

电气化高速公路在我国实行的可行性分析

安家希、贺常相、樊超超、吕倩、罗君艇、李晓杰

(西安交通大学)

摘要：为减少我国高速公路货运污染，本文结合无轨电车的特点以及我国高速公路货运状况，提出了一个电化改造高速公路的模拟方案，并对其经济性和减排效率进行了评估。该方案在我国约9300公里的高速公路段架设供电电网及相关设备，为一种电力/柴油双动力混合动力货车提供行驶动力。这种货车的大部分时间依靠电网提供动力，在需要变道或离开高速公路进入城市时可切换至柴油动力系统，不仅具有无轨电车低噪、环保、节能等优点，还克服了无轨电车灵活性低以及城市视觉污染的缺点。这种货车每公里行驶费用仅为传统柴油车的二分之一，代替40%的传统货车后，每年节省的能源价值118.86亿元人民币。电力/柴油混合动力货车比传统柴油货车还减少了87.8%氮氧化物、78.5%的颗粒物和至少95%的碳氢化合物及一氧化碳排放，综合评估后具有极大减排意义。

1绪论

1.1我国的货运现状

我国主要的货运周转量由铁路、内河和沿海水运以及高速公路承担。2006——2013年高速公路货物周转量变化趋势如图1.1【1】所示。

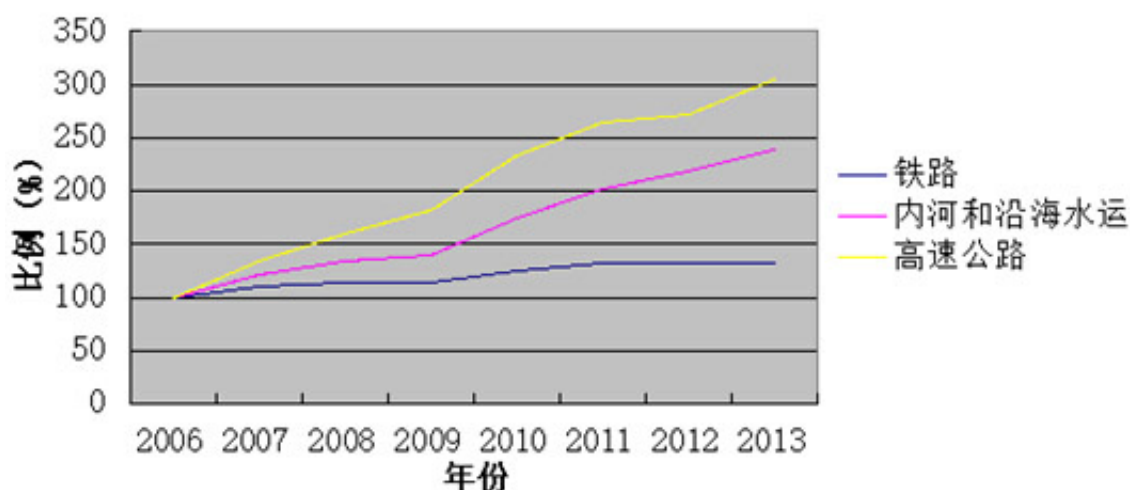


图1.1 2006——2013年高速公路货物周转量变化趋势

可见高速公路周转量所占的比重在持续上升，这有赖于载货汽车数量的增加。截至2013年我国的载货汽车数量已达1419.48万辆，并以每年百万辆的速度持续增长。高速公路货运在运输方面起到的作用越来越重要，然而货运汽车使用量的增大将会带来更加严峻的环境问题。2012年全国高速公路货车排放污染物见表1.2【2】。

