



# 东非某工程嵌岩灌注桩钢护筒卷边问题分析

冯光华<sup>1</sup>, 王胤彪<sup>2</sup>, 涂启达<sup>2</sup>, 于小林<sup>3</sup>, 陈厚松<sup>2</sup>, 郭立涛<sup>2</sup>

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;

2. 中交四航局第一工程有限公司, 广东 广州 510310; 3. 广东省中山市宏鸿工程有限公司, 广东 中山 528400)

**摘要:** 东非某水工码头桩基础为嵌岩灌注桩, 桩尖进入强风化岩层, 嵌岩至钢护筒底部以下 8 m。在引桥钻进过程中, 钢护筒出现卷边现象。高应变全程动测结果显示, 持力层较硬, 能量传递效率达到 92.4%, 桩身最大应力为 220 MPa。经设计指示, 最后 10 击的平均贯入度减少, 钻岩深度增加至 13 m, 修改沉桩方案后持力层由强风化变成全风化层, 卷边现象基本上消除。本工程经验可为嵌岩灌注桩理论研究和工程应用做出参考。

**关键词:** 嵌岩灌注桩; 钢护筒; 卷边; 高应变全程动测

中图分类号: U 655.54<sup>+</sup>4.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)07-0148-06

## On steel casting crimping of rock-socketed cast-in-place pile in East Africa

FENG Guang-hua<sup>1</sup>, WANG Yin-biao<sup>2</sup>, TU Qi-da<sup>2</sup>, YU Xiao-lin<sup>3</sup>, CHEN Hou-song<sup>2</sup>, GUO Li-tao<sup>2</sup>

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. The First Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510310, China;

3. Guangdong Zhongshan Honghong Engineering Co., Ltd., Zhongshan 528400, China)

**Abstract:** The rock-socketed cast-in-place pile is used in a hydraulic dock in East Africa. The bearing stratum is strongly weathered rock and the socketed depth is 8 m under the pile tip of steel casting. The crimping of steel casting is found during drilling. Whole-process PDA test shows that the bearing stratum is hard, the transfer efficiency of energy is 92.4%, and the maximum stress of the steel casting pile is 220 MPa. The average set of last 10 blows is decreased as the designer requires and socketed depth increases to 13 m. The bearing stratum is completely weathered rock according to the new scheme and crimping completely disappears. The engineering experience may serve as reference for the theoretical research and engineering practice of rock-socketed cast-in-place piling.

**Key words:** rock-socketed cast-in-place pile; steel casting; crimping; whole-process PDA test

嵌岩灌注桩因单桩承载力高、沉降小等优点被广泛应用于码头、桥梁、高层建筑、重型厂房等建筑基础<sup>[1-5]</sup>。

基于东非某工程嵌岩灌注桩钢护筒沉桩中出现卷边现象, 总结该地质状况下钢管桩沉桩规律和能量传递的情况, 分析钢护筒卷边情况的根源。本工程嵌岩灌注桩钢护筒上部钢护筒桩长有 37.73 m 和 43.75 m 两种规格, 桩径 1.2 m, 壁厚 12.5 mm, 基桩两端 1 m 范围内加厚至 25 mm,

桩身材质为 S275JR, 钢护筒收锤标准是最后 10 击贯入度平均值达到 3 mm/击, 出现卷边后, 设计将收锤标准放宽至最后 10 击贯入度平均值为 5 mm/击, 持力层由强风化变成全风化层, 卷边现象基本上消除。

### 1 工程概况

工程位于非洲东部海岸, 码头采用高桩式结构, 主体长 435 m, 引桥长 776 m, 岸上通道长

收稿日期: 2013-11-19

作者简介: 冯光华 (1984—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事桩基检测与科研工作。

550 m。工程总基桩数量为 633 根, 其中起重码头平台 408 根, 引桥和拖轮码头共 225 根。桩基础采用嵌岩灌注桩结构形式, 钢护筒采用 BSP-CG 240 型液压锤施打至设计高程、SP120 型管端气举反循环钻钻岩至钢护筒底部以下 8 m, 清孔后浇注混凝土, 灌注桩桩身混凝土强度等级要求为 C40, 钢护筒采用高应变检测, 嵌岩桩采用自平衡静载检测。

