

汽车专用混合动力变速器和电驱动系统及其变速器发展状况（下）

□ 德国博世公司 / 罗本进
□ 北京工业大学 / 石照耀

随着环保压力继续增加，发展混合动力系统以及纯电动汽车的需求越来越大；特别是我国政府对新能源汽车的支持力度加速了新能源汽车技术开发的速度。

电动车电驱动系统及电驱动变速器

在国家大力推动新能源汽车的政策鼓励和支持下，中国电动车市场这几年得以大幅度增长，2017年新能源汽车销量超过77万辆。目前电动车的厂家也非常之多，导致大部分厂家的产量不高，形成不了超过年产20万辆以上的规模（见图22），相应的电驱动系统在量产电动车上也主要是根据汽车动力要求和安装空间，配置及设计相应的电动机、变速器和电控，一般没有集成为一体。

随着电动车市场的发展，电驱动系统的需求也相应越来越大，到2020年估计市场规模会超过300亿元（见表2）。但是随着国外主流汽车零部件供货商的加入，其大规模量产质量及成本控制能力、系统集成能力会对整个行业带来巨大的

冲击，加上电动机原材料价格的波动，国内电驱动公司的成本压力将会非常大（电动机成本构成见图23），目前欧洲大型汽车公司如奔驰、宝马、大众、奥迪等等未来大批量电动车平台电驱动系统的开发，基本是借助于自己力量或者西方传统汽车零部件供应商。特别是一些著名变速器供应商也大力开发集成电驱动系统，如采埃孚、吉凯恩等等。国内电驱动系统必须及时

开发出高集成度的适合大批量生产（50万台/年）的电驱动系统，才有可能进入大型汽车公司主流供货商行列。价格方面，电驱动目标价格可能会在1万元左右，只有高集成度的电驱动系统和达到一定规模，也才有可能控制成本，获得未来竞争力。对于齿轮制造行业来说，电驱动系统一级供货商如果是国外主要零部件公司的话，其齿轮等机械零部件可能会考虑从国内寻求生产



图22 中国电动车年销量和厂家分布（网上数据建立）

商，如上海变速器公司、双环公司、南高齿等。国内齿轮公司应该加强电驱动系统变速器单元设计计算以及系统集成能力的培养、积累和系统化产品需求管理，可以在生产齿轮的基础上，提供齿轮箱的设计服务，扩大商业模式。

目前电驱动系统的集成度还不高，每辆电动车需要相应配备分立设计的电动机、控制器和变速器，从而形成电驱动系统的类别。电驱动系统一般由汽车厂或者新能源电动机企业根据开发的电动机特性，然后根据汽车厂要求的汽车性能和安装空间，相应设计和配置需要的变速器。汽车驱动电动机产品主要还是处于转速较低，电动机体积较大的状况。电动机、控制器和变速器集成化可以实现高功率密度，转速高于15 000r/min的高速电动机将会是主流批量汽车的标准配置。表3是目前国内主要电驱动产品公司。

下面分析汽车驱动特性和电动机输出特性带来的对电动车变速器（或者说减速器）的设计特性要求及发展趋势，然后给出一些产品实例。

1. 汽车驱动特性和电动机输出特性对变速器挡位影响

由于电动机输出特性接近汽车动力要求的理想需求，导致电动机作为动力源不需要很多挡位。图24比较了发动机加5挡变速器和电动机加一个固定减速比后汽车牵引力的输出特性。

表4给出了不同变速器应用的挡位数目前考虑的范围，可以看出电动车电驱动一般以一挡为主，为

表2 电动机电控市场价格及规模预期（整理计算）

车型	项目	2016A	2017A	2018E	2019E	2020E
乘用车	数量/套	322 679	578 000	811 789	1 227 097	1 747 724
	平均价/元	20 900	18 810	16 929	15 236	13 712
	价格趋势估计	—	-10%	-10%	-10%	-10%
	市场规模/亿元	67.4	108.7	137.4	187.0	239.7
客车	数量/套	135 300	86 767	80 000	80 000	80 000
	平均价/元	44 000	39 600	35 640	32 076	28 868
	价格趋势估计	—	-10%	-10%	-10%	-10%
	市场规模/亿元	59.5	34.4	28.5	25.7	23.1
专用车	数量/套	60 662	153 500	207 225	279 754	377 668
	平均价/元	20 900	18 810	16 929	15 236.1	13 712.49
	价格趋势估计	—	-10%	-10%	-10%	-10%
	市场规模/亿元	12.7	28.9	35.1	42.6	51.8
总计	数量/套	518 641	818 267	1 099 014	1 586 851	2 205 392
	市场规模/亿元	140	172	201	255	315

