

用于混合动力发动机的技术选择及其参数决策模型研究

王楠^{1, 2}, 吴晗²

(1. 北京理工大学 机械与车辆工程学院, 北京 100000; 2. 北京电子科技职业学院汽车工程学院, 北京 100000)

Technology Selection and Parameter Decision model for Hybrid Engine

Nan Wang^{1,2}, Han Wu¹

(1 School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081; 2. Automotive Engineering, Beijing PolyTechnic, Beijing 100176)

Abstract: This paper aims to develop a comprehensive Decision model under the constraint conditions of thermal efficiency, knock factor and emissions, with the lowest cost-effectiveness ratio as the optimization objective. It can quickly decide a series of technical and parameter combination schemes that may meet the constraint conditions and have low cost-effectiveness ratio. This model utilizes DOE and NSGA - II genetic optimization algorithms to quickly determine the optimal technical solution and its parameters. Research has shown that using this model for optimization calculations can shorten the total time of the same 2000 optimization calculations from 3 days to 3 minutes compared to calling the GT Power solver, greatly reducing the computational time. The accuracy of the model is good, and the prediction error of thermal efficiency can be controlled within 1%, and the estimation error of detonation factor can also be controlled within 10%.

摘要: 本文中建立了一个在热效率、爆震因子以及排放多指标约束条件下, 以费效比最低为优化目标的综合决策模型, 其可以快速地为混合动力发动机决策出一系列既可能满足约束条件, 同时费效比又偏低的技术及参数组合方案。此模型利用 DOE 和 NSGA-II 遗传优化算法, 可以快速决策出最优的技术方案及其参数。研究表明, 利用该模型进行优化计算, 相比调用 GT-Power 求解器计算, 同样 2000 次优化计算的总用时可以从 3 天缩短至 3 分钟, 大大减少运算时间, 且模型的准确度较好, 热效率的预测误差可以控制在 1% 以内, 爆震因子的估计误差也可以控制在 10% 以内。

关键词: 混合动力发动机; 费效比; 多指标; 决策模型

Key words: hybrid engine, cost efficiency ratio, multiple indicators, decision model

中图分类号: TK402

文献标识码: A

0 概述

发动机热效率是一个由较多因素共同影响的重要技术指标。目前, 在当前的研究中, 得到普遍认可且可以有效提高发动机热效率的技术手段有缸内直喷技术、米勒循环技术、可变配气正时技术、废气再循环和停缸技术等。如何在这些技术中筛选出

最佳的技术手段, 对发动机热效率提升具有重要意义。在传统的发动机正向开发流程中, 往往通过进行大量的台架实验, 对所有技术和参数组合方案进行一次扫描, 然后确定出最佳技术手段。然而这无疑要耗费高昂的人工、时间和资金成本, 并且实验数据受到环境和设备的影响很大, 这将导致实验的重复性较低。为了解决这个问题, 本文提出通过建

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (xxxxxxx); **** 基金项目 (****)

作者简介: 作者 1 (出生年-), 男, 博士生, 主要研究方向为 ****, E-mail: #####@#####;

作者 2 (联系人), E-mail: #####@#####.

立一个决策模型来实现发动机热效率改善技术手段的快速决策。本文借鉴 GT-Power 中仿真模型的搭建思路,通过建立计算模型来代替发动机台架实验,然后利用 ModeFrontier 强大的优化计算能力。最终,决策出适宜的发动机热效率改善的技术手段。

1 提升发动机热效率关键技术

1.1 高压压缩比技术

压缩比升高可以使理论热效率提升,并且可以提高燃烧速率,缩短燃烧持续期,从而提升等容度,使有效热效率显著提升。但是,压缩比的升高也会提升最高爆发压力和最高燃烧温度,从而更易引发爆震,既会使热效率急剧降低,又会降低发动机寿命。因此高压压缩比技术一般不单独使用,必须要配合一些可以抑制爆震的技术共同使用,例如下文所讲述的米勒循环、EGR 技术等,这些技术提升热效率的真正原因就是可以提升在不发生爆震情况下的最高压缩比,间接的来提升热效率。

在高压压缩比技术的研究或者工程应用中,大多均与米勒循环技术联合使用来提升热效率,其意义在于保持有效压缩比不变,提升几何压缩比,等同于提升了膨胀比,从而提升了理论热效率,同时在较低的有效压缩比下还不易发生爆震。例如, Sakata 等就通过试验研究了米勒循环和高压压缩比相结合对降低有效燃油消耗率的促进作用,其实验所用的发动机的有效压缩比和几何压缩比分别为 8.5 和 20,在工况 2500rpm,平均有效压力为 700kPa 下,研究发现该发动机的有效燃油消耗率相对于原机型降低了 18%。Miganakallu 等人基于一台压缩比为 10.5 的 SI 发动机,研究了配合米勒循环后几何压缩比提升至 13 的高压缩比机型与原机型之间在热效率上的差距^[1]。研究发现该发动机相较于原机型指示热效率提高了 5.2%。此外在商业机型的应用上,马自达、福特、通用以及丰田等汽车制造商也都纷纷将高压压缩比和米勒循环应用到其量产的汽油机中。

1.2 米勒循环技术

米勒循环通过大幅增大进气门晚关角或者变为进气门早关来实现实际压缩比小于膨胀比的目的。在相同实际压缩比情况下,更大的膨胀比可以更充分地利用燃烧的放热量,从而提升理论热效率。但是使用米勒循环后,由于有效进气量降低,尤其是在低速状态下,气体流动惯性有较小,这将导致发动机在低速状态下的输出扭矩小,车辆加速性能差。

同时,实际压缩比的缩小,可以降低压缩上止点处的压力与温度,从而降低爆震倾向,因此米勒循环通常会与高压压缩比和高进气增压技术共同使用。

北京交通大学的智鑫对米勒循环和高压压缩比联合使用对热效率的提升进行了研究^[2]。研究结果表明:如图 1 所示,在单独采用米勒循环技术时,即不断增大进气门晚关角,由于有效压缩比的降低,有效燃油消耗会提升,意味着热效率反而会下降;而单独采用高压压缩比技术时,随着压缩比的不断增大,会进入爆震区域内;而联合使用米勒循环技术与高压压缩比技术可以有效提升爆震限值内的最高压缩比,虽然米勒循环会降低有效压缩比,从而降低了热效率,但是由于在爆震限值内几何压缩比可以进一步升高,因而在相同的有效压缩比下,热效率仍然是提升的。

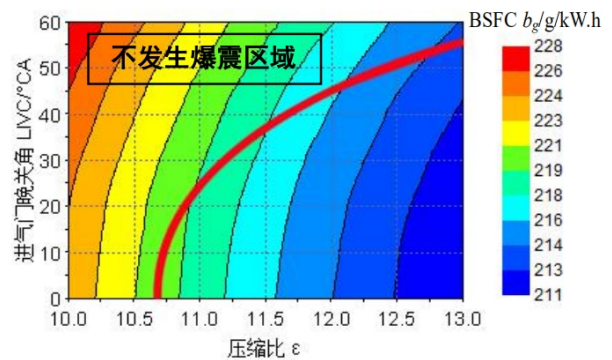


图 1 压缩比与米勒循环联合使用对爆震及有效燃油消耗率的影响。

1.3 EGR 废气再循环技术

EGR 类型分为内部和外部 EGR,外部 EGR 是将燃烧后的部分废气通过特定的管道导入到进气歧管内,与新鲜空气混合后重新进入气缸内。而内部 EGR 则可以通过可变气门正时技术改变进、排气正时从而使一部分废气在缸内回流。EGR 率通过控制 EGR 阀的开度来实现,EGR 率越高,流回到缸内的废气的比例就越大。

在不与其他技术联合使用的情况下,EGR 技术本身就可以提升热效率,其原因主要有三个:一是废气导入进气歧管后可以增大进气压力,从而降低泵气损失,提升机械效率,从而提升有效热效率;二是缸内引入废气后,由于废气不放热,一部分燃烧放热量用于加热废气,另外,氧浓度的降低也导致放热速率降低,均会致燃烧温度降低,从而使传热损失降低;三是由于燃烧温度的降低,废气的解离反应降低,后燃期缩短,因而等容度提升。但是如图 2 所示,EGR 率仅在很小的一段范围内提升对

有效热效率有提升作用,但提升作用相比压缩比提升对热效率的提升幅度仍很小,而当 EGR 率高于某一个值后反而对热效率有显著的降低作用,这主要是因为 EGR 率过大会造成燃烧持续期显著延长,等容度降低,从而导致热效率降低;此外,废气本身的比热比就高于空气,导致理论热效率降低;而且引入废气后,发动机的循环变动也会增加。但是,可以利用 EGR 降低燃烧温度,从而降低爆震倾向的特点来与高压压缩比技术联合使用,从而提升热效率。

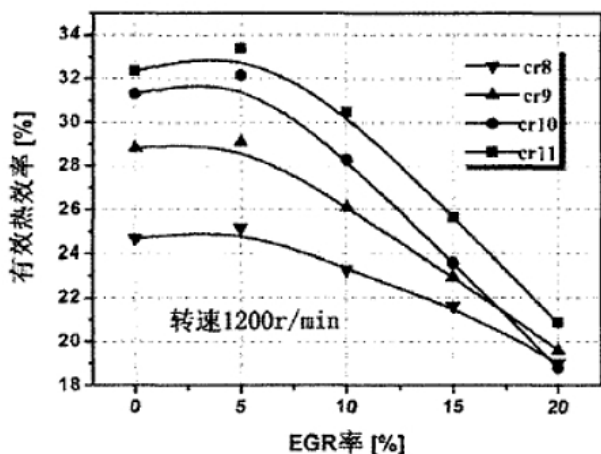


图2 不同压缩比情况下 EGR 率对有效热效率的影响

昆明理工大学的郭玉彬等人通过在不同压缩比下开展 EGR 对发动机性能和排放的研究发现,随着 EGR 率的增加,发动机的燃烧特性朝着爆震倾向下降的趋势发展^[3]。同时随着 EGR 率的增加,压缩比对滞燃期、燃烧持续期以及最高燃烧温度的影响也逐渐变小。这也说明了 EGR 结合高压压缩比以提升热效率的可行性。天津大学的潘锁柱等人在一台 GDI 汽油机上也同样印证了 EGR 率的增加,有助于放缓放热过程,降低爆震倾向^[4]。上海理工大学吴达等人在 EGR 对增压直喷发动机在全/中负荷下热效率的影响机理的分析中,发现 EGR 通过增加工质比热容比,改善燃烧放热等容度,减少传热损失,有助于提高热效率,而在中负荷下, EGR 的引入还有利于降低泵气损失,他们在压缩比对热效率的作用研究上发现废气再循环可以改善高压压缩比导致的爆震,进而提升理论热效率^[5]。

1.4 可变配气正时技术

可变配气正时技术是根据发动机转速和负荷的变化来调整配气相位,它可以实现多种功能,例如降低泵气损失、提高充量系数、改变实际压缩比和实际膨胀比、实现内部废气再循环以及降低废气残余系数等,可变机构可以起到在全工况范围内提升

发动扭矩、热效率以及降低排放等多种效果。通过改变进气正时来充分利用各工况下的进气惯量从而提升扭矩,通过增大进气门正时还可以实现扫气功能,从而降低废气残余系数,同时也是米勒循环的实现方法,二者均可以降低爆震,从而进一步提升压缩比来提升热效率。而设置适当的排气正时可以实现内部 EGR,从而降低泵气损失,由此也可以提升热效率。

日本丰田公司在 2005 年推出了新一代 3.0L V6 均质当量比的缸内直喷汽油机,并使用了 VVT 机构,通过合理调整相位可以减小发动机中小负荷下的泵气损失,从而使热效率提升^[6]。富临精工于 2006 年推出了双 VVT 系统,可以同时改变进气和排气正时,以同时实现有效压缩比的减小和有效膨胀比的增大,使热效率得到较高的提升^[7]。2007 年韩国起亚汽车公司在 2.0T 涡轮增压缸内直喷汽油机上安装了双 VVT 技术,在城市运行工况下可以降低油耗 17%以上^[8]。2011 年日产汽车公司推出了一台 1.6L 缸内直喷汽油机,通过使用 VVT 技术,可以实现较高的内部 EGR 率,从而降低泵气损失,使扭矩和燃油消耗率均有明显的改善^[9]。

1.5 减摩技术

(1) 润滑减摩

在优化缸内燃烧来提升热效率之外,有效降低发动机热功转换过程中摩擦导致的能量损耗,通过提高机械效率,也可以提升发动机的有效热效率,这正是减摩技术的应用的目的。其中润滑减摩是最行之有效的一种技术。在润滑减摩领域, Castleman 通过应用雷诺方程为润滑分析奠定了理论基础,之后有大量基于活塞-缸套系统润滑机理对减摩效果的研究,一方面基于流体动力润滑模型,从油膜厚度、油液供给、热效应、油液粘度、油膜惯性力以及缸套失圆等方面开展活塞-缸套系统润滑及摩擦学性能的研究,另一方面,基于混合润滑模型,研究表面粗糙度、表面波纹度、裙部表面轮廓以及缸套变形对润滑及摩擦学性能的影响。在大量理论研究的基础上,工程上通过润滑油改良已经可以实现有效的减摩。润滑油的改良主要通过润滑油添加剂实现,润滑油添加剂主要分为油溶性添加剂和纳米颗粒添加剂,润滑油添加剂在润滑领域有着广泛的应用,如美国的 TMT、日本的 TCL 以及国产的 YY102 等在降低摩擦、减小磨损及延长使用寿命方面均有较好的表现。以油溶性 FPS 为例,其可以在汽油机中提高机械效率 4.5%,在柴油机中提高 4.6%。但是

一般元素需解决其易水解、腐蚀金属等问题，具有较高的成本。近年，随着纳米材料的应用，纳米添加剂在润滑油中的优良表现及作用机理不断的完善，成为发动机减摩技术的研究热点。

(2) 表面改性减摩

表面改性减摩技术也是一种有效的减摩手段。表面改性技术包括了表面织构设计、表面珩磨技术以及表面涂层技术，基于润滑理论，表面织构设计可以有效降低摩擦磨损，提高经济性、可靠性和耐久性。材料的表面形貌特征、润滑状态、织构参数、位置以及分布等对最终的减摩效果都存在很大的影响。Ryk 等运用试验方法评估了活塞环组表面部分织构对减摩的影响，结果发现活塞环部分织构可以减少 25% 的摩擦损失，降低 4% 的燃料消耗。此外，表面珩磨技术可将表面粗糙度降低至 $Ra0.32\sim0.08$ 微米，精珩时可降低至 $Ra0.04$ 微米以下，珩磨后的形状精度以及表面粗糙度均直接影响发动机的摩擦损失。除此以外，利用表面涂层技术喷涂、电镀和沉积等手段在接触表面加上一层耐磨材料也是减少发动机摩擦磨损的有效途径。尤其是在高强化发动机中，较高的爆发压力会促使摩擦磨损进一步升高，而表面涂层技术通过改善接触面摩擦学性能，达到有效减摩的效果。国内外均有相关的应用，例如仪征威龙公司采用激光熔覆技术将陶瓷颗粒增强的金属粉体熔覆于活塞环的表面，克服了涂层与基体结合强度不足的问题，与 CrN、镀铬相比其摩擦系数降低了 40%，达到了 0.08，降低油耗 1% 以上。此外，通过在活塞顶上喷涂 $100\mu\text{m}$ 的 TiO_2 涂层，还可以增强活塞的绝热性能，有助于降低发动机燃油消耗，有效热效率可提高约 3%。

1.6 附件电器化技术

发动机的良好运转不仅涉及缸内的进排气和燃烧过程，还需要大量的附件提供辅助支持，这些附件设计到润滑、冷却以及热管理等多个方面，而发动机运转的过程中，这些附件也在消耗发动机输出的能量，传统均为机械式附件，它们被动地由皮带轮带动，然而这些附件的输出特性大部分均与发动机并不完全匹配，因此并没有合理的使用能量，通过附件电器化，可以在发动机需求多的时候供给得多，需求少的时候降低能量消耗。

(1) 电子水泵

在冷却方面，传统发动机中使用的机械式水泵是基于发动机转速工作的，在低负荷、低转速的工作下，水泵所提供的冷却量仍然远大于发动机所需

求的，这就导致有一部分发动机输出的指示功浪费在了本不必要的水泵驱动功上了，导致发动机的有效热效率下降。然而，电子水泵是基于 ECU 控制的，ECU 根据水温等反馈信号，通过 PWM 调节信号的占空比，并将信号输出给电子水泵内部的电机转速控制器，通过调节电子转速来调节冷却水的流量，从而使发动机所需要的冷却量与电子水泵所提供的冷却量时刻匹配，降低发动机指示功的消耗。此外，电子水泵采用电力驱动，相比机械水泵减少了皮带等附件的使用，减少了摩擦功，屈佳闻等对电子水泵的试验中发现，NEDC 循环工况下，采用电子水泵最高可实现 2% 油耗的降低。

(2) 电子节温器

在热管理方面，传统蜡式节温器一般开启温度为 $80\sim90^\circ\text{C}$ ，在中低负荷下，冷却液温度仍较低，因此发动机传热损失大，机油粘度也很大，导致摩擦损失很大。使用电子节温器可以升高节温器的开启温度，从而降低传热和摩擦损失。如图所示，马为等对采用电子节温器的发动机的节油潜力展开研究发现，使用节温器可以使小负荷时降低 2% 左右的油耗，中负荷时可以降低 1-2% 左右的油耗。

(3) 连续可变排量机油泵

在润滑方面，传统机械式机油泵的供油量基本与转速呈线性关系，在热机怠速至低转速和小负荷时有过多的发动机指示功被浪费，导致发动机的有效热效率下降。而采用可变排量机油泵可降低 1-2% 燃油消耗率。

2 决策模型

图 3 所示的决策流程图，展示了拟合函数的拟合原理和方法，Matlab 模型搭建的原理及流程，ModeFrontier 决策平台中各模块的功能及操作方法，以及最后用户挑选出最低费效比技术组合方案和对不同参数组合方案验证的方法。

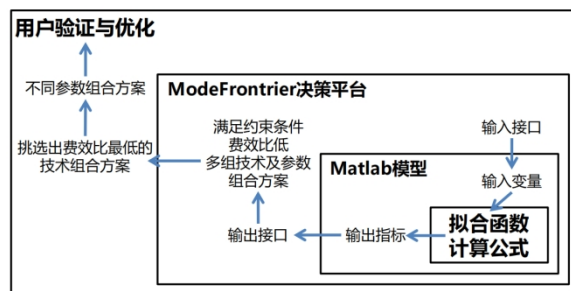


图 3 决策流程图

2. 1 GT-Power 模型

本研究中所有用来拟合函数的数据均来自于下图 4 中所示的 GT-Power 模型的计算结果。该模型的原型机为 PSA 1.2T 涡轮增压 GDI 发动机，原型机并未使用 EGR 技术，本研究中在此基础上增加了 EGR 管路。设置变量为 CR 压缩比，代表高压压缩比技术；LIVC 为进气凸轮轴型线上增长的曲轴转角，其可以体现在进气门晚关角的变化上，代表米勒循环深度；EGR 率，代表 EGR 技术；VVT 可变气门正时技术由 IVT 进气门早开角和 EVT 排气门晚关角组成；ST 为点火正时。

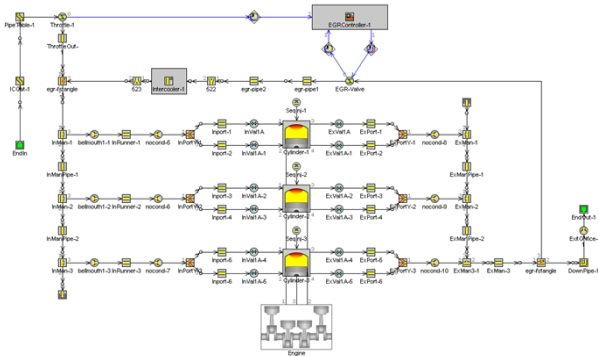


图 4 GT-Power 模型示意图

2. 2 Matlab 模型

此 Matlab 模型是此决策平台的核心模块，它是此决策平台的求解器，一切计算结果均是由此 Matlab 模型向决策平台所提供的。为了向决策平台提供能快速计算热效率及爆震因子 KI 的求解器，本研究中在 Matlab 中建立了一个仅包含若干个拟合函数式和计算公式的计算模型，其可以实现输入变量，通过拟合函数计算就可以快速输出近似的计算结果，相比传统性能仿真软件中的求解器，其计算更直接、更简便、更快速。

图 5 展示了构建的 Matlab 模型，其中最重要的技术要点就是如何能在不需要大量拟合数据和复杂拟合程序的前提下，也就是保证在不进行高元函数的拟合下就可以拟合出同时包含所有技术参数的函数式。在本研究中所有用来拟合函数的数据均是由 GT-Power 发动机模型中的计算结果所提供的。函数拟合的大致思路是先由拟合单技术函数出发，再利用每两个单技术函数拟合出所有相应的双技术函数，最后将所有双技术函数组合成全技术函数，由此可以在不进行更多元函数拟合的条件下就将所有备选技术的参数包含在了一个拟合函数中。另外，也将排放计算、费用计算、费效比计算公式编入其中，

其是一个集成了各种技术参数输入功能和各种性能指标及费用、费效比计算结果输出功能的计算模型。

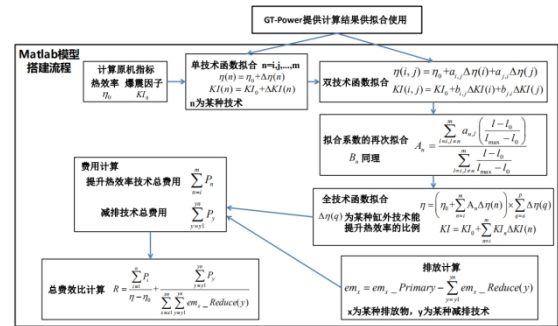


图 5 Matlab 程序编写流程

Matlab 模型搭建的各步骤解释如下：

(1) 热效率及爆震因子 KI 单技术函数、双技术函数、全技术函数拟合：利用 GT-Power 可以求解出各项技术在不同水平时，例如压缩比 $CR=9.5, 10.5$ 时热效率及爆震因子 KI 的计算结果，利用这些数据拟合出关于热效率及爆震因子 KI 的函数，用以部分替代性能仿真软件中复杂的求解程序，减少程序计算量。具体步骤如下：

①原机值：计算出原机参数时的原机热效率及爆震因子。

②单技术函数拟合：在 GT-Power 中每次仅以一个技术的水平值作为变量，得到不同水平值关于热效率及爆震因子 KI 的计算结果。在 Matlab 中编写程序，利用二次最小二乘法将这些数据拟合出单技术水平关于热效率和爆震因子 KI 的函数 η 和 KI ，其中 x 为某一项技术的不同水平值，并将二者分别分裂为原机热效率 η_0 和热效率变化值 $\Delta\eta$ 两项，以及原机爆震因子 KI_0 和爆震因子变化值 ΔKI 两项。

③双技术函数拟合：首先，将每两技术进行组合，每次以两个技术各自的水平值 x_1 和 x_2 作为变量，计算出各水平组合时的热效率及爆震因子 KI。同样也将各计算结果分裂为原机值项和以及变化值项及。然后，用两个单技术变化值项拟合出双技术变化值项。由此可以使两个单技术在各自水平下单独使用时的变化值以某一比例相加等于两个单技术在各自水平下同时使用时的变化值，两个单技术变化值项前需要乘上的比例系数，即热效率双技术变化值项中的两个系数 A_1, A_2 ，爆震因子双技术变化值项中的两个系数 B_1, B_2 就是需要求出的拟合系数。最后，将此拟合系数乘在相应的单技术变化值项前，并将二者相加，再加上原机值项后，此函数就可以等效为双技术函数了。

④全技术函数拟合：由于某一项技术均会和其

余各技术组合一次，从而分别拟合出一个双技术变化值项，以及一个该技术变化值项前相应的拟合系数。若要使全技术变化值项中包含所有的技术参数，就要将所有的双技术变化值项进行组合，其组合方法就是将某一技术变化值项前所有的拟合系数按照图 13 中“拟合系数的再次拟合”框内的公式再次进行拟合，从而得到一个新的拟合系数，将其与该项技术的变化值项相乘，之后再将所有技术按照上述步骤计算后得到的项相加即可得到全技术变化值项，此时已经可以将所有的技术参数包含在一个函数中了。将其再加上原机值项后，即可得到全技术函数。由此仅在最高元为二元函数拟合的条件下就实现了多元函数的拟合。另外，由于此函数式仅是一个多元二次的简单代数式，因此相较于 GT-Power 求解器中复杂的方程来说，求解此代数式所需的计算量大幅减小，耗时便也大幅缩短。

⑤缸外技术热效率提升比例计算：由于一些设计在缸外用于提升热效率的技术，例如减排技术、附件电器化技术在文献资料中一般是以提升原机热效率的百分比来标明的，所以还需将全技术函数乘上这些技术所提升热效率百分比的总和。

(2) 排放计算：为使用减排技术后某种污染物的实际排放值，为不加任何减排技术前该污染物的初始排放值，为各种减排技术对该污染物减排效果的总和，用初始排放值减去减排总值就等于该污染物的实际排放值。

(3) 总费用计算：将所有用到的用于提升热效率的缸内和缸外技术费用相加得到用于提升热效率的总费用，将所有用到的减排技术的费用相加得到用于减排的总费用。

(4) 总费效比计算：费效比定义为使用到的所有技术的总费用除以其发挥的效能，即将用于提升热效率技术的总费用除以当前所用技术方案的热效率相比原机热效率的提升值得到用于提升热效率的费效比，用减排技术的总费用除以当前所用技术方案的总排放物值相比初始总排放物值的减小值得到用于减排的费效比，二者相加即为总费效比。

3 模型校验

3.1 原机热效率计算

本文是针对 3000rpm 中转速，65% 中负荷的点工况进行了组合方案技术及其参数的决策研究，所有用来拟合的计算结果均是在此工况下计算得到

的。原机压缩比 $CR=9.5$ ；米勒深度 $LIVC=0$ ，表示未使用米勒循环技术；EGR 率 $EGR=0$ ，表示未使用 EGR 技术；进气门早开角 $IVT=48.3^\circ$ ，排气门晚关角 $EVT=32.8^\circ$ ；ST 点火正时为 9.4° 。计算得到原机热效率为 35.2307%，远小于本研究中所设置的热效率 40% 的约束条件，爆震因子为 78.7983，满足本研究中所设置的爆震因子小于 160 的约束条件。

3.2 单技术函数拟合

在各技术水平的常用值范围内挑选出等距的 7 个水平值，分别计算这些水平值下热效率及爆震因子 KI 的数值，并将这些水平值与所计算出的热效率和爆震因子 KI 利用二次最小二乘法拟合出函数，下面仅以压缩比 CR 关于热效率的拟合函数为例。拟合函数为：

$$\eta(CR) = -0.0785 * CR^2 + 2.5191 * CR + 18.4241 \quad (1)$$

由下图 6 中拟合曲线与仿真值的对比可以看出，二次最小二乘法拟合出的曲线可以很好地通过各仿真数据点，说明单技术拟合函数的计算是十分可靠的。之后，将此热效率拟合函数减去原机热效率值 35.2307%，即可得到压缩比 CR 前的热效率变化值项。其余各技术也均按照此方法进行单技术函数拟合，然后再分裂出变化值项用于拟合双技术变化值项。

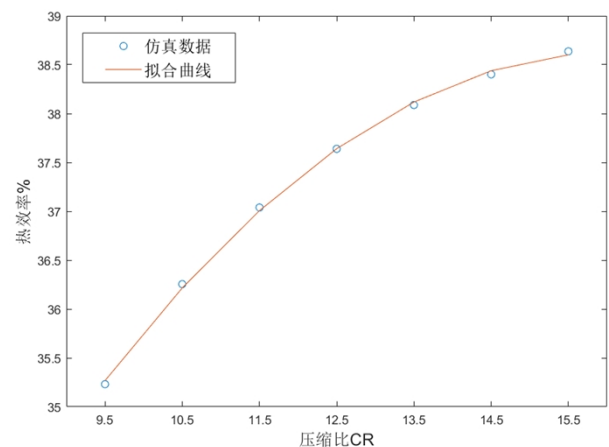


图 6 压缩比 CR 关于热效率的拟合曲线与仿真数据对比

3.3 双技术函数拟合

以压缩比 CR 和米勒循环深度 LIVC 拟合热效率双技术函数为例阐述双技术函数的拟合方法。首先，按照如下表 1 所示的双技术组合方案进行仿真计算并得到相应的计算结果，

在表 1 展示了热效率的计算结果，例如 $CR=10.5$ ， $LIVC=10$ 时热效率变化值为 1.05624，将其与两个技术在同样水平下单独使用时的热效率变化值，即 $CR=10.5$ 单独使用时热效率变化值为

1.02466，LIVC=10 单独使用时热效率变化值为 0.02961，即将两个单技术在各自水平下的热效率变化值以某一比例相加后等于二者在各自水平下同时使用时的热效率变化值，由此可以得到双技术热效率变化值项了，再将其加上原机热效率值就可以等效为双技术热效率函数了。

表 1 双技术组合方案及热效率计算结果

CR	LIVC	热效率 (%)
9.5	0	35.2307
10.5	10	36.2869
11.5	20	37.0665
12.5	30	37.6304
13.5	40	38.0093
14.5	50	38.2318
15.5	60	38.296

双技术热效率变化值函数：

$$\Delta\eta(CR, LIVC) = 1.01477 * \Delta\eta(CR) + 0.74304 * \Delta\eta(LIVC) \quad (2)$$

双技术热效率函数：

$$\eta(CR, LIVC) = \eta_0 + 1.01477 * \Delta\eta(CR) + 0.74304 * \Delta\eta(LIVC) \quad (3)$$

由上述双技术函数拟合过程可知，由于某一项技术均会与其余各技术组合一次，从而均可以拟合出一个相应的双技术变化值项，以及一个该技术变化值项前相应的拟合系数，如下表 2 所示为计算得到的所有拟合系数，“/”左侧的为横向上技术变化值项前的拟合系数，右侧的则为纵向上技术变化值项前的拟合系数。

表 2 热效率双技术函数拟合系数

	CR	LIVC	EGR	IVT	EVT
LIVC	0.74/1.01				
EGR	0.29/1.13	1.41/-0.24			
IVT	1.07/1	1.26/0.55	1.08/1.08		
EVT	0.97/1.03	0.96/0.97	1.11/0.84	1.04/0.37	
ST	-0.48/0.69	1.08/1.34	2.07/1.44	1.03/1	1.08/0.03

3.4 全技术函数拟合

若要使全技术函数中存在所有技术参数，就要将上述的所有双技术函数进行组合，组合方法就是将某一技术变化值项前的所有拟合系数再次拟合得到一个新的拟合系数，将此新的拟合系数乘上该项技术的变化值项，再将所有技术均按照此方法计算得到的项相加即可得到全技术变化值项，再将其加上原机值项即可得到全技术函数了。

每项技术变化值项前的所有拟合系数不可以简

单地取平均值来得到一个常数，要求每一项技术变化值项前经过再次拟合后得到的新拟合系数可以根据其余技术使用的不同水平组合而变化。例如高压压缩比、米勒循环、EGR 同时使用时，以 CR 压缩比变化值项前新的拟合系数为例，当 LIVC 米勒循环技术使用得更多时，即相比 EGR 其偏离原机值更大时，CR 压缩比变化值项前新的拟合系数将更加偏向于 CR 与 LIVC 组合时的拟合系数，即表 2 中的 1.0148。其相比 EGR 偏离原机值越多，则越靠近 1.0148 此值。而当仅使用 LIVC 米勒循环时，且无论 LIVC 当前的取值为多少，只要 EGR 率为 0，则 CR 变化值项前新的拟合系数就恒等于 1.0148，此时全技术函数就与 CR 和 LIVC 组合时的双技术函数相等了。而当 EGR 率偏离原机值更多时也同理，其余技术变化值项前的系数也具有同样的特性，上述原理也可以扩展到所有技术均使用的情况下。根据此需求，本研究中设计了如下式 (1) 所示的拟合方法，将某一个技术变化值项前的所有拟合系数再次进行了拟合，从而得到了全技术函数中该项技术变化值项前的拟合系数。

4 模型精度

在 ModeFrontier 决策平台中进行计算，共需进行 2000 次优化计算，耗时仅为 3 分钟，远低于传统台架实验开发和 ModeFrontier 与 GT-Power 耦合时优化计算的时长。由于排放计算均是按照已经编写好的程序将使用到的减排技术的减排效果进行叠加计算，因此不必再进行准确性验证了，仅需选择费效比最低的减排技术组合方案即可，在本例中的减排技术价格和减排效果的输入值下，最终需要同时使用到 EGR 废气再循环、HInj 高压喷射系统、GPF 汽油机颗粒捕集器和 TWC 三元催化器。下面需要对决策平台给出的满足热效率及爆震因子 KI 约束条件的若干个技术及参数组合方案进行验证。计算完成后决策平台给出了如表 3 中所示的 16 个可能满足约束条件的参数组合方案，按照费效比增大的顺序依次填写在了下表中。事实上，在这 16 个参数组合方案中仅有两种技术组合方案，其中 1-14 参数组合方案具有同样的技术组合方案，其费效比最低，而 15-16 参数组合方案也具有同样的技术组合方案，其费效比则最高。同一技术组合方案中的不同参数组合方案的费用均是相同的，仅是因为参数组合不同，导致热效率有略微的差别，从而导致费效比也有所不同。

表3 决策模型的参数组合方案

序号	热效率(%)	误差(%)	爆震因子	误差(%)
1	40.224	0	193.515	-0.2095
2	40.137	0	182.982	-0.1436
3	40.146	0	183.123	-0.1445
4	39.953	-0.0012	167.403	-0.0463
5	40.232	0	215.048	-0.3441
6	39.788	-0.0053	150.619	0
7	39.662	-0.0085	136.161	0
8	39.81	-0.0048	147.07	0
9	40.165	0	216.095	-0.3506
10	39.836	-0.0041	160.174	-0.0011
11	39.874	-0.0031	158.908	0
12	39.712	-0.0072	146.581	0
13	39.614	-0.0097	134.817	0
14	39.946	-0.0014	161.557	-0.0097
15	39.68	-0.008	147.178	0
16	39.734	-0.0067	150.465	0

由表3中可以看到在决策平台给出的16个参数组合方案中,尚不能找到一个组合方案的仿真值是可以同时满足两个约束条件的,这说明使用拟合函数进行近似计算的误差是不可避免的,但大部分参数组合方案的仿真值距限值的差值均已较小,可以通过后期的进一步优化找到满足约束条件的参数组合方案。用户首先需要从中选取出费效比最低的技术组合方案,即1-14参数组合方案所对应的同一个技术组合方案,需要使用到EGR技术、3级减摩技术、电子水泵、可变排量机油泵和电子节温器技术,由于IVT进气门早开角与EVT排气门晚关角的取值均未超出设定的范围,因此可以认为不需使用VVT技术。由于在此费效比较低的技术组合方案中没有仿真值可以同时满足两个约束条件的参数组合方案,因此用户可以选取其中距离限值总相对误差最小的一个参数组合方案,在本例中为参数组合方案11,在此方案中各技术参数的上下一定范围内集中地进行优化,可以再次利用优化软件耦合仿真软件进行优化计算,也可以直接在发动机台架上对各参数进行调整,直至找到可以同时满足两个约束条件的参数组合方案。由于此时既可能满足约束条件,同时费效比又最低的技术组合方案已经确定下来,并且各技术参数的大致范围也已经确定下来,因此再次进行优化计算或者实验调整参数的工作量将大幅降低。

5 结论

(1) 此决策模型是在优化计算软件ModeFrontier中搭建完成的,利用DOE和NSGA-II遗传优化算法可以自动调节参数进而快速锁定既满足约束条件,同时费效比又较低的多组技术与参数的组合方案,相比人工调节参数,此决策平台实现了自动化,既节省了人工和时间成本,也使得决策出的优选方案更全面。

(2) 此决策平台中提供了技术水平值范围及步长、技术费用、排放物初始值、减排技术效果以及指标约束限值输入接口,用户可根据市场调研或者实验数据自行更改技术价格和效果,该平台也可适用于未来更高热效率、更低排放发动机技术及参数的决策。

(3) 在Matlab中建立了一个综合计算模型,其集成了技术水平、技术价格等多种输入功能,也集成了热效率、爆震因子KI、总费效比等多种输出功能。利用决策平台调用此模型进行优化计算,即可实现多指标约束条件下,以费效比最低为优化目标的综合决策。

参考文献:

- [1] 姚若禹. 米勒循环模式对柴油机性能影响的计算与试验研究[D]. 华中科技大学[2023-07-28].
- [2] 智鑫, 宁智, 吕明, 李岳. 基于油耗的米勒循环与高压压缩比相关性研究[J]. 车用发动机, 2019, 0(5): 16-.
- [3] 郭玉彬. EGR与变压缩比协同作用对汽油机性能及排放影响的研究[D]. 交通工程学院, 2014.
- [4] 潘锁柱, 宋崇林, 裴毅强, 等. EGR对GDI汽油机燃烧和排放特性的影响[J]. 内燃机学报, 2012, 30(5): 6.
- [5] 吴达. 废气再循环对增压直喷汽油机热效率影响的研究[D]. 上海交通大学[2023-07-28].
- [6] 罗振璧, 罗杰, 杜维, 等. 丰田生产方式的最新发展[J]. 世界制造技术与装备市场, 2009(3): 97-104.
- [7] 袁子扬. 富临精工并购升华科技案例分析[D]. 湘潭大学[2023-07-28].
- [8] [1]高永兴. 双VVT高增压高压压缩比直喷汽油机的抗爆震性能研究[J]. 上海交通大学, 2012.
- [9] 江龙飞. VVT缸内直喷汽油机进气量建模与仿真[D]. 合肥工业大学[2023-07-28].

第一作者简介

王楠，北京理工大机械与车辆工程学院动力机械及工程专业在读博士，研究方向内燃机的效率提升及模型仿真，目前第一作者在《FUEL》发表 SCI 论文 1 篇，第二作者在《Ceramics International》发表 SCI 论文 1 篇，授权软件著作权 1 项。