

# 城市轨道交通节能线路设计研究

李文波

(北京城建设计研究总院有限责任公司 北京 100037)

**摘要** 在城市轨道交通中,能耗主要包括牵引能耗和动力能耗两部分,影响牵引能耗的因素主要包括车型、车辆启动和制动方式、车辆最高速度、线路条件、季节因素等。通过数据调查和牵引计算模拟,分析站间距、敷设方式、平曲线半径、节能坡的坡度与坡长、节能坡与站台端部的距离、节能坡组合方式等因素对列车牵引能耗的影响,提出节能线路设计的一般原则,并对节能坡的节能效果进行分析。

**关键词** 城市轨道交通;节能;线路设计;节能坡;牵引能耗

**中图分类号** U231+.2 **文献标志码** A

**文章编号** 1672-6073(2013)02-0008-06

目前国内轨道交通建设规模越来越大,建设速度也越来越快。随着运营里程的不断增加,节约能源、降低运营成本的问题也越来越突出。

根据国内建成线路的运营经验,20 km 的轨道交通线路,年用电量约为 6 000 万~1 亿 kW·h。据此推算,若建成 300 km 的轨道交通线网,年用电量将达到 9 亿~15 亿 kW·h<sup>[1]</sup>。例如,2009 年广州和深圳两市在轨道交通运营中的电费成本分别占总成本的 20.5% 和 23%<sup>[2]</sup>。

笔者从单条轨道交通线路着手,通过对站间距、敷设方式、线路平曲线、坡段长度和坡度等线路条件对牵引能耗的影响进行分析,提出了在线路设计过程中,为应对节能应该采取的设计方法和措施。

## 1 影响能耗的因素

城市轨道交通的能耗主要分为列车牵引能耗和动力照明能耗两大部分。列车牵引能耗指列车在运行过程中消耗的电能,主要包括列车牵引系统、空调及附属

系统等设备能耗;动力照明能耗指车站在运营过程中消耗的电能,主要包括空调及通风、照明、给排水、电梯、自动扶梯、屏蔽门、弱电系统等设备能耗。

### 1.1 影响牵引能耗的因素

影响城市轨道交通系统牵引能耗的因素主要包括车型、车辆启动制动方式、车辆最高速度、站间距、牵引供电系统电压和馈电方式、季节因素、线路条件(平面曲线、纵坡、敷设方式等)和行车密度等。

### 1.2 影响动力能耗的因素

影响城市轨道交通系统动力能耗的因素主要包括车站敷设方式、车站的环控方式、车站规模、车站客流乘降量、季节及地域、车站出入口数量和自动扶梯数量等。

## 2 线路条件对牵引能耗的影响

轨道交通线路的敷设方式、站间距、平曲线半径、纵断面坡度和坡长均会对牵引能耗产生较大的影响。

在线路的规划阶段,应合理选择敷设方式和站间距,以达到节能目的;在设计过程中,应尽可能优化平面曲线半径,以减少车辆在行驶过程中因曲线阻力大而增加电耗;优化线路纵坡,采用“高车站低区间”的节能坡设计,使列车进站时上坡,将动能转化为势能,列车出站时下坡,再将势能转化为动能,有利于减少牵引能耗;在线路纵坡设计时,还应确定节能坡的变坡点离站台端部的合理距离,以达到节约能源的目的。

以下模拟分析结果的前提条件均为 6 节 4M2T 编组的 B 型车,列车最高运行速度为 80 km/h。

### 2.1 站间距

城市轨道交通线路的站间距应根据具体情况确定。站间距较小能够方便步行到站的乘客,但会降低旅行速度,增加乘客出行时间和运营公司的配车数量;同时,由于多设车站也增加了工程投资和运营成本。站间距较大有利于列车的节能,但是容易让步行到站的乘客感觉不便,并且会增加车站负荷。根据国内外

收稿日期: 2012-08-16 修回日期: 2012-09-21

作者简介: 李文波,男,大学本科,高级工程师,长期从事城市轨道交通线路规划与设计研究工作,liwb@buedri.com

城市轨道交通设计和运营的经验,主要服务于城市中心地区的轨道交通线路平均站间距为 1.0 ~ 1.2 km,市区以外有所增加。

轨道交通线路的站间距大小与牵引能耗有直接的关系,列车的牵引能耗在启动和制动时消耗较大。站间距过小,列车启动制动频繁,牵引能耗较大;站间距过大,列车给电时间长,同样不利于节能。

