

基于 DOE 的汽车动力传动系统参数优化设计方法

Method of Drive Train Parameter Optimization Design Based on Design of Experiment

孙宏图¹, 王天灵², 宋希庚¹

(1. 大连理工大学能源与动力学院, 2. 道依茨一汽大连柴油机有限公司)

摘要：提出了基于 DOE 的汽车动力传动系统参数优化设计的方法。应用正交试验设计方法进行试验方案设计，用 GT-DRIVE 软件对试验进行模拟计算，对试验结果的分析处理采用回归分析的方法，研究了汽车动力传动系统参数对汽车动力性和燃油经济性试验指标的影响，并对参数进行了优化设计，为汽车动力传动系统参数的设计提供了重要参考依据。

关键字：优化设计，试验设计，动力传动系统，GT-SUITE

Abstract : A method of drive train parameter optimization design based on design of experiment (DOE) is developed. The method of orthogonal design is applied in the DOE, and the experiments are simulated with the software of GT-DRIVE. The results are analyzed with the analysis of regression to study the effect of the drive and fuel economy performance by the factor of drive train parameters. The parameters of drive train are also designed with the method of optimization to provide the reference of the design of drive train.

Keywords : Optimization design; Design of experiment; Drive train; GT-SUITE

1 前言

汽车动力系统参数是影响汽车动力性和燃油经济性的重要参数。汽车动力传动系统参数的优化设计可以根据某一确定的目标函数，包括动力性和燃油经济性的综合评价指标，进行优化计算，设计计算过程繁琐而复杂^[1-5]。

DOE 分析及优化技术具有设计灵活、计算简便、试验次数少、可靠性高、适应面广等优点，已经成为现代设计方法中一个重要的分支。DOE 分析方法作为一种有效的数理统计和试验因素分析方法，汽车安全、汽车车身优化设计、汽车悬架参数优化设计和汽车制动系统设计等研究领域中都得到了广泛的应用^[6-9]。

本文提出基于 DOE 的汽车动力系统参数优化设计方法，将 DOE 方法应用到汽车动力系统参数

优化设计中，以汽车动力性和燃油经济性为目标函数进行优化设计。设计过程比较简单，对汽车动力系统参数的选择提供重要的理论依据。

2 试验设计基本过程^[10]

DOE (Design of Experiment)，即试验设计包括 3 个阶段：制定试验计划，即方案设计；实验计划的实施，即进行试验；实验结果统计分析。对设计的要求是试验次数要尽量少，而所包含的有用信息要尽量多，并且能有方便分析试验结果的方法。

在方案设计阶段，选择好可控因素及其水平，可控因素在实验中在调查研究和少量试验的基础上，确定这些因素的变化范围，以及在因素的水平个数。根据因素个数，水平个数，等因素综合选择试验方案。

试验计划的设计与实施阶段，确定总的试验次数，能包含试验目的所需要的尽可能多的信息，并保证分析试验结果的正确性和统计的精度。试验采用随机化方法，监控试验计划的要求得到试验，并准确记录试验结果。

试验结果的统计分析阶段，根据记录的试验数据，进行整理，计算统计假设检验中的统计量和模型中各个参数的估计量。对统计分析的结果做出科学而符合实际的解释，并提出建议。

3 基于 DOE 的动力传动系统参数设计

汽车动力传动系统参数设计是基于汽车发动机的特性，对汽车动力传动系统各个参数，即变速器和主减速器的传动比进行设计。汽车动力传动系统参数对汽车动力性和燃油经济性都有着重要的影响。用 DOE 分析方法把变速器和主减速器传动比作为优化的变量参数，以提高汽车的动力性和燃油经济性为目标，通过与发动机参数的匹配，优化各个参数值，提高汽车的动力性和燃油经济性。本文中以公交车为例，应用 DOE 分析对汽车的动力传动系统参数进行优化设计。

3.1 方案设计

对动力传动系统参数进行优化，将汽车动力性和燃油经济性的评价指标作为试验设计的指标。根据工程实际的需要，选择 0-80km/h 加速时间作为动力性的评价指标，城市公交循环工况下的百公里油耗作为燃油经济性的评价指标。

选择主减速器和变速器各个挡位的传动比作为试验设计因素。为了使大部分可控因素固定在较为成熟的水平上，在设计因素水平前进行了少量的试验及计算，然后确定这些因素的变化范围，以及在做试验时对这些因素应取哪几个水平，以使试验结果具有工程的实用价值。本次 DOE 分析过程中，选择了 6 个因素，每个因素取 3 个水平。汽车上选用了 6 档变速器，并设 5 挡为直接挡，则试验因素水平如表 1 所示。

