

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210440

基于等效故障注入试验的列车风源系统 故障影响规律与分析*

丁景贤^{1,2}, 左建勇^{2,3}, 任利惠²

(1. 同济大学机械 Engineering 流动站 上海 201804; 2. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院 上海 201804;
3. 同济大学上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室 上海 201804)

摘要:为获取列车风源系统故障诊断所需特征参量及故障影响规律,针对部分故障模式不可注入或注入具有破坏性等问题,阐述了风源系统的构成原理和故障模式,提出了等效故障模型设计方法及等效故障注入流程,基于等效故障注入试验研究了5种典型故障模式在不同故障程度下的影响规律并分析了故障原因。研究表明:等效故障注入试验可以在不对风源系统造成破坏的情况下再现供气不足、油温高以及压缩机不加载3类典型故障现象,且不同故障模式的影响规律和特征参量不同。进气过滤器严重堵塞时总风压力不足740 kPa,造成供气不足现象;温控阀严重卡滞时最高喷油温度和机头排气温度分别较正常值增加了约20℃和17℃,冷却油流量最大减小了约14 L/min;冷却器积灰引起冷却效果下降,环境温度分别为20℃、35℃和50℃时,最大下降约3℃;油严重泄漏时喷油流量高出正常值约19 L/min,机头排气温度最高可达105℃,造成油温高现象;卸荷电磁阀卡滞造成开度为25%~100%时总风压力只有690 kPa,造成供气不足现象,开度为0时空压机第一次正常工作并停机后无法重新启动,造成压缩机不加载现象。研究结果为基于温度、压力等多传感器数据的故障诊断算法设计以及智能风源系统传感器布局提供了参考。

关键词:列车;风源系统;等效故障注入试验;故障模式;特征参量;传感器布局

中图分类号: U270.7 TH-39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.30

Fault influence law and analysis of train air supply systems based on equivalent fault injection test

Ding Jingxian^{1,2}, Zuo Jianyong^{2,3}, Ren Lihui²

(1. Postdoctoral Station of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Shanghai Key Laboratory of
Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To obtain characteristic parameters and fault influence law required for fault diagnosis of the train air supply system, and address the problems that some fault modes cannot be injected or the injection is destructive, the structure composition, working principle and fault modes are explained. The equivalent fault model design method and the equivalent fault injection process are proposed. Based on the equivalent fault injection test, the influence laws of five typical fault modes at different failure levels were studied and the causes of the faults are analyzed. The research results show that the equivalent fault injection test could reproduce the three typical fault phenomena of insufficient air supply, high oil temperature and compressor not loading without causing damage to the air supply system. The influence laws and characteristic parameters of different fault modes are different. When the air intake filter is severely blocked, the total air pressure is less than 740 kPa, resulting in insufficient air supply. When the temperature control valve is severely stuck, the maximum fuel injection temperature and the compressor head exhaust temperature are increased by about 20℃ and 17℃ compared with the normal values, and the maximum cooling oil flow is decreased by about 14 L/min. The cooling effect is reduced due to the accumulation of dust in the cooler, and the maximum drop is about 3℃ when the ambient temperature values are 20℃, 35℃, and 50℃, respectively. When the oil is seriously leaking, the fuel injection flow is about 19 L/min higher than the normal value, and the compressor head exhaust temperature could reach up to 105℃, resulting in high oil temperature. When the opening degree of the

收稿日期: 2022-09-14 Received Date: 2022-09-14

* 基金项目: 国家自然科学基金(62273258)、中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划(N2022J019)、上海市多网多模式轨道交通协同创新中心项目资助

unloading solenoid valve is from 25% ~ 100%, the total air pressure is only 690 kPa, resulting in insufficient air supply. When the opening degree is 0, the air compressor could not restart after the first normal operation and shutdown, causing the compressor not loading. The research results provide a reference for the design of fault diagnosis algorithm based on multi-sensor data such as temperature and pressure and sensor layout of intelligent air supply systems.

Keywords: train; air supply system; equivalent fault injection test; fault mode; characteristic parameter; sensor layout

0 引言

轨道交通凭借“高效、便捷、环保”等优点已成为城际和市域通行的主要交通方式^[1]。伴随轨道交通服役时间的增加,作为轨道交通的核心组成部分,列车设备的安全性受到业内的广泛关注^[2-4]。风源系统为制动系统、受电弓等用风设备提供工作必需的清洁、干燥的压缩空气,是列车的关键设备,其可靠性极其重要。但由于风源系统安装在车底架下,列车运行时服役于振动冲击^[5-7],沙尘、潮湿^[8]等恶劣环境中,启停频繁,各部件不可避免会发生性能退化甚至功能故障。目前已出现供气不足、油温高以及压缩机不加载等典型故障现象^[9-11],严重影响列车服役安全、效率和维护成本。

随着大数据、人工智能等技术的推广应用,开展风源系统故障诊断研究能够对潜在故障做出预警,对提高风源系统安全可靠,降低维护成本具有重要意义,关键在于获取特征参量和故障影响规律等先验知识^[12]。然而,目前风源系统智能化程度不高,仅有少量压力、温度开关用于控制反馈,缺少服役状态数据,无法基于多传感器信息与历史数据进行故障预警和诊断^[13-14]。

