

GT-POWER 和 BOOST 气道流量计算对比

Comparison of Port Flow Calculation between GT-POWER and BOOST

曲 栓

(中国北方发动机研究所, 天津)

摘 要:针对 GT-POWER 和 BOOST 因传热模型差异导致的预期进气量差异与计算不符的问题, 建立了模型, 对比分析了两软件气道流量计算的差异。分析结果表明: 在进气量计算方面, 除了两软件气道传热模型和管路计算方法的差异, 进气量计算模型也存在差异, 即 GT-POWER 采用了新的喉口压力和压比, 这导致两者的进气流量有差别。在排气流量计算方面, 两软件采用的模型和计算结果基本相同。

关键词: GT-POWER; 气道流量; 有效流通面积修正; BOOST

Abstract: Differences in port heat transfer model of GT-POWER and BOOST should lead to a certain trend in mass flow rate; however, the results of the soft wares do not show the expected trend. To this problem, models are built, and differences in port flow calculation of the two soft wares are analyzed. The results indicate that, in regards to intake flow, the two soft wares not only use different port heat transfer models and pipe discretization methods, but also use different intake flow models, that is, GT-POWER uses a new throat pressure and pressure ratio, which leads to differences in intake port flow. In regards to exhaust flow, the two soft wares use same model and leads to similar results.

Key words: Port flow; Effective flow area correction; Port heat transfer model; BOOST

1. 前言

论文[1]指出: “从 GT-POWER 和 BOOST 气道传热模型可见: GT-POWER 计算的是气道网格单元壁面的传热, 而 BOOST 计算的是气体经过气阀喉口的传热。两种不同处理方法对进气量的影响应该是: 对于 GT-POWER, 进气道传热会影响进气温度, 进而影响进气量; 而对于 BOOST, 正向流动时, 喉口处的传热不影响上游气体温度, 倒流时会影响气道内气体温度, 但通常倒流量较小。因此, 可以推测: 1) GT-POWER 进气道传热对进气量影响较大, BOOST 进气道传热对进气量影响较小; 2) 进气道无传热时, GT-POWER 和 BOOST 进气量应该基本相同。”

采用论文[1]中的模型, 计算了 GT-POWER 进气道热流量对空气流量和充气效率的影响, 并与 BOOST 对比(表 1)。计算结果表明:

1) 对于 GT-POWER, 相对于基准设置, 进气道热流量对空气流量和充气效率影响较大; 对于 BOOST, 相对于基准设置, 进气道热流量对空气流量和充气效率影响较小, 这与论文[1]的推测相符;

2)GT-POWER 和 BOOST 进气道热流量为 0 时, 空气流量和充气效率与 BOOST 相差较大, 这与论文[1]的推测不符;

3) GT-POWER 基准设置(进气道传热乘积因子为 1.5)时, 计算的进气道热流量是 BOOST 基准设置的 3.5 倍, 充气效率比 BOOST 低 1.4 个百分点。

本文对比 GT-POWER 和 BOOST 气道流量计算方法, 探明气道流量计算差异的原因。首先, 建立了的发动机模型。然后, 介绍了两个软件气阀流量计算模型。最后对比了进气道流量计算结果和排气道流量计算结果。

表 1 GT-POWER 和 BOOST 进气道热流量对空气流量和充气效率的影响

	GT-POWER				BOOST	
传热模型	-	-	-	-	Zapf (基准)	None
进气道传热乘积因子	1.5 (基准)	1.0	0.5	0	-	
进气道热流量/kW	-2.2	-1.6	-0.8	0	-0.67	0
空气流量/(kg/s)	0.150	0.152	0.153	0.155	0.152	0.153
充气效率	0.910	0.921	0.932	0.944	0.924	0.932

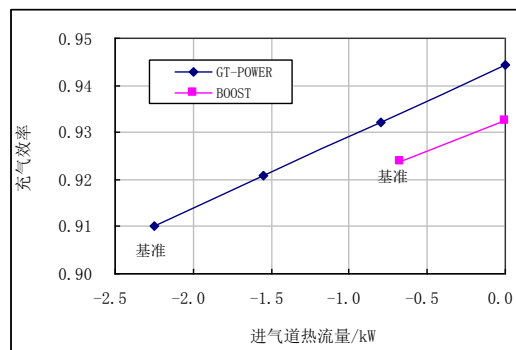


图 1 进气道热流量对充气效率的影响

2. 发动机模型

GT-POWER 和 BOOST 模型均从论文[1]中修改得到。为了避免其他干扰, 管路仅包括进气道和排气道。在进气道上, 均布五个测点(图 4)。

表 2 与传热相关的基准设置

	GT-POWER	BOOST
传热模型	-	Zapf
进气道传热乘积因子	1.5	-
进气道壁面温度/K	450	450
排气道传热乘积因子	2.0	-
排气道壁面温度/K	550	550

