

文章编号:1006-2106(2015)07-0111-06

绿色高铁建设环境成本 CS、BPNN 估算方法研究^{*}

刘敬严^{**} 陈 蕾 宋 宁 段晓晨

(石家庄铁道大学, 石家庄 050043)

摘要:研究目的:如何界定高铁建设环境影响内容、估算环境成本是高铁实现绿色工程的重要内容。本文在界定高铁建设环境成本的计算内容基础上,运用显著性成本方法(CS)建立高铁建设环境成本数据库,运用 BP 神经网络方法预测拟建工程全生命建设环境成本,并以长益城际铁路进行实例验证,结果表明该模型适用性强,对高铁全生命建设环境成本预测准确性高。

研究结论:(1)通过 CS 理论提取高铁工程显著性环境成本项目可以大幅简化环境成本估算工作量;(2)BP 神经网络在高铁项目环境成本估算方面具有适用性;(3)为更准确估算环境成本,需进一步完善高铁项目建设环境成本数据库;(4)本文提出的高铁建设环境成本估算方法和评价体系,可应用于铁路行业高铁项目的建设环境成本估算和控制等工作。

关键词:绿色高铁;建设环境成本;人工神经网络;显著性成本

中图分类号:C935;X828 文献标识码:A

Research on the Construction Environmental Cost Estimation of Green High-speed Railway Based on CS and BPNN

LIU Jing-yan, CHEN Lei, SONG Ning, DUAN Xiao-chen

(Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: Research purposes: It is important to analyze construction environmental impact factors and estimate environmental cost for green engineering construction. Content of high-speed railway construction environmental cost was analyzed according to the definitions. The cost-significant (CS) theory was put forward to find out Cost-significant Items (CSIs) based on the data and information of completed projects. BP neural network method was introduced to predict the environmental costs of proposed construction project based on environmental cost database. Changsha-Yiyang inter-city railway environmental costs prediction results proved the accuracy.

Research conclusions: (1) Significant cost theory can greatly simplify the workload by finding out cost-significant items when estimating high-speed railway construction environmental cost. (2) BP neural network has applicability in high-speed railway construction environment cost estimation. (3) High-speed railway construction environment cost database need to be supplemented further for more accurate estimation. (4) The construction environmental cost evaluation method, put forward in this paper, can be applied in construction environmental cost estimation and control.

Key words: green high-speed rail; construction environmental cost; artificial neural network; cost significance

^{*} 收稿日期:2015-05-07

基金项目:教育部项目(11YJAZH121);河北科技厅项目(14456104D);河北省社科基金项目(HB14GL021);河北省软科学研究基地项目:工程建设管理研究(12457206D-14);河北省教育厅人文社科重点基地项目

^{**} 作者简介:刘敬严,1980 年出生,女,讲师。

1 引言

目前我国正处于大规模高铁建设和运营高峰期,至今投入运营的新建高铁有 4 322 km,在建高铁有 1 万余公里,预计到 2020 年将达到 1.8 万公里以上。大量的高铁建设的开展,使我们在享受高速、便捷的同时,也面临对沿线生态环境破坏、水土流失、珍稀动植物栖息破坏等生态环境问题。环保部因环保投资问题曾叫停胶济、津秦、贵广等高铁项目。高铁项目不仅要考虑经济效益,还必须顾及环境和资源保护,注重绿色环保工程^[1]。准确的预测是提高项目环保投资使用效率,降低环境污染的有效手段之一。为实现高铁绿色生态工程,如何界定环境影响内容、估算环境成本^[2]是一个摆在我们面前的重要问题。本文主要以绿色高铁全生命周期的环境成本估算为基础,重点对建设环境成本内容和估算方法展开深入研究和探讨。

