

关于杭州地铁列车节能运行的研究

万先进 万柠涛

杭州地铁运营有限公司 浙江 杭州 310000

摘要: 随着城市轨道交通在我国的快速发展, 地铁逐步成为公共交通的重要组成部分。地铁在促进城市发展、优化空间布局、缩短出行时间, 提高生活质量的同时, 也带来了较大的能源消耗。绿色、节能是当前城市轨道交通建设和运营管理中较为紧迫的任务, 是降低运营成本、提高运营效率的重要环节。杭州地铁作为市属国有企业, 降本增效工作任务紧、担子重, 研究列车节能运行意义重大。本文以杭州地铁运营线路为研究对象, 运用数据分析工具, 试图找出列车不同运行速度与单位牵引能耗间的关系。在满足客流需求与乘客服务的前提下, 尽量选取最优能耗的速度等级进行运行图编制, 以期达到节能减排的目的。

关键词: 旅行速度; 牵引能耗; 节能

1 列车节能运行的理论研究

1.1 杭州地铁能耗现状

2022年杭州地铁正线列车牵引能耗占总能耗比重为58.8%。由此可见, 研究优化正线牵引能耗是实现城市轨道交通节能减排的重要步骤。

1.2 影响牵引能耗因素

影响列车牵引能耗的因素较多, 主要有线路条件、车型、驾驶策略、运行计划等。线路中区间的坡度、曲线半径的占比、站间距均会对列车牵引能耗产生影响。曲线半径占比越高的线路, 列车牵引时所受阻力越大, 牵引能耗越高。因不同车型的自重、载荷、牵引系统等均有所不同, 故车型的差异会导致牵引能耗的不同。列车从出站启动到进站停车会经过牵引、惰行及制动三个阶段。采取不同的驾驶策略, 即列车牵引曲线不同, 牵引能耗也会有所差异。驾驶策略包括技术速度与工况。

一般来说, 技术速度越高, 列车牵引能耗越大。工况, 即牵引、惰行、制动三种运行状态的组合情况。因惰行时列车处于滑行状态, 不消耗电能, 故惰行工况越多、占比时长越大, 牵引能耗就越小。在列车制动时, 由再生制动产生的能量, 会先供给列车自身的空调及照明等辅助系统。其余能量大部分会反馈至电网。如供电分区中有正在加速的列车, 则这部分能量会供加速列车使用。否则, 这些能量就会经由高阻值电阻或其他方式消耗成热能。

1.3 牵引能耗与各因素相关性分析

针对上述因素, 选取可定量分析的相关参数如车型、编组、平均站间距、技术速度、旅行速度等, 与每车公里牵引能耗(为排除编制影响, 不采用每列公里牵引能耗)做相关分析。

杭州地铁各线路能耗相关参数

| 线路 | 每车公里牵引能耗 (千瓦时/车公里) | 车型 | 编组 | 车型1 | 车型2 | 平均站间距 (公里) | 技术速度 (公里/小时) | 旅行速度 (公里/小时) |
|-------|-----------------------|----|-----|-----|-----|---------------|-----------------|-----------------|
| S1号线 | 1.54 | B | 6B | 239 | 1 | 1.33 | 46.8 | 34.6 |
| S2号线 | 1.53 | AH | 6AH | 264 | 2 | 1.51 | 44.5 | 33.5 |
| S3号线 | 1.59 | B | 6B | 239 | 1 | 1.43 | 45.2 | 35.1 |
| S4号线 | 1.88 | AH | 6AH | 264 | 2 | 1.63 | 48.0 | 35.9 |
| S5号线 | 2.10 | A | 6A | 310 | 3 | 1.95 | 57.2 | 44.3 |
| S6号线 | 2.17 | A | 6A | 310 | 3 | 2.03 | 56.6 | 43.8 |
| S7号线 | 1.49 | B | 6B | 239 | 1 | 1.45 | 46.6 | 35.8 |
| S8号线 | 1.70 | A | 6A | 310 | 3 | 1.19 | 43.6 | 32.4 |
| S9号线 | 1.80 | B | 4B | 236 | 1 | 3.15 | 69.4 | 58.0 |
| S10号线 | 1.88 | A | 6A | 310 | 3 | 4.16 | 74.7 | 60.9 |

