

高寒山地环境特种车辆底盘适应性评价研究

朱涛¹, 甄伟^{2*}, 闫帅¹, 刘成绪¹

(1.94221 部队, 山东 日照 276800; 2.92212 部队, 山东 青岛 266000)

摘要: **目的** 解决特种车辆底盘在高寒山地特殊自然环境中的适应性问题, 以提高特种车辆在此类环境下的使用效能和保障能力。**方法** 通过深入分析高寒山地环境的特点, 结合某型特种车辆底盘的任务需求、结构组成及历史运行数据, 识别其受环境影响的关键分系统。进一步建立一套适用于高寒山地环境的特种车辆底盘评估指标体系, 并运用熵权-TOPSIS 方法对多因素下的车辆底盘进行综合评价和型号选择。**结果** 构建了评估指标体系, 并应用熵权-TOPSIS 方法对特种车辆底盘进行了有效的评价和优选。基于新的研究成果、实际使用经验和评估过程, 提出了一系列提升高寒山地地面武器系统效能的策略。**结论** 通过提出的评估体系和优选方法, 可以有效地提高特种车辆底盘在高寒山地环境下的适应性和性能, 同时为类似环境下的地面武器系统使用和维护提供科学的决策支持和实践指导。

关键词: 高寒山地; 高原; 特种车辆; 评价方法; 熵权; 环境适应性

中图分类号: TJ81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9242(2024)06-0023-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.06.004

Worthiness Evaluation of Special Vehicle Chassis in High-altitude Mountainous Environments

ZHU Tao¹, ZHEN Wei^{2*}, YAN Shuai¹, LIU Chengxu¹

(1. Unit 94221, Shandong Rizhao 276800, China; 2. Unit 92212, Shandong Qingdao 266000, China)

ABSTRACT: The work aims to address the worthiness issues of special vehicle chassis in the unique natural environment of high-altitude mountainous regions and enhance the operational effectiveness and support capabilities of special vehicles in such conditions. By conducting an in-depth analysis of the characteristics of high-altitude mountainous environments and integrating the mission requirements, structural composition, and historical operational data of a specific type of special vehicle chassis, the study identified key subsystems that were significantly affected by environmental factors. An evaluation indicator system suitable for the high-altitude mountainous environment for special vehicle chassis was further established, and the entropy weight-TOPSIS method was applied for a comprehensive assessment and model selection of the chassis under multiple factors. An assessment indicator system was established and the entropy weight-TOPSIS method was applied to effectively evaluate and select special vehicle chassis. Based on new research findings, practical experience and the evaluation process, a series of strategies were proposed to improve the performance of ground weapon systems in high-altitude mountainous regions. The proposed evaluation system and selection method can effectively enhance the adaptability and performance of special vehicle chassis in high-altitude mountainous environments, while also providing scientific decision-making support and practical guidance for the

收稿日期: 2024-04-08; 修订日期: 2024-04-24

Received: 2024-04-08; Revised: 2024-04-24

引文格式: 朱涛, 甄伟, 闫帅, 等. 高寒山地环境特种车辆底盘适应性评价研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(6): 23-30.

ZHU Tao, ZHEN Wei, YAN Shuai, et al. Worthiness Evaluation of Special Vehicle Chassis in High-altitude Mountainous Environments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(6): 23-30.

*通信作者 (Corresponding author)

use and maintenance of ground weapon systems in similar settings.

KEY WORDS: high-altitude mountainous regions; plateau; special vehicle; evaluation method; entropy weight; environmental worthiness

“高寒山地”定义为海拔在 3 000 m 以上、气候寒冷、空气稀薄的山地^[1]。我国拥有世界上面积最大的高寒山地地域，海拔 3 000 m 以上的地域约占 26%^[2]，并多位于边疆地区。从高寒山地的定义可以看出，相关环境中海拔高，温度低，且道路通常情况复杂，存在积雪；车行道路较少，连续弯道多，道路坡度大，路面较窄，导致对驾驶车辆技术要求较高。另外，由于居民点稀疏，距离交通枢纽较远，难以获取支援保障。

某型特种车辆为针对特殊工作设计，其底盘系统是保障快速反应、远程机动的有力支撑，对提高驻地/机动状态转换速度、远程投送速度有着至关重要的作用^[3-4]，其外廓尺寸、质量等方面超过一般通用载人及货运车辆设计限界。该型特种车辆在使用单位拓展的使命任务中，有可能机动部署至高寒山地地区开展行动，但特殊环境下其分系统部分性能出现劣化，制约了高寒山地地域相关工作的开展。因此，开展其底盘系统环境适应性相关评价研究，并制定有效的提升措施，对确保在极端条件下任务的圆满完成，有着十分重要的现实意义。

