



高新科技译丛

Quo Vadis : Evolution of Modern Navigation The Rise of Quantum Techniques

现代导航的演进 ——量子技术的兴起

Quo Vadis :
Evolution of Modern
Navigation The Rise of
Quantum Techniques

[美] F.G.Major 著

吴德伟 杨春燕 徐小杰 苗强 戚君宜 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press



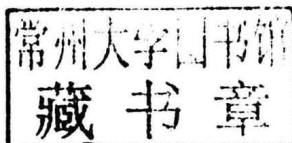
Springer

现代导航的演进 ——量子技术的兴起

Quo Vadis: Evolution of Modern Navigation
The Rise of Quantum Techniques

【美】F. G. Major 著

吴德伟 杨春燕 徐小杰 苗 强 戚君宜 译



国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字：军-2016-070 号

图书在版编目 (CIP) 数据

现代导航的演进：量子技术的兴起/ (美) F.G.梅杰 (Fouad G.Major)
著；吴德伟等译. —北京：国防工业出版社，2018.2

书名原文：Quo Vadis : Evolution of Modern Navigation The Rise of
Quantum Techniques

ISBN 978-7-118-11551-2

I. ①现… II. ①F… ②吴… III. ①量子论—应用—卫星导航
IV. ①TN967.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 025910 号

Translation from the English language edition:

Quo Vadis: Evolution of Modern Navigation The Rise Quantum Techniques by Fouad G. Major © Springer
Science+ Business Media. New York 2014

All rights reserved.

本书简体中文版由 Springer Science+ Business Media 授权国防工业出版社独家出版发行。
版权所有，侵权必究

※

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)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 385 千字

2018 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 128.00 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

译者序

导航，这一所有运行体赖以完成任务的核心技术之一，自古以来从未停止过发展的步伐。导航这项应用性科学，其涉及的学科范围之广、专业知识之浩瀚，远远超出了初学者的想象。投身导航研究的专业人员，只有上通天文、下通地理，古知航海、今知航天，从各个方向领域跟踪钻研导航技术的进步，才能不断地满足各种运行体发展的要求，精心为用户服务。

如今，人类已经实现了更快、更高、更远、更深的运行梦想。超高速飞行、太空探索、深海潜航等活动都牵引着导航技术向更高的水平发展。译者所在团队长期从事空天飞行器导航理论与技术教学科研工作，面对导航发展的迫切需求，紧密跟踪导航前沿，从类脑智能自主导航、量子信息技术实现的新型导航等方面，力图破解现代导航依然存在的实际问题。

然而，导航将何去何从？美国的 Major 教授以他的量子物理学家新视野，给出了导航专业人员期待的回答。我们曾也乘人工智能、量子信息科学兴起之东风，追随认知导航、量子导航创新的步伐，但并未意识到导航未来发展方向的涵义。而 Major 先生却以他智慧的论述，自然而然地将量子技术的兴起与现代导航的演进联系起来，毫不晦涩地指明了未来导航发展的方向，令导航专业人员大有豁然开朗、立身学科专业峰巅之感。更令人钦佩的是，此书作者身为量子物理学者、原子钟方面的顶级专家，竟能将导航的演进这样一幅波澜壮阔的漫漫长河史，如数家珍般地娓娓道来，令我们感到虽弥久钻研、苦心积淀也自愧不如。

此书的益处不仅是史诗般地对导航发展历程进行描述，更是就量子理论与技术在导航发展中的支撑作用做出了系统、深刻的阐述。令译者汗颜的是，作者提到此书可适用于具有大专水平的非专业人员阅读参考，而事实上，虽然译者本身就是导航专业人员，但是对此书一些内容的理解仍有些困难，可能存在着严重的东西方对量子物理和量子力学基础建立的差异，或许美国等西方发达国家在这方面已经与我们拉开了差距，我们亟需把这项缺课补上，而这本书恰恰可以起到助推作用。也正因为如此，译者团队精心地将此书翻译出来奉献给我国的专业和非专业人员鉴赏学习。

全书共有 18 章，在作者洋洋洒洒的笔下是对导航原理所依托的全部物理基础的

诠释，内容之丰富为导航专业人员所向往，受到导航及相关专业人员的欢迎。我们虽未能与 Major 先生谋面，但却好似相识已久，期待与大师相见的那一天。翻译工作是由吴德伟教授、杨春燕教授、徐小杰副教授、戚君宜副教授、苗强讲师合力完成的，其中，吴德伟教授翻译了第 1、2、17、18 章，杨春燕教授翻译了第 3、4、5、6 章，徐小杰副教授翻译了第 8、9、11、12 章，戚君宜副教授翻译了第 14、15、16 章，苗强讲师翻译了第 7、10、13 章。吴德伟、杨春燕教授进行了全书的统稿工作，苗强讲师负责了全书插图的编译。正如前面所提到的，因译者团队本身对量子理论和技术的认识不深，故在翻译当中难免会有词义不达的缺憾，恳请读者雅正。感谢李响、韩昆、魏天丽、方冠等研究生在此书翻译过程中的助力。

译 者

2017 年 12 月

前言

近年来,全球导航和大地测量等领域在精度和实时性方面均取得了革命性的进展。20 世纪中叶,“太空征服”的迅速开展和超稳定原子钟的发展,推动了具有高精度并且可连续全球覆盖卫星导航系统的实现。在美国, GPS 系统(全球定位系统)最初起源并服务于军事需要,但后来扩展到普通大众。毋庸置疑,高分辨率 GPS 系统主要还是为未来军事之用。其他卫星系统包括欧洲的“伽利略”定位系统、俄罗斯的“格洛纳斯”卫星导航系统和中国的“北斗”。

