

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.07.006

两种管道电磁无损检测方法研究综述*

刘 雨, 张思全*, 尹 畅, 齐 川
(上海海事大学 物流工程学院, 上海 201306)

摘要:针对工业运输过程中的管道腐蚀或机械损伤这一问题,对目前两种管道电磁无损检测方法即涡流检测和漏磁检测进行了深入研究,对两种管道电磁无损检测方法的基本原理、系统结构、各自的应用技术特点及适用范围进行了归纳,介绍了这一领域的国内外研究进展。分别列举了两种管道电磁检测方法的工程应用实例,提出了一些技术应用上的注意事项。对两种检测方法的研究总结结果表明,对金属管材类的表面和近表面探伤或管材焊缝进行检测时,涡流检测具有很大的优势,如速度快、精确度高,在管道有包覆层的情况下同样能够很好地检测到管道缺陷;对管道的横向和纵向裂纹或对检测速度要求非常高的管道在线检测中,漏磁检测与其他检测方法相比,优势明显。

关键词:电磁无损检测;涡流检测;漏磁检测;管道无损检测

中图分类号:TH878;TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)07-0844-06

Summary of two pipeline electromagnetic nondestructive testing methods

LIU Yu, ZHANG Si-quan, YIN Chang, Qi Chuan

(College of Logistics Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to deal with pipeline corrosion or mechanical damage, in-depth studies on eddy current testing (ECT) and magnetic flux leakage testing (MFLT) were already carried out on these two electromagnetic nondestructive testing. With the summary of their respective principles, system architectures, their technical characteristics, application scopes and some practical rules, the domestic and overseas research progress in this area and their application examples were cited. The results indicate that, compared with other testing methods, ECT has great advantage in the detection of surface, near-surface and the weld metal of the pipe such as high speed, high accuracy. Pipeline deflections with coating layers can be detected as well; while MFLT is more obvious in horizontal and vertical crack detection, especially for its large application in the detection of high speed pipelines.

Key words: electromagnetic non-destructive testing; eddy current testing(ECT); magnetic flux leakage testing(MFLT); pipelines non-destructive testing

0 引 言

管道在工业系统中占有举足轻重的作用,例如天然气、电力、核设施等行业都利用管道来进行运输。然而由于管道往往铺设于地下,地形复杂,环境恶劣,极易发生灾难性的事故。虽然现在的很多管道都加了防

腐层,但随着管道运行时间不断增加,腐蚀或疲劳裂纹都是不可避免的,而电磁无损检测作为一种非破坏性的检测技术,在管道日常安全检测与维护中发挥了越来越重要的作用^[1]。

根据材料本身的电磁性能变化为依据,对材料的实际缺陷或性能进行测试的一类方法统称为电磁无损

收稿日期:2014-03-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175321);上海市教委科研创新资助项目(12YZ154)

作者简介:刘 雨(1990-),男,江苏南京人,主要从事电磁无损检测方面的研究. E-mail:liuyusmu@163.com.

通信联系人:张思全,男,博士,副教授,硕士生导师, sqzhang@shmtu.edu.cn

检测。涡流检测和漏磁检测是电磁无损检测技术的两种类别,它们都具有无接触、无损害、无辐射、速度快等优点。在管道检测中这两种检测方法都已得到了广泛的应用。不管是系统结构中的激励源研制,传感器的设计,还是系统后期的信号处理、管道缺陷特征提取等方面的研究国内外学者都取得了较大的进展。不仅在管道缺陷检测领域中,涡流检测及漏磁检测在船舶、飞机、建材等工程应用领域都同样应用广泛^[2]。

虽然上述两种检测方式都基于电磁感应的原理,但它们的检测激励方式,如激励频率的选取、检测传感器的设计以及信号特征提取和系统整体设计构造都有所差别。

本研究通过对两种管道电磁检测方法的阐述、分析和相互比较,对两种管道检测技术的研究现状的介绍,以及列举一些工程应用实例和注意事项,以期能够促进管道检测技术的进一步交流与发展。

