



科学家讲科普

空 天 探 索

中国科协青少年科技中心 组编

中国科学院老科学家科普演讲团 编著

科学普及出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

空天探索 / 中国科协青少年科技中心组编; 中国科学院老科学家科普演讲团编著. —北京: 科学普及出版社, 2017.7

(科学家讲科普)

ISBN 978-7-110-09604-8

I. ①空… II. ①中… ②中… III. ①空间探索—普及读物 IV. ①V11-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 160342 号

策划编辑	郑洪炜 李 洁
责任编辑	李 洁 刘 晨
装帧设计	中文天地
责任校对	杨京华
责任印制	马宇晨

出 版	科学普及出版社
发 行	中国科学技术出版社发行部
地 址	北京市海淀区中关村南大街 16 号
邮 编	100081
发行电话	010-63583170
投稿电话	010-63581070
网 址	http://www.cspbooks.com.cn

开 本	787mm × 1092mm 1/16
字 数	142 千字
印 张	9.5
版 次	2017 年 7 月第 1 版
印 次	2017 年 7 月第 1 次印刷
印 刷	北京盛通印刷股份有限公司
书 号	ISBN 978-7-110-09604-8 / V · 36
定 价	35.00 元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)



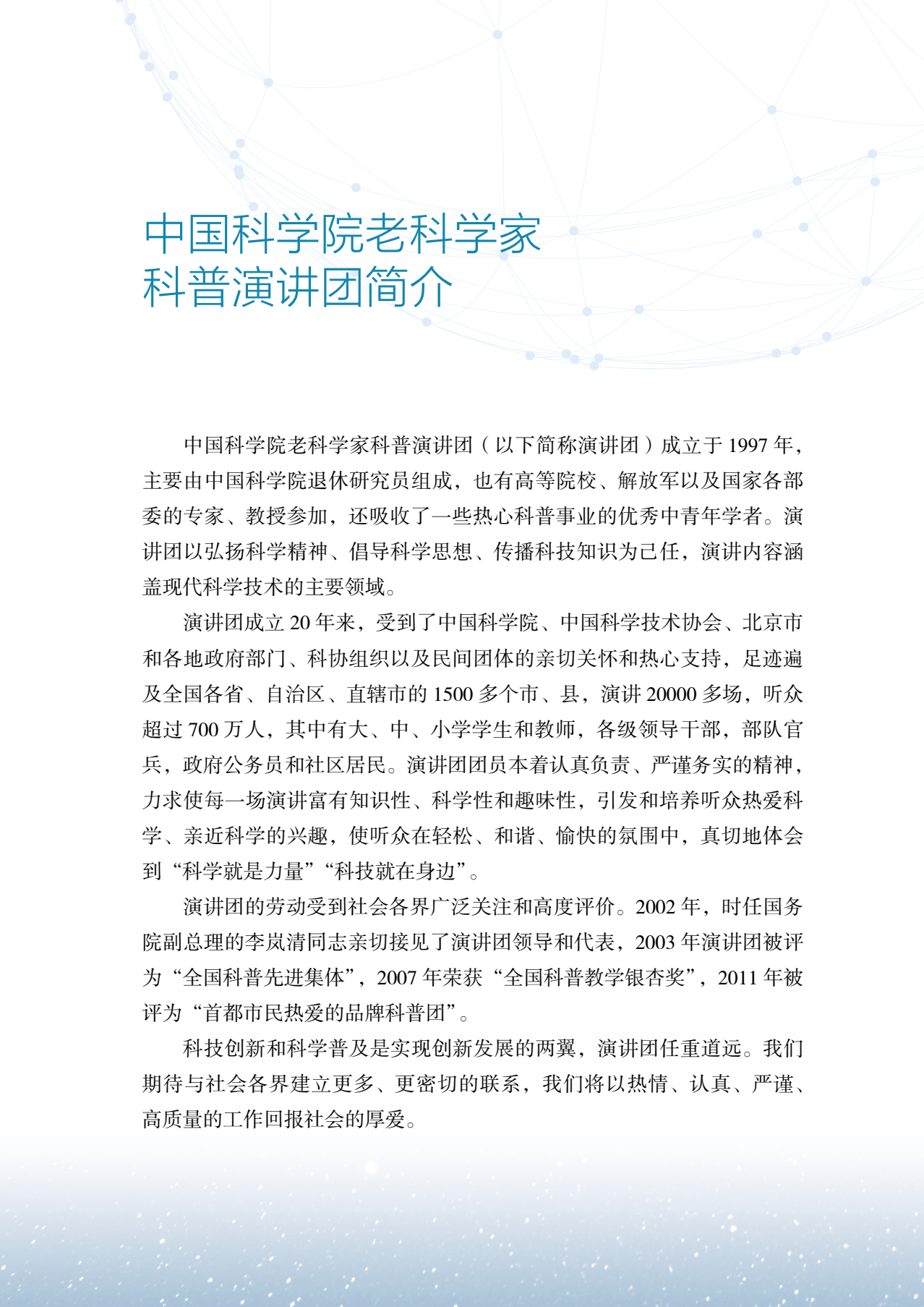
编委会

编委会主任：刘 阳

编委会副主任：刘会强 白武明

主 编：李冬晖

编 委：李 挺 徐文耀 任 高 徐德诗 潘厚任
张继民 石 磊



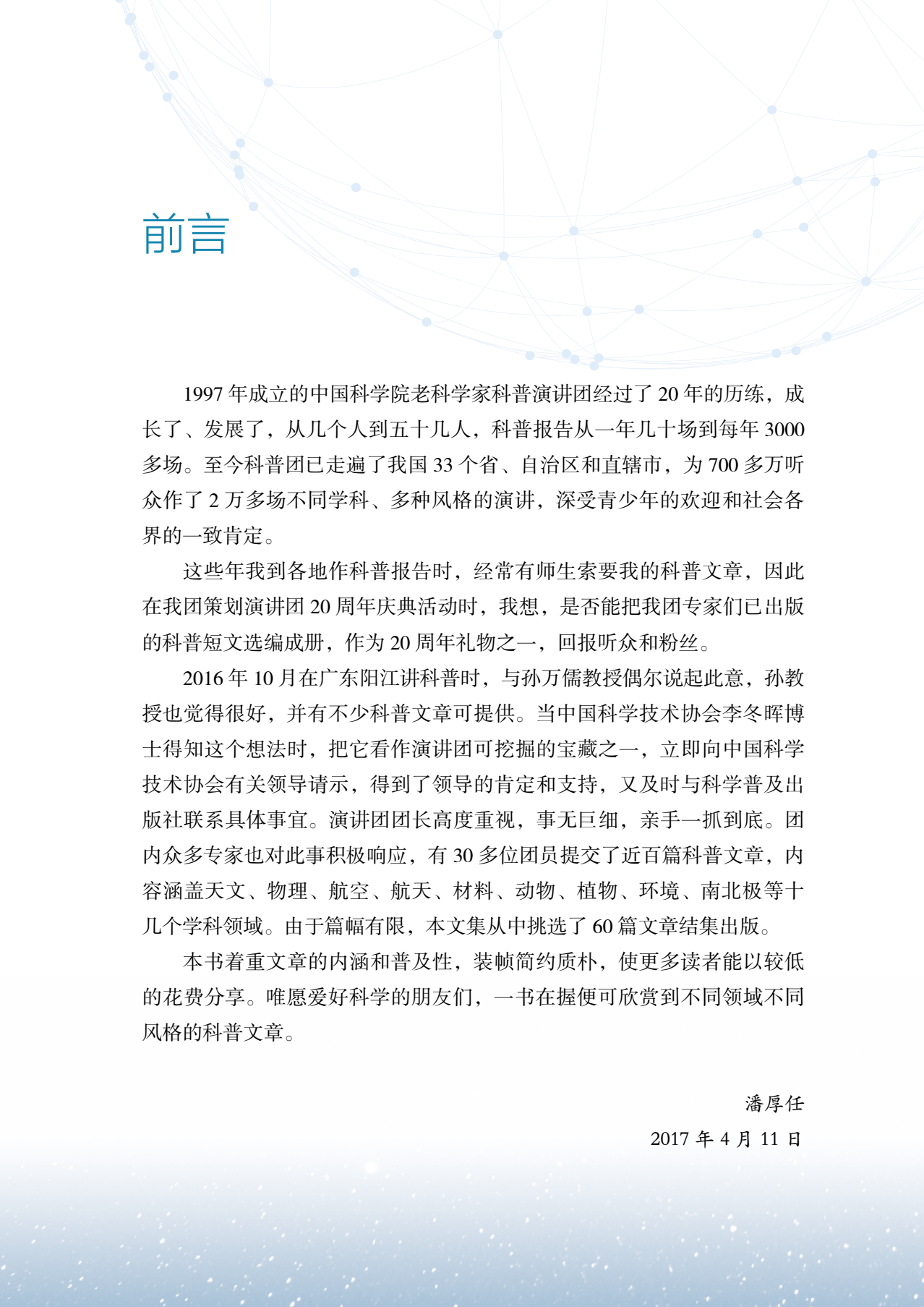
中国科学院老科学家 科普演讲团简介

中国科学院老科学家科普演讲团（以下简称演讲团）成立于1997年，主要由中国科学院退休研究员组成，也有高等院校、解放军以及国家各部委的专家、教授参加，还吸收了一些热心科普事业的优秀中青年学者。演讲团以弘扬科学精神、倡导科学思想、传播科技知识为己任，演讲内容涵盖现代科学技术的主要领域。

演讲团成立20年来，受到了中国科学院、中国科学技术协会、北京市和各地政府部门、科协组织以及民间团体的亲切关怀和热心支持，足迹遍及全国各省、自治区、直辖市的1500多个市、县，演讲20000多场，听众超过700万人，其中有大、中、小学学生和教师，各级领导干部，部队官兵，政府公务员和社区居民。演讲团团员本着认真负责、严谨务实的精神，力求使每一场演讲富有知识性、科学性和趣味性，引发和培养听众热爱科学、亲近科学的兴趣，使听众在轻松、和谐、愉快的氛围中，真切地体会到“科学就是力量”“科技就在身边”。

演讲团的劳动受到社会各界广泛关注和高度评价。2002年，时任国务院副总理的李岚清同志亲切接见了演讲团领导和代表，2003年演讲团被评为“全国科普先进集体”，2007年荣获“全国科普教学银杏奖”，2011年被评为“首都市民热爱的品牌科普团”。

科技创新和科学普及是实现创新发展的两翼，演讲团任重道远。我们期待与社会各界建立更多、更密切的联系，我们将以热情、认真、严谨、高质量的工作回报社会的厚爱。



前言

1997年成立的中国科学院老科学家科普演讲团经过了20年的历练，成长了、发展了，从几个人到五十几人，科普报告从一年几十场到每年3000多场。至今科普团已走遍了我国33个省、自治区和直辖市，为700多万听众作了2万多场不同学科、多种风格的演讲，深受青少年的欢迎和社会各界的一致肯定。

这些年我到各地作科普报告时，经常有师生索要我的科普文章，因此在我团策划演讲团20周年庆典活动时，我想，是否能把我们团专家们已出版的科普短文选编成册，作为20周年礼物之一，回报听众和粉丝。

2016年10月在广东阳江讲科普时，与孙万儒教授偶尔说起此意，孙教授也觉得很好，并有不少科普文章可提供。当中国科学技术协会李冬晖博士得知这个想法时，把它看作演讲团可挖掘的宝藏之一，立即向中国科学技术协会有关领导请示，得到了领导的肯定和支持，又及时与科学普及出版社联系具体事宜。演讲团团长高度重视，事无巨细，亲手一抓到底。团内众多专家也对此事积极响应，有30多位团员提交了近百篇科普文章，内容涵盖天文、物理、航空、航天、材料、动物、植物、环境、南北极等十几个学科领域。由于篇幅有限，本文集从中挑选了60篇文章结集出版。

本书着重文章的内涵和普及性，装帧简约质朴，使更多读者能以较低的花费分享。唯愿爱好科学的朋友们，一书在握便可欣赏到不同领域不同风格的科普文章。

潘厚任

2017年4月11日



目录

CONTENTS

李 竞

● 暗物质和暗能量

——决定大宇宙结构和宇宙最终命运的两个科学名词 / 001

宇宙膨胀正在加速

——2011 年诺贝尔物理学奖新贡献 / 007

天地大碰撞

——可能演变成潜在地球杀手的近地小行星 / 013

小行星命名法则的今昔 / 024

何香涛

● 寻找宇宙中的黑洞

——纪念广义相对论百年 / 030

潘厚任

● “东方红一号”卫星还能在轨道上运行多久 / 044

构筑“天宫”何难何用 / 046

“东方红一号”卫星为什么取多面球体 / 051

阿波罗登月四十周年

——再论“登月骗局”之争 / 052

冥王星的新定位，是进步，是倒退 / 062

人类登陆火星要克服哪些困难 / 064

焦维新

● 绚丽多彩的大气光学现象 / 069

石 磊

● 太空“狗侠” / 075

王宁寰

- 红外热敏感材料与响尾蛇导弹 / 084
- 喷火战机夺冠军，材料科学显神通 / 090

陈 光

- 从电影《萨利机长》谈鸟与飞机的关系 / 099

徐邦年

- 从未来空战解密四代战斗机 / 114

傅前哨

- 音障、热障与黑障 / 124
- 关于过载 / 131

张德良

- 更快、更高、更远
——漫谈高超声速飞行技术 / 136

暗物质和暗能量

——决定大宇宙结构和宇宙最终命运的两个科学名词

李 竞

中国科学院国家天文台 研究员

“物质”和“能量”是两个普通而常见的科技名词，也是最上位的科技名词。如果它们各自加上一个普通定语“暗”，就组成了新的复合词——“暗物质”和“暗能量”，前者令物理学家几乎一无所知，后者使科学家荣获了 2012 年诺贝尔物理学奖。

这两个物理名词涉及的对象，都是天文学家发现、确认并命名的，这两个词算是天文学名词。

先说暗物质

“暗物质”这个名词出现于 1932—1933 年，距今已有 80 年，已不是个新名词。早在 20 世纪 30 年代初，天文学家已确知，星系、星系群和星系团均是银河系之外的河外天体和河外天体系统。为了判断由为数不多星系组成的星系群以及拥有众多成员星系构成的星系团，究竟是成员固定和整体结构稳定的天体系统，还是既不稳定、也不固定、成员最终四散、各自东西、“群”和“团”解体的短暂组成，可根据“群”和“团”的成员星系和观测者之间的近似相同的距离，以及它们彼此一致的退行速度（即谱线红移）进行确认，星系群和星系团既不是投影的视觉效应，也不是短暂的组成，而都是稳定的天体系统。

瑞士旅美天文学家弗里茨·兹威基还更进一步深入探讨了“群”和“团”的稳定性。他从一个拥有五个成员星系的星系群入手，估算各个成员的质量，以及测定它们在“群”内各自的空间运动速度。兹威基首先——

测定五个星系的亮度，并根据已知的星系群距离求出它们各自的光度。再运用在恒星物理方法中已熟知的质光关系，即恒星光度和恒星质量之间的对应关系，测定出各个星系的质量，然后总和五个天体的质量，这就求出这个星系群的整体质量。按此方法求出的星系群质量称为光度质量。兹威基发现，如此求出的星系质量所产生的引力不足以控制星系各自的空间运动，各星系必将各奔东西、四散解体，这与星系群是稳定结构的结论不符。兹威基又在认为星系群为一个稳定组织的前提下，根据五个成员星系的空间运动数据，估算该“群”的质量，称之为力学质量。结果出乎意料地发现力学质量是光度质量的百倍。随后他又陆续考察了后发星系团和其他几个星系群，结论同样：光度质量仅及力学质量的 $1/400 \sim 1/100$ 。天文学界将这一出乎意料的发现称为短缺质量问题。随后，天文学界发现，不仅在光学波段，在其他波段，例如射电、紫外，也都观测不到任何足够份额的短缺质量，遂将理应存在、却又观测不到的天体称为暗物质。

20 世纪 50 年代，射电天文学兴起，通过观测银河系中的氢的分布和运动，估算银河系的质量。结果发现，根据银河系自转求出的力学质量比依据恒星天文测定的银河系光度质量多出几十倍、上百倍。在银河系中也出现了短缺质量问题。

20 世纪 80 年代，美国女天文学家薇拉·鲁宾运用分光方法，系统地研究旋涡星系的自转，并从而求出星系质量。她的令人信服的结论是：所有的旋涡星系都存在短缺质量，其依据发光天体（所有的恒星和星际物质的总和）测定的光度质量不仅只及力学质量的 $1/100$ ，甚至更少。暗物质再度引人关注，但真相依然不明。被推上暗物质候选名录的有中微子、黑洞、濒死和已亡的恒星（黑矮星、白矮星）、星际物质、行星。但所有这些已知暗天体的预期质量还是填补不上短缺的大缺口。

20 世纪 90 年代，通过遥远类星体在前景大质量集团（主要是星系团）的引力透镜效应作用下，形成了“爱因斯坦弧”或“爱因斯坦环”的深空观测资料。天文学家“看见”了充斥和笼罩星系团、呈形态不规则的晕状或云态的暗物质身影。

天文学家遂宣称已拥有铁证，表明宇宙中存在暗物质。并估算出，在

宇宙物质中由原子构成的各种已知天体和暗物质，分别各约占 15% 和 85%。专门研究天体的天文学家竟不知占大头的天体究竟为何物，遂诚心诚意向物理学家求教，期望能查明，构成这些在宇宙物质中约占 4/5 的看不见的天体，究竟都是哪些基本粒子？

根据暗物质存在的天文铁证，尤其是近年获得的新观测资料，构成暗物质的基本粒子，至少要同时具备下列三个属性：

（1）质量较重。否则它们构成的物质无法填补短缺质量的巨大缺口。应该指出，之前曾一度被推举为热门候选体的中微子就不再合格。

（2）中性，并几乎不与任何其他物质（天体）发生作用和反应，亦即对任何天体，对它似乎都是透明的。因此，另外一些前任的候选天体，诸如黑洞、白矮星、行星，都将被排除在外。

（3）初始运动速度即使不为零，也必须很小。不然，不可能集聚成晕状或云态。例如，接近光速的中微子就不可能形成中微子云。

迄今，物理学家声称，在已知的基本粒子族群中，还没有哪一种能够构成观测到的暗物质。可以说，现代物理学对天文学家确信存在的暗物质几乎一无所知。如今科学界一致认为，揭示暗物质的真相是对现代科学的一大挑战。

顺便指出，暗物质不是一个天文学新名词，在全国科学技术名词审定委员会 1978 年公布的《天文学名词》中，它已经入载。在 1998 年问世的第二版《天文学名词》中，还增加了注释。在筹划中的第三版《天文学名词》中，“暗物质”词条也正在修订。

二、再谈暗能量

直到 20 世纪 20 年代末，科学界和公众对宇宙的一致认可是无边无际、无限辽阔、无论在时间上还是空间上全都是无始无终、永恒的和宁静的。1929 年，美国天文学家爱德文·哈勃借助当时威力最大的光学望远镜所取得的遥远星系的观测资料，发现银河系之外的所有的与银河系相似或同类的星系，全都各自相互高速地飞散和飞离而去。他还发现，星系彼此之间

的距离越远，四向离散的运动速度越大。哈勃的这一发现在经过核实、确认和认可后，天文学家认为，这个规律的最佳解释是宇宙的时空整体在膨胀，遂称之为哈勃定律。根据测定出的膨胀速率，可以推算出何时是膨胀的起点，这就是宇宙自膨胀开始以来的年龄。膨胀以来所达到的距离、所覆盖的领域，正是宇宙今日的大小。有了年龄，又有了大小，宇宙当然在时间上和空间上都是有限的，这样就出现了全新的有起源、有演化、有年龄、有大小、时空正在膨胀的动态宇宙。由于膨胀的宇宙在理论和依据的观测资料上均获得支持和验证，完全改变了人们对宇宙的认识，哈勃宇宙膨胀的发现遂被尊为 20 世纪最伟大的天文学成就。

哈勃发现的星系四向退行的规律，即所谓的哈勃定律，被建立、证实、确认和公认之后，哈勃本人、他的科研小组、团队以及后来人，在随后的七八十年间，持续地开展后续探索，其中有两项课题一直不曾间断。其一是精测、修订和改善宇宙膨胀的速率数值，因为它直接关乎据此推算出的宇宙年龄和大小的精准。2012 年借助哈勃空间望远镜的探测取得的膨胀率是 74.3 ± 2.1 千米 / 秒 / 3 百万光年。由此求出，宇宙诞生以来的年龄为 137.5 ± 1.1 亿年，可观测宇宙的大小约为 137 亿光年。

另一项课题则是探究和查明宇宙膨胀速率是否恒定不变，宇宙是持续膨胀，还是这一源于大爆炸的膨胀斥力有朝一日将不敌宇宙物质的引力，最终终止膨胀，让位于引力，变为宇宙收缩。这是关乎宇宙未来走向何方、决定宇宙命运的大课题。天文学家的探索办法是观测尽可能遥远的星系，测定距离，将之与根据星系光谱的谱线红移资料、按哈勃定律所显示的距离相互对比，如果二者一致，表示哈勃定律所反映的距离真实正确；反之，则指出，膨胀速率发生了变化，已不再有效地显示星系的真实距离。为了精准测定距离，必须掌握精确可靠的“量天尺”。天文学通常是将某种光度恒定或已了解其光度变化规律的天体作为标准光源，例如，造父变星。然而，深空星系的距离太大，超过 60 亿 ~ 70 亿光年，即便运用现有的威力最大的光学望远镜，星系中的造父变星也暗弱得无法观测。因此，要有光度不仅恒定、已知，而且强大的“标准光源”。20 世纪 90 年代，一个由美国天文学家索尔·珀尔马特和亚当·里斯领导的团队，以及另一个以澳大

利亚天文学家布莱恩·施密特为首的科研小组，不约而同地开展了此项探索。他们全都采用 Ia 型超新星作为“标准光源”^①。课题称为“深空超新星巡天”，科学目标是考察膨胀速率在深空是否恒定不变。在当时，主流的观点是：斥力性质的宇宙膨胀力因受宇宙物质引力的影响，最终会减弱而减速。当取得最初几个深空 Ia 型超新星的测光资料后，发现其亮度比在哈勃定律预期距离上，应显现的亮度暗弱，也就是说这个光度已知的“标准光源”实际处在更远的距离上。如果观测资料无误，数据处理得当，就意味着膨胀速率不是放慢，而是提速。这个结果与预期的正好相反。这两个科研团队都没有急于公布这个初步但是意料之外的发现，而是反复检查和核对科研的各个环节，并继续巡天，获取更多的超新星测光资料。几年后，更多更新的数据不仅表明，在距离 70 亿 ~ 80 亿光年以及更远的深空，不仅膨胀提速，而且距离越远，提速的程度越大。这表明宇宙膨胀正在加速。1998 年，这两个课题团队公布了他们的惊人发现，科学界一致认为他们发现了前所不知也未曾预期、叠加在宇宙大爆炸诞生的膨胀运动之上、斥力性质的能量，取名暗能量。它成为世纪之交的最重大的天文学发现和科学

① “标准光源”——超新星。

超新星是罕见的天象，它的出现是恒星世界最大、最亮、最激烈的爆发事件。当超新星爆发时，亮度能够超过整个星系。所以，超新星是天文学在光学波段所能观测到的距离最远的单个天体。超新星爆发之前的天体有两类。一类是质量超过 10 ~ 20 个太阳质量的大质量恒星，另一类是密近双星中的白矮星。现在涉及的是后者。

密近双星指不仅彼此引力联系，还有相互物质交流的双星系统。如果系统中的一个成员是白矮星，另一个成员是其他类型的恒星，当演化的进程达到恒星的物质流向白矮星的阶段，白矮星的质量因此会增加，当增加到超过某一定量时，就会结构失衡、整体爆炸，成为超新星。天文学将这样的爆发事件称为 Ia 型超新星。

白矮星是一种致密天体，它是质量和太阳相仿的普通恒星在生命历程的终端，因内部核心的核聚变反应息止，失去结构支承，坍缩而演变成的天体。20 世纪 30 年代初，印度青年钱德拉塞卡（S.Chandrasekhar）在英国进修期间，根据恒星内部结构理论求证指出，当致密的白矮星质量达到并超过 1.44 个太阳质量时，即将失衡解体。后来，天文学将白矮星的这一质量上限称为钱德拉塞卡极限，随后几十年的天文发展历程证明了这一理论预期的正确性。鉴于在恒星结构和演化领域的学术贡献，钱德拉塞卡荣获 1983 年诺贝尔物理学奖。

选定质量已知的爆发天体作为“标准光源”合理、正确、明智、可信。正是由于依据精准度高的“量天尺”，通过深空超新星巡天得出的宇宙膨胀在加速这一发现才一鸣惊人、举世瞩目，被视为重中之重的成就。

成就。深空超新星巡天的资料指出，暗能量的威力在 70 亿光年以外的深空开始显现。按照现有的共识，宇宙大爆炸源于 137 亿年之前。也就是说，宇宙诞生之后约 70 亿年，宇宙的行为开始从膨胀转变为加速膨胀。如果照此模式加速膨胀，那么不出 1000 亿年，宇宙物质的密度将小到接近无，宇宙必将暗淡无光。这真是宇宙命运的未来吗？

根据已测定的暗能量，推算出包括已知天体和暗物质在内的宇宙物质，以及暗能量三者分别在宇宙总物质密度中所占的份额：

普通物质（由原子组成的所有已知的发光和不发光的天体）

4.6% $\pm$ 0.15%

暗物质 23.3% $\pm$ 1.0%

暗能量 72.1% $\pm$ 1.5 %

这是一幅令人惊异、出乎想象的宇宙图像，它表明，迄今天文学已知和探索所及的天体仅占全部宇宙的不足 5%，超过 95% 的部分均有待科学探究^①。

鉴于暗能量事关重大，2011 年诺贝尔物理学奖授予“深空超新星巡天”课题的 3 位首席天文学家。如今人们对暗能量还知之很少，对其本原和内涵了解不多。暗能量正在成为物理、天文以及宇宙学的热门话题和攻关研究对象。

原文发表于《中国科技词语》，2013 年第 15 卷第 4 期。

^① 欧洲空间局（ESA）2013 年 3 月 21 日公布 2009 年升空运行的第三代宇宙微波背景辐射普朗克（Planck）卫星的观测数据和分析结果显示，宇宙膨胀的速率为 67.3 千米 / 秒 / 3 百万光年，宇宙诞生以来的年龄为 138.2 亿年；宇宙质能组成为：可见物质 4.9%、暗物质 26.8%、暗能量 68.3%。这一成就被誉为迄今描述得最精确的宇宙图像。

宇宙膨胀正在加速

——2011 年诺贝尔物理学奖新贡献

李 竞

中国科学院国家天文台 研究员

宇宙在大爆炸中诞生，但会去往何处？获得 2011 年诺贝尔物理学奖的美、澳三位天体物理学家，通过对超新星的观测给出了答案：宇宙膨胀不断加速，而且逐渐变冷。这个发现，被瑞典皇家科学院称为“震动了宇宙学的基础”。为什么说此发现意义如此重大？我们还是先从人们对宇宙的认识说起。

一、宇宙原来不是无限的，时空也不是永恒的

20 世纪 20 年代以前，如果有人提问：“我们的宇宙从何而来？又将走向何方？”科学家都无法回答。因为在那时，科学家运用牛顿力学观察宇宙，得出的科学结论是：“我们的宇宙无论是时间还是空间都是永恒的、无限的。我们的时空没有起点，也没有终了。”这就是距今不到百年前的科学宇宙观。

1929 年，美国天文学家爱德文·哈勃根据观测发现星系距离的远近和星系谱线红移的大小成正比，即星系距离越远，它们四向退行的速度越大。后人将观测到的这一天象称为哈勃定律。哈勃定律表明，宇宙的时空整体在四向膨胀。宇宙既然在膨胀，必然有膨胀的起点，所以，宇宙一定有诞生的那一刻；既然有诞生，就一定有迄今为止的年龄，以及诞生之后膨胀至今的大小领域，因此，宇宙不是无始无终的和无限的，而是有限的。既然有年龄，就必然有生老病死，所以宇宙就不是永恒和宁静的，而是演化和动态的。这样一来，就完全颠覆了传统的奉为经典的宇宙观。

宇宙膨胀的发现、取证和确认，被认为是 20 世纪最重要的、意义深远的天文进展和成就，它改变了世人和公众对宇宙面貌和本原的认知和理解。

二、宇宙的膨胀起源于“大爆炸”

自从得知宇宙膨胀这一新天象之后，有人会问，如果宇宙确实在膨胀，为什么感知不到月球、火星、木星、太阳在远离地球而去，也没有听说太阳系、银河系在膨胀？另外，宇宙为什么会膨胀？膨胀之力来自何方？宇宙未来的命运会是什么？

关于地球人为什么感觉不到宇宙膨胀的疑问，不难解答。宇宙膨胀的速率是多少？根据 2011 年最新修订的测定值是每 300 万光年每秒 73.8 千米。即在每 300 万光年辽阔的空间领域内，每秒的膨胀速率是 73.8 千米。要知道，地月距离才 1 光秒多，日地距离 8 光分多，太阳系“半径”（太阳至海王星的距离）约 5 光时。在这样小的空间范围，当然察觉不出宇宙膨胀。不仅如此，即使在太阳系到银河系的两个伴星系（大麦哲伦云和小麦哲伦云）的 50 万~60 万光年的空间领域，以及地球到距离最近的大旋涡星系——仙女星系的约 220 万光年的空间范围里，由于膨胀速率小于星系自身的空间运动速度也不易被察觉。只有当宇宙的空间尺度远大于几百万光年的前提



下，宇宙的膨胀才显现，并成为宇宙大尺度结构的最主要特征。

三、宇宙一直膨胀下去吗

哈勃自从确认星系的普遍红移现象并建立了哈勃定律之后，随即和他的科研同仁持续地探究：在更深远的空间，哈勃定律是否继续有效？膨胀速率是恒定的吗？会不会减速？

20 世纪下半叶，随着更多的大型光学望远镜的兴建问世，科学家继续向更深远的天际进军，将探究的距离扩展到 40 亿~50 亿光年的远处。结果发现，哈勃定律仍然有效，宇宙依旧稳步地四向膨胀。进入 20 世纪 80 年代，随着科技的进步，一批口径 8~10 级的巨型光学望远镜陆续落成，观天、新型探测器件取代了经典的照相手段，计算机在天文观测和数据处理方面广泛运用，宇宙的大尺度结构的探索已向 50 亿光年之外的更远处进发。

四、选好“量天尺”

不少人都知道，光年是天文学中一种长度计量单位。在太阳系之外的星际空间，恒星之间的距离，通常以几十、几百、几千光年为计。在银河系之外的星系际空间的距离，近则几百万光年、上千万光年，远则几亿、几十亿光年。人们不禁要问，如此辽阔的距离究竟是如何测量的？

首先，一定要明白“光度”和“亮度”这两个内涵不同的词。光度是发光体本身固有的发光本领。例如，一个 100 瓦的灯泡，它的光度就是 100 瓦。亮度则是观测者看上去的明亮程度，与发光体的距离有关。100 瓦的灯泡，放在距离 10 米处，看上去很亮；若放在距离 100 米处，看上去就暗多了。根据物理知识——亮度和距离的平方成反比，因此，距离远了 10 倍，亮度暗了 100 倍。距离 100 米处的 100 瓦灯泡，看上去亮度只有 1 瓦。这样，在知道这只灯泡的光度为 100 瓦的前提下，再将它置于还能看得见的远处，只需测定它的亮度，就能依据“距离平方的反比”定则，准确推算出远处灯泡的距离。我们可以将已知光度的灯泡称为一个标准烛

光。天文学家领悟到可以运用类似的标准烛光方法去测定天体之间的距离。然而，在茫茫宇宙中，能够成为标准烛光的天体是什么？

五、探测深空的“量天尺”——Ia 型超新星

现代天体物理学表明，宇宙中发射最强光度的单个天体是超新星爆发，它的光强足以贯穿几十亿、上百亿的辽阔空间。此外，还知道超新星爆发是恒星演化终端走向消亡的一种表现形式。超新星爆发前的前身天体有两类，其一是由两个恒星组成的双星，由于彼此距离近，以至于呈现物质交流，遂称为密近双星。当双星中的一个已演化成白矮星，此时如果受到其伴星以股流形式高速投入的物质，这个白矮星则因结构失衡，突然整体爆发毁灭，成为光度超强的超新星。按照分类，它们称为I型。早在20世纪30年代，已确认一个稳定的白矮星的质量上限是1.4个太阳质量（此项天体物理成就获得1983年诺贝尔物理学奖）。因此得知，I型超新星的前身是个1.4个太阳质量的白矮星。根据天文学中的质量—光度关系，知道了质量，也就准确地知道了光度。到20世纪末，又进一步得知，I型超新星中有一个次型Ia型，其光度的均匀性更好。这样，天文学家终于获得了新的标准光源——Ia型超新星，一款适合测量深空距离的“量天尺”。

六、深空超新星巡天的重大发现——暗能量

1994—1995年，2~3个国际科研小组，在天体物理学家索尔·珀尔马特、布莱恩·施密特和亚当·里斯等首席科学家的主持下，申请到8~10米级巨型光学望远镜和哈勃空间望远镜的支持，遂启动各自的深空超新星巡天探测课题，目标之一即是借助Ia型超新星这个“量天尺”探究50亿~60亿光年以远、前人知之甚少的宇宙膨胀动向。

超新星是恒星世界罕见的天象，一个正常星系，例如银河系平均要上千年才有一次超新星爆发，而且还不一定为I型。如果探测和巡视的对象同时为十万个、百万个星系，那么正好捕捉到较为短暂的爆发进程就不再



► 索尔·珀尔马特（左）、亚当·里斯（中）和布莱恩·施密特（右）于2006年被授予邵逸夫天文学奖，此后三人被授予2011年诺贝尔物理学奖。

罕见。

当最初观测到几个遥远的 Ia 型爆发事件后，他们惊奇地发现，已知光度的 Ia 型超新星的亮度比在哈勃定律预期距离处应有的亮度暗一些，如果观测和数据处理均正确无误，合理的解释就是它们的距离比预期的更远，退行的速度比预期更大。这一现象在 50 亿~60 亿光年距离更远的大宇宙深空开始呈现，而且距离越远，亮度变暗的程度越大。历经几年的巡天搜索，累积到的深空 Ia 型超新星爆发样本的总数已达几十个之多。在遥远的深空，宇宙膨胀正在加速的发现已是不容争辩的事实。这大大地超乎预期。不少人曾推测，宇宙物质具有的引力最终会超过宇宙膨胀之力，致使膨胀终止，转为宇宙收缩。因此，当 21 世纪之初，宇宙膨胀在加速的天文发现公之于世后，震惊了科技界，乃至全社会。人们惊奇地得知，在大宇宙中，除了有与宇宙物质同在的万有引力和来自于大爆炸的膨胀之力外，还有一种前所未有的斥力性质的神秘之力，在 50 亿~100 亿光年的大宇宙中逐渐

显示为最大的主力，姑且称之为暗能量。

更令人惊奇的是，根据已取得宇宙膨胀加速的资料和数据推算得知，在宇宙中，对其本原和真相知之甚少的暗能量竟占宇宙物质总量的 73%。也就是说，人们在此之前竟然对宇宙组成中的 3/4 全然不知晓。就此还可推测，如果在今后的深入研究中，宇宙确实按现在已探测到的加速膨胀，再过上千亿年，那时，一切核聚变的产能活动全都将息止，物质密度小到接近真空，我们宇宙的命运将是寂静、寒冷和无。

