

㊦首届学术报告会㊦

编号
机—8302

论文资料

激光准直技术在大型设备轴系安装上的应用

(蔡 华 麟)

常州工业技术学院

几三·十二

激光准直技术在大型设备轴系安装上的应用

本文是在激光准直技术为发电厂大型汽轮机——发电机组轴系安装上的应用研究课题的总结基础上撰写的，该课题是与陕西省火电工程公司及华东电力建设公司为安装20万千瓦汽轮发电机组主轴轴系找正共同协作研究，並於1983年3月在上海由电力部主持正式通过鑑定，作为电力系统安装新工艺列为施工新技术应用于现场。

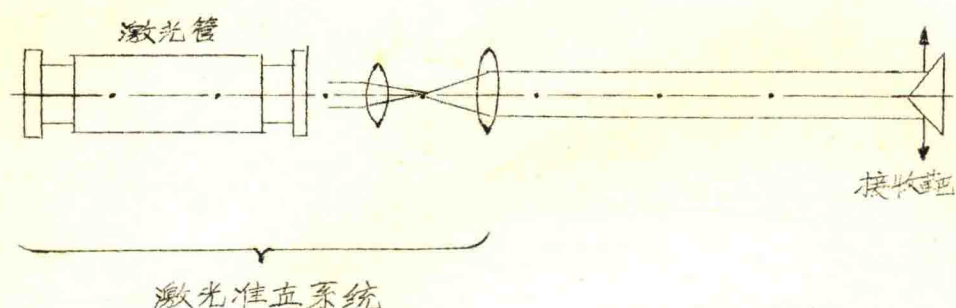
以激光束为基准线的激光准直仪是用来测量平直度和与此相关联的平行度，垂直度以及三度空间位置关系的。具有连续波的气体激光器由于能使一支高强度相干光束发射到很远的距离，因此激光准直仪具有工作距离大，效率高及测量时不受人为因素影响等特点。

氦氖气体激光器发射的激光束是工作波长为 0.6328 微米的单色可见光，呈红色，直观而又准直。激光准直仪正是应用激光束作为空间基准直线，配以一定的光电接收转换元件，测量光束的空间位置，达到测量的目的。由于测量数据用电显示，读数直观，灵敏度高，有利于自动控制和记录。

一、激光准直测量的基本原理

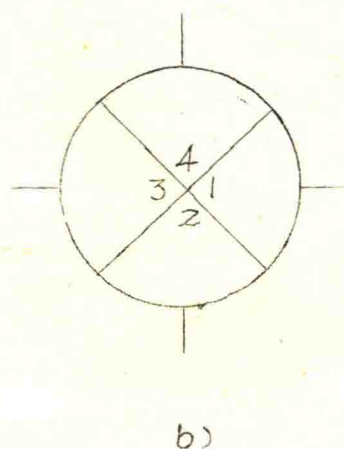
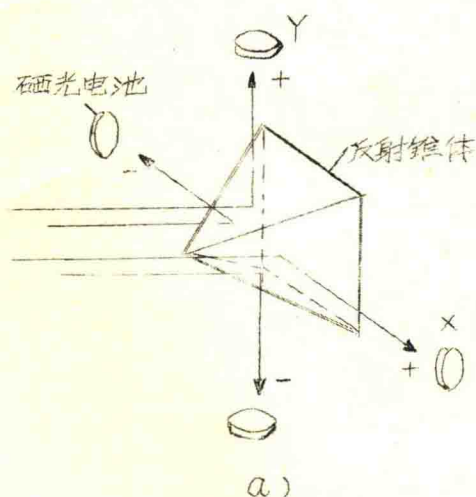
激光管发射的激光束经由透镜系统放大扩束后，以直径为10毫米左右的光束射向接收靶，光束在相当长的距离内几乎保持不变。〈图1〉接收靶将光束的位置经过光电转换元件转换成电号输出。

242/v.1(2)



