

基于频率法的钢绞线预应力检测

陈卓敏², 张奔牛¹, 黄月华³, 袁 灿²

(1. 重庆交通大学 土木学院; 2. 重庆交通大学 信息科学与工程学院, 重庆 400041;
3. 江苏交通科学研究院, 南京 210000)

摘 要: 针对混凝土桥梁的钢绞线预应力检测的实际问题, 提出了一种基于频率振荡的新方法对钢绞线有效预应力进行研究, 对该方法进行了理论分析和公式推导, 搭建了相应的实验系统, 并对钢绞线进行了应力加卸载实验。实验结果表明, 钢绞线频率与钢绞线所受应力值存在一阶线性关系, 且单调递减, 由此验证了基于频率法进行应力检测原理的有效性。

关键词: 桥梁; 钢绞线; 预应力; 频率

DOI: 10.16640/j.cnki.37-1222/t.2016.09.189

0 引言

预应力钢绞线在张拉及结构运营过程中, 由于受到设计荷载以及各种其它突发因素的作用, 结构将不可避免地发生损伤, 使得结构的健康状况不断恶化, 从而威胁整个结构的正常使用和安全。因此, 为了保证工程结构的正常使用和安全, 需对结构的健康状况进行实时在线检测或监测, 以便尽可能早地发现结构隐含的缺陷或损伤, 并且采取必要的防范和修复措施, 否则将有可能导致灾难性的后果发生。

目前国内外对钢绞线预应力无损检测方法主要有: 超声导波检测法、等效质量检测法、磁通量检测法等。

超声导波测试法根据波动理论和声弹理论^[1], 利用应力波传输时间对预应力钢绞线应力水平的敏感性, 通过应力波的传输时间变化来评价钢绞线中的应力水平。

等效质量法利用激励锤敲打锚头^[2], 通过粘贴在锚头上的传感器采集锚头振动响应, 从而推算出钢绞线的有效预应力。

这两种方法有了一定的发展, 但目前它的精度很难达到实际应用要求。

磁通量传感器基于铁磁性材料的磁弹效应原理^[3], 即当铁磁性材料受到外力作用时, 其内部将产生机械应力, 其磁导率会发生相应的变化, 从而可以通过测定磁导率的变化来反映应力的变化。受加载条

的问题。对于给定一系列成本为 N 的询问 \mathcal{Q} 引理 2 限定了这样一个攻击者的有利条件的上界。模拟器是有效的而且运行时间的上界是 $t_c = O(N^2)$, 对于向模拟器的每个询问, 如果 \mathcal{S} 是连根节点, 它必须找出到 BTT 的路径, 如果该路径是带有填充信息的, 则模拟器向随机预言机发送一个成本是到 BTT 的路径长度的询问, 到 BTT 的路径长度的上界是 N 。

类似于引理 2 我们有引理 3. 攻击者在拥有对一系列 $N < 2^c$ 个询问 \mathcal{Q} 的回复时区分随机置换函数 f 和 $p[\text{RO}]$ 的有利条件上界是:

$$\text{Adv}(A) \leq 1 - \prod_{i=1}^N \left(\frac{1 - \frac{i}{2^c}}{1 - \frac{i-1}{2^{r+c}}} \right)$$

进而得到了定理 2。

定理 2. 当 f 是一个随机置换函数时 ESC 的 RO 区别有利条件上界是:

$$1 - \prod_{i=1}^N \left(\frac{1 - \frac{i}{2^c}}{1 - \frac{i-1}{2^{r+c}}} \right) \quad (\text{其中 } N \text{ 是询问成本})$$

参考文献:

[1] 陈伟彬. 一个阻止内部碰撞转状态碰撞的海绵建构变体 [J]. 科技

传播, 2014 (06): 149-150.

[2] G. Bertoni, J. Daemen, M. Peeters, and G. Van Assche, Cryptographic sponge functions [OL], (2012/02/15) [2013/11/30] <http://sponge.noekeon.org/>.

[3] U. Maurer, R. Renner, and C. Holenstein, Indifferentiability, impossibility results on reductions, and applications to the random oracle methodology, Theory of Cryptography-TCC 2004 (M. Naor, ed.), Lecture Notes in Computer Science, no. 2951, Springer-Verlag, 2004, pp. 21-39.