1 高寒山地环境特点及影响分析

1.1 高寒山地地域气候环境

我国高寒山地主要位于西藏、青海、甘肃、云南等省，分布相对广泛。高寒山地地域随海拔上升，普遍出现明显的大气压力下降，空气密度降低，含氧量降低；平均气温低，昼夜温差加大；气候干燥，日照辐射强，风沙大等特点^[5]。通过相关数据^[6]分析可以发现，随海拔高度上升，大气温度、大气压力、大气密度、水沸点等参数随之降低或减小，海拔每上升 1 000 m，大气平均温度下降约 5 °C，压力降低约 12%（8%~13%^[7]），密度降低约 10%，沸点下降约 3 °C（所列数据为平均值，主要影响设备长期运行状况。若考虑短期极限情况，还应参考各类因素的极值），如图 1 所示。

1.2 某型特种车辆底盘任务剖面及组成

某型特种车辆其寿命期剖面主要有运输、贮存、执行任务等状态事件，其中执行任务为特殊环境下重

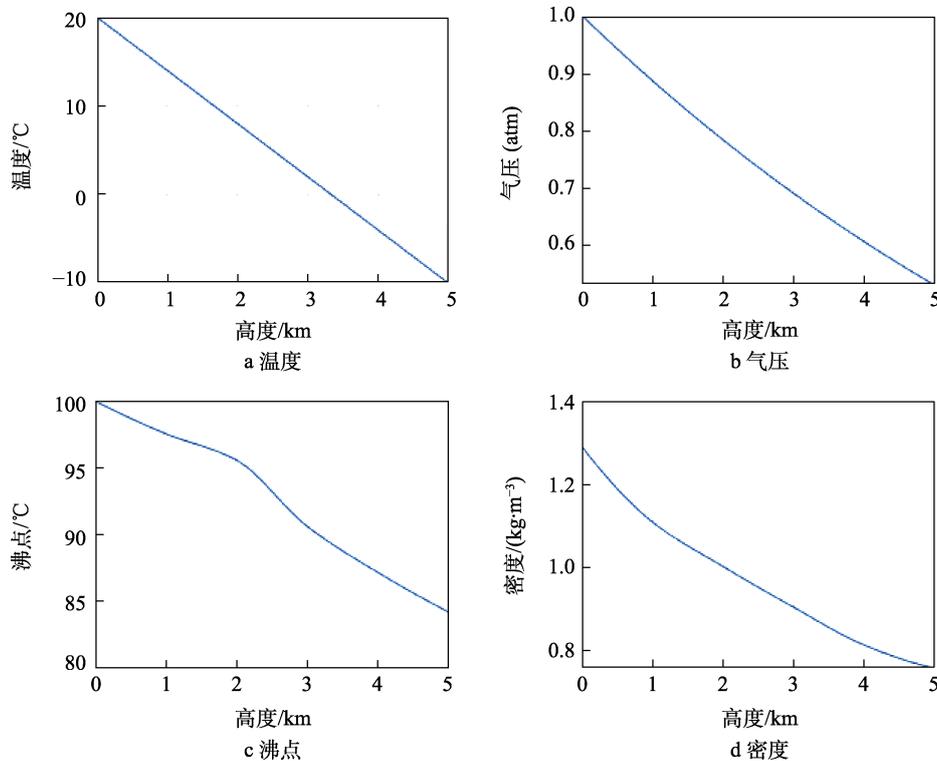


图 1 高原环境大气参数

Fig.1 Atmospheric parameters in plateau environments: a) temperature; b) pressure; c) boiling; d) density

点考虑的内容。根据该型特种车辆底盘选型论证总要求及技术说明书, 其执行任务中应具备如下主要功

能: 携车载设备机动; 为配备的设备供电。主要分系统组成如表 1 所示。

表 1 某型特种车辆底盘基本组成
Tab.1 Basic components of a specific type of special vehicle chassis

系统总成	分系统			
	1	2	3	4
动力系统 (A)	发动机	油箱	进排气及润滑等动力辅助装置	
传动系统 (B)	传动箱	分动器	车桥	传动轴
行走系统 (C)	车轮	悬架	车架	
转向系统 (D)	转向器	转向传动机构	转向液压助力机构	
制动系统 (E)	行车制动	驻车制动	排气制动	液力缓行器
电气系统 (F)	电源	起动装置	仪表和信号装置	照明设备
驾驶室 (G)	座椅	外壳	空调器	暖风除霜装置
其他 (H)	接地装置	电缆	取力发电装置	车载设备接口

