

基于模型的发动机仿真与优化

鲁 胜, 吴长水, 凌宪政, 刘扬柏

(上海工程技术大学 汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 利用 Matlab 软件中的 MBC (model-based calibration) 工具箱和仿真软件 Ricardo Wave 对汽油发动机的动力性进行了基于模型的标定和优化; 在标定流程中, 首先利用 Wave 建立了发动机仿真模型, 并通过验证; 接着, 运用实验设计 (DoE) 方法确定了发动机的运行工况点, 并用仿真模型计算出发动机在这些工况点处的参数和性能 (扭矩、油耗、功率和缸内最高压力等); 最后, 建立发动机数学统计模型和标定优化; 得到了发动机点火提前角、空燃比 MAP 图和优化后转矩的三维图; 研究结果表明, 该方法结合现代 DoE 试验设计理论和自动标定技术, 不仅使发动机的扭矩从 198 Nm 提升到 215 Nm, 还能减少试验时间, 提高标定效率。

关键词: 基于模型的标定; 试验设计; 发动机; 标定优化

Research on Simulation and Optimization of Gasoline Engine Based on Model

Lu Sheng, Wu Changshui, Ling Xianzheng, Liu Yangbo

(Automotive Engineering College, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The MBC (model-based calibration) toolbox in MATLAB software and Ricardo Wave were used to optimize the power performance of a gasoline engine. In the calibration process, firstly, the Wave simulation model of the engine was established and validated; then, engine operating points were determined by using the design of experiments (DOE) method, and parameters and performance (torque, fuel consumption, power and the cylinder maximum pressure, etc.) of the engine at these operating points were calculated by the simulation model. Finally, the engine mathematical statistical model was established and calibration optimization. The engine ignition advance angle, air-fuel ratio and the torque of the engine were obtained. The results show that the method combined with the modern DoE test design theory and automatic calibration technology not only makes the engine torque from 198 Nm to 215 Nm, but also reduces the test time and improve the calibration efficiency.

Keywords: model-based calibration; DoE; engine; calibration and optimization

0 引言

为了满足国家法规以及人们对汽车性能的需求, 发动机电控参数的优化标定显得尤为关键^[1]。但是标定任务繁重, 需要标定的量已经由 1998 年的 2 个发展到目前的 7 到 10 个, 需标定的 MAP 已由 1980 年的 8 张增多到 2015 年的 1 000 多张, 预计下一代发动机将会增长到 10 000 到 15 000 张^[2]。然而, 在发动机的研发过程中, 大部分的专家学者是先研究发动机的电控硬件系统, 再对发动机进行台架测试, 然后标定优化^[3], 这样的流程工作量非常大而且成本很高。

本文介绍的基于模型的标定技术是一种将数学优化理论与发动机标定技术相结合而形成的离线模式下的自动标定方法, 它能在很大程度上减少标定时间。其思想是基于 DoE 试验设计和统计工具去构造发动机标定模型, 其目的是建立控制变量 (如点火提前角, 空燃比) 和优化目标 (如最大扭矩、功率、最小排放和燃油消耗量) 之间的响应关系^[4]。DoE 有广义和狭义之分, 狭义仅仅指试验设计本身, 而广义指试验设计、统计建模和优化等一系列的优化过程。本文中的 DoE 是广义的试验设计, 它包括发动机工况点、建模方法和优化策略的选择, 而工况点可以通过拉丁抽样方法、中心组合设计、V 优选法和 D 优选法等获得^[5]。响应关系可以通过多项式函数、径

向基函数等实现。典型的发动机标定流程如下:

- 1) 定义发动机转速和负荷的区域, 获取发动机工况点;
- 2) 确定发动机的控制参数;
- 3) 通过转速、负荷和控制参数测量发动机性能;
- 4) 建立近似发动机响应模型;
- 5) 离线模式下, 通过改变控制参数, 优化发动机;
- 6) 与真实发动对比, 验证优化后的控制参数和性能结果, 若对结果不满意, 则返回第一步, 重新标定。

