

引用格式:张 玮,柴跃跃. 基于最小能耗原理的明渠水力最佳断面数值研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(21): 294—299
Zhang Wei, Chai Yueyue. Numerical investigation on optimum section based on the principle of minimum energy consumption[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(21): 294—299

水利工程

基于最小能耗原理的明渠水力最佳断面数值研究

张 玮 柴跃跃

(河海大学港口海岸与近海工程学院,南京 210098)

摘 要 最佳水力断面推求是一个十分有意义的理论问题。基于最小能耗原理,采用三个最具代表性的表达式,分别推求了梯形断面渠道的最优宽深比,并就边壁与河底糙率不同时的最优断面进行了探讨。结果表明:利用最小能耗原理,可以推求梯形断面的最优宽深比,而且根据三种表达式所得结果是相同的;对于梯形断面渠道,当河岸糙率与河底糙率比值增加时,最优宽深比将有所增大;当边坡系数增加时,最优宽深比也将有所增大;在河岸缺少约束的条件下,河流具有向宽浅发展的内在属性。

关键词 梯形断面渠道 最小能耗原理 最优宽深比 边坡系数 糙率系数

中图法分类号 TV133; **文献标志码** A

在长期的水利工程实践中,对于河道最佳断面形态的研究,如最佳宽深比等,是一个十分有意义的理论问题,历来为人们所关注。

迄今为止,国内外学者对于明渠水力最佳断面已做过许多研究,例如,水力学教材^[1]中将水力最佳断面定义为过水断面一定,湿周最小时,过水能力最大的断面,并根据这一定义推求梯形断面的最优宽深比。美国垦务局^[2]根据河床边界切应力处处等于床沙临界起动切应力的不冲不淤渠道这一定义,提出了余弦型曲线表示稳定渠道断面形状。张志昌等^[3]根据明渠均匀流理论,利用水力学教材中的水力最佳断面基本定义,研究了抛物线型渠道水力最佳断面水深与抛物线参数之间的关系。黄雪莲^[4]在底坡、糙率、过水断面面积一定的前提下,根据水力最佳断面的基本定义,通过水力最佳断面的湿周对水深求极值来推求梯形水力最佳断面的宽深比。辛英华等^[5]同样根据水力学教材中的水力最佳断面的基本定义,研究了U形渠道的水力最佳断面。黄才安等^[6]根据最小能耗原理,利用最小河流功推求梯形断面的最优宽深比及明渠复式断面的综合糙率。不难看出,在以

往的研究中,均假定过水断面中各处糙率是相同的;至于糙率不同的渠道尚未涉及,此外,在应用最小能耗原理研究水力最佳断面时,文献[6]也仅仅利用了最小河流功理论,而实际上最小能耗原理有不同的表达形式,目前学者广泛认可的主要有:最小比降、最小河流功和最小单位能耗率三种,这些公式在应用时所得结果是否一致,也是大家关心的问题。

本文在前人研究的基础上,以最小能耗原理为基础,根据最小能耗原理的三个表达式,对梯形断面渠道最优宽深比开展研究,并就河岸糙率与河底糙率不同时的最优宽深比进行探讨,研究成果具有一定的理论价值。

1 最小能耗原理

国内外学者^[7]认为,冲积河流自动调整作用的结果,不仅在于平衡的要求;而且还要使体系内部的能量趋向于按照一定的规律来进行分配;并运用不同的极值理论和假设来解决流体力学、水力学及河流动力学问题。有关这方面的文献较多,包括最大输沙率、最小能量、最大阻力系数、最小能耗率等,其中“最小能耗原理”是众多学者普遍接受、认可的一种假说。目前对于最小能耗原理的基本概念较为统一,即:具有稳定河床边界的河流系统,在一定的来水、来沙条件下,当河流处

2018年2月2日收到 国家重点研发计划(2016YFC0402100)资助
第一作者简介:张 玮(1958—),男,汉族,山东青岛人,教授,博士研究生导师。研究方向:港口航道工程。E-mail:zhangweihhu@sina.com。

