

■华晨汽车工程研究院/王晓娟 邓庆斌 嵇晓霞 孟德伟

■郑州航空工业管理学院/王丽萍

基于虚拟样机技术的 电动汽车传动系统开发

在目前全球环境污染和能源危机日益严峻的情况下，发展纯电动汽车（BEV）和插电式混合动力汽车已成为国际公认的解决环境污染和能源危机的有效方法。纯电动汽车作为未来汽车发展的主要方向之一，以其绿色环保、低噪声、能源利用率高、便于操作等优点，越来越受到人们的青睐。

目前，对BEV的研究主要集中在能源存储、控制策略等方面。由于驱动电动机具有较好的牵引特性，因此BEV的传动系统不需要离合器和变速器，取而代之的是电驱动传动系统（EDU），又称双级减速器。BEV的车速控制由电动机控制器通过调速系统改变驱动电动机的转速即可实现。因此，BEV的动力系统由驱动电动机和EDU两部分组成，二者之间的匹配对整车的动力性、经济性、续航里程有显著影响。本文针对纯电动汽车，根据整车性能指标而设计开发一款EDU产品，并通过虚拟样机技术校核了EDU总成及关键零部件设计的合理性。

BEV系统结构和工作原理

本文是基于某款轿车而开发的纯电动驱动系统，该动力系统方案由动力电池、驱动电动机、控制系统、EDU等组成。驱动电动机与控制系统是电动汽车的关键部件，驱动电动机具有调速范围宽、转速高、

起动转矩大、效率高且有动态制动强和能量回馈等特性，当纯电动汽车减速或制动时，电动机可作为发电机将动能转化为电能存储到动力电池中；控制系统结构相对简单，只要根据蓄电池充电状态决定其运行或停止，系统结构原理如图1所示。

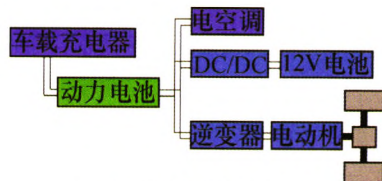
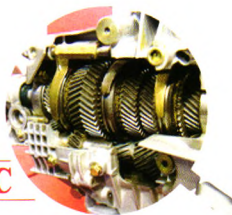


图1 纯电动汽车结构原理

BEV传动系统设计

纯电动汽车原则上不需要任何种类速比的变速器，因为驱动电动机具有广域高效、高功率密度的独特优势，能够满足车辆低速恒转矩、高速恒功率以及宽调速范围的复杂动力需求，从而使车辆实现从静止到运动的过程。但为提高电动机的效率，未来电动车的EDU产品会配备2、3挡速比或是一个简单的无级变速器。就目前而言，国内外批产的主流EDU产品均为一个挡位。本文介绍的EDU设计方案同样采用两轴式、单速比的传动方案，并具备机械式驻车机构。EDU的设计开发应基于整车的开发目标，利用Cruise软件评价整车的动力性、经济性和爬坡能力，从图2中可



可以看出，当EDU的总速比为9~9.5时，整车的经济性较好，且可以满足整车动力性和爬坡性能的设计指标。BEV变速器内部结构如图3所示。

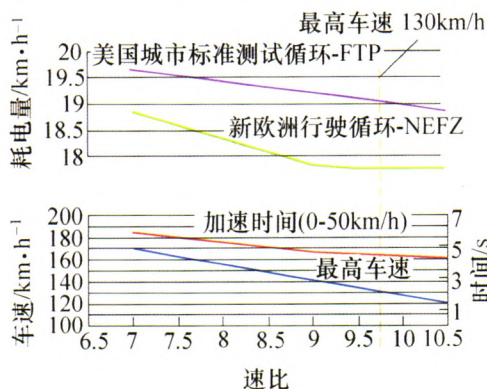


图2 整车动力性与经济性计算结果

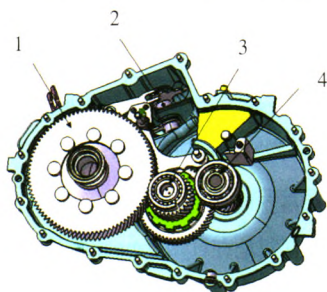


图3 BEV变速器内部结构

- 1.差速器分总成 2.机械式驻车制动系统 3.输出轴分总成
- 4.输入轴分总成

BEV传动系统仿真分析

EDU仿真模型的建立与分析基于RomaxDesigner和Hypermesh软件，RomaxDesigner是一个虚拟产品开发与模拟工作平台，可用于整个变速器系统的设计与分析，包括箱体、轴承与传动系统。

