

利用 DOE 和遗传算法优化重载卡车的传动参数

Using Design of Experiment and Genetic Algorithm to obtain the optimum transmission parameters of Heavy Duty Truck

韩恺, 吴峰, 张付军

(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

摘 要: 发动机与传动系统之间的匹配是否合理, 对整车燃油经济性有很大的影响。本文利用 DOE 设计和遗传优化算法, 在不降低驾驶性能的前提下, 探索一种以经济性为目标的动力传动参数优化方法。本文以某 9 挡矿用重载卡车为研究对象, 利用 GT-SUITE 软件建立了动力传动模型, 使用 DOE-post 工具进行 DOE 分析和 GA 优化。结果表明, 采用 DOE 与 GA 分析相结合的方法, 不仅可以大幅缩减试验样本容量和仿真时间, 亦可达到令人满意的效果。通过优化匹配, 该矿用车的燃油消耗量下降了 6.19%。

关键词: 动力传动匹配; GT-SUITE; DOE; 遗传算法; 重载卡车

Abstract: Matching between the engine and transmission, have a great impact on fuel economy. In this paper, Design of Experiment (DOE) statistical method and Genetic Algorithms (GA) based optimization method are used to obtain the optimum transmission parameters for a certain driving cycle such that the drivability characteristics of the vehicle will not change. The study is carried on a Mining Dump Truck with 9 forward shifts manual transmission. The truck powertrain is modeled using GT-Suite, and DOE - Post processing tool of the GT-Suite is used for DOE analysis and GA optimization. Results indicate that using the method of DOE and GA to optimize the transmission parameters could not only largely reduce the capability of the samples and time, but also get good calibration results as the normal way. By optimizing the transmission parameters, fuel consumption decreased by 6.19%.

Key words: Powertrain Matching; GT-SUITE; Design of Experiment; Genetic Algorithms; Heavy Duty Truck

引言

对于重型卡车来说, 整车厂一般根据发动机厂和变速箱厂提供的参数进行选配, 这使得整车的开发与动力传动系的开发不能同步, 这就在很大程度上影响了整车的性能。相关研究表明, 通过发动机和传动系的合理匹配, 可降低 5~10%的车辆燃油消耗^[1]。

国内学者对汽车动力传动系统参数优化匹配方法进行了大量的相关研究,提出了以动力性、经济性为最佳匹配法^[2],模糊优化方法^[3],区间优化方法^[4],基于遗传算法的优化方法^[5]等。通过以上这些方法,均能在保证动力性的基础上,对车辆的经济性有所改善。但是,以上的研究中均采用了多工况驾驶循环,而这种模式只能粗略地反映汽车的行驶工况,无法反应道路坡度、载荷状态等因素的影响^[6]。

本文以九挡手动变速重载矿用卡车为研究对象,提出一种基于实际驾驶循环的以经济性为目标的动力传动参数优化方法。利用 GT-SUITE 软件包建立车辆静态和动态仿真模型,将拉丁超立方抽样法(LHS)和遗传优化算法应用于仿真实验设计和数据分析,以车辆经济性为优化目标,对车辆的传动系统参数进行优化。相比传统优化模型中所采用的多工况循环,本研究中所使用实际驾驶循环,能够更加真实全面的反映车辆使用性能。因为,实际驾驶循环不仅保证了车辆使用过程中运动学分布的相似性,而且保证了驾驶过程中动力学的一致性。此外,在实际循环模型中还能考虑道路坡度、载荷状态等影响汽车性能的重要因素。尤其是针对在特定工况下使用的重载卡车而言,通过优化传动系参数达到改善燃油经济性的目的,具有实际意义。

1 仿真模型的建立

1.1 模型输入参数

本文所研究的矿用重载卡车采用双后驱动桥结构,驱动形式为 6×4,配备了潍柴 WD12.375 型发动机和 9 挡手动变速箱。表 1 为该矿用重载车的一些主要参数。