于平衡状态时,其水流能耗率为最小;当改变其河床边界条件或来水、来沙条件时,能耗率就不为最小值;但河流会自动地进行调节,使自身达到与河床边界和来水来沙条件相适应的平衡状态,从而使能耗率恢复为最小值;但河流调整前后的水流能耗率最小值并不一定相同,因为能耗率最小值与其对应的河床边界条件和来水来沙条件是相适应的。

能耗率最小值的表达式有多种,最具代表性的主要有:最小比降 ($S = \min$)^[8]、最小河流功 ($\gamma QS = \min$)^[8]、最小单位能耗率 ($\gamma US = \min$)^[9]等。有一部分学者认为在一定的来水、来沙条件下,河流将通过增加河长,减小比降的方式来达到能耗最小,此时最小能耗原理数学表达式为 $S = \min$ 。

徐国宾等^[10]首先阐明最小熵产生原理等价于最小能耗原理,即在非平衡线性区,一个开放系统内的不可逆过程总是向熵产生或能耗率减小的方向进行。当熵产生或能耗率减小至最小值时,系统的状态不再随时间变化。然后基于最小熵产生原理,利用流体力学的基本方程,即连续方程、运动方程和能量方程以及热力学的吉布斯公式,推导出了最小能耗原理数学表达式为 $\gamma QS = \min$ 。

文献[9,11]为了证明最小能耗原理存在于河流系统中,从不可压缩流体的纳维埃-斯托克斯运动方程导出的雷诺紊流平均运动出发,详细进行了推导,结果表明在所有满足连续方程和给定边界条件的流速分布中,只有使能耗率取最小值得那个流速分布才能满足运动方程。然后其又通过对所研究的水流区域的能量耗散函数求体积分,推导出了水流能耗率的数学表达式为 $\gamma US = \min$ 。

2 梯形最佳断面推求

当渠道的底坡和床面糙率系数一定时,对于给定的设计流量和断面面积、湿周或者所需的材料最小的断面被称为水力最佳断面。为了不失一般性,将分别以最小比降 ($S = \min$)、最小河流功 ($\gamma QS = \min$)、最小单位能耗率 ($\gamma US = \min$) 这三个代表性的表达式为基础,首先推求各部分糙率相同时梯形渠道水力最佳断面的宽深比,在此基础上,再针对各部分糙率不同时的最佳宽深比进行探讨。

2.1 最小比降 ($S = \min$)

河道一般会逐渐弯曲,通过加长河道、减小比降的方式来达到能耗最小,当比降达到最小值,即 $S = \min$ 时,河道将处于稳定状态。河道梯形过水断面形态示意图如图 1 所示。

一维水流的连续性方程可表达为

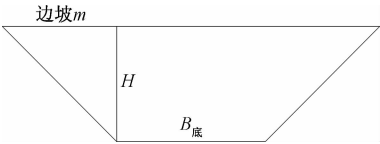


图 1 河道梯形过水断面形态示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the channel trapezoidal overwater section

$$Q = AU \tag{1}$$

式(1)中, Q 为流量, m^3/s ; U 为断面的平均流速, m/s ; A 为过水断面面积, m^2 。

天然冲积河流中,一般用 Manning 公式来量化河床边界对水流的阻力:

$$U = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

式(2)中, R 为河流过水断面的水力半径, m ; S 为能坡或水力坡度; n 为糙率系数。

假设单一顺直河道由均匀泥沙组成,断面形态为梯形,边坡系数为 m ,则有以下关系式:

$$A = (B_{\text{底}} + mH)H \tag{3}$$

$$R = \frac{(B_{\text{底}} + mH)H}{B_{\text{底}} + 2H \sqrt{1 + m^2}} \tag{4}$$

式中, $B_{\text{底}}$ 为河道底宽, m ; H 为断面水深, m 。

由式(1)~式(4)得:

$$S = \frac{n^2 Q^2}{A^{\frac{10}{3}}} (B_{\text{底}} + 2H \sqrt{1 + m^2})^{\frac{4}{3}} \tag{5}$$

