DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.015

高海拔地区内燃机车功率修正控制方法研究

赵　刚
（中车大连机车车辆有限公司，辽宁 大连 166022）

摘　要：文章以高海拔地区内燃机车功率修正需求为设计输入，详细介绍了目前高原内燃机车在不同运用场景下的功率修正控制方法的理论依据、控制效果和局限性，提出了一种自适应功率修正控制策略。通过对柴油机工作特性和高海拔地区复杂运行条件的深入分析，建立了其功率输出与海拔、环境温度、增压器排温、增压器转速等参数之间的算法模型，并结合多机重联隧道运行工况下主从机车中冷后空气温差变化特性，设计了一种全场景自适应的柴油机功率修正控制算法，并通过现场试验验证其正确性，实现了在保证柴油机可靠性的基础上最大程度发挥柴油机功率输出。

关键词：高原内燃机车；功率修正；增压器等排温法；多机重联；自适应控制

中图分类号：U260.9+7　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X(2024)03-0124-06

0　引言

随着青藏铁路开通以及世界一些高海拔地区铁路的建设，高原型内燃机车、动车组的需求变得越来越大[1]，在实际运用过程中内燃机车面临着空气稀薄、空燃比降低的风险，易受到高原地区海拔差大、桥隧比高等复杂的运行条件影响，柴油机性能参数与在平原运用对比有较大差异，尤其是增压器转速和增压器排温在高海拔地区运用会大幅上升，为了将柴油机各项指标保持在安全可靠范围内，保证机车正常运行，需要对柴油机功率进行修正控制[2]。中车大连机车车辆有限公司研制的多款内燃机车已在高原地区运用，公司积累了宝贵的运用数据和相关控制经验，本文以装用12V 265柴油机的双机重联机车和动车组为载体[3-4]，结合柴油机特性和高原复杂多变的运用环境提出柴油机自适应功率修正控制策略。

1　既有功率修正控制方法

内燃机车在高海拔地区运用时，空气中的含氧量降低，导致柴油机的进气量减少，燃烧不充分，降低了功率输出和燃油燃烧效率，为了适应高原环境，需要对柴油机进行功率修正，有效降低其机械负荷和热负荷。根据交流传动内燃机车铁道标准可知，内燃机车功率修正适用环境范围及要求为：当环境温度超过30 ℃，或大气压力低于93.19 kPa，或海拔高度超过700 m时，可进行功率修正[5]。

现有内燃机车功率修正控制方法主要有两种：第一种根据“增压器等排温法”进行主动功率修正，不需要依赖柴油机增压器转速和增压器排温的实时运行参数，该方法在出口高原地区国家的直流传动内燃机车中广泛应用，如东风系列、CKD系列机车；第二种是利用柴油机增压器转速或增压器排温与设定运用限值之间的差值进行被动功率修正，这种控制方法主要应用在高原型HXN3B调车机车。两种功率修正控制方式的本质都是通过降低柴油机的输出功率，从而降低柴油机的机械负荷和热负荷。在机车冷却能力和柴油机输出功率一定的情况下，高海拔地区增压器排温表征柴油机热负荷，而增压器转速表征柴油机机械负荷。在实际运用中，通过提高增压器转速可以增加增压器进气压力和进气量，在一定海拔范围内保障柴油机功率正常输出，但是随着海拔的继续升高，增压器转速的调节能力逐渐到达上限，如果继续维持当前的柴油机功率输出，那么柴油机缸内燃烧将急剧恶化，增压器排温会持续升高，增压器转速也会保持在高转速，

通信作者：赵　刚，男，高级工程师，主要从事内燃机车顶层设计规划等方面的研究；E-mail: zhaogang.dl@crrcgc.cc
引用格式：赵刚. 高海拔地区内燃机车功率修正控制方法研究[J]. 机车电传动, 2024(3): 124-129.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.015.
Citation：ZHAO Gang. Research on power correction control methods for diesel locomotives operating at high altitudes[J]. Electric drive for locomotives,2024(3): 124-129.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.03.015.

