

GB/T ××××《紧固件 轴向应力超声测量方法》编制说明

(征求意见稿)

一、 工作简况

1. 任务来源

本项目根据国家标准化委员会下发的“国标委发[2020]53号”文《关于下达2020年第四批推荐性国家标准计划及相关标准外文版计划的通知》要求，由全国紧固件标委会负责归口并组织相关单位制定，项目名称为《紧固件 螺栓轴向应力超声检测方法》(项目编号：20204710-T-604)。计划应完成时间为2022年。

2. 主要工作过程

起草(草案、论证)阶段：

(1) 立项

本项目在2018年全国紧固件标准化技术委员会第六届二次年会上提请全体参会人员表决，全票通过，技术委员会委员总数100人/参与投票人数87人/赞成票数87人，超过委员总人数的3/4，符合相关规定要求。全国紧标委及时上报了国家标准制定计划建议，国标委于2020年12月下达本项计划，项目编号：20204710-T-604，项目周期24个月。

(2) 工作组会议

——第一次工作组会

为在该标准中准确体现各相关方要求，按时完成国标制定工作，保证验证试验有效实施，全国紧标委秘书处于2021年5月7日在浙江省杭州市召开《紧固件螺栓轴向应力超声检测方法》国标项目工作组会，参加此次会议的共计57人。会议针对标准草案的框架结构和技术要求开展了热烈的讨论，形成了会议决议，见表1。

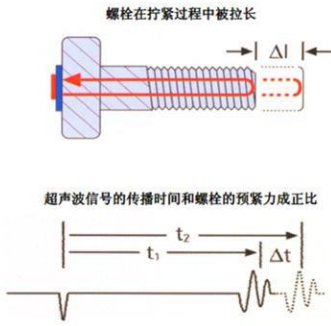
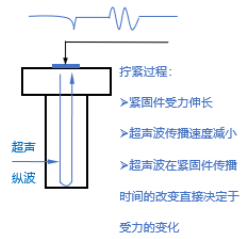
——验证试验方案研讨会

为保证《紧固件 轴向应力超声测量方法》国标项目(计划号20204710-T-604)研制工作质量，确保验证试验的有效实施，以确认超声波检测仪器的测量范围和精确度、零应力螺栓和自由状态螺栓标定的差异、扭拉和纯拉标定应力系数的差异等，于2021年7月8日召开《紧固件轴向应力超声测量方法》国标项目验证试验方案研讨会视频会议，参加会议的有25家单位，近40人。与会专家对《紧固件 螺栓轴向应力超声测量方法》验证试验方案进行了热烈的讨论，针对试样的规格和性能等级等要求、各规格螺栓的测量点、试验项目和程序，以及时间安排统一了意见，并确认了参加验证试验工作的设备厂家。会议决定：

- a)会后，秘书处与山东高强尽快确认试件长度、材料、数量；
 - b)由秘书处根据会议意见对验证试验方案进行修改，并尽快发工作组；
 - c)由武汉国检整理汇总不同材料对比数据，由中车风电整理汇总不同测温位置对比数据，提交秘书处；
 - d)由秘书处确认杭州戡威科技有限公司、上海泛华、上海诺霸三家公司的仪器是否参加验证试验工作。
- 经会后征求意见，形成验证试验方案见附件1。

表 1 《紧固件 螺栓轴向应力超声检测方法》第一次工作组会议决议

章节	讨论情况	会议决议
标准名称	<p>声弹性原理测出的是应力（单纵波/双波），轴力为计算值；标定过程中采用应力变化量与声时变化量比值，暂定为“轴向应力”；</p> <p>“测量”侧重于检出量值，“检测”改为“测量”；</p> <p>轴向应力超声测量方法适用于螺栓、螺钉和螺柱产品，删去标准名称中的“螺栓”二字，在范围中界定适用范围</p>	标准名称修改为“紧固件 轴向应力超声测量方法”
1 范围	<p>被测件要求：</p> <p>型式：螺栓、螺钉和螺柱</p> <p>单波：公称直径$\geq 5\text{mm}$</p> <p>双波：公称直径$\geq 12\text{mm}$</p> <p>推荐长径比$\geq 3:1$，特殊情况可参考本文件</p> <p>所有性能等级</p>	<p>1 范围</p> <p>本文件规定了紧固件轴向应力超声检测方法的术语和定义、代号、原理、仪器、程序、数据处理和报告。</p> <p>本文件适用于螺栓、螺钉和螺柱在装配过程中或装配后轴向应力的测量和紧固状态评价，以及螺栓、螺钉和螺柱在服役状态轴向应力的动态原位监测。</p> <p>本文件适用的紧固件：</p> <p>a) 单波：公称直径$\geq 5\text{mm}$，双波：公称直径$\geq 12\text{mm}$；</p> <p>b) 推荐长径比$\geq 3:1$，特殊情况可参考本文件；</p> <p>c) 所有性能等级。</p> <p>具有特殊结构型式，如空心、变径的产品在测量过程中有可能出现误差，应咨询相关专家。</p>
2 规范性引用文件		按实际引用统一整理
3 术语和定义	<p>1) GB/T 38952：超声体波、体波探头</p> <p>2) ASTM E1685-2013：长度变化、有效长度、纵波、脉冲回波螺栓测量仪、参考长度、参考传播速度、飞行时间</p> <p>3) 草稿中：零应力螺栓、对比螺栓</p>	<p>GB/T 16823.3、GB/T 38952 中界定的以及下列术语和定义适用于本文件。</p> <p>长度变化、有效长度、纵波、横波、参考长度、参考传播速度、飞行时间、零应力螺栓、对比螺栓、压电陶瓷片</p>
	零应力螺栓用于设备校准归零，同批次制备 1 件即可	暂定保留“零应力螺栓”
4 代号	<p>声时T_{S0}、T_{L0}、T_S、T_L</p> <p>应力σ</p> <p>声弹性系数k_S、k_L (GB/T 38952 中为 ε_S、ε_L)</p> <p>应力系数K_S、K_L</p>	按标准文本中实际出现代号列出
5 原理	<p>本文件中规定双波测量、单波测量两种方法。</p> <p>1) 单波：</p> <p>各设备厂单波计算公式中均已考虑拧紧后应力变化对超声波传播速度的影响。</p>	<p>5.1 单波原理</p> <p>单波原理参考资料：</p>

	<p>单波需提炼基本原理公式，参考公式如下：</p> $F = \frac{E \cdot S \cdot \Delta L}{L}$ $\Delta L = \frac{1}{2} \cdot (T_1 - T_0) \cdot v$ $F = \pi D^2 \frac{E}{8(r + D)} \frac{K_s \Delta SC_{t_0}}{1 + K_t(t - t_0)}$ <p>2) 双波：</p> $\sigma = \frac{T_L^2 T_{S_0}^2 - T_S^2 T_{L_0}^2}{k_S T_S^2 T_{L_0}^2 - k_L T_L^2 T_{S_0}^2}$ <p>已考虑拧紧时长度变化因素：</p> <p>“螺栓轴向尺寸变化”指螺栓自由状态下长度尺寸公差。</p> <p>对于应力系数而言，不管是应力变化量和声时变化量拟合直线，还是夹紧力和声时拟合直线，斜率是一致的。</p> <p>试验原理由肖老师负责整理</p>	<div></div> <p>螺栓在拧紧过程中被拉长</p> <p>超声波信号的传播时间和螺栓的预紧力成正比</p> <ul style="list-style-type: none">◆ 1975年，日本德岗辰雄从有限变形弹性理论出发导出了超声传播速度差与应力差的关系式，成为现代声弹性应力测量的基础；◆ 声速受被测物的内部应力和温度的影响而变化；◆ 针对螺栓建模，简化关系式导出公式： $\Delta t \approx 2L'T[k(\theta) + 1/C]/E(\theta) + 2L\Delta\theta T[b(T)/C + g(T)]/C$ <p>式中：L'——螺栓有效夹紧长度 k——与材料弹性常数有关的系数 θ——温度 C——螺栓无应力时的超声波传播速度 E——杨氏弹性模量 L——螺栓总长度 T——应力</p> <div></div> <p>5.2 双波原理</p>
	<p>单波法：测量的是夹持部分的平均应力；</p> <p>双波法：测量的是螺栓总长度内的平均应力。</p> <p>与会代表对于螺栓全长平均应力与螺栓夹持部分应力的差异有争议，建议选取适当的验证试验方案进行验证</p>	<p>验证试验：单波、双波、拉力机数据对比</p> <p>同批号产品，不同试验设备进行对比</p> <p>验证试验方案草稿由窦智负责</p>
<p>6 仪器</p> <p>基本组成：</p> <p>其他元件</p> <p>（参考 ASTM E1685）</p>	<p>1) 电磁式、压电式单波和双波仪器组成有差异，应分别给出组成及各仪器的相应参数。</p> <p>超声波探头：目前选用压电超声或电磁超声</p> <p>2) 系统测量精度：不同设备厂提供的精度有差异，在实验室和工程应用中差异较大，目前有±2%，±3%，±5%三种精度；</p> <p>3) 螺栓轴向应力有效范围：各行业设计要求的夹紧力值不同；参考美国</p>	<p>本文件中给出仪器的组成和参数：</p> <p>单波：沈宇平（电磁式）、任海（压电式）提供</p> <p>双波：沈宇平（电磁式）、任海（压电式）提供</p> <p>包括耦合剂、贴片的使用</p> <p>超声波探头：压电超声、电磁超声</p>

	<p>焊接学会标准，10%σ_s 以下和 90%σ_s 以上为非线性，测不准，采用弹性阶段，保证测试精度；暂不考虑汽车行业的过屈服点安装要求；</p> <p>4) 残余应力： 据徐教授团队和永济电机测量： M8，残余应力≥ 10 kN/应力截面积 10.9 级残余应力，100MPa，5% 左右； 其他设备厂及用户多数采用自由状态的同批螺栓作为对比螺栓</p> <p>5) 仪器校准： 各仪器分别校准： 系统校准：在研的校准计量规程（JJG）；GB/T 38952—2020 附录 C</p>	<p>系统测量精度：工程应用中$\leq \pm 5\%$（包含螺栓产品的误差）</p> <p>螺栓轴向应力有效范围：（15%~90%）σ_s</p> <p>制备零应力螺栓简易方法：在弹性阶段重复拉伸多次</p> <p>仪器校准：引用在研的 JJG 或 GB/T 38952—2020 附录 C</p> <p>对于零应力螺栓和自由状态螺栓标定的试验结果进行验证试验</p>
<p>7 程序</p> <p>准备被检测试件；</p> <p>准备标定试件，标定“零应力”声时，标定声弹性系数（通过拉伸试验标定应力系数）；</p> <p>测量温度；</p> <p>准备耦合介质；</p> <p>放置检测探头；</p> <p>测量；</p> <p>远程测量</p>	<p>1) 检测位置：中心部位（示意图给出）。</p> <p>2) 检测表面和反射面要求： 测试表面对表面防腐没要求，标志非凸字，耦合状态良好，测试部位和反射面应平整。</p> <p>3) 检测在役螺栓时，如果螺栓已经发生变形（如弯曲），对回波的获取会有影响</p>	<p>检测位置：中心部位（示意图给出）。</p> <p>表面质量要求：检测表面和反射面应平整。</p> <p>被检试件要求：检测时应可获得清晰的横波和纵波的回波。</p>
	<p>温度补偿：声弹性系数与温度无关，仅与材料有关；温度对声时有影响。检测温度在声弹性系数标定温度的$\pm 15^\circ\text{C}$ 范围内，温度范围太小。超出温度范围时，对于未知材料，做全温度标定（纵坐标：声时速度、横坐标：温度）</p>	<p>孙应兵负责整理温度补偿方法文字（公式、已知材料数据）</p>
	<p>纯拉伸状态和拉-扭状态对超声波速度的影响： 与应力方向有关，45 度角以上影响不大。 根据虎克定律，纯弹性阶段，纯拉和拉-扭状态应力系数一致，但屈服强度大小不同，影响精度。安装一段时间后，扭转应力逐渐释放，产生松弛，扭转应力的影响逐渐消失。 金风经验：原来全拉伸标定，发现问题，后采用扭矩法标定，差 5%~7%（扭拉关系）。施工后一段时间（需考虑）消除，通常 1h 后消除 50% 以上</p>	<p>“定轴力施工”需要考虑扭拉关系，建议放在附录中。</p> <p>扭拉和纯拉两种方式，在弹性阶段应力系数需进行相关验证试验</p>
	<p>应力系数的标定（原附录 B）中，拉伸试样的制备要求是否删去，直接用“待检测螺栓”进行拉伸试验，获得声弹性系数？</p>	<p>对于大规格产品、高成本产品适用</p>

	应力系数标定： 1) 零应力螺栓用于仪器校准清零； 2) 被测螺栓（自由状态）； 3) 数据库选取暂不采纳，整理数据库数据后再定	应力系数标定： 被测螺栓（自由状态）； 标定试样（对于大规格产品、高成本产品适用）
	标定用样本数量通常根据用户的检测需求确定，其大小对精度有影响，标定用样本数量越大，精度越高；但也要考虑成本	标定用样本数量 ≥ 3 件
	1) 压电陶瓷片要求、粘贴方法，耦合剂用量、涂抹方法，各种耦合方式要求不一，但均应能保证检测时可获得清晰的横波和纵波的回波。 2) 长期监测时，考虑到耦合剂风干、老化等问题，不适用耦合剂，声波发射源和被测试件不发生相对位置移动。	压电陶瓷片的粘贴或耦合剂的涂抹应能保证检测时可获得清晰的横波和纵波的回波。长期监测时，声波发射源和被测试件不发生相对位置移动。
8 数据处理	1) 必须进行温度补偿； 2) 原理中已考虑，不需进行长度变化或应力变化补偿； 3) 数据库的建立：声弹性系数为理论计算值，应力系数更有实用性	1) 孙应兵整理温度补偿方法 2) 沈宇平负责整理数据库数据
9 报告	至少应包括检测单位、人员、日期、检测环境温度、螺栓材料、长度、表面粗糙度、检测区域大小、位置、体波探头中心频率、螺栓轴向应力数值...	
其他	人员资质	建议泛泛提及，不做强制规定，如测试人员需进行必要的培训后方可进行测试工作

会后分工：

1. 肖老师：第 5 章单波、双波原理。
2. 窦智：验证试验方案草稿。
3. 孙应兵：温度补偿方法。
4. 沈宇平：数据库数据。
5. 沈宇平：电磁式单波和双波仪器组成、参数要求，以及试验程序
6. 任海：压电式单波和双波仪器组成、参数要求，以及试验程序

完成时间：5 月 17 日之前提交秘书处。

——第二次工作组会

原定于 2021 年 9 月完成的验证试验，由于疫情防控等原因，到 2022 年 6 月中旬基本完成。为更好总结试验结果，确定标准草案中超声波检测仪器的测量范围、精度、标定螺栓的选取和标定方式、试验程序等技术内容，于 2022 年 6 月 21 日召开《紧固件 轴向应力超声测量方法》国标项目第二次工作组会视频会议，约有 40 家单位参加会议。会上通报了试验进度和试验结果，并对标准草稿技术内容进行了修改，会议决议见表 2。

