



上海市空间智能控制技术重点实验室  
Shanghai Key Laboratory of Aerospace Intelligent Control Technology

●侯建文 阳光 冯建军 贺亮 等编著  
刘付成 主审

# 深空探测

## ——金星探测

Deepspace Exploration  
—— Venus Exploration



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

• 侯建文 阳光 冯建军 贺亮 等编著  
刘付成 主审

# 深空探测

## ——金星探测

Deepspace Exploration  
—— Venus Exploration

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书首先对金星进行了概要介绍,以金星探测的科学目标为角度介绍了金星环境,对各国进行金星探测活动进行了详细地讲述,主要包括整体结构、温控系统、推进系统、电源系统、GNC系统、有效载荷以及故障分析。然后介绍了未来金星探测规划,主要包括金星环绕探测任务、金星大气漂浮探测任务以及金星表面和巡视探测任务。最后介绍了金星探测的关键技术构想。

本书可以作为航天爱好者的参考书,也可以作为航天器总体及有关专业的科技人员和高校师生的参考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

深空探测:金星探测 / 侯建文等编著. —北京:  
国防工业出版社, 2015. 12  
ISBN 978 - 7 - 118 - 09519 - 7

I. ①深… II. ①侯… III. ①金星探测器 IV.  
① V476.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 092419 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 16 1/4 字数 330 千字

2015 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717



# 前言

## PREFACE

“我们从何而来？”人类一直对浩瀚无垠的神秘宇宙充满了无限的向往。当今世界，深空探测的发展水平已经成为一个民族创新能力、一个国家综合国力的重要标志之一。1957年苏联发射了人类第1颗人造卫星，1960年3月美国发射了人类第1个深空探测器——“先驱者”5号。进入21世纪以来，美国、俄罗斯、欧洲航天局（欧空局）、日本以及印度相继制定了宏大的深空探测的长远规划和实施计划，一些深空探测项目已经成功实施，深空探测已经成为世界航天活动的主要发展方向之一。

金星是地球的邻近行星，因为其质量和大小等性质与地球十分类似，因此又称它为地球的“姊妹星”。中国古代称金星为“太白”或“太白金星”，也称“启明”或“长庚”（傍晚出现时称“长庚”，清晨出现时称“启明”）。西方则将金星视为爱的象征，命名为爱神“维纳斯”。

虽然金星在质量和体积上与地球很接近，运行轨道与地球轨道距离最近，但是金星却具有很多不同于地球的特征。金星的自转方向与地球相反，大气层充满了浓密的二氧化碳，温室效应很强，表面温度高达600K，因此，人类对神秘的金星充满了兴趣。

科学家曾经推想金星有类似于地球的生机环境和海洋，但是1956年的雷达微波探测表明，金星表面是酷热世界。1961年，人类开始用雷达探测金星的自转。航天时代的来临，揭开了金星的神秘面纱，书写了人类探测金星的新篇章。截至2013年年底，人类共发射了43颗金星探测器，其中美国8颗，苏联33颗，欧盟1颗，日本1颗。

全书由侯建文负责制定编著大纲、写作方案并统稿。

第1章由侯建文、阳光、贺亮编写。金星概述,介绍了金星的物理、气候和地质地貌特征,金星探测的科学目标和工程目标以及对金星探测的过去和未来进行了概要介绍。

第2章~第5章由冯建军、贺亮、曹涛、满超、周杰编写。详细介绍了金星探测的过去和现在。其中,第2章介绍俄罗斯(苏联)金星探测的过去和现在,第3章介绍了美国金星探测的过去和现在,第4章介绍了欧空局金星探测的过去和现在,第5章介绍了日本金星探测的过去和现在。

第6章~第8章由贺亮、冯建军、王卫华、刘宇、郭彦余编写。介绍了金星探测的未来规划。其中,第6章介绍了金星环绕探测任务,第7章介绍了金星大气漂浮探测任务,第8章介绍了金星表面和巡视探测任务。

第9章由阳光、侯建文、耿森编写。从深空探测的角度详细讨论了金星探测的关键技术构想。

最后附有世界各国金星探测活动编年表。希望本书能够为我国金星探测任务提供有力的借鉴和佐证,并且能够对中国未来的深空探测发展战略的制定、金星探测技术的发展发挥有力的支撑作用。

