

混动专用发动机密封系统设计

李轶 郑国栋 陈志翔

(西安比亚迪汽车有限公司 陕西 西安 710119)

摘要: 混动专用发动机设计趋向于紧凑化、高性能,工作温度略高于传统发动机,使用环境复杂,频繁启停,这对发动机密封性能提出了更高的要求。要避免量产发动机产生“三漏”问题,密封系统设计需要在整机研发初期,根据发动机工况和要求同时开发。文章从密封件材料选择、尺寸校核、仿真分析、台架试验进行系统设计和验证,确保密封系统的可靠性要求,为整机可靠性提升及性能开发提供参考。

关键词: 混动专用发动机; 密封环境; 密封系统; 密封性能

0 引言

混动专用发动机在汽车上的角色逐步从直驱转化为以发电为主,设计趋向轻量化、紧凑化、体积小、功率大方向发展。混动发动机设计结构紧凑导致零部件异型结构多,各零部件间配合密封面狭小,螺栓压紧力不能过大,频繁启停,原地发电工况长期处于高转速,加入涡轮系统后小型发动机的冲击加大等一系列的严苛工况,对发动机密封系统性提出了很高要求^[1]。密封系统在发动机设计初期,需要和整机硬件设计同步进行,接口零件所配合的密封件需要形成一个系统来设计验证。

1 发动机密封环境

1.1 工作环境

密封系统设计需要先输入发动机外部与内部工况环境,性能指标与温度压力不同影响密封件材料选型及性能。某型号混动发动机外部工作环境温度为-40~140℃;湿度为0~100%;海拔为0~5500m。内部工作环境见表1。

表1 发动机内部工作环境

介质	工作压力/kPa	工作温度/℃
高压油	400	120
低压油	0~2	120
进气	160	65
燃气	9000	1800
排气	62	950
冷却液	200	115

1.2 密封介质

密封介质分为进气、排气、机油、冷却液。首先对介质化学成分分析,对密封系统材料选型至关重要。

进气: 主要成分为空气,此发动机带有废气再循环系统(EGR),EGR系统的加入使废气中的酸性介质循环进入进气系统,废气遇冷形成酸性冷凝水,对管路和密封材料造成酸性腐蚀^[1]。

排气: 主要化学成分为氮气、二氧化碳、水蒸气、一氧化碳、碳氢化合物、二氧化硫、氮氧化物、颗粒物。

机油: 三类及以上基础油占比85%左右,为长侧链多支链的饱和烷烃。机油使用过程中受到高温、高剪切等作用会被氧化生成羧酸等有机酸,混动发动机频繁启停,机油中的有机酸和汽油含量会高于传统发动机^[1]。

冷却液: 主要成分为乙二醇、水、异辛酸钠、癸二酸钠、4-硝基苯甲酸单钠盐、九水偏硅酸钠、苯三唑、活性紫-5。

2 发动机密封系统框图

发动机密封系统设计,需要重点考虑以下方面:(1)密封件材料及尺寸选型;(2)紧固件设计及布置;(3)密封法兰面结构和加工工艺;(4)合理的装配方式。

图1为某混动专用发动机密封系统的连接框图,包含了密封件、接口零件及两者间的连接方式等。图中:A代表密封件,B代表接口零件,数字代表装配方式;1表示粘接,2表示紧固件,3表示过盈配合,4表示旋转,5表示卡扣,6表示压接;直线表示两者之间无运动,

