

# 测力传感器在张力检测系统中的设计与应用

□ 汤建华<sup>1,2</sup>

(1. 常州纺织服装职业技术学院智造学院; 2. 江苏省碳纤维先进材料智能制造工程技术研究开发中心)

**【摘要】**精确的张力检测与控制是自动化生产过程中的一个重要控制参数。在各种不同的张力检测方案中,采用电阻应变式测力传感器直接或间接测量张力的方法是目前最为简便经济的方案之一。本文根据电阻应变式测力传感器的结构及其张力检测技术原理对其进行了分类和归纳总结。这些方式主要包括:串联测量、双轮测量、三轮测量和集成式测量等。文中对这些测量方式的应用场景及其传感器的使用注意事项进行了阐述,可为张力检测系统的设计与传感器选型提供参考。

**【关键词】**称重传感器; 测力传感器; 张力检测; 柔索; 电阻应变

文献标识码: A 文章编号: 1003-1870 (2024) 04-0028-07

## 引言

张力检测最初较多应用安全保护等场合,例如起重机超限检测、电梯超限检测和吊索拉力检测等。随着自动化生产速度的日益加快,以及对产品质量要求的不断提高,精确的张力检测与控制在自动化生产过程中起到了越来越重要的作用。例如钢铁、有色金属、造纸、印刷、塑料薄膜和纺织等行业都需要精确可靠的张力检测与控制,以满足提高产品加工速度,保证稳定优质的产品质量,提高设备生产效率以及最终实现生产过程智能化等目标。

根据工作原理不同,张力检测的传感器可以分为几种:电容式<sup>[1]</sup>、压磁式<sup>[2]</sup>、光纤式<sup>[3]</sup>、光电式<sup>[4]</sup>、声表面波式<sup>[5]</sup>、图像式<sup>[6]</sup>和电阻应变式等等。与其他技术方案相比,基于电阻应变式原理的张力检测传感器具有成熟稳定、测量准确等优点,因而目前的应用最为广泛<sup>[7]</sup>。基于这一原理的张力检测传感器与常见的测力传感器(或称重传感器)结构原理类似,只是针对张力检测的特定应用需求而开发。因此,

本文根据张力检测中被测设备结构、运行状况和安装方式等方面特点,对测力传感器在张力检测系统中的应用与设计进行了分类和归纳总结。最后结合市场需求,简要阐述张力检测的重要性,并对测力传感器在张力检测中的未来发展方向进行了展望。

## 1 张力测量概述

张力检测的对象主要是线材及带材,如纱线、钢丝绳、电缆、薄膜、钢带以及金属箔材等。在工程力学上,这类由柔软的绳状、链条或带状体所形成的约束称为柔性约束,又称为“柔索”,其特点是只能受拉不能受压,所以其在承受载荷时只有轴向力不为零。柔索在任一截面内的总内力,在理想的悬链状态下,均与柔索的曲线相切,所以在一般的工程应用中,就统称为柔索的张力。在工程应用中,对柔索进行张力测量的目的大致可以分为安全监测和工艺(质量)控制两大类:

### 1.1 安全监测

在起重运输、石油与矿产勘探等设备和工程

中，广泛采用了柔索结构。用钢丝绳或绳索作为柔索，可以实现起重、吊装等作业。在这个过程中，钢丝绳的张力控制十分关键，需要确保重物的平稳、准确运输，并保证吊装设备的安全运行。钢丝绳作为典型的柔索，是一种传递拉伸力的理想器件。当它通过滑轮或滑轮组时，可以改变张力的方向、大小。若不考虑滑轮组的摩擦力，可以认为其所受张力与负荷成一定的比例关系。由于钢丝绳作为柔索器件具有这样的特性，所以各种起重机械按照法律法规要求必须进行称量、超载报警和力矩报警时，大多在钢丝绳上寻找解决方案。如今在天车定滑轮两端支撑桥式测力传感器的张力测量装置，已能使称量系统达0.1%FS 以上的精度。

