

· 国家自然科学基金资助出版 ·

电动汽车 再生制动及其控制技术

叶 敏 郭金刚 编著
曹秉刚 主审

REGENERATIVE BRAKING AND
ITS CONTROL TECHNOLOGY ON
ELECTRIC VEHICLE



人民交通出版社
China Communications Press

014002461

U469.72

38

国家自然科学基金资助出版

电动汽车再生制动及其控制技术

叶 敏 郭金刚 编著
曹秉刚 主审

人民交通出版社



北航

C1688245

U469.72
38

内 容 提 要

本书重点分析了电动汽车制动电气再生与机械摩擦联合制动特性,提出主辅电源能量回馈系统,使再生制动系统可同时实现升降压功能,实现回收能量对主辅电源充电;详细分析了并联制动策略、最佳感觉串联制动策略和最优能量回收串联制动策略;制定出电动汽车最大化能量回收制动力分配策略,并将再生制动应用于防抱死制动系统;通过建立电动汽车制动防抱死系统动力学模型、轮胎模型和液压系统模型,提出了电动汽车防抱死制动控制技术。

本书可供从事电动汽车科学研究单位相关设计和研发人员参考,也可供高等院校相关专业教师和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电动汽车再生制动及其控制技术 / 叶敏, 郭金刚编
著. -- 北京: 人民交通出版社, 2013. 8
ISBN 978-7-114-10651-4

I. ①电… II. ①叶… ②郭… III. ①电动汽车—再生制动②电动汽车—控制系统 IV. ①U469.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 112460 号

书 名: 电动汽车再生制动及其控制技术

著 作 者: 叶 敏 郭金刚

责任编辑: 丁润铎 富砚博

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 720×960 1/16

印 张: 14

字 数: 260 千

版 次: 2013 年 8 月 第 1 版

印 次: 2013 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10651-4

定 价: 42.00 元

(有印刷、装订质量问题,由本社负责调换)

前 言

由于环境污染和能源短缺问题备受关注,电动汽车已成为全世界汽车工业研究的热点。然而,时至今日电动汽车仍难以产业化,主要是受续驶里程短和初始成本高两大因素制约。再生制动能量回收技术在不提高汽车初始成本的前提下,作为提高其续驶里程的有效手段,已成为电动汽车研究领域的一个突出亮点。再生制动加入到传统液压制动系中会改变原有车辆制动性能,因此需使再生制动与液压制动之间协调一致,确保车辆制动稳定性及驾驶平顺性,并最大化提高能量回收效率,延长电动汽车的续驶里程。

本书是作者近年来在电动汽车领域研究成果的总结。作者的研究工作得到了西安交通大学电动汽车与系统控制研究所曹秉刚教授的鼎力支持。曹秉刚教授是国内最早研究电动汽车技术的专家之一,在他的指导下,作者开始了电动汽车再生制动系统的研究,在此深表感谢!

本书内容共分8章,其中第1、4、5、8章由叶敏编著,第2、3、6、7章由郭金刚编著,研究生窦建明参与了本书稿的整理工作。

在本书部分成果的研究、撰写和出版过程中得到了国家自然科学基金“电动汽车机械摩擦与电气再生制动响应一致性匹配机理研究”(51105043)的资助,作者谨致谢忱。

由于作者水平有限,书中的疏漏和不足之处在所难免,诚请读者批评指正。

作 者

目 录

1 概论	1
1.1 电动汽车发展的目的与意义	1
1.2 电动汽车发展的现状	2
1.3 电动汽车关键技术及其发展方向	6
1.4 再生制动概述	8
1.5 电动汽车再生制动的技术发展	18
2 再生制动系统的动力学分析及模型	22
2.1 概述	22
2.2 再生制动系统的结构	22
2.3 电动汽车制动动力学分析	29
2.4 电驱动系统模型	32
2.5 储能系统模型	37
2.6 电动机再生制动原理	40
2.7 电动机再生制动策略	44
3 电动汽车储能系统设计与控制	51
3.1 电动汽车复合储能系统设计	51
3.2 双能源系统控制策略	54
3.3 仿真研究	61
4 XJTUEV-Ⅱ 电动汽车总体设计	65
4.1 概述	65
4.2 电动汽车动力驱动系统	65
4.3 XJTUEV-Ⅱ 电气系统	67
4.4 控制系统硬件设计	76
4.5 DSP 软件程序	82
4.6 蓄电池监控系统	88
4.7 XJTUEV-Ⅱ 电动汽车性能测试实验	93
5 基于参数摄动的电动汽车能量回收鲁棒混合控制	95
5.1 概述	95

