

利用 GT-POWER 进行柴油机增压器匹配选型

Match of turbocharger for a diesel engine with GT-POWER

王新校、王辉

(潍柴动力股份有限公司, 山东省潍坊市)

摘 要: 本文以某款增压柴油发动机为例, 对放气阀增压器的匹配方法和步骤进行了简单的叙述, 并对匹配计算结果与试验结果进行了简单的对比, 说明了利用一维仿真软件 GT-POWER 进行增压器匹配选型的可行性以及应该注意的问题。

关键词: 柴油机, 增压器匹配, GT-POWER, 放气阀

Abstract: A GT-POWER model of turbocharger diesel engine is built to illustrate the matching process of a waste-gate turbocharger, the results of simulation and experiment are discussed to interpret the feasibility of the matching with GT-POWER and the questions to care.

Key words: diesel engine, turbocharger matching, GT-POWER, waste gate valve

1 前言

随着仿真工具的不断成熟以及国内主机厂对仿真工具的理解和重视程度不断加深, 在柴油机设计开发中, 越来越多的内容逐步通过一维热力学仿真软件与试验相结合的手段来完成, 并且显示了很好的效果。

柴油机增压器匹配一直是柴油机开发中一项非常重要的工作, 增压器对发动机的排放性能和动力性都有非常重要的影响, 增压器与燃油喷射系统相互配合, 使得发动机的气与油达到最优的匹配, 既保证了经济性又可以保证排放, 在增压器的匹配过程中要考虑很多方面的需求, 例如: 压比、效率、排气压力、高原海拔需求、喘振余量限制, 发动机最优经济区位置、发动机瞬态性能等。在发动机增压器选型过程中仿真是一个非常有价值的工具, 尤其是当增压器匹配方案较多, 为了提高工作的效率和降低研发成本, 一维热力学计算软件 GT-POWER 在增压器选型中发挥了越来越重要的作用, 前期通过热力学计算选出比较好的方案再进行台架的试验验证, 是一条省时间而且高效的手段, 越来越受到主机厂的关注, 发挥越来越重要的作用。

GT-POWER 作为广泛应用的一维热力学计算软件,经过多年的发展,其精度和可行性逐步为用户接受。本文以一个放气阀增压器的匹配和计算过程为例来说明利用 GT-POWER 进行增压器匹配的过程,并对计算结果进行了简单的讨论分析。

由于涉及产品,文中的发动机详细参数没有提供。

2 一维模型的建立和标定

2.1 模型标定的方法

GT-POWER 软件的计算是将柴油机流动系统分成多个控制体积,采用的是一维流体动力学方程进行数学描述,根据质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律三大定律。

为了确保增压器匹配的准确度,模型针对该机型的外特性进行了标定计算。

标定过程中模型的选择和参数调整简述如下:

- 1) 燃烧模型采用 `burn_rate` 模型,此曲线有缸压曲线分析获得。
- 2) 由于摩擦扭矩与转速有很大的关系,故模型中不同转速的摩擦平均有效压力稍有调整。
- 3) 气道参数采用气道吹风试验台获取的流量系数和涡流比参数输入。

2.2 模型发动机本体建立和校正

2.2.1 发动机本体模型的建立

根据发动机各部分的相应图纸和发动机尺寸,中冷器参数,气道试验,进排气管图纸等搭建了一维模型如图 1 所示:

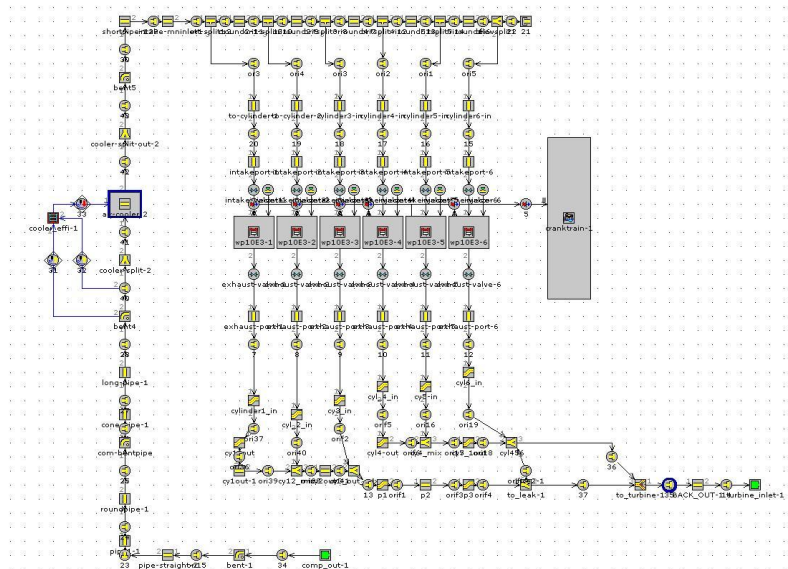


图 1: 发动机本体模型

2.2.2 发动机本体标定

为了保证增压器匹配的准确度，首先需要对发动机本体进行标定，利用该款机型已有的试验数据进行发动机外特性的本体标定，将计算误差控制在 5% 以内，将模型计算结果与已有的试验数据进行比较，进气量，中冷后的压力、温度、功率、涡轮机进口压力、温度的比较结果如图 2、3、4、5、6、7 所示，模型标定完成后 95% 的参数计算误差控制在 5% 以内，发动机本体达到计算的要求，可以用来选配新的增压器，误差率的计算公式为（计算值-试验值）/试验值。

