

◇ 研究报告 ◇

## 用纵横波声时比法测螺栓轴力\*

刘广兴<sup>1,3</sup> 崔伟坛<sup>1,3</sup> 张瑞峰<sup>1,3</sup> 张丙法<sup>1,3</sup> 刘楚达<sup>2</sup> 席传让<sup>2†</sup>

(1 山东电力工业锅炉压力容器检验中心有限公司 济南 250000)

(2 长沙魔能信息科技有限公司 长沙 410000)

(3 国网山东省电力公司电力科学研究院 济南 250000)

**摘要:** 用纵横波测量螺栓轴力的技术已取得较大发展。该文介绍了纵横波比值法原理,通过理论推导,获得比值法计算的简易公式。建立试验平台,用现场用螺栓进行标定和测量,得出比值法在工程实践状态下的测量误差在 10% 以内,基本能满足工程应用的要求。此外,针对试验结果,该文还初步探讨了误差出现的原因以及提高精度的方法。该文介绍的比值法,无需精确测量标定螺栓长度和纵横波声速,现场应用更加简洁,具有较大的工程应用价值。

**关键词:** 纵横波; 螺栓; 轴力测量; 超声波; 比值法

中图分类号: O429

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2023)02-

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2023.02.

### The accuracy of measuring bolt axial force by acoustic time ratio method of longitudinal and transverse waves

LIU Guangxing<sup>1,3</sup> CUI Weitan<sup>1,3</sup> ZHANG Ruifeng<sup>1,3</sup> ZHANG Bingfa<sup>1,3</sup>

LIU Chuda<sup>2</sup> XI Chuanrang<sup>2</sup>

(1 Shandong Electric Power Industry Boiler and Pressure Vessel Inspection Center Co., Ltd., Jinan 250000, China)

(2 Changsha Buiand Information Technology Co., Ltd., Changsha 410000, China)

(3 State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250000, China)

**Abstract:** The technology of measuring bolt axial force by longitudinal and transverse waves has been developed greatly. This paper introduces the principle of longitudinal and transverse wave ratio method, and obtains the simple formula of ratio method through theoretical derivation. The test platform is established, and the field bolt is used to calibrate and measure. The measurement error of the ratio method introduced in this paper is less than 10% in engineering practice, which can basically meet the requirements of engineering application. In addition, according to the test results, the causes of errors and method of improving the accuracy are also discussed in this paper. The ratio method introduced in this paper does not need to accurately measure the length of the calibration bolt and the velocity of the longitudinal and transverse waves, which is more concise in field application and has great engineering application value.

**Keywords:** Longitudinal and transverse wave; Bolt; Axial force measurement; Ultrasonic wave; Ratio method

2022-06-29 收稿; 2022-11-01 定稿

作者简介: 刘广兴 (1981-), 男, 山东济南人, 本科, 研究方向: 无损检测。

† 通信作者 E-mail: 20255447@qq.com

## 0 引言

螺栓作为一种连接用标准件,普遍应用于各种类型设备及工程设施当中。在非重要场合,螺栓的轴力一般无需测量,但在风机、水轮机组、桥梁、航空等领域的重要连接部位,螺栓的轴力需要严格控制。不恰当的轴力会导致螺母松脱或者螺栓断裂,从而使螺栓连接提前失效。因此准确测量螺栓轴力,能够有效提高螺栓连接可靠性和结构安全性<sup>[1]</sup>。

常规的螺栓轴力测试方法有扭矩扳手法、电阻应变片法、光测力学法等,这些方法都有一定的局限性<sup>[2]</sup>。目前工程中普遍使用的扭矩法和转角法,只能在螺栓安装时对轴力进行控制,不能用于在役螺栓轴力的测量,并且误差较大,实际轴力偏差甚至达到目标轴力的20%以上<sup>[3]</sup>。电阻应变片法主要用在实验、一次性使用场合。光测力法需要在螺栓中心钻孔,用以预埋光纤,成本较高,同时影响螺栓强度,应用较少。基于声弹性效应的螺栓轴力超声测量技术是一种低成本、快速、无损的螺栓轴力测量方法。该技术自出现以来,就受到国内外学者的广泛关注。目前常用的超声轴力测量传感器主要有两种,一是采用压电陶瓷晶片的超声探头;二是采用电涡流技术的电磁探头,简称EMAT。压电陶瓷探头技术成熟,信号强度高,但需要耦合剂,属于接触式传感器。电磁探头近年来逐渐成熟,通过高频感应线圈在被测表面产生高频电涡流,从而激发超声体波来达到测量的目的,它不需要耦合剂,具有非接触的特点,但目前使用范围有限。

