

国内各城市的轨道交通线网电耗统计分析^{*}

——基于中国城市轨道交通协会数据分析的研究报告之三

高阳 顾保南

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 电耗是城市轨道交通系统的主要运营成本之一, 分析电耗指标对于城市轨道交通系统运营效益改善措施的制定、线网规划方案评价工作的深化与优化均具有重要作用。基于城市轨道交通协会统计数据, 对 2015—2017 年间国内 27 座城市的轨道交通线网的电耗指标按不同制式进行了统计分析, 并对各城市地铁线网的电耗指标按不同车型线路进行了统计分析。基于统计数据分析了地铁线路的敷设方式、客运周转量、线路负荷强度、线路满载率等因素对电耗的影响。

关键词 城市轨道交通; 线网; 电耗

中图分类号 U293.6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.08.001

Statistical Analysis of Power Consumption of Rail Transit Network in China—Report 3: Data Analysis of Urban Rail Transit Association of China

GAO Yang, GU Baonan

Abstract Power consumption is one of the main operating costs of urban rail transit system. Analysis of power consumption indicators plays an important role in the establishment of improvement measures, deepening and optimizing the evaluation of line network. The energy consumption level of various urban rail systems in 27 cities in China during the period from 2015 to 2017 is calculated, and the power consumption index statistics of metro lines that adopt different vehicles in different cities are carried out. Finally, the impact relationship of route laying mode, passenger person-kilometers, load intensity and load rate of metro lines are analyzed according to statistical data.

Key words urban rail transit; network; power consumption

Author's address State Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China

截止 2018 年 12 月 31 日, 我国已有 36 座城市(内地 32 座、港台地区 4 座)开通运营城市轨道交通线路, 18 座城市开通现代有轨电车线路^[1]。其中, 北京、上海、广州等多地的城市轨道交通线路已经开通运营 10 年以上, 线路运营的水平 and 效率逐渐成为了城市公共交通发展的管理重点。在城市轨道交通运营费用构成项目中, 占比最高的是员工工资, 其次便是电耗费用。根据北京、南京等地的地铁线路运营经验, 电耗费用一般占运营费用的 20% 以上^[2-3]。因此, 在保证客运服务质量的同时, 降低线路电耗成为了各运营公司减少成本支出的主要方向。

用于衡量城市轨道交通线路电耗的指标类型较多, 如描述列车运营公里与线路电耗关系的单位车公里总电耗指标和单位车公里牵引电耗指标, 描述客运周转量与线路电耗关系的单位人公里总电耗指标和单位人公里牵引电耗指标, 以及牵引电耗在总电耗中占比指标, 等等。对城市轨道交通电耗的研究多集中在车站运营电耗和列车运行电耗的预测模型修正方面, 通过量化分析电耗影响因素调整模型变量, 例如: 文献[4]通过“列车运行计算系统”模拟分析了曲线、坡道以及列车质量等因素对城市轨道交通线路电耗的影响; 文献[5]使用同样的方法进一步分析了车辆制式、列车满载率、列车编组方案等因素对城市轨道交通线路电耗的影响; 文献[6]的研究认为, 线路敷设方式对地铁线路的牵引电耗有显著影响, 并根据北京地铁的电耗数据标定建立了地下线和地上线的牵引电耗估算模型; 文献[7]统计了 2006 年北、上、广等 7 座城市的部分轨道交通线路的电耗水平, 并结合各线路具体运营情况分析敷设方式、满载率、客流量等因素与电耗的影响关系, 但该研究时间较早, 可能与当前城

^{*} 上海申通地铁集团有限公司项目(JS-KY18R001-WT-18038)

市轨道交通电耗状况存在差异。中国城市轨道交通协会(以下简称“协会”)的年度报告^[8-10]中以城市为单位简要统计了近年来全国城市轨道交通的电耗指标平均值,没有讨论各城市的电耗指标差异。

