

聚焦水星：“信使”号的太空之旅

李良

2004年8月3日，美国宇航局成功发射了“信使”号水星探测器，开始了炎热的水星之旅。按照预定计划，“信使”将于2011年3月抵达预定的环绕水星的轨道，它将围绕水星进行为期一年的科学探测。“信使”携带的多种科学仪器，将对水星的表面、内部、大气、磁场以及附近的物理环境进行综合考察。科学家们期待着信使号谱写空间科学时代行星物理学的新篇章。

为何要再次探测水星

科学家们一直在探讨太阳系的起源和演化，为此，在最近的几十年中，先后实施了“水手”号系列行星空间探测器、“先驱者”系列、“旅行者”系列、“阿波罗”登月、“乔托”号、“维加”号彗星探测器、“海盗”号、“探路者”号、“机遇”号和“勇气”号等火星探测器，还有“太阳峰年”卫星、“尤利西斯号太阳极区探测器”、太阳物理观测卫星(SOHO)、“伽利略”号木星探测器、“舒梅克”小行星探测器、“卡西尼·惠更斯”土星探测器，等等。无疑，科学家对于距离太阳最近的水星也同样很感兴趣，特别它是怎样演变成目前状态的。

美国宇航局早在1973年11月3日向水星发射“水手”10号探测器，自那时以来，对水星的探测沉寂了30年，但科学家们对水星的地面光学和射电观测研究并没有停止。当年“水手”10号不是环绕水星探测的，只是3次近距离掠过水星，它曾经在1974年和1975年3次飞越水星，仅探测了大约45%的水星表面，发回了5000多张照片。但以现在的标准衡量，这些照片的质量就深入研究水星已远远不够。由于水星本身具有“金属质感”，令科学家们格外着迷。随着电子计算机技术和航天器隔热技术的发展，美国宇航局终于启动“信使”号水星探测计划。



图1 载有“信使”号水星探测飞船的“德尔塔2”型火箭在美国佛罗里达州卡纳维拉尔角空军基地升上太空

“信使”号的原文 MESSENGER 是由“水星表面”(Mercury Surface)、“太空环境”(Space Environment)、“地理化学”(Geochemistry)以及“全面遥测”(Ranging)几个英文单词的缩写合成的，突出了此项太空探索目标的范围广泛；而 Mercury 的原意正是古罗马神话故事中为诸神传递消息的信使。美国宇航局2004年7月14日发布的一项声明中指出，了解水星对理解类地行星及其演化是十分重要的。除了想了解水星表面的成分和水星上是否存在“冰”，科学家还希望“信使”号的科学研究能帮助解答水星上的地质演变和水星内核结构等问题。

归纳起来，“信使”号的科学目标主要有以下几项：(1)水星的密度为什么那样高，(2)水星具有何种地质形成过程，(3)水星内核具有怎样的构成和形态，(4)水星的磁场特征是什么，(5)水星的两极有没有冰冻水，(6)水星表面有哪些不稳定物质对其外层大气的形成起了重要作用。

虽说此次“信使”号的水星之旅无法与“勇气”号和“机遇”号火星探测器相媲美，也不能与最近已飞进土星轨道的“卡西尼-惠更斯”号比肩，但是，它毕竟是人类派遣的第一艘进入水星轨道并围绕水星进行探测的航天器，也是30多年来距离水星最近的探测器。

太阳烘烤下的水星

水星是古代人所知道的五大行星(金星、木星、水星、火星和土星)之一，在西方这些行星曾被称做“游星”或天空中的“流浪者”。中国古代称水星为“辰星”。水星的英文名字 Mercury 源于 Mercurius，是罗马神话中的诸神的信使，因为他的行动特别迅速。而水星绕太阳公转速度也很快，即它绕太阳公转一周只需要88个地球日。这主要归因于水星距离