在停站次数相同时,站间距对列车运行能耗的影响主要表现在对惰行时间的影响。为了获得相同的技术速度,在站间距较小时,列车需要不断推高手柄位,而站间距较大时,可以延长在较高速度时的惰行工况时间。惰行工况下单位距离能耗小于牵引工况。

在运行距离相同的情况下,站间距对运行能耗的影响主要是因为频繁制动导致的动能损失。列车在平直道上牵引时,牵引电能转化为列车动能的过程中存在电气损耗和列车运行的基本阻力损耗,虽然列车在制动过程中,将一部分动能回馈牵引网,但这一部分难以弥补制动造成的动能损失<sup>[3]</sup>。

图 1 为不考虑平面曲线和线路纵坡的情况下,不同站间距的牵引能耗模拟分析结果。

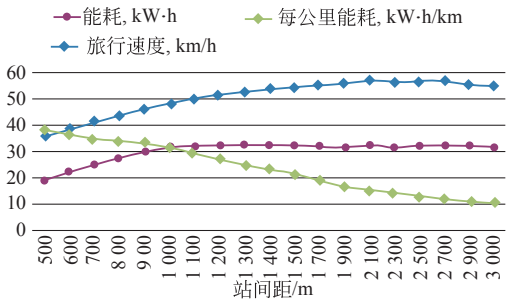


图 1 不同站间距牵引能耗对比分析 (节能牵引模式)

从图 1 可以看出,整个区间每公里牵引能耗随站间距的增大而减小,而牵引总能耗在站间距为 500 ~ 1 000 m 时,随站间距的增大而不断增加。但在站间距为 1 000 ~ 3 000 m 时,站间距的增大对区间的牵引总能耗影响并不大,这主要是因为模拟计算中,列车采用的是“牵引—惰行—制动”运行模式,即列车牵引时间相当,惰行时间增加,牵引总能耗变化不大,但区间运行时间明显增加。若为了减小运行时间,在长大区间 (站间距 2 000 ~ 3 000 m) 的列车需要采用“牵引—惰行—牵引—制动”的二次牵引运行模式,因增加了列车牵引时间,牵引总能耗显著增加,如图 2 所示。

从图 1 和图 2 可以看出,站间距小于 1 000 m 时,站间距越小,每公里牵引能耗明显增加,站间距每减

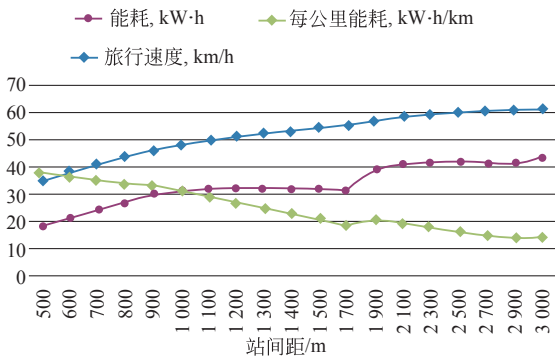


图 2 不同站间距牵引能耗对比分析 (二次牵引模式)

小 100 m,每公里牵引能耗增加约 4.5%,且旅行速度明显降低;站间距大于 2 000 m 时,站间距越大,每公里牵引能耗的降低和旅行速度的增加放缓。

综合分析,站间距采用 1 000 ~ 2 000 m 较为合理。

2.2 敷设方式

城市轨道交通敷设方式有高架、地面和地下 3 种,地下线的坡道附加阻力、曲线附加阻力、隧道附加阻力一般要比地面线和高架线大,另外采用地面或高架线还可减少通风设备、排水设备、车站和隧道照明等设备的耗电。因此,线路的敷设方式对牵引能耗有影响。表 1 和图 3 分别为部分城市轨道交通线路的敷设方式与牵引能耗对比分析结果<sup>[4]</sup>。

