

文章编号: 1671-6612 (2019) 06-592-05

# 基于线路限速的高速列车运行能耗分析

王 振<sup>1</sup> 毕海权<sup>1</sup> 李 明<sup>2</sup> 阳光武<sup>3</sup>

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 中车唐山机车车辆有限公司 唐山 064000;

3. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031)

**【摘要】** 高速列车在不同线路限速运行时会产生不同的运行时间和能耗。通过分析高速列车能量流程和转化, 给出列车运行分项能耗构成和计算方法, 对 250km/h 和 350km/h 速度等级高速列车在不同线路限速时的运行分项能耗进行计算和分析, 结果表明: 站间距越长, 线路限速越高, 速度等级越高的列车节时优势越明显。250km/h 线路限速时, 高速列车运行阻力能耗占总能耗的 60%以上; 对限速线路, 合理的高速列车速度等级选择可降低列车线路运行能耗。

**【关键词】** 高速列车; 能量流程; 运行能耗; 线路限速

中图分类号 U270.2/U2-9 文献标识码 A

## Operating Energy Consumption Analysis of High-Speed Train Based on Line Speed Limit

Wang Zhen<sup>1</sup> Bi Haiquan<sup>1</sup> Li Ming<sup>2</sup> Yang Guangwu<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;

2. CRRC TANGSHAN Co., Ltd, Tangshan, 064000;

3. Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031 )

**【Abstract】** High-speed train will produce difference running time and energy consumption when running at different line speed limit. By analyzing the energy flow and transformation, this paper presents the composition and calculation method of energy consumption of high-speed train. Based on the method, the energy consumption of 250km/h and 350km/h speed class high-speed train in different line speed limits is calculated and analyzed. The results show that longer distance between station and higher speed limit in rail line will cause obvious time advantage with higher speed class. The energy consumption of running resistance of high-speed train accounts for more than 60% of the total energy consumption in the 250km/h line speed limit. Reasonable speed class selection of high-speed train can reduce the operating energy consumption for a speed limit rail line.

**【Keywords】** high-speed train; energy flow; operating energy consumption; line speed limit

## 0 引言

随着高速铁路运营里程的增加和运行目标速度的不断提高, 列车运行能耗问题凸显。文献[1]对直线电机车辆的能量流程和能耗进行了分析, 给出了直线电机车辆的运行节能措施。文献[2-4]对高

速列车的运行能耗进行了分析, 认为列车在运行过程中获得的能量主要用于克服运行阻力、维持列车所需动能、增加运行过程中的势能。除上述损耗外, 还存在为保证客室环境舒适度和照明、维持牵引传动系统设备正常运行等的辅助能耗和牵引传动系

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB1200504-D-01)

作者简介: 王 振 (1993.4-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: Sean\_Wwz@163.com

通讯作者: 毕海权 (1974.12-), 男, 博士, 教授, E-mail: bhquan@163.com

收稿日期: 2019-03-12

统设备本身损耗<sup>[5]</sup>。

以上文献虽分析了高速列车运行能耗构成,但未给出分项能耗和总能耗的关系,以及各分项能耗的计算方法和占比情况。

目前基于运动做功的能耗测算方法都以列车运动方程为计算基础,外加相应的牵引策略,以实现列车在具体线路的牵引运行计算。Milroy, Asnis, Howlett 等人最早提出了被命名为“Mechanical energy model”的机械能模型,其中较为详尽地给出了列车的运动方程<sup>[6-8]</sup>,在基于一定的假设和约束条件下,该模型主要被用来证明和计算最优运行方案。

本文首先通过分析高速列车能量流程和转化,并在列车运动方程的基础上,给出高速列车分项能耗计算方法。然后通过牵引运行计算,对 250km/h 和 350km/h 速度等级高速列车在不同线路限速条件下的运行分项能耗进行计算,量化分析不同线路限速时高速列车的运行节时和能耗情况,为高速列车的节能运行提供参考。

