

新型引水式水电站的理论与实践

XINXING YINSHUISHI SHUIDIANZHAN DE LILUN YU SHIJIAN

陈其伟 王西宏 主编
谷兆祺 彭守拙



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

要 容 内

新型引水式水电站的理论与实践

XINXING YINSHUISHI SHUIDIANZHAN DE LILUN YU SHIJIAN

陈其伟 王西宏 主编
谷兆祺 彭守拙

图 书 在 册 号 (CIP)

ISBN 958-7-2084-2117-0
中国水利水电出版社, 2008

I. ① 新... II. 陈... III. 引水式水电站—概论 IV. TV74

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 182830 号

定 价	20.00 元
印 数	0001—2500 册
发 行	2008 年 1 月第 1 版 2008 年 1 月第 1 次印刷
格 式	787mm×1092mm 1/32 开本 18.2 印张 433 千字
版 次	北京市兴利印刷厂
印 处	中国水利水电出版社出版发行
书 号	ISBN 958-7-2084-2117-0
社 址	北京市西城区百万庄大街 2 号 (100044)
电 话	(010) 88383834, 88383843
邮 政	北京市图书情报中心 (零售)
网 址	http://www.waterpub.com.cn
发 行	全国各地新华书店和各大书店均有代售

封面设计



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是我国水电建设者在新型引水式水电站建设方面的探索研究总结。全书共分为五个部分。前两部分是介绍新型引水式水电站的理论和挪威在这方面的实践经验，后三部分介绍新型引水式水电站在我国小天都、金康及其他水电站中的应用。通过实践经验的总结，表明了新型引水式水电站在经济、环保、节能等方面的优点。

本书可供水电站设计、施工方面的工程技术人员及相关专业的大专院校师生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

新型引水式水电站的理论与实践/陈其伟等主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2008

ISBN 978-7-5084-5117-6

I. 新… II. 陈… III. 引水式水电站—研究 IV. TV74

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 182830 号

书 名	新型引水式水电站的理论与实践
作 者	陈其伟 王西宏 谷兆祺 彭守拙 主编
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 18.5 印张 439 千字
版 次	2008 年 1 月第 1 版 2008 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—2500 册
定 价	50.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

党和国家的领导人一贯号召鼓励各行各业人士要创新，自主创新，以提高我国在世界上的竞争力，加快我国科技的发展，促使我国国力的提升，更快地发展并早日实现国富民强。水利水电工程在近年来有了飞速的发展，长江三峡工程已接近完成，南水北调工程正在起步，西南以至全国水电工程有大小几百个项目正在做规划、设计，或大规模施工。有许多方面急需创新也应该创新，以期把事情办得更好。

水利水电工程的发展也牵涉到许多环境保护、淹没、移民等问题，引发了一些矛盾。我们水电工作者本身也应努力做好各方面的工作，创造和谐发展的局面。修建水利水电工程往往要建设一些水库拦蓄洪水、调蓄径流。这是绝对必要的，但建多大的水库，建在什么地方，能否尽量少淹些土地却是可以考虑斟酌的。修一些引水式、混合式的水电站，可以少淹一些地，但要沿山开挖一些道路，使某些河段脱水，也会对生态环境造成一定影响。

《新型引水式水电站的理论与实践》一书是记述我国水电建设者努力创新，减少水电站建设投资、缩短工期的一些成果，是不破坏环境、努力维护景观的一些成果。

所谓“新型引水式水电站”是相对于常规引水式水电站的老模式而言的。它的特征是一坡到底、深埋。充分利用围岩的承载能力，不衬砌、少配筋。采用气垫式调压室。

四川华能康定水电有限责任公司负责的小天都水电站是全面采用了上述三项新概念的第一座水电站，也是

对新型引水式水电站的第一次探索。小天都水电站位于大渡河右岸一级支流瓦斯河上，在甘孜藏族自治州康定县境内，瓦斯河上游有龙头水库，下游有五个梯级电站，总装机容量 70 万 kW，小天都水电站为第四级。

