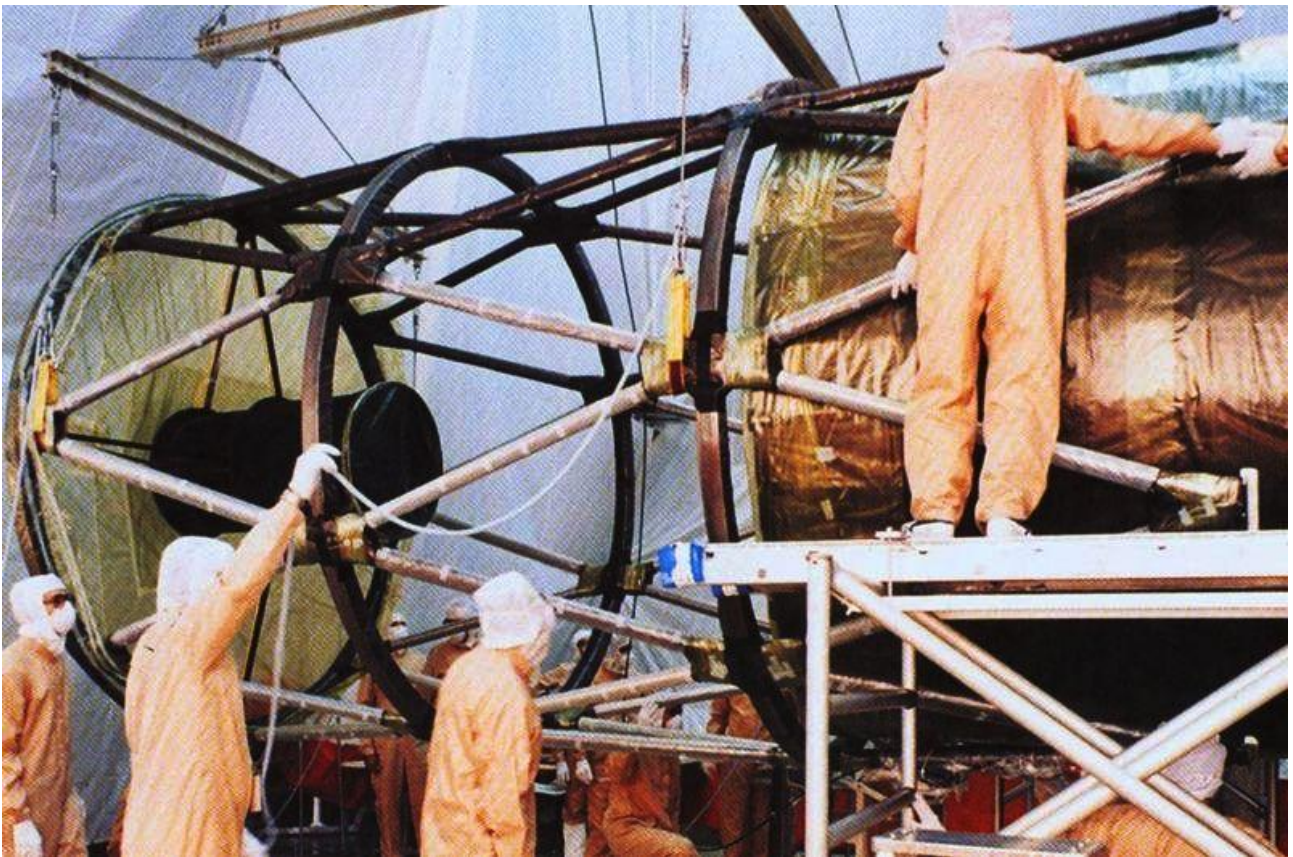


激光干涉法测试技术应用——Application Note: 002

波音公司激光干涉法大尺寸构件 超低热膨胀系数测试技术综述

Review of Boeing Company Laser Interferometer Method for
Ultralow Thermal Expansion Measurement on Large Size Component



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，已无法满足长度 1m 以上大尺寸构件的超低热膨胀系数测量，多数航天器用大尺寸构件需要精确测量整个构件的超低热膨胀系数。本文对美国波音公司在太空望远镜大尺寸桁架超低热膨胀系数整体测量方面的研究工作进行了综述，以了解国外技术发展状况，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 1m 以上长度的 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。

本文将介绍美国波音公司在太空望远镜桁架超低热膨胀系数测试方法和测试设备方面所开展的工作。

2. 波音公司激光干涉法第一代热膨胀系数测试技术

早在 1971 年波音公司的 Bond 等人就开始研究一种用于监测大直径天线在空间模拟腔体内动态行为的多通道激光干涉法测试技术^[1]，其中采用了可反转条纹计数技术来测量安装在试验箱体外测量装置与安装在腔体内天线上 7 个光学反射镜之间的距离。