〈图1〉

接收靶是由一块四角反射锥体及对应的四片硒光电池组成〈见图2-a〉或由平凸型四象限硅光电池组成〈见图2-b〉（现在均采用平凸型硅光电池）。



〈图2〉

当激光束照射在四角反射锥体表凸角就反射到在四个位置上布置的四块硒光电池上。如果光束中心和反射锥尖重合，那么两两相对的四块硒光电池接受的是同样大小能量的激光，其输出差值为零，起了对中的作用，表示此时接收靶的中心刚好在激光束的中心位置。如果接收靶的位置在X轴方向或Y轴方向有所偏离，则位于X轴方向的或Y轴方向的两块硒光电池接收到不同能量的

·Z·

激光，其输出差值将不等于零，或为正值或为负值，这就意味着此时激光靶相对激光束中心发生了或左或右，或上或下的偏离，然后只要根据偏离的方向和数值，将目标连同接收靶调查位置，直至X轴方向和Y轴方向输出均为零，即表示位置已调查到与激光束重合。

所以激光准直仪能够很方便地应用于大型机床床身和导轨的平直度和平行度等测量和调查，它比一般光学准直仪具有距离长，精度高和更为直观等优点，目前已被广泛应用于机床制造业，电力系统安装，造船及高层建筑的电梯安装等。

西北电力建设局自1981年起先后在秦岭电厂二期1#机(20万千瓦)和连城电厂2#机(10万千瓦)运用激光准直技术安装汽轮机本体，对低压缸就位，隔板找正，轴系标高复测和汽缸垂弧变动等进行了测量，并与原来传统的测量手段作了对比。秦岭二期1#机轴系安装时，采用钢丝、激光和水准仪检测轴承座标高，测量如附表。激光准直方法所测得的数据与水准仪方法很接近，比钢丝法要精确得多。

附表

<测量点为各轴承油 高 mm>

测量点 测量手段	4	3	2	假轴	1	备 注
激光准直法	0	1.55	4.07	5.5	79	1#点标高超出仪口量程
水准仪法	0	1.50	5.0		10.5	目 测
钢丝法	0	1.40	3.57	5.18	10.48	

连城2#机低压缸隔板找正(共八级隔板)激光测量值与转动子实测数值相比，X方向相差均在0.05毫米左右，Y方向相差0.07毫米左右；高压缸共十四级隔板，X方向相差为0.03毫米左右，Y方向相差0.10毫米。而连城1#机采用假轴找正，假轴测

测零值与真转子测零值比较，最大相差达 0.4~0.5 毫米。

结论是应用激光准直技术安装汽轮机本体是可行的，其主要优越性有：

1、测零精度高。准确性高于其他“拉钢丝”和“假测”等测零工艺；

2、由于激光具有方向性好、单色、高强度等优点，可以在较长距离提供准直中心，测零的同时可进行调直，工艺衔接不受影响，方便施工，为安装多缸大型机组创造了良好的条件。

3、满足电力部颁布《施工及验收技术规范》及制造厂要求的有关技术标准，能够保证工程质量。

4、测零方法简便，数据反映直观迅速。秦岭 1# 机组在空缸试机时，在测零汽缸垂弧变动零的同时，分别在中低压缸的轴承位置上放置定心口进行监视，观察缸体变化情况，通过一次机缸，就测得汽缸垂弧变动零和分析出各轴瓦的升降零。

5、与旧工艺相比较，不但减轻了施工人员的劳动强度，而且缩短了安装工期，提高了工效，连城 2# 机的高压缸和低压缸隔板找正，直接采用激光准直技术，其工期比工地计划提前了十天，比原来 1# 机缩短了 2/3 的时间。华东电力建设局的统计中，对国产大型汽轮机安装中，30 万千瓦汽轮机，用激光法作轴系找正工效比下颁定元提高 2.7 倍，隔板及汽封套找正提高 4.7 倍。

