

城市轨道交通接触网评价体系研究

胡江¹ 张中安¹ 吴林科¹ 周格仟²

(1. 深圳市地铁三号线投资有限公司 广东深圳 518000; 2. 华中科技大学土木工程与力学学院 武汉 430074)

摘要 论述接触网在城市轨道交通中的作用,以及接触网的不同形式对城市轨道交通产生的影响。在确定接触网选用的原则基础上,建立城市轨道交通接触网评价指标体系。从技术经济性的角度,对接触网的实用性、可靠性、使用寿命、安全性、环境适应性、对车辆影响和可维护性等方面的技术性以及经济性进行综合评价,以促进我国城市轨道交通健康发展。

关键词 城市轨道交通;接触网;评价体系;指标

中图分类号 U231.7 **文献标志码** A

文章编号 1672-6073(2013)01-0033-04

目前,我国已经成为世界上最大的城市轨道交通市场。接触网系统在城市轨道交通牵引供电系统中向电动车组提供电能,是唯一的且没有备用的供电设施,其重要性不言而喻。如何选用技术先进、经济合理、安全可靠的接触网形式,越来越引起投资者和建设者的关注。下面从技术经济学角度出发,在理论上提出并建立城市轨道交通接触网的评价体系,为城市轨道交通接触网建设决策提供参考。

一般来说,接触网技术与城市轨道交通运行模式和牵引供电电压制式密切相关。城市轨道交通接触网系统一般采用直流供电,目前世界各国城市轨道交通的供电电压大都在DC 600~1 500 V之间。IEC(国际电工委员会)制订的电压标准为600、750和1 500 V三种,我国GB 50157—2003《地铁设计规范》将DC750 V和DC1 500 V列为轨道交通直流牵引供电系统的标准电压等级。接触网按安装位置的不同可分为接触轨和架空接触网,其中架空接触网按照悬挂类型分为柔性悬挂和刚性悬挂,分别称为柔性架空接触网和刚性架空接触网。

收稿日期: 2012-04-06 修回日期: 2012-06-18

作者简介: 胡江,男,大学本科,工学学士,高级工程师,总工程师,副总主任,从事轨道交通方向的研究,xjhjiang@126.com

1 接触网评价指标体系研究成果

1.1 现有研究成果综述

目前,国内公开发表的有关城市轨道交通接触网评价指标体系的成果还比较少,主要集中在对选择接触网类型的比较方面。

1.1.1 针对特定轨道交通项目的接触网选择

在对广州地铁4号线牵引网形式进行选择时,初步选定了架空刚性接触网和下部接触式接触轨,再通过对主要技术参数、机械耐磨性能和使用寿命、土建投资、技术经济、供电安全性、城市景观6个方面,对两者进行比较分析^[1]。在对西安地铁2号线车辆牵引供电制式选择时,从线网角度出发,充分考虑城市特点,按受控因素先后顺序进行技术经济比较,提出了全线采用DC1 500 V架空接触网的方式^[2]。

1.1.2 对城市轨道交通接触网类型的比较

有的学者通过分析城市轨道交通两大类牵引供电接触网的基本要求、不同类型与特点,提出不同城市选择接触网形式时应注意处理的关系和建议^[3]。还有的学者以广州地铁柔性、刚性接触网和接触轨牵引网的实际运营为例,对其安全性、经济性、景观等进行了综合分析,认为轨道交通牵引网的形式不能只从技术的角度来进行选择,而要以社会责任(包括适用性、安全性、经济性等)来判断决策^[4]。

1.1.3 对城市轨道交通接触网评价体系的探讨

有学者对这方面进行了比较深入的研究,根据整体性、适应性、可比性、技术先进、经济合理、国产化和全寿命周期等原则,建立了城市轨道交通评价体系,该体系通过外部、内部和工程三部分评价系统,对车辆制式、行车速度、供电制式、受流和技术性能、系统一致性和兼容性、设备国产化程度、工程投资经济性以及工程适应性等方面进行综合评价^[5]。