## 2 钢护筒卷边情况

引桥钢管桩桩长为 43.75 m, 桩径 1.2 m, 壁

厚 12.5 mm, 桩头和桩尖 1 m 以内加厚处理, 壁厚为 25 mm, 按照设计要求, 桩身并未作防腐蚀处理。沉桩采用 BS-CG 240 液压锤, 锤芯质量为 16 t, 额定跳高为 1.5 m, 钢护筒的收锤标准为锤芯跳高 0.8 m, 连续沉桩达到最后 10 击贯入度的平均值达到 2 mm/击即可收锤。引桥基桩为 207 根, 在后期的嵌岩钻进过程中发现 35 根钢护筒出现卷边现象, 比例为 16.9%。卷边的钢护筒情况见表 1。

表 1 引桥 35 根卷边钢管桩信息

桩号	钢护筒桩尖高程/m	轴号	持力层	RQD 值/%	钻孔号	桩号	钢护筒桩尖高程/m	轴号	持力层	RQD 值/%	钻孔号
PB01	-15.68	1 <sup>#</sup>	泥岩	40	B205	PB126	-25.27	31 <sup>#</sup>	砂岩	52	B210
PB03	-15.82	1 <sup>#</sup>	泥岩	40	B205	PB128	-25.85	31 <sup>#</sup>	砂岩	43	B210
PB12	-19.26	4 <sup>#</sup>	泥岩	85~100	B205	PB129	-24.29	31 <sup>#</sup>	砂岩	52	B210
PB40	-14.29	14 <sup>#</sup>	密实砂层	/	B207	PB131	-25.31	32 <sup>#</sup>	砂岩	52	B210
PB45	-13.51	15 <sup>#</sup>	砂岩	/	B208	PB133	-24.63	32 <sup>#</sup>	砂岩	52	B210
PB65	-21.6	21 <sup>#</sup>	泥岩	65~100	B209	PB134	-24.78	32 <sup>#</sup>	砂岩	52	B210
PB108	-23.29	28 <sup>#</sup>	泥岩	65~100	B109	PB135	-24.13	32 <sup>#</sup>	砂岩	52	B210
PB110	-23.65	28 <sup>#</sup>	泥岩	65~100	B109	PB137	-26.92	33 <sup>#</sup>	砂岩	43	B210
PB111	-23.85	28 <sup>#</sup>	泥岩	65~100	B109	PB136	-27.03	33 <sup>#</sup>	砂岩	43	B210
PB113	-25.92	29 <sup>#</sup>	砂岩	43	B210	PB139	-27.46	33 <sup>#</sup>	砂岩	90~100	B210
PB114	-25.14	29 <sup>#</sup>	砂岩	52	B210	PB140	-27.18	33 <sup>#</sup>	砂岩	43	B210
PB117	-25.63	29 <sup>#</sup>	砂岩	52	B210	PB142	-28.98	34 <sup>#</sup>	砂岩	90~100	B210
PB118	-28.36	30 <sup>#</sup>	砂岩	90~100	B210	PB145	-30.17	34 <sup>#</sup>	砂岩	90~100	B210
PB119	-27.13	30 <sup>#</sup>	砂岩	43	B210	PB146	-29.88	34 <sup>#</sup>	砂岩	90~100	B210
PB120	-23.39	30 <sup>#</sup>	砂岩	0	B210	PB147	-27.28	34 <sup>#</sup>	砂岩	90~100	B210
PB121	-28.19	30 <sup>#</sup>	砂岩	90~100	B210	PB150	-28.00	35 <sup>#</sup>	砂岩	0	B211
PB122	-26.87	30 <sup>#</sup>	砂岩	43	B210	PB163	-27.38	37 <sup>#</sup>	砂岩	43	B211
PB124	-25.59	31 <sup>#</sup>	砂岩	52	B210						

