制氧机辅助进气改善高原内燃机动力不足的应用设计

余建淳
宁波讯强电子科技有限公司　浙江　宁波　315800

摘　要：高原地区大气压低、含氧量稀缺，内燃机存在进气不足、燃烧不充分问题，导致动力衰减、油耗升高、排放恶化，制约工程机械与运输车辆运行。本文设计制氧机辅助进气系统，采用膜法富氧制氧技术，以旁通进气方式为内燃机补充富氧空气。搭建高原模拟试验台，选取四缸柴油内燃机为对象，设置 3500 米、4500 米两种海拔工况开展对比试验。试验表明，加装装置后内燃机标定功率最高提升 10.4%，最大扭矩提升 16.1%，燃油消耗率最大下降 14.1%。该装置结构简单、适配性强，可有效改善高原内燃机动力性能，具备较高工程推广价值。

关键词：高原环境；内燃机；动力不足；制氧机；辅助进气；性能优化

引言：我国青藏高原、云贵高原等高海拔区域是基建建设与资源开发的重要区域。海拔升高导致大气压与空气含氧量显著下降，直接影响内燃机进气效率。常规内燃机未适配高原工况，高海拔下进气氧浓度不足，燃油燃烧反应速率放缓，出现动力大幅衰减现象，同时产生积碳、热负荷升高、零部件磨损加剧等问题。当前涡轮增压、电控优化等改良方式成本高、适配性差。为此，本文设计制氧机辅助进气系统，依托富氧制氧技术补充进气氧含量，结合试验验证装置改良效果，为高原内燃机动力优化提供低成本、高效率的技术方案。

1 高原内燃机动力不足成因分析

1.1 高原环境大气特性

高原环境核心特征为低气压、低氧浓度、低温，且海拔越高环境特征越显著。平原地区标准大气压强为 101.325kPa，空气氧气体积分数稳定维持 21%；海拔 3500m 区域大气压强约 66.5kPa，氧气体积分数降至 14.8%；海拔 4500m 区域大气压强仅 57.2kPa，氧气体积分数低至 13.2%。低气压环境会减小内燃机进气压力，单次进气容积流量下降，气缸内充气效率大幅降低。同时高原低温环境会延长燃油雾化蒸发时间，混合气均匀度变差，进一步干扰燃烧反应进程，这是内燃机动力衰减的外部环境诱因。

1.2 内燃机内部工作故障机理

从内燃机工作原理分析，进气、压缩、做功、排气四个冲程均受高原低氧环境干扰。第一，进气冲程中，稀薄空气导致进气量不足，缸内混合气氧气占比偏低，燃油无法充分燃烧；第二，压缩冲程混合气压缩终了温度、压力达不到平原标准，滞燃期延长，燃烧稳定性下降；第三，做功冲程燃烧释放热量不足，活塞推力减小，输出扭矩与功率持续衰减；第四，排气冲程燃烧残留杂质较多，气缸内部易生成积碳，堵塞排气通道，增大机械运行阻力。此外，燃烧不充分会导致尾气中一氧化碳、碳氢化合物含量升高，加剧环境污染[1]。

1.3 现有改良技术弊端

目前行业内改善高原内燃机动力的常用技术包含涡轮增压技术、燃油喷射电控优化、进气预热改造等。涡轮增压技术可压缩空气提升进气量，但高原低气压下增压响应滞后，高负荷工况易出现增压衰竭，且设备造价高昂、维修难度大；电控优化仅能微调燃油喷射参数，无法从根本上解决缺氧问题，动力提升幅度不足 5%；进气预热改造虽能改善燃油雾化效果，但无法补充氧气，积碳问题仍未解决。综合来看，现有技术存在局限性，亟需研发低成本、高效率、易安装的辅助进气增氧装置。

2 制氧机辅助进气系统总体设计

2.1 设计总体思路

本次设计以低成本、高适配、易拆装为核心原则，选用膜法富氧制氧机作为核心增氧设备，采用旁通辅助进气结构，不改动内燃机原有进气管路。系统工作原理为：制氧机抽取外界空气，通过高分子富氧膜筛选分离氧气，制备氧气体积分数 28%~32% 的富氧空气，经稳压管路输送至内燃机进气歧管，与自然进气混合，提升混合气整体氧浓度，优化燃烧条件。系统搭配压力传感器、流量调节阀，实时监测进气压力与进气量，根据内燃机负荷自动调整富氧供给量，适配不同海拔、不同工况下的运行需求。