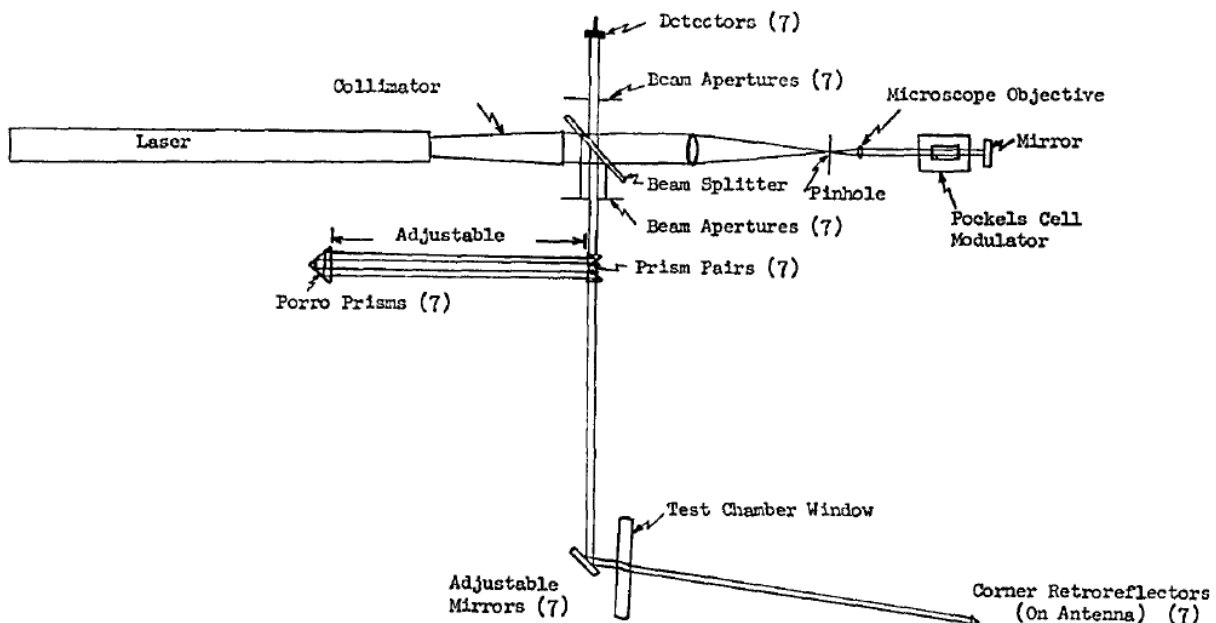


图 2-1 多通道激光干涉仪光学系统结构示意图

试验腔外测试仪器距离腔体内部天线的距离将近 5m，干涉仪采用了 Twyman-Green 干涉仪，其中参考光束的相位在 13.5kHz 频率处进行调节以便对每个通道进行可反转条纹计数，

每根条纹计数对应的距离变化增量为 7.9nm (0.125 倍激光波长), 整个光学系统结构如**图 2-1**所示。

基于上述技术, 波音航空公司在 1974 年至 1975 年期间针对大型空间望远镜 (LST) 项目中的石墨环氧测量支架进行了热膨胀系数测试考核**[2]**。具体测试考核包括了两方面的内容, 一方面是测试管状支架和 H 型支架的热膨胀系数, 另一方面是对管状支架热膨胀系数进行了热循环效应考核。

热膨胀系数测试试件为 91.44 厘米长的截面分别为圆形和 H 型的管材, 被测试件放置在真空腔内并稳定 24 小时后再进行测试, **图 2-2**所示为测试装置的结构示意图。如图所示, 被测试件悬浮在含有加热套的真空腔内, 激光干涉仪的光学部件放置在真空腔外的底部位置, 形成立式结构热膨胀系数测量装置, 用来测量试件长度变化的聚焦光束垂直进入真空腔底部的光学窗口, 整个测量装置实物如**图 2-3**所示, 激光干涉仪测量装置实物如**图 2-4**所示。

每个被测试件上安装了三只测温热电偶和四个角反射镜, 如**图 2-5**所示。激光干涉仪测量得到四个角反射镜的位移变化, 由此得到热变形量和监视试件的倾斜。在被测试件的顶部安置一个参考反射镜用来抵消被测试件和干涉仪之间相对运动所带来的影响。

测试中真空腔内部气压低于 1Torr 以下并使真空度稳定 16 个小时, 然后使试件温度升到 37.8℃ (100 °F) 后在冷却下来, 整个加热冷却过程中, 每隔 2.8℃ (5 °F) 测试一次热变形量, 每隔 14℃ (25 °F) 进行一次 30 分钟的恒温。整个温度变化过程直到试件冷却到-73.3℃ (-100 °F) 停止。

铺层方向为 $(0_2 \pm 50)_s$ 的管状试件热变形量测试结果如**图 2-6**所示, 整个过程的平均线膨胀系数为 $7.2 \times 10^{-8} / ^\circ\text{C}$ ($4 \times 10^{-8} / ^\circ\text{F}$)。 **图 2-7**所示为管状构件热膨胀系数测试与计算之间的比较结果, 从比较结果可以看出板层方向的有效性, 这种特性可以用来设计特殊性能的复合材料。