5.2	电动汽车再生制动工作特点	96
5.3	能量回收系统参数摄动模型	98
5.4	鲁棒混合控制	104
5.5	仿真与实验研究	115
6	电动汽车整车制动控制	125
6.1	概述	125
6.2	典型的制动力分配策略	125
6.3	最大化制动力分配策略	128
6.4	基于优化的制动力分配	135
6.5	整车制动系统仿真	142
7	电动汽车防抱死制动系统控制	156
7.1	电动汽车防抱死制动系统概述	156
7.2	汽车防抱死制动系统模型	158
7.3	基于滑模变结构的电动汽车防抱死制动控制	165
7.4	机电制动力分配控制方法	171
7.5	仿真研究	173
8	电动汽车主辅电源能量回馈研究	182
8.1	概述	182
8.2	主辅电源能量回馈系统	183
8.3	H_2/H_∞ 控制	186
8.4	仿真研究	191
8.5	实验研究	194
	附录	198
	参考文献	204

1 概 论

1.1 电动汽车发展的目的与意义

汽车是现代工业最重要的技术成果之一。汽车工业和其他工业的发展,促使人类社会向高度发达的工业社会进展。然而,汽车的大量应用,已经对环境和人类生存产生重大影响。

目前,世界汽车保有量约 8 亿辆,预计到 2020 年全球汽车保有量将达到 12 亿辆,其中增量主要来自发展中国家。国际能源机构的统计数据表明^[1],2003 年全世界 57% 的石油消耗在交通领域。预计到 2020 年交通用油将占到全世界石油总消耗的 62% 以上。据美国能源部预测,2020 年以后,全球石油需求与常规石油供给之间将出现净缺口。有关专家预测,如果不尽快开展对替代能源的研究和开发,地球上有限的石油资源就会在短期内因过度开采而枯竭。因此,寻找新能源是一项非常迫切的任务。

汽车在大量消耗资源的同时,其排放的废气还会造成严重的环境污染并影响人类健康。汽车废气中含有一氧化碳、氮氧化物以及对人体产生不良影响的其他固体颗粒,尤其是含铅汽油,对人体的危害更大。据统计,由于目前运行的汽车大部分都是以汽油或柴油为燃料,在美国城区,43% 的非甲烷有机物、57% 的氮氧化物以及 82% 的一氧化碳都是汽车废气排放产生的,而且全世界 20% 的一氧化碳排放量来源于汽车废气。因此,汽车废气已成为城市大气污染的一个主要原因^[2]。

随着全球能源危机的不断加深,石油资源的日趋枯竭以及大气污染、全球气温上升的危害加剧,各国政府及汽车企业普遍认识到节能和减排是未来汽车技术发展的主攻方向,发展电动汽车将是解决这两个技术难点的最佳途径。

电动汽车^[3,4]是主要以蓄电池为动力源,全部或部分由电动机驱动的汽车,是涉及机械、电子、电力、微机控制等多学科的高科技技术产品。在外形上,电动汽车与传统的汽车并无显著区别,它们的主要区别在于动力和驱动系统。电动汽车主要有纯电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池电动汽车 3 种类型^[5]。与内燃机汽车相比,电动汽车具有以下优点:从能源角度来看,电动汽车将使能源的利用多元化和高效率,做到可靠、平衡和无污染地利用能量;从环保角度来

看,纯电动汽车和燃料电池电动汽车是零排放或超低排放交通工具,即使计算发电厂的排放,从总量上来看,它将使全球污染大为减少;从智能交通系统角度来看,作为一种交通工具,由于电动汽车比传统燃油汽车更易实现精确的控制,所以智能交通系统将有可能率先通过电动汽车实现,从而提高道路利用率和交通安全性。电动汽车是一个洁净、高效、智能、可持续发展的绿色交通运输工具。

