

“十二五”国家重点图书出版规划项目

25

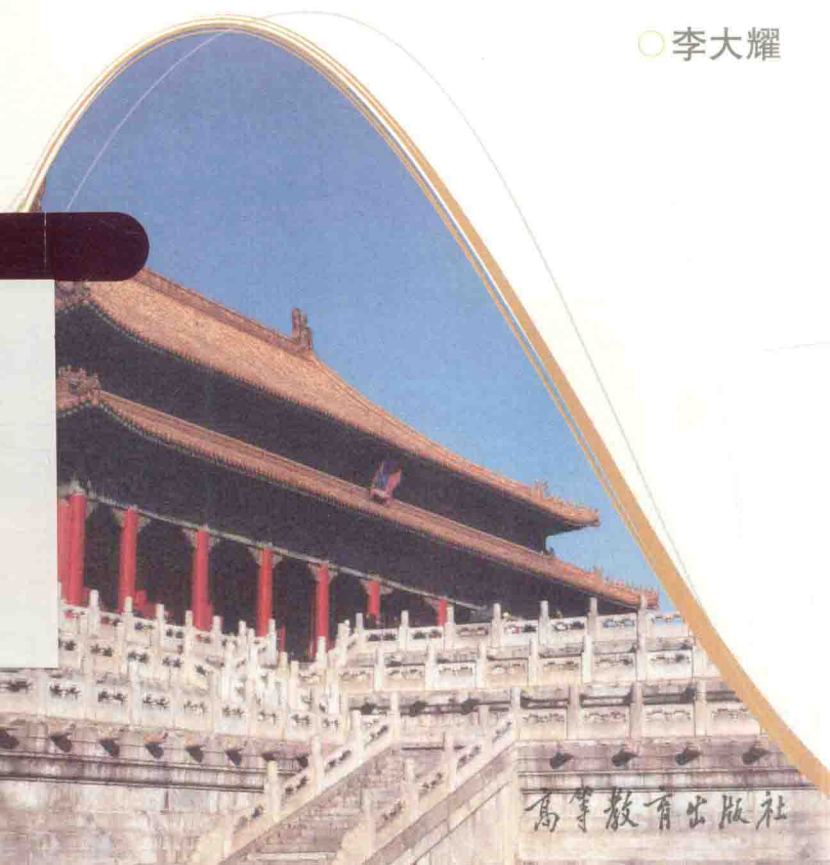
□ 数学文化小丛书

李大潜 主编

开启航天大门的金钥匙

——齐奥尔科夫斯基公式

○ 李大耀



高等教育出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

数学文化

李大潜

开启航天大门 的金钥匙

Kaiqi Hangtian Damen de Jinyaoshi

——齐奥尔科夫斯基公式

李大耀

高等教育出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

开启航天大门的金钥匙：齐奥尔科夫斯基公式 / 李大耀编. -- 北京：高等教育出版社，2014.9

(数学文化小丛书 / 李大潜主编. 第3辑)