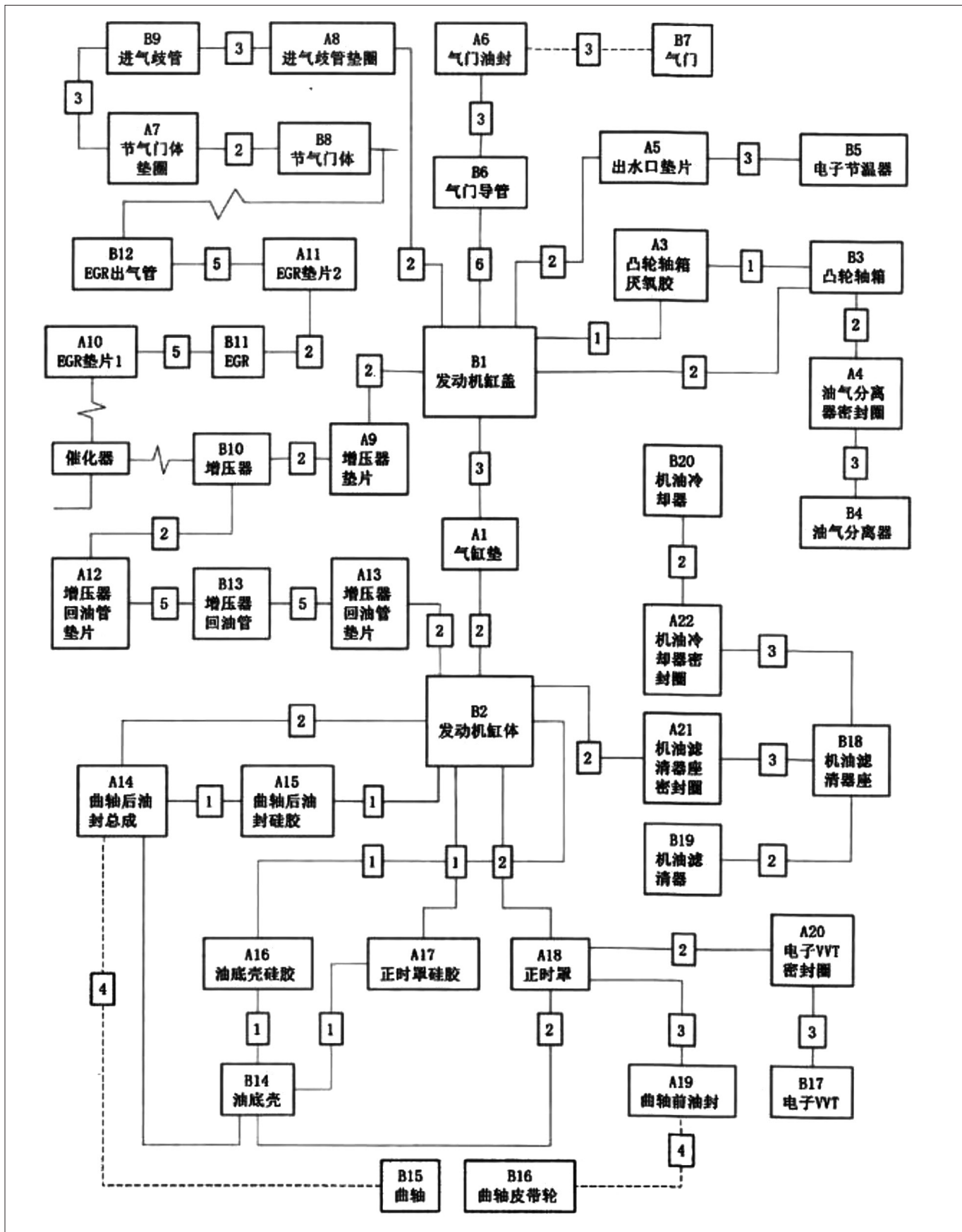


图1 发动机密封系统框图

虚线表示两者之间有相对运动^[2]。

3 发动机密封系统设计

3.1 气缸垫密封

气缸垫基本特性见表2。

表2 气缸垫基本特性

名称	气缸垫
使用场景	缸盖与缸体密封
材料	1号板 SUS301 (厚 0.2mm) 2号板 SUS301 (厚 0.2mm) 3号缸口板 SUS304 (厚 0.12mm) 4号板 SUS301 (厚 0.2mm) 1、4号板双面局部印刷氟橡胶涂层, 2号板下表面缸口部位印刷氟橡胶涂层
密封介质	燃烧室气体, 冷却液, 高压机油, 低压机油
密封方式	密封筋+密封涂层

其中缸口板作为限位板使用 SUS304 材料, 304 延展性能优良, 硬度较小, 适合做翻边而不会被折断的限位层, 优点是对压筋变形限制, 防止极限过压, 减少动态间隙运动, 提高筋的疲劳强度。

对气缸垫进行仿真, 仿真数值见表3。

表3 气缸垫仿真校核

工况	评价内容	数值	单位
装配工况	缸口筋密封压力	192.06	MPa
	水孔半波最小密封压力, 回油筋半波最小密封压力	37.8	MPa
	高压回油筋最小密封压力	96.3	MPa
额定工况+爆压	缸口筋密封压力	152.3	MPa
	水孔半波最小密封压力, 回油筋半波最小密封压力	19.6	MPa
	高压回油筋最小密封压力	22.4	MPa
	全波垫片跳动量	7.6	μm
	半波垫片跳动量	16.3	μm

