

高水头电站地面压力管道结构选型

胡 蕾¹, 石长征¹, 伍鹤皋¹, 冯建武², 刘 曜²

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710065)

摘要: 为了选择合适的高水头引水式电站压力管道形式, 采用规范推荐的解析方法设计地面明钢管和钢衬钢筋混凝土管, 结合实际工程对二者进行有限元分析。结果表明: 相比明钢管方案, 采用钢衬钢筋混凝土管可以减少使用厚钢板和高强钢, 节省投资; 避免钢管卷板、焊接方面的困难以及复杂的伸缩节和支墩制造、安装和维护工艺; 可根据具体情况选择边坡是否支护或管道回填, 降低可能出现的山体滑坡等自然灾害的威胁程度。

关键词: 水电站; 高水头; 明钢管; 钢衬钢筋混凝土管; 镇墩; 支墩; 结构选型

中图分类号: TV732.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2015)02-0052-05

Structural type of ground penstock for hydropower station with high head//HU Lei¹, SHI Changzheng¹, WU Hegao¹, FENG Jianwu², LIU Yao²(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Northwest Survey and Design Institute of China Hydropower Consulting Group, Xi'an 710065, China)

Abstract: A suitable type of penstock should be selected for high-head hydropower station with diversion penstock. In this sense, it is proposed the analytic method and finite element method to design exposed steel penstock and steel lined reinforced concrete penstock, referring to relevant specifications. Results show that thicker or high-carbon steel plates could be decreased for steel lined reinforced concrete penstock compared with exposed steel penstock, which can lower the costs and avoid difficulties in rolling and welding. Additionally, the expansion joints and supports are not required, as well as complex installation and maintenance technology. Besides, due to the particular case around the steel pipe, slope support and pipeline backfill can be an alternative. Thus, the penstock will not be greatly affected by landslides and other similar natural hazards.

Key words: hydropower station; high head; exposed steel penstock; steel lined reinforced concrete penstock; anchorage block; buttress anchorage; structure selection

引水式水电站的引水道一般较长, 用来集中水电站的全部或相当大部分水头, 多见于流量小、坡降大的河流中、上游或跨流域开发方案。因此经常遇到压力管道直径虽然不大, 但承受水头非常高的情况, 设计和施工亦有相当大的难度, 直接关系到整个工程的运行安全。例如我国的羊卓雍湖、天湖、依萨河二级水电站, 设计水头均高达 1 000 m 左右, 但引水钢管直径只有 1~2 m。当压力管道直径较小或为了加快施工进度、降低工程投资, 经常采用地面压力管道, 比如地面明钢管或地面钢衬钢筋混凝土管。

地面明钢管受力明确, 结构简单, 便于安装维护, 但对于高水头电站, 不可避免地要大量使用厚壁钢管和高强钢, 除了增加投资外, 还带来钢板施工卷制焊接上的困难。另一方面, 由于明钢管暴露在空

气中, 也面临众多的安全问题, 包括防爆、地震、山体滑坡、温度影响等。例如我国广西天湖水电站水头落差高达 1 074 m, 压力钢管直径 1.0 m, 施工期 12、13 号镇墩管段因上游大雨发生泥石流而被冲击, 钢管发生侧向位移^[1]。当明钢管跨越活断层时, 需要设置较多柔性的伸缩节、支墩以适应断层错动, 同时整体结构和支墩的刚度也要满足抗震的要求, 设计难度较大^[2]。除此之外, 因日晒导致钢管左、右两侧温度不同, 钢管产生横向变位, 支墩因而承受横向推力。诸葛睿鑑等^[3-4]分别运用结构力学法和有限元法计算明钢管支墩的自由温度变位和横向反力, 认为不均匀日照温差会引起较明显的横向变位, 尤其是在钢管放空时, 可能会导致结构失稳。

20 世纪 60 年代在前苏联钢衬钢筋混凝土管以

作者简介: 胡蕾(1989—), 女, 山东菏泽人, 博士研究生, 主要从事水电站压力管道和地下工程研究。E-mail: leih209@gmail.com

通信作者: 石长征(1983—), 女, 湖北荆门人, 博士, 主要从事水电站压力管道和地下工程研究。E-mail: scz4@163.com

坝后背管的形式开始应用,20世纪80年代以来我国也在多座大型坝后式水电站中开始应用,但这些管道均属大直径、中低水头压力管道。20世纪90年代建造的依萨河二级水电站首次将钢衬钢筋混凝土管应用于小直径、特高水头的地面明管结构^[5],避免了厚壁明钢管复杂的制作安装工艺,长期的运行实践也证明该压力管道是安全可靠的。