故障注入方法通过对故障模式进行复现,可有效获取数据和进行可靠性验证^[15]。Arlat等^[16]运用故障注入方法对计算机系统的容错机制进行可靠性验证,方法行之有效。马骅等^[17]提出了基于历史故障数据的云平台故障注入测试方法,模拟实验结果表明方法有效。彭宇等^[18]通过在无人机模型上进行故障注入与仿真,获取了故障数据。故障注入方法在轨道交通领域也得到了应用,蔡伯根等^[19]搭建了列车运行控制系统故障注入仿真平台,对关键设备典型故障注入案例进行测试,验证了方法的有效性。田春等^[20]和左建勇等^[12]运用故障注入方法在地铁制动系统试验台上分别模拟了常用和紧急制动故障,获取了相应的故障数据。上述文献表明了基于故障注入方法获取故障数据的可行性。然而,随着现代化装备复杂度和集成度的提高,有些故障模式不可注入或注入后易导致系统出现不可修复的损坏。具体到列车风源系统,进气过滤器由于杂质堆积造成的堵塞故障无法使其恢复至正常状态;温控阀、卸荷电磁阀由于封装严密,卡滞故障难以直接注入;油气筒油泄漏故障注入容易造成环境污染甚至引发火灾。上述问题限制了列车风源

系统故障注入试验的开展,故障数据获取困难,试验成本高。为此,有学者对等效故障注入方法进行了相关研究。邱文昊等^[21]提出了基于“故障模式-功能-状态”故障行为模型的等效故障注入方法,并通过某装备发射控制系统验证了方法的有效性。李天梅等^[22]针对位置不可访问的故障注入问题,提出了基于故障传递特性的等效故障注入方法。但目前尚未见基于等效故障注入方法研究列车风源系统故障影响规律的相关报道。事实上,由于风源系统的工作介质具有连续性,各部件之间存在耦合联动关系,故障存在“传播性”,即某一部件的故障除了影响自身外,还会通过气路或油路进行传递造成连锁反应,引起其余部件出现故障现象^[23],满足等效故障注入的条件。

因此,本文以某列车风源系统为研究对象,详细阐述并分析风源系统的结构组成、工作原理以及典型故障模式。结合各部件数学模型设计了等效故障模型,并给出了等效故障注入流程。最后,开展等效故障注入试验研究了列车风源系统在不同故障程度下的故障影响规律,并分析了故障原因。

1 风源系统故障模式分析

1.1 工作原理

如图1所示,典型风源系统主要由空气压缩机组、双塔干燥器、过滤器、电控单元以及气控单元组成^[11],其工作过程包含3个阶段,即:空载启动阶段(吸气过程),供风阶段(压缩过程)和卸荷阶段(排气过程)。



图1 风源系统

Fig. 1 Air supply system

电控单元和气控单元负责压缩机启停控制。压缩机启动后,空气经进气过滤器过滤,打开进气阀后通过压缩机头产生压缩空气。压缩空气与油形成油气混合物进入

油气分离器并打在油气筒隔板上凝聚成液态沉降在油气筒底部,完成油的粗滤。剩余部分由油气分离器进行油气精细分离后被收集在油气分离器的底部,在压缩空气的作用下通过回油管返回压缩机头。温控阀中的感温元件能控制阀芯位移进而控制油直接或经油冷却器冷却后到达油过滤器。当油气分离器内压力达到最小压力阀开启值时,压缩空气经过空气冷却器冷却后对外输出。由于冷却后的高压湿空气中含有水蒸气和油雾,在进入双塔干燥器之前依次经过汽水过滤器和除油过滤器过滤后通过排水(污)电磁阀定时排出。在双塔干燥器切换和排水(污)过程中总风压力均会下降,且前者下降幅度大,后者较小。双塔干燥器对空气冷却器冷却后的高压湿空气进行干燥。除尘过滤器负责去除压缩空气经过双塔干燥器后携带的粉尘。总风压力达到目标值后压缩机停机,油气分离器内压力经卸荷电磁阀卸放至进气阀内,确保压缩机组下次能够在低负载的情况下重新启动。

1.2 故障模式

由风源系统工作原理可知,卸荷电磁阀、温控阀等关键部件对于确保风源系统正常工作必不可少,部件失效会引起风源系统故障,进而影响行车安全。根据实地调研和风源系统工程师运维经验,归纳分析风源系统关键部件典型故障模式如表1所示。

表1 风源系统关键部件典型故障模式

Table 1 Typical failure modes of key components of the air supply system

序号	故障模式	故障机理
1	进气过滤器堵塞	空气中尘土等杂质堆积在滤芯表面
2	进气阀卡滞	阀芯被杂质等异物卡住不动
3	油气分离器堵塞	金属微粒、油的劣化物等杂质堵塞滤芯
4	温控阀卡滞	阀芯被杂质等异物卡住不动
5	冷却器积灰	散热翅面被灰尘、油污等覆盖
6	油过滤器堵塞	金属微粒、油的劣化物等杂质堵塞滤芯
7	油气筒油量不足	密封不严或老化失效,带压油泄漏
8	卸荷电磁阀卡滞	阀芯被杂质等异物卡住不动