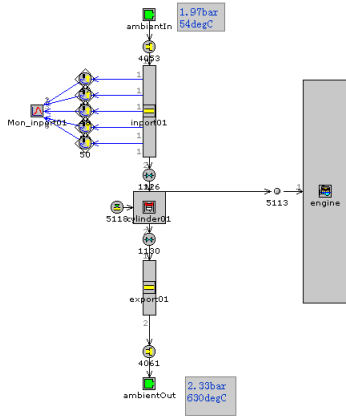


图 2 GT-POWER (V7.0) 模型

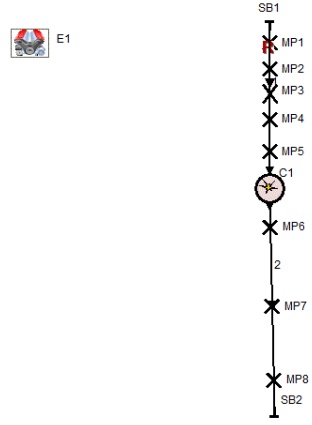


图 3 BOOST (V2013.1) 模型

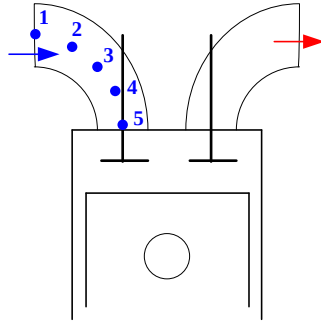


图 4 进气管路测点示意图

3. GT-POWER 和 BOOST 气阀流量计算模型对比

3.1. 计算公式

根据两个软件的用户手册，气阀质量流量计算模型相同，均采用公式（1）~（5）所示的理想喷嘴流量模型， ρ_{is} 和 U_{is} 为喉口处的密度和速度， Pr 为压比， A_{eff} 为有效流通面积。

尽管如此，需要注意的是，由于两个软件管路一维非定常流动求解方法的不同，导致计算流量时采用的 p_{01} 、 T_{01} 所在管路位置不同。

$$\begin{aligned} \dot{m} &= A_{eff} \cdot \rho_{is} \cdot U_{is} \\ &= A_{eff} \cdot p_{01} \cdot \sqrt{\frac{2}{R \cdot T_{01}}} \cdot \begin{cases} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma-1} \left[Pr^{\frac{2}{\gamma}} - Pr^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}, & Pr \geq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma+1}}, & Pr \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\rho_{is} = \begin{cases} \rho_0 \cdot Pr^{\frac{1}{\gamma}}, & Pr \geq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \rho_0 \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}}, & Pr \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (2)$$

$$U_{is} = \sqrt{2R \cdot T_{01}} \cdot \begin{cases} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \text{Pr}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}, & \text{Pr} \geq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma+1}}, & \text{Pr} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{Pr} = \frac{p_2}{p_{01}} \quad (4)$$

$$A_{\text{eff}} = C_d \cdot \frac{\pi d_{\text{ref}}^2}{4} \quad (5)$$

3.2. GT-POWER 参数位置

GT-POWER 采用有限容积法和交错网格，在网格中心求解标量，在边界求解矢量（图 5）。每个管路的网格单元数由管长和设置的离散长度决定。在每个网格单元内部认为标量都是相同的。

图 2 中 GT-POWER 模型的进气道分为两个网格单元，测点 2 和测点 4 分别位于两个网格单元的中心。分析进气道上五个测点的压力（图 6）可见，测点 1 和测点 2 的压力相同，测点 4 和测点 5 的压力相同，测点 3 压力是测点 2 和测点 4 的平均。所以对于标量来说，在包含多个网格单元的管路上，如果测点在相邻网格单元交界处，则取两个网格单元的平均值，如果测点在其他位置，则输出测点所在网格单元中心的值。矢量也采用类似的处理方法。

根据以上分析，进气阀正向流动时，p01 和 T01 是第二个网格单元中心（测点 4）的值。

从图 7 可见，从测点 2 到测点 4，由于气道壁面的传热，气体温度升高。

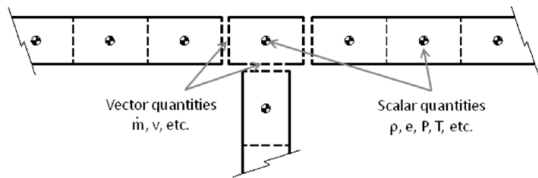


图 5 GT-POWER 管路计算模型[2]

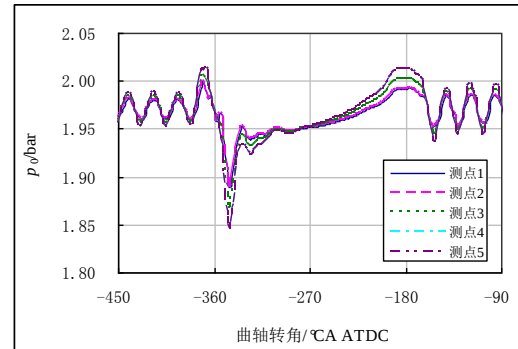


图 6 五个测点的压力

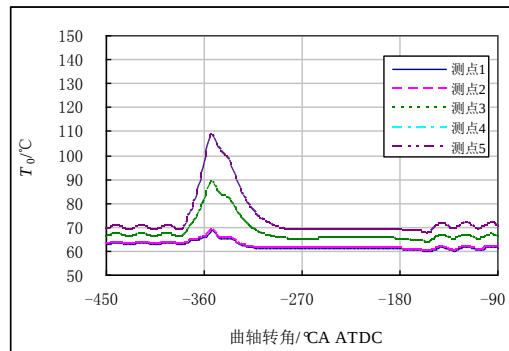


图 7 五个测点的温度

3.3. BOOST 参数位置

BOOST 管路计算采用有限容积法，非交错网格（图 8）。所有参数在网格中心求解，但是通过插值，可以获得任意位置的参数。在本文中，采用与 GT-POWER 相同的离散长度。图 3 中 BOOST 模型的进气道也有两个网格单元。