虽然压电陶瓷探头和电磁探头激发超声波方式不一样,但测量轴力的原理相同,都基于以下两种:

(1) 单波方法:仅使用纵波。先测量螺栓零约束时(零应力)的超声渡越时间(简称声时),然后测量受力状态下的声时,通过声时差来计算轴力。它属于“相对”型测量,通常在拧紧操作时使用。

(2) 双波方法:利用两种不同性质的波——纵波和横波。无需测量紧固螺栓零约束时的纵波和横波声时,就可计算螺栓的轴力大小。它属于“绝对”型测量,在拧紧过程中或拧紧后使用,适用于已拧紧的螺栓或螺钉,但该方法尚未完全工业应用<sup>[4]</sup>。

双波法目前流行的有声速法和比值法。声速法需要精确计算被标定螺栓零应力状态下的纵横波声速,所以对被标定螺栓的长度测量精度要求非常

高(微米级),同时需要对螺栓端面进行打磨,以降低耦合剂厚度引起的误差。在现场测量时,同一规格的螺栓之间的长度误差也不能太大(一般要求1%以内),否则影响测量结果。

针对这种情况,本文介绍了另一种双波测量计算方法——比值法。即利用纵横波声时的比值与螺栓轴力的线性关系,直接计算螺栓的绝对轴力,该方法无需知道被标定螺栓零应力下的声速,不需要精确测量螺栓的长度,在回波信号良好的情况下无需打磨螺栓端面,计算和测量更简便,有较大的应用空间。

## 1 比值法原理

在役螺栓轴力可以通过测量螺栓轴向应力获得,如图1所示,纵波和横波在螺栓轴向传播,螺栓轴向应力可通过螺栓中声弹性效应产生的声速变化进行测量。根据声弹性理论,螺栓中的纵波和横波声速均会随着应力大小变化而变化,其表达式为

$$V_{\sigma}^L = V_0^L(1 + C^L\sigma), \quad (1)$$

$$V_{\sigma}^S = V_0^S(1 + C^S\sigma), \quad (2)$$

其中: $V^L$ 和 $V^S$ 分别为纵波和横波的声速;下标0和 $\sigma$ 分别代表无应力状态和加载应力状态; $\sigma$ 为螺栓的轴向应力; $C^L$ 和 $C^S$ 分别为螺栓材料的纵波和横波声弹性常数。

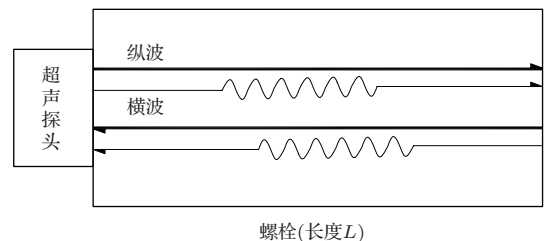


图1 纵横波传播示意图

Fig. 1 Schematic diagram of longitudinal and transverse wave propagation

由于纵波和横波与轴线的夹角非常小,可以将它们的传播路径近似视为沿轴线传播。因此探头接收到的纵波和横波信号的声时分别为

$$T_{\sigma}^L = \frac{2L}{V_0^L(1 + C^L\sigma)}, \quad (3)$$

$$T_{\sigma}^S = \frac{2L}{V_0^S(1 + C^S\sigma)}, \quad (4)$$

其中: $L$ 为螺栓长度。对横波与纵波声时比函数进行泰勒展开:

$$\begin{aligned} \frac{T_{\sigma}^S}{T_{\sigma}^L} &= \frac{V_0^L}{V_0^S} \cdot \frac{1 + C^L \sigma}{1 + C^S \sigma} \\ &= \frac{V_0^L}{V_0^S} [1 + (C^L - C^S) \sigma + (C^S - C^L) C^S \sigma^2 \\ &\quad + \cdots + R_n(\sigma)]. \end{aligned} \quad (5)$$

