

节能与新能源汽车传动技术的发展

徐向阳

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191, 中国)

摘要: 传动技术是汽车动力总成的核心技术, 节能与新能源汽车的发展, 对传动技术提出了新的挑战。该文结合节能与新能源汽车技术路线图, 提出了传统内燃汽车、混合动力车 (HEV) 和插电式混合动力汽车 (PHEV)、纯电动汽车 (EV) 对传动系统的要求; 阐述中国内地变速器产业发展现状, 分析了不同类型自动变速器的特点, 以及多挡化、宽速比、轻量化、高功率密度、高效率、持续优化的发展方向; 介绍了混合动力和插电式混合动力构型方案类型和各自的特点, 分析了典型构型方案的优缺点, 以及混合动力和插电式混合动力控制技术研究发展情况; 最后分类介绍了集中式电驱动和分布式电驱动技术的发展状况。

关键词: 新能源汽车; 自动变速器; 混合动力; 插电式混合动力

中图分类号: U 463.2 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1674-8484.2017.04.001

Development of transmission technology for energy-saving vehicles and new energy resource vehicle

XU Xiangyang

(School of Transportation Science and Technology, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Transmission technology is the key of the vehicle powertrain. The development of energy-saving vehicle and new energy resource vehicles posed new challenges to the transmission technology. Based on energy-saving vehicle and new energy resource vehicle technology roadmap, the requirement of the traditional internal combustion vehicles, hybrid vehicle (HEV) and plug-in hybrid vehicle (PHEV), pure electric vehicle (EV) on the transmission system side were proposed, and the development of the transmission industry in Mainland China was also described. The characteristics of different types of automatic transmission was analyzed. The development direction of multi-shift, wide speed ratio, lighting weight, high power density, high efficiency and continuous optimization was described. The types of HEV/PHEV configuration schemes and their respective characteristics were introduced. The advantages and disadvantages of typical configuration schemes and the development of HEV/PHEV control technologies were analyzed. Finally, the development of centralized electric drive and distributed electric drive technology was introduced.

Key words: new energy vehicles; automatic transmission; hybrid; plug-in hybrid

收稿日期 / Received : 2017-11-26。

第一作者 / First author : 徐向阳 (1965—), 男 (汉), 山东, 教授。E-mail: xxy@buaa.edu.cn。

面对世界各国日益严格的燃油消耗和排放法规，世界汽车工业正面临着一场深刻的变革，汽车电动化已经成为不可逆转的趋势。中国政府是汽车电动化最强有力的推动者，从“十五”计划开始直到“十三五”规划，为了推动汽车电动化，先后出台了众多的鼓励和财政补贴政策。发展新能源汽车已经成为国家战略和行业共识，成为中国由汽车大国走向汽车强国的必由之路。2016 年 10 月 30 日，中华人民共和国工业和信息化部正式发布了《节能与新能源汽车技术路线图》^[1]，明确提出节能汽车、新能源汽车和智能网联汽车 3 个汽车产品方向，到 2020 年，乘用车新车平均油耗 5 L，新能源汽车销售占比达到 7% 以上；到 2025 年，乘用车新车平均油耗 4 升，新能源汽车销售占比达到 15% 以上；到 2030 年，乘用车新车平均油耗 3.2 L，新能源汽车销售占比达到 40% 以上。

节能与新能源汽车的发展，对汽车传动技术提出新的挑战。为了降低汽车油耗，适应不同的节能与新能源汽车产品，汽车传动技术必须进行新的创新，采取新的技术路线。

对传统内燃车而言，为了进一步节能、环保，传动系统需要更多的挡位、更宽的速比范围、更高的传动效率；对于微混、中混、全混为代表的节能型汽车而言，则需要满足微混、中混和全混的自动变速器或机电耦合系统；对于包括插电式混动、纯电驱动在内的新能源汽车而言，则必须开发插电式混动系统和纯电驱动系统。

本文将围绕汽车传动系统的核心部件自动变速器或机电耦合系统，阐述并介绍节能与新能源汽车传动技术的最新发展进展和发展趋势。

1 传统内燃车传动技术

1.1 传统内燃车自动变速器发展状况

自 1939 年世界上第一款自动变速器在通用汽车上得到正式应用以来，经过近 70 多年的发展，形成了 AT/AMT/CVT/DCT 4 种类型在汽车产业中大量应用的自动变速器，依次为自动变速器 (automatic transmission, AT)、机械式自动变速器 (automated mechanical transmission, AMT)、无级变速器 (continuously variable transmission, CVT) 和双离合自动变速器 (dual clutch transmission, DCT)。这 4 种类型自动变速器结构和工作原理不同，各有优缺点，适合应用的车型也不尽相同，产品开发的技术难点和难度也有所差别，如表 1 所示。但总体上说，这 4 种类型自动变速器都不可或缺电控软硬件系统，而电控软硬件系统正是中国汽车产业的软肋，因此，4 种类型的自动变速器在中国的产业化基础基本相同^[2]。

由于中国国内市场巨大，车型种类繁多，每种自动变速器都有市场需求，因此，经过最近 10 多年的发展，中国国内基本形成了 AT/AMT/CVT/DCT 多种技术路线并存、竞相发展的格局。从 21 世纪初开始，中国国内自主的整车企业和零部件企业纷纷投入巨资研究开发各类自动变速器，其中北京航空航天大学与盛瑞传动股份有限公司合作，经过 10 年自主创新，成功研制出了世界首款前置前驱 8 挡自动变速器 (8AT)，并获得了 2016 年国家科技进步一等奖。另外，上汽、吉利、长城、江淮、比亚迪等企业先后开发出了 DCT，湖南江麓容大车辆传动股份有限公司、奇瑞等先后开发出了 CVT，重庆青山工业有限责任公司和上海汽车变速器有限公