表 1 矿用重载卡车模型的主要输入参数

参数名称	数值	参数名称	数值	参数名称	数值
整车整备质量	22000kg	1 挡传动比	12.65	7 挡传动比	1.83
满载质量	62000kg	2 挡传动比	8.38	8 挡传动比	1.34
标定功率	276kW	3 挡传动比	6.22	9 挡传动比	1
标定转速	2200r/min	4 挡传动比	4.57	主减速比	11.277
最大扭矩	1510Nm	5 挡传动比	3.4	驱动桥传动效率	0.82
最大扭矩转速	1500r/min	6 挡传动比	2.46		

本文采用的实际驾驶循环行驶距离为 17290m,行驶时间为 2551s,平均行驶车速为 24.31km/h。图 1 为驾驶员实际驾驶的换挡曲线和车速曲线。从图 1 可以看出,在整个驾驶循环中,驾驶员用到了 4-9 挡。图 2 为实际路面的路谱信息。从图 2 可以看出,该车辆实际行驶路面整体成上升趋势,路面坡度变化较小,坡度大于 5%的路段占全部路段的 11%,最大路面坡度为 13.6%。

1.2 静态和动态仿真模型

图 3 和 4 分别是利用 GT-SUITEMP 软件建立的矿用重载卡车静态和动态仿真分析模型。

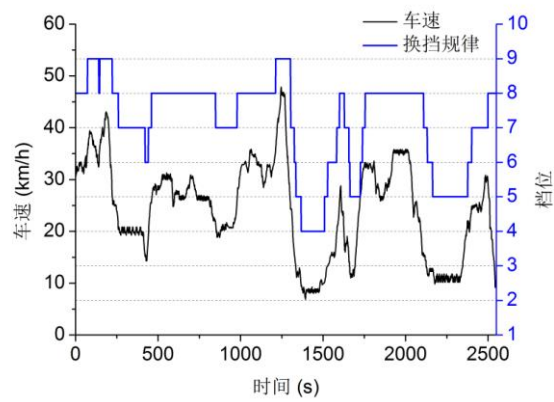


图 1 车速-时间曲线及换挡规律

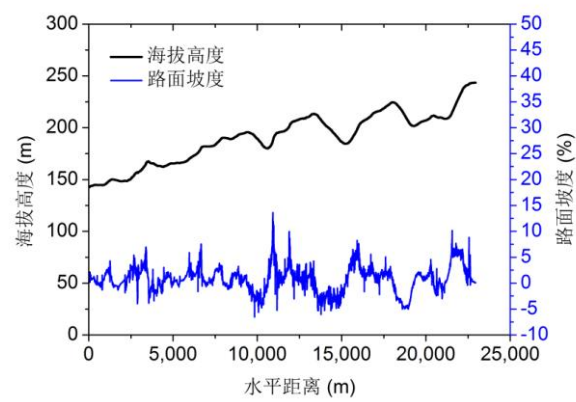


图 2 实际驾驶循环中的路谱信息

在静态和动态仿真模型中，采用了基于 MAP 的发动机模型。利用静态模型计算出矿用重载卡车的主要动力性能指标，例如最高车速、最大爬坡度等。计算结果用来校核车辆的性能是否能够满足实际驾驶的需求，同时确定各挡传动比设计的极限值。

动态模型中驾驶员的行为由驾驶循环的数据进行控制，利用实际驾驶循环中的换挡规律建立驾驶员模型，并通过控制器跟踪实际的车速变化。利用实际驾驶循环中的路谱信息构建车辆动态模型中的路面模型。校核后的动态模型跟踪驾驶循环中车速的变化，获得准确的仿真输出循环，保证仿真计算结果与试验数据相吻合。

