

★黑龙江省精品图书出版工程

海上星光导航

HAISHANG XINGGUANG DAOHANG



季必达 冯惠兰 编著
陈福胜 主审

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

黑龙江省精品图书出版工程

内容简介

本书是《海上星光导航》系列丛书的第一本，主要介绍海上星光导航的基本原理、观测方法、数据处理、定位精度、应用范围等。本书可作为航海专业及相关专业的教材，也可供从事航海工作的技术人员参考。

海上星光导航

HAISHANG XINGGUANG DAOHANG

编著 季必达 冯惠兰
主审 陈福胜

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书主要阐述星光导航原理及其系统设计,内容共分五章,主要介绍星体特征、视坐标计算、星光导航原理、海上星光导航设备组成及系统设计有关的基础知识。

本书适合于天文导航科研、教学人员使用,也适合天文导航爱好者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

海上星光导航/季必达,冯惠兰编著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2014. 11

ISBN 978 - 7 - 5661 - 0938 - 5

I. ①海… II. ①季… ②冯… III. ①航海导航
②天文导航 IV. ①U675.7 ②TN966.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 267401 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 12.75
字 数 325 千字
版 次 2014 年 11 月第 1 版
印 次 2014 年 11 月第 1 次印刷
定 价 49.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前言

白天,灿烂的太阳给人们送来温暖和阳光,哺育万物生长;夜晚,明媚的月亮把洁白的月光洒向大地,无数闪烁的星体带给人们的是一线星光。正是由于太阳、月亮和星体有了这些光线——星光,人类才能较早地发现它们,研究它们,探索其运动和变化规律,使之较早地造福于人类,从而产生了天文科学。因为星体距离我们地球十分遥远,所以可以把星体射向地球的光线(入射光线)看作平行光线。比如在地球上用1 m口径的光学望远镜接收太阳(这颗离我们最近的恒星)表面上某一点射出的两束光线,如果这两束光线夹角等于零,则说明两束光线是平行光线。太阳到地球的距离约为一个天文单位(实际是1.000 000 023 6天文单位),即 1.5×10^8 km[《中国大百科全书(天文卷)》402页,1980年],这两束光线在1 m口径的光学望远镜处的夹角为

$$\gamma = 2\alpha \tan^{-1} \frac{1}{2 \times 1.5 \times 10^8 \times 10^3} = 0''.000\ 001\ 374 \approx 0''.0$$

这样就可以把太阳的入射光线看作是平行光线,而把太阳的入射光线方向看作是太阳的实际视位置方向。根据观测星体的视方向对大地真水平面的张角来确定地球上某点的地理位置和对真北的方位,这就是星光导航和星光导航的使命。远在两千多年前,我国劳动人民就知道星光导航的原理,《淮南子》曾记载“夫乘舟而惑者不知东西见斗极则悟矣”。可见,星光导航是依据对星体星光的观测来确定位置和航向的一门科学。现在,由于电子技术的飞速发展,依靠光电传感器观测的星光导航已经成为高、精、尖导航的一种专门学科。

从原理上分析,星光导航的研究内容大致可以分成三个部分,即星体、星光导航设备和水平基准平台,见图0-1。

星光导航虽然也属于天文学研究范畴,但两者的研究方向和内容是有区别的。天文学在于探索、发现新的天体,研究观测已发现天体的物理特性、运动变化规律、时间坐标及其给人们生活带来的影响等,这是最基础的研究。而星光导航则是在天文学基础上的一种应用研究。星光导航研究的主要内容包括:星体星光具有哪些特征;如何在明亮的天空背景中捕获、跟踪和检测星体;如何精确测出星光与大地真水平基准面之间的夹角;如何定位和定向。

星光导航是用星体作为测量基准的,它不受外界电磁波的干扰破坏,在地球上任何地方、任何高度都可以导航,一次定位能同时给出较高精度位置信息和最高精度的航向修正信息,一直受到人们的关注。

本书作者多年从事天文导航工程设备研制与技术项目预先研究工作,书中所推导的公式和所列数据,很有实用价值。本书适合于天文导航科研、教学人员使用,也适合于天文导航爱好者阅读。

