

# 小口径防斜试验及防斜理论探讨

中南矿冶学院地质系探工室 孙宗頤

湖南省第一煤田地质勘探队 李达淮 庄廷武

随着小口径钻探事业的发展，小口径孔斜问题也逐步暴露出来。原来认为小口径就能解决孔斜的问题，现在看来并不尽然。真正易斜地区，如某些变质岩（片岩、千枚岩、板岩）地区及部分沉积岩地区的孔斜问题，还是比较突出的，需要认真研究和解决。

我们进行了小口径孔斜的预防试验，取得了一定的效果。现结合试验情况，探讨一下有关孔斜及防斜的问题。

## 一、明冲井田的地质、孔斜情况介绍

明冲井田位于永耒向斜北端中段。出露地层自上而下有新生界第四系，中生界三迭系下统大冶群，古生界二迭系上统大隆组、龙潭组，二迭系下统当冲组。

全井田为一单斜构造，但次一级褶皱较发育。地层倾角浅部一般为 $25^{\circ} \sim 26^{\circ}$ ，南段次一级向斜东翼有时竟出现直立和倒转。井田内断裂构造较发育。整个地层以硅质层、煤层、泥岩、灰岩、砂岩、石英岩为主，岩性多变，软硬互层，属易斜地层。

该井田原煤勘128队曾施工过，当时是大口径钻进，孔斜比较突出。煤勘一队二分队1977年又来到这个井田时，开了二台小口径机台，一台大口径机台。施工结果证明，小口径孔斜仍不能满足规范要求。按孔斜级别标准，丙级孔高达50%，见表1。

表1

孔斜级别 孔径	甲级孔	乙级孔	丙级孔	备注
小口径 $\phi 77$ $\phi 57$	25 %	25 %	50 %	300米以内的孔，顶角不超过 $7^{\circ}$ 为甲级，不超过 $10^{\circ}$ 为乙级，超过 $10^{\circ}$ 的为丙级。
大口径 $\phi 91$	52.9 %	11.8 %	35.3 %	500米的孔分别为 $12^{\circ}$ ， $15^{\circ}$ 或 $15^{\circ}$ 以上。

表中未统计128队施工的钻孔。

在施工过程中，所用的设备是：钻机为石家庄煤机厂生产的千米钻机（X B—1000），水泵为TBW250/40型；动力机为柴油机4135（80匹马力）；钻塔为四脚铁塔，高15米左右。开孔一般为直孔，冲洗液为泥浆（部分曾用聚丙烯酰胺处理）。在灰岩、泥质灰岩、部分粉

砂岩、碳酸泥岩及煤层中钻进时，都采用合金钻进。在硅质灰岩、细砂岩、砂岩及部分粉砂岩中采用金刚石钻进或钢粒（大口径钻进时）钻进。

### 大小口径钻进中孔斜情况对比见表 2。

表 2

孔深 孔 径 (米)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	平均百米斜率	备注
小 口 径	1°35'	3°38'	6°29'	8°53'	12°14'	15°13'	18°19'	22°54'	—	—	5°27'	20个孔
大 口 径	1°15'	3°25'	5°31'	6°58'	9°20'	11°53'	13°30'	15°03'	14°06'	18°23'	4°24'	17个孔

表 2 是作为全孔统计的。但是许多小口径钻孔开孔并不是用小口径钻进的，有的甚至用大口径打了一、二百米后才换小口径的，所以为了摸清小口径孔斜情况，我们将大口径孔段去掉，并把Φ77孔径与Φ57孔径分别进行统计，结果见表 3。

表 3

		孔									
		15—33	15—35	15—39	15—54	15—55	15—57	15—58	16—13	16—14	
全孔	θ/孔深	18°/320米	40°/423	39°/590	12°/245	29°/392	13°/345	8°30'/145	9°/235	4°/168	
孔径	百米斜率	5.63°	9.45°	6.61°	4.9°	7.4°	3.77°	5.86°	3.83°	2.38°	
Φ77孔段	Δθ/孔段长	—	—	28°/448	4.3°/80	16°/190	9°/217.6	8.5°/145	3°/166	0.8°/70	
孔段	百米斜率	—	—	6.25°	5.37°	8.41°	4.15°	5.86°	1.8°	1.14°	
Φ57孔段	Δθ/孔段长	15.5°/267	29°/220	10°/127	7°42'/135	12.5°/160	4°/128	—	6°/69	3.2°/98	
	百米斜率	5.8°	13.2°	7.87°	5.7°	7.8°	3.13°	—	8.7°	3.27°	

