

②

8-14

抽水蓄能电站的水力学专门问题

——'94 抽水蓄能工程国际学术讨论会论文综述(二)

索丽生

TV743

(河海大学水力发电工程系 南京 210098)

摘要 '94 抽水蓄能工程国际学术讨论会有关水力学专题的 12 篇论文涉及抽水蓄能电站的一系列水力学专门问题。本文将归纳为输水系统非恒定流、调压室型式与涌浪、岔管体型及水头损失、进水口旋涡及出水口拦污栅流激振动等 5 个问题予以综述。

关键词 抽水蓄能 水电站 水力学 非恒定流 调压室 学术会议 综述

抽水蓄能电站在电力系统的调峰、调频及事故备用等方面发挥的巨大作用促使世界各国大规模兴建,并向着高水头、大容量和大机组方向发展。与常规水电站不同,抽水蓄能电站既发电又抽水,工况转换频繁,这就要求输水系统和机组在双向水流的情况下都能处于较好的运行状态,以提高电站的综合效率。因此,抽水蓄能电站面临一系列水力学专门问题,如输水系统非恒定流、调压室型式与涌浪、双向水流下岔管的体型与水头损失、进水口旋涡(本文以发电工况定义上下游及水流正向)以及出水口拦污栅振动等。在'94 抽水蓄能工程国际学术讨论会上,这些水力学问题均有所涉及,各国的研究者向大会提交了 12 篇有关论文,总结了工程经验,介绍了研究成果,提出了不少新的观点和见解。下面从上述五个方面对这些论文涉及的抽水蓄能电站的水力学专门问题加以综述。

1 输水系统非恒定流(或过渡过程)

与常规水电站相比,抽水蓄能电站输水

系统布置常较复杂,并有发电、抽水两方向水流;其削峰填谷的特殊使命导致电站运行工况多,转换频繁;在运行和过渡过程中,可逆式水泵水轮机可经历正水泵、水泵制动、水轮机、水轮机制动和反水泵等特性区,机组特性对非恒定流及机组过渡过程的影响显著。因此,抽水蓄能电站的水力-机械过渡过程远比常规水电站复杂,也引起了设计者的极大重视和研究者的浓厚兴趣,与会论文(水力学专题,下同)中竟有六篇(半数)论及此题(含三篇专谈调压室水力问题)就不足为怪了。

输水系统非恒定流分析常常是确定输水系统布置的关键因素之一。文献[1]介绍了宁波溪口抽水蓄能电站水力过渡过程分析成果在引水隧洞、调压室、压力管道及尾水洞布置和定线中的应用及其所发挥的重要作用,给出了一个典型的实例。

抽水蓄能电站水力-机械过渡过程分析中需考虑的工况组合较多。如文献[2]介绍我国台湾明潭抽水蓄能电站输水系统(该电站输水系统由并列的二个输水单元组成,每

个单元中含隧洞、上游调压室和压力管道各一, 机组三台, 尾水洞三条) 水力过渡过程计算中详细考虑了以下十种工况组合:

a. 发电工况, 上库为高水位、下库为低水位时丢弃负荷: ①三台机丢弃最大负荷、导叶正常关闭; ②三台机丢弃额定负荷, 导叶正常关闭; ③三台机带上额定负荷后、调压室水位回升时丢弃全负荷; ④三台机丢弃最大负荷, 其中一台机导叶拒动。

b. 上库为低水位、下库为高水位, 三台机丢弃全负荷后调压室水位回落时又同时带上负荷。

c. 抽水工况, 上库为低水位、下库为高水位时水泵失电: ①三台水泵同时失电且导叶拒动; ②三台水泵同时失电, 导叶正常关闭; ③三台水泵同时失电, 其中一台的导叶拒动。

d. 上库为低水位、下库为高水位时水泵启动: ①一台水泵启动; ②二台水泵同时启动。

天荒坪抽水蓄能电站过渡过程分析中^[3]还包含了水轮机或水泵正常停机等情况。

究竟分析多少和哪些工况才既安全又合理呢? 这主要取决于该电站在电力系统中的作用、输水系统的组成特点、主结线型式、机组台数及控制性能等因素。例如, 对有调相任务的电站, 除上述组合外, 还应包含由水泵工况转换到调相工况等情况; 对担负事故备用并对速动性要求较高的电站还可能包括抽水转为发电(或反之)的情况。鉴于带上或增加负荷、水泵启动及正常停机等属于“可控”情况, 同时动作的机组台数不应过多, 以免对输水系统提出过高要求, 增大投资; 由于一般抽水蓄能电站引水隧洞较短而水头较高, 调压室水位波动周期短、衰减较快, 假定在调压室水位波动不利时刻再度发生丢弃或增加负荷的必要性不大(明潭的隧洞长达 3 169m, 调压室水位波动周期约 210s, 情况