小天都水电站水头 393.5m，引用流量 $77.7\text{m}^3/\text{s}$ ，装三台混流式机组，总装机容量 24 万 kW。沿瓦斯河右岸开引水洞，长 6km，在其末端设地下厂房。

小天都水电站设计之初亦沿用常规开发方式修筑水头较低的引水道，在厂房后山坡上修建地面调压井，再沿后山坡修地下高压钢管。但这种常规模式在此处有以下明显的缺点。

(1) 隧洞底坡较平，洞线较高，总长 6km 的隧洞沿途就有 5 个施工支洞，而且支洞口高程越来越高出河床，到达厂房处高差近 400m。由河边到各支洞口的施工支洞的公路总长达 8.5km，这些公路都需沿右岸山坡上开凿。峡谷中右岸有川藏公路通过，与压力引水隧洞同在一岸，修建这些支洞的上山公路，既破坏环境，又耗费很多的资金和很长的工期，开挖这些上山公路也会影响川藏公路的正常运输。

(2) 做成常规式引水道布置，由于隧洞洞线较高，洞线要穿过右岸几条小支沟，绕道较远，洞线较长。

(3) 做常规式地面调压室，调压室位置岩石覆盖就会变薄，工程量会增大。而且调压室离厂房距离会变远，造价增加。建造昂贵的高压管道，水击压力也会增大，调节保证的性能也相对较差。

(4) 若隧洞浅埋，离风化卸荷带较近，岩石就较差。有更长的洞段必须采用衬砌，因此造价要高，工期要长。

而做成新型深埋式的压力隧洞，有下列缺点。

(1) 要做气垫式调压室，更要求地质上不漏水、漏气。而且气垫式调压室的工程量要增加，设计要比常规调压室复杂。

(2) 气垫式调压室停机检修后重新启动时要充气、充水，约需 10~20 天，使发电量减少。

(3) 深埋洞各支洞的长度要增加，造价也会相应增加。

权衡利弊之后，四川华能康定水电有限责任公司认为采用新型引水式水电站的新模式，利大于弊，共可节约造价 3500 万元以上，而它在环保上的优点，则是常规设计无法比拟的。因此，决定采用此设计。

成都勘测设计研究院也同意了这种意见，积极配合，采用新技术修改设计。

清华大学水利水电工程系，以清华华同科技开发咨询公司的名义承担了这一新型设计的咨询与协助工作。

四川华能康定水电有限责任公司组织协调施工、监理、质检等各方面的工作，尽力保证新方案的施工质量，工期先后历时3年，比原计划提前7个月建成投产。

小天都水电站建设的同时，成都勘测设计研究院等单位又继续创新，在金汤河金康水电站上也采用类似的措施，设计气垫式调压室时，用钢衬代替水幕来防止漏气，用部分构造钢筋来代替常规设计配筋，节省了大量钢筋。2005年金康水电站也提前投入生产。

新型引水式水电站的难点在于要做到气垫式调压室不漏气或少漏气。我国第一个采用地下气垫式调压室的是四川自一里水电站，装机容量13万kW，建成投产后漏气漏水稍多，后经一些处理减少为 $40\text{Nm}^3/\text{min}$ ，开启全部空压机补气可以正常运行。小天都水电站是第二个，投产后漏气量 $14\sim 20\text{Nm}^3/\text{min}$ ，投产一次成功，水位达到设计要求。经核算，空压机年耗电电费24万元，在经济上是允许的。第三个是金康水电站，采用钢板衬砌气垫式调压室，漏气量减少到 $20\text{Nm}^3/\text{h}$ ，可以令人满意。

