



“十二五”国家重点图书出版规划项目
航空航天精品系列

INTRODUCTION TO PULSAR NAVIGATION

脉冲星导航概论

● 徐国栋 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

014035924



“十二五”国家重点图书出版规划项目
航空航天精品系列

TN967.1
28

INTRODUCTION TO PULSAR NAVIGATION

脉冲星导航概论

徐国栋 著



北航

C1723225



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

158280210

“十二五”国家重点图书出版规划项目

航空航天精品系列



内容提要

本书系统介绍了脉冲星导航的基本理论,详细分析了脉冲星导航技术的主要问题,从脉冲星信号检测、脉冲星信号处理、脉冲星信号定时、脉冲星信号定向、脉冲星信号定位等方面对脉冲星导航技术进行了深入的论述。本书取材广泛,内容新颖,充分反映了国际上近年来在脉冲星导航领域所进行的研究工作,也反映了作者在脉冲星导航技术方面进行的创新成果。

本书可作为理工科大学信号处理、飞行器控制专业的教师和硕士、博士生教材或参考书,也适合于航天领域的科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

脉冲星导航概论/徐国栋著. —哈尔滨:哈尔滨

工业大学出版社,2014.4

“十二五”国家重点图书出版规划项目·航空航天精品系列

ISBN 978-7-5603-3912-2

I. ①脉… II. ①徐… III. ①脉冲星—卫星导航

IV. ①TN967.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 314995 号

策划编辑 赵文斌 杜 燕

责任编辑 李长波 赵文斌 杜 燕 鹿 峰

封面设计 高永利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂

开 本 787mm×960mm 1/16 印张 10.5 字数 215 千字

版 次 2014 年 4 月第 1 版 2014 年 4 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-3912-2

定 价 48.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)



前言

星空导航是一门古老而年轻的学科,它既包含了人类几千年来利用天体导航的经验与技能,也包含了近几十年来由于脉冲星的发现所带来的新原理,以及由此引发的对脉冲星导航理论及相关技术的深入研究。

从1967年发现脉冲星信号开始,脉冲星这种奇异的天体便激发了天文工作者的浓厚兴趣和深入的研究。脉冲星有规律而又微弱的信号,曾一度被认为是外星人向地球人发出的联络信号,之后被确认为是一种新型的天体,这为人类认识宇宙打开了一个新的窗口。

脉冲星是20世纪60年代天文学的四大发现之一,在不到20年的时间里,发现者接连两次获得诺贝尔物理学奖,引起了全世界的轰动。脉冲星对天体物理学的研究具有极大的意义,其突出特点为现代物理学特别是高能物理和宇宙学提供了一个天然的平台,也为人类研究宇宙的起源、演化和变迁提供了一把天然的钥匙。

随着空间技术的发展,脉冲星信号的空间探测也进入了新的阶段,人们对脉冲星的认识也更加深入。除了继续在地面探测发现射频脉冲星外,通过空间探测,又发现了可见光波段的脉冲星、X射线脉冲星以及 γ 射线脉冲星。与此同时,利用脉冲星导航的研究也取得了一定的进展。

鉴于脉冲星导航技术在空间应用特别是在深空探测方面的重要意义,本书系统而深入地介绍了国内外脉冲星导航的主要理论及新技术,使读者能够对该领域的发展现状、跟踪脉冲星导航的最新发展趋势和热门的研究方向有一个全面了解。本书可以用作硕士、博士研究生的教材或参考书,而且其内容的广度与深度也能适应相关领域科技工作者的研究与应用。为此,在选材上,作者刻意于内容的广泛性、新颖性和先进性;侧重于阐明基本思想及基本理论,并在理论研究与应用方面进行了论述,对脉冲星导航技术所涉及的相关成果进行了归纳与总结。