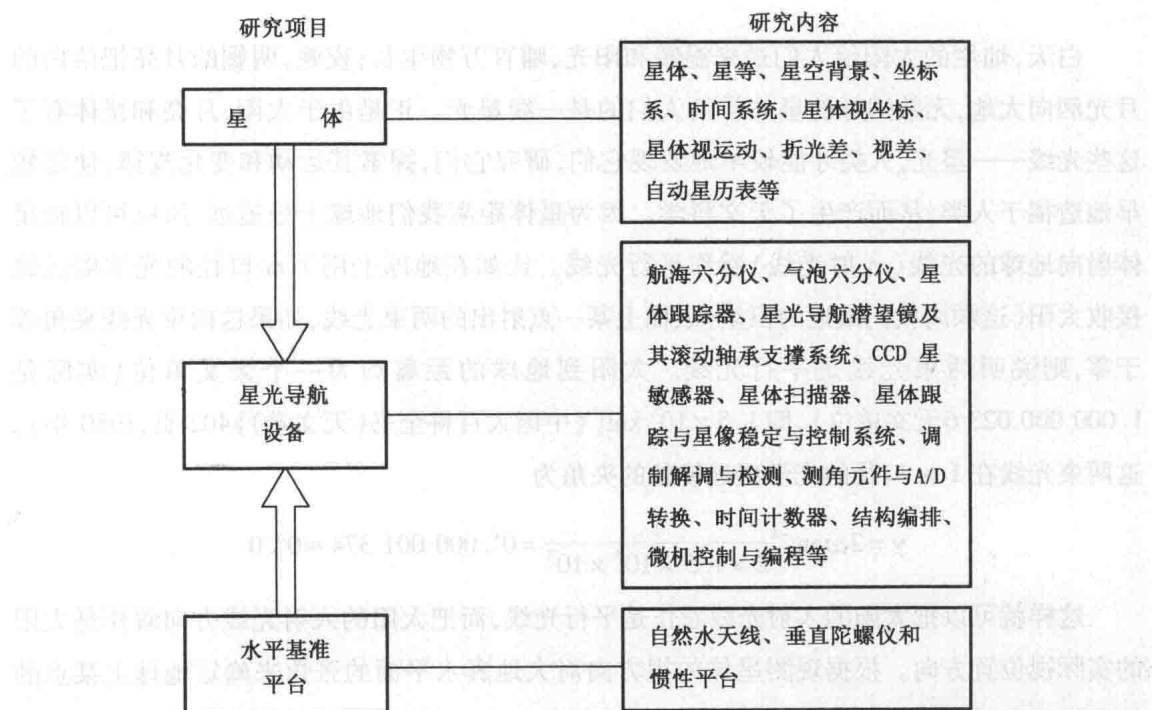


图 0-1 星光导航原理流程图

本书主要阐述星光导航原理及其系统设计:第一章为星体;第二章为星光导航定位原理;第三章为航海六分仪;第四章为潜用星光导航仪;第五章为船用星体跟踪器。

本书由季必达、冯惠兰编著,陈福胜主审,季稟喃校核。本书在编写过程中参考或引用了国内外一些专家学者的论著,在此一并表示衷心的感谢。

书中难免存在不足和欠妥之处,恳请广大读者批评指正。

编著者

2014 年 1 月

目 录

第一章 星体	1
第一节 星体光谱、星等及常用的导航星历表	1
第二节 星体与星座	15
第三节 星体视坐标	23
第四节 一种机选自动星历表	41
第二章 星光导航定位原理	51
第一节 天文导航三角形	51
第二节 天测船位线	53
第三节 高度截距法定位	56
第四节 天文定位的直接解算法	69
第五节 天文定向	71
第六节 星光导航的误差修正	73
第三章 航海六分仪	77
第一节 六分仪的构造原理	77
第二节 六分仪的校正与指标差的测定	80
第三节 六分仪的观测方法	84
第四章 潜用星光导航仪	86
第一节 基于惯性平台提供的潜艇人工水平基准	88
第二节 星光导航潜望镜	91
第三节 轴承支撑系统	105
第四节 电子数字计算机与接口线路	116
第五节 模拟数字转换装置(A/D)	119
第六节 铷原子时间频率标准	125
第七节 高度和方位随动系统	128
第八节 潜用星光导航仪的主控程序框图	134
第五章 船用星体跟踪器	137
第一节 船用星体跟踪器的安装结构形式	139
第二节 船用星体跟踪器的光学系统	141
第三节 星体传感器	146
第四节 船用星体跟踪器的星体检测和坐标转换	156
第五节 船用星体跟踪器的光学瞄准线稳定控制	166
第六节 数字跟踪控制系统的电子电气装置	176
附录一 坐标变换公式推导	186
附录二 潜用星光导航仪的数学模型	190

第一章 星 体

星体是星光导航系统的基准观测目标,它在有暗星星云、极光以及太阳光在大气中闪烁的环境里能被检测到。以前,人们用目视方法通过望远镜观察星体,用人眼进行瞄准,即人眼看见的星体才能用来导航。但是现在随着光电技术快速发展,人眼看不见的星体也能被用来导航。因此,星体视坐标、星体视运动、星体运动规律、星体和天空背景的辐射特性等都是星光导航研究的重要内容。当然,影响星光导航系统设计的还有:望远镜孔径、光学材料、视场角、光电传感器(星敏感器)的选取、搜索与扫描方式、信号处理线路等。本章重点讨论作为基准星体的特征。第一节为星体光谱、星等及常用导航星体的星历表;第二节为星座;第三节为星体视坐标;第四节为实用机选星历表。

第一节 星体光谱、星等及常用的导航星历表

1. 星体光谱

为什么星光导航采用星体作为观测的基准目标呢?主要考虑三方面因素:第一,星体是永恒的、可见的,不管在地球的什么地方、什么高度上,只要能看见星体就可以进行导航;不但夜间能测星导航,而且白天借助仪器也可以测星导航。不管是谁,只要你能看见星,就可以用它来导航,因此应用不受限制。第二,经过天文学特别是天文台(如我国紫金山天文台等)的多年观测与研究,现在人们已经能精确地知道星体的视坐标,而且精确度很高,赤经精度为 $\pm 0.001^\circ$,赤纬精度为 $\pm 0.01''$ 。如果取地球赤道半径为 $R_{\text{地}} = 6\,378\,140\text{ m}$,地球自转一周是 24 h (或 360°),对应赤道上某一点走过的线距离是 $2\pi R_{\text{地}} = 40\,075\,036\text{ m}$,则 $1^\circ = 40\,075\,036 / (24 \times 3\,600) = 463.83(\text{m})$, $1'' = 40\,075\,036 / (360 \times 3\,600) = 30.922(\text{m})$ 。即星体视坐标精度优于 $\pm 0.56\text{ m}$ 。这样的目标精度对于一般的导航系统来说是足够用了。第三,经过天文学的多年观测研究,对多数星体的特征,如峰值波长、辐射强度、星等、大气折射等,有比较清楚的认识,并能进行量化。因此在应用星体导航时,心里是有数的。