[4] J. Coron, Y. Dodis, C. Malinaud, and P. Puniya, Merkle-Damgård revisited: How to construct a hash function, Advances in Cryptology-Crypto 2005 (V. Shoup, ed.), LNCS, no. 3621, Springer-Verlag 2005, pp. 430-448.

[5] E. Andreeva, B. Mennink, and B. Preneel, Security reductions of the second round SHA-3 candidates, Cryptology ePrint Archive, Report 2010/381, 2010, <http://eprint.iacr.org/>.

作者简介: 陈伟彬 (1987-), 男, 广东汕头人, 硕士研究生, 助教, 研究方向: 密码学和数论等。

件影响目前仅能用于体外预应力测量。

由于目前预应力测量方式的局限性,本文提出一种新的方法,将预应力钢绞线作为振荡电路的一部分,利用振荡频率对钢绞线应力的敏感性来评价预应力钢绞线中的应力水平。

1 频率法测量预应力原理

频率法检测的基本原理^[4]是将钢绞线作为多谐振荡电路的一部分,利用振荡频率与钢绞线应力的敏感性,通过测试多谐振荡电路的频率变化来评价预应力钢绞线中的应力水平。原理图与等效电路如图1所示,其中①端伸长的直线即为模拟的钢绞线:

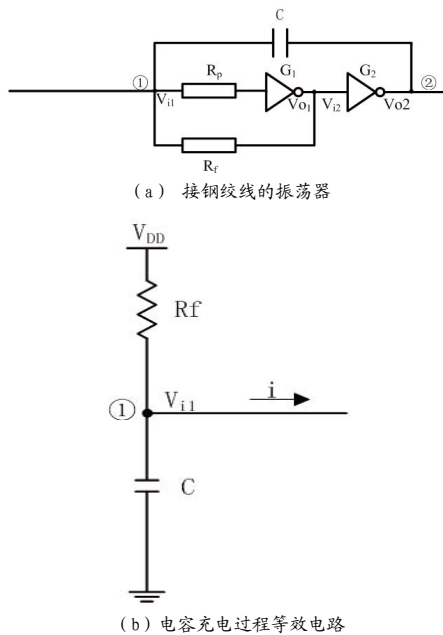


图 1

振荡器的振荡频率 f 由电容 C 的充电时间 t_1 、放电时间 t_2 所决定。即:

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2} \quad (1)$$

整个振荡过程中,电容 C 的放电时间 t_2 不变。由于钢绞线的接入,充电时间 t_1 发生一个微小的变化,相当于电容值发生了改变,此时振荡器的振荡频率 f 的微分方程为:

$$df = -\left(\frac{1}{t_1 + t_2}\right)^2 dt_1 = -f_0^2 dt_1 \quad (2)$$

其中, f_0 为钢绞线应力为零时的振荡频率。将多谐振荡器的振荡公式

$$f = \frac{1}{2R_f C \ln 3} = \frac{1}{2.2R_f C} \quad (3)$$

代入式 (2) 可得:

$$df = -R_f \ln 3 f_0^2 dC \quad (4)$$

如图 1 (a) 所示,振荡器的①端接上钢绞线后,首先给电容 C 充电,只有一小部分的电流流进钢绞线。当电容 C 充电饱和后,进行放电,电流将流进钢绞线,此时流进钢绞线的电荷量用 Q 表示,金属线上的恒定电势用 U_T 表示。则电容可表示为:

$$C = \frac{Q}{U_T} \quad (5)$$

将式 (5) 代入式 (4) 可得:

$$dQ = -\frac{U_T}{R_f \ln 3 f_0} df \quad (6)$$

由推导公示可以看出,流进钢绞线中的电荷量与频率值成比例关系。而钢绞线的电荷存储能力与钢绞线的长度有关,钢绞线越长,流进钢绞线的电荷也就越多,反之,就减少。由于钢绞线长度远大于直径,可以认为是一根线性的电荷存储管道,因此可设存在线性关系:

$$dQ = ndl \quad (7)$$

式中 dl 为钢绞线长度变化量, n 为比例常数。代入式 (6), 我们可以得到:

$$df = -\frac{R \ln 3 f_0^2}{n U_T} dl \quad (8)$$

由于式 (8) 中的系数均为常数,可认为钢绞线长度变化与振荡频率变化呈一阶线性关系。而钢绞线长度 l 与应力 σ 存在如下关系:

$$\sigma = E \varepsilon = \frac{dl}{l} \quad (9)$$

那么将式 (9) 代入式 (8), 最终可以得到:

$$\sigma = -\frac{n U_T}{R_f \ln 3 f_0^2 l} df \quad (10)$$

因此,理论上证明我们可以通过检测频率变化来实现预应力应力检测。

2 实验

为了证明理论的正确性,我们设计了如图 2 所示的实验装置,整个装置包括锚具、承载杠杆、承重框、试样钢绞线和若干组钢丝。首先将钢绞线两端用锚具锚固,然后利用粗钢丝拴住锚具并将钢绞线固定于上下两端,其中,上端固定在承重架上,下端通过连接 1:3 的承载杠杆并固定在地面上。从而使得整个预应力钢绞线处于垂直拉伸状态,杠杆一端连接承重框,通过向承重框加入和去掉重物来达到加载、卸载的目的。

实验中所使用的重物是标准混凝土试件,每块重 7.5Kg,装满承重框能达到 180Kg 的重量。所采用的预应力钢绞线是 1×7 标准型,其主要参数指标为:公称直径为 15.20mm,截面积为 140mm²,每米参考质量为 1101g/m,抗拉强度不小于 1720MPa,最小破断拉力为 241kN。

实验的主要器材:安装好的实验装置、5V 稳压电源、多谐振荡器、数字频率计数器一台 (GFC-8131H)、数字示波器一台 (TDS-2012)、1m 长的同轴电缆一根、工具包一个、线手套一双、6.25m 长的预应力钢绞线一根、重量为 7.5Kg 的混凝土试件 (30cm×10cm×10cm) 若干。

实验过程按照以下步骤进行:

(1) 搭建实验装置,使预应力钢绞线处于垂直拉伸状态,并将承重框悬挂在杠杆的端头,让杠杆处于平衡状态。

(2) 制作初始频率为 64KHz 的多谐振荡电路。

(3) 将 1m 长的同轴电缆一端焊接在预应力钢绞线的端顶,一端焊接在多谐振荡器的输入端,采用同轴电缆是为了增强实验系统的抗干扰能力。同时,将数字频率计和数字示波器连接在多谐振荡器的输出端。

(4) 加载,向承重框内加入混凝土试件,每次增加 4 块,即每次铁框增重 30Kg,从而钢绞线每次加载为 120Kg,一直加至铁框装满试件使钢绞线受重达到 600kg。

(5) 记录变化频率值,观察信号波形。以杠杆端头悬挂承重框处于平衡状态时为初始状态,荷载每增加一次就记录一次频率变化值,每次记录 5 组数据,然后取平均值。

(6) 卸载、重复实验,卸载过程与加载过程类似,同样记录下每次卸载的频率变化值。取完混凝土试件后,进行下一组实验。整个

实验系统如图 2 所示。

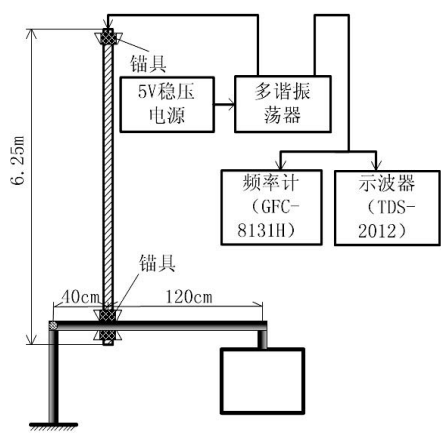


图 2 实验系统图

3 实验结果与分析

对公式 (3) 取 $R_t=1.5K\Omega$ 、 $C=4.7nf$ ，通过计算可得初始频率 $f \approx 64.47453KHz$ （不接钢绞线时的理论值），当钢绞线接上振荡器后，对记录的实验数据进行整理（已求平均值），如表 1 所示：