表 1 部分城市轨道交通线路敷设方式一览

线路	线路长度/km			
	地下	地面	高架	总计
京 1 号线	31.04 (100%)	0	0	31.04
京 2 号线	23.1 (100%)	0	0	23.1
京 13 号线	3.47 (8.5%)	11.28 (27.6%)	26.1 (63.9%)	40.85
京八通线	0	11.05 (58.3%)	7.91 (41.7%)	18.96
沪 1 号线	19.46 (59.6%)	5.39 (16.5%)	7.81 (23.9%)	32.66
沪 2 号线	16.53 (87%)	0	2.47 (13%)	19.0
沪 3 号线	2.74 (11%)	1.41 (5.6%)	20.82 (83.4%)	24.97
沪 4 号线	13.75 (91.5%)	0	1.28 (8.5%)	15.03
沪 5 号线	0	0.46 (2.7%)	16.76 (97.3%)	17.21
广 1 号线	16.44 (88.9%)	2.06 (11.1%)	0	18.5
广 2 号线	19.73 (100%)	0	0	19.73
宁 1 号线	14.85 (68.4%)	0	6.87 (31.6%)	21.72
长轻轨一期	0.6 (4.1%)	13.0 (89.1%)	1.0 (6.8%)	14.6
津滨轻轨	0	5.49 (12.1%)	39.92 (87.9%)	45.41
津 1 号线	15.65 (58.9%)	1.39 (5.2%)	9.52 (35.9%)	26.55
渝 2 号线	2.55 (13.7%)	0	16.03 (86.3%)	18.58

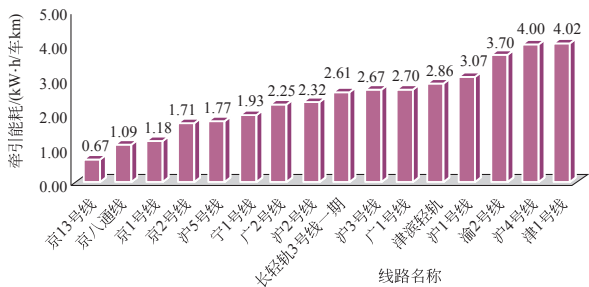


图3 各线路换算单位车公里牵引能耗排序

从表1和图3可以看出,由于地面和高架线相对于地下线,其曲线和坡度的设计条件一般都会比地下线好,而且车体内照明用电量也要小,地面和高架线的耗电要比地下线小,但也存在以下一些特殊情况。

1) 对于北方的严冬季节,由于车内采暖设备耗电量的影响,地面和高架敷设方面的优势不是非常明显,如长春轻轨、津滨轻轨。

2) 重庆单轨采用的橡胶轮胎,摩阻力较大,也会导致牵引能耗的增加。

3) 有些地面或高架敷设方式的坡度起伏较大,因列车较为频繁地爬坡与制动,牵引电耗相较于纯地下线路来讲,并未有很大的电耗优势,如沪4号线、重庆单轨。

2.3 线路平曲线

线路平面曲线是线路条件的重要组成部分,曲线半径与线路的定位及等级、车辆性能、行车速度、地形地物条件等有关。列车在曲线上运行产生离心力,这会影响旅客的舒适度,因此通常会设置外轨超高来产生向心力,以达到平衡离心力的目的。当曲线半径一定时,速度越高,要求设置的超高就越大。

曲线半径对牵引能耗的影响主要表现在以下两方面:

1) 由于存在平面曲线,列车运行时会产生曲线单位附加阻力,从而导致牵引能耗增加。曲线附加阻力与曲线半径、列车速度、曲线外轨超高以及轨距加宽、列车车辆的轴距等许多因素有关,很难用理论方法推导其解法,一般的经验公式为<sup>[5]</sup>

$$\omega_r = \frac{A}{R}g$$

式中: $\omega_r$ ——曲线单位附加阻力,N/t;

A——试验常数,标准轨距取值600;

R——曲线半径,m;

g——重力加速度,m/s<sup>2</sup>。

城市轨道交通的轨距同样符合标准轨距,可以采用下式来计算:

$$\omega_r = \frac{600}{R}g$$

如果用圆曲线长度L(m)与曲线转角 $\alpha(^{\circ})$ 表示半径,则 $R = \frac{180L}{\pi\alpha}$ 。

$$\text{上式也可以写为}\omega_r = \frac{10.5\alpha}{L}g$$

在曲线长度相等的情况下,曲线半径越小,则曲线转角越大,曲线附加阻力会越大,一般会导致牵引能耗增加。

有研究成果对站间距为1 km,曲线半径取100~1 000 m,两种类型列车分别在限速40 km/h、50 km/h和60 km/h进行了列车牵引能耗的模拟计算<sup>[6]</sup>;研究结果表明,平曲线上的曲线附加阻力对牵引能耗的影响不是很明显,半径减小200 m,区间牵引能耗增加值不超过4 kW·h。