我们认识星体的第一感觉是它的星光人眼可见,而且能辨别出哪颗星亮、哪颗星暗。若采用光电转换器件也是一样。由于大多数天文观测仪器都和人眼配合使用,因此先介绍一下标准人眼的结构和光谱特性是有必要的。

(1) 人眼的光谱

人眼本身类似一个光学仪器,人眼结构是这样的:外壳是一个不透明的白色硬质球,把整个眼球包起来的叫巩膜,见图1-1。角膜是由角质组成的透明球面,厚度约为 0.55 mm ,折射率为 $1.377\,1$,外界光线是先通过角膜才进入眼睛的。前室是角膜后面的一部分空间,充满折射率为 $1.377\,4$ 的透明液体,深度为 3.05 mm 。后面紧挨前室的是虹彩,它中央有一个圆孔,控制进入眼睛的光束口径,这个口径称为瞳孔,它视被观察物体的亮度不同,来改变瞳孔直径的大小,以调节进入眼睛的光通量。后面挨着瞳孔的是水晶体,它是由多层薄膜组成的一个双凸透镜,而且各层折射率不同,中间为 1.42 ,最外层为 1.373 。水晶体周边

肌肉的作用,使前表面的半径发生变化,以改变眼睛的焦距,使不同的物体成像在网膜上。在水晶体后面充满的是一种和蛋白质相似的玻璃体,它的折射率为 1.336,叫后室。后室的内壁是由神经细胞和神经纤维组成的网膜,网膜是眼睛的感光部分。网膜外面是脉络膜,它呈现黑色,吸收光线,这样后室就变成了一个暗室。在视轴线上,网膜有一个最灵敏的感光区,叫黄斑。黄斑的边缘是一个没有感光细胞的盲点,它是神经纤维的出口。

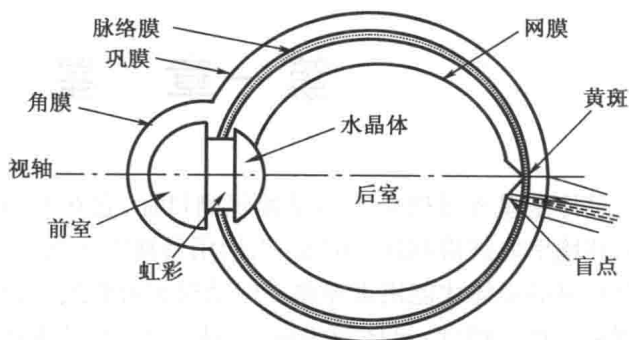


图 1-1 人眼结构示意图

入射星光经过角膜和水晶体折射后,成像在网膜上,并靠外边肌肉的牵动,能自动地使星体像落在黄斑上。眼睛的视场约为 150° ,但是只在视轴周围 $6^\circ \sim 8^\circ$ 的范围内才能清晰成像,其他部分比较模糊。白天人眼瞳孔直径大约为 2 mm,夜间可以达到 8 mm。若直接用肉眼观察天文望远镜时,它们的像都成在无穷远处,以使眼睛处于无调节的自然状态。

人眼视网膜对入射光线的照度表达式为

$$E_{\text{眼}} = \frac{\tau_{\text{眼}} L D_{\text{瞳}}^2}{4f_{\text{眼}}^2} \quad (1-1)$$

式中 $E_{\text{眼}}$ ——人眼视网膜上像的照度, lx;

L ——物体表面的亮度, cd/m^2 ;

$f_{\text{眼}}$ ——人眼前焦距, mm, 当人眼肌肉松弛时, $f_{\text{眼}} = 17.06 \text{ mm}$;

$D_{\text{瞳}}$ ——瞳孔直径, cm;

$\tau_{\text{眼}}$ ——人眼的透过率, 它与波长有关, 见表 1-1。

表 1-1 不同波长下的人眼透过率

波长/ μm	0.40	0.42	0.46	0.52	0.56	0.60	0.66	0.70
$\tau_{\text{眼}}$	0.09	0.16	0.43	0.53	0.57	0.61	0.66	0.70

日间视觉用单色光见度 $K(\lambda)$ 表示, 即在同一波长下测定的光通量与辐射通量之比。

$$K(\lambda) = \frac{\phi_{\text{测入}}}{\phi_{\text{辐入}}} \text{ lm/W}$$

如在波长 $\lambda = 0.555 \mu\text{m}$ 处, $K(\lambda)$ 出现最大值, $K_{\text{最大}}(\lambda) = 673 \text{ lm/W}$ 。但是, 日间视觉采用相对光见度, 见表 1-2。

$$U_{\text{相对}}(\lambda) = K(\lambda)/673$$

夜间视觉采用 $U'_{\text{相对}}(\lambda) = K'_{\text{相对}}(\lambda)/1725$ 表示, $K'_{\text{相对}}(\lambda)$ 出现在 $\lambda = 0.510 \mu\text{m}$ 处。

