

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306572

中长距离压力管道裂缝缺陷微波检测研究^{*}

袁勤文^{1,2} 裘国华^{1,2} 田珊珊^{1,2} 沈嘉诚^{1,2}

(1. 中国计量大学信息工程学院 杭州 310018; 2. 浙江省电磁波信息技术与计量检测重点实验室 杭州 310018)

摘 要:本文探究了微波无损检测技术在中长距离压力管道的裂缝缺陷检测中的应用。从理论上分析了微波在具有弯曲的压力管道内传输的特点以及裂缝检测的方法。通过仿真模拟了微波在中长距离管道内的传输以及经过弯管后的微波模式的改变,验证了在直管道与弯曲管道中检测裂缝缺陷的可行性。构造长度超过 5 m,直径为 8 cm 的直管道与弯曲管道,使用矢量网络分析仪与螺旋天线将微波导入管道中,对轴向、周向以及斜向裂缝进行检测,观察无缝与有缝甚至多条裂缝情况下的 S_{11} 参数的幅度的改变并确定裂缝所在的位置。对于直管道中的轴向、周向和斜向裂缝检测,误差分别为管道总长的 0.047%、0.018% 和 0.298%,对于弯曲管道中轴向、周向和斜向裂缝检测,误差分别为管道总长的 0.074%、0.065% 和 0.203%,表明建立了一种有效的远程检测中长距离管道裂缝的方法。

关键词:微波;无损检测;直管道;弯曲管道;裂缝缺陷

中图分类号: TN98;P225.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Research on microwave detection of slits in medium to long distance pressure pipes

Yuan Qinwen^{1,2} Qiu Guohua^{1,2} Tian Shanshan^{1,2} Shen Jiacheng^{1,2}

(1. College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Technology and Metrology of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This article explores the microwave non-destructive testing technology for slit defects in medium to long distance pressure pipes. The characteristics of microwave transmission in bent pressure pipes and methods for slits detection were theoretically analyzed. The feasibility of detecting slit defects in straight and bent pipes was verified by simulating the transmission of microwave in medium to long distance pipes and the changes in microwave mode after passing through bend. Straight and bent pipes with a length of more than 5 m and a diameter of 8 cm were constructed and microwaves were introduced into the pipes using a vector network analyzer and a spiral antenna to detect axial, circumferential, and oblique slits, and the amplitude of the S_{11} parameter was varied in the case of slitless, slit, and even multiple slits to determine the location of the slits. For axial, circumferential, and oblique slits detection in straight pipes, the errors are 0.047%, 0.018%, and 0.298% of the total pipes length, respectively. For axial, circumferential, and oblique slits detection in bent pipes, the errors are 0.074%, 0.065%, and 0.203% of the total pipes length, respectively. This indicates that an effective remote detection method for medium to long distance pipes slits has been established.

Keywords: microwave; nondestructive testing; straight pipe; bent pipe; slit defect

0 引 言

随着工业的迅速发展,压力管道在社会生产中的应用范围变得越来越广泛^[1],在石油、化工、电力、冶金、轻

工和医药等领域都能发挥巨大的作用。常见的压力管道包括天然气管道与液化石油气管道等利用一定的压力,用于输送气体或者液体的具有可燃、易爆等特点的管状设备,在使用过程中经常会受到来自管道内部与外部的各种因素的影响,从而导致缺陷的产生^[2-4],尤其是裂缝

缺陷,如无法及时发现管道中的裂缝,将会导致管道泄漏,引发一系列的灾难。因此,利用相关检测技术与检测方法对投入运行的压力管道进行定期检测,是为保证压力管道运行安全的有效手段^[5-6]。常用的缺陷检测技术有磁粉检测、超声检测、射线检测、涡流检测等。磁粉检测需要对铁磁材料进行磁化处理,通过检测在材料缺陷处产生的漏磁场的变化来寻找缺陷,该方法可以直观显示缺陷位置和形状等信息,但局限于铁磁性材料,且材料形状对检测效果影响较大^[7]。超声检测使用超声波在管道内传播,可检测出管道的焊缝错边、腐蚀和裂纹等缺陷,检测效率高,可实现自动化检测,适用于结构简单的材料^[8]。射线检测技术将射线发射到检测对象中,利用传感器和胶片,能够直观检测出缺陷大小和位置等信息,但在检测过程中需要注意防护,以免射线对人体造成危害^[9-10]。涡流检测基于电磁感应原理,通过测量检测对象内感应涡流的变化,从而发现缺陷。涡流检测具有快速、高灵敏度的特点,且适合在高温下进行自动化检测,但它适用的检测材料也比较有限,且需要对材料表面进行处理,检测的深度通常无法满足需求^[11]。

微波无损检测因其无耦合剂、非接触、无辐射危害等特点而受到广泛关注^[12]。在检测过程中,利用微波技术向金属管道发送电磁波。此时,金属管可以被视为微波波导^[13]。由于微波具有传输距离长、衰减小、在不连续界面处反射的特点,当它遇到缺陷时,微波传输会受到影响。已有研究利用微波和信号处理技术检测管壁变薄^[14]。对于裂缝缺陷,有研究使用线性偏振圆极化 TE_{11} 模式检测管道中不同方向的裂缝^[15]。在管道系统中,无法避免管道弯曲的情况^[16],因此已有研究使用 TE_{11} 模式来检测管道弯曲处的裂缝缺陷^[17],而对于经过管道弯曲处之后的裂缝缺陷检测研究则较少。对于直径大于 6 cm 且距离较长的管道的裂缝缺陷检测,单一模式的微波频率带宽太小,不足以检测到裂缝^[18]。此外,对于斜向裂缝的检测,也少有研究。

本文旨在对直管道、具有弯曲的管道中的轴向裂缝、周向裂缝以及斜向裂缝进行微波无损检测的研究。首先通过仿真软件验证微波在长度略超过 5 m、直径为 8 cm 的直管道与具有 90° 弯曲的管道内传输以及检测裂缝缺陷的可能性,接着使用矢量网络分析仪作为微波的发生器与接收器,通过同轴线与平面螺旋天线,将 3~6 GHz 频率范围内的微波导入圆形压力管道中,将管道当成圆波导,使微波在其中传输。通过读取并分析 S_{11} 参数,对不同数量以及不同方向的裂缝缺陷进行检测,并对其检测效果进行评估,以建立一种高效的检测方法。