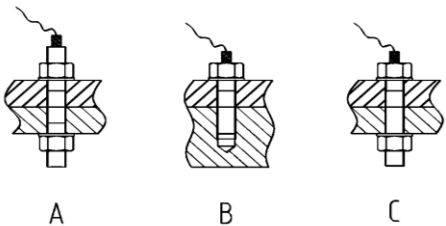
表 2 《紧固件 轴向应力超声测量方法》第二次工作组会议纪要
会议期间修改内容

章节	修改前	修改后
1	<p>本文件规定了螺栓轴向应力超声检测方法的术语和定义、代号、原理、仪器、程序、数据处理和报告。</p> <p>本文件适用于螺栓、螺钉和螺柱在装配过程中或装配后轴向应力的测量和紧固状态评价，以及螺栓、螺钉和螺柱在服役状态轴向应力的动态原位监测。本文件适用的紧固件：</p> <p>a) 单波：公称直径$\geq 5\text{mm}$，双波：公称直径$\geq 12\text{mm}$；</p> <p>b) 推荐长径比$\geq 3:1$，特殊情况可参考本文件；</p> <p>c) 所有性能等级。</p> <p>具有特殊结构型式，如空心、变径的产品在测量过程中有可能出现误差，应咨询相关专家。</p>	<p>本文件规定了螺栓、螺钉和螺柱（以下简称螺栓）轴向应力超声检测方法的术语和定义、代号、原理、仪器、程序、数据处理和报告。</p> <p>本文件适用于螺栓、螺钉和螺柱在装配过程中或装配后轴向应力的测量和紧固状态评价，以及螺栓、螺钉和螺柱在服役状态轴向应力的动态原位监测。本文件适用的螺栓：</p> <p>a) 单波：公称直径$\geq 5\text{mm}$，双波：公称直径$\geq 12\text{mm}$；</p> <p>b) 推荐长径比$\geq 3:1$；</p> <p>c) 性能等级 8.8 级及以上；d) 声学各向同性材料。</p> <p>e) 轴向应力范围：（30%~90%）$R_{p0.2}$（螺栓材料屈服强度）。</p> <p>由于具有特殊结构型式（如长度较短、空心、变径）或几何形状，以及性能等级 8.8 级以下的螺栓、螺钉或螺柱，在进行超声波检测时可能达不到本文件规定的测量精度要求，宜咨询相关专家。</p> <p>远程测量系统相关信息见附录 A。</p>
3.2	对比螺栓	标定螺栓
3.4 定义	对应力作出响应的紧固件长度。	对应力作出响应的紧固件长度，通常按夹紧长度加螺栓头部厚度的一半和螺母高度的一半。
6.1 第 1 段	用于本文件规定的轴向应力测量方法的测量系统如图 1 所示，应包括螺栓轴向应力超声体波检测仪、体波检测探头温度传感器、零应力螺栓或对比螺栓和耦合剂。	用于本文件规定的轴向应力测量方法的测量仪器如图 1 所示，应包括体波检测探头、螺栓轴向应力超声体波检测仪和温度传感器。
6.3	服役螺栓轴向应力有效范围：（15%~90%） $R_{p0.2}$ （螺栓材料屈服强度）。	服役螺栓轴向应力有效范围：（30%~90%） $R_{p0.2}$ （螺栓材料屈服强度）
6.3 第 2 段	数据采集频率应不小于 1000Hz，信号灵敏，显示分辨率能够区分 0.1ns 的回波时间差（测量分辨率：0.01 纳秒）。测量装置应包含温度补偿接口。	<p>测量装置应包含温度补偿接口。</p> <p>时间测量分辨力应优于被测螺栓应力达到 70% 屈服强度时的声时增量的 1/100。</p>
原 6.5		<p>移至 7.4</p> <p>7.4 应力系数标定</p> <p>7.4.1 标定螺栓</p> <p>标定螺栓的材料和型式尺寸应与被检测螺栓基本一致（长度误差应在 1.0% 以内）。</p> <p>有特殊要求时，可按 GB/T 38811 规定的高能声束法或按 GB/T 25712 规定的振动时效法制备基准零应力螺栓，或通过弹性阶段重复拉伸多次的简易方法制备零</p>

章节	修改前	修改后
		<p>应力螺栓作为标定螺栓。</p> <p>大规格螺栓可采用机加工拉伸试样进行应力系数的标定，试样制备和标定方法由供需协议。</p> <p>7.4.2 标定程序</p> <p>螺栓应力系数标定条件应与被测螺栓装配状态保持一致。</p> <p>在环境温度（10℃～35℃）下，使用符合GB/T 16825.1的拉力试验机，在材料弹性范围内对标定螺栓按照GB/T 228.1规定的方法进行拉伸试验，测量点不少于5点，宜使用3支标定螺栓的声时与轴向力试验数据，拟合标定曲线，得到应力系数。</p>
原 6.6		<p>移至7.3</p> <p>7.3 耦合剂</p> <p>检测过程中如使用耦合剂，以保证在工作温度范围内探头与构件表面具有稳定可靠的声耦合，则体波的声时检测、声弹性系数标定和零无应力声时标定过程使用的耦合剂应保持相同。</p>
原 6.7		删去
7.1		由郑国龙补充示意图
7.5		7.5 “测量程序”由郑国龙、任海、声时、博昇、武汉中科负责
原 8.1、 8.2		<p>移至7.6</p> <p>7.6误差补偿</p> <p>7.6.1 温度补偿</p> <p>当标定和实测温度不同时，应进行温度补偿。</p> <p>单纵波法螺栓应力测量的温度补偿可按式（7）计算：</p> $\sigma = K_L \frac{[T_L(\theta) - \alpha_L(\theta - \theta_0)] - T_{L0}}{T_{L0}} \quad (7)$ <p>双波法螺栓应力测量的温度补偿可按式（8）计算：</p> $\sigma = \frac{[(T_s(\theta) - \alpha_s(\theta - \theta_0)) / [(T_L(\theta) - \alpha_L(\theta - \theta_0)) - (T_{s0} / T_{L0})]}{\frac{1}{K_s}(T_{s0} / T_{L0}) - \frac{1}{K_L}\{[(T_s(\theta) - \alpha_s(\theta - \theta_0)) / [(T_L(\theta) - \alpha_L(\theta - \theta_0))]\}} \quad (8)$ <p>7.6.2 形状因子补偿</p> <p>螺栓连接仅在紧固长度内产生轴向应力，螺栓的紧固长度与其总长度往往是不同的，长度的差异与螺栓形状和螺母位置有关，这种长度差异常称为螺栓连接的形状因子，应对螺栓连接的形状因子进行补偿。</p>
原附录 A		删去

会后修改内容

章节	修改前	修改后
3.1 定义	为获得螺栓紧固力的绝对值，利用高能声束控制法（GB/T 38811）制备的无应力螺栓。	利用高能声束控制法（GB/T 38811）或振动时效法（GB/T 25712）制备的内应力接近 0 的标定螺栓。
4	T_{L0} 零应力时纵波在紧固件长度内的传播时间	T_{L0} 无应力时纵波在紧固件长度内的传播时间
4	T_{s0} 零应力时横波在紧固件长度内的传播时间	T_{s0} 无应力时横波在紧固件长度内的传播时间
5	0 应力、零应力	无应力
5.1	螺栓连接时，在载荷的作用下，螺栓中会产生轴向应力。依据材料的声弹性原理，螺栓的轴向应力会引起超声波传播速度的变化，对于长度确定的螺栓连接，轴向应力变化将使超声波在其轴线方向的传播时间发生变化；依据材料的弹性原理，螺栓中的轴向应力还会引起螺栓长度的变化，进而引起超声波在其轴线方向的传播时间发生变化；因此，	依据材料的声弹性原理，螺栓的轴向应力会引起超声波传播速度的变化，对于长度确定的螺栓连接，轴向应力变化将使超声波在其轴线方向的传播时间发生变化。因此，可通过测量无轴向应力条件下和有轴向应力条件下超声波在螺栓中的传播时间变化计算出螺栓的轴向应力，从而根据螺栓的应力截面积算出螺栓连接的紧固轴力。

章节	修改前	修改后
	可通过测量无轴向应力条件下和有轴向应力条件下超声波在螺栓中的传播时间变化计算出螺栓的轴向应力，进一步可根据螺栓的有效截面积算出螺栓连接的轴向紧固力。	
7.1	增加图2	 <p style="text-align: center;">图2 测量位置示意图</p>
7.5	<p>7.3.1 轴向应力测量仪应根据制造商的规范对照某一参考标样进行校验或调整。</p> <p>7.3.2 通过标定零应力试样或自由状态试样获取被测螺栓的纵波声弹性系数k_s和横波声弹性系数k_t；环境温度应该在声弹性系数标定试验温度的$\pm 15^\circ\text{C}$范围内，并对检测到的螺栓轴向应力数值进行温度补偿和修正（见8.1），如果超出该温度范围，应该选用特殊探头或耦合剂，重新标定体波的声弹性系数和零应力声时。</p> <p>7.3.3 在被测螺栓指定位置上放置体波检测探头，在确保有清晰体波回波的基础上，截取波段，计算声时T_L和T_S，得到体波传播方向上的应力数值和状态。回波峰值应保证在体波检测仪满量程的60%~80%。</p>	<p>7.5.1 单波测量程序</p> <p>a) 测量每颗螺栓自由状态下的回波时间为T_0（探头放置的端面位置应与标定时保持一致）</p> <p>b) 螺栓装配（即拧紧螺栓）</p> <p>c) 测量螺栓装配后的回波时间T_1（探头放置的端面位置应与步骤a)保持一致）</p> <p>d) 系统通过标定曲线、温度补偿系数、声时差从而计算螺栓预紧力</p> <p>注：压电超声需提前在试件端面贴陶瓷片，电磁超声无需提前在试件端面贴陶瓷片，详见7.2节。</p> <p>7.5.2 双波测量程序</p> <p>a) 螺栓装配（即拧紧螺栓）</p> <p>b) 测量螺栓应力状态下的纵横波声时比值（探头放置的端面位置应与标定时保持一致）</p> <p>c) 通过测得的声时比值，计算螺栓预紧力</p> <p>注：压电超声需提前在试件端面贴陶瓷片，电磁超声无需提前在试件端面贴陶瓷片，详见7.2。</p>

——工作组内意见讨论会

为了保证征求意见稿质量，于2022年6月27日-7月15日在工作组内对征求意见稿草稿征集意见，发出单位50家，回函并有意见单位9家，返回意见共计81条。并于8月15日召开线上意见讨论会，共计46人参加会议。会上围绕81条意见开展了讨论，并形成处理意见见附件2。

(3) 起草

计划下达后，在全国紧标委秘书处的组织下组建了轴向应力超声测量方法工作组，确定了工作方案，提出了进度安排。对国内外紧固件轴向应力超声测量设备的现状与发展情况进行了全面调研，同时广泛搜集和检索了国内外的技术资料。经过大量的研究分析、资料查证工作，全面地总结和归纳，结合实际应用经验和验证试验结果，在此基础上编制了《紧固件 轴向应力超声测量方法》标准草案初稿，并组织专家对标准中的主要内容进行多次研讨和认真修改。于2022年9月1日形成标准征求意见稿，经组长审核后报至秘书处。

征求意见阶段：

2022年9月，标委会秘书处通过电子邮件、微信群推送等方式公开征求意见，共向150家行业有关单位、科研院所、大专院校及有代表性的标准利益方发函征求意见。

3. 主要参加单位和工作组成员

本标准起草单位：中机生产力促进中心有限公司等。

主要起草人：

二、标准编制原则和主要内容

1. 标准编制原则

本标准在制定工作中遵循“面向市场、服务产业、自主制定、适时推出、及时修订、不断完善”的原则，标准制定与技术创新、试验验证、产业推进、应用推广相结合，统筹推进。

本标准在结构编写和内容编排等方面依据 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》进行编写。在确定本标准主要技术性能指标时，综合考虑生产企业的能力和用户的利益，寻求最大的经济、社会效益，充分体现了标准在技术上的先进性和技术上的合理性。

2. 标准主要内容

本文件规定了螺栓、螺钉和螺柱轴向应力超声检测方法的术语和定义、代号、原理、仪器、程序、数据处理和报告。

3. 解决的主要问题

螺纹紧固件连接是工业现场中常用的连接形式，连接的可靠性在很大程度上取决于安装后的预紧力，即螺栓的应力状态。过大的预紧力会引起螺栓屈服或被连接件压陷，从而导致预紧力丧失，甚至引起螺栓断裂；过小的预紧力则会使连接件出现松动、开封或泄漏，也会引起连接件产生应力波动，加速疲劳失效。

螺栓轴向应力的超声无损检测技术，针对不同场合螺栓轴向应力的无损检测，提供有效而快速的检测方法，解决了螺栓安装后预紧力(螺栓轴向应力)的实时测量，可有效预防由于预紧力衰减造成的事故隐患；双波法可解决由于无法获得已安装螺栓或埋深地脚螺栓的长度而无法有效获取螺栓的服役轴向应力状态的技术难题；针对关键连接部位的螺栓，实现对其轴向应力的长期监测，并能远程获悉螺栓的工作情况。

4. 主要技术内容确定依据

(1) 标准名称

2021年5月7日第一次工作组会议对标准名称进行了讨论：声弹性原理测出的是应力（双波/单纵波），轴力为计算值，标定过程中采用应力变化量与声时变化量比值，建议保留“轴向应力”；“测量”侧重于检出量值，建议“检测”改为“测量”；轴向应力超声测量方法适用于螺栓、螺钉和螺柱产品，建议删去标准名称中的“螺栓”二字，在范围中界定适用范围。按会议决议标准名称修改为《紧固件 轴向应力超声测量方法》。

应力是对材料特性归一化的描述，虽然测量中标定和测量的值实际都等于轴力，但测量的原理是源于材料声弹性特征，是应力声时关系。测得的不是某点的具体值而是夹紧长度范围内的等效值，是由测量条件形成的，包括螺栓的形状特征，当螺栓等截面时，轴向应力是相对准确的。所以可以声明测量值和标定值实际等于轴向拉力，但测量方法应是轴向应力测量方法。如果过分强调轴力等表面上的符合性，容易忽略材料特征的决定性关系，比如，同材料在不同直径时，标定的应力系数应是相接近的。综上，标准名称中应是“轴向应力”而不是“紧固轴力”。

(2) 范围

产品适用范围：根据超声波检测设备对被测件的要求，对于螺栓、螺钉和螺柱，单波法适用于公称直径 $\geq 5\text{mm}$ ，双波法适用于公称直径 $\geq 12\text{mm}$ ；推荐长径比 $\geq 3:1$ ；性能等级 8.8 级及以上。

轴向应力测量范围： $(30\% \sim 90\%) R_{p0.2}$ 。在该应力区间可保证超声传播的线性关系，且应力值较低时，相对误差较大。

由于具有特殊结构型式（如长度较短、空心、变径）或几何形状，以及性能等级 8.8 级以下的螺栓、螺钉或螺柱，可参考本文件执行，但在进行超声波检测时可能达不到本文件规定的测量精度要求。

三、主要试验（或验证）情况

2021 年 8 月～2022 年 6 月，根据附件 1 中《紧固件 螺栓轴向应力超声测量方法》验证试验方案，围绕设备仪器测量范围、精度，零应力螺栓和自由状态螺栓标定系数结果的差异，扭拉和纯拉两种方式在弹性阶段应力系数差异开展了试验验证工作。

