

瑞典地下岩石工程施工技术概况

傅冰骏

(水利水电科学研究院岩土所)

前言

采矿曾是瑞典的特别重要的事业。在本世纪的最初十年，大锤和钢钎仍然是开挖地下洞室的最重要工具，尤以瑞典大部分基岩为前寒武纪花岗岩和片麻岩等古老而坚硬的岩体，岩石开挖既昂贵又费时费力，直到80年代才使用机械化液压钻进。目前采用的一台三臂液压凿岩台车，一人操纵每小时钻进速率可达160米。本世纪以来岩石开挖的发展情况如图1所示。

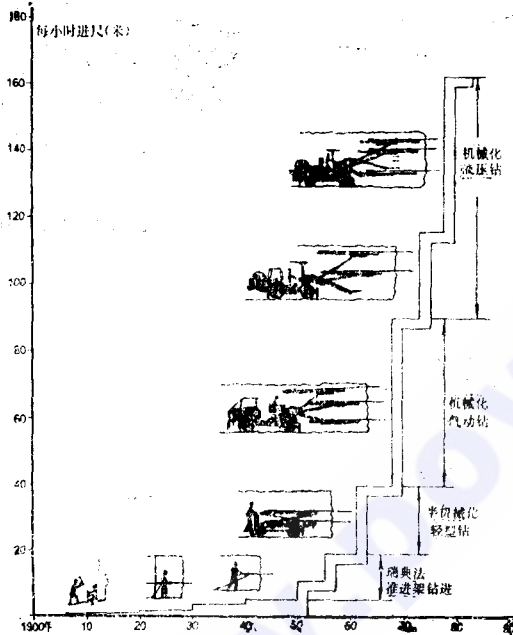


图1 岩石钻进技术一百年

一、地下水电站的基岩开挖

水电能源是瑞典工业发展的重要因素，目前约60%的电能靠水电供应。现在全国约有1000座水电站（总装机容量约为1500余万千瓦），其中60%以上的水电站建筑在地下。前寒武纪岩石为地下施工提供了优良的地质条件。在水电站地下建筑

中，洞室的最小断面约10米²，最大的约在300米²以上（如世界上最大的Stornorrfoe水电站的尾水隧洞断面面积为390米²）。断面面积在20~60米²之间的，被列为中等尺寸。这些隧洞不需混凝土衬砌，岩石的加固只限于锚杆及喷混凝土。地下洞室通常设计成城门洞型，跨度限制在9~10米之间，大断面以增加隧洞的高度来满足。这种大断面的岩石开挖分为两步：先开挖顶部导洞，然后再钻进垂直一倾斜孔爆破挖除下面的台阶。

水电站设计中尽量采用深竖井。已有的钻机可钻直径为2.4米的大口径竖井。在Juktan水电站已钻成深达270米的竖井，导向钻孔的偏差只有3%。

注：本文系笔者在1981、1982年先后与瑞典能源代表团、阿特拉斯公司（ATLAS COPCO CO）经理Lars Forsselius先生等就坚硬岩石隧道掘进等交换意见时所了解的情况，并参考已有文献编写的。

二、钻爆法施工经验

1. 岩石开挖的施工程序

采用钻爆方法开挖岩石的施工程序是钻孔、爆破、清渣、运输和支护。其中钻孔和爆破是最复杂的工序。为既经济又安全地开挖洞室，最重要的是：

- (1) 选择正确的施工方法；
- (2) 选择合适的施工设备；
- (3) 完善的工程计划和施工组织管理。

2. 钻进设备

在地下水电站岩石开挖中，可以根据具体情况采用不同型式的钻架台车。其中轻型的有Cauodrill及Rialarill两种；重型的有Boomer型。另一种Promec型隧洞钻架台车有各种型式。其中Promec TH480型台车，有4个钻臂，钻进断面可达96米²，适用于大型地下工程开挖。水电站地下厂房及隧洞开挖最常用的近代设备是Boomer H170型钻架台车(图2)。这种机械备有三把BUT15型钻臂及COP1038型液压凿岩机，最大活动范围为宽12米，高7米。一个钻工可以从容地同时操纵三个钻臂，瑞典的实践表明三臂台车通常较4臂以上的台车更为灵便。

