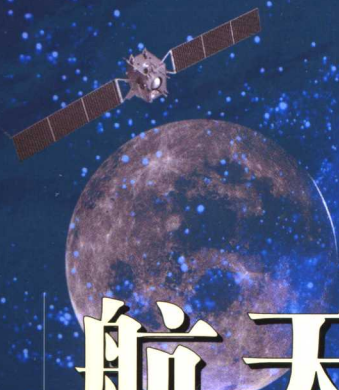


A satellite with solar panels is in the upper left corner, and a large, detailed moon is in the center-left background.

# 航天科技基础

HANGTIAN KEJI JICHU

□ 徐 予 康建勇 编著 □



國防工業出版社

National Defense Industry Press

# 航天科技基础

徐 矛 康建勇 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书主要叙述航天科学技术的基础知识。全书包括天体运行的动力学原理、航天器的运行轨道、火箭推进原理及推进装置、航天系统工程概述、卫星的基本保障系统、卫星的有效载荷及其应用、空间探测器、载人航天器、航天运载火箭、航天发射场、航天测控网、中国的载人航天工程及中国的探月工程等内容,以基本原理为主线,深入浅出,通俗易懂,力求系统地体现航天科学技术基础和最新发展。

本书可作为高等学校理工科相关专业大学生或研究生的教学参考书,也可供航空航天领域工程技术人员参考。此外也是航天科技活动感兴趣者了解航天科技知识,拓宽科学知识面的一本参考读物。

### 图书在版编目(CIP)数据

航天科技基础/徐矛,康建勇编著. —北京:国防工业出版社,2008.3

ISBN 978-7-118-05473-6

I. 航... II. ①徐...②康... III. 航天学—基本知识  
IV. V4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 180421 号

※

国防工业出版社出版发行  
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)  
四季青印刷厂印刷  
新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 18 字数 410 千字  
2008 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422  
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474  
发行业务:(010)68472764

## 序

航天技术是人类开发空间资源和探索宇宙的技术基础,是国家综合国力的体现。我国航天活动在党和国家的正确领导和全国人民的大力支持下,从1970年4月发射第一颗人造地球卫星到2003年10月“神舟”5号、2005年10月“神舟”6号载人飞船连续发射成功,标志着我国航天技术已进入世界先进行列。我国的航天事业取得了可喜的成绩,已建立较为完整的航天运载火箭系列,研制成各类科学实验和应用卫星及载人飞船,建设成配套的卫星发射中心和航天测控网。我国航天在卫星通信、卫星资源勘察、卫星气象、卫星导航和载人航天等领域为国民经济和国防安全作出了重大的贡献。

为更好地普及航天科技知识,促进航天事业的发展,提高全民科学素质,出版一本介绍航天科技基础知识的科技读物是十分必要的。

本书编著者是长期从事航天技术研究和在航天发射第一线工作的科技专家,从我国自行设计、研制的第一个火箭型号开始,多次参加我国运载火箭的飞行试验和卫星发射的技术工作,是我国航天事业发展的见证人。作者在编著过程中收集了大量资料,通过认真分析、严密推敲完成了全书的编写工作。本书对航天飞行原理、卫星轨道、航天系统、卫星、载人航天器、航天运载火箭、航天发射场、航天测控网、中国载人航天工程以及中国探月工程等众多方面作了详细的介绍,文笔流畅,内容深入浅出,是一部具有知识性和资料性的航天科技基础技术读物,它不仅适合于青年学生和航天爱好者的需要,同时对从事航天科技、管理人员也是一部很有价值的参考资料。

祝《航天科技基础》一书成功出版,希望它为中国航天事业的兴旺发达发挥应有的作用。

中国科学院院士 余梦伦

2007年10月

## 前 言

1957年10月4日世界上第一颗人造地球卫星发射成功,人类活动范围发生了一个新的飞跃。航天,由理论变成了现实。50年来,航天科学技术取得了突飞猛进的发展,航天科学技术已经形成了完整的体系,它渗透到人类社会的各个领域,成为人类生活不可缺少的组成部分。譬如,打开电视机,会看到经通信卫星传送的画面和消息;看天气预报,就有气象台根据气象卫星观测到的气象资料所作的天气预报等等,不胜枚举。