本书共7章,主要从脉冲星及脉冲星信号特性、脉冲星信号检测、脉冲星信号处理、脉冲星信号定时、脉冲星信号定向、脉冲星信号定位等方面对脉冲导航理论进行了深入的论述。

本书也是作者在脉冲星导航技术研究成果方面的总结性著作,各章节内容均包含了

作者在脉冲星导航方面的独家见解与研究。作者在本书中涉及的有关研究工作得到了国家 863 项目的资助。

由于脉冲星导航技术正处于概念研究阶段,其理论也处于完善与发展过程中,作者拙笔亦难明晰全貌,不妥之处在所难免。诚恳希望诸位专家、同行和读者批评指正。

徐国栋

2012 年 6 月于哈尔滨工业大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 脉冲星概述	2
1.1.1 脉冲星类型	4
1.1.2 脉冲星信号辐射的频谱特点	5
1.1.3 导航脉冲星选择	5
1.2 导航相关技术概述	6
1.2.1 罗兰导航系统	8
1.2.2 全球定位系统	9
1.3 脉冲星信号探测概述	11
1.3.1 信号探测机理	13
1.3.2 电荷放大电路	14
1.4 脉冲星导航体系结构概述	15
1.5 本章小结	16
第 2 章 脉冲星信号探测与检测	17
2.1 微条探测器	19
2.2 CCD 探测器	21
2.3 SEED 探测器	22
2.3.1 SEED 探测器参数设计	27
2.3.2 SEED 探测器信号检测能力	29
2.3.3 SEED 探测器信号检测方法	31
2.4 脉冲星信号波形参数	31
2.5 脉冲星信号处理	34
2.6 本章小结	37

第3章 脉冲星信号到达时间测量	38
3.1 世界时系统	39
3.2 系统定时	41
3.3 惯性参考系	46
3.3.1 地心参考系	47
3.3.2 太阳质心参考系	51
3.4 脉冲星信号定时测量	56
3.4.1 脉冲间隔测量单元	57
3.4.2 脉冲信号识别与时间延时检测单元	58
3.4.3 脉冲信号特征识别	58
3.5 本章小结	59
第4章 脉冲星信号处理	60
4.1 脉冲星信号的周期估计	67
4.2 脉冲星信号预处理	72
4.3 离散脉冲星信号处理	77
4.4 时间序列估计	87
4.5 本章小结	92
第5章 脉冲星信号定向	94
5.1 太阳敏感器	96
5.2 红外地球敏感器	98
5.3 星敏感器	99
5.4 无线频率信标	100
5.5 磁强计	100
5.6 惯性敏感器	100
5.7 模拟式太阳敏感器	101
5.8 脉冲星敏感器	102
5.9 本章小结	115
第6章 脉冲星导航定位	116
6.1 飞行器定位	124

6.2	脉冲星相对定位方法	128
6.3	基于脉冲星定位的飞行器轨道确定	134
6.4	基于脉冲星定位的速度确定	136
6.5	星食定位法	137
6.6	本章小结	140
第7章	脉冲星定位精度分析	141
7.1	时间基准精度分析	141
7.2	引力延时误差分析	142
7.3	空间弯曲误差分析	143
7.4	空间定位误差的多普勒分析	144
7.5	空间定位参考点选择误差分析	149
7.6	脉冲星定时分析	150
7.6.1	脉冲星时	153
7.6.2	引力修正	154
7.6.3	姿态测量与定时	155
7.7	本章小结	155
结 论		156
附 录		157
参考文献		158
名词索引		159

到的 10 大 X 射线源或 γ 射线源,同时也发现了新的可用于航天器导航的脉冲星。虽然在
这些大型的航天器上获得了非常精细的脉冲星信号源的分布图,但在一般航天器中应用
相关的探测技术依然存在一定的困难。除探测器需要较大的体积、质量及功耗外,信号检
测积累时间过长也是一个大问题,在微小型航天器上应用难度就更大。

虽然在实现上有难度,但脉冲星导航的潜在优势是显而易见的,特别是在航天应用方
面具有以下特点。

(1) 脉冲星信号稳定度高。脉冲星是宇宙中的自然天体,是高速旋转并伴随强烈辐
射的中子星,旋转周期稳定,因此辐射的脉冲信号周期稳定,被誉为自然界最稳定的时钟,
可以作为高精度的时间基准,一年变化不超过 $1\ \mu\text{s}$ 。

(2) 脉冲星定向精度高。脉冲星是距离太阳系遥远的天体,距离一般在 5 000 至
100 000 光年之间,由于距离遥远,因此脉冲星的方向在一年的时间内基本上可以