如今，暗能量已成为物理学界的一个关注热点和议题，必然会推动和影响今后宇宙学，乃至物理学的发展和进步。可以认为，宇宙膨胀的加速和暗能量的发现是继宇宙膨胀和膨胀的宇宙确认之后，迄今为止可与之并论的重大天文贡献。发现宇宙膨胀正在加速的三位首席天体物理学家共同被授予 2011 年诺贝尔物理学奖，以表彰深空超新星巡天科研课题取得的成就，当在意料之中。

原文发表于《百科知识》，2011 年第 22 期。

天地大碰撞

——可能演变成潜在地球杀手的近地小行星

李 竞

中国科学院国家天文台 研究员

一、从恐龙灭绝说起

地质学家通过对恐龙化石采用放射性元素计年的探测研究，确认于距今 2.1 亿年的三叠纪和侏罗纪之交，恐龙诞生、繁衍、成熟、壮大并雄霸天下。历经 1.6 亿年，直至侏罗纪之后的白垩纪和第三纪之交，在距今 6500 万年的时候，称王称霸了 1 亿多年的形形色色的、跑的、飞的、食草的、吃肉的多种类型的动物，在白垩纪之末的短期内，从地球上消失，灭绝了。

天文学家对适者生存说的挑战：关于恐龙灭绝之谜，有许多学说、推测和假说，其中得到广泛认同的是适者生存说。该学说的内容为：白垩纪和第三纪之交的 6500 万年前，地球环境发生了一次重大变化，恐龙族群不能适应变化之后的新环境，遂被淘汰出局。这一达尔文学说的版本似乎言之有理。是否有依据呢？有些不足和牵强。似乎在过去 2 亿年间，没有足以使全球 85% 的物种灭绝的气象变化、气候起伏、地质环境变异和地球物理活动，例如大规模的地震群发和火山群发。天文学家质疑，在这段时间缺少足以令称霸了 1.6 亿年的物种退出历史舞台的动力。

恐龙确实“经风雨、见世面”：20 世纪 70 年代天文学家测定，银河系整体以逆时针方向自转，太阳系和附近空间的恒星，以每秒 250 千米的速度环绕银河系中心运行，约 2 亿年绕转一周，太阳系所在的银河系盘状结构的自转和叠加其上的旋涡结构的运动并不完全同步。每个旋涡星系的特征之一是拥有旋涡结构，旋涡结构是星系中聚集了大量新诞生和年轻的、

特别明亮的恒星，以及大量的氢。银河系是一个巨型旋涡星系，拥有 2 条主旋臂和几段次旋臂。太阳系就位于一段旋臂附近。

由于银河系盘状结构和旋涡结构的自转不同步，在恐龙生活的 1.6 亿年间，太阳连同太阳系曾 3 次跨过旋涡臂，从恒星稀疏的盘状结构，跨经旋涡臂上，再移往盘状结构处。有人类文明的岁月以来，我们一直在恒星较为稀疏的盘状结构上，还没有处在旋涡臂上

的经历。当位于旋涡臂上之际，满天的星辰要比我们熟悉的星空灿烂得多，来自恒星和其他天体的辐射也强烈得多。感受如何，未曾亲历，不得而知。不过，恐龙族群确已平安度过。

地磁反转极性是一项已知的地球物理现象，也是真相未解的一个自然之谜。古地磁学家和古岩石学家测知，在恐龙生活的岁月曾有过 3 次地磁的极性反向。在反向过程中，地球环境有哪些变化和变异，我们不是很清楚，因为有人类文明以来，还没有经历过地磁极性反向。看来，恐龙族群曾“经风雨、见世面”，并非言过其实。天文学家的质疑仅是质疑，还提不出有关恐龙灭绝的新观点和见解。

二、

阿尔瓦列茨的团队科学考察和 1980 年新假说的诞生

1980 年，一个关于恐龙灭绝的全新假说问世：恐龙灭绝是一个突发事件的外来因素造成的全球性灾难后果。这项创新假说的首席科学家是美籍以色列物理学家阿尔瓦列茨。此前，他已是诺贝尔物理学奖获得者。20

世纪 70 年代末，他和他的团队研究古地层的放射性元素。在白垩纪和第三纪之间的地层中（即地质学术语中的 K / T 界），发现在各个不同地域，普遍存在放射性元素铱（iridium）的丰度偏高的异常现象。铱是一种重元素，历经若干亿年的地质演化，地球表层的这类重元素均已沉积到地幔深处，在地表中不复存在。那么，在 K / T 界的岩体中怎么会有偏高的放射性元素铱？阿尔瓦列茨和他的科研小组通过对 K / T 界岩石样本的铱的丰度的测定、岩石的计年、铱的总量的估算，得出推论：6500 万年前的白垩纪晚期，一个小行星与地球不期而遇，造成的灾难性后果是地球物种大灭绝，恐龙从此消失，地球进入一个新的地质时期——第三纪。然而，这个创新的物种灭绝外因说问世后，并没有得到普遍重视和认可。

三、1990 年资源卫星的揭秘

事态的转机发生于 1990 年，当时一个资源卫星在墨西哥湾南端尤卡坦半岛的末尾，发现一个未知的延伸海中的凹陷地貌，该地貌前所未见，长径 180 千米，短径 165 千米，岩体计年为 6500 年，显示为一个 6500 年前形成的陨击坑。这样，与小行星遭遇、陨击坑形成、恐龙灭绝、K / T 界铱丰度反常，四者互为因果，证认为一。依据陨击坑的地形地貌和铱总量的估算，科学家描绘出一幅灾难图：一个直径 10 ~ 15 千米的小行星，以每秒 40 千米的速度撞向地球，由于地球大气的阻尼和摩擦效应，小行星燃烧并汽化，天体前端形成 20000℃ 高温的冲击气柱，在地表撞出陨击坑。这一陨击的动态能量相当于 50 亿颗原子弹的威力，或 120 万次 8 级地震释放的能量。高温气柱将所遇的一切，无论是大气、海洋、岩石、生物，统统汽化，最后变成云气。与此同时，在着陆地域引发大火，乃至洲际规模。洲际变故所形成的云气，随大气环流笼罩全球，阻断了正常的太阳辐射，植物因缺失光合作用而死亡，素食和肉食恐龙均因食物链的破坏而消亡，退出历史舞台。这是一段极可能有过的地球演化史的描绘，虽然已获得较有分量的科学界认同，但仍是一个有待进一步确切和深入探究的假说或学说。现在，我们姑且将小天体陨击事件认作恐龙灭绝的罪魁祸首。

四、陨击天体来自何方

如果在地球的演化史中，确实遭遇过足以引发全球性灾难的小天体碰撞，人们不禁要问，陨击天体来自何方？那是唯一的一次孤立事件，还是不止一次频发事件中的一次？

地球是个地质活动活跃的天体，有造山运动、板块活动、大陆漂移、地震、火山、环流等，有鲜明的“沧海桑田”。所以，地球的地形和地貌均是较为年轻的结构，地球大气有一定的阻尼效应。即便如此，地球表面遗存的大小陨击坑超过百个。而没有大气、干涸荒芜的水星，以及我们的近邻——同样是没有大气保护、地质活动较为宁静的月球，它们的地表遍布大大小小古老和年轻的陨击坑，相互叠加数以万计。所以，小天体的陨击在太阳系是普遍性的事件。6500 万年前的天地大碰撞肯定不是唯一的一次天象。那么，来袭的小天体来自何方？

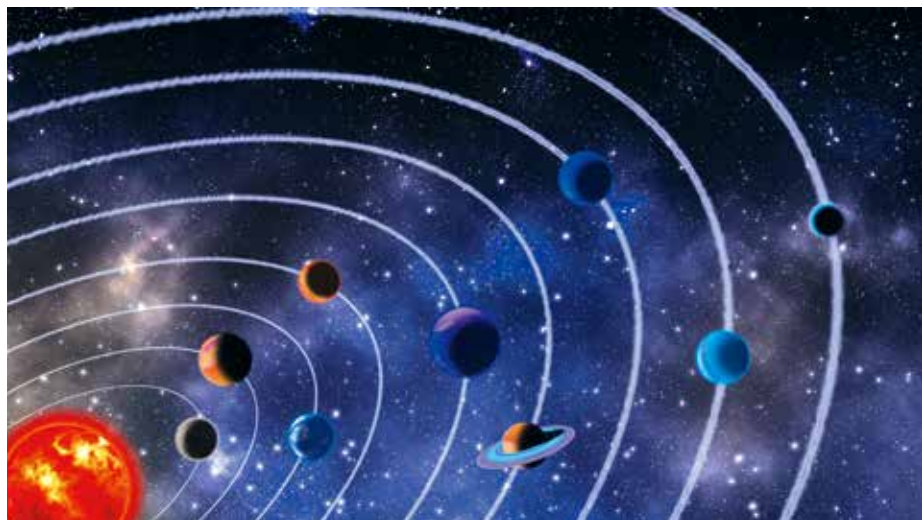
太阳系天体的布局：在地球附近空间分布着许许多多固态粒子，小的以毫米计，甚至更小，它们或是太阳系演化早期的残存物，或是诸如彗星遗撒或抛射的固态颗粒。当它们与地球相遇，在大气中受阻、摩擦发光，

成为流星、化为尘埃。我们现在要谈的不是这样的小天体，而是足以形成陨击坑，大小以几十米、百米、上千米的“大个”小天体。



下图是一幅太阳系示意图，特别强调“示意”二字，是因为图中的太阳和行星的大小尺码，以及天体之间距离远近，完全不按比例，与真相相差极远。

真实情况是，如果将日地之间的平均距离定为 1.0，那么，太阳—水星的距离约是 0.4，太阳—金星的距离是 0.7，太阳—火星的距离是 1.5，太



► 太阳系的示意图

阳—木星的距离是 5.0，太阳—土星的距离是 10.0。这一幅行星分布图表明，它们排列有序，但似乎火星—木星之间的空档“太大了点”，像是“偏离了有序”。

火星和木星轨道之间的可能存在“丢失了的行星”：18 世纪 60—70 年代，不止一位天文学家质疑，在火星公转轨道外侧和木星公转轨道内侧之间，还有一个行星。只是由于某种原因，例如反射太阳光的效率太低，致使人们的观察“视而不见”。这一没有扎实科学依据的推测，引起一些天文学家和天文爱好者的关注，他们使用手边的望远镜，在行星出没的黄道带天区进行目视巡天搜索。这样，一晃过了二三十年。

勤奋观测促使新型天体的发现：意大利天文学家皮亚齐（Piazzi G.）是一位观测好手，1800 年 1 月 1 日夜间，用望远镜观测到一个亮度 8 星等、在已有星图中未曾标出的天体，后续的观测表明其为一个方位移动的天体。随即公布了时间跨度约一个月，被疑似为彗星的方位变动的观测资料。德国数学家、天文学家高斯（Gauss J.C.F.）运用他当年新创立的天体力学方法，及时推算出新发现的天体的轨道，指出它不是彗星，而是位于火星和木星轨道之间，以近圆轨道环绕太阳运行的天体。一时间，天文界盛传，

发现了“丢失了的行星”。一时的激情和兴奋过后，在更多、更深入的观测数据和资料的分析和归算的基础上，科学家发现新天体的直径和质量，不仅小于行星族群中最小的水星，甚至比月球还小。不禁要问，这样的天体能称为行星吗？它是行星吗？最后经天文学界商定，确认它是另类行星，命名为小行星，并为它取名为谷神星。从此，太阳系的成员就有了大行星和小行星之分。

小行星世界面面观：直径 900 多千米的谷神星发现后的 40 年间，又陆续发现了另外 3 个小行星，它们都比谷神星小，直径在 300~500 千米之间，轨道也都在火星之外、木星轨道之内。天文学家确信那里没有“丢失了的行星”，很可能有小行星族群。19 世纪中叶，天文学家将新兴的照相方法作为观测手段引进天文探索领域，提高了效率，小行星巡天的成果累累。到 19 世纪末发现的小行星总数达 450 个。这种依赖照相方法作为搜索和发现小行星的手段模式，一直延续到 20 世纪 80 年代，小行星的发现总数从 1950 年的 1600 个增加到 80 年代中期的 5000 个。80 年代以来，自动化、程序化和数码成像等新技术相继引进天文实测领域，取代了古典方法和手段，发现的小行星总数在不断增加：2000 年 24 万个、2005 年 50 万个、2009 年 80 万~90 万个。在这一技术创新带动小天体巡天搜索高速发展的进程中，国家天文台兴隆观测站和紫金山天文台盱眙观测基地均做出众所瞩目的贡献。

这上百万个小天体中的绝大多数都在火星和木星之间，环绕太阳运行。小行星族群所在的天区，称为主小行星带。读者可能会问，这一天区内分布着上百万个运行中的小行星，那里是不是持续不断发生相互碰撞事件？其实是多虑。火星和木星之间是一环相当辽阔的区域，光线跨过这段距离，需时近 30 分钟。相比之下，地球和月球之间的距离，光线运行只需 1.25 秒。事实上，主小行星带并不“拥挤”，典型的两个小行星之间的平均距离是 200 万千米。

将小行星推向地球附近空间的原动力：既然大量的小行星都位居火星之外的主小行星带天区内，在距离地球并不近的空间内也和地球一样，沿各自的轨道环绕太阳公转，那么，其中一些怎么会“改弦易辙”，偏离了

轨道，飞向地球附近，以至于发生碰撞事件？诚然，太阳系形成之初，从混沌的无序状态逐步演变为动态平衡、盘状的有序结构系统，在此进程中，小天体和大天体之间、小天体和小天体之间的碰撞频频不断。随着动态平衡的形成，无序的碰撞息止。时至今日，仍有一些小行星或小天体的残片，因碰撞而改变了原有轨道，运行到地球轨道附近。当一个小行星的轨道的一部分达到天文学定义的近地，即被冠以近地小行星之名。当轨道进而达到天文学设定的红线，则被标记为潜在威

胁的近地小行星。一经发现，必然

就成为天文学家全力跟踪检测

和严加防范的对象。形成墨

西哥湾尤卡坦半岛撞击坑

的祸首正是一个威胁地

球的近地小行星。

太阳系演化早期阶段形成的近地小行星及其残片，随着岁月增进，必然越来越少。这是否意味着人们对它们关注和防范的强度可以与时降低？绝对不可。因为太阳系中还有一个自然推力，将会源源不断地促成近地小行星。这是怎么回事？

木星是太阳系中最大的行星，其质量是地球的 318 倍，超过其他 7 个行星质量的总和。木星质量大，引力场的范围和威力也大，对其附近小行星的运行干扰的力度也大。天文学家发现，在一个小天体的公转周期和木星的公转周期成整数比的条件下，将出现轨道共振效应，从而使小行星的轨道改变，从原初的近圆轨道变成椭圆轨道，进而可能成为近地小行星。

什么是轨道周期整数比？什么是轨道共振的后果？如果整数比是 1:2，即木星公转 1 周的时间与某一个小行星公转 2 周的时间相等，即为



► 撞进地球大气的近地小行星示意图

二者公转周期成整数比；又如，整数比是 2:5，即木星公转 2 周的时间与另一个小行星公转 5 周的时间相等，这也是二者公转周期成整数比。在这一类型的条件下，将形成轨道共振，其结果是小行星因受木星的摄动，轨道从近圆变成椭圆，从而可能运行到地球轨道附近，并可能变成近地小行星。木星的存在和它的作用力，将持续地促使形成新的近地小行星。这就是天文学家一定要坚持并必须有效地搜索、巡视、监测可能成为威胁地球的近地小行星的天文依据。

五、记忆犹新的事件

根据地球的地质史得知，在最近 5 亿年内至少有 5 次大规模的物种灭绝，其中最近的一次就是 6500 万年前的以恐龙灭绝为标记的事件。现在还没有足够的证据，确认历次物种灭绝均是偶现突发。根据地表已确认的陨击坑的年龄的统计研究，其规律是陨击天体的大小和陨击的事件间隔成正比，即造成局域性破坏的较小碰撞，时间间隔短；引发全球性灾难的重大碰撞，时间间隔长。过去百年间，就有不止一次地灾难自天而降。

1976 年妇女节“吉林陨石”的光临：在距今 40 多年前的一个节日的下午 15 时许，吉林地区上空突现大大小小的火球，在伴随着的雷鸣声中，陨星雨自天而降，散布在 500 平方千米地域内。事后收集到石质陨落体百余块，称为“吉林陨石”，其中最大的一块重 1770 千克。经研究，“吉林陨石”是一个直径超过 200 千米的石质小行星的残片，在 100 万年前，“流窜”到地球附近空间，最终撞上地球，并在 20 千米高空爆炸裂碎，成为“吉林陨石雨”。这一天象，仅形成直径 2 米的小陨击坑，未造成破坏性天灾。

1908 年西伯利亚空降天火的大劫难：百年前西伯利亚通古斯地区上空大火自天而降、轰鸣之声传千里的事件，后世称为“通古斯之谜”。事件的始末是：1908 年 6 月 30 日清晨 7 时许，在我国青海格尔木以北约 2000 千米处的俄罗斯通古斯地区上空，一个大火球自天而降。轰鸣之声传至 1000 千米之远，远近地震台站均记录到地震波，地磁台站也记录到地磁扰动，随后，在通古斯地区上空呈现异常辉光。由于该地人烟稀少、信息不

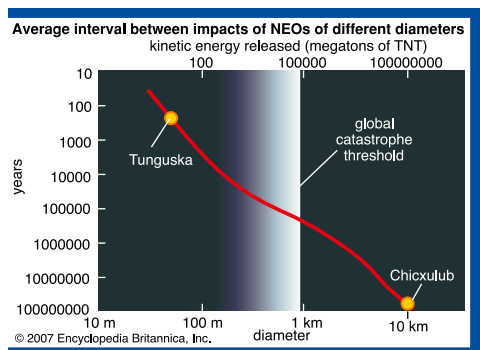
通，当时究竟发生了什么，外界一无所知。遂称之为“通古斯事件之谜”。1927年，事件过了19年，才有一人只身前往，就地探险考察。此人是苏联地学家格里戈里·伊万诺维奇·库利克。他拜访了当地的牧民，记录了耳闻的传说，就地探测了直径约50米的陨击坑，踏勘了周边方圆30千米的焦土区，目睹了2000平方千米内过火林木的四向倒伏。出乎库利克意料的是，在陨击坑内和周边，未见任何陨击体的残片。在随后的岁月，这位敬业的科学家又5次深入通古斯腹地深入探查，直至1939年的第6次科考之后，研究因卫国战争的阻断才终止。后世根据库利克的研究和考察，公认“通古斯事件”的陨击者，为一直径约60米小天体，它或许是恩科彗星（Encke's Comet）的残片，或许是近地小行星。事件发生的那天，它以每秒25千米的速度撞击地球，因大气摩擦，在8千米的高空燃烧并汽化，其冲击气柱以相当于1000个原子弹的爆炸威力撞击通古斯大地，引起了闻名遐迩的“通古斯事件”。这一事例表明，几十米大小的小天体的陨击引发的灾难虽是区域性的，但陨击点如果是人烟密集的城镇，其后果也会令人不寒而栗。

六、天地大碰撞事件可能发生的频率

天文学家和广大公众关心和关切的，一是威胁地球，造成大灾难的陨击事件，如果真的不可避免，可能何时光临？二是能否“人定胜天”力促事件不发生？是否能够减灾避祸？

先来谈谈第一个提问。具有学术权威的《不列颠大百科全书》中有一则“陨星”（meteorite），2007年发表了该词目新修订的电子版释文。现借助其中一幅插图——“近地小天体的大小、动能威力和两次陨击的时间间隔的相关图”，回答这一提问。

图中，下方横坐标的尺度表示的是近地小天体的直径，单位分别是米（m）和千米（km）。上方横坐标的尺度是陨击天体释放的动能，以TNT炸药的威力表示，单位是百万吨。左侧纵坐标是两次同样大小的近地小天体陨击地球的时间间隔，单位是年。图中的红线是相关曲线。曲线上橙色圆点



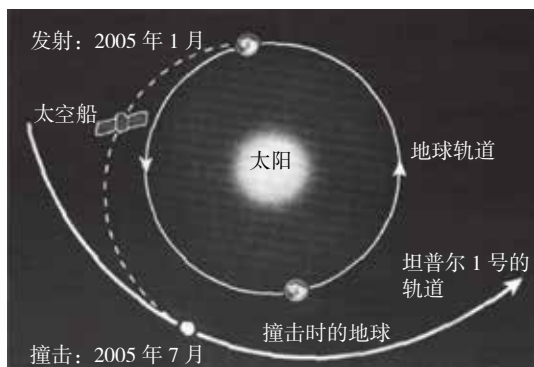
► 近地小天体（NEO）的大小、动能和两次陨击时间间隔的相关图（图片来自美国国家航空航天局网站）

表示历史上的 2 个陨击事件。左上的是“通古斯事件”，小天体直径 60 米，两次陨击的时间间隔约是 300 年。右下的是“尤卡坦半岛事件”，直径大小是 10 千米，时间间隔约近 1 亿年。图中间画一直线，分成左右两个区域。左区的小天体直径小于 1 千米，右区则是大于 1 千米。明确显示，小于 1 千米的小天体，祸及局域；

大于 1 千米者则将引发全球性灾难。应该指出，上面讲述的虽具有一定科学性，但究竟是统计意向和结论，当然还需要进一步深入探讨、深化、改进和完善。

七、2005 年的一次令人鼓舞的成功演练

再说说第二个提问。1994 年，鉴于对近地小行星的认识的深化，多国天文学家联合组建了国际小行星巡天和监测网，中国科学院国家天文台和紫金山天文台 10 多年来，积极地参与网站的常规性观测、搜索、分析、研究，成为重要的成员。为发现新的小行星，检测出其中的近地小行星，评估其威胁等级等，做出可圈可点的贡献。据悉，在最近的若干年间，尚未检测出极具威胁的近地小行星。与此同时，还实现了一次大可借鉴的实兵演练。

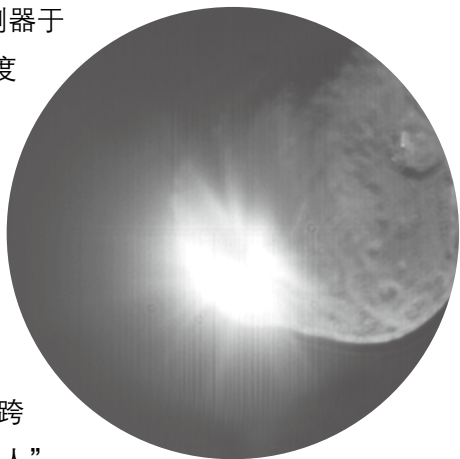


► “深度撞击”飞行轨迹以及与后来居上的彗星坦普尔 1 号冲撞的示意图

发现新的小行星，检测出其中的近地小行星，评估其威胁等级等，做出可圈可点的贡献。据悉，在最近的若干年间，尚未检测出极具威胁的近地小行星。与此同时，还实现了一次大可借鉴的实兵演练。

2005 年，一个名为“深

度撞击”(Deep Impact)的空间探测器于1月2日升空,以每秒20千米的速度飞离地球。它的主要科学目标是释放一个370多千克金属锥锤,在近距离处与一个彗星冲撞,观察并研究冲撞前的彗星表面和冲撞后的陨击坑。选定的目标是椭圆轨道周期5.5年的彗星——坦普尔1号。它于1867年被发现,观测资料的时间跨度长达150年,是天文学家的“老熟人”。2005年7月4日,坦普尔1号彗星的飞行速度比“深度撞击”还快每秒30千米,



► “深度撞击”释放的金属锥锤与彗星碰撞的瞬间

它从深空远处赶上“深度撞击”,以每秒10千米的相对运动速度,迎面碰上飞行器释放出的金属锥锤。结果,金属锥锤在彗星表面撞出一个直径100米、深30米的陨击坑,完满地达到“深度撞击”的科学使命。

这次科学实验是一个飞行器和一个天体的碰撞,二者的运行速度均高于从枪膛射出的子弹。在科技掌控下,在千万千米的远处准确撞击,精度大大超过“百步穿杨”。天文学家举手相庆。因为他们明白,如果“深度撞击”飞行器携带的金属锥锤换成核弹,坦普尔1号彗星换成威胁地球的近地小行星,岂不是可以化解险情了!这真是一次大有帮助的模拟演练,极大提高了天文学家化解灾情的信心。

八、最后的寄语

近地小行星对地球的威胁始终存在。人类的智慧、努力和科技,能够实现减灾和避祸。

原文收录于《科学在这里》,科学出版社2011年出版。

小行星命名法则的今昔

李 竞

中国科学院国家天文台 研究员

一、200 年间小行星发现总数稳步增加和高倍增长

从 1801 年意大利天文学家朱塞普·皮亚齐利用光学望远镜在目视巡天时发现第一个小行星算起，到 2005 年年初的 200 多年间，已记录在案的小行星的总数超过 50 万个。从小行星表刊载的星数的增长资料（见下表），能够反映出天文观测技术和研究方法的进步和发展。

小行星表刊载的星数

年份	已发现的总数（个）	载入星表的总数（个）	已有专名的小行星（个）
1801	1	1	1
1844	4	4	4
1900	450	450	450
1950	1600	1600	
1980	3000	2400	
1995	10000	6000	
1997	36000	8000	5500
1999	160000	10000	
2000	230000	16000	
2001	290000	26000	
2002	370000	42000	
2003	420000	65000	10000
2004	500000	96000	12000

19 世纪上半叶，天文学家唯一的有效观天手段是通过折射或反射望远

镜用肉眼巡视，发现最初的 4 个小行星共经历了近半个世纪。19 世纪下半叶，天文观测中引进照相方法，小行星的发现效率大增，到 20 世纪初，已知总数达到 450 个。这个增长速率一直持续了近百年。到了 20 世纪 90 年代，天文实测进入数字化时代，电荷耦合器件（CCD）作为天体辐射接收器件全面取代了天文照相底片。1994 年组建的国际小行星检测网站在巡天观测活动中已全程使用计算机操作，发现率持续增长。在天文学中，所有记录在案的天体，无论是太阳系天体、恒星、双星、星团和星云、不同波段的辐射源，还是各种类型的河外天体，都各有专名和不同的命名法。那么，在国际上和中国，小行星是如何命名的？我国和国际如何接轨？

二、早期的命名传统——仙女族群

在西方，除太阳和月亮外，以神话中的神灵命名行星，分别给木星、火星、金星、土星和水星冠以主神（Jupiter）、战神（Mars）、爱神（Venus）、农神（Saturn）和信使之神（Mercury）之名。望远镜发明后，发现的 3 个行星也按自古传承的传统为它们取名：天王星（Uranus）、海王星（Neptune）和冥王星（Pluto）。17 世纪以来陆续发现的行星的卫星也遵循古例，冠以与各自从属的行星神灵有关的小精灵之名，例如，火卫二（Deimos）、木卫四（Callisto）、土卫六（Titan）、天卫五（Miranda）、海卫一（Triton）和冥卫（Charon）。第一个小行星发现后，再一次沿用传统以神话中的神灵为之命名，小行星 1 号（Ceres），这是一个主管五谷杂粮的女性小神灵。随后发现的 3 个，也援例照办：Pallas、Juno 和 Vesta，也都是女神仙。从此，每一个小行星都有两个名称，一个是小行星总表的数字序号，另一个是以女性神灵为称谓的专名。这个约定成为 19 世纪天文学家遵循的小行星命名规则，而专名的命名权属于发现者或发现者所在的天文台。

19 世纪初，英国传教士伟烈亚力（Wylie Alexander）将当时英国天文学家约翰·赫歇尔的《天文学纲要》（*Outlines of Astronomy*）引入中国。这是一本天文学名著，讲述直到 19 世纪 40 年代末的天文学成就。该书自 1849 年问世，曾多次再版，并译成多国文字。伟烈亚力和清代知名学者李善兰合作共

译该书，中译本取名《谈天》，于 1859 年出版。原著成书时，发现的小行星有 10 个。当《谈天》完成译稿时，发现数已增至 57 个。《谈天》的再版本，附有一个到 1871 年止的包括 116 个小行星的总表。李善兰在为这些小行星确定中文名称时，不采用较为便捷的音译，而是意译。因为音译不仅与汉语化的大行星的名称（如木星、金星）不协调，与李善兰已采用的卫星的命名法（如木卫四、土卫六）也不协调，对于不熟悉西方古代神话中诸多神仙之名的中国读者也极不方便。意译小行星专名并非易举，与音译法相比，显然是一条更为艰辛的途径。首先由熟悉神话掌故的传教士描述已作为小行星专名的神话人物的身世、特征、专长、职责等，再由文化底蕴深厚的学者李善兰选配恰如其分的汉文名。例如，谷神星、智神星、婚神星、灶神星、虹神星（Iris）、花神星（Flora）、司琴星（Lutetia）、丽神星（Euphrosyne）、香女星（Eugenia）、月神星（Diana）、河神星（Aegina）、纺神星（Klotho）、伴女星（Klymene）、祭神星（Iphigenia）。《谈天》编译的包括 116 个中文专名的小行星总表是对中西文化交流的贡献，也是对国外天文文学名词汉语化的成功尝试。《谈天》首创的小行星专名已成为重要的天文文献，其中大都沿用至今。

三、19 世纪末的命名规则——从仙境到人间

由于照相巡天的运用，发现的小行星总数较快地达到 300 个，可供天文学家选用的神话人物名称数目日渐稀少，显得不敷应用。经国际天文学界协商，命名范围从天上仙境扩展到地上人间，可以用国家、地域、城市、人物等作为专名，但仍遵循以阴性名词命名的规定（见下表）。

部分小行星专名

编号	部分小行星专名	编号	部分小行星专名
301	Bavaria（地名）	531	Zerlina（歌剧《唐璜》中的女角）
327	Columbia（地名）	555	Norma（歌剧《诺尔玛》中的主角）
341	California（地名）	666	Desdemona（歌剧《奥赛罗》中的主角）
371	Bohemia（地名）	815	Coppelia（舞剧《葛培莉亚》中的主角）
469	Argentina（国名）	861	Aida（歌剧《阿依达》中的主角）
471	Papagena（歌剧《魔笛》中的女角）		

对于阳性人名、地名、物名等，则加上阴性的词尾使之阴性化（见下表）。

部分小行星专名和原名

编号	部分小行星专名	部分小行星专名和原名
324	Bamberga	Bamberg（天文台）
443	Photographica	Photography（方法）
484	Pittsburghia	Pittsburgh（地名）
508	Princetonia	Princeton（研究院）
566	Stereoskopia	Stereoskop（仪器）
768	Struveana	Struve（天文学家）
784	Pickeringia	Pickerring（天文学家）
837	Schwarzschilda	Schwarzschild（天文学家）
851	Zeissia	Zeiss（仪器厂）
855	Newcombia	Newcomb（天文学家）
886	Washingtonia	Washington（人名、地名）
991	McDonalda	McDonald（天文台）
995	Sternberga	Sternberg（天文台）
1000	Piazia	Piazzi（天文学家，谷神星发现者）
1002	Olbersia	Olbers（天文学家）
1034	Mozartia	Mozart（音乐家）
1039	Sonneberga	Sonneberg（天文台）
1059	Mussorgskia	Mussorgsky（音乐家）
1123	Shapleya	Shapley（天文学家）
1192	Prisma	Prism（仪器元件）
1422	Strömgrenia	Strömgrenia（天文学家）
1560	Strattonia	Stratton（天文学家）

对中国人来说，要特别加以注意，不要一律按字面音译，不然会弄出笑话。例如，小行星 508 是“普林西顿”，不能译成“普林西托尼娅”；小行星 1034 是“莫扎特”，不能译成“莫扎提娅”；小行星 1192 是“三棱镜”，不能译成“普丽兹玛”。

四、命名法则的进一步开放

20 世纪中叶，国际天文联合会第 20 专业委员会终于突破小行星专名

女性化的规定，不再要求将阳性的人名、地名、事名、物名等加上阴性词尾。从此，在小行星专名的族群中不仅有保持原词原貌的人物（历代名人、科学家、诺贝尔奖获得者、历届国际天文联合会的主席、文学家、音乐家、歌剧和戏曲中的角色、有命名权者题献的人物等）、事物（天文台站、天文仪器、学府、科学院、学术机构和团体、重大事件、纪念日和周年纪等），还有国家、省名、州名、城镇、村落、山峦、河川、湖海、动物、古生物、花草、鱼虫，真是蔚为大观（见下表）。

部分小行星专名

部分小行星专名	编号	部分小行星专名	编号
牛顿	8000	全偶数	24680
居里夫人	7000	团结	8991
爱因斯坦	2001	自然科学的数学原理	2653
哈勃	2069	小行星命名辞典	19110
卡门	558	联合国	6000
罗曼罗兰	1269	中华	1125
斯皮尔伯格	25930	北京	2045
海尔天文台	1024	太平洋	224
中国科学院	7800	咕咕鸟	2731
北京大学	7072	暴龙	9951
国际天文联合会	5000	创神星	50000
第一百（小行星纪念）	513		

此外，已有 50 多个中国的省市名称被用作小行星专名。

五、国际天文联合会的命名新法

小行星的编号和命名由国际天文联合会下属的小行星中心（MPC）主持。1995 年确认的统一格式是每一个小行星有暂定编号、永久编号和专名共 3 种称谓。其中，暂定编号的内涵往往令不明其详者感到困惑，其实一点即破，并不神秘。

暂定编号由发现年份、发现月份的上半月或下半月，以及该半个月的发现顺序号共 3 部分组成：

发现年份用 4 个数字表示，如 1999、2002、2005。

发现月份用从 A 到 Y 中的 24 个字母表示，字母 I 不用。A 表示 1 月上半月、D 是 2 月下半月、J 是 5 月上半月、Q 是 8 月下半月、T 是 10 月上半月、Y 是 12 月下半月。

顺序号用从 A 到 Z 中的 25 个字母代表从 1 到 25 个数字，字母 I 不用。A 是第 1 个，H 是第 8 个、L 是第 11 个、Z 是第 25 个。25 以上则用字母加上数字，如 A1 是 26、B1 是 27、Z1 是 50。

例如，暂定编号 1994FW 表示该小行星是 1994 年 3 月下半月发现的第 22 个，编号 1997CD1 表示 1997 年 2 月上半月发现的第 29 个，编号 2004VF8 表示 2004 年 11 月上半月发现的第 206 个。

到 2005 年年初，已有暂定编号的小行星超过 50 万个。

当一个小行星有不少于 4 次回归期间的观测资料，又有较为精确的轨道数据时，国际小行星中心即授予一个永久编号，用数字表示。例如，第 433 号、第 3789 号。如今已有永久编号的小行星超过 96000 个。当一个小行星获得永久编号后，发现它的天文学家或天文台站即得到专名的命名权。到 2005 年年初，已有专名的小行星约 12000 个。

附表 以中国天文学家命名的小行星

编号	中国天文学家	编号	中国天文学家
1802	张衡（东汉）	3405	戴文赛
1881	邵正元（美籍）	3513	曲钦岳
1888	祖冲之（南北朝）	3751	江涛（旅欧）
1972	一行（唐）	3797	余青松（美籍）
2012	郭守敬（元）	4760	张家祥
2027	沈括（北宋）	6741	李元
2051	张钰哲	6742	卞德培
2240	蔡章献（台湾）	6743	廖庆齐（旅美）
3014	黄授书（美籍）	16757	落下闳（西汉）
3171	王绶	28242	明安图（清）
3241	叶叔华		

