

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.11.015

基于 SVR 模型的灌注桩价格估算研究

黄善明

(福建省交通工程造价管理站, 福建 福州 350001)

摘要: 采用基于结构风险最小化思想的支持向量回归 (SVR) 模型预测了灌注桩的中标价格。在分析灌注桩的成本动因的基础上, 通过历史项目清单预算确定了 17 个回归自变量, 根据历史项目中标价格 (因变量) 和成本动因 (自变量) 来估算当前项目价格。利用该模型对福建省某高速公路灌注桩进行了价格估算, 并与基于定额的清单预算价格以及多元线性回归估算价格进行了对比。结果表明: 估算结果相对于其他两种方法明显接近实际中标价格, 采用 SVR 模型可以大大提高估算的准确性, 有效控制造价, 提升公路工程造价管理水平。

关键词: 桥梁工程; 价格估算; 支持向量回归; 灌注桩价格; 工程量清单

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2014) 11-0092-04

Study on Price Estimation of Bored Piles Based on Model of Support Vector Regression

HUANG Shan-ming

(Traffic Engineering Cost Management Station of Fujian Province, Fuzhou Fujian 350001, China)

Abstract: The bid price of bored piles is predicted using the model of support vector regression based on structural risk minimization. On the basis of analyzing the cost drivers of bored piles, 17 regression independent variables are determined by means of the budget of the historical project list, and the price of the current project is estimated according to the historical project bid price (dependent variable) and cost drivers (independent variable). By using the model, the price of the bored piles of a certain expressway in Fujian Province is estimated, and the estimated price is compared with the list budget price based on quota and the estimated price of multivariate linear regression. The result shows that (1) the estimated price is significantly closer to actual bid price compared with the prices obtained from other 2 methods; (2) using the SVR model can greatly improve the accuracy of estimation, effectively control cost, and enhance the level of highway engineering cost management.

Key words: bridge engineering; price estimation; support vector regression; price of bored pile; bid quantity list

0 引言

灌注桩是桥梁工程的主要子项, 在公路工程量清单中, 灌注桩子目包含了孔身成型、混凝土浇筑养生及附属工作^[1]。近三年来, 福建省高速公路灌注桩子目费用平均为工程量清单中桥梁涵洞费用的 13%, 对项目中标价格有着重要的影响。

目前公路工程量清单价格估算是基于官方定额

编制的清单预算。由于定额的滞后性, 造成清单预算部分子目价格与市场中标价格差距较大, 严重影响公路造价估算的准确性^[2], 其中清单预算灌注桩子目比中标价平均高出 30% 以上, 需要寻找新的估算方法来使估算接近市场水平。美国公路项目招标价格估算多采用基于历史项目价格的估算方法, 估算结果接近市场水平^[3]。由于公路工程的单一性, 受复杂成本动因影响, 难以根据历史价格准确预测

收稿日期: 2014-04-04

作者简介: 黄善明 (1968-), 男, 福建闽清人, 博士, 高级工程师. (huangsm_001@163.com)

灌注桩的中标价格。支持向量回归 (Support Vector Regression, SVR) 可以通过历史项目成本动因和中标价格的回归分析, 在国内地铁、石油等行业的造价预测中取得较优预测结果^[4-5]。支持向量机的分类算法在公路交通行业如围岩分类、车型识别方面有较多应用研究^[6-7]。

1 SVR 基本原理

支持向量机是基于结构风险最小化思想的机器学习算法, 利用适当的核函数可将非线性函数映射到高维空间进行支持向量求解, 同时把高维空间点积计算转换为低维空间的核函数计算^[8]。在考虑引入松弛变量软化边界时, 允许一定训练错误的边界, 可以得到 SVR 表达式:

$$\min \frac{\|\omega\|^2}{2} + C \sum_{i=1}^l (\xi + \xi^*), \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} y_i - \omega x_i - b \leq \varepsilon + \xi_i, \\ \omega x_i + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^*, \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, l, \end{cases} \quad (2)$$

式中, ξ 和 ξ^* 为松弛变量; ε 为不敏感损失系数; C 为惩罚系数; ω 和 b 为回归超平面参数^[9]。 x_i 为回归自变量; y_i 为回归因变量。