21世纪是信息社会,信息已成为这个时代新形态的宝贵资源,及时、准确、充分地掌握和利用信息是作好工作,取得科技制高点的重要基础。航天科学技术是获取、传输和应用信息资源的现代化手段。一个国家航天科学技术的水平和成就,反映了这个国家的科学进步和综合国力。有过古代四大发明的中国,过去,对人类进步作过重大贡献。今天,为了社会物质文明和精神文明的进步,为了振兴中华,我们希望航天科学技术的基础知识普及中华大地,对千家万户不再是奥秘,而是普通的科学常识。

本书主要介绍航天科学技术的基础知识,全书共13章。第1章,天体运行的动力学原理,简要介绍天体运行的基本定律和动力学基本原理。第2章,航天器的运行轨道,主要介绍运行轨道的基础知识、轨道要素和几种运行轨道。第3章,火箭推进原理及推进装置,介绍固体和液体火箭发动机原理。第4章,航天系统工程概述,主要介绍航天系统的组成和航天器的类型。第5章,卫星的基本保障系统,重点介绍了构成卫星平台的结构、热控制、姿态控制、测控、数据管理及电源分系统。第6章,卫星的有效载荷及其应用,详细介绍了不同类型应用卫星的功能、组成、原理、特点及发展趋势。第7章,空间探测器,重点叙述了对月球的探测,概要介绍了对其他行星的探测情况。第8章,载人航天器,主要介绍航天飞船、航天飞机及空间站组成原理和发展。第9章,航天运载火箭,详细论述了火箭的组成、原理和工作情况,简要介绍世界主要航天大国火箭发展概况。第10章,航天发射场,讨论了航天发射场应具备的条件,介绍了发射场航天发射各系统组成及功能,概要介绍了世界主要航天发射场。第11章,航天测控网,介绍了航天测控网的功能、原理组成及主要技术,简要介绍世界主要航天测控网概况。第12章,中国的载人航天工程,简要介绍中国载人航天工程发展情况。第13章,中国的“嫦娥”探月工程,简要介绍中国探月发展状况。

本书可作为高等学校理工科类有关专业大学生或研究生的教学参考书,也可供航空航天领域工程技术人员参考。此外,也是航天科技活动爱好者了解航天科技知识、拓宽科学知识面的一本参考读物。在编著本书过程中,参考了许多专家学者著作

和撰写的文章(见书末参考文献),在此表示衷心感谢。舒昌廉专家指导了本书的编写并审改了全书,中国科学院院士余梦伦为本书撰写了《序》,太原卫星发射中心翁杰专家审阅了全书,提出了宝贵意见和建议,在此一并表示诚挚的谢意。此外,为了本书的出版,国防工业出版社崔晓莉编辑做了大量的工作,作者表示真诚的感谢。限于作者水平所限,本书定有不少不妥之处,恳请读者指正。

编著者

2007年10月

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| <b>第 1 章 天体运行的动力学原理</b>  | 1  |
| 1.1 天体运行的轨道及开普勒定律        | 1  |
| 1.2 牛顿的伟大发现              | 3  |
| 1.3 宇宙速度                 | 4  |
| <b>第 2 章 航天器的运行轨道</b>    | 9  |
| 2.1 有关轨道的基础知识            | 9  |
| 2.2 航天器的发射轨道             | 21 |
| 2.3 卫星的几种特殊运行轨道          | 23 |
| 2.4 卫星轨道要素的选取            | 28 |
| 2.5 轨道确定与轨道改进            | 29 |
| 2.6 轨道机动与轨道维持            | 30 |
| <b>第 3 章 火箭推进原理及推进装置</b> | 33 |
| 3.1 火箭推进的原理              | 33 |
| 3.2 火箭的推进装置              | 36 |
| 3.3 液体火箭发动机              | 38 |
| 3.4 固体火箭发动机              | 42 |
| <b>第 4 章 航天系统工程概述</b>    | 45 |
| 4.1 航天系统工程的组成            | 45 |
| 4.2 我国航天系统工程的创建和成就       | 47 |
| 4.3 航天器的分类               | 51 |
| <b>第 5 章 卫星的基本保障系统</b>   | 54 |
| 5.1 卫星的结构分系统             | 54 |
| 5.2 卫星的热控制分系统            | 56 |
| 5.3 卫星的姿态控制分系统           | 59 |
| 5.4 卫星的测控分系统             | 62 |
| 5.5 卫星的数据管理分系统           | 64 |
| 5.6 卫星的电源分系统             | 65 |
| <b>第 6 章 卫星的有效载荷及其应用</b> | 68 |
| 6.1 通信卫星                 | 68 |
| 6.2 气象卫星                 | 76 |
| 6.3 地球资源卫星               | 83 |
| 6.4 导航卫星                 | 88 |

