

液体传感法测量倾角的原理、技术及应用

刘启武 金宽助

(齐齐哈尔师范学院物理系)

本文介绍一种新的倾角测量方法——液体传感法。此方法简便易行,在国民经济领域中有一定研究推广价值。文中着重阐述了它的测量原理,典型传感器结构以及应用等方面的主要内容。

在地质勘探、建筑施工、国防工程、自动控制、卫生保健以及文化生活等许多领域,经常需要测量倾斜角或控制倾斜度。

传统的地质测斜仪是根据液面水平原理或悬锤铅直原理设计的。常用的方法有氢氟酸试管腐蚀法、像纸显影法、单点曝光照像法、化学浆液固结法、定盘法、机械摆锤旋转电阻法等^[1]。这些测量方法都很繁琐,甚至笨拙,每测一点,要往复多次提拉钻具,劳动强度大,效率很低,而且测得的数据是不连续的,对于沿 X, Y, Z 三度空间分布复杂参数的测量就更加困难。在测量时,要进行相当复杂的修正和计算,相应产生较大的误差。这些比较陈旧的测量方法,已在国内外延用了几十年。

60年代以来,我国先后研制生产了单点全测仪(如 JXY-2、感光测斜仪等)、多点全测仪(如 JJX-3, JXC-1, JXK-2等型)、陀螺测斜仪(JDL-1, JTL-50等型),测斜技术有了长足的发展,但倾斜传感方式仍未脱离传统的机械悬锤模式。

1977年,美国 OWL 公司试制成 OWL780 型数字测斜仪,采用了微处理机、数字显示、同步打印、键盘操作等先进技术,在美国风靡一时。在地质钻探中,为配合孔底动力机定向钻进,采用随钻测量(measurment while drilling),简称 MWD 遥测系统。世界一些发达国家,如美国、苏联、法国、英国、联邦德国等争相研究,并已有产品相继问世。美国 BJ-休斯公司定型生产的遥测井斜仪(teledrift)、遥测宽角度井斜仪(wide angle teledrift),特勒科(Teleco)

公司生产的正脉冲式遥测井斜仪、WOT 负压脉冲式测量仪等,是采用压力脉冲法设计的,应用颇广。

此外,美国科学钻井设备公司(Scientific-Drilling Cantrols)生产的“EYE 遥测井斜仪”、法国石油研究所(IEP)研制的“AZINTAC 遥测定向仪”,其原理基本相似,采用带金属导线的特殊钻具,不停钻可连续测量井下定向的全部参数。近年来,美国德维尔柯(Develco)公司研究一种垂直极化磁场法,物理性能更容易控制,与钻具接触电阻无关,对大气噪声不敏感。近期,美国斯珀林森公司利用声波法,研制了加“重发器”的声波遥测仪,通过钻杆传输孔底信息,结构简单,成本较低,但抗干扰能力较差。

前面列举了国外地质测斜技术的概况。关于倾角传感技术,受专利保密所限,尚未尽知。70年代以来,我国对 MWD 技术的研究已有进展,但离实用商品化尚有距离。近年来,我国重视引进国外先进技术,进口了一些小口径测井仪器,但价格十分昂贵,要花费大量外汇,应用范围很受局限。

目前,国内常用的测斜仪器,对于 3° 以下小倾斜角几乎无法测量,其原因是:小倾角的机械传感力不足以克服静摩擦力,限制了仪器对小角度的分辨力。因此,在国家地质钻探规程中,不得不把最小钻孔斜度允值定为:直孔 $2^\circ/100\text{ m}$,斜孔 $3^\circ/100\text{ m}$ ^[2]。实际上,对于 5° 以下小角度的测量值只能取作参考,因为误差太大。多年来,解决小倾角的测量问题,是测井工

作有待突破的难关。

角度测量灵敏度，关键在于传感器的敏感程度，特别是对于小角度反应的敏感度。传感器的精度，在很大程度上决定了角度测量的精确度。

在许多测量场合，对于传感器的体积、重量、几何尺寸、形状、材质等是有要求的，甚至是苛刻的。譬如在地质测量中，探测金属矿钻孔孔径只有 33 mm，井下探头除去壁厚和允许游动间隙，只剩下十几个 mm 的径向空间，要将机械传感器装在其中，并要通过一定的转动行程来测量角度，其难度和精密度之高是难以想象的^[3]。同时，由于空间体积所限，重锤(垂直基准)的惯量小，机械转动力要克服微型轴承的静摩擦力和特制电位器的转动摩擦力，装置才能转动，对于小倾角，传感系统无法转动，也就不可测量。对于倾斜大于 30° 的转角，摆锤与万向节框架受到管径几何尺寸的限制，根本无法测量^[4]。

