

车用柴油机涡轮增压匹配系统软件开发

邓大伟¹, 石磊¹, 邓康耀¹, 刑卫东², 朱向国²

(1. 上海交通大学动力机械及工程教育部重点实验室, 上海 200240; 2. 中国北方发动机研究所, 山西大同 037036)

摘要: 根据涡轮增压柴油机的平均参数模型, 建立了车用柴油机增压选型与匹配系统, 可以完成对增压方案的选取、增压参数的计算以及增压器型号的选取等工作; 以 Visual C++ 为开发平台, 进行了系统软件的开发; 以 D6114 柴油机为例进行了匹配计算, 并与相应的试验结果进行对比, 两者吻合良好, 进一步验证计算模型、程序的正确性。

关键词: 涡轮增压柴油机; 增压系统; 匹配

中图分类号: TK423.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2010)03-0016-04

Software Development of the Matching System for Vehicle Diesel Engine and Its Turbocharger

Deng Dawei¹, Shi Lei¹, Deng Kangyao¹, Xing Weidong², Zhu Xiangguo²

(1. Key Laboratory of Power Machinery and Engineering, Ministry of Education,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;
2. China North Engine Research Institute; Shanxi Datong 037036)

Abstract: A selecting and matching system for turbocharged diesel engine was developed using the mean value model of turbocharged diesel engines. The system can accomplish the work of selecting turbocharging solution, calculating relevant parameters and selecting the type of turbocharger. The software of this system was developed based on Visual C++ program language. Matching calculation was carried out on D6114 diesel engine and the calculating results matches well with the experiment results, which verified the accuracy of the calculating model and program.

Keywords: turbocharged diesel engine; turbocharging system; matching

1 引言

随着世界各国对汽车经济性、动力性和排放法规要求的日益严格, 车用柴油机先进的涡轮增压技术越来越得到重视和应用。可变喷嘴环涡轮增压在奔驰、宝马、法拉利、萨博等高档汽车发动机上得到广泛应用; Peugeot 407 和 607 四缸 2.2L 发动机上都使用了相继增压系统; 博格华纳开发的可调两级增压系统在 BMW 535 3.0L 柴油机、Opel 1.9L 等轿车发动机上得到应用^[1]。

车用涡轮增压柴油机要获得良好的性能, 必须解决好柴油机与涡轮增压系统匹配的问题。选择合适的增压系统型式, 选配合理的增压器型号, 可以使所匹配的柴油机在经济型、动力性、排放性、高原工作能力等性能方面得以有较大幅度的提高。本文在对涡轮增压器与柴油机匹配关系进行深入研究的基础上, 建立增压柴油机平均参数计算模型, 并将整个选配系统分为增压系统型式的选取、增压参数匹配计算和增压器选型等几个模块, 在 Visual C++ 环境下编制了整个匹配计算程序。

收稿日期: 2009-09-03; 修回日期: 2010-01-05

基金项目: 国家科技重点实验室基金项目(9140C3307080802)。

作者简介: 邓大伟(1986-), 男, 硕士, 主要研究方向为内燃机性能与增压技术, Email: shddw1986@163.com。

2. 计算模型和软件开发

2.1 增压柴油机平均参数模型

发动机平均参数模型是以循环平均参数之间的数学关系为基础建立的模型, 它不考虑每一循环中各个参数的波动情况, 而是直接以循环平均参数为变量^[2]。最基本的增压柴油机的平均参数模型由发动机机体、空滤器、压气机、中冷器、涡轮和消声器等六个部分组成^[3]。

(1) 发动机本体

① 发动机等转速耗气特性线计算

$$\pi_c = \frac{M_{FP} \tau R_g T_s}{n V_s \eta_v \varphi_s \sqrt{T_0}} = \frac{M_{FP}}{n} \cdot \text{const} \quad (1)$$

式中: 参考流量 $M_{FP} = \dot{m}_a \cdot \sqrt{T_0/P_0}$; n 为发动机转速, r/min ; V_s 为发动机排量, L ; $R_g = 287 J/(kg \cdot K)$; T_s 为进气管温度, K ; τ 为冲程系数: 四冲程 $\tau=2$, 二冲程 $\tau=1$; η_v 为充气效率; φ_s 为扫气系数。

