

发动机是传统燃油车的动力源，也是整车热管理系统的热量源，整车热管理设计开发中需要对发动机在不同工况下的能量分布有清楚的了解，特别是需要对冷却系统散热量、排气热量等有准确输入，进而提高整车热管理仿真分析和设计的精确度。

□ 安徽江淮汽车集团股份有限公司 朱增怀

发动机能量分布分析与测试研究

发动机能量分布及测试手段

从能量转化的角度，发动机工作时燃油燃烧释放的热量主要转化为五个部分：有效功率、冷却液带走的热量、排气带走的热量、增压中冷系统损失的热量，以及余项损失，余项损失包括驱动辅助机构的能量及热辐射和传导而散失到周围环境中的热量。各部分能量分布、传递方式和测试手段如图 1 所示。

发动机能量分布计算方法

根据能量的传递方式，各种能量的测量及计算方式如下：

$$Q_F = P_b + Q_c + Q_e + Q_{oilcl} + Q_{intercooler} + Q_u \quad (1)$$

发动机热平衡方程如式（1）所示，式中 Q_F 为燃料燃烧的放热量； P_b 为发动机输出的有效功率； Q_c 为冷却液带走的热量损失； Q_e 为排气的热量损失； Q_{oilcl} 为机油的热量损失； $Q_{intercooler}$ 为增压中冷系统的热量损失； Q_u 为余项热损失，以上单位均为千瓦（kW）。

发动机各放热组成部分，通过以下方法来测量和计算：

1）燃油燃烧的放热量：根据燃料热值和单位时间的燃油消耗量计算。

$$Q_F = \frac{m_f \times C_f}{3600} \quad (2)$$

式中 C_f 为燃料热值，燃油检测获得，单位为 J/kg； m_f 为燃油的质量流量，试验可测得，单位为 kg/h。

2）发动机输出的有效功率：通过测功机输出轴功率测量得出有效功率，单位为 kW。

3）冷却液、机油、增压中冷系统带走的热量：

以上三类热损失使用比热算法获得，即通过测量流经热交换器或零部件冷却液的质量流量和冷却液前、后的温差经公式计算获得。

4）排气带走的热量损失：排气热损失也采用比热法计算。但排气温度过高，很难通过气体流量计直接测得排气体流量。根据质量守恒定律，普遍认为排气的质量流量等于进气质量流量与燃油质量流量之和。

因此，排气热损失计算见式（3）：

$$Q_e = \frac{((m_a + m_f) \times C_{pe} \times T_e) - (m_a \times C_{pa} \times T_{amd})}{3600} \quad (3)$$

式中 m_a 为空气质量流量，试验可测得，单位为 kg/h； m_f 为燃油的质量流量，试验可测得，单位为 kg/h； C_{pe} 为排气定容比热，根据排气成分和排气温度查表获得，单位为 kJ/(kg·℃)； T_e 为排气温度（增压后/催化前），试验可测得，单位为℃； C_{pa} 为进气受热容积，根据进气成分和

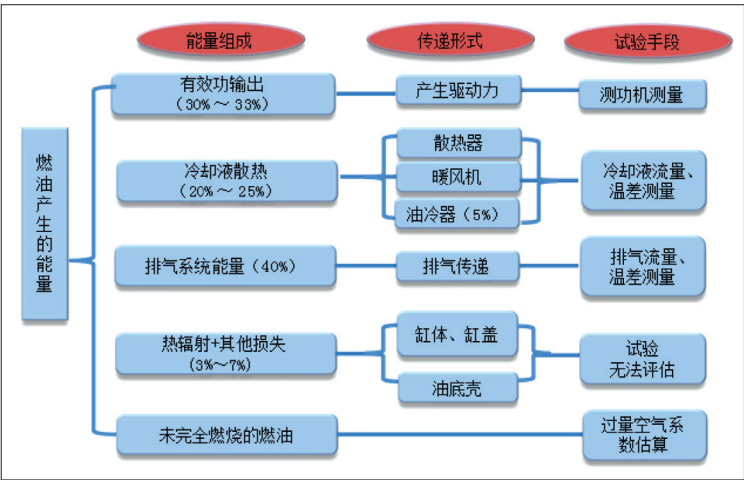


图 1 发动机能量分布及测试手段示意图

进气温度查表获得，单位为 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ； T_{amd} 为进气歧管温度（中冷后进气温度），试验可测得，单位为 $^\circ\text{C}$ 。