|             |                        |            |
|-------------|------------------------|------------|
| 6.5         | 测地卫星 .....             | 94         |
| 6.6         | 科学卫星 .....             | 96         |
| 6.7         | 生物卫星 .....             | 101        |
| 6.8         | 技术试验卫星 .....           | 103        |
| 6.9         | 空间平台 .....             | 105        |
| <b>第7章</b>  | <b>空间探测器 .....</b>     | <b>110</b> |
| 7.1         | 空间探测概述 .....           | 110        |
| 7.2         | 月球探测 .....             | 112        |
| 7.3         | 太阳及行星探测 .....          | 117        |
| <b>第8章</b>  | <b>载人航天器 .....</b>     | <b>128</b> |
| 8.1         | 载人航天器的特殊要求和分类 .....    | 128        |
| 8.2         | 载人航天器的特设系统 .....       | 130        |
| 8.3         | 载人航天飞船 .....           | 136        |
| 8.4         | 航天飞机 .....             | 141        |
| 8.5         | 空间站 .....              | 145        |
| <b>第9章</b>  | <b>航天运载火箭 .....</b>    | <b>154</b> |
| 9.1         | 我国航天运载火箭简介 .....       | 154        |
| 9.2         | 美国航天运载火箭简介 .....       | 157        |
| 9.3         | 俄罗斯航天运载火箭简介 .....      | 160        |
| 9.4         | 欧洲空间局的“阿丽亚娜”系列火箭 ..... | 162        |
| 9.5         | 火箭的总体结构 .....          | 164        |
| 9.6         | 火箭的推进系统 .....          | 169        |
| 9.7         | 火箭的控制系统 .....          | 175        |
| 9.8         | 火箭的遥测系统 .....          | 179        |
| 9.9         | 火箭的安全自毁系统 .....        | 180        |
| 9.10        | 火箭的其他系统 .....          | 180        |
| 9.11        | 火箭的典型飞行程序和轨道特征参数 ..... | 182        |
| <b>第10章</b> | <b>航天发射场 .....</b>     | <b>184</b> |
| 10.1        | 世界主要航天发射场 .....        | 184        |
| 10.2        | 航天发射场的技术区和发射区 .....    | 188        |
| 10.3        | 航天发射场的测控通信系统 .....     | 191        |
| 10.4        | 时间统一勤务系统 .....         | 199        |
| 10.5        | 航天发射场的气象保障工作 .....     | 203        |
| 10.6        | 航天发射场的其他技术勤务保障 .....   | 205        |
| <b>第11章</b> | <b>航天测控网 .....</b>     | <b>206</b> |
| 11.1        | 航天测控网的作用与组成 .....      | 206        |
| 11.2        | 国外主要航天测控网概况 .....      | 208        |
| 11.3        | 我国的航天测控网 .....         | 209        |
| 11.4        | 我国航天测控网的发展前景 .....     | 214        |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| <b>第 12 章 中国的载人航天工程 .....</b>   | <b>218</b> |
| 12.1 概述 .....                   | 218        |
| 12.2 载人航天工程的实施 .....            | 219        |
| 12.3 中国人圆了几千年的飞天梦 .....         | 249        |
| 12.4 我国载人航天的后续任务 .....          | 251        |
| <b>第 13 章 中国的“嫦娥”探月工程 .....</b> | <b>254</b> |
| 13.1 概述 .....                   | 254        |
| 13.2 月球开发的意义 .....              | 257        |
| 13.3 我国“嫦娥”工程的实施 .....          | 258        |
| <b>附录一 对齐奥尔科夫斯基公式的推导.....</b>   | <b>268</b> |
| <b>附录二 我国主要航天运载火箭技术性能.....</b>  | <b>269</b> |
| <b>附录三 矢量和矩阵运算法则(节录) .....</b>  | <b>273</b> |
| <b>参考文献.....</b>                | <b>275</b> |
| <b>结束语.....</b>                 | <b>276</b> |