本书在编撰过程中得到了上海市空间智能控制技术重点实验室的大力支持,上海航天控制技术研究所所长刘付成研究员在百忙中对本书进行了审阅,在此表示感谢。

限于编者的水平,书中难免有不妥之处,恳请专家和读者批评指正。

编者

2015年9月

# 目录

## Contents

<b>第1章</b>	<b>概述</b>	<b>1</b>
1.1	金星探测入门	1
1.2	金星探测的科学目标	3
1.2.1	基本参数	3
1.2.2	金星大气参数	4
1.2.3	金星的内部结构和磁场与磁层	8
1.2.4	金星的地形和地质	10
1.3	金星探测的工程目标	17
1.4	金星探测的过去概述	19
1.5	金星探测的未来概述	20
<b>第2章</b>	<b>俄罗斯(苏联)金星探测的过去和现在</b>	<b>24</b>
2.1	苏联“金星”(Venera)系列探测器	24
2.1.1	“金星”1/2 任务	24
2.1.2	“金星”3/4/5/6 任务	27
2.1.3	“金星”7/8 任务	30
2.1.4	“金星”9/10 任务	32
2.1.5	“金星”11/12 任务	34
2.1.6	“金星”13/14 任务	37
2.1.7	“金星”15/16 任务	39

2.1.8	“金星”系列任务主要探测结论	41
2.2	苏联“维加”(Vega)“金星—哈雷彗星”探测器	42
2.2.1	概述	42
2.2.2	整体结构	44
2.2.3	科学目标	46
2.2.4	飞行过程	46
2.2.5	有效载荷	47
2.2.6	故障分析	50

### 第3章 美国金星探测的过去和现在 52

3.1	美国“水手”(Mariner)系列任务	52
3.1.1	“水手”1号	53
3.1.2	“水手”2号	54
3.1.3	“水手”5号	55
3.1.4	“水手”10号	56
3.2	“先驱者—金星”1号、“先驱者—金星”2号	58
3.2.1	概述	58
3.2.2	整体结构	60
3.2.3	飞行过程	62
3.2.4	有效载荷	64
3.2.5	姿态控制	67
3.2.6	轨道控制	68
3.2.7	故障分析	70
3.3	“麦哲伦”号探测器	72
3.3.1	总体概况	72
3.3.2	热控系统	74
3.3.3	雷达系统	77
3.3.4	雷达传感器	82
3.3.5	测绘	92
3.3.6	飞行过程	96
3.3.7	“麦哲伦”任务的实施	98
3.3.8	麦哲伦星际导航中的差分多普勒跟踪	102

3.3.9 “麦哲伦”号各飞行阶段导航	112
3.3.10 故障分析	115

## 第4章 欧空局金星探测的过去和现在 120

4.1 总体设计	121
4.1.1 结构系统	122
4.1.2 温控系统	122
4.1.3 电源系统	124
4.1.4 推进系统	124
4.1.5 姿态与轨道控制系统	124
4.1.6 通信系统	126
4.1.7 数据管理系统	128
4.1.8 有效载荷	130
4.2 飞行过程	135
4.2.1 发射和巡航阶段	136
4.2.2 金星轨道入轨	138
4.2.3 在轨操作	139
4.3 与“火星快车”的比较	141
4.3.1 设计共同点	141
4.3.2 设计不同点	142

## 第5章 日本金星探测的过去和现在 143

5.1 任务概况	145
5.1.1 探测器设计	145
5.1.2 姿态和轨道控制系统	147
5.1.3 “拂晓”号在进行的轨道和姿态约束	148
5.2 科学目标	150
5.3 “拂晓”号探测轨道设计	150
5.3.1 发射轨道和地球分离轨道	150
5.3.2 巡航段轨道设计	151
5.4 操作方案	152