2 绿色高铁建设环境成本体系内容

2.1 绿色高铁建设环境成本内涵

绿色高铁在其全生命周期内应能满足交通运输要求,提供健康、环保、高效的铁路运输服务。建设绿色高铁应运用技术创新,满足社会出行需求,最大限度地降低单位运量对土地的占用和能源的消耗,减少环境影响,实现可持续发展。我国高铁环境成本平均为 5%~6%,要达到绿色高铁目标,环境成本所占比重还应大幅提高。

环境成本是指高铁项目为减少对环境造成破坏而自愿和被迫采取的成本,是为了达到环保目的和环保要求而付出的费用。全生命周期环境成本是指高铁工程从决策到报废全生命过程中为了减少和补偿工程对生态环境造成的影响和损失(需要达到国家强制性的环境标准)而需要发生的全部费用的总和,可分为全生命建设环境成本和全生命运营环境成本。本文着重研究高铁全生命建设环境成本,即高铁项目为了减少和补偿工程建设对环境造成的影响和损失所产生的费用。

2.2 绿色高铁建设环境成本内容

现行《铁路工程工程量清单计价指南》中对于高铁建设环境成本的计算方法尚无特别说明,借鉴国内外相关研究^[3-4],本文认为高铁全生命建设环境成本的费用主要包括大气环境成本、水环境成本、声环境成本、电磁振动环境成本、固体废物环境成本、生态环境成本。

2.2.1 高铁建设生态环境成本

高铁建设生态环境成本主要是指为了减少和防治

生态破坏而采取的措施费用,包括野生植物与动物保护成本、水土流失防治成本和农田恢复成本。

2.2.2 高铁建设声环境成本

高铁建设声环境成本主要是指为了减少和防治噪声而采取的措施费用,如为靠近强声源的工人配备耳塞和头盔费用以及因限制工作时间比原来增加的费用;因加强对机械和车辆的维修以使它们保持较低的噪声而产生的增加费用等。

2.2.3 高铁建设振动环境成本

高铁建设振动环境成本是指为了减少和防治工程建设振动对环境造成的影响和损失所采取的防治工程和措施(如在施工时采取振动或者是爆破施工的时候对周围土坯房进行监控的费用以及进行必要补救措施的费用)的规划设计、实施费用。

2.2.4 高铁建设水环境成本

高铁建设水环境成本是指水污染治理及防治工程及措施(如化粪池、临时格池、沉淀池、隔油池、干化堆积场、防治有害物质被大风暴雨冲刷进水体所用的临时遮挡设施等)的规划设计、建设、维修养护、报废等费用。

2.2.5 高铁建设大气环境成本

高铁建设大气环境成本是指大气污染治理工程及措施(如治理措施、除尘设施、对道路进行洒水处理等)的规划设计、建设、维修养护、报废等费用。

2.2.6 高铁建设固体废物环境成本

高铁建设固体废物环境成本是指固体废物清理工程及措施的规划设计、建设、维修养护、报废等费用。

3 绿色高铁建设环境成本估算方法

3.1 显著性成本 CS 理论

显著性成本(Cost-significant, CS)中 20%~30%的工程量清单项目约占总造价的 70%~80%,称为显著性成本项目(Cost-significant Items, CSIs),其他的项目称为非显著性成本项目(non-CSIs)。可采用显著性成本理论从同类已完工程中选出 CSIs,计算显著性因子 csf,推断出工程的整体造价和相似工程的造价,简化计算工作,保证投资估算的精确度^[5-6]。

CS 理论核心工作是用均值法寻找 CSIs,应用步骤如下:

一是,运用均值理论从同类已完工程中选出 CSIs;

二是,计算拟建工程的显著性成本项目的成本;

三是,计算同类工程显著性成本项目显著性因子并求其平均值,将平均值作为拟建工程的显著性因子;

四是,待建工程造价等于 CSIs 造价除以显著性因子均值。

3.2 BP 神经网络

误差反向传播网络 (Back – Propagation Neural Network, BPNN) 因其能够进行信息并行处理,容错性强,具有自适应与自组织能力,在工程成本估算中有所应用^[7-8]。