1 优化目标及约束

进气量和转速相同, 而点火提前角和空燃比不同的工况下, 发动机的最大转矩是不一样的, 且这两个参数对扭矩的影响非常大。因此, 对点火提前角和空燃比进行标定是非常有必要的。本次研究动力性, 其标定目标函数为:

$$\begin{aligned} \max T_{iq}(S, N, L, A) \\ T_{ex} \leq \lim T_{ex} \\ P_{peak} \leq \lim P_{peak} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: T_{iq} 为发动机转矩, S 为点火提前角, N 为发动机转速, L 为节气门开度, A 为空燃比, T_{ex} 为排气温度, $\lim T_{ex}$ 为排气温度限值, P_{peak} 缸内最高爆发压力, $\lim P_{peak}$ 缸内最高爆发压力限值。

本文标定优化目标是发动机转矩, 优化变量为点火提前角和空燃比。即通过标定点火提前角和空燃比, 使发动机满足排气温度和缸内最高爆发压力的限值条件, 并使最大扭矩达到最优。

收稿日期: 2016-04-12; 修回日期: 2016-05-19。

基金项目: 上海市教育委员会科研创新项目 (15KY0616)。

作者简介: 鲁 胜 (1991-), 男, 江西东乡人, 硕士研究生, 主要从事内燃机性能优化与分析方向的研究。

2 试验设计

控制参数的相互作用会对性能产生影响，利用多变量交叉组合进行发动机试验的传统标定方法是难以实现的^[6]。目前，DoE (design of experiment) 在发动机研发过程中运用的越来越广泛，其主要思想是把发动机看作数学模型，利用统计学的方法优化发动机的参数。本文采用 MBC 工具中的空间填充法 (Space filling) 进行实验设计。空间填充法是一种基于概率分布的实验设计方法^[7]。其原理是试验点之间的距离按照最小距离最大化、最大距离最小化分布。为了减少的试验点数，借助功率类似的发动机，用它的外特性作为限制。以点火提前角为局部变量，转速、节气门开度和空燃比为全局变量，经过空间填充实验设计，数据整理和筛选，最终确定了 80 个试验工况点，如图 1。

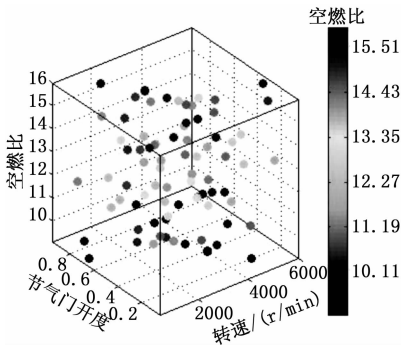


图 1 试验工况点

3 发动机仿真模型

Ricardo Wave 是一款专业的发动机模拟计算软件。用 Ricardo Wave 建立了一个四缸四冲程发动机模型，如图 2。表 1 为该发动机的主要参数。该模型为涡轮增压，缸内直喷发动机，采用 woschni 传热模型和韦伯函数解析缸内燃烧放热规律，其函数表达式为：

$$x_a = 1 - \exp\left[-6.908\left(\frac{\alpha - \alpha_\beta}{\alpha_z}\right)^{m+1}\right]$$
 (2)

式中， x_a 为燃料燃烧百分率， α 为曲轴转角， α_β 为燃烧起始角， α_z 为燃烧持续角， m 为燃烧品质指数。

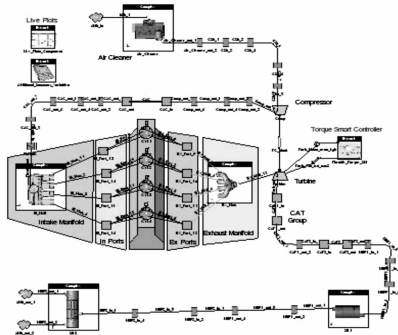


图 2 发动机 Wave 模型

在上步骤得到的试验设计工况点中，保证转速、负荷和空燃比不变，每个工况点依次扫描点火提前角，间隔为 4，扫描 10 次，总共扫描 $80 \times 10 = 800$ 次，然后，用 Wave 计算出这 800 个点的扭矩，功率，排气温度和缸内最高爆发压力，表 2 为获得的部分数据。

