

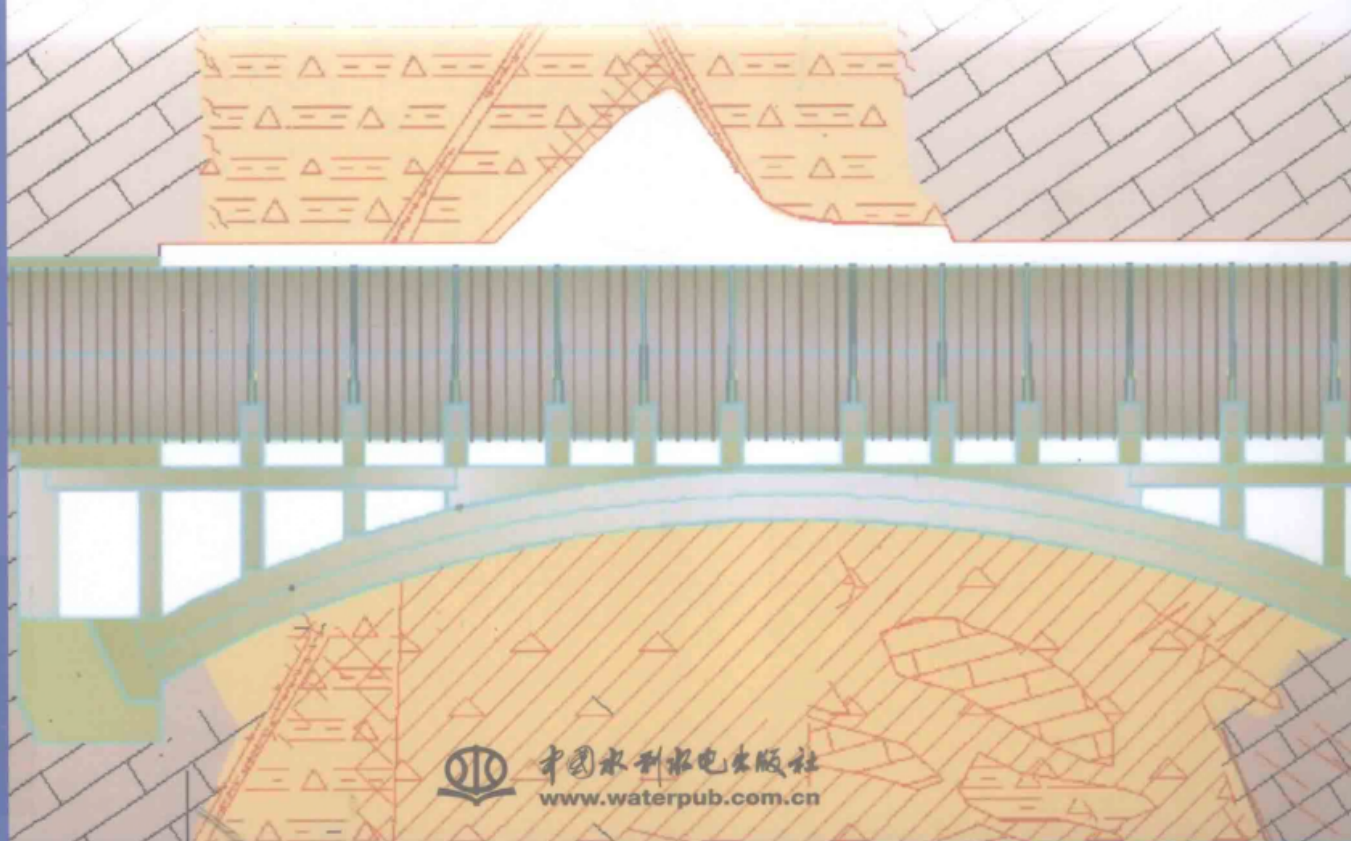
高山峡谷岩溶地区
水电工程实践技术丛书



中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院 主编

天生桥二级水电站 强岩溶深埋长大隧洞 勘察与设计

◎ 白学翠 余波 卢昆华 袁景花 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

● 策划兼责任编辑 王照瑜 Tel: 010-68545946 E-mail: wzyu@waterpub.com.cn
● 封面设计 何玉晓

天生桥二级水电站 强岩溶深埋长大隧洞 勘察与设计



中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院 主编

销售分类: 水利水电工程 / 地下工程勘测设计

ISBN 978-7-5084-8430-3



9 787508 484303 >

定价: 48.00 元

高山峡谷岩溶地区
水电工程实践技术丛书



中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院 主编

天生桥二级水电站 强岩溶深埋长大隧洞 勘察与设计

白学翠 余 波 卢昆华 袁景花 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书总结了天生桥二级水电站引水隧洞的勘测、设计经验,系统介绍了在强岩溶复杂地区修建深埋长大隧洞的相关技术。