2 等效故障注入试验

2.1 等效故障模型

故障注入^[15]是人为向系统中引入需求故障,加速系统失效同时观测和回收系统对注入故障的响应信息,并对信息进行分析,是获取故障数据的有效方法。故障注入主要有硬件故障注入和软件故障注入,前者是在实物上的物理故障实现方法,后者是通过建模与仿真软件在计算机仿真模型中注入故障的方法。

由风源系统构成原理可知,风源系统实属一个“机-电-气-液”耦合复杂非线性系统,难以获取风源系统精细准确的模型,而模型的简化处理容易使试验结果的精确性降低甚至得到错误的结果。为保证获取故障影响规律的准确性,本文采用基于硬件的故障注入方法。

此外,风源系统因各部件封装集成度较高,存在部分故障模式不可注入,或注入后难以恢复至正常状态甚至出现不可修复的损坏等问题,限制了故障注入试验的开展。考虑到风源系统工作介质具有连续性,故障发生后会在风源系统内部进行传递,满足等效故障注入的条件,风源系统等效故障注入流程如图2所示。

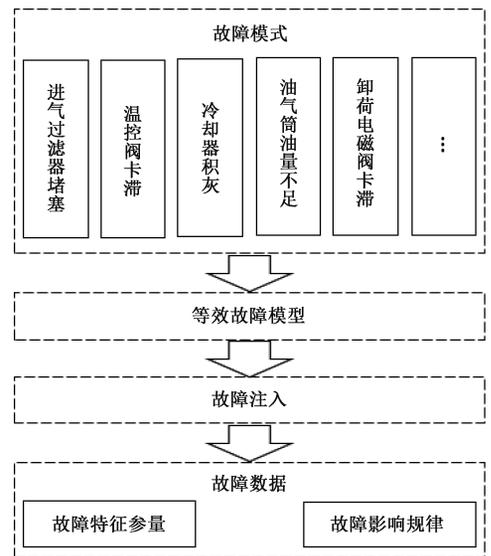


图2 风源系统等效故障注入流程

Fig. 2 Equivalent fault injection flow chart of the air supply system

显然,图2中等效故障模型越接近风源系统各部件实际运行期间所发生的故障,试验结果就越准确。为此,本文提出基于数学模型分析的等效故障模型设计方法。基于该方法得到的各部件等效故障模型因具有严格的理论基础而具有可信性。

以进气过滤器堵塞故障模型为例,由于空气经过进气过滤器后温度变化很小,可以忽略不计,因此只需考虑压力损失,进气过滤器的压力损失表示为^[24]:

$$\Delta p = \xi \frac{\rho U^2}{2} \quad (1)$$

式中: Δp 为压力损失; ξ 为阻力损失系数; ρ 为空气密度; U 为进气过滤器面流速。

由式(1)可知,可以通过调整 ξ 或 U 来设计进气过滤器堵塞故障模型,其余等效故障模型可依据各部件数学模型来获取。综合故障传递特性和等效故障模型获取的

可操作性,本文基于“等效故障注入思想”设计的5种典型等效故障模型的实现方法如表2所示。

表2 风源系统典型等效故障模型实现方法
Table 2 Typical equivalent fault models realization methods of the air supply system

序号	故障模式	等效故障模型实现方法
1	进气过滤器堵塞	在进气过滤器和进气阀之间放置橡胶板,通过控制橡胶板开孔直径模拟不同堵塞程度
2	温控阀卡滞	在温控阀轴端固定座加工一螺纹孔,通过控制螺栓旋进深度模拟不同卡滞程度
3	冷却器积灰	用油泥遮挡不同面积的冷却器翅片以模拟不同积灰程度
4	油气筒油量不足	通过注油口抽取不同体积的油以模拟不同泄漏程度
5	卸荷电磁阀卡滞	在卸荷电磁阀后端串联一针阀并拔掉电插头,控制针阀的开度模拟不同卡滞程度

2.2 传感器布置

风源系统正常工作状态主要受进气温度、进气压力、总风压力等环境和负载因素的影响,而风源系统典型故障涉及气路和油路,具有连续性,各部件间存在耦合关系,但目前风源系统只设有压力开关和温度开关,无法实时获取各测点传感器数据。

为了能够实时监测风源系统关键部件在正常以及故障时的状态变化,便于提取特征参量,在风源系统中布置了相应的传感器,传感器布置明细如表3所示。

表3 传感器布置明细
Table 3 Sensor layout details

序号	监测对象	序号	监测对象
1	进气压力	8	油气分离器前后端压力
2	进气温度	9	空气冷却器前后端温度
3	进气过滤器后端压力	10	除尘过滤器前后端压力
4	喷油流量	11	油冷却器前后端温度
5	冷却油流量	12	油过滤器前后端压力
6	喷油温度	13	总风缸容积流量
7	机头排气温度	14	总风压力

2.3 试验设备

为了真实模拟实际故障,等效故障注入试验在与实际列车相同的风源系统上开展。按照表2等效故障模型实现方法和表3传感器布置明细对风源系统进行改造,改造后的风源系统以及测试设备如图3所示。