1. 试验数据

各厂家试验数据见表 3～表 8，测量误差对比见图 1～图 6。

表 3 M12 单波测量

厂家	超声形式	标定点	拉力机力值(kN)	测量平均力值(kN)	测量平均误差(%)
A	压电	1	11.9	11.77	1.83
		2	23.8	23.32	2.05
		3	35.7	34.92	2.16
		4	47.6	46.87	1.58
		5	59.5	58.91	1.22
		6	71.4	71.09	1.38
B	电磁	1	11.9	11.17	11.43
		2	23.8	23.63	4.20
		3	35.7	34.72	2.74
		4	47.6	46.78	1.89
		5	59.5	58.91	1.11
		6	71.4	71.53	1.32
C	压电	1	11.9	12.47	13.56
		2	23.8	22.73	5.82
		3	35.7	34.83	3.12
		4	47.6	47.02	1.78
		5	59.5	59.39	1.27
		6	71.4	71.96	1.29
D	压电	1	11.9		
		2	23.8		
		3	35.7		
		4	47.6		
		5	59.5		
		6	71.4		
E	电磁	1	11.9	12.08	4.87
		2	23.8	23.36	7.23
		3	35.7	34.40	4.54
		4	47.6	46.08	3.78
		5	59.5	58.24	3.13
		6	71.4	71.12	2.52
F	压电	1	11.9	10.77	11.52
		2	23.8	22.32	7.89
		3	35.7	34.15	5.81
		4	47.6	46.17	4.37
		5	59.5	58.33	3.38
		6	71.4	70.91	2.38
G	压电	1	11.9	11.90	2.90
		2	23.8	23.07	3.47

		3	35.7	34.62	3.02
		4	47.6	46.24	2.87
		5	59.5	58.08	2.45
		6	71.4	70.42	1.74
H	压电	1	11.9	11.63	7.80
		2	23.8	23.00	7.10
		3	35.7	34.42	6.73
		4	47.6	45.94	7.04
		5	59.5	58.52	5.95
		6	71.4	71.30	5.70
I	压电	1	11.9	12.18	3.79
		2	23.8	23.72	2.30
		3	35.7	35.33	2.28
		4	47.6	47.11	2.20
		5	59.5	59.19	2.15
		6	71.4	71.76	2.10
J	压电	1	11.9	11.62	6.36
		2	23.8	23.17	4.69
		3	35.7	35.48	2.72
		4	47.6	48.17	3.78
		5	59.5	60.69	2.97
		6	71.4	72.46	3.09
K	压电	1	11.9		
		2	23.8		
		3	35.7		
		4	47.6		
		5	59.5		
		6	71.4		
L	压电	1	11.9	11.98	0.92
		2	23.8	23.99	1.03
		3	35.7	35.98	1.04
		4	47.6	47.98	1.05
		5	59.5	59.96	1.15
		6	71.4	71.93	1.07

表 4 M36 单波测量

厂家	超声形式	标定点	拉力机力值(kN)	测量平均力值(kN)	测量平均误差(%)
A	压电	1	115	114.57	2.79
		2	230	226.84	2.17
		3	345	339.21	2.12
		4	460	452.87	1.84
		5	575	568.50	1.40
		6	690	687.69	0.95
B	电磁	1	115	109.29	4.97
		2	230	217.57	5.40
		3	345	326.95	5.23
		4	460	441.65	3.99
		5	575	559.63	2.79
		6	690	685.52	0.66
C	压电	1	115	117.30	2.02
		2	230	232.39	1.79
		3	345	348.01	1.70
		4	460	465.30	1.67
		5	575	582.21	1.37
		6	690	697.29	1.54
D	压电	1	115	107.13	7.19
		2	230	216.28	6.02
		3	345	329.41	4.52

		4	460	445.25	3.21
		5	575	562.39	2.19
		6	690	683.59	1.17
E	电磁	1	115	121.07	5.80
		2	230	234.31	2.05
		3	345	348.04	1.14
		4	460	465.82	1.27
		5	575	586.61	2.02
		6	690	709.39	2.81
F	压电	1	115	107.82	6.24
		2	230	217.10	5.61
		3	345	329.49	4.49
		4	460		
		5	575		
		6	690		
G	压电	1	115	111.80	6.36
		2	230	227.41	3.23
		3	345	341.57	2.03
		4	460	456.59	1.63
		5	575	572.23	1.62
		6	690	687.71	1.95
H	压电	1	115	118.27	2.42
		2	230	227.90	1.11
		3	345	340.91	1.54
		4	460	456.88	1.30
		5	575	574.14	1.07
		6	690	691.40	0.79
I	压电	1	115	110.56	3.55
		2	230	220.47	3.91
		3	345	331.58	3.68
		4	460	445.05	3.07
		5	575	561.30	2.21
		6	690	683.84	0.68
J	压电	1	115		
		2	230		
		3	345		
		4	460		
		5	575		
		6	690		
K	压电	1	115	115.87	2.08
		2	230	227.74	1.15
		3	345	341.50	0.88
		4	460	457.58	0.71
		5	575	577.28	0.87
		6	690	702.56	1.94
L	压电	1	115		
		2	230		
		3	345		
		4	460		
		5	575		
		6	690		

表 5 M56 单波测量

厂家	超声形式	标定点	拉力机力值(kN)	测量平均力值(kN)	测量平均误差(%)
A	压电	1	286		
		2	572		
		3	858		
		4	1144		

		5	1430		
		6	1716		
B	电磁	1	286	267.91	6.28
		2	572	547.71	6.46
		3	858	821.79	5.87
		4	1144	1112.29	5.52
		5	1430	1406.42	5.24
		6	1716	1663.94	3.03
C	压电	1	286		
		2	572		
		3	858		
		4	1144		
		5	1430		
		6	1716		
D	压电	1	286	296.82	4.06
		2	572	583.79	2.82
		3	858	875.71	2.46
		4	1144	1160.20	1.79
		5	1430	1457.61	2.42
		6	1716	1770.75	3.27
E	电磁	1	286	293.07	3.44
		2	572	577.99	2.35
		3	858	854.88	1.93
		4	1144	1136.43	1.66
		5	1430	1418.65	1.59
		6	1716	1706.25	1.62
F	压电	1	286	296.77	5.14
		2	572	586.86	3.98
		3	858	880.09	2.94
		4	1144		
		5	1430		
		6	1716		
G	压电	1	286	291.59	1.96
		2	572	581.10	1.71
		3	858	865.24	1.27
		4	1144	1149.44	1.13
		5	1430	1437.65	1.10
		6	1716	1717.44	0.79
H	压电	1	286	284.93	1.97
		2	572	568.34	1.48
		3	858	849.37	1.35
		4	1144	1131.89	1.16
		5	1430	1418.34	0.89
		6	1716	1724.77	0.86
I	压电	1	286		
		2	572		
		3	858		
		4	1144		
		5	1430		
		6	1716		
J	压电	1	286		
		2	572		
		3	858		
		4	1144		
		5	1430		
		6	1716		
K	压电	1	286		

		2	572		
		3	858		
		4	1144		
		5	1430		
		6	1716		
L	压电	1	286		
		2	572		
		3	858		
		4	1144		
		5	1430		
		6	1716		

表 6 M12 双波测量

厂家	超声形式	标定点	拉力机力值(kN)	测量平均力值(kN)	测量平均误差(%)
A	压电	1	11.9	12.47	14.85
		2	23.8	24.29	9.07
		3	35.7	35.95	6.80
		4	47.6	47.61	5.87
		5	59.5	59.82	5.41
		6	71.4	71.96	5.25
B	电磁	1	11.9	12.21	3.87
		2	23.8	24.65	3.87
		3	35.7	36.67	2.71
		4	47.6	48.59	2.09
		5	59.5	60.05	0.92
		6	71.4	72.05	0.92
C	压电	1	11.9	11.25	8.91
		2	23.8	23.15	4.51
		3	35.7	35.29	1.83
		4	47.6	47.85	1.68
		5	59.5	60.99	3.36
		6	71.4	74.41	4.86
D	压电	1	11.9		
		2	23.8		
		3	35.7		
		4	47.6		
		5	59.5		
		6	71.4		
E	电磁	1	11.9	10.50	13.22
		2	23.8	22.87	8.46
		3	35.7	34.72	4.99
		4	47.6	47.14	6.62
		5	59.5	58.84	4.47
		6	71.4	70.87	4.06
F	压电	1	11.9		
		2	23.8		
		3	35.7		
		4	47.6		
		5	59.5		
		6	71.4		
G	压电	1	11.9		
		2	23.8		
		3	35.7		
		4	47.6		
		5	59.5		
		6	71.4		
H	压电	1	11.9	15.39	36.27

		2	23.8	26.46	20.56
		3	35.7	34.55	6.59
		4	47.6	47.10	7.51
		5	59.5	57.78	9.31
		6	71.4	72.06	6.98
I	压电	1	11.9	12.26	3.49
		2	23.8	24.52	3.55
		3	35.7	36.76	3.37
		4	47.6	48.95	2.94
		5	59.5	61.17	2.91
		6	71.4	73.84	3.41
J	压电	1	11.9		
		2	23.8		
		3	35.7		
		4	47.6		
		5	59.5		
		6	71.4		
K	压电	1	11.9		
		2	23.8		
		3	35.7		
		4	47.6		
		5	59.5		
		6	71.4		
L	压电	1	11.9		
		2	23.8		
		3	35.7		
		4	47.6		
		5	59.5		
		6	71.4		

表 7 M36 双波测量

厂家	超声形式	标定点	拉力机力值(kN)	测量平均力值(kN)	测量平均误差(%)
A	压电	1	115		
		2	230		
		3	345		
		4	460		
		5	575		
		6	690		
B	电磁	1	115	105.51	9.97
		2	230	217.25	5.58
		3	345	331.15	4.02
		4	460	446.55	2.92
		5	575	563.47	2.01
		6	690	680.95	1.57
C	压电	1	115	118.69	4.19
		2	230	232.82	2.17
		3	345	348.31	1.60
		4	460	465.35	1.16
		5	575	583.30	1.49
		6	690	696.12	1.86
D	压电	1	115		
		2	230		
		3	345		
		4	460		
		5	575		
		6	690		
E	电磁	1	115	119.39	6.48
		2	230	234.50	2.59

		3	345	349.30	1.90
		4	460	468.19	2.14
		5	575	588.13	2.28
		6	690	709.73	2.86
F	压电	1	115		
		2	230		
		3	345		
		4	460		
		5	575		
		6	690		
G	压电	1	115		
		2	230		
		3	345		
		4	460		
		5	575		
		6	690		
H	压电	1	115	107.40	6.61
		2	230	221.13	4.14
		3	345	332.60	3.59
		4	460	440.40	4.26
		5	575	554.00	3.65
		6	690	674.47	2.25
I	压电	1	115	113.96	2.15
		2	230	223.70	2.74
		3	345	334.69	2.99
		4	460	448.21	2.56
		5	575	565.49	1.65
		6	690	685.46	0.81
J	压电	1	115		
		2	230		
		3	345		
		4	460		
		5	575		
		6	690		
K	压电	1	115		
		2	230		
		3	345		
		4	460		
		5	575		
		6	690		
L	压电	1	115		
		2	230		
		3	345		
		4	460		
		5	575		
		6	690		

表 8 M56 双波测量

厂家	超声形式	标定点	拉力机力值(kN)	测量平均力值(kN)	测量平均误差(%)
A	压电	1	286		
		2	572		
		3	858		
		4	1144		
		5	1430		
		6	1716		
B	电磁	1	286	271.97	6.23
		2	572	566.77	6.71
		3	858	830.32	7.41

		4	1144	1157.86	1.86
		5	1430	1460.66	2.62
		6	1716	1721.81	0.71
C	压电	1	286		
		2	572		
		3	858		
		4	1144		
		5	1430		
		6	1716		
D	压电	1	286		
		2	572		
		3	858		
		4	1144		
		5	1430		
		6	1716		
E	电磁	1	286	311.32	11.25
		2	572	597.37	5.72
		3	858	874.49	3.15
		4	1144	1157.95	2.23
		5	1430	1440.67	1.82
		6	1716	1723.65	1.69
F	压电	1	286		
		2	572		
		3	858		
		4	1144		
		5	1430		
		6	1716		
G	压电	1	286		
		2	572		
		3	858		
		4	1144		
		5	1430		
		6	1716		
H	压电	1	286	289.67	3.66
		2	572	573.87	2.35
		3	858	859.00	1.73
		4	1144	1147.27	1.68
		5	1430	1426.13	1.14
		6	1716	1715.80	1.33
I	压电	1	286		
		2	572		
		3	858		
		4	1144		
		5	1430		
		6	1716		
J	压电	1	286		
		2	572		
		3	858		
		4	1144		
		5	1430		
		6	1716		
K	压电	1	286		
		2	572		
		3	858		
		4	1144		
		5	1430		
		6	1716		

L	压电	1	286		
		2	572		
		3	858		
		4	1144		
		5	1430		
		6	1716		

表 9 直拉扭拉

标定方式	测量方式	标定点	拉力机力值(kN)	测量平均力值(kN)	测量平均误差(%)
直拉标定	直拉测量	1	115	114.57	2.79
		2	230	226.84	2.17
		3	345	339.21	2.12
		4	460	452.87	1.84
		5	575	568.50	1.40
		6	690	687.69	0.95
直拉标定	扭拉测量	1	115	119.48	3.89
		2	230	231.82	2.36
		3	345	345.30	1.02
		4	460	457.95	0.96
		5	575	570.99	1.17
		6	690	688.04	0.86
扭拉标定	扭拉测量	1	115	118.98	2.64
		2	230	232.16	2.12
		3	345	343.07	2.59
		4	460	456.69	1.79
		5	575	570.90	0.99
		6	690	689.97	0.44

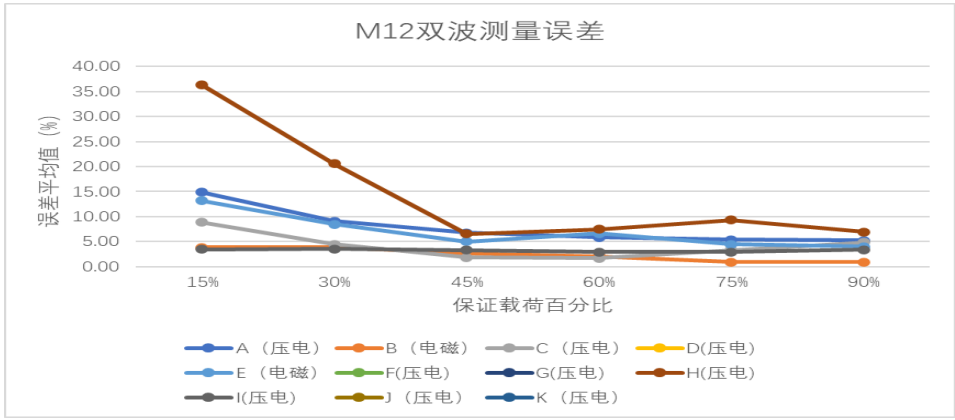
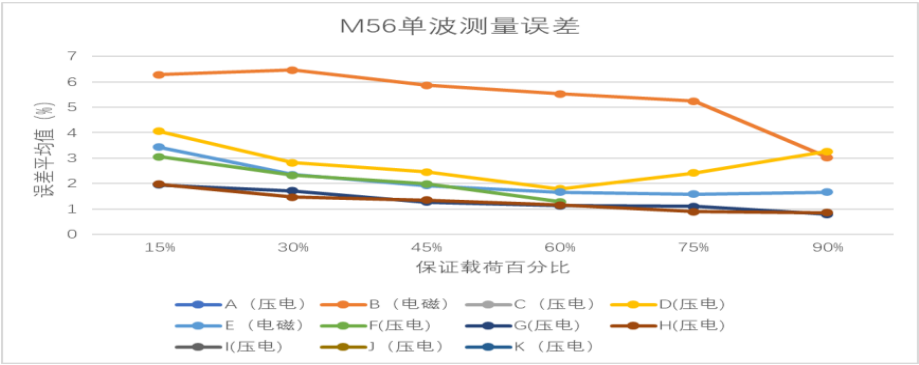
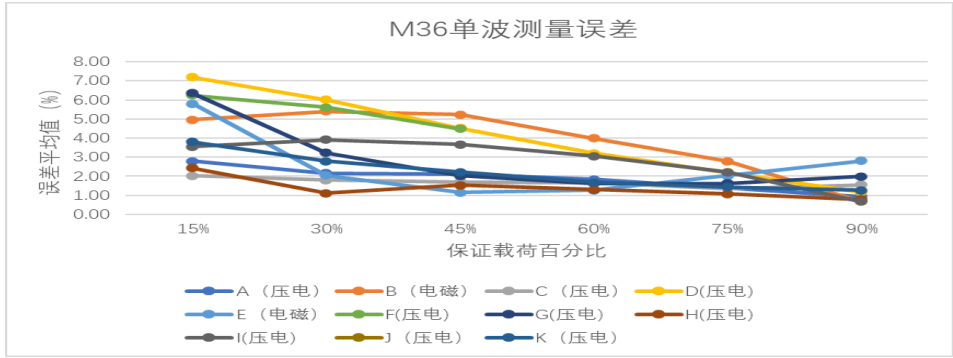
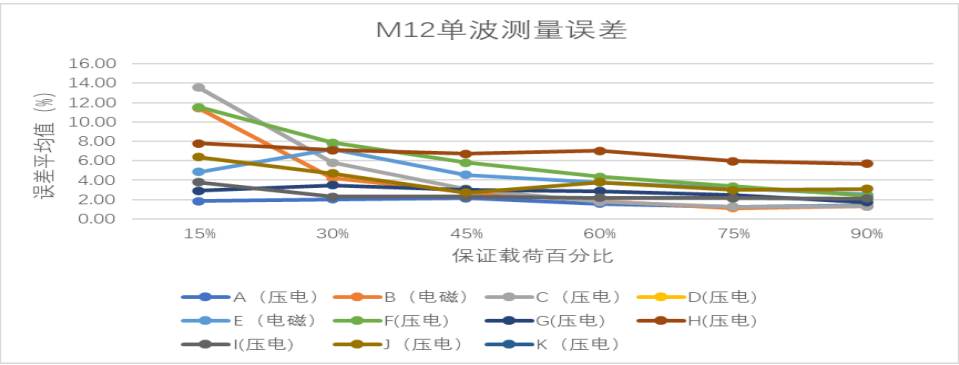
表 10 单波零应力 10 次

