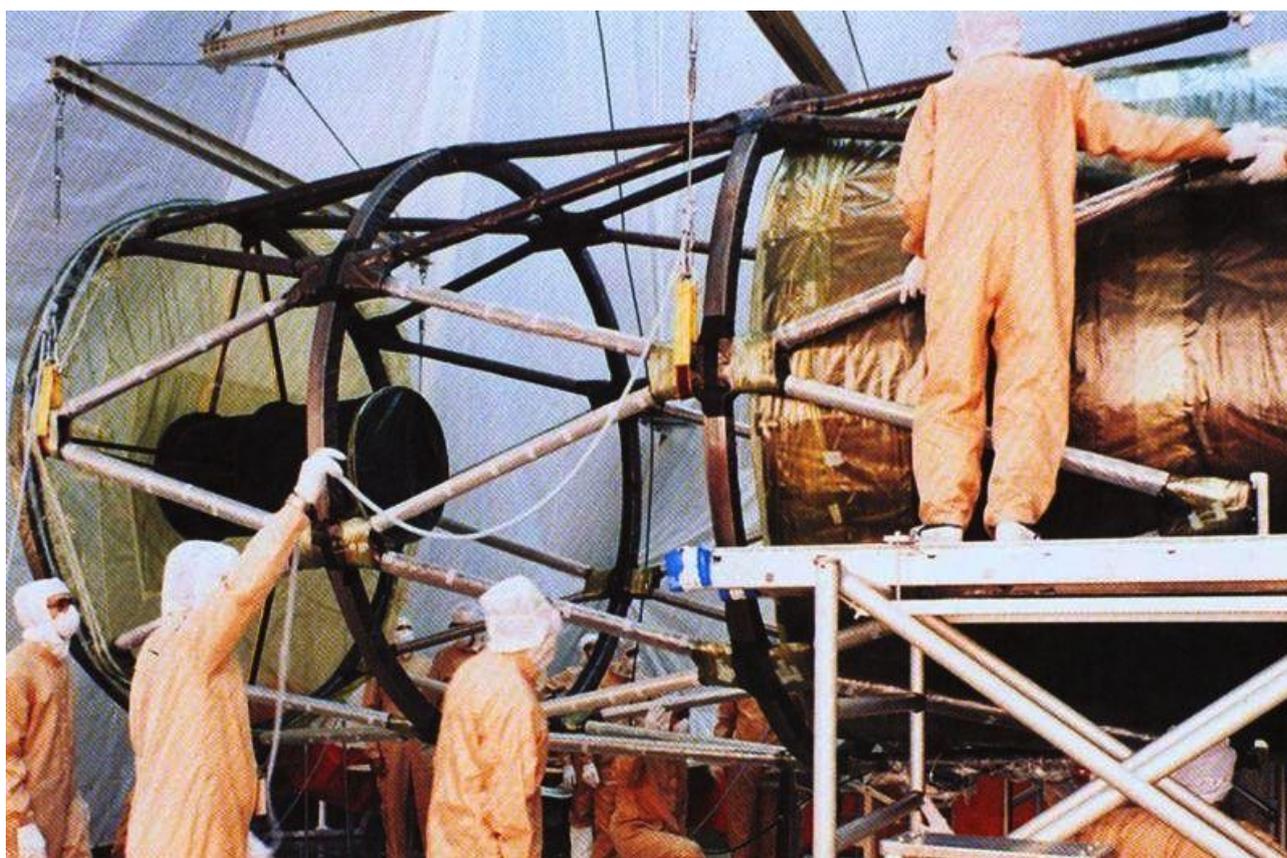


激光干涉法测试技术应用——Application Note: 001

国内大尺寸构件超低热膨胀系数 测试技术综述

Review of Domestic Ultralow Thermal Expansion Measurement
Technology for Large Size Component



上海依阳实业有限公司

www.eyoungindustry.com

摘要：航天器用各种大尺寸构件都普遍要求超低膨胀系数以保证构件尺寸的稳定性，传统热膨胀系数测试只针对长度 100mm 以下的小试样，已无法满足大尺寸构件的超低热膨胀系数测量，需要精确测量整个构件的超低热膨胀系数。本文对国内在大尺寸构件热膨胀系数整体测量方面的研究工作进行了综述，以了解国内目前的发展状况，给今后开展此方面工作提供参考和借鉴。

1. 前言

在太空运行的各种航天器，由于没有大气层的保护，其环境温度变化很大，向阳面温度可高达上百摄氏度，而被阳面温度却在零下几十摄氏度。因此，航天器在空间环境中，由于材料的热膨胀，会引起航天器结构的尺寸变化。但是从航天器的某些部件和仪器的技术要求考虑，希望航天器的某些结构的稳定性要好，这一点对通讯卫星天线结构及敏感元件、太空望远镜的镜筒支架等的使用和安装尤为重要。尤其是卫星和望远镜桁架结构更要求其在一定的环境温度变化范围内不因热应力产生变形或者变形极小，即所谓零膨胀。

传统热膨胀系数测试只针对长度 100mm 以下的小试样，已无法满足大尺寸构件的超低热膨胀系数测量。为适应航天器制造的要求，特别是对于以 m 为长度单位的 E-08/K 量级材料热膨胀系数需要更加准确的测试。因此，研究航天器用复合材料工程构件的超低膨胀测试方法和相应的测试设备，具有重要的科学意义和实用价值。

本文将介绍国内在工程构件级热膨胀系数测试方法和测试设备方面所开展的工作。

2. 光纤位移传感器测试方法[1]

针对卫星用低膨胀纤维增强复合材料杆件，上海复合材料科技有限公司与国防科技大学合作开展相应的热膨胀系数测试系统研究，具体的测试要求为：

(1) 测试件是碳纤维复合材料杆件，杆件形状为圆杆或矩形杆。长度尺寸 1m，圆杆直径 $\phi 10\sim 80\text{mm}$ ，壁厚为 2mm 左右。矩形杆的截面不超过 $100\text{mm}\times 100\text{mm}$ ，壁厚 2mm 左右。

(2) 能测量在温度范围 $-70\sim +100^\circ\text{C}$ 的轴向伸缩量，并测量相应温度，从而得出工程试件的热膨胀曲线。测量误差不大于 $\pm 3\%$ 。

(3) 试验箱能按要求的程序升温，升温程序可调，并能实时控制。对设定点的温度控制精度优于 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，测量精度优于 0.5°C 。试件周边温度的均匀性优于 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。