# 第 1 章 天体运行的动力学原理

## 1.1 天体运行的轨道及开普勒定律

### 1.1.1 “地心说”与“日心说”

人类对天体运行规律的认识,是随着人类社会生产实践和科学实验的发展而不断深化的。早在古希腊时代,哲学家亚里士多德(公元前 384—公元前 332)对天体的运行就提出过“地心说”。公元 2 世纪,希腊天文学家托勒密(90—168)(图 1-1)对“地心说”又加以推演论证,使它进一步系统化了。他认为地球是静止不动地居于有限的宇宙中心。太阳、月球和其他所有星球都是围绕着地球旋转。当时的教会借助这种理论,说上帝创造了地球,并创造了宇宙的一切。这种理论独据欧洲达 1300 年。

直至 15 世纪,波兰天文学家哥白尼(1473—1543)(图 1-2)通过长达 30 年对天体的观测,对盛行欧洲的“地心说”提出挑战。于 1510 年—1514 年间写下了《天体运行论》手稿。提出:太阳是宇宙的中心,所有行星都围绕太阳按圆形轨道运转;地球同时也绕着自转轴自转;人们每天看到的太阳由东向西运行,是因为地球每昼夜向东转动一周的缘故,而不是太阳在移动;天上星球的不断移动,是因为地球本身在转动,而不是星体围着“静止”的地球转动;月球是地球的卫星。



图 1-1 托勒密

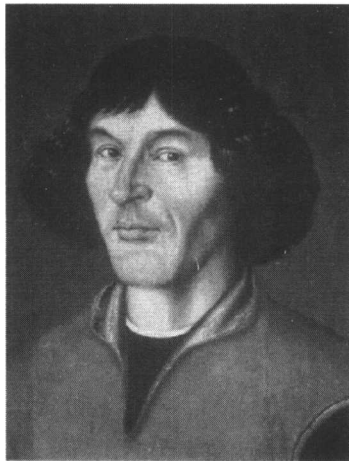


图 1-2 哥白尼

哥白尼知道,这些学说与宗教教义水火不相容。因而迟迟不能下决心出版自己的著作。直到 1543 年他逝世前,在朋友劝说下才出版了《天体运行论》,使这部伟大科学巨著得以问世。

哥白尼创立的“日心说”,从根本上改变了旧的宇宙观,在科学发展史上具有划时代

的意义,也为通向近代天文学铺平了道路,成为近代天文学的奠基人。

1.1.2 天体运行的开普勒定律

在哥白尼之后,欧洲的天文学有很大的发展,其中做出过重要贡献的有丹麦天文学家第谷(1540—1601)(图1-3)、英国天文学家伽利略(1564—1642)(图1-4)和德国天文学家开普勒(1571—1630)(图1-5)。第谷在临终前将自己多年积累的天文观测资料全部交给了开普勒,再三叮嘱开普勒,要继续他未完成的工作,并将观测结果出版。开普勒首先用很长的时间对第谷遗留下来的大量火星观测资料进行了分析,结果发现火星的轨道并不是像前人所说的正圆轨道。在经过多次试验后,开普勒确定火星的轨道为椭圆轨道,而太阳正处在椭圆的焦点之一。接着,他测出地球绕太阳的轨道也是一个椭圆。



