

卫星发射运行和回收过程中的力学问题探讨

彭日章

(保定市第二中学 河北 保定 071000)

刘富成

(河北大学物理科学与技术学院 河北 保定 071002)

(收稿日期:2017-10-22)

摘要:从运载火箭和卫星发射原理出发,对人造卫星发射、运行和回收过程中的力学问题进行了分析探讨.根据动量守恒导出了发射过程中一级火箭的瞬时速度和最大速度以及加速度,与齐奥尔科夫斯基公式吻合.从力学角度对卫星运行的稳定性问题进行了探讨和研究.

关键词:人造卫星 万有引力 发射 运行 回收

1 引言

随着火箭技术的发展,人类离开孕育自己的地球,飞往无垠太空的美好愿望早已变成了现实.1957年10月4日,第一颗人造地球卫星上天,曾作为人类奇迹震惊全球,同时拉开了人类空间活动的序幕.1970年4月24日,中国第一颗人造地球卫星成功发射,由此开创了我国航天史的新纪元,使中国成为继苏、美、法、日之后世界上第5个独立研制并发射人造地球卫星的国家^[1].

人造卫星作为发射数量最多、用途最广、发展最快的航天器,可应用于空间探测、科学研究、通讯导航、天气预报、土地资源调查等多个领域,在军事和经济上发挥着越来越重要的作用.但在卫星的发射运行和回收中,还存在着诸多问题需要探讨和解决.本文就卫星发射、运行和回收过程中的力学问题进行探讨.

2 卫星发射过程中的力学问题

2.1 运载火箭和卫星发射原理

运载火箭是一种依靠火箭发动机喷射高温高压

气体产生的反作用力推动前进的飞行器.火箭发动机点火后,推进剂在燃烧室燃烧,从而产生大量的高温高压气体,以很高的速度从喷管中向后喷出,对火箭产生向前的反作用力,推动箭体和卫星向前运动.这里卫星称为载荷,载荷是指卫星、载人飞船、空间站等人造飞行器.火箭的推进剂中含有燃料和氧化剂,因此火箭并不需要像飞机那样依靠空气中的氧,从而可以在真空环境的宇宙中飞行^[1].

2.2 火箭和卫星系统的速度及加速度

2.2.1 3种宇宙速度

从地球向宇宙空间发射火箭时,需要一定的速度.如果火箭发射速度过小,则无法支持卫星到达运行轨道,而如果发射速度过大,会使卫星脱离轨道.因此,人造卫星要在预定轨道上稳定地围绕地球运行,必须具有恰当的速度.目前较为准确且有代表性的运行速度有3个,分别称为第一、第二和第三宇宙速度.

第一宇宙速度(又称环绕速度):物体围绕地球表面做圆周运动的速度,也是人造地球卫星的最小

作者简介:彭日章(2001-),男,在读高中生.

指导教师:刘富成(1981-),男,博士,副教授,主要从事大学物理教学和科研工作.

发射速度,大小为 7.9 km/s.

第二宇宙速度(又称逃逸速度):是指物体完全摆脱地球引力束缚,飞离地球所需要的最小初始速度,大小为 11.2 km/s.

第三宇宙速度(又称脱离速度):是指在地球上发射的物体摆脱太阳引力束缚,飞出太阳系所需的最小初始速度,大小为 16.7 km/s.

航天器需要根据所要完成的任务来决定运行速度.火箭发射飞行达到预定高度和速度并经姿态调整后,卫星以一定的速度与火箭分离,进入预定轨道,在万有引力作用下沿轨道运行.

2.2.2 一级火箭的速度和加速度

下面讨论在不考虑地球引力和空气阻力条件下,一级火箭的瞬时速度以及燃料燃烧完毕所达到的最大速度,并由速度得出火箭的加速度表达式.