2.2 核心硬件选型

结合中小型柴油内燃机工作参数，完成系统硬件选型，核心设备参数如下：一是富氧制氧机，采用卷式高分子富氧膜，额定工作电压 24V，富氧浓度 30%±2%，最大产气量 120L/min，适配环境温度-20℃~50℃，满足高原低温工作要求；二是稳压输送管路，选用耐高低温橡胶软管，内径 25mm，承压范围 0~0.8MPa，防止管路漏气；三是智能调控组件，包含高精度压力传感器（测量精度 ±0.1kPa）、电磁流量调节阀，响应时间≤ 0.5s；四是固定减震支架，采用碳钢材质，搭配减震橡胶垫，削弱设备运行振动对内燃机的影响。整套设备重量≤ 18kg，安装便捷，适配各类工程机械内燃机。

2.3 系统结构布局与工作流程

本系统采用旁通式安装布局，制氧机独立固定于内燃机侧边空旷位置，避免高温烘烤，进气口朝向迎风面，降低进气杂质含量。管路连接方式：制氧机出气口连接流量调节阀，经稳压管路接入内燃机进气歧管，在空气滤清器后方完成富氧空气混合，既避免杂质进入气缸，又保障混合均匀度[2]。系统工作流程分为四步：第一步，传感器实时采集内燃机转速、进气压力信号，传输至控制模块；第二步，控制模块结合海拔工况判定富氧需求量，调节阀门开度；第三步，制氧机制备富氧空气并完成稳压输送；第四步，富氧混合气进入气缸完成燃烧，排出废气，实现动力优化闭环调控。

2.4 防干扰优化设计

为适配高原恶劣工况，对系统进行专项优化设计。其一，在制氧机进气端加装两级过滤装置，拦截高原风沙、粉尘，防止富氧膜堵塞；其二，管路连接处采用密封卡扣 + 耐高温密封胶双重密封，杜绝漏气泄压；其三，增设过载保护模块，当内燃机高负荷过热时，自动降低富氧供给量，控制缸内燃烧温度，避免爆震故障；其四，优化电路布局，采用防水防短路线束，适配高原雨雪、霜冻天气，提升设备运行稳定性。

3 试验方案设计与数据分析

3.1 试验基础条件

本次试验采用高原发动机模拟试验台，通过气压调节装置模拟不同海拔大气环境，试验样机选用常用四缸直喷柴油内燃机，额定转速 2200r/min，标定功率 65kW，自然吸气方式。试验环境温度恒定为 10℃，模拟高原常温工况，试验测试仪器包含功率测试仪、扭矩传感器、油耗分析仪，设备校准误差均≤ 0.5%。试验设置两组对照：空白组为未加装制氧机的原机，实验组为加装辅助进气制氧系统的改良机型，分别在 3500m、4500m 海拔工况下开展满负荷性能测试，记录动力、油耗核心参数。

3.2 试验测试数据汇总

通过试验采集整理关键性能数据，对比原机与加装制氧机辅助进气系统后的内燃机性能差异，具体试验数据如下表所示。

表 1 不同海拔工况下内燃机性能试验对比数据

试验海拔 (m)	试验组别	标定功率 (kW)	最大扭矩 (N・m)	燃油消耗率 (g/(kW・h))	进气氧浓度 (%)
3500	空白组（原机）	54.21	218.36	258.72	14.8
3500	实验组（加装装置）	58.87	245.22	229.23	27.65
4500	空白组（原机）	49.65	196.58	286.45	13.2
4500	实验组（加装装置）	54.81	228.23	246.17	29.12

3.3 试验结果分析

3.3.1 动力性能分析

由试验数据可知，加装制氧机辅助进气系统后，内燃机动力性能显著提升。3500m 海拔工况下，改良机型标定功率达到 58.87kW，较原机提升 8.6%，最大扭矩提升 12.3%；4500m 高海拔工况下，动力优化效果更为突出，标定功率提升 10.4%，最大扭矩提升 16.1%。海拔越高，外界氧气稀缺程度越高，制氧机补氧优势越明显。富氧空气提升缸内氧浓度，加快燃油燃烧速率，缩短滞燃期，燃烧爆发力增强，活塞做功效率提升，有效改善高原内燃机动力疲软、加速无力的问题[3]。

3.3.2 经济性能分析

油耗数据直观反映燃油利用效率，原机在 3500m、4500m 海拔下燃油消耗率分别为 258.72g/(kW・h)、286.45g/(kW・h)，燃油浪费严重。加装辅助进气装置后，两种海拔工况燃油消耗率分别降至 229.23g/(kW・

h)、246.17g/(kW · h)，降幅分别为 11.4%、14.1%。高浓度氧气促使燃油充分燃烧，减少积碳生成，降低无效燃油损耗，同时优化燃烧放热均匀性，减少热量散失，提升燃油能量转化率，大幅改善内燃机经济性能。

