

施工导流隧洞设计理论与安全运行技术进展

马旭东 戴光清 杨 庆

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 四川 成都 610065)

摘要 :从当前水利水电工程中采用隧洞导流的有利条件出发 ,介绍导流隧洞设计理论新进展和提高导流隧洞工程效益及安全性技术进展 ,建议通过经济技术比较和导流模型试验来确定最优导流布置方案。

关键词 :导流隧洞 ;导流风险率 ;设计理论 ;安全运行技术 综述

中图分类号 :TV672⁺.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2009)05-0084-05

Progress of design theory and safe operation technology for diversion tunnels//MA Xu-dong, DAI Guang-qing, YANG Qing
(Stat Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract :Based on the advantages of diversion tunnels currently in use in water resources and hydropower projects, the technical progress of diversion tunnel design theory, the engineering efficiency of diversion tunnels, and the safety technique progress are analyzed. Economic and technical analysis and a diversion model test are suggested in order to determine the optimal layout scheme of a diversion tunnel.

Key words :diversion tunnel; risk rate of diversion; design theory; safe operation technique; review

导流是水电工程建设中必不可少的环节 ,导流的成功与否直接决定着整个工程的工期、投资、第 1 台机组发电等各个方面 ,故施工导流方式的选择至关重要。目前主要的导流方式有隧洞导流、分期围堰导流、明渠导流、涵管导流等。

当水电站及供水、灌溉航运等水利枢纽建设在河道中下游河床相对宽阔区域时 ,虽然流量较大 ,但临时分流建筑物容易布置 ,采用分段围堰或者明渠导流较多。据统计 ,在 1998 年以前修建的混凝土坝工程中 ,采用河床分期导流的约占 39% ,岸边明渠导流的约占 29% ,隧洞导流的约占 32% ,河床分期导流和明渠导流为主要的导流方式 ,这些工程 70% 分布于大江大河的中下游地区。葛洲坝水利枢纽、三峡水利枢纽、丹江口水利枢纽等工程均采用了分期围堰导流方式。

随着河道下游水利工程建设的结束 ,水电工程开发建设逐渐转向河流上游。诸多工程地处高山峡谷、地形复杂多变、河道狭窄地区 ,分期围堰或明渠导流限制了施工场地 ,对工期和投资均有较大影响 ;随着科学技术的发展 ,大型隧洞开挖及支护技术逐渐成熟 ,施工机械化水平大幅度提高 ,大流量已非隧洞导流难以克服的困难 ,故隧洞导流逐渐呈上升趋势。

近年来 ,采用隧洞导流的水利工程均位于峡谷地区 ,主要为高拱坝、高土石坝 ,如二滩、溪洛渡、锦屏一级、瀑布沟、两河口、双江口等水利枢纽均采用隧洞导流方式。

山区河道水利枢纽的总体特征为 :坝址区内河谷狭窄 ,一般呈对称 V 形或 U 形河谷 ,河床覆盖层较厚 ,拦河大坝相对较高 ,大坝建筑物一般为土石坝、面板堆石坝、拱坝等坝型 ,不具备采用明渠或者分期围堰导流的条件。采用隧洞导流的主要有利条件是 :坝址区内两岸山体雄厚 ,一般地质条件较好 ,具备良好的隧洞布置条件 ;导流隧洞建于河道岸边山体内 ,可以简化枢纽布置 ,当导流流量较大时可以修建几个导流隧洞 ,施工基坑勿需过水 ,从而加大了施工空间 ,有利于加快施工进度 ,可将导流洞改建为其他永久性建筑物 ,做到一洞多用 ,节省工程投资和缩短工期。

1 导流隧洞设计理论进展

1.1 施工导流标准

拟定导流方式和导流方案时 ,导流设计流量主要取决于导流设计的洪水频率标准 ,即施工导流标准。施工导流由于面临施工过程中洪水情况未知、

施工误差及施工技术等多方面问题,导致导流隧洞实际过流能力与设计过流能力不完全相符,因而选择导流标准实质就是选择要冒多大超标洪水风险的问题^[1],故施工过程中导流系统风险率成为选择施工导流标准的前提和依据^[2]。