较为特殊)。引水道较短的电站上库高水位时水泵失电导叶关闭有可能导致调压室最高涌浪水位^[4](见下文), 这种情况也不应疏忽。

规划设计初期, 机组合同尚未签订, 通常不能提供准确的机组特性资料。此时, 可暂以相近容量和水头的机组特性代之, 待获得准确资料后再作验算。我国台湾明潭抽水蓄能电站的设计经验^[2]表明这种替代完全可行。

抽水蓄能电站水力过渡过程的计算方法现已比较成熟, 特征线法得到了广泛应用^[2,4], 对边界条件, 尤其是可逆式水泵水轮机的全特性曲线的处理甚为重要。过渡过程的数值模拟软件开发也日益完备, 如法国电力公司开发的 BELIER 软件^[3]可分析电站运行中可能遇到的各种情况, 由于数学模型中也包含了 PID 调速器, 机组调节品质的优化也可一并进行研究。该软件已成功地运用于多个工程项目之中, 包括我国的广州抽水蓄能电站与天荒坪抽水蓄能电站。经与现场观测的数据相比, 计算成果相当令人满意, 这表明抽水蓄能电站水力过渡过程的数值分析已具有较高的精确性和可靠性。

2 调压室型式及涌浪

抽水蓄能电站的调压室的主要类型与常规水电站大致相同。当水头较高、水库水位变幅较大时, 宜采用双室式调压室; 反之, 常选用阻抗式调压室。抽水蓄能电站采用地下厂房时, 输水道常埋置较深, 地质条件允许时, 可考虑设置气垫式调压室。不过, 抽水蓄能电站的调压室要在发电、抽水的各种工况下运行, 其容积(尤其是下室容积)通常比常规水电站的调压室大。密切结合工程的具体条件、采用最合理的布置形式和结构尺寸非常重要, 也大有文章可作, 与会论文中即有几个精彩实例。

文献[1]所介绍的宁波溪口抽水蓄能电

站引水道上设置的双室式调压室形如“烟斗”，布置奇特（图1）。等截面隧洞式的下室设1%纵坡，低端通过连接管与引水隧洞衔接，高端与竖井及上室相连。这种布置方式带来不少好处。一是充分利用了地形：上室位置地面高程合适，山坡较缓，可采用开敞式上室，施工方便，工程量小；二是改善了调压室的水力条件：下室充水时，空气可沿下室顶坡经竖井顺利排出，下室向隧洞补水时，其底坡又有助于水流流向隧洞，减轻了隧洞式下室排气不易水流不畅之忧；三是下室结构简单、施工方便：常见的“盲肠式”下室必须设正底坡补水、倒顶坡排气，因而是变截面的，该调压室的下室为等截面隧洞，简单方便。

文献[5]介绍的反向阻抗式调压室(surge tank with reverse flow throttle)的布置型式更是独具匠心。这种调压室仍由上室、竖井和下室组成（图2），但在竖井与下室之间设置极不对称的阻抗装置，使水流进、出竖井时的水头损失比为1:17甚至1:50。此外，另有一通气管从上室顶部直接引入下室。调压室水位上涌时，下室水流顺利进入竖井和上室，防止调压室底部产生过高压；水位下降时，阻抗装置内形成激烈的涡流，抑制由竖井向下室的水流，造成很大的水头差，

通气管中的水位迅速降至下室内，并不断补气，以保证下室向隧洞补水而不产生负压，竖井中的水则慢慢补给下室，保证下室不被排空。由于调压室底部压力由通气管控制，反应极快，且远低于竖井水位，故可有效地使隧洞或压力管道中离去的水流减速，减少补水量，缩小下室容积。研究资料表明，反向阻抗式调压室的下室容积仅为常规双室式调压室下室的1/2，甚至1/3。当然，这种调压室的结构，特别是该阻抗装置较为复杂。目前，奥地利已有六座抽水蓄能电站采用了这种调压室。