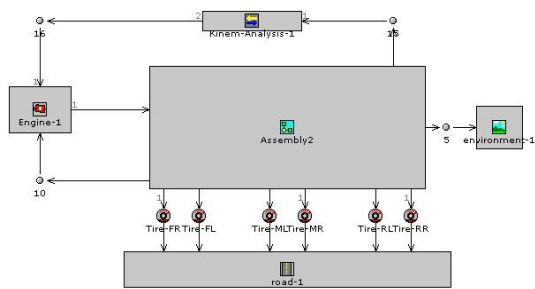


图 3 重载矿用车静力学模型

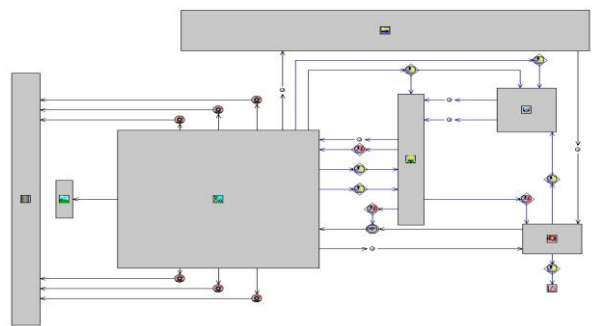


图 4 重载矿用车动力学模型

2 参数优化

2.1 仿真试验样本

在本研究所采用的驾驶循环中，使用到的挡位分布在 4-9 挡，同时保证直接挡（9 挡）的传
仍为 1。因此，共选取了 6 个传动系设计变量，分别为 4-8 挡的传动比（ i_4-i_8 ）和主减速比 i_0 。
根据静态模型的计算结果（最大爬坡度、最高车速）和汽车实际使用性能要求，确定各挡传动比
范围，如
[表 2](#)所示。

表 2 各设计变量的变化范围和影响因素水平设置

参数名称	最小值	最大值	步长	水平个数
i_4	4.2	4.57	0.1	5
i_5	2.88	3.4	0.2	3
i_6	1.97	2.46	0.2	3
i_7	1.45	1.83	0.1	5
i_8	1.1	1.35	0.1	4
i_0	10.557	11.765	0.3	4

全部计算完成上述仿真试验样本，需要太长的时间（采用双核 INTEL CORE i5 处理器的计算机
大约需要 88 天）。为了解决计算耗时太多的问题，本文将 DOE 设计与优化算法相结合，用较少的算
例进行优化匹配，获得拟合度较好的响应曲面，然后以此为数据基础使用优化算法进行寻优。

2.2 DOE 试验设计与遗传算法优化

DOE 是一种结构化的、有组织的数据统计方法，其主要优点就是可以呈现多个研究变量之间的相
互关系和整个系统的运作方式。另外一个优点就是，通过合理的 DOE 设计，只需要进行少量代表性
的试验，即能找到在较大设计空间内变量之间的影响规律^[9]。其中拉丁超立方抽样法(Latin Hypercube
Sampling, LHS)，作为一种分层抽样方法，以其良好的散布均匀性和对整个解空间的代表性，及随
机的搜索功能，成为充满设计空间的重要方法^[10]。

遗传算法(GA)是以遗传理论和自然选择为基础，将适者生存规则与群体内染色体的随机信息交
换机制相结合的全局寻优算法^[9]。其优点是具有内在的隐并行性和鲁棒性，并且对所求函数的可导性
和连续性没有明确的限定。目前，GA 作为一种全局优化算法，已经在汽车领域研究中得到广泛应用，
尤其是在多目标优化问题中，其可信度和高效性已得到广泛认证^[9-11]。

在本文的研究中，首先利用 LHS 抽样方法进行 DOE 设计，依据相应的随机规则，在设计空间内产生 62 种典型的传动比组合方案。然后，利用所建立的动态仿真模型分别对每种方案进行仿真计算，并对结果进行统计分析，建立所求函数的响应曲面。最后，使用基于 GA 的优化工具，在保证动力学过程相似的情况下，以最低燃油消耗量为优化目标，获得最佳的传动系参数组合。边界条件为仿真的行驶距离与实际行驶距离的误差小于 0.1%，进而保证仿真动力学过程与实际过程的一致性。

