

高温压力管道过热探测与试验研究

潘家辰 蒋彦龙 施红 王合旭

(南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016)

摘要:在分析现有民用飞机空气导管过热探测系统工作原理的基础上,指出飞机空气导管过热探测系统的不足。基于热敏材料特性和组合电路,设计了一种高温压力管道过热探测系统及方法,实现了对高温压力管路的过热报警并定位的功能,并提出了相应的优化方案。通过搭建管道过热探测试验台,对设计的方案进行了试验验证,并考察过热段长度及管内气体温度对探测系统响应时间的影响。研究表明:探测系统的响应时间随着管道内气体的温度升高而减少,但当管内温度达到一定值时,响应时间几乎保持不变。同时,探测系统的响应时间随着过热段的长度增加而减少。

关键词:高温压力管道;过热探测;定位

中图分类号: TB941

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2014)04-0618-07

Overheat Detection for High-Temperature and Pneumatic Duct and Its Experimental Analysis

Pan Jiachen, Jiang Yanlong, Shi Hong, Wang Hexu

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Based on the study of the duct overheat detection system of civil aircraft in existence, its shortage is pointed out. Therefore a modified overheat detection system is designed with heat-sensitive property material and combinational circuits, which owns the capabilities of alarm and location for the high-temperature and pneumatic duct overheat part. Some interrelated optimization methods are put forward as well. Also, the overheat detection experiment platform is built and the designed detection system is validated experimentally. The influences of the overheat length and the response time of internal air temperature on the system are conducted. The research results show that the response time of the detection system decreases with the increase of temperature of the internal air and the response time remains approximately constant when the temperature reaches a certain value. Meanwhile the response time of the detection system decreases with the increase of overheat length.

Key words: high-temperature and pneumatic duct; overheat detection; location

作为高温压力气体传输通道的飞机空气导管路在正常运行过程中,由于管道的腐蚀、外力作用、绝热层老化等因素会产生管道泄漏或者过热的现象,该情况不仅影响下游供气子系统的正常工作,也会给管路周围的结构和部件带来安全隐患。因此,及时发现并定位泄漏或过热部位,对于保障飞行安全,提高维修针对性,具有重要意义。

鉴于上述原因,在管道故障检测方面,自 20 世纪 70 年代以来,众多国家都开展了管道泄漏或过热的检测和定位研究,发展了许多新的方法和措施^[1-7],某些方法在飞机中得到了一定程度的应用^[8-12]。对高温压力管道,需采用全线分布式探测,如飞机空气导管主要采用 Kidde、Meggitt 等国外供应商垄断的线形感温探测元件,虽然能够实现

全线分布式探测,但不具备定点报警功能,造成管路故障时检修进度慢、效率低等不足。针对过热定位功能,Cholin John^[13], Victor Chilekwa^[14]等提出全同光栅过热探测技术,实现了在光纤光栅温度传感技术上的火灾探测系统,并应用于石化行业储油罐区安防系统中,然而光纤光栅探测系统不能检测出小于1 m的过热管段,响应不灵敏且光纤易断裂,造价也很高,不利于推广应用。目前,国内针对飞机空气导管过热或泄漏方面的研究较少,于艳红^[15]在现有飞机感温线模型的基础上,利用电压表和电流表的组合电路,提出了一种过热故障定位方法,提高了检修时感温线弱化点的定位精度,但是该方法不具备实时报警功能。赵作海^[16]在电桥平衡的基础上对探测元件发生的“短路”情况,改变连接线和加入辅助线,逐步提高故障定位的精度,基本实现故障定位的要求,但是方法过于繁琐,且对测试仪器的精度要求较高。

本文在现有空气导管过热探测系统的基础上,提出结构简单的改进方法和相应的优化方案,以同时实现对高温压力管道的过热报警及定位,并考察过热段长度及管内气体温度与改进的探测系统响应时间之间的关系。

