作逆时针转动,则沿顺时针行进的光将先到达环上 A 点,其光程 L_1 短;而沿逆时针行进的光束将后到达 A 点,其光程 L_2 长.两束光的光程差为

$$\Delta L = 4S\omega / v \quad (6)$$

式中, $\Delta L = L_2 - L_1$ 为光程差, S 为环路所围面积, v 为光在环路中的传播速度.

两束光的相位差为

$$\Delta\phi = 2\pi\Delta L / \lambda = 8\pi S\omega / \lambda v \quad (7)$$

式中, $\Delta\phi$ 为相位差, λ 为激光在环路中的波长.

固定在环路上的接收器接收到的两束光的频率差为

$$\Delta\nu = 4S\omega / \lambda L \quad (8)$$

式中, $\Delta\nu$ 为频率差, L 为环路周长.

可见, 当环形光路转动时, 沿相反方向行进的两束光的光程、相位和频率都不同. 这种现象称作萨甘纳克效应.

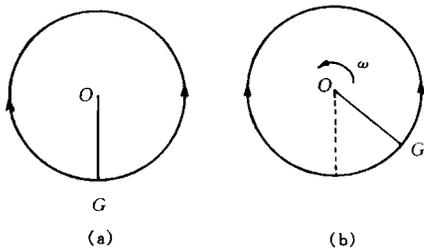


图 3

象称作萨甘纳克效应.

由(7)式和(8)式可知, 只要测出了两束光的相位差或频率差, 就可计算环路转动的角速度. 将按这种原理制成的测速装置安装在转动物体上, 则可以测量物体的角速度.

1. 光纤陀螺仪

光纤陀螺仪的结构如图4所示. A是激光器, B是一个用长为0.5~1km的光纤密绕而成的环形线圈, D是光电接收器, M是半反半透镜. 由激光器A射出的激光束被半反半透镜M分成两束, 它们分别从光纤的1端和2端射入环形光路. 两束光在环路中沿相反方向行进, 最后又分

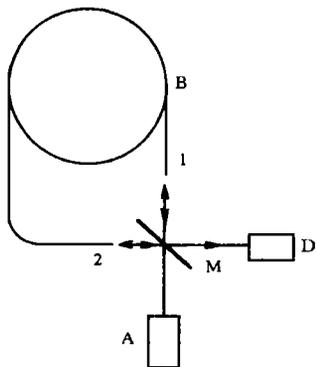


图 4

别从2端和1端射出. 两束出射光再经M透射或反射后进入光电接收器D, 产生干涉. 干涉光强与两束出射光的相位差有关. 光电接收器通过干涉光强测出两束出射光的相位差, 则由(7)式就可计算出线圈绕中垂轴转动的角速度.

2. 激光陀螺仪

激光陀螺仪的核心是一个环形激光器. 环形激光器的环形腔兼作环形光路, 其光路如图5所示. 环形腔是一个细小的三角形环形腔. 腔中充有氦氖混合气体, 并安装有电极. 在三角形环路的三个顶角安装有三个平面镜. 其中, M_1, M_2 是全反射镜, N是半透半反镜. 激光器工作时, 由于电极被加电, 从而使腔中的氦氖气体激发, 在环形腔中产生两束沿相反方向行进的激光. 这两束激光行进至半透半反镜N时, 将分别有一部分光束从N透射出来作为出射光束. 如果环形激光器相对于惯性系无转动, 则两束出射光的频率相同; 而如果环形激光器相对于惯性系绕其中垂轴有转动时, 则两束出射光的频率将不同. 利用光电接收器测出两出射光束的频率差, 由(8)式可计算出激光器转动的角速度.

用一个激光陀螺仪或一个光纤陀螺仪只能测量运动物体绕陀螺仪中垂轴转动的角速度. 为了能测量运动物体在三维空间的转动情况, 通常需要将三个陀螺仪分别固定在三个相

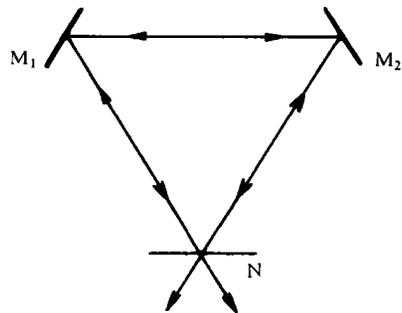


图 5

互垂直的平面内. 激光陀螺仪和光纤陀螺仪主要用作制导装置. 尤其是光纤陀螺仪, 因为其具有体积小、重量轻、结构简单、安装和使用方便等许多优越性, 所以成为了理想的导航装置.