第1章 绪 论

脉冲星导航技术是近年来的热门研究课题,虽然 Bell 在 1967 年就发现了脉冲星发出的射频脉冲信号,Reichley 在 1971 年建议利用脉冲星为地基系统提供定时,Downs 在 1974 年提出了利用射频脉冲星进行导航的概念,但迄今为止脉冲星导航依然处于理论与探索阶段。由于脉冲星一般距离太阳系十分遥远,脉冲星发出的信号在到达地球空间后已经十分微弱,并且通常只有射频谱段的脉冲星信号能够到达地面,需要几十米的天线接收并且要进行长时间的信号积累才能检测到脉冲星信号,因此对于多数航天器应用均会受到实际的限制;对于可见光谱段的脉冲星信号,也存在相似的问题,并且受太阳光线等背景光的影响,探测器需要指向特定的空间进行脉冲星信号的积累,探测器尺寸仍然很大,在航天器中应用也存在相当的难度;对于 X 射线谱段或 γ 射线谱段的脉冲星信号,可以采用较小尺寸的探测器,根据测算,0.1 m² 的探测器尺寸基本上可以实现脉冲星信号的有效检测,该尺寸的探测器对于航天器应用是可以接受的。由于 X 射线或 γ 射线谱段的脉冲星信号受大气的影响,无法到达地面,因此 X 射线或 γ 射线谱段的脉冲星主要是通过航天器上的探测器发现的。

对于发射 X 射线或 γ 射线谱段信号脉冲星的研究,使人们对脉冲星导航的设想有可能变为现实,而 X 射线探测器方面的进展则为脉冲星信号的检测提供了必要的基础。在所发射的航天器中,有一些用于宇宙探测的有效载荷,对银河系进行了 X 射线成像探测并获得了大量成果,对银河系 X 射线源及 γ 射线源进一步加深了认识,确定了目前可以探测到的 10 大 X 射线源或 γ 射线源,同时也发现了新的可用于航天器导航的脉冲星。虽然在大型的航天器上获得了非常精细的脉冲星信号源的分布图,但在一般航天器中应用相关的探测技术依然存在一定的困难。除探测器需要较大的体积、质量及功耗外,信号检测积累时间过长也是一个大问题,在微小型航天器上应用难度就更大。

虽然在实现上有难度,但脉冲星导航的潜在优势是显而易见的,特别是在航天应用方面具有以下特点:

(1) 脉冲星信号稳定度高。脉冲星是宇宙中的自然天体,是高速旋转并伴随强烈辐射的中子星,旋转周期稳定,因此辐射的脉冲信号周期稳定,被誉为自然界最稳定的时钟,可以作为高精度的时间基准,一年变化不超过 1 μ s。

(2) 脉冲星定向精度高。脉冲星是距离太阳系遥远的天体,距离一般在 5 000 至 100 000 光年之间,由于距离遥远,因此脉冲星的方向在一年的时间内基本上可以认为是

不变的,地球在一年内围绕太阳运动过程中,脉冲星的方向变化在微角秒以内,这使得以脉冲星方向为参考的定向可以达到非常高的精度。

(3) 脉冲星定位精度高。将脉冲星发出的脉冲信号波前看成是直线,在以地球绕太阳圆周运动的空间尺度上看,其误差不会超过 300 m,对于围绕地球运动的航天器空间尺度,其误差在 1 mm 以内。

(4) 脉冲星导航安全性好。脉冲星信号不会出现人为故障,也不会出现人为的干扰,除非航天器自身发生故障,否则脉冲星就可以为航天器提供安全可靠的导航信息。

(5) 脉冲星导航适用空间大。无论在近地空间还是在深空领域,脉冲星均可以提供导航信息,基本没有限制,比目前的导航系统具有更大空间的适应性。

脉冲星导航的特点决定了它必将成为研究的热门课题,美国国防高级研究计划局在 2004 年提出了 X 射线脉冲星导航计划,以满足航天任务从近地空间直至星际空间飞行的持续、高精度的自主导航需求。

作为航天大国,我国在发展独立的全球定位系统的同时,也要研发可适应多种任务目标的星际导航系统。为了实现星际导航的任务目标,可行的技术途径就是利用脉冲星进行导航。在近地空间,同样可以用脉冲星进行航天器的导航,而且由于脉冲星导航可以免除人为的干扰,因此使用脉冲星导航技术的航天器可以实现真正意义上的自主导航。脉冲星导航技术是否能够在航天器上应用主要依赖于探测器技术的进展状态,一旦探测器实现了小型化,则脉冲星导航即可迅速进入实用阶段,它可与全球定位系统一起共同完成近地空间航天器的定位导航工作。对于使用脉冲星导航的航天器,不仅可以在近地空间实现自主导航控制,而且可以实现星际飞行的自主导航。即便是在全球定位系统失灵的情况下,使用脉冲星导航的航天器也不会有任何问题,完全可以实现自主导航,因此对脉冲星导航技术的研究具有重要的战略意义。

