

天文导航

天文导航

王裕齐、申功勋编译



国防工业出版社

87.9

4

004187

天文导航

天 文 导 航

王裕齐、申功勋 編譯



國防工業出版社

內 容 簡 介

本书收集了近年来外国杂志所发表的有关天文导航方面的研究論文18篇。介紹了用于宇宙飞船、人造卫星、远程导弹和飞机上导航定位用的星体跟踪系统和仪器。书中还提供了不少設計、应用和导航天文学等方面的参考資料，可供有关方面的研究工作者参考。

天 文 导 航

王裕齐、申功勋編譯

•
国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业登记证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

•
787×1092 1/16 印張 15 7/8 369 千字

1966 年 1 月第一版 1966 年 1 月第一次印刷 印数：0,001—0,750 册

統一书号：15034·1039 定价：（科七）2.20 元



数据加载失败，请稍后重试！

天 文 导 航

王裕齐、申功勋 編譯



国防工业出版社

內 容 簡 介

本书收集了近年来外国杂志所发表的有关天文导航方面的研究論文18篇。介紹了用于宇宙飞船、人造卫星、远程導彈和飞机上导航定位用的星体跟踪系統和仪器。书中还提供了不少設計、应用和导航天文学等方面的参考資料，可供有关方面的研究工作者参考。

天 文 导 航

王裕齐、申功勛編譯

•
国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

•
787×1092 1/16 印張 157/8 369 千字

1966 年 1 月第一版 1966 年 1 月第一次印刷 印数：0,001—0,750 册

統一书号：15034·1039 定价：（科七）2.20 元

編者序言

近年来，天文导航技术获得了迅速发展。目前在宇宙飞船、人造卫星、远程导弹和飞机上广泛地采用着天文定位方法或天文——惯性；天文——多普勒等组合导航的方法。本书收集了近年来外国杂志所发表的有关天文导航方面的研究论文 18 篇。其中头 12 篇是根据 1963 年美国电子电器工程师学会出版的一期天文导航专刊译出的。这些文章介绍了用于宇宙飞船、人造卫星、远程导弹和飞机上导航定位用的星体跟踪系统和仪器，文中提供有不少设计、应用和导航天文学等方面的参考资料，可供我国有关方面研究工作者参考。这几篇文章我们仍按原书的次序来编排，只是在第五篇 Joel Greene 的“当作天文罗盘使用的天体跟踪器”一文后，插入了该作者在 1964 年刊在“Navigation”上的一篇“超音速飞机导航中应用的白昼天体跟踪器”的文章，该文介绍了美国正在试制的预备在 1970 年使用的一种新型的白昼天体跟踪器，这样两篇文章放在一起，将有助于读者对美国的天文导航仪器的现有水平和发展趋势有所了解。第十四篇“天体制导”一文我们是参考了其他同志的译文，由于该文内容比较全，故而将它编入。最后四篇是讨论有关宇宙导航中光学技术的应用和星体能量调制的方法。

由于我们水平有限，在编译中肯定有许多不妥之处，我们衷心希望能得到同志们的帮助和指正。

在编译中，周大年同志和秦世光同志给我们提供了不少帮助，我们仅表示感谢。

編者

1965 年 5 月

目 录

編者序言.....	3
宇宙导航时要考虑的某些天文学和地球物理学方面的问题 A. M. Naqvi and R. J. Levy	5
星体跟踪和扫描系統的性能及参数設計..... John E. Abate	28
星体跟踪器的系統分析..... Floyd V. McCanless	40
在地球和宇宙导航系統中应用的电子管光电探测器的性能比較 Norman P. Laverty	58
用拓扑学方法来分析星体跟踪系統..... Glenn Quasius	72
利用光学輻射分析来識別星体..... J. H. Flink	81
当作天文罗盘使用的天体跟踪器..... Joel Greene	93
超音速飞机导航中应用的白昼天体跟踪器..... Joel Greene	113
用于远程導彈中的星体慣性导航..... Vern A. Blumhagen	122
以地平为基准的卫星导航系統..... R. L. Lillestrand and J. E. Carroll	137
对局部照明月球的跟踪..... Roger S. Estey	165
宇宙制导应用的光电图形匹配器..... John N. Packard	179
宇宙导航仪器..... S. Moskowitz, P. Weinschel	188
天体制导..... R. B. Horsfall	209
宇宙导航中光学技术的应用..... Wesley J. Haywood Jr.	222
紅外線跟踪系統比較..... Alan R. Gedance	229
星体跟踪系統角噪音标准..... E. K. Sandeman	234
綫性扇形調制盘的調頻式星体跟踪系統..... E. K. Sandeman	238