我国台湾明潭抽水蓄能电站^[2]直径7.5m的引水隧洞末端设置高150m，直径14m的阻抗式调压室（其上部实际上是直径为27m的上室）。设计中研究了阻抗口大小对涌浪及底部压力的影响，选择孔口直径为4.5m，以图最高涌浪水位与调压室底部压力相等。此时，孔口面积与隧洞截面积之比为0.36，与以往的研究成果基本一致。

常规水电站调压室的水位波动计算已积累了比较成熟的经验。由于抽水蓄能电站运行工况复杂，影响因素众多，有关调压室最高、最低涌浪发生的条件尚不大明确。文献[4]比较了水泵失电导叶正常关闭和水轮机全弃负荷导叶正常关闭两种情况下，隧洞糙

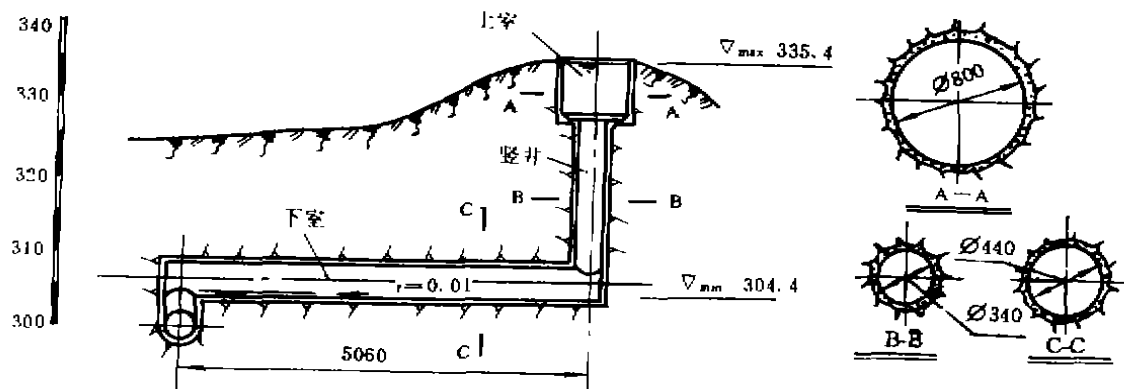


图1 溪口抽水蓄能电站双室式调压室

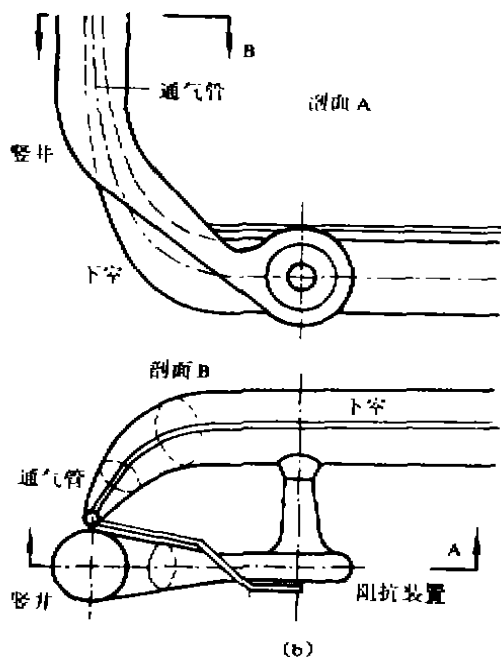
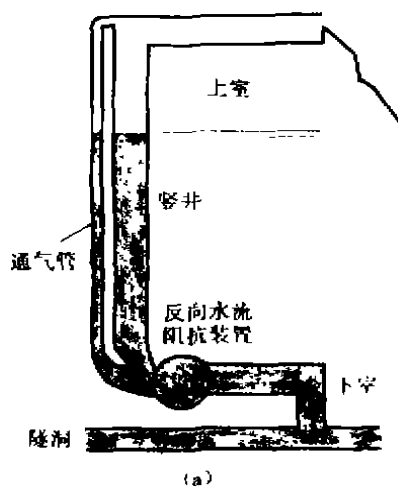


