

“十二五”国家重点出版物出版规划项目



中国汽车工程学会

汽车工程图书出版专家委员会 推荐出版

新能源汽车关键技术研究丛书

地面车辆混合动力驱动系统 建模与控制优化

MODELING AND CONTROL OPTIMIZATION FOR
GROUND VEHICLE HYBRID PROPULSION SYSTEM

邹 渊 胡晓松 著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

“十二五”国家重点出版物出版规划项目



中国汽车工程学会

汽车工程图书出版专家委员会 推荐出版

新能源汽车关键技术研究丛书

地面车辆混合驱动系统 建模与控制优化

MODELING AND CONTROL OPTIMIZATION FOR
GROUND VEHICLE HYBRID PROPULSION SYSTEM

邹渊 胡晓松 著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书围绕混合驱动系统构型、参数匹配与控制优化设计展开,阐述了地面车辆混合驱动系统集成与控制优化设计的基础理论、技术途径和应用方法。第1章分析了混合驱动系统及其控制优化技术。第2章分析混合驱动系统构型及其特征。第3章提出混合驱动系统建模与系统控制的技术挑战,归纳关键部件模型以及快速控制工程技术。第4章分析了锂离子动力电池建模与系统辨识技术。第5章分析了混合驱动系统最优控制及系统优化的理论和方法。第6章分析混合驱动系统非线性规划的优化控制理论和方法。第5章和第6章都结合实际应用开展深入剖析,以加深读者理解。第7章和第8章分别针对轮式和履带车辆给出了混合驱动系统建模、控制优化以及快速控制工程的实例。

版权专有 侵权必究

· 图书在版编目(CIP)数据

地面车辆混合驱动系统建模与控制优化/邹渊,胡晓松著. —北京:北京理工大学出版社,2015.1

ISBN 978-7-5682-0523-8

I. ①地… II. ①邹… ②胡… III. ①混合动力汽车-动力系统-研究
IV. ①U469.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 082078 号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/保定市中华美凯印刷有限公司

开 本/710毫米×1000毫米 1/16

印 张/18

彩 插/6

字 数/300千字

版 次/2015年1月第1版 2015年1月第1次印刷

定 价/68.00元

责任编辑/林 杰

封 雪

文案编辑/杜春英

责任校对/周瑞红

责任印制/王美丽

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

新能源汽车已被国家列入七大战略新兴产业之一和《中国制造 2025》十大重点优先发展的领域之一。习近平总书记指出,“发展新能源汽车是我国由汽车大国迈向汽车强国的必由之路”。国家《节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)》指出,汽车产业是国民经济的重要支柱产业,在国民经济和社会发展中发挥着重要作用。随着我国经济持续快速发展和城镇化进程加速推进,今后较长一段时期汽车需求量仍将保持增长势头,由此带来的能源紧张和环境污染问题将更加突出。加快培育和发展节能汽车与新能源汽车,既是有效缓解能源和环境压力,推动汽车产业可持续发展的紧迫任务,也是加快汽车产业转型升级、培育新的经济增长点和国际竞争优势的战略举措。

结合国际汽车产业发展趋势来看,大力发展以纯电动汽车、插电式混合动力汽车、燃料电池汽车等为代表的新能源汽车,不仅有助于解决我国汽车消费面临的能源、环保和噪声污染等问题,也是我国汽车产业实现由大变强的重要途径之一。在国家“863计划”等科技重大项目和节能与新能源汽车示范推广等扶持政策的大力支持和推动下,我国汽车企业纷纷加大新能源汽车产业化力度,新能源汽车关键零部件及相关技术取得重大进步,动力电池发展环境持续优化,驱动电机技术稳步提升,整车控制技术研发布应用水平显著提升。

目前,我国新能源汽车研发体系已初步形成,2015年新能源汽车产销量跃居世界第一。自主研发开发出混合动力、插电式混合动力、纯电动和燃料电池汽车等各类整车产品,初步掌握了电动汽车整车设计、系统集成等关键技术,基本形成混合动力、纯电动和燃料电池新能源汽车动力系统技术平台和新能源汽车技术标准体系框架和测试评价能力,建立了新能源汽车的动力技术平台,形成了比较完整的关键零部件体系;自主开发的纯电动汽车在整车动力系统匹配与集成设计、整车控制方面,取得了突破性进展,接近国际先进水平。