对式(5)改写可得:

$$S = \frac{n^2 Q^2}{A^{\frac{10}{3}}} \left(\frac{A}{H} - mH + 2H \sqrt{1 + m^2} \right)^{\frac{4}{3}} \tag{6}$$

对于给定的流量 Q ,在面积 A 一定的情况下,根据最小能耗原理,水力坡度 S 对断面水深求极值,即

$$\frac{dS}{dH} = 0, \text{ 得:}$$

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dH} &= \frac{4n^2 Q^2}{3A^{\frac{10}{3}}} \left(\frac{A}{H} - mH + 2H \sqrt{1 + m^2} \right)^{\frac{1}{3}} \times \\ &\quad \left(-\frac{A}{H^2} - m + 2 \sqrt{1 + m^2} \right) = 0 \end{aligned} \tag{7}$$

由式(7)得:

$$-\frac{A}{H^2} - m + 2 \sqrt{1 + m^2} = 0 \tag{8}$$

将式(3)代入式(8),得:

$$\frac{B_{\text{底}}}{H} = 2(\sqrt{1 + m^2} - m) \tag{9}$$

对于矩形断面,边坡系数 $m = 0$,代入到式(9)中得 $\frac{B_{\text{底}}}{H} = 2$,这个结果与传统方法或者教科书中的结论是一致的。

2.2 最小河流功 ($\gamma QS = \min$)

当单位时间单位长度的水体能耗最小,即 $\gamma QS = \min$ 时,河道将处于稳定状态。

由式(1)~式(4)得:

$$P = \gamma QS = \gamma \frac{n^2 Q^3}{A^3} (B_{\text{底}} + 2H \sqrt{1+m^2})^{\frac{4}{3}} \quad (10)$$

则对于给定的流量 Q ,在面积 A 一定的情况下,根据最小能耗原理,河流功 $P = \gamma QS$ 对断面水深求极值, $\frac{dP}{dH} = 0$ 得:

$$\frac{dP}{dH} = \gamma \frac{4n^2 Q^3}{3A^{\frac{10}{3}}} \left(\frac{A}{H} - mH + 2H \sqrt{1+m^2} \right)^{\frac{1}{3}} \times \left(-\frac{A}{H^2} - m + 2 \sqrt{1+m^2} \right) \quad (11)$$

且

$$\frac{dP}{dH} = 0 \quad (12)$$

由此可得:

$$-\frac{A}{H^2} - m + 2 \sqrt{1+m^2} = 0 \quad (13)$$

将式(3)代入式(13)得: $\frac{B_{\text{底}}}{H} = 2(\sqrt{1+m^2} - m)$ 。

2.3 最小单位能耗率 ($\gamma US = \min$)

当单位时间单位水体的能耗最小时,即 $\gamma US = \min$ 时,河道将处于稳定状态。

由式(1)~式(4)得:

$$P = \gamma \frac{Q}{A} S = \gamma \frac{n^2 Q^3}{A^{\frac{13}{3}}} (B_{\text{底}} + 2H \sqrt{1+m^2})^{\frac{4}{3}} \quad (14)$$

则对于给定的流量 Q ,在面积 A 一定的情况下,根据最小能耗原理,最小单位能耗率 $P = \gamma US$ 对断面水深求极值, $\frac{dP}{dH} = 0$, 得:

$$\frac{dP}{dH} = \gamma \frac{4n^2 Q^3}{3A^{\frac{13}{3}}} \left(\frac{A}{H} - mH + 2H \sqrt{1+m^2} \right)^{\frac{1}{3}} \times \left(-\frac{A}{H^2} - m + 2 \sqrt{1+m^2} \right) \quad (15)$$

且

$$\frac{dP}{dH} = 0 \quad (16)$$

由此可得:

$$-\frac{A}{H^2} - m + 2 \sqrt{1+m^2} = 0 \quad (17)$$

将式(3)代入式(17)得: $\frac{B_{\text{底}}}{H} = 2(\sqrt{1+m^2} - m)$ 。

倪晋仁认为最小河流功 ($\gamma QS = \min$) 公式的一个特例,是过水断面固定时的最小单位能耗率

($\gamma US = \min$) 公式;也就是说在过水断面固定时,两种表达式是等价的。在上述推导过程中采用最小河流功 ($\gamma QS = \min$) 与最小单位能耗率 ($\gamma US = \min$) 推求的梯形渠道水力最佳断面的宽深比是相同的,也证明了这种观点。

