



基于BP神经网络的横向受荷桩承载力预测*

蒋建平

(上海海事大学海洋科学与工程学院, 上海 201306)

摘要: 为研究横向受荷桩的承载性状, 基于BP神经网络对其承载力进行预测。选取桩径、桩入土深度、荷载的偏心距、土的不排水抗剪强度作为神经网络的输入, 得出黏土中横向受荷桩承载力的BP神经网络预测模型, 发现训练BP神经网络时, 桩承载力的拟合值与实测值的相对误差平均值为4.54%; 检验BP神经网络时, 桩承载力的预测值与实测值的相对误差平均值为5.39%。结果表明, 建立的基于BP神经网络的黏土中横向受荷桩承载力预测模型是可行的。

关键词: 桩; 承载力; 横向荷载; BP神经网络; 预测; 误差; 训练样本; 检验样本

中图分类号: TU 473; U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)01-0158-06

Prediction of bearing capacity of lateral loading pile based on BP neural network

JIANG Jian-ping

(College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To investigate the bearing behaviors of lateral loading piles, we predict the ultimate bearing capacity of lateral loading pile based on BP neural network. Taking the pile diameter, depth of pile embedment, eccentricity of load, undrained shear strength of soil as the input of neural network, we obtain the prediction model of pile bearing capacity based on BP neural network. It is found that the average value of relative error of fitting value of pile bearing capacity compared with the observed value for 31 groups of independent variables training BP neural network model is 4.5%; and the average value of relative error of prediction value of pile bearing capacity compared with the observed value for 7 groups of independent variables validating BP neural network model is 5.4%. The conclusion is drawn that the prediction model of bearing capacity of lateral loading pile based on BP neural network is feasible.

Keywords: pile; bearing capacity; lateral load; BP neural network; prediction; error; training sample; validating sample

桩基础是岩土工程中的一种最重要的地基基础形式, 被广泛地应用于建筑、桥梁、高桩码头、海洋钻井平台等工程中^[1-4]。对于桩基设计来说, 合理地确定单桩竖向承载力是一项重要内容和一个关键的技术问题。由于桩土相互作用机理比较复杂、单桩的破坏模式较多以及施工方法的影响等原因, 精确地计算单桩竖向承载力具有很大困难。目前, 确定、计算和预测桩承载力的方法主要有5种: 1) 基于试验的方法; 2) 经验公式法;

3) 理论公式法; 4) 基于桩顶荷载-桩顶沉降曲线(即Q-S曲线)的各种数学模型预测法; 5) 多因素综合预测法。其实, 桩承载力受到众多因素(如桩长、桩直径、桩身材料强度、桩侧土性状、桩端土性状等)的影响, 桩承载力与这些因素共存一个系统中。因此, 要更精确地确定或预测桩的承载力, 考虑各主要因素影响的多因素综合预测方法不失为一个最有效的方法。目前, 该方法主要有模糊推理法、偏最小二乘回归法、支持向量机

收稿日期: 2016-05-02

*基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41372319); 上海市教委科研创新项目(14YZ101); 上海市研究生教育创新计划实施项目(水利工程博士点培育)(20131129)

作者简介: 蒋建平(1966—), 男, 博士, 教授, 从事工程地质、港航工程方面的教学和研究工作。

回归法等。人工神经网络法也是一种多因素综合预测方法, 它目前在桩基础方面得到了一些应用^[5], 但还未涉及横向受荷桩。

鉴于此, 本文考虑 4 个主要影响因素, 采用 BP 神经网络方法来预测横向受荷桩的承载力。

1 影响横向受荷桩承载力的主要因素及样本的获取

经分析, 选取影响横向受荷桩承载力的主要因素——桩径、桩入土深度、荷载的偏心距、土的不排水抗剪强度。其中, 土的不排水抗剪强度是

针对黏性土(当然最好能采用 c 、 φ 值), 如果是砂性土则应采用标贯击数。

以室内模型试验中 38 根横向受荷桩的实测资料作为样本^[6], 其中训练样本 31 组, 检验样本 7 组(表 1)。模型试验中地基土为黏土, 桩为短的刚性桩, 桩直径 6.35 ~ 33.3 mm, 桩的入土深度为 130 ~ 300 mm。样本中的桩承载力实测值是通过包含有应力传感器的加载装置实现的(也可用加砝码的滑轮式加载系统), 偏心距用位移计测得。