1 国外探测系统设计原理及缺陷

如图1所示的飞机引气过热探测线沿飞机热空气管道布置,安装在飞机发动机、辅助动力装置、后设备舱、机身、机翼等位置。引气管道为合金组成的金属管道,金属管道外层包裹着一层绝缘保护材料,绝缘保护材料和金属管道之间有狭小空间层。绝缘保护材料的管壁上,每隔一段距离有一个导流孔。当飞机的引气管道发生引气泄漏的时候,泄漏的热空气就通过空间层,从导流孔流出,流向飞机引气过热探测传感元件。考虑到多余度设计

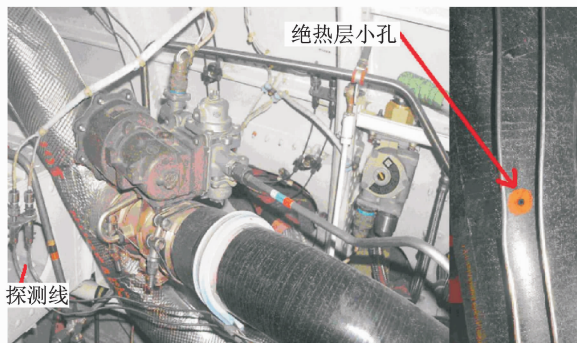


图1 典型飞机空气导管管路的过热探测系统图

Fig. 1 Typical system diagram of air-duct overheating detection

的需要,飞机的引气过热探测传感元件采用双环路平行安装,传感元件沿着热空气的管道,由带绝缘扣的卡子固定在管道表面,正对着小孔。一旦发生引气泄漏,热空气从小孔中吹出,传感元件探测到高温,传输信号给引气过热控制计算机,并发出报警信号。

1.1 探测系统工作原理

目前,国外飞机上普遍采用的是电阻感温线式过热探测线,由固体镍导线、多孔氧化铝陶瓷圈和镍合金外壳3部分构成。固体镍导线镶嵌在镍合金管中,两者之间填充多孔氧化铝陶瓷圈,陶瓷圈浸过低熔点共晶盐。探测线外层镍合金管接地,而内芯镍导线则与控制系统相连,两者之间施加恒定电压。正常温度下,陶瓷圈能阻止电流通过,而一旦着火或者过热时,芯体电阻值会突然下降使得内导线和外壳接通,从而引起电流信号变化,控制系统给出相应的警告信号。

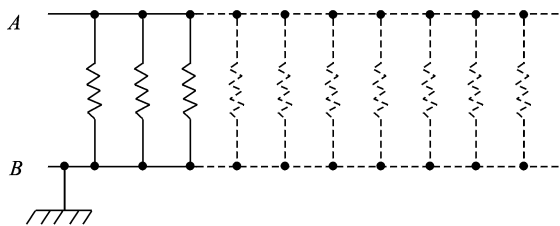


图2 感温探测线路等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of temperature detection lines

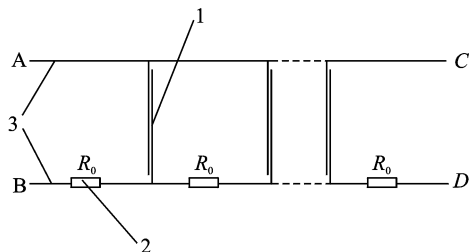
如图2所示,虽然同一回路上的探测线串行连接,但实际电路为并联电路。当所监测的管路系统没有泄漏或未产生过热时,A,B两端无电流,即电阻无穷大;当任何一段感温探测线受到过热气体冲击时,A,B两端的电路就会短路,探测器则会发生过热警报。

1.2 探测系统缺陷

由目前典型的飞机管路过热探测系统安装和工作原理可知,探测环路虽然由多段感温探测线串行而成,但当系统收到报警信号时,只能判断某一探测环路所监测管路出现过热或者发生故障,而无法确定发生过热或故障的具体位置。目前排除故障的传统方法有两种:一种是二分排除法;一种是试探法^[15]。这两种方法的缺陷是工作繁琐,费时长,有时候即使判断出哪半段故障,也需要拆掉飞机的盖板以及其他设备,不能精确定位。因此,有必要研究出一种具有及时报警、故障定位、检测范围广且适用于飞机空气导管管路泄漏或过热报警探测系统。

