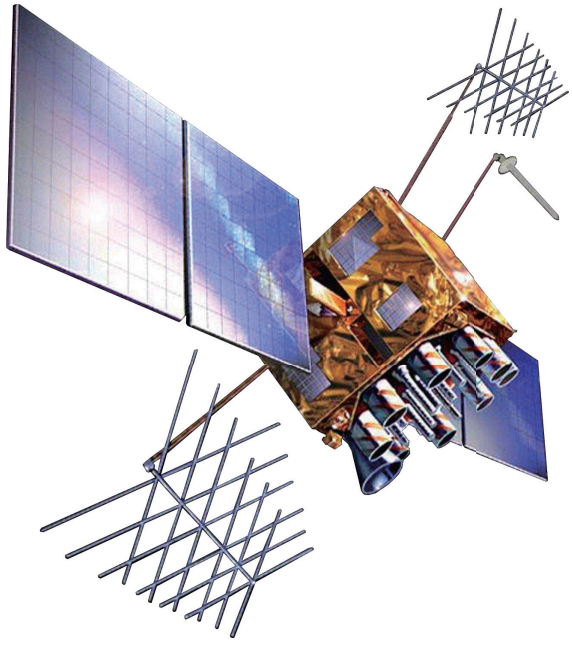
中国科技的梦想与荣光

北斗导航

——高精度全球卫星定位系统

杨凤霞　张端明　著



河北出版传媒集团
河北科学技术出版社

图书在版编目（CIP）数据

北斗导航 : 高精度全球卫星定位系统 / 杨凤霞， 张端明著. -- 石家庄 : 河北科学技术出版社， 2019.9
（中国科技的梦想与荣光 / 刘树勇主编）
ISBN 978-7-5717-0052-2

Ⅰ. ①北… Ⅱ. ①杨… ②张… Ⅲ. ①卫星导航－全球定位系统－介绍－中国 Ⅳ. ①P228.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第159734号

北斗导航——高精度全球卫星定位系统

杨凤霞　张端明　著

出版　河北出版传媒集团　河北科学技术出版社
地址　石家庄市友谊北大街 330 号（邮编：050061）
经销　新华书店
印刷　北京兴星伟业印刷有限公司
开本　700 毫米 × 1000 毫米　1/16
印张　10.5
字数　130 000
版次　2020 年 4 月第 1 版
印次　2020 年 4 月第 1 次印刷
定价　45.00 元

序

中国科技在古代曾经灿烂辉煌，为人类文明做出过重大贡献。但是自明末之后，中国科技开始渐渐落后于西方。新中国成立之初，中国科技特别是高新技术领域几乎一穷二白，在极其困难的情况下，中国科技工作者发扬自力更生、艰苦奋斗精神，奋起直追。1964 年 10 月 16 日 15 时中国第一颗原子弹爆炸成功，1967 年 6 月 17 日 8 时中国第一颗氢弹空爆试验成功，1970 年 4 月 24 日 21 时中国第一颗人造卫星发射成功……以“两弹一星”为标志，中国开始了自身现代历史上第一次自主科技创新的历程。1978 年全国科学大会召开，中国迎来了“科学的春天”，在航空航天、超级计算机、海洋科学、超级工程、医药科技等众多领域取得了举世瞩目的成就。进入 21 世纪以来，我国科技发展突飞猛进，取得了一批引领世界的科技成果。正如习近平总书记在党的十九大报告中指出：“创新驱动发展战略大力实施，创新型国家建设成果丰硕，天宫、蛟龙、天眼、悟空、墨子、大飞机等重大科技成果相继问世。”一系列“叫得响、数得着”的科技成果，惊艳世界。这些科技成果既增强了我国综合国力，又为改善人民生活水平做出了重大贡献。

河北出版传媒集团领导高度重视宣传我国发展伟大成就，亲自谋划选题，指导河北科学技术出版社组织有关专家、科普作家编写了这套《中国科技的梦想与荣光》科普图书。这套书主要介绍了包括太空探索、北斗导航、中国天眼、量子通信、中国大飞机、深海探测、巨型计算机、中国高铁等近些年对中国乃至世界产生重大影响的科技成



果。在这套书中，读者在了解当代最前沿科学技术知识的同时，还会从中看到我国科学技术工作者“坚持、坚忍、坚韧”的可贵品格和“勤奋学习，自主创新”的精神；在生动有趣的科学故事中，读者可以了解到其中蕴含的科学思想、科学精神和科学方法，潜移默化中提高自己的科学素养；读者也会从科技工作者的勤奋、创新、拼搏和献身精神中受到鼓舞，并以更大的决心去迎接未来的挑战，为实现中华民族的伟大复兴而努力奋斗。

2019 年是新中国成立 70 周年，把新中国取得的科技成就宣传好，让更多的人了解中国科技发展历程，了解中国科学家艰苦奋斗、勇于创新的精神，在全社会形成爱科学、学科学、用科学的浓厚氛围，是一件很有意义的事情，我愿意向广大读者推荐这套科普图书。

中国工程院院士 

2019/9.

前 言

2018 年 12 月 27 日，国务院新闻办公室在新闻发布会上宣布：我国自主设计、自主建设的北斗三号基本系统完成建设，于当日开始提供全球服务。这标志着北斗系统服务范围由区域扩展为全球，北斗系统正式迈入全球时代。

北斗系统是中国自主建设、独立运行、与世界其他卫星导航系统兼容共用的全球卫星导航系统，可在全球范围、全天候、全天时为各类用户提供高精度、高可靠的定位、导航、授时服务。自 20 世纪 90 年代北斗系统启动研制，按“三步走”发展战略，先有源后无源，先区域后全球，前后经历 28 年，先后建成北斗一号、北斗二号、北斗三号系统，走出了一条中国特色的卫星导航系统建设道路。

