

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.05.016

# 基于磁通量法的空间网架结构无损应力检测的 试验方法研究\*

殷志祥, 宁志扬

(辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 测试在役空间网架结构的轴力或应力是网架结构健康检测的核心内容之一, 探究一种实用无损的应力检测方式对在役空间网架结构的健康状况进行合理的评估成为当前工程亟待解决的问题。磁通量法在桥梁索力检测的应用比较成熟, 但没有应用于空间结构的杆件应力测试方面主要是由于网架结构杆件在长度、受力性质及约束的影响而使其杆件轴力的测试尚处于研究阶段。据此采用磁通量法对网架结构杆件轴力进行了试验研究。选取了可能影响轴力测试结果的感应线圈绕线匝数、激励线圈绕线匝数、激励电压、荷载工况四个因素开展了一系列的试验研究。结果表明: 传感器的绕线匝数、激励电压都会直接影响到电磁感应响度的大小, 实际工程中必须选择合适的绕线匝数和激励电压。磁通量传感器在套入杆件后对不同的荷载工况表现出了良好的敏感性, 将其运用于杆件的轴力检测是可行的。

**关键词:** 健康检测; 磁通量法; 杆件轴力; 激励电压; 绕线匝数

**中图分类号:** TU312<sup>+</sup>.1   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2020)05-0803-08

## Study on the Test Method of Nondestructive Stress Test of Space Truss Structure by Magnetic Flux Method

YIN Zhixiang, NING Zhiyang

(School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** Measuring the axial force or stress of the long-span truss structure is one of the core contents of the health monitoring of the truss structure. Exploring a non-destructive health monitoring method to assess the health of the truss structure in a reasonable assessment of the current project is to be solved. The application of magnetic flux method in bridge cable force monitoring is relatively mature, but it is still in the research stage when it is applied to obtain bar axial force of truss structures. Because of the obvious differences in the length, material properties, mechanical properties and constraints of the lattice structure, it is necessary to carry out further experimental studies on the factors that may affect the test results to determine whether it is feasible. In this paper, the magnetic flux method is used to study the bar axial force of the truss structure. A series of experimental studies were carried out on four factors: the winding turns of the induction coil, the winding turns of the excitation

\* 收稿日期: 2018-03-12; 修回日期: 2018-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1261122)资助

作者简介: 殷志祥(1962-), 男, 教授, 博士生导师。主要从事大跨度空间结构方面的研究。Email: lntuyzx@163.com

通讯作者: 宁志扬(1992-), 男, 硕士研究生。主要从事大跨度空间结构方面的研究。Email: 870648529@qq.com

coil, the excitation voltage and the load case, which could affect the test results. The results show that the winding number and the excitation voltage of the sensor will directly affect the loudness of the electromagnetic induction, and the number of turns and the excitation voltage must be selected in a certain engineering project. The magnetic flux sensor exhibits good sensitivity to the different load conditions after the bar is inserted, and it is feasible to apply it to axial force measurement of the bar.

**Keywords:** health monitoring; magnetic flux method; bar axial force; excitation voltage; winding turns;

## 引言

大跨度空间网架结构以其刚度大、重量小、传力便捷、施工方便、结构布置灵活多变等一系列显著的优点得到越来越广泛的应用<sup>[1]</sup>。但随着网架结构入役年限的增长以及各种自然、人为因素的不利影响,使得网架结构性能发生恶化。对各种在役的网架结构进行定期健康检测确定其实际服役状态,避免发生重大破坏具有重要的工程意义<sup>[2-3]</sup>。因此对网架结构杆件轴力的无损检测在整个结构的安全运营中就显得十分必要。

针对杆件轴力测试方法,国内外学者开展了一系列研究。张晶<sup>[4]</sup>通过频率法测试杆件轴力,分别研究了边界条件、杆件长度、截面及杆件轴力对杆件频率采集的影响关系,但其试验是建立在单杆的基础上进行的,而在网架结构中由于螺栓球节点的存在周围杆件对于频率采集结果的影响不可忽略;周庠天等<sup>[5]</sup>提出了利用磁通量法测量钢索拉力的试验研究,其研究成果主要适用于桥梁结构的索力健康检测;李素贞等<sup>[6]</sup>对于实际工程中难以对杆件边界条件进行准确的判定,提出采用解析法对杆件轴力进行识别的方案,其方案对于轴力较大的杆件有较好的适用性,但对于轴力较小的杆件误差较大并不适用。