以往的资料较多的是针对某一种压力管道形式单独进行分析,也有文献致力于研究合适的设计方法或安全评估方法^[6-7],但鲜有涉及压力管道选型时的综合考虑因素,在工程可行性研究阶段,这是首要考虑的问题之一。对于不同的地面管道形式,其适用条件、设计方法、施工工艺等均有较大的差异,需要具体情况具体分析。另外,仅用规范推荐的解析方法设计压力钢管显然偏不安全,本文采用有限元方法优化设计结果,在反映不同形式管道的受力特性的同时综合考虑结构安全、施工工期、工程造价等因素,选择合适的压力管道形式。

1 不同压力管道形式解析法设计

某水电站引水隧洞后接压力钢管,埋入洞内的钢管长约700.31 m,明管段长约807.16 m,压力钢管管径2 m。明管段布置如图1所示,沿线共布设8个镇墩,镇墩将管道固定,在初步设计阶段将每2个镇墩之间的管段独立分析。本文对地面明钢管和钢衬钢筋混凝土管两种方案进行比较分析。

1.1 地面明钢管强度设计

根据主要荷载(内水压力)按锅炉公式^[8]初估管壁厚度 t :

$$t = \frac{Pr}{\sigma_R} \quad (1)$$

$$\sigma_R = \frac{f}{\gamma_0 \psi \gamma_d} \quad (2)$$

式中: P 为设计内水压力,MPa; r 为钢管内半径,mm; f 为高强钢设计强度,MPa; γ_0 为结构重要性系数; ψ 为设计状况系数(持久状况); γ_d 为结构系数;

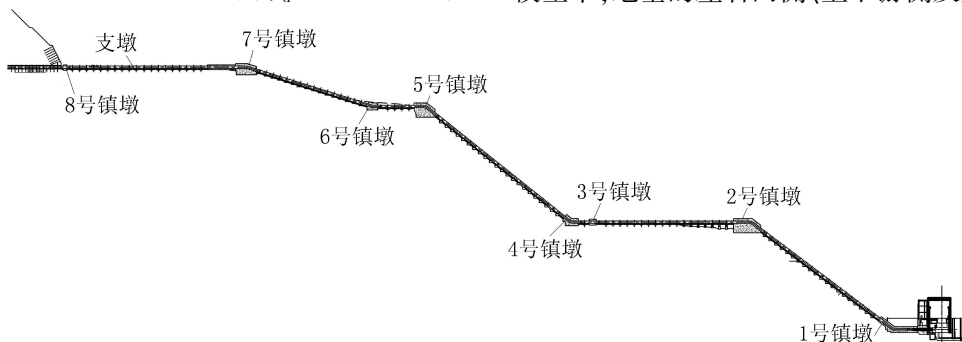


图1 明管段布置示意图

σ_R 为钢管结构构件的抗力限值,MPa。

以1、2号镇墩之间的末跨为例,最大设计内水压力(包括静水压力和水击压力)为8.61 MPa,高强钢材抗力限值为231 MPa,钢管壁厚计算值为37.3 mm,再考虑2 mm的锈蚀裕量,管壁结构厚度初定为 $t=40$ mm。管壁厚度除应满足承载能力要求外,还应根据制造、运输、安装等要求,保证必需的刚度,应满足式(3)计算的最小厚度:

$$t \geq D/800 + 4 \text{ mm} \quad (3)$$

式中 D 为钢管直径,mm。该水电站工程 $D=2000$ mm,即 $t \geq 6.5$ mm,实际选用管壁厚度 $t=40$ mm,满足要求。

1.2 钢衬钢筋混凝土管强度设计

地面钢衬钢筋混凝土管道可以参照DL/T 5141—2001《水电站压力钢管设计规范》^[8]的坝后背管结构分析方法设计。根据该规范的规定,钢衬钢筋混凝土管道设计应满足:

$$Pr \leq \frac{t_1 f_s + t_2 f_y}{\gamma_0 \psi \gamma_d} \quad (4)$$

式中: t_1 、 t_2 分别为钢管管壁厚度和钢筋折算厚度,mm; f_s 、 f_y 分别为钢板和钢筋抗拉强度设计值,MPa。

根据各计算断面的具体参数,按式(4)可以求得相应的钢管厚度和钢筋配置,在此基础上通过有限元法进一步校核。

2 不同压力管道形式有限元法分析

2.1 地面明钢管三维有限元分析

以1、2号镇墩之间的管段为对象建立明钢管有限元模型,包括压力钢管、伸缩节、支承环、滑动支墩、镇墩以及部分地基,垂直于管轴线方向地基宽度取17 m,基础深度取10 m。压力钢管沿轴线每隔6 m设置1对支墩,沿线依次设置1~20号支墩,在明钢管的上镇墩下游设置伸缩节,明钢管有限元模型如图2所示。钢管、支承环采用壳单元模拟,混凝土和地基采用八结点实体单元模拟,支墩上、下滑动面以及套筒式伸缩节采用面-面接触单元模拟。有限元模型中,地基的左右两侧、上下游侧及底部均施加法

向约束。压力钢管细部结构、支承环和套筒式伸缩节如图3~5所示。混凝土密度为2500 kg/m³,弹性模量为28 GPa,泊松比为0.167;钢材密度为7850 kg/m³,弹性模量为206 GPa,泊松比为0.3;基岩弹性模量为3 GPa,泊松比为0.29。

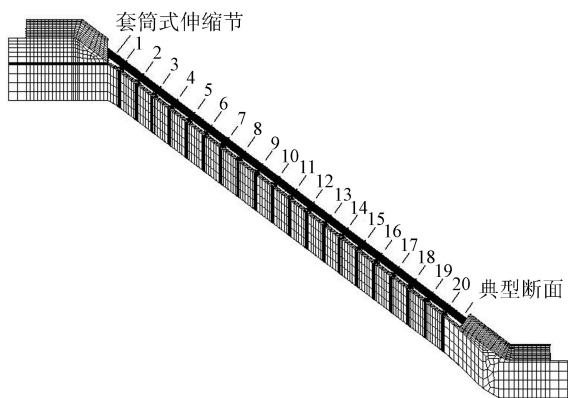


图2 明钢管有限元模型

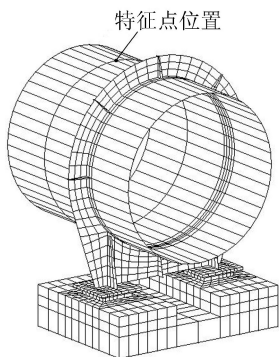


图3 压力钢管细部结构示意图

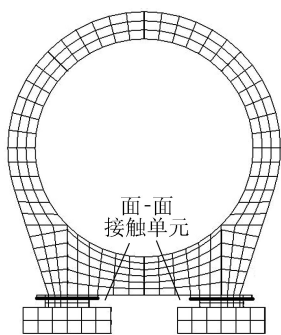


图4 支承环示意图

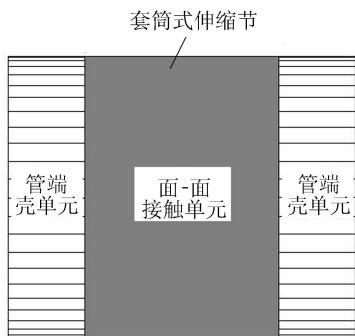


图5 套筒式伸缩节示意图

采用公式(1)~(3)初步确定钢管壁厚,设计内水压力为7.65~8.61 MPa,进行结构自重、内水压力、温度作用(±5℃)组合下的受力分析;再根据应力计算结果对管道结构进行优化设计。

钢管各点的等效应力应满足以下条件:

$$\sigma = \left[\sigma_{\theta}^2 + \sigma_x^2 + \sigma_r^2 - \sigma_{\theta}\sigma_x - \sigma_{\theta}\sigma_r - \sigma_x\sigma_r + 3(\tau_{\theta x}^2 + \tau_{\theta r}^2 + \tau_{xr}^2) \right]^{\frac{1}{2}} \leq \sigma_R \quad (5)$$

式中: σ_x 、 σ_{θ} 、 σ_r 分别为轴向、环向、径向正应力(均以拉为正),MPa; $\tau_{\theta x}$ 、 $\tau_{\theta r}$ 、 τ_{xr} 为剪应力,MPa。

根据有限元计算结果,1、2号镇墩之间的钢管壁厚采用40 mm时,在温降工况,下镇墩附近钢管整体膜应力超过了高强钢抗力限值231 MPa,因此考虑将钢管壁厚加厚2 mm。