根据以上分析，进气阀正向流动时， p_{01} 和 T_{01} 是进气道出口边界（测点 5）的值。

与 GT-POWER 不同的是，进气道上五个测点的压力和温度均不相同（图 9 和图 10）。

由图 10 可见，在进气阀刚打开时缸内气体倒流，测点 5 温度达 450°C 左右；在正向流动阶段，五个测点的温度基本相同；在进气门关闭时缸内气体倒流，测点 5 温度在 130°C 左右。

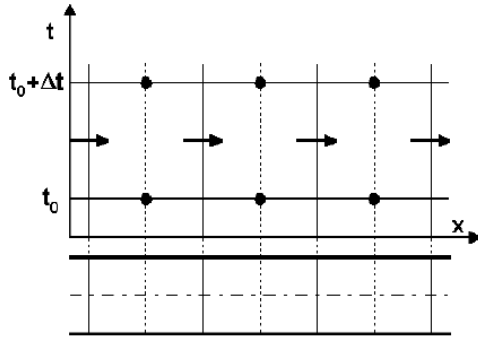


图 8 BOOST 管路计算[3]

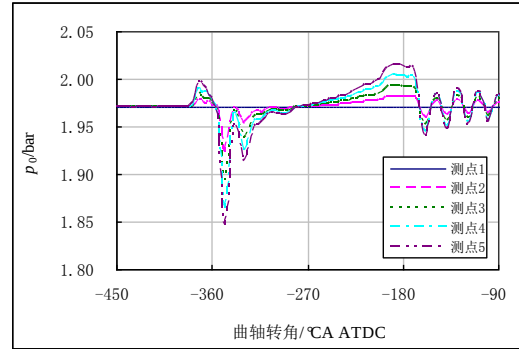


图 9 五个测点的压力

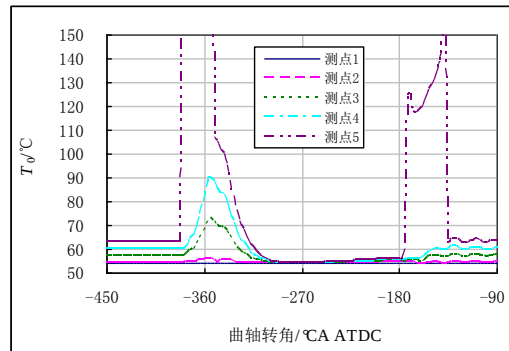


图 10 五个测点的温度

3.4. 小结

对比图 7 和图 10 可见，两个软件对气道传热的处理方法不同，导致气阀前温度存在差异，这是两个软件进气流量计算差异的原因之一。

两个软件管路计算方法（包括网格离散方法和插值方法）不同导致边界参数不同。根据图 9 和图 10 可见，进气流量计算时，GT-POWER 采用测点 4 的参数，BOOST 采用测点 5 的参数，而测点 4 和测点 5 的参数存在差异，因此这是两个软件进气流量计算差异的原因之二。

4. 进气道计算结果对比

4.1. 流量计算对比

由表 3 可见，在基准设置下，两者的空气流量和热流量趋势与整机计算结果（表 1）相同，即

GT-POWER 的空气流量小、进气道热流量大。

图 11 为两个软件进气道有效流通面积、出口压力、出口温度、压比、质量流量等参数的对比。可见，GT-POWER 进气道出口温度比 BOOST 高 15℃左右。

在亚音速流动情况下，对公式（1）求全微分，假设 p_{01} 和 Pr 是两个独立参数，则

$$\frac{dm}{m} = \frac{dA_{\text{eff}}}{A_{\text{eff}}} + \frac{dp_{01}}{p_{01}} - \frac{1}{2} \frac{dT_{01}}{T_{01}} + \frac{\frac{1}{\gamma} - \frac{\gamma+1}{2\gamma} Pr^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}}{1 - Pr^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}} \frac{dPr}{Pr} \quad (6)$$

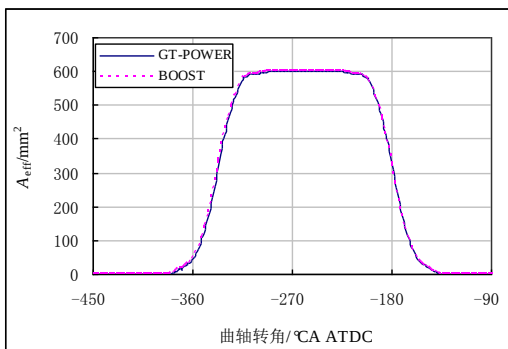
由表 4 和图 11 可见，-270° CA ATDC 时，与 BOOST 相比，GT-POWER 的 p_{01} 小、 T_{01} 大。以 BOOST 为基准，对 GT-POWER 质量流量的影响分别是-0.9%、-1.9%。