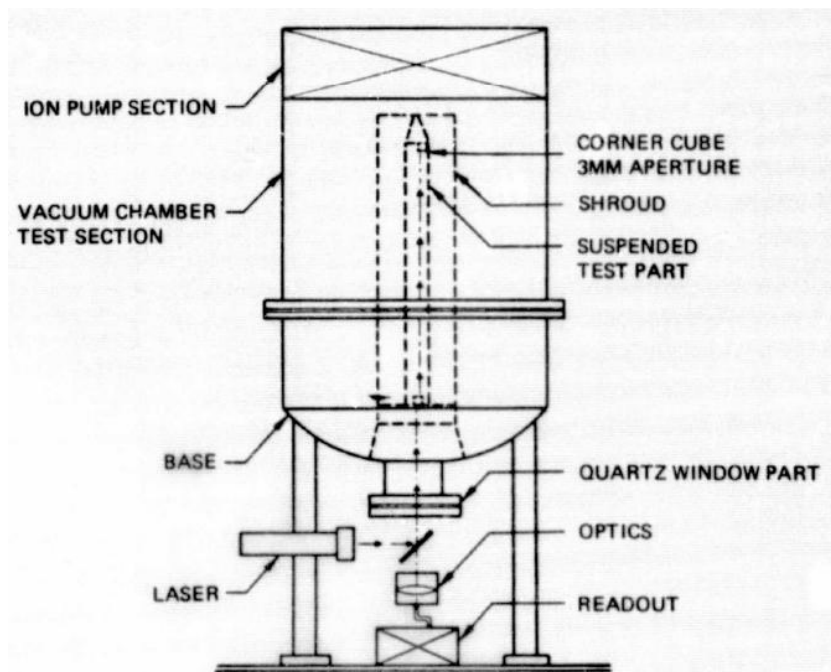


图 2-2 热膨胀系数测试系统结构示意图

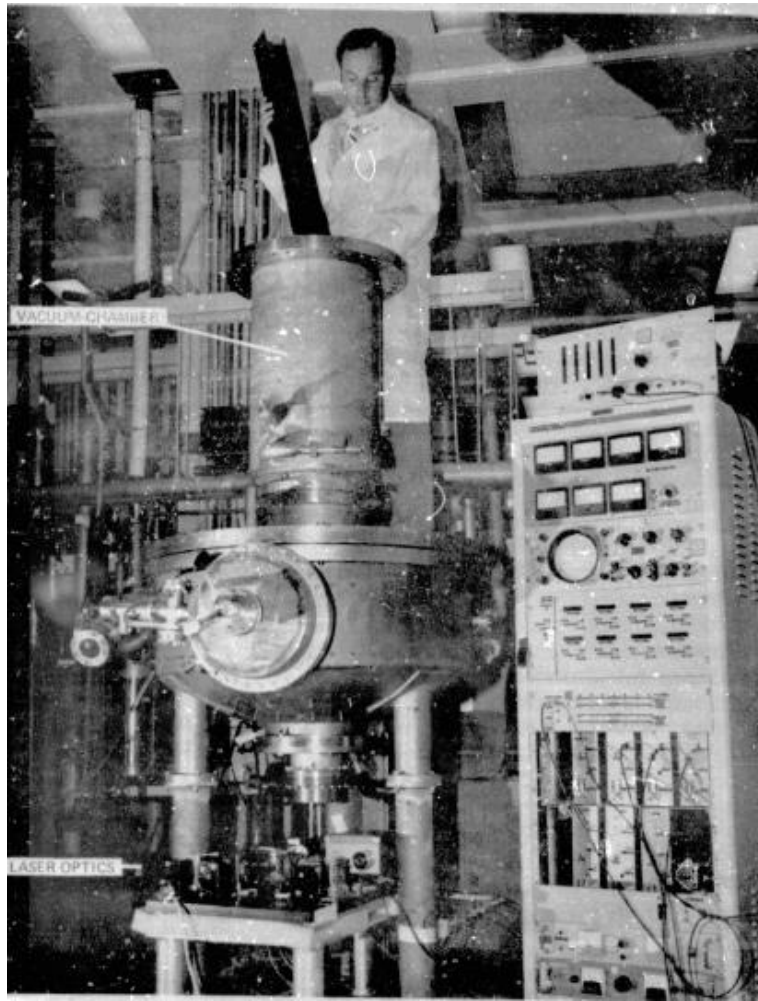


图 2-3 热膨胀系数测试系统整体照片

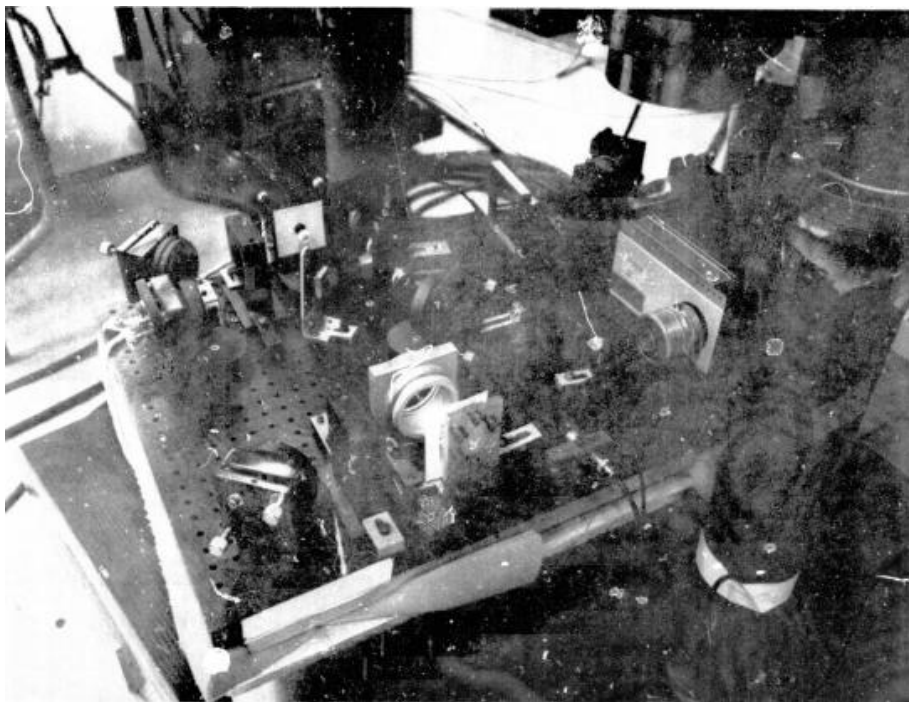


图 2-4 热膨胀系数测试系统激光干涉仪测量装置

在进行管件热膨胀系数热循环考核试验中，先沿着试件长度方向上安装两只 1 英寸宽的电加热电阻器以建立起与热真空试验相同的试件状态，在热真空试验中，电阻加热器是用来控制管件的温度，而在管件热膨胀系数热循环试验中，加热电阻器只是实现相同的结构状态，热循环试验的温度控制则是采用真空腔内的加热套来实现。

