

# 车辆高海拔环境起步性能试验研究

邹永显, 徐保荣, 王 伟, 张晓光

(北京特种车辆研究所, 北京 100072)

**摘要:** 对于全域机动车辆而言, 高海拔环境起步性能是评价其高原环境适应性和机动性的重要指标; 针对多个型号车辆存在的高海拔环境起步困难问题, 在系统开展车辆起步过程动力学分析的基础上, 从车辆本身所具有的动力和所受外界阻力两个方面对高海拔环境车辆起步性能影响因素进行了深入分析, 通过对某履带车辆高海拔起步性能的实车试验验证, 确定了发动机低速扭矩特性、传动油温、行驶坡度、使用工况是高海拔环境影响车辆起步性能的关键因素, 为车辆论证、研制、试验和使用工作的改进和发展提供了依据。

**关键词:** 车辆; 高海拔; 起步性能; 影响因素; 试验

## Experimental Study on Starting Performance of Vehicles in High Altitude Environment

Zou Yongxian, Xu Baorong, Wang Wei, Zhang Xiaoguang

(Beijing Special Vehicle Institute, Beijing 100072, China)

**Abstract:** Starting performance in high altitude environment is an important index to evaluate plateau environmental adaptability and mobility for universal motor vehicle. To the starting difficulty of many types of vehicles in high altitude environment, based on systemic the process dynamics analysis of vehicle starting, the influencing factors of starting performance in high altitude environment were analyzed from two aspects—vehicle driving force and resistance force. Through proving test to the starting performance in high altitude environment of a certain tracked vehicle, the key influencing factors are identified including engine torque characteristics at low speed, transmission oil temperature, running slope and operation mode, which provide evidence for demonstration, development, test and operation of vehicles.

**Keywords:** vehicles; high altitude; starting performance; influencing factors; test

## 0 引言

装备环境适应性是武器系统在实际环境下的性能、效益、可靠性等达到理想环境下的程度, 它是衡量武器装备质量水平高低和作战使用价值大小的重要标志<sup>[1]</sup>。对于全域机动车辆而言, 高海拔环境下的使用条件和环境状况相对于平原地区有很大差异, 对车辆的机动性会产生较大影响<sup>[2]</sup>。作为影响车辆快速机动能力的一项重要指标, 车辆起步性能与车辆所处的环境条件有直接关系。

在装备试验中多次发现, 不同型号车辆在 4500 米以上的高海拔环境下存在起步困难问题, 严重影响装备机动性能的发挥。基于此, 在系统开展车辆起步性能动力学分析的基础上, 从车辆本身所具有的动力和所受外界阻力两个方面对高海拔环境车辆起步性能影响因素进行了深入分析, 最后通过实车试验验证了理论分析的正确性。

## 1 车辆起步过程动力学分析

高海拔环境下车辆的起步性能是指车辆在高海拔环境下起步的难易程度, 也就是车辆迅速安全地起步的能力<sup>[3-4]</sup>。目前, 为提高车辆的起步性能, 履带车辆多采用液力机械传动型式。下面通过对液力机械传动车辆起步过程动力学分析来研究高海拔环境车辆起步性能影响因素。

### 1.1 车辆起步牵引力计算模型

对于液力机械传动车辆而言, 一般来说, 发动机动力传递路线如图 1 所示。其中, 一部分功率由冷却风扇、进排气装置等损耗, 另一部分由油泵等辅助系统损耗, 剩余功率经液力变矩器最终传递至两侧主动轮, 这部分功率称之为净功率, 对应的扭矩称为净扭矩。

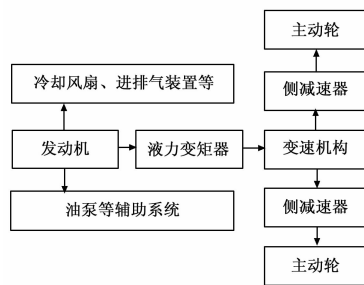


图 1 液力机械传动车辆动力传递路线

车辆动力由发动机输出端传递给液力变矩器泵轮, 而后由涡轮输出。那么涡轮输出端的扭矩按下式计算<sup>[5]</sup>

$$M_T = M_B K \quad (1)$$

式中,  $M_T$  为涡轮转速,  $M_B$  为泵轮转速,  $K$  为液力变矩器的变矩系数。

泵轮输入扭矩来自于发动机的净输出扭矩, 那么

$$M_B = M_{ej} \quad (2)$$

式中,  $M_{ej}$  为发动机输出的净扭矩。

主动轮牵引力  $F_q$  按下式计算

收稿日期:2014-12-20; 修回日期:2015-03-20。

作者简介:邹永显(1979-),男,山东即墨人,工程师,主要从事地面车辆系统论证与试验方向的研究。

$$F_q = \frac{M_T \eta_{i_{ch}}}{r_K} \tag{3}$$

式中， $i_{ch}$  为传动系统总传动比，是综合传动装置前传动比、变速机构传动比及侧减变速器传动比的乘积。 $\eta$  为变速机构与行动装置总效率， $r_K$  为主动轮工作半径。