本丛书汇集了近年来我国新能源汽车研究掌握的新技术、新理论等先进成果,充分体现了我国在新能源汽车领域所取得的卓越成绩。北京理工大学、同济大学、吉林大学、华南理工大学、北京信息科技大学、中国汽车技术研究中心、长安汽车工程研究院等国内从事相关领域研究的权威单位共同组建了本丛书的作者

队伍,期望以此为新能源汽车领域专家和学者搭建学术交流平台,对提升我国新能源汽车的研发水平起到促进作用,也是出版界助力提升我国新能源汽车关键技术的重要成果。

本丛书以新能源汽车领域的研发与设计为主线,以纯电动汽车、插电式混合动力汽车以及燃料电池汽车为对象,围绕新能源汽车电池、电机、电控等关键技术的设计、仿真、优化和工程应用开展研究,汇集了我国近年来在纯电动车辆技术、混合动力驱动系统控制、混合动力耦合系统构型与装置、电动汽车整车控制优化、新能源车辆轻量化、燃料电池汽车建模等领域取得的重要理论及技术成果。其学术价值得到了国际专家学者的高度认可,其中《地面车辆混合驱动系统建模与控制优化》《混合动力耦合系统构型与耦合装置分析设计方法》已与德国 Springer 签署版权输出协议。

本丛书入选“十二五”国家重点出版物出版规划项目,其出版得到了中国汽车工程学会(SAE-CHINA)汽车工程图书出版专家委员会以及作者单位的领导、专家及工作人员的关心和大力支持,在此深表感谢!此外,书中难免存在不当之处,敬请读者批评指正!

北京理工大学副校长

孙逢春

在车辆驱动系统电气化的发展背景下，混合驱动系统已经成为地面车辆一类重要的机电装备。该类机电装备构型复杂，不同学科和动态过程耦合交叉，系统动态特性与控制密切相关，如何实现最优的系统集成与控制是混合驱动系统面临的重要理论和技术挑战之一。究其理论实质是确保综合性能最优的系统与控制集成设计，也即常说的系统动态匹配与优化控制问题。

本书主要围绕上述问题展开。侧重分析了地面车辆混合驱动系统集成与控制的现状、驱动系统构型以及混合驱动系统建模与仿真技术，建模方面重点阐述了锂离子电池参数辨识和最优状态估计技术。阐述了混合驱动系统最优控制和系统优化的基础理论和工程方法。阐述了以伪谱法和凸优化为代表的混合驱动系统非线性规划系统优化控制的基础理论和工程方法。最终给出了相关理论和方法在轮式车辆和履带车辆混合驱动系统建模与控制应用实例。全书采用基于模型的设计（MBD，Model-Based Design）思路，把混合驱动系统动态特性与控制理论密切结合，注重先进控制技术在混合驱动系统设计的深入应用，较为系统的阐述了作者在混合驱动系统集成与控制设计相关理论和方法及其工程技术实践，具有较高的理论意义和工程应用价值。

本书第一作者邹渊博士多年来一直从事混合驱动系统集成与控制的相关研究工作，其所在的科研团队对轮式或履带式车辆混合驱动系统均有深入研究。令人欣喜的是，作为机械工程的青年学者，能够把先进控制理论和方法与混合驱动系统匹配与性能调控密切结合，持续在混合驱动系统集成与控制领域刻苦钻研，为车辆混合驱动系统集成与控制设计引入了新的思路及技术途径，相信会对我国混合驱动系统集成与控制的相关理论和技术发展产生积极的影响，推动混合驱动系统集成与控制技术的发展。

本书提供了丰富的工程应用实例，基础理论与工程应用密切结合是本书的特点。该特点使得本书既适合于高等院校的师生阅读，也适合于研究及企业相关研发人员阅读。我乐于向从事混合驱动系统研发工作的相关师生以及科研人员推荐本书。