原文发表于《中国科学技术语》，2006 年第 8 卷第 1 期。

寻找宇宙中的黑洞

——纪念广义相对论百年

何香涛

北京师范大学天文系 教授

苏联著名物理学家诺贝尔奖得主列夫·达维多维奇·朗道，给世界著名科学家排名，例如，玻尔、狄拉克、薛定谔等定为 1 流，自己定为 2 流半，唯独爱因斯坦定为 0.5 流。爱因斯坦于 1905 年创立狭义相对论，1915 年创立广义相对论。爱因斯坦自己说，没有我爱因斯坦，别人也可以建立狭义相对论，但对于广义相对论，没有我爱因斯坦，50 年内不会有人问津。联合国将 2005 年命名为国际物理年，纪念狭义相对论的诞生。广义相对论正式发表于 1916 年，2016 年适逢百年，仅以一篇小小的文章，作为纪念。

一、驱车寻找妖怪

20 世纪 80 年代初，我在英国皇家爱丁堡天文台进修两年，著名的尼斯湖就在那里。尼斯湖位于苏格兰的北部，苏格兰人把湖称作 loch，尼斯湖叫作 Loch Nessie。从爱丁堡开车到尼斯湖，行程 100 多千米，但由于全是在起伏不平的丘陵地上行驶，再加上我们先到苏格兰最北部的天堂岛游览了一番，等到达尼斯湖时已是下午 4 点多。尼斯湖是一个狭窄的长条，宽度只有 100 米左右，最宽处似乎也不会超过 200 米，但长度却有 10 千米以上。据称，古冰川时期，在造陆地时这里发生了激烈碰撞，出现了断裂错位，从而形成了裂缝状的湖泊，湖深达到 100 米以上。一到这里，首先给人的感觉是雾气缭绕，阴森恐怖，英国的天气本来就是阴多晴少，旅行社打广告常常是到有太阳的地方去。尼斯湖的周围森林茂密，更



▶ 当年站在尼斯湖旁，虽然没有看到妖怪，心情却颇为澎湃

是终日不见天日。在这种环境中，见不到妖怪倒是反常了。我们开车沿尼斯湖走走停停，持续了个把小时。也许是尼斯湖的妖怪怯生，见了外国人害怕，始终没有露面。当地人讲，要等在那里几天几夜，才有看到的机会。不信，有各种照片为证。曾经有人建议，用近代声纳等先进技术，在湖内扫荡一遍，以求真伪。聪明的苏格兰人马上表示反对，这不是砸旅游业的饭碗吗？

二、 黑洞的由来

把类星体比作妖怪，而且是尼斯湖中的妖怪，颇为贴切。不仅用词新奇，还可以增加想象空间。不仅如此，只有把黑洞放在类星体的中心，这个妖怪才更能勉强令人信服。

像中国的封神榜一样，先把各路神仙封定，哪里需要，就出现在哪里。黑洞也是一样，尘封在那里数百年，由于没有需求，也就没人问津。到了20世纪60年代，以类星体为代表的一系列新的发现，无法得到圆满地解释，只好把黑洞请了出来。一时间，黑洞越炒越热，天文学家千方百计地

寻找黑洞，物理学家挖空心思去探究黑洞的物理本质。

黑洞概念的提出源自牛顿的万有引力定律。我在英国进修期间，曾到剑桥大学访问，在那里有一棵不大的苹果树，被告之是牛顿当年看到的苹果落地之树。虽然原树早已死亡，但新树还是在原地栽植的。据说，牛顿本人并不否定是由于看到苹果落地而想到万有引力，不过，牛顿看到的那棵苹果树应该在乡下，因为他年轻时曾在那里躲避过瘟疫。我身后的这栋建筑，确实是牛顿工作过的地方。

牛顿出生于伽利略逝世的1642年，18岁考入剑桥大学的三一学院，毕业后致力于数学、力学、光学诸方面的研究。由于成果卓著，26岁便成为剑桥大学的教授，30岁成为英国皇家学会的会员。牛顿的最大成就无疑是万有引力定律。



► 在牛顿的苹果树旁留影，这棵小树不可能是“原物”，但身后的古老建筑却有几百年的历史了

1687年，划时代的巨著《自然哲学之数学原理》出版，详细地阐述了万有引力定律的全部内容。那一年，牛顿45岁。

万有引力定律究竟是如何发现的？其实，真正的功劳来自天文学。牛顿所处的时代，正值天文学的大革命，哥白尼学说刚刚取得胜利，人们都在关注天体的运动。开普勒继承了他的老师、丹麦天文学家蒂谷的观测资料，从中得出了行星绕太阳运动的三大定律，然而，大家不清楚是什么力量迫使行星必须绕太阳这样运动，关键之处是这种强迫力还必须与两个天体之间的距离平方成反比。首先证明这一点的不是牛顿，而是胡克。牛顿的朋友哈雷赶紧将这个�息告诉牛顿，牛顿说他早已胸有成竹，于是，将论文《论运动》寄给了哈雷。论文中从中心引力出发，牛顿导出了开普勒的三大定律，尤其是行星运动的轨道不应该是圆而是椭圆这一定律。随后，牛顿在另一篇论文《论物体的运动》中，又给出了中心引力的具体形式，不仅与两天体间的距离平方成反比，还与

它们的质量乘积成正比。这便是万有引力定律的完整表述。

谈到万有引力定律，引起了我的一段回忆。1977年，大学恢复了招生，最初的几批学生招收的是工农兵大学生。这些学生都没有高中毕业，有的连初中都没有上过。我当时教他们力学，难度之大，可想而知。当时的思想是只要有革命的精神，任何困难都可以克服。为了理论联系实际，我在讲解引力定律时结合了开普勒的行星运动，由开普勒的三定律推导出万有引力定律。牛顿当年是如何推导的，我当然不知道。自己大概用了一天时间全部推完，感到很得意。为了使同学容易接受，我尽量用初等数学教授，并简化了推导步骤。他们是天文系的学生，这不是最好的与实际相结合吗？没有想到，这件事竟给我惹来了麻烦。工农兵上大学，使停课多年的学校有了一点生机，但后来同学的革命热情又掀了起来，开始进行大批判。我当时的处境本来就是一个资产阶级知识分子，运动中已经挨过批判。一时间，我的课又成了“典型”“玩弄数学游戏”……

由牛顿的万有引力定律联想到黑洞，一般教科书都认为这是出自法国的数学家和天文学家皮埃尔·拉普拉斯。

牛顿的故乡，居然没有人想到黑洞。于是，英国人找出了一位天文爱好者，名叫米切尔，据说他的黑洞想法比拉普拉斯早了10多年。乔治·米切尔原本是一位牧师，1783年，他向英国皇家学会提交了一份报告。根据牛顿的引力理论和光的微粒理论，米切尔做了一番计算。他把光看作是一个微小的粒子，认为光也应该受引力的作用，天体的引力如果足够大，则粒子会无法逃离。如果保持太阳的密度，只要有一个比太阳的直径大500倍的天体，就可以做到这一点。这样一个天体的大小刚好占满整个太阳系。由于米切尔的天才想法，使之成了英国皇家天文学会的特别会员。

法国著名数学家和天文学家皮埃尔·拉普拉斯于1796年同样根据牛顿的万有引力定律计算出一个天体可以发不出光。拉普拉斯的计算和米切尔类似，只是以地球为例，如果把地球的直径放大250倍，而密度不变，就可以变成一个发不出光的天体。拉普拉斯与米切尔不同的是，他是一位大科学家，数学和天文并重，著名的拉普拉斯方程就是表述天体引力势函数的一个偏微分方程。他在1796年出版的《宇宙体系论》中，讨论了太阳

系的起源问题，认为太阳系是由一团星云演化而成的，这是最早的从科学角度讨论天体的起源。拉普拉斯的黑洞概念也是在这本书中阐述的。1816年拉普拉斯当选为法兰西科学院院士，后出任院长。据说，他还担任过拿破仑政权的内政部长，不过只当了六个星期。

米切尔和拉普拉斯的计算，都是基于光的微粒说，微粒说最早是由牛顿创立的。后来，光的微粒说和波动说争论不休。1801年，光的双缝衍射实验成功，波动说占了上风。拉普拉斯认为，他预言的不发光的暗星也许并不存在。于是，在其新版的《天体力学》巨著中，把有关的内容居然都删掉了。

无论是米切尔，还是拉普拉斯，他们提出的黑洞概念并没有引起人们的注意。虽然米切尔还提出了寻找不能发光的天体的方法，如果碰巧这种天体和一个发光的天体组成双星，就可以通过发光的伴星找到这种天体。此后，将近200年的时间，黑洞天体的想法无人问津。

三、石头黑洞

黑洞的引力场极强，其周围的时空是弯曲的。因此，只有用相对论才能解释清楚黑洞，真正的黑洞应该是爱因斯坦的黑洞。

科学的发展有时就像小孩捉迷藏一样，时隐时现。牛顿的万有引力定律和力学三定律是如此之完美，从天上到地下，它可以解释一切。在牛顿看来，唯一不能解释的只有太阳系当初为什么会动起来。他百思不得其解，只好让上帝在开始的时候推它一把。英国著名诗人亚历山大·波普曾写下诗句来赞美牛顿：

自然界和自然界的规律隐藏在黑暗中，

上帝说：“让牛顿去吧”。

于是一切成为光明。

上帝也没有想到，牛顿带来的光明只能维持在有限的时空中，到了宇宙空间，能够带来光明的是爱因斯坦。

孩提时代的爱因斯坦似乎并不那么聪慧，据说，到3岁时才刚学会说

话。大凡成了伟人，大家都爱探讨小时候是否就与众不同，其实，一个人的成长和成才，有许多偶然因素。对爱因斯坦小时候聪明度的评价，往往也是一种炒作。1935年，美国普林斯顿的一位专栏作家写了一篇报道，称爱因斯坦是“最伟大的在世数学家，但没学好数学”。爱因斯坦的回答是“我数学一直都学得很好”，甚至说“我15岁之前就掌握了微积分”。

1902年，大学毕业的爱因斯坦好不容易找到了一份工作，在伯尔尼的发明专利局当了一名最低等的三级职员。但就是这项工作，激发了他的智慧神灵。由于是专利局，接触的都是各种专利申请和有关最新科技的探讨。爱因斯坦从中受到了启发，在短短几年中，连续发表具有开拓性的论文。1905年，这一年中他发表了四篇论文，每一篇都达到了诺贝尔奖级别的水平。其中的《论运动媒质的电动力学》，提出了相对论的重要观念，后来便形成狭义相对论。这一年，爱因斯坦只有26岁。

到了1915年，爱因斯坦不满足狭义相对论的局限性，又大胆地提出了广义相对论。如果说狭义相对论是爱因斯坦继承和归纳了许多别人的工作，广义相对论则是他一人的独辟蹊径。广义相对论于1916年3月20日正式发表在德国的《物理学年鉴》上，题目是《广义相对论基础》，论文系统地概括了广义相对论，后单独成文，成为爱因斯坦的第一本专著。

狭义相对论对许多人来说都难以接受，广义相对论带来的更是雾水一潭。牛顿带给大家的光明又重新回到了黑暗，于是，那位曾经歌颂过牛顿的诗人亚历山大·波普，在歌颂完牛顿的诗句后面，是这样“歌颂”爱因斯坦的：

但不久，

魔鬼说：“让爱因斯坦去吧”。



▶ 童年时代的爱因斯坦，没有人能预测出他日后会成为伟大的科学家

于是一切又重新回到黑暗中。

的确，爱因斯坦最伟大的科学贡献——狭义相对论和广义相对论，不但把牛顿的光环抹黑，也没有给爱因斯坦带来任何光明。广义相对论真正开始闪光是在它创建半个世纪之后了。

爱因斯坦创建相对论时正值第一次世界大战。广义相对论刚刚问世，正在前线服役的卡尔·史瓦西尔德便给爱因斯坦写信，寄来了他对爱因斯坦场方程的解。信中，他给出了球形物体周围时空特性的严格数学解，计算表明，任何质量物体都存在着一个临界半径，如果把物体的质量挤压在临界半径之内，则时空的弯曲程度将会把它与外界隔绝开来。不仅物质，包括光在内，都无法从中逃脱。这个临界半径后来被称为史瓦西半径，这样的天体孤立于人们的视野之外，自然就是黑洞了。

我们可以从原初的万有引力定律导出黑洞要求的物理条件。考虑一个质量为 m 的物体，处在一个天体的上空，天体的质量为 M ，物体想要离开天体，其动能必须能克服天体的引力势能，也就是要满足：

$$\frac{1}{2}mv^2 = G\frac{Mm}{r}$$

上式中，左边是一个物体的动能，右边是该物体的势能，其中， v 是物体的速度， G 是万有引力常数，由此得出：

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

这就是通常所说的一个天体的逃逸速度，对于地球来说，将地球的半径 r 和质量 M 代入上式，得出：

$$v_{\text{地}} = 11.2 \text{ 千米 / 秒}$$

这就是逃离地球的第二宇宙速度。如果有一个天体，它的质量 M 足够大，或者 r 足够小，达到了逃逸速度等于光速 c ，即令 $v = c$ ，便很容易从上式得出：

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

这时， r_s 的意义显然就是黑洞的半径。该公式还告诉我们，任何一个质量为 M 的天体，都可以压缩成为黑洞。这个公式和相对论推出的简化公式完全一样。

史瓦西尔德当年得到的爱因斯坦的方程的解相当复杂，被认为是爱因斯坦方程最完备的一个解。爱因斯坦本人当即把这个解提交给了普鲁士科学院，时间是 1916 年年初。根据史瓦西尔德的解释加以简化，就可以得到和上式完全一样的公式。因此，后人把上式中的 r 称为史瓦西半径，把这样的黑洞称为史瓦西黑洞。

真正的黑洞本来是从爱因斯坦的广义相对论导出的，但爱因斯坦本人并不喜欢黑洞。他非常欣赏史瓦西尔德的工作，但对由此推出的黑洞却绝对不能接受，一直到了 20 世纪 50 年代，许多物理学家和天文学家都开始认可黑洞存在的可能，爱因斯坦仍坚持那是“不允许的”。基普·索恩在其著作《黑洞与时空弯曲》一书中，谈到爱因斯坦对黑洞的态度时写道“他的头脑里有一块打不破的石头，遮住了真理”。的确，爱因斯坦的性格像一块石头，他的看法从来不为别人动摇。当年，他和同时代的大物理学家波尔，为了量子力学是否是完备的，争论了几十年，互不让步，无果而终。到了晚年，爱因斯坦又走入了统一场论的死胡同，他硬是要把自然界的所有作用力都统一在他爱因斯坦的账下，为此他一直奋战到生命的最后一刻。1955 年 4 月 17 日，他垂危的生命有所好转，立即要求大夫把他的统一场论文中一项还没有计算完的稿纸拿来，想继续算下去。到了次日凌晨 1 点 15 分，上帝便夺去了他的生命。

爱因斯坦石头般的性格也许和他的名字有关，我在德国访问时得知，爱因斯坦（Einstein）德文的原义是“一块石头”。我查遍国内有关爱因斯坦的文章，似乎没有人提到这一点。因此，虽然爱因斯坦不喜欢黑洞，我还是冠以“石头黑洞”，以彰显爱因斯坦坚韧不拔的科学精神。

四、如何寻找黑洞

由于黑洞不辐射任何电磁波，寻找黑洞的方法只能是间接的。有一个

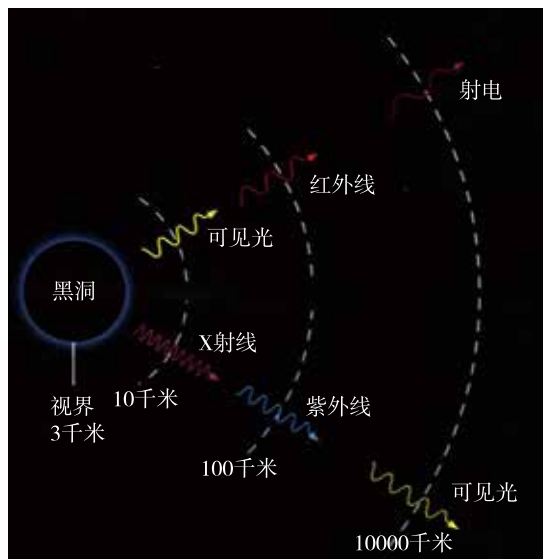
电视连续剧，名字叫《黑洞》，把贪污犯的贪吝形容成像黑洞一样。警察为了挖出“黑洞”，只能从“黑洞”四周的各种蛛丝马迹入手。天文学家和警察一样，也只能查找黑洞周围的纰漏。黑洞虽然自身不辐射电磁波，但黑洞在“吸食”周围的物质时，它的周围会辐射出X射线。因此，天文学家寻找黑洞的第一关键，便是查找能发出X射线的天体。

黑洞为什么能发出X射线？这是一个非常复杂的物理过程，到现在仍然没有完全研究清楚。概括地说，黑洞在“吸食”周围的物质时，会在它的四周形成一个圆盘，这个圆盘是扁平的，像磨盘一样，叫做吸积盘。吸积盘围绕黑洞旋转，物质在掉进黑洞之前的过程中会加速运动，粒子间剧烈碰撞，产生极高的温度。在如此高的温度下，就会激发X射线。因此，X射线并不是从黑洞里面发出的，而是从黑洞周围的吸积盘中发出的。

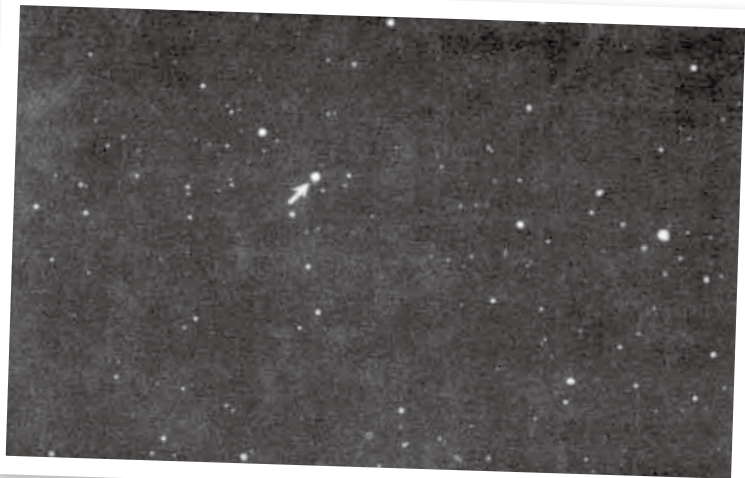
如果是一个孤零零的黑洞，周围没有可“进食”的物质，便不会形成吸积盘，也就不会发出X射线。因此，单独的黑洞的确不发出任何辐射，也就无法被探测到。当黑洞和一个普通的恒星结为双星时，情况就会发生变化。开始时，两颗星远远地相互绕转，彼此相安无事。随着时间的推移，

两颗子星之间的距离有可能拉近，一旦成了密近双星，便会出现物质交流，就像两者之间搭了一座桥梁一样。如果两颗子星都是普通的恒星，物质交流就会有来有往。但如果一个是黑洞，就会变成单向流，黑洞不停地“吸食”伴星的物质，在自己的周围形成吸积盘，同时发出X射线。

发出X射线的双星不一定都包含着一个黑洞。必须对X射线双星做深入的物



► 从黑洞周围发出的各种辐射，天文学家感兴趣的是X射线



► 天鹅座 X-1 的光学图像

理剖析，计算出双星中每一个子星的质量。如果有一个子星的质量相当大，超过了三个太阳的质量，而且自身不发普通的光，这个子星就应该是一个黑洞。

目前，天文学家用这套方法已经发现了不少的黑洞。最著名的有天鹅座 X-1，即位于天鹅座方向的、编号为 1 的 X 射线源。天鹅座 X-1 是一个非常强的 X 射线源，早在 1965 年 X 射线卫星上天之前便被探测到。

发现天鹅座 X-1，动用了 X 射线、射电和光学的全部观测手段，花了 15 年的时间。相信黑洞存在的天文学家声称，类似天鹅座 X-1 的黑洞还有几十个，这些黑洞的参数都有待进一步测定。确定一个黑洞是多么不容易啊！

五、危险的幽灵

宇宙中有一些黑洞，原本不一定十分可怕。常言道，惹不起，可以躲得起。只要我们远离黑洞，和它保持足够的距离，超出了黑洞的强引力范围，就不会有任何危险。但是，凡属恶魔类的东西，总有恶魔般的招数。人人都知道毒品不好，可吸毒者仍然前赴后继。黑洞也许是在向



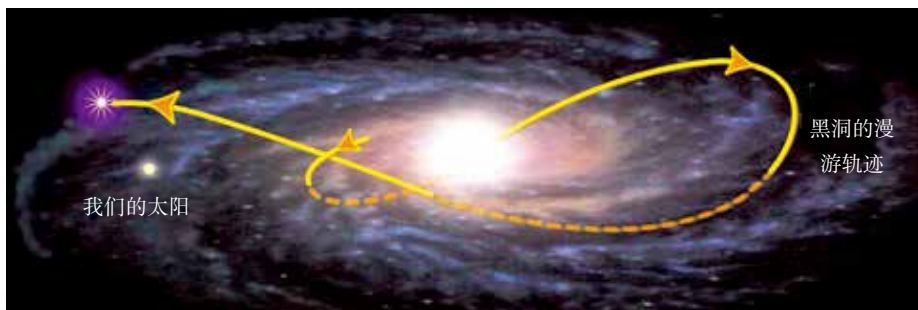
► 和黑洞结伴是很危险的，当伴有黑洞的双星演化为密近双星时，它会不停地吞噬其伴星的物质

人间学习，掌握了一套自身壮大的本领。

宇宙物质密度比地球上的真空还要稀薄。单独的黑洞生活在宇宙中，无依无靠，没有任何物质可以“进食”。换句话说，黑洞的引力场虽然强，但不会自然增加，也不会对周围的宇宙产生任何影响，不会造成任何危害。不过，黑洞是一个

不甘寂寞的天体，忍不住个人孤独，总要设法找一个伴星为侣。就像一个好吃懒做的人，总要傍上一个大款。成为双星之后，两者逐渐靠近，形成密近双星。密近双星的特点是两颗星的大气物质会产生交流。对于含有黑洞的双星来说，这个好吃懒做的“人”总是吸食“大款”的钱财。这种吸食是无止境的，越吸食，它的胃口越大，因为它的引力强度随之在不断地增大，最终的结果是“大款”完全被吃掉。可怕之处在于，它吞噬完一个“大款”之后，并不罢休，还会去寻找新的“大款”。

原来，黑洞在银河系中到处漫游，甚至可以穿越银河系，从上翻到下，或者从下翻到上，上图是一幅黑洞漫游的示意图。我们的太阳就在黑洞附近，实在太危险了！



► 黑洞在银河系中游荡，四处寻找猎物

六、黑洞不黑，重回和谐

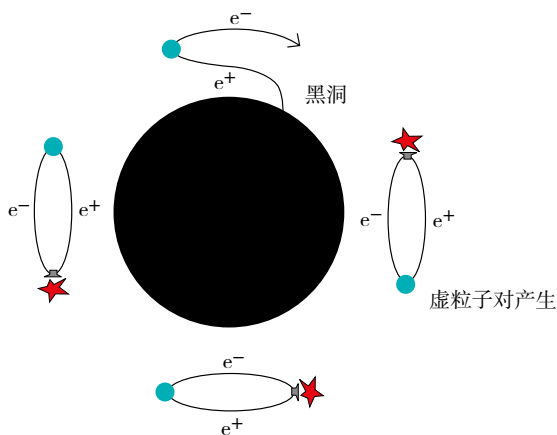
现在提倡和谐社会，和谐的英文是“concord”，古今中外，都认为是重要的。英法联合制造的大型客机，也取名为“和谐号”。

社会如此，宇宙也是如此。宇宙之所以成为宇宙，生存在那里长达100多亿年，在整体上也必须要求它处于和谐状态。黑洞成为了制造宇宙不和谐的最大杀手。不难设想，宇宙中游荡着一批黑洞，每一个黑洞都是光“吃进”，不“吐出”。久而久之，宇宙中所有的物质都会掉进黑洞中，包括所有发光的恒星，整个宇宙会变成黑暗世界。看来，宇宙能和谐生存的关键是制服黑洞。

史蒂芬·霍金出生于1942年1月8日，这一天正是伽利略逝世300周年。别人都没有在意，是霍金本人注意到了这一点，他甚至提醒大家注意：“你们看我像不像是伽利略转世？”他自己也知道，这仅仅是玩笑，这一天出生的孩子超过20万。不过现在看来，这20万中最聪明的一个是霍金，前无古人、后无来者。

物理学和天文学家史蒂芬·霍金名字目前已经誉满全球，他的出名不仅仅是因为他在科学研究方面的成就，还有许多传奇式的色彩。他选了一个最令人感兴趣的研究对象——黑洞，写了一本最时髦的科普读物——《时间简史》，得了一种最奇怪的病——卢伽雷病。这三件事的每一件都是一部传奇。他得的是一种肌肉萎缩病，英文叫ALS (amyotrophic lateral sclerosis)，由于美国著名棒球手卢伽雷曾得过此病，因此又被称为卢伽雷病。此病世间少有，凡得此病者，皆无法医治。霍金大学毕业前患上此病，年仅20岁，大夫告诉他，只能再活2年。绝望中的霍金遇到了一位知心的女友，他的第一任妻子简，23岁时他与简结婚，这时的霍金已经行动不便，走路时不得不依靠拐杖。简对霍金一心一意，还为他生了两个孩子。

借助于量子力学的概念，得出黑洞可以“蒸发”的结论。在量子世界里，真空并非绝对的空无一切，那里仍然是“活跃的”世界，存在着正粒子和反粒子，这些正反粒子都是一对一对地捆绑在一起，在通常情况下，显示不出任何的作用。正粒子带的是正能量，反粒子带的是负能量，正负能量结



► 如果虚粒子产生在视界的外面，成员之一将会掉入黑洞，另一个成员将会逃逸，于是黑洞损失质量

合在一起，仍然是真空。因此，这些粒子都称为虚粒子，意思是徒有其名地虚设在那里，不发挥任何作用。但是，遇到特殊环境，这些虚粒子还是会起来“造反的”。在黑洞的附近，引力场太强了，强大的引力会把捆绑在一起的虚粒子对撕裂开来，使这些粒子活跃起来，反粒子会掉进黑洞中去，同时把负能量带进黑洞，而它的伙伴，带有正能量的正粒子无依无靠，只好远离而去，离开黑洞的表面，逃向远方。进入黑洞的负粒子，到了黑洞之后，又会和黑洞里的一个正粒子结合，重新捆绑在一起，也就是中和了黑洞里的一份正能量，使之变为真空。聪明的读者不妨仔细地想一想，这样交换的结果，是不是等价于一个真实的粒子从黑洞中跑了出来？

如果要全面地分析，黑洞当然也可以把正反粒子都“吃进去”，不过这样“吃进去”，不会产生任何效果，等于“白吃”。还有一种可能性，黑洞把正能量“吃进去”，让反粒子逃走。但是，黑洞的周围是普通的真空地带，反粒子无依无靠，无法存在，不可能逃离出去。

教授，在人们心目中是最高的学术头衔。在英国，一个学院或一个研究所，只能设一个教授，这位教授退休或离去，才能再设一位教授。霍金的研究工作太出色了，而教授的位置又没有空缺，无奈之下，剑桥大学特设了一个教授职位，叫做引力物理学教授，当时霍金只有 35 岁。在此之前

三年，他已经选为英国皇家学会会员。在英国，这样一个注重传统的保守国家，年纪轻轻便获此殊荣，实为罕见。不仅如此，霍金于 1979 年又获任第十七届英国剑桥大学卢卡斯数学教授，这是 1633 年由卢卡斯出资设立的，后来成为英国的最高学术水平代表，相当于英国的诺贝尔奖。到了 1989 年，霍金又被英国王室授予勋爵。在英国，只有对国家有突出贡献的人才能被授勋，授勋仪式由英国女王亲自颁发勋章。勋爵称谓在英国是至高无上的奖赏，表示对国家有重要贡献。“勋爵”的英文就是“Sir”，sir 本来含义是先生，但如果以大写的形式冠在一个人的名字之前，就变成勋爵。在当代的英国天文学家中，被授予 Sir 的还有稳恒态宇宙的创始人霍伊尔。

由于霍金的贡献，我们的宇宙又重新回到了和谐。

“东方红一号”卫星还能在轨道上运行多久

潘厚任

中国科学院国家空间科学中心 研究员

1970年4月24日发射上天的我国第一颗人造地球卫星“东方红一号”，至今已在轨道上运行了40多年，大家都很关心它还能运行多久？

影响人造地球卫星轨道寿命的主要因素是地球周围的大气层和卫星本身的外形、质量，尤其是轨道。

卫星绕地运行时，大气的阻力会不断消耗它的动能，使其高度逐渐降低，特别是远地点高度降得更快，轨道逐渐趋圆，最后在稠密大气层中像流星一样陨落。阻力的大小取决于大气密度、卫星轨道的高度、扁率和卫星的质量及弹道截面（垂直于速度方向的面积大小）。

地球大气的密度随高度依指数律递减。粗略地说，在120千米以下，每增加16千米高度，大气密度降低约1个数量级；从120~3000千米，大气密度每降低1个数量级，高度间隔从40千米递增到1200千米。因此，卫星的近地点越高、轨道扁率越大，轨道寿命就越长。按经验估算，对近地点为400千米的轨道，扁率从0.0增大到0.2，轨道寿命可延长约100倍。

因为地球大气的结构十分复杂，其密度值随太阳活动程度有很大起伏。不同的高度、地理纬度、季节，变化也不尽相同，甚至每日不同的时刻也不一样。再加上卫星运行时，随着姿态取向，其弹道截面也不是常量。所以要精确计算轨道寿命非常困难，充其量是粗略地估算。

“东方红一号”卫星的初始轨道为：远地点高度2384千米、近地点高度439千米，扁率为0.125。

卫星质量173千克，外形为直径1米的72面球体，还有4根3米长的短波天线、1根0.4米长的超短波天线、连接环等凸出物。方案设计时

之所以采用 72 面近球形，除为了在初期考虑使用太阳电池时的方便之外，也是为了尽可能减小行进时弹道截面的起伏变化。这样还可从轨道跟踪数据反演卫星运行区的大气密度值及其变化。

依照这些数据估算，我们的“东方红一号”卫星在轨道上“活”到 60 大寿应无问题。

从 2009 年 2 月其远地点和近地点分别降至 2075 千米和 430 千米高度的数据来看，39 年的运行结果与最早的理论分析相符合，而大气阻力对轨道寿命的实际影响看来比估算的要小些。由此，“东方红一号”卫星在轨道上“活”到 80 岁也不是不可能的。

当然，也不能排除撞上较大的流星体、太空碎片等意外伤害的可能性。

原文发表于《国际太空》，2015 年第 5 期。

构筑“天宫”何难何用

潘厚任

中国科学院国家空间科学中心 研究员

我国 2006 年发布的航天白皮书中所列近期主要任务之一是载人航天实现航天员出舱活动，进行航天器交会对接试验；开展具有一定应用规模的短期有人照料、长期在轨自主飞行的空间实验室的研制，开展载人航天工程的后续工作。

一、必须逾越的一步

“神舟七号”的上天，已经实现了我国首次航天员出舱活动，突破了舱外航天服以及出舱活动相关的一系列关键技术。之后发射的“天宫一号”以及随之相继上天的“神舟八号”“神舟九号”“神舟十号”飞船，就是实现这一主要任务的重要组成部分。其中的核心就是突破航天器在轨的交会、对接技术。它是构筑太空实验室、规模更大的太空站，以至进一步实现载人登月、登火星等一系列未来工程所必须逾越的一步。

构筑具有一定规模的太空设施，如欧美等 16 国正在轨道上联合组建的国际空间站，其总重量超过 400 吨，至今尚没有能一次将它送上太空的大推力火箭。它的总面积差不多一个半足球场大，试想，一枚运载火箭的头部要包容如此大小的载荷，将如何进行组装、运输、安装到发射塔架旁发射上天？合理、可行的办法是将它一部分一部分地发射上去，在运行轨道上组装成整体。这就要通过交会、对接来操作实施。所以它是进一步推进航天事业必须克服的技术关键。

二、难点简述

交会对接，就是使两个分别发射的飞行器在运行轨道上会合，最终连接成为一个飞行器。一般是先将目标飞行器发射入轨，精确测定运行轨道，当其飞经待发飞行器发射场上空时，择机发射，使后者与前者运行在相同的轨道上，即相同的高度、速度和轨道倾角，而且两者相距控制在几千米至十几千米的范围内。然后，依靠飞行器本身的机动能力使两者逐渐接近、连接成一体。由此可见，这比拦截、击中飞行器的过程更为复杂，要求也更高。

近地轨道飞行器的运行速度，差不多是子弹刚出枪口时速度的八倍，要使如此高速的两个物体在几百千米的高空会合、同步飞行，必要的前提是运载火箭的控制精度和飞行器轨道精确测量技术已经过关。而交会、同步飞行则是最终实现对接的前提条件。要使两个高速飞行器的对接接口能安全、准确地连接在一起，还需要解决稳定而精确的姿态控制技术、可靠可控的机动技术以及精确定位、瞄准的对接装备。对接过程中，定位、控制不当，致使擦碰或连接后留有扭曲力矩等，都会产生严重后果。

三、历史回顾

据报道，苏联于1962年8月12日首次试验了“东方三号”和“东方四号”飞船的太空交会，1963年6月16日再次用“东方五号”和“东方六号”进行交会。两船相距达5000米，都没有实现对接。美国最早在1965年12月15日用“双子座6A”飞船，与“双子座7号”飞船实现会合，并靠机动飞行，使两者相距缩小至30厘米，也未实现对接，因为当时飞船未具备对接功能。

1966年3月16日，美国用“双子座8号”飞船，与无人的“阿吉纳8”目标飞行器实现了首次太空交会并对接。苏联则在1967年10月30日用“宇宙186号”和“宇宙188号”飞行器实现了自动对接。1978年1月，苏联用“联盟26号”和“联盟27号”与“礼炮6号”太空站构成了三体

相连的太空飞行平台。

初期，对接过程中曾用雷达来测量定位，现在是用激光加上视频等来捕获定位。人和自动设备结合则更有效，这是“ $1+1 > 2$ ”。当代成熟的技术，可使两船接近的速度控制在每秒钟约5厘米左右，捕获定位的精度可达2~3毫米。若像国际空间站、航天飞机那样装有计算机和人为可控的机械臂，则也可用其实现抓获对接。