5.4.1	发射与初始状态检查	152
5.4.2	巡航	153
5.4.3	金星轨道捕获	154
5.4.4	重新捕获尝试	154
5.4.5	正常金星观测	154
5.5	载荷配置	156
<b>第6章 金星环绕探测</b>		<b>158</b>
6.1	金星进入探测器	158
6.1.1	金星极地轨道器	159
6.1.2	金星椭圆轨道器	160
6.1.3	进入探测器总体	161
6.2	中国金星探测构想	164
6.2.1	科学目标与工程目标	164
6.2.2	金星探测方案设想	165
6.2.3	金星探测器的基本构型	166
<b>第7章 金星大气漂浮探测</b>		<b>168</b>
7.1	金星飞机的概念设计	168
7.2	金星飞机的科学任务	175
<b>第8章 金星表面和巡视探测</b>		<b>177</b>
8.1	旗舰任务	177
8.2	“金星-D”	181
8.2.1	“金星-D”项目——长期金星研究计划当中的第一个项目	181
8.2.2	“金星-D”项目构想和探测器外观设计	182
8.2.3	探测器构型	184
8.3	欧洲金星探索者	185
8.3.1	概述	185
8.3.2	关键技术	187
8.4	表面和大气层、金星化学探索者	189

8.5	金星实地探测器	190
8.5.1	概述	191
8.5.2	基线任务概念	192
8.5.3	巡航操作	193
8.5.4	金星着陆器	193
8.5.5	进入配置	195
8.5.6	ADEPT - VITaL 结构组成与机械机构	197
8.5.7	进入气动热分析及设计面临的困难	200
8.6	“金星移动探索者”	205
8.6.1	科学目标	205
8.6.2	任务概述	207
8.6.3	有效载荷	208
8.6.4	操作概念及任务设计	209
8.6.5	飞行器	212
8.6.6	进入和降落单元	212
8.6.7	着陆器	213
8.6.8	着陆器移动性	215
8.6.9	着陆器热系统	216
8.6.10	着陆器通信	218
8.6.11	着陆器重量功率和数据率	218
8.6.12	技术成熟度	219

## 第9章

## 金星探测关键技术构想

220

9.1	深空探测关键技术	220
9.1.1	新型轨道设计技术	220
9.1.2	新型结构与机构技术	221
9.1.3	热控技术	222
9.1.4	自主导航与控制技术	223
9.1.5	新型推进技术	223
9.1.6	新型能源技术	226
9.1.7	测控通信技术	228
9.1.8	综合电子系统技术	229

9.1.9	有效载荷技术	230
9.1.10	外星工作站技术	230
9.1.11	运载和运输系统技术	232
9.1.12	载人系统技术	232
9.2	深空探测关键技术的综合分析	232
9.2.1	目前国外深空探测关键技术的发展重点	232
9.2.2	未来国外深空探测应用的各类关键技术	233

---

<b>结束语</b>		234
------------	--	-----

---

<b>附录</b>	<b>世界各国金星探测活动编年表</b>	235
-----------	----------------------	-----

---

<b>参考文献</b>		245
-------------	--	-----

---



# 1

## 概述

维纳斯(Venus)是希腊神话中的爱与美的女神之名,也是星空之中最明亮的行星——金星的名称。金星是距离太阳第二近的行星,地球是距离太阳第三近的行星,由于金星的大小和质量跟地球相当而称为地球的“姊妹行星”。金星全球具有浓密的大气和云层,过去对金星的神秘表面和自转等情况不甚了解。

航天时代以来,金星曾一度成为关注的焦点之一。截至2011年,世界各国共发射了43颗金星探测器,其中美国8颗,苏联33颗,欧盟1颗,日本1颗。22颗探测器已成功地探测了金星,其中美国6颗,苏联15颗,欧洲1颗。其中,金星飞越/环绕/大气层进入任务33次,着陆任务8次,漂浮任务2次。

虽然在20世纪90年代金星探测进入了一段平静期,但世界航天强国从来没有停止过金星探测的步伐。进入21世纪后,美、俄、欧等纷纷公布了各自的金星探测计划。NASA制定金星探测“旗舰”任务,计划在2030年前实现金星取样返回探测,俄罗斯制定了金星环绕与着陆多种方式综合探测的Venera-D计划等,再次拉开了金星探测的热潮。

### 1.1 金星探测入门

在中国古代,金星被称为“太白”,清晨现于东方时为“启明星”,夜晚现于西方时为“长庚星”。西方则视其为爱的象征,命名为爱神“维纳斯”。它是地球的邻近的内行星,质量和大小等性质和地球十分类似,因此又称为地球的“姊妹星”。

