

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108114

预应力钢绞线磁谐振应力监测试验研究^{*}

周建庭^{1,2}, 刘惠玲^{1,2}, 张森华^{1,2}, 张 洪^{1,2}, 廖 棱³

(1. 省部共建山区桥梁及隧道工程国家重点实验室 重庆 400074; 2. 重庆交通大学土木工程学院 重庆 400074;
3. 重庆交通大学材料科学与工程学院 重庆 400074)

摘 要: 预应力钢绞线是混凝土结构的关键受力构件, 其有效预应力一旦损失严重, 将威胁结构安全。为了精准监测钢绞线应力状态, 基于磁谐振原理和磁弹效应, 提出预应力钢绞线磁谐振应力监测方法。设计了双线圈磁谐振传感器, 分析了测试频率选择方法, 搭建了钢绞线应力监测系统。为验证该方法的可行性, 对不同设计拉力的镀锌钢绞线和涂环氧树脂钢绞线试件进行了应力监测试验。试验结果表明: 不同批次的钢绞线对应的感应电压随拉力的变化趋势相似; 感应电压和钢绞线应力非线性相关, 三次拟合优度 R^2 均大于 0.96, 灵敏度可达 0.064 79%/kN; 依据拟合结果和测得感应电压计算钢绞线应力, 得到在高荷载情况下钢绞线应力测试误差集中小于 4%, 为预应力钢绞线监测提供了新方法。

关键词: 钢绞线; 应力; 监测试验; 磁谐振; 磁弹效应

中图分类号: TH82 TM15 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Experimental research on monitoring magnetic stress resonance of the prestressed steel stranded wire

Zhou Jianting^{1,2}, Liu Huiling^{1,2}, Zhang Senhua^{1,2}, Zhang Hong^{1,2}, Liao Leng³

(1. State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing 400074, China;
2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Prestressed steel strands are key components of concrete structures. Once the prestress loses severely, the structure safety will be threatened. To precisely monitor the stress of the steel strand, a prestress monitoring method is proposed, which is based on the magnetic resonance and the magnetoelastic effect. A dual-coil magnetic resonating sensor is designed, the selection of the test frequency is analyzed, and a stress monitoring system is established. To evaluate the feasibility of this method, stress monitoring experiments are carried out. To be special, the galvanized steel strands and the epoxy-coated steel strands are tested under different design tensions. Experimental results show that the induced voltages change similarly with the tension under different batches of steel strands. The induced voltage nonlinearly is related to the stress. By using the three fit, the goodness of the fitting (R^2) is greater than 0.96. In addition, the test sensitive reaches 0.064 79%/kN. According to the fitting results and the measured induced voltage, the stress of the steel strand is calculated. When the tension is high, the test error is almost less than 4%. This demonstrated that a new stress monitoring method is proposed for prestressed steel strands.

Keywords: steel strand; prestress; monitoring test; magnetic resonance; magnetoelastic effect

0 引 言

钢绞线作为预应力混凝土结构中的关键受力构件,

使用年限不断增长, 其健康状况的好坏直接影响结构的耐用性和安全性^[1]。预应力钢绞线在张拉及桥梁运营过程中, 由于材料性能、施工状况和环境条件等因素的影响, 混凝土桥梁会产生不可预见的预应力损失, 从而造成

收稿日期: 2021-06-17 Received Date: 2021-06-17

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金 (U20A20314)、重庆市杰出青年科学基金 (cstc2020jcyj-jqX0006)、重庆市自然科学基金创新群体科学基金 (cstc2019jcyj-cxttX0004)、重庆交通大学研究生科研创新项目 (2021S0006) 资助

预应力水平的降低和预应力分布的不均匀。一旦钢绞线预应力失效,将给桥梁结构带来巨大的安全隐患,影响结构的工作性能。因此,为了保证结构的安全,实现对预应力钢绞线现存应力的准确监测显得十分重要^[2]。