截至 2019 年 6 月，北斗系统在轨工作卫星共 39 颗，包含 19 颗北斗二号卫星和 21 颗北斗三号卫星。2019 至 2020 年，还将发射 8 ~ 9 颗北斗三号卫星，在巩固亚太区域服务的同时，还将进一步提升全球服务性能。根据计划，我国将于 2020 年全面完成北斗三号全球组网建设，2035 年将建成以北斗系统为核心的、更加泛在、更加融合、更加智能的国家综合定位导航授时（PNT）体系。

中国开发的北斗系统，打破了美国 GPS 系统对卫星定位技术的垄断，而且在保证军用的同时尽可能开发民用领域，以便实现盈利。截

至 2018 年底，各类国产北斗终端产品应用规模已累计超过 8000 万台 / 套，采用北斗兼容芯片的终端产品社会总保有量接近 7 亿台 / 套（含智能手机）。2018 年我国北斗导航产业规模达到 855 亿元人民币，预计 2020 年将达 4000 亿元人民币。聚集在北斗星座下的产业迅速壮大，一日千里。北斗星座的建设为我国国民经济的发展增添了强大的正能量，为高科技的发展注入了新的动力。

从国家安全来讲，GPS 将来最多能用在普通民用导航上，其他各领域（尤其是关乎国家安全）将强制安装北斗系统。目前，北斗系统已在我国国防现代化的建设中抢占了一个关键的制高点，并且在我国的火箭军、空军、海军和陆军的现代化、智能化中扮演着关键角色。

本书的写作，正好处于北斗系统的建设基本完成之际，不断有好消息传来。然而，本书毕竟是一本介绍北斗系统的科普书籍，因此，不可能完全覆盖北斗系统建设的所有内容。我们的重点在于弘扬爱国主义，传播科学知识，不得不有所取舍，有所侧重，希读者见谅。还有一点需要说明，我们所有素材的选择，包括文字和图片，全部取自网络及报刊公开发表的材料，特别是图片，基本上来源于网络公开的图片。

作　者

2019 年 6 月

目 录

一、我们的祖先是如何定位的… 1

在大自然中寻找方向标…… 1

伟大的发明——指南针…… 4

地图的作用 …… 6

二、现代科学定位和导航技术的发展及演变…… 7

声波定位——声呐 …… 7

神奇的雷达在战争中大显神威——无线电定位…… 10

雷达的发展史…… 12

利用神奇的激光定位——激光雷达…… 14

欲穷千里目，更上一层楼——卫星定位…… 17

三、现代千里眼和顺风耳——全球卫星导航系统…… 22

现代千里眼和顺风耳是如何寻找目标的——导航系统的定位原理 …… 22

全球卫星导航系统有哪些主要组成部分 …… 23

四、他山之石，可以攻玉——国外三大 GNSS 系统的素描 …… 26

GNSS 系统诞生于战火硝烟中 …… 26

欧洲人也跟上来了——欧盟伽利略（GALILEO）系统的建设 …… 29

欧洲人命运多舛——伽利略计划实施中的曲折 …… 33

想赶超美国 GPS 的俄罗斯格洛纳斯系统 …… 37

五、我国北斗卫星导航系统的“三步走”战略…… 43

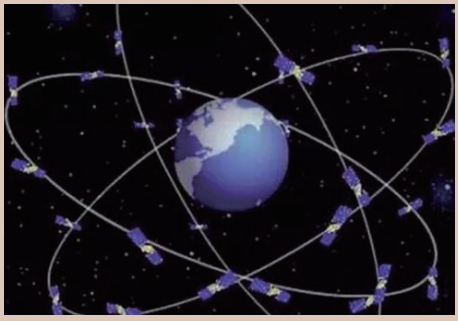
我国为什么要建设北斗卫星导航定位系统 …… 43

坚定走自力更生、自主发展的道路 …… 47

我国卫星导航系统的开端——北斗一号 …… 48

北斗星人再接再厉又一程——北





斗二号 …… 54
北斗冲向全球——北斗三号 …… 64
北斗卫星导航系统有什么特色和优势 …… 75

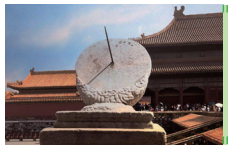
六、北斗人更上一层楼 …… 80
漫漫征程——北斗卫星导航系统的发展历程 …… 80
北斗系统高精定位背后的黑科技（1）——北斗地基增强系统（GBAS） …… 84
北斗系统高精定位背后的黑科技（2）——北斗星基增强系统（SBAS） …… 90
北斗系统海陆空“三位一体”大显神通——千里眼伸向海洋深处 …… 94
向更精准的时空定位进军 96

七、北斗系统是确保国防安全的强大利器…… 107
北斗系统与国防现代化 … 107
北斗系统与抗战胜利 70 周年阅兵式 …… 113
北斗系统与东风系列导弹 … 117
北斗系统与卫星制导炸弹 … 123
中国“天眼”——北斗系统在他国…… 128

八、北斗系统为全世界人民谋福祉…… 134
北斗系统在国民经济领域全面推进 …… 134
基础产品已在市场大显神通 …… 135
北斗系统使交通运输更加畅通 …… 138
建设智慧农业、智慧林业、智慧渔业及智慧牧业 …… 140
北斗系统在特殊服务领域的应用 …… 145

九、灿烂的发展前景…… 148
发展蓝图 …… 148
新北斗系统新心脏 …… 149
大国重器——北斗与 5G 联手 …… 150
沟通万物，永不失联——鸿雁星座 …… 155





