

文章编号:1000-8055(2011)05-1099-05

轻型航空发动机二级涡轮增压匹配模拟

王艳华, 李云清, 陈小龙, 李 波

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为了使现有轻型航空发动机在海拔高度为 10 km 的高空保持原有动力性不变, 需要采用二级涡轮增压, 保持发动机在不同海拔高度时稳压腔内的进气密度与海平面的一致. 对原发动机在一级涡轮增压的基础上进行二级涡轮增压匹配. 这里采用 AVL-Boost 软件建模, 根据实验校验一级涡轮增压模型, 然后建立二级涡轮增压模型. 考虑小型离心式压气机高海拔工作特性受雷诺数影响, 确定了压气机匹配工作点. 计算表明, 匹配方案可行, 原发动机满足飞行设计要求.

关 键 词: 轻型航空发动机; 二级涡轮增压匹配; 雷诺数; 工作点; 增压匹配模拟; 发动机性能

中图分类号: V234.1

文献标志码: A

Two-stage turbocharging matching of light aero-engine at high altitude

WANG Yan-hua, LI Yun-qing, CHEN Xiao-long, LI Bo

(School of Transportation Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to operate the light aero-engine without power loss at altitude 10 km, two-stage turbocharging was required to keep the intake air density at in plenum different altitudes the same as that at sea level. AVL-Boost model was built to simulate the working process of single-stage turbocharging engine and the model was verified through relevant experiments. Based on the primary model, the two-stage turbocharging model was built. Considering the effect of Reynolds number on small size centrifugal compressor at high altitude working condition, the matching operating points of each stage compressor were found. The simulation calculation result shows that the matching scheme is suitable for the engine and could achieve design requirements.

Key words: light aero-engine; two-stage turbocharging matching; Reynolds number; operating points; turbocharging matching simulation; engine performance

大气状况对涡轮增压发动机的运转性能有着较大影响. 大气条件的改变将使发动机的进气量、燃烧、排气温度、输出功率、比油耗和涡轮增压器的特性等均发生变化. 无人机飞行高度日益提高, 其动力轻型活塞式汽油发动机的研制也正向提高高空性能方向发展. 这里通过利用 AVL-Boost (AVL 公司的发动机设计优化分析软件) 对无人

机汽油发动机进行二级涡轮增压匹配, 考虑不同海拔高度对压气机工作特性变化的影响, 使此汽油发动机在 0 ~ 10 km 不同海拔高度都具有地面航行时的动力性^[1-4]. 关于活塞式发动机二级涡轮增压系统的研究, BMW (Bayerische Motoren Werke) 公司在世界轿车柴油机领域内首次采用了二级废气涡轮增压^[5]. 在国内二级涡轮增压系

收稿日期: 2010-11-09; 修订日期: 2011-01-14

作者简介: 王艳华(1978—), 女, 山西太原人, 博士生, 主要从事发动机结构设计, 缸内喷雾、燃烧分析研究.

统研究相对较少. 魏名山等人对带外置式蝶阀的二级涡轮增压系统和带内置式旁通阀的二级涡轮增压系统进行了结构和性能的比较研究^[6], 并且在柴油机上应用二级涡轮增压提高升功率^[7]. 徐斌等人对轻型航空发动机进行了增压建模和二级涡轮增压方案的模拟^[8-9]. 这里主要考虑了压气机特性随海拔高度的变化, 进行轻型航空发动机的二级涡轮增压匹配研究, 为原发动机满足设计要求提供了参考依据.

1 二级涡轮增压模型的建立

1.1 原发动机参数和模型

原轻型航空发动机在地面时的主要参数如表1所示.

表1 原发动机主要技术参数

Table 1 Technical parameters of gasoline engine

参数	数值
缸数	4
缸径/mm×行程/mm	79.5×61
排量/L	1.2
压缩比	9
额定功率/kW(标定转速/(r/min))	73(5500)
最大扭矩/(N·m)(标定转速/(r/min))	144(4900)

利用 AVL-Boost 软件建模, 一级涡轮增压模型如图1所示, 并进行实验验证.

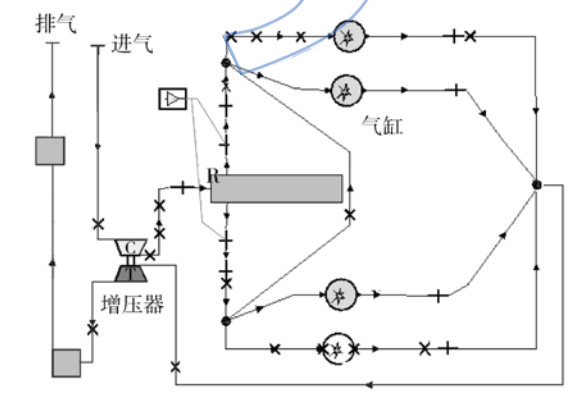


图1 发动机一级涡轮增压模型

Fig. 1 Single-stage turbocharging engine model

发动机一级涡轮增压模拟计算值与实验数据对比(图2和图3), 功率最大误差为2.77%, 燃油消耗率最大误差为3.63%. 建模基本合理, 符合实际需求.

