

性能与排放

## 二级涡轮增压中冷柴油机变海拔适应性研究

刘建敏, 董意, 王普凯, 刘艳斌, 韩立军, 何盼攀

(装甲兵工程学院, 北京 100072)

**摘要:** 针对某一级增压柴油机在高海拔地区工作时功率大幅下降的问题, 基于 GT-Power 软件建立了二级涡轮增压中冷柴油机的工作过程模型并经试验数据验证; 采用所建立的模型预测分析了二级增压柴油机在变海拔条件下的进、排气参数, 以及增压中冷等部件的性能参数的变化规律。分析表明: 二级增压柴油机具有良好的变海拔适应性。

**关键词:** 二级涡轮增压柴油机; 海拔; 工作过程; 性能

**中图分类号:** TK421<sup>+</sup>.8    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4357(2017)01-0016-06

## Adaptive Research of Two-Stage Turbocharging and Intercooling Diesel Engine at Variable Altitudes

Liu Jianmin, Dong Yi, Wang Pukai, Liu Yanbin, Han Lijun, He Panpan

(Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072)

**Abstract:** To solve the problem that the power of a one-stage turbocharging diesel engine decreases seriously when working at high altitude, GT-Power software was adopted to establish the operation model of two-stage turbocharging and intercooling engines, and then the model was verified with experiment data. Based on the model, the change rule of intake and exhaust parameters of two-stage turbocharging diesel engines at variable altitudes, as well as the performance parameters of parts such as compressors and intercoolers were predicted and analyzed. The analysis results indicate good adaptability of the two stage turbocharging diesel engine at variable altitudes.

**Key words:** two-stage turbocharging diesel engine; altitude; working process; performance

### 0 引言

目前的柴油机大多是基于平原环境设计制造的, 当在高海拔地区工作时, 由于大气压力和密度的降低, 使得进气量减少, 燃烧不良, 易造成热效率降低, 功率下降, 从而导致柴油机动力性、经济性、可靠性和排放特性恶化。虽然一级涡轮增压装置在一定程度上弥补了海拔变化对进气量的影响, 但其效果不尽如人意。文献 [1] 表明: 在 3 km 以上工作时, 一级增压柴油机的功率下降超过了 20%, 其各项动力性指标已不能满足使用需求。

相对而言, 二级涡轮增压柴油机受环境因素影响更小, 有着更好的变海拔适应性。在 21 世纪初, 德国、荷兰、捷克等国就已推出了成熟的商用二级涡轮增压柴油机。截至目前, 我国的研究者也围绕一级涡轮增压系统的变海拔特性, 两级涡轮增压系统之间以及与中冷器的匹配, 涡轮及压气机旁通阀的开度和设置等问题展开了许多有益的研究。李鲁宁<sup>[2]</sup>等结合试验分析了某二级增压重型柴油机的性能, 证实了该柴油机良好的中低转速动力性和燃油经济性, 但是没有考虑海拔条件对柴油机的影响; 刘系磊<sup>[3]</sup>等对变海拔条件下单级和二级涡轮

收稿日期: 2016-05-09

基金项目: 国家“973”计划项目。

作者简介: 刘建敏(1963-), 男, 教授, 主要研究方向为动力传动系统状态检测与故障诊断技术, E-mail: 13391567396@163.com。

增压柴油机进行了仿真,结果表明了二级增压柴油机良好的变海拔适应性,但其所研究的柴油机功率较小、转速偏低,两级压气机之间未设置中冷器,不能全面反映大功率二级涡轮增压中冷(Two-stage Turbocharging and Intercooling, TTI)柴油机的变海拔特性;王艳华<sup>[4]</sup>等利用 AVL-BOOST 软件在一级增压航空发动机的基础上匹配了 TTI 装置,但其研究重点在于两级增压装置的匹配计算上,未涉及进排气过程。目前对于车用 TTI 柴油机的研究还很不成熟,尤其是进排气过程中的各参数,其性能指标随海拔变化波动较大且对柴油机的燃烧等过程有很大影响,须进行详细研究。

## 1 数学模型

在计算过程中假定空气为理想气体;缸内燃烧采用零维模型;进、排气管路的气体流动均为准稳态过程;涡轮与压气机的转速则通过两者的扭矩差计算得到。下面详细介绍各个过程的数学模型。