长时间处于这种状态将影响柴油机相关部件的可靠性，因此本文采用柴油机增压器转速和增压器排温作为功率修正的关键控制参数，确保柴油机的可靠运用。

1.1　主动功率修正控制方法

主动功率修正控制方法的理论基础为“增压器等排温法”，控制示意图如图1所示。

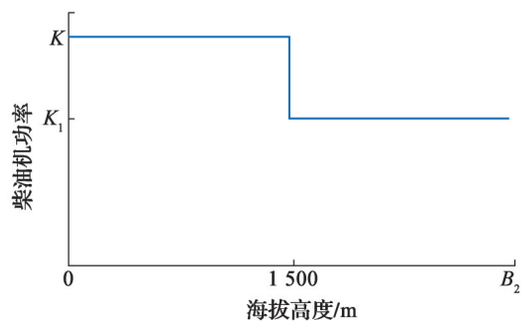


图1　柴油机主动功率修正控制方法控制示意图

Fig. 1　Schematic diagram of active power correction control method for diesels

由图1可知，当机车在低于海拔高度1 500 m的地区运用时，柴油机按照额定功率K运用，无须降功率，此时柴油机增压器排温值为A ℃。当机车在海拔高度高于1 500 m的地区运用时，根据“增压器等排温法”，以当前海拔高度下柴油机增压器排温为A ℃时所发挥出的柴油机功率作为标定后的柴油机功率K_1，即该海拔高度下的功率修正系数$\lambda=K_1\div K$。在1 500~B_2海拔高度范围内的固定交路运行时，全部采用最高海拔B_2下的功率修正系数对柴油机功率进行修正。

1.2　被动功率修正控制方法

柴油机被动功率修正方法以柴油机的增压器转速和增压器排温两项重要的性能指标为控制目标，通过PI调节方式实时修正柴油机功率[6]。控制方法流程图如图2所示。

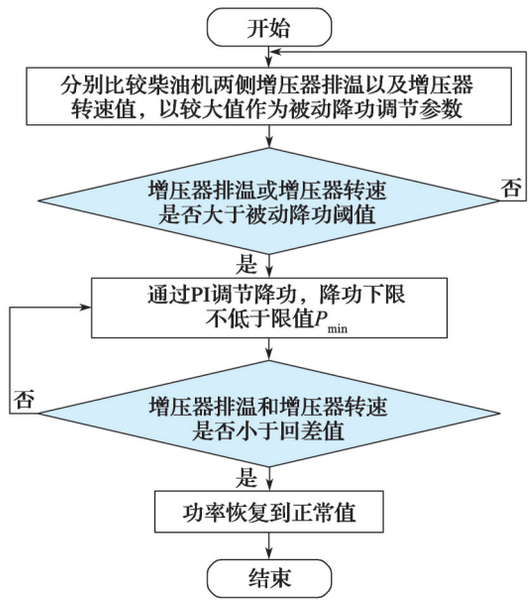


图2　柴油机被动功率修正控制方法流程图

Fig. 2　Flow chart of passive power correction control method for diesels

由图2可知，柴油机被动功率修正方法的控制方案为：

① 对柴油机两侧的增压器转速和增压器排温实时监测，取较大值作为被动功率修正控制参数。

② 当柴油机增压器转速或者增压器排温大于被动降功阈值时，通过PI调节的方式主动降低柴油机功率，从而抑制增压器转速或增压器排温进一步升高，在此过程中如果机车牵引级位不变，则柴油机转速保持不变只降低柴油机功率。在PI调节器中以增压器转速和增压器排温作为输入信号，以PI调节器的功率输出值作为输出信号，实现柴油机功率调节。以增压器排温为例，当增压器排温达到降功阈值T时，需要系统以温度T为控制目标，既要快速调节功率防止增压器排温上升过快，又要在排温下降过程中将温度稳定在温度T附近，而采用PI调节控制，利用其比例积分控制优势，可实现快速响应、保证稳态精度和抗干扰能力。

③ 当柴油机功率降低后，柴油机增压器转速会快速下降，但增压器排温不会马上降低反而会出现短时上升的情况。如果不设置功率修正下限值保护，柴油机功率将持续降低，机车会持续减速甚至停车。重载货运或客运内燃机车在隧道内停车都存在非常大的安全风险，为避免出现以上情况，根据高原内燃机车长期运行经验设定柴油机功率下降的下限值为P_{min}，P_{min}等于当前机车牵引挡位减2挡位对应的柴油机额定功率值。

④ 当柴油机增压器转速和增压器排温小于设定回差值时，以当前机车牵引挡位对应的柴油机额定功率值为目标，控制柴油机功率以正常50%的加载率平稳恢复，防止因柴油机功率恢复过快引起功率震荡或柴油机喘振。