2 改进的过热探测系统

针对上述提到的现有的飞机管道过热探测系统存在的不足,本文提出一种具有定位功能的过热探测系统,该方案等效电路图如图3所示。



1—感温探测基元;2—定值电阻;3—导线

图3 改进方案等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit of improved scheme

改进后的管道过热位置探测系统及方法,由AC导线、BD导线、 n 个感温探测基元、 $n+1$ 个定值电阻组成。其中,每个感温探测基元对应一个管道探测区域。

改进方案中,感温探测基元的数量可根据过热探测区域的大小和数量设置,每个感温探测基元的工作温度和监控范围可依据需要分别设定。为了能够在探测过热的同时,定位过热区域,整个探测系统中采用相同阻值的电阻 R_0 。假设电路中总共有 n 个感温探测基元:

(1)若从AB侧依次向CD侧计数的第 i 个感温探测基元对应的管道探测区域发生过热,则从AB侧测得的电阻值为 $R_{AB} = iR_0$,从CD侧测得的电阻值为 $R_{CD} = (n+1-i)R_0$,此时发出管道过热信号并根据阻值的大小给出具体过热的位置;

(2)若AB侧依次向CD侧计数的第 i 个、第 j 个感温探测基元对应的管道探测区域同时发生过热,则从AB侧测得的电阻值为 $R_{AB} = iR_0$,从CD侧测得的电阻值为 $R_{CD} = (n+1-j)R_0$,此时检测由AB侧依次向CD侧计数的第 i 个感温探测基元对应的管道探测区域和第 $n+1-j$ 个感温探测基元对应的管道探测区域;

(3)若发生两处以上探测区域过热,假设AB侧依次向CD侧计数的最近的过热区域为第 i 个感温探测基元、最远的过热区域为第 j 个感温探测基元,则从AB侧测得的电阻值为 $R_{AB} = iR_0$,从CD侧测得的电阻值为 $R_{CD} = (n+1-j)R_0$,此时检测由AB侧依次向CD侧计数的第 i 个感温探测基元对应的管道探测区域和第 $n+1-j$ 个感温探

测基元对应的管道探测区域,检测完成后,重复前述过程,直至排除所有过热区域。

3 试验研究

针对上述改进方案,搭建试验台验证其可行性。对于感温探测基元,选取目前市场上已有的火灾探测用不可恢复式感温电缆,其内部结构如图4所示。



图4 感温探测基元示意图

Fig. 4 Schematic diagram of temperature detection element

感温探测基元一般由两根双绞的感温电缆线组成,每根感温电缆线包括中心导线与中心导线四周的热敏绝缘材。中心导线由金属导线构成,具有良好的导电性,其阻值可以忽略不计。在正常监视状态下,由于热敏绝缘材料的绝缘作用,感温电缆线MX,NY之间处于绝缘状态,测量单元处于断开状态;当导管高温气体泄漏时或绝热层破裂时,由于气体的加热作用,感温电缆周围温度上升,当上升至感温电缆的感应温度时,热敏绝缘材料的电阻值发生变化,则感温电缆线MX,NY之间的电阻或电动势发生变化,通过测量导线MX,NY之间的电阻或者电动势就能探测到该探测单元所在区域是否发生过热现象。

3.1 试验装置与系统

试验装置的整个系统由6个部分组成:变频器、变频电动机、风机、换热器、调功器及管道组成。

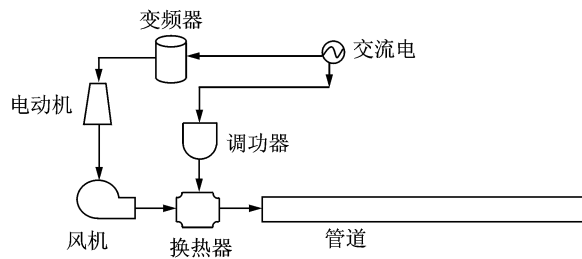


图5 试验台原理图

Fig. 5 Schematic diagram of test bench

电动机带动风机转动,空气经过加热器加热后,高温气体通过包裹有绝热层的管道,直接排出。变频器可实现对电动机转速的调节,从而改变整个系统的流量;调功器与加热器相连接,调节加热器的功率。通过变频器和调功器的配合调节,最终控制流经管道的气体温度。