本书的内容主要有:强岩溶地区修建深埋长大隧洞工程的勘察方法,强岩溶地区隧洞围岩分类和评价及评分的标准,长大隧洞设计方法,岩溶地下水和各类大型溶洞的处理型式和主要结构,强岩溶地区深埋隧洞的施工技术和主要施工设备,强岩溶地区使用物探技术的评价方法等。

本书主要供水利水电工程技术人员,特别是隧洞工程相关人员和大专院校师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

天生桥二级水电站强岩溶深埋长大隧洞勘察与设计 /
中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院主编;白学翠等
著. — 北京:中国水利水电出版社, 2011.2
(高山峡谷岩溶地区水电工程实践技术丛书)
ISBN 978-7-5084-8430-3

I. ①天… II. ①中… ②白… III. ①水力发电站—
引水隧洞—地质勘探②水力发电站—引水隧洞—设计
IV. ①TV732.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第026311号

书 名	高山峡谷岩溶地区水电工程实践技术丛书 天生桥二级水电站强岩溶深埋长大隧洞勘察与设计
作 者	中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院 主编 白学翠 余波 卢昆华 袁景花 等著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (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	210mm×285mm 16开本 12印张 363千字 2插图
版 次	2011年2月第1版 2011年2月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	48.00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

“高山峡谷岩溶地区水电工程实践技术丛书”

编辑委员会

主任委员 潘继录

副主任委员 范福平

委 员 蔡金良 封云亚 韦晓明 罗友余 许朝政 杨家修
李月杰 范国福 庞 峰 杨益才 肖万春 郑 治
白学翠 陈 宏 湛正刚 姚元成 李明卫 陈寅其
陈能平 罗建新 沈春勇 苟胜国 王 波 颜义忠
王 勇 李月彬 周 威 曾正宾 王 芳 周维娟

《天生桥二级水电站强岩溶深埋长大隧洞勘察与设计》

主要参加人员

(排名不分先后)

白学翠 余 波 卢昆华 袁景花 王柏乐 冉懋鸽 郑 治
潘继录 刘义洲 程家梁 王树础 范福平 王仲龙 邹成杰
汪泽斌 谢本泰 王首生 王宗简 杨益才 韦 港 周云生
张国富 肖万春 汪兴建 潘亨永 陈占恒 叶 明 徐方平
刘秀珍 邓家庆 费 晶 柏子伦 徐劲松 金 城 许朝政
陆 兰 蒋承华 石志勇 周屈强 王 彬 代年粉 文亚豪
张超杰 何应强 李 松 尹学林 杜 松 谭天元 王 芳
张凤强

序一

天生桥二级水电站利用南盘江上有名的长 14.5km、落差达 180m 的雷公滩河段引水发电，装机容量 132 万 kW，是国家重点建设项目。该电站地区地质条件复杂，被誉为“地质博物馆”。工程区既存在地层相变问题，又存在高地应力问题；既存在隧洞岩溶涌水问题，又存在岩爆问题；既存在自然高边坡稳定问题，又存在工程高边坡治理等复杂的工程地质和水文地质问题。水电工作者们不畏艰险，克服重重困难，成功建设了单条长达 9.8km、直径为 8.7~12.1m（最小内径~最大外径）的 3 条引水隧洞和 1 条排水洞。隧洞沿线通过了十多处跨度达 60 余米的溶洞和塌方冒顶地段，勘察、设计和施工各方经历了严峻的挑战。在天生桥二级电站引水隧洞的建设过程中，勘察设计人员认真开展了隧洞岩溶和岩爆专项研究，引进国际先进的物探设备，提出了先进的设计理念和围岩高压固结灌浆等施工新工艺，配合大型全断面掘进机开挖，圆满解决了一系列工程问题，为强岩溶、高地应力地区修建大型地下工程积累了宝贵的经验。