1.3 高寒山地环境因素对车辆底盘产生的影响

1) 低压缺氧。低压环境将直接影响发动机的工作状态^[8], 随海拔高度的增加, 气压逐渐降低, 空气密度逐渐减小, 进排气等动力辅助装置工作效率降低, 空气中氧气的绝对含量也变小, 导致发动机动力性下降。由于空气密度下降, 导致进入发动机活塞缸的混合气体变浓, 发动机油耗上升^[9]。某型底盘示例数据如图 2 所示。另外, 由于空气密度降低, 发动机散热性能下降 (包括变速齿轮油散热), 机油耗量增加^[10]。

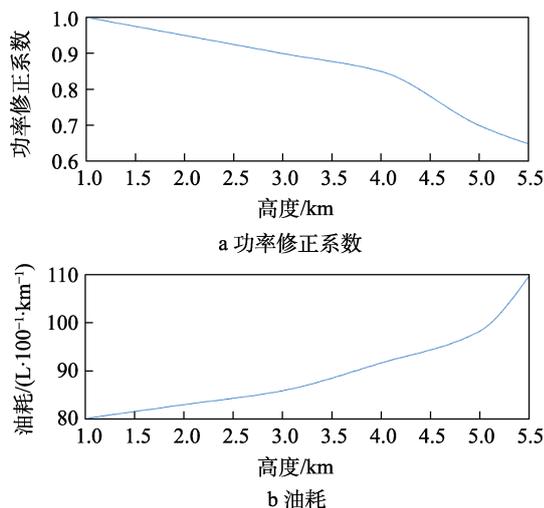


图 2 随高度变化的功率修正系数与油耗
Fig.2 Power correction coefficient and fuel consumption with altitude variation: a) power correction coefficient; b) fuel consumption

2) 低温。低温环境对车辆的性能有明显影响, 当环境温度为-30~-20℃时, 电子器件会出现灵敏度降低^[11]、可靠性下降, 各类电缆、油管变硬变脆^[12], 车辆一次起动机成功率降低, 电池亏电^[13]、油脂凝固、气路结冰、车

窗结霜等现象大面积出现, 润滑等动力辅助装置工作效率不好, 造成动力及传动系统磨损增大, 故障率升高。详细故障问题与分析可见相关参考文献^[14]。

3) 强辐射。高原地区大气层较薄, 紫外线辐射较平原地区更加强^[15]。长期暴露在强辐射环境中, 会加速车辆非金属部件 (如塑料、橡胶) 的老化^[16], 缩短使用寿命。

4) 复杂多变的地形地貌。高原地区地形复杂多变, 山路陡峭, 弯路遍布。这对车辆的通过性、操纵稳定性、爬坡能力等提出了更高要求。由于路面质量较差, 制动系统应用频繁, 在使用液力缓行器时, 需注意变矩器温升。同时, 地质岩性和沙砾含量较高, 容易造成刮蹭或损坏车身底盘^[17]。

受高寒山地环境因素影响的特种车辆的主要分系统见表 2。

表 2 受高寒山地环境因素影响的特种车辆主要分系统
Tab.2 Primary subsystems of special vehicles affected by high-altitude mountainous environments

环境因素	影响部位
低压缺氧	A1、A2、A3
低温	A3、F1、F2、G3、G4、H2
强辐射	C1、H2、G2
复杂地形	C3、D1、D2、E1、E3、E4

2 环境适应性评价指标体系

环境适应性是指装备 (产品) 在其寿命期内可能遇到的各种环境的作用下, 能实现其所有预定功能和性能和 (或) 不被破坏的能力^[18]。对应于某型特种车辆底盘, 则需要其在特定环境下完成相应功能 (参见 1.2 节中执行任务中主要功能)。针对高寒山地条件下车辆装备易发问题, 核心功能指标需涵盖: 机动性评价指标, 在规定时间内完成不低于指定距离的机动; 能源供应评价指标, 为车载设备进行不低于指定

时长的供电；基础环境适应性指标，须在指定环境下可实现功能；可靠性与维修性评价指标，可靠性和维修性指标在指定的范围内。以上相关指标为门槛类指标，均需达到最低要求，否则相关底盘不能满足相关任务需要。在此基础上，进一步拓展，对于满足以上基本条件的各型底盘进行进一步指标评估。