由式(1)可知, 当发动机转速不变时, 增压比与流量近似成正比。

② 发动机运行线的计算

空气流量为:

$$\dot{m}_a = b_e N_e L_0 \phi_a / 3\ 600 \text{ kg/s}; \quad (2)$$

式中: b_e 为有效燃油消耗, $kg/(kWh)$; N_e 为有效功率, kW ; ϕ_a 为过量空气系数; L_0 为燃油化学计量空燃比。

比油耗、充气效率、过量空气系数等随发动机转速有一定关系, 若用户没有给定这些参数, 则系统可通过经验公式进行自动拟合计算。

③ 发动机排气温度的计算

采用热力学第一定律建立发动机热力学计算模型^[4], 估算涡轮前平均废气温度:

$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \dot{m}_{out} h_{out} - \dot{m}_{in} h_{in}$$

式中: $\dot{Q}$ 为总传热量; $\dot{W}_s$ 为发动机指示功; $\dot{m}_{in}$ 、

$\dot{m}_{out}$ 分别为发动机流进、流出工作介质质量; h_{in} 、 h_{out} 分别为发动机流进、流出工作介质的比焓, 整理简化成下式

$$T_{03} = T_{02} + k T_f + K / (1 + \alpha) \quad (3)$$

式中: $k = c_{pf} / (c_{pa} \alpha)$, $K = Q_f \eta_{ex} / c_{pex}$, c_{pf} 、 c_{pa} 、 c_{pex} 分别为燃油、新鲜空气、废气的定压比热; α 为空燃比; $\dot{m}_f Q_f$ 为燃油总热值; T_f 为喷入燃油温度; T_{02} 为发动机进气温度; T_{03} 为平均废气温度; 名义废气可用能量率 $\eta_{ex} = 1 - \eta_{th} - \eta_{loss}$ 表示; η_{th} 为发动机热效率; 热损失 η_{loss} 由发动机试验数据计算拟合得来。

(2) 压气机、涡轮和中冷器采用常规的热力学计算模型^{[1]、[5]}。

2.2 系统软件开发

基于 Visual C++ MFC 的单文档进行了系统软件开发, 主要包括用户登录系统、交互界面层以及数据库系统, 数据库系统存储涡轮增压器图谱数据, 可以实现动态添加图谱。软件中主要实现了如下功能:

(1) 发动机总体参数输入和增压系统型式选择

首先输入发动机的基本几何和性能参数, 初步计算出功率密度、扭矩密度、最大增压比等参数。

由于不同用途的发动机所侧重的性能指标有所不同, 因此有必要按照发动机用途和类型分类研究, 使得增压方式与发动机的型式和用途相适应, 增压系统型式初选原则如下: ① 首先根据发动机用途和功率密度、扭矩密度等性能参数选出可用的增压系统型式; ② 再由总体参数估算压比和流量范围, 依次按单级增压、废气放气增压、可变喷嘴环涡轮增压、顺序增压和两级增压考虑; ③ 若压比大于 4, 则选用两级增压, 否则选用单级增压; 若使用带放气阀增压, 废气放气量大于 20%, 则换用可变喷嘴环涡轮增压; 若流量超出可变喷嘴环涡轮增压限制范围, 则换用顺序增压。如图 1 所示。