四、衍生的需求

太空站构建时需用交会对接技术，建成后维持正常运行也离不开交会对接。例如，用无人飞船定期输送燃料、食物及保证航天员正常生活、工作的各类必需品，用载人飞船分批接送航天员等。载人登月、登火星、登陆小行星等活动，稳妥的方案是有人登陆的同时，还有人留守在绕轨飞行器内，以便于登陆舱起飞后与轨道舱交会对接，再一起返回地球。昂贵的应用卫星，常由于机动调轨调姿的燃料耗尽或部件小故障而影响使用寿命，利用交会对接技术，可对其进行补给或修理，航天飞机甚至把哈勃太空望远镜“抓”回地面进行维修。静止轨道只能容纳360颗卫星同时工作，现在已经没有多余的星位分配给各国了，也可用交会对接技术对其补给而延长寿命，或把失效的卫星推向“坟墓”轨道而空出位子来。在未来的反卫星等太空对抗中，交会对接技术无疑更会大有用武之地。

五、我国的目标

我国计划在已有成果的基础上，用较短的时间，一鼓作气地突破交会、对接和连接成多体太空飞行平台等关键技术。

目标飞船本身就具备进行太空科学与应用试验条件，与多艘“神舟”飞船对接后，实际上已构成我国第一个初具规模的太空实验室。在“神舟”一号至七号飞船上，已经开展了对地观测、空间环境、空间天文、微重力流体物理、材料科学、生命科学等观测和实验。在各领域有效载荷研制、

实验方法、数据存储、传送、处理和理论分析方面打下了基础。相比之下，由于空间实验室运行时间较长，飞船资源（指提供有效载荷的重量、容积、电力、测控信道、数据存储预处理、星内环境保障等能力）及航天员主要精力都可更多地满足科学任务的需要，这将对科学目标的确定、为有效载荷的设计研制创造更为有利的条件，航天员的飞行任务中也可更多地包含有人照料的科学实验。此外，还可在上面开展更先进的自循环生保系统、环保系统等试验。

我国新型大推力运载火箭研制的顺利推进，海南新发射场的投入使用和新一批男、女航天员的选拔培训，为我国从空间实验室向构建更大规模太空站的过渡提供了保证。长时间运行和资源相对充足的太空站，可为众多的科学和应用领域，提供舱内和舱外、有人照料和无人照料、微重力和超重、对天和对地等各类实验平台，为太空学的发展开辟更为广阔的前景。当然，为面对和适应新的目标任务，对新老航天员也提出了新的更高要求。例如，航天员不仅要熟练新型飞船的操作控制，适应长时间、多任务的太空飞行，还需对新的科学和技术实验有一定的了解，在太空按预定计划进行照料，或通过船地信道，根据地面要求进行实时操作控制。

太空科技不是孤立的，它的发展必将带动一系列科技以及经济的发展，同时也将增强开展双边和多边平等互利的国际合作的实力。

六、未来不是梦

航空、航天活动的发展符合普遍的规律。初创时期只囿于飞行员的小圈子内，技术成熟后再逐渐扩展到更大的范围。现在“登天”已经不是最难的事了。至今，全世界已经有超过 30 个国家的约 500 人上过天，其中约 1/10 是女航天员。除航天员外，科学家、医生、教师、记者、议员等也都去过，还有 7 位是花了大钱到太空去旅游的。随着我国太空实验室、太空站的构建与成熟，我国的航天活动也会逐步扩展到航天员的圈子之外。我相信，我国有志于圆太空之梦的科学家、教师、记者等各界人士，对他们来说，未来并非都是梦。我国广大的青少年中也有很多是航天迷，他们

之中有很多大胆的太空畅想。他们提出的项目也上过航天飞机。之前专为青少年发射的“希望一号”卫星，就有 105 个项目参与竞选，其中不乏很好的设想。只是由于能供给的卫星资源有限，只有极少数的项目有幸如愿。在我国未来构建的“天宫”里，所能提供给用户的平台资源会大得多。到时候愁的不是太空平台资源的限制，而是有没有足够的好创意、优秀项目去充分利用、发挥“天宫”的效益。

2010 年 8 月底应《北京日报》记者邀请撰写了此文，登于 2010 年 9 月 1 日该报科技专刊。在排版、标题等方面记者做了改动。

后被《中国科技教育》收录，发表于 2011 年第 2 期。

“东方红一号”卫星为什么取 多面球体

潘厚任

中国科学院国家空间科学中心 研究员

1965年6月初，何正华、胡其正和我在草拟我国第一颗人造卫星总体方案时，何正华提出了“东方红一号”的命名和72面球形的结构外形，胡其正和我都认为很好。除了结构空间利用等考虑因素外，还有两个设计要点。

一是原先打算在“东方红一号”上就用太阳能供电系统。当时的太阳能电池是硅片，在平面上粘贴比在曲面上方便可靠。而且卫星采用自旋姿态稳定方案，在轨运行时，卫星自旋轴相对于太阳的取向是不断变化的。72面球体的外形，可便于太阳能电池片在不同径向的面上适当地均匀布设，以使任何时刻太阳能电池的总输出变化很小，这对整星能源系统的设计很有利。利用球面天文的公式，可准确地计算出任一时刻太阳光线在72个面中任一表面的入射角。大家知道，太阳能电池的输出大小与太阳光的入射角直接相关。

虽然“东方红一号”上最终未用太阳能电池，但在相同外形的我国第二颗人造卫星“实践一号”上成功地使用了这一设计方案，该卫星在轨工作超过了八年。

二是自旋稳定的姿态方案，卫星本体相对于轨道运行方向的取向也是随时间不断变化的。采用球形设计，可使卫星飞行时的弹道截面基本不变（因星体上有天线、与火箭的对接环等，会造成弹道截面的一些变化）。这样，不用在卫星上安装探测仪器，就可利用卫星的测轨跟踪数据反演推算卫星飞经高度的大气密度值及其变化。虽然所得数据精度不很高，但当时我国对卫星高度的大气密度及其变化的实测值还完全是空白。这是利用“东方红一号”的上天尽可能多得到科学数据的一点想法。

原文发表于《国际太空》，2010年第4期，29页。

阿波罗登月四十周年

——再论“登月骗局”之争

潘厚任

中国科学院国家空间科学中心 研究员

为纪念“阿波罗 11 号”登月 40 周年，美国国家航空航天局公布了人类首次踏上月球的较清晰的原始录像，并举行一系列的纪念活动。

1969 年 7 月 20 日，近百万的美国人聚集在美国东南部的佛罗里达州，全世界以亿计的人通过电视转播，都在注视着人类首次踏上月球的历史性壮举。古代的希腊、中国，都流传着人类梦想飞上月亮的神话故事。在即将成为事实的时刻，自然会引起人们的极大关注。

40 年过去了，但至今还有对阿波罗登月是真是假的质疑和一些争论。或许是因为人类多少年来一直有着对登天之难的根深蒂固的观念，或许是公众对官方和媒体宣传失实的事例印象颇深。1974 年比尔·凯恩写了《我们从未登上月球》一书（*We Never Went to the Moon*，Bill Kaysing），声称阿波罗登月完全是愚弄公众的政治骗局，并列举了一些疑点。凯恩是雷德兰兹大学的文科学士，虽然他并不具有多少工程和科学知识背景，但在 1956—1963 年，他曾在北美航空公司的火箭动力分部工作过，他的质疑更增加了很多人的疑惑。2006 年 8 月初，又传出阿波罗登月的 2.7 万米原始录像带丢失的消息，无疑更激发了质疑者很多新的联想。

美国当局对此则始终未予理睬。或许是认为这些质疑荒唐可笑，不屑一驳；或许是觉得这些争议也不无好处，这也是人类不懈追求真理的可贵品质；再者，这些质疑和争论并未影响到主流舆论，也无损于美国的太空强国的形象和地位。不过，凯恩的责难也曾激怒过航天员詹姆斯·洛维尔。他曾四次飞向太空，其中两次是乘坐“阿波罗 8 号”和“阿波罗 13 号”飞行。1996 年 7 月，他曾说“这家伙简直是个疯子，他的行为使我愤怒。我

们曾花了很多时间为登月做准备，耗费了大量的钱，冒了很大的风险。登月是我们国家每一个人为之骄傲的事。”为此两人曾引起过官司纠纷。

作为“局外人”，严格地说，难以肯定阿波罗登月究竟是真是假，因为并不掌握第一手确切资料和真凭实据。但是对于这些质疑和争议之点，是可以依据已公布的资料，用科学的态度来加以逐一分析判断的。以下将对质疑者提出的种种疑点，逐一加以说明、分析。

• 疑点 1:

在登月照片黑暗的背景上，见不到明亮的星星。

由于月球没有大气，在月面上看星星，确实应该比地面上看更明亮，而且不闪烁。但遥远的星星只是个光点，其光度比月球上被阳光或灯光照亮的物体要暗得多。如果用相机把星星照出来，需用较长的曝光时间和大光圈，或配以高感光度的底片。但在这样的条件下，月面近距离物体的成像就会过度曝光、变成一片白了。如果使用闪光灯，有效距离仅有几米至几十米，对遥远的物体没有用处。

因此，这是很合理的结果，不能说明这些照片是伪造的。反过来说，即使要伪造，在照片的黑暗天空背景上加一些星星的像点，即使在 60 年代，技术上也不难实现。

• 疑点 2:

由于太空中辐射很强，航天员带上月面的胶卷会失效（按凯恩的原意，胶卷应被软化了）。

在地球大气层外的太空环境中，所受到的辐射是比地面上的要强。胶片是否被强辐射毁坏，主要取决于辐射穿透胶片时，被其吸收、发生相互作用的程度。即使辐射能量很大，胶片不吸收其能量、不产生相互作用，也不会受到损伤。例如，在通过机场安检时，X 光的能量不小，可穿透照射到行李中各种物件，形成清晰的图像，但对胶卷还是安全的。

其实在 20 世纪 60 年代初，美国、苏联的军用侦察卫星、我国早期的返回式遥感卫星上，也都使用过胶片成像。

• 疑点 3:

月面人物、物体影子有的方向不一致，与可视作平行光的太阳光影子不相符，疑似是在摄影棚中不同灯照射的结果。

由于地球和月球离太阳约 1.5 亿千米，在地球、月球上的阳光可视作平行光，因而形成的影子应是平行的。但月球表面是起伏不平的，还形成不同方向、不同倾斜度的坡面。从侧面看过去，投影在不同斜坡、不同高度上的影子，就会造成不同方向的错觉。而且照片中每个物体的影子都是单一的，若是两个或更多的灯光照射，则会形成两个或多个的影子。因而这一点并不能否定其真实性。

• 疑点 4:

月面是真空中，月面上的美国旗不可能迎风飘扬。



仔细看照片，旗子的顶部还有个横杆固定着展开的旗子。据报道，旗子是折叠放在登月梯子的一条空心腿中带上月面的。本身的褶皱，看上去很像迎风飘扬。

• 疑点 5:

登月舱在月面着陆时，火箭发动机应在月面轰击出数以吨计的月球尘土，因而形成一个大坑，照片上的登月舱下面却没有。

由于月面的真空度极高，约 10^{-12} 毫米汞柱，即相当于约 1.3×10^{-14} 的地球大气压，因此火箭喷流在月面不会生成冲击波。而且随着登月舱离月面越来越近，降落速度也越来越小，而且是向下的方向，喷焰中废气和细小的微粒，不会撞击起太多的尘土。

• 疑点 6:

凯恩认为，美国在当时根本不具备把人送上月球的技术。

从美国整个航天发展历程来看，20 世纪 50 年代末，美国在发射人造

卫星后，也立即向月球发射卫星，不断提高射月的精度。相继进行了水星、双子星等系列载人飞行计划，逐步掌握了出舱、交会、对接等太空飞行技术，整合、协调了原分散于三军的火箭计划，并发射了“勘察者”等系列的探月飞行器、着陆器，获取了地-月环境和月面地形等大量数据资料。这些也都为载人登月创造了条件，进一步实现载人登月并不奇怪。

凯恩甚至认为“阿波罗1号”“挑战者号”灾难都是当局的阴谋，为防止登月骗局暴露而采取的、有步骤的杀人灭口。

我在全国各地对学生、公众所做的600余场报告的互动中，也常有关于阿波罗登月迷局的问答，现将其中常问的疑点摘要归纳、分析如下。

• 疑点7:

航天员下梯登月的那幅照片是假的，因为月球上没有空气来散射光线，航天员所处的位置应该是一片漆黑，根本不可能从照片上反映出他的身影。

对于这点，可以反问“为什么不能用闪光灯呢？”

• 疑点8:

阿姆斯特朗下梯登月的照片是不可能拍到的。

这个问题提得非常好。从这个照片的拍摄角度看，阿姆斯特朗还未踏上月面，不可能有人或自动设置从旁边来拍摄。我看到的相关资料是，在梯上的是阿尔特林，阿姆斯特朗先下来为阿尔特林拍照的。不过，这张经典的照片，象征着阿姆斯特朗的一小步、人类的一大步。

• 疑点9:

首次登陆月球的航天员只有两名，但一张照片中却同时出现了两个人的合影，请问当时的技术水平下，已经出现自动拍照相机了吗？

从拍摄角度分析，是从登月舱上自动设备所拍。20世纪60年代已有程控或遥控的设备。如苏联加加林在1961年首飞太空时，就有实况图像。登月小车上也装有自动摄像设备。当然留在绕月轨道舱里的第三位航天员，飞经时也有可能拍摄。

• 疑点 10:

在月球表面，白天温度高达零上 121℃，而在一些登月照片中可以看到，相机露在宇航服外而没有采用任何措施。胶片在零上 66℃就会受热失效，那如此之多的登月照片是如何拍摄下来的。

月面上日照和阴影两部分的温差可达到 200~300℃，这没错。从月面照片上很长的影子可知，太阳在月平面上的高度角很低。这说明“阿波罗”的登月点选在靠近日照和阴影交界线附近的日照区，此处的温度较适中，不会过高和过低，可减少航天服调节衣内温度的负荷，也可使着陆设备便于正常工作，这是合理的选择。

• 疑点 11:

月球上重力是地球的 1/6，航天员应该轻易地比地球上跳得 6 倍高或 6 倍远，从录像上看充其量跳离地面 7~10 厘米，不到 1 米远。

美制的舱外太空服有三种尺码，在地面上重约 124 千克。为了尽可能减轻负担，在当时的技术条件下，把登月服减到了在地面上约 100 千克重，因此在月面上还有 16 千克多的重量。穿上此重量的衣服，不仅难以跳得高，而且由于航天服的复杂臃肿，也限制了行动的灵活机动程度。

• 疑点 12:

月球车扬起的尘土应该是到处飞扬，而录像中月球车扬起的尘埃却以很好的抛物线落下，并非像在地球上的尘土一样四处飞扬、飘在空中。

月面上没有空气，因而不存在风和空气的浮力，尘土不会飘浮移动。此点正好印证了发生在月面的景象。

• 疑点 13:

登月的航天员在月面安装了激光反射器，但有专家指出，当地球上的激光束照到月球上时，会发散成一个直径达 7 千米的大光束，再反射回到地球上时，光束直径会达到 20 千米。月地之间的距离遥远，月球本身完全可以实现镜面反射。也就是说这个光束是由月亮本身反射的，月球上根本没有什么激光反射器。

“阿波罗 11 号”“阿波罗 14 号”和“阿波罗 15 号”的航天员曾在月

面上安置了激光反射器，因而使约 38 万多千米的月地距离的测量精度大大提高。月面上高低不平，还覆盖着一层浮尘，对光束的吸收率高、反射率低，而且是无定向的漫反射。激光反射器由许多个反射角集成，每个反射角形似立方体的一个角。其原理是任何入射光线，可沿入射方向反射回去，因此反射率高，大大提高了返回光束的截获和测量的可能性。由于来回 2 次远距的传播，强度按 4 次幂衰减（地面上接收到的光流量，每秒钟不到一个光子）。可用许多个反射角并列可增加反射面积；用功率很大的激光源，通过大口径望远镜瞄准月面上放置反射角的区域发出脉冲光束；接收时需经精度很高的滤光器把返回的激光脉冲从杂散干扰光中分离出来，再经放大、较长时间的测量处理，才能得到较好的结果。

利用月面激光反射器的测量工作一直在进行，主要测量部门是美国德克萨斯州的麦克唐纳天文台，位于加利福尼亚州、夏威夷以及法国、德国的天文台也进行了测量。至今，测得的月地距离已精确到 3 厘米；而且发现月球正以每年 3.8 厘米的速度远离地球。依据月球自旋天平动的精确测量，推断月球内部应有直径小于 350 千米的液态核心，还得出地球自旋有每年 1/1000 秒的慢变化等。

针对这样的事实，“骗局论”者认为，月面反射器是由无人登月器自动放置的，苏联的月球号无人着陆器也曾在月面上放置过激光反射器。

从技术角度看，由人来放置，让反射器朝向地球很容易，而自动放置则不那么简单，两者的工程设计不一样。

• 疑点 14:

“阿波罗”登月用的“土星 5 号”火箭。现代航天飞机也只不过能一次把不超过 20 吨的零碎有效载荷送入地球低轨道。而“土星 5 号”火箭是 20 世纪 60 年代研制出来的，据说能轻而易举把 100 吨以上载荷送上地球轨道，将几十吨物体推出地球重力圈，用来发射空间站应该是轻而易举的事，可是为什么现在却弃而不用了呢？据说连图纸都没有保存下来。

在“阿波罗计划”接近尾声时，当时美国新当选的共和党总统尼克松，针对美国下一步太空发展的几个方案，选定了在 10 年左右的时间内，实

现航天飞机的计划方案。航天飞机最大的好处是可重复使用，一次可乘坐 7~10 名航天员；便于和未来的轨道太空站交会对接，用作地空往来的太空渡船；它一次能运送 29.5 吨的载荷，虽然这比“土星 5 号”的运载量小很多，但它的货舱的容积很大，可把体积很大的载荷完整地送上太空。当时希望建成航天飞机后，能把昂贵的太空运输费用降低一个数量级，虽然这个希望未能如愿，但在当时几个方案的对比下，这显然是抉择的要点之一。“土星 5 号”的近地轨道载荷量最大约 139 吨，但是费用昂贵。

对阿波罗任务完成后的各类太空任务来说，用它好比杀鸡用牛刀。因此，我认为把发展重点转向航天飞机是当时向前看的战略决策。从技术上看，实施“阿波罗计划”所突破、掌握的各种关键技术、工艺以及质量控制等管理经验，包括“土星 5 号”，都会在新计划中继承发扬。同时，“土星 5 号”所采用的元器件、材料、计算机、控制、通信、电源等设备大多是基于 20 世纪 60 年代中期水平。在新一代的火箭研制中，都是需要不断地更新换代的。所以我认为，“土星 5 号”的停用并不能说明登月是骗局。

• 疑点 15:

一些人说，在航天发射中把一个物体发射到月球上相对容易一些，可再要从月球上发射出来就没那么容易了。

相对来说，从月面上起飞比从地面起飞更简便些。月面的逃逸速度为 2.4 千米/秒，地面的大于 11 千米/秒；月面上不需顾及由于大气的存在而产生的阻力和恶劣天气带来的种种麻烦。

• 疑点 16:

“阿波罗 11 号”飞船从发射到月球再从月球上发射回来，时间长达 5 天。在这段时间内如何使作为登月舱燃料的液氢始终保持在超冷状态。

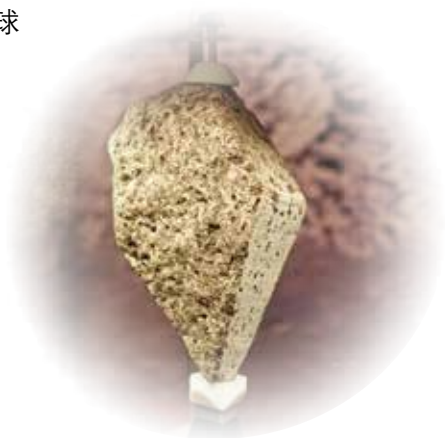
太空飞行器的一个很重要的分系统是温度控制分系统。由于太空中真空度极高，因而飞行器与外界的热交换只有辐射途径，传导和对流只在飞行器内部才起作用。依据这一道理，可采用被动和主动的办法来调节飞行器及其各部件、装备，使其维持在正常工作所需的温度范围内。如穿上保温、隔热的“衣服”，用涂层或其他物理、化学方法，调节飞行器或设备外

表面的发射系数与吸收系数之比，即控制其向外界释放或吸入热量，以调高或降低其温度。也可用电热丝、半导体或热管等来加热、制冷或转移热量。绝热、保温加上恒温电路控制等，可使飞行器或设备在变化的环境下恒定其温度。对于液氢、液氧燃料箱，在太空主要是隔绝来自太阳光和内部设备发热等的热量传入。

• 疑点 17:

从 1969—1972 年年底，美国共发射了 7 艘载人飞船进行登月飞行，带回 382 千克月球土壤和岩石样品，这些岩石肯定是在月球上带回来的吗？

阿波罗登月共带回了 382 千克的月球物质，苏联的“月球号”着陆器也多次取回月球物质。1979 年卡特总统访华时曾作为礼品赠送我国 1 克的月球物质，曾由中国科学院贵阳地球化学研究所，将其部分进行了测定，结果与所知月球物质的特性相符。当然也不能完全排除人造月球物质的可能性。



• 疑点 18:

月面上所摄图像中，有月球景物竟在镜头标尺线之前。

一般镜头上的标线、定位线等用于目视，并不留在所摄图像上。专用于测绘的图像，景物在标线之前是不可能的。不过，我没见过这类月面图像，这些资料的来源本身也存疑点。

综上所述，这些质疑并不能证明登月是骗局。

阿波罗登月时，曾在月球放置过多种仪器设备，如月震仪等。也在月面进行过多种实验，如一块比重很大的物体与一根羽毛在月面上同时落到月面的实验等。

需要指出的是，这些视频、图片所反映出的壮丽的月面景象和实况展

示，在地面摄影棚内是难以模拟的。

数字图像处理最早出现于 20 世纪 50 年代。60 年代初期的图像处理主要是提高图像的质量，如图像的增强、复原、编码、校正、压缩等，实际用于月球和行星际探测器传送回来的图像，用计算机绘制出了月球的地形图等。大家知道，60 年代中期是 IBM 360 诞生的年代，那时最高级计算机的运算速度约每秒 10 万~100 万条指令。而今天的普通微型机，每秒可以执行数亿条指令，性能比那时计算机要好上千倍。1968 年才制造出世界上第一块 256 比特的随机存储片，替代了 50 年代发展起来的磁芯存储技术。Intel 在 1971 年制成的 4004 处理器含有晶体管数目约 2300 个，1993 年的 Intel Pentium 处理器晶体管数目为 310 万个，而 2006 年的



Intel Core 2 Duo 处理器则内含 2.91 亿个晶体管。在计算机软件方面，1981 年诞生 DOS，1985 年开始有了 MW-Windows；多媒体技术则是在 80 年代后才迅速发展起来的。由此可见，阿波罗登月的动态资料，用现在的技术制作，完全可以以

假乱真，但依靠 60 年代的水平，是做不到的。

我们很难设想，美国当局会毫不考虑后果，在这样重大的事情上弄虚作假，欺骗全球公众。即使不信任当局，也应该相信直接参与这项庞杂系统工程的数以万计的美国科学家、工程技术人员和各个岗位上的美国公民。无法想象所有人员都会胁从这样的傻事并长期保持沉默。美国的媒体更是无孔不入，只要有蛛丝马迹，就会追根究底。特别是当年的冷战时代，如真有作假，苏联也不会放过加以揭露的极好机会。因为苏联在加加林首次实现太空飞行之后，有抢先登月的计划，只是在 N1 大型火箭试射爆炸、经费拮据的情况下放弃载人登月计划的，但始终监视着美国阿波罗的动态。在阿波罗登月的视频中，曾有苏联的无人探月飞行器正好飞越登月点上空

的画面。

美国和苏联 20 世纪探月的着陆点都是记录在案、公示于世的。20 世纪 90 年代起，各太空大国再次掀起了重返月球的高潮。人类在月球上建立基地，开发利用月球资源是迟早的事。届时在月面上的漫游，甚至“考古”活动、寻访、探索 20 世纪 60 年代登月点的遗迹，将再一次引起公众的很大关注。

让我们翘首以待，在月面上找出当年阿波罗登月真凭实据的时刻，将是终结这场跨世纪争论的时候。

原文为《国际太空》杂志的邀稿，发表于 2009 年 11 月（总第 371 期），标题为《简谈阿波罗登月骗局之争》。略有删改，附图略，参见原文。

冥王星的新定位，是进步，是倒退

潘厚任

中国科学院国家空间科学中心 研究员

2006年8月24日，捷克首都布拉格第26届国际天文学联合会上来自全球75个国家的2500名天文学家，经过激烈的争论，通过投票，宣布原太阳系九大行星之一的冥王星，新界定为矮行星，此后太阳系则恢复1930年前的八大行星态势。这一历史性的举措引起了全世界的瞩目。

早在19世纪末，天文学家观测到海王星和天王星轨道运动的不规则，就预言这是由于尚未发现的第九颗大质量行星的引力摄动所至。天文学家帕西瓦尔·洛威尔领导了第九大行星的搜寻工作。在洛威尔故世几年后，洛威尔天文台的克莱德·汤博，通过用广角相机对全天空的照相搜索，终于在1930年找到了冥王星。

后来，在测定了冥王星的质量后发现，它的质量竟如此之小，远不足以引起海王星和天王星的不规则运动。这一历史的“误会”，使冥王星的大行星定位从一开始就包含着不稳固的基础，因而天文学家们对此一直争论不断。

冥王星的直径2280千米，仅月球直径（3476千米）的 $\frac{2}{3}$ ，质量只及地球的 $\frac{1}{455}$ ；而且轨道面与黄道面 17° 倾斜，扁率也比一般行星为大。正由于其轨道的特殊，天文学家一直在想，它的起源应与其他行星不同。曾认为它原是海王星的一颗卫星，但1978年又发现它拥有一颗相对很大的卫星——卡戎（Charon，直径1200千米），这个假定不再成立。

1951年杰拉德·柯伊伯提出，在海王星轨道外存在着由许多小天体组成的环带，是太阳系近日彗星的发源地。现在知道这个环带（又名柯伊伯带）离太阳30~50AU（AU为天文单位，1AU约等于地球和太阳的距离），

充满着平均尺度为 10~50 千米的小天体。

随着观测技术的不断提高，特别是哈勃太空望远镜的上天，一系列柯伊伯带天体被发现，如 1992QB1、1993SC、WW31、EB173、WR106、VB12、2003UB313、2004DW、2004XR 等。例如，2005 年 9 月 10 日发现的 UB313 拥有一个“月亮”，2006 年 4 月 11 日测定 UB313 比冥王星还大 3%，2006 年 6 月 22 日又发现冥王星的第二、第三个“月亮”（Nix 和 Hydra）。这些观测事实使天文学家日益相信冥王星也应属于柯伊伯带天体。

由此可见，这次多数天文学家赞成的太阳系内行星、矮行星和小天体三种类别的新界定，应是人类对太阳系认识的深化和刷新，是科技的进步。众所周知，从托勒玫地心说到哥白尼日心论，就是对太阳系认知的一次大飞跃。今后还会不断被刷新，但八颗行星的态势不太可能会改观。

原文于 2006 年 10 月由中国教育科学研究院在网上发表。

人类登陆火星要克服哪些困难

潘厚任

中国科学院国家空间科学中心 研究员

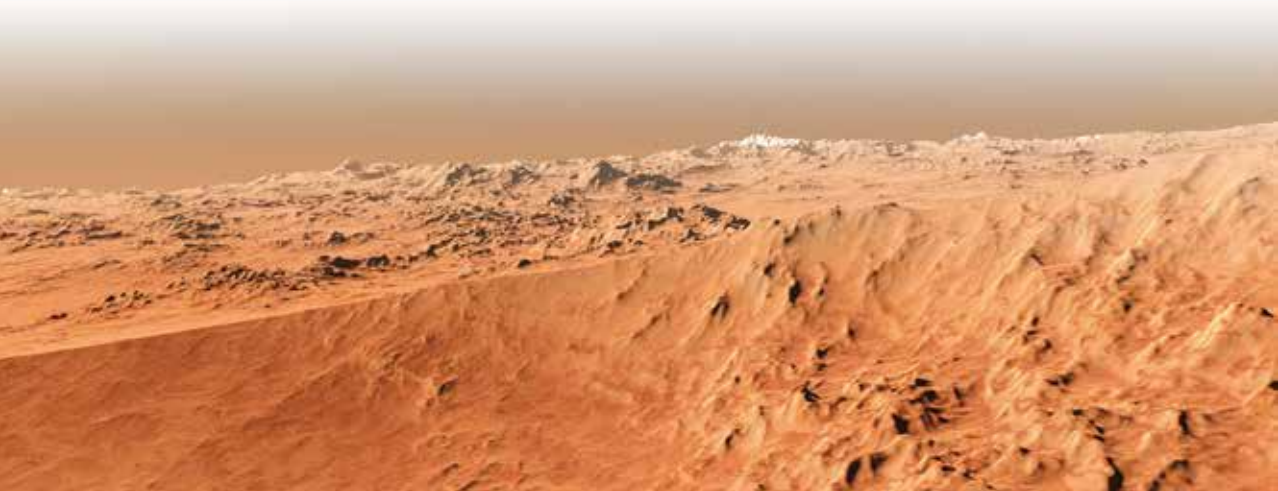
有中国志愿者王跃参加的人类首次全面模拟火星载人航天飞行“火星-500”试验，于2010年6月3日在莫斯科启动，并已顺利完成。而美国总统贝拉克·奥巴马2010年4月表示，美国将放弃旨在重返月球的“星座计划”，期待到21世纪30年代中实现载人登陆火星。那么，我们真的有可能亲眼目睹人类登陆火星的壮举吗？和登月相比，人类登陆火星要克服哪些特殊的困难？

一、

发射重量大大增加，利用空间站、月球做“中转”

20世纪60年代末至70年代初，人类曾完成了六次登月。然而和登陆月球相比，人类登陆火星最显而易见的困难就是太空飞行的距离大大增加。

► 火星地貌想象图





► 火星登陆想象图

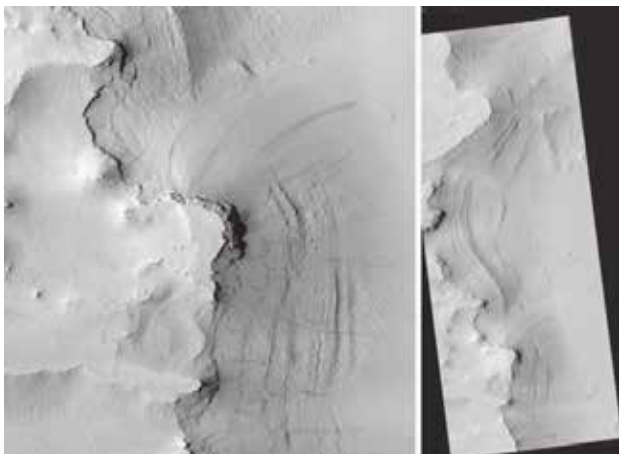


► 机器人在火星上工作的想象图

距离的增加会带来一系列的问题，登火星的困难多半与此有关。

国家天文台研究员李竞告诉笔者，月球基本在一个圆轨道上围绕地球运转，距离差不多是 38 万千米。以现有的火箭，差不多 3 天内就可以到达。而火星和地球都围绕太阳运转，相互的距离是一个大变量。当它们处在太阳的同一侧时距离最短，光线大约要走 4 分钟；而当它们分处于太阳的两侧时，距离最长，光线大约要走 20 分钟。即便是最短距离也差不多有 6000 万千米，比地月距离远了一二百倍。火箭飞向火星，需要半年多的时间才能到达，加上在火星逗留的时间，人类从火星往返，差不多需要一年半的时间。

一年半的时间，航天员需要的食品、饮料、氧气，飞行、返回的燃料等都要随舱携带，这是一批很大的物资，而且这么长时间的飞行，总要给航天员一定的活动空间，轨道舱不能太小，这和载人登月以及无人探测火星时的情况都是大大不同的，这就使火箭的起飞重量成倍增加，而目前人类还造



► 火星侦察轨道器的 HiRISE 拍摄的 Tikhonravov 盆地

不出这样大的火箭。

另外除了在火箭技术上寻求突破以外，还有另外一些可能的解决问题思路，比如把飞船、物资、火箭等一部分一部分地运到地球空间站上去，在空间站里组装起来之后再向火星发射，这样就可以摆脱很多地球引力的影响。同样的思路，利用月球作为中转“跳板”，也是一种可能的办法。

二、火星引力比月球大，“火星服”要“大减负”

月球引力是地球的 $\frac{1}{6}$ ，而火星引力是地球的 38%。火星引力是月球的差不多一倍，这个差别也会带来一系列的问题。

首先是登陆火星的宇航服问题。当年“阿波罗计划”中的登月服，在地球表面重量约 100 千克，在月球表面重量是十几千克，人穿上在月球表面活动还是可以接受的。但这套服装在火星表面的重量是近 40 千克，相当于人扛着七八十斤的重量四处活动，就显得太重了。因此，必须研制出适合登陆火星的宇航服，它在地面上的重量应该不超过 50 千克。

同样由于火星引力比月球大了一倍，返回火箭要克服的引力也大了一倍，登陆舱与绕火星运行的轨道舱会合后，需要达到每秒 5 千米以上的速度，才能克服火星引力，踏入返回地球之旅。

与月球相比，月球上完全没有大气，而火星上虽然大气很稀薄，但毕竟有的，因此也有气象。从地球上观测，发现火星上的沙尘暴很厉害，这对返回火箭的发射可能带来影响。

三、选择发射窗口不容易，一旦错过要等两年多

正如前面所说，由于火星与地球相互位置关系比较复杂，选择发射窗口及飞行路径就是一个十分复杂的工作，绝不像打枪瞄准那么简单，可以说每个火星探测器走的路径都不尽相同。

载人登陆火星，不但要选择合适的发射窗口，还要考虑登上火星后，是否有合适的返回窗口。一旦错过，火星和地球会越飞越远，等待下一次火星与地球再来到与太阳同一侧的最短距离，需要 780 天之后了。

由于要同时考虑发射和返回，因此发射窗口和返回窗口都不可能是最佳选择，这需要进行复杂周密的计算。

同样由于距离遥远，给飞船的跟踪、测轨、通信工作都带来了很大的挑战。火星上温度很低，年平均气温在零下 60℃ 左右，这对电子元器件的正常工作是个巨大考验。李竞介绍说，苏联曾多次发射火星探测器，也曾进入火星轨道甚至在火星着陆，但都没有有效地解决通信联络问题。2003 年 6 月 2 日，欧洲宇航局“火星快车”探测器发射升空，它携带的“猎兔犬 2 号”登陆器预定于 2003 年 12 月 25 日凌晨登陆火星，但直至今日地面控制中心仍未与其取得联络。如果这样的事情发生在载人火星登陆上，无疑会酿成惨剧。

四、太空生存一年半，挑战精神、生理新极限

人类到目前为止，最长的太空飞行记录是 438 天，是由一位俄罗斯航天员在“和平号”空间站上创造的，当时人回来是用担架抬下来的。这是一个比较极端的试验，而现在通常的做法是，空间站上的航天员要半年换一批，这样比较符合人体承受的限度。

人类往返火星，需要在太空停留约一年半，不但超出了目前为止人类在太空停留的极限，还要完成登陆火星等很多复杂的工作，人的精神和体力到底能不能受得了，将是很大的疑问，目前进行的“火星-500”试验，就是对此进行的试验探索。

举一个最简单的例子，在火星上与地球进行一问一答一次最简单的对话，要花费十几分钟的时间，这对人的耐心就是个考验，而且一年半的时间里，如果总吃太空食品人体是否能承受？我们可以考虑在飞船内种一些蔬菜加以解决，这个在技术上并不困难。

