

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.05.041

大口径有压玻璃钢管当量粗糙度取值

常 胜^{1,2}, 牧振伟¹, 万连宾³

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利水电勘测设计研究院, 乌鲁木齐 830000;
3. 额尔齐斯河流域开发工程建设管理局, 乌鲁木齐 830000)

摘要: 针对大口径有压玻璃钢管当量粗糙度取值问题, 采用计算分析方法, 判别不同工况下大口径玻璃钢管道管内水流流态, 验证了当量粗糙度对其水力计算的重要性; 在此基础上, 以新疆小洼槽倒虹吸管道为例, 利用齐恩公式、哈兰德公式, 计算不同当量粗糙度取值情况下各工况的水头损失值, 将计算结果与实测数据作比较分析和误差分析, 结果表明, 大口径有压玻璃钢管在一般工况下管内水流流态基本处于紊流过渡区, 大口径有压玻璃钢管当量粗糙度取值范围宜为 0.005~0.01 mm。

关键词: 大口径; 玻璃钢管; 当量粗糙度; 流态判别; 齐恩公式; 哈兰德公式

中图分类号: TV131.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)05-1016-05

Value analysis for equivalent roughness of pressure FRP pipe with large diameter

CHANG Sheng^{1,2}, MU Zhenwei¹, WAN Lianbin³

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;
2. Xinjiang Survey and Design Institute of Water Resources and Hydropower, Urumqi 830000, China;
3. Xinjiang Irtysh River Basin Development Project Construction and Management Bureau, Urumqi 830000, China)

Abstract: In terms of the value problem for the equivalent roughness of pressure FRP pipe with large diameter, the water flow regimes of FRP pipe under different working conditions were analyzed using the calculation method, which verified the importance of equivalent roughness to hydraulic calculations. On the basis, JiEn formula and Haaland formula were used to calculate the head loss of small trough inverted siphon with different equivalent roughness values under each working condition. The calculation results were compared with the measured data, which suggested that the flow regime in the pressure FRP pipe with large diameter is usually in the turbulent transition zone, and the equivalent roughness is about 0.005 to 0.01 mm for the pressure FRP pipe with large diameter.

Key words: large diameter; FRP pipe; equivalent roughness; flow regime identification; JiEn formula; Haaland formula

近十几年里, 玻璃钢管作为一种新型管材, 凭借质量轻、耐腐蚀、抗压性能高、水力特性好等诸多优势在管道领域异军突起, 现已被广泛地运用到国内外输水工程中, 其中规模较大的有新疆小洼槽倒虹吸工程、香港供水工程、石家庄引水改善环境工程、沙特 YANBU 工业城、黎巴嫩 YASYIKOS 等。在工程实践中, 许多工程师以及学者们针对玻璃钢管的材质、抗压性能、施工技术等相关特性及方法作了大量研究和改进, 却鲜有关于玻璃钢管水力特性问题的研究。

当量粗糙度作为管道工程设计中重要的水力参数, 取值大小直接影响着工程规模和效益, 尤其对于大型输配水工程, 在工程设计中对水头损失精度要求相当严格。若当量粗糙度

取值偏小, 工程将无法达到设计过流能力; 若取值偏大, 将会增加工程投资。因此, 确定合理的当量粗糙度取值至关重要。

本文以国内最大规模玻璃钢倒虹吸工程—新疆小洼槽倒虹吸为研究对象, 针对大口径有压玻璃钢管当量粗糙度取值问题进行了研究, 以便为后续同类管材工程设计提供借鉴。

1 大口径玻璃钢管水流特性分析

1.1 管道水流流态判别

在国内管道水力设计中, 通常选取糙率和谢才公式计算沿程阻力系数; 国际上, 以法国规范为例, 一般选用管道当量粗糙度和柯尔布鲁克公式^[1]。

收稿日期: 2014-12-08 修回日期: 2015-08-15 网络出版时间: 2015-09-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20150924.2102.024.html>

基金项目: 新疆高等学校科研计划重点项目资助(XJEDU2011119); 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2012211A059)

作者简介: 常 胜(1990), 男, 河南南阳人, 主要从事工程水力学方面研究。E-mail: xjchangs@163.com

通讯作者: 牧振伟(1973), 男(回族), 河南南阳人, 教授, 主要从事水力学及河流动力学方面研究。E-mail: xjmzw@163.com

谢才公式

$$\lambda = \frac{8g}{C^2} = \frac{8gn^2}{R^{1/3}} \quad (1)$$

柯尔布鲁克公式

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.1 \lg \left[\frac{k}{3.71d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} \right] \quad (2)$$