一、我们的祖先是如何定位的

在日常生活中，定位和导航从古到今都是人类活动面临的重要问题。北斗卫星导航系统的最基本功能是定位和导航。那么我们的祖先是如何定位和导航的呢？

在大自然中寻找方向标

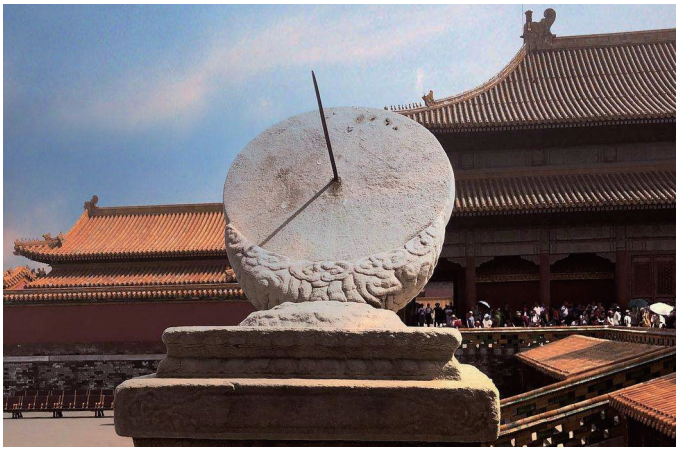
在古代，没有 GPS，没有导航仪，人们通过对自然现象的观察，总结经验，通过日、月、星宿的方位，树木、花朵的朝向，树的年轮等来判定方位。例如：人们发现向日葵的叶子和花盘始终随着太阳。因此，上午向日葵朝向东方，而在日落的时候指向西方。而花盘一旦盛开后，就固定朝向东方。又如生活在北半球的人们发现，树叶茂密的一面是南面，树叶稀疏的一面为北面；树桩年轮宽的一面为南面；蚂蚁洞大的一面也朝南面；岩石上苔藓也是南面比北面多。因此我们在行进的时候



向日葵的花盘总是朝向太阳

就可以通过这些自然现象辨别方向。

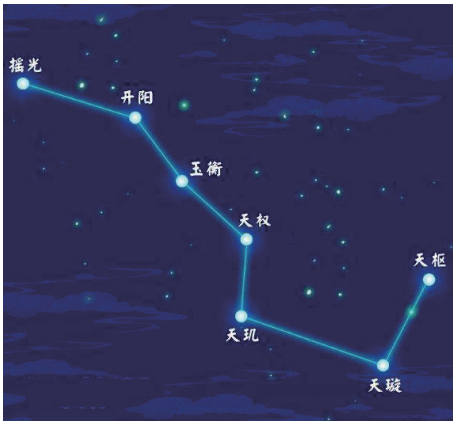
在茫茫无际的沙漠中迷路怎么办？沙漠中没有树木，没有房屋，没有河流，也就是说没有任何参照物，如何辨别方向？没有参照物人们就分不清方向，一不小心就会迷路。有经验的沙漠行走者会以太阳、月亮及天上的星星为参照物来进行辨位，而且还要注意不同的时间月亮和太阳的位置也是不同的。以太阳为例，将一根直杆垂直立在地面，拿一块石子放在直杆影子的顶点处。10 分钟后，在移动后的直杆影子的顶点处再放一块石子。然后，在两块石子间连一条直线，这条直线所代表的方向就是东西方向，与这条直线垂直的方向就是南北方向，其中，直线向着太阳的一端指向南方，相反的方向则是北方。这实际上就是日晷辨方向的原理。



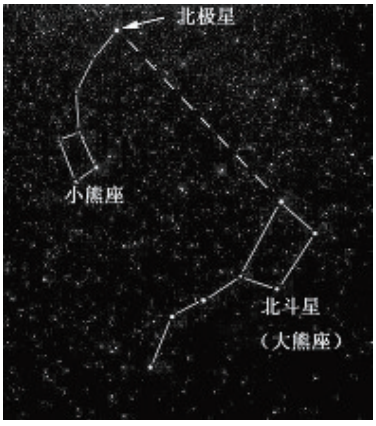
故宫里的日晷

我们的祖先发现，在夜空中，北方的天际有七颗最明亮、最容易发现的星星——北斗七星，其排列颇像古代舀酒的斗，故称北斗。这七颗星属于大熊星座，其中四颗星排列成梯形，像勺形的斗口，另三颗星像斗柄。这七颗星分别命名为天枢、天璇、天玑、天权、玉衡、开阳、摇光。

古人还发现一个奇特的现象，就是将斗口两颗星的距离延长五倍，就找到了一颗奇特的星，它是最靠近北天极的一颗最明亮的星——北极星。



北斗七星图

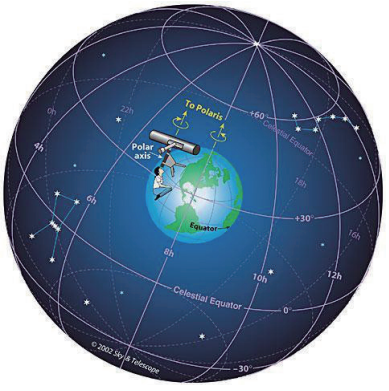


北极星与北斗七星

那什么是北天极呢？首先，我们讲一讲什么是天球。在繁星闪烁的晚上观察星星，直观感觉繁星好像嵌缀在一个巨大的球体上，这就是所谓的天球。地球自西向东自转，由于相对运动的关系，观察者感觉天球似乎在自东向西转动。

北极星就在天球的北极。

古人在航海中利用星座导航，有长远的历史。汉代的《淮南子·齐俗》中说“夫乘舟而惑者，不知东西，见斗极则瘖矣”，就是利用北极星为航行定向。东晋隆安三年（399 年），我国第一个出国取经的高僧法显大师去往古印度求经，历时 14 年，他撰写的《佛国记》记载：“大海弥漫无边，不识东西，唯望日、月、星宿而进。若阴雨时，为逐风去，亦无准。”这是我国有文献记载的利用天文技术导航的最早的实例。星辰的方位与角度则通过一种古老的天文测量技术——“牵星术”得到，该技术就是通过牵星板