结论: 缸垫密封性能满足要求, 缸口最小压力大于 34.5MPa, 满足限值, 油水最小压力大于 10MPa, 满足限值。

3.2 其他金属垫片密封

其他金属垫片基本特性见表4。

金属垫片的表面处理方式根据端口不同温度, 优化涂层材料。高温端改为更耐高温的二硫化钼涂层, 来满足长期高温工况下的密封性。

3.3 油封密封

发动机曲后油封常用橡胶弹性唇形密封, 它是把冲压好的金属骨架与氟橡胶粘接在一起, 油封密封原

表4 其他金属垫片基本特性

名称	使用场景	材料	密封介质	密封方式
EGR 垫片 1	催化器废气钢管与 EGR 冷却器法兰密封	基材 SUS301, 表面涂二硫化钼	高温废气	密封筋+密封涂层
EGR 垫片 2	EGR 阀与 EGR 出气管法兰密封	基材 SUS301, 表面涂氟橡胶	低温废气	密封筋+密封涂层
增压器垫片	缸体集排孔与涡轮增压器法兰面密封	SUS301, 涡轮增压器侧涂二硫化钼	高温废气	密封筋+密封涂层

理主要有两个方面: 第一为油膜原理, 一般轴的表面粗糙度设计为 $Ra0.2 \sim 0.6$; 第二为泵吸原理, 当轴旋转时, 由于油封结构的特殊性导致接触压力不均匀分布, 油封储油端、空气端产生不同的压力变化, 使储油端相对空气端形成一定的内向吸引力, 产生“泵吸”作用, 使已经浸过密封唇达到空气侧的油液重新回到储油端。油封唇口增加回油线后在轴上的接触线呈锯齿状, 在动态情况下类似一个泵的叶片, 极大地增加了油封的回油能力。

曲轴油封耐介质考虑七大性能, 分别为耐矿物油性、耐汽油性、耐硫酸、耐氢氧化钠、耐水 80℃、耐候及耐臭氧、气密性。目前橡胶产品中, 氟橡胶可以全部满足, 高温时永久压缩变形控制出色, 空气中典型工作温度可达到 220℃。主唇橡胶表面喷涂聚四氟乙烯 (PTFE), 进一步降低唇口摩擦。

曲轴后油封基本特性见表5。

表5 曲轴后油封基本特性

名称	曲轴后油封
使用场景	曲轴与缸体密封
材料	橡胶 FKM 弹簧 SWC-JIS-G3506 冲压钢板 SPCC 主唇涂 PTFE
密封介质	机油, 灰尘
密封方式	密封筋+密封涂层

曲前油封常用热塑性材料的旋转轴用唇形密封圈, 主唇为聚四氟乙烯材料, PTFE 油封相比氟橡胶油封能承受更高的温度和压力, 由于 PTFE 拥有极低的摩擦系数, 会带来更好的减摩擦效果。混动发动机频繁启/停, 机油中的有机酸和汽油含量会高于传统发动机, PTFE 耐介质性更为出色, 最高耐温可达 300℃。FKM 弹簧油封唇口线速度 $\leq 25m/s$, PTFE 油封最大唇口线速度 $\leq 50m/s$, 特别适用于高转速工况, 混动专用发动机使用工况以发电为主, 启动高转速, 曲轴油封使用 PTFE 更为合适。现已逐步用 PTFE 油封替换原有的 FKM 弹簧油封。

曲轴前油封基本特性见表6。

表6 曲轴前油封基本特性

名称	使用场景	材料	密封介质	密封方式
曲轴前油封	曲轴与正时罩密封	橡胶 ACM 骨架 SPCC 主唇 PTFE	机油, 灰尘	密封筋+密封涂层

3.4 涂胶密封

厌氧胶选用乐泰 5188 (红色), 用于凸轮轴箱与缸盖密封面。厌氧胶主要成分是甲基丙烯酸酯, 当隔绝空气中氧气时, 厌氧胶开始固化, 形成自由基, 在活泼金属离子 (Cu, Fe) 作用下, 自由基开始聚合固化, 没有空气的情况下, 可以在紧密贴合的金属表面之间固化, 特别适合在具有良好附着力的铝基法兰上使用。可以在装配后立即提供对低压的密封 (即时密封)。厌氧胶对法兰面粗糙度要求较高, 要求 $Ra0.8 \sim 1.6$, 平面度 $0.05/100$ 。