### 1.1 缸内热力过程

将气缸盖底面、活塞顶面和气缸套内壁面围成的空间作为一个热力系统,采用零维燃烧模型计算其热力过程。工质状态参数如压力、温度、质量和组成成分等随曲轴转角的变化规律由能量方程、质量方程以及气体状态方程联立求解得到<sup>[5]</sup>。

由缸内热力系统能量守恒,得缸内温度变化微分方程为:

$$\frac{dT}{d\varphi} = \frac{1}{mc_v} \left( \frac{dQ_b}{d\varphi} + \frac{dQ_w}{d\varphi} - p \frac{dV}{d\varphi} + \frac{dm_e}{d\varphi} H_2 + \frac{dm_a}{d\varphi} H - U \frac{dm}{d\varphi} - m \frac{\partial U}{\partial \lambda} \frac{d\lambda}{d\varphi} \right) \quad (1)$$

缸内质量变化微分方程为:

$$\frac{dm}{d\varphi} = \frac{dm_b}{d\varphi} + \frac{dm_e}{d\varphi} + \frac{dm_a}{d\varphi} \quad (2)$$

理想气体状态方程为:

$$pV = mRT \quad (3)$$

式中:  $T$  为缸内气体温度;  $m$  为缸内气体质量;  $c_v$  为气体定容比热;  $Q_b$  为燃料燃烧放热率;  $Q_w$  为气缸壁面传热率;  $p$  为缸内气体压力;  $V$  为缸内气体体积;  $H_2$  为流入气缸单位质量气体对应的焓;  $H$  为缸内单位质量气体对应的焓;  $U$  为缸内单位质量气体对应的内能;  $\lambda$  为过量空气系数;  $m_b$  为缸内燃油质量;  $m_e$  为流经进气门的气体质量;  $m_a$  为流经排气门的气体质量;  $R$  为气体常数。

### 1.2 进、排气管路气体流动

对于进、排气系统中的直管道、三通管和阀门

等部件,须确定其内部气体流动的连续方程、动量方程和能量方程,进而求解进、排气状态<sup>[6]</sup>。

连续方程:

$$\frac{dm}{d\varphi} = \frac{1}{\omega} \sum_{\text{boundaries}} \dot{m}_b \quad (4)$$

动量方程:

$$\frac{dme}{d\varphi} = p \frac{dV}{d\varphi} + \frac{1}{\omega} \left[ \sum_{\text{boundaries}} \dot{m}_b H_b - h_w A_w (T - T_w) \right] \quad (5)$$

能量方程:

$$Adp + \sum_{\text{boundaries}} \dot{m}_b u_b - \frac{d\dot{m}_b}{d\varphi} = \frac{(4C_f \frac{dx}{D} + C_p) \frac{\rho u_b^2 A}{2}}{\omega dx} \quad (6)$$

式中:  $\varphi$  为曲轴转角;  $\omega$  为曲轴旋转角速度;  $\dot{m}_b$  为边界面处的气体质量流量;  $m$  为气体质量;  $e$  为单位质量气体的总能量;  $p$  为气体压力;  $V$  为气体体积;  $H_b$  为边界面处单位质量气体对应的总焓;  $h_w$  为壁面传热系数;  $A_w$  为壁面传热面积;  $T$  为气体温度;  $T_w$  为壁面温度;  $A$  为气体流动截面积;  $dp$  为对应的压力降;  $\rho$  为气体密度;  $u_b$  为边界面处的气体流速;  $C_f$  为壁面摩擦系数;  $dx$  为沿气体流动方向的气体厚度;  $D$  为气体流动截面的当量直径;  $C_p$  为压力损失系数。

### 1.3 涡轮增压器转速

确定废气涡轮增压器工作状态的关键是确定其工作转速<sup>[7]</sup>。一个计算时间步长内涡轮增压器转速的变化量由涡轮提供的扭矩和压气机消耗的扭矩之差得到:

$$\Delta n_{k,t} = \frac{30}{\pi} \Delta t \frac{M_t \eta_{k,t,m} - M_k}{I_{k,t}} \quad (7)$$