1.2 现有研究成果评价

综上所述,学者们城市轨道交通接触网评价指

标体系方面的研究大致有两种思路:一是对城市轨道交通接触网类型进行比较和选择,通过分析不同接触网类型的特点,对多种指标进行综合分析,在比较城市轨道交通接触网类型的基础上,选择特定的接触网形式,见文献[1-4];二是直接构建城市轨道交通接触网的评价体系,见文献[5]。两者各具特点,前者侧重于实际应用,后者侧重于理论研究,然而都有需要改进的地方。

1) 指标体系构建比较简单,所查阅的文献都体现出指标的大而不精,有些只有一级指标。

2) 指标体系权重目前的研究还是个空白。虽然文献[5]构建了评价体系,但却没有对体系的指标进行权重的分析,不能直接应用。

3) 前面论述的研究成果都是对接触网的定性分析,而没有采用定量分析方法进行评价。

本研究希望在此3点之上取得突破,一方面构建更细部的指标,另一方面通过渠道确定指标体系中指标的权重,从而为定量分析接触网打好基础。

2 建立接触网评价体系的原则

目前,我国城市轨道交通接触网的形式呈现多样化,都直接采用或引进国际先进技术,这无疑对我国城市轨道交通技术的整体发展有明显的促进作用,但也带来了评价不同形式的接触网是否适合一个特定城市轨道交通项目的判断问题。这一问题对一个城市的轨道交通网络而言更加具有现实意义,因为接触网作为城市轨道交通电动车组电能的唯一提供者,直接影响轨道交通网络化的发展。从这个意义上讲,建立城市轨道交通接触网评价体系必须坚持以下原则。

2.1 技术先进和经济合理性原则

技术先进是要求不同形式的接触网在技术方面保持当前国际国内先进水平,关键技术能够解决接触网工程建设中存在的问题,满足车辆运行及维护需要,采用新材料、新工艺等;经济合理性是在保证接触网技术可靠性和先进性的基础上,有效节约建设投资,降低运营成本。技术上达到先进水平、经济上保持在合理可接受的范围,显然是评价不同接触网形式的一个基本准则。

2.2 全寿命周期原则

城市轨道交通运营实践表明,接触网的使用寿命对轨道交通线路运行的影响非常明显。在轨道交通项目中,不同形式接触网的全寿命周期有所差异,一般架空接触网的大修周期要小于接触轨形式的大修周期,这仅是从接触网本身而言的。此外,接触网的全寿命

周期还反映在其性价比、零部件和备品备件的互换性及维护周期等方面,这些因素对确定接触网形式不仅是必要的,也是需要重点考虑的。

2.3 可比较性原则

在轨道交通建设项目中,有柔性架空接触网、刚性架空接触网和接触轨3种类型的接触网,其可比较性是指在不同受流方式下对3种类型的接触网进行比较,这是评价和选择接触网形式的基础。

3 城市轨道交通接触网评价指标体系

根据以上原则,将城市轨道交通接触网评价指标体系分解为4个层次,一级指标是技术经济性指标,二级指标分为技术性和经济性2项,三级指标分为9项,四级指标细化为38项指标,如表1所示。根据指标能否直接获取,可分为硬指标和软指标。硬指标是指能直接从统计数据库中取得数据的指标,如属于建设成本中的接触网系统设备投资、配套投资等;软指标是指不能直接取得数据的指标,往往只能用语言描述,如评价实用性的载流能力、同类工程经验、设备成熟度等。

3.1 技术性指标

技术性指标,又称为功能性指标,包括实用性、可靠性、使用寿命、安全性、环境适应性、对车辆影响和可维护性7个部分。作为城市轨道交通的一个重要组成部分,接触网首先应满足相应的技术要求,这是最基本的,不能满足相应的功能,经济性就无从谈起。城市轨道交通接触网首先应表现出实用性,表现在正线允许行车速度、载流能力、同类工程经验、安装精度要求、设备成熟度等方面;一个不实用的接触网形式,不论其经济性如何,都不能被接受。接触网的可靠性对轨道交通的正常运行起着非常重要的影响,只有可靠的接触网,才能提供舒适、高效、准时的轨道交通服务水平,具体表现为供电的可靠性、故障影响范围、事故抢修对其他专业响应时间影响、车辆连续受流、授流质量等方面^[7]。其他子指标在这里就不一一罗列。