BP 神经网络学习过程:信号从输入层输入,途径隐含层处理后,进入到输出层。如果输出层的数据信号与实际存在偏差,那么就会进入误差反向传播阶段,由输出层进入,经过隐含层到达输入层,一层一层传递,通过修改每层权重,不断的学习训练直到实现权值稳定、误差最小为止。

4 案例分析

4.1 工程概况

新建长沙至益阳城际铁路起源于长沙站,途经宁乡到达益阳市,线路全长 72. 609 km,为双线客运专线,设计速度目标值为 250 km/h,工程静态投资约 92.33 亿。该工程位于湘西北平原丘陵区,项目主要工程如表 1 所示。

长益城际铁路建设,因工程永久征用土地使土地利用功能发生局部变化,土石方工程使地表植被受到一定程度破坏,可能产生局部范围的水土流失;施工期

会造成交通干扰、行走不便,产生的施工扬尘、施工噪声、建筑垃圾、施工废水影响周边环境。需要采用重型钢轨、弹性扣件,铺设跨区间无缝线路,采用新型车辆,降低噪声、振动源强;对沿线敏感点采取设置声屏障、隔声通风窗等措施;沿线车站设置污水处理设施,污水经处理后达标排放等措施减少环境影响。

表 1 主体工程组成一览表

工程名称	工程内容
线路工程	正线(双线)全长 72. 609 km
站场工程	全线新建尖山、黄金镇、金洲、宁乡、沧水铺、益阳共 6 座车站
路基工程	区间正线路基长 28. 735 km
桥涵工程	特大、大、中桥梁共计 45 座 37. 671 km
隧道工程	隧道 6 座,计右线 5 643. 75 延长米
轨道工程	正线采用无砟轨道结构,一次铺设跨区间无缝线路
电气化	本段新建牵引变电所 2 座(长沙、全民乡)

4.2 环境成本估算

4.2.1 选择 CSIs

通过对已完高铁工程资料的分析,可将已完高铁工程特性归纳为 8 个:列车运行速度、线路长度、农田区占比、桥梁占比、隧道占比、一类环境区占比、二类环境区占比、施工方案,量化评分如表 2 所示。

表 2 绿色高铁全生命建设环境成本工程特征量化表

项目	量化值
列车运行速度/(km/h)	1— $\in [200,225)$; 2— $\in [225,250)$; 3— $\in [250,275)$; 4— $\in [275,300)$; 5— $\in [300,325)$; 6— $\in [325,350]$
线路长度/km	1— $\in [0,100)$; 2— $\in [100,200)$; 3— $\in [200,300)$; 4— $\in [300,400)$; 5— $\in [400,500)$; 6— $\in [500,+\infty)$
农田区占比/%	1— $\in [20,30)$; 2— $\in [30,40)$; 3— $\in [40,50)$; 4— $\in [50,60)$; 5— $\in [60,70)$; 6— $\in [70,80]$
桥梁占比/%	1— $\in [20,30)$; 2— $\in [30,40)$; 3— $\in [40,50)$; 4— $\in [50,60)$; 5— $\in [60,70]$
隧道占比/%	1— $\in [0,10)$; 2— $\in [10,20)$; 3— $\in [20,30)$; 4— $\in [30,40)$; 5— $\in [40,50)$; 6— $\in [50,60]$
一类环境区占比/%	1— $\in [5,10)$; 2— $\in [10,15)$; 3— $\in [15,20)$; 4— $\in [20,25)$; 5— $\in [25,35)$; 6— $\in [35,40]$
二类环境区占比/%	1— $\in [5,10)$; 2— $\in [10,15)$; 3— $\in [15,20)$; 4— $\in [20,25)$; 5— $\in [25,35)$; 6— $\in [35,40]$
施工方案	1—机械化程度高;2—机械化程度中等;3—机械化程度低