宇宙导航时要考虑的某些天文学和 地球物理学方面的问题

A. M. Naqvi and R. J. Levy

摘要 本文主要讨论在宇宙飞船中，利用自足设备来进行光学测量的各种天文学与地球物理学方面的问题，以及这些问题与确定飞船的位置和速度的关系。

I. 总 論

本題所涉及的範圍很广泛，但本文只就以下三个方面进行讨论：第一，有关在光学波长範圍内利用电磁辐射测量来获取信息的问题。第二，有关用宇宙飞船上的自足导航设备来进行测量的问题。第三，有关地球卫星和星际（包括月球）探测的两种宇宙飞船。

我們根据相对给定座标系統和已知其位置与速度的一些天体进行测量，以便确定飞船的距离和相对速度。如果不能直接观测飞船的速度，那么，我們可以用在一个已知時間間隔内来测量两个位置的方法計算出来。各测量数值和导航参数（例如，在一个已知瞬間的六个軌道諸元，或飞船位置和速度矢量的六个分量）之間的关系，不在本文討論範圍之内。

显然，任何空間测量方法都是以对所接收到的各种天体辐射光的分析为依据的。对一个地球卫星來說，必須要考慮对地球大气（例如散射光、吸收、放射等）的修正。

在理論上，可以根据对任何电磁辐射特性的测量来获得导航資料。这些特性指的是方向、光强度、頻率、偏振和光束到达的瞬間。但实际上，上述各种特性并不都是适用的和可靠的。例如現在尚未有人提出过用偏振测量的方法来获取导航資料。

为了使对某一物理量的测量能得出准确的导航資料，应滿足下列标准：

1) 在太阳系的一些已知点（例如地球）上，能够精确得知这个物理量的值。否則它将影响空間测量的准确度；

2) 这些物理量应不具有瞬变特性，或者瞬变性是能精确預測的，否則将引起大的誤差；

3) 当飞船位置或速度变化时，物理量立即也能显示出变化。例如：由宇宙飞船測得的行星座标能在导航中应用，但在太阳系内航行时，尤其是在太阳系内域航行时，恒星座标改变极小；

4) 按現有技术水平，应能在宇宙飞船上精确測出这个物理量。

在宇宙导航中，根据飞船与天体距离的远近可分成两类天体。所有在太阳系中的天体（太阳、行星——包括地球、小行星、月亮以及其他行星的卫星等）可以称为“近”天体，这是与远距离“天体”相比較來說的，实际上它的最近距离也都超过了 $1/4$ 兆天文单位 ($a.u.$)。通常，由于宇宙飞船的运动，任何星特性（方向、辐射光通量等等）都不会有很大改变。为此須进行近天体的测量。但并非是星际航行中星不重要。实际上由于它們是“國

定”(其已知运动已作修正)的,因此它們可以作为一个天体座标构架,用来测量行星的位置。

对近天体进行测量,原則上有如下几項:

1) 在一个近天体和一个星中間来测量角度[1][2]。除了精确地測量这些角度外,还需要精确地測量星际座标和各行星的軌道;

2) 輻射光通量的測量。虽然从光通量的平方反比定律,可以准确地測得距离。但是,这并不合适。因为光通量的变化是不能預計的,而且由于行星的盈亏使問題更加复杂化[3][47];

3) 直徑的測量。天体的角直徑和它的距离成反比。这种測量的困难在于:太阳的直徑可能会改变,而行星的直徑又不能准确的知道[4][39]及本文Ⅲ-B。故此法不适宜用于中程导航,但可用于終点制导;

4) 虽然光行差的位置改变是与飞船速度有关,但是因为太小,无法利用它来确定飞船的速度[5];

5) 多普勒光譜綫位移是和天体与飞船的相对速度成比例的,但用它作为一种測量方法来说是太小了。

下面,我們先来简单地介紹一下,在研究宇宙导航仪器和工程問題时所需要的一些天文学和地球物理学方面的知識。

II. 星

星体在宇宙导航中是起着重要的作用。它們是天球上的“陆标”。經過視差和适当的运动修正后,星体可认为是“固定的”物体。

一大批星体的准确位置都列在所謂基本星体位置目录表內(見本文Ⅱ-4部分)。天文学中所有其他的定位測量,包括太阳系中各目标的測量,也都是采用与邻近的,并已知其准确位置的一組标准星体相比較的办法。在宇宙中也是用同样方法来进行測量的。

天空中是有着非常多的星体。星等的减弱与星体数目的增加是成对数的关系。星体是合理地均匀地分布在天空中。天文学家們曾經广泛地研究过各种星体,并且作出了它們的主要特性表。

A. 星体位置一覽表

每一个特定时期(某年某月)的星体位置,总是可以用赤經(α)和赤緯(δ)来表示。其所以要特地說明时期的原因,是在于基准面和参考点,也即:赤道和春分点因进动和摄动而将改变位置。从一个时期到另一个时期的座标轉換是很簡單的。但是,如果轉換期要經過許多年,那么,就将累积誤差(进一步討論可參閱实用天文学教本或参考文献[6])。