## 1.2 工艺（质量）控制

在丝、纤维、织物、线缆以及钢丝绳等产品的生产过程中，都需要用恒定的力将其缠绕在卷筒上。但随着缠绕过程中卷筒直径的不断增大，卷筒的线速度会逐渐变大，所以需要张力测量装置（较常见采用梁式结构的测力传感器）提供张力信息反馈给控制器以控制卷筒的速度，以使其有一个恒定的缠紧力。

在造纸、印刷工业中，复卷机、施胶机、压光机、涂布机以及分切机等造纸设备在生产过程中需要精确的张力控制，因为纸机张力影响着成纸质量、造纸效率和生产成本。一般在纸机的各传动部分的导纸辊上安装张力检测装置进行张力控制，如可以在运行辊筒两侧安装轴销式或梁式的测力传感器进行张力检测。

在钢铁、冶金行业中，为控制轧制生产线上薄板带钢的质量，需要在退火、清理、镀锌等工艺过程中对运行中的薄板做连续的动态张力测量与控制。此时，一般采用大容量的测力传感器进行张力检测。

在汽车工业中，汽车轮胎的质量与其挤出部件的尺寸稳定性与张力控制直接相关。在全钢子午胎的结构中，内衬层、胎侧、胎面、垫胶等部件均由挤出机联动线生产，其中联动线的张力控制是工艺管控的关键点。通常采用张力直接检测方式，将两

个测力传感器配对使用，装配在检测导辊两端，挤出物料通过检测导辊时，对测力传感器施加力进行测量。

## 2 测力传感器的张力测量方式与设计分析

如上所述，基于测力传感器的张力检测有着广泛的应用。通过对张力的测量和控制，可以确保相关设备和结构的安全运行，并且可以对生产流程进行优化和提升。虽然测力传感器在张力检测中应用的行业领域众多，但根据其所在设备类型及安装方式，本文将其在张力检测中的应用方式分为以下几种，并对其设计要求进行简要分析。

### 2.1 张力的串联检测

测力传感器直接与柔索串联套接在一条线上，是检测柔索张力最简单有效的方法。下面通过3个典型应用实例，说明此种方式下测力传感器及其检测装置的设计技术。

图1为某起重设备上安装在钢丝绳固定端的张力检测装置的结构示图及为此匹配设计的拉式测力传感器外形示意图。在该装置设计中，钢丝绳不是直接套串在传感器的环孔中，其原因主要基于以下两点：①钢丝绳直接套串在传感器的环孔时，其绕曲半径过小，会使得钢丝绳在频繁受额定载荷时，外层钢丝因缠绕曲率太小而断裂。②测力传感器作为检测元件，为达到一定的输出灵敏度，在其额定负荷时的工作应力会比较高（一般高于200MPa），内部存在应力集中区，若将其直接应用在起重设备的负载装置中，存在一定风险。因此，如图1所示在测力传感器两侧附加了过载能力充分的护板，以保障检测装置本身的安全性。此外，根据这类张力检测的要求，测力传感器结构进行了一定的优化设计：不仅表现在外形和连接结构上有匹配安装空间的独特设计，还包括在内部结构上不同于一般的板环传感器，而是采用了一种以板环为框架，应变区为剪切盲孔的结构。这种结构主要有两个优点：一是提高了传感器过载能力；二是传感器对钢丝绳的扭转不会产生明显的干扰信号。

