

# 轮式车辆高原环境适应性评价研究

许翔, 刘瑞林, 董素荣, 周广猛, 刘刚

(军事交通学院, 天津 300161)

**摘要:** **目的** 研究轮式车辆的高原环境适应性及其评价方法。**方法** 通过分析轮式车辆环境适应性的基本内涵, 结合车辆高原使用情况调研、高原实地试验以及理论分析, 构建轮式车辆高原环境适应性评价指标体系, 应用层次分析法(AHP)和模糊数学理论建立轮式车辆多性能指标的综合评价模型。**结果** 轮式车辆的动力性、可靠性、起动性和热平衡等性能受高原环境影响最大, 大部分轮式车辆的高原环境适应性等级为“一般”或“较差”。**结论** 轮式车辆的高原环境适应性定量综合评价结果可以作为高原地区车辆论证、设计、选型或改进的参考依据。

**关键词:** 轮式车辆; 高原环境适应性; 层次分析法; 模糊综合评价

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2014.04.016

**中图分类号:** TJ812; X820.3 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2014)04-0082-06

## Fuzzy Comprehensive Evaluation on Plateau Environmental Adaptability of Wheeled Vehicles

XU Xiang, LIU Rui-lin, DONG Su-rong, ZHOU Guang-meng, LIU Gang

(Military Transportation University, Tianjin 300161, China)

**ABSTRACT: Objective** To study the plateau environmental adaptability and evaluation method of wheeled vehicles.

**Methods** The primary connotation of vehicle environmental adaptability was elaborated. Combined with the plateau investigation, test data and theoretical analysis, the evaluation index system of plateau environmental adaptability for wheeled vehicles was set up. A fuzzy synthetic evaluation model for the plateau environmental adaptability of vehicles was established by using hierarchical analysis and fuzzy evaluation theory. **Results** The power performance, reliability, start ability and thermal balance of wheeled vehicles were the major performance indexes obviously affected by the plateau environment. The results indicated that the plateau environmental adaptability was ranked "ordinary" or "poor". **Conclusion** The correct evaluation result of plateau environmental adaptability could provide the basis for demonstration, design, selection or improvement of wheeled vehicles on plateau.

收稿日期: 2014-04-16; 修订日期: 2014-04-30

Received: 2014-04-16; Revised: 2014-04-30

作者简介: 许翔(1978—),男,甘肃榆中人,博士,讲师,主要研究方向为动力机械高原环境适应性试验与评价。

**Biography:** XU Xiang(1978—), Male, from Yuzhong, Ganshu, Ph. D., Lecturer, Research focus: the plateau environment suitability test and evaluation of mechanical power.

通讯作者: 刘瑞林(1963—),男,教授,主要研究方向为动力机械环境适应性。

**Corresponding author:** LIU Rui-lin(1963—), Male, Professor, Research focus: dynamic mechanical environment adaptability.

**KEY WORDS:** wheeled vehicles; plateau environmental adaptability; analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation

我国是轮式车辆使用环境最严酷的国家之一,拥有世界上海拔最高、自然环境最恶劣的高原地区。轮式车辆作为机动作战与后勤保障的通用平台,是军事装备的重要组成部分。轮式车辆在高原地区使用时,由于受到各种高原环境条件的作用,导致车辆的材料劣化,总成及零部件寿命缩短,机动性、可靠性、维修性和安全性等均有不同程度下降,严重影响车辆的作战效能<sup>[1]</sup>。

环境适应性评价是装备环境工程工作的重要内容<sup>[2]</sup>。高原环境适应性评价为高原地区轮式车辆的选型和改进,以及高原型轮式车辆的论证、设计和评估等提供科学依据。针对轮式车辆环境适应性评价研究缺乏的问题,文中依据轮式车辆高原使用情况调研及高原实地试验数据,结合高原环境对轮式车辆性能影响机理分析,在深入研究轮式车辆高原环境适应性及其评价指标的基础上,构建了轮式车辆高原环境适应性评价指标体系。应用层次分析法(AHP)和模糊数学理论建立了轮式车辆多性能指标的综合评价模型,对5种典型轮式车辆的高原环境适应性进行了综合评价,为综合评价轮式车辆高原环境适应性提供了一种科学实用的定量评价方法。