3.2 经济性指标

经济性指标,又称成本性指标。这里所指的成本,是全寿命周期成本^[6],也就是产品从设计制造到交付使用、直到报废为止,全过程的生产费用和使用费用之和,即 $C = C_{\text{生}} + C_{\text{使}}$ 。对城市轨道交通接触网而言,经济性指标包括建设成本和运营成本。在此,建设成本要考虑接触网系统设备投资、配套投资、土建投资以及车辆投资等方面,在得知寿命周期的前提下,可以计算出净年值;运营成本要考虑年运营成本,包括运营管理

表 1 城市轨道交通接触网评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	四级指标
技术 经济性	技术性	实用性	正线允许行车速度
			载流能力
			同类工程经验
			安装精度要求
			设备成熟度
		可靠性	供电可靠性
			故障影响范围
			事故抢修对其他专业响应时间影响
			车辆连续受流
			授流质量
		使用寿命	附件使用寿命
			主件使用寿命
			车辆授流器使用寿命
		安全性	人员安全性
			设备安全性
			安全防护要求
			对地漏电流
		环境 适应性	自然灾害的适用性
			隧道净宽要求
			隧道净高要求
			车辆段处净宽要求
			车辆段层高要求
			对本线景观的影响
		对车辆 影响	线网协调性
			对转向架、列车主电路、 底架设备布置影响
			对车体的外形、尺寸影响
		可维护性	车辆受流器数量及价格
			施工方便性
			维护机具
			维护工艺操作
			维修周期
			备品备件
			其他专业检修配合复杂性
			车辆受流器维护费用
	经济性	建设成本	接触网系统设备投资
			配套投资
			土建投资
			车辆投资
			寿命周期
		运营成本	运营管理费用
			电能损耗

费用、电能损耗等。

4 接触网评价指标体系的评价标准确定

从表 1 可知,一、二级指标采用的是价值工程里面的概念,一级指标的技术经济性类似于价值工程中的价值 V ,二级指标中的技术性、经济性分别类似于价值工程中的功能 F 和成本 C ,其评价标准参考价值工程中的相关内容^[8]。而三、四级标准的权重是本文讨论的内容,这里采用专家打分法。

4.1 确定权重

在评价指标体系中,权重起着至关重要的作用。无论该指标体系多么完善,或者做出的初步评价多么准确,如果权重设定得不合理,就会影响最终的计算结果,从而降低整个体系的合理性和科学性。因此,设定一套科学合理的权重体系至关重要,本研究推荐使用专家打分法来确定指标的权重。

4.2 确定分值

为了使评价指标体系具有可操作性,第四级指标安排的分值满分都是 10 分。其中,0 分意味着不能满足该项要求,10 分意味着完全符合该项要求,得分越高表示符合程度越高。具体打分在于专家们根据要求来把握,从尊重客观事实出发,要选择具有高水平资历和阅历的专家。

4.3 评价标准

在指标权重确定的基础之上,专家对评价指标体系中的技术性指标进行评分,综合计算可以分别得到评价对象的功能性系数 F_i 。然后,考虑经济性指标,分别计算评价对象的建设成本与运营成本之和的净年值,进而推算出评价对象的成本系数 C_i 。由价值工程 $V = F/C$ 可知,评价对象 V_i 值谁大谁优。

5 接触网评价体系的实证研究

深圳地铁 9 号线起自深圳湾公园站,止于文锦站(又称向西站),全长 25.33 km,共设 22 座车站。该线在选择接触网类型的过程中,考虑了 3 种接触网悬挂方式的特点:柔性架空接触网适用于地面线路和高架线路,刚性架空接触网适用于地下线路,接触轨适用于地上及地下线路。据此,初步选定刚性架空接触网与接触轨,然后再对这两种方式按照 7 项技术性指标进行评价(见表 2),由评分得出刚性接触网与接触轨的功能系数 F 。另外,考虑系统全寿命周期成本 C ,通过成本数据分析得到两方案的成本系数(见表 3)。