1.1 脉冲星概述

脉冲星(Pulsar)是一种高速旋转的中子星。天文学研究认为:在恒星的核燃料耗尽以后,恒星中心部分的坍缩引起超新星爆发时,向中心坍缩的质量超过 1.4 个太阳质量,而又小于 2.0 个太阳质量时,自由电子的简并压力不能抵抗强大的引力而继续坍缩,导致原子核破裂,电子和质子作用变成中子,并以中子产生的简并压力平衡引力而使坍缩停止,形成稳定的中子星。

恒星在坍缩过程中,由于角动量守恒,在体积缩小的同时,将伴随星体旋转速度的增加。当巨大的恒星坍缩成 10 km 量级的中子星时,其自转速度可能达到每秒几周、几十周,甚至上百周。

多数中子星具有非常强的磁场,高能粒子特别是高能电子,在磁场中作回旋运动时,

根据电磁动力学会沿切线方向发出一种光辐射,这与同步加速器中产生的同步辐射类似。同步辐射强度与电子能量的4次方成正比,并与回旋半径的平方成反比。在中子星的磁场两极具有更高的磁场强度,带电粒子所受的加速度更大,回旋半径更小,因此也就产生更加强烈的同步辐射,并与中子星一起转动形成射电波束。由于中子星的自转轴与磁轴一般并不重合,每当射电波束扫过地球时,将会接收到一个电磁脉冲信号,这就是脉冲星的由来,因此脉冲星也就是高速旋转的中子星。

中子星是一种连续稳定辐射电磁能量的天体,只是在磁极方向辐射的强度大,其他方向辐射的强度较小,因此在中子星旋转过程中,从地球观测到的信号呈现周期性的变化。中子星自旋的稳定性,使得脉冲信号的周期也非常稳定。

在目前已经观测到的近2000颗脉冲星中,其信号的周期一般在1.56 ms至5 s之间。脉冲星的周期特别稳定,特别准确,可以和地球上的原子钟媲美,毫秒脉冲星周期的长期稳定度可以达到 10^{-14} 量级,成为挂在天上的“标准钟”。

关于脉冲星的发现具有一段神奇的经历。1967年7月,剑桥大学新建成一台射电望远镜并用它进行天文观测,射频接收频率选择为81.5 MHz,工作波长为3.68 m。用望远镜观测并担任繁重记录处理的是休伊什教授的博士研究生——24岁的乔丝琳·贝尔小姐。在10月的一天,贝尔在观测过程中发现了一系列的奇怪的脉冲信号,这些脉冲的时间间距精确相等,周期十分稳定。贝尔小姐立刻将发现的情况报告给她的导师休伊什教授,当时休伊什教授认为这是受到了地球上某种电波的影响。但是,第二天,也是在同一时间,也是同一个天区,那个神秘的脉冲信号再次出现。这一次可以证明,这个奇怪的信号不是来自地球,它确实是来自天外。

这是不是外星人向地球发出的文明信号呢,起初人们是这样怀疑的,因为如此稳定的周期脉冲信号,恐怕只有外星人能够发送,新闻媒体对这个问题投入了极大的热情,并以“小绿人”向地球人发送联络信号进行了大肆渲染。但不久又发现了天空中另外几个这样的天区,显然“小绿人”不太可能从不同遥远的天际向地球发来信号。在接下来不到半年的时间里,人们陆续发现多个这样的脉冲信号。天文学家最后终于证明,这是一种新型的还不被人们认识的天体,并把它命名为脉冲星。1974年,这项新发现获得了诺贝尔物理奖,奖项颁给了休伊什教授,以奖励他所领导的研究小组发现了脉冲星。在脉冲星的发现中,贝尔小姐作出了重要贡献,休伊什教授应感谢贝尔小姐严谨的科学态度和极度细心的观测。

伴随着脉冲星的发现,人们越来越多地了解了脉冲星的奇特性质,并展开了大量的研究,同时也打开了一扇研究宇宙的新的窗口。下面是脉冲星发现中的里程碑事件:

发现的第一颗脉冲星,编号为PSR 1919+21,也就是贝尔小姐发现的脉冲星,位于狐狸座方向,周期为1.337 301 192 27 s;

发现的第一颗脉冲双星,编号为PSRB 1913+16,它也是发现的第一颗毫秒脉冲星;

发现的第一颗带有行星系统的脉冲星,编号为 PSRB 1257 + 12;发现的第一颗双脉冲星系统,编号为 PSRJ 0737 - 3039。脉冲星发现的每一个事件都代表了人类认识自然的一次深入,其奇特性质给人们带来的启示具有深远的影响。例如,人们对脉冲星信号周期的研究导致了脉冲双星的发现;通过对脉冲星信号到达时间的分析发现了脉冲星的行星;根据脉冲星形成机理,三名中学生发现了一颗脉冲星等。