图1-3 第谷

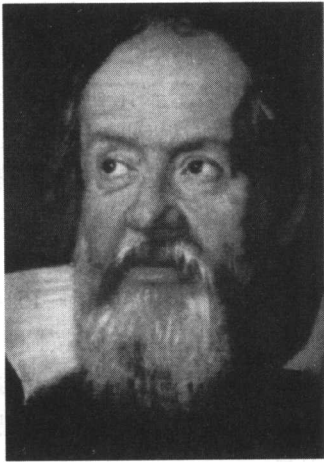


图1-4 伽利略



图1-5 开普勒

开普勒进一步确定行星绕太阳运动的速度和行星与太阳之间的距离有关,二者之间存在一定的关系。于是,开普勒于1609年发表了两条关于行星运动的定律。

开普勒第一定律:一切行星都沿各自的椭圆轨道运动,太阳在椭圆的一个焦点上。

开普勒第二定律:在相等时间内,太阳和运动着的行星的连线,所扫过的面积都是相等的。

如图1-6所示,用公式表示,当 $\Delta t_{A-B} = \Delta t_{C-D}$ ,则有

$$S_{AB} = S_{CD} \tag{1-1}$$

式中: $\Delta t_{A-B}$ 、 $\Delta t_{C-D}$ 表示行星从A点到B点和从C点到D点所需的时间; $S_{AB}$ 、 $S_{CD}$ 分别为行星在A、B、C、D各点与太阳中心的连线从A点到B点和从C点到D点所扫过的面积。

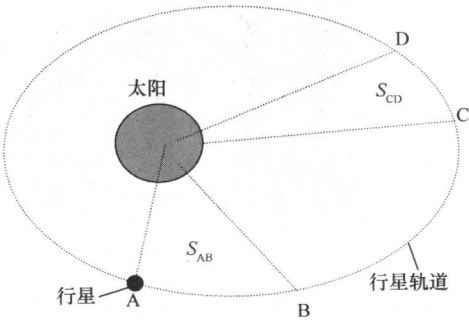


图1-6 开普勒第一、第二定律示意图

1618年开普勒发表了第三条定律。

开普勒第三定律:各个行星绕太阳公转周期的平方和它们的椭圆轨道的半长轴的立

方成正比。

用公式表示为

$$a^3/T^2 = K \quad (1-2)$$

式中: $a$  为行星绕太阳公转轨道的半长轴; $T$  为行星绕太阳公转的周期; $K$  为常数。

开普勒对行星运动三定律的发现,为经典天文学奠定了基础,并导致数十年后牛顿万有引力定律的发现,进一步得出这一系统的数学解。所以说,开普勒对世界天文学作出过重大贡献。

伽利略对自由落体运动的研究和对运动物体惯性及运动的相对性的研究,有力地支持了哥白尼的日心学说,并为牛顿力学的建立打下了基础。他还是天文望远镜的发明者。

## 1.2 牛顿的伟大发现

### 1.2.1 牛顿万有引力定律

牛顿(1642—1727)(图1-7)近代天文学家、数学家、物理学家。他出生在英格兰一个农民家庭,出生后三个月父亲便去世,两岁时母亲改嫁,母亲把他送到外祖母家抚养。11岁继父去世,牛顿才回到母亲身边。他从少年起就喜欢读书,手不释卷,在舅父的支持下,18岁时进入剑桥大学。

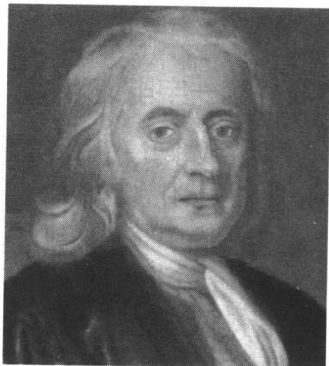


图1-7 牛顿

1665年剑桥大学授予牛顿学士学位,1669年26岁的牛顿就成为剑桥大学著名的数学教授。牛顿善于观察思考,刻苦钻研。他继承和总结了伽利略、开普勒等前人的理论和实践,终于发现了对人类具有划时代意义的万有引力。他认为一切物体之间都有互相吸引的力。太阳吸引行星,行星吸引行星,以及地球吸引地面上一切物体的力,都是具有相同性质的力。他用数学的方法,证明了开普勒定律中太阳对行星的作用是吸引力(即向心力),并求得向心力数值的大小。1687年牛顿出版了《自然哲学的数学原理》,书中除发表运动三大定律外,还发表了万有引力定律。

牛顿万有引力定律:两物体之间存在着互相的吸引力,其大小与两物体质量的乘积成正比,与两物体之间的距离平方成反比。

用公式表示为

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1-3)$$

式中: $F$  为引力; $m_1$ 、 $m_2$  为两物体的质量; $r$  为两物体之间的距离; $G$  为万有引力常数。从试验得到: $G = 6.6726 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ 。

