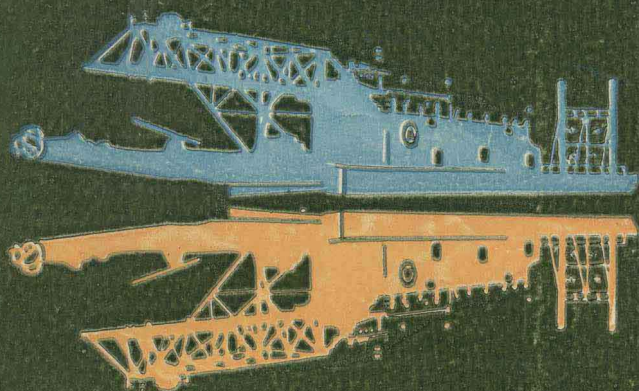


FUNDAMENTALS OF HYDRAULIC DREDGING

水力疏浚原理

(美) T.M. 特纳 著



交通部上海航道局设计研究所

水 力 疏 浚 原 理

Fundamentals of Hydraulic Dredging

〔美〕 T.M. 特 纳 著

上海航道局设计研究所情报室译

上海航道局设计研究所

1987年5月

译者说明

本书 1984 年在美国出版，作者托马斯·M·特纳 (Thomas M. Turner) 多年来从事土木工程技术，现任美国 Ellicott 公司挖泥船部总经理，该公司是美国历史最长的、规模最大的挖泥船制造厂商。

在翻译本书时删略的内容有：1. 序言；2. 照片；3. 书后的参考文献及词汇索引表。

参加本书翻译的有：周伟江、徐珊、赵治华、刘哲萍、范新中、顾伟浩、吕景宝、王钢、丁长生。

第一部分由朱国贤高级工程师、周伟江、杨权审校；第二部分由郑励高级工程师、林风付总工程师审校。杨权对全书进行统一整理工作。插图由司国良绘制。

南京水利科学研究院韩乃斌对第一部分的翻译作了大量的工作，谨此致谢。

由于我们水平有限，错误之处在所难免，诚恳希望读者批评指正。

Thomas M. Turner

Fundamentals of Hydraulic Dredging

First edition 1984

目 录

第一部分 疏浚理论

第一章 水力学概论	(1)
一、疏浚水力学引论	(1)
二、流速水头 h_v	(1)
三、离心泵原理	(6)
四、泵相似定理	(7)
五、比重的作用	(8)
六、泥浆的作用	(9)
七、泥泵水头效率系数	(9)
第二章 产量	(11)
一、产量计算公式	(11)
二、孔隙率、重量、比重	(12)
三、产量的度量系统	(13)
四、体积与重量的换算	(15)
五、克/升的换算	(16)
第三章 疏浚效率	(18)
一、最大泥浆浓度与气蚀的关系	(18)
二、疏浚效率的定义	(18)
三、疏浚第一法则的重新解释	(20)
第四章 水力输送的因素	(22)
一、水力输送的紊动要求	(22)
二、吸泥管流速	(22)
三、各种土质的紊动要求	(23)
四、各种不同管道所需的流速	(23)

第五章 挖泥船的最大产量	(31)
一、大气压头引起流动	(31)
二、挖泥船的流量随吸泥管内流速和断面积而变化	(32)
三、高程对流速的影响	(33)
四、高程和温度对挖泥船功率的影响	(34)
第六章 挖掘深度的影响	(37)
一、吸泥管内水头损耗的分析	(37)
二、流速水头 h_v	(37)
三、吸口水头损耗 h_E	(38)
四、摩阻水头损耗 h_F	(39)
五、比重水头 h_{SG}	(40)
六、挖泥深度与生产率的关系	(40)
七、最佳的吸泥管流速	(42)
八、泥泵的安装高度与水面线的关系	(43)
第七章 泥泵功率与排泥管长度的关系	(44)
一、泥泵功率与 GPM、比重和水头的关系	(45)
二、泥管的管径与摩擦阻力的关系	(46)
三、摩阻水头 h_F 与 GPM 和管径的关系	(47)
四、马力与管线尺寸的关系(功率系数)	(48)
五、所推荐的泥泵马力	(51)
第八章 产量图	(53)
一、大气压、转矩和流速对产量的制约	(54)
二、吸泥管管径	(55)
三、排泥管管径	(58)
四、接力泵的作用	(59)
五、潜水泵的作用	(60)
第九章 疏浚周期	(62)
一、泵送清水时的水头——能量曲线	(62)
二、泵送清水时的系统阻力	(62)