表 1 试验设计分析因素水平表

因素(传动比)	变量	水平 1	水平 2	水平 3
主减速器	A	4.50	5.50	6.50
1 挡	B	6.00	6.55	7.10
2 挡	C	3.55	3.88	4.20
3 挡	D	2.15	2.38	2.30
4 挡	E	1.35	1.48	1.60
6 挡	F	0.65	0.75	0.85

由于设计的因素比较多，设计时采用正交试验设计的方法。正交试验设计方法具有试验点均匀分散、整齐可比的特点，在 DOE 分析中可以减少试验次数，缩短计算时间，保证设计的效果。设计一个 6 因素、3 水平的正交矩阵，设计时选用 $L_{18}(3^6)$ 的正交表，将 6 个因素分别放在选定正交表的前 6 列上，正交表的每一行对应着一次试验方案，即各因素的一组水平匹配方案，根据正交表得到 18 个试验。

3.2 试验实施

根据整车的参数在 GT-DRIVE 中建立计算模型，计算参数如表所示。

表 2 计算参数

项目	参数
车型	CA6120D116
型式	双轴后置发动机
长/宽/高(mm)	11996/2545/2375
轴距(mm)	6100
前轮距/后轮距(mm)	2050/1847
整备质量(kg)	10800
最大总质量(kg)	18000
迎风面积(mm ²)	6.04

轮胎规格	9.00-20
传动效率	0.95
发动机型号	BF6M1013-26
发动机型式	直列六缸水冷
标称功率(kW)	192
最大扭矩(Nm)	950
最大扭矩转速(n/min)	1400~1600
最低燃油消耗率(g/kWh)	201

将上述试验方案输入到 GT-DRIVE 中的 DOE 模块中进行 DOE 设置。试验设计的指标选为汽车在循环工况下的百公里油耗。循环工况采用 GB/T 19754-2005 中的循环工况。汽车的动力性指标作为约束条件，保证汽车在循环工况下具有足够的动力性。计算结果如表 3 所示。

表 3 DOE 分析试验结果

试验	因素水平组合	指标 (L/100km)
1	A1B1C1D1E1F1	23.3498
2	A1B1C2D2E2F2	25.0562
3	A1B1C3D3E3F3	26.9777
4	A1B2C1D1E2F2	22.6530
5	A1B2C2D2E3F3	26.4921
6	A1B2C3D3E1F1	24.4627
7	A1B3C1D2E1F3	24.0448
8	A1B3C2D3E2F1	25.8816
9	A1B3C3D1E3F2	25.2661
10	A2B1C1D3E3F2	32.8379
11	A2B1C2D1E1F3	32.1461
12	A2B1C3D2E2F1	32.0078
13	A2B2C1D2E3F1	32.0646
14	A2B2C2D3E1F2	32.3558
15	A2B2C3D1E2F3	32.9419
16	A2B3C1D3E2F3	33.4887
17	A2B3C2D1E3F1	32.0185
18	A2B3C3D2E1F2	32.2760

从试验结果中可以看出 A1B2C1D1E2F2 的组合，试验指标值最小，汽车燃油经济性最好，可以初

步选择这个组合作为汽车动力传动系统参数值。

3.3 回归分析

回归设计是在多元线性回归的基础上用主动收集数据的方法获得具有较好性质的回归方程的一种试验设计方法。试验中建立的燃油经济性指标 y 与传动系统参数变量因素 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ 间相关关系的定量表达式为回归方程，用一个多项式去逼近，根据上述计算过程，对试验结果进行分析，回归方程为

$$y = B_0 + \sum_j B_j x_j + \sum_j B_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j} B_{ij} x_i x_j$$
 式中： x_j 为各个因素变量， y 为试验指标。求出各项回归系数 B ，如表 4 所示。

表 4 回归方程回归系数表

变量名称	系数名称	因素值
B0	Constant	32.5715
B1	i0	4.1167
B2	ig1	0.1216
B3	ig2	0.113
B4	ig3	0.3503
B5	ig4	0.3991
B6	ig6	0.6142
B12	i0*ig1	0.1146
B13	i0*ig2	0.0499
B14	i0*ig3	0.1509
B15	i0*ig4	-0.6006
B16	i0*ig6	0.1941
B23	ig1*ig2	-0.0132
B24	ig1*ig3	-0.0044
B25	ig1*ig4	-0.0782
B26	ig1*ig6	0.0924
B32	ig2*ig3	-0.0102
B33	ig2*ig4	0
B34	ig2*ig6	0
B35	ig3*ig4	-0.0203