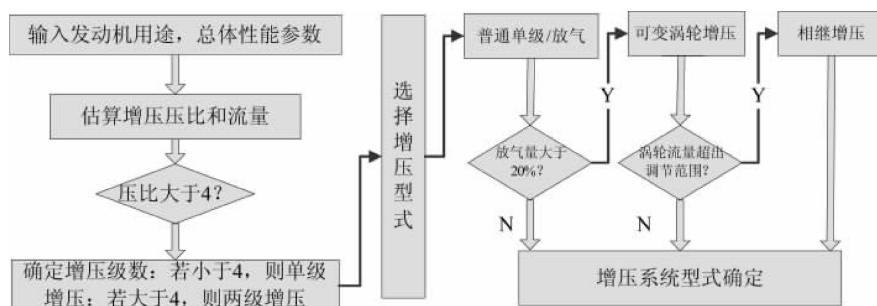


图 1 增压系统型式初选流程图

(2) 不同增压系统型式下的增压匹配计算

根据单级普通增压、废气放气增压、可变喷嘴

环涡轮增压等不同增压型式，对涡轮增压器的匹配计算分别进行研究，并编制了相应的程序，可以完

成增压参数的详细计算。图 2 所示为废气放气增压计算的流程。

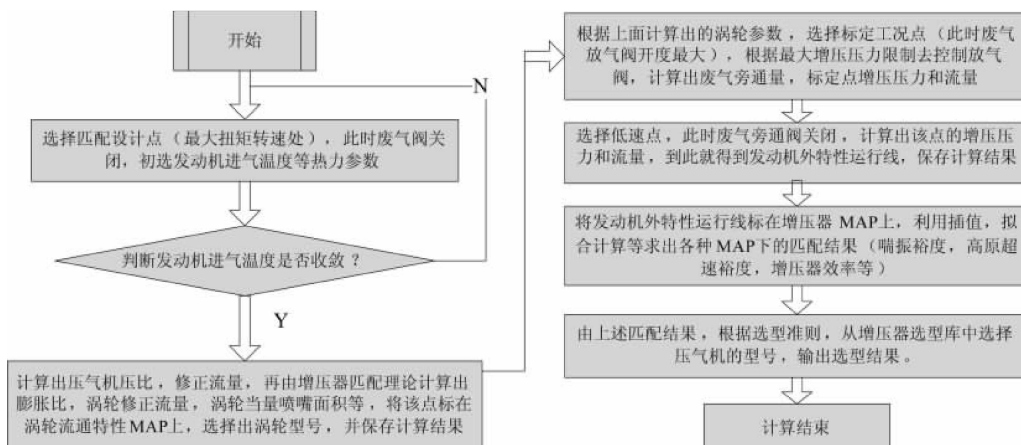


图2 废气放气增压计算流程

(3) 涡轮增压器图谱的数值表示

增压发动机配合计算中，需要在压气机特性线图上确定配合运行点。为使程序能自动寻找配合运行点，要求将试验得到的压气机特性曲线用数值表示，并输入计算机中存储。本文按照等转速线、等效率线、喘振线的格式读取增压器 MAP 数据。由于涡轮增压器特性曲线中，转速和效率均是增压器转速和流量的二元非线性函数，故使用网格法^[6]离散压气机图谱，通过拉格朗日二元三乘三点插值求出对应的增压器转速值和效率值，存储在计算机中，并在设备环境中绘制出增压器 MAP。

(4) 发动机与涡轮增压器匹配特性的计算

根据上面建立的增压柴油机模型，计算出发动机最大扭矩工况和标定工况以及其他重要工况的增压压比、修正的压气机流量，标注在压气机图谱上，绘制出发动机与压气机的联合工作运行线；同时将涡轮膨胀比和修正的涡轮流量标注在涡轮特性图谱上，完成对涡轮的选取。

(5) 匹配结果的综合评价和涡轮增压器选择

根据联合工作运行线计算出压气机工作效率、喘振裕度和高原超速裕度。

喘振裕度：

$$\phi_{\text{surge}} = \left[(m_i - m_0) / m \right]_{\min} \cdot 100\% \quad (4)$$

高原超速裕度：

$$\phi_{\text{speed}} = \left[(N_{\text{limit}} - N_i) / N_{\text{limit}} \right]_{\min} \cdot 100\% \quad (5)$$

式中： m_i 为发动机运行点的增压器流量； m_0 为对应的增压器图谱上喘振流量； N_{limit} 为涡轮最高允许转速； N_i 为增压器实际转速。

然后对涡轮增压器与发动机的匹配效果进行综合分析，并根据相应的匹配准则确定出增压器型号。

发动机与增压器的匹配准则为：①满足发动机的功率和经济性指标；②保证主要工况运行在高效率区域：对于商用车则要求最大扭矩点在压气机的最高效率区间，对于乘用车要照顾最大扭矩点和额定功率点的效率，一般选择最大扭矩点和额定功率点的中间转速在压气机的最高效率区间；③喘振裕度和高原超速裕度都在 15% 以上；④压气机无堵塞，压缩比和膨胀比不超限，涡轮排气温度不超限。