图 2 反向阻抗式调压室
(a) 布置示意图 (b) 阻抗装置

率、长度、调压室截面积不同时，引水隧洞调压室最高水位的变化情况，结果发现：若抽水流量接近发电工况的初始流量，或者引

水隧洞相对较短并设置了双室式调压室时，水泵失电导叶正常关闭可能成为计算调压室最高水位的控制工况。这一现象当引起设计者们的充分注意。

水泵工况下抽水蓄能电站调压室涌浪计算的解析公式尚不多见，增加了初期规划设计的难度。文献[6]基于水泵失电导叶拒动情况下的经验流量过程线，导出了该情况下等截面调压室最低涌浪的估算公式，该式使用方便，不需机组的特性资料。算例表明，该式的估算结果与计及机组特性时的电算成果相差不大，在拟定调压室尺寸中很有实用价值。

3 岔管体型及水头损失

抽水蓄能电站多采用一管多机的供水方式。岔管处的水头损失在整个输水系统的能量损失中举足轻重，研究岔管的合理体型自然十分必要。由于抽水蓄能电站的岔管受双向水流作用，故不能简单照搬常规水电站岔管体型设计的经验。

文献[7]兼顾岔管的水力、结构、施工、工程造价等因素，讨论了埋藏式钢筋混凝土岔管的体型设计问题。通过若干方案的比较，选择最优方案。

鉴于岔管中水流流态的复杂性，水力模型试验仍是研究岔管水流流态和水头损失、从而优化岔管体型的重要手段。文献[8]介绍了抽水蓄能电站双向水流岔管水力模型试验的一个例子。模型试验中，为了满足几何相似与雷诺数相似而又不致于使模型流速过大，作者主张利用某一雷诺数下的量测成果推算高雷诺数下的水头损失。为此，基于实测数据拟合得出分岔点前后测管水位差与流量的二次抛物线关系及流速水头差与流量的关系，以便外推量测值。文献[1]中也提及，该抽水蓄能电站的岔管体型有待于通过水力模型试验加以优化。

近些年来，利用数学模型模拟岔管处的

水流特性也有了长足进步。文献[8]在进行水力模型试验的同时,也对岔管水流进行了数值分析,采用了k-ε双方程模型、有限体积元法及运动坐标系。发电工况下,数值模拟的结果与水力模型试验成果相当吻合。计算表明,分岔水流对称时,距离分岔点不远处,支管中的流速分布和压力分布即趋于均匀。抽水工况的计算表明,汇流时的水头损失远比分流时大(该论文脱稿时,抽水工况的水力模型试验尚未完成)。文献[9]利用三维流线迎风有限元计算了月牙肋岔管在发电工况下的水流状态,模型中考虑了流线曲率对紊流结构的影响,获得的流态分布及不同分流比下的岔管水头损失系数与试验值吻合。不过,求解岔管水流的数值方法虽已取得一定进展,它在复杂岔管中的实际应用仍有待进一步研究。

4 进水口旋涡

抽水蓄能电站的水库消落深度大,进水口淹没深度较小,并且其单机容量大,引用流量大,因此进水口旋涡问题较常规水电站更为严重,对进水口的体型设计要求较高,也常采用各种防涡工程措施。

进水口旋涡可分为立轴旋涡(主要指井式进水口)和横轴旋涡(指侧式进水口),前者更容易发展为吸气旋涡。影响旋涡形成的主要因素包括水库地形、引水道断面尺寸和流速、进水口的淹没深度以及引渠的尺寸与形状等,其中以淹没水深 H 与进水口直径(或孔口高度) d 之比最为重要,故工程设计中常以临界淹没水深 H_c 作为判别吸气旋涡产生的条件:低于该水深时,将产生吸气旋涡,否则通常只形成表面旋涡。现有文献中已有许多计算 H_c/d 的经验公式。

文献[10]通过分析轴对称流态下旋涡池(底部出流,因而类似井式进水口)内吸气旋涡的实验数据,提出了一个临界淹没水

深的计算式:

$$\frac{H_c}{d} = 0.5Fr^{0.55} + 1.0(FrN_r)^{0.6667}$$

式中 $Fr = V/\sqrt{gH}$ 为弗劳德数; $N_r = \Gamma H/Q$ 为无因次的旋涡环量, $\Gamma = 2\pi rV_\theta$ 为旋涡环量, r 为半径, V_θ 为切向流速, Q 为流量。 N_r 也可表示为 V_θ/V_r , 即切向流速与径向流速之比。该式的计算结果与其它文献中的实验数据较为吻合。