## 1 高速列车运行能耗构成

### 1.1 高速列车能量传递及转化

高速列车能量传递及转化示意如图 1 所示,从受电弓到轮对为列车牵引时的能量传递过程,从轮对到受电弓为列车再生制动时向电网的馈电过程。在能量传递过程中,变压器和变流器存在能量损失,主要涉及变压、变流效率问题,最终损耗以热能形式散失到周围环境中。经过牵引电机和齿轮变速箱的能耗,主要为电机内部电损和机械传动系统的摩擦阻力损耗,最终也以热能形式散失到周围环境。指向辅助系统的箭头表示运行过程中流向列车辅助设备的能量。

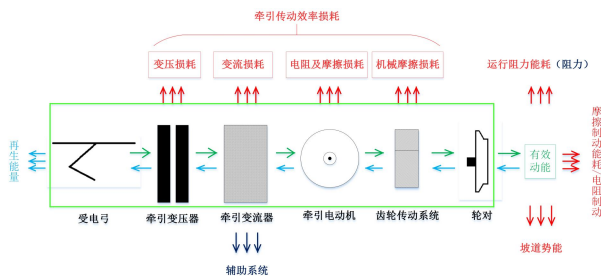


图 1 高速列车能量传递示意图

Fig.1 Diagram of high-speed train energy transfer  
经过轮轨粘着作用输出的能量,一部分因克服

轮轨摩擦而消耗,另一部分转化为列车的有效动能。该部分有效动能最终转化为运行过程中的气动阻力能耗、制动过程中机械结构间的摩擦阻力能耗、列车在线路的势能和再生制动过程能量,而再生制动过程能量中,部分能量因牵引传动系统设备效率问题而损耗,该部分能量称为电制动传递损耗。

综合以上分析,将高速列车运行能耗分为牵引传动效率损耗、运行阻力能耗、辅助能耗和制动过程能耗,其中制动过程能耗又分为摩擦制动能耗、电制动传递损耗和再生能量三部分。

### 1.2 分项能耗计算方法

建立式(1)所示的列车运动方程<sup>[8]</sup>:

$$\begin{cases} v(x) = \frac{dx}{dt} \\ (1+\gamma)Mv(x)\frac{dv(x)}{dx} = F_d(x) - B(x) - W_0(x)/1000 + G(x) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $M$ 为列车总质量,  $t$ ;  $r$ 为列车回转质量系数,一般取0.06;  $F_d(x)$ 为列车提供牵引力, kN;  $G(x)$ 为列车运行附加阻力, kN;  $v(x)$ 为列车在线路 $x$ 处的运行速度, m/s。

根据牵引运行计算原理,建立运行阻力能耗、牵引传动效率损耗等的计算方法。 $dx$ 段线路中的牵引能耗、轮周制动能耗、运行阻力能耗、再生能量等可按式(2)计算。根据对应的牵引传动系统设备效率可计算牵引和再生制动过程中的牵引传动效率损耗和电制动传递损耗。

$$Q_i(x) = F_i(x) \cdot v(x) \cdot dt \quad (2)$$

式中:  $Q_i(x)$ 为 $dx$ 段线路对应受力条件下的能耗, kWh;  $F_i(x)$ 为列车在位置 $x$ 处的相应受力,如轮周牵引力、轮周制动力、运行阻力等, kN;  $v(x)$ 为列车在位置 $x$ 处的运行速度, m/s;  $dt$ 为 $dx$ 段线路中的运行时间。

列车在整条线路的分项能耗可按式(3)计算。

$$Q = \sum Q_i(x), \quad (3)$$

式中:  $Q$ 为整条线路的对应能耗, kWh。

## 2 计算参数

### 2.1 列车特性参数

为对比不同速度等级车型因质量、起动加速度等的不同造成列车动力特性差异时列车在不同线

路限速的运行能耗情况，本文给出时速250km/h和350km/h等级高速列车质量及动力参数，对这两种车型下的运行能耗进行对比分析，两种速度等级列车特性参数见表1。250km/h速度等级高速列车定员人数较大，且在0~200km/h平均加速度小于350km/h速度等级高速列车。

