

# 整平船声呐测距对检测精度的影响

宋江伟<sup>1,2</sup>, 张浩男<sup>1,2</sup>

(1. 中交一航局第二工程有限公司, 山东 青岛 266071;  
2. 天津市水下隧道建设与运维技术企业重点实验室, 天津 300461)

**摘要:** 在大连湾海底隧道碎石基床整平施工中, 声呐系统扮演着重要的角色, 可精准检测碎石垄的铺设质量, 但声呐测量精度易受测距的影响, 为研究水中不同测距对声呐的影响程度, 确定最适合整平船验收的声呐测距范围, 利用整平船全抬升式碎石基床验收方式, 通过改变水中声呐测距高度来分析整平船声呐不同测距对检测精度的影响程度, 从而得出验收时水中声呐的最佳测距范围, 为后续管节的碎石基床整平施工及碎石垄验收提供依据。

**关键词:** 整平船声呐; 测距; 检测精度; 碎石基床整平

中图分类号: U617; U674.3; U455.46 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2024)04-0020-04

doi: 10.7640/zggwjs202404005

## Influence of sonar ranging on detection accuracy of leveling ship

SONG Jiang-wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Hao-nan<sup>1,2</sup>

(1. No.2 Engineering Company Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Company Ltd., Qingdao, Shandong 266071, China;  
2. Tianjin Key Laboratory of Construction, Operation and Maintenance Technologies for Underwater Tunnels,  
Tianjin 300461, China)

**Abstract:** In the leveling construction of gravel bed of Dalian Bay subsea tunnel, sonar system plays an important role, which can accurately detect the laying quality of gravel bed, but the measurement accuracy of sonar is easily affected by ranging. In order to study the influence degree of different ranging on sonar in water and determine the sonar ranging range that is most suitable for the acceptance of the leveling ship, this paper uses the acceptance method of fully lifted gravel bed of the leveling ship to analyze the influence degree of different ranging degrees of sonar in the leveling ship on the acceptance accuracy by changing the height of sonar ranging in water, so as to obtain the optimal ranging range of sonar in water during the acceptance. The conclusions obtained are used to provide a basis for subsequent gravel bed leveling construction and gravel ridge acceptance of pipe sections.

**Key words:** leveling ship sonar; ranging; detection accuracy; gravel bed leveling

### 0 引言

大连湾海底隧道碎石基床整平是利用我国第一艘平台式高精度深水抛石整平船“津平1号”<sup>[1]</sup>进行施工。“津平1号”整平船碎石基床验收方式分为全抬升式验收与整平船全漂浮式验收2种, 全漂浮验收时抛石管底部高程会随潮汐不断变化,

声呐距垄顶的距离也会不断变化, 而整平船全抬升验收时, 船体处于插桩稳定状态, 抛石管不受外界因素影响, 高程恒定。为确保研究数据的精确合理, 故选用整平船全抬升验收方式进行研究, 本研究通过整平船全抬升式不同测距下声呐验收数据的对比分析, 确定在保证碎石垄验收检测精

收稿日期: 2023-11-07

基金项目: 2021年度交通运输行业重点科技项目(2021-MS1-050)

作者简介: 宋江伟(1988—), 男, 河北邢台人, 工程师, 从事项目施工生产管理工作。E-mail: 378052470@qq.com

度时的声呐最佳测距范围。

大连湾海底隧道由 1 节 135 m 直线段管节, 12 节 180 m 直线段管节和 5 节 148 m 曲线段管节组成, 隧道纵断面为 W 形, 所有管节均设有纵坡, 基床顶标高在-14.152~-30.358 m 之间。本研究选定 E10 管节实验槽区域, E10 管节具体数据如表 1 所示。

表 1 E10 管节纵坡控制误差统计表  
Table 1 Statistical table of E10 pipe section slope control error