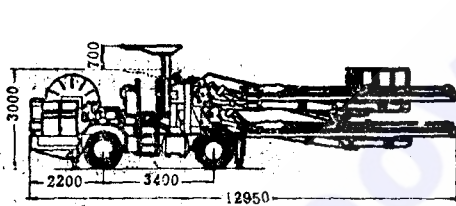


图2a Boomer H170重型钻架台车适用于大型地下洞室(单位:毫米)

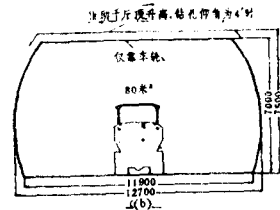
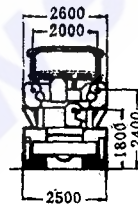


图2b Boomer H170的活动范围(单位:毫米)

Boomer H170型钻架台车的特点为：

- (1) 可伸缩的工作平台 可供操作人员对围岩性状进行目测、埋装炸药和安装锚杆等。
- (2) 液压凿岩机 凿岩机的标准型式为COP1038HD型。每一个钻的净钻进速

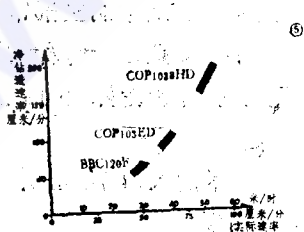


图3a 液压钻进速率高

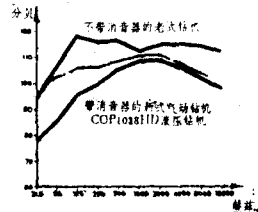


图3b 液压凿岩钻减少噪音水平

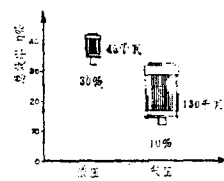


图3c 液压钻只消耗三分之一的能量

率为1.80米/分，45千瓦的电动机，整个台车所需的动力为150千瓦。配套使用的钻杆为

R 38L型, 钻杆的长度一般从3.1~5.5米。液压凿岩机于1973年才用于隧道开挖, 其最显著的优点是钻速高, 较低的噪音和较少的能量消耗(图3)。

(3) 新型球齿钻头(图4) 普通钻头需要研磨来保证钻进速率, 因此往往每钻4个或5个孔之后停钻换钻头, 这显然费时、费力。新型钻头带有半球形纽扣状的碳化钨镶齿, 即球齿钻头, 直译为纽扣状钻头(button-bit)。这种钻头的突出优点是无需研磨, 也无需定期更换, 只需少量修整以保持原有的形状。钻速与普通钻头相比, 新型钻头高10~15%; 使用寿命长两倍。

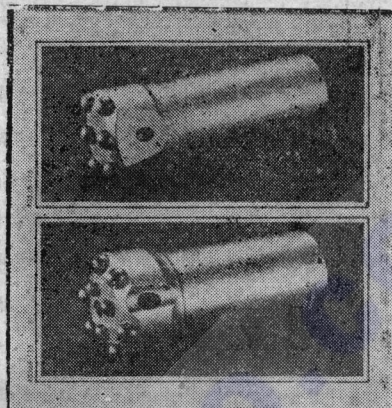


图4 两种新型球齿钻头

(4) 平行钻进保持系统 每一钻臂都配有自动控制的平行钻进保持装置, 使所有钻孔保持平行。这是成功地进行循环作业, 或深孔爆破(Long rounds)作业的先决条件。

(5) 自动控制系统 整个钻进过程由自动化系统控制, 可以防止卡钻或其它事故。每一钻孔钻完之后, 凿岩钻头即自动停止工作并回到原位, 大大减少了操作人员的工作量, 也延长了机器的使用寿命。

(6) 增压泵 COP103HD凿岩机都配有增压泵, 使水压达到10~12巴来冲洗钻孔。

3. 钻孔布置方式

瑞典以往的钻孔布置通常采用V型掏槽, 目前大都采用平行掏槽方法(爆破孔与掏槽孔见图5)。爆破孔的孔径为45毫米, 中间两个平行掏槽孔的孔径为102毫米。采用平行掏槽既安全又容易掌握。强有力的液压钻机可将45毫米的孔很快扩成102毫米。两个平行掏槽孔的钻进深度可达5.0米, 一次崩落的长度为4.6~4.7米。掏槽孔与附近的爆破孔严格平行是爆破成功的重要条件。当前, 隧洞施工人员倾向于用深孔爆破。据估计, 最近十年内深孔爆破的平均长度已从3米延长到4米。

