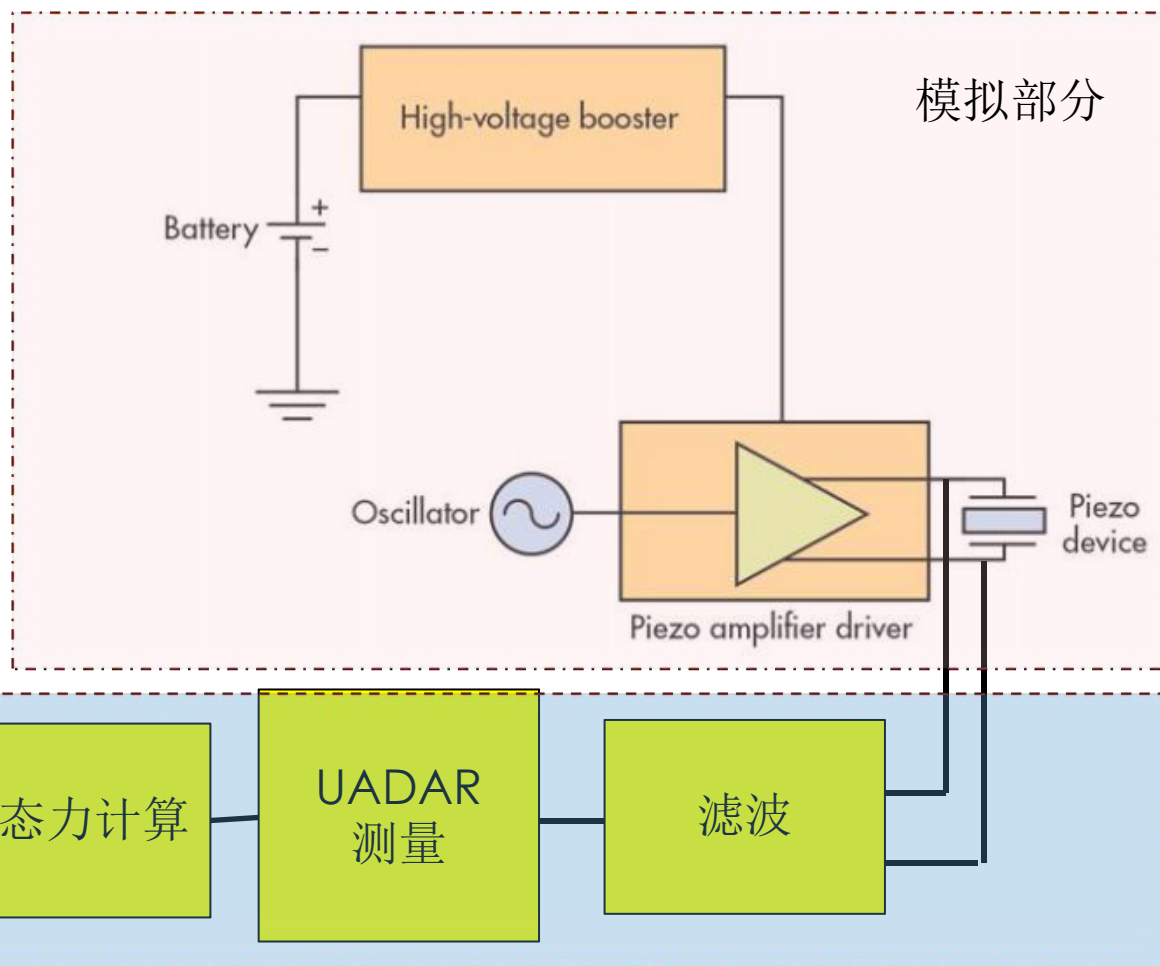


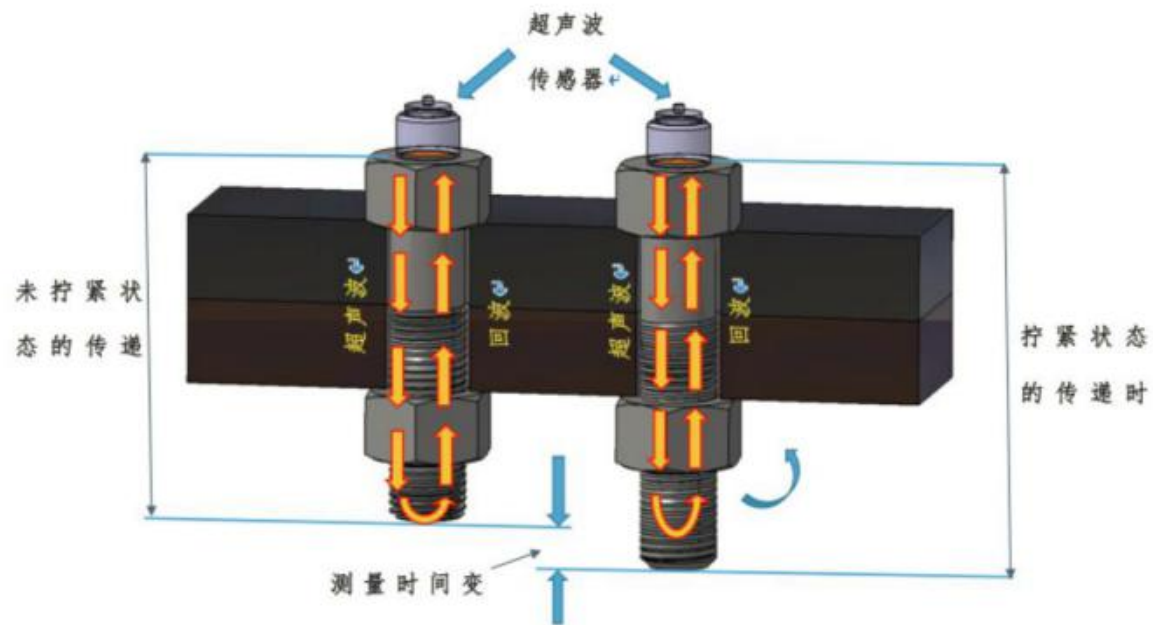
超声螺栓轴力测量技术

超声螺栓预紧力测量仪原理



纵波测量原理...

4.1



$$F = \frac{E \cdot S \cdot \Delta L}{L}$$

两个计算轴力的公式...

$$F = \frac{E \cdot S \cdot \Delta L}{L} \begin{cases} \rightarrow P_R = \left(\frac{AEK_R}{L} \right) \left(\frac{V_m}{V_i} \right) \delta L_c + Y \\ \rightarrow P_S = \left(\frac{V_m}{V} \right) \left(\frac{AE}{1 - \alpha} \right) \left(\frac{\delta L_c}{L + \delta L_c} \right) + Y \end{cases} \quad \alpha = \frac{\Delta V_m}{\varepsilon \cdot V_m}$$

P = Preload, lb,

A = Bolt cross section area, in²,

E = Young's modulus, lb/in²,

K_R = Raymond Stress factor (~0.3 for steel),

L = Bolt effective length under tensile stress, in,

V_m = Ultrasonic velocity in material, in/sec,

V_i = Instrument setting for ultrasonic velocity, in/sec,

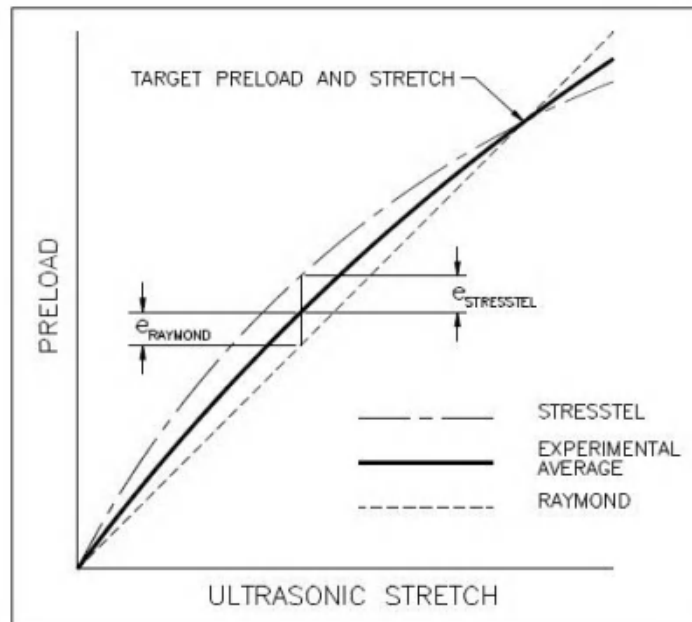
δL_c = Temperature compensated ultrasonic stretch, in,

Y = Y intercept of calibration linear fit

α = Acoustoelastic constant

ε = Strain.

测量误差来源 (1) ...

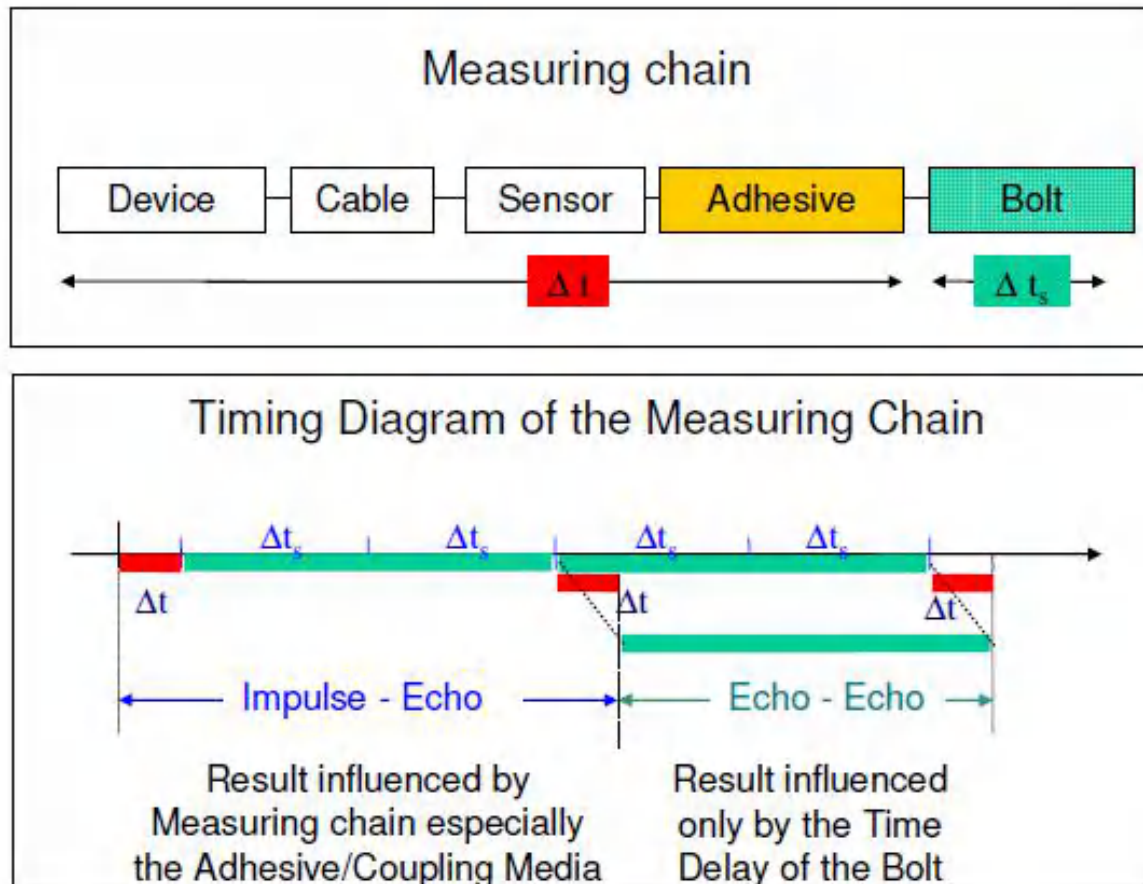


$$\left(\frac{\Delta P_R}{P_R}\right)^2 \cong \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_m}{V_m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L_g}{L_g}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \alpha}{1-\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \delta L_c}{\delta L_c}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Y}{P_R}\right)^2$$

$$(\Delta \delta L_c)^2 = \left([\Delta \delta L_c]_{\text{coupling}}\right)^2 + \left([\Delta \delta L_c]_{\text{temperature}}\right)^2 + \left([\Delta \delta L_c]_{\text{instrument}}\right)^2$$