式中:  $\Delta \eta_{k,t}$  为涡轮增压器转速变化量;  $\Delta t$  为计算时间步长;  $M_t$  为涡轮提供的扭矩;  $\eta_{k,t,m}$  为涡轮增压器机械效率;  $M_k$  为压气机消耗的扭矩;  $I_{k,t}$  为涡轮增压器转动惯量。

涡轮增压器的瞬时转速为:

$$n_{k,t,2} = n_{k,t,1} + \Delta n_{k,t} \quad (8)$$

式中:  $n_{k,t,2}$  为本时间步长内的涡轮增压器转速;  $n_{k,t,1}$  为上一时间步长内的涡轮增压器转速。

## 2 柴油机模型

### 2.1 柴油机主要参数

本文中的 TTI 柴油机是在某一级增压柴油机的基础上更换了经过匹配的 TTI 装置得到的,TTI 装置在两级压气机后分别设置中冷器,对压缩气体进行冷却。该 TTI 柴油机的主要参数如表 1 所示。二

级压气机的特性曲线分别如图 1、2 所示。

表 1 TTI 柴油机的主要参数

| 形式                | 直列六缸二级<br>涡轮增压中冷柴油机 |
|-------------------|---------------------|
| 缸径 × 冲程/(mm × mm) | 110 × 110           |
| 发火顺序              | 1-5-3-6-2-4         |
| 压缩比               | 15                  |

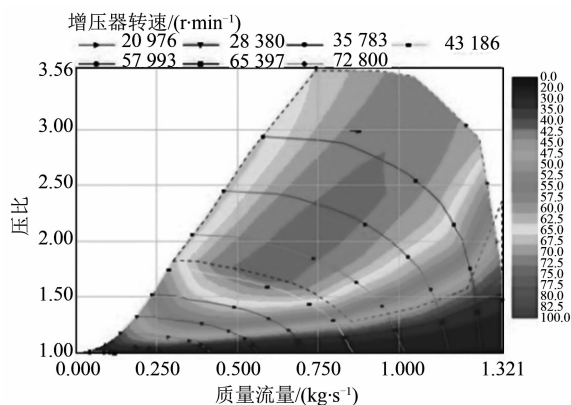


图 1 一级压气机特性曲线示意图

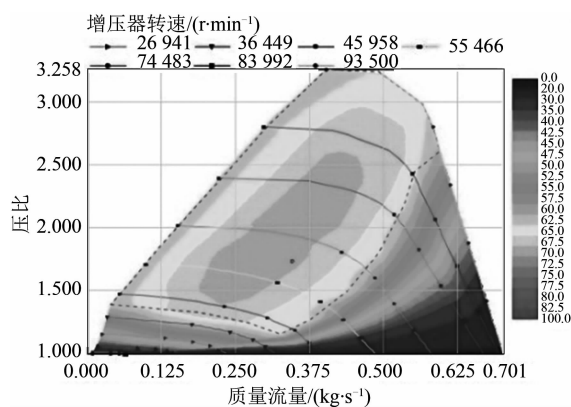


图 2 二级压气机特性曲线示意图

TTI 柴油机二级中冷器均采用冷却液对增压空气进行冷却, 其主要参数如表 2 所示。其中的换热量为柴油机工作在  $4\,200\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ , 进气量为  $0.9\ (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$  时, 冷却液从增压空气中吸收的热量。

表 2 两级中冷器参数

| 参数                 | 一级中冷器 | 二级中冷器 |
|--------------------|-------|-------|
| 换热量/kW             | 63    | 120   |
| 换热面积/ $\text{m}^2$ | 19.28 | 35.30 |
| 散热管直径/mm           | 3.5   | 3.5   |
| 散热管个数/个            | 3 000 | 3 900 |