表 3 参数对比

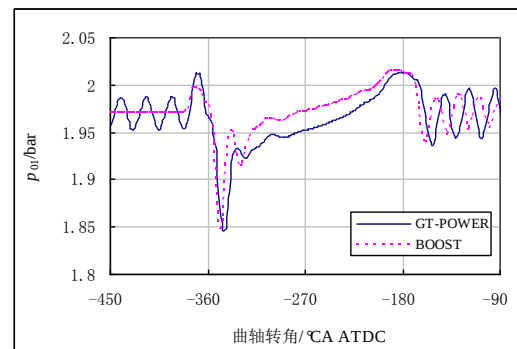
	GT-POWER	BOOST
Lambda	1.618	1.638
进气道压力/bar	1.962	1.965
空气流量/(kg/s)	0.0366	0.0371
进气道热流量/kW	0.528	0.152

表 4 -270° CA ATDC 参数对比

	GT-POWER	BOOST
Aeff/mm ²	601	601
p01/bar	1.95	1.97
T01/℃	68.6	56.0
Pr	0.813	0.815
m/(kg/s)	0.204	0.210
公式（6）右侧第一项	0.000	-
公式（6）右侧第二项	-0.009	-
公式（6）右侧第三项	-0.019	-
公式（6）右侧第四项	0.004	-
公式（6）左侧	-0.028	-



(a) 有效流通面积 Aeff



(b) 压力

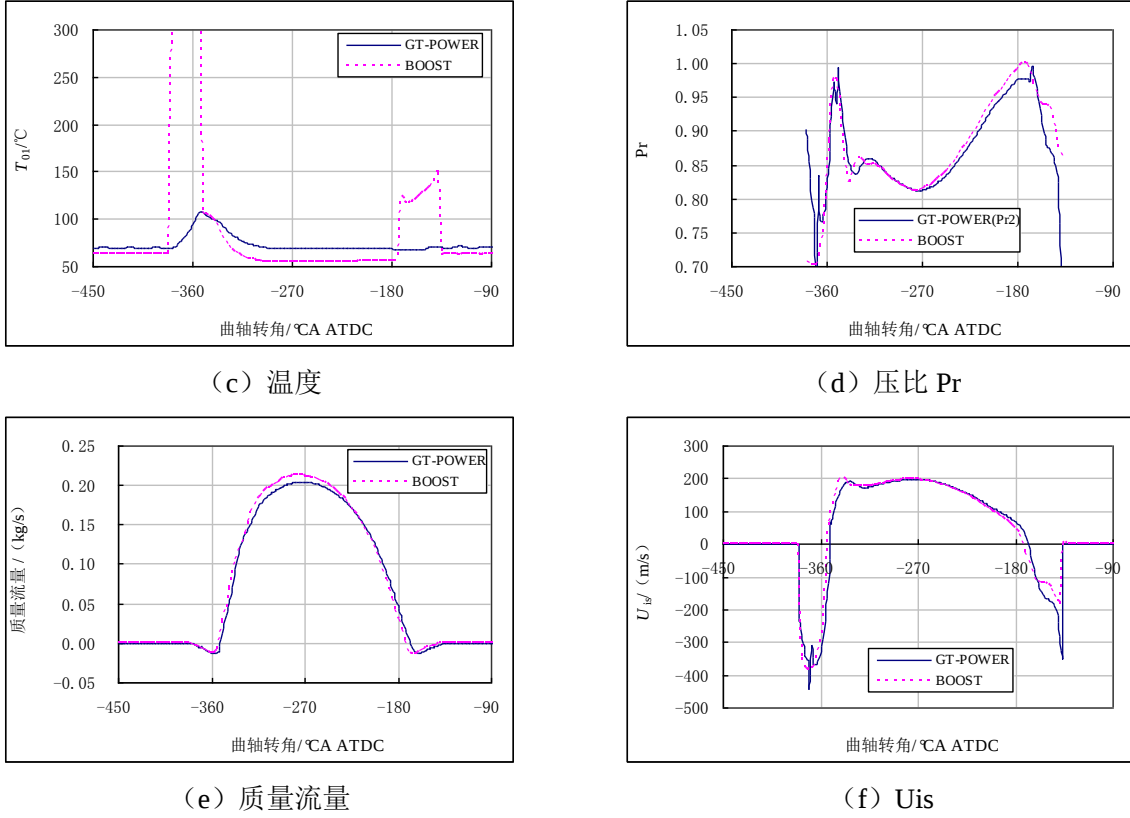


图 11 进气道参数对比

4.2. GT-POWER 计算结果

GT-POWER 计算结果中，不但有进气道出口压力和气缸压力，还有进气阀喉口压力，如图 12 所示。

公式 (7) 和 (8) 列出了两个压比定义方式，其中， Pr_2 采用喉口压力定义。图 13 为两个压比对比。

$$Pr_1 = \begin{cases} \frac{\text{气缸压力}}{\text{进气道总压}}, & \text{进气道总压} \geq \text{气缸压力} \\ \frac{\text{进气道压力}}{\text{气缸压力}}, & \text{进气道压力} \leq \text{气缸压力} \end{cases} \quad (7)$$

$$Pr_2 = \begin{cases} \frac{\text{喉口压力}}{\text{进气道总压}}, & \text{进气道总压} \geq \text{气缸压力} \\ \frac{\text{喉口压力}}{\text{气缸压力}}, & \text{进气道压力} \leq \text{气缸压力} \end{cases} \quad (8)$$