这几个水电站的创新设计，体现了党中央“开拓创新，与时俱进”的要求，体现了现代可持续发展、和谐发展的理念，即在人类对自然的改造利用之时，尽可能不破坏原有的风貌。

在整个设计、施工过程中，小天都水电站全体工作人员认真学习国外有关的先进经验，结合我国的实际情况，总结了自己的经验，写成了这本书，以供大家参考。我国有许多这样的水电站有待兴建，每修建一个水电站都可以省几百万元甚至上亿元，都可以减少一些对自然风貌的破坏，所以希望今后能有更多的新型水电站投入生产运行，以节约更多的社会资源。由于水平有限，总结可能不够准确全面，望读者给予指正。

本书承蒙清华华同科技开发咨询公司与清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室部分资助出版，特此致谢！

谷兆祺

2007年9月

前言

《新型引水式水电站的理论与实践》一书筹备已有两年，随着华能小天都水电站和金康水电站的先后投产发电最终辑成出版了。

人们利用水能资源，已近千年；利用水力发电，也有百余年的历史了。引水式水电站，比比皆是，这里的“新型引水式水电站”新在哪里？与众不同体现在什么地方？我们作为本书的编者，在这里谈点肤浅的认识。

20世纪五六十年代，“岩石力学”在欧洲兴起；70年代，北欧挪威的水电站出现了“气垫式调压室”，使高水头引水式水电站在立面布局上出现了革命性的变化：从“乙”字形变成了“一斜杠”，从传统的“进水口—低压引水隧洞—调压井（室）—高压钢管—水轮机蜗壳”的布置方式变成了“一坡到底”。这不仅使得引水式水电站在总体布局上变得灵活、紧凑，便于施工和运行管理，而且因隧洞埋深加大，岩石的整体性会变得好起来，工程能更好地利用山岩的地应力场，隧洞不衬砌，山岩直接承载较高的内水压力……，从而减少衬护工作量，缩短工期，节约了工程投资。

我们称之为“新”，更由于“一坡到底”的水电站引水布置方式不必挖掘高差巨大的竖井或斜井（调压井、压力管道），“一坡到底”的引水隧洞设计可“顺坡上驴”，利用沿河公路或通道，就近布置施工支洞，省掉了传统引水式水电站所需的各施工支洞的上山公路的修筑。这不仅缩短了工程准备工期，节省了工程量，更重要的是不再因筑路而开挖山坡，损坏植被，从而堆积弃渣，

侵占农田或河道。一句话：“有利环保”。既开发利用了水能，又达到了人与自然和谐相处的目的，顺应了当前世界经济发展的新潮流。

华能小天都水电站的成功发电，标志着我国第一座采用“一坡到底”引水开发方式建设水电站的成功；金康水电站的投产运行，则代表“气垫式调压室”也可在地质环境较差的地层中应用，同时标志着这项技术在我国的新进展。

本书共分为五个部分。前两部分介绍了新型水电站的理论和挪威在这方面的实践（编译），后三部分叙述了我国工程界在此领域中的应用。新型引水式水电站的核心理念是利用山岩及其地应力场，承担各种工况下其引水发电系统建筑物的内外荷载，其工程措施就是依据工程现场获得的地质参数，按照挪威准则（或雪山准则）设计、建造一座水电站的引水发电系统（含气垫式调压室）。

我们在这里向广大水电工作者推荐这本书，以期抛砖引玉；并愿与大家一起，为实践科学发展观，推进我国的水电事业向绿色环保、节能高效的方向发展，献上绵薄之力。

编者

2007年9月

目 录

序

前言

【第一部分 新型引水式水电站简介】

新型引水式水电站 陈其伟 谷兆祺 (3)

【第二部分 挪威工程经验介绍】

气垫调压室的设计原则及其应用 王雄志 彭守拙 (17)

挪威水电站建设气垫式调压室的基本经验 王西宏 (35)

水工隧洞及有关部分的地勘工作 黄常之 李凡友 彭守拙 (48)

气垫式调压室的地质勘探 李凡友 黄常之 谷兆祺 (55)