2　既有功率修正控制方法运用场景及运用效果

2.1　典型运用场景

目前在高海拔地区内燃机车柴油机功率修正方法主要采用主动和被动相结合的控制方式，有以下2种典型运用场景：

① 运行交路短，线路区间海拔跨度小的运用场景。以拉萨到日喀则这段线路为例，拉日线全长253 km，海拔高度为2 900~4 033 m，全线隧道占比28.6%，最大坡度12.5‰。在该运用场景下，采用柴油机主动功率修正法即可满足常规要求，被动降功在机车运行中遇到极端环境或柴油机本身出现故障时起保护作用。

② 运行长大交路，线路区间海拔跨度大，桥隧比高的运用场景。以格尔木到拉萨这段线路为例，格拉

线全长 1 118 km，线路海拔高度最高 5 100 m。在这种运用条件下，由于海拔跨度大、桥隧比高，不能简单地以主动功率修正方法降低柴油机功率，需要结合实际线路运用特点，设定合理的主动功率修正基准，并在部分运用区间通过激活被动降功以保证机车运行。

2.2 现有功率修正控制方法应用

以采用双机重联编组形式的内燃机车实际运行数据为例，对现有功率修正控制方法的实际运用效果进行分析。

2.2.1 主动功率修正方法及功率基准设定

主动功率修正控制方法需要根据增压器等排温法和实际线路运行情况设定主动功率修正基准。在运行交路长、海拔跨度大的格拉线，如果将主动修正功率基准定在最高海拔，则柴油机功率无法充分发挥，影响机车运用效果；反之，如主动修正功率基准设定较低，则意味着在大部分运行区间将全部采用被动降功的方式，而长期依靠柴油机增压器转速或增压器排温触碰限值的被动降功方式，这对柴油机的可靠性是一种考验。

2.2.2 被动功率修正控制策略的特性

双机重联机车在拉日线的隧道运行试验数据如图 3、图 4 所示，其中，B 节机车为主控机车，位于编组前方，A 节机车为从控机车，位于编组后方。

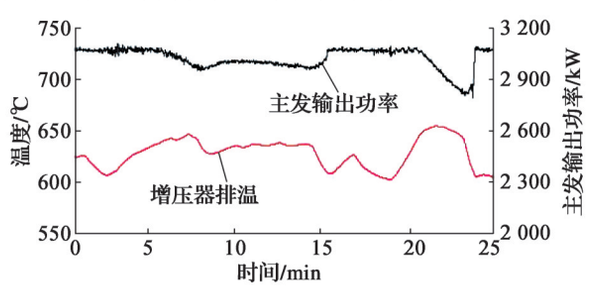


图 3 A 节机车长大隧道线路运行试验曲线

Fig. 3 Curve of operational experiment for locomotive A in long tunnel

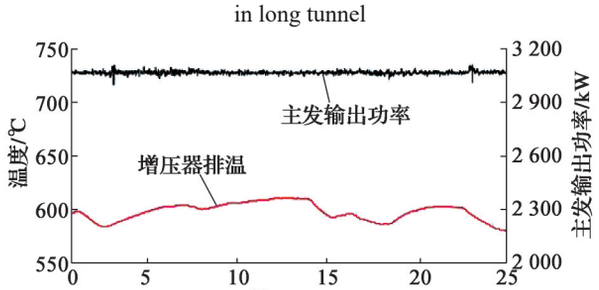


图 4 B 节机车长大隧道线路运行试验曲线

Fig. 4 Curve of operational experiment for locomotive B in long tunnel

对比图 3 和图 4 曲线可以看出，当机车进入隧道后，B 节机车作为主控机车在前方运行，柴油机增压器排温正常；A 节机车作为从控机车在后方运行，进入隧道后受前车 B 节机车排出废气的影响，柴油机增压器进气温度及排温迅速升高，触发被动降功，如果增压器排温变化剧烈，会造成柴油机功率振荡，导致前后两节机车功率输出不一致。由图 3 可知，A 节机车主发输出功率下降时增压器排温没有同步跟随下降，直至主发输出功率在下降 200 kW 后，增压器排温才停止上升，因此，采用柴油机增压器排温触发被动降功存在滞后性。