第2次校核结果表明钢管壁厚取42 mm时能够满足钢材的抗力限值要求。

2.1.1 位移分析

钢管沿轴向可以有一定的滑动,受结构自重和管内水重的作用,钢管主要产生轴向位移,图6为压力钢管沿线特征点的轴向位移(沿管轴线指向下游为正),特征点取自各支承环上游附近,编号取自对应支墩。伸缩节附近钢管的变形最大,沿管轴线向下游线性减小。最大轴向位移为39.2 mm,发生在温降工况伸缩节下游端的钢管,全部由套筒式伸缩节吸收,伸缩节上游的钢管受镇墩的固定作用几乎不产生位移,说明套筒式伸缩节可以起到补偿上下游段钢管错动位移的作用。此外温度作用对钢管变形的影响是比较显著的,温升工况时,钢管受热膨胀,轴向向下游的位移减小。温降工况支承环沿支墩的滑移量与上部钢管的轴向位移是基本相等的,支墩几乎不动,最大滑移量为40.8 mm,温升工况的情况类似,只是数值有所减小。

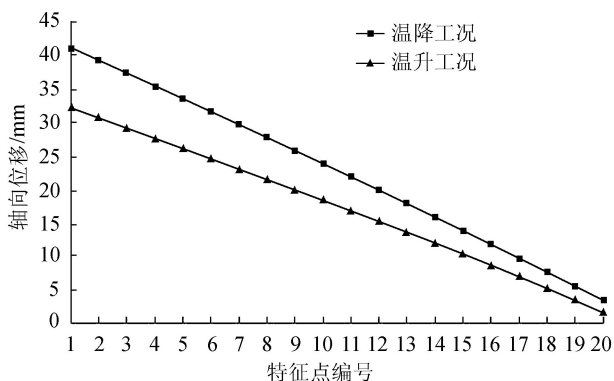


图6 压力钢管特征点轴向位移

2.1.2 应力分析

图7为温降工况19、20号支墩之间压力钢管的

等效应力等值线,钢管的应力主要受内水压力控制,随着内水压力逐渐增大,钢管的等效应力也呈现由上游至下游逐渐增大的规律,但支承环旁管壁的应力较小,图8为20号支承环的等效应力等值线,应力由内向外逐渐增大。



图7 19、20号支墩之间压力钢管的等效应力等值线(单位:MPa)

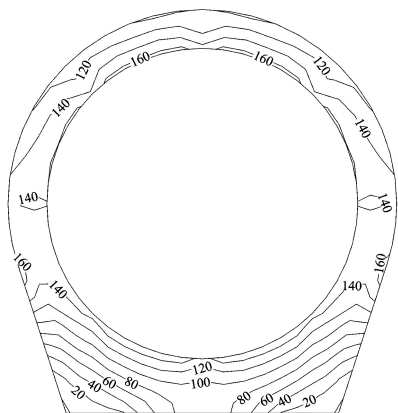


图8 20号支承环等效应力等值线(单位:MPa)

2.2 钢衬钢筋混凝土管道三维有限元分析

同样以末跨1号镇墩上游侧典型断面为例,采用有限元软件 ABAQUS 对该断面钢衬钢筋混凝土管道方案进行非线性有限元分析,外包混凝土厚度 500 mm,具体断面尺寸见图9。在计算中仅考虑了设计内水压力和管道自重,混凝土采用塑性损伤模型,钢筋和钢衬假定为线弹性材料。由于管道是轴对称结构,仅取管道的一半建模计算,对称面按对称边界处理。管道地基横向和竖向尺寸均取 5.4 m,地基四周及管道轴向两端面均施加法向位移约束,地基地部全约束。模型网格划分见图10和图11。钢管外包混凝土

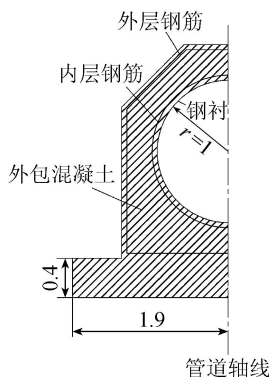


图9 典型断面尺寸(单位:m)

