

典型任务剖面下发动机载荷谱统计研究

Loading Spectrum Statistical Study of the Engine on Representative Profile

王旭东, 骆清国, 张更云, 冉光政, 司东亚
(装甲兵工程学院 机械工程系, 北京 100072)

摘 要: 载荷谱是装甲车辆发动机结构寿命研究的根本依据。为深入研究发动机载荷谱, 本文以某型装甲车辆为研究对象, 基于发动机工作过程数值计算方法、车辆行驶理论, 应用 GT-SUITE 软件建立了发动机性能仿真模型, 车辆性能仿真模型和随机路面模型。模拟了车辆行驶过程中驾驶员操作和路面状况对发动机动态工况的影响, 并自主设计了挡位、车速传感器, 通过实车试验对模型进行了验证。统计分析了装甲车辆发动机典型任务剖面下的载荷参数时间历程, 得到了发动机载荷统计谱, 为基于载荷谱的装甲车辆发动机可靠性设计和试验提供了依据。

关键词: GT-SUITE; 装甲车辆; 发动机; 载荷谱

Abstract Loading spectrum is the basis of the structure and life research of the armored vehicle engine. The armored vehicle is taken as the subject, based on the working process simulation method of diesel engine, vehicle driving theory; the power performance simulation model was built by GT-SUITE and including the engine model, vehicle model and road model. The model simulated the influence of the operation of the drive and the transient operation condition of the engine, and designed the gear and vehicle speed sensor, and the model is validated by the experiment. Analyzed the load parameters of the engine, and established the loading spectrum of the engine and its components assembly, the method lays the foundation of the dependability design and experiment for the armored vehicle engine based on loading spectrum.

Key words: GT-SUITE; Armored vehicle; engine; loading spectrum

1 引言

发动机载荷谱是发动机在规定任务、用法和使用条件下载荷参数的统计, 是发动机及其零部件结构强度分析、可靠性与寿命研究的根本依据^[1]。自上世纪八十年代以来, 空军对载荷谱研究非常重视, 航空发动机载荷谱的发展比较迅速, 并且已经取得了一定的研究成果^[2-4], 对发动机结构寿命及可靠性研究起到了积极的推动作用。但是目前为止, 我国装甲车辆发动机载荷谱还没有较为深入的研究, 装甲车辆发动机一直采用参考类比的沿袭经验设计, 而并不是基于载荷谱的可靠性设计。可

可靠性设计的核心思想就是将载荷谱作为发动机设计、试验、定型、定寿和延寿的规范。因此,为了提高装备性能和可靠性,亟待开展和加强装甲车辆发动机载荷谱的研究工作。

发动机载荷谱按其适用对象可分为实测谱和设计谱。实测谱主要针对现役发动定型装车之后进行载荷参数测试得到,这样做不但周期长、成本高,而且在装甲车辆设计阶段,发动机以及与之匹配的传动装置、行动装置均未定型生产,不具备测试条件。设计谱是针对在研发动机,根据预计任务剖面,通过模拟器模拟或数值仿真的手段得到。在装甲车辆设计阶段就可以根据有关设计参数,计算发动机载荷历程,得到发动机及其零部件载荷谱,从而提高装备可靠性,缩短研制周期。随着现代计算方法的发展,为装甲车辆发动机载荷参数计算提供了有效而准确的工具^[5]。

本文基于发动机工作过程数值计算方法和车辆行驶理论,应用 GT-SUITE 软件建立了发动机性能仿真模型,车辆性能仿真模型和随机路面模型。充分考虑了驾驶员操作、路面状况对发动机工况的影响,实现了发动机动态载荷参数计算,并通过实车试验进行了验证,为装甲车辆发动机载荷谱研究提供了一种新方法。

2 建模基本理论

2.1 发动机性能仿真模型

将发动机气缸作为一个热力系统进行考察研究,系统的边界由活塞顶、气缸盖及气缸套壁面组成;描述缸内工质状态变化的参数有压力 P 、温度 T 、质量 m 和气体的组成成分,它们由状态方程、质量守恒方程及能量守恒方程联系起来。

$$\text{状态方程:} \quad pV = mRT \quad (1)$$

$$\text{质量守恒方程:} \quad \frac{dm_z}{d\phi} = \frac{dm_E}{d\phi} - \frac{dm_A}{d\phi} + \frac{dm_B}{d\phi} \quad (2)$$

$$\text{能量守恒方程:} \quad \frac{dE}{d\phi} = \frac{dQ_B}{d\phi} + \frac{dm_E}{d\phi} h_E - \frac{dm_A}{d\phi} h_A - \frac{dQ_W}{d\phi} - p_z \frac{dV_z}{d\phi} \quad (3)$$