2.4 各部分糙率不同时水力最佳断面

在以上推导过程中,前提条件是假设梯形断面各部分糙率系数相同;但是在明渠水力计算中常常遇到各部分糙率不同的情况。现在假设河道断面是由两种糙率不同的部分组成,即河底糙率与河岸糙率不同,分别为 n_b 、 n_w ,综合糙率 $n_{\text{综}}$;相应于河底阻力与河岸阻力的过水断面面积为 A_b 、 A_w ,总的过水断面面积为 $A_{\text{总}}$;断面平均流速在面积 A_b 、 A_w 中保持不变;河道底宽为 $B_{\text{底}}$,水面宽度为 B 。

则一维水流的连续性方程为

$$Q = (A_b + A_w) U \quad (18)$$

式(18)中, A_b 为相应于河底阻力的过水断面面积, m^2 ; A_w 为相应于河岸阻力的过水断面面积, m^2 。

根据曼宁公式:

$$U = \frac{1}{n_{\text{综}}} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

式(19)中, $n_{\text{综}}$ 为综合糙率系数。

假设单一顺直河道断面形态为梯形,边坡系数 m ,则有以下关系式:

$$A_{\text{总}} = A_b + A_w = (B_{\text{底}} + mH) H \quad (20)$$

式(20)中, $A_{\text{总}}$ 为总的过水断面面积, m^2 。

$$R = \frac{(B_{\text{底}} + mH) H}{B_{\text{底}} + 2H \sqrt{1+m^2}} \quad (21)$$

由式(18)~式(21)得:

$$S = \frac{n_{\text{综}}^2 Q^2}{A_{\text{总}}^{\frac{10}{3}}} (B_{\text{底}} + 2H \sqrt{1+m^2})^{\frac{4}{3}} \quad (22)$$

对式(22)改写可得:

$$S = \frac{n_{\text{综}}^2 Q^2}{A_{\text{总}}^{\frac{10}{3}}} \left(\frac{A_{\text{总}}}{H} - mH + 2H \sqrt{1+m^2} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (23)$$

根据爱因斯坦的水力半径分割法,可得综合糙率 $n_{\text{综}}$ 与河岸及河底糙率 n_w 、 n_b 的函数关系为

$$n_{\text{综}} = \left(n_b^{\frac{3}{2}} \frac{X_b}{X} + n_w^{\frac{3}{2}} \frac{X_w}{X} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (24)$$

且对于给定的流量 Q ,在面积一定 $A_{\text{总}}$ 的情况下,根据最小能耗原理,水力坡度 S 对断面水深 H

求极值,即 $\frac{dS}{dH} = 0$, 得:

$$\frac{dS}{dH} = \frac{4n_{\text{综}}^2 Q^2}{3A_{\text{总}}^{\frac{10}{3}}} \left(\frac{A_{\text{总}}}{H} - mH + 2H \sqrt{1+m^2} \right)^{\frac{1}{3}} \times$$

$$\left(-\frac{A_{\text{总}}}{H^2}-m+2\sqrt{1+m^2}\right)+\frac{2n_{\text{综}}Q^2}{A_{\text{总}}^{\frac{10}{3}}}\times\left(\frac{A_{\text{总}}}{H}-mH+2H\sqrt{1+m^2}\right)^{\frac{4}{3}}\frac{dn_{\text{综}}}{dH}=0\quad(25)$$

结合式(24)、式(25)化简得:

$$-\left(\frac{B_{\text{底}}}{H}\right)^2+\left[\left(\frac{n_w}{n_b}\right)^{\frac{3}{2}}\sqrt{1+m^2}-2m\right]\frac{B_{\text{底}}}{H}+2(1+m^2)\times\left(\frac{n_w}{n_b}\right)^{\frac{3}{2}}-2m\sqrt{1+m^2}\left(\frac{n_w}{n_b}\right)^{\frac{3}{2}}=0\quad(26)$$

