

# 越野动力系统动态倾斜试验装备及方法研究

符良才，张明朗，白李卓，龙焱祥，李锦林，李政宏  
比亚迪汽车工业有限公司

**【摘要】** 针对越野车特殊路况和激烈驾驶的倾斜场景，在缺乏测试装备及测试方法的情况下，自主设计开发了行业领先的多角度多场景动态倾斜测试平台，制定了模拟整车倾斜场景的台架测试方法。本文以某越野动力系统为研究对象，对发电系统及电动总成进行动态倾斜场景验证，并分析系统关键表征指标参数及潜在风险。研究成果为系统设计与验证提供依据，为企业制定内部倾斜试验标准提供参考。

**【关键词】** 越野，动力系统，动态倾斜，试验装备，试验方法

## Research on Equipment and Method of Dynamic Tilt Test for Off-road Power System

Fu Liangcai, Zhang Minglang, Bai Lizhuo, Long Yanxiang, Li Jinlin, Li Zhenghong  
BYD Auto Industry Co., Ltd.

**Abstract:** In view of the special road conditions of off-road vehicles and the scene of intense driving, in the absence of test equipment, the industry-leading multi-angle and multi-scene dynamic tilt test platform was independently designed and developed, and the bench test method was developed to simulate the vehicle tilt scene. This paper takes a cross-country power system as the research object, verifies the dynamic tilting scenario of the power generation system and electric assembly, and analyzes the key characterization index parameters and potential risks of the system. The research results provide a basis for system design and verification, and provide a reference for enterprises to establish internal tilt test standards.

**Key words:** off-road, power system, dynamic tilt test, test equipment, test method

## 引言

越野车行驶的路况复杂，环境恶劣，尤其我国地域广阔，地形、海拔、湿度和温度情况复杂多样，涵盖了各种极端严酷环境。在这些复杂的路况中上山下河、穿越沙漠、爬沟过坎等，常常存在着陡坡、乱石、坑洼、起伏、弹坑、壕沟等动态倾斜路面。另外，越来越多的越野爱好者喜欢剧烈驾驶，如高速转弯、漂移、急制动、急加速等，在这些驾驶情况下，动力系统的润滑冷却介质会由于重力、惯性及离心力等相对壳体平面出现一定角度的倾斜<sup>[1]</sup>。特殊路况和激烈驾驶相互作用，导致车辆连续瞬间动态交变倾斜。

车辆处于激烈驾驶和特殊路况的工作状态，对动力系统的润滑系统和曲轴箱通风系统有较大考验。如果设计不合理，会造成发动机润滑不足、曲轴箱通风系统窜油，以及电动总成的润滑不足、搅油等，导致烧机油、排放不达标、摩擦功增大、振动及噪声恶化等一系列问题。极端情况下，可能会由于润滑不足而造成动力系统运动件的拉伤和损坏<sup>[2]</sup>。所以对于动力系统动态倾斜场景验证尤为重要。

在缺乏测试装备及测试方法的情况下，通过对越野车倾斜场景及潜在风险分析，自主设计开发了采用液压动力驱动的多角度多场景动态倾斜测试平台，制定了模拟整车倾斜场景的台架测试方法。本文以某新能源越野车的动力系统为研究对象，为了识别发电系统和电动总成在动态倾斜场景下的潜在风险，验证不同运行及倾斜场景组合工况下的动力系统的关键表征指标参数和功能表现。

研究成果表明，自主设计开发的测试平台，实现了整车

倾斜场景台架模拟。制定的台架试验方法，实现了对倾斜场景下动力系统的潜在风险识别和功能表现验证。同时，可对系统设计与验证提供依据，为企业制定内部倾斜试验标准提供参考。

## 1 越野车倾斜场景及风险分析

越野车辆常上山下河、穿越沙漠、爬沟过坎等，行驶的路况复杂，环境恶劣。在这些复杂的路况中，常常存在陡坡、乱石、坑洼、起伏、弹坑、壕沟等倾斜路面，典型倾斜路况如图1所示，以上这些情况会使车辆及动力系统产生快速的俯仰、侧倾、翻转、上下颠簸等运动。



图1 越野车典型倾斜场景

另外，越来越多的越野爱好者喜欢剧烈驾驶，如高速转弯、漂移、急制动、急加速等，这些驾驶情况下，动力系统的润滑介质会由于重力、惯性及离心力等相对壳体平面出现一定角度的倾斜。