1.2 电动汽车发展的现状

电动汽车的基本结构可以分为电动机驱动系统、能源系统和辅助系统^[2]。

电动机及其控制系统是电动汽车的关键技术之一。目前,应用于电动汽车的电动机主要有直流电动机、交流感应电动机、开关磁阻电动机和永磁电动机等种类^[4]。直流电动机需定期维护、寿命短,适合于对功率需求较小的场合使用。感应电动机是一种应用非常广泛的交流电动机,其成本低、工艺成熟、调速范围宽,与磁场定向控制技术相结合,可有效改善电动机的控制性能。开关磁阻电动机以其结构简单、成本低廉、转矩特性理想等优点,使得其在电动汽车上有着广阔的应用前景,目前有许多汽车公司都把它应用在电动汽车上。永磁电动机通过采用永磁材料,可有效减小电动机损耗,其体积小、效率高,可在正弦交流电源/脉宽调制电源(PWM)下工作。永磁电动机调速范围宽,特别适合于电动汽车使用,丰田、通用等汽车公司都采用了这项技术。

能源系统是电动汽车发展遇到的最大障碍。出于电动汽车的特殊要求,电动汽车用蓄电池必须同时具有高比能量、高比功率、长寿命和安全可靠等特点,但基于现有技术,还没有一种能量存储装置可满足这些要求^[4]。可应用于电动汽车的电化学蓄电池包括铅酸蓄电池、镍氢蓄电池和锂离子蓄电池等。铅酸蓄电池技术成熟、成本较低,是唯一可批量生产的车用蓄电池,但其比能量和比功率较低。镍氢蓄电池性能优于铅酸蓄电池,可满足电动汽车使用的近期目标,但其成本高,具有记忆效应和充电发热问题。生产镍氢蓄电池的主要公司是 Ovonic 公司。锂离子蓄电池正在被越来越多的电动汽车采用。锂离子蓄电池工作电压高、比能量大、体积小、寿命长;其中磷酸铁锂蓄电池以其化学性质稳定、安全性高而被特别看好。与电化学蓄电池相比,超级电容能量密度高,可快速充电,寿命长,因此可作为很好地辅助功率源;不过由于超级电容的比能量较低,因此难以单独用作电动汽车的储能装置。超高速飞轮是电动汽车的有效储能方式之一,其比能量和比功率较高、寿命长、可快速充电,因此不但可作为主能源的负载均衡装置,更可独立作为电动汽车的能量源,但必须处理好工作时的陀螺力矩。

辅助系统主要用于为电动汽车提供控制电源、动力转向、空气调节和充电控制等功能。

1.2.1 国外现状

面对能源和环境的压力,发展电动汽车,实现汽车动力系统的电气化,在国际上已经形成了广泛共识。国外著名的汽车制造公司都非常重视电动汽车的研究,发达国家也都制定了一些相关的政策和法规来推动电动汽车的发展^[6]。

世界各国普遍重视纯电动汽车的发展,各大汽车制造公司积极参与,在产品研发和示范运营等方面都取得了很大的进步。目前,国外纯电动汽车主要应用于小型乘用车、大型公交车及市政等特殊用途的车辆上。而由于受到蓄电池技术、充电等基础设施建设等方面的限制,纯电动汽车的大规模推广使用还为时尚早。世界著名的汽车制造公司都在不断推出新的传统汽车品牌的同时,投入大量的人力和物力,发展电动汽车,以抢占先机^[7]。大众公司在 2009 年法兰克福车展上展出了电动概念车 E-up,该车配备锂离子充电蓄电池,最大续驶里程可达 130km^[8]。雷诺公司的 Fluence 电动汽车同样配备锂离子充电蓄电池,续驶里程可达 160km,最大功率 70kW,最大扭矩高达 226N·m。日产公司已于 2009 年 8 月发布了首款电动汽车 Leaf,并计划 2010 年开始在美国和日本销售。Leaf 配备复合锂离子蓄电池,续驶里程 161km,所采用的交流电动机最大功率 80kW,最大扭矩 280N·m。印度 REVA 公司也曾计划于 2010 年生产电动汽车 NXP,该车可采用铅酸充电蓄电池或锂离子蓄电池,采用锂离子蓄电池时,最高车速达 104km/h,感应电动机最大输出功率 25kW,最大扭矩 92N·m,续驶里程可达 160km。此外,通用雪佛兰 Volt、丰田的 RAV-4 五座轿车、本田的 Plus 四座轿车、标志—雪铁龙 P106 四座轿车等都投入了商业化运行。美国、日本、法国、德国和以色列等国家都制定了纯电动汽车推广计划,电动汽车的充电系统建设也陆续启动。