1 原理分析

1.1 圆波导工作模式

对圆形压力管道进行检测时,可将其视为圆波导。圆波导部分波型的截止波长如表 1^[19]所示。其中, λ_c 为截止波长, a 为管道半径。

表 1 圆波导部分波型的截止波长

Table 1 Cutoff Wavelength of Partial Waveform in Circular Waveguide

波型	TE_{11}	TM_{01}	TE_{21}
λ_c	$3.41a$	$2.61a$	$2.075a$
波型	TE_{01}, TM_{11}	TE_{31}	TM_{21}
λ_c	$1.640a$	$1.496a$	$1.223a$

截止频率 f_c 可通过式(1)计算得出:

$$f_c = \frac{c}{\lambda_c} \quad (1)$$

式中: c 为光速。

1.2 管道弯曲处模式转换

在圆形管道的弯曲处,微波传输模式将发生转换,数学表达式如式(2)所示^[20]:

$$\begin{cases} \frac{dA_{m'n'}^+}{d\alpha} = -jr\beta_{m'n'}A_{m'n'}^+ - j\sum_{mn} rC_{(m'n')(mn)}^{\pm} A_{mn}^{\pm} \\ \frac{dA_{m'n'}^-}{d\alpha} = jr\beta_{m'n'}A_{m'n'}^- + j\sum_{mn} rC_{(m'n')(mn)}^{\pm} A_{mn}^m \end{cases} \quad (2)$$

其中, A 是耦合模式的复振幅, C 是耦合系数, β 是相位常数, r 是弯管曲率半径, α 为弯曲角度,正负号分别表示传播向前与向后方向, m, n, m', n' 是模式数。其中 $r\beta_{m'n'}$ 可以表示为式(3):

$$r\beta_{m'n'} = r\sqrt{k^2 - k_{cm'n'}^2} - r\sqrt{k^2 - \frac{X_{m'n'}^2}{(D/2)^2}} \quad (3)$$

由于 C 取决于弯管曲率半径 r 、管道内径 D 以及频率 f ,且相位常数取决于 D 和 f ,微波在管道弯曲处的模式转换是 4 个因素的函数^[21],如式(4)所示:

$$F(r, D, \alpha, f) = F_N\left(\frac{r}{D}, \frac{f}{f_c}, \alpha\right) \quad (4)$$

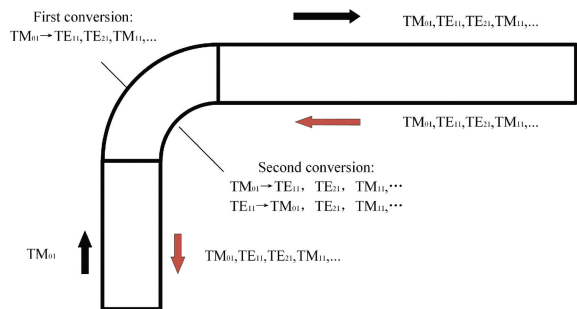
以 TM_{01} 模式为例,其在弯管中将会发生如图 1 所示的模式转换^[20]。

1.3 反射系数

对于一个二端口网络,散射参量由线性关系式(5)定义:

$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: a_1 表示端口一的人射电压, a_2 表示端口二的人射

图1 TM_{01} 模式在弯管处的模式转换Fig. 1 Mode conversion at the bend of mode TM_{01}

电压, b_1 表示端口一的反射电压, b_2 表示端口二的反射电压。

在此实验中, 主要测量的参数为端口一的反射系数 S_{11} , 如式(6)所示。

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0} \quad (6)$$

1.4 缺陷定位

缺陷的定位在时域中进行^[22-23], 首先需要计算多个频率成分的微波在管道中传输时的群速度 v_g , 如式(7)所示。

$$v_g = 2l_{cal} / T_{end} \quad (7)$$

式中: l_{cal} 为无缝管道的长度, T_{end} 为管道末端所对应的时间。

确定群速度后, 可计算出裂缝的位置, 如式(8)所示:

$$l_s = v_g T_s / 2 \quad (8)$$

式中: l_s 为裂缝位置, T_s 为裂缝位置所对应的时间。

2 实验内容

2.1 仿真

首先使用 HFSS 软件构建 3 种管道模型, 包括无缝直管道、无缝弯曲管道与轴向裂缝弯曲管道, 以验证微波在直管道与弯曲管道内部的传输以及传输模式的改变, 并对具有轴向裂缝的弯曲管道的 S_{11} 参数与另外两种管道进行比较, 验证检测弯曲管道裂缝缺陷的可能性。为了符合后续实验中所搭建的实际管道数据, 构建的直管道长度为 5 305 mm, 内径为 80 mm, 构建弯曲管道模型总长度为 5 345 mm, 内径为 80 mm, 90°弯管在 930 mm 处, 此外, 构建与上述相同的弯曲管道并在 3 455 mm 处的上方制造一条长 105 mm、宽 7 mm 的轴向裂缝, 使用频率为 3~6 GHz。图 2~4 分别为微波在直管道、弯曲管道以及轴向裂缝弯曲管道内传输时的电场强度分布图, 直管道内的微波模式并未改变, 而在具有弯曲的管道内传输时,

可以明显观察到经过弯管后传输模式发生了一定的改变。

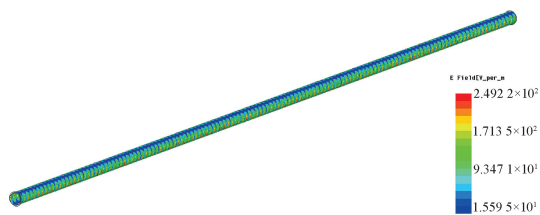


图2 直管道内部微波传输电场强度图

Fig. 2 Electric field intensity diagram of microwave transmission in a straight pipe