ISBN 978 - 7 - 04 - 040980 - 2

I. ①开… II. ①李… III. ①航天-数学公式-普及读物 IV. ①V4-05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 196184 号

策划编辑 李蕊

责任编辑 蒋青

封面设计 张楠

版式设计 王艳红

插图绘制 杜晓丹

责任校对 窦丽娜

责任印制 毛斯璐

出版发行 高等教育出版社

咨询电话 400-810-0598

社址 北京市西城区德外大街4号

网址 <http://www.hep.edu.cn>

邮政编码 100120

<http://www.hep.com.cn>

印刷 北京中科印刷有限公司

网上订购 <http://www.landaco.com>

开本 787mm × 1092mm 1/32

<http://www.landaco.com.cn>

印张 4

版次 2014年9月第1版

字数 72千字

印次 2014年9月第1次印刷

购书热线 010-58581118

定价 10.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究

物料号 40980-00

数学文化小丛书编委会

顾问：项武义（美国加州大学伯克利分校）

姜伯驹（北京大学）

齐民友（武汉大学）

王梓坤（北京师范大学）

主编：李大潜（复旦大学）

副主编：王培甫（河北师范大学）

周明儒（江苏师范大学）

李文林（中国科学院数学与系统科学研究院）

编辑工作室成员：赵秀恒（河北经贸大学）

王彦英（河北师范大学）

张惠英（石家庄市教育科学研究所）

杨桂华（河北经贸大学）

周春莲（复旦大学）

本书责任编辑：周春莲

数学文化小丛书总序

整个数学的发展史是和人类物质文明和精神文明的发展史交融在一起的。数学不仅是一种精确的语言和工具、一门博大精深并应用广泛的科学,而且更是一种先进的文化。它在人类文明的进程中一直起着积极的推动作用,是人类文明的一个重要支柱。

要学好数学,不等于拼命做习题、背公式,而是要着重领会数学的思想方法和精神实质,了解数学在人类文明发展中所起的关键作用,自觉地接受数学文化的熏陶。只有这样,才能从根本上体现素质教育的要求,并为全民族思想文化素质的提高夯实基础。

鉴于目前充分认识到这一点的人还不多,更远未引起各方面足够的重视,很有必要在较大的范围内大力进行宣传、引导工作。本丛书正是在这样的背景下,本着弘扬和普及数学文化的宗旨而编辑出版的。

为了使包括中学生在内的广大读者都能有所收益,本丛书将着力精选那些对人类文明的发展起过重要作用、在深化人类对世界的认识或推动人类对

世界的改造方面有某种里程碑意义的主题，由学有专长的学者执笔，抓住主要的线索和本质的内容，由浅入深并简明生动地向读者介绍数学文化的丰富内涵、数学文化史诗中一些重要的篇章以及古今中外一些著名数学家的优秀品质及历史功绩等内容。每个专题篇幅不长，并相对独立，以易于阅读、便于携带且尽可能降低书价为原则，有的专题单独成册，有些专题则联合成册。

希望广大读者能通过阅读这套丛书，走近数学、品味数学和理解数学，充分感受数学文化的魅力和作用，进一步打开视野、启迪心智，在今后的学习与工作中取得更出色的成绩。

李大潜

2005年12月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

一、前言	1
二、钱学森首创“航天”新名词	5
三、“太空”近乎等同于太阳系空间	8
四、太空的下边界位于何处	10
五、太空资源——航天致力开发的对象	12
六、地球吸引力的近似公式	25
七、地心引力场中航天器的势能和机械能	31
八、航天速度与航天能量	34
九、火箭发动机的推力公式	44
十、火箭运动方程	49
十一、单级火箭的理想速度公式	51
十二、多级火箭的理想速度公式	60

十三、航天运载器和航天器简介	67
十四、卫星式航天器的发射弹道	74
十五、卫星式航天器的发射方向	78
十六、卫星式航天器运行轨道之一——开普勒 椭圆轨道	83
十七、卫星式航天器运行轨道之二——轨道 摄动	96
十八、卫星式航天器运行轨道之三——几种 特殊的轨道	100
十九、返回型卫星式航天器的返回轨道	103
二十、我国航天事业发展概况	111
参考文献	117

一、前 言

航天指的是用人造的飞行器(航天器)在地球稠密大气层之外、太阳系之内的空间(称为太空,其与太阳系空间只有些微差异)进行的以飞行为主要特征的活动。遨游太空或太空遨游是航天的通俗说法。

遨游太空是人类自古以来的理想。在科学技术水平和生产力十分低下的古代,人世间就已产生了反映古人对太空朴素向往的诸如“嫦娥奔月”之类的有关航天的神话传说。随着人类对自然界认识的深化,神话传说逐渐让位于科学幻想。在火炮技术得到发展后,人们从19世纪中叶开始设想乘炮弹去月球旅行。科幻小说中提到的一些飞向太空的方法,虽有一定的科学依据和能唤起人们对航天的兴趣,但在实际上却行不通。不论是先进的大炮,还是近代的飞机,都不能提供航天器进行太空遨游所需的能量,只有现代火箭才是人类实现航天的唯一可行的工具。这就是说,人类的航天梦只有在科学技术发展到一定程度后,才能成为现实。