本文基于协会统计的各城市轨道交通运营单位上报的数据,分制式、分城市、分车型线路分析国内城市轨道交通的电耗指标,总结我国城市轨道交通的电耗指标的影响因素,可为城市轨道交通节能减排措施的制定提供参考依据。

1 2015—2017 年城市轨道交通线网不同制式的电耗统计分析

本文以 2015—2017 年国内 27 座城市运营的城

市轨道交通线路(不含当年 6 月 30 日之后开通的线路)为研究对象,参照协会年度报告^[10]和相关分析文献^[11]中线路的制式统计结果,将城市轨道交通线路分为地铁、轻轨、单轨、中低速磁浮、市域铁路、APM(自动导向轨道系统)、有轨电车等制式。利用协会的基础统计数据计算各类制式线路的单位车公里总电耗、单位人公里总电耗、单位车公里牵引电耗、单位人公里牵引电耗以及牵引电耗占比指标,如表 1 所示。部分线路由于数据缺失未纳入统计分析范围。

结合表 1 及相关的电耗数据资料,归纳得到如下结论:

1) 不同制式线路的单位车公里总电耗差异明

表 1 2015—2017 年城市轨道交通各制式电耗指标统计								
指标	统计时间	地铁	轻轨	单轨	中低速磁浮	市域铁路	APM	有轨电车
单位车公里总电耗/(kW·h)	2015 年	3.685	3.064	3.189				
	2016 年	3.765	3.693	3.135		2.905	13.460	2.760
	2017 年	3.813	2.869	3.004	4.559	2.634	12.082	1.673
单位人公里总电耗/(kW·h)	2015 年	0.073	0.052	0.068				
	2016 年	0.066	0.088	0.065		0.104	0.497	0.123
	2017 年	0.069	0.056	0.063	5.851	0.086	0.394	0.105
单位车公里牵引电耗/(kW·h)	2015 年	1.819	2.024	1.750				
	2016 年	2.012	1.776	1.703		1.738	2.931	2.045
	2017 年	1.983	1.949	1.823	2.153	1.679	2.959	1.188
单位人公里牵引电耗/(kW·h)	2015 年	0.036	0.034	0.037				
	2016 年	0.035	0.042	0.036		0.062	0.108	0.079
	2017 年	0.036	0.041	0.038	2.763	0.055	0.096	0.069
牵引电耗占比/%	2015 年	49.36	66.06	54.88				
	2016 年	53.57	48.09	54.31		59.85	21.77	72.73
	2017 年	52.32	67.93	60.69	47.23	63.74	24.50	72.82

显。APM 最高,为 12.082 ~ 13.460 kW·h;其次是中低速磁浮,为 4.559 kW·h;再次是地铁,为 3.685 ~ 3.813 kW·h;然后依次是单轨、轻轨、市域铁路、有轨电车。中低速磁浮的数据样本较少(长沙磁浮快线 2016 年 5 月开通试运营,日均客流量尚不足 1 万人次),目前的结果还不具有可比性。单轨的单位车公里总电耗为 3.004 ~ 3.189 kW·h,略低于地铁,说明单轨系统总电耗并不比地铁高,这与单轨系统主要采用高架敷设方式、设备配置较地铁少有关。

2) APM 的单位车公里牵引电耗明显高于其他制式线路,为 2.931 ~ 2.959 kW·h;中低速磁浮的单位车公里牵引电耗为 2.153 kW·h,明显高于地

铁。地铁、轻轨、单轨、市域铁路的单位车公里牵引电耗略有差异,但相差幅度较小,为 1.679 ~ 2.024 kW·h,可能受车体质量、满载率、线路敷设方式及平纵断面等因素影响。有轨电车的单位车公里牵引电耗数据波动较大,可能是数据样本基数较小、每年变化幅度大等因素所致,还需进一步考察。

3) 地铁、轻轨、单轨的单位人公里总电耗、单位人公里牵引电耗的差异不明显。2015—2017 年,地铁、轻轨、单轨的单位人公里总电耗为 0.056 ~ 0.088 kW·h,单位人公里牵引电耗为 0.034 ~ 0.042 kW·h。