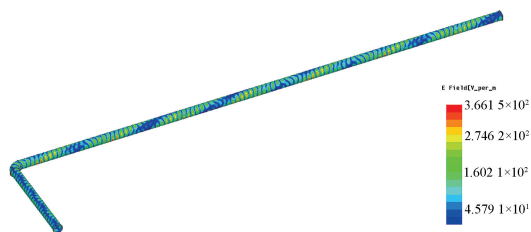


图3 弯曲管道内部微波传输电场强度图

Fig. 3 Electric field intensity diagram of microwave transmission in a bent pipe

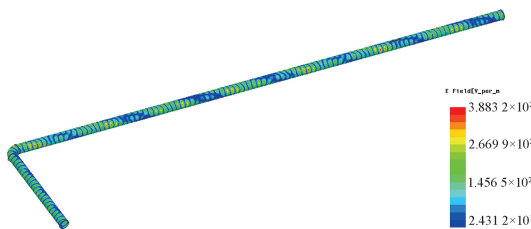


图4 轴向裂缝弯曲管道内部微波传输电场强度图

Fig. 4 Electric field intensity diagram of microwave transmission inside the bent pipe with axial slits

图 5 为仿真结果中的频域对数幅度图。从图 5 可以看到, 在 3~6 GHz 内, 无缝直管道的对数幅度总体趋势缓慢下降。从与之形成鲜明对比无缝弯管道曲线可以看出, 当管道具有 90°弯曲情况时, 对数幅度在 4.5 GHz 处发生了突变, 峰值高达 -3.3 dB, 此现象是由微波在管道弯曲处的反射造成的。而在具有裂缝缺陷的弯曲管道中, 对数幅度在 4.4 GHz 附近发生了最大的突变, 峰值高达 -3.7 dB, 略微低于无缝情况的弯曲管道, 但在 4.1 GHz 与 4.7 GHz 处也有一些较小的突变, 峰值分别为 -4.1 与 -4.2 dB, 这是由微波在裂缝缺陷处的反射造成的。由此可知使用 3~6 GHz 的微波对于弯曲管道的裂缝缺陷检测是可行的。

2.2 实验设备

实验设备包括 Agilent 矢量网络分析仪、UWB-3 圆极

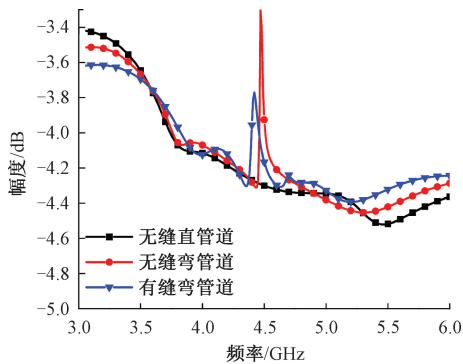


图 5 仿真结果频域对数幅度
Fig. 5 Frequency domain logarithmic amplitude of simulation results

化超宽带螺旋天线、同轴线、压力管道等。本研究所使用的天线为 UWB-3 圆极化超宽带天线,是一种全向圆极化天线,可沿着天线水平周围进行均匀地辐射^[24-25],适用于全方向地无线电信号发射和接收、信号覆盖、宽带信号测试等用途。天线阻抗为 50 Ω,频率范围为 3~6.5 GHz,功率容量为 5 W。螺旋天线与矢量网络分析仪分别如图 6 和 7 所示。



图 6 UWB-3 圆极化超宽带天线
Fig. 6 UWB-3 circularly polarized ultra-wideband antenna



图 7 Agilent 矢量网络分析仪
Fig. 7 Agilent vector network analyzer

2.3 实验平台搭建

1) 管道裂缝设计

本研究所检测的管道包括具有轴向裂缝、周向裂缝以及斜向裂缝的直管道和弯曲管道,管道材料为钢,内径皆为 80 mm,无缝管道通过将金属片覆盖住裂缝来模拟实现。不同的连接头以及连接松紧程度等因素会导致不

同管道总长度以及裂缝位置有所改变,以测量结果为准。轴向裂缝直管道总长 5 305 mm,第 1 条轴向裂缝位于 2 195~2 300 mm 处,第 2 条轴向裂缝位于 4 340~4 445 mm 处。轴向裂缝弯曲管道总长 5 345 mm,930 mm 处有一个 90° 的弯曲,第 1 条轴向裂缝位于 2 225~2 330 mm 处,第 2 条轴向裂缝位于 4 370~4 475 mm 处。周向裂缝直管道总长 5 323 mm,第 1 条周向裂缝位于 2 240~2 247 mm 处,第 2 条周向裂缝位于 4 044~4 051 mm 处。周向裂缝弯曲管道总长 5 364 mm,930 mm 处有一个 90° 的弯曲,第 1 条周向裂缝位于 2 280~2 287 mm 处,第 2 条周向裂缝位于 4 082~4 089 mm 处。斜向裂缝直管道总长 5 365 mm,1 条斜缝位于 4 433~4 473 mm 处。斜向裂缝弯曲管道总长 5 400 mm,930 mm 处有 1 个 90° 的弯曲,1 条斜向裂缝位于 4 443~4 483 mm 处。

2) 检测方式

首先将若干短管道通过连接头组装成长 5 m 左右的管道,在弯曲处使用弯头进行连接。使用同轴线连接矢量网络分析仪和平面螺旋天线,并将天线固定在被检测管道的一个入口处,将不同频率范围的微波导入到具有不同裂缝情况的直管道和弯曲管道中,通过观察频域与时域的 S_{11} 参数幅度来判断被测管道中是否有裂缝缺陷以及裂缝缺陷的位置,所使用的频率范围皆为多次测试后选定的最佳频率范围。实验平台示意图如图 8 所示。

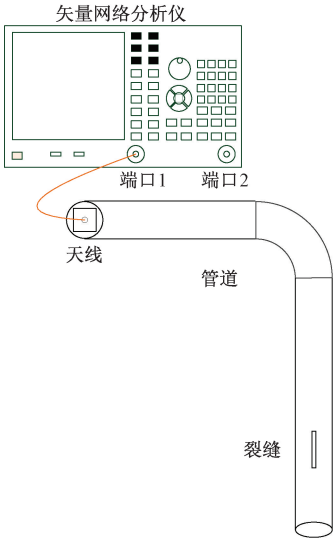


图 8 实验平台示意图
Fig. 8 Schematic diagram of the experimental platform

对轴向裂缝直管道、轴向裂缝弯曲管道、周向裂缝直管道和周向裂缝弯曲管道进行的检测包括无缝、1 条缝、以及两条缝的情况,对斜向裂缝直管道和斜向裂缝弯曲管道进行的检测包括无缝和 1 条缝的情况,其中无缝情况是将金属片包裹裂缝来实现。管道裂缝以及实验平台