管节编号	管节长度/m	首端标高/m	尾端标高/m	高差/m	坡度/%
E10	180	-20.098	-20.088	-0.01	0.005

1 整平船声呐验收

1.1 概述

声呐系统在大连湾海底隧道碎石基床整平施工中扮演着十分重要的角色, 它是碎石基床质量验收的重要检测设备之一<sup>[2]</sup>, 整平船共包含 2 个施工声呐, 二者对称分布在抛石管的左右两侧, 距离抛石管中心为 2.0 m, 2 个声呐距离抛石管底高度为 1.87 m。试验过程中通过改变声呐距离垄顶高度, 来分析声呐 1 与声呐 2 的垄顶高程测量值及碎石垄验收合格率, 从而得出不同测距对验收精度的影响<sup>[3]</sup>, 整平船声呐验收示意图如图 1 所示。

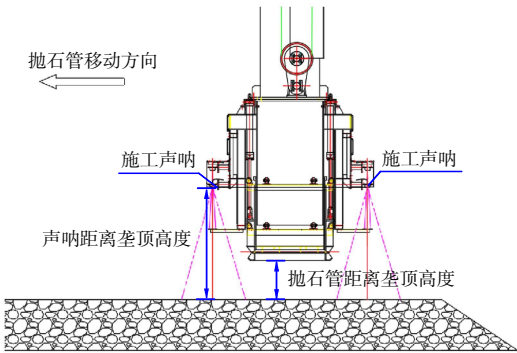


图 1 整平船声呐验收示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of sonar acceptance of leveling ship

1.2 原理简介

碎石基床验收时主要利用装于抛石管底部的 2 个施工声呐同时发出声信号, 当声信号遭遇碎石基床后会立即返回并被接收, 通过计算该过程所用时间来反算碎石基床顶部高程, 整平船声呐的测量误差可控制在±10 mm 以内。

1.3 目标垄选择

选取整平船全抬升方式铺设的 1 号碎石垄作

为此次研究的目标垄, 目标垄厚度为 1.3 m, 横向长度为 37.4 m, 顶部设计高程为-22.5 m。为提升目标垄铺设精度, 该垄采用 2 层施工, 目标垄底层厚度为 1.0 m, 顶层厚度为 0.3 m, 先进行底层铺设, 再进行顶层铺设。铺设时整平船抛石管底部刮刀采用 0% 来模拟 E10 管节 0.005% 的坡度。E10 管节碎石垄布设示意图见图 2。

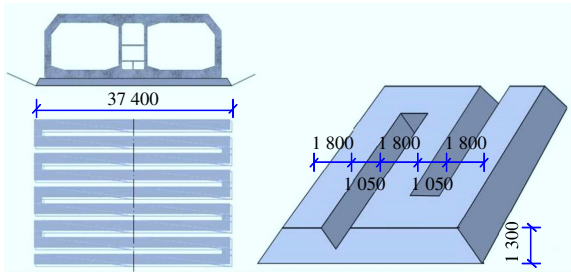


图 2 E10 管节碎石垄布设纵横断面图(mm)  
Fig. 2 Vertical and horizontal profile of E10 pipe section gravel ridge layout(mm)

1.4 验收方式选择

对比整平船全抬升式与全漂浮式 2 种验收方式, 全漂浮式验收由于整平船处于漂浮状态, 整平船易受水文条件影响, 抛石管易受潮汐影响, 验收过程中, 声呐测距随潮汐不断变化, 不适合此研究验收方式, 故选取全抬升式验收方式。待目标垄铺设完成后, 整平船插桩抬升并对目标垄进行测量验收, 验收时抛石管需沿着垄横向(整平船艏艉方向)移动大车, 若移动过程中基线偏移大于 4 cm, 需通过调整小车来纠偏, 以防声呐 1 与声呐 2 所测数据差异较大, 从而影响试验效果。

1.5 工况选定

本研究自变量只考虑抛石管底部声呐不同测距  $h$ , 为将水文气象要素对试验研究的影响程度降到最低, 选取当天最佳工况条件相同时间段进行试验研究, 具体数据统计见表 2。