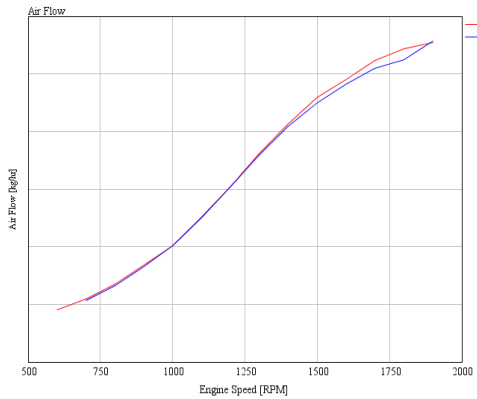


图 2：发动机进气量计算值与试验值比较

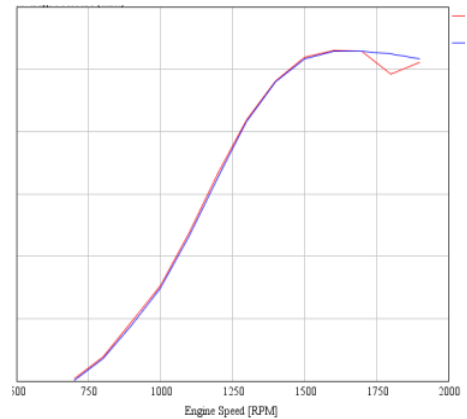


图 3：中冷后压力计算值与试验值比较

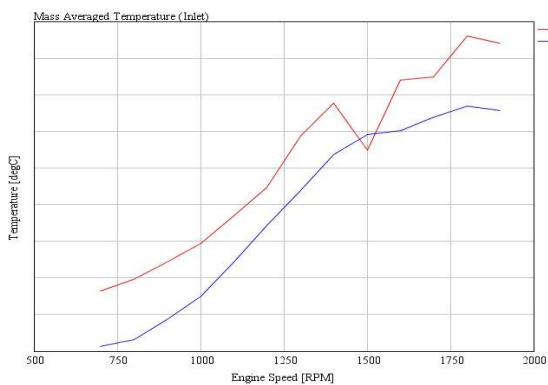


图 4：中冷后温度计算值与试验值

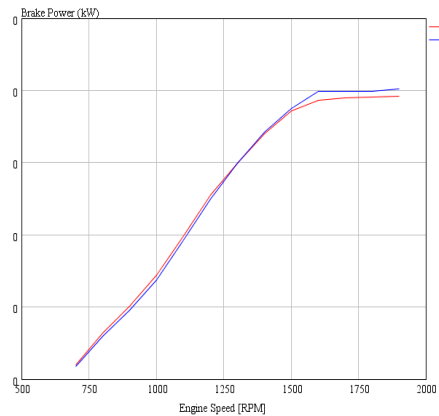


图 5：功率计算值与试验值比较

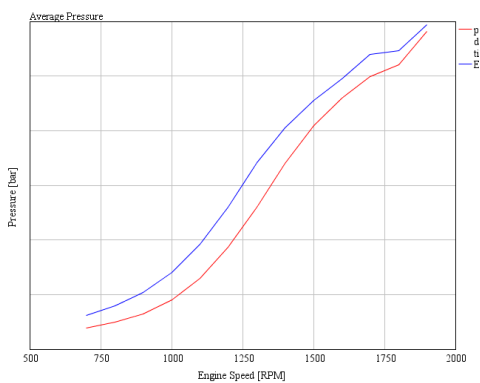


图 6：涡轮前压力计算值与试验值比较

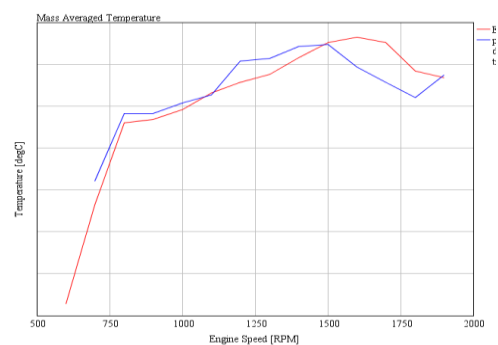


图 7：涡轮前温度计算值与试验值比较

3 增压器模型建立与匹配计算

选配压气机要达到发动机的进气量需求，同时压气机效率较高，压气机 map 图要能够包络住发动机整个的转速和负载工况，同时考虑到发动机的特殊应用，来调节高效区域所在的位置，保持运行点不超过增压器的限制，同时保持合适的海拔能力。

涡轮机是给压气机提供动力的装置，涡轮机需要有足够的做功能力来驱动压气机，并且要有尽可能高的效率，涡轮机 map 图的流量范围要足以满足发动机需求，满足增压器的温度限制和速度限制，选配良好的涡轮机既可以给压气机足够的功，同时保持发动机合适的 pmep。

本文选取的增压器为一款 waste-gate 增压器，waste-gate 增压器主要特点是为了满足发动机在低速时候高扭矩的需求，涡轮端尺寸相对 free floating 的增压器要小，以保证低速时候更高的做功能力来达到发动机低速的扭矩需求，但是发动机高速时候增压器极易超速和超过发动机的爆压限制，因此高速时候涡轮端的旁通阀需要打开放气，以使增压器的增压压力控制在合理的范围内，同时保持放气量在合理的范围内，以保证增压器效率不会恶化严重。

为了仿真增压器在发动机运行过程中的开启与关闭，需要搭建 waste-gate 的物理模型，增压器供应商提供了增压器放气阀、弹簧等一些物理参数，利用 GT-POWER 里面的机械模块搭建了 waste-gate 的物理模型。

为了准确模拟增压器在发动机上面的运行点，获取了供应商的涡轮端 map 和压端 map，由于涡轮端 map 试验方法的限制，范围太窄，并且质量不高，因此对涡轮机 map 根据经验进行了简单预处理和调整，以增加模拟计算的准确度。

搭建的 waste-gate 的物理模型如图 9 所示，涡轮机 map 预处理后如图 10 所示。

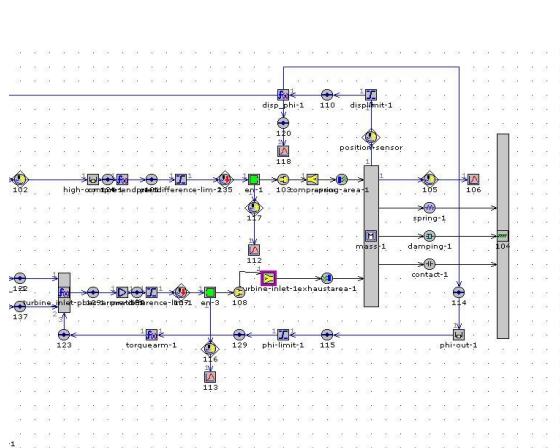


图 9: waste-gate 物理模型

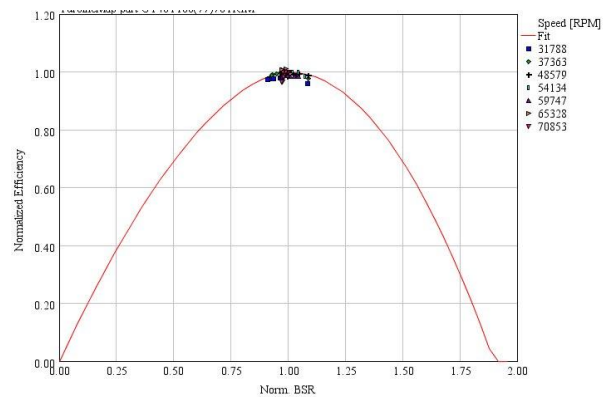


图 10: 涡轮端 map 预处理后结果

对搭建完的模型进行计算，外特性计算结果与后期获取的试验值进行对比如下图所示，进气量、进气量误差率、计算值在压气机 map 的运行点、试验值在压气机 map 图上的运行点、涡轮机运行点、涡前温度、涡前压力、压气机出口压力、压气机出口温度、功率比较值如下图 11、12、13、14、15、16、17、18、19、20 所示。