联立气体状态方程、质量守恒方程和能量守恒方程就可求解缸内气体压力、温度和质量。

发动机燃烧过程采用 Hiroyasu 多区燃烧模型,综合考虑了液滴燃油的蒸发和燃烧,通过发动机性能试验数据对着火延迟放大系数,射流破裂长度及卷吸作用放大系数进行了校核,该模型能够较好的反应发动机变工况下的燃烧性能。

此外,发动机动态工况数值模拟还需要发动机动力学模型和涡轮增压器动力学模型。

发动机动力学模型:

$$\frac{dn_e}{dt} = \frac{30}{\pi} \frac{M_e - M_p}{J_{ep}} \quad (4)$$

式中： n_e 为发动机转速； M_e 为发动机净输出扭矩； M_p 为负载扭矩； J_{ep} 为发动机当量惯性矩。

涡轮增压器动力学模型：

$$\frac{dn_{TC}}{dt} = \frac{30}{\pi} \frac{M_T - M_c}{J_{TC}} \quad (5)$$

式中： n_{TC} 为涡轮增压器转速； M_T 为增压器涡轮发出扭矩； M_c 为增压器压气机消耗扭矩； J_{TC} 为涡轮增压器转子惯性矩。

采用发动机工作过程仿真软件 GT-SUITE 软件建立了某型车辆发动机性能仿真模型，如图 1 所示。

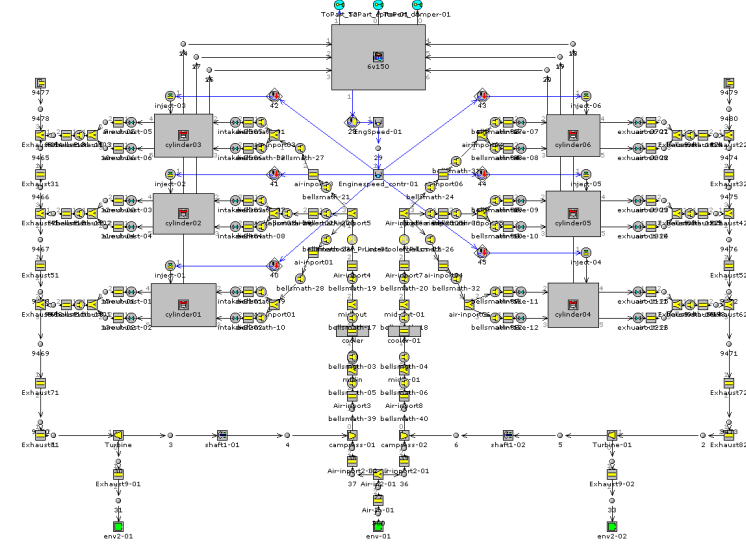


图 1 发动机性能仿真模型

2.2 车辆性能仿真模型

装甲车辆性能仿真模型主要由液力变矩器、传动箱、侧减速器等组成。通常采用原始特性曲线表征液力变矩器的工作性能。液力变矩器的原始特性反映了泵轮转矩系数 λ_B 、变矩比 K 、效率 η 随转速比 i 的变化规律，其数学模型为：

$$\begin{cases} \lambda_B = \frac{M_B}{\gamma \cdot n_B^2 D^5} = f_1(i) \\ K = \frac{M_T}{M_B} = \frac{\lambda_T}{\lambda_B} = f_2(i) \\ \eta = \frac{M_T \cdot \omega_T}{M_B \cdot \omega_B} = K \cdot i \end{cases} \quad (6)$$

式中： M_B ， M_T 为泵轮，涡轮转矩； γ 为油液重度； n_B 为泵轮转速； D 为变矩器循环圆最大直径； λ_T 为涡轮转矩系数； ω_B ， ω_T 为泵轮，涡轮角速度。

变速箱和侧减器通过改变发动机曲轴输出的扭矩及转速，以适应整车在起步、加速、行驶过程中变化的外界阻力。其数学模型为：

$$\begin{cases} \omega_{out} = \frac{\omega_{in}}{i} \\ T_{out} = T_{in} \cdot i \cdot \eta \end{cases} \quad (7)$$