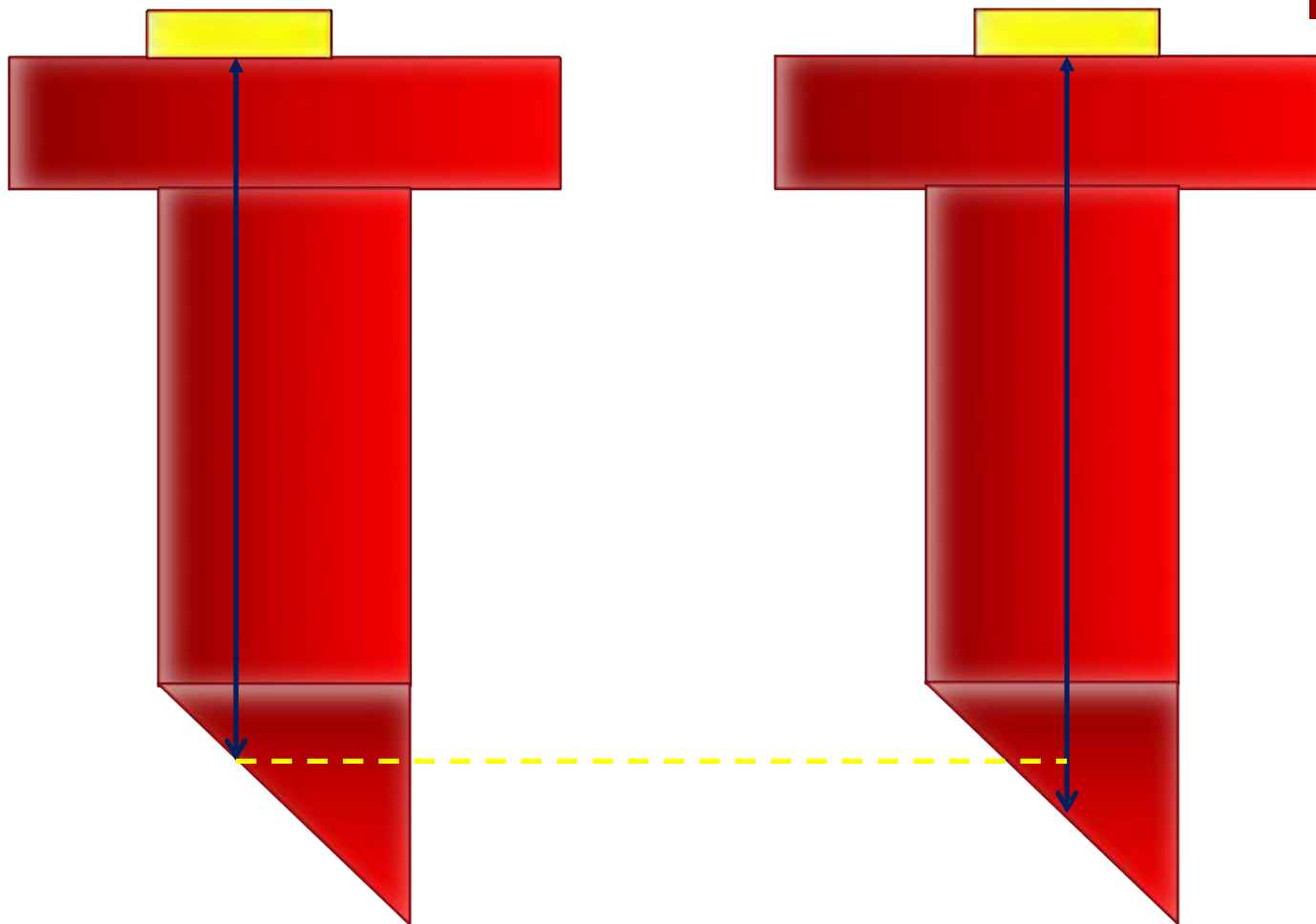
测量误差来源（2） ...

4.4



探头型测量位置所带来的误差...

4.5



超声伸长量VS实际伸长量...

$$L_0 = V_0 t_0$$

$$L_1 = V_0 (1 - \underline{k_s} \sigma - \underline{k_t} \Delta T) (t_0 + \Delta t)$$

$$\Delta L = L_1 - L_0 = V_0 t_0 - (\underline{k_s} \sigma + \underline{k_t} \Delta T) V_0 t_0 + V_0 \Delta t - (\underline{k_s} \sigma + \underline{k_t} \Delta T) V_0 \Delta t - V_0 t_0$$

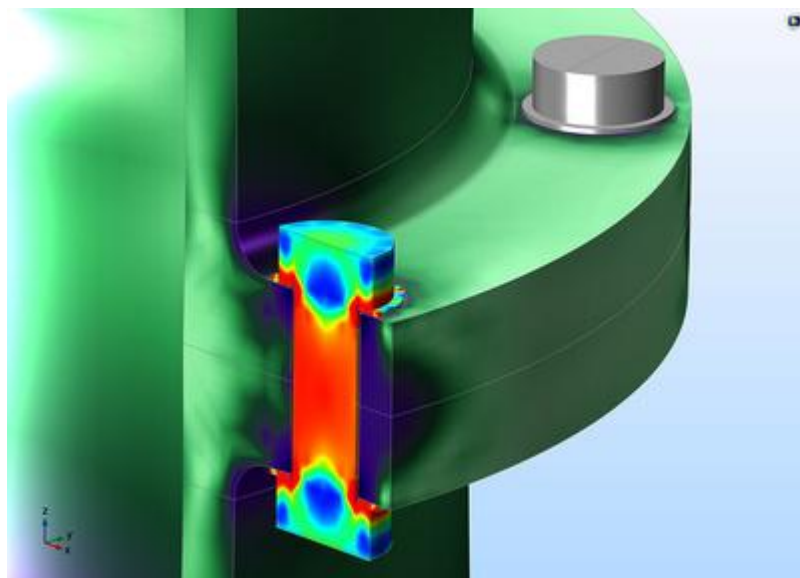
$$= V_0 \Delta t - V_0 ((\underline{k_s} \sigma + \underline{k_t} \Delta T) t_0 - (\underline{k_s} \sigma + \underline{k_t} \Delta T) \Delta t)$$

$$\approx V_0 \Delta t - V_0 t_0 (\underline{k_s}^* \sigma + \underline{k_t}^* \Delta T)$$

$$= V_0 (\Delta t - t_0 (\underline{k_s}^* \sigma + \underline{k_t}^* \Delta T))$$

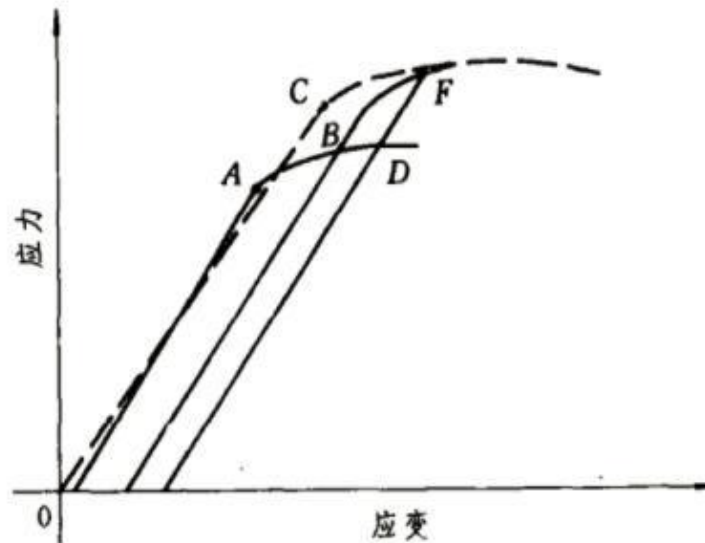
超声伸长量不等于实际伸长量....

螺栓标定建议...



- 建议在标定的时候，使用实际夹持长度；
- 尤其对于短螺栓，应力场分布不均匀对精度影响更大；

标定建议:纯拉VS扭拉...



虚线:纯拉伸曲线
实线:复合应力曲线
C:纯拉伸时屈服点
A:拉、扭复合作用时屈服点

图2 应力-应变图

- 对于使用在弹性段的螺栓，依据我们的实验，纯拉标定的轴力VS伸长量（声时差）数据完全可以应用于扭拉；
- 在拧紧过程中，螺栓受到拉伸和扭转联合作用，其强度比受纯拉伸载荷时的抗拉强度低15%左右。

纯拉VS扭拉实验...

4.9



使用张拉（纯拉）的标定数据，测量的扭拉轴力

扭拉力	#4	扭拉力	#5
14.91	15.02	6.13	7.5
19.97	19.86	10.42	11.92
24.83	24.45	15.27	16.33
30.53	30.2	20.53	21.58
35.83	35.7	25.62	26.3
		29.84	30.42
		34.3	35.02

张拉力	#1	#2	#3	#1窄头	#6
10	11.056	11.104	10.272	10.125	10.063
20	21.133	21.059	19.681	20.211	19.752
30	31.012	30.742	29.414	30.371	29.554
40	41.392	40.875	39.01	40.586	39.618
50	51.364	50.905	48.98	50.747	49.794

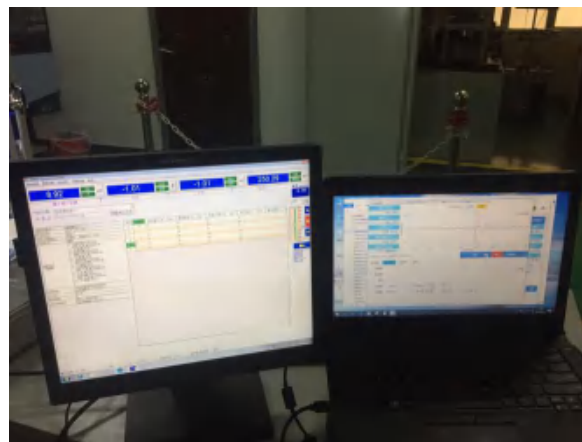
纯拉的复测数据

纯拉VS扭拉

4.10



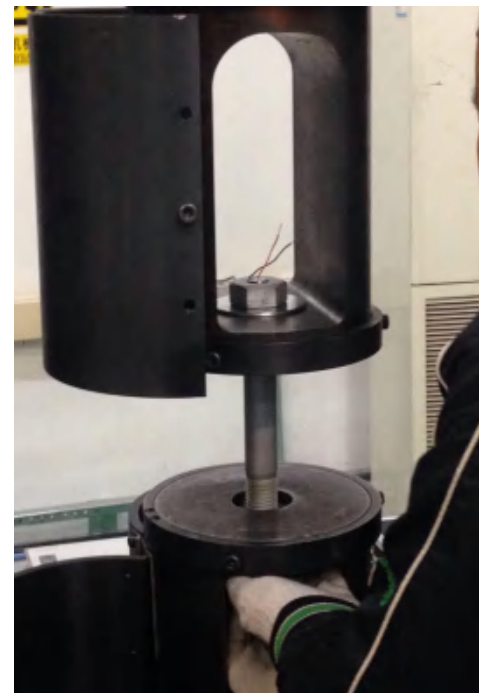
拉力机输出
8.92kN
12.57kN
14.15kN



超声输出
8.775kN
12.18kN
13.51kN

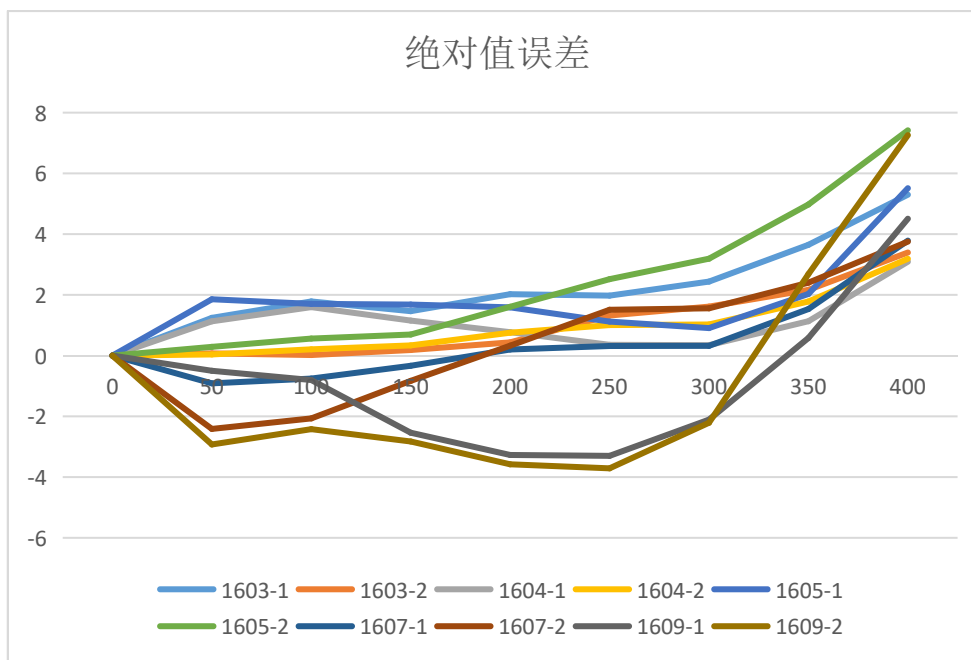
M14的高铁刹车盘螺栓，纯拉标定，扭拉测试。

测量精度案例（1）...



