

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.06.067

道路桥梁检测中的拉索频率识别技术

赵琳¹, 贾鹏飞¹, 吴华勇¹, 马明雷², 杨伟²

(1.上海市建筑科学研究所有限公司, 上海市 201108; 2.上海市政养护管理有限公司, 上海市 200023)

摘要: 阐述将拉索频率识别技术应用于道路桥梁检测中的具体应用, 进而提出振动频率法原理和相应计算公式。通过试验案例, 指出利用 IBIS-FS 系统进行多阶频率识别, 并进一步分析影响拉索索力测量的重要因素, 具体包括: 拉索边界条件、设置抗弯强度、频谱分析结果的精确度以及减振器装置、拉索垂度等。未来随科学技术发展, 拉索频率识别技术应用, 其精确能够准确识别桥梁道路振动频率。

关键词: 道路桥梁; 检测; 拉索; 频率识别; IBIS-FS

中图分类号: U446

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)06-0261-06

0 引言

在当前经济快速发展的背景下, 斜拉桥可广泛应用于大跨度桥梁建设中, 在斜拉桥中斜拉索作为重要构件, 其能够承担桥梁在施工中和成桥后正常运营的荷载作用力, 并且索内应力将从一定程度上影响桥梁上部结构、内力分布情况以及变形程度, 深入分析斜拉桥拉力算法对于设计斜拉桥以及施工具有重要意义。当前研究振动频率法用于索力测量操作便捷, 已成为当前索力测量主要方法。在计算斜拉索索力过程中, 可将拉索假设为弦张梁, 在实际工程中影响索力的因素包括拉索抗弯刚度和垂度, 因此需深入分析影响索力因素, 本研究提出在计算索力时可采取振动频率法。近年来, 国外研究学者对数值模拟以及实验法开展大量研究, 他们考虑抗弯刚度以及拉索垂度对基频产生的影响, 进一步提出频率法测定索力的相关公式, 深入讨论索力适用范围以及精度范围。郝坤超提出拉索垂度会影响基数阶频率^[1]。在索力测量时, 一般采取偶数阶频率的方式, 其能够忽略垂度影响, 进而提出索力计算公式。本研究结合索力计算公式, 根据工程参数分析索力计算公式的精确度以及对不同公式精确度偏差的产生原因进行深入探讨。

1 振动频率简介

1.1 基本原理

对于索力测试, 现有的研究方法包括振动波法、

频率法、油压表读数法、传感器测量法以及三点弯曲法等^[2]。其中频率法主要是利用拉索索力以及自振频率间存在的关系, 通过测定拉索振动加速度, 进而能够获得频率, 最终获得索力值。该方法操作简单, 成本低, 可重复利用设备。综合多种索力测试方法, 目前研究学者提出, 在具体工程中应用较广且实用性强的方法是频率法, 在索力测量过程中一般采用平均法进行测量, 将拉索表面加速传感器拾取拉索位于自由振动状态下的加速度信号, 通过频谱分析能够将该信号转为频率信号, 进而能够准确获得拉索自由振动频率。通过分析自振频率与拉索索力, 以获得准确的索力数值。弦理论是指自振频率与拉索索力两者之间的关系, 具体公式如式(1)所示。

$$H = \frac{4ml^2 f_n^2}{n^2} \quad (1)$$

在获得拉索自振频率之后, 根据式(1)能够求出索力, 该式表明, 拉索中各阶自振频率是指第一阶频率的整数倍, 因此该计算公式为基频法计算, 要求明确频率阶次, 而这一点是无法保证的。因此, 研究学者提出新基频法, 具体流程为: 从频谱图索取峰值明显一阶频率, 可将其设置为 f_n , 进而推算基频为 f_n/n , 可选取频谱中其余频率值, 如果频率值接近整数, 这种情况下可认为 f_n 表示第 n 阶频率, 否则需进行 $n+1$ 或 $n-1$ 并返回上一步, 以此类推, 直到所选取的 n 值满足相应条件。新基频法利用频谱图峰值相对明显的频率, 将其除以 n , 能够获得基频, 采用该方法进行测试, 能够减小误差。乔道鹏^[3]提出可通过离散时间序列变换法进行斜拉索固有频率求解, 进而能够通过随机振动法准确求解斜拉索索力值。

收稿日期: 2022-07-28

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(课题)(18DZ1201200)