对每个已完高铁工程特性进行量化打分,进行显著性成本分析。如某已完高铁工程,其工程特性定量

指标描述为 $X_1 = (1,1,3,5,1,2,3,2)$,该高铁工程全生命建设环境成本内容如表 3 所示。

表 3 某已完高铁全生命建设环境成本内容

序号	具体项目	费用/(万元/km)	序号	具体项目	费用/(万元/km)
1	动物桥或动物通道工程费用	219. 03	7	农田恢复工程及措施费用	237. 65
2	高架桥工程费用	149. 24	8	沉淀池工程费用	90. 94
3	化粪池工程费用	52. 47	9	降噪费用	6. 04
4	自然区保护工程费用	60. 21	10	降振措施费用	10. 02
5	生态恢复工程措施费用	64. 64	11	护坡工程措施费用	48. 01
6	水土保持工程费用	269. 91	12	临时格池工程费用	6. 46

续表 3 某已完高铁全生命建设环境成本内容

序号	具体项目	费用/(万元/km)	序号	具体项目	费用/(万元/km)
13	大气污染治理及措施费用	37.16	22	监测费用	2.57
14	绿化工程费用	1.18	23	生活垃圾处理费用	3.25
15	干化堆积场工程费用	38.32	24	减少夜间施工增加费	8.41
16	临时遮挡设施费用	39.37	25	车辆绕行增加费	4.34
17	现场职工防护费用	0.64	26	监督费用	3.83
18	除尘设施费用	0.59	27	排水沟工程费用	18.11
19	道路洒水处理费用	2.36	28	管理费	10.57
20	建筑垃圾处理费用	5.06	29	宣传费	6.16
21	隔油池工程费用	4.85	-	汇总	1 401.39

大约 30% 的工程项目占总造价的 80%, 显著性成本项目共 8 个: 动物桥或动物通道工程费用, 高架桥工程费用, 化粪池工程费用, 自然区保护工程费用, 生态恢复工程措施费用, 水土保持工程费用, 农田恢复工程及措施费用。沉淀池工程费用。显著性成本总额为 1 144.09 万元/km, 显著性系数为 0.816, 显著性成本项目占比为 27.59 %。同理, 整理其他已完高铁项目数, 建立已完高铁项目全生命建设环境成本数据库。

4.2.2 估算 CSIs 环境成本和显著性因子

第一步, 建立环境成本数据。选取 19 个已完工程的数据为样本, 建立环境成本 BP 神经网络预测模型, 第 1~15 个工程数据作为学习样本, 第 16~19 个工程数据作为检验样本, 第 20 个长益城际铁路全生命建设环境成本数据作为预测样本。基础数据如表 4 所示。

表 4 基础数据表

序号	输入项								输出项	
	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	O_1	O_2
1	4	5	1	2	2	2	2	2	1 144.09	8.16
2	1	1	1	1	1	1	1	2	1 262.33	8.21
3	3	4	5	2	1	3	3	3	2 414.07	8.13
4	4	5	5	3	3	5	2	2	1 806.88	8.01
5	1	5	1	1	1	1	2	2	2 005.84	7.94
6	4	2	6	3	1	4	2	3	2 109.61	7.98
7	5	5	2	2	2	3	4	2	1 508.71	8.24
8	6	4	2	4	5	4	4	1	1 785.64	8.31
9	2	2	2	2	1	2	3	1	1 902.68	7.93
10	4	5	5	2	1	4	3	1	1 974.97	8.14
11	1	2	1	1	1	1	1	1	1 534.97	7.96
12	6	6	1	3	2	3	5	2	1 407.68	7.83
13	1	1	1	1	1	1	2	2	1 362.36	8.01
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1 036.03	8.12
15	6	5	3	5	5	6	6	2	1 676.36	7.89
16	1	1	1	1	1	1	1	1	2 228.38	8.07
17	1	1	1	1	1	1	2	2	1 980.15	8.2
18	2	2	2	2	1	2	1	3	1 704.33	7.93
19	4	2	1	3	1	3	1	3	1 656.88	8.31