表 1-2 相对光见度数值

波长/nm	日间视觉 $U_{\text{相对}}(\lambda)$ $L \geq 3 \text{ cd/m}^2$	夜间视觉 $U'_{\text{相对}}(\lambda)$ $L \geq 3 \times 10^{-5} \text{ cd/m}^2$
350	—	0.000 3
360	—	0.000 8
370	—	0.002 2
380	0.000 04	0.005 5
390	0.000 12	0.012 7
400	0.000 40	0.027 0
410	0.001 20	0.053 0
420	0.004 00	0.095 0
430	0.011 60	0.157 0
440	0.023 00	0.239 0
450	0.038 00	0.339 0
460	0.060 00	0.456 0
470	0.091 00	0.576 0
480	0.139 00	0.713 0
490	0.208 00	0.840 0
500	0.323 00	0.948 0
510	0.503 00	0.999 0
520	0.710 00	0.953 0
530	0.862 00	0.849 0
540	0.954 00	0.697 0
550	0.995 00	0.531 0
560	0.995 00	0.365 0
570	0.952 00	0.243 0
580	0.870 00	0.155 0
590	0.757 00	0.094 2
600	0.631 00	0.056 1
610	0.503 00	0.032 4
620	0.381 00	0.018 8
630	0.265 00	0.010 5
640	0.175 00	0.005 8
650	0.107 00	0.003 2
660	0.061 00	0.001 7
670	0.032 00	0.000 9
680	0.017 00	0.000 5
690	0.008 00	0.000 2
700	0.004 00	0.000 1

表 1-2(续)

波长/nm	日间视觉 $U_{\text{相对}}(\lambda)$ $L \geq 3 \text{ cd/m}^2$	夜间视觉 $U'_{\text{相对}}(\lambda)$ $L \geq 3 \times 10^{-5} \text{ cd/m}^2$
710	0.002 10	—
720	0.001 05	—
730	0.000 52	—
740	0.000 25	—
750	0.000 12	—
760	0.000 06	—
770	0.000 03	—

图 1-2 所示为日间视觉和夜间视觉的相对光见度曲线。

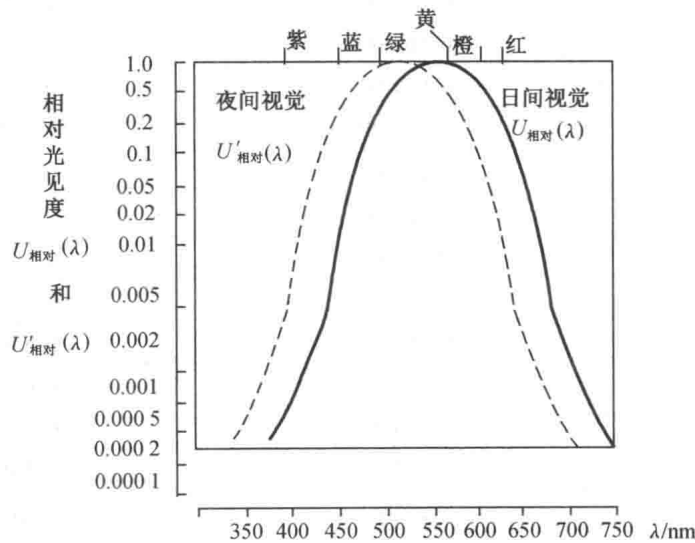
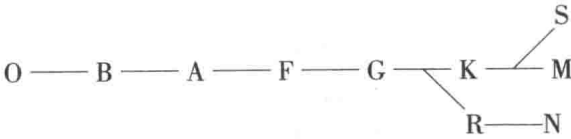


图 1-2 日间视觉和夜间视觉的相对光见度曲线

由此可见,人眼视觉的光谱范围为 0.38 μm 到 0.77 μm 。

(2) 星体的光谱

恒星光谱是由它们的物理性质、化学成分和运动状态等决定的,一般根据光谱就可以判断它们的温度,这是天文学光谱的研究内容。美国哈佛大学天文台在 19 世纪末提出恒星光谱分类的哈佛系统,用拉丁字母表示恒星光谱分类为



恒星光谱共分十个类型,从左到右温度是逐渐降低的,而且各型之间的过渡是连续的。每种类型又分为十个小型,如 O 型分为 $O_0, O_1, O_2, O_3, O_4, O_5, O_6, O_7, O_8, O_9$ 。O 型最热,为 40 000 K, M 型最冷,为 3 000 K。其中, O 型呈蓝白色,如猎户座 ι (伐三); B 型呈蓝白色,如

大熊座 η (摇光); A 型呈白色, 如天琴座 α (织女一); F 型呈黄白色, 如仙后座 β (王良一); G 型呈黄色, 如太阳和天龙座 β (天棣三); K 型呈橙色, 如金牛座 α (毕宿五); M 型呈红色, 如猎户座 α (参宿四); 另外, R ~ N 型呈橙到红色, S 型呈红色。

哈佛大学天文台在 1918—1924 年发表了“亨利·德雷伯星表”(HD 星表), 里面载有二十多万颗星的光谱及各种参数(如位置、运动、星等、峰值光谱等)。其中, 99% 的星体光谱属于 B ~ M 型。

公元前 4 世纪, 战国时代魏国天文学家石申著有《天文》八卷, 照样载有 121 颗恒星的位置, 这是世界上最古老的星表。1969 年起, 中国紫金山天文台相继出版了《中国天文年历》《天文测星简历》和《航海天文历》以供科研、测绘和航海等部门使用。《中国天文年历》载有 1 217 颗恒星 ($|\delta| < 80^\circ$) 的视位置、星等、峰值光谱等数据。同时载有太阳、月亮、金星、木星、水星、火星、土星等的视位置、星等、峰值光谱等数据。

人类最早发现的星体是人眼能够看见的星体。人眼对可见光敏感。根据美国无线电公司编的《电光学手册》, 可见光的波长 λ 为 $0.38 \sim 0.77 \mu\text{m}$, 见图 1-3。