转换为拉格朗日函数问题后, 可得到 SVR 模型的对偶形式:

$$\min \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_i)(\alpha_j^* - \alpha_j) [\Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j)] + \varepsilon \sum_{i=1}^l (\alpha_i^* + \alpha_i) - \sum_{i=1}^l y_i (\alpha_i^* - \alpha_i), \quad (3)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_i) = 0, \\ 0 \leq \alpha_i^*, \quad \alpha_i \leq C, \\ i = 1, 2, \dots, l, \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\alpha_i, \alpha_i^*, \alpha_j, \alpha_j^*$ 为拉格朗日乘子向量; 点积 $\Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j)$ 可以看作 x_i 和 x_j 在变换后空间的相似性度量。

(3) 式中点积 $\Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j)$ 可以用原空间相似度函数即核函数 K 表示。常用核函数有线性核函数、多项式核函数、高斯径向基核函数和多层感知器核函数。不同样本采用不同核函数的拟合回归效果不同。本文估算模型采用适用性较广的高斯径向基核函数:

$$K(x, y) = \exp\left(-\frac{\|x - y\|^2}{2\delta^2}\right), \quad (5)$$

式中 δ^2 为高斯核宽度。

对 (3) 和 (4) 式求解, 得到拉格朗日乘子向量解:

$$\bar{\alpha}^{(*)} = (\bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_1^*, \dots, \bar{\alpha}_l, \bar{\alpha}_l^*)^T,$$

此时最优超平面为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (\bar{\alpha}_i^* - \bar{\alpha}_i) K(x_i, x) + \bar{b}. \quad (6)$$

根据 $\bar{\alpha}^{(*)}$ 的分量 $\bar{\alpha}_j$ 或 $\bar{\alpha}_k^*$ 可求最优超平面参数 \bar{b} :

$$\bar{b} = y_j - \sum_{i=1}^l (\bar{\alpha}_i^* - \bar{\alpha}_i)(x_i x_j) + \varepsilon, \quad 0 < \bar{\alpha}_j < C, \quad (7)$$

或

$$\bar{b} = y_k - \sum_{i=1}^l (\bar{\alpha}_i^* - \bar{\alpha}_i)(x_i x_k) - \varepsilon, \quad 0 < \bar{\alpha}_k^* < C. \quad (8)$$

2 灌注桩成本动因分析

成本动因包括内因和外因。内部因素包括承包人自身人员、机械设备、财务、技术水平、管理水平等内部资源状况。由历史价格数据估算的灌注桩子目价格可视为涵盖了历史项目承包人在内因素的平均水平, 则估算的差异由外部因素所决定, 通过历史项目的清单预算可以提取出外部影响因素。

灌注桩子目价格估算的外部因素有:

(1) 工程结构特征

工程结构特征主要是截面面积和孔深。子目的名称反映桩径, 清单预算所套用的定额则是以孔深进行分类的。如挖孔桩分孔深 10 m 以内和 10 m 以上两个类别, 回旋钻陆上钻孔桩分孔深 20, 40, 60, 80 m 以内四个类别。挖孔孔深越深, 工作效率越低, 排烟效果变差, 不可预见风险大大提升。钻孔孔深越深, 功效越低, 钻头摆动幅度越大, 扩孔率越高, 混凝土损耗量越大。该子目以 m 为单位, 不同截面积的灌注桩所包含的工程量不同。

(2) 地质结构

灌注桩成孔所穿过地层的结构对成孔的成本影响较大。预算定额根据灌注桩造孔的难易程度, 将地质结构分为 8 类: 砂土、黏土、砂砾、砾石、卵石、软石、次坚石、坚石。桩径 150 cm、孔深 40 m 以内, 回旋钻钻孔砂土和坚石的定额基价分别为 296.8 元/m 和 3 386 元/m, 相差超过 10 倍。经过相关性分析, 部分地质类别钻孔长度比例与灌注桩单价显著相关。

(3) 地形地貌

清单预算所能反映的地形地貌只有钻孔地点在水中还是陆上。陆上桩只需进行简易处理就能将水

中施工转换为陆上施工的水中桩,其费用与深水区灌注桩施工费用差异大。深水基础施工需要的钢结构围水设施、钻孔平台等临时设施费用对灌注桩费用影响较大。

(4) 资源价格

灌注桩的主要资源包括人工、水泥、中粗砂、碎石、施工机械,这些资源费用约占灌注桩直接工程费用的90%。机械除自身的摊销费用外,其余的成本均是柴油或电的消耗。电的价格是政府定价,近年来基本没有变化。水泥、中粗砂、碎石价格均取自清单预算报表。