实际上当 $n_w=n_b$, 则式(26)化简为

$$-\left(\frac{B_{\text{底}}}{H}\right)^2+\left(\sqrt{1+m^2}-2m\right)\frac{B_{\text{底}}}{H}+2(1+m^2)-2m\sqrt{1+m^2}=0\quad(27)$$

求解式(27)得: $\frac{B_{\text{底}}}{H}=2(\sqrt{1+m^2}-m)$ 。

这个计算结果与前面式(9)的结果是一致的。现在分几种不同的情况进行讨论:

(1) 河岸糙率系数是河底糙率系数的 2 倍, 即 $n_w=2n_b$, 由式(26)得:

$$-\left(\frac{B_{\text{底}}}{H}\right)^2+\left(2\sqrt{2}\sqrt{1+m^2}-2m\right)\frac{B_{\text{底}}}{H}+4\sqrt{2}(1+m^2)-4\sqrt{2m}\sqrt{1+m^2}=0\quad(28)$$

通常情况下, 宽深比是指水面宽度与水深的比值, 由几何关系得水面宽度 B 与河道底宽 $B_{\text{底}}$ 的函数关系为

$$\frac{B}{H}=\frac{B_{\text{底}}+2mH}{H}=\frac{B_{\text{底}}}{H}+2m\quad(29)$$

式(29)中, B 为水面宽度, m 。

观察式(28)可知, 式(29)为关于 $\frac{B_{\text{底}}}{H}$ 的一元二次方程, 求解式(28), 并结合式(29)可得:

$$\frac{B}{H}=-\frac{1}{2}\left[2m-2\sqrt{2}\sqrt{1+m^2}\pm\sqrt{(8+16\sqrt{2})(1+m^2)+4m^2-24\sqrt{2m}\sqrt{1+m^2}}\right]+2m\quad(30)$$

式(30)中, 在计算应用时, 要考虑 $\frac{B_{\text{底}}}{H}$ 的实际情况, 不能为负数。

(2) 河岸糙率系数是河底糙率系数的 3 倍, 即 $n_w=3n_b$, 同样由式(26)可得:

$$-\left(\frac{B_{\text{底}}}{H}\right)^2+\left(3\sqrt{3}\sqrt{1+m^2}-2m\right)\frac{B_{\text{底}}}{H}+6\sqrt{3}(1+m^2)-6\sqrt{3m}\sqrt{1+m^2}=0\quad(31)$$

观察式(31)可知, 依然是关于 $\frac{B_{\text{底}}}{H}$ 的一元二次

方程。求解式(31), 并结合式(29)水面宽度 B 与河道底宽 $B_{\text{底}}$ 的函数关系式可得:

$$\frac{B}{H}=-\frac{1}{2}\left[2m-3\sqrt{3}\sqrt{1+m^2}\pm\sqrt{(27+24\sqrt{3})(1+m^2)+4m^2-36\sqrt{3m}\sqrt{1+m^2}}\right]+2m\quad(32)$$

式(32)中, 在计算应用时, 仍要考虑 $\frac{B_{\text{底}}}{H}$ 的实际情况, 不能为负数。

(3) 河岸糙率系数是河底糙率系数的 4 倍, 即 $n_w=4n_b$, 由式(26)可得:

$$-\left(\frac{B_{\text{底}}}{H}\right)^2+\left(8\sqrt{1+m^2}-2m\right)\frac{B_{\text{底}}}{H}+8(1+m^2)-8m\sqrt{1+m^2}=0\quad(33)$$

观察式(33)可知, 依然是关于 $\frac{B_{\text{底}}}{H}$ 的一元二次方程, 求解式(33), 并结合式(29)水面宽度 B 与河道底宽 $B_{\text{底}}$ 的函数关系式可得:

$$\frac{B}{H}=-\frac{1}{2}\left[2m-8\sqrt{1+m^2}\pm\sqrt{128(1+m^2)+4m^2-96m\sqrt{1+m^2}}\right]+2m\quad(34)$$