航天器原子钟在这些系统中起着关键性作用,它可以通过地面辅助,保持连续的亚微秒级的同步卫星网络。GPS 已经发展成为一种成熟可靠、全球通用的系统,只需相对便宜的手持接收机便可应用。与掌上无线通信设备一样, GPS 已渗入到我们的文化之中。技术同化脚步的加快不可避免地拉开了公众的技术理解水平与新技术复杂程度之间的差距。微电子技术和计算机的复杂化降低了对操作设备时对专业知识的要求,只需知道按钮的功能即可。

本书旨在通俗易懂地阐述一些基本原理,深入说明卫星导航系统的设计,同时在正文中通过介绍性章节简介导航方法的早期发展。本书不是在讲导航的历史,只是尝试用史学观点介绍导航。

本书主要面向大专水平、具备物理和工程方面基础的求知非专业人员。它以直观的方式,广泛介绍了地面和空间导航演变的相关主题,且较少使用数学公式。前两章介绍自然界中的导航和古代水手的导航,包括腓尼基人、维京人、太平洋岛上居民所用的导航。第 3、4 章介绍恒星导航、星座及星坐标等要素。第 5~7 章介绍精密机械计时器,海洋中经度的测定和精密可控石英时钟最近的发展。第 8 章总结介绍了量子概念,作为讨论微波和光与原子之间相互作用的准备知识。有关原子钟的介绍相当详细,包括氢微波激射器、铯束、铷电池,以及最新发展的铯喷泉和单离子频率标准。随后介绍陀螺罗盘的章节引出了对萨格纳克激光陀螺的讨论。从第 13 章开始介绍有关基于时间的导航:先是基于地面网络的“罗兰 C”和“奥米茄”,随后是基于卫星的系统,包括轨道理论、早期的卫星导航系统 SECOR、TRANSIT 等;最后推出了全球导航卫星系统——全球定位系统(GPS),该系统是本时代重大技术成就之一。对 GPS 分三大部分进行介绍:空间、控制和用户部分。研究人员试图通过实现超常的协调性和精度,使整个系统正常运作。GPS 尤其是差分 GPS 的应用广泛,除了常见的空中导航、海洋导航和导弹制导, GPS 还应用于大地测量、重大工程建设、矿业项目、农业、生态、紧急定位,更不用说高速公路导航。第 17 章是太空导航的相关内容。第 18 章讨论了导航的未来,届时原子干涉仪可作为陀螺罗盘使用,铯喷泉作为原子时间标准,量子计算机用来更新卫星星历。

在此,对为本书的顺利完成做出各种贡献的人们深表感谢。

目 录

第 1 章 自然界中的导航	1	3.2 伊斯兰天文学	36
1.1 动物导航	1	3.3 欧洲天文学家	37
1.2 通过太阳确定方向	2	3.4 艾萨克·牛顿	41
1.3 通过星星确定方向	3	参考文献	44
1.4 磁场定向	4	第 4 章 现代天文学的要素	45
1.5 风和气流	6	4.1 行星地球	45
1.6 电场定向	7	4.2 月球和行星	47
1.7 信鸽	7	4.3 内行星	49
1.8 帝王蝶	9	4.4 外行星	51
1.9 长距离迁徙的鸟类	11	4.5 恒星	55
1.10 太平洋鲑鱼	13	4.6 星座	59
1.11 人类的导航	13	参考文献	59
参考文献	14	第 5 章 海洋导航	60
第 2 章 早期的导航	16	5.1 地理坐标	60
2.1 沙漠游牧民族	16	5.2 天文坐标系	61
2.2 太平洋中的航海家	17	5.3 时间系统	63
2.3 星象罗盘	19	5.4 导航三角形	64
2.4 腓尼基人	21	5.5 截距法 ^[3]	65
2.5 维京人	23	5.6 导航三角形的表格解 ^[4]	66
2.6 古代的仪器	25	5.7 月球距离法	67
2.6.1 日晷和夜行仪	25	5.8 六分仪	68
2.6.2 磁罗盘	26	5.9 磁罗盘	69
2.6.3 沙漏	27	参考文献	71
2.6.4 拖板计程仪和拖曳式 计程仪	28	第 6 章 经度问题	72
2.6.5 戴维斯象限仪	28	6.1 早期时钟	72
2.6.6 星盘	29	6.2 机械钟	73
参考文献	29	6.3 弹簧平衡轮钟	75
第 3 章 天文学的历史背景	31	6.4 现代精密计时表	81
3.1 古代天文学	31	参考文献	82
		第 7 章 石英革命	83