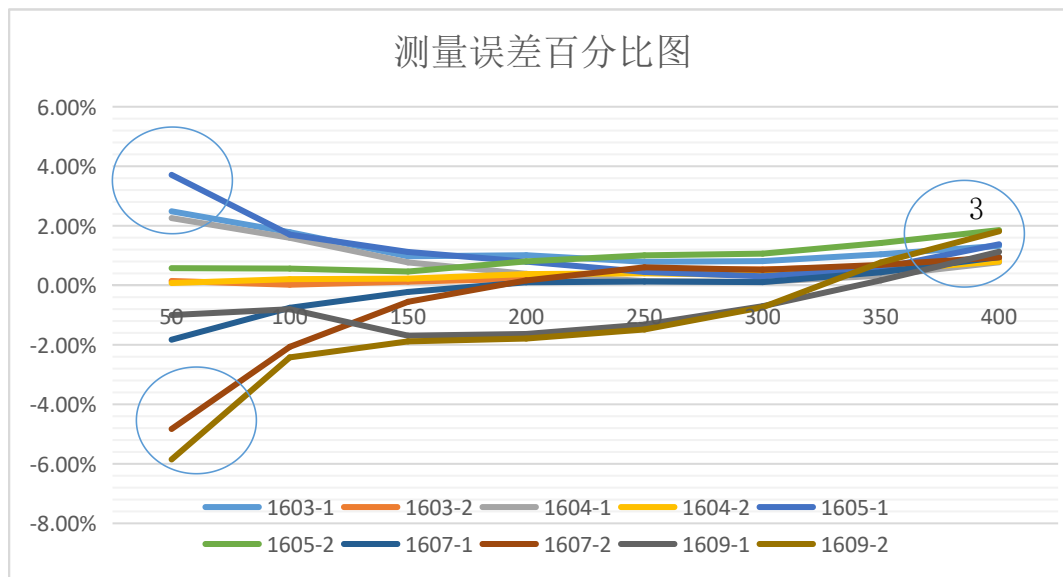
- 10.9级M30螺栓6支；在螺栓头部粘结2MHz压电陶瓷片并引出电极，使之成为智能螺栓；
- 实验采用航天标准化研究院紧固件认证中心的螺栓拉伸机，其主要指标为：量程（600KN）；精度（0.5%）。

测量精度案例（2） ...



- 在待测6支螺栓中，随机选择一支做标定实验：在0KN至400KN范围内以40KN为步长进行加载，同时使用iBolt智能螺栓系统进行测量，计算并获取应力补偿系数；
- 将获取的只与螺栓冶金材料相关的应力补偿系数，带入到其余5支螺栓，对其在0KN至400KN范围内以50KN为步长进行加载，比对螺栓拉伸机输出实际力值和超声系统测量值，进行误差分析。

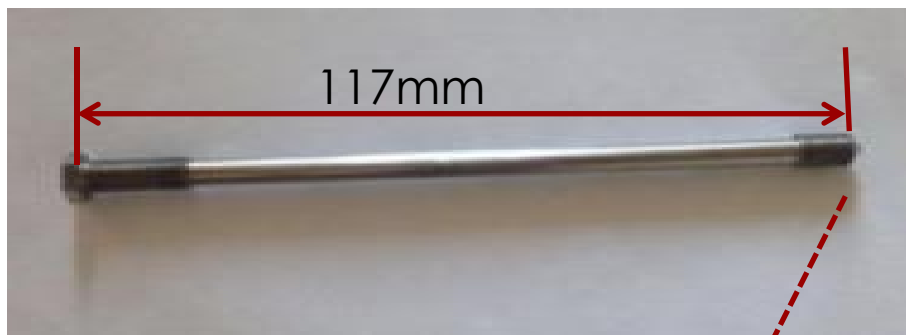
测量精度案例（3） ...



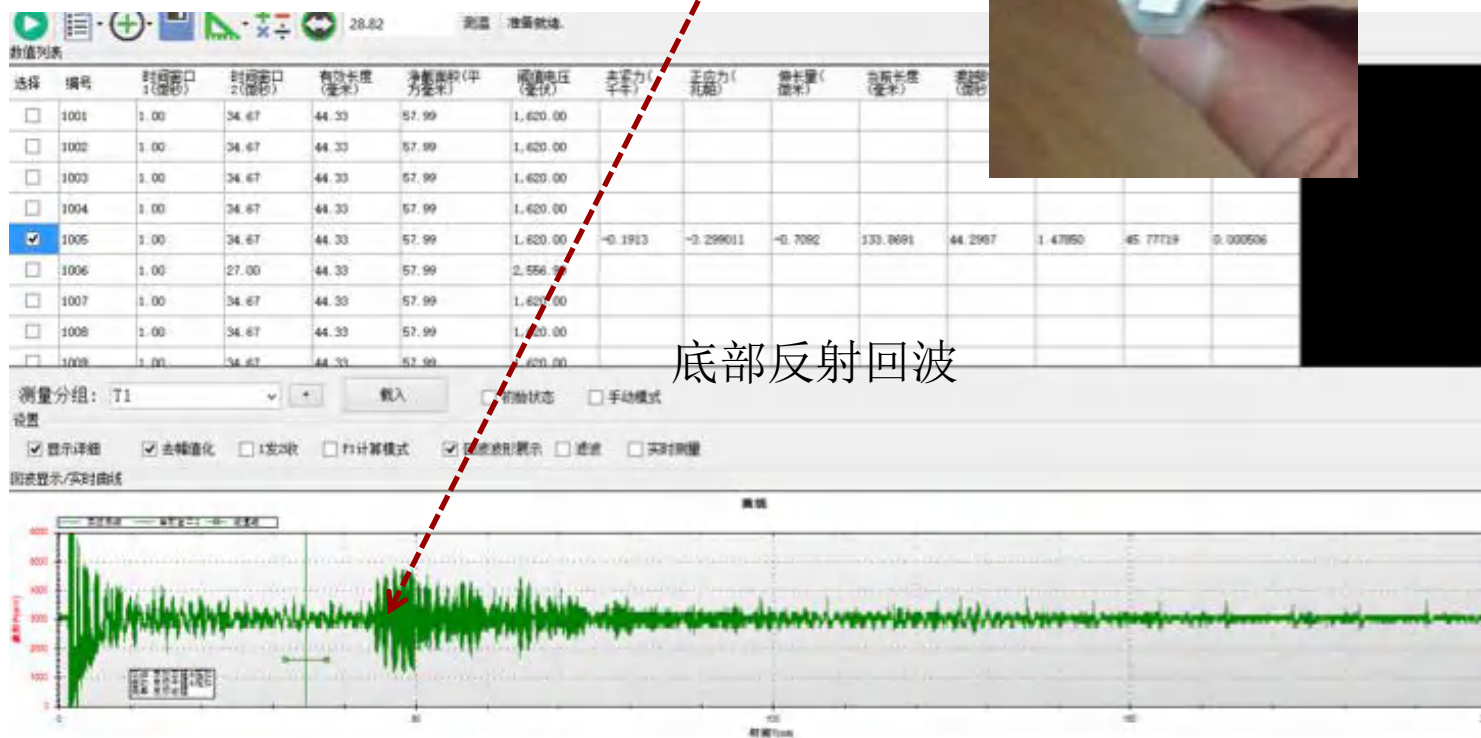
- iBolt智能螺栓系统，依据用户精度需求，可以通过对同一批次或同一厂家或同一型号进行一次性标定，获取只与螺栓冶金参数相关的应力补偿参数；
- iBolt智能螺栓系统，在高于额定预紧力60%的情况下，其测量精度可达 $\pm 1.5\%$ ；

长径比大的螺栓轴力测量（1）...

4.14

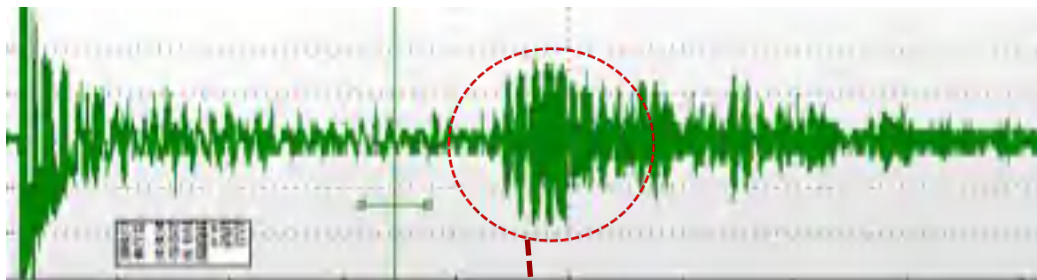


压电陶瓷片

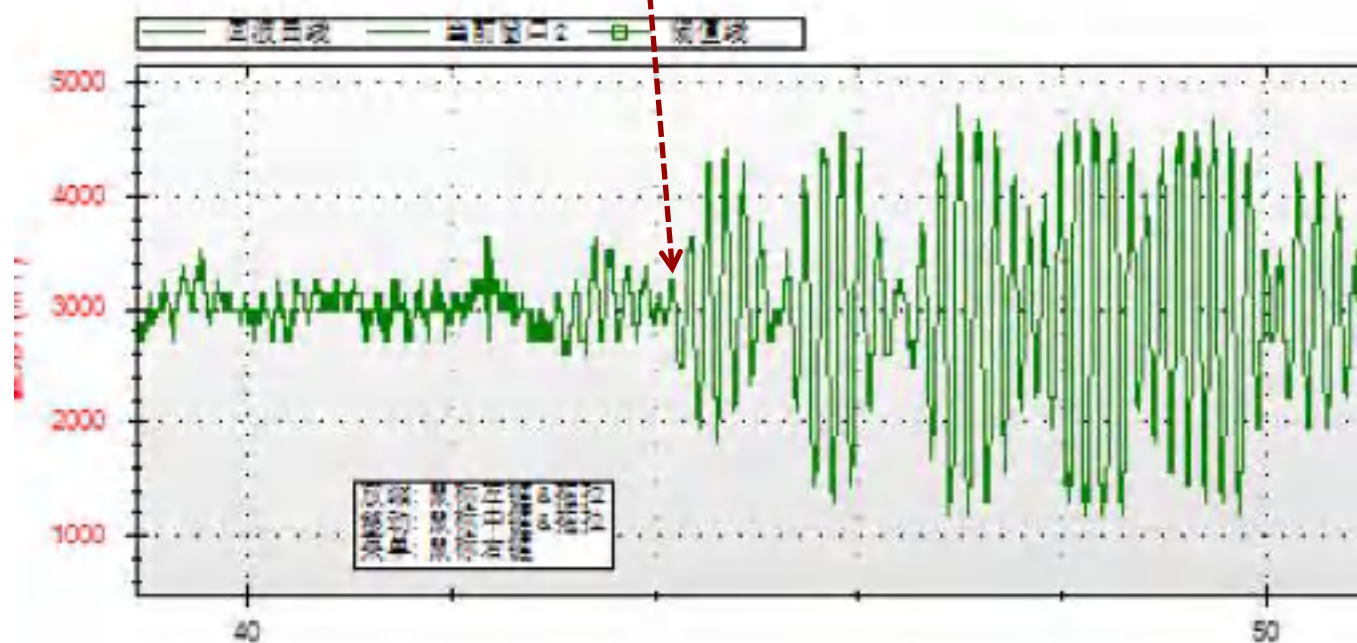


长径比大的螺栓轴力测量（2） ...

4.15

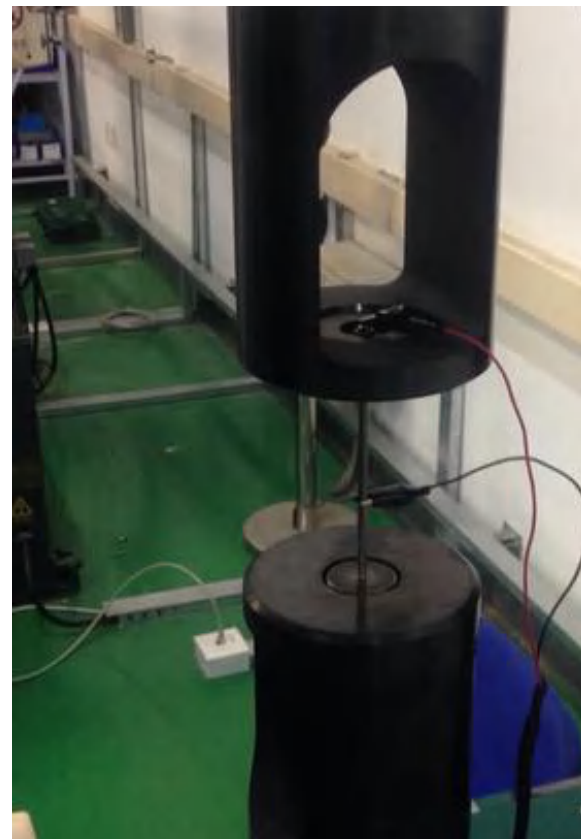
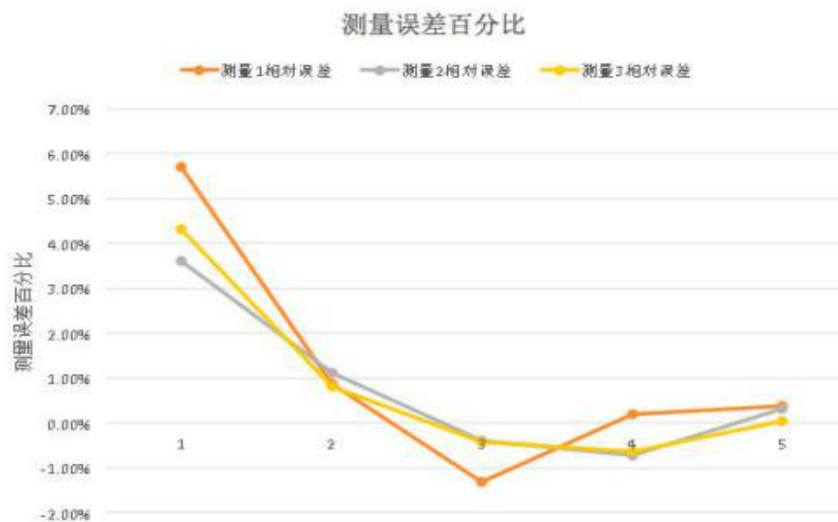
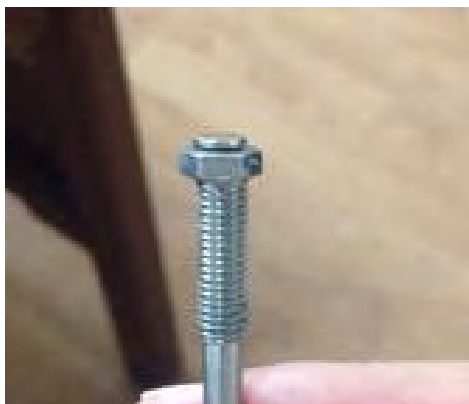


底部反射TOF（Time of Flight）约为44微秒



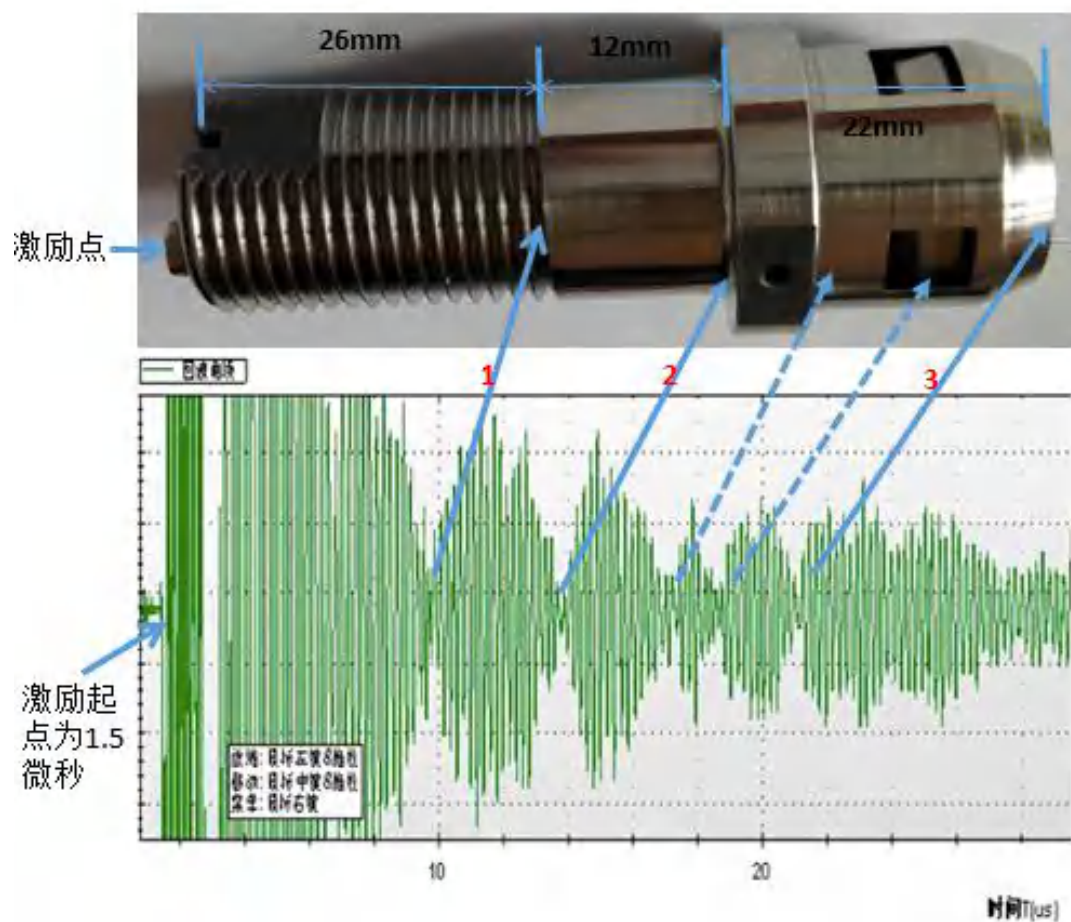
测量精度案例（2） ...

4.16



4.17

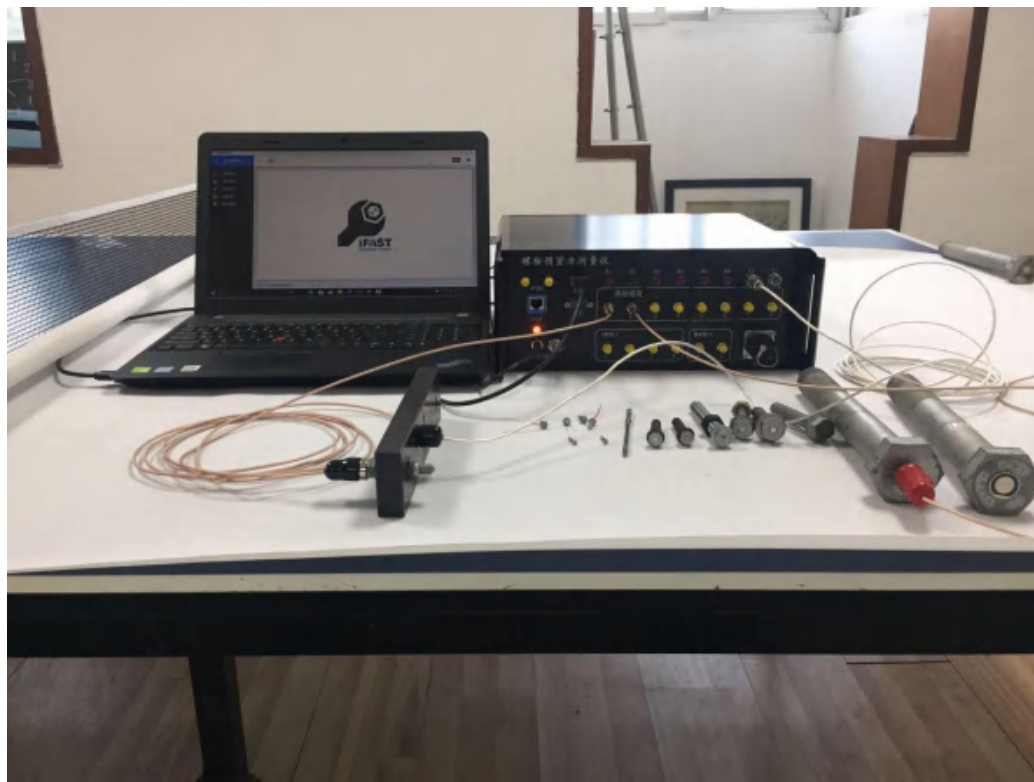
复杂螺栓结构的回波...



在被测物上对照声速
计算回波时间，并在
时域信号上选择对应
的回波峰，进行测量。

测量螺栓种类...

4.18



各种螺栓...



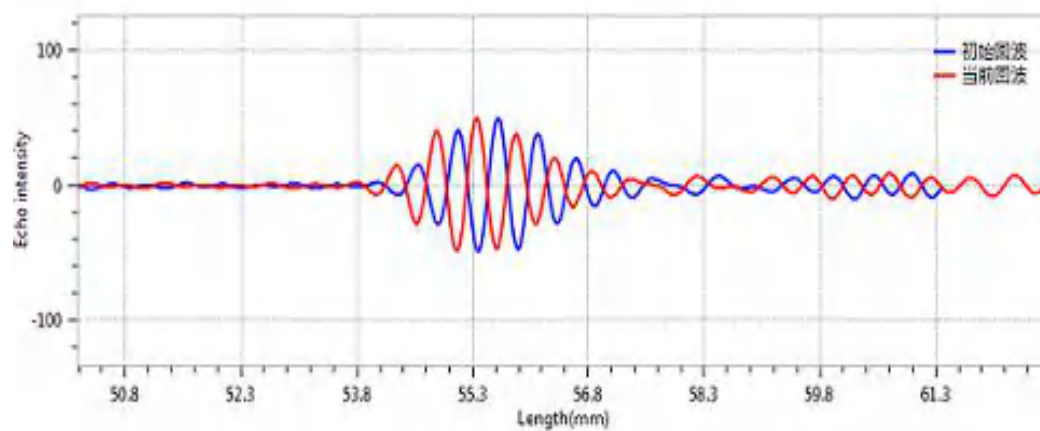
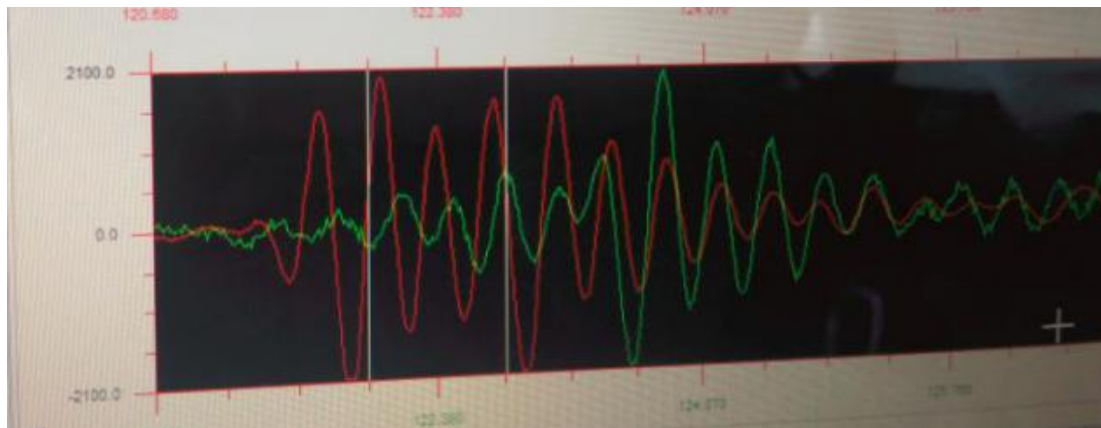
M5



M5

信号处理：滤波...

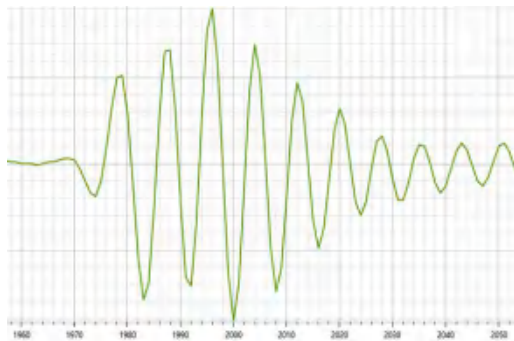
4.19



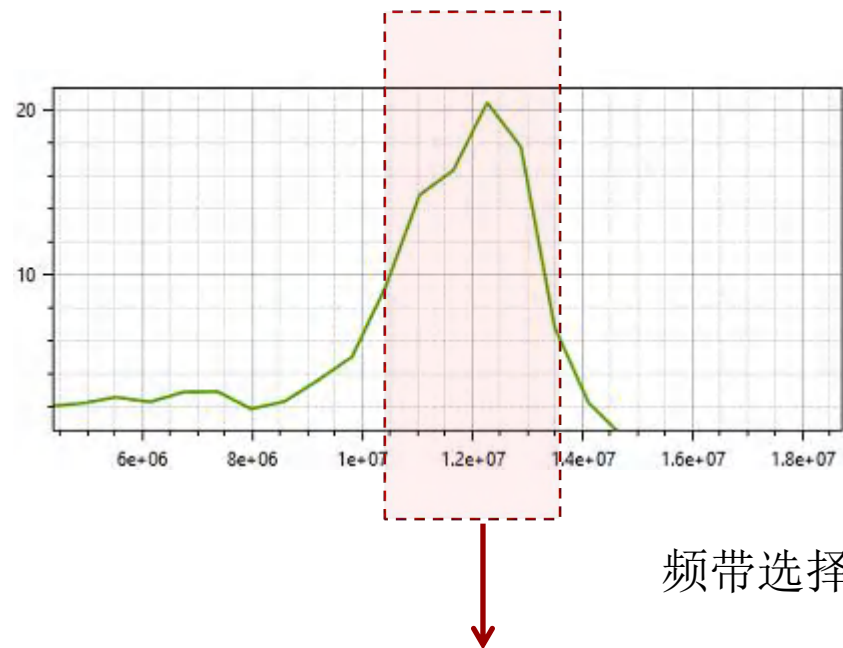
不滤波和滤波的波形差异

超声螺栓轴力测量技术：滤波

4.20

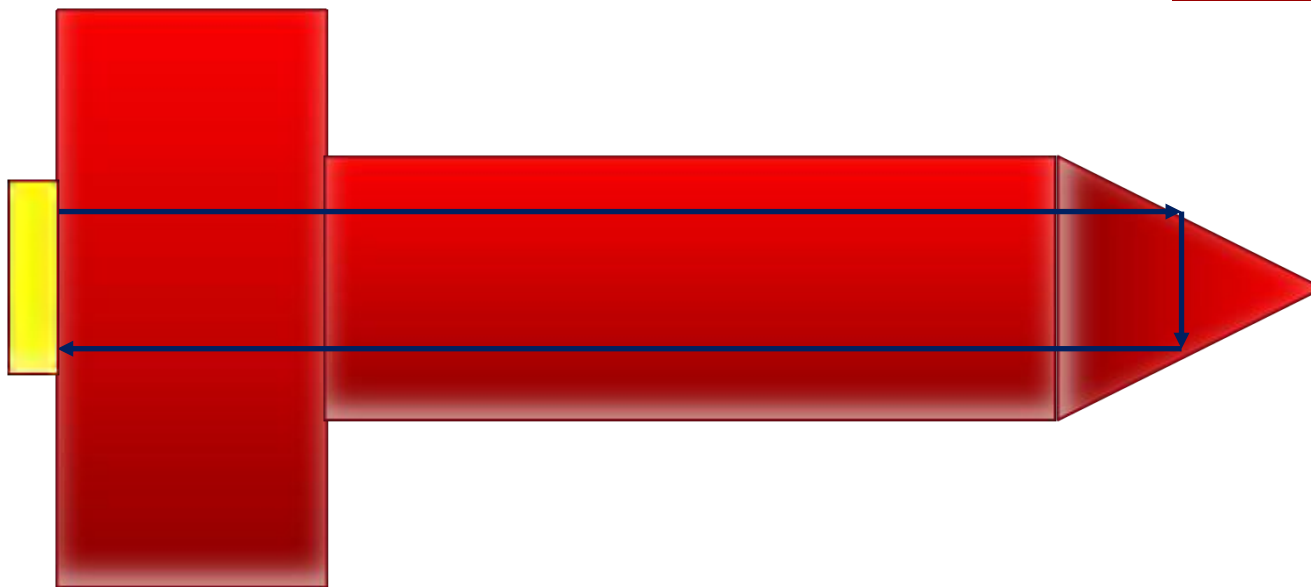


未滤波波形



频带选择

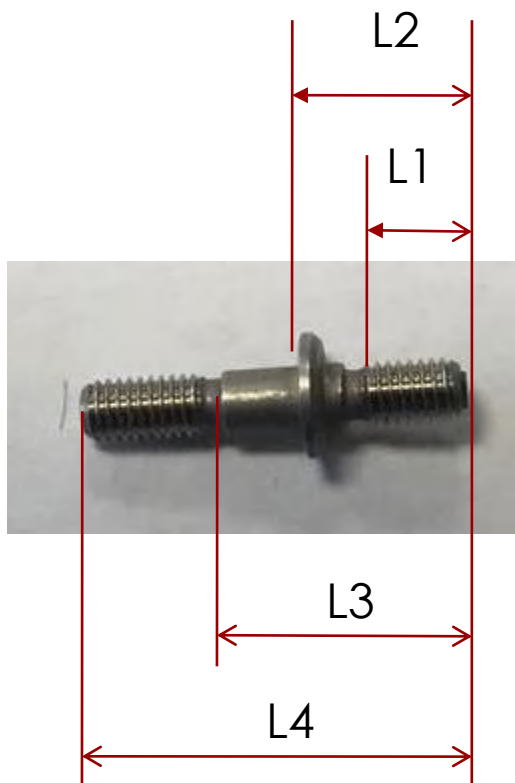
螺栓是否需要两端磨平？



- 螺栓尾部为非平面的时候，其回波路线在应力区是固定的。
- 从技术上的角度，螺栓端面磨平和信号滤波是等价的。

滤波案例...

4.22

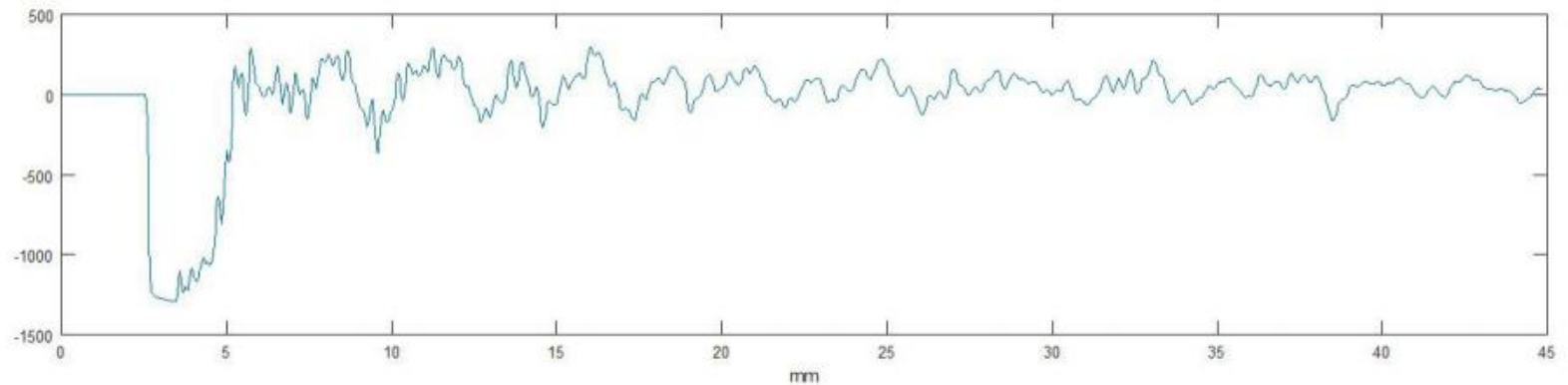


测量对象

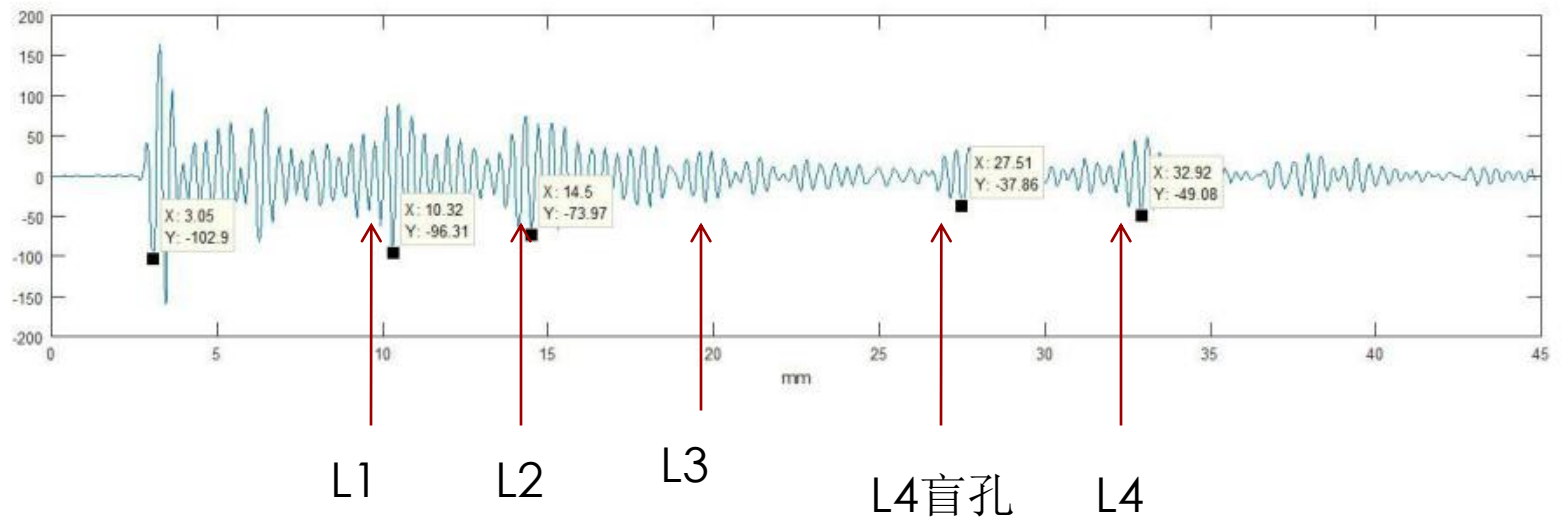
- L1: 7.1mm
- L2: 11.6mm
- L3: 17.5mm
- L4: 28mm (盲孔: 25.8mm)

滤波VS不滤波...

滤波前



滤波后



超声螺栓轴力测量技术：UADAR

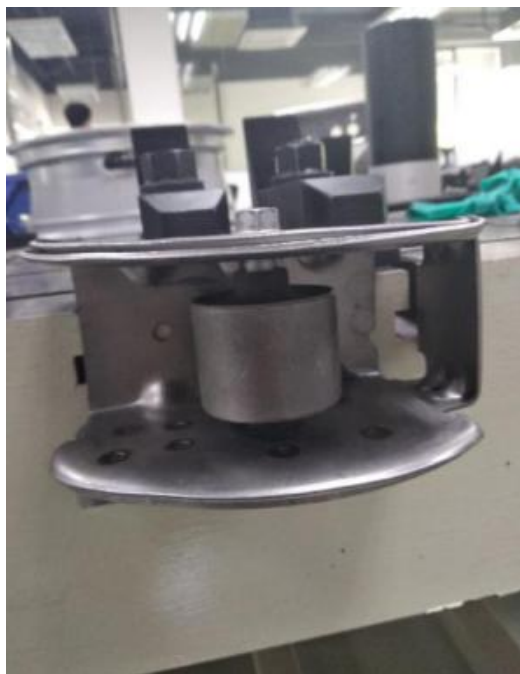
4.24



Uadar (Ultrasonic Detection and Range) 技术不仅实现了完整的雷达信号理论而且增加了适合超声波的动态跟踪技术，使得回波波形、测量峰的幅值无论怎么变化，超声设备都像长了眼睛、有了记忆一样，始终追踪着最初的测量峰，以保证测量的成功，这就像是地面的雷达始终追踪着天空中忽隐忽现飞机目标一样。

弯矩带来的问题（1） ...

