

特高压输电线路工程造价预测模型研究

——基于因子分析及BP神经网络

徐莉 李卓然

(武汉大学经济与管理学院, 武汉 430072)

〔摘要〕 本文在对特高压输电线路工程进行项目划分的基础上, 分析识别出影响特高压输电线路工程造价的主要因素, 并使用因子分析法对其中18个主要影响因素进行度量, 将得到的5个因子作为输入、工程单位造价作为输出, 构建了基于BP神经网络的造价预测模型, 以国内已建和在建的9个特高压输电工程中的75段输电线路工程数据为样本进行了实证研究, 结果证明预测模型对特高压输电线路工程造价进行预测具有可行性和较高的准确性, 为特高压工程全生命周期内管理优化提供了一种新的思路和实现方法。

〔关键词〕 特高压 工程造价 因子分析 BP神经网络 预测模型

DOI: 10.3969/j.issn.1004-910X.2017.07.003

〔中图分类号〕 F062.4 〔文献标识码〕 A

1 绪论

相较于传统电网, 特高压输电具有提升输电效益、节省工程投资、拉动输变电装备制造等相关行业发展、促进能源基地和新能源的集约化开发、增强电网运行安全性等优势, 建设以特高压交、直流互联为骨干网架的坚强智能电网是我国电网发展的重大战略举措^[1]。当前是我国特高压电网的快速发展期, 也是特高压电网的建设高峰期。根据国家电网规划, 截至“十三五”结束, 我国特高压输电线路建设长度和变电(换流)容量将分别达到8.9万km和7.8亿kVA, 2020年前特高压项目投资预计达7000亿元。但特高压工程具有跨地区、规模大、工期长、总投资高等工程特性, 随着特高压输电的发展和特高压输电建设规模的增长, 亟需一套科学、合理的理论和应用体系来支撑各生命周期的特高压工程管理。其中特高压工程造价管理为关键性部分。

作为世界电力科技领域的前沿技术, 新世纪以来国内学者对特高压输电的专业技术进行了大量研究, 近年来研究领域开始涉及社科领域。张庆(2012)^[2]基于特高压线路工程建设的现状, 提出了控制特高压输电线路工程造价的主要技术

措施和管理措施。刘慧敏(2013)^[3]通过分析特高压输电线路工程定额使用方面的问题, 从运距、质量、经费等方面对影响特高压输电线路工程造价的原因进行了研究。国维、王静(2014)^[4]通过对1000kV晋东南——南阳——荆门特高压交流输电线路工程与常规输电线路工程进行比较分析, 发现特高压输电线路工程在八分裂导线施工、基础施工和组塔施工等方面的特殊性影响了工程成本费用和造价, 并从投标和项目管理两个角度提出了相应对策。张平朗、李园园(2011)^[5]、秦博(2011)^[6]和邵亚南、戴博(2016)^[7]分别以云广直流线路工程、晋东南——南阳——荆门特高压交流输电线路工程和宁浙±800kV特高压直流线路工程为例, 通过比较分析特高压直流线路与±500kV直流线路投资结构, 在考虑工程量水平、主要材料价格水平、地形地质、气候环境等因素的基础上, 对特高压线路工程的合理造价水平区间进行了研究和估算。国外目前几乎没有相关研究, 这与国外无大规模特高压输电规划不无关系。

综上所述, 目前国内关于特高压输电线路工程造价方面的研究多采用比较分析, 通过将特高

收稿日期: 2017-03-23

作者简介: 徐莉, 武汉大学经济与管理学院教授, 博士, 博士生导师。研究方向: 投融资管理、项目管理、评估理论与方法、项目风险管理等。
李卓然, 武汉大学经济与管理学院硕士研究生。研究方向: 方向工程管理、预测与决策。

压输电线路工程与常规输电线路工程进行比较,从而得出特高压输电线路工程的造价特点和影响因素,进而估算其合理的造价区间,这样的研究方法可行性较高,但缺乏数据支撑和定量分析。因此,本文以大量实际工程数据样本为基础,以定量研究为主要手段,以期对特高压输电线路工程造价预测及特高压工程的优化管控提供一种新的思路和切实可行的方法。

本文构建特高压输电工程造价预测模型的基本思路是:首先对特高压输电线路工程造价进行影响因素分析得出影响工程造价的主要影响因素;然后以实际工程数据为样本,使用因子分析法对影响因素进行度量分析,得出影响特高压输电线路工程造价的主要因子;最后以主要因子作为自变量,以单位工程造价作为因变量,建立BP神经网络模型加以训练得到预测模型,并通过实证研究验证其准确性。

2 特高压输电线路工程造价影响因素分析

结合国家能源局发布的《电网工程建设预算编制与规定(2013年版)》对架空输电线路工程项目的划分,本文将特高压输电工程划分为基础工程、杆塔工程、接地工程、架线工程和附件工程,这5个分项工程的造价加上其他费用即本文的特高压输电线路工程造价。

