

数字式智能化锚索预应力传感器的研究与设计

胡时友, 王全成, 姜昭群

(中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 610081)

摘 要: 预应力传感器是锚固工程、预应力混凝土工程、预应力桥梁工程等领域进行监测、研究与试验必不可少的测量用传感器。在分析预应力传感器研究现状的基础上, 详细介绍了数字式智能化锚索预应力传感器的工作原理、结构设计、计量检定结果、主要特点和应用情况。

关键词: 数字式; 智能化; 锚索; 预应力; 传感器

中图分类号: U417.1+16 文献标识码: A 文章编号: 1000-3746(2001)02-0030-04

Study and Design of the Digital Intelligent Cable Pre-stress Sensor/HU Shi-you, WANG Quan-cheng, JIANG Zhao-qun (Institute of Mining Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 610081, China)

Abstract: The pre-stress sensor is necessary for measurement in monitoring, research and test in the construction of anchors, pre-stress concrete and pre-stress bridges. Based on the present research on pre-stress sensors, the operating principle, structural design, calibration results, main features and usage of the digital intelligent anchor cable pre-stress sensor were described in details.

Key words: digital; intelligent; anchor cable; pre-stress; sensor

预应力传感器是预应力锚固工程、预应力混凝土工程、预应力桥梁工程等领域进行预应力监测、研究与试验必不可少的测量用传感器。我国地质灾害防治工程和岩土工程领域广泛使用预应力锚索, 锚索在施加预应力后, 由于地质、地下水、地震等自然因素和杆体材料的蠕变、锚具的效率损失、爆破振动等人为因素的影响, 在相当长的一段时间内, 其锁定预应力必然会发生变化, 变化严重时甚至会导致整个工程的失败。因此, 各国标准都规定, 必须对预应力进行长期监测。由此可见, 传感器性能的好坏将直接影响测量的精度。

1 预应力传感器的研究现状

现有锚索测力传感器从结构形式上可分为3种类型, 即圆筒式、轮辐式和液压式; 从敏感元件上又可分为电阻应变计式、差动电阻应变计式和钢弦式等几种类型。电阻应变式传感器是将应变计直接粘贴在弹性体上, 具有测试精度高、结构简单、成本低的特点, 因此在实验测试、科学研究和称重领域得到了广泛采用, 但它也普遍存在着零漂和动漂较大的问题。差动电阻式测力传感器的一般结构是, 在沿圆筒轴线方向对称布置3~4只差动电阻式应变计,

当圆筒受力发生变形时, 差动电阻应变计的电阻比随之改变, 用比例电桥仪就可测出该电阻比, 电阻比的变化量又与圆筒应变成正比。这种传感器受环境温度影响较大, 测试精度也偏低。应变式和差动电阻式由于输出是模拟信号, 信号的大小都在毫伏级别, 因此, 不能进行信号的远距离传输, 不能满足边坡、桥梁等远距离监测的要求。钢弦频率式传感器由于其结构简单、零点稳定、信号传送距离较远等优点, 因而在岩土工程领域得到了较广泛的应用, 近几年来也在锚索测力上得到了推广。

根据传感器的类型不同, 使用的二次仪表主要有静态和动态电阻应变仪、比例电桥仪和钢弦频率测定仪, 这些都是通用仪表, 不能直接读出锚索的预应力值, 而要通过标定曲线, 各种修正和计算才能得到锚索荷载, 不能进行连续自动监测与记录。

综上所述可见, 国内的锚索预应力传感器存在如下几方面的不足, 尚需进一步改进:

(1) 信号不能远距离传输。电阻应变式和差动电阻式传感器的电信号一般都在微伏至毫伏级之间, 随着传输距离的增加, 噪声与干扰增大, 灵敏度显著降低, 一般使用距离在几米至十几米之间, 若采用恒流源技术, 传输距离可适当加长。这类传感器

收稿日期: 2000-09-26

基金项目: “地矿部百名跨世纪科技人才培养计划”资助项目的研究内容之一(9603)

作者简介: 胡时友(1964-), 男(汉族), 重庆合川人, 中国地质科学院探矿工艺研究所副所长, 教授级高级工程师, 探矿工程专业, 硕士, 从事岩土加固、围岩监测和地质灾害防治技术的科研与开发工作, 四川省成都市一环路北二段一号, (028)3177204, gys@mail.sc.cninfo.net。

万方数据

必须将现场使用的引线和传感器连接后同时进行标定,否则,如果引线型号或长度在现场使用时发生改变,就会引起阻抗变化,必将导致测量结果不准,给现场使用带来极大的不便。钢弦式传感器为交流频率信号,输出电压波形幅值有失真或衰减,对测量结果影响较小,因此传输距离较远,国内的钢弦式传感器传送距离已达 300 m,国外已有传送距离达 3000 m 的钢弦式传感器。地质灾害边坡监测一般都要求在远离危险区以外进行,因此,要求预应力锚索传感器传输距离要尽量远一些。

(2)传感器防潮、防水、防雷电、抗干扰性能差,不能完全适应地质灾害野外长期工作的恶劣环境,大多数传感器在装上之后 2~3 年内就失效了,没有达到长期监测的目的。

2 数字式智能化锚索预应力传感器的设计

锚索预应力传感器的设计指导思想概括起来有 4 点:(1)良好的自然线性;(2)较高的输出灵敏度;(3)抗侧向能力强,结构简单,易于加工和密封;(4)长期稳定性好,能够适应野外长期监测的恶劣环境。

2.1 弹性体材料的选择与热处理

弹性体常用材料有铬镍铜、铬锰硅合金钢、铝合金、钛合金等(见表 1)。对于锚索预应力传感器,主要考虑要有较高的机械强度和弹性极限,经过对比,最后选用了来源广泛、价格低廉的 40Cr 钢材,为了使之有稳定的弹性和低的蠕变,要求热处理后的硬度达到 HRC40~HRC45,并进行一定的时效处理,以提高传感器的重复性精度。

表 1 弹性体常用材料

材料牌号	弹性模量		线膨胀系数 $\beta/(10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	强度极限 σ_b/GPa	屈服极限 σ_s/GPa	弹性模量温度系数 $B_E/(10^{-4} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	备注
	E/GPa	G/GPa					
40Cr	218		11	1.0	0.8	-3	用于一般传感器
35CrMnSi2A	200		11	1.65	1.3	-3	用于高精度传感器
60Si2MnA	200	8.7	11.5	1.6	1.4		用于小厚度平面弹性元件,疲劳极限高
50CrVA	212	8.3	11.3	1.3	1.1		用于承受交变荷载的弹性元件
30CrMnSiA	210			1.08	0.834		
40CrNiMoA	210			1.08	0.932		

2.2 弹性体结构型式的选择及其设计

锚索预应力传感器要求中间是空心的,有 3 种结构型式可供选择,各自的优缺点见表 2 所示。尽管圆筒式结构是一种最经典的并具有明显优点和明显缺点的结构,但我们认为,由于现代电子技术的飞速发展,其输出灵敏度低的缺点可以克服,本次仍然选用了圆筒式结构。

表 2 预应力传感器 3 种结构对比

型式	主要优点	主要缺点
圆筒式	结构简单、紧凑、易于加工,在相同体积下可承受较大的应力,故被广泛应用于大、中量程(10~5 MN)的传感器	为了保持应变工作区的均匀,高度较大;由于泊松效应的影响,应力越高,非线性越大,因而输出灵敏度低;抗侧向能力差
轮辐式	优良的自然线性,精度高;外形低,抗侧向载荷和偏心载荷能力强	结构最复杂,加工难度最大
板环式	弹性体为整体结构,受力状态稳定,温度均匀性好,输出灵敏度高,传感器高度低,抗侧向载荷和偏心载荷能力强	结构较复杂,加工难度较大

如图 1 所示,弹性体外径为 D ,内径为 d ,在锚索预应力 F 的作用下,经受力分析得出:

$$D = \sqrt{d^2 + 4F/(\pi E \epsilon)}$$

万方数据

式中: ϵ ——弹性体的应变; E ——弹性体的弹性模量。

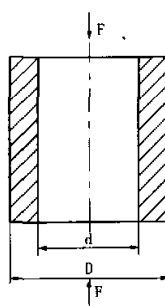


图 1 传感器受力分析

根据锚具的结构尺寸,初选弹性体的内径 d ,在最大负载时应变值应在 $(8 \sim 12) \times 10^{-4} \epsilon$ 之间,传感器允许过载 20%,在额定载荷时取应变为 $9 \times 10^{-4} \epsilon$,40Cr 钢材弹性模量为 218 GPa,代入上式计算就可得出弹性体的外径 D 。弹性体高度 H 的确定,主要是要充分考虑到弹性体在锚索预应力作用下,使应变计工作区域的应变场具有足够的均匀性,也就是 H 至少要比 D 大,根据传感器内藏电路的空间要求,考虑上述应变均匀的需要来选取传感器高度 H 的值。根据不同锚具大小设计出的弹性体的结构参数见表 3 所示。

2.3 应变计的选择、组桥与补偿

用于传感器上的应变计应该具有应变与电阻变化线性好,灵敏度系数大而分散小,通常选阻值 $\geq 350 \Omega$,有足够的疲劳寿命,零漂、蠕变、滞后小的特点,据此选择阻值为 350 Ω 的箔式应变计。因传感

表3 数字式锚索预应力传感器弹性体参数

型号	内径 d / mm	外径 D / mm	高度 H / mm	适用锚 具型号
BHR/1000A	85	117	170	$\emptyset 15-4$ $\emptyset 15-5$
BHR/1000B	96	125	170	$\emptyset 15-6$ $\emptyset 15-7$
BHR/1500	115	150	180	$\emptyset 15-8$ $\emptyset 15-9$
BHR/2000	132	174	220	$\emptyset 15-10$ $\emptyset 15-11$ $\emptyset 15-12$
BHR/3000	165	216	260	$\emptyset 15-15$ $\emptyset 15-17$ $\emptyset 15-19$

器外形尺寸较大,为了消除受力不均的影响,采用了8片应变计对称布置,组成全桥的方案,如图2所示。其指示应变 ϵ 为:

$$\epsilon = 2(1 + \mu) F / (EA)$$

式中: μ ——弹性元件的泊松比; A ——圆筒的截面积。

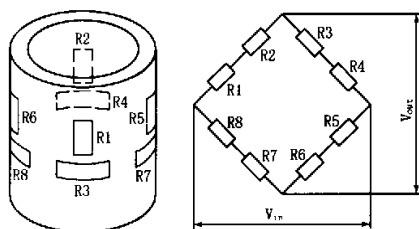


图2 弹性体贴片与组桥方案

要保持传感器长期稳定、精确地工作,需要进行电路补偿,如初始不平衡补偿、温度补偿、非线性补偿和输出灵敏系数调整等。在应变计测量电桥中,满足 $(R1 + R2) \times (R5 + R6) = (R3 + R4) \times (R7 + R8)$ 时电桥才会平衡,但各桥臂中的应变计的电阻总会有一定的偏差,为使电桥平衡,可在桥路中串联电阻进行补偿,对串联电阻材料的要求是电阻率、电阻温度系数和应变灵敏系数都要低。对桥路进行了零点和温度补偿,温度补偿最大达 80°C ,因此,传感器可保证在 $-10 \sim 55^\circ\text{C}$ 的环境温度范围内正常使用。

2.4 结构设计与密封

在结构设计上显然首先要考虑的是贯彻简单实用的原则,因为对任何制造者都欢迎最简单的结构形式,这样可以简化加工工艺、降低成本;其次结构要有很好的刚性,减少外界振动的干扰;第三,整个传感器应尽量是一个整体,避免组合结构形式,因为诸如紧固松动、焊接变形、滑动位移等因素的存在,万方数据

都可能对传感器的重复性、可靠性带来潜在影响。另外,锚索预应力传感器长期处在野外日晒夜露、经受风霜雪雨的恶劣环境中,其密封、防潮性能和防腐蚀性能的好坏将直接影响到传感器的使用寿命。鉴于此,传感器外壳仍采用圆筒结构,与弹性体用螺钉连接,在密封上,所有接触面都采用了耐油 O 形密封圈,螺孔内涂密封胶,信号插座也选用了密封插座。

采取上述措施后,较好地解决了传感器的电气防水、防潮问题;除了信号插座盖有螺钉外,其余螺钉都在传感器内部,可防止无关人员对安装在野外的传感器的拆卸破坏。传感器结构如图3所示。

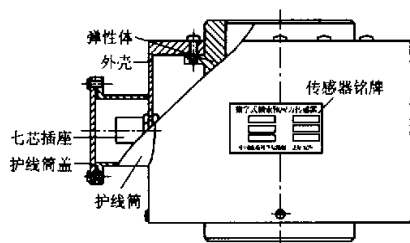


图3 数字式锚索预应力传感器结构图

2.5 数字式智能化电路设计

在传感器内设计了一套电子线路,由信号放大、A/D 转换器、单片机和数据发射与接收电路组成。传感器的电信号经 A/D 转换后可以通过适配器进入计算机,每个传感器都是由单片机构成的智能化测量单元,具有数据采集、模-数转换、数据发送等功能,同时可以接受计算机对其发送的控制指令。计算机的 RS232C 串口 TDX 端通过驱动器和光电隔离器进入单片机的数据接收端 RXD。同样单片机的数据发射端 TXD 通过光电隔离器件后才能进入计算机的 RXD 端。由光电隔离器件实行电流环的数据传输形式,从而既解决了数据远距离传输问题,又实现了计算机与传感器之间的隔离,提高了抗干扰能力。传感器和适配器之间采用六芯屏蔽电缆连接,其中有发射和接收数据线各 1 对,电源线 1 对。传输距离的远近,会导致导线电阻和分布电容的变化,但对测量结果没有影响。

3 传感器的计量检定与应用

数字式锚索预应力传感器交由具有法定计量检测资格的中国测试技术研究院进行计量检定,显示仪表用笔记本电脑,同时也用 BMS-1 型锚索预应力测量仪进行了对比显示实验,加力设备是 HJII -

100 型 1000 kN 二等标准测力机,测力机为机械杠杆式,砝码加载,其计量检定数据如表 4 所示。从表中可以看出,除 10、16、18 号稍差外,其余的非线性

误差都在 0.3%~0.5%FS 以内,完全能够满足对锚索监测试验的精度要求,说明数字式智能化传感器结构设计和内藏式电子线路设计都是合理的。

表 4 数字式智能化锚索预应力传感器计量检定数据

传感器号	加载/kN									精度等级 /%FS	
	0	100	200	300	400	500	600	800	900		1000
	MS-1 测量系统显示值/kN										
00-02	-0.4	99.3	199.2	299.4	399.5	499.5	599.8	799.2	899.3		0.3
00-03	-0.1	95	195	295	395	497	599	802	904		0.5
00-04	0.8	97.5	196.5	296.5	398	500	601	804		1005	0.5
00-05	0.3	99.4	199.3	299.7	400.5	500.6	601	801.6		999.6	0.3
00-06	0	96	195	295	395	496	599	804		1005	0.5
00-07	-0.1	96	195	295	395	497	599	803	905		0.5
00-08	0	97	197	297	398	499	600	803		1003	0.3
00-09	-0.1	98.5	199	299.5	400	500.5	601	801	901		0.3
00-10	0	94	192	292	394	495	598	801		1006	1.0
00-11	0	95	195	295	396	498	599	802		1005	0.5
00-12	-0.5	101	201.4	301.5	401.5	501	601	799.5	899		0.3
00-13	0	97	195	295	395	497	599	802		1004	0.5
00-14	-0.2	96	196	296	397	498	600	809	902		0.5
00-15	-0.1	96	195	295	396	498	600	803		1005	0.5
00-16	-0.1	109	210	308	405	501	598	791	887		2.0
00-17	-0.1	103	203	302	400	500	598	796	895		0.5
00-18	-0.1	106	206	304	402	500	598	794		991	1.0

数字式锚索预应力传感器及其测量系统研究成功并取得了计量检定证书之后,受到了与地质灾害有关的建设单位和大学的关注,其中广安—重庆高速公路广安—邻水段 7、8、9 号高边坡治理工程共使用了 1000 kN 数字式锚索预应力传感器 15 个,用于锚索预应力的长期监测;有关大学也购买了预应力传感器、锚索位移传感器和与之配套的显示仪表,用于锚索的各种性能试验测试。

4 结论

(1)应变传感器及其内藏信号放大、A/D 转换和数据发射与接收电路构成的数字式智能化传感器的一种设计方案,测量结果不受导线长短的影响,传感器数字信号通过适配器可以进入计算机,组成

多路自动监测报警系统。传感器互换性好。适合锚索、桥梁、预应力结构工程、桩基工程等预应力的长期监测和各种试验测试。

(2)室内试验、计量检定和野外长期监测使用表明,数字式智能化锚索预应力传感器设计合理,能适应野外温差大、环境恶劣的条件,具有精度高、防水、防潮、抗干扰性能好的优点。

参考文献:

[1] 中国岩土锚固工程协会.岩土锚固工程技术[M].北京:人民交通出版社,1996.
[2] 徐灏,等.机械设计手册[M].北京:机械工业出版社,1991.
[3] 马良呈,等.应变电测与传感技术[M].北京:中国计量出版社,1993.