

# 预应力及张力综合检测技术体系

## (V1.92)



2012-07-15 初稿

2021-12-06 第 33 次修订

2022-02-11 第 34 次修订

2023-04-18 第 35 次修订

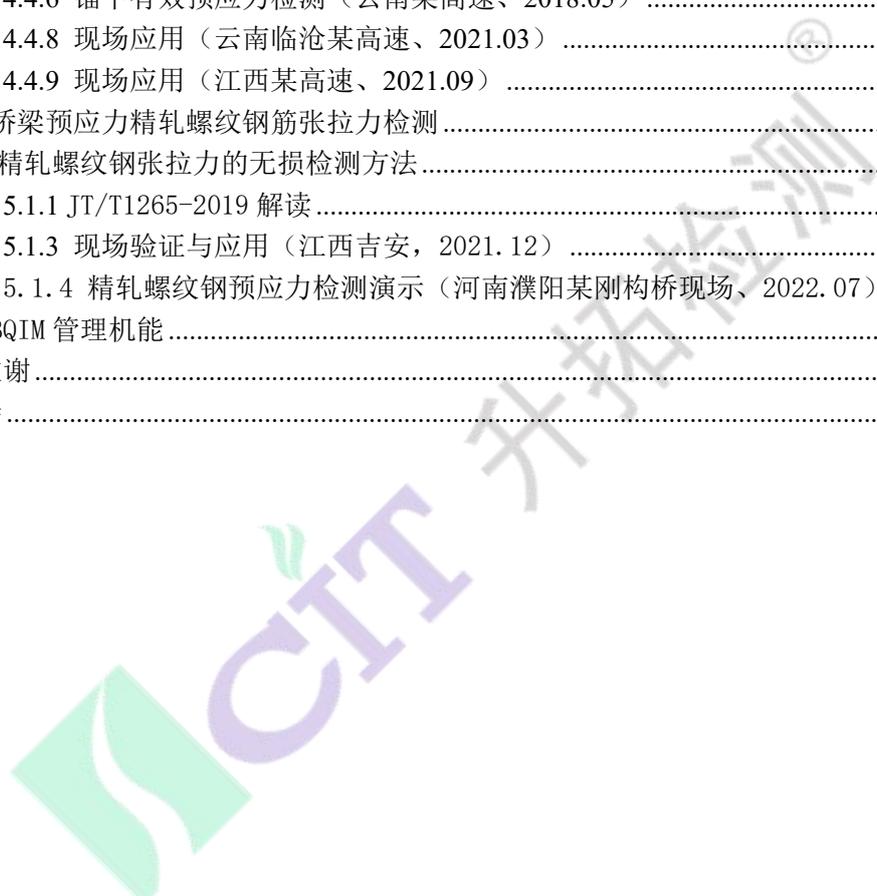
四川升拓检测技术股份有限公司

[www.scentralit.com](http://www.scentralit.com)

## 目 录

第 1 章 概述 .....	4
第 2 章 空悬锚索、拉杆、吊杆张力检测 .....	4
2.1 测试的意义 .....	4
2.2 测试方法和原理 .....	5
2.2.1 基本理论 .....	5
2.2.2 主要影响因素 .....	5
2.2.3 边界条件影响的修正 .....	6
2.3 模型试验 .....	6
2.3.1 均质拉杆模型试验（沈阳远大、2012.06） .....	6
2.3.3 多孔钢绞线模型试验（北京顺义、2019.02） .....	7
2.4 现场验证试验 .....	8
2.4.1 中承式拱桥吊杆（贵州六盘水市、2012.05） .....	8
2.4.2 特大悬索桥拉杆（贵州乌江 G201 国道、2012.08） .....	8
2.4.3 中承式双曲拱桥吊杆（贵州惠水、2014.06） .....	9
2.5 特点和适用范围 .....	10
2.5.1 特点 .....	10
2.5.2 问题点 .....	10
第 3 章 埋入式锚索锚下张力检测 .....	10
3.1 测试的意义 .....	10
3.2 测试方法和原理 .....	12
3.2.1 理论基础 .....	12
3.2.2 计算参数的标定 .....	12
3.3 模型试验验证及应用 .....	12
3.3.1 四川理工升拓无损检测联合实验室 .....	12
3.4 现场验证及应用 .....	13
3.4.1 贵阳中坝立交桥，2011.05 .....	13
3.4.4 黑龙江某事故桥梁预应力评估，2012.10 .....	13
3.4.6 广东某在建桥梁预应力评估，2013.10 .....	14
3.4.9 张拉锚杆验证（四川，2015.05） .....	14
3.4.12 铁路高架桥有效预应力检测（安徽，2018.07） .....	15
3.4.13 在役桥墩锚下有效预应力（安徽马鞍山，2019.08） .....	15
3.5 测试流程、特点和适用范围 .....	16
3.5.1 测试流程 .....	16
3.5.2 特点 .....	16
3.5.3 优越性 .....	16
3.5.4 测试精度和误差 .....	17
3.5.5 主要问题点 .....	17
3.5.6 应用方案建议 .....	17
第 4 章 反拉法测试 .....	17
4.1 测试流程、特点和适用范围 .....	17
4.2 常用方法 .....	18
4.2.1 整束张拉 .....	18

4.2.2 单根张拉 .....	18
4.2.3 单根张拉与整束张拉的比较 .....	19
4.2.4 反拉式检测事故分析及安全注意事项 .....	19
4.3 反拉式有效预应力检测仪（SRS-PTT）的原理及验证 .....	20
4.3.1 反拉式有效预应力检测仪（SRS-PTT）的测试原理 .....	20
4.3.2 特点及优势 .....	20
4.3.4 试验验证（山西太原，2016.05） .....	20
4.3.5 对比试验验证（广东佛山，2020.01） .....	21
4.4 反拉式有效预应力检测仪（SRS-PTT）的现场应用 .....	22
4.4.1 现场应用（贵州罗望高速，2016.07） .....	22
4.4.3 现场应用（江苏某高速，2018.03） .....	22
4.4.6 锚下有效预应力检测（云南某高速、2018.05） .....	23
4.4.8 现场应用（云南临沧某高速、2021.03） .....	23
4.4.9 现场应用（江西某高速、2021.09） .....	24
第5章 桥梁预应力精轧螺纹钢张拉力检测 .....	24
5.1 精轧螺纹钢张拉力的无损检测方法 .....	24
5.1.1 JT/T1265-2019 解读 .....	24
5.1.3 现场验证与应用（江西吉安，2021.12） .....	25
5.1.4 精轧螺纹钢预应力检测演示（河南濮阳某刚构桥现场、2022.07） .....	26
第6章 BQIM 管理机能 .....	26
结语及致谢 .....	26
技术支持 .....	27