上海复合材料科技有限公司研制的这套热膨胀测试系统主要由温度控制系统、机械系统、数据采集系统、计算机控制与分析系统四大部分构成。

(1) 温度控制系统：采用高低温试验箱，满足温度范围和温度控制要求。

(2) 机械系统：包括测试系统的基座、测试基准、试件支架。

(3) 数据采集系统：包括光纤位移传感器。

(4) 计算机控制与分析系统：主要用于控制整个测试过程，实现测试数据的自动采集、分析、存储与测试结果的显示。

位移采集采用 MTI2000 光纤位移传感器，其特点是非接触式，最大量程 2mm，分辨率为 $0.25\mu\text{m}$ 。

MTI2000 光纤位移传感器包含一组发射光光纤和一组接收光光纤，如图 2-1 所示，发射光光纤和接受光光纤以三种不同方式排列(不规则、半圆心及同心圆形状)，卤钨灯提供光源，光传输到光纤中，光纤探头发出的光照射在被测物上，被测物反射回来的光进入接受光光纤并传入到 MTI-2000 中。

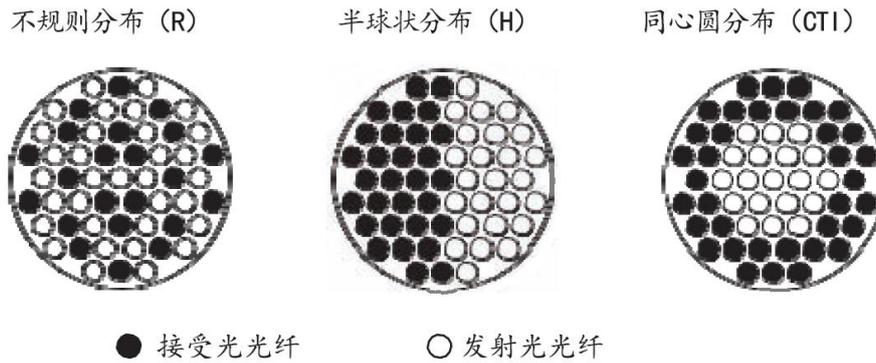


图 2-1 光纤分布示意图

如图 2-2 所示, 当光纤与被测物接触时, 没有光能传输给接收光光纤, 输出信号为“零”。随着探头与被测物之间距离的增加, 接收光纤接收的光也增加, 并且增加的光和距离之间非常敏感, 与信号输出也呈很好的线性。随着距离的继续增加, 接收光光纤接收到的光达到峰值, 如果探头和被测物之间的距离继续增加, 接收到的光将会持续减少, 结果是具有第二个很灵敏且具有大量程和标准距离的测量范围。

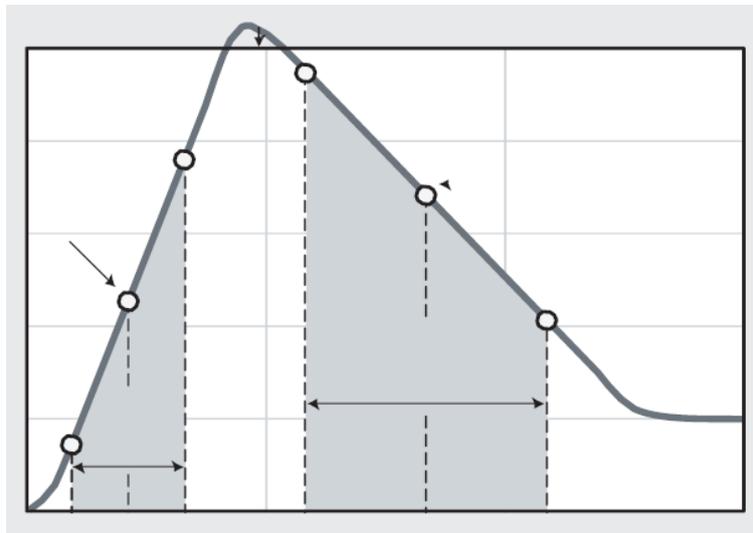


图 2-2 MTI2000 光纤位移传感器输出信号与位移的变化关系

整个测量系统的测量基准利用低膨胀系数材料殷钢制作, 测量基准包括殷钢连杆、传感器微调台和殷钢传感器夹具。测量基准至于试验箱外, 因不受试验箱内温度变化影响, 而且整个测量基准能够控制在 $0.5\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ 以下。

被测件通过试件支架安装在试验箱内, 试件支架包括殷钢 V 形架、低导率材料升降杆和剪式升降台, 被测件水平置于 V 形架内, 由 V 形架自动定心, 从而保证被测件轴心与两个传感器侧头平行。被测件支架通过剪式升降台固定在大理石基础件上, 不与试验箱体接触。

剪式升降台能够调整被测件在试验箱内高度, 从而保证能够测量不同直径的被测件的热膨胀系数。在温度快速变化的情况下保证箱体和支架对称变形, 同时减小支架的质量, 以减小其热容, 防止测量时受到支架变形影响而产生的缓慢漂移。

文献中并未报道此测试系统的结构, 但根据分析可以大概此测试系统为双端面测试结构, 即将两路光纤位移传感器对准被测件的两个端面, 同时测量两个端面的位移, 最终得到整个测试件的热膨胀长度变化。整个测试系统的结构如所示。