设火箭发射前包括卫星和推进剂在内的系统总质量为 M_0 ,燃料燃烧完毕后系统的质量为 M ,高温高压气体向后喷射的速度为 u ,视为常量,火箭飞行速度为 v ,系统从点火发射开始到燃料燃烧完毕,系统质量因喷射气体而减少.若在发射过程中的任一时刻 t 开始,经 dt 时间火箭向后喷射的高温高压气体质量为 dm ,气体喷射速度为 u ,系统剩余部分的质量为 m ,因喷射 dm 的气体而使系统增加的速度为 dv ,由于忽略地球引力和空气阻力,系统动量守恒.设火箭开始发射的时刻 $t=0$,由于系统在发射前总动量为零,故在 $t \sim t+dt$ 时间内向后喷射气体的动量 udm 与系统向前飞行增加的动量 mdv 之和为零.

$$udm + mdv = 0 \quad (1)$$

由式(1)得

$$dv = -u \frac{dm}{m}$$

积分得

$$v = -u \ln m + c$$

式中 c 为积分常量,因为 $t=0$ 时火箭静止, $v=0$, $m=M_0$,则 $c = u \ln M_0$,代入上式得

$$v = -u \ln m + u \ln M_0 = u \ln \frac{M_0}{m} \quad (2)$$

式(2)即为火箭系统的瞬时速度表达式,它表明,火箭从静止开始,速度随 m 的减小而增大,当燃料燃烧完毕时, $m=M$,此时火箭达到最大速度,即

$$v_{\max} = u \ln \frac{M_0}{M} \quad (3)$$

系统的加速度为

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dm} \frac{dm}{dt} = -\frac{u}{m} \frac{dm}{dt} \quad (4)$$

式(3)正是前苏联著名火箭专家齐奥尔科夫斯基首先得出的火箭获得最大速度公式^[2].而式(4)给出了火箭飞行的加速度,因 m 随时间减小, $\frac{dm}{dt}$ 为负值,故 a 为正值.因 m 和 $\frac{dm}{dt}$ 均为变量,故 a 一般不是常量,火箭做变质量变加速度的变速运动.

2.2.3 考虑地球引力时火箭的速度

齐奥尔科夫斯基速度公式是在不考虑地球引力和空气阻力条件下得出的.事实上,火箭系统所受的地球引力往往不能忽略.对于近地轨道卫星系统所受地球引力可视为恒力,方向指向地心,大小为 mg .对于垂直向上发射的卫星,地球引力的作用是使系统的速度减小,设在 dt 时间内,因地球引力而使系统减小的速度为 dv_g ,其方向指向地心,与火箭系统的速度方向相反.由动量定理得

$$mg dt = m dv_g$$

两边积分得

$$mgt = m v_g + c_1$$

因 $t=0$ 时, $v_g=0$,故 $c_1=0$,则 $v_g=gt$,根据速度叠加原理,考虑地球引力时,火箭系统的速度为

$$v = u \ln \frac{M_0}{m} - gt \quad (5)$$

式(5)中, t 为系统的质量由 M_0 变为 m 所用时间.

2.2.4 多级火箭的速度

目前的火箭如果采用高能推进剂——液氧加液氢,在采取先进结构的情况下,火箭在扣除地球引力和空气阻力的损失后,只能达到 7 km/s 的速度,连第一宇宙速度都无法达到.所以依靠目前的推进剂,单级火箭不足以将卫星送入地球轨道,必须采用

多级火箭^[2].

多级火箭由两级以上火箭以串联式构成,最下层为第一级以接力式点火发射.通过这样一级一级的加速最终将卫星送入轨道.多级火箭的最终速度为每一级火箭速度的总和,设火箭最终速度为 v ,一、二、三级火箭速度分别为 v_1, v_2, v_3 ,则合速度

$$v = v_1 + v_2 + v_3 \quad (6)$$

3 卫星运行过程中的力学问题

3.1 人造卫星的常用轨道

3.1.1 圆轨道

用于把人造天体作为空间观测站、基准点和中继站的场合.要把人造卫星发射到圆轨道,必须满足速度与入轨点当地环绕速度相同且速度方向与入轨点处地平线平行两个条件.

3.1.2 椭圆轨道

常用于科学探测卫星,发射时需要控制入轨点的速度,入轨点的高度需要取近地点的高度,也就是说,人造卫星在近地点入轨比较方便.

3.1.3 地球同步轨道

高度为35 786 km,轨道平面与赤道平面夹角(倾角)为零,运行周期与地球自转一周的时间相等,即23 h 56 min 4 s,卫星在轨道上的绕行速度约为3.07 km/s,卫星的角速度等于地球自转的角速度.适合作为通信卫星轨道.发射过程也要比一般圆轨道复杂,一般要经过送入初始轨道、经过赤道时转移轨道、加速并调整方向3个环节.

3.1.4 极地轨道

倾角为 90° 的轨道,这种轨道的优点是在这种轨道上飞行的卫星可以飞经全球,因此气象卫星、观测卫星和侦察卫星一般都采用这种轨道.