在天生桥二级水电站工程成功运行近 20 年之际，本人欣喜地看到贵阳勘测设计研究院组织部分曾参与工程勘察和设计人员，编写了这本介绍天生桥二级水电站隧洞工程建设的专著，我认为该书的出版对提高当前我国水电建设技术水平是很有借鉴意义的。

作为有幸参与天生桥二级水电站隧洞工程建设全过程的水电工作者，我衷心希望本书能对广大的同行有所帮助。同时也相信，通过锦屏二级等工程的建设实践，在复杂地质条件下大型地下工程的建设水平将迈上更高的台阶。

中国工程设计大师

2010 年 11 月

序二

天生桥二级水电站是我国建设红水河水电基地、实现“黔电送粤”的骨干工程之一，从开始就得到了党和国家领导人的高度重视，原国务院总理李鹏、原政协副主席钱正英、原水利部部长汪恕诚和原电力工业部副部长李鄂鼎等领导都曾到天生桥二级水电站视察和指导工作，为天生桥二级水电站的顺利建设给予了大力支持和关怀。原水电总局、中国水电工程顾问集团下属各设计研究院、中国水利水电科学研究院、中国科学院地质研究所、清华大学、四川大学、武汉大学、河海大学、大连理工大学等全国知名科研单位和高等院校都曾参与天生桥二级水电站的咨询或勘测设计和科研工作，为解决重大工程技术难题、推进该水电站建设作出了应有的贡献。

天生桥二级水电站是中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院（以下简称贵阳院）继成功设计建设猫跳河六个梯级水电站之后，于1973年开始承担勘测设计的第一个大型水电站，是贵阳院从小河支流走向大河干流、从中型水电站设计跨入大型水电站设计的标志性工程，前后历经二十余载，凝聚了两代工程技术人员的心血和智慧。进点之初，工作条件异常艰苦，勘探设备和生活物品只能人挑马驮，所住帐篷、茅屋冬天寒冷、夏天闷热……贵阳院人硬是凭着一种信念、一种勇气、一种拼劲，不畏艰险、不惧困难、勇于创新，二十余年如一日，自始至终秉承“急工程所急、想工程所想”的服务理念，终于成功设计建成天生桥二级水电站。

天生桥二级水电站始建于我国改革开放初期，当时国家正百业待兴，要在强岩溶地区建成大型水电站的确面临不少挑战，为此，工程建设伊始就走开放道路，设计、施工均借鉴和吸收了国外发达国家的先进经验。中一瑞（典）水电集团代表、美国陆军工程师团专家组都曾考察了天生桥二级水电站并提出了设计修改建议；美国哈扎公司聘请了国际上岩土工程著名专家、学者和顾问对天生桥二级水电站工程进行咨询并结合隧洞工程举办技术讲座；日本电源开发和工营东京电力公司在建设期间多次进行咨询；贵阳院主要技术骨干也分批到日本等国家考察学习。贵阳院广大工程技术人员坚持科研与生产相结合，大胆采用新理论、新技术、新工艺、新材料，积极应用超深钻孔、地质雷达、岩性检测仪等先进勘测手段，成功解决了复杂岩溶地区长大引水隧洞所遇大型溶洞、岩爆、涌水等复杂的工程问题，采用多种手段成功治理了380m的厂房高边坡，成功应用碾压混凝土筑坝新技术于大坝建设；引水隧洞率先采用了大直径TBM全断面开挖方法。通过本工程的成功实践，贵阳院在复杂岩溶区长隧洞勘测设计、岩爆预测与处理、超高边坡勘测设计等方面均处于国际先进或领先水平，有力地促进了我国水电科技的发展，也因此获得了国家科技进步二等奖、全国设计银奖等多项荣誉。

天生桥二级水电站还为贵阳院培养了大量科技和管理人才，一大批年轻的工程技术人员在实践中脱颖而出。他们当中，有的被评为全国设计大师，有的成为国家管理人才，有的成为水电工程知名专家，有的走上贵阳院的重要管理或技术岗位，他们为贵阳院的快速发展、更是为我国水电事业快速发展作出了应有的贡献。