表 1.2 2012 年全国高速公路货车污染物排放量

	一氧化碳 (CO)	碳氢化合物 (HC)	氮氧化物 (NO _x)	颗粒物(PM)
数量/万吨	347.0922	49.8212	133.003	15.717

可见，高速公路货运污染是一项至关重要且亟待解决的课题。

方案所研究的电化高速公路计划将在我国部分高速公路路段架设电网，将传统无轨电车与高速公路货运的特点相结

合，用一种新型电力/柴油双动源混合动力货车代替传统货车，计算其经济可行性和节能减排量。

1.2 电化高速公路的理论背景和意义

最先在公路上架设线网的机车是无轨电车。我国1914年就开始使用无轨电车，然而由于其低灵活性和线网城市视觉污染等原因逐渐被淘汰，但随着汽车排放污染的加剧，具有“绿色公交”之称的无轨电车重新受到人们的重视，我国也已研发出应用于城市客运系统的双动源无轨电车【3】。

然而双动源无轨电车的应用领域不应仅仅局限于客运。

由于高速公路上载货汽车的行驶轨道相对固定，完全可以将公路进行电化改造，为一种新型的电力/柴油双动源混合动力货车（后文统一以混合动力货车指代）提供运行的可能。混合动力货车大部分运行状态由高速公路上架设的线网提供动力，在需要变道或进入城市时可切换柴油动力系统。不仅移动灵活、不会产生城市视觉污染，同时具有巨大节能减排潜力。

然而架设长距离线网设施的前期投资成本巨大，因此，电化改造公路的经济性和节能减排潜力分析成为了一项必要而具有意义的课题。

2 方案展示

2.1 方案概述

用混合动力货车代替部分载货汽车承担公路运输工作，同时为混合动力货车在我国货运流量密度最高的高速公路配置相应的供电接触网络及相关设施。在中国约9300公里的高速公路上进行模拟电化改造并计算投入运行后带来的经济与环境影响。