1 电磁无损检测技术的原理

石油天然气输送管道大多以导体为主,笔者设计的电磁无损检测技术都是以导体作为被测对象,其基本原理都是基于电磁感应现象,可以用比较简洁的麦克斯韦方程组表示出来。电磁感应原理在电磁无损检测方法的体现是:电磁之间的能量与被测物的交互作用,这种交互作用在理论上可用麦克斯韦方程组表示^[3]:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times D = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \times B = 0 \quad (4)$$

式中: E —电场强度向量, H —磁场强度向量, D —电通密度向量, B —磁通密度向量, J —电流密度向量, ρ —电荷密度。

电磁场特性还可以用下面关系式表达:

$$B = \mu H \quad (5)$$

$$J = \sigma E \quad (6)$$

$$D = \varepsilon E \quad (7)$$

式中: σ —电导率, ε —介质的介电常数, μ —介质的磁导率。

式(1~7)是电磁检测技术的物理基础,将上面各式相结合,可以求解出电磁检测正问题的解。

涡流检测是建立在电磁感应原理基础上的一种无损检测方法,适用于导电材料。当导体如管道置于交

变磁场中,导体中就会有感应电流产生,这种电流称为涡流。由于导体自身因数(如电导率、导磁率、形状、尺寸和缺陷等)的变化,会导致感应电流发生变化,可以利用这种现象来判知管道的性质、形状及有无缺陷。涡流检测管道监测时,可以在线或者离线检测,其形式也多种多样,如扇形式、平面组合式、穿过式、阵列式等。

漏磁在线管道检测在我国起步于1993年,当时中国石油天然气管道局管道技术公司从美国引进了D273 mm和D529 mm两套管道漏磁检测器。在国外,早在1966年苏联学者就提出了利用磁偶极子、无限长磁偶极带模拟工件表面的点状缺陷、浅裂纹和深裂纹,开创了漏磁检测定量分析的先河。漏磁检测中,实现检测的首要一步是磁化,它往往决定着被测对象能否有足够被测量和分辨的磁场信号,而且也影响到检测信号的性能和检测装置的结构特性。漏磁检测系统包括前端漏磁信号采集、数据压缩、缺陷识别等几大部分,而缺陷识别技术将决定检测仪器最终是否能够将管道缺陷的集合参数即缺陷长度、宽度、深度等信息以数据的方式体现出来,以使检测人员对管道的破损、腐蚀程度有确切地了解,成为是否需要及时更换管道的科学依据^[4]。

2 两种管道检测的原理和系统框图

2.1 管道涡流检测的原理和系统框图

常规的涡流检测系统包括信号发生电路、信号放大电路、检测探头、信号处理电路等,其原理框图如图1所示。激励信号一般分为正弦激励和方波激励,目前以方波为激励源的脉冲涡流检测技术发展得非常迅速。将由高精度的波形发生器产生的信号经信号发生器放大之后送给激励线圈,之后通过检测线圈、霍尔传感器或者巨磁阻传感器将包含有管道缺陷的信号输送出来,经过调理电路之后,通过数据采集卡送入PC机上,对信号的特征量进行提取。

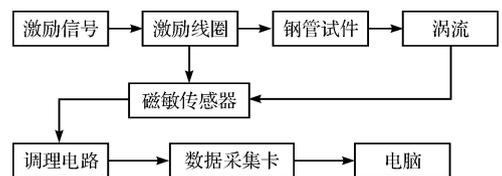


图1 涡流检测系统框图

相较于一般的平面导电板来说,测量管道难度要大得多,有时往往还要深入到管道内部进行裂纹或者腐蚀性的测量,这就要求探头的设计或者器材的测量

方式与以往的平板测量完全不同。本研究在管道测量中设计出了多种内穿式、外穿式的涡流管道探伤仪器,这些检测仪器往往与管道机器人相结合,因为有时管道直径太小,直接让工作人员进入测量显然是不现实的,从而使得管道爬行机器人的研制也在不断深入当中。如韩国的 Seungho Kim, Seung Ho Jung 团队设计了在韩国核电站管道测量方面的机器人和螺旋驱动的管道爬行机器人^[5-6]。其他学者对可视化机器人^[7]以及可对管道裂纹缺陷及腐蚀进行定位的机器人都有深入的研究^[8]。