中国汽车工程学会理事长

Track-laying vehicles, also known as tracked vehicles, are commonly used in off-road driving, when the soil can be soft and uneven. Because of their unique mechanical designs, their propulsion and steering power requirements are intertwined. This unique attribute is a major reason transmissions for tracked vehicles are different from those designed for wheeled vehicles—torques and speeds to the left and right tracks must be independently controlled for straight driving and turning. An important future development trend of tracked vehicles is their hybridization, for better fuel economy and performance. However, it is clear that hybrid powertrains designed for wheeled vehicles cannot be readily applied to tracked vehicles. While some publications exist in the literature, they are hard to find partly because of the fact tracked vehicles are heavily used in military applications. This inconvenient truth unfortunately impacted the development of hybrid powertrains for agriculture, construction and mining tracked vehicles.

Both authors of this book are faculty members of the Beijing Institute of Technology with experience in the design of traditional tracked vehicles. Both of them also have studied at the University of Michigan, as visiting scholars in my laboratory, working on the modeling, analysis and optimization of hybrid wheeled vehicles and battery systems. A few years after they return to their home institute, I am thrilled to find that they have co-authored this book, applying model-based methods to the design and analysis of hybrid tracked vehicles. They presented and discussed several existing series and power-split hybrid powertrains. In addition, the model-based methods described in this book draw from the rich literature of hybrid wheeled vehicles. Many of the presented methods can be applied to the design and analysis of hybrid tracked vehicles provided that proper models are available.

Millions of hybrid wheeled vehicles have been sold world-wide. They are living evidence that hybrid technologies are mature and can provide unprecedented fuel saving performance. This book represents an important effort in spreading the knowledge to tracked vehicles. I

found it well organized and a joy to read. I hope the readers enjoy it as much as I did.

W. B.

Huei Peng

Professor, Department of Mechanical Engineering

Director, US-China Clean Energy Research Center—Clean Vehicle Consortium

University of Michigan

系统集成与控制是地面车辆驱动系统顶层设计技术，其内涵为通过驱动系的匹配与控制获得系统层面的最优性能。混合驱动系由于构型、参数配置与工作模式灵活多变，工作过程对控制极度依赖，系统匹配与控制对驱动系性能影响更为显著。本著作围绕混合驱动系构型、参数匹配与控制优化设计展开，立足于著者在该领域的理论和研究实践，着眼于系统动力学基本原理与视角，引入基于模型的设计（MBD，Model-Based Design）理念，从模型表征和系统匹配及控制入手，阐述了地面车辆混合驱动系统集成与控制优化设计的基础理论、技术途径和应用方法。

本书特点一是模型与控制设计并重，模型重在揭示驱动系的动静态特性而控制重在实现最优的利用和调控；二是理论和技术实践并重，包括系统建模、最优控制和系统优化的基础理论和技术实现与工程应用方法。力求让读者从系统层面把握地面车辆混合驱动系统集成与控制设计的理论与技术实质。第1章对地面车辆混合驱动系发展、系统控制及优化技术进行综合分析。第2章分析地面车辆混合驱动系构型及其特征。第3章提出地面车辆混合系统建模与系统控制的技术挑战，并归纳关键部件模型以及快速控制工程技术。第4章分析了锂离子动力电池建模与系统辨识技术。第5章分析了混合驱动系最优控制及系统优化的理论和方法。第6章分析地面车辆混合驱动系非线性规划的优化控制理论和方法。第5章和第6章都接合实际应用开展深入剖析，以加深读者理解。第7章和第8章分别针对轮式和履带车辆给出了混合驱动系建模、控制优化以及快速控制工程的实例。

拙文能够成稿完全受惠于北京理工大学车辆工程学科多位教授的指导和培养。感谢孙逢春教授在作者求学和工作中给予的指导和帮助，孙老师是作者博士期间的导师，也是作者所在北京理工大学电动车辆国家工程实验室和国防科技创新团队“电驱动力理论与关键技术”的学术带头人，本书完成得益于他的大力支持与帮助。感谢项昌乐教授在作者工作和学术上的指导与鼓励。感谢作者所在电动车辆国家工程实验室以及车辆工程学科同事们给予的包容、帮助和砥砺，感谢张承宁教授和林程教授的支持与帮助。拙文成稿也得益于作者在密歇根大学安娜堡校区和瑞士联邦苏黎世理工大学的合作研究，感谢 Huei Peng 教授和 Lino Guzzella 教授在学术上的合作与讨论。本书内容大多来自作者及其所在团