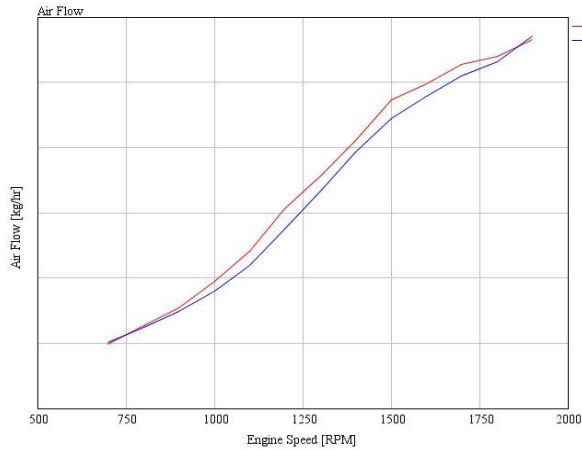


图 11: 进气量计算值与试验值比较

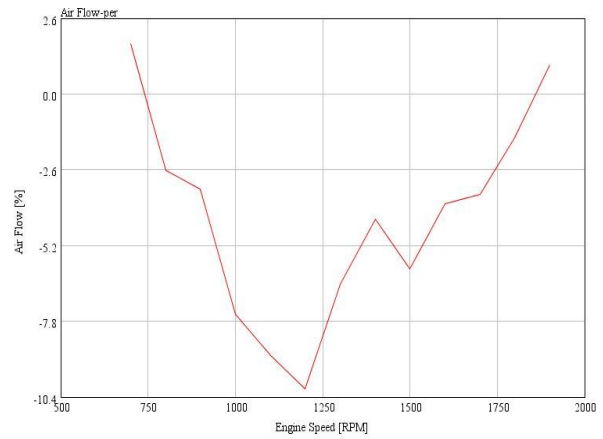


图 12: 进气量

从图 11、12 可以看到，进气量仿真值在发动机高速时候误差率低，1500rpm 以上，误差率基本保持在 5%左右，900-1400rpm 之间误差率在 5%到 10%之间，对增压器预测选型精度是足够的，分析原因是发动机高速时候进气量大，因此相对误差会较小，通过计算可以看到增压器在发动机大扭矩点和标定点，可以提供足够的空气，达到了匹配的目标，因此采用 GT-POWER 进行 waste-gate 增压器选型时，更多时候应该采用高速的进气量作为判断依据。

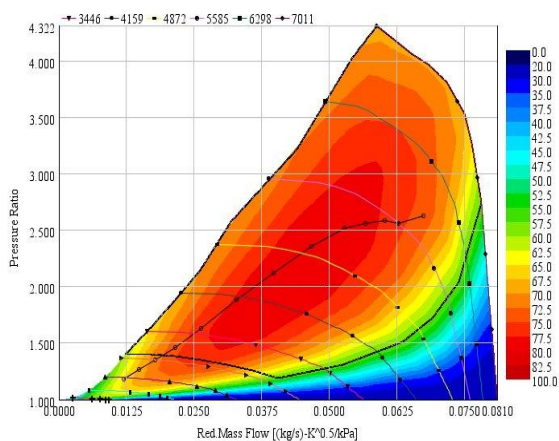


图 13: 压气机运行点

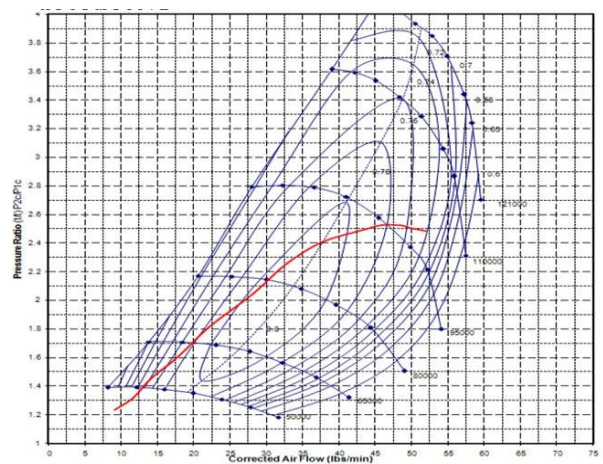


图 14: 试验值在 map 图上的位置

从图 13、14 可以看到，发动机运行点穿过了压气机的高效区域，且发动机的大扭矩点都位于高效区域里，发动机的最小转速点距离左侧的喘振线有足够的距离，最高转速点距离阻塞线也有足够的距离，发动机具有较高的高原能力，通过对比图 13、14 可以看到，计算值与试验值在 map 图上的位置相差不大，验证了计算的准确度。