2.1 基础工程

基础工程主要根据各基杆塔组立的重量和高度,结合每个塔基地形地质条件以及其他工程技术设计因素,进一步确立基础型式、基础尺寸以及基础钢筋混凝土量。依照地形地貌现状、地质承载力确定护坡、挡土墙和排洪沟的砌筑方式、材质类型和砌筑量。混凝土费用受到制备方式和混凝土强度等级的影响,浇制标准根据基础型式确定,基础尺寸参照实际地质情况以及杆塔重量进行设计,与影响杆塔重量的因素形成关联。

2.2 杆塔工程

影响杆塔工程造价的量价因素包括塔材量和塔材单价,其中塔材量基本由杆塔重量决定,影响每基重量的因素主要包括杆塔设计参数中的风速、覆冰、回路数、导线材质、杆塔高度,另外高塔及耐张转角塔在杆塔中所占比例对每基重量

有正相关影响。导线材质由线路电压等级和输送容量确定,而杆塔高度则受到电压等级以及地形比例的影响。

2.3 接地工程

接地工程造价主要包括降阻模块安装费用、接地体安装费用、接地网费用、征地费用、引下线安装费和材料运输费等。土壤电阻率直接影响接地电阻,从而影响到接地体的设计数量、规格和埋深以及降阻模块的设计用量。接地体连接类型也是接地工程造价影响的重要因素,而地形因素则是决定连接类型的主要因素。此外,接地工程还受电压等级、输送功率、气象条件等影响。

2.4 架线工程

架线工程造价主要包括牵张场地建设费用、导线材料费用、导线架设费及跨越架设费等。牵张场地建设费用受牵张场地数量及形式、导线分裂数和地形影响。导线材料费用可以分离为导线单价与线材量,导线型号决定导线单价,而导线型号又包括导线芯数、导线用材及导线截面积等因素。单位长度导线的架设费用由电压等级、回路数、导线分裂数、地形比例共同决定,架设工程量则由路径长度决定。

2.5 附件工程

附件工程造价主要是绝缘子串及其它金具的安装费用。绝缘子串的安装费用根据导线分裂数、绝缘子等级与绝缘子类型确定,其中导线分裂数受输送容量、导线材质及电压等级的影响,绝缘子等级选择依据是电压等级、单根导线截面积和污秽等级,而绝缘子类型则通过地形确定。这些附件的数量主要受塔基数、回路数以及路径长度影响。

2.6 其他费用

特高压架空线路工程其他费用主要包括建设场地征用费及清理费、工程启动运行费、工程建设管理费、基本预备费和科研设计费等。其中,建设场地征用及清理费包括建设场地征用、塔基补偿、送电线路走廊施工赔偿和余物清理费等。塔基征用面积受到架空线路的输送容量、电压等级影响,与塔基数成正比;迁移补偿面积受到电压等级、塔基数、杆塔型式和回路数影响;送

电线路走廊施工赔偿面积由路径长度、架线方式和施工水平决定;余物清理费取决于拆除单位、拆除体积及长度。其余几项费用则被地区政策及地区经济水平主导。

根据上文分析,结合影响因素数量、因素之间相关性、因素可量化性和因素数据可获得性等

情况,本文选取回路数、导线单价、塔材单价、地形、地质、风速、覆冰、导线截面、耐张比例、土石方量、基础混凝土量、基础钢材量、塔材量、导线用量、合成绝缘子用量、盘式绝缘子用量、金具用量和杆塔数量作为特高压输电线路工程造价的影响因素,如表1所示。

表1 特高压输电线路工程造价影响因素表

| | 基础工程 | 杆塔工程 | 接地工程 | 架线工程 | 附件工程 | 其他费用 |
|--------|------|------|------|------|------|------|
| 回路数 | | √ | | √ | √ | √ |
| 导线单价 | | | √ | √ | | |
| 塔材单价 | | √ | | | | |
| 地形 | √ | √ | √ | √ | √ | |
| 地质 | √ | √ | √ | | | |
| 风速 | | √ | | | | |
| 覆冰 | | √ | | | | |
| 导线截面 | | √ | √ | √ | √ | |
| 耐张比例 | √ | √ | | | | |
| 土石方量 | √ | | | | | √ |
| 基础混凝土量 | √ | | | | | |
| 基础钢材量 | √ | | | | | |
| 塔材量 | | √ | | | | |
| 导线用量 | | | √ | √ | | |
| 合成绝缘子量 | √ | √ | | | √ | |
| 盘式绝缘子量 | | | | | √ | |
| 金具用量 | | | | | √ | |
| 杆塔数量 | | √ | √ | √ | | √ |