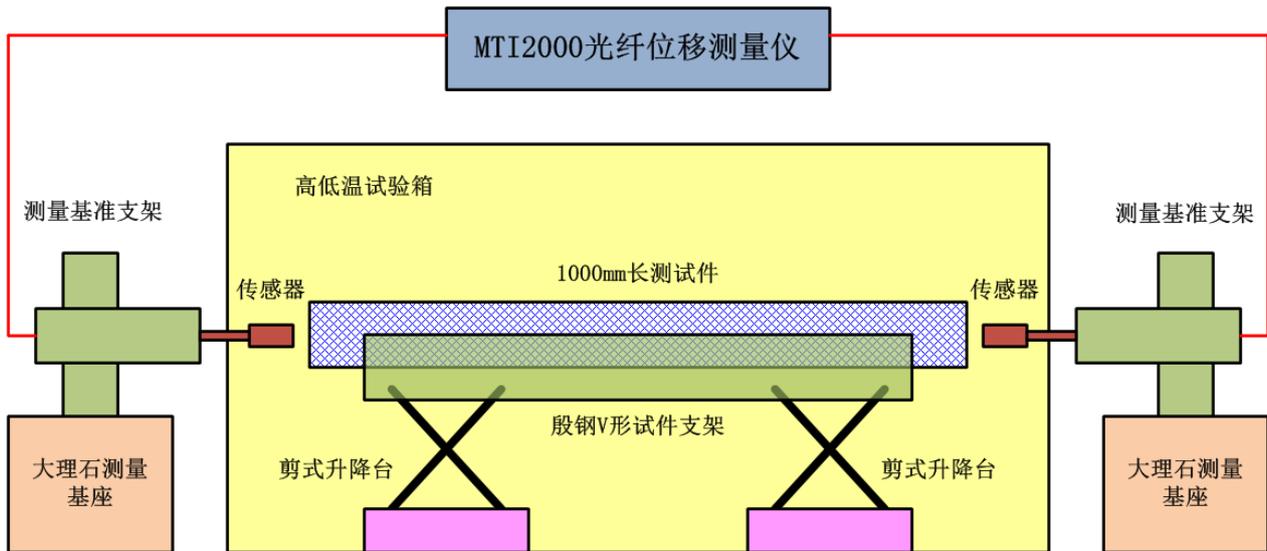


图 2-3 低膨胀纤维增强复合材料杆件热膨胀系数测试系统结构示意图

从文献报道分析这套大尺寸构件热膨胀系数测试系统技术指标和测试结果，可以得出以下初步的结论：

(1) 位移传感器分辨率为 $0.25\mu\text{m}$ ，那么测量准确度基本也就在 $1\mu\text{m}$ 左右，这个测量准确度基本与千分表相同，所能测试的热膨胀系数最小也就在 $1\text{E-}06/\text{K}$ 左右，还无法测试-7 量级甚至-8 量级的零膨胀系数材料。而目前的 2m 长构件热膨胀系数可以达到 $5\text{E-}08/\text{K}$ 水平，由此可见采用这种测试方法无法满足目前零膨胀构件的测试需求。

(2) 采用光纤式位移传感器所进行的位移测量，是一种相对测试方法，实际测量精度还需要采用更高级别仪器进行计量标定才能保证热膨胀系数测量准确性。

(3) 采用已知热膨胀系数的铝材 Ly12CZ (淬火状态) 制成的测试件进行测量精度考核，测试件直径为 $\phi 20\text{mm}$ ，常温下长度 1m，壁厚为 2.5 的管型材。在 $-50\sim 20^\circ\text{C}$ 测试温度范围内，测定的平均热膨胀系数为 $19.9\text{E-}6/\text{K}$ ， $20\sim 100^\circ\text{C}$ 测试温度范围内，测定的平均热膨胀系数为 $21.4\text{E-}6/\text{K}$ 。文中得出的结论是对于这种 $\text{E-}06/\text{K}$ 量级的热膨胀系数测试偏差在 7% 以内。由此试验证明这套大尺寸只能测试 $\text{E-}06/\text{K}$ 量级的热膨胀系数。

(4) 文中报道了对直径 $\phi 20\text{mm}$ 、壁厚 2mm、长度为 1m 的碳纤维复合材料圆杆热膨胀系数测试结果，测试温度范围为 $10\sim 30^\circ\text{C}$ 。测试结果显示热膨胀长度变化量为 $-17.47\mu\text{m}$ ，线膨胀系数为 $-0.87\text{E-}06/\text{K}$ 。文中仅报道了两次重复性测量，两次重复行测量重复精度为 1.3%。由此可见这种碳纤维复合材料圆杆热膨胀系数很大，距离所需要的零膨胀系数差距很大。

(5) 从文中报道可以看出，整个测试是以殷钢基座为基准，理论上这个测量基准能够控制在 $0.5\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ 以下。但考虑到伸入试验箱内光纤长度的变化，以及并未采用同侧差分测量抵消光纤长度的技术手段，很大可能会出现碳纤维复合材料圆杆实际热膨胀系数很小，但此套装置并不能准确测试，测试结果反而是此装置的系统误差，即碳纤维复合材料圆杆很小的热膨胀以及完全淹没在测试系统误差内。

(6) 尽管文中报道的碳纤维复合材料圆杆热膨胀系数测试结果在 $-0.87\text{E-}06/\text{K}$ 左右，这表现出碳纤维复合材料圆杆生产工艺还未能实现整体圆杆的零膨胀，更表现出测试方法自身精度完全无法达到零膨胀测试需要，但这是目前国内对大尺寸管件低膨胀测试的首次尝试，尽管不成功但意义非常重大。从对 1m 长的圆杆测试结果可以看出，在 $10\sim 30^\circ\text{C}$ 温度范围内，圆杆收缩了 $17.47\mu\text{m}$ 。那么如果采用取样方式进行热膨胀测试，取样尺寸如果为 100mm，那么 100mm 小试样的受热收缩也仅仅为 $1.7\mu\text{m}$ 左右。对于这种不到 $2\mu\text{m}$ 的热膨胀，采用目前常规的热膨胀仪器都无法进行测量。文中所报道的 1m 长碳纤维复合材料圆杆热膨胀系数测

试恰恰证明了低膨胀构件整体热膨胀系数测试的必要性，这点在超低热膨胀系数构件中显得更为突出。

3. 顶杆测试方法

3.1. 千分表位移探测器[2-3]

针对长度 400~700mm 的碳纤维复合材料管件，原中国科学院兰州物理研究所（现中国航天科技集团公司第五研究院第五〇研究所）张建可等人直接采用传统顶杆法在-50~40℃ 范围内测试了轴向和径向两个方向上的热膨胀系数，位移测量采用了千分表。