3.2 试验过程

考虑到试验的安全以及考察各种不同因素对探测系统的影响,试验通过绝热层的分段来实现管道的过热现象。由于试验的管道温度相对较高,绝热层采用岩棉。

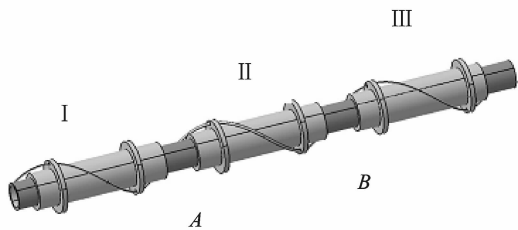


图6 探测系统功能模拟示意图

Fig. 6 Schematic diagram of detection simulation system

如图6所示,将管道的绝热层分为3段,编号为I、II、III,每段绝热层可沿管道活动。当模拟管道表面过热时,通过将相邻的两段绝热层分开,将管道裸露在空气中,即有间隙A和间隙B,并在间隙处设置Pt100温度传感器探测温度。当管道内气流稳定一定时间后,管道的表面温度即能满足试验要求的过热现象。

试验的实际电路图如图7所示。试验时,共设置三段感温电缆,分别为1a,1b和1c。图中,电源为24V直流电,每个定值电阻的阻值为100Ω。

试验过程分为两个阶段,第一阶段分析探测系统的功能特性即考察探测系统是否能进行过热响应以及过热定位;第二阶段考察影响探测系统性能的主要因素,如加热段长度及接触温度。

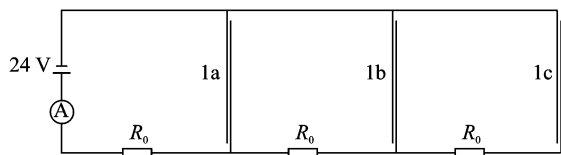


图7 试验等效电路图

Fig. 7 Test equivalent circuit

3.2.1 探测定位试验

(1)布置探测系统线路,探测线路敷设在绝热层外侧,螺旋布置,且感温电缆1a紧贴编号I和编号II的绝热层分开处,分开距离为10cm,编号II和编号III的绝热层无间隙,获取探测回路的电流值变化情况;

(2)重新布置探测线路,编号I和编号II的绝热层无间隙,编号II和编号III的绝热层分开,分开距离为10cm,获取探测回路的电流值变化情况。

上述试验步骤获得的数据如图8所示。

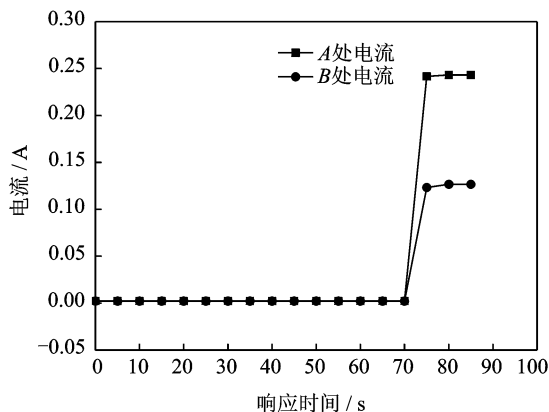


图8 A、B处产生过热系统电流随时间变化

Fig. 8 Time-variation overheat current of the positions A and B

由图8可知,当A处产生过热时,测试系统的电流为由原来的接近0A瞬间转变为0.24A,当B处产生过热时,测试系统的电流转变为0.12A,两处由于加热温度和过热段的长度一致因此响应时间基本一致,均为72s。通过回路中电流变化幅度的不同可以清楚的识别出管段出现过热的位置。因此,探测系统实现了不同管段过热报警并识别过热段的功能。

3.2.2 探测灵敏度的影响因素

作为飞机管道的过热探测系统,其响应时间是整个系统的一个优化设计目标。以下考察管道过热长度及管内温度对探测器响应时间的影响,其中设置过热长度为4,10cm;设置管道温度变化范围在119~135℃。改变绝热层拉开的距离,得到的试验数据如图9所示。

