

文章编号:1672-9331(2020)04-0042-05

钢绞线电磁谐振效应机理及应力检测研究

涂 冲¹,张奔牛²,王锦森¹,郑德云¹,刘申林¹,鲁渊¹,张进¹

(1. 中电投工程研究检测评定中心有限公司,北京 100142; 2. 重庆交通大学 土木工程学院,重庆 400074)

摘 要:提出了一种基于电磁谐振的钢绞线应力无损检测方法,该法只需将作为电感的钢绞线两个不受力端接入振荡电路,通过频率计采集电路振荡频率即可测量钢绞线应力;建立了钢绞线应力与电路振荡频率的数学模型,并构建了 7 股钢绞线试验系统来验证该数学模型。理论分析和试验研究均表明:LC 电磁谐振电路振荡频率随着钢绞线应力的增大而减小。该方法可用于在役桥梁有效预应力的快速检测与评估。

关键词:桥梁工程;无损检测;钢绞线;电磁谐振;预应力

中图分类号: U446.3

文献标志码: A

Study on mechanism of electromagnetic resonance effect and stress detection of steel strands

TU Chong¹, ZHANG Ben-niu², WANG Jin-sen¹, ZHENG De-yun¹,
LIU Shen-lin¹, LU Yuan¹, ZHANG Jin¹

(1. C+E Center for Engineering Research Test and Appraisal Co., Ltd., Beijing 100142, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: A method for non-destructive detection of the steel strand stress based on electromagnetic resonance was proposed. This method only needs to connect the two unstressed ends of the steel strands as the inductors to the oscillation circuit, and the stress of the steel strands can be measured by collecting the oscillation frequency of the circuit through a frequency meter. The mathematical model of the stress and the frequency was established, and a 7-steel-strand test system was built to verify the mathematical model. Theoretical analysis and experimental study all show that the oscillation frequency of the LC electromagnetic resonance circuit decreases as the stress of the steel strands increases. This method can be used for the rapid detection and evaluation of the effective prestress of in-service bridges.

Key words: bridge engineering; non-destructive detection; steel strand; electromagnetic resonance; prestress

预应力损失会直接影响混凝土结构裂缝的发生和扩展,并进一步对结构的耐久性和安全产生影响。因此,对在役桥梁有效预应力的检测显得

尤为重要。

目前,利用超声波对预应力结构进行无损检测已成为国内外的研究热点,且在钢绞线应力检

收稿日期:2020-04-30

基金项目:重庆市社会民生科技创新项目(cstc2016shmszx30026);乌鲁木齐市科学技术计划项目(Y161320008);重庆高校创新团队建设计划项目(CXTDG201602013)

通讯作者:涂 冲(1992-),男,重庆江津人,中电投工程研究检测评定中心有限公司工程师,主要从事桥梁检测方面的研究。E-mail: tu_chong@foxmail.com

测方面已取得了重要突破。Qian 等^[1]通过数值模拟和 7 股钢绞线试验,验证了超声导波能量熵谱检测 7 股钢绞线应力的有效性;Niederleithinger 等^[2]用 20 个超声换能器建立的网络定性地检测了混凝土梁的应力状态;此外,Elfergani 等^[3]、Feng 等^[4]利用超声波技术研究了预应力梁的腐蚀性破坏。然而,由于超声波固有的高频特点(高于 20 kHz),导致超声波在预应力混凝土钢绞线中的能量衰减过快,制约了它的检测长度(至今只能达到数米)。

