

高等学校教学参考书

陀螺经纬仪定向

张国良 编

TUOLUOJINGWEIYIDINGXIANG

中国矿业大学出版社

陀螺经纬仪定向

张国良 编

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书着眼于实际应用，介绍了陀螺经纬仪的结构与工作原理；并以逆转点法和中天法为重点；系统阐述了陀螺经纬仪定向的原理和方法；同时对陀螺定向导线的平差、定向误差分析以及如何制定陀螺定向测量的各项限差等均做了较详细的探讨。书中介绍的各种定向方法均有实测记录与计算实例。

本书是大专院校测量专业的教学参考书，亦可作为测量工程师培训教材，或供现场从事测量工作的技术人员参考。

前 言

陀螺经纬仪是将陀螺仪和经纬仪结合在一起用作定向的仪器。目前已在矿山、建筑、测绘、铁道、森林、军事等部门得到应用。陀螺经纬仪的使用不受时间和环境的限制，同时观测简单方便、效率高，又能保证较高的定向精度，是一种先进的定向仪器。

陀螺经纬仪的研究已有40多年的历史，其间经不断地改进，目前已研制成工程定向所普遍采用的上架悬挂式陀螺经纬仪。我国从五十年代开始研制这种仪器，后来由于众所周知的原因中断了一段时间，直至七十年代才重新开始这项工作，并取得了可喜的成果。例如，制成DJ6-T60、JT60、DJ2-T20及JT15等型号的陀螺经纬仪。近年我国亦进口了一定数量的GAK-1、Gi-C11等型仪器。由于陀螺经纬仪定向在我国实际应用较晚，近期才较为普遍，因此，定向中产生的有关问题还有待我们结合国情作深入的探讨和研究。

本书对于陀螺经纬仪的结构、陀螺仪定向原理、陀螺经纬仪的发展等作了较系统介绍，重点介绍了陀螺仪的定向方法；对国内外最常用的逆转点法定向和中天法定向、定向的精度评定，陀螺定向导线的平差等都作了较详细的论述；对上述两种陀螺仪定向方法的误差作了分析，对仪器的检校、维修及注意事项亦作了介绍。陀螺经纬仪定向的各类限差是直接指导定向工作并使定向成果具有必要精度的保证。本书根据实际资料和试验成果，对逆转点法定向和中天法定向时的

观测个数、计算方法、各种观测限差的制定等都进行了多方面的分析和探讨，得出比较符合我国具体情况的各项限差值。对立井采用陀螺经纬仪定向时的联系测量方法进行了专门介绍。书中附有定向、平差的记录、计算等实例。

本书初稿写于1979年初，1986年4月又重新改写，并作为测量工程师培训班的讲义试用。在此基础上再行修改写成本书。由于本人水平所限，书中错漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

张国良于中国矿业大学

目 录

前 言

第一章 绪论及力学基础	(1)
第一节 绪论.....	(1)
第二节 力学基础.....	(11)
第二章 陀螺经纬仪的工作原理	(16)
第一节 自由陀螺仪及其特性.....	(16)
第二节 地球自转及其对陀螺仪的作用.....	(20)
第三节 陀螺仪轴对地球的相对运动.....	(23)
第四节 陀螺仪轴的进动方程.....	(26)
第三章 陀螺经纬仪的分类和基本结构	(36)
第一节 陀螺经纬仪的分类.....	(36)
第二节 JT15型陀螺经纬仪的基本结构.....	(37)
第三节 瑞士威特(WILD)厂GAK-1型 陀螺经纬仪介绍.....	(50)
第四节 匈牙利莫姆(MOM)厂GI-C11型 陀螺经纬仪介绍.....	(54)
第五节 小型陀螺罗盘仪MBB-3介绍.....	(58)
第四章 陀螺经纬仪的定向方法	(63)
第一节 陀螺经纬仪定向的作业过程.....	(63)
第二节 陀螺经纬仪悬带零位观测.....	(70)
第三节 粗略定向.....	(73)