## 第 1 章 概述

预应力结构（混凝土梁、岩锚、吊杆、拉杆等）在运行的过程中，不可避免地会出现各种老化、劣化现象（如混凝土强度降低，预应力损失等）。同时，在预应力结构的制作中，预应力张力的损失也时有发生，严重时甚至造成安全隐患和垮桥等恶性事故，从而造成社会经济的损失。

我们历时 10 余年，与国内外相关机构合作开发了一整套针对这预应力/张力的解决方案和技术体系。该方案基于无损检测技术，具有测试效率高、可靠性好、对结构无损伤等特点，可以大大地提高预应力梁的质量保证度。

该技术体系的检测内容主要包括：埋入预应力体系的锚下预应力；空悬拉杆、吊杆、锚索的张力。

整个技术体系的测试精度和效率达到工程要求，已在国内外上百个桥梁工程中得到了实际应用。此外，与预应力结构相关的技术还有：预应力孔道的灌浆密实度（纵向、横向及竖向）；混凝土的材质、缺陷、厚度尺寸等。

我们具有相关技术的全部知识产权，并申请和获得了多项国家发明专利，产品出口到日本等海外。



预应力混凝土梁多功能检测仪（SPC-MATS）

## 第 2 章 空悬锚索、拉杆、吊杆张力检测

### 2.1 测试的意义

斜拉桥、吊桥和中、下承式拱桥、幕墙、大跨度屋顶等结构以其良好的跨越能力和

优美的造型受到设计者青睐。在其施工及成桥后的维护中，拉索与吊杆的张力测试将贯穿整个过程。

作为桥梁结构的传力构件，吊杆的损坏会对桥梁结构产生灾难性的后果。2002年四川宜宾小南门的金沙江大桥突然垮塌，事故原因据分析是主桥的中部北端2号吊杆处截面下游的吊杆先发生断裂，随后2号吊杆处截面上游的吊杆也发生断裂，该处横梁和架于横梁上的桥面板随着吊杆的断口以下部分掉入江中，接着主桥的另一端3个界面处的吊杆也发生了断裂，导致全桥4孔桥面板的垮塌；2011年4月12日，位于新疆巴音郭楞蒙古自治州库尔勒市郊的孔雀河大桥，主跨第2根吊杆发生断裂，致使大桥长约10米、宽约12米的路面发生垮塌，造成主跨第3、4、5道矮T梁掉入河中<sup>[6]</sup>。



左到右：宜宾小南门金沙江大桥，库尔勒市孔雀河大桥

因此，能否准确的识别吊杆索力对吊杆拱桥的施工及运营阶段都有着非常重要的工程意义。目前国内外常用的索力测试方法有以下几种：油压表法、传感器法、频率法、磁通量法。现阶段以频率法最为经济、实用，因而应用最为普遍。本技术体系也以构件的自振频率为基础。

## 2.2 测试方法和原理

空置锚索、拉杆/吊杆大体可以分为两类，即均质结构：锚索、拉杆本身均质；层状结构：锚索外部有外壳保护层。这两种对象的测试方法有一定的区别。

### 2.2.1 基本理论

对于空悬和张紧的锚索、拉杆/吊杆（其垂度影响忽略不计时），其横向振动可以用轴力作用下两端铰接梁的振动模型来模拟。

### 2.2.2 主要影响因素

在实际的测试中，以下影响因素要注意：边界条件的影响以及计算长度的确定、测试频率的阶数的确定、阻尼器的影响、外壳的影响，包括外壳承担的张力，振动频率的影响等、临近结构。

在本系统中，综合地考虑了以上各种因素：

1) 不仅考虑了拉杆抗弯刚度的影响，而且可在一定程度上自动修正边界条件的影

响<sup>[2][6]</sup>；

- 2) 自动修正阻尼器的影响<sup>[3]</sup>；
- 3) 通过对自由（不受拉）状态下外壳振动模态的计算，可以分离外壳与内部钢绞线的振动频率，同时也可以测试外壳的受力状态。

### 2.2.3 边界条件影响的修正

在实际的锚索、拉杆/吊杆的张力测试中，其边界条件往往介于铰接和固结之间。根据学者们的研究成果，采用一端铰接，一端固结的方式与吊杆的实测结果最为吻合。但是，在这种情况下的张理论解非常复杂，为此，学者们提出了不少简化方法。

## 2.3 模型试验

### 2.3.1 均质拉杆模型试验（沈阳远大、2012.06）

#### 1) 试验概要

应沈阳远大特种集团邀请，我们对幕墙不锈钢拉杆的有效张力进行了测试。测试包括两部分内容，即单根拉杆验证测试和结构拉杆测试。

#### 2) 单根拉杆验证测试

千斤顶内径足够大，没有束缚预应力拉杆。在此状况下，测试结果是令人满意的。



拉杆张力测试的情景

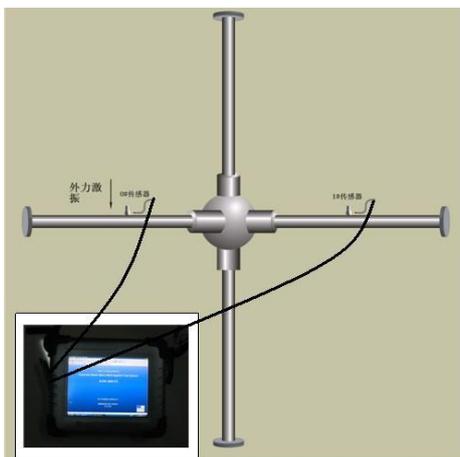
#### 3) 结构拉杆验证测试

由于在结构中的拉杆之间通过铰接互相连接，因此在激发振动和测试时，不可避免地会受到临近其它拉杆的影响。



拉杆张力结构测试

为此，我们开发了基于多频道的拉杆张力测试技术，取得了良好的效果（并已申请发明专利）。



基于多频道的拉杆张力测试概念

测试结果表明：

- (1) 通过对周边拉杆自振频率的测试及影响消除，得到了满意的测试结果；
- (2) 随着张力的增加，拉杆铰接部分对计算长度的贡献度也有所增加；
- (3) 若仅测试单根拉杆，在高张力区有可能产生较大的误判。其原因在于，当张力较高时，测试对象拉杆与周围的拉杆间联系更为紧密，所受的影响也就更大。

### 2.3.2 多孔钢绞线模型试验（北京顺义、2019.02）

受北京中交基础设施养护集团委托，对自由锚索张力测试效果验证。利用静载锚固机张拉四根钢绞线，作为检测对象，设计张拉总力值为 400KN。测试时对四根钢绞线分别测试。