作者简介: 赵琳(1992—), 女, 工学硕士, 工程师, 从事桥梁检测和监测工作。

1.2 计算公式

结合弦理论,采用频率法计算斜拉索索力,首先需测定斜拉索的固有频率,之后分析索力与固有频率两者之间的关系,能够获得斜拉索索力^[4]。如式(2)所示为张紧斜拉索自由振动微分方程。

$$\rho_1 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^2} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \quad (2)$$

式(2)中,沿索长方向的坐标用 x 表示,垂直索长方向坐标用 y 表示, ρ_1 表示所限密度, EI 表示索的抗弯刚度,高度 T 为索力数值。假设斜拉索设置边界条件为两端铰接,因此式(3)所示为拉索拉力。

$$T = 4\rho_1 l^2 \left(\frac{f_n}{n}\right)^2 - \frac{n^2 \pi^2 EI}{l^2} \quad (3)$$

式(3)中, n 表示振动阶数, f_n 表示斜拉索第 n 阶自振频率, l 表示拉索长度,假设其拉索为两端固结状态,因此能够忽略抗弯刚度对其产生的影响,如式(4)所示。

$$T = 4\rho_1 l^2 \left(\frac{f_n}{n}\right)^2 \quad (4)$$

从式(4)可以发现,针对同一根拉索,在忽略抗弯刚度这一因素时,假设索力一定,这种情况下索的第 n 阶自振频率与振动阶数比值为常数,频谱图为间距一致的谱线。

1.3 能量法分析

为能够简化阻尼器以及拉索垂度对索力产生的影响,本研究借助能量原理以分析频率与索力两者关系。根据索力计算公式,分析阻尼器与拉索垂度对其产生的影响,本研究将阻尼器产生影响作用于拉索弹性支撑位置,同时默认斜拉索为两端铰接状态^[5]。第一,位移函数的确定,带阻尼器的拉索振动模型如图1所示。

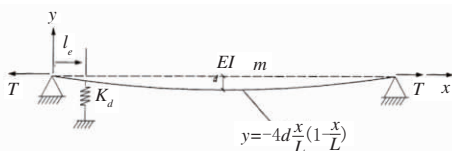


图1 带阻尼器的拉索振动模型

假设斜拉索为两端铰接状态,其中一端设置钢护筒阻尼器,假设在该阻尼器系统中 K_d 表示拉索支撑高度,拉索长度用 L 表示, EI 表示索的抗弯刚度, l_e 为阻尼器具体安装位置, m 表示单位长度质量, S 表示拉索索力,由于相对来说,索的线型可默认为是抛物线。在安装阻尼器之前需计算均匀等截面拉索横向弹性挠度位移方程,如式(5)所示:

$$v(x,t) = \varphi(x) \sin(\omega t + \alpha) \quad (5)$$

该方程中 $\varphi(x)$ 、 ω 、 α 分别表示振型函数、拉索的圆频率以及相位角。当索端铰接过程中,此时可将振型函数设为正弦函数。如式(6)所示:

$$\Psi_1 = \sin(\pi x i / L) / \sin(\varepsilon i \pi) \quad (6)$$

通过上述公式, i 表示固有频率阶次,会使阻尼器对带动起阻尼器以跨拉索产生较大振型影响,但对于其他跨来说产生影响较小,因此根据该公式可以假设其余各跨形状函数仅相差一个常数,且为正弦函数,对于带阻尼器部分可将其叠加反对称高阶项,同时将拉索分为两段进行分析,其中一段为受阻尼器影响的跨,另一段为未受阻尼器影响的其他跨,以推导拉索索力的计算公式。

2 IBIS-FS 技术

对于大型建筑物和桥梁结构安全性以及结构处理状态的评价分析,可通过观察构件变形情况来看实现。尤其对于大型结构,在目前结构件检测中关键是要进行非接触式位移测量以及振动测量。微变形远程测量系统,即 IBIS-FS,是基于微波干涉研发的的创新雷达技术,该技术能够将线性调频连续波技术、干涉测量技术等实现结合,在具体应用过程中可快速分析大型结构件动态、静态挠度以及自振特性^[6]。近年来,许多研究针对 IBIS 技术,在斜拉索测试中获得一定索力,其硬件结构如图2所示。