太阳很近，水星到太阳的平均距离为 5800 万千米，大约是地球到太阳平均距离的 $1/3$ 。水星围绕太阳公转的速度在每秒 42.7 ~ 52.6 千米之间，平均为每秒 47.9 千米。它的公转轨道是个形状很扁的椭圆，偏心率达 0.21，近日点和远日点的距离相差 2400 万千米。

水星是九大行星中距离太阳最近的行星。若论其大小它只能排在第八，因为它仅仅比太阳系边缘的老九——冥王星大。水星的平均直径为 4880 千米，而冥王星的直径只有 2280 千米。从地球上观察水星，一般只能在日落后或日出前一小段时间观测，在水星接近地平线的时候，由于地球大气的干扰，即使使用最好的望远镜，其可见度也是很差的。因为在这样低的地平线上，水星反射太阳的光线要通过的地球大气厚度是水星在天顶时的 10 倍。

看上去，水星仿佛总在太阳两边摆动，它与太阳的角距离最大不超过 28 度。因此，水星几乎经常被“淹没”在黄昏或黎明的太阳光辉里。平时人们很难看到它，只是在它与太阳的角距离最大（28 度）时（称为水星大距）才容易见到。相传，著名天文学家哥白尼在意大利求学时始终未看到水星，他回到波兰的托伦城后又因为那里地理纬度较高，水星在地平线上逗留的时间很短暂，所以直到它临终在病榻上仍叹息未能观测到水星而抱恨终生。

水星自转周期的发现

观测表明，水星围绕太阳公转轨道的近日点位置每转过一圈会略有改变，好像一个摇摇晃晃的陀螺，这就是著名的水星近日点“进动”现象，这一事实成为检验爱因斯坦广义相对论的重要依据。虽说水星围绕太阳运转很快，但它的自转却非常缓慢。长期以来，天文学家均认为水星像月球一样是同步自转的，即它的自转周期和公转周期相等，这样，水星就总是以半个球面朝向太阳，而另半边的身子则始终背向太阳，因此没有昼夜交替现象。这个错误的认识一直持续到 20 世纪 60 年代。

1962 年，美国天文学家用阿雷西博天文台射电望远镜，向水星发射了雷达波进行探测，发现它的日照面和背阳面发出的总射电流量大体一致，这意味着两个地区的平均表面温度差别不大。这个观测结果很快使人们对水星同步自转的观念产生了怀疑。人们想到，因为假如水星上没有昼夜交替的现象，其背阳面永远接受不到太阳的直接辐射，永远处在寒

冷之中，因此其表面的温度也就不可能与炽热的日照面的温度相近。当时不少天文学家仍然不肯放弃同步自转这个传统观念，为了解释射电观测的结果，他们推演说由于水星上具有大气层，日照面的热量通过大气传递给背阳面，因而两面的温度相差不多。

1965 年，美国射电天文学家根据多普勒效应，用雷达波测量水星两个边缘反射波间的频率差，终于得出了水星的自转周期为 59 个地球日。阿雷西博天文台射电望远镜是世界上最大的射电望远镜，它的碟形天线口径达 305 米。科学家们进一步发现，原来水星的自转周期刚好等于公转周期的 $2/3$ ，根据这个比例关系反推，水星的自转周期应准确地等于 58.646 个地球日。这就是说，在水星围绕自转轴自转 3 周的时间里正好绕太阳公转两周。因此，有人风趣地说，水星上的一天（一昼夜）等于两年。这显示了水星具有自转、公转偶合共振现象。水星自转周期的推算结果后来由进一步的射电观测以及十几年后的“水手”10 号水星探测器拍摄的照片所证实。

“水手”10 号探水星

水星是目前科学家们了解较少的行星之一，“信使”号探测器不是第一个水星探测器。早在 1973 年 11 月 3 日，美国宇航局发射了“水手”10 号空间探测器，这是人类派往水星的第一个探测器。其主要任务是探测水星，顺便考察一下金星。经过 3 个多月的飞行，它于 1974 年 2 月 5 日飞越金星，离金星最近时有 5000 千米。在对金星考察的同时，飞船借助于金星的引力“支援”改变了运动的速度和方向，进入一条周期为 176 天的椭圆轨道，它的近日点与水星的远日点相合。这样，利用水星的自转周期与公转周期为 2:3 的关系，探测器就可周期性地与水星相遇，在两次相遇之间，水星正好自转 3 圈，所以在每次相遇时，探测器的空间指向和水星的表面光照度都完全相同，对水星拍摄非常有利。