### 1.2.2 牛顿运动三定律

牛顿的《自然哲学的数学原理》是一部力学的经典著作。牛顿在这本书中,从力学的

基本概念(质量、动量、惯性、力)和基本定律(运动三定律)出发,建立了经典力学的完整而严密的理论体系。

牛顿运动第一定律:如果物体处于静止或作匀速直线运动,在没有外力作用下,它仍将保持静止或继续作匀速直线运动。

牛顿运动第二定律:物体在外力作用下,将产生运动加速度。加速度的大小与力的大小成正比,与物体的质量成反比,加速度的方向与力的方向相同。

用公式表示为

$$a = \frac{F}{m} \quad (1-4)$$

式中: $a$ 表示物体运动加速度( $\text{m/s}^2$ ); $F$ 表示作用在物体上的合外力( $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$ ),又称牛顿或牛(N),也可以取 $\text{kg} \cdot \text{km/s}^2$ 为单位,此时称为千牛(kN); $m$ 表示物体质量(kg)。

牛顿运动第三定律:两个物体的相互作用力,总是大小相等方向相反。

牛顿运动三定律构成经典力学的理论基础,是解决物体运动问题的基本理论依据,也是解决人造天体在太空中运动的基本理论依据。

## 1.3 宇宙速度

### 1.3.1 第一宇宙速度

月球在地球引力的作用下,以一定的速度绕着地球运行,成为地球的卫星。它既不需要动力,又永远伴随着地球,以椭圆轨道作不间断运行。

那么,需要有多大的速度才能成为绕地球运行的卫星呢?为了使讨论问题简单,首先假设地球是一个均匀的球体,其半径为 $R$ ,并且不考虑地球表面大气产生的阻力和其他干扰力,卫星仅在地球引力作用下运行。

设有一个质量为 $m$ 的卫星以半径为 $r(r \geq R)$ 的圆轨道绕地球运行,运动速度为 $v$ 。由动力学知识可知:要维持卫星围绕地球作圆轨道运行,必须同时满足两个条件。第一,必须有一个向心力,即地球对卫星的引力,见式(1-3),力的方向指向地心;第二,卫星必须在与地心连线的切线方向具有足够大的速度。因为速度方向不断变化,加速度指向地心,卫星就受惯性力(俗称离心力)作用,其大小为 $mv^2/r$ ,离心力的方向与向心力相反。当向心力与离心力相等时,二者处于平衡状态,卫星就绕地球作不间断的圆轨道运行。用公式表示为

$$F_{\text{离心}} = mv^2/r \quad (1-5)$$

$$F_{\text{向心}} = GM_e m/r^2 \quad (1-6)$$

式中: $M_e$ 为地球的质量。

由式(1-5)和式(1-6)相等,化简得

$$v = \sqrt{\frac{GM_e}{r}} \quad (1-7)$$

在地面附近的高度上,可认为 $r = R$ , $R$ 为地球平均半径,式(1-5)就成为

$$F_{\text{离心}} = mv^2/R \quad (1-8)$$

此时,地球引力成为熟知的  $mg_0$ ,即

$$F_{\text{向心}} = \mu m/R^2 = mg_0 \quad (1-9)$$

式中: $\mu$  为地球引力常数, $\mu = GM_e$ ;  $g_0$  是地球表面的引力加速度。这时的  $v$  记为  $v_1$ ,由式(1-8)和式(1-9)相等,化简得

$$v_1 = \sqrt{\frac{\mu}{R}} = \sqrt{g_0 R} \quad (1-10)$$

已知: $g_0 \approx 9.80665 \text{ m/s}^2$  (地球表面重力加速度的标准值);  $R \approx 6.37103 \times 10^3 \text{ km}$ ;  $\mu = 3.986032 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$ 。

代入式(1-10)得

$$v_1 \approx 7.90 \text{ km/s}$$

$v_1$  就是卫星环绕地球表面作圆周运动所需要的速度。称为第一宇宙速度,又称环绕速度。卫星在获得这一水平方向的速度以后,不需要再加动力就可以依靠惯性环绕地球运行。应注意以下四个问题:

(1) 卫星的环绕速度与卫星的质量无关,只与卫星到地心的距离有关。即无论多大质量的卫星,相同  $r$  值的两个卫星,其环绕速度是相同的。但从发射卫星所需要的能量来看,卫星质量越大,要获得环绕速度所需的能量越多。