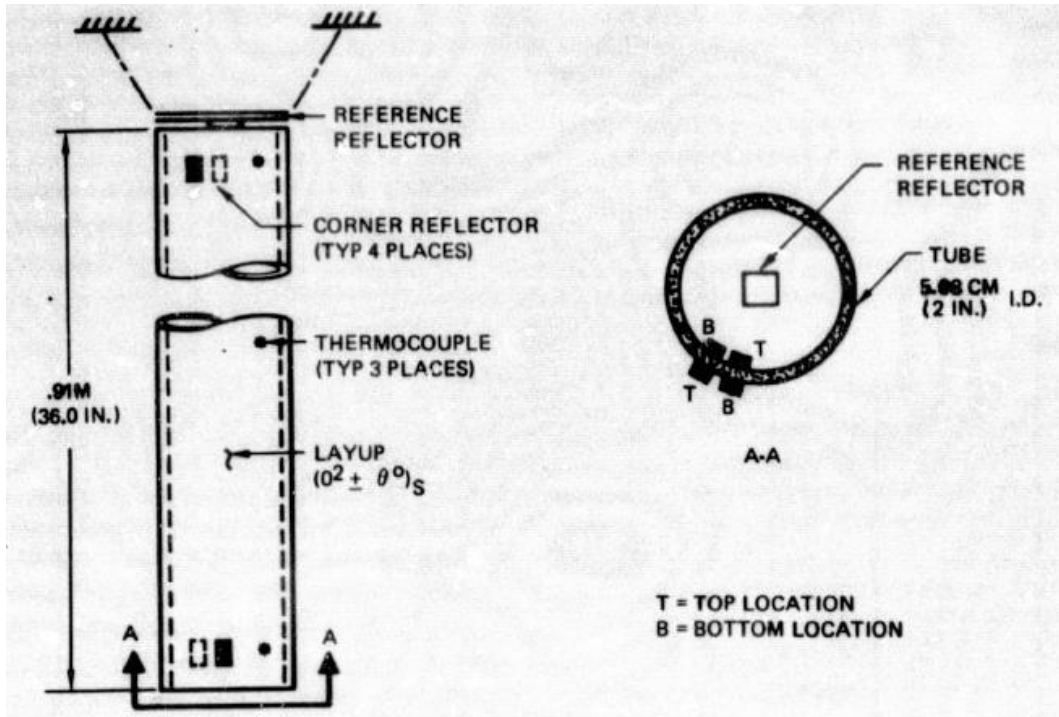


图 2-5 热膨胀系数测试系统测温传感器和光学器件安装位置示意图

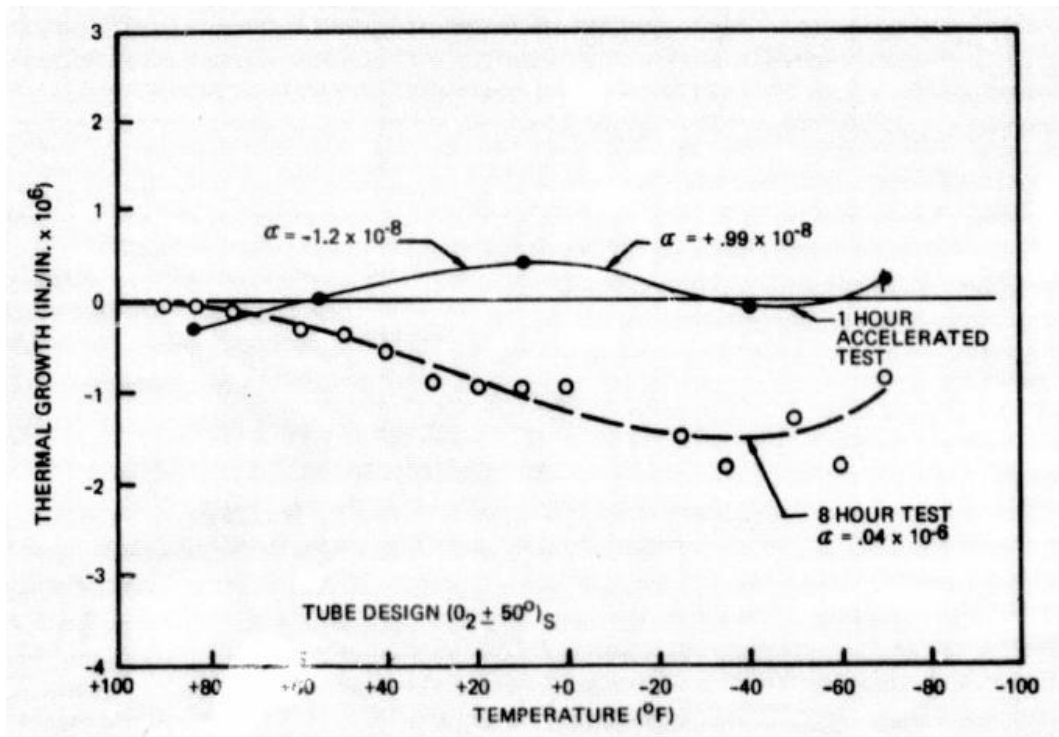


图 2-6 试件热变形量随温度变化的测试结果

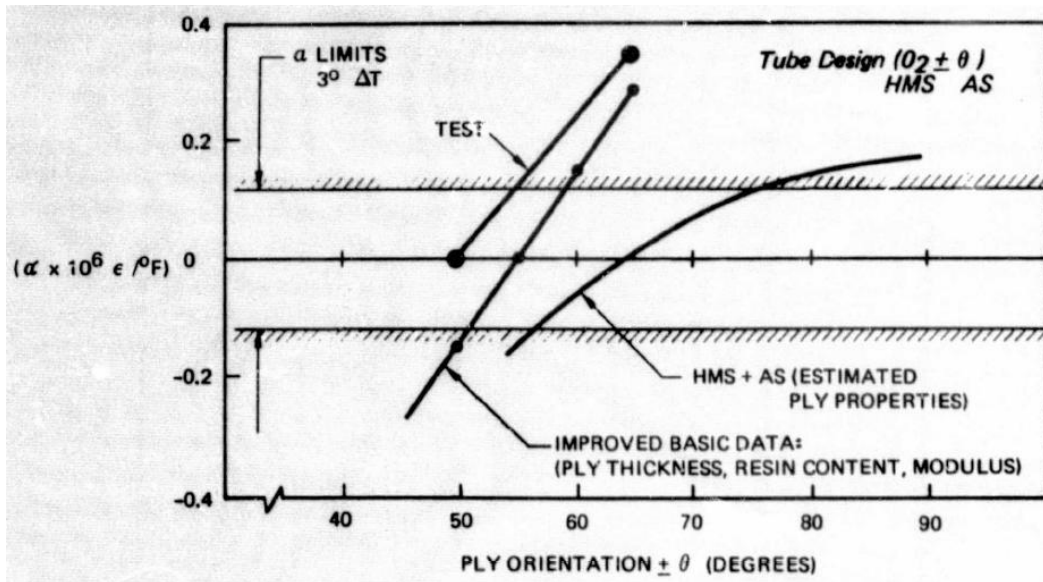


图 2-7 测试与设计结果的比较

在热膨胀系数热循环考核试验中，反射镜和温度传感器的安装与热膨胀系数测试时完全相同。热循环测试时也是先抽真空使得试件进行一两天的除湿，然后进行+38℃~78℃ (+100°F~100°F) 温度范围内的 208 次的冷热循环，大约间隔 50 次循环进行一次测量，在最后一次循环时，测试将电阻加热器取出后的试件热膨胀系数。

热循环过程中试件的热膨胀系数随温度变化测量结果如图 2-8 所示。在第一次循环过程中，热膨胀系数随温度变化是一个从+75°F的 $0.23 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 变化到-75°F的 $0.36 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 斜率相对恒定的斜线。在后续的热循环测试中，热膨胀系数变化曲线在-25°F前保持相同的斜率，然后随着温度的降低发生快速降低，这种现象认为是试验完成后发现的微裂纹所引起。选择试件的一段管壁进行抛光和显微镜下观察可以发现明显的径向状微裂纹。

