



航天科技图书出版基金资助出版

定向原理 与方位角的传递

孙方金 王姜婷 张玉龙 等著
缪寅宵 王俊勤 审定



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助项目

定向原理与方位角的传递

孙方金 王姜婷 张玉龙 张俊杰 张新远
李永刚 刘为任 周玉堂 王兴岭 张忠武 著
缪寅宵 王俊勤 审定



中国宇航出版社

· 北 京 ·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

定向原理与方位角的传递 / 孙方金等著. -- 北京 :
中国宇航出版社, 2014. 6

ISBN 978 - 7 - 5159 - 0683 - 6

I. ①定… II. ①孙… III. ①定向测量 ②方位角测量
IV. ①P204 ②P212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 106813 号

责任编辑 马 航 装帧设计 文道思

出版
发行

中国宇航出版社

社 址 北京市阜成路 8 号 邮 编 100830
(010)68768548

网 址 www.caphbook.com

发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)
(010)68768541 (010)68767294(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010)68371105 (010)62529336

承 印 北京画中国画印刷有限公司

版 次 2014 年 6 月第 1 版
2014 年 6 月第 1 次印刷

规 格 787 × 1092

开 本 1/16

印 张 22.25

字 数 487 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 0683 - 6

定 价 188.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

序

导弹、火箭发射时，需进行射向初始对准，射向初始对准包括定向和传递两部分。定向是指获得标准方位角操作过程，通常采用三种定向方法：大地测量法定向、惯性技术定向和 GNSS 卫星导航系统定位法定向。传递是指把标准方位角传递至弹上或箭上瞄准基面的过程。在传递过程中，需适应各种复杂的环境条件，如：动基座条件下的传递、具高度差时的传递和在狭小空间中的传递等。有时传递需构成一个分系统。

定向和传递涉及三大专业：大地测量专业、惯性技术专业和测试计量技术与仪器专业。由于专业特点不同，为了保证本书的质量，三个专业的专家们分别负责撰写、校对和审定各自专业的内容。中国人民解放军卫星定位总站和六一三六五部队负责第 3 章大地测量法定向和第 5 章卫星导航系统定位法定向的撰写；天津航海仪器研究所负责第 4 章惯性技术定向的撰写；北京航天计量测试技术研究所负责第 1, 2, 6, 7 章的撰写及全书的统一构思与审定。在老专家把关的前提下，一些青年科技人员也参加了撰写工作。

本书力求既能适合本专业读者的特点，又能适合非本专业读者的需要，在他们获得定向与传递的基础知识和基本概念的同时，能按工作需求选用内容，因此书中重点介绍了定向与传递的工作原理、基本方法、性能特点与实用公式，并尽量从物理概念上阐述清楚。对一些新研究的方法，不仅说清其原理、特点，还写明了尚存在的不足之处及改进意见。即使对一些已列入规范、比较经典的方法，也尽量从分析的角度，指出其优缺点，说明其演变、发展过程。

本书是一本计量科学和型号实践相结合的专著。计量工作保障了型号任务的完成，型号任务促进了计量技术的发展。本书介绍的方法和设备，基本都经过了型号任务的考验，行之有效。由于是计量行业的专著，因此采用了计量行业的名词、术语，如：有关部门常用“中误差”表达的误差，本书用“标准偏差”表达，而将“精度”以“准确度”表达等。

本书的出版得到了航天科技图书出版基金和北京航天计量测试技术研究所的资助。书中有关工程光学的内容，得到了长春理工大学王志坚教授的帮助。北京航天计量测试技术研究所周谦、李廷元同志为本书的撰写和出版，做了大量的工作，特此一并表示感谢。

作 者

2014 年 5 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 瞄准基面	1
1.2 方位角	2
1.3 定向方法	3
1.3.1 大地测量法定向	3
1.3.2 惯性技术定向	4
1.3.3 卫星导航系统定位法定向	8
1.4 方位角的传递方法	10
1.4.1 传递时的对准——重合法与准直法	10
1.4.2 方位角导引法	13
1.4.3 折转光管平移法	14
1.4.4 五棱镜折转定角法	14
1.4.5 垂直传递法	15
1.4.6 自动补偿技术	16
1.5 方位角的传递设备	16
1.5.1 经纬仪类仪器	16
1.5.2 附件化的测量器具	17
1.5.3 自准直仪	18
1.5.4 自调平工作台	19
1.6 动态测量	19
1.6.1 基本概念	19
1.6.2 基本方法	20
1.6.3 动静态比较法	21
1.6.4 陪检工具验证法	22
1.7 计量校准	23
参考文献	25