3 高海拔地区柴油机功率自适应修正控制策略

通过对现有功率修正控制方法实际运用效果和不足的分析，本文提出一种自适应功率修正控制方法以满足内燃机车在高海拔地区复杂多变条件下的运用需求[7-9]。该方法基于增压器等排温法和大气压力–环境温度–海拔高度关系，针对多机重联机车在长大隧道等特殊运用工况需求，增加中冷后空气温差补偿控制策略，建立“大气压力–环境温度–中冷后空气温差补偿–功率修正系数”模型。

3.1 自适应功率修正控制策略

3.1.1 激活条件与失效机制

触发柴油机功率自适应修正控制策略的前提条件：

①柴油机处于功率输出状态，且功率输出值大于 2 挡位对应功率值；

②环境温度、大气压力和中冷后空气温度的传感器检测值均在有效范围内；

③柴油机没有触发其他限制功率的保护，如限手柄保护和停机保护；

④若为多机重联机车，则重联机车通信正常。

当上述条件全部满足，激活柴油机功率自适应修正控制策略。为了保证该控制策略的可靠性，增加大气压力、环境温度和中冷后空气温度检测失效处理机制，当以上任一参数检测值超出正常范围时，则退出自适应功率修正控制，采用被动功率修正，确保机车正常运行。

3.1.2 “大气压力–环境温度–功率修正系数”模型计算方法

以柴油机各挡位的额定功率为基准对高海拔地区运行的柴油机进行功率修正，UIC 标准条件下内燃机车柴油机牵引挡位、转速和功率的对应关系如表 1 所示。

表 1 UIC 标准条件下柴油机转速、功率与挡位对应关系表

Table 1 Correspondence table of diesel speeds, power and gears under UIC standard conditions

参数	0 挡	1 挡	2 挡	3 挡	…	N 挡
柴油机转速/(r·min^{-1})	A_0	A_1	A_2	A_3	…	A_n
功率/kW	K_0	K_1	K_2	K_3	…	K_n

通过传感器采集大气压力，并根据海拔高度与大气压力的对应关系推算当前的海拔高度，如表 2 所示。

表2　海拔高度与大气压力对应关系表

Table 2　Correspondence table of altitudes and atmospheric pressures

海拔高度/m	0	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	…	B_n
大气压力/kPa	101	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	…	X_n

在假定湿度影响可以忽略的情况下，根据表1和表2得出大气压力–环境温度–功率修正系数计算方法为：

$$K_{Ni}=\lambda_1\times K_i \tag{1}$$

$$\lambda_1=k-0.10645(1-k) \tag{2}$$

$$k=\left(\frac{P_i}{760}\right)^{0.7}\times\left(\frac{293}{T_i}\right)^{1.2} \tag{3}$$

式中：K_{Ni}为当前挡位修正后的功率值；λ_1为初始功率修正系数；K_i为当前挡位额定功率值；P_i为当前的大气压力值；T_i为当前的热力学温度值[10]。

基于上述公式设计功率修正系数MAP ,具体包含12个牵引挡位对应的“大气压力–环境温度–功率修正系数”三维MAP，如表3所示。表4为 “大气压力–环境温度–功率修正系数” MAP表。

表3　牵引挡位对应三维MAP表

Table 3　3D MAP table of traction gears

挡位	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
MAP	MAP1	MAP2	MAP3	MAP4	MAP5	MAP6	MAP7	MAP8	MAP9	MAP10	MAP11	MAP12

表4　大气压力–环境温度–功率修正系数MAP表

Table4　MAP table for atmospheric pressure-ambient temperature-power correction coefficients

大气压力	T_0	T_1	T_2	T_3	...	T_n
P_0	λ_{00}	λ_{01}	λ_{02}	λ_{03}	...	λ_{0n}
P_1	λ_{10}	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	...	λ_{1n}
P_2	λ_{20}	λ_{21}	λ_{22}	λ_{23}	...	λ_{2n}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
P_n	λ_{n0}	λ_{n1}	λ_{n2}	λ_{n3}	...	λ_{nn}

3.1.3　多机重联机车中冷后空气温差功率修正系数补偿算法

多机重联机车进入长大隧道时，重联编组内所有机车在同一时刻所处的大气压力、环境温度基本一致，实时计算的功率修正系数基本相同，但受前方主控机车排出废气的影响，重联编组后方从控机车与主控机车的中冷后空气温度会有较大差异，导致后方运行机车增压器排温快速升高触发排温高保护，造成柴油机功率下降过多且功率波动比较剧烈[8]，因此，“大气压力–环境温度–功率修正系数”模型在隧道工况下无法有效地反映后节从控机车最佳的当前功率输出状态。