目前工程中测量杆件轴力常用的方法有频率法和应变片测试法<sup>[7]</sup>。频率法由于不能忽略节点及周围杆件对频率采集的影响,其精度有待于进一步提高。利用磁通量法测试杆件受力往往被运用于桥梁工程的索力测试中,而将其运用于网架结构的轴力测试研究还处于起步阶段<sup>[8]</sup>。魏宝华<sup>[9]</sup>借助相对磁导率增量与索力的拟合关系,进行温度补偿得到相对磁导率公式来求解索力,通过实体模型测试获得可靠数据;王刚<sup>[10]</sup>在磁弹效应基础上自制传感器结合 ANSYS 软件对索力进行求解,结果证明了

磁通量法测试索力的可行性;柴爱红<sup>[11]</sup>详细介绍了磁通量法在平行钢丝斜拉索、平行钢绞线斜拉索、拱桥吊杆索力的工程运用实例,为磁通量法的工程运用提供有效参考。以上研究都表明将磁通量法运用于索力检测是可行的,鉴于拉索受力与网架结构受力的相似性将磁通量法运用于网架结构杆件轴力的测试成为一种新的选择。本文主要通过自制的磁通量传感器进行试验,讨论了激励线圈与感应线圈匝数、荷载工况、激励电压几个因素对试验测量结果的影响,验证了将磁通量传感器运用于网架结构杆件轴力测试的可行性。

## 1 基本原理

磁通量法基本原理如图 1 所示。核心部分电磁感应系统是由主要线圈和次要线圈两部分组成,主要线圈为激励线圈,次要线圈为感应线圈。当激励线圈通过瞬时电流时,由于电磁感应现象将会在感应线圈产生相应的瞬时感应电压并且借助放大器系统可以测得感应线圈上的瞬时感应电压。

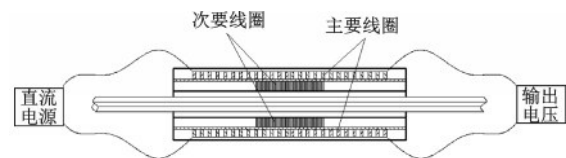


图 1 磁通量法基本原理

Fig.1 Basic principle of the magnetic flux method

由于电磁感应现象而在感应线圈上产生的电流强度及电压大小主要是由铁芯材料本身决定,或者说与材料的磁导率直接相关。而材料的磁导率又与铁芯所处的应力状态紧密联系。因此通过应力状态、瞬时感应电压、材料参数之间的相互联系换算得到的磁导率来间接反映杆件的受力状况。

依据磁畴的内在势能理论可知材料磁化性质会因外加应力的变化而变化。结构杆件在荷载作

用下其磁导率会发生相应变化,借助磁通量传感器对结构在不同荷载工况下的瞬时感应电压进行检测,推导出杆件磁导率的变化进而反映其实际受力。

$$E_s = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma \sin^2 \theta \quad (1)$$

式中,  $E_s$  为磁性应变能;  $\lambda_s$  为磁致伸缩系数,在未磁化材料被磁化至饱和时产生;  $\sigma$  为外加应力;  $\theta$  为外加应力与磁化方向的夹角。

试验中借助材料磁场强度  $H$  和磁通量  $B$  的关系来表述材料的磁化:

$$B = \bar{\mu} H \quad (2)$$

式中,  $B$  为磁通量,  $\text{Wb/m}^2$ ;  $\bar{\mu}$  为磁导率张量;  $H$  为材料磁场强度,  $\text{A/m}$ 。

激励线圈输入激励电压后,由于电磁感应现象而在感应线圈引起的感应电压强度为:

$$V_{\text{ind}}(t) = -[nA_s \frac{\partial B(t)}{\partial t} + n(A_i - A_s)\mu_0 \frac{\partial H(t)}{\partial t}] \quad (3)$$