表 2 声呐验收当天工况统计表  
Table 2 Statistical table of working conditions on the day of sonar acceptance

风力	风向/(°)	流速/(m·s <sup>-1</sup> )	流向/(°)	有效波高/m	波周期/s
2 级	230	0.2	15	0.2	2

1.6 测距高度选择

选取 7 组声呐不同测距高度<sup>[4]</sup>进行验收, 来分析不同高度对碎石垄验收检测精度影响程度。具体数据见表 3。

表3 不同测距高度对碎石垄验收精度影响程度统计表

Table 3 Statistical table of the influence of different ranging heights on the acceptance accuracy of gravel ridge

参数	序号						
	1	2	3	4	5	6	7
抛石管距垄顶的高度	0.3	1.0	1.2	1.5	2.0	3.0	4.0
声呐距离垄顶的高度	1.805	2.505	2.705	3.005	3.505	4.505	5.505

### 1.7 验收速度设定

为保证试验自变量的唯一性,根据整平船全抬升式验收作业的限制条件,设定每次验收时,抛石管移动速度为 2.5 m/min,验收全程保持不变。

### 1.8 试验流程

目标垄铺设完成后,整平船处于插桩抬升状

态,通过移动整平船大小车将整平船抛石管中心定位至目标垄起点垄中心线正上方(距法线距离为 18 m,基准线偏离 0 cm),根据 RTKTide 软件显示的高程,控制绞车下放抛石管,到达指定验收高度,设定大车移动速度为 2.5 m/min,开始移动大车进行目标垄质量验收,同时记录测量数据。7 组试验流程一致,只改变抛石管距垄顶的高度。

### 2 数据分析

此研究对 7 组不同抛石管距垄顶高度、不同声呐距离垄顶高度的验收结果进行汇总整理,主要从声呐验收合格率、声呐测量垄顶高程平均值、声呐测量垄顶高程平均值与设计值差值数值进行统计分析,具体数据见表 4。

表4 不同测距高度验收结果统计表

Table 4 Statistical table of acceptance results of different ranging heights

序号	抛石管距垄顶的高度/m	声呐距离垄顶的高度/m	合格率/%		高程平均值/m		(平均值-设计值)/cm	
			声呐 1	声呐 2	声呐 1	声呐 2	声呐 1	声呐 2
1	0.3	1.805	99.8	99.8	-22.499	-22.503	0.1	-0.3
2	1.0	2.505	98.4	99.2	-22.475	-22.482	2.5	1.8
3	1.2	2.705	61.0	84.3	-22.463	-22.471	3.7	2.9
4	1.5	3.005	7.1	33.5	-22.444	-22.456	5.6	4.4
5	2.0	3.505	0.8	4.8	-22.426	-22.441	7.4	5.9
6	3.0	4.505	0.4	0.3	-22.378	-22.403	12.2	9.7
7	4.0	5.505	0.0	0.1	-22.327	-22.362	17.3	13.8

由表 4 分析可知,随着抛石管底部距垄顶高度的增加,声呐 1 与声呐 2 验收的垄体合格率会不断下降,声呐测量值会不断变大<sup>[5]</sup>,高程测量值与设计值偏差也越来越大,测量精度越来越差,当抛石管底部距离垄顶 4 m 时,合格率下降至 0,声呐测量最大偏差值为 17.3 cm。

将 7 组不同抛石管距垄顶高度的目标垄验收成果图及不同抛石管距垄顶高度与声呐偏差值变化曲线进行汇总分析。

随着抛石管底部距离高度的增加,声呐 1 与声呐 2 的离散程度越来越大,当抛石管距垄顶距离大于等于 2 m 时,声呐 1 与声呐 2 测量点基本全部超过设计上限高程-22.46 m。如图 3 所示(取序号 1、5、7 为例)。距垄顶不同高度声呐 1 与声呐 2 差值见图 4,由图 4 可知,抛石管底部距垄顶高度较小时,声呐 1 与声呐 2 测量值与设计差值偏差越小,当距离逐渐增加时,声呐 1 与声呐 2 测量值与设计差值偏差逐渐增大。