2) 曲线半径与允许列车通过的速度有关,列车通过曲线的速度按下式计算<sup>[7]</sup>:

$$v_c = \sqrt{\frac{Rh}{11.8}}$$

式中:h——超高值。

从上式可以看出,曲线半径越小,列车限速越小。列车限速小,会导致列车运行速度低,区间运行时间增加。由于列车运行速度低,所以会导致单位时间牵引能耗的降低。

图4为对站间距1.2 km的运行区间,在区间中部设置不同半径的曲线时,不同平曲线半径的牵引能耗模拟分析结果。

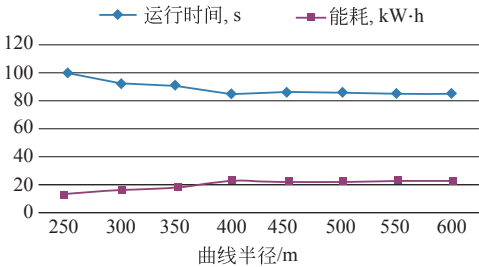


图4 不同曲线半径对牵引能耗的影响

从图4可以看出,对于城市轨道交通常用的250~450 m限速曲线半径,区间运行时间随半径的增大而减

少,牵引能耗随半径的增大而增加,能耗增加较为明显;半径超过 450 m 的曲线对区间运行时间和牵引能耗影响并不大;在曲线半径小于 450 m 时,虽然曲线半径越小,牵引能耗也越小,但是区间运行时间增加,小半径曲线会恶化线路条件,加速车轮和钢轨的磨耗。因此,小半径曲线不能作为一种降低牵引能耗的措施,有条件时应尽量采用半径大于 450 m 的曲线。

2.4 线路纵断面

列车在线路上运行时,受到牵引力、基本运行阻力、曲线阻力、风阻力和坡度阻力 5 种力的作用,其中基本运行阻力、曲线阻力及风阻力与列车运行方向相反,而坡度阻力的方向是变化的。当列车上坡时,坡道阻力与列车运行方向相反,使列车减速;当列车下坡时,坡道阻力与列车运行方向相同,使列车加速运行。

在轨道交通线路纵断面设计中,将车站设置在凸形坡段上,使列车进站时上坡,将动能转化为势能,列车出站时下坡,再将势能转化为动能,这样有利于减少能量消耗,达到节能的目的。这种设计也叫做节能坡设计,如图 5 所示。

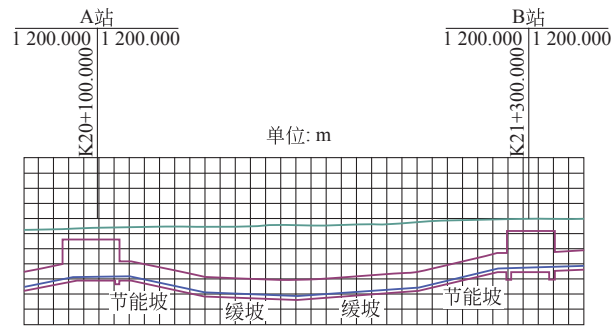


图 5 典型节能纵断面设计案例

节能坡要达到节能的目的,必须合理选择节能坡的坡度、坡长、位置以及缓坡连接方案,才能达到较优的节能效果。

2.4.1 坡度对牵引能耗的影响

图 6 为两车站标高相同,站间距为 1.2 km 时,区间的牵引能耗模拟结果。区间设计成“节能坡—缓坡—缓坡—节能坡”的 V 字坡形式,缓坡的坡长和坡度分别取 250 m,3‰,节能坡坡长取 250 m,坡度分别取 3‰,4‰,6‰,8‰,10‰,⋯,30‰。