表3 国内主要电驱动产品公司及配套供应汽车商

企业名称	供应汽车商
上海电驱动股份有限公司	一汽、上汽、东风、长安、奇瑞
北京精进电动	奇瑞、东风神龙
大洋电机	一汽、长安、广汽、北汽
上海大郡动力控制技术有限公司	一汽、上汽、东风、长安、广汽、北汽
湖北神电汽车电机有限公司	一汽-大众、神龙、上汽、通用、比亚迪
深圳大地和	万向电动、众泰、浙江康迪、济南宝雅
信质电机	一汽-大众、上海大众
方正电机	比亚迪、东风

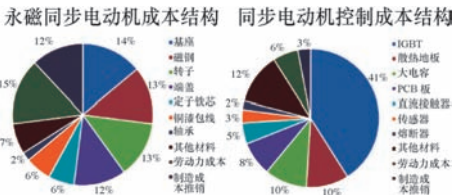


图23 电动机成本构成（来源：中国产业信息网）

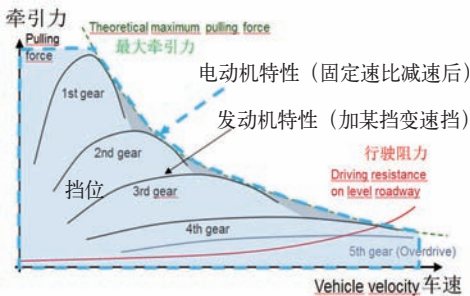


图24 发动机5挡变速器和电动机1挡减速器的汽车牵引力输出特性比较

了提高效率和驱动动力配置，两速的电驱动也会占市场一定份额。

2. 从汽车到电驱动到变速器的性能需求与设计

汽车作为交通工具，已经从简单的能够实现输出转矩驱动汽车到现在成为一个复杂的系统，其功能方面以及非功能方面的需求已经涉及各个方面，与品牌相关的价格竞争力也是重要成功因素。图25列出了一些汽车层面的需求，作为汽车主要的子系统电驱动系统，相应的可以推导出其性能需求。

对电驱动系统的变速器在设计验证时主要需要保证下列性能要求：效率、可靠性（强度、寿命）和NVH。

效率方面：举例一款电驱动系统采用80kW的异步电动机，10kHz的逆变器，在综合工况下其功率损耗及其占比如图26所示，变速器大约占电驱动系统14%的损耗。

寿命方面：汽车一般要求保证300 000km的寿命，汽车会行驶在不同的路况以及不同的驾驶场景，据此汽车厂会定义一个载荷谱用于电驱动系统的强度及寿命计算，对变速器设计需要考虑在不同车速下车轮功率，转矩数值，包括城市、高速、乡间等驾驶工况，还要包括最大功率及峰值功率下的最大扭矩，防抱死制动系统（ABS）启动导致的转矩载荷也要考虑在变速器设计之中。

NVH方面：NVH是电驱动系统的一个重要评价指标，随着电动机转速的提高，NVH成为电驱动设计中的一个重要研究课题。这包括电动机本身的噪声、电动机转矩波动

通过变速器带来的噪声、变速器本身的啮合产生的振动噪声等。电驱动系统的NVH的计算优化需要建立一套完善的工具链，并且需要正确细致的设计好测试验证环节。图27显示计算电驱动NVH的示例。

结构方面：电驱动系统发展趋势是采用高速电动机，功率密度大，把变速器和电控单元集成在一起。典型的如博世新开发的集成电驱动桥eAxle。一般系统设计中包含润滑冷却系统、驻车锁止的统一

表4 不同变速器应用的挡位数合理范围

		12V	48V	电气化		
		发动机	弱混	强混/插电	DHT专用混合动力变速器	电动车
挡位数		发动机为主			电驱动为主	
	10	10	10	10		
	9	9	9	9		
	8	8	8	8		
	7	7	7	7		
	6				单电动机 6	
	5				单电动机 5	
	4				单电动机 4	
	3				单电动机 3	3
	2				双电动机 2	2
	1				双电动机 1	1

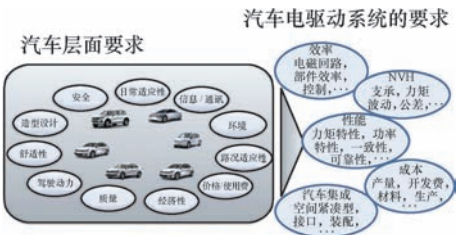


图25 汽车和电驱动的需求（基于VW发表整理）

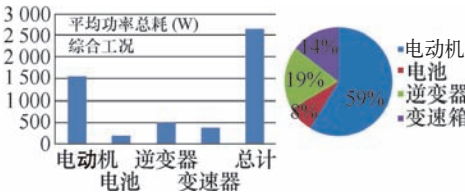


图26 电驱动系统损耗比较

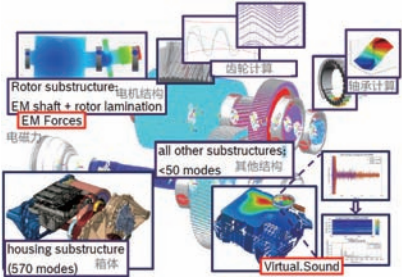


图27 电驱动系统NVH分析工具链

考虑。

电驱动系统的变速器结构布局可以是平行轴或者同轴，可以采用定轴齿轮传动或者行星齿轮传动（见图28）。

电驱动系统的变速器设计需要从电驱动系统整体角度出发，首先获得系统和零部件的需求，了解设计边界条件如汽车载荷、电驱动系统支承结构（各方向的刚度）等，然后开始进行强度、寿命以及NVH方面的计算，不断优化、选取合适的轴承标准件等，随后是原型的制造与测试验证，经过不同样品阶段到达量产产品的最终定型。电驱动系统变速器设计参考流程如图29所示。

电驱动系统总体设计时还要考虑冷却润滑结构，冷却主要涉及到电驱动的电控和电动机；轴承和齿轮需要润滑，图30是针对电动机、电控与变速器的润滑冷却系统布局概念图。

很多电驱动系统一般也集成驻车锁止机构，特别是欧洲汽车公司的电动汽车。驻车锁止机构必须与变速器同时设计，是电驱动总体集成设计的一项重要任务，表5列出了驻车锁止机构的功能和其对应的指标要求，图31给出了宝马i3上采用的驻车锁止机构示意图。

3. 市场上一些主要电驱动系统示例

以下列举几个有代表性的电动车电驱动系统及其变速器特点。

(1) 特斯拉Model S电驱动系统。

特斯拉电驱动系统采用异步电动机驱动，S60峰值功率为

245kW，采用两级一档减速器，四个齿轮和一个差速器。特斯拉电驱动系统实物图和其中一款电动机的峰值曲线如图32所示。

整个电驱动系统的质量大约77kg，材料构成见表5。

(2) 奔驰EQ平台电动车EQC电驱动系统。

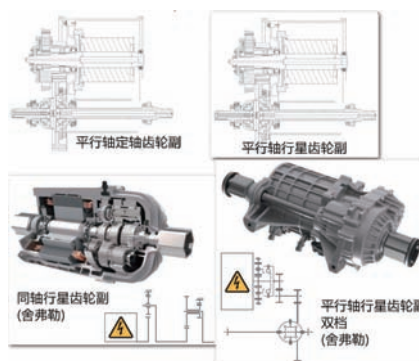


图28 电驱动系统齿轮箱结构实例

电驱动系统变速器开发流程



图29 电驱动系统变速器设计参考流程

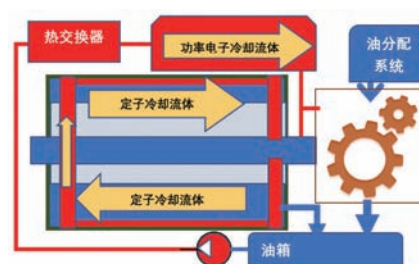


图30 电驱动润滑冷却系统布局概念图

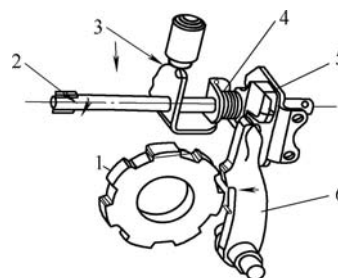


图31 i3驻车锁止机械机构示意图（整理，i3专利）

1.锁止轮 2.(轴上) 执行器换口 3.卡位 4.弹簧卡销 5.卡销 6.棘爪

奔驰汽车将于2019年推出第一台基于电动车平台EQ开发的电动车EQC，其电驱动系统性能指标见图，由采埃孚公司提供。也同样采用两级一档减速器，减速比为9.6。驻车锁止机构也集成在电驱动总成中。

(3) 通用雪佛兰Bolt电驱动系统。

雪佛兰Bolt电动汽车是北美产量比较大的电动车。其电驱动主要集成了电动机与齿轮箱，电控部分独立。也同样出于成本考虑采用相对简单的两级一档减速器，其差速

器的轴与电动机同轴（见图33）。

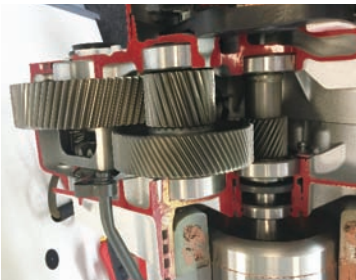
结语

国内目前主要电驱动系统生产产品是以开发电动机和电控为主，然后根据现有电动机、汽车驱动性能要求及空间位置设计配置相应减速器，减速器不是作为电驱动系统的一个关键部分对待。

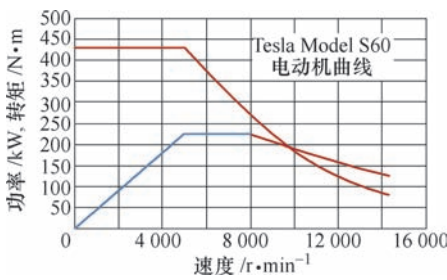
国内电驱动系统供应商认识到高端集成系统的主流趋势，主要厂商正在大力开发包含了电动机、减速器与电控等集成电驱动系统，如大洋电动机，精进电动机等。在这方面几年后市场产品的格局会逐步清晰，国内汽车驱动电动机、变速器及齿轮厂家一定要在目前的关键时机，开发出适合大批量生产的具有竞争力的模块化集成电驱动系统。（完）**AUTO1950**

表5 特斯拉S60电驱动材料质量分布

材料	质量/kg	占比 (%)
电器零件	23.024	29.92
电线	0.039	0.05
钢	18.384	23.89
金属及弹性体	0.098	0.13
其他金属零件	6.000	7.80
铝合金	1.818	2.36
铜	27.224	35.38
其他非金属	0.120	0.16
其他塑料	0.063	0.08
塑料PA	0.154	0.20
塑料PC	0.034	0.04
总计	77	100



(a)



(b)

图32 特斯拉Model S 电驱动系统及减速器（来源：互联网整理）

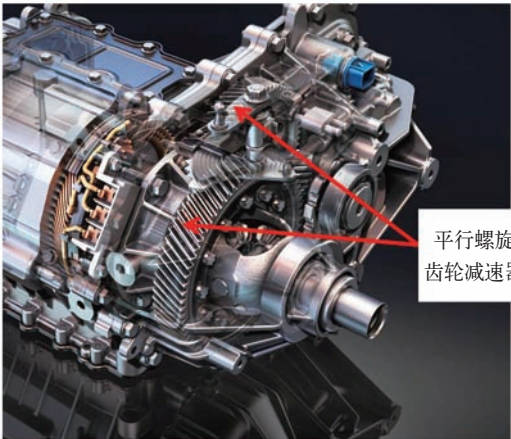


图33 通用雪佛兰Bolt电驱动系统



罗本进，斯图加特大学工学博士，德国博世公司动力总成及自动变速器系统专家，全德华人机电工程学会副主席，长期从事汽车动力总成产品的批量开发和前期研发，有多项职务发明专利。