



ScienceDirect 提供的内容列表

## 交通研究 D 部分

期刊主页: [www.elsevier.com/locate/trd](http://www.elsevier.com/locate/trd)

### 电动汽车能耗测量和 估计



Xinkai Wu <sup>a</sup>, 大卫·弗里斯 <sup>b</sup>, 阿尔弗雷多·卡布雷拉 <sup>b</sup>, 威廉·A·基奇 (William A. Kitch) 生于

<sup>a</sup> 北京航空航天大学交通科学与工程学院,北京 100191

<sup>b</sup> 加州州立理工大学波莫纳分校土木工程系,地址:3801 West Temple Ave., Pomona, CA 91768, 美国

#### 文章信息

#### 抽象的

关键词：  
电动汽车  
电动汽车数据收集  
能源消耗估算  
行为  
电动汽车性能

许多人认为使用电动汽车是大幅减少石油消耗的一种方式。  
依赖性、更高效地运营车辆并减少碳排放。由于  
鉴于电动汽车的潜在益处,联邦和地方政府已投入大量资金用于此。  
政府投入资金并采取了一系列立法和监管措施来促进电动汽车的部署。  
以及普及。凭借这种势头,不难看出,在不久的将来,电动汽车将会……  
有望获得显著的市场渗透率,尤其是在人口稠密的城市地区。  
空气质量问题日益严重。我们很快将面临最大的挑战之一:如何应对  
如何提高电动汽车交通系统的效率?本研究迈出了应对这一挑战的第一步,着手解决一个根本性问题,即如何测量和估算。

本文首先介绍了一种能够收集电动汽车能耗数据的系统。具体而言,本文首先提出了一种能够收集电动汽车能耗数据的系统。该系统收集了电动汽车的实际使用数据和车辆行驶数据。随后,将其安装在本研究中制造的一辆电动汽车改装车上作为测试车辆。收集了大约 5 个月的电动汽车数据。  
已收集这些数据,并已使用这些数据来分析电动汽车的性能和  
驾驶员行为。分析表明,电动汽车在城市道路行驶时效率更高。  
比起在高速公路上行驶,其他路线更安全。对这位电动汽车驾驶员的进一步调查。  
路线选择行为表明,电动汽车用户试图在出行时间和能耗之间取得平衡。尽管还需要更多数据才能得出普遍结论。

这一发现或观察结果可能很重要,并可能给交通带来变化。  
为未来以电动汽车为主的交通系统进行规划。此外,  
本研究分析了电动汽车的功率、车速、加速度和道路坡度之间的关系。基于分析结果,本文进一步提出:

一种分析型电动汽车功率估算模型。使用测试车辆进行评估。  
结果表明,所提出的模型能够成功估算电动汽车的瞬时功率和行程时间。  
能源消耗。未来的研究将着重于应用所提出的电动汽车功率估算模型来提高电动汽车的能源效率。

2014 Elsevier Ltd. 保留所有权利。

#### 介绍

交通运输系统对经济增长的健康发展至关重要。然而,目前的交通运输系统主要依赖以石油为燃料的内燃机 (ICE)。这不仅导致世界经济遭受重创。

通讯作者。电话:+8610 82316760;传真:+8610 82316330。

电子邮箱地址: [xinkaiwubua@gmail.com](mailto:xinkaiwubua@gmail.com) (X.吴), [davidmfreese@gmail.com](mailto:davidmfreese@gmail.com) (D. Freese), [acabrera@csupomona.edu](mailto:acabrera@csupomona.edu) (A. Cabrera), [wakitch@csupomona.edu](mailto:wakitch@csupomona.edu) (西澳基奇)。

<sup>1</sup> 电话:+1 (909) 869 3147;传真:+1 (909) 869 4342。

<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2014.10.007>

1361-9209 / 2014 Elsevier Ltd. 保留所有权利。

交通运输业受制于全球石油市场的波动 (Pound, 2012) ;但更重要的是,它已成为经济中最大的温室气体排放源 (Greene 和 Schafer, 2003) 。由于预计原油供应短缺以及减少温室气体排放的迫切需要,越来越多的人才和资源正集中于此。

构建可持续交通运输系统,既能应对气候变化挑战,又能减少对石油的依赖。

(美国交通部, 2010) 在众多创新技术中,乘用车电气化被许多人视为一项……

可以显著降低对石油的依赖,提高车辆运行效率,并减少碳排放。

电动汽车 (EV) 包括插电式混合动力汽车 (PHEV) 和纯电动汽车 (BEV)。插电式混合动力汽车通常配备中等规模的储能系统和内燃机,以确保大部分里程实现电气化;

保持与当今内燃机汽车相同的续航里程。纯电动汽车完全依赖电池,并提供完整的石油产品。

针对特定车辆领域的排量。本研究主要关注纯电动汽车 (以下简称电动汽车)。

采纳技术具有巨大的潜力,可以在应对能源和环境危机方面发挥重要作用。

当前的交通系统。首先,电力可以帮助满足未来的交通需求。以美国为例,因为

绝大多数电力生产资源来自国内,电动汽车被视为实现能源多元化的绝佳途径。

运输燃料。尽管在成本和电池技术方面仍存在一些挑战,但国产燃料的供应情况良好。

只要车辆在夜间充电,电力就不是问题,因为那时有多余的发电能力可用。

(Pound, 2012) 此外,电动汽车的燃料成本远低于燃油车。住宅平均价格为……

假设电价约为每千瓦时 11.5 美分,一辆纯电动汽车大约可以行驶 30 英里。

每加仑汽油消耗约 80 美分电力,行驶里程约为同等配置燃油车的四分之一 油价为每加仑 3 美元。

汽油方面 (Andersen, 2012) 其次,电力在减少温室气体排放方面具有巨大潜力。电动汽车本身也具有……

虽然电动汽车的电力生产过程可能会造成空气污染,但其本身是零排放的。如果采用美国目前的平均发电结构,与目前的内燃机汽车相比,电动汽车可以减少约 33% 的温室气体排放。

动力车辆 (美国交通部, 2010) 假设到 2050 年轻型车辆 (LDV) 的渗透率为 56%,这将总共带来

交通运输排放量减少 26–30% (美国交通部, 2010 年)。

电动汽车的巨大潜在优势已经吸引了大量关注和投资,尤其是在电动汽车技术领域。自近年来以来,电动汽车技术的发展一直备受瞩目。

2010 年,超过 20 家汽车制造商推出了纯电动汽车 (BEV) 或插电式混合动力汽车 (PHEV)。在美国,政府已拨款用于相关领域。

大量刺激资金用于促进替代燃料的使用 (Skerlos 和 Winebrake, 2010)。美国复苏

2009 年的《美国复苏与再投资法案》(ARRA) 为电动汽车和电池技术提供了超过 20 亿美元的资金,旨在……

到 2015 年,美国道路上行驶的电动汽车数量达到一百万辆的目标 (Canis 等人, 2011)。(最近的一篇文章表明,

目标要到 2018 年才能实现 (2012 年汽车大会)。许多州也承诺推广电动汽车。

例如,加利福尼亚州已采取多项立法和监管措施来促进电动汽车的部署和普及,例如零排放车辆和低碳燃料标准监管计划以及购买电动汽车的补贴 (Elkind, 2012)。这些举措表明了该州推广电动汽车的决心。由此可见,

鉴于目前的增长势头,不难看出,电动汽车在不久的将来可能会获得显著的市场渗透率,尤其是在人口稠密、空气质量问题严重的城市地区。我们很快将面临最大的挑战之一:如何……

提高整个电动汽车交通系统的效率? (此处电动汽车交通系统包括所有与电动汽车相关的设施)

将技术和政策应用于设施的规划、功能设计、运营和管理,以及

为保障人员安全、高效、经济、环保的流动,需要建设基础设施。

以及货物。)

目前电动汽车研究主要集中在如何克服技术障碍,例如电池技术限制 (Axsen 等人, 2010) 和充电基础设施问题 (Morrowa 等人, 2008)。为了解决这些障碍,人们投入了大量的研究力量和资金 (Deutsche Bank, 2009; Frade 等人, 2010; He 等人, 2013; Ip 等人, 2010; Pan)。

等, 2010; Sioshansi, 2012; Sovacool 和 Hirsh, 2009; Sweda 和 Klabjan, 2011)。例如, 根据德意志银行 (2009) 进行的一项研究, 超过 70 亿美元被投资于锂离子电池制造, 以建设超过

电池产能达 3600 万千瓦时, 足以满足 1500 万辆混合动力汽车或 150 万辆电动汽车的用电需求。

许多研究也探讨了公共充电站的选址问题。例如, Frade 等人 (2010) 构建了一个最大覆盖模型来确定充电站的部署数量; Ip 等人 (2010) 应用了一种分层方法。

Pan 等人 (2010) 开发了一种两阶段随机规划模型, 用于优化设置充电站, 该模型采用了聚类模型来定位充电站;

插电式混合动力汽车电池更换站; Sweda 和 Klabjan (2011) 开发了一种基于代理的电动汽车决策支持系统。

车辆充电基础设施部署; He 等人 (2013) 采用博弈论方法对此进行了研究。

优化插电式混合动力汽车公共充电站的部署。

然而, 目前针对如何提高电动汽车交通系统效率的研究却寥寥无几。

他们尚未意识到这个问题的重要性, 部分原因是他们没有预见到全球即将到来的增长。

对于电动汽车而言, 更重要的是, 由于缺乏对电动汽车性能和驾驶员行为的了解, 我们尚未……

本研究旨在识别电动汽车及其驾驶员影响能源消耗和效率的独特特征。这些独特特征可能从根本上改变我们对人们出行和驾驶行为的理解, 并进一步影响交通运输系统、环境和社会。本研究首先通过调查来探索这些特征。

电动汽车能耗测量与估算。

测量和估算电动汽车的用电量是未来提高电动汽车交通系统能源效率的重要要求。与传统的内燃机汽车相比, 电动汽车最先进的特性之一是:

其优势在于能够通过再生制动系统 (RBS) 捕获和储存能量 (Clegg, 1996; Xu 等人, 2011; Zhang)。等, 2008)。RBS 利用电动机通过向驱动轮施加负扭矩来为电池充电,

