

# 浅谈多普勒效应及其应用

赵旭光 邬明音

(烟台师范学院物理系 山东 264025)

在日常生活中,人们都有这样的经验:当一列高速行驶的火车从远处鸣笛而来时,人耳听到的笛声的音调会愈来愈高;而当火车鸣笛离去时,其笛声音调会愈来愈低,相关的描述在许多书中都有,此现象就是声波的多普勒效应。它是奥地利物理学家多普勒于 1842 年发现的,而电磁波频域的多普勒效应在 1938 年才得到证实。现在,它在许多领域得到了广泛的应用。

## 1. 多普勒效应的含义及普遍公式

多普勒效应是指当波源和接收器之间有相对运动时,所接收到的频率不等于波源振动的频率的现象。

如图 1 所示,如果用  $\nu_s$ 、 $\nu_R$  和  $\nu$  分别表示波源振动的频率、接收器接收到的频率及媒质质元的振动频率(或单位时间内通过波线上一点的波的个数), $\nu_s$  的意义是波源单位时间内所发出波的个数, $\nu_R$  的意义是单位时间内接收到波的个数,此时多普勒效应的公式为

$$\nu_R = \frac{V + u_R \cos \theta_R}{V - u_S \cos \theta_S} \nu_s \text{ (彼此相互接近)}$$

$$\nu_R = \frac{V - u_R \cos \theta_R}{V + u_S \cos \theta_S} \nu_s \text{ (彼此相互远离)}$$

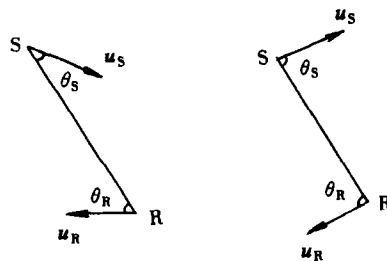


图 1

以上公式只适用于低速运动的物体,而且从中可以看出多普勒效应不但与波源和接收器的运动速度有关,而且还与波源和接收器的相对位置有关,同时还能得出许多书中给出的特例——即在同一直线上运动物体的多普勒效应公式形式。

对于光波的多普勒效应公式形式如下。如图 2

对误差小于 5% 等。

我国的海洋一号水色卫星(HY-1)是一颗试验型业务卫星,主要用于海洋水色要素探测,为海洋环境监测与资源开发服务,海洋环境监测与资源开发包括海洋生物资源开发利用,海洋污染监测与防治,海岸带资源开发和海洋科学研究等领域。

海洋卫星平台是采用 SJ-5 卫星共用平台进行适应性改进和升级而成的 CAST968B 平台,装载 1 台海洋水色扫描仪和 1 台 CCD 相机。卫星具有小范围变轨能力和太阳帆跟踪太阳对日空间能力,采用了 GPS 自主定轨技术,具有较高的指向精度和姿态测量精度。其主要技术指标列于表 1。

海洋一号的有效载荷实时观测区域为西北太平洋区域,即渤海、黄海、东海、南海和日本海等。其中重点观测区域在我国海岸带和大陆架。

海洋一号的设计和性能均已达到当今世界水色卫星较先进的水平,标志着我国的海洋遥感的新纪

元。我们相信,中国一定能在海洋遥感和海洋的开发利用上跻身世界前列。

表 1

卫星质量	360kg
轨道类型	太阳准同步圆轨道。 轨道高度 798km 轨道倾角 98.8°
卫星尺寸	1.2 × 1.1 × 1.1m <sup>3</sup>
电源输出功率	初期 320W 末期 450W
载荷覆盖周期	对水色扫描仪重复观测周期为 3 天,对 CCD 相机重复观测周期为 7 天
降交点地方时	初期 8:35 ~ 9:00 寿命末期 10:15 ~ 10:50
姿态稳定	对地定向;三轴稳定
指向精度	俯仰 ≤ 0.4 度 滚动 ≤ 0.4 度 偏航 ≤ 0.5 度
指向稳定度	三轴 0.01 度/S
姿态测量精度	俯仰、滚动 ≤ 0.2 度 偏航 ≤ 0.3 度
卫星工作寿命	2 年

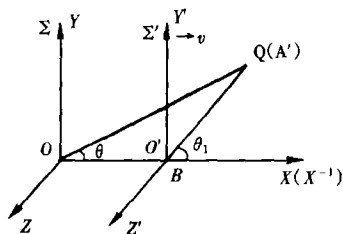


图 2

所示,观察者 A 静止于  $\Sigma$  系中的 Q 点,光源 B 静止于  $\Sigma'$  系的原点  $O'$ ,且  $\Sigma'$  系相对于  $\Sigma$  系以速度  $v$  沿  $XX'$  正方向运动。设光源发出光波的频率为  $\nu_0$ ,观察者接收到光波的频率为  $\nu$ ,则有

$$\nu = \nu_0(1 - \beta^2)^{1/2} / (1 - \beta \cos \theta) \quad (\beta = v/c)$$

当  $\theta = 0$  时,  $\nu = \nu_0 \sqrt{(c+v)/(c-v)}$  发生“蓝移”

