

东南交通青年教师

科研论丛

# 即插即用式 光纤陀螺全站仪 组合定向技术

于先文 ▶ 著

TRANSPORT

PLUG AND PLAY ORIENTATION  
TECHNOLOGY OF FIBER OPTIC  
GYROSCOPE AND TOTAL STATION

东南大学出版社

东南交通·青年教师·科研论丛

# 即插即用式光纤陀螺全站仪 组合定向技术

于先文 著



东南大学出版社  
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

## 内容提要

GPS 测量技术的一个重要优势是不需点间通视,于是在地面日常测量中希望有简捷的单点定向技术与 GPS 测量技术相配合。鉴于光纤陀螺具有全固态、数字输出、启动快等优点,将其与全站仪组合,实现即插即用,完成定向后卸去光纤陀螺,全站仪可继续进行日常测量工作。本书共分三大部分,第一部分主要叙述了需求背景、组合定向的地理基础、全站仪的主要构造、光纤陀螺定向原理及误差特性;第二部分主要介绍了组合方案、操作方法,建立了观测方程以及坐标方位角计算公式,介绍了组合常参数标定的条件、方法,分别对常参数标定精度和定向精度进行了分析,介绍了光纤陀螺全站仪组合定向的应用方法;第三部分介绍了原理样机的硬件制成、解算软件开发以及常参数标定过程,利用原理样机进行了外业测试及精度分析。

本书可作为惯性技术应用、测绘工程、测绘仪器等技术领域的科技人员、工程技术人员的参考书籍。

## 图书在版编目(CIP)数据

即插即用式光纤陀螺全站仪组合定向技术/于先文  
著. —南京:东南大学出版社, 2014. 12

(东南交通青年教师科研论丛)

ISBN 978-7-5641-5416-5

I. ①即… II. ①于… III. ①即插即用技术—光学  
陀螺仪—全站型光电速测经纬仪—研究 IV. ①TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 303013 号

## 即插即用式光纤陀螺全站仪组合定向技术

著 者 于先文

责任编辑 丁 丁

编辑邮箱 d. d. 00@163. com

---

出版发行 东南大学出版社

社 址 南京市四牌楼 2 号 邮编:210096

出 版 人 江建中

网 址 <http://www.seupress.com>

电子邮箱 [press@seupress.com](mailto:press@seupress.com)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 南京玉河印刷厂

版 次 2014 年 12 月第 1 版

印 次 2014 年 12 月第 1 次印刷

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 8.5

字 数 185 千

书 号 ISBN 978-7-5641-5416-5

定 价 38.00 元

# 总 序

在东南大学交通学院的教师队伍中,40岁以下的青年教师约占40%。他们中的绝大多数拥有博士学位和海外留学经历,具有较强的创新能力和开拓精神,是承担学院教学和科研工作的主力军。

青年教师代表着学科的未来,他们的成长是保持学院可持续发展的关键。按照一般规律,人的最佳创造年龄是25岁至45岁,37岁为峰值年。青年教师正处于科研创新的黄金年龄,理应积极进取,以所学回馈社会。然而,青年人又处于事业的起步阶段,面临着工作和生活的双重压力。如何以实际行动关心青年教师的成长,让他们能够放下包袱全身心地投入到教学和科研工作中?这是值得高校管理者重视的问题。

近年来,我院陆续通过了一系列培养措施帮助加快青年人才成长。2013年成立了“东南大学交通学院青年教师发展委员会”,为青年教师搭建了专业发展、思想交流和科研合作的平台。从学院经费中拨专款设立了交通学院青年教师出版基金,以资助青年教师出版学术专著。《东南交通青年教师科研论丛》的出版正是我院人才培养措施的一个缩影。该丛书不仅凝结了我校青年教师在各自领域内的优秀成果,相信也记载着青年教师们的奋斗历程。

东南大学交通学院的发展一贯和青年教师的成长息息相关。回顾过去十五年,我院一直秉承“以学科建设为龙头,以教学科研为两翼,以队伍建设为主体”的发展思路,走出了一条“从无到有、从小到大、从弱到强”的创业之路,实现了教育部交通运输工程一级学科评估排名第一轮全国第五,第二轮全国第二,第三轮全国第一的“三级跳”。这一成绩的取得包含了几代交通人的不懈努力,更离不开青年教师的贡献。

我国社会经济的快速发展为青年人的进步提供了广阔的空间。一批又一批青年人才正在脱颖而出,成为推动社会进步的重要力量。世间万物有盛衰,人生安得常少年?希望本丛书的出版可以激励我院青年教师更乐观、自信、勤奋、执着的拼搏下去,搭上时代发展的快车,更好地实现人生的自我价值和社会价值。展望未来,随着大批优秀青年人才的不断涌现,东南大学交通学院的明天一定更加辉煌!