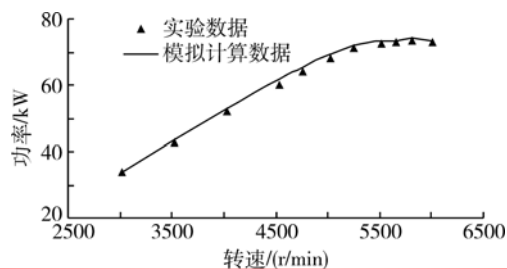


图2 发动机一级涡轮增压模型功率对比

Fig. 2 Power comparison of simulation and experiment

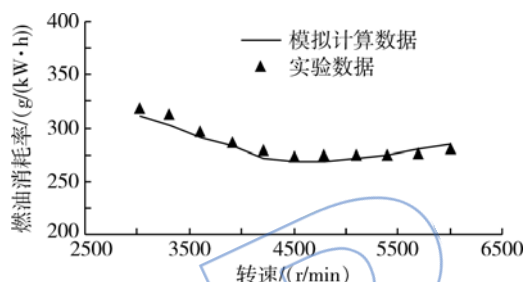


图3 发动机一级涡轮增压模型燃油消耗率对比

Fig. 3 Fuel consumption rate comparison of simulation and experiment

1.2 二级涡轮增压模型的建立

原发动机压比为2.43. 单级增压后发动机运行海拔高度为4.8 km, 之后发动机进气管内的压力和质量流量随海拔高度增加而下降, 单级增压不能为发动机提供充足的进气充量^[8], 需采用二级涡轮增压系统以提高发动机的高空动力性能.

在原发动机一级涡轮增压模型基础上加装二级涡轮增压器, 为防止增压后进气温度过高, 采用中冷技术, 中冷器出口温度为300 K. 在模拟计算过程中, 涡轮增压器带有内部放气阀, 调节进气量, 防止超速, 达到预期压比. 二级涡轮增压模型如图4(图中TC2表示一级, TC1表示零级).

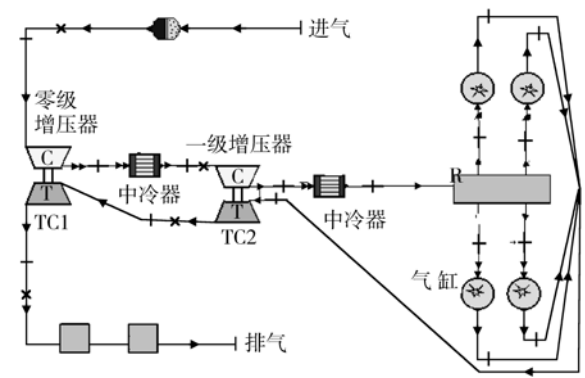


图4 发动机二级涡轮增压模型图

Fig. 4 Two-stage turbocharging engine model

2 二级涡轮增压匹配

要求发动机在给定海拔高度发出标定功率,则需要保持发动机的空气质量流量为常数. 原发动机目标功率为 73 kW, 经计算理论所需空气质量流量约为 0.078 kg/s. 考虑能量传递损失, 预使飞行海拔高度达 10 km, 则压比需要达到 5.5^[10]. 在进行涡轮增压匹配过程中, 存在两个难点: 第一是选择合适的涡轮增压器, 使其提供不同海拔高度下不同压比, 直到海拔最高点; 第二是调节涡轮增压器, 使压气机和涡轮机在各自工作的有效区内.

2.1 压比分配

目前最佳压比分配一般采用 5 : 5~6 : 4^[11], 在海拔高度为 10 km 时, 采用一级压比为 2.2, 零级压比为 2.5. 零级涡轮增压器边界条件为环境压力和温度, 通过控制一级压气机内部废气阀开度使其出口压力达到 0.12 MPa 时就不再有压力的升高. 一般匹配要求尽量使发动机的整个工作区处于压气机的高效区.

2.2 海拔高度对涡轮增压器工作特性的影响

这里选用车用的离心式压气机, 叶轮尺寸小, 标准大气条件下的雷诺数 Re 都小于 2×10^5 , 不处于自模区. 随着海拔高度的不断增加, 雷诺数不断减小, 气体黏性阻力的影响增大, 涡轮增压器的特性都是雷诺数的函数^[12-14].

