



自然疏浚法及其在航道工程中的应用*

孔令双¹, 曹祖德², 王巍¹, 戚定满¹

(1. 上海河口海岸科学研究中心, 上海 201201; 2. 交通部天津水运工程科学研究院, 天津 300456)

摘要: 以不淤浚深为理论基础、水流归槽为关键动力, 提出了自然浚深法, 可使航道增深后少淤或不淤。该法在广州港伶仃洋航道中获得很好效果。还对江苏洋口港和浙江嘉兴港在增深出海航道时如何应用该方法作了原则性的提示, 可供参考。

关键词: 自然浚深法; 不淤浚深; 水流归槽; 航道整治

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)11-0112-06

Natural dredging method and application in channel engineering

KONG Ling-shuang¹, CAO Zu-de², WANG Wei¹, QI Ding-man¹

(1. Estuarine & Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China;

2. Tianjin Scientific Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: Taking dredging without siltation as the theoretical basis and current afflux as the key motive force, this paper presents the natural dredging method, which bears the effect of less siltation or no siltation following channel deepening. This method is applied to Lingdingyang channel of Guangzhou and achieves a satisfactory effect. Furthermore, the guiding opinion is put forward for the channel deepening engineering of Yangkou port in Jiangsu province and Jiaxing port in Zhejiang province.

Key words: natural dredging method; dredging deepening without siltation; current afflux channel; channel regulation

兴建防沙工程和加强疏浚是航道防沙减淤最通用的两种方法, 但在深水区开辟航道时, 由于水深坡缓, 兴建防沙工程投资太大。本文提出的自然浚深法可以弥补这个不足。

淤泥质海岸影响海床长周期演变的主要海洋动力是潮流^[1], 床沙的水动力特性与潮流长周期平均值(简称平均流速)相对应, 如床沙的起动流速与平均流速一致; 水体含沙量与平均流速的水体挟沙力相对应; 平均水深与平均流速的平衡水深一致。在潮流不断发生变化的过程中, 当潮流流速大于平均流速和水体挟沙力大于平均含沙量时, 床面即发生冲刷; 当潮流流速小于床沙起

动流速和水体挟沙力小于平均含沙量时床面发生淤积。在潮流长期作用下, 床面即达到冲淤相对平衡状态。因此, 在研究潮流对海床稳定的影响时, 将不定常流的潮流转化为定常流, 可得到同样结果。定常流的水面为平均潮面, 定常流的流速可利用现场全潮测验结果, 由下式确定:

$$u=0.5u_m+0.25(u_s+u_n) \quad (1)$$

式中: u 为定常流速; u_m 为中潮潮段平均流速; u_s 为大潮潮段平均流速; u_n 为小潮潮段平均流速。

通常认为, 在稳定海床上开挖航道后, 若航道与来流流向夹角不大时, 航道内水深加大, 由于水流归槽, 流速增大, 但因水体挟沙能力变

收稿日期: 2012-04-10

*基金项目: 国家自然科学基金(41206072); 海洋公益性行业科研专项(200905001)

作者简介: 孔令双(1972—), 女, 博士, 副教授, 主要从事河口海岸动力泥沙运动研究。

小, 航道仍将发生淤积, 淤积量随航道浚深增加而增加; 若航道与来流流向夹角较大时, 水深增加, 流速减小, 水体挟沙能力降低, 床面剪切力减小, 航道发生淤积。但最新研究发现, 航道淤积与浚深大小有关, 可分3种情况: 第1种情况是航道浚深较小, 航道不发生淤积; 第2种情况是航道浚深较大, 航道发生淤积; 第3种情况是当航道浚深超过某一深度后, 航道淤积保持某一常值^[2], 不随浚深加大而加大, 上述淤积与浚深的关系可用图1表示。