除了以上四项因素之外,成孔工艺对灌注桩价格的影响也较大,但从历史资料中难以提取该因素,故不在估算中考虑该因素。

成孔特征按定额名称分孔径、孔深。地质特征以钻孔长度来体现,不能直接用于单价估算,需按表1的特征分类提取并转换为特征值,再进行单价分析。各地质层长度比例由各地层钻孔定额所对应的钻孔长度累加后除以总桩长得到,各孔深长度比例由各孔深钻孔定额所对应的钻孔长度累加后除以总桩长得到,截面积由桩径按圆截面积计算得到。

各成本估算影响因素之间存在一定的相关性,因素数量也较多,需要通过主成分分析来整合各因素并转换为新的互不相关的因素。这些因素有:砂土层长度比例,黏土层长度比例,砂砾层长度比例,砾石层长度比例,卵石层长度比例,软石层长度比例,次坚石层长度比例,坚石层长度比例,孔深40 m以内长度比例,孔深60 m以内长度比例,孔深80 m以内长度比例,截面积(单位为 m^2),人工(单位为元/d),32.5级水泥(单位为元/t),中粗砂(单位为元/ m^3),碎石(单位为元/ m^3),柴油(单位为元/t)。

3 主成分分析原理

主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)将较多数量的变量重新组合转换为数量较少的互不相关的且能反映原始变量绝大部分信息的新变量,即主成分^[10]。设原始变量数据为 $m \times n$ 维矩阵 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$,其协方差矩阵 \mathbf{C} 为:

$$\mathbf{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(X_i - \bar{X})^T, \quad (9)$$

式中, X_i 为样本值; \bar{X} 为样本均值。

对 \mathbf{C} 进行特征分解,得到:

$$\lambda_i \alpha_i = \mathbf{C} \alpha_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (10)$$

式中, λ_i 为 \mathbf{C} 的特征值; α_i 为 λ_i 所对应的特征向量。

任意的两个特征向量 α_i 相互正交,设 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_i$,则第 i 个主成分为:

$$y_i = \alpha_i^T \mathbf{X}_0. \quad (11)$$

通过累计贡献率 φ 来确定主成分数量:

$$\varphi = \sum_{i=1}^m \lambda_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (12)$$

4 估算实例

以福建省山岭重丘区某高速公路为例,该项目有7个合同段,其中灌注桩子目共有44个,全部为陆上灌注桩或简易处理即可陆上施工的水中桩,因此选取同区域内近三年历史项目中的同类灌注桩共136个子目的中标数据。以中标价格为因变量,表1所列影响因素为自变量,进行SVR回归估算。以历史项目数据前96组作为训练集,后40组作为测试集。

4.1 数据预处理

为了避免较大值域的特征值的左右回归分析结果,需要将自变量进行标准化,将其值转换到 $[0, 1]$ 范围内。

$$y_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad y_i \in [0, 1], \quad (13)$$

式中, y_i 为标准化特征值; x_i 为原始特征值。

4.2 主成分分析

使用Matlab中的princomp函数对标准化后的训练测试集自变量进行PCA分析。将 φ 值设为95%,将17个原始自变量压缩到11个主成分。将训练测试中产生的 α_i 导出,将预测集数据中心化,再与 α_i 相乘得到新坐标系下的预测集数据。最后按照训练测试集的主成分数目确定预测集的主成分。

4.3 SVR回归预测

使用基于Matlab和Libsvm^[11]的FarutoUltimate工具箱^[12],对处理好的数据进行SVR分析。采用交叉验证(CV)方法^[11-12]并结合图1调整svmtrain函数的参数 c 和 g ,寻求最优训练测试结果。训练测试集拟合最优 R^2 均超过0.9,得到的 c 值为741 455.200 2, g 值为0.011 049。