针对上述情况，在“大气压力–环境温度–功率修正系数”模型基础上增加了中冷后空气温差补偿控制策略。在初始功率修正系数的基础上，同步计算从控机车与主控机车的中冷后空气温差T_{DT}，当T_{DT}大于设定的温差阈值T_{ST}，则激活中冷后空气温差补偿功能，计算出补偿系数λ_2。λ_2的取值依据为：以12V 265柴油机为例，在常规环境下柴油机满功率输出时，增压器排温在580~600 ℃区间内波动，增压器排温被动降功阈值为630 ℃，假设增压器排温取中间值590 ℃，根据中冷后空气温度每增加1 ℃，增压器排温增加2 ℃的经验关系，为最大程度避免触发增压器排温被动降功，将重联机车中冷后空气温差T_{DT}限制在20 ℃以内，经过试验和运用数据分析将中冷后空气温差补偿系数分为3档控制：当10 ℃<T_{DT}<15 ℃时，λ_2=0.98；当15 ℃<T_{DT}<20 ℃时，λ_2=0.94；当T_{DT}≥20 ℃时，λ_2=0.88。最终的功率修正系数$\lambda=\lambda_1\times\lambda_2$。在此过程中如果触发了增压器排温被动降功，则取自适应功率修正和增压器排温被动降功两者的最小值作为最终的功率输出值，其详细控制方案如图5所示。

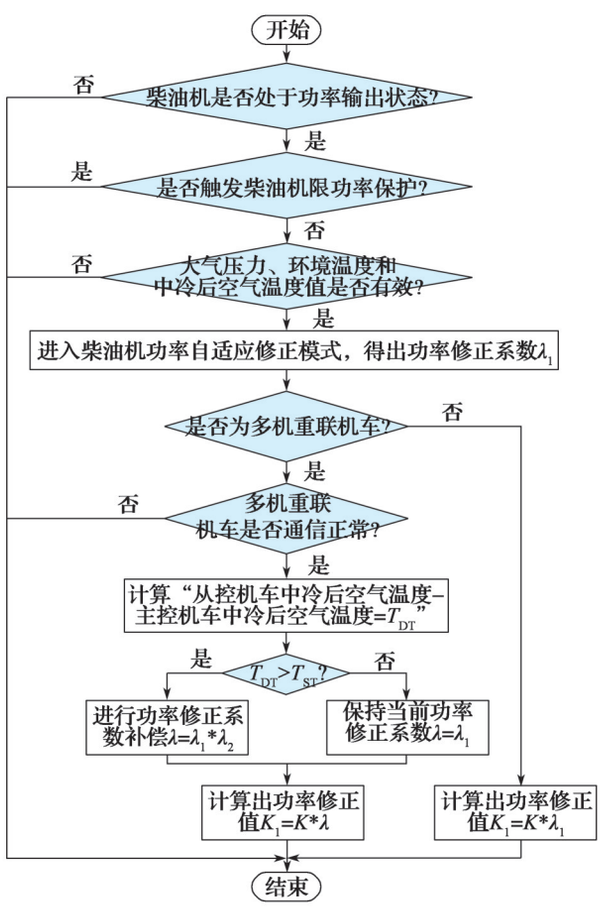


图5　自适应功率修正控制方法流程图

Fig. 5　Flow chart of adaptive power correction control method

3.2　试验验证分析

为验证高海拔地区柴油机功率自适应修正控制策略的应用效果，采用一款装载12V 265柴油机的双机重

联内燃机车在甘肃乌鞘岭隧道进行了实车验证，乌鞘岭隧道海拔高度3 650 m，隧道长度20.05 km，满足功率修正试验条件。试验效果曲线如图6~图8所示，其中，B节机车为主控机车，A节机车为从控机车。

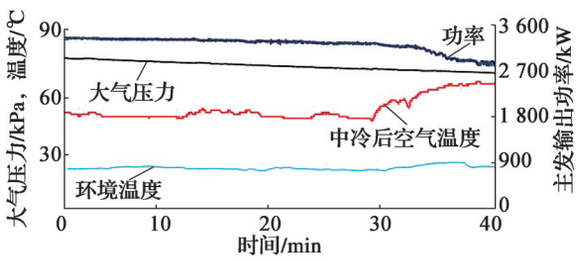


图6 乌鞘岭隧道A节柴油机功率修正试验曲线

Fig. 6 Curve of power correction experiment for diesel locomotive A in Wushaoling tunnel