电磁法是利用钢绞线(铁磁性材料)固有磁特性与外加应力紧密相关的特点(磁弹效应)实现应力检测的。有学者在钢索、无黏结钢绞线应力检测及新建结构有黏结钢绞线在线监测方面取得了重要进展,且有望解决在役结构有黏结预应力钢绞线的检测问题。如尚仁杰等^[5]对缓黏结预应力混凝土钢绞线开展了大量试验,结果表明在钢绞线应力达到 1 100 MPa 时仍能得到较精确的结果;孙志远等^[6]、尹文霞等^[7]、Guan 等^[8]基于磁弹效应开发出不同应力检测装置进行应力检测,都取得了较好的成果;Li 等^[9]、张奔牛等^[10]通过对钢绞线力磁效应原理进行分析,提出了基于 LC 振荡电路检测钢绞线应力的新思路;涂冲等^[11]针对无黏结预应力钢绞线应力的研究表明,当频率达到 0.01 kHz 时,应力测量误差为 100 MPa;Yim 等^[12]利用铁磁材料的磁致伸缩逆效应开发了一套应力传感器,并将此电磁传感器用于监测桥梁斜拉索力。通过对比数值分析与监测结果,验证了电磁传感器用于索力监测的有效性,但此法在复杂环境下难以准确测量应力。

为寻求高效、准确的预应力无损检测方法,本研究以钢绞线应力与磁特性的关系为基础,结合 LC 电磁谐振法,对钢绞线应力和振荡频率展开了研究。区别于声信号和光信号,电磁振荡信号能够有效地在钢绞线中传播。该法适用于既有结构和新建结构预应力的检测。

1 理论与模型

1.1 LC 振荡原理

LC 谐振电路,也称 LC 振荡电路,由电感和电容组成,如图 1 所示。在本研究设计的电路中,用

钢绞线代替电感接入振荡电路,并外接一固定电容元件,形成 LC 振荡电路。

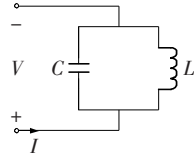


图 1 LC 振荡电路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LC oscillation circuit

由电学理论知,LC 振荡电路的振荡频率可表示为:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \quad (1)$$

式中: f 为电路振荡频率; L 为钢绞线电感; C 为电容。

1.2 钢绞线电感模型

钢绞线较短时,其结构特征近似于线段导线,因此主要表现出直导线的电感特性。当电流通过时,在导线内部及周围产生磁场,磁路是同心的封闭磁力线圆环,方向由右手定则确定。当电流改变时,磁通量随之改变,在电流中会产生电压。对于非磁质材料,导线电感为自感磁通链与电流之比,亦称静态电感。

$$L = \frac{\Psi}{I} \quad (2)$$

式中: Ψ 为自感磁通链; I 为电流; L 为导线电感。

导线内电感 L_{in} 可表示为:

$$L_{in} = \frac{\Psi_{in}}{I} = \frac{\mu l}{8\pi} \quad (3)$$

式中: L_{in} 为导线内电感; μ 为导体磁导率; l 为导线长度。

对于线段导线产生的外部电感,根据毕奥—萨伐尔定律求得钢绞线外任意一点 $P(x, y)$ 的磁感应强度,如图 2 所示。

电流元 $I dy$ 在 P 点产生的磁感应强度 dB 可表示为:

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{dy}{c^2} \sin\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{I x dy}{[x^2 + (y - b)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

式中: dB 为 P 点磁感应强度; μ_0 为空气磁导率。

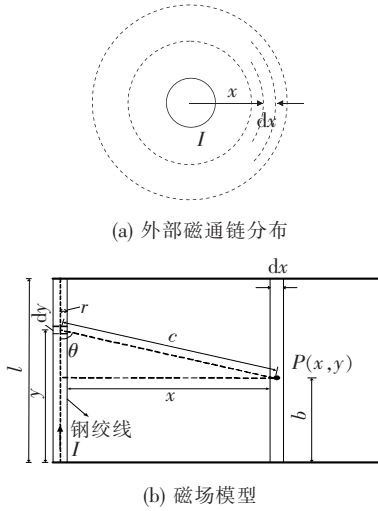


图2 线段导线外部磁通链计算示意图

Fig. 2 Calculation diagram of magnetic flux outside the line segment

因此,线段导线在 P 点产生的磁感应强度标量大小为:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^l \frac{x}{[x^2 + (y-b)^2]^{\frac{3}{2}}} dy = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left[\frac{l-b}{x \sqrt{x^2 + (l-b)^2}} + \frac{b}{x \sqrt{x^2 + b^2}} \right]. \quad (5)$$