目前，国内广泛使用的常规测斜仪器，多采用机械式传感方式，通过重锤与万向节结构，带动弧形特制线绕电位器转动，使电压随角度改变，将非电量转化为电量。这样，势必存在上面分析的主要缺陷，如测量误差大、小角传感灵敏度低、成本造价高等。特别对于小孔径测斜，工艺要求过于精密，即使对较小倾斜角作精确度

不高的测量，也是相当困难的。

一、倾斜角的含义

本文以地质勘探测井为例加以说明。图 1 是在地质测量中几种斜孔示意图。理想直井，在全深度内，中心轴母线 OQ 与垂直法线 OP 相重合；在地质工程设计深度内和理想斜井时，中心轴母线与垂直法线之夹角 $\angle POQ$ 恒定为 α ，如图 1(a) 所示，其水平方位角恒定为 β 。但由于工艺条件限制、地质构造差异、钻探水平、钻具挠曲变形等因素的影响，使钻孔几何参数沿深度偏离规定值，如图 1(b)，(c) 所示。可见，倾角 α 是随深度 H 变化的几何量。

同时，钻孔的倾斜方位也随着深度不同而变化。亦即任一地质钻井的倾斜角 α 在 X, Y, Z 三度空间随着深度的延伸而改变。在图 2 中， OP 为铅垂法线， OQ 为钻孔母线，其夹角 α 为倾斜角。 $O'Q$ 与 X 轴方向(通常定为北极 N 方向)夹角为 β ，即为倾角 α 对应的水平方位角。显然，在地质测量过程中，要同时给出 α, β, H 三个参量对应的瞬时值，才能准确地描述井下该点的几何位置及井孔空间形状。其函数表达式可写作

$$\alpha = f(\beta, H). \quad (1)$$

对上式取全微分则得

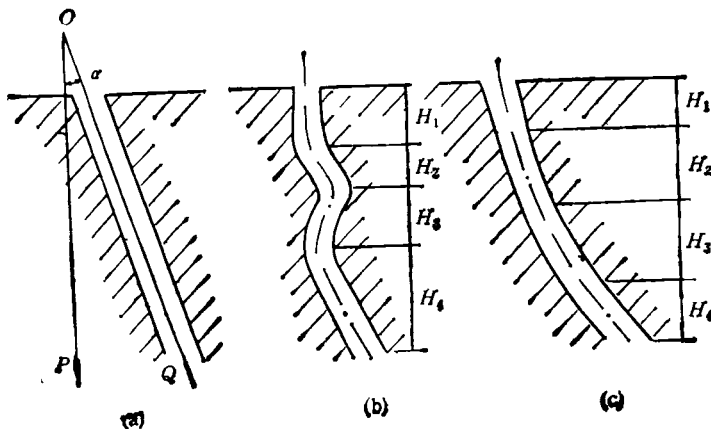


图 1 几种斜孔示意图

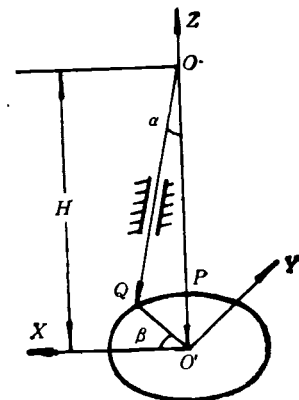


图 2 钻孔水平方位

$$d\alpha = \frac{\partial\alpha}{\partial\beta}\bigg|_H d\beta + \frac{\partial\alpha}{\partial H}\bigg|_\beta dH. \quad (2)$$

假定角度与深度呈线性规律变化,对于微小变量 $d\alpha, d\beta, dH$, 可以用有限变量值代替, 于是 α 可表示为

$$\alpha = A_{xy}\beta + 1/K_h \cdot H, \quad (3)$$

上式中 A_{xy} 为水平系数, K_h 为垂直系数。

$$A_{xy} = \frac{\partial\alpha}{\partial\beta}\bigg|_H \approx \frac{\Delta\alpha}{\Delta\beta}\bigg|_H,$$

$$K_h = \frac{\partial H}{\partial\alpha}\bigg|_\beta \approx \frac{\Delta H}{\Delta\alpha}\bigg|_\beta.$$