对于45毫米的爆破孔, 周边孔之间的距离为0.65米, 边界内的孔距一般为0.75~0.80米。

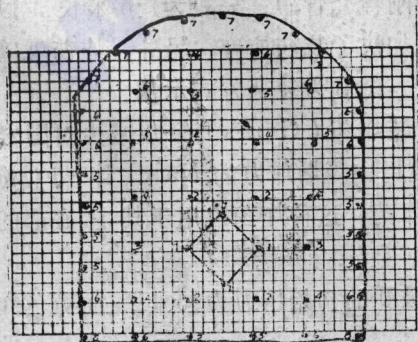


图5a 装药及爆破次序

4. 周边孔的钻进

周边孔的质量取决于隧洞的形状和围岩表面的粗糙程度。为了保证钻进质量, 钻架台车配有进钻回旋装置(feed roll-over)及钻孔仰角控制器(Look out), 这两种设备与钻孔自动平行保持系统协同工作。进钻回旋装置可以转动推进器, 使凿岩机能贴近造型的围岩表面钻进。仰角控制器能使周边钻孔与平行线的最大偏差在 4° 范围内, 可以避免不适当的超挖, 并使岩石的扰动减少到最小程度。

编号	钻进数据	单位	数量	掏槽孔详图
1	隧洞断面	米 ²	35	比例尺1:4
2	爆破孔直径	毫米	45	
3	掏槽孔直径	毫米	102	
4	钻孔数	个	59+2	
5	孔深	米	3.9	
6	钻进长度	米	238	
7	进尺	米	3.7	
8	爆破体积	米 ³	130	
9	钻孔密度	米/米 ³	1.83	
10	钻架台车 台车类型	Boomer	H170	2×∅102毫米空心孔
11	凿岩机型式	COP	1038HD	
12	凿岩机数	台	3	
13	净钻速	米/分	1.80	
14	实际进尺	米/分	0.88	
15	台车出力	米/分	2.64	
16	时间估算 钻进长度	米	238	
17	掏槽孔补偿长度	米	15	
18	相当长度	米	253	
19	钻进时期	分	96	

图5b 炮孔布置方式示例说明

5. 爆破

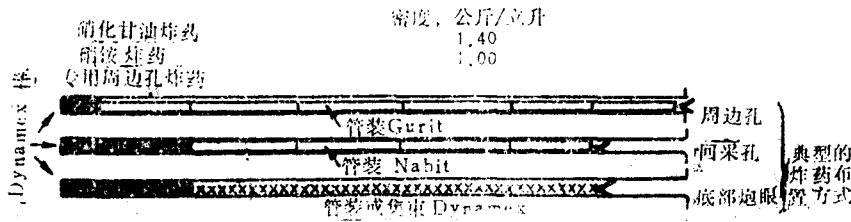
光面爆破在瑞典是常用的方法。隧道施工中应用多种型式(不同类型的炸药,不同直径)的专用管装炸药。炸药装入用合成材料制成的刚性套管中,一般为1.0米长,以代替常规的炸药包,每个炮孔只需装3~4管即可,加快了装药速度。另外,炸药可以更加均匀地分布在工作面上,从而充分利用它的能量。图6为装药方式示例。

为了达到光面爆破的目的,周边孔内装入专用管装炸药(Gruit),以减少对围岩的扰动。对于中间部分的回采孔(Stope hole),使用中等爆炸力的Nabit炸药(粉状硝酸炸药)。底部钻孔埋设炸药力强的Dynamex炸药,这种炸药也用于其它底部的爆破孔。

Gruit炸药的优点是爆破力低。这种炸药给予爆破孔的初始压力为900巴,而黄色炸药给出的初始压力则高达30000巴。

6. 引爆装置——电爆和非电引爆

一般用电爆雷管。毫秒迟发者用于掏槽钻孔，半秒迟发者用于其它炮眼。现代的电



炸药重(公斤)	Dynamex	Nabit	Gurit	每孔总计	孔数	一个循环
周边孔	0.5	—	1.0	1.5	23	34.5
掘进孔	1.5	2.8	—	4.3	30	129.0
底部炮眼	7.0	—	—	7.0	6	42.0
总计	98.5	84.0	23.0	—	59+2	205.5