天生桥二级水电站设计不仅有成功的经验，也有失败的教训。1993年5月5日在2号机组做甩负荷试验时，1号调压井事故检修闸门井结构突然破坏，这次事故给工程造成了很大损失，贵阳院的声誉也受到很大影响。贵阳院人痛定思痛，完善并健全了质量体系，同时把每年的5月5日确定为院“质量日”，使“警钟长鸣”，以此唤起全院职工对产品和服务质量的危机感、责任感和使命感，确保类似工程质量事故不在贵阳院重演。在此以后，贵阳院承担勘测设计的“西电东送”首批重点工程引子渡、洪家渡、索风营水电站顺利建成，“西电东送”第二批重点工程光照、思林、董箐水电站已投产发电；同时加强了科技创新，采用了大量先进的勘测设计技术，又获得了一批国家科技进步二等奖、国家设计金奖等多项殊荣。

我作为天生桥二级水电站设计工作的参与者，亲历了整个建设过程，一直对其有着深厚的感情。看到《天生桥二级水电站强岩溶深埋长大隧洞勘察与设计》专著即将面世，甚感欣慰，这是当年参与天生桥二级水电站勘测设计人员的共同心愿。天生桥二级水电站强岩溶地区长大引水隧洞的成功建设，是勘察、设计、施工紧密配合、共同协作的结果，对强岩溶区深埋长大隧洞及类似地质条件长大隧洞的勘察、设计、施工具有一定的启示和借鉴作用，对工程隧洞的勘察设计技术和施工技术的发展具有一定的促进作用。

我衷心希望贵阳院继续加强技术总结，不断提高，不断创新，以促进生产、经营和管理全面、持续发展。

2010年11月

序三

天生桥二级水电站于1979年开始筹建，2002年全部建成，历经20余年，发挥了“滇电送粤”的枢纽站作用，实现了早期的“西电东送”宏伟规划。与此同时，见证了我国的改革开放和市场经济发展历程，同样也见证了贵阳院勘测设计人员的艰苦努力、敢为人先和无私奉献。很多曾经参加天生桥二级引水隧洞工程勘察、设计和处理的人员，如王柏乐设计大师、兰春杰院长、冉懋鸽副院长等已经陆续调离贵阳院走上更重要的岗位任职；有些已永远地离开了我们，如邹成杰、孙仲乐副总工等，他们曾经为工程建设呕心沥血，做出了重要贡献，他们的研究成果和职业精神留给了工程、留给了贵阳院。作为工程建设的参与者和本书的策划者，在此，谨向他们致以崇高的敬意！

天生桥二级水电站的勘测设计凝聚了两代人的心血，形成的高边坡、复杂岩溶地区深埋长大隧洞的勘测设计技术处于国际领先水平，发变电技术居于先进水平；工程先后获得各种科技奖近20项，其中包括国家科技进步二等奖、全国优秀工程设计银奖和铜奖等国家、省部级奖13项。早在1995年，我院已故副总工程师邹成杰主编的《典型层状岩体高边坡稳定分析与工程治理》，就由水利电力出版社出版并公开发行，天生桥二级的高边坡、复杂岩溶地区深埋长大隧洞勘测设计研究成果和经验已广泛应用于其他同类工程，对于促进我国水电技术的发展起到了积极的作用。

贵阳院承担的南盘江天生桥二级水电站勘测设计，是继乌江猫跳河梯级以后，在强岩溶地区修建大型地下工程的又一个代表性创新成果。工程的3条引水隧洞总长30km，遭遇到7条暗河、40余个大型溶洞，通过创新思路、分析研究，集成应用超前灌浆、管棚混凝土护顶、钢拱架支撑、钢支撑挑梁、顶管、先回填混凝土再开挖等多种方法予以解决，高压固结灌浆首次实施于加固围岩和充填溶洞，桩基础、拱桥、钢筋混凝土管梁、钢管、化学灌浆等多种工程处理型式组合采用，堪称“岩溶工程博物馆”，极大地提升了贵阳院研究处理岩溶工程难题的能力与水平。直到今天，在建成投产的工程中，天生桥二级水电站的3条大型地下引水隧洞的工程规模仍然居于国内首位；隧洞工程的勘察设计和处理成果已成为地下工程建设史上的经典之作。