7.1 历史背景	83	11.3 光放大	144
7.2 石英晶体	85	11.4 激光输出功率	146
7.3 X 射线晶体学	87	11.5 激光输出波谱	146
7.4 人造石英晶体	89	11.6 气体激光系统	148
7.5 石英谐振器	90	11.6.1 氦—氛激光器	148
7.6 石英谐振器作为电路 元件	92	11.6.2 氩离子激光器	150
7.7 振荡器稳定性	92	11.7 半导体激光器	151
参考文献	95	11.8 晶体固体激光器	154
第 8 章 经典原子钟	96	11.8.1 红宝石激光器	154
8.1 量子力学术语	96	11.8.2 Nd ³⁺ YAG 激光器	155
8.2 薛定谔方程	98	11.8.3 Ti ³⁺ : 蓝宝石 激光器	156
8.3 原子结构	100	11.9 激光冷却原子	157
8.4 原子光谱	101	参考文献	161
8.5 超精细相互作用	102	第 12 章 机械陀螺罗盘	162
8.6 铷标准	104	12.1 陀螺运动	162
8.7 铯标准	109	12.2 在旋转的地球上运动	166
参考文献	113	12.3 陀螺罗盘的控制	168
第 9 章 原子和分子振荡器	114	12.4 陀螺振荡的阻尼	169
9.1 氨微波激射器	114	12.5 陀螺仪的主要误差	171
9.2 铷微波激射器	116	12.5.1 稳定误差	171
9.3 氢微波激射器	117	12.5.2 陀螺仪主体运动 误差	172
9.4 相关电子	123	12.6 斯伯利·马克 37 型 陀螺罗盘	173
9.5 氢微波激射器的性能	124	12.7 环形激光陀螺仪	173
参考文献	127	12.8 光纤陀螺	176
第 10 章 离子场约束	128	12.9 MEMS 振动陀螺仪	177
10.1 引言	128	参考文献	177
10.2 潘宁阱	128	第 13 章 无线电导航	179
10.3 保罗阱	130	13.1 概述	179
10.4 囚禁离子频谱学	134	13.2 无线电测向	179
10.5 近期进展: 囚禁单个 离子	138	13.3 伏尔航空导航	181
参考文献	139	13.4 雷达	181
第 11 章 光频振荡器: 激光	141	13.5 罗兰-C	183
11.1 简介	141	13.6 罗兰-C 海图	185
11.2 光腔	141		

13.7 误差源	187	16.5.2 卫星授时	222
13.8 罗兰-C 接收机	189	16.5.3 航空和航海导航	223
13.9 民用接收机	191	16.5.4 铁路	224
13.10 奥米伽系统	192	16.5.5 农业	224
参考文献	192	16.5.6 地面交通	225
第 14 章 卫星导航: 空间部分 ..	193	16.5.7 安全和救灾	226
14.1 历史背景	193	16.5.8 休闲娱乐	226
14.2 GPS: 系统设计	196	16.5.9 环境	226
14.3 GPS 卫星轨道	197	16.5.10 空间应用	227
14.4 轨道摄动	199	参考文献	227
14.5 星载系统	200	第 17 章 太空导航	228
14.6 GPS 卫星信号 ^[3]	202	17.1 简介	228
14.7 最新发展: GPSIII	204	17.2 阿波罗计划	229
参考文献	205	17.3 阿波罗计划的设计	230
第 15 章 卫星导航: 控制部分 ..	206	17.4 遥远行星的导航: 水手号 使命	237
15.1 引言	206	参考文献	240
15.2 监测站的地理位置	207	第 18 章 导航的未来	241
15.3 卫星星历的确定	211	18.1 引言	241
15.4 GPS 时间协调	213	18.2 物质波: 德布罗意理论	241
15.5 信号传播速度	214	18.3 原子干涉: 衍射光栅	246
参考文献	215	18.4 卡皮查—狄拉克效应	246
第 16 章 卫星导航: 用户部分 ..	216	18.5 原子干涉仪	249
16.1 引言	216	18.6 原子陀螺仪	250
16.2 GPS 接收机	217	18.7 铯喷泉频率标准	252
16.3 差分 GPS	219	18.8 量子计算机	255
16.4 GPS-INS 组合	220	参考文献	257
16.5 GPS 的应用	221	后记	259
16.5.1 测绘和制图	221		

第1章 自然界中的导航

1.1 动物导航

地球上的生命形态千变万化，行为方式各异，但最让我们费解的是，许多生物在长途迁徙过程中，即使是穿越广袤无垠的海洋，也不会迷失方向。但是，在很大程度上，动物行为的遗传学基础对我们仍是一个谜。看似无止境的进化之路在许多方面已变得越发明显，动物已经进化到能够根据不同环境找到方向的程度。一些动物居住并活动于地球表面的各种地形中，而一些动物伴随着风云翱翔于大气之中，还有一些生活在茫茫大海深处。举一显著事例，帝王蝶能够穿越整个北美大陆迁徙成千上万英里，路途之长，以致至少需要两代才可完成迁徙！同样令人困惑的还有一些其他动物的迁徙行为，例如，马恩岛海鸥的飞翔速度很快，可以滑翔掠过大西洋到达繁殖地；太平洋鲑鱼则历经两年，游过成千上万英里的海洋回到其孵化的流域。

目前，我们对许多迁徙物种仍然缺乏认知，以至于无法从基本的导航功能分析它们的行为。为了适应大规模迁徙，在动物进化过程中产生了很多奇特行为，错综复杂，使我们难以分析所看到的动物行为，因为它们采用的导航方法取决于其所处的特定环境。然而，为了理解动物的迁徙和归航行为，我们必须根据观察到的、可描述的行为区分基本的导航技能。最基本的一种导航被动物行为学家^[1]称为“引航”，该术语源于船舶导航。在此，活动是在连续熟悉的“地标”的导引下完成的，同时这些“地标”之间有着一些随机或系统的搜索联系。“地标”的含义非常广泛，它不仅指可辨认的、可见的物理特征信号，还包括基于听觉和嗅觉的信号。在寻找目的地的过程中，如果超出了目前的感知范围，则需要一个概念性地图，以及身体对时空与方向的判断，来寻找下一个地标。这种多物种拥有的高级导航能力要通过罗盘定位来获得。动物拥有维持特定罗盘方位的能力，即无需预先了解任何地标，便可确定相对地球南北轴的坐标轴方位。仅有几种物种可实现的最高级导航才是“真正的导航”，这些动物无需预先了解其路径，也能沿着正确的方向前往目的地。当然，这并不能说明这些动物拥有某种超自然的感知能力或第六感帮助其实现这些条件下的导航，也许有些动物天生携带内部“地图”，它们能够利用这样的能力确定移动方向，并感知时间的推移以及其他信号。否则，又该如何解释帝王蝶的迁徙呢？

