

应用 GT-SUITE 进行柴油机总能系统循环分析

豆佳永

中国北方发动机研究所

摘要：性能分析、冷却系统分析、供油系统分析等系统分析与元器件匹配分析在一定程度上对最终的性能优化做出了贡献，由于系统间的分割，边界条件不能适时传输，导致无法达到整机的整体匹配与优化。在此基础上提出了柴油机总能系统循环的概念：将供油、供气、冷却、传热、燃烧、性能耦合到一起，统一考虑能量的转化、分布与阶梯利用。实现元器件或分系统性能的改变对整机性能的影响，做到整机性能全局优化。应用 GT-SUITE 平台流动、热、机械、控制的联合搭建特性，建立柴油机总能系统循环优化平台。应用此平台进行了某柴油机整机性能提升和匹配优化，获得了较好的工程应用效果。

关键词：性能分析、总能系统循环、GT-SUITE

研究背景

现代发动机的研究正在经历着理论——机制——设计——计算——试验——分析改进的轮回。无论是在理论研究领域，还是对于机制的认知，到设计、计算、试验、分析领域，都在取得更多的成果，工程设计人员需要做的事情就是：学习理论，认清机制，应用工程分析软件进行计算与设计，设计试验并进行计算、设计、试验结果的联动分析。追求性能的提升一直是工程人员的责任和梦想，在这个发展的技术领域里面，如何选择和应用更先进的分析工具促进性能的提升成为我们需要关注的一个重要问题。

目前与性能和系统匹配分析相关的分析软件的主要种类、分析内容和功能：

性能分析软件主要进行发动机工作循环和气体交换模拟，考虑管道内的一维气体动力特性，燃烧采用零维或者准维燃烧模型，主要进行发动机进气结构、排气结构、气门正时、涡轮增压器匹配等方面的分析工作。这方面的软件主要有：GT-power、WAVE、Boost。

供油系统分析软件主要进行燃油供给系统的设计，分析现有系统的可能存在的问题和实现特定的喷油规律。这方面的软件主要有：GT-fuel、Hydsim、Amesim、Flowmaster。

冷却系统分析软件主要进行发动机热管理，用于冷却回路的分析和设计。这方面的软件主要有：GT-cool、Amesim、Flowmaster。

润滑系统分析软件主要进行轴承的分析，润滑回路的分析和设计。这方面的软件主要有：Excite、Flowmaster、Engdyn、Orbit。

可以看的出，有些软件具有很广泛的应用范围，象 Flowmaster、Amesim 等；有些软件针对性很强，象 AVL 系列、Ricardo 系列、GT 系列；**如何合理选择和应用这些软件，做到分析到位又省时省力省钱，就需要考虑工程分析的特殊要求。**

1. 工程需求特性与软件选择

工程分析是一个动态的过程，以工程需求为技术牵引，整合现有的分析工具，达到对应的工程设计参考要求。所以工程分析具有以下几个特征：

- 工程分析目的满足工程设计需求

- 工程分析过程中边界条件准确、易于获得
- 工程分析精度高
- 工程分析工作量、耗时可以接受

对于我们的发动机,最明显的特征为三高一低:高体积功率、高质量功率、高功率密度、低油耗。基于这种的工程需求,要求从总能的角度考虑工程设计和工程分析问题,考虑能量的转化、分析与阶梯利用过程,关注能量转化过程中转化装置的运动特性、承力特性、质量特性、体积特性。

从两个方面对总能系统进行了研究工作,一方面是总能系统循环的理论特征:发动机属于典型的压力驱动装置,受到机械负荷和热负荷的限制,通过降低不必要的过大推动力来进行系统间的匹配和系统内的匹配;针对各个部位通过详细的设计与分析减少阻力来降低系统阻力。

一方面的工作是寻找合适的分析工具将供油、供气、冷却、传热、燃烧、性能耦合到一起进行工程分析:

软件平台的选择和优缺点分析:

AVL 软件系列主要包括 boost (性能分析)、hydsim (供油系统分析)、fire (燃烧分析)、excite (运动学、动力学分析)、curise (车辆动力匹配分析) 等模块,涵盖了需要分析的主要问题,缺少冷却分析模块;此软件群的一个发展方向就是将 Flowmaster 引入 AVL 系列,组合成一个完整的性能分析与系统匹配分析平台。AVL 平台最大的问题就是各个软件模块是分开的,没有实时耦合联动。分析过程中可以截取需求的数据进行数据的传输与作为边界条件,但是没有解决互为边界条件时的交互问题。

Ricardo 软件系列主要包括 wave (性能分析)、vectis (燃烧分析)、valdyn (气门系动态分析)、engdyn (曲轴、发动机和轴承润滑全耦合分析)、pisdyn (活塞二次动力学和活塞裙润滑分析) 等模块,与性能与系统匹配相关的主要是 wave 和 vectis 软件,缺少了供油、冷却系统分析模块。Ricardo 平台相对来说更侧重于结构动力学的分析。以 Ricardo 平台为基础搭建总能系统优化平台需要做的工作更多。

Flowmaster、Amesim 属于通用的一维热流体分析软件,这类软件最主要的问题是没有发动机专业模块,尤其是燃烧放热模块,所以将会给性能分析带来很大的束缚。

GT 软件系列主要包括 gt-suite (多系统耦合分析)、gt-power (性能分析)、gt-fuel (供油系统分析)、gt-cool (冷却系统分析)、gt-driver (动力系统分析)、gt-crank (曲轴连杆机构动力学分析)、gt-vtrain (配气机构运动学、动力学分析) 等模块,涵盖了需要分析的主要问题,并且 gt-suite 基于多物理方程(流、热、力)的求解,实现发动机各个系统同时求解,能够考虑更多的系统细节;GT 软件系列成为了总能系统循环优化平台的主要基石。

2. 柴油机总能系统循环优化平台

前面分析了总能系统循环优化平台的理论特征,也就是说从驱动力的分配和降低元器件的阻力特性上面做工作;具体到柴油机,可以细化到一个更具体的层面:

发动机性能的提高主要受到机械负荷和热负荷的限制,如何在现有的机械负荷和热负荷承受能力下,优化出最佳的性能成为柴油机总能系统循环优化模型的主要分析目的。体现机械负荷的特征参数为爆发压力,体现热负荷的主要参数为排气温度,这里不去研究机械负荷、热负荷的更细化的表征问题,主要考虑的是在爆发压力和排气温度限制条件下,如何组织发动机的热力循环过程,使得整机性能最优。发动机的核心是燃烧,燃烧过程受到供油系统特性、供气系统特性、传热特性的影响,供油系统的影响是最大的,随着强化程度的提高供气系统所处理的能量比例也大幅度的提高,传热的调整和控制决定着热负荷的大小,也间

接决定着发动机的强化程度。

总能系统循环优化模型的三大支柱：供油燃烧模型、增压通流模型、耦合传热模型。

柴油机的核心和关键：供油、供气、燃烧。

供油系统的变化对于柴油机性能的影响是至关重要的，所以供油系统与系统分析的实时联动耦合成为必须；到目前为止，通过前面的软件功能与优缺点分析，只有 GT—suite 具有对应的能力。

随着柴油机的不断强化，增压器的功率消耗（布雷登循环的能量特性）占到了输出功率的 30%~40%，供气系统的核心是增压器，增压器属于旋转叶轮式机械，增压器的匹配一直是柴油机气系统匹配研究的重点和难点；如何将增压器的设计与匹配与柴油机设计分析工作耦合到一起进行联动分析就成为解决增压器匹配分析的关键；对此我们提出了增压通流模型的概念，增压通流模型必须考虑增压器结构与性能之间的关联关系，考虑旋转叶轮机械与往复运动机械之间的耦合匹配关系（流量的大幅度变化），考虑循环气量变动对燃烧过程的影响。

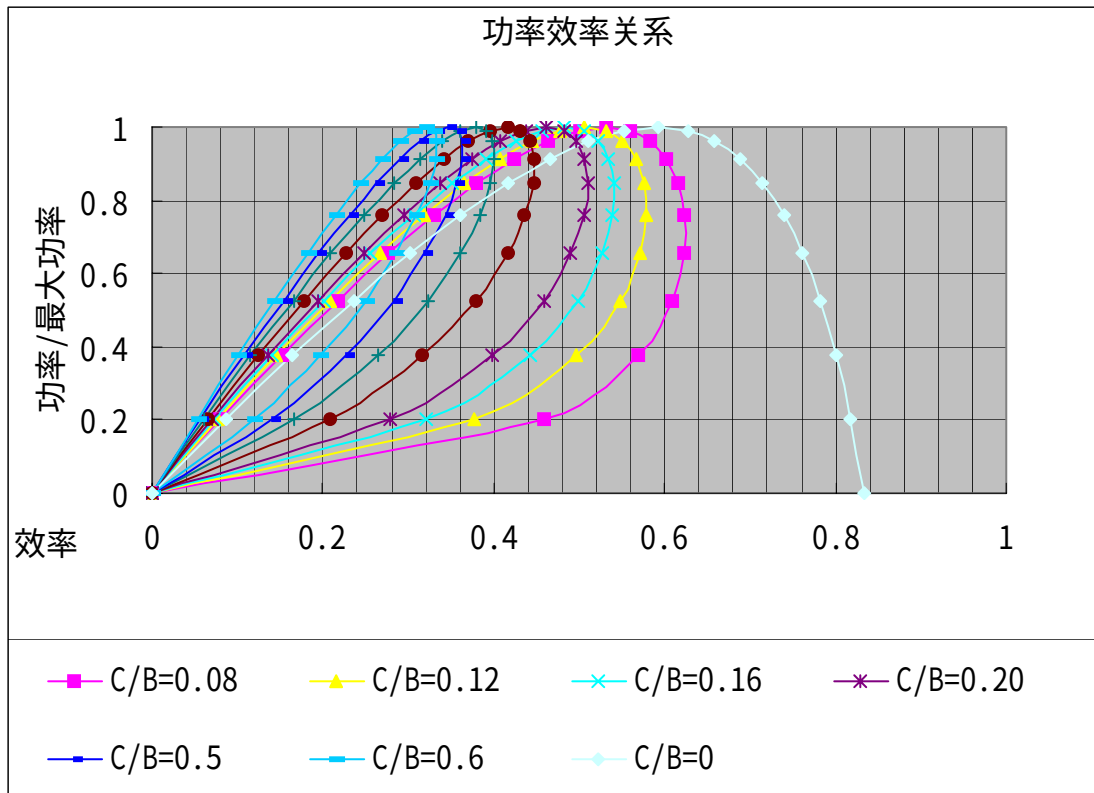
通过压气机、涡轮机一维模拟分析软件获得增压器结构与增压器性能的对应关系；通过三维压气机、涡轮机流动分析对一维模拟结果进行检验和修正，通过三维瞬态压气机、涡轮机流动分析确认流量变动对增压器性能的影响，并获得修正量；通过采用一维模拟、三维修正的方式保证计算的精度、边界条件变动影响、计算分析的工作量和时间问题。

气系统的变化对燃烧系统的影响可以通过准维燃烧模型或者三维燃烧过程分析来考虑和处理。

通过第三方优化软件（mF）控制压气机、涡轮机一维模拟分析软件（nrec—concept）和 GT—suite 软件，实现增压器与性能的联动耦合分析。

通过建立增压通流模型，应用准维或三维燃烧分析，应用 mF、nrec—concept、GT—suite 软件组合进行联合分析，实现了供油、供气、燃烧、性能的联动分析和交互影响，实现了供油、供气系统结构的变动对性能的关联影响分析。成为总能系统平台的主要部分。

传统的传热分析主要是看热平衡结果，也就是说传热的比例问题。依据有限时间热力学理论，传热影响了功率效率圈的形状特性。下图为达到预期功率输出时，不同传热比例对功率效率圈的影响。从图中可以看出，随着散热比例的增加，可以达到的最高热转化效率数值在持续降低。



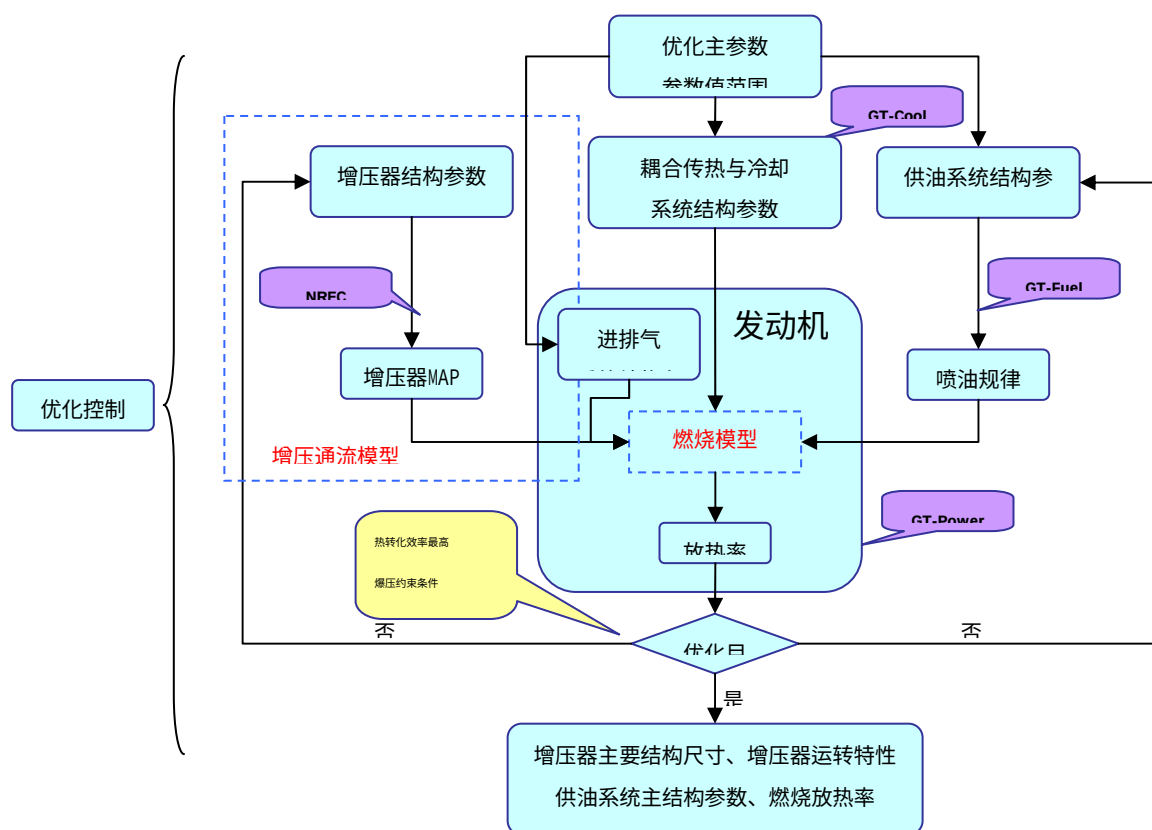
如何控制散热比例,使得即满足热负荷要求又能够使得热转化效率最高成为传热研究的主要目的。

分析热负荷问题的难点主要是两个方面:热边界条件加载问题,热负荷计算过程中的约束加载问题。

冷却侧传热能力的变动会影响到燃烧过程和散热量,燃烧的变动也会影响传热量,所以需要建立耦合传热模型考虑冷侧传热特性、燃烧过程、热侧传热特性的相互影响,才能给热负荷分析提供实时的准确的边界条件。

GT-cool 和 GT-power 的实时紧密耦合可以解决这个问题。

通过 mF、nrec-concept、GT-suite、gt-power、gt-fuel、GT-cool 软件的组合形成了总能系统循环优化平台。



3. 柴油机总能系统循环优化平台的应用

根据三高一低的工程需求，应用总能系统循环优化平台，进行某柴油机性能提升研究。此柴油机功率提升前性能状态为：升功率 32.5kW/L，油耗为 214g/kWh，涡轮前排气温度为 610℃，爆发压力为 14.1MPa。

功率提升的第一步目标为：升功率达到 44 kW/L，油耗低于 210g/kWh，涡轮前排气温度低于 720℃，爆发压力低于 18MPa。

功率提升的第一步目标为：升功率达到 53 kW/L，油耗低于 220g/kWh，涡轮前排气温度低于 720℃，爆发压力低于 22MPa。

对于性能提升的工程经验主要有：提高发动机转速，重新匹配增压器，调整循环喷油量；优化调整包括调整供油提前角、调整喷油器、调整高压油管、调整配气相位等方面，主要评估供油系统的供油能力和性能效果。

针对这些工程经验，应用总能系统循环优化模型进行预测分析和评估，并进行优化分析。

总能系统循环模型中 GT-power 与 GT-fuel 的耦合需要解决以下几个方面的问题：

- 喷油器接口的问题：GT-power 下面的喷油器元件与 GT-fuel 下的喷油器元件不一致，需要选择合适的元件来连接。
- 缸内流动、传热的问题：在 GT-power 下面需要考虑空气流动、传热影响问题。
- 时间同步问题：供油系统的转速为发动机转速的一半，同时需要供油零度时刻与发动机零度时刻的对应。
- 燃烧模型问题：至少准维燃烧模型才能够进行联合运算分析。

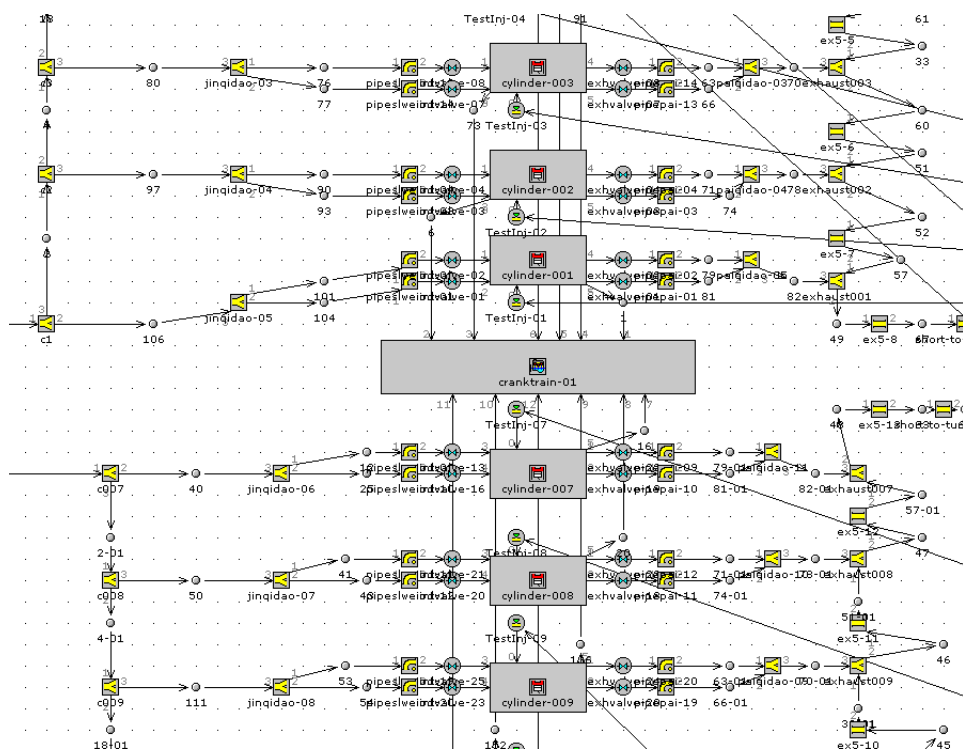
总能系统循环模型中 GT-power、GT-fuel、GT-cool 的耦合建模需要解决以下几个方面的问题：

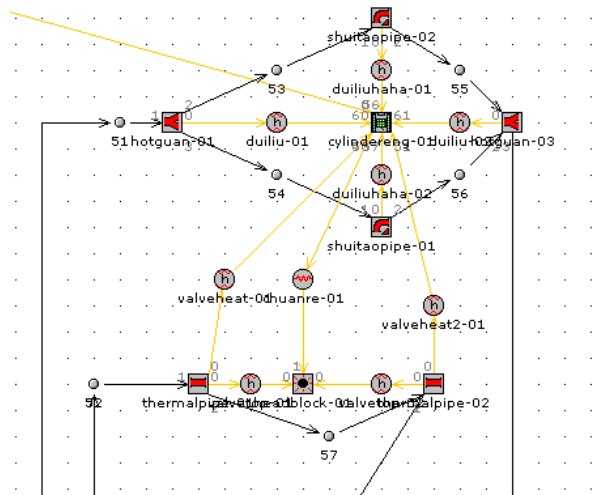
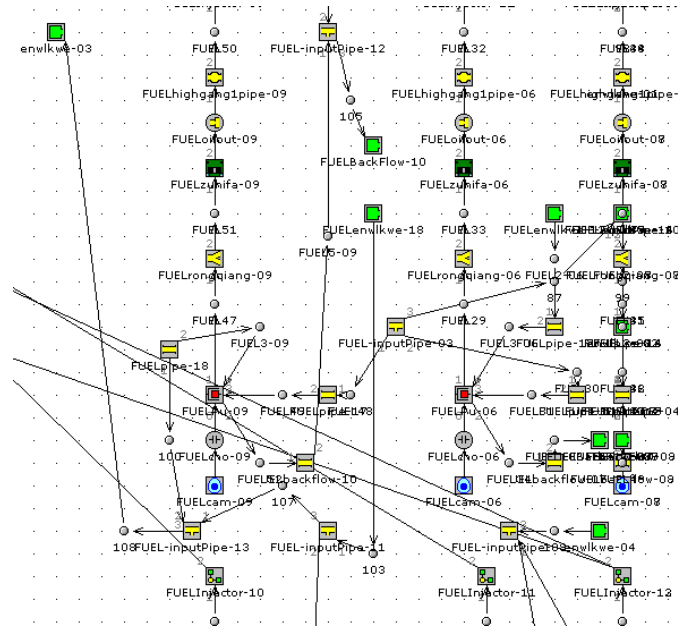
- 流体不同特性问题：power 下的气体是可压缩气体，fuel 下的燃油属于可压缩液体，cool 下的水属于不可压缩液体，所以计算过程中要分析设定对应的特性和求解方法。
- 时间同步问题：三个回路的时间同步性要仔细考虑，尤其变动过程中的计算。
- 传热与流动的相互影响与流、热实时耦合传递问题：需要采用特殊的元件进行表达，以达到分析目的。

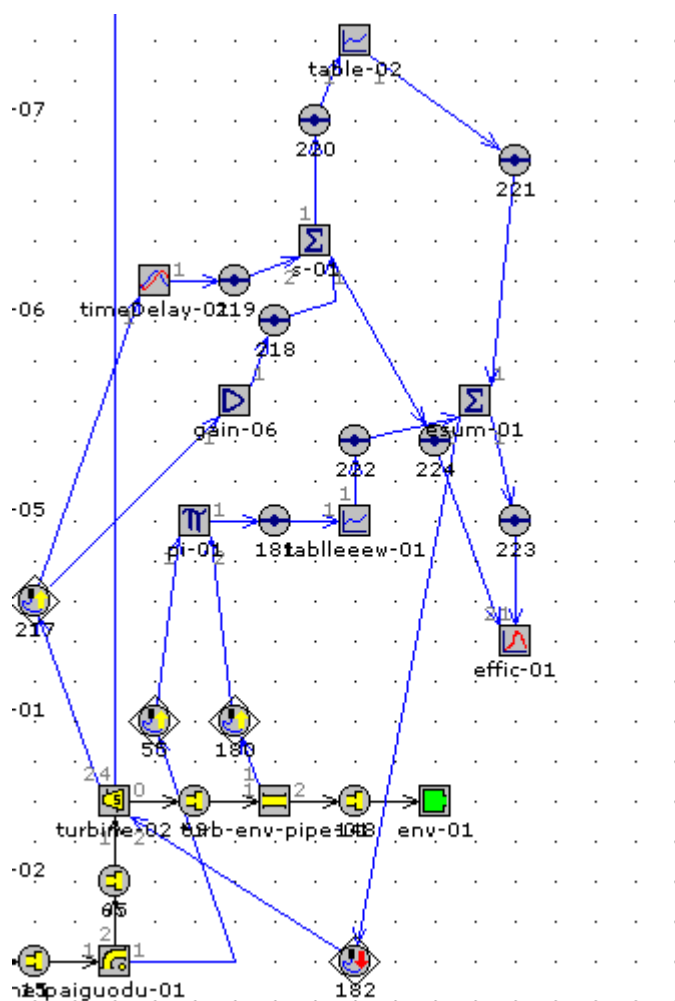
总能系统循环模型中 GT—power、GT—fuel、GT—cool、mF、nrec—concept 的耦合建模需要解决以下几个方面的问题：

- 数据交流问题：power 与 nrec—concept 软件的交换哪些数据。
- 时间与运算次序问题：mF 如何控制运算过程，整个分析总时间的合理控制。
- 过程监控问题：监控哪些数据证明各个软件运行正常，数据正常。

通过解决上面的问题，建立的总能系统循环优化模型见下图：







首先进行总循环模型初始计算状态与初始性能状态的拟和，拟和的结果如下：

	试验	计算
升功率	32.5	32.51
爆压	14.2	14.1
油耗	215	214
压后温度	158	155
压后压力	182	188
涡前温度	590	610
涡前压力	129	125

拟和以后首先进行的是高压泵能力的评估和转速的影响，通过计算分析获得的结果，认为能够达到预期的性能，并进行了功率拉升试验，结果如下：

	目标	预测	试验
升功率	44	44.1	44.2
爆压	18	16.5	16.4

油耗	210	216	219.1
压后温度	?	196	198
压后压力	?	217	220
涡前温度	720	722	742

说明通过提高转速，此高压泵基本能够达到预期的性能水平。接下来的工作就是匹配和优化

对比两种高压油管：2.5 与 2.75mm 直径，对比不同的匹配气象，对比不同的供油提前角：22deg~28deg，对比不同的喷油器：8×0.42，8×0.435，8×0.44，对比两种结构设计的增压器；通过一系列的对比和优化，最终选择的状态为：2.5mm 高压油管，供油提前角 26deg，8×0.44 的喷油器，流通能力较大的增压器。按照预测比较后的选择进行了性能试验，性能结果如下：

	目标	预测	试验
升功率	44	44.2	44.2
爆压	18	17.5	17.2
油耗	210	204	206
压后温度	?	198	195
压后压力	?	201	204
涡前温度	720	718	724

在一定范围内，性能预测分析具有较高的预测精度，减少了试制次数，减少了试验次数，获得了较好的工程效果，达到了预期目标。

进一步提升性能的分析：通过提高转速，应用此高压泵，合理匹配增压器，预期能够达到如下性能状态：

	目标	预测
升功率	53	53.05
爆压	22	21.6
油耗	220	217
涡前温度	720	707

预计此高压泵可以获得更高的性能，同时油耗、爆压、排温指标都在可行范围。为性能的进一步提高和匹配优化奠定了基础。

5、 结论

根据具体的工程需求特性，进行了性能分析与系统匹配软件的比较和选择，最后确认 GT—suite 最适合三高一低的工程特性需求。

在 GT—suite 基础上，通过理论分析和建立增压通流模型、供油燃烧模型、耦合传热模型，形成了总能系统循环优化平台。

应用 GT—suite 基础上的总能系统循环优化平台进行了某柴油机性能提升评估和匹配优化工作，使得升功率水平提高了 36.4%，同时油耗低于预期水平，爆压和排气在可接受范围。进行了进一步提升性能的评估工作，认为应用此高压泵还能够获得性能的进一步提升：使得升功率水平比原机提高了 63.6%，同时油耗低于预期水平，爆压和排气在可接受范围。