表 1 4 种类型自动变速器基本特点比较

类别	AMT	AT	CVT	DCT
基本结构	单离合器、定轴齿轮传动换挡执行机构； 电机或液压系统、电子控制系统、箱体	液力变矩器、行星齿轮为主、换挡元件； 液压控制系统、电子控制系统、箱体	液力变矩器、行星和定轴齿轮、锥盘钢带； 液压控制系统、电子控制系统、箱体	双离合器、定轴齿轮传动、换挡元件； 液压控制系统、电子控制系统、箱体
优点	结构简单成本低，效率高，扭矩适应面广	动力换挡，换挡品质高，扭矩适应面广	无级变速，结构相对简单，低成本	动力换挡，换挡品质好，效率相对高
缺点	换挡动力中断，换挡舒适性差，控制系统要求高	结构相对复杂，传动效率相对较低，方案专利保护	传动效率相对低，关键零部件受控，传递扭矩受限	结构相对复杂，关键零部件受控，控制系统要求高
适配车型	低成本小型乘用车、重型车	各种类型车辆	以小排量乘用车为主	小排量乘用车 (干式)、中大排量 (湿式)

公司等开发出了AMT等。因此,中国国内自主的自动变速器产业已经基本突破和掌握了各种类型自动变速器研发和产业化的核心技术,打破了国外长期对中国市场和技术的垄断。如图1所示,2015年中国大陆乘用车自动变速器搭载率接近50%,超过1000万台。自主品牌自动变速器市场占有率2015约5%,2016约10%,预计2017年将达到200万台,市场占有率达到15%左右。

2.2 传统内燃车自动变速器发展趋势

以AT为例,为了降低整车油耗,使自动变速器能够与发动机和整车进行更佳的匹配,多挡位、宽速比、轻量化、高效率、高功率传递密度是各类自动变速器追求的目标和发展方向,如图2所示。自动变速器的挡

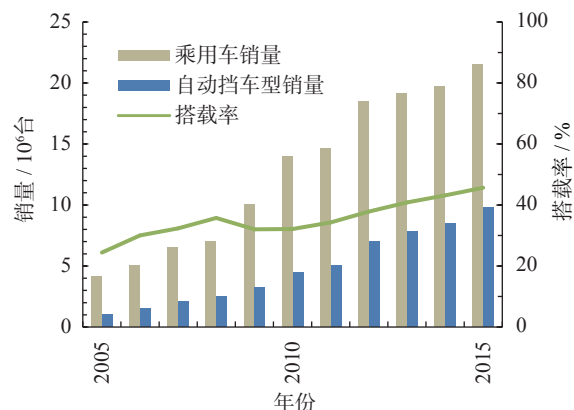


图1 中国乘用车销量及自动变速器搭载率

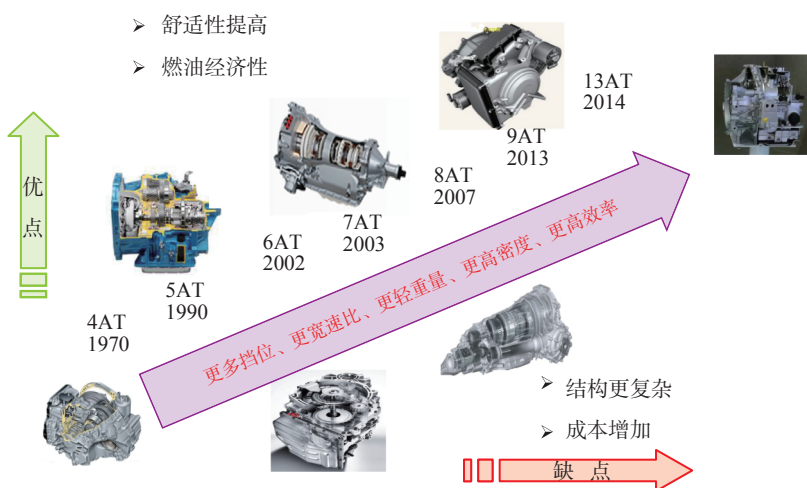


图2 自动变速器发展趋势

位从1970年的4挡,已经发展到了10挡、乃至13挡;传动比范围也由4挡时的4到5之间,扩展到了目前的9到10之间。

如图3所示,对自动变速器进行持续的优化,以便获得更高的传动效率,也是传动内燃车自动变速器重要研究内容和发展方向,以DCT为例,德国布伦瑞克大学的研究表明,通过持续的优化,DCT的欧洲油耗及排放评定标准(New European Driving Cycle, NEDC)综合传动效率,可以由83%提高到90.5%。

2 混合动力和插电式混合动力传动技术

传统燃油汽车采用发动机作为单一动力源,难以实现2020年中国乘用车油耗降至5.0 L/100 km的目标,采用发动机和电机为动力源的混合动力汽车和插电式混合动力汽车,具有优化发动机和电机工作区域、实

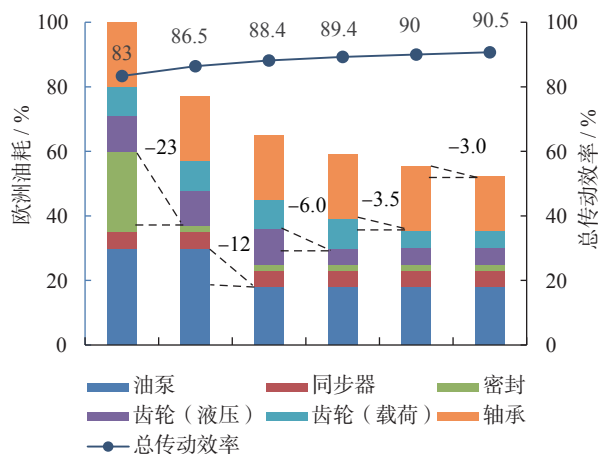


图3 自动变速器持续优化以提高NEDC综合传动效率

现制动能量回收等突出优点，既可降低燃油消耗又可满足续航里程需求。因此，混合动力系统是实现汽车低碳化技术的重点突破方向之一。

3.1 混合动力和插电式混合动力构型方案设计

混合动力系统构型是混合动力和插电式混合动力技术的基础，是实现原始创新的第一步，也是各个汽车企业保护的核心专利技术。通过对比分析现有混合动力系统的结构可发现，其基本构型可分为两大类（见图 4），结构特点见表 2。