搭建如图9和10所示。

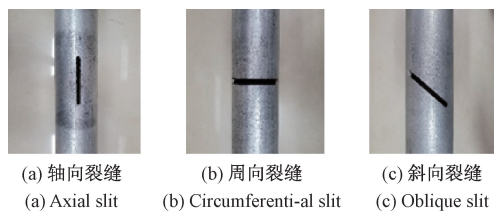


图9 管道裂缝

Fig.9 Pipe slits

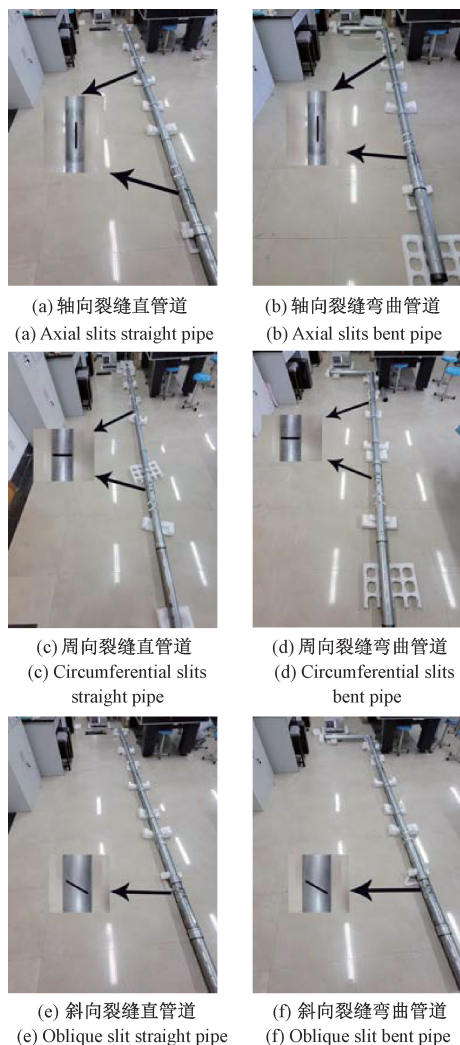


图10 实验平台

Fig.10 Experimental platform

3 实验结果

3.1 轴向裂缝直管道检测

使用微波频率范围为3~5 GHz,此时管道中传播的

波型主要有 TE_{11} 、 TM_{01} 、 TE_{21} 、 TE_{01} 和 TM_{11} 。时域检测结果如图11所示。

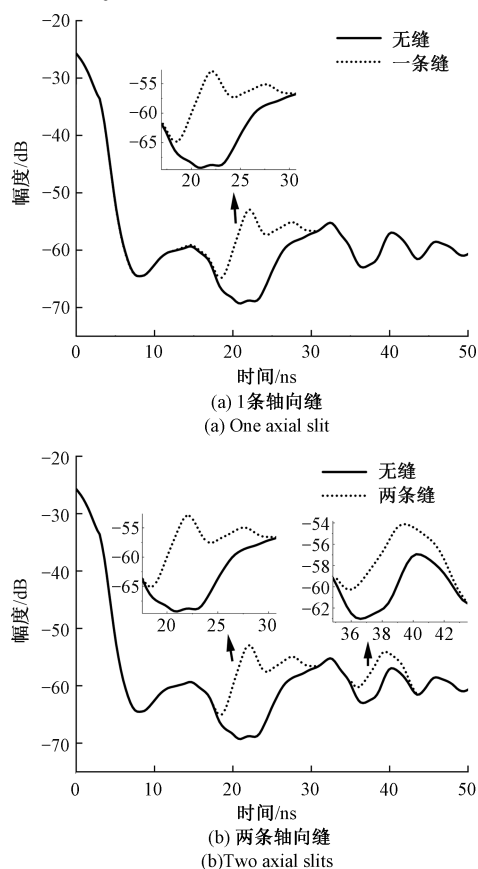


图11 轴向裂缝直管道检测时域对数幅度

Fig.11 Logarithmic amplitude of time domain for detection of straight pipe with axial slits

由图11(a)、(b)可见,3 ns处的小突变是由微波从天线导入到管道中时的不匹配引起的,作为起始时间,45.9 ns处的波峰是由微波到达管道末端引起的,作为结束时间,可由式(7)计算出群速度 v_g 为 2.473×10^8 m/s。由图11(a)可知,检测直管道的第1条轴向裂缝时,有缝与无缝情况的时域对数幅度在17.4~30.9 ns出现了明显分歧,21.2 ns处相差最大,为15 dB,表明此时微波在管道中遇到了裂缝,使得传输受到了影响,发生了强烈的反射。由式(8)计算得出该时刻所对应的管道上的位置为2250 mm处,表明成功检测出了直管道的1条轴向裂缝。由图11(b)可知,检测直管道的两条轴向裂缝时,除了由第1条缝在17.4~30.9 ns处造成的反射外,在35~43 ns处也出现了分歧,38.5 ns处的对数幅度差最大,为8 dB,表明第2条轴向缝造成了反射。由式(8)计算得出该时刻所对应的管道上的位置为4390 mm处,表明成功同时检测出了直管道上的两条轴向裂缝。两条轴向裂缝的检测图如图12所示。

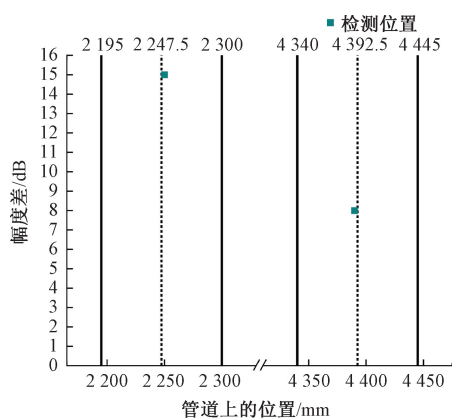


图 12 轴向裂缝直管道检测图

Fig. 12 Axial slits straight pipe inspection diagram

图 12 中的实线表示缝在管道中的起点和终点,虚线表示缝的中点,绿点表示检测位置。可以直观地看出两条缝的检测点均落于缝的起止线内,以缝的中间位置为基准面,两条缝的误差均为 2.5 mm,即管道总长 5 305 mm 的 0.047%,且对数幅度差分别为 15 和 8 dB。