5) 燃料未完全燃烧造成的热量损失。燃料未完全燃烧造成的热损失（记为 Q_u ）也占有一定比例。汽油机在高速高负荷工况下，为控制汽油爆燃和排气温度不超出限值，ECU 会控制燃油供给系统相对多喷一些油到缸内，使气缸内混合气加浓，其过量空气系数 $\lambda < 1$ ，此时就会有相当一部分燃料不能完全燃烧。由于未完全燃烧的燃料量不能直接测量，本次试验在发动机排气端布置氧传感器测量缸内混合气的过量空气系数。根据汽油燃烧的理论空燃比，假使超出理论空燃比的那部分燃油是不会发生燃烧的。则当 $\lambda \geq 1$ 时，未完全燃烧燃料的热损失 $Q_u=0$ ；当 $\lambda < 1$ 时， $Q_u=Q_f \times (1-\lambda)$ 。

发动机能量分布试验方法

台架上发动机布置整车冷却系统（散热器、暖风机、膨胀水箱等），在发动机运行稳定达到热平衡状态下，通过测量发动机各系统及零部件的温差、流量，得出发动机各零部件、系统能量分布的数据。

在台架不同转速、不同负荷下冷却液温度、油温达到平衡状态下，测量发动机各系统部件的压力损失、温度差、流量，从而计算出其吸收的热量。试验时，保持节温器处于全开状态，发动机出水温度控制在 90°C ；发动机转速从 1000 r/min 开始，一般间隔 500 r/min 进行

测量，直至额定转速；同一转速下，分别测量发动机负荷处于 0、20% 负荷、40% 负荷、60% 负荷、80% 负荷、100% 负荷下的压力损失、温度差和流量。

对发动机冷却系统传感器进行布置、标定、检查确保测量参数有效。台架布置如图 2 所示。

发动机台架传感器布置清单见表所示。

试验结果及分析

通过万有特性，测量出发动机的流量、压力、温度分布情况。各转速下发动机部件流量、压力分布如图 3 所示，随着转速的上升，冷却系统流量不断增加，相关部件的压力损失同步增加。通过散热器流量和暖风流量即可计算出水泵的总流量，通过水泵扬程、油冷器压力损失和暖风系统压力损