注: O_1 表示每公里的显著性环境成本; O_2 表示 csf 系数。

第二步, 建立估价模型。

确定输入层节点数。采用三层 BP 网络模型, 选择 Sigmoid 函数作为节点输出函数。模型的输入单元为 8 个显著项目, 输出单元为 2 个: 显著性成本项目 CSIs 数额和显著性系数 csf, 用 O_1 和 O_2 表示。

确定隐含层的节点数。采用试凑的方法确定本神经网络隐含层的神经元个数取 9。

确定输出层节点数。与输入层节点数的确定相同, 本次建模是对长益城际铁路建设环境成本作出预测, 其目标输出为环境成本。

第三步, 网络训练和预测。构建 BP 网络, 最大迭代次数 1 000 次, 容许误差 0.001。 O_1 和 O_2 训练结果如图 1 和图 2 所示。

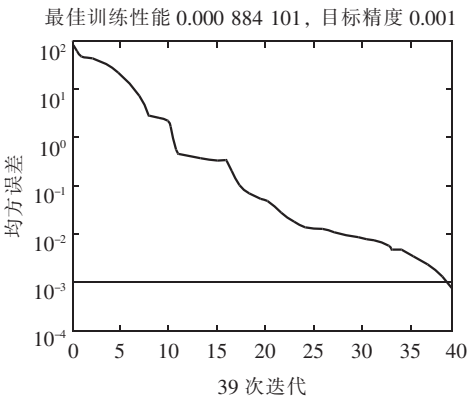


图 1 BP 网络 O_1 收敛过程

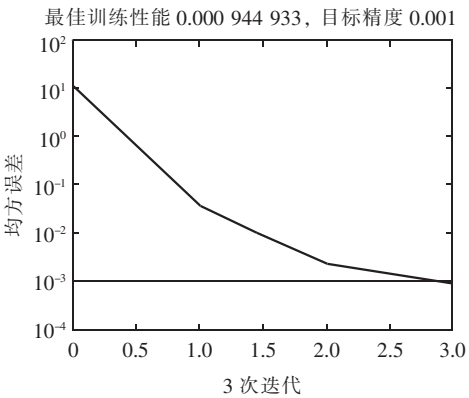


图 2 BP 网络 O_2 收敛过程

用收敛后的网络对第 16、17、18、19 组数据进行预测,运行 10 次取平均,结果如表 5、表 6 所示。

表 5 BP 网络 O_1 和 O_2 运行 10 次结果列表

样本序号 输出项 次数	16		17		18		19	
	O_1	O_2	O_1	O_2	O_1	O_2	O_1	O_2
1	2 205	0.769	1 901	0.862	1 541	0.814	1 792	0.863
2	2 186	0.764	2 091	0.815	1 681	0.821	1 552	0.631
3	2 315	0.721	2 102	0.852	1 632	0.776	1 545	0.686
4	2 215	0.861	1 843	0.865	1 791	0.794	1 613	0.728
5	2 196	0.805	2 023	0.791	1 602	0.768	1 581	0.869
6	2 295	0.789	2 163	0.795	1 770	0.782	1 703	0.852
7	2 156	0.715	1 901	0.842	1 712	0.759	1 621	0.697
8	2 356	0.902	1 990	0.831	1 502	0.813	1 602	0.849
9	2 276	0.776	1 974	0.866	1 752	0.826	1 733	0.808
10	2 255	0.785	2 041	0.839	1 661	0.809	1 522	0.794