現有几种星表。一种是“基本星表”,是对星体位置进行直接的和基本的測量。这种表的准确度最高。但它只包括几千个星。另一种“普通星表”,包括几万到几十万个星。普通星表通常是根据以前的星表加以整理而得的。还有一种“差別星表”其位置都是参照基本星表,但作了修正,因而精确度較高。差別星表仅适用于北半天球。此外,还有一些仅給出近似位置,适于粗略識別用的星表。表1所示为現有各种星表的情况。有关对宇宙导

航所用的星表可参阅文献[18]。

当讨论定位测量的精确度时，我们应当记着赤经 α 是用时间单位给出的，赤纬 δ 是用角度来度量的。在 α 中， $0^s.01$ (s 为时秒——译者) 的准确度相当于 $0.15'' \cos \delta$ 或者近似于 $0.1''$ 。

另外，要注意的是任何星表中所列的星体，其定位精确度是不相同的。通常是弱星定

表 1 星表

星 表 名 称	形式①	参考 文献	星 数	近似的 极 限 等 级	给出的小数位数 (α) (δ)		宇宙导航 的准确度	备 考
FK4	F	7	1535	6±	时秒 0.001	角秒 0.01	适当	
N30	~F	8	5268	6+	0.001	0.01	适当	p.e.②0.03''~0.13''
GC	G	9	33342	7-11	0.001	0.01	边缘的	p.e.②0.03''~0.60''
AGK2	D	10	~14000	7	0.01	0.01	边缘的	主要对北天空 AGK3还没有公开出版 只包括黄道带
AGK3	D	11	~300000	9	0.001?	0.01	适当(?)	
ZC	D	12	3539	7-9	0.001	0.01	边缘	
Smithsonian (斯密司 逊表)	G	13	250000	9+	0.001	0.01	?	
Yale Bright star (耶鲁亮星)	A	14	9110	6.5+	时秒 1	角秒 1	不合适	
Henry Draper (亨利 迫佩尔表)	A	15	225000	10	分钟 0.1	角秒 1	不合适	
Durchmusterungen 表	A	16	~10 ⁶	10	时秒 0.1	角分 0.1	不合适	
美国星历表	A	17	1078	4.75	时秒 0.1	角秒 1	不合适	

① 形式：F = 基本的，G = 普通的，D = 差别的，A = 近似的。

② 所给出的小数位数，并不一定反应精确度。

③ p.e. = 可能误差。

位精确度要低一些。总的来说，南半天球各星的精度较低，愈靠近南天轴愈低。这是因为对南半天空的测量进行得还不够。

图 1 为依文氏 (Irwin) [19] 提出的，在 1960 年 GC 星表中的估计误差。这里赤经和赤纬误差是综合在一起的，虽然赤经的平均误差要比赤纬误差大 13%。到 1970 年 GC 星表中的误差可能不再适于宇宙导航应用，但那时可以利用具有更多星体和更精确定位的 AGK3 星表。

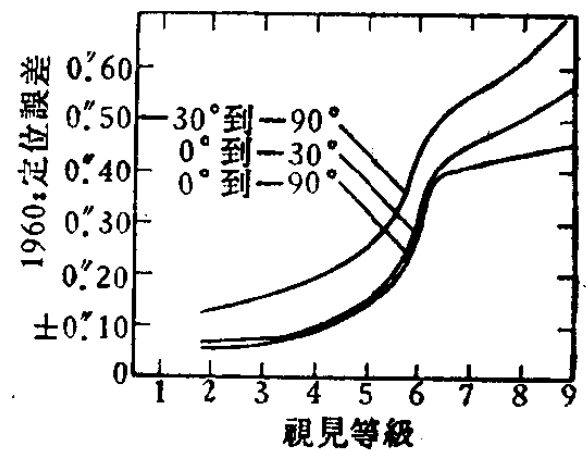


图 1 1960 年 GC 星表定位的可能误差

B. 光谱特性和温度

用光谱分类的方法可以把星体分成 B、A、F、G、K 和 M 等几个组。另外还有 W、O、R、N 和 S 等几个组是由于它们只包括约 1% 的所有表观亮星，因此在这里就不再予以讨论了。每一个光谱级还再分十个级，采用 0 到 9 的数字来标号。

此外，星体又按照它们真正的（不是视见的）发光度来分组。最重要的发光度等级是超巨星，巨星和主序星。下面是常用的较详细的分类[20]：

I 超巨星（包括 C 星）

II 亮巨星

- I 巨星
 IV 次巨星
 V 主序星 (又称为矮星)
 Sd 次矮星
 W 白矮星

除了具有很少的吸收和放射线之外, 一个星的光谱强度分布和一个黑体极为近似。表 2 摘自参考文献[21]给出的不同光谱与发光度等级的各星体的有效温度。

表 2 对于不同光谱与发光度等级的有效温度和颜色指标^①

光 谱 Σ_p	颜 色 指 标 CI			有 效 温 度 T_e		
	主 序 星	巨 星	超 巨 星	主 序 星	巨 星	超 巨 星
B0	-0.42			22000		
B5	-0.36			14000		
A0	-0.17			10700		
A5	+0.03			8500		
F0	+0.15	+0.22		7400		
F5	+0.28	+0.40	+0.34	6500		
G0	+0.42	+0.60	+0.70	5900	5200	4900
G5	+0.58	+0.82	+1.05	5500	4600	4300
K0	+0.77	+1.06	+1.4	4900	4100	3800
K5	+1.08	+1.35		4200	3600	3300
M0	+1.3	+1.5		3600	3400	3000
M5	+1.5			2800	2800	