4) 不同制式的牵引电耗占比(牵引电耗占总电

耗的比例)也有明显差异。有轨电车最高,为 72.73%~72.82%;其次为市域快轨,为 59.85%~63.74%;APM 最低,为 21.77%~24.50%。地铁、轻轨、单轨的牵引电耗占比差异不明显,可能受线路的敷设方式、设备配置、满载率等因素影响,其更细的变化特征还需进一步深入分析。

2 2017 年不同城市的地铁线路电耗指标统计分析

在我国开通运营的各类城市轨道交通制式中,地铁的应用最为广泛,有 27 座内地城市开通了地

铁。本文将主要以地铁 A、B 型车线路为对象进行电耗指标的分析。以城市为主要单位统计的 2017 年地铁 A、B 型车线路电耗状况如表 2 所示,各类电耗指标的比较情况如图 1~3 所示。

结合表 2、图 1~3 及相关的电耗数据资料可知,不同城市地铁线路的各项电耗指标均存在较大的差异,进一步归纳得到如下结论:

1) 各城市地铁线路的单位车公里总电耗变化范围为 2.771~7.101 kW·h,单位车公里总电耗最高值与最低值之比为 2.56,变化幅度很大。石家庄、南宁、福州等城市的地铁线路仅开通运营 1~2

表 2 2017 年各城市地铁分车型的电耗指标统计表

城市及地铁 线路类型	线路条数	单位车公里总电耗/ (kW·h)	单位人公里总电耗/ (kW·h)	单位车公里牵引电耗/ (kW·h)	单位人公里牵引电耗/ (kW·h)	牵引电耗 占比/%
石家庄 A 型车线路	2	7.101	0.221	2.264	0.071	31.88
南宁 B 型车线路	1	7.072	0.165			
福州 B 型车线路	1	6.936	0.264	2.131	0.081	30.72
合肥 B 型车线路	1	5.110		1.757		34.38
广州 A 型车线路	3	5.072	0.057	2.509	0.028	49.47
青岛 B 型车线路	1	4.994	0.144	1.612	0.046	32.28
天津 B 型车线路	4	4.902	0.083	1.944	0.033	39.65
长沙 B 型车线路	2	4.848	0.109	2.100	0.047	43.31
南昌 B 型车线路	1	4.799	0.125	1.686	0.044	35.14
深圳 A 型车线路	7	4.757	0.093	2.311	0.044	48.59
东莞 B 型车线路	1	4.740	0.189	2.069	0.083	43.66
苏州 B 型车线路	3	4.619	0.164	1.546	0.055	33.48
宁波 B 型车线路	2	3.981	0.196	1.429	0.070	35.90
成都 B 型车线路	4	3.905	0.070	1.735	0.031	44.42
杭州 B 型车线路	3	3.868	0.090	1.801	0.042	46.57
昆明 B 型车线路	1	3.852	0.080	1.974	0.041	51.25
广州 B 型车线路	3	3.731	0.052	2.134	0.030	57.20
哈尔滨 B 型车线路	2	3.719	0.114	1.116	0.034	30.00
北京 A 型车线路	5	3.669	0.079	1.958	0.042	53.38
无锡 B 型车线路	2	3.664	0.171	1.540	0.072	42.03
深圳 B 型车线路	1	3.616	0.055	1.910	0.029	52.82
上海 A 型车线路	11	3.610	0.055	2.162	0.033	59.88
南京 B 型车线路	1	3.585	0.240	1.714	0.115	47.80
重庆 B 型车线路	3	3.335	0.068	1.756	0.036	52.64
郑州 B 型车线路	2	3.222		1.859		56.43
沈阳 B 型车线路	2	3.205	0.055	1.625	0.028	50.69
西安 B 型车线路	3	3.198	0.062	1.708	0.033	53.40
南京 A 型车线路	4	3.122	0.056	1.934	0.035	61.95
北京 B 型车线路	13	2.986	0.048	1.794	0.029	60.10
大连 B 型车线路	2	2.771	0.096	1.919	0.066	69.26