NO.	项 目	单 位	数 量	NO.	时 间 估 计	时 间	单 位	分 钟
1	隧洞断面	米 ²	35	9	准备	10.0	1	10.0
2	爆破体积	米 ³	130	10	装药孔	59	0.9	53.1
3	总药量	公斤	205.5	11	装药进尺(米)	230	0.3	69.0
4	装药密度	公斤/米 ³	1.58	12	所需时间			132.1
5	毫秒爆破雷管	个	6	13	折减			2
6	半秒爆破雷管	个	53	14	所需净时间			130
7	装药孔	个	59	15	小组人数			3
8	装药长度	米	230	16	装药时间(分)			42

图6 装药及爆破次序说明

爆雷管虽然由于隧洞中电气设备所产生的离散电流而略有危险，但基本上安全，当有雷电危险时则禁止使用。

近来瑞典的炸药工厂已经制造出一种非电引爆系统，叫做Nitro Nobel AB。引爆系统的主体是一根薄壁塑料管，管内涂以一层很薄的炸药。塑料管可以传送速度为2000米/秒的冲击波，由冲击波起爆具有延时元件的爆破雷管。这是一种最好、最安全的起爆系统。

7. 通 风

通风设备一般设置在隧洞的进口处，按照隧洞的长度及所需风量，调整风压。爆破后大约需要10~15分钟的时间将烟雾消除，然后才能装岩出渣。

8. 装岩及运输系统

最常用的装岩机是轮胎式(如Caterpillar 980C)，装斗容积是3.5~4.0米³，每小时装岩70米³。

值得提出的是一种叫做Hüggloader 10HR型的蟹脚式装岩机(图7 a、b)，其主要

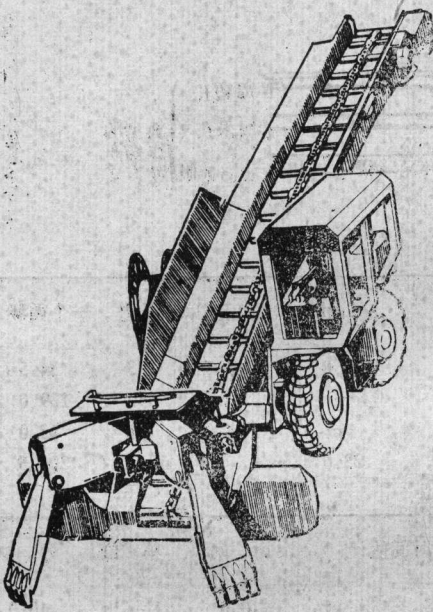


图7a 蟹脚式装岩机

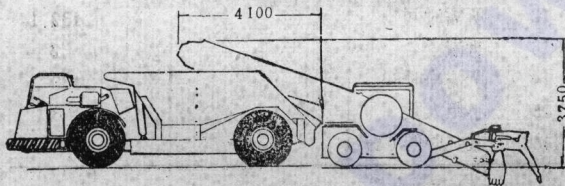
图7b 蟹脚式装岩机向Kiruna KL250型卡车卸岩
(单位: 毫米)

图9 Diamec 251-A新型金刚岩芯钻机

*Hewlett-Packard公司产品。

特点是电动, 不象柴油装岩机那样排出大量废气。它用两个挖掘臂 (digging arms) 把岩渣直接扒到传送带上, 将岩渣装入自卸卡车, 并能够停在工作面附近连续工作, 每分钟出渣 3 米³。

9. 施工组织工作

(1) 工作效率 提高工作效率, 不仅要有良好的设备, 还要有熟练的技工队伍。选择爆破孔及掏槽布置的合适方案是顺利完成计划的中心环节。精确详细的分析布置是由专用电子计算机 CARE (Computer Analysis of Rock Excavation——岩石开挖计算机) 来完成的。CARE 综合考虑了施工中的各种因素: 孔深、孔径、炸药类型等等, 不掺杂任何主观意见, 开挖效率提高。ATLAS 公司系采用美国 HP3000 型*电子计算机。采用 CARE 布置炮眼有时可比常规方法节省 30% 的钻孔。