激光准直测零以激光作为空间基准直线，它必须满足：

(一) 要求激光的在光轴处为中心位置，其两边对中心的亮度分布呈点对称，且要求该中心所形成的轨迹是一条直线。

工作在基横模 (TEM₀₀) 的氦氖激光因其光束截面的光强呈高斯分布，光强对于光束中心对称分布，它发射出一束肉眼可见的红光，所以可以被用来作为参考基准直线。

(二) 随着测零距离的增加，尽管激光具有很好的方向性，

但激光在谐振腔的出口处由于衍射而将产生激光束发散的现象，使激光亮度分布发生变化，影响测量的灵敏度。

衍射角 $\Delta\theta$ 可用光波波长 λ 和光束直径 D 的关系式表示：

$$\Delta\theta = 2.44 \frac{\lambda}{D}$$

由关系式可知，当光束直径 D 越大，其发散角度越小。因此选择适当的光学透镜系统将激光束扩展变宽，可以提高接收靶的测量灵敏度。

(三) 激光光流的稳定性。由于激光放电极的发热，周围温度的影响及机械强度的不足等原因，常会引起激光束的漂移，它将直接影响测量精度的提高。

对于一般光学准直仪，其测量长度较短，通常在几米之内，光束的漂移不明显，但激光准直仪常利用激光的特性，测量距离在数十米直至数百米，对于这样的测量距离，光束的微小漂移，将导致到达接收靶的仪器偏离很大，测量就不准确。

本课题是配合电力系统 20 万千瓦双水内冷汽轮发电机轴系安装找正新工艺，对激光准直系统激光束稳定的影响因素和改进措施作如下探讨和研究。

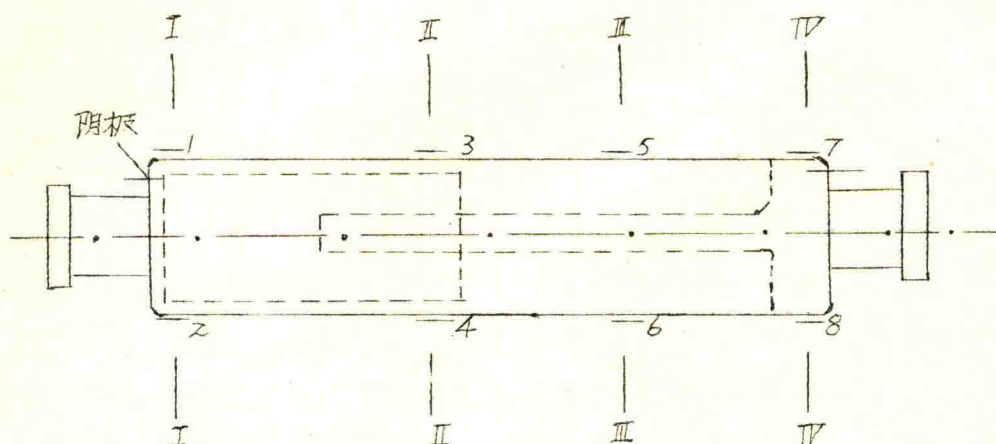
二、激光准直系统影响激光束稳定的因素。

激光极在点燃过程中是一个热流，它的阴极、阳极和毛细极各部位温度各不相同，它将导致谐振腔反射镜产生相对位置的变动，使激光束产生位移。

1、激光准直系统温度场的分布及其测定。

激光准直系统包括激光极和准直外套两部分。上海第二光学仪器厂制造的激光准直仪，激光极是安装在准直外套中的。激光极不仅本身产生热变形，而且由于热传导，使准直外套也发生热变形。激光准直系统发射出来的激光束的漂移将是这两种影响因素