第 2 章 180°反射式三棱镜	26
2.1 性能特点	26
2.1.1 对角度的单向敏感特性	26
2.1.2 多像特性	28
2.1.3 对水平度的函数敏感特性	31
2.2 棱线水平度	32
2.2.1 公式推导	32
2.2.2 等效法推导	34
2.2.3 实验验证	35
2.2.4 检测方法	36
2.2.5 自调平三棱镜	40
2.3 安装要点	40
2.3.1 平面度与安装变形	41
2.3.2 支点距离	43
2.3.3 与主基面平行度	46
2.4 反射率	48
2.4.1 薄膜特性	48
2.4.2 反射率的垂直入、反射测量法	50
2.5 分体式金属三棱镜	52
2.5.1 性能特点	52
2.5.2 结构实例	53
参考文献	54
 第 3 章 大地测量法定向	 55
3.1 大地方位角测量	55
3.1.1 地球的形状和大小	56
3.1.2 参考椭球体	58
3.1.3 测量坐标系的概念	60
3.1.4 大地(导线)与工程测量建立控制网的基本要求	70
3.1.5 地地导弹基准边方位角联测方法	73
3.2 天文方位角(真方位角)测量	80
3.2.1 概述	80
3.2.2 天球坐标系	83
3.2.3 天文测量中的时间系统	88

3.2.4 恒星视位置计算	92
3.2.5 天文经纬度与方位角测定的基本原理	101
3.2.6 天文点的测定	105
3.3 几种方位角的关系	111
3.3.1 大地方位角与天文方位角的关系	111
3.3.2 大地方位角与平面坐标方位角的关系	112
3.3.3 大地北、平面坐标北和磁北之间的关系	112
3.3.4 磁偏角与大地方位角、平面坐标方位角的关系	113
参考文献	114
第4章 惯性技术定向	115
4.1 基础知识	115
4.1.1 发展历程	115
4.1.2 名词术语	116
4.1.3 惯性空间	117
4.1.4 惯性坐标系、载体坐标系与导航坐标系	118
4.2 陀螺仪	119
4.2.1 单自由度液浮积分陀螺仪	120
4.2.2 静电陀螺仪	122
4.2.3 激光陀螺仪	124
4.2.4 光纤陀螺仪	126
4.2.5 微机械陀螺仪	129
4.3 加速度计	131
4.3.1 概述	131
4.3.2 液浮脉冲摆式积分加速度计	131
4.3.3 石英挠性加速度计	133
4.4 静态惯性定向设备	134
4.4.1 陀螺经纬仪	135
4.4.2 寻北仪	146
4.5 动态惯性定向设备	152
4.5.1 舒勒调谐原理及在惯性导航系统中的实现	152
4.5.2 惯性导航系统	157
4.5.3 陀螺罗经	172
参考文献	181

第 5 章 GNSS 全球卫星导航系统定位法定向	182
5.1 GNSS 全球卫星导航系统	182
5.1.1 GNSS 全球卫星导航系统概述	182
5.1.2 卫星导航的特点	184
5.1.3 卫星导航时空基准	185
5.2 卫星导航定位基本原理	186
5.2.1 卫星导航系统构成	186
5.2.2 卫星定位基本原理	190
5.2.3 GPS 信号	191
5.2.4 GPS 的定位方法	193
5.2.5 载波相位测量	201
5.2.6 载波相位测量的同步观测解	205
5.2.7 GPS 导航定位采用的坐标系统	208
5.3 GPS 测定大地方位角	209
5.3.1 GPS 网的布测	210
5.3.2 GPS 接收机及其检验	212
5.3.3 GPS 测量主要误差	221
5.3.4 GPS 测量	225
参考文献	241
 第 6 章 方位角的传递方法	 242
6.1 平行光准直法	242
6.1.1 工作原理	242
6.1.2 等效距离	243
6.1.3 视场切割	244
6.2 发散光投射法	245
6.2.1 工作原理	245
6.2.2 测量方法	247
6.3 方位角导引法	251
6.3.1 测量方法	251
6.3.2 注意事项	252
6.3.3 应用举例	254
6.4 折转光管平移法	255
6.4.1 工作原理	255