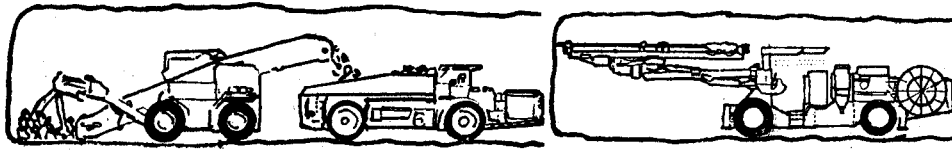
电子计算机不只用于钻孔布置, 还可用来编制一个工作循环所需的钻进时间, 炸药量的消耗, 钻进及爆破费用等其它施工计划。

总体施工计划的常规编制工作, 可按专用的表格进行 (图 8)。

三、其它几种新型仪器设备

1. 金刚石钻进系统

近年来在地下工程的勘探和施工阶段, 运用金刚石钻进, 尤其是钻进水平向的前导钻孔得到较快的发展。瑞典 Craelius AB 公司为此研制成了有关的钻机系列。主要型号是 Diamec 250, Diamec 251-A, Diamec 260, Diamec 700 等。以 Diamec 251-A 为例 (见图 9), 该钻机为全液压型, 可一人操作; 外形尺寸



NO.	项 目	单 位	数 量	备 注
1	开挖条件			
2	隧道断面	米 ²	35.0	
3	隧道长	米	3650	理论的
4	岩石方量	米 ³	128.000	
5	岩石类型		花岗岩	
6	设备			
7	台车型号		BoomerH170	
8	凿岩机		COP1038HD	
9	机数		3	
10	钻杆		R38-R32	
11	装岩机型号		Hjuggloader	LOHR
12	运输系统		卡车	KL50
13	工作循环			
14	钻进准备	分	10	
15	钻进循环	分	96	
16	装药循环	分	42	
17	清场	分	.5	
18	爆炸通风	分	15	
19	总循环	分	168	
20	清除工作面	分	10	
21	装载运输	分	120	
22	支护	分	15	
23	其它工作	分	10	
24	出渣循环	分	155	
25	循环时间	分	323	
26	工作效率	分/小时	50	45-50-55
27	正常循环时间	小时	6.45	
28	作业			
29	工作时间	小时/天	16.0	
30	每天完成循环	每天	2.5	
31	每循环进尺	米	3.7	
32	日进度	米/天	9.25	
33	工作天数	天/月	22	
34	月进度	米/月	203.5	
35	长期效率	%	80	
36	计划进度	米/月	163	
37	计划调整			
38	耳室	米 ³	3650	
39	耳室耽误进尺	米	120	
40	折合进尺	米	3770	
41	完成时间	月	23	

图8 ATLAS COPCD公司岩石开挖计划表

为长3.4米，高1.9米，宽1.3米；钻机本身最大重量为650公斤（不包括动力设备），钻孔直径为43毫米；钻杆为铝合金；最大钻进深度为400米，整个钻进过程由控制盘操纵。控制盘包括三个控制阀和一个控制杠杆。通过自动连续记录的钻进参数，如冲力、转速、冲洗液压力和流量、钻进速效等，与其它岩石试验结果相对比，可以初步建立钻进参数与岩石物理—力学指标间的关系。

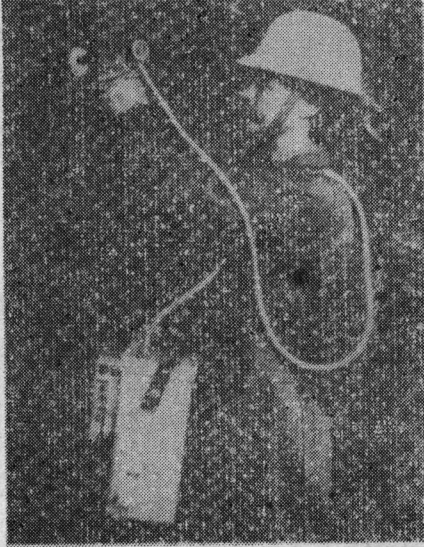


图10 无损锚杆检测仪工作情况

2. 无损锚杆检测仪 (nondestructive boltmeter) (图10)

这是一种直接检查砂浆锚杆灌浆质量和锚固效果的新型仪器，可检查并确定锚杆长度，并将锚固效果自动分类。

仪器由主机、示波器、探头及电缆等组成，探头本身是一个压电晶体。试验时将探头放到锚杆端部并发射弹性波，弹性波沿锚杆传播，一部分能量经过灌浆材料传入岩体，因此波的振幅发生衰减。在锚杆的另一端，弹性波发生反射，反射波由外端的压电晶体加以记录。根据激发波和反射波的时距计算锚杆的长度。分析反射波的振幅衰减，还可以确定锚杆的工作状态。

