

Analysis on the Energy Consumption of High-Speed Train

Hairong Sun¹, Jinpeng Yu^{1,2}, Guoqing Gou²

¹CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan Hebei

²Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Email: sunhairong@tangche.com

Received: Dec. 3rd, 2017; accepted: Dec. 20th, 2017; published: Dec. 27th, 2017

Abstract

The operating economy of high-speed train is an important reference index for high-speed railway operating economy and sustainable development. The running energy consumption of high-speed trains is an important factor affecting the economy of high-speed train operation. On the basis of analyzing the life cycle cost of high-speed train, this paper analyzes the composition of energy consumption of high-speed train operation and the proportion of its energy consumption, and further puts forward the model of high-speed train running energy consumption. On this basis, the paper analyzes the proportion and influence factors of the high-speed train, and gives the upgrading direction of energy saving and consumption reduction of high-speed train and provides references for energy saving and emission reduction for high-speed train.

Keywords

High-Speed Train, Life Cycle Cost, Operating Economy, Running Energy Consumption, Energy Saving and Consumption Reduction

高速列车运行能耗分析

孙海荣¹, 于金朋^{1,2}, 苟国庆²

¹中车唐山机车车辆有限公司, 河北 唐山

²西南交通大学, 四川 成都

Email: sunhairong@tangche.com

收稿日期: 2017年12月3日; 录用日期: 2017年12月20日; 发布日期: 2017年12月27日

摘要

高速列车运营经济性是高速铁路运营经济性和可持续发展的重要参考指标。而高速列车运行能耗是高速

文章引用: 孙海荣, 于金朋, 苟国庆. 高速列车运行能耗分析[J]. 声学 & 振动, 2017, 5(4): 61-66.

DOI: 10.12677/ojav.2017.54009

列车运营经济性的重要影响因素。在分析高速列车全寿命周期成本的基础上,分析了高速列车运营能耗构成及其各部分能耗占比,进一步提出了高速列车运行能耗模型,在此基础上分析了各部分能耗的占比和影响要素,并给出了高速列车节能降耗的提升方向,为高速列车节能减排提供借鉴。

关键词

高速列车, 全寿命周期成本, 运营经济性, 运行能耗, 节能降耗

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

截止 2015 年,我国“四横四纵”高速铁路主骨架已经形成,累计上线运营列车 1500 余列,通车里程 1.9 万公里,以高速铁路为骨架的快速铁路网的总规模达 4 万公里以上。高速铁路的发展要与社会经济发展相适应,高速列车作为高速铁路运输旅客和货物的重要装备之一,高速列车运营经济性是高速铁路运营经济性和可持续发展的重要参考指标[1] [2] [3] [4] [5]。而高速列车运行能耗是高速列车运营经济性的重要影响因素,因此,本文建立了高速列车运行能耗模型,分析了各能耗的占比及其影响因素,在此基础上给出了高速列车节能降耗的提升方向,对高速列车节能减排有着重要意义。

2. 高速列车运行能耗模型

高速列车全寿命周期内的能耗并贯穿于设计、制造、运营、维护和报废等各个阶段,运营过程能耗在全寿命周期内所占比重最大[1] [2] [3],是高速列车节能降耗的重点阶段,见图 1。

2.1. 高速列车运营能耗构成

通过对高速列车运营部门和主机厂的相关数据的统计分析,可知:高速列车运营过程中的能耗主要包括高速列车运行关的能耗、车站及基础设施能耗和其他形式能耗等三部分,分别占高速列车运营能耗的 82%、17%和 1%,见图 2。