6.4.2 应用举例	256
6.5 五棱镜折转定角法	256
6.5.1 五棱镜的工作原理	257
6.5.2 水平度对角度的影响	258
6.6 偏振光垂直传递法	260
6.7 线状激光投射、差分输出垂直传递法	264
6.8 自动补偿方法	268
6.8.1 自准直仪漂移的差动反光镜补偿法	269
6.8.2 铅垂度的液体光楔自动补偿法	270
6.9 角锥棱镜的工作原理	272
6.9.1 结构参数	272
6.9.2 工作原理	273
6.9.3 性能特点	275
参考文献	277
第7章 方位角的传递设备	278
7.1 关于经纬仪的基础知识	278
7.1.1 轴系	278
7.1.2 测角系统	282
7.1.3 水准器	286
7.1.4 动态测量功能	288
7.2 附件化的测量器具	292
7.2.1 装于物镜防尘罩处的测量器具	293
7.2.2 装于目镜端的测量器具	294
7.2.3 装于照准部支架上端面、装提手处的测量器具	296
7.3 配套测量器具	299
7.3.1 GPS 标灯、标柱	299
7.3.2 五棱镜	300
7.3.3 角锥棱镜	304
7.3.4 折转光管	309
7.4 垂直传递装置	312
7.4.1 整体式垂直传递装置	312
7.4.2 偏振光垂直传递装置	313
7.4.3 线状激光投射、差动输出垂直传递装置	314

7.4.4 垂直传递装置的检测	315
7.5 自准直仪的种类	318
7.5.1 目视式自准直仪	319
7.5.2 光电指零式自准直仪	320
7.5.3 数字式自准直仪	321
7.5.4 大口径自准直仪	324
7.6 自调平工作台	325
7.6.1 台体结构	326
7.6.2 控制原理	330
7.6.3 动态试验	332
7.6.4 改进意见	335
7.7 动态角校准装置	336
7.7.1 测量器具动态准确度的试验方法	336
7.7.2 动态角校准装置	337
7.7.3 动态指零	340
7.7.4 排列互比法	342
参考文献	346

第1章 概 论

惯性制导系统不仅用于控制弹道式导弹主动段飞行的全过程，还用于控制飞航式导弹保持发射初期的稳定飞行，直至导引头捕获目标。惯性制导的特点之一是需进行初始对准操作，即将发射状态的三向初始角位置信息提供给弹上控制系统。这些信息包括：导弹的射向，双向水平度或对大地水平面的双向姿态角。确定初始射向也称为瞄准，而确定双向水平度或姿态角，早期曾采用调整弹体垂直度的方法确定，当前则大都用弹上的加速度计进行“自主式”对准。

实现射向初始对准的必要条件有：

- 1) 导弹弹体或火箭箭体上需设有瞄准基面；
- 2) 具有已知方位角，即进行定向，该方位角是初始对准的依据，因此一般应具有较高的准确度；
- 3) 把已知方位角传递至瞄准基面，进行方位角的传递，在传递过程中，需适应各种复杂的条件，如：具高度差时的传递、狭小空间中的传递和动态环境条件的传递等。在船舶上的传递往往需组成一个传递系统。