表 1 汽油机主要参数

汽油机型式	直列 4 缸、4 冲程
吸气方式	增压中冷
排量	2.0L
缸径	82.5mm
冲程	92.8mm
压缩比	9.6
额定功率	76kW/4000r/min
最大扭矩	280Nm/2500—3500r/min

表 2 部分工况点仿真数据

Load	AFR	Speed	Spark	BTQ
%	Ratio	r/min	°	Nm
0.825	13.02	2588	5	172.1
0.825	13.02	2588	9	175.1
0.825	13.02	2588	13	173.8
0.825	13.02	2588	17	168.7
0.825	13.02	2588	21	160.5
0.825	13.02	2588	25	170
0.825	13.02	2588	29	157.8
0.825	13.02	2588	33	124.5
0.825	13.02	2588	37	113.6
0.825	13.02	2588	41	106.4

4 发动机统计建模

以点火提前角作为局部变量，转速、节气门开度、空燃比作为全局变量，扭矩作为响应量，建立发动机二阶统计模型，如图 3。为了使统计模型更加贴近实际发动机，需要添加一些约束条件，如缸内最高爆发压力 $P_{pebk} \leq 8$ MPa，来限制发动机缸内压力过高。二阶统计模型能够反映局部变量与全局变量之间的映射关系。在局部模型建立了关于点火提前角 S 的分段二次多项式回归模型，其数学表达式为：

$$T_{iq} = \begin{cases} -c_1(S-k)^2 + \max(if S > k) \\ -c_2(S-k)^2 + \max(if S < k) \end{cases}$$
 (3)

其中： c_1, c_2, k, \max 为局部模型的回归系数。 k 为局部最佳点火提前角； \max 为局部最大扭矩； c_1 为局部最大扭矩点右边二次回归模型的二次系数； c_2 为局部最大扭矩点左边二次回归模型的二次系数。而回归系数又是以模型中全局变量 (N, L, A) 为自变量的函数，采用径向基函数 (Hybrid RBF) 来反映两者间的关系。径向基函数的表达式为：

$$\begin{cases} U_k = \exp\left[-\frac{(x_k - c_k)^T \cdot (x_k - c_k)}{2\sigma_k}\right] \\ y_k = \sum_{k=1}^N W_k U_k(x) - \theta \\ k = 1, 2, 3 \dots n \end{cases}$$
 (4)

式中， U_k 是传递函数的输出值， x 是输入样本， c 是中心值， σ 是偏差值， y 是网络预测输出值， N 是隐含层节点数， W 是连接权值， θ 是阈值，下标 k 表示第 k 个单元。在构建完模型后，需要通过均方根误差来检查局部模型的数据和判断全局模型是否合理，若均方根误差较大，则在不影响整个曲线拟合趋势的条件下，可以移除一个数据组中的某个点或者移除整个数据

组。经过多次来回的检查并移除数据, 可以得到精确的拟合结果, 如回归系数 max, 图 4 是全局模型中 max 预测值和观测值的分布图, 可以清晰的看到全部点基本上在直线, 模型误差小于 3%。