1. EDU仿真模型的建立

首先在RomaxDesigner软件中建立齿轴系、轴承、花键的仿真模型，在Hypermesh软件中建立箱体的有限元模型，并用RomaxDesigner有限元求解器进行缩聚，用于分析壳体柔性对系统的影响，并定义所有的系统属性与连接参数，从而建立完整的EDU仿真分析模型（见图4）。在分析过程中，与驱动电动机连接的壳体端面被约束六个自由度，将驱动电动机的功率转矩曲线作为输入功率载荷应用于Romax模型中，即可进行总成耐久性分析（包括齿轴系和轴承的可靠性分析、齿轮啮合错位量分析）、齿轮传递误差分析、壳体静

强度分析和壳体模态分析。



图4 EDU仿真分析模型

2. 齿轮的可靠性分析

在设定好的载荷工况下运行载荷谱分析计算，得到每个齿轮的损伤率和应力分析结果（见图5和附表）。

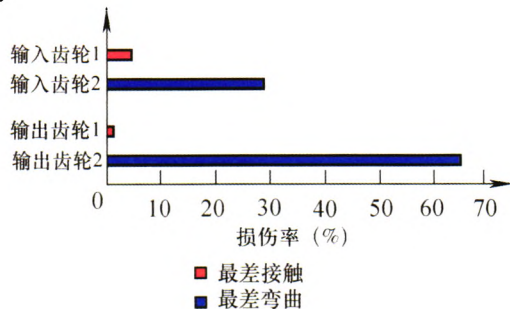


图5 各齿轮的损伤率

各齿轮应力分析校核结果

齿轮	接触疲劳寿命/h		弯曲疲劳寿命/h		综合寿命/h	评定结果
	左齿面	右齿面	左齿面	右齿面		
输出齿轮2	8.57×10^5	—	218.75	—	218.75	合格
输出齿轮1	—	9184.24	—	—	9184.24	合格
输入齿轮2	2.79×10^5	—	490.15	—	490.15	合格
输入齿轮1	—	3008.63	—	—	3008.63	合格

完整的齿轮分析报告不但提供了强度校核结果，而且详细列出了载荷谱中每种工况下的弯曲应力、接触应力、损伤率和安全系数。从分析结果可以看出，各齿轮的损伤率均低于70%，且在Romax中定义的载荷谱要比实车工况条件更加苛刻，因此各齿轮均满足强度要求，安全系数如图6所示。

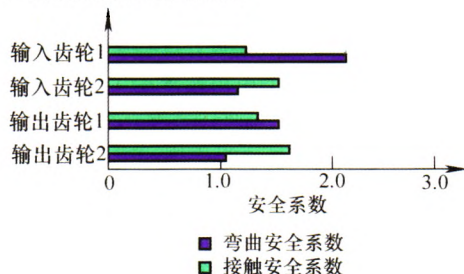
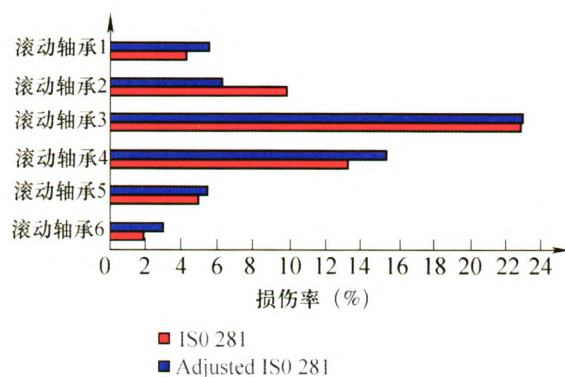