上述分析表明,如果采用传统的点测方法,同时描述 α, β, H 三个既独立存在又互为变量的空间参数是相当困难的,要经过复杂的计算和经验换算,才能获取一口井的全部测斜数据,其繁琐程度可想而知。

如果找到一种非常简便的传感方法,能够随着探头在被测井孔中的下降(或提升),快速自动地同步给出井深(H)、倾角(α)、方位角(β)各参数,传感器的体积和形状可以在大范围内选定,那么经济成本将会大幅度下降,测量范围可以扩大,小倾角测量灵敏度和测量精度也会提高,从而给测井工作带来极大的方便,这正是本文下面所要探讨的内容。

二、液体传感方法

1. 液体传感原理与典型结构

水银、酒精溶液、盐水、天然矿水、自来水等许多液态物质,它们具有不同的导电性能(电导率),其导电性能可以用渗杂办法随意控制。液体具有良好的仿形性、流动性,摩擦阻力小以及具有一定的温度稳定性等特性。利用液态介质的这些特性,可以使倾角传感器的结构大为简化,使工艺精密和造价昂贵的角度传感器的制作成为举手之劳。

根据传感要求,将液态物质(电解液)封装在密闭容器内,引出电极,随着角度、位置、方向的变化,电阻、电容或电感量相应发生变化,并与被测量呈一定的函数关系,即成为液体角度

传感器。如果传感器接入电路,能给出电平的高低、电压或电流的大小、电阻的大小(或者有无,亦即有“0”,“1”两种工作状态),即成为一种液体角度传感器的特殊形式——倾斜(位置)开关。

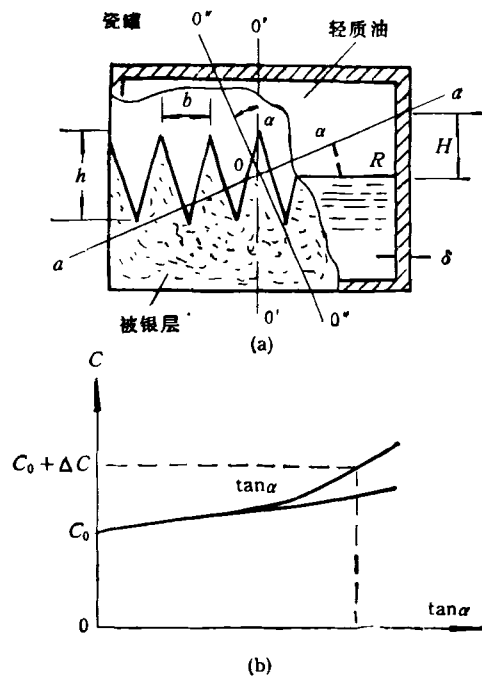


图3 倾角传感器示意图
(a) 电容式倾角传感器; (b) $C = f(\tan\alpha)$ 曲线

图3(a)为一种电容式倾角传感器示意图。在圆柱形瓷介容器内充以水银,作为电容器的一个电极。瓷罐外壁用烧结法均匀被银,中部呈三角齿形,齿高 h 应满足下式:

$$h = k \cdot D \cdot \tan\theta, \quad (4)$$

式中 k 为齿高系数,通常取 $k = 1.5-2$,覆盖角 $\theta = 6 \pm 1^\circ$,齿宽 b 按下式选取:

$$b = \pi D / m, \quad (5)$$

式中 D 为瓷罐内径, m 为齿数,通常取 $m = 24-32$,壁厚 $\delta = 1.2-1.8 \text{ mm}$,介电常数 $\epsilon = 100$ 。外壁被银层作为电容器的另一电极,则此罐形容器成为一只可变电容器,并有如下关系式:

$$C = A \cdot \epsilon \cdot R / \delta, \quad (6)$$

式中 C 为电容器容量, A 为传感系数, ϵ 为介电

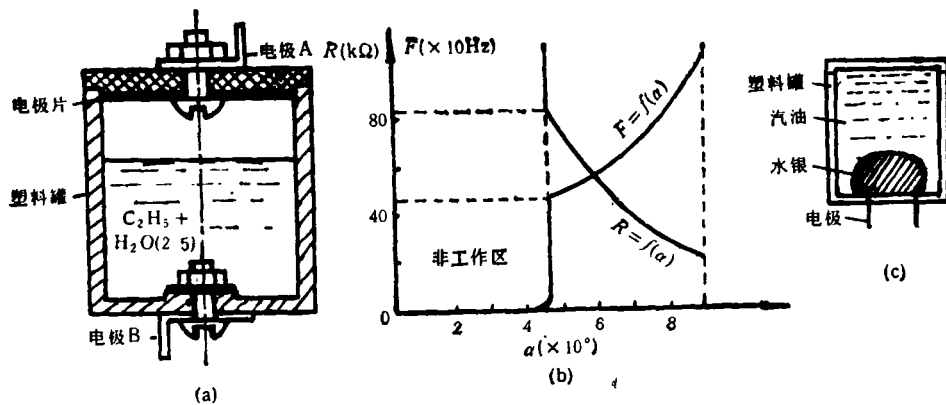


图4 电阻式液体倾斜传感器
(a) 传感器构造示意图; (b) 工作特性曲线; (c) 水银倾斜开关

常数, R 为瓷罐内圆半径, δ 为壁厚。当水银罐倾斜 α 角时, 容器内水银柱面与容器外壁被银层相对位置发生变化, 电容量相应改变。当倾角为 α 时, 有如下关系式:

$$\tan \alpha = \frac{H}{R}, \quad (7)$$

$$H = R \cdot \tan \alpha,$$

圆柱面一边水银覆盖变化面积为

$$\Delta S_{1/2} = \pi R H = \pi R^2 \tan \alpha, \quad (8)$$

总变化面积为

$$\Delta S = 2 \pi R^2 \cdot \tan \alpha. \quad (9)$$

假设电容器具有以下理想条件:

- (1) 容器为理想圆柱面, 无椭圆及锥度。
- (2) 壁厚均匀, 360° 各截面无变化。
- (3) 材质均匀, 即介电常数在各部位为一固定常量。

则电容值变量与水银覆盖面积成正比, 即

$$\Delta C \propto \Delta S, \quad (10)$$

将(9)式代入(10)式, 则

$$\Delta C \propto 2 \pi R^2 \cdot \tan \alpha, \quad (11)$$

当 R 确定后, 令 $k = 2 \pi R^2$ 为常量, 则

$$\Delta C \propto k \cdot \tan \alpha, \quad (12)$$

$$\alpha \propto \arctan \Delta C / k.$$

(12)式说明, 当容器倾斜时, 电容量变化与倾角变化呈正切函数。图3(b)为 $C = f(\tan \alpha)$ 曲线。 C_0 为固有电容值, ΔC 为当倾角为 α 时的电容增量, 则瓷罐电容 $C = C_0 +$

ΔC 。

图4(a)是一种电阻式倾斜传感器。在塑料圆罐内充定量的电解液(如酒精、自来水、盐水等), 为增加流动性, 减小壁面摩擦阻力, 可加入适量纯净的汽油, 兼有冲洗电极和防止氧化腐蚀作用。电解液面高度决定了初始工作角度。图4(b)给出初始角为 45° 情况下的工作特性曲线。图4(c)是利用水银滴与汽油作为传感介质, 制作倾斜开关示意图。当倾斜角大于某一角度时, 水银球将电极接通。当倾斜角小或倒置时, 水银球脱离电极, 相当于开关断开。

利用上述工作原理, 可以设计出各种规格的倾角传感器和倾斜开关, 适应 360° 任意方位, 方法十分简便。

2. 提高小角度测量灵敏度

为了提高小角度测量灵敏度, 可向容器内加入轻质油(如汽油、柴油、缝纫机油等), 以减小电解液与管壁的摩擦阻力。

对于图3(a)所示的电容式传感器, 在容器中间 $5-7^\circ$ 倾斜区, 将被银层做成若干个三角齿形, 如图5所示。当倾角 $\alpha = 0$ 时, 水银面居中。当倾斜 α 角时, 前齿水银面由 0° 时的 ab 变化到 cd , 后齿(后部 180° 对应部位)由 $a'b'$ 变化为 $c'd'$ 。前齿覆盖面积减小梯形 $abcd$, 后齿水银覆盖面积增加 $a'b'c'd'$, 总覆盖面积变化量为

$$\begin{aligned} \Delta S &= a'b'c'd' - abcd \\ &= a'eg + b'fh. \end{aligned} \quad (13)$$