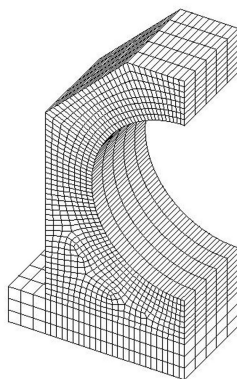


图10 混凝土网格

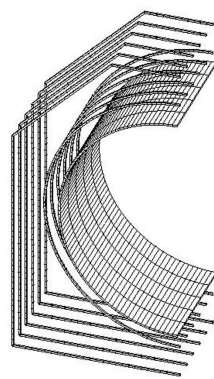


图11 钢管和钢筋网格

强度等级为 C25,厚度 500 mm,弹性模量 28 GPa,泊松比 0.167;钢材弹性模量 206 GPa,泊松比 0.3;基岩弹性模量为 3 GPa 左右,泊松比为 0.29。

同样根据公式(4)计算出管壁厚度和钢筋配置,再用有限元方法校核,最终使得钢管、钢筋及混凝土均满足强度和刚度要求。解析法得到的结果是钢管采用厚度 30 mm 的高强钢,混凝土配置双层钢筋 $\phi 32@200$ 。经过有限元法优化后,钢管厚度增加到 34 mm,配筋改变为双层 $\phi 32@167$ 。此时钢管等效应力最大值为 193.4 MPa,小于高强钢抗力限值 256 MPa;内、外钢筋应力最大值分别为 190.5 MPa 和 155.7 MPa。图12显示了混凝土最终损伤状况,混凝土的开裂情况仍较为严重,但受到布筋密度的约束,开裂宽度较小,根据外层钢筋的应力最大值计算混凝土裂缝宽度为 0.24 mm^[9]。

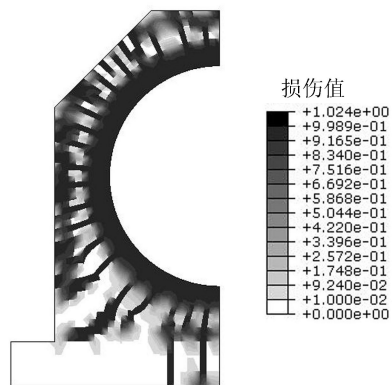


图12 混凝土损伤状况

3 管型对比与分析

由以上分析可知,地面明管段采用明钢管和钢衬钢筋混凝土管道形式均可满足要求,根据公式(1)~(4),针对桩号 P0+700.31~P1+474.35 之间所有管段分别按照地面明钢管和钢衬钢筋混凝土管道方案进行设计,最终确定各管段钢管壁厚和钢筋配置见表1。

表 1 管道设计结果

起止桩号	明钢管			钢衬钢筋混凝土管			
	钢管壁厚/ mm	钢材	混凝土 厚度/mm	钢管壁厚/ mm	钢材	环筋配置	纵筋配置
P0+700.31 ~ P0+913.28	34	高强度	300	34	Q345R	1 层 $\phi 25@200$	1 层 $\phi 20@250$
P0+913.28 ~ P1+013.83	34	高强度	300	34	Q345R	1 层 $\phi 28@200$	1 层 $\phi 22@250$
P1+013.83 ~ P1+092.27	38	高强度	500	34	Q345R	2 层 $\phi 28@200$	2 层 $\phi 22@250$
P1+092.27 ~ P1+323.34	40	高强度	500	34	Q345R	2 层 $\phi 32@167$	2 层 $\phi 22@250$
P1+323.34 ~ P1+485.55	42	高强度	500	34	高强度	2 层 $\phi 32@167$	2 层 $\phi 22@250$

3.1 工程量

a. 如果采用明钢管方案,钢管至少需要采用壁厚为 34 ~ 42 mm 的 600 MPa 级高强度钢才能满足设计要求,钢管的壁厚与直径之比 T/D 为 1.7% ~ 2.1%,基本可以满足规范规定的 2.08%,钢管的卷板、焊接不会存在很大困难。说明从结构安全与构造方面考虑,明钢管方案是可行的。

b. 如果采用钢衬钢筋混凝土管道方案,那么 P1+323.34 桩号之前只需采用壁厚为 34 mm 的 Q345R 低合金钢,之后才需采用壁厚为 34 mm 的 600 MPa 级高强度钢,钢管 T/D 值同样可以满足规范要求;同时 P1+013.83 桩号之前钢管外包混凝土厚度为 300 mm,布置 1 层钢筋,而 P1+013.83 桩号之后钢管外包混凝土厚度为 500 mm,布置 2 层钢筋即可满足要求。

c. 以上分析遵循的原则均是保证结构安全的前提下做到工程量最少,在此前提下若选用明钢管方案,钢材全部选用高强度钢,不仅选材焊接工艺复杂,造价也高于普通钢许多;而选用钢衬钢筋混凝土管道方案,外包钢筋混凝土结构和钢板联合承载,只需 P1+323.34 桩号之后采用高强度钢,由于允许外包混凝土开裂,可以充分发挥钢板和钢筋的强度。加上钢筋的单价低于钢板,无需伸缩节和支墩的加工、安装和运输费用,初步估算可以节省 20% 左右的投资。

3.2 应用基础

明钢管方案受力明确,有着广泛的应用基础,我国已建成的水电站工程如隔河岩、天湖、龚嘴等均成功应用了明钢管。钢衬钢筋混凝土管道虽然在地面式引水钢管中的应用实例较少,尤其是高水头水电站,国内可以参考的有已建成的依萨河二级水电站引水钢管和天生桥一级水电站引水钢管的厂前段。但以坝后背管的形式在三峡、李家峡、东江、五强溪等高 HD 值水电站中的应用已经得到了学术界和工程界的普遍认可。

3.3 钢管制作、安装和维护

对于明钢管,伸缩节和支墩的制作和安装是施工过程中非常重要的环节,如果出现问题,将会威胁到整个管线系统的安全运行,因此对伸缩节和支墩

从选型、制作到安装和维修均有较高的工艺要求。如若遇到管道 HD 值较高、地质条件复杂、地基断裂带密集或地震烈度较高等有特殊需求的情况,则要求更高。而观之钢衬钢筋混凝土管,则省去了此类需求。

3.4 安全性

为确保电站运行安全,若采用明钢管方案,必须根据地质条件对两岸边坡采取支挡、加固与防护措施,及时清理废渣废料。而钢衬钢筋混凝土管道由于压力钢管外围有混凝土保护层,即使在地震或其他自然灾害情况下发生边坡崩塌等类似事故,危害程度也相对较小。

4 结论

a. 从结构安全的角度来讲,地面明钢管和钢衬钢筋混凝土管方案均可以保证水电站安全稳定运行。但采用钢衬钢筋混凝土管道方案,可以通过外包钢筋混凝土联合承载减少钢板厚度,避免选材、焊接方面的困难,同时节省投资。

b. 两种管道形式在工程界均有良好的应用基础和丰富的实践经验,但从钢管制作、安装和维护方面来讲,钢衬钢筋混凝土管可以避免设置伸缩节和结构复杂的支墩以及将来运行过程中有可能出现的相关技术问题,可加快施工进度,降低施工工艺复杂性。

c. 在管道安全性方面,钢衬钢筋混凝土管还能使可能出现的山体滑坡等自然灾害对工程安全运行的威胁程度大幅度减小。因此,推荐选用钢衬钢筋混凝土管道方案。

参考文献:

- [1] 肖振荣. 天湖水电站压力钢管被泥石流冲弯事故分析及处理[J]. 水力发电,1993(11): 59-62. (XIAO Zhenrong. Analysis and process of mud-rock flow accident for Tianhu hydropower station penstock [J]. Water Power,1993(11): 59-62. (in Chinese))

(下转第 84 页)

- and fluid-particle interaction sediment-laden flows over developing sand dunes [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2008, 8(5/6): 569-578.
- [44] NEZU I, SANJOU M. PIV and PTV measurements in hydro-sciences with focus on turbulent open-channel flows [J]. *Journal of Hydro-Environment Research* 2011, 5(4): 215-230.
- [45] OMIDYEGANEH M, PIOMELLI U. Large-eddy simulation of three-dimensional dunes in a steady, unidirectional flow: part 1. turbulence statistics [J]. *Journal of Fluid Mechanism*, 2013, 721: 454-483.
- [46] LIU Shihe. Turbulent coherent structures in channels with sand waves [J]. *Journal of Hydraulic Dynamics*, 2002(2): 106-110.
- [47] LÓPEZ F, FEMANDEZ R, BEST J. Turbulence and coherent flow structures associated with bedform amalgamation [J]. *Water Resources*, 2004(10): 1-10.
- [48] NEZU I, ADOA A. Three-dimensional structure of space time correlation on coherent vortices generated behind dune crest. [J]. *Journal of Hydraulic Researches*, 1999, 37(1): 945-958.
- [49] CHANG K, CONSTANTINESCU G. Coherent structures in flow over two-dimensional dunes [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(5): 2446-2460.
- [50] KESHAVARZI A, BALL J, NABAVI H. Frequency pattern of turbulent flow and sediment entrainment over ripples using image processing [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012(16): 147-156.
- [51] GYR A, SCHMID A. Turbulent flows over smooth erodible sand beds in flumes [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1998, 36(6): 1003-1007.
- [52] DEY S, SARJAR S, SOLARI L. Near-bed turbulence characteristics at the entrainment threshold of sediment beds [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 137(9): 945-958.