表 6 结果分析

样本序号	16	17	18	19
O_1 预测值	2 246	2 003	1 664	1 626
O_1 实际值	2 228	1 980	1 704	1 656
O_1 相对误差/%	0.79	-3.78	-2.32	-1.82
O_2 预测值	7.89	8.36	7.96	7.78
O_2 实际值	8.07	8.2	7.93	8.31
O_2 相对误差/%	-2.24	1.95	0.38	-6.38
预测环境成本	2 846	2 396	2 091	2 090
实际环境成本	2 761	2 414	2 149	1 993
相对误差/%	3.09	-0.76	-2.69	4.87

通过对表 7 进行分析,发现相对误差值很小 ($\leq \pm 5\%$),在投资估算精度的要求范围之内 ($\leq \pm 10\%$)。

第四步,建设环境成本估算。根据表 2 量化表得出长益城际铁路的基础数据表(如表 7 所示),估算建设期环境成本,运行 10 次得到 O_1 和 O_2 的平均值如表 8 所示。 O_1/O_2 就是环境成本。

表 7 长益城际铁路基础数据表

序号	输入项							
	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8
20	3	1	1	4	1	5	6	2

表 8 长益城际铁路环境成本预测结果

O_1 平均值	O_2 平均值	O_1/O_2 (环境成本:万元/km)
1 885.22	0.800	2 356.53

通过表 8 可知,长益城际铁路建设期环境成本估算投资为 235 653 万元/km,则整个线路建设期环境成本估算总投资为 171 105.29 万元。

5 结论

本文对高铁全生命建设环境成本计算内容和估价

方法进行深入研究和分析,建立了高铁全生命建设环境成本计算内容体系,根据以往已经完工或开通运营项目收集高铁建设环境成本数据,运用显著性成本方法进行数据整理挖掘,建立了高铁全生命建设环境成本数据库,运用 BP 三层神经网络方法预测拟建工程全生命建设环境成本,并以长益城际铁路作为实例验证了高铁全生命建设环境成本预测的准确性和适应性。

研究证实,通过显著性成本理论(CS)提取高铁工程显著性环境成本项目(CSIs)可以大幅简化环境成本估算工作量。BP 神经网络在高铁项目环境成本估算方面具有适用性。高铁项目建设环境成本数据库的完善程度对环境成本估算准确度具有重要影响。

今后应继续收集、整理、分析和归纳已经竣工和投入运营的高铁项目数据,建立和完善环境成本估算体系,为模型的构建和预测提供数据支持。

参考文献:

[1] 卢春房.京沪高速铁路建设管理创新与实践[J].铁道工程学报,2014(9):1-7.
Lu Chunfang. Research on the Management Innovation and Practice of Construction for Beijing - Shanghai High Speed Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society,2014(9):1-7.
[2] 王兆雨,段晓晨,张徐.高铁建设环境成本估算方法应用研究[J].石家庄铁道大学学报(社会科学版),2015(1):48-53.
Wang Zhaoyu, Duan Xiaochen, Zhang Xu. Applied Research on Methods of Environmental Costs of High Speed Railway Construction [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Social Science Edition) 2015(1):48-53.