施工导流系统存在诸多不确定性因素,如影响施工来流量的水文因素、水力因素、大坝施工进度计划因素、结构因素等,施工导流系统的风险是由以上诸多不确定性因素综合产生的。施工导流方式确定前一般需要根据实际情况建立超标和超载风险率模型,分别从经济风险、风险选择和风险障碍3个要素考虑风险的影响^[1],具体表现为风险成本(即导流工程费用及工期)、风险发生概率(即超标洪水发生概率)和风险发生后果(即超标洪水发生造成的损失)3方面。

对于一些中小型工程,国内外越来越多地采用降低导流标准的方法来减少导流工程量,同时节省投资和加快施工进度^[3-5]。对于挡水期内出现超标洪水的情况,主要采取以下处理方式:①利用上游梯级电站或龙头水库调蓄洪水;②适当加高上游围堰;③汛期基坑过水(即过水围堰);对于山区河流,洪枯流量比值大、峰值高,采用过水围堰配合导流隧洞临时挡水度汛的方式成为中小水电工程建设的一种趋势^[3]。

1.2 洞形选择

导流隧洞的常用洞形包括圆形、马蹄形和圆拱直墙形(城门洞形),实际工程中导流洞断面的形式主要取决于工程地质条件。通过对近年来国内已建和在建的39座工程进行统计,结果表明其中大约77%的导流隧洞采用圆拱直墙形,大约15%的导流隧洞采用圆形,其他洞形则凤毛麟角。可见,当前导流隧洞主要采用圆拱直墙形,原因为:①底部过水面积大,从而枯期泄流能力大,既有利于通航、放木,又有利于降低截流难度及上游围堰高度;②适合各种流态,利于宣泄水流;③地质条件适应能力强,可以通过调整高宽比来保持围堰稳定;④便于隧洞开挖(新奥法),施工简便,有利于加快施工进度等。对地质条件差、洞室断面尺寸大、承水压高且流态复杂的隧洞,则需慎重研究其洞形^[6],一般会改用圆形或修正马蹄形隧洞。修正马蹄形断面由于受力条件较好而被优先选用,如天生桥一级水电站左岸导流洞基岩为较软弱的泥岩与砂岩互层,且岩层走向与水流方向平行,导流洞选用修正马蹄形断面。选择断面形式时应客观地对各种断面形式进行经济技术比较,并以最终效益作为评价原则,切忌因增加施工难度而忽视运行安全可靠^[6]。

1.3 导流隧洞布置及进出口体型

导流隧洞洞线布置的影响因素除地质因素外,还与拦河坝所在位置的地形特征、围岩岩性等因素有关^[7]。导流隧洞通常布置于河道凸岸,一方面有利于缩短导流隧洞长度,另一方面则可以减小导流隧洞转弯的角度,使水流平顺^[8]。布置的总体原则如下:①在尽量避免不良地质条件区域的前提下保证导流隧洞洞线最短;②力求水流平顺,与上下游围堰堰脚保持足够距离,以防淘刷;③进出口高程的选定要考虑截流落差、通航、封堵条件等;④洞线岩体稳定,断层较少,裂隙不发育。

导流隧洞的进出口体型主要由其所处位置的岩性决定,对于岩性好的进口,可直接设置成岸坡式入口,前部用引水渠连接;对于地质条件不良的进口,宜遵循‘早进洞、晚出洞’的原则,尽量少干涉进口岩体,同时在洞口前端设置明洞,以保持进口段岩体稳定。导流隧洞出口洞线与主河道交角宜尽量小,一般控制在 $6^{\circ} \sim 9^{\circ}$ 范围内;为了满足工程要求和地质条件较差而交角较大时,必须采取工程措施,以防止对下游河道产生不利冲刷^[9]。山区河流水位大多暴涨暴落,导流隧洞出口体型一般按有压流设置,通常为减小出口局部负压而将出口局部缩小。某些工程为了增大导流隧洞的泄流量而将出口段做成逐渐扩大型,减小出口流速和水头损失系数以减小总水头损失。如漫滩水电站采用的导流隧洞出口面积较洞身面积扩大10%,出口因出现负压而泄流能力增大5%~8%^[9]。若导流隧洞后期要改建为永久性建筑物,则其出口体型须按永久性建筑物出口体型设计。

1.4 导流隧洞最优洞径及围堰高度的多目标选择

导流隧洞洞径和上游围堰高度决定着整个工程施工导截流的投资与工期,二者之间存在相当复杂的多目标选择,需要通过优化计算以确定最佳导截流建筑物规模。优化计算方法主要经历以下3个阶段:①最早的计算方法只限于施工费用最小的单目标优化;②考虑施工费用和施工工期的多目标选择,采用权重法求解成为当前最主要的优化方法;③综合施工费用、施工工期、导截流风险以及施工难度为一体的群体决策优化方法越来越多地被应用于在建和拟建的很多大型控制性工程中^[10-11]。