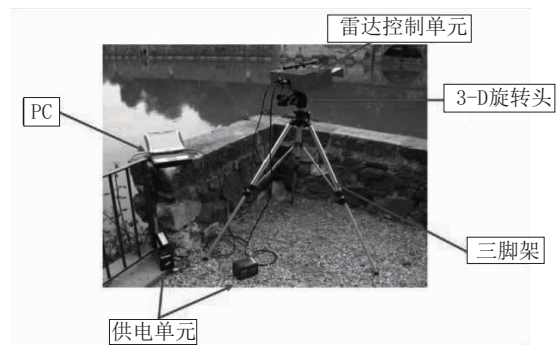


图2 IBIS 硬件结构示意图

该系统中雷达传感器包括发射及接收雷达信号部件,其中垂直向极化测量可利用 H20 天线实现,其最大增益为 20 dB,主正弦波宽度为 -3 dB 以及 -10 dB,PC 电脑用于安装数据采集软件和处理软件,供电保护单元能够对两块电池实现保护作用,这两块电池分别用于雷达传感器和电脑供电,在电量使用时该设备能够续航 4 h,固定装置为 3-D 旋转头和一个三脚架构成,从该设备的原理来看,IBIS 集合了干涉测量技术,以及步进频率连续波测量技术,其

中步进频率连续波技术,即 SF-CW,其采用不同步进频率,要求在同一段时间中连续发射电磁波,并且距离分辨率为 $R=C2B$,C 和 B 分别表示光速以及系统带宽,因此实际测距与距离分辨率无明显联系,且在最大探测范围内,该系统的距离分辨率可达 50 cm。其次,通过干涉测量技术能够准确测量目标位移情况,通过雷达反射波相位差来实现距离测量。传感器对于目标物的每次测量,都涉及振幅以及相位,且传感器的测量精度能够满足建筑、桥梁等多个行业的检测需求。借助微变形远程测量系统在测试拉索索力值时,能够借助相位差以及动态监测拉索振幅相关参数,比较不同时间点的相位差获得最小位移变量,进一步分析拉索的自振频率。通过自振传感器这一元部件,使无线振动测试系统能够通过低频或者超低频振动能量分析仪进行拉索阻力的测试。在具体开展测试时,需绑扎自振传感器用于其中一个拉索测试,但采用该方法测试效率较低。利用微变形远程测量系统进行索力测试时,根据通视条件,能够同步测量多根拉索的索力,通过一次扫描即能够获得所有拉索有效信号,其中不同的峰值能够代表同一根拉索。

3 案例分析

为深入了解 IBIS-FS 的具体应用情况,本次试验使用微变形远程测量系统 (IBIS-FS) 仪器,对斜拉桥拉索的频率进行快速识别。利用 IBIS-FS 设备对沱港大桥的南北两侧的斜拉索和桥塔进行振动监测,大桥主塔为双柱钢筋混凝土直塔,纵向直柱形,横向带交叉腹杆的双柱式钢架,柱中心距 8.7 m,柱高中心部设置十字交叉形抗风腹杆 4 道。桥面以上塔高 44 m,离地面 52 m 高,主塔外包尺寸 3.4 m × 1.2 m,斜拉索为竖琴式密索布置,塔柱前后设置 11 组斜拉索,水平索距 6.5 m,垂直为 3.25 m,梁内锚固,塔端张拉。试验布置图如图 3 所示。

在具体测试中,雷达传感器通过发射电磁波的方式,使其能够照射斜拉索由近到远,通过电磁波测试拉索并使其返回信号,并且雷达距离每个拉索位置存在较强返回信号,可将雷达到其他拉索视线距



图 3 试验布置图

离结合索设定距离向分辨率,将其划分为距离向分辨单元,之后比较所获得的信号强度图,即可准确判断每个强反射信号来自哪些斜拉索散射信号,确定每根斜拉索反射信号之后,可针对被斜拉索反射的后向散射信号处理,以获得每根斜拉索频谱图,进而能够获得拉索振动频率。本研究分两种工况进行分析,针对斜拉索动态监测获得数据进行处理之后,能够获得热信噪比图,观察现场使用全站仪测量的雷达传感器、斜拉索几何关系以及雷达距离向分辨单元和热信噪比图的对应关系。