式中,  $A_s$  为铁磁性材料横截面积;  $H(t)$  为永久磁场强度;  $A_i$  为线圈横截面积;  $n_j$  为激励线圈缠绕圈数;  $\mu_0$  为真空磁导率。

设磁场各向同性,则可将被测材料的磁导率表示为:

$$\mu_r = 1 + \frac{A_i}{A_s} \left( \frac{V_{\text{out}}}{V_0} - 1 \right) \quad (4)$$

式中,  $V_{\text{out}}$  为测量的输出电压;  $V_0$  为不经过铁磁材料的输出电压。

由以上理论可知,电磁感应系统中铁芯的存在与否会直接影响瞬时感应电压强度。而且,不同的荷载工况下铁芯材料的感应电压与铁芯材料不受力时的感应电压也不同,并且随外力变化感应电压也会随之变化。由此,可以通过试验得到材料的磁导率,并对不同荷载工况下的材料磁导率进行标定,绘制应力—磁导率曲线。实际工程运用时,只需现场测量材料的磁导率并与试验室标定的应力—磁导率曲线对比即可得出杆件的实际受力大小。

## 2 试验研究

### 2.1 磁通量传感器的制作研究

依据上述基本原理,自行设计制作3个磁通量

传感器,并通过一系列试验验证其用以检测杆件轴力的可行性。传感器的线圈采用直径为0.8 mm的铜线绕制而成,激励线圈与感应线圈之间通过绝缘层隔开。传感器的尺寸见表1,传感器如图2所示。

表1 传感器尺寸

Table 1 Description of the sensor dimensions

传感器编号	长度/cm	直径/mm	激励线圈匝数	感应线圈匝数
1	15	60	10	5
2	15	60	15	5
3	15	60	15	10



图2 自制传感器

Fig.2 Photograph of the homemade sensor

试验选用HZDH直流恒压源为试验分别提供8、10、12 V的直流电流激励。利用RIGOL DS1102型示波器来记录通电瞬时由于外接电压源的激励而在感应线圈上产生的瞬时感应电压,并依靠示波器的数据存储功能将记录的数据导出。本文所选用的杆件模型长为400 mm,截面形式为 $\Phi 48 \times 3.25$ ,其密度为 $7850 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为 $2.06 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 。

首先进行传感器可行性研究试验如图3所示,分为以下几个步骤:连接仪器不套入杆件输入不同的激励电压记录传感器感应电压;连接仪器套入杆件输入不同的激励电压记录传感器感应电压;连接仪器套入杆件不输入激励电压记录传感器感应电压。得到的试验结果及分析如图4~6所示。

由图4~6可以发现由于杆件的存在而使传感器的瞬时感应电压强度显著增强,与之前的理论分析结果相吻合。以3号传感器为例,当输入激励电压为12 V时,试验时传感器中套入杆件时产生的瞬时感应电压相较于传感器中未套入杆件时产生的瞬时感应电压有明显的跃升。而其它型号的传感器在不同的激励电压下都表现出了相同的规律。这使得试验中对磁通量变化的记录、分析成为可能。

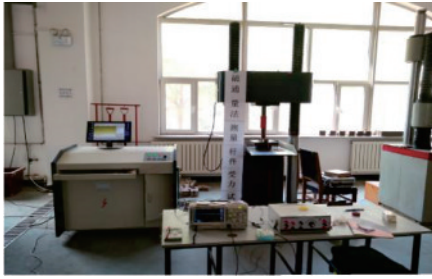


图3 试验现场  
Fig.3 Test site

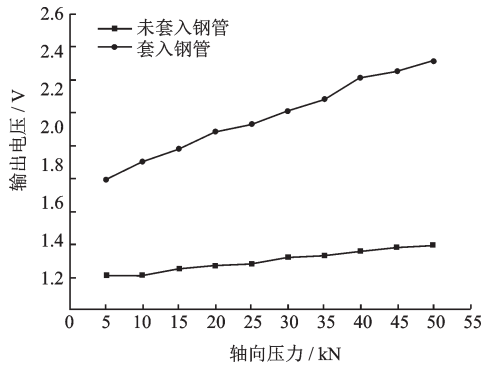


图4 1号传感器套入杆件前后测得的瞬时感应电压  
Fig.4 Instantaneous induction voltage measured before and after the first sensor is inserted into the steel tube