- [3] Song Xiaodong, Fu Yanbing, Chen Zhiya, etc. **Environmental Impact Evaluation for High-speed Railway**[J]. *Journal of Central South University*, 2014 (6): 2366-2371.
- [4] 段晓晨, 马变晓, 王兆雨, 等. 高速铁路区域生态本底评价方法研究[J]. *铁道工程学报*, 2015(1): 7-11.
Duan Xiaochen, Ma Bianxiao, Wang Zhaoyu, etc. **Research on the Primitive Ecological Conditions Evaluation Method of High-speed Railway Region**[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2015(1): 7-11.
- [5] 段晓晨, 余建星, 张建龙. 基于 CS、WLC、BPNN 理论预测铁路工程造价的方法[J]. *铁道学报*, 2006(6): 117-122.
Duan Xiaochen, Yu Jianxing, Zhang Jianlong. **A Method of Estimating WLC of Scheduled Railway Projects Based on CS, WLC and BPNN Theorems**[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2006(6): 117-122.
- [6] 段晓晨, 郭兰英, 张新宁. 新建高铁工程非线性造价估算方法研究[J]. *铁道学报*, 2013(10): 114-122.
Duan Xiaochen, Guo Lanying, Zhang Xinning. **Research on Nonlinear Estimating Methods of Whole Life-cycle Cost for China High-speed Railway Project**[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2013(10): 114-122.
- [7] 李晓娟. 基于 BP 神经网络的工程造价估算模型研究[J]. *甘肃联合大学学报(自然科学版)*, 2011(4): 47-49, 113.
Li Xiaojuan. **Model of the Construction Cost Estimation Based on Back Propagation Neural Network**[J]. *Journal of Gansu Lianhe University (Natural Science Edition)*, 2011(4): 47-49, 113.
- [8] 王运琢. 基于 BP 神经网络的高速公路工程造价估算模型研究[J]. *石家庄铁道大学学报(自然科学版)*, 2011(2): 61-64.
Wang Yunzhuo. **Research on Estimation Model of Highway Project Cost Based on BP Neural Network**[J]. *Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science)*, 2011(2): 61-64.

(上接第 72 页 From P. 72)

应该做为评价的重要因素。国内城市轨道交通正在高速发展,越来越多的城市正在或准备建设轨道交通,希望本文能提供有益的借鉴。

参考文献:

- [1] 陈玲. 浅谈哈尔滨地铁正线接触网悬挂方案[J]. *铁道工程学报*, 2006(7): 64-67.
Chen Ling. **Preliminary Discuss of Overhead Catenary System Project of Haerbin Metro Line**[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2006(7): 64-67.
- [2] IEC 60850—2007, 铁路应用设施—牵引系统的供电电压[S].
IEC 60850—2007, *Railway Applications—Supply Voltages of Traction Systems*[S].
- [3] Friedrich Kiessling, Rainer Puschmann, Axel Schmieder, Egid Schneider. **Contact Lines for Electric Railways (2nd Edition)**[M]. Erlangen: Publicis Publishing, 2009.
- [4] 郭其一. 城市轨道交通车辆供电制式的分析研究[J]. *城市轨道交通研究*, 2011(8): 1-4.
Guo Qiyi. **Analysis on the Power Supply System of Urban Rail Transit Trains**[J]. *Urban Mass Transit*, 2011(8): 1-4.
- [5] GB 50157—2013, 地铁设计规范[S].
GB 50157—2013, *Code for Design of Metro*[S].
- [6] 中铁电气化勘测设计研究院. 北京地铁 6 号线工程牵引供电制式选择专题分析报告[R]. 北京: 中铁电气化勘测设计研究院, 2008.
China Railway Electrification Survey Design & Research Institute. **Analysis Report of Traction Power Supply System of Beijing Metro Line 6**[R]. Beijing: China Railway Electrification Survey Design & Research Institute, 2008.
- [7] 杨立新. 香港地铁的供电系统概貌[J]. *地铁与轻轨*, 1999(2): 35-40.
Yang Lixin. **Power Supply System General View of Hong Kong Metro**[J]. *Metro and Light Rail*, 1999(2): 35-40.
- [8] [日]财团法人铁道综合技术研究所. 接触网与受电弓特性[M]. 中铁电气化局集团有限公司, 译. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
The Japanese Railway Comprehensive Technology Research Institute. **The Catenary and Pantograph Characteristics**[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010.
- [9] 胡文伟, 丘庆球, 孙才勤, 等. 东莞城市快速轨道交通 R2 线工程供电系统授流方式专题研究报告[R]. 东莞: 东莞市轨道交通有限公司, 2010.
Hu Wenwei, Qiu Qingqiu, Sun Caiqin, etc. **Dongguan Power Supply System Research Report of Urban Rapid Rail Transit Line 2 Project**[R]. Dongguan: Dongguan Rail Transit Co. Ltd, 2010.