如图 14 所示，采用 Pr_1 时，用公式计算的质量流量与 GT-POWER 计算的不符，采用 Pr_2 时，两者基本相符。这说明 GT-POWER 采用 Pr_2 计算流量。

尽管如此，仍然存在两个问题：

1) 喉口压力如何计算？需要注意的是：在正向流动的前半段，喉口压力大于气缸压力；后半段喉口压力小于气缸压力。这说明，在正向流动前半段喉口后按节流处理，后半段按照压力恢复处理。从公式 (9) 可见，这相当于 GT-POWER 给标准喷嘴模型定义了一个修正系数 f (图 15)。

$$\dot{m} = f \cdot A_{\text{eff}} \cdot p_{01} \cdot \sqrt{\frac{2}{R \cdot T_{01}}} \cdot \Psi(\text{Pr}1) = A_{\text{eff}} \cdot p_{01} \cdot \sqrt{\frac{2}{R \cdot T_{01}}} \cdot \Psi(\text{Pr}2) \quad (9)$$

2) 图 14 (b) 中 -180~ -169° CA ATDC 范围内, 公式计算值与 GT-POWER 计算值不符, 前者为负, 后者为正。在该范围内进气道末端总压小于气缸压力 (图 12), 此时流动方向应该是反向流动 (从气缸内到气道), 但 GT-POWER 仍然处理成正向流动。事实上, 按照 GT-POWER 的计算方法, -180° CA ATDC 时, U_{is} 为 67m/s, 此时改为反向流动也不合适。

另外, 图 14 (a) 表明, 在相同的边界下, 采用 GT-POWER 计算方法 (采用 Pr2) 计算的空气流量比用 Pr1 计算值大。

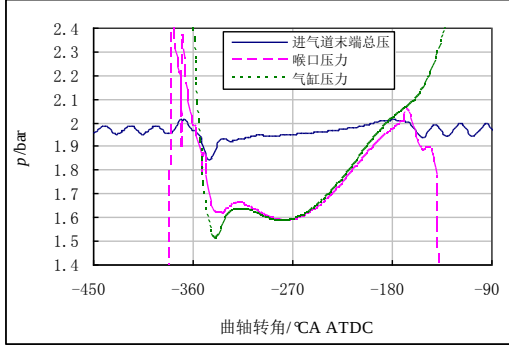


图 12 GT-POWER 压力对比

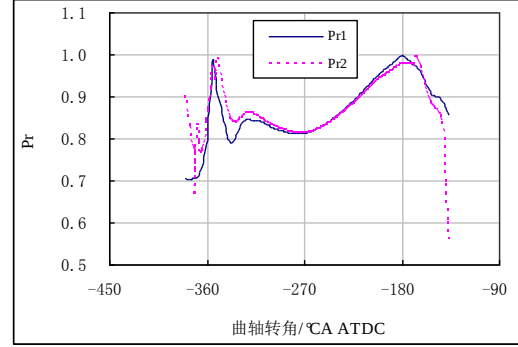
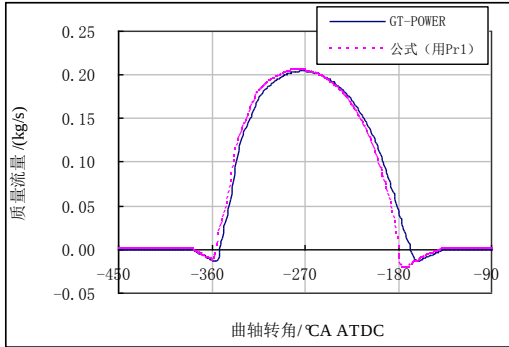
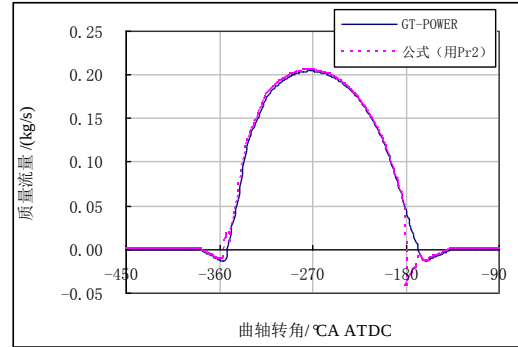