表 1 高速列车特性参数

| Table 1 Characteristic parameters of high-speed train |             |                    |          |
|---|-------------|--------------------|----------|
| 动力特性参数/速度等级   | 250km/h     | 350km/h            |          |
| 最高持续运营速度 (km/h)                                       | 250         | 350                |          |
| 最高运营速度 (km/h)   | 250         | 380                |          |
| 定员载荷平直道逆风速度 (km/h)                                    | 54          |                    |          |
| 最高持续运营速度时的剩余加速度 (m/s <sup>2</sup> )                   | 0.059       | 0.05               |          |
| 0~200km/h 平均加速度 (m/s <sup>2</sup> )                   | 0.262       | 0.4                |          |
|   | 0~5km/h     | 0.5528             |          |
| 最大常用制动减速度 (m/s <sup>2</sup> )                         | 5~20km/h    | 0.0129519v+0.48852 |          |
|   | 20~70km/h   | 0.7472             |          |
|   | 70~115km/h  | -0.002662v+0.9336  |          |
|   | 115~380km/h | -0.0013977v+0.7877 |          |
| 编组形式  | 4M4T        |                    |          |
| 定员载荷 (t)  | 408.50      | 501.18             |          |
| 定员数量 (人)  | 610         | 557                |          |
| 定员下动车质量 (t)   | 216.20      | 251.24             |          |
| 动车/拖车回转质量系数   | 0.06        |                    |          |
| 基本阻力 (N/kN)   | A           | 0.00088            | 0.00011  |
|   | B           | 107.28             | 117.1255 |
|   | C           | 5.9295             | 7.0485   |
| 齿轮传动效率  | 0.975       |                    |          |
| 牵引电机效率  | 0.947       |                    |          |
| 牵引变流器效率   | 0.9702      |                    |          |
| 牵引变压器效率   | 0.96        |                    |          |
| 再生能量利用系数  | 100%        |                    |          |

2.2 线路及限速参数

表 2 线路参数

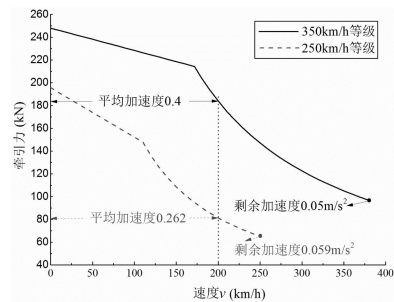
| Table 2 Parameters of high-speed railway line |       |          |       |                         |
|---|-------|----------|-------|-------------------------|
| 线路名称  | 直达方案  | 站间距 (km) | 运行策略  | 限速参数 (km/h)             |
| L1 线  | S1-S2 | 245.68   |       | 250, 275, 300, 325, 350 |
|   | S1-S2 | 451.268  | 最快速策略 |                         |
| L2 线  | S1-S3 | 1025.577 |       | 250, 350                |
|   | S1-S4 | 1706.454 |       |                         |
|   | S1-S5 | 2295.6   |       |                         |

给出高速铁路运行线路参数及运行策略，如表2所示。列车从起始站运行至终点站，中间不停车，采用最大牵引/制动能力的最快速策略。为对比线路限速不同时的线路运行时间和能耗结果，线路限速取表2所示限速参数。

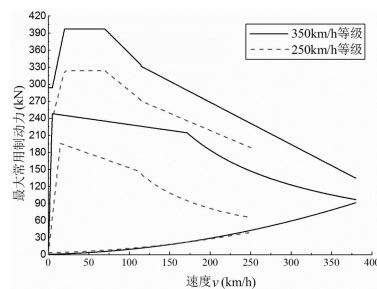
3 计算结果及分析

3.1 列车牵引/制动特性

根据表 1 中的列车特性参数，计算列车牵引/制动特性如图 2 所示。图 2 (b) 中，从上往下依次为最大常用制动力、再生制动力和运行基本阻力。在 0~200km/h 平均加速性能、常用制动力和再生制动力方面，350km/h 速度等级高速列车均大于时速 250km/h 速度等级高速列车。在 0~250km/h 速度区间，两车型运行基本阻力相差不大。