对备选涡轮增压器进行等转速线上的特性参数转换.

压气机效率 η 和雷诺数 Re 的关系^[11]为

$$\eta = 1 - \left[a + (1 - a) \left(\frac{Re_0}{Re} \right)^\gamma \right] \times (1 - \eta_0) \quad (1)$$

涡轮增压器的质量流量 $\dot{m}$ 为

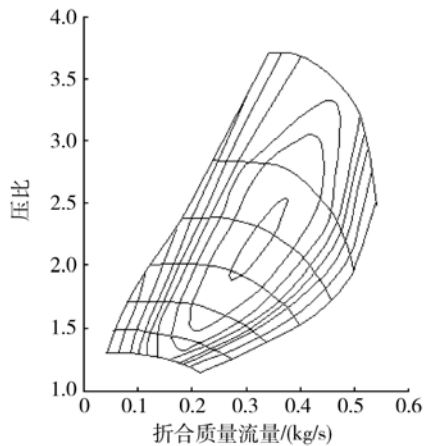
$$\dot{m} = \dot{m}_0 \frac{\phi}{\phi_0} \frac{p_1}{p_0} \frac{T_1}{T_0} \quad (2)$$

压气机压比 π 为

$$\pi = \left[1 + \frac{\mu}{\mu_0} \frac{\dot{m}_0}{\dot{m}} \frac{p_1}{p_0} \left(\frac{T_0}{T_1} \right)^2 \frac{\eta}{\eta_0} \left(\pi_0^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) \right]^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (3)$$

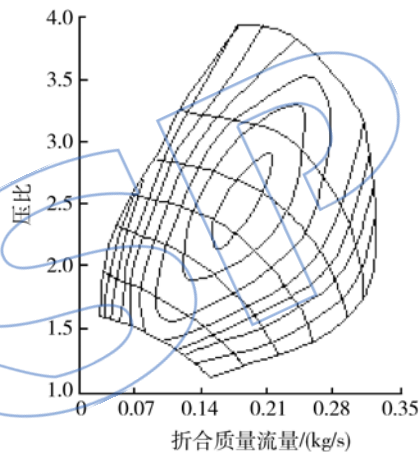
其中 a, γ 为常数, 随具体的压气机和具体的公称变化; κ 为等熵指数, ϕ 为流量系数, μ 为功率系数, p 和 T 表示压力和温度, 下标 1 表示经压缩后气体状态, 下标 0 表示环境气体状态.

对零级压气机特性图在海拔高度近 6 km 时进行特性转换如图 5 所示. 可以看出, 随着海拔高



(a) 地面压气机特性图

(环境压力为 1.013 MPa, 温度为 273.15 K)



(b) 海拔高度近 6 km 压气机特性图

(环境压力为 0.0512 MPa, 温度为 242.7 K)

图 5 不同海拔高度压气机特性对比

Fig. 5 Comparison of compressor characteristics at different altitudes

度的增加, 压气机特性线整个流量范围变窄, 而且向小流量方向偏移. 一级压气机入口气体条件为经零级压气机压缩中冷后气体压力和温度. 根据发动机目标功率为 73 kW (5500 r/min), 进气质量流量保持不变约为 0.078 kg/s 以及压气机高空特性确定零级和一级压气机工作点, 如图 6 (一级)、图 7 (零级) 所示.

2.3 利用 Boost 进行匹配计算

把所选涡轮增压器的特性输入 Boost, 进行压比计算. 确定压气机工作点如图 6 (一级)、图 7 (零级) 所示. 通过调节废气控制阀, 在到达海拔高度 4.5 km 之前以一级涡轮增压器工作为主.

利用 Boost 计算不同海拔高度时发动机在 5500 r/min 满负荷工况下的性能, 发动机能保持

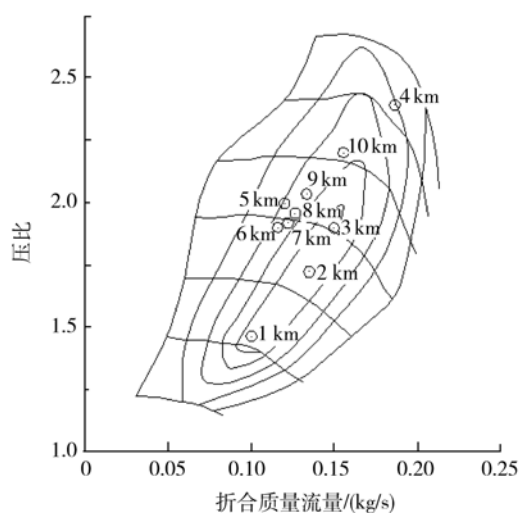


图6 不同海拔高度压气机工作点图(一级压气机)
Fig. 6 Operating points of two-stage turbocharging engine at different altitudes (first stage)