注:标√表示该影响因素对该工程造价有直接显著影响,反之则影响不显著。

3 特高压输电线路工程造价影响因素度量

3.1 原始数据收集与处理

本文原始数据依据锦屏——苏南、皖电东送等在内的我国近年来已建成和在建的9个特高压工程中的75段输电线路工程。从中收集特高压输电线路工程单位造价、回路数、导线单价、塔材单价、地形、地质、风速、覆冰、导线截面、耐张比例、土石方量、基础混凝土量、基础钢材量、塔材量、导线用量、合成绝缘子用量、盘式绝缘子用量、金具用量和杆塔数量这19个指标的数据。其中,工程单位造价为因变量,其它均为自变量。

由于在上文识别得出的18个影响因素当中,回路数、地形和地质均为描述性因素,因此,首先需要对这3个因素进行量化处理,具体处理方法如下:

(1) 输电线路回路数的单回路、双回路、三回路和四回路分别以1、2、3、4表示,如果一段线路包含多种回路数,需要根据不同回路数线路长度占总线路长度的比例对所含回路数进行加权平均处理。

(2) 特高压输电线路途径地形包括平地、丘陵、河网、泥沼、山地、高山和沙漠,划分为5个等级,平地为第一等级,丘陵为第二等级,河网、泥沼和沙漠合并为第三等级,山地和高山分别为第四和第五等级,这5个地形等级分别以1、2、3、4、5表示,如果一段线路包含多种地形,需要根据不同地形所占比例对所含地形进行加权平均处理。

(3) 特高压输电线路途径地质包括普通土坑、坚土坑、松砂石、干砂、水坑、泥水坑、流

沙和岩石坑,普通土坑为第一等级,坚土坑为第二等级,松砂石和干砂为第三等级,水坑、泥水坑、流沙和岩石坑分别为第四、五、六、七等级,这些地质等级用1~7进行表示,如果一段线路地质条件复杂多样,根据不同地质所占比例对所含

地质进行加权平均处理。

此外,本文中导线截面按照公式“导线截面=单根导线面积×导线芯数”进行计算。

具体数据如表2所示:

表2 特高压输电线路工程造价数据样本(一)

| 线路编号 | 单位造价 y (元/km) | 回路数 x_1 | 导线单价 x_2 (元) | 塔材单价 x_3 (元) | 地形 x_4 | 地质 x_5 | 风速 x_6 (m/s) | 覆冰 x_7 (mm) |
|------|--------------------|-----------|-------------------|-------------------|----------|----------|-------------------|------------------|
| 1 | 3813365 | 1 | 17800 | 7100 | 5.00 | 5.00 | 27.000 | 15.000 |
| 2 | 2892010 | 1 | 17974 | 7100 | 4.26 | 4.05 | 27.000 | 10.000 |
| 3 | 4101272 | 1 | 17800 | 7100 | 5.00 | 4.05 | 27.000 | 15.000 |
| 4 | 2498761 | 1 | 18500 | 7100 | 3.48 | 5.31 | 30.000 | 10.000 |
| 5 | 2504040 | 1 | 21000 | 10010 | 1.70 | 4.02 | 30.000 | 10.000 |
| 6 | 2867401 | 1 | 21000 | 10010 | 2.97 | 4.02 | 30.000 | 10.000 |
| 7 | 3348459 | 1 | 21000 | 14724 | 4.00 | 4.02 | 30.000 | 15.000 |
| 8 | 2590952 | 1 | 18500 | 7100 | 2.40 | 3.19 | 28.000 | 10.000 |
| 9 | 2245363 | 1 | 17800 | 7100 | 3.14 | 5.00 | 28.000 | 10.000 |
| 10 | 2727586 | 1 | 18500 | 7100 | 2.18 | 4.49 | 30.000 | 10.000 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 75 | 3344714 | 1 | 17800 | 7100 | 4.00 | 4.20 | 30 | 15 |

表2 特高压输电线路工程造价数据样本(二)

| 线路编号 | 导线截面 x_8 (mm ²) | 耐张比例 x_9 | 土石方量 x_{10} (m ³ /km) | 基础混凝土量 x_{11} (m ³ /km) | 基础钢材量 x_{12} (t/km) | 塔材量 x_{13} (t/km) | 导线用量 x_{14} (t/km) |
|------|----------------------------------|------------|---------------------------------------|---|--------------------------|------------------------|-------------------------|
| 1 | 5400 | 0.375 | 855.600 | 190.150 | 18.690 | 173.360 | 39.750 |
| 2 | 5400 | 0.215 | 533.240 | 154.560 | 13.870 | 135.200 | 36.780 |
| 3 | 5400 | 0.455 | 549.660 | 186.910 | 18.970 | 200.360 | 37.400 |
| 4 | 5400 | 0.161 | 912.520 | 228.460 | 12.270 | 111.820 | 34.740 |
| 5 | 5400 | 0.161 | 1382.500 | 194.920 | 13.700 | 125.400 | 33.500 |
| 6 | 5400 | 0.164 | 745.036 | 205.370 | 12.300 | 144.900 | 36.800 |
| 7 | 5400 | 0.297 | 731.177 | 249.905 | 14.378 | 157.846 | 36.840 |
| 8 | 5400 | 0.132 | 1022.798 | 216.265 | 9.069 | 123.797 | 34.586 |
| 9 | 5400 | 0.067 | 346.585 | 134.827 | 6.618 | 109.349 | 38.019 |
| 10 | 5400 | 0.151 | 1124.062 | 253.882 | 9.811 | 128.016 | 34.657 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 75 | 5400 | 0.286 | 390.558 | 152.601 | 11.654 | 171.218 | 38.737 |