通过相关性分析, 得到每车公里牵引能耗与各参数间的相关系数, 如下表所示。

每车公里牵引能耗与各线路参数的相关系数矩阵

| 参数 | 每车公里牵引能耗 | 车型1 | 车型2 | 平均站间距 | 技术速度 | 旅行速度 |
|----------|----------|------|------|-------|------|------|
| 每车公里牵引能耗 | 1.00 | | | | | |
| 车型1 | 0.78 | 1.00 | | | | |
| 车型2 | 0.78 | 0.99 | 1.00 | | | |
| 平均站间距 | 0.86 | 0.50 | 0.51 | 1.00 | | |
| 技术速度 | 0.89 | 0.58 | 0.54 | 0.93 | 1.00 | |
| 旅行速度 | 0.86 | 0.55 | 0.51 | 0.94 | 0.99 | 1.00 |

每车公里牵引能耗与技术速度的相关系数为0.89，可以认为两者高度相关，存在较强的相关关系。因此，可通过研究技术速度与牵引能耗间的关系，通过优化列车运行速度，达到节能的目的。

1.4 牵引能耗节能途径

1.4.1 通过优化列车运行速度达到节能目的

正线牵引能耗可视为单位公里能耗与列车实际运营里程的乘积。因此，通过减少单位公里能耗可达到节能目的。一般来说，列车的最高运行速度越低，则达到该峰值速度的牵引时间就越短，消耗的电能就越少，因此可采用设置线路限速的方式降低列车运行速度。此外，设置较低的列车运行等级，也可以降低列车运行速度，达到减少单位公里能耗的目的。

1.4.2 通过减少运营里程达到节能目的

正线牵引能耗可视为单位公里能耗与列车实际运营里程的乘积。因此，通过减少运营里程可达到节能目的。在实践中，通过优化列车运行图，针对高峰、平峰采用不同旅速、不同行车间隔（保证高峰期较小行车间隔，拉大平峰期行车间隔），运用大小交通嵌套的方式，可在不显著降低乘客服务水平的前提下，总体上减少列车运营里程，达到节能的目的。

1.4.3 通过优化信号系统的速度曲线、工况组合等方式达到节能目的

根据地铁线路运行条件，选择合适的惰行点，充分利用势能通过惰行的方式实现列车节能运行。通过惰行运行，使列车在站间牵引和制动命令的变化次数最少，减少小幅度牵引和小幅度制动带来的能量消耗。同时该方式可以增加牵引及制动相关继电器的使用寿命。该方法在站间距较短的线路上适应性较差，在站间距较长的线路上适应性较好。信号系统节能策略实施途径：信号

厂商设计ATO曲线，尽量减少多次给车辆的牵引和制动指令，减少牵引-制动-惰行的转换达到节能的目的。

1.4.4 通过优化列车运行图，实现列车制动再生能高效利用

当空气制动系统用于列车制动时，列车的动能将全部转化为热能被浪费。为避免这种情况，在列车制动时，将动能部分转化为电能回馈给接触网，供相同供电分区内其他列车牵引使用。提升列车制动再生能利用率的途径是通过优化列车运行图，尽量保证制动与启动的同时性，当同一时刻，同一供电分区的两列车一列制动，一列启动时，制动列车产生的制动再生能将被启动列车利用，从而节省能耗。该方法涉及的制动再生能利用率的高低，取决于列车运行图的编制，即合理计算相同供电分区内两列车的制动与启动时机、列车间的行车间隔，对运行图编制的要求较高。同时，因运行图的编制受信号系统、编图软件、首末班车时间、对外公布的行车间隔、上线列车数、停站时间等诸多因素影响，因此，通过运行图的编制实现列车制动再生能的充分利用，目前较难付诸实践。

2 列车节能方法的实践——降低单位公里牵引能耗

2.1 牵引能耗测试方案——以S6号线为例

为充分了解各线路不同运行速度下牵引能耗的消耗情况，杭州地铁开展各线路列车牵引能耗测试。本文以S6号线为例进行测试方案介绍。测试列车为末班车后的2列回库列车，载荷为AW0，即空载。检修人员分别在测试开始时、测试结束后对列车HMI界面中能耗与公里数等数据进行拍摄及记录，测试首日采用运行等级一，次日采用运行等级二，第三日采用运行等级三，第四日采用运行等级四。不同运行等级下区间运行时间、牵引能耗的测试结果如下所示。

