



多普勒效应及其现代应用

袁玄义 王永昌 张延曹

(空军导弹学院基础部 陕西 713800)

生活中,人们都有这样的经验:当高速行驶的火车从远处鸣笛而来时,人耳听到的笛声音调愈来愈高;而当火车鸣笛离去时,其笛声音调愈来愈低.此现象就是声波的“多普勒效应”.它表明:当波源与观察者之间有相对运动时,观察者所接收到的波的频率与波源所发射的频率不同.“多普勒效应”是奥地利物理学家多普勒于1842年发现的;而电磁波频域内的“多普勒效应”在1938年才得到证实.从本世纪四十年代起,人们开始了“多普勒效应”的应用工程研究,现已广泛应用于航空、航天、航海、导弹和气象探测等许多领域.

一、光的多普勒效应

光的传播不需要赖以媒质,且真空中的光速 c 是个常量;因而只要光源与观察者之间存在相对运动,就可确定其多普勒效应,但需用相对论分析处理.

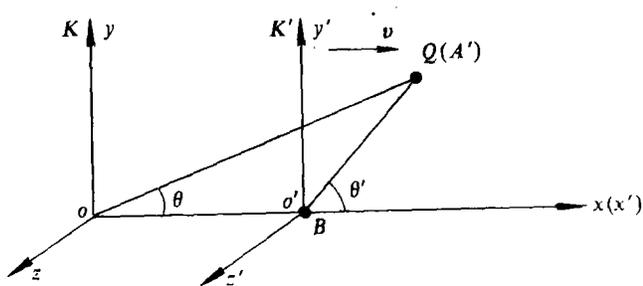


图 1

如图1所示,观察者 A 静止于 K 系中的 Q 点,光源 B 静止于 K' 系的原点 O' ,且 K' 系相对 K 系以速度 v 沿 XX' 正方向运动.设光源发出光波的频率为 γ_0 ,观察者接收到的光波的频率为 γ ,通过计算可得:

$$\gamma = \gamma_0 (1 - \beta^2)^{1/2} / (1 - \beta \cos \theta) \quad (\beta = v/c) \quad (1)$$

当光源和观察者在两者的连线方向上相趋近时, $\theta = 0$,由(1)得:

$$\gamma = \gamma_0 \sqrt{(c+v)/(c-v)} \quad (2)$$

此时 $\gamma > \gamma_0$.即观察者所观察到的光源所发出的光谱谱线将向短波方向移动,发生“兰移”.

当光源和观察者在两者的连线方向是相分离时, $\theta = \pi$,由(1)得:

$$\gamma = \gamma_0 \sqrt{(c-v)/(c+v)} \quad (3)$$

此时, $\gamma < \gamma_0$.表明观察者所观察到的光源所发出的光谱谱线,将向长波方向移动,发生“红移”.

红移值常用波长或频率变化的相对值来表示,令其为 Z ,因 $c = \lambda\gamma$,按(3)式得:

$$\begin{aligned} Z &= (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 = (-\gamma + \gamma_0) / \gamma \\ &= \sqrt{(c+v)/(c-v)} - 1 \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式表明,多普勒效应产生的红移,由光源离开观察者的退行速度决定,故称为“退行红移”,或“速度红移”.

在垂直于光源运动方向上, $\theta = \pi/2$,由(1)式得:

$$\gamma = \gamma_0 \sqrt{1 - \beta^2} \quad (5)$$

如果光源运动速度 v 远小于光速,即 $v/c \ll 1$,则 β^2 项可略去,由(1)式可得:

$$\gamma = (1 + \beta \cos \theta) \gamma_0 \quad (6)$$

当 $\theta = 0$ 或 π 时,由(6)式可得经典物理学中的多普勒效应公式:

$$\gamma = (1 + v/c) \gamma_0 \quad (\text{紫移}) \quad (7)$$

$$\gamma = (1 - v/c) \gamma_0 \quad (\text{红移}) \quad (8)$$

此时红移

$$Z = v/c \quad (9)$$

特别应指出:在经典物理学中,当 $\theta = \pi/2$ 时,

$$\gamma = \gamma_0 \quad (10)$$

二、多普勒效应在现代科技中的应用

现代物理知识

1. 退行红移是“大爆炸宇宙”论的基础

大爆炸宇宙论认为:我们现在所处的宇宙是在大约 150 亿年以前,由一次爆炸形成的.在最初的爆炸中,那些运动得最快的产物,现在构成了宇宙的最外区.因此,物质相对我们的径向速度越大,它的红移也越大.20 世纪以来,天文学对遥远星系发出的光波所作的光谱分析表明,几乎所有的星系都有红移.至 1978 年,发现正常星系的最大红移为 0.75.1929 年,哈勃发现河外星系的红移 Z 与离我们的距离 r 成正比,此即哈勃定律.据此推知,星系的径向速度 v 与距离 r 成正比,故哈勃定律可表示为:

$$v = Hr \quad (11)$$

式中 $v = cZ$, H 为哈勃常数,最初测定值为每秒每兆秒差距 500 公里,新近值为每秒每兆秒差距 50—100 公里.如果认为星系红移是速度红移并遵从哈勃定律,那么就可算出星系的退行速度与离地球的距离,表明遥远的星系以很大的速度远离地球而去.所以用多普勒效应和哈勃定律来解释星系的红移现象,描绘出了大爆炸宇宙论所预言的宇宙膨胀的图象.可见河外星系的退行红移,具有宇宙学意义,被称为宇宙学红移.哈勃定律的发现是 20 世纪天文学中最重大的事件之一.宇宙学家普遍认为,它是人们观察到宇宙膨胀的证据,从而改变了静态宇宙结构的先验观念.

2. 横向多普勒效应,验证了相对论“时间膨胀”的结论

多普勒效应中,我们把由光源和观察者在其连线上的相对运动所引起的多普勒效应,叫做纵向多普勒效应;而把在垂直于光源运动方向上所观察到的多普勒效应,叫做横向多普勒效应.

由 (10) 式可知:经典物理学中,在垂直于光源运动方向上, $\gamma = \gamma_0$, 所以不存在多普勒效应.而由 (5) 式可知:当光源运动速度 v 与光速 c 可比拟时,则在垂直于光源运动方向上, $\gamma = \gamma_0 \sqrt{1 - \beta^2}$ 此时 $\gamma \neq \gamma_0$, 这便是

横向多普勒效应,是相对论所预言的新现象.因而能否从实验中观察到横向多普勒效应,对于检验相对论是否正确也有着重要意义.伊夫斯和史蒂威分别于 1938 年和 1941 年,用实验证实了多普勒效应的存在,这进一步表明了相对论的正确.设一个光波信号的周期为 T , 因 $T = 1/\gamma$ 所以由 (5) 式得: $T = T_0 / \sqrt{1 - \beta^2}$, 这正是狭义相对论的时间膨胀效应,可见横向多普勒效应是相对论“时间膨胀”效应所产生的必然结果.上述实验事实也验证了狭义相对论的“时间膨胀效应”.

3. 多普勒频移与卫星导航和飞机微波着陆

在多普勒效应中,我们把观察者所接收到的频率 γ 和光源所发射的频率 γ_0 间的差值,叫多普勒频移,并以 f_d 表示,由 (6) 式可得:

$$f_d = \gamma - \gamma_0 = \gamma_0 v \cos \theta / c \quad (12)$$

可认为 (12) 式就是海军导航卫星系统和飞机多普勒扫描微波着陆系统的理论基础.

设 B 为导航卫星,它以速度 v 沿图 2 所示

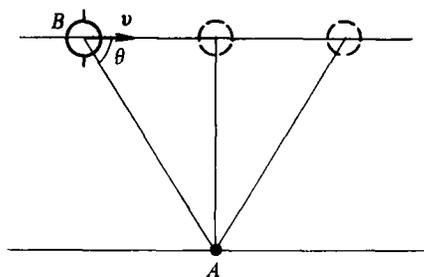


图 2

方向通过海中舰船 A 的视界,并按规定不断向地面发射导航无线电信号.当卫星向舰船飞来,与舰船最近和离开舰船飞去,舰船所接收到的多普勒频移曲线如图 3 所示.多普勒频移曲线与舰船位置有着——对应的关系,所以只要测得卫星通过时的多普勒频移曲线,就可确定海中舰船的位置.实际中要精确测量瞬时多普勒频移是有困难的.常测量在一定时间间隔内

的多普勒计数 N , 它比例于这段时间内导航卫星和舰船间距离的总变化. 若 t_1 到 t_2 时间内, 测得多普勒计数为 $N_{12} = (r_2 - r_1) / \lambda_0$, 相应卫星位置在 S_1, S_2 ; t_2 到 t_3 时间内, $N_{23} = (r_3 - r_2) / \lambda_0$, 卫星位置在 S_2, S_3 , 这样就得到两个距离差参量, 它们的位置面是分别以 S_1, S_2 和 S_2, S_3 为焦点的旋转双曲面, 加上地球的椭球面, 就可对海中舰船定位. 第一个海军卫星导航系统—子午仪, 就是按此方法建立起来的积分多普勒导航系统.