B36	$ig3*ig6$	0
B46	$ig4*ig6$	0
B11	$i0^2$	-1.3588
B22	$ig1^2$	0.0269
B33	$ig2^2$	0.0153
B44	$ig3^2$	0.0342
B55	$ig4^2$	-0.0939
B66	$ig6^2$	0.0497

根据上述回归系数可以得到回归方程。从回归方程中，可以看出因素对燃油经济性试验指标的影响。主减速器速比的影响尤为重要，这与一般的汽车动力传动系统匹配的原则是一致的。同时 5 挡和 6 挡速比的影响也是非常重要的，主要原因是在循环工况下其挡位的利用率高，对燃油经济性的影响很大。

通过回归方程，如果令其它因素为定值，则可以预测试验指标随另外一个因素的变化趋势，试验指标随每个因素变化的趋势如图 1 所示。

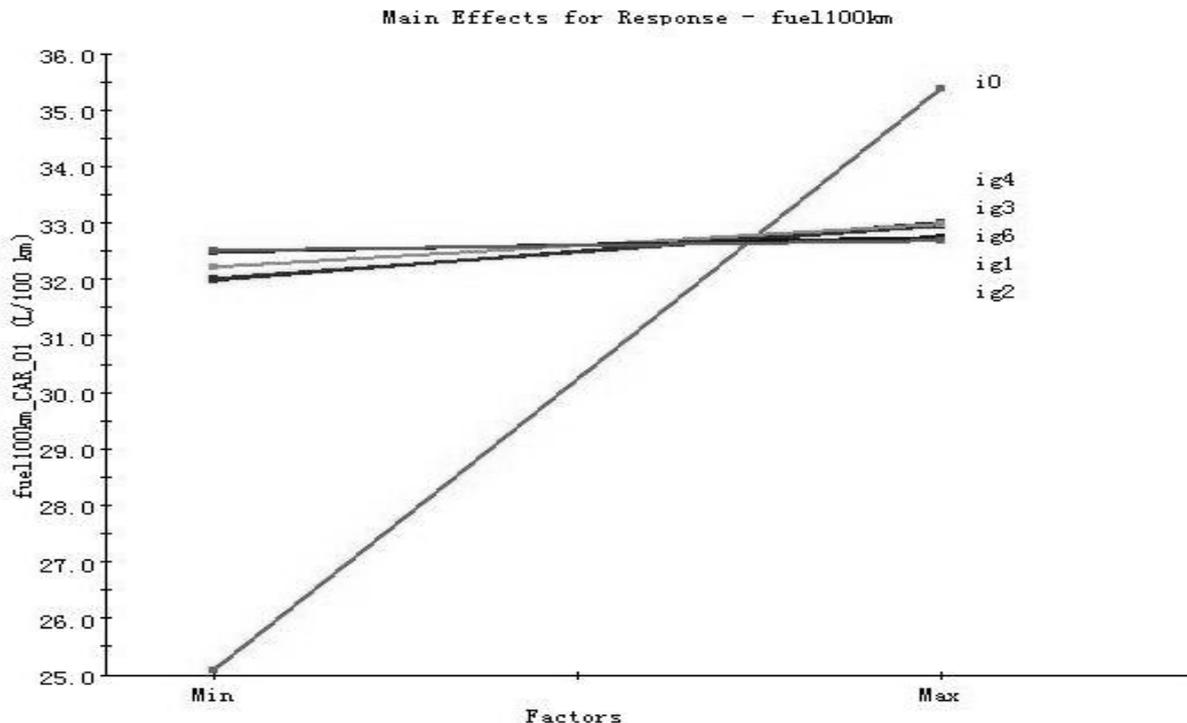


图 1 因素对指标的影响趋势预测图

从预测图中可以看出，降低挡位的传动比能够提高汽车的燃油经济性，但影响的程度不同，主减速器的影响是最为明显的。各个因素的交互对试验指标也有着重要的影响，如表 5 所示。

表 5 各个因素的交互对指标的影响值

因素	i0	ig1	ig2	ig3	ig4	ig6
i0	—	0.01	0.02	0.73	1.28	0.42
ig1	0.01	—	0.02	0.14	0.13	0.14
ig2	0.02	0.02	—	0.02	0	0
ig3	0.73	0.14	0.02	—	0.03	0
ig4	1.28	0.13	0	0.03	—	0
ig6	0.42	0.14	0	0	0	—

从表中可以看出，交互影响主要还是各个挡位与主减速器的交互影响，这与挡位的使用情况是一致的。

4 动力传动系统参数优化

试验设计可以根据各自因素对试验指标的影响来预测试验结果，并可以根据试验结果对因素进行数值的优化，以得到最优的因素的组合。主减速器传动比优化迭代过程，如图 2 所示。

