

# 上海磁悬浮铁路预应力轨道梁检测技术

王清标<sup>1</sup> 王渭明<sup>1</sup> 张峰<sup>2</sup> 牛军<sup>3</sup>

(1 山东科技大学 山东青岛 266510 2 泰安市建筑质量监督站 山东泰安 271000)

(3 泰安市城市设计院 山东泰安 271000)

**摘要:**上海磁悬浮铁路是世界上第一条投入商业运营的磁悬浮铁路。它的建设过程中科技人员攻克了许多技术难关。其中,土木工程部分技术难度最大的就是预应力轨道梁的制作。由于磁悬浮轨道梁使用性能的特殊要求,其制作精度要求极高。施工过程中最为重要的就是预应力轨道梁制作过程中的先张-后张预应力的张拉控制。文章分析介绍了振弦式传感器的技术特点和振弦式锚索测力仪的开发、研制及应用情况。

**关键词:**磁悬浮铁路 预应力 轨道梁 振弦式传感器 锚索测力仪

## 1 引言

上海磁悬浮列车示范线西起地铁2号线龙阳路车站,东至浦东国际机场,线路正线全长30Km,设计运行速度为430Km/小时,单向运行时间8分钟,发车间隔时间为10分钟。全线共有复合轨道梁2551榀,轨道梁的规格有12m, 21m, 24m, 50m。梁中钢绞线采用270级高强度低松弛钢绞线,直径15.24mm,每股公称面积140mm<sup>2</sup>,标准强度1860MPa,技术条件符合美国标准《预应力混凝土用无涂层七丝钢绞线技术条件》ASTMA416M-98和《预应力混凝土用钢绞线》GB/T5224-1995的规定。

### 1.1 轨道梁的选择

目前,从德国与日本的磁悬浮技术来看,研究较成熟的形式有三种,分别是:混凝土轨道梁、钢结构轨道梁和钢筋混凝土复合轨道梁。对三种轨道梁从运行、磨损、噪音、成本、运输和热膨胀等方面进行了详细分析论证,确定采用钢筋混凝土复合轨道梁。因为它既有混凝土轨道梁的优点:刚度大、噪音吸收好、成本低,又有钢筋轨道梁的优点:制作精度高,容易达到精度要求。此外,可以把预应力混凝土梁和钢筋功能件分别按标准制作,使复杂问题简单化,缓和施工周期紧的矛盾。

### 1.2 轨道梁主要性能指标

(1) 梁的设计标准跨度为21.00m, 24.00m。

(2) 梁高2209mm, 梁上顶面宽2800mm, 下底面最宽处3000mm。

(3) 预应力采用了国内首创的先张-后张预应力体系,均为7 $\phi$ 5高强度低松弛钢绞线,其张拉设备、机具配套。

(4) 混凝土采用C60早强、高强度、高流动性、低收缩的特殊混凝土,弹性模量 $E_a > 36.0\text{GPa}$ 。

### 1.3 轨道梁的特点

(1) 制作精度高,制造难度大。列车相对轨道梁以120m/s左右的速度运动,因此对轨道梁的制作精度要求极高,制造难度极大。其预应力混凝土梁允许误差梁长 $\pm 5\text{mm}$ ,梁高 $\pm 2\text{mm}$ ,梁宽 $\pm 2\text{mm}$ ;其连接件、预埋件部分的三维控制点与设计偏差在x、y、z三个方向为 $\pm 2\text{mm}$ ;其机加工后组装误差为 $\pm 0.2\text{mm}$ 。

(2) 具有承重、导向和驱动功能等多重功能。磁悬浮列车轨道梁所安装的长定子线圈(依附于轨道梁)对轨道梁具有承重功能。

(3) 对梁的收缩、徐变施工控制要求高。有效控制混凝土的收缩、徐变是最为重要的问题。

### 1.4 制造过程中的关键技术问题

由于磁悬浮轨道梁使用性能的特殊要求,加之国内又无同类工程的经验借鉴,因此轨道梁的制作加工技术有很多突破点和关键点。模板系统、C60混凝土的配制、消除地基基础沉降影响的可调支座设计等等一系列技术问题需要解决。