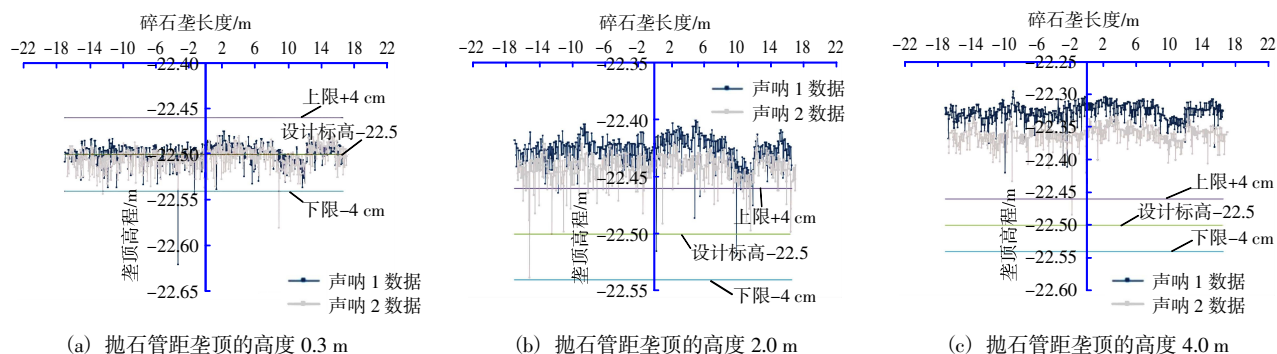


图3 抛石管距垄顶不同高度验收成果图

Fig. 3 Acceptance diagram of riprap pipe at different heights from the ridge top

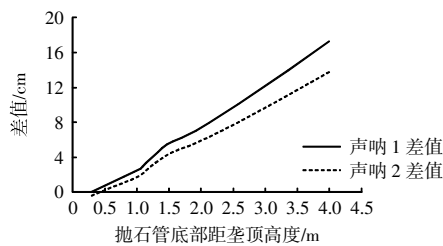


图4 距垄顶不同高度声呐1与声呐2差值

Fig. 4 Difference between sonar 1 and sonar 2 at different heights from the ridge top

综上所述,在验收时抛石管底部至垄顶距离不能过大,距离越大测量误差越大<sup>[6]</sup>,测量精度也随之下降。碎石垄验收时,抛石管底部距垄顶高度应控制在1.0 m以下<sup>[7]</sup>,否则将影响到验收成果。

3 应用效果及分析

大连湾海底隧道工程18节沉管已全部安装完成并顺利通车,各管节贯通测量数据首段最大偏差34 mm,尾端最大偏差38 mm,均满足设计要求,通过各管节的贯通测量数据证实了各碎石基床的整平效果良好,声呐测量验收结果显示,基床的标高、坡度及误差可满足设计要求,垄顶高程可控制在 $\pm 4$  cm<sup>[8]</sup>以内,各管节平均合格率可达96%以上,具体数据如表5所示。