将式（1）、式（2）分别代入式（3），得

$$F_q = \frac{M_{ej} K \eta_{i_{ch}}}{r_K} \tag{4}$$

### 1.2 车辆起步阻力计算模型

对于有级固定传动比变速机构，车辆在行驶方向上所受起步阻力为<sup>[6]</sup>

$$F_r = F_f + F_i + F_w + F_j \tag{5}$$

式中， $F_r$  为车辆的起步阻力， $F_f$  为车辆的滚动阻力， $F_i$  为车辆的坡度阻力， $F_w$  为车辆的空气阻力， $F_j$  为车辆的加速阻力。

各阻力的计算公式分别为

$$F_f = fmg \cos \alpha \tag{6}$$

式中， $f$  为车辆与地面的滚动阻力系数， $m$  为车辆总质量， $\alpha$  为车辆行驶的坡度角。

$$F_i = mg \sin \alpha \tag{7}$$

$$F_w = A_c Su^2 \tag{8}$$

式中， $A_c$  为空气阻力系数， $S$  为车辆迎风面积， $u$  为车辆行驶速度。

$$F_j = ma\delta \tag{9}$$

式中， $a$  为车辆的行驶加速度， $\delta$  为车辆在固定挡位下的质量转换系数。

将式（6）～式（9）代入式（5），得

$$F_r = fmg \cos \alpha + mg \sin \alpha + A_c Su^2 + ma\delta \tag{10}$$

### 1.3 车辆完成起步的条件

根据地面车辆直线行驶理论，车辆完成起步应满足以下两个条件：

1) 车辆在行驶方向上所具有的牵引力不小于其所受起步阻力，即

$$F_q \geq F_r \tag{11}$$

将式（4）、式（10）代入式（11），得

$$\frac{M_{ej} K \eta \sum i}{r_K} \geq mg(f \cos \alpha + \sin \alpha) + A_c Su^2 + ma\delta \tag{12}$$

2) 车辆在行驶方向上所具有的牵引力不大于其附着力，即

$$F_q \leq F_\varphi \tag{13}$$

## 2 高海拔环境车辆起步性能影响因素分析

### 2.1 基于车辆起步动力的影响因素分析

从式（13）的左侧看，影响车辆起步性能的因素有发动机净扭矩、液力变矩器的变矩系数、传动和行动系统总效率、主动轮工作半径，各参数对车辆牵引力及起步性能的影响如表 1 所示。

与平原相比，在高海拔环境下上述 5 个参数中发动机净扭矩和变矩系数容易发生显著变化。同时，在一定条件下，可通过对传动系统局部结构的调整来改变传行系统总效率或传动系统总传动比，以改善车辆的起步性能。

1) 发动机净扭矩：

在高原地区，大气压力和含氧量随海拔高度增大而减小的程度比较明显。据试验统计，海拔高度每增加 1 000 米，大气

压力约下降 11.5%，空气密度约减少 9%，不同海拔高度的气压和空气密度变化情况如表 2 所示。

表 1 车辆牵引力影响因素

序号	参数名称	变化趋势	对牵引力的影响	对起步性能的影响
1	发动机净扭矩	↓	↓	↓
2	变矩系数	↓	↓	↓
3	传行系统总效率	↓	↓	↓
4	传动系统总传动比	↓	↓	↓
5	主动轮工作半径	↑	↓	↓

表 2 不同海拔高度条件下气压和空气密度变化情况

序号	海拔高度/m	空气密度/(kg/m³)	气压/kPa
1	0	1.225	1 013.0
2	1 000	1.112	896.6
3	2 000	1.006	793.0
4	3 000	0.909	699.3
5	4 000	0.819	614.9
6	5 000	0.763	538.8

高海拔地区气压和空气密度的下降，使得压燃式柴油机的气缸充气密度降低，过量空气系数减小，从而导致燃烧不充分，后燃性严重，工作粗暴，燃油消耗量增大，排气黑烟严重，废气有害物质排放量大大增加，功率下降。图 2 为某型柴油机平原和海拔 4 500 米高海拔环境下的外特性。