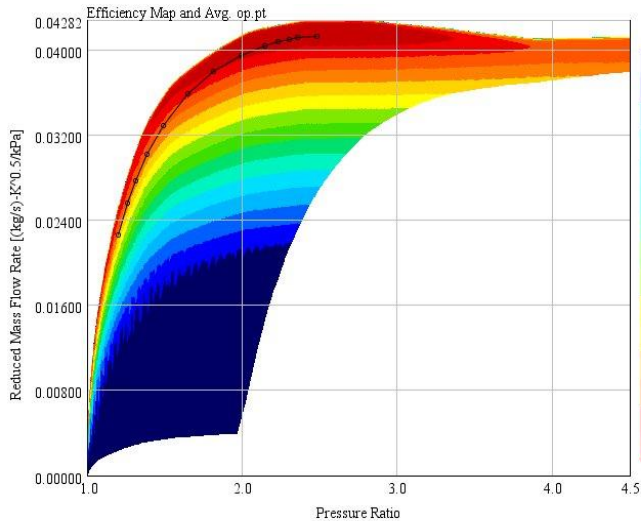


图 15: 涡轮机运行点

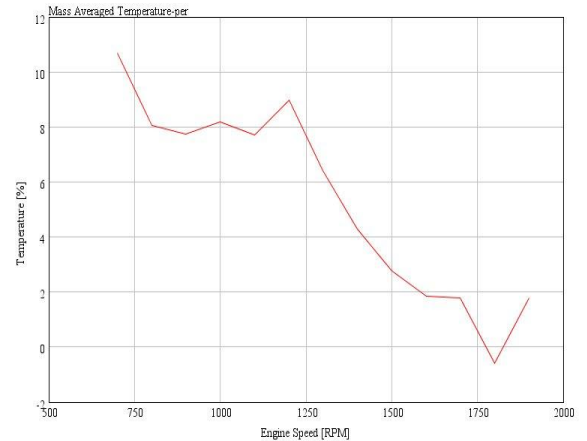


图 16: 涡前温度计算值与试验值误

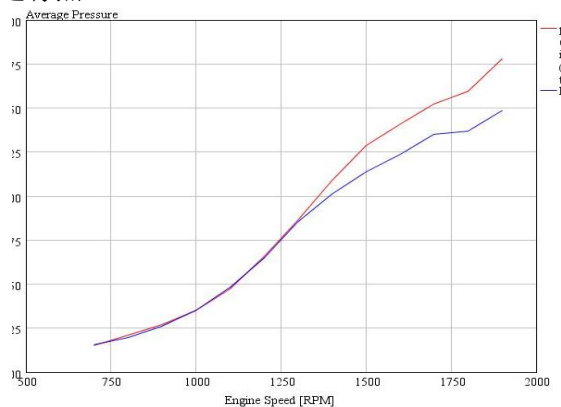


图 17: 涡前压力计算值与试验值

从图 15 可以看到发动机运行点在涡轮机的高效区域里，结合图 17 可以看到高速时候涡端的膨胀比也不高， p_{mep} 保持在合理的范围内，发动机的高速性能不会恶化，同时涡前温度也在合理的范围内，不会超过涡端机械强度的限制，对比图 16 可以看到涡前温度在发动机高速段与试验值误差较小，涡轮机进口的压力在高速时精度较低，原因可能是缸内燃烧模型和涡轮机 map 图精度不高引起的，因为涡轮机 map 图是在稳流试验台上面测得的，而实际的发动机的气流是瞬态脉动的，因此是采用涡端 map 计算是会引起计算误差的，涡前温度在高速时精度较高，低速时候精度低，而涡前温度的准确性与排气管温度的计算以及缸内燃烧模型的准确度都有关系，笔者认为原因是缸内燃烧情况与标定本体时所用的 `burn_rate` 已经有所不同，而增压器选型时采用的是 `burn_rate` 燃烧模型，因此会引起计算误差。