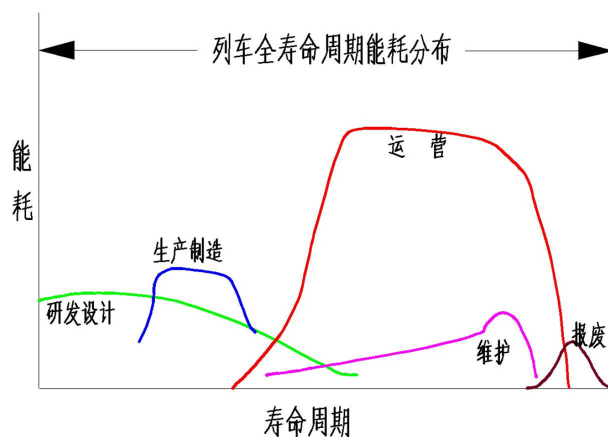


Figure 1. Distribution of life cycle cost of high-speed trains

图 1. 列车全寿命周期能耗分布

2.2. 高速列车运行能耗模型

高速列车的电能流路径是从牵引供电接触网 - 高速列车 - 轮轨 - 牵引供电接触网的能量流路径，见图 3。从图 3 可知，电能从变电站经接触网到列车，最终通过轮轨界面的回流，在整个运行过程中，电能消耗可以分为以下四个方面[6]：

- ▶ 列车克服阻力运动的能量；
- ▶ 由于牵引系统效率低而损失的能量；
- ▶ 用于提供乘客服务功能的能量；
- ▶ 牵引供电系统损失的能量。

故此，可建立高速列车运行能耗模型，见图 4。图 4 中模型是带再生制动列车和不带再生制动车的能量流模型，其中再生制动是指将非再生制动中由摩擦制动器造成的热能损失反馈到电网中。