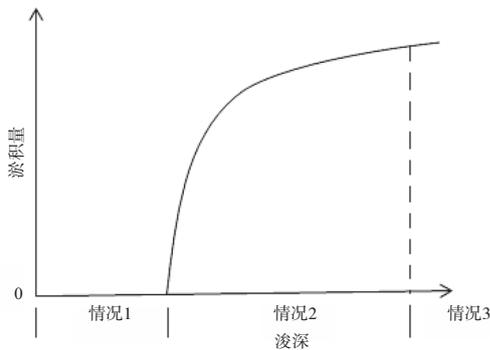


图1 淤积与浚深的关系

上述关系对航道开发和利用有一定参考价值。本文只研究第1种情况下, 航道不淤机理及不淤浚深临界值, 并提出工程实用情况, 其他情况将另文介绍。

1 航道水流特点

当水流斜向越过航道时, 由于水深变化的影响, 航道内的水流将向下游偏转, 流速也将发生较大变化(图2)。

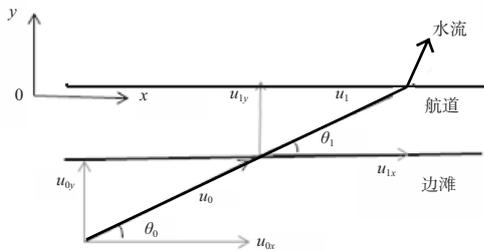


图2 航道水流变化

为了便于分析, 将航道内外水流沿直角坐标进行分解, 并建立各向流速在航道内外间关系。

在y向, 流速分速与航道轴线正交, 航道内外

间分速关系如下^[3]:

$$u_{1y} = \frac{h_0}{h_1} u_{0y} \quad (2)$$

式中: u_{0y} 为边滩流速在航道轴线垂直方向的分量; u_{1y} 为航道内流速在航道轴线垂直方向的分速; h_0, h_1 分别为边滩和航道水深。

在x方向, 受水流归槽的影响, u_{1x} 与 u_{0x} 之间的关系比较复杂, 可表示为,

$$u_{1x} = \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^b u_{0x} \quad (3)$$

式中: u_{0x}, u_{1x} 分别为边滩和航道平行于航道轴线的流速分量; b 为系数, 与挖槽长、宽尺度有关, 当挖槽尺度长宽比小于6时, b 为“+”; 当挖槽长宽比大于6时, b 为“-”。 b 与挖槽长宽比之间的关系如图3所示。

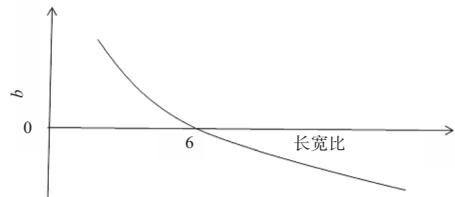


图3 指数b与挖槽长宽比的关系

航道的长宽比为无限大, 根据数模试验和专门物模^[4-5]可知, b 约为-0.22, 因此式(3)可写为:

$$u_{1x} = \left(\frac{h_1}{h_0}\right)^{0.22} u_{0x} \quad (4)$$

由图2知, $u_{1y} = u_1 \sin \theta_1, u_{1x} = u_1 \cos \theta_1, u_{0y} = u_0 \sin \theta_0, u_{0x} = u_0 \cos \theta_0$, 且 $u_1^2 = u_{1x}^2 + u_{1y}^2, u_0^2 = u_{0x}^2 + u_{0y}^2$ 。将以上关系代入式(2)和式(4)可得:

$$u_1^2 = (u_{1x}^2 + u_{1y}^2) = \left[\left(\frac{h_1}{h_0}\right)^{0.44} \cos^2 \theta_0 + \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^2 \sin^2 \theta_0 \right] u_0^2 \quad (5)$$

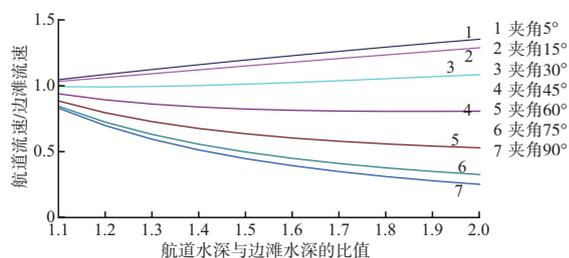
或 $u_1 = \eta u_0 \quad (6)$

$$\eta = \sqrt{\left(\frac{h_1}{h_0}\right)^{0.44} \cos^2 \theta_0 + \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^2 \sin^2 \theta_0} \quad (7)$$

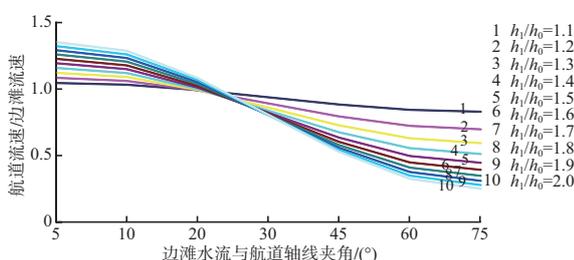
由式(5)或(6)可知, 航道内流速大小与航道挖深和流速来向有关(图4), 当水流来向与航道夹角 $<30^\circ$ 时, 随着水深的增加, 航道流速增大; 当水流来向与航道夹角 $>30^\circ$ 时, 随着水深的增加, 航道流速减小, 不同航道水深水流临界来向与航道夹角不同, 当 $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ 时, 航道流速