根据碳纤维复合材料管件热膨胀性能的各向异性，张建可等人分别设计了轴向和径向低温热膨胀系数测量装置，两套装置如图 3-1 所示。

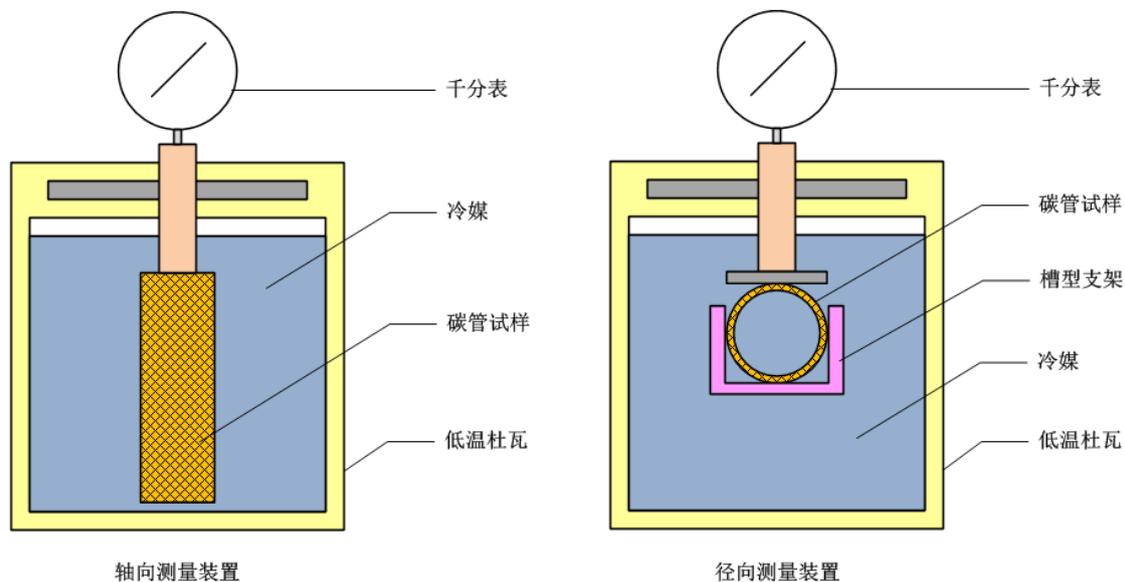


图 3-1 碳纤维复合材料管件顶杆法轴向和径向热膨胀系数测量装置示意图

轴向热膨胀系数测试采用直立式测量方式，径向热膨胀系数测试采用卧式测量方式，管件试样采用相应支架定位防止管件试样滑动和移动。由于管件尺寸较大，一般直径在 30~60mm 左右，长度为 400~700mm，因此，已不能将其装入一般的低温热膨胀系数测试设备。作者在建立新装置的前提下，采用了传统顶杆法外接千分表的传统方法进行测试，顶杆采用热膨胀系数极小或已知热膨胀系数的材料制成，作者采用了碳纤维复合材料 0° 方向单层板制成，这样做的前提是认为此方向上单层板的热膨胀系数极小。测试前将管件装入低温装置中，将顶杆与千分表连接，然后根据温度范围选择加入冷媒如冰水、液氮乙醇、液氮和其他温度的恒温液体等。

为减少温度对测量顶杆和千分表的影响，减小测试误差，采用冷媒对被测管件试样冷却时要尽量避免冷媒与测量顶杆和测量千分表直接接触。管壁可以放置或缠绕加热器，用来提高管件和冷媒的温度。这种方法只能测试从冷媒温度到室温的平均热膨胀系数，测试时要保证管件在低温温度点的热平衡，以及到室温时的热平衡。

作者采用建立的测量装置分别对碳管试件的两个方向热膨胀系数进行了测量，测试管件为 M40 碳纤维与 TDE-85 环氧树脂复合而成，纤维的铺层方式为 $\pm 30^\circ \sim \pm 35^\circ$ 、 0° 和 $\pm 30^\circ \sim \pm 35^\circ$ 三层铺层，每层厚度 1mm，管壁厚度约 3mm，管件直径 60mm，长度 630mm。测试结果如图 3-2 和图 3-3 所示，测试结果都为一温度区间的平均值。

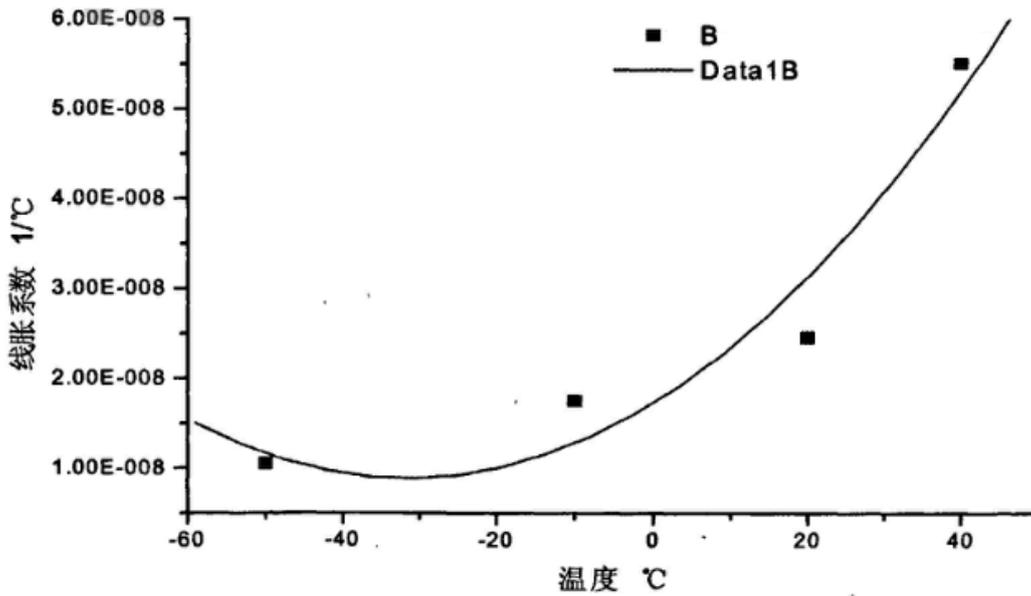


图 3-2 碳管试件轴向平均热膨胀系数曲线

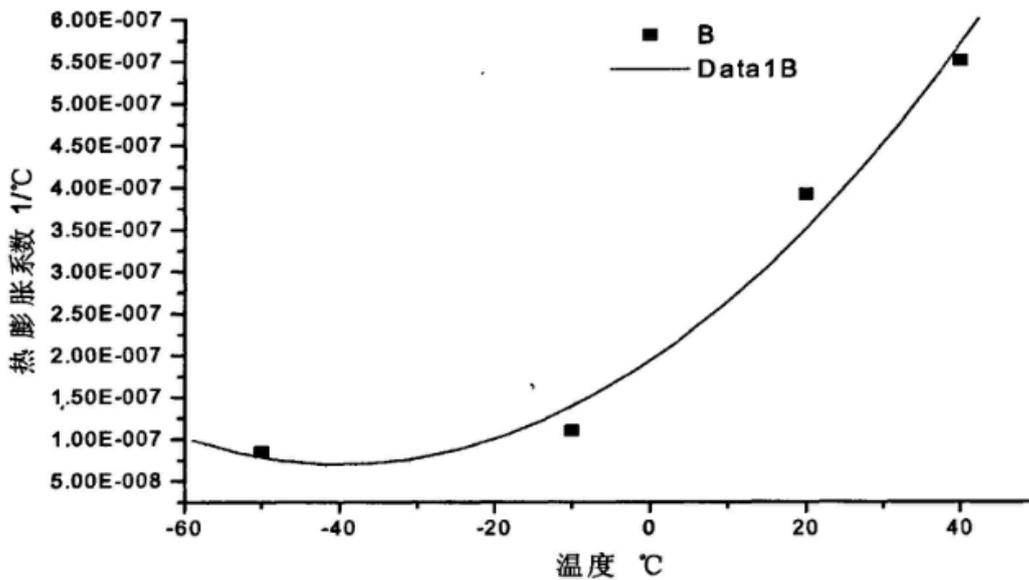


图 3-3 碳管试件径向平均热膨胀系数曲线

通过以上测试结果，作者认为测试数据可以达到约 E-08/K 数量级，这一整体管件结果与一般试样级别测试结果不同。理论上，管件的线膨胀系数是试件自身的性质，但从测试数据来看，整体管件测试与从管件中取样测试，两种测试数据相差较大，有的数据甚至相差一个数量级。这是因为从管件中截取试样的受力状态与完整状态下管件样品的受力状态存在不同，因此热膨胀的状态也不同。因而，要精确测量管件的热膨胀状况，应进行整个管件的热膨胀性能测试。