3.2 卫星的入轨和变轨

3.2.1 卫星的入轨

卫星入轨是指按照设计要求使卫星进入预定轨道.一般说来,卫星从地面垂直发射后,到达距地面几百千米时通过方向调整系统使火箭由竖直向上调

整为倾斜向上,同时继续加速,当速度达到第一宇宙速度且方向水平时进入近地轨道,卫星在地球引力作用下做近地轨道运动.所谓近地轨道,是指距离地面很近(几百千米)的以地球中心为圆心的圆形轨道.下面讨论忽略大气阻力和其他干扰力,卫星系统只在地球引力作用下的圆形轨道速度,即入轨后的速度.

设 G 为万有引力常量, M 为地球质量, m 为卫星质量, R 为地球半径, h 为卫星距地面高度,由万有引力定律得

$$G \frac{Mm}{(R+h)^2} = m \frac{v^2}{R+h}$$

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R+h}} = 7.9 \sqrt{\frac{R}{R+h}} \text{ km/s} \quad (7)$$

式(7)即为卫星在距离地面高为 h 的圆形轨道上做匀速圆周运动的速度.

3.2.2 卫星的变轨

由于受火箭的运载能力以及发射地点等因素的制约,卫星在运行期间常常需要变轨,卫星在轨期间自主改变运行轨道的过程称为变轨.比如发射地球同步轨道卫星时,先以第一宇宙速度发射到近地轨道,在圆形轨道的近地点开启发动机点火加速,使卫星进入大椭圆轨道,运行稳定后在椭圆轨道的远地点再次点火加速并调整姿态到适合的轨道高度.如图1所示.

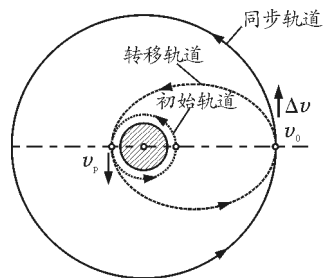


图1 卫星的变轨

卫星变轨时,由卫星发动机喷射气体加速,卫星速度增加,所做圆周运动需要的向心力增加,但在原来轨道上的万有引力不足以提供原来圆形轨道所需要的向心力,故卫星将做离心运动,而进入椭圆轨

道,此时地球位于椭圆轨道的一个焦点上.卫星在椭圆轨道上运行速度是随位置而变化的,稳定后到达椭圆轨道的远地点时再次点火加速而进入地球同步轨道.

3.3 动压力与火箭系统的稳定性

在火箭飞行过程中,因火箭在大气层中运动时空气阻力要阻止它飞行,这种阻力称为动压力.空气对飞行物动压力的合力的作用点,称为压力中心,要使火箭系统稳定飞行而不发生翻转,就必须使动压力中心位于火箭系统质心的后方,使二者连线与向前的速度矢量在同一条直线上.为使动压力中心达到以上要求,一般可在火箭靠近尾部的地方安装轴对称的尾翼.以使动压力中心位于质心的后方,保证火箭系统稳定飞行.

上述稳定性原理,从力学角度分析,安装尾翼后,由于作用在尾翼上的空气阻力使动压力中心移动到质心后方,此时即使由于某种原因使箭体绕质心相对原来速度方向发生稍许偏转,这时向后的动压力作用在其中心上所产生的力矩迫使箭体转回到原来的速度方向,从而保证了火箭系统的稳定飞行.以上是从火箭系统的外部结构设计来增加系统的稳定性.事实上,航天器在发射、入轨及在轨过程中会经历振动、冲击、噪声加速度和微重力等多种动力学环境,这些环境的扰动激励会直接或间接施加在航天器及其部件上^[3],为保证火箭系统的稳定性,除羽翼的作用外,一般火箭内部还具有自动控制稳定系统.

4 卫星回收过程中的力学问题

4.1 卫星回收过程的几个阶段

卫星回收过程的几个阶段如图2所示.卫星的返回,首先要由地面指挥系统发出指令,启动卫星自身携带的小型制动火箭点火减速,由运行轨道变轨进入过渡轨道(图2所示的AB段);其次,在重力作用下沿着过渡轨道自由下降(BC段),然后,进入大气层(CD段),最后就是着陆部分了(DE段).

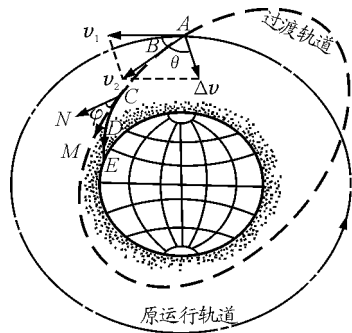


图2 卫星回收过程示意图

4.2 卫星回收过程中的受力和运动情况

为使卫星下落到地面预定的回收区域内,必须精确计算制动火箭的点火位置以及推力大小和方向,使卫星沿着与当地水平面成 θ 角的方向获得每秒约几百米的速度 Δv ,从而使卫星以原轨道速度 v_1 和 Δv 的合成速度 v_2 进入一条椭圆形的过渡轨道(制动飞行段AB段).在大气层外,卫星只在重力作用下做变速椭圆轨道运动,直到进入大气层(BC段).卫星在进入大气层时的速度方向与当地水平线的夹角 φ 叫做再入角. φ 不能太大也不能太小.对于载人卫星一般 φ 取 $1 \sim 3^\circ$,对于不载人的卫星, φ 取 $3 \sim 10^\circ$.卫星进入大气层后,受重力和空气阻力,空气阻力与速度的方向相反.在空气阻力的作用下,速度急剧下降到 200 m/s 左右(CD段).同时由于大气摩擦产生热量,因此卫星材料需要耐高温.最后是着陆阶段(DE段),在 15 km 以下的高度,卫星打开自身携带的降落伞,由降落伞产生更大的阻力将卫星的速度进一步降低到 9 m/s 以下的安全着陆速度^[1].卫星着陆时会受到地面的反作用力,对于载人卫星要采取减振措施,以防航天员受伤.

参考文献

- 1 范剑峰,张晖.懂一点空间技术.北京:中国青年出版社,1980
- 2 蔡永芳.人造地球卫星和初等数学力学.福州:福建人民出版社,1978
- 3 刘晨,朱剑涛,刘丽红,等.某平台卫星发射及在轨力学环境测量与分析.航天器环境工程,2017,34(3):271

声音的多普勒效应演示装置的设计与制作

哈登喆

(河北衡水第一中学 河北 衡水 053000)

(收稿日期:2018-04-27)

摘要:根据多普勒效应概念和原理,设计和制作了一套“声音的多普勒效应演示实验装置”,它可以由电动机带动发出某一频率声音的扬声器转动,实验者可听到声调高低的变化,也可用麦克风转换为电信号由示波器显示声波频率的变化.该装置可以用于物理演示实验教学,通过简单的操作可以直观地把声音的多普勒效应演示出来.

关键词:多普勒效应 频率 演示实验

1 引言

奥地利物理学家及数学家克里斯琴·约翰·多普勒于1842年首先提出:当波源和观察者有相对运动时,观察者接收到的波的频率会发生改变.有人请一队小号手在平板车上演奏,再请训练有素的音乐家用耳朵辨别音调的变化,得到结果验证了这一效应.

不论是声波、水波等这样的机械波,还是无线电波、光波这样的电磁波,当波源或观察者相对于介质运动时都会发生多普勒效应,因此它是波动过程共

有的一种特征.

多普勒效应的发现意义重大,在很多领域有着广泛应用.例如交通管理中多普勒雷达对车辆进行测速,医学上的多普勒彩超进行疾病诊断,在天文学上恒星光谱的多普勒红移现象揭示了宇宙的膨胀.

在生活中人们也会有样的经验:当一辆警车或救护车鸣笛从身边疾驶而过时,听到的声调由高变低,这说明声源和人有相对运动时,人听到声音的频率也发生了变化,这是声音多普勒效应的一种表现.我们设计和制作了一台声音的多普勒效应演示装置,可以方便地对这一现象进行演示.

Studies on the Mechanics Issue in the Process of Satellite Launch, Operation and Recovery

Peng Rizhang

(The secondmiddle school of Baoding, Baoding, Hebei 071000)

Liu Fucheng

(College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding, Hebei 071002)

Abstract: Based on the principle of launch vehicle and satellite launch, the mechanics of satellite launch, operation and recovery have been analyzed and discussed. The instantaneous velocity, maximum velocity and acceleration of the first-stage rocket during the launching process have been deduced according to the conservation of momentum. The calculated results coincide with the Ziolkovsky formula. The stability of satellite operation from the viewpoint of mechanics has also been discussed and studied.

Key words: satellite; gravity; launch; operation; recovery