图 13 Pr1 和 Pr2 对比



(a) 压比 Pr1



(b) 压比 Pr2

图 14 GT-POWER 计算结果与公式 (6) 计算结果的对比

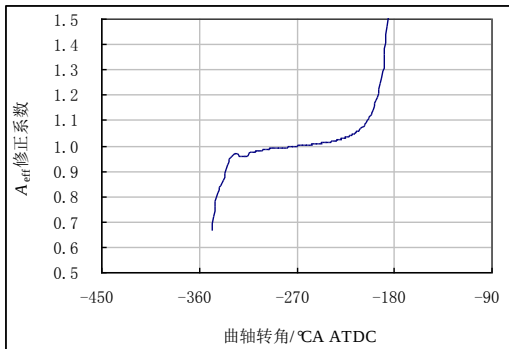
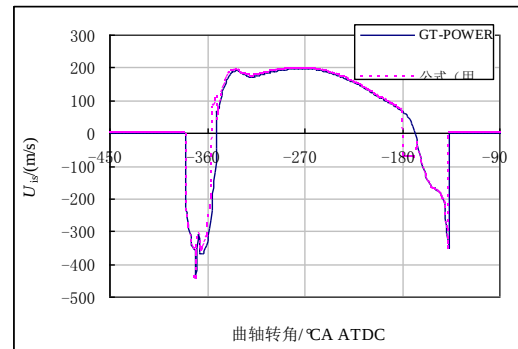


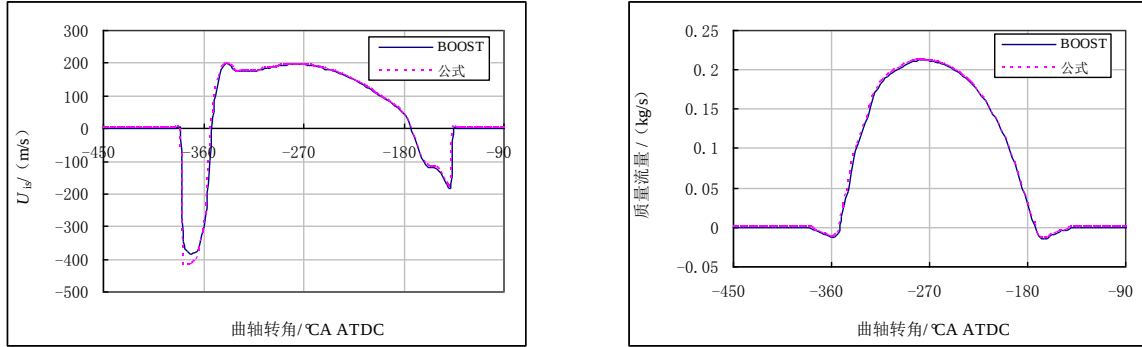
图 15 修正系数 f

图 16 喉口速度 U_{is} 对比

4.3. BOOST 计算结果

BOOST 没有定义喉口压力，压比用 Pr_1 。

图 17 为 BOOST 计算结果与公式 (1) ~ (3) 计算结果的对比。计算的细微差别可能是公式采用的物性参数与 BOOST 不同。



(a) 速度 U_{is}

(b) 质量流量

图 17 BOOST 计算结果与公式 (6) 计算结果的对比

4.4. 小结

根据以上分析，GT-POWER 虽然采用理想喷嘴模型，但通过软件内部模型，计算了喉口处的压力（与缸内压力不同），并用喉口压力定义了压比来计算进气流量。这是两个软件进气流量不同的原因之三。

表 5 给出了基准设置下，两个软件进气流量不同的原因及影响。GT-POWER 比 BOOST 的进气量大-1.3%。其中传热模型贡献-1.9%左右，流量计算模型贡献是正的，而管路计算方法的影响难以评估。

表 5 GT-POWER 和 BOOST 进气流量不同的原因及影响

	GT-POWER	BOOST	差值 (以 BOOST 为基准) /%
空气流量 / (kg/s)	0.0366	0.0371	-1.3%
传热模型的影响	-	-	-1.9%
管路计算方法的影响	-	-	
流量计算模型的影响	-	-	>0