式(34)中, 在计算应用时, 仍要考虑 $\frac{B_{\text{底}}}{H}$ 的实际情况, 不能为负数。

3 关于结果的讨论

从最佳梯形断面的推求结果可以得到, 在最小能耗原理的三个代表性表达式中: 最小比降 ($S=\min$)、最小河流功 ($\gamma QS=\min$)、最小单位能耗率 ($\gamma US=\min$), 无论采用哪一种, 最后所求得的最优宽深比都是相同的, 说明这三种表达式本质上是一致的。

根据前述的研究结果, 可以计算各种不同条件下的最优宽深比, 详见表 1 和图 2, 由此可见: 当边坡系数一定时, 河岸糙率与河底糙率的比值越大, 最优宽深比也越大。例如, 对于矩形断面 ($m=0$), 当河岸糙率与河底糙率相同时, 最优宽深比是 2, 与传统方法所得结果一致; 而当河岸糙率是河底糙率 3 倍时, 最优宽深比是 6.74, 宽深比增加十分明显。这主要是由于在边坡一定的情况下, 河岸糙率相对越大, 其对水流的阻力作用相对于河底来说也会相对较大, 此时河流系统为了满足最小能耗原理, 会减小水深以减小与河岸的接触面积, 即通过减小河岸湿周, 来达到降低能量损耗的目的, 从而使得最优宽深比增大。

表 1 最优宽深比与边坡系数、糙率系数比值倍数关系表
Table 1 Relationship between optimal width ratio and slope coefficient and roughness coefficient ratio

最优宽深比	倍数			
	一倍	二倍	三倍	四倍
0	2.00	4.18	6.74	9.66
1	2.83	5.08	8.32	12.23
2	4.47	7.24	12.28	18.47
3	6.32	9.72	16.92	25.71
4	8.25	12.33	21.81	33.35
5	10.20	14.99	26.81	41.05

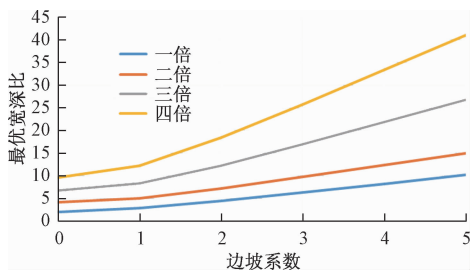


图 2 最优宽深比随边坡系数及糙率系数比值倍数的变化曲线图

Fig. 2 Curve of optimal width and depth ratio Optimum breadth depth ratio slope coefficient and multiple of the ratio of the roughness coefficient

而当河岸糙率与河底糙率的比值一定时,随着边坡系数 m 的增加(即坡度越来越缓),最优宽深也比越来越大。例如,当河岸糙率是河底糙率 3 倍时, $m=0$ 时的最优宽深比是 6.74,而 $m=3$ 时的最优宽深比是 16.92。河道断面的阻力由两部分组成,河底与河岸。在面积一定时,随着宽深比的增加,水深和河底宽度相对减少,河底所受阻力也相应降低,边坡上的阻力相应增加,至于宽深比何时为最佳,则应由最小能耗原理来加以确定。

在天然河流中,河岸的糙率一般大于河底,河岸也总会发生侧向侵蚀而使得边坡变缓,根据上述研究结果,此时的最优宽深比将会有所增加,由此可以认为,在河岸缺少约束的条件下,河流具有向宽浅发展的内在属性。

4 结论

(1) 基于最小能耗原理,可以推求梯形断面渠道的最优宽深比,在边坡垂直的情况下,梯形断面退化成矩形,此时的结果与传统方法的结论一致,说明利用最小能耗原理推求梯形断面最优宽深比的方法是合理可行的。

(2) 根据最小能耗原理的基本定义,分别有最小比降、最小河流功、最小单位能耗率三种表达形式,分别将其用来推求梯形断面的最优宽深比时,结

果是完全一致的。

(3) 对于梯形断面渠道,最优宽深比与河底糙率、河岸糙率以及边坡系数有关。在边坡一定的情况下,随着河岸糙率与河底糙率比值的增加,最优宽深比也随之增大;在河岸糙率与河底糙率比值一定的情况下,随着边坡系数的增加,最优宽深比也会随之增加。