(收稿日期: 2014-07-15 编辑: 熊水斌)

(上接第 56 页)

- [2] 石长征, 伍鹤皋, 李云, 等. 跨活断层倒虹吸明钢管对断层错动的适应性 [J]. *水力发电学报*, 2012, 31(2): 198-204. (SHI Changzheng, WU Hegao, LI Yun, et al. Study on adaptability to fault slide and aseismic behavior of exposed steel penstock for fault-crossing inverted siphon [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, 31(2): 198-204. (in Chinese))
- [3] 诸葛睿鑑. 明钢管支座的横向推力 [J]. *云南水力发电*, 2007, 23(3): 33-34. (ZHUGE Ruijian. Transverse thrust for piers of exposed penstock [J]. *Yunnan Water Power*, 2007, 23(3): 33-34. (in Chinese))
- [4] 徐海洋, 伍鹤皋, 石长征. 日照温差影响下明钢管支墩受力特性研究 [J]. *水力发电*, 2010(12): 27-30. (XU Haiyang, WU Hegao, SHI Changzheng. Analysis on the stress characteristics of exposed penstock supports under the influence of temperature differences due to sunshine [J]. *Water Power*, 2010(12): 27-30. (in Chinese))
- [5] 杨和风. 钢衬钢筋混凝土地面管在依萨河二级水电站中的应用 [J]. *水力发电*, 1997(1): 56-58. (YANG hefeng. Application of steel lined reinforced concrete pipe in Yisahe II hydropower station [J]. *Water Power*, 1997(1): 56-58. (in Chinese))
- [6] 徐彬, 候建国, 安旭文, 等. 水电站压力钢管的安全度设置水平 [J]. *水利学报*, 2012, 43(8): 957-965. (XU Bin, HOU Jianguo, AN Xuwen, et al. Safety level of hydropower steel penstocks [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(8): 957-965. (in Chinese))
- [7] 杨绿峰, 张伟, 韩晓凤. 水电站压力钢管整体安全评估方法研究 [J]. *水力发电学报*, 2011, 30(5): 149-156. (YANG Lufeng, ZHANG Wei, HAN Xiaofeng. Integral safety evaluation method for steel penstocks of hydroelectric station [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2011, 30(5): 149-156. (in Chinese))
- [8] DL/T 5141—2001 水电站压力钢管设计规范 [S].
- [9] DL/T 5057—2009 水工混凝土结构设计规范 [S].

(收稿日期: 2013-11-19 编辑: 周红梅)

(上接第 76 页)

- [9] 崔莹. 多源地质空间数据挖掘方法及应用 [D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [10] BALLAGH L M, RAUP B H, DUERR R E, et al. Representing scientific data sets in KML: methods and challenges [J]. *Computers & Geosciences*, 2011, 37(1): 57-64.
- [11] 刘尚蔚, 魏鲁双. 数字地质多源数据库及三维建模方法研究 [J]. *人民黄河*, 2012, 34(2): 123-125. (LIU Shangwei, WEI Lushuang. Research on the digital geological multiple source database and 3D modeling method [J]. *Yellow River*, 2012, 34(2): 123-125. (in Chinese))
- [12] 张鸣之, 诸云强, 罗德利, 等. 地质环境数据集成服务及其系统实现 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2013, 24(3): 84-89. (ZHANG Mingzhi, ZHU Yunqiang, LUO Deli, et al. Geo-environmental data integration and service research and software system implement [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2013, 24(3): 84-89. (in Chinese))
- [13] ZHU Liangfeng, WANG Xifeng, ZHANG Bing. Modeling and visualizing borehole information on virtual globes using KML [J]. *Computers & Geosciences*, 2014, 62(1): 62-70.
- [14] 俞鸿年, 卢华复. 构造地质学原理 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1998.

(收稿日期: 2014-03-21 编辑: 熊水斌)