表2 接触轨与刚性接触网综合价值工程评分比较

序号	项目				刚性接触网			接触轨		
	类别	权重系数	子类别	权重系数	评价	评分	计算得分	评价	评分	计算得分
1	实用性	0.09	正线允许行车速度	0.2	≤140 km/h	9	0.16	≤100 km/h	9	0.16
			载流能力	0.2	满足供电需求	8	0.14	好	9	0.16
			同类工程经验	0.2	多	9	0.16	较多	9	0.16
			安装精度要求	0.2	高	8	0.14	较高	9	0.16
			设备成熟度	0.2	好	9	0.16	较好	8	0.14
2	可靠性	0.16	供电可靠性	0.3	较高	8	0.38	高	9	0.43
			故障影响范围	0.1	较长	8	0.13	短	9	0.14
			抢修响应时间	0.3	短	9	0.43	较短	8	0.38
			车辆受流连续性	0.2	好	9	0.29	有影响	8	0.26
			授流质量	0.1	好	9	0.14	较好	8	0.13
3	使用寿命	0.15	附件使用寿命	0.3	接触线 10 ~ 15 年	8	0.36	支撑防护系统 20 年	9	0.41
			主件使用寿命	0.55	汇流排 30 ~ 50 年	8	0.66	接触轨 50 ~ 70 年	9	0.74
			授流器寿命	0.15	长	9	0.2	较短	8	0.18
4	安全性	0.16	人员安全性	0.3	好	9	0.43	较好	8	0.38
			设备安全性	0.2	高	9	0.29	高	9	0.29
			安全防护要求	0.3	低	9	0.43	高	8	0.38
			对地泄漏电流	0.2	低	9	0.29	高	8	0.26
5	环境适应性	0.14	对本线自然灾害的适用性	0.1	较好	8	0.11	好	9	0.13
			隧道净宽要求	0.2	好	9	0.25	较好	8	0.22
			隧道净高要求	0.2	高	8	0.22	较低	9	0.25
			车辆段线间距	0.2	窄	9	0.25	较宽	8	0.22
			车辆段层高要求	0.1	高	8	0.11	较低	9	0.13
			对本线景观的影响	0.1	较好	8	0.11	好	9	0.13
			线网协调性	0.1	好	9	0.13	较好	8	0.11
6	对车辆影响	0.15	对转向架、列车主电路、底架设备布置影响	0.3	好	9	0.41	较好	8	0.36
			对车体上部和肩部的外形、尺寸影响	0.5	好	9	0.68	有影响	8	0.6
			车辆受流器数量及价格	0.2	低	9	0.27	高	8	0.24
			施工方便性	0.1	较方便	7	0.11	方便	9	0.14
7	可维护性	0.15	维护机具	0.1	较多	7	0.11	较小	9	0.14
			维护工艺操作	0.1	较复杂	7	0.11	简单	9	0.14
			维修周期	0.2	较长	7	0.21	长	9	0.27
			备品备件	0.1	相对较多	7	0.11	少	9	0.14
			其他专业检修配合复杂性	0.2	简单	8	0.24	复杂	7	0.21
			车辆受流器维护	0.2	较少	9	0.27	较多	7	0.21
			8	功能综合得分					8.527	
9	功能系数					0.499		0.501		

表3 成本系数计算

项目	刚性接触网	接触轨
全寿命周期费用指标/(万元/年)	1 006	943
成本系数 C_i	0.516	0.484

表4 价值系数计算

项目	刚性接触网	接触轨
功能系数 F_i	0.499	0.501
成本系数 C_i	0.516	0.484
价值系数 V_i	0.967	1.036

根据价值工程的概念,根据功能评价系数(F_i)与成本系数(C_i),计算价值系数(V_i)=功能评价系数(F_i)/成本系数(C_i),其中 V_i 最大者为最佳方案,计算结果如表4所示。

(下转第45页)