式中: B 为 P 点磁感应强度。

设导线半径为 r , 则线段导线 l 的总磁通为:

$$\Phi_e = \int B dS = \int_0^l \int_0^b \frac{\mu_0 I}{4\pi x} \left[\frac{l-b}{x \sqrt{x^2 + (l-b)^2}} + \frac{b}{x \sqrt{x^2 + b^2}} \right] dx dy = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(l \cdot \ln \frac{l + \sqrt{l^2 + r^2}}{r} - \sqrt{l^2 + r^2} + r \right). \quad (6)$$

式中: Φ_e 为线段导线的总磁通。

所有磁通只与单根导线交链, 故外部磁通链与磁通相等。

$$\Phi_e = \Psi_{\text{out}}. \quad (7)$$

式中: Ψ_{out} 为外部磁通链。

整根导线外部电感可表示为:

$$L_{\text{out}} = \frac{\Psi_{\text{out}}}{I} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(l \cdot \ln \frac{l + \sqrt{l^2 + r^2}}{r} - \sqrt{l^2 + r^2} + r \right). \quad (8)$$

所以整根导线电感可表示为:

$$L = L_{\text{in}} + L_{\text{out}} =$$

$$\frac{\mu l}{8\pi} + \frac{\mu_0}{2\pi} \left(l \cdot \ln \frac{l + \sqrt{l^2 + r^2}}{r} - \sqrt{l^2 + r^2} + r \right). \quad (9)$$

由于导线长度远大于半径, 即 $l \gg r$, 上式可简化为:

$$L = \frac{\mu l}{8\pi} + \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} - 1 \right). \quad (10)$$

将钢绞线等效为线段导线, 而钢绞线磁导率远大于真空磁导率, 即 $\mu \gg \mu_0$, 上式可简化为:

$$L = \frac{\mu l}{8\pi}. \quad (11)$$

受力拉伸后钢绞线长度 l 可表示为:

$$l = l_0 + \Delta l. \quad (12)$$

式中: l_0 为钢绞线原长; Δl 为受力后钢绞线伸长量。由材料本构关系知:

$$\sigma = E \epsilon = E \frac{\Delta l}{l_0}. \quad (13)$$

式中: σ 为钢绞线应力; E 为钢绞线弹性模量。

伸长量 Δl 可表示为:

$$\Delta l = \frac{\sigma l_0}{E}. \quad (14)$$

又因为钢绞线磁导率可表示为:

$$\mu = \mu_0 \mu_r. \quad (15)$$

联立式(1)、(12)、(14)和(15)有:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r (l_0 + \frac{\sigma l_0}{E})}{8\pi} \cdot C}}. \quad (16)$$

式中: f 为电路振荡频率; μ_0 为真空磁导率; μ_r 为钢绞线相对磁导率; l_0 为钢绞线初始长度; σ 为钢绞线应力; E 为钢绞线弹性模量; C 为电路电容。

由于 μ_0, μ_r, l_0, E, C 均为常量, 结合式(16)可知, 电路振荡频率随着钢绞线应力的增大而减小。

2 试验

为验证钢绞线应力与 LC 电路振荡频率的变化关系, 本研究搭建了相应的试验系统, 如图 3 所示。钢绞线、频率计和 LC 振荡电路串联组成一个闭合回路, 直流电源为振荡电路和频率计提供电源。液压万能试验机对 7 股 15.2-1860 级预应力钢绞线施加拉力, 在加载过程中由计算机采集应