山区河流水电工程上游围堰一般采用土石围堰,对于风险率大的控制性工程,可采用碾压混凝土围堰;对于一些中小型工程,可选择采用钢板桩围堰、沉井围堰或草土围堰等。某些年内径流量变化大、枯水期较长且洪峰流量大的中小型水电工程,采用过水围堰度汛的方式逐渐增加,上游围堰能挡住枯水期某一适当频率洪水即可。

1.5 闸门布置及向下游供水方式

导流隧洞进口闸门主要有岸塔式和竖井式。对于岩性较好且岸坡较缓的进口,一般设置成岸塔式以简便布置(图1);对于岩性较差或者岸坡较陡的进口,则一般设置成竖井式,前部采用有压洞连接。河谷狭窄且岩性差、岸坡较陡的进口,多采取中闸室的布置形式(图2),即在导流隧洞适合部位设置竖井式闸室,这样既能利用岩性好的地段设置闸门,又可避免进口立轴漩涡卷的影响,如两河口水电站、溪洛渡水电站、拉西瓦水电站等导流隧洞均采用了中闸室的布置方式。

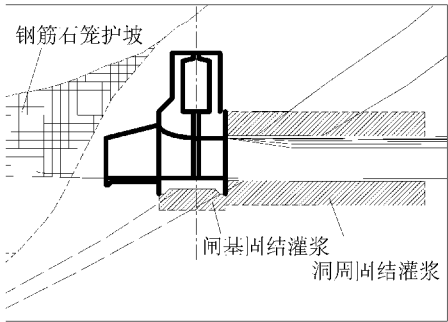


图1 岸坡式布置

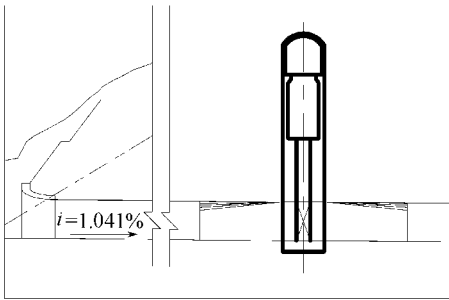


图2 中闸室布置方式

在导流隧洞封堵期内,为了维持河流的生态流量,必须向下游供应一定流量。当前主要采用的供水方式有:①利用大坝泄洪底孔或放空洞供应一定流量;②在已建的大坝坝体内设供水涵管;③在导流隧洞适当区段另设1条引水隧洞等。

2 提高导流隧洞工程效益和安全性技术进展

2.1 导流隧洞改建

为了节省工程投资和施工工期,在水利水电工程设计中导流隧洞应尽可能与永久性建筑物相结合,其主要改建方式包括:永久泄洪洞、发电尾水隧洞和放空洞等^[12-13]。改建为永久泄洪洞的主要形式有:“龙抬头”式泄洪洞、孔板式泄洪洞、洞塞式泄洪洞以及竖井旋流和水平旋流溢洪洞(放空洞)等。当前国内已建和在建的很多水电工程都对导流隧洞采取了不同方式的改建,如二滩水电站导流隧洞改

建为“龙抬头”式泄洪洞,溪洛渡水电站将1号、2号、5号、6号导流隧洞下游段改建为永久发电尾水隧洞,公伯峡右岸导流隧洞改建为水平旋流泄洪洞,拉西瓦水电站导流隧洞改建为竖井旋流泄洪洞,小浪底水电站导流隧洞改建为孔板式泄洪洞,泸定水电站导流隧洞改建为洞塞式泄洪洞等。其他改建方式有“三洞合一”,即将导流隧洞、泄洪洞和放空洞的尾部相结合,如卡基娃水电站将左岸泄洪洞和放空洞与导流隧洞的尾部相结合。

导流隧洞改建时必须顾及到永久性建筑物的工作特点和水力条件,由于施工导流期间年内水位变化较大,导流隧洞的水流流态会更加复杂,往往处于无压、有压及明满流交替过流工况,因此会出现一些特殊的水力现象^[14]。如溪洛渡水利枢纽工程将导流隧洞下游段改建为永久发电尾水隧洞,出口高程受到限制,隧洞内存在封洞水跃等特殊水力现象,对导流隧洞的泄流能力和洞身结构稳定有较大影响,进出口处水力条件变得很复杂。