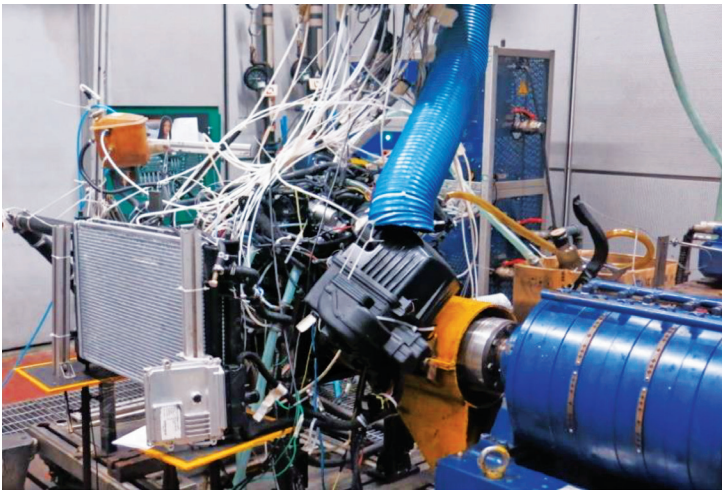


图 2 发动机台架布置示意图

表 台架传感器布置清单

传感器名称	单位	传感器名称	传感器名称	单位	传感器名称
SPEED	r/min	发动机转速	PWI	kPa	发动机进水压力
FB_VAL	kg/h	燃油消耗量	PWO	kPa	发动机出水压力
TORQUE	Nm	发动机转矩	P_PUMW_I	kPa	机械水泵进水压力
TWI	$^\circ\text{C}$	发动机进水温度	P_PUMW_O	kPa	机械水泵出水压力
TWO	$^\circ\text{C}$	发动机出水温度	P_HEAT_I	kPa	暖风机进水压力
T_BAT_A	$^\circ\text{C}$	中冷后进气温度	P_HEAT_O	kPa	暖风机出水压力
T_EXH	$^\circ\text{C}$	排气温度	P_OILC_I	kPa	油冷器进水压力
T_OIL	$^\circ\text{C}$	主油道温度	P_OILC_O	kPa	油冷器出水压力
T_OILC_I	$^\circ\text{C}$	油冷器进水温度	P_PUMO_A	kPa	电子水泵进水压力
T_OILC_O	$^\circ\text{C}$	油冷器出水温度	P_PUMO_B	kPa	电子水泵出水压力
T_HEAT_I	$^\circ\text{C}$	暖风机进水温度	P_TURW_I	kPa	增压器出水压力
T_HEAT_O	$^\circ\text{C}$	暖风机出水温度	P_TURW_O	kPa	增压器进水压力
T_RAD_I	$^\circ\text{C}$	散热器进水温度	P_BATW_A	kPa	中冷器出水压力
T_RAD_O	$^\circ\text{C}$	散热器出水温度	P_TANK_D	kPa	膨胀水箱内压力
T_AIR	$^\circ\text{C}$	大气温度	P_RAD_I	kPa	散热器进水压力
FLOW_VAL	L/min	散热器水流量	P_OIL	kPa	主油道压力
W_FLOW	L/min	电子水泵水流量	P_CRANK	kPa	曲轴箱压力
PHI	%	大气湿度	P_AIR	kPa	大气压力