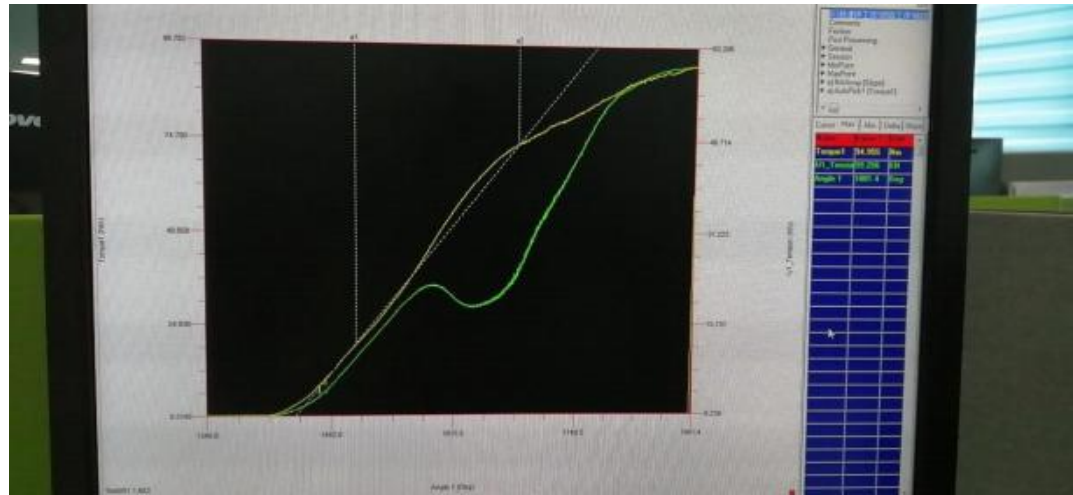
4.25



- 在很多螺栓副中，其夹持物为刚度较小的材料，如上图所示的夹持物带橡胶基材；螺栓在紧固的时候，螺栓受到弯矩而弯曲，导致超声回波幅值缩小、波形变异；
- 而目前所有的超声螺栓轴力测量设备都采取的是“**最大峰值法**”。

弯矩带来的问题（3） ...

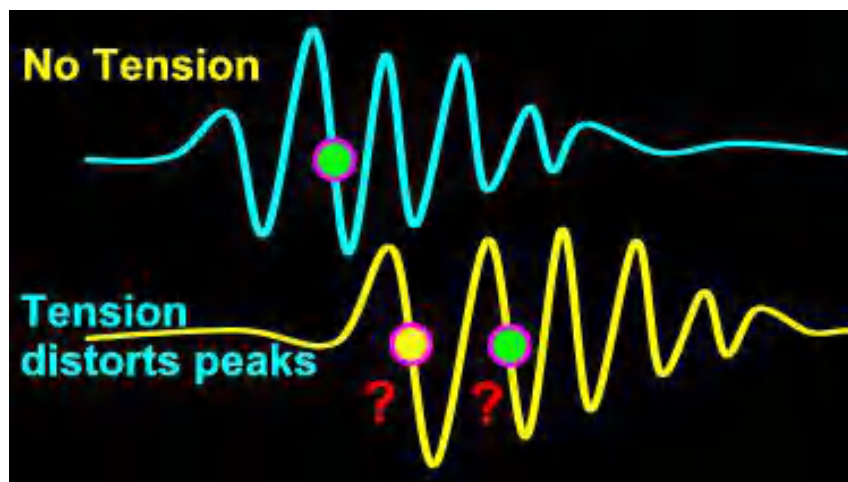
4.26



- 最大峰值法的问题在于：在螺栓紧固的时候，弯矩的影响，最大峰值发生了变化，不再是最大峰值了，称之为跳峰，则会导致测量失败。

弯矩带来的问题（2） ...

4.27



- 最大峰值法的问题在于：在螺栓紧固的时候，由于存在胶层受到应力的影响或弯矩的影响，最大峰值发生了变化，不再是最大峰值了，称之为跳峰，则会导致测量失败。

弯矩问题的复现...

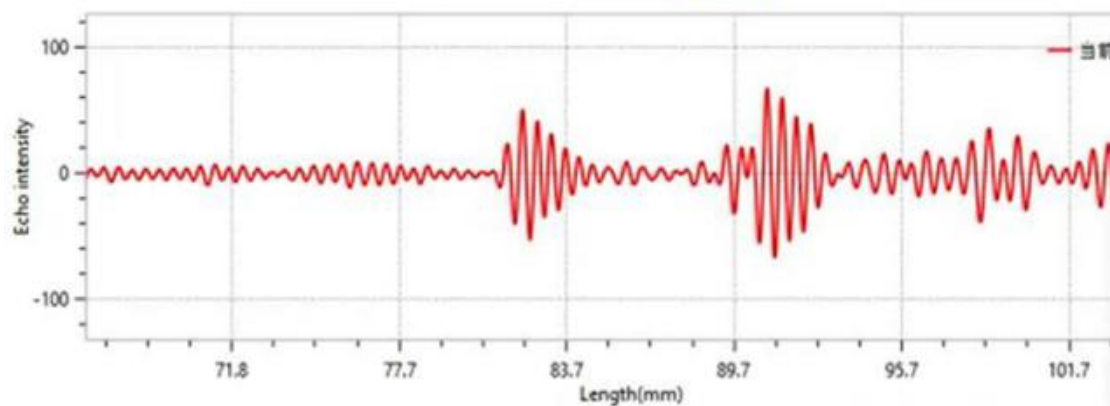
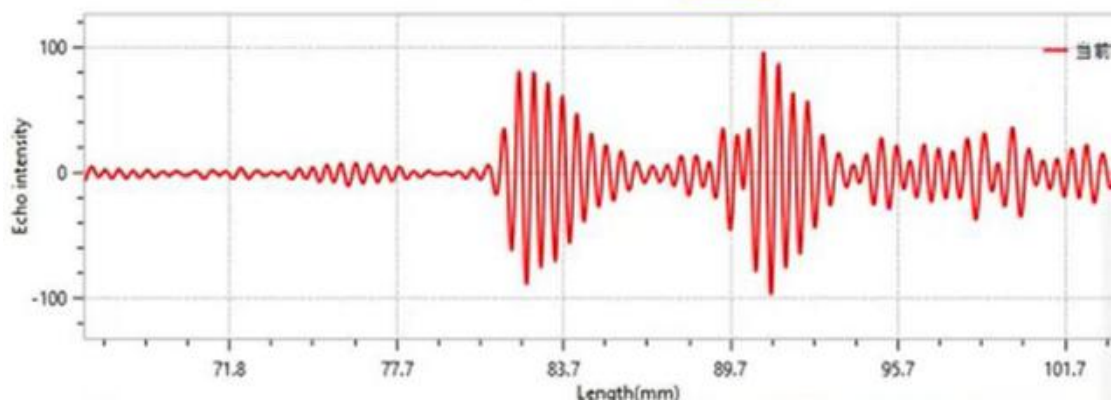
4.28



被试验螺栓和工装

超声螺栓轴力测量技术：本质

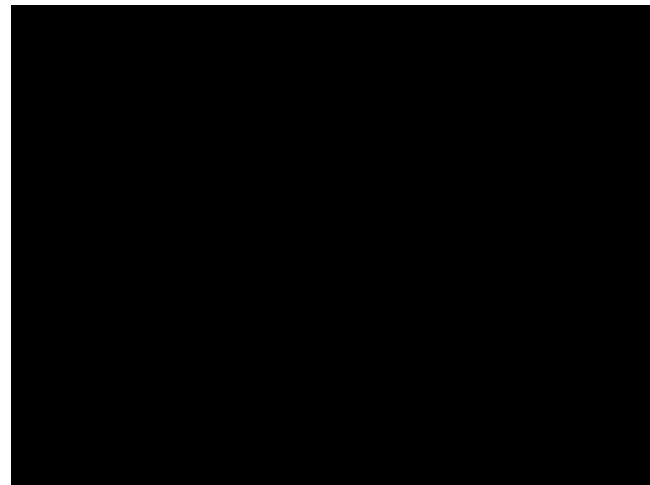
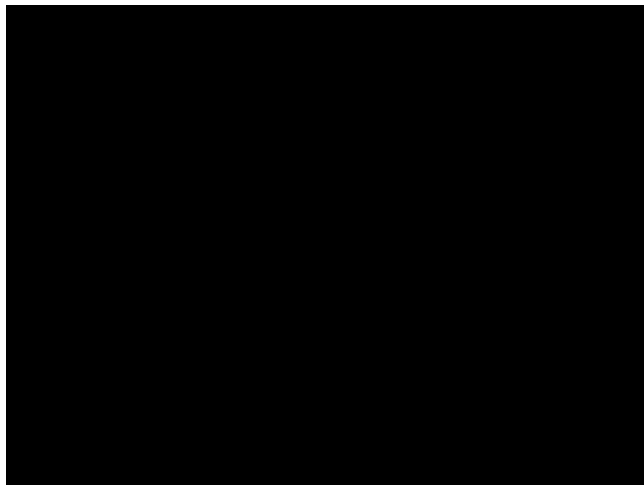
4.29



螺栓紧固过程中5MHz压电陶瓷片初始和最终波形

弯矩对波形的影响（1）

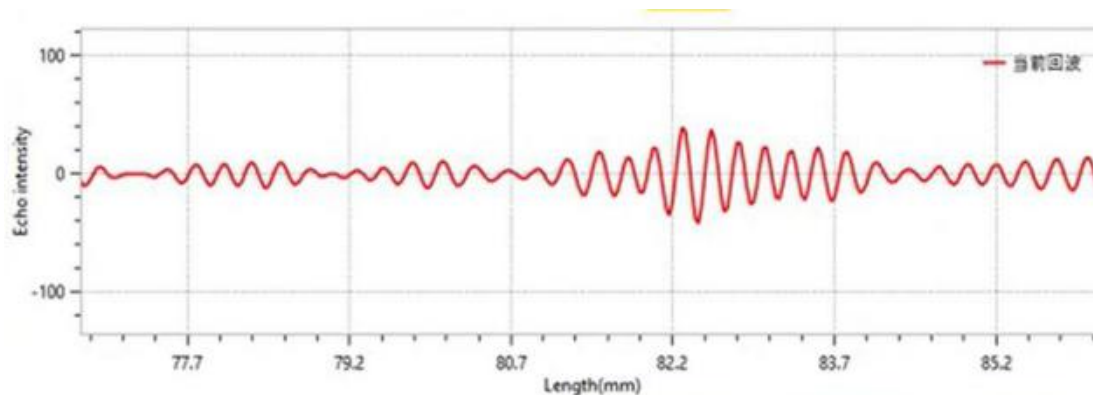
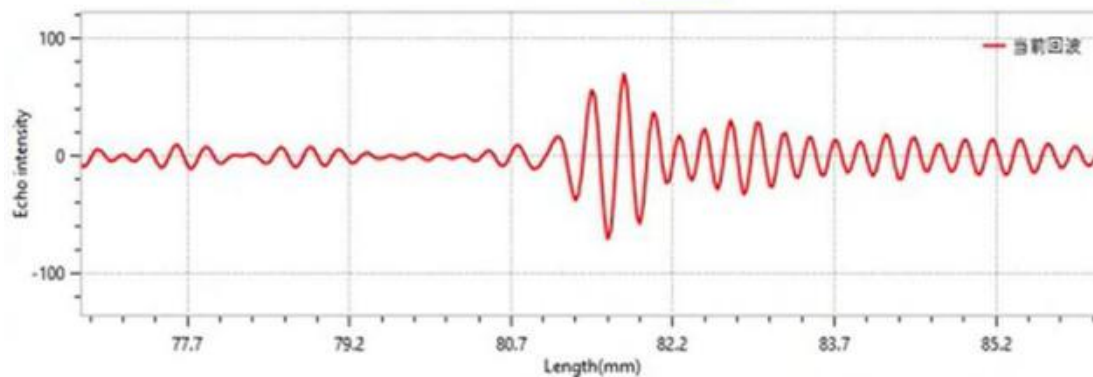
4.30



螺栓紧固过程中5MHz压电陶瓷片初始和最终波形的动态过程

弯矩对波形的影响（2）

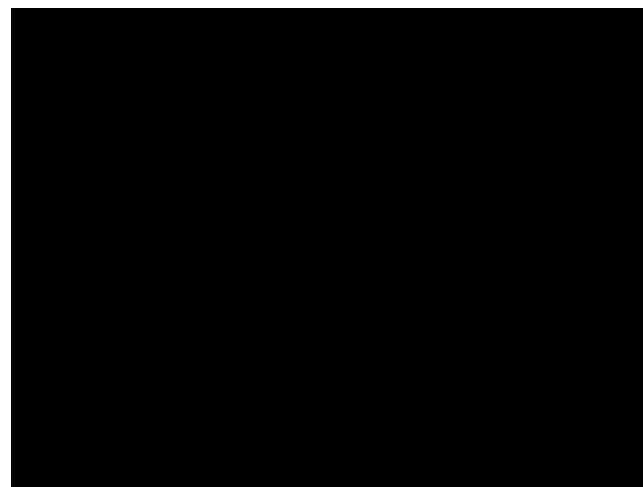
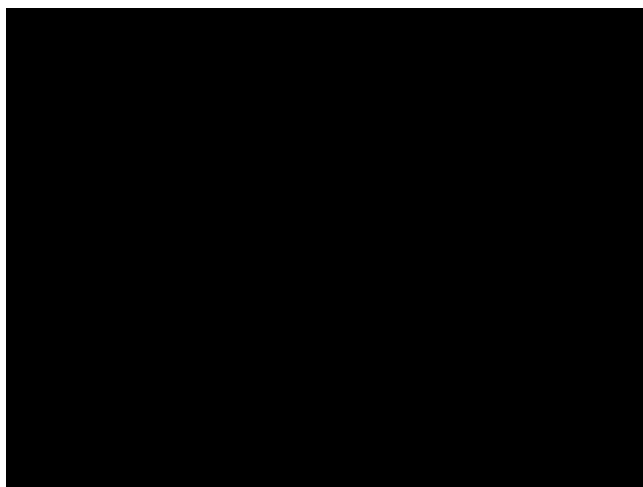
4.31



螺栓紧固过程中10MHz压电陶瓷片初始和最终波形

弯矩对波形的影响（3）

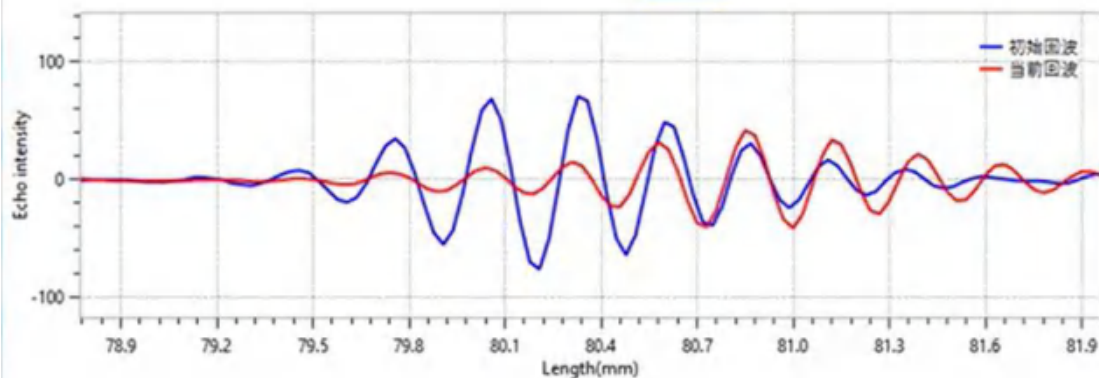
4.32



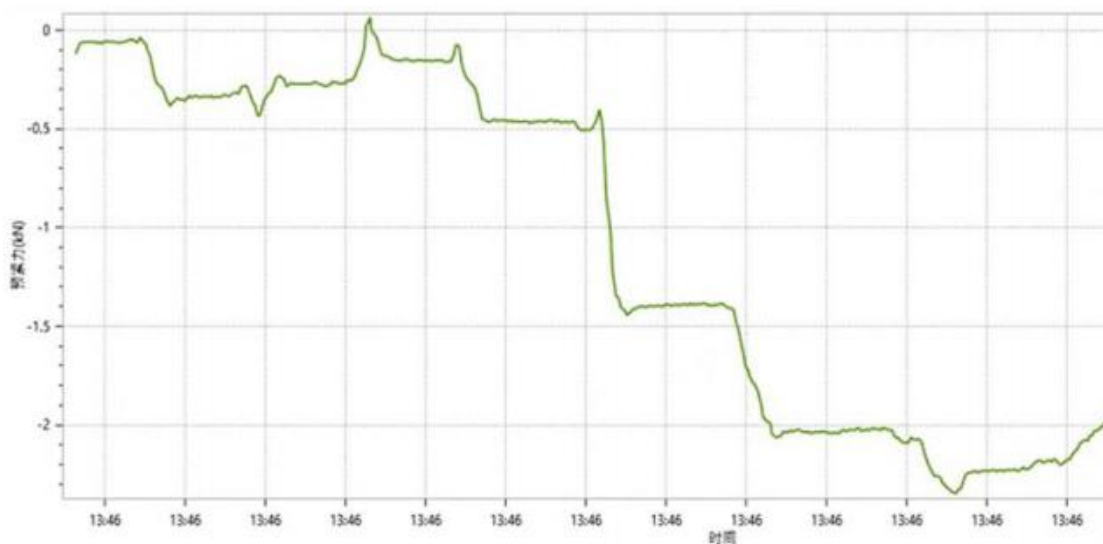
螺栓紧固过程中10MHz压电陶瓷片初始和最终波形的动态过程...

UADAR的解决方案（1）

4.33



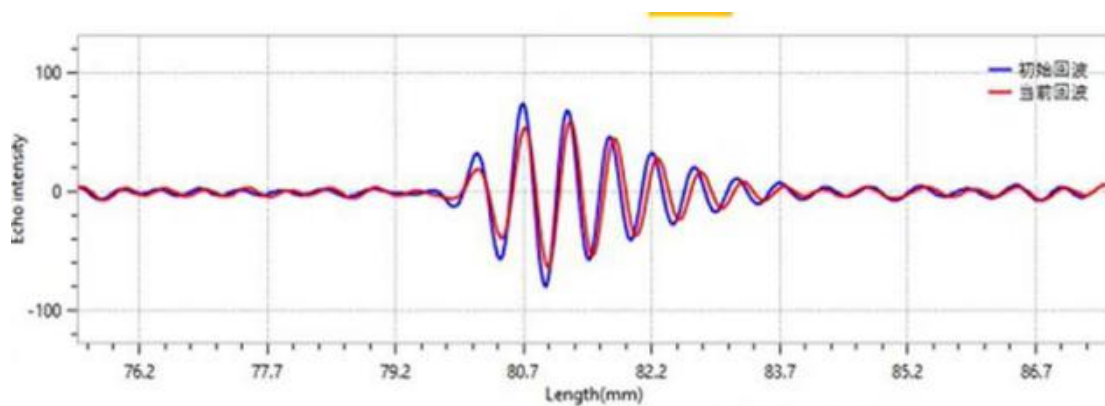
10MHz压电陶瓷片：初始波形（蓝色）和紧固波形（红色）



轴力VS时间

UADAR的解决方案（2）

4.34



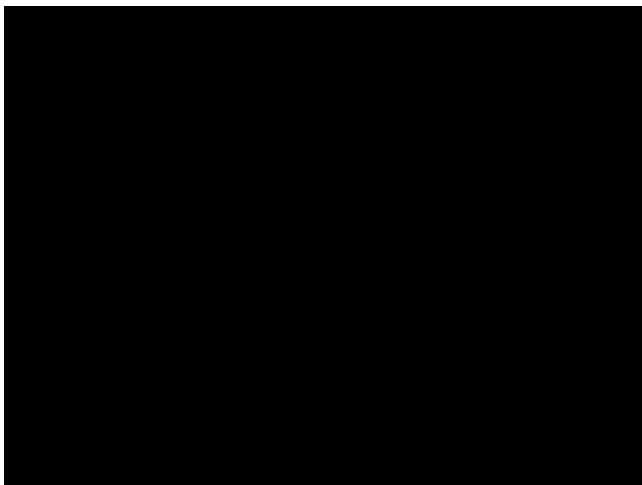
5MHz压电陶瓷片：初始波形（蓝色）和紧固波形（红色）



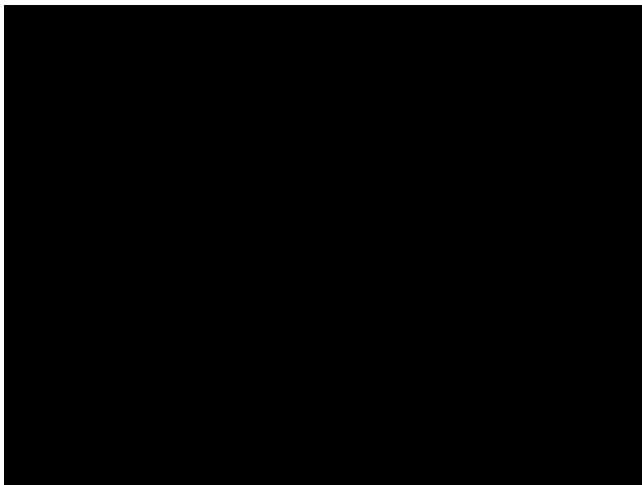
轴力VS时间

UADAR的解决方案（3）

4.35



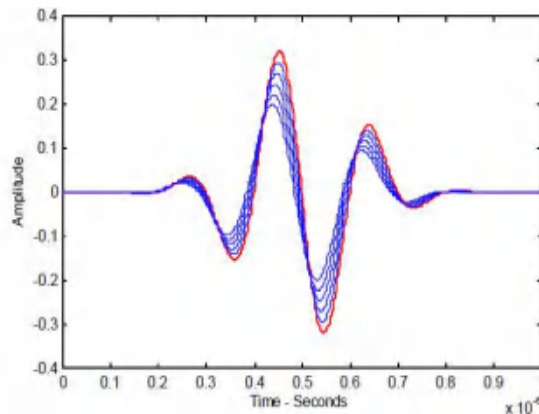
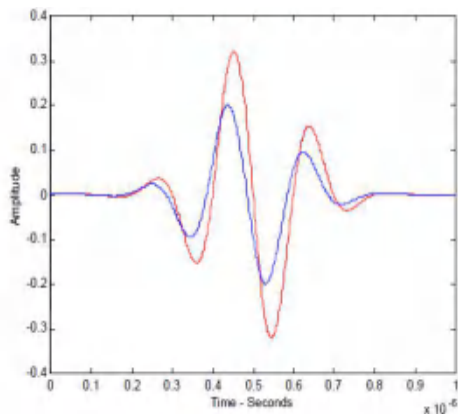
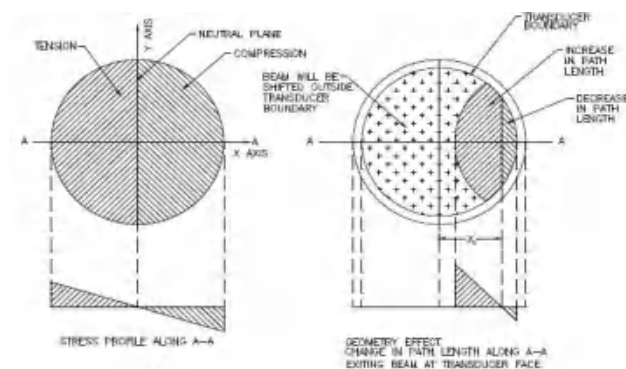
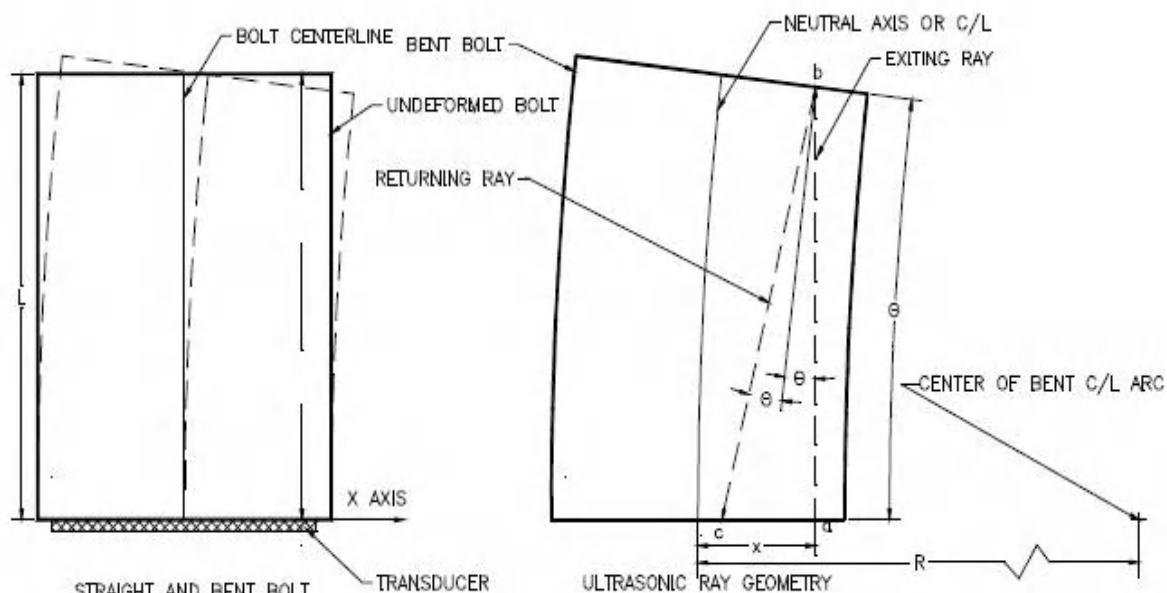
5MHz压电陶瓷片：初始波形（蓝色）和紧固波形（红色）



10MHz压电陶瓷片：初始波形（蓝色）和紧固波形（红色）

弯矩为何会导致回波的波形变化？（1）

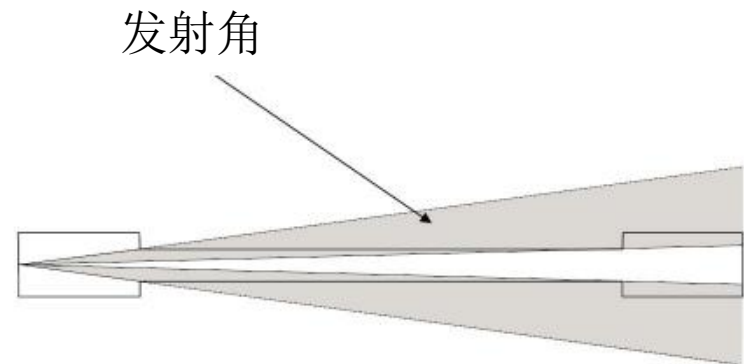
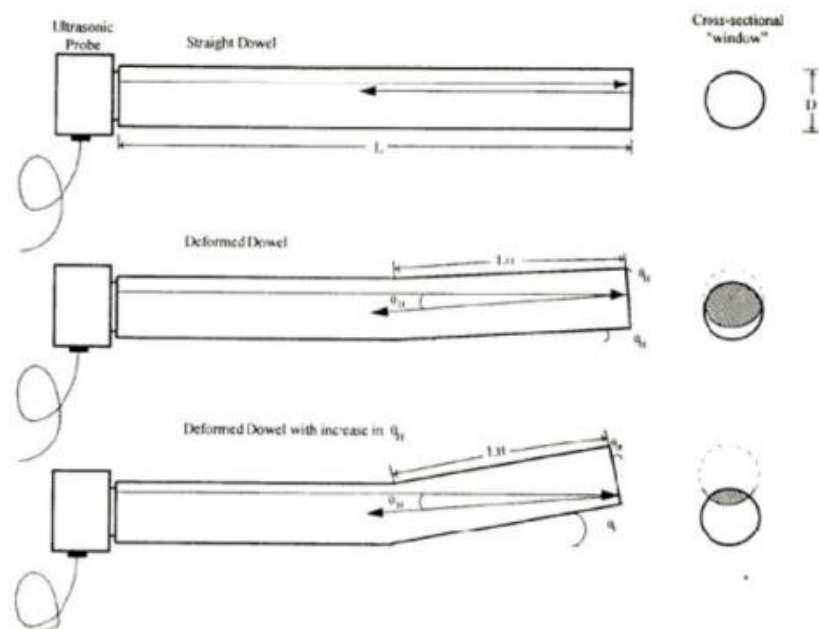
4.36



原始波形（红色），紧固时波形（蓝色）

弯矩为何会导致回波的波形变化？（2）

4.37



- 低频的发射角大；
- 分布在径向 r 较大区域的能量较多，所以10MHz的尾随波会随着弯矩的增大而幅值增大；

超声螺栓轴力测量技术：解决方案

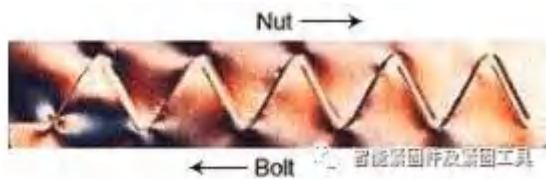
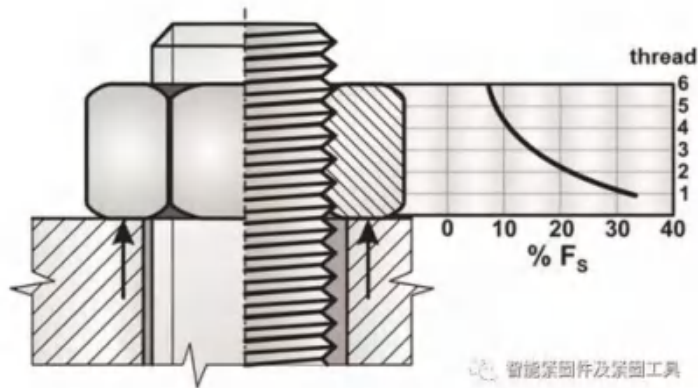
4.38

UADAR技术的结论：

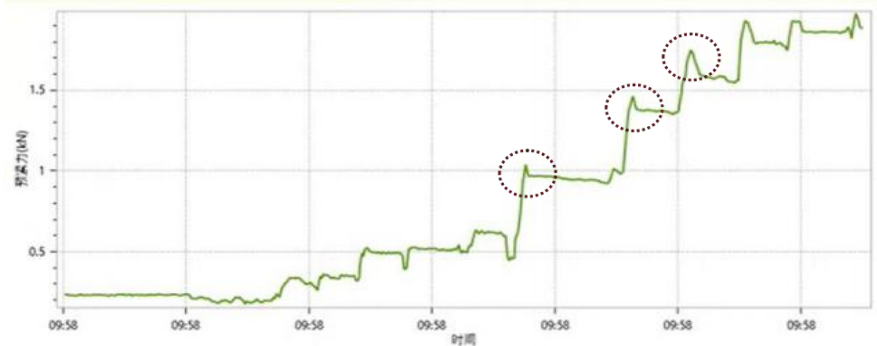
- 由于采用了Uadar技术，即便在模拟装配中螺栓受到了弯矩作用，测量系统也可以完美地跟踪测量峰，完成轴力测量任务；
- 采用了滤波、Uadar技术，用户无须打磨平螺栓底部，而是在在信号处理上“打磨平”了回波；
- 建议用户使用5MHz的压电陶瓷片，在模拟装配的时候将弯矩影响降到最低（很多国外的设备的压电陶瓷片为8MHz）；
- 使用Uadar技术，在标定后，可以测量螺栓在工作状态时的弯矩（在技术议题部分有延伸讨论）。

补充：小荷刚露尖尖角...

4.39



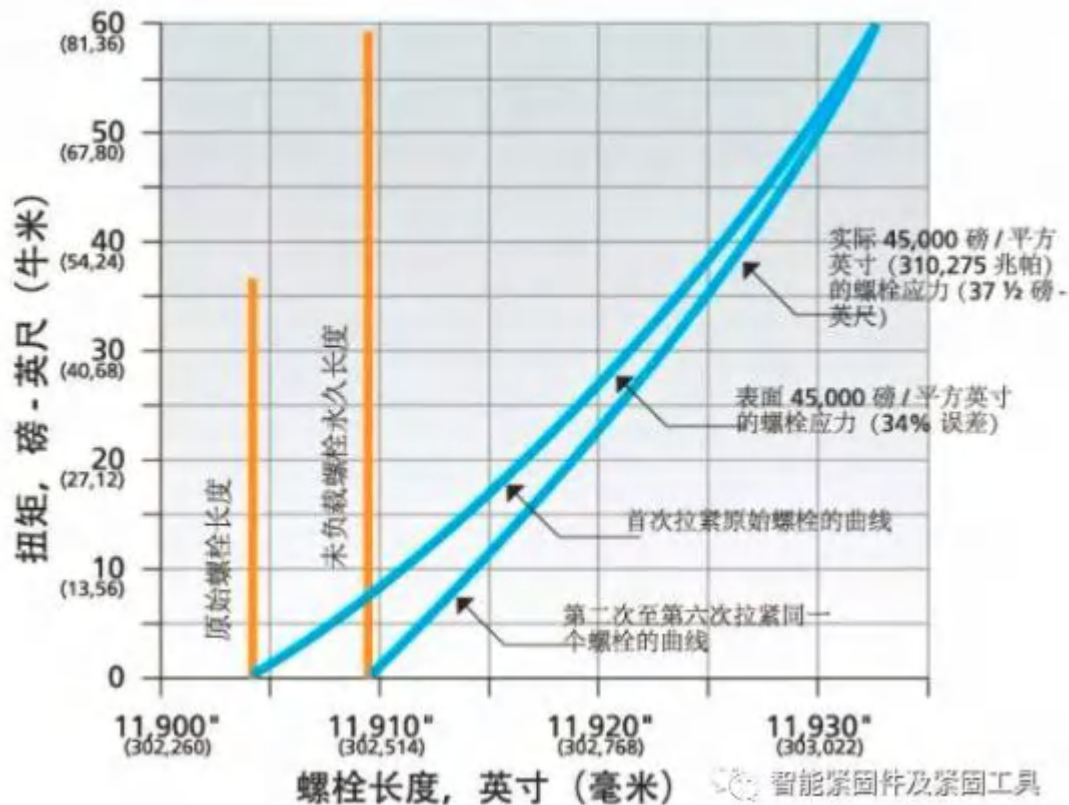
第一扣螺纹的塑性变形所导致...



补充： Virgin Bolt Phenomenon ...

4.40

某次特定螺栓测试中的「原始螺栓现象」示例



这表示加热处理导致螺栓杆外部快速变硬，致使芯部受到剧烈压缩并将晶粒聚在一起。制造过程中剥离其外层会释放这种压力。施加于成品螺杆外部的拉伸荷载有效地使晶粒重新定位（如同解开链条）。所以，这也是为何航空工业在紧固螺栓的时候，在很多情况下均采取二次紧固的原因。

补充： 压电陶瓷片的尺寸...

4.41

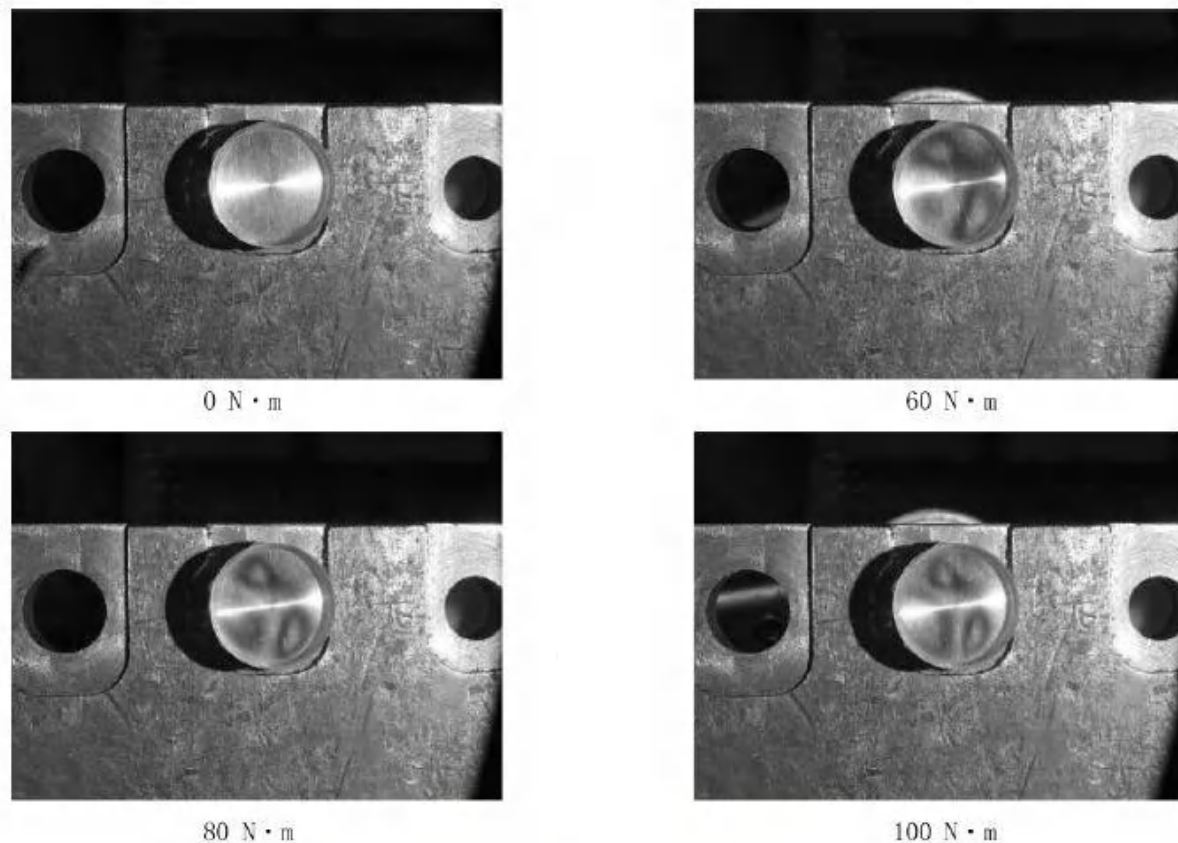


图 4 不同扭矩下应力光图(M14)

Fig. 4 Picture of photostress under different load

压电陶瓷片尺寸过大，紧固螺栓时会导致回波幅值降低、甚至崩片，所以合理选择压电陶瓷片尺寸对于螺栓监测应用至关重要。通常的原则是：压电陶瓷片的直径不超过螺栓直径的**25%**，最为保险。