三、泵送泥浆时的水头——能量曲线·····	(63)
四、泵送泥浆时的系统阻力·····	(64)
五、疏浚周期的解释·····	(64)

第二部分 疏浚实践

第十章 挖泥船类型的选择·····	(67)
一、普通吸扬式·····	(67)
二、耙吸式·····	(68)
三、绞吸式·····	(71)
四、补偿式绞吸挖泥船·····	(72)
第十一章 工程计算·····	(75)
一、摩阻水头的损耗·····	(75)
二、产量图的绘制·····	(81)
三、工程的估价·····	(84)
第十二章 绞刀·····	(93)
一、型式与功能·····	(93)
二、篮式绞刀·····	(93)
三、斗轮·····	(105)
四、循环式输送链绞刀·····	(107)
五、高速转盘式绞刀·····	(110)
第十三章 泥泵·····	(113)
一、泥泵的型式·····	(113)
二、可通过块粒的净空尺度·····	(113)
三、全衬里与部分衬里的泥泵的比较·····	(114)
四、叶轮·····	(114)
五、填料箱·····	(116)
六、轴与轴承·····	(117)
七、可调整的安装·····	(117)
八、刮板·····	(118)

九、泵壳	(120)
十、进口速度	(121)
十一、叶尖速度	(122)
十二、进口直径和叶轮直径(OD)的比较	(122)
十三、功率系数	(123)
十四、驱动装置	(123)
十五、扭转振动	(125)
十六、推力	(126)
第十四章 潜水泵与接力泵	(129)
一、潜水泵	(129)
二、潜水泵的设计要求	(130)
三、喷射泵	(131)
四、天然气问题	(132)
五、潜水泵传动装置	(133)
六、接力泵与输送距离	(134)
七、与泥泵的配合	(134)
八、水击	(134)
九、接力泵的位置	(136)
第十五章 泥泵和排泥管的磨损	(139)
一、寿命与磨损	(139)
二、寿命公式	(140)
三、系数 K	(140)
四、水力设计系数 H	(141)
五、布氏硬度系数 B	(141)
六、泥沙浓度 C	(141)
七、泥泵尺寸 S	(142)
八、速度 V	(143)
九、泥沙的重量 W	(143)
十、中值粒径 d_{50}	(144)

十一、泥沙颗粒的棱角 A	(144)
十二、寿命公式的应用	(145)
十三、排泥管寿命简化公式	(146)
十四、正常范围内的有效性	(147)
十五、压力	(147)
十六、腐蚀	(147)
十七、磨损区	(148)
第十六章 辅助设备	(150)
一、船首绞车	(150)
二、横移速度	(151)
三、缆绳拉力	(151)
四、锚	(152)
五、抛锚杆	(156)
六、定位桩起升绞车	(157)
七、定位桩	(157)
八、定位桩台车	(159)
九、钢丝绳	(159)
第十七章 仪器仪表和自动控制	(163)
一、绞刀组件	(163)
二、泥浆泵吸系统	(164)
三、绞车	(164)
四、发动机	(165)
五、产量指示仪	(165)
六、泥浆流速的自动控制	(166)
七、挖掘深度	(167)
八、罗经	(167)
九、定位设备	(167)
十、测深	(167)
十一、泥浆流速仪	(168)