目前,应力无损检测方法主要包括超声导波法、涡流法、LC电磁谐振法、磁弹效应法等。钱骥等^[3]提出了一种基于导波奇异值向量的模式识别方法,以实测导波的奇异值分解结果,建立具有学习能力的支持向量回归模型,实现在役桥梁钢绞线应力检测;Dubuc等^[4]提出了一种基于超声导波的数据融合方法,用于腐蚀下钢绞线应力重分布的无损监测,但该方法未考虑塑性应变,测试结果不精确。何燕等^[5]提出了声发射传感器,对七丝喷涂钢绞线进行拉伸断裂试验,该方法动态响应好,但易受噪声影响。Zhang等^[6]提出了时间逆转(TR)方法,利用基于应力波的主动传感技术来监测楔形锚固系统的松弛状态,但该方法应力波的信噪比较低,松弛状态测试不精确。Cao等^[7]采用低频传输涡流测试方法,设计了一种由径向对称探头组成的可调环形测试装置,克服了涡流技术的通常局限性,为钢丝绳进行无损检测提供了一个新思路。王威等^[8]利用涡流对无粘结预应力钢绞线护套厚度的测量试验,来判断钢绞线护套厚度涡流检测方法的可行性,但该方法精度不高。Zhang等^[9]基于LC电磁谐振法建立了两种钢绞线的电感模型来拟合钢绞线的长度,分析了不同长度钢绞线的应力-频率关系,但该方法误差较大。Li等^[10]提出了基于电磁弹性效应的电磁振荡(EMO)两端钢绞线应力测量方法,对七丝钢绞线进行了应力测量试验,但该方法易受电磁干扰,精度不高。

刘小亮等^[11]基于磁弹索力传感器的结构原理,通过改变感应线圈长度模拟内部磁场分布的均匀性变化情况,对磁弹索力传感器的设计进行了进一步的优化。胡孝阳等^[12]基于磁弹效应和磁电原理,研发了电磁弹传感器以实现 $\phi 80$ mm高钒索的索力监测。田章华等^[13]提出了一种基于磁弹效应的应力监测方法,设计开发磁弹应力传感器和相应的磁弹应力监测系统,并进行多次张拉试验,对该测量系统的测量精度和稳定性进行验证。张琦^[14]提出了放置式磁弹索力测量传感器,并对15 mm直径钢缆索开展了不同励磁方式下的放置式磁弹传感器钢缆索索力测量试验研究。目前,虽然国内外学者对磁弹法监测铁磁性构件应力研究较多,但检测精度较低、抗干扰能力有待提升。可见,对于预应力钢绞线应力的监测仍需进一步研究。

在两只同轴电磁耦合线圈之间插入一只无源谐振线圈,可利用谐振耦合显著提高能量传输效率。为探索这种谐振增强效应在传感器领域的应用可能性,刘存跃等^[15]提出了无源LC谐振器,放置于电涡流位移传感器探测线圈与金属目标靶间的测量通道中,以及对发射-接

收式双线圈位移检测系统进行了实验,证明了当传感器工作在该谐振器的谐振频率点附近时,有效探测距离和灵敏度会得到显著增强。

本文在既有研究的基础上,将磁弹效应与磁谐振效应相结合,提出了基于磁谐振的预应力钢绞线应力监测方法,并构建了磁谐振传感器理论模型。分析了磁谐振传感器的工作原理,剖析了传感器感应电压与钢绞线应力间的关系。为验证提出方法的可行性,针对设计拉力不同的镀锌钢绞线和涂环氧树脂钢绞线试件,开展了应力监测试验。

1 基本原理

为减小传感器尺寸并提高预应力钢绞线应力监测的灵敏度,在既有研究的基础上,以磁弹效应理论为基础,采用双线圈磁谐振传感器进行应力监测,如图1所示。磁谐振传感器由线圈骨架和两个线圈组成。线圈骨架采用非金属材料制成,两个线圈分别同方向缠绕在线圈骨架上且导线均伸出结构外,形成初级线圈和次级线圈。

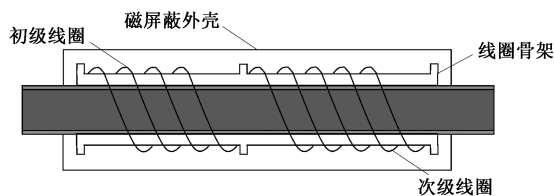


图1 磁谐振传感器

Fig. 1 Magnetic resonance sensor

1.1 应力与感应电压间的关联性

磁弹效应^[16]指出铁磁性材料的磁化强度会受内力和温度影响而改变。预应力钢绞线属于铁磁性材料,由铁磁性材料的磁滞特性可知,预应力钢绞线的磁导率与自身的应力、温度、环境磁场强度有关,当预应力钢绞线拉力改变时,预应力钢绞线的磁导率也会随之改变,继而导致通过材料的磁通发生变化。而传感器上的感应线圈,可以捕捉材料感应出的感生电动势的变化量,通过将非电量的应力转换成可以测量的电学量,达到应力监测的目的。

