

前置掺气坎对弯道急流横向超高影响的数模研究

汪厚松, 刁明军, 蒋雷, 王军, 官夏菲, 任昱

(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:通过对比分析,前置掺气坎对弯道横向超高的沿程波状分布规律基本无影响;前置掺气坎可以降低弯道急流的横向超高,弯道半径越小,前置掺气坎对弯道急流横向超高的整体改进作用越显著;掺气坎对同一弯道横向超高的整体改进作用还受流量的影响。

关键词:数值模拟;前置掺气坎;弯道急流;横向超高

中图分类号:TV131.3+4;U448.42;U617.4

文献标识码: C

文章编号:1001-2184(2018)01-0111-03

1 研究背景

在某些水利工程中,由于受地形和地质条件的限制,泄水建筑物不可避免地布置成弯道形式,而泄水建筑物中的水流通通常是高速水流,水流属于急流状态,因此弯道急流是水利工程中常见的水流现象。许多专家和学者^[1-3]发现了弯道水流现象并对弯道水流的机理进行了深入研究。王伟、许唯临^[4]等对弯道水沙的运动进行了理论研究;王平义、蔡金德^[5]等对弯曲河道的纵向垂线平均流速的平面分布进行了研究,推导出了变曲率动床弯道水流纵向垂线平均流速计算公式;刁明军、杨海波^[6]等对弯道水流的研究现状进行了阐述,指出对弯道水流进行数值模拟研究将是一种趋势;杨玲霞、张银华^[7]等通过水工模型试验对改善弯道急流流态进行了研究;惠爱璐、王飞虎^[8]等采用水工模型试验对大底坡急流弯道通气减蚀所形成的掺气空腔长度和水体掺气浓度进行了研究;吴宇峰、伍超^[9]等通过模型试验对斜槛在急流弯道超高控制进行了研究,阐明了斜槛防治超高的原理,提出了斜槛的设计方法;许光祥、童思陈^[10]等对单纯弯道下的水面横比降沿程分布进行了研究,得出了弯道横比降沿程分布特性及其统一计算公式。横向超高是弯道水流的一项重要指标,改善弯道水流横向超高具有重要的工程意义。在弯道前增设掺气坎对弯道急流横向超高的影响还缺乏研究,由于弯道的横向超高主要因弯道纵向流速沿横向分布不均匀所引起的,前置掺气坎的设置必将影响到弯道纵向流速沿横

向分布,进而影响弯道横向超高。因此,有必要研究前置掺气坎对弯道急流横向超高的影响。

肖鸿、周赤^[11]等采用数值模拟和模型试验对掺气减蚀设施进行了研究,将水深和流速的模拟结果与模型试验数据进行对比得出最大误差不超过2%,证明了 Eulerian 模型和 VOF 模型模拟掺气设施的可行性;罗永钦、刁明军^[12]等采用模型试验和数值模拟对泄洪洞掺气减蚀设施进行了研究,水面线的模拟结果最大误差保持在3%以内,数值模拟表明 k-ε 模型和 VOF 方法能够准确地对泄洪洞掺气减蚀问题进行模拟与分析,特别是对自由水面捕捉和掺气空腔的长度模拟精度较高;叶茂、伍平^[13]和漆力健^[14]等采用数值模拟的方法对掺气坎后水流进行了研究,进一步证明了 VOF 方法在模拟自由水面和空腔长度的准确性。基于数值模拟方法研究掺气水流积累的成功经验,本研究以某工程的排洪隧洞的弯道为研究对象,采用标准 k-ε 模型与 VOF 模型对不同半径下的弯道在有无前置掺气坎的情况下进行了数值模拟研究。

2 数学模型

本文采用的标准 k-ε 紊流模型,其方程组^[15]如下:

$$\text{连续方程: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{动量方程: } & \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} \\ & = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

收稿日期:2018-01-18

k 方程:
$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \rho \varepsilon \tag{3}$$

ε 方程:
$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4}$$

其中, ρ 和 μ 分别为容积分数平均的密度和动力粘性系数, P 考虑重力后的压强项, μ_t 为紊动粘性系数, 可以由紊动能 k 和紊动能耗散率 ε 按下式求出:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{5}$$

