

混合动力电驱变速器 耐久试验开发

混合动力电驱变速器EDU采用了插电式强混的形式，蓄电池和驱动电动机是EDU的主动动力源，发动机为辅助动力源。EDU包含了TM电动机、ISG电动机、双离合、二挡传动系统、差速器及同步器等主要部件。本文探讨了混合动力变速器耐久试验要求、试验台架的构建，并提出了试验评判的标准；根据混合动力电驱变速器的换挡控制策略，在传统机械式换挡耐久台架上进行改建，制定了EDU详细的换挡过程及试验规范，并通过变速器耐久试验、换挡耐久试验，考核了传动系统结构、换挡控制策略、换挡执行部件的有效性。

EDU耐久试验概述

混合动力电驱变速器EDU的样机如图1所示，EDU的耐久试验开发内容包括变速器耐久试验和换挡耐久试验开发，试验设备包括变速器耐久试验台和换挡耐久试验台。



图1 混合动力电驱变速器EDU样机

变速器耐久试验是变速器最重要的性能测试，它是整车用户最关心的性能之一，作为产品可靠性指标，会直接影响到产品的销售。变速器耐久性能与设计技术、全面质量管理、原材料和热处理等密切相关。变速器耐久试验分为台架试验与道路试验。汽车的使用条件十分复杂，道路试验是汽车在真实道路上进行的实际行驶试验，是开发工作中一个不可缺少的环节，需要花费大量的时间、资金及资源。在产品开发阶段进行耐久台架试验有利于更早验证变速器的综合耐久能力，避免直接进行道路试验失效后的被动，为开发工作节约了时间和资金，对验证传动系的耐久寿命具有重要的参考价值。

变速器换挡耐久性试验是变速器开发阶段试验主要组成部分，主要考核的内容是同步器的耐久性。换挡耐久试验是考核同步器寿命的重要试验，就目前了解到的CAE方法，很难模拟同步器系统完成同步器疲劳仿真，台架试验是目前最有效的方法。

1. 变速器耐久试验设备

变速器耐久台架试验是考核产品能在工作寿命内保持处于稳定状态的齿轮、轴和轴承的载荷验证试验，验证齿轮在循环载荷下不发生接触疲劳失效和弯曲疲劳失效。

(1) 设备构建 EDU变速器耐久试验使用的试验设备为3E-machine试验台架。台架的结构简图如图2



所示, 台架输入通过带传动代替发动机与EDU变速器连接, EDU变速器输出通过转接器和传动轴与试验台架的输出电动机连接。

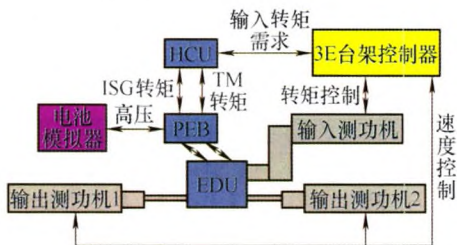


图2 变速器耐久试验台结构示意图

试验时运行转速控制系统内的台架输出电动机, 并采用台架输入, 连同EDU ISG和EDU TM电动机来施加所需的载荷。

电池模拟设备AV 900提供高压直流电源, 与PEB连接, PEB与HCU (混合动力控制单元)、EDU中的TM电动机及ISG电动机连接, 为TM电动机及ISG电动机提供电源, 并根据HCU的指令对电动机进行控制。

HCU会传达控制TM和ISG电动机的指令到PEB, 并同时向3E-machine台架控制器发送一个转矩指令。HCU所要求的外部信号从台架和EDU传感器直接获得, 也可以通过3E-machine台架控制器或外部模型系统 (如Mathworks XPC) 进行模拟。