2.2 管道漏磁检测的原理和系统框图

漏磁管道检测基本原理如图 2 所示^[9]。永磁体产生强度大的磁场并通过钢制导磁使铁磁性管道的管壁磁化到饱和程度,这和通常所熟知的涡流检测有很大不同,涡流检测不需要将管壁磁化到饱和,所以一般不会用永磁体来磁化。当管壁上没有缺陷时,产生的磁场会均匀分布,原理图如图 2(a) 所示;当管壁上存在异常情况,如腐蚀缺陷、裂纹、焊接疤痕时,所在处就会有漏磁通,原理图如图 2(b) 所示,通过磁敏探头检测漏磁通就可以发现管道的缺陷。最后分析数据曲线的特征量就可以确定管道的腐蚀、裂纹或者焊痕等大小。

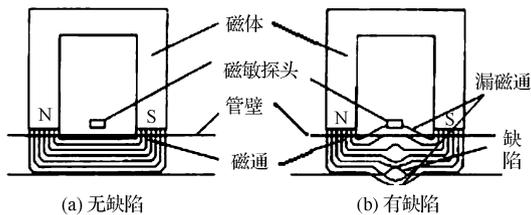


图 2 漏磁检测原理图

管道漏磁检测器系统结构如图 3 所示。检测器为了能够通过管道弯头,一般都采用节状的设计结构,节与节之间通过万向节与动力节相连,同时万向节与比管道内径稍大的橡胶碗相连,利用它阻塞管道介质流动产生推力,进而带动整个装置向前移动。在测量节,沿着管壁的四周排列着数十个乃至上百个磁敏探头,每个探头内都包含几个检测通道来检测不同方向上漏磁场。探头排列地越紧密,对缺陷处漏磁场的记录就越准确。

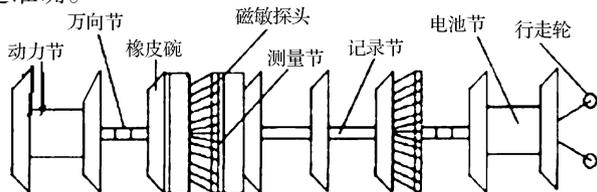


图 3 管道漏磁检测器系统结构

在漏磁管道检测中,缺陷的长度、宽度、深度对漏磁场的分布都会有影响,同时,测量时激励的频率、移动的相对速度以及测量的材质都会对漏磁场的强度和信号有一定影响^[10],在这一方面,一些专家学者也做了很多的研究。和涡流检测相类似,漏磁场检测同样受到探头传感器提高高度因数的影响,在这一方面我国杨宾峰、罗飞路等^[11]学者也都做过深入的研究。

3 两种管道电磁无损检测研究进展

3.1 管道涡流检测进展

在 2000 年,学者陈德智和邵可然^[12]就对管道裂纹涡流检测线圈阻抗信号进行了仿真研究,他们将检测管道半径远大于线圈尺寸时,管壁看成平板导体,从而使问题得到简化。如果管道半径不是远大于线圈尺寸,通过对平板模型的修正获得比较准确的数值仿真结果。

在 2006 年,学者罗飞路、徐小杰团队^[13]设计实现了铁磁性管道的远场涡流检测系统,并对其进行了性能的改善,他们通过对传感器、激励线圈、检测线圈、探头的优化的设计以及线圈间距的设计硬件电路的搭建,最终设计成功,并成功地小规模投入使用,具有检测灵敏度高、成本低廉的特点。