3.2 轴向裂缝弯曲管道检测

使用微波频率范围为 3~6 GHz,此时管道中传播的波型主要有 TE_{11} 、 TM_{01} 、 TE_{21} 、 TE_{01} 、 TM_{11} 和 TE_{31} 。时域检测结果如图 13 所示。

由图 13(a)、(b)可知,起始时间为 3 ns,结束时间为 49 ns,由式(7)计算出群速度 v_g 为 2.324×10^8 m/s。由图 13(a)可知,检测弯曲管道的第 1 条轴向裂缝时,有缝与无缝情况的时域对数幅度在 18.6~26.7 ns 时出现了明显分歧,22.6 ns 时幅度相差最大,为 7 dB,表明此时微波在管道中遇到了裂缝,发生了强烈的反射。由式(8)计算得出该时刻所对应的管道上的位置为 2 278 mm 处,表明成功检测出了弯曲管道上的 1 条轴向缝。由图 13(b)可知,检测弯曲管道的两条轴向裂缝时,除了由第 1 条缝在 18.6~26.7 ns 处造成的反射外,在 36.3~43.2 ns 处也产生了分歧,41 ns 时幅度相差最大,约为 2 dB,表明第 2 条轴向缝造成了反射。由式(8)计算得出该时刻所对应的管道上的位置为 4 415 mm 处,表明成功同时检测出了弯曲管道上的两条轴向缝。图 14 为两条轴向裂缝的检测图。

从图 14 可以看出,两条缝的检测对数幅度差分别为 7 和 2 dB,检测位置皆落于缝的起止线内,其中第 1 条缝的检测位置离中点较近,误差为 0.5 mm,即管道总长 5 345 mm 的 0.009%,第 2 条的误差为 7.5 mm,为管道总长的 0.14%,平均误差为 4 mm,为管道总长的 0.074%。由此可知直管道的轴向裂缝检测效果强于弯曲管道。

3.3 周向裂缝直管道检测

使用微波频率范围为 3~4.5 GHz,此时管道中传播

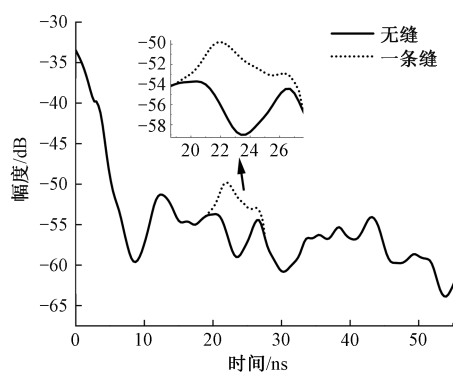
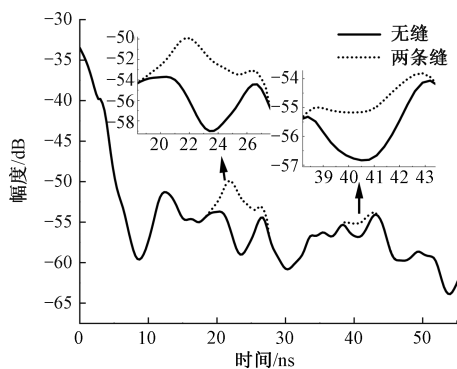
(a) 1条轴向缝
(a) One axial slit(b) 两条轴向缝
(b) Two axial slits

图 13 轴向裂缝弯曲管道检测时域对数幅度

Fig. 13 Logarithmic amplitude of time domain for detection of bent pipe with axial slits

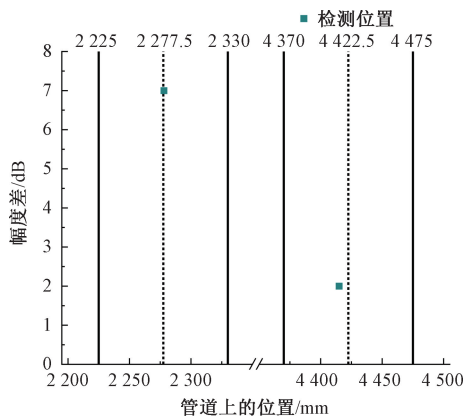
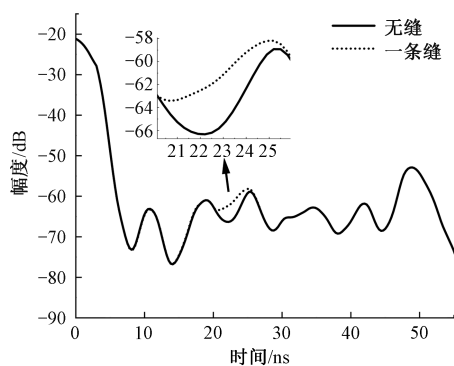


图 14 轴向裂缝弯曲管道检测图

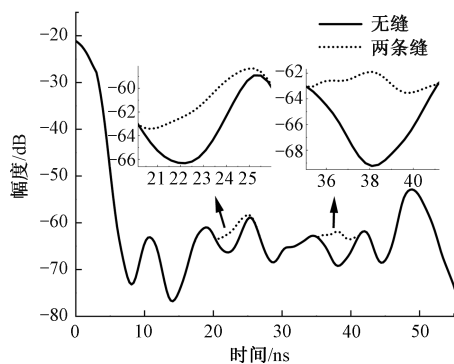
Fig. 14 Axial slits bent pipe inspection diagram

的波型主要有 TE_{11} 、 TM_{01} 和 TE_{21} 。时域检测结果如图 15 所示。

由图 15(a)、(b)可知,起始时间为 3 ns,结束时间为 48.9 ns,由式(7)计算出群速度 v_g 为 2.319×10^8 m/s。由图 15(a)可知,检测直管道的第 1 条周向裂缝时,有缝与无缝情况的时域对数幅度在 20.1~25.8 ns 时出现了



(a) 1条周向缝
(a) One circumferential slit



(b) 两条周向缝
(b) Two circumferential slits

图 15 周向裂缝直管道检测时域对数幅度

Fig. 15 Logarithmic amplitude of time domain for detection of straight pipe with circumferential slits