式中： λ 为沿程阻力系数； n 为管道糙率； R 为水力半径(m)； k 为管道当量粗糙度(mm)； d 为管径(mm)； Re 为雷诺数。

谢才公式简单便于计算，但前提是必须保证管道水流流态处于紊流粗糙区；而柯尔布鲁克公式范围更加宽泛，适用于整个紊流区，但计算相对繁杂。

实际管道水流基本处于紊流区域，最为常见的流态是紊流粗糙区和紊流过渡区。由于国内常见的输水管道为混凝土管和钢管，这两种管道如果未加特殊处理(涂层等)，其管道水流往往处于紊流粗糙区，这也是谢才公式在国内广泛运用的主要原因。但是玻璃钢管作为新型管材，内壁光滑，水流流态并非传统认为的紊流粗糙区。判别流态最常用的方法，根据雷诺数 Re 和相对粗糙度(k/D)，查寻莫迪图，确定流区。故本文计算了管径 $D=1\sim 4$ m不同流量($Q=5\sim 20$ m³/s)下的雷诺数 Re 和相对粗糙度(k/D)，并依次判断水流流态，现将部分结果汇总于表1。由于玻璃钢管当量粗糙度经验值为0.01 mm，考虑该值存在变化范围，因此本文初步

将当量粗糙度取值范围定为0.005~0.05 mm，表1中当量粗糙度取值 $k_1=0.005$ mm， $k_2=0.05$ mm。若雷诺数 Re 一定，管道相对粗糙度为 k_1/D 和 k_2/D 时，水流流态同时满足紊流过渡区，那么 $k/D(k_1 \leq k \leq k_2)$ 时，水流流态一定处于紊流过渡区。

表1中， D_j ($j=1, 2, 3, 4$)表示玻璃钢管不同管径 $D_1=1$ m、 $D_2=2$ m、 $D_3=3$ m、 $D_4=4$ m， Re_j 表示管径 D_j 对应的雷诺数。以管径 $D_1=1$ m，相对粗糙度 $k_1/D_1=5.0 \times 10^{-6}$ 和 $k_2/D_1=5.0 \times 10^{-5}$ 为例；流量 Q 为5~20 m³/s时，管道水流雷诺数 Re_j 在 $4.8 \times 10^6 \sim 2.0 \times 10^7$ 范围内。根据莫迪图查得，当 $k_1/D_1=5.0 \times 10^{-6}$ ， k_2/D_1 为 5.0×10^{-5} 时，雷诺数 Re 分别在 $1.2 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^8$ 和 $4.5 \times 10^5 \sim 3.7 \times 10^7$ 该区间范围内，水流流态为紊流过渡区。由此判断，管径 $D_1=1$ m内的水流在一般工况下属于紊流过渡区。通过表1，可以得到 k_i/D_j ($j=2, 3, 4$)一般工况下对应的雷诺数 Re_j ($j=2, 3, 4$)范围为： $2.4 \times 10^6 \sim 9.5 \times 10^6$ ， $2.2 \times 10^6 \sim 8.70 \times 10^6$ ， $1.2 \times 10^6 \sim 5.0 \times 10^6$ 。根据莫迪图，判别得出管径 $D=1\sim 4$ m的水流流态在一般工况下处于紊流过渡区。这也同时说明了糙率和谢才公式不适用于大口径有压玻璃钢管水力计算。

表1 大口径有压玻璃钢管水力要素计算

Tab. 1 Calculation analysis of the hydraulic factors of pressure FRP with large diameter

$Q/$ (m ³ ·s ⁻¹)	k_1/D_1 /10 ⁻⁶	k_1/D_2 /10 ⁻⁶	k_1/D_3 /10 ⁻⁶	k_1/D_4 /10 ⁻⁶	k_2/D_1 /10 ⁻⁵	k_2/D_2 /10 ⁻⁵	k_2/D_3 /10 ⁻⁵	k_2/D_4 /10 ⁻⁵	Re_1	Re_2	Re_3	Re_4
5.000	5.000	2.500	1.667	1.250	5.000	2.500	1.667	1.250	4 877 050	2 438 525	2 167 578	1 219 262
7.000	5.000	2.500	1.667	1.250	5.000	2.500	1.667	1.250	6 827 869	3 413 935	3 034 609	1 706 967
10.000	5.000	2.500	1.667	1.250	5.000	2.500	1.667	1.250	9 754 099	4 877 050	4 335 155	2 438 525
12.000	5.000	2.500	1.667	1.250	5.000	2.500	1.667	1.250	11 704 919	5 852 459	5 202 186	2 926 230
15.000	5.000	2.500	1.667	1.250	5.000	2.500	1.667	1.250	14 631 149	7 315 574	6 502 733	3 657 787
20.000	5.000	2.500	1.667	1.250	5.000	2.500	1.667	1.250	19 508 198	9 754 099	8 670 310	4 877 050