的随机组合。我们对 250 毫米 1 毫瓦的氦氖气体激光管作温度实测试验，各测温点布置如图 3 所示。



<图 3>

图 4 为激光管各点温升曲线，从图中曲线可看到以下几点：

激光管本身的热平衡，一般经过予热 30 钟左右就趋于稳定。

激光管分四个截面位置，每个截面在上、下方，各布置一个测温点，由曲线组中可看出每一截面上、下两点的温度是不相等的。

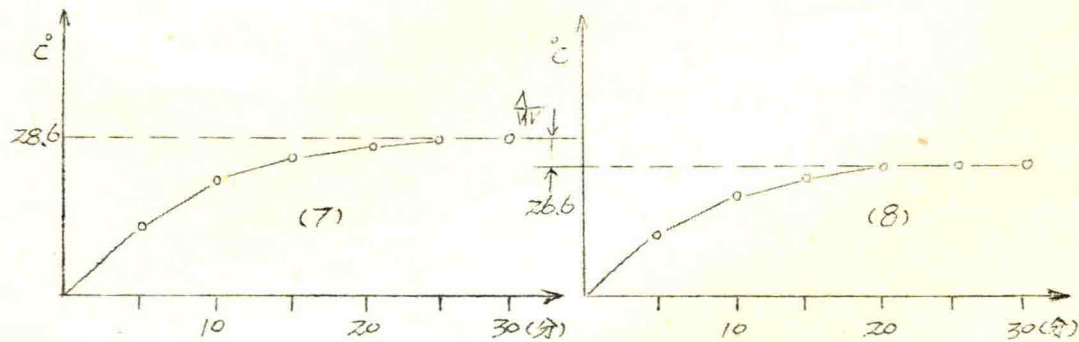
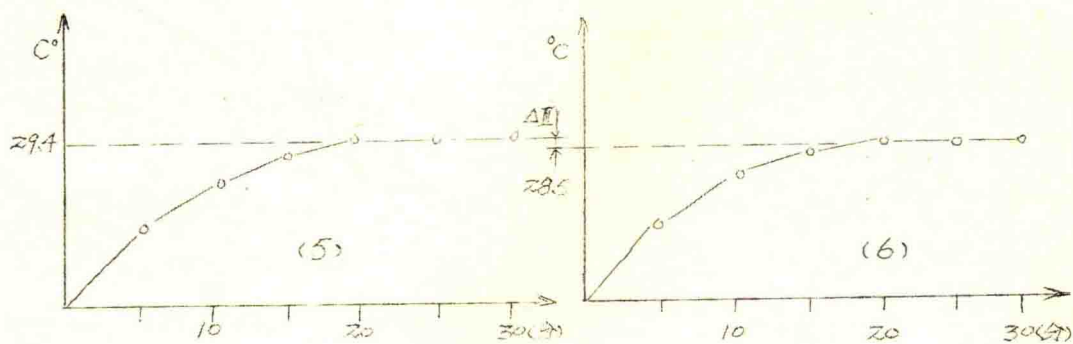
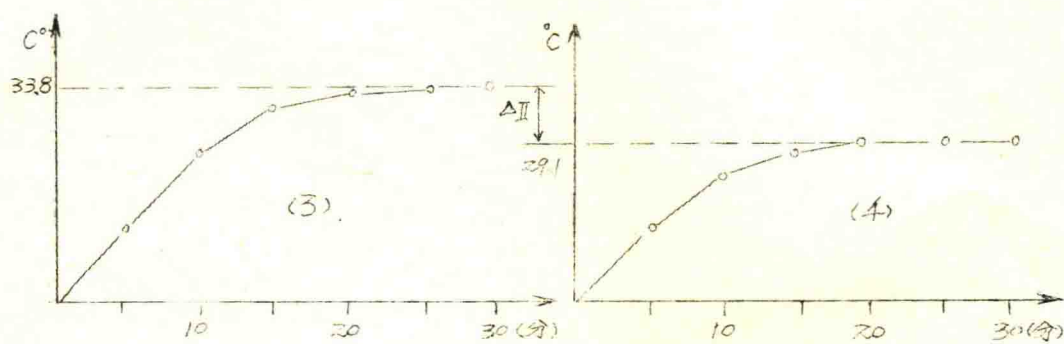
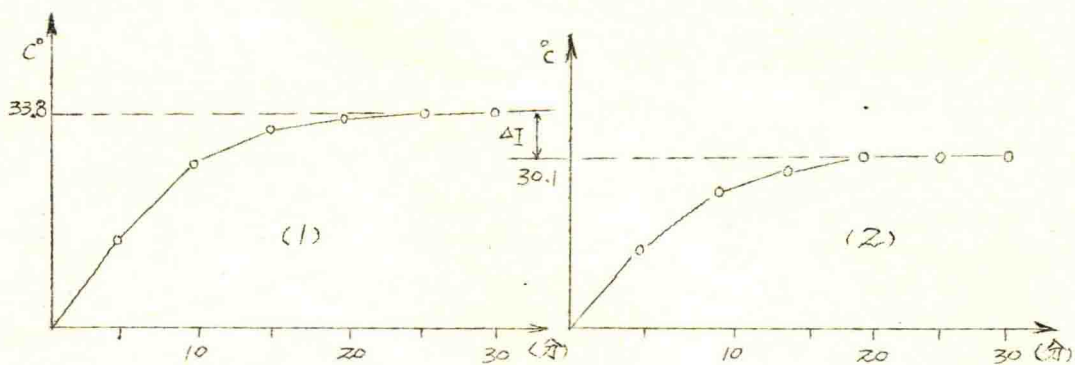
截面 I $\Delta I = 33.8^{\circ}\text{C} - 30.1^{\circ}\text{C} = 3.7^{\circ}\text{C}$