队的科研实践。其中胡晓松博士撰写 4.1 至 4.5、4.7.1 和 4.7.2 以及 6.4 和 6.5 凸优化部分，特此致谢。

感谢国家自然科学基金（50905015 和 51375044）、国防基础科研重点项目（B2220132010）和高等学校创新引智计划（B12022）的资助。感谢研究生刘腾、高玮、邵冰、孙石、田野、刘德兴和魏守洋协助整理并校对部分书稿。感谢北京理工大学出版社的支持。

岳拴云女士在写作过程中给予了充分的理解与支持，使作者能集中精力完成了写作，谨致以深深的感谢。

希望本书的出版能为混合驱动系统集成与控制技术的发展贡献力量。囿于著者水平以及科学技术的快速发展，书中观点和内容难免有不当之处，恳请批评指正。

邹渊

1.1 地面车辆混合驱动系统现状

1.1.1 地面车辆动力驱动系统发展历史

在人类历史发展的长河中，地面车辆一直作为一类主要的交通工具来实现自由移动的梦想，其中地面车辆动力驱动系统则占据着重要地位，其作用是把车载能量源转化为动力，并经过功率适应性调控传递到驱动轮或履带上以实现车辆正常行驶。

纵观地面车辆的发展历史，其每次质量上大的飞跃都与动力驱动系统的技术革新和发展密切相关。在 18 世纪以前一段较长的历史时期，地面车辆主要依靠牲畜作为动力，其动力驱动系统较为简单，牵引功率通过缆绳传递到车体上，通过赶车人对牲畜的驯服来实现驱动功率的控制。图 1-1 是中国秦代兵马俑中出现的两乘马车。

18—19 世纪是地面车辆动力驱动系统技术的萌芽和发展期，其发展与工业革命密切相关，蒸汽机、电动机和内燃机等动力转化装置技术和产品为地面车辆动力驱动系统注入新活力。有记载表明，最早的地面车辆动力驱动系统的雏形可能发明于中国清朝康熙年间，传教士南怀仁制作了蒸汽机小车，该发明基于蒸汽机动力系统^[1]。此后，蒸汽机动力系统还被广泛地应用在汽车、铁路和船舶上^[2]。19 世纪末，在巴黎举行的国际电气展览（International Exposition of Electricity）上出现了电力驱动的汽车，此后到 20 世纪初，电动汽车被广泛应用在城市公共交通和个人交通系统中。几乎在同一



图 1-1 中国秦代两乘马车兵马俑

时期，以内燃机为动力的汽车由德国人卡尔·本茨发明出来。在 19 世纪末一度形成了电动汽车和内燃机汽车并存的局面。到 20 世纪初，一方面由于内燃机技术的进步，如起动机应用，另一方面由于加油便利且续驶里程远大于电动汽车，以内燃机为动力的汽车逐渐成为主流。美国福特车型的大量生产最终使得以内燃机为动力的汽车成为历史的选择，并催生了汽车工业百年发展的历程和革新，对人类社会和生活产生了巨大的影响。

20 世纪末至今，全球能源危机以及环境保护的压力使得人们重新审视以石化燃料为主体的内燃机汽车工业的弊病。内燃机汽车庞大的产量和使用既消耗大量的石化自然资源，同时也产生了大量有害排放物，污染空气且引发了温室效应，威胁着地球生态平衡与安全。清洁汽车技术日益被重视和研究，如各类替代燃料车辆，特别是电动汽车又一次成为世界研究的热点。