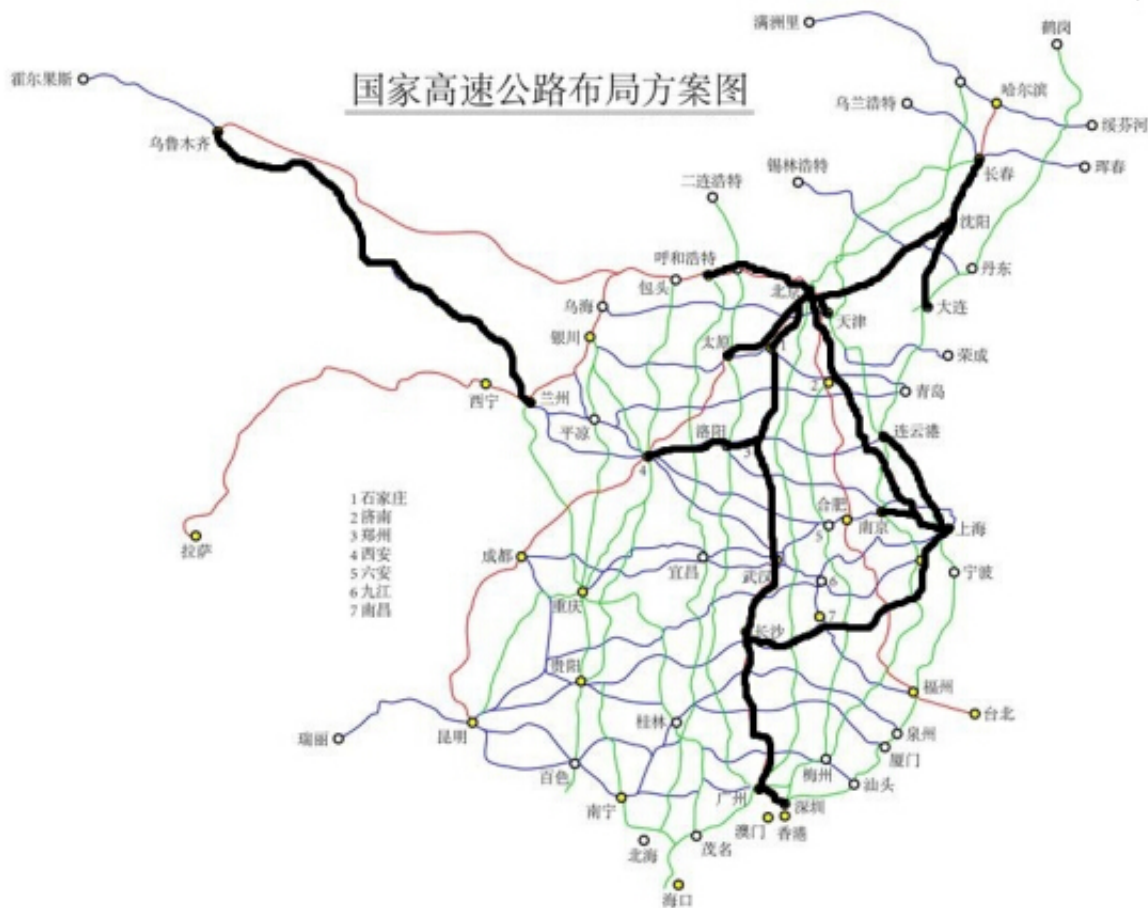
2.2 增添供电接触网的路段

从政治经济作用以及适应交通量等方面考虑，为混合动力货车运行提供能源的取电接触线路应从技术等级最高的高速公路开始改造。同时考虑到铺设取电接触网的成本应尽可能低，首先应选取货运密度最大的高速公路路段进行改造，我国2013年货运密度如图2.1【4】所示。



图 2.1 我国 2013 年高速公路货运密度

本文将货运密度大于 $500 \text{ t} \cdot \text{km} / \text{km}$ 的道路标注在我国高速公路布局图上，并将其所在的连接两省会城市的高速路段一起进行电化改造，模拟情况示意图如图2.2所示，其中高速公路的电化改造路段用深黑线表示。



图示供电接触网所在路段及其年货物周转量如下：

京哈高速公路全段（1209公里，1205.35亿吨公里）

京藏高速公路北京到呼和浩特段（660公里，281.10亿吨公里）

沈大高速公路全段（348公里，141.16亿吨公里）

京昆高速公路太原到石家庄段（172公里，137.58亿吨公里）

连霍高速公路瓜州站到兰州段（1060公里，350.08亿吨公里）

连霍高速公路宝鸡到开封段（580公里，307.40亿吨公里）

京港澳高速公路全段（2285公里，1490.87亿吨公里）

京沪高速公路全段（1262公里，1155.56亿吨公里）

沪昆高速公路上海到株洲段（963公里，509.50亿吨公里）

沈海高速公路上海到南通段（113公里，80.61亿吨公里）

沪蓉高速公路上海到南京段（150公里，161.19亿吨公里）

供电接触网模拟线路总长为9259公里，年货物周转量共计5820.4亿吨公里【5】

2.3混合动力货车运行原理

双动源无轨电车已是比较成熟的技术，双动源无轨电车已于2014年在北京投入运行。其动力来源由线网供应，在脱离线网后可利用蓄电池行驶10公里左右【3】。混合动力货车的主要动力来源与之类似而其备用柴油机能够支持其脱线行驶更长的距离。

混合动力货车已有理论基础。德国西门子公司于2012年提出的混合动力箱式货车系统，其电力来源于输电网，目前该系统仍然在德国处于测试阶段。图2.3为正在进行测试的混合动力货车。



图 2.3 正在进行测试的混合动力货车

供电网分布方式如图所示，根据交通量设计整流站数量和规格，电网正负极间距和电网高度根据安全性及货车实际情况确定。

当重型电动货车驶入有电网铺设的高速公路时，驾驶员可升起受电弓，货车驱动系统由柴油机驱动改为电机驱动；并且受电弓可以自动调节接触位置来适应货车轻微的横向移动。当需要脱离电网时，受电弓会自动收回（也可手动收回），同时切换到柴油机驱动。这种混合动力货车也可以有效的回收利用刹车能，并且电动机的可靠性较好，据西门子研究人员称这种货车行驶速度可达90km/h。

3.政策性分析

3.1电气化高速公路对原交通法规的影响程度说明

根据我国《道路交通安全法实施条例》规定，重型载货车应行驶在右侧慢速车道，不可长时间占用左侧快速车道行驶，故本方案计划在高速公路右侧车道进行线网架设，以降低道路改造对原交通情况的影响程度。