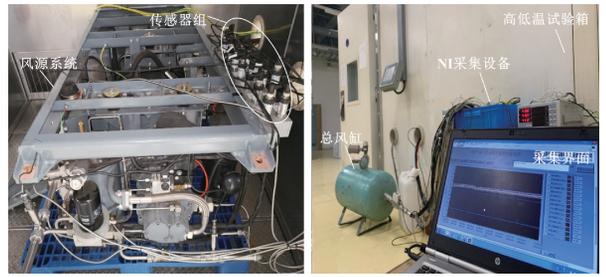


图3 风源系统试验现场

Fig. 3 Test site of the air supply system

等效故障注入试验过程中进气压力为大气压,进气温度通过高低温试验箱调节,可调节温度范围为-60℃~100℃,总风压力目标值为900 kPa。表3中各传感器信号通过信号调理电路模块转化并滤波后由NI采集设备实现同步采集、显示和保存,采样频率为10 Hz。

3 风源系统故障影响规律与分析

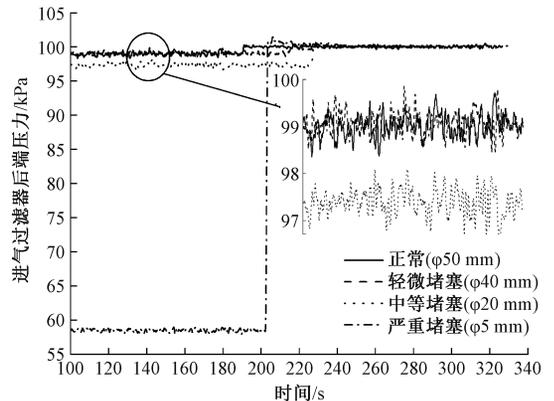
等效故障注入试验记录了表3中所有传感器数据,数据量较大,为便于观察,经初步分析后给出了5种典型故障模式下与正常值具有明显变化的特征参量-时间历程曲线。

需要说明的是,由于风源系统工作过程包含空载启动(吸气),供风(压缩)和卸荷(排气)3个阶段,所以总风压力曲线呈现先增加,然后保压,最后下降的特点。

3.1 进气过滤器堵塞

正常情况下进气过滤器后端有效通径为φ50 mm,图4给出了进气过滤器滤芯正常、轻微、中等以及严重堵塞时进气过滤器后端压力和总风压力变化曲线。

由图4可知,风源系统发生进气过滤器轻微堵塞时,进气过滤器后端压力与正常值基本无差异。但随着滤芯堵塞程度的增加,进气过滤器后端压力不断减小,中等堵塞时的进气过滤器后端压力比正常值低约2 kPa,但总风压力仍可以达到目标值附近;当发生严重堵塞时,进气过



(a) 进气过滤器后端压力
(a) Rear pressure of air intake filter

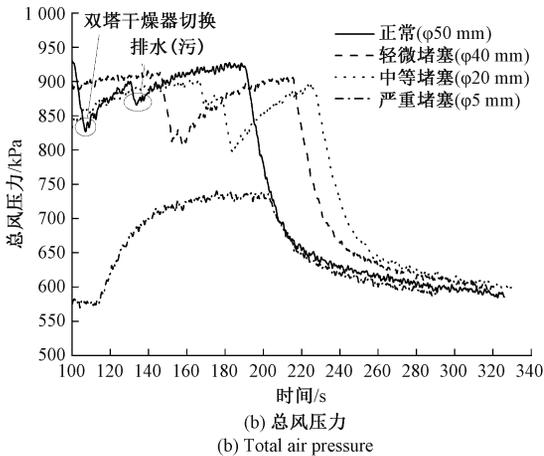


图4 进气过滤器堵塞试验结果

Fig. 4 Test results of air intake filter clogging

滤器后端压力不足 60 kPa,总风压力不足 740 kPa。分析原因为:严重堵塞时进气压力损失急剧增加,进气阀阀芯两端压力差不足以使进气阀阀芯运动到位,进气通道不能完全开启,最终造成供气不足现象。