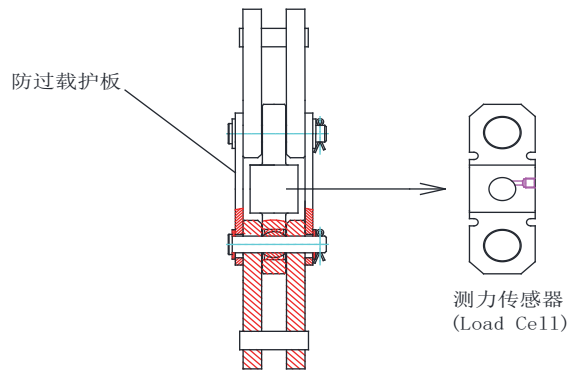


图1 钢丝绳张力检测装置及测力传感器示意图

图2为某吊索桥空悬钢索的张力检测装置示意图。在这种应用工况下，测力传感器是作为钢索承拉杆的一个“垫圈”安装的，也称为“锚索计”。这

种应用方式采用了压式测力传感器来检测钢索的张力，因此，其相对图1中采用的拉式测力传感器的应用方式更为安全。

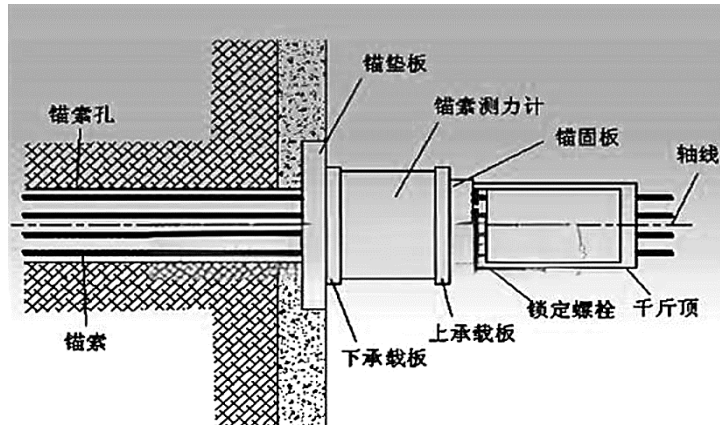


图2 桥梁钢索张力检测装置示意图

另外，这种垫圈式(筒式)测力传感器的高度一般较低，根据圣维南原理可知，较难隔离钢索与固支承载平面不完全垂直导致的偏载误差。如图3所示是针对这种检测工况专门设计的一种传感器，与一般的垫圈式测力传感器不同的是，其在承压端与应变筒之间设计了一段“柔性薄壁圆筒”作为过渡，可在一定程度上隔离钢索与固支承载平面不完全垂直导致的偏载误差，以提高检测精度。

当然，需要说明的是，在升降机这类的应用工况中，被套垫在钢绳拉杆上的传感器受力状况相对良好。因为电梯上设有的缓冲防振弹簧，不仅大大减小了加速运行时的冲击力，还自动均衡了传感器承载面的负荷分布。

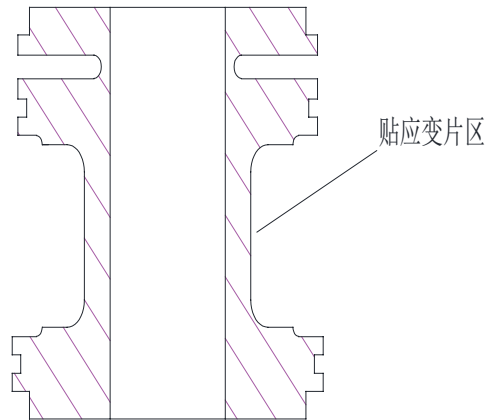


图3 带“柔性薄壁圆筒”过渡结构的弹性体

## 2.2 张力的双轮检测

运行中的柔索张力无法使用上述串联方式进行检测，此时可以将原柔索运行系统中的一套辊轮改造成张力检测装置（如图4所示）。或可以根据检测要求，增设一套辊轮装置而达到在线检测张力的目的。这类检测方法的特点是，一般在运行的柔索系

统会采用两组辊轮，并且在多数情况下，使柔索成 $90^\circ$ ，因此往往称为双轮张力检测技术。

在图4中，A轮的轴芯受到柔索张力 $T$ 和 $T'$ 的合力，假若忽略A轮上的滚动摩擦力，则 $T=T'$ 。其中 $T'$ 由水平设置的铰支拉杆承受，张力 $T$ 则全部作用在测力传感器上。

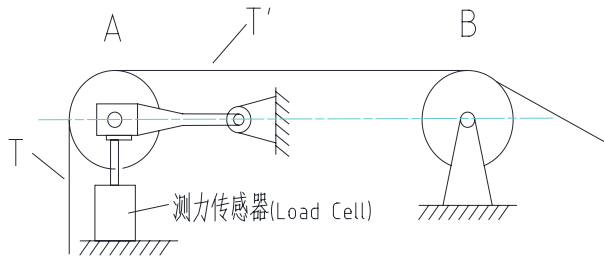


图4 双轮张力检测装置示意图

图5所示为双轮在线张力检测技术的另一个应用实例。当起重机吊臂改变角度时，起重钢绳与吊臂之间的夹角也随此改变，因此无法用一般的测力传感器对钢绳张力进行检测（起吊重量检测），而图5