以航天为实现目标的航天学(或航天工程)是一个由航天理论、航天实践、航天技术和航天应用等组成的复杂的科技体系. 其兴起始于 19 世纪和 20 世纪之交, 蓬勃发展则始于 20 世纪 50 年代后半期. 苏联于 1957 年 10 月 4 日成功发射世界上第一个人造天体——“伴侣”1 号人造地球卫星, 将人类社会的发展推进到航天时代. 截至 2013 年 12 月, 全世界共进行了 5 000 多次成功的发射, 约将 6 700 个航天器(含我国的航天器约 220 个)送入太空运行(内有 6 艘载人飞船登上月球、1 个深空探测器已于 2013 年 9 月飞出太阳系). 其中, 人造地球卫星约占 89%, 载人航天器及与其直接相关的无人航天器约占 8%, 深空探测器约占 2.4%.

如同恩格斯所述“天文学只有借助数学才能发展”(见《自然辩证法》)那样, 以人造天体活动为研究对象的航天学也需借助数学才能得以发展. 作为一个曾在大学数学系就读、后又在航天领域从事工作多年的科技人员, 笔者深切感到数学在航天领域大有用武之地, 现今航天领域的各部门都在应用最新的数学理论与方法来解决实际的工程技术问题, 以推动航天事业的进程. 从某种意义上甚至可以说, 数学引领人类实现、发展了太空遨游. 本书以齐奥尔科夫斯基公式为例进行说明.

被世人誉为“航天之父”的俄国学者康斯坦丁·埃杜阿尔道维奇·齐奥尔科夫斯基(К. Э. Циолковский)撰写的《利用喷气工具研究宇宙空间》(这里, 喷气工具指火箭, 宇宙空间指

太空)的第一部分于1903年由俄国杂志《科学评论》发表,第二部分于1911年由俄国杂志《航空通报》发表.在这篇著作中,齐奥尔科夫斯基提出了航天学中最重要基本公式:

$$\Delta V = W \ln \frac{M_0}{M_k}.$$

在上述这个被后人称为齐奥尔科夫斯基公式的式子中:

ΔV 为火箭(这里指单级火箭)的理想速度 V 大小的增加值,为在不考虑大气阻力和天体引力等理想情况下,火箭在其发动机工作期间获得的速度大小的增加值;

W 为火箭发动机的喷气速度 W (相对于火箭的速度)的量值;

M_0 为火箭发动机工作开始时刻的火箭质量;

M_k 为火箭发动机工作结束时刻的火箭质量;

$\ln$ 为自然对数的符号.

这里及以后,在不致产生误解时,提到理想速度、喷气速度等原本应该用黑体字符表示的矢量形式的物理量,也可认为就是用白体字符表示的该物理量的大小或量值.

齐奥尔科夫斯基公式表明,火箭的理想速度大小的增加值与火箭尺度的大小无关,仅取决于火箭发动机喷气速度 W 和火箭的质量比 M_0/M_k . 正是这一崭新的结论启迪出发展多级火箭的新概念,为现代火箭技术和航天技术的发展奠定了理论基础.齐奥尔科夫斯基公式的重要性早已得到世界公认.

1957年5月15日,尼加拉瓜邮政当局发行的10张1套题为“改变世界面貌的10个数学公式”的邮票中,印有齐奥尔科夫斯基公式的邮票赫然在列。

追根溯源,齐奥尔科夫斯基公式建立的依据就是17、18世纪创立和发展起来的变量数学(即高等数学,包括解析几何、微积分和微分方程等)和以其为工具的经典力学(以牛顿运动定律为基础的力学,亦称牛顿力学)。

二、钱学森首创“航天” 新名词

汉字“天”含义丰富，用途广泛。它既可作为时间的单位，又可指天空，还可以认为是神佛仙人居住之地……那么，航天中的“天”是什么呢。对此问题，可谓“仁者见仁，智者见智”。其中，一种看法是它泛指地球稠密大气层之外的宇宙空间（地外宇宙空间或简称空间）；另一种看法则认为它只是狭义的天空，专指我们的家园——地球的稠密大气层之外、直到太阳系边界的那部分空间。笔者比较倾向于后一种看法。