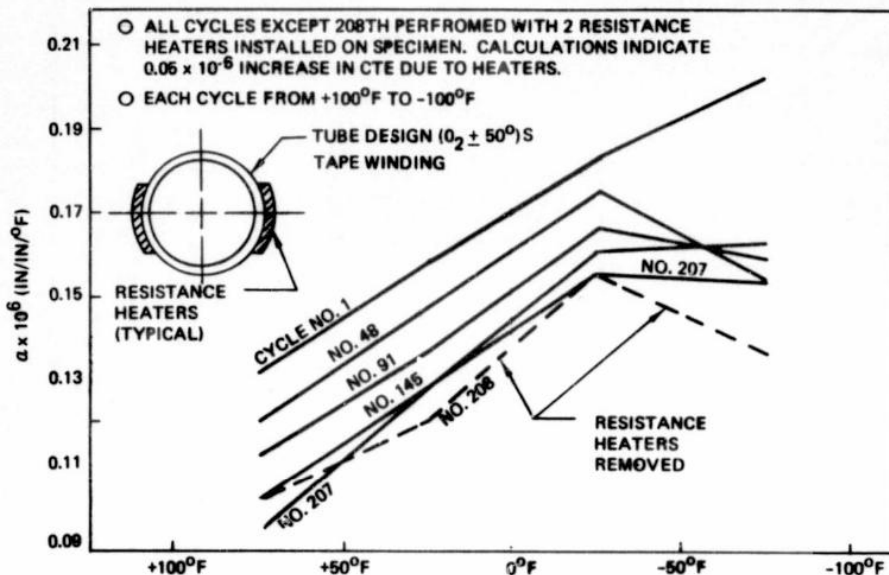


图 2-8 热循环过程中试件热膨胀系数随温度变化的测量值

在波音公司第一代多通道干涉仪中，采用了 Twyman-Green 干涉仪、单频激光器和波前分割技术开发了 7 条测量光束的激光干涉法位移测试系统，条纹计数速度为 4KHz。导致这款干涉仪测量系统中途退役的主要问题是低条纹速率能力、大尺寸光束分光器造成通道之间漂移以及激光反馈造成的激光噪声，具体不足如下：

- (1) 通过分光镜使得信号和参考光束的光强之间形成固定比例，但并不是准确的 1:1 比

例关系，而且这个比例不可调整，但在实际测试时则希望不替换分光镜来调节这个比例。

(2) 激光干涉仪的实际效率和准确度通常有意设计成低于它们的理论效率，这是由于如果这种干涉仪经过准直后达到它的最大效能，激光会反射回激光光源。而激光是一个振荡器，既是很低水平的返回光都会引起严重的能量波动。为了使得返回光最小化，干涉仪系统的光学对准常常会有点失谐，降低干涉仪的效能，同时会明显降低干涉仪分辨率。可以通过几种途径来实现失调，如采用空间滤光器。如图 3-1 所示光路结构中，根据已知光学原理，空间滤光器结构显然不是最优化，如果针孔制成最佳尺寸来最好的进行过滤，则会使得太多的激光返回到激光器。另外，当光学系统精密调谐后，会使得从振镜组返回的参考光以及从被测目标返回的信号光都会透射过分光器返回到激光器，也会造成激光器不希望的能量波动。为减小这种现象，要使得返回的参考光束略微失焦到允差允许水平。然而，这种参考光束的失焦，会造成参考光束的波前发生相应的变形，这不仅会降低仪器的能量效率，而且会明显降低干涉仪的分辨率。

(3) 由于环境变化所造成的参考光波前的相误差，在分光镜处的反射信号光和反射参考光会发生不准直现象。参考光按照分光镜处的指向，在与从被测目标返回的信号光会合前，会穿过一些光学器件和大量的气氛环境。气氛环境条件的轻微变化，如湿度、气压和温度，都会给参考光带来明显的相误差。而相误差将会被探测器解读为一个信号光的光程差，这将进一步导致目标热变形相关的测量误差信息。

3. 波音公司激光干涉法第二代热膨胀系数测试技术

鉴于第一代干涉仪存在的问题，Bond 等人做了进一步的改进，改进后的技术于 1978 年获得了美国专利 [3]。此项技术是在干涉仪中使参考光和信号光都来自一个共同的源。信号光被指向被测目标并形成反射，反射后的信号光被定义为返回信号光。然后参考光与返回信号光会合形成一束复合光。通过此复合光，可以采用已知手段提取与被测目标相关的有用信息。仪器自身包含了一块透光材料平板、定位平板的支架、入射的信号光以及返回的信号光，所有这些光束都以一定的角度入射到平板上。仪器还包括第一和第二反射面，这两个反射面被固定在平板的两个相对面上，固定位置与参考光位置相关。入射和返回的信号光总会入射并与参考光形成会合形成复合光，同时，其他剩余的参考光和返回的信号光都会被定向而充分的避免了它们形成透射而返回到激光器。改进后的干涉仪光学系统结构如图 3-1 所示。

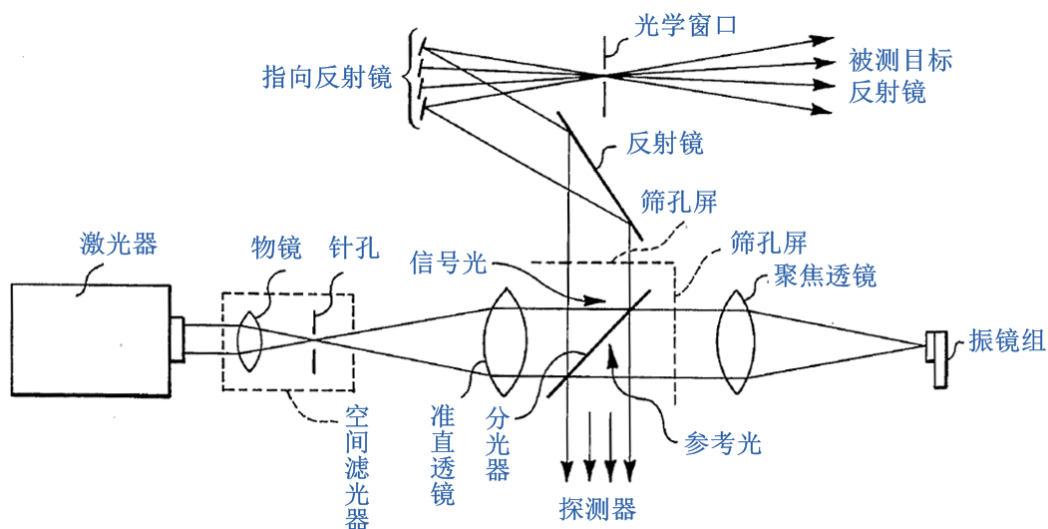


图 3-1 改进型多通道激光干涉仪光学系统结构示意图

基于以上激光干涉仪的改进，为了展示多通道激光干涉仪的应用，Bond 设计了一种用于

热膨胀系数测量的激光干涉仪装置，装置的光路如图 3-2 所示。此热膨胀仪中包含了一个环境试验腔体 37，腔体内放置被测试样 39，此膨胀仪试样的布置与用于航天器大型构件热变形测量中被测试件的布置形式略有不同，但测试思路基本相似。