由图 1 可见: 大部分钢管桩卷边位置集中在 1~2 m 的范围内。桩顶锤击引起的力波沿着桩身往下传递, 当遇上持力层较硬时候, 桩尖反射上行压应力波和下行压应力波叠加, 在桩尖位置加强, 而距离桩尖 1 m 位置, 壁厚由 12.5 mm 增加至 25 mm, 存在应力集中问题, 叠加的桩身压应力值超过桩身屈服强度时, 便产生桩身部分屈曲, 即卷边现象。当钻桩机钻至卷边深度时便产生卡钻现象, 数小时在同一深度内磨动。

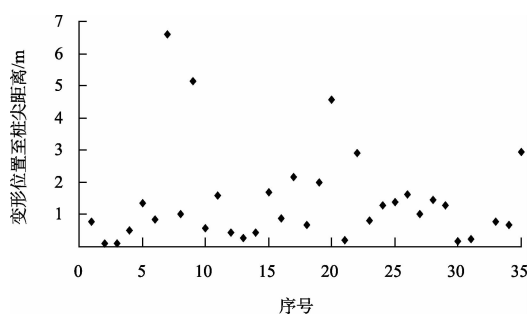


图 1 钢护筒变形位置至桩尖距离

### 3 卷边钢护筒沉桩规律

PB117 和 PB131 钢护筒存在卷边现象且曾做过高应变检测，以此 2 根桩沉桩情况为代表分析卷边钢护筒的沉桩情况。由表 1 可知 PB117 和 PB131 对应的钻孔号均为 B210，持力层为 *RQD* 值为 52 的强风化砂岩层。B210 孔的土层分布情况见表 2。

表 2 B210 孔土层分布情况

土层名称	层厚/m	底层高程/m	岩石质量指标 <i>RQD</i> /%
淤泥混细砂	3.8	-18.8	
黏土混砂	0.7	-19.5	
砂岩	1.5	-21.0	0
泥岩	2.2	-23.2	0
砂岩	0.6	-23.8	0
砂岩	0.9	-24.7	52
砂岩	1.5	-26.2	43~52

由表 2 可知，上面覆盖层为 4.5 m 的黏土混砂层，砂层下面是 4.3 m 的全风化层，*RQD* 值为 0，下部为强风化砂岩层，*RQD* 值为 43~52。

图 2 为卷边钢管桩 PB117 和 PB131 贯入度随着桩尖高程变化的示意图。上部砂层比较松软，每击下沉数十厘米，当桩尖到全风化砂岩层时，贯入度迅速减少，全风化下部 *RQD* 值为 43~52 的强风化砂岩层，其贯入度均在 5 mm/击以下，PB117 收锤贯入度为 1.9 mm/击，PB131 收锤贯入度为 1.7 mm/击，且最后 10 击贯入度平均值小于 2 mm/击，达到收锤标准。

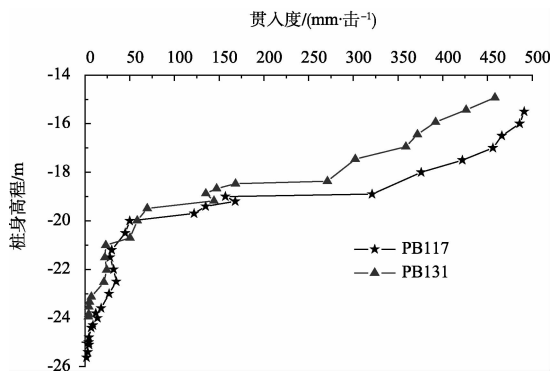


图 2 PB117 和 PB131 基桩沉桩过程贯入度的变化

### 4 钢护筒高应变检测和沉桩过程全程动测结果

#### 4.1 引桥钢护筒高应变检测结果

引桥钢护筒高应变检测分开初打承载力检测和复打承载力检测，复打在沉桩施工 7 d 后进行。共有 5 根桩进行高应变检测，其中 PB117 和 PB131 桩存在卷边现象。5 根引桥钢管桩施工参数见表 3。高应变检测的钢管桩均达到了设计要求的最后 10 击贯入度平均值达到 2 mm/击。

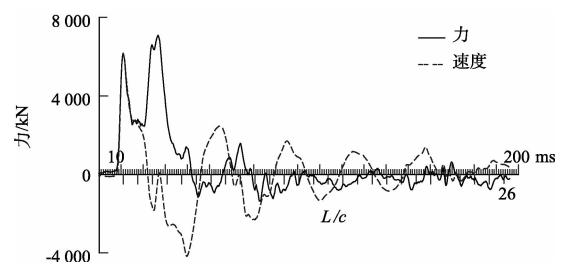
表 3 高应变检测的基桩桩施工参数

桩号	桩长/m	规格/mm	入土深度/m	动测贯入度/(mm·击 <sup>-1</sup> )
PB95	37.75	φ1 200 × 12.5	11.76	1.8
			11.82	1.6
PB117	37.75	φ1 200 × 12.5	11.74	1.9
			11.83	1.3
PB131	43.75	φ1 200 × 12.5	11.22	1.7
			11.27	1.2
PB151	43.75	φ1 200 × 12.5	12.72	1.8
			12.77	1.5
PB161	43.75	φ1 200 × 12.5	10.40	1.7
			10.46	1.5

注：每根桩第 1 行为初打施工参数，第 2 行为复打施工参数。

由表 3 可知，复打贯入度比初打终锤贯入度要小，均小于 2 mm/击。

图 3 和 4 为 PB117 和 PB131 钢管桩高应变初复打实测曲线。由图可知，桩身入土深度范围内上部土层实测力曲线和速度曲线粘合在一起，侧阻力较小，而在约 75% 入土深度后力曲线和速度曲线分离，侧阻力迅速增加，桩身进入较硬土层，桩端区域速度曲线迅速向 0 周以下偏移，桩底反射明显，基桩的初打和复打曲线区别不大，说明复打桩周土和桩端土承载力提高不大，桩端土岩土恢复系数较小。



a) 初打

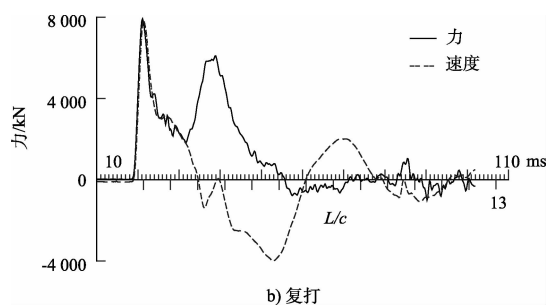
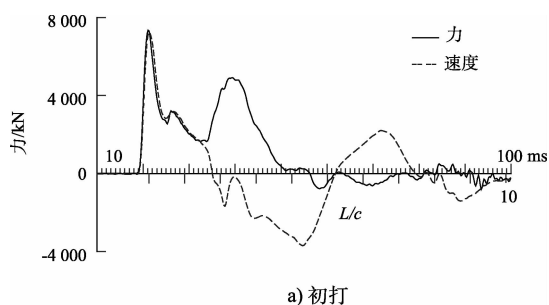