明显分歧, 22.35 ns 时幅度相差最大, 为 4 dB, 表明此时微波在管道中遇到了裂缝, 使得传输受到了影响, 发生了强烈的反射。由式(8) 计算得出该时刻所对应的管道上的位置为 2 244 mm 处, 表明成功检测出了直管道上的 1 条周向缝。由图 15(b) 可知, 检测直管道的两条周向裂缝时, 除了由第 1 条缝在 20.1~25.8 ns 处造成的反射外, 在 34.2~41.1 ns 处也出现了分歧, 37.9 ns 时对数幅度相差最大, 为 7 dB, 表明第 2 条周向缝造成了反射。由式(8) 计算得出该时刻所对应的管道上的位置为 4 046 mm 处, 表明成功同时检测出了直管道上的两条周向缝。图 16 为两条周向裂缝的检测位置图。

从图 16 可以看出, 两条缝的检测点皆位于起止线内, 第 1 条的误差为 0.5 mm, 为管道总长 5 323 mm 的 0.009%, 第 2 条的误差为 1.5 mm, 为管道总长的 0.028%, 平均误差为 1 mm, 为管道总长的 0.018%。

3.4 周向裂缝弯曲管道检测

使用微波频率范围为 3~5 GHz, 此时管道中传播的波型主要有 TE_{11} 、 TM_{01} 、 TE_{21} 、 TE_{01} 和 TM_{11} 。时域检测结果如图 17 所示。

由图 17(a)、(b) 可知, 起始时间为 3 ns, 结束时间为

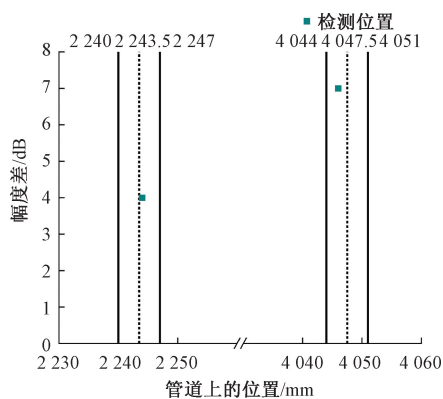
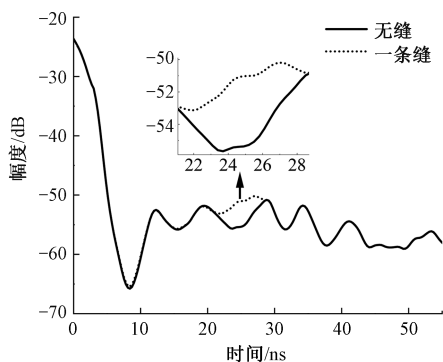
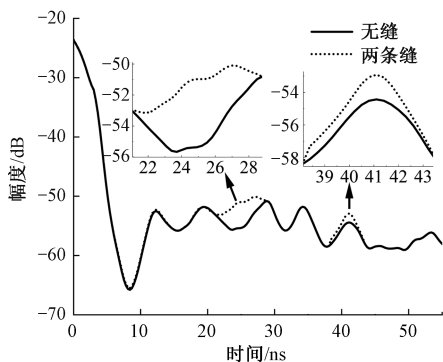


图 16 周向裂缝直管道检测图

Fig. 16 Circumferential slits straight pipe inspection diagram



(a) 1条周向缝
(a) One circumferential slit



(b) 两条周向缝
(b) Two circumferential slits

图 17 周向裂缝弯曲管道检测时域对数幅度

Fig. 17 Logarithmic amplitude of time domain for detection of bent pipe with circumferential slits

53.1 ns, 由式(7) 计算出群速度 v_g 为 2.142×10^8 m/s。由图 17(a) 可知, 检测弯曲管道的第 1 条周向裂缝时, 有缝与无缝情况的时域对数幅度在 21~28.8 ns 时出现明显分歧, 24.3 ns 时幅度相差最大, 约为 4 dB, 表明此时微波在管道中遇到了裂缝, 使得传输受到了影响, 发生了强烈的反射。由式(8) 计算得出该时刻所对应的管道上的位置为 2 281 mm 处, 表明成功检测出了弯曲管道上的 1

条周向缝。由图 17(b)可知,检测弯曲管道的两条周向裂缝时,除了由第 1 条缝在 21~28.8 ns 处造成的反射外,在 38.1~43.5 ns 处也出现了分歧,41.1 ns 时对数幅度相差最大,约为 2 dB,由式(8)计算得出该时刻所对应的管道上的位置为 4 081 mm 处,表明成功同时检测出了弯曲管道上的两条周向缝。图 18 为两条周向裂缝的检测位置图。

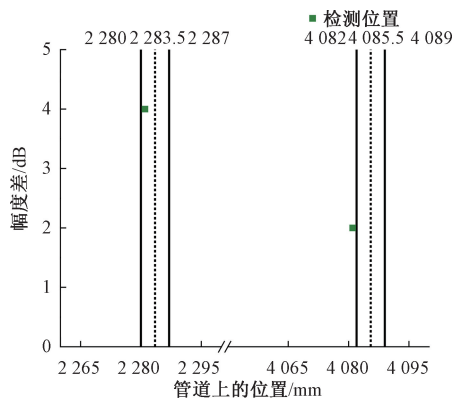


图 18 周向裂缝弯曲管道检测图

Fig. 18 Circumferential slits bent pipe inspection diagram

根据图 18 可知,第 1 条周向缝的检测对数幅度差为 4 dB,检测位置落于起止线内,误差为 2.5 mm,为管道总长 5 364 mm 的 0.046%。第 2 条的检测对数幅度为 2 dB,检测位置没有落于起止线内,误差为 4.5 mm,为管道总长的 0.084%,可见经过一个 90° 弯曲以后,对于远端的周向裂缝检测位置出现了略微的偏差,这是由于在管道弯曲处损失了较多能量,且周向裂缝在管道上的跨度较小,故检测位置出现了偏差,但检测位置依然在裂缝附近。平均误差为 3.5 mm,为管道总长的 0.065%。由此可知直管道的周向裂缝检测效果强于弯管道。

3.5 斜向裂缝直管道检测

使用微波频率范围为 3~6 GHz,此时管道中传播的波型主要有 TE_{11} 、 TM_{01} 、 TE_{21} 、 TE_{01} 、 TM_{11} 和 TE_{31} 。时域检测结果如图 19 所示。