式中： i 为传动比； ω_{in} 、 ω_{out} 为输入、输出角速度； T_{in} 、 T_{out} 为输入、输出扭矩； η 为传动效率。

模型中变速箱档位和液力机械工况切换由驾驶员控制，应用 GT-SUITE 软件建立了某型车辆传动装置性能仿真模型，如图 2 所示。

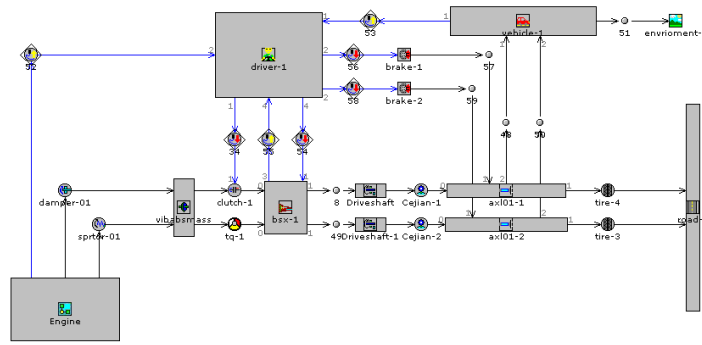


图 2 车辆性能仿真模型

2.3 随机路面模型

路面不平度 $q(l)$ 一般认为是均值为 0 的各态历过程，在给出路面不平度自功率谱密度函数 $G_q(n_0)$ 的情况下，可以用有限个离散空间频率 n_k 的三角函数来描述路面不平度这一随机过程：

$$q(l) = \sum_{k=1}^N \alpha_k \cdot \sin(2\pi n_k l + \Phi_k) \quad (8)$$

$$\alpha_k^2 = G_q \cdot n_0^w \left(\frac{1}{1-w} \right) \left(n_{ku}^{1-w} - n_{kl}^{1-w} \right) \quad (9)$$

$$Grade = 100 * \tan(\sin^{-1}(\frac{\partial Elev}{\partial Dist})) = 100 * \frac{\Delta q}{\Delta l} \quad (10)$$

式中： l 为路面纵向里程； Φ_k 为相角， N 个在 $(0 \sim 2\pi)$ 区间内均匀分布且相互独立的随机变量；

α_k 为路面幅值； $Grade$ 为路面坡度。

按对数坐标以等距方式来划分空间频率得到 N 个中心频率, n_k 为第 k 个频段的中心频率, n_{ku} 为该频段的上下限频率。根据路面不平度分类标准编制^[6]的 D 级路面不平度及其路面坡度分别如图 3 和图 4 所示。

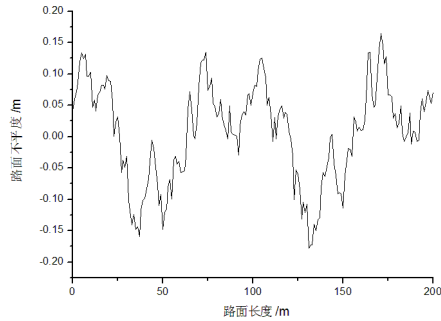


图 3 D 级路面不平度

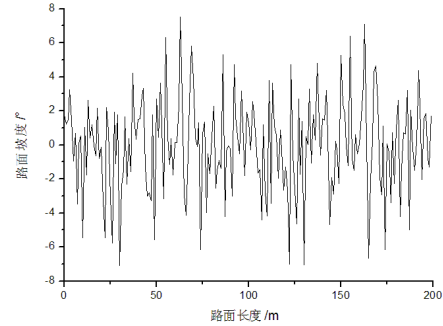


图 4 D 级路面坡度

3 试验验证

对某型装甲车辆在硬质水泥路面上进行典型工况实车试验, 采集记录车辆、发动机的工作参数。利用建立的装甲车辆动力性能模型进行相同工况和环境条件下的仿真计算, 将计算结果与试验数据进行比较分析, 验证装甲车辆动力性能仿真模型的有效性。

发动机主要参数通过车载电控单元读取, 包括发动机目标转速、实际转速、加油齿杆位移、排气温度等, 使用基于虚拟仪器的电控柴油机实车测试系统进行实时参数采集。自行设计了挡位和车速传感器。以车辆挡位及发动机目标转速为模型输入, 对车辆起步加速工况进行仿真, 并进行了实验验证, 发动机转速、车辆行驶速度计算值与实验值对比分别如图 5 和 6 所示。