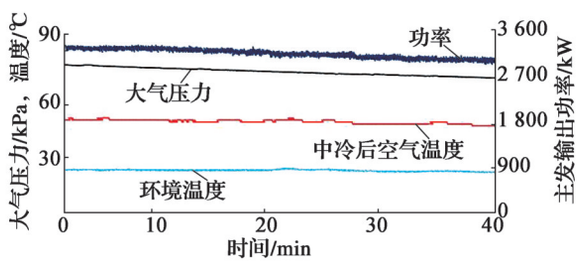


图7 乌鞘岭隧道B节柴油机功率修正试验曲线

Fig. 7 Curve of power correction experiment for diesel locomotive B in Wushaoling tunnel

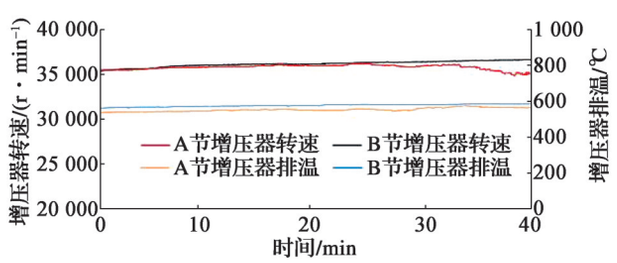


图8 两节机车增压器转速和增压器排温对比曲线

Fig. 8 Comparison curve of supercharger speed and supercharger exhaust temperature between two locomotives

由图6~图8数据曲线可以看出，整个试验过程分为以下3个阶段：

① 在0~30 min时间段内，因海拔高度变化，隧道内的大气压力持续下降，由82 kPa逐渐降低73 kPa，环境温度均保持在23 ℃左右，中冷后空气温差4 ℃左右，两节机车通过“大气压力–环境温度–功率修正系数”模型进行功率修正，主发输出功率由3 360 kW下降到3 250 kW。

② 在30~40 min时间段内，A节机车中冷后空气温度快速升高至70 ℃，B节机车中冷后空气温度在50 ℃左右。30 min时，主从机车中冷后空气温差达到设定的温差阈值10 ℃，触发了中冷后空气温差功率修正系数补偿；30~32 min时间段内，主从机车中冷后空气温差在10~15 ℃范围内，此时λ_2=0.98，A节机车主发输出功率从3 250 kW下降到3 185 kW；32~34 min时间段内，主从机车中冷后空气温差在15~20 ℃范围内，此时λ_2=0.94，A节机车主发输出功率下降到3 050 kW；34~40 min时间段内，主从机车中冷后空气温差达到20 ℃，此时λ_2=0.88，A节机车主发输出功率下降到2 880 kW；36 min时，主从机车中冷后空气温差不再增加，A节机车主发输出功率达到平衡状态。

③ 40 min后机车驶出隧道，试验完成，牵引挡位回零，主从机车进气温差回到阈值以下，退出功率修正状态。

上述试验表明，采用分段式补偿系数设定方法，整个控制过程中功率变化平稳，满足重联机车在隧道环境下的运用需求，最大程度发挥了柴油机功率，且柴油机相关参数保持在合理范围内，达到了预期效果。

4 结论

本文以高海拔地区柴油机功率修正控制为研究对象，分析了现有功率修正控制方法及其不足，深入研究了柴油机外部工作环境、自身关键参数以及特殊运用场景对柴油机功率输出的影响，提出了一种全场景自适应的柴油机功率修正策略。通过线路试验验证了该方案能显著提高功率控制的稳定性，有效保证柴油机功率输出，为高海拔地区和特殊工况下的内燃机车可靠运行提供了重要的指导作用和参考价值。

参考文献：

[1] 王奭. HXN3型(过渡方案)高原内燃机车在青藏铁路的运用[J]. 铁道机车与动车, 2016(11): 35-37.
WANG Shi. The application of HXN3 (transitional scheme) plateau diesel locomotive on Qinghai-Tibet Railway[J]. Railway locomotive and motor car, 2016(11): 35-37.