图 3 PB117 高应变实测曲线



a) 初打

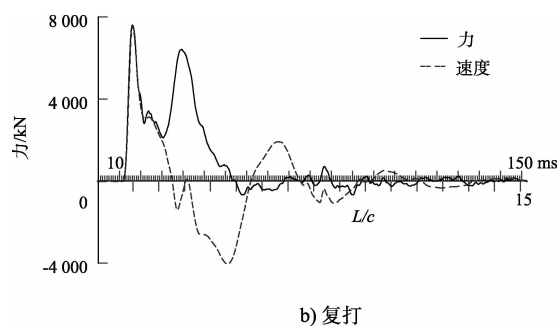


图 4 PB117 高应变实测曲线

由图 3a) 和图 4a) 可知, 高应变初打时, 与 PB117 相比, PB131 的实测力曲线和速度曲线粘在一起沿着时间轴分布更长, 因此上部软层较厚, 因此其初打时侧阻力相对较大。试验桩高应变测试参数见表 4。

表 4 试验桩高应变测试参数

桩号/初、复打	最大锤击能量/kJ	最大桩身应力/MPa	最大加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	最大动位移/mm	贯入度 mm/击	动测极限承载力/kN	侧阻力/kN	端阻力/kN	承载力恢复系数	极限承载力对应的桩顶沉降量/mm	
PB95	初打	102.2	178.4	283	19	2.0	5 646.3	2 382.3	3 264.0	1.16	25.3
	复打	107.3	189.3	328	28	1.6	6 558.5	3 020.7	3 537.8		30.8
PB117	初打	100.2	194.6	214	21	2.0	6 758.7	3 013.3	3 745.5	1.03	26.8
	复打	113.8	203.4	248	25	1.3	6 935.2	3 159.7	3 775.5		35.3
PB131	初打	98.0	203.5	298	25	2.0	6 291.5	2 878.2	3 413.3	1.05	31.6
	复打	109.2	199.8	232	26	1.2	6 633.2	3 107.8	3 525.3		34.6
PB151	初打	102.2	189.4	277	25	2.0	6 027.0	2 882.8	3 144.2	1.11	37.0
	复打	111.8	178.5	304	26	1.5	6 697.5	3 407.4	3 290.1		35.4
PB161	初打	95.8	171.2	293	27	2.0	5 047.3	2 200.9	2 846.3	1.19	42.3
	复打	109.0	183.4	411	28	1.5	6 023.8	2 934.3	3 089.5		44.0

注: PB117 和 PB131 桩卷边。

#### 4.2 PB204 桩沉桩过程高应变全程动测结果

鉴于引桥存在钢管桩大量卷边的情况, 设计调整了收锤标准, 新的终锤贯入度要求为最后 10 击贯入度平均值放宽至 5 mm/击。为测试沉桩过程中, 桩身参数的变化, 选择的 PB204 施工过程高应变全程动测, 基桩位于 40 轴, 施工资料见表 5, 地质资料参考 B201 号孔, 地质资料见表 6。

为测试过程的安全性, 防止仪器安装的过程中出现溜桩现象, 压锤稳定后锤击数阵, 安装加速度和力传感器, 监控沉桩过程中桩身贯入度、能量、桩身应力等参数的变化。

表 5 PB204 施工资料

规格/mm	轴号	桩尖高程/m	持力层
1 200 × 12.5	40	-32.0	强风化

表 6 B201 孔资料

土层名称	层厚/m	底层高程/m	RQD 值/%
黏土混砂	1.5	-20.7	
松散细砂	4.5	-25.2	
全风化泥岩	4.5	-29.7	0
强风化砂岩	5.9	-35.6	13 ~ 15