中AB两个轮组及一套复杂的机构就是为了消除张力测量过程中这种影响而设置的。其巧妙就在于无论吊臂如何变换角度，B轮组始终只受到两个互相垂直的张力 $T$ 和 $T'$ 作用。

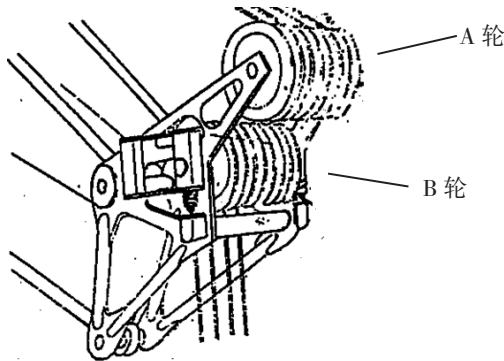


图5 起重机吊臂角度变化时自动调节张力检测装置示意图

事实上，只要运行中柔索的夹角始终不变，也可以仅采用单个辊轮，通过常规的测力传感器检测

其合力，从而求得柔索张力，如图6所示。

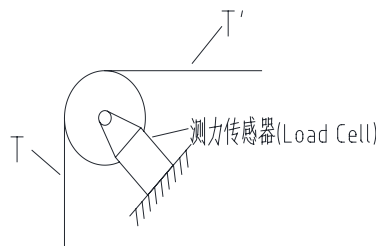


图6 单轮张力检测装置示意图

### 2.3 张力的三轮检测

在柔索运行的两端不便于安装张力检测装置的场合，也可以在柔索任意的运动段增设三个位置固定的辊轮，即可检测运动中的柔索张力。如图7所示

示，若忽略辊轮的摩擦力，则两端的张力 $T=T'$ ，测力传感器测得的压力 $P=2T\cos(a/2)$ 。因此，在三轮对称排列的条件下，只要测出合力 $P$ ，也就可测出张力 $T$ 。

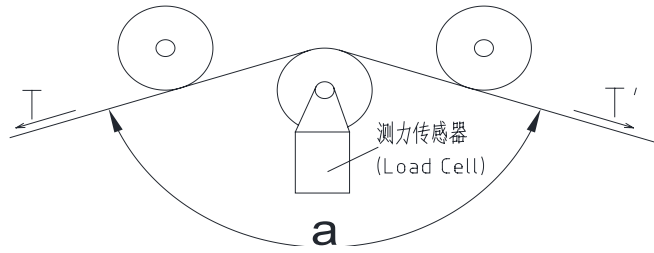


图7 三轮式张力检测装置示意图

由于三轮式张力测量装置的安装具有便携方便等优点，目前已发展成为一种较为标准化的产品。

如图8、图9所示为其中两种常见的产品形式。

#### 现场使用实拍

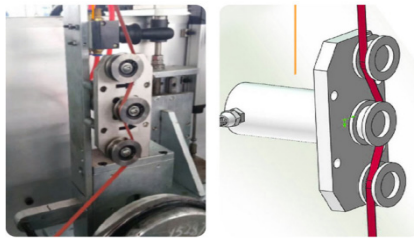


图8 三轮式张力测量传感器1及应用实例



图9 三轮式钢丝绳张力测量传感器2

三轮式张力检测装置在设计制作时必须充分考虑下面几个因素：

#### (1) 夹角 $a$ 变化引起的误差及解决方法

三轮式张力装置的测量对象是张力的合力，其计算式为 $P_{\text{合}}=2T\cos(a/2)$ 。由于三个辊轮不可避免存在间隙以及钢丝绳承载变形引起的中心偏移等因素存在，这些都必然造成夹角变化，从而产生测量

