

L20V190 天然气发动机的研发

杨加成, 张翠云, 卢秀霞, 唐长明, 李明晓

(中国石油集团济柴动力有限公司, 山东 济南 250306)

摘要: 介绍了济柴自主研发 L20V190 天然气发动机的过程, 主要包括: 整机性能指标设定及分析计算, 方案布置, 详细设计, 样机投制及产品调试等。台架试验表明: L20V190 天然气发动机相关技术指标达到了设计目标。为后续批量生产及下一代天然气发动机产品开发奠定了基础。

关键词: 天然气发动机; 性能; 结构; 试验

中图分类号: TK432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2020)06-0007-05

Development of L20V190 Natural Gas Engine

Yang Jiacheng, Zhang Cuiyun, Lu Xiuxia, Tang Changming, Li Mingxiao

(CNPC Jichai Power Co., Ltd., Shandong Jinan 250306)

Abstract: The development of self-developed L20V190 natural gas engine is introduced, including the determination of performance index, analysis and calculation of the whole engine, layout, detailed design, prototype making and product debugging, etc. Bench test show that the technical index of L20V190 natural gas engine achieves the design goal and lays the foundation for batch production, and development of next-generation natural gas engines in the future.

Key words: natural gas engine; performance; structure; test

0 引言

随着国家分布式能源政策的颁布实施, 天然气利用率大幅提高。在综合考虑占地面积、综合能源利用率、维护成本等因素后, 越来越多的数据中心、机场、大型写字楼的电源等也趋向选用大功率天然气发电机组。

济柴作为国内传统天然气发动机制造厂商, 研制开发了多系列气体发动机及其发电机组, 机型包括 190 系列的 4 缸、6 缸、8 缸、12 缸、16 缸等。点火型式包括: 缸外混合, 火花点燃; 缸外混合, 柴油引燃; 缸内喷射, 火花点燃等。功率范围涵盖 180~1 500 kW。燃气种类由天然气延伸至焦炉煤气、沼气、煤层气、瓦斯气、炼化尾气等多种气体。

为进一步拓展 190 系列机组的功率覆盖范围, 济柴在 H16V190 天然气发动机的基础上, 研制开

发了 20 缸 V 型长行程天然气发动机。

1 主要技术、经济指标

20 缸 V 型天然气发动机型号为 L20V190。产品的具体设计性能参数见表 1。

2 计算分析

2.1 整机性能计算

采用 AVL BOOST 软件对 L20V190 天然气发动机整机性能进行计算分析及预测。图 1 为搭建的整机计算模型。计算分析时通过调整发动机技术参数, 如增压比、排气总管直径、发火顺序、空燃比、环境温度等, 以确定最佳方案并为后续的轴系计算等提供边界条件。

BOOST 性能计算表明: ①增压比为 3.16 时发动机功率可达到 1 900 kW, 此时单个增压器流量

为 1.416 kg/s; ②空燃比大于 26.3 (对应过量空气系数 λ 为 1.613) 时, 排温可控制在 650 °C 以内; ③发动机的活塞压缩比从 10 提高到 11, 热效率从 38.7% 提高到 39.5%, 涡前排温降低约 15 °C, 最高燃烧压力升高约 1 MPa, 燃气消耗率降低了 4 g/(kW·h), 经对比分析决定采用压缩比为 11 的方案; ④排气总管直径从 115 mm 增加到 145 mm, 对发动机性能的影响较小, 决定保持现有排气管直径 125 mm 不变; ⑤计算显示改变发火顺序对发动机性能影响很小, 决定根据曲轴扭振计算结果选取合适的发火顺序^[1]。

表 1 L20V190 技术参数

型式	四冲程、预混、增压中冷
气缸数及排列	20 缸, V 型
气缸直径/mm	190
活塞行程/mm	255
活塞总排量/L	144.6
压缩比	11 : 1
标定转速/(r·min ⁻¹)	1 000
标定功率/kW	1 900
平均有效压力/MPa	1.58
活塞平均速度/(m·s ⁻¹)	8.5
最高燃烧压力/MPa	15
最低空载稳定转速/(r·min ⁻¹)	≤600
热耗率/(kJ·kW ⁻¹)	9 500 (天然气热值为 38.03 MJ/m ³)
冷却方式	强制冷却
润滑方式	压力和飞溅润滑
起动方式	气马达起动