十二、疏浚作业过程自动化·····	(169)
第十八章 操作和排除故障·····	(171)
一、操作错误及其预防措施·····	(171)
二、挖泥船前移的摆动角·····	(172)
三、摆动宽度·····	(173)
四、锚位·····	(174)
五、挖槽宽度极限·····	(175)
六、故障的检查及排除·····	(178)
七、仪表读数异常及其有关故障·····	(179)
第十九章 环境与挖泥船·····	(181)
一、环境保护论者与开发者·····	(181)
二、水污染的定义·····	(181)
三、混浊度·····	(182)
四、作为清除工具的挖泥船·····	(182)
五、效率与环境破坏·····	(183)
六、建议·····	(183)
所用符号一览表·····	(185)
换算表·····	(187)

第一章 水力学概论

一、疏浚水力学引论

水力疏浚系统的研究涉及到对液体流独特应用的分析。虽然这类研究运用了传统的水力学原理,但是在实践中,挖泥系统中由于泥沙的存在而变得更为复杂,因为泥沙使液体的流变特性或流态发生很大的变化。

疏浚的液体通常是水,它是真正的流体,即牛顿流体,并遵循传统的流体力学原理,然而,当沙或其它海底物质进入水中后,水就变成了泥浆,其流动特性随所含泥沙的种类和百分比的不同发生较大的变化。

研究水力疏浚必须了解泥浆流的特性,以及传统流体力学的原理,因为泥浆输送系统实质上是一种泥沙水力输送系统。如果把这种系统运用到一艘水力式挖泥船上,就是利用泥浆流把从挖槽或航道中挖起的泥沙(海底底质)输送到吹填或排泥区(有时称为抛泥区)。

水力式挖泥船是一种浮动的机器,它使海底底质进入由它所形成的水流中,并通过封闭的管道将泥沙输送到指定的排泥区。水力式挖泥船种类繁多,如普通的吸泥船、绞吸式挖泥船、耙吸式挖泥船和簸箕式挖泥船等,这类挖泥船都遵循本书中所叙述的原理。

二、流速水头 h_v

在疏浚水力学中,流速水头是疏浚人员应充分了解的最重要的概念之一。按其定义,流速水头是指液体为达到某种流速,所需落下的垂直距离。因此根据其含义,有效水头与形成的流速是

密切相关的。由于流速水头 h_v 几乎与液体流计算中的各个方面都有关，无论是进口的水头损耗，还是管线的摩阻力或泥泵的设计等，因此要求那些有前途的疏浚人员应掌握其原理，并能在实践中加以应用。在任何液体流系统的计算中，流速水头是基本的单元，它的表达式如下：

$$h_v = \frac{v^2}{2g} \quad (1-1)$$

即：流速水头等于流速的平方除以重力加速度的二倍。

该式也可改写成：

$$v = \sqrt{2gh} \quad (1-2)$$

显然，要产生流速 v ，就要求液体有 h 英尺高的压头，而 h 与 v 存在着这样的关系，即 v 等于 h 和二倍重力加速度乘积的平方根。流速水头 h_v （也可称为压力）可以用被泵送的液体柱的高度来表示。如果泵送的液体是比重为 1.0 的清水，那么就可简单地换算成磅/英寸² 的压力。1 立方英尺的清水重 62.4 磅，见图 1-1。显然，在该立方体中水柱的高度为 1 英尺。因此立方体底部的水头为 1 英尺。立方体底部的面积为 12 英寸乘 12 英寸，即等于 144 平方英寸。由于水的总重量为 62.4 磅，则立方体底部的压强为：

$$\frac{62.4 \text{ 磅}}{144 \text{ 英寸}^2} = 0.433 \text{ 磅/英寸}^2$$

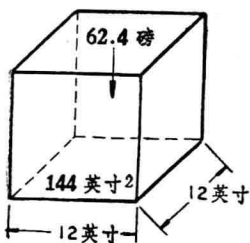


图 1-1 1 立方英尺清水的水头

因此，1 英尺水头等于 0.433 磅/英寸² 的压力，而 10 英尺水头则等于 4.33 磅/英寸² 的压力。

如果泵送其他的流体，那么将该流体的水头乘以其比重即可算得与水当量的水头。例如，比重为 1.4 的一种泥浆，其流速压头为 5 英尺，当量水头为 $5 \times 1.4 = 7.0$ 英尺。对疏浚人员来说，这是