EDU单元的冷却系统要符合整车上的方式, 通过基于台架的热交换器设置。其冷却能力必须能够在试验持续运行过程中驱散足够的热量。

台架配置了一个外部风扇来吹散变速器壳体上方的空气, 有助于保持总体的油温。

(2) 试验台的功能及特点 EDU耐久试验台由一台驱动电动机及控制系统、增速箱、两台测功电动机及控制系统、冷却系统、数据采集与分析系统、转矩/转速传感器、台架测试控制系统等组成 (见图3)。驱动电动机采用西门子公司1PL6224 (156kW, 4500r/min) 电动机, 两台交流测功机采用西门子公司低惯量变频电动机1PL6284, 控制系统都采用AFC变频系统; 测功机具备正转和反转的功能, 能满足混合动力汽车驱动和制动的模拟性能测试。为了模拟发动机的高转速在驱动电动机和变速器之间安装一个1:2的增速器。EDU变速器耐久试验台架对驱动电动机、测功机的技术要求如下。

驱动电动机: 功率165kW, 0~900 N·m, 转速范围0~4500r/min, 转矩控制精度 $\pm 0.2\%$ FS, 转矩测量精度 $\pm 0.2\%$ FS, 转速控制精度 ± 1 r/min, 转速测量精度 ± 1 r/min。

测功电动机: 恒功率区最大功率 ≥ 195 kW, 恒转矩区最大扭矩 ≥ 2328 N·m (800r/min), 电动机最高转速 ≥ 3300 r/min, 过载能力 $\geq 20\%$ (15min), 转矩测量精度 $\leq \pm 0.05\%$ FS, 转矩控制精度 $\leq \pm 0.1\%$ FS, 转速测量精度 $\leq \pm 1$ r/min, 转速控制精度 $\leq \pm 1$ r/min。

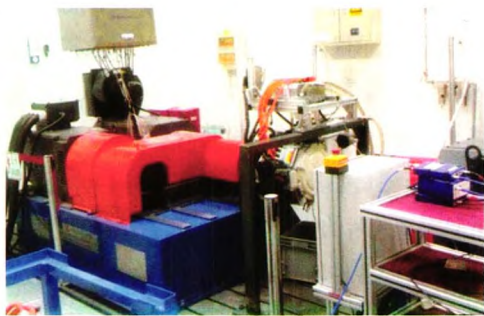


图3 EDU耐久试验台

2.换档耐久试验设备

(1) 设备开发基础 与机械式变速器同步器换挡耐久试验不同的是, EDU的换挡机构、液压系统是变速器集成一体, 由HCU根据换挡规律、换挡策略等进行自动控制, 适合于量产的混合动力电驱变速器同步器换挡耐久试验台需要新增设备。考虑在项目开发前期, 为了缩短开发周期及减低成本, 在量产换挡耐久台架到位之前, 决定先改造一台作为EDU临时换挡耐久试验台架, 用于验证同步器及相关液压驱动、执行原件的产品设计。

混合动力电驱变速器内已经包含液压系统, 在HCU发出指令后, 由液压系统来执行换挡及离合器开合的动作, 因此有别于传统手动变速器的换挡耐久试验台架要求。但是台架的机械结构基本与机械式变速器类似, 试验台主要由驱动电动机、惯性飞轮、传动轴、工装夹具等部分组成, 试验台采用惯性飞轮旋转惯量模拟车辆直线行驶惯量, 实现EDU换挡过程中所需输出轴处的惯量模拟, 尽可能确保台架上模拟惯量在EDU同步器结合过程中对其造成的冲击与整车行驶过程中的同步器同步过程所承受的冲量相当。因此, 考虑在现有的机械式换挡耐久试验台 (见图4) 上进行开发。

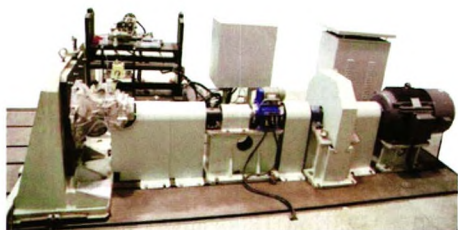


图4 传统机械式变速器换挡耐久试验台

该换挡耐久试验台的性能及技术指标如下：

- 1) 该台架可以测试参数位移 L 、换挡力 f 、转速降 n 三路信号，输入工业控制计算机并同步采集显示。
- 2) 所有显示仪表（包括传感器）以及控制器（驱动转速控制、温度控制等）均采用当今最为先进的现场总线相互与计算机连接，极其简单可靠。
- 3) 转矩测量采集速率可达到2ms以上，特别适合换挡试验等试验时的快速转矩测量。
- 4) 试验台各种功能接口都是开放的，借助这些功能接口，可以实现EDU所需要的功能。
- 5) 驱动电动机输出转矩0~117N·m，转速0~1498r/min。

(2) 试验台配置 驱动单元EDU换挡耐久试验台需要将EDU安装在一个带有驱动电动机的试验台上，电动机能在EDU输出端（锁定差速器）驱动EDU（见图5）。

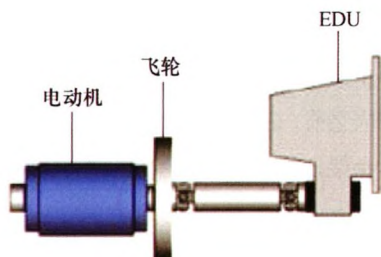


图5 换挡耐久试验台概念图

试验台配置要求：变频电动机功率30kW，额定转速6000r/min，额定转矩80N·m；转速控制稳定度0.5%；转速测量精度0.1%；转矩传感器量程0~200N·m，转速0~6000r/min；温度传感器量程0~200℃。这项试验中需要配备HCU，试验控制器模拟所有HCU所需的信号以便完成试验中的换挡操作。

换挡耐久试验测控系统如图6所示，换挡控制计算机通过诊断服务请求换挡或者提供电流。对于EDU变速器，通过CAN卡与控制模块HCU进行通讯，接收或

发送必要的控制指令，接收和记录必要的试验数据。软件程序可以设定变转速运行工况，并根据从HCU获得的挡位信息作为工况改变的触发点，同时可以向HCU发送控制相关信息（如变速器输出端转速），作为HCU控制换挡动作依据。

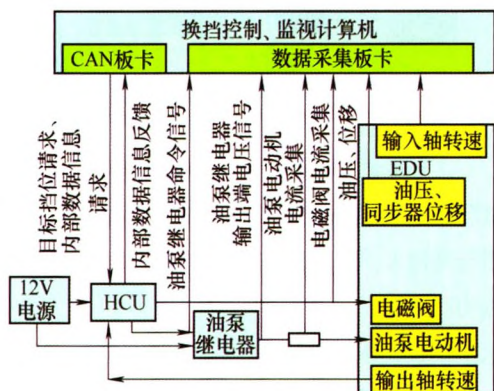


图6 EDU换挡耐久试验测控系统示意

试验条件

1. 变速器耐久试验条件

实验前完成以下准备工作：

- 1) 所有齿轮检验（包括主传动）数据应完整记录。
- 2) 装配新轴承并完全清洁。
- 3) 记录所有齿轮轴向间隙。

变速器内装配的齿轮应完成全部的检验和测量。正式试验前，变速器以转速2500r/min和30%输入试验转矩对每个挡位试验30min。这样可确保整个系统在试验前正常工作。在整个试验过程中变速器的总油温控制在 $90^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

2. 换挡耐久试验条件

本试验在已有合格变速器中采用随机抽取法，抽取样本数为三台。在变速器中的同步器装配之前，所有的同步器零部件的可用性必须经由工程核准和供应商质量校验，所有的同步器零部件需要测量，测量项目及要求如下：同步器磨损间隙，在200N的预负载下测量三次，取平均值；啮合锥面表面粗糙度；拨叉脚宽度；套筒沟槽宽度；套筒沟槽表面粗糙度。

测试结束时，以上测量项目需要重复一次，与测

试前数据进行比较。在变速器组装之前，应按相关规则测试液压阀组和驱动器以确保这些零部件的功能。

(1) 试验磨合 在换挡耐久测试前，对差速器齿轮进行焊接锁死，将变速器输出的一边连接到驱动电动机上，变速器的输入轴可以自由旋转。在装配完成的EDU上开始换挡耐久试验之前，需要先执行变速器磨合试验，要求见表1。磨合过程中注意变速器内是否有异常情况，并实时记录。完成磨合后将变速器内的润滑油放出，加注新的润滑油，并进行半小时的旁路过滤，直至达到试验要求的润滑油清洁度。

表1 走合工况

走合挡位	一档 ↔ 二挡
变速器输出轴转速/r·min ⁻¹	500
挡位停留时间/s	2
走合次数/次	500

(2) 试验条件 混合动力电驱二挡变速器要求测试试验台控制器有控制和保持电动机速度的能力，在试验中需要测量电动机的输出转速、输入轴的速度、变速器油箱油温和试验变速器挡位试验时实时显示挡位位置。

试验需要一个电风扇用来给变速器提供风冷，需要一个能测量0~200℃的温度传感器。传感器的信号需要通过放大器转换成为一个电压信号（0~5V），这个信号要与选择的记录器和控制器相匹配。

试验所需要采集、记录、显示的数据包括：输出轴转速；采集换挡过程信号（SV2电流、G1电流、换挡行程传感器位移信号），供判断换挡是否正常，同步器是否失效；监控换挡时液压系统主油压、C1电流、C2电流等信号，以便确认其他系统正常工作。

验证试验

1.变速器耐久试验

EDU变速器耐久试验周期见表2，试验应在5%的分程序中运行。每个分程序包含11个阶段，其中包括5个一档状态、5个二挡状态和1个倒挡状态。对于每个分程序，11个阶段应以表的顺序进行。倒挡假设为电动机逆向运转的一挡工况。ISG、TM和台架输入电动机之间的动力分配见表3。

表2 耐久试验载荷谱

挡位	工况描述	输入转速/r·min ⁻¹	输入转矩/N·m	时间/min	合计时间/h
一档	最大转矩	1700	427	264	81.06
	最大功率	5000	287	19	
	常用载荷	1600	320	4157	
	能量回收	2875	-116	420	
	最高转速	6800	140	3	
二挡	最大转矩	1700	757	29	140.76
	最大功率	5000	287	70	
	常用载荷	1600	320	8120	
	能量回收	2875	-116	222	
	最高转速	6800	140	3	
倒挡	载荷	1600	-368	60	1

表3 功率分配表 (单位: kW)

挡位	工况描述	发动机	ISG电动机	TM电动机	合计
一档	最大转矩	41.8	11.4	22.8	76
	最大功率	115.5	12	22.5	150
	常用载荷	19.3	11.8	22.5	53.6
	能量回收	-10.5	0	-24.5	-35
	最高转速	55	0	45	100
二挡	最大转矩	68.7	18.9	47.2	134.8
	最大功率	115.5	12	22.5	150
	常用载荷	19.3	11.8	22.5	53.6
	能量回收	-10.5	0	-24.5	-35
	最高转速	55	0	45	100
倒挡	载荷	-39.5	0	-22.2	-61.7

2.换挡耐久试验

实验前要对变速器进行加热，选择一个挡位并把变速器温度提升到90℃±5℃，然后开始测试。在所有换挡过程中保持温度很重要；在低速换挡时变速器周围需要隔离防护，并且在低温时需要外部加热。

试验过程如下：选择一档；确保一档挂入（从换挡位置看出/通过CAN总线从HCU报告得出）；在超过5s的时间内，输出速度提升到需要的输入轴速度值（见表4）；换为二挡；确保二挡挂入（从换挡位置看出/通过CAN总线从HCU报告得出）；在超过5s的时间内，输出速度下降到需要的输入轴速度值（见表4）；按要求的换挡次数重复以上步骤（见表5）。

表5概述了每个变速器需要完成的全部换挡次数，

试验台控制器以最小频率记录换挡次数。

表4 试验工况

试验挡位	一档↔二挡	一档↔二挡	N挡↔一档
变速器输出轴转速/r·min ⁻¹	500	700	173
挡位停留时间/s	1	1	5 (空挡), 1 (1挡)
试验次数/次	180 200	31 800	280 000