利用训练测试集的SVR参数对估算项目数据进行预测,得到估算单价。SVR估算与线性回归估算及清单预算对比情况见表1和图2。表2中相对误差 e 的计算式为:

$$e = \frac{|x' - x|}{x} \times 100\%, \quad (14)$$

式中， x' 为实际单价； x 为估算单价。

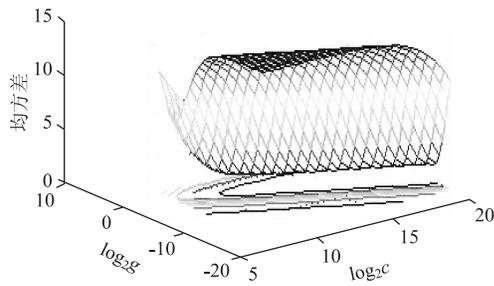


图 1 CV 参数寻优 3D 视图

Fig. 1 3D view of optimization of CV parameters

表 1 灌注桩单价估算结果对比 (单位: %)

Tab. 1 Comparison of estimation results of unit price of bored piles (unit: %)

估算方法	相对误差			SVR 对项目总价影响程度
	最大值	最小值	平均值	
SVR 估算单价	15.18	0.04	5.62	0.22
线性回归估算单价	19.53	0.96	8.55	0.43
清单预算价	59.99	15.03	34.32	1.79

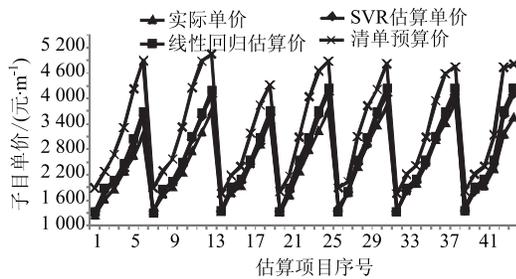


图 2 灌注桩估算单价对比

Fig. 2 Comparison of estimated unit prices of bored piles

对比方法中线性回归估算采用 spss 软件，以中标价为因变量，以表 1 中的数据为自变量进行多元线性回归，回归调整后得到 R^2 为 0.923。而清单预算则是根据交通运输部颁布的定额和预算编制办法编制的实际项目清单进行预算。从估算结果来看，灌注桩单价 SVR 估算的相对误差最小，平均只有 5.62%，估算偏差对项目总价影响也最小，仅为 0.2%。SVR 估算不但比清单预算大幅度提高了精确性，相对线性回归估算也有明显的优势。

5 结论

本文采用 SVR 模型，在灌注桩子目实例中进行 SVR 估算，得到较好的估算结果，其估算准确性明显比目前的清单预算要好。SVR 估算结果可以反映近期市场价格水平，因此，应该逐步建立和完善基于历史项目实际价格数据的 SVR 估算体系，有效控

制造价，提升公路工程造价管理水平，促进公路交通建设事业的发展。

参考文献:

References:

[1] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程标准施工招标文件 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
P. R. C. Ministry of Transport. Tender Documents for Standard Highway Construction [M]. Beijing: China Communications Press, 2009.

[2] 侯波. 公路工程估价管理体系及确定方法与控制模式研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.
HOU Bo. Research on Highway Project Cost Management System and Determination Method and Control Mode [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.

[3] MOLENAAR K, ANDERSON S, SCHEXNAYDER C. AASHTO Practical Guide to Estimating [EB/OL]. [2014 - 03 - 02]. <http://design.transportation.org/Documents/TC Cost Estimating/NCHRP 20 - 07 Practical Guide to Estimating.docx>.

[4] 马加传. 基于支持向量回归的钻井成本预测方法研究与应用 [D]. 西安: 西安石油大学, 2010.
MA Jia-chuan. Research on and Application of SVR-based Well Drilling Costs Forecasting Method [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2010.

[5] 郝宽胜, 张桐林. 基于模糊最小二乘支持向量机的建设工程造价快速预测方法研究 [J]. 铁路工程造价管理, 2012, 27 (3): 1 - 4.
HAO Kuan-sheng, ZHANG Tong-lin. Research on Project Cost Fast Forecasting Method Based on the Fuzzy Least Square Support Vector Machine [J]. Railway Engineering Cost Management, 2012, 27 (3): 1 - 4.

[6] 李文勇, 陶汉卿. 基于最小二乘支持向量机的车型识别算法研究 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (1): 101 - 105.
LI Wen-yong, TAO Han-qing. Study on Vehicle Type Identification Algorithm Based on Least Squares Support Vector Machine [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (1): 101 - 105.

[7] 苏永华, 马宁, 胡检. 采用小样本统计理论的隧道围岩分类 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (8): 66 - 69.
SU Yong-hua, MA Ning, HU Jian. Classification of Tunnel Surrounding Rock Based on Small Sample Statistical Theory [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (8): 66 - 69.