	单波 1 次测量误差	单波 2 次测量误差	单波 3 次测量误差	单波 4 次测量误差	单波 5 次测量误差	单波 6 次测量误差	单波 7 次测量误差	单波 8 次测量误差	单波 9 次测量误差	单波 10 次测量误差
15%	4.160	3.757	3.860	3.619	3.550	3.528	3.455	3.409	3.451	3.418
30%	4.742	4.341	4.443	4.204	4.135	4.113	4.041	3.995	4.037	4.004
45%	4.437	4.035	4.137	3.898	3.828	3.806	3.734	3.687	3.729	3.697
60%	3.437	3.030	3.134	2.892	2.822	2.800	2.726	2.679	2.722	2.689
75%	2.448	2.038	2.143	1.898	1.827	1.805	1.731	1.683	1.726	1.693
90%	0.258	0.579	0.472	0.723	0.796	0.819	0.895	0.943	0.899	0.933

表 11 双波零应力 10 次

	双波 1 次测量误差	双波 2 次测量误差	双波 3 次测量误差	双波 4 次测量误差	双波 5 次测量误差	双波 6 次测量误差	双波 7 次测量误差	双波 8 次测量误差	双波 9 次测量误差	双波 10 次测量误差
15%	6.548	6.914	5.929	5.819	5.940	5.988	6.013	6.010	5.884	5.912
30%	2.737	2.664	3.271	3.379	3.199	3.094	3.076	3.087	3.215	3.180
45%	1.823	2.406	2.764	2.787	2.638	2.490	2.487	2.506	2.592	2.561
60%	1.480	2.302	2.303	2.283	2.160	2.006	2.012	2.034	2.081	2.056
75%	1.003	1.732	1.514	1.467	1.359	1.200	1.213	1.236	1.260	1.239

90%	1.129	1.380	1.025	0.977	0.948	0.985	0.979	0.970	0.968	0.975
-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------



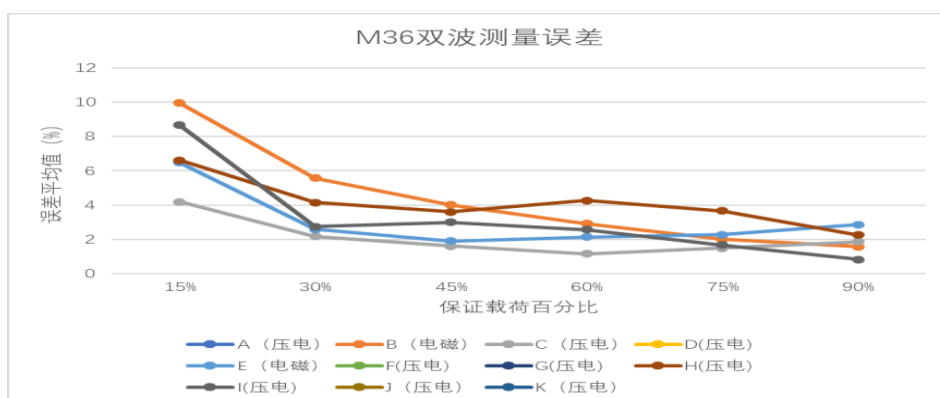


图 5

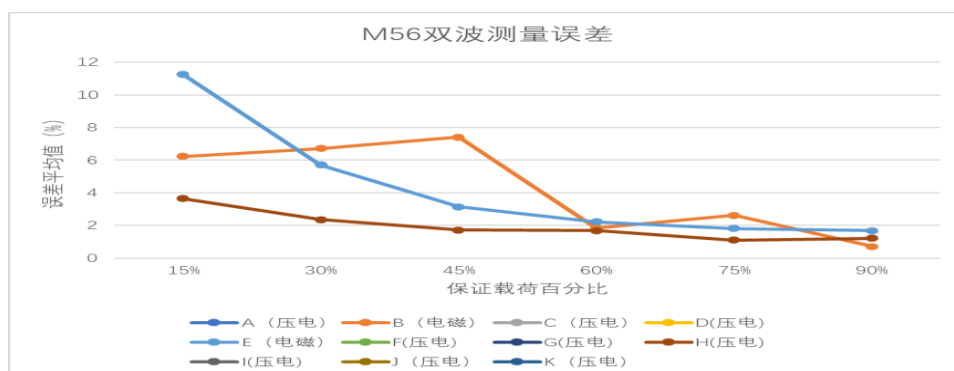


图 6

2. 设备仪器测量范围、精度

每台仪器选择 M12、M36、M56 各 3 支做系数标定，在试验机上加载至规定力值，同时使用仪器进行测量，获取声时差或声时比与预紧力之间关系的标定数据，使用 3 支螺栓标定数据拟合一条标定曲线，将获取的螺栓标定系数代入仪器。另外每种规格选取 5 支螺栓进行试验，在相同试验机上分别加载至规定力值，每颗螺栓在各加载点分别读数 3 次，记录结果。

为保持结果的一致性和可对比性，同种规格的所有螺栓均采用同一加持长度，M12 螺栓夹持长度为 47mm，M36 螺栓夹持长度为 280mm，M56 螺栓夹持长度为 186mm。其中 M12、M36 螺栓使用开口式工装，M56 螺栓使用环形工装。

对于 M12、M36、M56 三种规格的螺栓，超声波测量单波法平均误差见图 7，超声波测量双波法平均误差见图 8。单波法与双波法对比见图 9。

在所有参与标定厂商中，单波法在 M12 螺栓 15%Rp0.2 点时，平均测量误差超过了 5%。在 30% ~ 90%Rp0.2 时，平均测量误差均低于 5%。M12 螺栓在 15%Rp0.2 共有 150 个测量值，其中有 71 个值误差值超过了 5%。在 30% Rp0.2 共有 150 个测量值，其中有 51 个值误差值超过了 5%。M36 螺栓单波法各点的平均测量误差均小于 5%。其中 15%Rp0.2 点共有 150 个测量值，其中有 50 个值误差值超过了 5%。M56 螺栓的单波各点的平均测量误差均小于 5%。其中 15%Rp0.2 点共有 90 个测量值，其中有 29 个误差值超过了 5%。

对于 M12、M36、M56 三种规格的螺栓。M12 螺栓采用双波法进行测试时，总体误差已经超过了 5%。其中 15%和 30% Rp0.2 点各有 90 个测量值，分别有 57 和 50 个误差值超过 5%，45%~90%Rp0.2 点共有 360 个测量值，其中有 131 个误差值超过了 5%。双波法在 M36 螺栓 15%Rp0.2 点时，平均测量误差超过了 5%。在 30% ~ 90%Rp0.2 时，平均测量误差均低于 5%。在 15%Rp0.2 共有 75 个测量值，其中有 33 个值误差值超过了 5%。在 30%Rp0.2 共有 75 个测量值，其中有 19 个值误差值超过了 5%。双波法在 M56 螺栓 15%Rp0.2 点时，平均测量误差超过了 5%。在 30%Rp0.2 时，平均测量误差均接近 5%。在 15%Rp0.2 点共有 45 个测

量值，其中有 23 个值误差值超过了 5%。在 30%Rp0.2 点共有 45 个测量值，其中有 19 个值误差值超过了 5%。

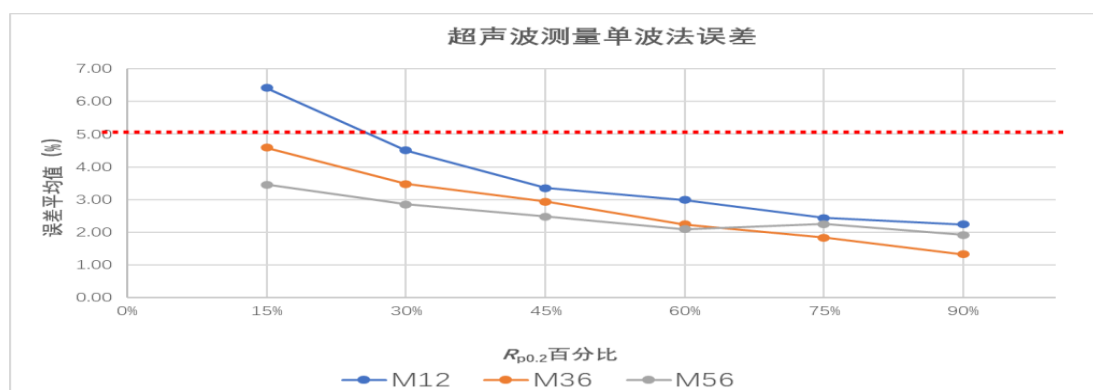


图 7

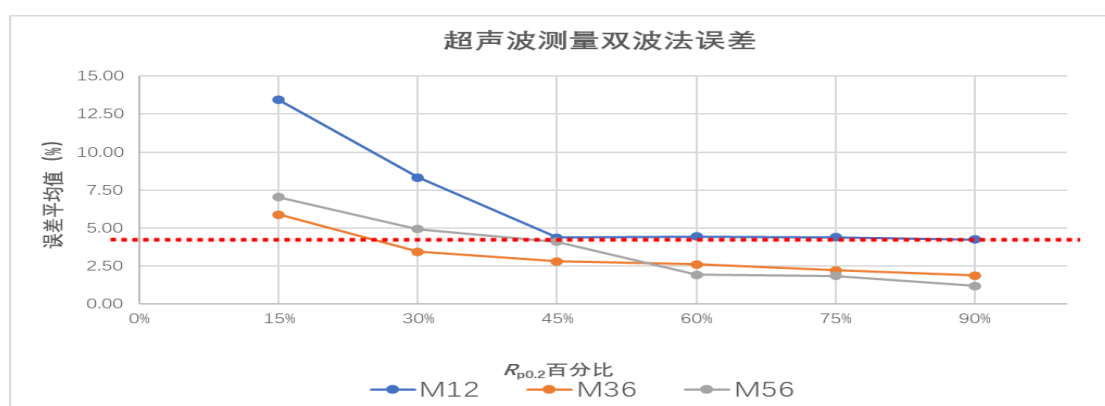


图 8

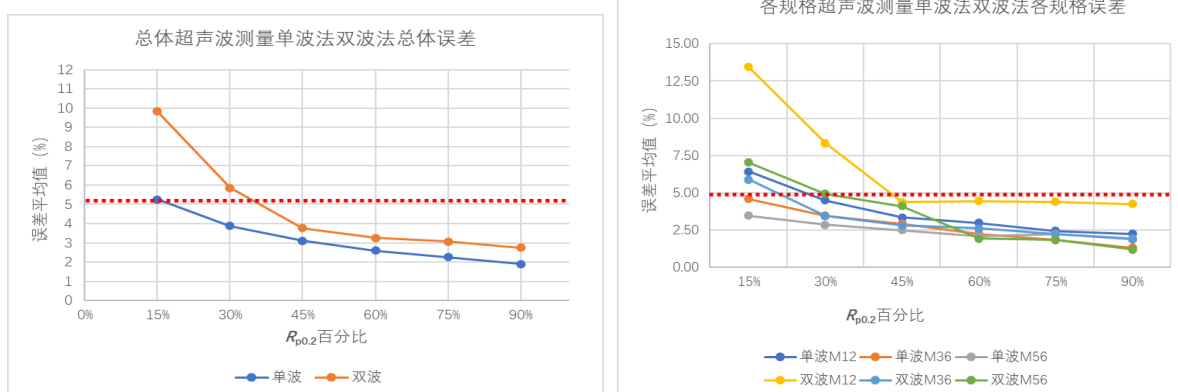
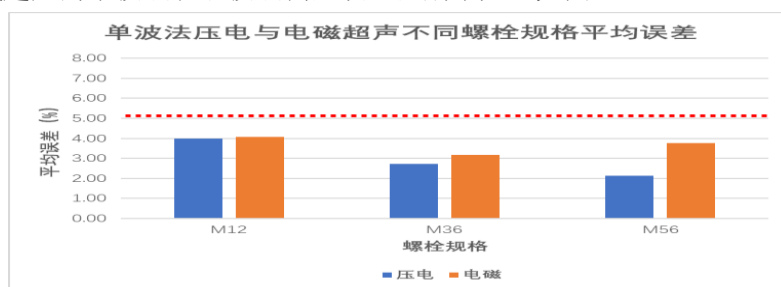


图 9

从现有试验结果来看，双波法误差比单波法要大一点；双波法在小规格螺栓上的测量误差明显偏大；双波法在不同规格螺栓上，其在 15%Rp0.2 点的测量误差均超过了 5%。

压电式与电磁式超声的单波法和双波法测量误差区别不大，见图 10。



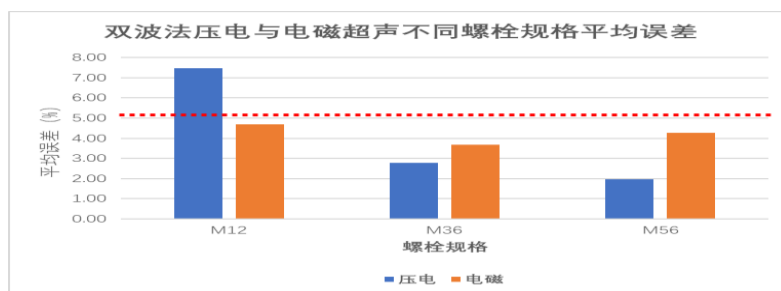


图 10

3. 零应力螺栓和自由状态螺栓标定系数结果的差异

选择 3 支 M36 规格螺栓做系数标定，以下表中力值进行加载，同时使用仪器进行测量，获取声时差或声时比与预紧力之间关系的标定数据，使用 3 支螺栓标定数据拟合成一条标定曲线。对这三根螺栓重复拉伸 10 次，记录每一次的标定曲线。将获取的 10 个螺栓标定系数分别代入仪器，另外各选取 3 支螺栓进行试验，分别对其在表中 1 点至 6 点范围内进行加载，分别记录不同标定次数下获得的标定系数对另外三根螺栓的测量结果。