2.1 特种车辆底盘高寒山地环境适应性评价指标体系构建

在构建评价指标体系时，遵循科学性、全面性、可操作性的原则，即能够准确反映特种车辆底盘在特殊环境下的性能，指标体系全面覆盖影响适应性的关键因素，以及指标易于理解和测量。基于核心功能，将特种车辆底盘的环境适应性评价指标体系进一步细化，以确保其在特殊环境条件下均能保持高效稳定的性能。以下是对环境适应性评价指标体系的具体构建：

1) 机动性能评价指标。机动性能是衡量特种车辆底盘在复杂地形和恶劣环境下移动能力的指标，具体评价指标包括爬坡能力、越障能力、机动速度、机动距离。

2) 能源供应评价指标。能源供应评价指标关注车辆底盘为车载设备提供稳定电源的能力，具体评价指标包括供电稳定性、供电持续时间、供电功率。

3) 基础环境适应性指标。基础环境适应性指的是选型底盘可在指定的海拔高度、温湿度进行工作的能力，具体评价指标包括最高工作海拔高度、温度范围。

4) 可靠性与维修性评价指标。可靠性与维修性是衡量特种车辆底盘在长期使用过程中的稳定性和维护便利性的重要指标，主要评价指标包括平均故障间隔时间 (MTBF)、平均修复时间 (MTTR)。

通过上述评价指标体系的构建，可以相对全面地评估特种车辆底盘在特定环境下的环境适应性。这些指标不仅涵盖了底盘的基本功能性能，还包括了其在极端条件下的稳定性和可靠性。通过对这些指标进行评估和测试，可以有助于提升特种车辆底盘的设计水平和使用效能，确保其在复杂环境下能完成预定任务。

2.2 多型特种车辆底盘相关指标

对于 2.1 节相关指标,进行进一步明确以下内容。

1) 机动性能评价指标。爬坡能力 (增益型指标)：车辆在满载下爬纵坡能力，以百分比形式进行描述，其值为高度与水平距离的比值。越障能力 (增益型指标)：车辆底盘垂直越障高度，其值为不造成车辆损伤的翻越障碍物最高高度。机动速度 (增益型指标)：车辆底盘在高寒山地 (四级公路) 可达到的最大安全车速。机动距离 (增益型指标)：车辆未进行补充加油情况下，高寒山地条件最长机动距离。

2) 能源供应评价指标。供电稳定性 (增益型指标)：底盘在高寒山地条件下是否能够完成取力供电，为车载设备稳定供电 (能/不能：1/0)。供电持续时间 (增益型指标)：底盘在高寒山地条件下完成指定距离机动后，对车载设备能够持续供电的最长时间。供电功率 (增益型指标)：底盘在高寒山地条件下稳定供电功率。

3) 基础环境适应性评价指标。最高工作海拔高度 (增益型指标)：底盘整体可工作的最高海拔高度。最低工作环境温度 (增益型指标)：底盘整体可工作的最低环境温度 (取正值)。最高工作环境温度 (增益型指标)：底盘整体可工作的最高环境温度。

4) 可靠性与维修性评价指标。平均故障间隔时间 (增益型指标)：高寒山地条件下，底盘在两次故障之间的平均工作时间。平均修复时间 (成本型指标)：高寒山地条件下，底盘出现故障后，完成维修所需的平均时间。

对基本满足高寒山地使用需求底盘参数指标描述如下。

1) 机动性能指标。载质量 30 t 情况下爬坡能力不低于 15%，越障能力不低于 40 cm，机动速度不低于 40 km/h (四级公路)，机动距离不低于 400 km。

2) 能源供应指标。可完成 400 km 机动后，持续供电不少于 1.5 h，供电功率不低于 20 kW。

3) 基础环境适应性指标。可在 3 000 m 以上工作，适应环境温度为-25~45℃。

4) 可靠性与维修性指标。平均故障间隔时间不低于 30 h，平均修复时间不高于 1 h。

筛选满足基础条件的 4 种型号底盘车辆的相关指标参数进行汇总，见表 3。

表 3 受高寒山地环境影响多型底盘评价指标参数

Tab.3 Evaluation indicator parameters for several types of chassis affected by high-altitude mountainous environments