进一步试验发现磁通量传感器对于套入杆件所受的荷载变化表现为当荷载从5 kN增加到50 kN的过程中,套入杆件的传感器瞬时感应电压增加了0.29 V,变化率为21.9%。而相同情况下未套入杆

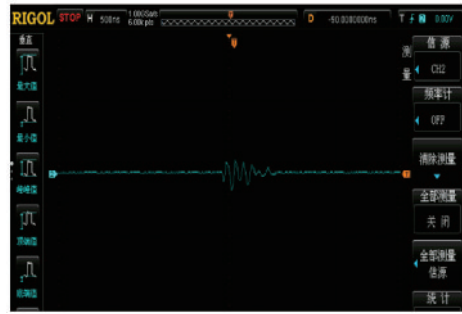


图5 未套入杆件时瞬时感应电压图像

Fig.5 Instantaneous induced voltage image before the sensor is inserted into the steel tube

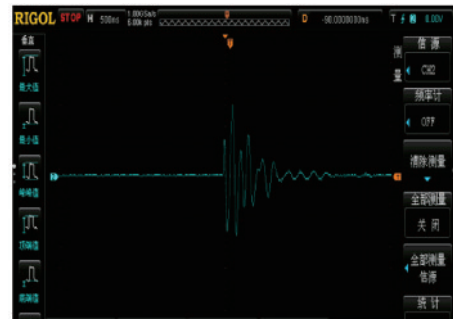


图6 套入杆件后瞬时感应电压图像

Fig.6 Instantaneous induction voltage image after the sensor is inserted into the steel tube

件时瞬时感应电压仅增加了0.03 V,变化率为2.9% (表2)。套入杆件后使传感器的瞬时感应电压值显著增加,同时变化率也显著增加。

表2 未套入钢管时的瞬时感应电压

Table 2 Instantaneous induced voltage before inserting the sensor in the steel tube

传感器 编号	激励电压/V	轴向压力/kN									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	8	1.01	1.02	1.02	1.03	1.04	1.04	1.06	1.05	1.05	1.04
2		1.11	1.09	1.12	1.12	1.10	1.13	1.13	1.14	1.13	1.14
3		1.14	1.14	1.15	1.15	1.17	1.18	1.16	1.17	1.19	1.18
1	10	1.07	1.08	1.09	1.11	1.10	1.11	1.13	1.14	1.14	1.16
2		1.15	1.16	1.16	1.18	1.17	1.19	1.19	1.18	1.21	1.20
3		1.18	1.18	1.21	1.20	1.22	1.21	1.23	1.24	1.24	1.25
1	12	1.13	1.14	1.16	1.16	1.18	1.21	1.23	1.22	1.25	1.27
2		1.19	1.21	1.23	1.24	1.27	1.26	1.29	1.31	1.35	1.37
3		1.21	1.21	1.25	1.27	1.28	1.32	1.33	1.36	1.38	1.39

磁通量传感器套入杆件但没有输入激励电压时图像基本上呈直线形式,微小的变化是由于试验时周围环境的干扰而造成的。如图7所示,可见要想通过传感器对杆件的轴力进行测量必须对传感

器施加一定大小的激励电压。套入杆件后,通过外接电压源对传感器输入激励电压后,不管杆件受力的数值大小,输出电压波形在形式上都是一致的,即为逐渐衰减的正弦波。

表3 不同激励电压不同轴向压力下的瞬时感应电压

Table 3 Instantaneous induced voltage under different excitation voltages and axial pressures