链接 人类为何要登陆火星

■ 对科技发展是巨大推动

人类探索外星球，绝不仅仅是为了满足好奇和幻想，而是对科学技术发展的巨大推动。比如，美国科学技术与苏联一下拉开了巨大差距，主要是由于登月计划的成功实施带来的。今天所有的高科技，如果追根溯源，往往都可以追踪到当年的“阿波罗计划”，像无线通信技术、计算机技术的突破，都是出于人类登月的需要。

可以想象，人类登陆火星计划的实施，必然会给人类科学技术的新突破带来强烈刺激，最终给人类的发展带来福祉。而科学技术的突破，往往需要设定一个具体目标作为抓手，才能集中力量获得实现。

■ 了解外星球未解之谜

正是由于人类登月以后捡回了月球岩石，在月球上安装了月震仪，才对月球的起源、形成有了更深入的认识。如果人类能够成功登陆火星，一定会对火星的认识有更大的突破。

长期以来有一种说法，认为火星上有大洪水冲刷的痕迹，并由此推测火星上曾经有过生命，但是后来由于环境恶化，生命灭绝了。甚至有人更进一步提出，火星的过去就是地球的现在，火星的现在就是地球的未来。人类如果能够登陆火星实地考察，甚至如果能够获得火星生命化石，一定会让我们对于宇宙和生命的认识有大的突破。

原文刊载于《北京日报》，编辑王凌光。

绚丽多彩的大气光学现象

焦维新

北京大学地球与空间科学学院 教授

大气中的光学现象是绚丽多彩的，例如大家熟悉的闪电。还有一些是许多人不熟悉的，例如气辉、极光、红闪和蓝急流，这些光学现象是大自然的奇观，对这些现象的研究也具有重要的科学意义。

一、气辉

气辉是高层大气吸收了太阳电磁辐射能量后产生的一种微弱光辐射。出现在地球上空 50~500 千米之间，其亮度比极光低得多，分布也均匀，因而不易被人们所察觉。

按照高层大气接受太阳照射情况的不同，气辉分为夜气辉、昼气辉和曙暮气辉三类。

夜气辉：是高层大气在夜间，即没有太阳光照射时产生的光辐射。为高层大气成分在太阳紫外线、X 射线作用下离解和电离的结果，分子氧和含氢化合物的光致离解起主要作用。在这过程中被吸收的能量通过化学反应被释放出来。

昼气辉：是高层大气在太阳光照射条件下产生的光辐射。主要的激发机制为共振散射、荧光散射和光电子碰撞。



► 国际空间站上观测到的气辉



► 奋进号航天飞机观测到的气辉

昼气辉的光谱成分最丰富，发射强度也高。在白昼观测时，由于有很强的散射太阳光，在地面观测需要分辨率很高的光谱仪。利用卫星观测是获得昼气辉资料的重要手段。

曙暮气辉：是日出前和日落后，太阳天顶角在 90° 和 110° 之间时的光辐射。此时低层大气在地球阴影中，高层大气则接受到来自斜下方的太阳光照射。随着太阳天顶角的变化，通过在某一地点观测到的气辉强度的变化，可获得发射成分的高度分布。它的激发机制主要是共振散射。

气辉在可见光、紫外和红外很宽的波段都有发射，光谱中含有许多原子、分子和离子的谱线或谱带，在可见光和近红外区还迭加有连续谱。

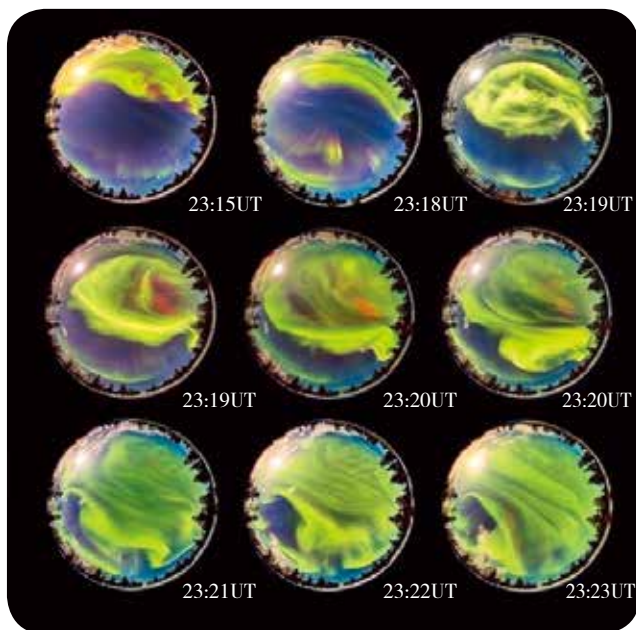
测量气辉的光谱和强度，可以获得高层大气成分的信息。

二、极光

顾名思义，极光是发生在极区高层大气的发光现象。但是，什么原因引起极区高层大气发光？为什么极光是五颜六色、绚丽多彩的？现在人们已经弄清楚，极光现象与高能带电粒子有密切的关系。当来自地球磁层或直接来自太阳的高能带电粒子注入高层大气时，撞击那里的原子和分子，使它们激发出各种颜色的光。

极光通常出现在高磁纬地区，在背阳侧主要在 100 ~ 150 千米的高空，在向阳侧主要在 200 ~ 450 千米范围内。在地磁活动时期，特别是大的地磁活动时的极光极为壮观。在磁暴期间，极光有时可以延伸到纬度较低的地区。

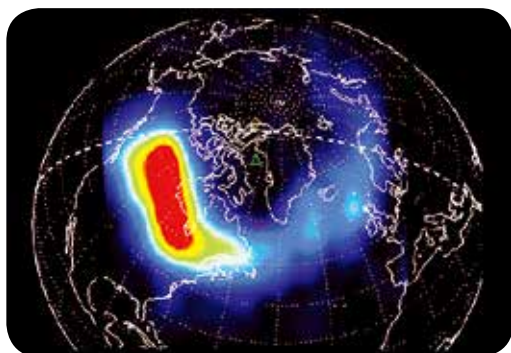
极光的外形有多种形态，如宁静的均匀光弧（或光带）、射线状极光、弥散状极光和大尺度均匀光面。下图给出几种典型的极光图形，以及在 2014 年 3 月 12—13 日夜间发生极光暴。



► 2014 年 3 月 12—13 日夜间发生的极光暴



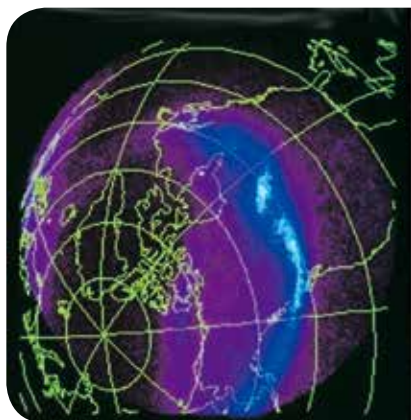
► 典型的极光图形



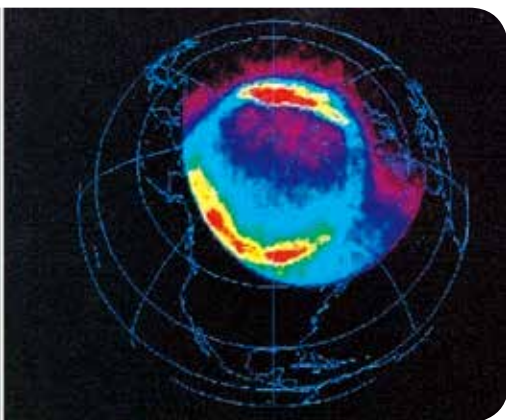
► X 射线极光

左图是 X 射线极光，这种极光的出现，说明有高能电子沉降到地球的极区。

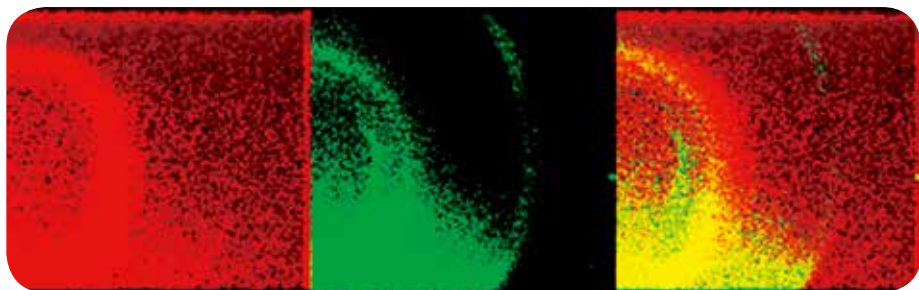
下图是紫外极光和质子极光图像。质子极光是质子撞击地球大气层产生的极光，三幅图中，中间的是电子极光，右边的是质子与电子极光合成图，黄色区域说明撞击到该区域的质子和电子通量大体相当。



► 紫外极光



► 质子极光



三、红闪和蓝急流

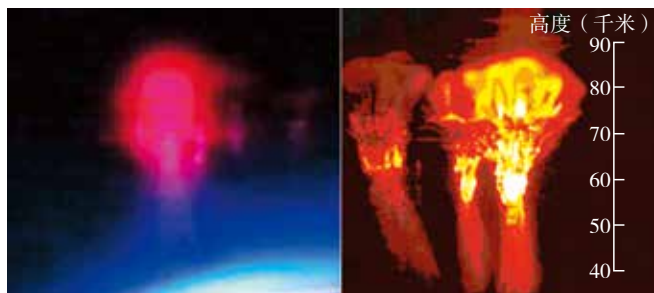
红闪和蓝急流是伴随雷暴的高层大气光学现象，它是用灵敏的照相机在强雷暴顶（大约 15 千米）到低电离层（大约 95 千米）的高度范围观测到的。第一个红闪的像是在 1989 年偶然得到的，从那以后，到 1990 年年初，从航天飞机上大约获得 20 个图像。现在，在夏季的雷暴区已获得大量的图像，包括来自地面和飞机的测量。从飞机上也获得许多蓝急流的像，这也是以前没有记录的雷暴上空光学活动形式。蓝急流似乎是直接从云顶形成的，通过平流层以一个窄锥向上射出，向上的速度大约 100 千米 / 秒。

红闪是大规模、弱亮度的闪，直接出现在雷暴系统中，与云一地及云内闪电同时发生。它们的空间结构从单个或多个垂直拉长的点、上下延伸很大的点到从云顶向 95 千米高度扩展的亮群。红闪基本上是红色的。最亮的区域位于 65 ~ 75 千米高度，在这个高度以上，常常有暗红的气辉或扩展到 90 千米以上的模糊结构。在亮区以下，蓝的丝状结构常常向下扩展到 40 千米。红闪很少单个出现，通常以两个、三个或更多的簇发生。某些很大的红闪似乎是组合了许多个别的红闪。其他红闪是更松散的组合，可能水平扩展到 50 千米或更大的距离，占有大气层的体积超过 10000 立方千米。

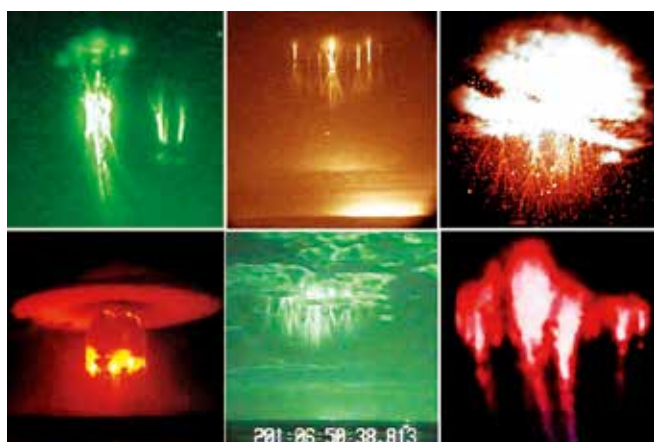
红闪是重要的空间光学现象，研究红闪的形态特征及发生规律对于军事侦察和导弹预警有重要意义。红闪的发生会伴随着强的电磁脉冲，它将影响电离层的形态和辐射带的高能粒子分布，是空间天气研究中值得注意的问题。

蓝急流是伴随着雷暴发生、从雷暴活动区顶部向上射出的蓝色光束。通常发生在雷暴云顶之上，高度范围为 15 ~ 50 千米，并以大约 100 千米 / 秒的速度向上传播，在 40 ~ 50 千米的高度散开并消失，特征时间约 300 毫秒。蓝急流呈漏斗形，底部直径为 1.6 ~ 3.2 千米，顶部直径为 8 ~ 10 千米。

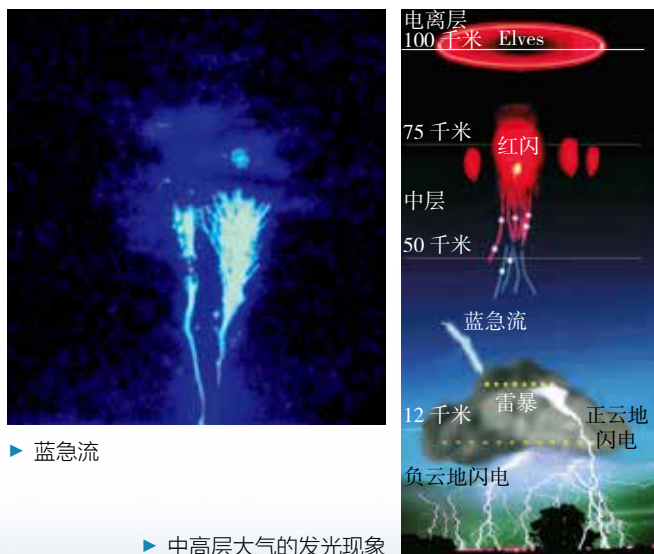
研究蓝急流的形态特征及发生规律对于军事侦察和导弹预警有重要意义。蓝急流也是一种重要的空间电学现象，来自蓝急流的电磁脉冲可能影



► 红闪及其出现的高度



► 多种形态的红闪



► 蓝急流

► 中高层大气的发光现象

响电离层的形态和辐射带高能粒子的分布。

左图分别是红闪出现的高度和几种典型的红闪，以及蓝急流的形态。下图概括了在中高层大气出现的几种光学现象，其中 ELVES 的意思是“来自电磁脉冲源的光发射和甚低频扰动”。

原文收录于《空间天气与人类社会》，知识产权出版社 2015 年出版。

太空“狗侠”

石磊

中国航天报社 高级记者

狗是人类忠实的朋友。在人们津津乐道于宠物狗、看家狗、牧羊狗、缉毒狗、导盲狗等狗类，如何令人爱怜、血统娇贵、通晓人性、为人民服务之时，我们不应该忘记还有一种狗，它们默默无闻地献身于人类的航天事业，为人类推开天宇之门助了一臂之力。

自从 1961 年 4 月 12 日苏联航天员尤里·加加林首次推开天门之后，迄今已有 500 多位航天骄子进行了千余人次的太空遨游，人类通往天宫的道路上铺满了成功的彩带和鲜花，航天员们也成为了公众心目中戴着神秘光环的英雄。然而回首人类半个多世纪的登天征程，人们不能忘记自己的亲密朋友曾经留下的足迹和付出的牺牲，它们就是一批为人安全进入太空打前站的太空“狗侠”，是它们首先被选作试验品踏上了生死未卜的太空航行之路。

一、为什么挑选狗

真正环绕地球轨道飞行的动物实验是从狗开始的。1957 年 11 月苏联一只名叫莱伊卡的小狗乘坐“伴侣二号”生物卫星成功地飞上了太空。虽然在它之前也有些果蝇、老鼠之类的动物尝试过太空飞行，但是它们只是搭乘生物火箭进行过亚轨道飞行，并没有真正飞上太空。

为什么挑选狗来当太空试飞员呢？据苏联从事宇宙科学研究的马尔金博士回忆说：当时，苏联航天医学研究所曾有过用猴子做试验的打算。他们咨询马戏团的驯兽师“教会猴子穿皮鞋要用多长时间？”驯兽师答：“大

约3个月，不过有时也白费劲。”“能否给它们打针，因为它们常会得与人类相似的疾病？”“这就更难了。”原来，猴子通常对不习惯的东西反应过敏。比如，马戏团演出途中遇到迎面驶来的火车突然鸣笛，一只猴子当场惊吓而死。由于苏联著名科学家巴甫洛夫对狗的生理，特别是狗的条件反射神经系统，进行过出色的研究，并且评价甚高，说它们对主人忠贞不渝，善解人意，是人类的兄弟。于是，苏联航天医学研究所更加偏爱于狗，他们决定，选择狗作太空试飞员。马尔金博士说：“如果不是狗，人类通往星际的道路可能会艰险百倍。”当然，对动物先行者的看法也不尽相同，比如，美国人就比较青睐灵长类，他们经常选择猴子和猩猩进行太空试验。

二、第一支“太空狗队”全是公狗

苏联在20世纪40年代末组织了第一支参加试飞的狗队，其成员全是“贫民”出身的公狗，它们不是良种狗，也就是那种人们常说的看家狗。看家狗不娇贵，比猎犬、宠物狗更能吃苦耐劳。苏联航天医学研究所挑选狗的标准很严格：除了身体健康无疾病外，每只狗的体重不能超过6千克（当时火箭运载能力有限），身高不超过35厘米。研究所负责饲养狗的是名叫舒拉的妇女。她是个有特性的人，小狗们都喜欢她，而她自己也不开小狗。舒拉每次下班回家，身后总是跟着三四名“预备航天员”，这在当时已是严重“违反纪律”的行为。因为航天试验是绝对保密的，所有参与试验的科学家和员工都必须签字保密，而且严禁随便串门。但小狗不会签字，卫兵也无法阻止它们的行动，于是它们经常钻过围墙跟着舒拉回家，和她的孩子们一起睡在床上，舒拉也常给它们一些放风的自由。但是她发现，这些“男士们”对航天事业三心二意，最让它们感兴趣的不是太空飞行，而是异性，它们常常等不及主人给脱掉“航天服”，就偷偷溜出去和雌狗“约会”去了。舒拉家附近的住户们，经常看见这些出没无常、身着奇装异服的狗，他们大惑不解，不知这些狗是干什么的。公狗们无组织无纪律的行为，给“太空狗队”的管理增加了一定难度。

三、“狗侠”牺牲的事时有发生

1949年，苏联火箭和飞船总设计师谢尔盖·科罗廖夫指定一组科学家专门负责小狗的训练，教它们进舱室、穿衣服、完成各种命令，习惯待在类似飞船舱室的特制箱槽里，在身上安置传感器。目的是研究太空失重环境对动物的影响以及密封舱维持生命的功能。聪明的“太空狗队”成员在很短的时间内进行了大量的训练准备工作，到了1951年，小狗戴茨卡和杰济卡已做好了“上天”的准备。

1951年6月，科罗廖夫精心挑选这两只小狗充当生物火箭的乘客，它们被发射到110千米的高空，并且安全返回。着陆后，人们打开舱盖，戴茨卡和杰济卡安然无恙。当工作人员从它们身上卸下所有装备后，两只小狗飞跑着、嬉戏着，不用检查就可断定它们未受损伤。

小狗试飞成功后，一位卫星设计师高兴地把小狗杰济卡抱回了家，让这位“太空小英雄”和自己的家人一起生活。没想到却救了杰济卡的命——不久之后进行第二次发射时，杰济卡由另一只小狗丽莎接替，但由于降落伞未打开，小狗戴茨卡和丽莎“以身殉职”。紧接着小狗斯梅莱娅和玛丽施卡又成功进行了一次飞行，但是随后的载狗发射又失败了。

1949—1959年，苏联共进行了26次生物火箭试验，有52狗次参加试验，失重时间最长是10分钟，“狗侠”死亡的事时有发生。最初的“太空狗队”有八九只小狗，不久就有四只因事故丧生，以至于有的狗一听说要上天就神经紧张，浑身哆嗦，其中一只叫伯比克的狗在发射前竟然“叛逃”失踪了，试验人员只好临时找了一只替身狗。

四、“巾帼”不让须眉

1957年11月3日，在苏联“伴侣二号”生物卫星上，一只名叫莱伊卡的小雌狗成了第一个绕地球轨道飞行的动物航天员，它是从10只参加过训练的小狗中择优选拔出来的，年龄2岁，体重6千克。“莱伊卡”在俄文中是一种狗的品种，而她的真名其实叫库德娅芙卡（小卷毛）。



► 1957 年，世界第一个飞天的动物航天员——小狗莱伊卡
(来自《太空探索》)



► 2007 年，俄罗斯为纪念莱伊卡飞天 50 周年，在莫斯科落成了首条太空狗纪念碑
(来自《太空探索》)

狗和人一样也有不同的类型，有的温顺、皮实，容易适应新的环境；有的脾气暴躁、我行我素，难以驾驭。因此，对小狗航天员也进行了严格的选拔和训练，莱伊卡就是易于适应新环境、能够不剧烈活动、耐得住长时间静默的温顺小狗，它在地面狭小的座舱里穿戴着全部装备安静地度过了 20 天，生理功能没有发生紊乱，也没有“乱说乱动”，所以光荣当选首飞航天员。它在天上生活了 5 个昼夜，身体各个部位的信息通过电波传回了地面，科研人员对此欣喜若狂，他们了解到太

空环境对动物的身体机能并未构成致命的威胁，这为人进入太空增强了信心。只可惜，当时的生物卫星不具备返回功能，可爱的莱伊卡只好孤独地、永远地“住”在了天上。不过，它的勇敢壮举使莱伊卡一举成为全世界知名度最高的“名犬”。

五、\ 小狗太空呕吐与加加林首飞时间直接相关

生物卫星的试验取得了巨大的成功，科研人员获取了火箭在飞行过程中超重、失重、噪声和振动冲击对动物生理影响的资料，了解了高空大气的物理性质和宇宙辐射的强度，研究了密封舱生命保障系统和防护装置，初步解决了回收和安全救生的方法。

1960年5月—1961年3月，苏联明显加快了载人航天的研究步伐，在不到1年的时间里，连续发射了7艘“东方号”试验飞船，其中6艘载有小狗。

1960年5月15日，第一艘试验飞船发射。回收时，返回舱失控，不仅未对地返回反而被抛上更高的轨道。还好飞船中没有活物，只乘坐了一个假人。

7月23日，发射第二艘飞船，因火箭发生故障28.5秒后爆炸，航天狗巴斯（黑豹）和里斯施卡（小狐狸）命归黄泉。

8月19日，第三艘飞船载着名叫别尔卡（松鼠）和斯特里尔卡（小箭）的2只狗和50只老鼠、数十只果蝇进入太空轨道，这艘被人们戏称为“动物园”的飞船共飞行了25小时。小狗别尔卡和斯特里尔卡非常幸运，在绕地球18圈之后，安全返回了地球。6个月后的体检证明，小狗没有受到太空辐射的损伤。斯特里尔卡后来生了6只幼犬，其中一只叫普施尼卡被送给肯尼迪总统的孩子们作为礼物，普施尼卡的后裔依然存活至今。别尔卡和斯特里尔卡死后，被做成标本曾在莫斯科和世界许多国家巡回展览，它们像英雄一样受到了人们的尊敬。

12月1日，第四艘飞船又载小狗姆什卡（小蜂）和皮契卡（小蝇）进入轨道。返回时，由于制动火箭点火偏差，造成再入角过大与空气摩擦剧烈，

2只小狗连同返回舱一起被烧成灰烬。壮烈牺牲的姆什卡曾经是莱伊卡的“队友”，她们同时被选拔进入了“航天第一梯队”，但在训练中她因闹情绪拒绝适当进食而最终落选，未能成为“航天第一犬”。

12月22日，第五艘飞船因火箭故障而未能进入轨道，幸运的是地面迅速启动了应急救生系统，2只小狗戴姆卡（小女士）和克拉萨夫卡（美人）饱受惊吓，失魂落魄地随返回舱着陆。

1961年3月9日和21日，在小狗切尔诺斯卡（小黑）和兹维多契卡（小星，由加加林亲自命名）分别成功返回后，飞船总设计师科罗廖夫才正式做出了首次载人飞行的决定。

4月12日，加加林乘坐“东方一号”飞船驶向茫茫宇宙。这艘飞船的原型就是小狗别尔卡和斯特里尔卡进入太空时坐过的密封舱。而他为什么首飞太空只飞行了108分钟，其中的奥秘也在于狗。原来在第三艘试验飞船飞到第四圈时，一只狗呕吐严重，这导致苏联当局决定，为稳妥起见，加加林首飞只在轨道上飞行一圈，历时108分钟。

六、太空狗侠也有中国狗

触摸太空的并非都是苏联狗。1966年2只中国狗加入了太空狗侠的行列。

中国的太空狗队是“男女混编”队，成员不少，有150多只备选的小狗，都是参考苏联的选拔标准从各地挑来的。通过选拔，仅“身材”一条标准就淘汰了一大批，只有30多只小狗过关。之后，科研人员又对小狗的灵活性和“心理素质”进行鉴定。有的小狗灵活性太强，一分钟都坐不住，有的小狗灵活性太弱，一碰到嘈杂的环境就开始发抖甚至痉挛。雌狗小豹，黑白相间，挺拔刚毅，反应灵敏，训练时十分听话；雌狗珊珊一身黄毛，个头适中，性格温柔，沉稳好静，像个小姐姐。这两只雌狗以其优秀的品质突破重围成为其中的佼佼者，光荣地入选“太空犬”。

1966年7月15日上午，安徽广德发射场万籁寂静，人们屏住呼吸待命发射。突然，一声呼啸，中国制造的T-7A（S2）火箭直入云霄，火箭生物舱内的小豹、4只大白鼠和12支生物试管，顿时腾云驾雾窜

上 70 千米的高空。24 分钟后，生物舱成功着陆在距离发射地点 40 千米的山区。飞行过程中，摄影系统拍摄了狗的神情和姿态，安装在生物舱内的磁记录系统则详细记下了狗的心电、血压、呼吸和体温等生理指标。虽然小豹在地面上“久经考验”，但是到了高空仍然十分



► 20 世纪 60 年代，我国用探空火箭进行了小狗小豹的升空试验

（来自《太空探索》）

恐惧，从高空传回的图片可以看出它的表情惊恐、眼神茫然。当回收舱安



► 我国送小狗上天的探空火箭在安徽广德成功发射

（来自《太空探索》）



► 我国探空火箭发射准备
(来自《太空探索》)

全抵达地面，技术人员打开舱盖抱出小豹时，这只刚刚经受了高空历险的小狗温顺地把头依偎在人身上，欢快地摇着尾巴，好像如释重负：我终于回来了。13天后小狗珊珊又率4只大白鼠乘第二枚火箭飞向蓝天，稍后也安然返回了地面。

通过2次载狗生物火箭试验，科研人员进行了生理、生化、细菌、免疫、遗传、组织化学、细胞及亚细胞水平形态学的生物医学研究，

获得了我国首批生物空间飞行的资料。

尽管2只中国小狗非常出色，但毕竟它们只飞到了70千米的高空，没有达到莱伊卡飞行的太空高度。

七、“太空狗侠”训练艰苦

小豹和珊珊上天前接受了各种各样的训练，训练的科目相当艰苦。比如要走“独木桥”锻炼平衡能力；被捆绑在木板上不断翻转，增强抗晕眩本领；捆在振动器上受训，以耐得住火箭发射时受到强烈震动；装进小铁箱里用离心机高速旋转，在强大的离心力下培养坚强的意志；待在冰箱里的滋味也不好受，因为高空气温很低，小狗必须接受低温训练；还要让它们置身于刺耳的大喇叭下，以适应火箭发射时的噪声环境。

发射前夕，它们被施行了外科手术，右颈总动脉被移至颈部的皮瓣内以记录血压，银质电极埋入胸部第五肋皮下记录心电。因为在生物火箭发射之后，小狗要经历主动段、失重段、返回段这三种不同的阶段，必须测

试小狗在不同阶段的心率、血压、心电和呼吸这四大生理指标，这些数据对载人航天有着重要的参考价值。

值得一提的是，小豹和珊珊上天的时候享受了比较优越的待遇，这得感谢比它们早上天的大白鼠们。由于缺乏经验，一开始科研人员忽视了生物舱的舒适问题。比如，试验时大白鼠们被火箭模拟发射振得死去活来，心律失常，以致科研人员连完整的心电曲线都没有测下来。后来科研人员对生物舱做了很多改进工作，为小狗设计了带有减震器的托盘，小豹和珊珊系上了安全带趴在托盘里；尾部连接屎、尿收集器，密封生物舱保持在24℃。它们的感觉可比大白鼠要好多了。

凯旋而归的小豹和珊珊成了中国的“动物明星”，它们被运往北京，在著名生物学家贝时璋的陪同下，受到当时中国科学院（以下简称中科院）院长郭沫若和党组书记张劲夫的亲切“接见”。

专家们认为，2次载狗生物火箭飞行试验，为我国高空生物学的研究和载人航天生命保障工程的研制，积累了宝贵的经验。

红外热敏感材料与响尾蛇导弹

王宁寰

中国科学院应用研究与发展局 高级工程师

美国研制的响尾蛇导弹 AIM-9，是世界上第一种红外制导空对空导弹。红外装置可以引导导弹追踪热的目标，如同响尾蛇能感知附近动物的体温而准确捕获猎物一样。

导弹长近 3 米，直径 120 余毫米，弹体由铝管制成。弹头前端有一个玻璃罩，内部装有热敏感材料制成的热源探测器件及系统，也就是寻找目的系统，该系统由一组硫化铅热感电池及聚焦光学部件构成。

响尾蛇导弹命中率极高的原因

由于现代战斗机都是采用喷气式发动机，喷管喷出的高温气体中含有



美国 AIM-9X 空空导弹
(响尾蛇导弹)

大量的红外线辐射。飞行员驾机上天，已经不是用导弹单纯攻击敌机的机身。当飞机上天以后，想方设法绕到敌机后部，瞄准器对准敌机的喷火口，一按电钮，响尾蛇导弹就向敌机尾喷管飞驰而去，并且咬住不放，直到击中尾喷管使敌机炸毁。它们均采用非制冷硫化铅红外

► 美国科学家研制的响尾蛇空空导弹

探测器，并用超小型电子管放大器进行信号处理，只能在目标尾后进行探测，且距离为 10 千米以下，有效攻击范围仅为目标尾后 2~3 千米。

一般来说，飞机一旦被响尾蛇导弹咬住，必死无疑，但也有例外。据说有一位飞行员，发现仪表屏红灯报警，说明敌人的响尾蛇导弹向他飞来，他心里计算离击毁飞机还有十秒钟时间，按飞行条例规定他可以跳伞，放弃飞机。但飞行员十分镇静，突然他灵机一动，调转机头向太阳飞去，响尾蛇导弹也跟踪着向太阳飞去，此时飞行员突然驾机一个猛子向下扎去。响尾蛇导弹来不及反应，以为太阳的热源就是飞机尾喷管，于是一直向太阳飞去。这个飞行员以他良好的心理素质、灵活的头脑和丰富的科学知识，保护了飞机也保护了自己。

响尾蛇导弹通过不断攻进，性能不断提高，已经发展成多品种、系列化。其中，超级响尾蛇导弹成为战果最辉煌的空空导弹。这种导弹先后总共生产 10 万多枚。时至今日，“响尾蛇”成为世界上产量最大的红外制导空对空导弹，也是实战中被广泛使用的少数导弹之一，参加过越南战争、马岛冲突和海湾战争。各型响尾蛇导弹都采用红外制导，发射后导弹控制舱前面的导引传感器，探测目标发出的红外辐射，使导弹自动跟踪目标飞行，直至击中目标，最大的优点是可发射后不用再操作，减轻了飞行员的心理负担。

几十年来，颇有威力的响尾蛇导弹经历了许多战争和冲突的考验，身影也遍及世界许多国家和地区，可谓大名鼎鼎。1981 年 8 月，美国海军的



► 空战中的响尾蛇导弹



► 马岛战争中英国垂直起降“海鹞”战斗机

两架F-14“雄猫”战斗机曾在1分钟内击落利比亚的2架苏-22式攻击机，使用的就是超级响尾蛇导弹。1982年马岛战争中，英军10架“海鹞”式战斗机发射27枚超级响尾蛇导弹，击落了24架阿根廷飞机。西方传媒称它是“具有划时代意义的空中杀手”。

二、响尾蛇导弹发明受动物学家启发

动物学家发现，在没有月光的森林里，伸手不见五指。小动物出来觅食，什么也看不见，只能依靠鼻子的嗅觉和爪子的触觉来寻找食物，摸到一个果子就把它吃了。可是响尾蛇确不一样，它高昂着头四面环顾，一低头就咬住一只老鼠，再一低头又咬住一只兔子，真是百发百中，令人赞叹！科学家纳闷好奇：难道响尾蛇的眼睛是夜光眼，可以在黑暗中识别各种动物？于是就抓了一条响尾蛇进行研究，结果发现响尾蛇的眼睛是近视眼。难道响尾蛇的耳朵特别灵，可听到小动物爬行的微弱声音？研究结果发现响尾蛇是个聋子。一条又聋又瞎的响尾蛇还有什么其他特殊功能吗？

于是，科学家把响尾蛇放在一个暗室中，分别照射各种不同波长的光线。当照射到红外线时，响尾蛇突然高抬起头对着红外光源。若换个方向照射红外光，响尾蛇又突然调过头来，紧盯着红外光源。接着，科学家经过仔细研究，终于发现在响尾蛇的鼻子上部长着第三只眼睛——红外热感应器官。原来，动物身上都会发出一种不可见的红外光，人看不见，其他动物相互也看不到。唯有响尾蛇的第三只眼能看见，使响尾蛇能清楚地分辨出各种动物的形状和位置，准确地一口咬住。

响尾蛇属爬行类脊椎动物，是一种管牙类毒蛇，牙根毒囊内藏有剧毒。一般体长1.5~2米。体呈黄绿色，背部具有菱形黑褐斑。尾部末端具有一串角质环，是多次蜕皮后的残存物，当遇到敌人或急剧活动时，迅速摆动尾部的尾环，每秒可摆动40~60次，能长时间发出响亮的声音，致使敌人不敢近前或被吓跑，故称为响尾蛇。响尾蛇属肉食性，喜食鼠类、野兔，也食蜥蜴、其他蛇类和小鸟。常多条集聚一起进入冬眠。卵胎生，每产仔蛇多达8~15条。主要分布于南、北美洲。

响尾蛇能感知动物的奥秘在鼻子和眼睛之间。响尾蛇在眼和鼻孔之间有一个颊窝，是热能的灵敏感受器，可用来测知周围敌人（温血动物）的准确位置。颊窝一般深 5 毫米，只有一粒米那么长。这个颊窝是喇叭形，喇叭口斜向朝前，其间被一片薄膜分成内外两个部分。里面的部分有一个细管与外界相通，所以里面的温度和蛇所在的周围环境的温度是一样的，而外面的那部分却是一个热收集器，喇叭口所对的方向如果有热的物体，红外线就经过这里照射到薄膜的外侧一面。显然，这要比薄膜内侧一面的温度高，布满在薄膜上的神经末梢就感觉到了温差，并产生生物电流，传给蛇的大脑。蛇知道了前方什么位置有热的物体，大脑就发出相应的“命令”，去捕获这个物体。