“水手”10 号终于在 3 月 29 日到达水星上空，“水手”10 号在离水星表面 705 千米处通过，随后又在当年的 9 月 21 日和 1975 年 3 月 6 日两次通过水星。1975 年 3 月 16 日第三次相遇，此时能源耗尽。水手 10 号探测器与水星的最近距离曾达到 327 千米。3 次探测共发回 5000 多张照片，分辨率为 1 ~ 0.5 千米，比地面观测高 750 ~ 1500 倍。照片的覆盖面约为水星表面的 57%，据此绘制了水星表面图。

水星的表面与月球的表面非常相似,都是由岩石组成,并且经受过猛烈的陨石撞击,布满了环形山。水星的直径大约 4800 千米(月球则略小于它 3500 千米)。但水星在很多方面都是独一无二的,它是最靠近太阳的大行星,其围绕太阳的运行轨道半径仅为地球轨道半径的 $1/3$ 。

水手 10 号的探测表明,水星没有大气,没有水,是一个高温干燥的世界,赤道正午的温度高达 429°C ,而在漫漫长夜,表面温度降至 -173°C 。水星表面酷似月球,平原上布满上千个大大小小的环形山,那是早期陨石雨袭击造成的,环形山周围有辐射条纹。其中一次最大的碰撞,形成一个直径达 1350 千米的盆地,由于那里是温度最高的地方,故取名为“卡路里盆地”,即酷热盆地的意思。盆地底部有许多山脉和裂缝。最长的裂缝达 185 千米,宽度几百米到几千米不等,最深的深度达几百米,裂缝切断山脉,形成断崖峭壁。水星表面一丁点儿水都没有,而且没有找到表面曾经被水侵蚀过的证据。

水星表面密密麻麻地布满了大大小小的环形山,还有凹凸不平的盆地和坑穴等。一些坑穴显示出陨星不止一次地撞击过同一地点。水星表面与月面的差别是,直径在 20~50 千米的环形山不多,而月面上的许多环形山都超过了 100 千米。在分析水星表面的照片时,细心的研究者注意到,水星表面上有一些巨大的褶皱,据推测那是早期水星内核变冷和收缩时形成的。水星上有一条长达 100 多千米、宽约 7 千米的大峡谷,为了纪念美国阿雷西博射电天文台测出水星自转周期一事,科学家将其命名为“阿雷西博峡谷”。

水星质量比地球小,它的地心引力只有地球地心引力的 $3/8$,所以其表面上的物体,只要有 4.2 千米/秒的速度就可以逃逸。“水手”10 号飞船探测到水星有一个全球性的磁场,其强度约为地磁场的 $1/100$ 。水星磁场的发现说明,其内部很可能是一个高温液态的金属核。根据水星的质量和密度数值,科学家推算其应有一个既重又大的铁镍内核,核的直径约占水星直径的 $2/3$ 。

1990 年水星正好又一次转到了其北极地区朝向地球观测者的位置,美国科学家抓紧良机,利用设在美国新墨西哥州荒漠中的甚大阵射电望远镜,对水星作了为期两个星期的观测研究,得到了水星北极地区的一些图像。经过一年多的分析论证,他们于

1992 年宣布,水星极地的雷达照片显示这些大环形山内部的反光度极高,因此科学家推测那里的物质可能是冰,这些冰的来源可能是早期太阳系的冰冻团物质。在水星两极至少保存着 30 个大小不同的冰冻湖泊,由于太阳光永远照不到较深的陨坑内,所以其恒定温度约在零下 212°C 以下。但相反的意见则认为,仅依据雷达照片上的“发亮”点来推测水星两极地区有冰存在是不准确的,不可盲目轻信。