当干涉仪用于热膨胀仪时，通过被测试样上的一个特殊位置对参考光进行定向和反射，由此来测定被测试样与干涉仪之间位置的相对位移。

激光源 41 产生一束极化角已知的连续激光，例如采用氦氖激光器作为激光源，单频激光的波长为 632.8nm。激光器发出的偏振光束作用到偏振旋转器 43 上，偏振旋转器是一种已知结构其功能为可控改变入射光束偏振角的装置。经偏振旋转器 43 出来的光束作为改变过的源光束，这是因为此光束已经被操作者改变为特定的偏振角，这与原始激光束的偏振角会有不同。改变了偏振角的激光光束传输到透镜组 45 后变成所希望直径的光束，光束直径的选择要使得空间滤波的不能低于 80%。改变直径后的光束经 45° 放置的反射镜 47 反射后照射到偏振棱镜 49 后变成水平和垂直两个偏振分量，水平偏振光作为入射参考光 51a，而垂直偏振光作为入射信号光 53a。

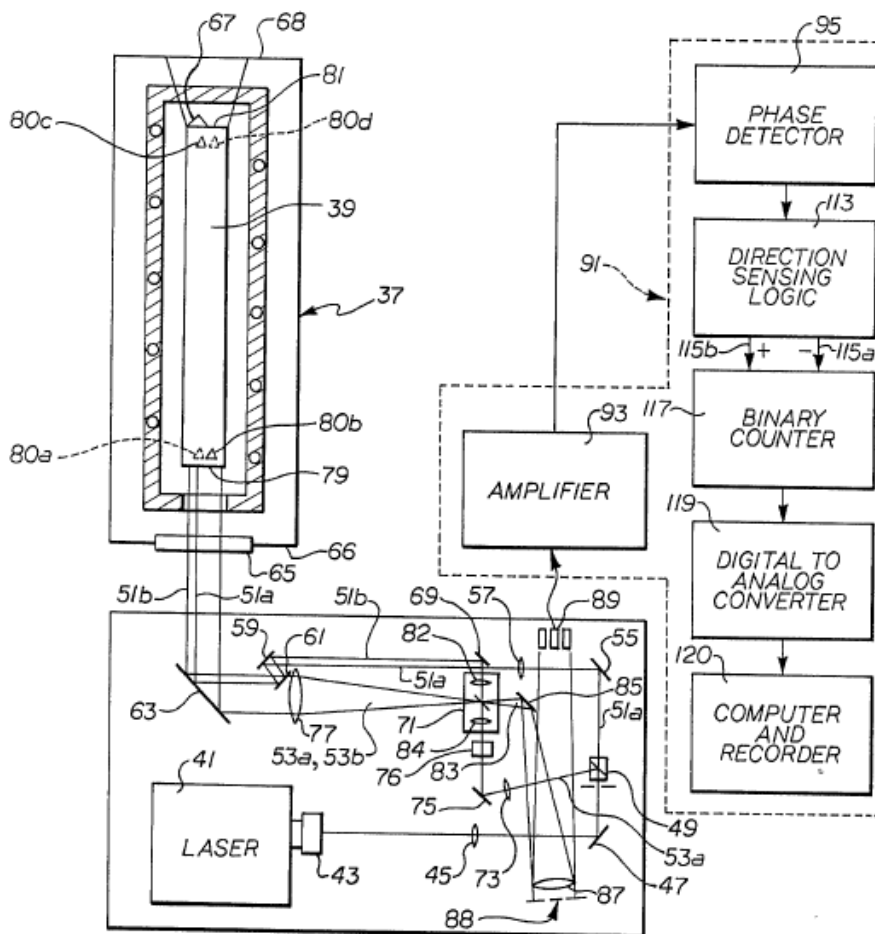


图 3-2 激光干涉法热膨胀仪光路示意图

通过偏振旋转器 43 和偏振棱镜的组合，使得作为入射光的参考光和信号光的光强可以很方便的进行调节而不需要更换光学器件或从新准直干涉仪的任何部件，仅仅通过改变激光器输出激光的偏振角即可实现，参考光 51a 和信号光 53a 光强之比可以根据需要进行调节。

参考光 51a 经 45° 放置的反射镜 55 反射后照射到透镜 57，此透镜有助于使得入射参考光 51a 保持所希望的光束直径。参考光 51a 透过透镜 57 后在两个相近的平面反射镜 59 和 61 上形成反射，反射光照射到折叠镜 63。通过折叠镜 63，入射参考光 51a 透过位于环境试验腔体 37 近端 66 的光学窗口 65，并沿着试样 39 旁侧穿行大约腔体 37 的长度距离，然后由布置在试样 39 远端 81 位置处的反射器 67 进行全反射。

全反射回来的参考光 51b，会因为反射器 67 布置的特点相对于入射参考光 51a 发生轻微的偏移而形成相互相向平行，并最终通过处于近段 66 的光学窗口 65 返回。返回的参考光 51b 经折叠反射镜 63、近距离反射镜 59 和 61 以及反射镜 69 的一些列反射后，返回进入合成了空间滤波器、光束合成器和调节器结构的模块 71。

从偏振棱镜 49 出来的信号光 53 通过类似与透镜组 45 和 57 的透镜组 73 后，信号光保持在所希望的光束直径上。透镜组 73 后面是取向取决于信号光 53a 的反射镜 75，通过反射镜 75，入射的信号光 53a 投射到半波片 76 上，将垂直偏振方向的信号光 53a 转变为水平偏振方向光并导入模块 71 内。由此，信号光就会与从被测物返回的水平偏振的参考光在模块 71 内形成混合。

在模块 71 内，入射的信号光 53a 经过空间滤波后被反射出模块 71 到准直透镜组 77，准直透镜组 77 的焦距为 25.4cm，准直后的光束直径为 5cm。透射过准直透镜组 77 的光束依然为入射信号光 53a，并被反射镜 63 反射穿过光学窗口 65。虽然此入射信号光 53a 依然是单一光束，需要牢记的是一个有孔屏幕或类似器件都会产生一系列的子信号光束。

入射的信号光束 53a 照射到安装在被测试样 39 上的反射镜 80a-80d 上，反射镜 80a 和 80b 以近乎 180° 水平方式布置在靠近试样近段 79 的位置处，以相同方式在试样远端 81 处布置反射镜 80c 和 80d。第一组反射镜 80a 和 80b 放置的与被测试样 39 呈正交形式，第二组反射镜 80c 和 80d 的布置同样如此。

反射镜 80a-80d 都是立方角反射器，立方角反射器可以将入射的信号光按照原光路进行反射，就算入射光呈一定角度入射也是如此。这里所用的立方角反射器的平面端面或孔径为 3mm。

基于立方角反射器的反射，信号光（此时为返回信号光 53b，实际上是四束返回信号光）返回并穿过光学窗口 65，经反射镜 63 反射后通过透镜组 77 聚焦进入模块 71。