表 1 训练模型、检验模型的实测数据表及拟合值与实测值比较

样本	桩径/mm	桩入土深度/mm	荷载的偏心距/mm	土的不排水抗剪强度/(kN/m ²)	横向受荷桩承载力实测值/N	横向受荷桩承载力 BP 神经网络的拟合值/N	相对误差/%
	6.35	146.10	19.10	38.80	69.50	70.11	0.88
	13.00	260.00	0.00	24.00	225.00	223.36	-0.73
	13.50	190.00	0.00	24.00	128.00	127.94	-0.05
	13.50	300.00	50.00	3.40	30.00	31.50	4.99
	13.50	300.00	50.00	4.00	36.00	37.77	4.93
	13.00	132.10	33.80	38.80	53.00	53.12	0.22
	13.50	300.00	50.00	7.20	64.00	64.38	0.59
	18.00	300.00	50.00	10.00	89.00	99.18	11.44
	18.00	300.00	50.00	3.40	39.00	39.23	0.58
	20.40	300.00	50.00	4.00	46.00	47.90	4.12
	12.30	300.00	50.00	5.50	44.00	43.43	-1.29
	18.40	300.00	50.00	4.00	51.00	44.52	-12.71
	33.30	300.00	50.00	5.50	110.50	111.86	1.23
	12.30	300.00	50.00	3.40	29.50	32.60	10.52
	12.30	300.00	50.00	7.20	58.00	56.65	-2.33
	18.40	300.00	50.00	10.00	114.00	103.58	-9.14
	20.40	300.00	50.00	5.50	59.50	66.67	12.05
训练样本	6.35	139.70	25.40	38.80	65.50	65.07	-0.65
	25.40	300.00	50.00	7.20	90.00	86.83	-3.52
	25.40	300.00	50.00	5.50	75.00	77.09	2.79
	20.40	300.00	50.00	10.00	87.00	95.78	10.09
	25.40	300.00	50.00	10.00	151.61	152.14	0.35
	25.40	300.00	50.00	3.40	50.00	51.19	2.38
	33.30	300.00	50.00	3.40	78.50	74.58	-5.00
	20.40	300.00	50.00	3.40	38.00	41.81	10.02
	12.50	130.00	0.00	24.00	106.00	106.81	0.77
	18.00	300.00	50.00	4.00	49.00	43.90	-10.40
	18.00	300.00	50.00	5.50	65.00	62.16	-4.36
	18.00	300.00	50.00	7.20	87.00	85.97	-1.18
	18.00	300.00	50.00	10.00	116.50	105.18	-9.72
	12.30	300.00	50.00	10.00	81.00	82.50	1.85
	12.30	300.00	50.00	4.00	35.00	36.34	3.83
	18.40	300.00	50.00	3.40	42.50	39.61	-6.80
检验样本	25.40	300.00	50.00	4.00	58.00	59.71	2.94
	13.50	300.00	50.00	5.50	50.00	47.24	-5.52
	18.40	300.00	50.00	5.50	65.50	63.35	-3.28
	18.40	300.00	50.00	7.20	86.50	86.78	0.32
	20.40	300.00	50.00	7.20	76.50	88.02	15.06

究竟训练样本或学习样本多少是合理的，目前尚无统一的用法，在实测资料缺乏的情况下，十几组学习样本也是可行、合理的^[7]。

2 横向受荷桩承载力的 BP 神经网络预测

2.1 BP 神经网络的基本原理

人工神经网络^[8] (artificial neural network, ANN)是近年来迅速发展的前沿性交叉学科，具有自组织、自学习、联想、容错、抗干扰和非线性动态处理等特征，可实现高度的网络输入因素与网络输出目标间的非线性映射关系。神经网络可揭示数据样本中蕴含的非线性关系，大量处理单元组成非线性自适应动态系统，在不同程度和层次上可模仿大脑的信息处理机理，灵活方便地对多成因的复杂的未知变量进行高度建模。

BP 神经网络^[9-11] (back propagation artificial neural network, BPANN)是典型的多层前馈型网络，由输入层、隐含层和输出层组成，层与层之间多采用全部连接方式，同一层单元之间不存在相互连接。BP 网络算法的基本思想是通过网络输出误差的反向传播，不断调整和修改网络的连接权值，从而使网络误差达到最小。BP 神经网络的训练过程包括前向计算和误差反向传播两个过程。对于输入信号，先向前传播到隐含层，经过作用函数后，再把隐含层的输出信息传播到输出层，如果在输出层得不到期望的输出，则转入反向传播，将误差信号沿原来通路返回，通过修改各层神经元的权值，使得误差信号最小。BP 神经网络的节点作用函数一般为 S 型函数。