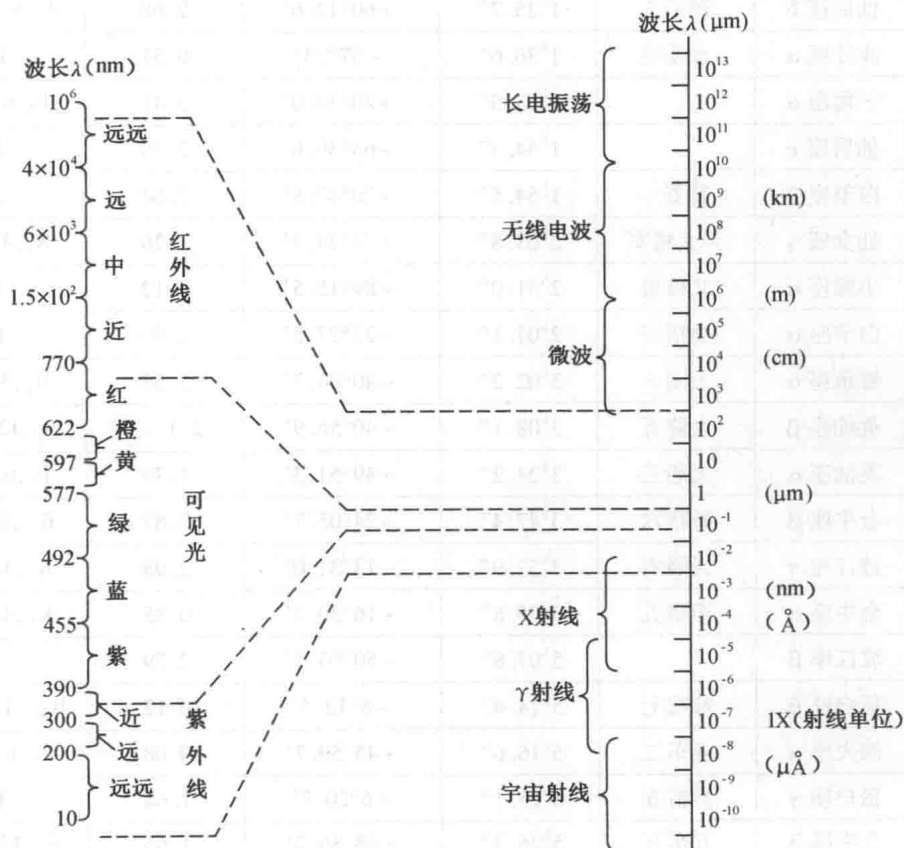


图 1-3 电磁波谱

($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$)

人眼按照可见光光谱能够看见的星体可以排列成一个表, 见表 1-3 (《1998 年中国天文年历》)。

表 1-3 常见星体星表

序号	星座星名	星 名 (中文)	视 坐 标(1998 年)		目视星等/(m)	光 谱
			视赤经 α	视赤纬 δ		
1	仙女座 α	壁宿二	$0^h08.2^m$	$+29^\circ05'$	2.06	$A_{0P}, 10\,000\text{ K}$
2	仙后座 β	王良一	$0^h09.1^m$	$+59^\circ09'$	3.27	$F_5, 6\,800\text{ K}$
3	飞马座 γ	壁宿一	$0^h12.4^m$	$+15^\circ10.5'$	2.83	$B_2, 26\,000\text{ K}$
4	水蛇座 β		$0^h25.6^m$	$-77^\circ15.6'$	2.80	$G_0, 6\,000\text{ K}$
5	凤凰座 α	火鸟六	$0^h26.2^m$	$-42^\circ18.8'$	2.39	$K_0, 4\,500\text{ K}$
6	仙女座 δ		$0^h39.3^m$	$+20^\circ51.0'$	3.27	$K_2, 4\,300\text{ K}$
7	仙后座 α	王良四	$0^h40.5^m$	$+56^\circ31.6'$	2.23	$K_0, 4\,500\text{ K}$
8	鲸鱼座 β	土司空	$6^h43.5^m$	$-17^\circ50.6'$	2.04	$K_0, 4\,500\text{ K}$
9	鲸鱼座 η		$1^h08.5^m$	$-10^\circ11.7'$	3.45	$K_0, 4\,500\text{ K}$
10	仙女座 β	奎宿九	$1^h09.6^m$	$+35^\circ36.6'$	2.06	$M_0, 3\,800\text{ K}$
11	仙后座 δ	阁道三	$1^h25.7^m$	$+60^\circ13.6'$	2.68	$A_5, 8\,700\text{ K}^*$
12	波江座 α	水委三	$1^h36.6^m$	$-57^\circ23'$	0.51	B_5^*
13	三角座 α		$1^h53.0^m$	$+20^\circ34.0'$	3.41	$F_5, 6\,800\text{ K}$
14	仙后座 ε		$1^h54.3^m$	$+63^\circ39.6'$	2.36	B_3
15	白羊座 β	娄委一	$1^h54.5^m$	$+20^\circ47.8'$	2.64	A_5
16	仙女座 γ	天大将军	$2^h03.8^m$	$+72^\circ24.3'$	2.26	$K_0, 4\,500\text{ K}$
17	小熊座 α	北极星	$2^h31.0^m$	$+89^\circ15.5'$	2.12	F_8
18	白羊座 α	娄宿三	$2^h07.1^m$	$+23^\circ27.2'$	2.00	K_2
19	鲸鱼座 α	天囷一	$3^h02.2^m$	$+40^\circ04.7'$	2.53	$M_0, 3\,800\text{ K}$
20	英仙座 β	大陵五	$3^h08.1^m$	$+40^\circ56.9'$	2.1 ~ 3	$B_8, 12\,000\text{ K}$
21	英仙座 α	天船三	$3^h24.2^m$	$+49^\circ51.3'$	1.79	$F_5, 6\,800\text{ K}$
22	金牛座 β	昴宿六	$3^h47.4^m$	$+24^\circ05.7'$	2.87	$B_{SP}, 6\,800\text{ K}$
23	波江座 γ	天园六	$3^h57.9^m$	$-13^\circ31.0'$	2.95	$K_5, 4\,000\text{ K}$
24	金牛座 α	毕宿五	$3^h35.8^m$	$+16^\circ30.2'$	0.85	$K_5, 4\,000\text{ K}$
25	波江座 β		$5^h07.8^m$	$-50^\circ05.5'$	2.79	A_3
26	猎户座 β	参宿七	$5^h14.4^m$	$-8^\circ12.5'$	0.12	$B_{8P}, 12\,000\text{ K}$
27	御夫座 α	五车二	$5^h16.6^m$	$+45^\circ59.7'$	0.08	$G_0, 6\,000\text{ K}$
28	猎户座 γ	参宿五	$5^h25.1^m$	$+6^\circ20.7'$	1.64	B_2
29	金牛座 β	五车五	$5^h26.2^m$	$+28^\circ36.2'$	1.65	$B_8, 12\,000\text{ K}$
30	天兔座 α		$5^h32.6^m$	$-17^\circ49.6'$	2.58	$F_0, 7\,500\text{ K}$
31	猎户座 ε	参宿二	$5^h36.1^m$	$-1^\circ12.3'$	1.70	$B_0, 30\,000\text{ K}$
32	天鸽座 α	丈人一	$5^h39.6^m$	$-34^\circ04.8'$	2.64	B_{SP}
33	猎户座 ξ	参宿一	$5^h40.7^m$	$-1^\circ56.8'$	2.05	$B_0, 30\,000\text{ K}$
34	猎户座 α	参宿四	$5^h55.1^m$	$+70^\circ24.2'$	0.4 ~ 1.3	$M_0, 3\,800\text{ K}$