目前，电动车辆的定义逐渐明确，一般相对于以内燃机为动力的常规车辆而言，多指在车辆动力驱动系统驱动功率流中含有电功率的车辆。电动汽车一般包括纯电动汽车（BEV, Battery-powered Electric Vehicles）、混合动力汽车（HEV, Hybrid Electric Vehicles）和燃料电池汽车（FEV, Fuel Cell Electric Vehicles）。也有以是否具备接入电网充电的能力来分类的，类别包括可充电电动汽车、燃料电池汽车和混合动力汽车，可充电电动汽车又包括纯电动汽车和插电式混合动力汽车（PHEV, Plug-in Hybrid Electric Vehicles）两类。其他路面车辆的分类一般借鉴电动汽车分类的提法。由于当前车载电能存储技术及产品的能量密度、功率密度和使用成本无法达到内燃机车辆的水平，因此纯电动汽车和燃料电池汽车多用在公共交通和政府主导的示范项目中，用以降低人口密度较大的城区的排放污染，并引领汽车工业向绿色环保的方向发展。

混合动力汽车由于兼具内燃机动力驱动系统和电气化驱动系统的特点，具备充分发挥两类驱动系统的优势的潜力，是极具市场竞争力的技术。然而，

电气化驱动的引入使得系统复杂度增加,特别是由于同时具有多个动力源,如何实现功率的高效利用与传统的内燃机车辆不尽相同,这是地面车辆混合驱动系统的关键技术和难点,也是本书的核心主题。

1.1.2 地面车辆混合驱动系统现状及发展

地面车辆混合驱动系统的发展缘由既来自节能与环保的要求,如提高动力驱动效率可以增加续驶里程而导致单位里程的油耗与排放降低,也来自混合驱动系统为提升车辆总体性能提供了更大的发展空间,如电驱动系统的反应远比内燃机系统迅速和灵敏,电缆传递功率比机械传动更具灵活性。此外市场竞争中用户更不会接受车辆综合性价比的丝毫降低,而囿于当前电驱动系统在车载电储能密度和能量补充上无法达到内燃机的储能水平和能量补充的便利性,综合内燃机和电动机的混合动力驱动系统可以兼具两类动力驱动系统的优势,可以提高系统综合性能且更加节能与环保。当前地面车辆混合动力驱动系统已经逐步应用在多种类型的轮式车辆上。表 1-1 为截止到 2014 年,美国市场各类混合动力乘用车的销售情况^[3]。

部分装备混合动力驱动系统的乘用车已经实现了规模可观的市场销售,如丰田公司的普锐斯(Prius)轿车目前全球销量已经超过 500 万辆^[4]。该车采用混联式混合动力驱动系统,依靠行星轮系使内燃机、发电机和驱动电动机实现动力复合来驱动车辆,该动力复合方式获得了更大的系统优化空间和性能设计空间,使该系统成为迄今为止业界公认的成功混合动力驱动系统之一,其结构如图 1-2 所示。美国通用汽车公司推出了沃蓝达(Volt)双模式混合动力驱动系统,该系统采用行星排和多个离合器实现发动机和两个电动机的动力耦合,依靠离合器和制动器配合实现工作模式的切换。与普锐斯系统不同的是,该系统依托多个离合器实现双工作模式。该动力耦合模式体现了一类模块化的思想,依据该思路,通用汽车公司使用行星轮系提出了行星排、多模混合动力驱动系统^[5]。

在混合动力乘用车中,福特汽车研制的前后轴混联混合动力系统值得重视,相比于丰田普锐斯和通用沃蓝达系统,该混合动力驱动系统结构具有一定的特色,即采用前后轴同时驱动的方式,内燃机和电动机 1 动力耦合后用于驱动前轴,而后轴通过电动机 2 来驱动。这种结构体现了动力驱动系统与车身驱动构型的一体化设计趋势。

混合动力驱动系统也广泛应用在商用车领域,各大商用车生产商纷纷推出了装备混合动力驱动系统的客车与卡车。美国举办了高效率卡车混合动力展览(HTUF),以此来推动商用车混合动力驱动系统的技术发展和市场应用。伊顿公司推出了前置并联式的混合动力驱动系统,发动机和电动机在自

表 1-1 美国市场各类混合动力乘用车销售情况 (截止到 2014 年)