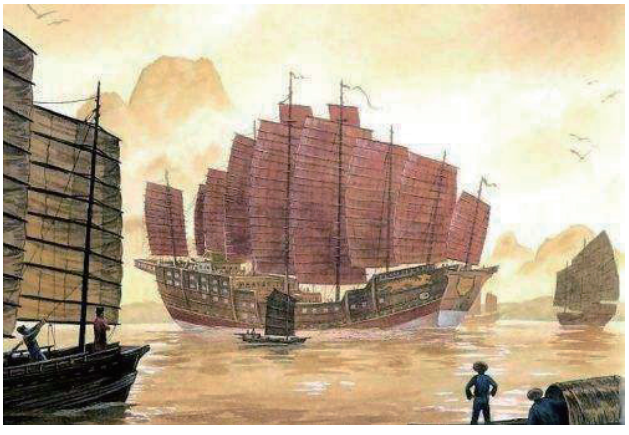


天球示意图

测量星体高度（北极星或华盖星）定出船舶所在的纬度，而牵星板是“一副十二片，乌木为之，逢小渐大，大者长七寸余，标为指、二指以至十二指，俱有细刻，若分寸然”的工具。1405—1433 年，郑和七下西洋，船舶导航时也用到了“牵星术”，同时还用到了对景定位法、三向交叉定位法，提高了船舶定位精度，把定量航行技术提高到接近近代水平。

伟大的发明——指南针

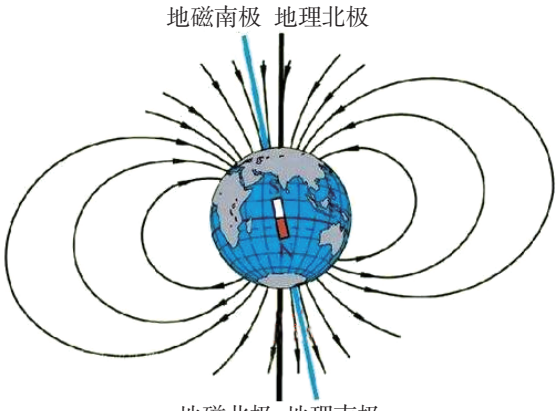
英国著名的科学技术史专家李约瑟（1900 — 1995 年）在《中国对航海罗盘研制的贡献》一文指出：“磁石指向性转移到它吸过的铁块的发现在中国大约在 1 世纪到 6 世纪。在 11 世纪以前的某个时期就已发现，不仅可以用铁块在磁石上摩擦产生磁化现象；而且还可以用烧红的铁片，经过居里点，冷却或淬火而得到磁化，操作时，铁片保持南北方向。”这种现象中学生在物理课中都观察过，即自由浮悬的磁针会自然地指向南方。到了北宋时期，指南针成为重要的定位工具。沈括在《梦溪笔谈》中记载：“方家以磁石摩针锋，则能指南。”就是用磁石去摩擦针，使针具有磁性。在美国探索频道写实电视节目《荒野求生》中，有一集贝尔用一根铁丝摩擦头发，使其充分磁化，放在一片叶子上，再让叶子在静水上漂浮，磁化的铁丝使叶子慢慢旋转，直到对准南北方向，也是同样的道理。



郑和航海示意图

原来地球本身就是一个大磁体，其磁北极在地球的南极，而磁南极

则在地球的北极。磁极与地球的两极几乎重合。



地磁体示意图

将磁针和方位盘联成一体的仪器称作“罗盘”。我国的海上丝绸之路的开拓者们和西方大航海时代的麦哲伦和哥伦布驾驶着帆船横渡辽阔的印度洋、太平洋和大西洋，创造了一幕幕航海史上壮丽的篇章，使用的导航设备就是罗盘。

1492 年 8 月，哥伦布在西班牙王室的支持下，率 90 名水手，驾驶着三艘大帆船，从巴罗斯港出发一直向西航行。他于 1492 年 10 月到达了现在的美洲巴哈马群岛的华特林岛，他坚信自己到的是印度。哥伦布 1493 年 4 月返回西班牙，并对外宣布他已经找到了通往印度的航道，轰动了整个欧洲，还得到西班牙国王的礼遇。虽然后来他又先后三次率


哥伦布


麦哲伦


罗盘



领船队远航“印度”，但一次也没有为西班牙国王带回黄金和香料，人们甚至认为他是骗子。1506 年 5 月 20 日，哥伦布在贫病中默默死去。

1499—1504 年，意大利航海家阿美利哥·维斯普西沿着哥伦布的航路，几次航行到所谓的“印度”进行实地考察。1507 年，他轰动全世界的《海上旅行故事集》问世，认定哥伦布发现的并非“印度”，而是“新大陆”。这片土地后来以他的名字命名为 America，即美洲。这距离哥伦布去世不到一年。尽管哥伦布并不承认他发现的是美洲，但是后人仍尊重他的功绩，把他誉为“发现美洲的人”。

地图的作用

从古至今，地图一直是人们用来导航的重要工具，还是定位不可缺少的工具。

在古代，地图的定位功能和对行军的导向作用，具有重要的战略和军事价值。1986 年，甘肃省文物考古研究所在天水放马滩的秦墓出土了 7 幅地图，经考证，它们绘制的年代为秦始皇八年（公元前 239 年），被认为是中国最早的实物地图。

古人起初用最原始的方法，边走边丈量，再绘制在石头或绢上。直到西晋，有一名才子裴秀，对前人的方法进行了归纳提炼，提出 “制图六体说”，即分率（比例尺，反映出图中线条和面积的比例）、准望（方位，反映图中各单位的相互关系）、道里（距离）、高下（地势起伏，即相对高度）、方邪（倾斜角度或坡度）、迂直（河流道路的曲直，即高低与距离的换算）作为绘图六原则。利用该方法，他主编完成《禹贡地域图》18 篇，这是我国目前有文献可考的最早的历史地图集。在西方制图技术传到中国前，几乎都是依据此制图法。