混合动力货车的受电弓采用智能控制系统，内置扫描系统，可通过定位接触线网，自动切换柴油/电力驱动两种模式。故混合动力货车驾驶员在进行拐弯或超车时，与传统货车相比，没有较大区别。可见，使用混合动力货车后，对原来交通情况影响较小。

3.2相关政策对方案的支持性分析

根据中国工业与信息化部提出的《电动汽车科技发展“十二五”专项规划》，产业升级的需求已使我国成为了世界

上最大的汽车生产和消费国，面临着节能减排的严峻挑战，发展新能源汽车势在必行，而电动汽车或混合动力汽车更是其中的重中之重。可见，我国在未来几年内，会大力发展新型混合动力汽车，这对本方案提供了一定的技术支持。

此外，自国务院出台《关于加快新能源汽车推广应用的指导意见》至今，发改委电动汽车用电价格、财政部免征车购税政策、工信部免征车购税目录等陆续发布。可以看出，国家对于电动汽车的发展是大力支持的，故电气化高速公路项目具有较好的发展前景。

3.3小结

根据政策性分析可知，在高速公路右侧低速车道假设线网及使用新型混合动力火车可以最大程度的降低对原交通情况及相关法规的影响，故交通法律法规无需进行较大修订。根据近年来我国出台的相关政策，在未来几年内，我国对于电动汽车发展的支持是不遗余力的，所以发展电气化高速公路顺应了我国相关政策的要求和产业升级的需求。故认为电气化高速公路模拟方案不会对现有交通法规产生较大影响且受国家相关政策的支持。

4经济性分析

4.1经济性分析变量说明

经济性分析变量说明见表4.1。

表 4.1 经济性分析变量说明表

符号	意义	单位
a	改造高速公路里程数	公里
b	改造高速公路总货物周转量	吨公里
c	改造高速公路行驶量	公里
d	高速公路总货物周转量	吨公里
e_1	高速公路货车平均每公里油耗	升每公里
e_2	改造高速路段电车平均能耗	千瓦时每公里
f	电化公路每公里改造费用	元/公里
f_1	电化公路每公里一年的维护费用	元/公里
g	货车总数量	辆
h	混合动力货车占传统火车的比例	
k	柴油价格	元每升
n	根据货流量加权后的平均电价	元每千瓦时
η_1	货车平均内燃机效率	
η_2	电车平均电动机效率	
η_3	煤电转化效率	
η_4	水电转化效率	

4.2 经济性分析过程

改造初期投入 $z = a \cdot f$ 约为 2510~3200 亿元^[6]

改造前的高速公路货车每年耗能价值为 w_1 元:

$$w_1 = k \cdot c \cdot e_1 \quad (1)$$

混合动力货车占传统货车比例为 h 时每年的耗能价值为 w_2 元:

$$w_2 = k \cdot c \cdot e_1(1 - h) + n \cdot c \cdot e_2 \cdot h + a \cdot f_1 \quad (2)$$

每年节约价值 w 元:

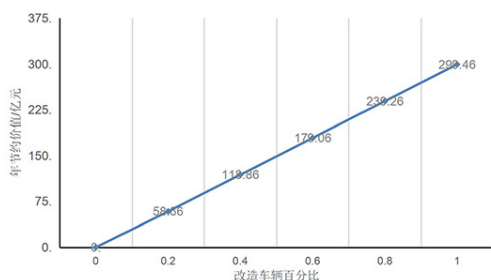
$$w = w_1 - w_2 \quad (3)$$

根据不同车辆改造率, 得到每年节约能源价值如表 4.2。

表 4.2 年节约费用与改造车辆百分比关系

改造车辆百分比	20%	40%	60%	80%	100%
年节约价值/亿元	58.66	118.86	179.06	239.26	299.46

函数关系如图 4.3。



当混合动力货车占传统货车比例为40%时，每年节约的能源价值118.86亿元，可在20—28年内收回初期投资。

4.3小结

根据经济性分析可知，电化高速公路虽然初期投入高，约为2510~3200亿元，但后期回报也很可观，当混合动力货车占传统货车比例为40%时，每年节约的能源价值118.86亿元。与普通燃油货车相比，可以快速收回成本并产生相对收益，这说明电化高速公路模拟方案在经济上具有可行性。