根据电磁感应原理^[17-18],当电感线圈中有激励电流通过时候,电感线圈的周围就会产生激励磁场;根据互感原理,当初级线圈周围产生激励磁场时,次级线圈会产生电流,从而产生感应电动势;以次级线圈谐振频率激励初级线圈,初级线圈和次级线圈产生磁谐振,此时次级线圈感应电动势达到最大值。当置于磁场中的钢绞线受力发生变化时,钢绞线磁化强度因力致磁化发生改变,使得次级线圈谐振频率改变,导致初级线圈和次级线圈不再产

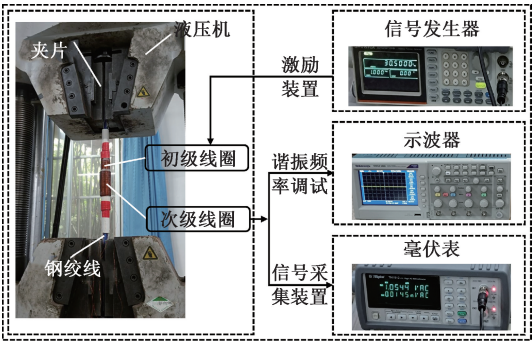


图 3 传感器的安装效果图

Fig. 3 Rendering of the sensor installation

2.2 传感器及试件准备

在内径 32 mm 的 PVC 管上,用直径为 0.35 mm 的漆包线绕制初级线圈和次级线圈,线圈参数如表 1 所示。

表 1 线圈参数表
Table 1 Coil parameter table

传感器编号	初级线圈		次级线圈	
	匝数	绕制层数	匝数	绕制层数
1100S2000	100	1	2 000	10

为了验证应力检测方法适用于不同的钢绞线,钢绞线原料采用 1x7-15.20 带 PE 护套镀锌钢绞线和涂环氧树脂钢绞线,两种钢绞线分别准备 6 根,合计 12 根,长度均为 80 cm,为了使万能试验机能够稳定的夹持试件,均剥去表面 PE 护套。为了保证试验结果的可靠性和可重复性,在不用荷载工况下,对两种钢绞线分别进行了两次独立试验。

2.3 加载程序

为了研究在测试频率下,钢绞线加卸载过程对感应电压的影响,用万能试验机对钢绞线试件进行加载和卸载。由于预应力钢绞线的许用应力不超过 0.75 倍极限抗拉强度,因此加卸载区间为 0~200 kN。程序如表 2 所示,试件编号中,F 为设计拉力,S 为钢绞线批次,S1 为镀锌钢绞线,S2 为涂环氧树脂钢绞线,W 为不同工况试件编号。

在加载阶段,加载步长为 10% 设计拉力。当加载至预定拉力水平后,持荷 10 s,在持荷的前 3 s 不进行数据采集,以保证钢绞线充分变形和减小毫伏表反应滞后带来的误差。在持荷的后 7 s 采集感应电压峰峰值数据 10 次,并对采集到的数据进行平均以减少测量误差。加载完成后,以相同的步长卸载至 0 kN,由此形成一个加卸载循环。同种工况下重复测量一次,并更换不同的批次的钢绞线进行两次重复测量。

表 2 加载程序表
Table 2 Loader table

试件组别	试件批次	试件编号	加载程序	设计拉力/kN
Group1	1	F200S1W-1/2	加载-卸载	200
Group2	2	F200S2W-1/2		200
Group3	1	F100S1W-1/2		100
Group4	2	F100S2W-1/2		100
Group5	1	F050S1W-1/2		50
Group6	2	F050S2W-1/2		50

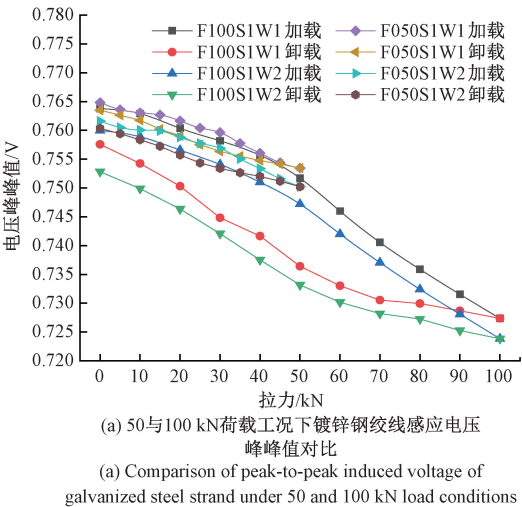
以次级线圈谐振频率激励初级线圈,初级线圈和次级线圈产生磁谐振,此时次级线圈感应电动势达到最大值,随着激励频率偏离谐振频率,激励电压降低。以谐振频率为分段点,曲线右枝的斜率略大于左枝。为了提高感应电压对激励频率的灵敏度,激励频率宜大于谐振频率。