水电隧洞支洞的堵头设计 陈应球 庞 飞 谷兆祺 (62)

AIRCOM 程序简介及系统运行的数值模拟 彭守拙 李凡友 (68)

气垫式调压室的监测和运行 杨鹏 彭守拙 谷兆祺 (75)

某输水隧洞渗漏估算 彭守拙 (100)

【第三部分 在小天都水电站的应用】

“一坡到底”引水布置方式在华能小天都水电站的建设实践 陈其伟 王西宏 (109)

小天都水电站引水系统的布置研究 郝元麟 (117)

气垫式调压室在小天都水电站中的应用 殷家庆 李凡友 徐钢 (124)

小天都水电站气垫式调压室的工程地质条件及处理措施研究 冷鸿斌 (129)

小天都水电站气垫式调压室建设综述 杜鹏侠 杨 鹏 殷家庆 (136)

小天都水电站气垫式调压室运行控制原理及气水系统简介 刘 丁 雷 军 (149)

小天都水电站水压致裂法三维应力的测量研究 丁立丰 郭啟良 陈群策 (153)

小天都水电站气垫式调压室洞壁围岩的高压透水性
的测量研究 郭啟良 李 宏 安其美 丁立丰 毛吉震 (162)

小天都水电站气垫式调压室洞壁围岩原地承载力
的水力阶撑测试 郭啟良 陈群策 赵仕广 侯砚和 (175)

小天都水电站气垫式调压室设计方案可行性

的岩体力学分析 郭啟良 张志国 侯砚和 张彦山 (188)

【第四部分 在金康水电站的应用】

钢包气垫式调压室在金康水电站的应用 周小刚 张 良 赵晋兵 (197)

金康水电站气垫式调压室工程地质研究 陈春文 周晓清 (204)

金康水电站调压室方案的比选 赵晋兵 郑岳岷 (211)

高压隧洞衬砌设计配筋研究 钟建文 谷兆祺 彭守拙 (219)

关于气垫式调压室工程运用的探讨 张 良 赵晋兵 (228)

【第五部分 其 他】

高水头水轮机在小天都水电站的使用 雷 军 刘 丁 (239)

小天都水电站计算机监控系统设计介绍 李 伶 木基伟 (244)

小天都水电站电气一次设计简介 钟 滔 (248)

金康水电站引水隧洞石膏岩工程地质探讨 陈春文 (252)

关于金康水电站气垫式调压室的壁挂钢罩方案 王西宏 毛奇清 (262)

金康水电站首部枢纽基础处理设计 苏 玮 郑岳岷 (268)

建设项目管理中工程量的有效监控 杨安辉 (275)

单回路双栓塞止水压力技术及其应用 安其美 丁立丰 王海忠 赵仕广 (278)

新型引水式水电站简介

新型引水式水电站

陈其伟¹ 谷兆祺²

(1. 华能四川水电有限责任公司; 2. 清华大学)