2014年3月16日

# 前 言

定向在测绘工作中占有非常重要的地位。一是它的必要性,无论日常测图还是全站仪放样,不进行定向,将无法继续进行测绘工作,定向精度差了,测绘成果精度也相应较差;二是它的频繁性,几乎每一个测绘任务,甚至每一次全站仪架设都需要进行定向。

在 20 世纪 50 年代以前,地下矿井的巷道测量定向是一个非常棘手的问题。随着机械陀螺经纬仪的出现,很好地解决了单点定向问题,使得地下巷道测绘成果精度得到了极大的提高。对于早期地面日常测绘工作,由于地面高等级控制点较多、地面控制测量本身就需要布成点间通视的网状形式,极少出现需要进行单点定向的问题。

然而,随着 GPS 测绘技术在控制测量中的快速普及、城镇测绘任务的增多以及测绘周期的缩短,通视困难地区的全站仪定向问题也日渐突出。GPS 测绘技术的一大优势就是不需点间通视,但在由 GPS 测量技术得到的控制点上架设全站仪又需要有另一个通视的控制点定向,这使得 GPS 测绘技术的优势没有得到充分发挥,同时也给在城镇地区的 GPS 控制点布设带来了困难。

现有的机械陀螺全站仪组合虽能很好地解决单点定向问题,但从便携性、操作性、经济性等角度看,其难以在地面日常测绘中普及应用。当前,光纤陀螺以其全固件、数字化输出、启动快、寿命长等优点,已在导航领域逐步取代机械陀螺,成为惯性传感器的主力军。再考虑到全站仪已是测绘工作中最为常规的仪器,于是将光纤陀螺与全站仪组合,即插即用,完成单点定向后,可以继续利用全站仪进行测绘工作的技术思路应运而生。

通过几年的理论研究和攻关,形成了组合方法、常参数标定方法、应用方法、操作方法、定向解算、误差分析等理论成果。在此基础上,研制了原理样机,编制了相应软件,并利用原理样机进行了外业测试。外业测试结果表明,理论方法和相应公式是正确的,测试结果与仿真结果基本吻合。

本书共分 8 章。第一章,主要介绍了工程需求背景、单点定向的技术现状以及光纤陀螺的发展情况;在此基础上,梳理了即插即用式光纤陀螺全站仪组合的技术难点及解决方案。第二章,介绍了组合定向涉及的坐标系、地球椭球上的点线面,以及方

位角、子午线收敛角、垂线偏差等概念。第三章,介绍了全站仪的主要构造、主要轴系关系、为组合定向所能提供的数据,以及方向观测误差及处理方法。第四章,论述了光纤陀螺的工作原理、定向原理,以及光纤陀螺的误差特性。第五章,为本书的核心部分,主要阐述了即插即用式光纤陀螺全站仪组合的技术方案、硬件组合方法、操作方法,建立了精确的观测方程,并进一步得到实用的全站仪望远镜视准轴方位角计算公式;在此基础上,分析了定向结果的系统误差和偶然误差,给出了光纤陀螺选型公式。第六章,阐述了即插即用式光纤陀螺全站仪组合常参数的意义,以及常参数标定的条件、方法,并对标定的精度进行了分析。第七章,阐述了即插即用式光纤陀螺全站仪组合的应用方法、应用场合,并以地籍测量为例,讨论了光纤陀螺的等级选择问题。第八章,介绍了原理样机各主要部件的选型、解算软件的开发以及原理样机的常参数出厂标定,并介绍了原理样机及解算软件的测站操作过程和精度测试情况。

本书研究内容的开展得到了“十一五”国家科技支撑计划课题“新型惯导与全站仪、GPS集成地籍调查设备研制”、江苏省测绘科研基金项目“即插即用式光纤陀螺/全站仪组合定向方法研究”的资助。本书有幸出版,得到了江苏省优势学科建设资助。此外,还要感谢东南大学交通学院青年教师发展委员会,给予青年教师专著出版的支持与帮助。

本书研究内容的开展以及本书的出版都得到了我的博士生导师王庆教授的悉心指导和大力支持。在研究内容开展期间,东南大学仪器科学与工程学院王宇博士对本书的研究内容提出了宝贵的意见并给予了实验支持,实验室硕士研究生范开喜、王宇飞、衣昌明参与了原理样机的电源开发、解算软件编写及测试工作。同时,本书研究内容的开展过程中,也得到了实验室潘树国教授、王慧青副教授的帮助。在此,本人对以上老师和同学表示深深的感谢!此外,本书的撰写也参阅了大量的文献资料,在此也对这些文献的原作者们表示敬意和感谢!