这三个条件中，瞄准基面是在导弹结构设计时设置完成的，因此初始对准是分为定向和传递两大步完成的。

从计量观点看，初始对准属于几何量计量的角度量。在航天工业中，角度量主要用于四个方面：惯性器件及其测试设备，定位、定向设备，遥测跟踪设备和专用工艺装备。

1.1 瞄准基面

瞄准基面是导弹设计时为进行射向初始对准而设置的。和瞄准基面在方位方向垂直、并指向瞄准基面的方向线就是导弹的射向。由于瞄准基面是引出基面，它必须和惯性平台台体上的六面体或惯性组合的侧基面等主基面严格平行，才能代表主基面，因此，两者的平行度是重要的检测项目。在结构设计时，瞄准基面应尽量靠近主基面，连接两基面的结构件要有足够的刚性。当两基面的距离较远时，结构件的变形会增大平行度误差，这种现象称为“杆臂效应”。瞄准基面和主基面平行度的测量，称为“基面转换”。两基面距离较近时的测量，一般属部件测量；两基面距离较远时，如：从弹体的仪器舱至尾翼上部，则属于全弹体测量；当弹体在垂直状态进行测量时，称为“垂直基面转换”；在水平状态进行测量时，称为“水平基面转换”。垂直转换符合使用状态，但操作复杂；水平转换便于实施，但易受弹体挠度影响。

常用的瞄准基面是三棱镜。这种三棱镜的两直角面是反射面，两反射面的相交线称为

“棱线”，棱线是表达三棱镜性能的基准线。斜面是透光面，由于具有两个反射面，因而属偶数面反射。当入射光是平行光，且三棱镜为棱线水平状态安装时，则在俯仰方向上，无论光束水平入射，或成斜角入射，入射光都能原路返回。即俯仰方向对三棱镜的转动及入射角的变化都是不敏感的，只要入射光打在三棱镜上，就能原路返回，获得返回像。而方位方向却保留了平面反光镜的性能，三棱镜在方位方向有微小角位移时，返回光以二倍关系偏离，因此这种三棱镜是单向敏感式反光器件，一般称为 180° 反射式三棱镜。

180° 反射式三棱镜的单向敏感特性是非常有用的。三棱镜一般安装在弹体仪器舱处，距地面较高；而三棱镜的对准和测量仪器距地面的高度要低得多。正是由于三棱镜的单向敏感特点，使得具有较大高度差时的对准、测量成为可能，这时测出的是三棱镜棱线法线的水平角。

180° 反射式三棱镜的特殊问题是“棱线水平度”。当棱线水平时，测量仪器的望远镜光轴无论是成水平状态“平瞄”，还是对水平面成俯仰角“斜瞄”，水平角的读数都是相同的，不引起误差。当棱线不水平时，平瞄仍不引起误差；但斜瞄时水平角的读数将发生变化，产生水平角的测量误差。因此三棱镜在装调和使用时，都应注意棱线水平度问题，使用时常采用测出棱线水平度，再予以修正的方法。

180° 反射式三棱镜不仅用作弹上的瞄准基面，还常用于各种测试工装。例如，惯性组合的侧基面是主基面，当在花岗岩平板上用“多位置法”测试时，需进行定向。惯组的定位采用其侧基面和平板上的两定位销靠住的方法，因此平板上两定位销连线是测试设备的基面，定向时需制造测试工装，工装上制有同样尺寸的侧基面，并装一块 180° 反射式三棱镜，将三棱镜的棱线和侧基面调至严格平行，这样的工装即可用于测试平板的定向。

有关 180° 反射式三棱镜的工作原理、性能特点和测试方法等详见第 2 章。

常用三棱镜作为瞄准基面，但瞄准基面并非只能用三棱镜。具有较好平面度和粗糙度的平面，都可用作瞄准基面，所需的反光等功能，可采用制造测试工装方法解决。

1.2 方位角

空间角常用水平角和垂直角两个分量表达：水平角是空间角在大地水平面上的投影角；垂直角是在铅垂面上的投影角。导弹的射向是指在大地上水平面上的投影角。但是水平角不能确定方向，多个水平角之间是没有任何相互联系的，要使水平角能确定方向，并把不同的水平角联系起来，就需建立一个统一的基准，这个基准就是“北”。把对准北时的方向作为角度的起始边，即角度的零度位置，以顺时针转动的角度值表达，这样就能确定方向，并把不同的水平角联系起来，这就是“方位角”的含义。方位角就是从北起始，顺时针转动的水平角，方位角是没有负值的，例如，从北起始，反时针转动 1° ，不能表达为 -1° ，而应表达为 359° 。

方位角从北起始，但在不同的坐标系中，北有不同的定义，相互间也不重合。北共有五种：天文北、真北、大地北、坐标北和磁北。

1) 天文北。在天文坐标系中,以地球的平均自转轴(国际习用原点 CIO)确定的北称为平天文北,简称天文北。从天文北起始的方位角称为天文方位角。在天文坐标系中,测站点的位置以测站点的大地铅垂线为依据。