对于水星,尚有一大堆待解之谜:水星的内部结构如何?它的核心与我们的地核是否一样,是半液体状的还是固体状的?它有什么样的地质史?有没有经历过火山活动?水星的磁场结构怎么样,它从哪里来?水星的两极“发亮”物质如果不是水冰,又是什么呢?另外,组成水星的物质为何这么“密实”?这也是科学家长思而不得其解的一个问题。目前对其约有 3 种理论,一种认为,水星在从原始太阳星云中形成时,因偏爱于吸引密度较大的粒子,故而密度较高;另一种认为,早期的太阳特别的“热”,它把原始水星的外部岩石层都挥发掉了,留下了富含金属的核心;还有一种认为,水星在形成初期,遭受多次巨大的碰撞,把它的外层和上地幔层撞入了太空。科学家期盼在今后的水星探测能揭开这个谜底。

“信使”的构造及科学仪器

“信使”号探测器造价 4.27 亿美元,配备了高清晰度的成像设备,虽然说此次水星之旅无法与火星探测器相媲美,也不能与已经飞近土星的“卡西尼”号比肩,但是,它是人类派遣的第一艘进入水星轨道并围绕水星运行的探测器,也是 30 多年来距离水星最近的探测器。“信使”主要由推进系统、电源分系统、姿态控制分系统、热控制分系统、电子设备及天线和科学有效载荷组成。

“信使”上装备了两种模式的液体化学推进系统,一种是装有肼和四氧化氮的双组元主推进器,它用于大的变轨机动,如进入环水星轨道时使用;另一种是装有肼的 16 个小型单组元推进器,它用于在小的变轨机动或轨道保持时使用。发射时,“信使”携带的推进剂质量达 618 千克,约为其总质量(1130 千克)的 55%。

“信使”号的电源分系统主要是太阳能电池翼和镍氢电池,电池存储太阳能电池阵产生的能量,然后提供给其他分系统。“信使”号的姿态控制主要由 4 个反作用动量轮来完成,必要时还可以使用小功率推进

器来帮助完成姿态控制任务。为了确定轨道和姿态，“信使”采用了几台星跟踪器及一个由4台陀螺仪和4个加速度计组成的惯性测量单元完成，并用6台数字太阳传感器作为备份。“信使”探测器设计的关键在于必须适应水星上的高温环境。即在水星的高温环境中，保证其电子设备和仪器正常工作。

“信使”号的“大脑”是有冗余的综合电子舱(IEMs)，每个舱中装有两台处理器，其中一台是25MHz的主处理器，另一台是10MHz的容错处理器。“信使”的两副天线用于下行通信，向地球发送科学数据及“信使”的状态信息；其上的中增益和低增益天线既可用于上行通信也可用于下行通信，通过上行通信向“信使”号发送控制指令。

“信使”所携带的主要的科学仪器名称及功能如下：

水星双重成像系统(MDIS) 该仪器由一台广角成像仪和一台窄角成像仪组成，用于绘制地形图和搜集地形信息。其枢轴式工作台将有助于成像仪指向科学家选择的任意方向。

γ射线和中子分光计(GRNS) 该仪器将探测由水星表面放射性元素及被宇宙射线激活的水星表面元素发出的γ射线和中子，得到的数据拟用来确定不同元素的相对丰度，以及确定没有被太阳光直接照射的水星极地是否存在冰。

X射线分光计(XRS) 太阳发出的γ射线和高能X射线撞击到水星表面，能引起表面元素发出低能X射线。XRS将探测这些低能X射线，以便测出水星外壳中各种元素的丰度。

磁强计(MAG) 它将测量水星的磁场，并考察水星外壳被磁化的岩石范围。

水星激光高度计(MLA) 该仪器的工作原理是：向水星表面发射激光，激光被水星表面反射后，用1个传感器接收。通过计算激光从发射到返回的时间，可以精确测定“信使”与水星表面的距离，而依据距离的变化量可以精确绘制出水星表面的地形图。

