

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201702105



# 天然气和生物柴油在气道和缸内 喷射混合的燃烧特性分析

李 军, 苏 彪

(重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074)

**摘要:** 将某款柴油机改用进气道喷射天然气和缸内直喷生物柴油的混合燃烧方式,通过均匀设计的方式,综合运用二次多项式逐步回归法和综合加权评分值法,确定天然气和生物柴油的最佳掺烧比.通过 GT-POWER 仿真软件创建柴油机模型,分析在不同发动机转速下该柴油机的动力性、经济性和排放性.仿真结果表明:混合燃烧方式较原机的动力性和经济性略有下降;在中高转速时,混合燃烧方式的 NO 排放量低于原机,但 CO 排放量与原机相比基本保持不变.

**关键词:** 柴油机; 燃烧特性; 天然气; 生物柴油; 均匀设计; 掺烧比; GT-POWER 仿真

**中图分类号:** U 262.111.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2017)05-0614-05

## Analysis of Combustion Characteristics of Natural Gas and Biodiesel in Airway and In-Cylinder Jet Mixing

LI Jun, SU Biao

(School of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** A mixed combustion mode was adopted for a diesel engine by the way of natural gas injected into the inlet and biodiesel directly injected into the cylinder. The two-polynomial stepwise regression method and comprehensive weighted score method were used to determine the optimal blending ratio of natural gas and biodiesel. The diesel engine model was built by GT-POWER simulation software, and the power, economy and emissions of the diesel engine at different engine speeds were analyzed. The simulation results show that comparing with the original mode the power and the economy of mixed combustion slightly decreased; in high speed, the NO emission is lower, but CO emission remained unchanged.

**Keywords:** diesel engine; combustion characteristics; natural gas; biodiesel; uniform design; blending ratio; GT-POWER simulation

环境污染严重和石油资源短缺这两大问题已经成为社会的热点,而汽车尾气排放却是城市的主要污染源之一<sup>[1]</sup>.因此,各国政府非常重视车用清洁能源的研究及应用<sup>[1]</sup>.生物柴油作为一种替代燃料,与石化柴油相比,其生命周期中 CO 净释放量少<sup>[2]</sup>,对解决日益严重的化石燃料短缺和温室气体的控制等问题意义重大<sup>[3-8]</sup>.近年来,国内外开展了大量生物柴油在柴油机上应用的研究<sup>[9-10]</sup>,证明了生物柴油作

**收稿日期:** 2017-02-17

**通信作者:** 李军(1964-),男,教授,博士,主要从事汽车发动机排放与控制、节能与新能源汽车的研究. E-mail: cqleejun@163.com.

**基金项目:** 重庆市自然科学基金重点资助项目(CSTC2013YYKFB0184);重庆市重点实验室科研基金资助项目(CSCT2015YFPT-ZDSYS30001, CSTC2015YFPT-ZDSYS3000);重庆市教委科研基金资助项目(KJ120423)

为替代燃料的可行性. 天然气由于低排放、安全可靠、技术成熟的特点,使其具有良好的经济效益和环境效益<sup>[11]</sup>. 当天然气与空气混合充分、燃烧彻底,可大幅度降低 CO 和碳氢化合物的排放量,且天然气的火焰温度低,也会使 NO 排放量减少<sup>[11]</sup>. 本文通过 GT-POWER 仿真软件创建柴油机模型<sup>[12]</sup>,改用进气道喷射天然气和缸内直喷生物柴油混合燃烧方式,采用均匀设计的方式确定天然气和生物柴油的最佳掺烧比例,并分析该款柴油机的动力性、经济性及排放性.

# 1 均匀设计确定掺烧比

## 1.1 均匀设计试验点选择<sup>[13-15]</sup>

选用柴油机的主要技术参数:发动机位四缸、四冲程、增压中冷型式;缸径为 100 mm;冲程为 100 mm;连杆长度为 152 mm;排量为 3.14 L;喷油压力为 95 MPa;全负荷时的过量空气系数为 1.68. 运用均匀设计以扭矩、燃料消耗率、CO 和 NO 排放为优化目标,研究确定天然气和生物柴油的最佳掺烧比例. 试验点掺烧比的分配,如表 1 所示. 选择天然气掺烧比( $x_1$ )、发动机转速( $x_2$ )和负荷( $x_3$ )为实验因素,均匀设计试验的安排及试验结果,如表 2 所示. 表 2 中: $y_1, y_2, y_3, y_4$  分别表示扭矩和燃油消耗(BSFC),CO,NO 的排放量.

表 1 试验点掺烧比的分配  
Tab. 1 Distribution of mixing ratio of test point

试验点	天然气掺烧比	转速/ $r \cdot \min^{-1}$	原机空燃比	天然气	生物柴油
N1	0.5	2 000	0.066 8	0.033 40	0.033 40
N2	0.6	1 000	0.078 6	0.047 16	0.031 44
N3	0.9	5 000	0.089 9	0.080 91	0.008 99
N4	0.3	5 000	0.089 9	0.026 97	0.062 93
N5	0.2	5 000	0.089 9	0.017 98	0.071 92
N6	0.2	1 000	0.078 6	0.015 72	0.062 88
N7	1.0	2 000	0.066 8	0.066 80	0
N8	0.6	4 000	0.085 1	0.051 08	0.034 04
N9	0.8	1 000	0.078 6	0.062 88	0.015 72
N10	0.7	2 000	0.066 8	0.046 76	0.020 04
N11	0.7	5 000	0.089 9	0.062 93	0.026 97
N12	1.0	3 000	0.068 7	0.068 70	0
N13	0.9	4 000	0.085 1	0.076 59	0.008 51
N14	0.1	4 000	0.085 1	0.008 51	0.076 59
N15	0.3	2 000	0.066 8	0.020 04	0.046 76
N16	0.8	3 000	0.068 7	0.054 96	0.013 74
N17	0.4	3 000	0.068 7	0.027 48	0.041 22
N18	0.1	3 000	0.068 7	0.006 87	0.061 83
N19	0.5	4 000	0.085 1	0.042 55	0.042 55
N20	0.4	1 000	0.078 6	0.031 44	0.047 16

表 2 均匀设计试验安排及试验结果  
Tab. 2 Arrangement of uniform design and test results

水平	$x_1$	$x_2 / r \cdot \min^{-1}$	$x_3$	$y_1 / N \cdot m$	$y_2 / g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$	$y_3 / g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$	$y_4 / g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$
N1	0.50	2 000	0.25	120.0	334.00	3.82	8.06
N2	0.60	1 000	0.50	272.0	349.00	283.00	6.35
N3	0.90	5 000	1.00	241.0	436.00	471.00	7.30
N4	0.30	5 000	0.25	71.1	723.00	543.00	14.90
N5	0.20	5 000	0.75	119.0	902.00	307.00	23.80
N6	0.20	1 000	0.25	102.0	421.00	120.00	6.76
N7	1.00	2 000	0.50	265.0	273.00	113.00	6.74
N8	0.60	4 000	1.00	366.0	301.00	144.00	9.89

续表

Continue table

水平	$x_1$	$x_2/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	$x_3$	$y_1/\text{N}\cdot\text{m}$	$y_2/\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	$y_3/\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	$y_4/\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$
N9	0.80	1 000	0.75	371.0	287.00	251.00	5.92
N10	0.70	2 000	1.00	466.0	234.00	35.60	10.20
N11	0.70	5 000	0.50	133.0	507.00	497.00	8.41
N12	1.00	3 000	0.75	327.0	275.00	144.00	7.29
N13	0.90	4 000	0.25	94.6	449.00	323.00	6.65
N14	0.10	4 000	0.50	121.0	925.00	8.62	20.00
N15	0.30	2 000	0.75	362.0	252.00	0.06	15.30
N16	0.80	3 000	0.25	107.0	355.00	118.00	6.61
N17	0.40	3 000	0.50	239.0	276.00	6.99	14.20
N18	0.10	3 000	1.00	204.0	591.00	1.03	13.60
N19	0.50	4 000	0.75	282.0	307.00	96.80	11.50
N20	0.40	1 000	1.00	409.0	292.00	144.00	7.30

1.2 二次多项式逐步回归法

对试验数据采取二次多项式逐步回归法进行分析,二次多项式模型为

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_m x_m + \sum_{1 \leq j, k \leq m} \beta_{j,k} x_j x_k.$$
 (1)

以转矩为优化目标的回归方程为

$$y_1 = -176.351\ 1 + 258.975\ 5x_1 + 0.088\ 2x_2 + 677.030\ 1x_3 - 337.794\ 8x_1^2 - 277.653\ 0x_3^2 + 0.000\ 5x_1x_2 + 328.669\ 1x_1x_3 - 0.062\ 6x_2x_3.$$
 (2)

以 BSFC 为优化目标的回归方程为

$$y_2 = 786.4 - 912.5x_1 - 0.1x_2 - 427.4x_3 + 1\ 059.1x_1^2 + 301.2x_3^2 - 0.2x_1x_2 - 197.3x_1x_3.$$
 (3)

以 CO 为优化目标的回归方程为

$$y_3 = 408.057\ 9 + 175.135\ 7x_1 - 0.373\ 0x_2 - 53.631\ 2x_3 + 68.821\ 2x_1^2 + 0.000\ 1x_2^2 + 164.153\ 4x_3^2 + 0.014\ 3x_1x_2 - 118.868\ 7x_1x_3 - 0.057\ 2x_2x_3.$$
 (4)

以 NO 为优化目标的回归方程为

$$y_3 = -0.119\ 9 - 6.351\ 7x_1 + 0.005\ 6x_2 + 18.596\ 2x_3 + 3.911\ 8x_1^2 - 14.339\ 9x_3^2 - 0.003\ 7x_1x_2 + 2.975\ 7x_1x_3 - 0.000\ 1x_2x_3.$$
 (5)

1.3 综合加权评分值法

实验需要对发动机转矩,BSFC,CO 和 NO 排放量进行优化.因此,要对各个优化目标进行整合,从而得到可以量化的综合优化目标.文中采用加权综合评分值法,得出综合优化目标函数  $Y_i$ ,其计算式为

$$Y_i = a_iy_1 + b_iy_2 + c_iy_3 + d_iy_4.$$
 (6)

采用综合加权评分值法确定各个优化目标的权重系数,各权重系数绝对值之和应为 1.由于 NO 排放变化量较小,所以不将 NO 排放作为优化目标,取  $c_i = 0$ .由发动机性能可知,扭矩越大越好,对于 BSFC,CO 的排放则是较小为好.为了统一优化目标,使得综合优化目标函数大小的变化所代表的发动机性能优劣,将扭矩的权重系数设置为负数,因此,综合优化目标数值越小发动机性能越好.

根据各优化目标重点,设置了两种权重分配方案.1) 方案一.  $a_1 = -0.3, b_1 = 0.3, d_3 = 0.4$ . 2) 方案二.  $a_2 = -0.4, b_2 = 0.4, d_2 = 0.2$ . 由此得到综合优化目标方程  $Y_1, Y_2$  分别为

$$Y_1 = 452.048\ 49 - 281.388\ 37x_1 - 0.205\ 66x_2 - 352.781\ 51x_3 + 446.596\ 92x_1^2 + 0.000\ 04x_2^2 + 239.317\ 26x_3^2 - 0.054\ 43x_1x_2 - 205.338\ 21x_1x_3 - 0.004\ 10x_2x_3,$$
 (7)

$$Y_2 = 466.712\ 02 - 433.563\ 06x_1 - 0.149\ 88x_2 - 452.498\ 28x_3 + 572.522\ 16x_1^2 + 0.000\ 002x_2^2 + 264.371\ 88x_3^2 - 0.077\ 34x_1x_2 - 234.161\ 38x_1x_3 + 0.013\ 60x_2x_3.$$
 (8)

综合考虑发动机的各种使用工况,在不同的天然气掺烧比下,对综合优化目标方程  $Y_1, Y_2$  的发动机转速  $x_2$  和负荷  $x_3$  进行二重积分计算,  $x_2$  的变化范围为  $1\ 000 \sim 5\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $x_3$  为  $25\% \sim 100\%$ .

由此得到综合优化目标与不同天然气掺烧比的关系曲线, 如图 1 所示。

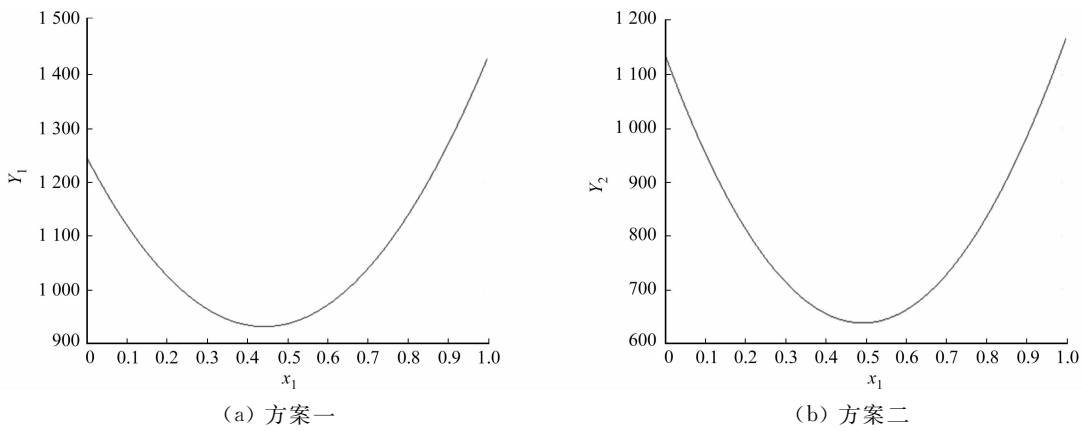


图 1 综合优化指标与天然气掺烧比的关系

Fig. 1 Relationship between comprehensive optimization index and blending ratio of natural gas

对于加权综合评分值法的权重方案, 当综合优化目标  $Y_1, Y_2$  取最小值时, 所对应的天然气掺烧比分别为 0.4 (方案一) 和 0.5 (方案二), 即为综合考虑所有工况下以扭矩, BSFC, CO 排放为优化目标的较优掺烧比。

## 2 较优掺烧比下发动机性能分析

改用进气道喷射天然气和缸内直喷生物柴油的混合燃烧方式后, 通过均匀设计的方式, 结合二次多项式逐步回归法和综合加权评分值法, 确定天然气和生物柴油的最佳掺烧比例。通过 GT-POWER 仿真软件, 分析在不同发动机转速下方案一、二和原机的发动机动力性、经济性和排放性, 如图 2~5 所示。图 2~5 中:  $T$  为发动机扭矩;  $n$  为发动机转速;  $Q_b$  为燃油消耗率;  $Q_{NO}, Q_{CO}$  分别为 NO, CO 的排放量。

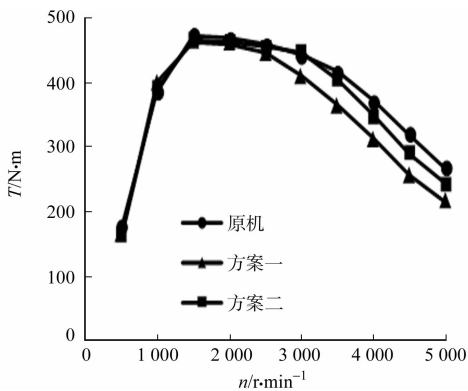


图 2 不同转速下发动机扭矩的变化

Fig. 2 Variation of engine torque at different speeds

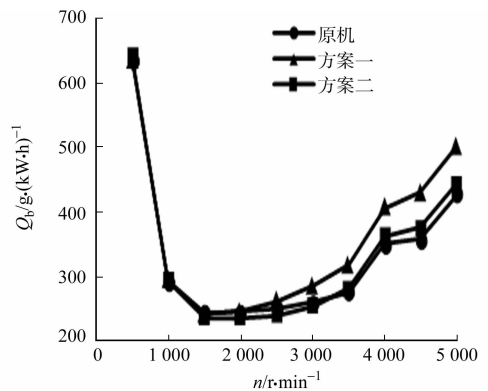


图 3 不同转速下燃油消耗率的变化

Fig. 3 Variation of fuel consumption under different speeds

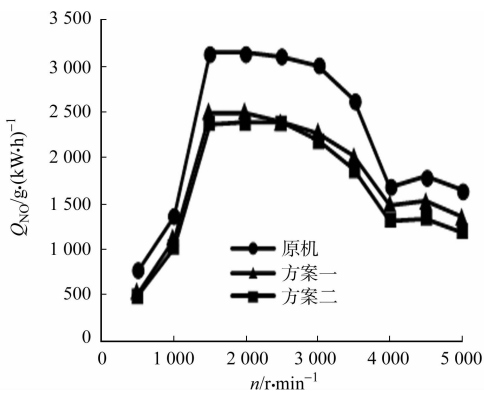


图 4 不同转速下 NO 排放的变化

Fig. 4 Variation of NO emission at different speeds

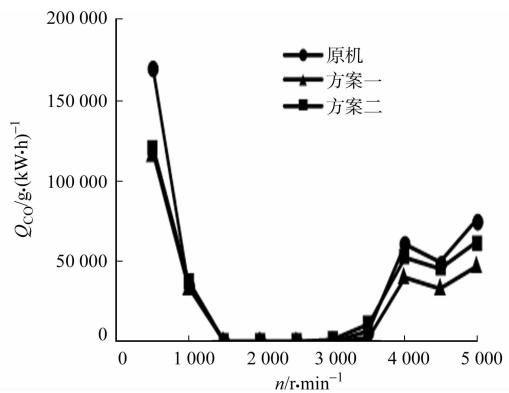


图 5 不同转速下 CO 排放的变化

Fig. 5 Variation of CO emission at different speeds

由图 2~5 可知:改用进气道喷射天然气和缸内直喷生物柴油混合燃烧方式后,发动机转矩和燃油消耗率与原机大致相同,在中高转速时,两者略低于原机. 因此,其动力性和经济性也呈相同的趋势. 在低转速和高转速时,混合燃烧方式的 NO 排放略优于原机,在中等转速( $1\,500\sim3\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ )时,NO 的排放明显优于原机. 混合燃烧方式对 CO 的排放影响不大,在  $1\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  以下和  $4\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  以上时,CO 的排放会略低于原机.

3 结 束 语

通过将某款柴油机改用进气道喷射天然气和缸内直喷生物柴油的混合燃烧方式,分析该款发动机的燃烧特性. 通过均匀设计的方式,综合运用二次多项式逐步回归法和综合加权评分值法,得到了两种方案下两种天然气掺烧比例. 研究表明:改用进气道喷射天然气和缸内直喷生物柴油的混合燃烧方式,可以在基本保持动力性和经济性的基础上,提高发动机的排放性能,明显减少了 NO 的排放量.

参 考 文 献:

[1] 张晓,胡真,李湘萍. 高比例二甲醚和生物柴油混合燃料在直喷柴油机上试验研究[J]. 内燃机工程,2008,29(5):21-25.

[2] SHEEHAN J,CAMOBRECO V,DUFFIELD J,*et al.* An overview of biodiesel and petroleum diesel life cycles[J]. Biomass Fuels,2000,99(10):3975-3981.

[3] LIN Yafen,WU Y P G,CHANG Changtang. Combustion characteristics of waste-oil produced bio-diesel/diesel fuel blends[J]. Fuel,2007,86(12/13):1772-1780.

[4] ZHANG Xusheng,GAO Guanghai,LI Liguang,*et al.* Characteristics of combustion and emissions in a DI engine fueled with biodiesel blends from soybean oil[C]// Sae International Powertrains, Fuels and Lubricants Congress. Shanghai:SAE International,2008:158-160.

[5] ALPUERT A,ARMASA O,FERNANDE J R. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emission[J]. Progress in Energy and Combustion Science,2008,34(2):198-223.

[6] 刘秀花. 生物质能源产业技术发展趋势[J]. 创新科技,2014(11):26-27.

[7] 谢敬思,程世庆,张慧敏.  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  气氛下生物质与煤混燃的 NO 排放特性研究[J]. 热力发电,2012,41(8):32-36.

[8] 谢敬思,程世庆,张慧敏.  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  气氛下生物质混煤燃烧  $\text{SO}_2$  排放特性的实验研究[J]. 锅炉技术,2012,43(5):74-78.

[9] 楼狄明,徐宁,谭丕强,等. 废气再循环对燃用生物柴油发动机排放的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版),2016,44(2):291-297.

[10] 范晨阳,徐斌,刘亚哲. 柴油机燃用生物柴油的经济性和排放特性[J]. 农机化研究,2013,35(2):210-213.

[11] 徐元利,赵丰,谈炳发. 基于 6105 型柴油机的天然气发动机研制[J]. 天津科技大学学报,2016,31(1):64-65.

[12] 李东民,张慧,李玉善. 不同氧空比下发动机动力性能与  $\text{NO}_x$  排放仿真分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2016,37(3):281-286.

[13] 刘文卿. 实验设计[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

[14] 方开泰,马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京:科学出版社,2001.

[15] 王贤烽,彭美春,王海龙. 柴油/生物柴油/乙醇三元混合燃料最佳掺烧比的研究[J]. 车用发动机,2008,177(4):84-89.

(责任编辑:黄仲一 英文审校:崔长彩)