“航天”这个新名词及其定义，最早出现于 20 世纪 60 年代中期。1967 年 9 月，我国杰出科学家钱学森先生（1911—2009）在我国第一种返回型遥感卫星可行性论证会开幕式的讲话中说，人类在（地外）宇宙空间的飞行活动，在很长的时间里只限于太阳系之内，将之称为“宇宙航行”未免有些夸大。他建议，（把）人类在（地球稠密）大气层以外、太阳系以内的飞行活动，称为“航天”；而在（地球稠

密) 大气层以内的 (飞行) 活动, 称为“航空”; (只有) 飞出太阳系, 那才是真正的宇宙航行, 可简称“航宇”。钱学森先生说: “我提出‘航天’这个名词, 是受到 (我国人民的伟大领袖) 毛 (泽东) 主席 (1893—1976) 的诗句‘巡天遥看一千河’的启发, 是毛主席‘巡天’一词的延伸。” (见涂元季, 莹莹. 钱学森故事. 北京: 解放军出版社, 2011.)

钱学森先生的上述建议得到我国航天界的认同. 现今, 航天、航天器、航天运载器、航天发射、航天事业等已成为国人熟悉的词汇.

恕笔者冒昧, 钱学森先生对毛泽东主席诗词中“巡天”一词的理解似与毛泽东主席的原意有别. “坐地日行八万里, 巡天遥看一千河”源自毛泽东主席于 1958 年 7 月 1 日所著《七律二首·送瘟神》中的第一首诗. 这二首七律是毛泽东主席于当年 6 月 30 日看到当日《人民日报》报道了江西省余江县用了两年时间根治了对人民的危害极其严重的血吸虫病后, 欣喜得“浮想联翩”“夜不能寐”, 于“微风拂煦、旭日临窗”之际挥笔写就初稿, 后修改发表的. 在第一首诗中, 毛泽东主席用革命浪漫主义的手法, 把想象推进到广阔无垠的天际、星空.

毛泽东主席在 1965 年 10 月 25 日致周世钊先生 (1897—1976, 毛泽东主席青年时代好友) 的信中如此说 (参见朱向前. 诗史合一: 毛泽东诗词的另一种解读. 北京: 人民出版社, 2008):

“坐地日行八万里是有数据的. 地球直径约一万二千五百公里, 以圆周率 3.141 6 乘之, 得约四万

公里，即八万华里。这是地球自转的里程……巡天，即谓我们这个太阳系（地球在内）每日每时都在银河系里穿来穿去。银河一河也，河则无限。一千言其多而已。我们人类只是巡在一条河中，看则可以无数。”

如此看来，毛泽东主席诗中的“天”指的是银河系，而非太阳系。

三、“太空”近乎等同于 太阳系空间

“太空”这个名词在我国出现的时间早于“航天”。毛泽东主席于1958年12月21日写就的《七绝·仿陆放翁》中就用了“太空”这个词。该诗全文为：“人类而今上太空，但悲不见五洲同。愚公尽扫饕蚊日，公祭毋忘告乃翁。”（参见上一节提到的《诗史合一：毛泽东诗词的另一种解读》）但在我国航天界大约从20世纪70年代才开始使用“太空”。1985年中国大百科全书出版社出版的《中国大百科全书·航空航天》中就有“太空”这个条目，并将其定义为“地球（稠密）大气层以外的宇宙空间，又称外层空间或空间”。笔者曾认为用“太空”称呼地外宇宙空间，形象化地反映了这一空间中的绝大部分近乎空洞无物的特点。

如同钱学森先生把宇宙航行（简称宇航）分为航天和航宇两部分，现在看来似不宜简单地把“太空”作为整个地外宇宙空间的代名词。

我们知道，宇宙为包括地球及其他一切天体（自然，这里指的是天然存在的天体，下同，对人造