表 2 混合动力系统基本构型结构特点

基本构型		结构特点
简单“附加”式	P0	BSG 电机布置在传统启动机的位置
	P1	ISG 电机布置在发动机后、分离离合器前，与发动机曲轴相连
	P2	电机布置在分离离合器后、变速器前，与变速器输入轴相连
	P3	电机布置在变速器后，与变速器输出轴相连
	P4	电机布置在后桥上
有机集成式	DHT	将电机和机电耦合机构有机集成，多采用双电机

第一类是采用简单“附加”技术，将电机叠加在传统燃油动力传动系统上，根据电机叠加位置不同，分为 P0、P1、P2、P3、P4 及其相互之间的组合构型；第二类是将电机和机电耦合机构有机集成为专用混合动力变速器 DHT（dedicated hybrid transmission），与发动

机协同工作，构成专用混合动力系统，例如丰田 THS、通用 Voltec、本田 i-MMD、科力远 CHS 等。第一类简单“附加”式混合动力系统，没有从结构和原理上打破传统燃油汽车的固有模式，都是基于传统的自动变速器（AT/AMT/DCT/CVT），其最大的优点是可以充分利用现有的内燃机传动系统技术和产品平台，但节油效果难以做到极致。P0~P4 及其不同组合的简单“附加”式混动系统，国内外研究已经相对成熟。所以，混合动力系统构型优选主要是针对第二类的专用混合动力变速器 DHT。

图 5 中给出了国内外典型的 DHT 构型，表 3 中列出了对应图 5 中各构型的构型特点和工作模式。

可以看出，DHT 具有发动机、电机等多个动力源，其机电耦合机构由多个行星排、定轴圆柱齿轮、离合器等多种元件构成，有同轴、平行轴等不同布置方式。元件的组合、连接和布置方式不同，其组成的混合动力系统构型不同，工作模式也不同（见表 3）。

德国鲁尔波鸿大学 Peter Tenberge^[3] 在传统 AT 变速器结构的基础上，对电机的嵌入方法进行了研究，提出了科力远 CHS 构型。美国密西根大学 Peng Hui^[4-6] 基于丰田和通用的混合动力系统，研究了包含 2、3 个行星排的混合动力系统构型组合。埃因霍芬理工大学 Emilia Silvas^[7] 基于拓扑优化法，建立了包含多个行星排的混合动力系统构型组合模型，其计算量非常大。北京理工大学苑士华^[8] 采用杠杆分析法研究了 2 个行星排的构型组合。吉林大学王伟华^[9-10] 利用杆模型逆向分拆法研究了 2 个行星排的混合动力系统构型组合。德