将动能转化为电能。值得注意的是,许多混合动力电动汽车 (HEV)也安装了RBS (基于可靠性的制动系统)。由于RBS的存在,电动汽车在“间断”的城市道路上行驶比在畅通无阻的高速公路上行驶效率更高 (Knowles等人,2012)。这与内燃机汽车形成鲜明对比,内燃机汽车由于制动和热损耗,在城市行驶中需要消耗更多能量 (Gao等人,1999;Rajashekara,2004)。

电动汽车在城市驾驶中的能源优势可能会显著影响人们的路线选择,并进一步动摇传统交通分配理论的基础。几十年来,自沃德罗普 (Wardrop) 于 1952 年发表开创性研究以来 (Wardrop,1952), 我们一直认为人们在出行时会遵循沃德罗普的第一原则,即用户均衡,选择出行时间最短的路径 (Sheffi,1984), 因为节省时间一直被认为是出行者最重要的目标。虽然降低油耗是一个重要但次要的目标,但在大多数情况下,寻找油耗更低的路径与燃油车用户最大限度地缩短出行时间是一致的 (Ericsson 等, 2006)。这种时间和燃油优化的一致性通常促使人们选择高速公路路线。

然而,对于电动汽车驾驶员来说,选择能耗较低的路线与选择最短路径可能完全不同,因为节省能源有利于低速路线 (例如城市道路),而节省时间通常有利于高速路线 (即高速公路)。因此,当电动汽车用户数量较大时,电动汽车驾驶员选择节省能源或节省旅行时间可能会显著影响交通网络中的交通分配。这将导致高速公路和主干道系统的交通流量发生重大变化。电动汽车用户从最短路径切换到节能路径的可能性非常大,部分原因是电动汽车驾驶员可以看到能源使用情况。电动汽车驾驶员敏锐地意识到实时能源使用情况和再生制动的优势。因此,当旅行时间增益不显著时 (通常发生在高峰时段),电动汽车用户可能经常选择当地城市道路而不是高速公路来节省能源。

随着电动汽车逐渐成为重要的交通方式,交通工程面临的一项挑战是如何利用电动汽车及其驾驶员的独特特性来提高电动汽车交通系统的能源效率。第一步是深入研究电动汽车及其驾驶员的独特特征。本研究填补了这一空白,首先开发了一套电动汽车数据采集系统,该系统能够采集电动汽车的运行数据,包括电池系统数据 (例如电池荷电状态、电池组电流、电池组电压和电池组功率) 以及车辆行驶数据 (例如速度、加速度和车辆位置 (纬度、经度和海拔))。该系统已安装在本研究开发的电动汽车改装车上作为测试车辆,并已采集了约5个月的电动汽车数据。基于这些数据,本研究对电动汽车的性能和驾驶员行为进行了全面分析。特别是,该分析比较了城市道路行驶和高速公路行驶的效率。此外,该分析还探讨了电动汽车的能耗、车速、加速度和道路坡度之间的关系。得出的关系为我们创建本文提出的电动汽车能耗和估算模型提供了实证基础。

本文结构如下:首先是引言,然后在“电动汽车数据采集系统”一节中介绍电动汽车数据采集系统。该系统能够采集电动汽车的使用数据和驾驶信息。“数据分析”一节对数据进行全面分析,随后在“电动汽车能耗估算模型”一节中提出电动汽车能耗估算模型。最后,本文总结全文并展望未来研究方向。

### 电动汽车数据收集系统

本研究开发了一种电动汽车数据采集系统,该系统能够采集电动汽车的使用数据和驾驶信息。该数据采集系统已安装在本研究制造的电动汽车改装车上作为测试车辆。

数据采集系统已对测试车辆进行了约5个月的数据采集。本节将详细介绍电动汽车改装车辆和数据采集系统。

### 电动汽车改装车

为了支持这项研究,研究团队打造了一辆电动汽车改装车。这辆电动汽车由一辆1987年的日产D21皮卡改装而成 (见图1)。该系统目前包含一台50马力、120伏交流电机,并配备柯蒂斯控制器。电池组由36块3.2伏、180安时的锂聚合物电池串联而成,形成一个115伏、180安时的电池组。伊利森电池管理系统 (BMS)用于监控每个电池的电压和温度,并控制电池的充电。



图 1. 电动汽车改装车和电池。

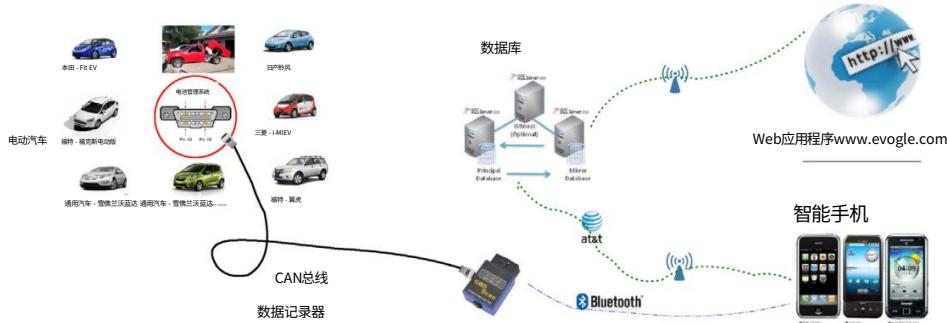


图 2. 数据采集系统架构。

该系统。车上安装了一台2000瓦的Elcon充电器。车上配备两条数据总线,一条用于电池管理系统(BMS),另一条用于电机控制器。BMS总线采用控制器局域网(CAN)总线,并使用车载诊断(OBD-II)系统数据标准,OBD-II提供诸如单体电池电压、温度和电阻;电池组电压、电流和功率;以及众多诊断和控制参数等信息。这辆车作为本研究的测试平台。需要注意的是,我们并未在本研究中使用目前市售的电动汽车,原因在于这辆改装电动汽车为我们提供了更多探索电动汽车能耗特性的机会。但该电动汽车中使用的大多数技术都是最新的。首先,这辆改装车中使用的锂离子电池已被当今大多数插电式混合动力汽车(PHEV)和纯电动汽车(BEV)所采用,包括日产聆风(Nissan Leaf)、福特福克斯电动版(Ford Focus Electric)、特斯拉Model S和Smart ED(Elithion, 2014)。其次,改装车辆安装了交流电机,实现了能量回收制动,这对于量产电动汽车而言至关重要。最后,该车辆使用的Elithion电池管理系统(BMS)非常适合量产电动汽车,并已帮助包括俄罗斯汽车制造商AvtoVaz和瑞典电动汽车制造商在内的多家电动汽车生产企业超越竞争对手(Elithion, 2014)。此外,由于D21皮卡的尺寸与道路上行驶的典型轻型乘用车相似,因此该测试车辆的能耗特性应与道路上行驶的典型电动汽车类似。但该测试车辆并非量产车型,这可能会使我们的观察和结论存在偏差,因此在未来的研究中,必须使用目前市售的电动汽车进行验证。

## 数据收集系统

我们开发了一套数据采集系统,用于收集电动汽车的在用数据和行驶信息。在用数据包括电池使用情况、电池荷电状态、电流、电池组电压、离车充电事件的时间、持续时间、位置、功率等级和充电器类型等。行驶信息包括速度、加/减速度和车辆位置(纬度、经度和海拔)。数据采集是本研究的基础。数据采集系统的架构如图2所示,它由四个部分组成。首先,使用CAN总线数据记录器(通过电池管理系统BMS)采集在用车辆数据;然后,数据通过蓝牙发送到智能手机(或平板电脑)。同时,智能手机中的全球定位系统(GPS)采集车辆位置数据并生成行程轨迹。然后,使用安装在智能手机上的应用程序将轨迹数据与在用车辆数据同步。同步后的数据以1 Hz的采样频率通过WiFi或蜂窝网络传输到数据库。我们进一步开发了一个网络应用程序,用于向电动汽车用户发布从原始数据中提取的一些有用信息。

该数据采集系统已使用电动汽车改装车成功进行了测试。图3展示了[一个数据样本](#)。如图所示,A列记录GPS时间;B列和C列记录经度和纬度;D列为GPS测量的车速(单位:米/秒);E列为GPS测量的海拔高度;F列为平板电脑加速度计记录的加速度信息;G列至J列为能量使用相关信息,包括电池组电流(单位:安培)、电池组总电压(单位:伏特)、电池组功率(单位:千瓦)和荷电状态(SOC,单位:%)。虽然该数据采集系统仅在我们的测试车上进行了测试,但其概念具有通用性,应可应用于任何其他电动汽车。

## 数据分析

自2012年11月起,加州州立理工大学波莫纳分校的一位教职工一直使用这辆测试车辆进行日常通勤。我们收集了约5个月的数据(2012年11月、2012年12月、2013年1月、2013年4月和2013年5月)。如图4所示,这些数据包含169次行程。每次行程,我们都收集了电动汽车的使用数据和驾驶信息。本节将对这些数据进行全面分析,并提出一些观察结果/结论。需要注意的是,这些结论是基于单辆电动汽车收集的数据得出的。我们并不打算将这些结论推广到其他情况。但这些观察结果/结论揭示了电动汽车和电动汽车驾驶员的一些有趣行为,这些行为可以作为有用的参考。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	GPS Time	Longitude	Latitude	GPS Speed (M/sec)	Altitude	Acceleration (g)	Pack Current(A)	Pack Total Voltage(V)	Pack Power(kW)	State of Charge(%)	
14	Mon Dec 03 08:42:29 PST 2012	-117.72477	34.12169	11.471457	392.1571	0.01566211	214.3000031	109.0999985	23.39999962	76	
15	Mon Dec 03 08:42:30 PST 2012	-117.72492	34.12169	12.108709	392.4927	0.0045982	231.8999939	109.5	23.39999962	75	
16	Mon Dec 03 08:42:31 PST 2012	-117.72506	34.12169	12.7350855	393.1273	-0.0242881	194.199997	110.199997	25.29999924	75	
17	Mon Dec 03 08:42:32 PST 2012	-117.72521	34.1217	12.897027	393.9691	-0.05181026	173.8999939	111	19.29999924	75	
18	Mon Dec 03 08:42:33 PST 2012	-117.72537	34.12171	13.385689	395.0716	-0.01456756	149.1000061	111.9000015	19.29999924	75	
19	Mon Dec 03 08:42:34 PST 2012	-117.72553	34.12171	14.347867	395.0588	0.03336321	91.69999695	116.5999985	10.69999981	75	
20	Mon Dec 03 08:42:35 PST 2012	-117.72569	34.12172	14.9783945	394.5511	0.02614931	-17.2000076	119.5	10.69999981	75	
21	Mon Dec 03 08:42:36 PST 2012	-117.72588	34.12171	14.313869	394.1217	-0.07667585	-62	119.699997	-7.4000001	75	
22	Mon Dec 03 08:42:37 PST 2012	-117.72604	34.12171	14.1171733	393.5269	-0.05349614	-62	119.9000015	-7.4000001	75	
23	Mon Dec 03 08:42:38 PST 2012	-117.7262	34.12171	13.395488	392.9295	-0.01359403	-59.7000076	119.9000015	-7.0999999	75	
24	Mon Dec 03 08:42:39 PST 2012	-117.72635	34.12171	12.954473	392.4275	0.02876573	-57.2000076	119.9000015	-7.0999999	75	