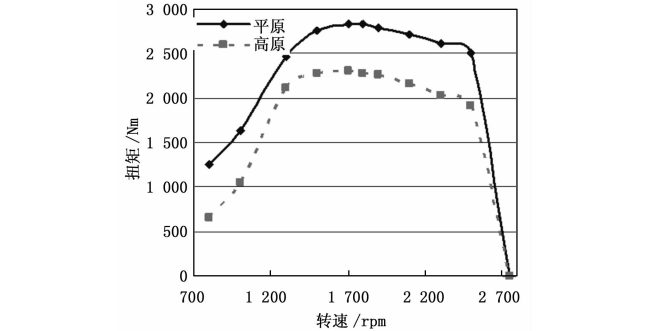


图 2 某型柴油机平原和高原外特性

由图 2 可以看出，与平原工况相比，高海拔环境下发动机在怠速、最大扭矩转速、标定功率点的扭矩分别下降 47.9%、18.4%、24.0%。从下降趋势看，两头下降多，中间下降少，即以最大扭矩点为起点向两侧延伸，发动机扭矩下降率逐渐增大。同样，发动机净扭矩的变体情况与之相似。而车辆起步性能的好坏，在很大程度上取决于发动机的低速特性，即低转速区域的扭矩输出情况，因此，发动机低转速区域扭矩的下降程度直接影响车辆的起步性能。

2) 液力变矩器变矩系数：

液力变矩器的变矩系数  $K$  用以表征液力变矩器的变矩能力，即变矩器在一定范围内无级地改变泵轮向涡轮传递功率的能力。对于固定型号的变矩器，一般认为其与速比呈确定的线性关系，即

$$K = f(i) \quad (14)$$

式中,  $i$  为液力变矩器涡轮与泵轮的转速之比。

这是基于液力变矩器效率特性不变的前提下得出的。事实上,液力变矩器在不同温度条件下传动效率会发生相应改变。

液力变矩器泵轮负荷特性按下式计算

$$M_B = \rho g \lambda_B D_y^5 n_B^2 \quad (15)$$

式中,  $\rho$  为液力变矩器用油密度,  $\lambda_B$  为泵轮力矩系数,  $D_y$  为变矩器循环圆直径,  $n_B$  为泵轮转速。

由式(15)知,变矩器泵轮负荷与其用油密度直接相关。随着传动油温的下降,油的粘度和密度相应增大,发动机带动变矩器泵轮的负荷也随之增大,变矩器的传动效率相应下降。

文献[7]研究表明,随着传动油温的下降,变矩器的传动效率呈下降趋势。由于试验的温度范围较窄,油温变化对变矩器传动效率的影响效果不是很明显。实车试验结果显示,车辆在正常行驶时,传动油温一般在75~100℃的范围内,经过充分行驶加温的车辆在-10℃左右的野外低温条件下停放48小时(加盖蓬布),传动油温会降至6~10℃,最高可下降94℃。如此大幅度的温度下降,必然会导致变矩器传动效率的显著下降。

根据变矩器传动效率  $\eta_B$  与变矩系数的关系  $\eta = Ki$ ,在变矩器速比范围不变的条件下,随着其传动效率的下降,变矩系数也相应减小。因此,传动油温的下降会使得变矩器变矩系数减小,从而降低车辆的起步性能。

## 2.2 基于车辆起步阻力的影响因素分析

从式(12)右侧看,影响车辆起步阻力的因素有车辆总质量、地面摩擦系数、车辆行驶的坡度角、空气阻力系数、车辆迎风面积、车速、车辆行驶加速度、质量增加系数。车辆平稳起步时,车速相对较低,车辆接近于静止状态,空气阻力和加速阻力可忽略不计,因此车辆起步时的行驶阻力的影响因素主要是车辆总质量、地面摩擦系数、车辆行驶坡度角。对于固定车辆,其总质量不可更改。地面摩擦系数和车辆行驶坡度角可作为起步性能试验的边界条件。为提高试验的可操作性,一般在高原地区野外条件下,选择平坦的自然土质路面进行车辆起步性能试验。

## 3 高海拔环境车辆起步性能试验

为验证不同因素对高海拔环境车辆起步性能的影响效果,在青藏高原对某履带车辆进行了不同条件下的起步性能试验。试验场地海拔高度为4500m。试验按先单一因素后综合因素的原则进行,分别进行了高海拔常温条件下平坦路面起步性能试验、高海拔低气温条件下平坦路面起步性能试验、高海拔低气温条件下复杂工况起步性能试验。