第四节	精密定向·····	(76)
第五节	陀螺经纬仪的检校、维修 及注意事项·····	(90)
第六节	陀螺经纬仪定向的精度评定·····	(100)
第五章	陀螺经纬仪定向的误差分析及导线平差·····	(105)
第一节	逆转法定向的误差分析·····	(105)
第二节	中天法定向的误差分析·····	(108)
第三节	陀螺仪定向导线的平差·····	(112)
第六章	陀螺经纬仪定向限差的制定·····	(120)
第一节	概述·····	(120)
第二节	陀螺经纬仪跟踪逆转点法 和中天法定向时必要的、 合理的观测个数的确定·····	(120)
第三节	摆动中值计算方法的选择·····	(136)
第四节	各种观测限差的确定·····	(139)
第五节	两种定向方法的比较·····	(153)
第七章	利用陀螺经纬仪进行立井联系测量·····	(155)
第一节	概述·····	(155)
第二节	利用陀螺经纬仪经过一个立井的 联系测量·····	(155)
第三节	利用陀螺经纬仪经过两个立井的 联系测量·····	(158)
附录	自动化陀螺经纬仪简介·····	

第一章 绪论及力学基础

第一节 绪 论

一、概述

在矿山测量中，利用几何方法进行立井定向需要占用井筒，停止生产而造成经济损失。从实验资料看，在500m以上深井内垂球线的摆动不再符合简谐运动的规律，由投点误差增大引起的投向误差很大，以致用几何定向法得出的测量成果精度不高。因此，为着适应采矿事业发展，一种既不占用井筒，又能达到定向精度的新型仪器陀螺经纬仪问世了。

陀螺经纬仪是将陀螺仪和经纬仪结合在一起用作定向的仪器。目前已被应用于矿山、建筑、测绘、铁道、森林、军事等各个部门的定向测量。由于它不受时间和环境的限制，观测即简便效率又高，而且能保证较高的定向精度，所以是一种先进的定向仪器。现在完全可能以其取代国内沿用百年之久的几何定向法，从而克服几何定向法耗时费力影响生产的弊病。

陀螺经纬仪在矿山测量中可用作：

1) 在井下每一水平进行定向。因陀螺经纬仪是陀螺仪和经纬仪结合而成的仪器，其中陀螺仪依据陀螺罗盘的原理，能在陀螺灵敏部本身重力和地球自转的组合作用下，使其陀螺轴精确地指示出真北方向，同时可在经纬仪水平度盘上得出该方向读数。因此陀螺经纬仪可以精确地测定地面和井下巷道任意测站(除南、北极以外)的真子午线方位，或任意测线

的地理方位角，然后加入子午线收敛角即求出坐标方位角。

2) 控制导线测量方向误差的积累。在导线测量中可在适当地点加测陀螺方位边，既可发现水平角的粗差，又可有效地减少方向误差的积累。

3) 矿山及地下工程大型巷道贯通定向。

4) 在荫蔽地区进行线路、管道、隧道等工程的定向。

5) 如能与激光测距仪配套使用，则可用极坐标法测定新点。

二、国内外陀螺经纬仪定向的发展简况

1852年，法国物理学家傅科(Foucault)第一次提出地球的自转会在陀螺仪上产生效应的设想：“无需进行任何天文观测或地磁观测，只要由陀螺仪观测就可以得出任何地点的子午线位置”。但是，受当时技术条件的限制，傅科的实验未能获得预期效果。直到十九世纪初，陀螺仪首先在航海上被用作导航仪器。进入本世纪五十年代才开始用陀螺仪进行矿山测量定向的试验，在这三十多年的时间里，矿山测量中应用陀螺经纬仪的发展情况大体可分为三个时期：

1. 五十年代的液体漂浮式陀螺罗盘仪

液浮式矿用陀螺罗盘仪是在船舶陀螺罗经的基础上研制而成的。联邦德国1947年开始，在克劳斯塔(Clausthal)矿业学院列伦斯曼(O. Rellensmann)教授领导下，在安休茨公司船舶陀螺罗经的基础上，进行测量陀螺仪的研究，1949年研制出第一台仪器，命名为MW1型子午线指示仪。该仪器将观测系统和陀螺灵敏部合为一体，其陀螺灵敏部是一个漂浮于液体中的球形浮子。在球形浮子中封闭着一个高速马达。马达开动后，浮子在液体中具有三个自由度，由地球自转作