应当说明,为保证前后齿对称,应取齿数为偶数,并均匀地分布在壁面圆周上。这样,相对于无齿柱面,电容随 α 角变化时,每个三角齿增加两个小三角形面积的容量,这对于提高小角度传感灵敏度是有利的。当倾角大于 $6 \pm 1^\circ$ 时,齿区已被水银柱面对应覆盖(或全部脱离),齿区不再起作用。

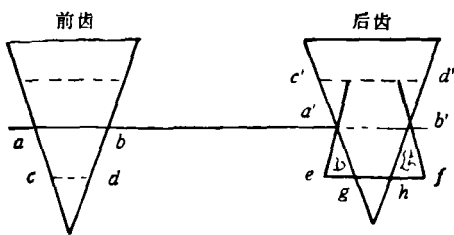


图5 三角齿的作用

上面讨论的是容器上部被银情况。当下部被银时,电容量变化情况恰好相反,不作赘述。从上述分析可见,由于加入了三角齿,扩大了小倾角的电容变化量,使仪器对小角度($0-5^\circ$)测量分辨率明显提高,这一点从理论和实际应用上都得到了证实。

3. 边界效应

在液体传感器中,有的介质与壁面浸润,如水、酒精溶液等,有的介质与壁面不浸润,如水银、油脂等,因此液体介面并不是水平的,在壁面附近分别呈现上翘和下凹状,这种现象称为边界效应。影响边界效应的主要因素有:容器与液体的材质、容器内径与形状、内壁表面光洁度、液体粘滞系数,壁面油污、温度影响等等。由于边界效应产生在壁面附近,对于小倾角变化灵敏度的影响是不可忽略的。容器越小,这种影响则更明显。当管径小到一定程度(因容器、液体材质而异),液体粘滞力大于倾斜下滑力,传感器将失去作用。同时,液体粘滞系数大,将影响倾角传感的线性度。由于边界效应的影响,会给倾角测量造成一定误差。为了提高测量精度,减小边界效应引起的测量误差(主要是小倾角区),可采取下述办法:

(1) 合理选择液体传感容器的体积与形状,在条件允许情况下,尽可能将内径取大些。

(2) 适当选取容器和液体介质材料,合理确定液体界面高度。电容传感式选不浸润材质,电阻传感式选浸润材质。

(3) 在容器内充适量轻质油,减少壁面摩擦力,液体粘滞系数要小。

(4) 电容传感式倾角传感器,适当选定三角齿高度、齿数。

(5) 采用电子线路进行修正和补偿。

三、液体传感方法的应用

1. 测量倾角

将液体倾角传感器接入振荡电路,由于传感器的阻容变化,使振荡频率随倾角变化而改变^[5],并遵循一定函数关系。信号经过放大、频率-电压转换^[6]、线性补偿后,使倾角与电压变化呈线性关系,即 $\Delta\alpha \propto \Delta V$,通过指针式仪表显示倾角值。如果通过模-数转换,采用简易数字频率计(或电压表),可以方便地实现数字显示。图6是新型旋光数字式测斜仪的原理方框图。仪器采用图3(a)型电容式倾角传感器。井下倾角信号与方位信号合成,全井斜信号由电缆传到井上。信号分离级将频率、幅度(脉宽)不同的两种信号分离出来。倾角信号经电路处理后,由数字显示器直读倾角值,并由数字打印机记录数据。方位信号经处理后,在旋光盘打出正北(N)与方位两条亮线,由旋光盘读取方位角 β 值,并输入打印机。井上自整角接收机与井下发射机同步旋转(精度 0.5%),如实地反映了井下状态。仪器可测倾角 55° ,精度优于 0.5° ,方位附加误差小于 2% ,小角分辨率为 $\pm 0.3^\circ$,可对深度、倾角、方位同步可逆测量。

2. 倾斜开关

如图4(c)所示,导电介质采用水银,电极用铁丝,导通电阻小于 0.2Ω ,关断电阻大于 $5M\Omega$ 。水银的充入量和容器内径大小决定倾斜控制角度。容器内充入汽油,目的在于改善