由于本文主要考察声时比与受力之间的线性关系,所以忽略高阶项和余项,取一阶项(展开到一阶导数为止)作为近似,有

$$\frac{T_{\sigma}^S}{T_{\sigma}^L} \approx \frac{V_0^L}{V_0^S} + \frac{V_0^L(C^L - C^S)}{V_0^S} \sigma. \quad (6)$$

根据式(6)可知,在测量前对零应力螺栓纵横波声弹性常数进行标定,在现场测量时,只需要测量在役螺栓的声时比就可以计算出螺栓的轴向应力大小,进而确定螺栓轴力<sup>[5]</sup>。为进一步方便计算,螺栓的轴力可简单的表示为

$$F = \sigma \cdot S, \quad (7)$$

式(7)中: $S$ 为螺栓横截面积。

结合式(6)和式(7),可得

$$F \approx \frac{T_{\sigma}^S}{T_{\sigma}^L} \cdot \frac{SV_0^S}{V_0^L(C^L - C^S)} + \frac{S}{C^S - C^L}. \quad (8)$$

经简化后可得

$$F \approx A_{\sigma} + K_{\sigma} \cdot k_{S/L}, \quad (9)$$

式(9)中: $A_{\sigma}$ 为计算常数( $S/(C^S - C^L)$ ); $K_{\sigma}$ 为双波系数( $SV_0^S/[V_0^L(C^L - C^S)]$ ),两者通过试验标定得到; $k_{S/L}$ 为纵横波声时比( $T_{\sigma}^S/T_{\sigma}^L$ ),通过测量得到。

根据式(9)可知,通过标定得出螺栓的双波系数和计算常数,结合现场测量得出的纵横声时比,就可直接计算出螺栓的轴力。

此外,温度变化对超声的传播速度有很大的影响,但本文采用纵横波结合测量时时间很短,温度变化可以忽略不计。

## 2 试验方法及步骤

### 2.1 试验方法

本试验以风电常用叶根螺栓为试验对象,总数为5根。为贴近工程实际条件(用少量螺栓进行标定,然后大批量测量),首先用纵横波探头对同规格的2根螺栓进行零应力纵横波声时比测量,并取平

均值作为零应力声时比基准值。然后利用标定台对螺栓进行加载和双波测量与记录,取双波系数平均值作为计算用系数。最后对其他3根螺栓加载,利用标定好的双波系数和测量的纵横声时比计算螺栓轴力,并与实际受力情况对比,分析测量的精度。

### 2.2 试验条件

试验用螺栓尺寸规格为M36×580,缩颈双头螺栓,中径为 $\Phi 28$ (mm),10.9级42CrMoA材质。端面平整,表面达克罗处理,采用二硫化钼润滑。用记号笔给它们标记序号,如图2所示。

本试验使用的超声探头为长沙颯能产纵横波专用一体探头(图3),晶片尺寸 $\Phi 12$ (mm),双接口,可独立激发,有螺纹丝扣,便于安装和固定。

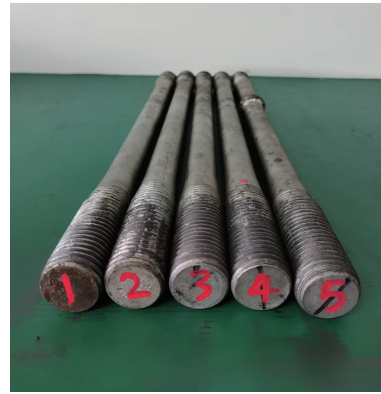


图2 试验用螺栓

Fig. 2 Test bolts



图3 纵横波一体探头

Fig. 3 Longitudinal and transverse wave integrated probe

配合纵横波探头使用的是横波专用耦合剂(图4)。常规水基超声波耦合剂对于横波传导效果不佳,横波专用耦合剂采用特有配方,黏稠度比较大,能有效增强纵横波的回波信号强度,常温下有效测量范围可达1000 mm。