为检验仪器的可靠性，瑞典国家动力局等单位曾用271个水泥灌浆锚杆及21个树脂灌浆锚杆进行各项试验，并与抗拔试验等常规方法相比，证明无损检测仪的使用效果较好。该仪器主机重9.3公斤，示波器重15公斤，操作方便。

3. 膨胀锚杆 (swellex) 系统

这种锚杆是ATLAS COPCO公司最近研制的新产品，广泛应用于采矿工程。其主要部件是：1) 重新成型的空心钢管—锚杆；2) 带夹具的安装杆；3) 高压水泵 (图11)。

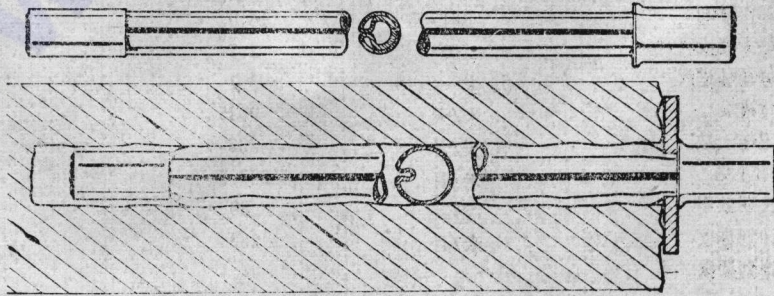


图11 膨胀锚杆

锚杆主体是直径为41毫米的钢管。钢管用机械方法加工成型，使其外径缩至28毫米。管的两端用短套管加固再焊接密封。下部套管上附有一块垫板，并钻有一个小孔，安装

时高压水灌入空心锚杆中,使钢管在钻孔内膨胀。由于膨胀力的作用,使锚杆紧贴岩壁。这种锚杆的特点是:1)安装迅速、简单(每小时可装50根);2)与岩壁结合力强,能抵抗较大的剪切变形;3)抗震性能好;4)锚杆可用安装杆进行设置,安装时也无需用较大的力矩转动锚杆;5)可避免其它方法(如用水泥或化学灌浆)安装锚杆时所带来的污染。

4. 全机械化操作的液压锚杆安装机

瑞典近来研制的Boltec 500型全机械化锚杆安装机,适用于安装灌浆锚杆、树脂锚杆、劈裂式锚杆等不同型式的岩石锚杆。采用自动遥控系统钻孔,由操作人员远距离安装锚杆,根据不同的岩石条件可选用COP 1022HD型液压冲击凿岩机,或选用COP402R型液压回旋式凿岩机。前者适用于较坚硬的岩石,后者适用于松软或中等强度的岩石。Boltec H370型是一种标准锚杆安装机,工作时可与Boomer H170台车或其它相适宜的台车配套使用。锚杆机的迴旋范围为 360° ,标准的锚杆直径为20~25毫米。

结 语

瑞典的地下岩石工程施工技术在国际上是相当先进的,而我国在这方面相对较为薄弱。近年来,国家科委已将水电站地下洞室快速施工列为重点攻关项目,我们在各方面都取得显著的进展(如成功地使用了直径为5.8米的隧道掘进机及国产CTJ-4Z型四臂重型凿岩台车,在应用塑料导爆管非电引爆技术方面也取得成功的经验等)。但在利用小口径金刚石钻进水平前导钻孔,施工机械的设备配套,一机多用,广泛采用光面爆破技术,使用大直径隧道掘进机,用电子计算机进行优化开挖方案选择,监测自动化等方面与瑞典相比还有差距,他们的经验值得我们借鉴。

参 考 文 献(略)

关于本刊仍以半年刊出版敬告读者

本刊原拟于1985年改为季刊,因申报手续办理过迟等原因,本年度仍按半年刊出版。发行日期(6月、12月)、篇幅(120面)、定价(0.80元)不变。今年十一月份将出版一期“深厚复盖层工程研究”增刊,定价0.80元,全年订费仍为2.40元。今年按季刊订阅的订户订费不变;按半年刊订阅的订户,每期应补汇增刊订费0.80元。请订户同志们原谅,并向读者、作者同志们敬歉。

《四川水力发电》编辑部

1985, 6,