图 3. 数据样本。

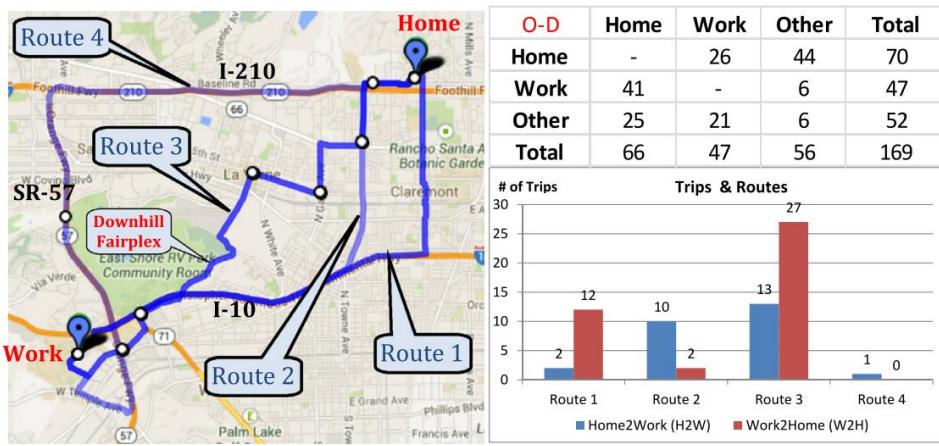


图 4. 行程和路线。

本文可为未来的研究提供参考。此外,本文提出的数据分析方法和步骤具有通用性,可供其他研究借鉴。

#### 驾驶员行为

为了研究电动汽车驾驶员的行为,我们首先将全部169次行程分为以下几类:家到工作地点(H2W)行程、家到其他地点(H2O)行程、工作到家(W2H)行程、工作到其他地点(W2O)行程、其他地点到家(O2H)行程、其他地点到工作地点(O2W)行程以及其他地点到其他地点(O2O)行程。图4中的表格详细列出了这些行程类型。我们最关注的是日常通勤行程,即H2W和W2H,因为这些行程对于研究驾驶员的出行行为至关重要。在记录的169次行程中,有67次是完整的通勤行程(26次H2W和41次W2H)。许多其他通勤行程由于驾驶员途中停留,被拆分为两次行程。例如,由于驾驶员在商店停留,H2W行程变成了H2O行程和O2W行程。通过对数据的分析,我们发现了一些有趣的现象,这些现象可能有助于理解电动汽车驾驶员的行为。

#### 电动汽车驾驶员的路线选择

首先,我们观察这位电动汽车用户的路线选择。从这位用户的家到工作地点,谷歌地图推荐了三条路线:路线1、路线2和路线4(见图4)。但根据我们收集的数据,我们发现这位用户也经常使用路线3(见图4)。我们识别出四条类似的上下班路线。需要注意的是,尽管这位电动汽车用户已被告知我们正在收集数据,但他仍然自行决定路线。

在这四条路线中,路线4大部分路段为高速公路,因此属于高速公路路线;路线3为城市主干道,因此属于市内路线;路线1和路线2则各占一半高速公路路段和一半市内路段。有趣的是,在总共67次通勤行程中,该参与者选择了路线3(市内路线)40次(其中13次为高速公路往返行程,27次为城市往返行程);而仅选择了路线4(高速公路路线)一次。由此可见,该参与者更倾向于市内通勤。

为了更好地理解这位司机为何更倾向于选择市内路线而非高速公路路线,我们总结了一些我们认为可能影响司机路线选择的重要因素。这些因素包括总行程时间(分钟)和总行程距离。

(以英里为单位)、平均行驶速度(以英里/小时为单位)、总能耗(以千瓦时为单位)和平均能源效率(以千瓦时/100英里为单位)。

图5中的两幅图分别展示了图4中所示的四条路线在H2W和W2H行程中的测量平均值。从图5a可以看出,驾驶员选择路线3(市内路线)而非路线4(高速公路路线)的可能原因是,与路线3相比,路线4虽然节省的行程时间非常有限(1.3分钟),但能耗却显著更高(3.0 kWh)。此外,由于H2W行程的路线2和路线3在行程时间和能耗方面均无显著差异,数据表明驾驶员对这两条路线的选择没有偏好,因为选择这两条路线的次数相近(路线2为10次,路线3为13次,参见图4中的图表)。但总体而言,司机选择路线2和3的频率远高于使用路线1和4,因为路线1的行驶时间过长(平均27分钟,而路线4平均23分钟),而路线4的能耗明显更高(平均4.7千瓦时,而路线1平均1.8千瓦时),如图5所示。

同样,在上下班途中,参与者大部分时间(41次行程中27次,见图4表格)选择了3号路线,即市内路线。然而,根据我们的数据分析,3号路线并非最佳选择。如图5b所示,与3号路线相比,1号路线所需时间更短(23.6分钟 vs. 24.9分钟),能耗也略低(3.4千瓦时 vs. 3.5千瓦时)。2号路线的能源效率最高(31.1千瓦时/百英里),但由于2号路线的样本量仅为2例,因此这一结论尚存争议。总的来说,就节省能源和出行时间而言,这位驾驶员的路线选择确实不错。

驾驶员偏爱市内路线这一现象很有意思。但驾驶员选择“市内路线”很可能是受某些特定原因影响,例如周边高速公路拥堵或某些特定天气状况。因此,利用数据探究驾驶员路线选择与周边高速公路交通状况或当地天气状况之间是否存在因果关系将十分有意义。从图4可以看出,周边高速公路包括10号州际公路(I-10)、210号州际公路(I-210)和57号州道(SR-57)。I-10是1号和2号公路的高速公路路段;I-210和SR-57几乎覆盖了4号公路的整个路线。交通拥堵程度可以用服务水平(LOS)来表示。根据2010年公路通行能力手册(HCM, 2010)的建议,服务水平(LOS)是根据交通密度确定的,而交通密度可以使用加州交通部(Caltrans)收集的环形检测器数据进行估算。

性能测量系统(PeMs, 2014)。对于每个H2W或W2H行程,基于行程时间,我们首先估计三个高速公路路段(I-10、I-210和SR-57)的平均密度值,如图4所示,然后得出LOS值。