三、

据说，响尾蛇还有一个惊人的本领，就是死后一小时内照样能咬人至死

许多人上了当，难道蛇变成“鬼蛇”还要报复人吗？

通过研究，科学家终于解开了响尾蛇死后咬人的秘密。美国的研究指出，响尾蛇即使在死后一小时内，仍可以突然弹起袭击人。美国亚利桑那州凤凰城行善者地区医疗中心的研究者发现，响尾蛇在咬噬动作方面有一种反射能力，而且不受脑部的影响。

研究员访问了 34 名曾被响尾蛇咬噬的伤者，其中 5 人表示，自己是被死去的响尾蛇咬伤。即使这些响尾蛇已经被人击毙，甚至头部切除后，仍有咬噬的能力。一直以来，科学家只知道响尾蛇的头部拥有特殊器官，可以利用红外线感应附近发热的动物，而响尾蛇死后的咬噬能力来自何处并不明白。通过研究发现，这种能力还是来自这些红外线感应器官的反射作用。即使响尾蛇的其他身体机能已停顿，但只要头部的感应器官组织还未腐坏，即响尾蛇在死后一个小时内，仍可探测到附近 15 厘米范围内发出热能的生物，并自动做出袭击的反应。科学家根据这一原理发明出许多相应器件和装置，广泛运用于军事领域。

想一想，世界上的动物头脑结构多么精巧，为了捕食和生存，竟然长

出这样完整的一套红外薄膜热感应接受和处理系统。真可谓巧夺天工，无与伦比。这就为人类研究和发展红外探测技术，提供了基础信息和知识，从这点说，响尾蛇成了人类的老师。

我们知道世界万物都有温度，有温度就会有红外线辐射，哪怕在最低的温度零下 273°C 也存在，只不过接近绝对零度时的热辐射极其微弱，而在常温下的物质发出的红外线都是可以监测到的。动物学家公布了他们对响尾蛇热感应器官及其功能的研究结果，引起材料科学家的兴趣。许多国家的材料科学家都试验用矿物材料来制造红外热感应材料并先后取得成功。但是，做得最好的应该是中国科学院上海技术物理所。

四、中国科学院红外热感应材料研究世界领先

中国科学院上海技术物理所的主要研究方向为红外物理与技术研究。研究所作为中科院承担国家重大任务的核心研究所之一，集基础与应用基础研究、高新技术创新研究、应用系统技术和相关产业化为一体，是国内红外探测系统、元器件和红外物理研究的骨干单位。中国科学院上海技术物理所 1998 年进入中科院首批知识创新工程试点单位，2007 年被中科院列为综合配套改革试点单位。

该所研究的红外热感应材料综合指标在国际领先，通俗地说就是“价廉物美”。国外厂商都看上了该所的材料，希望购买。谁都知道原材料跟红外传感器件比，价格差十倍甚至几十倍。可是科学院的研究所缺乏市场经验，怎样做到既掌握材料技术专利，又获取最大的知识产权效益？研究所决定与国外强强合资，建立起中国红外材料及器件在世界上的领先地位。

美国学术界在评论该所的工作时写道：“现在他们不仅已经赶上世界，并且在一些领域走在前面。”

我国现在正处于国民经济、国防建设和高新技术快速发展阶段，对功能材料的需求越来越多，光依靠从国外进口，必然受制于人。好在我国科技主管部门早已把发展功能材料列入国家科技发展规划中，尤其对我国占有世界储量 70% 资源优势的具有战略意义的稀土功能材料，在研究和开发

上，都给予很大的重视和支持，使我国在稀土磁性功能材料和高温超导材料的研究和应用开发方面，取得令世人信服的成果。

功能材料与高新技术发展密切相关。现在全世界各国材料研究机构都把功能材料研究作为主要研究内容，它占了全部新材料研究的 85%。近年来，我国的功能材料部分研究成果，开始步入世界领先行列。相信，将来会有更多功能材料研究处于国际领先水平。

原文收录于《点石成金：神奇的新材料与纳米技术》，山东教育出版社 2010 年出版。有改动。

喷火战机夺冠军，材料科学显神通

王宁寰

中国科学院应用研究与发展局 高级工程师

一、排名夺冠的“喷火”式战斗机

2009年初，世界著名《国际航空》杂志网站，组织读者投票评出对世界军事航空发展影响巨大的战机。评选结果，英国的“喷火”式战斗机夺冠。这是一架在第二次世界大战时由英国设计的小型战斗机，看上去很不起眼，为什么会获此殊荣呢？

事情还得从第二次世界大战说起！

我们都知道，第二次世界大战在欧洲是由希特勒德国法西斯挑起的。当时，希特勒为了准备战争，集中了大批优秀科学家和工程师，为他研制新技术武器装备。与此同时，希特勒还提出了一个新战术，取名叫闪电战。

所谓闪电战，就是出其不意地闪电般快速出击、快速前进、快速解决战斗。它与现今的快速反应部队差不多。当时希特勒为闪电部队配备了先进的快速坦克、快速装甲车、快速炮车，就连他的步兵也配备了带斗的快速三轮摩托车，组成摩托化部队，从而使这支部队能真正达到闪电般快速出击的目的。

为配合快速出击，希特勒还命令在德国境内修筑了大量高速公路，你们知道高速公路是谁发明的？是希特勒发明的，没想到吧！实际上，当时希特勒发明高速公路只是为了战争的需要，并没有想到它会为今后的经济发展发挥重大作用。

当希特勒把战争准备工作完成。一声令下！德国法西斯的闪电部队先后向四面八方冲了出去，很快就把欧洲大部分国家占领了。但是，有一个

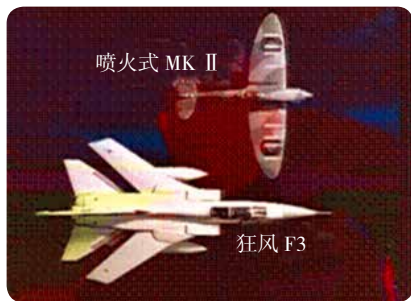
国家在海上，它没法占领，那就是英国。于是希特勒命令他的空军出动大型轰炸机，对英国进行狂轰滥炸，英国军民损失惨重。

英国政府和军民当然要反抗，要自卫。这时候，一批英国科学家和工程师研制了一种新型战斗机，取名叫喷火式战斗机。

事实上，这种飞机根本就不会喷火，它只是螺旋桨战斗机。按设计要求，这种战斗机的机身长度只有 9.54 米，只有现代狂风式喷气式战斗机的一半，因而小巧灵活，快速机动。如果真能飞上天，肯定能追上德国笨重的轰炸机，把它打下来，人们对它寄予极大的希望。

第一批飞机制造出来了，紧接着的任务就是试飞和演习。于是英国皇家空军挑选了一批优秀的试飞员来执行试飞演习任务。不幸的是，在一次演习飞行中，一架喷火式战斗机的螺旋桨主轴突然断裂，飞机直冲地面，机毁人亡，驾驶员是一位勋爵的儿子。

此事在英国政府及军方内部引起极大的震动。它不仅是因为损失了一架飞机和一位优秀的飞行员，更主要的是，其他飞机都不敢上天作战。而德国的轰炸机仍然在日夜狂轰滥炸，企图以它的空中优势来征服英国。



▶ 第二次世界大战中英国喷火式战斗机与现代狂风战斗机对比

二、中国留学生李薰临危受命

怎么办？于是英国政府下令调查，要求科学家尽快寻找原因。英国一些科学家花了许多时间寻找原因，结果是众说纷纭，拿不出确切的结论和解决办法。此时，战况越来越严酷，英国政府束手无策。就在这关键时刻，一位英国科学家推荐李薰来解决这个问题。

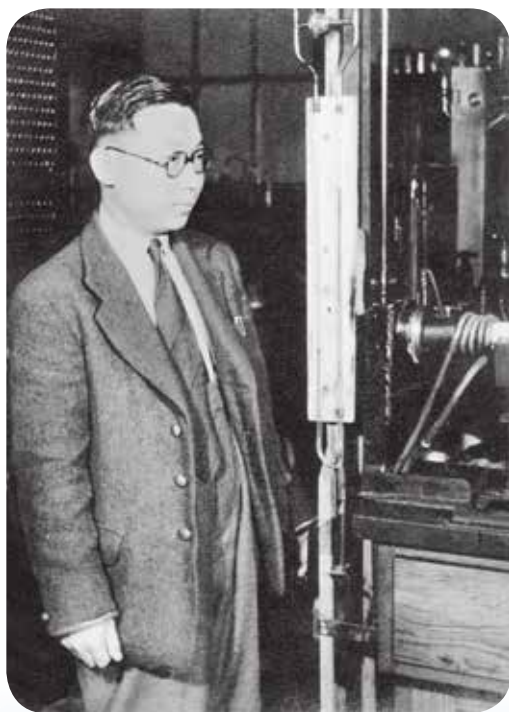
李薰是中国湖南人，以优异的成绩考取政府资助的官派留学生，到英国谢菲尔德大学冶金学院攻读博士学位。李薰不仅具有大多数中国留学生刻苦学习、成绩优秀的特点，而且还善于思考问题，敢于向权威理论提出

疑问和挑战。更主要的是，李薰动手能力强，他能自己设计组装仪器来实验验证自己新的科学设想和论断，是完成这项任务的最合适的人选。

尽管当时英国有些人对选择一个中国留学生来干这项重要工作有些怀疑，但最后还是决定把解决喷火式战斗机螺旋桨轴断裂原因的研究任务交给了李薰。李薰接到任务后，他独辟蹊径，走前人未走过的路，在半年多的时间里，通过夜以继日地反复试验和探索，终于找到了钢轴断裂的真正原因，抓住了造成飞机事故的罪魁祸首——钢中氢原子。

提出氢脆理论，功劳威震天下：我们知道，世界上的万物都是由原子组成的，在这些原子中，以氢原子的质量最轻、直径最小，在元素周期表中排名第一。使人没想到的是它竟能钻进金属中，躲在金属的微细缺陷中。这些微细缺陷实际上是比原子直径大不了多少的材料陷阱或晶界缝隙，有专家称其为微空隙。

李薰在研究中发现，当金属材料在高温熔炼加工受热时，氢原子就会钻进金属，向某些缺陷扩散。当温度降低时，两个以上的氢原子就会结合变为氢分子，由于氢分子的体积比氢原子大许多倍，此时在缺陷中就会产生巨大的内压力，足以把小小的缺陷撑开一个小裂纹，以便释放能量。这个小裂纹肉眼根本看不见，这样的材料在非振动的情况下使用，不会造成金属断裂事故。但是飞机螺旋桨轴是在不停地旋转和振动，裂纹会因振动而扩大直到使钢轴断裂，造成机毁人亡事故。这种微小的裂纹，纵向观察叫发纹，横向观察叫白点，学术上



► 李薰在英国实验室

称之为氢致裂纹。

李薰苦心钻研，并弄清了钢中含氢产生白点需要孕育期和钢中去氢的规律，解决了长期存在的问题。李薰等找出了钢中氢含量及机械强度与发裂的关系，即每 100 克钢中含氢达 2 毫升时，就能降低钢的塑性。而当时一般生产的钢，其含氢量高达 4~6 毫升左右，钢的氢脆难以避免。造成发裂的钢含氢量一般较高，氢在钢中的扩散率和溶解度是钢产生发裂与否的两个重要因素。



▶ 英国喷火式战斗机打下无数德国轰炸机

李薰等提出一个理论，即在缺陷附近由于氢的聚集而产生内压，导致裂纹。此压力的形成，则是由于高温时原子氢向缺陷扩散，在室温下原子氢变为分子氢，这些分子氢不能扩散，因而产生巨大内压力，使钢发生裂纹。当有碳化物存在时，氢与碳化物反应形成甲烷，其压力也足以产生裂纹。冷加工时伴有缺陷生成，从而增加分子氢含量，促使氢脆萌生。李薰在 1942—1948 年，关于钢中氢的研究，发表了一系列有价值的论文，为钢中氢的研究进一步奠定了科学基础，受到人们赞誉。

李薰通过试验，弄清了氢原子聚集的原因和引起裂纹的规律，提出了解决的办法，终于使喷火式战斗机重返蓝天，以优异的性能给德国法西斯空军以沉重的打击。

消息传开，朝野轰动，一位年仅 27 岁的中国留学生，竟能在半年多的时间里，解决如此重大的问题，不能不令人佩服。科学界对这位青年学者，给予极高的评价。许多留学生的也纷纷祝贺李薰，要知道那个年代的中国留学生是被人看不起的，李薰用自己的科研实力证明了中国人的聪明才智，为中华民族争了光。

李薰的研究结果被称作金属氢脆理论。它不仅解释了历史上一些金属桥梁和钢轨等金属结构件，因振动突然断裂的原因，也为以后避免发生类似事故提供了理论依据。

三、李薰获最高学位——科学博士

李薰也因此而获得英国白朗敦奖章和奖金。在他毕业的时候，学校授予他通常应得的哲学博士学位（英文缩写是 Ph.D），并留在学校实验室从事指导博士生的工作。后来，由于李薰出色的工作成绩和在冶金学上的杰出的贡献，学校又授予他极少人才能获得的第二个博士学位——冶金科学博士称号（英文缩写是 D.met.）。

要知道，在英国历史上，只有哲学博士学位，后来新学科越来越多，可是，英国科学家仍把哲学看作是研究科学的科学，一个人只有用哲学的观点来看待世界和探索世界，他才能成为一个科学家。念完博士学位，说明你已掌握了研究科学的方法，但你并不一定是科学家，因而无论什么专业博士毕业生，一律按传统授予哲学博士。而只有个别的特别优秀的哲学博士，他们的研究结果对人类历史和世界科学事业的发展具有重大贡献，才另外授予一个最高学位——科学博士学位。

这在英美科学界是一个极高荣誉的学位。李薰当时获得的是冶金科学博士，而李薰所在的谢菲尔德大学，是当时英国唯一有权授予该学位的大学，历史上一共只有两人获得冶金科学博士称号，一位是英国人，就是李薰的导师，安德雷教授，另一位就是李薰。这可以说是中华民族的骄傲。

现在，在英国和欧洲提起喷火式战斗机，人们还是津津乐道，赞不绝



► 李薰获博士学位

口。许多欧美的航空博物馆都陈列着这架飞机的实物展品，但是知道李薰故事的人并不很多。可是，在世界材料科学界，李薰的名字是响当当的。在英国谢菲尔德大学的实验室里，至今仍保存着李薰当年研制的世界第一台测量氢气的仪器——定氢仪，供人们参观。李薰的照片被指定永远挂在实验室的墙上。

这不仅是因为他解决了喷火式战斗机螺旋桨轴的断裂问题，而且因为他创造的金属氢脆理论，正确解释了历史上一些金属结构材料破坏的原因及机理，并且为以后避免出现类似事故提供了理论依据，为世界材料科学的发展做出了重大贡献。



世界著名的《国际航空》杂志网站，最近组织读者投票评选航空领域20世纪100个最重要事件和100名最重要人物，并评出对世界军事航空发展影响巨大的战机。据俄新网报道，评选结果显示，英国的“喷火”战斗机，美国的C-130“大力神”军用运输机和美国的F-16战斗机分获前三名。俄罗斯的苏-27战斗机由于缺乏可靠的实战记录，仅位列第四。“喷火”战斗机于1938至1957年间装备英国皇家空军，在反法西斯战争中立下不朽战功。

► 美国航空博物馆中陈列喷火式战机



► 李薰设计的第一台定氢仪 ► 李薰的照片永远挂在实验室墙上

四、郭沫若院长发出邀请，冲破阻挠毅然回国

1949年11月1日中科院成立，第一任院长郭沫若向海外著名科学家发出邀请，请他们回国组建新的研究所或担任学术带头人。当时我国在美、英等国的留学生和已有成就的著名学者，都想回到中国，用自己学到的知识报效祖国。

当李薰拿到郭沫若的亲笔信后，十分激动，恨不得能马上回国。但是，当时极端敌视中国的美、英帝国主义，都相继立法，阻挠中国留学生回国。

李薰的导师也出面，劝他留在英国，并指出现在中国太穷、太落后，回去很难发挥作用。但李薰回答得很好，他说：“正是因为我们国家太穷、太落后，我才应该尽快回去，为我的祖国做出贡献。”李薰的话深深地打动了他的导师，导师最后说：“我理解你了，你应该回去。”

可是，由于法律原因，许多同情李薰的英国人也是爱莫能助。李薰此时已经是实验室主任，指导着近 20 多位博士生，其中有 5 名中国留学生。于是他和这些中国留学生商量回国的办法，最后终于抓住了英国法律上的一个条文，使事情有了转机。

原来英、美这些国家，法律多如牛毛，大小事都有法律管着。正好英国有个公务员休假法，规定科学家每年有两周带薪休假，只要你认为自己太累了，该休假了，任何人不得阻拦。根据这个条文，李薰写了一个出国旅游休假的申请报告。学校当局无可奈何，只能批准，但有一个条件，到英国本岛以外旅游，也只准在大英帝国殖民地范围内。于是李薰把旅游的最后一站，选在香港。

就这样，李薰和他的学生与英国政府斗智斗勇，冲破阻挠，最终先后坐船一月，绕道欧洲，途经香港，回到祖国。

在中科院院长郭沫若设宴招待李薰的宴会上，郭沫若建议李薰在中央刚批准给科学院的用地中关村建立中科院第一个研究所。事后，李薰听说中国最大的钢铁基地在东北鞍山，重工业基地在沈阳。于是赶到东北考察，最后，李薰放弃了北京中关村的良好条件，选择了我国当时的重工业基地沈阳，建立了中科院第一个材料科学研究所——中国科学院金属研究所，



► 李薰回国继续从事研究工作

为我国国民经济的恢复和发展，为我国的“两弹一星”及航空、航天等高新技术领域的新材料研究和应用做出了重大贡献。

1982年，李薰被任命为中科院副院长。1983年年初，李薰肺炎初愈，为探讨中科院和所属有关研究所面向冶金工业建设的新途径，决定全面考察我国新建的冶金工业。他不顾年迈的身体，从宝山钢铁总厂刚回京不久，即赴攀枝花钢铁公司、长城钢厂、武汉钢铁公司等地考察。

在考察中途经昆明时，不幸于3月30日凌晨溘然长逝，时年70岁。李薰走了，但他留下了对党、对国的一片忠心，留下了一支精心培育的科研队伍，留下一个在中国一直排名第一的金属研究所。

李薰所从事的研究工作，当时叫作冶金学，现在被统一称作材料科学与工程。

五、我们从李薰故事中可以得出几点结论

中国人的聪明才智一点不比外国人差，只要有足够的努力，再有合适的条件和机遇，一定会做出世界领先的成果。

为什么说“科学技术是第一生产力”，李薰从事科学研究，工厂工程师从事应用技术研究，只有科学加上技术才能形成第一生产力，使喷气式战斗机重飞蓝天。

从李薰的故事中可知道，材料科学对人类和社会进步多么重要，贡献多么巨大。



▶ 李薰接待外国专家



▶ 李薰视察上海宝山钢厂

小贴士 什么是科学技术

科学和技术密切相关但又不是是一回事，你知道什么是科学吗？简单说，科学就是探索自然的奥秘。千百年来，成千上万科学家都在进行探索自然奥秘的艰苦工作，弄清奥秘后，写成文章、书籍、报告、论文，供人们参考，接着又开始选定自然奥秘中的新课题进行探索研究。

这种研究工作，在科学界叫基础研究，它的研究结果就是发表文章和论文。李薰是研究材料的科学家，在英国时他探索的是飞机螺旋桨金属钢轴为什么会断裂的奥秘，最后抓住了罪恶祸首是氢原子聚集造成裂纹，于是写成论文上交给英国政府，李薰的科学研究工作就完成了。英国政府将李薰的论文送到军工厂，那里的专家工程师看了报告后才恍然大悟：原来造成飞机钢轴断裂原因，不是通常认为的固体非金属夹杂物，而是氢原子。氢原子是哪里来的呢？

工厂的工程师们是从事应用技术工作的，他们最熟悉钢轴的生产工艺过程。于是立即想到，冶炼和加工过程中潮湿的水汽在高温下分解，是氢原子进入了钢轴的主要原因。工程师们马上采取措施，从原材料开始严格控制，避免水汽接触，强化冶炼中的沸腾排气过程。新制造的钢轴内就没有氢原子聚集形成的裂纹，重新装上飞机，使喷火式战斗机重飞蓝天，给法西斯空军沉重打击，为第二次世界大战的胜利立了大功。

这个功劳中既有李薰基础科学研究的功劳，也有工厂中工程师们应用技术研究工作的功劳，二者缺一不可。因而可以说，只有科学加上技术才能形成第一生产力，使喷气式战斗机重飞蓝天。

原文收录于《点石成金：神奇的新材料与纳米技术》，山东教育出版社2010年出版。有改动。

从电影《萨利机长》谈鸟与飞机的关系

陈 光
北京航空航天大学 教授

2016 年 12 月，许多大电影院放映了一部名为《萨利机长》的电影，这是一部以真人真事改编的电影，一位长期从事航空工业工作的老同志看了此电影后评价称：“这是一部好电影，按我们中国式思维和语言，这是一部积极正面的主旋律影片，但它又很特殊，是少有的、不以情节取胜，而是在平平静静的叙事中，真真切切、一点一滴地打动你的好电影。”

电影《萨利机长》讲的是发生在 2009 年 1 月 15 日美国纽约的轰动航空界的一件惊心动魄的飞行事件。

由切斯利·萨伦伯格机长（萨利机长的原型）驾驶的美国全美航空公司 A320 客机执行由纽约飞往北卡罗来纳州夏洛特市的 1549 航班，机上搭载了 150 名乘客。萨伦伯格机长时年 57 岁，20 世纪 70 年代曾服役于美国空军，为一名 F-4 战斗机飞行员。1980 年从空军退役后，他来到全美航空公司做飞行员，同时经营着一家安全顾问公司。除了定期执行飞行任务外，萨伦伯格还是一个专门调查飞机事故的委员会的成员，曾多次参与美国联邦交通安全委员会组织的有关飞行事故的调查。

萨伦伯格机长与副驾驶杰夫·斯基尔斯于 15 点 26 分驾驶 A320 客机从纽约拉瓜蒂亚机场起飞，当飞机离地 95 秒左右、还没有爬升到 900 米时，突然，他们两人先后发现飞机前方约一个足球场的距离处，飞来一群十几只翼展约 1.8 米、体重 3.2~8.2 千克的黑颈黑雁。说时迟那时快（约 4 秒），两台发动机几乎同时被大鸟击中，鸟群也打在挡风玻璃与机身其他部位，驾驶舱内瞬间弥漫着血腥气味（驾驶舱与座舱是引入发动机高压压气机出口处空气进行增压的，吸入发动机的鸟被风扇叶片绞成碎片时发出

的血腥气味，也被带进驾驶舱与座舱），8秒后两台发动机均熄火停车，飞机进入无动力飞行状态。当时飞机高度约900米，下降速度为每秒5米（相当于电梯每秒钟下降2层），飞机下面是高楼林立、人来人往的纽约市区，而飞机上还满载着20余吨燃油，如果控制不好飞机坠地，将造成比“9·11”事件还严重得多的灾难。情况万分紧急，机长立即发出紧急呼救的信号，报告飞机双侧发动机停车。地面指挥机长将飞机飞回机场，这样飞机要飞一个接近180°的大转弯，耗时较长，飞机肯定飞不到机场就会坠落，于是萨伦伯格机长不听地面的指挥，决定将飞机降落在就近的哈德逊河上，当地面指挥听到他的决定后，认为“降落在哈德逊河上的话，没有人会活下来。我认为那就是他自判死刑。那一刻，我感到我将是最后一个与飞机上通话的人了。”这是因为航空业内人士知道，将飞机降落在水面上是非常难的事，飞机在着水的瞬间，稍有偏斜，飞机就会在与水的撞击下，粉身碎骨。例如，1996年埃塞俄比亚航空公司被劫持的961航班，由于燃料耗尽，飞机试图降落在距离科摩罗岛国沿海不远的印度洋上。飞机翼尖先撞上了水面，造成飞机猛烈旋转，随后机体四分五裂，机上125人由于猛烈撞击致死或溺水而亡。

萨伦伯格机长凭着长期以来练就的高超技术与心理素质，将没有动力的飞机平稳降落到哈德逊河面上，当飞机在河面上停下来时，距飞机遭鸟撞时仅过了3分钟，距飞机起飞时仅过了4分钟。此时，在萨伦伯格机长指挥下，乘务员立即将飞机前部左、右两侧的应急出口打开（飞机后部也有两个应急出口，但由于飞机尾部沉入水中较多，应急出口被水淹没无法打开），有序地将乘客疏散到左、右机翼及应急充气滑梯（此时已变为应急气筏了）当所有乘客都撤出机舱后，萨伦伯格机长两次从舱前走到舱后，检查是否还有乘客遗留在机舱中，当确定舱内的确无人后，才跨出舱门登上应急气筏上。

当飞机着水后，航行在哈德逊河上的许多船只，纷纷改变航程，自觉地参与到抢救站在飞机机翼与应急气筏上、但浸泡冰冷河水（当时气温为零下6℃，水温为2℃）中的遇难旅客，在飞机着水后的14分钟（距飞机起飞18分钟）内，共有14艘船只将飞机上全部155人救上岸。这是近半个世纪以来大型商业客机首次成功地迫降在一条河流上，而且机上人员无

一伤亡的事件。萨伦伯格进行了一个教科书式的机腹着水动作，从而阻止了这架重 100 吨（燃油 20 吨）的飞机在与水面接触时解体。

1549 航班的 A320 客机在低空遭遇鸟群的撞击下，双侧发动机停车。萨伦伯格机长驾驶着这架无动力的飞机，安全迫降在哈德逊河上，机上 155 人被赶来救援的多艘船支救出，谱写了一曲感天动地的“哈德逊河上的奇迹”，萨伦伯格机长也成为在美国人人称颂的英雄，受到全美国人的赞扬。当时即将卸任的乔治·布什总统第二天就打电话给萨伦伯格机长，对他的英勇事迹进行表扬。一个半小时后，他又接到新当选的总统巴拉克·奥巴马打来的电话，除了盛情表扬了他的英雄事迹外，还邀请他及他的机组成员以及他们的家属去参加总统就职仪式。

电影《萨利机长》真实地重现了“哈德逊河上的奇迹”，一些观众看完电影后，感到小小的飞鸟怎么会对 100 余吨庞然大物的 A320 客机造成损害，险些酿成 150 余人丧命的灾难。

一、鸟是飞机的天敌

从 1903 年莱特兄弟发明动力飞机上天，就有了鸟撞飞机的事件，1908 年莱特兄弟的飞机与鸟相撞，这是世界上第一次鸟撞飞机。1912 年 4 月 3 日，飞越美国大陆的第一人 Calbraith Rogers 在飞行中遇鸟撞击造成机毁人亡，也成为世界上飞机被鸟撞牺牲的第一人。

1960 年 10 月 4 日，美国东方航空公司一架大型四发客机 Electra，正在滑跑起飞机轮刚离地时，突然一群飞鸟撞入了一号发动机，随后，二号、四号发动机也遭到袭击，发动机受损严重，飞机失控。最终，飞机摇摇晃晃地坠入波士顿海湾，机上 59 名乘客、3 名机组人员全部遇难。事后，在机场跑道上发现了散落着的 75 只飞鸟的尸体。1962 年，一架飞行中的“子爵号”客机在美国马里兰遭到几只迁移的天鹅撞击失事，17 人死亡。

这是最早的客机遭鸟击坠毁的事故。随着飞机越来越大，飞行速度也不断增加，鸟撞飞机的事件越来越多，例如，从 20 世纪 60 年代起到 21 世纪初，仅在美国遭鸟击而失事的民航大型客机就有 25 架；1985 年到 21

世纪初，有 23 架美国军用飞机遭鸟击坠毁。又如，1991—2005 年，中国民航共发生过 826 次鸟击飞机事件（没有发生机毁人亡事故），直接经济损失约 6000 万美元。

从 20 世纪 60 年代起到 21 世纪初，世界范围内由于飞鸟撞击飞机至少造成了 78 架民用飞机损失、219 人丧生，250 架军用飞机损失、120 名飞行员丧生。目前，全世界每年大约发生 1 万次鸟撞飞机事件。

由于保护野生鸟禽意识的加强，使鸟类数量激增，而且也越来越肥大，例如，1980—2006 年，在美国和加拿大，加拿大鹅的数量平均每年增加 7.3%。在美国，加拿大鹅 1990 年约有 100 万只，到了 2008 年，增加到 390 万只，18 年间几乎增加了 3 倍。再加上客机越来越大，发动机的推力和吸气量越来越大，因此鸟撞击飞机的事件越来越多。例如，在美国，民用飞机遭鸟击事件在 1990 年为 1738 次，到了 2007 年上升为 7439 次，17 年中鸟撞飞机的事件增加了 4 倍。

二、鸟撞击飞机撞击力巨大

人们称呼的鸟撞飞机，实际上是高速飞行的飞机撞到了飞行中的鸟禽，其撞击力非常大。例如，一只体重 900 克的鸟，如果以与飞机的相对时速 185 千米/时相撞，其撞击力就有 1190 千克力；若相对速度为 926 千米/时，其撞击力可达到 29750 千克力；当一只体重为 7.25 千克、当量直径为 20 厘米的大鸟，以相对速度 963 千米/时与飞机相撞时，其撞击力高达 130 吨力，其破坏力是难以想象的。因此，当鸟撞上以较大速度飞行的飞机时，不仅会粉身碎骨、血肉模糊，而且有时会击穿飞机机头、撞坏机翼前缘、击碎挡风玻璃与发动机短舱等。至于鸟撞发动机，不仅概率大，而且危害度更大。

三、鸟撞发动机频次多、危害更大

鸟撞发动机除了有飞机与鸟的相对速度引起的撞击外，还有发动机工作时要由发动机前方（飞机飞行速度稍大时）或四周（飞机飞行速度较

低时)吸入大量空气,鸟会随着吸入发动机的空气一起被吸入发动机。另外,发动机迎风面积约占客机迎风面积的14%~18%(波音公司统计数据),所有这些因素都会引起鸟撞发动机的事件,这类情况占鸟撞飞机事件的大多数。波音公司统计了1982—1993年,该公司客机遭鸟撞事件中,76.7%为鸟撞发动机事件。

现在,飞机发动机的推力和工作时吸入的空气量越来越大。例如,歼-6飞机的涡轮喷气发动机吸气量为每秒44千克(地面、最大状态,下同),歼-7的为每秒64千克。用于波音757客机的大涵道比涡轮风扇发动机吸气量约是歼-7发动机的6倍,达到每秒356千克,波音747客机的约为每秒740千克;用于波音777客机的发动机的吸气量则高达每秒1120千克,是歼-7发动机吸气量的近20倍!这些数字到底有多大呢?现举一个例子来说明。如果有一座足球场大小、高度为6.1米的体育馆,关闭其全部门窗而另开一个圆形窗口。将一台用于波音757客机的发动机进气口对着圆形窗口(尺寸与发动机进气口一般大),用馆内空气供发动机工作。那么,不到2分钟,体育馆的空气就会被发动机抽吸一空,馆内形成真空。体育馆的建筑将在馆外与馆内的压差作用下而倒塌。从此例可看出,发动机工作时所吸入的空气量有多么大了。因此,发动机吸入飞鸟是很自然的事。不仅如此,当大型发动机工作时,地面设备、维护人员如不注意,进入发动机前方也会被吸入。所以飞机在地面开车时,有严格的规定,不准人员进入限定的区域内。

2002年4月20日,中国国际航空公司的一架波音767-200客机执行由日本大阪关西国际机场飞往北京国际机场的航班任务,当飞机向起飞跑道滑行中,突然发动机报警系统指示发动机不能正常工作,驾驶员当即终止飞机起飞。经检查,在飞机滑行中,发动机将航空公司一名机务人员吸入,不仅该机务人员当场死亡,而且将发动机打坏,航空公司不得不将乘客送到宾馆休息,从北京运去一台发动机换下被损坏的发动机后,第二天才将旅客运回北京。值得注意的是,出事时发动机是在慢车状态下工作,此时发动机转速低,吸入的空气量小。即使这样,也将体重60~70千克的机务人员吸入发动机,如果在起飞最大推力下工作,其吸入外物的能力



► 发动机风扇叶片被鸟撞击遭到损伤



► 风扇叶片遭鸟击受损情况

可想而知。

由于发动机以最大状态工作时，空气以每小时 300 ~ 350 千米的速度被吸入发动机，因此随空气一起吸入的飞鸟也将以这个速度撞到发动机前端部件上，产生一个非常大的撞击力，所以发动机吸入飞鸟又被称为鸟撞发动机。如果鸟撞到发动机的静止部件如进气道与支板等，其危害程度还比较轻，但是如果撞到高速旋转的风扇叶片上，其相对的撞击速度更高、力量更大，不仅会造成叶片严重损伤，而且撞坏叶片的碎块，还会随着进入发动机的空气流流到高压压气机甚至燃烧室中，打坏发动机后面的部件，严重时会造成发动机停车。前面谈到的 1549 航班 A320 客机，就是在起飞中遇到大鸟鸟群，大鸟撞击了发动机，使发动机严重受损而双发停车的。

四、

鸟撞飞机造成飞机严重受损或机毁人亡的几起事故

1994 年，伦敦希思罗机场一架波音 -747 客机撞上了一群鸽子后坠毁，机上 350 名乘客全部遇难。

2000 年，俄罗斯一架安 -8 运输机发动机吸入 1 只野天鹅在刚果坠毁，造成 21 人死亡。

1995年6月3日，法航“协和号”超声速客机降落纽约时，在离地3.3米处，3号发动机吸入一两只加拿大鹅，打坏发动机，其碎片又打坏4号发动机。飞机安全着陆，无人员伤亡。

1977年1月17日，一架MD-80飞机在美国达拉斯机场起飞时遭到400多只山鸟撞击，几乎所有部分均遭损伤，发动机被更换。当时有1万多只山鸟在机场寻食。

1995年9月22日，美国空军的一架E-3预警机（由B707改装）起飞时，遭到30多只鸟的撞击，2号发动机吸入3只加拿大鹅、1号吸入1只。飞机坠毁，机上24人无一生还。

1988年巴黎航展期间，苏联的米格-29进行了飞行表演，这是多年来苏联先进战机首次出现在巴黎航展上。可是米格-29刚一起飞就当场坠毁，原来是一台发动机吸进鸟而使发动机停车，飞机无法控制而坠毁，飞行员跳伞获救。

1991年，意大利航空表演时，英国空军的一架战斗机在飞行中，与一群海鸥相撞而坠毁，2名驾驶员死亡。

1999年11月14日，我国空军的一架苏-27战斗机在芜湖机场发生了因鸟击导致机毁人亡的事故。

1996年7月15日，比利时空军的一架C-130运输机，在荷兰艾因哈芬着陆时遭遇500~600只欧洲八哥的撞击坠毁，4名机组人员及30名乘客遇难，仅7名乘客获救。

1987年9月，美国空军的B-1B轰炸机在科罗拉多进行低空高速飞行训练课目时，遭遇1只6.5千克重的美洲白鹈鹕撞击，撞中翼根并打坏液压系统，飞机坠毁，机上6人中3人遇难，损失2.15亿美元。

2000年1月19日，美国空军一架F-16飞行中遭遇1只土耳其秃鹰



► 美空军的B-1B轰炸机



► 美空军的 F-16 战斗机

的撞击坠毁。

1987 年 5 月，美国空军一架 F-4 鬼怪式战斗机在进行低空高速训练课时，遭到 1 只重 9 千克的秃鹰撞击，飞机失控，驾驶员跳伞失败而死亡，机上的武器操纵员摔死。

2009 年 9 月，一架从德国杜塞尔多夫机场飞往科索沃首府普里什蒂纳的波音 737 客机，在起飞过程中突遇一大群掠鸟撞向飞机，其中有 200 多只被吸进了客机右侧的发动机里。这架客机当时的时速约 300 千米/时，其他的鸟撞到了机身上，机身被撞出凹痕，还好没有穿透。事后可以在机身上看到血浆四溅的鸟尸体。掠鸟体长约 20 厘米、体重仅只有 75 克，是很小的鸟，虽然有 200 多只撞进发动机中，但均被风扇叶片及压气机叶片绞得粉身碎骨，未造成发动机内部零件损坏，发动机还能正常工作。受鸟撞成轻伤的飞机，45 分钟后，飞回起飞机场成功迫降。机上无一人受伤，飞机也只是轻微受损，但两台发动机需拆下进行分解清洗。

五、防止鸟撞飞机的措施

鸟撞飞机大大影响飞机飞行安全，美国、加拿大与英国等国都设有专门研究防止鸟撞飞机的机构——鸟撞委员会（Bird Strike Committee, BSC）。另外，还有欧洲 BSC、国际 BSC 等。

防止鸟撞坏飞机的措施主要有两个方面，即采取被动的预防措施使飞机在飞行中不会遭遇鸟的袭击，以及飞机采取耐撞设计，以提高飞机的抗鸟撞能力。

鸟撞飞机的事件从高度来看，大多数发生在 600 米以下，其中 60% 发

生在 300 米以下。从航线来看，客机的鸟撞事件大约有 70% 是发生在着陆阶段，25% 左右发生在起飞阶段。之所以大都发生在飞机起飞或着陆阶段的低空，这是由于大多数鸟类主要是在低空活动，例如，机场及其附近的环境就特别适宜鸟类的活动。因此，为保证飞机不受到鸟撞击的威胁，保证飞行安全，就要求将机场及其邻近区域没有飞行活动的鸟类。

被动预防措施是驱鸟，将鸟由机场及机场附近赶走，由于鸟是人类的朋友，在驱鸟中不能伤害鸟，更不能采用杀害鸟的方式达到驱鸟的目的。驱鸟的方法比较多，一般采用从鸟类的视觉、听觉、食性等方面入手的各种先进设备。例如煤气炮、用高音喇叭播放鸟类天敌鸣叫声的“驱鸟王”、采用稻草人原理制作的“恐怖眼”和利用训练有素的猛禽来驱赶其他飞鸟的“以鸟制鸟”等方法。

也可采用人工驱赶、鸣枪示警等方法将聚集在机场上空的鸟群赶走，例如，1997 年 9 月 22 日下午，千余只大雁和乌鸦聚集在北京首都国际机场东跑道上空盘旋。经驻场部队鸣枪哄赶，历时两个多小时，才将雁群和乌鸦赶走。为此，当日航班 16 架次未能按时离港，造成大量旅客滞留机场。

还可以在跑道两头安装特殊的声音放音器，用大功率的扬声器播放鸟感到害怕的各种声音，使鸟听到后远离跑道而去。

煤气炮是一种专为机场设计的驱鸟系列设备之一，它能自动不间断地发出无害的雷电爆炸声，以达到驱鸟目的，点火间隔可以在 30 秒至 60 分钟之间调整，可在 360° 范围内任意转动，声音有效覆盖面积约为 2 万平方米，也不会影响机场周边鸟类的正常生活。有报道称首都机场有 40 台左右的煤气炮，每隔 7~8 分钟响一次，一天 24 小时开机。

风动驱鸟器是在机场跑道两侧设置可转动的、画有猛禽双眼的平板，采用稻草人原理制作的“恐怖眼”，在风的吹动下不时转动，以吓走接近跑道的飞鸟。

也可治理机场生态环境，消除鸟类生存条件。例如，将氨茴酸甲脂等注入机场附近低洼处的积水中，鸟类十分讨厌它的味道，从而达到了驱散机场附近鸟类的目的。在航线安排上要选择合适的航线及飞行空域，避开鸟类迁徙线路，减少鸟撞的机会。

从生态学观点和环境保护观点出发，应建立稳定的生态系统，利用一切生物和非生物因素，降低鸟撞飞机所造成的危害。例如，上海浦东国际机场用生态综合治理的方法迁移鸟的栖息地，断绝鸟的食物链。他们铲除了机场易生虫引鸟的杂草，种上不易生虫的马尼拉草和狗牙根草；对机场周围小塘进行深挖或改为旱田，与当地种田农户协调改种玉米、水稻等鸟

无法栖息、觅食的其他农作物等。在浦东机场东南

方 11 千米处为鸟建造了一个 200 公顷的

“安居工程”九段沙湿地的自然保护区。

曾经出没在机场上空的 150 多种鸟群，据称有 70% 迁移至九段沙。



▶ 涂有白色条带的进气锥

在与发动机风扇转子一起高速旋转的进气锥上，围绕锥体画上一条白色的由细到粗的条带，工作时这些条带形成一个闪动的白色光耀，使前方的飞鸟视而生畏、远离而去，避免惨

遭杀身之难。据称，这种措施多少有一定效果，已在多型大涵道比涡扇发动机中采用。研制一种机载雷达系统，它能自动预报鸟撞的危险，可使飞机主动回避鸟群。

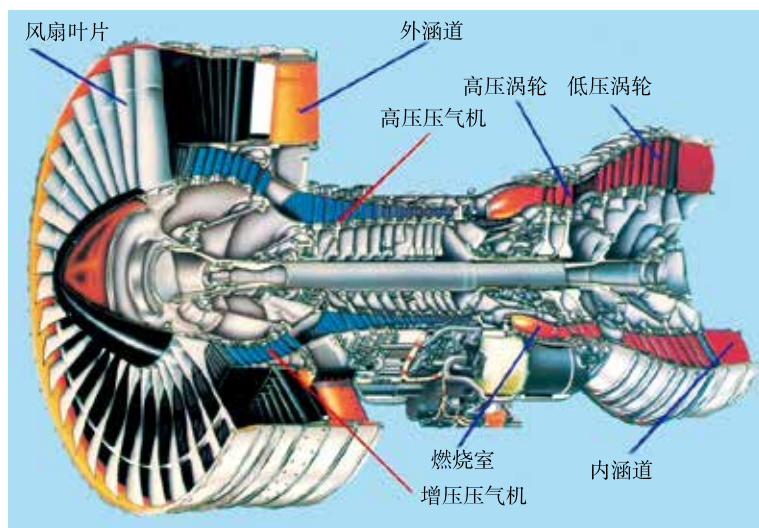
虽然采取了以上一些措施，但是还不能解决鸟撞飞机导致严重事件的发生，因为自由飞翔在天空中的鸟或鸟群，会在不同的地方，遭遇在航行中的飞机，也就是飞机防不胜防地会遭遇飞翔中的鸟类。如果飞机抗鸟击的能力较差，就会导致飞机严重受损甚至造成机毁人亡的重大事故。为此，飞机与发动机要采取耐鸟撞的设计，从根本上提高飞机的抗撞力。

六、

飞机、发动机采取耐撞设计，以提高飞机的抗鸟撞能力

飞机在设计时，对于那些容易受到鸟撞击的部位，例如，风挡玻璃、雷达罩、机翼前缘等应予以加强，以能承受大鸟的撞击。美国空军通过试

验提出要求，当飞机的飞行速度为 950 千米 / 时，座舱结构和风挡玻璃应能承受重量为 1.6 千克的鸟的撞击。上述这些部位在飞机上都是固定不动的，相对而言，较容易解决。但是对于发动机，就困难许多，因为在发动机进口后就是高速旋转的风扇叶片，风扇叶片长而薄，当受到鸟撞击后容易折断，不仅会造成发动机振动加大，而且断片会随气流流向发动机后部，打坏后续部件，严重时造成发动机停车；碎片夹在叶尖上与机匣间被转子带着旋转时，会由于摩擦引起发动机失火；折断的叶片如果打穿机匣，还会打坏飞机的结构与系统等。对于客机用的大涵道比涡扇发动机，风扇叶片更长，且随着发动机推力的增加，风扇叶片越来越长，例如，用于波音 757 飞机发动机的风扇叶片长 0.522 米，用于波音 747 飞机的风扇叶片长为 0.8~0.9 米，而用于波音 777 的发动机风扇叶片长达 1 米多。

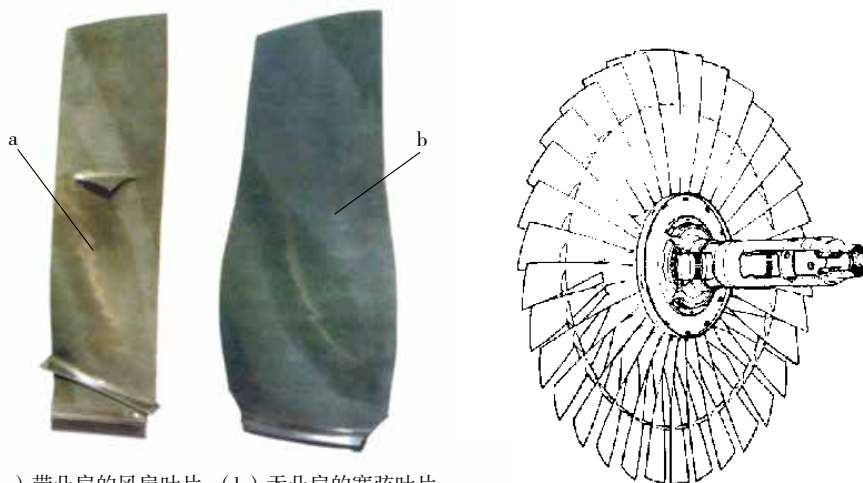


► 大涵道比涡扇发动机前端是高速旋转的风扇叶片

风扇叶片设计时，不仅要考虑抗鸟撞击的能力，还要考虑长叶片工作时的振动问题。20 世纪 70 年代前后研制的所有大涵道比涡扇发动机，其风扇叶片都是将叶身上距叶尖 $1/3 \sim 2/3$ 处做出向两侧伸出的凸肩，各个叶片的凸肩相互抵紧形成一加强叶片的环箍。这样，不仅增加了叶片的刚性，提高了抵抗外物（包括鸟）撞击的能力与叶片自振频率，而且不易出现振

动。即使出现叶片振动，凸肩的抵紧面之间的摩擦可吸收振动能量，使叶片振动不起来。但是，这种带凸肩的设计，却带来许多问题。例如，叶片不易加工；叶片根部所受的离心负荷加大，凸肩与叶身交界处还会产生附加的弯曲应力，气流流过凸肩会产生分离，不仅使流通面积减少，而且使效率降低等。为此，从 20 世纪 80 年代起，国外几家大发动机公司都在设法解决叶片带凸肩引起的问题。然而，由于风扇叶片所处的特殊工作条件，要全面解决这些问题是比较困难的。

将风扇叶片加宽成为宽弦叶片，随着叶片宽度的加大，其厚度自然变大，宽而厚的叶片，抗外物打击的能力大大提高，也不易引起振动，因此是解决采用凸肩带来问题的好方法。但是，这种宽而厚的叶片重量也随之增加了许多，叶片根部难以承受，安装叶片的盘也必须做得很厚重。这样的零件显然不适合用于大型航空发动机上。因此，在大涵道比涡扇发动机诞生以后，经过近 15 年的时间，才研制出适用的宽弦风扇叶片。

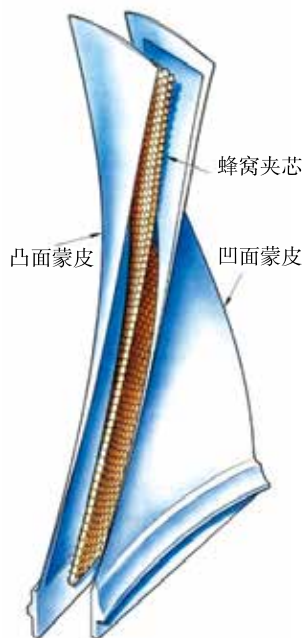


(a) 带凸肩的风扇叶片 (b) 无凸肩的宽弦叶片

► 两种叶片的比较

► 多个叶片的凸肩相互抵紧组成一环箍

20 世纪 80 年代中期，英国罗尔斯·罗伊斯公司设计发展了“三明治”的宽弦夹层风扇叶片，这种叶片的叶盆与叶背分别由两块钛合金做成，中心部分挖掉形成空腔，空腔中嵌入钛合金蜂窝结构的芯板，通过活性扩



► “三明治”式的宽弦风扇叶片

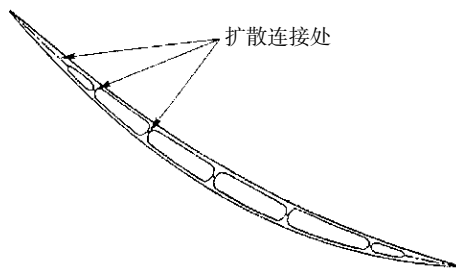


► 具有桁架结构芯的风扇叶片剖面图

散连接的方法将三者连接在一起，形成一个重量轻的宽弦叶片。这种设计既解决了风扇叶片抗鸟击的能力与抗振动问题，又减轻了叶片的重量，很快在该公司的发动机中得到应用。

该公司后来又在“三明治”式叶片的基础上做了进一步的改进，即芯部使用三角形桁架结构取代了原有的蜂窝结构。这种芯部的结构不仅轻而且能参与承力，使每片叶片的重量比蜂窝芯的低 15%，这种叶片从 20 世纪 90 年代起一直到现在都应用于该公司新研制的发动机中。

美国通用电气公司在 20 世纪 90 年代初期采用了前缘包有钛合金蒙皮的复合材料叶片设计，不仅用于波音 777 飞机的发动机中，而且用于波音 787 与波音 777X 飞机的发动机中。与此同时，美国普拉特·惠特尼公司采用了两个叶形材料焊接成具有空心结构的叶片，它是在由钛合金加工的叶盆、叶背上，先分别铣出许多径向槽道，然后用扩散连接方法连成在叶片心部的多道空槽。这种叶片中间带有六条槽带形成的空心，减轻了重量，而未被铣削处又被相互焊接在一起，增加了叶片抗外物打击的能力。这种结构的叶片不仅用于波音 777 飞机的



► 普拉特·惠特尼公司的铣槽空心宽弦风扇叶片

发动机上，也用于第四代战斗机 F-22 的发动机上。

采用上述三种方法设计的风扇叶片，不仅减轻了发动机重量，而且大大提高了发动机抗大鸟撞击的能力。截至 2017 年年初，尚未见到过使用这些设计方法的风扇叶片的发动机，遭到鸟撞击而造成发动机空中停车事件的报道。

七、

苛刻的试验以确保飞机、发动机能承受大鸟的撞击

为确保飞机与发动机所设计的结构能达到抗鸟击的能力，除研制单位要进行从零件，组件到部件的模拟试验，并通过试验结果对某些部位进行改进外，国家的适航部门还要对飞机、发动机进行严格的专项考核试验，只有通过适航部门的专项考核试验，满足严格的适航条例后，所设计的抗鸟击结构才算合格。

以发动机为例，风扇叶片最易被鸟撞击，且一旦遭鸟撞击，其后果十分严重。因此，研制单位采取了多种既减轻重量又能抗鸟击的措施，但是这些措施是否可行，要进行考核试验。现在，所有国家的适航部门都有严格的规定，在发动机投入使用前，要进行投鸟的考核试车。

以中国民航为例，2002 年 4 月在中国民用航空规章第 33 部《航空发动机适航标准》(CCAR-33) 的基础上，颁布了修订的《航空发动机适航规定》(CCAR33-R1)，在修订的 CCAR33-R1 中专门增加了一条“第 33.76 条 吸鸟”。在该条中，规定发动机需进行投中鸟与大鸟试验，投鸟的重量及个数与风扇迎风面积有关。例如，用于波音 737、A320 飞机的发动机，投中鸟试验时，需投 1 只 1.15 千克和 5 只 0.75 千克的鸟，投大鸟试验时，需投 1 只 2.75 千克的鸟；用于波音 747 飞机的发动机，投中鸟试验时，需投 3 只 1.15 千克的鸟，投大鸟试验时，需投 1 只 3.65 千克的鸟；用于波音 777 飞机的发动机，投中鸟试验时，需投 4 只 1.15 千克的鸟，投大鸟试验时，需投 1 只 3.65 千克的鸟。另外，条例中还规定了审定标准，投中鸟时，不得引起：推力损失超过 25%、着火、碎片非包容、过大载荷

以及失去停车能力等。投大鸟时，规定：鸟吸入速度为 320 千米 / 时，吸鸟后 15 秒不能移动油门杆，试验中不得出现：着火、碎片非包容、过大载荷与失去停车能力等。

另外，当鸟被发动机吸入撞到风扇叶片时，叶片可能折断，断片在离心力作用下，会击穿风扇机匣，甩离发动机；打坏发动机外部结构，例如液压导管、电缆等造成严重的二次损伤。为此，在设计时，应加强风扇机匣的包容性，使从叶根处断裂的断片，不能击穿机匣而包容在发动机内部，因此，风扇机匣又称包容环。为了考核发动机的包容环能否将从根部断裂的风扇叶片断片包容住，各国的适航条例中，均有一条发动机包容环的考核试验，此项试验费用较高且危险。试验时，在一片叶片根部安装一个爆炸用的雷管，在风扇转子转速达到 100% 时，将雷管引爆，从叶片的根部炸断叶片，检验叶片断片是否能被包容环包住。如果叶片断片包容在发动机内部、发动机还能继续运转 15 秒且未引发着火，发动机安装节没有损坏，那么，就通过了发动机包容性的考核。当然，这台试验的发动机会遭到严重损坏而报废，损失几百万美元；如果试验不成功，叶片断片击穿包容环甩离发动机，会打坏试车台架的设备，甚至到打断燃油导管或液压系统导管引发台架失火，损失会更大。因此，在进行适航审定试验中，考核包容性的试验都安排在最后，且有适航部门的代表参与。

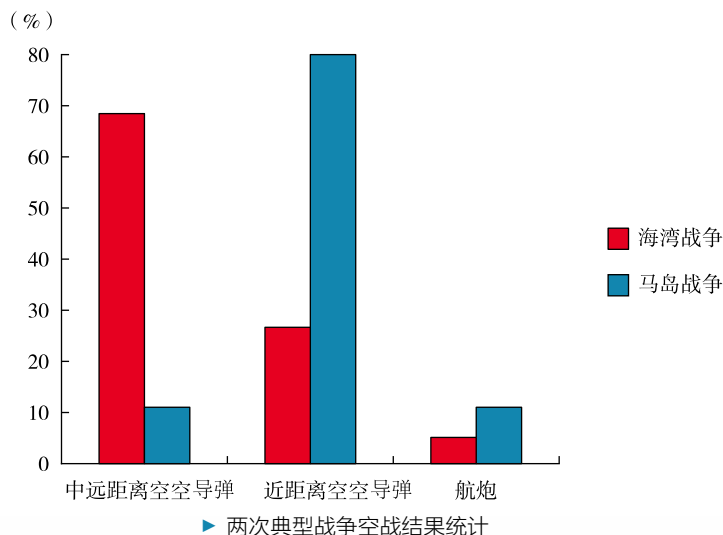
由于采取了以上各种措施，鸟撞飞机带来的危害后果已有所降低，但是并未完全消除。今后，适航部门可能会修改发动机抗鸟撞的试验要求，即增加投鸟试验中鸟的重量与数量，在驾驶员培训方面增加飞机遇鸟撞后的应对能力等。

从未来空战解密四代战斗机

徐邦年

空军指挥学院军事理论研究所 研究员、博士生导师

未来空战到底会是什么样的形式？我们从过去一些典型战争的空战结果可以看到一些端倪。这里以其中的两次为例：一次是发生在 1982 年的马岛战争，另一次是发生在 1991 年的第一次海湾战争。这两次战争的空战结果统计见下图。



从空战结果可以看出，在马岛战争中用中远距离空空导弹（以下简称中距空空导弹，又称中距弹）打下的飞机只占 10%，用近距空空导弹打下的飞机占 80%，用航炮打下的飞机占了 10%，从这个结果可以看出，马岛战争中用空空导弹打下的飞机共占了 90%，这就告诉我们，将来空战的主要制胜武器可能是空空导弹。所以，现在世界各国为了在未来能取得空战胜

利都在努力发展自己的空空导弹。那么，这次空中作战用近距空空导弹打下的目标占到 80%，是不是就能断定未来空战的武器主要就是以近距离空空导弹（以下简称近距空空导弹，又称近距弹）为主呢？是不是意味着将来的空战主要是近距离的空战？不是。后来，在 1991 年发生了第一次海湾战争中，这次战争的空战产生了一些新的特点，使大家有了新看法。在这次战争中，空中作战一共打下了 38 架飞机，其中用中远距空空导弹打下的飞机有 26 架，即中远距空战中击落了的飞机占 68.4%；用近距空空导弹打下的飞机有 10 架，即近距离空战中打下的飞机占 26.6%，还有 2 架飞机是用航炮打下来的（占到了 5%）。这样的空中作战结果表明，超视距空战已经成为主要的空战形式了。

未来空战会有什么特点？根据上述结果，现在学术界普遍认为未来空战可能三个阶段。未来的空战很可能在飞行员用肉眼还没有发现目标时就开始了，因为这时雷达可能就发现目标，进入到空战第一个阶段，即以中远距空空导弹为主要攻击武器的超视距空战。如果在第一阶段中，中远距空空导弹打光了，可能要进入第二个阶段，即以近距离格斗弹为主要攻击武器的近距离空中格斗。这时若是近距离格斗弹也打光了，就将可能进入空战第三个阶段，即以航炮或者是火炮为主要攻击武器的近距离空战。具体到某一次战争，不一定三个阶段都存在，但是从整个战争的过程来看，三个阶段都会存在，以中远距离导弹为攻击武器的超视距空战为主要空战形式。这就说明，未来空战将会是两种形式、三个阶段，即超视距空战和近距空战（空中格斗）两种形式，以中远距导弹为主要攻击武器的超视距空战、以近距空空导弹为主要攻击武器的近距格斗、以航炮为主要攻击武器的近距格斗等三个阶段。这就是第四代战斗机需要有超视距空战能力的原因。

超视距空战怎么进行？经过理论分析和模拟发现，如果导弹的过载大于飞机过载的 3 倍，那么飞机要想用本身的机动来摆脱导弹的攻击已经不可能了。现在飞机的最大过载只有 9 个，而导弹技术性能已经大大提高，可以达到 50 个过载以上，这时一旦瞄准飞机并且发射了导弹，对方除了使用干扰以外，极少能够用自身的机动动作来摆脱。因此有个战法叫“先敌

发现、先敌攻击”，哪一方能够先发现敌人、先发射导弹，就可能取得空战胜利。这时是否能真正躲避导弹的攻击就要看飞行员的智慧了，因为施放干扰能否奏效要看飞行员能否准确判断射来的导弹类型，发射干扰的时机和发射干扰的数量是否得当。这些因素都正确了才有可能躲避导弹攻击。所以，航空技术发展到今天是否真正能在超视距空战中取得胜利，还需要深入研究超视距空战战法。

近距离格斗的战法比较多。除了一些传统的机动动作（如蛇形机动、水平盘旋、战斗转弯等）外还有一些新的动作。例如，俄罗斯飞行员普加乔夫在 1989 年巴黎航空展览会上驾驶俄罗斯的苏 27 战斗机首次完成的眼镜蛇机动（又叫普加乔夫眼镜蛇机动）。这个动作的具体情况是：飞行员在平飞时快速向后拉杆，机头翘起来以后，机头上仰至 $110^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 之间，形成短暂的机尾在前、机头在后的平飘状态，飞机平飘至最后飞行员推杆压机头，飞机又恢复到平飞状态，完成整个动作。机动时飞机进入的速度约为 425 千米/时，飞机以超过每秒 110 千米/时的速率减速，然后减速到 148 千米/时，这个动作仅使飞机承受 $3.5 \sim 4$ 个 g 的过载，在整个机动过程中，飞机的飞行高度几乎没有什么变化。有人说这个战术没有什么价值，因为飞机拉起来 2 秒、平飘 4 秒、放下去 2 秒，在这么短的时间里来不及发射导弹，敌人已经跑掉了。也有人说这个动作非常有战术价值，因为假如敌人飞机在上方，我方飞机在下方，我方可以把飞机拉起来用机头对着目标，就可以发射导弹把敌人打下来。俄罗斯的苏 27 战斗机就是我国引进的歼-11 战斗机，后来俄罗斯又研制了新的战斗机苏 35，它比苏 27 多了一个小翼，一共有 3 对机翼，所以这种外形称为三翼面外形，小翼称为鸭



► 普加乔夫眼镜蛇机动



► 苏-35 战斗机



► “钩子”动作示意图 ► 1993 年，迪拜航空展览会上苏-35 战斗机对苏-30 战斗机的空战表演

式小翼。有了这个鸭式小翼，就能产生脱体涡，使主机翼的升力大大提高，飞机转得快、机动性能比较好。苏 35 战斗机的挂点多达 14 个，能携带 14 枚导弹或炸弹，可以同时发射 6 枚导弹，即同时攻击 6 个目标。另外，这架飞机在尾部装了一个后视雷达，可以看到后方 60 千米，同时跟踪 8 个目标，这是传统飞机没有的。过去打仗时，敌人经常从后方偷袭，因此往往是两架飞机同时起飞，前面一架专门打击敌人的叫长机，后面一架专门保护长机的叫僚机，空战中往往僚机牺牲的情况比较多。比如，我国有名的战斗英雄张积慧，他的僚机飞行员单子玉就是为了保护长机而牺牲的，表现出了高度的爱国主义精神和集体主义精神，我们要记住这些无名英雄。后来为了验证和研究眼镜蛇机动是否有战术意义，俄罗斯在计算机上做了大量的模拟，并于 1993 年在迪拜的航空展览会上进行了一次空战表演：开始的态势是苏 35 战斗机在前，后面是苏 30 战斗机并具有战术位置优势。空战开始后不久，苏 35 战斗机突然做了一个眼镜蛇机动动作，结果苏 30

战斗机就从主动状态变成了被动状态，位置变成了在苏 37 战斗机的前面，苏 37 战斗机这时进行反击，苏 30 战斗机也不甘示弱想迅速绕到苏 37 战斗机的后方再次攻击，这样两架战斗机你追我赶地在空中转了两圈，正当苏 30 战斗机想加速前进、进一步绕到苏 35 战斗机的后方再次进行攻击的时候，苏 35 战斗机又做了一个动作，经过了两次机动动作就把苏 30 战斗机“打”下来了。从过程来看，这两次机动动作是不一样的，第一次机动动作是传统的典型的眼镜蛇机动，第二次机动动作是在大坡度盘旋的情况下，快速将机头拉起对准目标，这个动作好像在盘旋状态下做眼镜蛇机动，被称作为钩子。经过这次空战表演之后，人们对眼镜蛇机动的认识比较一致了，只要条件成熟就可能用到这个动作。



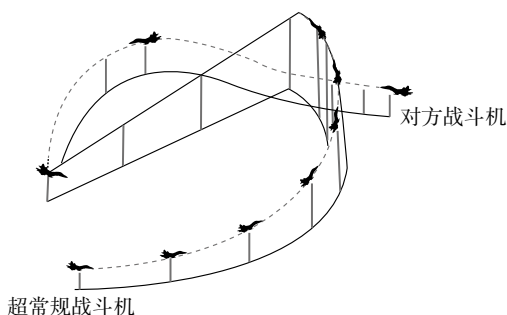
► 1994 年，苏 -37 战斗机做 360° 圆周运动

俄罗斯继续开展研究，他们的苏 37 战斗机在 1994 年做了 360° 圆周运动，只花了 8 秒时间就在垂直平面内完成了 360° 的旋转运动。传统战斗机完成这个动作要上升到几千米的高度，时间在 1 分钟以上；苏 37 战斗机只用 8 秒，上升只有 100 多米，飞机的旋转角速度更大，飞

机的机动性就大大提高，可使敌方飞机迅速处于被动状态。当时，360° 圆周运动震动了航空界，也叫超级眼镜蛇机动。

美国也在不断研究未来的空战机动动作，例如在 1994 年美国用 F-16 战斗机完成了对眼镜蛇机动的研究。美国为了研究未来空战战术动作，制订了 F-16 多轴推力矢量计划（MATV）。对 F-16 战斗机进行了改装。F-16 战斗机是 20 世纪 70 年代装备部队的第三代战斗机，它加了一个边条，使主翼的升力大大提高，它的作用和鸭式小翼类似，但它是固定的，效率比鸭式小翼差一些。F-16 战斗机还装了一个安全伞、改进了发动机、安装了可旋转的轴对称的喷口，使之成为矢量推力发动机，美国使用这个飞机

完成了对眼镜蛇机动的研究。另外，美国与德国联合研制了一架 X-31 飞机，这个飞机上有一个鸭式小翼和一个特殊的尾喷口。尾喷口是一个安装了三个舵面的特殊喷口，这三个舵面叫作燃气舵，可以上下左右转动，这样发动机的喷气流方向也可以改变。因此，发动机既可以改变推力的大小，又可以改变推力的方向。这样的发动机叫作矢量推力发动机。美国为什么要研究这样的飞机？原来，德国试飞员赫布斯特曾在 20 世纪 80 年代提出：未来的空战有可能使用所谓的超机动动作。过去，飞机在大迎角飞行时有可能失去控制而进入螺旋，而赫布斯特却提出在大迎角飞行时，利用一些技术也可以控制它让飞机做机动动作，能以很快的角速度转弯，这时转弯的角速度可达每秒钟 70° ，大大超过了传统飞机的机动能力（动作过程见右图）。



► 1994 年，X-31 战斗机做赫布斯特机动

到了 1994 年，美国和德国就用 X-31 战斗机验证了赫布斯特的这个思想：完成了这个机动动作，证明战斗机可以以很大的角度上升，随着高度的增加速度越来越小，上升到顶点时速度已经很小了，这时飞机突然以每秒钟 70° 的角速度转弯，机头就可迅速对准目标并发射导弹。这种机动因为是赫布斯特提出来的后来被称为赫布斯特机动。所以，将来的空战可能要用到眼镜蛇机动、“钩子”、赫布斯特机动等这样的超机动动作。这就是为什么后来的第四代战斗机要有这样的超机动能力的历史背景和由来。

未来的战斗机除了应该有上述两个特性外，后来又经过研究和空战实践总结出另外两种特性：隐形能力和超音速巡航。

隐身技术。用于减少目标的各种被探测特征量的技术，叫作隐身技术，隐身技术又称为低可探测技术或目标特征控制技术。它是改变武器装备等目标的可探测信息特征，使敌方探测系统难以发现或发现距离缩短的综合性技术。作为一门交叉性学科，它综合了诸如流体力学、材料学、电子学、光学、声学等众多领域的技术，是第二次世界大战以来新出现的重大军事

技术项目之一。隐身技术实际上是传统伪装技术走向高技术化的发展和延伸，隐身技术的提出很早，但只有美国才使隐身技术获得了实际运用并产生了巨大的作战效能。1991年，美国在第一次海湾战争中大量使用了隐形飞机F-117，并取得辉煌战果，而本国的战斗机没有一架受到损失。但是，这种战斗机在科索沃战争中被击落了。其中有一个说法，它是被捷克的无源雷达（维拉）击中的。这种无源雷达有三根天线，接收目标飞机自己发出来的各种信息如雷达波、无线电波等，再经过中央计算机高速计算，算出目标飞机的各种参数，例如飞机的高度、速度、方位、运动方向。然后，把目标的这些信息送到导弹阵地，军方就可以按这些运动参数发射导弹把目标打下来。从此就有了隐身和反隐身技术的彼此较量，发展到今天形成了隐身技术和反隐身技术的对抗。

目前，隐身技术主要采用雷达隐身技术和红外隐身技术两种。雷达隐身包括外形隐身、采用非金属材料、涂敷吸波材料、等离子技术和自适应性阻抗加载技术。外形隐身，就是从外形上使雷达波乱反射（散射），使雷达所接收的雷达反射波大大减少，美国的F-117、F-22战斗机采用了这种方法。第二种隐身办法是在飞机上使用透光率很好的非金属材料，雷达波照射时就透过去了，大大减少雷达反射波，也可以达到隐身效果。现在的，非金属材料如玻璃钢、复合材料、碳素纤维等，它们的强度和刚度都已经接近或超过金属材料。目前，飞机上用到的非金属材料只占10%左右，将来可能达到70%~80%。第三种隐身方法是在飞机上使用吸波材料，即在飞机表面上涂敷吸波材料可以吸收雷达波，以减少雷达反射波。第四种方法是用等离子隐身技术，即在飞机上装一个等离子发生器，使飞机表面上产生一层薄薄的可以吸收雷达波或改变雷达波频率的等离子体，以此达到隐身目的。第五种方法是自适应性阻抗加载技术。这是通过在纯导体表面刻槽留缝并接腔体，改变目标表面的电流分布，使其产生与雷达回波频率、振幅相等但相位相反的附加辐射波，该附加雷达波在雷达接收天线方向上与雷达回波相抵消，从而减小雷达反射波。在阻抗加载技术中，如能自动地根据目标接收到的雷达波的方向、频率来调整自身产生的电磁波，这便是自适应阻抗加载技术。目前，后面两种方法还不是很成熟，因为离子发

生器本身不能隐身，降低了等离子隐身技术的作用。自适应性阻抗加载技术的主要问题是要知道对方的频率才可以抵消雷达波以达到隐身的目的，但是如何知道对方的频率是一个很大的难题。

红外隐身，主要是使飞机上面能够发热的一些设备，例如发动机、无线电等设备降低发热量。目前战斗机上的发动机都有加力燃烧室，即在燃烧室后部的发动机中部加装了一个燃料喷口，喷出燃料再进行一次燃烧，有的也叫二次燃烧室。将来的发动机可以把这种燃烧室取消，以减少热量。还有一种可能是把发动机进气道和尾喷口都做成 S 形，或者在尾喷口进行隐身设计，有人曾经提出在尾喷口里面装一个空调，让发动机喷出来的气流温度降低，发出来的红外线就可以减少。另外，还可以减少无线电发射机等设备发出的热量。

此外还有可见光隐身技术、声波隐身技术、防止电磁信号泄漏技术等，这里就不一一细说了。

隐身技术在发展，反隐身技术也在发展，最典型的代表是多 / 双基地雷达。飞机各个方向的隐身效果不一样，如果只用一个雷达，在一个方向可能发现不了，如果在几个方向都装雷达并联结在一起，就更容易发现目标。其他类型的雷达，例如多 / 相控阵雷达、超宽带雷达、激光雷达、米



► JY-26 远程相控阵雷达



► 警戒引导雷达 YLC2V

波雷达、合成孔径雷达和高频超视距后向散射雷达等都使反隐身技术获得了极大的发展空间。在珠海航空展览会上，展出了我国的多种反隐身雷达，可对入侵机造成极大的威胁。

既然将来空战的主要形式可能是超视距空战，那么就要求发射的导弹攻击距离越远越好。那么，如何才能增加导弹的攻击距离？除了增加导弹本身的性能外，还需增加载机的飞行速度，增加了装载导弹的载机飞行速度后，导弹发射时的初速度就大了，进而可以增加导弹的攻击距离。为此，就要求战斗机飞行速度很大并能保持长时间的超音速速度，一旦发现敌机就可以马上投入战斗并保证导弹有足够的攻击距离。这就是要求战斗具有超音速巡航的原因。