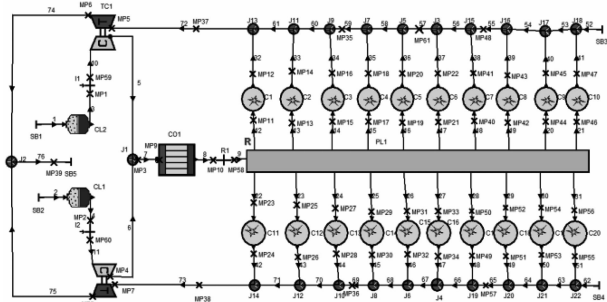


图 1 整机计算模型

2.2 轴系分析计算

采用 AVL Excite 软件对 L20V190 天然气发动机轴系进行计算分析, 主要包含扭振计算分析和曲轴圆角疲劳强度分析。扭振计算分析模型基于 designer 软件搭建, 对单机和机组分别建立不同模型并进行分析计算, 单机模型如图 2 所示。台架模型将联轴器和测功器考虑在内, 因数据的局限性, 将联轴器主动件惯量与飞轮合为一体, 联轴器从动

件与测功器合为一体。曲轴的疲劳强度分析计算表明: 最高燃烧压力为 15 MPa 时, 曲轴曲柄销及主轴颈各圆角处的安全系数均大于许用值 1.5。

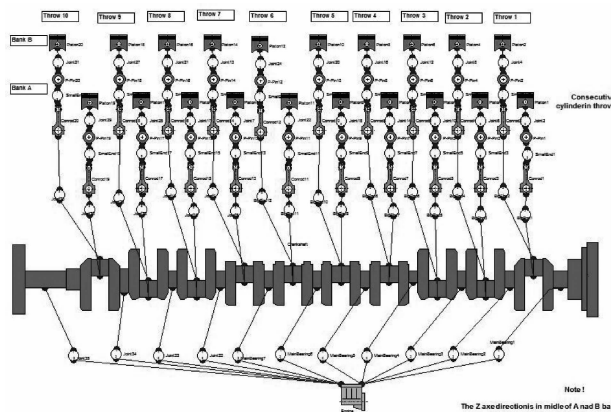


图 2 曲轴扭振计算模型

轴系设计中的主要难点为: 确定发动机的点火顺序以便进行曲柄排列设计。由于 20 缸点火组合方式较多, 首先选出六种不同的点火排列方式, 发火间隔角均为 12°~60°。六种排列方式代号分别为 AA、AB、BA、BB、CA、CB, 各自具体点火顺序如下。

AA: 1-16-6-12-2-18-8-14-4-20-10-15-5-19-9-13-3-17-7-11;

AB: 1-15-6-19-2-13-8-17-4-11-10-16-5-12-9-18-3-14-7-20;

BA: 1-18-3-16-5-14-7-12-9-11-10-13-8-15-6-17-4-19-2-20;

BB: 1-13-3-15-5-17-7-19-9-20-10-18-8-16-6-14-4-12-2-11;

CA: 1-17-4-18-3-19-2-16-5-11-10-14-7-13-8-12-9-15-6-20;

CB: 1-14-4-13-3-12-2-15-5-20-10-17-7-18-8-19-9-16-6-11。

对以上六种点火顺序进行轴系扭振计算, 对比不同点火顺序下减振器壳体振幅、轴段最大应力(见图 3 及图 4) 等参数, 最终确定发动机的发火顺序采用 BA 方式。

3 方案设计

L20V190 天然气发动机是在 L12V190 柴油机基础上增加 8 缸变形开发而成; 而其燃气组织、增压配气型式和 H190T 天然气机相似。燃气采用预混单点喷射; 增压采用恒压增压; 冷却、润滑系统进行适应性改进, 将机油冷却器部件移到高温冷却系统中, 并增加了增压器后润滑装置。发动机整体