式中 C_μ 为经验常数; σ_k 和 σ_ε 分别为 k 和 ε 的紊流 Prandtl 数, $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 为 ε 方程常数。 G 为平均速度梯度引起的紊动能产生项, 由下面的公式定义:

$$G = \mu_y \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{6}$$

各常数取值见表 1:

表 1 紊流模型中常数的取值

紊流模型	C_μ	σ_k	σ_ε	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$
标准 $k-\varepsilon$	0.09	1.0	1.3	1.44	1.92

采用 VOF 方法追踪水面。该方法认为计算域内水气交界面的网格空间由气相、水相混合充填, 密度 ρ 和动力粘性系数 μ 为气相(水相)容积分数的函数:

$$\rho = \alpha_w \rho_w + (1 - \alpha_w) \rho_a \tag{7}$$

$$\mu = \alpha_w \mu_w + (1 - \alpha_w) \mu_a \tag{8}$$

式中 α_w 为水的容积分数, ρ_w 、 ρ_a 分别为水和空气的密度, μ_w 、 μ_a 分别为水和空气的动力粘性系数。通过对水的容积分数 α_w 的迭代求解, ρ 和 μ 可以通过公式(7)、公式(8)求出。

本次模拟的区域从上游库区到弯道结尾直线段末端。溢流堰顶处桩号为(渠)0+000, 掺气坎处桩号为(渠)0+320, 弯道起始处桩号为(渠)0+370, 明渠收缩段末端以下宽度均为 5 m, 如图 1 所示。掺气坎上游底坡为 0.11, 下游底坡为 0.08, 如图 2 所示。模型区域的整体网格数量为 35 万。由于弯道处为本次研究的重点, 对弯道区域进行了加密处理, 如图 1 所示。

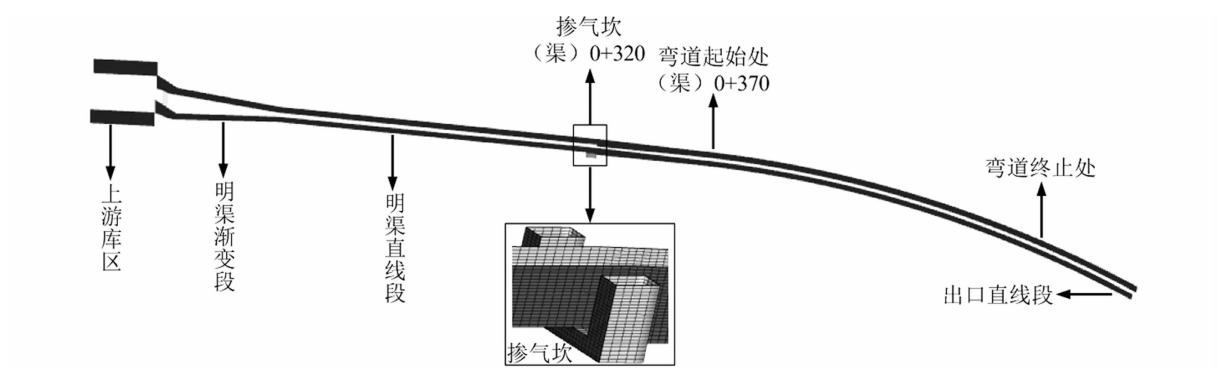


图 1 计算域三维模型

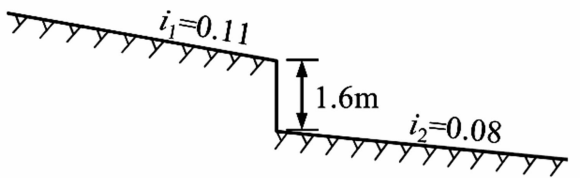


图 2 掺气坎尺寸图

3 计算工况

本次数值模拟计算工况如表 2 所示:

4 结 果

由于数据提取和结果分析的需要, 对于转弯半径为 $R = 150\text{ m}$, 转弯角 $\theta = 47^\circ$ 的弯道, 从弯道

表 2 计算工况

工况编号	洪水频率	流量 Q $/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	半径 R $/\text{m}$	前置掺气坎
No. 1	1 000 年一遇	279.9	150	无
No. 2	1 000 年一遇	279.9	150	有
No. 3	1 000 年一遇	279.9	500	无
No. 4	1 000 年一遇	279.9	500	有
No. 5	100 年一遇	195.3	150	无
No. 6	100 年一遇	195.3	150	有
No. 7	100 年一遇	195.3	500	无
No. 8	100 年一遇	195.3	500	有
No. 9	5 年一遇	85.8	150	无
No. 10	5 年一遇	85.8	150	有
No. 11	5 年一遇	85.8	500	无
No. 12	5 年一遇	85.8	500	有

起始处开始,弯道全程等间距设置 21 个监测断面(编号为 1 到 21),各监测断面之间间距为 6.15 m;对于转弯半径为 $R=500\text{ m}$,转弯角 $\theta=26^\circ$ 的弯道,从弯道起始处开始,弯道全程等间距设置 37 个监测断面(编号为 1 到 37),监测断面间距为 6.33 m。由于弯道区域的流速较高,属于高速

水流,弯道区域的流速均在 20 m/s 以上,存在强烈的掺气现象,故本文选取水气界面的体积分数为 0.2 的等值线作为自由水面,并对每个监测断面的左岸水深 h^l 和右岸水深 h^r 进行了提取,得到各工况下弯道段的横向超高 $\Delta h=h^l-h^r$ 沿程分布,如图 3 所示。

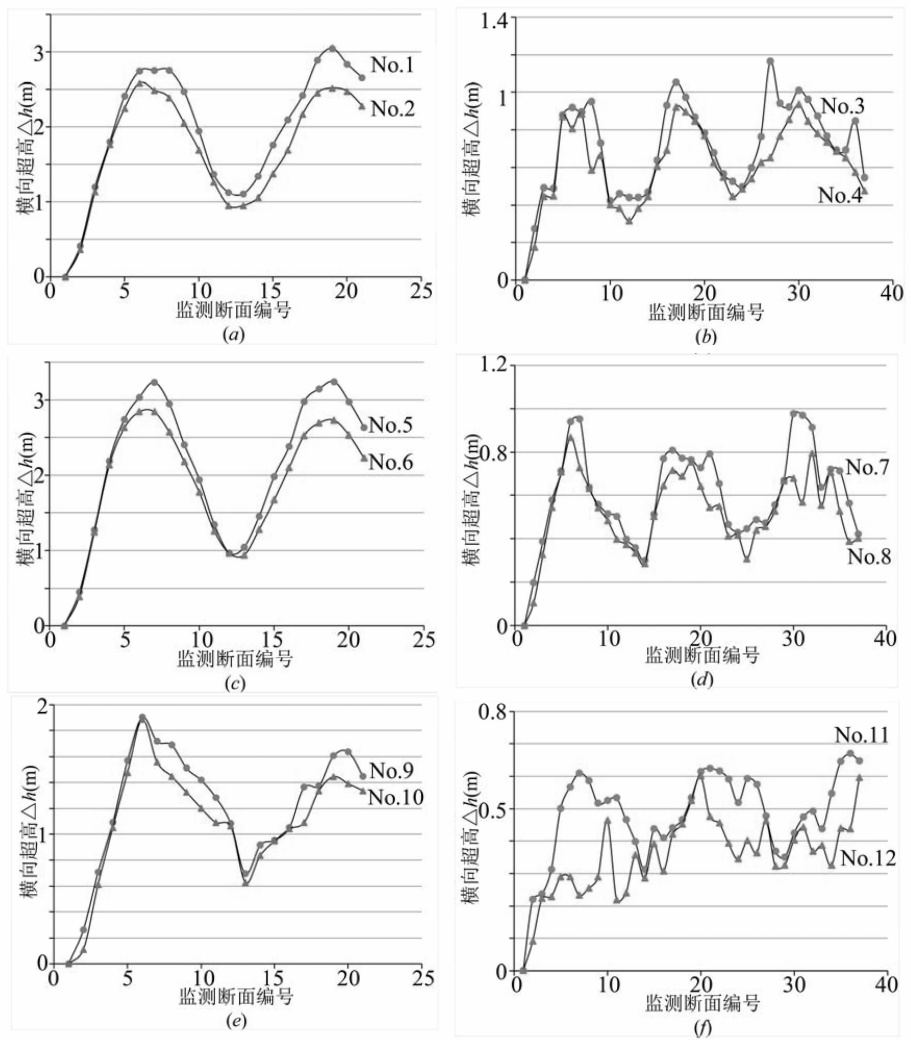


图 3 横向超高沿程分布

由于监测断面的左岸水深均大于右岸水深,对同一弯道各监测断面在无掺气坎时的得到横向超高 $\Delta h_i^{\text{无坎}}$ 与有掺气坎时得到横向 $\Delta h_i^{\text{有坎}}$ 超高之差取平均值,得到横向超高的平均降低值 $\overline{\Delta h^{\text{降}}}$:

$$\overline{\Delta h^{\text{降}}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i^{\text{无坎}} - \Delta h_i^{\text{有坎}}) \quad ((9))$$

式中 N 为弯道监测断面的总数, i 为监测断面的编号,横向超高平均降低值 $\overline{\Delta h^{\text{降}}}$ 如图 4 所示:

5 研 究

由图 3 可知,各弯道横向超高沿程呈波状分

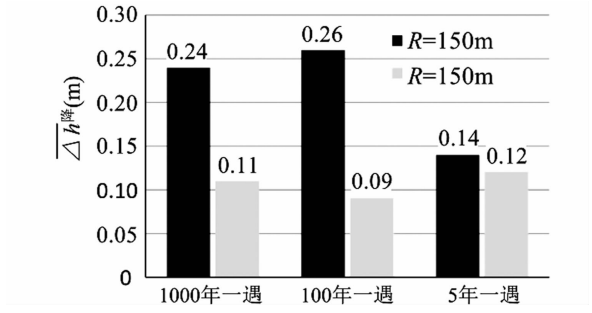


图 4 各工况下横向超高平均降低值分布,对于 $R=150\text{ m}$ 的弯道,1~6 号监测断面区域

横向超高沿程逐渐增加,6~13号监测断面横向超高沿程超高逐渐减小,13~19号监测断面横向超高沿程逐渐增加,19~21号监测断面横向超高逐渐减小,波长特性约为73.8 m;对于 $R=500$ m弯道而言,同样表现出类似于 $R=150$ m时的沿程变化规律,相应的波长特性约为101.28 m。增设掺气坎和未设掺气坎的横向超高沿程波状分布同步,同一弯道不同流量下的波长特性相同,波幅特性随流量的减小而减小,波长特性主要受边壁条件控制。弯道内的急流由于弯道边壁偏转而产生扰动,所形成的冲击波经过弯道壁面反射向下游传播,导致横向超高沿程呈波状分布^[16]。扰动因边壁的变化而产生,并经边壁反射向下游传播,因此,波长特性主要受边壁条件控制。增设掺气坎对弯道横向超高沿程波状分布规律基本无影响。

在弯道前增设置掺气坎后,各个监测断面处的横向超高比未增设掺气坎时对应工况下的横向超高有所降低,横向超高降低值在横向超高沿程的第一个单调区间内表现不显著,基本为0,随后向下游逐渐表现显著,在 $R=150$ m的弯道中横向超高最大降低值为0.507 m(1 000年一遇)、0.529 m(100年一遇)和0.275 m(5年一遇),在 $R=500$ m的弯道中横向超高最大降低值为0.436 m(1 000年一遇)、0.405 m(100年一遇)和0.376 m(5年一遇),如图3所示。弯道断面的水面形态取决于弯道纵向流速沿横向分布,由于水流经过掺气坎到跌落至底板的过程中,增加了水体与空气以及水体与水体之间的剪切摩擦,改变了水体原有的状态,使进入弯道的水体流场进行了重新分布,弯道纵向流速沿横向分布相对于未增设前置掺气坎时的流场发生了变化,强迫掺入的大量气体沿程外溢,使水流的紊动增强,改变了弯道区域原有流场,降低了流速分布的不均匀性,从而降低了弯道区域的横向超高。

由于监测断面取值存在离散性,因此本研究采用横向超高的平均降低值来反映前置掺气坎对弯道急流横向超高的整体改进程度。由图4可知,对 $R=150$ m的弯道而言,掺气坎对弯道横向超高的整体改进程度在100年一遇工况时最大为0.26 m,在1 000年一遇工况时次之为0.24 m,在5年一遇工况时最小为0.14 m;对 $R=500$ m的弯

道而言,掺气坎对弯道横向超高的整体改进程度在5年一遇工况时最大为0.12 m,在1 000年一遇工况时次之为0.11 m,在100年一遇工况时最小为0.09 m。每种工况下,掺气坎对 $R=150$ m的弯道的改进程度比对 $R=500$ m的弯道改进的程度要大。在同一掺气坎作用下,弯道半径越小,弯道横向超高整体改进效果越显著;掺气坎对同一弯道的横向超高改进效果还受流量的影响。

6 结 论

本研究运用数值模拟的方法,对不同半径的弯道急流在有无前置掺气坎条件下的横向超高进行了研究,得出了以下结论:

(1)在弯道前增设掺气坎可降低弯道急流的横向超高,并且对弯道急流横向超高的沿程波状分布规律基本无影响,此措施可为类似的工程提供改善弯道急流横向超高的经验;

(2)前置掺气坎对弯道急流横向超高的整体改进程度与弯道半径有关,半径越小,改进程度越显著,掺气坎对同一弯道横向超高的改进程度还受流量的影响。

参考文献:

- [1] 罗索夫斯基著,尹学良译. 弯道水流的研究[J]. 泥沙研究, 1958,3(1):83-95.
- [2] THOMSON J. On the origin and winding of rivers in alluvial plains [M]. Proc. Royal Society of London, 1876,25(3):83-88.
- [3] 刘焕芳. 弯道自由水面形态的研究[J]. 水利学报, 1990(4):46-50.
- [4] 王韦,许唯临,等. 弯道水沙运动理论及应用[M]. 成都:成都科技大学出版社,1994(7):27-50.
- [5] 王平义,蔡金德,等. 弯曲河道纵向垂线平均流速平面分布的研究[J]. 水动力学研究与进展, 1994(6):267-275.
- [6] 刁明军,杨海波,等. 弯道水力学研究现状与进展[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2007,33(3):597-599.
- [7] 杨玲霞,张银华,等. 改善弯道急流流态的实验研究[J]. 中国农村水利水电, 2006(7):77-79.
- [8] 惠爱璐,王飞虎,等. 大底坡急流弯道通气减蚀水力特性研究[J]. 西北水资源与水工程, 1997,8(2):55-59.
- [9] 吴宇峰,伍超,等. 斜槛在急流弯道控制超高的设计研究[J]. 水力发电学报, 2007,26(3):78-81.
- [10] 许光祥,童思陈,等. 弯道水面横比降沿程分布特性研究[J]. 水力发电学报, 2009,28(4):115-118.
- [11] 肖鸿,周赤,等. 掺气减蚀设施数值模拟研究探讨[J]. 长江科学院院报, 2014,31(10):115-119.
- [12] 罗永钦,刁明军,等. 高坝明流泄洪洞掺气减蚀三维数值模拟分析[J]. 水科学进展, 2012,23(1):111-115.

(下转第143页)

新中,要考虑是否适合本企业文化,是否能对提升本企业的文化发挥作用,用优秀的制度来保证文化建设的实施。

第三,行为文化的倡导。企业文化建? 设一个非常重要的方面,就是要落实到行动之中。我们常? 说,看一个人,不仅要听其言,而更要观其行。社会公众对一个企业的认识也是如此。因此在企业文化建设中,企业家要积极倡导优秀的行为文化,并且身体力行。行为文化的倡导可以分为两个层次:一是企业要有全新的管理行为,在自己的管理行为中处处体现出本企业的文化特点,体现出企业的文化品位;二是员工要有全新的工作行为,要用爱岗敬业、诚实守信的行为,来具体实践企业的文化,使社会公众通过企业员工的行为,更好地认识该企业的文化内涵。

第四,物质文化的构件。企业的物质形态,往往? 也反映出一个企业的文化特点。这种物质形态表现在整? 洁的厂容厂貌、现代化的工作设施和环境、具有先进理念的办公环境等等,在企业的“硬件”中反映出企业的文化追求,使员工处于良好的文化氛围之中。一个企业的文化? 形态,我们可以用从小到大的四个同心圆来表示。最小的? 一个圆圈我们把它叫做精神文化,稍大一点的圆圈是制度文化,再往外的一圈是行为文化,最外层的一圈称之为? 物质文化。每一个企业的文化建设都可以由内而外,从最? 核心的精神文化做起,直至最表层的物质文化,针对本企? 业的特点,通过具体而扎实的努力,一步一个脚印,必将? 能够把企业文化建设落到实处,抓出成效。

为什么中国许多“明星”企业很快成为“流星”企业? 为什么企业高层与中基层难以达成共识并存在沟通障碍? 为什么企业在组织变革与流程再造过程中员工感到迷惘、迟疑而不愿跟进,导

(上接第 114 页)

[13] 叶茂,伍平,等.泄洪洞掺气水流的数值模拟研究[J].水力发电学报,2014,33(4):106-108.

[14] 漆力健,廖华胜,等.低弗劳德数掺气坎空腔回水问题研究[J].水利学报,2007,38(7):819-825.

[15] 王福军.计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004:120-123.

[16] 吴持恭.水力学:下册(第四版)[M].北京:高等教育出版社,2008:311-324.

致变革成效不佳? 为什么企业文化理念与行为严重背离(文化虚脱)? 为什么中国企业的制度成本高(心理契约的天然缺陷)? 为什么企业分权? 分利就分心? 诸如这些问题都是企业没有建设优秀的企业文化造成的。之所以在过去有好多明星企业成为流星企业,就是因为那些企业没有对企业文化给予足够重视,没有建设属于自己企业的优秀的企业文化。他们在短短的几年内,可能效益还不错,但是,最终会在激烈的竞争? 中处于劣势而昙花一现。

在知识经济时代,如果用企业文化对员工进行管理会极大地提高员工的积极性。在有优秀企业文化的企业里,企业高层与中层、基层之间的沟通是很顺畅的。由于企业文化是企业员工共同认可的一套价值体系,并且在建设过程中员工都曾参与,因此对员工都有普遍的、很强的引导、约束作用,不会造成员工感到迷惘、迟疑而不愿跟进的情况。另外,也不会出现文化虚脱的现象。由于企? 业文化的凝聚力量,企业也不会出现分权分利就分心的现象。

6 结 语

综上所述,有些物质资源也许会枯竭,惟有文化生生不息。企业? 文化是一种无形的生产力,一种潜在的生产力,一种无形的资产和财富。企业文化会极大地促进企业的发展,所以,只要做到企业和企业文化的互相协调,互相补充,互相促进,使两者同步运行,建设出一套优秀的企业文化来,一定会对企业的长远发展起到积极的、不可估量的作用。

作者简介:
喻欣(1962-),男,重庆长寿人,毕业中央党校成都分部企业经济管理专业,项目经理,从事物业行政管理工作。

(责任编辑:卓政昌)

作者简介:
汪厚松(1991-),男,湖北孝感人,硕士研究生,主要研究水利工程;
刁明军(1968-),男,四川简阳人,教授,博士生导师,主要研究工程水力学;
蒋雷(1990-),男,四川中江人,博士研究生,主要研究高速水力学;
王军(1992-),男,湖北恩施人,硕士研究生,主要研究水利工程;
官夏菲(1994-),女,福建三明人,硕士研究生,主要研究工程水力学;
任昱(1994-),男,河南南阳人,硕士研究生,主要研究工程水力学。

(责任编辑:卓政昌)