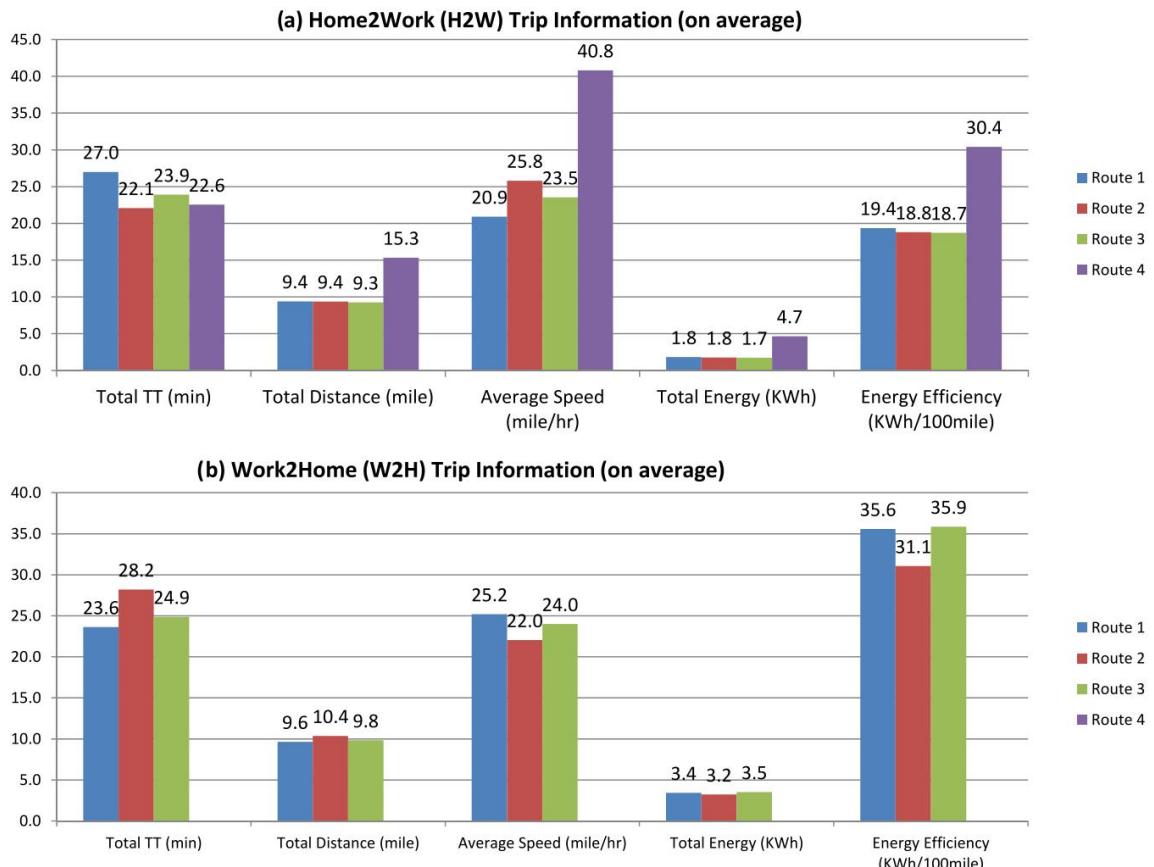


图5. 工作到家(W2H)和家到工作(H2W)的出行信息。

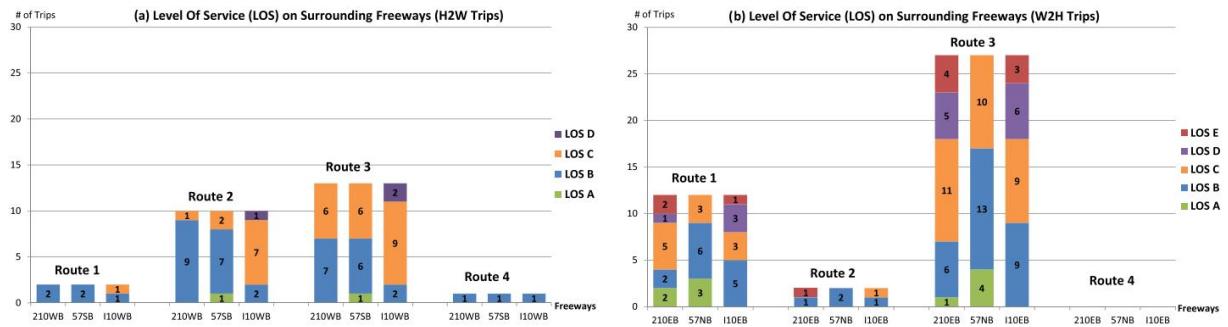


图 6. 周边公路的服务水平 (LOS)。

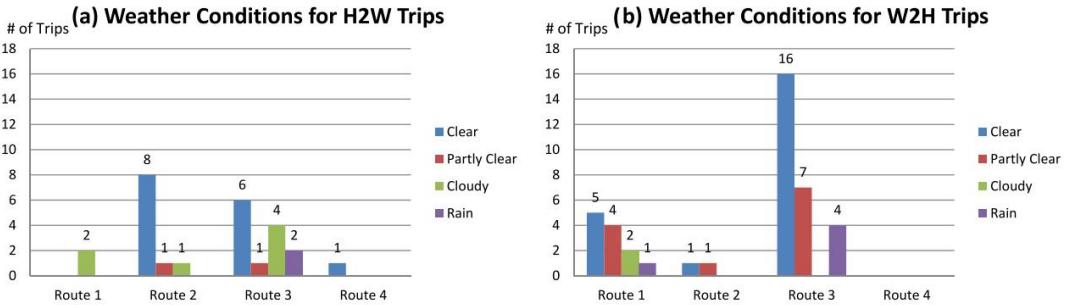


图 7. 当地天气状况。

数据如图6所示。如图所示,对于每条路线,我们展示了其周围三条高速公路路段(包括I-210、SR-57和I-10)的交通拥堵等级(以服务水平LOS表示)。不同颜色的柱状图代表不同的LOS,柱状图上的数字表示在同一道路上且周围高速公路拥堵等级相同的出行次数。例如,图6a中“路线3”下方黄色柱状图的第一个数字“6”表示有6次H2W出行选择了路线3,且周围高速公路之一I-210WB的交通拥堵等级(即LOS)为C级。从图中可以看出,当驾驶员选择路线3(一条市内路线)时,周围高速公路的交通拥堵程度并不一定很严重。如图6b中“路线3”下方不同颜色的柱状图所示,其服务水平(LOS)可能为A到E之间的任何等级。此外,当驾驶员选择路线1或2时,I-10号州际公路的交通状况可能拥堵(即LOS为D或E),如图6b中“路线1”和“路线2”下方的紫色和红色柱状图所示。因此,从数据分析来看,很难看出该驾驶员选择“市内”路线与周边高速公路的交通拥堵程度之间存在任何因果关系。

我们进行了类似的数据分析,以探究驾驶员选择“市内路线”与当地天气状况之间是否存在因果关系。驾驶员很可能选择在市内街道行驶,以避免恶劣天气对高速公路行驶的影响,因为恶劣天气会显著增加高速公路上的交通事故。为了验证这种可能性,我们从美国国家气候[数据中心\(2014\)](#)和[AccuWeather\(2014\)](#)收集了每次行程期间的[天气数据](#)。天气状况分为晴天、多云、阴天和雨天。

图7展示了分析结果。如图所示,很难找到该驾驶员路线选择与天气状况之间的任何因果关系。虽然驾驶员选择3号路线的大部分时间天气晴朗(55.0%),但这仅仅是因为南加州大部分时间天气晴朗(54.5%)。此外,从数据中我们无法看出雨天对该驾驶员路线选择有任何显著影响。

通过对一位电动汽车驾驶员的访谈,我们发现了一些更有趣的现象。访谈显示,对于这位电动汽车用户而言,出行时间并非其选择路线时的唯一考量因素;电动汽车的能耗也对其路线选择产生了显著影响。具体来说,这位用户试图在出行时间和能耗之间取得平衡。访谈还表明,该用户在驾驶燃油车和电动汽车时选择的路线截然不同。驾驶燃油车时,该用户经常选择路线1.2和4,这些路线通常包含一段较长的高速公路路段,因为他认为这些路线的出行时间最短。除非得知高速公路出现严重拥堵,否则该用户几乎不会选择本地街道路线,即路线3。相比之下,驾驶电动汽车时,该用户很少选择纯高速公路路线,即路线4,因为其能耗较高。此外,该驾驶员表示,在获得按路线划分的能耗数据后,他调整了电动汽车的路线选择。最初,该驾驶员在高速公路往返行程中会避开1号和2号路线,因为他认为这两条路线由于高速公路行驶里程较长,能耗会更高。

然而,在得知H2W车辆在1号、2号和3号路线上能耗基本相同后,司机开始更频繁地选择2号路线。由于1号路线的行程时间明显长于2号路线,因此司机仍然避免选择1号路线。

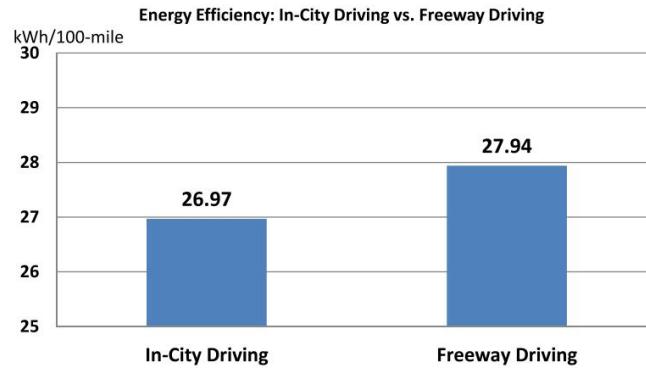


图 8. 城市驾驶与高速公路驾驶的能源效率。

以上发现都非常重要,但还需要更多数据才能推广应用。众所周知,对于大多数传统燃油车驾驶员而言,出行时间是他们选择路线时的唯一主要因素。但对于电动汽车用户来说,他们的路线选择不仅取决于出行时间,还与电力消耗有关。这可能会影响对驾驶员路线选择的预测,从而在不久的将来电动汽车市场份额显著提升时,对交通系统的整体交通分配产生影响。

#### 城市驾驶与高速公路驾驶的能源效率

数据显示,这位电动汽车车主更倾向于在城市道路上行驶。可能的原因是,电动汽车在有路段的城市道路上行驶比在畅通无阻的高速公路上行驶更加节能。 Zahabi 等人 (2013) 和 Chaudhry (2010) 曾提及类似的电动汽车行驶行为, Knowles 等人 (2012) 近期也观察到了这一现象。为了进一步验证这一观点,我们将 167 次行程的所有数据分为两类:城市道路行驶和高速公路行驶;然后,对于每类数据,我们计算了总能耗除以总行驶距离的能耗效率。结果表明,在城市街道上行驶确实比在高速公路上行驶更节能(城市道路行驶为 26.97 千瓦时/百英里,高速公路行驶为 27.94 千瓦时/百英里;见图 8)。这两个数值之间的差异相对较小。其中一个主要原因是,这位电动汽车车主的大部分行程都是在城市内行驶。

城市内行驶的总距离为 529 英里,而高速公路行驶的总距离仅为 110 英里。

此外,许多市内行程都是上坡路段。这也降低了市内驾驶的能源效率。

随着更多高速公路驾驶数据的积累,城市驾驶和高速公路驾驶的能源效率差异可能会进一步扩大。

#### 日常能源效率

我们的数据分析还发现了一个有趣的现象,那就是这位特定电动汽车驾驶员在 5 个月的驾驶过程中,其能源效率有所提高。这里,我们将电动汽车的能源效率定义为行驶 100 英里所需的千瓦时数,即 kWh/100 英里(数值越高,效率越低)。我们计算了该参与者在 5 个月数据收集期间每次行程的能源效率。由于该驾驶员的大部分行程是日常通勤,因此许多行程的路线相同。具体来说,我们从数据中识别出三条路线,该电动汽车用户在这些路线上行驶超过 10 次:一条水路(18 次)、一条油路(10 次)和一条水路(27 次)。图 9 展示了使用这三条路线的所有行程的能源效率。需要注意的是,由于一些技术问题,2013 年 2 月和 3 月的数据尚未收集。从图 9 可以清晰地看出,能源效率随时间推移逐渐提高,这是一个非常有趣的现象。通过与这位参与者的访谈,我们注意到,在我们向他提供日常出行的能源效率信息后,这位驾驶员在数据收集期间调整了驾驶行为以节约用电。具体来说,他识别出一些能耗较高的路线和路段,并调整驾驶行为以提高效率。他还尽量避开一些能耗特别高的路线和路段。需要注意的是,研究团队并未向这位驾驶员提供任何节能指导。所有调整都是这位驾驶员自行完成的。但我们确实向他提供了日常出行的能耗和效率信息;参与者在访谈中也承认,这类信息帮助他调整了驾驶和出行行为,从而节约用电。