国外的混合动力汽车已经逐渐成熟,产品相继进入市场,并成为各大汽车制造公司产业化的重点。目前,混合动力汽车的实用化程度不断提高,已经开始大规模产业化,且插电式混合动力汽车越来越受到人们的重视。混合动力汽车的发展和商品化,最有影响的成果来自丰田和本田两大汽车公司。本田公司于 1997 年 12 月推出首款批量生产的混合动力轿车 Prius,目前已经在全世界 20 多个国家上市销售。截至 2009 年 9 月,Prius 全球累计销售已突破 200 万辆,是混合动力汽车应用最成功的典范。Prius 目前已发展到第三代,为插电式设计,其纯电力续驶里程为 24.3km^[9]。继 Prius 之后,丰田还推出了 Estima 混合动

力汽车和搭载软混合动力系统的 Crown 轿车。本田公司于 1999 年在日本市场推出 Insight 混合动力汽车,目前该车发展到第二代,采用了本田特有的智能型集成发动机辅助动力传动系统(IMA),配备了一台 1.3L 排量 66kW 的可变气门正时和升程电子控制系统(VTEC)汽油发动机和一台 10kW 的电动机。此外,本田还有 Civic 和 Fusion 两款混合动力汽车,这些车型都有不错的销量。在美国,早在 1993 年,美国能源部就与三大汽车公司签订了联合开发混合动力汽车的合同。2004 年,通用又与戴姆勒—克莱斯勒公司宣布了双方在混合动力汽车研发方面合作的声明。目前,通用的混合动力车型有 Saturn Vue 和 Volt 两款。此外,福特也推出了 Escape 四驱混合动力汽车,大众、宝马、奔驰等公司也都有混合动力汽车。在应用于公交车方面,美国已在包括西雅图在内的 20 多个城市试验使用混合动力公交车,瑞典、法国、比利时、意大利和德国等国家计划在 9 个欧洲城市运行混合动力公交车线路。

燃料电池汽车的发展也是各大汽车公司竞相角逐的领域。虽然由于燃料电池技术和成本等方面的原因,造成燃料电池汽车在短期内还不能大规模推广,但各公司都投入了巨大的人力、物力进行攻关,并取得了重要进展。欧洲戴姆勒—克莱斯勒汽车公司早在 1994 年就开发了第一辆燃料电池汽车 Necar,此后 A 级 F-Cell 和 B 级 F-Cell 相继被推出。通过采用巴德拉的燃料电池技术,可使续航里程达到 400km。通用公司开发了 Hydrogen 3 燃料电池汽车,其燃料电池由 200 块串联在一体的单体电池组成,并由一个 68L 的氢气罐提供氢气。本田汽车制造公司开发的 Honda-Fcx,装用 86kW 的质子交换膜(PEM)燃料电池,经美国环境保护局和加州大气资源委员会鉴定为零排放的燃料电池汽车。其他各汽车公司生产的样车如大众 Hymotion、本田 FCHV-5、日产 X-Trail 等都具有满意的测试性能。

除了各大汽车制造公司的积极参与,部分国家的政府也从战略发展的高度提出了一些国家性计划,并通过各项优惠政策,加大对电动汽车的支持力度,推进电动汽车产业化的进程。美国总统奥巴马指出,到 2015 年要有 100 万辆的充电式混合动力汽车在美国使用,美国能源部也将设立 21 亿美元的政府资金支持电动汽车用蓄电池等部件的研发。对购买混合动力汽车的车主,可享受税收优惠。日本将电动汽车的发展作为“低碳革命”的主要内容,对购买包括电动汽车在内的低排放车辆实行“绿色税制”。德国政府在 2008 年就提出未来 10 年要在德国普及 100 万辆插电式混合动力电动汽车和纯电动汽车的计划。英国对纯电动汽车免缴消费税。其他如法国、意大利等国也都有相应的支持政策。各种国家计划和优惠政策的实施,必将加快国际电动汽车产业化的进程。

1.2.2 国内现状

我国的电动汽车虽然没有国外起步早,但政府高度重视,“八五”计划以来,电动汽车研究一直是国家重大项目,2001 年设立的“电动汽车重大科技专项”,确立了以纯电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车为“三纵”,以电动机驱动系统、整车控制系统和动力蓄电池为“三横”的研发框架^[10]。通过各方的紧密配合,我国的电动汽车研究取得了重大进展,发展势头强劲。