导航中十分有用的地标来源于动物的活动空间，除了较为常见的可见物体或地形特征外，还可能是气味或者声音。动物的行为与其周围所有能够识别的信号有关。在地面生活的昆虫可以利用地面上可见的地标或嗅觉作为辅助，白天迁徙的鸟类可以识别地理特征，如远处低空的海岸线。这类地标对于候鸟至关重要，它们可以利用地标校正预定飞行路线的任何偏差，如由侧风引起的偏差。引航在某些动物的归巢行为中扮演着重要

的角色，然而对于信鸽却较为次要。一些实验可有力地证明，即便信鸽几乎可以完全看到鸽房。通过操控也可使它们辨别方向的能力出现定位偏差。

1.2 通过太阳确定方向

截至目前，在动物行为中，最显著却又惊人的共有特征是，某些动物可以依据地球地轴实现自身的导向，即实现罗盘定向。对于许多拥有视觉焦点或者至少拥有足够感光能力的动物，如果能够感知一天中太阳不断变化的位置，则可以由太阳确定方位。事实上，许多动物可以精确做到利用其生物钟，准确结合太阳的运动，推断出一个恒定的方位。此生物钟会调节动物和植物的内在机理，从而产生所谓的昼夜节律（拉丁语：circa=关于，dies=天数），此术语意味着每天有规律的重复变化。自古以来，人们就已注意到这种遵循昼夜循环的周期性行为。18 世纪，以为动植物分类而闻名于世的伟大自然主义者卡尔·林奈（Carolus Linnaeus）指出，不同种类的花，其花瓣会在一天中不同的时间展开和合拢。这种现象具有一定的规律性，卡尔·林奈据此开垦了一个花园，种满了在一天中不同时间开放的花草，做成了一个花钟。最新研究揭示了光刺激与驱动昼夜节律化学过程的生化途径。首次在植物中发现的光敏感物质——隐花色素，它在蓝色到紫外光谱区起着光传感器的作用，能够进行 24 小时周期性的生化过程。在这之前，人们已发现老鼠和人类视网膜中的细胞与植物中的隐花色素有类似基因，这表明这类基因在昼夜光感应中起着重要的作用。对果蝇的详细研究也发现了可控制昼夜节律生化反应的特异性序列。

蜜蜂和某些鸟类补偿太阳运动的能力已被定量证明。20 世纪 50 年代，古斯塔夫·克莱默（Gustav Kramer）^[2]对关在鸟笼中的八哥进行的一系列经典实验表明：通过使用镜子改变鸟看到太阳的视线位置，也会相应改变它们的方向感。因为感受到方向改变，笼中之鸟就想要飞出鸟笼进行迁徙，从而表现出焦急或者“焦躁不安”（德语：Zugunruhe）就证明了这一点。另外，还可通过使八哥逐步适应交替的昼夜循环，系统地改变其生物钟^[3]，进一步定量证明具有同一能力。结果发现，鸟类的确可以感知太阳每小时 15° 运动。研究人员对许多其他脊椎动物和无脊椎动物也进行了类似的实验，包括信鸽、两栖类等，都得到了相似的结果。很多物种并不需要直接看到太阳，它们已经拥有透过云层和大气的散射间接感知太阳光偏振方向的能力。太阳光穿过大气发生散射从而使天空呈现蓝色是由一定模式偏振引起的，这种模式取决于太阳的相对位置和观察方向。人们可以使用偏振滤光器来证明这一点，例如，使用一对“偏振”太阳镜会发现，通过滤光器观察到的天空亮度，在沿着视线绕轴旋转过程中是各不相同的。这样就使得能够检测这种偏转现象的物种，无论是在阴天条件下还是太阳在地平线以下，又或在黎明和黄昏的时候，都能够找到自己的方向。第 2 章在介绍维京人在大雾中仍能确定太阳位置的能力时，会对此话题进行详细描述。真正了不起的是蜜蜂、蚂蚁和蜘蛛这些无脊椎动物，有证据表明，它们能够在光谱的紫外线区域（380~410nm）检测到偏振方向，并用于定位。例如，一项针对沙漠蚁^[4]的实验表明，这种生物能够在广阔的区域中寻找食物，且能够在没有气味线索的情况下回到自己的巢穴，在实验中，它们可以单独穿越距离其巢穴数百米的

沙滩试验区。将偏振滤光器安装在可移动框架上,使蚂蚁暴露在偏振方向可控的阳光下,尽可能使蚂蚁看不见任何可以帮助其回到巢穴的地标。结果发现,在成功地返回巢穴的过程中,蚂蚁似乎确实能够对阳光紫外线成分的偏振有所感应。另外,研究人员在蜘蛛的身上安装了二次光学传感器,感知落在它们身上的阳光偏振方向,从而也证实了在蜘蛛身上存在对紫外线的独特性感应。