除此之外，从保持战斗机具有高超作战能力的角度来看，还应该要求未来战斗机能够有精确打击能力和多目标攻击能力。

根据上面的分析可以知道，未来战斗机或第四代战斗机应该具有如下五个特点：①具有隐身功能；②具有做超机动动作的能力，即能够完成像赫布斯特机动、“钩子”和眼镜蛇机动等超机动动作；③具有超视距空战的能力；④具有超音速巡航的能力，能够进行长时间的超音速飞行；⑤具有多目标攻击和精确打击的能力。这五条中的前四条专家们的观点是一样的，最后一条不同的专家可能有不同的观点，我们这里是从作战能力上提出的，有的专家从机务维护方面出发，可能会提出可靠性的要求等，会与其他人不同。我国自行研制的两架歼-20飞机第四代战斗机在2016年珠海航展上亮相，向世人展示了我国第四代战斗机的杰出战斗能力。这是一架隐身战斗机，它的外形很独特，垂直尾翼向外偏斜形成V字形、翼身使用了翼身融合技术，使歼-20战斗机具备了隐身的外形条件。从首飞到现在，已经生产了十架左右的科研试飞飞机（编号为2002~2017号），可以看出外形做了较大改进，如发动机进气道做了改进，侧面的尾喷口已经被遮挡，风挡的涂料也做了改进，因此隐身性能有了较大改进。另外，它的外形用了鸭式布局的形式，在前面有一对鸭式小翼，在它的两侧还装有边条。这样就使歼-20飞机在机动飞行过程中产生脱体涡，增大了飞机升力，从而提高了飞机的机动能力，预计歼-20飞机的



► 歼-20 飞机

机动能力很可能比其他四代机如 F-20、F-35、T-50 都要好。它属于重型战斗机，也可能是多用途偏重于夺取制空权的战斗机，航程应该比歼-11、歼-15 都大，至少能满足未来保卫支援南海作战的需要（达到 2000 千米以上），因此估计它的航程应该在 1500~2200 千米范围内。歼-20 使中国的战机提高了一个档次，成为第三个能研制第四代隐身战斗机的国家。

音障、热障与黑障

傅前哨

空军航空杂志社 副编审

人类在发展航空与航天事业的过程中，曾经遇到过许多的难题和技术障碍，其中最著名的可能要算音障、热障与黑障三大问题了。这三者之间有一定关联，但解决起来一个比一个困难。它们的共同特点是：与飞行器在大气层中的运动速度、高度等因素有关。

一、关于音障

音障是 20 世纪 40 年代出现的一个航空名词。自美国的莱特兄弟于 1903 年研制成功世界上第一架比重大于空气、带动力的有人驾驶的飞机之后，经过三四十年的发展，航空技术取得了相当大的进步，飞机的性能提升很快，一些较先进的活塞式战斗机的平飞速度已能达到马赫数 0.5 左右（马赫数又称 M 数，即飞行速度或流速与音速之比），在俯冲状态，它们的速度甚至能够超过 M 数 0.7。据称，第二次世界大战末期的喷火式、P-51 一类的新型或改进型活塞式战斗机，在用最大功率俯冲时，其速度差不多已相当于音速的 9/10。

在驾机向音速逼近的情况下，飞行员发现，飞机的阻力会猛增、升力也明显发生变化，如同撞在一堵墙上一样，发动机使再大的劲，速度也无法继续提高。与此同时，飞机还出现了严重的自动低头力矩，并伴随着尾翼抖振、机翼抖振等现象。当时，人们认为，对有人驾驶的航空器来说，音速是一个不可逾越的界限。于是，便将上述问题和现象称之为音障。

后来，经过大量的实验研究，科研人员发现，飞机在冲击音障时，飞

行员感受到的实际上是空气的压缩性效应，并与激波有关。而且，所有这些现象都是跨音速飞行所特有的。

当高速运动的物体（如炮弹、火箭弹等）在大气中以超音速的速度飞行时，在其前方不远处的空气会受到剧烈压缩，无数的扰动波因来不及传播而迭聚在一起，从而形成一个特殊的空气界面——激波。

在高亚音速状态，机翼和机身的某些弯曲部位可使该处空气的流速大于实际的飞行速度，从而出现局部超音速区。这些局部超音速区通常都会产生激波。激波的厚度很小（只有几微米），但影响很大，前方来流经过激波面时，其物理特性（如速度、温度、密度、压力等）将出现极大的变化：气体的温度、静压等参数升高，流速由超音速降至亚音速，从而致使作用在飞行器上的空气动力（升力、阻力等）随之发生改变。

激波与最接近机翼（尾翼）表面的气流附面层相互作用后，会造成激波失速现象，使气流分离并引起抖振。气流分离的另一个直接后果是导致阻力系数的加大。在跨音速段，由于激波的出现，航空器的阻力随飞行 M 数的提高而陡然上升，超过该阶段以后才有所降低，但全机零升阻力系数仍比低速和亚音速飞行时高出一倍以上。

激波不仅引发阻力的急增，还会对飞行器的升力线斜率、压力中心位置和俯仰力矩特性等产生重大影响。这些气动参数的突然变化，自然会造成功飞行状态的动荡，使之难以驾驭。如果没有摸清这一现象的规律并采取针对性的措施，飞机在接近、达到或超过音速时就极易发生事故。这就是所谓的音障。

面对该难题，人类没有退缩，而是顽强攻关，实施更强劲的冲刺。经过大量的实验研究，航空科研人员初步掌握了激波对超音速飞行的影响机理。

为了克服技术障碍，飞机设计师用新型喷气式发动机取代了活塞式发动机，并通过采用薄翼型的后掠翼、三角翼、双三角翼、梯形翼以及尖锐的机头、细长的机身、跨音速面积律、超临界翼型等技术措施和方案，大大延缓了激波的生成、降低了它的不利影响。由此而改进设计的飞机终于具备了突破音障的能力。

20 世纪 40 年代中期，美国有关部门着手开发一种用于研究的、能以

超过音速的速度飞行的有人驾驶飞机，从而开始了著名的“X计划”。几年后，“X系列”研究机的第一个产品——X-1由贝尔飞机公司试制成功。

1947年10月14日，美国空军的王牌飞行员查尔斯·E. 耶格尔上尉驾驶着X-1飞机再次向音障发起挑战，并最终取得了成功，率先进入超音速飞行的领域。

进入20世纪50年代之后，随着涡轮喷气式发动机技术的不断进步和飞机外形设计的日趋成熟，固定翼飞机（特别是战斗机、攻击机、轰炸机、侦察机等军用航空器）超过音速已不在话下。从此，音障一词，便很少被人提及了。

二、突破热障

当飞行器在稠密大气中的运动速度超过M数2.5时，其表面的温度会急剧升高，必须相应地在机体的不同部位采取局部降温、增强结构、换装新材料等措施。否则，它们在高温环境下，将难以持久、安全地飞行。这就是所谓的热障。

热障实际上是由气动加热引起的。飞机进行超音速飞行时，受激波与机体间的高温压缩气体的加热和机体表面与外界空气强烈摩擦的影响，其蒙皮的温度会随M数的持续提高而不断加大。飞行M数为2.0时，机头处的温度略超过100℃，而当M数等于3.0时，飞机表面的温度则上升至350℃左右。

气动加热会使飞机的结构刚度下降、强度减弱，并产生热应力、应变等现象，甚至引起灾难性的颤振。气动加热还会造成座舱温度升高、油料挥发、稀释甚至沸腾等后果。因此，对飞行速度超过音速三倍的航空器来说，其主要的承力结构、机翼和尾翼的蒙皮等，必须用耐高温的特种钢、钛合金和复合材料（例如碳纤维复合材料、陶瓷基复合材料等）制造，并需采取适当的隔热、冷却等措施。

航空界一般把M数2.5作为热障的界限。低于这一值，可用常规的方法和材料制造飞机；高于该值，则必须选择新的手段和新型材料。

热障对飞机的设计、生产和安全飞行都会带来严重的影响。为了测试航空器在较高飞行 M 数条件下的热效应，探索对付热障的办法，1952 年，美国的贝尔公司研制出了一种以火箭发动机为动力的试验机——X-2。该机于 1952 年 6 月 22 日，由 B-50 轰炸机挂载投放，实现了首飞。1956 年 9 月 27 日，飞行员米尔本·阿普特驾驶 X-2 飞机完成了一次史无前例的突破“热障”的飞行，当时，这架飞机的最大平飞 M 数达到了 3.2。

从 1957 年起，美国便开始着手研制超音速三倍的作战飞机，1962 年 4 月，A-11 军用飞机的原型机首飞成功；1964 年 9 月，B-70 战略轰炸机的原型机——XB-70A 进行了第一次试飞。同年，苏联专门针对 B-70 轰炸机而设计的米格-25 截击机问世。迄今为止，能够突破热障的实用型有人驾驶飞机，只有这少数几种。出于经济性和作战效率等方面的考虑，后来研制的军用飞机和超音速客机，都把最大飞行 M 数的指标定在 2.5 以下。

为了与平飞速度低于 M 数 2.5 的普通超音速飞机有所区别，某些航空界和军界人士把突破了“热障”的飞机，如 X-2、SR-71、B-70、米格-25、T-4 等，称之为高超音速飞机。其实，按照速度区间的分类，它们所能达到的最大速度仍属于超音速范围。

在航空与航天技术领域，专家们一般根据航空器或航天器在大气层中的飞行 M 数的大小，将物体的运动速度划分为四个区域：

► 米格-25 截击机



亚音速区—— M 数小于 0.75；

跨音速区—— M 数 0.75 ~ 1.2；

超音速区—— M 数 1.2 ~ 5.0；

高超音速区—— M 数 5.0 以上。

进入高超音速区的飞行器，遇到的热障问题更为严重。这正是当今的航空航天工程师在研制空天飞机、高超音速飞行器（如 X-43A、X-51A、HTV-2 等）时，必须面对的难点和需要花大力气解决的关键环节之一。

世界航空界有一个传统，那就是追求高空、高速。军事强国的设计人员一直没有放弃过对高超音速飞行器的探索，总是想方设法让飞行器飞得更快、更高、更远。自 20 世纪 70 年代以来，美国的一些军火工业巨头就不断地向五角大楼推荐各种新的方案。因为，高超音速飞行器本身所具有的优点，是普通飞机无法比拟的。其应用前景极为诱人：这类飞行器能够在较短的时间内迅速抵达地球上任何一点。例如，一架巡航速度为 M 数 12 以上的高超音速飞机，从西半球的美国飞到东半球的日本，只需两个多小时，所用时间要比现在的跨太平洋航行短得多。飞得高、飞得快的军用飞机在对敌侦察或作战时，不易遭到对手的地面防空武器的攻击，活动空间和安全系数很大，在许多方面，甚至在心理上都占有优势。SR-71 和米格-25 飞机纵横天下，很少失手，就是明证，未来的高超音速飞行器的能力不知要比 SR-71、米格-25 高出多少倍。当然，其前提条件之一是必须克服热障这一拦路虎。

三、浅析黑障

音障和热障与航空的关系极为密切。而航天部门研究黑障问题更多一些，因为这是航天器重返大气层时必然会发生的现象。当飞行器在大气层中以十几至二十几个 M 数的速度运动时，其头部、机翼（弹翼）等处会形成很强的激波。由于激波的高温压缩作用和气体的黏性作用，使飞行器的动能被迅速转换为热能。

当机体周围的温度达到一定程度后，其周边的空气便会出现分解现象。这时，空气分子在高温下，部分分解成原子状态的氧和氮，两者化合为一

氧化氮，从而导致空气化学成分的改变。

若再继续增大飞行速度，温度将进一步提高（航天器重返大气层时，其表面温度可达 1000°C 以上），气体原子和飞行器表面被烧蚀的材料将呈现出电离的现象（空气原子等彼此碰撞，失去电子，变成带电的离子）。于是，在飞行器外表面便会形成一层高温电离质。

如果把再入大气层的弹道导弹弹头等锥形体飞行器看作是无坚不摧的“龙泉”“利刃”的话，那么，包裹在它四周的高温电离质就像是刀鞘。于是，人们便形象地将其称之为等离子体鞘（或等离子壳层）。

主要由大量的正离子和自由电子组成的等离子体，属于物质的第四态（其他三态为固态、液态、气态）。它实际上是一种宏观电中性的电离气体（即带正电的粒子数量和带负电的粒子数量相等），其在导电、导热、扩散、辐射、黏滞性、抗磁性、波动传播等方面，都与普通的气体不一样。

三尺青锋入剑匣，就看不见宝剑了。飞行器也一样，只要在其表面形成了一层等离子体鞘，它便有可能遁形。这是因为等离子体的导电率较高，对无线电波的发射、接收和绕射影响很大。在一定的条件下，它会吸收电磁波，或将入射的电磁波向电子密度低的地方折射，或使电磁波绕过等离子体团。即使是返回到雷达接收机的编码信号，也会因为受到电磁力的影响而造成极化失真，导致测量误差，从而无法分辨其信息内容。

由于等离子体鞘形成的电磁屏障如同一堵墙一样，阻挡、散射和吸收电磁波，使电磁波的传输大大衰减。其结果是，在一定的高度和时间内，再入大气层的飞行器发出的通信信号，外界收不到；地面控制站发来的无线电指令，飞行器也收不到。此时，搜索跟踪雷达也难以“看到”它，从而导致信息交流的严重恶化，甚至完全中断。人们把这种受等离子体鞘的影响所造成的再入通信中断的现象，称之为黑障。

对航天控制系统来说，黑障的出现，会给返回大气层的卫星、宇宙飞船、航天飞机、远程弹道导弹等空间飞行器的制导和测控带来很大的危害，必须采取避开等离子体鞘频率、降低等离子体鞘频率或改变飞行器的外形与再入姿态使等离子体鞘变薄等措施，以改善飞行器的再入通信。由于技术困难很多，所需费用巨大，受技术和经费上的制约，目前所用的办法，

效果尚不够理想。

再入通信中断的高度范围与大气层的分子密度分布有关。研究表明，在 20~100 千米的高度之间，最易出现黑障。在这一范围内，大气分子的密度适中，对运动物体产生的气动阻力较小，只要飞行器的速度较大，其周围的气体就会因高温而产生电离现象，并最终形成等离子体鞘。

航天飞行器的气动外形和再入姿态不同，出现黑障的时间也不同。一般来说，洲际弹道导弹的弹头在重返大气层阶段，信号中断的时间大约为十几秒至几十秒；航天飞机由于外形和飞行姿态均比较复杂，返回地球时产生等离子体鞘的时间长达 20 分钟左右。在这段时间内，如果出了问题，由于通信联络不畅，航天飞机驾驶员将难以取得地面的帮助，一切都只能依靠自己。

然而，事物总是一分为二的。失之东隅，收之桑榆。既然突破黑障不容易，那么利用黑障隐身岂不很理想吗？再入通信中断固然是坏事，但在某些时刻和某些高度上“匿踪”，对弹道导弹的突防却又是件好事。如果能适当延长黑障发生的时间段，将会给敌方空天防御系统的远程探测和跟踪，造成很大的困难。

若能有意识地利用黑障的特点，就可在一定的活动范围内，为高超音速飞行器蒙上一件“隐身外衣”，达到匿影藏形的目的。目前国外正在研制中的几种高超音速飞行器的最大速度可达十几个马赫（甚至超过 M 数 20），飞行高度都在 20 千米以上，基本具备了产生黑障的条件。当高超音速飞机抵达敌区上空，并受到对手的弹道导弹防御系统、高能激光武器系统等防空/防天火力的威胁时，有意识地调整飞行速度、改变外形和姿态角，便可在机体周围或局部区域，形成一层对电磁波干扰很大的等离子体鞘，致使敌方的探测系统和制导系统失去目标。

当然，利用黑障隐身是要付出代价的，产生黑障的前提是，飞行器的速度和姿态角要比较大，在气动阻力的作用下，将其动能迅速转换成热能。对再入大气层的航天器来说，通过这一过程可以降低再入速度，但对于平飞的高超音速军机、导弹而言，则必然会消耗更多的燃料。所以，此法只能短时间使用。

原文发表于《航空杂志》，2012 年第 1 期和第 2 期。

关于过载

傅前哨

空军航空杂志社 副编审

一、载荷与过载

任何结构件在工作中都会受到其他物体对它的作用力，这种作用力通常叫做载荷（或外部载荷），其单位为千克/厘米²或千克/米²。例如，飞机机翼上承受的空气动力、发动机推（拉）力、惯性力以及翼下挂载的副油箱、空空导弹、航空炸弹、起落架等的重力，都是作用于机翼的载荷。大小与方向不变（或变化很小）的载荷称为静载荷；突然加在构件上的载荷，或加载后大小与方向（或其中之一）有显著变化的载荷叫动载荷。

过载又叫过荷，它是载荷系数、载荷因数、过载系数等的简称。其基本定义为：作用在飞机、导弹等航空器上的全部空气动力、推（拉）力等的合力（ R ）与飞机、导弹本身的重力（ G ）之比（即载荷与重量之比）。通常用字母 n 这一无量纲的数值来表示航空器承受载荷的相对大小（ $n=R/G$ ）。

在航空器设计（尤其是战斗机、空空导弹、地空导弹的设计）方面，最大使用过载是一个非常重要的指标。该参数与航空器的外形、结构、强度等密切相关，并直接影响着飞机、导弹的机动性等飞行能力。

在航空与航天领域，也有用载荷（ R ）与质量（ m ）之比（ R/m ）来代表飞机、导弹等航空器所承受的过载，其度量单位为重力加速度（ g ）。人们通常以重力加速度的倍数（即几个 g ），表示过载的大小（或者说用重力的倍数表示物体在加速度作用时所产生的惯性力）。其大小与产生加速度的外力相等，而方向则与加速度的方向相反。以飞机为例，在空中进行各种运动时，飞机机体的所有部位也相应地承受着载荷，过载越大，说明升力

(或侧力)与飞机重量之比就越大。等速直线平飞时,升力与飞机的重量相同,过载(或升力载荷系数)等于1;曲线飞行时,升力往往不等于飞机重量,过载也就大于或小于1。

在物理学上, a 是表示加速度的符号, v 表示速度, v_0 表示初始速度, t 表示时间,则 $a=(v-v_0)/t$,其单位为米/秒²; g 是表示重力加速度的符号,其单位也为米/秒²,重力加速度的值随地球纬度和距海平面的高度而变化。国际上采用的标准值是980.665厘米/秒²,大约为9.8米/秒²。地球上的所有物体都承受着引起1g加速度的重力,因而一切物体都有重量。

有一点需要指出,许多人把重量与质量混为一谈,其实,重量(G)是矢量,单位为千克(或牛顿),1千克(力)大约等于9.8牛顿;而质量(m)是标量,单位为千克(力)·秒²/米。任何物体的重量在数值上都比其质量大,重量应是质量的 g 倍,即 $G=mg$ 。

二、过载对飞行的影响

飞机的机动能力主要受几个方面的影响,如可用升力的大小、发动机剩余推力的大小、阻力的大小、机动过载的大小等。飞机的机动过载还受两个条件的限制,一是机体的结构强度,二是人体的生理承受能力。如果某型飞机的结构设计过载为12个 g ,就表示该机最大能承受12倍标准重力加速度的载荷。超过这一值,飞机就可能损坏。

航空器的载荷系数一般分为设计过载和使用过载两个指标。飞机的最大设计过载和使用过载(载荷系数)与机翼、机身等部件结构的材料选择、强度设计、生产工艺等有关。从理论上讲,只要有战术技术方面的需求,飞机可以设计、制造得非常坚固,使之能够经得起极高过载的考验,但是机上乘员承受过载的能力却很有限。从工程设计的角度讲,这是一对需要认真“调和”的矛盾。

在地面静止状态,人体所受的过载为1个 g 左右,在剧烈运动状态,例如以较高的速度做起伏运动时,过载便会大于或小于1。普通人往往在正过载达到3~4 g 时,便会感到头晕目眩,到了4.5~5 g 时,就有可能晕

厥。而优秀飞行员在身穿抗荷装具时所能承受的最大过载一般可达到 9 个 g 左右（持续时间十几秒）。以此为界，先进战斗机的最大使用过载多数都不超过 $9g$ ，否则将无谓地付出代价。

在飞机设计中，过载按外力的作用方向分为纵向、法向和侧向载荷系数。在机体坐标轴系（ X_t 、 Y_t 、 Z_t ）中的三个分量分别是 n_{xt} （纵向载荷系数）、 n_{yt} （法向载荷系数）和 n_{zt} （侧向载荷系数），并按坐标轴的方向确定其正负。在研究问题时，也有把载荷系数投影于速度坐标轴系的三个轴，用这三轴上的分量来表示的。飞机外载荷和强度计算使用最多的是法向载荷系数 n_{yt} （或升力载荷系数 n_y ）：

$$Y = n_y \cdot G \text{ 或 } n_y = Y/G$$

式中， Y 代表飞机的升力， n_y 代表飞机的升力载荷系数， G 为飞机的重量。

升力 Y 为正值时，过载为正，反之为负。飞机、导弹做机动飞行，主要靠改变法向过载的大小和方向来实现。空中飞行时，机上乘员与飞机承受的过载是相同的。在等速平飞状态，人所承受的法向过载为 1，过载大于 1 时，便出现超重现象，而过载等于 0 或小于 1，则谓之失重。

在航空器的结构强度设计上，一般将过载定义为：规定的载荷与飞机重量之比。所谓规定的载荷，主要包括空气动力、惯性力、地面（或水面）的反作用力等。

一些特殊的飞行器（如舰载机、空空导弹等），其外载荷和强度计算除了重视法向载荷系数外，往往还要关注纵向、侧向载荷系数。以舰载喷气式战斗机为例，其整个弹射起飞的过程只有 2~3 秒钟左右，在这样短的时间内，一架二三十吨重的飞机的速度会从 0 增至 200~300 千米/时左右，飞行员背部承受的（纵向）过载可达 4~5 g 。

舰载机在着舰过程中，机体、飞行员所承受的法向过载和纵向过载均较大。例如，F/A-18C/D 舰载战斗机降落在航母飞行甲板上的一刹那，其下沉速度可达到 7.32 米/秒，而空军型的 F-16C 在跑道上着陆时的下沉率，只有 3 米/秒多一点。因此，二者在接地瞬间所遭受到的反作用力相差很

大。舰载机在拦阻着舰状态下，拦阻索与飞机尾钩之间产生的瞬时拉力，大约为舰载机着舰重量的 4.5~6 倍，即着舰时的纵向过载可达 4.5~6g。这样复杂、恶劣的使用条件，对舰载机的设计和飞行员的身体素质都提出了非常高的要求。

三、关于过载的极限

人所能承受的过载极限除了与其自身的生理条件、心理素质、配备的抗过载装具以及是否受过专门训练等因素相关联外，还与承受过载的时间有关。驾驶战斗机的飞行员在身穿抗荷服（同时采用抗荷正压呼吸并做抗荷动作）进行高机动飞行时，能够承受的最大过载为 8~9g（称为持续性正过载）。超过这一数值，无论是对飞行员，还是对飞机都很危险。在持续时间较长的情况下，9g 的过载的确是一个不可逾越的门槛。

不过，8~9 倍的重力加速度并非战斗机驾驶员所能耐受的极限。由于飞行人员的过载耐受力与过载对人体作用的方向、作用的时间以及过载增长率（ g/t ）密切相关，如果大过载状态持续的时间很短（即所谓冲击性过载），那么，这个标准是可以提高的。比如，在弹射救生实验过程中，受试人员承受的弹射力高达 1470 千克左右，但总持续时间只有 0.12~0.18 秒。在此种状态下，瞬间过载（冲击性过载）可增至 16.3~20g。这就成为了人体的另一个过载限制值。

弹射救生过程的特点是：最大过载值高、过载增长率高，但作用时间很短。由于冲击性过载对人体的主要影响是脊柱损伤，为保证飞机乘员的救生安全，战斗机、强击机的座椅在向上弹射出舱时的设计加速度，往往定在 18g 以下（150~200 米/秒²），过载增长率低于 200g/秒，过载作用时间小于 0.6 秒，终速约为 16 米/秒。只要飞行员弹射离机时的程序、动作能够按照操作要领实施，一般都不会受到伤害。

驾机飞行是一种智能和技能相结合的、安全风险很大的活动，而实施弹射救生更是一个复杂的、充满风险的过程。因为二者都需要与大过载打交道。在各种不同的飞行状态下，需要注意的事项很多，而留给飞行员进

行决策和反应的时间又很短。因此，平时必须加强相关课目的训练，牢牢掌握机动飞行与弹射救生的要领，培养良好的心理素质，以保证在高难课目或高机动飞行中，能够做到以准确的程序、正确的动作驾驶飞机，在弹射救生过程中能够以准确的动作、正确的姿势弹出座舱，安全离机。

原文发表于《航空杂志》，2011 年第 11 期。

更快、更高、更远

——漫谈高超声速飞行技术

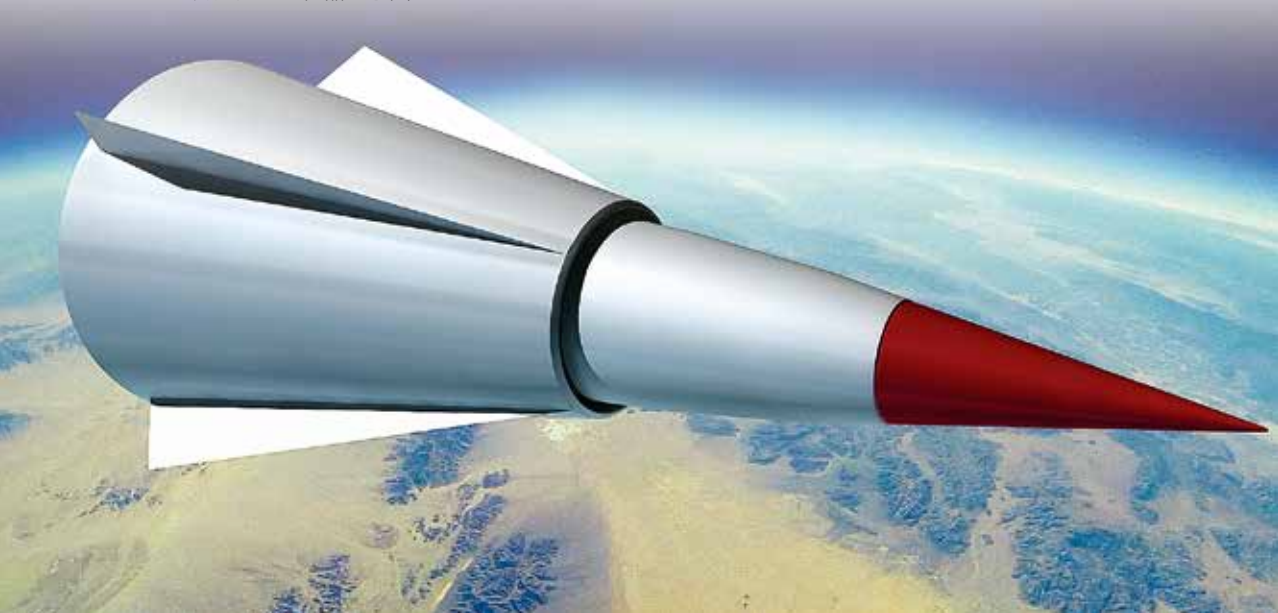
张德良

中国科学院力学研究所 研究员

自古以来，人类始终有一个梦想，人可以像鸟一样在天空翱翔，甚至要飞向星际太空，经过多少年的不懈努力。终于在 1903 年，美国莱特兄弟发明了世界上第一架飞机，1957 年苏联发射了世界上第一颗人造卫星，1969 年美国航天员阿姆斯特朗登上月球，人们实现了翱翔天空，飞离地球，飞向太空的梦想！100 多年来人们从最初的姗姗学步开始、经过亚声速飞行、进入超声速飞行时代，同时也发射卫星、登上月球，飞向火星和深入太阳系，人类在一步一步地朝着更快、更高和更远的目标前进！

然而，人类并不满足于此，从 20 世纪 90 年代起人们提出了更高的愿望：“在一小时内飞到地球任何角落”。为此，各国科技人员全力以赴地研究高超声速飞行技术。什么是高超声速飞行？高超声速飞行要求飞行器的

► 高超声速飞行器想象图



飞行速度超过 5 倍声速，即飞行速度大于 6000 千米/时。一旦人们掌握了高超声速飞行技术，就可以在 1~2 个小时内从北京飞到纽约，或到达地球任何角落。

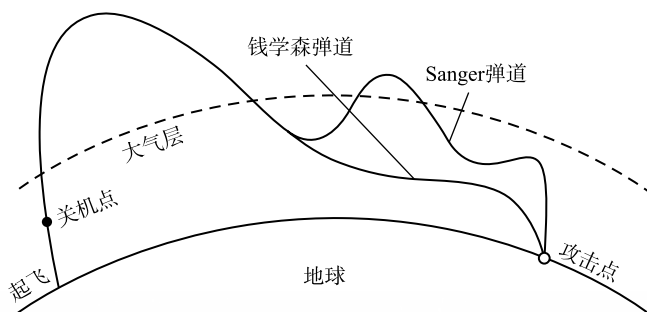
目前，世界各国正在对高超声速飞行的关键技术研究，并已取得了一定进展，其中以美国、中国和俄



► 钱学森讲解飞行轨道

罗斯等为主。经过这些年的研究，高超声速飞行器有了一些雏形。它们是：高超声速巡航导弹（例如 X-51），高超声速空天飞机（例如 X37B）和高超声速火箭助推—滑翔飞行器（例如 HTV-2）等。

说起高超声速飞行技术，一定要提到我国的著名科学家钱学森，高超声速（hypersonic）术语就是钱学森在 20 世纪 40 年代首创的。不仅如此，他还提出了高超声速滑翔飞行弹道，即钱学森弹道。



► 钱学森弹道示意图

要实现高超声速飞行，绝不是件容易的事，有许多难以克服的问题需要我们去解决，因此，目前高超声速飞行技术依然处在尝试阶段。它的主要难点是：

适合高超声速飞行的发动机——超燃冲压发动机：当飞行速度大于五

倍声速时，传统的涡轮喷气、涡轮风扇等发动机已经不能满足这种飞行条件，必须采用超燃冲压发动机。它不需要涡轮和压气机，只由进气道、隔离段、燃烧室与尾喷管组成，整体结构相对简单。空气通过一系列激波压缩后，在较短时间（毫秒量级）点燃燃料，就能产生巨大推力。然而，超燃冲压发动机研制进展甚微，至今仍处于探索阶段。

克服飞行器机体气动加热问题，即热障问题：在实现高超声速飞行时，由于激波和黏性作用，使机体周围温度急剧升高，温度可达到数千摄氏度，形成严酷的气动加热环境。一般飞行器结构根本无法承受，因此需要对飞行器进行专门的热防护设计。目前，高超声速飞行器的热防护问题仍不能完全解决。

符合合理气动布局的一体化设计：设计高性能高超声速飞行器，除了分别考虑各部件的气动布局外，还必须考虑飞行器机体 / 推进器一体化设计技术。它已成为制约其总体性能提升的关键技术之一。实际飞行试验表明，现有的高超声速一体化设计理念，不能满足工程应用需求，需要有新的概念性突破。

再现高空高超声速飞行的地面试验设备，即高超声速激波风洞：高超声速飞行需要解决气动布局、超声速燃烧、高温气动热等复杂问题，这些问题最好首先在地面试验设备中进行研究和分析。如何突破传统气动实验原则，在地面上研制出能再现高空高超声速飞行条件下全尺度模型试验设备和测试技术是多年来久攻未破的世界难题。

经过多年艰苦不懈努力，我国科技人员在高超声速飞行领域已经取得了举世瞩目的成就。主要有：我国有关科研单位在超燃冲压发动机研制、地面试验验证和飞行试验技术等方面进行了开拓性研究，并已取得突破。2011 年我国成功进行了跨大气层空天飞行器——神龙的试飞，标志我国已完成了发射空天飞行器的火箭发动机研制工作。2014—2016 年，我国多次完成了高超声速火箭助推—滑翔弹头载体飞行试验和测试，其飞行速度超过声速 10 倍。所有这些成就已引起了世界各国，特别是美国的震惊。

中国科学院力学研究所利用独创的反向爆轰驱动创新技术，在地面上研制成功国际首座总长度 265 米、实验段直径 3.5 米的超大型高超声速

激波风洞。它可以再现在 25~50 千米高空、飞行马赫数 5~9 的高超声速飞行条件，整体性能处于国际领先水平，这为我国高超声速飞行进行地面模拟试验创造了有利条件。该成果获得 2016 年度美国航空航天地面试验大奖（AIAA Ground Testing Award for 2016）。这是该奖设立 40 年来，在高超声速风洞技术方面，全球仅有的三个获奖者之一，也是我国首次获此殊荣。

高超声速飞行技术正以势不可当的力度向前发展，它是未来航空航天工业的基石和国家空天安全的支柱，它对国民经济的发展和国家权益的保障具有重大战略意义。同时，高超声速技术的发展也正在改变人类的生活模式，推动了现代社会的发展。



► 我国 JF-12 超大型高超声速激波风洞

原文发表于《知识就是力量》60 周年特刊和 2017 年 2 月刊。

以下图片来源于维基百科

P11

作者：Ariess

<https://en.wikipedia.org/wiki/File:Shaw2006astro.jpg>

P14

作者：ESA/Hubble & NASA

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:UGC_12158.jpg?uselang=zh-cn

P23

作者：NASA/JPL-Caltech/UMD

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Goneinaflash.jpg?uselang=zh-cn>

P59

作者：Wknight94

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lunar_Olivine_Basalt_15555_from_Apollo_15_in_National_Museum_of_Natural_History.jpg

P65 下图

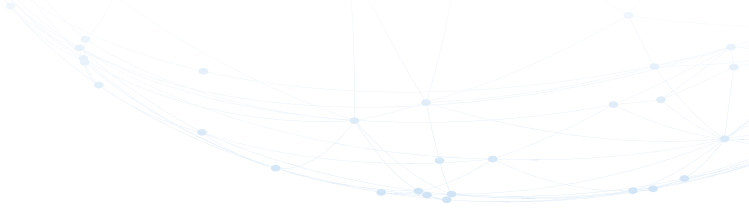
作者：Jim Secosky & NASA

https://en.wikipedia.org/wiki/File:Tikhonravov_Basin_Streaks.JPG

P105

作者：Staff Sgt. Bennie J. Davis III

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:B-1B_over_the_pacific_ocean.jpg?uselang=zh-cn



P106

作者： Staff Sergeant Jason Gamble

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:F-16_CJ_Fighting_Falcon.
jpg?uselang=zh-cn](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:F-16_CJ_Fighting_Falcon.jpg?uselang=zh-cn)

P117 右上图

作者： g4sp

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SU-30MKI-g4sp.jpg?uselang=
zh-cn](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SU-30MKI-g4sp.jpg?uselang=zh-cn)

P127

作者： Dmitry A. Mottl

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mig-25.jpg>

P136

作者： Daniel Toschläger

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:WU-14_HGV.jpg