一个非常有用的概念，因为水柱的高度是很容易测出和表明的。另外，天然的大气压头（泵吸水头的动力）为34英尺水柱，它相当于30英寸水银柱或14.7 磅/英寸²的压力。疏浚人员应该认识到水头通常是以多少英尺的水柱高度来表示的，而压力是以磅/英寸²来表达的，但两者之间的换算很方便。

流速的单位是英尺/秒，这是一个普通的容易理解的表达式。但是衡量速度变化的加速度就不怎么好理解了。如果流速每秒增加1英尺/秒，那么其表达式就变成每秒、每秒1英尺。这对外行可能发音太别扭，但由于流速是每秒钟增加1英尺/秒，因此加速度要以每秒每秒1英尺（英尺/秒²）为单位。

既然流速水头的概念对疏浚人员是如此重要，那么对表达式 $h_v = v^2/2g$ 的推导，能加深对此概念的进一步理解。

假设一自由落体从 h 高度下坠，见图1-2，在海平面，重力加速度 g 被测定为32.2英尺/秒²。该落体自由下落时其速度每秒增加32.2英尺/秒，所遇到的阻力忽略不计，若用公式的形式表达则为：

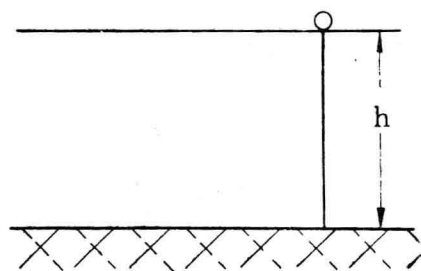


图 1-2 自由落体

$$v = gt \quad (1-3)$$

式中：

v = 瞬时速度；

g = 重力加速度(32.2 英尺/秒²)；

t = 落体下落的时间(秒)。

为此，如果落体下落的初速度为零，1秒钟以后达到32.2英尺/秒，2秒钟后达到64.4英尺/秒，按下表以此类推：

时间(秒)	瞬时速度(英尺/秒)	平均速度(英尺/秒)
0	0	0
1	32.2	16.1
2	64.4	32.2
3	96.6	48.3
4	128.8	64.4

从式(1-2)中得出的速度是在经过一定时间之后所取得的瞬时速度，而不是落体下降速度从零开始的平均速度。在恒定的加速度下，平均速度应是初速度零加上最后或瞬时速度再除以2：

$$v_{\text{平均}} = \frac{0 + v}{2} = \frac{v}{2}$$

为了求得一落体在时间 t 内下落的距离 h ，可用时间乘以平均速度，即：

$$h = \frac{v}{2} \times t \quad (1-4)$$

这样，就可根据自由落体已知下落的时间，用式(1-3)得出 v 值，再用式(1-4)计算出距离 h 。如果不知道下落时间，而只知道距离或速度，也能求出其它未知数。

从式(1-3)，我们知道 $v = gt$ ，如果要计算 t ，则 $t = v/g$ 。现以 v/g 代表 t 代入式(1-4)，得出：

$$h = \frac{v}{2} \times \frac{v}{g} = \frac{v^2}{2g} \quad (1-1)$$

这是传统的流速水头的表达式。如果要计算速度，则：

$$v = \sqrt{2gh} \quad (1-2)$$

当仅知道 h ，而要计算流速时，这个公式是非常有用的。

上述简单的物理知识对水力疏浚原理起何作用呢？疏浚人员应知道一种真正的流体（称为牛顿流体，以纪念艾萨克·牛顿发

明重力定律而命名)，是按自由落体定律而作用的。假如用一个水箱代替如图 1-2 所示的自由落体，箱内的液体高为 h ，底部有一开口的喷嘴，见图 1-3，流体按流速水头表达式 (1-1) 和 (1-2) 流过喷嘴。请注意：如果 1-3 中的 h 等于 4 英尺，那么在喷嘴的出口处流速将为：