目前,我国的纯电动轿车和客车已经通过了国家质检中心的型式认证,“电动汽车重大科技专项”的实施,有力地促进了纯电动汽车的发展。北京新能源汽车有限公司已完成了包括 C30DB、M30RB、Q60FB 等多款纯电动乘用车的开发和量产,形成了 4 万辆新能源汽车生产能力。截至 2009 年年底,江淮公司旗下 30 辆纯电动安凯客车也交付给合肥公交系统使用,实现了纯电动公交车零的突破。

混合动力汽车方面,一汽、东风、长安、比亚迪和奇瑞等各大汽车公司都已完成样车开发。长安汽车公司基于起动机/发电机一体化(ISG)轻度混合方案,与重庆大学合作,成功进行了三轮样车的开发。2009 年,国内首款自主品牌混合动力汽车“长安杰勋”上市,该车配备 1.5L 排量发动机和 13kW 永磁同步无刷电动机,续驶里程超过 500km。在 2008 年奥运会期间,由奇瑞、长安、一汽、东风等多家企业投入了 100 辆混合动力汽车及 495 辆其他形式的电动汽车,实现了奥运史上最大规模的电动汽车示范运行。2008 年,30 辆北汽福田欧 V 混合动力客车在广州投入正式运营。这些示范运行的实施,为我国混合动力汽车的研发积累了宝贵的经验。

“电动汽车重大科技专项”中的燃料电池客车项目,由清华大学和北京客车总厂承担,上汽集团、同济大学和上海燃料电池汽车动力系统公司承担燃料电池轿车项目。目前,我国燃料电池汽车的研究平台已初步建立,整车操控性、安全性等均已取得较大提高^[11]。同时,依据自身技术,我国提出了 2010~2020 年争取燃料电池电动汽车批量生产的产业化目标。在北京奥运 20 辆氢燃料蓄电池轿车的基础上,确定了 2010 年上海世博会 100 辆燃料电池场内电动汽车和 70 辆燃料电池电动轿车的示范运行计划。同济大学研发的“超越三号”以 35MPa 的高压氢气为燃料,具有零排放、高效率和低噪声等优点。

我国政府历来非常重视电动汽车的研发,“十五”和“十一五”计划期间,都将电动汽车列入国家 863 重大科技专项计划,对电动汽车的发展提供了强有力的支持。在 2008 年的“首届中国绿色能源汽车发展高峰论坛”上,科技部又提出了

“十城千辆”的新能源汽车发展计划,并于2009年初由四部委启动了示范推广工作,支持在北京、上海、重庆等13个城市的公共服务领域示范推广电动汽车。2009年3月,国务院发布的《汽车产业调查和振兴规划》明确表示重点支持电动汽车零部件产业化和整车的示范推广工作。为加快电动汽车进入市场,在标准法规和产品管理体系上,我国已经制定了30多项相关标准,电动汽车也已经正式列入国家汽车新产品公告管理。

1.2.3 存在的问题

虽然电动汽车能够较好地解决汽车工业目前所面临的能源和环境污染问题,而且又是目前汽车工业研究的热点;但必须承认,电动汽车的大规模推广使用还有很长的一段路要走^[7,12]。电动汽车本身就是一个集汽车技术、电气技术、电子技术、信息技术和化学技术等综合学科,其发展必须依赖于这些学科的共同发展。现阶段电动汽车存在的主要问题是初始成本高和续驶里程不理想,因此,制约电动汽车推广使用的关键在于解决动力蓄电池问题。具体是指必须处理蓄电池能量密度低而使续驶里程短;生产工艺不成熟而使循环寿命低;体积和质量大而使车辆有效载荷小;价格高而使使用成本增加等问题。为此,各大汽车公司现在正在开发一些先进的蓄电池,如锂离子蓄电池、镍氢蓄电池、锌空气蓄电池和磷酸铁锂蓄电池等。为降低成本,人们正在努力改善电动汽车的各个子系统,如电动机、功率变换器、电子控制器、能量管理系统等,同时对电动汽车整车系统进行综合优化。此外,电动汽车的推广还必须加快基础设施的建设,电动汽车的产品可靠性和成熟性也有待于进一步提高。

1.3 电动汽车关键技术及其发展方向

1.3.1 电动汽车关键技术

现阶段,电动汽车相关研究主要集中在以下几个方面^[4,11]:

(1)系统总体机电一体化匹配设计及车身技术。电动汽车由于车身质量、空间和能源的矛盾,因此在设计时必须考虑采用轻质材料以减轻整车的质量,在充分利用空间的情况下尽可能增大车厢内部乘员空间,最大限度地降低空气阻力系数和滚动阻力系数,以减小行驶阻力;利用机电一体化匹配设计,使得整车结构参数达到最优化。

(2)高功率密度驱动电动机。驱动电动机是电动汽车的关键部件,电动机的

性能、效率直接影响电动汽车的性能,电动机的尺寸、质量也影响到车辆的整体效率。

(3)汽车用动力蓄电池的性能。汽车用动力蓄电池的主要性能指标包括比能量、能量密度、功率密度、循环充电次数及成本,另外对动力蓄电池的安全性、可靠性、充电方便性和维护性都有一定的要求。蓄电池的性能决定了电动汽车的性能指标。目前主要限制电动汽车发展的是车用动力蓄电池,其比能量、比功率、循环使用寿命低和成本高。

(4)电力驱动系统综合控制。实现电动汽车各种驱动方案的关键技术是驱动电动机的调速控制和行驶系统的控制。首先必须建立准确适用的数学模型,设计快速有效的控制算法,然后再开发以微处理器为核心的控制单元。控制技术和方法的研究也是当今世界各国攻关的热点。

(5)智能化的能量管理系统。能量管理系统完成采集车辆的各个子系统输入的传感器信息并执行车辆状态监控和诊断、充电方式控制和提供剩余能量显示等功能,智能化的能量管理系统研究与开发不仅要建立包括蓄电池在内的电动汽车的数学模型,而且要开发以微处理器为核心的电子控制单元。

1.3.2 电动汽车发展方向

目前在世界范围内,零排放电动汽车的技术已经逐渐成熟并开始商品化,一次充电续驶里程基本能满足市区交通的要求。大规模应用的主要问题是电动汽车的初始成本高、充电时间长、充电设备少和续驶里程不理想。纯电动汽车(BEV)可以实现零排放,但一次充电行程短,因此只适用于特定的场合,如社区交通、零排放管制的城市及娱乐场所的短途运输等。混合动力车(HEV)正在国内外形成新一轮的技术开发热点,它可以提高燃油经济性,但不能达到零排放,只能改善排放。在零排放电动汽车未成主流之前,可起到过渡性的作用,因此HEV是目前可以大批量生产、替代燃油汽车、减少废气排放的较现实的电动汽车。可以预见在未来10年,BEV和HEV将在其特定市场范围内扩大商业化生产规模并占有各自的份额,增长速度取决于它们的价格因素。而燃料电池车(FCEV)仍处于研发阶段,要想低成本批量生产仍有待时日。20年以后,FCEV会成为未来的主流技术,会有长远的市场前景,其商业化速度也会加快,因为只有它在续驶里程和性能方面能与燃油车相媲美^[11,13,14]。

总体来说,我国电动汽车历经5年的研究开发,实现了发达国家多年的技术进步过程,特别是FCEV技术与国外先进技术比较接近;BEV在某些方面具有一定领先水平;但HEV方面,我国虽然多方开展了研发工作,但与国外先进技

术特别是日本水平相比仍有很大差距。FCEV 在我国虽有很好的应用前景,但由于价格和技术上的原因,近 20 年内不可能进入规模市场。随着蓄电池(特别是锂铁蓄电池)、电动机、控制器技术的发展,BEV 将有广阔的发展前景,其中,适合我国国情的微型电动汽车将会率先发展。未来 10 年,HEV 将会迅速发展,并占有一定的市场规模。充电式(Plug-in Hybrid)特别是利用夜间电力充电的混合动力电动汽车(PHEV)更有发展前途。

经过多年的研究,电动汽车技术已经取得了很多进展,如果要完全取代燃油汽车,还需要在以下 4 个方面有所突破:

- (1)提高续驶里程;
- (2)降低电动汽车价格;
- (3)提高蓄电池的使用寿命;
- (4)发展包括充电设施在内的基础设施。

在这些问题中,续驶里程短和初始成本高是影响电动汽车普及的最关键因素。为解决续驶里程短这个问题,关键是开发高性能的动力蓄电池,但动力蓄电池技术短期内难以取得突破性进展,而再生制动能量回收技术在不提高汽车初始成本的前提下,作为提高电动汽车续驶里程的有效手段,已成为电动汽车研究领域的一个突出亮点。