3.2 温控阀卡滞

正常情况下温控阀阀芯最大行程为 9 mm,由于温控阀在油温高时起作用,图 5 给出了 50℃ 下温控阀阀芯正常、轻微、中等以及严重卡滞 4 种情况的试验结果。

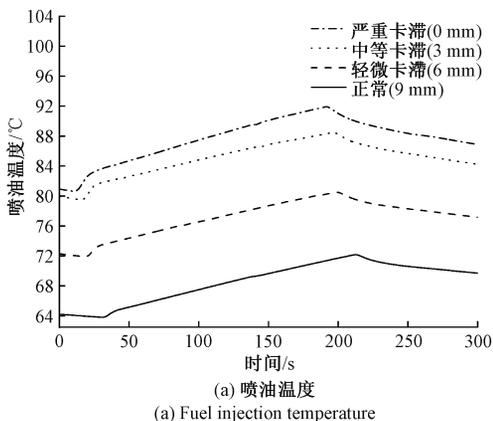
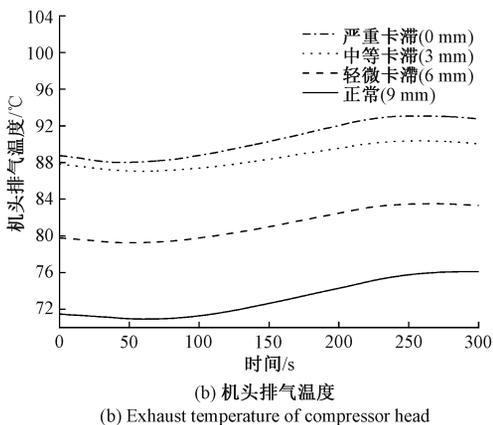
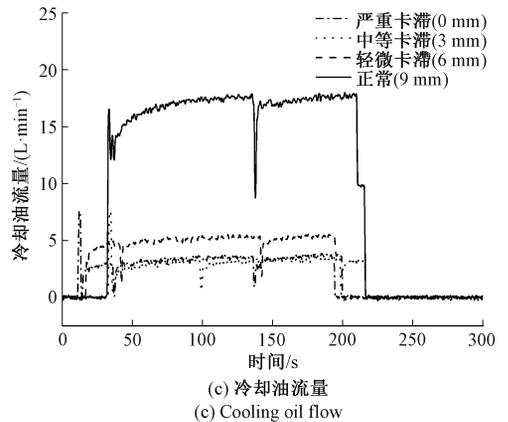
(a) 喷油温度
(a) Fuel injection temperature(b) 机头排气温度
(b) Exhaust temperature of compressor head

图5 温控阀卡滞试验结果

Fig. 5 Test results of temperature control valve stuck

由图 5 可知,随着温控阀阀芯卡滞程度增加而导致行程不断减小时,喷油温度和机头排气温度均不断增加,而冷却油流量却减小,严重卡滞时最高喷油温度和机头排气温度分别较正常值增加了约 20℃ 和 17℃,冷却油流量最大减小了约 14 L/min。这是因为阀芯卡滞时温控阀的旁通回路无法完全打开并截止主回路,部分油从温控阀主回路直接返回压缩机头,导致从旁通回路流经油冷却器的油量减少,无法充分发挥油冷却器的冷却作用,造成油温高现象。

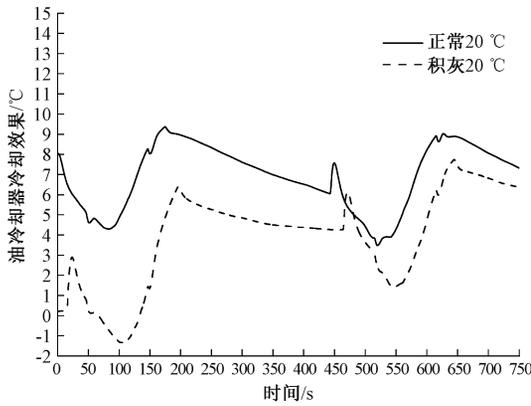
3.3 冷却器积灰

考虑到冷却器面积较大,冷却器积灰不会特别严重,本文在冷却器被遮挡 25% 面积的前提下,依次调整环境温度分别为 20℃、35℃ 和 50℃,观察冷却器冷却效果,试验结果如图 6 所示。

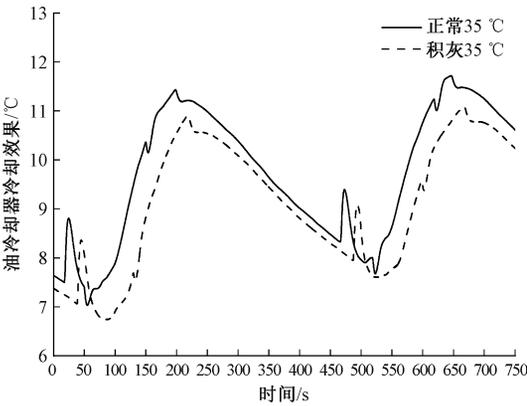
由图 6 可知,环境温度分别为 20℃、35℃ 和 50℃ 时,冷却器积灰情况下冷却效果均下降,最大下降约 3℃。这是由于当冷却器散热翅面被灰尘、油污等覆盖时,离心风扇抽入的冷空气与压缩机排出的压缩空气进行热交换的能力减弱,散热不畅,导致机体温度上升。此外,随着环境温度的升高,冷却器冷却效果提高,说明冷却器在环境温度高的时候更能发挥其冷却能力。因此,为避免更为恶劣环境下由于压缩机工作产生的温度不能及时与环境温度置换,油温和排气温度过高而停机,需要定期清洗冷却器以确保其冷却效果。

3.4 油气筒油量不足

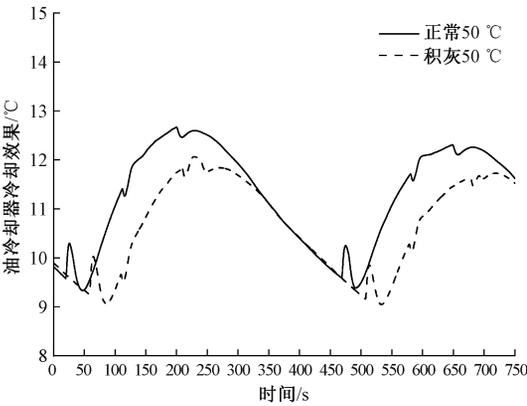
正常情况下油气筒油量为 4.5 L,考虑到油气筒漏油一般不会特别严重,但在环境温度过高时可能会因油量不足造成压缩机工作产生的温度不能充分冷却,图 7 给出了 50℃ 下油气筒油量分别为正常、轻微、中等以及严重泄漏的试验结果。