① 颜色指标定义, 见 I-C 部分。

按绝对发光度 L (每秒钟输出的总能量) 来表示的有效温度 T_e ,

$$L = 4\pi R^2 T_e^4 \sigma,$$

式中 R 为星的半径, σ 为斯忒藩-玻耳兹曼 (stefan-Boltzmann) 常数。天文物理学家们所使用的星体温度有几种不同的定义 (颜色温度、亮度温度等等), 但是有效温度在物理方面是最有意义的, 在理论上它是一个极有用处的参数。

从表 2 所示的广泛的星体温度范围, 可以明显的看出: 在不同光谱范围内, 不同星体光强度分布变动很大。这种变化情况示于图 2 [22]。

图中表示出从地球大气上面所接受的一些最亮星的光能 (属于不同的光谱与发光度等级) 和波长的关系。从图上可以看出, 似乎很光亮的

红星, 例如猎户座 α 星 (参宿四) 是在 5000 Å 以下的短波长范围内, 它具有很小的能量。

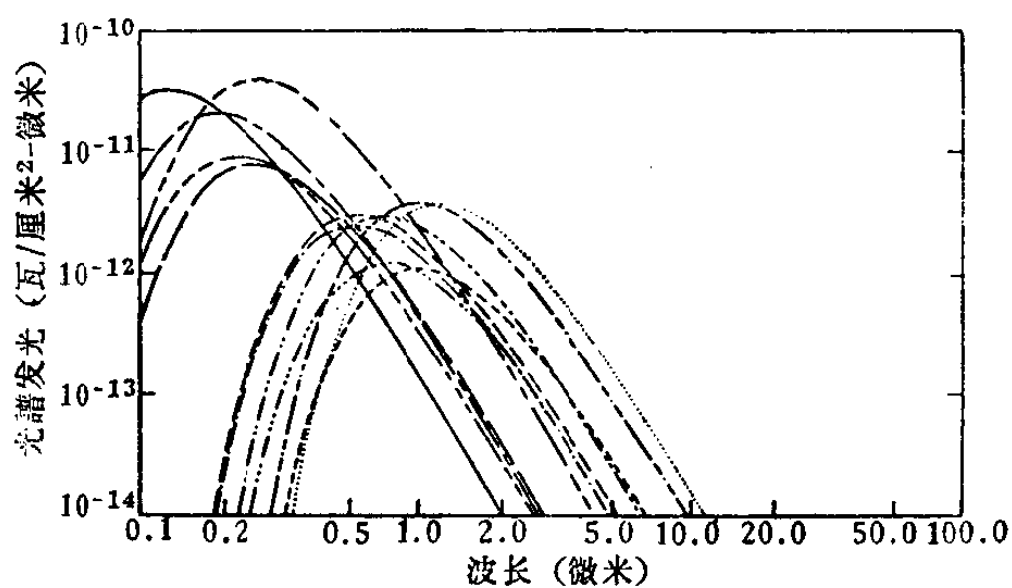


图 2 在大气上面所选择的诸亮星的光谱发光

- 半人马座 β 星 —— 天琴座 α 星 -·-·-·- 双子座 β 星
 —— 波江座 α 星 —— 船底座 α 星 —·—·— 猎户座 α 星
 —— 大犬座 α 星 -·-·-·- 御夫座 α 星 - - - - - 天鹤座 β 星
 —— 猎户座 β 星 -·-·-·- 牧夫座 α 星 ······ 仙女座 β 星

对于按照光谱分类的星表，請参阅文献[15]与[20]。在不同光谱范围内所测出的星等的讨论見本文 I - C 部分。

C. 星等

对宇宙导航来说，星体发射的光通量是一个很重要的特性，能用它来识别一个星体，虽然不能说这是一个很好的标准，但是，在设计识别星体或测量其特性的仪器时，是一定需要知道能由星体获得多大的辐射量。不同发光度的星体的频率分布将在 II - D 部分中讨论。