图4 横波耦合剂

Fig. 4 Ultrasonic transverse wave couplant

### 2.3 试验台的搭建

本试验在长沙飏能超声实验室进行。使用的主要设备为通用螺栓预紧力标定平台(图5),该平台采用空心油缸给螺栓加载拉力,空心测力计用于测量螺栓实际受力大小,测力计精度为0.01 kN。此外,该平台还自带超声激励及采集硬件和标定测量软件,能精确采集到纵横波的回波声时,声时测量精度为1 ns。标定测量软件可自动计算双波系数,为便于读者理解,本文双波系数计算将单独列出计算依据和过程(见3.1节标定计算)。

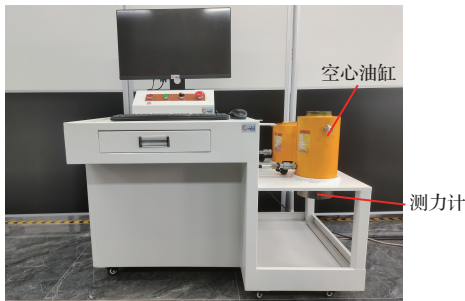


图5 试验用标定台

Fig. 5 Test calibration table

试验时将螺栓穿过空心油缸和测力计安装,两端用垫片和螺母固定,用垫片调整夹持长度,经测量夹持长度为486 mm。

在探头晶片面涂抹少量横波耦合剂,用专用夹具(图6,拧紧盖)将纵横波探头安装固定于螺栓端面,接通纵横波探头线,试验准备完成。

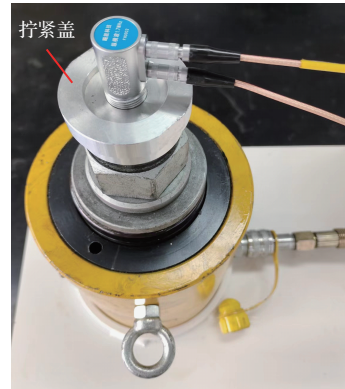


图6 螺栓及探头安装

Fig. 6 Bolt and probe installation

### 2.4 试验步骤

按螺栓序号依次在标定台上进行试验。先对1#和2#螺栓进行标定,然后根据标定的系数对3#~5#螺栓进行测量验证。标定及验证操作方法类似,具体为:螺栓和探头安装完后,首先测量并记录螺栓未受力状态下的零应力纵横波声时,然后通过标定台对螺栓进行拉力加载,以50 kN为起始测量拉力,30 kN为步长,350 kN为最终拉力(根据风场力矩标准,M36叶根螺栓工作拉力在300 kN左右),通过标定软件(图7)测量并记录每次加载完毕后的纵横波声时。分别加载并测量和记录5根螺栓的声时和受力数据。



图7 标定测量软件

Fig. 7 Calibration measurement software

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 标定计算

采用图6试验装置对螺栓进行加载试验,用1#和2#螺栓的数据作为标定计算依据,分别计算初始声时比和双波系数,然后取平均值做计算参数。双波系数采用EXCEL表格进行直线拟合,根据式(9),

得到的斜率即为双波系数  $K_\sigma$ , 试验结果数据如表1和表2所示。

计算结果如下: 1#螺栓: 双波系数  $K_\sigma^1 = -36430$ , 常数  $A_\sigma^1 = 66527$  (图8); 2#螺栓: 双波系数  $K_\sigma^2 = -33328$ , 常数  $A_\sigma^2 = 60830$  (图9); 取平均值: 双波系数  $\bar{K}_\sigma = -34879$ , 常数  $\bar{A}_\sigma = 63678.5$ 。

表1 1#螺栓标定数据记录及计算结果 (环境温度 26.37 °C)

Table 1 1# bolt calibration data records and calculation results (temperature 26.37 °C)