1 目前常规设计模式

我国目前多数常见的引水道设计模式如图 1 所示。

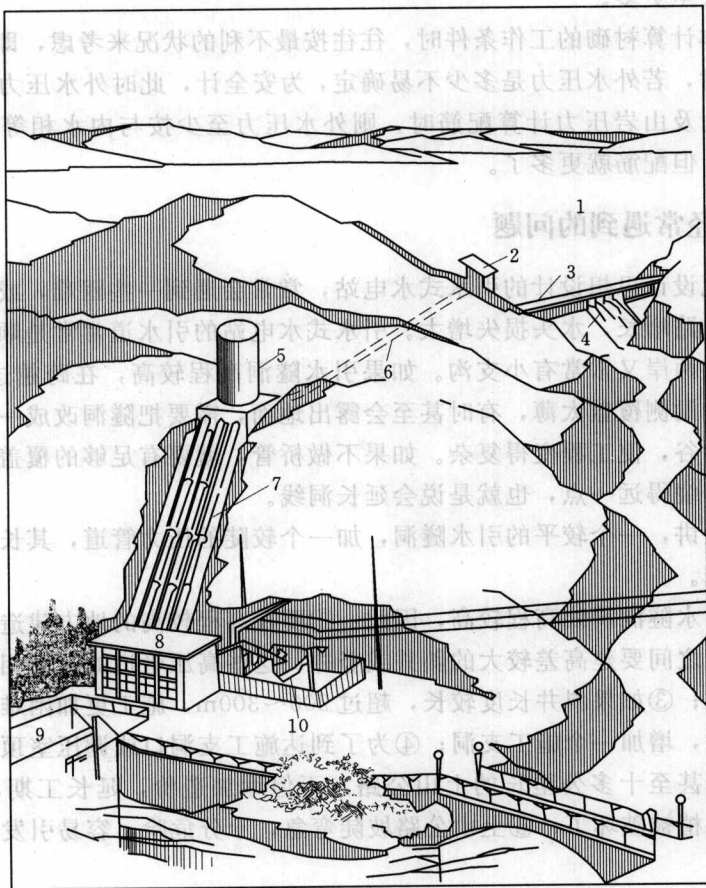


图 1 常规引水式水电站设计模式图

- 1—水库；2—闸门室；3—坝；4—溢流坝；5—调压室；6—有压隧洞；
7—高压管道；8—厂房；9—尾水渠；10—开关站

在河道上建一个低水头水闸或者做一个进水口,然后开凿一条引水隧洞,隧洞坡度较小,尽可能保持洞线较高,洞内内水压力较小,最好不超过 60m 水头,这样可以减轻钢筋混凝土衬砌所承受的内水压力,使之配筋不会太多。

隧洞一直通到水电站厂房上游,厂房位置尽可能选在山坡较陡、岩石较好、山坡稳定的位置。在上端做常规调压室,在山坡里做地下钢板衬砌压力隧道或在地面上做地面钢管。然后,后面做水电站厂房,多半是地面厂房,偶尔在条件合适时也做地下厂房。

常规设计模式的设计思想归纳起来有以下两个方面:

(1) 隧洞内水压力必须由衬砌承担,山岩会形成压力,也必须由衬砌承担。衬砌一般由钢筋混凝土做,最好是滴水不漏,因此一般要求限裂设计,比较重要的地段则要求抗裂设计。这样,钢筋混凝土中配筋就会很多,少则每立方米混凝土中配筋 40~50kg,多则超过 100kg,甚至更多。由于要承担外压,因此,多半要配内外双层钢筋,荷载很大的地方甚至三层四层钢筋。由于配双层以上钢筋,因此,衬砌厚度少则 50~60cm,多则 100cm,甚至更多。

(2) 在具体计算衬砌的工作条件时,往往按最不利的状况来考虑,即衬砌在按内水压力计算配筋时,若外水压力是多少不易确定,为安全计,此时外水压力按 0 考虑。衬砌在按外水压力及山岩压力计算配筋时,则外水压力至少按与内水相等的外水水头计算,这样安全,但配筋就更多了。

2 常规设计经常遇到的问题

按上述常规设计思想设计的引水式水电站,常常会遇到一些困难,或者说是缺点。

(1) 隧洞线路增长,水头损失增大。引水式水电站的引水道常常是顺着河道,在峡谷中走的,河道两岸又常常有小支沟。如果引水隧洞高程较高,在跨越这些小支沟时,常常会使洞顶、洞侧覆盖太薄,有时甚至会露出地面,需要把隧洞改成一段明管,用桥梁的形式跨越沟谷,使工程变得复杂。如果不做桥管,就要有足够的覆盖厚度,往往要将隧洞洞线绕沟绕得远一点,也就是说会延长洞线。

