

长效振弦式锚索测力计研究

邓铁六 栾兆群 王清标 马俊亭

摘要 本文介绍长效振弦式锚索测力传感器的结构特点、工作原理、技术性能和配套仪表,并对主要相关技术的研究成果作了论述:(1)弱激发电路解决频率不一致问题;(2)微小变形原则及活塞传压、活动膜加老化技术解决长期稳定性问题;(3)新数学模型提高传感器准确度,使二次仪表直接准确地显示物理量值。

关键词 振弦式传感器 锚索测力计

1 前言

大量程锚索测力计主要用于预应力桥梁、斜拉桥、水电站大坝、边坡等处锚索拉力的监测,由于监测时间长达数年之久,对传感器的长期可靠性、稳定性(含温度稳定性)和耐潮湿等性能要求很高,设计制造合格的长效锚索测力计需解决一系列技术难题,如老化工艺问题。目前,国内长效产品尚不过关,国外进口产品性能较好,但价格贵,供货与服务不如国内方便,因而迫切需要有国产高性能的长效锚索测力计供用户使用。

作者应用长期从事大量程振弦式传感器和相关技术研究的系列成果,设计制造了10台MGH-1000型长效锚索测力传感器,老化达到稳定后,送2台到山东省计量科学研究所进行测试,技术性能如下:

编 号	05#	07#
量 程(kN)	1000	1000
滞 后(%FS)	2.22	0.73
不重复度(%FS)	0.05	0.09
进程误差(%FS)	0.32	0.24
综合误差(%FS)	1.22	0.49

MGH-1000的过载能力为140%FS。

测试依据:GB5604-85。

标准测力机示值误差:0.1%。

此后,由柳州海威姆建筑机械有限公司模拟现场对05#做了长时满量程加载试验,表明传感器输出稳定(二次仪表显示力值其波动在温度影响范围之内)。根据过去的经验,这种传感器的寿命可达10年以上,其良好的重复性和较高的进程准确度保证了长期满载工作数据准确可靠,能满足长期监测的需要。

下面简要介绍MGH-1000锚索测力传感器和配套仪表及相关技术成果。

2 自激振弦式传感器的结构和工作原理

自激振弦式传感器的结构分两类:(a)横式弦,(b)竖式弦,如图1所示:

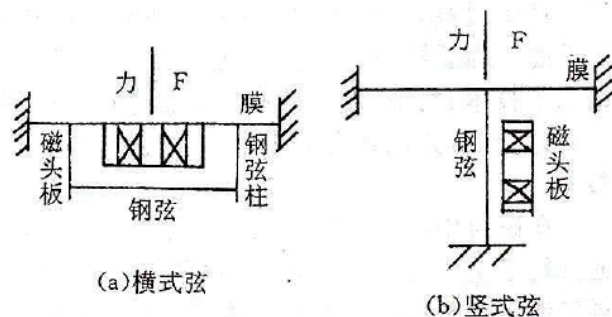


图1 自激振弦传感器的结构形式

其工作原理如图2所示:钢弦的微小振动在

邓铁六 山东科技大学洛赛尔传感技术有限公司 总工程师 教授
 栾兆群 山东科技大学洛赛尔传感技术有限公司 主任
 王清标 山东科技大学洛赛尔传感技术有限公司 副总经理
 马俊亭 山东科技大学洛赛尔传感技术有限公司 高级工程师

感应磁头线圈里产生电动势,输出电压经激发电路放大后形成脉冲,回输给激发磁头线圈,产生脉冲力作用于钢弦,若接线正确为正反馈且反馈系数大于1,则钢弦的振动不断加强,直至输出电压被电源限幅为止。这时,激发电路将输出与弦振动同频率的电信号(一般为矩形波)。实验标定输出频率 f 与所受外力 F 的对应关系,应用时测 f 可反推力 F 的值。

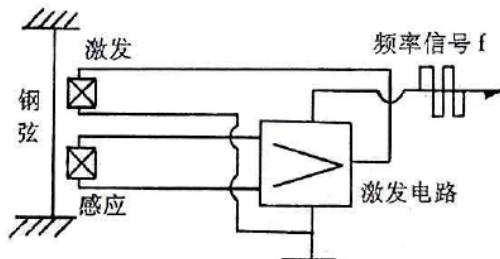


图2 自激激发原理示意图

3 高增益弱激发电路

由上述可知,振弦式传感器必须有激发电路的频率计与之配套使用。人们发现:不同激发电路对同一传感器获得的频率并不相同,接长电缆也会使激发频率降低。为使配套仪表有良好的互换性,且不受长电缆的影响,必须解决激发频率的不一致问题。

振弦的振型如图3,对应频率

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \quad (1)$$

式中: L ——弦长

ρ ——弦密度

σ ——弦拉应力

$n=1,2,3,\dots$ 振型的波腹数, $n=1$ 为基频, $n=2$ 为倍频,其余依此类推。

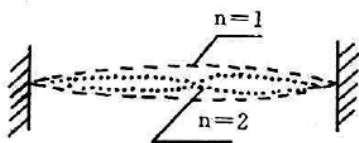


图3 振弦的振型

假若设计的激发电路实现了单向弱激发,使弦只在某一方向作基频振动,则传感器的输出频率应为

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \quad (2)$$

在外力 F 不变时 σ 不变, f 应稳定不变,不随激发电路的不同以及电缆长短而变,激发频率有良好的 consistency。按此设计的高增益弱激发电路框图如图4所示。10只激发电路先后对同一传感器,测试频率相差 $\leq 0.2\text{Hz}$;100m屏蔽电缆、500m双绞线与1m电缆频差 $\leq 0.2\text{Hz}$ 。传感器的满量程输出不低于500Hz,故产生的误差不大于0.04%FS,对于准确度为1%FS、0.5%FS的一般传感器,此误差可忽略不计。解决了频率不一致问题。

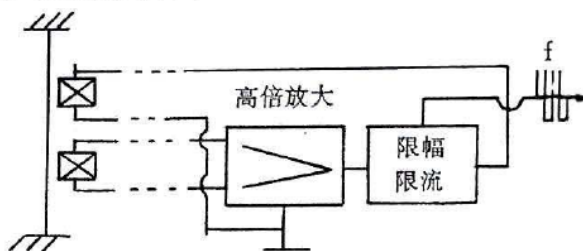


图4 高增益弱激发电路原理框图

4 振弦传感器的数学模型

根据(2)式,再假设:传感器工作膜在满量程工作时,仅产生微小变形,则弦增加的应力 $\Delta\sigma = \sigma - \sigma_0$ 将与膜受的外力 F 成正比:

$$\Delta\sigma = kF \quad (3)$$

式中 k 为由传感器结构决定的比例常数。

注意到 $f_0 = \sqrt{\sigma_0 / 2L} \sqrt{\rho}$ 为 $F=0$ 时的频率(称为初频),可得

$$F = A(f^2 - f_0^2) \quad (4)$$

式中: $A = 4L^2\rho/k$ 为传感器常数。

(4)式即国际上公认的振弦传感器数学模型,以上推导由作者给出,主要在于说明其适用条件及 A 为常数。该式缺 f 的一次方项,只能描写特殊的二次抛物线,对多数振弦传感器拟合误差偏大(达百分之几)不能使用,为提高拟合的准确度,在肯定 A 为常数的前提下,将(4)式修正如下:

$$F = A(f^2 - f_0^2) + B(f - f_0) \quad (5)$$

式中: A 、 B 为传感器常数。

(5)式应能描写任意的二次抛物线。

对于老化达到稳定的振弦式传感器,用(5)式由标定数据最小二乘拟合求 A 、 B ,拟合误差大为减小,好的传感器误差可小于0.1%FS,因此可用它来检验传感器的设计是否合理,并确定传感器的准确度等级。以电脑为核心的二次仪表,用(5)式作数学模型可方便准确地直接显示被测物理量

的值,在仅由温度变化引起初频漂移时,可用现场温度平衡后的初频代替标定时的初频(代替 f_0),仍能获得比较准确的结果,为振弦式仪器的推广应用铺平了道路。

为了能方便快速地用微机计算A、B及确定传感器的准确度,求出了基本公式,编写了相应应用程序。用最小二乘法拟合求A、B的基本公式为:

$$A = \frac{TU - SW}{RU - S^2}, B = \frac{RW - ST}{RU - S^2} \quad (6a)$$

$$\left. \begin{aligned} R &= \sum_{i=1}^N (f_i^2 - f_0^2)^2, S = \sum_{i=1}^N (f_i^2 - f_0^2)(f_i - f_0) \\ U &= \sum_{i=1}^N (f_i - f_0)^2, T = \sum_{i=1}^N F_i(f_i^2 - f_0^2), \\ W &= \sum_{i=1}^N F_i(f_i - f_0) \end{aligned} \right\} \quad (6b)$$

式中:N——校准点数。

5 高压液体压力传感器的结构设计

一般厂家采用的竖弦液压传感器结构如图5,新设计与其主要的不同在以下几点:

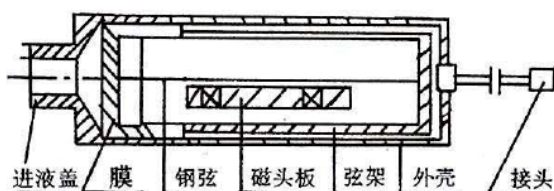


图5 一般的竖弦液压传感器结构

(1)为避免膜受力过大,不采用传统的直接测量,而是在进液盖内加小直径活塞传压(液体不接触工作膜)使高压满量程测量时膜受力小,挠度很小。经充分老化的膜,在长期满量程承载及频繁加载的情况下,有良好的长期稳定性。其突出表现是重复性好,不重复度很小。

(2)采用活动工作膜,中心设厚台,减小中心部位应力,厚台处整体变位,变形规范,并便于选用优质合金钢严格热处理,按(5)、(6)式精选分级;

(3)活动膜与装弦架胶粘成一体,与外壳为两体,两者松结合。外壳受震动、碰撞、冷热等作用发生的一般变形,不影响传感器初频,不改变其性能;

(4)钢弦选用优质不锈钢丝,磁头线圈用胶封,传感器各结合部均密封,加上振弦工作时不怕

潮,传感器寿命长达10~20年以上。

(5)采用温度补偿技术,温度稳定性良好。

07#液体压力传感器的主要性能指标如下:

量 程:60MPa

滞 后:0.76%FS

不重复度:0.1%FS

进程误差:0.24%FS

综合误差:0.42%FS

温度系数*:0.08%FS/℃(未进行温度补偿)

2001年3月中旬研究成功温度补偿,可使传感器的温度系数减小到0.01%FS/℃,即在20℃标定后,温度变化50℃(-30~70℃),传感器的误差仅改变0.5%FS。

6 锚索测力传感器的结构设计

由于载荷达到1000kN以上,若采用传统的直接测量法,材料应力很大,长期承载易产生蠕变,导致零点和灵敏度漂移,致使质量差、体积大,不易热处理,难以保证性能优良。因此仍采用间接测量,设计了有中孔的液压转换油缸与高压液体压力传感器组合而成,其外观如图6。

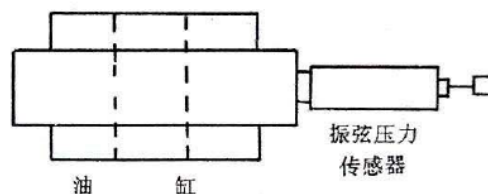


图6 MGH型锚索测力传感器外观图

油缸的设计对性能影响很大,钢板焊接法虽不需考虑密封问题,但准确度、重复性、稳定性等综合性能差,不拟采用。活塞与缸体组成液压转换式测力油缸,已在单体液压支柱载荷检测中使用了约5000个,有丰富实践经验,既能保证密封,又能保证优良的综合性能,因此这种方案可能是最佳方案。设计中特别注意了以下问题:

(1)为延长使用寿命,采用两道密封圈,第一道损坏后,第二道开始工作;

(2)增加活塞高度,提高缸体和活塞的硬度与配合精度,以提高抗偏载能力,减小偏载误差;

(3)选择优良介质,粘稠易密封,又起润滑作用,工作温度-40~80℃;

(4)设计了可事先调整的最大压缩量1~5mm

(下转第40页)

序张拉,板张拉顺序按顺时针方向进行张拉。对于两端张拉的预应力筋,采用两套设备在两端同时张拉。在裙楼预应力梁中有部分梁面张拉端和在塔楼中因遇到脚手架在水平或垂直方向与预应力筋发生交错而无法张拉的张拉端采用变角张拉。

预应力张拉控制应力: $\sigma_{con}=0.70f_{pk}$ 。

张拉程序:0荷载→初应力(10% σ_{con} ,量测伸长初值)→张拉控制荷载(100% σ_{con} ,量测伸长终值,并核对张拉力与伸长值)→锚固锁定。

张拉过程中以应力控制为主,通过油表读数及预应力筋的伸长值测量,对预应力筋张拉实行双控管理。实际预应力筋伸长值与计算伸长值偏

(上接第44页)万一密封失效发生泄漏,最多只能压缩5mm,对锚索拉力影响不大。

第一批制造10台,做了一系列试验、改进,最后性能都达到要求。配套构成锚索测力传感器后,主要性能取决于高压液体压力传感器。

05"、07"锚索测力传感器的参数已在前言中作了介绍,不重复度优于0.1%FS、进程误差为0.3%FS左右、滞后小,充分说明其性能优良。根据过去的经验这种传感器的使用寿命主要取决于密封圈,可达10年左右。

7 传感器的老化筛选

老化筛选对传感器的质量保证起着重要作用,即使设计合理,未经老化筛选仍然是不可靠的,特别是长期埋设使用的传感器,必须使其可能发生的漂移(由形变引起)在老化阶段充分完成,达到良好的重复性后方能使用。老化筛选一般采用:(1)振动老化,(2)冷热老化,(3)加载老化三种基本方式互相组合进行,最后由加载老化后传感器的不重复度来判定传感器是否达到了稳定,然后进行标定,求出主要参数进行分档出厂。

8 配套二次仪表

最常用的配套仪表为GSJ-2型多功能电脑检测仪,1990年由煤炭部鉴定后推广使用。它由内部可充电电池供电,属安全防爆型产品,内有弱激发电路,可用来测频率标定振弦传感器;也可直接显示待测物理量的值(需事先将该传感器的常

差应在-5%~+10%的范围内,若超出其规定的范围时,应停止张拉,查明原因,方可继续施工。

六、结语

无粘结预应力结构的运用推广已有多,本工程很好地把无粘结预应力运用在裙楼的大跨度框架和塔楼的大平板中,充分发挥了预应力的施工技术先进、施工方便、速度快、结构安全可靠、改善建筑物使用功能的特点,很好地适应了高层建筑扩大开间,扩大柱网和降低建筑层高、增加建筑层数的要求,展示了无粘结预应力混凝土结构广阔的发展前景。

数A、B、f。按键存入)。使用时,电脑测出频率f后,即按(5)式计算出力F进行显示,约0.5秒刷新一次。每台GSJ-2最多可输入24只传感器的常数,显示的测量数据还可按键存入0、1、2……9共10个区总共500个数据。GSJ-2A还有接口可将存贮的测量数据输入微机进行处理。由于GSJ-2使用E²ROM,这些常数和测量数据可长期保存,不会丢失。

根据工程需要,现正制作简化的普及型GSJ检测仪或称显示器,具有以下功能:(1)按键测频,可用来标定传感器及进行调零;(2)事先插片(集成电路存贮器)输入某传感器的A、B、f。可与该传感器1对1配套使用,直接显示物理量值。

这种1对1显示的普及型产品,使用简便,适合工程现场工人使用。

配套二次仪表的基本技术参数如下:

测频误差:≤0.2Hz

分辨力:≤0.1Hz

与传感器配套测量:准确度与传感器相同。

分辨力:1kN、0.01MPa,可更小。

加接电器:屏蔽电缆100m、双绞线500m或更长。

9 结束语

作者为许多煤矿研制了大量程振弦式传感器、智能二次仪表和监测系统,获得推广应用,并已于2000年把成熟的技术应用于锚索测力计的研制,这种新产品将对预应力行业的监测有所帮助。