在 2010 年,韩国学者 C. S. Angani 和 D. G. Park^[14]利用两个安装有霍尔传感器的线圈同时测量管壁的厚度,当厚度有差别是,两个传感器会有相应的信号差,从而区别出管壁的厚度。

在 2011 年,伊朗学者 M. S. Safizadeh^[15]测试了利用脉冲涡流检测对带有绝缘层的管道进行腐蚀性测试,从而说明,脉冲涡流对有绝缘层的管道有很好的测试作用。我国南昌航空学院的康小伟和付跃文也对带包覆层磁性管道腐蚀脉冲涡流检测技术进行了研究。实验结果也表明,对于较大面积的腐蚀缺陷,即使包覆层较厚时,在合适的检测参数下,脉冲涡流也具有很好的检测能力。

在 2011 年,荆毅飞、杨宾峰团队^[16-17]设计了新的管道轴向裂纹检测脉冲远场涡流传感器,并对其进行了仿真,通过提取感应电压信号的负峰值和过零时间作为特征量分析管道的检测信息,在此基础上设计了 4 种不同结构的传感器模型,比较了 4 种模型过渡区的远近、对轴向裂纹检测,表明了连通激励磁路的传感器模型具有更好的检测效果以及灵敏度的高低对不同壁厚管道检测的结果的影响。

在 2012 年陈兴乐、毛雪飞、雷银照团队^[18-20]对管

道脉冲涡流磁场激励线圈电压解析以及金属管道外放置式偏心弯曲矩形线圈涡流场的解析。利用了二阶磁矢量建立了涡流问题的数学模型,得到了含待定偏心线圈系数的二阶位函数表达式,从而能够进一步进行解析计算。

3.2 管道漏磁检测进展

在2005年李亮、阙沛文^[21-22]就利用巨磁阻传感器的灵敏度高、可靠性好、测量范围宽、体积小等优点设计了一种管道漏磁传感器,并在检测管道壁微小缺陷中获得了成功。同时该团队将小波算法和神经网络算法用在了海底石油管道漏磁缺陷检测中,表明了小波变换能够很好地去掉检测中的主要干扰信号,且系统具有收敛速度快、逼近精度高的特点。

在2009年,王韞江、王晓锋等人^[23]设计了脉冲漏磁传感器,对带有一定厚度保温层管道腐蚀缺陷进行了检测,采用脉冲方波作为激励,这样既利用了漏磁检测效果好的优点,提高了激励场的穿透深度,又利用了脉冲激励所具有的频率成分丰富的优点,增强了激励场对保温层的穿透效果和对管道深层缺陷的检测效果。

在2012年,韩国学者 Hui Min Kim、Yong Woo Rho、Gwan Soo Park 等人^[24-25]针对管道内外压力不同以及管道裂纹过长过窄等问题设计了一种圆周式的漏磁检测传感器,该传感器能够将漏磁最大化,并通过有限元方法进行了仿真,验证了这种方法的可实施性。2014年该团队利用圆周式漏磁传感器的检测系统来对管道轴向裂纹形状进行了估测,利用这种检测探头,获取了较多的管道裂纹特征,从而为估测裂纹的大小形状提供了有力的支撑。

4 两种管道检测方法应用特点

涡流检测与其他常用管道检测相比有比较独特的优势。与超声波和射线法相比,其它不需要耦合剂,可以实现非接触以及快速在线式检测。与磁渗透法相比,其不污染环境,同时操作也非常简单。对于管道内部、外部表面或者近表面缺陷有较高灵敏度,尤其是一些带有几层包覆层的管道,其同样能够在不破坏包覆层的情况下,检测出管道的裂纹和腐蚀^[26]。涡流检测系统探头的好坏与检测灵敏度有着较为密切的关系。管材在线、离线都可以采用多种形式的涡流传感器。一般来说,穿过式线圈在系统机构设计方面较为简单,能够高速进给提高效率。直径较小的管材($D < 50 \text{ mm}$)一般外穿式线圈比较方便,速度快、效率高。焊管的主要