用实现指北进动。该仪器采用电磁线圈定中心，三相交流电解法供电。全套仪器重量约640kg。1949年MW1型曾在西德鲁尔矿区井下进行了定向测试，结果陀螺方位角一次测定中误差 $\pm 1'$ ，一次定向时间4h。在鲁尔矿区测量的成果，使测量工作者看到采用和发展陀螺仪定向的重大意义。经不断地改进。于1951年出现了MW2型，1955年出现MW3型，1959年又出现MW4a型陀螺罗盘仪。考虑到灵敏部用电磁定中心时，电磁线圈稍不对称即会给陀螺仪带来不对称误差，输入电压不稳定时，陀螺球的浮高也会发生变化。因此MW4a型仪器采用了带状悬挂结构，即液浮的陀螺球，通过一根金属悬挂带悬挂，悬挂带承受部分重量，这将使仪器内部结构大为简化，省略了电磁线圈，因此耗电量降低。可用蓄电池和晶体管变流器供电，提高了陀螺转子角动量的稳定性，仪器重量减轻，定向精度提高。MW4a型仪器全套重量190kg，一次定向时间需1~2h，陀螺方位角一次测定中误差 $\pm 20''$ 。

苏联自1948年开始，全苏矿山地质力学与测量科学研究院(БНМН)于1950年研制成M-1和M-2型矿用陀螺罗盘仪，它的特点是液体漂浮式双陀螺转子的陀螺球，内充氧气，电磁线圈定中心。全套仪器重达600kg，一次定向5h，陀螺方位角一次测定中误差 $\pm 90''$ 。1954年该研究院又做出新的努力，研制成MYГ-2型陀螺罗盘仪（见图1-1）该仪器灵敏部采用了液浮式单转子陀螺球，内充氢气。1957年研制出MB-1型防爆型矿用陀螺罗盘仪，这种仪器采用圆柱形浮子，突出的改进在于以轴尖定中心代替了电磁线圈定中心，提高了定中心的精度。因结构简化，仪器本身的重量降为26kg。1959年和1963年分别研制出AG型和M-2型陀螺罗盘仪，成为该研

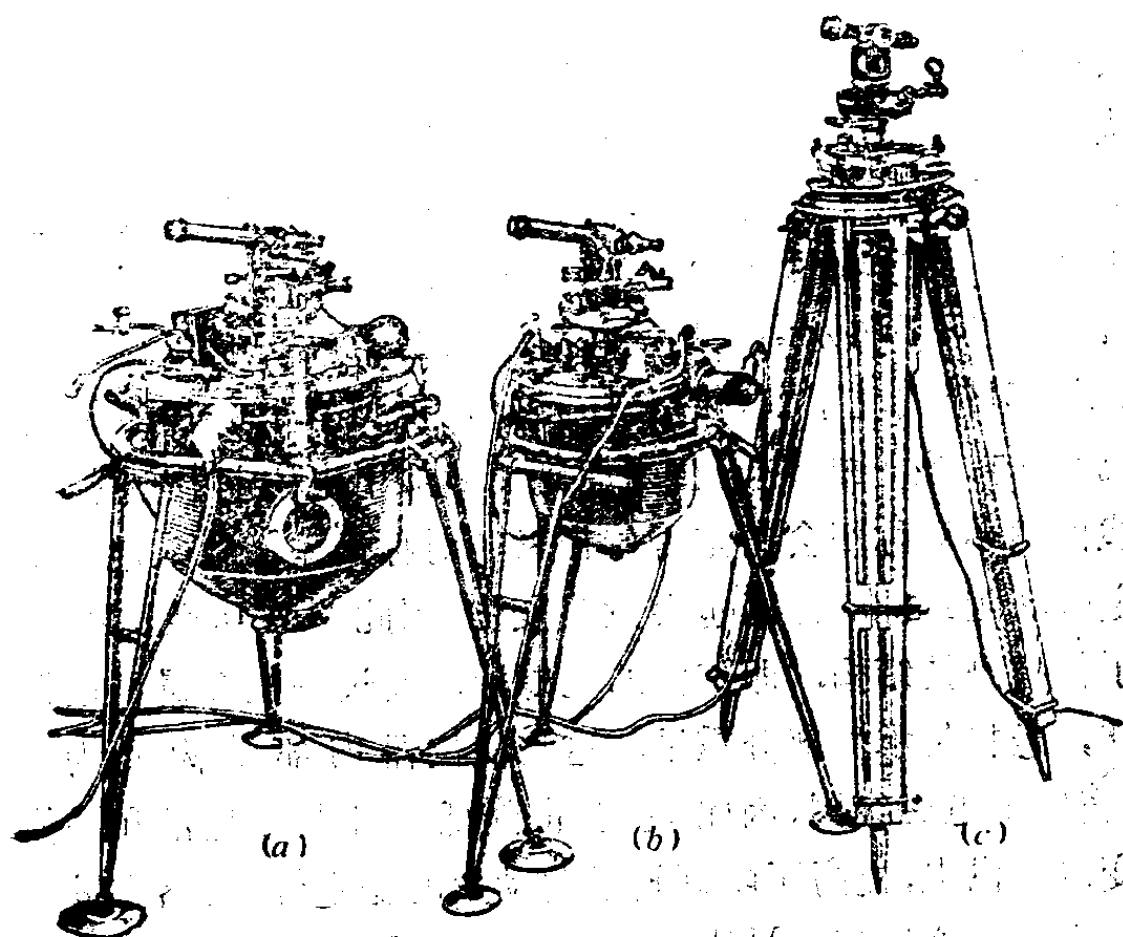
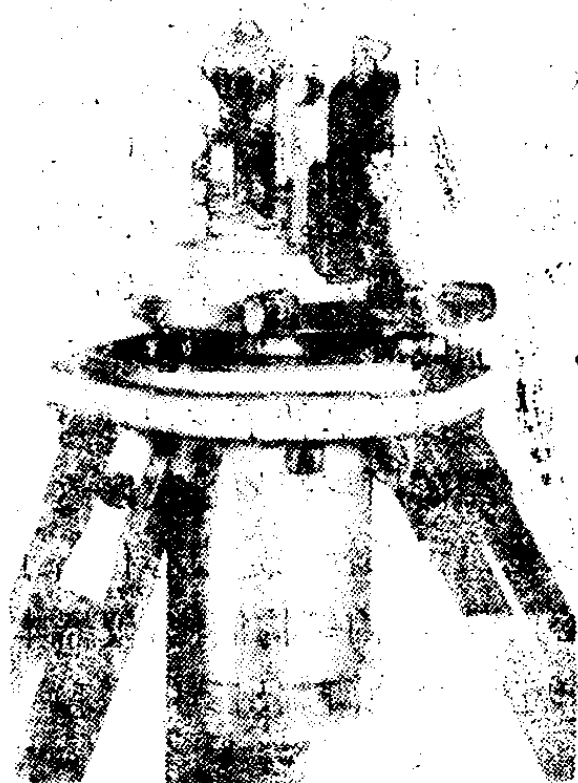