$u_1 = \frac{h_0}{h_1} u_0$ ，显然小于边滩来流流速；当 $\theta_0=0$ 时，

$u_1 = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{0.22} u_0$ ，航道流速明显大于边滩流速。



a) 航道挖深



b) 流速来向

图4 航道流速和航道挖深与流速来向的关系

航道流速等于边滩流速时的水流临界来向与航道夹角，可由式(5)得到下式：

$$\sin^2 \theta_{0k} = \frac{\left(\frac{h_1}{h_0}\right)^{0.44} - 1}{\left(\frac{h_1}{h_0}\right)^{0.44} - \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^2} \quad (8)$$

当边滩流速与航道轴线夹角小于 θ_{0k} 时，航道流速将大于边滩流速。

航道水流流向为：

$$\tan \theta_1 = \frac{u_{1y}}{u_{1x}} \quad (9)$$

将式(2)和式(4)代入上式整理得：

$$\tan \theta_1 = \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^{1.22} \tan \theta_0 \quad (10)$$

由上式知， $\theta_1 < \theta_0$ ，因此边滩水流进入航道后向航道下游偏转。

2 航道泥沙淤积

含沙水流由边滩进入航道后，当航道的水流挟沙能力小于水体含沙量时，泥沙落淤，航道发生淤积。在相对稳定的淤泥质海床上，边滩水流的含沙量与边滩水流的挟沙能力一致，也可以说在相对稳定的淤泥质海床上，开挖航道后，航道

水流的挟沙能力小于边滩水流的挟沙能力，航道就要发生淤积。

边滩水流挟沙力 S_{0*} （即边滩含沙量）和航道水流挟沙力 S_{1*} 分别由下式确定^[4, 6-7]，

$$S_{0*} = S_0 = \alpha_s \rho \frac{u_0^2}{gh_0} \quad (11)$$

$$S_{1*} = \alpha_s \rho \frac{u_1^2}{gh_1} \quad (12)$$

式中： S_{0*} 、 S_{1*} 分别为边滩和航道水流的挟沙力； S_0 为边滩原始含沙量； α_s 为挟沙力系数； ρ 为水体密度； g 为重力加速度。

将式(12)除以式(11)并代入式(5)后整理得：

$$\frac{S_{1*}}{S_{0*}} = \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^{0.56} \cos^2 \theta_0 + \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^3 \sin^2 \theta_0 \quad (13)$$

式(13)右边项的值总小于1，即使在 $\theta=0$ 时也是小于1的。因此，航道水流挟沙能力总是小于边滩水流的挟沙能力，航道浚深后淤积总会发生。

航道的淤积率可根据边滩原始含沙量 S_0 与航道水流挟沙力 S_{1*} 的差来确定。

$$P = \alpha \omega (S_0 - S_{1*})$$

$$\text{或 } P = \alpha \omega S_0 \left(1 - \frac{S_{1*}}{S_0}\right) \quad (14)$$

式中： P 为航道淤积速率； α 为泥沙淤积机率； ω 为泥沙沉降速度。

将式(13)代入式(14)后得

$$P = \alpha \omega S_0 \left[1 - \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^3 \sin^2 \theta_0 - \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^{0.56} \cos^2 \theta_0\right] \quad (15)$$

式(15)为航道淤积速率计算公式，曾在我国多处航道淤积计算中应用，效果很好。

3 不淤浚深概念及其临界值的确定

由以上分析可知，淤泥质海床上开挖航道后，航道要发生淤积。但进一步分析了航道新淤积土的沉积密实和起动临界值的变化过程以及潮流流速变化过程后，发现在浚深初期，航道深度不大时，并不发生淤积，这个发现对航道开发十分有利。