返回的信号光 53b 将聚焦后进入模块 71 后与返回的参考光 51b 在模块 71 中混合而产生复合光 83，这是返回参考光 51b 与返回信号光 53b 叠加后结果。复合光 83 由四部分组成，每路返回信号光都会与返回的参考光形成叠加。通过这种方式，返回的信号光 53b 和参考光 51b 最终形成复合光 83，如图 3-3 所示。

复合光经反射镜 85 反射并通过透镜组 87 聚焦到镜面阵列 88 上，镜面阵列 88 中的每一个镜子反射复合光 83 中的其中一束光到所选择的其中一个探测器 89 上。干涉仪中探测器数量取决于所需探测的复合光 83 中的光束数量，在图 3-2 所示光路中，需要选择四个探测器。

复合光中的每束光都对应一个探测器，都具有各自的信号处理设备 91。信号处理设备 91 采集相应探测器的输出信号，进行放大和分析以提供所需分辨率并与信号光光程和方向变化的相关信息，通过这些信息，就可以精确确定一特定结构件在热或其他应力作用下的热膨胀系数和动态响应。信号处理过程在文献[2]中有详细描述。

综上所述，此装置用一个单元形式，包含了空间滤波器、光束混合器和调制器功能，来用于高分辨率干涉仪。这种结构可是使得干涉仪达到理论上的分辨率能力，并实质性的消除了反射光对激光光源的影响，并保证了参考光与信号光之间的准确准直。同时还保证了返回的参考光 51b 与返回的信号光 53b 叠加产生的干涉条纹仅仅与信号光的光程差相关，而与外

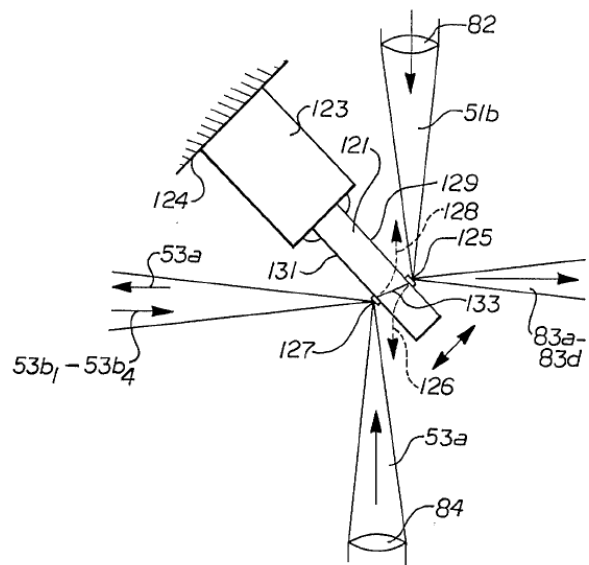


图 3-3 信号光与参考光混合光路示意图

激光器 1 所带的问题。

在信号和参考光束中采用了附加的声光调制器 (AOM)，通过调制器中的移动声波对入射光的衍射，产生一个激光频率的多普勒平移，从而使得信号光的频率为 80MHz 而参考光频率为 81MHz。当信号和参考光合成后，条纹位置与 1MHz 相位调制后的差频成比例关系。

倾斜片 23 和反射镜 25 控制位置和方向使得信号光 5 准直照射到聚焦透镜组 27 的入射光孔，类似的倾斜片 29 和反射镜 31 控制位置和方向使得参考光 7 照射到透镜组 33。聚焦透镜组 27 和 33 分别聚焦信号光和参考光到一个光束清洁过滤器和合成器组装器件 35，此组装器件 35 的结构如图 4-2 所示。

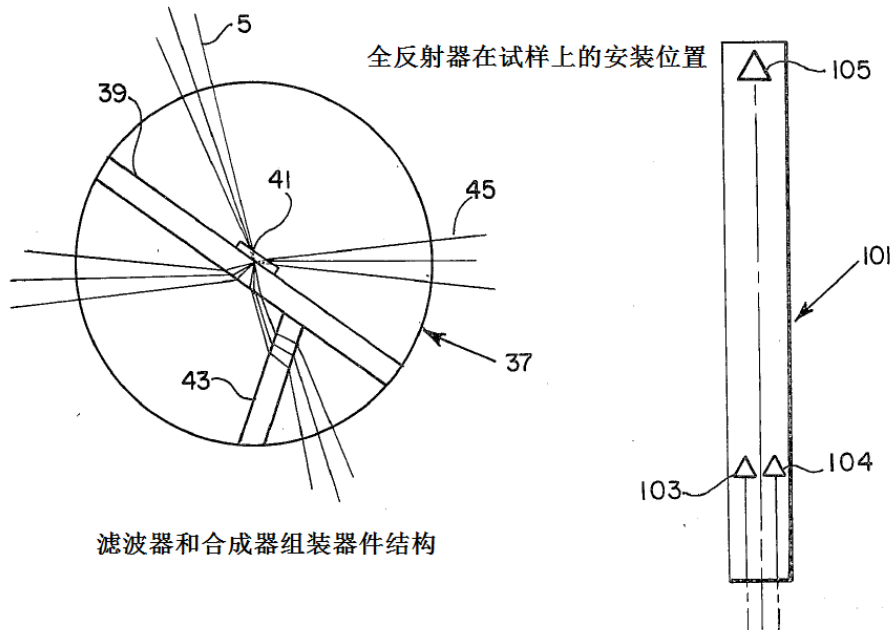


图 4-2 滤波器和合成器组装器件结构示意图

组装器件 35 包含了一个厚度为 0.004" 的薄玻璃片 39，在薄片玻璃 39 一侧的中心位置固定一个双面椭圆反射镜 41，玻璃片 39 的取向与入射信号光中心线呈 Brewster 角以抑制入射光平面内偏振光的 Fresnel 反射。

与薄片玻璃 39 相同厚度的补偿玻璃片 43 被固定在反面，入射进来的参考光 7 以 Brewster 角为入射角穿过玻璃片 43，并在椭圆反射镜 41 的背面形成反射。薄片 43 会对穿过玻璃片 39 到反射镜 41 的参考光变形进行补偿。

如果玻璃片 39 足够薄以至于参考光没有明显的波前变形，这个补偿片 43 也可以取消。然而，如果玻璃片 39 做的太薄则会很难进行安装处置。

反射镜 41 为微型尺寸，尺寸在 7~10 微米之间，选择微型反射镜 41 是想使得反射镜起到一个空间过滤器或光束清洁器的作用。反射镜 41 是一个通常在激光应用中针孔类型空间过滤器的反射模拟。