3.3.3 工况适配性分析

试验过程中，制氧机辅助进气系统运行稳定，无漏气、卡顿故障，在-10℃~15℃温度区间内，富氧浓度波动差值≤ 1.5%，适配高原温差变化。同时，内燃机怠速、中高速运转工况下，补氧调节响应灵敏，无爆震、异响问题。但试验发现，海拔超过 5000m 时，外界空气过于稀薄，制氧机产氧效率小幅下降，后续需优化进气增压结构，进一步提升极端高海拔适配能力。

4 系统应用优势与现存问题

4.1 应用优势

相较于传统改良技术，本次设计的制氧机辅助进气系统具备多重应用优势。一是改造成本低，整套设备采购、安装成本不足 3000 元，无需改动内燃机本体结构，远低于涡轮增压改装费用；二是适配性广，可适配柴油、汽油内燃机，适用于运输车、挖掘机、发电机等各类高原设备；三是运维简便，设备结构简单，富氧膜使用寿命可达 3 年以上，日常仅需清理过滤杂质，维护难度低；四是环保减排，燃油充分燃烧可降低一氧化碳、颗粒物排放，试验测得尾气污染物排放量平均下降 22.6%，符合环保排放标准。

4.2 现存问题

结合试验过程与实际工况测试，该系统仍存在部分缺陷。（1）极端高海拔适配性不足，海拔 5000m 以上区域，大气含氧量过低，制氧机进气流量受限，富氧制备效率下降，动力优化幅度缩减至 7%以内；（2）设备能耗存在损耗，制氧机工作需消耗内燃机少量输出功率，满负荷工况下能耗损耗约 2.1%；（3）低温耐久度不足，-25℃以下极寒环境中，管路密封性下降，易出现轻微漏气问题，影响补氧稳定性。

5 优化改进方案

5.1 极端高海拔适配优化

针对高海拔进气不足问题，在制氧机进气端加装微型增压风机，风机增压范围 0~0.15MPa，提升进气流量，保障稀薄空气环境下制氧效率。同时优化富氧膜组件，采用双层复合富氧膜，提升氧气筛选精度，将极端海拔下富氧浓度稳定维持在 30%以上，确保动力优化效果。增设海拔感应模块，自动匹配不同海拔的补氧参数，实现智能化精准控氧[4]。

5.2 能耗损耗优化

优化制氧机动力供给方式，采用独立锂电池供电，搭配太阳能充电板，利用高原充足太阳能储能，减少内燃机自身功率消耗，将能耗损耗控制在 1%以内。同时优化控制逻辑，内燃机怠速、低负荷工况下调低制氧功率，避免能源无效消耗，进一步提升设备节能性能。

5.3 低温防护优化

对输送管路、密封连接件进行升级，选用耐低温聚氨酯密封材料，适配-40℃低温环境。在制氧机外侧加装保温隔热罩，内置恒温加热模块，低温环境下自动升温，防止设备结冰卡顿。优化管路排布，远离低温迎风面，减少热量流失，提升极寒工况运行稳定性。

结束语

本文针对高原内燃机动力不足问题，完成制氧机辅助进气系统设计，通过模拟试验验证改良效果。试验表明，该系统可有效提升进气氧浓度，3500 米、4500 米海拔下内燃机动力提升明显、油耗显著降低，设备成本低、适配性强，契合高原工程需求。同时指出设备存在极端高海拔性能偏弱、能耗轻微损耗等问题，并提出优化方案。后续可结合智能控制算法实现动态补氧，优化集成体积，推动该装置在高原交通、工程、发电领域规模化应用，为高原内燃机改良提供技术参考。

参考文献

[1] 邓纪辰, 梁海涛, 崔洪江. 高原内燃机车柴油机空气滤清系统流场仿真 [J]. 大连交通大学学报,2024,45(2):58-62.

[2] 孙传庆, 杜静远, 魏宏. 高原双源动力集中型动车组内燃动力车技术特点及运用 [J]. 铁道机车与动车,2023(9):8-10.

[3] 范荣辉, 付建辉, 康子剑, 等. 高原双源动力集中动车组内燃车牵引变流器关键技术分析与验证 [J]. 机车电传动,2024(2):101-107.

[4] 侯逸飞, 李嘉诚, 胡誉缤, 等. 高原环境对汽油机性能影响及改进措施 [J]. 内燃机与配件,2023(1):74-76.