型号	爬坡能力/%	越障能力/cm	机动速度/(km·h ⁻¹)	机动距离/km	供电稳定性	供电持续时间/h	供电功率/kW	最高工作海拔高度/km	最低工作环境温度/℃	最高工作环境温度/℃	平均故障间隔时间/h	平均修复时间/h
1	15	60	40	550	1	2.5	24	3	-35	45	40	0.6
2	25	60	50	600	1	2.5	30	4.5	-35	50	50	0.5
3	25	50	40	600	1	3	22	4.5	-25	50	50	0.6
4	25	50	50	550	1	2.5	28	4	-30	45	50	0.5

3 基于熵权与 TOPSIS 的特种车辆底盘环境适应性分析

当前有多种方法^[19-22]实施多准则决策, 其中的 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)^[23-25]是一种有限方案多目标决策分析方法, 应用比较广泛。本文将引入特种车辆底盘选型评价中, 并采用熵权理论来计算权重。熵权法是一种相对客观的赋权方法^[25], 它基于信息熵的概念来确定各评价指标的权重, 与 AHP、ANP^[26]等方法相比较, 摒弃了人的主观性对于权重的影响, 对于已经满足了基本条件的相关方案选优决策相对准确。信息熵是定义一种度量来计算 2 个随机向量之间信息量的差异, 2 个随机向量分布越不一致, 其熵值也越大。

3.1 熵权法在特种车辆底盘环境适应性分析中的应用

在特种车辆底盘的环境适应性分析中, 熵权法可以用来确定各个环境适应性评价指标的权重, 进而对底盘的环境适应性进行综合评价。

在使用熵权法之前, 首先需要对收集到的数据进行标准化处理。标准化处理的目的是消除不同指标之间量纲和数量级的影响, 使所有指标处于同一比较尺度下。不同类型的数据根据式 (1) 实施标准化处理:

$$\begin{cases} y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}}, \text{增益型指标} \\ y_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}}, \text{成本型指标} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为原始参数指标; y_{ij} 为归一化后的参数

$$Z = \begin{bmatrix} 0.327 & 0.543 & 0.442 & 0.478 & 0.500 & 0.475 & 0.458 & 0.371 & 0.555 & 0.473 & 0.419 & 0.000 \\ 0.546 & 0.543 & 0.552 & 0.521 & 0.500 & 0.475 & 0.573 & 0.556 & 0.555 & 0.526 & 0.524 & 0.707 \\ 0.546 & 0.543 & 0.442 & 0.521 & 0.500 & 0.569 & 0.420 & 0.556 & 0.397 & 0.526 & 0.524 & 0.000 \\ 0.546 & 0.543 & 0.552 & 0.478 & 0.500 & 0.475 & 0.535 & 0.494 & 0.476 & 0.473 & 0.524 & 0.707 \end{bmatrix}$$

2) 权重计算。根据标准化后的数据, 计算每个指标的权重:

$$W = [0.027 \quad 0.005 \quad 0.008 \quad 0.001 \quad 0.000 \quad 0.004 \quad 0.010 \quad 0.016 \quad 0.012 \quad 0.002 \quad 0.006 \quad 0.909]$$

3) 综合评价。根据计算得到的权重和标准化值, 计算出 4 种特种车辆底盘的环境适应性相对接近度:

$$S = [0.013 \quad 2 \quad 0.481 \quad 8 \quad 0.029 \quad 7 \quad 0.473 \quad 5]$$

3.4 结论

基于熵权与 TOPSIS 法的特种车辆底盘环境适应性分析, 能够客观地确定各个评价指标的权重, 减少人为因素的影响, 特别是在已经筛选过可满足最低需求的方案优选中, 可提高评价结果的准确性和可靠性。以表 3 中 4 种供选型的特种车辆底盘数据进行计算, 排序顺序为型号 2、型号 4、型号 3、型号 1, 即

指标; $\min x_{ij}$ 为某个原始参数中的最小值; $\max x_{ij}$ 为某个原始参数中的最大值。

标准化后的数据, 根据以下步骤计算每个指标的熵值^[27]: 1) 计算每个指标的频率分布; 2) 根据频率分布计算每个指标的概率分布; 3) 利用概率分布计算每个指标的熵值。