加载力 N/kN	纵波声时 $T_\sigma^L/\mu s$	横波声时 $T_\sigma^S/ns$	纵横波声时比 $k_{S/L}$
0	197.25489	360.245392	1.826294
50	197.484497	360.373123	1.824817
80	197.625557	360.456757	1.823938
110	197.769508	360.547325	1.823068
140	197.905556	360.638153	1.822274
170	198.048248	360.731415	1.821432
200	198.185638	360.823639	1.820635
230	198.325249	360.918282	1.819830
260	198.464905	361.014503	1.819034
290	198.605461	361.111771	1.818237
320	198.744682	361.207436	1.817445
350	198.890999	361.303566	1.816591

表2 2#螺栓标定数据记录及计算结果 (环境温度 26.5 °C)

Table 2 2# bolt calibration data records and calculation results (temperature 26.5 °C)

加载力 N/kN	纵波声时 $T_\sigma^L/ns$	横波声时 $T_\sigma^S/ns$	纵横波声时比 $k_{S/L}$
0	197.255226	360.160698	1.825861
50	197.542206	360.246857	1.823645
80	197.685379	360.284645	1.822515
110	197.825966	360.35759	1.821589
140	197.968292	360.441139	1.820701
170	198.108253	360.529373	1.819860
200	198.248375	360.617516	1.819019
230	198.385666	360.710861	1.818230
260	198.527054	360.801826	1.817394
290	198.665535	360.895134	1.816597
320	198.801758	360.988586	1.815822
350	198.949654	361.083755	1.814950

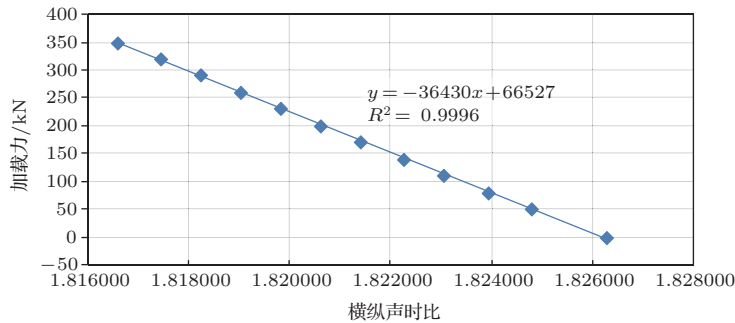


图8 1#螺栓标定计算

Fig. 8 Calibration calculation of 1# bolt

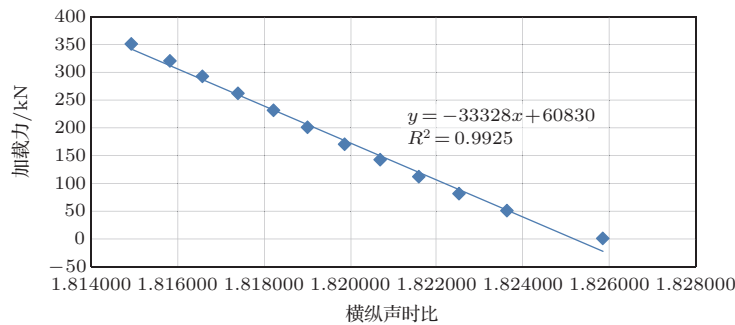


图9 2#螺栓标定计算

Fig. 9 Calibration calculation of 2# bolt

### 3.2 精度检验

接下来用相同的方法依次对3#、4#、5#螺栓进行加载测量,记录每颗螺栓的加载力及对应下横纵波声时,采用式(9)的公式计算比值法下的轴力结果。

$$F = \bar{A}_\sigma + \bar{K}_\sigma \cdot k_{S/L}, \quad (10)$$

式(10)中,双波系数及常数采用3.1节计算出来的平均值,测量及计算结果见表3~表5。

由上述数据计算可得:3#螺栓比值法计算平均误差为-5.25%,最大误差为-8.05%;4#螺栓比值法计算平均误差为-6.67%,最大误差为-8.87%;5#螺栓比值法计算平均误差为-6.82%,最大误差为-9.25%。

表3 3#螺栓测量数据记录及计算结果(环境温度 27.01 °C)