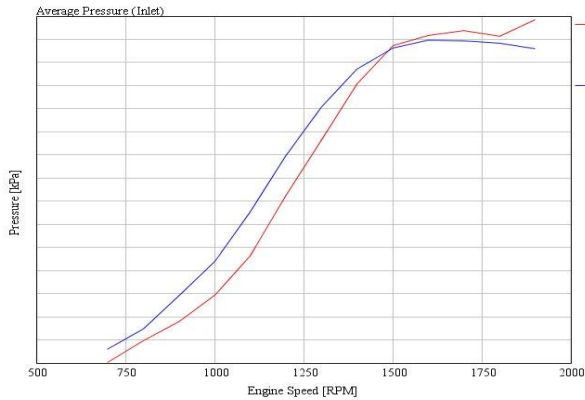


图 18: 压气机出口压力试验值与计算值

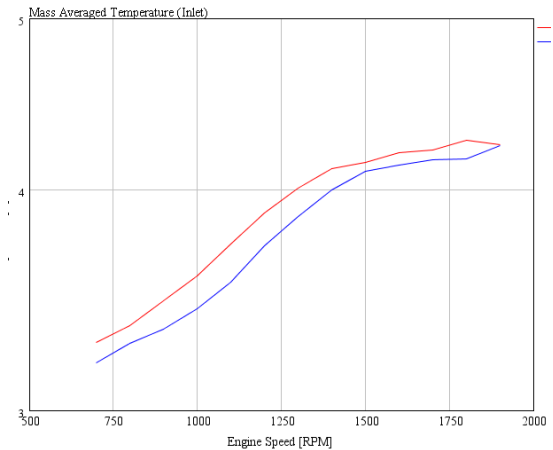


图 21: 压气机出气温度计算值与实际值

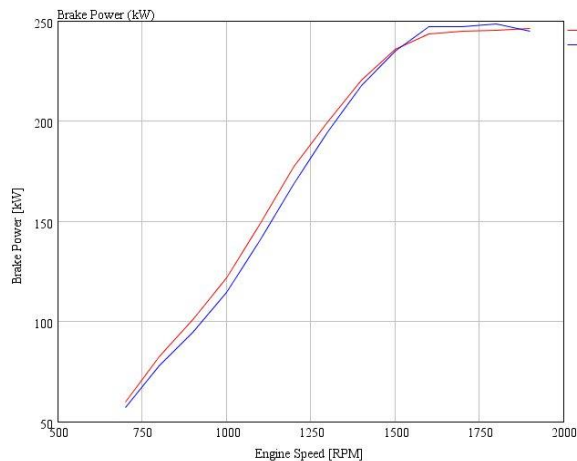


图 20: 功率计算值与试验值

从图 18、19 可以看到压气机出口压力和温度计算值与试验值在高速时候相差很小，误差较小，低速时候误差率加大，但是误差率都在 8% 以内，作为一个预测模型精度是足够的，从计算结果可以看到压气机出口温度在合理的范围内，满足压气机叶轮的强度要求和高原要求，压气机出口压力计算值与试验值误差在全工况内都较小，出口压力满足发动机的爆压要求，结合图 20 可以看到增压器可以满足发动机功率需求。

4 结论

1. 本文简单的介绍了利用 GT-POWER 模型进行 WASTE-GATE 增压器的匹配过程和进行了简单的结果分析，可以看到利用 GT-POWER 进行增压器的匹配计算，高速时候精度高，低速精度低，但是作为一个预测模型其计算的精度满足工程应用的需求。

2. 如何提高增压器匹配的精度是一个复杂的过程，取决于 map 图的准确度以及模型的复杂程度，

因为涡轮机 map 和压气机 map 是在增压器厂稳流试验台上面得到的，发动机的气流是脉动的，因此需要后期需要根据试验结果对 map 图的进行修正，这是计算误差引起的一个重要原因，此外还有涡端与大气以及涡端与压气机端的传热都会引起计算误差，这些在模型里面都没有详细考虑。

3.waste-gate 增压器在发动机运行过程中会打开进行涡端的放气，本模型没有详细的进行涡端放气阀的详细模拟，涡端的放气量与涡端放气压差以及开启直径都有关系，本模型只是采取了简单的机械模型进行放气阀模拟，放气量采取线性关系式近似代替，在计算时会引起计算的误差。

4.增压器的匹配时还要考虑喘振余量、高原能力等，在本文中并没有详细的一一列举讨论，在匹配时候也要进行相应的考虑。

5.增压器匹配最终目标是达到发动机的开发要求，因此一切的评价都是以发动机性能和排放为最终的评价选型依据。

5 参考文献

- [1] GT-POWER USER GUIDE