## 2.2 模型的建立

基于 GT-Power 软件分别建立原柴油机和 TTI

柴油机的工作过程模型。如图 3、4 所示。图 4 中的 A、B 两点是为验证模型的准确性而设定的与实测值对应的进、排气道的两个节点。

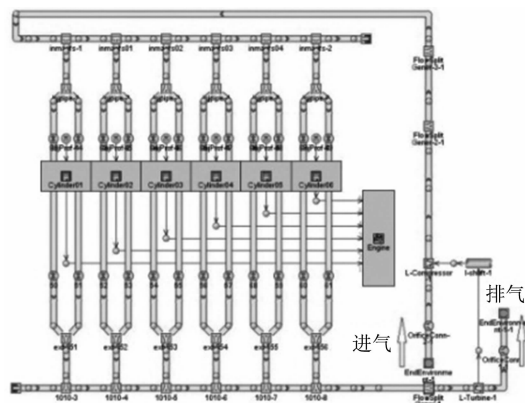


图 3 原柴油机工作过程模型

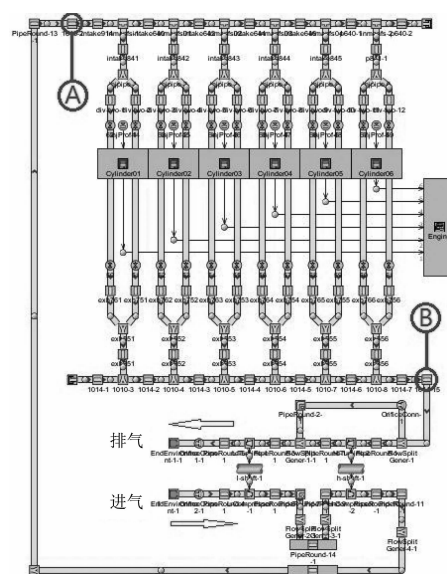


图 4 TTI 柴油机工程过程模型

## 2.3 模型的验证

在海拔为  $0\ \text{km}$ , 转速为  $4\,200\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$  时, 对 TTI 柴油机模型进行计算, 并与已知试验值进行对比, 结果如表 3 所示。从表中可以看出: 计算结果与试验值的相对误差均在 5% 以内, 说明所建模型的准确性。

表 3 试验值与计算结果对比

| 项目                                     | 试验值   | 计算值   | 误差   |
|----------------------------------------|-------|-------|------|
| 功率/kW                                  | 551.0 | 526.9 | 0.04 |
| 进气量/ $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$ | 0.90  | 0.88  | 0.02 |
| A 点温度/ $^{\circ}\text{C}$              | 108.3 | 110.2 | 0.02 |
| A 点压力/MPa                              | 0.493 | 0.497 | 0.01 |
| B 点温度/ $^{\circ}\text{C}$              | 597.6 | 608.3 | 0.02 |
| B 点压力/MPa                              | 0.589 | 0.612 | 0.04 |
| 最大缸压/MPa                               | 22.89 | 22.61 | 0.01 |

3 变海拔条件下柴油机性能预测分析

在转速为 4 200 ( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ) 时选取 0 ~ 5 km 六种海拔, 利用所建立的模型对柴油机功率、进排气等参数进行计算分析, 结果如下。

3.1 功率随海拔变化规律

表 4 所示为大气状态参数以及柴油机功率随海拔的变化。从表中可以看出: 在高海拔地区原柴油机功率降幅明显, 最高达到了 21%; 而 TTI 柴油机功率的最大降幅仅为 3%, 体现了其良好的高原适应性。

表 4 大气参数及柴油机功率随海拔变化情况

| 海拔/km | 大气温度/K | 大气压力/MPa | 原柴油机功率/kW | TTI 柴油机功率/kW |
|-------|--------|----------|-----------|--------------|
| 0     | 288.2  | 0.098    | 540.0     | 526.9        |
| 1     | 281.7  | 0.086    | 537.6     | 526.2        |
| 2     | 275.1  | 0.077    | 531.0     | 524.6        |
| 3     | 268.7  | 0.067    | 518.0     | 521.3        |
| 4     | 262.2  | 0.060    | 487.8     | 518.2        |
| 5     | 255.7  | 0.052    | 429.2     | 513.1        |

3.2 进气参数随海拔变化规律

图 5 所示为 TTI 柴油机进气 (A 点) 温度随海拔的变化规律。由图可得: 虽然大气温度随海拔升高降幅明显, 但进气温度却变化不大, 在 5 km 时进气温度为 384.51 K, 相对平原时下降了 3% 左右。这主要是两级涡轮增压系统的补偿作用所致。