测试过程中作者还发现，经过多次测量后，碳环氧复合材料管件热膨胀数据逐渐减小。这说明经过冷热循环后，材料经过“老化”锻炼，消除了管件内部的应力，因而使其热膨胀系数逐渐变小。这与碳纤维复合材料板材试样的热膨胀测试规律也是相同。由此，也说明了碳环氧复合材料部件成型后，若经过一定的高低温处理工艺，可以较大幅度的减小部件的低温热膨胀系数。

以上测试结果作者发表在第八届全国低温工程大会暨中国航天低温专业信息网 2007 年度学术交流会论文集中[2]，但在发表在 2010 年真空与低温杂志上的“碳/环氧管件的低温热膨胀系数测试研究”[3]一文中，作者只是将以上的碳纤维更换为石墨纤维，其他内容几乎与文献[2]完全相同，测试结果不同的是轴向测试结果为负值，径向测试结果完全相同，文中的轴向和径向热膨胀系数测试结果如图 3-4 和图 3-5 所示。

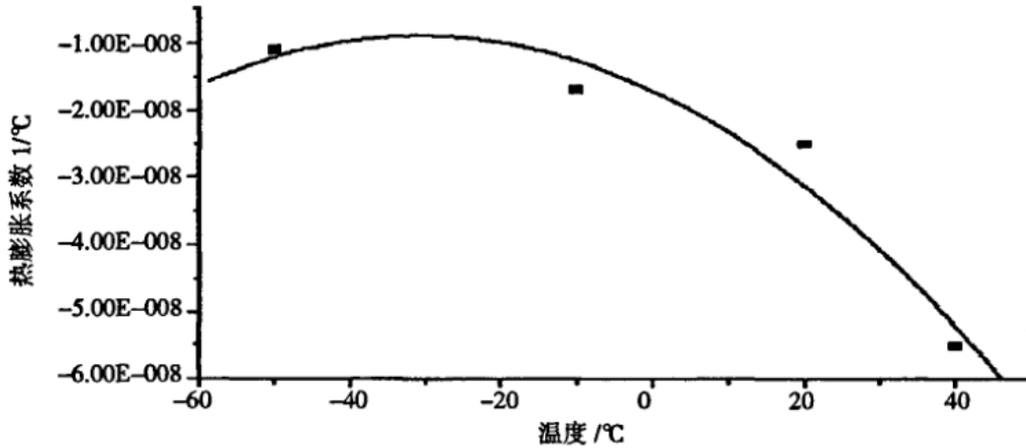


图 3-4 碳管试件轴向平均热膨胀系数曲线

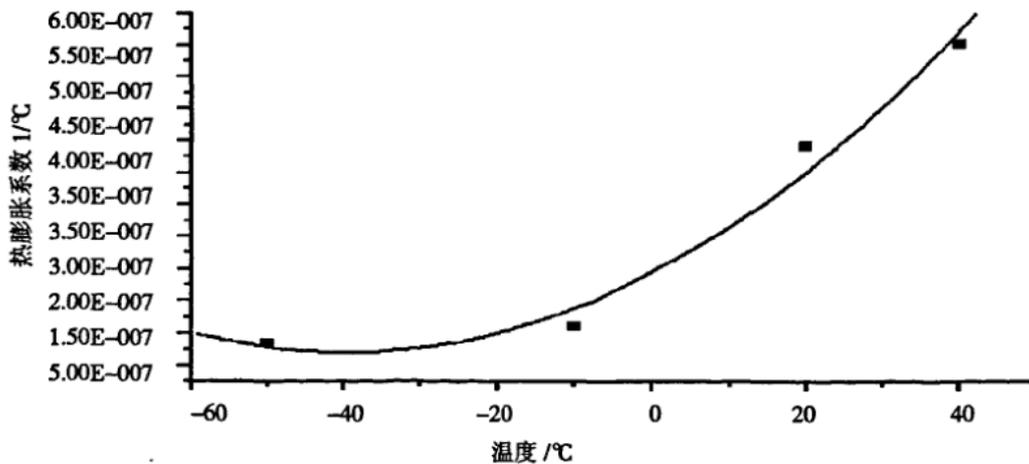


图 3-5 碳管试件径向平均热膨胀系数曲线

通过对作者两篇几乎相同的文献报道分析，让人不可思议的是采用顶杆法千分表可以测试 E-08/K 量级的超低热膨胀系数。文献中报道的试件长度为 630mm，如果热膨胀系数选择最大测量值 6E-08/K，温度变化 (-50°C~20°C) 也选择最大值 70°C，以期望得到最大的热膨胀位移量，那么对应的热膨胀量应该为 $6E-08/K \times 0.630m \times 70^\circ C = 264.6E-08m = 2.646\mu m$ 。这就是说在整个低温热膨胀测试过程中，整个管件试样轴向膨胀量不到 3 微米，而千分表的测量精度也只有 3 微米，可见采用千分表根本不能测量出轴向 E-08/K 量级的超低热膨胀系数。

同样，对于径向热膨胀系数测量，文献中报道的试样外径为 60mm，如果选取文献中径向最大热膨胀系数测量值为 5.5E-07/K，温度变化 (-50°C~20°C) 也选择最大值 70°C，以期望得到最大的热膨胀位移量，那么对应的热膨胀量应该为 $5.5E-07/K \times 0.06m \times 70^\circ C = 23.1E-07m = 2.31\mu m$ 。同样，在整个低温热膨胀测试过程中，整个管件试样径向热膨胀量也不到 3 微米，可见采用千分表也根本不能测量出径向 E-07/K 量级的低热膨胀系数。

3.2. 电感测微仪[4]

哈尔滨工业大学李彦平等，报道了一种用于大尺寸整体构件线膨胀系数测量的测试系统，位移测量采用瑞士生产的 TESA 电感测微仪，并采用差动位移测量结构，设计测试 2.5m 长标准量杆的线膨胀系数。通过精度分析，计算得到的测量不确定度达 E-08/K 量级。测试系统结构如图 3-6 所示。