由图 19 可知,起始时间为 3 ns,结束时间为 47.4 ns,由式(7)计算出群速度 v_g 为 2.416×10^8 m/s。检测直管道的 1 条斜向裂缝时,有缝与无缝情况的时域对数幅度在 38.5~42.5 ns 时出现明显分歧,40 ns 时幅度相差最大,为 1 dB,表明此时微波在管道中遇到了裂缝,使得传输受到了影响,发生了反射。由式(8)计算得出该时刻所对应的管道上的位置为 4 469 mm 处,表明成功检测出了直管道上的 1 条斜向裂缝。图 20 为 1 条斜向裂缝的检测图。

由图 20 可知斜向裂缝的检测位置落于起止线内,误差为 16 mm,为管道总长 5 365 mm 的 0.298%。

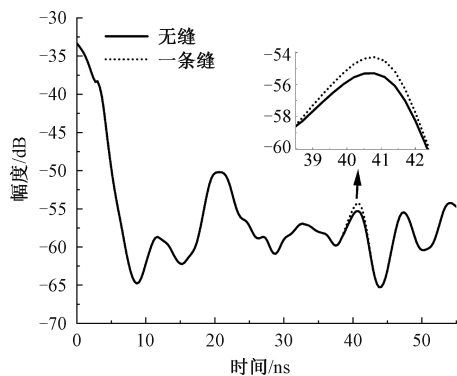


图 19 斜向裂缝直管道检测时域对数幅度

Fig. 19 Logarithmic amplitude of time domain for detection of straight pipe with an oblique slit

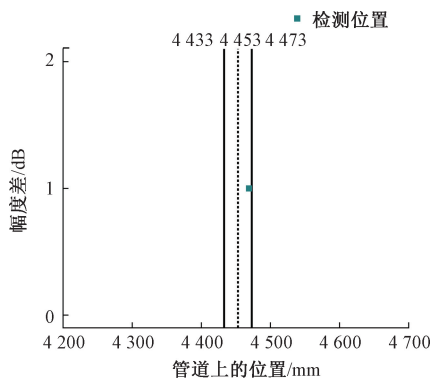


图 20 斜向裂缝直管道检测图

Fig. 20 Oblique slit straight pipe inspection diagram

3.6 斜向裂缝弯曲管道检测

使用微波频率范围为 3~5 GHz,此时管道中传播的波型主要有 TE_{11} 、 TM_{01} 、 TE_{21} 、 TE_{01} 和 TM_{11} 。时域检测结果如图 21 所示。

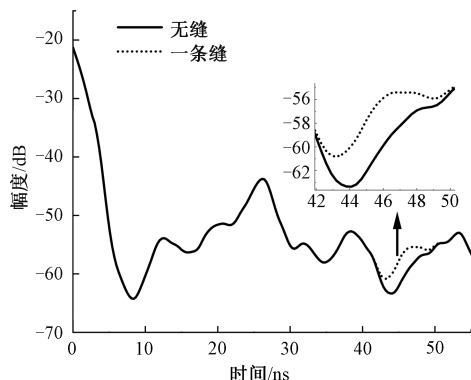


图 21 斜向裂缝弯曲管道检测时域对数幅度

Fig. 21 Logarithmic amplitude of time domain for detection of bent pipe with an oblique slit

由图 21 可知,起始时间为 3 ns,结束时间为 53.1 ns,

由式(7)计算出群速度 v_g 为 2.156×10^8 m/s。检测弯曲管道的1条斜向裂缝时,有缝与无缝情况的时域对数幅度在41.7~50.4 ns时出现明显分歧,44.3 ns时幅度相差最大,为4 dB,表明此时微波在管道中遇到了裂缝,使得传输受到了影响,发生了反射。由式(8)计算得出该时刻所对应的管道上的位置为4 452 mm处,表明成功检测出了弯曲管道上的1条斜向裂缝。图22为1条斜向裂缝的检测图。

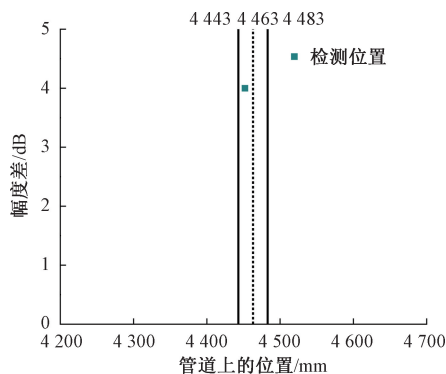


图22 斜向裂缝弯曲管道检测图

Fig. 22 Oblique slit bent pipe inspection diagram

由图22可知缝的检测位置位于起止线内,误差为11 mm,为管道总长5 400 mm的0.203%,可见管道弯曲对于斜向裂缝的检测影响较小。

4 结 论

本文基于微波传输特性理论以及微波无损检测技术的优势,对长度超过5 m、直径8 cm的直管道与弯管道的裂缝缺陷进行了检测。使用矢量网络分析仪与平面螺旋天线向圆管道内部输入多种模式的微波,通过收集与观察 S_{11} 参数的变化,在频域与时域中对管道的轴向裂缝、周向裂缝与斜向裂缝进行了检测与定位,得出如下结论。

1) 此方法对于直管道的裂缝缺陷检测准确度最高,缺陷处的反射也最为强烈,对于3种裂缝的位置检测误差均小于管道总长的0.3%,其中对于轴向和周向裂缝的检测效果最佳,位置检测误差分别为管道总长的0.047%、0.018%。

2) 当检测经过一个90°弯曲后的管道裂缝缺陷时,对于轴向裂缝和周向裂缝的位置检测准确度略微有所下降,但误差任然较小,分别为管道总长的0.074%和0.065%,缺陷处的反射也有所减少。而对于单独检测1条斜向裂缝的效果较为稳定。