## 1 研究方法

### 1.1 基本内涵

依据 GJB 4239《装备环境工程通用要求》中对装备环境适应性的定义,轮式车辆的高原环境适应性可以描述为车辆在其储存、运输、使用和维修等过程中,在可能遇到的各种高原环境条件的作用下能实现其预定功能、性能和(或)不被破坏的能力,是车辆的重要质量特性之一<sup>[3-4]</sup>。高原环境适应性试验与评价是考核及评估轮式车辆高原环境适应性的主要方法和手段。

高原地区海拔高(气压低)、温差大、紫外线强、风沙尘大、道路条件差等,对轮式车辆的各项性能有明显影响。例如,动力性下降、油耗量增加、起动困难、发动机易“开锅”、制动性和通过性变差、可靠性

和耐久性降低、故障率升高、维修保障困难等。

### 1.2 试验

环境适应性试验是考核、验证与研究轮式车辆环境适应性的重要手段。通过高原环境适应性试验,可以发现轮式车辆设计中存在的缺陷,并采取必要的纠正或防护措施,提高轮式车辆的高原环境适应能力。轮式车辆高原环境适应性试验一般包括高原实地试验和高原环境模拟试验<sup>[5]</sup>。

选取典型车型(指挥车、运输车、加油车和抢修车),分别在天津、格尔木、拉萨以及青藏公路沿线进行了高原实地试验,研究分析了高原环境对轮式车辆的动力性、起动性、热平衡性、经济性、制动性、可靠性、维修性能等的影响,为轮式车辆高原适应性评价提供了试验依据。试验结果表明,海拔高度每升高1 km,车辆起步加速性能下降4%~12.9%,最大牵引力下降3.3%~8.7%,多工况燃料消耗量增加2.7%~5.8%。在海拔4.5 km爬长坡工况下,车辆各总成普遍存在过热现象,部分车辆发动机无法达到热平衡状态,并出现“开锅”现象。车辆制动距离随海拔升高增大,制动器温升明显。指挥车10 000 km可靠性行驶试验和维修性试验表明,平均故障间隔里程为1400 km,当量故障率为1.08次/1000 km;高原地区车辆平均修复时间较平原增大3.8倍,每千公里修复性维修工时增加2.3倍。

### 1.3 评价

轮式车辆高原环境适应性评价,是根据车辆高原环境适应性指标要求,按照有关标准规定的方法或评价方法,对各项环境适应性指标要求达到的程度进行评价。环境适应性评价的实质是采用多组样本数据构成的向量对评价区域内环境适应性做出客观、定量的评判,是实现车辆环境适应性目标重要而有效的监督和控制手段,贯穿于车辆论证、研制、生产和使用的全过程<sup>[6]</sup>。环境适应性评价一般包括确定评价对象、评价指标、评价准则、评价方法、评价结果分析等内容。评价过程如图1所示。

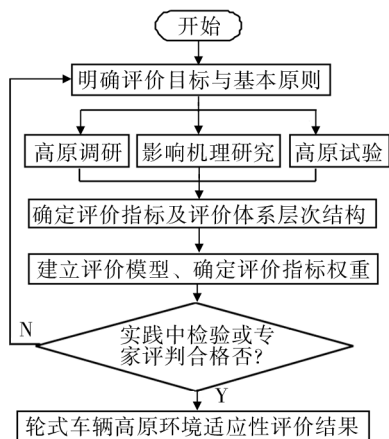


图1 评价流程

Fig.1 Flowchart of AHP evaluation

## 2 评价指标体系的建立

### 2.1 原则

建立科学合理的评价指标体系是进行车辆高原环境适应性评价的依据和核心。轮式车辆的性能参数较多,参数之间关系复杂,某些性能指标之间相互影响、相互制约,并且高原环境从多方面影响车辆的综合性能。为了系统、准确地评价车辆的高原环境适应性,评价指标体系的建立应遵循以下原则:首先,应突出高原地区对轮式车辆的特殊使用要求,即高海拔适应性、高寒适应性、越野机动性、制动安全性、使用可靠性及维修保障性等;其次,评价指标体系应体现代表性、可信性、实用性和独立性原则<sup>[7]</sup>。