表2 特高压输电线路工程造价数据样本(三)

| 线路编号 | 合成绝缘子用量 x_{15} (支/km) | 盘式绝缘子用量 x_{16} (片/km) | 金具用量 x_{17} (t/km) | 杆塔数量 x_{18} (基/km) |
|------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 15.080 | 342.800 | 3.260 | 2.170 |
| 2 | 11.500 | 403.830 | 3.380 | 1.970 |
| 3 | 15.710 | 445.120 | 7.750 | 2.400 |
| 4 | 8.220 | 289.410 | 4.220 | 2.075 |
| 5 | 13.000 | 252.800 | 5.100 | 2.148 |
| 6 | 13.350 | 301.215 | 5.778 | 2.120 |
| 7 | 14.888 | 491.936 | 7.842 | 2.000 |
| 8 | 10.194 | 272.607 | 4.042 | 2.140 |
| 9 | 8.995 | 96.268 | 2.648 | 1.820 |
| 10 | 12.058 | 288.790 | 4.543 | 2.180 |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| 75 | 12.925 | 460.333 | 5.968 | 1.920 |

3.2 因子分析实证检验

本文使用SPSS软件对表2中的18个影响因素数据进行因子分析。

首先,进行数据的相关性检验。计算得到的KMO值为0.769,表明指标之间相关性较强;巴特利特球形度检验的结果显著性水平Sig.值为0.000,拒绝零假设,这表明不存在样本数据过小无法进行分析的情况,对该样本数据进行主成分

分析是可行的。这两个指标共同表明这18个影响因素数据指标之间有一定的相关性,因而可以进行因子分析。相关性检验结果如图1所示:

KMO 和 Bartlett 的检验

| | |
|------------------------------|----------|
| 取样足够度的 Kaiser-Meyer-Olkin 度量 | 0.769 |
| Bartlett 的球形度检验 近似卡方 | 1580.701 |
| df | 153 |
| Sig | 0.000 |

图1 SPSS 影响因素数据相关性检验结果输出图

表3 SPSS 因子分析解释总方差结果输出图

| 成份 | 初始特征值 | | | 提取平方和载入 | | | 旋转平方和载入 | | |
|----|-------|--------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|
| | 合计 | 方差的% | 累积% | 合计 | 方差的% | 累积% | 合计 | 方差的% | 累积% |
| 1 | 7.477 | 41.542 | 41.542 | 7.477 | 41.542 | 41.542 | 6.354 | 35.297 | 35.297 |
| 2 | 3.256 | 18.086 | 59.628 | 3.256 | 18.086 | 59.628 | 3.542 | 19.677 | 54.974 |
| 3 | 1.882 | 10.457 | 70.085 | 1.882 | 10.457 | 70.085 | 2.516 | 13.975 | 68.950 |
| 4 | 1.138 | 6.322 | 76.407 | 1.138 | 6.322 | 76.407 | 1.222 | 6.786 | 75.736 |
| 5 | 1.004 | 5.578 | 81.985 | 1.004 | 5.578 | 81.985 | 1.125 | 6.249 | 81.985 |
| 6 | 0.868 | 4.824 | 86.809 | | | | | | |
| 7 | 0.721 | 4.008 | 90.817 | | | | | | |
| 8 | 0.436 | 2.421 | 93.239 | | | | | | |
| 9 | 0.325 | 1.805 | 95.044 | | | | | | |
| 10 | 0.280 | 1.556 | 96.600 | | | | | | |
| 11 | 0.207 | 1.149 | 97.749 | | | | | | |
| 12 | 0.146 | 0.809 | 98.558 | | | | | | |
| 13 | 0.081 | 0.449 | 99.007 | | | | | | |
| 14 | 0.063 | 0.348 | 99.355 | | | | | | |
| 15 | 0.050 | 0.280 | 99.635 | | | | | | |
| 16 | 0.035 | 0.196 | 99.831 | | | | | | |
| 17 | 0.023 | 0.128 | 99.959 | | | | | | |
| 18 | 0.007 | 0.041 | 100.000 | | | | | | |