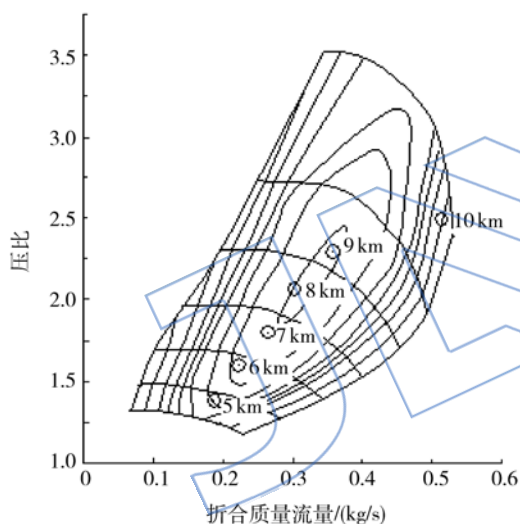


图7 不同海拔高度压气机工作点图(零级压气机)
Fig. 7 Operating points of two-stage turbocharging engine at different altitudes (zero stage)

海平面时的功率 73 kW 左右(如图 8),满足初始设计要求.不同工况下,发动机进气压力保持在 0.12 MPa 左右(如图 9).

设计过程中为使发动机的动力性能达到正常值,应合理控制废气阀开度.这里通过控制零级涡轮机进气流量来控制其工作.随海拔高度的增加,逐步减小废气阀开度(如图 10),使更多的废气流入涡轮做功.此外,一级涡轮增压器在增压后,设定压力达到 0.12 MPa 后,废气阀自动放气,防止转速过高.

汽油发动机燃烧温度高,采用废气涡轮增压

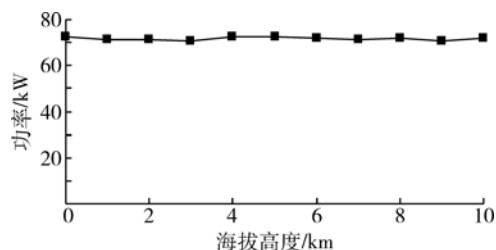


图8 发动机功率随海拔高度的变化

Fig. 8 Variation of engine power at different altitudes

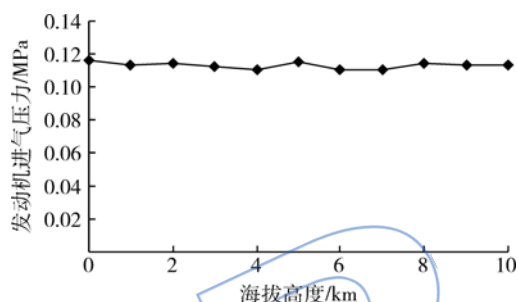


图9 发动机进气压力随海拔高度的变化

Fig. 9 Variation of intake pressure of engine at different altitudes

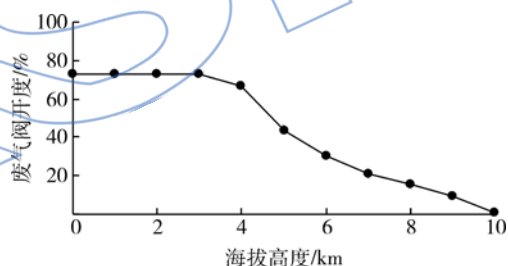


图10 废气阀开度随海拔高度的变化(零级涡轮侧)

Fig. 10 Variation of opening of waste gate at different altitudes (zero stage)

时,需考虑涡轮热负荷.一级涡轮进气温度较高.经计算,一级涡轮前的进气温度在海拔高度增加时变化不大.最高温度为 1051.6 K,未超出涡轮的工作温度范围.零级涡轮前进气温度随海拔高度的增加略有下降,最高温度为 1001.1 K.二级涡轮增压器的排气温度基本满足涡轮工作的要求^[9].