传感器 编号	激励电压/V	轴向压力/kN									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	8	1.32	1.34	1.35	1.38	1.41	1.44	1.49	1.54	1.57	1.61
2		1.41	1.43	1.46	1.51	1.55	1.59	1.64	1.69	1.72	1.75
3		1.43	1.43	1.48	1.55	1.57	1.61	1.64	1.71	1.73	1.78
1	10	1.54	1.56	1.6	1.68	1.72	1.78	1.84	1.85	1.87	1.91
2		1.58	1.62	1.65	1.71	1.75	1.79	1.86	1.93	1.98	2.11
3		1.59	1.63	1.68	1.73	1.79	1.83	1.92	1.95	2.01	2.13
1	12	1.73	1.74	1.78	1.81	1.85	1.86	1.89	1.91	1.95	1.97
2		1.86	1.89	1.96	2.01	2.09	2.14	2.21	2.25	2.33	2.39
3		1.79	1.9	1.98	2.08	2.13	2.21	2.28	2.41	2.45	2.51

综上磁通量传感器在套入杆件的情况下,给予一定的激励电压可以对杆件的轴力变化表现出良好的敏感性,进而对杆件轴力进行测量。

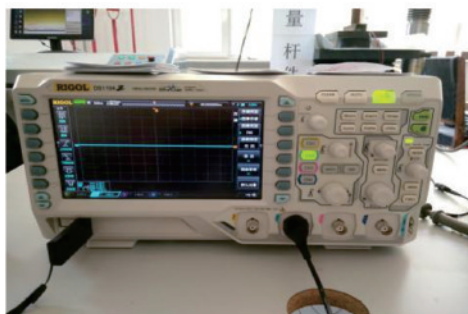


图7 套入杆件后未通入激励电压的瞬时感应图像

Fig.7 Transient induction image without excitation voltage after the sensors is inserted into the steel tube

## 2.2 杆件试验过程及结果

由于网架结构杆件在长度、材料属性、受力性质及约束上与拉索都存在着明显不同,因此对于可能影响到试验结果的因素必须进行进一步的试验研究以确定其是否可行。选取了可能影响试验结果的感应线圈绕线匝数、激励线圈绕线匝数、激励电压、荷载工况四个因素开展了一系列试验研究。试验时将自制的磁通量传感器套在杆件中间并通过压力机逐级加载。将传感器上的激励线圈与感应线圈分别与稳压器及示波器连接,在不同荷载工况下及不同的激励电压下通过示波器采集杆件的瞬时感应电压。通过瞬时感应电压确定其对应磁导率,对不同的荷载工况下的磁导率进行标定,并绘制应力-磁导率曲线。

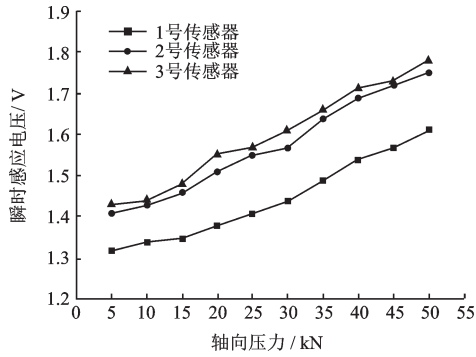
## 2.3 数据分析

由图8可以发现同一杆件在相同激励电压下,随着杆件所受压力的逐渐增加测得的瞬时感应电压整体上都表现出了上升的趋势。由于随着杆件两端轴向压力的逐渐增大,导致了受压杆件的横截面积逐渐增加,进而导致参与磁导的铁磁材料在量上也逐渐增加,磁导率增大。因此表现出了感应电压逐渐增加的趋势。

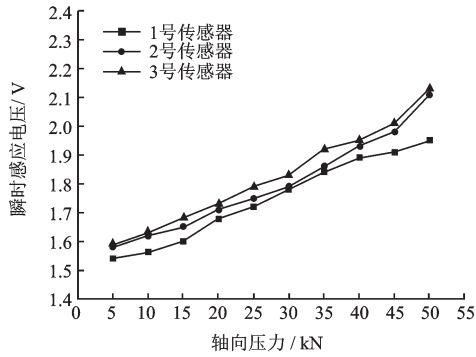
同时可以发现,不论是在相同荷载工况不同的激励电压还是相同的激励电压不同的荷载工况下,传感器的瞬时感应电压由大到小依次为3号、2号、1号。产生这种现象的主要原因就是磁通量传感器激励线圈及感应线圈的绕线情况。1号传感器的激励线圈及感应线圈线圈匝数在3个传感器中最多,更多的激励线圈可以产生更大的激励磁场,而更多的感应线圈处于磁场当中产生的感应电压也就更大。