明万历十年（1582 年），西方传教士利玛窦来到中国，将西方的投影法和近代地图学传到中国。



二、现代科学定位和导航技术的发展及演变

随着社会的发展，人们对定位及导航的需求日益增加，对定位的精度和导航的准确度要求越来越高。人类利用声波、无线电波、光波等等，发展出不同的定位与导航技术。

声波定位——声呐

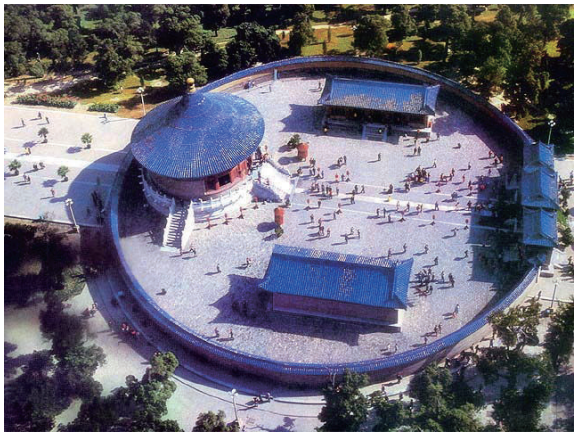
我们都有常识，当有人大声叫喊时，我们能够很快判断出声音的大致方位，这就是利用声波定位。

声波通过介质（空气或固体、液体）传播并能被人或动物所感知。

频率在 20 ~ 20 000 赫兹之间的声音是可以被人耳听到的。频率超过 20 000 赫兹的声波称为超声波，频率低于 20 赫兹的声波则称为次声波。超声波和次声波我们是听不到的，但是有的动物可以听得到。例如，蝙蝠能够用耳朵接受超声波，狗、大象、鲸、水母等则能听到次声波。

声音在传播介质中是以一定的速度传播的，例如，空气（0℃）中 331 米 / 秒，海水（25℃）中 1531 米 / 秒，铁（棒）中 5200 米 / 秒等等。声音在传递过程中遇到障碍物就会反弹，发生回声现象。

天坛的回音壁就是回声效应的最好例子。回音壁是皇穹宇的围墙，墙高 3.72 米，厚 0.9 米，直径 61.5 米，周长 193.2 米。墙壁是磨砖对缝砌成的，墙头覆着蓝色琉璃瓦。围墙的弧度十分规则，墙面极其光滑整齐。只要两个人分别站在东、西配殿后，贴墙而立，一个人靠墙向北说话，声波就会沿着墙壁连续反射前进，传到一二百米远的另一端，可以

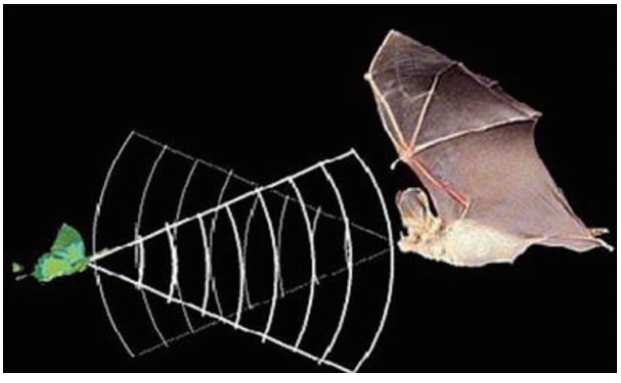


天坛回音壁

使对方听得清清楚楚，所以被称为“回音壁”。

许多动物都是利用回声原理定位寻找它们的猎物。例如蝙蝠、海豹、海狮以及一些鱼类。蝙蝠在飞行的时候，喉内能够发生超声波，超声波通过口腔发射出来。当超声波遇到昆虫或障碍物而反射回来时，蝙蝠能够用耳朵接受超声波，就可以判断物体的距离和速度。

人们通常把蝙蝠的这种探测目标的方式叫作“回声定位”。人们借鉴这种定位方式，发展出声呐技术。



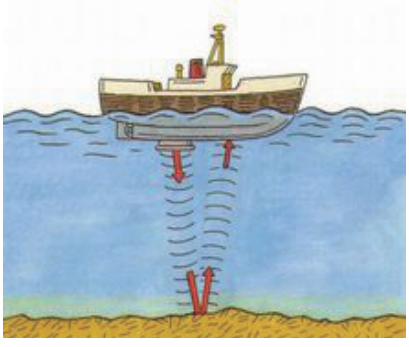
蝙蝠回声定位示意图

声呐是英文“Sound Navigation And Ranging”的缩写“SONAR”的音译，其中文全称为“声音导航与测距”。它是一种利用声波在水下的传播特性，完成水下探测和通讯任务的电子设备，分为主动式和被动式两种类型。所谓主动式是指探测系统主动发射超声波，来接收其回声。所谓被动式是被动地接收探测目标发出的超声波。

声呐技术是 1906 年由英国海军的刘易斯·尼克森发明的。他发明

的第一部声呐仪是一种被动式的聆听装置，主要用来侦测冰山。到第一次世界大战时开始被应用到战场上，用来侦测潜藏在水底的潜水艇。

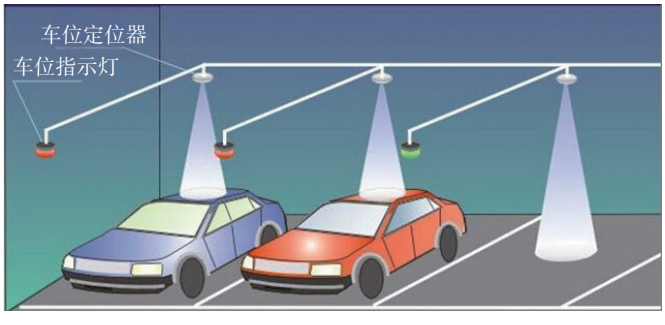
声呐是各国海军进行水下监视使用的主要技术，用于对水下目标进行探测、分类、定位和跟踪；进行水下通信和导航，保障舰艇、反潜飞机和反潜直升机的战术机动和水中武器的使用。此外，声呐技术还广泛用于鱼雷制导、水雷引信，以及鱼群探测、海洋石油勘探、船舶导航、水下作业、水文测量和海底地质地貌的勘测等。一百余年来，声呐技术在水下探测和定位中长盛不衰的原因是超声波在水下独特的传播特性。