号										平均百米 斜率	备注
16—36	16—37	16—38	17—14	17—15	17—19	17—23	17—33	—	—	—	—
23°/400	22°/365	22°30'/400	20°/290	7°30'/132	18°/250	9°/145	7°45'/145	—	—	—	这里未包
5.75°	6.03°	5.63°	6.9°	5.68°	7.2°	6.2°	5.35°	6.05	—	—	括试验钻
—	—	7.5°/114	—	9°/142	—	—	7.45°/145	—	—	—	孔及19线
—	—	6.58°	—	6.34°	—	—	5.35°	5.46	—	—	上的二个
20.5°/300	18°/240	15°/250	20°/220	—	16.1°/170	9°/145	—	—	—	—	钻孔
6.83°	7.5°	6°	9.1°	—	9.46°	6.2°	—	—	7.37	—	—

从表 2 及表 3 可以清楚的看出，在易斜地区，用小口径钻进时的孔斜比用大口径钻进时的还大。譬如大口径的斜率每百米为4°24'（见表 2 ）时，Φ77孔径的斜率为每百米5°28'，而Φ57孔径的斜率则达7°22'。

在不同地层中，用不同直径的钻头钻进时的孔斜情况见表4。

表4

孔 径	地层名称	大冶灰岩	大隆组硅质层	龙潭煤系地层
大口径 $\Phi 91$		$3^{\circ}20'$ /百米	$3^{\circ}26'$ /百米	$4^{\circ}49'$ /百米
小口径	$\Phi 77$	$6^{\circ}43'$ /百米	$6^{\circ}28'$ /百米	$4^{\circ}50'$ /百米
	$\Phi 57$		$9^{\circ}54'$ /百米	$7^{\circ}30'$ /百米

## 二、防斜试验

我们在调查现场使用的钻具的基础上，提出了防斜钻具的方案，其结构见图1。

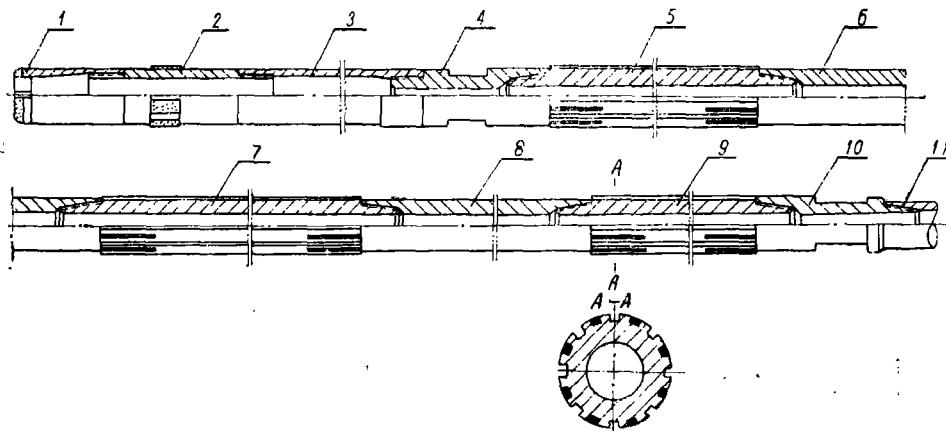


图1. 井底防斜钻具组结构

1—钻头，2—扩孔器，3—岩芯管，4—异径接头，5.7.9—扶正器，  
6.8—导正钻铤，10—异径接头，11—钻杆。

考虑到现场施工的特点，我们加工了Φ77和Φ57两种规格的防斜钻具。

Φ77防斜钻具的各种尺寸为：钻头外径： $\Phi 77.5$ ；岩芯管： $\Phi 73 \times 4$ ，长2米；扶正器： $\Phi 78 \times 17$ ，长0.3米；导正钻铤： $\Phi 68.20$ ，长2.5米。