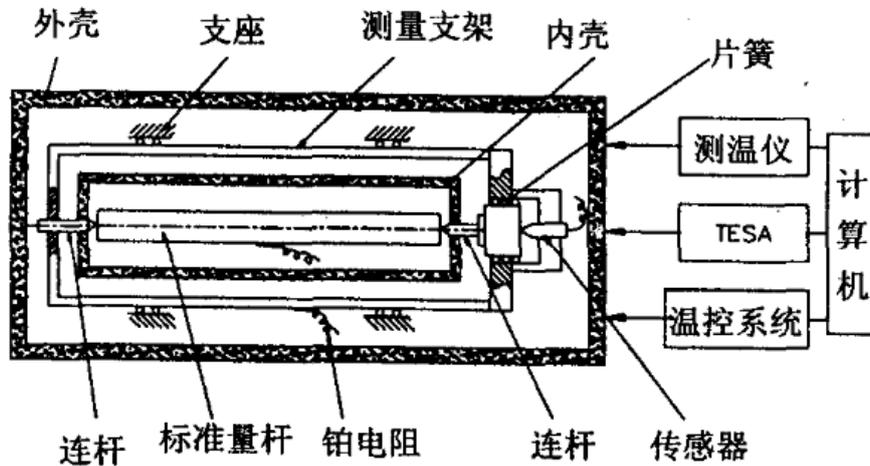


图 3-6 测试系统结构示意图

测试系统主要包括主机箱、电感测微仪、温度测量系统、内外温控系统及计算机等。主机箱分为内外两层保温箱。变形量测量装置置于外保温箱中，外保温箱温度保持恒定，由外温控系统控制，送入冷热风调节温度使温度保持在 $20 \pm 0.05^\circ\text{C}$ 。由此消除了测微仪探头的温度漂移，保证测量系统示值稳定。

被测试件置于内保温箱中，由内温控系统控制其温度，用风机吹动内保温箱中空气，使之循环流动，以使各处温度均匀一致。采用精密测温仪测量试件的温度，沿试件的测量线多点贴附温度传感器，取其各采样点的温度平均值作为试件的温度值。温度的升降变化则根据需要由温控系统通过调节电热器或冷热风流量来控制。

在温度测量及控制中，被测试件沿测量线方向应当具有同样的温度，但实际上温控环境有一定的温度梯度，造成被测试件温度的不平衡。由于被测试件尺寸大，沿测量线方向温度的差异较为显著，因此，温度测量值应取被测试件沿测量线上若干检测点的平均值，检测点数目根据被测试件尺寸和精度要求来确定，被测试件尺寸大，精度要求高，则应取较多的检测点。

测温系统采用了薄膜铂电阻 Pt100 传感器作为测温元件，具有体积小、精度高、稳定性好、响应速度快的特点，适于贴附被测试件测量温度。考虑到多点测温的需要，系统中配置了 12 路同等精度的铂电阻传感器，整个系统的温度测量不确定度为 0.03°C 。

被测试件尺寸大，导致变形量测量支架尺寸也大，且测量支架受力变形、热变形等诸多因素影响也大。因此在整个测试系统中，测量支架是影响整个测试系统精度的主要因素之一。

本系统将测量支架设计成双向浮动形式，由精密弹性导轨支撑，可向测量方向两端做灵活的测量运动。随着温度变化，试件会产生热变形，并沿测量方向推动前测杆与后测杆使之产生相对位移。后测杆固定在测量支架上，前测杆则通过片簧支撑浮动地支撑在测量支架上，前测杆相对于测量支架产生的相对位移，由电感测微仪测量得出，从而可得到试件热变形量。当试件没有变形，只在测量方向上移动，则只会使整个测量支架前后移动，而测杆与支架之间无相对位移，电感测微仪不会有示值变化。因此，这一测量系统允许试件沿测量方法两端

在一定范围内自由移动。这一测量原理降低了试件的安装定位要求，最大限度地避免了支撑摩擦、接触力变形、定位误差等因素的影响，对保证热变形的高精度测量极为有利，特别适于大尺寸试件的热变形测量，这是该测试系统的技术特点之一。

测量支架由特种殷钢制成，其线膨胀系数为 $0.5E-06/^\circ\text{C}$ ，这是目前国内热变形最小的金属材料之一，它使外保温箱内温度波动对测量支架系统影响及其微小，是保证测量精度的又一重要条件。

所用的 TESA 电感测微仪是由瑞士生产的高精度测微仪，最高分辨率为 $0.01\mu\text{m}$ ，示值精度为 $1/1000$ ，即在 $\pm 20\mu\text{m}$ 挡示值误差不超过 $0.04\mu\text{m}$ 。对于低膨胀系数材料制造的量杆，其热变形也很小，作者认为使用 $\pm 20\mu\text{m}$ 挡的量程已经足够，测微仪在本系统中具有足够的精度。

作者在文献中并未给出相关的热膨胀系数测试数据，仅仅是做了测量不确定度分析计算。在不确定分析中，认为主要不确定度源为变形量测量和温度测量。当设定 $\Delta T=1^\circ\text{C}$ ， $\alpha=1E-06/^\circ\text{C}$ ， $L=2.5\text{m}$ 时， $\Delta L=\alpha L\Delta T=2.5\mu\text{m}$ ，计算出的总不确定度为 $7E-08/^\circ\text{C}$ 。

在此测量装置设计中，测量支架是位移测量的基准，由于采用了线膨胀系数为 $0.5E-06/^\circ\text{C}$ 的特种殷钢制作测量支架，而且测量支架放置在温度波动为 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 的外保温箱内，作者认为支架热膨胀带来的影响可以忽略不计。而实际上，在温度波动为 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 即温差 ΔT 为 0.1°C 时，假设支架与试样长度相同（实际上要比试样更长）为 2.5m ，那么测量支架所带来的位移漂移为 $0.125\mu\text{m}$ ，而相同情况下试样的热膨胀位移量也才 $2.5\mu\text{m}$ ，由温度波动而导致测量支架所带来的测量误差将近 5% 左右。由此可见这种测试结构设计整体尽管合理，但需要采用热膨胀系数更低的材料制作测量支架。也就是说，这种结构所测材料的热膨胀系数必须要大于测量支架的热膨胀系数，否则测试误差会很大。而且，这种测试结构设计由于受到测量支架尺寸固定的限制，基本上只能测试固定长度试样，无法进行各种大跨度长度的试件进行测试，对于不同长度的试件，需要配套采用不同的测量支架。

4. 激光干涉法[5,6]

哈尔滨工业大学陈中在其博士论文中设计了一种采用激光干涉法进行位移测量的大尺寸构件热变形测量装置，此系统设计中提出了一种同步控温的测量方式，即被测构件和位移测量系统放置在同一温度环境中。采用这种方式可以简化测试系统，且整个系统的温度场均匀，被测试件和测量系统温度梯度大为减小，易于控制温度变化产生的影响。