声呐水下探测原理图

超声波的波长短、绕射现象小、方向性好，在水下传播时穿透能力强，损耗小，易于获得较集中的声能，可用于测距（定位）、遥感等。

现代超声波定位技术，不仅用于水下的探测，在地面的定位中也有应用，包括室内定位和场地定位。由于超声波在空气中的衰减较大，在空气中的传播距离一般只有几十米，只适用于较小的范围，可用于无人车间等场所中的移动物体定位，如汽车驾驶考场的超声波车位定位等。现代超声波自动定位仪定位精度在5厘米之内，响应速度为0.1秒，定位范围为场地内半径30米的区间。



超声波车位定位示意图

神奇的雷达在战争中大显神威——无线电定位

1897 年的一个夏天，俄国科学家、发明家阿·斯·波波夫在一次无线电通信试验中意外发现，当一艘轮船通过两艘军舰之间时，通信会突然中断，等船驶过后，两舰之间的通信又恢复了正常。他敏锐地意识到，这只船在经过两舰之间时挡住了无线电波。由此推测，如果将船只换作海上探测目标，利用电磁波的这一特性就可以探测到物体。可惜的是，他没有将此想法付诸实践。



俄国科学家、发明家阿·斯·波波夫

1935 年，英国著名的物理学家罗伯特·沃特森·瓦特发明了世界上第一台雷达。当时，希特勒纳粹已经上台了，大肆扩展军备，欧洲大陆硝烟滚滚。为了防御敌机对本土的攻击，在时任英国首相斯坦利·鲍德温的授意下，英国空军部指派一直致力于“实体定位”研制的罗伯特·沃特森·瓦特研制能够探测敌机的防御武器。

1935 年 2 月 25 日，瓦特带领他的团队进行了一次雷达实用探测试验。探测装置被安放在一台载重汽车上，目标飞机从 15 千米外向载重汽车所在地点飞来。当飞机距离汽车 12 千米时，科研人员在显示器上看到了由飞机反射回来的无线电信号的回波。这是世界上第一台雷达。1938 年，在东海岸建立起对空雷达警戒网，即“海岸警戒雷达”。这个 200 千米长的雷达网，在第二次世界大战中发挥了重大作用。随后，英国海军又将雷达安装在军舰上，这些雷达在海战中也发挥了重要作用。

1940年7月，法兰西战役结束，法国、荷兰、比利时、卢森堡、丹麦、挪威等国全都被德国占领，整个西欧只剩下英国还在抵抗。英国人民在丘吉尔首相的领导下，傲然不屈抵抗德国法西斯的侵略。希特勒几次劝诱无效后恼羞成怒，下令制订入侵英国的计划。

德军企图首先夺取制空权，以摧毁英国的防御工事，消灭英国空军。于是德国空军元帅戈林集结了德国空军主力3个航空队2669架飞机，战斗机和轰炸机各占一半，而英国只有700架战斗机和500架轰炸机，德国占有2∶1的优势。

大不列颠空战英德双方飞机损失比0.527∶1，飞行员损失比0.069∶1，以英国空军的完胜结束，粉碎了德国征服英国的阴谋。英军以少胜多，以弱胜强，创造了战争史上的奇迹。

英军虽然飞机数量少，但性能优秀，而且与雷达、高炮和拦阻气球组成了完整的防空体系，又是本土作战，几乎没有航程限制，大大抵消了数量上的劣势。尤其是英军建立了完善的雷达预警系统，可以有效发现来袭敌机的数量和方向等基本情况，避免了战斗机不必要的空中巡逻



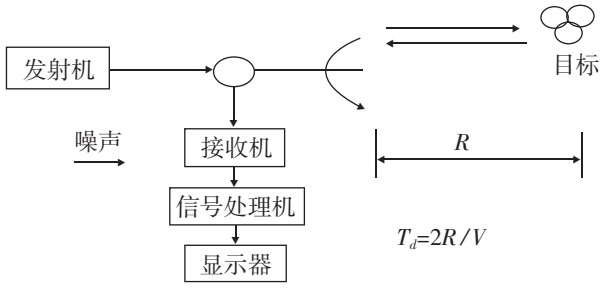
英伦空战场景

警戒，使战斗机起飞就是迎战，节约了大量人力、物力。英国是最早将雷达投入实战的国家。

我国的首部雷达是在 1945 年春天，抗日战争胜利前夕，由天才物理学家束星北领导研制成功的。

雷达的发展史

雷达的工作原理其实跟声呐相似，简单来说，就是利用无线电波定位。一般雷达系统包括五个基本组成部分：发射机、发射天线、接收机、接收天线和显示器，以及诸多辅助设备如电源设备、数据录取设备、抗干扰设备等。



雷达工作原理示意图

雷达通过雷达天线定向发射电磁波，遇到目标，电磁波发生反射，再由雷达天线、接收器接受反射波，送至接收机进行处理，从而获得目标的位置信息。实际上这是一种主动式定位。

如果目标与接收机距离为 L，通过测量得到发射电磁波脉冲信号和目标反射的回波脉冲信号之间的时间差为 t，而电磁波的传播速度为光速 c，则：

$$L=ct/2$$

换言之，测得时间差 t，就可以知道目标距离我们有多远。实际上，接收机还可以得到反射波的方位、仰角信息。根据仰角和距离就能计算

出目标高度。

所谓多普勒雷达就是利用电磁波的多普勒效应的定位器。电磁波与声波一样，也是一种波。人们发现所有的波都具有多普勒效应，电磁波也不例外。当多普勒雷达发射一固定频率的脉冲波对空扫描时，如遇到活动目标，回波的频率与发射波的频率会出现频率差，称为多普勒频率。根据多普勒频率的大小，可测出目标对雷达的径向相对运动速度；根据发射脉冲和接收脉冲的时间差，可以测出目标的距离。