缺陷发生在焊缝周围,首选穿过式线圈,因为无论焊缝偏向多大角度,其都可以保证检测的可靠性。

而在检测直径较大的管材时,采用穿过式探头的检测灵敏度会很差,因为被检测工件体积增大,缺陷相对于被检测工件的体积所占的比例要小得多,又因为焊缝竖直排列,不易弯曲,对于大直径的金属管道检测要求高的工件,一般采用新式平面的组合式探头或旋转探头,平面式组合探头检测仪如图4所示。



图4 平面式组合探头检测仪

在利用涡流测量金属管道时,往往只能改变激励频率,通过改变频率来满足检测条件,获得预期的检测结果。频率的选择是由检测对象决定的。如果测量的管材直径发生变化,需要提高灵敏度,这就需要使用的检测频率。表面缺陷可以使用较高的频率来测量,然而对于表面下的缺陷,在保证有足够穿透深度的同时,又要使得缺陷与其他干扰有效信号的因素之间有足够相位的差别,从而能够有效地分辨出来,所以选择合适的激励频率也是非常重要的。在此种情况下,本研究会相互考虑各方影响因素,进行这种的考虑办法。

涡流检测管道同样有一定的缺陷性,在通过缺陷反射的信号特征来辨别缺陷形状、大小和媒介性质依然存在较大的难点,往往不能够很好地对缺陷进行判别,这也是将来涡流管道检测热点。不管是增加传感器,还是运用采用新的数据处理方法,最终目标还是想要能够准确无误地辨别出缺陷的尺寸类型。

电涡流检测大多适用于探测材料表面或近表面的缺陷,其缺点是自动化程度低、工艺复杂,难以实现定量检测,且需人工观察、判断,对操作人员的技术要求较高。而漏磁法对材料内部、表面缺陷都可以检测,尤其对铁磁性材料缺陷极为敏感。漏磁法能够测量管状缺陷的形式也多种多样,如横向缺陷,即沿管周向上的损伤,主要包括管壁腐蚀、裂纹、孔洞等。纵向缺陷,即管材轴线方向平行的缺陷,主要包括裂纹、折叠、偏磨等。针对被检测缺陷特征量的不同,研究人员应该选用不同的检测方式和结构。对横向裂纹,应该沿管材轴线方向上进行磁化并在四周安装检测元件。

管材穿过探头沿轴向运动,实现了对缺陷特征的扫描和探测。抽油杆检测仪如图 5 所示,是一种单一的横向探头检测。



图 5 井口抽油杆检测仪

有些漏磁检测设备能够同时检测纵向和横向缺陷,这对旋转机构的安装、制造、调试等方面要求很高。目前,国内在这一方面研究与仪器制造与国外有一定差距,这类检测设备多为进口,价格也比较高。

5 结束语

本研究概述了两种管道电磁无损检测技术:涡流无损检测技术和漏磁无损检测技术,并对它们的原理、系统结构各自特点以及近年来国内外的发展趋势进行了介绍,同时列举了一些工程应用的实例与注意点。涡流检测是一种传统的电磁无损检测方法,但近几年发展迅速的如脉冲涡流检测技术等使得涡流检测的应用领域更加宽泛,灵敏度也得到了很大的提高。漏磁无损检测在管道在线检测方面有不可替代的作用,速度快,灵敏度高。这两种技术都是基于电磁学理论发展起来的,也因此具有电磁检测的一些优点及缺点。例如安全无损、测量范围只能限定为导体等。

在这两种管道电磁无损检测发展中,很多东西都是相辅相成的。涡流检测的很多技术如传感器信号的提取、信号发生器的设计都可以借鉴到漏磁检测中来,同时一些信号提取的算法,如小波算法、模糊算法也可以两种检测方法相互结合运用。随着管道检测这一领域不断深入研究,这两种管道电磁无损检测技术将会获得更大的发展空间。

参考文献 (References):

[1] 杨筱衡. 油气管道安全工程[M]. 北京:中国石化出版社, 2005.
[2] 任吉林,林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京:科学出版社,

2008.