5.减排量分析

5.1两种货车的排放量对比

传统货车百公里的污染物排放量如表5.1所示。

表 5.1 传统货车百公里污染物排放量

污染物类型	CO	HC	NOx	PM
质量/克	4497.8	645.5	1723.0	203.3

混合动力货车百公里污染物排放量如表 5.2 所示。

表 5.2 混合动力货车百公里污染物排放量

污染物类型	CO	HC	NOx	PM	SO ₂
质量/克	低于225	低于32	210.2	43.7	154.3

传统货车与混合动力货车污染排放量对比情况如图 5.3 所示。

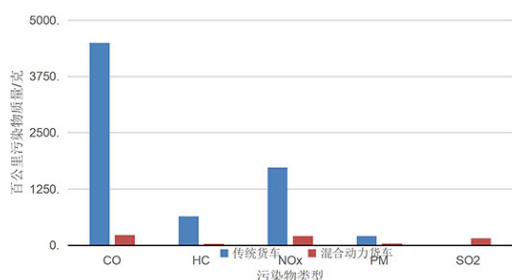


图 5.3 传统货车与混合动力货车污染排放量对比图

可见，使用混合动力货车带来的减排能力是显著的。混合动力货车比传统柴油货车减少了 87.8% 氮氧化物、78.5% 的颗粒物和至少 95% 的碳氢化合物及一氧化碳排放，然而传统货车没有 SO₂ 的排放，而我国的火力发电厂会排放一定量的 SO₂。因此需要结合不同种类污染物的危害程度以及混合动力货车的使用情况，进一步评估两种方案的污染程度。

5.2 电化高速公路方案的减排量分析

电化高速公路的货运周转量占高速公路总的货运周转量的比例： b/d ，带入数据得比例为 25.62%。

电化公路路段货车排放污染量后等于全国高速公路货车总污染量乘以周转量比例。计算得到每年传统货车在电化路段行驶所排放的各类污染物数量如表 5.4^[2]所示。

表 5.4 每年改造路段传统货车总排放量

污染物类型	CO	HC	NOx	PM
质量/万吨	88.91	12.76	34.06	4.03

全部使用混合动力货车时，污染物排放量为：生产一度电排放的污染物数量¹¹乘以每公里耗电¹²再乘以改造路段行驶量¹³。

结合实际情况，将电化路段所有货车中的 40% 替换为混合动力货车后，每年在改造路段排放的污染量如表 5.5。

表 5.5 混合动力货车时的污染量

污染物类型	CO	HC	NOx	PM	SO ₂
质量/万吨	54.95	7.90	23.60	3.08	2.32

我们将两种情况下的排放量进行对比如图 5.6 示。

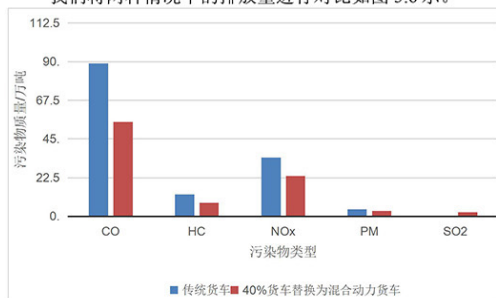


图 5.6

改造路段使用混合动力货车对各类污染物减排量的贡献如下:

一氧化碳: 一氧化碳是一种窒息性气体, 进入人体后同血液中的血红蛋白结合, 进而使血红蛋白不能与氧气结合, 从而引起机体组织缺氧, 导致人体窒息死亡。(126页) 通过对改造路段使用混合动力货车, 该路段一氧化碳的排放量将减少95%以上。很大程度上降低了一氧化碳对环境的影响。

碳氢化合物: 空气中的碳氢化合物包括很多种类, 其中挥发性有机物的影响较大, 它有毒性, 刺激性, 致癌性和特殊的气味性, 会对人的各种粘膜刺激, 最常见的是对眼, 鼻, 咽喉部位的刺激, 对人体产生急性损害。长期接触这些有机物会对皮肤, 呼吸道以及眼粘膜有所刺激, 引起接触性皮炎, 结膜炎, 哮喘性支气管炎以及一些应变性疾病。(319页) 而使用混合动力货车, 则可以基本消除改造路段的碳氢化合物的影响。

氮氧化物: 大气中的氮氧化物含量达到一定程度时, 在一定的天气条件下, 可以与空气中其他污染物如碳氢化合物等发生一系列反应产生“光化学烟雾”, 其主要成分是臭氧和高氧化性有机物, 是一种氧化性烟雾。光化学烟雾会严重危害人类健康, 如20世纪40年代发生在美国洛杉矶的光化学烟雾事件导致几百人死亡。(318页) 对改造路段使用混合动力货车, 该路段的氮氧化物的排放量将下降26.66万吨, 同比下降了87.81%。对减少光化学烟雾对人类的危害有重要意义。

颗粒物: 大气颗粒物通过接触或刺激皮肤而进入人体。并且不同粒径的颗粒物可以进入到呼吸系统不同的部位, 导致呼吸系统不同程度的病变。同时由于重力沉降颗粒物会沉积在绿色植物叶面, 干扰植物吸收阳光和二氧化碳以及放出氧气和水的过程, 从而影响植物的健康和生长。还可以杀伤生物, 引起食物链改变, 进而影响整个生态系统。由于颗粒污染物多为多空状结构, 对大气中的气态污染有一定的吸附作用, 因而可以与气态污染物一起进行协同迁移, 扩大气态污染物的污染范围和停留时间。影响日照时间和地面的能见度, 改变局部地区的小气候条件, 进而影响生态系统。(313-314) 由于在改造路段使用混合动力货车, 大气颗粒物的排放量将会下降2.82万吨, 同比下降78.49%, 将会大大减小对雾霾天气的影响, 提高地表能见度。

二氧化硫: 二氧化硫进入大气候氧化形成三氧化硫, 最后形成酸雨。酸雨将会导致大片森林枯萎, 土壤酸化, 农作物减产, 许多水生生物消失, 建筑物遭侵蚀, 给人们的生产生活带来严重危害。使用混合动力货车后, 大部分大气污染物将会降低排放量, 但是会造成二氧化硫的排放量会上升5.18万吨, 可能会加剧酸雨的危害。但是, 通过对以上污染物排放量增减的比较综合, 权衡来看在改造路段使用混合动力货车是有利于环境友好的。

5.3小结

由减排量分析可以看出, 双动源混合动力货车的运营可以大量减少污染物的排放, 这对我国经济可持续发展有重要意义。此外, 电改化高速公路还会对我国经济发展, 社会产业发展产生积极影响。故建议相关部门大力扶持双动源混合动力汽车和电改化高速公路的发展。

参考文献

【1】交通运输部综合规划司, 长安大学运输科学研究院.2013中国高速公路运输量统计调查分析报告【M】.北京: 人民交通出版社, 2014:4-5

【2】交通运输部综合规划司.2013年交通运输行业发展统计公报【Z】.2014-05-13

【3】姬璘璘.无轨电车复兴潮【J】.交通世界, 2014, 21: 36-37

【4】肖润谋,李彬,陈荫三.交通运输工程学报【J】.2013年中国高速公路网运输状态, 2014, 14(6): 69-71

【5】交通运输部综合规划司, 长安大学运输科学研究院.2013中国高速公路运输量统计调查分析报告【M】.北京: 人民交通出版社: 2014:25-52

【6】Los Angeles Plans Pilot of Siemens eHighway【N】.Sustainable-Business.com News, 2012-5-17
<http://www.sustainablebusiness.com/index.cfm/go/news.display/id/23714>

【7】污染物排放总量控制司.2013年环境统计年报【Z】.2014-11-24

【8】周基树，延卫，沈振兴等.能源环境化学【M】.西安交通大学出版社，2010：233-239

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/97636.html>