由于上部黏土层较为软弱, 考虑到桩身沉桩质量, 前面数阵采用 0.4 m 的跳高, 达到松散砂

层后采用0.8 m的跳高。持力层为强风化砂岩层，桩尖高程为-32.0 m，进入持力层2.3 m。沉桩过程贯入度、能量、桩身应力变化见图5。

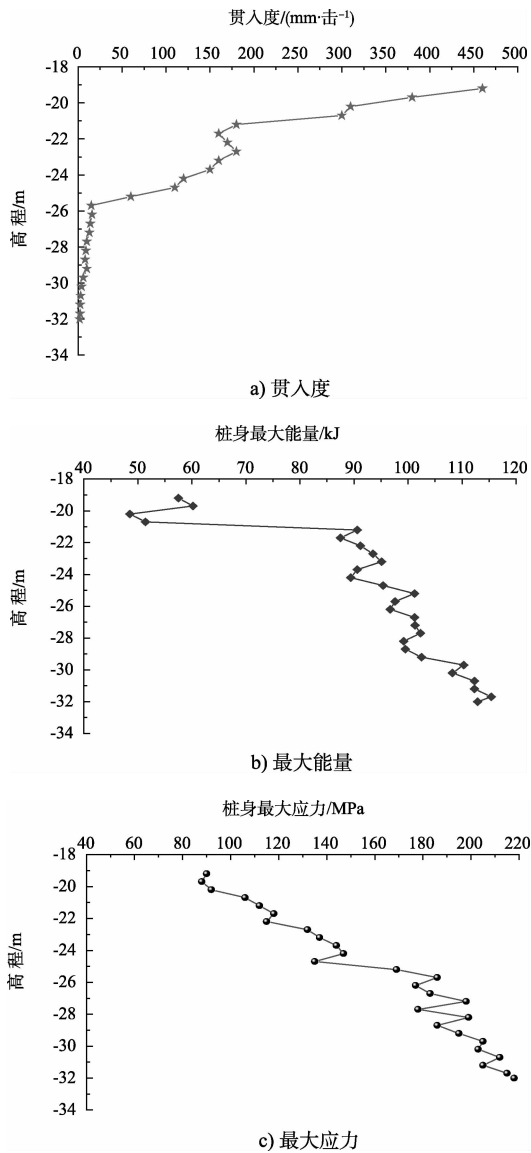


图5 PB204 钢护筒沉桩过程中参数变化

由图5可知，上部较为松软的黏土混砂层和松散细砂层，贯入度较大，每击数十厘米。桩尖位于全风化泥岩时，层贯入度迅速减少，为10 mm/击左右，而强风化砂岩层对应的贯入度在6 mm/击以下，终锤贯入度为1.8 mm/击。

锤跳高为0.4 m的土层能量为48.5~60.2 kJ，锤芯跳高调整为0.8 m时，能量增加明显，全风化泥岩层桩身最大能量为89.4~102.5 kJ，而强风化砂岩层最大能量略为增加，均达到100 kJ以

上，最大值118.3 kJ，对应的能量传递系数为92.4%。

桩身最大压应力值在强风化砂岩层达到200 MPa以上，最大值为220 MPa。而全风化层，最大应力值在200 MPa以下。

### 4.3 钢护筒卷边原因分析

根据港口工程桩基规范<sup>[6]</sup>6.2.4，钢管桩的外径与厚度之比不宜大于100。钢管桩沉桩困难时，抗锤击要求的最小壁厚可按经验确定，也可以按下式计算：

$$t = 6.35 + d/100 \quad (1)$$

式中： $t$ 为钢管桩抗锤击要求的最小壁厚（mm）； $d$ 为钢管桩外径（mm）。

根据规范的要求对于1 200 mm外径的钢管桩，依上述公式，抗锤击要求的最小壁厚18.35 mm，而实际的钢管桩壁厚为12.5 mm，远远小于规范要求的最小壁厚。

水运工程钢结构设计规范<sup>[7]</sup>10.0.5中规定钢管桩的外径与有限厚度之比不宜大于100，钢管桩需打入良好持力层，且沉桩困难时其外径与厚度之比不宜大于70。1 200 mm外径钢管桩对应的为17.1 mm壁厚。

引桥钢管桩高应变测试参数见表3。由表3可知，PB117和PB131基桩的端阻力较大，并且端阻力恢复系数较小，极限承载力恢复系数也较其它基桩小。因卷边基桩桩尖进入的岩层RQD值较高，岩层较硬，桩端阻力接触面积增加，端阻力较大。而极限承载力对应的桩顶沉降量普遍较小，PB95、PB117、PB131、PB151拟静载最大桩顶沉降量均小于40 mm。