国内目前运用最多且改建技术最成熟的方式主要为“龙抬头”式泄洪洞和发电尾水隧洞,诸多工程均采用了这2种改建方式,对其研究也比较深入、广泛,经验积累丰富,可控性较强。“龙抬头”式泄洪洞泄流能力强,水位适应范围大,但高速水流段较长,若不采取减蚀措施,在反弧段等地方易发生空蚀^[12],且洞内消耗能量较少,需设置出口消能工,下游河道消能压力较大。

改建为洞塞式泄洪洞的主要优点为:改建洞段短,原导流隧洞大部分都能充分利用。缺点是:①缩小了过流断面,使过流能力减小;②闸门下游相当长的一段泄洪洞仍存在高速水流问题;③下游尾水位限制性较强^[12]。

竖井泄洪洞作为一种新型改建方式为国内多个水电站所采用,其主要优点为:泄流能力大,消能率高,改建方式简单且抗蚀能力强,不会产生挑流雾化,且竖井可以有效地避开一些不良的地址区域。但所建成的竖井泄洪洞均未使用过,没有实测资料所验证,已知与未知的许多技术难题均未得到妥善解决^[15-17]。

2.2 水面波动、气囊、空蚀、空化、负压

当导流隧洞内水流为明流时,水流经过弯段或者闸室后其水面受到干扰而波动较大,可能生成菱形波而出现折冲水流,洞内的流态会变得复杂;当导流隧洞内水流处于明满流的状态时,洞顶会有气囊漂移而减小导流隧洞的泄流能力,通过动水压力的作用,气囊扩大、缩小或破裂使洞壁的脉动压强增大,还可能引起导流隧洞的振动,从而对洞身结构、

围岩稳定和隧洞衬砌产生不利影响。洞内流速较高的地方,水流空化,可能会产生局部空蚀,诸如闸门槽、出口等部位。在导流隧洞内为压力流而出口为自由出流的条件下,当弗劳德数大于4以后,出口洞顶普遍会出现负压;当弗劳德数大于6以后,出口几乎会全断面出现负压,负压的存在不仅对导流隧洞的衬砌要求提高,还有可能导致洞底或者顶部的结构性破坏^[1,18]。因此在导流隧洞进口处采取一定的工程措施避免空气进入导流隧洞是非常必要的。有效的方式是在适当部位设置中闸室,逸散导流隧洞进口漩涡卷进的空气,有效地减小导流隧洞游离气囊。如溪洛渡、两河口等水电站均采用了中闸室的布置方式。

2.3 进口立轴漩涡

对于大部分导流隧洞,运行期上游水位变化幅度大,在某些特殊水位,受地形地貌、进口流速分布不均和进口曲线等多种因素的影响,导流隧洞进口处可能出现漩涡,并以立轴卷气漩涡居多^[19]。研究表明:立轴漩涡的存在虽然对导流隧洞的泄流能力影响较小,但由漩涡卷进的空气在洞顶形成游离气囊(或气泡),故需通过设置一些消涡设施(消涡墙、消涡板等)或者对进口地形做适当的开挖(填筑),以尽量减小或者消除进口立轴漩涡。在溪洛渡水电站整体导流试验中,戴光清等^[20]提出“人字形”消涡墙,避免和减轻了漩涡在导流隧洞进口前一定范围内的游离和贯通,并且使导流隧洞的泄流能力增加了0.75%(图3)。由于形成因素较为复杂,目前未能提出一种应用广泛且效果明显的措施来消除和减弱进口立轴漩涡,主要通过模型试验设置消涡措施。

2.4 出口消能

导流隧洞进出口高程均较低,出口下泄水流总

体表现为:流速高、单宽流量大、弗劳德数低,为了避免水流冲刷下游河道、淘刷下围堰,特别是在下游有滑坡体的情况下出口消能工的设置是非常必要的。导流隧洞出口一般设扭型挑坎或差动坎,通过模型试验研究,适当调整主流出射角。当单宽流量过大时还要设置一些必要的消能设施和采取局部扩散(收缩)的措施来减小水流对下游的影响。当导流隧洞轴线与其他建筑物出口轴线相邻时,泄流能量相对集中,易对下游产生较大的破坏力。导流隧洞出口下游河道中的水流流态,特别是主流位置的水流流态对导流隧洞出口体型较敏感^[21]。试验研究表明:导流隧洞出口消能应扩缩结合调整,与扩散相比,边墙收缩对流向的控制更加方便有效,而与弧形扩散和收缩相比,直线扩散和收缩又更易有效控制流向^[22]。