然后通过主成分分析法抽取共同因子, 通过特征值和碎石图相结合的方法来确定因子数目, 并通过最大方差法进行因子旋转, 输出总方差解释表。

由表3中的总方差解释表可知, 前5个因子的特征值大于1, 且提取了5个因子时, 其累积贡献率已达到81.985%, 解释了超过80%的方差内容, 因此可确定所需提取的主因子数目为5个, 通过图3也可以很直观地得出相同结论。

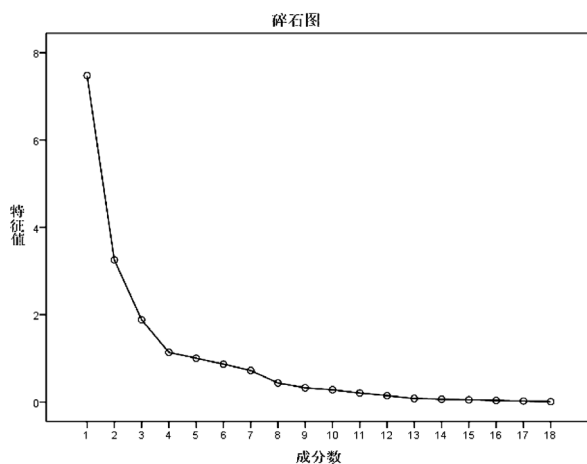


图3 碎石图

由表3中的总方差解释表可以得到原变量与主因子之间的线性组合, 为便于因子的解释, 采用矩阵正交法进行转轴后得到5个因子的荷载矩阵和因子得分系数矩阵, 结果如表4及表5所示。

表4 因子荷载矩阵^a

| | 成份 | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 回路数 | 0.357 | 0.811 | 0.358 | 0.030 | -0.015 |
| 导线单价 | 0.666 | -0.439 | -0.159 | 0.428 | -0.224 |
| 塔材单价 | 0.007 | 0.380 | 0.328 | 0.401 | -0.522 |
| 地形 | 0.412 | -0.513 | 0.472 | -0.342 | 0.189 |
| 地质 | 0.251 | -0.532 | 0.285 | 0.327 | 0.095 |
| 风速 | -0.193 | 0.142 | -0.693 | 0.181 | 0.006 |
| 覆冰 | 0.884 | -0.334 | -0.122 | -0.046 | 0.016 |
| 导线截面 | -0.720 | 0.247 | -0.247 | -0.339 | 0.075 |
| 耐张比例 | 0.614 | -0.418 | 0.299 | -0.305 | 0.041 |
| 土石方量 | 0.642 | 0.588 | -0.311 | -0.010 | 0.122 |
| 基础混凝土 | 0.897 | 0.290 | -0.116 | -0.037 | 0.059 |
| 基础钢材 | 0.854 | 0.297 | -0.223 | -0.053 | 0.161 |
| 塔材 | 0.944 | -0.061 | -0.208 | 0.018 | -0.008 |
| 导线 | 0.395 | 0.802 | 0.343 | -0.141 | 0.069 |
| 全成绝缘子 | -0.077 | 0.096 | 0.306 | 0.543 | 0.688 |
| 盘式绝缘子 | 0.809 | -0.284 | -0.016 | -0.085 | -0.220 |
| 金具 | 0.813 | 0.297 | 0.297 | -0.009 | -0.159 |
| 杆塔数量 | 0.798 | -0.064 | -0.411 | 0.026 | 0.181 |

提取方法: 主成份。
a. 已提取了5个成份。

由表4中的因子载荷可以看出, 因子1主要解释导线单价、覆冰、导线截面、基础混凝土、基础钢材、耐张比例、土石方量、基础混凝土、基础塔材、塔材量、盘式绝缘子用量、金具用量和单位杆塔数量等因素, 因子2主要解释回路数、地形、地质、导线用量等因素, 因子3主要解释风速等因素, 因子4和因子5主要解释塔材单价、合成绝缘子等因素。

表5 因子得分系数矩阵^a

| | 成份 | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 回路数 | 0.037 | 0.909 | 0.016 | 0.278 | 0.094 |
| 导线单价 | 0.832 | -0.312 | 0.097 | 0.304 | 0.073 |
| 塔材单价 | -0.086 | 0.261 | -0.080 | 0.776 | -0.019 |
| 地形 | 0.228 | -0.087 | 0.839 | -0.210 | 0.027 |
| 地质 | 0.291 | -0.364 | 0.412 | 0.173 | 0.355 |
| 风速 | 0.079 | -0.155 | -0.717 | -0.149 | -0.056 |
| 覆冰 | 0.888 | -0.002 | 0.325 | -0.111 | -0.064 |
| 导线截面 | -0.675 | -0.013 | -0.382 | -0.330 | -0.224 |
| 耐张比例 | 0.463 | -0.004 | 0.702 | -0.135 | -0.103 |
| 土石方量 | 0.558 | 0.673 | -0.300 | -0.121 | -0.016 |
| 基础混凝土 | 0.774 | 0.549 | 0.061 | -0.052 | -0.029 |
| 基础钢材 | 0.764 | 0.529 | -0.027 | -0.173 | 0.005 |
| 塔材 | 0.930 | 0.218 | 0.133 | -0.053 | -0.064 |
| 导线 | 0.041 | 0.959 | 0.085 | -0.113 | 0.036 |
| 全成绝缘子 | -0.112 | 0.100 | 0.013 | -0.029 | 0.924 |
| 盘式绝缘子 | 0.775 | 0.021 | 0.365 | 0.076 | -0.227 |
| 金具 | 0.568 | 0.597 | 0.333 | 0.274 | -0.055 |
| 杆塔数量 | 0.868 | 0.136 | -0.058 | -0.261 | 0.024 |