通过分析每一分辨单元结果发现,如果分辨单元来自同一斜拉索反射信号,那么这些分辨单元才能够表示斜拉索同一种振动频率,相同如果一个分辨单元中存在几根不同拉索反射信号,那么该分辨单元频谱图,则会表现出不同拉索的不同振动频率。

3.1 工况分析

(1) 工况 1 南斜拉索面

设备放置在距离西塔约 5 m 处,离南侧拉索垂直距离约 4 m。设备的高度约 1.5 m,具体位置如图 4 所示。



图 4 设备现场布置图

经过计算,雷达和索的距离、对应的范围和 bin 见表 1。

表 1 工况 1 雷达与索距离

索号	一号	二号	三号	四号	五号	六号	七号	八号	九号	十号	十一号
距离 /m	5.9	8.6	11.5	14.5	17.6	20.7	25.3	26.9	30.0	33.27	36.5
range	5.2	7.5	10.5	13.5	15.7	18.7	21.7	24.7	28.5	30	34.5
bin	8	11	15	19	22	26	30	34	39	41	47

(2)工况 2 北斜拉索面

设备位置与工况 1 相同,对北索面的第三根和第四根斜拉索施加了人工激励。

经过计算,雷达和索的距离、对应的范围和 bin 见表 2 所示。

表 2 工况 2 雷达与索距离

索号	一号	二号	三号	四号	五号	六号	七号	八号	九号
距离 /m	7.25	9.3	11.83	14.58	17.46	20.4	23.41	26.42	29.56
range	—	—	1.2	4.2	6.5	9.5	2.5	4.7	7.7
bin	—	—	16	20	23	27	31	34	38

致时索自振频率与索频率成反比,表示索长度越短,自振频率越高,索越长,则自振频率越低,因此,通过试验研究以及理论方法分析,该规律是符合的,进一步说明采用 IBIS-FS 监测系统能够快速识别索振动频率,且识别准确性高。

对于工况 2,由于存在人工激励,因此,雷达所监测频率幅值较大,频率识别间数越多,则会从一定程

3.2 数据分析

结合数据研究,延长拉索会使振动频率有一定程度减少,从一定程度来看,拉索长度越长,其频率越低。理论上相同材料拉索,桥梁拉索频率是与索长以及索承受拉力、索截面积具有一定联系。当索力一

度上增强识别能力,对于距离较近的拉索,尤其两根拉索距离低于 1 m 的情况下,由于受雷达分辨能力的限制,无法对两根拉索进行准确识别。除此之外,由于存在噪声,对于较远条索采用雷达识别,频率不明显。