标定与测量时螺栓的夹持长度均保持为 280mm，试验设备和工装与精度测试时相同

从图 11 可以看出，随着标定螺栓拉伸次数的增加，其标定系数与结果误差趋于稳定，标定螺栓经过 3 次以上反复拉伸之后，结果误差趋于稳定。

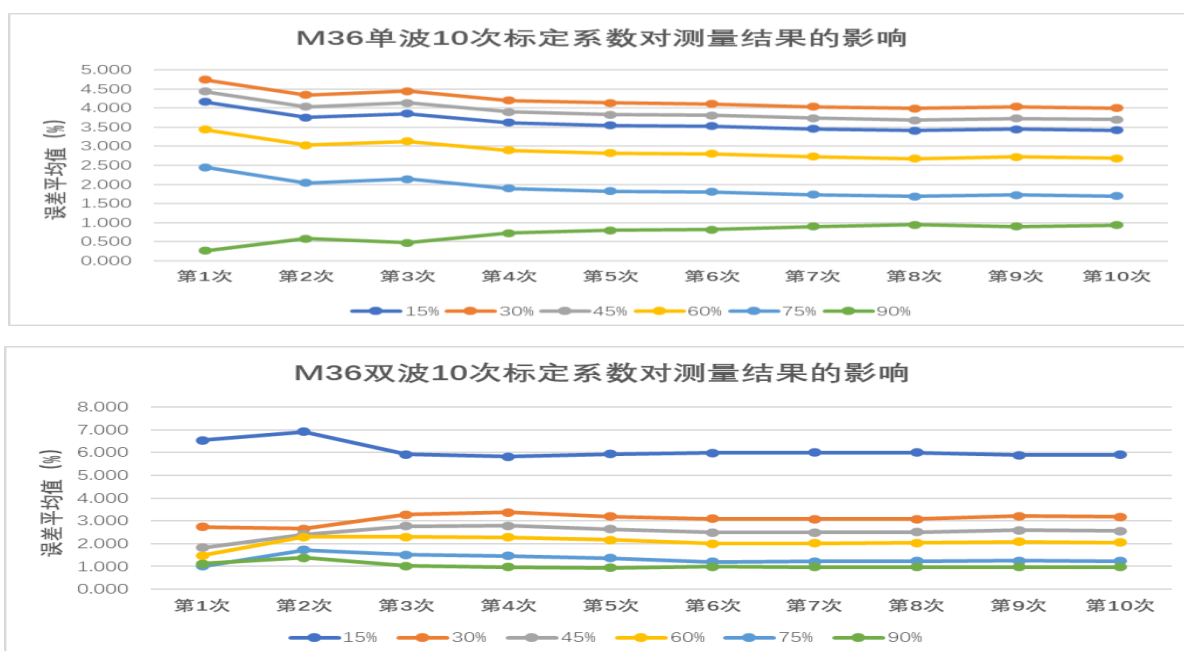


图 11

4. 扭拉和纯拉两种方式在弹性阶段应力系数差异

分别选择 3 支 M36 规格螺栓做纯拉和扭拉的系数标定，以规定力值进行加载，同时使用仪器进行测量，获取标定数据。分别拟合获取纯拉标定曲线和扭拉标定曲线，代入仪器。另外各选取 5 支螺栓进行扭拉试验，分别加载至规定力值，每颗螺栓在各加载点分别读数 3 次，记录结果。

为保持结果的一致性和可对比性，使用同一超声波设备试验，所有螺栓均采用 290mm 夹持长度，纯拉加载速率为 8kN/s，扭拉加载转速为 3r/min。

从图 12 可以看出，纯拉标定曲线和扭拉标定曲线的没有明显区别，其斜率误差也小于 1%。从测量结果来看，无论是采用纯拉标定扭拉测试还是扭拉标定扭拉测试，其误差都在可接受范围内。

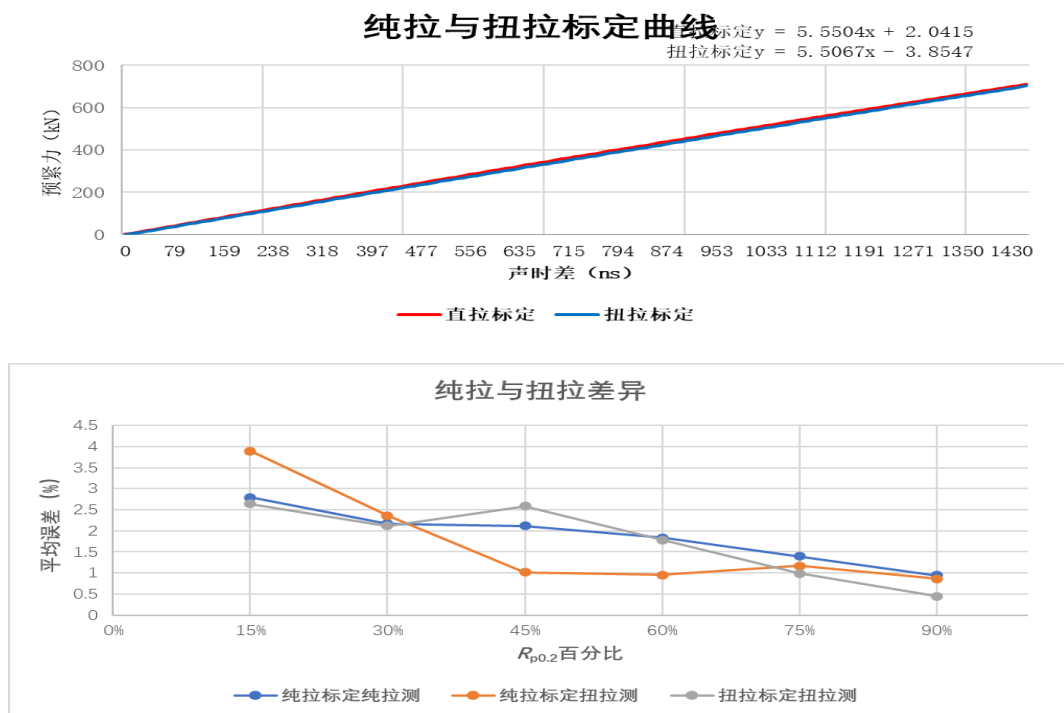


图 12

综合验证试验结果，对标准草案提出以下建议：

- “1 范围 单波：公称直径 $\geq 5\text{mm}$ ，双波：公称直径 $\geq 12\text{mm}$ ；”建议适当调整。
- “6.3 螺栓轴向应力超声体波检测仪 服役螺栓轴向应力有效范围：（15%~90%）（螺栓材料屈服强度）”建议调整为“（30%~90%）（螺栓材料屈服强度）”。
- “系统测量精度：工程应用中 $\leq \pm 5\%$ ”建议保持不变。

四、标准中涉及专利的情况，

本标准不涉及专利问题。

五、预期达到的社会效益、对产业发展的作用等情况

本标准是紧固件试验方法小类制定项目之一，规定了螺栓、螺钉和螺柱（以下简称螺栓）轴向应力超声检测方法的术语和定义、代号、原理、仪器、程序、数据处理和报告不仅适用于螺栓在拧紧过程中或拧紧后轴向紧固应力的静态无损检测，也适用于螺栓在服役状态中轴向服役应力的动态原位监测。标准实施主体为航空航天、船舶轮机、铁路桥梁、化工设备、新能源领域关键设备的设计、使用、管理单位，以及紧固件设计、制造、施工和检测单位等。

本项目填补了螺栓轴向应力超声无损检测标准的空白，对螺栓紧固过程和螺栓服役状态轴向应力超声无损检测方法的技术性能、安全可靠性的提出了要求，能更好地完成螺栓轴向应力无损检测领域的应用，促进无损检测装备的应用，对提升我国紧固件安装轴向应力的一致性，以及在役紧固件轴向服役应力检测技术水平具有十分重要的意义。

六、与国际、国外对比情况

目前国内外对螺栓轴向应力无损检测开展了脉冲回波反射法、渡越时间法、相位法等技术的研

应用。

国内已有基础标准 GB/T 38952—2020《无损检测 残余应力超声体波检测方法》，但不适用于螺栓、螺钉和螺柱类长径比较大的产品。

本标准在国内先进水平。

七、在标准体系中的位置，与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性

本标准属于紧固件标准体系“基础通用”大类“试验方法”小类。

本标准与现行相关法律、法规、规章及相关标准协调一致。

八、重大分歧意见的处理经过和依据

无重大分歧意见。

九、标准性质的建议说明

建议按推荐性国家标准发布。

十、贯彻标准的要求和措施建议

建议本标准批准发布 6 个月后实施。

十一、废止现行相关标准的建议

无。

十二、其他应予说明的事项

经 2021 年 5 月 7 日第一次工作组会议讨论：“测量”侧重于检出量值，建议“检测”改为“测量”；轴向应力超声测量方法适用于螺栓、螺钉和螺柱产品，建议删去标准名称中的“螺栓”二字，在范围中界定适用范围。根据该次会议决议，标准名称修改为《紧固件 轴向应力超声测量方法》。

轴向应力超声测量方法国标工作组
2022-9

附件 1:

《紧固件 螺栓轴向应力超声测量方法》验证试验方案

1. 试验目的

根据《紧固件 螺栓轴向应力超声测量方法》第一次工作组会议对范围、仪器精度、程序等章节提出的相关疑问和争议开展试验验证。

2. 试样

2.1 生产单位

试样统一由山东高强提供。

2.2 规格

表 1 试样规格

序号	规格	数量/件	备注
1	M12×65-10.9	300	去除头部端面头标
2	M36×265-10.9	240	另要连接副（栓、母、垫）64 套 （带扭矩系数）
3	M56×280-10.9	240	另要连接副（栓、母、垫）32 套 （带扭矩系数）
M12 选取 1-2 家仪器进行 7.2 验证试验（单波、双波各 33 件+3+3(标准零应力螺栓)）； M36 选取 1-2 家仪器进行 7.3 验证试验（单波、双波各 8 件）。			

2.3 要求

六角头螺栓（GB/T 5782）1≥5d；要求同一规格型号为同一批次；来样注明材料和表面处理。

3. 各规格紧固件标定点

表 2 各规格紧固件标定点力值

kN

规格	0 点	1 点	2 点	3 点	4 点	5 点	6 点	备注
M12×L-10.9	0	11.9	23.8	35.7	47.6	59.5	71.4	
M36×L-10.9	0	115	230	345	460	575	690	
M56×L-10.9	0	286	572	858	1144	1430	1716	

4. 拟参加验证工作仪器生产企业

表 3 仪器生产企业名单

序号	仪器生产企业	联系人	备注
1	北京理工大学	徐春广 13701099129	双波
2	北京艾法斯特科技发展有限公司	任海 13466666822	双波、单波 自荐 10 次零应力实验 的系数拟合
3	上海天乘实业有限公司	孙应兵 15821239233	单波
4	中物院成都科学技术发展中心	罗坤 13550369859	单波
5	武汉中科创新技术股份有限公司	王子成 13807106459	双波、单波
6	中铁大桥科学研究院有限公司	荆国强 18971003117	双波、单波
7	苏州博昇科技有限公司	沈宇平 15150126158	电磁超声，双波、单波
8	杭州戡威科技有限公司	方文平 15336566035	双波、单波
9	北京声时科技有限公司	汪开灿 18651119345	电磁超声，双波、单波 自荐扭拉、零应力测试
10	上海兹懋仪器科技有限公司 （代表美国 LCT 设备）	郑军 18017569635	单波
11	北京博思伟业机电贸易有限公司	张树国 13901178496	单波
12	航天精工股份有限公司	王川 18722626325	单波

13	上海泛华紧固系统有限公司 (代理美国 MCI)	甘露 13310161825	单波 (因疫情未参与)
----	----------------------------	----------------	-------------

5. 试验地点

机械工业通用零部件产品质量监督检测中心

地址：北京市海淀区首体南路 2 号

联系人：窦智 18600966746；陈艳玲 13811225067

6. 标定试验设备

微机控制电液伺服万能试验机 SHT4305、SHT4106、CHT4206

高强螺栓摩擦性能试验机 CSM35153

7. 试验

7.1 验证设备仪器测量范围、精度

7.1.1 单波

每台仪器选择 M12、M36、M56 各 3 支做系数标定，以表 2 中力值进行加载，同时使用仪器进行测量，获取声时差与预紧力之间关系的标定数据(实验室填写)，使用 3 支螺栓标定数据获取一条标定曲线 (X 轴：声时差，单位：ns；Y 轴：预紧力，单位：kN)，将获取的螺栓标定系数代入仪器。

表 4 单波标定数据

理论值 kN 拉伸机	拉力机力值	1#声时差 (ns)	拉力机力值	2#声时差 (ns)	拉力机力值	3#声时差 (ns)
1 点						
2 点						
3 点						
4 点						
5 点						
6 点						

每种规格另外选取 5 支螺栓进行试验，分别对其在表 2 中 1 点至 6 点范围内进行加载，每颗螺栓在各加载点分别调整探头读数 3 次 (如：1-1、1-2、1-3)，记录结果。

表 5 单波测量数据

测量点	1				2				3				4				5			
	拉力机力值	1-1	1-2	1-3	拉力机力值	2-1	2-2	2-3	拉力机力值	3-1	3-2	3-3	拉力机力值	4-1	4-2	4-3	拉力机力值	5-1	5-2	5-3
1 点																				
2 点																				
3 点																				
4 点																				
5 点																				
6 点																				

对表 5 中数据进行相对误差计算，填入表 6。计算公式：(当前测量值-当前理论输出值)/当前理论输出值*100%。

表 6 单波测量误差

测量点	1				2				3				4				5			
	拉力机	1-1	1-2	1-3	拉力机	2-1	2-2	2-3	拉力机	3-1	3-2	3-3	拉力机	4-1	4-2	4-3	拉力机	5-1	5-2	5-3

	力值				力值				力值				力值				力值			
1点																				
2点																				
3点																				
4点																				
5点																				
6点																				

7.1.2 双波

每台仪器选择 M12、M36、M56 各 3 支做系数标定，以表 2 中力值进行加载，同时使用仪器进行测量，获取仪器输出横/纵波声时比值与预紧力之间关系，获取横/纵波声时比值与预紧力之间关系的标定数据（实验室填写），使用 3 支螺栓标定数据获取一条标定曲线（X 轴：声时比；Y 轴：预紧力，单位：kN），将获取的螺栓标定系数代入仪器。

表 7 双波标定数据

理论值 kN 拉伸机	拉力机力值	1#声时比	拉力机力值	2#声时比	拉力机力值	3#声时比
1 点						
2 点						
3 点						
4 点						
5 点						
6 点						

每种规格另外选取 5 支螺栓进行试验，分别对其在 表 2 中 1 点至 6 点范围内进行加载，每颗螺栓在各加载点分别调整探头读数 3 次（如：1-1、1-2、1-3），记录结果。

表 8 双波测量数据

测量点	1				2				3				4				5			
	拉力机力值	1-1	1-2	1-3	拉力机力值	2-1	2-2	2-3	拉力机力值	3-1	3-2	3-3	拉力机力值	4-1	4-2	4-3	拉力机力值	5-1	5-2	5-3
1点																				
2点																				
3点																				
4点																				
5点																				
6点																				