II $\Delta II = 33.8^{\circ}\text{C} - 29.1^{\circ}\text{C} = 4.7^{\circ}\text{C}$

III $\Delta III = 29.4^{\circ}\text{C} - 28.5^{\circ}\text{C} = 0.9^{\circ}\text{C}$

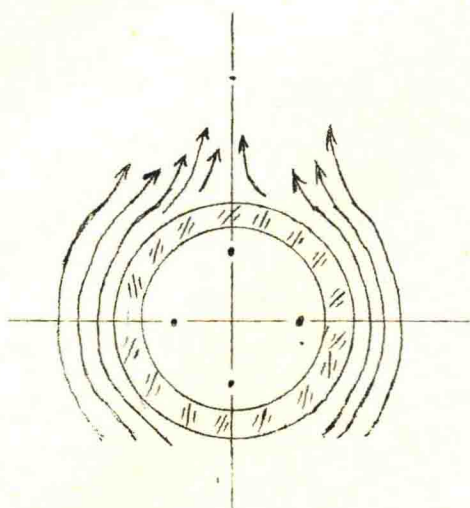
IV $\Delta IV = 28.6^{\circ}\text{C} - 26.6^{\circ}\text{C} = 2^{\circ}\text{C}$

几支激光管所测定的温度几乎都有这个规律，一是同一截面上、下两点温度不等，同时各截面上温度不同，在阴极下位温度高，沿着激光管轴线有温度梯度。



<圖4>

造成同一截面上的上、下两点温度不均匀的主要原因是热对流所引起。如查(5)所示。它导致激光管的上缘比下缘的温度

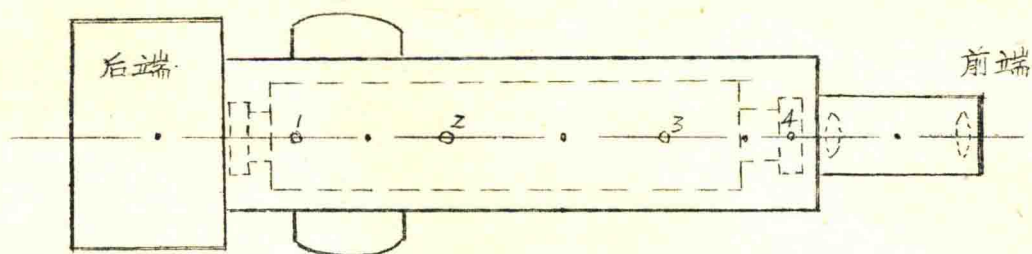


<图5>

高，将引起激光管沿纵向产生两端向下弯曲的趋势，但另一方面由于各截面的上、下点温差相等，所以激光管轴线实际弯曲变形将更复杂和不规则的。此外各截面的温度分布不均，使激光管各截面的受热膨胀变形也是不规则的，因此激光管的变形既有纵向也包含有横向变形。