当航道浚深不大时，航道内水流对航道的冲淤情况与未浚深前潮流对海床的冲淤情况大致

相似, 小潮时淤积, 大潮时冲刷, 全潮段呈基本冲淤平衡并略有淤积。但新淤积土开始时密度很小, 极易起动悬扬, 而后逐渐密实, 开始密实速度较快, 随着时间的推移密实速度逐渐缓慢, 数月后才能密实到黏土的密度。在航道初期淤积阶段, 由于潮流周期性的冲淤交替, 新淤积土可在一个时段内保持相对准密实度。由于潮汐变化的周期为半个月, 因此新淤积土的相对准密实度的大小相当于新淤积土开始密实过程的第 8 d 的密实度。当航道浚深很小时, 航道内潮段平均流速略增或略减, 但仍能将新淤积土起动悬扬, 这时航道内不会发生淤积。随着航道的加深, 航道内潮段平均流速小于新淤积土的相对准密实度时的起动流速时, 航道就会发生淤积。因此, 航道内发生淤积的临界条件, 如以床面水流剪切力表示, 可采用下式:

$$\tau_{1k} = \tau_8 \quad (16)$$

式中: τ_{1k} 为航道内潮流对床面的潮段平均剪切力; τ_8 为新淤积土的起动临界剪切力, 相当于淤积土密实过程中第 8 d 密实土的临界起动剪切力。

根据试验结果和现场资料分析, 新淤积土第 8 d 的起动剪切力达到该淤积土最终密实后的 70%~80%。因此, 式 (15) 可进一步写成如下形式

$$\tau_{1k} = \alpha_8 \tau_0 \quad (17)$$

式中: α_8 为第 8 d 的密实系数, 其值随淤积土粒径增大而增大; τ_0 为淤积土最终密实度时的起动剪切力。在相对稳定的河床上, 其值与潮段平均床面剪切力相当。

剪切力用下式表示:

$$\tau_{1k} = \rho f_c u_{1k}^2 \quad (18)$$

$$\tau_0 = \rho f_c u_0^2 \quad (19)$$

式中: ρ 为水体密度; f_c 为潮流摩阻系数。

将式 (18) 和 (19) 代入 (17), 并考虑水流与航道夹角为 $\frac{\pi}{2}$ 的最不利情况, 引进 $u_{1k} = \left(\frac{h_0}{h_{1k}}\right) u_0$ 的关系后, 得

$$h_{1k} = K h_0 \quad (20)$$

式中: h_{1k} 为不淤浚深临界深度; K 为不淤浚深系数, $K = \sqrt{\frac{1}{\alpha_8}}$, 与新淤土粒度大小及潮段平均流

速有关, 粒径越小, 流速越大, K 越大, 其值范围为 1.1~1.2。

将式 (20) 代入式 (8), 得到不同浚深 h_{1k} 时相应临界角度 θ_{0k} 。当 $h_{1k} = (1.1 \sim 1.2) h_0$ 时, θ_{0k} 相应的临界角度为 $26^\circ \sim 33^\circ$ 。

4 自然浚深法及其在航道中的应用

4.1 自然浚深法的概念

自然浚深法是以航道不冲不淤浚深为基础, 将航道分层浚深, 每层深度均在不冲不淤浚深范围内。为了保证航道不淤和少淤, 航道轴线的选择应与潮流主动力轴线的夹角小于航道浚深相应的临界角, 充分发挥水流归槽作用, 达到加大流速减少淤积的目的。

因为本方法主要依靠自然动力, 故叫自然疏浚法。

4.2 应用情况

1) 实例 1: 广州伶仃洋航道应用后的效果。

伶仃洋位于广州港虎门口外, 经长期海洋与河口水动力作用, 口外河床地形已成稳定的三滩两槽格局, 广州港一直利用伶仃洋西槽即伶仃洋西水道作为出海航道。

20 世纪 90 年代以前, 伶仃洋西水道内有一浅段, 底高程为 -9.0 m, 年淤强为 42 cm, 成为广州港出海的障碍, 需要浚深至 -11.5 m 才能满足当时航运要求。为了浚深该浅段, 广州港从 1996 年起将 2.5 m 的深度分为 2 层, 第 1 层浚深 1.5 m, 浚深后年淤强并不增加, 1 a 后, 又进一步浚深 1.0 m, 航道底高程达到 -11.5 m, 最终验收, 航道淤积并不增加, 淤厚仍维持在 40 cm 左右。

广州港伶仃洋西水道航道的浚深是自然浚深法最成功的事例, 主要经验可归纳为以下 3 点: ① 将 2.5 m 的浚深分成 2 层, 第 1 层为 1.5 m, 浚后水深与原始水深之比为 1.16; 第 2 层为 1.0 m, 浚后水深与原始水深之比为 1.09, 均在不淤浚深范围内。② 伶仃西水道与航道基本一致, 水流主动力线与航道轴线夹角很小, 水流归槽作用明显。③ 伶仃洋内地形呈三滩两槽格局, 西面槽为伶仃西水道, 是广州航道所走的水道, 东槽为矾石水道。