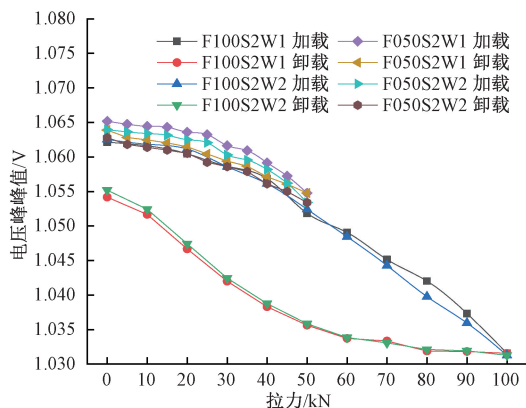
分别对镀锌钢绞线和涂环氧树脂钢绞线在不同工况下进行加卸载循环试验。试验时,镀锌钢绞线谐振频率为 31.5 kHz,测试时激励频率为 33.5 kHz,涂环氧树脂钢绞线谐振频率为 28.5 kHz,测试时激励频率为 30.5 kHz,激励电压均为 1 V。

3 试验结果与分析

3.1 不同工况下同一荷载的感应电压峰峰值对比分析

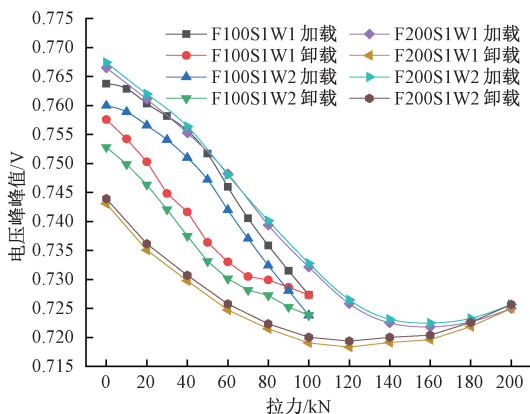
对设计拉力为 50、100、200 kN 的钢绞线试件进行了加卸载循环试验。由于设计拉力为 100 和 200 kN 的试件的受力过程包含了 50、100 kN 的荷载工况,则将 100 kN 荷载工况下的 0~50 kN 部分的感应电压峰峰值与 50 kN 荷载工况下测得感应电压峰峰值、200 kN 荷载工况下的 0~100 kN 部分的感应电压峰峰值与 100 kN 荷载工况下测得感应电压峰峰值分别进行对比。如图 4 所示。





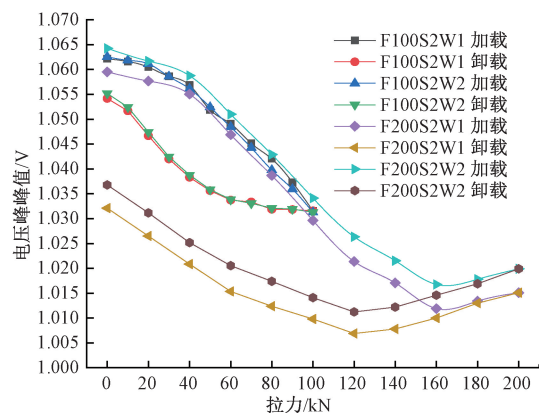
(b) 50与100 kN荷载工况下涂环氧树脂钢绞线感应电压峰峰值对比

(b) Comparison of peak-to-peak induced voltage of epoxy-coated steel strands under 50 and 100 kN load conditions



(c) 100与200 kN荷载工况下镀锌钢绞线感应电压峰峰值对比

(c) Comparison of peak-to-peak induced voltage of galvanized steel strand under load conditions of 100 and 200 kN



(d) 100与200 kN荷载工况下涂环氧树脂钢绞线感应电压峰峰值对比

(d) Comparison of peak-to-peak induced voltage of epoxy-coated steel strands under load conditions of 100 and 200 kN

图4 不同工况下同一荷载的感应电压峰峰值对比分析
Fig. 4 Comparative analysis of the induced voltage value of the same load under different working conditions