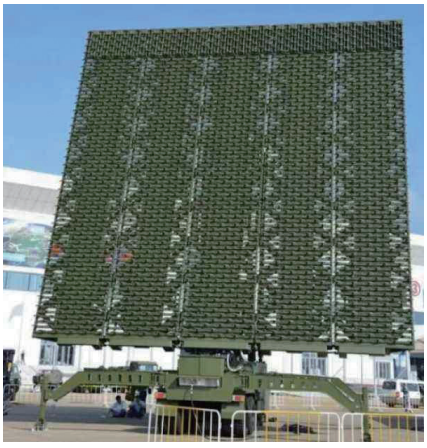


多普勒雷达

脉冲多普勒雷达于 20 世纪 60 年代研制成功并投入使用。20 世纪 70 年代以来，随着大规模集成电路和数字处理技术的发展，脉冲多普勒雷达广泛应用于机载预警、导航、导弹制导、卫星跟踪、战场侦察、靶场测量、武器火控和气象探测等方面，成为重要的军事装备。装有脉冲多普勒雷达的预警飞机，已成为对付低空轰炸机和巡航导弹的有效军事装备。如美国战机装备的 APG–68 雷达，代表了机载脉冲多普勒火控雷达的先进水平。这种雷达可对空中、地面和海上目标边搜索边跟踪，抗干扰性能好，飞机低空飞行时，还可引导飞机跟踪地形起伏，以避免与地面相撞。

20 世纪 60 年代，开始出现了阵列天线。几十个甚至几百个半波振子按照一定的规律排列，这种雷达称为相控阵雷达。

雷达为什么要庞大的天线呢？其原因是雷达必须接收反射回的电磁波信号，但电磁波在空气中传播有损耗，传播得越远，衰减越厉害。雷



军用相控阵预警雷达

达所探测的目标物通常在几百千米以外，等它到达接收机时，往往信号过于微弱。因此需要庞大的天线，此外，还必须放大接收的信号达几百万倍以上。

随着科技的进步，雷达的种类越来越多，如监视雷达、搜索雷达、火控雷达、制导雷达、气象雷达、导航雷达等，应用也越来越广泛。

利用神奇的激光定位——激光雷达

激光是一种特殊频率的电磁波。1960 年 5 月 15 日，美国加利福尼亚州休斯实验室的科学家梅曼宣布获得了波长为 0.6943 微米的激光，这是人类有史以来获得的第一束激光，梅曼因而也成为世界上第一个将激光引入实用领域的科学家。1960 年 7 月 7 日，西奥多·梅曼宣布世界上第一台激光器诞生。

由于优异的特性，激光得到了广泛的应用。它具有什么令人感兴趣的特性呢?

一是定向性。激光朝一个方向射出，光束的发散度极小，大约只有 0.001 弧度，接近平行。1962 年，人类第一次使用激光照射月球，地球到月球的距离约 38 万千米，但激光在月球表面的光斑不到 2 千米。

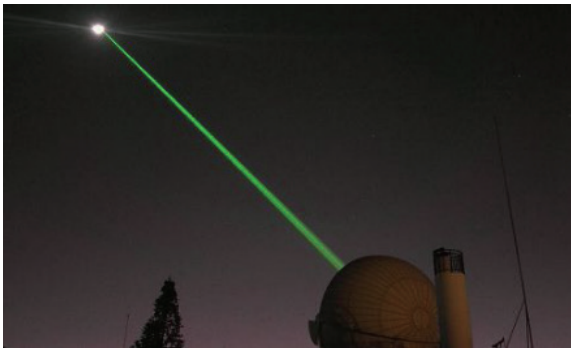
二是亮度极高。现代红宝石激光器的激光亮度，能超过太阳亮度的几百亿倍。因为激光的亮度极高，所以能够照亮远距离的物体。

三是颜色极纯。用术语来说，就是单色性极好。光的颜色由光的波长（或频率）决定。一定的波长对应一定的颜色。太阳辐射出的可见光的波长约在 0.76 微米至 0.4 微米之间，对应的颜色从红色到紫色。太阳

光是复色光，而激光则是非常纯的单色光。一般来说，激光的波长是相同的，即使有所分散，也是非常小的。

四是能量极大。激光的单个光子的能量并不算很大，但是它的能量密度很大（单位体积的光子数很多），短时间里能聚集起大量的能量。

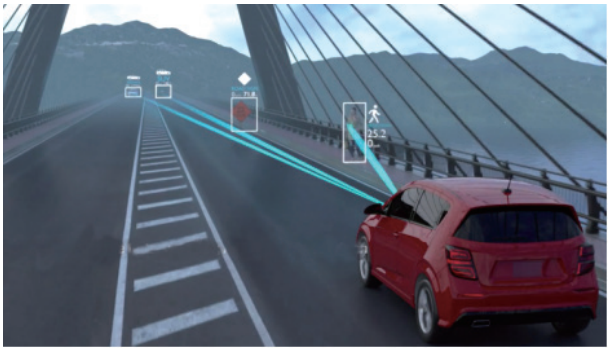
激光的最早应用之一就是定位和测量距离。1969 年，激光用于遥感勘测，激光被射向阿波罗 11 号放在月球表面的反射器，激光测得的地月距离误差在几米之内。



利用激光测量月地距离

激光雷达最基本的工作原理与无线电雷达没有区别，即由雷达发射系统发送一个信号，经目标反射后被接收系统收集，通过测量反射光的运行时间而确定目标的距离。至于目标的径向速度，可以由反射光的多普勒频移来确定，也可以测量两个或多个距离，并计算其变化率而求得速度。

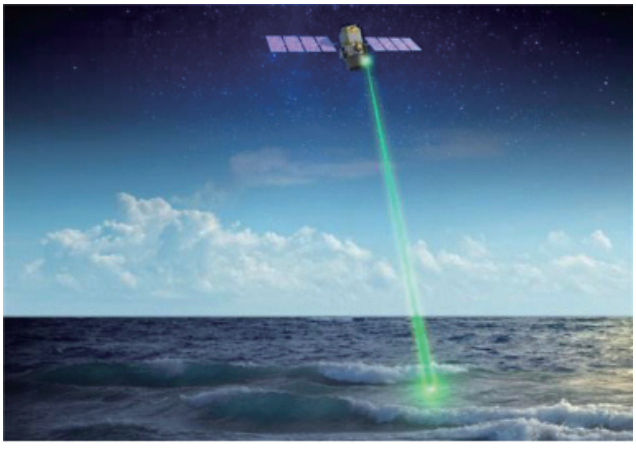
激光雷达能精确测量目标位置（距离和角度）、运动状态（速度、振动和姿态）和形状，探测、识别、分辨和跟踪目标。经过多年努力，科学家们已研制出火控激光雷达、侦测激光雷达、导弹制导激光雷达、靶场