尽管这颗邻星和地球十分相似,但金星的自转方向跟地球相反,大气层充满了浓密的二氧化碳气体,温室效应很强,表面温度高达600K,因此人类对这颗神秘的星球充满了兴趣。如果能够掌握金星大气运动规律、演化历史,就能有助于解读和



分析地球大气未来的发展趋势和现在潜在的危险;分析金星表面形貌、地质结构、火山活动,就能对金星的起源及类地行星的形成过程进行比较研究,为了解太阳系的起源和演化提供有力证据。

虽然金星被称为地球的“姊妹星”,但是它的环境与地球可谓天壤之别。金星独特的环境也是吸引科学家们对它产生极大好奇不断探索的原因。金星的主要特点可以概括为以下几点:

#### (1) “度日如年”。

天文观测发现,金星的自转周期为 243d,公转周期为 223d,其自转速度比公转更慢。金星上的“一天”相当于地球上的 8 个月,金星的白昼与黑夜各长达 4 个月。有科学家推测,40 亿年前,金星的自转速度与现在的地球自转速度基本一致,而随着“年龄”的增长,金星仿佛迟缓了,而其究竟如何演变成“度日如年”的机理还有待进一步科学探索和研究。

#### (2) “西升东落”。

金星的自转很特别,是太阳系内唯一逆向自转的大行星,其自转方向与其他行星相反,是自东向西。也就是说,在金星上看,太阳是自西方升起,从东方落下。

#### (3) 大气超旋。

苏联发射的 Venera 金星探测器发现,金星大气层中最为活跃的地方是对流层和中间层内(即 0~100km),带状风在云层顶部最高速度可超过 100m/s,比地球上任何台风的速度都高,带状风在地面及中层大气顶(100km)的风速又减小为 0。2005 年欧洲航天局(European Space Agency, ESA),简称欧空局发射的“金星快车”通过遥感的手段对这一超旋现象进行了研究,却仍无法揭示其现象的根本原因。后试图将浮空器送入到对流层和中间层展开研究。

#### (4) 温室效应。

据科学家推测,早期的金星和地球拥有着相似的大气层和地表水。大约 20 亿年前,金星大气层中的氧气和水逐步逃逸,金星也没有了类似于地球上的石灰岩和海洋存储二氧化碳。因此二氧化碳成了大气层的主要成分。金星被厚厚的大气层包围,大气非常浓密,其中 96.5% 为二氧化碳,3.5% 为氮气,因此金星表面永远是浓云笼罩下的阴天,见不到明亮的太阳。

金星距离太阳比地球距离太阳近约 1/3,入射到金星大气层顶的光照比地球多 1 倍,但大气的反照率高达 0.76,而地球的反照率只有 0.39,也就是说,真正能够到达金星低层大气的光照比地球还少。浓密的二氧化碳带来的温室效应使得金星表面温度达到了 470°C,而且基本上没有昼夜和季节的差别。

#### (5) 火山密布。

1989 年 NASA 发射的“麦哲伦”号金星探测器发现,金星上存在的大型火山有 1600 多处,小火山的总数估计超过 10 万处,可谓火山密布,是太阳系中拥有火山数量最多的行星。目前为止,金星上尚未发现活火山。尽管大部分火山早已熄灭,

仍不排除金星存在活火山的可能性。

## 1.2 金星探测的科学目标

### 1.2.1 基本参数

金星绕太阳公转轨道半长轴为 0.7233AU (1.0823 亿 km), 公转周期为 224.701 (地球日), 轨道偏心率为 0.00677, 轨道面对黄道面倾角为  $3.3947^\circ$ 。由于金星公转轨道比地球小, 从地球上看去, 它离太阳的视角小于  $48^\circ$ , 仅在黎明或者黄昏才容易见到。因为金星本身不发光, 仅可以看到被太阳照亮的部分, 在它相对于地球的会合运动 (会合周期为 583.92d), 甚至肉眼就可以依稀辨别出它有类似月球的盈亏的位相和视大小 (图 1-1) 周期性变化。