图6 各齿轮安全系数

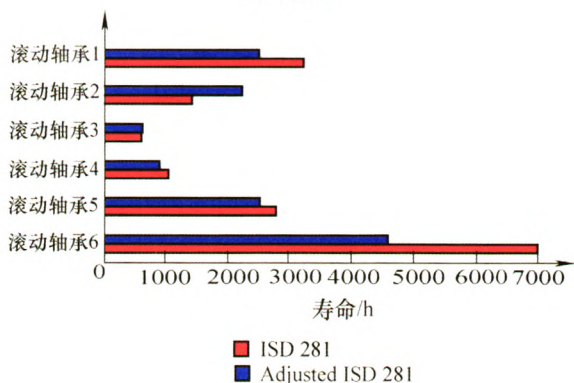
以上安全系数的计算结果均是未进行微观修形的前提下计算得出,后续通过合理的微观修形各齿轮的传递误差,安全系数将进一步得到提升。

3.轴承的可靠性分析

轴通过轴承支撑在EDU内,轴承寿命分析要充分考虑系统变形、轴承预紧、错位及滚子修形。该EDU产品所选择的轴承均为标准轴承,可以直接调出Romax Designer中的轴承数据,运行载荷谱,得到损伤率和寿命计算结果(见图7)。



(a) 损伤率



(b) 寿命

图 7

4.齿轮啮合错位量分析

传统变速器噪声主要包括敲齿和啸叫,因驱动电动机工作平稳、转矩波动小、无非承载齿轮啮合,所以EDU的工作噪声主要表现在啸叫。啸叫(Gear Whine)是由于齿轮系统啮合过程中齿对的传动误差而产生,其特点是由工作齿轮产生,具有明显的阶次特征,与齿数等相关。当壳体的固有模态被激励共振后,啸叫噪声变得更加严重。产生传递误差的因数主要有两方面,一是齿轮本身,包括齿轮宏观参数,齿轮的啮合刚度(由于在啮合过程中接触线长度及齿厚的变化,导致啮合刚度发生变化);二是齿轮的啮合

错位,啮合错位是由壳体、轴承、轴的变形以及轴承游隙等系统综合因数产生的。

本文首先分析了各载荷工况下齿轮的啮合错位,得到齿轮沿啮合线的位移,其主要是由于系统变形导致的,将位移组合便可得到齿轮副的组合变形,最大的张开量即为齿轮副的啮合错位量。利用Romax的微观几何分析模块得出齿轮传动误差,并分析了EDU系统综合变形引起的齿轮啮合错位对齿轮齿面载荷分布情况的影响,通过齿轮修形降低齿轮传递误差,改善齿轮啮合状况,优化前后效果如图8所示。

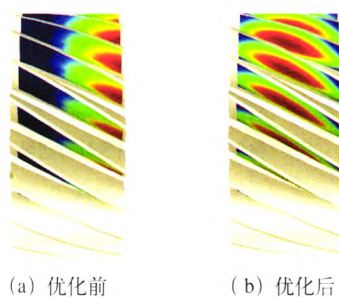


图8 优化前后效果对比

5.壳体静强度和模态分析

壳体有限元模型是在Hypermesh软件中建立的,随后将壳体有限元模型导入Romax中,并将有限元模型与轴承中心点进行连接,然后缩聚壳体有限元模型,并检查壳体缩聚的刚度矩阵,刚度矩阵缩聚计算结束后不再需要导入刚度矩阵等方面的操作,Romax会将刚度矩阵自动导入到EDU模型中。随后即可进行EDU系统计算,系统计算结果将提供壳体变形计算的边界条件,在完成EDU系统计算后即可开始对壳体进行有限元应力计算、变形计算和模态振型分析。壳体的静态分析结果如图9和图10所示,根据ADC10材料的100次循环的 $S-N$ 曲线,许用应力为190MPa,本次计算最大应力为124MPa,安全系数为1.53,EDU的壳体静强度满足设计要求。