太阳光偏振甚至也可能延伸至水下环境,其中水本身形成的散射可导致光发生偏振,其方向取决于太阳的位置,这种偏振的感测深度已经超出了可见阳光的深度。

1.3 通过星星确定方向

能够在夜间迁徙的某些物种明显地表明,它们一定可以通过太阳以外的其他方式实现方向定位。人们自然而然地认为星图是绝佳之选,将此类信号作为线索明显比明亮的太阳更为困难。为了通过星星确定方向,动物必须补偿因地球自转引起的星图的明显转动,这与利用太阳定位的要求一样。另外,生物钟也必须发挥作用。通过观察它们迁徙的首选方向法,研究人员再次对夜间迁徙的鸟类进行了实验,结果发现情况也是这样的。在针对靛彩鹀^[5]的一系列经典实验中,鸟被关在特制的圆笼中,天黑后放到开阔的天空。可以观察到,当天空明亮、星星清晰可见时,鸟的迁徙方向感完全正确,但是在阴天条件下,它们就明显地失去了方向感,同时失去了活力,显然,最直观的解释是鸟是根据星星来判断方向的。当然,很难凭借鸟这一种动物就得出有关生物行为的确切结论,因为难以确定和控制影响观察时的各种因素,或许,看到阴沉沉的天空,鸟儿就变得沮丧或者感知到风暴即将来临。对靛彩鹀^[6]进行了一系列更加令人信服的实验,天文馆被用来模拟夜空,结果表明,这些鸟朝着投射到天文馆圆顶的星星方向迁徙,即使天文馆北极星设置的方向远离真正的罗盘方向时,也是如此。如果关闭了天文馆星,圆顶光线变得昏暗,鸟的夜间迁徙会明显受到影响变得杂乱或者完全停止。为了测试鸟是否需要提前暴露在夜空下,以培养正确的迁徙方向感,研究人员将靛彩鹀的幼仔隔离饲养直到第一次迁徙,之后在天文馆中进行测试。最初它们只是随机寻找方向,后来它们便表现出了正常的迁徙行为。通过使两组靛彩鹀幼仔适应天极的不同方位,进一步验证了它们利用星图辨别迁移方向的论点。

曾经,人们认为只有鸟类拥有这种非凡的能力。然而,最近瑞典隆德大学的研究人员玛丽·达克(Marie Dacke)和埃里克·沃伦恩特(Eric Warrant)报告了在南非对粪甲虫进行的实验^[7]。这些粪甲虫将粪便滚成比自己大的粪球,然后沿着某条直线快速离开,以躲开粪堆周围的人群,即使在晚上也不会迷失方向。这就要求它们保持一个恒定的方位,因而,肯定在夜间有某种导航辅助。以前人们曾认为只有月亮能提供这种辅助,但后来慢慢发现,在没有月亮的晴空中,许多甲虫仍然能够实现导航!这引发了人们对星星作用的猜测。为了验证该猜测,研究人员在天文馆中不断变换天空状态操纵甲虫,对其进行观察,结果明确表明星星提供了必要的信号,特别是一些明亮的星星集中成为一条线状我们将称其为银河,能够指引它们的路线。

有人可能认为,在夜空中月亮比星星更明亮,它可以是夜行迁移动物的天然向导,但它并不适合长途迁徙。最主要的原因是月亮在运动时,在整个月运周期中,它的视位

置和外观每天都会大幅度变化，有时甚至会消失。为了利用月亮固定一个罗盘方位，生物必须跟踪日周期和月运周期这两个不相干的周期。然而有些情况却证明，在对照实验中的沙蚤以及最近实验中的粪甲虫等昆虫可用月亮确定方向。

1.4 磁场定向

在人们发现磁性的早期，磁场对动物行动可以神秘地产生好或坏的影响，被认为是遍及一切的力量。古中国的风水（发音为“fung shway”）学派至今仍然流行，在该学派中，利用磁“罗盘”使古迹建筑，甚至生活中家具等物体在空间对准，表示吉利。从早期的观察中可以发现，天然磁石（一种铁矿磁的形式）如果自由旋转，会自动找到相对于地球轴的固定方向。在 16 世纪晚期，威廉·吉尔伯特（William Gilbert）已将天然磁石的这种显著特性作为自己的研究课题，在《论磁》一书中，他提出了革命性的理念，文中提及地球本身也具有天然磁石的特性。他的地磁理论认为大地被磁场包围，仿佛一块大磁铁嵌入地球中心，与地球的自转轴基本对齐。这为制造一个用自由转动的磁针构成航海罗盘提供了理论依据。第 2 章将涉及更多关于磁罗盘历史的内容。

在生物领域，地磁场在引导动物迁徙和归航路线方面的确扮演着重要的角色。一些动物能够在无垠的海洋和沙漠，甚至在没有任何视觉提示的阴天长途跋涉，显然意味着它们使用了非视觉的备用导航系统。事实上，显而易见，这种非视觉的能力源自感知地磁场方向的能力。这种想法可以追溯到近一个世纪前。在一系列欧洲知更鸟^[8]综合实验中，给载流圆形线圈（这些线圈以同轴的形式布局在鸟笼的对侧）的鸟笼施加成对的均匀磁场，一对沿水平轴，另一对沿垂直轴。用这种方式，鸟可以感应到独立变化磁场的垂直和水平分量。再一次观察鸟在迁徙过程中的一般方向性，人们会惊讶地发现，知更鸟不仅感应到了磁场，而且作出了相当复杂的反应。它们并没有像人们使用磁罗盘一样简单地使用水平分量的方向，相反，水平分量只定义一个轴，并没有定义沿该轴的特定方向；它是由相对垂直方向的总磁场斜率决定的。这就意味着，对于一个给定的水平分量，如果反转磁场的垂直分量，鸟的迁徙方向也随之反转，如图 1.1 所示。