桩身最大能量为95.8~113.8 kJ，0.8 m跳高的最大系统能量为128 kJ，能量传递系数为74.7%~88.9%。桩身最大压应力值为171.2~203.5 MPa。桩身材质为欧标的S275JR，理论屈服强度为275JR。考虑到桩身壁厚为12.5 mm，较薄，且在桩尖端1 m内加厚，钢管桩锤击能量最大值往往出现在桩两端，因此存在应力集中现象，

当最大应力值超过局部桩身屈服强度时,导致卷边现象的出现。

当收锤标准由 2 mm/击放宽至 5 mm/击时,其桩尖对应的位置为全风化层和强风化层,能量和最大应力值均减少。能有效减少卷边现象的发生。

## 5 结论

1) 钢管桩壁厚过小是导致卷边现象的直接因素,且在桩尖加厚区的应力集中区是沉桩最薄弱位置;

2) 桩身材质为 S275JR 的钢管桩在沉桩过程中桩身应力不宜超过 200 MPa;

3) 钢管桩收锤标准应根据具体的持力层性质定义,对于壁厚较薄的钢管桩,应慎用强风化作为持力层。

## 参考文献:

- [1] 李建军,梁仁旺,毛虎平.大直径嵌岩灌注桩静载试验[J].建筑结构,2012,42(1):115-119.
- [2] 丁翠红,钱世楷.软岩嵌岩桩承载性状的研[J].浙江工业大学学报,2002,30(5):441-445.
- [3] 刘树亚,刘祖德.嵌岩桩理论研究和设计中的几个问题[J].岩土力学,1999,20(4):86-92.
- [4] 何思明,卢国胜.嵌岩桩荷载传递特性研究[J].岩土力学,2007,28(12):2598-2602.
- [5] 张忠苗.软土地基超长嵌岩桩受力性状[J].岩土工程学报,2001,23(5):552-556.
- [6] JGS 167-4—2012 港口工程桩基规范[S].
- [7] JTS 152-4—2012 水运工程钢结构设计规范[S].

(本文编辑 郭雪珍)

~~~~~

(上接第 144 页)

## 4 结语

随着数字化进程的不断发 展,针对目前航迹成图抽象、精度较低以及成图工作繁琐、耗时长的问题,基于 AutoLISP 与 DCL 开发了一套航迹自动绘制工具。通过 DCL 搭建的自主用户界面灵活、高效地输入所测船舶信息,利用 AutoLISP 代替人工手动重复操作实现测量 GIS 数据的自动成图。经过实践项目的验证,本工具在保证绘图效果和精度的基础上,大大降低了制图人员的工作量、极大提高了工作效率。基于 AutoLISP 与 DCL 的航迹自动绘制工具的成功研发在一定程度上支持了航道安全性维护及相关管理工作。

## 参考文献:

- [1] 靖常峰,盛林,魏海洋,等.基于 AutoLISP 的空间数据

质检与整理工具集设计与实现[J].测绘通报,2013(4):29-32,36.

- [2] 龚子楨,花向红,尹相宝,等.基于 AutoLISP 的高程点批量修改算法设计与实现[J].测绘通报,2011(4):41-43,46.
- [3] 唐存宝,邵哲平,唐强荣,等.基于 AIS 的船舶航迹分布算法[J].集美大学学报:自然科学版,2012,17(2):109-112.
- [4] 张炜,周斌麟. Visual LISP 和 CASS 相结合实现断面图的自动绘制[J].测绘与空间地理信息,2011,34(4):239-240,244.
- [5] 卢俊辉,朱宵黎.用 AutoLISP 和 del 开发 AutoCAD 图幅形成及快速出图[J].机械设计与制造,2006(8):81-82.
- [6] 龚子楨,花向红,徐秀川,等.在 CAD 平台下实现房屋属性自动修改的方法[J].测绘通报,2011(9):80-82,94.

(本文编辑 武亚庆)