1.2 管道水力计算公式介绍

管道水流处于紊流过渡区时，沿程水头损失系数的计算公式包括柯尔布鲁克公式、阿尔特舒尔公式、齐恩公式、哈兰德公式等。

阿尔特舒尔公式

$$\lambda = 0.11 \left[\frac{k}{d} + \frac{68}{Re} \right]^{0.25} \quad (3)$$

齐恩公式

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.14 - 2 \lg \left[\frac{k}{d} + \frac{21.25}{Re^{0.9}} \right] \quad (4)$$

哈兰德公式

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1.8 \lg \left[\left(\frac{k}{3.7d} \right)^{1.11} + \frac{6.8}{Re} \right] \quad (5)$$

式中： λ 为沿程阻力系数； k 为管道当量粗糙度(mm)； d 为管径(mm)； Re 为雷诺数。

阿尔特舒尔公式是由前苏联学者阿尔特舒尔于1950年提出，由于历史原因，该式很长一段时间流行于国内石油储运界。部分水利学者在当量粗糙度研究中借鉴该式，例如田世场等所著的《预应力钢筋混凝土管输水阻力测试分析》^[2]

中，正是利用阿尔特舒尔公式计算确定PCCP管道当量粗糙度。但该公式具有一定适用范围，蒲家宁等所著的《阿尔特舒尔摩阻因数公式应割爱停用》^[3]中，指出该式只适用于直径小、内壁粗糙的管道。

齐恩公式为柯尔布鲁克公式的简化式，适用范围为 $10^{-6} \leq k/D \leq 0.01$ ， $5000 \leq Re \leq 10^{8/4}$ 。

哈兰德公式由柯尔布鲁克光滑管公式和尼古拉兹粗糙管公式组合而成^[3]。在蒲家宁所著的《紊流混掺区十一个显式摩阻公式的比较》^[5]中，表明哈兰德公式在计算紊流过渡区沿程阻力系数精度和速度两方面具有明显优势。

2 大口径玻璃钢管当量粗糙度计算

2.1 研究方法介绍

目前，国内关于管道当量粗糙度研究方法，大致分为两种：第一种方法，通过水力学管道试验，测量不同工况下流量、水头差等数据，并利用相应公式计算出管道的当量粗糙度，这种方法以天津大学和天津市水利局在天津市东丽区新地河泵站进行的PCCP-E输水阻力测试为代表；第二种，采用表面形貌仪等仪器设备测量管道绝对粗糙度，再根据绝对

粗糙度与当量粗糙度之间转化关系,最终确定当量粗糙度取值范围,这种方法以郑双凌等人《预应力钢筋混凝土管(PG-CP)的阻力系数与粗糙度研究》^[6]为代表。由于受实验条件制约,第一种方法适用于直径小、内壁较粗糙的管道,对于大口径玻璃钢管并不适用。而第二种方法的关键问题是能否保证绝对粗糙度与当量粗糙度转化关系的合理性及准确性。

在比较上述两种方法优劣的基础上,又考虑到玻璃钢管内壁光滑,短距离管道试验水头损失小,导致误差相对较高;再者实验室内场地、供水设备等条件无法满足大口径玻璃钢管水力实验。所以,本文通过对小洼槽倒虹吸工程原型观测,获取多组工况数据,并采用不同当量粗糙度(k 取值范围为 0.005~0.050 mm)计算的方法,确定大口径玻璃钢管当量粗糙度 k 的取值范围,具体做法如下。