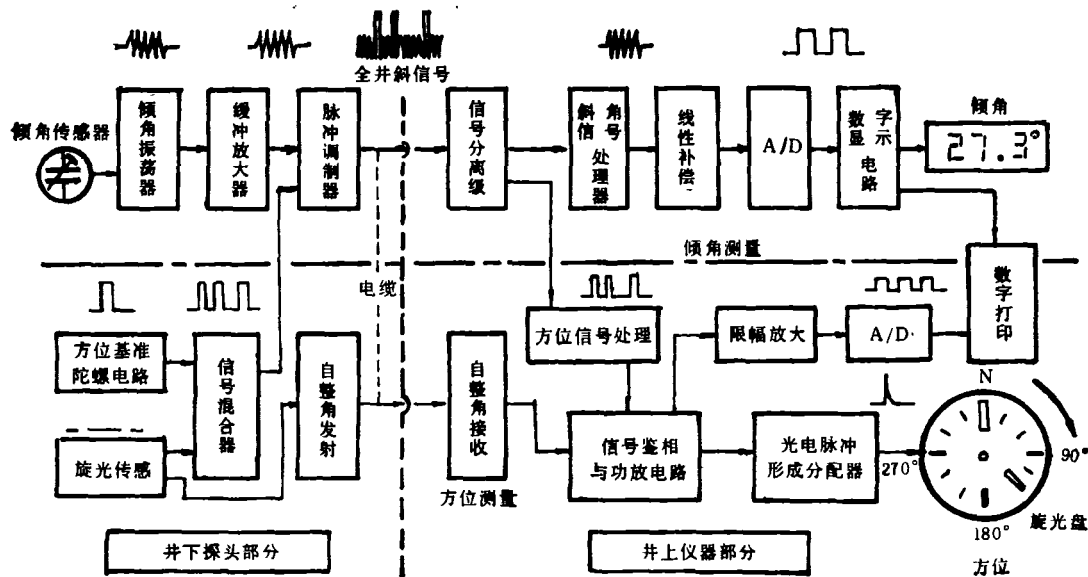


图 6

水银的流动性,冲洗电极,防止氧化。如果将水银换成盐水或自来水,接入开关电路,可作为电子开关。当传感器倾斜某一角度时,水银沿壁面下滑力大于摩擦阻力,将电极接通或关断。

3. 水平控制

将水银(或其它电解液)滴充入小圆管内,加入适量纯净汽油,两端各引出两根金属丝电极,严密封闭,即成为一只水平控制开关。使用时,将传感器水平放置,当位置失平时,通过水银滴流动,将电极接通,工作灵敏可靠。

4. 方位控制与测量

在某些场合,需要对倾斜方向加以定向控制或测量^[7]。只要使液体传感器具有方向性,仅向既定方向倾斜,才能接通或关断电路,其他各方位无控制作用,方法简单有效。

5. 方位与倾斜报警

根据实用需要,将上述相应的液体传感器接入报警电路,通过音响、灯光的有无、强弱来实现方位、倾斜报警,方法十分简便。

综上所述,由于液体传感方法简便可靠,体

积、形状自由度大,具有方向性,工艺简单,成本低廉等优点,因而在工业自动控制与测量、国防军事工程、仪器仪表、人民文化物质生活、卫生保健等许多领域,有广泛的应用价值。关于液体传感器的应用还有很多,限于文字,不能一一枚举。

本文作者谨向刘启文高级工程师、张达英同志表示由衷地感谢。

- [1] 吴光琳、汤顺德,钻孔弯曲和定向钻探,成都地质学院,地质出版社,(1984),62—132。
- [2] 国家地质矿产部,岩心钻探规程,地质出版社,(1983),30。
- [3] 王金铭,文华川编译,世界石油勘探和开发技术资料,中国工业出版社。(1965),116。
- [4] Ю. С. Констин и др., Экспресс-Информация, Техник и Технология, (1983), 21。
- [5] Э. В. Бурсиан, Физические Приборы, Москва Издательство Просвещение, (1984), 116。
- [6] В. М. 奥利弗, J. M. 卡奇编,张伦等译,电子测量和仪器,科学出版社,(1980),103。
- [7] Ф. А. Шамшев и др., Недра, Технология и Техника, (1983), 11。