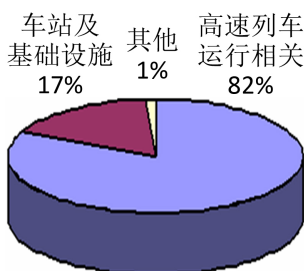


Figure 2. Energy consumption proportional of high-speed railway
图 2. 高速列车运营能耗比例

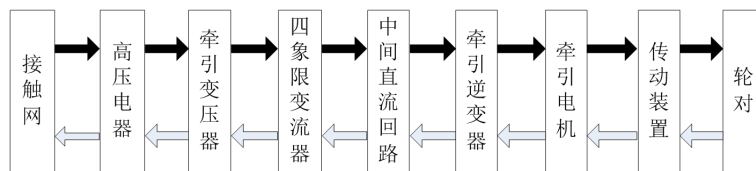


Figure 3. The route of energy flow
图 3. 能量流路径

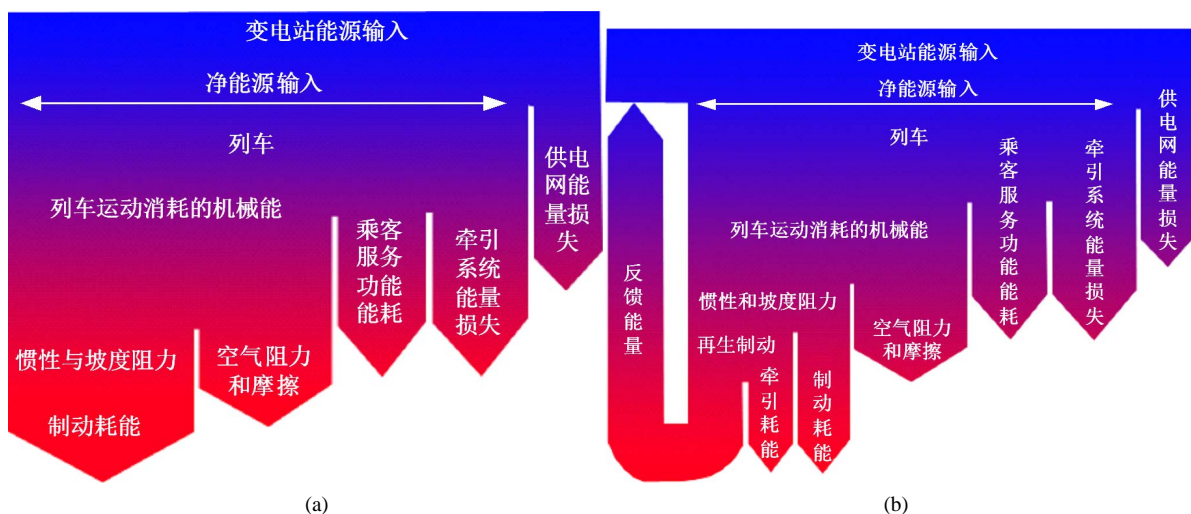


Figure 4. Running energy consumption module of high speed train (a) Without regenerative brake; (b) With regenerative brake
图 4. 高速列车运行能耗模型 (a) 不带再生制动; (b) 带再生制动

3. 高速列车运行能耗分析

3.1. 高速列车运行阻力能耗分析

根据 ATOC (2009)和 IEP (DfT, 2009a)新的 RSSB(2007)牵引能耗报告可知(见图 5), 高速列车运行能源需求主要是用来克服列车运行阻力、惯性和坡度阻力牵引列车运行的牵引能耗和为旅客提供服务功能的辅助能耗。从图 5 中可知, 牵引能源可分为用来克服惯性(如: 加速)和坡度阻力而消耗的能量、克服运行阻力(摩擦力和阻力)需要的能量两部分, 牵引能耗约占列车总消耗能源的四分之三[7]。

克服惯性和坡度阻力所需的能量与列车质量成正比, 分别转换为动能和重力势能。采用再生制动就是尽可能多的恢复这些能量, 但再生制动效率低和运行工况的限制(例如, 网压过高时不允许再生制动)不可避免的会造成一部分能量损失。列车的加速度分布(如停止/启动的循环次数)会影响克服惯性所需的能量, 路网地形也会影响克服坡度阻力所需的能量。

克服列车运行阻力的能源主要用于摩擦生热, 其阻力可由戴维斯公式得到。现代高速列车运行过程中, 空气阻力占主导地位, 对于给定的列车, 运动阻力与列车速度的平方成正比。

3.2. 由于牵引系统效率低而损失的能量

牵引系统的电气元件和机械元件效率低会导致部分能量以热量形式耗散。现代动车组车从接触网获得电能, 经变压器、变流器后变成三相交流电供给电机, 再经传动装置将电能转化为机械能传递至车轮, 驱动列车运行。德国最先进的 16.7 Hz、15 kV 的交流系统在满负荷运行时可达到约 85%的功率效率, 50 Hz 的 AC 或 DC 系统则能达到更高的效虑[8]。

测得京津城际动车组运行时总能耗为 $9.5544 \times 10^9 \text{ J}$, 牵引能耗 $8.47 \times 10^9 \text{ J}$, 可算出牵引系统能耗大约占列车运行总能耗 88.65%, 牵引系统各部分能耗占比见图 6。

3.3. 用于提供乘客服务功能的能量

乘客服务功能包括照明、取暖以及旅客车厢的通风。虽然这些功能主要在列车运行过程中提供, 但在列车停止后也需要进行清洁和维护工作, 确保列车在下次启动时仍处于舒适的环境。乘客服务功能的能源需求很大程度上取决于周围环境氛围。UIC EVENT 在 2003 年的研究中表明, 乘客服务功能的平均能耗约占列车总能耗的 20% [9] [10], 见图 7。