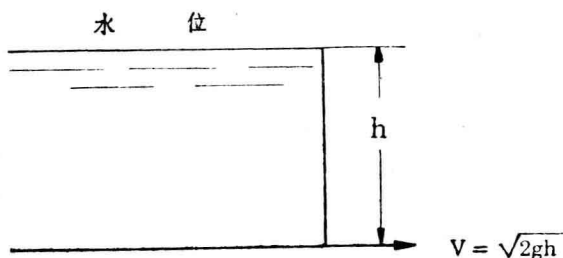


图 1-3 流体流过喷嘴

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 32.2 \times 4} = 16 \text{ 英尺/秒}$$

同样，如果知道喷嘴处的流速为 16 英尺/秒，那么也可计算出产生这一流速的水头，即：

$$h = \frac{v^2}{2g} = \frac{16^2}{2 \times 32.2} = \frac{256}{64.4} = 4 \text{ 英尺}$$

流速水头的简单物理概念指出，要产生一定的流速就需要一定的水头。在上述例子中，要产生每秒 16 英尺的流速，就要有 4 英尺的水头。

有效水头增加 1 倍，但流速不会增加 1 倍，因为流速是根据有效水头的平方而变化。下列公式将说明当水头加倍和翻两番时对流速的影响。

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 32.2 \times 8} = 22.7 \text{ 英尺/秒}$$

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 32.2 \times 16} = 32 \text{ 英尺/秒}$$

请注意：由于 h 和 v 之间有平方根的关系，水头翻两番时，流速才加倍，如上述第二例。

三、离心泵原理

对于牛顿流体，流速水头公式的效应是完全可逆的。不仅 4 英尺的水头可产生每秒 16 英尺的流速，（各种损耗忽略不计），而从图 1-2 的喷嘴处引入 16 英尺/秒流速也会在水箱内产生 4 英尺高的水头。

离心泵的原理就是利用了流速水头的可逆特性。由于叶轮的叶片在泵内流体中旋转，流体在离心力作用下被压入到泵壳内，在那里绝大部分流速转换成压力或水头，作为流速水头表达式中的函数，见图 1-4。

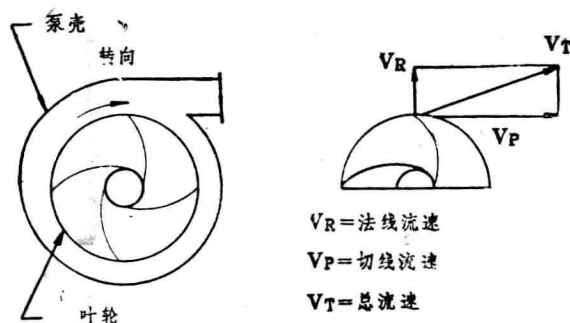


图 1-4 流速三角形

剩余的流速能量传输给流体，用以保持泥泵内的流速和克服通过泥泵时的各种流量损耗。奇怪的是，由此取得的水头通常要比从叶轮顶端速度所计算出的流速水头大一些。这是因为流体必须沿叶轮的切线和法线方向进入泵壳，所产生的合成流速要比任一分速大，因而流体所获得的流速要高于叶轮顶端的速度，见图 1-4。

在一定的转速下，泵所产生的水头同通过该泵的流量有一个固定的关系。该关系通常可由试验来确定，并用该泵的水头—能力图或特性曲线来表示，见图 1—5。

当转速处于所绘的特性曲线上时，通过此泵的流量的任何变化都会带来水头的变化，反之亦然。如果已知泵的转速，以及水头或流量中的一项，则另一项就可根据水头—能力图来确定，因为泵必定会按曲线所固定的形式来运转。