(2) 随着卫星的高度增加,即式(1-7)中的  $r$  变大,卫星在该高度作圆轨道运行所需的速度  $v$  (指与地面成水平方向的速度,下同)将下降。如离地面 1000km 高度的卫星,要绕地球作圆轨道运行,只需 7.36km/s; 在 35800km 高度的圆轨道,速度只需 3.07km/s。但从发射卫星所需能量来讲,卫星高度越高,为了克服地球引力的作用,所需的总能量还是增加的,要有更大推力的火箭才能在该高度达到此速度。月球到地球的平均距离为 384400km,它绕地球运行的平均轨道速度为 1.03km/s。

(3) 当卫星的速度(指近地点时速度)大于该高度对应的圆轨道环绕速度,而小于脱离速度(将在 1.3.2 节中介绍)时,卫星的轨道不再是圆轨道,而是椭圆轨道。且近地点的速度越大,椭圆的偏心率越大。

(4) 前面曾假设不考虑大气阻力,而实际上地面以上是有大气层的,离地面愈近,大气密度愈大,对卫星的阻力也愈大。卫星运转中受大气阻力的影响,速度会逐渐下降,导致轨道高度逐渐下降,甚至进入稠密大气层,使卫星被烧毁。故实用上发射圆轨道卫星一般都在离地面 150km ~ 200km 高度以上。高度愈高,卫星运行的寿命愈长。

### 1.3.2 第二宇宙速度

从地面上发射一个物体,能使该物体脱离地球引力场所需的最小速度,叫做第二宇宙速度,又称脱离速度(亦称逃逸速度)。

设一个质量为  $m$  的物体在地面附近具有第二宇宙速度  $v_2$ 。由动力学知识可知,物体的动能为

$$E_k = \frac{1}{2}mv_2^2 \quad (1-11)$$

正如通常研究两个互相吸引物体的相互作用势能的情况一样,以相距无穷远处的势能定义为零势能<sup>①</sup>。一旦这样定义零势能的位置,那么,在地面附近物体的势能都是小于零的负值。飞行物体从离地心  $r$  处运动到无穷远处( $r$  逐渐增大到无穷),这一过程中飞行物的势能从一个负值逐渐提升到零。总的势能提升量为<sup>②</sup>

$$GM_e m/r$$

在地面处,有  $r = R$ ,从地面发射飞行物到脱离地球引力场过程中,势能的提升量为

$$GM_e m/R$$

于是,根据机械能守恒原理,如果地面附近的飞行物具有的动能正好等于上述势能提升量,它就足以靠消耗自身的动能,来提升势能而运行到无穷远处,即脱离地球的引力范围。于是要求  $v_2$  至少应满足:

$$\frac{1}{2}mv_2^2 = \frac{GM_e m}{R} \quad (1-12)$$

化简式(1-12),得

$$v_2 = \sqrt{\frac{2GM_e}{R}} = \sqrt{2g_0 R} \approx 11.18 \text{ km/s}$$

一旦物体在地面获得大于  $v_2$  的速度,物体将会沿着一条抛物线轨道,脱离地球引力场,而成为太阳系的一颗行星。

需要说明一点:这里求得的第二宇宙速度以及前面的第一宇宙速度,都是相对于地心而言的。考虑到地球自转所带来的自转速度,故发射时采取顺着地球自转方向发射,充分利用地球自转产生的牵连速度,将会以较少的能量获得第一或第二宇宙速度。

地球自转产生的牵连速度,与发射点的位置(纬度)和发射方向有关。在赤道上最大,在南、北极为零;地球向东自转,因此向正东发射最有利。在不同纬度上由于地球自转而产生的速度的大小,按在赤道上的速度值乘以  $\cos\phi$  ( $\phi$  是发射点纬度)得到。发射时在赤道上的最大的牵连速度为  $0.465 \text{ km/s}$  (此时发射方向为正东)。就此而言,发射场设在低纬度地区较为有利。

同样,不同高度对应有不同的脱离速度。表 1-1 给出了不同高度卫星的圆轨道速度和该高度处的脱离速度。其中月球一项是指月球绕地球轨道的平均速度,而非绕月球表

① 实际上在太阳系中飞行的航天器,当离地心足够远处,地球引力小到可以忽略不计,就可以被看作无穷远。通常认为当距地心  $9.29 \times 10^5 \text{ km}$  以外,便被认为已经脱离地球引力场,以后就在太阳引力作用下运动。从地心以  $9.29 \times 10^5 \text{ km}$  为半径作一球,称此球为地球的“影响球”。