图1-1 M-3(a), MyF-2(b), MF(c)型陀螺罗盘仪

究院液体漂浮式陀螺罗盘仪的最终成果。

中国矿业学院于1958~1960年也研制成结构、重量、精度与苏联M-1、M-2相似的仪器，并在北京矿务局进行了工业试验，精度为1'。该仪器供电、恒温、

图1-2 Gi-B2型陀螺经纬仪



冷却系统与 MYГ-2 相似。1964 年，中国矿业学院与某部队合作研制成与 MB 型相似的浮子陀螺经纬仪，在北京矿务局进行了工业试验，精度为 $2'$ 。

第一阶段几种典型的矿山陀螺罗盘仪的技术特征列于表 1-1。其共同缺点是体积大，过于笨重，因而不便在井下使用。

表 1-1 液体漂浮式矿山陀螺罗盘仪的技术特征

仪 器 型 号	国 家	研 制 单 位	出 现 时 间	一 次 测 定 中 误 差 ($''$)	主 机 重 量 及 全 套 重 量 (kg)	定 向 时 间 (h)	技 术 特 征
MW 1	联邦 德国	克劳斯 塔尔矿 业学院	1949	± 60	60/250	4	液漂式单转子陀螺球，电磁 线圈定中心，陀螺供电源 330Hz, 100V 三相交流，陀 螺转速 19000r/min，角动量 $87 \times 10^6 \text{g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}$ ，摆动周 期 27min
MW 4a	联邦 德国	芬奈厂	1959	± 15	76/186	1-1.5	液漂单转子陀螺球，带式悬 挂定中心，晶体管变流器供 电 200Hz, 100V 三相交流。 陀螺转速 19000r/min，摆 动周期 22min
MW 10	联邦 德国	芬奈厂	1962	± 30	33/75	40 min	液漂圆柱形灵敏部，带状悬 挂定中心，晶体管交流器供 电 400Hz, 110V，陀螺角 动量 $18 \times 10^6 \text{g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}$ ，摆 动周期 8min