由于脉冲星是在坍缩的超新星的残骸中发现的,它们有助于我们了解星体坍缩时发生了什么情况,还可以通过对它们的研究揭示宇宙诞生和演变的奥秘,而且随着时间的推移,脉冲星的行为也会发生多种多样的变化。

每颗脉冲星的周期并非恒定如一,脉冲星在辐射能量的过程中,将逐渐失去一部分旋转能,且转速下降。通过连续多年观测脉冲星信号的周期,可以精确测量出脉冲星转速降低了多少、在演变过程中能量损失了多少,并对脉冲星寿命周期进行预测。实际观测数据表明,每颗脉冲星都有与众不同之处。有的亮度极高;有些会发生星震,顷刻间使转速陡增;有些在双星轨道上有伴星;还有数十颗脉冲星转速极快,每秒旋转数百周以上,被称为毫秒脉冲星。以下几节将进一步对脉冲星分类、脉冲星信号特点及导航脉冲星选择等方面进行论述。

1.1.1 脉冲星类型

根据脉冲星系统的组成可以将脉冲星类型进一步细分,包括独立的旋转驱动脉冲星、热能驱动脉冲星、吸积驱动脉冲星及其他异常脉冲星等。

(1) 旋转驱动脉冲星。这类脉冲星具有很强的磁场,带电粒子被磁场束缚在磁瓶中,在带电粒子沿磁力线螺旋运动过程中,在磁极处汇聚聚焦,并产生同步辐射。由于磁轴与旋转轴不一致,因此在辐射波束扫过观测者与脉冲星连线方向时会接收到射电脉冲信号。旋转型脉冲星辐射能量是通过损失星体旋转能量交换的,因此这类脉冲星的旋转速度将逐渐下降,其脉冲信号周期也将逐渐变长,并且由于能量的消失,最终脉冲辐射也将消失,但该过程也是非常漫长的,脉冲信号周期每年变化在微秒量级。

(2) 热能驱动脉冲星。这类脉冲星是在超新星爆炸后形成,星体表面的温度开始逐渐冷却,由于各处的温度并不是按同样速度变化的,造成有的地方温度高,有的地方温度低。高温区的热能引起电子加速,与其他粒子相撞,产生强烈的电磁辐射。同样星体旋转将使辐射波束扫过观测者,产生周期的脉冲信号。

(3) 吸积驱动脉冲星。吸积驱动脉冲星主要是双星系统,在中子星的附近有一颗伴星,中子星将伴星的物质转移到中子星上来。这种物流通过中子星磁场建立的通道转移到磁极,并产生了炽热辐射区,脉冲信号是由于中子星旋转在不同视角观测产生的辐射变化。吸积驱动脉冲星还可以细分为两种。一种是脉冲星与大质量伴星(10 ~ 30 个太阳质

量)运行的双星系统,标记为 HMXB(高质量 X 射线脉冲双星),一种是脉冲星与小质量伴星(小于 1 个太阳质量)运行的双星系统,标记为 LMXB(低质量 X 射线脉冲双星)。在 HMXB 系统中,伴星产生巨大的星际风,当脉冲星穿越星际风时,将吸收星际风中的物质,并产生强烈的 X 射线辐射。在 LMXB 系统中,虽然星际风不是很强烈,但由于中子星的强大势能,它完全有能力将伴星中的物质吸收过来,形成围绕中子星的吸收盘,并且伴随物质的吸收将产生强烈的 X 射线辐射。

(4) 异常脉冲星。异常脉冲星是由于星体巨大磁场衰减导致的,这些星体通常存在 $10^9 \sim 10^{11}$ T 的磁场,相比之下,太阳仅有 5×10^{-3} T 左右的磁场。这些异常 X 射线脉冲星非常类似软 γ 射线发射源,具有大于 10^{10} T 以上的磁星、中子星均划分到该类脉冲星中。

1.1.2 脉冲星信号辐射的频谱特点

可以根据脉冲星辐射信号的频谱进行分类,脉冲星具有射频频脉冲星、可见光脉冲星、X 射线脉冲星、 γ 射线脉冲星及频谱混合型脉冲星。

(1) 射频频脉冲星。这是一类被研究较多的脉冲星,因为在地面就可以接收到脉冲星发出的射频信号,也能够通过地面巨大的天线接收到它的电磁信号,这允许早期观测者能够实现脉冲星的观测。射频频脉冲星的信号辐射频率从几十兆赫到几吉赫。