分析图4可知,加载状态下,镀锌钢绞线在不同工况下同一荷载的感应电压峰峰值最大差异值为0.0069 V,差异百分比最大为0.95%,涂环氧树脂钢绞线在不同工况下同一荷载的感应电压峰峰值最大差异值为0.0024 V,差异百分比最大为0.22%;卸载状态下,镀锌钢绞线在不同工况下同一荷载的感应电压峰峰值最大差异值为0.0138 V,差异百分比最大为1.83%,涂环氧树脂钢绞线在不同工况下同一荷载的感应电压峰峰值最大差异值为0.0182 V,差异百分比最大为1.92%。

不同工况下同一荷载的感应电压峰峰值差异百分比均不超过2%,这证明了基于磁谐振测量预应力钢绞线应力的方法测试结果的稳定性和可重复性,表明了感应电压峰峰值变化表征钢绞线应力状态方法的可行性。

3.2 感应电压峰峰值与荷载之间的关系

数据分析时,选择感应电压作为表征预应力钢绞线磁特性随应力变化的磁特征值。然后使用该磁特征值,分析其与实际应力之间的关系。由图4可知,感应电压随拉力的增大而减小,感应电压与拉力间存在对应关系。

在不同工况下测量时,预应力钢绞线受力荷载与感应电压之间的变化趋势基本相同。当激励频率大于谐振频率时,在加载阶段,随着钢绞线拉力的不断增大,传感器电感增大,谐振频率降低,感应电压在不断减小;在卸载阶段,随着钢绞线拉力的不断减小,感应电压在不断增大,这表明感应电压平均值同荷载之间的函数关系显著。

当钢绞线张拉荷载工况为200 kN时,在加载过程中,图4中曲线表明荷载阶段在160~200 kN时随着钢绞线拉力不断增大,感应电压随之增大;在卸载过程中曲线显示荷载阶段在120~200 kN时随着钢绞线拉力的减小,感应电压随之减小。这与上述分析的预应力钢绞线受力荷载与感应电压之间的变化趋势相反。这是由于在加载过程中,荷载阶段在0~160 kN时电感是随着拉力增大而增大,荷载阶段在160~200 kN时电感是随着拉力增大而减小;在卸载过程中,荷载阶段在0~120 kN时电感是随着拉力减小而减小,荷载阶段在120~200 kN时电感是随着拉力减小而增大^[19]。而电感和感应电压是倒数的关系,则会出现图4(b)中末端曲线与上述变化趋势相反的情况。

在同种荷载工况、同种钢绞线批次下测得的加载段和卸载段拉力与感应电压关系曲线并不重合,这是由于钢绞线属于铁磁性材料,经过加载拉伸后,材料本身存在磁滞现象^[20-21]。

对试验中获取的12组数据进行定量分析以明确各感应电压峰峰值随荷载变化关系,采用拟合优度 R^2 表征各感应电压峰峰值随荷载变化的密切相关性,采用各荷载区间内感应电压的相对变化率绝对值 η ,以表征各感应电压对荷载的灵敏度。二者拟合关系一般化为下式:

$$F = aV^3 + bV^2 + cV + d \quad (10)$$

则不同工况下的感应电压峰峰值与荷载变化关系的结果分别如表 3 所示。

表 3 不同工况下感应电压 V 同荷载 F 变化关系的拟合结果
Table 3 Fitting results of the relationship between induced voltage V and load F under different working conditions

受力状态		R^2	$\eta/(\%/ \text{kN})$
F050S1W1	加载	0.990 66	0.040 65
	卸载	0.999 13	0.027 24
F050S1W2	加载	0.988 75	0.044 09
	卸载	0.996 20	0.026 87
F050S2W1	加载	0.983 69	0.046 82
	卸载	0.990 49	0.024 62
F050S2W2	加载	0.978 72	0.053 02
	卸载	0.989 26	0.030 33
F100S1W1	加载	0.997 03	0.064 79
	卸载	0.991 39	0.039 90
F100S1W2	加载	0.997 91	0.062 57
	卸载	0.997 40	0.038 60
F100S2W1	加载	0.983 85	0.055 43
	卸载	0.972 73	0.021 44
F100S2W2	加载	0.989 02	0.045 13
	卸载	0.981 13	0.022 67
F200S1W1	加载	0.993 54	0.027 07
	卸载	0.970 92	0.021 55
F200S1W2	加载	0.993 60	0.054 37
	卸载	0.969 25	0.042 72
F200S2W1	加载	0.995 04	0.047 33
	卸载	0.993 51	0.025 12
F200S2W2	加载	0.997 61	0.045 90
	卸载	0.988 73	0.029 41