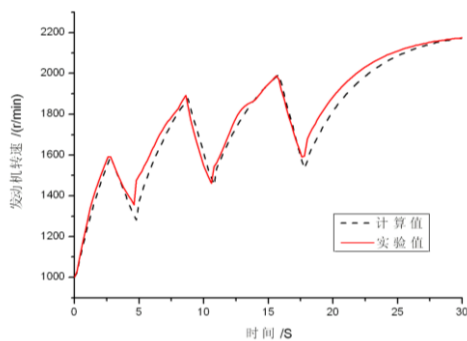


图 5 发动机转速计算值与实验值

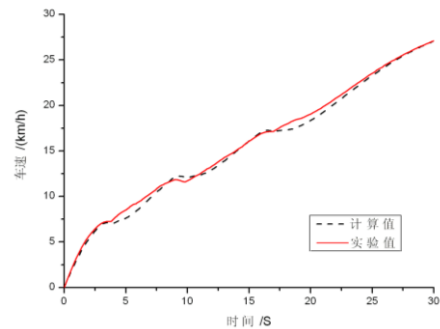


图 6 车速计算值与实验值对比

从发动机转速、车速的计算值和实验值对比可以看出, 计算结果与实验值吻合较好, 发动机转速和车速最大误差分别为 7.33% 和 8.45%, 表明装甲车辆动力性能联合仿真模型能够较为准确的反映车辆及发动机的动态性能。

4 计算结果与分析

为深入研究装甲车辆发动机在不同任务剖面下的载荷谱，选取温区起伏土路和热区起伏土路这两个典型任务为例进行计算，各任务剖面时间均为一个小时，挡位分布比例如表 1 所示。

表 1 典型任务剖面挡位分布比例

挡位	分布比例%	
	热区起伏路	温区起伏路
1 挡	4	2
2 挡	6	2
3 挡	25	2
4 挡	40	4
5 挡	15	40
6 挡	10	50

按照上述两种任务剖面进行仿真计算，选取发动机转速和扭矩作为载荷参数，热区起伏路和温区起伏路下发动机载荷时间历程如图 7 和图 8 所示。

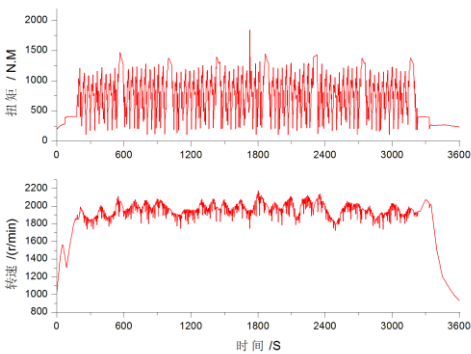


图 7 热区起伏路发动机载荷历程

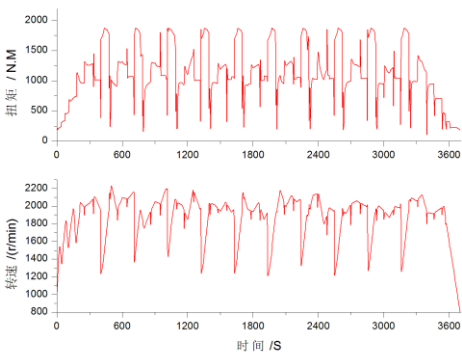


图 8 温区起伏路发动机载荷历程

装甲车辆发动机载荷谱与一般机械构件的载荷谱有所不同，它是一个三维图谱^[7]。其中：X 轴为平均有效压力，反映了发动机的载荷强度；Y 轴为发动机转速，反映了发动机的载荷频率；Z 轴为工况分配比例，反映了发动机的载荷分布。热区起伏路和温区起伏路发动机载荷谱分别如图 9 和图 10 所示。