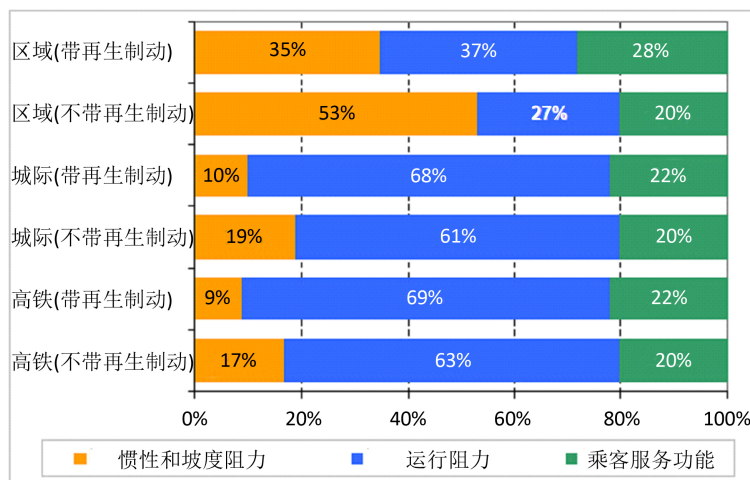


Figure 5. The running energy consumption of high-speed train
图 5. 高速列车运行能耗

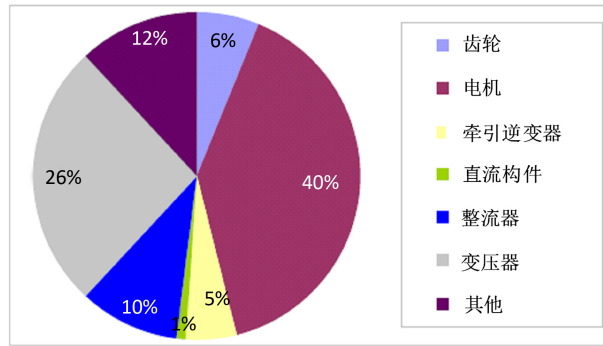


Figure 6. Energy consumption ratio of traction system

图 6. 牵引系统各部分能耗比

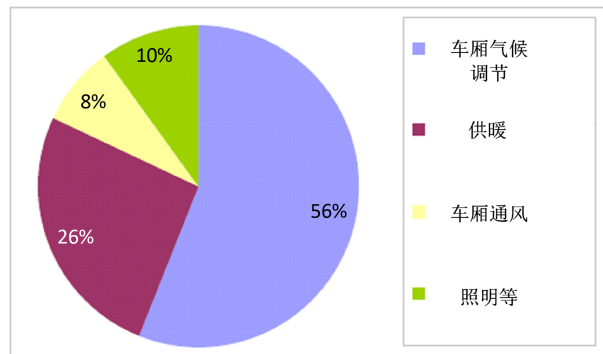


Figure 7. UK train passenger service function of energy requirements in Winter (0°C)

图 7. 冬天(0°C)英国列车乘客服务功能的能源要求

Table 1. Measures to reduce train energy [11]

表 1. 降低列车能耗措施[11]

措施类型	措施	对能耗的影响	对比高铁和传统列车的适用性
技术措施	减少列车质量	新干线降低 1 吨/车重量可使二氧化碳排放降低 1%。	这两种列车类型具有大致类似的效果，更有利于服务和更频繁的停止。
	气体力学和摩擦	新干线空气阻力减少 10%可使二氧化碳排放降低 6%。	由于空气动力阻力更大，更快的速度和能源需求成正比。
	减少牵引系统的损耗	牵引组件减少 1%的能源使用量可使整体能耗降低 1%，如果采用再生制动，牵引和制动系统效率可进一步提高。	这两种列车类型具有大致类似的效果。
	再生制动	城际可节省 5%~7%的能源；列车可降低能源使用的 8%~9%。	新型动车组必备，适用于站点多的路线。
	提高空间利用率	TGV 双层设计几乎比 TGV 单层减少座位/km 能耗的 30%。	同样适用于两种列车类型，有些策略(双层，宽体)不符合英国的基础设施。
操作措施	提高乘客服务功能效率	减少乘客气候控制能耗的 10%可降低列车整体能耗的 1%。	列车每天运行的距离越长可降低的座位/km 乘客服务功能能耗越多。
	增加负荷因数	在所有措施中，增加负荷因数具有最大的降低乘客/km 能耗潜力。	同样适用于两种列车类型，高速列车负荷因数通常高于城际列车。
	高效的牵引策略	高效的牵引策略可以提高牵引效率的 7.5%	同样适用于两种列车类型，但不是本研究考虑的问题。