Table 3 3# bolt measurement data record and calculation results (temperature 27.01 °C)

加载力 $N/\text{kN}$	纵波声时 $T_\sigma^L/\mu\text{s}$	横波声时 $T_\sigma^S/\text{ns}$	横纵波声时比 $k_{S/L}$	比值法计算的轴力 $F/\text{kN}$	误差/%
0	197.24398	360.100807	1.825662	1.24	
50	197.495117	360.281097	1.824253	50.37	0.75
80	197.635651	360.378914	1.823451	78.35	-2.06
110	197.774223	360.473648	1.822652	106.21	-3.45
140	197.912186	360.56826	1.821860	133.85	-4.39
170	198.049515	360.666168	1.821091	160.67	-5.49
200	198.188126	360.763779	1.820310	187.92	-6.04
230	198.326393	360.860619	1.819529	215.15	-6.46
260	198.462128	360.959618	1.818783	241.15	-7.25
290	198.6007	361.058716	1.818013	268.01	-7.58
320	198.739906	361.156433	1.817232	295.28	-7.73
350	198.876564	361.253464	1.816471	321.82	-8.05

表4 4#螺栓测量数据记录及计算结果(环境温度 27.2 °C)

Table 4 4# bolt measurement data record and calculation results (temperature 27.2 °C)

加载力 $N/\text{kN}$	纵波声时 $T_\sigma^L/\mu\text{s}$	横波声时 $T_\sigma^S/\text{ns}$	横纵波声时比 $k_{S/L}$	比值法计算的轴力 $F/\text{kN}$	误差/%
0	197.25856	360.05233	1.825281	14.52	
50	197.475372	360.249191	1.824274	49.65	-0.71
80	197.61058	360.345612	1.823514	76.16	-4.80
110	197.746323	360.438751	1.822733	103.40	-6.00
140	197.884644	360.533684	1.821939	131.10	-6.36
170	198.021507	360.630913	1.821170	157.90	-7.12
200	198.158607	360.725975	1.820390	185.11	-7.44
230	198.300308	360.824448	1.819586	213.16	-7.32
260	198.440987	360.923172	1.818793	240.80	-7.38
290	198.567482	361.01963	1.818121	264.27	-8.87
320	198.708923	361.118332	1.817323	292.08	-8.72
350	198.850395	361.216637	1.816525	319.94	-8.59

表5 5# 螺栓测量数据记录及计算结果 (环境温度 27.5 °C)

Table 5 5# bolt measurement data record and calculation results (temperature 27.5 °C)

加载力 $N/\text{kN}$	纵波声时 $T_{\sigma}^L/\mu\text{s}$	横波声时 $T_{\sigma}^S/\text{ns}$	纵横波声时比 $k_{S/L}$	比值法计算的轴力 $F/\text{kN}$	误差/%
0	197.249901	360.116304	1.825686	0.41	
50	197.530167	360.347302	1.824265	49.97	-0.05
80	197.668839	360.45051	1.823507	76.40	-4.50
110	197.807114	360.544962	1.822710	104.21	-5.27
140	197.940903	360.650085	1.822009	128.65	-8.11
170	198.075356	360.725071	1.821151	158.59	-6.71
200	198.21347	360.819569	1.820358	186.22	-6.89
230	198.349197	360.924738	1.819643	211.17	-8.19
260	198.482674	361.019945	1.818899	237.12	-8.80
290	198.61998	361.105152	1.818071	266.01	-8.27
320	198.757141	361.21081	1.817348	291.23	-8.99
350	198.892204	361.305712	1.816591	317.64	-9.25