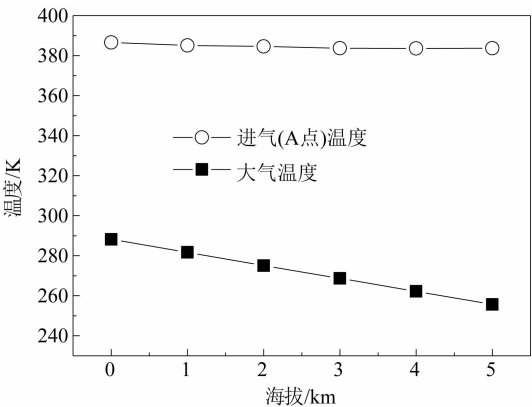


图 5 进气温度随海拔变化示意图

图 6 所示为 TTI 柴油机进气 (A 点) 压力随海拔的变化规律。由图可得: 随海拔升高大气压力和进气压力均有所下降, 且后者的降幅更大。其中海拔为 5 km 时的进气压力为 0.347 MPa, 相对平原下降了约 30%。说明两级涡轮增压装置对大气的增压效果不如对大气的升温效果。

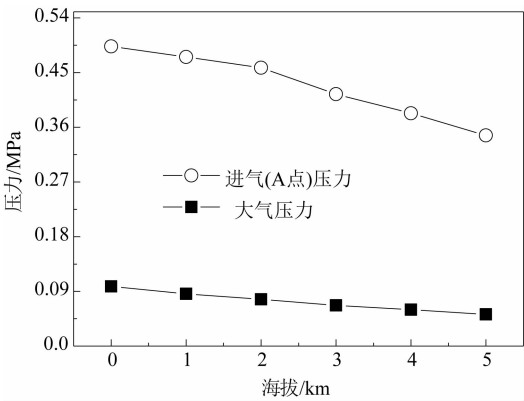


图 6 进气压力随海拔变化示意图

表 5 所示为进气密度和质量流量随海拔高度的变化规律。由表可知: 进气密度和质量流量随海拔升高呈下降趋势, 其中海拔为 5 km 时进气密度为  $3.1 (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ 、质量流量为  $605.7 (\text{g} \cdot \text{s}^{-1})$ , 相对平原分别下降 28% 和 30%, 与进气压力的变化规律大致相同。

表 5 进、排气参数随海拔变化情况

| 海拔/km | 进气质量流量/<br>( $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 进气密度/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 排气密度/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) |
|-------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 0     | 865.7                                         | 4.3                                          | 2.2                                          |
| 1     | 832.3                                         | 4.1                                          | 2.1                                          |
| 2     | 802.4                                         | 4.0                                          | 2.0                                          |
| 3     | 726.6                                         | 3.7                                          | 1.8                                          |
| 4     | 672.8                                         | 3.4                                          | 1.7                                          |
| 5     | 605.7                                         | 3.1                                          | 1.5                                          |

3.3 排气参数随海拔变化规律

表 5 也显示了排气密度随海拔的变化规律。由表可知: 排气密度随海拔升高也呈下降趋势, 在海拔为 5 km 时, 排气密度为  $1.4913 (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ , 相对于平原时下降了 34%。之所以降幅变大, 主要是由于进气密度逐渐变小, 排气温度逐渐变高导致排气密度进一步降低, 两方面原因叠加造成。

图 7 所示为 TTI 柴油机排气 (B 点) 压力和温度随海拔的变化规律。由图可知: 排气的温度和压力随海拔的变化规律正好相反。其中排气温度随海拔升高呈上升趋势, 海拔为 5 km 时的排气温度为 1 045 K, 相对于平原时升高了约 18%。这是由于随海拔升高进气温度降低不明显, 且空气逐渐稀薄, 缸内空气越来越少导致燃烧不良, 热效率降低, 尾气带走的热量越来越多造成的。而排气压力随海拔升高逐渐降低, 海拔为 5 km 时排气压力为 0.446 MPa, 相对于平原时降低了 23%, 相对进气压力降幅变小, 这是由于进气压力逐渐降低, 排气