由图9可知,同一过热段长度,探测系统的响应时间随着管道内气体的温度升高而减少,但当管道内温度达到一定值时,响应时间的变化程度较小,几乎保持不变。同时,对比同一温度下,10cm长的过热段的响应时间均要小于4cm长的过热段,且有管内温度越低,响应时间相差越大的趋势。

由图可知,试验中的探测系统响应时间均较长,FAA/JAA(FAA,美国联邦航空管理局;JAA,欧洲联合航空主管局)中的TSO-C11E条例明确指出了飞机火警报警系统的响应时间应控制在5s以内,其主要原因是试验中采用的工业用感温电缆材料特性所决定,因此后期可通过对感温电缆材料的选取或研制来完善该探测系统。尽管如此,本文中提出的相关设计方案能满足飞机空气导管过热

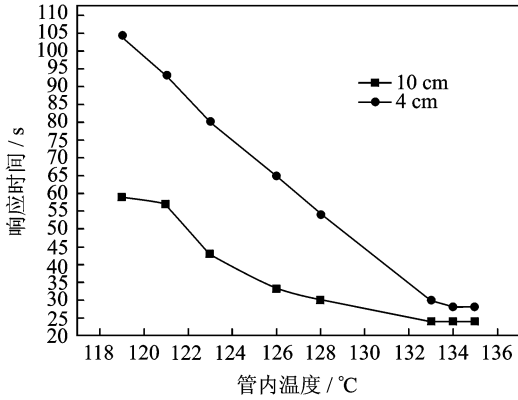


图9 探测系统响应时间随着管内温度和过热段长度的变化

Fig. 9 Response time of overheating detection system with change of temperature and overheat section length

探测并定位的功能,为飞机过热探测系统的进一步开发提供了参考。

4 过热探测系统的优化

作为高温压力管道的过热探测系统,其重要的设计指标为系统的探测定位能力以及系统的响应时间。系统的响应时间应为气流温度传递到探测线的时间和探测线熔断的时间两者之和,而探测线熔断时间跟探测线材料本身有关,因此可通过改善气流温度的传递时间来增强系统的响应灵敏度。

4.1 空气绝热层挡板的设计

飞机空气导管的绝热方式主要为空气层和固体层混合绝热,现有的空气绝热层为一个中间没有任何阻挡的空气通道,当管道某一处发生泄漏的时候,泄漏的气流将扩散在整个空气通道中,泄漏的气流压力和温度损失较大,那么从导流孔喷射出气流的能量占原泄漏气流的总量较少。因此,可每隔一定数量的导流孔之间设置一挡板,如图10所示。图中 L 为泄漏孔与挡板间距离对管道泄漏进行数值模拟,模拟采用FLUENT软件进行并行计算。模型网格图如图11所示,采用结构网格,并对泄漏口周围、导流孔周围以及壁面处的网格进行了加密。