目前，天生桥二级水电站已建成近10年，放空检查各条隧洞的运行情况良好，达到设计预想的目标。开展天生桥长大引水隧洞的系统总结，回顾工程建设的历史，记载工程技术创新及其发展的轨迹，用于交流推广、应用传承，为水电事业的发展留下宝贵的技术财富，具有重要的现实意义与作用，值得倡导和实践。在工程建成10年后的技术总结，实属不易。在此，也向本书的作者们表示感谢！

本书主要编撰天生桥二级水电站引水发电隧洞工程建设中比较有代表性的内容，体现了工程勘察评价方法和设计思想的技术性，其中的经验和教训，都是非常宝贵的财富，也是贵阳院开展岩溶地区地下工程建设研究成果总结的重要组成部分，可供从事水利水电工程及其他地下工程的专业技术人员、工程的建设者及其管理者参阅和借鉴。

2010 年 11 月

前言

天生桥二级水电站是首批实现西电东送的工程和华东地区电力枢纽的骨干电站，于1979年开始筹建，在建设过程中受到国民经济条件和调整的影响，强岩溶地区大型隧洞的勘测、设计和施工技术水平也影响了建设的进度。1992年实现首台机发电，2002年底全部建成。在天生桥二级水电站引水隧洞的勘测设计和建设中，缺乏经验和完善的规程规范，迄今为止，隧洞设计理论也仍然不很成熟，争议不断。天生桥二级发电引水隧洞为3条 $9.8\text{km} \times (8.7 \sim 9.8\text{m})$ （长度 $\times$ 内径），该隧洞是当时国内规模最大的发电引水系统，也是迄今为止已建综合规模最大的发电引水系统。对于主洞总长度达29km和排水洞长度达到7km的天生桥二级大规模引水隧洞，设计人员为节省工程投资，在设计初期就提出了围岩作为结构主体，参与承担内水压力的设计目标。强岩溶地区如何保证隧洞运行安全，如何实现围岩参与承担内水压力以及如何保证施工，贯穿于整个建设过程中，对该工程引水隧洞的勘测方法、设计理论、施工方法及岩溶处理技术，进行了深入的研究和大胆的尝试，首次将高压固结灌浆作为加固围岩的主要措施。在工程施工过程中，隧洞通过的每一个岩溶管道系统，都进行了专门的补充勘测、处理设计和施工措施研究，形成了在强岩溶地区修建长大隧洞的系列技术。天生桥二级发电引水隧洞的建成，推动了长大引水隧洞的设计和施工水平的进一步发展。

天生桥二级引水隧洞穿越6条暗河系统，遭遇了40余个大型溶洞，在该强岩溶地区修建大型地下工程，建设初期通过水文地质调查和勘察，对岩溶发育规律和程度做出明确的判断，但是不论做了多少前期勘察工作，并不可能在开挖前完全把溶洞边界和涌水位置判断得很清楚，在开挖和施工过程中，仍然需要对岩溶水文地质、工程地质问题进行深入细致的研究，根据具体情况进行处理措施研究。

对于隧洞的开挖，初步设计阶段考虑掘进机担负隧洞68%（长度19.6km）的掘进，并引进了2台直径为10.8m的罗宾斯全断面硬岩掘进机，但隧洞修建于岩溶发育地区，溶洞地质条件非常复杂，隧洞通过大型溶洞、断层，并遭遇岩爆，对于这些问题处理的工期很长，对掘进机适应性和设备配件也考虑不周，管理不完善，最终掘进长度仅占隧洞总长的22%，使掘进机的运用尚未达到预期效果。

中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院为了总结在高山峡谷岩溶地区水电工程建设取得的成绩、经验和教训，提高技术水平，成立了“高山峡谷岩溶地区水电工程实践技术丛书”编辑委员会，要求以贵阳院设计人员为主，对天生桥二级水电站等工程技术进行系统总结，开展技术交流。在编委会的领导下，进行了本书的编撰工作并如期完成。