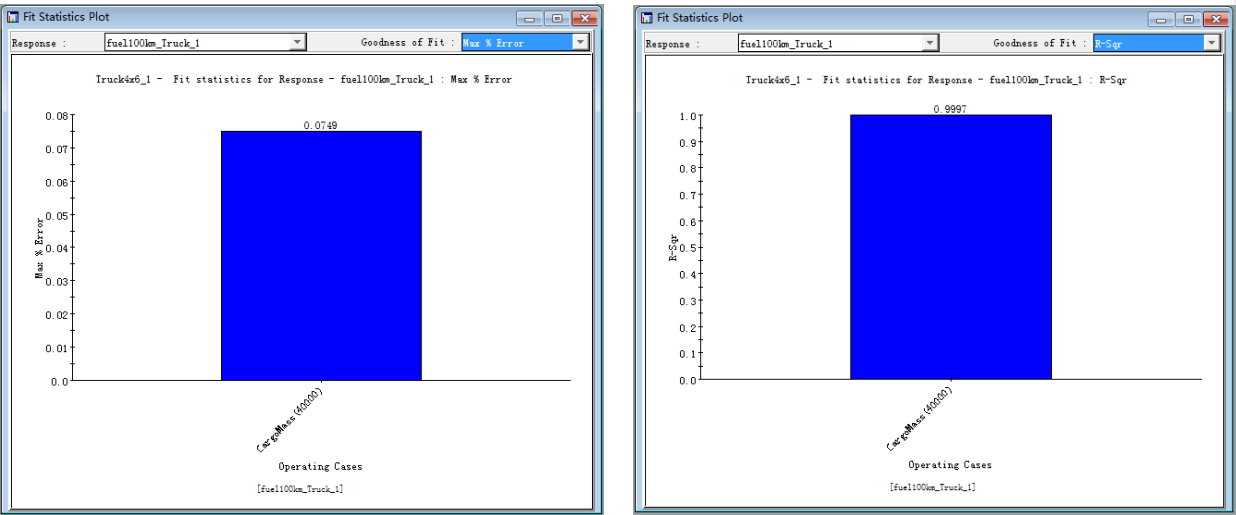
设计变量： $X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6] = [i_4, i_5, i_6, i_7, i_8, i_9]$

目标函数： $\min : f(X) = Q_s$

约束条件： $s.t. : 17272.8 \leq S(X) \leq 17307.3$

式中： Q_s 为实际百公里油耗 ($L / 100km$)； $S(X)$ 为总的行驶距离 (m)。

在 DOE 仿真计算结束后，建立起总燃油消耗量的响应曲面，响应曲面的质量如图 5 所示。响应曲面的最大拟合误差为 0.0749%，R-Sqr 为 0.9997，拟合精度可用于 GA 优化计算。



(a) 响应曲面 Max % Error

(b) 响应曲面 R-Sqr

图 5 驾驶循环 DOE 响应曲面拟合质量

3 优化结果分析

3.1 GA 优化结果验证

动态计算输出驾驶循环与实际驾驶循环数据对比如图 6 所示，90%以上的瞬时车速误差小于 1%，平均车速误差为 0.37%，瞬时车速最大误差 6.38%，可证明动态模型能够较为准确的模拟出车辆实际的驾驶过程。