### 3.1 高海拔常温条件下平坦路面起步性能试验

该项试验的目的是考核高原正常条件下发动机功率满足车辆起步的能力。为保证起步性能试验不受发动机自身低温供油限制、传动油温较低、路面坡度、车重变化、地面附着系数等条件的影响,试验样车配至战斗全重(后续试验中均配至战斗全重),且试验前车辆经行驶预热,发动机水温为72℃,机油温度为74℃,传动油温为75℃,动力传动系统处于良好的工作状态。试验路面为平坦的土质路面。

车辆以怠速状态挂1挡起步,挂挡后发动机转速由800r/

min下降至580r/min左右,驾驶员踩下油门踏板,发动机转速缓慢上升,发动机持续冒黑烟,车辆由静止到运动用时30s。起步过程中,发动机转速、车速及挡位关系如图3所示。

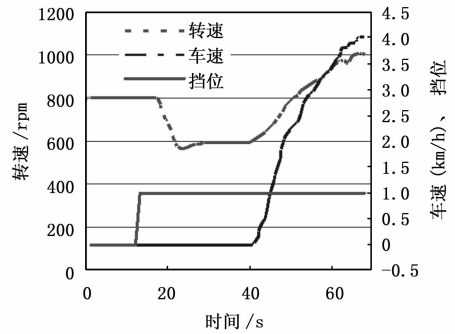


图3 高海拔常温条件下起步性能试验结果

试验结果表明,车辆挂起步挡后不能实现迅速起步,严重影响车辆的加速性。分析认为,在高海拔条件下,由于空气稀薄,发动机进气量明显减少,输出扭矩下降。同时,在低速起步阶段发动机增压器基本不起作用,导致输出扭矩进一步降低,不能克服传动装置反馈的地面阻力,发动机转速会被压至500~600r/min。此时,尽管控制器自动加油至所允许的最大油量,发动机仍不能够快速恢复至正常的怠速转速800r/min。

针对上述原因,采取了两方面措施。第一,优化发动机低转速(500~1100r/min)下的喷油策略,提高其动力输出能力,曲线如图4所示。第二,调整发动机喷油策略与传动装置换挡控制策略,在发动机接到起步信号后,改进PID控制参数,将起步瞬间的发动机目标转速由800r/min提升至1000r/min。

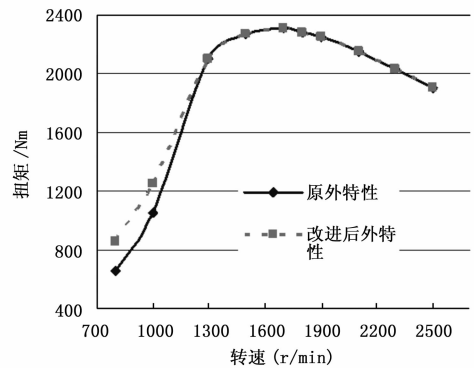


图4 发动机低速区扭矩改进效果

技术改进后,采用前述试验方法再次进行车辆起步性能试验。车辆怠速状态挂1挡起步,挂挡后发动机转速稳步提升至1000r/min左右,驾驶员踩下油门踏板,发动机转速继续上升,车辆可平稳快速起步。起步过程中,发动机转速、车速及挡位关系如图5所示。试验证明,高海拔环境下发动机低速区功率下降是造成车辆起步困难的主要原因。

### 3.2 高海拔低气温条件下平坦路面起步性能试验

与高海拔常温条件相比,高海拔低气温条件下液力变矩器的变矩系数会减小,最终会导致车辆牵引力的减小。该试验项

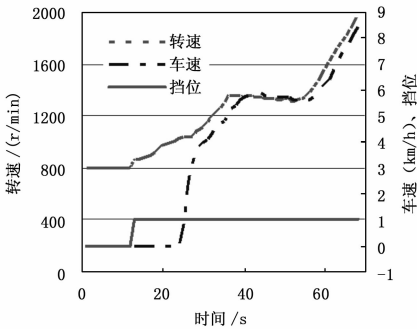


图 5 技术改进后高海拔常温条件下起步性能试验结果

目主要考核车辆在发动机功率下降和变矩系数减小双重条件下的起步性能。为保证起步性能试验不受发动机自身低温供油限制、路面坡度、车重变化、地面附着系数等条件的影响，试验样车配至战斗全重，试验路面为平坦的土质路面。