密封硅胶选用乐泰 5900H (黑色), 用于缸体与油底壳密封面、正时罩密封面、曲轴后油封组件密封面, 室温硫化硅胶主要成分是二甲基硅氧烷, 当吸收空气中的水气时, 硅胶从表面开始固化, 最终形成橡胶类弹性体。采用密封硅胶的法兰面设计需要重点考虑设计和装配工艺。

涂覆密封硅胶法兰面设计重点:

(1) 铸铝正时罩在法兰内轮廓作倒角储胶槽结构设计;

冲压油底壳法兰内侧作倒圆角结构设计。法兰面装配后, 涂于法兰面上的硅胶会挤到倒角结构内, 凝固后在倒角处形成完整连续的胶条, 起到类似橡胶密封圈的作用, 能有效阻止内部油气渗漏和抵抗法兰间隙变化而造成的密封胶剥离。

(2) 胶涂层设置于法兰平面上, 距离倒角储胶槽 $1 \sim 1.5\text{mm}$ 处, 这样可以保证两法兰压紧后将足够量的胶挤压进倒角结构内。

(3) 两个标准件轴线距离根据经验选 10 倍螺栓尺寸, 如 M6 螺栓间距选 60mm 左右。

(4) 法兰面两螺栓连线称为螺栓压力线, 法兰螺栓孔设计尽量靠近法兰中心线, 与螺栓压力线重合, 可使法兰面上螺栓夹紧力分布一致, 面压均匀, 保证密封胶有持久的密封能力。

3.5 橡胶密封圈密封

3.5.1 材料选择

橡胶密封圈是依靠其本身受到机械压力或同时受到介质压力的自紧作用产生的弹性变形而堵塞流体泄漏通道的, 是静密封和往复密封的主要结构之一。发动机常用橡胶密封圈基本特性如表7所示。

密封圈选择基本要求如下:

(1) 允许使用的温度范围。发动机环境温度 $-40 \sim 140^\circ\text{C}$, 高温要求耐老化性好、抗蠕变性好、耐松弛强度高、持久强度高及耐腐蚀性好, 低温要求物理力学

表7 发动机常用橡胶密封圈基本特性

名称	使用场景	材料	密封介质	密封方式
油气分离装置密封圈	取气口、回油通道、小负荷通道密封	ACM	机油, 油气	端面密封
凸轮轴后端盖 O 形圈	凸轮轴箱后端	FKM	机油, 油气	径向密封
机油冷却器 O 形圈	机油冷却器座与缸体主油道密封	FKM	机油	端面密封
	机冷与机油滤清器座间密封			
机油尺 O 形圈	机油尺插拔密封	FKM	机油	径向密封
机油收集器总成密封圈	机油收集器与机油泵连接法兰密封	FKM	机油	端面密封
机油滤清器座密封圈	机油滤清器座与脏油道密封	FKM	机油	端面密封
加油口盖密封圈	机油口盖密封	FKM	机油	端面密封
放油螺塞垫圈	油底壳放油口密封	FKM	机油	端面密封
VVT 驱动电机密封圈	VVT 与正时罩密封	FKM	机油	端面密封
进气歧管组件密封圈	进气歧管与缸盖进气口处密封	FKM	空气, EGR 回流废气	端面密封
节气门密封圈	进气歧管与节气门处密封	FKM	空气, EGR 回流废气	端面密封
电子调温器密封圈	电子调温器与缸盖密封	ACM	冷却液	端面密封
冷却除气管 O 形圈	水套除气管密封	EPDM	冷却液	径向密封
增压器进水管 O 形圈	增压器进水管密封	EPDM	冷却液	径向密封
增压器出水管 O 形圈	增压器出水管密封	EPDM	冷却液	径向密封