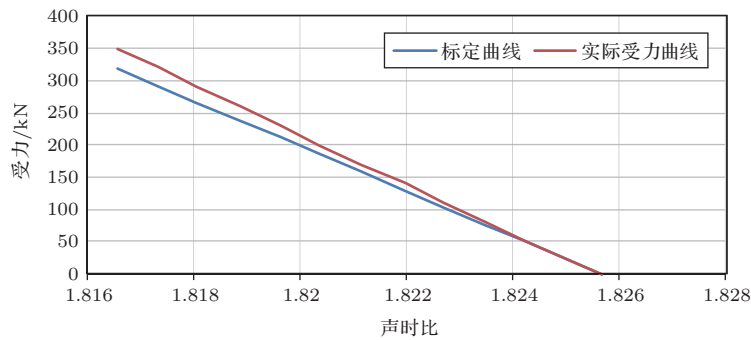


图10 误差分析

Fig. 10 Error analysis

在环境温度变化较小时 (变化小于 1 °C), 通过比值法计算轴力的平均误差分别为 -5.25%、-6.67%、-6.82%, 三者平均值为 -6.25%, 最大误差为 -9.25%, 相对一般单纵波测量 ( $\pm 3\%$ ) 来说, 其精度偏低。但测量及计算简单, 对螺栓要求低, 无需精确测量标定螺栓的长度。此外, 10% 以内的精度对于工程应用来说, 已经足够。

### 3.3 误差分析

由 3.2 节精度检验试验结果可知, 比值法计算的误差随受力的增大而有所增大, 其主要原因为: 标定的方法为线性拟合, 由于误差的关系, 标定的曲线与实际受力曲线会存在夹角, 如图 10 所示, 随着受力增大, 由标定曲线计算出来的误差也随之增大。此外, 式 (6) 的推导只考虑一阶线性量, 忽略了高阶

项及余项, 而高阶项和余项会随着应力增大而增大, 所以导致计算的误差也随应力的增大而增大。

如需进一步提高测量精度, 一是增加标定螺栓的数量, 使标定系数更加趋向于大样品的均值, 这样标定斜率跟理论斜率更加接近; 二是考虑高阶项的影响, 计算标定曲线时引入多阶项进行拟合, 减少计算公式上的理论误差。

## 4 结论

本文针对纵横波法测量在役螺栓轴力的问题, 提出了相对简单和实操性更强的比值法, 详细论述了比值法的原理及推导过程。通过推导结果可以看出, 比值法关注的是横波和纵波直接的声时比, 标定时不需精确计算螺栓横波和纵波的零应力声速, 公

式简单,只需在标定时测量少量螺栓的横波和纵波声时,然后对比值与轴力进行线性拟合,即可得到螺栓比值法的计算参数。本文不足之处在于,试验的螺栓数量及规格较少,覆盖的范围有限,试验结论还需用详细的数据进一步论证。同时本文的试验环境为近似恒温环境,对温度的考虑不足,温度对超声声速的影响非常大,如果要实现不同温度下的精确测量,则必须用该方法对不同温度进行补偿。总体来说,本文介绍的比值法操作简单,实际应用潜力较大,将为超声测量在役螺栓轴力提供良好的示范。

### 参 考 文 献

- [1] 江泽涛,朱士明. 纵横波测已紧固螺栓轴向应力[J]. 应用声学, 2000, 19(1): 16-21.  
Jiang Zetao, Zhu Shiming. The measurement of the stress in a tightened bolt by the ultrasonic longitudinal and transverse waves[J]. Journal of Applied Acoustics, 2000, 19(1): 16-21.
- [2] 李光,莫亚梅,吴努. 螺栓轴向应力测量技术的研究概况及展望[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2009, 8(3): 67-71.  
Li Guang, Mo Yamei, Wu Nu. Research and prospect on the technique for bolt axial stress measurement[J]. Journal of Nantong University (Natural Science Edition), 2009, 8(3): 67-71.
- [3] Arcella F G, Froes F H. Producing titanium aerospace components from powder using laser forming[J]. JOM, 2000, 52(5): 28-30.
- [4] Walaszek H, Bouteille P. Ultrasonic stress measurement: application to preload assessment on already tightened bolts[J]. Materials Science Forum, 2006, 44(524-525): 459-464.
- [5] 丁旭,武新军. 在役螺栓轴力电磁超声测量系统的研制[J]. 无损检测, 2016, 38(6): 48-52, 64.  
Ding Xu, Wu Xinjun. Development of EMAT based axial load measurement system for in-service bolts[J]. Nondestructive Testing, 2016, 38(6): 48-52, 64.