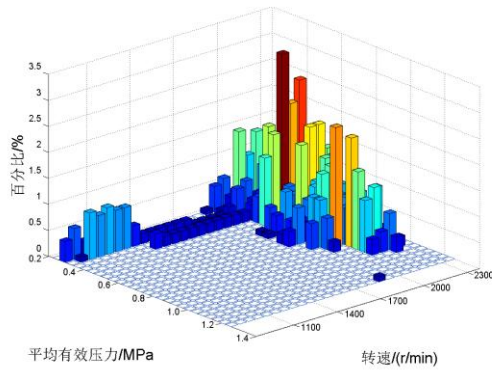


图 9 热区起伏路发动机载荷统计谱

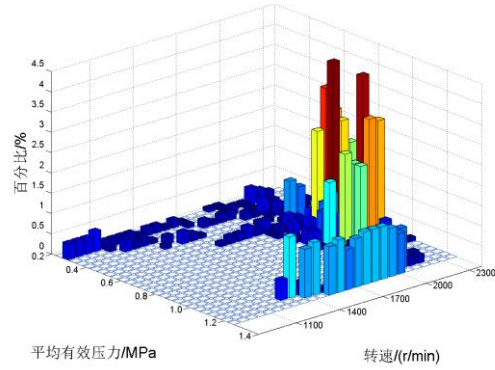


图 10 温区起伏路发动机载荷统计谱

装甲车辆热区起伏路段为热区丛林，路况复杂车速较低，挡位集中在 3 挡和 4 挡，发动机负荷较小，因此平均有效压力集中在 0.6MPa；而温区起伏路段为温区平原，路面开阔车速较高，车辆行驶挡位集中在 5 挡和 6 挡，发动机大负荷运行时间较长，平均有效压力集中在 1.0MPa。温区起伏土路和热区起伏土路路面类型均为硬质土路，地面阻力系数相同。但由于车速档位分布不同，造成发动机实际负荷差异很大，反映了任务剖面对装甲车辆发动机载荷工况有很大影响。

发动机整机载荷谱统计对象是发动机的主要工作参数，它反映的是发动机总体载荷状况。发动机零部件载荷谱需要通过发动机整机谱转换得到。例如，曲轴和连杆的应力极值主要取决于气缸最大爆发压力和转速，两种典型任务剖面下的发动机爆压统计如图 11 和图 12 所示。热区起伏路爆压平均值为 8.51MPa，温区起伏路爆压平均值为 9.5MPa。

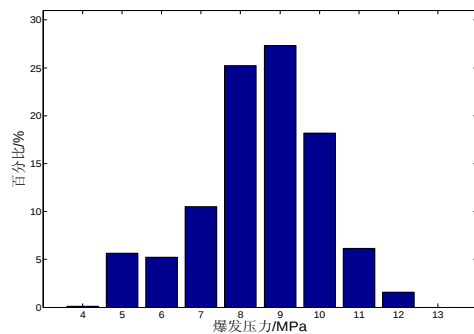


图 11 热区起伏路发动机爆压统计分布

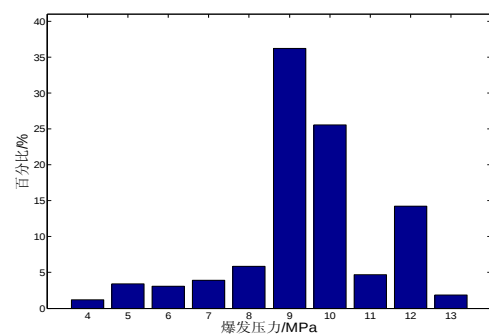


图 12 温区起伏路发动机爆压统计分布

5 结论

(1) 文中所建立的整车动力性能仿真模型，可以更加准确的反应发动机在车辆实际运行中驾驶操作和路面状况等对发动机工况和零部件载荷变化的影响。

(2) 提出了一种装甲车辆发动机载荷谱仿真与试验相结合的研究方法。这种方法不仅可以反映发动机整机载荷参数,还可以反映发动机每个工作循环中零部件的载荷变化,从而建立起发动机整机谱和零部件谱的映射关系。

(3) 通过对比分析,发动机及其零部件在不同任务剖面下的载荷有很大差别。因此,在发动机设计、试验、定型考核和寿命管理时必须将载荷谱作为根本依据。

6 参考文献

- [1] S.Cote. T-58 Propulsion System Duty Cycle. AIAA: 78-1088, July 1978: 1-12
- [2] 张勇, 蔚夺魁. 航空涡喷涡扇发动机多参数载荷谱编制方法研究 [J]. 航空发动机, 2004, 30 (1): 6-9
- [3] 杨兴宇. 涡轴发动机综合飞行载荷剖面研究 [J]. 机械强度, 2006, 28 (6): 909-915
- [4] 马双员, 张永峰. 航空发动机载荷谱综述 [J]. 现代机械. 2011, 5: 15-17.
- [5] 骆清国, 刘红彬. 基于 GT-Power 的柴油机环境适应性研究 [J]. 装甲兵工程学院学报. 2010, 12: 27-30
- [6] 路面不平度测量分析与应用 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2000
- [7] 严立, 余宪海. 内燃机磨损及可靠性技术 [M]. 人民交通出版社. 北京, 1992: 234-235