工况 1、工况 2 的时程图和频谱图分别如图 5、图 6 所示。

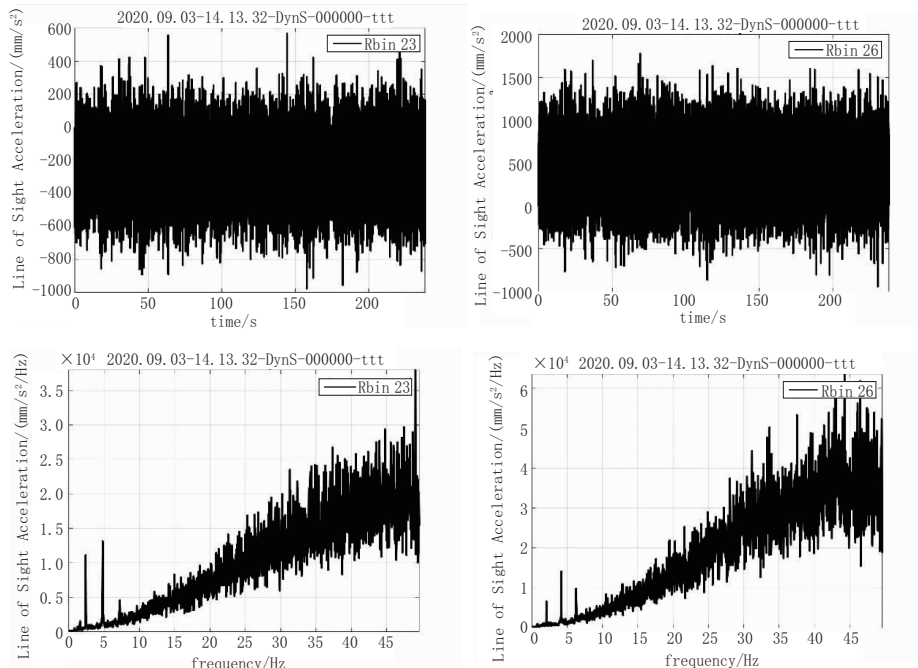


图 5 工况 1 南斜拉索面时程图和频谱图

4 频率法测定

4.1 拉索抗弯刚度

拉索的抗弯刚度由截面惯性矩、截面积、弹性模量等多种因素共同决定。通过研究表明,斜拉索的刚度与钢丝的黏结程度有关,因此在分析抗弯刚度因素时其机制相对复杂,由于索截面使用材料不同,无论采用钢丝绳或者钢绞线索,均含外部保护层,因此无法对拉索的抗弯刚度进行准确确定,即便拉索外部保护层材料相同,但整体材料分布不均匀,由多根

钢丝构成拉索,并且钢丝之间会存在界面力,因此,无法将其作为完全连接结构,如果将各根钢丝相互独立看待,由于钢丝之间存在相互接触,因此,会阻止相互滑动摩擦力存在,显然,将钢丝抗弯刚度给予简单叠加是不合适的。

4.2 边界条件

端部约束对于结果计算以及索刚度具有直接影响,根据多项研究发现,索约束主要介于固结和铰接间,固结铰接不同,主要由于在约束位置存在一定的弯矩,固结约束转角数值为 0,通过小件约束的方式

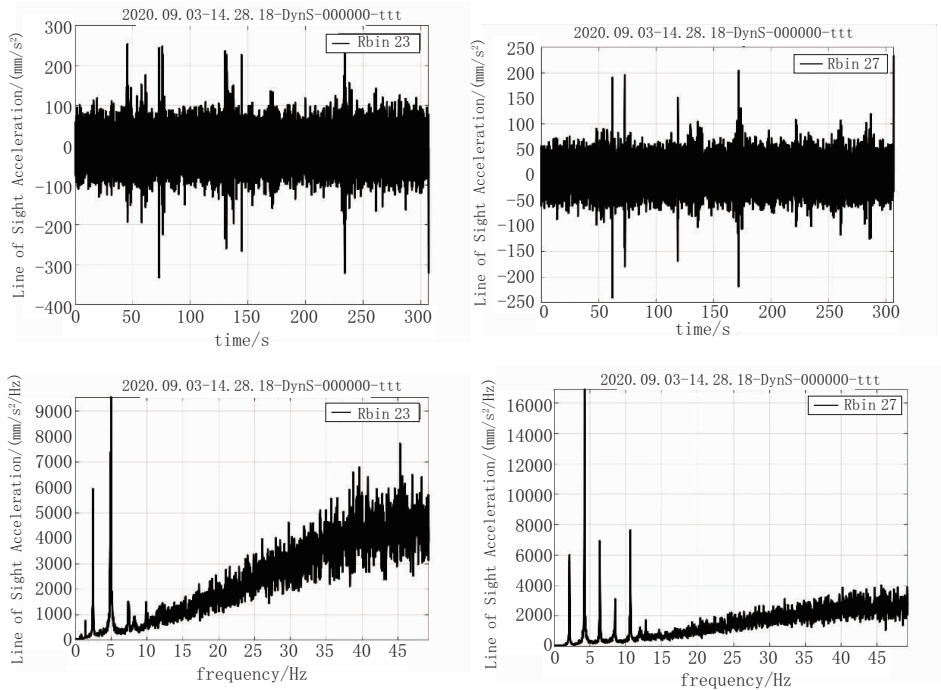


图6 工况2北斜拉索面时程图和频谱图

能够保持索自由转动。约束位置无弯矩存在,如果索的刚度为0,那么处于固结状态和铰接状态下是无明显差别的,此时,如果利用固结状态会导致振动体系高度提高,若进一步提升模型的固有频率,使索力计算数值偏低,采用能量法进行推导,以获得索力计算的边界条件,影响索力精确度达2.5%~4.3%,可通过不同约束方式进行计算。针对长度较长的斜拉索,约束方式对索力计算精度产生影响较小,主要由于采用不同方式进行索约束仅会对靠近端部位置的索产生影响,如果长度较长,那么对索端约束影响也是比较小的,对于长度较短的索来说索力作用影响是比较大的。在具体工程中,模拟短索边界条件无法忽略索力精度影响,因此应当选择端部约束进行短索分析。