2) 真北。真北也属天文坐标系的范畴,从真北起始的方位角称真方位角。真北是指地球的瞬时自转轴,和平均自转轴的差别在半径为 $0.3''$ 左右的范围内变化,因此工程上常用真北来代替平天文北,用真方位角代替天文方位角。如:用陀螺经纬仪找出的是真北,但不再换算至平天文北。

3) 大地北。大地坐标系的特征是采用参考椭球,椭球的中心和地球的质心重合,参考椭球的自转轴为大地北,它位于椭球的短轴处。从大地北起始的方位角称为大地方位角,测站点的位置以测站点至参考椭球的法线为依据。参考椭球的参数经历了多次修改。当前我国 CGC2000 中国大地坐标系的 2000 参考椭球^[1]共有 4 个定义常数:长半轴 ($6\,378\,137\text{ m}$)、地球(包括大气)引力常数、地球动力形状因子和地球旋转速度(地球旋转速度为 $7.292\,115 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$)。按定义常数及相关公式,可以得到导出参数,如:椭球的扁率为 $1:298.257\,223\,563$ 。2000 参考椭球和 WGS-84 协议地球坐标系的参考椭球是一致的。

4) 坐标北。从坐标北起始的方位角称为坐标方位角。高斯坐标系是平面坐标系,用于绘制地图、交通和施工等。

5) 磁北。地球磁场的北称为磁北,从磁北起始的方位角称为磁方位角。地球磁场是不均匀的一片,磁极是在大量测试数据的基础上,用数学解析的方法计算出来的,和地球自转轴的交角约为 11.5° ^[2]。

航天工业主要应用大地坐标系和天文坐标系,导弹的弹道计算用大地坐标系,因而射向的初始对准以大地方位角表达;而惯性器件测试设备的定向则采用天文方位角,这是因为数据处理时,要消除地球自转角速度的影响。

1.3 定向方法

确定测站点在地心空间直角坐标系中 x, y, z 的值,或在大地地理坐标系中的经度、纬度和高程称为定位;确定测站点至目标点两点连线的方位角称为定向。定向共有三种方法:大地测量法定向;惯性技术定向;GNSS 卫星导航系统法定向。

1.3.1 大地测量法定向

大地测量法定向是应用广泛、历史悠久、准确度高、具有基础性和权威性的定向方法。

采用大地测量法定向,需事先埋设好瓷质“标石”,或建造好“标墩”或“观测墩”,水泥干透后才能进行测量。在导弹的发射场坪,为了不影响车辆通行,常采用埋设标石的办法。如图 1-1 所示, A 为测站点,使用时在此架设瞄准或校准用的经纬仪类仪器(均

需有自准直功能)； B 为目标点，使用时在此架设标杆仪。经纬仪和标杆仪均需将仪器上的光学对中器和 A 、 B 点标石上端面的十字线中心或加粗的中心点对准。 $A \rightarrow B$ 方位角 A_0 。要在使用前测好，因此当经纬仪望远镜目镜分划板竖丝和标杆对准，望远镜光轴的方位角即为 A_0 ，把经纬仪转 θ_1 角， A_0 和 θ_1 之和，等于要求的射向方位角。转动发射台，直至弹上三棱镜和经纬仪自准直，此时指向棱线的三棱镜法线即处于要求的射向方位角上。由于只有一个传递角 θ_1 ，因此属一次传递。一次传递虽然简单，但布点时需进行“放样”，以保证经纬仪转到射向位置不能再转时，仅转动发射台就能够准直。一旦布点完成后，一次传递只能用于预定射向。如果射向改变，就需重新布点，更不能绕过地下井或船舶上的结构障碍物。 A 、 B 两点的距离应该适当，不能太近，以减小定向测量与使用时“对中”误差的影响。