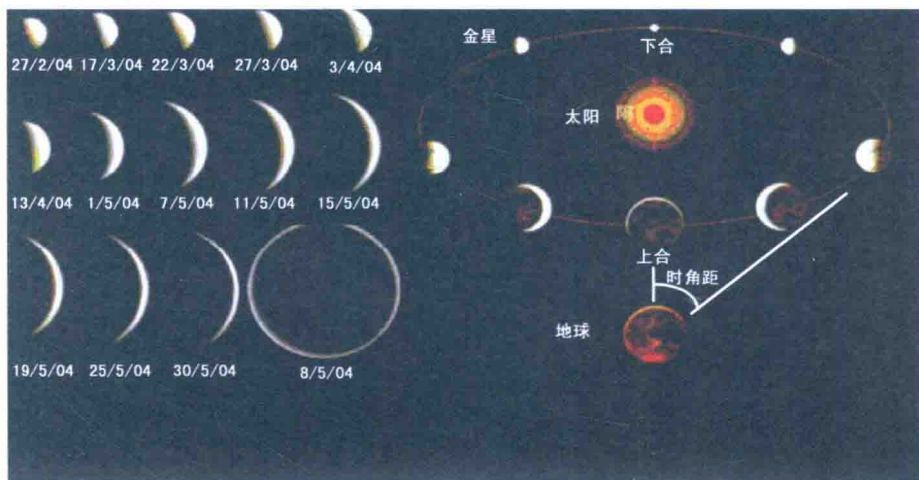


图 1-1 金星的位相(右)和视大小(左)的变化

金星的自转很特殊, 自转方向与地球的自转相反, 其赤道面与轨道的夹角为  $177.33^\circ$ , 或自转轴也近于垂直轨道面, 但北极朝南, 自转周期长达 243.018 个地球日。奇怪而有趣的是, 在金星和地球绕太阳公转的会合运动中, 金星每次接近地球时, 类似月球那样, 面对地球的几乎总是金星的同一侧。

金星的质量为  $4.869 \times 10^{24}$  kg, 是地球质量的 81.5%, 金星的半径为 6052 km, 是地球半径的 94.9%。金星的平均密度为  $5.24 \text{ g/cm}^3$ , 跟地球的密度 ( $5.52 \text{ g/cm}^3$ ) 相当。金星赤道表面重力加速度为  $8.87 \text{ m/s}^2$ , 逃逸速度为  $10.36 \text{ km/s}$ 。但是金星和地球也有很大差别, 例如金星的自转方向与地球相反, 金星有以  $\text{CO}_2$  为主的极其浓密的大气, 温室效应很强, 浓云笼罩的金星表面很热, 金星表面没有液态水海洋, 更没有生物。

虽然人们对金星这个相似的近邻更感兴趣, 但航天时代之前对它了解甚少, 揭

示金星奥秘成为航天的热门任务,有很多新发现。因为金星在大小等方面与地球相似,原来以为金星会有磁场,但是出乎意料的是,飞船上的磁力仪探测不出金星本身的磁场,金星赤道处磁场强度仅为地球磁场的1/1000以下。但由于金星的电离层与太阳风相互作用会产生磁场,对太阳风流产生阻碍,在金星周围也形成类似磁层的区域。金星电离层的上游也存在弓形激波面。在弓形激波面与电离层之间是磁鞘,堆积太阳风等离子体和磁力线。代替一般磁层的磁层顶,金星磁层存在电离层顶,在1.1倍金星半径处,它把电离层及磁鞘中的等离子体和磁力线分开。磁鞘中的行星际磁力线受电离层所阻碍而绕金星弯转,形成金星背后的感生磁尾;磁尾由反向磁力线的两瓣组成,与地球的磁尾类似。因为金星没有自身的偶极磁场,就没有持久的俘获粒子,也没有辐射带。

### 1.2.2 金星大气参数

金星有比地球浓密得多的大气,表面压强达93bar,主要成分是 $\text{CO}_2$ ,其次是 $\text{N}_2$ ,还有少量的 $\text{SO}_2$ 、Ne和 $\text{H}_2\text{O}$ ,它们的平均含量如图1-2所示,还有氯化氢( $\text{HCl}$ ,0.1~0.6ppm,ppm是百万分之一)、氟化氢( $\text{HF}$ ,0.001~0.005ppm)、硫酸( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )、硫化氢( $\text{H}_2\text{S}$ );金星大气的氘与氢的比率(D/H约2.5%)远高于地球的(0.016%),而金星高层大气的D/H是总平均的1.5倍,这是由于大气的水汽( $\text{H}_2\text{O}$ )被太阳紫外线离解为H和O,H容易逃逸到太空。