3 结 论

在对原发动机一级涡轮增压模型进行标定的基础上,建立了原发动机的二级涡轮增压 Boost 计算模型.考虑了海拔高度对压气机工作特性的影响,首先对压气机的工作特性进行了转换,再利用二级涡轮增压模型进行二级涡轮增压匹配计

算,从而确定了二级涡轮增压器类型和不同海拔高度压气机的工作点。

最后对发动机的工作特性进行了对应压比下的模拟计算,符合设计要求。为活塞式发动机在高海拔工况下二级涡轮增压提供了可参考的匹配方法。

参考文献:

- [1] Chasse A, Moulin P, Gautier P, et al. Double stage turbo-charger control strategies development[R]. SAE Paper 2008-01-0988, 2008.
- [2] Alexandros P, Richard S. Modeling and control of diesel engines equipped with a two-stage turbo-system[R]. SAE Paper 2008-01-1018, 2008.
- [3] Niklas W, Hans-Eric A. Simulations and measurements of a two-stage turbocharged heavy-duty diesel engine including EGR in transient operation[R]. SAE Paper 2008-01-0539, 2008.
- [4] 朱大鑫. 涡轮增压与涡轮增压器[M]. 北京:机械工业出版社, 1992:229-230.
- ZHU Daxin. Turbocharging and turbocharger[M]. Beijing: China Machine Press, 1992:229-230. (in Chinese)
- [5] Steinparzer F, Stfitz W, Kratochwill H. 新型二级增压 BMW 6 缸共轨直喷式柴油机[J]. 国外内燃机, 2006(1): 1-6.
- Steinparzer F, Stfitz W, Kratochwill H. A new two-stage turbocharging diesel engine BMW 6 with high pressure common rail direct injection system[J]. Foreign Internal Combustion Engine, 2006(1): 1-6. (in Chinese)
- [6] 魏名山, 张志, 何永玲, 等. 带不同类型调节阀的二级增压系统结构与性能对比[J]. 内燃机工程, 2009, 30(1): 51-55.
- WEI Mingshan, ZHANG Zhi, HE Yongling, et al. Configuration and performance comparisons between regulated two-stage turbocharging systems with different valves[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2009, 30(1): 51-55. (in Chinese)
- [7] 魏名山, 季凯, 马朝臣. 车用柴油机的二级增压[J]. 汽车技术, 2005(1): 25-28.
- WEI Mingshan, JI Kai, MA Chaochen. Two-phase supercharging of automotive diesel engines[J]. Automobile Technology, 2005(1): 25-28. (in Chinese)
- [8] 徐斌, 于鲸跃, 魏玲. 高空汽油机二级涡轮增压研究[J]. 车辆与动力技术, 2009, 114(2): 41-44.
- XU Bin, YU Jingyue, WEI Ling. Research of two-stage turbo-charging system of aero-engine at high altitude[J]. Vehicle & Power Technology, 2009, 114(2): 41-44. (in Chinese)
- [9] 徐斌, 魏玲, 赵鹏. 活塞式航空发动机二级涡轮增压系统匹配分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(5): 551-554.
- XU Bin, WEI Ling, ZHAO Peng. Match analysis on two-stage turbocharging system of piston aero-engine[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(5): 551-554. (in Chinese)
- [10] Loth J L, Morris G J, Metlapalli P B. Staged turbocharging for high altitude IC engines[R]. AIAA-1997-3294, 1997.
- [11] 周全正. 两级增压系统中压比和废气能量合理分配的计算方法[J]. 洛阳工学院学报, 1990, 11(3): 23-30.
- ZHOU Quanzheng. Calculation of reasonable distribution of total pressure ratio and exhaust energy in two-stage turbocharging system[J]. Journal of Luoyang Polytechnic Institute, 1990, 11(3): 23-30. (in Chinese)
- [12] 蒋德明. 内燃机的涡轮增压[M]. 北京:机械工业出版社, 1986:311-315.
- JIANG Deming. Turbocharging of internal combustion engine[M]. Beijing: China Machine Press, 1986:311-315. (in Chinese)
- [13] 丰镇平, 沈祖达, 赵剑兵. 高原车用增压器离心式压气机特性的修正转换及其探讨[J]. 内燃机学报, 1992, 10(2): 129-134.
- FENG Zhenping, SHEN Zuda, ZHAO Jianbing. Performance of correction-transformation and analysis of plateau vehicle turbocharger centrifugal compressors[J]. Transactions of CSICE, 1992, 10(2): 129-134. (in Chinese)
- [14] 刘刚, 刘瑞林, 张恒, 等. SOFIM 8142.43 柴油机增压器高原匹配模拟试验研究[J]. 军事交通学院学报, 2010, 12(1): 47-50.
- LIU Gang, LIU Ruilin, ZHANG Heng, et al. Experimental study on turbocharger matching with SOFIM 8142.43 diesel engine simulating high altitudes[J]. Journal of Academy of Military Transportation, 2010, 12(1): 47-50. (in Chinese)