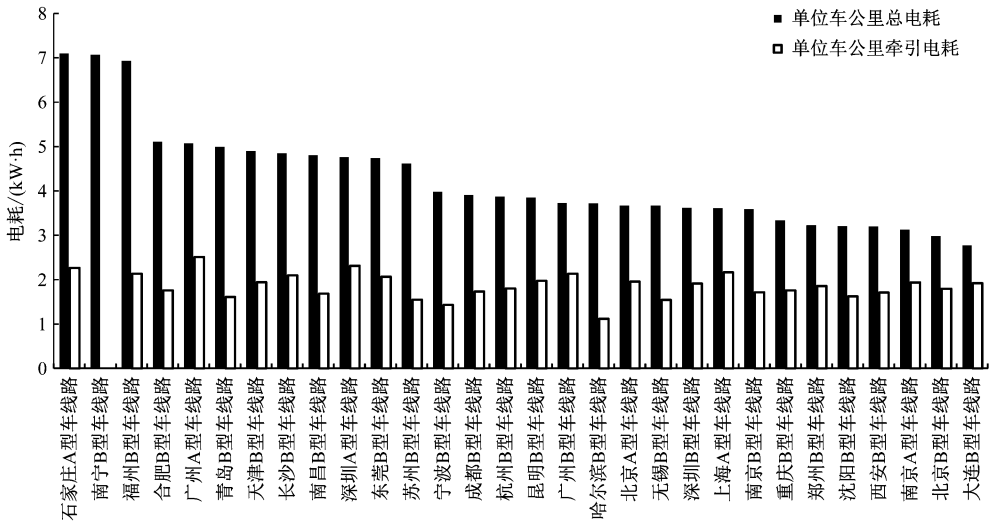


图1 2017年各城市地铁A、B型车线路单位车公里总电耗与牵引电耗指标比较图

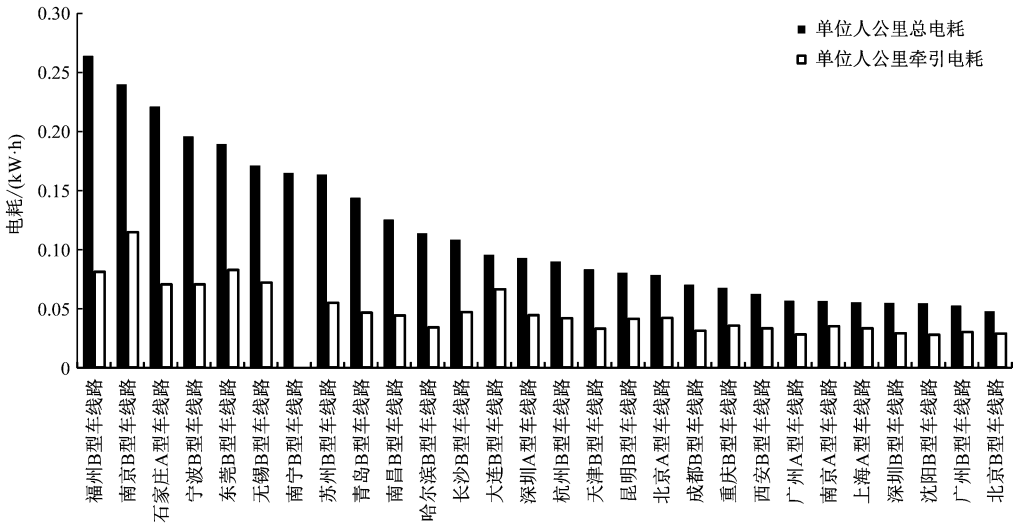


图2 2017年各城市地铁A、B型车线路单位人公里总电耗与牵引电耗指标比较图

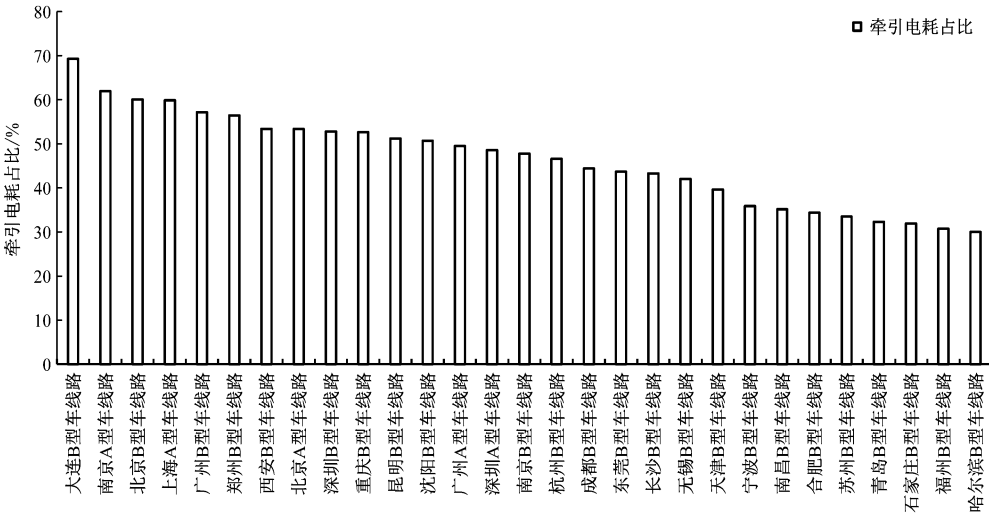


图3 2017年各城市地铁A、B型车线路牵引电耗占比指标比较图

年,单位车公里总电耗较高;北京、上海、广州、南京等城市线路的开通运营时间均超过5年,单位车公里总电耗均较低。随着线路客运量、列车周转量的增加,单位车公里分摊的动力照明用电低,因而降低了单位车公里总电耗指标值。运营时间较短的线路,其单位车公里总电耗指标普遍较高;运营时间较长的线路,其单位车公里总电耗指标普遍越低。此外,从上述图表还可看出,车型不是影响总电耗指标的最重要因素,例如,上海A型车线路的总电耗指标值小于深圳、无锡、苏州等城市的B型车线路。不同城市的单位车公里总电耗指标差异巨大的原因还有待深入研究。