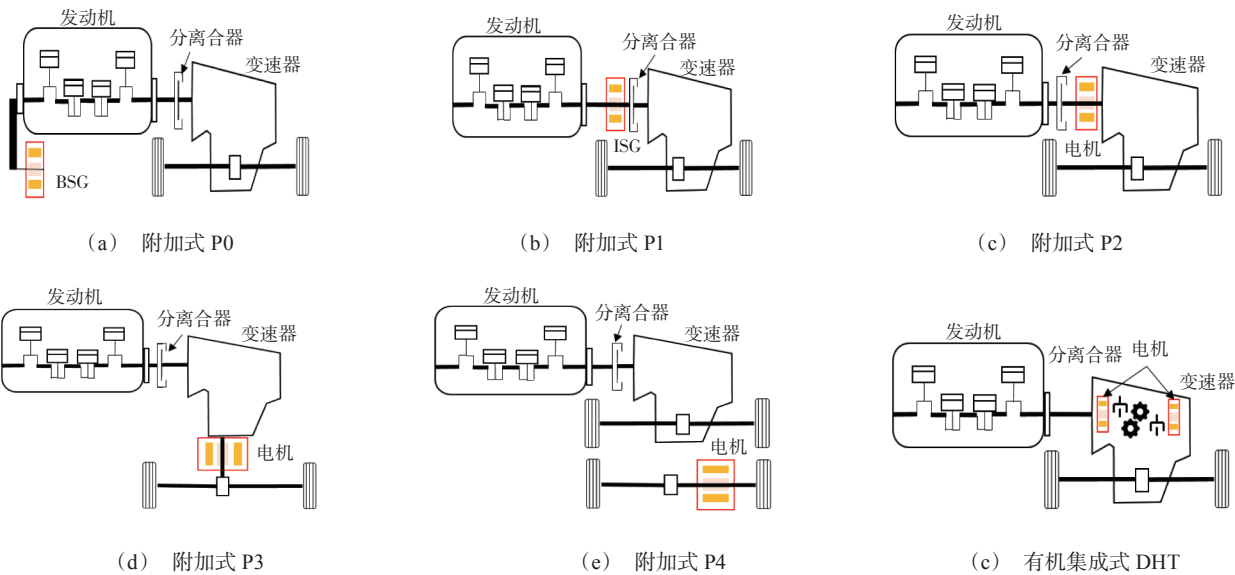


图 4 混合动力系统基本构型分类

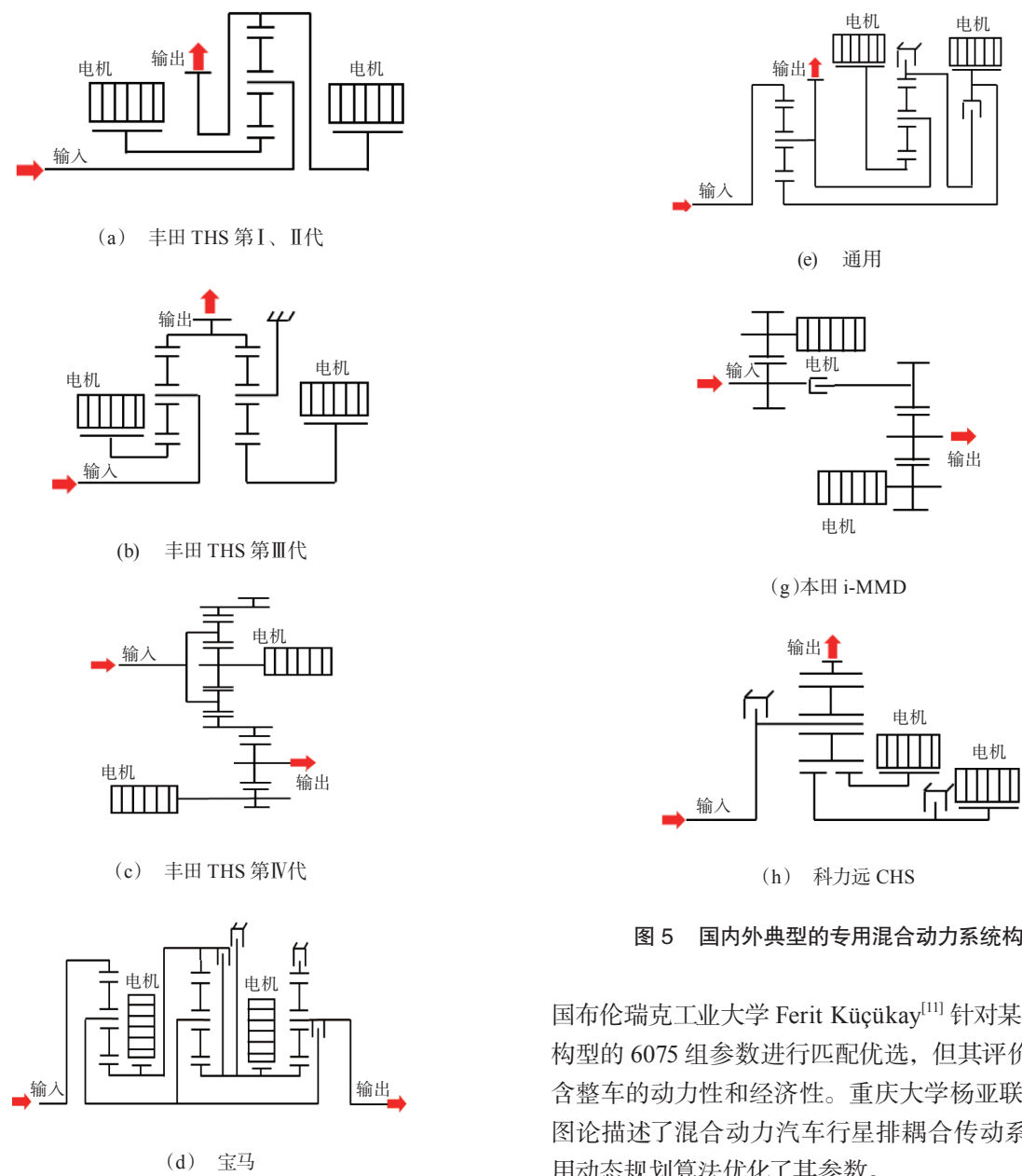


图 5 国内外典型的专用混合动力系统构型

国布伦瑞克工业大学 Ferit Küçükay^[11] 针对某具体 DHT 构型的 6075 组参数进行匹配优选,但其评价指标只包含整车的动力性和经济性。重庆大学杨亚联^[12-13]运用图论描述了混合动力汽车行星排耦合传动系统,并采用动态规划算法优化了其参数。

表 3 国内外典型的专用混合动力系统构型特点和工作模式

系统构型		构成	工作模式
丰田 THS	I、II 代	1 行星排、2 电机同轴布置	1 电控无级变速、1 电驱动发动机启停、制动能量回收等
	III 代	2 行星排、2 电机同轴布置	1 电控无级变速、1 电驱动发动机启停、制动能量回收等
	IV 代	2 行星排、1 圆柱齿轮、2 电机平行轴布置	1 电控无级变速、1 电驱动、1 发电发动机启停、制动能量回收等
宝马		3 行星排、2 电机、4 离合器同轴布置	2 电控无级变速、4 发动机驱动、1 电驱动、4 混合驱动发动机启停、制动能量回收等
通用 Voltec		2 行星排、2 电机、2 离合器同轴布置	2 电控无级变速、1 发动机驱动、2 电驱动、1 混合驱动发动机启停、制动能量回收等
本田 i-MMD		2 圆柱齿轮对、2 电机、1 离合器平行轴布置	1 电驱动、1 发动机驱动、1 混合驱动、发动机启停、制动能量回收等
科力远 CHS		1 复合行星排、2 电机、2 离合器同轴布置	2 电控无级变速、2 电驱动、1 发动机驱动、2 混合驱动、发动机启停、制动能量回收等

3.2 混合动力和插电式混合动力系统控制技术

目前,国内外的研究工作多侧重于第一大类简单“附件式”混合动力系统的发动机启停控制、能量分配控制、制动能量回收、混合驱动模式切换过程动态控制等方面。

美国俄亥俄州立大学 Rizzoni 等^[14]在接近最高效率点或最佳燃油消耗率时采用模糊逻辑控制技术实现电机启动发动机;密歇根大学 Peng Hui 等^[15]以驾驶舒适和快速启动为优化目标,采用动态优化策略和反馈控制法,减小发动机快速启动过程中的振动和噪声;通用汽车 Anthony Smith 等^[16]采用动力学仿真分析了发动机启动过程中分离离合器与电机转矩耦合的特性;意大利罗马第二大学 Cordiner 等^[17]以稳态能量和瞬态动力性为目标设计了混合驱动模式下发动机/电机协调控制策略;法国普瓦提埃大学 Cauet 等^[18-19]采用线性参数可变控制法利用电机来主动减振。