全书共6章。第1章介绍工程特点和在工程建设过程中涉及的主要勘察、设计、施工技术。第2章介绍工程的岩溶、水文和岩爆条件,根据工程区岩溶和地下水活动特性,提出了在强岩溶地区修建长大隧洞工程的勘察方法及围岩分类和评价方法,说明了强岩溶区采用溶洞面积率、充填情况、溶洞位置及涌水量进行评分的标准。第3章介绍本工程隧洞设计的理论和方法,重点介绍了溶洞和地下水处理的型式、分期处理措施和主要结构。第4章介绍工程的施工程序、方法、施工设备和施工技术,同时总结了在强岩溶地区使用大直径硬岩掘进机的经验和教训。第5章介绍隧洞工程采用物探勘测和对施工质量评价的运用情况,介绍强岩溶地区使用物探技术对隧洞质量进行评价的原理和方法。第6章介绍隧洞监测设计和初期监测成果。尽管本工程已经建成多年,迄今为止,其规模和复杂程度仍然位于已建工程之首,在本书的编写中,重点针对目前隧洞工程设计中争议比较多的问题、工程大型溶洞处理方法和地下水处理方法进行介绍,总结在岩溶地区修建长大隧洞的施工技术和施工设备使用的经验和教训,为类似工程的勘察、设计和施工提供参考。

本书前言由白学翠执笔,第1章由白学翠、余波、卢昆华执笔,第2章由余波、王仲龙执笔,第3章由白学翠执笔,第4章由卢昆华执笔,第5章由袁景花执笔,第6章由白学翠执笔。全书由郑治、冉懋鸽审稿,白学翠统稿。

由于天生桥二级水电站引水隧洞规模巨大,地质条件又非常复杂,工程建设受到国内外专家的关注,先后有前苏联、挪威、瑞士、前南斯拉夫、美国、日本等多国专家团进行过咨询,尤其是日本电源开发和工管东京电力公司及美国哈扎公司,对工程进行了系统技术咨询和地下工程技术讲座,工程建设受益于国际最先进的地下工程勘察方法、设计理念和施工技术。

天生桥二级水电站的勘测设计始于1965年,工程的最终建成汇集了几辈勘测、设计和施工人员的智慧,隧洞的勘测、设计和大型溶洞的处理研究得到了众多科研单位和院校的支持,在本书的撰写过程中,大量引用了参与人员和参与单位的成果,参阅了大量与本工程相关的文献和资料,虽已列出,难免遗漏。谨此表示衷心的感谢!

在编撰过程中,尽管作了很大努力,但由于工程完建时间较长,又受限于当时的认识水平和分析研究手段,书中难免有片面、遗漏和错误,敬请读者批评指正。

作 者

2010年11月

目 录

序一
序二
序三
前言

1 综述	1
1.1 工程概况	1
1.2 引水隧洞工程主要岩溶特点	4
1.2.1 岩溶水文地质	4
1.2.2 溶洞规模	5
1.3 隧洞工程技术	5
1.3.1 勘测技术	5
1.3.2 设计技术	6
1.3.3 施工技术	7
2 岩溶隧洞工程地质勘察	9
2.1 基本地质条件	9
2.1.1 地形地貌	9
2.1.2 地层岩性	9
2.1.3 构造	10
2.2 隧洞区岩溶水文地质条件	11
2.2.1 水文地质条件	12
2.2.2 岩溶发育的基本特征及规律	14
2.2.3 隧洞区岩溶水文网演化	21
2.3 主要岩溶工程地质问题评价	23
2.3.1 隧洞岩溶稳定问题	25
2.3.2 岩溶涌水及外水压力	31
2.3.3 强岩溶地区深埋引水隧洞岩爆问题	35
2.4 强岩溶地区引水隧洞勘测与围岩分类	38
2.4.1 勘察内容	38
2.4.2 勘察方法	38
2.4.3 岩溶隧洞围岩分类	39
2.4.4 岩溶地区深埋引水隧洞岩爆预测与评价方法	43
2.4.5 岩溶地基勘察方法	43
2.5 小结	46
3 岩溶地区长大引水隧洞设计及工程处理	48
3.1 岩溶地区水工隧洞设计关注的问题	48