其中预应力的张拉控制问题是最为重要的。由于轨道梁既有先张又有后张两种预应力,国内也无这方面的工程实例,因此施工中的预应力张

拉控制工艺,将决定设计意图能否实现,对轨道梁的最终变形控制起到最为关键的作用。

目前国内预应力张拉控制普遍采用液压千斤顶的压力表控制,压力表精度低,不能满足工程要求。因此研究一种量程大、精度高、稳定性好的预应力锚索测力仪成为关键技术问题。山东科技大学和上海建筑科学院承担了开发研制任务。经过分析研究,决定采用振弦式传感器技术。

## 2 振弦式传感器的优点

测量土木工程力学参数的仪器很多,目前在工程建设中常用的有电阻应变片式和振弦式仪器这两大类。这两大类仪器各有优缺点,但从工程实践中比较得知,振弦式传感器的优点更为突出。其优点如下:

(1) 准确度高; (2) 重复性好; (3) 长期稳定性好,适用于长期观测; (4) 有良好的抗震性能; (5) 易于防潮防水,特别适用于在恶劣的环境中进行长期测量; (6) 结构简单可靠,制作安装方便; (7) 由于传输的是频率信号,而不是电压信号,可远距离传输,而不带来附加误差,故适合多点远传和遥测,并且便于数字化和智能化; (8) 振弦式传感器可做成全钢结构,坚固耐用,并且造价低廉,与之配套的钢弦频率仪小巧轻便,并有智能化数字直读物理量的仪器,适宜现场使用。

## 3 振弦式传感器结构及工作原理

### 3.1 振弦式传感器结构形式

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:

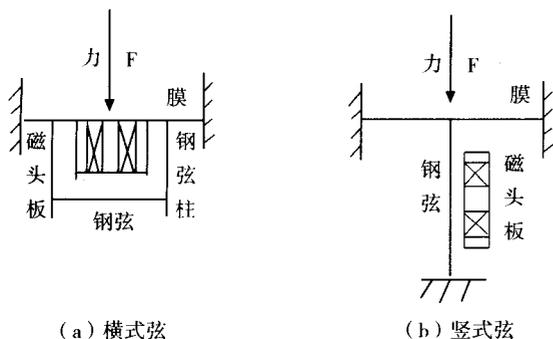


图1 振弦传感器的结构形式

### 3.2 振弦式传感器工作原理

其工作原理如图2所示:钢弦的微小振动在感应磁头线圈里产生感应电动势,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 $f$ 可推算力 $F$ 的值。

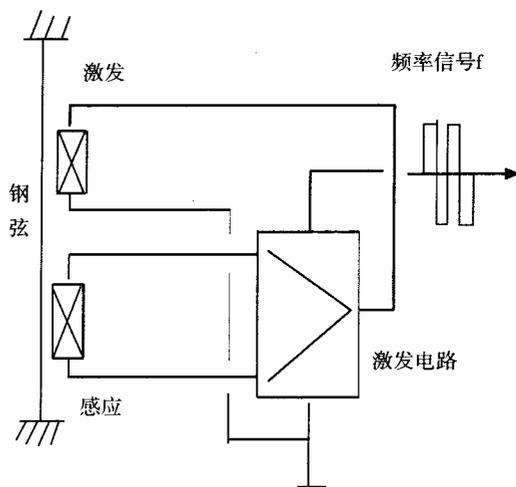


图2 自激发原理示意图

## 4 振弦式传感器数学模型

振弦式传感器数学模型,国际公认的模型是

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

式中: $F$ —待测物理量(力,压力等);  
 $K$ —比例系数; $f$ —与 $F$ 对应的输出频率; $f_0$ — $F=0$ 时的频率(初频)。但(1)式仅适用于少数振弦传感器,对于大多数传感器而言,拟合误差偏大,精度太低,需要修正。