2.2 BP 神经网络结构设计、学习与检验

2.2.1 BP 神经网络结构设计

由前述可知，本文要建立的预测模型中，因变量为 1 个，自变量为 4 个，因此可确定本文 BP 神经网络的输入层节点数为 4 个，输出层节点数为 1 个，所以神经网络结构的确定主要是确定隐含层数及其节点数。

建立多层神经网络模型时，采用适当的隐层

节点数是很重要的。可以说选用的隐含层数及其节点数是否合适往往是网络成败的关键。经反复试算，最终确定隐层数为 3，每个隐含层的节点数都取 12 个(图 1)。

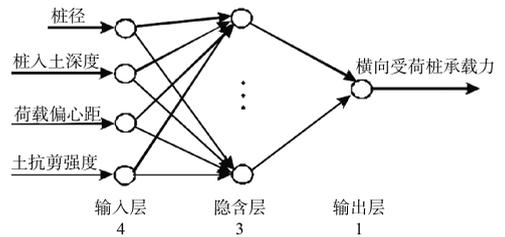


图 1 BP 神经网络结构

2.2.2 BP 神经网络学习训练

神经网络的学习，主要是通过样本的反复训练来实现的。训练的好坏直接决定系统的质量。在本文的 BP 神经网络学习、训练时，先对原始的样本数据进行标准化转换，再设置最小训练速率为 0.1，动态参数为 0.6，参数 Sigmoid 为 0.9，训练过程控制中，设置最大迭代次数为 20 000。因不知迭代次数达 20 000 时的误差是多少，故特意将误差设置小一些，使之小于迭代次数 20 000 时的误差，最后确定允许误差为 0.000 001。

横向受荷桩承载力的神经网络的训练样本由如下 4 维矢量构成： $\mathbf{X}=[x_1, x_2, x_3, x_4]$ 组成，分别代表的是桩径、桩入土深度、荷载的偏心距、土的不排水抗剪强度(表 1)。