分析表 3 可知,同一批次的钢绞线在同种工况下测得的 2 组感应电压与荷载关系函数间存在较高的重复性,感应电压与荷载之间存在函数关系,且曲线拟合度较好,拟合优度均大于 0.96,表明荷载与感应电压具有良好的相关关系,且基于磁谐振测量预应力钢绞线应力的方法的拟合度优于电磁谐振法^[22-23],与磁弹效应法相近^[24],证明了该方法测试结果的准确性。

此外,12 组数据的感应电压灵敏度均大于 0.021 44%/kN,表明当钢绞线外加荷载发生变化时,磁谐振传感器系统可准确捕捉到感应电压的变化量,进而有效反应钢绞线的应力状态。对比钢绞线在 3 种荷载工

况下的感应电压灵敏度,发现在 100 kN 荷载工况下感应电压的变化量最大,灵敏度可达 0.064 79%/kN,相较于磁弹效应法,灵敏度提高了 0.037 79%/kN^[25-26],表明结合磁谐振与磁弹效应测量预应力钢绞线应力的方法可以适当地提高检测灵敏度。

3.3 应力检测误差分析

将所测得的感应电压峰峰值代入拟合的公式中,所得的结果与实际测得的荷载进行对比,由于对低荷载时的钢绞线应力研究意义不大,故只对大于 20 kN 的荷载进行分析^[13],结果如图 5 所示。

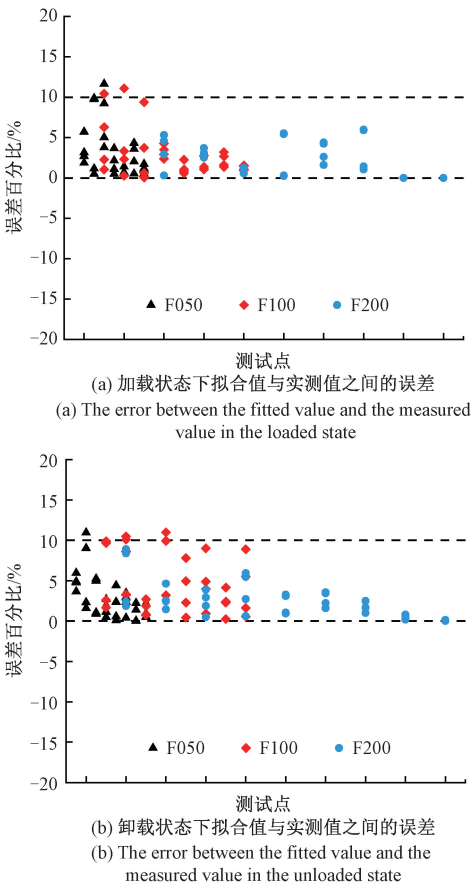


图 5 应力检测误差
Fig. 5 Stress detection error

由加卸载循环状态下的拟合值与实测值的误差分析中可以发现,在任意工况下,其误差值均不超过 12%,且在高荷载情况下均集中在 4% 以下。其中,加载状态下,对镀锌钢绞线和涂环氧树脂钢绞线在不同工况下将大于测得的感应电压峰峰值代入相应拟合公式中所得的拟合值与实测值间最大误差为 6.23 kN,相对误差百分比为 5.24%;卸载状态下,在不同工况下测得的感应电压峰峰值代入相应拟合公式中所得的拟合值与实测值间最大误差为 5.79 kN,相对误差百分比为 5.48%。试验误差较小,与磁弹效应法的测试结果接近^[19]。

4 结 论

本文从电磁感应和磁谐振效应的基本原理出发,理论分析了感应电压和钢绞线应力间的相关性,据此提出了基于磁谐振的预应力钢绞线应力监测方法。设计了基于磁谐振的双线圈传感器,搭建了钢绞线应力检测实验平台,对两个类别的钢绞线进行应力监测试验。试验结果表明:

1)不同工况下同一荷载的感应电压峰峰值差异百分比均不超过 2%,这证明了基于磁谐振测量预应力钢绞线应力的方法测试结果的稳定性和可重复性,表明了感应电压峰峰值变化表征钢绞线应力状态方法的可行性。

2)当激励频率大于谐振频率时,随着钢绞线拉力的不断增大,感应电压在不断减小。感应电压峰峰值随荷载变化显著呈函数关系,且函数拟合优度 R^2 均大于 0.96;在 100 kN 荷载工况下感应电压的变化量最大,灵敏度可达 0.064 79%/kN。这证明了基于磁谐振测量预应力钢绞线应力的方法测试结果准确且可以适当地提高检测灵敏度。