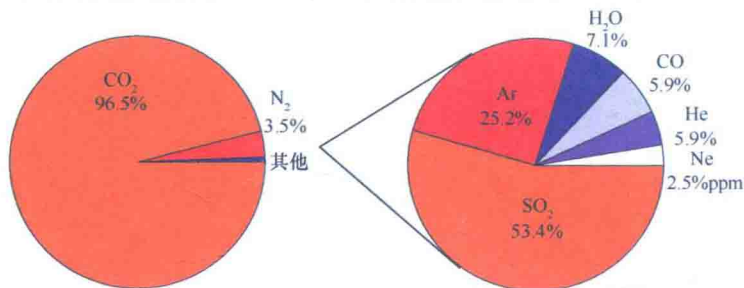


图1-2 金星的大气成分

类似于地球大气按照气温随高度变化的分层,金星大气可以自低向高划分为对流层、中间层、热层和外大气层。与地球大气对比,金星高层大气要冷些,而底层大气很热。金星表面温度是类地行星中最高的,由于热惰性和风转移热,尽管自转很慢,但表面各处温差不超过10K,可谓“全球同此凉热”(图1-3)。

金星的对流层占大气总质量的99%,略高于50km为对流层与中间层的边界——对流层顶。根据“麦哲伦”号和金星快车探测,在高度52.5~54km区的气温为293K(20℃)与310K(37℃)之间。

在高度50~65km处有浓密的云层,甚至夜间看到80km高云。这些云特征的分布往往对称于赤道,呈“Y”或“反C”字形,主要是从东向西运动,有4天和6天的云



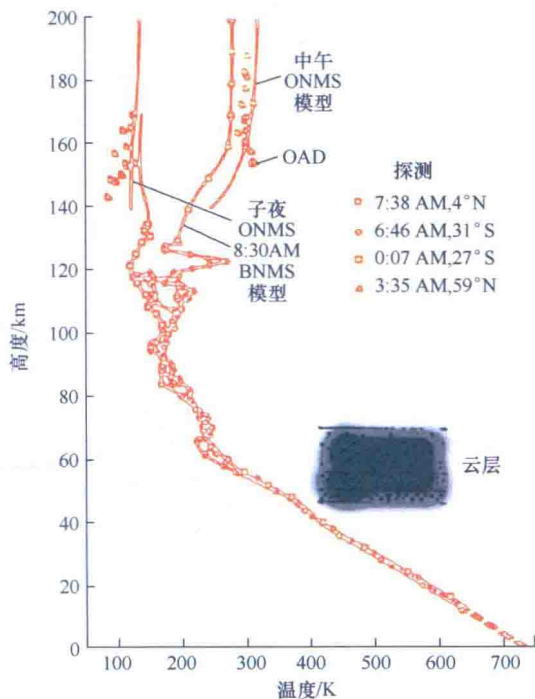


图 1-3 金星大气温度随高度的变化

纹特征团,也有从赤道向极区的(云顶)风,但风速仅  $5 \sim 10\text{m/s}$ ,这可能反映  $\text{SO}_2$  (及其他成分)含量的变化,与大气环流有关。纬度小于  $50^\circ$  的对流顶风速达  $100\text{m/s}$  (慢于自转)。往高纬的风速很快减小,到两极减为 0。强烈的云顶风造成所谓大气的“超自转”;垂直方向上风速随高度减小的变化梯度很大(每千米减小  $3\text{m/s}$ ),到表面附近平均为  $0.3 \sim 1.0\text{m/s}$ ,但因为大气密度大,仍足以搬运尘埃和小石块。

金星的云主要是硫酸( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,占 75%)和水汽(占 25%),还有少量的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{HF}$  以及其他气溶胶,多为液滴,也推测有固体结晶微粒的。金星大气存在一系列的化学反应。云层以上主要是光化学反应,云层以下主要是热化学反应,而云区是液相反应。高温的表面岩石可以放出  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{HF}$ 、 $\text{HCl}$ ,它们在大气化学中起重要作用。 $\text{H}_2\text{SO}_4$  是高层大气的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  受太阳的光化作用产生的: $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{O}$ , $\text{SO}_2 + \text{O} \rightarrow \text{SO}_3$ , $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$ 。大气化学也对于大气的动力学及云的形成起重要作用。