当  $\theta = \pi$  时,  $\nu = \nu_0 \sqrt{(c-v)/(c+v)}$  发生“红移”

当  $\theta = \pi/2$  时,  $\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2}$

当  $v \ll c$  时有  $\nu = \nu_0(1 + \beta \cos \theta)$

由  $\theta = 0$  或  $\theta = \pi$  可得经典物理学中的多普勒效应公式,  $\theta = \pi/2$  时有  $\nu = \nu_0$ ,即经典物理学中只能得到纵向多普勒效应,而无法得到横向多普勒效应。

## 2. 多普勒效应的应用

### ●激光测速

参考光速型测速仪是利用光的多普勒效应测量速度,其基本原理如图 3 所示。L 为激光器, D 为光电探测器, B 为待测物体, L、D 被固定在惯性系中, B 相对于 L 以速度  $u$  运动。

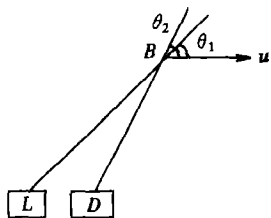


图 3

若在某一时刻由激光器 L 向物体 B 发射一束频率为  $\nu_0$  的激光,在  $u \ll c$  时,物体 B 接收到激光频率近似为  $\nu' = \nu_0(1 - u \cos \theta_1/c)$ ,物体 B 在接收到激光的同时,向周围空间发射频率为  $\nu'$  的散射光,此时 D 接收到的频率为

$$\nu = \nu'(1 - u \cos \theta_2/c) = \nu_0(1 - u \cos \theta_2/c)(1 - u \cos \theta_1/c);$$

实际上, L、D 安装在一起,此时  $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ ,则上式略去二次项有  $\nu = \nu_0(1 - 2u \cos \theta/c)$ ,而  $\Delta \nu = \nu_0 - \nu = 2u \nu_0 \cos \theta/c$ 。

由上式可知:只要能测出  $\Delta \nu$  值,就可以计算出物体 B 的速度大小  $u$ ,而  $\Delta \nu$  则可以利用测量拍频的方法测出。另外,根据多普勒效应还可以测量流体的速度,物体转动的角速度等。

●横向多普勒效应,可以验证相对论时间膨胀的结论

在垂直于光源运动方向观察辐射时,经典公式给出  $\nu = \nu_0$ ,而相对论给出的公式形式为  $\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2}$  ( $\theta = 90^\circ$ ),此时  $\nu \neq \nu_0$ ,即在垂直于光源运动方向上,经典物理学中不存在多普勒效应,根据相对论知识可得观察到的辐射频率小于静止光源的辐射频率,这现象称为光的横向多普勒效应(而通常意义上的称为纵向多普勒效应),它已为 Ives-Stilwell 实验所证实,它是相对论时间延缓效应证据之一。

### ●激光冷却中性原子

1997 年 10 月 15 日,瑞典皇家科学院宣布,将该年度的诺贝尔物理学奖授予美国斯坦福大学的朱棣文(Steven Chu),法国巴黎高等师范学院的克罗德—塔努吉(Claude Cohen-Tannoudji)和美国国家标准和技术研究所的威廉·菲利普斯(William D. Phillips),以表彰他们在发展激光冷却和捕陷中性原子技术方面的杰出贡献。

原子静止时的吸收频率为  $\nu_0$ ,则由于多普勒效应,当它以速度  $v$  相对于光波运动时,被共振吸收的光波的频率应该是  $\nu = \nu_0(1 - v/c)$ 。吸收光子后原子以自发辐射的方式发出光子回到基态,然后再吸收光子,再自发辐射。每吸收一个光子,原子都得到与其运动方向相反的动量,而每次自发辐射发射光子的方向却是随机的(自发辐射是各向同性的),因之多次重复下来,吸收时得到的动量随吸收次数增加,而自发辐射损失的动量平均为零,原子因之被减速,这就是 1975 年汉斯和肖洛提出激光冷却原子的主要思想,也是所谓“多普勒冷却”的基本机制,它是激光冷却技术中的最重要的原理。激光冷却和中性原子捕陷的两个重要应用是原子波激射和原子喷泉。北京大学已成功实现原子喷泉,其意义极为深远,因为原子喷泉可做成准确度极高的原子钟,每 3000 万年时间里可望仅误差 1 秒,这是建设我国独立自主时间频率系统、使我国自由控制时间和空间基准的重要设备。

另外,多普勒效应也可应用于医学诊断,宇宙大爆炸理论的研究,以及卫星导航,飞机微波着陆等许多领域。