2) 各城市地铁线路的单位人公里总电耗变化范围为0.048~0.264 kW·h,最高值与最低值之比高达5.50,比单位车公里总电耗变化幅度更大。其变化特征与上述单位车公里总电耗类似,这里不再赘述。

3) 各城市地铁线路的单位车公里牵引电耗变化范围为1.116~2.509 kW·h,最高值与最低值之比为2.25。该指标值较高的是广州、深圳、石家庄、上海的A型车线路,较低的是哈尔滨、宁波、无锡、苏州的B型车线路。A型车比B型车自重重大,容纳的客流更多,因而A型车的单位车公里牵引电耗比B型车的大。

4) 各城市地铁线路的单位人公里牵引电耗变化范围在0.028~0.115 kW·h,最高值与最低值之比为4.11。该指标值较高的是南京、东莞、福州、无锡等城市的B型车线路,较低的是广州、上海、北京、沈阳的B型车线路及广州的A型车线路。负荷强度对单位人公里牵引电耗指标有显著影响,负荷强度增加,单位人公里牵引电耗指标就会降低。表3列出了这些线路的日均负荷强度,由表3可见,单位人公里牵引电耗较高的4个城市线路的负荷强度均低于0.6万人次/km,单位人公里牵引电耗较低的5个城市线路的负荷强度均高于1.5万人次/km。