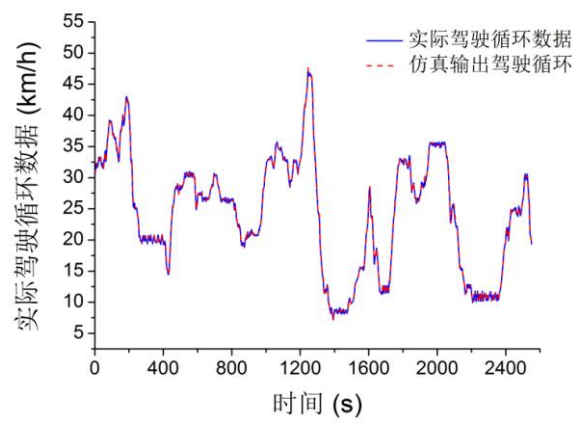


图 6 仿真计算与试验数据对比

遗传优化算法的主要参数的设置：最大遗传代数 为 100，初始种群数量为 40，优化变量数为 样本变异率为 0.01。为保证优化结果的准确性，将优化后的传动系参数带入动态仿真模型进行 计算，验证结果如

表 3 所示。结果表明，优化后的传动系参数组合能够保证动力学过程的一致性。

删除的内

表 3 最优传动系参数的验证

性能指标	GA 优化结果	动态仿真验证结果	相对误差/%
总行驶距离/m	17290.08	17288	0.01
平均百公里燃油 消耗/(L·100km ⁻¹)	99.470443	99.5	0.03

3.2 GA 优化结果分析

表 4 为汽车传动系参数的优化结果，优化后的变速器常用挡位传动的分配类似偏置等比级数，而原车变速器传动比设计均为等比级数，使得常用挡位的发动机转速范围变宽，即在高挡位时两挡 位之间的重合区域增大。采用这样的传动比分配规律，可使常用车速在经济区内工作的概率增加， 提高了发动机负荷率。从图 5 可以看出与原车相比，优化后的发动机工况点更多的分布在最佳经济 区。因此，优化后车辆的总燃油消耗量从原车的 106.033 L / 100km 降到 99.47 L / 100km，燃油经 济性提高了 6.19%。

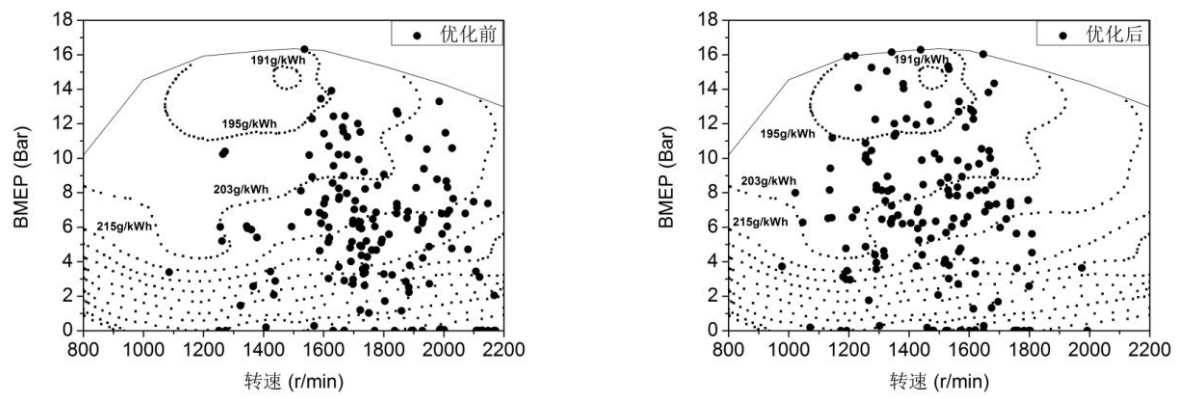
带格式的
首行缩进
距

删除的内

带格式的
删除的内

表 4 汽车传动系参数优化前后对比

速比	i_0	i_4	i_5	i_6	i_7	i_8
原车	11.277	4.57	3.4	2.46	1.83	1.34
优化后	10.568	4.25	3.267	2.316	1.486	1.187