由(1)式很容易看出, $F$ 与 $f$ 是对应的两个未知数, $f_0$ 是初始频率,是个已知数, $K$ 是比例系数,由传感器材料和结构形式确定,可以看作是已知数。那么,(1)式从数学上看,它是个二次抛物线,由于只有二次项和常数项,缺少一次项,因此它只能描述特殊的抛物线。这也说明了它为什么只适用少数传感器的原因。

将(1)式修正为

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

(2)式含常数项、一次项、二次项,是一个标准的二次函数,可以用来描写任意二次抛物线,因此它能适用与任何振弦式传感器。

## 5 振弦式锚索测力仪设计

锚索测力仪主要用于预应力张拉控制以及在时间作用下的应力变化情况进行检测、监测,由于检测、监测的精度要求极高,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,设计制造性能优异的长效锚索测力仪需解决一系列技术难题(包括解决老化工艺问题)。

由于荷载达到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,导致零点和灵敏度飘移,而且质量大体积大,不易热处理,刚度不匹配,性能难以保证。因此采用间接测量,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:其结构形式如图3。

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,不宜采用。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,因此这种方案有可能是最佳方案。设计中特别注意以下几个问题:

(1)为保证密封效果,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和精度,以提高抗偏载能力,减小偏载误差。

(3)选择优良液体介质,粘稠易密封,又起润滑作用,压缩模量小,不增加附加误差,工作温度 $-40 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 。

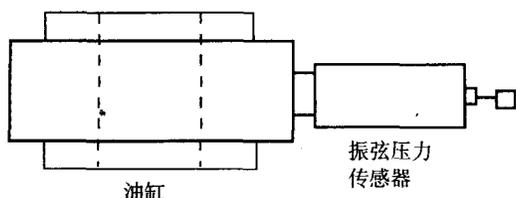


图3 锚索测力传感器结构外观图

## 6 振弦式锚索测力仪标定测试

2001年成功设计制造了10套锚索测力仪,用于上海磁悬浮列车轨道梁预应力检测和钢绞线性能的实验室检测。2001年6月送到中国计量科学院力学室进行测试标定。

计量标准器为:5MN基准测力计机。

计量标准器的不确定度为: $3 \times 10^{-4}$  (K=3)。

测试环境条件为:温度:24℃ 湿度:52% RH。

测试依据为:JJG391-1985《负荷传感器试行检定规程》。测试结果如下表1。

由中国计量科学院测试结果可以看出:

(1)准确度非常高,有的达到了0.05%FS,完全可以制造0.1级产品。(2)重复性良好,均达到了万分之几。(3)计量标准器的不确定度为 $3 \times 10^{-4}$ ,结果准确可靠。

表1 中国计量科学院测试结果

编号	型号规格 (MGH)	量程 (kN)	滞后	不重复度	满量程误差
035	4000	4000	0.5%FS	0.04%FS	0.05%FS
033	4000	4000	0.9%FS	0.2%FS	0.05%FS
032	2500	2500	0.03%FS	1.3%FS	0.12%FS
020	2500	2500	0.06%FS	0.9%FS	0.16%FS
021	2500	2500	0.07%FS	1.2%FS	0.2%FS
026	2500	2500	0.06%FS	1.0%FS	0.16%FS
028	2500	2500	0.08%FS	0.8%FS	0.08%FS

## 7 预应力轨道梁检测应用

所生产的振弦式锚索测力仪主要用于磁悬浮铁路轨道梁先张-后张预应力设备的标定,即用于千斤顶泵站压力表的标定,确定钢绞线张力与泵站压力的关系,然后用压力表监控后张预应力,以保证预应力分级张拉控制,应用示意如图4。同时,上海建筑科学院还将其用于预应力材料检测室,用来检测钢绞线与锚具组件的力学性能实验室检测。

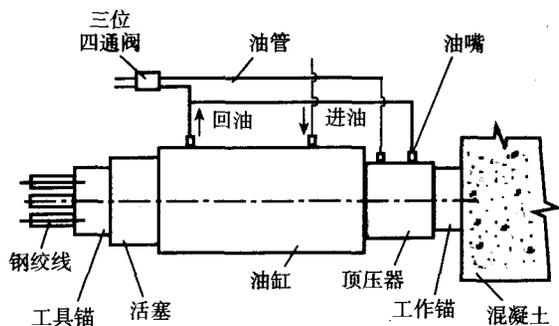


图4 锚索测力仪应用示意图

## 8 结束语

山东科技大学研究生产的振弦式锚索测力仪在上海磁悬浮预应力轨道梁检测工程中,在轨道梁的制作、安装过程中,在预应力的张拉控制过程中,发挥了重要的作用。通过工程实践表明,振弦式锚索测力仪具有以下优点:

(1) 精确度高,技术先进,达到了国际领先水平。

(2) 承载体结构设计合理,消除了偏载造成的影响,使全部荷载作用在传力装置上。

(3) 所设计的锚索测力仪量程大,可以做到1000t以上。

(4) 锚索测力仪的适用温度范围大,可以用在环境恶劣、潮湿的工况。

(5) 数字化显示,直接显示力值,操作简单,使用方便。

### 参考文献

- [1] 邓铁六,王清标,胡建明. 振弦传感技术的新进展及新型锚索测力计[J]. 中国岩石与力学工程学报. 2001.20(增): 1769~1771 (Deng Tie-liu Wang Qing-biao Hu Jian-ming, new developments of self-excitation vibrating-wire sensor technology and new type force sensor for pulling force measurement of anchor cable. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20 (Special Edition), 1769-1771.)
- [2] 马俊亭, 邓铁六, 郑丰隆. 一种测量物理量力的大小的钢弦式传感器[P]. 中国: ZL96156680.5 (Ma Jun-ting, Deng Tie-liu, Zheng Feng-long. Steel Wire Sensor Used for Measuring Physical Force. China: ZL96156680.5)
- [3] 崔玉亮, 邓铁六, 于凤. 《谐振式传感器理论及测试技术》. 北京: 煤炭工业出版社, 1997 (Cui Yu-liang, Deng Tie-liu, Yu feng. Resonant Mode Sensor Theory and Testing

Techniques, Beijing: Coal Industry Press, 1997, 1-20)

- [4] 郑丰隆, 邓铁六, 赵振远. 双线圈钢弦激发器[P]. 中国: ZL9323121.8, 1993. (Zheng Feng-long, Deng Tie-liu, Zhao Zhen-yuan. Double Coil Steel Wire Exciter. China: ZL9323121.8, 1993)
- [5] 邓铁六, 于凤, 邓伟. 大量程自激振弦式传感器及相关技术. [J]. 传感器技术. 2001, 9, 41-46. (Deng Tie-liu, Yu Feng, Deng Wei. Big Measurement Range Self-excited Vibrating Sensor and Relevant Techniques. [J], Sensor Techniques, 2001, 9, 41-46.)
- [6] Wang Qing-biao, Deng Tie-liu, Chen Bing-zhi. NEW DEVELOPMENTS AND APPLICATION OF SELF-EXCITATION VIBRATING-WIRE SENSOR. [J]. NEW PROGRESS ON CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE—Proceeding of the Third China-Russia Symposium on Underground Engineering of City and Mine. 2004, 51-56.

### (上接第7页)

索、拉索和揽风索相结合的结构业已竣工,并已于2004年9月投入正常使用。在设计过程中,对于这一“世界第一”的结构,遇到并解决了许多新问题,主要有以下几点:

(1) 通过悬索、拉索和揽风索三种柔性构件的组合,实现了大跨度楼间玻璃大堂的结构体系,传力途径明确、简洁。

(2) 提出了拉索接地端的弹簧节点形式,减小了温度荷载及偶然荷载对拉索内力及支座反力的影响。

(3) 进行了悬索结构的弹性模型结构风致振动试验。

致谢: 承蒙院柯长华、张青两位总工程师、院研究所甘明博士、中国建筑科学研究院钱基宏、马明同志提出了很多宝贵意见和建议,特此致谢。

### 参考文献

- [1] 安妮特·博格勒等著. 轻·远—德国约格·施莱希和鲁道夫·贝格曼的轻型结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [2] 沈世钊等著. 悬索结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [3] 建筑结构荷载规范 (GB50019-2001) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.