提取方法: 主成份
旋转法: 具有 Kaiser 标准化的正交旋转法
a. 旋转在9次迭代后收敛

最后, 根据公式 $Y=XB'$, 计算出因子得分值, 作为下一阶段特高压输电线路工程造价预测模型的最终训练和检验数据, 数据结果如表6所示。

4 特高压输电线路工程造价预测模型

4.1 模型构建基本思路及步骤

特高压输电线路工程造价预测模型构建的基本思路是: 以上文中的造价主要影响因子为自变量, 以工程单位造价作为因变量, 建立二者之间的非线性数学模型。具体操作步骤如下: (1) 确定网络结构, 构建BP神经网络; (2) 利用处理后的数据对BP神经网络进行训练; (3) 将训练好的BP神经网络对特高压输电线路工程造价进行预测, 并对预测结果进行准确性分析。

4.2 构建BP神经网络

根据 Kolmogorov 定理, 具有一个隐含层的三

表6 特高压输电线路工程单位造价及因子得分表

| 线路编号 | 单位造价 | 因子1 | 因子2 | 因子3 | 因子4 | 因子5 |
|------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 3813365 | 11641.71 | -2999.3 | -1005.02 | 9037.752 | -138.39 |
| 2 | 2892010 | 11582.23 | -3302.35 | -879.291 | 9139.359 | -134.395 |
| 3 | 4101272 | 11575.45 | -3197.93 | -871.552 | 9081.947 | -158.443 |
| 4 | 2498761 | 12178.48 | -3181.66 | -984.624 | 9242.417 | -79.6168 |
| 5 | 2504040 | 14229.07 | -2900.93 | -1131.32 | 12201.64 | 52.3171 |
| 6 | 2867401 | 13936.79 | -3316.19 | -917.563 | 12281.4 | 50.40675 |
| 7 | 3348459 | 13725.2 | -2061.5 | -1213.22 | 15951.96 | -83.3393 |
| 8 | 2590952 | 12224.94 | -3112.45 | -1023.32 | 9228.371 | -76.8325 |
| 9 | 2245363 | 11050.08 | -3400.42 | -958.392 | 9089.707 | -74.0567 |
| 10 | 2727586 | 12328.2 | -3022.2 | -1045.83 | 9215.092 | -81.4438 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 75 | 3344714 | 11438.13 | -3334.3 | -827.575 | 9106.629 | -159.091 |

层 BP 神经网络能在以任意精度逼近任意非线性连续函数,能够胜任不同类型的预测实践,这一点已经被大量的实证研究所证实,因此本文选用三层 BP 神经网络模型构建特高压输电工程造价预测。

由于上文通过因子分析得出了 5 个主因子,因此本文的 BP 神经网络输入层节点数为 5 个,需要预测的因变量是相应输入条件下特高压输电线路工程的单位工程造价,因此网络的输出层节点数确定为 1 个。

隐含层的节点个数确定相对复杂,目前尚无方法可以精确地确定合适的隐含层节点数,但有若干经验公式如下:

$$m < \sum_{i=0}^n c_i^{[n_i]}$$

式中 m 为输出层节点数, n 为输入层节点数, n_i 为隐含层节点数。

$$n_i = \log_2 n$$

式中 n 为输入层节点数, n_i 为隐含层节点数。

$$n_i = \sqrt{n+m+a}$$

式中 m 为输出层节点数, n 为输入层节点数, n_i 为隐含层节点数, a 为 1~10 之间的常数。

根据经验公式,本文模型的隐含层节点数应为 3 或 4,为构建更合理、精度更高的 BP 神经网络,分别建立了隐含层节点数为 3 和 4 的 BP 神经网络进行训练和比较。结果显示,节点数为 3 时,网络误差更小,预测准确性更高,因

此隐含层节点数确定为 3 个。

综上所述,本文最终建立的 BP 神经网络模型为 5-3-1 的网络结构。

标准 BP 算法将学习过程分为正向传播过程和反向传播过程两个阶段。以输入层到隐含层再到输出层的方向为正向,正向传播过程是指自变量的信息通过输入层输入至隐含层,再经过隐含层进行处理得到实际输出值的过程;反向传播过程是指如果输出层未能得到期望的输出值,计算实际输出与期望输出之差值,即误差,并误差逐层递归调节权值和阈值,使误差值逐渐减小,直到满足网络精度要求或达到最大学习次数,学习过程结束。