从图 6 可以看出,在运行距离和限速条件一致的情况下,牵引能耗随节能坡坡度的增大而减小,

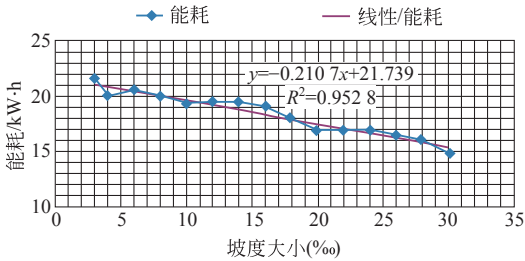


图 6 不同坡度下的牵引能耗

利用最小二乘法对数据进行线性拟合,得出在该模拟条件下,牵引能耗(y)与节能坡坡度(x)的函数关系为

$$y = -0.2107x + 21.739$$

节能坡坡度每增加 1‰,牵引能耗会减少 0.21 kW·h。因此,利用城市轨道交通线路纵断面 V 字坡的设计,使列车进站时上坡将动能转化为势能,列车出站时下坡将势能转化为动能,从而达到节能的目的。但是,节能坡的坡度也不宜过大,列车在过大的坡度上运行时,操纵方式稍不合理便引起较大的能源消耗;有研究表明,节能坡的坡度大小设置为 22‰~26‰较为合理<sup>[8]</sup>。

2.4.2 坡长对牵引能耗的影响

图 7 为两车站标高相同,站间距为 1.2 km 时,区间的牵引能耗模拟结果。区间设计成“节能坡—缓坡—缓坡—节能坡”的 V 字坡形式。节能坡坡长分别取 190,200,210,⋯,350 m,坡度取 24‰;缓坡坡长依次缩短,分别取 305,295,285,⋯,145 m,坡度取 26‰。

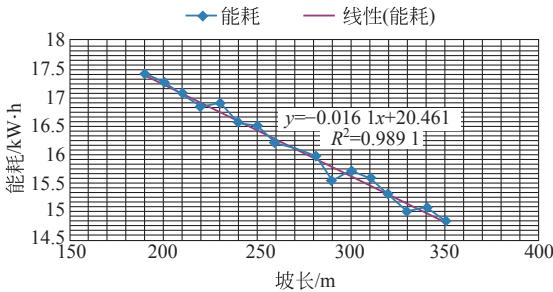


图 7 不同坡长下的牵引能耗

从图 7 可以看出,在运行距离和限速条件一致的情况下,牵引能耗随节能坡坡长的增大而减小,利用最小二乘法对数据进行线性拟合,得出在该模拟条件下,牵引能耗(y)与节能坡坡长(x)的函数关系为

$$y = -0.0161x + 20.461$$



节能坡坡长每增加 10 m, 牵引能耗会减少 0.16 kW·h; 采用 250 m 和 350 m 的坡长比采用 200 m 的坡长分别节能约 4.5% 和 14%。

可见, 在理想情况下节能坡的坡长应尽可能长, 但并不是节能坡越长越好。通过对模拟条件下的速度—距离曲线和电流—距离曲线分析后发现, 坡长在 260 ~ 300 m 时, 列车运行至 1/3 坡段时停止牵引并转为惰行, 列车利用剩下 2/3 坡段的坡道下滑力进行加速至最大运行速度, 以达到牵引能耗最小化, 但这种方式对列车的操纵要求非常高。

2.4.3 节能坡离站台端的距离对牵引能耗的影响

图 8 为节能坡的竖曲线端部离站台端的距离分别为 0, 2, 4, 6, …, 100 m 时, 区间的牵引能耗模拟结果。站间距为 1.2 km, 区间设计成“节能坡—缓坡—缓坡—节能坡”的 V 字坡形式, 节能坡的坡度 24‰, 坡长 250 m。

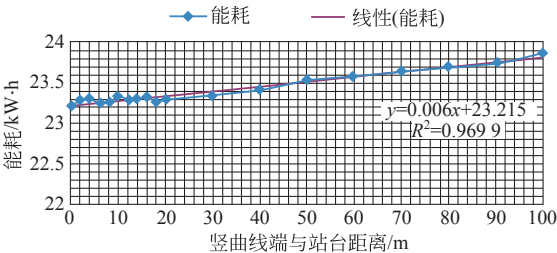


图 8 V 字坡区间节能坡位置对牵引能耗的影响

从图 8 中可以看出, 牵引能耗随节能坡与站台距离的增大而增加, 利用最小二乘法对数据进行线性拟合, 得出在该模拟条件下, 牵引能耗 ( $y$ ) 与节能坡位置 ( $x$ ) 的函数关系为

$$y = 0.006x + 23.215$$

( $x$  为节能坡的竖曲线端与站台距离)