- [3] 何敏,柴孟阳. 三种电磁无损检测方法综述[J]. 测试技术, 2012, 31(3): 1-4.
[4] 余文来. 管道漏磁检测缺陷识别技术的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学信息科学与工程学院, 2009.
[5] KIM S, JUNG S H, LEE S U, et al. Application of Robotics for the Nuclear Power Plants in Korea[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. Montréal: [s. n.], 2010: 1-4.
[6] KIM S, KIM C H, BAE Y, et al. Development of Spiral Driven Type Mobile Robot for NDT Inspection in Small Pipes of Thermal Power Plants[C]//Proceedings of the 2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems, Gwangju: [s. n.], 2013: 924-927.
[7] KRYS D, NAJJARAN H. Development of Visual Simultaneous Localization and Mapping (VSLAM) for a Pipe Inspection Robot[C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, Jacksonville: [s. n.], 2007: 344-349.
[8] RUST I C, ASADA H H. A Dual-Use Visible Light Approach to Integrated Communication and Localization of Underwater Robots with Application to Non-Destructive Nuclear Reactor Inspection[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Saint Paul: [s. n.], 2012: 2445-2450.
[9] 孙寅春. 基于传感器阵列的脉冲漏磁特征提取技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学自动化学院, 2010.
[10] 李俊儒,钟舜聪,杨晓翔,等. 基于低频电磁技术的管道缺陷检测方法研究[J]. 机电工程, 2012, 29(2): 155-158.
[11] 曹海霞,王畅,杨宾峰,等. 脉冲涡流无损检测提高效率研究[J]. 空军工程大学学报, 2011, 12(3): 45-49.
[12] 陈德智,邵可然. 管道裂纹涡流检测线圈阻抗信号的快速仿真[J]. 电工技术学报, 2000, 15(6): 75-78.
[13] 徐小杰,罗飞路,刘春艳,等. 铁磁性管道腐蚀远场涡流检测性能的改进[J]. 测试技术学报, 2006, 20(5): 461-466.
[14] ANGANI C S, PARK D. G, KIM C G, et al. Dual core differential pulsed eddy current probe to detect the wall thickness variation in an insulated stainless steel pipe[J]. **Journal of Magnetics**, 2010, 15(4): 204-208.
[15] SAFIZADEH M S, HASANIAN M. Gas pipeline corrosion mapping using pulsed eddy current technique[J]. **Advanced Design and Manufacturing Technology**, 2011, 5(1): 11-18.

(下转第 853 页)

本文引用格式:

刘雨,张思全,尹畅,等. 两种管道电磁无损检测方法研究综述[J]. 机电工程, 2014, 31(7): 844-848, 853.

LIU Yu, ZHANG Si-quan, YIN Chang, et al. Summary of two pipeline electromagnetic nondestructive testing methods[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(7): 844-848, 853.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

4 结束语

救生舱舱段的设计需要满足一定的结构强度,同时还要满足舱体内部空间,单纯的依靠舱壳来满足强度要求难度较大,该新型救生舱设计的外挂保护壳,起到了很好的抗爆冲击的作用,保证了救生舱的结构强度,采用有限元分析结果表明:

(1) 外挂保护壳的设计是相当合理的,实现了牺牲外挂保护壳保护舱壳的设计初衷,新舱最大等效应力值出现在外挂保护壳上,新舱的最大变形量也是出现在外挂保护壳上。

(2) 与市面上的旧型舱比较,新型舱段的设计在结构强度与材料方面皆优于旧型舱的设计,质量减轻了近40%,具有良好的经济性。舱壳最大等效应力比旧舱减小150.5 MPa,最大变形减小0.734 1 mm,密封性比旧舱优越。

(3) 研究结果为该新型舱的进一步研究与分析提供了理论依据。

参考文献 (References):

[1] 栗婧,金龙哲,汪声. 基于应急避难空间的矿山安全防护体系研究[J]. 中国安全科学学报,2010,20(4):155-159.