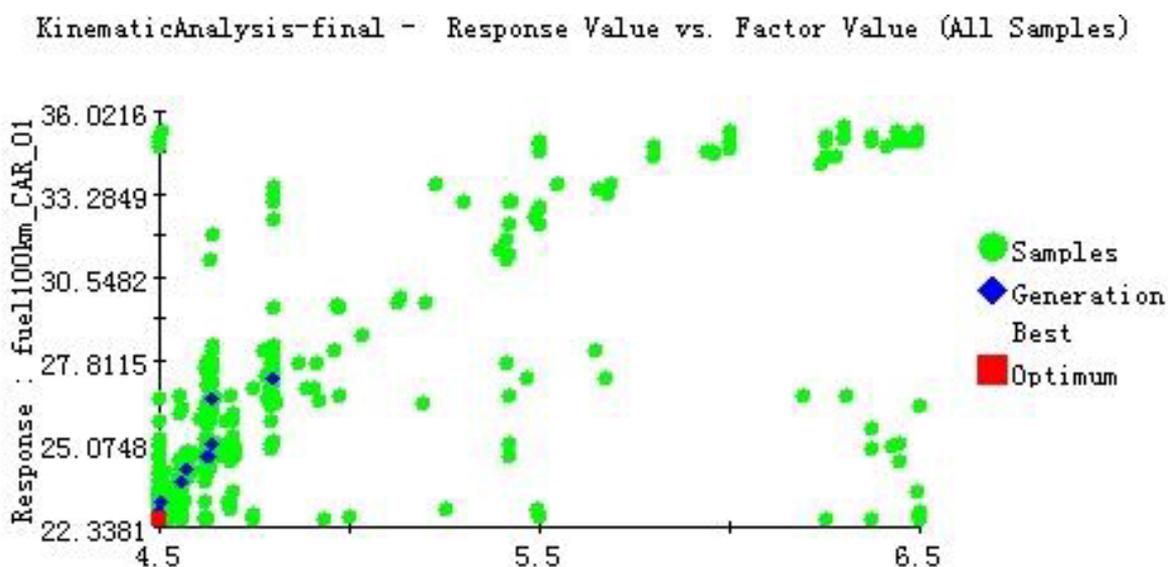


图 2 DOE 优化结果

各个参数都可以进行优化,通过优化计算,得到最后优化结果为 $i_0=4.5$, $i_{g1}=6.07$, $i_{g2}=3.55$, $i_{g3}=2.46$, $i_{g4}=1.35$, $i_{g6}=0.76$, 循环工况下油耗 $Q=22.60\text{L}/100\text{km}$ 。基于上述优化结果,可以对传动系统零部件进行配齿,为动力传动系统参数的设计提供参考依据。

5 结论

基于 DOE 分析的方法,对汽车动力传动系统参数进行了优化设计。利用正交试验设计方法进行方案设计,用回归分析方法对试验结果进行统计分析,得出各个因素对试验指标影响。通过 DOE 分析对各因素进行预测和优化,为动力传动系统参数设计提供重要的参考依据。

参考文献

- [1] 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(1): 37-41.
- [2] 葛安林, 吴锦秋, 林明芳. 汽车动力传动系统参数的最佳匹配[J]. 汽车工程, 1991(1): 35-42.
- [3] 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(2): 65-72.
- [4] 岳惊涛, 廖苓平, 彭莫等. 汽车动力系统的合理匹配评价[J]. 汽车工程. 2004(26): 102-106.
- [5] 何仁, 王建峰. 汽车动力传动系统合理匹配的实用方法[J]. 中国公路学报. 2000(1): 100-103.
- [6] R. Hambli. Design of Experiment Based Analysis for Sheet Metal Blanking Processes Optimization [J]. The international Journal of Advanced Manufacture Technology. 2004, 19(6): 402-409.
- [7] F.M. Shuaeib, etc al. A New Motorcycle Helmet Liner Material: The Finite Element Simulation and Design of Experiment Optimization [J]. Material and Design 28 (2007) 182-195.
- [8] 李学修, 黄虎, 刘长虹. 基于试验设计分析方法的轻卡车身结构优化[J]. 上海工程技术大学学报. 2007(21): 104-108.
- [9] 于昌阳, 马力. 驾驶室隔振改进设计中 DOE 技术的应用研究[J]. 机械研究与设计. 2006(19): 40-41.
- [10] 王万中. 试验设计与分析[M]. 高等教育出版社. 2004.