对于润滑系统，激烈驾驶工况和特殊行驶路况均可以转化为一定的爬坡角度进行复现。例如，在急加速时的效果与上坡效果相同，高速右转弯的效果与车辆左侧倾效果相同等，这些情况对发动机的具体影响角度可以用以下公式计算：

$$\tan\theta = \frac{a \cos\varphi}{a \sin\varphi + g} \quad (1)$$

式中， $\varphi$  是爬坡角度； $\theta$  是动态液面与水平面的夹角； $a$  是车辆实际加速度； $g$  是重力加速度。动态液面夹角如图 2 所示。

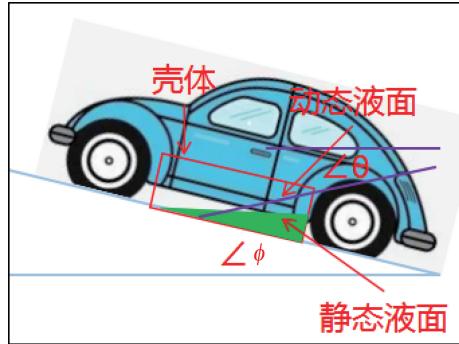


图 2 动态液面夹角示意图

车辆处于激烈驾驶和特殊路况的工作状态，对发动机的润滑系统和曲轴箱通风系统有较大考验。如果设计不合理，会造成发动机润滑不足，曲轴箱通风系统窜油等，导致烧机油、排放不达标、摩擦功增大、振动及噪声恶化等一系列问题。极端情况下，可能会由于润滑不足而造成发动机运动件的拉伤和损坏。同时也可能会造成电动总成的润滑不足、搅油等，导致摩擦功增大和齿轮、轴承等旋转部件损坏。

## 2 动态倾斜测试平台自主开发

### 2.1 装备开发难度

行业暂无现成的模拟混合动力汽车发动机系统带载动态倾斜场景的相关台架测试装备，主要难点如下。

1) 传统台架，由于铸铁平台及测功机过重，通过改造可实现稳态功能，但动态工况无法满足。

2) 动态快速交变过程中，供油、供水、供电、排烟等存在一定的安全隐患。

3) 倾斜场景工况瞬时动态交变，倾角大，控制精度高，需要有很强的控制能力。

4) 俯仰、左右侧倾需要同时组合交变，需要有合理的硬件设计。

5) 需要联动控制试验样件、测试平台、附属设备、数据采集、控制通信、安全保护等，需要有较强的联动交互能力等。

### 2.2 场景特征分析

#### 2.2.1 车辆极限倾斜角度

汽车最大爬坡度表征了汽车的爬坡能力，是评价汽车动力性的指标之一。常见车型的设计爬坡能力如下：普通轿车爬坡度为 32% 左右；四驱 SUV 爬坡度为 46% 左右；越野车

具有非常强悍的爬坡能力，最大爬坡度接近 100%，到目前为止，没有任何车型能克服 100% 以上的坡度，这是汽车的物理极限。爬坡角度  $\varphi$  与爬坡度的关系：爬坡度 =  $\tan\varphi \times 100\%$ ，如图 3 所示。最大行驶加速度与牵引力、车重、附着力及空气阻力息息相关，一般汽车加速度为  $0.7g$  左右，加速度  $a$  与倾斜角度  $\theta$  关系为  $\theta = \arctan \frac{a}{g}$ ，例如当加速度为  $0.7g$  时，倾斜角度为  $35^\circ$ 。爬坡角度和加速度共同作用下，其倾斜角度可通过式 (1) 计算，最大倾斜角度不会超  $45^\circ$ 。

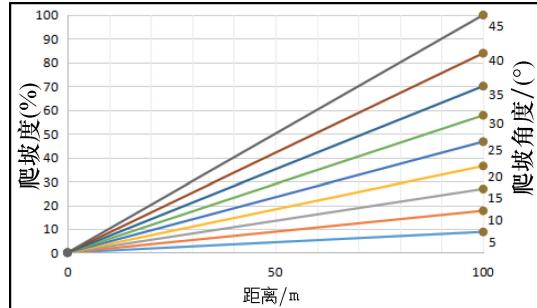


图 3 爬坡角度与爬坡度的关系

#### 2.2.2 车辆极限倾斜角度变化率

通过实车测试采集典型越野路谱，修正整车参数及道路限制条件，利用 CarSim 工具对激烈驾驶工况和极限行驶路况下的车辆进行整车动力学仿真建模，如图 4 所示。



图 4 激烈驾驶和极限行驶路况仿真示意图

通过仿真分析，可以得出车辆在典型越野路况下的倾斜变化率如图所示，可以从图 5 中得知，车辆的极限倾斜角度变化率不超过  $21^\circ/\text{s}$ 。

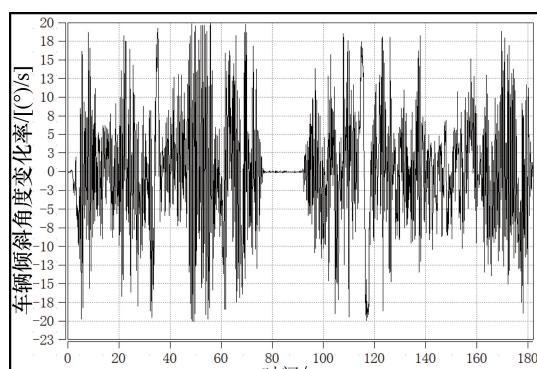


图 5 车辆倾斜角度变化率



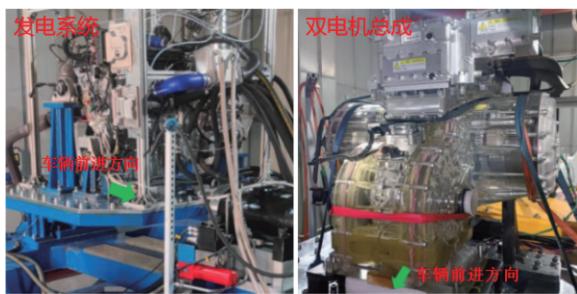


图 9 倾斜试验样品安装方式

## 3.2 试验方法研究

### 3.2.1 发电系统倾斜场景验证方法

为了验证不同倾斜场景下发电系统的润滑冷却系统及曲轴通风系统的设计目标及状态表现，进行了试验方法开发，见表 1。

表 1 发电系统倾斜场景验证方法

发动机转速/(r/min)	发动机负荷(%)	机油量/L	倾斜方向及角度			
			仰倾	俯倾	左侧倾	右侧倾
1000		3.6			0°	
2000	20	4.1	0°	0°	25°	
3000	60	4.6	45°	45°	27°	0°
4000	80	5.1			28°	30°
5000					29°	
					30°	

综合考虑试验样件状态及设计开发要求，控制不同发动机转速、发动机负荷、机油量、倾斜方向及角度（仰倾、俯倾、左侧倾、右侧倾）的参数组合，获得相应组合工况下的机油含气量、机油压力、曲通窜油量及发电效率等目标参数。机油压力通过采集主油道处引出的压力传感器直接得出，曲通窜油量通过观测油气分离器出口处的透明收集罐得出，发电效率通过发动机油耗及功率分析仪结果计算得出，机油含气量通过体积法<sup>[3]</sup>测量原理计算得出。

### 3.2.2 电动总成倾斜场景验证方法

为了验证不同倾斜场景下电动总成电机润滑冷却及输出轴齿轮甩油特性，进行了试验方法开发，见表 2。

表 2 电动总成倾斜场景验证方法

倾斜方向及角度	电机转速/(r/min)				
	500	1000	1500	2000	≥2500
水平 0°	√	√	/	√	√
仰倾 30°	√	√	/	√	/
仰倾 40°	√	/	/	/	/
仰倾 45°	√	√	/	√	/
俯倾 40°	√	/	/	/	/
左侧倾 30°	√	/	/	/	/

(续)

倾斜方向及角度	电机转速/(r/min)				
	500	1000	1500	2000	≥2500
左侧倾 42°	√	√	√	/	/
右侧倾 28°	/	/	/	√	/
右侧倾 30°	/	/	/	√	/
右侧倾 32°	√	√	/	/	/
右侧倾 33°	/	/	/	√	/

为了便于观测，要求安装特殊加工的透明箱体，并布置摄像头实时监控记录，在不同倾斜角度和不同工况下观察总成内的甩油情况，以及齿轮、轴承的润滑油液的多寡。考虑到透明箱体的材质、设计开发要求及电子泵和机械泵配合工作特性等，试验环境温度为室温，润滑油量为 5.9L，验证电子泵故障机械泵单独工作。预充油功能时间验证、倒车工况试验等本文不做展开。

## 3.3 场景验证目标达成分析

### 3.3.1 机油含气量达到行业优良水准

机油中存在空气会改变其黏度、密度等属性，影响其润滑冷却等性能。不同倾斜条件下，对发动机机油泵泵油效果产生直接影响，同时还存在发动机缸盖内机油因倾斜而造成的回油效果变化以及曲轴搅油问题。搅油产生的气泡逐渐向机油液面消散，越接近液面气泡密度越高，被机油泵大量吸入。

5.1L 机油量、发动机负荷 60%、左侧倾 27° 和 6.1L 机油量、发动机负荷 60%、左侧倾 30°（油泵位于右侧）的数据分析如图 10 所示，由分析结果可知：

- 1) 机油加注量过大时，可能存在一定程度的曲轴搅油情况，导致机油含气量有所增大。
- 2) 任何工况下，机油含气量均未超过行业一般要求的优良水准（≤15%）。

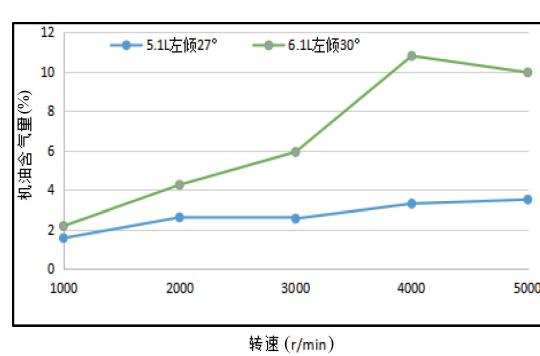


图 10 发动机机油含气量

### 3.3.2 机油量充足时机油压力不存在大幅下降

机油压力的产生是依靠油泵的泵油压力和机油流动阻力形成的，机油压力过低，会出现润滑不良、磨损、局部过热、异响等情况，严重时可能会造成发动机“烧瓦”。

分析结果见图 11~图 13，结果发现：

- 1) 当机油加注量在机油尺下刻度线（4.1L）以上时，不同机油压力与倾斜方向、倾斜角度虽不存在明确的关系，

但其压力不会出现大幅下降。

2) 当机油加注量低于机油尺下刻度线 (3.6L) 时, 且左侧倾达到 30° 时, 其明显低于其他机油加注量下的机油压力。

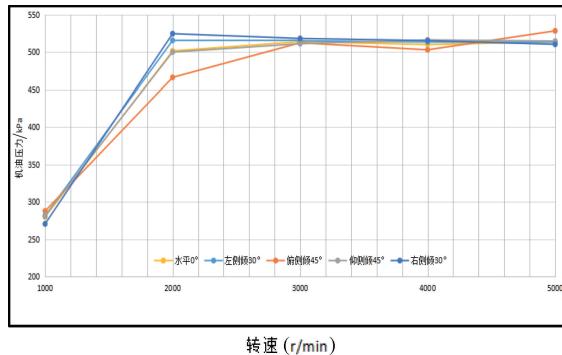


图 11 5.1L 负荷 80% 各极限倾角下的机油压力

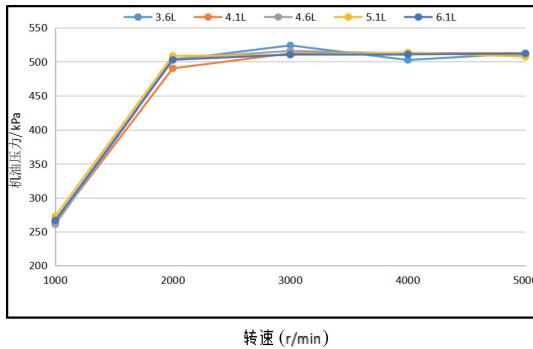


图 12 左倾 20° 负荷 80% 各机油加注量下的机油压力

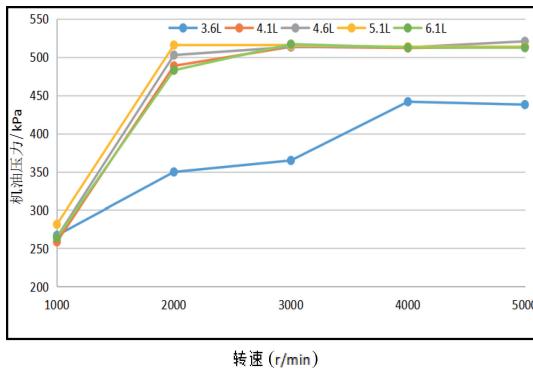


图 13 左倾 30° 负荷 80% 各机油加注量下的机油压力

### 3.3.3 个别极限倾斜场景曲轴箱通风系统窜油量有一定风险

不同倾斜条件下, 如果发动机润滑系统和曲轴箱通风系统 (简称曲通) 设计不合理, 会造成曲轴箱通风系统窜油, 导致烧机油、排放不达标等问题。

对各工况下的曲通窜油量进行汇总分析, 曲通窜油量部分结果汇总见表 3。由结果可知, 机油加注量少于 5L 时, 基本无窜油或极少量窜油; 只有仰倾和左侧倾的情况下出现窜油, 俯倾与右侧倾基本无窜油或极少量窜油, 应该与油气分离器安装位置有关, 该发动机油气分离器位于飞轮端排气侧缸盖上 (按车辆行驶方向为左后方处)。

表 3 不同控制参数下的曲通窜油量部分结果汇总表

试验工况	转速 5000r/min 负荷 80% 机油量 5.1L 俯倾 45°	转速 5000r/min 负荷 80% 机油量 5.1L 左侧倾 30°	转速 5000r/min 负荷 80% 机油量 5.1L 仰倾 45°
窜油图片			
窜油量	基本无窜油或极少量窜油	少量窜油	大量渗油

### 3.3.4 多方面综合影响发电效率

不同倾斜条件下, 可能存在润滑不足、搅油等情况, 从而造成摩擦功增大, 导致发电效率降低。发电效率等于发电功率除以发动机燃油完全燃烧产生的热量百分比。

分析对比了各极限倾角、不同机油加注量及不同左侧倾角的发电效率, 结果见图 14~图 16。由结果发现, 发电效率与倾斜方向、倾斜角度及机油加注量不存在明确的关系, 可能是由于产品结构、油泵位置等多方面综合相互作用。

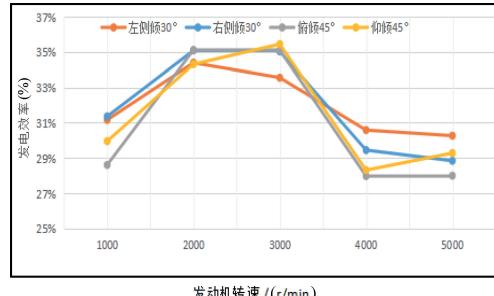


图 14 5.1L 负荷 80% 各极限倾角下的发电效率

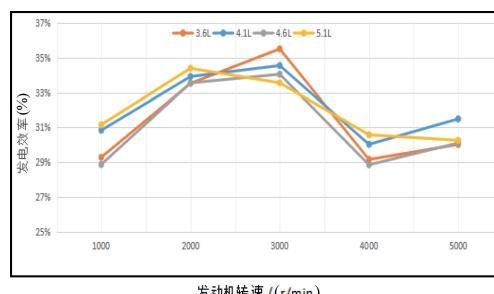


图 15 左倾 30° 负荷 80% 各机油加注量下的发电效率

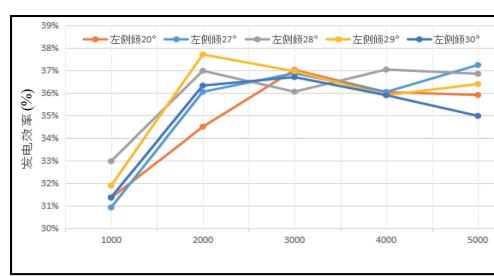


图 16 5.1L 负荷 60% 不同左侧倾角下的发电效率

### 3.3.5 产品结构特点影响电动总成润滑特性及效果

不同倾斜条件下，会造成箱体润滑油液面出现不同高度及角度，对油泵的泵油效果及齿轮甩油造成影响，可能造成润滑冷却不足，导致温度超限、磨损、异响、渗油等问题。试验过程中，监控记录的电机转子及齿轮有无润滑典型情况见表 4。

表 4 电机转子及齿轮有无润滑典型情况

部位	驱动电机		齿轮	
	左	右	左	右
典型情况图片				
润滑情况	有润滑	无润滑	有润滑	无润滑

驱动电机润滑油冷却试验结果汇总见表 5，可知：

- 1) 水平状态下，电机转速小于 1000r/min 时，由于转速低，泵油能力不足，仅依靠机械泵不能满足电机的润滑冷却需求。
- 2) 仰倾时，吸油口处油面上升，满足电机的润滑冷却需求。
- 3) 俯倾时，吸油口处油面下降，甚至吸空，导致无法有效泵油。
- 4) 左侧倾时，由于重力等因素影响，右电机无法润滑冷却，相反，右侧倾时，左电机无法润滑冷却。

表 5 驱动电机润滑油冷却试验结果

倾斜方向及角度	不同电机转速下左右驱动电机情况									
	500r/min		1000r/min		1500r/min		2000r/min		≥2500r/min	
	左	右	左	右	左	右	左	右	左	右
水平 0°	●	●	●	●	/	/	●	●	●	●
仰倾 30°	●	●	●	●	/	/	●	●	/	/
仰倾 40°	●	●	/	/	/	/	/	/	/	/
仰倾 45°	●	●	●	●	/	/	●	●	/	/
俯倾 40°	●	●	/	/	/	/	/	/	/	/
左侧倾 30°	●	●	/	/	/	/	/	/	/	/
左侧倾 42°	●	●	●	●	●	●	●	/	/	/
右侧倾 28°	/	/	/	/	/	/	/	●	●	/
右侧倾 30°	/	/	/	/	/	/	/	●	●	/
右侧倾 32°	●	●	●	●	/	/	●	/	/	/
右侧倾 33°	/	/	/	/	/	/	●	●	/	/

注：1. 左右驱动电机按整车前进方向定义。

2. ●代表该部位能够润滑。

3. /代表该部位不能被润滑。

输出轴齿轮甩油试验结果汇总见表 6，可知：

- 1) 水平 0° 及俯倾状态下，润滑油液面在齿轮上，能有

效甩油。

2) 仰倾时，齿轮无法接触润滑油，不能有效甩油。

3) 左侧倾时，右输出轴齿轮无法接触润滑油，不能有效甩油。相反，右侧倾时，左输出轴齿轮无法接触润滑油，不能有效甩油。

表 6 输出轴齿轮甩油试验结果

倾斜方向及角度	不同电机转速下左右齿轮情况									
	500r/min		1000r/min		1500r/min		2000r/min		≥2500r/min	
	左	右	左	右	左	右	左	右	左	右
水平 0°	●	●	●	●	/	/	●	●	●	●
仰倾 30°	●	●	●	●	/	/	●	●	/	/
仰倾 40°	●	●	/	/	/	/	/	/	/	/
仰倾 45°	●	●	●	●	/	/	●	●	/	/
俯倾 40°	●	●	/	/	/	/	/	/	/	/
左侧倾 30°	●	●	/	/	/	/	/	/	/	/
左侧倾 42°	●	●	●	●	●	●	●	/	/	/
右侧倾 28°	/	/	/	/	/	/	/	●	●	/
右侧倾 30°	/	/	/	/	/	/	/	●	●	/
右侧倾 32°	●	●	●	●	/	/	●	/	/	/
右侧倾 33°	/	/	/	/	/	/	●	●	/	/

注：1. 左右齿轮按整车前进方向定义。

2. ●代表该部位能够润滑。

3. /代表该部位不能被润滑。

## 4 结论

- 1) 自主设计开发的多角度多场景动态倾斜测试平台，实现整车特殊路况和激烈驾驶的倾斜场景台架模拟，并可覆盖发电系统及电动总成等产品。
- 2) 试验方法可有效地对动力系统动态倾斜场景进行验证。
- 3) 试验方法在任何工况下，机油含气量均未超过行业一般要求的较优水平（≤15%）；但机油加注量过大时，可能存在一定程度的曲轴搅油情况，导致机油含气量有所增大。
- 4) 机油量充足时，机油压力不存在大幅下降；当机油量低时，达到一定倾角后，机油压力瞬间大幅度下降，可能是机油泵存在一定吸空的现象导致。
- 5) 仰倾和左侧倾的工况下出现明显窜油，可能与油气分离器安装位置有关。
- 6) 不同的倾斜方向和角度对发电效率的影响未呈现一定的规律，除摩擦功影响外，也受产品结构、润滑方案等综合作用影响。
- 7) 驱动电机润滑油冷却和输出轴齿轮甩油润滑，与箱体结构及油泵安装位置息息相关。

## 参 考 文 献

- [1] 孙博, 曲函师, 李春旺, 等. 汽油发动机倾斜试验技术研究 [C]//中国汽车工程学会论文集. 北京: 机械工业出版社, 2019: 688-692.
- [2] 王力斌. 汽油发动机倾斜试验研究 [J]. 汽车实用技术, 2022, 47 (1): 136-140.
- [3] 余成龙, 刘磊, 马允普. 倾斜试验人工放油法机油含气量误差研究 [J]. 内燃机, 2017, (1): 52-55, 58.