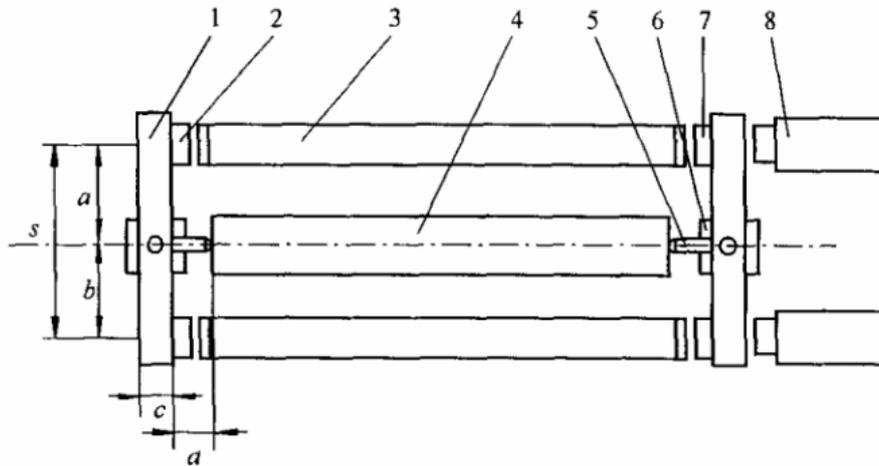
但此设计方案的实现前提是：

- (1) 测试仪器稳定，温漂小。
- (2) 测量链温度稳定性好，机械结构、光学参数、电器性能等受温度变化影响小。
- (3) 温度影响可通过补偿和修正消除。

在此设计中研究了干涉光路的真空屏蔽技术，提出了以真空光路作为“光学支架”的测量方案，这为实施同步控温测量方案提供了基本条件。测试系统的整体设计思路是采用双频激光干涉测量系统，系统中（包括光路系统）受温度变化的影响很小并可通过实验准确给出，通过测量链的设计进行补偿和对测量数据进行修正，将测量系统的热漂移基本消除。测试系统原理如图 4-1 所示。

在测量系统中，两根支撑于精密导轨上的测杆布置于被测构件的两端，其侧头分别与被测构件的两端接触并保持恒定的接触力。两测杆可沿导轨的导向方向即测量线方向分别做精确的线位移。当温度变化使被测构件沿测量方向产生伸缩，则推动两测杆产生测量位移，其位移之和即为构件的热变形。一根测杆上固定有偏振分光镜组（包括参考反射镜），另一根测杆上固定有测量反射镜，激光头以专用支架支撑于地基上，并与偏振分光镜组及测量反射镜处于同一测量线上。偏振分光镜和测量反射镜之间放置内部抽成真空的密封玻璃管，只在偏

振分光镜和测量反射镜之间留有少许间隙。因此绝大部分测量光路为真空光路，可有效降低环境因素的影响。



1. 测杆 2. 反射镜 3. 真空管 4. 被测试件 5. 测头
6. 精密导轨 7. 偏振分光镜 8. 激光器

图 4-1 大尺寸构件热膨胀系数测试系统原理图

在被测构件上，沿测量线方向均布的若干检测点处贴附铂电阻温度传感器，被测构件的温度取测量线上各检测点温度传感器测得温度的平均值。被测试件和整个测量系统放置于精密空调室内同步控温，室温按测量要求改变，并采取适当措施控制温度梯度。改变温度则被测构件尺寸发射变化并向两端自由胀缩，使测杆沿测量方向做相应的位移，从而使测量反射镜与偏振分光镜之间的距离产生相应的变化。设计的测量装置设置了两路激光测量系统，变形量的测量值应为两路激光系统示值的平均值。

在此测量系统，测量仪器、装置和被测构件组成测量链，测量链的设计对测量准确性有直接影响。在测量链设计中存在如下技术难点，作者提出了相应的解决方案：

(1) 测量线与被测线并列布置，使得测量线与被测线不重合，测杆的倾斜、弯曲变形等会严重影响测量精度，且不符合阿贝原理。测量链布置应采取措施减小阿贝误差，具体解决方案为布置两路激光测长系统，其测量光路平行并列于被测构件一定距离的位置，构成两条测量线与被测线平行并列的测量链。通过理论计算验证了这种布置的可行性，但在实际制作过程中很难实现等距平行的要求。

(2) 激光测量光路长，环境影响严重，必须采取有效措施减小其影响。测量链中的测杆受到温度影响会产生伸缩变形和弯曲变形，如果测杆采用 $11.5E-06/K$ 的金属材料，温度变化 $1^{\circ}C$ 会使得两根测杆的总变形量为 $0.126\mu m$ 。对于这个系统误差作者设计通过补偿环节或数据的修正予以消除，经修正后的残余位移约为 $\pm 0.012\mu m$ 。当然，采用热膨胀系数更低的材料制作测杆，则伸缩变形带来的偏差会明显降低。测杆弯曲变形是由测杆上的温差造成，作者分析计算了测杆上可接收的最大温差为 $0.03^{\circ}C$ 。作者通过分析计算还对真空管路的参数进行了设计，设计要求真空管内的残余气压应不大于 $55Pa$ 时才能保证光路环境温度变化 $20^{\circ}C$ 时，由折射率变化引入的长度测量误差不超过 $1E-08$ 。

(3) 温度对连接件和光学器件有显著影响，必须采取适当措施控制和消除。采用真空屏蔽光路可以显著减小环境温度对测量的影响，但温度变化对真空管路连接件还是会产生影响。为此，作者设计了两种测量链形式，如图 4-2 所示。其中 M 表示测量线尺寸， L 表示被测线尺寸， B 为补偿环节尺寸。图 4-2 (a) 的补偿环节为正向串接形式，当 B 有正的尺寸变化时，

测量结果产生负值变化，可补偿测量系统的正误差；图 4-2 (b) 的补偿环节为反向串接形式，当 B 有负的尺寸变化时，测量结果产生正值变化，可补偿测量系统的负误差。