不同运行等级下每列公里牵引能耗测试结果

| 运行等级 | 测试列车 | 开始时总牵引能耗 (千瓦时) | 结束时总牵引能耗 (千瓦时) | 测试牵引能耗 (千瓦时) | 开始时总里程 (公里) | 结束时总里程 (公里) | 测试里程 (公里) | 每列公里牵引能耗 (千瓦时/列公里) | 平均牵引能耗 (千瓦时/列公里) |
|------|-------|----------------|----------------|--------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|------------------|
| 等级一 | 测试列车1 | 2319156 | 2319409 | 253 | 174415 | 174431 | 16 | 15.80 | 15.78 |
| | 测试列车2 | 2134814 | 2135066 | 252 | 160869 | 160885 | 16 | 15.75 | |

续表:

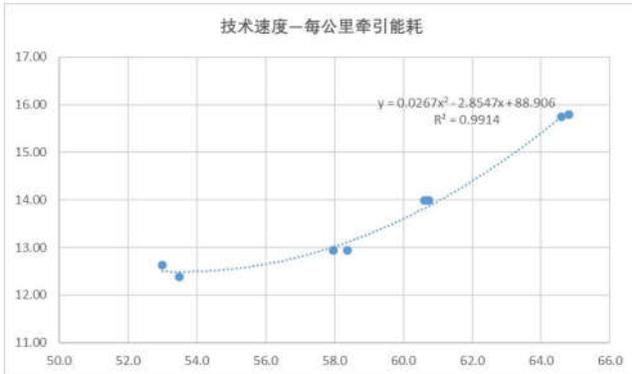
| 运行等级 | 测试列车 | 开始时总牵引能耗 (千瓦时) | 结束时总牵引能耗 (千瓦时) | 测试牵引能耗 (千瓦时) | 开始时总里程 (公里) | 结束时总里程 (公里) | 测试里程 (公里) | 每列公里牵引能耗 (千瓦时/列公里) | 平均牵引能耗 (千瓦时/列公里) |
|------|-------|----------------|----------------|--------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|------------------|
| 等级二 | 测试列车1 | 2328158 | 2328385 | 227 | 175090 | 175106 | 16 | 13.99 | 13.99 |
| | 测试列车2 | 2135317 | 2135544 | 227 | 160909 | 160925 | 16 | 13.99 | |
| 等级三 | 测试列车1 | 2324002 | 2324212 | 210 | 175379 | 175395 | 16 | 12.94 | 12.94 |
| | 测试列车2 | 2192465 | 2192675 | 210 | 164614 | 164630 | 16 | 12.94 | |
| 等级四 | 测试列车1 | 2172532 | 2172737 | 205 | 163686 | 163702 | 16 | 12.63 | 12.51 |
| | 测试列车2 | 2136219 | 2136420 | 201 | 160976 | 160992 | 16 | 12.38 | |

2.2 测试结果相关性分析——以S6号线为例

以S6号线为例, 将不同运行等级下对应的技术速度与每列公里牵引能耗做回归分析, 绘制散点图及趋势线。

不同技术速度下牵引能耗消耗情况

| 技术速度 (公里/小时) | 每列公里牵引能耗 (千瓦时/列公里) |
|--------------|--------------------|
| 64.8 | 15.80 |
| 64.6 | 15.75 |
| 60.6 | 13.99 |
| 60.7 | 13.99 |
| 58.4 | 12.94 |
| 58.0 | 12.94 |
| 53.0 | 12.63 |



X为技术速度, Y为每列公里牵引能耗, 两者高度拟

合二次函数

$$Y = 0.0267x^2 - 2.8547x + 88.906$$

从图可知, 在技术速度明显下降的情况下, 每公里牵引能耗下降较为缓慢, 其趋势线与二次函数高度拟合, R^2 达0.9914。根据二次函数对称轴公式 $X = -b/2a$, 得出函数最低点 $X = 53.46$, $Y = 12.60$, 即当技术速度为53.46公里/小时, 理论上每公里牵引能耗达到最低值, 为12.60千瓦时/公里。