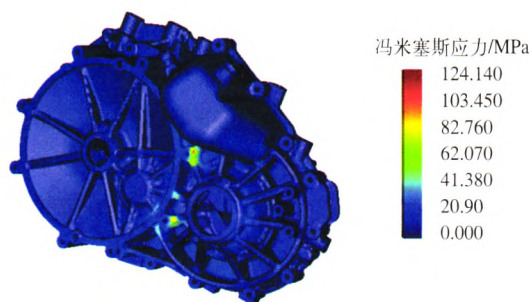


图9 应力云图

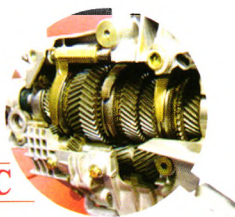
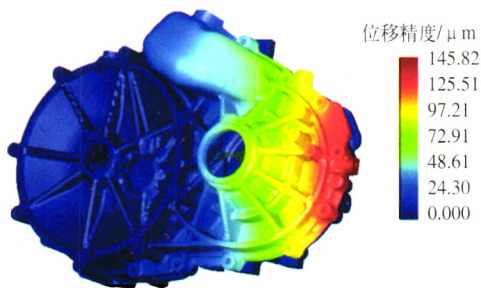


图10 位移云图

EDU的固有特性（固有频率、固有振型）对整车的振动和噪声有较大的影响，为了求解EDU的固有频率，要进行模态分析，以判断其在工作时是否会产生共振。物体理论上是有无穷阶模态，振动是这无穷阶模态的叠加，但一般的工程结构模态计算中，引起EDU共振的主要是较低阶次频率，因为高阶频率的振动由于阻尼的影响而衰减非常快，所以在实际振动中难以出现高阶共振。因此，本文对EDU壳体进行了约束状态下的模态分析，得出其前20阶的固有频率和固有振型，壳体前四阶的模态振型分析结果如图11所示。

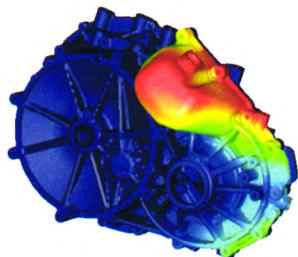


图11 第一阶：852.8687Hz局部振动

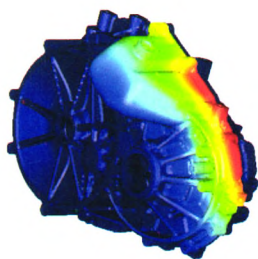


图12 第二阶：1484.786Hz局部振动

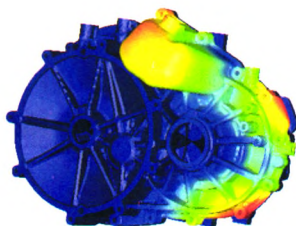


图13 第三阶：1655.0799Hz局部振动

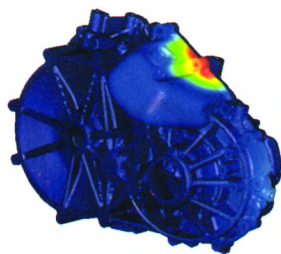


图14 第四阶：2028.8409Hz局部振动

图11 模态振型分析结果

分析结果表明，EDU壳体前四阶的频率分布范围为852.87~2028.84Hz，一阶频率为沿Z轴的扭转振动，出现弯曲扭转变形，壳体后顶部的振幅最大；二阶频率为绕Y轴的扭转振动，同样是壳体后顶部的振幅最大，出现弯曲扭转变形；三阶频率为沿Y轴的平移振动，离壳的局部振动剧烈；四阶频率为绕Y轴的扭转振动，壳体顶部振幅最大。由于驱动电动机的转速范围为0~10 000r/min，基频0~167Hz，在车辆行驶过程中，道路产生的激振一般不会超过100Hz，悬置产生的激振7~15Hz。经计算分析表明，EDU壳体各阶固有频率均在传动系统共振区之外，说明该EDU壳体满足动态特性要求。

结语

本文对纯电动汽车搭载的传动系统进行结构设计、虚拟仿真分析和优化设计，为EDU的设计开发提供一定依据，并得出以下结论：

- 1) 根据整车开发指标确定了传动系统的速比，满足了整车动力性、经济性、爬坡性能的要求。
- 2) 完成了对电驱动变速器的全部开发工作，包括壳体设计、齿轮宏观参数的确定、P挡机构设计和润滑系统设计等。
- 3) 对电驱动变速器的齿轴系、轴承、壳体等部件进行了仿真分析，并进行了优化设计，改善齿轮啮合状况，降低了传动误差，达到了较好的效果。

关键词：

电动汽车 传动系统 仿真分析

(收稿日期20130203)