及耐低温脆性。

(2) 在密封介质中的稳定性。密封材料与密封介质之间不发生化学反应,在密封介质作用下对接触应力松弛和蠕变的稳定性。

(3) 尺寸选型。密封圈根据压力和使用位置选择合适的压缩率和填充率。

(4) 经济性和工艺性。材料首先考虑满足可靠性要求,在均衡经济性后选择材料。工艺需考虑安装倒角与粗糙度等要求,防止安装时划伤密封圈。

FKM作为一种特殊的合成高分子弹性体具有耐高低温、耐油、耐溶剂、耐强氧化性、密封稳定性及良好的物理机械性能,在所有合成橡胶中综合性能最佳,俗称“橡胶王”,使用温度可达 250°C ,发动机大部分密封圈选用FKM材料来应对高温和耐油工况。

ACM是以丙烯酸酯为主单体经共聚而得的弹性体。其特征是耐热、耐机油、耐候性优异,尤其耐油性好于AEM(乙烯丙烯酸酯橡胶)。耐热性仅次于氟橡胶和硅橡胶,使用温度可达 $150\sim 170^{\circ}\text{C}$,在低于 150°C 的油中,有接近FKM的耐油性能,成本相比FKM低。一般气门室盖垫与油气分离装置方形密封圈选择ACM。

EPDM是含有少量非共轭二烯类第三单体的乙烯-丙烯三元共聚物的三元乙丙橡胶,乙丙橡胶耐老化性能好,有突出的耐臭氧性能。可以在 130°C 的环境中长期使用, 150°C 条件下间歇使用。当温度高于 150°C 时,开始慢慢分解。乙丙橡胶呈非极性,不饱和度很低,化学稳定性高,因此对极性液体醇、酸、强碱、氧化剂(H_2O_2 、 HClO)、酮、某些酯有很好的稳定性。具有疏水性,耐热水和水蒸气性能相对突出。冷却水管及冷却系统密封一般选用EPDM。

3.5.2 尺寸校核

以VVT驱动电机密封圈为例,进行尺寸校核,见表8。

表8 VVT驱动电机密封圈尺寸校核

名称	参数
密封圈截径 W/mm	4.45
圈槽深度 H/mm	3.25
压缩余量 σ/mm	1.2
沟槽宽 G/mm	3.1
密封圈体积 $/\text{mm}^3$	1454.9
沟槽体积 $/\text{mm}^3$	2252.7 ~ 2500.1
压缩率 $E=22\% \sim 29.35\%$, 满足设计标 $15\% \sim 30\%$; 填充率 $n=55.28\% \sim 65.97\%$, 满足设计标 $< 85\%$	

3.6 台架试验验证

此款发动机安排了4项台架试验,分别是3000h循环冷热冲击试验、800h循环负荷试验、400h全速全负荷试验、50h超速试验,每个项目安排2台发动机进行验证。

循环冷热冲击试验工况在最大热负荷和怠速之间往复变化,水温在 35°C 与 105°C 之间快速转换,按照热胀冷缩的规律,会降低连接件所形成的压强,破坏密封件,压紧件之间相对滑移,扯破密封垫,零件内部冷热不均热应力交变而开裂,循环冷热冲击试验广泛用来考核发动机可靠性。循环载荷试验主要验证发动机不同转速和负荷工况下,对中低速和中低负荷的耐久性试验。全速全负荷试验主要验证发动机在转速急剧变化和快速加载时的耐冲击和振动能力,以及各零部件受热突变下发动机的可靠性。超速试验是超出额定转速一定比例下进行的试验,可验证运动件的耐久可靠性^[1]。

通过4项台架试验,密封系统均无渗漏发生,密封性能验证通过。

4 结语

以最初混动发动机密封环境与密封介质为基础,把整机所有密封件、接口零件及两者间的连接方式进行整理,绘制密封系统框图,便于后期密封件的选型设计。对混动发动机密封系统根据密封件分类,分为气缸垫类金属垫片、油封、涂胶密封、橡胶密封圈四大类,进行材料选择、尺寸校核、仿真分析、台架试验等系统设计,验证了整机密封系统的可靠性。

参考文献:

- [1] 李轶. 某混动专用发动机正时罩密封结构优化及分析[J]. 汽车画刊, 2023(05):34-37.
[2] 冉帆, 郎伟钦, 黄兆春. 汽油发动机密封系统的开发及应用[J]. 上海汽车, 2018(11):9-15.

作者简介: 李轶(1989.10-), 男, 汉族, 陕西渭南人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 发动机系统研发; 郑国栋(1995.07-), 男, 汉族, 陕西西安人, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 整车系统仿真; 陈志翔(1994.08-), 男, 汉族, 陕西西安人, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 发动机系统研发。