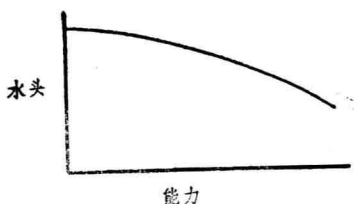


图 1-5 离心泵水头—能力曲线

四、泵相似定律

通常，泵的制造商会提供泵在不同转速下的水头—能力曲线、功率和效率资料，见图 1-6。然而，如果仅知道一个转速方面的数据，那么该泵在其它转速方面的性能就可采用下面泵的相似定律来近似地计算：

(1) $GPM \sim RPM$

(2) $h \sim (RPM)^2$

(3) $HP \sim (RPM)^3$

泵的第一相似定律说明驱入泵壳内的流量和从排出口排出的流量 GPM (加仑/分)同转速 RPM (转数/分)成正比例增加。

在泵的第二相似定律中，水头 h 按转速 RPM 或叶轮顶端速度的平方而增加。它反映了与流速水头的关系，这里 v 为叶轮顶端速度。

$$h = \frac{v^2}{2g}$$

在泵的第三相似定律中，马力 HP 按转速 RPM 的立方而增加。由于马力随流量和水头两者而变，而流量和水头又分别是转速的一次方和二次方，因此马力是转速的三次方。

当泵的叶轮外径改变时，也可运用泵的相似定律，这时以叶轮顶端的转速为决定因数。

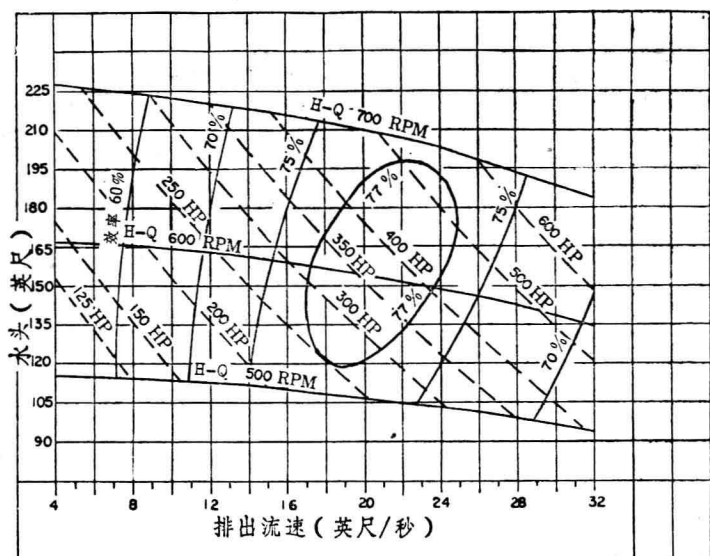


图 1-6 离心泵的水头—能力曲线

五、比重的作用

为了便于测试和相互比较，制造厂家提供的泥泵特性曲线是以泵送清水为基础的。然而，泥泵的用途是用来泵送呈泥浆状态的泥沙。疏浚人员必须注意到用泥浆来代替清水(真正的牛顿流体)会有很大的差异。

假设泥浆由水和非常细的泥沙颗粒组成，该流体的特性基本上同牛顿流体差不多，其主要差别是比重。我们进一步假设其比重为 1.4，稠度同水一样，这时检查泥泵的水头—能力曲线，就可看到两者之间没有什么变化。然而，原来表示泵水的水头—能力曲线这里却代表了比重为 1.4 的流体。如果将压力表安装在排泥管上，就会看出在相同的流量率下，其压力约为水压力的 1.4 倍。泥泵功率曲线也会比水的升高 1.4 倍，而且只要流体是牛顿流体，泥泵的效率就不会受到影响。