准直套是一钢制套筒，前端装有光学透镜系统，套筒外圆是金属制球型支承，激光管安装在准直套内，位于套的偏后部位。上述对激光管各点温度的测定，只是证实了作为热源的激光管本身，它的各点温度分布不均，变形也不均。而实际工作时，激光管在准直套中，由于散热条件的限制，激光管散发的热量以幅射、传导和对流的形式，传递给准直套，直到在新的条件下的热平衡为止。

我们对准直套外侧布置测温点，如查6所示。当时室温 $t_0 = 16.7^\circ\text{C}$ ，激光准直系统预热2小时，连续采样11小时，采用半导体点温计读数(后来的一些试验改为温差热电偶与检流计，测温



<图6>

精度和灵敏度大为提高), 实测数据如下:

截面 I $T_1 = 22.5^\circ\text{C}$

II $T_2 = 23^\circ\text{C}$

III $T_3 = 22.7^\circ\text{C}$

IV $T_4 = 22^\circ\text{C}$

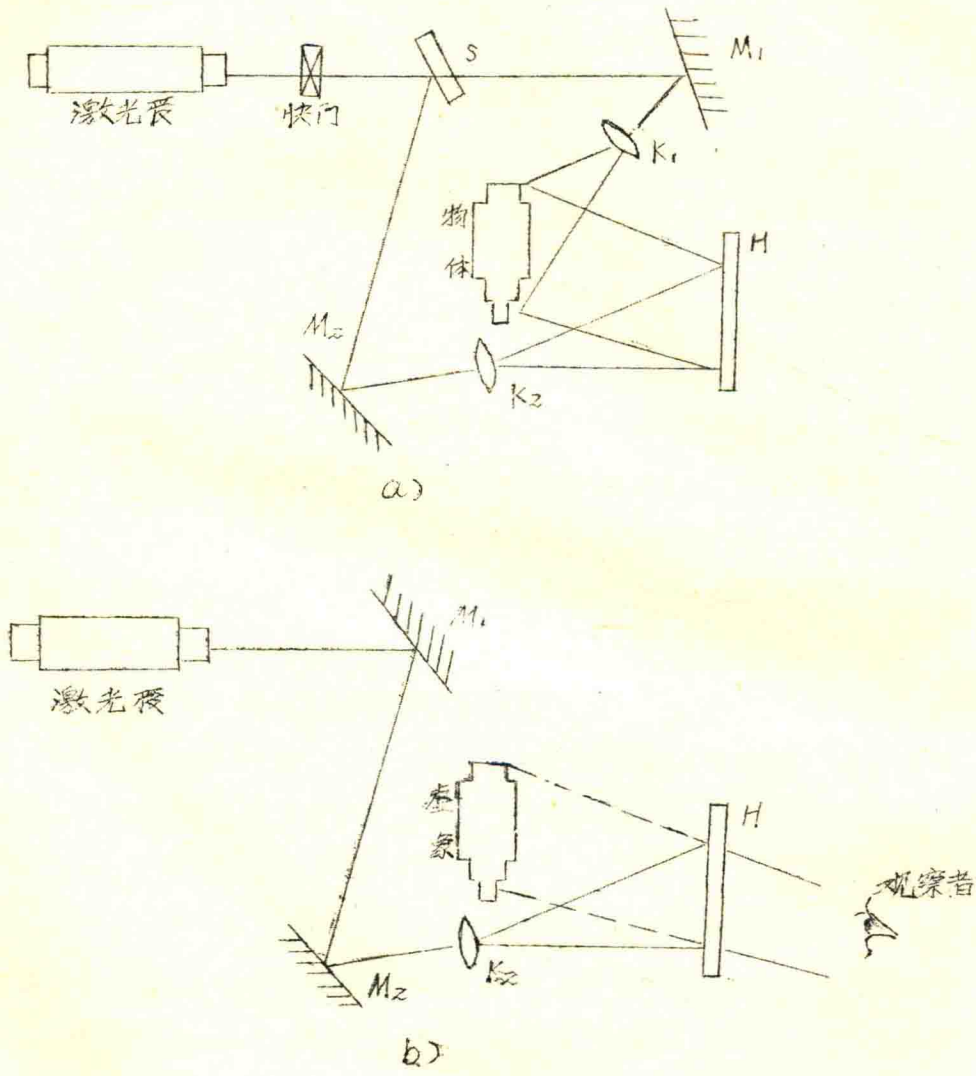
从数据上可看出, 激光管放入准直套后, 作为准直系统的一个整体, 它的热平衡条件变了, 热平衡的温度也不同於激光管单独测时的温度, 但有一点是相似的, 即在靠近激光管的阴极的准直管的部位, 温度要高于其它各点, 同时准直管的各个截面温度也是不一样的, 所以准直套的受热变形情况也是复杂的。