由图9发现在相同的荷载工况下激励电压越大,产生的感应磁场越强。这是由于在相同的荷载工况下,激励电压越大产生的激励磁场越大,相应的感应磁场也会越大。而且在同一激励电压下,传感器的瞬时感应电压都表现出良好的线性规律。通过实测获得的杆件的瞬时感应电压求得杆件材料的磁导率,并绘制应力-磁导率曲线。实际工程中可以通过实测不同杆件的瞬时感应电压进而与标定的应力-磁导率比较,获得杆件的实际受力。

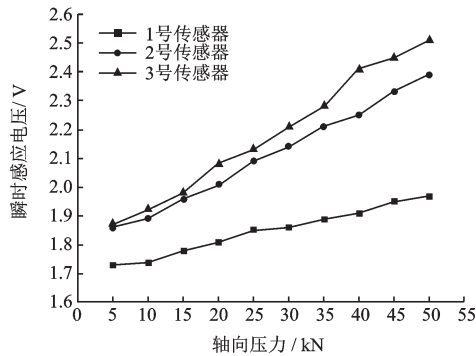
为进一步研究感应电压 $V$ 、激励线圈的绕线匝数 $n_1$ 、感应线圈绕线匝数 $n_2$ 、杆件的荷载工况 $N$ 四个因素之间的函数关系,采用Matlab软件对上述试验



(a) 8 V



(b) 10 V



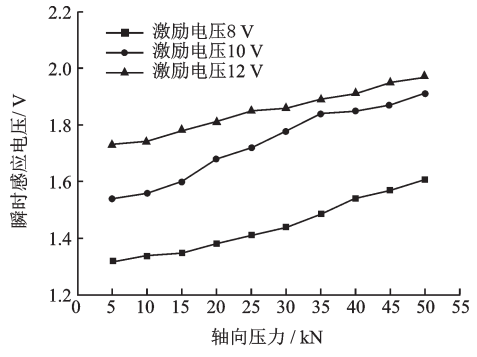
(c) 12 V

图8 激励电压下不同压力时的瞬时感应电压

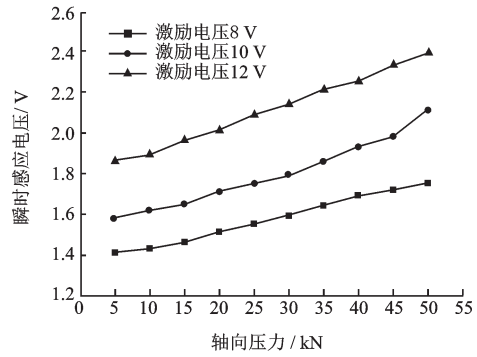
Fig.8 Instantaneous induced voltage under different excitation voltages and pressures

数据进行了线性及二次非线性拟合。得到的拟合结果见表4。

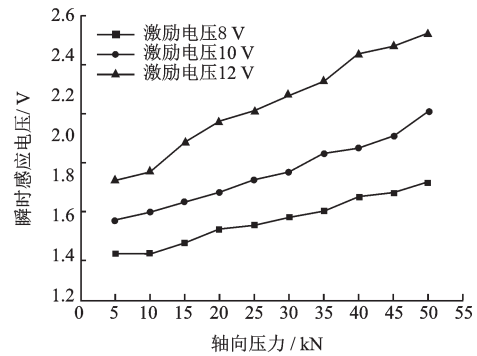
由表4可见,对四个试验因素进行线性拟合时拟合优度可以达到0.944 2,而进一步进行二次非线性拟合时拟合优度达到0.944 5,相较于线性拟合结果只有微小的提高基本上可以忽略不计。因此可以认为感应电压 $V$ 、激励线圈的绕线匝数 $n_1$ 、感应线圈绕线匝数 $n_2$ 、杆件的荷载工况 $N$ 四个因素之间呈线性关系,相应的关系式为 $V=0.079N+0.238n_1+0.556n_2-1.587$ 。



(a) 1号



(b) 2号



(c) 3号

图9 1号、2号、3号传感器在不同激励电压下的瞬时感应电压

Fig.9 Instantaneous induced voltage of different sensors under different excitation voltages