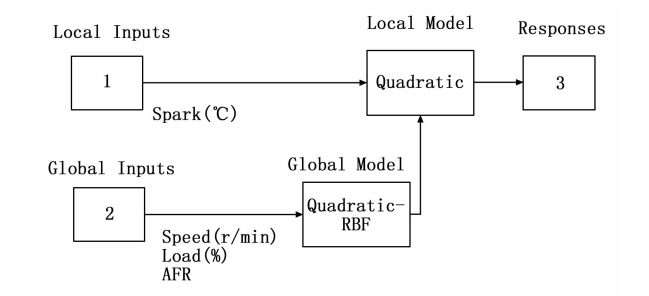


图 3 二阶统计模型

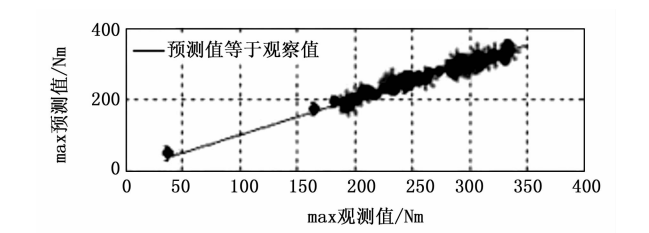


图 4 Hybrid RBF 函数 max 预测值与观测值分布

5 标定优化

本文优化目标是发动机最大扭矩, 约束条件为排气温度和缸内最高爆发压力, 标定变量是点火提前角和空燃比。MBC 工具箱中的 CAGE 提供的单目标函数 foptcon、NBI 和 Worked Example 等 3 种算法, 其中 foptcon 算法适用范围为任意自由变量个数, 单目标数和带约束模型, 故采用 foptcon 算法。将上面建立的统计模型导入 CAGE 中进行优化, 优化模型如图 5。

添加变量点火提前角 S, 空燃比 A, 转速 N 和节气门开度 L, 设置点火提前角 S 和空燃比 A 为 Free Variable, 转速 N 和节气门开度 L 为 Fixed Variable。转速的间隔为 500 r/min, 节气门开度间隔为 0.1, 设置优化表格。

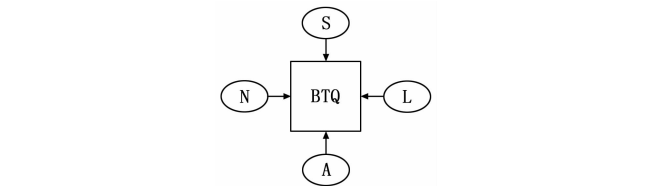


图 5 峰值扭矩优化模型

本文对点火提前角和空燃比进行优化, 得到它们的 MAP 图和转矩的三维图, 如图 6—图 8。从图中可以看出, 点火提前角和空燃比优化的比较光顺, 在负荷为 100%, 转速为 1 000~2 500 r/min 时, 发动机转矩随着转速的增加而增大; 转速在 2 500~5 000 r/min, 随转速的增大而减小, 最大扭矩为 215 Nm。