5. 排气道计算结果对比

5.1. 流量计算对比

图 18 为两个软件排气道进口/喉口有效流通面积、气缸压力、气缸温度、压比、质量流量等参数的对比。

可见，在临界排气阶段 ($Pr < 0.55$)，两个软件计算的气缸压力、气缸温度基本相同，计算质量流量也基本相同。

在亚临界排气阶段，BOOST 气缸温度低，喉口速度比 GT-POWER 小。

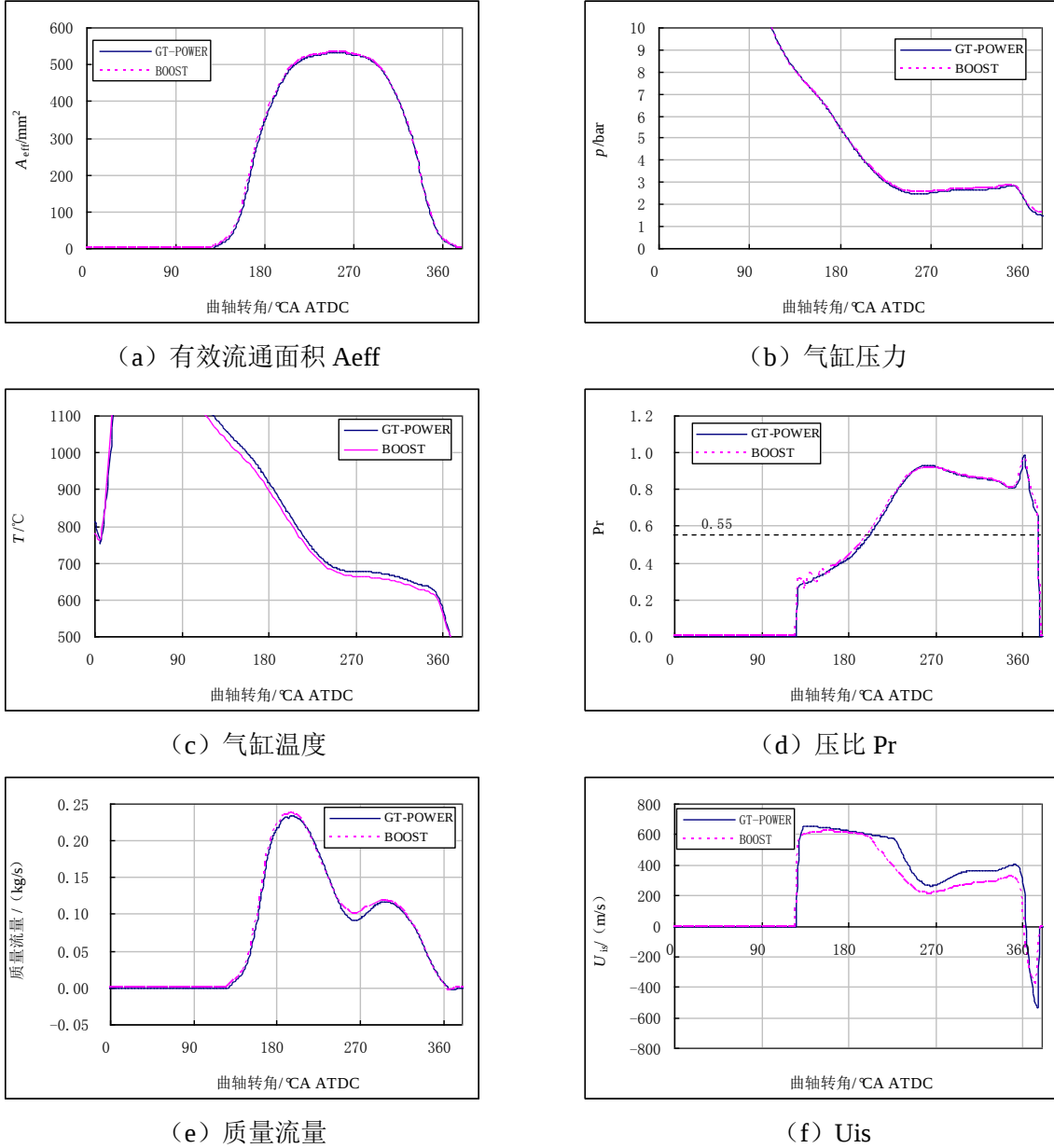


图 18 排气道参数对比

5.2. GT-POWER 计算结果

GT-POWER 后处理中, 提供了排气道喉口的各种参数。

图 19 为 GT-POWER 计算的气缸压力、喉口压力和排气道压力的对比。从三个压力和喉口 Ma 来看, GT-POWER 把排气道等效成拉伐尔喷管来计算喉口参数。

图 20 为两种压比的对比。图 21 为按照两种压比计算的质量流量, 并与 GT-POWER 计算的质量流量对比。从图 21 计算结果可见, 虽然 GT-POWER 计算了喉口参数, 但考虑到流量系数的测量方法, 仍然采用 Pr_1 计算质量流量。

$$\text{Pr1} = \begin{cases} \frac{\text{排气道压力}}{\text{气缸压力}}, & \text{气缸压力} \geq \text{排气道压力} \\ \frac{\text{气缸压力}}{\text{排气道总压}}, & \text{气缸压力} \leq \text{排气道总压} \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{Pr2} = \begin{cases} \frac{\text{喉口压力}}{\text{气缸压力}}, & \text{气缸压力} \geq \text{排气道压力} \\ \frac{\text{喉口压力}}{\text{排气道总压}}, & \text{气缸压力} \leq \text{排气道总压} \end{cases} \quad (11)$$