### 2.2 评价指标的选取

轮式车辆高原环境适应性水平通过整车的性能参数、各总成及系统工作参数等反映出来。文中依据对高原的调研和轮式车辆高原实地试验结果,结合高原环境对车辆性能影响机理的分析,选取便于量化考核、且对车辆高原使用影响较大的性能及相应指标作为评价指标。

- 1) 动力性能:取平均车速和加速性能指标评价。
- 2) 起动力能:取最低起动温度及相应海拔高度,以及最低起动温度下的起动时间和暖机时间评价。
- 3) 热平衡性能:选取发动机额定工况下冷却液和排气温度评价。

- 4) 经济性能:选取等速行驶百公里燃油消耗量评价。
- 5) 通过性能:选取地形通过性能和地面通过性能评价。
- 6) 安全性能:选取车辆制动性能及驾驶室的人-机-环工程适应性能评价。
- 7) 可靠性能:选取车辆的平均故障间隔时间和平均故障间隔里程评价。
- 8) 维修性能:选取平均修复时间和维修费用评价。
- 9) 保障性能:选取保障资源配置(随车保障工具和设备、技术资料配备情况)、技术人员完成保障任务的能力评价。

### 2.3 评价指标体系

轮式车辆高原环境适应性能评价是典型的多目标、多变量、综合性评价问题,为了科学、系统、客观地对轮式车辆高原环境适应性水平进行综合评价,必须建立一个能够反映高原环境从多方面影响轮式车辆性能的多层次、科学实用的评价体系。利用层次分析法建立了轮式车辆高原环境适应性评价指标体系,如图2所示。

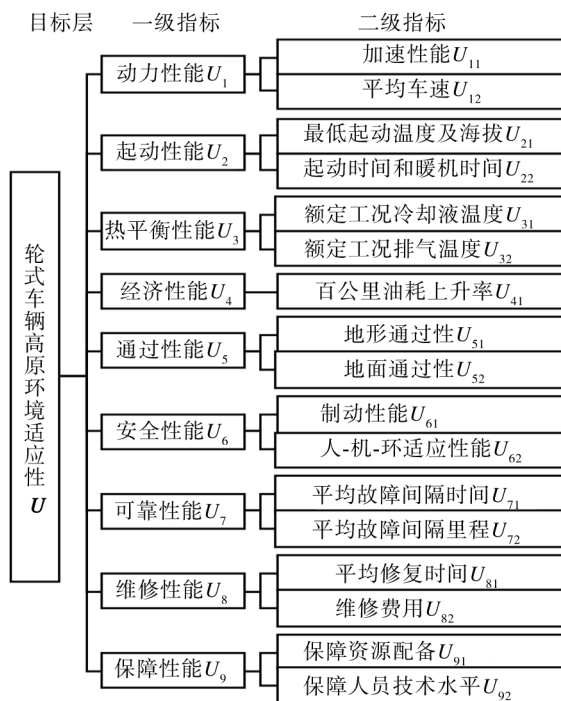


图2 轮式车辆高原环境适应性评价指标体系

Fig.2 The evaluation system of plateau environmental adaptability for wheeled vehicles