3)基于磁谐振测量预应力钢绞线应力的方法的测试结果具有稳定性和可重复性,在高荷载情况下误差值均集中在 4% 以下,试验误差较小。

参考文献

- [1] 田力,李永欣. 近爆冲击波和破片复合作用下预应力钢筋混凝土空心板梁的损伤效应分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2019,50(5):1154-1164.
- TIAN L, LI Y X. Analysis of damage effects of a prestressed reinforced concrete hollow beam subjected to the synergistic effects of blast and fragments[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019,50(5):1154-1164.
- [2] 刘欣,封皓,杨洋,等. 基于 J-A 力磁耦合模型的压力磁测系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021,35(4): 232-238.
- LIU X, FENG H, YANG Y, et al. Research on pressure magnetic measurement system based on J-A model of force-magnetic coupling [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35 (4): 232-238.
- [3] 钱骥,杨金川,李健斌,等. 基于导波奇异值向量的钢绞线应力检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019,

40(9):27-35.

QIAN J, YANG J CH, LI J B, et al. Research on the stress measurement method of steel strand based on singular value vector of guided wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(9):27-35.

- [4] DUBUC B, EBRAHIMKHANLOU A, SALAMONE S. Stress monitoring of prestressing strands in corrosive environments using modulated higher-order guided ultrasonic waves [J]. Structural Health Monitoring, 2020,19(1):202-214.
- [5] 何燕,周楚淮,罗杰. 桥梁钢绞线断丝声发射监测应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2019,15(2): 236-237.
- HE Y, ZHOU CH H, LUO J. Research on application of acoustic emission monitoring for broken wires of bridge steel strand [J]. Highway Traffic Technology (Applied Technology Edition), 2019,15(2):236-237.
- [6] ZHANG X Y, ZHANG L Y, LIU L J, et al. Prestress monitoring of a steel strand in an anchorage connection using piezoceramic transducers and time reversal method [J]. Sensors,2018,18(11):4018.
- [7] CAO Q S, LIU D, HE Y H, et al. Nondestructive and quantitative evaluation of wire rope based on radial basis function neural network using eddy current inspection [J]. Ndt & E International,2012,46:7-13.
- [8] 王威,牛晓波,苏三庆,等. 涡流检测用于无粘结预应力钢绞线护套厚度测量的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2016, 48(3):340-345.
- WANG W, NIU X B, SU S Q, et al. Experimental research on the eddy current testing method for sheath thickness measurement of unbonded prestressed steel strand [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2016, 48(3):340-345.
- [9] ZHANG B, TU C, LI X, et al. Length effect on the stress detection of prestressed steel strands based on electromagnetic oscillation method[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019,19(12):2782.
- [10] LI X X, ZHANG B N, Y C, et al. An electromagnetic oscillation method for stress measurement of steel