3.1.1	岩溶段围岩稳定问题	48
3.1.2	岩溶地基稳定问题	48
3.1.3	岩溶地下水影响问题	48
3.1.4	强岩溶地区隧洞地应力和岩爆问题	48
3.2	大流量引水系统的布置	48
3.2.1	隧洞洞线布置	48
3.2.2	隧洞洞径和体型	50
3.2.3	隧洞间距	51
3.3	强岩溶地区长隧洞的分类和分段设计	51
3.3.1	隧洞设计基本要求	51
3.3.2	隧洞结构型式	52
3.3.3	隧洞结构的分类和分段	53
3.3.4	隧洞结构设计	55
3.4	岩溶地下水的处理	56
3.4.1	岩溶涌水特性	56
3.4.2	引水隧洞的外水压力问题	57
3.4.3	排水洞设计	58
3.5	围岩衬砌组合结构分析	61
3.5.1	围岩应力与变形	61
3.5.2	地应力影响分析	62
3.5.3	衬砌厚度与衬砌应力分析	63
3.5.4	隧洞应力、变形与时间关系	65
3.5.5	隧洞收敛变形规律	67
3.5.6	岩体结构引起的楔形体稳定问题	68
3.5.7	支护措施和支护参数	68
3.5.8	混凝土及钢筋混凝土衬砌标准结构设计	69
3.6	特殊洞段处理	72
3.6.1	砂泥岩洞段	72
3.6.2	岩爆洞段	73
3.6.3	岩溶洞段	74
3.6.4	隧洞高压固结灌浆	77
3.7	典型溶洞段综合处理结构	79
3.7.1	YKC 端承桩与混凝土管梁组合结构	79
3.7.2	钢筋混凝土与钢衬组合结构	81
3.7.3	拱桥与钢管组合结构	81
3.7.4	摩擦桩与混凝土管梁组合结构	85
3.7.5	大直径桩与钢管组合结构	98
3.8	隧洞综合糙率	104
3.8.1	TBM 开挖洞段隧洞喷混凝土表面糙率测定试验	104
3.8.2	I 号引水隧洞综合糙率测试	106
3.9	常规灌浆	106
3.9.1	回填灌浆	106
3.9.2	常规固结灌浆	106

3.10	分缝和止水	107
3.11	I 号和 II 号隧洞的连通洞设计	108
3.11.1	I 号和 II 号隧洞的连通洞设计	108
3.11.2	I 号和 II 号连通隧洞相关运行要求	108
3.12	支洞及连通洞封堵	109
3.13	隧洞的放空检修	109
3.14	小结	109
4	强岩溶地区长大隧洞的施工	111
4.1	施工总布置策划	111
4.1.1	概述	111
4.1.2	施工布置与施工程序	111
4.2	施工方法与施工设备	113
4.2.1	钻爆法开挖	113
4.2.2	掘进机施工	114
4.2.3	混凝土衬砌施工 (全断面针梁钢模)	120
4.2.4	高压固结灌浆	122
4.2.5	III 号引水隧洞超前开挖	123
4.3	典型溶洞段处理	128
4.3.1	2 号支洞 0+618m 桩号段古溶洞处理	128
4.3.2	I 号、II 号主洞 0+830~0+912m 桩号段相变带溶洞处理	128
4.3.3	充填型溶洞深孔大口径灌注桩处理	129
4.3.4	深软基半充填型大溶洞拱桥施工技术	130
4.4	网络计划在引水隧洞施工中的应用	133
4.5	小结	135
5	隧洞地球物理探测、检测与质量评价	136
5.1	隧洞地球物理工作概述	136
5.2	隧洞地球物理方法与技术	137
5.2.1	地质雷达法	137
5.2.2	应力波反射法 (测桩)	138
5.2.3	单孔声波法	139
5.2.4	钻孔录像法	140
5.2.5	声波 CT	140
5.2.6	电磁波 CT	140
5.2.7	孔间声波穿透	141
5.2.8	孔内弹模	142
5.2.9	高频声波反射法	142
5.2.10	表面声波法	143
5.2.11	瞬态面波法	143
5.2.12	声波回波法 (钢管脱空检测)	144
5.2.13	超声回弹综合法	146
5.3	隧洞沿线岩溶构造探测	147
5.3.1	使用方法与工作布置	147