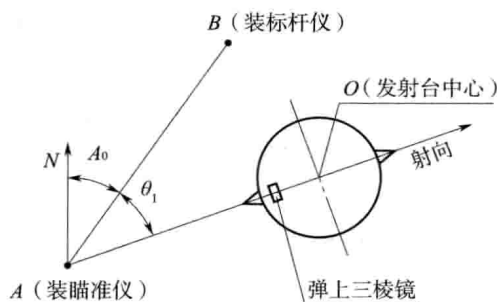


图 1-1 一次传递法原理图

惯性技术实验室中的定向，不可能设置像场坪那样有足够远距离的两点，一般距离都很近，因此常采用建造“标墩”的方法。墩上固定平面反光镜，因其像质比三棱镜好，常用大地测量法测出箭头指向反光面的法线的方位角。惯性技术一般用天文方位角。在大地测量建点时，为了保持稳定性与观测的方便，也常采用建墩的方法。此时在墩中埋设一个连接螺栓，螺纹的中心为测站点或目标点，为和经纬仪及卫星系统定位接收机天线的连接相适应，螺纹单位为英制单位，直径为 $5/8$ in，螺距为每吋 11 牙。经纬仪连接上后即进行了定心，不再需要进行对中操作，因此称为“强制对中”。强制对中不仅操作方便，而且具有更高的对中准确度，螺纹付的间隙一般为 0.1 mm，而光学对中器和主机竖轴同心度指标为 0.5 mm。为保证使用中的稳定性，标墩和观测墩建造时需有地基，地基深度需挖至冻土层以下。

大地测量法定向，测前需埋设标石或建墩，因此适用于“有准备阵地”；定向成果是两固定点连线的方位角，因此属“静态测量”范畴。

有关大地测量法定向的测量原理、测量方法、技术指标，详见本书第 3 章。

1.3.2 惯性技术定向

惯性技术定向是一种重要的定向方法，在特定条件下，有时既不能采用大地测量法定向，也不能采用 GNSS 卫星系统定位法定向，唯一可行的是惯性技术定向。例如：为适应

水下的环境条件,潜艇在水下用艇上安装的惯性导航平台,进行动态定向,输出实时方位角。在船舶工业中称方位角为航向角;又如:矿井等地下作业,也需用惯性技术定向,由于是静态定向,因此常用陀螺经纬仪。

惯性定向设备的核心元件是陀螺仪。传统框架陀螺仪装有高速旋转的转子,当没有外力矩作用时,自转轴的指向相对惯性空间保持不变,即具有“定轴性”;当陀螺仪受到外力矩作用时,自转轴的指向向外力矩矢量方向进动,即具有“进动性”。近年来,出现了激光陀螺仪、光纤陀螺仪、原子陀螺仪等新型陀螺仪,这些陀螺仪没有高速旋转的转子,不具有定轴性和进动性,在工程上主要应用其“能测量出相对惯性空间旋转角速度或角位移”这一特性。

应用惯性技术的定向设备很多,按其基本工作原理,主要有两类:摆式原理和罗经原理。摆式原理利用了陀螺仪的定轴性和进动性,主要代表设备有陀螺经纬仪等;罗经原理利用陀螺仪的能测量出相对惯性空间旋转角速度或角位移的特性。

1.3.2.1 摆式原理定向

摆式原理定向是指利用地球自转引起的陀螺轴绕真北的往复摆动轨迹进行定向。产生摆动有两个条件:陀螺主轴具有水平方向和垂直方向作双向摆动的自由度(即具有两个完全的自由度);装有陀螺的灵敏部重心在陀螺仪中心之下,并和支点有一段距离。支点是指灵敏部和悬挂带(又称吊丝)的连接点。摆动法采用的典型仪器是陀螺经纬仪,陀螺经纬仪是陀螺仪和经纬仪的组合,陀螺仪用于寻北,经纬仪用于测角。按陀螺经纬仪寻北原理可知,其寻出的是地球瞬时自转轴的真北,测出的是真方位角,近似为天文方位角。陀螺经纬仪具有较好的机动性,不需要事先设置大地测量点,因此可用于无准备阵地的定向。由于不需接收卫星等外界信号,因此可用于地下作业时的定向。准确度最高的陀螺经纬仪是瑞士的吊丝式陀螺经纬仪,其标准偏差为 $3.2''$,但对震动敏感;在寻北的摆动周期内又需保持方位不变,因此可用于地下作业时的定向,不能用于动态寻北。