5) 各城市地铁线路的牵引电耗占比变化范围为30.00%~69.26%,最高值与最低值之比为2.31。其影响因素还有待深入研究。

3 地铁电耗的主要影响因素分析

以制式或城市为组别计算的电耗指标值在描述时模糊了线路之间的差异,由于线路的主要敷设

表3 2017年单位人公里牵引电耗较高与较低的线路的日均负荷强度指标

城市及地铁线路类型	线路条数	单位人公里牵引电耗/(kW·h)	日均负荷强度/(万人次/km)
南京B型车线路	1	0.115	0.417
东莞B型车线路	1	0.083	0.281
福州B型车线路	1	0.081	0.549
无锡B型车线路	2	0.072	0.454
广州B型车线路	3	0.030	2.018
北京B型车线路	13	0.029	2.131
深圳B型车线路	1	0.029	1.801
沈阳B型车线路	2	0.028	1.556
广州A型车线路	3	0.028	4.550

方式、客运规模以及列车满载率等对电耗水平均有不同程度的影响。受限于统计数据,本文仅对地铁A、B型车线路电耗的主要影响因素进行分析。

3.1 线路主要敷设方式

地铁线路在高架段和地面段运行时一般处于开放式环境,不会产生地下段的通风、照明等电能消耗项目,地铁的电能主要使用在车辆牵引和动力照明设备两大方面,牵引电耗占比指标能够反映出线路运营中电耗的总体情况^[9],因此地铁线路的地下段比例越大,牵引电耗占比一般越高。图4分别比较了北京地铁B型车线路之间、上海地铁A型车线路之间的地下段比例和牵引电耗占比指标的变化情况,基本反映了线路主要敷设方式对牵引电耗占比的影响关系。

3.2 客运周转量

客运周转量是综合体现线路旅客运输规模和运输距离的指标。在线路长度和列车的运营公里不变的情况下,客运周转量越高代表列车满载率越高且线路的负荷强度越大,地铁列车需要更多地为牵引电机等供电,牵引电耗占总电耗的比例一般会随之上升。以2014年开通试运营的3条地铁线路为例,2015—2017年间的年这3条地铁线路的客运周转量和牵引电耗占比变化情况如表4所示。

这3条线路在2015—2017年的列车运营公里数未发生明显增长。由于2014年开始试运营,因此表4中线路在首个统计年度2015年的牵引电耗占比值较低,但随着时间的推移,客运周转量逐渐增大,牵引电耗占比指标值也基本呈现逐渐升高的趋势。

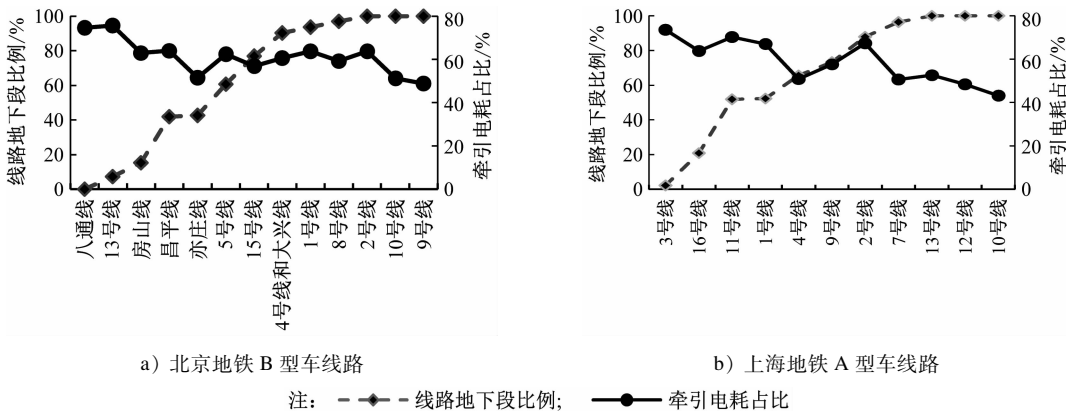


图 4 2017 年地铁线路地下段比例与牵引电耗占比指标变化图

表 4 3 条 2014 年开通试运营的地铁线路 2015—2017 年的年客运周转量和牵引电耗占比指标统计表

线路	试运营时间	年客运周转量/(万人·km)			牵引电耗占比/%		
		2015 年	2016 年	2017 年	2015 年	2016 年	2017 年
无锡地铁 1 号线	2014-07-01	30 598.87	35 673.76	40 120.37	31.27	33.33	40.46
南京地铁 10 号线	2014-07-01	31108.75	32878.21	36359.36	48.12	50.79	49.86
无锡地铁 2 号线	2014-12-28	19849.52	23243.28	27102.92	36.55	37.92	44.09