当前S6号线工作日时刻表, 高峰期单程区间运行时间为1090秒, 对应技术速度为53.60公里/小时, 理论上每公里牵引能耗12.60千瓦时/公里, 已达到最优牵引能耗12.60千瓦时/公里。

2.3 各线路技术速度-牵引能耗相关性汇总

通过绘制散点图和趋势线的方式, 将各线路技术速度与对应牵引能耗测试结果做回归分析, 选取拟合程度最好的函数, 结果如下表所示。

*Excel中的 R^2 是趋势线拟合程度的指标, 它的数值大小可以反映趋势线的估计值与对应的实际数据之间的拟合程度, 拟合程度越高, 趋势线的可靠性就越高。

通过测试, S2号线、S3号线、S6号线、S7号线、S8号线、S10号线的技术速度与单位公里牵引能耗呈现极强的相关性, R^2 在0.9以上; S4号线、S10号线相关性相对较弱, 分别为0.76和0.8; S5号线测试结果未呈现相关性。

杭州地铁各线路技术速度与牵引能耗相关关系

| 线路 | 拟合函数类型 | R^2 (相关系数) | 拟合函数 | 备注 |
|------|---------|--------------|------------------------------------|---------------|
| S1号线 | 多项式(2次) | 0.99 | $y = 0.0105x^2 - 0.607x + 17.543$ | 强相关性 |
| S2号线 | — | — | — | 限速区段过多, 不进行测试 |
| S3号线 | 多项式(2次) | 0.98 | $y = 0.0132x^2 - 0.7894x + 22.278$ | 强相关性 |
| S4号线 | 线性 | 0.76 | $y = 0.1472x + 7.0686$ | 较强相关性 |
| S5号线 | — | — | — | 未呈现相关性 |
| S6号线 | 多项式(2次) | 0.99 | $y = 0.0267x^2 - 2.8547x + 88.906$ | 强相关性 |
| S7号线 | 线性 | 1.00 | $y = 0.3381x - 6.3129$ | 强相关性 |
| S8号线 | 线性 | 1.00 | $y = 1.5446x - 55.204$ | 强相关性 |

续表:

| 线路 | 拟合函数类型 | R ² (相关系数) | 拟合函数 | 备注 |
|-------|--------|-----------------------|------------------------|--------------|
| S9号线 | 线性 | 0.93 | $y = 0.3802x - 17.813$ | 强相关性 |
| S10号线 | 线性 | 0.80 | $y = 0.1172x - 2.5908$ | 测试能耗明显低于正常水平 |

通过以上测试、分析,可得出采取较低的运行等级,较慢的运行速度能够有效降低单位公里牵引能耗的结论。部分线路如S1号线(采用二次函数拟合效果更好的线路)其边际效益递减,即随着列车运行速度的减小,每公里牵引能耗的下降愈发不明显。但正如前文提到,降低运行速度会不可避免地延长乘客旅行时间,造成服务水平下降,故应在充分考虑客流需求、乘客服务水平等因素后谨慎运用。此外,可将节能发力点转移至信号厂商优化列车速度曲线,减少牵引工况的占比,提高惰行工况占比,以及优化升级再生能馈系统、提高电力利用效率等。

结束语:本文通过理论研究、实验测试等方法,在全面了解杭州地铁各线路参数、能耗的基础上,对影响列车正线牵引能耗的因素进行分析,并通过优化列车运行等级的方式探寻降低牵引能耗的方法。受制于专业知

识等因素限制,本文对可显著降低能耗的,例如通过信号系统优化牵引曲线、提高列车制动再生能利用效率等方法研究较为浅显,希望各信号厂家、供应商及专业部门进一步深入研究。

参考文献

- [1]高豪,郭进,张亚东.城市轨道交通列车追踪间隔与牵引能耗优化[J].交通运输系统工程与信息,2020,20(6): 171-172.
- [2]谢汉生,满朝翰,商一帆.地铁主要能耗影响因素及节能措施分析研究[J].现代城市轨道交通,2013(4): 65-66.
- [3]蒲一超.城市轨道交通列车牵引节能策略优化[J].城市轨道交通研究,2019,(11): 63-64.
- [4]谢志锋,田龙,郭金,等.地铁列车牵引能耗优化策略研究[J].铁道通信信号,2019,55(9): 84-85.