从反射镜 41 反射出的经过过滤的信号光 45 经过透镜组 47 准直后，穿过临近的具有 19 个孔径为 0.5" 的多孔片 49，信号光 45 被分割为 19 束直径为 0.5" 的测试光束 51-69，这 19 束细测试光束经临近的反射镜 70 折射到中继反射镜 71-95 上。图 4-1 只描绘了 19 束测试光束中的 4 束，同时也只描绘了 8 个中继镜。通过反射镜这些测试光束传输透过光学窗口 97 进入真空测试腔体 99。

通常在真空腔体 99 内放置 6 个石墨环氧被测试件，图 4-1 中只显示了其中一个。试样上布置了三个立方角反射器，其中两个 103 和 104 在试样的底部，一个发射器 105 在试样顶部，如图 4-2 所示。每个反射器反射一束测量光使其返回到过滤器和合成器组装器件 35 内。

由于存在衍射效应，返回光束的直径要大于椭圆反射镜 41 的直径，这样测试光束 51-69 绕过反射镜穿过薄玻璃片 39 并与过滤后的参考光 107 进行合成。反射镜 109 和 111 固定用来折返合成后的光束 112，并导引它们到探测器组件 113。探测器组件中包含了 19 组透镜来聚焦光束到 19 个光电倍增管探测器 204。每路参考和信号的合成光束用 200 表示，被检测的信号经过信号处理器 115 进行处理，最终得到相关信息和数据。

在这项新技术应用中惊奇的发现经过但反射镜滤波器和光束合成器后的返回光不会产生激光器噪声问题，返回光束的 161MHz 多普勒频移只占氦氖激光 1600MHz 增益带宽的 10%，而且返回光束被激光腔体强烈的排斥。由此可见，这项技术可以明显的改进多通道干涉仪性能，使得激光反馈问题不再存在。

在此项新技术中通过定位在以光传输片上的两个侧面安装微型椭圆镜构成新型空间滤波器和光束合成装置中，在此传输片的另一边还有一个补偿光传输片来接受参考光以补偿光束的波前变形。此项技术还包括了一个新型光束合成装置，新型光束合成装置将使得参考光不会在指向被测目标，这将信号光的光程完全独立不会受到外界环境的影响。

这项新技术已经用于一台新型的 19 通道的干涉仪测量装置中，并成功的应用于与空间光学望远镜组装件用石墨环氧结构单元的热膨胀系数和热稳定性测试[5]。

从波音公司第三代多通道激光干涉仪技术可以看出，尽管可以实现多通道的测试，每个通道都需要独立的光路和相应光学器件，特别在多通道同时测试是会给实际工程实现带来很大困难。为此，Bond 等人又开发了一种扫描式激光干涉仪并获得了专利[6]。这种扫描式激光干涉仪的详细介绍请参考相关专利，这里就不再详细介绍。

5. 分析与结论

通过以上对美国波音公司激光干涉仪测试技术发展的综述，可以得出以下总结：

(1) 波音公司激光干涉仪技术已经基本成熟，已成功应用于大尺寸构件的热膨胀系数和热稳定性测试，已完全可以测试 E-8/K 量级的大尺寸构件的热膨胀系数。

(2) 由于采用的多普勒差频技术，波音公司的激光干涉仪就相当于双频激光干涉仪，由此带来了许多双频激光干涉仪的很多优点，如极好的抗振性能，这在大尺寸构件测试中显得尤为重要，这将有效的提高热膨胀系数长时间测试过程中的稳定性和可靠性，大幅提高了工程应用中的适用性。

(3) 波音公司激光干涉仪测试技术考虑了工程应用的实用性，可以对 19 个大尺寸试件的热膨胀系数同时进行测量，大幅提高了测试效率。

(4) 波音公司设计的多试样热膨胀系数测试系统为立式结构，从真空腔顶部以直立形式放入被测试件。对于以米为长度单位的大尺寸试件，这种直立形式测试结构是以高度换面积，使测试系统向空间高度发展而节省占地面积。同时，通过调节真空腔高度以适合不同试件尺寸测试需要。

(5) 波音公司激光干涉法热膨胀系数测试系统的这种立式结构，对于众多 2 米以上的大尺寸构件测量无异于就是一个高空作业，从操作上来说可能存在一定的隐患，需要配置相应的安全防护措施。

(6) 在测试中，提取试件位移量的全反射器需要固定在被测试件上，全反射器需要与信号光完全垂直。由于是试件立式形式放入真空腔内，这就很难在全反射器固定好后在真空腔内进行后续光路调整，这就对全反射器的固定、整体信号光路的调整以及试件的固定提出很高要求。同时，全反射器在试件上的固定还不能损坏被测试件。

(7) 在波音公司设计的多试样热膨胀系数测试系统中，并未提到温度变化过程中试件热膨胀不均匀和温度不均匀造成全反射器相对于信号光的发生倾斜时给测试带来的影响。这种试件倾斜现象在大尺寸构件中尤为明显，且会对反射返回的信号光路产生偏离而造成测试误

差，甚至返回信号光偏离严重造成无法探测。

(8) 波音公司的这种双频激光干涉仪以及多通道扫描干涉仪技术，尽管已经在工程上得到了应用，但并未真正商品化和市场化，并没有经历过大规模的应用考核和检验，还是缺少在工程上众多应用后的技术迭代，最重要的是众多用户无法进行再现重复，但作为一种技术路线有着重要的参考价值。

总之，波音公司激光干涉仪测试技术以及相应的多通道热膨胀系数测试系统为大尺寸构件超低热膨胀系数测试以及工程构件热变形测试展示了一个成功的技术途径，证明这种技术可以成功的应用大尺寸构件的测试评价，为今后这方面的工作提供了成功经验和借鉴。

6. 参考文献

[1] C. R. Pond, M. H. Horman, and P. D. Texeira, "Multiple Channel Interferometer for Metrology," Appl. Opt. 10, 2144-2149 (1971)

[2] S. Oken and D. E. Skoumal. "Design, Fabrication, and Test of a Graphite/Epoxy Metering Truss". NASA-CR-144177, Final Report, Feb. 1974-Dec. 1975.

[3] C. R. Pond, "Optical Device for Use in Improved Interferometers" US4105336, 1978

[4] C. R. Pond, P. D. Texeira, R. E. Wilbert, "Multiple channel interferometer" US4329059, 1982

[5] C. Golden and E. Spear. "Requirements and design of the graphite/epoxy structural elements for the optical telescope assembly of the space telescope", Technology for Space Astrophysics, Meeting Paper Archive, 1982-1833

[6] C. R. Pond, P. D. Texeira, R. E. Wilbert, " Scanning interferometer" US4890921, 1990.