观察可知，在多云天气下，磁场定向对信鸽^[9]返航也很重要。稍后本章将详细讨论信鸽。磁场信息的处理方式和决定信鸽行为的方式仍有待深入研究，很难准确地设计和解释环境对实验的影响，然而观察结果表明，这些鸟类对于磁场的变化极其敏感。最近有报告称，已经在信鸽的头部和蜜蜂的腹部找到磁性物质，但还需要进一步研究这些物质是否和定向有关。

动物对周围磁场敏感的另一个重要例子是无脊椎动物，尤其是蜜蜂。当然，这些生物是人类生活中重要商品的生产者，因此地位特殊，所以人类对其颇有研究兴趣，尤其是它们的群居行为和组织。更吸引人的是“野外工作”的蜜蜂在发现蜜源，返回蜂巢后能够准确地告知其他蜜蜂蜜源的位置。奥地利生物学家

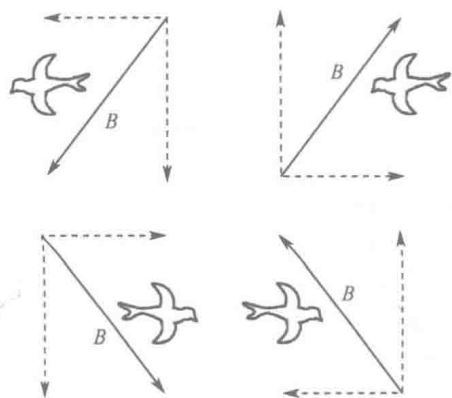


图 1.1 磁场对知更鸟的影响（B-磁场强度）

卡尔·冯·弗里希(Karl von Frisch)^[10]使用特制的带有观察窗的蜂箱,观察到返巢的蜜蜂会跳一种复杂舞蹈,它们遵循8字形的路线,身体左右摇摆。舞蹈是在蜂巢的垂直蜂窝表面上进行的。通过这种运动定量地传达食物源的方向和距离信息,这是动物之间交流最明显的例子。相对垂直面摆动的路线角等于食物源相对太阳方向的方向角,距离与摆动的频率或次数相当。报道称,在蜜蜂活动的区域施加不同强度的磁场可以影响舞蹈摆动的路线方向。

相比于别的线索,迁徙的候鸟利用地磁场在洲际间的导航会受到称为磁场风暴^[11]的短暂性干扰。地磁风暴已然成为地磁场领域的研究课题,磁暴与太阳耀斑一样会产生壮观的极光,同时干扰无线电通信。早在18世纪,磁场观测站就对地磁场一段时间的变化做了系统观测。在某些天观测记录的磁场强度相当平滑且有规则的准周期,而某些天的记录则出现了较大的不规则瞬时波动。规则的磁场变化每半小时重复一次,最大变化大约是100伽马(1伽马= 10^{-9} T)。人们认为这种平滑变化源自于电离层上的大气“潮汐”,从而造成地球的稳定磁场上形成一股导电气体流,像发电机一样诱发电流,即发电机效应。正是这些电流引起了地面磁场周期性地小幅增加。与这些变化不同的是,磁场风暴强度具有脉冲形式,磁场的水平分量突然增加,在高水平保持一个小时左右,然后下降至最小值,几天之后又恢复正常值。通过装有无电线跟踪器的信鸽实验表明,超过100伽马的磁场干扰足以明显降低鸟类准确判断归航方向的能力。

虽然我们已了解到磁场对鸟类导航能力有很大的影响,但对这种感应能力的神经和生化基础方面的理解并没有多大进展。视觉、嗅觉、听觉等其他感官系统都有可以识别的感觉器官,但是并没有在任何动物的体内发现磁场感觉器官。例如,声波必须与生物的某个特定的部位即耳朵接触才能产生交互,而磁场的独特之处就在于它能够自由地接触整个生物体,从而形成与生物的任何一点或多点的交互。而且此交互可能并不局限于某个可识别的器官,而是可能在大脑等的某些分散区域。

近年来,人们对解答动物磁感应问题的兴趣愈加高涨。最近出现了有望揭示这一奥秘的方法更加激发了人们的研究兴趣。对于生活在海洋中的生物,它们对地磁场的敏感可以通过电磁感应进行合理解释。多亏了迈克尔·法拉第(Michael Faraday)使我们知道一个电导体穿过磁场时会沿着它产生感应电动势(emf)。据推测,鲨鱼和鳐科等类似动物就拥有这样的器官,它们在地磁场中的运动会产生可感知的电压,从而引起电磁感应。这一假设的主要难点在于动物周围是一个移动的导体,即海洋,而海洋本身也会产生电场。多项公开的实验报告都澄清了射线对磁场灵敏度的影响,但是并没有达成一致意见。然而,鸟类和昆虫的磁场感知能力仍有待解释,但不难想象动物身体的某些导电部位穿过磁场时可能也会产生电动势(emf)。

另一个更有前途的假设是地磁场或其变化能够影响动物的生化过程。显然,如果确实是这样,那么它一定要历经一个极其微妙的过程。这当然不是简单的能量交换,因为影响生物反应所需要的能量要远高于地磁场可以提供的能量。然而,在原子物理学中也有例子表明,根据量子对称性的量子选择规则,弱磁场可以影响更多高能光子的吸收和发射。一种基于量子态的对称性的磁场感受器的机理引发了人们的极大兴趣。它涉及成对自由基离子的相干电子自旋态。相干态本质上是固有的量子特性,与粒子具有单一、独立的坐标和动量的经典力学不同,例如电子束的量子描述必须遵从对称性原理,实际