由于旋涡的形成很大程度上还与行近水流的流态有关,该流态又受地形、进水口尺寸与形状等条件影响,很难通过算式精确概括,实际工程设计中大多还需通过水力模型试验来研究吸气旋涡的生成条件和防涡措施。如文献[1]所介绍的进水口,虽然满足了临界淹深度的要求,但通过水力模型试验,加设了防涡梁与防涡梳板,以达到消除旋涡、改善进水流态的目的。

进(出)水口的水力模型试验除了研究发电工况(进水)时的旋涡现象外,还包括研究进水口的水头损失、过水能力、压力和流速分布以及闸门水力特性等。如文献[11]介绍了意大利阿那波(Anapo)抽水蓄能电站上库井式进水口采用的圆筒形闸门的水力特性模型试验成果。此外,水泵工况(出水)时还要观察流态与流速分布,以免导致拦污栅振动破坏,该问题见下一小节。

5 出水口拦污栅流激振动

抽水蓄能电站的上库进(出)水口与下库出(进)水口一般均需设置拦污栅。工程实践中,拦污栅事故时有发生,且主要是下库出水口拦污栅在发电出流时因水流激发振动导致破坏。如美国的15座大型抽水蓄能电站中,就报导过8例拦污栅破坏事故,破坏的情况可以是单根栅条在横向或顺水流向发生振动破坏或扭曲,也可能整扇拦污栅在垂直水流或顺水流方向发生振动破坏。

激发拦污栅振动的振源有两个,即水轮机尾水管中的旋涡脉动和栅条尾部旋涡脱落,前者的干扰频率与水轮机转速有关,通常较低也比较固定;后者则与过栅流速及栅条形状尺寸有关。由于抽水蓄能电站的单机容量大,尾水隧洞中的流速较高,出水时水流不易均匀扩散,主流区局部流速则更高,这样会提高栅条尾部旋涡脱落的干扰频率,激发栅条或栅片振动。当水流扩散条件不好以致出现局部回流时,拦污栅同时受到双向水流作用,也会引起振动导致疲劳破坏。

文献[12]提供了天荒坪抽水蓄能电站出水口过栅水流的模型试验成果。该出水口扩散段长17.4m,水平扩散角 10.58° ,底板水平,上唇扩散角 8.5° ,设中墩一个。根据测得的流速分布情况,拦污栅上游面处,主流偏向中墩上部,断面流速分布不均,水平方向最大流速与平均流速之比 $u_{\max}/\bar{u}$ 达3.17。无拦污栅时,该比值为2.32,说明拦污栅的存在加剧了出流的不均匀性。拦污栅下游面处流速分布的总趋势与上游面相同, $u_{\max}/\bar{u}=3.02$,但“锯齿”分明,紊动激烈。栅条及纵横肋尾部均有脉动的尾流和旋涡脱落,其最高频率(换算为原型值)为39Hz,很可能诱发拦污栅振动。由于天荒坪抽水蓄能电站出水口拦污栅离水轮机200m,该模型试验中未考虑水轮机尾流的影响。

为了避免拦污栅流激振动,应使栅条的自振频率高于旋涡脱落的频率。实验表明,改善水流扩散条件、减小过栅流速、加厚栅条可降低旋涡的干扰频率;缩短栅条的自由长度,增加栅条的中间固定点可提高栅条的自振频率。