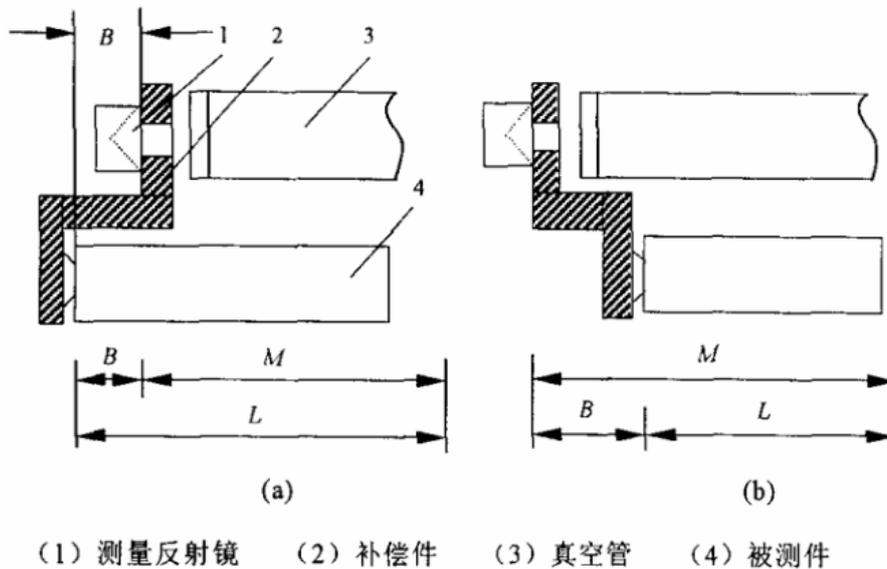


图 4-2 补偿链结构示意图

激光侧脸系统中，偏振分光镜、参考反射镜及侧脸反射镜都受温度变化的影响产生变形，是测量系统产生相应的温度漂移。由于其作用机理较为复杂，作者提出通过实验测试给出相应的温度漂移值，具体光学器件总的温漂测试结果最大为 $0.35\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 。

作者对所设计的测试系统进行了不确定分析，在测试系统参数规定为试样长度 2500mm ，温差 1°C ，变形量为 $2.5\mu\text{m}$ 时，总不确定度为 $1\text{E}-07/^\circ\text{C}$ ，但作者并未给出任何实际试件测试结果。

通过对上述激光干涉法测量装置设计方案的分析，可以得出以下结论：

(1) 针对大尺寸构件的热膨胀系数测试，作者设计采用了激光干涉法测试技术，通过激光干涉法可以有效的保证测量精度，而激光干涉法测试技术也是国外大尺寸构件热膨胀系数测试，特别是 E-08/K 量级超低热膨胀系数测试的常用技术手段。

(2) 设计了真空管路来减小温度和环境气体折射率对光路的影响，这是一种新的思路，可在减小测试影响的同时避免试样也放置在真空中所带来的温度控制复杂性。但单独增加真空管路势必会增大系统的复杂性而带来其他更复杂的影响，在实际制作和系统的稳定性方面很难实现，但这种新思路对今后测试系统的设计很有借鉴意义。

(3) 作者设计测试系统的主要思路是通过理论计算结合大量的测试修正和补偿来保证测量精度，这种思路对于可用标准试样进行校准的测试设备而言是可行的，对具有很好的可重复性测试能力的测试设备也可行，但对于这种大尺寸构件热膨胀系数测试而言，测试条件和各种影响因素众多，靠补偿修正很难达到很高的测量准确度。

(4) 激光干涉法具有很高的测量精度，完全可以实现 E-08/K 量级的超低热膨胀系数的准确测试。但此设计方案测量精度的主要局限在测杆和真空管的热变形上，被测试件的热变形不能小于测杆和真空管的热变形，否则测试误差会很大。

(5) 统观作者的设计方案可以看出，作者在整个热膨胀测试系统的设计上明显缺乏热膨胀测试的实践经验，整个系统设计的太复杂，容易受到干扰的因素太多，多数只从理论方面考虑，而实际制造中很难实现或实现后的效果很差。这也是这篇博士论文研究期间没有真正做出测试系统和进行过任何真正试样测试的原因。

5. 结论

对于大于尺寸构件的整体热膨胀系数测试，目前国内的研究工作也仅是以上的几篇报道，但非常有代表性。通过以上国内在大尺寸构件热膨胀系数测试方面研究工作的分析，可以得出以下结论：

(1) 采用上述光纤位移传感器和顶杆法千分表方式根本不可能进行大尺寸管件的 E-07/K 和 E-08/K 量级的低热膨胀系数测量，只能满足 E-06/K 量级的普通热膨胀系数的测量。对于大尺寸构件超低热膨胀测试研究，上述文献所报道的研究工作基本无任何参考价值，只能作为失败的案例起到警示作用。

(2) 采用电感测微仪和激光干涉仪这些高精度位移测试技术的思路是正确的，但国内的研究基本都忽略了测试系统中测试基准准确性。测试基准受各种因素影响所产生的变形位移会对测量精度带来致命影响，往往直接决定了测试系统的测试精度范围和测试设备等级，这也是国内测试设备无法达到高精度测量的主要原因。

(3) 综述中的文献报道是国内航天系统专业研究所和著名院校在大尺寸管件热膨胀系数整体测量方面所做的研究工作，也是到目前为止国内仅有的相关研究工作的报道。从这些报道中可以看出，国内的这些研究工作中，对材料热膨胀性质的了解非常不透彻，对热膨胀测试技术的理解完全处于很低水平，多侧重于理论分析和计算，很少考虑能不能工程实现，而且很多设计上的问题总是试图采用理论修正的办法来弥补，这些都是目前国内无法真正准确测量大尺寸构件热膨胀系数的主要原因。

(4) 国外从上世纪七十年代哈伯天文望远镜开始，就展开了相应的大尺寸构件 E-08/K 量级超低热膨胀系数测试的研究工作，并且随着太空项目的发展国外多家机构开展了这方面的研究，并研制了多套大尺寸构件整体热膨胀系数测试的设备。国内在这方面的研究基本没开展国外资料调研工作，都属于闭门造车。

(5) 尽管在大尺寸构件超低热膨胀系数测试方面国内外技术水平差距巨大，但随着现代测试技术的发展，采用新技术和各种成熟可靠的技术手段完全可以实现弯道超车，快速实现技术上的突破，满足超低膨胀大尺寸构件的生产和质量需求，促进国内航天技术的发展。

6. 参考文献

- [1] 唐妹红, 彭小强. 低膨胀纤维增强复合材料杆件的测试研究[C]// 全国复合材料学术会议. 2006.
- [2] 张建可, 冀勇夫. 碳纤维复合材料管件低温热膨胀性能测试研究[C]// 第八届全国低温工程大会暨中国航天低温专业信息网 2007 年度学术交流会论文集. 2007.
- [3] 张建可, 冀勇夫. 碳/环氧管件的低温热膨胀系数测试研究[J]. 真空与低温, 2010, 16(3):181-184.
- [4] 李彦平, 丁振良, 袁峰等. 大尺寸标准量杆线膨胀系数的高精度测量[C]// 光学精密工程. 2003:128-131.
- [5] 陈中. 大尺寸标准量杆检定中关键技术的研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2002. 哈工大博士论文.
- [6] 陈中, 丁振良. 大型构件尺寸微小变化的高精度激光干涉测量[J]. 激光杂志, 2000, 21(2):26-27.