本文引用格式:

常德功,李国星,王吉利. 新型矿用移动救生舱结构的分析与研究[J]. 机电工程,2014,31(7):849-853.

CHANG De-gong, LI Guo-xing, WANG Ji-li. Analysis and research of new mine mobile capsule structure[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(7):849-853.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第848页)

[16] 荆毅飞,王晓锋,杨宾峰,等. 管道轴向裂纹检测脉冲远场涡流传感器设计与仿真分析[J]. 空军工程大学学报,2011,12(6):74-78.

[17] 陈明,李秉昕,贾丛玉. 管道耦合水击的最优阀调节问题研究[J]. 流体机械,2011,39(3):31-36.

[18] 陈兴乐,雷银照. 金属管道外侧脉冲磁场激励的线圈电压解析式[J]. 中国电机工程学报,2012,32(6):176-182.

[19] 陈兴乐,雷银照. 金属管道外放置式偏心弯曲矩形线圈涡流场的解析解[J]. 电工技术学报,2012,27(9):153-159.

[20] MAO Xue-fei, LEI Yin-zhao. Analytical solutions to eddy current field excited by a probe coil near a conductive pipe[J]. *NDT&E International*,2013(54):69-74.

[21] 李亮,阙沛文,陈亮. 巨磁阻传感器在管道漏磁检测中的应用[J]. 仪表技术与传感器,2005(12):44-46.

[22] 金涛,阙沛文,陶正苏. 小波神经网络在海底石油管道漏磁缺陷检测中的应用[J]. 石油大学学报,2005,29(3):83-91.

[2] 万毅. 矿山空压机站智能监控系统的设计与实现[D]. 南京:南京理工大学自动化学院,2007.

[3] 黄友锐,王清灵,凌六一. 基于 PROFIBUS-DP 总线的压风机监控系统[J]. 煤矿机械,2005(12):106-108.

[4] 张军. 集散型自动化控制系统在煤矿压风机房的应用[J]. 中州煤炭,2009(5):71-73.

[5] 高广伟,张禄华. 煤矿井下移动救生舱的设计思路[J]. 中国安全生产科学技术,2009,5(4):162-164.

[6] 安标国家矿用安全标志中心. 煤矿可移动式硬体救生舱通用技术条件(2011年9月征求意见稿)[S]. 安标国家矿用产品安全标志中心. 2011.

[7] 常德功,李国星,李松梅. 一种模块化的新型矿用救生舱:中国,201310442479[P]. 2013-12-25.

[8] 檀润华,王庆禹,苑彩云,等. 发明问题解决理论: TRIZ——TRIZ 过程、工具及发展趋势[J]. 机械设计,2011(7):7-11.

[9] AW K C, HUANG W D J, DE SILVA M W R P. Evaluation of climatic vibration testing on plastic waterproof enclosure for electronic equipment using ANSYS workbench[J]. *Materials and Design*,2007(28):2505-2510.

[10] 杨旭东. 煤矿救生舱的爆炸模拟分析[J]. 煤矿机械,2012,33(2):113-115.

[11] 刘鸿文. 材料力学 I[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2004.

[编辑:张豪]

[23] 王韞江,王晓锋,丁克勤. 管道腐蚀检测中新型脉冲漏磁传感器的设计与实验验证[J]. 传感技术学报,2009,22(10):1406-1412.

[24] KIM H M, RHO Y W, YOO H R, et al. A Study on the Measurement of Axial Cracks in the Magnetic Flux Leakage NDT System[C]//Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, Seoul:[s. n.],2012:624-629.

[25] KIM H M, PARK G S. A study on the estimation of the shapes of axially oriented cracks in CMFL type NDT system[J]. *IEEE Transactions On Magnetics*,2014,50(2):1468-1503.

[26] 康小伟,付跃文. 带包覆层铁磁性管道腐蚀脉冲涡流检测技术[J]. 无损检测,2011,33(9):40-42.

[编辑:张豪]