

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514235

基于分段互感式涡流探头的电梯钢带 内部钢丝断丝检测方法^{*}

魏义敏,孙小龙,冷孝丽,潘 骏

(浙江理工大学全省机电产品可靠性技术重点实验室 杭州 310018)

摘要:电梯钢带作为由钢丝绳演变而来的新型传动与承载构件,凭借柔性好、抗腐蚀能力强和传动效率高等特点,在现代电梯系统中已得到了广泛应用。然而,钢带在运行过程中长期受循环应力等因素影响,易引发内部钢丝绳磨损、断丝和断股等隐蔽性损伤,往往难以及时发现,严重威胁电梯运行安全。现有的检测方法存在响应慢、效率低或依赖停机检测等问题,难以满足钢带断丝的在线检测需求。为此,提出了一种基于电涡流检测的钢带内部钢丝绳断丝损伤检测方法。首先,考虑到钢带具有无自由端、连续结构及不易拆卸的特点,设计了一种具有空间环绕式绕线结构、可自由开合的外穿分段互感式涡流探头;其次,利用有限元仿真对该探头的匝数、偏离值等关键参数进行分析与优化;最后,基于优化后的参数制作了分段互感式探头实物,搭建了试验平台开展钢带断丝损伤检测试验,同时在单股钢丝绳中注入不同断丝量以验证检测系统的性能。试验结果表明,该探头可在钢带运行速度为0.5 m/s的条件下稳定检测出至少4根的断丝损伤,感应信号与断丝数量呈正相关,具备良好的动态检测能力。研究结果为电梯钢带内部钢丝绳断丝在线检测提供了有效参考。

关键词:电梯钢带;钢丝绳断丝缺陷;涡流检测;互感式探头;有限元分析

中图分类号: TH878 TM154 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

Detection method for broken wires inside elevator belts based on segmented mutual inductance eddy current probe

Wei Yimin, Sun Xiaolong, Leng Xiaoli, Pan Jun

(Zhejiang Key Laboratory of Reliability Technology for Mechanical & Electrical Product, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: As a novel traction and load-bearing component derived from steel wire ropes, the elevator belt has been widely applied in modern elevator systems due to its flexibility, corrosion resistance, and high transmission efficiency. However, long-term cyclic stresses can induce hidden defects such as cord wear, broken wires, and strand fractures, which are difficult to detect in time and pose serious safety risks. Existing methods often suffer from slow response, low efficiency, or dependence on shutdown inspection, making them unsuitable for online detection of broken wires. To overcome these limitations, this study proposes an eddy current-based detection method for broken wires in elevator belt steel cords. A segmented mutual-inductance probe with a spatially wound, openable configuration was designed, and finite element simulations were conducted to optimize coil turns and lift-off parameters. Based on the optimized design, a prototype was fabricated and a test platform established. Sensitivity was first evaluated by introducing different numbers of broken wires into a single steel strand, followed by detection experiments on elevator belts. Results show that the probe can stably detect at least four broken wires at a belt speed of 0.5 m/s. The induced signal amplitude increases with the number of broken wires, and the system exhibits good dynamic detection capability. These findings provide a practical reference for online detection of broken wires in elevator belt steel cords and offer technical support for enhancing elevator safety and enabling preventive maintenance.

Keywords: elevator belt; broken wire defects; eddy current testing; mutual inductance probe; finite element analysis

0 引言

电梯曳引钢带是一种将多根等间距并排的钢丝绳包裹聚氨酯的新型传动和承载构件。作为由钢丝绳演变而来的新型构件,钢带采用多股细钢丝与高分子包覆层复合结构,具有曳引力高、柔性好、传动噪声低等优点^[1]。这种特殊结构在有效提升传动性能的同时,也避免了内部钢丝绳与曳引轮的直接接触,大大降低了腐蚀和外部磨损。然而,受循环应力等因素的影响,钢带内部钢丝绳仍不可避免地出现损伤,而断丝则是常见的一种^[2],一旦断丝趋于集中,钢丝绳的承载强度将被严重削弱,从而导致安全隐患。且此类损伤难以通过外观直接识别,因此对钢带内部钢丝绳的断丝损伤进行高效、精准的无损检测,尤其是在电梯运行过程中的在线检测,是保障其安全稳定运行的关键。然而受限于钢带的形式结构限制,如尺寸小、钢丝绳数量多、钢丝直径小等因素,现有的钢带无损检测方法尚不完善。目前钢带无损检测方法主要有3种:漏磁法^[3-6]、电阻法^[7]和寿命值设定法。虽然这些方法在一定程度上取得了研究进展,但仍存在明显局限。如漏磁法虽然能检测到4根以上的断丝,但需将钢丝绳励磁至饱和状态,导致激磁装置体积庞大、系统复杂、调试困难,难以实现对运行中钢带的在线检测;电阻法虽具有成本低、结构简单、便于集成等优势,更适合在线检测场景,但仅对大范围断股损伤有着较好的检测效果,而对局部断丝等早期微小损伤不敏感,且易受到温度、振动等外界因素干扰;寿命值设定法则过于依赖经验推算,误报率较高^[8],难以满足实际工程需求。更为重要的是,现有检测手段普遍依赖电梯停运状态进行检测,在线实时性不足,制约了钢带损伤的早期发现与预警能力,因此,有必要对运行中的钢带进行损伤检测。

涡流检测作为一种广泛应用于工业领域的无损检测技术,具有检测速度快、灵敏度高、无需耦合介质等优点^[9],在金属管道、航空结构件和轨道交通轮轨系统等多个领域得到了广泛应用。例如,殷晓康等^[10]提出的旋转电磁场探头适用于金属管道表面缺陷检测。于霞等^[11]设计了一种差分线圈对飞机发动机涡轮叶片上的微裂纹进行检测。许鹏等^[12]将涡流与漏磁技术融合用于高速轨道损伤检测,取得了良好效果。在钢丝绳检测方面,涡流探头对断丝缺陷的响应也得到了有效验证^[13-14]。与其他方法相比,涡流检测在不接触、非耦合的情况下即可获取损伤响应信号,非常适合在线检测,尤其适用于运动状态下的导电部件缺陷识别。这一特点恰好满足了电梯钢带在运行状态下进行实时检测的迫切需求。因此,提出基于涡流法的电梯钢带内部钢丝绳断丝缺陷检测方法,结合电梯钢带结构特点以及无自由端的限制,设计了一

种可以自由开合的分段互感式涡流检测探头,通过有限元仿真优化了探头设计参数,搭建了涡流无损检测系统,并对不同断丝量的钢丝绳以及运动状态下的损伤钢带进行了检测试验,以验证所提方法的有效性和可行性。

1 电梯钢带涡流检测方案

1.1 分段互感式探头结构设计

电梯钢带由承载体(钢丝绳)和包覆层(聚氨酯)组成,其结构如图1所示。

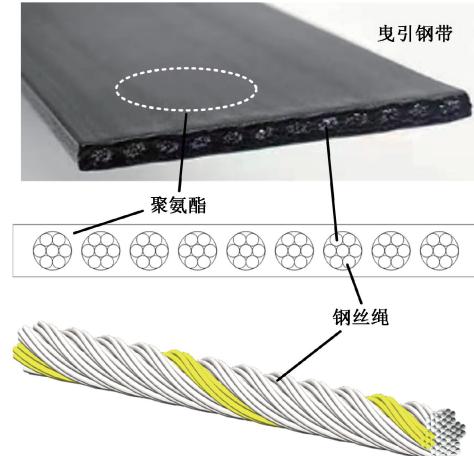


图1 电梯钢带结构

Fig. 1 Diagram of an elevator belt

钢丝绳涡流检测一般采用放置式的饼式探头,如图2(a)所示。文献[14]表明该类探头对轴向缺陷的检测效果较差,且无法通过一次扫描判断全周的断丝缺陷,外穿式探头则可以很好的解决这个问题,能够大大提升检测效率,如图2(b)所示。

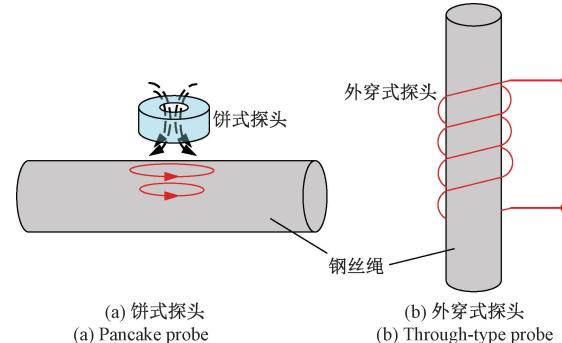


图2 饼式探头与外穿式探头

Fig. 2 Pancake probe and through-type probe

但在大部分检测工况下,电梯钢带一般为无自由端连续结构且不易拆卸,传统绕线方式的外穿式探头受其结构限制无法开合从而套在钢带外面,为克服这一局限,

设计了一种如图3所示的区别于传统轴向平行绕制方式,具有空间环绕式的多匝激励线圈。该激励线圈与2个相同的接收线圈一同组成分段互感式涡流探头。该探头的绕制和组装十分方便,且可实现整体结构的开合,满足钢带的在线检测需求。

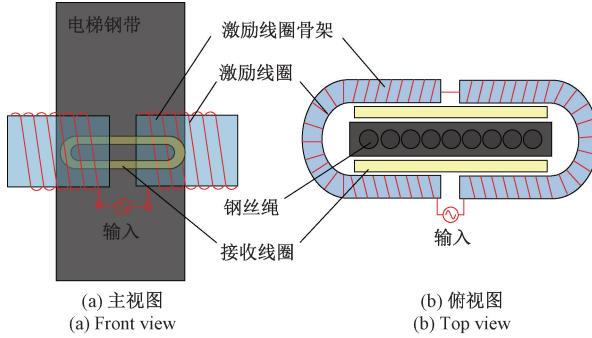


图3 分段互感式探头示意图

Fig. 3 Diagram of a segmented mutual inductance probe

1.2 涡流检测基本原理

涡流检测技术是基于法拉第电磁感应定律的无损检测方法,其基本原理如图4所示。

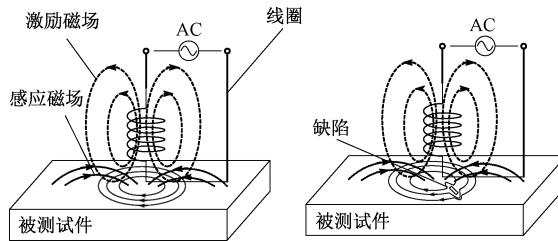


图4 涡流检测技术原理

Fig. 4 Principle of eddy current testing technology

当交变电流的施加到激励线圈时,线圈周围会产生和激励电流垂直的初级磁场。将激励线圈靠近导体时,由于电磁感应的作用,导体中会产生与激励磁场垂直的且呈漩涡状流动的电流——涡流。涡流又产生一个与激励磁场方向相反的次级磁场,当检测线圈位于裂纹(损伤)上方时,涡流在导体中的流动受到裂纹的干扰,使得感应磁场发生变化。当使用检测线圈拾取信号时,感应磁场的变化会导致线圈阻抗的变化。通过线圈阻抗的变化就可以确定损伤的位置和程度。对于钢带内部钢丝绳来说,断丝缺陷会引起涡流路径阻断,从而导致局部磁场与涡流分布发生变化^[15],因此可以通过涡流法实现其断丝缺陷的检测。

导体中感应的涡流存在分布不均匀的现象,涡流在导体表面的密度最大,随着深度的增加而呈负指数衰减,当激励频率较高时,涡流主要集中在导体表面附近流动,这种现象称之为趋肤效应,而涡流进入导体的深度称为

趋肤深度^[16]。涡流密度衰减到表面值的1/e时的趋肤深度定义为标准趋肤深度。标准趋肤深度公式^[17]为:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{f\mu\sigma\pi}} \quad (1)$$

式中: δ 是标准趋肤深度,单位为m; f 是激励频率,单位为Hz; μ 是材料磁导率,单位为H/m; σ 是材料电导率,单位为S/m。空气中及真空中的磁导率为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$,单位为H/m。对于铁磁性材料, $\mu = \mu_0 \times \mu_r$, μ_r 为相对磁导率。

由式(1)可知,当电导率与相对磁导率为固定值时,随着激励频率的增大,趋肤深度逐渐减小,因此可以通过改变激励信号频率来控制趋肤深度从而满足检测需求。值得注意的是,随着激励频率减小,透入深度增加,但也会减小导体表面涡流的密度^[18],从而造成检测灵敏度下降,因此,在选择激励频率时需要综合考虑趋肤深度以及灵敏度的影响。

1.3 探头互感模型与等效电路

涡流检测探头是检测系统中的核心部件,按照检测原理可分为自感式和互感式两种。自感式探头一般仅由一个线圈构成,结构简单且成本较低,但在复杂环境下抗干扰能力较差,特征信号提取困难。而互感式线圈一般由2个以上的线圈组成,如图5所示,相比于自感式探头,互感式探头具有更高的灵敏度、更高信噪比以及不易受温度影响等优点^[19],且由于激励线圈与感应线圈分别独立,可以通过分别优化它们来实现更好的检测效果。

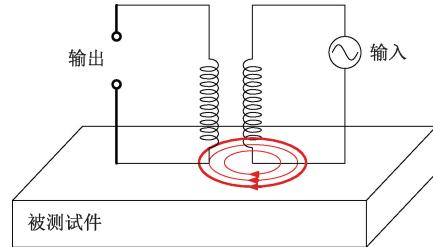


图5 互感式探头结构

Fig. 5 The structure of the mutual inductance probe

在互感式探头中,2个线圈分别实现激励与接收,接收线圈通过感知磁场变化输出感应电压从而判断被测试件中是否存在损伤。由于试验中所使用的激励频率在20 kHz以下,在此频率段内,互感线圈的等效电路模型可如图6^[20]所示。

图6中 U_1 和 U_2 分别为激励电压和感应电压; L_1 、 L_2 、 L_3 分别为激励线圈、接收线圈和被测试件的电感; R_1 、 R_2 、 R_3 分别为激励线圈、接收线圈和被测试件的电阻; M_{12} 为激励和接收线圈之间的直接互感, M_{13} 为激励线圈和导体之间的互感, M_{23} 为接收线圈和导体之间的互感。

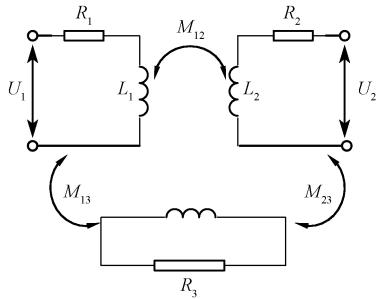


图 6 互感线圈等效电路模型

Fig. 6 Equivalent circuit model of the mutual inductance coil

线圈和回路自身的复阻抗 Z 表示为电阻 R 和感抗 $j\omega L$ 之和, 即:

$$Z = R + j\omega L \quad (2)$$

式中: j 是虚数符号; 角频率 $\omega = 2\pi f$, f 为频率。由基尔霍夫定律可写出等效电路模型的数值表达式为:

$$\begin{pmatrix} Z_1 & j\omega M_{12} & j\omega M_{13} \\ j\omega M_{21} & Z_2 & j\omega M_{23} \\ j\omega M_{31} & j\omega M_{32} & Z_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

感应电压 U_2 可表示为:

$$j\omega M_{21}I_1 + Z_2I_2 + j\omega M_{23}I_3 = U_2 \quad (4)$$

由式(4)可知接收线圈电压由 3 部分组成, 其中互感 M_{23} 产生的电压成分包含损伤信息, 但该值大小与感应涡流的大小即与互感 M_{13} 直接相关, 但激励线圈与接收线圈的互感 M_{12} 又会对有用信号造成干扰^[21]。因此, 为提高互感式探头的检测能力, 应尽可能的增大 M_{13} 与 M_{23} , 减小线圈间的直接互感 M_{12} 。

本研究所设计的分段互感式检测探头, 采用特殊的绕线方式使得探头可以实现自由开合, 充分考虑了电梯钢带连续、无自由端及不易拆卸的特点以及检测工况, 极大增加了探头使用的便捷性、实用性和可操作性; 外穿式激励线圈的设计使得涡流场能够几乎覆盖钢带表面, 可以实现一次扫描检测出所有缺陷, 极大提高了检测效率; 互感式探头设计可以有效对抗干扰, 提高检测灵敏度于准确率, 并可以分别对激励端与接收端进行优化设计, 大大增加了探头的适用性。

2 互感式探头的设计及有限元仿真

本章通过 ANSYS Maxwell 软件进行有限元仿真。该软件是专为电磁场分析开发的专业仿真工具, 适用于低频电磁问题的建模与求解, 在传感器等电磁器件的设计与分析方面具有广泛应用。其基于有限元方法, 能够高效求解 Maxwell 方程组, 并支持静态、瞬态、频域等多种仿真类型。因此, 选择使用该软件进行所提探头进行仿

真分析。通过建立电梯钢带内部钢丝绳以及探头三维模型并进行仿真, 探究了不同接收线圈的结构参数以及损伤程度对检测结果的影响, 并基于仿真结果提出接收线圈的优化设计进而确定接收线圈的结构参数, 为制作分段互感式线圈提供数据基础。

2.1 仿真模型建立与参数设置

首先建立电梯钢带内部钢丝绳以及涡流探头的仿真模型, 如图 7 所示。

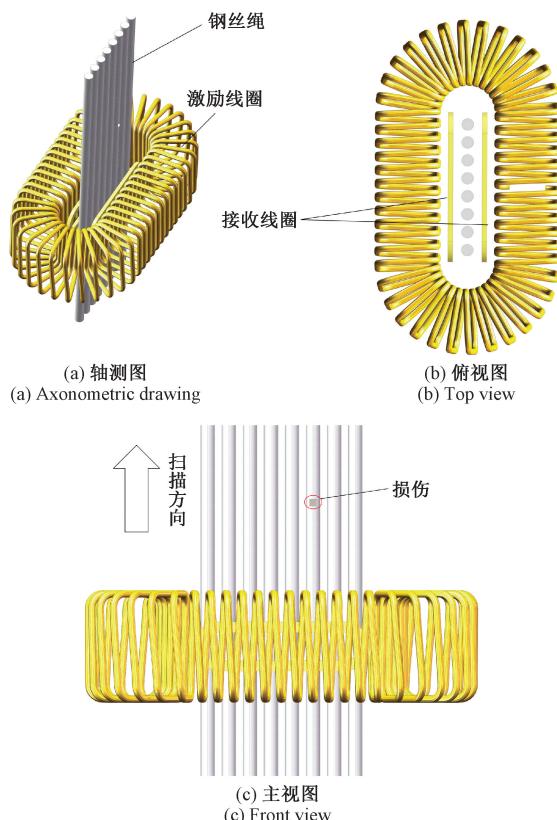


图 7 含损伤钢丝绳的互感式探头仿真模型

Fig. 7 Simulation model of the mutual inductance probe with damaged steel wire rope

该模型包括激励线圈、接收线圈、多根钢丝绳、缺陷以及空气域。激励线圈区别于传统饼式线圈的绕线方式, 其目的在于实现激励线圈的开合以及分段式设计。接收线圈为沿着钢丝绳轴线对称放置的两个完全一致的跑道型线圈。相较于圆形线圈, 其灵敏度虽然略低一些, 但一次性扫描的面积更大, 拥有更高的检测效率^[22], 因此采用跑道型线圈作为接收探头。跑道型接收线圈与激励线圈的结构参数如图 8 所示。

为简化模型提高计算效率, 仿真模型中的钢丝绳用数根圆柱进行代替, 同时在其中一根钢丝绳上制作 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的缺陷来模拟钢丝绳的断丝损伤。电梯钢带内部钢丝绳的原材料大多为导磁性能好的碳素

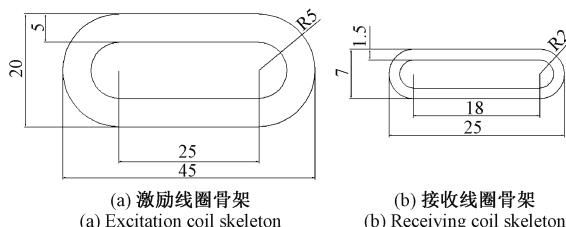


图 8 激励线圈骨架与接收线圈骨架尺寸

Fig. 8 Dimensions of the excitation and receiving coil formers

钢或合金钢,因此,仿真中采用高导磁率的 1008 钢作为钢丝绳材料,激励线圈与接收线圈材料为铜,以上 2 种材料均出于软件中的材料库,可直接用于仿真,无需添加材料的电磁参数。基于软件的趋肤深度计算器得出,在 10 kHz 激励频率下,趋肤深度可以达到 0.33 mm,恰好满足钢带内部钢丝表面及近表面损伤的检测需求,而在此频率下,若进一步提高频率则会降低趋肤深度,减少检测范围;进一步降低频率则可能会导致感应电压幅值降低进而影响检测精度,因此在灵敏度与穿透深度之间的权衡下,决定采用 10 kHz 作为激励频率。模型部分参数如表 1~3 所示。

表 1 激励线圈参数

Table 1 Parameters of the exciting coil

匝数	激励电流/A	激励频率/kHz	材料
250	1	10	铜

表 2 接收线圈参数

Table 2 Parameters of the receiving coil

厚度/mm	匝数	材料
1	300	铜

表 3 钢丝绳参数

Table 3 Parameters of the steel wire rope

直径/mm	长度/mm	材料
2	80	1008 钢

2.2 特征信号提取

在仿真中,激励线圈与接收线圈保持相对位置不变,钢丝绳移动代替探头的移动,在钢丝绳损伤缺陷的前后 6 mm 范围以 0.5 mm 为步长进行查扫。图 9 为仿真结果,以接收线圈 1 的感应电压幅值呈现。

从图 9 中可以看出整体呈现 U 型对称,幅值范围为 2~100 mV。随着探头接近缺陷,接收线圈的感应电压幅值逐渐减小;而随着缺陷的远离,其电压幅值随之增大,当接收线圈移动至损伤正上方时,电压幅值出现小幅增加,这是由于缺陷的边缘效应引起的。

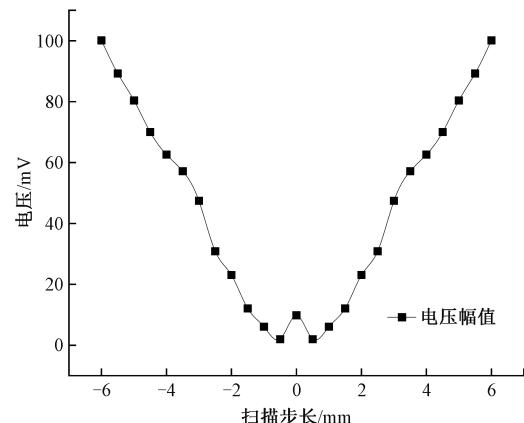


图 9 缺陷特征信号

Fig. 9 Feature signal of the defects

2.3 接收线圈匝数对检测结果影响

接收线圈的性能对于检测结果起着重要作用,而线圈匝数则是影响检测灵敏度的一个关键因素。因此将接收线圈匝数作为变量进行仿真分析。仿真过程中,线圈匝数以 100 匝为步长从 100 匝增大到 400 匝,仿真结果如图 10 所示。

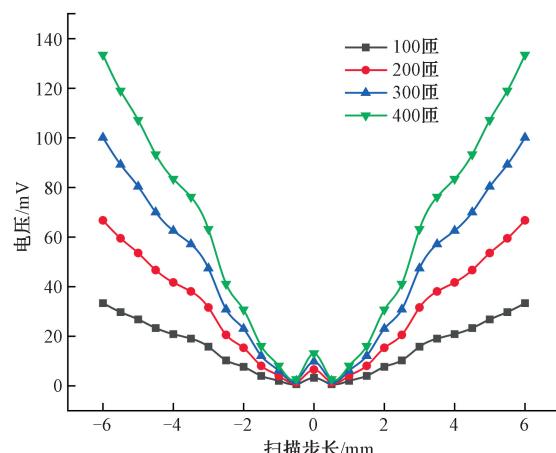


图 10 接收线圈匝数对电压的影响

Fig. 10 The influence of receiving coil turns to voltage

从图 10 中可以看出,随着接收线圈匝数的增加,接收线圈的感应电压幅值也随之增大,这就表明匝数越多,其检测灵敏度越高,检测性能越好。因此,在后续制作实物时,应尽可能在符合尺寸要求的情况下增加接收线圈的匝数以提高检测性能。

2.4 接收线圈偏离值对检测结果影响

接收线圈偏离值是指接收线圈的下表面到被测试件表面的距离。为研究偏离值对于检测结果的影响,将偏离值进行了参数化研究:从 0.1 mm 增大到 1.5 mm。在仿真过程中,接收线圈位于损伤正上方,除偏离值以外,其他参数维持不变。仿真结果如图 11 所示。

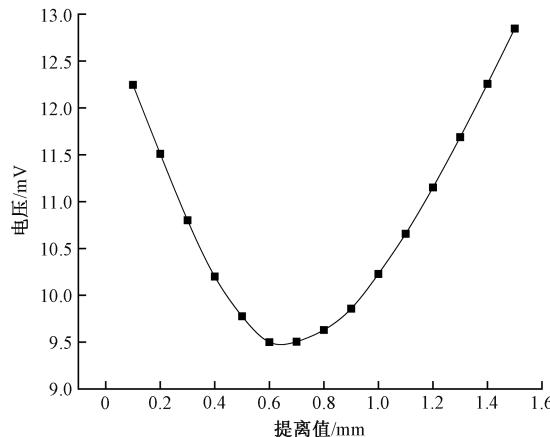


图 11 接收线圈提离值对电压的影响

Fig. 11 The influence of different lift-off values of receiving coil to voltage

随着提离值的增大,接收线圈感应电压幅值呈现先减小后增大的趋势。这是由于当接收线圈距离被测试件表面越近时,越容易受到涡流引发的次级磁场的影响,也就更容易受到缺陷的扰动,这种影响会随着提离值的增大而逐渐减小,在提离值为 0.6 mm 时电压幅值达到最小,而当提离值超过 0.6 mm 时,电压幅值又缓慢增加,这是因为接收线圈虽然远离了被测试件的表面,但却逐渐靠近了激励线圈,从而导致接收线圈与激励线圈的直接互感增大,进而导致电压幅值的增加,而此时感应电压的增大更多是因为电磁耦合干扰的影响,并且淹没了包含缺陷信息的特征信号,因此为更好的检测出损伤,应尽可能的减小提离值,并且增大接收线圈与激励线圈的距离以减小激励线圈对于检测结果的影响。

2.5 不同损伤程度对检测结果影响

为探究不同损伤程度对检测结果的影响,对其进行参数化研究,分别在钢丝绳上制作了 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 和 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 的缺陷,并且将缺陷深度以 0.1 mm 为步长增加到 1 mm,仿真结果如图 12 所示。

从图 12 中可以看到,随着缺陷深度的增加,接收线圈的感应电压幅值也随之增大;同时,在同一缺陷深度的情况下,缺陷面积的增加也会造成这一现象,这表明缺陷程度越大越容易被检测。此外可以观察到在缺陷深度处于 0.8 mm 以前,随着深度的增加,感应电压幅值会迅速增大,而在 0.8 mm 以后电压幅值增幅逐渐平缓,这是因为涡流检测中存在趋肤效应所导致,随着深度的增加,其涡流密度将呈现负指数降低,所以当缺陷深度达到一定程度后,缺陷特征信号变化就会趋于平缓。

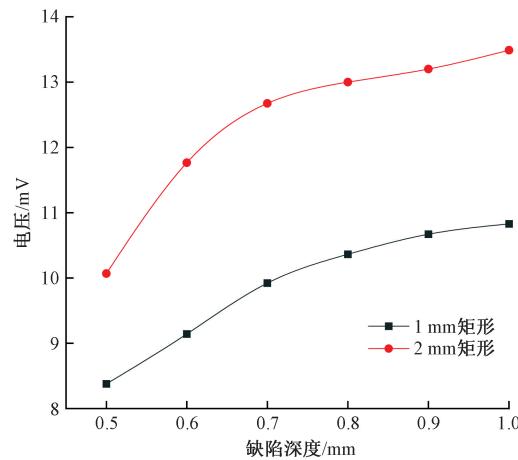


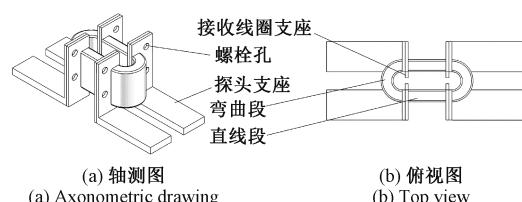
图 12 不同程度损伤对电压的影响

Fig. 12 The influence of different damage levels to voltage

3 试 验

3.1 探头制作与检测系统搭建

根据电梯钢带内部钢丝绳的检测需求,设计了一种结合钢带无自由端及扁平结构特点的分段互感式探头,并搭建了试验平台。探头结构如图 13 所示。



(a) Axonometric drawing (b) Top view

图 13 所设计的分段互感式探头结构

Fig. 13 The structure of the designed segmented mutual inductance probe

该探头包括激励部分与接收部分。激励部分由一对直线段和一对弯曲段组成,直线段设置了一组支架用以放置接收线圈。探头每一段通过螺栓连接,可以自由实现探头开合,从而套合住钢带进行损伤检测。接收部分为一对跑道型线圈骨架,通过直线段的接收线圈支座实现固定。探头骨架为树脂材料加工制作,满足所需的强度要求。激励线圈与接收线圈都使用 0.1 mm 的漆包铜线绕制而成。其中激励线圈为 500 匝,接收线圈则分别绕制了 250、300 和 350 匝,用以后续试验。分段互感式探头实物如图 14 所示。

为实现电梯钢带的断丝检测,对电梯钢带涡流检测系统进行设计与搭建,检测系统原理示意图如图 15 所示。

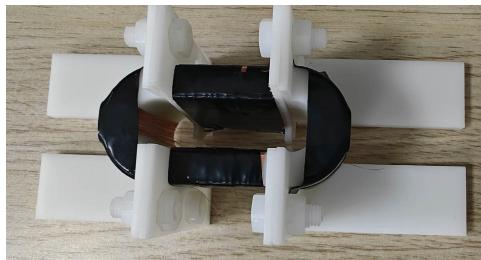


图 14 分段互感式探头

Fig. 14 Segmented mutual inductance probe

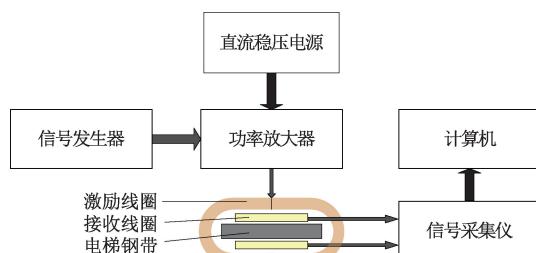


图 15 检测系统设计原理

Fig. 15 Schematic of the principle of the detection system

检测系统主要包括分段互感式探头、信号发生器、示波器、功率放大器、直流稳压电源、信号采集仪以及上位机等。首先由信号发生器产生一个频率和幅值一定的交流信号,然后经由功率放大器放大到所需倍数后输入到分段互感式探头中,从而在包裹的钢带表面感应出涡流,涡流产生的次级磁场和激励磁场共同影响接收线圈产生感应电压,而损伤的存在会导致空间磁场发生畸变,进而导致感应电压发生变化,感应电压通过接收线圈与信号采集仪连接采集并传输到上位机,最后通过信号处理软件分析显示结果。

3.2 钢带断丝检测试验

利用所提探头搭建了电梯钢带涡流检测系统,对电梯钢带断丝损伤进行检测试验。试验系统如图 16 所示。

为验证分段互感式探头以及试验系统的有效性,首先使用与钢带内部钢丝规格相同,直径均为 2 mm 的 7×7 钢丝绳进行试验。这些钢丝绳为该尺寸下常见的 304 不锈钢材料,属同一批次。将这些钢丝绳分别制备了 1~7 根的断丝损伤,如图 17 所示。

1) 不同匝数接收线圈对比试验

根据前文有限元仿真分析的结果,同时考虑到分段式探头的结构设计以及线圈骨架的制作等因素,将接收线圈的厚度以及偏离值均固定,分别为 2 mm 以及 1 mm,在接收线圈骨架尺寸的限制下,最大匝数为 350 匝。为探究不同匝数的接收线圈对检测性能的影响,分别制作了 250、300 和 350 匝接收线圈用以试验。本次试验使用



图 16 分段互感式探头涡流检测系统

Fig. 16 Eddy current testing system with segmented mutual inductance probe

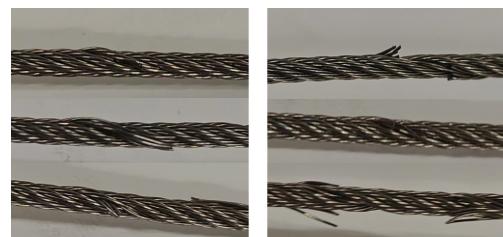
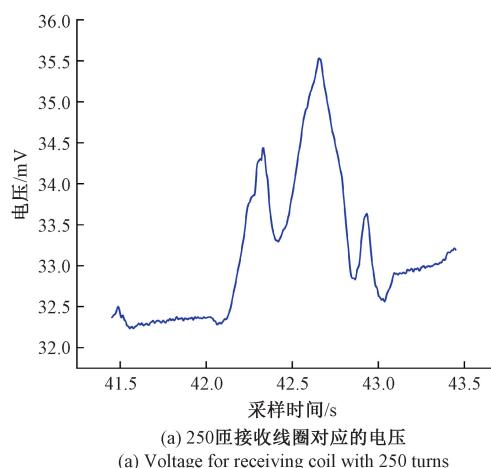
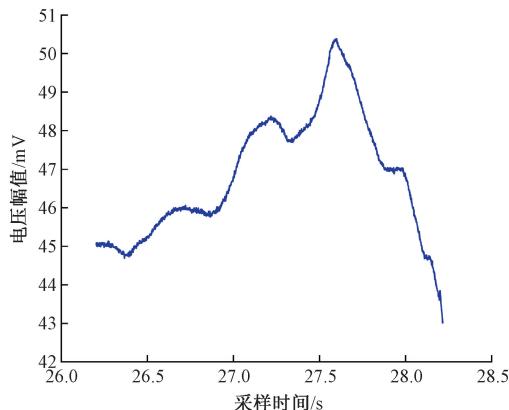


图 17 钢丝绳不同程度断丝损伤示意图

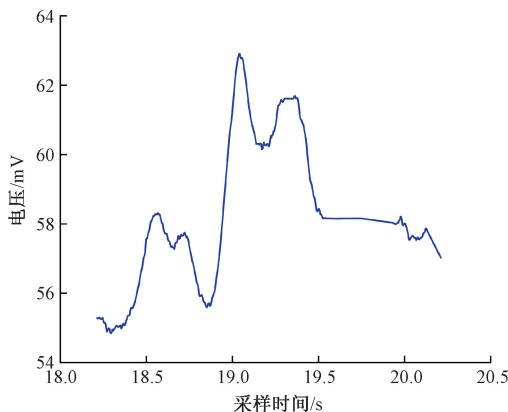
Fig. 17 Schematic diagram of steel wire rope breakage damage at varying severity levels

同一根 6 根断丝的钢丝绳作为试件。试验中,信号发生器产生一个幅值为 2 V、频率为 10 kHz 的正弦波信号,经功率放大器放大到 24 V 后通入激励线圈,除接收线圈匝数以外,其余参数不作改变。将分段互感式探头固定在试验台上,然后移动钢丝绳实现探头对钢丝绳的匀速扫查。通过信号采集和处理,在计算机软件中绘制出检测波形图。不同匝数的接收线圈的感应电压如图 18 所示。





(b) 300匝接收线圈对应的电压
(b) Voltage for receiving coil with 300 turns



(c) 350匝接收线圈对应的电压
(c) Voltage for receiving coil with 350 turns

图 18 不同匝数接收线圈检测结果

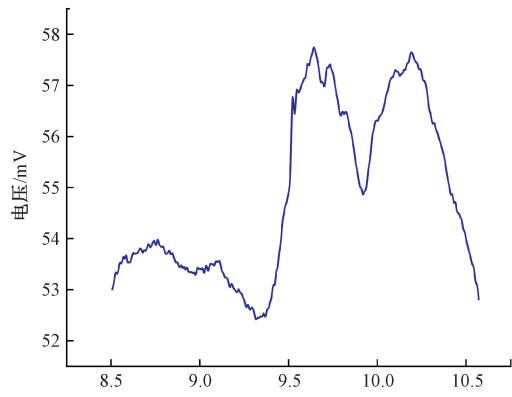
Fig. 18 Detection results of receiving coils with different turns

不同匝数接收线圈的检测结果如图 18 所示。从图 18 中可以看出,3 个接收线圈均在损伤处出现了明显的电压幅值变化,成功检出了 6 根断丝损伤,但其中 350 匝的接收线圈的感应电压幅值变化最为显著,信号峰值为 62.90 mV,且未损伤处的感应电压 53.00 mV 上下波动,电压变化率为 18.7%,远大于 250 匝接收线圈的 10.1% 和 300 匝接收线圈的 14.8%。这一试验结果与仿真结果吻合,表明接收线圈匝数越多,感应电压幅值越大,变化率也越大,检测性能越好,因此,采用了 350 匝接收线圈用于后续试验。

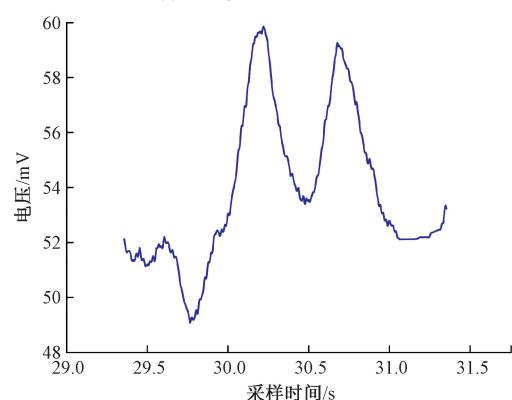
2) 不同断丝程度钢丝绳检测试验

使用所设计涡流检测系统对带有不同断丝数量的钢丝绳进行检测。试验中,接收线圈为 350 匝,其余激励参数与上文一致。检测结果如图 19 所示。

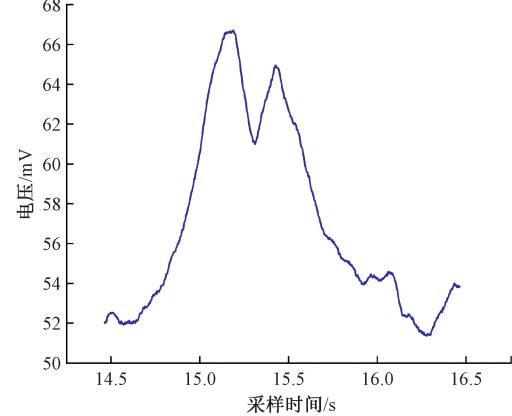
为提高试验结果的稳定性与可靠性,本次试验在相同工况下对每一组钢丝绳断丝状态共进行了 40 次重复检测,并对所得接收线圈感应电压进行平均处理,以消除偶发噪声与系统抖动对测量结果的干扰。试验结果如



(a) 4根断丝时的电压
(a) Voltage for four broken wires



(b) 5根断丝时的电压
(b) Voltage for five broken wires



(c) 7根断丝时的电压
(c) Voltage for seven broken wires

图 19 不同断丝程度钢丝绳检测结果

Fig. 19 Detection results of steel wire ropes with different number of broken wires

图 19 所示,分段互感式探头成功并能稳定检测到 4 根及以上的钢丝绳断丝损伤。而对于断丝数量为 1~3 根的损伤,虽然也记录到了微弱的感应电压波动,但其变化幅度较小,尚不足以实现可靠区分。具体来看,钢丝绳未损伤区域对应的感应电压幅值稳定在 53 mV 附近,而当

4根以上的断丝缺陷扫略过接收线圈位置时,感应电压出现明显波动,并随断丝数量增加而逐步上升,表明断丝程度越大,对涡流分布的扰动越强,感应信号中的峰值幅度也越显著。此外,本次试验结果所得平均波形在不同断丝状态下呈现出清晰的趋势变化,表明所提方法具有良好的稳定性与可重复性。

在此基础上,为进一步实现对钢带内部断丝缺陷的定量评价,有必要明确缺陷程度与检测信号之间的相关性。因此,依据检测结果探究了断丝数量与接收线圈感应电压峰值间的关系,表4给出了不同断丝数量与相应检出结果。

表4 不同断丝缺陷检测数据

Table 4 Detection data of different wire breakage defects

断丝数量/ 根	峰值均值/ mV	标准差	未损伤区域 均值/mV	标准差
4	63.71	0.43	53.39	0.18
5	65.60	0.43	52.33	0.38
6	68.47	0.96	52.77	0.43
7	71.41	0.83	53.15	0.27

表4中峰值均值为基于40次试验各自峰值计算,由于各试验中峰值出现位置存在微小差异,逐点平均会导致峰值幅值略有降低。因此,图18和19中平均曲线峰值与表4中基于单次试验峰值计算的均值存在差异。后者更能反映检测灵敏度,前者则更直观体现波形特征。根据表4中前3行数据,通过最小二乘法拟合可得信号幅值y与断丝数具有的关系为:

$$y = 2.385x + 54.740 \quad (5)$$

式中:x为断丝数量;y为感应电压峰值,单位为mV。利用式(5)可以基于检测信号推测出断丝数量。将表4中第4行数据代入式(5)中:当信号峰值y=61.41 mV时,对应的断丝数约为7根,检测结果与推测结果相符。

值得注意的是,此次试验中采用的304不锈钢为弱磁性或非铁磁性材料,相较于1008钢有较深的趋肤深度和较小的信号幅值,且信号变化幅度与仿真所预测的结果有所减弱,但趋势仍保持一致。此次试验主要用于验证所提探头与检测系统的可行性。后续试验采用电梯钢带进行,进一步提高对应性并验证所提探头的有效性。

3)运行钢带断丝检测试验

如前文所述,所提分段互感式探头可以实现1根钢丝绳至少4根断丝的检测,充分证明了该探头的可行性和有效性,为进一步验证该探头对于钢带内部钢丝绳断丝的检测效果,将同一根钢带在不同位置上制作不同程度的断丝损伤用以试验。钢带型号为:PBX34-25×3.3-

8×2.0,规格为宽25.00 mm,厚3.3 mm,内部8芯。损伤钢带如图20所示,其断丝数量从左到右分别为7根(1股)、14根(2股)、4根。



图20 具有不同程度断丝损伤的钢带

Fig. 20 Elevator belt with different levels of broken wire

为实现该探头对于运动状态下钢带的损伤检测,将探头置于钢带电梯轿厢上方,如图21所示。

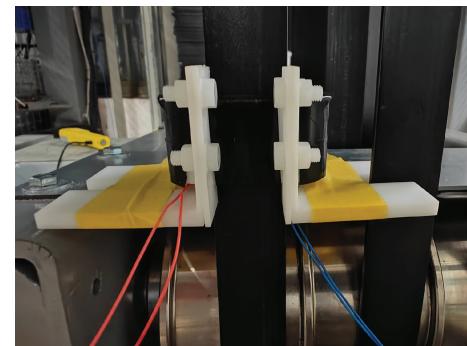


图21 试验现场

Fig. 21 Photo of the test site

试验电梯的运行速度由控制柜设定。考虑到试验电梯的行程较短、启停响应时间有限等客观条件,本研究将电梯运行速度设定为0.5 m/s。试验中,接收线圈为350匝,其余激励参数与上文一致。检测结果如图22所示。

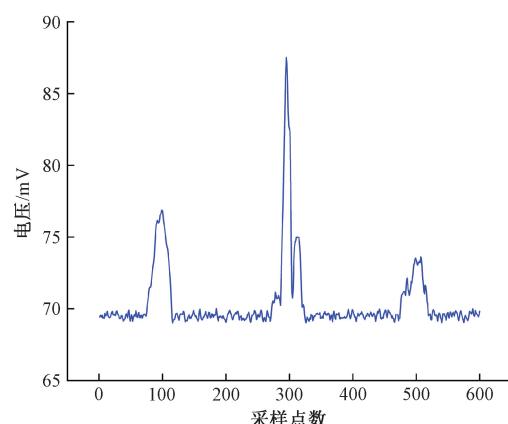


图22 0.5 m/s速度下钢带断丝损伤检测结果

Fig. 22 Detection results of elevator belt with broken wire at 0.5 m/s

此次试验中,所提探头成功检测出电梯钢带在0.5 m/s匀速运动状态下的3处断丝损伤,并且能够稳定

检出至少 4 根的断丝损伤。从图 22 中可以看出, 钢带未损伤区域的感应电压幅值稳定在约 70 mV 附近, 而当断丝缺陷被探头扫过时, 感应电压则会发生明显的变化。基于这一特性, 可通过电压信号的幅值波动初步判断钢带内部断丝的发生位置。

图 20 中所示的 3 处感应电压变化由左至右分别对应 7、14 和 4 根断丝损伤, 该检测结果与前文布置相符, 进一步验证了所提方法的有效性。同时也表明, 断丝数量越多, 对涡流场的扰动越显著, 检测信号响应越强, 从而更容易实现缺陷的识别与检出。

4 结 论

本研究设计了可开合的分段互感式探头用于电梯钢带断丝损伤检测, 克服了现有技术局限。主要结论为:

1) 分段互感式涡流探头采用可开合结构与特殊绕线方式, 适配钢带无自由端的在线检测场景, 跑道型接收线圈提升了检测效率。

2) 经有限元仿真优化探头结构, 试验表明优化后的探头能有效检测出单根钢丝绳至少 4 根断丝损伤, 感应电压幅值与断丝量呈正相关。

3) 搭建的检测系统在 0.5 m/s 速度下可稳定检测至少 4 根断丝, 具备实时在线检测能力, 且具有非接触、高灵敏度、便于集成优势, 但对 1~3 根断丝微小损伤检测能力有待优化探头结构进一步提升。

4) 与现有技术相比, 所提方法与部分现有方法在检测精度上相当, 并主要适用于近表面断丝缺陷, 但在电梯钢带无自由端、运行速度变化较大的在线检测环境中, 仍能保持稳定响应, 所提方法为电梯钢带的实时在线监测提供了可靠参考。

参考文献

- [1] 彭玉兴, 张修恒, 常向东, 等. 电梯钢带-曳引轮黏弹性动态滑移摩擦学特性研究 [J/OL]. 机械工程学报, 1-13[2025-07-04].
PENG Y X, ZHANG X H, CHANG X D, et al. Study on the viscoelastic dynamic sliding friction characteristics of elevator steel belt traction wheel [J/OL]. Journal of Mechanical Engineering, 1-13[2025-07-04].
- [2] PENG Y X, GU J, CHANG X D, et al. A quantitative recognition method based on VMD, CNN, and SVM for detecting wire rope breakage damage inside elevator steel belts [J]. Structural Health Monitoring, 2025, 213: 112724.
- [3] 朱雪丽. 电梯钢带疲劳及损伤的电磁无损检测技术研究 [D]. 深圳: 哈尔滨工业大学, 2019.
ZHU X L. Research on electromagnetic nondestructive

testing technology for fatigue and damage of elevator steel strip [D]. Shenzhen: Harbin Institute of Technology, 2019.

- [4] LEI H M, TIAN G Y. Broken wire detection in coated steel belts using the magnetic flux leakage method [J]. Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2013, 55(3): 126-131.
- [5] LIU S Q, XIA G S, WEN ZH H, et al. Fatigue monitoring of coated steel belts by means of magnetic inspection [J]. Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2023, 65(3): 153-160.
- [6] LIU ZH T, LIU Y L, SHEN CH, et al. Influence of tensile stress on the magnetic flux leakage signal of the coated steel belt [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2024, 39(6): 1728-1748.
- [7] LEI H M, TIAN G Y, ZHAO H, et al. Health monitoring for coated steel belts in an elevator system [J]. Journal of Sensors, 2012, 2012(1): 276-283.
- [8] 宿文耀. 基于无损检测的钢丝绳损伤定量识别研究 [D]. 济南: 山东大学, 2023.
SU W Y. Research on quantitative identification of wire rope damaged based on non-destructive testing [D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [9] 孟繁悦, 韩赞东, 石承昊. 多通道在线涡流检测系统研制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5): 51-57.
MENG F Y, HAN Z D, SHI CH H. Research on multichannel online eddy current testing system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(5): 51-57.
- [10] 殷晓康, 杨丽强, 王伟, 等. 外穿式集中绕组激励旋转电磁场涡流无损检测系统 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 239-250.
YIN X K, YANG L Q, WANG W, et al. Encircling rotating field eddy current non-destructive evaluation system with concentrated excitation windings [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 239-250.
- [11] 于霞, 张卫民, 邱忠超, 等. 飞机发动机叶片缺陷的差激励涡流传感器检测 [J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(9): 1582-1588.
YU X, ZHANG W M, QIU ZH C, et al. Differential excitation eddy current sensor testing for aircraft engine blades defect [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(9): 1582-1588.
- [12] 许鹏, 耿明, 方舟, 等. 基于复合电磁的高速轨道缺

- 陷检测方法研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(18): 57-65.
- XU P, GENG M, FANG ZH, et al. Study on high-speed rail defect detection method based on combination of EC and MFL testing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(18): 57-65.
- [13] 曹青松, 刘丹, 周继惠, 等. 一种钢丝绳断丝无损定量检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 787-794.
- CAO Q S, LIU D, ZHOU J H, et al. Non-destructive and quantitative detection method for broken wire rope[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(4): 787-794.
- [14] 于小杰, 李旭东, 解社娟, 等. 钢丝绳断丝缺陷涡流检测方法[J]. 中国机械工程, 2019, 30(22): 2757-2763.
- YU X J, LI X D, XIE SH J, et al. ECT method for wire breakage defects in wire ropes [J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(22): 2757-2763.
- [15] KOU Y F, GUO J J, LI J J, et al. A new detection method of the surface broken wires of the steel wire rope using an eddy current differential probe [J]. IEEE Access, 2022, 10: 63619-63625.
- [16] 赵宇辉, 赵吉宾, 李明玥, 等. 激光熔化沉积 TC4 钛合金电涡流检测仿真及亚表面缺陷检测[J]. 机械工程学报, 2024, 60(14): 34-41.
- ZHAO Y H, ZHAO J B, LI M Y, et al. Eddy current testing simulation and subsurface defect detection of TC4 titanium alloy for laser melting deposition[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(14): 34-41.
- [17] 张文渊, 金英, 金卫良, 等. 毯式涡流检测在结构应变测试中的研究[J]. 传感技术学报, 2024, 37(12): 2187-2193.
- ZHANG W Y, JIN Y, JIN W L, et al. Research on blanket eddy current testing in the structural deformation test [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2024, 37(12): 2187-2193.
- [18] 黄凤英. 钢轨表面裂纹涡流检测定量评估方法[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(2): 28-33.
- HUANG F Y. Quantitative evaluation method for eddy current testing of rail surface crack [J]. China Railway Science, 2017, 38(2): 28-33.
- [19] QIAN M, WANG ZH F, ZHAO J J, et al. Identification and classification of bearing steel bars based on low-frequency eddy current detection method[J]. Measurement, 2023, 213: 112724.
- [20] 靳建辉, 张卿, 韩博, 等. 复杂裂纹涡流检测与评估方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2): 280-288.
- JIN J H, ZHANG Q, HAN B, et al. Research on eddy current testing and defect evaluation methods for complex cracks [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 280-288.
- [21] 程军, 徐帅, 汪步云, 等. 一种自调零平切型电涡流探头及其在碳纤维复合材料微观成像中的应用[J]. 机械工程学报, 2021, 57(4): 27-35.
- CHENG J, XU SH, WANG B Y, et al. Application of self-nulling pancake-tangent eddy current probe for mesoscopic imaging of CFRP composites[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(4): 27-35.
- [22] 杨航, 汪圣涵, 唐健, 等. 凸轮轴的自动化涡流检测方法与系统[J]. 无损检测, 2020, 42(11): 61-66.
- YANG H, WANG SH H, TANG J, et al. Automatic eddy current testing method and system for camshaft[J]. Nondestructive Testing, 2020, 42(11): 61-66.

作者简介



魏义敏,2008年于浙江大学获得学士学位,2014年于浙江大学获得博士学位,现为浙江理工大学副教授,主要研究方向为机械动力学、机电产品状态监测和故障诊断。

E-mail:yiminwei@126.com

Wei Yimin received his B. Sc. , and Ph. D. degrees from Zhejiang University in 2008, and 2014, respectively. He is currently an associate professor at Zhejiang Sci-Tech University. His main research interests include mechanical dynamics and PHM of Electromechanical Products.



潘骏(通信作者),1996年于南昌大学获得学士学位,2002年于浙江大学获得硕士学位,2011年于浙江理工大学获得博士学位,现为浙江理工大学教授,主要研究方向为可靠性分析、设计与实验。

E-mail:panjun@zstu.edu.cn

Pan Jun (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanchang University in 1996, his M. Sc. degree from Zhejiang University in 2002, and his Ph. D. degree from Zhejiang Sci-Tech University in 2011. He is currently a professor at Zhejiang Sci-Tech University. His main research interests include reliability analysis, design, and experimentation.