3.3 线路负荷强度

线路负荷强度指标是线路客运周转量与线路长度的比值,反映单位长度地铁线路上平均承担的旅客周转量。以北京和深圳的地铁 A 型车线路为例,分析其线路负荷强度和单位人公里牵引电耗的

关系,如图 5 所示。图 5 基本反映了线路负荷强度越大单位人公里牵引电耗越低的趋势。这说明尽管线路负荷强度越高,列车的牵引电耗会随之增大,但规模效应使得单位人公里的牵引电耗值反而下降。

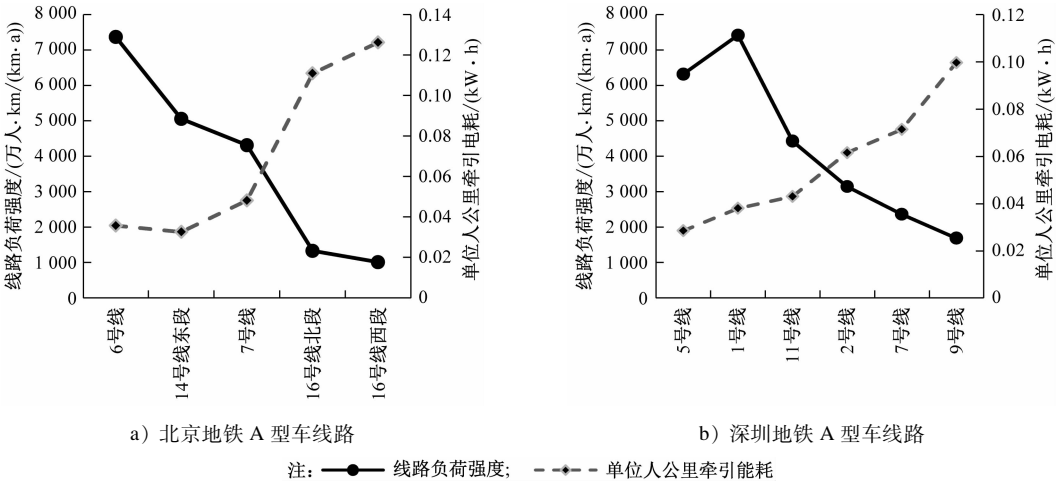


图 5 2017 年线路负荷强度与单位人公里牵引电耗指标变化图

3.4 线路平均满载率

通过基础统计数据中的线路客运总量、实际列车开行次数、列车编组及制式等运营指标匡算得到线路的平均满载率,这个指标可以从地铁列车的角度反映客流强度。以北京和深圳的地铁 A 型车线