参考文献

- 1 Suo Lishen, Yu Guoqing. Design of water conveying system of Xikou Pumped Storage Plant. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 293~300
- 2 Liu Shin-Chou, Hsieh Chi-Shou. Transient study and hydraulic design of surge tanks of Mingtan Pumped Storage Project in Taiwan. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, 1994, Nanjing 266~276.
- 3 Winckler V, Laperrousaz E, Liabot Y. Numerical simulations and industrial testing to study hydraulic operation of pumped storage power station. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 301~312
- 4 Liu Deyou, Suo Lisheng. Critical condition for maximum surge level in headrace surge tank of pumped storage plant. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 250~255
- 5 Steyrer P, Sametz L. Surge tank with reverse-flow throttles. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 283~292
- 6 Pei Aiguo. Estimation formula for Min. surge in pumped storage plant due to power failure with wicket gates open. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 277~282
- 7 Yao Lianhua. Geometric design of reinforced concrete manifold. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 313~316
- 8 Klasinc R, Knoblauch H. Head losses in the manifolds of pumped storage systems. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 243~249
- 9 Liu Qizhao, Cai Fulin. Numerical simulation of 3-D confined flow in bifurcation of pumped storage station. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 256~265

- 10 He Xuemin. On vortex formation at intakes of pumped storage station. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 234~242
 - 11 Bixio V, Cola R, Mariani, M. Hydraulic downpull on vertical-axis cylinder gates. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 222~226
 - 12 Cai Junmei et al. Study of characteristics of flow passing through trashracks in Tianhuangping Storage Station. In: Proceedings of International Symposium on Pumped Storage Development '94, Sept. 1994, Nanjing. 227~233
- (收稿日期: 1994-12-16)

中国水利水电出版社简介

新成立的中国水利水电出版社命名挂牌成立大会,于1995年4月3日在北京隆重举行。李鹏总理和卢嘉锡副委员长、陈俊生国务委员、钱正英副主席等党和国家领导人题了词。全国政协副主席钱正英,水利部老部长张含英、李伯宁、杨振怀等领导,以及水利部和电力部各司局、各在京单位的领导,还有首都报纸、电视、广播等新闻媒体的记者,共100多人参加了成立大会。

中国水利水电出版社最早的前身,是1956年1月建立的水利出版社。随着主管部门水利部和电力部的合并,1958年3月与电力工业出版社合并为水利电力出版社后,在30多年中也几经合并。

该社建立39年来,先后为我国水利水电行业出版技术标准、大中专教材和职工培训教材、学术专著、技术应用书、专业技术手册和图册、专业辞书、专业外文词典等,共4500多种,印行近亿册,对总结、引进、传播水利水电科学知识和技术成果,为我国四化建设和人才培养,作出了积极的贡献。

多年来,该社始终坚持“两个文明”一起抓,获得了一系列的荣誉:多次被评为“首都文明单位”和“中央国家机关文明单位”。1993年10月,该社被中宣部、新闻出版署联合表彰为全国15家之一的“优秀图书出版单位”。近10多年来,该社先后有13种图书获国家级优秀图书奖,有75种图书获部委级优秀图书奖。该社出版的《中国水利百科全书》、《中国水利》、《中国江河防洪丛书》等,均被列为国家“八五”重点图书,深受读者青睐和社会各界的好评。

经新闻出版署核准,中国水利水电出版社今后的出书范围为:“出版水利、水电专业理论、科技著作,技术应用书,技术标准,以及水利、水电专业的科普读物,大中专教材和职工培训教材”。

中国水利水电出版社拥有一支以高中级编辑出版人员为主、经验丰富的专业技术队伍,现全社共130人,业务部门设有:水利、水电、综合、对外合作等四个编辑室,分别从事上述各类出版物的选组审编工作和开展对外合作业务;装帧出版部,从事各类图书的封面、正文、插图设计和印制工作;发行部、门市部和设在杭州、武汉、成都、西安、郑州、沈阳的六个发行站,从事图书的批发、邮购、零售业务;音像出版部(水利部电化教育中心),为学校教学和专业技术培训摄制各类录像片;微机排版中心和校对中心,为社内外提供出版服务。职能管理部门设有:行政办公室,总编办公室(水利部教材编辑室),计划经营处、人事处,财务处等。

今后,该社每年将出版上述各类新书250余种,7000多万字,内容包括勘测、规划、设计、施工、安装、运行、管理以及教学、科研等各个方面。该社热烈欢迎水利水电行业和社会各界的专家学者及广大工程技术人员,踊跃投稿、推荐人才。

社 长:史梦熊 副社长:王万治 刘凤桐

总编辑:金 炎 副总编辑:谢良华

社 址:北京市西直门外三里河路6号

电话:(010) 8358031 (总机)

传真:(010) 8356845

邮编:100044

(金 炎 供稿)