表 1-3(续)

序号	星座星名	星 名 (中文)	视 坐 标(1998 年)		目视星等/(^m)	光 谱
			视赤经 α	视赤纬 δ		
35	御夫座 β	五车二	5 ^h 59.4 ^m	+44°56.7′	1.90	A _{0P} , 10 000 K
36	大犬座 β	军市一	6 ^h 22.6 ^m	-17°07.4′	1.98	B ₁ ,
37	船底座 α	老人	6 ^h 23.3 ^m	-52°41.0′	-0.72	F ₀ , (0.42) *
38	双子座 γ	井宿三	6 ^h 37.6 ^m	+16°23.9′	1.93	A ₀
39	大犬座 α	天狼	6 ^h 45.1 ^m	-16°42.9′	-1.46	A ₀ (0.279)
40	大犬座 ε	弧矢七	6 ^h 57.4 ^m	-28°56.0′	1.48	B ₂
41	大犬座 δ	弧矢一	7 ^h 08.3 ^m	-26°23.6′	1.86	F _{8P} ,
42	大犬座 η		7 ^h 24.6 ^m	-29°18.0′	2.45	B _{5P}
43	双子座 α	北河二	7 ^h 34.5 ^m	+31°53.5′	1.95	A ₀
44	小犬座 α	南河三	7 ^h 39.2 ^m	+5°13.6′	0.38	F ₅
45	双子座 β	北河三	7 ^h 45.2 ^m	+28°01.7′	1.14	K ₀ (0.75)
46	船底座 ε	海矢一	8 ^h 21.9 ^m	-59°24.0′	1.97	K ₀
47	船帆座 λ	天记	9 ^h 07.9 ^m	-43°25.8′	2.21	K ₅
48	船底座 β	南船五	9 ^h 12.9 ^m	-69°36.0′	1.67	A ₀
49	长蛇座	星宿一	9 ^h 27.5 ^m	-8°39.2′	1.98	K ₂ (0.31)
50	狮子座 α	轩辕十四	10 ^h 08.3 ^m	+11°58.4′	1.35	B ₈
51	狮子座 γ	轩辕十二	10 ^h 19.9 ^m	+19°50.9′	2.61	K ₀
52	大熊座 μ		10 ^h 22.2 ^m	+41°30.3′	3.05	K ₅
53	大熊座 β	天璇	11 ^h 01.7 ^m	+56°23.4′	2.37	A ₀
54	大熊座 δ	天枢	11 ^h 03.6 ^m	+61°45.4′	1.79	K ₀
55	狮子座 δ		11 ^h 14.0 ^m	+20°31.9′	2.56	A ₃
56	狮子座 β	五帝座一	11 ^h 48.9 ^m	+14°34.9′	2.14	A ₂
57	大熊座 γ	天玑	11 ^h 15.7 ^m	+53°42.1′	2.44	A ₀
58	乌鸦座 γ	轸宿一	12 ^h 15.7 ^m	-17°31.7′	2.59	B ₈
59	南十字架座 α	十字架二	12 ^h 24.9 ^m	-62°56.0′	1.39	B ₁
60	南十字架座 γ	十字架一	12 ^h 29.5 ^m	-56°57.0′	1.69	M ₃
61	半人马座 ζ	库楼七	13 ^h 55.0 ^m	-47°16.4′	2.55	B _{2P}
62	南十字架座 β	十字架三	12 ^h 46.0 ^m	-59°32.0′	1.28	B ₀
63	大熊座 ε	玉衡	12 ^h 53.9 ^m	+55°58.1′	1.77	A _{0P}
64	猎犬座 α	常陈一	12 ^h 55.9 ^m	+38°19.5′	2.90	A _{0P}
65	大熊座 ζ	开阳	13 ^h 23.8 ^m	+54°55.9′	2.27	A _{2P}
66	室女座 α	角宿一	13 ^h 25.1 ^m	-11°08.9′	0.98	B ₂
67	大熊座 η	摇光	13 ^h 47.4 ^m	+49°19.2′	1.86	B ₃
68	半人马座 β	马腹一	14 ^h 01.7 ^m	-60°13.0′	0.63	B ₇ (0.157)