### 3 评价模型

#### 3.1 评价指标权重的确定

由于各一级评价指标对轮式车辆高原环境适应性的影响程度不同,以及各一级指标对应二级指标的相对重要性也不尽相同,故需要确定评价指标间的权重值。文中采用专家打分法和层次分析法(AHP)来确定评价体系中各级指标的权重。根据评价指标相对重要度评分标准(见表 1),针对各级评价指标  $U_1, U_2, \dots, U_i$  和  $U_{11}, U_{12}, \dots, U_{ij}$ , 进行两两比较,并赋予相应的重要性值(由专家咨询值确定),以此为基础构造判断矩阵  $A$ 。

表 1 评价指标相对重要度评价标准

Table 1 The evaluation criterion of index weight

评价标准	含义
1	表示两个指标相比,同等重要
3	表示两个指标相比,前者比后者略微重要
5	表示两个指标相比,前者比后者明显重要
7	表示两个指标相比,前者比后者重要的多
9	表示两个指标相比,前者比后者绝对重要
2,4,6,8	介于相邻两个评价标准之间的情况

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $a_{ij}$ 表示第  $i$  个指标相对于第  $j$  个指标的相对重要度,  $a_{ii} = 1, a_{ij} = 1/a_{ji} (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 。

对判断矩阵进行一致性检验:

$$C_I = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (2)$$

$$C_R = C_I / R_I \quad (3)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵  $R$  的最大特征根; $C_I$ 为偏差一致性指标; $R_I$ 为判断一致性指标; $C_R$ 为随机一致性指标。

当  $C_R < 0.1$  时,表明判断矩阵  $A$  具有满意的一致性,满足车辆高原环境适应性评价要求,否则应对判断矩阵作适当修正。采用乘积根法计算各级指标权重值,得到权重值向量  $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$ 。最终得到的评价指标权重见表 2。

$$W_i = \frac{\prod_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{i=1}^n (\prod_{j=1}^n a_{ij})} \quad (4)$$

#### 3.2 模糊综合评价

模糊综合评价应用模糊数学中的模糊变换原理,通过构造等级模糊子集,将被评价对象的模糊指

表 2 轮式车辆高原环境适应性评价权重表

Table 2 The index weight of plateau environmental adaptability for wheeled vehicles

一级指标	权重	二级指标	权重
动力性 $U_1$	0.2972	加速性能 $U_{11}$	0.2229
		平均车速 $U_{12}$	0.0743
起动力性 $U_2$	0.1404	最低起动温度及海拔 $U_{21}$	0.1169
		起动时间和暖机时间 $U_{22}$	0.0234
热平衡性 $U_3$	0.1192	额定工况冷却液温度 $U_{31}$	0.0894
		额定工况排气温度 $U_{32}$	0.0298
经济性 $U_4$	0.0185	百公里油耗上升率 $U_{41}$	0.0185
通过性 $U_5$	0.1024	地形通过性 $U_{51}$	0.0768
		地面通过性 $U_{52}$	0.0256
安全性 $U_6$	0.0758	制动性能 $U_{61}$	0.0632
		人-机-环适应性能 $U_{62}$	0.0126
可靠性 $U_7$	0.1903	平均故障间隔时间 $U_{71}$	0.1585
		平均故障间隔里程 $U_{72}$	0.0317
维修性 $U_8$	0.0351	平均修复时间 $U_{81}$	0.0263
		维修费用 $U_{82}$	0.0088
保障性 $U_9$	0.0211	保障资源配备 $U_{91}$	0.0158
		保障人员技术水平 $U_{92}$	0.0053



标量化,基于模糊运算隶属度大小评价轮式车辆的高原环境适应性。模糊综合评价可以归纳为如下几个步骤:

1) 确定评价因素集: $U=(U_1, U_2, \dots, U_m)$ ,根据评价指标体系得到因素集,即 $U=(U_{11}, U_{12}, U_{21}, U_{22}, \dots, U_{91}, U_{92})$ 。