(a) 牵引特性



(b) 最大常用制动特性

图 2 高速列车牵引/制动特性

Fig.2 Traction/braking characteristics of high-speed train

3.2 线路运行时间及能耗

3.2.1 线路运行时间

两种速度等级高速列车在 L1 线 250km/h 限速运行时的里程-运行速度-运行时间曲线如图 3 所示。两列车的线路运行总旅行时间分别为 3689.3s 和 3729.7s，时间差较小。由于时速 350km/h 高速列车平均加速度和制动力较大，使得列车在 L1 线运行时达到限速位置提前，制动进站位置推后，造

成高速运行区间里程增加, 气动阻力能耗增大。

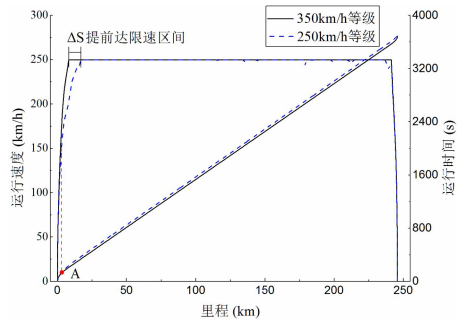


图 3 线路里程-运行速度-运行时间曲线

Fig.3 Operation curve of line mileage-running speed-running time

时速 350km/h 速度等级高速列车在 L1 线不同限速时的运行时间如图 4 所示。由图 4 可知, 线路限速越高, 线路运行总时间越小, 当线路限速由 250km/h 增加至 350km/h 时, 线路运行总时间将减小 15min。

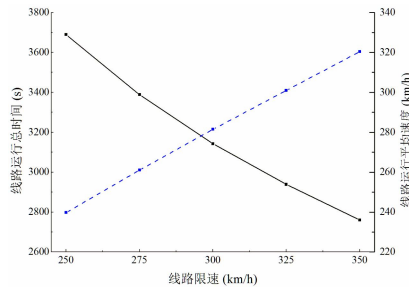


图 4 L1 线运行总时间和平均速度

Fig.4 Total operating time and average speed of L1

图 5 为 L2 线运行时, 不同直达方案下线路限速由 250km/h 增加至 350km/h 时的列车节时情况, 列车由 S1 站直达 S2 站、由 S1 站直达 S5 站两运行方案的线路节约时间相差 119.57min。可见, 线路间距越长, 线路限速越高, 速度等级越高的列车运行节时优势越明显。

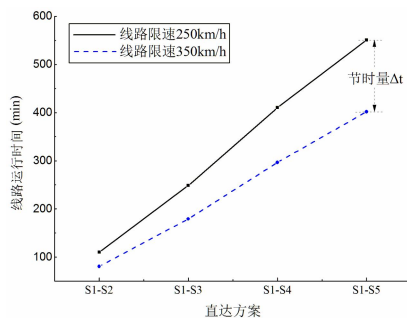


图 5 L2 线各直达方案下的运行时间

Fig.5 Operating time under each direct scheme of L2

### 3.2.2 线路运行能耗

两种速度等级高速列车在 L1 线 250km/h 限速运行时的分项能耗结果见表 3。可知, 线路运行能耗主要为运行阻力能耗, 其次分别为辅助能耗和牵引电气损耗, 制动过程能耗最小。350km/h 速度等级高速列车各分项能耗均增大。经过分析, 因 350km/h 速度等级高速列车质量较大, 使得最高限速时的动能较大, 而引起制动总能耗较大。350km/h 高速列车再生制动能力较强, 而使得再生能量占比增大, 摩擦制动能耗减小。与此同时, 列车质量较大还会引起运行过程中的机械阻力和附加阻力增加, 从而引起运行阻力能耗的增大。