由于笔者的专业视野及理论水平有限,书中难免有不妥和疏漏之处,敬请读者批评指正,以求共同进步。

# 目 录

第一章 绪论	1
1.1 需求背景	1
1.1.1 测绘需求	1
1.1.2 城镇测绘技术现状	1
1.2 机械陀螺经纬仪(全站仪)	4
1.2.1 机械陀螺经纬仪(全站仪)定向原理	4
1.2.2 机械陀螺经纬仪(全站仪)的发展	7
1.2.3 机械陀螺经纬仪(全站仪)定向方法	7
1.2.4 机械陀螺经纬仪(全站仪)的不足	9
1.3 光纤陀螺	10
1.3.1 光纤陀螺的发展	10
1.3.2 光纤陀螺的特点	11
1.3.3 光纤陀螺的应用	12
1.4 即插即用式光纤陀螺全站仪组合定向	12
1.4.1 技术难点	12
1.4.2 组合方案设计	13
1.4.3 技术特点及应用领域	14
第二章 组合定向的地理基础	16
2.1 地球自转	16
2.2 地球椭球	17
2.3 地球椭球的主要线和面	18
2.4 高斯平面坐标	19
2.4.1 投影方法	19
2.4.2 坐标系建立	21
2.5 方位角	21
2.5.1 方位角概念	21
2.5.2 不同方位角间关系	22

2.6	子午线收敛角	22
2.6.1	子午线收敛角公式	22
2.6.2	子午线收敛角计算精度	23
2.7	垂线偏差	25
2.7.1	垂线偏差的概念	25
2.7.2	垂线偏差值的获取	26
<b>第三章</b>	<b>全站仪构造及主要轴系</b>	<b>28</b>
3.1	全站仪概述	28
3.1.1	全站仪功能	28
3.1.2	全站仪组成	28
3.1.3	全站仪操作	30
3.2	水准管及电子微倾敏感器	30
3.2.1	水准管	30
3.2.2	电子微倾敏感器	31
3.3	全站仪的主要轴系	33
3.3.1	主要轴系关系	33
3.3.2	水准管轴垂直于竖轴的检验与校正	33
3.3.3	视准轴垂直于横轴的检验与校正	34
3.3.4	横轴垂直于竖轴的检验与校正	35
3.4	全站仪测角的电子补偿	35
3.4.1	视准轴误差补偿	36
3.4.2	横轴误差补偿	36
3.4.3	竖轴误差补偿	37
<b>第四章</b>	<b>光纤陀螺定向原理及主要误差</b>	<b>38</b>
4.1	光纤陀螺的基本原理	38
4.1.1	Sagnac 效应	38
4.1.2	光纤陀螺的工作原理	40
4.2	光纤陀螺定向原理	41
4.3	光纤陀螺的误差	42
4.3.1	主要误差	42
4.3.2	光纤陀螺误差模型	44
4.4	光纤陀螺分类和产品	45
4.4.1	光纤陀螺分类	45
4.4.2	光纤陀螺产品	46



<b>第五章 光纤陀螺全站仪组合定向原理</b> .....	47
5.1 组合方法 .....	47
5.1.1 安装方式 .....	47
5.1.2 技术流程 .....	48
5.1.3 操作方法 .....	50
5.2 光纤陀螺输出值预处理 .....	51
5.2.1 观测粗差的剔除 .....	51
5.2.2 标度因数确定及温补 .....	52
5.3 定向解算 .....	54
5.3.1 观测方程的建立 .....	54
5.3.2 全站仪竖轴方向的确定 .....	55
5.3.3 全站仪视准轴坐标方位角计算方程 .....	58
5.4 系统误差分析及处理 .....	59
5.4.1 涉及的系统误差 .....	59
5.4.2 安装误差近似取零的影响 .....	60
5.4.3 水平度盘面方位角不水平的影响 .....	62
5.5 偶然误差分析 .....	64
5.5.1 地球自转角速度误差的影响 .....	64
5.5.2 虚拟测站精度对定向精度的影响 .....	66
5.5.3 光纤陀螺测量精度的影响 .....	68
5.6 定向精确度 .....	71
5.6.1 验前定向精确度 .....	71
5.6.2 验后定向精确度 .....	71
<b>第六章 常参数出厂标定方法</b> .....	73
6.1 常参数及标定条件 .....	73
6.2 标定方法及解算 .....	74
6.2.1 转台顺时针旋转 .....	74
6.2.2 转台逆时针旋转 .....	75
6.2.3 常参数计算 .....	76
6.3 标定误差 .....	77
<b>第七章 即插即用式光纤陀螺全站仪组合的应用方法</b> .....	80
7.1 GPS 控制点布设 .....	80
7.1.1 GPS 概述 .....	80
7.1.2 GPS 控制测量 .....	81