2) 确定评价评语集: $V=(V_1, V_2, \dots, V_n)$ ,将轮式车辆的高原环境适应性评价指标分为“很好、较好、一般、较差、很差”等5个等级,采用基准模式向量 $V=(0.9, 0.7, 0.5, 0.3, 0.1)$ ,分别代表高原环境对轮式车辆性能指标的影响程度为很轻、较轻、一般、较重、严重等5个等级<sup>[8]</sup>。定义在标准环境条件下(1个标准大气压、环境温度为25℃)试验所得的各项性能指标均值作为轮式车辆高原环境适应性技术等级的“好”值。参照相关轮式车辆环境技术要求考核试验标准,依次确定各级评价指标的技术等级。例如,定义动力性指标下降幅度 $\leq 5\%$ 为“很好”,下降10%为“较好”,下降15%为“一般”,下降20%为“较差”,下降幅度 $\geq 25\%$ 为“很差”。

3) 确定各因素集的权重向量: $W=(W_1, W_2, \dots, W_m)^T$ ,已由前面的层次分析法得到。

4) 确定各评价项目的模糊综合评判矩阵: $R=(\gamma_{ij})_{m \times n}$ 。根据评价等级 $v_i$ 确定每一个评价方案相

对于评价指标的隶属度,从而得到从因素集 $U$ 到评语集 $V$ 的模糊关系矩阵 $R$ 。

$$R = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ \gamma_{m1} & \cdots & \gamma_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $n$ 为评价方案; $m$ 为评价指标; $\gamma_{ij}$ 为方案 $j$ 对应于评价指标 $i$ 的隶属度, $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ 。

5) 评价结果及分析:根据评价指标权重向量 $W$ 和模糊综合评判矩阵 $R$ ,通过模糊方程 $B=W \cdot R$ ,计算得到车辆高原环境适应性的模糊综合评价结果。按照最大隶属度原则,确定评价对象的最优排序。

## 4 应用实例

为验证建立的轮式车辆高原环境适应性评价指标体系及相应的评价模型,针对在同一高原地区使用的5种典型车辆,运用模糊综合评价法对其高原环境适应性进行综合评价。

通过调研和统计分析、高原环境试验及专家综合衡量打分的方式,得出了5种轮式车辆二级评价指标的隶属度值统计,见表3。根据前面已获得的评价指标权重,通过模糊运算,得出了5种轮式车辆

表3 几种典型轮式车辆高原环境适应性评价结果

Table 3 The plateau environmental adaptability evaluation of some typical wheeled vehicles

项目	车型				
	A型	B型	C型	D型	E型
加速性能	0.3	0.5	0.5	0.9	0.9
平均车速	0.5	0.7	0.5	0.7	0.7
最低起动温度及海拔	0.3	0.5	0.5	0.5	0.7
起动和暖机时间	0.3	0.5	0.7	0.7	0.5
冷却液温度	0.3	0.7	0.7	0.7	0.9
排气温度	0.5	0.5	0.5	0.9	0.5
百公里油耗上升率	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5
地形通过性	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7
地面通过性	0.3	0.5	0.7	0.5	0.5
制动性能	0.5	0.5	0.7	0.7	0.7
人-机-环适应性	0.3	0.3	0.7	0.7	0.5
平均故障间隔时间	0.3	0.5	0.7	0.5	0.7
平均故障间隔里程	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7
平均修复时间	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5
维修费用	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3
保障资源配备	0.3	0.3	0.7	0.7	0.7
保障人员技术水平	0.7	0.5	0.3	0.7	0.5
综合性能评价价值	0.3607	0.5441	0.5919	0.6731	0.7305
高原适应性评语	较差	一般	一般	一般	较好

高原环境适应性综合评价结果。

按照最大隶属度原则,5种轮式车辆的高原环境适应性由高到低的排序为:E型>D型>C型>B型>A型。按照评价值落在评语集“0.9,0.7,0.5,0.3,0.1”所在区间的不同进行反推,E型车辆的评价值最高,且介于0.7(较好)与0.9(很好)之间,可以将其高原环境适应性定性为“较好”,其他评价结果的定性评价以此类推。