水星大气和表面成分分光计(MASCs) 它的感光范围从红外线到紫外线，将测量大气丰度，并探测水星表面矿物质。

高能粒子和等离子体分光计(EPPS) 它可测量水星磁层中带电粒子(电子和各种离子)的成分、分布及能量。

独特的防护“盾牌”

由于水星离太阳很近，自然会受到太阳的强烈烘烤，因此“信使”号在探测水星过程中将面临高温的考验。为了确保科学探测器室内保持正常温度，科学家设计了一种手工制成的陶瓷纤维遮阳罩。在“信使”向阳面的这个隔热的罩子约2.7米长、2.4米宽、6毫米厚，大多数仪器位于背阳一面，就像一个手持盾牌的古罗马角斗士。陶瓷纤维遮阳罩的设计者、机械技师尼尔·贝克泰尔说，“如果该探测器不是在水星背对太阳的一面停留，那么它将很快被烤干。”“即使陶瓷纤维罩子背对太阳的时候，它的温度依然可以达到几乎烘烤食物的程度。”令人惊叹的是，为了给“信使”量身定做这面隔热护盾，他曾经向自己的母亲求教缝纫技巧，用特殊工具把陶瓷隔热片切割成小块，再用包有聚四氟乙烯绝缘材料的玻璃丝把一块块隔热片缝合成隔热“盾牌”。

除了独具特色的隔热盾牌，“信使”号还有许多引人注目的特点。“信使”的两翼就像两面镜子，人们甚至可以对着它们梳妆打扮。两翼由数千个小反光“镜子”组成，其中2/3的小镜子用于反射水星附近的强烈阳光，剩下的“镜子”用于将阳光转化成电能。“信使”内部有许多和电子仪器相连的排放热量的管子，一直通到飞行器外表。排热管一般情况下都会打开，向外排放电子仪器工作中释放的热量。当“信使”飞到水星和太阳之间的位置时，这些排热管将关闭，防止太阳释放的热量侵入飞行器内部。“信使”号探测计划首席热能工程师杰克·埃尔科莱风趣地说：“它基本上就是个热水瓶。”

奇特的“信使”之旅

根据预先设计的飞行轨道，“信使”号探测器预计要6年的飞行才能进入预定轨道。“信使”在飞越地球、金星以及进入环水星的轨道的一系列过程中，它将利用行星的引力来改变其环太阳的轨道，以节省推进剂的消耗。因为，当所携带的推进剂能满足其进入预定的环水星轨道所需的动力时，“信使”才能从围绕太阳的轨道进入环绕水星的轨道。

“信使”号将在2005年7月飞越地球，2006年10月和2007年6月两次飞越金星。在对金星进行考察后于2008年1月从水星附近飞过，而后又将在2008年10月第二次飞越水星，最后于2011年进入

环绕水星的轨道，对水星进行为期一年的科学考察。尽管水星距离地球仅有 8045 万千米，但“信使”号却要旅行大约 80 多亿千米才能抵达水星。也许读者会提问，为什么不让“信使”号直接飞入环绕水星运行的轨道呢？这主要是因为水星是距离太阳最近的行星，从航天技术角度上讲，一下子直接飞往水星无法实行。为了保证探测器不被太阳引力拽离预定轨道，采取了“借力”飞行的方法，即借助于地球、金星和水星的引力调整“信使”号的航速，最终让它顺利安全滑入水星轨道。据有关媒体透露，“信使”号的复杂航行路径是由美国国家航天局喷气推进实验室的、来自中国台湾的科学家陈婉妍女士设计的，时间是在 20 世纪 80 年代。就在 2002 年，陈婉妍还设计了一艘名叫“星尘”号的彗星探测器。“星尘”号太空船于 2002 年 11 月 2 日发射升空，按计划“星尘”号将于 2006 年把采集的彗星样本带回地球，这也有助于解开太阳系起源之谜。