将表 1 中的数据带入神经网络进行训练。训练过程中，当迭代次数为 20 000 时，训练停止，最后得到的残差为 0.000 723 89(图 2)。

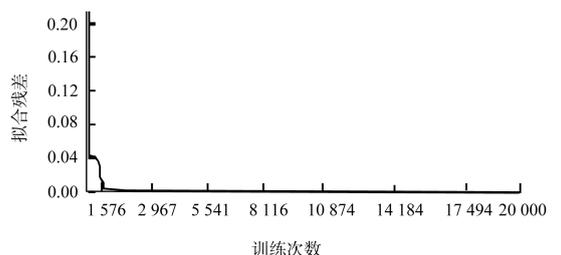


图 2 计算完成后的误差值

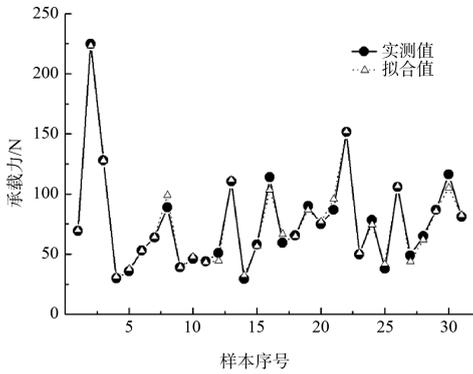
训练结束后，得到第 1~第 3 隐含层和输出层各个节点的权重矩阵(表 2)。

表 2 隐含层、输出层各个节点数的权重矩阵

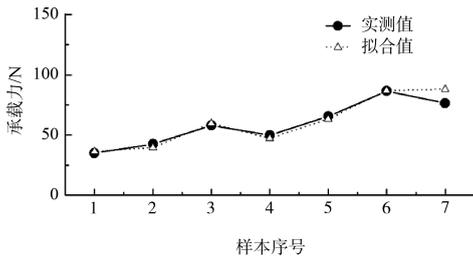
层别	各个节点的权重矩阵											
第 1 隐含层	-1.274 79	-2.741 09	-2.869 86	1.595 45	-4.123 63	-2.441 6	-0.428 81	-0.801 06	1.779 17	-1.009 62	-0.744 70	0.333 52
	0.981 87	-1.977 01	1.404 10	-0.022 37	-2.636 51	-1.647 25	-2.006 13	-0.715 68	0.299 81	-1.784 32	0.571 49	0.962 21
	-1.778 23	2.239 09	-0.687 54	-0.514 24	2.057 69	3.663 06	-1.673 99	-0.848 10	-2.324 99	0.394 12	0.401 58	-1.052 84
	0.138 63	1.318 91	1.797 29	-0.038 96	4.448 68	-3.896 96	-0.267 26	0.609 53	6.324 74	1.203 22	-6.199 77	6.832 61
第 2 隐含层	0.548 19	-0.901 84	0.083 25	0.261 89	-0.452 45	-0.102 42	0.320 67	0.873 70	0.614 86	0.101 68	-0.296 04	-0.579 92
	-0.026 46	2.637 10	-0.037 31	-0.747 42	-0.436 97	3.813 99	-0.636 69	0.199 21	-0.234 29	0.660 36	-1.428 24	-0.691 30
	-0.494 32	-0.025 96	0.404 85	-1.367 05	-1.388 75	0.399 48	0.244 41	1.960 99	-0.09 59	0.189 89	-0.925 65	-0.751 27
	0.093 04	-0.304 68	0.753 42	-0.028 93	1.024 75	-1.121 63	-0.068 90	-0.570 53	-0.526 66	0.131 14	0.651 24	-0.029 69
	-2.439 15	4.179 46	2.343 36	0.325 49	2.306 46	4.584 55	-2.149 15	-2.480 58	-1.876 72	0.968 03	-1.205 02	-0.525 74
	-0.327 61	2.123 18	1.248 29	0.533 65	0.386 36	3.756 46	-1.240 24	-0.506 87	-0.251 89	1.011 53	-0.079 57	-0.761 77
	-0.682 83	-0.590 26	0.336 46	0.090 09	-0.985 69	2.575 70	0.063 37	0.647 16	-0.323 51	0.878 50	-0.575 79	-0.648 16
	-0.109 53	-0.462 37	-0.411 07	-1.037 99	0.337 49	1.261 50	0.370 40	0.001 60	-1.026 21	-0.025 34	-0.603 09	0.480 66
	0.754 75	-1.940 33	-1.373 13	-0.561 70	-0.557 12	-3.186 16	1.427 25	1.212 81	0.864 67	0.500 95	0.591 07	-0.386 92
	-1.146 86	0.949 13	-0.573 23	0.021 35	0.713 16	1.306 13	-0.812 14	-0.133 95	-0.783 91	0.403 95	-0.829 91	-0.788 15
	0.510 84	2.701 30	0.267 74	1.120 50	1.230 50	2.765 86	-0.793 99	-1.635 30	0.134 73	0.478 17	0.312 27	-0.368 16
	0.568 45	-1.331 89	-1.149 43	-1.429 70	-1.224 29	-2.879 76	0.049 33	2.159 61	0.469 24	0.379 13	0.514 71	-0.183 76
第 3 隐含层	0.532 25	-0.954 24	-0.758 66	0.638 10	-0.876 45	-0.255 02	-1.069 70	0.082 83	-1.826 96	-1.041 70	-0.944 87	-1.901 65
	-1.424 33	-1.907 23	-0.147 25	-3.417 07	0.181 21	2.071 51	-0.092 33	-0.743 09	2.959 93	1.376 33	-0.840 80	1.769 79
	-1.307 73	-0.037 11	-0.486 27	-1.749 46	0.522 25	1.505 17	0.346 98	0.341 32	0.972 68	0.331 35	-0.610 88	1.213 24
	-1.336 89	-1.296 04	0.306 98	-0.535 65	-0.732 45	0.035 49	0.221 03	-0.358 61	1.228 96	-0.981 38	0.155 04	0.105 48
	-1.339 02	-0.565 22	-0.959 94	-2.010 43	-0.587 18	0.806 88	-0.885 66	-0.212 33	0.999 53	-1.650 74	-0.928 90	1.024 08
	-4.100 50	-3.101 61	-0.579 94	-5.970 64	0.624 83	3.363 36	0.538 39	0.067 13	1.058 07	1.810 92	-0.848 50	-0.323 58
	0.713 80	-0.025 50	-0.508 49	1.614 66	-0.470 53	-0.887 79	-0.885 83	0.220 20	-1.322 63	-1.479 17	-0.491 66	-1.048 66
	0.050 70	0.724 94	-0.736 97	1.856 09	0.549 25	-0.483 35	0.234 01	-0.928 09	-3.180 68	0.313 67	0.607 67	-2.024 26
	0.298 27	-1.063 97	-0.702 48	1.062 32	-0.814 07	-0.215 20	-0.696 55	-0.727 68	-1.866 55	-0.875 62	-0.989 00	-0.877 88
	-1.012 37	-0.452 60	0.162 29	-1.445 17	-0.164 71	1.218 61	-0.485 32	-0.819 23	-1.706 37	-0.333 65	-0.851 15	-1.164 50
	0.112 46	-0.186 37	0.283 53	0.403 53	-1.656 43	-0.431 28	-0.760 22	-0.572 12	-1.129 82	-1.713 85	-0.437 56	-0.994 85
	0.358 49	-0.299 95	0.634 28	0.709 85	-0.553 85	-0.637 98	-0.570 08	-0.516 99	0.783 45	-0.976 72	0.028 11	0.152 34
输出层	2.480 32											
	1.873 03											
	-0.434 20											
	4.331 98											
	0.459 77											
	-0.938 80											
	0.352 15											
	-0.062 01											
	-4.700 93											
	1.727 07											
0.289 33												
-1.813 07												