试验前车辆经 24 小时自然条件冷冻。当发动机水温达到使用说明书规定的 60 ℃使用条件后，开始车辆起步性能试验。试验共进行了 4 次，试验结果如表 3 所示。试验时，由于空挡下传动油温上升缓慢，采用制动车辆并挂挡的方式提高传动油温。

表 3 高海拔低气温条件下平坦路面起步性能试验结果

时间	发动机水温/ ℃	传动油温/ ℃	试验结果
10:55	60	28	发动机转速下降至 510 r/min,持续冒黑烟,无法起步。
11:00	65	36	发动机转速下降至 626 r/min,持续冒黑烟,无法起步。
11:05	70	43	发动机持续冒黑烟,可顺利起步。
11:10	75	45	发动机持续冒黑烟,可顺利起步。

由表 3 可以看出，在高海拔低气温条件下，当发动机以正常状态工作时，传动油温的下降会导致车辆起步性能的下降。车辆在平坦土质路面完成顺利起步，需保证传动油温不低于 43 ℃。同时，采用制动车辆并挂挡的方式提高传动油温效率较低，温升速率约为 1 ℃/min。

3.3 高海拔低气温条件下复杂工况起步性能试验

选择坡道起步和转向起步两种复杂工况考察坡道和转向对车辆起步的影响。试验选用坡度为 5°的自然土质路面，坡道起步试验和转向起步试验同步进行。试验时，先在坡底进行转向起步试验，而后进行坡道起步试验。坡道起步试验主要针对对停车场出现小幅度起伏的情况进行，因此选择坡度为 5°的自然土质路面。转向起步试验主要考核车辆边起步边转向情况下的机动能力，试验时车辆挂 1 挡起步，同时将方向盘向左（或向右）转至极限位置，观察发动机工作状态和车辆起步情况。试验结果如表 4 所示。

从表 4 可以看出，发动机在正常工作状态下，在传动油温较低时，车辆进行小坡度起步和转向起步较困难。当传动油温上升至 60 ℃时，车辆可完成坡道起步；当传动油温上升至

87 ℃时，车辆可完成转向起步，此时传动油温接近最佳工作范围 90~100 ℃。因此，在进行复杂工况起步时，将传动油温提升至最佳工作范围，有利于车辆动力性能的发挥，车辆起步效果更佳。

表 4 高海拔低气温条件下复杂工况起步性能试验结果

发动机 水温/℃	传动油 温/℃	转向起步	坡道起步
70	43	发动机转速迅速下降并熄火。	发动机转速下降至 541 r/min 持续冒黑烟,无法起步。
75	45	发动机转速迅速下降并熄火。	发动机转速下降至 604 r/min 持续冒黑烟,无法起步。
75	60	发动机转速迅速下降并熄火。	发动机持续冒黑烟,可顺利起步。
78	63	发动机转速迅速下降并熄火。	发动机持续冒黑烟,可顺利起步。
87	74	发动机转速迅速下降并熄火。	发动机持续冒黑烟,可顺利起步。
86	80	发动机转速迅速下降并熄火。	发动机持续冒黑烟,可顺利起步。
85	87	可完成转身并顺利起步。	发动机持续冒黑烟,可顺利起步。

4 结束语

车辆高海拔环境下的起步性能作为机动性能的一项重要指标，应当给予高度重视。试验结果表明，高海拔环境车辆起步性能的主要影响因素有：发动机低速扭矩特性、传动油温、行驶坡度、使用工况。改善发动机低速扭矩特性，提高车辆传动油温有利于改善车辆高海拔环境起步性能。此外，高海拔低气温条件下的坡道起步和转向起步是车辆起步试验的最恶劣工况。

针对车辆高海拔环境起步困难问题，在进行车辆总体设计时，不仅要提高发动机的功率储备，还应通过增加加温装置等措施提高传动油温的温升效率。

参考文献：

[1] 于衍华, 史国华, 等. 武器装备环境适应性认证 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2007.

[2] 张志强, 何勇灵, 等. 高海拔环境对车用柴油机的影响分析及对策 [J]. 装备环境工程, 2009, 143 (2): 27-31.

[3] 汪明德, 赵毓芹, 等. 坦克行驶原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.

[4] 肖殿东, 孙文军, 等. 一种针对起步能力的整车匹配计算方法 [J]. 机械研究与应用, 2011, 164 (5): 117-118.

[5] 朱经昌, 魏宸官, 等. 车辆液力传动 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.

[6] 余志生. 汽车理论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[7] 王建峰. 汽车液力变矩器油温对传动效率的影响 [D]. 天津: 河北工业大学, 2006.