7.2 单点定向方式·····	83
7.2.1 前视设站法·····	84
7.2.2 后视设站法·····	85
7.3 在导线测量中的应用·····	89
7.3.1 自由导线加测方向·····	89
7.3.2 导线网加测方向·····	90
7.4 定向目标的设定与使用·····	93
7.4.1 定向目标的设定·····	93
7.4.2 定向目标的使用·····	94
7.5 城镇地籍测量中的光纤陀螺选型·····	94
7.5.1 城镇地籍测量·····	94
7.5.2 与地籍测量相适应的光纤陀螺等级·····	95
<b>第八章 仪器试制及测试</b> ·····	<b>98</b>
8.1 硬件选型及开发·····	98
8.1.1 全站仪选型·····	98
8.1.2 光纤陀螺选型·····	98
8.1.3 电子手簿·····	100
8.1.4 陀螺电源开发·····	101
8.2 解算软件开发·····	103
8.2.1 软件整体功能·····	103
8.2.2 光纤陀螺串口数据获取·····	104
8.2.3 大文件的快速读入·····	105
8.2.4 异常处理·····	106
8.3 原理样机集成及常参数标定·····	108
8.3.1 原理样机集成·····	108
8.3.2 常参数实验室标定·····	109
8.4 应用测试·····	110
8.4.1 测站作业过程·····	110
8.4.2 实测验证·····	114
<b>参考文献</b> ·····	<b>118</b>
<b>附录 主要变量及符号释义</b> ·····	<b>121</b>

# 第一章 绪 论

## 1.1 需求背景

### 1.1.1 测绘需求

随着我国国民经济的快速发展,城镇范围正在不断扩大,城镇内部改造也在不断推进,城市道路建设、居民小区开发、商业楼宇建设、管线改造等大量工程项目持续不断上马。对于一个工程项目来说,项目前期,通常需要进行地形图测绘,为工程设计提供基础图件;工程建设过程中,需要进行施工测量,以保证工程施工按照设计图件进行;工程竣工后,通常需要进行竣工测绘,形成竣工图件。可见,测绘工作贯穿于城镇建设的整个过程中。

同时,随着城镇面貌的更新,大量地理信息和不动产权属界线发生了变化,可以说,这种变化每天都在进行。政府部门为了便于进行不动产权属管理和城市规划建设等工作,需要及时地进行城镇地籍测绘工作,以维持地籍数据的现势性。城镇地籍测绘的成图比例尺大、精度要求高、覆盖面广、现势性强,其成果具有法律特性,因此地籍测绘是一项日常的、周期的、特殊的城镇测绘工作。然而,由于在城镇区域测绘难度大、地籍测绘工作量大等原因,目前还有不少城镇的地籍数据欠缺或现势性较差。面对地籍测绘历史欠账、当前城镇化的快速推进,以及不动产权属管理要求的提高,我国城镇地籍测绘工作任务将更加繁重。

总之,随着城镇化的发展,城镇工程测绘、城镇地籍测绘的工作量越来越大、作业周期要求越来越短,迫使相应的测绘技术必须不断进行技术革新,以使城镇测绘达到工作强度小、作业速度快、测绘成本低的效果。

### 1.1.2 城镇测绘技术现状

城镇测绘在步骤上可分为控制测量和碎部测量两个过程。控制测量的目的是在测区内测得足够密度的图根控制点,碎部测量的目的是在这些图根点的基础上,测得碎部点坐标。

现有的城镇测绘技术主要有导线测量方法、GPS-RTK 测量方法两种,它们的主要区别在控制测量部分。

1) 导线测量

如图 1.1 所示,导线测量是从一个已知控制点出发,将相邻控制点用直线连接起来,形成蛇状,最后附和到另一个已知控制点或闭合到出发的已知控制点,构成导线。利用全站仪(Total Station, TS)测得导线各边边长及相邻边的夹角,进而解得各控制点的坐标。