金星大气的中间层从高度  $65\text{km}$  延续到  $120\text{km}$ ;热层从高度约  $120\text{km}$  开始,向上最终达  $220 \sim 350\text{km}$  的大气上限(外大气层)。中间层可以分为下、上两层。下层高度为  $52 \sim 73\text{km}$ ,与上云盖复合,几乎等温( $230\text{K}$ )。上层高度为  $73 \sim 95\text{km}$ ,温度开始往外降低,到高度  $95\text{km}$  处降到  $165\text{K}$ ,这是昼侧大气最冷部分。作为中间层与热层的边界,昼侧中间层顶的高度为  $95 \sim 120\text{km}$ ,温度上升到常数值  $300 \sim$



400K;相反,热层的夜侧是金星的最冷地方,温度仅为 100K,甚至称为“低温层”(cryosphere)。

金星的大气环流相当复杂,除了上述的云带东西环流运动,较低层存在子午(南北)环流,如图 1-4 所示。这终究是对流驱动的,太阳照射的赤道带热气体上升,缓慢流向到高纬,到纬度  $60^\circ$  开始下沉,从云下面返回赤道,形成子午环流——哈德莱(Hadley)环流。在纬度  $60^\circ \sim 70^\circ$  观测到极区冷环圈(cold polar collars),如图 1-5 所示,其温度比附近纬度低  $30 \sim 40\text{K}$ ,可能是上升空气绝热冷却所致,环圈内的云位于高度  $70 \sim 72\text{km}$ 。在冷环圈与中间高度的急流( $140\text{m/s}$ )之间存在联系。这样的急流是哈德莱环流的自然结果,应存在于纬度  $55^\circ \sim 60^\circ$ 。

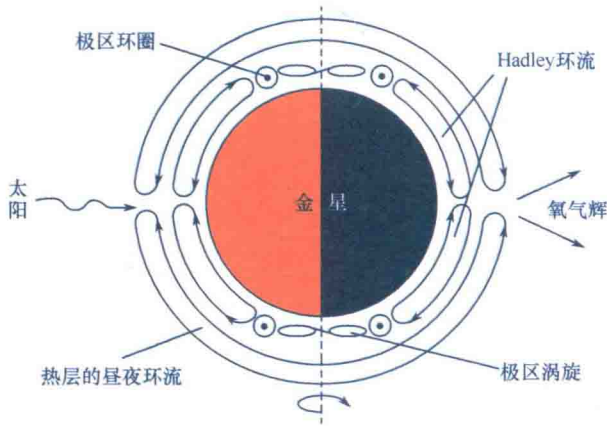


图 1-4 金星大气环流

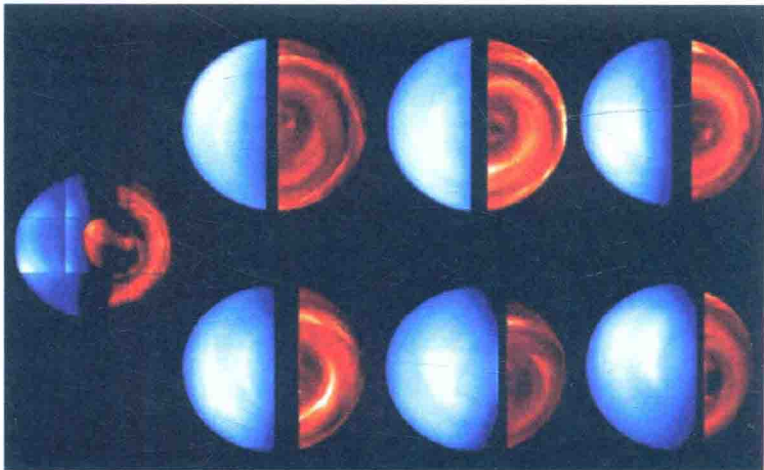


图 1-5 金星南极区的“双眼涡旋”(左小幅)及附近区冷环圈的昼(左半)夜(右半)变化