根据经纬仪和陀螺仪的结合方式,可分为上架式和下挂式两类。几乎所有的精密级仪器和自动化程度较高的仪器,均采用下挂式结构。吊丝式陀螺经纬仪^[3]属于下挂式结构,吊丝材料一般选用高弹性合金材料,截面多为矩形,寻北依靠的是陀螺仪敏感地球自转引起的大地水平面的变化。由于地球自转,某一时刻测站点的大地水平面和前一时刻的大地水平面都不平行。随着地球的自转在惯性空间作连续的转动,装在灵敏部内的陀螺仪,由于定轴性要保持其主轴在惯性空间的稳定,因此使得陀螺仪主轴和下一时刻大地水平面产生了夹角,从而引起支点和该时刻的大地铅垂线不重合,产生偏离距 a ,如图1-2所示。该偏离距和灵敏部的重力 G 形成外力矩 $G \times a$ (重力矩),该力矩作用在陀螺仪主轴上,使陀螺仪产生进动。假设陀螺仪主轴的正端偏离子午面以东,则进动使陀螺主轴回到子午面,此时,陀螺仪主轴和测站点大地水平面的夹角达到最大值,重力矩 $G \times a$ 和进动角速度也达到最大值,陀螺仪主轴继续进动,直到陀螺仪主轴和大地水平面重合;此时,重力矩 $G \times a$ 消失,但由于大地水平面继续转动,子午面以西不断升起,此时陀螺仪主轴正端低于水平面,重力矩出现负值,主轴又开始向东进动,从而加速了向子午面方向的运动,

出现了上述现象的逆过程。以角度表达的陀螺轴摆动轨迹是一个椭圆，椭圆两端是改变方向的两“反回点”，两反回点的中间位置，即是摆式定向仪器寻找的真北。

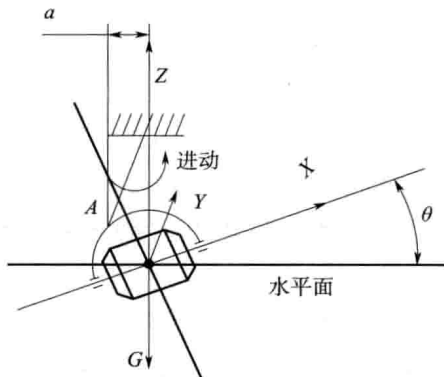


图 1-2 力矩形成原理图

陀螺的摆动周期越长，则定向所需的时间也越长。为了缩短摆动周期，常用的办法是增大灵敏部的质量，采用温升较小的直流陀螺马达，并把供电电池装于灵敏部内。这种方法能有效减小摆动周期，但电池寿命到期更换时，易破坏悬挂灵敏部的平衡，需专业部门完成，维修不便。

按陀螺摆动轨迹寻北，有人工测法和自动测法两种途径可以完成，一般来说，上架式陀螺经纬仪多采用人工测法，主要有跟踪逆转折点法、中天时间法和记时摆幅法等。自动测法主要有自动跟踪法、多点光电记时法、光电积分法、光电时差法等。另外，还有能使陀螺主轴稳定在指北方向的方法如脉冲阻尼法和连续阻尼法等，这些方法也都只适应于静态定向。

陀螺轴水平方向的摆动中心，原理上应是北；但由于仪器制造、装调误差的影响，实际对北往往有个常值夹角，称为“仪器常数”。该常数可用一等天文点作为标准测出，并在使用时予以修正。

吊丝式陀螺是摆式原理定向的一种方案，但不是惟一方案。图 1-3 是液浮式陀螺寻北仪原理图，宝石环 4 和支轴 5 组成径向约束点，灵敏部绕该点可作双向摆动；灵敏部质心 C 在浮力中心 D 之下，两点之间的距离为 L ，并应符合摆动的二个条件。陀螺稳速后，能产生绕北的摆动，其寻北原理和吊丝式陀螺是一样的，由于液体有减震和阻尼作用，因此能提高仪器的抗震性和摆动的稳定性，但液体对摆动的阻力比空气大，会影响灵敏度。