在飞越金星过程中，“信使”所携带的仪器，将对金星外大气层进行可见光和近红外成像，以便验证以前的观测数据；通过对磁场和带电粒子的监测，有助于科学家考察太阳风的加速离子特征；利用紫外-可见光谱测量使科学家能观察到金星外大气层成分的变化情况；搜寻金星日影区的闪电及金星发出的 X 射线。“信使”将 3 次从水星表面飞过，每次飞过水星 2 个月之后，它将进行变轨机动，调整其轨道，使其最终能够在 2011 年 3 月进入环水星轨道。这时候，“信使”号将对水星全球进行拍照，其中大部分是“水手”10 号探测器以前没有拍摄到的地方，而且分辨率会更高。同时，它还将对其表面成分、大气成分和水星磁层进行测量，这将是两次全面的水星科学考察，但这仅仅是“信使”号科学任务的开始。这些考察对以后持续一年的环绕水星轨道的科学考察有着极其重要的意义。

“信使”的环水星轨道是个大椭圆轨道，它距水星表面最近距离为 200 千米，而最远距离达 15193 千米。轨道面相对水星赤道的倾角为 80° ，轨道最低点位于水星北纬 60° 的上空。为了把“信使”送入环水星初始轨道的风险降到最低，“信使”将利用其推进器把速度降低到每秒 1.6 千米。这个过程会消耗所携带推进剂的 70%。当“信使”接近水星时，必须使主推进器的推力方向精确指向其速度方向。它到达初始轨道后，太阳引力及其光压等力使其

轨道缓慢变化。虽然，这些力只对它的 12 小时轨道周期影响不大，但是将会增大它轨道的近水星点高度和轨道倾角，不利于某些科学任务的完成。因此，为使其轨道的近水星点高度保持在 500 千米以下，在每个水星年(88 天)中，“信使”必须进行两次轨道维持。

在环水星轨道飞行期间，“信使”每天用 8 小时的时间传输数据，平均每天的下行数据传输速率为 15Mbit/s，即每秒 15 兆比特。但是，由于在此期间，水星与地球的距离变化很大，因此“信使”的数据传输速率变化也非常大，随着水星位置的变化，其数据要花费 4~12 分钟的时间传回地球。它环绕水星轨道飞行一个地球年的时间，在第 1 个水星昼夜期间，“信使”号通过不同的仪器对水星进行全球绘图；而在第 2 个水星昼夜期间，则有选择地进行科学考察。由此，科学家们将得到大量的关于水星研究的宝贵资料，包括水星的三维成像图、全球表面化学特征及磁场几何结构等。

总而言之，“信使”号需要将近 7 年的时间才能进入水星轨道，这次壮观的行程约 80 亿千米。专家认为，对于这么漫长的时空距离，必须把探测器轨道控制得非常好，让它能够按照科学家的需要进行探测，这里还有一个问题，就是必须精确地测控。所以实际上要探测水星有两大难题，一个是测控要好，一个是温控要好，这两个控制要做得好才能实现探测目的，这正是跟别的行星探测不一样之处。

在“信使”号的整个科学考察任务完成几年后，它最终将失去控制坠落在水星上。

(北京西外大街 138 号北京天文馆《天文爱好者》编辑部 100044)

封面照片说明

中科院高能所研究人员正在研制的硬 X 射线调制望远镜 HXMT，是目前世界上具有高灵敏度和较好空间分辨本领的空间硬 X 射线望远镜。该探测系统由 18 个单体组成，每个单体包括一个板条式准直器和一个探测面积为 280 平方厘米的 NaI/CsI 复合晶体探测器。每个探测单体的视场为，相邻两个探测单体的视场长边方向相差，总探测面积约 5000 平方厘米。其主要观测目标是：硬 X 射线巡天、活动星系核、X 射线双星、超新星遗迹、软 γ 射线重复暴、星系团、恒星的耀斑爆发、宇宙 γ 射线暴。(李博文)