2.2.3 BP 神经网络检验及误差分析
 训练好的网络已经具有了计算横向受荷桩承

载力的能力，为了验证训练效果，对神经网络进行检验，检验结果如表 1 和图 3~4 所示。



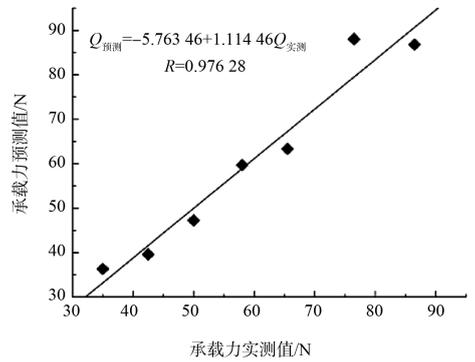
a) 拟合值与实测值



b) 预测值与实测值

图3 承载力拟合值、预测值的效果

从表1第8列和图3~4中可看出, BP神经网络模型的拟合和预测或验证效果好。具体来说,图3a)显示拟合值与实测值几乎完全重合,图3b)显示预测值与实测值吻合得较好;图4显示拟合值、预测值与实测值的相关曲线(相关系数都达0.976 28以上)几乎都是过原点,并与两坐标轴几乎成45°的直线;31组自变量数据的横向受荷桩承载力的BP神经网络拟合值与实测值的相对误差平均值为4.54%;7组自变量数据的横向受荷桩承载力的BP神经网络预测值与实测值的相对误差平均值为5.39%。



b) 预测值与实测值

图4 承载力关系曲线

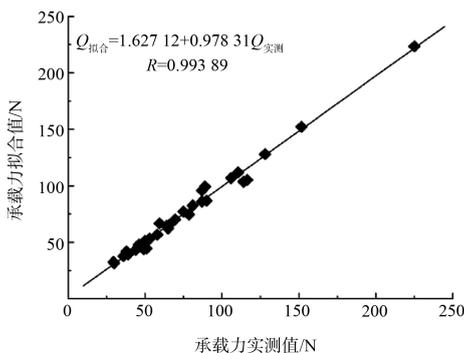
对岩土工程中桩基础承载力的训练误差和预测误差,最大误差小于25%,平均误差小于15%一般是可以接受的^[12]。因此,本文的预测精度是较高的。

3 结论

1) 人工神经网络法也是一种多因素综合预测方法,它目前在桩基础的竖向承载力预测等方面得到一些应用,但还未涉及到横向受荷桩,有必要加强。

2) 本文的主要意义在于首次考虑了众多的影响因素对横向受荷桩的承载力的影响,并基于这些影响因素对横向受荷桩的承载力进行了预测;其他人也可像本文一样建立自己的横向受荷桩的BP神经网络预测模型(影响因素即自变量可考虑增加桩的弹模和土的弹模),因为目前神经网络程序的编写已变得很简单,若利用Matlab就更容易了。本文神经网络模型的结构为:输入层节点数为4个,输出层节点数为1个;采用反复试算,最终确定隐层数为3,每个隐含层的节点数都取12个。