根据计算得到的熵值, 可以确定每个指标的权重。

3.2 使用 TOPSIS 法进行特种车辆底盘环境适应性多属性评价与排序

1) 构建加权标准化矩阵。将预处理后的数据矩阵与熵权法得到的权重相乘, 得到加权标准化矩阵。

2) 确定理想解和负理想解。理想解使用所有指标的最大值组合, 而负理想解使用所有指标的最小值组合。

3) 计算距离。计算每个方案与理想解和负理想解的欧氏距离。

4) 计算相对接近度。相对接近度是方案到理想解距离, 与到理想解和负理想解距离之和的比值。相对接近度越大, 方案越优^[28]。

5) 方案排序。根据相对接近度对所有方案进行排序, 得到最终的评价结果。

3.3 应用示例

通过试验测试得到了不同类型特种车辆底盘在高寒山地环境下的表现数据 (见表 3), 通过熵权法计算各个指标的权重, 并用 TOPSIS 法计算出底盘的环境适应性综合得分。

1) 数据处理。对试验和测试数据进行标准化处理, 得到每个指标的标准化值。其中, 对成本型指标 (越小越优) 进行了正向化:

指标的权重:

型号 2 的特种车辆底盘在高寒山地状态下总体表现更好。

4 特种车辆底盘高原适应性提升举措

进行相关的方案评估可完成在多型满足基本要求的特种车辆底盘中性能选型, 但对于已经选择出的最优方案, 仍可进一步采取相关设计来提升其可用度。

4.1 动力适应性提升措施

1) 提高发动机增压压力。为应对高原低压环境,

可适当提高增压压力,以补偿高原低压带来的输出功率下降^[29]。当前4个方案中,均采用无增压发动机。同时,优化燃烧系统设计,提高压缩比和喷油压力,确保燃烧充分^[30]。

2) 针对低温环境选用高性能低温轮胎,改装具有更好耐低温性能和更高抓地力的专用轮胎,轮胎胎面设计也需改善,以适应崎岖路面工况。

3) 针对低温环境优化热管理系统。对易冻部件(如发动机水箱、附件驱动箱等)预留预热系统,并可考虑加装进气预热系统^[31],以应对低温起动难问题;对易热部件如液压系统等预留散热系统;对驾驶室、蓄电池等预留温控集成系统。

4.2 能源供应性提升措施

增大燃油箱体积,以确保长距离机动和机动后的有效工作时间。在不影响车辆整体设计的前提下,可适当增大燃油箱体积(如采用两油箱方式)。同时,对关键部件如燃油泵、供油管路等采取保温加热设计。

4.3 可靠性与维修性提升措施

1) 配置智能故障自诊断系统增强故障监测维修能力。及时检测、隔离故障部件;配置远程通讯系统,远程监控车辆工作状态;配备高原应急维修工具箱,方便紧急抢修。

2) 特殊环境使用及维护保障手段改进。在特种车辆行驶在海拔高于3 000 m的高寒山地时,采用低档区行驶,关注发动机机油温度表、发动机缸盖温度表,特别是使用液力缓行器时,关注变矩器油温表指示;在路面质量较差,下长坡制动或连续制动过程中,除行车制动外,结合发动机排气制动和液力缓行器制动进行底盘制动;缩短转向系统、轮胎、其他橡胶和塑料部件、蓄电池检查和维护频率。

可靠、可控、经济是未来高原装备特种车辆保障持续发展的目标方向,通过上述举措,预计可显著提高装备载车在高原地区的适应性和可靠性,从而确保装备运输畅通,提高机动保障能力。

参考文献:

[1] 全军军事术语管理委员会. 中国人民解放军军语[M]. 北京: 军事科学出版社, 2011.
Military Terminology Management Committee. PLA Military Terms[M]. Beijing: Military science Press, 2011.

[2] 赵斌, 郭赞洪, 唐其环, 等. 浅析低气压对装备及元器件的影响[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 180-186.
ZHAO B, GUO Z H, TANG Q H, et al. Effects of the Low Air Pressure Environment on Equipment and Component[J]. Equipment Environmental Engineering,

2016, 13(5): 180-186.

[3] 邓博, 甄伟, 薛慧聪, 等. 某型装备载车系统维修性人机工程设计研究[J]. 包装工程, 2023, 44(12): 111-117.
DENG B, ZHEN W, XUE H C, et al. Maintainability Ergonomic Design of a Certain Type Equipment Loaded Vehicle System[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(12): 111-117.

[4] 刘瑞林. 装甲车辆环境适应性研究[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2019.
LIU R L. Armored Vehicle Environmental Adaptability Research[M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2019.

[5] 郑越. 高原高寒环境对通信设备的影响及对策探讨[J]. 通讯世界, 2020, 27(1): 91-92.
ZHENG Y. Influence of Plateau Cold Environment on Communication Equipment and Countermeasures[J]. Telecom World, 2020, 27(1): 91-92.