4.3 BP 神经网络的训练

本文以表 6 中的 75 组数据为样本,使用 Matlab7.0 进行仿真实验。使用前 60 组数据样本对构建好的 BP 神经网络进行训练,然后用剩下的 15 组数据样本对训练好的 BP 神经网络进行检验,将这 15 组数据样本中的主成分因子输入网络中,输出预测单位工程造价,对预测结果与实际工程造价进行比较,求得的偏差率,作为模型预测效果的检验指标。

在建立训练 BP 神经网络之前,首先需要对数据样本进行归一化处理,处理后的训练样本数据值均在 [-1, 1] 的范围内,更加用于 BP 神经网络的训练。使用 premmx 函数对表 6 中的数据样本进行归一化处理后的结果如表 7 所示。

表7 原始样本归一化后数据表

| 线路编号 | 单位造价 | 因子1 | 因子2 | 因子3 | 因子4 | 因子5 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| 1 | -0.8352 | -0.6718 | -0.4595 | -0.2788 | -0.9996 | 0.3376 |
| 2 | -0.932 | -0.6791 | -0.5446 | -0.2099 | -0.9702 | 0.346 |
| 3 | -0.805 | -0.6799 | -0.5153 | -0.2056 | -0.9868 | 0.2951 |
| 4 | -0.9734 | -0.6055 | -0.5107 | -0.2677 | -0.9404 | 0.4619 |
| 5 | -0.9728 | -0.3523 | -0.4318 | -0.3482 | -0.0846 | 0.741 |
| 6 | -0.9346 | -0.3884 | -0.5485 | -0.2309 | -0.0615 | 0.737 |
| 7 | -0.8841 | -0.4145 | -0.196 | -0.3931 | 1 | 0.454 |
| 8 | -0.9637 | -0.5997 | -0.4913 | -0.2889 | -0.9444 | 0.4678 |
| 9 | -1 | -0.7448 | -0.5722 | -0.2533 | -0.9845 | 0.4737 |
| 10 | -0.9493 | -0.587 | -0.4659 | -0.3012 | -0.9483 | 0.458 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 75 | -0.8845 | -0.6969 | -0.5536 | -0.1815 | -0.9796 | 0.2938 |

本预测模型采用 newff 函数建立一个网络结构为 5-3-1 的 3 层 BP 神经网络, 传输函数均选用 tansig 函数, 网络训练函数选用 traingdm 函数。采用 traingdm 函数对数据样本进行训练, 反向传播过程中用学习率可变的动量梯度下降算法修正 BP 神经网络的权值和阈值, 将最大学习次数设定为 10000 次; 目标误差设定为 4×10^{-3} ; 初始学习速率设定为 0.02。

将表 7 中预处理后的前 60 组样本数据输入构建好的神经网络进行训练, 经过 5680 次迭代后, 训练误差小于 4×10^{-3} , 符合之前设定的预测精度标准, 训练停止。

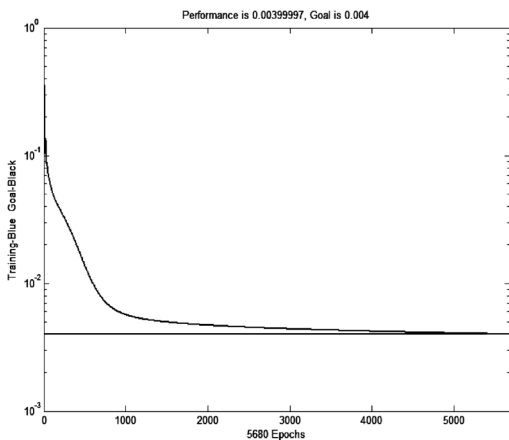


图6 BP神经网络训练误差曲线图

训练误差曲线如图 6 所示。

4.4 造价预测及准确性分析

本节使用上文训练好的 BP 神经网络对表 7

中剩余的 15 段特高压输电线路工程进行造价预测。将处理后的每段工程造价的主要因子输入训练好的 BP 神经网络, 然后将输出的预测结果使用 postmnmx 函数进行反归一化, 就是最后所得的预测值。预测结果如表 8 所示。