## 5 结论

1) 低气压和低温是影响轮式车辆高原环境适应性最重要的环境因素,轮式车辆的动力性、可靠性、起动性和热平衡等性能受高原环境影响最大。目前,高原使用的大部分轮式车辆的环境适应性等级为“一般”或“较差”。

2) 轮式车辆高原环境适应性评价是一项复杂的系统工程,高原环境从多方面影响车辆的性能,评价目标及指标较多且相互影响。科学、系统、客观地对轮式车辆高原环境适应性进行综合评价,需要综合运用环境适应性机理分析、高原试验等手段。

3) 通过应用层次分析法和模糊数学等基本理论知识,把轮式车辆在高原环境下的适应性评价问题,通过数学方法,将一个主观性的问题表征为一个客观的数学问题,从而实现对车辆客观统一的高原适应性评价。对于高原地区轮式车辆的论证、选型、评价等工作的开展提供了一定的理论依据。

### 参考文献:

[1] 刘瑞林. 柴油机高原环境适应性研究[M]. 北京:北京理工大学出版社,2013.  
LIU Rui-lin. Research on Plateau Environmental Adaptability of Diesel Engine[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press,2013.

(上接第69页)

[14] 党晓勇,赵英,庞明磊,等. 橡胶密封件加速老化试验影响因素分析及验证[J]. 装备环境工程,2013,10(4):5—8.

DANG Xiao-yong, ZHAO Ying, PANG Ming-lei, et al. Analysis and Verification of Influence Factors of Accelerated Aging Tests for Rubber Seals[J]. Equipment Environmental Engineering,2013,10(4):5—8.

[2] 胥泽奇,张世艳,宣卫芳. 装备环境适应性评价[J]. 装备环境工程,2012,9(1):54—59.

XU Ze-qi, ZHANG Shi-yan, XUAN Wei-fang. Environmental Worthiness Evaluation of Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering,2012,9(1):54—59.

[3] GJB 4239—2001, 装备环境工程通用要求[S].

GJB 4239—2001, Equipment Environmental Engineering General Requirements[S].

[4] 宣兆龙,易建政. 装备环境工程[M]. 北京:国防工业出版社,2011.

XUAN Zhao-long, YI Jian-zheng. Equipment Environmental Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press,2011.

[5] 许翔,刘瑞林,董素荣,等. 车辆高原环境模拟试验技术发展现状综述[J]. 装备环境工程,2012,9(6):63—66.

XU Xiang, LIU Rui-lin, DONG Su-rong, et al. On Development of Vehicle Simulated Plateau Environmental Test Technology[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012,9(6):63—66.

[6] 于衍华,史国华,山春荣,等. 武器装备环境适应性论证[M]. 北京:兵器工业出版社,2007.

YU Yan-hua, SHI Guo-hua, SHAN Chun-rong, et al. Environmental Worthiness Argumentation of Weapon Equipment[M]. Beijing: Weapon Industry Press,2007.

[7] 张志强,徐斌,何勇灵,等. 基于AHP评价方法的发动机性能评价[J]. 兵工学报,2008,29(5):625—628.

ZHANG Zhi-qiang, XU Bin, HE Yong-ling, et al. Engine Performance Evaluation Based on Analytic Hierarchy Process[J]. Journal of China Ordnance, 2008, 29(5):625—628.

[8] 王宪成,何星,胡俊彪,等. 发动机环境适应性模糊评价研究[J]. 内燃机工程,2013,34(2):88—91.

WANG Xian-cheng, HE Xing, HU Jun-biao, et al. Research on Engine Environmental Adaptability Based on Fuzzy Evaluation[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2013,34(2):88—91.

[15] 党晓勇. 弹用发动机橡胶密封件加速寿命评估影响因素分析[C]//航天科工第一届环境与可靠性技术交流会论文集. 2010:218—221.(余不详)

DANG Xiao-yong. Study for Sealed Performance of the Rocket Motor with Rubber Seals[C]//Proceeding of CASIC 1st Environment and Reliability Technology Congress. 2010:218—221.