若考虑到车站设计和施工的便利, 将节能坡移出车站范围, 即节能坡竖曲线端与站台距离由 10 m 增加至 50 m 时, 牵引能耗增加约 0.24 kW·h, 按近期日开行列车 200 对来计算, 仅 1 个区间 1 年增加牵引能耗约 17 520 kW·h。由此可见, 节能坡在有条件的时候应该尽量贴近站台设置, 这样节能效果更好。

2.4.4 节能坡与缓坡组合的能耗对比分析

表 2 为站间距为 1.2 km, 两车站轨面高差分别为 6.5, 8.7, 10.7, 12.7 和 14.7 m, 区间采用单个坡段和 2 个坡段组合时的牵引能耗对比分析模拟结果。

表 2 单个坡段与组合坡段的牵引能耗对比

	kW·h				
单个坡段参数	1 020 m - 6‰	1 050 m - 8‰	1 040 m - 10‰	1 040 m - 12‰	1 020 m - 14‰
单个坡段能耗	20.014	17.788	16.262	14.150	12.486
组合坡段参数	250 m - 15‰	250 m - 21‰	250 m - 26‰	250 m - 28‰	250 m - 30‰
	810 m - 3‰	780 m - 4‰	770 m - 5‰	760 m - 7‰	750 m - 9‰
组合坡段能耗	17.732	17.200	15.694	14.124	12.476

坡段拆分原则是, 将单个坡段拆分成 1 个坡长 250 m 的节能坡和 1 个缓坡的组合 (由于受竖曲线不能进入有效站台范围的控制, 单个坡段拆分成 2 个坡段的组合时, 区间坡段总长稍有变化), 如表 2 所示。

从图 9 可以看出, 坡度为 6‰, 8‰ 和 10‰ 时, 拆分成节能坡和缓坡的组合后, 牵引能耗有明显的减少; 坡度为 6‰ 时, 拆分后牵引能耗减少约 11%; 坡度为 8‰ 和 10‰ 时, 拆分后牵引能耗减少约 3%。

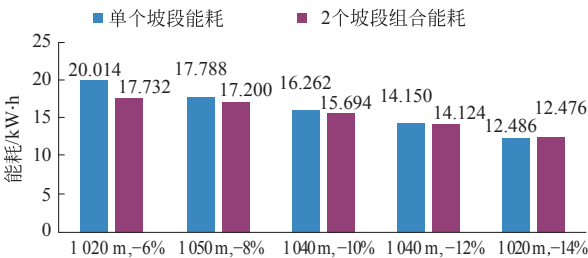


图 9 单个坡段与组合坡段的牵引能耗对比

坡度超过 10‰ 时, 拆分成节能坡和缓坡的组合后, 对牵引能耗几乎没有影响, 而且拆分后的节能坡坡度分别达 28% 和 30%, 拆分后的坡度过大, 反而对运营不利, 拆分的必要性不大。

2.4.5 节能坡的节能效果分析

图 10 为站间距为 1.2 km, 区间分别采用人字坡 (525 m \ 3‰, 525 m \ - 3‰)、一般 V 字坡 (525 m \ - 3‰, 525 m \ 3‰) 和节能 V 字坡 (250 m \ - 24‰, 245 m \ - 3‰, 245 m \ 3‰, 250 m \ 24‰) 时的牵引能耗对比分析模拟结果。

从图 10 可以看出, 坡度大小采用 3‰ 时, V 字坡相对于人字坡节能效果一般, 而且还需增设区间泵站。

将 3‰ 的坡段拆分成 24‰ 和 3‰ 的组合后, 区间坡段设计为“250 m \ - 24‰, 245 m \ - 3‰, 245 m \ 3‰, 250 m \ 24‰”的 V 字节能坡。从图 10 可以看出, V 字节能坡的设计相对于人字坡和一般的 V 字坡节能效果