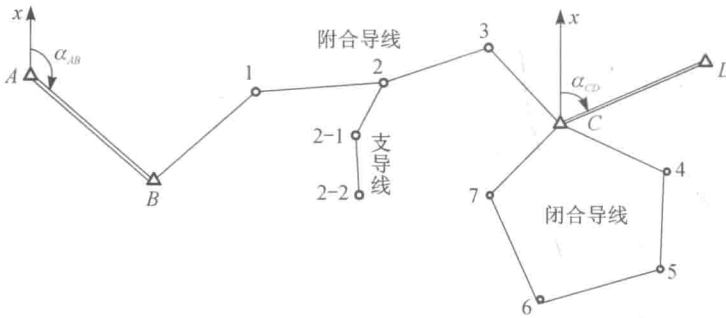


图 1.1 导线示意图

图 1.2 为某城镇的局部三维图。从图可见,城镇建筑物密集、树木较多,这严重影响了导线相邻点间的互相通视,在这种环境下进行图根导线测量难度很大。首先,由于建筑物、围墙遮挡,以及导线技术指标限制,有些图根点点位选择不利于后期碎部点观测,很多小巷、单位围墙内难以进行图根点布设。其次,在导线施测过程中,由于车辆、人流较多,严重影响点间通视,使得测量工作进展缓慢。再次,长时间在道路上架设仪器观测,既影响了交通,测量工作人员本身安全也受到了较大威胁。



图 1.2 某城镇的局部三维图

因此,随着对地籍数据现势性要求的不断提高,这种利用导线方法完成控制测量的缺点也日益凸显。

## 2) GPS-RTK 测量

全球定位系统(Global Positioning System, GPS)是一个基于人造卫星的可实现测速、授时、定位的现代技术。GPS一出现就在测量上得到了迅速应用。GPS测量原理如图 1.3 所示,地面 GPS 接收机接收到至少四颗 GPS 卫星信号,通过对信号进行解析得到每颗卫星的坐标及距地面测站的距离,利用后方交会原理,即可解得测站坐标。理论和实践均表明,由 GPS 卫星、测站构成的多面体体积越大,测量结果精度越好。

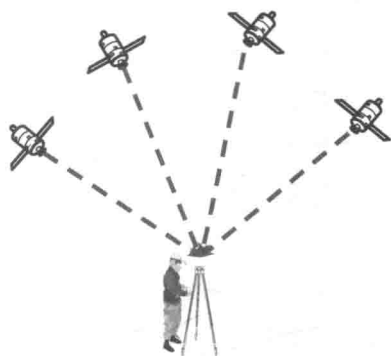


图 1.3 GPS 测量原理示意图

实时动态测量(Real Time Kinematic, RTK)技术是 GPS 测量的一种技术方式,是以载波相位为观测量,利用差分技术实现实时高精度定位。

相对导线测量技术,GPS-RTK 技术具有明显的优点:作业速度快,劳动强度低,节省了外业费用,提高了工作效率,点位精度均匀,没有误差积累,不要求两点间满足光学通视,操作简便。

但是,由于城镇内部建筑物和树木的遮挡,使得 GPS 接收机上方的视空较小,可视卫星较少,严重影响了 GPS 接收机的定位精度,经常出现定位精度满足不了测量要求的现象。甚至在一些楼宇间,接收不到四颗 GPS 卫星信号,无法实现定位。因此,作业人员不得不携带 RTK 流动站接收机寻找开阔地方,期盼实现厘米级定位。同时,为了满足后阶段碎部点测量需要,RTK 作业时既要保证图根点具有一定的密度,又要考虑图根点间的通视及距离。这些无疑会增加图根点布设的难度,导致工作量的增加和工程周期的延长,使得 GPS 定位技术所具有的控制点间不需要通视的优势没有得到有效发挥。

## 3) 碎部测量

如图 1.4 所示,点  $P$ 、点  $G$  为已知图根点,点 1 为待测碎部点, $N$  为北方向。在图根点  $P$  上安置全站仪,测得  $\angle GP1$  为  $\beta_{G1}$ ,点  $P$ 、点 1 间距离为  $D_{P1}$ 。利用点  $P$ 、点  $G$  坐标反算出坐标方位角  $\alpha_{PG}$ 。于是可得  $P1$  方向的坐标方位角:

$$\alpha_{P1} = \alpha_{PG} + \beta_{G1} \quad (1.1)$$

利用  $\alpha_{P1}$  和  $D_{P1}$  即可算得点 1 相对于点  $P$  的坐标增量,加上点  $P$  的坐标,即可得点 1 的坐标。