星体辐射光通量用对数坐标来表示。视见值和绝对（或真实）值是有区别的。但是，对宇宙导航来说，我们只使用视见数值。假设 f_1 和 f_2 代表在地球大气上面从两个星体上所接受的光通量（瓦/厘米²），这两个星等差可以由下式表示：

$$m_2 - m_1 = 2.5 \log(f_1/f_2)。$$

这样，相差一等相当于 4 个分贝（应为 8 个分贝——译者）。等级标度的零点是任意选择的，而等级差即给出相对光通量。零点的选择可将相对测量值转换成绝对值。

前面已经提到过，星体辐射近似黑体辐射。大多数光测量设备，只对有限光谱区域敏感。而且即使在这些区域里面，光谱灵敏度也是不均匀的。眼睛、照像底板和新型的光电池都曾经用来进行过星等测量。这些测量包括了一个宽的或是一个窄的光谱带。目视和照像方法采用很宽的带。眼睛最高的灵敏度大约在 0.50 和 0.62 微米之间，其最大值在 0.556 微米。照像底板的灵敏度不一样，但是在天文光度学中，最常用的几种的最高灵敏度大约在 0.35 到 0.50 微米之间，其最大值在 0.46 微米。现在有很多光敏面可以利用。它们曾经同有着宽的和窄的透射带的滤光器联用。显然，对一个给定的星来说，不同的设备所测出的星等都是不相同的。因此，就有这样几种等级——目视的、照像的、电视的（正色片和黄色滤光器合用具有近似与眼睛相同的灵敏度）、红外的、测辐射热的，和其他多种光电等级。各种不同等级标度的零点也是可以任意调整的。

颜色指标（CI）是照像等级（ m_{pg} ）与目视（或电视）等级（ m_v 或 m_{pv} ）二者值之差，

$$C. I. = m_{pg} - m_v,$$

或

$$C. I. = m_{pg} - m_{pv}。$$

同样，任何其他两种等级的差值也称为颜色指标。为了避免因确定颜色指标所用的等级的混乱，因此各种等级都有不同的符号标记。各种不同等级进行综合，将得到不同的颜色指标。

目视、照像和电视等级标度曾经使用了一个很长时期，并为国际上所确认。在星表中所给出的等级值，例如本文 II - A 中所讨论的各值，通常都是这三种当中的一种。星等值通常给出一位或者二位小数。但最后一位小数通常意义不大。天文学家们不需要很精确的，具有宽带型的视见等级。这理由很简单：因为天文学家们需要的是星体，他们最感兴趣的是绝对（或真实）等级。但因为不能精确地测量距离，所以等级准确度有所限制。此外，这些等级也不能给我们提供在窄光谱带中所具有的光通量值，或者其他光谱段中的光通量值。如果我们假设星体辐射是一个黑体分布，而且已知星体的温度，那么我们就可推导出光通量值。（见表 2，图 2 和参考文献[22]）。除了几个已知精确数据的亮星以外，由目视、照

像或电视等級所推导出的星体光通量绝对值的误差,可能达到百分之几。一个 m_{pg} 或 m_{pv} 等級的星体所接受到的光通量值 (瓦/厘米²微米),可近似由下式得出:

$$\log f_{\lambda} = -0.4m_{pg} - 11.3 \quad \text{在 } \lambda \sim 0.43 \text{ 微米};$$

$$\log f_{\lambda} = -0.4m_{pv} - 11.45 \quad \text{在 } \lambda \sim 0.54 \text{ 微米}。$$

在一些相对窄带内曾经作了较为精确的光电星等的测量。但是,这些测量只适用于一小部分星体。下面将讨论一些重要的光电测量。更仔细的讨论可参阅[23]。

在光电测量方面,最早的工作是由 Stebbins 和 Whitford[24]所建立的 6 色光度学,以后又被 Stebbins 和 Kron[25]所发展。6 色的范围是从 0.35 μ 到 1.03 μ ,但只有 400 个星的等級可应用。最广泛采用的系统是 Johnson 和 Morgan[26]的三色系统 (UBV)。有效波长是 0.36 μ (U), 0.43 μ (B) 和 0.55 μ (V)。(V) 等級系统曾经被作为国际电视等級应用。Johnson 和 Morgan 表中包括大约 300 个星, Hiltner[27] 中有 1259 个 O 与 B 型的星。Hiltner 文献中还包括了极化和光谱型的数据。

Harris 曾经提出[45] Hardie 曾做过但未经公布的红 (R) 与红外 (I) 的等級系统。有效波长为 0.69 和 0.82 μ 。这方面所作的星等测量还不够多,但是使用 R 和 I 等級的一些行星数据,现列于表 8 与表 9 中。

最近 Willstrop [28] 曾经公布一组非常好的绝对测量数值。他采用了四个窄带 ($\sim 200 \text{ \AA}$) 滤光器,它们的最大峰值透射率为 5410, 4600, 4340 和 4220 $\text{\AA}$ 。他曾经给出一个零等 $V=0.00$ 星的辐射光通量和在四种波长时, 20 个不同值的 (B-V) 颜色指标 (从 -0.3 到 +1.6)。他估计相对值的标准误差为 $\pm 2\%$ ($B-V < 1.2$ 时) 和 $\pm 3\%$ ($B-V > 1.2$ 时)。在他的 4 个 (窄带) 颜色系统中,他曾经测量出 221 个星的等級和颜色指标。