(2) 可见光脉冲星。在空间探测前,没有发现过可见光脉冲星,因为可见光脉冲星信号非常弱,大气的影响也无法排除,高空大气的剧烈变化,可能使星光看起来就是闪烁的。在空间探测后,特别是采用直径 2.4 m 的哈勃望远镜进行空间探测后,可见光脉冲星才不断地被发现。

(3) X 射线脉冲星。X 射线脉冲星辐射 $0.1 \sim 200$ keV 范围的 X 射线,有时也将 γ 射线脉冲星归入 X 射线脉冲星的范围,但两者导致辐射的机理是不同的,X 射线是电子激发的辐射,而 γ 射线是质子激发的辐射,其辐射能量更高,可以达到上千光电子伏。

(4) 频谱混合型脉冲星。有些脉冲星可以在多个谱段同时辐射信号,例如巨蟹座星云脉冲星在射频、红外、可见光及 X 谱段均有脉冲信号辐射。

1.1.3 导航脉冲星选择

已经发现的脉冲星虽然已经接近 2 000 颗,但可以用于导航的脉冲星数量并不多。主要原因有两个方面:一是脉冲星距离遥远,信号非常微弱;二是信号检测部件没有小型化,不适合空间应用。

对于射频频脉冲星信号的接收,如果没有几十米的接收天线是不可能的,即便是有可能在飞行器上使用,也必须付出很高的代价。并且在导航应用中,仅接收一颗脉冲星的信号是不够的,同时必须接收 3 颗以上脉冲星的信号,才可能算出飞行器的定位信息。大的接收天线其方向性强,波束很窄,要同时接收 3 颗以上脉冲星信号也是非常困难的。

对于可见光脉冲星信号的接收,其光学系统也是比较大的。采用类似哈勃望远镜的方案并不适合飞行器导航使用,并且也存在类似射频脉冲星信号接收的问题,其不同方向需要采用不同的光学系统。

采用X射线脉冲星或 γ 射线脉冲星进行飞行器导航是一种比较现实的选择。从目前探测器的研究进展看,有可能在X射线脉冲星导航应用方面取得成功。

在X射线脉冲星中,旋转型脉冲星、双星系统是比较适合导航的,它们具有合适的脉冲信号周期、脉冲信号类型以及合适的空间分布。由于脉冲星信号比较微弱,因此最重要是选择具有足够辐射强度的脉冲星,例如能流密度应在 $0.1 \text{ ph}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 以上(ph为photons缩写)。经过选择后,大约可有10颗左右的脉冲星用于导航。随着X射线探测器器件的改进,可能有更多的脉冲星用于导航。

1.2 导航相关技术概述

导航、制导与控制是进行空间探测的三项技术。其中,导航是相对于期望目标进行定位与定向的技术;制导是基于当前位置确定到达目标最优路径的技术;而控制是沿最优路径实现的技术。以上三项技术中,导航是后两项技术的基础。

定位与定向是导航技术的两个基本要素,在早期人类的活动中,人们注意到太阳、月亮及恒星等自然天体周期性的运动规律,并根据这些规律探索出了基本的定向与定位技能。从位于家园的局部区域开始,不断向四面八方扩展着自己的活动范围。为了适应不断扩大的活动范围,人们采用路标等进行定位,并建立了地标体系。在此基础上,出现了三角测量等大地测量技术,人们可以用数学的方法对地标进行精确测量,其定位与定向能力获得了空前的提高,可实现对新的待探索的活动区域进行精确定位与定向。通过地标体系,基本解决了陆地上的导航问题。

当人类走向海洋时,遇到了新问题。在近海,通过海岸线上的地标可以进行海上活动,而当超出视线后,在一望无际的大海上,海天一色,则可能迷失了方向。但幸好有太阳、月亮及天上的星星可以对方向进行判断。然而一旦遭遇极端天气情况,则仍然可能辨别不出方向,遭遇险境。而我国古代发明的指南针,很好地解决了这一问题。指南针利用地球磁场给出了不受气候影响,不受白天、黑夜影响以及不受地域影响的重要参考方向,在任何时候均不会发生找不到北的情况,从而为航海远行创造了必要的条件。

对比陆地与海上活动可以发现,陆地导航通过路标实现,通常可以沿着已有的路线活动,除非遇到三岔路口,一般情况下方向不是问题;但对于海上活动,方向更重要,一旦偏离方向,则可能导致意外,例如哥伦布意外发现美洲新大陆这样的事必然会发生。由于没有地标,方向和速度成为到达目标的主要影响因素,并需要引入时间因素,以便准确地对海上活动进行精确定位。