对表 8 中数据进行相对误差计算，填入表 9。计算公式：（当前测量值-当前理论输出值）/当前理论输出值*100%。

表 9 双波测量误差

测量点	1				2				3				4				5			
	拉力机力值	1-1	1-2	1-3	拉力机力值	2-1	2-2	2-3	拉力机力值	3-1	3-2	3-3	拉力机力值	4-1	4-2	4-3	拉力机力值	5-1	5-2	5-3
1点																				
2点																				
3点																				
4点																				
5点																				
6点																				

7.2 验证零应力螺栓和自由状态螺栓标定系数结果的差异（选取 1-2 家仪器进行）

7.2.1 验证零应力螺栓和自由状态螺栓标定对单波测量结果差异

每台仪器选择 M12 规格 3 支做系数标定，以表 2 中力值进行加载（最大力值到 75% $R_{p0.2}$ ），同时使用仪器进行测量，获取声时差与预紧力之间关系的标定数据（实验室填写），使用 3 支螺栓标定数据获取一条标定曲线。重复标定 10 次，记录数据。

表 10 单波第 1 次标定数据

理论值 kN 拉伸机	拉力机力值	1#声时差 (ns)	拉力机力值	2#声时差 (ns)	拉力机力值	3#声时差 (ns)
1 点						
2 点						
3 点						
4 点						
5 点						

表 11 单波第 2 次标定数据

理论值 kN 拉伸机	拉力机力值	1#声时差 (ns)	拉力机力值	2#声时差 (ns)	拉力机力值	3#声时差 (ns)
1 点						
2 点						
3 点						
4 点						
5 点						

第 3 次~第 9 次标定数据表（略）

表 12 单波第 10 次标定数据

理论值 kN 拉伸机	拉力机力值	1#声时差 (ns)	拉力机力值	2#声时差 (ns)	拉力机力值	3#声时差 (ns)
1 点						
2 点						
3 点						
4 点						
5 点						

将获取的 10 个螺栓标定系数分别代入仪器，另外各选取 3 支螺栓进行试验，分别对其在表 2 中 1 点至 6 点范围内进行加载，每颗螺栓在各加载点分别调整探头读数 3 次（如：1-1、1-2、1-3），记录结果。

表 13 单波测量数据（每个标定系数一个表）

测量点	1				2				3			
	拉力机力值	1-1	1-2	1-3	拉力机力值	2-1	2-2	2-3	拉力机力值	3-1	3-2	3-3
1 点												
2 点												
3 点												
4 点												
5 点												
6 点												

对表 13 中数据进行相对误差计算，填入表 14。计算公式：（当前测量值-当前理论输出值）/当前理论输出值*100%。

表 14 单波测量误差（每个标定系数一个表）

测量点	1				2				3			
	拉力机力值	1-1	1-2	1-3	拉力机力值	2-1	2-2	2-3	拉力机力值	3-1	3-2	3-3

1 点												
2 点												
3 点												
4 点												
5 点												
6 点												

7.2.2 验证零应力螺栓和自由状态螺栓标定对双波测量结果差异

使用双波仪器进行试验，重复 7.2.1 步骤。

7.3 验证扭拉和纯拉两种方式，在弹性阶段应力系数差异（选取 1-2 家设备进行）

7.3.1 使用扭拉标定数据进行扭拉测试（单波）

每台仪器选择 M36 规格 3 支做系数标定，以表 2 中力值进行扭拉加载，同时使用仪器进行测量，获取声时差与预紧力之间关系的标定数据（实验室填写），使用 3 支螺栓标定数据获取一条扭拉标定曲线（X 轴：声时差，单位：ns；Y 轴：预紧力，单位：KN），将获取的螺栓标定系数代入仪器。

表 15 标定数据

理论值 kN 拉伸机	扭拉机力值	1#声时差 (ns)	扭拉机力值	2#声时差 (ns)	扭拉机力值	3#声时差 (ns)
1 点						
2 点						
3 点						
4 点						
5 点						
6 点						

另外选取 5 支螺栓进行试验，分别对其在 表 2 中 1 点至 6 点范围内进行扭拉加载，每颗螺栓在各加载点分别调整探头读数 3 次（如：1-1、1-2、1-3），记录结果。

表 16 单波测量数据

测量点	1				2				3				4				5			
	扭拉机力值	1-1	1-2	1-3	扭拉机力值	2-1	2-2	2-3	扭拉机力值	3-1	3-2	3-3	扭拉机力值	4-1	4-2	4-3	扭拉机力值	5-1	5-2	5-3
1 点																				
2 点																				
3 点																				
4 点																				
5 点																				
6 点																				

对表 16 中数据进行相对误差计算，计算公式：（当前测量值-当前理论输出值）/当前理论输出值*100%。

表 17 单波测量误差

测量点	1				2				3				4				5			
	扭拉机力值	1-1	1-2	1-3	扭拉机力值	2-1	2-2	2-3	扭拉机力值	3-1	3-2	3-3	扭拉机力值	4-1	4-2	4-3	扭拉机力值	5-1	5-2	5-3
1 点																				
2 点																				
3 点																				
4 点																				
5 点																				
6 点																				

7.3.2 使用纯拉标定进行扭拉测试（单波）

将 7.1.1 中获取的纯拉标定补偿系数代入仪器，另外选取 5 支螺栓进行试验，分别对其在表 2 中 1 点至 6 点范围内进行扭拉加载，每颗螺栓在各加载点分别调整探头读数 3 次（如：1-1、1-2、1-3），记录结果。

表 18 单波测量数据

测量点	1				2				3				4				5			
	扭拉机力值	1-1	1-2	1-3	扭拉机力值	2-1	2-2	2-3	扭拉机力值	3-1	3-2	3-3	扭拉机力值	4-1	4-2	4-3	扭拉机力值	5-1	5-2	5-3
1 点																				
2 点																				
3 点																				
4 点																				
5 点																				
6 点																				

对表 18 中数据进行相对误差计算，填入表 19。计算公式：（当前测量值-当前理论输出值）/当前理论输出值*100%。

表 19 单波测量误差

测量点	1				2				3				4				5			
	扭拉机力值	1-1	1-2	1-3	扭拉机力值	2-1	2-2	2-3	扭拉机力值	3-1	3-2	3-3	扭拉机力值	4-1	4-2	4-3	扭拉机力值	5-1	5-2	5-3
1 点																				
2 点																				
3 点																				
4 点																				
5 点																				
6 点																				

7.3.3 对比扭拉标定与纯拉标定测量误差（单波）。

7.3.4 使用双波仪器进行试验，重复 7.3.1 至 7.3.3 步骤测试。

8. 验证试验时间安排（见表 20）

表 20 验证试验时间安排

序号	内容	完成日期
1	样品生产	2021.7.18
2	验证试验	2021.8.15
3	数据整理	2021.8.31

附件 2:

2022 年 7 月征求意见稿草稿意见汇总处理表

标准名称: GB/T 紧固件 轴向应力超声测量方法

第 1 页共 14 页

负责起草单位: 中机生产力促进中心有限公司

承办人: 陈艳玲

电话: 010-88301031

2022 年 8 月 11 日填写

序号	标准条款编号	意见内容	提出单位或委员	处理意见
1.	标题	建议将测量对象由应力修改为“紧固力”、“夹紧力”或“预紧力”等。理由如下: 螺栓应用中更多关心的是其“紧固力(单位 kN)”,而不是声程范围内平均意义上的“轴向应力(单位 MPa)”。在螺栓轴向,由于截面积不尽相同,轴向应力在不同截面存在是不同的。即应力是连续分布的,不具有单一性,而紧固力是唯一的,能够与声时差或声时比一一对应。而且标定所使用的拉力机、扭力机直接输出量是拉力,而不是应力。按照目前“草稿”的方法,标定时还需要除以“有效截面积”获得应力。在测量时则需乘以面积以计算紧固力。在产生了不必要的换算同时,人为地引入了误差,即“有效截面积”的估计。	北京声时 李展鹏	不采纳,根据 2021 年 5 月 7 日第一次工作组会议决议:声弹性原理测出的是应力(双波/单纵波),轴力为计算值;标定过程中采用应力变化量与声时变化量比值。标准名称保留为“轴向应力”
2.	1	范围。标准第二次工作组会中我司提了涂层厚度的问题,目前的叙述里面还是没有注明涂层厚度对测量的影响,依据上次讨论会中设备厂家的反馈,涂层较厚的螺栓轴向应力测不了或测不准,因此范围中是否需要明确螺栓的涂层厚度情况。	中船重工海为	不采纳,7.2 中“检测表面和反射面应平整。检测时应可获得清晰的横波和纵波的回波。”,要求在测量前应已消除涂层厚度的影响,不同涂层对超声的影响不同,不做具体要求
3.	1	c) 性能等级 8.8 级及以上;d) 声学各向同性材料;分二行	天乘 孙应兵、 武汉中科 王子成	采纳
4.	1 e)、6.3	e) 轴向应力范围:(30%~90%) $R_{p0.2}$ (螺栓材料屈服强度)。 对于一些行业预紧力的设计均值是 70%,但是某些行业对螺栓的安全系数要求比较高,设计预紧力的均值是 50%-70%,螺栓安装时预紧力是上下偏差,对于扭矩法安装,预紧力偏差可能会在±34%以上,即实际的范围可能在 50%-34%~50%+34%。所以建议轴向应力范围:(20%~90%) $R_{p0.2}$	明阳 王铎	不采纳,(30%~90%) $R_{p0.2}$ 的应力区间可保证超声传播的线性关系,同时应力值较低时,相对误差较大
5.	1	建议将“由于具有特殊结构型式(如长度较短、空心、变径)或几何形状,以及性能等级 8.8 级以下的螺栓、螺钉或螺柱,在进行超声波检测时可能达不到本文件规定的测量精度要求,宜咨询相关专家。”修改为“具有特殊结构型式(如长度较短、空心、变径)或几何形状,以及性能等级 8.8 级以下的螺栓、螺钉或螺柱,可参考本文件执行。”	武汉中科 王子成	部分采纳,修改为“由于具有特殊结构型式(如长度较短、空心、变径)或几何形状,以及性能等级 8.8 级以下的螺栓、螺钉或螺柱,可参考本文件执行,但在进行超声波测量时可能达不到本文件规定的测量精度要求。”
6.	1、附录 A	原:远程测量系统相关信息见附录A。	明阳 王铎	不采纳,远程测量是在役轴力测量的未来发展趋势,附

序号	标准章条编号	意见内容	提出单位或委员	处理意见
		建议去除远程测量相关的内容，远程测量系统是轴向应力超声测量的一种应用。本标准主要是说方法，远程测量系统实际是比较复杂的。		录 A 作为资料性附录给读者提供信息
7.	2	原：规范性引用文件 建议增加超声测量轴力的原理相关的标准或书籍文献。	明阳 王铎	补充引言, 说明技术发展脉络
8.	2 规范性引用文件	建议增加： GB/T20935.1—2018 金属材料 电磁超声检测方法 第1部分:电磁超声换能器指南 GB/T20935.2—2018 金属材料 电磁超声检测方法 第2部分:利用电磁超声换能器 技术进行超声检测的方法	苏州博昇 沈宇平	部分采纳，6. 2a)中引用 GB/T 20935.1
9.	3.2	原：标定螺栓 reference bolt 为获得螺栓紧固力的相对变化所制备的处于自由状态、作为检测基准的螺栓。 建议：标定螺栓，用于建立测量同规格的螺栓轴力与测量参数关系的试验用螺栓，标定螺栓原则上应与被测量螺栓的规格、生产批次一致。	明阳 王铎	部分采纳，定义修改为“用于建立测量轴向应力与测量参数关系，处于自由状态的试验用螺栓，材料和型式尺寸应与被测量螺栓基本一致。”
10.	3.3	长度变化 change in length 3.8使用	天乘 孙应兵	在正文中仅在 3.8 出现 1 次，是否删去 3.3“长度变化”术语，后续确定
11.	3.3	原：长度变化 change in length 3.8使用 由于轴向拉力变化导致的螺纹紧固件长度的物理变化。 建议：由于拉力和温度变化导致的螺纹紧固件长度的物理变化。温度也会导致长度变化。	明阳 王铎	不采纳，测量中已考虑温度补偿
12.	3.6	横波 transverse wave/shear wave	天乘 孙应兵	不采纳，尽量采用唯一术语
13.	3.9	飞行时间/传播时间 time of flight/propagation time	天乘 孙应兵	不采纳，尽量采用唯一术语，该术语修改为：“声时 time of flight 超声脉冲传输通过某段材料所用的时间。”
14.	3.10	压电陶瓷片 piezoelectric ceramic piece 交流音频超声频信号时，压电片会根据信号的大小频率发生振动而产生相应的声波。	天乘 孙应兵	不采纳，本文件中删去“压电陶瓷片”定义，按相应基础标准
15.	3.10	应力系数：stress coefficient	西南交通大学 苟国庆	采纳，“应力系数 stress coefficient 表征声时差和材料应力关系的系数。”
16.	3.10	声时差：acoustic time difference 不同应力状态下接收声波的飞行时间差值	西南交通大学 苟国庆	部分采纳， “声时差 time difference of flight 材料应力变化引起材料中超声传输延时的相对变化量。”

序号	标准章条编号	意见内容	提出单位或委员	处理意见
17.	3.11（新增）	增加“压电薄膜 piezoelectric film 具有机械能与电能相互转换功能的固体薄膜材料，一般厚度低于百微米。”（首先，在国外已经有很成熟的压电薄膜螺栓用于测量轴向应力的相关产品（Intellifast 公司），且有相关应用报道和专利公布；其次，我司在压电薄膜测量螺栓轴向应力领域已从事多年相关研究，申请有相关专利且相关产品已拥有客户。）	中物院成都科学技术发展中心 罗坤	不采纳，本文件中不对压电薄膜、压电陶瓷片等术语进行规定，删去原“3.10 压电陶瓷片”
18.	3	增加以下3个术语和定义 3.11 应力系数 表述测量声时和材料应力关系的系数。 3.12 声时 超声脉冲传输通过某段材料所用的时间。 3.13 声时差 材料应力变化引起材料中超声传输延时的相对变化量。	武汉中科 王子成	部分采纳， 3.10 声时 time of flight 超声脉冲传输通过某段材料所用的时间。 3.11 声时差 <u>time difference of flight</u> 材料应力变化引起材料中超声传输延时的相对变化量。 3.13 应力系数 stress coefficient 表征声时差和材料应力关系的系数。
19.	5	把原理的权威的出初和推荐引用的标准写出，原理国内、国外理论和修订上可能有一些不同，我们推荐一个多数认同的参数与理论。	明阳 王铎	与引言同时考虑
20.	5.1	修改为“依据材料的广义虎克定理和声弹性原理，螺栓的轴向应力会引起材料长度和超声波传播速度都发生变化，所以轴向应力变化将使超声波在其轴线方向的传播时间发生变化。因此，可通过测量超声波在螺栓中的传播时间相对变化计算出对螺栓施加的轴向应力，以及根据螺栓的应力截面算出螺栓连接的紧固轴力。”	武汉中科 王子成	部分采纳，修改为“依据材料的广义虎克定律，螺栓的轴向应力会引起长度变化；依据材料的声弹性原理，螺栓的轴向应力会引起超声波传播速度的变化，对于长度确定的螺栓连接，轴向应力变化将使超声波在其轴线方向的声时发生变化。因此，可通过测量超声波在螺栓中的声时差计算出对螺栓施加的轴向应力，从而根据螺栓的应力截面算出螺栓连接的紧固轴力。”
21.	5.2	增加单波法测量的原理，建议增加“单波法采用测量一种波型（例如纵波）的超声脉冲沿螺栓轴向传输的施加应力前和施加应力后的相对延时量，间接测量施加的应力大小。”； 建议删除公式 2 和公式 3 及公式说明。	武汉中科 王子成	采纳，增加第 1 段“单波法采用测量一种波型（例如纵波）的超声脉冲沿螺栓轴向传输的施加应力前和施加应力后的声时差，间接测量轴向应力。”
22.	5.2	建议在相对复杂的“原理公式”基础上，增加简明易懂的“测量公式”，如下。该公式既为实际的使用的公式，也简明地指明了预紧力与声时差是线性关系。 $F = k_s \Delta t_s$	北京声时 李展鹏	见 21 意见