3 结 语

隧洞导流以其特有的优势为目前大多数山区河流大中型水电工程所采用,导流标准的选择和工程地质条件决定了洞线布置、洞形和进出口体型,通过后期改建来最大限度地利用导流隧洞以节省投资成为一种趋势。然而因为导流建筑物为临时建筑物而往往不受设计和施工单位的足够重视,多种不良水力学问题亟待解决。为达到安全运行的目的,建议在严格论证各种导流方案的可行性基础上,通过经济技术比较和导流模型试验优化设计与施工,以确保导流工程的安全可靠。

参考文献:

- [1] 肖焕雄.施工导截流与围堰工程研究[M].北京:中国电力出版社,2002.
- [2] 范锡峨,胡志根,靳鹏.基于 Monte-Carlo 方法的施工导流系统综合风险分析[J].水科学进展,2007,18(4):604-608.
- [3] 肖国哲.中小型河流施工导流问题初探[J].山西水利,2001(1):41-42.
- [4] 方德斌,王先甲,胡志根.过水围堰施工导流联合泄流管理决策支持系统[J].中国工程科学,2003,5(1):62-68.
- [5] 吴正新,邓燕,席灿勇.索风营水电站施工导流设计及优化[J].贵州水力发电,2004,18(3):40-43.
- [6] 张文倬.导流洞若干问题初探[J].水电站设计,2004,20(4):66-70.
- [7] 黄彦昆.二滩水电站导流洞轴线布置优化[J].水电站设计,1994,10(1):58-61.
- [8] 甘文喜.对导流洞设计中若干问题的探讨[J].水电站设计,2000,16(4):34-37.
- [9] 姚福海.论大中型水电工程导流洞的设计布置[J].水电

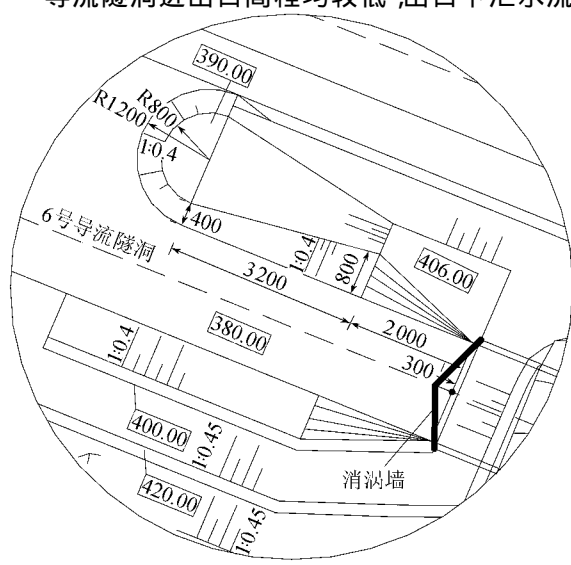


图3 导流隧洞进口消涡墙(单位:m)

站设计 2007 23(1):1-4.

[10] 陈先明 , 肖焕雄 . 施工导流系统随机优化设计 [J]. 水电站设计 2001 17(1) 5-8.

[11] 唐晓阳 . 不过水围堰隧洞导流方案洞径及围堰高度的多目标择优 [J]. 水力发电 1994 20(8) 36-40.

[12] 郭军 , 董兴林 , 高季章 . 导流洞改建为泄洪洞的几种形式及其应用 [C] / 刘树坤 , 陈刚 , 周教德 . 中国水利学会水力学专委会 2002 年年会论文集 . 西安 : 西安工业大学出版社 2002 39-43.

[13] 郑林平 , 李岳军 . 水工隧洞内消能工的研究及应用进展 [J]. 水力发电 2006 32(9) 81-83.

[14] 孙双科 , 刘之平 , 周胜 , 等 . 小湾水电站大型导流洞改建泄洪洞研究 [J]. 水力发电 2001 27(1) 26-31.

[15] 牛争鸣 , 洪锺 , 谢小平 , 等 . 导流洞改建为旋流式内消能泄洪洞的研究和实践—以公伯峡水电站为例 [J]. 水利水电科技进展 2007 27(1) 36-41.