[2] 张朝毅, 曹祥诚, 王洪峰, 等. 过渡型高原内燃机车增压器高原适应性优化试验研究[J]. 铁道机车与动车, 2021(6): 22-25.
ZHANG Zhaoyi, CAO Xiangcheng, WANG Hongfeng, et al. Experimental study on the plateau adaptability optimization for transitional plateau diesel locomotives[J]. Railway locomotive and motor car, 2021(6): 22-25.

[3] 钱铭, 张大勇, 廖洪涛. 复兴号高原双源动力集中动车组关键技术[J]. 中国铁路, 2022(6): 1-9.
QIAN Ming, ZHANG Dayong, LIAO Hongtao. Key technologies of Fuxing plateau dual-source power centralized EMU[J]. Chinese railways, 2022(6): 1-9.

[4] 傅鑫. HXN3K型客运内燃机车交流传动系统方案设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
FU Xin. Design of AC drive system of HXN3K passenger diesel locomotive[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.

[5] 国家铁路局. 交流传动内燃机车: TB/T 3488—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
National Railway Administration of People's Republic of China. AC drive diesel locomotive: TB/T 3488—2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.

[6] 戚元涛, 张朝毅, 芦宁, 等. 一种大功率中速柴油机的高原适应性改进[J]. 内燃机与动力装置, 2017, 34(6): 22-25.
QI Yuantao, ZHANG Zhaoyi, LU Ning, et al. Improvement of plateau adaptability of a medium-speed high-power diesel engine[J]. Internal combustion engine & power plant, 2017, 34(6): 22-25.

[7] 魏宏, 孙传庆, 范雅辉, 等. 高原内燃机车功率自动修正控制方法: CN 202211418153.9[P]. 2022-11-14.
WEI Hong, SUN Chuanqing, FAN Yahui, et al. Automatic power correction control method for plateau diesel locomotives: CN 202211418153.9[P]. 2022-11-14.

[8] 吕红卫, 张博睿, 贺达. 过渡方案 HXN3 高原机车柴油机增压器高原运用适应性方案研究[J]. 内燃机, 2018(1): 1-4.
LYU Hongwei, ZHANG Borui, HE Da. Study on the plateau adaptive scheme of the turbocharger for the transition scheme HXN3 plateau locomotive diesel engine[J]. Internal combustion engines, 2018(1): 1-4.

[9] 李洪波, 张福根, 张宏涛, 等. 喷油提前角和进气压缩压力对柴油机燃烧性能影响研究[J]. 内燃机, 2022, 38(3): 39-42.
LI Hongbo, ZHANG Fugen, ZHANG Hongtao, et al. Influence of fuel injection advance angle and intake compression pressure on combustion performance of diesel engine[J]. Internal combustion engines, 2022, 38(3): 39-42.

[10] 董锡明. 大气条件变化时增压四冲程柴油机的功率修正和试验:国际内燃机会议(CIMAC)1971 年规范的说明[J]. 国外内燃机车, 1971(3): 1-12.
DONG Ximing. Power correction and testing of turbocharged four stroke diesel engines under changing atmospheric conditions: explanation of the 1971 specifications of the international conference on internal combustion engines (CIMAC) [J]. Foreign railway locomotive and motor car, 1971(3): 1-12.

Research on power correction control methods for diesel locomotives operating at high altitudes

ZHAO Gang

(CRRC Dalian Co., Ltd., Dalian, Liaoning 166022, China)

Abstract: This paper introduced in detail the theoretical basis, control effects, and limitations associated with existing power correction control methods for plateau diesel locomotives in different application scenarios, and proposed an adaptive power control strategy, considering the power correction requirements of diesel locomotives operating at high altitudes as the design input. Through a thorough examination of operating characteristics of diesels and complex operating conditions at high altitudes, an algorithmic model was established to capture the relationships between diesel power outputs and parameters such as altitude, ambient temperatures, supercharger exhaust temperatures, and supercharger speeds. Subsequently, a full-scenario adaptive diesel power correction control algorithm was designed, taking into account the fluctuating features in post-intercooling temperature differences between the leading and other locomotives while operating under coupled conditions in tunnels. Furthermore, the validity of the proposed algorithm was verified through field experiments, where the power outputs of the diesels were maximized while ensuring their operational reliability.

Keywords: plateau diesel locomotive; power correction; supercharger exhaust temperature method; coupled multiple locomotives; adaptive control

收稿日期：2023-06-06；修回日期：2024-02-15