序号	标准章条编号	意见内容	提出单位或委员	处理意见
		$F = k_L \Delta t_L$ <p>式中</p> $k_L, k_S \text{ —— 纵波、横波标定斜率；}$ $\Delta t_L, \Delta t_S \text{ —— 纵波、横波声时差；}$ $F \text{ —— 轴力。}$		
23.	5.2	$\varepsilon_L = \frac{\frac{4\lambda + 10\mu + 4m}{\mu} + \frac{2l - 3\lambda - 10\mu - 4m}{\lambda + 2\mu}}{3\lambda + 2\mu}$ <p>修改图片格式公式（2）为“</p>	中物院成都科学技术 发展中心 罗坤	见 21 意见
24.	5.2	最后一段<由式（1）式可知>修改为“由式（1）可知”	中物院成都科学技术 发展中心 罗坤	见 21 意见
25.	5.2	（注：此处最好添加一段说明，说明公式(1)~(3)中的各参数具体怎么取值或者怎么通过标定实验进行实测）	天乘 孙应兵	见 21 意见
26.	5.2	<p>单波法测量原理</p> <p>（注：此处最好添加一个单波法测量原理示意图）</p>	天乘 孙应兵	采纳，增加测量原理示意图
27.	5.2、5.3	注明各参数和表达式的单位	明阳 王铎	采纳，在第 4 章代号中注明单位，5.2、5.3 公式中不再给出代号的说明
28.	5.3	<p>增加双波法测量的原理，建议增加“双波法采用同时测量两种波型（例如纵波和横波）超声脉冲沿螺栓轴向传输的绝对延时量，间接测量轴向的应力大小。”；</p> <p>公式 4 的参数 T_{L0}，T_{S0} 定义中“无应力”修改为“标定的无应力”；K_L，K_S 定义中“螺栓材料”修改为“标定的螺栓材料”；</p> <p>建议删除公式 5 和公式 6 及公式说明。</p>	武汉中科 王子成	<p>部分采纳，增加第 1 段“双波法采用同时测量两种波型（例如纵波和横波）超声脉冲沿螺栓轴向传输的声时差，间接测量轴向应力。”</p> <p>删去公式 5 和公式 6 及公式说明。</p>
29.	5.3	$\varepsilon_S = \frac{\frac{\lambda n}{4\mu} + 4\lambda + 4\mu + m}{\mu(3\lambda + 2\mu)}$ <p>修改图片格式公式（6）为“</p>	中物院成都科学技术 发展中心 罗坤	见 28 意见
30.	5.3	删除<式（6）中， λ 、 μ 为二阶（拉梅）弹性常数； k — m 、 n 为三阶（默纳汉）弹性常数>	中物院成都科学技术 发展中心 罗坤	见 28 意见

序号	标准章条编号	意见内容	提出单位或委员	处理意见
		中的1。(公式6中没有1三阶常数)		
31.	5.3	最后一段<即可由式(4)式计算>修改为“即可由式(4)计算”。	中物院成都科学技术 发展中心 罗坤	见28意见
32.	5.3	(注:此处最好添加一段说明,说明公式(4)~(6)中的各参数具体怎么取值或者怎么通过标定实验进行实测)	天乘 孙应兵	见28意见
33.	5.3	<p>建议在相对复杂的“原理公式”基础上,增加简明易懂的“测量公式”,如下。该公式既为实际的使用的公式,也简明地指明了预紧力与声时差是线性关系。</p> $F = k_F D + b_F$ <p>式中: D —— 仪器的测量量,常见表达式有:</p> $D = \frac{t_S - t_L}{t_S + t_L}、D = \frac{t_L}{t_S};$ <p>k_F —— 双波预紧力标定斜率;</p> <p>b_F —— 双波预紧力标定截距。</p>	北京声时 李展鹏	见28意见
34.	5.3	<p>双波法测量原理</p> <p>(注:此处最好添加一个双波法测量原理示意图)</p>	天乘 孙应兵	采纳,增加测量原理示意图
35.	6.2 a)	<p>建议将“体波检测探头应能同时实现超声横波与超声纵波的发射和接收”修改为“体波检测探头应能实现超声纵波和/或横波的发射和接收”;</p> <p>对于单波法测量,只要求超声探头具备横波或者纵波的发射和接收能力。</p>	武汉中科 王子成、北 京声时 李展鹏、西南 交通大学 苟国庆	采纳
36.		<p>6.2(a)“超声体波收发换能器和声楔块的材料选定和制备应符合GB/T 18852。”修改原因:超声轴向力测量多采用的直入射不需要“声楔块”</p> <p>建议修改为“超声体波收发换能器选定和制备应符合GB/T 18852。”</p> <p>6.2(c)“探头接触面与被检测构件表面良好贴合,必要时采用曲面楔块。”</p> <p>修改原因:同序号2意见</p> <p>意见:建议修改为“探头接触面与被检测构件表面良好贴合”</p>	西南交通大学 苟国 庆	不采纳,根据实际测量需要选用
37.	6.2 体波检测探头	<p>为了包含电磁超声换能器,建议修改为:</p> <p>a)体波检测探头应能同时实现超声横波与超声纵波的发射和接收,根据被检测材料的</p>	苏州博昇 沈宇平	<p>部分采纳,6.2修改为“6.2 体波检测探头</p> <p>a)体波检测探头应能实现超声横波和/或纵波的发</p>

序号	标准章条编号	意见内容	提出单位或委员	处理意见
		<p>材质、尺寸、表面形廓、检测区域及服役应力的检测长度（1）等需求，选定超声收发换能器的中心频率、声束截面积等探头参数，压电超声体波收发换能器和声楔块的材料选定和制备应符合 GB/T 18852。</p> <p>b) 压电超声换能器接触面与被检测构件表面良好贴合，必要时采用曲面楔块。</p> <p>c) 如果使用电磁超声体波收发换能器，换能器的选定和制备应符合 GB/T20935.1—2018。</p> <p>d) 构成 Z 轴方向应力检测的两个超声体波收发换能器在检测和标定使用时应该完全一致。</p>		<p>射和接收，根据被检测材料的材质、尺寸、表面形廓、检测区域及服役应力的检测长度（1）等需求，选定体波换能器的中心频率、声束截面积等探头参数。</p> <p>b) 压电式超声体波换能器和声楔块的材料选定和制备应符合 GB/T 18852。</p> <p>c) 电磁超声体波换能器的选定和制备应符合 GB/T 20935.1。</p> <p>d) 检测和标定用的服役应力体波检测探头应尽可能一致。</p> <p>e) 压电式超声体波换能器接触面与被检测构件表面良好贴合，必要时采用曲面楔块。”</p>
38.	6.2	<p>b)中“构成 Z 轴方向应力检测探头的两个超声体波收发换能器的性能要求一致”的“两个超声波收发换能器”指代不明，图 2 的测量示意图也没有指出如何布置两个超声波收发换能器。一般地，无论是压电超声还是电磁超声，仅需要一个探头即可同时收发横波和纵波，实现单波和双波的测量，因此建议将该表述删除。</p> <p>c)中应该分类讨论：</p> <p>对于压电超声，表述“探头接触面与被检测构件表面良好贴合，必要时采用曲面楔块。”正确无误；</p> <p>对于电磁超声，由于非接触的特性，“探头接触面与被检测构件表面良好贴合”不是必要条件。而实际上很大一部分螺栓都具有上凸的钢字，采用电磁超声技术可以在不打磨的情况下进行测量，且精度不受影响，因此不建议对其进行限制。此外，电磁超声没有“曲面楔块”的概念，GB/T 18852 也仅规定了压电超声楔块制备原则。</p>	北京声时 李展鹏	部分采纳，见意见 37
39.	6.2(b)	<p>原文：“构成 Z 轴方向应力检测探头的两个超声体波收发换能器的性能要求一致，同时，检测和标定用的服役应力体波检测探头应该完全一致。”</p> <p>修改原因：轴向力测量一般都是一个探头自发自收，很少存在两个探头的情况</p> <p>意见：建议修改为“检测和标定用的服役应力体波检测探头应该完全一致。”</p>	西南交通大学 苟国庆	采纳，见意见 37
40.	6.2 c)	<p>原：c) 探头接触面与被检测构件表面良好贴合，必要时采用曲面楔块</p> <p>建议：c) 探头接触面与被检测构件表面良好贴合，必要时采用曲面楔块，及使用耦合剂。</p>	明阳 王铎	不采纳，耦合剂不属于仪器，见 7.3。修改为“e) 压电式超声体波换能器接触面与被检测构件表面良好贴合，实现有效的超声波传递。”

序号	标准章条编号	意见内容	提出单位或委员	处理意见
41.	6.2 体波检测探头	<p>b) 构成 Z 轴方向应力检测探头的两个超声体波收发换能器的性能要求一致，同时，检测和标定用的服役应力体波检测探头应该完全一致。</p> <p><u>应修改为：</u> b) 构成 Z 轴方向应力检测探头的超声体波收发换能器的性能要求一致，同时，检测和标定用的服役应力体波检测探头应该频率一致。</p> <p>现阶段技术，超声体波探头单探头既能发横波也能发纵波，所以原文处的第一句话“两个”应该删除，另，标定时和检测时的探头不用一致，频率型号一致即可。如果标定用 A 探头，现场使用也要求 A 探头，阻碍该技术的推广。</p>	艾法斯特 任海	部分采纳，见意见 37
42.	6.3	<p>压电陶瓷片的固有频率应介于 2MHz~10MHz 之间。</p> <p>压电陶瓷片固有频率不应在固定范围，低频如 1MHz 或 500KHz 未来都非常有可能使用，高频（溅射）目前有 15mhz（核九院已做到）甚至非常有可能到 20mhz（航发），所以频率建议放宽。</p> <p><u>应修改为：</u> 压电陶瓷片的固有频率可介于 500KHz~20MHz 之间。</p>	艾法斯特 任海	部分采纳，修改为“超声检测频率应介于 2MHz~10MHz 之间。在满足测量精度的情况下，可采用本文件规定范围以外的频率。”
43.	6.3	建议将 “通过计算超声体波传播时间来得到对应的螺栓轴向应力值。” 修改为“通过测量超声体波传播时间计算得到对应的螺栓轴向应力值。”；	武汉中科 王子成	采纳
44.	6.3	<p>章节 1“范围”已经对螺栓轴向应力有效范围（30%~90%）进行了定义，该章节又重复了一遍，而且这个指标是对被测螺栓的约束，并不是对超声体波检测仪的约束，因此是否可以删除“服役螺栓轴向应力有效范围：（30%~90%）$R_{p0.2}$（螺栓材料屈服强度）”这一段。</p>	中船重工海为、武汉中科 王子成	采纳
45.	6.3	“时间测量分辨力应优于被测螺栓应力达到 70%屈服强度时的声时增量的 1/100。”中建议将“时间测量分辨力”更改为“时间测量分辨率”	西南交通大学 苟国庆、中物院成都科学技术发展中心 罗坤	采纳
46.	6.3	建议在“时间测量分辨力应优于被测螺栓应力达到 70%屈服强度时的声时增量的 1/100。”后面应增加典型尺寸、材料的应力延时增量参考表。	武汉中科 王子成	“时间测量分辨率应优于被测螺栓应力从无应力达到 70%屈服强度时的声时增量的 1/100。”各设备商提供时间测量分辨率
47.	6.3	<p>原：系统测量精度：工程应用中$\leq \pm 5\%$（包含螺栓产品的误差）。</p> <p>建议：工程应用中$\leq \pm 3\%$（包含螺栓产品的误差）。实际明阳验证与执行都为$\pm 3\%$。$\pm 5\%$的误差太大了，我们使用的 VDI2230 中推荐拉伸法、长度测量法安装和的螺栓预紧力安装偏差在$\pm 2\% \sim \pm 10\%$，即在实际紧固连接设计时，螺栓的预紧力范围会很窄，如预紧力测量误差$\pm 5\%$，满足不了要求。</p>	明阳 王铎	不采纳， $\pm 5\%$ 测量误差反映了现有设备的精度水平
48.	6.3	<系统测量精度>修改为“系统测量偏差”。（所谓 $\leq \pm 5\%$ 这个值是（系统测量值-拉力机输出值）/拉力机输出值得到的比值，我们觉得称之为系统测量偏差更为合理。）	中物院成都科学技术发展中心 罗坤	部分采纳，修改为“系统测量误差： $\leq \pm 5\%$ 。”移至 6.1 第 2 段

序号	标准章条编号	意见内容	提出单位或委员	处理意见
49.	6.3	本节末新增“压电薄膜的固有频率应大于 10MHz。”	中物院成都科学技术发展中心 罗坤	部分采纳,修改为“超声检测频率应介于 2MHz~10MHz 之间。在满足测量精度的情况下,可采用本文件规定范围以外的频率。”
50.	6.4	温度测量精度满足 A 级以上。 建议:注明精度,实际使用 PT1000 以上,精度在 0.01~0.02 度。温度对超声波测量精度有很大的影响。	明阳 王铎	不采纳,“A 级以上”为最低要求,不排斥更高精度要求。增加“温度传感器应定期进行校准。” A 级:不大于 $\pm(0.15^{\circ}\text{C}+0.002^{\circ}\text{C}\times\text{传感器量程})$; B 级:不大于 $\pm(0.30^{\circ}\text{C}+0.005^{\circ}\text{C}\times\text{传感器量程})$ 各设备商提供温度对应力测量的影响
51.	7.1	通常在紧固件端面的中间部位进行测量,可由用户提出要求,或由合同供需双方约定。	天乘 孙应兵	采纳,修改为“或由供需双方约定”
52.	7.1 图 2	最好对图中的 A、B、C 测量位置进行一些文字性的说明	天乘 孙应兵	采纳,增加指引线“1—紧固件端面的测量部位。”,增加 a)双头螺柱 b)螺钉 c)螺栓
53.	7.2	将<如使用压电超声技术应对试件端面中间位置进行贴(陶瓷)片>修改为“如使用压电超声技术应对试件端面中间位置进行贴(陶瓷)片或植入压电薄膜”	中物院成都科学技术发展中心 罗坤	部分采纳,7.2 修改为“检测表面和反射面应平整。检测时应可获得清晰的横波和/或纵波的回波。可在试件端面中间位置植入压电元件。”
54.	7.2、7.5	原:如使用压电超声技术应对试件端面中间位置进行贴(陶瓷)片。 实际很多厂家陶瓷片和探头集成一起,测量使用耦合剂。	明阳 王铎	采纳,见意见 53
55.	1 7.2 试件准备	检测表面和反射面应平整。检测时应可获得清晰的横波和纵波的回波。如使用压电超声技术应对试件端面中间位置进行贴(陶瓷)片,如使用电磁超声技术无需对试件端面中间位置贴(陶瓷)片。 原文如使用压电超声技术应对试件端面中间位置进行贴(陶瓷)片,这句话描述错误。 应修改为:如使用压电超声技术可选择对试件端面位置进行贴(陶瓷)片,或采用超声探头直接测量。	艾法斯特 任海	采纳,见意见 53 单波压电超声现无需(不强制贴片) 双波测量压电超声无需贴片
56.	7.2、7.5	原文:如使用压电超声技术应对试件端面中间位置进行贴(陶瓷)片,如使用电磁超声技术无需对试件端面中间位置贴(陶瓷)片。 修改原因:“(陶瓷)片”建议修改为更为专业的“压电陶瓷片”;同时对于双波法,由于横波压电晶片价格昂贵,因此多采用可重复的横纵波一体换能器,而不是粘贴“(陶瓷)片” 意见:建议删除“如使用压电超声技术应对试件端面中间位置进行贴(陶瓷)片,如使用电磁超声技术无需对试件端面中间位置贴(陶瓷)片。”的相关描述	西南交通大学 苟国庆	部分采纳,见意见 53
57.	7.3	“声弹性系数”改为“应力系数”	北理工 肖定国、天乘 孙应兵	采纳
58.	7.3	把耦合剂的质量要求写出	明阳 王铎	部分采纳,增加“采用压电超声双波法时,耦合剂应能稳定耦合横波的传导。”