尽管这项研究仅基于一位电动汽车驾驶员的行为,但其结果令人鼓舞,因为它表明,通过提供电动汽车能耗信息或反馈,电动汽车用户可能会有意识地调整驾驶行为,从而提高能源效率。毫无疑问,如果这种行为是大多数电动汽车驾驶员的普遍做法,那么对于开发能够向电动汽车用户提供反馈的电动汽车性能系统而言,将至关重要。因此,我们非常希望对此课题进行更深入的研究。

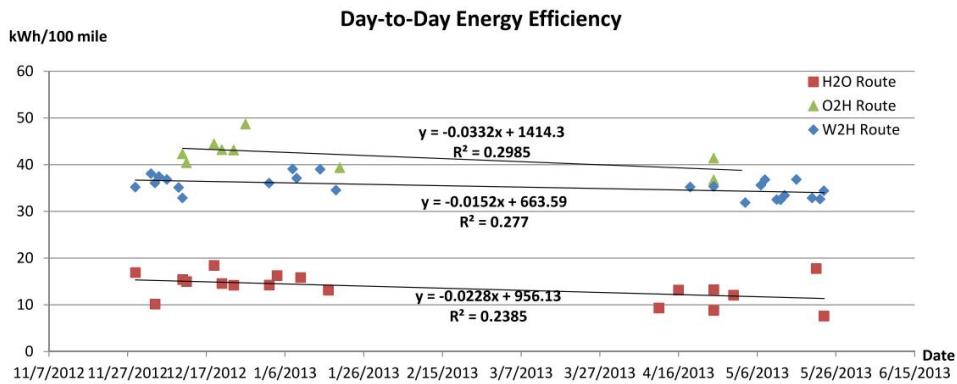


图 9. 三条路线的日常能源效率。

## 电动汽车性能

为了解电动汽车的能耗特性,一个有价值的研究视角是调查……功率、速度、加速度和道路坡度之间的关系。考虑到电动汽车在城市街道和高速公路上行驶时的能耗特性可能有所不同,我们首先将数据分为城市驾驶和高速公路驾驶两类。根据电动汽车行驶路段(城市道路或高速公路)的不同,分别分析了两种路段的行驶数据。本节将介绍分析结果。

## 功率与速度

图 10a 展示了电动汽车的能量消耗(单位:千瓦)与速度(单位:英里/小时)之间的关系(适用于城市驾驶)。图 10b(高速公路驾驶)也显示了这一点。无论是在城市道路还是高速公路上行驶,速度越快,所需的燃料就越多。

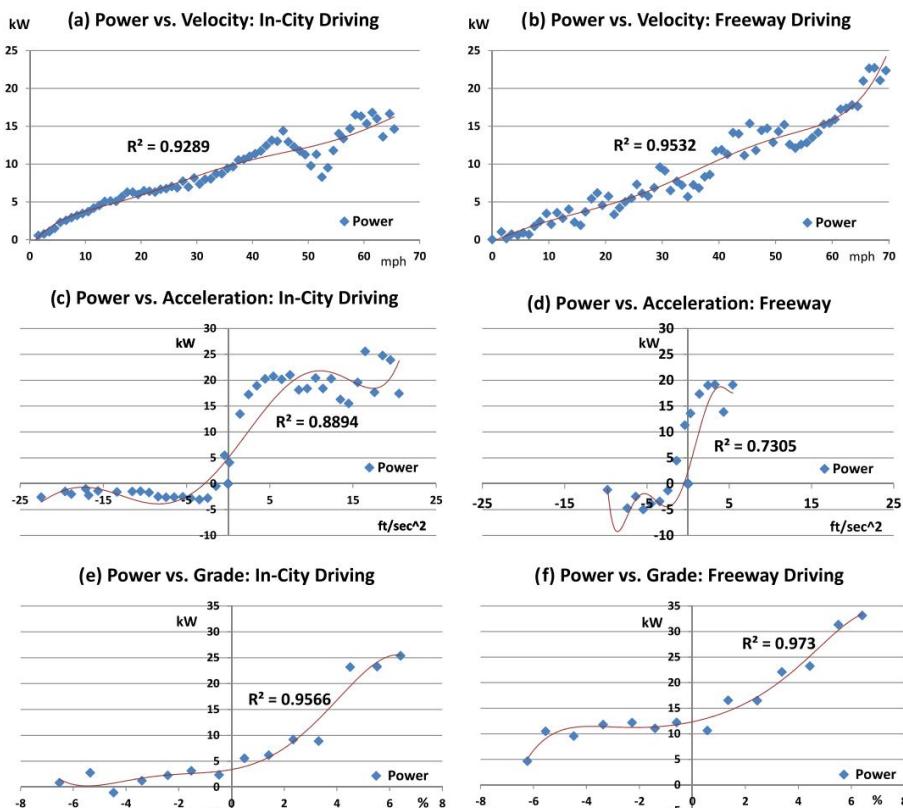


图 10. 城市道路和高速公路行驶的功率与速度/加速度/坡度的关系。

功率方面,有趣的是,当电动汽车在城市道路和高速公路上以约 55 英里/小时的速度行驶时,瞬时功率会明显下降至局部最小值。一个可能的原因是车辆行驶在负坡度上(例如,Fairplex Drive 的下坡路段;参见图4)。当车速达到约 55 英里/小时,驾驶员会松开油门,从而降低能量需求。此外,图中还显示,为了保持相近的速度,在高速公路上行驶所需的功率略高于在城市道路上行驶,尽管差异并不显著。

#### 功率与加速度

与传统内燃机汽车相比,电动汽车最先进的特性之一是其在减速时通过再生制动系统发电的能力。图 10c 和 10d 中的数据证实了这一结论。当加速度为负值(即减速)时,功率为负值,表明电动汽车正在再生能源;当加速度为正值时,功率为正值,表明电动汽车正在消耗能量。更有趣的是,从图中我们可以看出,当加速度在 5 到 5 ft/s<sup>2</sup> 之间时,功率随加速度的增加而成比例增加。然而,当加速度低于或高于 5 ft/s<sup>2</sup> 时,功率几乎保持不变,不随加速度变化。这一点在基于城市驾驶数据得到的功率-加速度曲线图(图10c)中尤为明显。功率的上限约为 20 kW,下限约为 5 kW。图 10d 也呈现出类似的趋势,该图基于高速公路行驶数据绘制。不难解释,下限的原因在于电动汽车的能量回收能力受限于电池组的充电容量,而电池组的充电容量又由电池管理系统控制。但上限(20 kW)远低于车辆的最大输出功率。这可能是由于驾驶员的驾驶行为所致。需要进一步研究来证实我们的解释。

#### 功率与等级

道路坡度对电动汽车的能耗也有显著影响。如图10e 和 10f 所示,随着道路坡度的增加,所需的瞬时功率也随之增加。需要注意的是,由于我们数据采集集中使用的 GPS 系统难以提供精确的海拔高度信息,因此我们手动从 Google Earth 中收集了海拔和坡度信息。

根据数据,我们还发现,坡度为正(即上坡)时功率变化明显大于坡度为负(即下坡)时的变化。如图10e所示,基于城市驾驶数据得出的功率与坡度关系图显示,当坡度从 0% 变化到 6% 时,功率从 5 kW 增加到 25 kW(相差 20 kW);但当坡度从 6% 变化到 0% 时,功率仅从 0 kW 增加到 5 kW(相差 5 kW)。同样,基于高速公路驾驶数据得出的功率与坡度关系图显示,当坡度从 0% 变化到 6% 时,功率增加约 20 kW(从 12 kW 增加到 32 kW);但当坡度从 6% 变化到 0% 时,功率仅增加 7 kW(从 5 kW 增加到 12 kW)。这可能是因为下坡时,无论坡度如何,驾驶员都会松开油门,因此所需的能量大致相同;而上坡时,为了保持一定的速度,所需的功率会根据坡度而变化。此外,从图 10e 和 10f 可以看出,即使坡度相同,高速公路行驶所需的功率也高于城市道路行驶。这可能是因为高速公路的行驶速度通常高于城市道路的行驶速度。

街道。

#### 电动汽车用电量分布

图 10 仅描述了电动汽车瞬时功率与速度、加速度和道路坡度之间的总体关系,因为图中的每个点仅代表多种不同情况下瞬时功率的平均值。例如,图 10a 中的点表示电动汽车以特定速度行驶时,在不同加速度和道路坡度等各种情况下所需的平均功率值。为了更好地理解功率、速度、加速度和道路坡度之间的关系,我们需要对数据进行更深入的研究。因此,我们将数据进一步细分为速度、加速度和道路坡度的特定范围。然后,基于细分后的数据,我们推导出了功率与速度、功率与加速度以及功率与坡度之间更精确的关系。最重要的是,通过对细分后的数据进行统计分析,我们可以量化电动汽车在特定坡度的道路上以特定速度和加速度行驶时所需功率的变化范围(使用分布)。

图 11 展示了上述数据分析结果的三个示例。图中括号内的两个数字分别代表均值和标准差。图 11a 显示了在加速度为 0–2 ft/s<sup>2</sup>、道路坡度为 0% 至 2% 的条件下,电动汽车功率与速度的关系。因此,图中每个带方框的红点代表电动汽车在加速度为 0 至 2 ft/s<sup>2</sup>、坡度为 0% 至 2% 的条件下,以特定速度行驶所需的平均功率值。类似地,图 11b 显示了在速度为 15–20 mph、道路坡度为 0% 至 3% 的条件下,电动汽车功率与加速度的关系;图 11c 显示了在车速为 25–30 mph、加速度为 0–2 ft/s<sup>2</sup> 的条件下,功率与道路坡度的关系。

请注意,如果有更多数据可用,这些范围可能会更小,从而提供对这些关系的更精确的描述。

请注意,平均功率值(即图 11 中红色方点的“y”坐标)是从一组数据点中得出的,这些数据点对应于电动汽车在特定条件下以特定范围行驶所需的功率值。

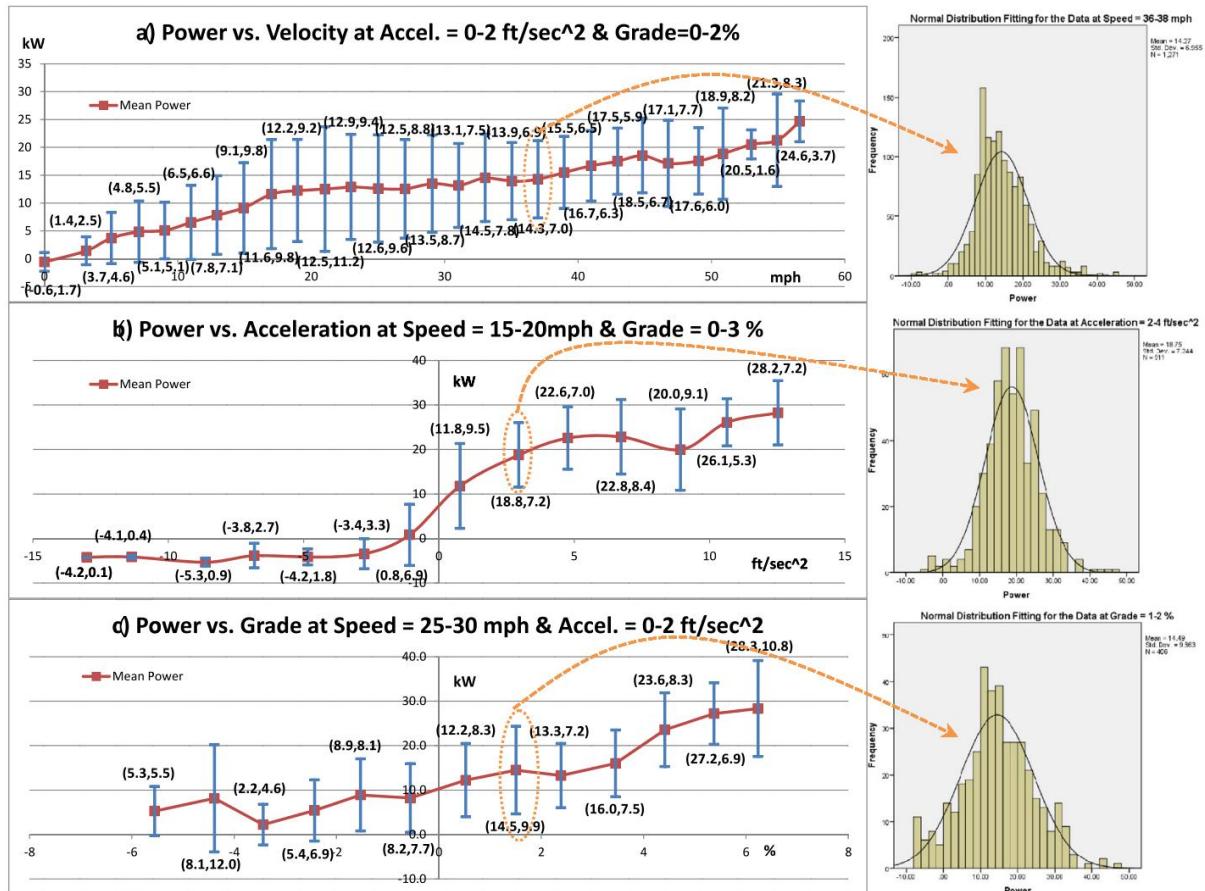


图 11. 固定加速度和坡度下的平均功率分布（括号内的数字分别代表平均值和标准差）。

我们首先分析了速度、加速度和坡度。然后，我们使用分布拟合数据，对每组功率数据进行统计分析。图 11 中的直方图表明，电动汽车在特定速度、加速度和坡度范围内的功率可以描述为正态分布（或对数正态分布）；并且，不同范围的分布有所不同，这可以从均值和方差的不同值（见括号中的数字）看出。如图 11 所示，每个分布的均值（用红色方块点表示）随 x 坐标的不同而变化，每个分布的范围（用蓝色条形表示）也因条件而异。请注意，每个数据点的范围是通过均值减去（下限）或加上（上限）标准差计算得出的。有很多与此处所示类似的图表。由于篇幅限制，我们仅展示三个示例。

利用分布来描述与特定速度、加速度和道路坡度范围相对应的功率数据，对于电动汽车的能耗估算至关重要。如图 11 所示，通过分布图，我们可以直接估算电动汽车在特定速度、加速度和坡度范围内行驶所需的平均功率及其方差。这本质上是一种数据驱动的方法，可用于估算电动汽车的瞬时功率和能耗。然而，该方法需要大量数据才能找到电动汽车功率、速度、加速度和道路坡度之间的精确关系。因此，该方法可能非常耗时且计算量巨大，因此可能不适用于实时应用。为了克服这些缺点，我们提出了一种解析式电动汽车功率估算模型，将在下一节中进行描述。

#### 电动汽车能耗估算模型

如上所述，直接使用分布来估计电动汽车的瞬时功率和能耗可能具有挑战性，部分原因是这些分布具有相对较大的方差，可能会产生估计误差，部分原因是这种方法在数据收集和分析方面耗时且计算成本高昂。

因此，本文提出了一种功率估计的分析模型。

## 功率估计模型

根据车辆动力学的基本理论（以及我们在数据分析中观察到的现象），我们知道电动汽车的瞬时功率取决于车速、加速度和道路坡度。因此，所提出的模型本质上是对电动汽车功率、速度、加速度和坡度之间关系的解析描述。

首先，根据基础物理学，电动汽车在特定条件下行驶所需的牵引力由三个主要阻力决定，如下式所示：

$$F = \frac{1}{4} ma + Ra + Rrl + Rg$$

δ1P

其中  $F$  为牵引力（单位为 N 或 lb）； $m$  为车辆质量（单位为 kg 或 slug）； $a$  为加速度（单位为 m/s<sup>2</sup> 或 ft/s<sup>2</sup>）， $Ra$ 、 $Rrl$  和  $Rg$  分别为空气动力阻力、滚动阻力和坡度阻力（单位为 N 或 lb）。

已知车辆速度为  $m$ （单位为米/秒或英尺/秒），加速度为  $a$ （单位为米/秒<sup>2</sup>或英尺/秒<sup>2</sup>），道路坡度为  $h$ （单位为度）， $Ra$ 、 $Rrl$  和  $Rg$  可通过以下公式计算：8

$$\begin{aligned} Ra &= \frac{1}{4} kv^2 \quad \frac{1}{4} CDAf v^2 \\ Rrl &\approx frl mg \\ Rg &= \frac{1}{4} mg \sin h \end{aligned}$$

δ2P

其中  $k$  为空气动力阻力常数，由空气密度  $q$ （单位为 kg/m<sup>3</sup> 或 slug/ft<sup>3</sup>）、车辆迎风面积  $Af$ （单位为 m<sup>2</sup> 或 ft<sup>2</sup>）和阻力系数  $CD$ （无单位）决定； $frl$  为滚动阻力常数（无单位）； $g$  为重力加速度（ $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  或  $32.2 \text{ ft/s}^2$ ）。

结合式 (1) 和式 (2)，我们可以得到：

$$F = \frac{1}{4} ma + kv^2 + frl mg + mg \sin h$$

δ3P

上述公式适用于内燃机汽车和电动汽车。要产生上述牵引力，车辆以速度  $v$  行驶所需的功率 ( $P$ )，单位为瓦特，可使用以下公式估算：

$$P = \frac{1}{4} F v = \frac{1}{4} ma v + \frac{1}{4} kv^3 + frl mg v + mg v \sin h$$

δ4P

实际上， $P$  是输出功率，它由输入功率 ( $P$ )，单位为瓦特提供。对于内燃机汽车， $P$  由燃料燃烧产生；但对于电动汽车， $P$  由电动机产生。电动汽车比内燃机汽车效率高得多，因为电动机的电能损耗很小。假设电动机效率为  $\eta$ ，则输入功率和输出功率之间存在以下关系：

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

δ5P

如果忽略空调和其他车辆附件的用电量，大部分电力损耗将是高电流区域的铜损（对于直流电机）或铁损（对于交流电机）。一般来说，功率损耗可以表示为电流 ( $I$ ) 的平方与导体电阻 ( $r$ ) 的乘积（Tanaka et al., 2008）。因此，电机效率  $\eta$  可以通过以下公式计算：

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{in} + I^2 r}$$

δ6P

其中  $I$ （单位为安培）表示电流， $r$ （单位为Ω）表示导体的电阻。

根据公式 (4)~(6)，电动汽车的瞬时功率可估算如下：

$$P = \eta P_{in} = \eta I^2 r$$

δ7P

另一方面，力  $F$  由电机的扭矩产生，扭矩可以简化为电枢常数 ( $K_a$ )、磁通量 ( $U_d$ ) 和电流 ( $I$ ) 的乘积：

$$F = K_a U_d I$$

δ8P

其中， $s$ （单位为牛米或磅英尺）为扭矩； $R$ （单位为毫米英尺）为轮胎半径； $K_a$  为电枢常数； $U_d$ （单位为韦伯）为磁通量； $I$ （单位为安培）为电流。注意，直流电机和交流电机的  $U_d$  值不同。对于直流电机， $U_d$  为每极直轴气隙磁通量；对于交流电机， $U_d$  为每极直轴气隙磁通量的均方根值。

为了简化式 (8)，我们定义：

$$K = K_a U_d$$

δ9P

则公式 (8) 变为：

$$F = \frac{K I}{R}$$

δ10P

最后,结合式 (3)、(7)和 (10),可以估算出电动汽车的瞬时功率:

$$P^{1/4} \frac{rR^2}{K^2} \frac{ma + kv^2 + f_{rlmg} + mg \sin h}{\rho v kv^2 \rho f_{rlmg} \rho mg \sin h \rho mav} \quad \text{式 (11)}$$

式 (11)可简化为:

$$P^{1/4} P_m \rho P_t \rho P_g \quad \text{式 (12)}$$

其中  $P_m^{1/4}$  是由  $\frac{rR^2}{K^2} ma + kv^2 + f_{rlmg} + mg \sin h$  是电机的功率损耗;  $P_t = v(k v^2 + f_{rlmg} + mg \sin h)$  是功率于行驶阻力造成的损失;  $P_g = mav$  是从加速 (或减速) 中获得的可能能量。

## 模型评估

上述模型已使用我们的测试车辆进行了评估。我们重点关注以下两个问题:

- (1)该模型能否准确估算瞬时功率;
- (2)该模型能否准确估算行程的能量消耗?

### 瞬时功率估算

为了估算电动汽车的瞬时功率,我们首先需要确定公式 (11)中的参数值,包括车辆重量 (m)、滚动阻力系数 (f<sub>rl</sub>)、空气动力阻力系数 (k)、电枢常数与

磁通量 (K)、电机等效电阻 (r)、轮胎半径 (R) 和传动效率 (g)。请注意其中大部分参数。

车辆重量、电枢常数、磁通量、电机电阻和轮胎半径等参数均为测试车辆的物理特性,因此可以直接从车辆上测量。其他参数,例如滚动阻力,则需要通过其他方式测量。

由于传动比、空气动力阻力系数和传动效率难以直接测量,因此根据其他相关研究对其进行估算。[表1](#)列出了模型中使用的这些参数的建议值。

基于[表1](#)中的数值,我们利用公式 (11)估算了电动汽车的瞬时功率,已知电动汽车的……速度、加速度和道路坡度。车辆在每个时间步长的速度和加速度均通过以下方式直接测量:

如前所述,数据收集系统和成绩信息均通过谷歌地球手动收集。

利用这些输入值,公式 (11)用于计算每个时间步长的电动汽车功率。然后,我们将估计的功率与实际功率进行比较。

该值由我们的数据采集系统直接测量。[图12](#)展示了一个基于 2012 年 12 月 3 日行程的示例。

由于数据点过多 (每秒一个数据点),因此仅保留了二十分钟的数据 (从上午 8:40:00 到上午 9:00:00)。

如图所示,带有三角形标记的紫色线代表估计的电动汽车功率。

图中带有方框标记的红线与实测电动汽车功率曲线非常吻合。这表明所提出的简单模型有效。

该估算模型能够准确估算电动汽车的瞬时功率。图中还包含了车辆速度 (绿线) 和加速度 (蓝线) 作为背景信息。有趣的是,我们可以看到功率的变化与车辆速度密切相关。

遵循加速度变化的趋势。

### 行程能耗估算

此外,我们还想了解所开发的模型能否准确估算一次行程的总能耗 (即用电量)。一次行程的总用电量 (E) 是通过将功率在行程时间 (T) 内进行积分计算得出的。

由公式 (13) 描述:

$$E^{1/4} Z_0 \int_0^T P dt \quad \text{式 (13)}$$

基于上述积分,我们计算了2013年5月期间40多次出行的能耗。[图13](#)对比了……

对每次行程的能耗进行测量和估算。显然,所提出的模型能够成功估算行程能耗。

表1

公式 (11) 中参数的建议值。

参数	价值观
车辆重量 (包括驾驶员), 米[公斤]	1266
滚动阻力系数, f <sub>rl</sub>	0.006*
空气动力阻力系数, k $\frac{1}{4}$	$\frac{2}{3} CDAf [kg/m]$
电枢常数与磁通量的乘积,K = K <sub>a</sub> U <sub>d</sub> [V s]	1.30**
电机电阻 (一般而言), r[X]	10.08
轮胎半径,R [m]	0.11
传输效率, g [%]	0.50
	95

\* 建议值来自[工程工具箱 \(2013a\)](#)。

\*\* 计算值基于以下假设: q = 1.2 kg/m<sup>3</sup>, Af = 2.666 m<sup>2</sup>, CD = 0.8, q 和 CD 值

建议值由[工程工具箱 \(2013b\)](#) 提供; Af 值由[Ecomodder](#) 提供。  
(2013 年)。

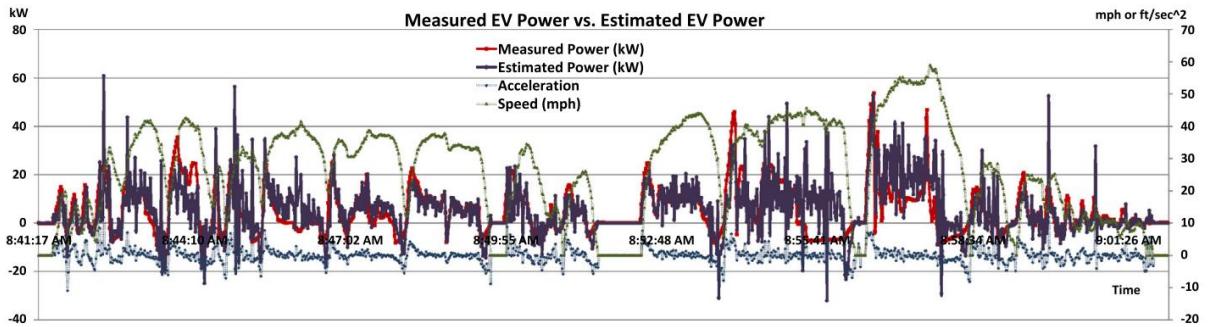


图 12. 测量功率与估计功率。

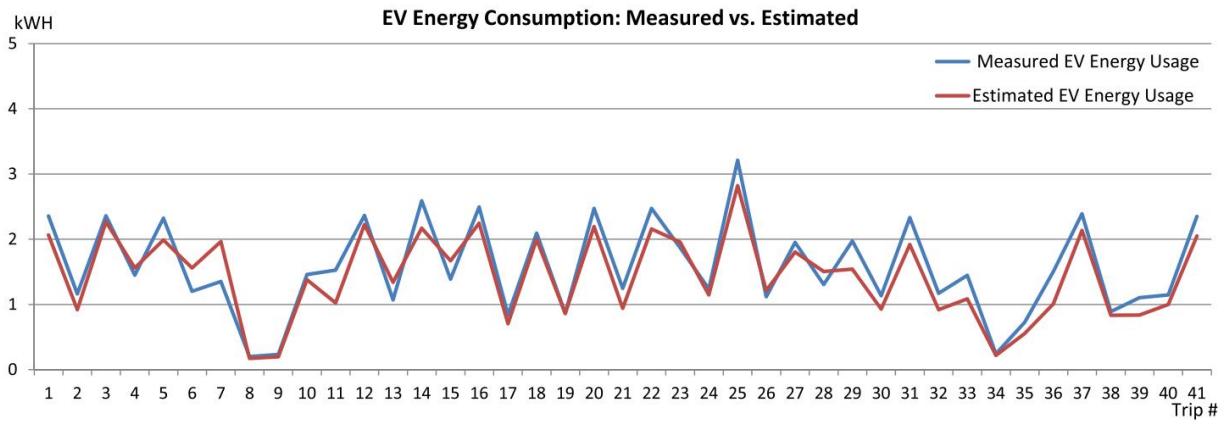


图 13. 41 次行程的电动汽车能耗估算值与实测值对比。

我们还计算了平均绝对误差 (MAE)。图 13 中所有行程的平均 MAE 为 15.6%。进一步校准表 1 中列出的参数可能会提高我们模型的精度。

我们想指出,所提出的模型是基于物理学中一些非常基础的理论构建的。许多其他研究也采用了类似的思路,例如Larminie 和 Lowry (2003)以及Tanaka 等人 (2008) 的研究。因此,仅从理论角度来看,很难说该模型有任何原创性贡献。但是,该模型能够很好地描述电动汽车的瞬时功率,它由电机损耗、行驶阻力损耗和加速可能带来的增益三部分组成;这有助于电动汽车功率的估算。此外,基于实际电动汽车对该模型进行全面评估,将对未来的研究有所裨益。

所提出的模型经过专门设计,因此具有个性化和数据驱动的特点。模型本身需要对车辆及其系统有深入的了解。但此类信息可以基于本研究开发的数据收集系统收集的历史和实时在用车辆数据来获取。未来的研究将开发一种数据驱动的方法,以推导和校准运行模型所需的参数。这样做也可以提高所提模型估计的准确性。

更重要的是,开发这种简单分析模型的目的是为了实现实时应用。与许多其他考虑过多因素而难以用于实时应用的模型不同,所提出的模型简单易用,非常适合实时应用。一个潜在的应用是利用该模型确定电动汽车在选定路线上的时变最优速度曲线,从而最大限度地降低能耗 (Wu et al., 2014)。这种应用还可以进一步应用于未来的自动驾驶技术。通过将最优速度控制集成到自动驾驶汽车中,并结合提供实时交通信息的联网车辆技术 (美国交通部, 2013),我们可以显著降低电动汽车的能耗。当电动汽车成为日常交通的主要方式时,这可能是一种缓解未来能源危机的有效途径。

## 结束语

本文首先介绍了一种能够采集电动汽车使用中数据的系统,这些数据包括电池荷电状态、电池组电流、电池组电压、电池组功率、车辆速度、加速度以及车辆位置 (纬度、经度和海拔)。随后,该系统被安装在本研究开发的一辆电动汽车改装车上作为测试车辆。目前已收集到约5个月的电动汽车数据。

这些数据已被收集并用于分析电动汽车的性能和驾驶员行为。分析表明,电动汽车在城市道路上行驶比在高速公路上行驶效率更高。因此,这位电动汽车驾驶员更倾向于选择城市道路而非高速公路。另一项重要发现是,通过及时获取能源使用信息,这位电动汽车驾驶员有意识地调整了驾驶行为以降低能耗。这可能表明电动汽车驾驶员存在信息驱动行为。

为了解电动汽车的能耗,我们分析了电动汽车功率与车速、加速度和道路坡度之间的关系。功率与速度的关系图显示,车速越高,所需功率越大;功率与加速度的关系图证实,电动汽车在加速时消耗能量,而在减速时则能回收能量;功率与坡度的关系图表明,随着道路坡度的增加,所需的瞬时功率也随之增加。但这些图表仅粗略地描述了电动汽车瞬时功率与速度、加速度和道路坡度之间的关系。为了更深入地了解功率、速度、加速度和道路坡度之间的关系,我们对数据进行了更深入的研究,将数据进一步细分为特定的速度、加速度和道路坡度范围,然后对细分后的数据进行统计分析。结果表明,在特定的速度、加速度和坡度范围内,电动汽车的功率可以描述为正态分布或对数正态分布。对于不同的速度、加速度和坡度范围,这些分布的均值和方差是不同的。了解特定速度、加速度和坡度范围对应的功率数据分布对于电动汽车能耗估算至关重要。利用这些分布,可以根据特定速度、加速度和坡度范围所指示的车辆状态直接估算电动汽车功率使用的均值和方差。这本质上提供了一种估算电动汽车功率的经验方法。