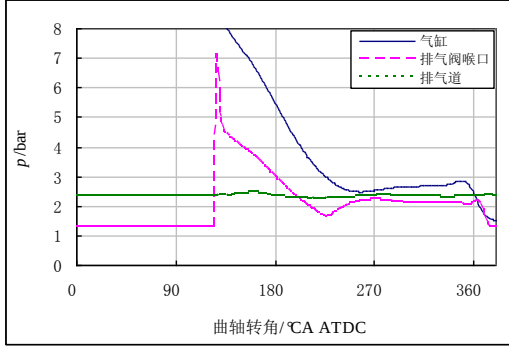


图 19 GT-POWER 压力对比

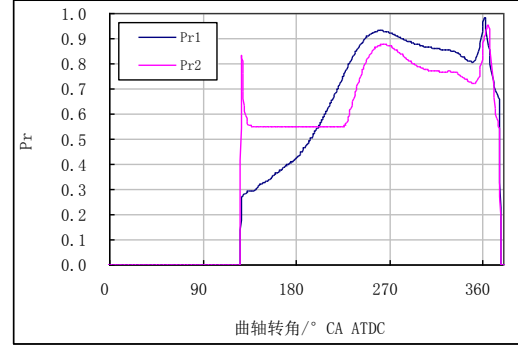
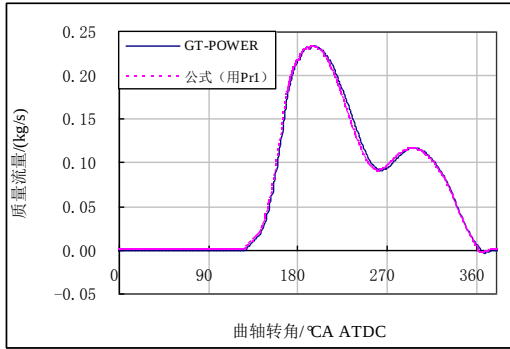
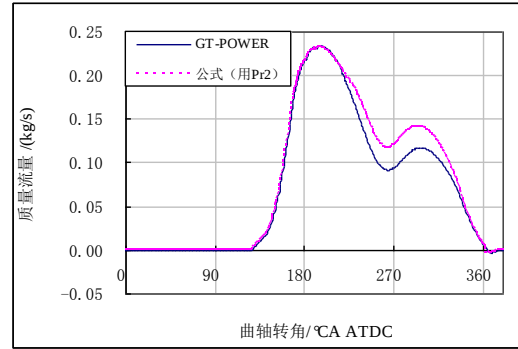


图 20 Pr1 和 Pr2 对比



(a) 压比 Pr1



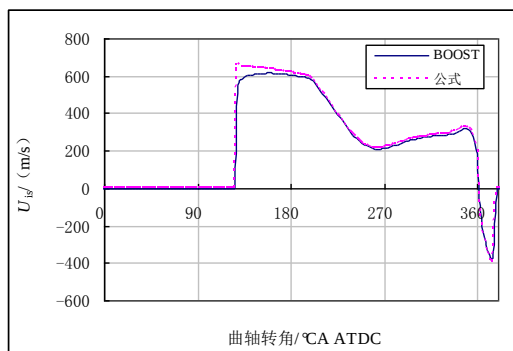
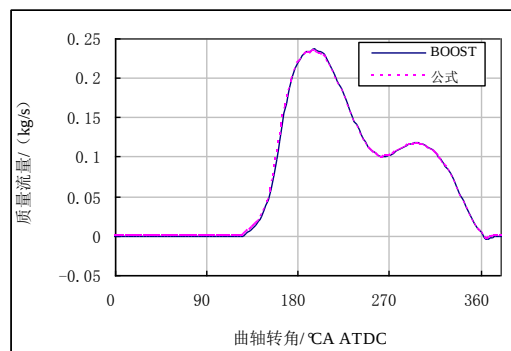
(b) 压比 Pr2

图 21 GT-POWER 计算结果与公式 (6) 计算结果的对比

5.3. BOOST 计算结果

BOOST 没有定义喉口压力，压比用 Pr1。

图 22 为 BOOST 计算结果与公式 (1) ~ (3) 计算结果的对比。

(a) 速度 U_{is} 

(b) 质量流量

图 22 BOOST 计算结果与公式 (6) 计算结果的对比

5.4. 低压循环对比

图 23 为 GT-POWER 和 BOOST 计算的低压循环对比，两者计算的 PMEP 相同。

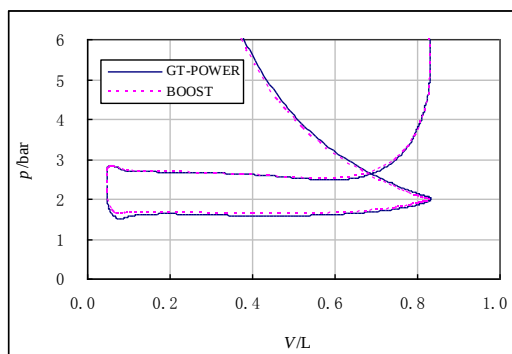


图 23 GT-POWER 和 BOOST 计算的低压循环对比

6. 结论

1) 在基准设置下，GT-POWER 和 BOOST 计算充气效率不同的原因是：一，两者采用不同的气道传热模型，导致进气阀前的气体温度不同；二，两者管路计算方法不同，导致计算流量采用的压力、温度测点位置不同；三，两者进气阀质量流量计算模型不同，虽然均采用理想喷嘴模型，但是 GT-POWER 在软件内部计算了新的喉口压力，并用该喉口压力定义了压比来计算进气量。

2) 两个软件排气阀质量流量计算方面和计算结果基本相同。

7. 参考文献

- [1] 曲栓，GT-POWER 与 BOOST 热平衡计算对比，2018 年 IDAJ 中国 CAE/CFD 技术年会
- [2] Gamma Technologies, “GT-SUITE Flow Theory Manual—VERSION 7.0”
- [3] AVL, “Theory—AVL BOOST VERSION 2013.1”