从纵剖面上讲,一个较平的引水隧洞,加一个较陡的压力管道,其长度也将大于一坡到厂房的斜线。

(2) 由于引水隧洞洞线高程较高,因此:①要在高程较高的地方建造调压室;②调压室到厂房机组之间要建高差较大的斜井或竖井;这些高压管道的长度相对较长,造价较高,施工困难;③如果斜井长度较长,超过 200~300m,施工更加困难,往往要在中间加上一个平段,增加一个施工支洞;④为了到达施工支洞口或调压室顶部及底部,往往要修建几公里甚至十多公里长的上山公路,不但增加造价,延长工期,并且破坏环境,把峡谷中的植被破坏了;⑤上山公路坡陡弯急,十分危险,容易引发施工时的一些事故。

(3) 常规设计的高压管道,往往倾向于布置在覆盖不太厚的山坡上,用钢板衬砌,到了厂房前用钢板做分岔管。这些都使工程造价增加,施工难度增加,工期增长。

(4) 洞线定得高,覆盖较薄,常会遇到地质较差的问题。我国许多地方属温带、亚热带气候,气温稍高,雨水不少,风化深度比较厚,新鲜或微风化基岩埋藏深度常达

20~30m, 甚至 40~50m。埋深浅, 洞线可能在风化岩层之中, 尤其是洞线与沟谷交叉处。常言道“逢沟必断”, 断层埋深浅, 常被定为Ⅳ类、Ⅴ类围岩, 施工难度大, 衬砌造价高, 甚至有时不得不用钢板衬砌。如果埋深较大, 深部风化程度轻一些, 岩性好一点, 情况可能会好一些。这些都是实际工作中常遇到的。

(5) 以往常规设计时高压管道覆盖定得浅, 有的只要求埋深大于 3 倍开挖洞径。按现代不衬砌水道的准则来考虑, 覆盖较薄时水道必须用钢筋板衬砌, 分岔管也必须用钢材焊制。这样高压管道、分岔管的造价就很高了, 施工工期也要长得多, 甚至有时成为控制发电的关键。

(6) 由于调压室在较高的位置, 离厂房会较远, 因此高压管道就会比较长, 这样管道中水击压力就会大些, 调节性能相对会较差。水击压力增大, 对钢管、蜗壳、机组的要求都会提高, 它们的造价也会相对较高。

(7) 常规的想法倾向于做地面厂房, 认为明亮、方便、安全, 有益于运行人员的健康。但地下厂房也有其特殊的优点, 例如适宜于在狭窄的山谷河道中修建, 不会受山坡塌方、雪崩的危害, 冬天、洪水季节时施工也方便, 地下厂房布置有时可以比较灵活。

以上种种问题都是由于认为隧洞必须衬砌, 而衬砌要承受大部分内外压力, 而且要不漏水, 因此要把洞线尽量定得高一点, 使它尽量少承受内水压力。但是, 这并不符合实际情况, 在山岩条件还可以的条件下, 山岩本身可以承担所有的内外荷载, 渗水也不会太大, 或者加以适当的处理后, 可以解决承载、渗水问题。目前, 很多工程已经采用了不衬砌水道, 他们的设计思路完全改变了, 而这种思路改变后, 不仅很容易解决传统设计中遇到的一系列问题, 而且可以带来一定的效益。现在人们提倡要“开拓创新, 与时俱进”。笔者认为这个口号, 这个要求, 绝不是只对国家管理, 政治思想等方面的工作有效, 而是对所有的行业, 各种各样的人们都适用的, 因为各行各业各种人都需要进步。况且我们这种设计, 已早有先例, 我们只要弄清楚旁人是怎么做的, 有什么规律, 弄清道理, 掌握要点, 照此办理就可以进一大步。如果能够在此基础上再有所创新, 那就更好了。