1999—2014 年混合动力车辆在美国的销售量																	
车辆类型	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	总 计
	1999—2014																
Toyota Prius														147 503	145 172	122 776	1 498 616
Prius c		5 562	15 556	20 119	24 600	53 991	107 897	106 971	181 221	158 574	139 682	140 928	136 463	35 733	41 979	40 570	118 282
Prius v														40 669	34 989	30 762	114 819
														223 905	222 140	274 500	1 731 717
Toyota Camry								31 341	54 477	46 272	22 887	14 587	9 241	45 656	44 448	39 515	308 424
Honda Civic				13 700	21 800	25 571	25 864	31 251	32 575	31 297	15 119	7 336	4 703	7 156	7 719	5 070	229 161
Ford Fusion											15 554	20 816	11 286	14 100	37 270	35 405	134 431
Lincoln MKZ											0	1 192	5 739	6 067	7 469	10 033	30 500
Mercury Milan											1 468	1 416	0	0	0	0	2 884
											17 022	23 424	17 025	20 167	44 739	45 438	167 815
Lexus RX400 h/450 h							20 674	20 161	17 291	15 200	14 464	15 119	10 723	12 223	11 307	9 351	146 513
Ford Escape						2 993	18 797	20 149	21 386	17 173	14 787	11 182	10 089	1 441	0	0	117 997
Mercury Mariner						0	998	3 174	3 722	2 329	1 693	890	0	0	0	0	12 806
						2 993	19 795	23 323	25 108	19 502	16 480	12 072	10 089	1 441	0	0	130 803
Toyota Highlander							17 989	31 485	22 052	19 441	11 086	7 456	4 549	5 291	5 070	3 621	128 040
Hyundai Sonata														20 754	21 761	21 052	83 240
Kia Optima													19 672	10 084	13 919	13 776	37 779
														30 838	35 680	34 828	121 019
Honda Insight	17	3 788	4 726	2 216	1 200	583	666	722	0	0	20 572	20 962	15 549	5 846	4 802	3 965	85 614
Lexus CT 200 h													14 381	17 671	15 071	17 673	64 796
Ford C-Max Hybrid														10 935	28 056	19 162	58 153
Honda Accord						1 061	16 826	5 598	3 405	196	0	0	0	0	979	13 977	42 042
Chevrolet Malibu										2 093	4 162	405	24	16 664	13 779	1 018	38 145

续表

1999—2014 年混合动力车辆在美国的销售量																	
车辆类型	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	总 计 1999—2014
Nissan Altima									8 388	8 819	9 357	6 710	3 236	103	0	0	36 613
Lexus ES 300 h														7 041	16 562	14 837	38 440
Toyota Avalon														747	16 468	17 048	34 263
Honda CR-Z											5 249	11 330	4 192	4 550	3 562	28 883	
Buick LaCrosse eAssist												1 801	12 010	7 133	7 353	28 297	
Lexus HS 250 h											6 699	10 663	2 864	649	5	0	20 880
Chevy Tahoe										3 745	3 300	1 426	519	533	376	65	9 964
GMC Yukon										1 610	1 933	1 221	598	560	288	31	6 241
										5 355	5 233	2 647	1 117	1 093	664	96	16 205
Saturn Vue									4 403	2 920	2 656	50	0	0	0	0	10 029
Subaru XV Crosstrek Hybrid																7 926	7 926
Volkswagen Jetta Hybrid														162	5 655	1 939	7 756
Lexus GS 450 h								1 784	1 645	678	469	305	282	607	522	183	6 475
Chevrolet Silverado											1 598	2 393	1 165	469	104		5 729
GMC Sierra											0	0	0	471	65		536
														940	169	30	6 295
Cadillac Escalade										801	1 958	1 210	819	708	372	41	5 909
Buick Regal eAssist													123	2 654	2 893	662	6 332
Porsche Cayenne												206	1 571	1 180	615	650	4 222
Infiniti Q50															307	3 456	3 763