布置主要参照 L12V190 柴油机及 H190T 天然气发动机。在满足发动机性能要求的基础上, 尽可能提

高零部件通用性。在整体布置中考虑对旋转件、高温件的防护措施。

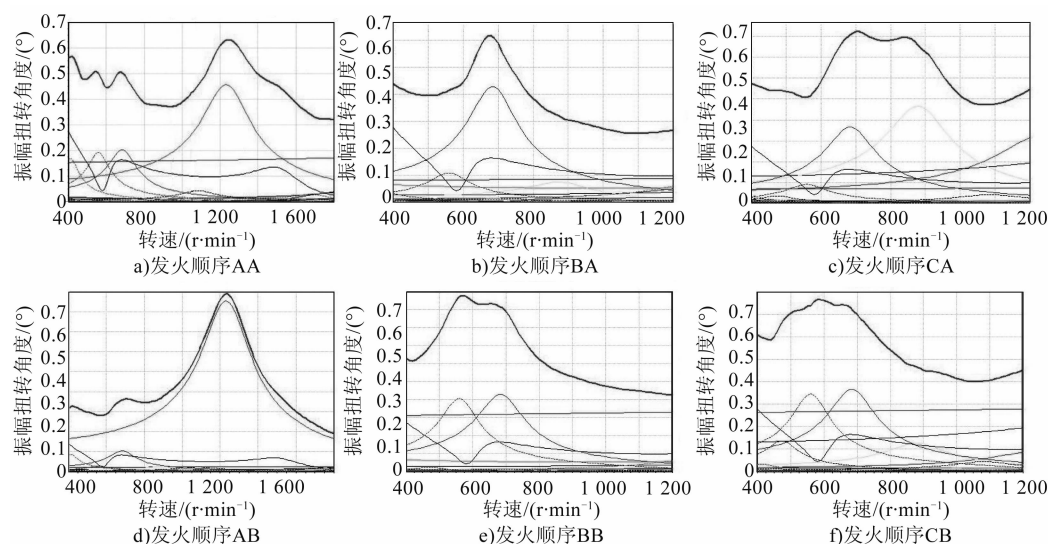


图3 不同发火顺序减振器壳体振幅对比

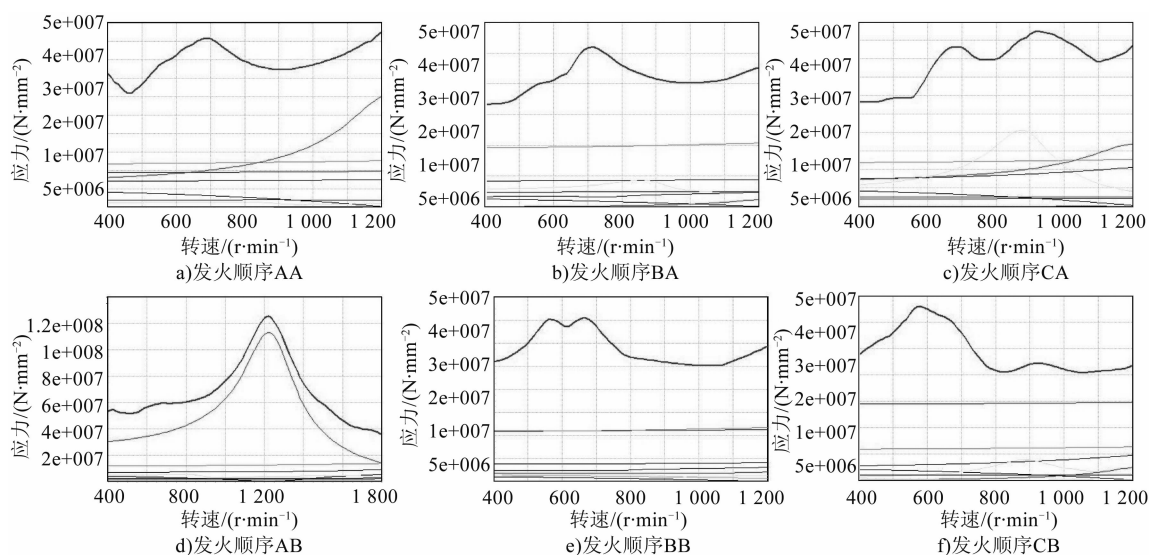


图4 不同发火顺序轴段最大应力对比

3.1 增压器布置设计

L20V190 天然气发动机整机布置中的最大难点是确定增压器的位置。设计时做了增压器飞轮端置和自由端置两种方案, 其三维布置效果分别如图5、图6所示。

增压器布置在飞轮端时可以合理利用整机长度方向空间, 但不利于用户现场燃气管路布置, 尤其对低浓瓦斯气源, 其燃气管路较粗, 布置十分不便。增压器布置在自由端时燃气管路布置较方便, 但增压器支架须要和多功能腔集成一起安装在机体上, 存在引发油气水路密封失效隐患, 且不利于维修。经过综合对比, 考虑客户实用性能, 最终采用