(下转第 102 页)

安全状态。

(4) 由于隧道在建设过程中, 不管是从地质环境、隧道设计还是施工过程中都有很多不确定因素影响隧道结构的可靠性大小, 通过本文的计算为后期隧道的建设和运营维护提供科学依据。

参考文献:

References:

- [1] 宋玉香, 景诗庭, 刘勇. 单线电气化铁路隧道衬砌结构目标可靠指标的试算分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18 (1): 46-49.
SONG Yu-xiang, JING Shi-ting, LIU Yong. Calculation of Object Reliability Index of Tunnel Lining Structure for Single Track Electrification Railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18 (1): 46-49.
- [2] 高波, 蔺安林, 赵万强. 隧道衬砌结构可靠指标计算方法的研究 [J]. 西南交通大学学报, 1996, 31 (6): 584-589.
GAO Bo, LIN An-lin, ZHAO Wan-qiang. Research on Computation Methods for Structural Reliability Index of Tunnel Lining [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1996, 31 (6): 583-589.
- [3] 谭忠胜, 高波, 关宝树. 偏压隧道衬砌结构可靠度分析 [J]. 西南交通大学学报, 1996, 31 (6): 595-601.
TAN Zhong-sheng, GAO Bo, GUAN Bao-shu. The Structural Reliability Analysis of Bias Tunnel Lining [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1996, 31 (6): 595-601.
- [4] GB50216-94, 铁路工程结构可靠度设计统一标准 [S].
GB50216-94, Unified Design Standard for Reliability of Railway Engineering Structures [S].
- [5] TB 10003—2001 J117—2001, 铁路隧道设计规范 [S].
TB 10003—2001 J117—2001, Code for Design of Railway Tunnel [S].
- [6] TB 10003—2005, 铁路隧道设计规范 [S].
TB 10003—2005, Code for Design on Tunnel of Railway [S].
- [7] 魏新欣, 丁文其. 公路隧道概率极限状态设计方法 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (10): 75-79.
WEI Xin-xin, DING Wen-qi. Probabilistic Limit State Design Method of Highway Tunnel [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (10): 75-79.
- [8] 杨建国, 谢永利, 李俊升, 等. 隧道结构可靠性研究进展 [J]. 现代隧道技术, 2009, 46 (6): 1-7.
YANG Jian-guo, XIE Yong-li, LI Jun-sheng, et al. Progress in Research on Tunnel Structural Reliability [J]. Modern Tunneling Technology, 2009, 46 (6): 1-7.
- [9] 梅刚. 基于非线性随机有限元的结构可靠度问题研究 [D]. 北京: 清华大学, 2005.
MEI Gang. Research on Structure Reliability Based on Nonlinear Stochastic Finite Element [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.
- [10] 张清, 王东元, 李建军. 铁路隧道衬砌结构可靠度分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13 (3): 209-218.
ZHANG Qing, WANG Dong-yuan, LI Jian-jun. Reliability Analysis of Lining Structures in Chinese Railroad Tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, 13 (3): 209-218.
- [11] 李飞. 钢管混凝土柱的可靠度与优化分析 [D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
LI Fei. Analysis of Reliability and Optimization of Concrete Filled Steel Tubular Column [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.
- [12] 武清玺. 结构可靠性分析及随机有限元-理论、方法、工程应用及程序设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
WU Qing-xi. Structural Reliability Analysis and Stochastic Finite Element: Theory, Method, Engineering Application and Program Design [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- (上接第95页)
- [8] VAPNIK V N. Statistical Learning Theory [M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 1998.
- [9] 邓乃扬, 田英杰. 支持向量机: 理论、算法与拓展 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
DENG Nai-yang, TIAN Ying-jie. Support Vector Machine: Theory, Algorithm and Development [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [10] 贾俊平, 谭英之. 应用统计学 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2008.
- JIA Jun-ping, TAN Ying-zhi. Applied Statistics [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2008.
- [11] CHANG C C, LIN C J. LIBSVM: A Library for Support Vector Machines [EB/OL]. [2014-03-02]. <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/papers/libsvm.pdf>.
- [12] 王小川, 李洋, 史峰, 等. MATLAB神经网络43个案例分析 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013.
WANG Xiao-chuan, LI Yang, SHI Feng, et al. Analysis of 43 Cases By Using Matlab Neural Networks [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2013.