此外, 对准直套的预热时间的测试表明, 在开机预热一小时半以后, 激光束的漂移才趋稳定, 一般选择预热二小时作为记录数据的依据。显然, 激光管的预热稳定和准直套的预热稳定是不相同的。

2. 激光准直系统热变形的激光全息摄形分析。

激光管, 光学透镜组和准直套构成激光准直系统, 激光管是热源, 在长时间的点燃过程中不断地将热量传给准直套和光学透镜系统, 准直套是金属的, 在散热过程中, 除了将热量传导给底座以外, 本身在空气中又有一个热对流的问题, 实测表明, 它的各个截面的上、下两点温度不等, 而且各个截面的温度也不等。

为了进一步模拟激光准直系统的热变形对激光光束漂移的影响，采用激光全息干涉测量技术以二次曝光法对激光准直系统作了全息摄影分析。在该系统刚点燃时（即处于系统冷态时）作第一次曝光，预热2.5小时后再作第二次曝光。激光全息摄影的光路如图7所示：

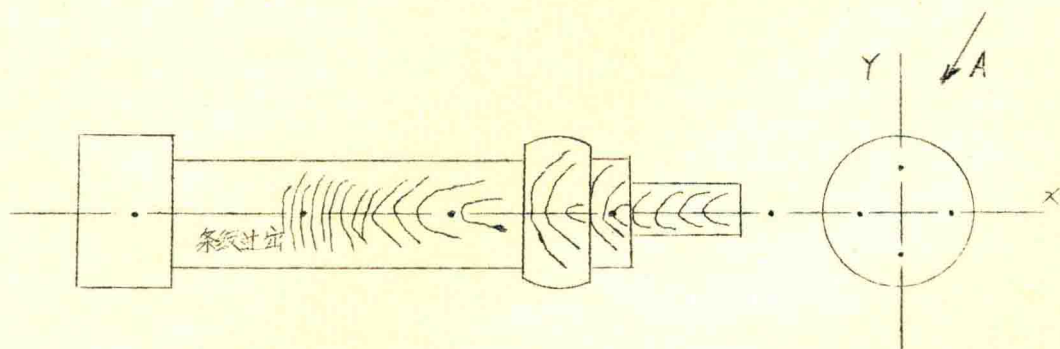


〈图7〉

图中 a) 为全息摄影时的光路，激光源发出的激光束，通过曝光用的快门后，经分光镜 S 分成两束光，通过 S 的一束光称为物光束，经反射镜 M_1 反射和扩束镜 K_1 扩束照射在物体上，再经物体漫反射到全息感光干版 H_1 上。由 S 反射的另一束光称为参考光束，经反射镜 M_2 反射和扩束镜 K_2 扩束直接照射到感光干版 H_1 上，这两束光在全息干版上发生干涉，以干涉条纹的形式记录在感光乳胶上。这样曝光后的干版经显形、定形后获得全息底版，它记录了物体光波的全部信息，即物体光波的振幅和位相。以后只要将全息底版置于原来记录时的光路中，并保持原位置，当用参考光束按原记录时的角度去照射时，就会看到在干版后面原来安放物体的位置呈现一个和原物体一样并具有立体感的虚象。再现光路如图中 b) 所示。

采用二次曝光法，它同时记录了物体变形前和变形后两种状态的信息。由于物体变形前后两束光波存在光程差，它们在空间就产生干涉。所以在全息底版再现时，在物体虚象上同时出现黑白相间的干涉条纹。从干涉条纹的形状、疏密及方向即能判别物体变形的情况。