在发动机启停控制方面,吉林大学程秀生等^[20]研究了分离离合器、ISG 电机和发动机的协同控制方法,整车测试结果显示可减小发动机启动冲击;中国农业大学张娜等^[21]采用电机转速闭环控制和发动机转矩斜率限制等方法来提高发动机启动过程中的汽车平顺性;重庆大学秦大同等^[22]指出,发动机点火时刻和分离离合器接合状态是造成发动机启动时输出转矩波动的主要原因,以分离离合器转速差、电机角加速度作为输入量,提出了分离离合器压力的模糊控制方法;同济大学李理光等^[23]的动力学仿真结果表明,采用循环工况和行驶里程修正发动机启停时刻的荷电状态(state of charge, SOC)值可以有效降低油耗;在能量分配控制方面,上海交通大学张建武等^[24]采用请求转矩与发动机最佳转矩的比值和电池电荷状态为输入、电机归一化转矩指令为输出,构建了有 22 条规则的模糊推理器,用以确定发动机和电机的最佳转矩分配;北京理工大学项昌乐等^[25]针对某专用混合动力系统,采用最小值原理进行功率分配优化控制;在混合驱动模式切换过程动态控制方面,清华大学宋健等^[26]采用 PID 控制和模糊控制,制定了纯电动-混合驱动模式切换的控制策略;吉林大初亮等^[27]在混合驱动模式切换过程中采用了基本的逻辑门限控制方法;在制动能量回收方面,清华大学李克强等^[28]以驾驶员制动意图和制动能量回收率为设计指标,基于最优控制理论建立了制动力分配模型,不但能够在 0.5 s 以内识别制动意图,而且可以将制动能量回收率提高 10% 左右;张俊智等^[29]通过变化的 PWM 信号控制离合器的结合与分离以优化制动舒适性和能量回

收效率;合肥工业大学赵韩等^[30]采用分层协调控制策略,通过实时确定目标滑移率,统一协调控制上层横摆力矩、下层滑移率及再生制动力矩,以保证混合动力汽车的制动稳定性。

3 电动汽车传动技术

为了实现节能减排,降低对石化能源的依赖度,从“十五”计划开始,中国政府出台了一系列鼓励政策推动新能源汽车,特别是电动汽车的发展,经过多个五年计划、规划的努力,到“十三五”规划时期的 2016 年,中国内地的电动汽车销量突破 50 万辆,占比超过了世界电动车销量的一半。

伴随着电动汽车最近几年的高速增长,电动汽车传动技术也日益引起重视。电动汽车传动系统分为两大类,一类是集中式电驱动技术,电机与变速器或减速器直接或通过传动轴连接,实现动力传动;另一类是分布式电驱动技术,又可以细分为轮边驱动和轮毂驱动。

4.1 集中式电驱动

目前,纯电动乘用车普遍采用集中式电驱动技术,采用单级减速器。尽管电机有比发动机更好的调速特性,但由于单级减速器速比调节范围有限,使整车动力性、特别是中高速阶段的加速性能、爬坡性能受到很大的限制,电机的高效率工作区也不能得到充分的利用。德国舍弗勒公司的对比研究表明,采用 2 挡变速器与采用单级减速器的车型对比,电机的需求扭矩可以降低 40% 以上,整车的续航里程可以增加 8%。因此,基于 AT/AMT/DCT 原理的纯电动车用 2~4 挡自动变速器成为最近几年国内外研究的重点。

早在 1995 年,奥地利的 SFT 公司为了拓展欧洲的纯电动汽车市场,研究开发了一款小型的基于同步器换挡的两挡自动变速器,可以搭载在中小级别的纯电动汽车上^[31]。而在 1998 年, Ford 和 GE 公司,开发了将驱动电机、两挡变速器和差速器集成的电驱动总成,搭载在 ETX 纯电动轿车上^[32]。为了提升电机整体的驱动效率,如图 6 所示,意大利的 Oerlikon Graziano 公司开发出了匹配小型电动汽车的两挡变速器^[33]。而奥地利的 AVL 公司为了提升液压系统工作效率,设计了一款低挡位离合器常接合且基于定轴齿轮传动的两挡自动变速器。

如图 7 所示,德国 IAV 公司基于模块化的思想,研发了基于简单行星排的两挡以及拉维纳行星排的三挡自动变速器,并将驱动电机集成其中作为电驱动总成,适用于中高级别的纯电动乘用车^[34]。

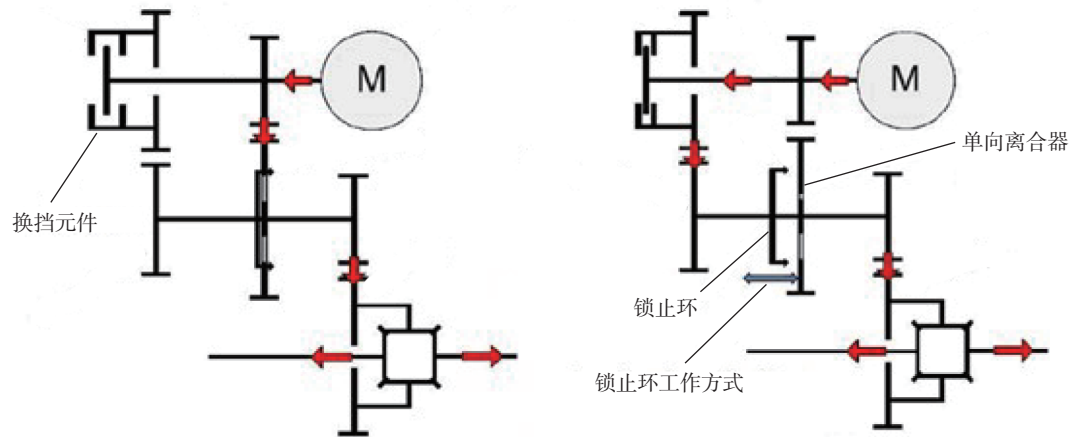


图 6 Oerlikon/Graziano 公司研发的两档自动变速器 [33]

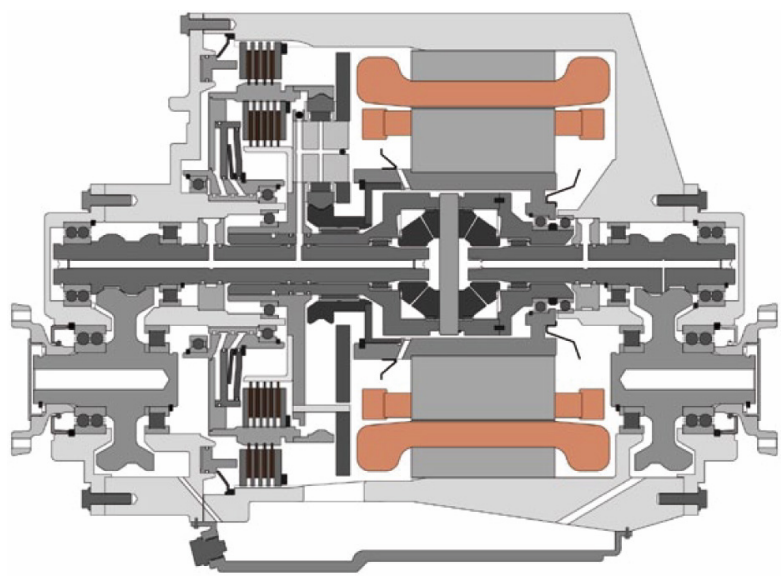


图 7 IAV 公司开发的两档行星变速电驱动单元 [34]