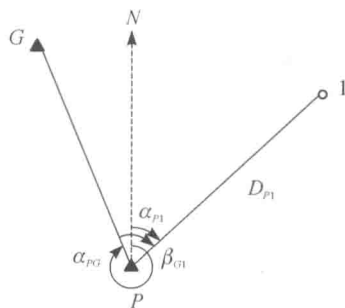


图 1.4 碎部测量示意图

以上即是碎部测量的过程。以此方法,可逐个测得各碎部点坐标。

由上述过程可见,后视点  $G$  的目的是为了通过  $\alpha_{PG}$  来获得方位角  $\alpha_{P1}$ 。为了提高反算坐标方位角  $\alpha_{PG}$  的精度,点  $P$ 、点  $G$  间距离必须大于一定的技术指标。

对于传统的导线法来说,碎部测量时,后视点是天然存在的;但对于 GPS-RTK 法来说,后视点是特意为碎部测量定向而测得的。在城镇区域,由于建筑物、树木遮挡,进行 RTK 高精度测量本来就比较困难,如果为了定向的需要,再测得一个距离满足一定要求的后视点,无疑会大大增加 RTK 测量的难度和作业时间,GPS 不需通视的优势并没有得到很好发挥。

设想,如果碎部测量时,不需后视点,直接在测站上就能得到方位角  $\alpha_{P1}$ ,这将使 GPS 的不需点间通视的测量优势得到充分发挥,很好地缓解 RTK 测量点位选择的压力,显著缩短外业作业时间。

现在常用于矿山井下测量的机械陀螺经纬仪(全站仪)即能满足上述技术要求,实现单点定向。

## 1.2 机械陀螺经纬仪(全站仪)

### 1.2.1 机械陀螺经纬仪(全站仪)定向原理

现有机械陀螺经纬仪(全站仪)是将机械陀螺与经纬仪或全站仪组合,利用机械陀螺寻北,进而得到经纬仪或全站仪视准轴的北向。

#### 1) 机械陀螺工作原理

图 1.5 所示为一个两自由度陀螺仪,陀螺仪外框可以绕  $Z$  轴转动,内框可以绕  $Y$  轴转动,内框内部有个绕自转轴高速旋转的转子,自转轴与  $X$  轴重合。 $X$  轴、 $Y$  轴、 $Z$  轴相互垂直,三轴交点为陀螺仪的自由度支点,该支点与转子重心重合。

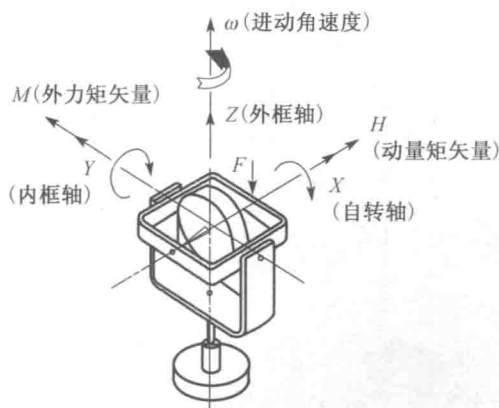


图 1.5 机械陀螺工作原理

该转子的动量矩矢量方向符合右手定则,即右手伸开,四指顺着转动方向抓住旋转轴,右手拇指指向的  $X$  轴方向即为动量矩矢量方向,也即旋转角速度矢量方向。

在没有任何外力影响下,无论整个陀螺仪如何运动,自转轴在惯性空间中维持不动,都始终指向于惯性空间中某一方向,这个性质称为陀螺的定轴性。

如果在垂直于  $X$  轴与  $Y$  轴形成的平面,对陀螺仪自转轴施加一个外力  $F$ ,则对旋转的陀螺转子形成了一个外力矩,该外力矩矢量与  $Y$  轴重合,方向依然符合右手定则。在这种情况下,动量矩矢量方向( $X$  轴方向)将绕  $Z$  轴转动,以最短的路径追赶外力矩矢量方向,这种现象称作陀螺的进动性。

机械陀螺的定轴性和进动性是机械陀螺寻北的理论基础。

## 2) 机械陀螺的寻北原理

下面以悬挂式机械陀螺为例,来说明机械陀螺的寻北原理。如图 1.6 所示,对图 1.5 所示的陀螺仪进行改造,将陀螺仪通过  $Z$  轴悬挂于一个壳体内,再将壳体安装在经纬仪或全站仪上,形成机械陀螺经纬仪(全站仪)。在这种情况下,陀螺仪自由度支点转移到了悬挂点  $O$ ,陀螺仪重心处于支点下方, $X$  轴平行于自转轴, $Z$  轴为陀螺重心与支点的连线。