[6] 赵徐成, 马俊伟, 朱逸天, 等. 保障装备高原环境适应性研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5): 27-31.
ZHAO X C, MA J W, ZHU Y T, et al. Research on Plateau Environmental Worthiness of Support Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5): 27-31.

[7] 雷争军, 严箐, 顾金玲, 等. 高原环境对防空武器装备的影响及其保障措施研究[J]. 现代雷达, 2022, 44(8): 94-99.
LEI Z J, YAN J, GU J L, et al. A Study on the Influence of Plateau Environment on Antiaircraft Weapon Equipment and Its Supporting Measures[J]. Modern Radar, 2022, 44(8): 94-99.

[8] 李海庆, 殷海红, 姜文革, 等. 某重型柴油机高原性能试验[J]. 装备制造技术, 2021(12): 6-8.
LI H Q, YIN H H, JIANG W G, et al. Highland Performance Experimental Study of a Heavy Diesel Engine[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2021(12): 6-8.

[9] 白朝谷, 李春波, 陆海, 等. 不同海拔对轻型汽车油耗的影响[J]. 专用汽车, 2023(10): 81-84.
BAI (C /Z)G, LI C B, LU H, et al. Influence of Different Altitudes on Fuel Consumption of Light Vehicles[J]. Special Purpose Vehicle, 2023(10): 81-84.

[10] 文雄, 董慷, 陈强. 提高面向高原地区的汽车发动机机油消耗适应性研究[J]. 装备制造技术, 2015(7): 181-184.
WEN X, DONG K, CHEN Q. Improve the Plateau Adaptability of Automobile Engine Oil Consumption[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2015(7): 181-184.

[11] 雷芸, 邱云峰. 基于温度变化的电子元器件参数响应研究[J]. 计算机与数字工程, 2015, 43(1): 155-158.
LEI Y, QIU Y F. Parameter Changes of Electron Components Based on Temperature Variation[J]. Computer & Digital Engineering, 2015, 43(1): 155-158.