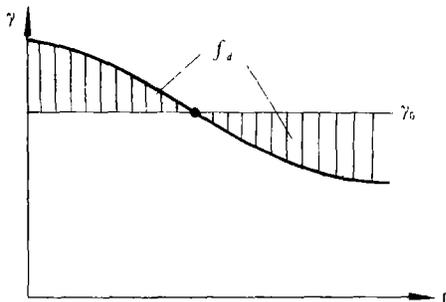


图 3

在图 4 中, 设 B 为地面上—辐射源, 以速度 v 运动; A 为装在飞机上的接收机, n 为辐射源运动方向的法线. 则由辐射源和接收机间相对运动所产生的多普勒频移也如 (12) 式所示. 当接收机相对于辐射源运动方向法线的方位角为 φ 时, 则有:

$$f_d = \gamma_0 v \sin \varphi / c \quad (13)$$

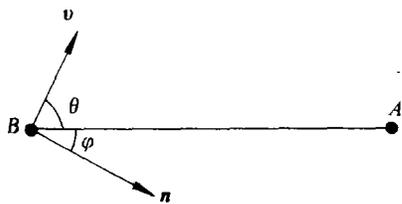


图 4

当 v, γ_0 恒定时, 则多普勒频移随方位角 φ 成正弦函数关系变化. 所以只要测得多普勒频移

值, 就可确定出飞机上接收机相对辐射源运动方向法线的方位角 φ . 在三维空间中, 保持 f_d 为常值的接收机的几何位置, 是一个以辐射源的运动方向为轴线, 以接收机和辐射源的连线为母线的圆锥面, 如图 5 所示. 因此, 多普勒扫描着陆系统中的等位面为圆锥面. 不管接收机处于圆锥面上任何地方, 其测得的 f_d 都是相同的. 这就是多普勒扫描微波着陆系统的工作原理.

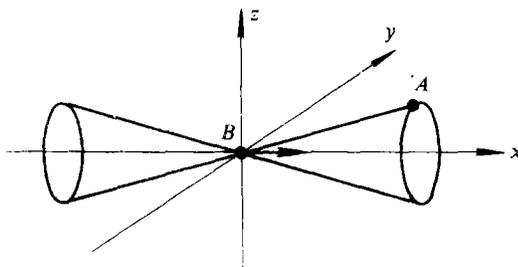


图 5

4. 多普勒雷达与动目标选择

多普勒雷达是一种目前被广泛采用的机载自备式导航设备, 它是多普勒效应和雷达原理为基础, 测量飞行器相对于大地坐标系的地速和偏流角从而达到导航的目的.

如图 6 所示, 设飞机以地速 v 水平飞行, 机上多普勒雷达以很窄的波束向前下方地面发射频率为 γ_0 的电磁波, 由于照射区域内地形、地物起伏造成机、地间的相对运动所引起的多普勒效应, B 点接收到的频率为

$$\gamma' = \gamma_0 c / (c - v \cos \theta)$$

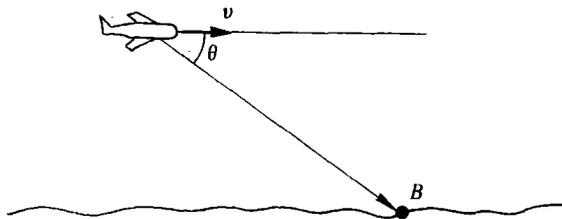


图 6

由于地面的漫反射, 一部分电磁能量又以

γ' 返回到飞机上被雷达接收. 同样道理, 雷达接收到的回波信号频率为:

$$\gamma = \gamma_0(c + v \cos \theta) / (c - v \cos \theta)$$

雷达技术中, 把飞机上雷达所接收到的回波信号频率 γ 与其所发射的探测信号频率 γ_0 间的差值叫多普勒频率, 仍以 f_d 表示. 考虑到电磁波传播速度 c 远远大于 v , $v/c \ll 1$ 及 $c = \lambda_0 \gamma_0$, 有

$$f_d = 2v \cos \theta / \lambda_0 \quad (14)$$

当 λ_0, θ 确定后, $2v \cos \theta / \lambda_0$ 是个常量, 故 f_d 与 v 成正比. 多普勒雷达中, 采用一种专门设备测量 f_d , 进而求得飞机地速 v .