序号	标准章条编号	意见内容	提出单位或委员	处理意见
59.	7.3	将<零无应力声时标定过程>修改为“ 零应力 声时标定过程”。（与第3节术语定义对应）	中物院成都科学技术发展中心 罗坤	不采纳，此处标定的是“ T_{L0} 无应力时纵波在紧固件长度内的传播时间”或“ T_{S0} 无应力时横波在紧固件长度内的传播时间”
60.	7.4.1	标定螺栓的要求，直线度要求，弯曲的螺栓对标定数据有影响。	明阳 王铎	不采纳，标准中已要求标定螺栓型式尺寸应与被测量螺栓基本一致
61.	7.4.1	“标定螺栓的材料和型式尺寸应与被检测螺栓基本一致（长度误差应在1.0%以内）”，建议修改成“标定螺栓的材料和型式尺寸应与被检测螺栓基本一致，推荐同厂家、同批次的同规格螺栓”。	北京声时 李展鹏	采纳，修改为“标定螺栓的材料、型式尺寸和夹持长度应与被测螺栓基本一致（长度误差应在1.0%以内），宜选用同厂家、同批次的同规格螺栓。”
62.	7.4.1	“基准零应力螺栓”改为“零应力螺栓”	北理工 肖定国、天乘孙应兵	采纳
63.	7.4.2	原：测量点不少于5点，宜使用3支标定螺栓的声时与轴向力试验数据 推荐：测量不小于5点，均布在20%-90%范围。不少于3个有效的标定数据。	明阳 王铎	部分采纳，修改为 “7.4.2.1 应力系数标定 螺栓应力系数标定条件应与被测螺栓装配状态保持一致。 在环境温度（10℃~35℃）下，使用符合 GB/T 16825.1 的拉力试验机，在材料弹性范围内对标定螺栓按照 GB/T 228.1 规定的方法进行拉伸试验，测量不少于5点，均布在轴向应力（30%~90%） $R_{p0.2}$ 范围内。宜使用3支标定螺栓的声时与轴向力试验数据，根据各测量点拉力值、螺栓公称应力截面积 A 计算轴向应力，得到应力-声时差标定曲线，拟合得出应力系数。 7.4.2.2 无应力状态声时比标定 对双波法，测量标定螺栓自由状态下纵波和横波传播时间 T_{L0} 及 T_{S0} ，计算得到无应力状态声时比（或其他声特征量），至少测量5支标定螺栓，取平均值。若声时比变异系数 >0.00025 ，应增加标定螺栓数量，直至变异系数 ≤ 0.00025 。 注：变异系数=标准偏差/平均值。”
64.	7.4	建议增加：7.4.3 应力系数数据库 如果合同双方同意，被检测螺栓的应力系数可以从合同双方任何一方的应力系数数据库中	苏州博昇 沈宇平	采纳，增加“7.4.3 应力系数数据库 如供需双方同意，被测螺栓的应力系数可以从供需双方

序号	标准章条编号	意见内容	提出单位或委员	处理意见
		提取。		认可的应力系数数据库中提取。”
65.	7.5	<p>考虑装配、在役、单波、双波，应有 4 种测量情况，建议 7.5 修改为：</p> <p>2 7.5 测量程序</p> <p>7.5.1 螺栓装配应力单波法测量程序</p> <p>a) 测量螺栓拧紧前（自由状态下）超声纵波在其长度内的传播时间为T_{Lo}，探头放置的位置应与应力系数标定时保持一致。</p> <p>b) 螺栓装配（即拧紧螺栓）。</p> <p>c) 测量螺栓拧紧后（装配状态下）超声纵波在其长度内的传播时间为T_L，探头放置的位置应与应力系数标定时保持一致。</p> <p>d) 根据应力系数、温度补偿系数和测得的纵波传播时间T_{Lo}及T_L，计算出拧紧后螺栓的轴向应力和紧固轴力。</p> <p>7.5.2 螺栓装配应力双波法测量程序</p> <p>a) 测量螺栓拧紧前（自由状态下）超声纵波在其长度内的传播时间为T_{Lo}和超声横波在其长度内的传播时间为T_{So}，探头放置的位置应与应力系数标定时保持一致。</p> <p>b) 螺栓装配（即拧紧螺栓）。</p> <p>c) 测量螺栓拧紧后（装配状态下）超声纵波在其长度内的传播时间为T_L和超声横波在其长度内的传播时间为T_S，探头放置的位置应与标定时保持一致。</p> <p>d) 系统基于公式及标定应力系数、温度补偿系数和横、纵波传播时间，T_{So}，T_{Lo}，T_S，T_L，计算出拧紧后螺栓的轴向应力和紧固轴力。</p> <p>7.5.3 螺栓服役应力单波法测量程序</p> <p>a) 查询螺栓拧紧前（自由状态下）超声纵波在其长度内的传播时间测量值T_{Lo}。</p> <p>b) 对在役（保持拧紧状态）螺栓，测量超声纵波在其长度内的传播时间为T_L，探头放置的位置应与应力系数标定和测量T_{Lo}时一致。</p> <p>c) 根据应力系数、温度补偿系数，查询得到的纵波传播时间T_{Lo}，和测量得到的纵波传播时间T_L，计算出服役状态螺栓的轴向应力和紧固轴力。</p> <p>7.5.4 螺栓服役应力双波法测量程序</p> <p>a) 查询螺栓拧紧前（自由状态下）超声纵波和横波在其长度内的传播时间测量值T_{Lo}和T_{So}。</p>	北理工 肖定国	<p>部分采纳，修改为：</p> <p>7.5.1单波测量程序</p> <p>a) 测量螺栓自由状态下超声纵波在其长度内的传播时间T_{Lo}，体波检测探头放置的端面位置应与标定应力系数时保持一致；</p> <p>b) 测量螺栓应力状态下超声纵波在其长度内的传播时间T_L，探头放置的端面位置应与标定应力系数和测量T_{Lo}时保持一致；</p> <p>c)根据应力系数、温度补偿系数和测得的纵波传播时间T_{Lo}及T_L，计算出应力状态下螺栓的轴向应力和紧固轴力。</p> <p>7.5.2双波测量程序</p> <p>a) 测量螺栓应力状态下超声纵波在其长度内的传播时间T_L和超声横波在其长度内的传播时间T_S，探头放置的端面位置应与标定应力系数时保持一致；</p> <p>b) 根据应力系数、温度补偿系数、无应力状态声时比（或其他声特征量），和测量得到的纵波及横波传播时间T_L及T_S，计算出应力状态下螺栓的轴向应力和紧固轴力。</p> <p>当测量精度要求较高时，应测量被测螺栓自由状态下超声纵波在其长度内的传播时间T_{Lo}和超声横波在其长度内的传播时间T_{So}。</p>

序号	标准章条编号	意见内容	提出单位或委员	处理意见
		<p>b) 对在役（保持拧紧状态）螺栓，测量超声纵波在其长度内的传播时间T_L和超声横波在其长度内的传播时间T_S，探头放置的位置应与应力系数标定和测量T_{Lo}及T_{So}时一致。</p> <p>c) 根据应力系数、温度补偿系数，查询得到的纵波及横波传播时间T_{Lo}及T_{So}，和测量得到的纵波及横波传播时间T_L及T_S，计算出服役状态螺栓的轴向应力和紧固轴力。</p> <p>注：为了保证测量已拧紧处于服役状态螺栓轴向应力的准确性，应使用在装配时测量并记录的自由状态下（拧紧前）超声波在其长度内的传播时间作为零应力声时进行计算。</p>		
66.	7.5.1、7.5.2	建议删除“注：压电超声需提前在试件端面贴陶瓷片，电磁超声无需提前在试件端面贴陶瓷片，详见 7.2 节。”	武汉中科 王子成	采纳，见意见 65
67.	7.5.1 和 7.5.2	两处注意事项相关内容建议修改为“注：试件准备详见 7.2 节”，不然在第 7 节中出现 3 段重复且较长的文字，稍显冗余。	中物院成都科学技术发展中心 罗坤	部分采纳，见意见 65
68.	7.5.1 单波测量程序	<p>注：压电超声需提前在试件端面贴陶瓷片，电磁超声无需提前在试件端面贴陶瓷片，详见 7.2 节。</p> <p>压电超声现无需（不强制贴片）</p> <p>所以备注<u>应予以删掉</u></p>	艾法斯特 任海	采纳，见意见 65
69.	7.5.2 双波测量程序	<p>注：压电超声需提前在试件端面贴陶瓷片，电磁超声无需提前在试件端面贴陶瓷片，详见 7.2。</p> <p>双波测量压电超声无需贴片</p> <p>本备注<u>应予以删掉</u></p>	艾法斯特 任海	采纳，见意见 65
70.	7.5.2	<p>b) 中“测量螺栓应力状态下的横纵波声时比值”，建议修改为“测量螺栓应力状态下的横纵波声时”。理由是“声时比”的表述限制了测量公式的形式，目前个厂家所用公式虽等价，但形式不相同。</p> <p>c) 中“通过测得的声时比值，计算螺栓预紧力”，建议修改为“通过测得的声时，计算螺栓预紧力”，理由同上。</p>	北京声时 李展鹏	部分采纳，增加“(或其他声特征量)”，见意见 65
71.	7.6.1	建议给出温度补偿公式各参数含义和单位， <u>注明公式出处</u> 。	西南交通大学 苟国庆、明阳 王铎	<p>部分采纳，注明α_S、α_L、θ、θ_0等第 4 章中未规定代号的含义、单位</p> <p>θ_0---测量无应力状态声时的温度</p> <p>θ---测量应力状态声时的温度</p> <p>α_S---横波温度系数</p> <p>α_L---纵波温度系数</p>
72.	7.6.1	(注：此处最好对公式(7)~(8)如何使用或者如何通过标定实验进行实测做一些描述)	天乘 孙应兵	不采纳，公式 7 和 8 仅供参考，不同的设备可能采用不

序号	标准章条编号	意见内容	提出单位或委员	处理意见
				同的温度补偿公式
73.	7.6.2	(注：此处最好对形状因子如何进行补偿或者如何通过标定实验进行实测做一些描述)	天乘 孙应兵	不采纳，应力系数标定时已包含形状因子
74.	8	$F = \sigma \cdot A$ <p>有超声波测轴力 F 的计算，我认为公式使用有问题。公式本身没有问题，如果 σ 是测量出来的，一个螺栓有不同截面，螺纹的应力截面积和螺杆是不一样的就会计算出几个轴力，而一个螺栓只能有一个轴力，在不同的截面应力是不同的。同样我们的这个标准的名称我认为也有有问题，因为一个螺栓不同的截面应力可能是不同的轴力才是唯一的。</p>	明阳 王铎	部分采纳，7.4.2.1 为应力系数标定，而非轴力系数标定，修改为“宜使用 3 支标定螺栓的声时与轴向力试验数据，根据各测量点拉力值、螺栓公称应力截面积 A 计算轴向应力，得到应力-声时差标定曲线，拟合得出应力系数。”
75.	9 测量报告	<p>在螺栓轴向应力测量过程中，可以手动或自动记录检测结果，生成测量报告，报告内容至少应包括以下内容：</p> <p><u>建议修改为：</u>在螺栓轴向应力测量过程中，可以手动或自动记录检测结果，生成测量报告，报告内容包括但不限于以下内容：</p>	艾法斯特 任海	不采纳，采用标准化语言“报告至少应包括以下内容：”
76.	9	<p>建议“材料”修改为“螺栓材料”</p> <p>建议“规格”修改为“螺栓规格”</p> <p>建议“表面粗糙度”修改为“螺栓表面粗糙度”</p> <p>建议“检测位置和大小”修改为“检测位置”，理由为“检测大小”意义不明确；</p>	北京声时 李展鹏	<p>部分采纳，“材料”修改为“螺栓材料”；</p> <p>“规格”修改为“螺栓规格”；</p> <p>“表面粗糙度”修改为“螺栓端面表面粗糙度”；</p> <p>“检测位置和大小”修改为“检测位置”</p>
77.	9 测量报告	<p>——检测环境温湿度；</p> <p><u>应修改为被检测工件温度</u></p>	艾法斯特 任海	部分采纳，增加“——被测螺栓温度；”
78.	A.1.2 改进的现场检测系统	<p>改进的现场检测系统除了上述现场检测系统具备的功能之外，还可以通过设定相应的检测间隔时间，<u>对螺栓的同一位置进行轴向应力循环检测，同时利用因特网</u>将每次检测得到的应力值实时地上传至网络云服务中，为远程监测提供数据源。</p> <p>改进的现场检测系统除了上述现场检测系统具备的功能之外，还可以通过设定相应的检测间隔时间，<u>对螺栓的同一位置进行轴向应力循环或实时监测，同时利用因特网或指定协议</u>将每次检测得到的应力值实时地上传至网络云服务中，为远程监测提供数据源。</p> <p>修改内容已标下划线</p>	艾法斯特 任海	采纳 附录 A 文字内容整体进行改进
79.	A.2.2 监测流程	c) 设定改进现场检测系统中的检测时间间隔，开始进行螺栓同一位点轴向应力的循环	艾法斯特 任海	采纳 附录 A 文字内容整体进行改进

序号	标准章条编号	意见内容	提出单位或委员	处理意见
		<p>检测，并将检测得到的螺栓轴向应力值实时上传至网络云服务。循环检测过程中的注意事项与现场检测中一致。</p> <p>c) 设定改进现场检测系统中的检测时间间隔，开始进行螺栓同一位点轴向应力的<u>循环或实时检测</u>，并将检测得到的螺栓轴向应力值实时上传至网络云服务。循环检测过程中的注意事项与现场检测中一致。</p> <p>修改内容已标下划线</p>		
80.		<p>文中未对螺栓夹持长度这个关键参数进行描述。</p> <p>在标定和实际测量中，通常需要明确夹持长度。标定用的夹持长度尽可能与实际使用的夹持长度一致，如果不一致而混用，会引入较大误差。如果标定夹持长度与实际使用夹持长度不一致但是差异较小，可以通过补偿解决。建议在标准中有所说明。</p>	北京声时 李展鹏	采纳，在 7.4.1 标定螺栓中增加“夹持长度”要求，在形状因子补偿中“紧固长度”修改为“夹持长度”
81.		<p>增加在试验机上以同规格的螺栓测量精度验证的要求，同时建议在不同温度下验证。验证的温度和应力不能和标定时的温度和应力一样。</p>	明阳 王铎	不采纳，不属于测量方法标准规定的内容
<p>说明：a.发送“征求意见稿草稿”的单位数：50 个。</p> <p>b.收到“征求意见稿草稿”后，回函的单位数：11 个。</p> <p>c.收到“征求意见稿草稿”后，回函并有建议或意见的单位数：9 个。</p> <p>d.没有回函的单位数：39 个。</p>				