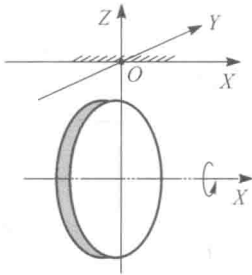


图 1.6 重心下移的陀螺仪

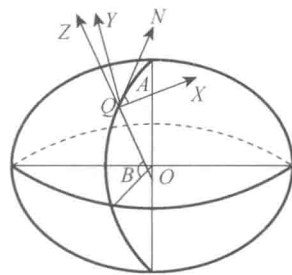


图 1.7 陀螺仪各轴与地球自转轴的关系

如图 1.7 所示,将机械陀螺经纬仪(全站仪)安置在一地面点  $Q$  上, $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  为陀螺仪三轴方向, $QN$  为测站子午面与  $XY$  平面的交线, $Z$  轴与地球赤道面的夹角为  $B$ , $X$  轴与  $QN$  的夹角为  $A$ 。设地球自转角速度矢量为  $\Omega_e$ ,由于陀螺仪随地球一起旋转,则  $\Omega_e$  在  $X$  轴、 $Y$  轴、 $Z$  轴上的分量分别为  $\Omega_{eX}$ 、 $\Omega_{eY}$ 、 $\Omega_{eZ}$ 。

则有

$$\Omega_{eX} = \Omega_e \cos B \cos A \quad (1.1)$$

$$\Omega_{eY} = \Omega_e \cos B \sin A \quad (1.2)$$

$$\Omega_{eZ} = \Omega_e \sin B \quad (1.3)$$

根据陀螺的定轴性, $X$  轴应指向惯性空间某一方向,即从惯性空间看,地平面绕  $X$  轴做西抬高东降低旋转,绕  $Y$  轴做南抬高北降低旋转,绕  $Z$  轴做远离  $X$  轴向  $Y$  轴方向旋

转;从地平面看,陀螺仪 X 轴方向在抬高, Y 轴方向在降低,且 X 轴与 Y 轴绕 Z 轴由西向东旋转。

如图 1.6 所示,当陀螺仪做上述转动时,陀螺仪重心偏离通过支点的铅垂线,由于重力的作用,形成了重力矩  $F$ 。根据陀螺的进动性,重力矩矢量在 X 轴的分量对陀螺仪自转轴的进动没有影响,在 Y 轴的分量对陀螺仪自转轴产生进动影响,使得陀螺仪自转轴与 X 轴一起绕 Z 轴向 Y 轴方向进动,即以角速度  $\Omega_{FZ}$  由东向西转动。

图 1.8 为垂直于测站子午线方向的一个平面,  $P_3P_6$  为该平面与测站子午面的交线,  $P_1P_5$  为该平面与测站水平面的交线。  $t_1$  时刻,陀螺仪 X 轴、Y 轴水平, Z 轴与测站重力线重合,陀螺仪自转轴指向  $P_1$  点。

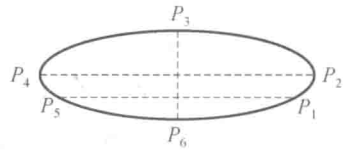


图 1.8 陀螺仪自转轴寻北时的指向轨迹

在随后的时间里,由于  $\Omega_{eY}$  的作用,陀螺仪自转轴上翘,陀螺仪重心偏离过支点的重力线,形成重力矩  $F$ ,产生向西的进动角速度  $\Omega_{FZ}$ 。随着陀螺仪自转轴上翘,

$\Omega_{FZ}$  不断增加,逐步抵消由于  $\Omega_{eZ}$  引起的陀螺仪自转轴向东旋转的速度。到  $t_2$  时刻,  $\Omega_{FZ}$  与  $\Omega_{eZ}$  大小相等,陀螺仪自转轴指向  $P_2$  点,并在此点发生指向逆转。

在随后的时间里,由于  $\Omega_{eY}$  的作用,陀螺仪自转轴继续上翘,  $\Omega_{FZ}$  大于  $\Omega_{eZ}$ ,陀螺仪自转轴向西转动,在  $t_3$  时刻,与测站子午面重合,指向  $P_3$  点。根据式(1.2),此时  $\Omega_{eY} = 0$ 。

在随后的时间里,由于  $\Omega_{FZ}$  大于  $\Omega_{eZ}$ ,陀螺仪自转轴越过子午面继续向西转动,导致  $\Omega_{eY} < 0$ ,陀螺仪重心向过支点的重力线回归,  $\Omega_{FZ}$  在减小,在  $t_4$  时刻,  $\Omega_{FZ}$  与  $\Omega_{eZ}$  大小相等,陀螺仪自转轴指向  $P_4$  点,并在此点发生指向逆转。