[16] 董兴林 , 高季章 , 鲁慎吾 , 等 . 导流洞改建为漩涡式竖井溢洪道综合研究 [J]. 水力发电 1995 21(3) 32-37.

[17] 孙双科 , 刘之平 , 周胜 . 下游高水位条件下导流洞改建为旋流竖井式泄洪洞的水力学问题研究 [J]. 水利学报 , 2000(10) 22-27.

[18] 陈超敏 , 詹金环 , 汪小茂 , 等 . 清江水布垭工程导流洞设计 [J]. 人民长江 2001 32(10) 16-17.

[19] 陈云良 . 进水口前立轴旋涡水力特性研究 [D]. 成都 : 四川大学 2006.

[20] 戴光清 , 杨庆 , 王海云 , 等 . 溪洛渡水电站施工导流整体水力模型试验报告 [R]. 成都 : 四川大学水力学国家重点实验室 2001.

[21] 刘善均 , 许唯临 , 曲景学 , 等 . 导流洞出口集中布置的优化研究 [J]. 四川大学学报 : 工程科学版 2003 35(2) 18-21.

[22] 刘善均 , 许唯临 , 邓军 , 等 . 大渡河瀑布沟水电站施工导流水工模型试验研究 [R]. 成都 : 四川大学水力学国家重点实验室 2002.

(收稿日期 2008-09-10 编辑 高建群)

(上接第 15 页) 结果就存在偏差^[7]。所以上述计算公式是否正确还需要试验来验证。

现根据试验条件 , 取 $d = 0.035\text{ m}$, $L = 50\text{ m}$, $l = 0.3\text{ m}$, $i = 0.1\%$, 水头为 50 cm 测压管读数时 , 水头损失的理论值计算结果与试验值的比较见表 1。其中 , $q = 4.33\text{ L/h}$, $T = 20^\circ$ 。

表 1 水头损失的实测值与计算值对比

x/m	h_{fx}/cm		x/m	h_{fx}/cm	
	实测值	计算值		实测值	计算值
5	23.3	23.6	30	30.0	27.8
10	25.0	24.9	35	30.2	28.1
15	27.0	25.9	40	29.7	28.2
20	28.4	26.8	45	28.8	28.3
25	29.5	27.4	50	28.5	28.3

由表 1 可知计算结果与试验实测结果基本上是吻合的。考虑到试验有一定的误差 , 以及计算理论值公式的建立是在沿程连续且为均匀出流的情况下推导出来的 , 这说明计算公式在与试验条件类似或基本一致的条件下是可以用于实际计算的。

5 结 论

多孔管微灌技术在干旱地区对解决农业灌溉缺水有着很大的成效 , 笔者主要研究了多孔管的压力分布沿程变化规律 , 分别研究了坡度、压力水头、孔距及管长对多孔管压力分布沿程变化的影响。利用水头损失公式导出了任一断面上在不同坡度情况下压力的计算公式 , 理论上分析了多孔管的压力分布沿程变化规律 , 并通过试验进行了验证 , 从计算结果与试验实测结果的对比看 , 二者基本相符 , 这说明计算公式在与试验条件类似或基本一致的条件下是可

以用于实际计算的 , 为多孔管微灌技术在干旱灌溉农业区的发展提供了依据。

参考文献 :

[1] 水利部农村水利司 . 节水灌溉技术标准选编 [M]. 北京 : 中国水利水电出版社 1999 :115-155.

[2] 王峻晔 , 章明川 , 吴东棣 . 流体在多孔管分支系统中的流动机理研究 [J]. 水动力学研究与进展 :A 辑 1999 14(1) 34-44.

[3] DAVIS M R , FUNGTAMASAN B. Two-phase flow through pipe branch junctions[J]. Int of Multiphase Flow 1990 16(5) 799-817.

[4] KELLER J , KARMELI D. Trickle irrigation design parameters [J]. Trans of the ASCE 1974 12(3) 651-663.

[5] 吕宏兴 , 裴国霞 , 杨玲霞 . 水力学 [M]. 北京 : 中国农业出版社 2002 :148-151.

[6] 吴持恭 . 水力学 [M]. 北京 : 人民教育出版社 1991 :60-68.

[7] 刘焕芳 , 孙海燕 , 苏萍 , 等 . 自压软管沿程压力水头分布研究 [J]. 水利水电科技进展 2006 26(1) 10-12.

(收稿日期 2008-10-27 编辑 方宇彤)