表 1-3(续)

序号	星座星名	星 名 (中文)	视 坐 标(1998 年)		目视星等/(^m)	光 谱
			视赤经 α	视赤纬 δ		
69	半人马座 θ	库楼三	14 ^h 04.9 ^m	-36°14.0'	2.04	K ₀
70	牧夫座 α	大角	14 ^h 15.5 ^m	+19°11.6'	-0.04	K ₀ (0.75)
71	半人马座 α	南门二	14 ^h 37.6 ^m	-60°43.0'	0.01	G ₂
72	天秤座 α	氏宿一	14 ^h 50.7 ^m	-16°01.9'	2.75	A ₃
73	小熊座 β	帝	14 ^h 50.6 ^m	+74°09.7'	2.08	K ₅
74	小熊座 α	北极星	2 ^h 30.9 ^m	+89°15.5'	2.12	F ₈
75	牧夫座 β		15 ^h 01.9 ^m	+40°23.8'	3.50	G ₅
76	北冕座 α	贯索四	15 ^h 34.6 ^m	+26°43.1'	2.23	A ₀
77	天蝎座 δ	房宿三	16 ^h 00.2 ^m	-22°36.7'	2.32	B ₀
78	天蝎座 α	心宿二	16 ^h 29.3 ^m	-26°25.4'	0.9 ~ 1.8	M ₀ (0.94)
79	武仙座 β		16 ^h 30.1 ^m	+21°29.7'	2.77	K ₀
80	南三角座 α	三角形三	16 ^h 45.5 ^m	-68°59.0'	1.93	K ₂
81	天蝎座 ε		16 ^h 50.0 ^m	-34°17.1'	2.29	K ₀
82	蛇夫座 η	宋	17 ^h 10.2 ^m	-15°43.2'	2.63	A ₂
83	武仙座 α		17 ^h 14.9 ^m	+14°23.6'	3.48	M ₃
84	武仙座 δ		17 ^h 14.9 ^m	+24°50.6'	3.14	A ₂
85	天蝎座 λ	尾宿八	17 ^h 31.6 ^m	-37°05.0'	1.60	B ₁
86	蛇夫座 α	侯	17 ^h 34.8 ^m	+12°33.8'	2.08	A ₅
87	天蝎座 θ		17 ^h 37.1 ^m	-42°50.6'	1.87	F ₀
88	天龙座 γ	天培四	17 ^h 56.5 ^m	+51°29.5'	2.23	K ₅
89	人马座 ε	箕宿三	18 ^h 24.1 ^m	+39°30.5'	1.85	A ₀
90	天琴座 α	织女	18 ^h 36.8 ^m	+38°47.1'	0.03	A ₀
91	人马座 σ	斗宿四	18 ^h 55.1 ^m	-26°17.8'	2.02	B ₃
92	天鹰座 δ		19 ^h 25.4 ^m	+3°06.8'	3.36	F ₀
93	天鹅座 β		19 ^h 30.6 ^m	+27°57.3'	3.08	K ₀ A ₀
94	天鹰座 α	牛郎	19 ^h 50.6 ^m	+8°51.9'	0.77	A ₅ (0.358)
95	天鹅座 γ		20 ^h 22.1 ^m	+40°15.2'	2.20	F _{8P}
96	摩羯座 β		20 ^h 20.9 ^m	-14°47.3'	3.08	G ₀ A ₀
97	孔雀座 α		20 ^h 23.3 ^m	-56°50.0'	1.95	B ₃
98	天鹅座 α	天津四	20 ^h 41.3 ^m	+45°16.6'	1.25	A _{2P}
99	天鹅座 ε		20 ^h 46.1 ^m	+33°57.9'	2.46	K ₀
100	天鹅座 ζ		21 ^h 12.8 ^m	+30°13.3'	3.20	K ₀
101	仙王座 α	天钩五	21 ^h 18.5 ^m	+62°24.8'	2.44	A ₅
102	仙王座 β		21 ^h 28.6 ^m	+70°33.4'	3.23	B ₁

表 1-3(续)