D. 不同视见星等的星体频率

图 3 给出了一个比给定的照像或视见等級 (m_{pg} 或 m_v) 还要亮的星体数目 Ω_m 。 Ω_m 是随着 m 近似对数地增加,但是在等級较高时则偏离开。由该图还可以看出: 较给定的照像等級还亮的星体数目比起同一视见等級还亮的星体数目来说,那么前者要小于后者 2/3。当星体逐渐减弱时,比值将减少。当等級 m 为 10 时,比值将小于 1/2。

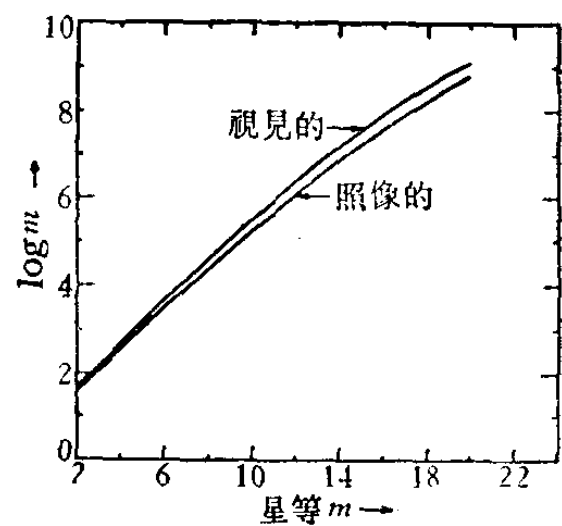


图 3 比视见等級 m 还要亮的星体数量 Ω_m

E. 地球上星体的分布

图 4 示出在采用赤道坐标系时, 50 个照像上最亮的星体的分布图。很明显, 分布是十分不均匀的。两根实线曲线是代表平行于银河纬度的两根线 ($+15^\circ$ 与 -15°)。50 个星体有 32 个是落在这窄带之内。

当极限等級值愈来愈大时, 不均匀分布就更加显著, 如图 5 所示。在图中 $\log N_{mrg}$ (在每一方度中比照像等級 m_{pg} 更亮的星数) 和银河纬度作为纵横座标 ($m_{pg}=5, 10, 15$ 和 20)。显然, 对任意一个极限照像等級 m_{pg} 来说, 在高银河纬度的星是较少于近银河赤道的星数。

银河的形状很像一个透镜, 太阳是在银河平面的一边。因此我们在低银河纬度上可以看到星体集中的现象。

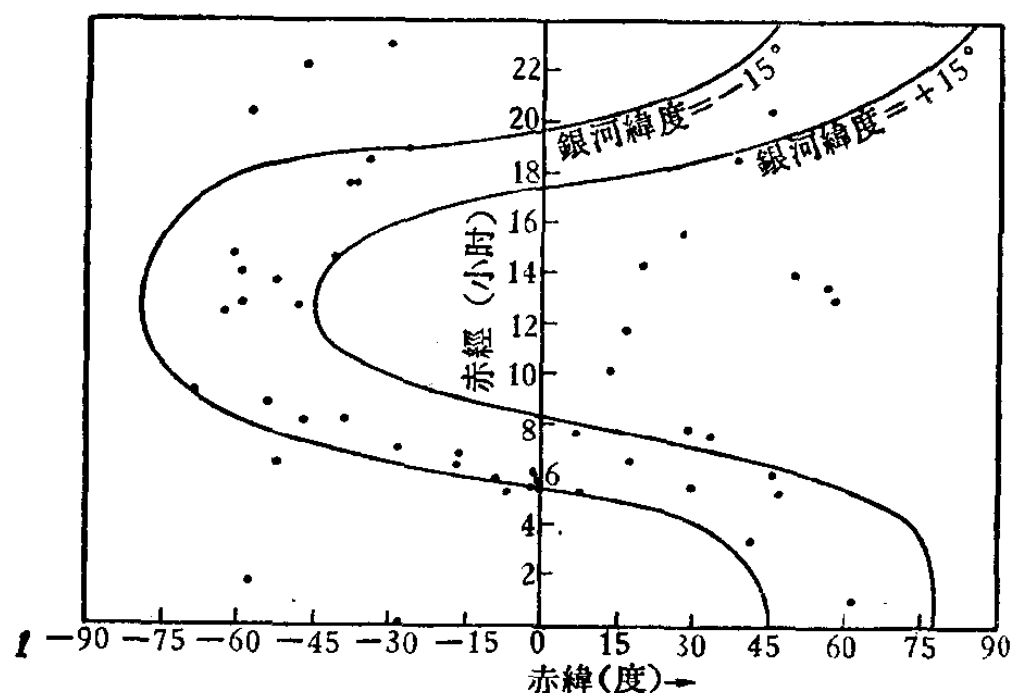
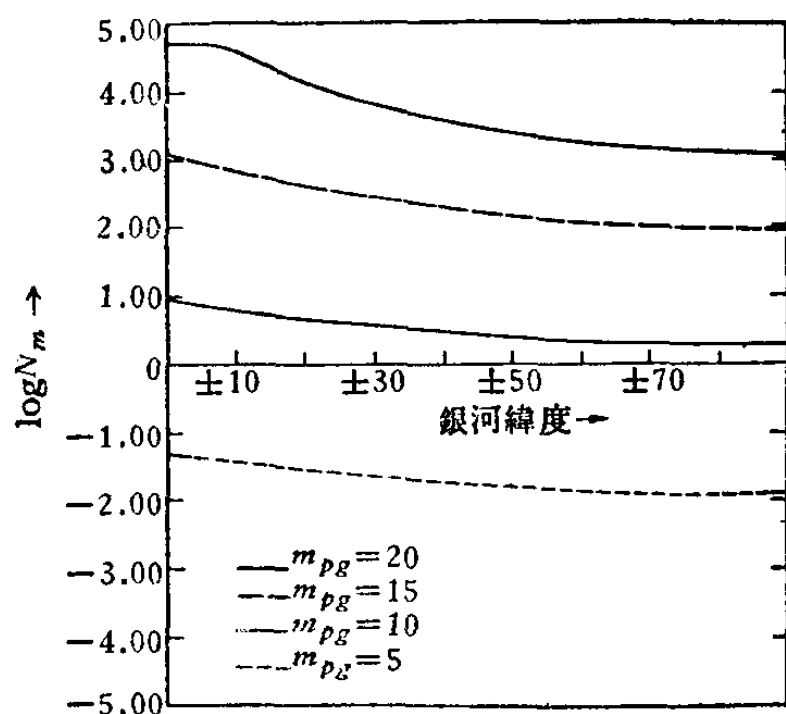