(4) 在天然河流中,河岸的糙率一般大于河底,河岸也总会发生侧向侵蚀而使得边坡变缓,此时的最优宽深比都将会有所增加,由此可以认为,在河岸缺少约束的条件下,河流具有向宽浅发展的内在属性。

参 考 文 献

1 赵振兴,何建京. 水力学. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2005: 180—181
Zhao Zhengxing, He Jianjing. Hydraulics. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 180—181

2 Glover R E, Florey Q L. Stable channels profiles; hydraulics No. 325. Washington: Bureau of Reclamation, 1951

3 张志昌,刘亚菲,刘松舰. 抛物线形渠道水力最优断面的计算. 西安理工大学学报, 2002; (3): 235—237
Zhang Zhichang, Liu Yafei, Liu Songjian. Calculation of the optimal section of the parabolic channel. Journal of Xi'an University of Technology, 2002; (3): 235—237

4 黄学莲. 梯形渠道经济断面设计. 农业科技与信息, 2009; (18): 36—37
Huang Xuelian. Design of economic section of trapezoidal channel. Information of Agricultural Science and Technology, 2009; (18): 36—37

5 辛英华,王正中. U 形衬砌渠道结构及水力最佳断面的分析. 节水灌溉, 2008; (2): 36—38,45
Xin Yinghua, Wang Zhengzhong. Analysis of structure of the U-shaped lining canal and hydraulic optimum section. Water Conservation and Irrigation, 2008; (2): 36—38,45

6 黄才安,奚 斌. 水流能耗率极值原理及其水力学实例研究. 长江科学院院报, 2002; (5): 7—9
Huang Caian, Xi Bin. Principle of extreme value of current energy consumption and its hydrodynamic case study. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002; (5): 7—9

7 徐国宾,杨志达. 基于最小熵产生与耗散结构和混沌理论的河床演变分析. 水利学报, 2012; (8): 948—956
Xu Guobin, Yang Zhida. Analysis of riverbed evolution based on minimum entropy generation and dissipation structure and chaos theory. Journal of Hydraulic Engineering, 2012; (8): 948—956

8 Chang H H. Minimum stream power and river channel patterns. Journal of Hydrology, 1979; 41:303—327

9 Yang C T, Song C C S. Theory of minimum rate of energy dissipation. Journal of the Hydraulics Division, ASCE. 1979;105 (HY7): 769—784

10 徐国宾,练继建. 流体最小熵产生原理与最小能耗率原理 (II). 水利学报, 2003; (6): 43—47

11

徐国宾. 非平衡态热力学理论在河流动力学领域中的应用. 天津: 天津大学, 2002

Xu Guobin. Theory of non-equilibrium thermodynamics and its application for field of river dynamics. Tianjin: Tianjin University, 2002

Xu Guobin, Lian Jijian. Principle of minimum entropy of a fluid and principle of minimum energy consumption rate (II). Journal of Hydraulic Engineering, 2003; (6): 43—47

Numerical Investigation on Optimum Section Based on the Principle of Minimum Energy Consumption

ZHANG Wei, CHAI Yue-yue

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

[Abstract] The ascertain of optimum hydraulic section is a very important theoretical problem. Based on the principle of minimum energy consumption, the optimum ratio of width to depth of trapezoidal channel is deduced by using three representative formulas. And the optimum section is discussed when the roughness of the wall and the river bed are not equal. The results show that the optimum ratio of width to depth of the trapezoidal cross section can be derived by using the principle of minimum energy consumption, and the results obtained by the three expressions are consistent. For trapezoidal channel, the optimum ratio of width to depth will increase when the ratio of roughness between river bank and river bottom increases, and the optimum ratio will also increase when the slope coefficient increases. In the absence of constraints on the banks, the river has the inherent attribute to become wider and shallower as it develops.

[Key words] trapezoidal channel the principle of minimum energy consumption the optimum ratio of width to depth slope coefficient roughness