对一段高温管道进行计算,管道进口采用质量流量进口,温度为446 K,管道出口为压力出口;空气绝热层内部有挡板时,将挡板作为壁面边界。

有、无挡板时剖面温度分布如图12,13所示。通过对比可知,在空气绝热层通道短距离内设置挡

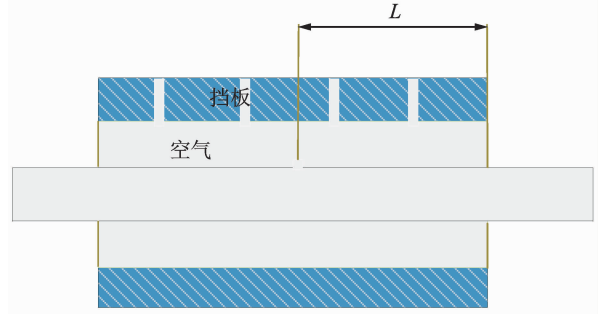


图10 挡板示意图

Fig. 10 Schematic diagram of baffles

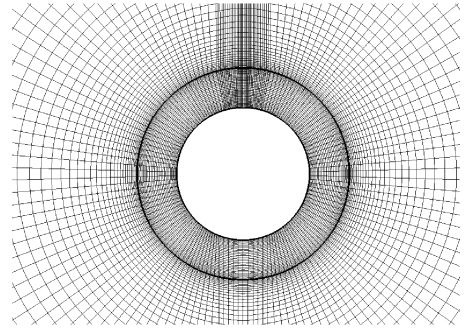


图11 管道壁面网格划分局部图

Fig. 11 Mesh partition along pipe-wall

板能提高各导流孔气体的温度值,从泄漏口泄漏的气流温度损失相对较小;而无挡板时,从导流孔喷出的气流相对较少。因此,当由于管道泄漏而发生过热时,增加挡板,可增加导流孔处的温度,减少整个探测系统的响应时间。

4.2 导流通道的设计

现有飞机过热探测系统多为双环路布置,两探测环路之间设有一定间隔,探测环路距离管道上方的位置。当发生小流量泄漏时,存在无法探测的可能性,针对小泄漏量探测,可采取图14形式加以改进。

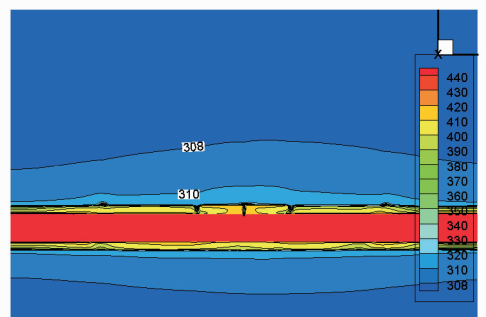


图12 无挡板剖面温度分布图

Fig. 12 Temperature distribution of non-baffle case

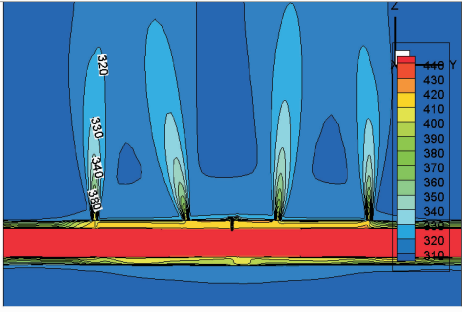


图13 有挡板剖面温度分布图

Fig. 13 Temperature distribution of baffle case

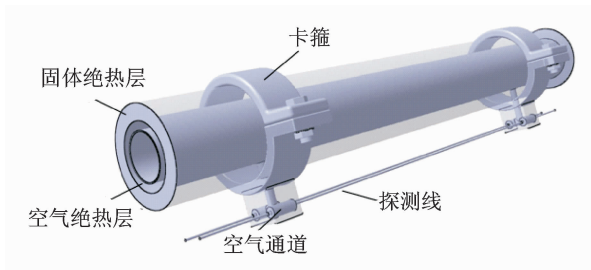


图14 一种改进的探测结构

Fig. 14 An improved detection structure

如图14所示,设计的安装装置包含有一对卡箍,卡箍通过螺栓连接,其中一个卡箍上设置有T型和H型组合的空气通道,空气从导流洞直接引入该空气通道,直接喷射在探测线上,该设计能减少泄漏气流的压力和温度损失。具有空气通道的卡箍安装在管道的下方,这种布置方式的优点在于能减少误报警,即当无任何泄漏时,空气绝热层中的高温气体也不会因为自然对流的作用通过导流孔传递到探测线上。

5 结 论

本文在详细分析了现有国外飞机空气导管过热探测器工作原理,提出了一种结构简单、可靠性高,并具有过热部位定位能力的高温压力管道过热探测系统及方法,并在此基础上提出了相应的优化方案。通过试验台对改进方案进行了试验分析,考查了加热段长度、管道温度对探测响应时间的影响。主要研究结论如下:

(1)试验结果表明:提出的改进方案能实现管路过热报警和过热管段定位的功能。同时,过热温度和过热段的长度对探测系统的响应时间影响较大,探测系统的响应时间随着管道内气体的温度升高和减少,但当管道内温度达到一定值时,响应时