合理的点火提前角能在很大程度上改善缸内的燃烧过程^[8], 进而提高动机的动力性、经济性及排放性能。点火提前

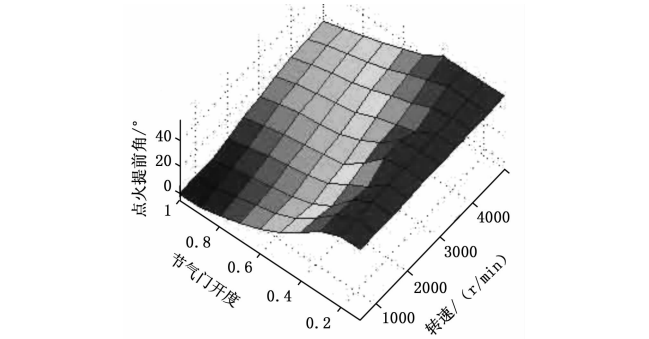


图 6 点火提前角 MAP 图

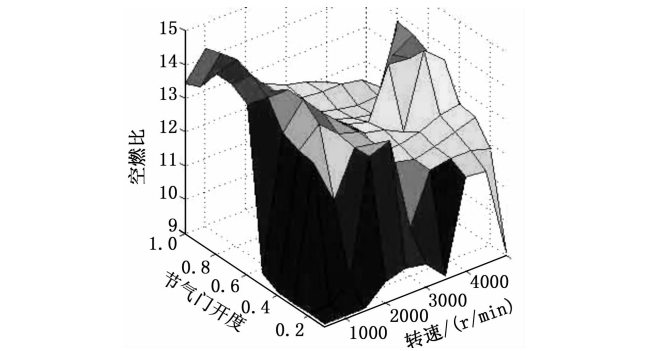


图 7 空燃比 MAP 图

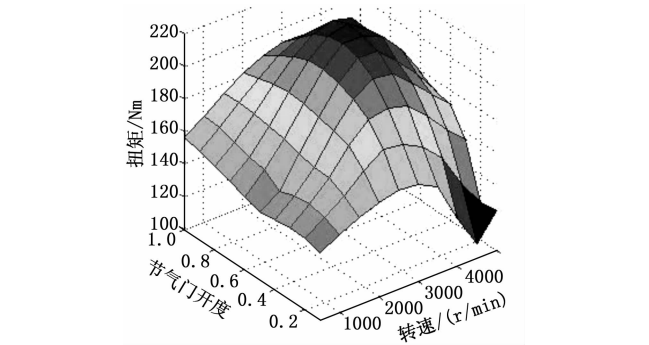


图 8 转矩 MAP 图

角标定的原则是在怠速工况, 点火提前角标定首先要保证发动机的运转平稳, 其次再考虑经济性; 在中低转速工况, 点火提前角标定首先要保证足够的低速扭矩和动力响应性能; 在高转速工况, 发动机点火提前角标定是在保证不发生爆震和失火的条件下, 使发动机在该工况点输出功率最大, 即保证发动机的经济性能优异。正如图 6 示, 点火提前角是随着发动机转速的增加而增加, 随着负荷的增加而较小。

图 7 是标定后的空燃比。空燃比是影响缸内燃烧的最大因素之一, 它决定发动机的动力性、经济性、排放和可靠性。空燃比的标定原则是在低速工况, 为了满足发动机的低速动力响应, 应该使燃烧混合气较浓, 如图 7, 转速在 1 000~2 000 r/min 之间, 空燃比较小, 混合气较浓; 在高转速工况, 空燃比标定主要考虑的是经济性能, 故空燃比较大, 混合气较稀, 如图 7, 转速在 3 500~5 000 r/min 所示; 在低负荷工况下 (节气门开度 L 小于 0.4), 混合气应较浓, 但混合气的浓度应该随负荷的增加而减小; 在高负荷下, 当节气门开度大于 3/4

时,为了满足发动机动力性的要求,空燃比应随着节气门开度的增加而减小。

6 结论

1) 用仿真软件 Ricardo Wave 建立的发动机模型代替实际发动收集数据,可重复性强,能够减少发动机运行成本和时间。

2) 确立了一种基于发动机模型对控制参数标定的方法。该方法将现代 DoE 试验设计、数学统计和标定技术结合起来,不仅可以优化发动机,提高发动机的动力性,还可以极大的减少标定成本,减少标定时间,缩短开发周期。优化前的最大扭矩为 198 Nm,而优化后的最大扭矩为 215 Nm。

参考文献:

- [1] 倪计民,杨挺然,杨健. 基于模型的高压共轨柴油机电控参数优化 [J]. 内燃机工程, 2008, 29 (1): 6-10.

- [2] 赵宏志. 汽油机动力总成系统匹配标定及优化研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2011.
- [3] 李云清,王海鹰,成传松,等. 联合 Boost 和 Matlab 基于模型的仿真和标定方法研究 [J]. 内燃机工程, 2010, 31 (4): 78-82.
- [4] Ho T, Karri V. Optimizing the sum performances of ignition timing and air to fuel ratio on torque of hydrogen powered car [A]. In The 15th Asia Pacific automotive Engineering Conference [C]. 2009, 15 (149): 1-7.
- [5] Kianifar M R, Campean L F, Richardson D. Sequential DoE Framework for Steady State Model Based Calibration [J]. SAE International Journal of Engines, 2013, 6 (2): 843-855.
- [6] 夏广文,张云龙,韩韶辉,等. 汽油机电控系统标定试验方法的研究 [J]. 内燃机工程, 2002, 23 (4): 82-85.
- [7] 胡德胜. 基于模型的汽油机气路系统控制 map 标定 [D]. 吉林: 吉林大学, 2015.
- [8] 范宝伟,潘剑锋,陈瑞,等. 点火提前角对天然气转子发动机燃烧过程的影响 [J]. 兵工学报, 2014, 35 (1): 1-8.