在(14)式中, 令 v 为空中一飞行动目标的运动速度, θ 为其运动方向与地面雷达站和动目标连线间夹角, 则此式即为动目标选择雷达的工作原理. 所以动目标选择雷达也是多普勒雷达. 如果雷达发射的是连续的射频信号, 便称为连续波多普勒雷达; 如果发射的是脉冲调制的射频信号, 则叫做脉冲多普勒雷达. 还有一种动目标显示雷达, 也是利用动目标回波信号的多普勒频率来消除固定目标回波干扰, 从而使运动目标得以检测和显示.

多普勒效应的应用是非常广泛的, 不只在上述的导航和雷达技术中有着重要作用, 而且在天体、人造卫星和火箭运动研究中, 也是有效的方法之一, 就是在超音医学领域也显示了特殊的功能. 随着当代科学技术的发展, 这一古老的效应将进一步显示出其强大的生命力.

三、多普勒效应与教学现代化

工科物理教学内容的现代化, 是当前广大物理教师所面临的一项紧迫任务. 如何具体实现呢? 我们体会有下述三点: 一是通过“开窗口”把物理学现代和前沿的新知识、新理论有机地渗透在基础教学之中, 使工科物理具有时代的气息; 二是在工科物理教学中贯彻“以掌握概念、强化应用为教学重点”的原则, 介绍物理知识在现代科技上的应用, 增强基础教学的活力; 三是配合教学内容适时开办前沿新知识、新技

术专题讲座, 这样就使得工科物理教学过程成为一个开放的过程, 从而达到与现代科技接轨的目的. 现以“多普勒效应”的教学为例予以说明. (1) 讲完机械波的多普勒效应后, 引进无线电波和光波的多普勒效应和红移现象. 这时可开设两个窗口: 一是介绍“退行红移”和“红移量”概念, 在此基础上指出河外星系的红移表明它们正在远离地球而去, 进一步再介绍哈勃定律, 说明它就是宇宙膨胀的证据, 这样就把学生视野引到了宇宙学这个前沿阵地. 二是介绍“引力红移”并指出它与多普勒效应的本质区别. 进而说明白矮星的红移的发现, 成为广义相对论三大验证之一. 这又使学生视野伸向广义相对论这个奇妙的领域. 当然, 这仅仅是引导学生通过窗口向外的“一瞥”, 但对开阔其眼界、增强其学习兴趣, 都大有益处. (2) 讲授了波源或观察者运动方向沿二者连线情况下的多普勒效应后, 进一步讲解当波源运动方向与二者连线夹角为 θ 时, 所发生的多普勒效应, 给出(6)式, 进一步介绍卫星导航中的多普勒频移公式(12)和(13)及雷达技术中的多普勒频率公式(14), 这样就使学员加深了对多普勒效应的概念和规律的理解和认识, 把知识学“活”. 进一步对控制专业的学生, 介绍卫星导航和飞机微波着陆系统的工作原理; 对雷达专业的学生介绍多普勒雷达及新体制脉冲多普勒雷达, 这样就使得基础物理知识与其在现代科技上的应用紧密联系起来, 既充分调动了学生学习的兴趣, 又为他们专业学习留下了接口. 在力学三大守恒定律之后, 我们讲解火箭、人造地球卫星飞行原理和空间技术; 讲热辐射后, 介绍红外物理和红外技术; 讲激光原理后, 介绍激光物理及激光技术; ……等, 都达到了上述目的. 在此基础上, 我们又举办了“超导、宇宙学、粒子物理”和“混沌”等专题讲座, 搞活了整个教学过程. 这些措施, 都受到了学生的普遍欢迎, 大家一致认为物理教学是所开科目中有特色的一门课, 爱听爱学, 取得了比较好的教学效果.