Φ57防斜钻具的各部尺寸为：钻头外径： $\Phi 57.5$ ；岩芯管： $\Phi 54 \times 4.5$ ，长2米；扶正器： $\Phi 57.5 \times 15$ ，长0.4米；导正钻铤： $\Phi 55 \times 13.5$ ，长2米。

第一次试验是在16—34孔、102机台进行的。该孔在孔深41米后采用Φ77的防斜钻具组钻进，至孔深93米后换径，采用Φ57的防斜钻具组至终孔。在钻进过程中，每隔50米用氯化氢测斜一次，开始防斜效果一直较好，但到二百米以后，发现孔斜控制不住。终孔后用电测仪（本队自制）全孔测量，结果见表5。

接着我们在17—17孔（102机台）和15—55孔（108机台）继续进行了试验。17—17孔为浅孔，基本上用Φ77钻头打的，终孔电测结果孔斜达到甲级标准。15—55孔是在孔深230米

以后，孔斜已达 $16^{\circ}30'$ 时，才用防斜钻具组的。共进尺90米，即从232到322米，322米以后又用普通钻具钻进的。这两个孔全孔电测结果见表5。

表5

孔深 (米) 孔号	0	50	100	150	200	250	300	350	400	平均斜率	备注
16—34	0	0	0	$0^{\circ}30'$	$1^{\circ}$	$6^{\circ}30'$	$14^{\circ}$	$20^{\circ}$	$28^{\circ}30'$	$7^{\circ}53'$	全孔试验
17—17	$0^{\circ}30'$	$2^{\circ}40'$	$4^{\circ}$	$5^{\circ}35'$	$7^{\circ}$					$3^{\circ}13'$	全孔试验
15—55	0	$0^{\circ}54'$	$3^{\circ}$	$8^{\circ}30'$	$13^{\circ}07'$	$16^{\circ}$	$20^{\circ}$	$24^{\circ}$	$29^{\circ}$	$7^{\circ}24'$	部分孔段试验

从表5可以看出，防斜钻具有一定的效果。如16—34孔，从0~200米区间的孔斜状况是十分令人兴奋的。在这个矿区的小口径、大口径钻进中都是少见的。

为了看清防斜钻具的效果，我们将17—17孔旁边打的17—15孔加以对比，见表6。其效果也是明显的。

表6

孔深 (米) 孔号	0	50	100	150	200	平均斜率	备注
17—17	$0^{\circ}30'$	$2^{\circ}40'$	$4^{\circ}$	$5^{\circ}35'$	$7^{\circ}$	$3^{\circ}13'$	使用防斜钻具
17—15	0	$3^{\circ}05'$	$4^{\circ}10'$	$9^{\circ}42'$	—	$6^{\circ}28'$	未使用防斜钻具

在15—15孔一个孔中，使用与未使用防斜钻具组时，孔斜变化见表7。

表7

未使用防斜钻具孔段			使用防斜钻具孔段			未使用防斜钻具孔段		
孔段	$\Delta\theta$	平均百米斜率	孔段	$\Delta\theta$	平均百米斜率	孔段	$\Delta\theta$	平均百米斜率
0~232	$16^{\circ}30'$	$7^{\circ}09'$	232—322	$4^{\circ}30'$	$5^{\circ}$	322—392	$8^{\circ}$	$11^{\circ}25'$

因此，通过第一阶段试验，可以看出防斜钻具的效果是肯定的，打200~300米孔深的钻孔，完全有可能消灭丙级孔。但打300—500米的钻孔，则还不能满足要求。于是，我们进一步改进了井底钻具组的结构，并进行了第二阶段的试验。

第二阶段试验的防斜钻具与第一阶段试验的钻具相比，主要不同处在于缩短了两个扶正器之间的导正钻铤的长度至1~1.2米，从而整个井底钻具组长5—6米。其次，我们将Φ57.5的扶正器外径加大到Φ58，即比钻头外径还大0.5毫米。合金钻进时，我们在钻头与岩芯管之间还加了一个扩孔器，外径为Φ58毫米。