然而,经验方法既耗时又计算量大。因此,本研究进一步提出了一种能够实时估算电动汽车瞬时功率的分析模型。该模型基于车辆动力学的基本理论以及功率、力、扭矩、电压和电流之间的基本关系。该模型已通过测试车辆进行了验证。结果表明,该模型能够成功估算电动汽车的瞬时功率和行程能耗。

总之,本研究对电动汽车的能源使用情况进行了全面综述。它证明了收集此类数据的可行性,以及从数据分析中获得的潜在见解。所提出的能源估算模型运行良好,具有作为研究工具和电动汽车用户资源的潜力。然而,本研究的数据集存在局限性,因为它仅包含一位驾驶员和一辆汽车的数据,而且该车辆并非目前市售车型,并且仅包含有限的高速公路行驶数据。为了获得更多数据以改进估算模型并验证本文提出的初步结论,本研究应扩展到包含更多不同的驾驶员和目前市售车型。

## 致谢

作者谨此感谢电子与计算机工程技术系 (ECET) 的 Gerald Herder 教授。

感谢加州州立理工大学波莫纳分校电子与计算机工程系的 Tim Lin 博士和系主任在电动汽车能耗估算模型开发方面提供的帮助,以及 Johnny Truong 先生在海拔数据采集方面提供的帮助。作者也感谢匿名审稿人对本文提出的建设性意见。

## 参考

- AccuWeather.2014. <<http://www.accuweather.com/>> (2014年8月15日访问)。
- 安德森,G.,2012.《油价波动和新技术正在助力交通燃料多元化》。全国州议会联合会<<http://www.ncsl.org/issues-research/energyhome/fueling-the-future.aspx>> (2013年4月22日访问)。
- Axsen, J., Kurani, KS., Burke, A., 2010. 电池是否已准备好迎接插电式混合动力车买家?《交通政策》17, 173–182。
- Canis, B. (2011). 混合动力和电动汽车电池制造:政策问题。国会研究服务处。<[http://nepinstitute.org/get/CRS\\_Reports/CRS\\_Energy/Energy\\_Efficiency\\_and\\_Conservation/Batteries\\_for\\_Hybrid\\_and\\_Elec\\_Vehicles.pdf](http://nepinstitute.org/get/CRS_Reports/CRS_Energy/Energy_Efficiency_and_Conservation/Batteries_for_Hybrid_and_Elec_Vehicles.pdf)> (2013年4月10日访问)。
- 2012年汽车大会。派克研究公司预测,插电式汽车销量将低于美国2015年的目标;但到2020年将保持强劲增长。<<http://www.greencarcongress.com/2012/07/pikepev-20120702.html>> (2014年7月15日访问)。
- Chaudhry, M., 2010 电动汽车的性能分析与优化。圣何塞州立大学硕士项目报告。
- Clegg, SJ, 1996.再生制动系统综述。利兹大学交通运输研究所工作论文 471 <[http://eprints.whiterose.ac.uk/2118/1/ITS105\\_WP471\\_uploadable.pdf](http://eprints.whiterose.ac.uk/2118/1/ITS105_WP471_uploadable.pdf)> (2013年4月15日访问)。
- 德意志银行,2009 年。《汽车及汽车零部件:电动汽车·插电式混合动力 2》<<http://www.fullermoney.com/content/2009-11-03/ElectricCarsPluggedIn2.pdf>> (2013年4月15日访问)。
- Ecomodder,2013. <<http://ecomodder.com/forum/emgarage.php?do=details&vehicleid=6380>> (2013年11月15日访问)。
- Elithion , 2014. <<http://elithion.com/ev.php>> (2014年8月12日访问)。
- Elkind,EN,2012。《到2025年实现电动汽车普及:加州如何才能在2025年前推动电动汽车的大规模普及》,加州大学洛杉矶分校法学院/伯克利分校法学院研讨会, <[http://www.law.berkeley.edu/files/ccelp/Electric\\_Drive\\_by\\_25-2.pdf](http://www.law.berkeley.edu/files/ccelp/Electric_Drive_by_25-2.pdf)> (2013年4月22日访问)。
- Ericsson, E.,Larsson, H.,Brundell-Freij, K.,2006 年.优化路线选择以实现最低燃油消耗 新型驾驶员辅助工具的潜在影响。《交通运输研究 C 新兴技术》14 (6), 369–383。
- Freude, I., Ribeiro, A., Goncalves, G., Antunes, AP, 2010. 中心城区电动汽车充电站选址优化模型。载于:《交通运输研究委员会第90届年会论文集》,交通运输研究委员会,华盛顿特区。
- Gao, YM., Chen, LP., Ehsani, M., 1999. 电动汽车和混合动力汽车再生制动有效性的研究。《SAE Trans.》108, 3184–3190。
- Greene, DL., Schafer, A., 2003. 减少温室气体排放:来自美国交通运输,皮尤全球气候变化中心,弗吉尼亚州阿灵顿 22201。HCM,2010 年。《公路通行能力手册》,交通研究委员会,国家研究委员会,华盛顿特区。
- He, F., Wu, D., Yin, Y., Guan, Y., 2013. 插电式混合动力汽车公共充电站的优化部署。《交通运输研究 B》47, 87–101。

- Ip, A., Fong, S., Liu, E., 2010. 基于层次聚类的城市电动汽车充电站分配优化。载于:第二届会议论文集  
国际数据挖掘与智能信息技术应用会议 (ICMIA) ,韩国首尔,2726–2730。
- Knowles, M., Scott, H., Baglee, D., 2012. 驾驶风格对电动汽车性能、经济性和感知的影响。国际电动混合动力汽车杂志 4 (3), 228–247。
- Larminie, J., Lowry, J., 2003. 电动汽车技术详解。英国约翰·威立父子出版社。
- Morrowa, K., Karnerb, D., Francfortc, J., 2008. 美国能源部车辆技术计划 - 先进车辆测试活动插电式混合动力  
电动汽车:充电基础设施审查,最终报告:INL/EXT-08-15058,巴特尔能源联盟,合同编号 58517。
- Pan, F., Bent, R., Berscheid, A., Izraelevitz, D., 2010. 定位V2G中的PHEV交换站。载于:第一届IEEE智能交通国际会议论文集。  
电网通信 (SmartGridComm) ,第 173–178 页。
- PeMS,即加州交通部绩效评估系统。<<http://pems.dot.ca.gov/>> (2014年8月15日访问)。
- Pound, WT, 2012. 《面向未来的交通能源:政策制定者指南》,华盛顿特区,第 20001 页。
- Rajashekara, K., 2004. 燃料电池汽车的功率转换和控制策略。载于:IEEE工业能源技术协会第29届年会论文集  
美国弗吉尼亚州罗阿诺克电子学会,第 3 卷,第 2865–2870 页。
- Sheffi, Y., 1984. 城市交通网络:数学规划方法的均衡分析。Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, NJ。
- Sioshansi, R., 2012. 电价对插电式混合动力电动汽车充电、成本和排放的影响建模。运筹学 60 (3), 506–516。
- Skerlos, SJ, Winebrake, JJ, 2010. 制定插电式混合动力电动汽车政策以增加社会效益。能源政策 38 (2), 705–708。
- Sovacool, BK, Hirsh, RF, 2009. 超越电池:对插电式混合动力汽车 (PHEV) 的优势和障碍以及车辆的探讨  
V2G 向电网过渡。能源政策 37 (3), 1095–1103。
- Sweda, T., Klabjan, D., 2011. 基于代理的电动汽车充电基础设施部署决策支持系统。载于:第7届IEEE会议论文集  
车辆动力与推进会议,伊利诺伊州芝加哥市。
- Tanaka, D., Ashida, T., & Minami, S., 2008. 基于电动汽车功率消耗的电动汽车速度曲线确定的分析方法,载于:IEEE 车辆动力与推进会议 (VPPC),中国哈尔滨。
- 工程工具箱,[http://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d\\_1303.html](http://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html) (2013 年 11 月 15 日访问)。
- 工程工具箱,[http://www.engineeringtoolbox.com/drag-coefficient-d\\_627.html](http://www.engineeringtoolbox.com/drag-coefficient-d_627.html) (2013 年 11 月 15 日访问)。
- 国家气候数据中心 (<http://www.ncdc.noaa.gov/>) , (2014 年 8 月 15 日访问)。
- 美国能源部,2014年,[http://www.afdc.energy.gov/vehicles/electric\\_batteries.html](http://www.afdc.energy.gov/vehicles/electric_batteries.html) (2014年8月12日访问)。
- 美国交通部,2010 年。《交通运输在减少美国温室气体排放中的作用》第一卷:综合报告,提交国会的报告,美国交通部  
运输。  
美国交通部,2013 年。《联网车辆研究》<[http://www.its.dot.gov/connected\\_vehicle/connected\\_vehicle.htm](http://www.its.dot.gov/connected_vehicle/connected_vehicle.htm)> (2014年8月12日访问)。
- Wardrop, JG, 1952.道路交通研究的一些理论方面。土木工程师学会会刊 II (1), 325–378。
- Wu, X., He, X., Yu, G., Harmandayan, A., 2014. 插电式电动汽车在信号控制干道上的能量最优速度控制。已接受发表。  
在华盛顿特区举行的交通研究委员会 (TRB) 第94届年会上。
- Xu, G., Li, W., Xu, K., Song, Z., 2011. 电动汽车的智能再生制动策略。Energies 4, 1461–1477。
- Zhang, J., Lu, X., Xue, J., Li, B., 2008. 串联式混合动力城市公交车再生制动系统。世界电动汽车杂志 2 (4), 128–134。
- Zahabi, S., Miranda-Moreno, L., Barla, P., Vincent, B., 2013. 探索实际工况下混合动力汽车与传统汽油汽车燃油经济性的贡献因素:以魁北克寒冷城市为例。载于:美国交通研究委员会第93届年会  
论文集。美国交通研究委员会,华盛顿特区。