上，这点制约了系统的特性。在此，我们不讨论量子理论，后面介绍原子钟的章节会涉及一些量子的概念。简单来说，对于一束电子中，其中一个分子的量子态的数学表达式必须是反对称的，即任何两个电子的坐标转换和旋转方向必须产生大小相等符号相反的函数，电子自旋方向有“上”或“下”两个值被视作一个坐标。对于 α 和 β 两个电子，函数的自旋部分必须是对称的形式：

$$\alpha(\uparrow)\beta(\uparrow), [\alpha(\uparrow)\beta(\downarrow) + \alpha(\downarrow)\beta(\uparrow)], \alpha(\downarrow)\beta(\downarrow) \quad \text{对称}$$
$$[\alpha(\uparrow)\beta(\downarrow) - \alpha(\downarrow)\beta(\uparrow)] \quad \text{反对称}$$

对称自旋函数必须与空间坐标的反对称函数相关联，反对称自旋函数则恰好相反。对称自旋函数可形成三态，而反对称函数只形成单态。再回到自由基离子对反应的话题，这些反应得到的结果可能对量子宇称条件形成的弱磁场造成巨大的影响。例如，自由基离子对由光学激发分子的形成，该能量上可以将一个电子转移到充当接受器的另一个分子，从而产生正负离子对。正离子上留下未配对电子自旋，该电子自旋与接收器分子上的采集电子自旋耦合。这些电子与外部任意磁场或者核磁矩相互作用，即进行所谓的超精细相互作用。一个重要的特点是转移回电子的概率取决于量子态的时间演变，即两种离子耦合电子自旋的量子态。这一时间演变对磁场敏感。

1.5 风和气流

对于主要生活在大气中的候鸟和昆虫，成功迁徙的关键在于在难以预测的气流和多云天气条件下的导航能力。这些物种已经进化到可以认知这些条件，从而有利于缓解它们的旅途劳顿，或者避免在长途跋涉时命丧汪洋大海，这点并不为奇。它们的飞行路线和时机受到暖流、被大型鸟类猎杀时上升的气流以及季风方向的影响。由于风速和风向在时间和空间上均不稳定，因此偶尔出现的侧风也不可避免地导致飞行路线偏移预定路线。为了纠正该偏移，迁徙的鸟类必须依靠海岸线或山峰等可见标志判断偏离预定路线的程度。显然，与鸟类这样体型较大的物种相比，飞行速度相对较慢的昆虫则更易受到风的影响，它们的路线几乎完全由风向决定。已有许多专业机构考察研究影响鸟类选择开始迁徙精确时间的决定性因素。如今已有力地证明它们更青睐顺风，这不足为奇；然而，并不能确定鸟类是否能够事先感知方向，等待有利的风向开始它们的迁徙之旅，或者它们的迁徙路线最初是否源自于一年当中的盛行风向。在任何情况下，肯定都要尽量避免顶风，因为如果要穿过一片大型水域的话，顶风有可能带来灾难。如前所述，风对昆虫至关重要，因为它们飞行速度缓慢，并且无法抵抗风力，例如大家公认的害虫——沙漠蝗虫会像黑云一样聚集遮住阳光，再随风飞行的过程中吃掉所有植被，周期性地困扰北非和中东地区。由于它们给农作物带来了灾难性的破坏，蝗灾很早就成了国际研究的课题。英国剑桥大学的研究人员发现，高浓度的荷尔蒙血清素与蝗虫的转性有关，使它们从一种独立的生物个体转变成具有攻击性、群居的、破坏性群体^[12]。人们通过卫星图像跟踪蝗群并密切监测它们的活动。蝗虫结群的现象也出现在鸟类当中，这又提出了一个有趣的问题：群体中的个体如何协调自己的飞行，从而形成一个整体、复杂的群体飞行。单独依靠风向并不能解释群体如何避免被分散，并且保持连贯的规模。如此看来，群体外面的个体会自己协调朝向群体中靠拢飞行。

1.6 电场定向

对于生活在深海的动物，在水中对电位（电压）梯度的敏感可能有助于引导它们迁徙。与发电机的原理相同，导电海水运动可通过地球磁场产生电压梯度。这些电势梯度的方向同时垂直于磁场和海洋水流的方向。假设这些水流在广袤的海洋中遵循一定的规律，则对电势梯度敏感的生物也许能够对自己相对于这种水流的方向进行定位，并提供导航信号。有证据表明，鳐鱼和鲨鱼对它们周围水的电势梯度敏感，因此可以根据海洋水流方向推测它们的位置。

举一利用电场实现电流导航的显著示例，在南美和非洲河流的浑水中存在“弱”电鱼，如裸背电鳗^[13]。这些生物的短距离导航已经进化到专业级电子化阶段，它们能够在低能见度环境下躲避障碍物和其他鱼类。裸背电鳗的尾巴上有一个可以释放相对较弱的电脉冲（不同于致命的电鳗的）专门器官，称为放电器官（EOD），在其周围会产生电场，因为水具有导电性，因此水和水中的其他固体导电率变化时，电场分布也随之畸变。通过检测沿鱼身前部皮肤表面的电场分布的变化，这种鱼能够“看到”物体，以及检测同种其他鱼的存在，同时探测周围的环境。随着与源距离（差不多相当于均匀介质中理想偶极子距离的反立方）的增大，电场强度快速减弱，因此这种感知方法只在动物周围小范围内有效，不适合长距离导航。这种感知模式的原理，虽然让人联想到蝙蝠的回声定位，但无论是能量辐射的类型还是最大范围，其共同点很少。