温度逐渐升高两方面原因叠加造成的。

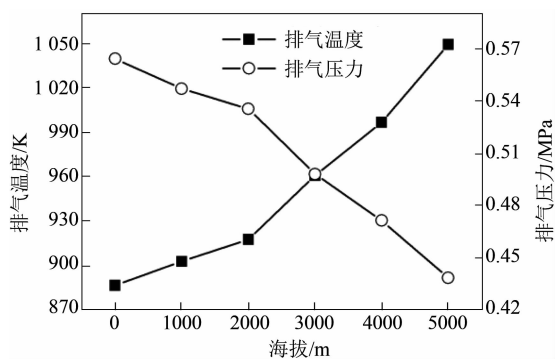


图7 排气参数随海拔变化示意图

### 3.4 压气机的进、出口压力随海拔变化规律

图8所示为两个压气机进、出口压力随海拔的变化规律。由图可知：大气压力与一级增压器的进口压力差别很小，一级压气机的出口压力与二级压气机的进口压力差别也很小，说明在中冷器冷却和管路阻力的共同作用下，进气压力变化很小。从图中还可以发现：随着海拔的升高，一级压气机的压缩能力逐渐降低，海拔为5 km时，压力升高0.12 MPa，相对平原条件压升下降37%。二级压气机的压缩能力较一级压气机有所提高，但随着海拔的升高仍然呈现下降的趋势，海拔为5 km时的压力升高为0.18 MPa，相对平原条件压升下降约16%。

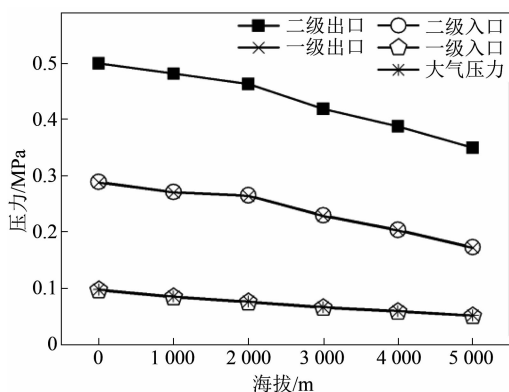


图8 压气机进、出口压力随海拔变化示意图

### 3.5 中冷器进、出口温度随海拔变化规律

图9所示为一级中冷器的进、出口温度随海拔变化示意图。由图可知：一级中冷器的冷却散热能力随海拔变化不大，这是由于中冷器的散热量相对较小，且冷却液的热物性参数随海拔变化波动较小。此外，从图中还可以发现：海拔在2 km以内时，进气温度随海拔升高略有上升，海拔超过2 km后进气温度随海拔升高逐渐降低。说明海拔2 km以内一级压气机压缩的升温效果大于海拔升高的降温效果，海拔高于2 km后反之。

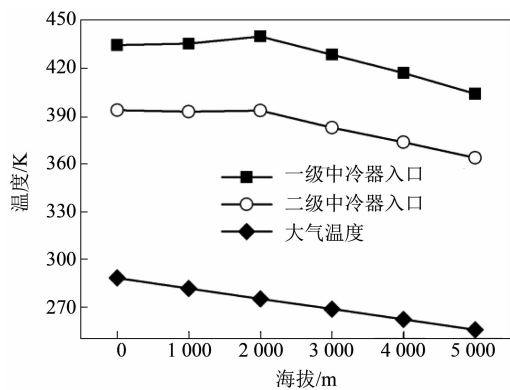


图9 一级中冷器进、出口温度随海拔变化示意图

如图10所示为二级中冷器的进、出口温度随海拔变化示意图。由图可知：二级中冷器的冷却能力随海拔变化也不大，但无论在什么海拔条件下，二级中冷器的冷却能力都较一级中冷器的更强。结合图9、10可知：一级压气机的升温效果大于一级中冷器的降温效果，但二级中冷器的冷却效果与二级压气机的升温效果相当。

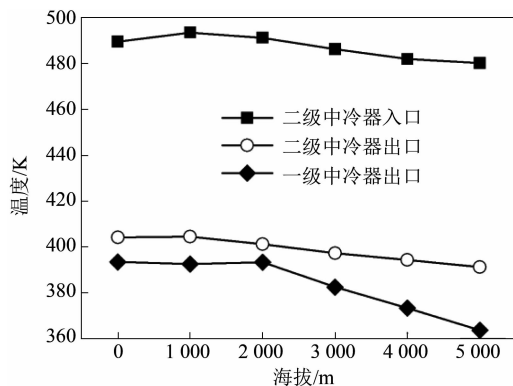


图10 二级中冷器进、出口温度随海拔变化示意图

## 4 结 论

本文利用GT-Power软件建立了某TTI柴油机的工作过程模型，通过与已知试验数据对比，验证了所建模型的准确性。利用该模型计算分析了六种海拔条件下的柴油机工作状态，得到如下结论：