3 挪威水电工程的经验

挪威水电在工程方面有许多好的经验, 尤其在水电站引水系统、地下工程方面有很多好经验。他们介绍其经验时, 经常首先介绍一张演化图, 如图 2 所示。

1950 年以前, 挪威还相当落后, 水电工业并不发达, 只有一些较小的水电站。挪威的地理、地质、水文条件一般来讲还不错, 有不少适宜于建电站的地方, 他们建造了一些引水式电站。常规引水隧洞, 在末端建常规调压室, 然后做地面高压管道, 常规地面厂房。这和世界各国的以往状况是一样的。

1950~1960 年, 挪威人感到使用地面压力钢管、建筑地面厂房有时会遇到一些困难, 例如雪崩、山岩塌落, 冬季严寒等。不如把管道、厂房建到地下更安全些, 即使多花一点投资也是值得的, 因此把钢管、厂房转入地下。但是当时对围岩还不十分信赖, 钢管虽然转入地下, 都是在隧洞中装明管。他们当时认为这样受力明确, 也便于维修。笔者访问挪威时, 也进到这些老电站的钢管隧洞中去看个明白。的确是明钢管, 隧洞周

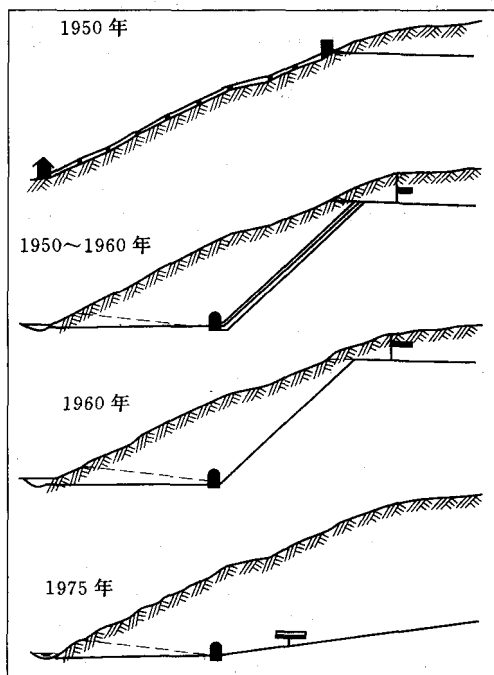


图2 挪威引水式水电站发展史示意图

围基本没做什么衬砌，管道和地面钢管的做法完全一样。这一个时期不长，人们很快发现应该利用围岩的承载能力。在隧洞中装明钢管，隧洞挖得相当大，而管道只能相对较小。工作条件很差，又没有得到更多的好处。当时也有一些工程做钢板衬砌隧洞的，人们发现也没什么缺陷，还可以利用山岩承担部分内水压力，从而节约一点投资。

1960~1975年，这一阶段岩石力学、地下工程有较大的发展，因此再也没人在隧洞内装明钢管了，全部都采用钢板衬砌隧洞，有一些工程甚至采用了不衬砌隧洞，不衬砌高压管道，绝大多数都获得成功，总结出一些经验。最大的不衬砌水道内水压力达到450m，使建造水电站的投资大为节省。10年之内，水电站总装机容量由644万kW增加到1677万kW，挪威很快由一个比较贫穷的落后国家变成一个中等发达国家，到1975年全国总发电量达774亿kW·h，人

均用电量近1.8万kW·h。目前我国年人均发电量只有近1200kW·h。

1975年以后，挪威水电站的发展又跨出新的一步，那就是在1973年在Driva电站采用了第一个气垫式调压室。该电站水头约为450m，装机容量为14万kW，气垫室容积为3000m³。该电站投入运行后，情况良好，漏气漏水极少。同时，在这之前对不衬砌水道的设计已比较成熟，已建成40余条内水压力在150m水头以上的不衬砌水道，除了早期有几条有问题外，其余40条运行均良好。可以说基本掌握了规律。因此，人们对深埋不衬砌水道、气垫式调压室有了信心，也看到了它们的优越性。引水式水电站的设计模式就演变成了图2中最下面的形式。从1973~2005年，挪威共建成带气垫式调压室的水电站10座，总装机容量达256万kW，其中两座最大的装机为124万kW的Kvilldal电站和另一座装机120万kW的Sima电站的一半（该电站由两个各自独立的引水系统），均采用气垫式调压室。目前，挪威全国水电站总装机容量已达2600万kW，占全国电力系统总容量的99.8%。挪威全国电力供应已达饱和状态，除满足全部工业、生活用电外，大量向邻近国家输出，更大量的用来冶炼出口金属产品，实际上是变相出口电力。加上北海石油以及其电子、机械产品的生产出口，挪威人均年国民产值在全世界一直排在前5名之内，和中东那些人口少、盛产石油的沙特阿拉伯、科威特等不相上下，排在美国、日本、英国、法国、德国等一流经济强国之前。