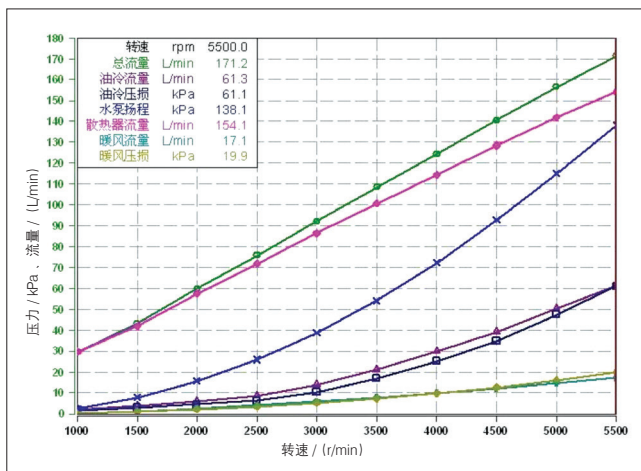


图3 各转速下发动机部件流量、压力分布图

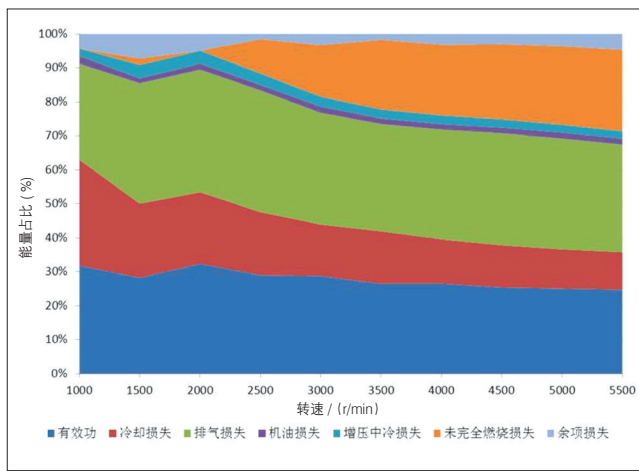


图4 外特性工况下各部分放热量的占比

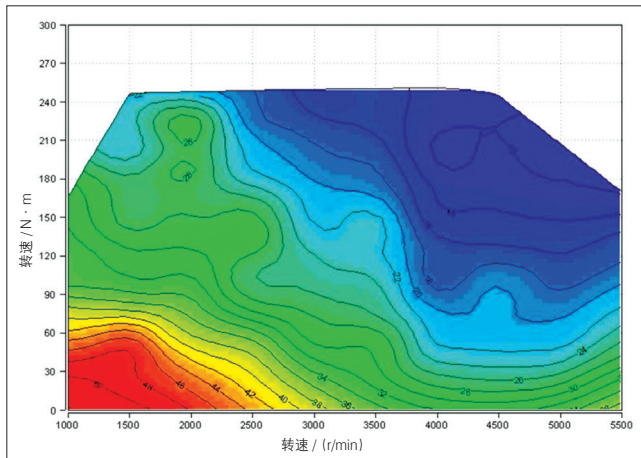


图5 发动机热效率(有效功占比)分布MAP(单位: %)

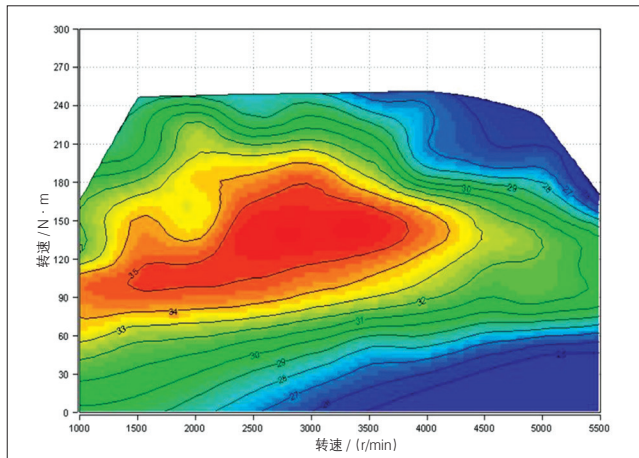


图6 发动机冷却液热损失占比分布MAP图(单位: %)

失即可计算散热器压力损失。冷却系统各部件进出水口温差通过布置冷却液温度传感器可间接测量,综合分析试验测量的各项参数,参照前述公式计算出发动机各部分的热损失分布情况。发动机在外特性工况点各部分的放热量比例分布情况如图4所示。从图4可以看出,该发动机外特性工况各部分放热量占比与图1所示理论值基本吻合,燃料燃烧产生的能量主要以排气系统热损失、有效功和冷却损失的形式释放出来。从图4同样可以看出,该发动机在中高速工况未完全燃烧部分的损失占比较高,

通过进一步分析发现,这与汽油机在中高速大负荷区域通过空燃比加浓降低排温的控制策略有直接关系。图5和图6是根据试验结果计算的发动机热效率分布MAP和发动机冷却液热损失占比分布MAP图。图5可更加清晰地看出在图4分析时提到的空燃比加浓区域,由于空燃比加浓和不完全燃烧的存在,发动机有效功占比显著下降,图5中蓝色区域是主要的空燃比加浓区域。

结论

通过对发动机能量分布的

分析和研究,在台架上完成外特性工况下各部分放热量占比,进而计算出发动机热效率分布MAP和发动机冷却液热损失占比分布MAP,为分析发动机在不同工况下的工作情况提供了直观的数据,也为整车热管理仿真分析精度提升提供更加准确的输入。通过对测试数据和结果进行分析发现,在测试设备选择、试验边界条件控制和测量介质选择等方面仍有进一步研究空间。^[A]