一旦确定了方向,则太阳等天体的周期运动就成为时间的主要参考物,在长期的活动中,人类掌握了利用太阳进行确定时间的技能,例如我国古代发明的日晷,可以很好地实现定时功能,并且达到相当的定时精度。日晷给出的时间是当地时间,例如12点,那是日影指向日晷表面中心线的时刻。在不同的地方,日晷指向中心线的时刻是不同的,关于这一点,使用日晷年代的人们并不清楚,否则人类可能会更早知道他生活的大地其实是个球。

在导航原理上,时间概念并不重要,正如爱因斯坦所说,对于时间的唯一理由是因为所有的事情不是同时发生的。因为定位与定向均是空间问题,在时空统一的宇宙中,定位、定向也意味着定时,反之也是如此。

时间的引入与采用的导航技术有关。在导航方法中,有些是与时间无关的方法,例如利用地标、灯塔等,它们的空间位置是已知的,并且不随时间变化,用多少时间到达目标位置不重要,重要的是利用这些导航标志到达了目标位置,实现了定位;在已知当前位置及目标位置的情况下,利用指南针或北极星等定向方法确定从当前位置到达目标位置的方向,并沿着确定的方向到达目标位置。在有些情况下,无法利用地标进行导航,例如在海上活动,其当前位置是用速度及时间测量的。例如从当前位置以每小时20 km的速度向东北方向航行5 h到达目标位置,从定位定向的角度看,目标是当前位置东北方向100 km处;如果航行速度精确,则也可以说5 h的路程到达目标位置;由于航行中间没有路标指示,只能靠方向与速度保持航行,因此时间与速度测量需要有足够的精度来保证导航的精度。

在定时、定向、测速等计量仪器出现后,特别是无线电导航技术的发展,使得导航能力获得了空前的提高,直接促进了航海、航空及探险活动的发展,导航范围也扩展到全球,并加快了全球化的进程。到20世纪60至80年代更是发展出了全球定位系统(GPS),将地标系统发展成为天标系统,人类进入了航天时代,并继续向星际空间发展,最终将走出人类的摇篮,迈向遥远的太空。

由于全球定位系统的出现,在地球空间范围内的位置坐标实现了实时测量。全球定位系统通过发送时间及广播导航数据,可以实现时间、位置、速度、姿态等信息的测量,并用GPS接收机完成导航数据的处理,提供导航服务。

当超越地球空间进入星际空间后,GPS系统将无法覆盖星际导航的范围,除构形分布不好外,其信号强度也变得越来越弱,最终不可使用,因此需要相适应的导航系统。除采用传统的星光导航技术外,脉冲星导航是实现星际导航的一种最具发展潜力的技术。在论述脉冲星导航技术之前,本节将对典型的导航系统进行介绍,从中可以了解导航系统的基本工作原理。

1.2.1 罗兰导航系统

罗兰导航系统是在发明无线电通信后出现的基于无线电基站的导航系统,无线电基站周期地发送定时信号,可为舰船或飞机提供距离及方向信息。罗兰导航系统的工作原理是采用双站测量对舰船或飞机进行导航。设导航基站 A 呼号信号为 $S_A(t)$, 导航基站 B 呼号信号为 $S_B(t)$, 需要导航的舰船位于待定位置 $P(x, y)$, P 点必位于以基站 A 为圆心, 半径为 r_a 的圆周上, 同时 P 点也必位于以基站 B 为圆心, 半径为 r_b 的圆周上, 在基站 A 与基站 B 坐标已知的情况下, P 点的位置坐标可以在 P_1 处, 也可以在 P_2 处, 如图 1.1 所示。

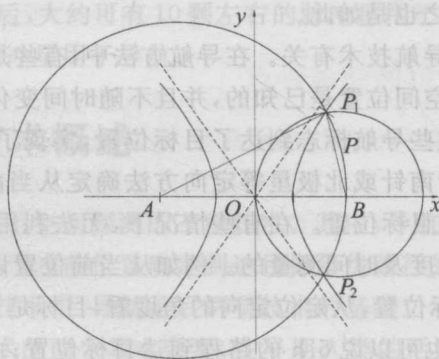


图 1.1 罗兰系统导航原理

舰船接收的无线电信号延时确定了船只到基站的距离, 如果舰船按固定时差进行航行, 则舰船 P 的坐标将在一条双曲线上运动。在图 1.1 中, 设 PA 与 PB 距离的差为 d , AB 在 x 轴上, 其基站之间的距离(基线长)为 b , y 轴定义在基站连线的中分线上, 则有