3.4. 牵引供电系统损失的能量

牵引供电用电是单相负荷,会在电力系统中产生较大的负序电流和负序电压,且因列车功率因数较低,高次谐波含量较大等会给牵引供电系统造成能量损耗。如谐波电流流入三相电子绕组产生旋转磁场,引起振动扭矩,并且增加定子绕组、定子铁芯、转子激磁绕组和阻尼绕组的附加电能损失和发热。谐波电流流入变压器产生的铁芯磁滞现象会引起噪音增大,此外,高次谐波的电流、电压还会引起附加的铁损和铜损,使变压器总电能损失增大。牵引供电系统损失的能量列车总消耗能源的 3%。

4. 高速列车节能降耗提升方向

列车节能降耗的措施可分为两大类:第一类是技术措施,通过硬件改进减少在给定操作条件下的能耗;第二类是操作方式改进,即通过修改列车操作方式减少硬件能耗,见表 1。表 1 总结了具体措施对能耗的影响及其对列车总的节能降耗的影响程度。

5. 结论

通过以上研究并分析,可以得出以下结论:

- 1) 通过高速列车全寿命周期能耗构成分析,得到了高速列车运营能耗构成及各部分权重,与高速列车运行相关的能耗占比高达 82%。在此基础上,进一步分析高速列车运行相关能耗并获得其能耗模型。
- 2) 根据高速列车运行能耗模型,指出了各部分能耗所占比重,分析了各能耗组成成分耗能的主要因素,为高速列车节能降耗的提出提供了技术提升方向;
- 3) 在前述研究基础上,给出了高速列车节能降耗的提升方向,并给出了具体措施对对能耗的影响及其适用性。

参考文献 (References)

- [1] 孙帮成,李明高,安超,马纪军,于金朋. 高速列车节能降耗关键技术研究[J]. 中国工程科学, 2015, 17(4): 69-82.
- [2] 胡辉. 我国铁路运输系统节能问题的研究分析[J]. 华东交通大学学报, 2011(28): 73-79.
- [3] 孙忠国. 铁路运输节能减排技术[M]. 北京: 化工工业出版社, 2009.
- [4] 陈涛. 基于改进拓扑度量法的城市轨道交通网络可达性分析[C]//2010 年交通运输类院校研究生学术论坛委员会. 全国交通运输类院校研究生学术论文集: 2010 年卷. 天津: 2010 年交通运输类院校研究生学术论坛委员会, 2010: 15-19.
- [5] Chen, T. Complexity Analysis of Railway Passenger Transport Service Network. 2010 年第六届中国交通高层论坛.
- [6] 王晓保,李亮,李晓龙,马晔. 城市轨道交通系统能耗裕度与节能分析[J]. 城市轨道交通学, 2011: 86-88.
- [7] 唐山轨道客车有限责任公司产品技术研究中心. 既有动车组运营能耗分析报告[R]. 唐山: 唐山轨道客车有限责任公司, 2013.
- [8] 陈涛. 高速列车运行能耗测算方法及其影响因素量化分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [9] 唐山轨道客车有限责任公司产品技术研究中心. 高速列车运行阻力的能耗影响因素分析及节能措施分析报告[R]. 唐山: 唐山轨道客车有限责任公司, 2014.
- [10] 周新军. 铁路节能现状及技术改进路径[J]. 铁路工程学报, 2011: 1-5.
- [11] Network Rail-New Lines Programme (2003) Comparing Environmental Impact of Conventional and High Speed Rail. Comparing Environmental Impact of Conventional and High Speed Rail.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2328-0530，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ojav@hanspub.org