续表

仪 器 型 号	国 家	研 制 单 位	出 现 时 间	一 次 测 定 中 误 差 (")	主 机 重 量 及 全 套 重 量 (kg)	定 向 时 间 (h)	技 术 特 征
M-1	苏联	全苏矿山 地质力学 及测量科 学研究院	1950	± 90	/550	5	液浮式双转子陀螺球, 电磁 定中心, 陀螺供电源500Hz, 120 V 三相交流, 陀螺转速 30000 r/min, 陀螺角动量 $111 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}$, 摆动周 期30min
MYT-2	苏联	全苏矿山 地质力学 及测量科 学研究院	1954	± 90	65/250	3	液浮式单转子陀螺球, 电磁 定中心, 陀螺供电源500Hz, 120 V 三相交流, 陀螺转速 30000 r/min
AG	苏联	全苏矿山 地质力学 及测量科 学研究院	1959	± 90	22/93	45 min	液漂圆柱形灵敏部, 轴尖定 中心, 陀螺供电源400Hz, 转速 22000 r/min, 陀螺角 动量 $24 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}$, 摆 动周期 2min
MB-2	苏联	全苏矿山 地质力学 及测量科 学研究院	1963	± 30	23/175	1	液漂圆柱式灵敏部, 轴尖定 中心, 陀螺供电源400Hz, 转速 22000 r/min, 陀螺角 动量 $24.3 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}$, 摆动周期 14min

2. 六十年代的下架悬挂式陀螺经纬仪

该类型仪器较大的改进是废弃了液浮式陀螺球和电磁定中心的结构形式, 而利用金属悬挂带把陀螺灵敏部于空气中悬挂在经纬仪空心竖轴之下。悬挂带之固定端与经纬仪的壳体相固联, 采用导流丝直接供电方式, 仪器内部结构大为简化; 取消了电磁线圈, 电能消耗降低, 采用携带式蓄电池组

和晶体管变流器，全套仪器进一步小型化，重量减轻；晶体管变流器比交流发电机组或电动振荡器的输出电压和频率稳定性高得多，使陀螺转速稳定，减少角动量的变动，相应的提高了仪器的观测精度；虽然悬挂带和导流丝存在一定的扭力矩，但该力矩小于陀螺指向力矩，又采用经纬仪照准部跟踪灵敏部的摆动观测方法，可以消除扭力的影响；灵敏部悬挂在空气中，利于散热，几乎不存在冷却的问题；当陀螺角动量一定时，适当加长灵敏部悬挂高度，使重心下移，增大了重力矩，摆动周期缩短，因此一次定向所需时间也就由原来的 2~5h 缩短为 1h 到 30min。

联邦德国克劳斯塔矿业学院和芬奈厂(Fennel)于1958年开始采取了上述新的发展方向，研制成功KT-1型陀螺经纬仪，随即匈牙利莫姆厂(MOM)于1961年生产了GI-B1型；民主德国弗赖堡精密仪器厂(FREIBERGER)于1964年出品了MRK-1型；苏联全苏矿山地质力学及测量科学研究所于1963年研制成MT-1型，1970年又研制成MBT-1型等仪器，均属金属悬挂带下挂灵敏部的陀螺经纬仪。这些仪器的特征列于表1-2中。

3. 七十年代的上架悬挂式陀螺仪

由于陀螺技术不断发展，精密小型陀螺元件的出现，考虑到矿山测量与某些工程测量要求定向精度不需十分高，发展了跨放在经纬仪支架上的陀螺附件，即经纬仪上架陀螺仪。它适应井下作业特点，仪器体积小，重量轻，观测时间短，便于操作和携带，且陀螺仪取下后，经纬仪还可单独作测角仪使用。该类型仪器的陀螺部分仍采用金属悬挂带悬挂陀螺灵敏部的结构形式。中国唐山煤炭科学研究所于1971年开始研究

表1-2 下架悬挂式陀螺经纬仪技术特征

仪 器 型 号	国 家	研 制 单 位	出 现 时 间	一 次 测 定 中 误 差 (")	主 机 重 及 仪 器 全 套 重 (kg)	定 向 时 间 (min)	技 术 特 征
T-1	联邦 德国	克劳斯塔 尔矿业学 院与芬奈 厂	1958	± 20	14/60	60	灵敏部用金属悬挂带悬挂在经纬仪竖轴以下，自准直光学系统观测摆动，蓄电池组直流输出24V，晶体管逆变器输出400Hz, 110V三相交流，陀螺转速24000r/min 角动量 $8.4 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}$
GI-B1	匈 牙 利	莫姆厂	1961	± 15	/78	30	灵敏部带状悬挂在经纬仪竖轴以下，自准直光学系统观测摆动，蓄电池组直流输出12V，晶体管逆变器输出400Hz, 30.5V三相交流，陀螺转速24000r/min，角动量 $3.9 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}$ ，摆动周期12min
MT-1	苏联	全苏矿山 地质力学 及测量科 学研究院	1963	± 20	16/45	40	灵敏部带状悬挂，具有自动跟踪系统，晶体管逆变器供电400Hz, 36V，摆动周期11min，角动量 $24.3 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}$
GI-B2	匈 牙 利	莫姆厂	1964	± 15	9.2/50	35	灵敏部带状悬挂，自动跟踪系统，陀螺供电416Hz, 30.5V三相交流，陀螺转速24000r/min，角动量 $3.9 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}$ ，摆动周期4.5min