为了扩宽传动比范围并提升驱动电机效率，乌克兰的 Antonov 汽车公司研发了一款三挡的可动力换挡的 EVT (electric vehicle transmission)，并在 NEDC 循环测试中，可以提升 15% 的工作效率 [35]。德国的 GKN 传动公司亦设计出了一款基于同步器换挡的两挡自动变速器，目前已经搭载在宝马混合动力跑车 i8 上，大大降低了对前轴电机的性能需求。

在理论研究方面，国外高校也做了充分的研究。英国桑德兰大学的 Ren 等通过仿真研究了相比于单挡减速器，多挡位及无级变速器在不同的循环工况中对于纯电动汽车效率的提升情况 [36]。德国达姆施塔特工业大学 Eberleh 等针对一款最高转速 23 000 rpm 的高速电机设计匹配了一款可动力换挡的两挡自动变速

器 [37]。英国萨里大学的 Sornioti 等以动力性与经济性作为优化目标，针对两款不同的驱动电机优选出了两组不同的传动比 [38]。该团队还设计一种新型的单离合器且无动力中断的纯电动车用两挡自动变速器，并研究了相应的换挡控制策略 [39]。此外，该团队还联合 Oerlikon Graziano 公司研发了一款将两个独立驱动电机耦合起来的四挡自动变速器，虽然通过同步器进行挡位切换，但可以通过协调双电机的控制实现动力不中断换挡 [40]。韩国成均馆大学的 Hong 等针对纯电动车用两挡 DCT (图 8) 研究了相应的换挡控制策略，以改善其换挡品质 [41]。国内北汽新能源与悉尼工业大学研发的两挡 DCT 电驱动总成，如图 9 所示。

为了提高集成度，降低成本，将电机、控制器和

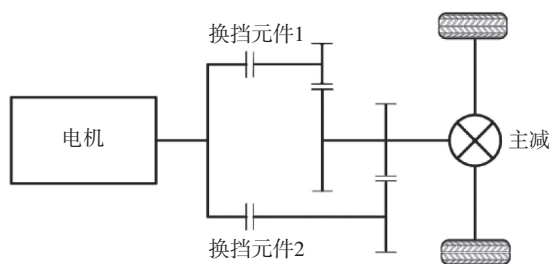


图8 韩国现代汽车公司与韩国成均馆大学研发的两档DCT电驱动总成的构成^[41]

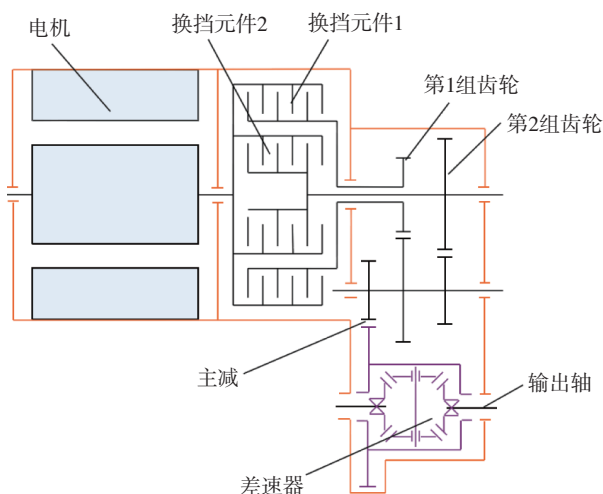


图9 北汽新能源汽车公司与悉尼工业大学研发的两档DCT电驱动总成^[42]

单级减速器或2~4挡自动变速器集成于一体，做成集成式电驱动桥，成为最新的研究热点。

4.2 分布式电驱动

分布式电驱动分为轮边电驱动和轮毂电驱动两种类型，德国ZF公司和中国比亚迪公司为代表的轮边电驱动已在城市公交车辆上得到了应用。

轮毂电驱动（轮毂电机）是将动力、传动和制动装置都整合到轮毂内。早在1900年，保时捷首先制造出了前轮装备轮毂电机的电动汽车，在20世纪70年代，轮毂电机在矿山运输车等领域得到应用。最近几年随着新能源汽车的推广，轮毂电机在城市公交车辆和乘用车上的应用研究日益得到重视。由于中国是最大的新能源汽车市场，Protean、Elaphe、e-Traction等国际轮毂电机技术领先的几个企业都有中资的身影或者被中资全资收购。但轮毂电机在公交车辆和乘用车上的应用仍然需要攻克电子差速、热管理、可靠性等关键技术难题。

5 结论

汽车电动化对汽车传动技术提出了新的要求。为了进一步节能、环保，传统内燃汽车的传动系统需要更多的挡位、更宽的速比范围、更高的传动效率。在电池续航里程和充电基础设施完善之前，混合动力汽车和插电式混合动力汽车是实现汽车节能减排的有效技术途径，混合动力和插电式混合动力构型方案设计和控制技术是关键，方案构型创新和最优能量管理是国内外研究的重点。为了更好地优化电动车动力性、降低电耗和成本，纯电动汽车多挡位自动变速器和集成式电驱动桥日益受到国内的重视，而分布式轮毂电机驱动则是未来纯电动汽车驱动技术的发展方向。

参考文献 (References)