1999—2014年混合动力车辆在美国的销售量

1999—2014 年混合动力车辆在美国的销售量																	
车辆类型	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	总 计
																	1999—2014
Nissan Pathfinder Hybrid															334	2 480	2 814
Acura ILX														972	1 461	379	2 812
Lexus LS600hL									937	907	258	129	84	54	115	65	2 549
Infiniti QX60 Hybrid															676	1 678	2 354
Infiniti M35h/Q70													378	691	475	180	1 724
Saturn Aura									772	285	527	54	0	0	0	0	1 638
BMW ActiveHybrid 3														402	905	151	1 458
Audi Q5 Hybrid														270	854	283	1 407
Mercedes-Benz S400												801	309	121	64	10	1 305
Mazda Tribute												570	484	90	0	0	1 144
BMW ActiveHybrid 5														404	520	112	1 036
Volkswagen Touareg Hybrid													390	250	118	30	788
Porsche Panamera S													52	570	164	0	786
BMW ActiveHybrid 7												102	338	231	31	45	747
Mercedes-Benz ML450												627	1	20	11	20	679
Chevrolet Impala eAssist															56	565	621
Mercedes-Benz E400 Hybrid															282	158	440
Lexus NX Hybrid																354	354
BMW ActiveHybrid X6																0	252
Acura RLX Hybrid												205	43	4	0		133
Chrysler Aspen										46	33	0	0	0	0	0	79
Dodge Durango											9	0	0	0	0	0	9

动机械变速器 (AMT) 前完成动力耦合, 依靠单向离合器实现发动机动力的接通和切断, 并形成了包括控制系统在内的整套解决方案。该方案中, 电动机也可以工作在发电状态下以此来实现制动能量回馈或车载发电。该方案的特点是内燃机动力输出轴与电动机转子同轴布置, 较为紧凑。

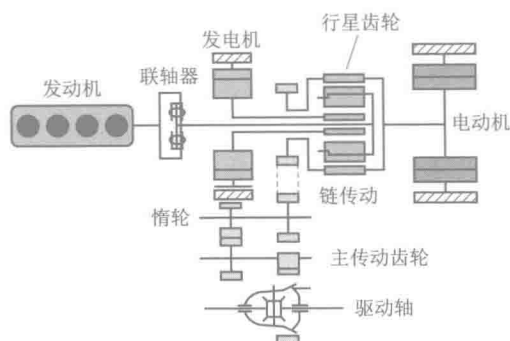


图 1-2 日本丰田公司普锐斯混合动力驱动系统

Oshkosh 公司为美国军方研制了柴油发动机和超级电容混合供电的、串联式混合动力和多轮驱动混合动力驱动系统 (Propulse 混合动力系统)。该驱动系统中, 柴油发动机-发电机组和超级电容可以实现混合供电, 由多台电动机分别单独驱动车轮。装备该混合动力驱动系统的卡车还可以兼作移动电源, 该车燃油经济性提高了约 20%。值得一提的是, 该电动机驱动采用了交流-交流变频器控制技术, 直接对交流电进行调制与控制, 提高了系统转化效率。

除上述轮式车辆外, 在节能减排和车辆驱动系统电气化发展的背景下, 混合动力驱动系统在履带车辆上的应用正在日益增多, 主要用于以战斗车辆为代表的高速履带车辆和以工程机械装备为代表的低速履带车辆。与传统履带车辆仅有内燃机动力源不同, 履带车辆混合动力驱动系统一般采用两个或两个以上动力源, 如内燃机和电动机/发电机, 依赖控制技术通过不同能量场转换实现功率耦合来驱动车辆行驶。与轮式车辆具有导向转向系统不同, 履带车辆仅依托驱动系统通过“滑移转向 (Skid-steering)”造成两侧履带速度差来调节行驶方向^[6,7]。该特点要求履带车辆混合驱动系统必须具备对两侧履带灵活分配功率的能力, 这使得履带车辆混合动力驱动系统的复杂程度较轮式车辆混合驱动系统有所增加。

混合动力驱动系统最早应用在高速履带车辆上。21 世纪初世界范围内出现了针对高速履带车辆混合动力系统的大规模理论与实车试制。得益于电子功率器件功率密度的提高以及自动控制技术的迅速发展, 混合动力高速履带车辆在机动性能、灵活供电以及燃油经济性方面的优势凸显出来, 发展混合动力高速履带车辆几乎成为全球共识。美国几乎在所有的高速履带车辆上都开展了混合动力驱动系统的研究与实车试验, 如提出了未来履带高速作战车辆方案 (Future Combat System)^[8], 研制了双侧电机独立驱动的、发动机-发电机组和动力电池组混合供电的串联式混合动力履带车辆^[9]。德国伦克