增压器自由端布置方案。

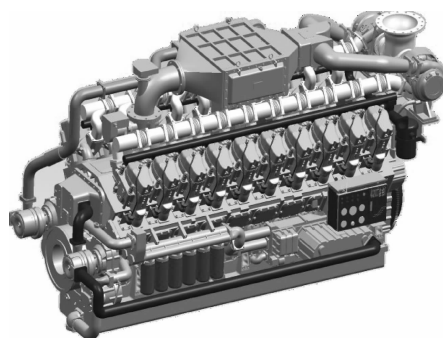


图5 增压器飞轮端放置三维概念方案

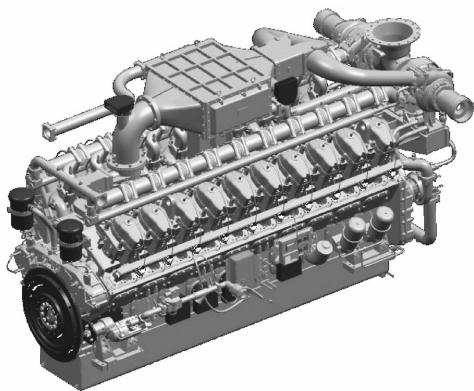


图6 增压器自由端放置三维概念方案

3.2 润滑系统设计

在 L20V190 天然气发动机润滑系统设计中, 首先针对机油冷却器进行三种方案的扩容设计, 分别从其长、宽、高三方面进行加大; 其次, 根据油冷器的放置位置进行机体端置和侧置两种方案的对比设计; 再根据发动机的实际使用特性增加了后润滑系统 (图 7)。其原理是在发动机非正常停机后, 针对增压器启用单独的一路润滑油路, 实现对增压器轴承的冷却和润滑, 带走部分热量, 并在轴承上建立油膜以避免轴承过热烧损, 从而实现对增压器的保护。这一功能对因气源不稳定而时常出现停车的发动机起到了有效的保护作用。

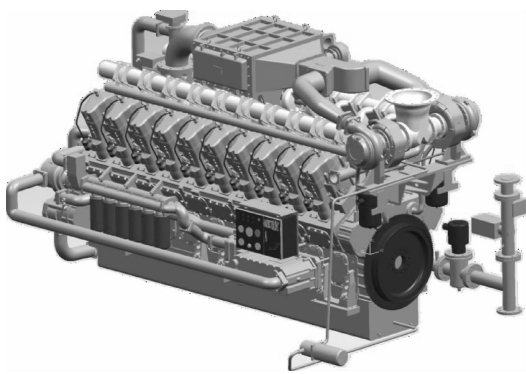


图7 发动机后润滑三维布置方案

4 详细设计

4.1 机体设计

L20V190 天然气发动机机体 (图 8) 延续了 L190 系列发动机的整体结构, 其内部集成了润滑油道及冷却水道, 顶部设计有燃气进气腔, 机体两侧为凸轮轴室。在细节上对机体进行了优化设计, 如机体两侧增加油污收集槽, 机体顶侧进气道进行通用改进等。此外, 发动机机体依旧延续了支架支撑方式, 机体支架每侧扩展到三个, 共六个, 全部为借用件, 实现了零件的通用化。

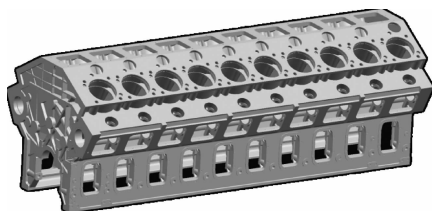


图8 L20V190 天然气发动机机体

4.2 轴系设计

在轴系详细设计过程中, 首先根据前期轴系计算确定的发火顺序完成曲轴的排列设计, 点火间隔角为 $12^\circ \sim 60^\circ$ 。从单侧看, 发动机 1、10 缸, 2、9 缸, 3、8 缸, 4、7 缸, 5、6 缸分别位于同一曲轴角度 (图 9)。发动机曲轴部件如图 10 所示。