(a) 20 °C



(b) 35 °C

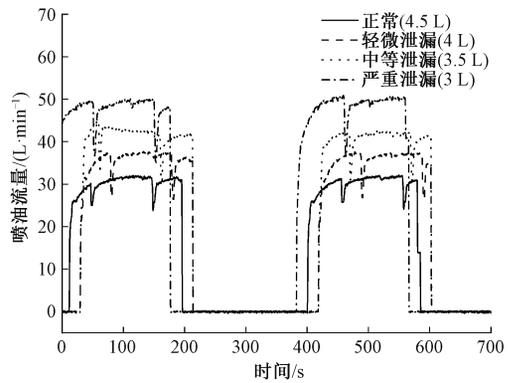


(c) 50 °C

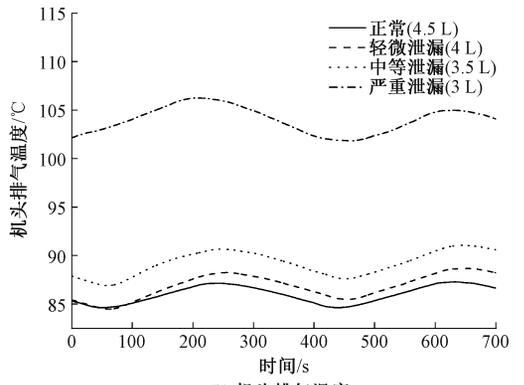
图6 冷却器积灰试验结果

Fig. 6 Test results of cooler dust accumulation

由图7可知,风源系统发生油气筒油量不足故障时,随着油气筒中油量不断减少,喷油流量和机头排气温度均增加。这是因为油除了起到润滑作用外还起冷却作用,当油路系统密封不严或老化失效导致带压油泄漏时,油量减少而又未能够及时补充,其冷却效果减弱,造成油温高现象。此时,油的粘性下降,流动阻力降低,油流速增加进而引起喷油流量增加。当发生严重泄漏时,喷油流量高出正常值约19 L/min,机头排气温度最高可达



(a) 喷油流量
(a) Fuel injection flow



(b) 机头排气温度
(b) Exhaust temperature of compressor head

图7 油气筒油量不足试验结果

Fig. 7 Test results of insufficient oil in oil cylinder

105°C,接近报警阈值,进一步泄漏会使温度开关断开,压缩机断电停机。

3.5 卸荷电磁阀卡滞

图8给出了卸荷电磁阀开度分别为0、25%、50%、75%以及100%这5种情况时油气分离器压力和总风压力变化曲线。

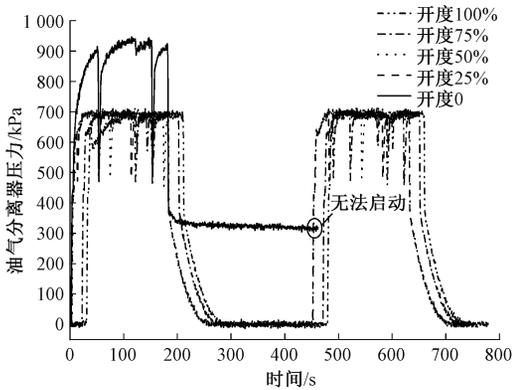
由图8可知,风源系统发生卸荷电磁阀卡滞故障,开度为25%~100%时的总风压力只有690 kPa左右,无法达到目标值;在开度为0时,压缩机第一次正常工作并停机后无法重新启动。这是因为卸荷电磁阀开度为25%~100%时,风源系统工作过程中油气分离器与进气阀阀座内一直处于连通“漏气”状态,总风压力无法达到目标值,造成供气不足故障。此时,由于总风压力低于列车正常运营要求,在压力开关的反馈下空压机会一直处于运转状态,造成能源浪费。卸荷电磁阀开度为0时,由于油气分离器压力无法通过卸荷电磁阀卸放至进气阀阀座内,油气分离器压力高于设定值(250 kPa),在压力开关的反馈下压缩机无法重新启动(如图8(a)),造成压缩机不加载现象。

表4 风源系统典型故障影响规律与特征参量

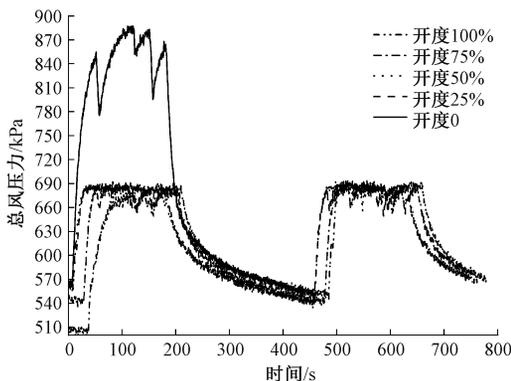
Table 4 Typical fault influence rules and characteristic parameters of the air supply system