西水道航道浚深后,水深加大,阻力减小,引起伶仃洋内进出水流的重分布,西槽水流进一步加强,东槽水流进一步削弱,因此航道淤积减轻,矾石水道萎缩。

2)实例2:洋口港烂沙洋北水道航道浚深的可行性分析。

江苏南通洋口港区有一条烂沙洋北水道,原是古长江的出海深水槽,水深大,水面宽阔,是洋口港区出海的主要通道,目前西太阳沙人工岛和LNG码头位于烂沙洋北水道的南侧。烂沙洋北水道是洋口港的生命线,是未来港口发展的希望。水道原始底高程在-15 m以上,但有一浅段,底高程只有-13.5 m,进一步浚深浅水段已成为发展洋口港的关键。

由于航道轴线基本与烂沙洋北水道深泓线一致,挖深航道可以充分利用水流归槽,不会引起航道流速减小。此外,从-13.0 m浚深到-15 m,只需浚深2 m,如分2层开挖,每层只浚深1 m,浚后水深与原始水深之比约为1.07,均在不淤水深范围内。因此浚深后应该不会引起航道的大量淤积。另外,根据已有研究,浚深后航道发生骤淤的可能性也不大。

3)实例3:嘉兴港出海航道浚深的可能性。

浙江嘉兴港位于杭州湾北岸,北为上海港,南望宁波-舟山港,西接长江和钱塘江,东向大海,区位优势十分突出。杭州湾北岸岸线顺直、水深、浪小、含沙量低、水面宽阔,具有建设深水大港的优良自然条件。近年来,嘉兴港蓬勃发展,成为地区性重要港口、上海国际航运中心的组成部分、舟山-宁波集装箱的重要喂给港。但嘉兴港的发展受到出海航道水深的重要限制。目前嘉兴港位于杭州湾湾口有一浅段,底高程为-10 m,大大限制了嘉兴港的发展。

自20世纪90年代杭州湾开挖试挖坑以来,由于资料不理想,引起了人们对杭州湾内开辟深水航道的疑虑,使得杭州湾成为开辟深水航道的禁区。但分析杭州湾自然条件后,认为杭州湾建设深水航道不是不可能,嘉兴港采用自然浚深法开发出海深水航道是可行的。

①从地貌条件分析,杭州湾为深水区,我国海湾口左岸普遍出现深水区,如渤海湾的曹妃甸、乐清湾口的大麦屿,深水区必与深水槽相伴而生。因此,杭州湾北岸深水区也伴有一条深水槽,这就是目前嘉兴港航道所走的深槽。

②嘉兴港在湾口的航道浅段与涨落潮流夹角很小,挖深航槽后,水流归槽,可减少航道淤积。更值得一提的是杭州湾潮很大,平均潮差为4 m左右,最大可达8 m,巨大的潮差带来巨大的流速,引起巨大的水流归槽,更加有利于冲刷新回淤土。

③嘉兴航道浅段如从-10 m浚深到-15 m,可分期实施,近期达到-12 m,远期达到-15 m。近期从-10 m到-12 m,可根据不淤浚深概念,分两层浚深,每层为1 m,这两次都在不淤浚深范围内。当达到近期目标后,再总结已有成果的基础上,从-12 m到-15 m仍采用自然浚深法分3层进行,每层1.0 m,最后达到-15 m。

④最后需要注意的是,在洋口港和嘉兴港采用自然浚深法之前,需对现场资料进行分析,必要时需要进行试挖试验,试挖槽宽度为40 m,深为1 m,但必须两端敞开与深水区相通。通过试挖槽试验可以了解水流归槽和航道不淤情况,为正式开挖提供可靠资料。

5 结论

1)自然浚深法是航道整治工程中除采用工程和疏浚外又一种新手段,主要是利用自然动力对新回淤土的冲刷以达到航道浚深减淤的目的。本法对深水区开挖航道时减淤有良好作用。

2)自然浚深法的关键是对航道不淤浚深的判别及水流归槽的作用有正确的认识和合理的应用。

3)不淤浚深是指航道浚深足够小时,潮流仍能将航道新淤积土冲刷而保持航道不淤的深度,其临界值为 $h_{1k}=(1.1\sim 1.2)h_0$ 。

4)航道轴线与水动力主轴小于某一临界值,由于水流归槽作用,航道内流速可大于边滩原始流速,因而加大对航道新回淤土的冲刷,保持航道内不淤或少淤,该临界夹角按不淤浚深要