我国水电资源比世界各国都多，比挪威当然更多，我国的矿产资源也是十分丰富的，两者都集中在西南及西北地区，而这些地方又是目前相对贫困、落后的少数民族聚居地区。如果我们能够努力学习国内外已有的先进经验，开发出我们潜在的资源、优

势，我们国家将会有多么灿烂的前景。四川阿坝藏族自治州已走上这条道路，四川甘孜藏族自治州也正在起步，我们完全可以期待 10 年、20 年之后这些地区也会富甲天下，整个西部地区，也许 30 年、50 年后将令人刮目相看。

目前挪威，引水式水电站设计思路和以往设计思路完全不同，主要表现在充分相信岩体的承载能力，尽量不作什么衬砌，按一定的要求深埋，用气垫式调压室代替了以往的地面调压室，尽量采用地下厂房。这种思路不仅省钱、省时、运用安全可靠，而且对环境的破坏可减少到最低程度。

4 引水道新设计思路的具体原则

4.1 隧洞覆盖厚度准则及定线

经过长期的实践摸索和探讨，人们认识到岩体中最小主应力大于最大静水压力，岩体中各构造弱面上的正压力大于最大的静水压力，那么岩体将不会被压力水劈裂，节理不会被张开。

但是，在开始设计的时候，人们很难清楚地知道岩体各部位的应力情况，要去获得这方面的资料，要花费不少时间及费用。人们发现最小主应力与岩体厚度有很密切的关系。也有少数例子或者局部地区，由于地壳构造应力较大，或者某些局部地方有应力集中，虽然覆盖不太厚，可是最小主应力却会比较大。但是，绝大多数情况下，覆盖厚度与地应力成正比关系。在隧洞定线问题上因为构造应力起主要影响的情况，不是主要的。

覆盖厚度最早只着重于洞顶以上岩石的厚度，因此就变成洞顶要有多厚的岩石才不至于被内水压力抬动，即大家所说的上抬理论。

后来发现洞线有水平的，也有斜井、竖井，地面有水平或较平缓的，也有陡峭的甚至是垂直的，因此覆盖厚度不仅是隧洞洞顶以上的垂直厚度，更有侧向厚度的问题，即洞线至山坡的最小厚度。

现在，世界上比较公认的覆盖准则有两种：一种被称为挪威准则，是挪威水电工程师与学者们根据实践经验统计总结出来的；另一种被称为雪山准则，是澳大利亚雪山工程的工程师与学者们根据他们的实践经验统计总结出来的。两种准则大同小异，差别不是太大，都是可用的，下面分别予以介绍。

4.2 挪威准则

在 1968 年以前，挪威设计不衬砌水道的经验规则即简单的上抬理论，不考虑河谷的地质。Bergh·Christensen 在 1971 年提出一个新的经验公式 [见式 (1)]，将河谷山坡的坡角考虑在内 (见图 3)。

$$C_{RM} > \frac{\gamma_w H}{\gamma_r \cos \beta} \quad (1)$$

式中 C_{RM} ——计算点至地表的最短距离，m；

β ——河岸的平均坡角，(°)；

γ_w ——水的容重；

γ_r ——岩石的容重；

H ——水头，m。