试验在16—32孔、102机台进行。孔深425米。钻孔上部用Φ77的钻头打的，从116.32米开始改用Φ57的钻头，终孔测斜结果见表8。

表 8

孔深 (米)	36	86	126	136	186	206	236	286	336	386	396	406	416	平均斜率
顶角	0°	2°30'	4°30'	6°	7°30'	5°30'	5°30'	4°30'	6°30'	7°30'	7°30'	9°15'	9°00'	2°10'
方位	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
备注	0~174米使用第一阶段试验用的钻具组				172~292米使用第二阶段设计的防斜钻具组				292米以后采用第一阶段试验的防斜钻具组					

从表 8 中可以看出，在172米以前，采用Φ77和Φ57的长的防斜钻具组，顶角还是继续上漂的，其斜率达4°/百米。在292—416的区间，斜率也达3°24'/百米。而在使用了短钻铤（即第二套方案）钻进的区间（172—292米），孔斜不但没有上漂，却还是下降的。全孔孔斜被评为甲级。

### 三、防斜理论的探讨

在孔斜原因的讨论中，人们常谈到孔斜的地质因素、技术因素和工艺因素。但谈的比较多的是地质因素。众所周知，某些岩石具有各向异性，某些地层软硬不均，地层呈倾斜状，这些都会致导孔斜。但各种各样的地质因素，归根结底是引起钻头接触的孔底是不均匀的，並引起井底的不均匀破碎，因此发生孔斜。

但只谈到这一点是不够的。我们知道，钻头总是与钻具连接的，并在施加一定的压力（加上回转）的情况下才进行钻进。因此，井底地层引起的破碎不均匀，必然同时要引起（甚至先引起）钻头以及连结钻头的井底钻具组的偏倒。由于某一地层的各向异性或地层的倾斜，钻头及井底钻具组也就总向某一边偏倒。也就是说，井底钻具组偏离原来钻孔轴线方向是引起孔斜的必然条件。反之，如果我们能使连接钻头的井底钻具组严格保持在原钻孔轴线方向上，那么即使遇到各向异性等易斜地层时，也不会发生孔斜。

这里谈的井底钻具组，是指紧接钻头的、能起导正作用的钻具组。其长度随钻头直径不同而不同。在岩芯钻探的大口径（Φ110）钻进中，其长度约7—9米，在小口径金刚石钻进中，其长度约4—6米。在石油钻进中则长达20~30米。为什么只谈井底钻具组，因为在井底钻具组上面的钻杆是一个柔性的细长杆，因此它不可能对孔斜有什么大影响。钻铤如不配合扶正器一起使用，在易斜地区钻进时，也不能很好控制孔斜。

那么如何能使井底钻具组在任何地质条件下保持或接近原钻孔轴线，就成为防斜工作中主要的课题。

在大口径钻进中，特别是钢粒钻进中，对孔斜的预防，人们都着眼于减小孔壁间隙来达到这一目的。我们在1977年钢粒钻进孔斜预防试验中，采用了钻头直径比导正钻具直径小的办法，使间隙减小到2—4毫米，孔斜与百米的斜率从10度以上降到1—2度。

小口径钻进间隙本来就小，如果因此得出结论，说小口径孔斜一定比大口径来得小，则不完全正确。因为，小口径与大口径相比，它也有自身的很大的弱点，即小口径井底钻具组（岩芯管）的刚性比大口径的小得多。众所周知，刚性是与它的轴惯性矩（T）成正比。大口径井底钻具组（Φ108岩芯管）的轴惯性矩几乎是小口径（Φ54岩芯管）的9—10倍，而在

钻进过程中，小口径钻进时的井底压力几乎和大口径相当（在明冲井田，井底压力一般都维持在600—800公斤，有时达1000公斤），这就必然引起井底钻具的弯曲。弯曲了的井底钻具组则很难在易斜地层中起到防斜的作用，因此孔斜必然严重。

从材料力学知道，轴惯性矩是和直径的四次方成正比，也就是说直径愈大，刚性愈大。在小口径范围内，可以采用各种措施来增加井底钻具组的刚性，从而达到防斜的目的。具体做法如下：

岩芯管是岩芯钻探中必不可少的。小口径岩芯管的轴惯性矩又如此小，如何提高小口径岩芯管的刚性呢？这里的做法是缩短岩芯管。弹性力学告诉我们，一个杆子能承受最大的压力而不发生弯曲的公式是：

$$P_{kp} = \frac{\pi^2 ET}{\mu l^2}$$

式中：E—材料的弹性系数；

T—钻具模断面的惯性力矩；

l—钻具长度；

$\mu$ —系数，与端点固定情况有关。

$$T = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)$$

D、d—岩芯管外径与内径。

在大口径钻进中，岩芯管一般长7—8米，我们如要求小口径岩芯管能承受与大口径岩芯管相同压力时，则小口径岩芯管长度可用下列公式求：

$$l_1^2 T_2 = l_2^2 \cdot T_1$$

式中： $T_1$ —小口径岩芯管轴惯性矩  $T_1 = \frac{1}{10} T_2$ 。

$T_2$ —大口径岩芯管轴惯性矩。

$l_1$ —小口径岩芯管长。

$l_2$ —大口径岩芯管长，取 $l_2 = 8$ 米。

代入后得： $l_1 = l_2 \sqrt{\frac{1}{10}} \approx 2.5$ 米。

2.5米长的小口径岩芯管与8米长的大口径岩芯管能承受相同的压力而不弯曲。考虑到大口径普通岩芯管的刚性在钻进中也感到不足，以及根据明冲井田回次进尺很少超过2米的具体情况，故在设计中取岩芯管长2米。在实际生产试验中，岩芯管长在2.0~2.7米范围内变动。即在钻进较软的岩石，回次进尺超过2米时，可适当用较长的岩芯管，因为这时井底压力一般也小些。岩石硬，回次进尺小时，则可以考虑用小于2米长的岩芯管。

在岩芯管上面，采用刚性比岩芯管大的钻具来进行导向。大口径钻进中的岩芯管有两个作用，一是贮芯，二是导向。在小口径钻进中，我们考虑岩芯管更多在贮芯方面的作用，而把导向作用转嫁给上面的刚性较大的钻具组。

表9列出了井底钻具组各部件的轴惯性矩。

轴 惯 性 矩  $T \text{ cm}^4$ 

表 9

岩 芯 管	钻 锤	扶 正 器
$\phi 73/\phi 65$	$\phi 57/\phi 44.5$	$\phi 55/\phi 28$
51.8	22.5	41.8
	101.74	120
		52.5

从表 9 中可以看出，钻锤料的轴惯性矩一般可比岩芯管的大一倍左右。考虑到它们的绝对值也并不大，所以钻锤的长度我们也只取 2 米 ( $\Phi 55$  钻锤) 到 2.5 米 ( $\Phi 68$  钻锤) (第一阶段试验)。

通过第一阶段试验，我们发现 2—2.5 米长的钻锤仍发生弯曲。这是通过测量钻锤直径的变化发现的，见表 10。

表 10

钻 锤 类 型	钻 锤 上 端 直 径 (毫米)	钻 锤 中 间 直 径 (毫米)	钻 锤 下 端 直 径 (毫米)	备 注
$\Phi 55$	$\Phi 55$	$\Phi 54.8$	$\Phi 55$	进尺约一百米
$\Phi 68$	$\Phi 65.7$	$\Phi 64$	$\Phi 66$	进尺二百米后测量的结果

因此在第二阶段试验时，我们把钻锤的长度从 2~2.5 米缩短至 1~1.2 米，从 16~32 孔试验结果充分看出刚性对井底钻具组的重要性。

虽然钻锤由于壁厚，它的轴惯性矩比岩芯管的大，但由于其外径受到孔径限制不可能无限增大，内径也不可能无止境缩小，所以其刚性通过提高轴惯性矩来提高也是有一定限度的。因此，我们还通过增加支点的办法，来改善钻具组的刚性。如图 2 所示。同样长的一根杆子，没有支点时，通过杆子传递的压力  $P_1$  比有支点的杆子能传递的压力  $P_2$  要小的多。

除考虑刚性外，在小口径防斜中，我们也考虑到缩小钻具与孔壁的间隙。在通常小口径钻进中，我们发现异径接头（现场又称螺丝头）磨损相当严重，譬如  $\Phi 55$  的外径往往磨到只有  $\Phi 50.2$  毫米还在使用。这样间隙可能达到 8 毫米以上。这与大口径钻进中的钢粒钻进相比，不算太大，但在小口径钻进中，则显得太大。

考虑到上述原因，就注意到扶正器的设计上。为了减少间隙，扶正器的外径设计为  $\Phi 58$ ，即比金刚石钻头的外径还大 0.5 毫米。这是我们分析了许多地层的岩芯与钻头内环状间隙而推算钻孔直径得出的。譬如金刚石钻进时（一般为砂岩）的间隙为 0.4~0.6 毫米，而合金钻进时（一般为泥岩等）的间隙为 1~2 毫米。

为了减少间隙，又不影响冲洗液的循环，扶正器上都开有水槽。一般要求通水面积与岩芯管周围的通水面积相当。 $\Phi 58$  和  $\Phi 78$  扶正器的通水面积都在 2~3 厘米<sup>2</sup>。

扶正器与一般用螺丝头（即异径接头）相比都长得多，这主要考虑扶正器与井壁接触时

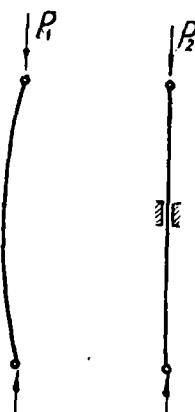


图 2. 支点作用图

应有比较大的接触面积。这是为了在钻进硬岩时，扶正器磨损不要太快；在钻进软岩时，不要破坏孔壁（由于单位面积上的压力小）。因此扶正器在整个圆周上的面积（除去水槽），都达500厘米<sup>2</sup>以上（当然接触面积要比这小）。

为了减少扶正器的磨损，在扶正器两端均匀镶嵌了一些硬质合金片。合金片在扶正器上没有出刃。

由于存在间隙，所以要求井底钻具组有一定的长度。当间隙一定时，井底钻具组长些，其导正作用也要好些。

井底钻具组与钻孔轴线间的夹角γ与钻具长度l、孔壁间隙f的关系为：

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{f}{l}$$

而

$$f = \frac{D - d_0}{2}$$

式中 D—钻孔实际直径

d—钻具外径

不同f值时，γ与l的关系见图3。

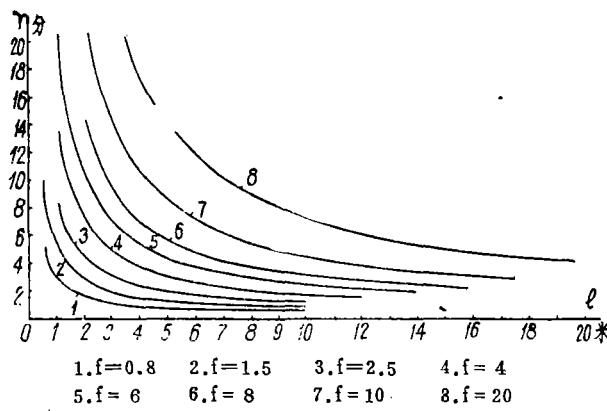


图3. 钻具长度对钻具歪斜的影响

由图可知，当间隙一定时，开始增加l，γ迅速下降，之后，则γ减小很少。这时的l可认为是合理的长度。此外，间隙不同时，合理的长度也将不同。一般间隙小时，合理长度要小些。