表5 同步器换挡试验次数

换挡形式	换挡开始时输入轴转速/r·min ⁻¹	换挡结束时输入轴转速/r·min ⁻¹	换挡次数
一档→二挡	4000	2138	212 000
二挡→一档	2500	4677	212 000
空挡→一档	0	1000	280 000
总计			636 000

试验结果及分析

1. 变速器耐久试验及结果分析

(1) 评判标准 变速器耐久试验后，变速器齿轮不应出现常见的齿轮失效形式，例如齿面疲劳点蚀、轮齿折断等。接触疲劳的失效形式有齿面灰斑和点蚀两种；弯曲疲劳的失效形式为全齿断裂。

EDU变速器耐久试验试验完成后应拆解变速器单元并目测检查以下项目：没有由于断裂造成的动态啮合中断；轴承挡上无剥落；允许有初始阶段的点蚀，但噪声不允许有明显增高（噪声≤90dB（A））。

(2) 试验结果及分析 所有取样EDU完成了表5的试验循环，试验过程中没有发生异常情况，经过拆解分析，轴承情况良好；试验后典型齿轮齿面的情况显示：齿轮按照试验评判标准没有出现齿面灰斑、点蚀、轮齿断裂等失效，接触区域合理，没有硬点；各齿轮试验前后的齿面测量数据结果显示齿面没有微观点蚀。变速器耐久台架试验零件拆解后显示EDU的齿轮、轴、轴承能够在试验循环下保持处于稳定状态，验证了设计耐久寿命，下一步将进行整车真实道路试验，更全面地评估16万km齿轴系的耐久寿命。

2. 换挡耐久试验结果及分析

三台EDU样本完成了表5的换挡次数，试验过程

中没有发生异常试验中断，如图7所示，换挡力根据设计要求为830N时，电磁阀的电流为1400mA，4号紫色线表示电磁阀的电流，换挡力符合设计要求时，从图7中3号蓝色线的同步器位置可以看出，同步时间控制在0.05s左右，满足设计要求。试验前后同步器、拨叉的磨损情况见表6。结果显示：同步器仍然存在一定的后备量，锥环及拨叉磨损情况良好，同步器性能可靠，达到设计寿命。

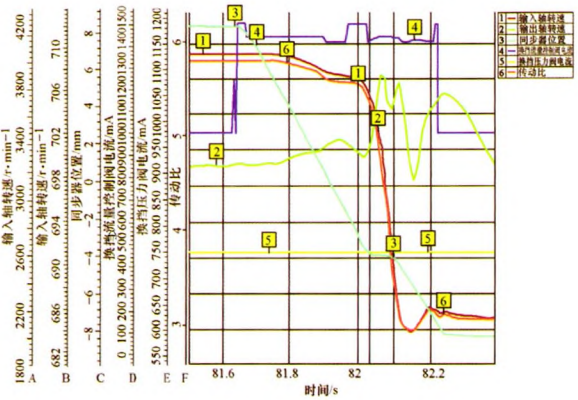


图7 EDU换挡耐久台架试验采集数据

表6 换挡耐久台架试验前后测量数据对比

测量项目	设计值	试验前测量值	试验后测量值
同步器后备量/mm	1.2~1.6 (目标值1.4)	一档: 1.46 二挡: 1.5	一档: 1.15 二挡: 0.975
锥环表面粗糙度/μm	Rz32	一档: 28.6 二挡: 30.2	一档: 1.56 二挡: 2.46
拨叉宽度/mm	7.2±0.45	7.32、7.34	7.3、7.36
齿套沟槽宽度/mm	8.7±0.1	8.72	8.74
拨叉轴大端直径/mm	24 f7	23.98	23.92
拨叉轴小端直径/mm	18 f7	17.97	17.966

结语

本文在传统机械式换挡耐久台架上进行改建，制定了EDU详细的换挡过程及试验要求。样机装配后，考核了传动系统结构、换挡控制策略、换挡执行部件的有效性，试验表明动力系统匹配合理，验证了传动系统、换挡执行部件的可靠性。

关键词:

混合动力 电驱变速器 耐久试验

(收稿日期20130621)