张力设备现场检测场景

检测结果显示:

- (1) 前三根钢绞线的力值都在 112KN 左右, 第四根钢绞线实测结果 78KN;
  - (2) 设计张拉值为 400KN, 测试值为 414KN;
  - (3) 经对四根钢绞线检查, 发现第四根确实存在松动情况, 明显振动位移更大。
- 现场验证及应用

## 2.4 现场验证试验

### 2.4.1 中承式拱桥吊杆 (贵州六盘水市、2012.05)

#### 1) 概要

六盘水市 BH 桥桥梁部分全长 404.42 米, 由主桥与引桥两部分组成, 孔跨布置为: 11.92 米空心板+120 米中承式系杆拱+12×20 米简支梁。吊杆共设 32 根, 左右幅各 16 根, 由上坡至下坡方向为 1-16 号。1、2、15、16 号吊杆采用 OVMS(K)7-109 型, 其余吊杆采用 OVMS(K)5-151 型, 均有外层钢壳。

#### 2) 测试结果

在测试和解析过程中, 有效地分离了钢壳的振动频率以及合理地确定了钢壳所承受的张力, 得到了合理的测试结果。

### 2.4.2 特大悬索桥拉杆 (贵州 WJ 特大桥、2012.08)

#### 1) 概要

应相关方面邀请，我们对 WJ 特大桥的吊杆和拉杆张力进行了检测。其中，吊杆外有 PVC 套管，而拉杆的钢绞线在端头附近露出。为了检验外壳对测试结果的影响，我们对拉杆在钢绞线上，以及外壳上均进行了对比测试。



测试情景

2) 测试结果表明:

- (1) 通过对外壳自由振动频率的分离，在外壳上也可以较好地测试;
- (2) 由于测试条件的限制，使得测试位置过于靠近支座，未能充分激发吊/拉杆的自由振动，使得测试频率偏高、测试张力偏大;

#### 2.4.3 中承式双曲拱桥吊杆（贵州惠水、2014.06）

1) 概要

应相关方面邀请，我们对位于贵州惠水的某桥吊杆的加载前、后张力进行测试。

桥梁为钢筋混凝土中承式双曲拱桥，孔跨布置为净跨 90 米，桥梁全长 115.6 米，桥面宽 20.5 米，设计荷载等级为汽车城—A 级。其中主孔为双肋式中承拱，拱肋为普通混凝土结构。吊杆顺桥向间距 485cm，采用 0VMLZM(K)7 型高强钢丝成品束，吊杆两端均采用冷铸锚，上下两端分别锚于拱肋及横梁内。

其中，上游方向 16、17 号及下游 1、2 号吊杆均为下端裸露，上端有套筒，其余吊杆整体均有吊杆。为了检验外壳对测试结果的影响，我们对拉杆在钢绞线上，以及外壳上均进行了对比测试。



桥梁及测试情景

2) 测试结果表明:

- (1) 尽管大部分吊杆有套筒, 但通过合适的传感器固定方式(如粘贴)和激励方式, 以及采用频谱对比的方式, 还是可以得到合理的测试结果;
- (2) 加载前张力的分布呈两端大, 中间小的趋势。加载后张力的变化率则相反, 呈两端小, 中间大的趋势;
- (3) 加载后全部吊杆的张力增加值为 1525KN, 与加载荷载 1800KN 吻合(部分荷载由两端支座承受);

## 2.5 特点和适用范围

### 2.5.1 特点

空置锚索、拉杆的测试理论本身, 经过广大学者多年的努力, 已经相对比较完善, 并在实际工程中得到了比较广泛的应用。另一方面, 对一些特殊情况, 如锚索外有套筒外壳, 拉杆组等情况, 在测试过程中会遇到很大的干扰, 从而严重影响测试精度, 甚至造成无法测试。

本技术方案则是针对这样的实际问题, 通过分离频谱的方法以期达到解决问题的目的。通过实际验证, 表明其效果是比较明显的。

### 2.5.2 问题点

目前, 存在的问题主要集中在有外壳的拉索张力测试上。

通常, 测试传感器只能安装在外壳上。如果拉索钢绞线与外壳完全脱离, 则无法获取内部钢绞线的振动信号, 也就无法分析钢绞线的张力。另一方面, 当钢绞线与外壳间有灌浆时, 灌浆状况也会对测试结果产生较大的影响。因此, 在具体的应用过程在一定具体分析, 多加注意。

## 第 3 章 埋入式锚索锚下张力检测

### 3.1 测试的意义

埋入式锚索在岩体支护、预应力结构中得到了极其广泛的应用。然而, 在施工过程中, 由于种种原因, 普遍存在着张力不足的问题。

根据广东省交通质监站在 2013 年 4 月组织开展的, 在建公路桥梁预应力工程施工质量专项监督检查工作的通报, 关于预应力张拉质量状况, 指出“根据检测结果, 在抽检的 14 片预制梁中, 2 片良好、10 片合格、2 片较差。作为梁板质量的关键性指标, 预

应力张拉施工质量还有待提高。”

此外，在个工程中，存在钢绞线不连续的现象（如下图），其张力严重不足。从而极大地威胁桥梁的安全。

造成钢绞线不连续的原因主要有：

- (1) 在反弯点，以及管壁变形，或者管壁破损造成混凝土浆液流入硬化，使得钢绞线难以穿过。此时，有的施工人员就采取从两端伸入钢绞线的方法。
- (2) 有的施工人员则恶意地偷工减料，在两端设置设计的钢绞线，而在中间则减少钢绞线的根数；



钢绞线不连续的状况

由于钢绞线的有效截面不够，所以无法张拉到设计的张力，甚至完全不张拉。其造成的危害很大，严重时会导致桥梁的断裂。因此，如果能够准确地测出锚索/杆的现有张力（也称为“有效预应力”），也可以推断出钢绞线的连续性，从而有效地杜绝这类恶性事件的发生。

对于空悬的钢索、拉杆，其张力有较好的测试方法（基于自振频率）。而对于拉杆、特别是填充拉杆，由于其内部钢绞线与外套之间存在脱空现象，使得钢绞线与拉杆壳体间的振动不一致以及难以确定振动质量及抗弯刚度，使得张力测试非常困难。此外，埋入结构内部的锚索体系，基于自振频率的测试方法则有很大的局限，因此，迄今尚无有效的张力测试方法。

为此，在综合国内外现有先进技术的基础上，我们提出了基于等效质量法（TTEM）的埋入式预应力测试原理和方法：该方法通过对锚头激振并测试锚头的振动响应，从而可以推算埋入式锚索/杆的张力。

该方法已获得国家发明专利，专利号：ZL200910177856.5。

## 3.2 测试方法和原理

### 3.2.1 理论基础

埋入锚索与空悬锚索的边界条件有很大的不同，而且埋入式锚索无法对内部锚索激发自由振动，只能通过对锚头或露出锚索激振。因此，单纯依靠频率的测试方法有非常大的缺陷，严重影响了测试范围和测试精度。

为此，我们将锚头、垫板等简化为如下的模型。即将锚头与垫板、垫板与后面的混凝土或岩体的接触面模型化成如下的弹簧支撑体系。

该弹簧体系的刚性  $K$  与张力（有效预应力）有关，当然张力越大， $K$  也越大。另一方面，在锚头激振诱发的系统基础自振频率  $f$  可以简化表示。其中， $M$  为振动体系的质量。

在式中，如果  $M$  为一常值，那么根据测试的基频  $f$  即可较容易地测出张力。然而，通过实验发现，埋入式锚索在锚头激振时，其诱发的振动体系并非固定不变，而是会随着锚固力的变化而变化。锚固力越大，参与自由振动的质量也就越大。

在此基础上，我们提出了基于“等效质量”原理的有效张力测试理论和测试方法。利用激振锤（力锤）敲击锚头，并通过粘贴在锚头上的传感器拾取锚头的振动响应，从而能够快速、简单地测试锚索（杆）的现有张力<sup>[4]</sup>。

同时，我们根据该理论开发了相应的张力测试技术（图 4-2-3）和设备。经过大量的试验验证，证明了该理论的正确性。验证结果还表明，该技术的测试范围、精度和测试效率能够满足工程实际的要求，已达到了实用水平。

### 3.2.2 计算参数的标定

如果条件允许，对各型号锚具，乃至各个现场进行参数标定是十分理想的。然而，由于条件所限，难以一一标定，所以在分析各参数意义的基础上，建立相关的数据库是非常必要的。

另一方面，在现场中，通过钢筋计等方法能够得到部分张力数据。然而，这些数据往往集中于一个狭小的区域，不利于参数的标定。为此，我们提出了相应的简略标定法。

## 3.3 模型试验验证及应用

### 3.3.1 四川理工升拓无损检测联合实验室

#### 1) 混凝土试验模型概要

## 2) 试验结果

测试得到的传统的张力-频率关系。可以看出，当张力超过 150KN 后，测试得到的自振频率已基本不再变化。这说明了单纯采用频率的方法是无法有效地测试埋入式预应力体系的有效预应力的。以及我们提出的等效质量法（TTEM）的测试结果。

可以得出：

- (1) 传统的单纯采用频率的方法无法适用较高张力状态。而等效质量法（TTEM）则在整个张力量程内保持了较好的相关关系，从而能够适用于张力检测；
- (2) 室内验证的结果表明，最大测试误差为设计值的 12%，平均测试误差为 3.7%。

## 3.4 现场验证及应用

### 3.4.1 贵阳 ZB 立交桥，2011.05

#### 1) 概要

该桥是“一纵一横”城市主骨架路网的立交节点，为贵阳新交通体系中的“大十字”关键工程。受贵阳市政建设公司委托，我公司对大桥预制箱张力进行检测和验证。

#### 2) 验证结果

表 3- 4-1 张力验证测试结果（9 束）

锚索编号	T1Z-1- D9	T1Y-2- D9	T2Z-1- D9
实际张力 (KN)	1757.7		
测试结果 (KN)	1756.7	1666.9	1642.8
相对误差	-0.06%	-5.17%	-6.54%

#### 3) 实际应用

对 3 个 12 束锚索（设计值应为 2343KN），现场测得 H1-1、H1-2、H1-4，张力分别为，1332.01、1780.55、387.98，其张力数值均低于理论值。同时，测得的灌浆密度指数也很低，表明这些锚索存在极大的安全隐患，因此施工方对此 3 个孔道及时进行退束（推出钢绞线）处理，发现正如检测结果所反映的那样，灌浆质量很差。为此，施工方重新进行了张拉和灌浆，从而保证了施工质量。

### 3.4.2 黑龙江某事故桥梁预应力评估，2012.10

由于事故的影响，某大桥的预应力体系受到了损伤。应相关方面的邀请，我们对某既有大桥的锚下有效预应力进行了检测和评估。



张力测试对象

我们在既有检测经验的基础上，结合该桥的具体情况，采用多种测试方法综合地测试了残存预应力、锚下混凝土质量等指标，得到了相关方面的认可。

### 3.4.3 广东某在建桥梁预应力评估，2013.10

广东某高速在建大桥在施工过程中，因工人操作失误，导致部分预应力梁未进行张拉或部分张拉。为了防止该类预应力梁出现在在建大桥中，受业主委托，我公司与重庆交科院的专家一道，对该在建大桥部分预应力孔道（已灌浆）进行测试。

测试结果表明，有效张力在设计值（1560KN）的-7.2%~3.3%之间。考虑到无损测试的误差区间（约为设计张力的10%），我们认为该批孔道的张力值符合设计要求，并得到业主、监理和施工方的一致认可。

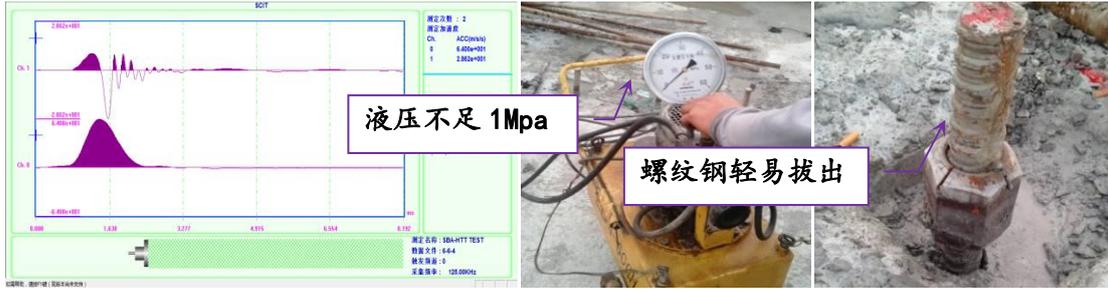


现场测试场景

### 3.4.4 张拉锚杆验证（四川，2015.05）

因怀疑四川某在建大桥现浇部分竖向螺纹钢预应力张拉不足，我们同相关单位对其利用等效质量法进行检测。检测结果发现部分螺纹钢确系存在未张拉现象，为验证测试结果可靠性，遂对其进行反张拉验证。用液压千斤顶进行反拉时，发现液压显示不足1MPa，且螺纹钢非常轻易的就被拔出。

该现象得到业主高度重视，通过施工单位的停工整改，确保了施工质量。



现场测试场景及未张拉螺纹钢波形

现场反张拉验证

### 3.4.5 铁路高架桥有效预应力检测（安徽，2018.07）

某客运专线在巡检中发现，有两孔钢绞线出现回缩现象。应相关单位邀请，我们对相关锚头进行了锚下有效预应力进行了检测。



测试对象及测试情景

### 3.4.6 在役桥墩锚下有效预应力（安徽马鞍山，2019.08）

应安徽高速检测中心邀请，对某大桥桥墩竖向预应力进行检测，该预应结构为无粘结预应力，每预应力束设计力值为 5000KN，共 35 根钢绞线，外部防护方式为金属罩，钢绞线外露长度约 25cm，预应力筋表面涂抹防锈油脂。

根据现场情况，选择采用等效质量法（DB35/T 1638-2017）对该结构的锚下有效预应力进行检测。



### 现场检测场景及检测对象

检测结果显示该孔道剩余锚下有效预应力约为 4616KN，相较设计力值仅差 7.68% < 10%，根据 DB35/T 1638-2017 判定该孔道预应力满足设计要求。

通过本次检测，也发现部分预应力束的预应力存在不同程度的损失，为相关单位对结构进行处理提供了可靠的依据。

## 3.5 测试流程、特点和适用范围

### 3.5.1 测试流程

在利用本技术进行张力测试时，对于不同型式的锚索，需要事先进行标定以确定相应的参数。根据不同的标定条件，可分为标准标定和简易标定。

标准标定一般采用一端张拉、一端标定的方法。而现场缺乏相应的标定条件，则可采用简易标定的方法，即在设计张力附近选取已知张力的若干点进行标定。

### 3.5.2 特点

- 1) 测试精度高：根据大量的验证试验的结果，本设备的测试误差一般小于 10%FS（量程）。
- 2) 适用范围广
  - (1) 适用对象：可适用于量程从数十 KN 到数千 KN 的锚索；
  - (2) 适用范围：在设计张力范围内均可适用，而在 20~80%量程区间，测试精度更高；
  - (3) 适用型式种类：通过标定，可适用于锚头外露的各种锚索（杆）和螺栓；
  - (4) 无论是灌浆前还是灌浆后，均可测试。

### 3.5.3 优越性

目前，作为测试张力的方法主要有拉拔试验和预置张力计。可以看出，本技术与拉拔试验结合，可以取长补短，较为圆满地解决张力检测的问题。

#### 测试方法的对比

方法	优点	缺点
拉拔试验	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 测试原理简明</li> <li>✓ 可测试单束钢绞线的张力</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 测试设备较为庞大、复杂；</li> <li>✓ 不适用于已灌浆孔道；</li> <li>✓ 有可能破坏垫片</li> </ul>

预置张力计、应变计、磁通量	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 可连续监测</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 一般不用于检测</li> <li>✓ 成本较高，应变计易损坏；</li> <li>✓ 设置钢筋计需切断钢筋，增加不安全因素；</li> </ul>
本技术	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 测试方便、快捷，可大量检测；</li> <li>✓ 也可适用于已灌浆孔道；</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 测试原理复杂；</li> <li>✓ 对同型锚具需标定；</li> </ul>

### 3.5.4 测试精度和误差

根据我们数十个工程的统计，等效质量法测试结果与实测值之间的相对误差如下：63.93%误差在±5%范围内、88.52%误差在±10%范围内、91.80%误差在±20%范围内。

因此，在绝大部分情况下，测试误差小于设计值（或者称满量程，FS）的10%。

### 3.5.5 主要问题点

但是，作为一种崭新的张力无损检测方法，在一些特定的情况下，其测试精度会受到较大的影响。

对此，山东大学桥梁所在实际使用过程中，对计算分析过程进行了适当的简化，提高了测试结果的稳定性。

### 3.5.6 应用方案建议

为了更好地服务于工程实践，根据具体的工程状况和要求，可以将本技术与拉拔检测技术（反拉法）相结合。由于反拉法需要钢绞线有一定的自由区间，因此不适合全面灌浆的工况（如桥梁）。此外，拉拔法会产生一定的残余变形以及可能会造成夹片的损伤，会对预应力产生一定的影响。因此，拉拔法只能在灌浆前小范围抽检。为此，结合等效质量法和反拉法是十分理想的。下面为推荐应用方案。

## 第4章 反拉法测试

“反拉法”时对具有自由端的及拉拔条件的锚下预应力最为可靠的检测方法。

### 4.1 测试流程、特点和适用范围

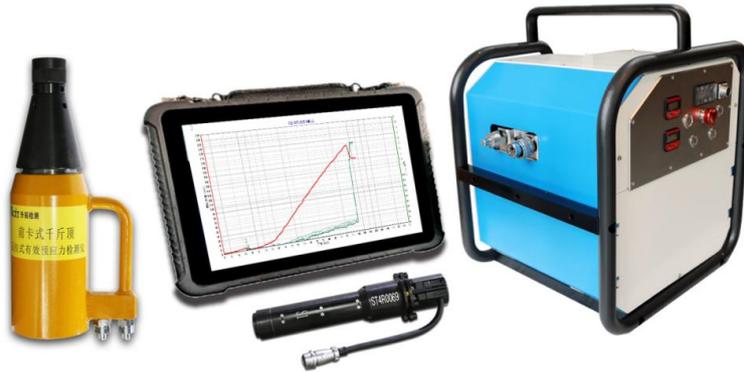
反拉法的基本原理如下：

- 1) 对露在体外的钢绞线进行整体或者单根张拉，同时测试张拉力和钢绞线伸长量。也可以对锚头本身进行拉拔；
- 2) 在拉拔力小于原有有效预应力时，夹片对钢绞线有紧固作用，能够自由伸长的

钢绞线为露出的自由长度；

- 3) 在拉拔力超过原有有效预应力时，锚头与夹片脱开，能够自由伸长的钢绞线除了露出的自由长度以外，一部分位于锚下的钢绞线也参与张拉。此时，自由伸长的钢绞线长度就会有较明显的增加。另一方面，夹片本身也会随着钢绞线的伸长而产生向外的位移。

因此，通过量测拉拔力~钢绞线或者夹片的位移关系，即可推算锚下有效预应力。



反拉式有效预应力检测仪

## 4.2 常用方法

目前，常用的反拉法有两类，即整束张拉和单根张拉。

### 4.2.1 整束张拉

整束张拉法的基本概念如下图，在外露钢绞线上安装同型工具锚，并在工具锚和原锚头（工作锚）之间设置千斤顶及位移、力传感器。

张拉钢绞线，当反拉力小于原有预应力时，参与伸长的钢绞线为外露长度。而反拉力大于原有预应力时，孔道内自由钢绞线也参加伸长。此时，参与伸长的钢绞线长度大大增加，从而在同样的拉拔力增量下，钢绞线的伸长量会显著增加，即拉拔力~位移关系出现拐点，该拐点的位置即反映了原有预应力。

### 4.2.2 单根张拉

单根张拉法的基本概念如下图，在外露单根钢绞线上安装工具锚，并在工具锚和原锚头（工作锚）之间设置千斤顶及位移、力传感器。其中，位移传感器量测夹片的位移。

张拉钢绞线，当反拉力小于原有预应力时，夹片对钢绞线有紧固力，不发生位移。而反拉力大于原有预应力时，夹片与钢绞线一道也参加伸长。此时，夹片的位移急剧增加，因此，测量夹片的位移趋势即可判定有效预应力。从理论上讲，只要夹片产生相对于锚头的位移，即可判定张拉力已大于原有有效预应力。因此，降低测量噪声，提高信

噪比是有意义的。此外，夹片产生相对于锚头的位移与孔道内钢绞线的自由段长度有密切的关系。

#### 4.2.3 单根张拉与整束张拉的比较

单根张拉法与整束张拉法相比，其区别主要在于两点：测试效率与仪器的便携性、预应力的判据

单根张拉法与整束张拉法的预应力判据是有明显不同的。对于整束张拉，其预应力判据是根据 F~S 曲线的下曲拐点，而对于单根张拉，则目前有两种判据：F~S 曲线的第二次上曲拐点、夹片的位移绝对值。

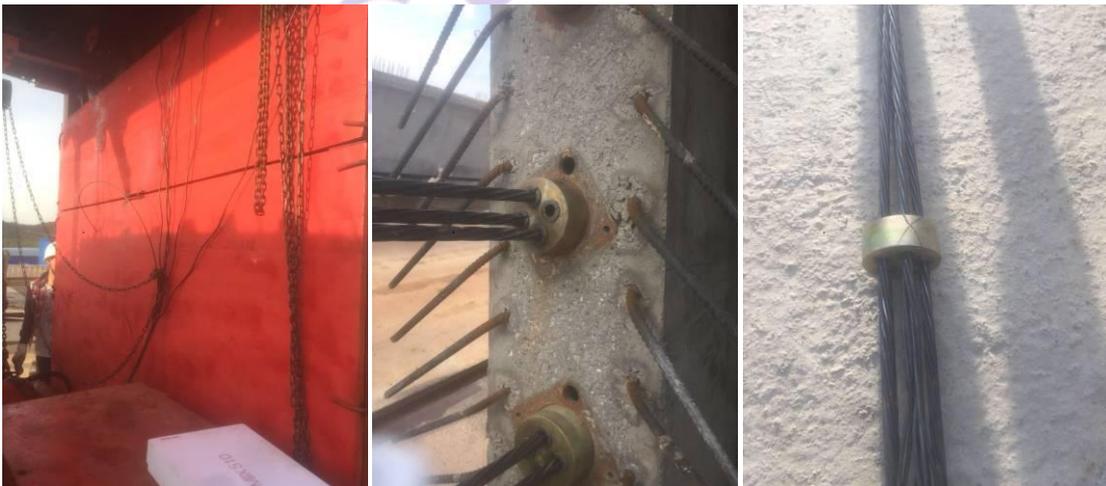
相对而言，单根张拉法对夹片的位移量相对比较容易控制，而整束张拉法的控制则较为困难。特别是各钢绞线的张拉预应力相差较大时，原预应力较小的钢绞线率先进入力平衡状态（即夹片开始松动被并带出），但由于其它钢绞线尚未进入力平衡状态，因此千斤顶继续工作，使得该夹片继续被带出，有可能使其被超拉进而超过允许的回缩极限（1mm）。所以，从对预应力结构的不利影响来看，单根张拉有一定的优势。

#### 4.2.4 反拉式检测事故分析及安全注意事项

如前所述，在采用反拉法进行有效预应力检测时，有可能出现超张拉的问题。该问题不仅影响检测后孔道（桥梁）的承载力，而且有可能造成钢绞线断裂（拉崩）、飞出的事故。

##### 案例一：钢绞线拉崩（2018.10）

下图是某检测机构在使用某厂家生产的反拉设备检测时，钢绞线拉崩、飞出的情形。



某厂家设备钢绞线拉崩、飞出事故照片

造成上述事故主要的原因有：钢绞线从中间破断；钢绞线从另一端夹片处滑脱；夹片本身缺陷：如夹片与锚具不配套、存在夹片滑丝，破裂等不良；已经做过反拉检测，由于反拉造成夹片不归位。

## 4.3 反拉式有效预应力检测仪（SRS-PTT）的原理及验证

我们开发了基于单根张拉的有效预应力检测仪 SRS-PTT。

### 4.3.1 反拉式有效预应力检测仪（SRS-PTT）的测试原理

本设备张拉过程中，通过对夹片的位移进行简单且可靠的控制（通常限制在 1mm），从而尽可能减少检测作业对夹片的损伤以及对极限承载力的影响。同时，根据夹片位移等参数，还可对测试值进行修正以进一步提高测试精度。

### 4.3.2 特点及优势

整套设备总共有 5 个传感器，均能实现防止超张拉以及其它各种保护功能。反拉式有效预应力检测仪（SRS-PTT）在单根张拉结束退千斤顶时，可以根据位移传感器的数值判断夹片是否退回原位，这样能直观的判断出本次张拉是否对整体结构造成不良的影响。如果在回到初始位置时，位移传感器数值为零或者与初始值相同，则可判定夹片回到原位，本次张拉没有对整体结构产生影响。

设备的特点在于：

- （1） 手自一体，可实现一键自动张拉、一键退顶。也配备了手动模式，提高操作安全性。同时，张拉、退顶速度可无极调节；
- （2） 3 个独立位移传感器实现夹片位移量独立检测和三重保护。不仅能够有效的避免超张拉，还能够确定本次张拉是否对结构产生破坏。
- （3） 交、直流均可供电，现场有电源时，可使用配送的 AC-DC 电源工作。如使用配送的电池供电，样机测试使用的电池可检测 300 根左右的钢绞线；

### 4.3.3 试验验证（山西太原，2016.05）

应山西省交通科学研究院邀请，我们进行了试验验证。测试采用张拉试验台（海华龙测试仪器有限公司生产的 MGW 型 600 吨级静载锚固试验机）。

测试时，将两个应力传感器分别安装在锚固机两端，通过张拉分别读取应力传感器测试值，两者之间进行对比。检测验证及回缩损失试验采用同步方式进行。

测试结果表明：

- （1） 由于反拉法的检测作业，会引起一定的预应力损失。如果控制的当，该损失可控制在 0.5% 以内；
- （2） 检测误差率在 -0.6%~ -1.4% 之间，平均在 -1.0%。

#### 4.3.4 对比试验验证（广东佛山，2020.01）

##### 1) 概述

我公司受邀于广东佛山某现场进行了对比演示（我司，上海 T、武汉 Z、重庆 Z 等）。



左：现场测试梁体

右：反拉设备（依次：升拓、T、武汉 Z、重庆 Z）

各家反拉设备对比

厂家	控制方式	自动化程度	力值来源	夹片侦测	限制方式
上海 T	无线（平板电脑）	全自动	油压换算	-	软件识别拐点
武汉 Z	无线（定制主机）	全自动	油压换算	-	软件识别拐点
重庆 Z	无线（手机 APP）	全自动	力传感器	-	不详
四川升拓	有线/无线	手动/全自动	力传感器	√	识别夹片位移

##### 2) 测试结果

锚下有效预应力设计标准值为 178KN。本次对比内容为同束重复测试三次重复性、同束不同厂家测试对比，测试孔道如下布置，其中每孔中钢绞线根数为 5 根。

各厂商分别各测试一束钢绞线，其对应一束钢绞线的每根均重复测试 3 次，以对比分析设备自身的重复性以及是否对结构造成影响，测试对比数据如下：

各家反拉设备自身重复性对比情况

厂家 序号	重庆 Z (N5Y)			武汉 Z (N5Z)			上海 T (N4Y)			四川升拓 (N4Z)		
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次
-1	168.9	170.3	171.4	190.0	190.0	190.9	193.7	191.1	188.7	188.5	188.7	189.3
-2	173.6	175.6	176.7	179.7	179.9	179.7	193.9	190.5	190.6	192.8	192.6	192.4
-3	166.6	167.5	167.9	184.0	184.1	183.9	202.3	185.8	181.0	190.2	189.5	189.4
-4	167.3	167.3	167.4	183.3	183.9	183.8	201.3	183.3	181.7	185.0	184.6	185.0
-5	166.9	167.5	167.7	188.9	187.6	188.7	188.7	186.5	183.6	185.3	183.8	184.1

通过分析，各家设备的数据重复性如下：

表 4-3-5 各家反拉设备重复测试三次数据标准差 (KN)

厂家 序号	重庆 Z(N5Y)	武汉 Z(N5Z)	上海 T(N4Y)	升拓 (N4Z)
-1	1.02	0.43	2.04	0.31
-2	1.28	0.10	1.58	0.94
-3	0.54	0.10	9.12	0.35
-4	0.05	0.28	8.89	0.18
-5	0.34	0.60	2.09	0.66

可见本公司设备的数据重复性很好，也证明了设备对结构扰动极小。同时，测试有效预应力结果值也符合设计标准值。

## 4.4 反拉式有效预应力检测仪（SRS-PTT）的现场应用

### 4.4.1 现场应用（贵州 LW 高速，2016.07）

山西交通科学研究院同我公司技术人员，对贵州省 LW 高速公路现场预应力桥梁进行反拉测试。测试对象为贵州省 LW 高速公路现浇预应力桥梁，测区为右 4-4 梁，该端面上有三处预应力钢绞线，每处钢绞线含有 9 束单根钢绞线。



测试现场示意图

下表为测试得到的预应力与实际预应力的对比表，可以看出，测试结果显示测试结果与控制预应力值基本符合，相对误差值控制在 5%以内，其精度是令人满意的。

### 4.4.2 现场应用（江苏某高速，2018.03）

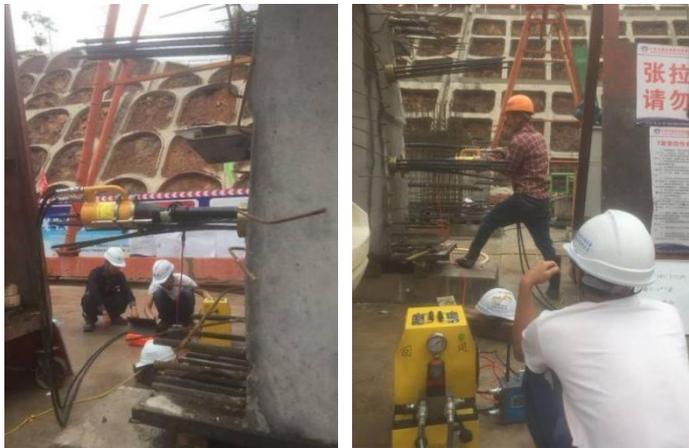
受某交通建设工程管理处的邀请，我公司技术人员对某高速预制梁的锚下有效预应力进行了检测演示。

测试结果显示，该梁的孔道预应力值整体较低。

经现场验证核实，该梁为本批次梁的首件张拉梁，采用整束张拉且施工张拉稳压时间不足，同时针对有效预应力偏差 5%的两个预应力孔道，发现一孔道为夹片在张拉过程中损坏，另一孔道为钢绞线伸长量不对。施工单位根据检测结果及时做出张拉施工方案的整改，保证了工程质量。

#### 4.4.3 锚下有效预应力检测（云南某高速、2018.05）

受云南相关单位的委托，对云南某高速预制梁进行了锚下有效预应力检测，根据现场实际情况，对指定梁体的两孔预应力束进行了预应力检测。



现场检测场景

经过本次检测，发现夹片咬合力不足造成钢绞线滑丝的现象，并及时分析发现问题为施工方存在锚夹具未配套使用。

#### 4.4.4 现场应用（云南临沧某高速、2021.03）

受云南相关单位的委托，对预制 T 梁进行锚下有效预应力检测，现场对其指定梁体共 2 孔预应力束进行检测。



现场检测场景

检测结果表明：

- 1) 两个孔道锚下有效预应力值与标准值的偏差在 $\pm 5\%$ 有效范围内。
- 2) 同时通过与现场实际张拉记录值对比，本次检测结果与现场实际张拉情况均相符。

#### 4.4.5 现场应用（江西某高速、2021.09）

受江西相关单位的委托，对江西省吉安市某预制梁现场进行锚下有效预应力检测。根据要求，对指定梁体预应力束进行检测，并与客户自有上海某设备进行对比。



现场检测场景

经过本次对比检测：

- 1) 采用我司反拉设备对密集钢绞线检测时，更省力且效率更高。
- 2) 我司设备检测的便捷度获得客户的一致认可，特别是软件数据的处理和计算获得了客户很高的评价。

## 第5章 桥梁预应力精轧螺纹钢张拉力检测

在预应力桥梁中，箱梁开裂的主要原因之一是竖向预应力损失过大。其中的竖向精轧螺纹钢的张力问题较为严重，如螺母未拧紧、安装误差大、张拉不到位等。因此，工程上亟待一种能够有效检测施工过程中竖向预应力螺纹钢的无损检测方法。

学者们（如徐向峰<sup>[8]</sup>、钟新谷<sup>[9]</sup>等）对此也做了不少工作，2019年交通部还颁布了《桥梁用预应力精轧螺纹钢张拉力检测方法（JT/T1265-2019）》。在此，我们在相关资料和研究成果的基础上，进一步改良和升级，开发了相应的检测和标定办法，具体包括无损检测方法和反拉方法。

### 5.1 精轧螺纹钢张拉力的无损检测方法

#### 5.1.1 JT/T1265-2019 解读

针对交通运输部“桥梁用预应力精轧螺纹钢张拉力检测方法（JT/T1265-2019）”，对其使用方法、适用范围、计算方法（标定和测试）、问题点等进行分析和解读。

- 1) 使用方法:其基本方法是通过测试螺纹钢外露部分的自振频率（主要是基础频

率)，再根据螺杆、螺母的参数，并结合标定参数来推算张拉力。

- 2) 适用条件:压浆前; 螺杆外露长度在 80~300mm; 螺杆、螺母符合 GB/T20065 的相关规定。
- 3) 标定是根据设计张拉控制力, 分成四级 (30%、50%、80%和 100%) 进行标定。
- 4) 测试: 根据测试得到的动力特征系数  $k$  和上述曲线控制参数  $a, b, c, d$ , 推算张拉力。
- 5) 问题点: 该方法最大的问题是没有明确定义动力特征系数  $k$ , 及其计算方法。根据其参编人员发表的论文, 可以将其理解为螺母与垫板间的接触刚度, 当然也可以是其它的参数。

### 5.1.2 现场验证与应用 (江西吉安, 2021. 12)

#### 1) 概述

受江西交科院邀请, 我司技术人员于 2021. 12 月, 对江西省吉安市某竖向预应力螺纹钢现场进行了试验检测。

#### 2) 标定

现场精轧螺纹钢外露长度较短 (平均在 15cm 左右), 因此将应力传感器放在千斤顶尾部受力位置实时侦测千斤顶实际的力值, 每根待标定的精轧螺纹钢分别按设计应力值的 20%、40%、60%、80%、100%进行张拉和参数标定。

#### 3) 现场测试

对 35 根螺纹钢进行了检测, 其中, 有 8 根螺纹钢预应力值解析值低于 450KN。

测试验证结果得到了委托方的高度认可

#### 4) 小结

- (1) 材质的差异和锤头直径大小对标定和测试结果影响较小;
- (2) 本次现场逐级标定的结果较离散, 较实际偏差较大; 采用简易标定的结果进行检测反而取得了较好的效果, 检测结果得到了有效验证;
- (3) 本次现场逐级标定的结果较离散, 分析可能的原因有 (a) 现场螺纹钢锚固垫板与锚固螺母间有水泥层, 在张拉工程中锚固的状态改变较大 (b) 现场的螺纹钢大多是和锚固表面保持倾斜的状态 (未垂直)

### 5.1.3 精轧螺纹钢预应力检测演示（河南濮阳某刚构桥现场、2022.07）

受河南相关单位的委托，对濮阳市某钢构桥现场进行了竖向精轧螺纹钢预应力检测，根据现场对3个桥墩共9根精轧螺纹钢竖向预应力进行检测。

检测结果表明：

- 1) 精轧螺纹钢预应力的检测值普遍比设计力值偏低。
- 2) 经过现场确认：力值较低的两根精轧螺纹钢在张拉工作中有出现反力架底部混凝土破裂的状况，检测结果与实际较符。

## 第6章 BQIM 管理机能

为了更有效地对检测信息加以管理，也对检测工作加以监督，我们开发了升拓检测数据库系统 CI-DBS (Central Inspection Data Base System) 以及建筑质量及健康信息模型系统 (BQIM)。该系统具有如下机能：GPS 机能、远程无线传送、数据库机能检测信息可视化机能。

详细资料可参阅“SCIT-1-TEC-12-2017-工程质量及健康信息模型系统(BQIM)”。

数据库网站网址：[www.scitdbc.com](http://www.scitdbc.com)

## 结语及致谢

我们潜心多年研制的技术和设备可以对预应力梁、岩锚、拉杆/吊杆、锚索的张力进行综合无损检测。经过大量的现场验证，其测试精度、测试效率、适用范围等均可满足工程要求，对保证工程质量具有非常积极的意义。自2011年初推向市场以来，在较短的时间内已在多个桥梁工程中得到了综合性的应用。

在该设备中，包含了大量的独创性技术，如等效质量法（TTEM）等以及拉杆外壳影响因素的消除技术等。这些方法使得我们的测试技术得到了国内外广泛的认可，均已申请了国家发明专利并取得多项授权。

在此，我们衷心期望这些技术、方法和设备能够为我国的土木工程建设贡献自己的力量，同时也期待着在实际应用中不断地完善和成熟。

最后，衷心向各位合作伙伴以及为本文提供了宝贵资料以及关心、支持我们的各位朋友表示诚挚的谢意！

## 技术支持

- ✓ 本资料为内部资料，仅供本公司及相关单位人员参考。未经本公司许可，任何单位和个人不能下载、阅读以及转载；
- ✓ 有关本资料相关的任何疑问，请咨询：
  - ✘ 四川升拓检测技术股份有限公司 客服咨询专线
  - ✘ TEL: (028)6861-1507、6861-1511、6861-1527
  - ✘ MAIL: [Support@scentralit.com](mailto:Support@scentralit.com)
  - ✘ HTTP: [www.scentralit.com](http://www.scentralit.com)
- ✓ 有关本资料的最新更新，可查阅本公司官方网站的下载中心：  
[http://www.scentralit.com/download\\_201003181343459218.html](http://www.scentralit.com/download_201003181343459218.html)
- ✓ 升拓相关官网与平台：

### 升拓检测媒体矩阵 | 扫码识别即可进入

升拓检测官网



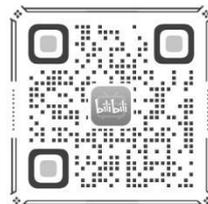
升拓官方公众号



抖音平台官网号



哔哩哔哩官网号



\*抖音和淘宝请分别使用对应软件扫码