间的变化程度较小几乎保持不变。同一温度下,10 cm长的过热段的响应时间均要小于4 cm长的过热段,且有管内温度越低,响应时间相差越大的趋势。

(2)尽管由于市面上现有感温电缆的特性决定了试验中的探测系统未能满足FAA的相关设计标准,但是本文中提出的探测系统方案及对过热探测系统的优化方案,为中国大飞机相关系统的自主研发提供了技术参考。

参考文献:

- [1] 孙会. 红外辐射热力管道泄漏点检测仪的研制[D]. 吉林:吉林大学,2012.
Sun Hui. The development of the infrared radiation heating pipeline leakage detector [D]. Jilin: Jilin University, 2012.
- [2] 王立宁,李健,靳世久. 热输原油管道瞬态压力波法泄漏点定位研究[J]. 石油学报,2000,21(4):93-96.
Wang Lining, Li Jian, Jin Shijiu. Pressure wave leak point instantaneous location of crude oil heating transport pipeline[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000,21(4):93-96.
- [3] 卢庆千,孙晓雷,胡序胜. 贮油罐泄漏显示报警仪及放射性示踪剂检漏研究[J]. 同位素,1990(1):29-30.
Lu Qingqian, Sun Xiaolei, Hu Xusheng. An alarm instrument for monitoring leakage of oil storage tanks and the location of leak position using radioisotope tracers [J]. Journal of Isotopes, 1990(1):29-30.
- [4] Wang Likun, Xu Bin, Wang Hongchao, et al. Oil pipeline leak detection system based on acoustic wave technology [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 220-223:1628-1632.
- [5] Hua Ke, Ye Hao, Wang Guizen, et al. Study on acoustic based leak detection and localization of nature gas pipeline[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2009,37(1): 181-183.
- [6] 赵松龄,盛胜我,殷业. 自来水管网声学检漏技术的研究[J]. 同济大学学报,1997,25(2):171-175.
Zhao Songling, Sheng Shengwo, Yin Ye. Research on tap water pipe network of acoustic leak detection technology [J]. Journal of Tongji University, 1997, 25(2):171-175.
- [7] 刘金海,冯健. 基于模糊最小-最大神经网络的输油管道泄漏故障诊断方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2011,43(S1):199-202.
Liu Jinhai, Feng Jian. Diagnosis for oil pipeline based

- on fuzzy min-max neural network[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(S1):199-202.
- [8] Toru K, Hiromu K, Satoshi M, et al. Application of probabilistic safety assessment to the pipe rupture incident at Hamaoka Unit-1[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2004, 41(1):77-85.
- [9] Gerald P, Markus H, Reinhold L. Life time and safety assessment of PE pressure pipes based on fracture mechanics fatigue tests[R]. Annual Technical Conference ANTEC, 2007, 5:2876-2879.
- [10] 李丽. 民用发动机短舱火警探测器温度特性地面试验研究[J]. 航空科学技术, 2012(3):34-36.
Li Li. Ground experimental study on fire detector temperature performance of engine nacelle[J]. Aeronautics Science & Technology, 2012(3):34-36.
- [11] Brake D E, Stearns S V, Ronsky N D. Enhanced pipeline leak detection using airborne differential absorption LIDAR [C]//Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference. Atlanta, US; [s. n.], 2008, 2:941-948.
- [12] Liou C P. Pipeline leak detection and location[C]//Pipeline Design and Installation: Proceedings of the International Conference. Reston; ASCE, 1990: 255-269.
- [13] John C. Optical fire detection[J]. Chemical Engineering Progress, 1989, 85(7):62-68.
- [14] Chilekwa V, Sharp D. Detection, location and sizing of multiple leaks in a duct [C]//Forum Acusticum Budapest 2005: 4th European Congress on Acoustics. Budapest; [s. n.], 2005: 2569-2572.
- [15] 于艳红. A300-600 飞机过热探测环路故障定位方法研究[D]. 天津:中国民航大学, 2004.
Yu Yanhong. Research on fault location of aircraft A300-600 overheat detection loops[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2004.
- [16] 赵海志. 飞机引气泄漏探测传感元件的故障定位研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2012.
Zhao Haizhi. Research on fault location of aircraft bleed air leak detection sensing elements[D]. Xi'an: Xidian University, 2012.