表4 试验数据拟合结果

Table 4 Fitting results of the experimental data

拟合方式	$c$	$N$	$V$	$n_1$	$n_2$	拟合优度
线性拟合	-0.2	0.01	0.126	0.03	0.007	0.944 2
平方拟合	0	0.008	0.1	0.024	0	0.944 5

## 2.4 磁通量法测试杆件轴力准确性验证

为比较磁通量法测试杆件轴力的准确性,现分别利用实际工程中常见的频率法、应变片法及本文研究的磁通量法对不同荷载工况下的杆件轴力进行测试,并与杆件实际所受轴力进行比较。杆件模

型长为 400 mm, 截面形式为  $\Phi 48 \times 3.25$ , 其密度为  $7850 \text{ kg/m}^3$ , 弹性模量为  $2.06 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ , 杆件激励电压为 12 V。试验如图 10 所示, 各测试方法精度比较如图 11 所示。



图 10 试验现场  
Fig.10 Test site picture

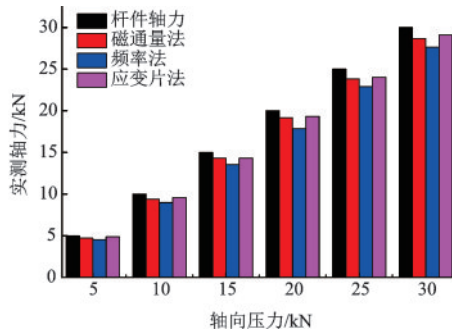


图 11 不同测试方法杆件轴力比较  
Fig.11 Comparison of axial force of bars in different test methods

由图 15 可知, 杆件在施加不同的荷载工况下采用应变法的实测轴力最接近真实值, 这是由于实验室能够满足应变片法所需的试验条件, 而在实际工程中则难以保证。采用磁通量法的平均试验精度可以达到 94% 以上, 明显优于频率法。因此实际工程中采用磁通量测试网架结构杆件轴力是可行的。

### 3 结 论

根据理论分析及试验研究运用磁通量法测试空间网架结构杆件受力的可行性, 分别从磁通量传感器的制作、激励电压、加载工况几个方面对磁通量法进行讨论, 结论如下:

(1) 磁通量传感器感应线圈与激励线圈的绕线匝数直接影响到感应磁场的强度, 在一定范围内, 两层线圈的绕线匝数越多, 测得的输出电压越大, 相反越小。

(2) 激励电压的大小是影响感应响度的重要因素之一, 实际工程中在其他条件不变的情况下可以适当的增大激励电压来增强感应磁场, 获得更加精确的试验结果。

(3) 在相同的激励电压下, 传感器对于不同的荷载工况表现出了良好的敏感性, 在 0~50 kN 的应力范围内, 通过标定应力-磁导率曲线可以很好的反应出杆件的实际受力。

(4) 通过对试验数据进行线性拟合得到  $V = 0.079N + 0.238n_1 + 0.556n_2 - 1.587$  拟合公式, 发现感应电压、激励线圈的绕线匝数、感应线圈绕线匝数、杆件的荷载工况四个因素之间基本上呈线性关系。

(5) 利用磁通量法测量网架结构杆件的实际受力具有良好的精度, 试验所需环境条件要低于应变片法, 精度优于频率法。此外还需要在试验中定量确定各参数与应力的影响关系, 以期为实际工程中网架结构的健康检测提供有效途径。

### 参 考 文 献:

[1] 袁永强, 李东升, 李宏男. 基于动力方法的改进杆件轴力识别[J]. 大连理工大学学报, 2015, 55(5): 511-517.  
Yuan Y Q, Li D Sh, Li H N. Improved method for axial force identification of member [J]. Journal of Dalian University of Science and Technology, 2015, 55(5): 511-517. (in Chinese)

[2] 陈 鲁. 空间结构中拉力测试的弹性工程磁学法理论与实践研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.  
Chen L. Investigation on the measurement of cable tensions in space structures based on the elasto-magnetic method [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)