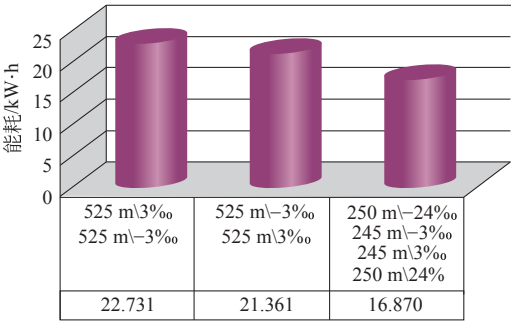


图 10 节能坡的节能效果分析

很明显,分别节能约 26% 和 21%。

按近期日开行列车 200 对来计算,仅 1 个节能坡段 1 年节约牵引能耗约 16.5 万 kW·h;按 1 个区间左右线同样采用节能坡的设计,1 个区间 1 年节约牵引能耗 66 万 kW·h。

3 结论

笔者通过收集资料、数据调查和模拟计算,针对线路敷设对牵引能耗的影响进行了研究,具体结论如下:

- 1) 从每公里牵引能耗和旅行速度两方面考虑,站间距采用 1~2 km 较为合理。
- 2) 一般情况下,地下线的坡道附加阻力、曲线附加阻力、隧道附加阻力一般要比地面线和高架线大,而且车体内部照明用电也会增加,因此牵引能耗一般也会比地面线和高架线大。
- 3) 平曲线对牵引能耗的影响表现在不同半径下的曲线附加阻力和曲线限速对牵引能耗的影响。同等长度的曲线,曲线半径越小,曲线附加阻力越大,牵引能耗也越大;对 B 型车而言,在曲线半径小于 450 m 的情况下,曲线半径越小,限速越低,牵引能耗也越低,但小半径曲线会恶化线路条件,加速车轮和钢轨的磨损,并不能作为一种降低牵引能耗的措施。
- 4) 在坡长一定的情况下,牵引能耗随节能坡坡度的变化成相应的线性变化;在坡度一定的情况下,牵引

能耗随节能坡坡长的变化成相应的线性变化。节能坡坡度和坡长分别采用 22‰~26‰和 250 m 左右较为合适。

5) 在设置节能坡的区间,节能坡在有条件的时候应该尽量靠近站台设置,这样节能效果更好。

6) 在地势条件允许、两车站埋深合理的前提下,若区间为单个坡段,且坡长较长,坡度大小为 6‰~10‰时,将其拆分成 1 个大坡和 1 个缓坡的组合,其节能效果更好,而且减小了列车进站的坡度;坡度超过 10‰时,拆分反而会恶化线路条件,不建议进行拆分。

7) 区间在采用标准的 V 字节能坡设计后,节能效果明显,单个坡段比不采用节能坡设计的坡段节能约 21%,按近期日开行列车 200 对来计算,仅 1 个区间 1 年节约牵引能耗 66 万 kW·h。

参考文献

[1] 张燕燕.城市轨道交通系统牵引及车站能耗研究[D].北京:北京交通大学,2008.

[2] 贾文峰.城市轨道交通能耗及列车运行节能技术[C]//第三届中国城市轨道交通机电应用创新专题研讨会.西安,2010.

[3] 李鲲鹏,张振生.直线电机轨道交通系统能耗分析[J].都市快轨交通,2008,21(1):31-33.

[4] 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.

[5] 毛保华.列车运行计算与设计[M].北京:人民交通出版社,2008.

[6] 王玉明.城市轨道交通系统能耗影响因素的量化分析[D].北京:北京交通大学,2011.

[7] GB 50157—2003 地铁设计规范[S].北京:中国计划出版社,2003.

[8] 梁广深.地铁节能线路纵断面设计研究[J].都市快轨交通,2009,22(4):37-39.

(编辑:曹雪明)

Design of Energy-Saving Route of Urban Rail Transit

Li Wenbo

(Beijing Urban Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100037)

**Abstract:** Energy consumption in urban rail transit consists of train traction, power and lighting. Factors affecting traction energy consumption include vehicle type, speed limit, conditions of line and seasonal climate. Through data investigation and train traction simulation, factors influencing traction energy consumption, such as station distance, laying mode, radius of horizontal curve, energy-saving slope gradient and length, distance between energy-saving slope and station and the combination of energy-saving slopes were analyzed, the basic principles for energy-saving route design were advanced, and the energy-saving effect of energy-saving slope was also elaborated.

**Key words:** urban rail transit; energy-saving; route design; energy-saving slope; traction energy consumption