续表

MRK -2	民主 德国	弗赖堡 精密仪 器厂	1965	± 16	18/72	50	灵敏部带状悬挂, 水银槽和 触针导电, 自准直光学系统, 蓄电池组直流24V, 晶体管 逆变器输出400Hz, 36V三 相交流, 陀螺转速 24000 r/min, 摆动周期4min
DTJ - I	中国	1001厂	1970	± 10	/60	40	灵敏部带状悬挂, 自动跟踪 系统, 蓄电池组直流27V, 晶体管逆变器输出500Hz, 40V 三相交流, 陀螺转速 30000r/min

这类仪器, 1972年出现了 KJD60 型陀螺经纬仪, 陀螺方位角一次测定中误差在 $\pm 60''$ 之内; 1973年唐山煤炭科学研究所和西安光学测量仪器厂合作, 在KJD60型仪器的基础上改进, 于1974年研制成功 DJ6-T60型陀螺经纬仪, 一次测定中误差在 $\pm 40''$ 之内; 1978年又研制成功 DJ2-T20 型陀螺经纬仪, 一次测定中误差 $\pm 20''$ 之内。1976年徐州光学仪器厂也试制成了 JT60型陀螺经纬仪, 经测试, 一次测定中误差也达到 $\pm 40''$, 并于1977年通过仪器鉴定投入批量生产。1979年中国矿业学院与徐州光学仪器厂合作, 经过近两年的努力, 于1980年研制成 JT15型陀螺经纬仪, 同年通过鉴定。陀螺方位角一次测定中误差为 $\pm 15''$, 已投入批量生产。JT15陀螺经纬仪在南极考察中, 于长城站进行了实际观测, (见图1-3b), 取得了满意的成果。

国外同类型仪器有瑞士威特厂的 GAK-1 型, 联邦德国芬奈厂的 TK4、TK5型, 匈牙利莫姆厂的 GI-C11 型, 日本测机舍的 GP-1型等。该类型仪器的有关技术特征列于表1-3中。

表1-3 上架悬挂式陀螺经纬仪技术特征

仪 器 型 号	国 家	研 制 单 位	出 现 时 间	一 次 测 定 中 误 差 (")	仪 器 重 量 (kg)	定 向 时 间 (min)	技 术 特 征
TK5	西德	芬奈厂	1964	± 20	21	20	灵敏部带状悬挂, 上架式陀螺附件, 晶体管变流器 12V, 三相交流 400Hz, 115V, 转速 22000 r/min, 摆动周期 8 min
GAK-1	瑞士	威特厂	1963	± 20	21	20	灵敏部带状悬挂, 陀螺仪是 T1A, T16, T2 经纬仪的附件, 小型陀螺马达的角动量 $1.86 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}$, 变流器直流 12V, 三相交流 400Hz, 115V
GI-C 11	匈牙利	莫姆厂		± 25	32	30	灵敏部带状悬挂, 陀螺仪是 MOM2" 级经纬仪附件, 陀螺马达角动量 $3.92 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}$, 变流器直流 24V 三相交流 410Hz, 34V
GP-1	日本	测机舍 公 司		± 20	约22	20	灵敏部带状悬挂, 小型陀螺马达的角动量 $1.6 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}$, 变流器直流 12V, 三相交流 400Hz, 115V
DT 2- J60	中国	唐山煤 研所西 安光学 仪器厂	1978	± 20	20	30	灵敏部带状悬挂, 陀螺仪是 2" 级经纬仪附件, 陀螺马达角动量 $3.92 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}$ 三相交流 400Hz, 36V
J 15	中国	中国矿 院徐州 光学仪 器厂	1980	± 15	20	25	灵敏部带状悬挂, 陀螺马达转速 21500 r/min, 变流器直流 24V, 三相交流 400Hz, 36V, 起制动大电流傍路, 三相 = 悬挂带 + 两根导流丝, 摆动周期 8min 40s