② 要克服引力,把质量为  $m$  的物体从  $r$  处移到无穷远处( $r = \infty$ ),需要对物体作的功为

$$A = \int_r^{\infty} F ds = \int_r^{\infty} (GM_e m/r^2) dr = GM_e m/r$$

这就是说,无穷远处的势能,比  $r$  处的势能高出  $GM_e m/r$ 。

面的月球卫星的环绕速度。月球卫星绕月球表面的环绕速度为 1.68km/s。

表 1-1 离地面高度不同卫星的圆轨道速度和该高度处的脱离速度

| 离地面高度/km    | 环绕速度/(km/s) | 脱离速度/(km/s) | 离地面高度/km                | 环绕速度/(km/s) | 脱离速度/(km/s) |
|-------------|-------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------|
| 0           | 7.904       | 11.178      | 5000                    | 5.924       | 8.378       |
| 500         | 7.619       | 10.775      | 35800(静止卫星)             | 3.07        | 4.342       |
| 1000        | 7.356       | 10.403      | 384400(月球) <sup>①</sup> | 1.03        |             |
| ①月球至地心的平均距离 |             |             |                         |             |             |

### 1.3.3 第三宇宙速度

在地面发射一个质量为  $m$  的物体,能脱离太阳引力场所需的最小速度,称为第三宇宙速度,又称逃逸速度。

地球上发射飞行物要逃逸出太阳的引力范围,那就要求它首先能脱离地球的引力,并且在脱离地球时仍具有足够的动能,以便挣脱太阳对它的引力束缚。

设物体脱离地球引力场时对太阳速度为  $v_s$ ,要使  $v_s$  达到能脱离太阳引力场,与式(1-12)同样道理,其对太阳的动能最小值应满足

$$\frac{1}{2}mv_s^2 = \frac{GM_s m}{R_{se}} \quad (1-13)$$

式中: $M_s$  是太阳的质量; $m$  是飞行物质量; $G$  是引力常数; $R_{se}$  是地球绕太阳公转轨道上到太阳中心的平均距离。故有

$$v_s = \sqrt{\frac{2GM_s}{R_{se}}} \quad (1-14)$$

已知: $M_s = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$ ;  $R_{se} = 1.49 \times 10^8 \text{ km}$ ,代入式(1-14)得

$$v_s \approx 42.2 \text{ km/s}$$

地球上发射物体,可充分利用连同地球一起进行着的公转运动速度。如前面所讲利用地球自转速度的道理一样,如果飞行物的速度方向是顺着地球公转的速度方向,就十分有利于挣脱太阳引力的束缚。

设地球绕太阳公转速度为  $v_0$ 。同样,因为太阳对地球的引力等于地球绕太阳公转的向心力(近似地把地球绕太阳的运动看作是圆周运动),于是参照式(1-8)和式(1-9)得

$$M_e \frac{v_0^2}{R_{se}} = \frac{GM_s M_e}{R_{se}^2} \quad (1-15)$$

于是解式(1-15)得

$$v_0 = \sqrt{\frac{GM_s}{R_{se}}} \approx 29.8 \text{ km/s}$$

因此,若顺着地球公转方向发射,飞行物要克服太阳引力束缚,必须具有的对地动能是  $m(v_s - v_0)^2/2$ ,再加式(1-12)给出的克服地球引力束缚所需的对地动能,于是飞离太阳系所需最少动能

$$\frac{1}{2}mv_3^2 = \frac{1}{2}m(v_s - v_0)^2 + \frac{GM_em}{R} \quad (1-16)$$

解式(1-16)可算出飞行物在充分利用地球绕太阳的公转速度情况下,所必须具有的对地心的第三宇宙速度  $v_3$  的最小值为

$$v_3 = \sqrt{\frac{2GM_e}{R} + (v_s - v_0)^2} \approx 16.69\text{km/s}$$

一旦地面上的飞行物在充分利用地球公转速度的情况下,获得大于  $v_3$  的速度,它将沿着相对于地球的双曲线轨道,先飞离地球引力场,以后再飞离太阳系,成为茫茫宇宙中的一个人造天体。