1.7 信鸽

自古以来，人们就已熟知信鸽（原鸽）的一种独特天赋，即在一个完全陌生的环境中将其释放，它们可以飞越遥远的距离，并回到家里的鸽房。根据圣经旧约记载，当诺亚释放鸽子来验证大洪水是否结束时，他满怀希望地期待它们返回，如果它们可以的话。从中世纪到 20 世纪战争时代，人们一直使用信鸽作为快速传递信息的载体。据说在滑铁卢战役拿破仑战败后，金融家罗斯柴尔德（Rothschild）（对于国王和皇帝是银行家）赶在别人之前在伦敦通过信鸽传递这一新闻，获得了巨大的利益。同样地，在 1870—1871 年的普法战争中，朱利叶斯·路透发现了一个商机，即围困中的巴黎急需与外界沟通。于是，他开展了信鸽传信服务，最终发展成现今的路透社。当时，摄影科学迅猛发展，特别是缩微摄影技术成为了可能，使其能够通过信鸽传送成千上万条信息。第一次世界大战期间（1914—1918），交战双方大规模使用信鸽，因为当时的无线电仍处于起步阶段，并不成熟，至少在战争开始的时候，信鸽在战场中发挥了重要的作用。1918 年，美国海军部发行了《信鸽接待、养护和训练手册》。第一次世界大战中，有一只名为 Cher Ami（亲爱的朋友）的鸽子被认为是最杰出的英雄之一，它挽救了一支部队——迷失的大军，纽约第 77 师。简而言之，这支部队太过深入敌军腹部，在重重炮火包围下如果不能将信息立即送达指挥所，该军必将全军覆灭。唯一可行的手段是信鸽，这就是 Cher Ami 成名原因。不幸的是，德国人发现了它从密集的火力中起飞，胸部中弹，失去了一只眼睛，

携带传书的腿部也受了伤，但它并没有被吓住，而是继续飞向指挥所，拯救了整个部队。法国政府因它非凡的勇气授予了荣誉骑士团勋章，图 1.2 为 Cher Ami 的雕塑。

在此次事件中，这只信鸽被赋予了人性的光芒，人们认为它具有忠于职守的精神。当然，事实是当时它没有其他选择，只能飞到它的“鸽房”，即此处所说的指挥所。第二次世界大战中，另一只名为“美国大兵乔”的信鸽因其卓越的贡献也荣获殊荣，它在意大利小镇被美国空军轰炸的紧急境地下，拯救了 1000 名英国士兵的生命。当时及时的通信已然最为重要，而“美国大兵乔”做到了，为此它获得了迪金勋章，这是一个英国专门为各种做出卓越贡献的动物授予的奖项，通常会授予参加搜寻和救援任务的猎犬。



图 1.2 英雄 Cher Ami

信鸽归巢行为一直是人们热衷的研究领域，与迁徙不同，在本地就可对其进行研究，观察和控制十分方便。人们对各种环境因素在信鸽从陌生的环境归巢过程中的作用仍然存有较大争议。人们普遍认为信鸽使用地图和罗盘，即通过构造一个概念性地图，推断它所在的位置，然后根据某种定位机理引导它飞行。有充分的证据表明，鸟类是通过嗅觉、磁性和视觉等环境的刺激，感知它在地图上的位置，而方向感则依赖于太阳和地磁场。尽管成功归巢一般来说还需要许多其他能力，但由于其变化性，通常用实验结果很难解释。不过毫无疑问，地磁场在信鸽以及其他候鸟的导航中发挥着一定的作用。人们做了一系列测试鸟类在完全阴天条件下是否利用磁定向导航的实验^[14]。实验时将小块磁铁连在一组鸽子的背上，对照组背负着同样质量的非磁性铜片，然后放飞。结果发现，有太阳光时，鸽子并没有丧失正确归巢的能力（所谓的消失方向），但在浓密云层的覆盖下放飞时，与对照组相比，实验组鸽子的磁场受到小磁铁的干扰，更容易产生随机偏离。后来，人们采用一个更精细的方法^[15]进行实验，即用微型励磁线圈取代小磁铁，这样，通过反转通电电流在线圈中的方向，便可简单地反转穿过鸟头部的磁场方向。两组信鸽携带这样的线圈，在阴天条件下放飞，一组设置的磁场方向是垂直向上，另一组则是垂直向下。据观察，两者在刚被放飞的时候飞向了相反的方向。随着（全球定位系统）GPS 的出现，后面的章节中会提及相关内容，现在可以以米级精度实时跟踪迁徙和归巢动物的活动。最近，GPS 已经用于详细研究受控条件下信鸽的活动，本章将介绍利用 GPS 长距离跟踪候鸟，例如马恩岛海鸥。GPS 最近已应用于详细研究信鸽^[15]在整个行程中的活动。以前的研究更多地集中于方位消失，即鸟在飞行过程中罗盘方位消失后的活动，结果发现鸽子在放飞之前，如果有 5min 的时间预先观察周围的环境，它会更快地归巢。在归巢飞行前它会在未知的放飞点侦查大约 1000m 的范围，就好像完成对出发地的预先观察。最近在对鸽子归巢能力中利用的传感器特性和位置研究^[16]表明，磁场感知部位在鸽子的上喙区。如果对上喙区进行局部麻醉，或者放置一块磁铁，就会影响鸟类发现磁场以及对正确方向的感知能力。磁场信息的处理和鸽子行为方式的决定仍然是一个谜，很难设计一个实验来扮演环境的角色，且不好解释。然而，观察结果的确表明，这些鸟对于磁场的变化极其敏感。最近的报告称，在鸽子的头部和蜜蜂的腹部已经发现存在磁性物质，但还需进一步研究这些磁性物质是否与方向有关。