- strands [J]. Measurement, 2018;330-335.
- [11] 刘小亮,陈伟民,章鹏,等. 传感器内部磁场分布对磁弹索力传感器性能的影响[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(4): 857-862.
- LIU X L, CHEN W M, ZHANG P, et al. Influence of inner magnetic field distribution on performance of magneto-elastic sensor for cable tension [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33 (4): 857-862.
- [12] 胡孝阳,段元锋,魏巍,等. 高钒索索力监测电磁弹传感器的研发与应用[J]. 结构工程师, 2021, 37(2): 78-83.
- HU X Y, DUAN Y F, WEI W, et al. Development and application of elasto-magneto-electric (EME) sensor for force monitoring of galvanized steel cables [J]. Structural Engineer, 2021, 37(2): 78-83.
- [13] 田章华,张海东,罗云,等. 基于磁弹效应的螺纹钢筋全量应力监测[J]. 结构工程师, 2017, 33(4): 111-116.
- TIAN ZH H, ZHANG H D, LUO Y, et al. Elasto-magnetic effect based total stress monitoring of screw-thread steel [J]. Structural Engineer, 2017, 33(4): 111-116.
- [14] 张琦. 钢缆索放置式磁弹索力传感器设计与试验研究[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2020, 34(4): 66-72.
- ZHANG Q. The design of the placed magneto-elastic cable force sensor and the stress test of the steel cable[J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2020, 34(4): 66-72.
- [15] 刘存跃,董永贵. 无源谐振器在电涡流位移传感器中的谐振增强效应[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(11): 1607-1610.
- LIU C Y, DONG Y G. Resonant enhancement of a passive resonator in an eddy current displacement sensor[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2012, 52(11): 1607-1610.
- [16] 周建庭,张森华,张洪. 磁测法在桥梁隐蔽病害检测中的研究进展[J]. 土木工程学报, 2021, 54(11): 1-10.
- ZHOU J T, ZHANG S H, ZHANG H, et al. Research progress of magnetic-based methods in hidden bridge disease detection [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(11): 1-10.
- [17] 赵亚宇,何沁,张泽宇,等. 基于电磁感应特性的钢绞线应力检测试验研究[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(4): 146-151.
- ZHAO Y Y, HE Q, ZHANG Z Y, et al. Experimental study on stress detection of galvanized steel strand based on electromagnetic induction characteristics [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(4): 146-151.
- [18] 李业辉,宁致远,薛邴森,等. 基于电感式传感器的金属颗粒材质识别及粒径估计[J]. 仪器仪表学报, 2021, 41(8): 24-33.
- LI Y H, NING ZH Y, XUE B S, et al. Metal particle material identification and size estimation based on the inductive sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 41(8): 24-33.
- [19] 陈静雯,张洪,张森华,等. 基于逆磁致伸缩的无励磁钢绞线应力测量研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(10): 10-18.
- CHEN J W, ZHANG H, ZHANG S H, et al. Research on stress measurement of non-excited steel strand based on inverse magnetostriction [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(10): 10-18.
- [20] LIU G F, FAN R H, ZHANG Z D, et al. Magnetic properties and special morphology of barium ferrite via electrospinning [J]. Rare Metals, 2017, 36(2): 113-117.
- [21] LIU S, YU G H, YANG M Y, et al. Co/Pt multilayer-based pseudo spin valves with perpendicular magnetic anisotropy [J]. Rare Metals, 2014, 33(6): 646-651.
- [22] 涂冲. 基于电磁谐振的钢绞线应力检测长度效应研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2019.
- TU CH. Length effect on the stress detection of steel strands based on electromagnetic resonance method [D]. Chongqing: Master Thesis of Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [23] 涂冲,张奔牛,王锦森,等. 钢绞线电磁谐振效应机理

及应力检测研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020,17(4): 42-46.

TU CH, ZHANG B N, WANG J S, et al. Study on mechanism of electromagnetic resonance effect and stress detection of steel strands [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2020,17(4): 42-46.

- [24] 姜建山,陈伟民,黄尚廉,等. 基于逆磁致伸缩的索力传感器磁路分析与参数设计[J]. 仪器仪表学报, 2009,30(4): 738-743.

JIANG J SH, CHEN W M, HUANG SH L, et al. Magnetic circuit and parameters of cable tension sensor based on magneto-elastic effect [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009,30(4): 738-743.

- [25] 徐聪. 基于磁弹效应的桥梁钢缆索应力在线监测及可重构系统研制[D]. 南昌:南昌航空大学,2018.

XU C. Online monitoring of stress of bridge steel cable based on magnetoelastic effect and development of reconfigurable system [D]. Nanchang: Master Thesis of Nanchang Hangkong University, 2018.

- [26] 柳权. 基于磁弹效应的钢缆索应力测量方法研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2015.

LIU Q. Study on stress measurement method of steel cable based on magneto-elastic effect [D]. Nanchang: Master Thesis of Nanchang Hangkong University, 2015.

作者简介



周建庭, 1993 年和 1996 年分别于重庆交通大学获得学士和硕士学位, 2005 年于重庆大学获得博士学位。现为重庆交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为结构安全监测、评价与加固。

E-mail: jtzhou@ cqjtu. edu. cn

Zhou Jianting received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Chongqing Jiaotong University in 1993 and 1996, and received his Ph. D. degree from Chongqing University in 2005. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Chongqing Jiaotong University. His main research interests include structure safety monitoring, evaluation and reinforcement.



张洪 (通信作者), 2009 年、2012 年和 2017 年分别于重庆交通大学获得学士、硕士和博士学位。现为重庆交通大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为桥梁健康监测及无损检测。

E-mail: hongzhang@ cqjtu. edu. cn

Zhang Hong (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Chongqing Jiaotong University in 2009, 2012 and 2017. He is currently a professor and a M. Sc. advisor at Chongqing Jiaotong University. His main research interests include bridge health monitoring and lossless testing.