(上接第 256 页)

SAMP 在导频 $p=32$ 时,信噪比也比 LS 在导频 $p=256$ 时低 1 dB。换句话说,如果要获得导频数是 256 时的 LS 信道估计性能,用 OMP 与 SAMP 仅需要导频等于 32。所以,用压缩感知的方法将会大大减少导频的数量,提高整个系统的吞吐量。

图 7 仿真了 LS 算法、OMP 算法和 SAMP 算法的 SER 性能,随着信噪比的增加, SAMP 算法的估计精度越来越高,并且一直优于其他两种算法,由此可见 SAMP 作为贪婪迭代类算法的一种,不需要稀疏度作为先验条件,更加适合低压电力线载波通信信道估计这样的实时应用。

参考文献:

- [1] Chen C S, Ku T, Lin C H. Design of PLC-based Identifier to Support Transformer Load Management in Taipower [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46 (3): 1072-1077.
- [2] Zhai M Y. Transmission Characteristics of Low-voltage Distribution Networks in china under the smart Grids Environment [J]. IEEE Transactions on Power Deliver, 2011, 26 (1): 173-180.
- [3] 唐良瑞,张勤,张平. 正交频分复用系统中基于迭代插值的低压电力线信道估计 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (1): 98-102.
- [4] Ren X, Chen W, Tao M. Position-based compressed channel estimation and pilot design for high-mobility OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64 (5): 1918-1929.
- [5] 陈书贞,张亚静,练秋生. OFDM 系统中基于压缩传感理论的信道估计算法 [J]. 信号处理, 2010, 26 (1): 157-160.
- [6] Sicong Liu, Fang Yang, Chao Zhang, Jian Song. Compressive sensing based narrowband interference cancellation for PLC systems [J]. 2014 IEEE Global Communications Conference, 2014, 298-299.
- [7] 郭俊龙,王学伟,王琳. 低压电力线载波通信压缩感知信道估计方法 [J]. 北京化工大学学报 (自然科学版), 2016, 43 (3): 111-114.
- [8] Zimmermann M, Dostert K. A multipath model for the power line channel [J]. IEEE Transactions on Communication, 2002, 50 (4): 553-559.
- [9] Wenbo Ding, Yang Lu, Fang Yang, Wei Dai, Jian Song. Sparse Channel State Information Acquisition for Power Line Communications [A]. 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC) [C]. 2015: 746-751.
- [10] Do T T, Gan L, Ngugen N H. Sparsity adaptive matching pursuit algorithm for practical compressed sensing [A]. Proceedings of the 42nd Asilomar Conference on Signal Systems and Computers [C]. Piscataway: IEEE, 2008: 581-587.
- [11] 陈恩庆,相小强,穆晓敏. 基于压缩感知的 MIMO-OFDM 系统稀疏信道估计算法 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2013, 34 (6): 6-9.

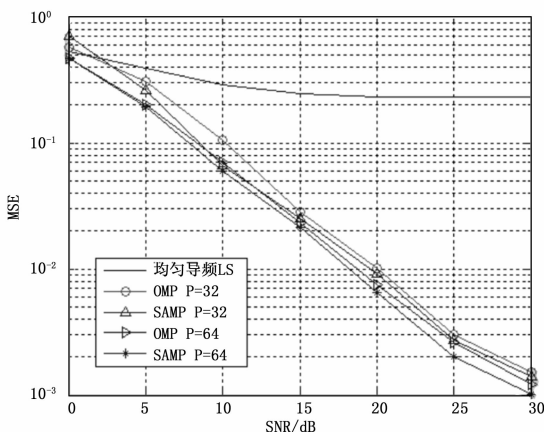


图 7 不同算法的 SER 比较

6 结论

笔者围绕低压电力线载波通信系统信道估计问题,研究了基于压缩感知的信道估计方法。针对低压电力线通信环境多径干扰的特点,建立了 CS 信道估计模型,将信道估计转换为压缩感知信号重构问题,首次采用压缩感知的稀疏自适应匹配追踪方法重构出低压电力线载波通信多径信道的冲击响应。仿真表明,基于 SAMP 的信道估计方法与其它常用信道估计算法相比,在频谱利用率以及估计性能方面比传统方法有显著提高。同时,在未知稀疏度的情况下,为低压电力线载波通信系统提供了一种稳定、可行的信道估计方案。