- [1] 节能与新能源汽车技术路线图战略咨询委员会，中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图 [M]. 北京：机械工业出版社，2016：1-46.
Energy and New Energy Vehicle Technology Roadmap Strategic Advisory Committee, SAE-China. Energy-Saving and New Energy Vehicle Roadmap [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2016: 1-46. (in Chinese)
- [2] 徐向阳. 自动变速器技术 [M]. 北京：人民交通出版社，2015：1-12.
XU Xiangyang. Automatic Transmission Technology [M]. Beijing: China Communications Press, 2015: 1-12. (in Chinese)
- [3] Meißner C, Tenberge I P. New concepts of active yaw control for electric and hybrid vehicles [C]// *Proc 3th int'l Conf Mechanical Engineering and Mechanics (ICMEM)*. Beijing. 2009, 2-7.
- [4] ZHUANG W, ZHANG X, PENG H, et al. Rapid configuration design of multiple-planetary-gear power-split hybrid powertrain via mode combination [J]. *IEEE/ASME Trans Mechatronics*, 2016, 21(6): 2924-2934.
- [5] LIU J, PENG H. Modeling and control of a power-split hybrid vehicle [J]. *IEEE Trans Contr Syst Tech*, 2008, 16(6): 1242-1251.
- [6] ZHUANG W, ZHANG X, ZHAO D, et al. Optimal design of three-planetary-gear power-split hybrid powertrains [J]. *Int'l J Automotive Technology*, 2016, 17(2): 299-309.
- [7] Silvas E, Hofman T, Serebrenik A, et al. Functional and cost-based automatic generator for hybrid vehicles topologies [J]. *IEEE/ASME Trans Mechatronics*, 2015, 20(4): 1561-1572.
- [8] YUAN Shihua, LIU Hong, PENG Zengxiong, et al. Analysis of the compound split transmission based on the four-port power split device [J]. *J Beijing Institute of Technology*, 2012, 21(1): 50-57.
- [9] 王伟华, 宋瑞芳, 刘松山, 等. 双模功率分流式混合动力系统构型分析 [J]. 汽车工程, 2015, 37(6): 648-654.
WANG Weihua, SONG Ruifang, LIU Songshan, et al. An analysis on the configuration of dual-mode power-split hybrid powertrain system [J]. *Automotive Engineering*,

- 2015, **37**(6): 648-654. (in Chinese)
- [10] WANG Weihua, SONG Ruifang, GUO Mingchen, et al. Analysis on compound-split configuration of power-split hybrid electric vehicle [J]. *Mech Mach Theory*, 2014, **78**(8): 272-288.
- [11] Sarioglu I L, Czapnik B, Bostanci E, et al. Optimum design of a fuel-cell powertrain based on multiple design criteria [J]. *J Power Sources*, 2014, **266**(10): 7-21.
- [12] 石万凯, 秦鹏飞, 杨亚联, 等. 新型动力耦合系统工作模式分析与参数匹配研究 [J]. 机械设计, 2016(10): 5-10.
- SHI Wankai, QING Pengfei, YANG Yalian, et al. Working mode analysis and parameter matching study of a novel power coupling system [J]. *J Mach Design*, 2016(10): 5-10. (in Chinese)
- [13] 杨亚联, 米娇, 胡晓松, 等. 混合动力汽车行星耦合传动系统的图论建模及动力学分析 [J]. 汽车工程, 2015, **37**(1): 9-15.
- YANG Yalian, MI Jiao, HU Xiaosong, et al. Graph Theory modeling and dynamics analysis on the coupled planetary transmission system of HEV. *Automotive Engineering*, 2015, **37**(1): 9-15. (in Chinese)
- [14] Glenn B, Washington G, Rizzoni G. Operation and control strategies for hybrid electric automobiles [R]. *SAE Technical Paper*, 2000-01-1537.
- [15] Kum D, Peng H, Bucknor N K. Control of engine-starts for optimal drivability of parallel hybrid electric vehicles [J]. *J Dyna Syst Meas Contr*, 2013, **135**(2): 450-472.
- [16] Smith A, Bucknor N, Yang H, et al. Controls development for clutch-assisted engine starts in a parallel hybrid electric vehicle [R]. *SAE Tech Paper*, 2011-01-0870.
- [17] Cordiner S, Galeani S, Mecocci F, et al. Torque setpoint tracking for parallel hybrid electric vehicles using dynamic input allocation [J]. *IEEE Trans Contr Syst Tech*, 2014, **22**(5): 2007-2015.
- [18] Cauet S, Coirault P, Njeh M. Diesel engine torque ripple reduction through LPV control in hybrid electric vehicle powertrain: Experimental results [J]. *Contr Engi Prac*, 2013, **21**(12): 1830-1840.
- [19] Njeh M, Cauet S, Coirault P. H_{∞} control of combustion torque ripples on hybrid electric vehicles [J]. *Int'l Federation of Automatic Contr Proc Vol*, 2010, **43**(7): 542-547.
- [20] 张玉玺, 程秀生, 陆中华. 轻度混合动力节能离合器控制策略研究及仿真分析 [J]. 汽车技术, 2007(8): 12-14.
- ZHANG Yuxi, CHENG Xiusheng, LU Zhonghua. Study on control strategy and simulation analysis of mild hybride electric vehicle saving energy clutch [J]. *Automobile Technology*. 2007(8): 12-14. (in Chinese)
- [21] 张娜, 赵峰, 罗禹贡, 等. 基于电机转速闭环控制的混合动力汽车模式切换动态协调控制策略 [J]. 汽车工程, 2014, **36**(2): 134-138.
- ZHANG Na, ZHAO Feng, LUO Yugong, et al. A Dynamic coordinated control strategy for the mode-switch of HEV based on motor speed closed-loop control [J]. *Automotive Engineering*, 2014, **36**(2): 134-138. (in Chinese)
- [22] 秦大同, 尚阳, 杨官龙. 插电式混合动力汽车纯电动行进间启动发动机的平顺性控制 [J]. 重庆大学学报, 2015, **38**(4): 1-9.
- QIN Datong, SHANG Yang, YANG Guanlong. The ride comfort control of PHEV during engine starting in-motion process [J]. *J Chongqing Univ*, 2015, **38**(4): 1-9. (in Chinese)
- [23] 李献菁, 孙永正, 邓俊, 等. 插电式串联混合动力汽车发动机起停控制策略的优化 [J]. 汽车工程, 2011, **33**(2): 112-117.
- LI Xianjing, SUN Yongzheng, DENG Jun, et al. Optimization of control strategy for engine start stop in a plug in series hybrid electric vehicle [J]. *Automotive Engineering*, 2011, **33**(2): 112-117. (in Chinese)
- [24] 殷承良, 浦金欢, 张建成. 并联混合动力汽车的模糊转矩控制策略 [J]. 上海交通大学学报, 2006, **40**(1): 157-162.
- YIN Chengliang, PU Jinhuan, ZHANG Jianwu. The fuzzy torque control strategy for parallel hybrid electric vehicles [J]. *J Shanghai Jiaotong Univ*, 2006, **40**(1): 157-162. (in Chinese)
- [25] 郑海亮, 项昌乐, 韩立金, 等. 双模式机电复合传动功率分配策略优化 [J]. 中国机械工程, 2015, **26**(10): 1415-1419.
- ZHENG Hailiang, XIANG Changle, HAN Lijin, et al. Power distribution strategy optimization for two-mode electro-mechanical transmission [J]. *Chin Mech Eng*, 2015, **26**(10): 1415-1419. (in Chinese)
- [26] 杨超, 李亮, 焦晓红, 等. 同轴并联混合动力系统模式切换控制研究 [J]. 中国科学: 技术科学, 2016, **46**(1): 91-100.
- YANG Chao, LI Liang, JIAO Xiaohong, et al. Research on mode transition control for single-shaft parallel hybrid powertrain [J]. *Scientia Sinica: Technologica*, 2016, **46**(1): 91-100. (in Chinese)
- [27] CHU Liang, WANG Qingnian, LIU Minghui, et al. Development and validation of logic threshold control algorithm for Parallel Hybrid Power Train [C]// *Future Transp Tech Conf Exp*, 2003: 231-235.
- [28] 罗禹贡, 李蓬, 金达锋, 等. 基于最优控制理论的制动能量回收策略研究 [J]. 汽车工程, 2006, **28**(4): 356-360.
- LUO Yugong, LI Peng, JIN Dafeng, et al. A study on regenerative braking stagey based on optimal control theory [J]. *Automotive Engineering*, 2006, **28**(4): 356-360. (in Chinese)
- [29] Samir S, Zhang J. Optimal control plant for switch-mode architecture of a regenerative braking system [J]. *Automotive Safety and Energy*, 2016, **7**(3): 305-312.
- [30] 尹安东, 赵韩, 孙骏, 等. 基于混杂系统理论的混合动力汽车驱制动控制研究 [J]. 汽车工程, 2015, **37**(10): 1150-1155.
- YI Andong, ZHAO Han, SUN Jun, et al. A Study on the driving and braking controls for hybrid electric vehicle based on hybrid system theory [J]. *Automotive Engineering*, 2015, **37**(10): 1150-1155. (in Chinese)
- [31] Resele P E, Bitsche O. Advanced fully automatic two-speed transmission for electric automobiles [R]. *SAE Tech Paper*, 1995-951885
- [32] Chan C, Chau K. Modern Electric Vehicle Technology [J]. *Power Engineer*, 2001, **16**(5): 240-240.
- [33] Green Car Congress. New two-speed electric vehicle

- transmission for improved performance, range and battery life [EB/OL]. [2009-05-12], <https://www.reddit.com/>.
- [34] Schneider D I E, Fickel D I F, Cebulski D I B, et al. Highly integrative and flexible electric drive unit for electric vehicles [J]. *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) Worldwide*, 2011, 113(5): 10-15.
- [35] Roberts S. Multispeed transmission for electric vehicles [J]. *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) Worldwide*, 2012, 114(4): 8-11.
- [36] Ren Q, Crolla D A, Morris A. Effect of transmission design on Electric Vehicle (EV) performance [C]// *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2009, IEEE 2009: 1260-1265.
- [37] Eberle B, Hartkopf T. A high speed induction machine with two-speed transmission as drive for electric vehicles [C]// *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2006; *Int'l Symp IEEE*, 2006: 249-254.
- [38] Sorniotti A, Boscolo M, Turner A, et al. Optimization of a multi-speed electric axle as a function of the electric motor properties [C]// *Vehicle Power and Propulsion Conf, IEEE*, 2010: 1-6.
- [39] Sorniotti A, Holdstock T, Pilone G L, et al. Analysis and simulation of the gearshift methodology for a novel two-speed transmission system for electric powertrains with a central motor [J]. *J Automobile Engineering*, 2012, 226(7): 915-929.
- [40] Holdstock T, Sorniotti A, Everitt M, et al. Energy consumption analysis of a novel four-speed dual motor drivetrain for electric vehicles [C]// *Vehi Power Propulsion Conf, IEEE*, 2012: 295-300.
- [41] Hong S, Ahn S, Kim B, et al. Shift control of a 2-speed dual clutch transmission for electric vehicle [C]// *Vehi Power Propulsion Conf, IEEE*, 2013: 1202-1205.
- [42] 詹文章. 纯电动轿车电驱动关键技术合作开发与新型应用研究 [J]. *中国科技成果*, 2013(13): 31-32.
ZHAN Wenzhang. Cooperative development and new application research of key technologies for electric drive of pure electric car [J]. *Chin Sci Tech Achiev*, 2013(13): 31-32. (in Chinese)

徐向阳 教授

北京航空航天大学交通科学与工程学院教授, 国家乘用车自动变速器工程技术研究中心常务副主任, 长期从事车辆传动与控制领域的教学和科研工作, 主持研发了世界首款前置前驱 8 挡自动变速器 (8AT), 并获得了 2016 年国家科技进步一等奖。另外, 获得省部级奖励 4 项, 获得发明专利 12 项, 发表论文近百篇, 培养研究生一百多人。

Prof. XU Xiangyang

A professor of School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, the executive deputy director of *National Engineering Research Center for Passenger Car Automatic Transmission*. He has been engaged in research and education in vehicle transmission and control technology for many years. He led the R&D of world first front-across application 8-Speed Automatic Transmission (8AT), and awarded First Prize of National Scientific and Technological Progress in 2016. In addition, he awarded other 4 Provincial and Ministerial Awards. He also had 12 innovation patents, published nearly 100 papers and tutored more than 100 master and PhD students.