选择井底钻具组的长度，还要考虑钻具组的刚性。因此不是井底钻具组愈长愈好。在大口径钻进中，曾有人将岩芯管加长到15~22米，但在防斜方面没有取得什么效

果。在小口径钻进中，用长7.5~8.5米的井底钻具组，其防斜效果也不如短的（长5~6米）井底钻具组。因此，井底钻具组有一个合理的长度。

#### 四、结论及今后研究方向

1. 目前经常谈的孔斜的自然弯曲规律，实际上是一种统计规律，它是地层、井底钻具组和钻进压力的函数，而不单纯是地质或某一种因素的函数。用数学方式表示，则可以写成：

$$y(\theta, \alpha) = F(g, A, P)$$

式中  $y(\theta, \alpha)$ —表示钻孔顶角、方位角变化规律；

g—表示地质因素；

A—表示井底钻具组的因素；

P—表示钻进时的井底压力因素。

2. 井底钻具组偏离原钻孔轴线方向，是引起孔斜的必要条件。重视改进井底钻具组的结

构，使其轴线尽可能与钻孔轴线接近，在很大范围内可以改善孔斜状况。

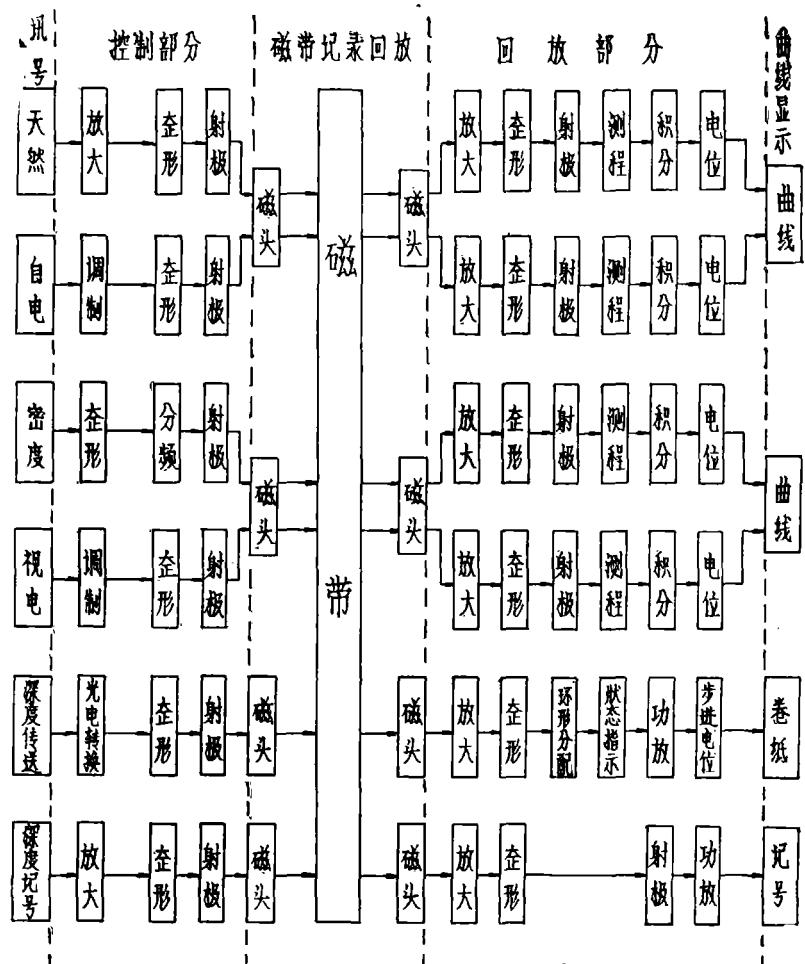
3.井底钻具组不应当像目前岩芯钻探那样单纯由岩芯管组成。而应考虑使用扶正器与钻铤，组成各种类型的井底钻具组来防止孔斜。

从防斜角度来衡量井底钻具组的质量时，不仅要看它与井壁间形成的间隙大小，还要看它的刚性大小。井底钻具组的长度，则随它的直径不同而不同。小口径的井底钻具组由于间隙小、刚性小，所以其长度一般比大口径的来得短些。

4.井底钻具组与孔壁的接触问题，应视地层不同而不同。譬如前面介绍的防斜钻具与井壁为间断接触，即在扶正器处接触。这对孔壁完整的地区，问题不大，在孔壁不完整的地区，则会影响效果。因此应进一步研究与井壁有连续接触的井底钻具组。

5.扶正器在使用中是易磨损件。目前采用的镶嵌硬质合金办法来提高它的耐磨性，并不是一个好办法。因为这加大了扶正器的加工量。扶正器磨损后，如何恢复其尺寸大小，也是需要今后进一步研究解决的。

(上接第46页)



JMC-4-4 数率式磁带测井仪电路方框图