综上可知此方法对于中长距离直管道与弯管道的裂缝缺陷检测具有较好的效果,对管道缺陷检测技术的发展具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 赵臻, 张轶. 压力容器和压力管道的使用安全管理问题及对策研究[J]. 造纸装备及材料, 2022, 51(5): 213-215.
ZHAO ZH, ZHANG Y. Research on safety management issues and countermeasures for the use of pressure vessels and pressure pipelines [J]. Papermaking Equipment & Materials, 2022, 51(5): 213-215.
- [2] 党争光. 长输天然气管道泄漏监测定位方法应用[J]. 石化技术, 2022, 29(7): 61-63.
DANG ZH G. Application of the disclosure monitoring and location method of long natural gas pipeline [J]. Petrochemical Industry Technology, 2022, 29(7): 61-63.
- [3] YU Y T, LI Y B, QIN H, et al. Microwave measurement and imaging for multiple corrosion cracks in planar metals [J]. Materials and Design, 2020, 196: 109151.
- [4] 石明江, 陈瑞, 冯林. 基于磁记忆的金属管道缺陷检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(1): 44-53.
SHI M J, CHEN R, FENG L. Metal pipeline defect detection method based on magnetic memory [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(1): 44-53.
- [5] 沈强, 袁红. 金属压力容器压力管道裂纹无损检测技术研究[J]. 中国金属通报, 2020, 28(4): 211-212.
SHEN Q, YUAN H. Research on non-destructive testing technology for cracks in metal pressure vessels and pipelines [J]. China Metal Bulletin, 2020, 28(4): 211-212.
- [6] KATAGIRI T, CHEN G, YUSA N, et al. Demonstration of detection of the multiple pipe wall thinning defects using microwaves [J]. Measurement, 2021, 175: 109074.
- [7] 马涛, 孙振国, 陈强. 基于几何与纹理特征相融合的磁粉探伤裂纹提取算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(1): 50-54.
MA T, SUN ZH G, CHEN Q. Crack detection algorithm for fluorescent magnetic particle inspection based on shape and texture features [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2018, 58(1): 50-54.
- [8] 谭超, 董峰. 多相流过程参数检测技术综述[J]. 自动化学报, 2013, 39(11): 1923-1932.
TAN CH, DONG F. Parameters measurement for multiphase flow process [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(11): 1923-1932.
- [9] 郭冠华, 熊鸿建. 中国射线检测技术现状及研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1683-1695.
WU G H, XIONG H J. Radiography testing in China [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1683-1695.

- 1683-1695.
- [10] 刘金海, 赵真, 付明芮, 等. 基于主动小样本学习的管道焊缝缺陷检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(11): 252-261.
LIU J H, ZHAO ZH, FU M R, et al. Active small sample learning based the pipe weld defect detection method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(11): 252-261.
- [11] 周德强, 潘萌, 常祥, 等. 铁磁性构件缺陷的脉冲涡流检测模式研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(6): 1498-1505.
ZHOU D Q, PAN M, CHANG X, et al. Research on detection modes of ferromagnetic component defects using pulsed eddy current [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(6): 1498-1505.
- [12] LI Z, HAIGH A, SOUTIS C, et al. A review of microwave testing of glass fibre-reinforced polymer composites [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2019, 34(4): 429-458.
- [13] 杨晨, 段滋华, 马海桃, 等. 金属管道表面缺陷微波无损检测[J]. 无损检测, 2013, 35(3): 34-37, 44.
YANG CH, DUAN Z H, MA H T, et al. Microwave nondestructive testing of metal pipe surface defects [J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(3): 34-37, 44.
- [14] SAKAI Y, YUSA N, HASHIZUME H. Nondestructive evaluation of wall thinning inside a pipe using the reflection of microwaves with the aid of signal processing [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2012, 27(2): 171-184.
- [15] CHEN G, KATAGIRI T, SONG H C, et al. Detection of cracks with arbitrary orientations in a metal pipe using linearly-polarized circular TE_{11} mode microwaves [J]. NDT and E International, 2019, 107: 102125.
- [16] UOSHITA S, SASAKI K, KATAGIRI T, et al. Long-range inspection of a pipe with a bend using microwaves [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2019, 59(4): 1519-1526.
- [17] CHEN G, KATAGIRI T, YUSA N, et al. Experimental investigation on bend-region crack detection using TE_{11} mode microwaves [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2022, 37(1): 71-80.
- [18] KATAGIRI T, SASAKI K, SONG H C, et al. Proposal of a TEM to TE_{01} mode converter for a microwave nondestructive inspection of axial flaws appearing on the inner surface of a pipe with an arbitrary diameter [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2019, 59(4): 1527-1534.
- [19] 骆新江, 张鹏泉, 张忠海. 基于虚拟仿真的圆波导教学方法[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(1): 120-125.
LUO X J, ZHANG P Q, ZHANG ZH H. Circular waveguide teaching methods based on virtual simulation [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2022, 41(1): 120-125.
- [20] CHEN G, KATAGIRI T, SONG H C, et al. Investigation of the effect of a bend on pipe inspection using microwave NDT [J]. NDT & E International, 2020, 110: 102208.
- [21] CHEN G, YUSA N, HASHIZUME H. Evaluation of general applicability of microwave NDT to pipes with a bend focusing on mode conversion [C]. 15th Japan Society of Maintenance Conference: Student Session, 2018: 277-280.
- [22] MATSUKAWA S, YOSHIDA K, NISHIMURA Y, et al. Time-domain analysis of microwave signal propagating along FRPM pipe walls and application to nondestructive inspection [C]. 2019 49th European Microwave Conference (EuMC), 2019: 932-935.
- [23] LIU L S. Application of microwave for remote NDT and distinction of biofouling and wall thinning defects inside a metal pipe [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2015, 34(40): 1-8.
- [24] 赵东贺, 韩国栋, 刘桂凤. 一种全向圆极化天线设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(8): 224-229, 235.
ZHAO D H, HAN G D, LIU G F. Design of omnidirectional circularly polarized antenna [J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30(8): 224-229, 235.
- [25] XIAO B, ZHONG L, HONG J S, et al. A novel compact planar spiral-shaped antenna [J]. The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES), 2013, 28(1): 57-63.

作者简介



袁勤文, 2020 年于北京印刷学院获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为微波检测。

E-mail: P21030854070@cjl. edu. cn



Yuan Qinwen received his B. Sc. degree from Beijing Institute of Graphic Communication in 2020. Now he is a M. Sc. candidate of China Jiliang University. His main research interest includes microwave detection.

裘国华 (通信作者), 1998 年于重庆大学获得学士学位, 2003 年于重庆大学获得硕士学位, 2012 年于浙江大学获得博士学位, 现为中国计量大学副教授, 主要研究方向为微波检测、信号与信息处理。

E-mail: qghfr@163. com

Qiu Guohua (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Chongqing University in 1998, M. Sc. degree from Chongqing University in 2003 and Ph. D. degree from Zhejiang University in 2012, respectively. Now he is an associate professor in China Jiliang University. His main research interests include microwave detection and signal and information processing.