1.4 再生制动概述

再生制动是电动汽车最重要的特性之一。再生制动是指在车辆减速或制动时,将其中一部分动能转化为其他形式能量储存起来以备驱动时使用的过程。通常,由于电动汽车的电动机可被控制作为发电机运行。因此,电动汽车可以方便的实现能量回收。

1.4.1 传统车辆能量回收技术

传统汽车使用的制动装置主要形式有机械式、气压式、液压式、气液混合式,其工作原理基本相同,都是利用制动装置把汽车行驶的动能通过机械摩擦方式转换为热能散发掉,以达到使汽车制动或减速的目的。这些制动装置工作时都存在以下缺点:

- (1)制动或减速过程中不能将汽车的动能回收,汽车的能量利用率低;
- (2)当汽车长时间频繁制动,制动器容易出现热衰退现象,引起制动效能降低;

(3)由于存在机械磨损,制动器的制动蹄片使用寿命缩短,汽车经济性能降低。

汽车如采用制动能量再生技术,有助于提高汽车能源利用率,减轻制动器热负荷,减少磨损,提高汽车行驶安全性和使用经济性^[15-27]。

早在 20 世纪 70 年代,美国威斯康星大学 Norman H. Beachley 等学者就开展了汽车制动能量再生系统的研究。经多年的研究,他们的研究小组研制出飞轮式、液压式和蓄电池式等 3 种储能形式的制动能量再生系统^[15]。1979 年,丹麦 P. Buchwald 和 G. Christensen 等比较详细地研究了制动能量回收理论,同时针对福特公司 EscortVan 车研制出液压储能的制动能量再生系统,节省燃油可达 30%。瑞典沃尔沃公司 1984 年进行了制动能量回收实验,在总质量为 16t 的城市客车上装了具有双动无级变速及液压容积式传动的飞轮式蓄能器。飞轮总质量 328kg,转速 1000r/min,在发动机功率 105kW 情况下,该装置可储能 225kW·h。在蓄能器工作的情况下,此客车最高车速为 80km/h,最大加速度 1.6m/s^2 ,节省燃料 15%~20.5%,而制造成本仅增加 20%~25%^[16]。沃尔沃公司从 1985 年起已有 20 多辆客车在伦敦、斯德哥尔摩和哥本哈根进行了实验。这些客车上装有 154kW 柴油机和容积式液力传动装置,即使在柴油机不工作及在蓄电池完全放电情况下,蓄能器所储存的能量也足够使客车加速到 30km/h 的速度行驶。装有该种蓄能器的公共汽车,可节省燃料 28%~30%,减少有害气体排放 50%。1986 年英国列依安特公司研制出一种与制动能量回收联动工作的无级变速传动装置,可节油 30%~40%,其中无级传动装置可节油 22%,能量回收装置可节油 8%~18%。1987 年,日本 Mitsubishi 公司的技术人员开发了一种液压储能系统,并在实际公交汽车中证实此种系统可节油 30%。1990~1991 年,前苏联专家根据无污染高速运输科研计划,对各种制动能量再生系统的前景进行了研究和比较,并为装有飞轮式制动能量再生系统的客车制定了数学模型,用电子计算机对 NUA3-5256 型城市客车,通过典型的城市循环实验,对制动能量再生系统工作性能进行了计算研究。美国格埃列特公司设计了总质量为 13t 带有制动能量再生系统的无轨电车。在线路停电时,飞轮蓄能器还能保证电车行驶 5.6~8.3km;其最高车速可达 70km/h,最大加速度达 1.6m/s^2 。综上所述,近 20~25 年,车辆能量回收的实现集中在变量泵/马达和液压一气压联合装置方面,这种装置适用于频繁起动、制动的城市公共汽车,而且公共汽车空间大,有安装能量回收装置的空间;但其成本高,约占汽车总成本的 10%~15%^[17-27]。