部件名称	影响规律			特征参量
	供气不足	油温高	压缩机不加载	
进气过滤器	1	0	0	进气过滤器后端压力;总风压力
温控阀	0	1	0	喷油温度;机头排气温度;冷却油流量
冷却器	0	1	0	冷却器前后端温度
油气筒	0	1	0	喷油流量;机头排气温度
卸荷电磁阀	1	0	1	油气分离器压力;总风压力

注:表中“1”代表有影响,“0”代表无影响。



(a) 油气分离器压力
(a) Oil-gas separator pressure



(b) 总风压力
(b) Total air pressure

图8 卸荷电磁阀卡滞试验结果

Fig. 8 Test results of unloading solenoid valve stuck

3.6 等效故障注入试验效果

由图4~8及上述分析结果可知,基于等效故障注入试验开展的风源系统5种典型故障模式能够有效再现供气不足、油温高以及压缩机不加载3类典型故障现象,提高了风源系统的故障注入率,且未对风源系统造成破坏,降低了试验成本。

另外表4归纳出了5种典型故障模式的影响规律与涉及的特征参量。

由表4可知,风源系统5种典型故障模式造成的故障影响规律不完全相同。进气过滤器后端压力、总风压力、喷油温度、机头排气温度、冷却油流量、冷却器前后端温度、喷油流量以及油气分离器压力可有效表征风源系统5种典型故障,可作为特征参量予以重点监测。另外,由于各故障模式涉及的特征参量不同,可结合故障影响规律设计各部件的故障诊断算法。

4 结论

本文为了获取列车风源系统故障诊断所需特征参量等先验知识,基于等效故障注入试验研究了风源系统5种典型故障模式的影响规律并分析了故障原因。主要结论如下:

1) 基于等效故障注入方法开展的5种典型故障模式故障注入试验有效再现了风源系统供气不足、油温高以及压缩机不加载3类典型故障现象且未对风源系统造成破坏,解决了风源系统部分故障模式不可注入或注入后易导致系统出现不可修复的损坏等问题,避免了对风源系统的破坏作用,降低了试验成本。

2) 风源系统5种典型故障模式的影响规律和所涉及的特征参量不完全相同,为基于温度、压力等多传感器数据融合的系统故障预警、关键部件故障定位以及易损易耗件故障预测算法研究以及智能风源系统开展监测传感器布局优化设计提供了依据。

参考文献

- [1] PERIS E, GOIKOETXEA J. Roll2Rail: New dependable rolling stock for a more sustainable, intelligent and comfortable rail transport in Europe [J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 567-574.
- [2] 左建勇, 冯富人, 丁景贤. 基于 Super smoother 和 3σ 原理的列车动态测试趋势性异常数据清洗方法与分析 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 65-73.
ZUO J Y, FENG F R, DING J X. Method and analysis of train dynamic test trending abnormal data cleaning based on super smoother and 3σ principles [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 65-73.