$$\frac{x^2}{d^2/4} - \frac{y^2}{(b^2 - d^2)/4} = 1$$

舰船接收到的基站信号分别为 $S_A(t - \tau_A)$ 、 $S_B(t - \tau_B)$, 其时差为

$$\tau = \tau_A - \tau_B$$

由于无线电波的传播速度为 c , 则 PA 与 PB 之间的距离差为

$$d = c\tau$$

根据接收两基站之间信号的时差测量可以确定舰船到基站 A 及基站 B 之间的距离差, 在基站之间位置已知的情况下, 可以获得舰船的相对运动轨迹。根据图 1.1 及双曲线的性质, 当舰船远离基站时, 其运动轨迹将逐渐接近渐近线

$$y = \pm \frac{\sqrt{b^2 - d^2}}{d} x = \pm x \tan \theta$$

其中, θ 为渐近线与基线(x 轴)之间的夹角, 因此罗兰导航系统同时可以提供一定的方向精度, 只要按一定的时差运动, 则可以确定运动的相对方向。通过坐标变换可以将舰船的

相对测量坐标转换到海图坐标系中,用于对舰船的导航控制。

显然,根据一对基站时差的测量仅能确定舰船位于某条双曲线上,具体的舰船坐标不是唯一的,还需要对另外一对基站提供的信号进行测量。一般通过对两对基站的测量可以给出两条双曲线,其双曲线的交点即为舰船的可能位置。

根据双曲线的性质,两条双曲线最多可能给出4组解,存在多值性。为了解决多值性问题,在罗兰系统中,采用主站、副站协同的工作机制,其中主站(例如基站A)称为主台,副站(例如基站B)称为副台。其协同工作机制是利用主台A控制副台B的工作,实现同步运行。主要工作过程为:主台A的定时器产生基准脉冲信号并触发发射主台信号,副台B接收到该信号后,再经过一段已知的延时,然后触发发射副台信号。通过主副台信号的延时同步发射,可以消除多值性的问题。

事实上,在图1.1中,如果舰船、主站及副站采用的时间基准基本同步,则可以通过测量主站到舰船、副站到舰船之间的延时,消除部分多值性问题。例如,如果主站到舰船的延时大于副站到舰船的延时,则舰船一定位于 $+x$ 轴一侧;如果小于,则位于 $-x$ 轴一侧;如果相等,则舰船位于 y 轴上。进一步,由舰船、主站及副站三点构成的三角形中,三条边是已知的,因此舰船的坐标仅可能位于 P_1 点或 P_2 点上。如果增加另外一对基站的测量,则可以确定舰船的另外一对坐标,或是 P_1 与 P_3 ,或是 P_2 与 P_3 ,两对基站测量共同包含的坐标点则为确定的舰船坐标点。

舰船的坐标确定之后,则可以获得舰船的运动方向以及舰船的运动速度等,并根据这些信息实现导航控制。考虑到地球的曲率半径,舰船并非在平面内运动,因此通过两对基站确定的舰船坐标存在一定的偏差,但只要舰船与基站之间的距离在一定范围内,则偏差不会造成太大的影响。目前,罗兰系统覆盖了全球主要的航线范围,罗兰系统基站的分布可以满足舰船(飞机)导航的基本要求,通过选择合适的基站,舰船(飞机)可以实现较高精度的定位与定向。

1.2.2 全球定位系统

全球定位系统(GPS)是美国国防部为陆、海、空三军研制的卫星导航定位系统,是美国继阿波罗登月和航天飞机之后的第三大空间工程。GPS具有全球、全天候、连续实时的精密三维导航定位能力,有着广泛的应用价值和发展潜力。GPS不仅可用于高精度的导航定位,而且可以实现高精度的时间传递,是地球上及近地空间导航定位最先进、最理想的技术。

GPS是基于卫星实现导航定位的系统,是在已知卫星每一时刻的位置和速度的基础上,以卫星为空间基准点,通过测站接收设备对多颗卫星进行测量,测定至卫星的距离或多普勒频移等观测量来确定测站的位置及速度。例如,在观测时刻 t ,测定用户接收机至3颗卫星 $S_j(j=1,2,3)$ 的距离,则可根据3颗卫星的位置 (X_j, Y_j, Z_j) ,算出用户接收机