- [12] 潘锋, 彭立群, 林达文, 等. 低温和频率对橡胶弹性元件刚度性能的影响[J]. 橡胶工业, 2020, 67(5): 323-329.
PAN F, PENG L Q, LIN D W, et al. Influence of Low Temperature and Frequency on Stiffness of Rubber Elastic Components[J]. China Rubber Industry, 2020, 67(5): 323-329.
- [13] 刘亨杰, 白文斌, 石靖. 高原低温环境对电站蓄电池的性能影响及对策研究[J]. 移动电源与车辆, 2021, 52(3): 40-42.
LIU H J, BAI W B, SHI J. Study on the Influence of Plateau Low Temperature Environment on the Performance of Power Station Battery and Its Countermeasures[J]. Movable Power Station & Vehicle, 2021, 52(3): 40-42.
- [14] 甄伟, 赵涛, 宗健, 等. 某型地面武器系统严寒地区保障问题与对策研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(7): 17-23.
ZHEN W, ZHAO T, ZONG J, et al. Support Problems and Countermeasures of a Certain Ground Weapon System in Frosty Region[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 17-23.
- [15] 晋亚铭. 西藏地空太阳辐射观测研究[D]. 拉萨: 西藏大学, 2019.
JIN Y M. Observation and Study on Solar Radiation in Tibet[D]. Lasa: Tibet University, 2019.
- [16] 黄鹏. 方舱橡胶密封条高原高寒环境适应性研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2020.
HUANG P. Study on Adaptability of Rubber Sealing Strip in Shelter to Plateau Cold Environment[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020.
- [17] 张彬. 高原远程机动安全风险研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
ZHANG B. Research on Safety Risk Management of Remote Maneuver on the Plateau[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.
- [18] 中国人民解放军总装备部. 装备环境工程通用要求: GJB 4239—2001[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2001.
General Armaments Department of the People's Liberation Army. General Requirements for Material Environmental Engineering: GJB 4239—2001[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of the General Armaments Department, 2001.
- [19] 董志华, 唐秀媛, 邵庆新. 高原综合环境及装备适应性评价[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(10): 71-76.
DONG Z H, TANG X Y, SHAO Q X. Comprehensive Plateau Environment and Evaluation of Equipment Adaptability[J]. Fire Control & Command Control, 2022, 47(10): 71-76.
- [20] 孟光磊, 李树发, 刘彬斌, 等. 防空预警雷达高原环境适应性评估的自学习模糊灰度方法[J]. 兵工学报, 2022, 43(1): 98-110.
MENG G L, LI S F, LIU B B, et al. Self-Learning Fuzzy Grey Method for Plateau Environmental Adaptability Assessment of Air Defense Early-Warning Radar[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(1): 98-110.
- [21] 桑培东, 李文豪. 基于熵权法-TOPSIS 的全过程工程咨询业务流程再造措施综合效益评价[J]. 项目管理技术, 2024, 22(1): 98-103.
SANG P D, LI W H. The Comprehensive Benefit Evaluation of Whole Process Engineering Consulting Business Process Reengineering Measures Based on Entropy Weight Method and TOPSIS[J]. Project Management Technology, 2024, 22(1): 98-103.
- [22] 刘艳, 刘艺, 陈江攀, 等. 导弹自然环境适应性综合评价方法[J]. 现代防御技术, 2021, 49(3): 123-129.
LIU Y, LIU Y, CHEN J P, et al. Comprehensive Evaluation Method of Missile's Natural Environment Adaptability[J]. Modern Defence Technology, 2021, 49(3): 123-129.
- [23] 付巧峰. 关于 TOPSIS 法的研究[J]. 西安科技大学学报, 2008, 28(1): 190-193.
FU Q F. Research on TOPSIS Method[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2008, 28(1): 190-193.
- [24] 安子樱, 胡淋翔, 李伟, 等. 基于 AHP-模糊综合评价法的应急装备灾害适应性评估[J]. 工业安全与环保, 2023, 49(2): 6-9.
AN Z Y, HU L X, LI W, et al. Disaster Environmental Adaptability Assessment of Emergency Equipment Based on AHP-Fuzzy Comprehensive Evaluation Method[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2023, 49(2): 6-9.
- [25] 邓丹青, 杜群阳, 冯李丹, 等. 全球科技创新中心评价指标体系探索——基于熵权 TOPSIS 的实证分析[J]. 科技管理研究, 2019, 39(14): 48-56.
DENG D Q, DU Q Y, FENG L D, et al. Exploration on the Evaluation Index System of Global Science and Technology Innovation Center: Empirical Analysis Based on Entropy Weight TOPSIS[J]. Science and Technology Management Research, 2019, 39(14): 48-56.
- [26] 王陈璐, 张杰, 黄晟青, 等. 基于认知熟悉策略和网络层次分析法集成模型的轻中度失智老人产品设计[J]. 机械设计, 2023, 40(9): 170-176.
WANG C L, ZHANG J, HUANG S Q, et al. Product Design for the Elderly with Mild to Moderate Dementia Based on Cognitive Familiarity Strategy and Analytic Network Process Integrated Model[J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(9): 170-176.
- [27] 许植涵, 郭毅, 吴浪. 基于改进的熵权-TOPSIS-灰色关联法施工导流方案的风险决策[J]. 科技与创新, 2023(24): 22-25.
XU Z H, GUO Y, WU L. Risk Decision of Construction Diversion Scheme Based on Improved Entropy Weight -TOPSIS- Grey Correlation Method[J]. Science and Technology & Innovation, 2023(24): 22-25.

[28] 赵吉成, 徐丕文. 基于模糊群决策的天津特色食品包装 SPA-TOPSIS 评价[J]. 包装工程, 2022, 43(17): 213-223.
ZHAO J C, XU P W. SPA-TOPSIS Evaluation of Tianjin Local Characteristic Food Packaging Based on Fuzzy Group Decision[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(17): 213-223.

[29] 董素荣, 熊春友, 刘瑞林, 等. 高原环境下柴油机增压技术研究与应用[J]. 军事交通学院学报, 2015, 17(5): 44-48.
DONG S R, XIONG C Y, LIU R L, et al. Study and Application of Turbocharging Technologies for Diesel Engine in Plateau Environment[J]. Journal of Military Transportation University, 2015, 17(5): 44-48.

[30] 周广猛, 刘瑞林, 许翔, 等. 高原环境对车辆动力性的影响及动力提升措施[J]. 装备环境工程, 2014, 11(3): 45-51.
ZHAO G M, LIU R L, XU X, et al. Effects of Plateau Environment on Power Performance of Vehicles and Measures to Improve Power Performance in Plateau[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(3): 45-51.

[31] 岳巍强, 王朔, 刘炳均, 等. 高原高寒地域中重型车辆进气预热启动辅助装置研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(10): 41-46.
YUE W Q, WANG S, LIU B J, et al. Engine Starting Auxiliary Device for Air Intake Preheating of Medium & Heavy Duty Vehicles in Plateau and Cold Area[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(10): 41-46.