[3] 罗尧治, 沈雁彬. 空间结构健康检测与预警技术[J]. 施工技术, 2009, 38(3): 4-8.  
Luo Y Zh, Shen Y B. Health monitoring and early warning technology in spatial Structure [J]. Construction Technology, 2009, 38(3): 4-8. (in Chinese)

[4] 张 晶. 频率法测试网架结构杆件轴力影响因素的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(5): 809-814. (in Chinese)  
Zhang J. Experimental study on influence factor of frequency method in test axial force of the members of space truss structure [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(5): 809-814. (in Chinese)

[5] 周庠天, 涂 慧, 王晓琳. 磁通量传感器索力检测系统在工程中的应用[J]. 预应力技术, 2011, 5(6): 35-40.  
Zhou X T, Tu H, Wang X L. Magnetic flux sensor cable

application of force detection system in engineering[J]. Prestress Technology, 2011, 5(6):35-40. (in Chinese)

[6] 李素贞, Roeck G D, Reyder E. 杆件轴力的一种识别方法[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 31(6):694-699.  
Li Sh Zh, Roeck G D, Reyder E. A method of identification of axial force in beam members[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 31(6): 694-699. (in Chinese)

[7] Helena G, Ramos A, Ribeiro L. Present and future impact of magnetic sensors in NDE[J]. Procedia Engineering, 2014, 86(12):406-419.

[8] 王社良, 王威, 苏三庆, 等. 铁磁材料相对磁导率变化与应力关系的磁力学模型[J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(3):288-291.  
Wang Sh L, Wang W, Su S Q, et al. A magneto-mechanical model on differential permeability and stress of ferromagnetic materia[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 25(3): 288-291. (in

Chinese)

[9] 魏宝华. 钢索索力识别方法研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2014.  
Wei B H. Study on the identification method of steel cable force [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2014. (in Chinese)

[10] 王刚. 基于磁弹效应的索力检测系统的研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.  
Wang G. The development of a cable force detecting system based on the magneto elastic effect [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese)

[11] 柴爱红. 磁通量传感器在桥梁索力监测中的应用[J]. 山西建筑, 2014, 40(22):209-211.  
Chai A H. On application of magnetic flux sensor in supervision of bridge cable force[J]. Shanxi Architecture, 2014, 40(22):209-211. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)



(上接第 788 页)

[9] Ghosh J, Padgett J E. Aging considerations in the development of time-dependent seismic fragility curves [J]. Structural Engineering, 2011, 136(12): 1 497-1 512.

[10] 赵桂峰, 何双, 马玉宏, 等. 基于钢筋坑蚀效应的近海隔震桥梁易损性分析[J]. 中国公路学报, 2016, 29(8):67-76.  
Zhao G F, He Sh, Ma Y H, et al. Fragility analysis of offshore isolated bridge based on steel pitting corrosion effect [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(8):67-76. (in Chinese)

[11] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
Niu D T. Durability and life forecast of reinforced concrete structure [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)

[12] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1 804-1 826.

[13] 乔万芝, 徐略勤, 李建中, 等. 基于  $A_p/V_p$  的双薄壁高墩刚构桥抗震性能研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(6):974-980.  
Qiao W Zh, Xu L Q, Li J Zh, et al. Seismic performance

of rigid frame bridge with double thin-walled high piers based on  $A_p/V_p$  characteristics [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(6): 974-980. (in Chinese)

[14] Priestley M J N, Seible F, Calvi G M. Seismic design and retrofit of bridges [M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.

[15] Matsuki S. Performance-based assessment of the seismic response of highway bridges with deteriorated reinforced concrete [D]. Engineer's Thesis: Stanford University, 2005.

[16] 徐略勤, 乔万芝, 何路平, 等. 地震下高墩刚构桥桥台-背土相互作用分析方法对比研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(6):105-112.  
Xu L Q, Qiao W Zh, He L P, et al. Comparison of analytical methods for the abutment-backfill interaction of a rigid frame bridge with high piers under seismic loading [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38(6):105-112. (in Chinese)

[17] 公路桥梁抗震设计细则: JTG/TB 02-01—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.  
Guidelines for seismic design of highway bridges: JTG/TB 02-01—2008 [S]. Beijing: China Communication Press, 2008. (in Chinese)