求约为 26° 以下。

5) 自然浚深法就是合适定线、合理分层、对航道分层浚深, 每层深度均在不淤深度范围内, 并受水流归槽影响, 保持航道不淤或少淤。

参考文献:

- [1] Cao Zude, Kong Lingshuang, Liu Defu. Sediment movement in periodic alternating current[J]. Journal of Ocean, 2002(1): 201-205.
- [2] 刘家驹, 张镜湖. 淤泥质海岸航道、港池淤积计算方法及其推广应用[J]. 水利水运科学研究, 1993(4): 301-319.
- [3] 乐培九, 张华庆. 河口海湾地区航道挖槽回淤的估算方法[J]. 水道港口, 1993(3): 1-10.
- [4] 曹祖德, 肖辉. 淤泥质海岸外航道淤积计算[J]. 水运工程, 2008(7): 127-131.
- [5] 曹祖德, 蔡嘉熙. 珠江口伶仃洋航道整治研究[J]. 水道港口, 1998(1): 4-9.
- [6] 李瑞杰, 罗锋, 周华民. 水流挟沙力分析与探讨[J]. 海洋湖沼通报, 2009(1): 88-94.
- [7] 曹祖德, 李蓓, 孔令双. 波、流共存时的水体挟沙力[J]. 水道港口, 2001, 22(4): 1-5.

(本文编辑 武亚庆)

更正启示

《水运工程》2012年第9期文章“潜堤透浪系数研究”第5页:

4.1 规则波作用下潜堤透射系数公式拟合

公式(1)应改为: $K_t = 1 - \tanh(k_1 \frac{a}{H} + k_2 \frac{H}{L}) + k_3 e^{-\frac{H}{B}}$

系数应分别改为: $k_1 = -0.25$, $k_2 = 6.34$, $k_3 = -0.32$ 。

公式(2)应改为: $K_t = 1 - \tanh(-0.25 \frac{a}{H} + 6.34 \frac{H}{L}) - 0.32 e^{-\frac{H}{B}}$

相关系数应改为0.96, 残差平方和应改为0.154。

4.2 不规则波作用下潜堤透射系数公式拟合

公式(3)应改为: $K_t = 1 - \tanh(k_1 \frac{a}{H} + k_2 \frac{H}{L}) + k_3 e^{-\frac{H}{B}}$

系数应分别改为: $k_1 = -0.24$, $k_2 = 6.27$, $k_3 = -0.27$ 。

公式(4)应改为: $K_t = 1 - \tanh(-0.24 \frac{a}{H} + 6.27 \frac{H}{L}) - 0.27 e^{-\frac{H}{B}}$

相关系数应改为0.97, 残差平方和应改为0.091。

图6和7的相应修改如下:

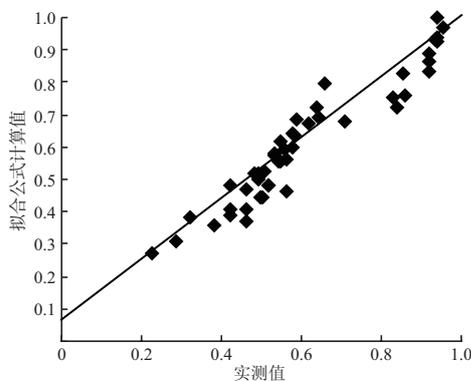


图6

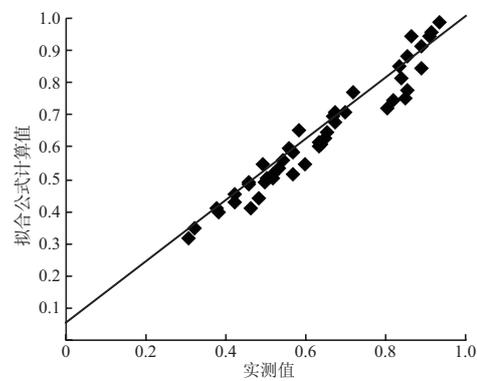


图7

由于作者不慎使用了不够完善的商用软件, 导致文章中拟合公式发生错误, 现予以更正。由此给读者带来的不便, 深表歉意!