- [3] 白彦超,安超,李明高,等. CRH₃型动车组武广客运专线服役性能跟踪研究[J]. 铁道机车与动车, 2018(1): 37-40,43.
BAI Y CH, AN CH, LI M G, et al. Tracking research on service performance of CRH₃ EMU in Wuhan-Guangzhou passenger dedicated line [J]. Railway Locomotives and EMUs, 2018(1):37-40,43.
- [4] 田永洙,沙森,史学玲,等. 动车组牵引系统服役安全性评估方法与标准研究[J]. 铁道车辆, 2015, 53(3): 21-24.
TIAN Y ZH, SHA M, SHI X L, et al. The safety evaluation method for service of traction system on multiple units and research on standards [J]. Railway Vehicle, 2015, 53(3):21-24.
- [5] 王文静,李广全,韩俊臣,等. 高速列车齿轮箱箱体动应力影响规律[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(1): 85-95.
WANG W J, LI G Q, HAN J CH, et al. Influence rule of dynamic stress of high-speed train gearbox housing[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019,19(1):85-95.
- [6] 李广全,刘志明,芮如兵,等. 高速列车齿轮箱应力响应与疲劳损伤评估[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(1): 79-88.
LI G Q, LIU ZH M, GUO R B, et al. Stress response and fatigue damage assessment of high-speed train gearbox [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018,18(1):79-88.
- [7] 朱海燕,王超文,邬平波,等. 基于小滚轮高频激励的高速列车齿轮箱箱体振动试验[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(5): 135-150.
ZHU H Y, WANG CH W, WU P B, et al. High-speed train gearbox housing vibration test based on small roller high-frequency excitation [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020,20(5):135-150.
- [8] WHITE B T, NILSSON R, OLOFSSON U, et al. Effect of the presence of moisture at the wheel-rail interface during dew and damp conditions[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232(4): 979-989.
- [9] 王群伟,范荣巍,金哲,等. 北京地铁昌平线制动系统总风欠压故障分析与探讨[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(1): 123-126.
WANG Q W, FAN R W, JIN ZH, et al. Analysis and discuss of main pipe under pressure fault of the brake system in beijing subway changping line [J]. Railway Locomotive & Car, 2019,39(1):123-126.
- [10] 王莲芝. 螺杆式空压机机油乳化分析[J]. 城市轨道交通研究, 2012(10): 93-94,106.
WANG L ZH. Analysis of the oil emulsification for screw compressor[J]. Urban Mass Transit, 2012(10): 93-94, 106.
- [11] 刘军. GKD₃型机车螺杆泵空压机高温故障的分析与处理[J]. 铁道机车与动车, 2013(11): 46-48,11.
LIU J. Fault analysis and treatment of high temperature in GKD₃ locomotive's screw pump air compressor [J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2013(11): 46-48, 11.
- [12] 左建勇,韩飞,胡薇. 地铁列车紧急制动故障特征再现仿真[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(5): 44-49,56.
ZUO J Y, HAN F, HU W. Reproduction simulation of emergency brake fault feature for subway train [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(5):44-49,56.
- [13] WU Y K, JIANG B, LU N Y. Multiple incipient sensor faults diagnosis with application to high-speed railway traction devices [J]. ISA Transactions, 2017, 67: 183-192.
- [14] 朱建渠,金炜东,郑高,等. 基于多源信息的高速列车走行部故障识别方法[J]. 振动与冲击, 2014, 33(21): 183-188.
ZHU J Q, JIN W D, ZHENG G, et al. High-speed train running gear fault recognition based on information fusion of multi-source [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33(21):183-188.
- [15] 孙峻朝,李运策,杨孝宗. 故障注入研究的一种理论框架[J]. 小型微型计算机系统, 1999, 20(11): 816-819.
SUN J CH, LI Y C, YANG X Z. A principle framework for the research of fault injection[J]. Journal of Chinese Mini-Micro Computer Systems, 1999,20(11):816-819.
- [16] ARLAT J, AGUERA M, AMAT L, et al. Fault injection for dependability validation: A methodology and some applications [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1990, 16(2):166-182.
- [17] 马骅,聂长海,吴化尧. 基于历史的云平台故障注入测试[J]. 计算机学报, 2019, 42(10): 2281-2296.

- MA H, NIE CH H, WU H Y. History-based fault injection testing for cloud platform[J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(10):2281-2296.
- [18] 彭宇, 史书慧, 郭凯, 等. 无人机飞控系统故障仿真及数据生成[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(7): 13-21.
PENG Y, SHI SH H, GUO K, et al. Fault simulation and data generation of UAV flight control system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(7): 13-21.
- [19] 蔡伯根, 尹青, 上官伟, 等. 列车运行控制系统仿真故障注入方法研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(6): 55-60.
CAI B G, YIN Q, SHANG G W, et al. Study on fault injection method for train control simulation system[J]. Journal of The China Railway Society, 2014, 36(6): 55-60.
- [20] 田春, 程梦婷, 潘丽莎, 等. 地铁列车常用气制动故障特征提取[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(1):84-90.
TIAN CH, CHENG M T, PAN L SH, et al. Fault feature extraction of service air braking of subway train[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2014, 42(1):84-90.
- [21] 邱文昊, 黄考利, 连光耀, 等. 基于 FFS 故障行为模型的等效故障注入方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(5): 952-960.
QIU W H, HUANG K L, LIAN G Y, et al. Equivalent fault injection method based on FFS failure behavior model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(5):952-960.
- [22] 李天梅, 胡昌华, 周鑫. 基于故障传递特性的位置不可访问故障注入方法[J]. 航空学报, 2011, 32(12): 2277-2286.
LI T M, HU CH H, ZHOU X. Fault injection method resulting from inaccessible location fault based on fault propagation characteristics [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(12): 2277-2286.
- [23] CHEN G, LIU F, MOHAMMAD S. Fault propagation analysis with uncertain parallel reasoning for process safety [J]. Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, 2016, 281: 428-435.
- [24] 涂华, 刘飞. 空气过滤器结构设计与计算[J]. 液压气动与密封, 2016(8): 33-35.
TU H, LIU F. Structural design and calculation of air filter[J]. Hydraulics Pneumatics and Seals, 2016(8): 33-35.

作者简介



丁景贤, 2016 年于兰州交通大学获得学士学位, 2022 年于同济大学获得博士学位, 现为同济大学博士后, 主要研究方向为列车制动与故障诊断。

E-mail: dingjx@tongji.edu.cn

Ding Jingxian received his B.Sc. degree from Lanzhou Jiaotong University in 2016, and received his Ph. D. degree from Tongji University in 2022. He is currently a postdoctoral fellow at Tongji University. His main research interest includes train brake and fault diagnosis.



左建勇(通信作者), 1999 年于西南交通大学获得学士学位, 2002 年于西南交通大学获得硕士学位, 2005 年于上海交通大学获得博士学位, 现为同济大学教授, 主要研究方向为列车制动与安全。

E-mail: zuojy@tongji.edu.cn

Zuo Jianyong (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Southwest Jiaotong University in 1999 and 2002, and received his Ph. D. degree from Shanghai Jiaotong University in 2005. He is currently a professor at Tongji University. His main research interests include train brake and safety.