图4 50个外观最亮的星 (照像等级)

图5 在不同銀河緯度比 m_{pg} 等级更亮的星体数目

III. 行 星

根据能从宇宙飞船上观测行星的实践，提出了与观测星体完全不同的问题。虽然是经过小孔径的望远镜来观测的，但行星还是呈现盘状。行星是围绕太阳来运行的，因此它们在天空中的相对位置是经常地变化着的。我们必须准确预知行星的轨道，然后才能利用宇宙飞船来进行行星的定位测量。行星的亮度也是随着相距太阳和观测者之间的距离而变化着的。此外，在行星盘上的亮度分布也是不均匀的。这意味着行星的发光中心不一定是它的质量中心。在确定行星质量中心的位置时，还由于行星的盈亏而变得更加复杂。金星、地球、火星和主要的行星都有大气层，这也给行星测量增添了麻烦。

A. 行星位置

宇宙航行中位置的确定是取决于对飞船中所观察到的各个天体之间的夹角测量。在制定航行计划时必须知道各行星的相对位置。本节我们将讨论天文时间、距离单位，以及行星坐标的制定和精确度等有关问题。

世界时 UT (即格林威治民用时——译者) 是形成广播时间信号的基础，例如 WWV 、 CHU 等时间信号。世界时是从天文观测的平均太阳时推导出来的，也即是从地球的旋转推导出来的。由于人们已知地球旋转的速度是不规律的，而且是无法预测的。因而提出了一种要较 UT 均匀的“牛顿”时间或者称为“历表时” ET 。行星位置是按照历表时来公布的。如果使用 UT ，则必须加以 $\Delta t = ET - UT$ 的修正。历表秒的定义是：1900年1月天0.5的一个太阳年的 $1/31,556,925.9747$ [29]。历表时和太阳时之差变化很慢，而且不规则。在前十年内，每一年的改变都小于1秒；在1959年5月 Δt 等于 +33.0 秒 (1963年可参阅参考文献 [17])。 Δt 只能在几年以前预测到几秒钟的范围。更准确的 Δt 值可以由二、三年周期的观测中推导出来。

近似的历表时，在实验室内可由铯“原子钟”来确定出历表秒。每年误差为 2×10^{-9} 或 ~ 0.1 秒 [30]。这样的准确度是适用于宇宙导航的，是在宇宙定位的误差范围之内。这表明宇宙航行中，可以采用一座钟可靠地保持历表时的准确度在 ± 1 秒之内。依照航程

時間的長短（由幾個月到幾年）相應的相對誤差為 10^{-7} 到 10^{-8} 秒。採用晶體振蕩器很容易得到這樣的準確度，因此在經過標準原子鐘校正後，可以用它來給出歷表時。也可以採用 WWV 標準頻率發射來校正振蕩器。從 ET 發射頻率到大約 UT 頻率時，需要有一個小的允許偏移[31]。