5.3.2	主要成果	147
5.4	基桩质量检测	148
5.5	特殊洞段围岩固结灌浆质量检测	148
5.5.1	灌浆效果评价设计思路	148
5.5.2	技术方法与工作布置	150
5.5.3	数据处理方法	150
5.5.4	主要成果	151
5.6	衬砌混凝土质量检测	155
5.6.1	技术方法与工作布置	155
5.6.2	主要成果	155
5.7	回填灌浆质量检测	156
5.7.1	技术方法与工作布置	156
5.7.2	主要成果	156
5.8	隧洞安全运行检测	156
5.8.1	物探检查内容及目的	156
5.8.2	技术方法及工作布置	157
5.8.3	主要成果	158
5.8.4	小结	168
6	隧洞监测设计及首次充水监测	170
6.1	隧洞监测设计	170
6.2	引水隧洞的首次充水和放水要求	171
6.3	隧洞首次充水和放水监测	171
6.4	小结	174
	参考文献	175

1 综 述

1.1 工程概况

天生桥二级水电站工程是南盘江、红水河梯级的第二个梯级，采用引水式开发。工程为一等大(1)型工程，以发电为目标。根据上游天生桥一级水电站的建设情况，本工程分两期建设，发电引水系统的布置考虑建设分期的要求，规划为规模相同的三个引水单元。一期工程为两洞四机，装机容量880MW，二期工程为一洞二机，装机容量440MW，二期工程与天生桥一级基本同步投入运行，总装机容量1320MW，保证出力730MW，年电量82亿kW·h。电站于1979年开始筹建，1981年因国民经济调整而缓建，1984年复工，1986年截流，1992年首台机发电，一期工程的二洞四机于1998年12月全部并网发电，2002年11月全部工程建成。天生桥二级水电站全部建成后，与上游的天生桥一级水电站共同构成一组电源点，电能输向华南地区。

电站枢纽由首部枢纽、引水系统、发电厂房和变电站组成。首部枢纽布置在天生桥峡谷出口的坝索，从坝索坝址至厂房河段长约14.5km的河段内，经坝索峡谷，雷公滩，桎杈到芭蕉林厂房，构成一个向北凸出的大河湾，集中天然落差180m，从山盆Ⅱ、Ⅲ期溶蚀剥夷面算起，深切河谷500~650m，两岸谷狭壁陡。

首部枢纽自左向右布置有左岸挡水坝、河床溢流坝、冲沙闸、发电坝式进水口、右岸挡水坝。为防止泥沙进入进水口，在坝式进水口前布置了沉砾池、拦沙坎、导水墙和冲沙廊道，在沉砾池前布置有导漂设施。

大坝为碾压混凝土重力坝，最大坝高60.7m，坝顶长471m，河床中部布置9孔12m×13.7m的溢流表孔，设计下泄流量19400m³/s。

电站引水系统由六个坝式进水口、三条坝后明管、三条引水隧洞、三座调压井及六条压力管道组成，单洞引水流量285m³/s。进口明管内径均为8.7m，平均长度约175m，三条引水隧洞采用裁弯取直的布置型式，引水隧洞平均长度9.8km，洞线穿越强岩溶地区，开挖洞径9.7~12.1m，是当时国内洞长、直径最大以及洞数最多的大型发电引水工程。引水隧洞上游灰岩段隧洞间距为40m，下游砂页岩段为50m。设计洞径为：钻爆法开挖段衬砌内径为8.7m，对于TBM（掘进机）开挖段，素混凝土或钢筋混凝土衬砌段内径为9.8m，锚喷支护段内径为10.4m。隧洞设计内水压力0.23~0.83MPa。在实际施工过程中，由于地质原因和施工设备原因，部分洞径调整为10.8m、9m、8m等，Ⅲ号隧洞调整为全部采用钻爆法开挖。

发电厂房布置为地面式，厂区布置有发电厂房、中控楼、500kV开关站、200kV开关站和500/220kV联络变电站，联络变电站先期与鲁布革联络，后期与天生桥一级联络。开关站采用六氟化硫全封闭组合电器，布置为户内式。

南盘江天生桥二级（坝索）水电站枢纽布置平面图见图1。

Ⅲ号引水隧洞纵剖面布置图见图1.1。

首部枢纽布置图见图1.1-3。