4.3 拉索垂度

非线性振动是指具备垂度的索振动,一般采取频率法进行拉索测试,拉索垂度会对其振动频率产生影响。在应力设计过程中,拉索长度设置为165.3 m,会产生由拉索垂度引起的基频误差为0.4%,在50%设计应力条件下,由于垂度导致的基频误差为2.8%。结合钢结构发现拉索垂度会影响基频,在计算索力时采用二阶频率进行计算,则此时垂度导致的误差无法忽略,随拉索长度增加,在受重力条件下垂度也会逐渐增加,通常拉索材料是高强钢丝或钢绞丝,允许压力相差较小时可结合允许压力进行索垂度的计算。

4.4 减振器

振动对斜拉索的设计分析其实是十分不利的,这种振动会使索端接头形成疲劳损伤,进而导致拉索防腐系统受到破坏,影响拉索耐久性,并且长时间振动,还会导致桥梁安全性降低。因此,应对斜拉索采取防振措施,拉索防振器包括辅助索减振与阻尼器减振,辅助索减振利用多根斜拉索横向连接,或将连接器并联在两根索中。根据文献研究以及通过实际工程研究拉索减振器产生的影响,并提出在长索靠近索端位置安装的减振器、阻尼器,约束刚度对基频产生的影响较小。

4.5 频谱分析结果精度

将传感器安装于拉索中进行振动信号测试,即频率法,一般采用频谱分析仪来检测拉索振动之后产生的自振频率。通过数学公式推导索力数值,在系统工程中用频率法测试。索力测试方法以及拉索振动理论相关研究表明,频谱结果精度涉及索力精度分析以及频率测试精度,当锁定测试过程中采用频率法,其中索力值是通过频率进行测量的,因此频率精度将会影响最终结果可靠性。在频率精度测试时,主要影响因素包括频率识别,是导致频率误差产生的关键因素,可将其细化为现场测试因素以及信号处理方法因素。

4.6 其他因素

除此之外,斜索也会产生拉索索力值误差,事实上对于斜拉索来说其具备一定斜度,尤其对于倾斜

拉索的索重力会沿索方向延伸,同时沿着索长度变化,其索力值也会发生变化。考虑拉索斜度对振动产生影响,通过数学公式计算比较复杂,因此在实际工程中可忽略斜拉索斜度对振动产生影响。根据研究,基于其他条件一致的前提下,将 20° 索倾斜增加至 80° ,在相同频率下能够降低1%索力值。因此,可忽略斜度对索产生的影响。但对于高精度索力数值在求解过程中,还需考虑斜索对其振动产生的影响。

5 结 语

本研究针对道路桥梁在检测中利用拉索频率识别技术进行分析,提出振动频率法的测试原理,以及具体计算公式。通过试验案例,指出利用IBIS-FS系统进行多阶频率识别,并进一步分析影响拉索索力测量的重要因素,包括拉索抗弯刚度、边界条件,拉

索垂度、减振器以及频谱分析结果精度。未来随科学技术发展,拉索频率识别技术应用,其精确能够准确识别桥梁道路振动频率。

参考文献:

- [1] 郝坤超,魏金波,李国强.考虑抗弯刚度影响的弹性支承拉索动力特性研究[J].建筑钢结构进展,2010,12(2):5.
- [2] 蔡玉龙,李周,危媛丞,等.考虑频率测试结果不确定性的拉索索力识别方法[J].科学技术与工程,2019,19(17):6.
- [3] 乔陶鹏,严普强,邓焱,等.斜拉索索力估算中振动信号处理方法的改进[J].清华大学学报(自然科学版),2003,43(5):644-647.
- [4] 韦凯,王平,刘子焯,等.一种轨道扣件系统共振频率的识别方法及装置:中国,CN106446443B[P]. 2020.
- [5] 李晓知.CCD微变形监测技术在边坡远程监控中的应用[J].有色金属文摘,2019,34(1):93-94,96.
- [6] 马红旭,陈志华,刘红波,等.基于频率测试标定拉索索力的有限元分析[J].建筑钢结构进展,2019,21(5):63-74,83.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿邮箱:cdq@smedi.com 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com 投稿网站:<http://www.csdqyfh.com>