3) 本文中训练BP神经网络时,横向受荷桩承载力的拟合值与实测值的最大误差为12.05%,相对误差绝对值的平均值为4.5%;检验BP神经网络时,横向受荷桩承载力的预测值与实测值的最大误差为15.06%,相对误差绝对值的平均值为5.4%。因此,本文中桩横向受荷桩承载力的预测精度是较高的。但本文在桩承载力的拟合值与实



a) 拟合值与实测值

测值的对比分析中, 所采用的实测值仅限于室内试验的实测数据, 而这个室内试验的实测数据与实际工程试桩的实测数据之间还是会有一定差异的。有待有条件时, 采用工程试桩实测数据对比, 则更有说服力。

4) 本文中地基土为黏性土, 采用的横向受荷桩承载力的影响因素为桩径、桩入土深度、荷载的偏心距、土的不排水抗剪强度; 如地基土为砂性土, 可将土的不排水抗剪强度换成标贯。

参考文献:

- [1] SEO H, BASU D, PREZZI M, et al. Load-settlement response of rectangular and circular piles in multilayered soil[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2009, 135(3): 420-430.
- [2] COMODROMOS E M, PAPAPOPOULOU M C, RENTZEPERIS I K. Pile foundation analysis and design using experimental data and 3-D numerical analysis[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2009, 135(6): 790-798.
- [3] 蒋建平, 高广运, 章杨松. 基于现场试验的桩身总侧阻力达到极限后的退化[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 633-642.
- [4] 陈新奎, 戴国亮, 龚维明. 开口钢管桩竖向承载力计算方法[J]. 水运工程, 2016(3): 137-144.
- [5] 孟庆峰, 程永舟, 胡旭跃, 等. 基于 BP 神经网络的冲积河床桥墩局部冲刷深度预测模型[J]. 水运工程, 2008(7): 39-43.
- [6] RAO K M, SURESH K V. Measured and predicted response of laterally loaded piles[C]//Proceedings of the sixth International Conference and Exhibition on Piling and Deep Foundations, India: [s.n.], 1996: 161-167.
- [7] 张国栋, 彭刚, 王钊, 等. BP 神经网络在单桩承载力预测中的应用[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2003, 25(1): 6-8.
- [8] 曾锦光, 舒雅琴. 材料非线性粘弹性的神经网络模拟[J]. 固体力学学报, 2004, 25(1): 71-74.
- [9] 孟文清, 焦健, 张亚鹏. 基于 BP 神经网络的 CFG 桩辅助设计的研究[J]. 山西建筑, 2007, 33(9): 3-4.
- [10] ZHANG L, WU K, ZHONG Y F, et al. A new sub-pixel mapping algorithm based on a BP neural network with an observation model[J]. Neurocomputing, 2008, 71: 2 046-2 054.
- [11] YU S W, ZHU K J, DIAO F Q. A dynamic all parameters adaptive BP neural networks model and its application on soil reservoir prediction[J]. Journal of systems engineering and electronics, 2008, 19(1): 167-174.
- [12] 涂帆, 常方强. BP 神经网络预测水泥搅拌桩单桩承载力[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2007, 28(1): 68-70.

(本文编辑 郭雪珍)

· 消 息 ·

疏浚技术装备国家工程研究中心举行授牌仪式

12月14日, 我国疏浚行业唯一的国家工程研究中心——疏浚技术装备国家工程研究中心授牌仪式在上海举行。

公司副总裁孙子宇参会表示, 疏浚技术装备国家工程研究中心要珍惜建设成果, 把握发展机遇, 切实做到三个“紧紧围绕”: 一要紧紧围绕国家发展趋势, 以振兴民族疏浚产业为己任, 不断探索, 持续创新; 二要紧紧围绕交通运输行业发展趋势, 始终保持清醒头脑, 认清形势, 锐意进取, 为产业升级服务; 三要紧紧围绕中国交建发展趋势, 努力推陈出新, 拓宽产业布局, 为公司新产业布局提供技术支撑。

疏浚技术装备国家工程研究中心于2011年9月获国家发展改革委批复筹建, 2016年9月建成并通过验收。该中心占地面积1.8万m², 建筑面积1.1万m², 建有全世界规模最大、技术最先进的疏浚试验平台。

http://en.ccccltd.cn/cccltd/news/gsyw/201612/t20161219_87013.html (2016-12-19)