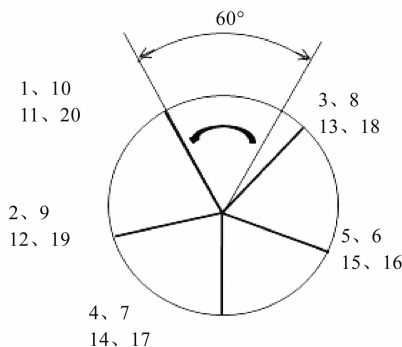


图9 L20V190 天然气发动机曲轴曲柄排列图

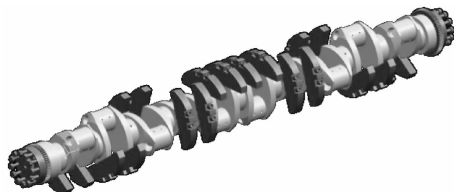


图10 L20V190 天然气发动机曲轴部件

4.3 凸轮轴设计

L20V190 天然气发动机凸轮轴部件 (图 11) 采用 4-3-3 形式, 单侧凸轮轴由前、中、后三段组成, 其中较长的一段为前端, 与定时齿轮相配合。凸轮轴进排气配气相位采用和 190 系列天然气发动机一致的配气相位值。



图11 L20V190 天然气发动机凸轮轴部件

4.4 其余机构、系统设计

按照产品标准设计流程完成 L20V190 天然气发

动机油底壳、进排气系统、润滑系统、冷却系统、燃气系统、起动系统、点火系统等所有发动机零部件的设计。在设计过程中，严格按照系列化、通用化及标准化三项要求，以保证发动机的高效研发。

5 样机投制及产品试验

在完成图纸设计后，按计划进入样机的投制环节。在首台样机零部件成套装配之前须完成发动机全部零部件的生产准备工作，包括：产品工艺规程的制定，工序卡片的绘制，外协零部件的委托生产及外购部件的采购工作等。

L20V190 天然气发动机采用装配岛方式装配。在装配过程中，严格按照装配工艺要求执行，各主要、重要螺栓采用液压拉伸器或阿特拉斯扳手安装，以保证预紧力。装配过程中的关键步骤均做好数据测量和记录工作。同时还要保证装配现场及各零部件的清洁度。图 12 为发动机装配现场图。



图 12 L20V190 天然气发动机装配图

L20V190 天然气发动机在完成样机试制后，便转入试验台架进入产品调试阶段。其目的是通过系统地改变与发动机的工作过程有关的参数和零部件，全面考察每一种变动对发动机性能的各种影响，然后确定综合效果最好的一套参数和零部件^[2]。图 13 为 L20V190 天然气发动机试验现场。

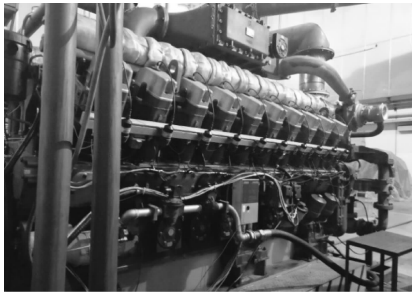


图 13 L20V190 天然气发动机试验现场图

L20V190 天然气发动机在试验台架顺利完成了型式试验及性能开发试验，并对发动机燃气消耗率及排放性能指标进行了优化修正。通过耐久试验对发动机的关键零部件进行了可靠性及稳定性考核。经试验验证：L20V190 天然气发动机相关技术

指标均达到或优于最初设计值，尤其是额定功率。在实际台架试验中，发动机在 2 000 kW 工况下依然表现优越，超过了预期性能指标。具体性能参数见表 2 及图 14。

表 2 L20V190 天然气发动机试验数据

转速/ (r · min ⁻¹)	功率/ kW	热耗率/ (kJ · kW ⁻¹)	过量空 气系数 λ	涡前排 温 1/℃	涡前排 温 2/℃	涡后排 温/℃
700	20	58 344	1.15	422	423	345
1 000	475	11 838	1.42	583	586	537
1 000	950	10 051	1.44	616	619	547
1 000	1 140	9 770	1.46	623	626	548
1 000	1 425	8 932	1.45	636	643	546
1 000	1 520	9 038	1.46	645	650	543
1 000	1 710	9 027	1.54	638	643	537
1 000	1 900	9 048	1.55	634	640	522
1 000	2 000	9 054	1.55	634	639	516