太陽系中的基本長度單位是天文單位，它等於地球軌道的長軸半徑。已公布的以太陽為中心的直角坐標系，採用了天文單位。太陽系中各種天體的矢量半徑值都是用這種單位量度的。

天文單位和標準公尺的精確比值，雖然還是最近才確定，但在很早以前，人們對星體之間的距離已能測到多於 6 位有效數。對星體之間距離的直接測量，例如 1961 年對金星的雷達試驗，都可以用來確定天文單位的長度。利用 Jodrell Bank、噴氣推進試驗室、林肯試驗室、美國無線電公司和蘇聯所公布的材料[32]，採用同一光速（299,792.8 公里/秒）以及各個試驗結果的平均值，我們可以得到天文單位的平均值為：

天文單位 $a.u. = 149,598,650 \pm 450$ 公里。

在本文中對這個值我們也採用了其他的量。Levy 曾對行星位置表的準確度作過討論[18]。通常使用的最準確位置表有下面幾種：由 Newcomb 提出的[33]和進行過修正的[34]水星、金星和地球——月亮系統位置表；由 Duncombe 和 Clemence 提出的[35]火星位置表。對於外圍的行星來說，它們的可靠位置[36]和修正值[37]也都曾經公布過。

“1960~1980”年行星座標[38]是一個很簡便的表。該表具有有限的小數位數，適用於作粗略的水星計算。表中還包括有適宜於所有導航用的其他行星，對於已經公布的各種位置表的可能誤差的估計值都列於表 3 中。

表 3 行星位置表可能誤差的估計值

天	體	公 里	行 星 半 徑 的 分 數 值	1 個天文單位 $a.u.$ 的角度	在平均太陽距離 時 的 角 度
水星		100	1/23	$0''.1_4$	$0''.4$
金星		150	1/41	0.2	0.3
地球-月亮系統		100	1/64	0.1_4	0.1
火星：					
(i) Newcomb 和 Ross 位置表		150	1/22	0.2	0.1
(ii) Duncombe 和 Clemence 位置表		100	1/34	0.1_4	0.1
某些小行星		150	0.4~6:	0.2	0.1
木星		600	1/120	0.8	0.2
土星		600	1/96	0.8	0.1
天王星		1000	1/25	2.1_4	0.1
海王星		1500	1/15	2.0	0.1
冥王星		3000	1	4.0	0.1

一個行星的觀測位置受到觀測者和行星兩種運動影響所發生的偏差，第一種叫做正常偏差，第二種叫做行星偏差。如果行星和背景星體，差不多都在同一方向上，則正常偏差可以自動消除。行星偏差可以用提前觀測時間來消除，也即如果在 T 瞬間觀測行星，則由表上查行星位置時可採用提早的時間 $(T - t)$ 。其中 t 為“光方程”或延遲時間。

光速

$$c = 299792.8 \pm 0.3 \text{ 公里/秒}$$

以及天文单位相适应的光方程式值为:

$\theta = 499秒.0068 \pm 0秒.0015 (a.u.)^{-1}。$

因此光经历时间为

$t = \theta \Delta,$

Δ 为以天文单位表示的与被观测行星间的距离。

对于进动的修正, 可以参阅球面天文学或天体力学中的通用修正公式, 也可以用查表的方法来得到。

B. 行星直径

各行星 (除了水星及可能还有火星以外) 都是迴轉橢圓体, 在两极位置扁平。橢圓率为

$f = \frac{r_e - r_p}{r_e} = 1 - \frac{r_p}{r_e},$

表 4 行星的光学直径①

	角 直 径②	綫 直 径	橢圓率倒数 f^{-1}	备 考
水星	6".46±0."02	4685公里±15	298 100±10	摘自 de Vaucouleurs [39]
金星③	16".86±0."03	12230±20		
地球④				
紅外(晴天)				
赤道的	17".598±0."001	12763±1		
极的	17".538±0."001	12720±1		
紅外(云遮)				
赤道的	17".610±0."002	12772±2		
极的	17".548±0."002	12727±2		
目視				
赤道的	17".635±0."003	12791±2		
极的	17".554±0."003	12732±2		
火星			15.0	摘自 Sampson[40]
赤道的	9".415±0".015	6828±10		
极的	9.32±0".01	6760±7	9.3±0.1	采用一般方法; 更侧重于 Lowell[41]。包括有 历表各值[17]的早先测 量, 看起来受輻照的影 响很大
木星				
赤道的	3'16".94±[1".4]	142840±[1000]		
极的	3'03".82±[1".4]	133320±[1000]		
土星				
赤道的	2'44".55±1".14	119300±800		
极的	2'26".90±1".72	106500±1250		
环系統(指土星环——譯者)				
外直径	6'18".88±0".67	274800±500		
卡西尼(Cassini)区中点	5'28".61±0".19	238330±140		
卡西尼区宽度	6".68±0".48	4840±350		

① 除非特別指明, 各直径都是指可見光($\lambda \approx 0.55 \mu$)而言。
② 距离为一个天文单位。
③ 云层外部。
④ 已做折射修正。