表 3 分项能耗计算结果

Table 3 The results of different energy consumption

| 分项能耗          | 350km/h | 250km/h | 差值     |
|---------------|---------|---------|--------|
| 牵引电气损耗(kWh)   | 510.38  | 459.51  | 50.87  |
| 再生能量(kWh)     | 236.19  | 115.67  | 120.52 |
| 制动过程能耗 (kWh)  | 38.36   | 18.79   | 19.57  |
| 电制动电气损耗 (kWh) | 114.28  | 159.59  | -45.31 |
| 摩擦制动能耗 (kWh)  | 388.83  | 294.05  | 94.78  |
| 运行阻力能耗 (kWh)  | 2716.80 | 2491.51 | 225.29 |
| 辅助能耗(kWh)     | 614.88  | 435.13  | 179.75 |
| 总能耗(kWh)      | 4230.89 | 3680.20 | 550.69 |

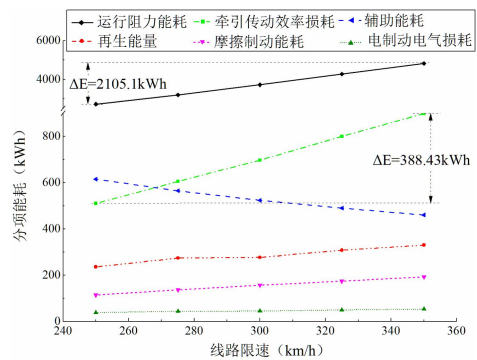


图 6 不同线路限速时的运行能耗结果

Fig.6 Results of operating energy consumption at different speed limits

时速 350km/h 速度等级高速列车在 L1 线不同线路限速运行时的能耗结果如图 6 所示。由图 6 可知, 随着线路限速的增加, 运行阻力能耗、牵引传动效率损耗、再生能量、摩擦制动能耗、电制动电气损耗均增加, 而辅助能耗减小。其中运

行阻力能耗增加较大,主要原因是高速列车线路限速从 250km/h 增加至 350km/h,最大限速运行时的气动阻力将增加 0~96%,气动阻力能耗增加量较大。

#### 4 结论

本文以高速列车和高速铁路线路参数为研究对象,分析了高速列车的运行分项能耗构成,并建立了运行分项能耗计算方法,对两种速度等级高速列车在不同线路限速条件下的运行时间和能耗情况进行了计算分析,结果表明:

(1) 站间距越长,线路限速越高,速度等级越高的高速列车线路运行节时优势越明显。

(2) 高速列车运行能耗构成中,主要为运行阻力能耗,250km/h 线路限速运行时,运行阻力能耗占比在 60%以上。

(3) 相同线路运行条件下,速度等级较高的高速列车运行能耗大于速度等级相对较低的高速列车。即列车在线路运行时,应充分考虑线路允许条件和经济性,选择速度等级适宜的高速列车,使高速列车发挥自身动力性能优势的同时降低运行能耗。

#### 参考文献:

- [1] 李鲲鹏,张振生.直线电机轨道交通系统能耗分析[J].都市轨道交通,2008,21(1):31-33.
- [2] 张家栋,陈海雷,朱彦恒,等.关于建立机车经济操纵评判标准的研究[J].中国铁路,1997(8):32-33.
- [3] González-Franco I, García-Álvarez A. Can High-Speed Trains Run Faster and Reduce Energy Consumption?[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2012,48:827-837.
- [4] 马卫武,李立清.动车组能耗计量与测评[M].长沙:中南大学出版社,2015.
- [5] UIC(Union Internationale des Chemins de fer). Evaluation of Energy Efficiency Technologies for Rolling Stock and Train Operation of Railways (EVENT) [R]. Berlin, 2003.
- [6] Milroy, Ian P. Aspects of automatic train control[J]. © ian peter milroy, 1980.
- [7] Asnis A, Dmitruk A, Osmolovski N. Using the maximum principle to solve the problem of energy-optimal of the motion of the trains[J]. Zh. Vychisl. Mat. Mat. Fiz. 1985,25(11):1644-1656.
- [8] Howlett P. Optimal strategies for the control of a train[J]. Automatica, 1996,32(4):519-532.