(1) 针对每一个 k 值,利用齐恩公式、哈兰德公式确定不同流量情况下相应的沿程阻力系数,再结合达西威斯巴赫公式,计算得到沿程水头损失值;沿程水头损失与局部水头损失之和,即总水头损失值为

$$H = h_f + h_j \quad (7)$$

其中,局部水头损失为

$$h_j = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (8)$$

式中: H 为总水头损失值(m); h_f 为沿程水头损失(m); h_j 为局部水头损失(m); ζ 为局部阻力系数; v 为水流流速(m/s)。

(2) 将试算结果与实测数据,按照下式作误差:

$$e = \frac{H_{\text{试算}} - H_{\text{实测}}}{H_{\text{实测}}} \times 100\% \quad (9)$$

式中: e 为总水头损失试算值与实测水头损失值之间误差(%); $H_{\text{试算}}$, $H_{\text{实测}}$ 分别为总水头损失试算值(m),实测水头损失值(m)。

(3) 根据(1)中计算水头损失值与实测水头损失值作比较分析。

(4) 根据(2)中计算水头损失值与实测水头损失值作误差分析。

(5) 在(3)、(4)的基础上,得到当量粗糙度的取值范围。

2.2 比较分析与误差分析

表 2 是按照(1)、(2)步骤计算的小洼槽倒虹吸当量粗糙度 $k=0.05$ mm 时的部分工况计算结果及实测数据。 Q 为流量; λ_i ($i=1,2$) 为沿程水头损失系数; h_{f_i} ($i=1,2$) 为沿程水头损失值; h_j 为局部水头损失值; H_i ($i=1,2$) 为总水头损失试算值; $H_{\text{实测}}$ 为总水头损失实测值; e_i ($i=1,2$) 为试算水头损失与实测水头损失值之间的误差; $i=1,2$ 分别代表齐恩公式、哈兰德公式。表 2 中 $Q=8.000$ m^3/s 时,齐恩公式和哈兰德公式计算结果与实测数据误差分别 1.554% 和 0.503%;但 $Q=17.260$ m^3/s 时,两者与实测值误差可以达到 11.747% 和 10.613%,这说明 $k=0.05$ mm 时,各工况条件下的计算结果波动较大。

表 2 新疆小洼槽倒虹吸当量粗糙度试算分析($k=0.05$ mm)

Tab. 2 Calculation analysis of the equivalent roughness of the small trough inverted siphon in Xinjiang ($k=0.05$ mm)

$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	Re	k/mm	λ_1	λ_2	h_{f1}/m	h_{f2}/m	h_j/m	H_1/m	H_2/m	$H_{\text{实测}}/\text{m}$	$e_1(\%)$	$e_2(\%)$
5.960	1 875 304	0.05	0.011	0.011	0.605	0.598	0.109	0.714	0.707	0.731	-2.265	-3.247
8.000	2 517 187	0.05	0.011	0.011	1.053	1.041	0.197	1.250	1.237	1.231	1.554	0.503
11.000	3 461 132	0.05	0.010	0.010	1.925	1.901	0.372	2.297	2.273	2.091	9.864	8.715
14.000	4 405 077	0.05	0.010	0.010	3.048	3.010	0.602	3.650	3.612	3.341	9.252	8.120
15.550	4 892 782	0.05	0.010	0.010	3.725	3.679	0.743	4.468	4.422	4.291	4.129	3.059
17.260	5 430 831	0.02	0.010	0.010	4.549	4.493	0.916	5.464	5.409	4.890	11.747	10.613

由于表 2 只是一个当量粗糙度($k=0.05$ mm)取值情况下的部分工况计算结果;当量粗糙度取值在 0.005~0.05 mm 之间,而每一个当量粗糙度对应应有 18 组工况需要进行计算,数据相当繁杂,不便于分析。因此,本文选取 $k=0.005$ mm, $k=0.01$ mm, $k=0.02$ mm, $k=0.03$ mm, $k=0.04$ mm, $k=0.05$ mm 五个典型当量粗糙度,每个当量粗糙度对应应有 18 组工况的计算结果,作出图 1、图 2。

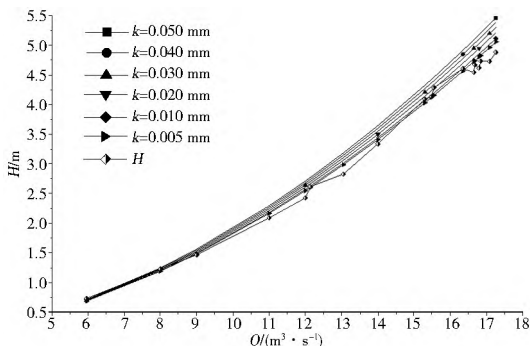


图 1 试算结果(齐恩公式)与实测数据比较

Fig. 1 Comparison of calculated results (JiEn formula) and measured data

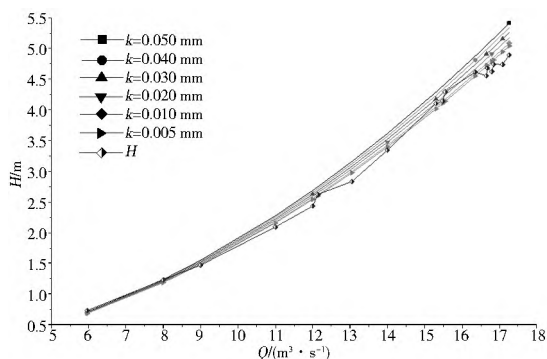


图 2 试算结果(哈兰德公式)与实测数据比较

Fig. 2 Comparison of calculated results (Haaland formula) and measured data

从图 1、图 2 可以看出,实测数据线大致趋势与各 k 值对应的水头损失线相近,只是在 $12 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 14 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $15 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 16 \text{ m}^3/\text{s}$ 部分流量段,出现极值。这是由于小洼槽地处新疆北部,常年多风,而小洼槽倒虹吸上下游水位是由布设在进、出口段的超声波水位仪测定,存在风浪造成的测量误差。文章已通过选取不同时期和工况下的多组数据

力图减小误差。此外,考虑到大口径管道过流能力要求较高,故在选取的18组数据中,77.8%的工况流量大于 $12\ 000\text{ m}^3/\text{s}$,55.56%的工况流量超过 $15\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 。

在 $Q \leq 9\text{ m}^3/\text{s}$ 流量段内,各 k 值对应的水头损失值与实测值相近,差值很小;随着流量增大,各 k 值对应的水头损失值与实测数据之间差值逐渐增大。图1、图2中, $k=0.005\text{ mm}$ 和 $k=0.010\text{ mm}$ 对应的两条 $Q \sim H$ 曲线最为接近实测值线。所以初步判断,大口径玻璃钢管当量粗糙度取值范围为 $k=0.005 \sim 0.010\text{ mm}$ 。

在图1、图2的分析基础上,齐恩公式、哈兰德公式试算结果与实测数据进行了误差分析,见图3、图4。从图中可以发现,虽然 $k=0.05\text{ mm}$ 在 $Q=6\text{ m}^3/\text{s}$ 时,误差仅为-2%,但在 $Q=16.5 \sim 17.5\text{ m}^3/\text{s}$ 时,误差高达13%。对于大口径有压玻璃钢管更关注的是不利情况下水头损失值,通常也就是大流量情况下水头损失值。而 $k=0.005\text{ mm}$ 和 $k=0.010\text{ mm}$ 所对应的误差在 $Q=6 \sim 18\text{ m}^3/\text{s}$ 范围内始终控制在6%范围内。因此,建议大口径玻璃钢管当量粗糙度取值范围为 $k=0.005 \sim 0.010\text{ mm}$ 。

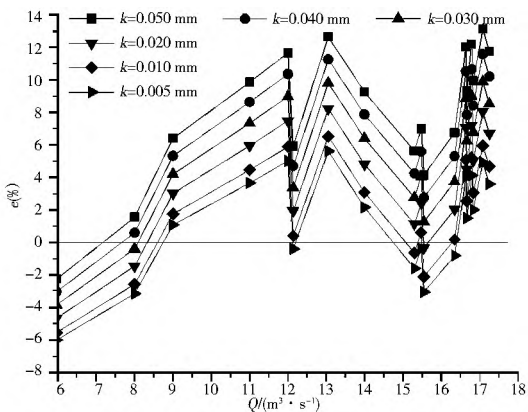


图3 试算结果(齐恩公式)与实测数据误差分析

Fig. 3 Error analysis of calculated results (JiEn formula) and measured data

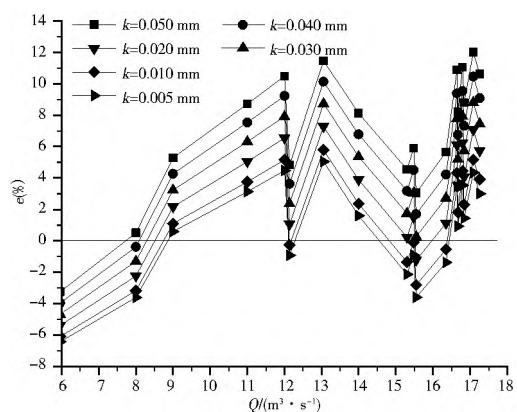


图4 试算结果(哈兰德公式)与实测数据误差分析

Fig. 4 Error analysis of calculated results (Haaland formula) and measured data

3 结论

通过对大口径有压玻璃钢管($D=1 \sim 4\text{ m}$)不同流量下水流流态判别以及对小洼槽倒虹吸不同当量粗糙度 k 值一般工况条件下计算分析和误差分析,得到以下结论。

(1)大口径有压玻璃钢管($D=1 \sim 4\text{ m}$)在一般工况条件下,管内水流流态基本处于紊流过渡区。

(2)建议大口径有压玻璃钢管当量粗糙度取值范围为 $k=0.005 \sim 0.010\text{ mm}$ 。

参考文献(References):

- [1] 李长辉, 缪晶广. 阿尔及利亚供水管线项目设计体会[J]. 有色冶金设计与研究, 2011(3): 39-42. (LI Chang hui, MIAO Jing guang. Design experience of Algeria water supply pipeline project[J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2011(3): 39-42. (in Chinese))
- [2] 田世场, 彭新民, 李东丽, 等. 预应力钢筋混凝土管输水阻力测试分析[J]. 水利水电技术, 2005, 36(10): 77-80. (TIAN Shi yang, PENG Xi r ming, LI Dong li, et al. Analysis on test of water conveyance resistance for prestressed concrete cylinder pipe [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(10): 77-80. (in Chinese))
- [3] 蒲家宁, 陈明. 阿尔特舒尔摩阻因数公式应割爱停用[J]. 后勤工程学院学报, 2006(3): 13-15. (PU Jia ning, CHEN Ming. Altshul friction factor formula should be discarded[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2006(3): 13-15. (in Chinese))
- [4] 吕宏兴, 裴国霞, 杨玲霞. 水力学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010. (LYU Hong xing, PEI Guo xia, YANG Ling xia. Hydraulics [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010. (in Chinese))
- [5] 蒲家宁. 紊流混摩区十一个显式摩阻公式的比较[J]. 油气储运, 1987, 6(2): 13-16+5. (PU Jia ning, A Comparison of the 11 Formulas for Turbulent Multi Friction Area[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1987, 6(2): 13-16+5. (in Chinese))
- [6] 郑双凌, 马吉明, 南春子, 等. 预应力钢管混凝土管(PCCP)的阻力系数与粗糙度研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(3): 126-130. (ZHENG Shuang ling, MA Ji ming, NAN Chun zi, et al. Study on drag coefficient and roughness of prestressed concrete cylinder pipe[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(3): 126-130. (in Chinese))
- [7] 常胜, 牧振伟, 万连宾. 玻璃钢管沿程水头损失计算公式选用[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(5): 196-198. (CHANG Sheng, MU Zhen wei, WAN Lian bin. Exploration on formula selection of friction head loss of FRP Pipe[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(5): 196-198. (in Chinese))
- [7] 常胜, 牧振伟, 万连宾. 大口径有压玻璃钢管水力计算公式分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(10): 159-161. (CHANG Sheng, MU Zhen wei, WAN Lian bin. Hydraulic calculation formula analysis for large diameter pressure FRP[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(10): 159-161. (in Chinese))
- [9] 李娟, 牧振伟, 何照青, 等. 小洼槽长距离倒虹吸水头损失的数值计算[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(5): 70-73. (LI Juan, MU Zhen wei, HE Zhao qing, et al. Numerical simulation of head loss of small trough and long distance inverted siphon [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(5): 70-73. (in Chinese))
- [10] 刘进, 王东黎, 杨进新. 南水北调中线PCCP管道的摩阻损失计算分析[J]. 南水北调与水利科技, 2008(2): 231-234. (LIU Jin, WANG Dong li, YANG Jin xin. Friction loss for the PC-

- CP pipe of the South to North Water Transfer (Middle Route) Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008(2): 231-234. (in Chinese))
- [11] 李东丽, 田世场, 王松庆. PCCP 输水阻力测试及防腐减阻关键技术研究[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(1): 159-162. (LI Dongli, TIAN Shiyang, WANG Songqing. Water conveyance resistance for PCCP and key technology for anticorrosive materials to decrease the resistance[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(1): 159-162. (in Chinese))
- [12] 邱秀云. 水力学[M]. 乌鲁木齐: 新疆电子出版社, 2008. (QIU Xiuyun. Hydraulics[M]. Urumqi: Xinjiang Electronic Press, 2008. (in Chinese))
- [13] 赵昕, 张晓元, 赵明登, 等. 水力学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009. (ZHAO Xin, ZHANG Xiaoyuan, ZHAO Mingdeng, et al. Hydraulics[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009. (in Chinese))
- [14] 李炜. 水力计算手册[M]. 第 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (LI Wei. Handbook of Hydraulic Calculations[M]. The Second Edition. Beijing: China WaterPower Press, 2006. (in Chinese))
- [15] 石泉, 张立德, 李红伟. 大型倒虹吸工程设计与施工[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (SHI Quan, ZHANG Lide, LI Hongwei. Design and Construction of the Large Inverted Siphon[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2007. (in Chinese))
- (上接第 999 页)
- [4] 张翼飞, 陈红敏, 李瑾. 应用意愿价值评估法, 科学制订生态补偿标准[J]. 生态经济, 2007, (9): 28-31. (ZHANG Yifei, CHEN Hongmin, LI Jin. Applying the the CVM to make the standard of ecological compensation reasonable[J]. Ecological Ecology, 2007, (9): 28-31. (in Chinese))
- [5] 段靖, 严岩, 王丹寅, 等. 流域生态补偿标准中成本核算的原理分析和方法改进[J]. 生态学报, 2010, 30(1): 221-227. (DUAN Jing, YAN Yan, WANG Danyin, et al. Principle analysis and method improvement on cost calculation in watershed ecological compensation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(1): 221-227. (in Chinese))
- [6] 程艳军. 中国流域生态服务补偿模式研究以浙江省金华江流域为例[D]. 中国农业科学院, 2006. (CHEN Yanjun. Research the Model of Drainage Basin Ecological Compensation Service in China, Jin Huajiang Watershed in Zhejiang Province as an example. Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2006. (in Chinese))
- [7] 江中文. 南水北调中线工程汉江流域水源保护区生态补偿标准与机制研究[D]. 西安建筑科技大学, 2008. (JIANG Zhongwen. Study on Ecological Compensation Standard and Mechanism of South to North Water Diversion in Hanjiang River Water Resource Basin [D]. Xi'an University of Architecture & Technology, 2008. (in Chinese))
- [8] 禹雪中, 李锦秀, 骆辉煌, 吴金萍. 河流水污染损失补偿模型研究[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 58-61. (YU Xuezhong, LI Jinxu, LUO Huifang, et al. Theoretical model for water pollution compensation in rivers in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, 16(1): 58-61. (in Chinese))
- [9] 赵来军. 我国湖泊流域跨行政区水环境协同管理研究—以太湖流域为例[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2009. (ZHAO Laijun. Research the harmonizing management model of lake basin in China, Taihu Lake as an example[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2009. (in Chinese))
- [10] 靳乐山, 甄鸣涛. 流域生态补偿的国际比较[J]. 农业现代化研究, 2008, 29(2): 186-188. (JING Leshan, ZHENG Mingtao. International comparison of river basin ecological compensation[J]. Research of Agricultural Modernization, 2008, 29(2): 186-188. (in Chinese))
- [11] 曹东, 王金南. 中国工业污染经济学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999. (CAO Dong, WANG Jingnan. Economics of Industrial Pollution in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1999. (in Chinese))
- [12] 赵来军. 湖泊流域跨界水污染转移税协调模型[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(2): 365-369. (ZHAO Laijun. Harmonizing model with transfer tax on the transboundary pollution of lake basin[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2011, 31(2): 365-369. (in Chinese))
- [13] 赵来军, 李旭, 朱道立, 等. 流域跨界污染纠纷排污权交易调控模型研究[J]. 系统工程学报, 2005, 20(4): 399-403. (ZHAO Laijun, LI Xu, ZHU Dao-li, et al. Study of regulating model with emissions trading on transboundary pollution dispute of river basin[J]. Journal of Systems Engineering, 2005, 20(4): 399-403. (in Chinese))
- [14] Weber M L. Market for water rights under environmental constraints[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2001, 42: 53-64.
- [15] Spulber N, Sabbaghi A. Economics of Water Resources: From Regulation to Privatization[M]. Kluwer Academic Publishers, 1994.