表 1 64KHz 范围内的加卸载实验数据

承重 (Kg)	计算应力 (MPa)	加载频率平均值 (KHz)	卸载频率平均值 (KHz)
0	0	63.11515	63.11461
120	8.571	63.09424	63.09338
240	17.143	63.07923	63.08007
360	25.714	63.06289	63.06313
480	34.286	63.04628	63.04549
600	42.857	63.03558	63.03558

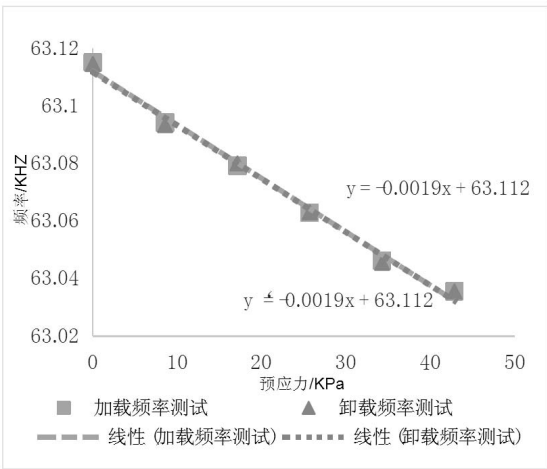


图 3 64KHz 范围内频率与应力关系图

由实验数据可见，随着应力的不断增加，检测到的频率随之不断减小；随着应力的不断减小，检测到的频率随之不断增加。钢绞线在应力状态下的频率误差在 10Hz 以内，且加载整个过程的频率变化值为 79.57Hz，卸载整个过程的频率变化值为 79.03Hz。

将实验对应的数据点在散点坐标图中标示出来，并对散点坐标图上的数据点进行线性拟合，如图 3 所示。

对实验数据进行线性拟合处理后得到其传感特性关系式为：

$$y=y' = -0.0019x+63.112 \tag{11}$$

式中， x 表示应力（MPa）， y 表示加载过程的频率值（KHz）， y' 表示卸载过程的频率值（KHz），应力灵敏系数为 1.9Hz/MPa。即在误差允许范围内系统灵敏度能够达到 19Hz/10MPa。

通过对三种不同频率下的实验数据分析，可以得到如下结论：

(1) 加卸载实验结果表明，检测到的频率平均值与钢绞线所受应力值存在一阶线性关系，且呈比例关系。

(2) 64KHz 范围内的实验数据显示，误差在 10Hz 范围内，加载线性度为 0.9932，卸载线性度为 0.9925，实验系统灵敏度为 19Hz/10MPa。

由此验证了基于频率法进行应力检测原理的有效性。

4 总结与展望

总的来说，本文提出的一种基于频率法的钢绞线预应力检测技术是一种新的可行的方法，它具有较高的灵敏度，并且检测系统结构简单、成本较低、方案易于实现。为更高精度的混凝土结构中的钢绞线预应力检测提供了一种新思路。

从本次实验检测情况来看，目前还存在一些问题需要更深入的研究：

(1) 信号处理方法的研究，钢绞线预应力检测时存在大量的干扰信号，如何准确地屏蔽这些外界干扰需要进一步加以研究。

(2) 本文中的检测结果均是在简易实验室条件下完成的，还需要设计更大的实验装置反复测试，在以后的工作中获取足够的检测事例，这样才能得到真正应用于实际工程的检测系统。

参考文献：

[1] S. Chaki, G. Bourse, Guided ultrasonic waves for non-destructive monitoring of the stress levels in prestressed steel strands, Ultrasonics, 2009 (49):162-171;
[2] 刘龄嘉, 贺拴海, 赵小星. 基于动力性能的 PC 梁有效预应力预测, 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29 (06): 37-40.
[3] H.C. Schoenekess, W. Ricken, W.J. Becker, Method to determine tensile stress alterations in prestressing steel strands by means of an eddy-current technique, IEEE Sensors Journal, Aug, 2007, 7 (08).
[4] N. Ashwear, A. Eriksson, Natural frequencies describe the pre-stress in tensegrity structures, Computers & Structures, Feb, 2014.

基金项目：交通运输部应用基础研究项目 (2015319814020)；重庆高校创新团队建设计划 (KJTD201306)。