注：涡前排温 1 为发动机左侧涡前排温（面向飞轮端）；涡前排温 2 为发动机右侧涡前排温（面向飞轮端）。

L20V190 天然气发动机在通过各项试验并达到最初设计指标要求后，按照规定进行新产品定型鉴定。鉴定通过后开始小批量生产，考核工艺装备的稳定性及在批量生产后是否会出现质量问题，并对暴露出来的问题及时进行跟踪解决^[3]，以保证产品质量的稳定性。这也是 L20V190 天然气发动机下步工作的主要内容。

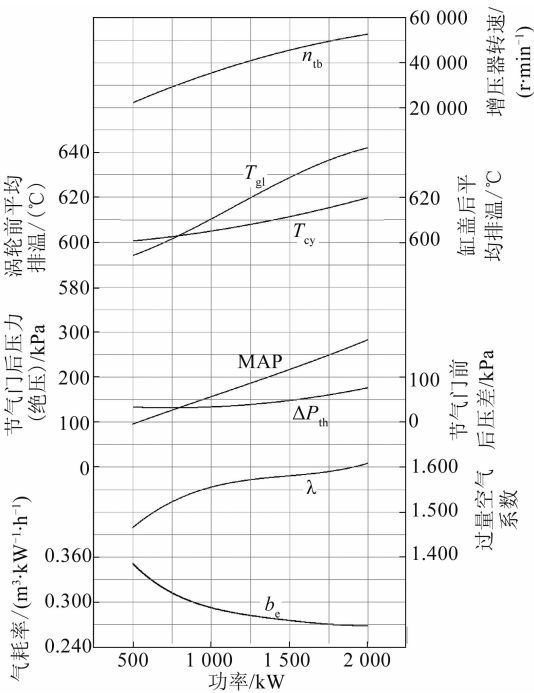


图 14 L20V190 天然气发动机负荷特性曲线

(下转第 17 页)

入的算法在仿真平台中自动运行,模拟生产过程中各种连续运行的设备,如泥浆罐等。多个设备模块组成大的生产系统。同类模块设计好后可以实现重用。仿真的生产系统运行平稳,便于工程师测试各类控制算法,进行工艺控制优化。

(5) 显示界面

上位机界面可分为两个区域,导览区:主要包含 PCS、ESD 菜单,具有变量查找、数据导出等功能性按键及系统时间;页面区域:主画面显示和控件操作区域。

5 结论

本文根据钻井船等海工装备的自动化仪表控制系统的功能需求,并结合船检规范,设计了钻井船仪表控制系统。该系统采用网络冗余的分布式控制和具有安全等级的安全控制器搭建,满足钻井生产过程监控需求和石化生产过程火气安全切断要求,确保船员和生产安全。钻井船仪控系统涉及的工艺过程控制和安全切断等控制策略复杂,难以通过普通测试仪表直接测量,为此搭建了半物理仿真验证

平台,基于以太网、串口等通讯,模拟各种生产过程中可能的故障,验证安全系统关断逻辑的正确性。结果表明:钻井船仪表控制系统样机的过程控制和安全系统的控制策略、关断策略安全有效;无线通讯和管理软件、报表分析、趋势预测等功能与实船需求相匹配。

参考文献

- [1] 曲媛. 深海钻井船的总体方案分析研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [2] 赵传亮, 张树立, 王嘉波. 钻井船钻井模块研究 [J]. 装备制造技术, 2017 (7): 121-123.
- [3] 倪明杰, 丁才发. FPSO 应急关断系统研究 [J]. 船舶, 2001 (1): 49-52.
- [4] 邹成业. 半潜钻井船的总体方案分析研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [5] RAHMAN M A, OSHEIBA A M, RADWAN T S, et al. Modelling and controller design of an isolated diesel engine permanent magnet synchronous generator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11 (2): 324-330.

(上接第 11 页)

6 结论

L20V190 天然气发动机从设计开始就严格按照标准发动机开发流程进行。L20V190 天然气发动机作为功率拓展新产品,虽然涉及的新前沿技术不是十分突出,但围绕密封、维护保养、HSE 等方面的一系列改进设计紧紧贴合了用户需求,并保证了产品的市场竞争力,同时也为下一代天然气发动机的产品开发提供了很好的参考。

参考文献

- [1] 中国石油集团济柴动力有限公司. L20V190 天然气发动机整机计算报告 [R]. 济南: 中国石油集团济柴动力有限公司, 2018.
- [2] 周龙保. 内燃机学 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] 杨连生. 内燃机设计 [M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1981.