在国内,原吉林工业大学在 20 世纪 80 年代中期就开展了高速飞轮储能复

合传动系统的研究。1996 年原吉林工业大学和哈尔滨工业大学利用二次调节静液传动技术,设计一种液压储能的传动系统,试验表明比常规液压传动能量转化效率提高将近一倍。1997 年,青岛大学和中国重型汽车集团公司研制的 ZK141A 公共汽车用飞轮蓄能器与液压机械无级变速器,通过仿真和台架试验证明燃油消耗可节约 35.1%。1999 年,湛江海洋大学以 EQ140 型东风 5t 自卸载货车为实验研究对象,设计制造了一套车辆制动能量回收实验装置,并对其进行了初步的实验,实验结果证明能量回收式车辆制动装置能有效提高车辆的制动效率,增加车辆行驶时的安全性;该装置能根据车辆工作的不同状况,自动完成吸收或释放车辆能量的工作过程。该装置工作时发热少,制动过程平稳,工作可靠性高。2002 年北京理工大学设计了以皮囊式液压蓄能器为能量储存装置、轴向柱塞式变量泵为能量转化元件的系统方案,建立起一套车辆制动能量回收系统的台架试验系统,对能量回收的原理和方法以及配套的控制方法进行了比较深入的研究。

综上所述,汽车能量回收技术对汽车产业具有积极的意义,备受国内外专家学者的关注。而对电动汽车而言,电动机的再生制动使其在不增加辅助装置的前提下,可实现制动能量回收,相比传统内燃机汽车而言更有优势,而其研究目前正处于起步阶段,有必要对其进行深入研究。

1.4.2 再生制动的潜力分析

传统汽车制动时,通常是利用摩擦制动器对车轮或传动轴产生一个制动转矩,并将产生的能量以热能的形式散失掉。事实上,汽车通过制动消耗的能量占到驱动能量的很大一部分。如果能将原本要以热能形式散失的能量进行回收,无疑将极大地提高汽车的运行经济性,而且也可以减小对制动器摩擦材料的消耗,提高安全性。

当汽车在平直的道路上行驶时,其功率 P 可以表示为^[28]:

$$P = \left(mgf + \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 + m \delta \frac{dv}{dt} \right) v \quad (1-1)$$

式中: m ——汽车总质量;

g ——重力加速度;

f ——车辆滚动阻力系数;

ρ ——空气密度;

C_d ——空气阻力系数;

A ——汽车行驶时的迎风面积；

v ——行驶车速；

δ ——汽车旋转部件旋转质量换算系数, $\delta > 1$ 。

$P \geq 0$ 时为驱动功率, $P < 0$ 时为制动功率。

总能量 E 需求为:

$$E = \int P dt \quad (1-2)$$

当 $E \geq 0$ 时为汽车所需要的是驱动能量, 并用 E_w 表示。若 η_1 是整个动力传动系统的效率, 则蓄电池需要消耗的能量 E_1 为:

$$E_1 = \frac{E_w}{\eta_1} \quad (1-3)$$

当 $E_1 < 0$ 时为汽车制动所能回收的能量, 并用 E_r 表示。若 η_2 是整个动力传动系统的回收效率, 则蓄电池的回收能量 E_2 为:

$$E_2 = -E_r \eta_2 \quad (1-4)$$

因此, $\frac{E_2}{E_1}$ 就可以表示能量回收的比例。

给定一组汽车参数: $m = 1\,540\text{kg}$; $f = 0.004\,8$; $C_d = 0.19$; $A = 1.8\text{m}^2$; $\delta = 1.05$; $\eta_1 = 0.75$; $\eta_2 = 0.65$ 。分别对几种典型运行循环的回收情况进行了对比, 其结果如表 1-1 所示。表中的运行循环包括中国城市乘用车普通道路运行循环 (CCDC)、欧洲经济委员会市区循环 (ECE15)、新欧洲运行循环 (NEDC)、日本 1015 循环、城区测功机运行循环 (UDDS) 和纽约城市运行循环 (NYCC)。其中 CCDC 的速度特性如图 1-1 所示。

典型运行循环能量回收对比

表 1-1

运行循环	CCDC	ECE15	NEDC	1015	UDDS	NYCC
$E_1 (\text{kJ})$	3 238.8	432.01	4 639.2	2 407.3	6 001.3	1 535.1
$E_2 (\text{kJ})$	959.65	129.41	1 081.6	401.07	1 714.2	501.04
$E_2/E_1 (\%)$	29.63	29.95	23.31	16.66	28.56	32.64

由表 1-1 可见, 采用再生制动后, 在各种循环上, 有望获得较高的能量回收率。

1.4.3 再生制动的影响因素

对于具有再生制动的汽车而言, 使其减速停车的力主要包括滚动阻力、空气阻力、坡道阻力、电动机制动力和制动器摩擦制动力。既然通过再生制动回收的