在随后的时间里,  $\Omega_{eY} < 0$ ,陀螺仪重心继续向过支点的重力线回归,在  $t_5$  时刻,陀螺仪重心与过支点的重力线重合,  $\Omega_{FZ} = 0$ ,陀螺仪自转轴水平指向  $P_5$  点。

在随后的时间里,由于  $\Omega_{eY} < 0$ ,陀螺仪自转轴下斜,陀螺仪重心偏离过支点的重力线,形成重力矩  $F$ ,产生向东的进动角速度  $\Omega_{FZ}$ 。陀螺仪自转轴在  $\Omega_{FZ}$  和  $\Omega_{eZ}$  共同作用下向东转动,在  $t_6$  时刻,到达测站子午面,指向  $P_6$  点,此时  $\Omega_{eY} = 0$ 。

在随后的时间里,陀螺仪自转轴越过子午面向东转动,  $\Omega_{eY} > 0$ ,陀螺仪重心继续向过支点的重力线回归,直至陀螺仪 X 轴、Y 轴水平, Z 轴与测站重力线重合,陀螺仪自转轴指向  $P_1$  点。

陀螺仪周而复始地重复上述过程,取  $P_2$ 、 $P_4$  的平均位置,即得测站子午面方向。

机械陀螺经纬仪(全站仪)的出现极大地解决了一些地下工程的定向问题,提高了地下工程的测量精度和工作效率。目前,机械陀螺经纬仪(全站仪)被广泛地应用于军事、矿山、隧道、森林及海洋等领域的定向测量中。



### 1.2.2 机械陀螺经纬仪(全站仪)的发展

机械陀螺经纬仪(全站仪)根据其灵敏部的悬挂形式不同可分为液浮式、悬挂式、磁悬浮式等。根据陀螺仪和经纬仪(全站仪)的相对位置不同可分为上架式和下架式。根据陀螺仪工作的自动化程度又可分为全自动式、半自动式、手动式。

机械陀螺经纬仪(全站仪)的发展,大致可划分为三个阶段:

第一阶段,20世纪50年代,在船舶陀螺罗盘的基础上,研制出矿山用液体漂浮式陀螺罗盘仪。

第二阶段,20世纪60年代,在矿山陀螺罗盘的基础上发展成下架悬挂式陀螺经纬仪。其利用金属悬挂带把陀螺灵敏部位在空气中悬挂,相对液浮式来说,结构大为简化。

第三阶段,20世纪70年代,随着精密小型陀螺原件的出现,发展出上架悬挂式陀螺经纬仪。

从20世纪80年代以来,随着电子技术、计算机技术的发展,以及全站仪的出现,将陀螺仪和全站仪组合,并利用自动化技术,形成了半自动机械陀螺全站仪,并进一步发展成全自动机械陀螺全站仪。

由上可见,机械陀螺经纬仪(全站仪)的发展主要依赖于陀螺技术的发展。

### 1.2.3 机械陀螺经纬仪(全站仪)定向方法

机械陀螺是利用陀螺自转轴在测站子午面两侧来回对称摆动,来获得陀螺自转轴的平均位置,进而得到测站子午线方向的。

#### 1) 仪器常数测定

理论上,机械陀螺经纬仪(全站仪)的陀螺自转轴稳定位置、观测自转轴摆动的分划板零线、经纬仪(全站仪)视准轴等应该在一个铅垂面内。但由于仪器结构误差,使得它们并不完全处于一个竖直平面内。因此,当利用陀螺仪自转轴寻北,利用经纬仪(全站仪)视准轴瞄准目标时,测得的真方位角与准确的真方位角之间存在差异,这个差异称作机械陀螺经纬仪(全站仪)的仪器常数。

如图1.9所示,设在测站Q上,利用机械陀螺经纬仪(全站仪)进行定向。QN为测站子午线北方向,QX为寻北时陀螺自转轴平均位置,QO为寻北时分划板零线方向,QS为经纬仪(全站仪)视准轴方向,QG为定向边。

当测量QG方向真方位角时,先利用仪器进行寻

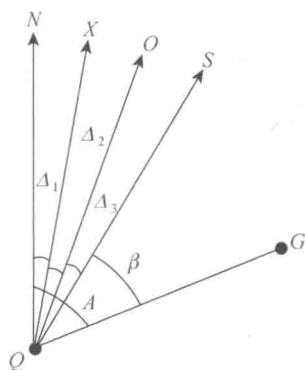


图 1.9 仪器常数的概念示意图