根据上述增压柴油机的计算模型和涡轮增压系统匹配软件的主要功能，设计出软件的主要界面如下图所示图 3~5 所示。



图3 总体参数输入和增压型式初选界面



图4 不同增压型式匹配计算界面

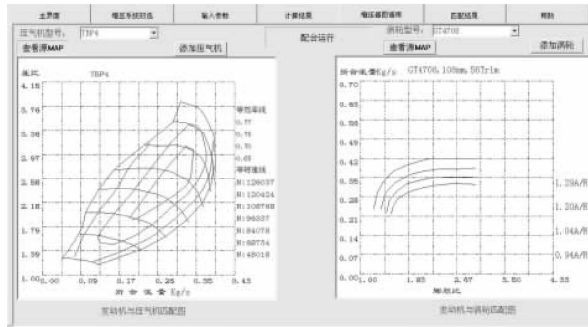


图5 涡轮增压器图谱加载和匹配特性界面

3 D6114 柴油机的增压系统匹配

以 D6114 柴油机为例进行涡轮增压系统选配计算, 首先输入 D6114 柴油机基本参数, 如表 1 所示。

表 1 D6114 柴油机基本参数

缸径×行程×缸数/mm×mm	114×135×6
压缩比	18
标定功率/kW	184(2 200 r/min)
最大扭矩/Nm	950.5(1 400 r/min)
标定工况比油耗/kg/(kW·h)	0.227 1

根据其总体性能参数和用途, 通过增压系统初选程序计算得出推荐的增压系统型式为单级废气放气增压, 通过进一步匹配计算, 选择 TBP4 涡轮增压器, 如图 6、7 所示。该涡轮增压器能够满足基本的匹配要求, 详细计算结果与试验结果见表 2,

其中大气压力: 101.5 kPa; 大气温度: 303 K。

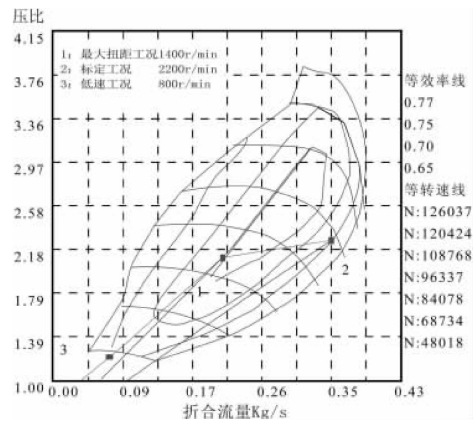


图6 发动机与 TBP4 涡轮配合特性

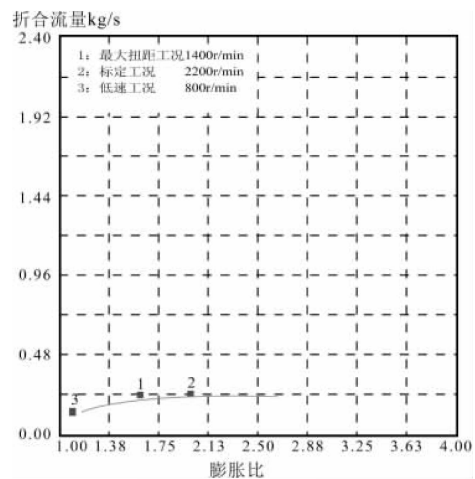


图7 发动机与 TBP4 增压器配合特性

表 2 D6114 原机外特性试验结果与选型计算结果对比(增压器型号: TBP4)

工况点转速/(r/min)	2 200		1 400		800	
	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值
增压压力/kPa	228.6	230.4	202	208.5	121.2	122.7
增压压比	2.252	2.27	1.990	2.052	1.194	1.210
中冷后进气温度/K	323.1	325.6	321.2	318.6	308.7	302.6
压气机流量/(kg/s)	0.346 3	0.346 0	0.199 1	0.203 0	0.068 2	0.069
涡轮前废温/K	886.2	903.2	856.2	878.7	779.2	806.9
压气机效率/%	/	71.3	/	76.8	/	70.5
喘振裕度/%	/	/	/	/	/	>>15
超速裕度/%	/	>>15	/	/	/	/
放气量/%	/	19.3	/	0	/	0