在汽车上使用激光雷达定位

测量激光雷达、导航激光雷达等。

我们知道，传统的水中目标探测装置是声呐。为什么不利用激光雷达探测水下目标？原因是一般频段的电磁波和激光在水中传导时，衰减极快，传递不远。后来人们发现，蓝绿激光在海水中传输时，衰减很小。这就是说，电磁波在蓝绿频段区间有一个小小的窗口，这个频段的激光可以在海水中“透明地”传递。20 世纪 90 年代，科学家发明了海洋激光雷达。这种雷达是利用蓝绿激光器发射和接收设备，通过发射大功率窄脉冲激光，探测海面下目标并进行分类，既简便，精度又高。



海洋激光雷达工作示意图

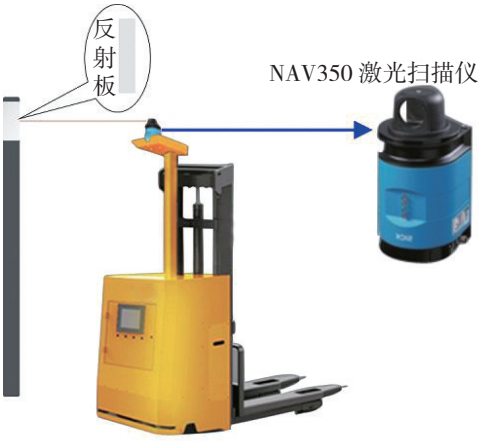
实际上，激光定位的应用已经深入到我们的日常生活中。包括机场登录引导、扫地机器人等。

以扫地机器人为例，它的顶端设置有一个可旋转的激光发射头和配套接收器，通过发射激光扫描自身到边界每个点的距离，每秒能够对周围环境进行五次扫描，从而生成房间内



扫地机器人工作示意图

部三维全景数字地图，还能根据屋内家具位置的变化实时进行更新。在清扫过程中，自动将周围物品的坐标数据储存在内存芯片中。



AGV 小车工作示意图

又如物流使用的 AGV（Automated Guided Vehicle，简称 AGV））小车，即自动导航小车。其原理是在行驶路径上安装精确反射板，AGV 会连续计算小车当前的位置，根据新位置关联反射板，去修正自身位置，以此来修正下一步动作。

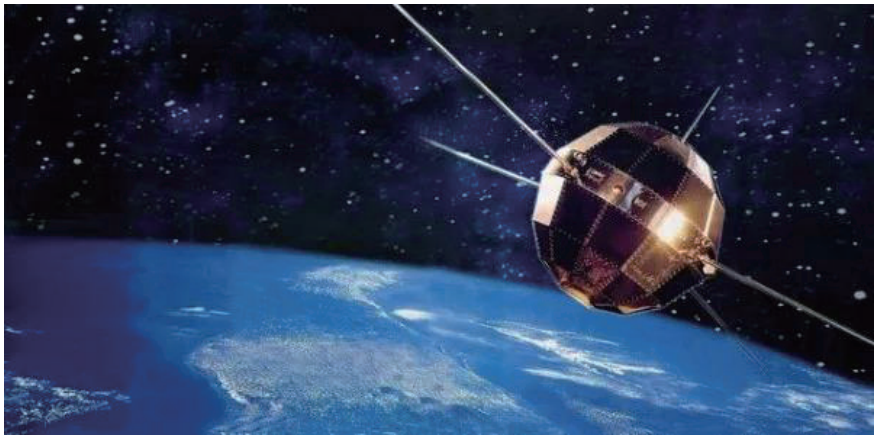
欲穷千里目，更上一层楼——卫星定位

唐朝诗人王之涣在《登鹳雀楼》中写道：“欲穷千里目，更上一层楼。”意思是想要远望千里的风光景物，就要登上更高的一层高楼。成语“登高望远”表明了同样意思。古代的烽火台便是古时用于点燃烟火传递重要消息的高台，遇有敌情发生，则白天施烟，夜间点火，台台相连，传递消息。唐代杜佑在《通典·拒守法》中，对当时的烽火台做了更为详细的记载：“烽台，于高山四顾险绝处置之，无山亦于孤迥平地置……台高五丈，下阔二丈，上阔一丈。”

实际上，现在普通雷达为了扩大定位搜索的范围，往往也建设高台，我们可以设想，能不能将雷达放在“天上”去呢？

于是，雷达装上了翅膀。首先，搭飞机上天，登高以望远；然后，更搭上了卫星，环绕地球，以便更清楚、更有效率地对探测目标定位。

1941 年，苏联最早在飞机上装备预警雷达。1943 年，美国麻省理



“东方红一号”卫星

工学院研制出机载雷达平面位置指示器，可将运动中的飞机拍摄下来。20 世纪 50 年代中期，美国装备了超距预警雷达系统，可以探寻超音速飞机。1959 年，美国通用电器公司研制出弹道导弹预警雷达系统，可发现、跟踪 5000 千米外 1000 千米高的导弹，预警时间为 20 分钟。1964 年，美国装置了第一个空间轨道监视雷达，用于监视人造地球卫星或空间飞行器。空间轨道监视雷达可以监测定位的区域非常广大，对于战争中的预警，非常重要。

1978 年，美国国家航空航天局（简称 NASA）喷气推进实验室发射了世界上第 1 颗载有合成孔径雷达的海洋卫星 Seasat-A。



飞机上装备预警雷达