优化前发动机工作点分布图 优化后发动机工作点分布图

图 7 优化前后发动机工作点分布对比图

主减速比对车辆动力性有着重要影响，选用较大的传动比时，汽车行驶阻力功率曲线沿发动机等功率曲线向右下方移动；反之，选用较小的传动比，沿等功率曲线向左上方移动，接近万有特性低油耗区。从表 5 可以看出，相比原车直接挡动力因数下降了 5.7%，车辆后备功率下降，加速性能略有损失，这是因为优化后的主减速比下降了 6.3%。优化后汽车最大爬坡度为 40.7%，相比原车下降了 1.5%，但仍然满足最大爬坡度大于 35%的设计要求。优化后汽车最高车速为 50.5km/h，相比原车提高了 4.6%，这是因为选用较小的主减速比使得最高挡位发动机转速范围变宽，提高了车辆的极限车速。总的来看，在保证实际驾驶性能的前提下，虽然车辆某些性能略有下降，但仍能满足车辆实际使用需求和设计要求。

表 5 汽车动力性能优化前后对比

性能指标	最大爬坡度/%	最高车速/ (km/h)	直接挡最 大动力因数	1 挡最大 动力因数
原车	41.32	48.3	0.035	0.405
优化后	40.7	50.5	0.033	0.391

4 结论

1) 本文综合考虑换挡过程、惯量部件、路面坡度对车辆性能的影响，利用实际驾驶循环的测试数据建立了整车动态仿真模型，提高了仿真模拟精度。

2) 本文通过 DOE 设计与遗传算法的有效结合，将普通优化匹配的 3600 次试验样本缩减至 62 次，大幅减少了仿真试验样本容量，节省了 98%的仿真计算时间，而相对误差保持在 0.03%以内。

3) 计算结果表明, 通过对传动系参数进行优化, 在保证动力性的同时, 该矿用重载卡车的燃油经济性提高了 6.19%。

5 参考文献

- [1] 刘惟信, 戈平, 李伟. 汽车发动机与传动系参数最优匹配的研究[J]. 汽车工程, 1991, 13(02): 65-72.
- [2] 葛安林, 吴锦秋, 林明芳, 等. 汽车动力传动系统参数的最佳匹配[J]. 汽车工程, 1991, 13(01): 35-42.
- [3] 丁能根, 连小珉, 蒋孝煜. 汽车传动参数的模糊优化设计[J]. 清华大学学报, 1997, 37(11): 123-126.
- [4] 何仁, 商高高. 汽车动力传动系参数的优化方法[J]. 江苏理工大学学报, 2000, 21(06): 61-64.
- [5] 李剑平. 基于遗传算法的汽车传动系参数优化[J]. 拖拉机与农用运输车, 2008, 35(04): 63-67.
- [6] 何仁, 刘星荣, 何泽民. 汽车动力传动系统最优匹配的研究和发展[J]. 江苏理工大学学报, 1997, 18(01): 37-41.
- [7] 倪计民, 杜倩颖, 周英杰, 等. DoE 在高压共轨柴油机优化设计中的应用[J]. 内燃机学报, 2009, 27(03): 231-236.
- [8] 刘晓路, 陈英武, 荆显荣, 等. 优化拉丁方试验设计方法及其应用[J]; 国防科技大学学报, 2011, 33(05): 73-77.
- [9] FU Jiang-hua, SHI Wen-ku, TENG Teng, LIU Zu-bin. Optimization of Automotive Powertrain Mounting System Based on Adaptive Genetic Algorithm, 2009 Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application.
- [10] Kikuo Fujita, Noriyasu Hirokawa, Shinsuke Akagi, Shinji Kitamura, Hideaki Yokohata. Multi-Objective Optimal Design Of Automotive Engine Using Genetic Algorithm, 1998 ASME Design Engineering Technical Conferences DETC98/DAC-5799.
- [11] Xudong Liu, Yanping Wu, Jianmin Duan. Optimal Sizing of a Series Hybrid Electric Vehicle Using a Hybrid Genetic Algorithm, 2007 Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics.