

钢弦式振弦测力称重技术最新进展

邓铁六¹ 金辉² 吕国良²

(1 山东科技大学 2 北京高登衡器有限公司)

【摘要】岩土工程界广泛应用的钢弦式振弦传感技术，由于所用数学模型的限制，很少能做到综合误差 0.1%FS，不能用于称重计量。山东科大邓教授在解决实际问题的过程中，从改进数学模型入手，建立并完善了《邓氏实用振弦传感技术》，成功应用于制造单体液压支柱密封质量检测仪、箕斗煤量称重仪、大量程锚索测力仪以及动态汽车称重仪等。在大量程高准确度与动态称重两个方面有所突破，力-液压转换式测力称重技术获多项专利。2017 年，北京高登衡器公司与邓教授合作进行称重传感器产业化技术攻关取得成功：竖式振弦压力传感器综合误差达到 0.03%FS，温度系数 $\leq 0.05\text{Hz}/^\circ\text{C}$ ，称重传感器结构尺寸、处理工艺和测试方法基本定型，可以进行产业化，以发挥该技术特有的某些优势。

【关键词】钢弦传感器；振弦传感技术；测力；称重

一、邓氏实用振弦传感技术基础

该技术从提高振弦传感器标定曲线拟合公式（数学模型）的准确度入手，提出特殊二次抛物线模型（邓模型），打开进入高准确度的大门；然后解决钢弦激发电路的可靠性和一致性问题，设计了带通滤波双线圈四线制钢弦激发电路，并提出“弱激发原理”，大大提高激发可靠性和输出频率的稳定性、一致性，显著提高了分辨率，为达到高准确度扫清了道路；采用单片机多周期法快速精确测量频率，为达到高准确度和进行低频动态测量准备好得力工具；与此相适应研制成功多种智能检测仪器。有了这个基础，配置活塞式压力校验仪和液压式测力机，即可顺利地对各种双线圈钢弦式振弦传感器进行试验研究，从小量程低准确度开始，经历 40 年逐步发展到大量程、低温度系数、高准确度以及低频动态领域。

1. 振弦传感器通用精确数学模型（简称邓模型）

公知的数学模型是：

$$W=K(f^2-f_0^2) \quad (1)$$

式中 f_0 为 $W=0$ 时的输出频率，称初频或零频； f 为 W 对应频率， K 为传感器常数。由于拟合公式缺 f 一次方项，不能准确拟合任意二次抛物线，故拟合误差较大，岩土工程国标规定综合误差 $\leq 2.5\%FS$ 为合格。为了突破数学模型的限制、使综合误差大幅下降，1980 年提出邓模型：

$$W=A(f^2-f_0^2)-B(f-f_0) \quad (2)$$

开初用三点无误差法求 A、B 常数，随后开发了最小二乘法求 A、B 常数的软件。

经实际应用深入研究证明，式(2)是同时兼具以下三个特征的最简模型：(1)拟合准确，较式(1)误差减小 60% 以上；(2)具有调零去皮功能，适用于衡器；(3)当传感器温度系数小时，在一定温度范围内，衡器调零后称量即准确，即式(2)隐含有一定的零点温漂修正功能。因此，若能将称重传感器的温度系数做到 0.05Hz/°C，则在 -10°C ~ +40°C 范围，衡器调零后称重即准确，不需另加温度补偿软硬件。

2. 带通滤波双线圈四线制钢弦激发电路（发明专利号 CN201410075828.3）和“弱激发原理”。配套采用铝磁头板，铁氧体磁环，激发线圈电阻 6 ~ 8Ω，感应线圈电阻 ≥ 40Ω，选 Φ0.2 的 65Mn 琴钢丝作振弦，将功放级激发电流调小到“弱激发”状态。可做到四芯双绞电缆至少 100m 能可靠激发，输出频率波动 < 0.1Hz，100m 电缆对频率影响 < 0.1Hz，各激发电路输出频率之差 < 0.1Hz。其原因是：“弱激发”时，钢弦只产生基频振动，无倍频成份，基频由弦的长度、密度和拉应力决定，是一个确定的数值，与激发电路的具体结构、器件参数和电缆长短无关。

3. 单片机多周期快速精确测频电路

电子技术快速发展、单片机广泛应用，刷新了测频技术，给振弦技术的发展带来了春天。

因频率 f 与周期 T 互为倒数： $f=1/T$ 。用单片机的一个计数器计数待测频率 f_x 的 m 个周期，经历时间 m/f_x ，用另一个计数器计数单片机同时段中的机器周期数 N ，有

$$m/f_x = N/f_r \quad (3-1)$$

式中 f_r 为机器工作频率，故有：

$$f_x = mf_r \tau / N \quad (3-2)$$

由于单片机机器频率 f_r 等于晶振频率 f_c 的 1/12：

$$f_x = mf_c / 12N \quad (3-3)$$

可求得测频误差为：

$$\Delta f_x = \pm \frac{12f_x^2}{mf_c} \quad (3-4)$$

静态测量，常用单片机晶振 $f_c=11.0592 \times 10^6$ Hz；对于传感器频率 $f_x=2500 \sim 3000$ Hz，测 $m=512$ 个周期，用时仅需 0.2s，测频误差 $\Delta f_x \leq 0.019$ Hz。

再如动态测量，用另一个计数器直接对晶振计数；采样频率 400Hz，对 $f_x=3000$ Hz， $m=7.5$ ，测频误差 $\Delta f_x \leq 0.108$ Hz。

可见，单片机多周期测频方法简单，用时少，精度高，动静态测量均能满足需求。这在没有单片机的时代是不可能做到的。

二、力 - 液压转换式振弦测力称重仪

1. DK-2A 型单体液压支柱密封质量检测仪

1989 年，试验发现，煤矿用外注式单体液压支柱由于所用乳化液含有大量细微气泡，检修后的支柱，做保压试验时，密封较好的可用支柱与明显渗漏不能用支柱一样也有压降，但降压曲线不同。经实测研究，并由煤炭部有关部门召开会议研讨，建议以 30min 压降 $\leq 20\%$ 为支柱合格可用的规范。应用微机控制 15 点巡测仪，同时对 15 棵支柱测降压曲线，发现用横式弦钢弦测力传感器测不准，原因是传感器安放在支柱四爪与钢架顶梁之间，顶梁宽度 $<$ 传感器直径，在顶梁上焊 20mm 厚钢盘，测压力仍然测不准，测得压力值与传感器放置方位有关。为适应此情况，设计了活塞 - 油缸与竖弦压力传感器组成的测力传感器，彻底解决了问题。采用 DK-2A 型单体液压支柱密封质量检测仪自动检测、打印结果，不仅比人工检测缩短时间 8 倍以上，而且节约大量人力，支柱密封质量更有保证，深受煤矿和支柱生产厂家欢迎，被选入“煤炭部 100 推”，一直用到现在还在使用。

这种力 - 液压转换式振弦测力传感器，结构如图 1 所示，活塞 3 置油缸 1 中，使用 O 型橡胶密封圈 4 密封，并以黄油 2 作传压“液体”。先将待测力转换成油压，再用振弦压力传感器 5 测压，使用时整体标定，用邓模型拟合，进程误差 $\leq 1.5\%FS$ （含标定压力机误差 $1\%FS$ ），符合煤炭部要求。

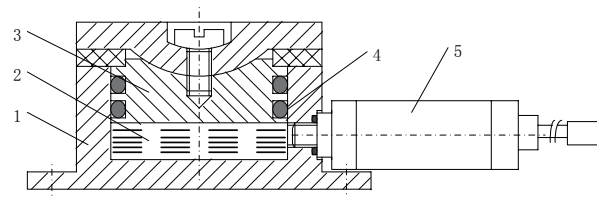


图 1 力 - 液压转换式振弦测力传感器结构图

测支柱保压性能时，传感器安装如图 2，在钢梁 1 上焊有圆垫板 2，传感器 3 安装在垫板 2 与支柱 4 的四爪之间。

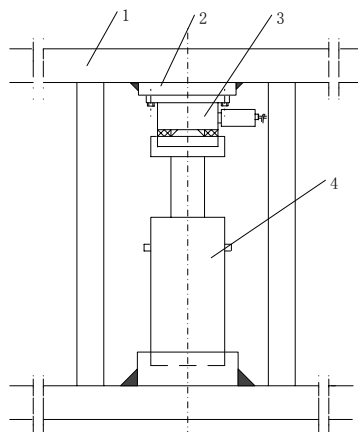


图 2 测支柱保压性能传感器安装图

2.MGH 型振弦锚索测力仪

2000 年，广西柳州建筑机械总厂（今柳州欧维姆机械股份有限公司）联系邓教授，述说外国公司的多弦锚索测力计，有偏载时各弦应变差别偏大，由平均值计算锚索张力难以令人信服；国产钢板焊接有中心孔的油压缸和振弦压力传感器组成的锚索测力传感器，重复性不好、准确度低，易损坏。邓教授和夫人马工于是参考图 1，为他们设计了有中心通孔的活塞 - 油缸和振弦压力传感器组成的锚索测力传感器，如图 3：

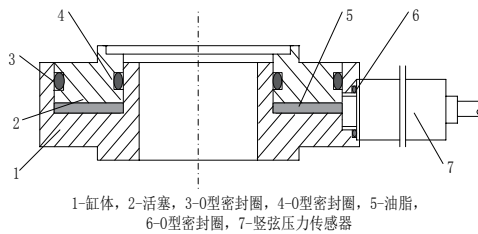


图 3 锚索测力传感器结构图



图 4 GSJ-2 检测仪

最早做的是额定载荷 1000kN 的两台，配用图 4 GSJ-2 型钢弦电脑检测仪，空载测频调零后，可准确显示所承受的力值。经山东省计量院标定，05 号：重复性 0.05%FS，进程误差 0.32%FS，滞后 2.22%FS，综合误差 1.22%FS；07 号：重复性 0.09%FS，进程误差 0.24%FS，滞后 0.73%FS，综合误差 0.49%FS。后又制作了两台 5000kN 的，经北京计量院标定，96 号：重复性 0.01%FS，进程误差 0.10%FS；75 号：重复性 0.01%FS，进程误差 0.06%FS。可见重复性良好，准确度高，开始进入大量程高准确度范畴。经该公司推荐，上海建筑科学研究院相关负责人来到山科大校办工厂，订购了一批锚索测力仪。其中两套 4000kN 的，经北京计量院标定，进程误差分别为 0.05%FS、0.08%FS，传力用了球面盖，能很好适应偏载。安装在实验室，用于上海磁悬浮列车轨道梁后加预应力设备的标定，中国德国监理认可；其他多套用于轨道梁施工现场。这些锚索测力仪发挥了相当重要的作用。

这时，提高竖式振弦压力传感器准确度主要采用活塞传压技术，见图 5：

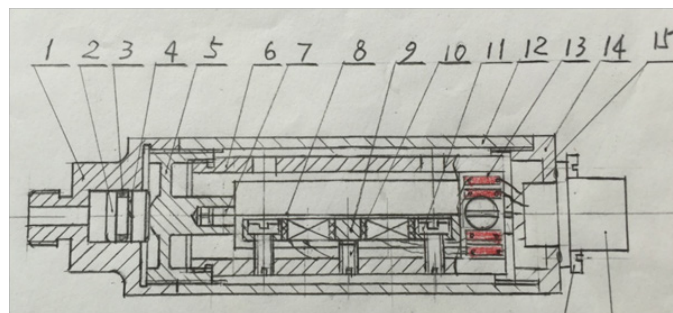


图 5 活塞传压结构原理图

高压液体(40 ~ 60MPa)进入引液接头1, 由活塞2转化为推力, 垂直作用于工作膜5的凸球面上, 膜5与弦架6之间安装有不锈钢弦8, 其固有振动基频 f 随压力 P 的增大而减小。利用活塞传压不仅给设计带来方便, 而且显著提高了进程准确度; 缺点是滞后还较大, 综合误差较大。

3. 动态汽车称重仪

2003年起, 国家采用计重收费治理高速公路超限超载运输, 邓教授帮助山东交润交通科技有限公司, 开发了振弦式动态汽车称重仪, 并在实际应用中取得成功。

后期所用称重传感器外观如图6所示:

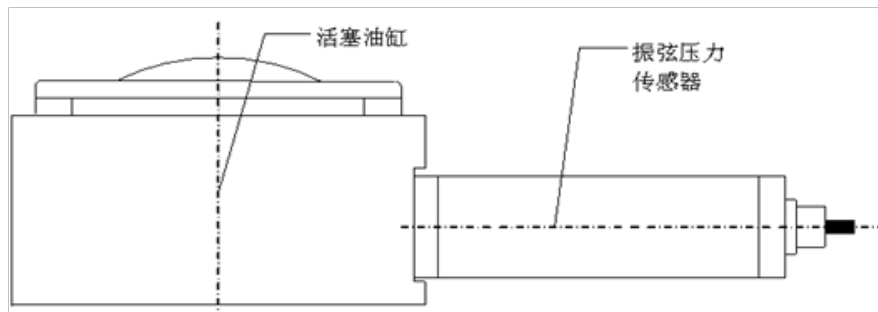


图6 振弦式动态汽车称重仪用称重传感器简图

试验表明: 静态称重传感器常用凹球面放置钢球, 对动态汽车称重带来较大误差; 活塞上部还是以凸球面为好, 误差较小。

由于动态汽车称重对准确度要求不是很高, 传感器误差 $< 0.3\%FS$ 即可满足要求。所以图5所示活塞传压振弦压力传感器曾用了几年。

后来, 泰安科达振远仪器仪表公司配合邓教授进行研究试验, 取得两项重要成果:

(1) 具有微摩擦阻力的力-液压转换装置获实用新型专利(专利号CN201320463597.4), 见图7, 要点是采用聚胺脂Yx型密封圈4和低温润滑油脂5, 显著降低摩擦阻力;

(2) 高准确度振弦压力传感器获发明专利(专利号CN200910017211.5), 如图8, 要点是在引液接头1与工作膜2连接螺纹上涂胶12, 不让高压液体进入, 避免液体强大横向胀力产生干扰, 但在退刀槽保留一定横向胀力。

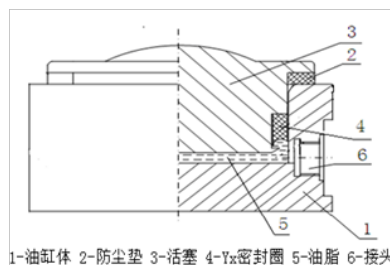


图7 力-液压转换装置结构图

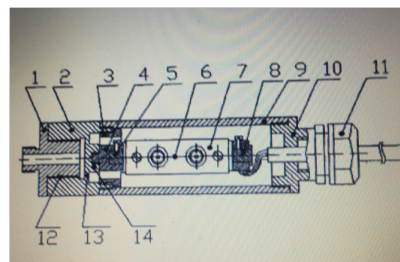


图8 高准确度振弦压力传感器结构图

这两项成果显著减小了力-液压转换式振弦称重传感器的综合误差。

显然这类传感器的突出优势在于：专心做好一种振弦压力传感器，配以不同尺寸的活塞-油缸，即可形成称重传感器系列；配以不同种类的活塞-油缸，即可成为不同产品，如锚索测力计，油压枕等，而且重复性好，准确度高。由于这一原因，促使作者对振弦压力传感器进行深入细致研究。

按图 8 做了一批 16 只振弦压力传感器，老化后用 0.05 级活塞式（砝码式）压力校验仪标定，最大综合误差 0.20%FS，最小综合误差 0.02%FS，其中 68% 的传感器综合误差 $< 0.1\%FS$ 。性能指标优于国内外钢弦压力传感器，可与高性能电阻应变式压力传感器媲美，并在不怕潮湿、抗电磁干扰、可接长电缆、易远传、便于数字化及长期稳定性好等方面具有优势。额定载荷 20t 的 JR85 号称重传感器经高精度测力机标定，综合误差为 0.04%FS，相当准确。这种振弦称重传感器用于动态汽车称重数千只，后期按业主要求，采样频率达到 400Hz，称重曲线光滑完整，动态称重效果良好。根据采样定理，该传感器可应用于频率 200Hz 以下变化力的测量。经检索钢弦传感器用于动态汽车称重具有新颖性，属国际首创；而且油缸具有低通滤波功能，用于动态汽车称重时可省去低通滤波器。

但作为称重传感器，仍存在问题：若要生产额定载荷 20t、准确度 0.05%FS 的称重传感器，使用该发明专利在引液接头与工作膜连接螺纹上涂胶的方法，生产产品合格率偏低，难以产业化。

4. 新结构高性能振弦压力传感器

2015 年，一个偶然机缘，促使北京高登衡器公司与邓教授合作。2017 年 5 月至 8 月，在公司生产基地，进行力-液压转换式振弦称重传感器产业化攻关，做了大量试验，取得满意效果：（1）基础工作方面，为减小压力传感器温度系数 α ，查知炭素结构钢热膨胀系数较小，选购高强度 $\Phi 0.2$ 的 65Mn 琴钢丝作振弦，弦长 52mm，配调质低硬度炭素结构钢弦架，做到 $\alpha \leq 0.05\text{Hz}/^\circ\text{C}$ ，最小 0.02 Hz/ $^\circ\text{C}$ ，远小于过去的 0.3 Hz/ $^\circ\text{C}$ ；同时，65Mn 琴钢丝弹性好，致传感器重复性良好，多点重复性误差 $\leq 0.01\%FS$ ，而且其磁性较强，激发可靠。（2）找到环形工作膜的较佳尺寸比例。（3）深入分析，阐明了压力传感器工作膜前端受液体横向胀力作用可导致回程出现“超前”现象，即频率的回复超前于压力的回复。设计工作膜以适当的“超前”抵消钢材带来的“滞后”，使“滞后”或“超前”很小，回程曲线与进程曲线基本重合，显著降低了传感器的综合误差。这可能是关键所在。

试制了两只振弦压力传感器 1705 号和 1706 号，初装，经 $-24 \sim 70^\circ\text{C}$ 冷热老化及 40MPa 加载老化后，由 0.05 级活塞式压力校验仪标定，没想到综合误差都是 0.03%FS，温度系数 $\alpha \leq 0.05\text{Hz}/^\circ\text{C}$ ，给作者大大增强信心。但加工单位没把好尺寸公差关，较好的 1706 号，多次拆卸引液接头后，数据变为：综合误差 0.05%FS，滞后 0.08%FS，还较好；1705 号则根本密封不住，必须更换引液接头。

不料此时由于称重行业产能过剩等原因，市场疲软，试验工作不得不停了下来。

试验虽然进行得还不够充分，但从理论和经验两个方面给了作者充分信心。因为我们对提高压

力传感器综合性能有了深入认识和具体办法，还请泰安科达振远仪器仪表公司开发了 GSJ-3 型智能检测仪和配套软件，进行半自动标定，求出大、小两个量程的常数：A、B 与 a、b，并设定了升压转换阈值 H 与降压转换阈值 h。升压时，先用 a、b 进行计算，当压力 $P \geq H$ 时，自动切换到用 A、B 计算；降压时则相反。这样就解决了抛物线拟合小量程误差大的问题。例如 1703 号，1635 号传感器，结构虽不是最优，但综合误差同样很小，1703 号综合误差 0.07%FS，1635 号，除额定压力 40MPa 时综合误差为 0.08%FS 外，其他各点均小于 0.03%FS。这给我们增强了信心。GSJ-3 型智能检测仪还有一个优点：标定完毕，可将传感器编号、标定日期和全部参数发送存入传感器芯片中。使用时，GSJ-3 可对传感器自动识别、调用参数进行计算，非常方便。

三、结论

综上所述，可见力 - 液压转换式振弦测力称重技术基本成熟，可以进行产业化，以发挥其某些独特优点；尤其是用于制造大量程低温度系数高准确度锚索测力仪，具有不可比拟的优势，值得推广应用。欢迎有兴趣有实力的企业合作开发，实现产业化。