力数据。频率计每秒采集一次频率数据,通过蓝牙传输到 PC 端。

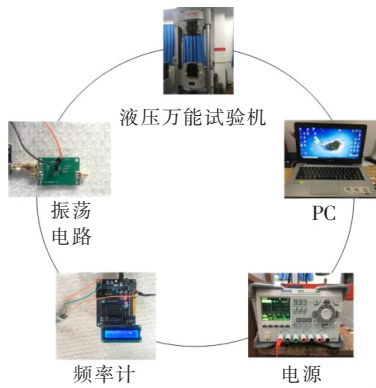


图 3 试验系统

Fig. 3 Experimental system

试验过程如下:控制万能试验机加载,使钢绞线处于紧绷状态,接通电路电源。然后,匀速加载至 15 MPa,最终加载至 60 MPa。每加载 5 MPa 记录一次电路振荡频率数据,一次试验共计记录 10 个振荡频率数据。数据采集完毕后,控制万能试验机将施加在钢绞线上的拉力卸载至零,如此循环完成 4 次加载试验。

3 试验数据与分析

为研究钢绞线应力与振荡频率之间的关系,利用中值滤波器对同一条件下测得的频率和应力数据进行处理,并分别计算出振荡频率的标准差和重复性误差。整理后的 4 组试验数据见表 1。

表 1 钢绞线试验数据

Table 1 The test data of steel strands

应力 σ /MPa	振荡频率 f /kHz				标准 差/kHz	重复性 误差/%
	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4		
14.389	74.303 1	74.302 9	74.303 0	74.302 8	0.015 66	0.021 1
19.784	74.301 8	74.301 7	74.301 8	74.301 5	0.016 04	0.021 6
25.324	74.301 7	74.301 5	74.301 2	74.301 3	0.016 36	0.022 0
31.223	74.300 1	74.299 9	74.299 5	74.300 7	0.016 33	0.022 0
37.266	74.299 5	74.299 3	74.299 2	74.299 9	0.016 10	0.021 7
42.158	74.298 7	74.298 8	74.298 2	74.298 8	0.016 26	0.021 9
46.691	74.298 4	74.298 9	74.298 4	74.298 6	0.016 21	0.021 8
50.935	74.297 2	74.297 3	74.297 6	74.297 9	0.016 00	0.021 5
54.173	74.296 1	74.296 7	74.296 8	74.296 9	0.015 28	0.020 6
57.554	74.295 8	74.295 3	74.295 9	74.295 7	0.015 28	0.020 6

由表 1 的试验数据绘制应力与频率关系的拟合曲线,如图 4 所示。拟合曲线方程可表示为:

$$\sigma = 74.315\,88f^{-2} + a。 \quad (17)$$

式中: σ 为钢绞线应力; f 为振荡频率; a 为常数。

钢绞线应力 σ 与振荡频率 f 的相关性系数 R^2 为 0.930 2,表明二者具有良好的相关关系。

分析表 1 中的试验数据和图 4 可知:

- ① 振荡频率的重复性误差均小于 0.022%。
- ② 振荡频率随钢绞线应力的增大而减小,与式(16)体现的变化关系相吻合。
- ③ 对钢绞线的 4 次加载,应力与振荡频率的变化趋势一致。
- ④ 拟合曲线在一定程度上反映了应力与振荡

频率的变化关系,证明 LC 谐振法用于钢绞线应力检测是可行的。

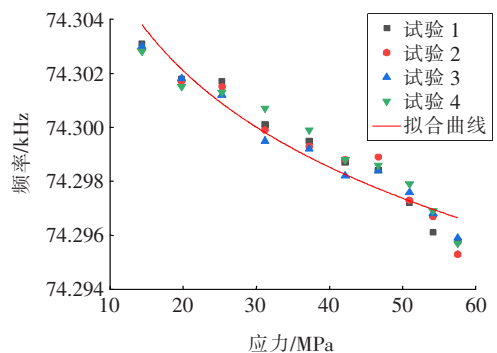


图 4 应力—频率关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between stress and frequency

4 结论

本研究以 7 股 15.2-1860 级低松弛预应力钢绞线为试样,基于 LC 振荡电路对预应力钢绞线的应力进行测量。通过理论分析与试验研究,建立了钢绞线应力与电路振荡频率之间的关系。主要结论如下:

1) 与传统方法相比,电磁谐振法测量钢绞线预应力的方法更加简便可行,而且能够在不损伤预应力结构的情况下较准确地反映钢绞线的应力。基于 LC 电磁谐振法预应力钢绞线应力检测的结果表明:钢绞线应力与振荡频率存在良好的相关关系,振荡频率随着应力的增大而减小。

2) 建立了基于电磁谐振效应的钢绞线应力—频率关系数学模型。根据 LC 电磁并联回路的吸能和释能产生谐振频率的电路特性,把钢绞线作为电路电感元件,将钢绞线磁弹效应的谐振电感效应机理整合成力—磁—电耦合效应关系,构建了钢绞线电磁振荡式应力测量技术原理。

3) 在理论分析中钢绞线应力与振荡频率的变化关系和试验研究结果一致,说明 LC 电磁谐振法用于预应力钢绞线应力检测是可行的。

〔参考文献〕

- [1] Qian J, Chen X, Sun L M, et al. Numerical and experimental identification of seven-wire strand tensions using scale energy entropy spectra of ultrasonic guided waves[J]. Shock and Vibration, 2018(4): 6905073.
- [2] Niederleithinger E, Herbrand M, Muller M. Monitoring of shear tests on prestressed concrete continuous beams using ultrasound and coda wave interferometry[J]. Bauingenieur, 2017, 92: 474-481.
- [3] Elfergani H A, Pullin R, Holford K M. Damage assessment of corrosion in prestressed concrete by acoustic emission [J]. Construction and Building Material, 2013, 40: 925-933.
- [4] Feng H, Liu X C, Wu B, et al. Design of a miniaturised ultrasonic guided wave inspection instrument for steel strand flaw detection[J]. Insight, 2017, 59: 17-23.

- [5] 尚仁杰,田钧元,杨潇. 缓黏结预应力混凝土梁钢绞线黏结性能试验研究[J]. 建筑结构, 2020(2): 55-60, 66. SHANG Ren-jie, TIAN Jun-yuan, YANG Xiao. Experimental study on cohesive property of steel strand in retard-bonded prestressed concrete beams[J]. Building Structure, 2020(2): 55-60, 66.
- [6] 孙志远,杨学山,石文勇. 基于磁弹效应的索力传感器研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(1): 182-186. SUN Zhi-yuan, YANG Xue-shan, SHI Wen-yong. Study on cable tension sensor based on magnetoelastic effect[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(1): 182-186.
- [7] 尹文霞,周先通,段元锋,等. 基于磁弹效应的高强钢丝应力监测试验研究[J]. 结构工程师, 2013, 29(5): 113-118. YIN Wen-xia, ZHOU Xian-tong, DUAN Yuan-feng, et al. Elasto-magnetic effect based stress monitoring of high-strength steel wires: experimental investigation[J]. Structural Engineers, 2013, 29(5): 113-118.
- [8] Guan B, Zang Y, Han X H, et al. Cold-rolled strip steel stress detection technology based on a magnetoresistance sensor and the magnetoelastic effect[J]. Sensors, 2018, 18: 1 638.
- [9] Li X X, Zhang B N, Yuan C, et al. An electromagnetic oscillation method for stress measurement of steel strands[J]. Measurement, 2018, 125: 330-335.
- [10] 张奔牛,袁灿,陈卓敏,等. 基于 LC 振荡的钢绞线应力测量研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2017(3): 8-12. ZHANG Ben-niu, YUAN Can, CHEN Zhuo-min, et al. Stress measurement of steel strands based on LC oscillation[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2017(3): 8-12.
- [11] 涂冲,张奔牛. 频率漂移对钢绞线应力测量的影响[J]. 交通科学与工程, 2019(1): 50-53, 65. TU Chong, ZHANG Ben-niu. Influence of the frequency drift on the stress measurement of the steel strand[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019(1): 50-53, 65.
- [12] Yim J, Wang M L, Shin S W, et al. Field application of elasto-magnetic stress sensors for monitoring of cable tension force in cable-stayed bridges[J]. Smart Structures and Systems, 2013, 12(S1): 465-482.