序号	星座星名	星 名 (中文)	视 坐 标(1998 年)		目视星等/(^m)	光 谱
			视赤经 α	视赤纬 δ		
103	宝瓶座 β		21 ^h 31.4 ^m	-5°34.8′	2.91	G ₀
104	飞马座 ε	危宿三	21 ^h 44.1 ^m	+9°52.1′	0.7~3.5	K ₀
105	摩羯座 δ		21 ^h 46.9 ^m	-16°08.1′	2.87	A ₅
106	宝瓶座 α		22 ^h 05.6 ^m	-0°19.7′	2.96	G ₀
107	天鹤座 α	鹤一	22 ^h 06.3 ^m	-47°07.0′	1.76	B ₅
108	天鹤座 β		22 ^h 42.31 ^m	-46°53.9′	2.11	M ₃ (0.95)
109	南鱼座 α	北落狮门	22 ^h 57.5 ^m	-29°38.3′	1.16	A ₃
110	飞马座 β	室宿三	23 ^h 03.7 ^m	+28°04.5′	2.72	M ₀
111	飞马座 α	室宿一	23 ^h 04.7 ^m	+15°11.7′	2.49	A ₀
112	仙王座 γ		23 ^h 39.3 ^m	+77°37.6′	3.21	K ₀

* 选自《普及天文年历》紫金山天文台,北京天文台,科学出版社,1987 年。

其中,B 型(蓝白色)28 颗,占 28/112=25%;A 型(蓝白色)30 颗,占 30/112=26.8%;F 型 9 颗,占 9/112=8%;G 型(黄色)5 颗,占 5/112=4.5%;K 型(橙色)24 颗,占 24/112=21.4%;M 型(红色)8 颗,占 8/112=7.1%。

恒星光谱类型与对应的有效温度和计算的最大辐射波长的关系见表 1-4。

表 1-4 恒星光谱及计算波长

恒星光谱类型*	对应的有效温度/K	最大辐射计算波长**/ μm
O ₅	50 000	
B ₀	30 000	0.148
B ₁	27 750	0.157
B ₂	25 500	0.166
B ₃	23 250	0.174
B ₄	21 000	0.183
B ₅	18 750	0.192
B ₆	16 500	0.201
B ₇	14 250	0.209
B ₈	12 000	0.218
B ₉	10 200	0.227
A ₀	10 000	0.279
A ₁	9 740	0.295
A ₂	9 480	0.311
A ₃	9 220	0.326

表 1-4(续)

恒星光谱类型 *	对应的有效温度/K	最大辐射计算波长 ** / μm
A ₄	8 960	0.342
A ₅	8 700	0.358
A ₆	8 450	0.373
A ₇	8 200	0.388
A ₈	7 950	0.403
A ₉	7 700	0.418
F ₀	7 500	0.420
F ₁	7 360	0.443
F ₂	7 220	0.466
F ₃	7 080	0.490
F ₄	6 940	0.513
F ₅	6 800	0.536
F ₆	6 660	0.560
F ₇	6 520	0.582
F ₈	6 380	0.606
F ₉	6 240	0.629
G ₀	6 000	0.643
G ₁	5 850	0.654
G ₂	5 710	0.664
G ₃	5 550	0.675
G ₄	5 400	0.686
G ₅	5 250	0.697
G ₆	5 100	0.707
G ₇	4 950	0.718
G ₈	4 800	0.729
G ₉	4 650	0.739
K ₀	4 500	0.750
K ₁	4 400	0.769
K ₂	4 300	0.788
K ₃	4 200	0.807
K ₄	4 100	0.826
K ₅	4 000	0.845
K ₆	3 960	0.864
K ₇	3 920	0.883
K ₈	3 880	0.902

表 1-4(续)

恒星光谱类型*	对应的有效温度/K	最大辐射计算波长**/ μm
K ₉	3 840	0.921
M ₀	3 800	0.940
M ₁	3 640	0.945
M ₂	3 480	0.950
M ₃	3 320	0.955
M ₄	3 160	0.960
M ₅	3 000	0.965
M ₆	2 840	0.970
M ₇	2 680	0.975
M ₈	2 520	0.980
M ₉	2 360	0.985

*《中国大百科全书——天文学》，中国大百科全书出版社，1980 年。

** 参见《电光学手册》(美)，无线电公司编，史斯伍译校。

表 1-4 所列有效温度定义为在整个光谱区内从星体辐射的黑体温度。它与在可见光范围内从星体辐射的黑体温度(即有色温度)是有区别的。通过测量星体峰值辐射的光谱,就可以估算出星体的辐射温度。

2. 星等及常用的导航星历表

星等是表示星体相对亮度的数值。它是用在地球大气层外接收到的星体辅照度来衡量的,是以相差五等的两颗星体的照度刚好差 100 倍为基准的。由代数知道, $-1 < 0 < +1$ 。星体越亮,星等代数值越小;星体越暗,星等代数值越大。后来,J. F. 赫歇尔发现, +1 等星比 +6 等星亮度差 100 倍。于是,普森就用公式(1-2)表示两颗星体的星等和它们的亮度关系:

$$m_1 - m_2 = -2.5 \lg \frac{I_2}{I_1} \quad (1-2)$$

式中 m_1, m_2 ——星体星等;

I_1, I_2 ——星体的亮度。

星体亮度随着星等的代数值增加而降低,星等代数值越大,星体越暗,比零等星亮的星体其星等是负的。也就是说,相邻等级两颗星体照度比为 $\sqrt[5]{100} = 2.512$ 。若 m 等星比 n 等星亮,则两颗星的照度比为

$$\frac{E_m}{E_n} = 2.512^{n-m} \quad (1-3)$$

这个星等标度定义一直运用至今。同时,星体亮度与星体的距离有关。一颗实际很亮的星体由于距离远而显得很暗(星等代数值大);反之,一颗实际很暗的星体由于距离近而显得很亮(星等代数值小)。

星等标度有如下五种(参见《中国大百科全书——天文学》,第 457 页):