1.3.2.2 罗经原理定向

采用罗经原理定向的典型且重要的设备是船舶上的惯性导航设备^[4]，在动态环境条件下，它能输出实时的方位角（航向角），其寻北原理是敏感地球自转角速度的东向分量、北向分量和垂直分量，并解算出船舶首向与北的夹角，见图 1-4 所示。把地球自转轴平移至通过测站点，则地球自转的角速度矢量可分解为垂直分量（又称方位分量）、北向分量（又称水平分量）和东向分量（与 z 、 y 轴垂直并指东的为 x 轴， x 轴上的分量为东向

分量)。三个分量的关系式如下:

$$\left. \begin{aligned} \text{东向分量: } \omega_{ex} &= 0 \text{ (因和地球自转轴垂直)} \\ \text{北向分量 (水平分量): } \omega_{ey} &= \omega_e \times \cos\varphi \\ \text{垂直分量 (方位分量): } \omega_{ez} &= \omega_e \times \sin\varphi \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中 ω_e ——地球自转角速度;

φ ——测站点的大地纬度。

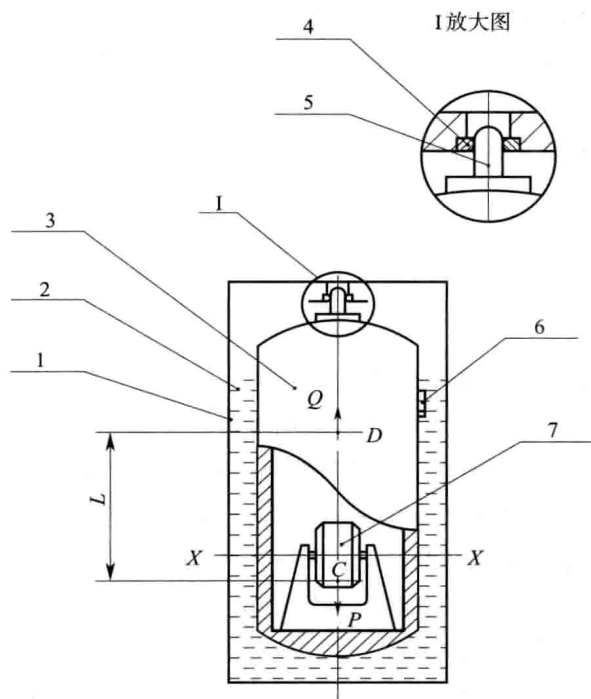


图 1-3 液浮陀螺寻北仪原理图

1—容器; 2—液体; 3—灵敏部; 4—宝石环;
5—支轴; 6—反光镜; 7—陀螺马达

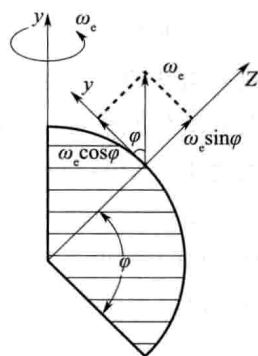


图 1-4 地球自转的角速度分量图

测量地球自转角速度的三个分量, 需采用敏感轴相互垂直的三个速率陀螺进行。速率陀螺的敏感轴和坐标转轴平行时, 速率陀螺敏感到的地球自转角速度分量如式 (1-1) 所示, 其中敏感轴指东的称为东向陀螺, 敏感轴指北的称为北向陀螺, 敏感轴垂直向上的称为方位陀螺。当北向陀螺的敏感轴对指北的坐标轴具 θ 角时, 北向陀螺和东向陀螺的输出发生改变, 如下式所示:

$$\left. \begin{aligned} \text{北向陀螺的输出: } \omega_{ey} &= \omega_e \times \cos\varphi \times \cos\theta \\ \text{东向陀螺的输出: } \omega_{ex} &= \omega_e \times \cos\varphi \times \sin\theta \\ \text{方位角 } \theta \text{ 为: } \theta &= \arctan [\omega_{ex} / \omega_{ey}] \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

在原理上, 利用罗经法静态寻北需要两个单自由度陀螺仪, 但也可利用一个单自由度陀螺仪通过旋转等效实现。如需动态寻北, 则需要三个单自由度陀螺仪, 构成伺服回路, 隔离载体运动, 或采用捷联算法, 建立数学平台, 实时解算载体运动。