误差。但当夹角 $a/2 \geq 80^\circ$ 时，因夹角变化引起的余弦值的变化相对极为微小，这是设计三点式张力测量装置的技术关键之一。

#### (2) 摩擦力引起的张力变化

中间测量轮左右钢丝绳上的张力，事实上是不一样的。运动方向一边的张力必然大于被动钢丝绳端的张力。而后者又大于负载施与钢丝绳的拉力。

尽管系统速率恒定时可以修正，但辊轮上摩擦力的变化仍会引起测量误差。从结构设计、加工工艺上保证辊轮与轴有小的摩擦系数、以及钢绳与辊轮槽有好的啮合状态，都可把摩擦力引起的张力变化控制得很小。

(3) 在实际应用过程中，钢丝绳在张力测量装置的三个滑轮上几经弯折，会加速钢丝绳的磨损和断裂。如果在加大夹角的同时，适当加大滑轮直径，减少钢丝绳与滑轮的接触曲率，则可把装置对钢丝绳正常使用寿命的影响控制到最小。

#### 2.4 集成式张力检测

上述三种张力的检测方法一般可以通过附加常规测力传感器的方式进行监测。随着测力传感器设计技术的进步，已经可以把张力检测装置简化，对

此，可归纳为下列三种技术方案：

##### (1) 轴销式张力检测技术

无论两轮式还是三轮式张力检测装置，其共同特点是要增加一个或多个测量辊轮，并通过杠杆等机构，把张力转变为负荷进行测量。基于这一目的，人们将辊轮的销轴改造为轴销式测力传感器，即可进行张力的测量。轴销式测力传感器实际上就是一根承受剪力作用的圆轴，根据圆轴的截面不同，可以分为工字截面、空心截面（圆筒式）两种内部结构形式，它们都具有很强的抗侧向载荷能力，所以只要测力传感器的加载轴线对准柔索张力的合力，就不需要附加其他抗侧结构就能检测出运行中柔索的张力（如图10所示）。

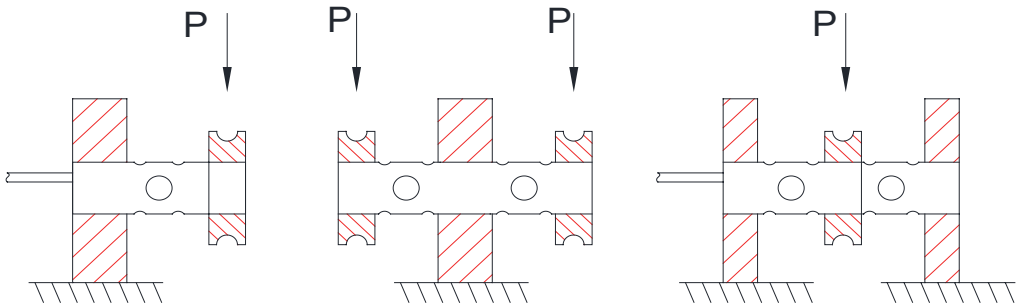


图10 轴销式测力传感器测量张力示意图

##### (2) 轴座式张力检测技术

若把辊轮的轴座做专门设计，就能使其成为测力传感器，即轴座与测力传感器一体化。应用常规

的工作辊轮，就可实现对张力的在线检测。如图11所示，为几种常见的轴座式张力传感器的结构示意图。

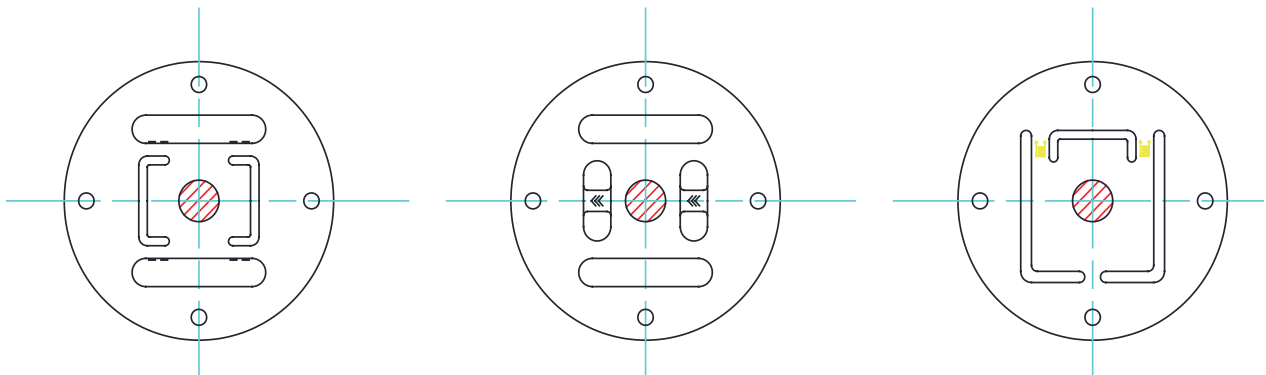


图11 几种常见的轴座式张力传感器的结构示意图

若轴座式传感器设计互成90°的十字梁结构,采用柔性机构加以互相隔离,则可利用双分量传感器的工作机理,分别测出水平分力、垂直分力,还可经信号处理显示合力,如Honeywell的6443系列测力传感器。

### (3) 垫板式张力检测技术

若把辊筒轴承座的垫板(基座)做专门设计,则

可以对原装设备的辊筒、轴承座均不做改造,也可实现张力的在线检测。如图12为加拿大KELK公司生产的张力传感器及安装示意图,它能提供一个相当大的稳定、牢固的安装平面可为各种轴承座提供安装方便,并且其特殊设计的柔性构件比较支连接可靠、简单,可防止辊轮运转时倾翻,因此也就提高了精度。

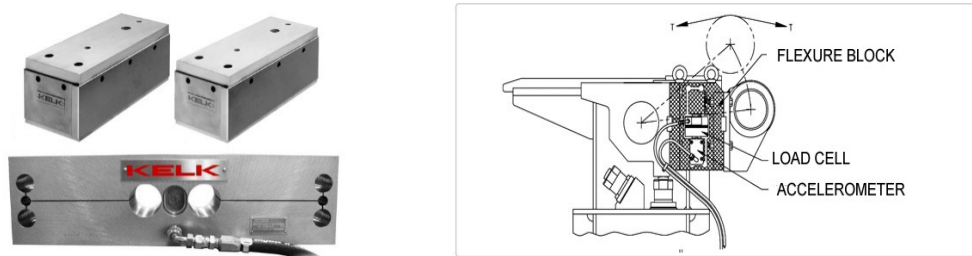


图12 垫板式张力传感器及安装示意图 (来源: [www.kelk.com/TENSION](http://www.kelk.com/TENSION))

### 3 结语

本文系统地探讨了电阻应变式测力传感器在张力检测系统中的设计与应用,详细阐述了不同张力检测方案的分类和特点,特别是串联测量、双轮测量、三轮测量和集成式测量等方式,并分析了它们各自的应用场景和其中测力传感器的设计与应用特点。总而言之,基于电阻应变式原理的测力传感器是一种简单、有效的张力检测方法。测力传感器作为张力检测系统中的核心元件,其性能与精度直接关系到整个系统的稳定性和可靠性。随着技术的不断发展,测力传感器必将在张力检测领域发挥更大的作用,通过将人工智能、物联网等技术与张力检测系统进行融合,实现智能化张力检测与控制,为实现更精确、更高效的生产自动化贡献更大的力量。

### 参考文献

- [1] 刘桦,姜琳. 电容式动态张力传感器的研究与设计[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2001,(03):58-60.
- [2] 周序怀. 压磁式传感器在新闻纸张力测试中的应用[J]. 中国造纸, 2009, 28(03):52-55.
- [3] 罗声,程志远,李维嘉等. 基于ADAMS的高精

度光纤张力传感器仿真设计[J]. 电子机械工程, 2021, 37(04):57-60.

[4] 张红冉,熊和金,薛念明. 基于光电鼠标传感器的纱线张力检测方法研究[J]. 科技创新导报, 2009, (33):4.

[5] 丁勇. 声表面波式纱线张力传感器的研究[D]. 东华大学, 2023.

[6] 白予生. 试论粗纺机纺纱张力的CCD在线监控[J]. 棉纺织技术, 2005, (09):16-20.

[7] 杨艳,安盼龙,赵瑞娟. 电阻应变式传感器的研究[J]. 物理与工程, 2010, 20(02):29-33.

### 作者简介

汤建华,男,江苏昆山人,正高级工程师。目前主要从事称重测力传感器,压力传感器等方面的技术研发工作。