(1) 随着海拔的升高，空气密度逐渐降低，但是由于二级涡轮增压系统的补偿作用，柴油机功率随海拔升高降低较少，说明TTI柴油机具有良好的高原适应性。

(2) 进气压力随海拔升高降幅明显，但由于两级压气机的增压作用，使得海拔为5 km时，进气压力仍能达到0.347 MPa，从而保证了相对充足的进气；进气温度随海拔升高降幅较小。

(3) 排气压力随海拔升高逐渐降低，但排气温度随海拔升高逐渐升高，这是因为进气温度随海

拔升高波动较小, 且缸内热效率降低, 废气带走的热量增加, 导致废气温度逐渐升高。

(4) 随海拔升高, 二级压气机的压缩能力均有所降低, 相对而言, 二级压气机的压缩能力受海拔影响较小。

(5) 由于冷却散热量较低且冷却液冷却能力较强, 二级中冷器的冷却能力受海拔条件影响较小, 且二级中冷几乎抵消了二级增压对进气的升温作用。

#### 参考文献

- [1] 王军. WD615 系列高原柴油机的开发 [D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [2] 李鲁宁, 孙万臣, 李文祥, 等. 车用重型柴油机二级增压系统模拟及试验研究 [J]. 车用发动机, 2013

(1): 56-60.

- [3] 刘系磊, 魏名山, 马朝臣. 不同海拔下单级和二级增压柴油机的仿真 [J]. 内燃机学报, 2010, 28 (5): 447-452.
- [4] 王艳华, 李云清, 陈小龙, 等. 轻型航空发动机二级涡轮增压匹配模拟 [J]. 航空动力学报, 2011, 26 (5): 1009-1103.
- [5] 刘瑞林, 周广猛, 董素荣, 等. 高压共轨柴油机高海拔性能仿真研究 [J]. 车用发动机, 2012 (3): 87-91.
- [6] 陈渝光, 吕红梅, 钱微, 等. 变海拔环境下的车用柴油机进气压力控制仿真研究 [J]. 车用发动机, 2010 (6): 63-66.
- [7] 王普凯. 车用大功率内燃机热状态建模与计算研究 [D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2009.

(上接第 15 页)

## 4 结 论

采用三维流动燃烧程序对 GP210 稀燃天然气发动机缸内燃烧进行了模拟计算, 计算结果与试验结果偏差在 5% 以内, 模拟计算结果真实、可靠。对模拟结果进行分析, 找出了该机型可进一步优化的空间, 为后续该机型的性能提高奠定了基础。

#### 参考文献

- [1] 魏象仪. 内燃机燃烧学 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1992.
- [2] 陈卓如, 金朝铭, 王洪杰, 等. 工程流体力学 [M]. 2 版, 北京: 高等教育出版社, 1992.
- [3] FRENKLACH M W H, RABINOWITZ M J. Optimization and analysis of large chemical kinetic mechanisms using the solution mapping method-combustion of methane [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1992. 18.
- [4] PETERS N, MAAS U, DIBBLE R W. The turbulent burning velocity for large and small scale turbulence [J].

Journal of Fluid Mechanics, 1999, 384 (01): 107-132.

- [5] Turns S R. An Introduction to combustion: Concept and Application [M]. McGraw-Hill, 2000.
- [6] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [7] 姚勇. 天然气发动机和汽油发动机的燃烧分析 [C]. 中国工程热物理学会年会, 2005.
- [8] 祝遵祥. 燃烧室形状对天然气发动机性能的影响 [D]. 吉林大学, 2008.
- [9] 徐旭常, 周力行. 燃烧技术手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [10] 司鹏, 张惠明, 杨志勇, 等. 燃烧室结构对稀燃天然气发动机性能的影响 [J]. 农业机械学报, 2009.
- [11] 王建昕, 帅石金. 汽车发动机原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [12] 杨书乔, 平涛, 李翔. 燃气喷嘴结构对天然气发动机混合气均匀性的影响研究 [J]. 柴油机, 2015, 37 (1): 13-16.