表5 各管节施工数据统计

Table 5 Construction data statistics of each pipe section

管节 编号	各管节碎石基床整平 结果			各管节安装后贯通测量结果				
	检测 点数	合格 点数	合格 率/%	高程偏差/mm		纵坡偏差/%		
				首端	尾端	设计 纵坡	实测 纵坡	偏差
E1	72 139	69 649	96.5	2	-38	-4.000	-4.030	-0.030
E2	125 773	121 774	96.8	-34	-28	-3.941	-3.938	-0.007
E3	125 178	123 569	98.7	-12	-5	-1.027	-1.024	0.003
E4	123 518	121 563	98.4	19	14	-1.072	-1.075	-0.003
E5	122 991	120 473	98.0	29	36	-0.046	-0.042	0.004
E6	122 453	119 158	97.3	-7	-31	1.121	1.106	-0.015
E7	123 127	120 131	97.6	9	36	2.241	2.263	0.022
E8	123 418	120 110	97.3	3	-3	1.829	1.826	-0.003
E9	119 954	116 565	97.2	-4	10	0.510	0.518	0.008
E10	113 453	111 283	98.1	30	37	0.005	0.015	0.010
E11	124 264	122 354	98.5	9	33	-1.362	-1.348	0.014
E12	100 839	98 703	97.9	-11	-12	-1.839	-1.840	-0.001
E13	116 525	114 624	98.4	-4	-3	-1.223	-1.222	0.001
E14	104 770	103 543	98.8	-1	-5	-0.051	-0.054	-0.003
E15	109 066	107 476	98.6	20	11	0.650	0.647	-0.003
E16	109 110	107 313	98.4	-2	-9	0.485	0.480	-0.005
E17	109 435	106 932	97.7	-20	-3	0.485	0.496	0.011
E18	108 974	106 658	97.9	-5	19	0.485	0.490	0.005

4 结语

通过整平船声呐不同测距对验收检测精度影响的数据分析,验证了为确保整平船碎石垄验收时的验收检测精度,抛石管底部至垄顶距离需控制在0.2~1.0 m范围。整平船全漂浮式验收时,抛石管底部距垄顶距离随涨落潮变化而发生改变,为此需不断调整抛石管的底部高程来时刻保证声呐测距范围。该成果的成功应用,进一步提升了整平施工的质量控制水平,可推广应用于类似沉管隧道工程中,具有显著的经济和社会效益。

参考文献:

[1] 李一勇,刘德进,陆连洲,等.深水抛石整平船的建造与应用[J].中国港湾建设,2010,30(S1):136-141.  
LI Yi-yong, LIU De-jin, LU Lian-zhou, et al. Construction and application of the deepwater rubble base leveling ship[J]. China Harbour Engineering, 2010, 30(S1): 136-141.

[2] 刘伯胜,黄益旺,陈文剑,等.水声学原理[M].北京:科学出版社,1993.  
LIU Bo-sheng, HUANG Yi-wang, CHEN Wen-jian, et al. Principles of underwater acoustics[M]. Beijing: Science Press, 1993.

[3] 刘孟庵,连立民.水声工程[M].杭州:浙江科学技术出版社,2002.  
LIU Meng-an, LIAN Li-min. Underwater acoustic engineering[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2002.

[4] 刘太刚.深水抛石整平船声呐检测系统和技术应用[J].中国港湾建设,2018,38(6):59-63.  
LIU Tai-gang. Sonar detection system of deep water riprap leveling ship and its application[J]. China Harbour Engineering, 2018, 38(6): 59-63.

[5] 曾鹏.定位声呐测距误差理论分析[J].声学技术,1987(1):18-24,42.  
ZENG Peng. Theoretical analysis of location sonar ranging error[J]. Acoustical Technology, 1987(1): 18-24, 42.

[6] 毛卫宁.水下被动定位方法回顾与展望[J].东南大学学报(自然科学版),2001(6):129-132.  
MAO Wei-ning. An overview of passive localization for underwater acoustics[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2001(6): 129-132.

[7] 崔凯兴.多普勒声呐系统原理及应用[J].科技广场,2010(5):169-171.  
CUI Kai-xing. Principle and implement of Doppler sonar system [J]. Science and Technology Plaza, 2010 (5): 169-171.

[8] 赵炜炜.某型声呐测距工况误差分析[J].舰船电子工程,2009,29(3):146-149.  
ZHAO Wei-wei. Ranging error analysis of a certain type of sonar [J]. Ship Electronics Engineering, 2009, 29(3): 146-149.