路为例,分析其平均满载率和单位人公里牵引电耗指标关联情况,如图 6 所示。由图 6 可见,总体上,随着线路平均满载率的提高,线路的单位人公里牵引电耗呈降低趋势。

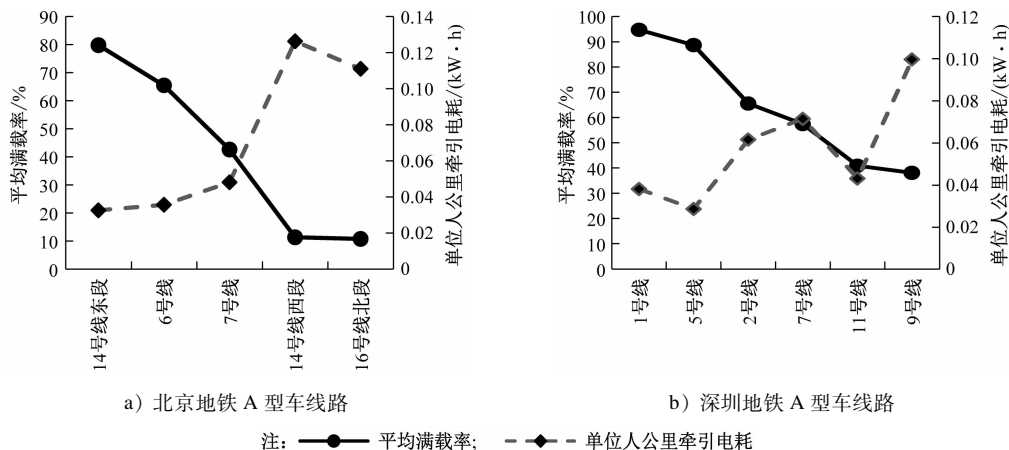


图6 2017年线路平均满载率与单位人公里牵引电耗指标变化图

4 结论

通过对2015—2017年协会统计数据进行分析,得到如下结论:

1) 不同城市轨道交通制式的电耗指标差异显著。单位车公里总电耗指标中,APM的表现高于其他制式,为12.082~13.460 kW·h,其后依次是中低速磁浮、地铁、单轨、轻轨、市域铁路、有轨电车;单位车公里牵引电耗指标中,APM同样明显高于其他制式,为2.931~2.959 kW·h,中低速磁浮次之,地铁、轻轨、单轨、市域铁路的该项指标表现较为接近,为1.679~2.024 kW·h;地铁、轻轨、单轨的单位人公里总电耗、单位人公里牵引电耗的差异均不明显,前者为0.056~0.088 kW·h,后者为0.034~0.042 kW·h;牵引电耗占比指标中,有轨电车最高,为72.73%~72.82%,市域铁路次之,APM最低。

2) 不同城市地铁A、B型车线路的电耗指标同样存在较大差异。各城市地铁线路的单位车公里总电耗变化范围为2.771~7.101 kW·h,单位人公里总电耗变化范围为0.048~0.264 kW·h,单位车公里牵引电耗变化范围为1.116~2.509 kW·h,单位人公里牵引电耗变化范围为0.028~0.115 kW·h,牵引电耗占比变化范围为30.00%~69.26%。其中,单位车公里总电耗与单位人公里总电耗指标受线路开通时长的影响较大;单位车公里牵引电耗指标受车型影响,A型车线路普遍高于B型车线路;单位人公里牵引电耗指标与线路的日均负荷强度

大体呈反比关系。

3) 敷设方式、客运周转量、负荷强度、满载率对地铁电耗指标值的影响显著。线路的地下段比例越高、线路客运周转量越大,牵引电耗占比指标一般越高;线路负荷强度越大、线路平均满载率越高,单位人公里牵引电耗越低。

参考文献

- [1] 赵昕,顾保南. 2018年中国城市轨道交通运营线路统计和分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(1): 1.
- [2] 戴华明,李照星,宋杰. 北京市城市轨道交通能耗现状及节能措施建议[J]. 铁路技术创新, 2016(4): 77.
- [3] 李研,张学兵. 南京地铁运营电耗分析及改进措施[J]. 现代城市轨道交通, 2012(5): 78.
- [4] 刘海东,毛保华,丁勇,等. 城市轨道交通列车节能问题及方案研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007(5): 68.
- [5] 赵月想. 城市轨道交通系统运营能耗研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2013.
- [6] 马占奎. 考虑线路运营特征的城市轨道交通系统能耗估算研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [7] 张雁,宋敏华,冯爱军. 城市轨道交通可持续发展研究及工程示范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [8] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通2015年度统计和分析报告[J]. 城市轨道交通, 2016(2): 14.
- [9] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通2016年度统计和分析报告[J]. 城市轨道交通, 2017(1): 20.
- [10] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通2017年度统计和分析报告[J]. 城市轨道交通, 2018(4): 6.
- [11] 田时沫,鲁放,杨珂,等. 2017年中国城市轨道交通运营线路统计与分析[J]. 都市快轨交通, 2018, 31(1): 16.

(收稿日期:2019-06-08)