表8 特高压输电线路工程造价预测结果表

| 线路编号 | 实际造价 | 预测造价 | 偏差绝对值 | 偏差率 |
|------|----------|----------|---------|---------|
| 61 | 2967858 | 2942000 | -25858 | -0.87% |
| 62 | 4887591 | 4263000 | -624591 | -12.78% |
| 63 | 3021849 | 2965000 | -56849 | -1.88% |
| 64 | 5072715 | 5244500 | 171785 | 3.39% |
| 65 | 2745517 | 2974900 | 202383 | 8.35% |
| 66 | 2935234 | 2948000 | 12766 | 0.43% |
| 67 | 3079138 | 3211000 | 131862 | 4.28% |
| 68 | 5841508 | 6002000 | 160492 | 2.75% |
| 69 | 3131120 | 3093000 | -38120 | -1.22% |
| 70 | 9924178 | 10168000 | 243822 | 2.46% |
| 71 | 3088781 | 2940000 | -148781 | -4.82% |
| 72 | 3135743 | 3072000 | -63743 | -2.03% |
| 73 | 12394195 | 11441000 | -953195 | -7.69% |
| 74 | 21276514 | 21498000 | 221486 | 1.04% |
| 75 | 3344714 | 2928000 | -416714 | -12.46% |

相对平均绝对误差 AARE 能较好地衡量预测模型的精确性, 其公式如下:

$$AARE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t} \right|, \quad t = 1, 2, 3, \dots, n$$

式中, y_t 为实际造价, \hat{y}_t 为预测造价。

由表8可知,本次造价预测的15组数据中,有11组数据与实际造价的偏差率小于5%,相对平均绝对误差为4.43%,一般在工程概算阶段,工程概算允许与实际工程结算存在5%~10%的偏差,在预算阶段,工程预算也允许与实际工程结算有3%~5%的偏差。因此由表8的结果可以得出:基于因子分析和BP神经网络建立的工程造价预测模型对特高压输电线路工程造价进行预测具有较高的准确性。

5 结语

在预算阶段,工程预算也允许与实际工程结算有3%~5%的偏差。因此由表8的结果可以得出:基于因子分析和BP神经网络建立的工程造价预测模型对特高压输电线路工程造价进行预测具有较高的准确性。本文以国内已建和在建9个特高压直流或交流输电工程中的75段输电线路工程为研究对象进行工程造价预测模型研究。在对特高压输电线路工程进行划分和分析的基础上,对影响特高压输电线路工程造价的主要影响因素进行了识别和度量,运用BP神经网络建立了特高压输电线路工程造价预测模型,并使用该模型以15段特高压输电线路工程为对象进行了实证研究和对比研究。

研究表明,本文的特高压输电线路工程造价预测模型预测结果与实际工程造价的偏差率

在一个可以接受的范围内,基本达到预测效果。

但是,由于目前国内特高压输变电工程还处于新兴阶段,特高压输电线路工程数据较少,本文的数据来源于不同工程的不同阶段,对研究结果精度产生一定影响;此外,通过因子分析所得的5个主成分因子虽然可以解释80%以上的变量,但是从分析结果来看,这5个主成分因子只是统计指标,而不能赋予其实际意义,不能进一步分析某一类因素对工程造价的影响,其原因也与原始数据样本数量和质量有关。随着特高压输电线路工程数据的丰富和完善,特高压输电线路工程造价预测模型的精度将会进一步提高。

参 考 文 献

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005: 1.
- [2] 张庆. 特高压输电线路工程造价管理措施分析[J]. 中国外资, 2012, 19: 228.
- [3] 刘慧敏. 影响特高压输电线路工程造价问题的探讨[J]. 山西建筑, 2013, 27: 221~222.
- [4] 国维, 王静. 特高压与常规输电线路工程成本费用与造价管理对比分析[J]. 价值工程, 2014, 22: 94~95.
- [5] 李园园, 张平朗. ±800kV特高压直流输电线路工程造价结构及投资水平分析[A]. 见: 电网工程造价管理优秀论文集[C]. 2011: 5.
- [6] 秦博, 张平朗. 1000kV特高压交流输电线路工程投资研究[A]. 见: 电网工程造价管理优秀论文集[C]. 2011: 4.
- [7] 邵亚南, 戴博. ±800kV特高压直流线路造价水平研究[J]. 中国电业(技术版), 2016(1): 59~63.

Research on Forecasting Model of UHV Transmission Line Project Cost

—— Base on Factor Analysis and BP Neural Network

Xu Li Li Zhuoran

(School of Economics and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

[Abstract] This paper identified and explored research on the main factors which influence UHV transmission line project cost on the basis of the detailed subdivision and analysis of the UHV transmission line project. And the author also measured the influence factors by factor analysis and established the forecasting model based on BP neural network by measured factors as the input and the project cost as the output. Finally, comparing the output of the model and the multiple linear regression prediction model with the actual cost to demonstrate the accuracy and applicability of the model, this paper researched empirically by using the data of 75 transmission lines of the 9 UHV DC or AC power transmissions and transformation engineering which had been built or under construction at home and proved that the forecasting model was feasible to the forecast research on the project cost. And it also provided a practical method of implementation for the forecast of engineering cost and optimal management and control.

[Key words] UHV; project cost; factor analysis; BP neural network; forecasting mode

(责任编辑:王平)