从计算结果可以看出: 最大扭矩工况点落在 TBP4 涡轮流通特性曲线上, 各工况点增压压力和压比的误差都小于 4%; 流量误差小于 2%; 中冷后进气温度误差也在 2% 以内; 涡轮前废气温度误差稍大, 但也在 5% 范围内。这表明该选配计算模型具有较高的精度。

同时, 增压器在发动机高速工况范围内都工作在高效率区, 最大扭矩工况工作在压气机最高效率区; 整个工况范围内运行点远离压气机喘振区域和堵塞线; 标定工况保持远大于 15% 的高原超速裕度, 说明 TBP4 涡轮增压器与 D6114 柴油机配合良好。

(下转第 39 页)

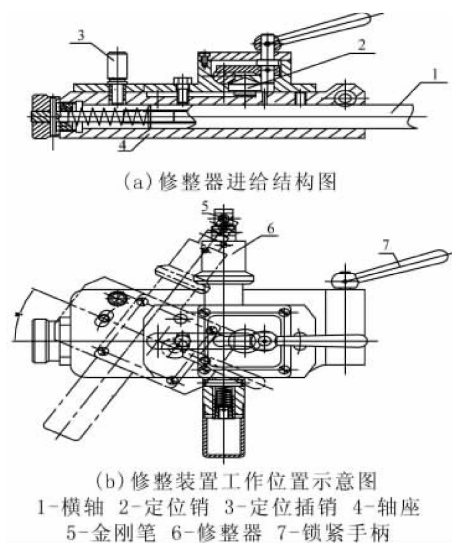


图4 修整装置示意图

6 效果分析

通过采用新的磨削工艺和砂轮成型修整装置, 不仅实现了产品国产化的需求, 满足了产品性能和

可靠性指标, 为最终实现该型号柴油机燃油喷射系统的国产化奠定了基础; 而且摸索出复合柱塞螺旋供油边棱磨削加工的新方法和新工艺, 研制出可以实现多种螺旋结构砂轮成型修整装置, 工艺方法和修整装置操作方便, 效果显著。

参考文献

- [1] 邓东密, 邓杰. 柴油机喷油系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [2] 朱国玺等. 汽车柴油机燃油系[M]. 北京: 人民交通出版社, 1984.
- [3] 陈宏钧. 机械加工工艺手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [4] 蒋德明. 内燃机原理[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1988.
- [5] 龚定安, 蔡建国. 机床夹具设计原理[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1984.
- [6] 王信义, 计志学等. 机械制造工艺学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.

(上接第 19 页)

4 结 论

(1) 采用涡轮增压柴油机的平均参数模型, 开发了车用柴油机涡轮增压系统匹配软件, 能够实现增压系统类型的选择; 增压参数的计算以及增压器型号的选取等工作。

(2) D6114 增压柴油机的匹配计算结果与试验结果吻合良好, 误差较小, 各工况点增压压力和压比的误差都小于 4%, 流量误差小于 2%, 中冷后进气温度误差也在 2% 以内, 进一步验证了系统模型的正确性。

(3) 匹配计算结果表明 D6114 原机所配 TBP4 涡轮增压器满足喘振裕度与超速裕度大于 15% 的指标要求, 发动机主要工况运行在增压器高效率区

域, 配合良好。

参考文献

- [1] Hermann Hiereth. Charging the internal combustion engine [M]. SpringerWienNewYork, 2007.
- [2] 毕小平等. 一个车用柴油机的平均值模型[J]. 汽车工程, 1999(3).
- [3] 陈策, 毕小平等. 涡轮增压柴油机平均参数模型及其仿真[J]. 车用发动机, 2000(5).
- [4] (英) 本森(Benson, R.S.)等. 内燃机[M]. 北京: 中国农业出版社 1982.
- [5] 顾宏中. 涡轮增压柴油机性能研究[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1998.
- [6] 朱仿君. 内燃机工作过程数值计算及其优化[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.