对激光准直系统所摄制的全息图如图 8 所示。感光干版放置在物体上方 A 方向。从全息图的干涉条纹的弯曲及条纹的疏密不



<图 8>

一、可以证实准直系统产生热变形，热变形主要是弯曲形式出现，並以Y方向的变形为主。干涉条纹过密的下位（即变形大的下位）正是作为热沉的激光管的部位，从条纹偏密及条纹曲率半径增大分析，该下位受热膨胀，沿轴向同时存在伸长变形和弯曲变形，並且是伸长变形佔的比例为多。

三、减少激光束漂移，提高准直精度的措施。

1、隔离热沉，阻止热对流，是制止激光束起始漂移的根本途径：

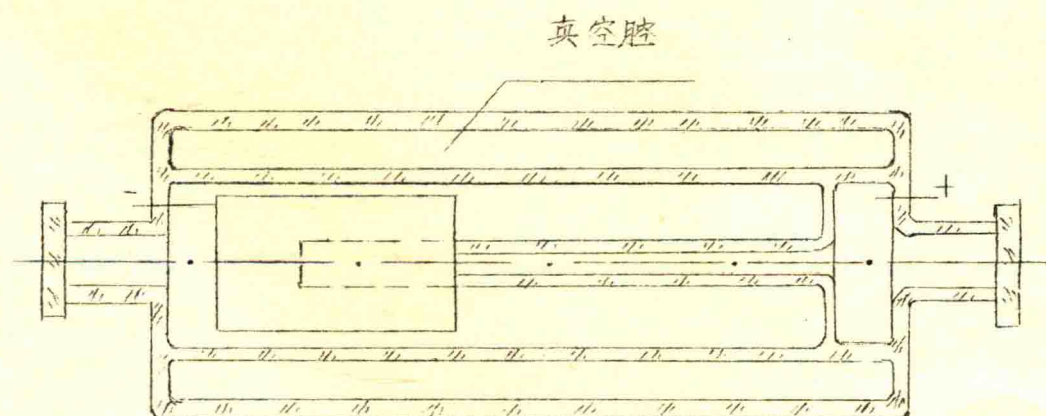
激光管作为热沉，它不仅本身产生热变形，也引起准直系统产生热变形，从而导致激光束经过光学透镜系统后发生漂移的根本症结所在，所以它的改进措施也必须从解决热沉着手。

美国专利 3626323 ——激光准直系的热稳定装置——提示了一种减少激光管的热管传到外套的新的热管存储和隔热装置，以实现激光束的稳定。该专利是在激光管周围充填绝热材料，绝热材料外面是一层导热材料，绝热材料选用颗粒状氧化镁结晶，它具有高的热容量和比较低的传热率。这种材料被激光管的热管加热转化为氢氧化镁，又通过外面导热层把热管散去而冷却，使氢氧化镁又转化为氧化镁。这样在绝热层内外形成一个温度梯度，使激光管保持在一定的工作温度上，又使外套与周围空间保持相近的温度，使激光束的漂移大为减小。

对于上述美国专利，我们曾作过试验，由于国内缺乏颗粒状氧化镁结晶，改用粉末状氧化镁，效果并不明显，更主要的是这种方法在激光管的两端仍有热管传递，导致准直管内腔的热对流而产生变形。

为了从根本上解决激光管热沉的影响，我们提示了隔离热沉，阻止热对流的方法，即将激光管置于真空腔内，阻止激光管热管的自由对流运动，使激光管处于均匀温度场中，经过一段时

间予热后将在平衡温度状态下保持变形稳定。激光段的热号在真空腔中由于没有自由对流运动，因此将几乎不付得到准直套上，从而保证了整个系统的稳定。



〈图9〉

图9所示为隔离热流，具有真空外套的新型激光管的示意图。它是在原来内腔或氦氖激光管的外层，再加上真空腔，以实现阻止空气对流运动的目的。该方案提示后得到华东电力建设局的大力支持，並委托上海玻璃制品厂研制，但因石英玻璃三层封接在技术上有一定困难及试制经费等问题，该工作不能进行下去，可望在今后具备一定条件后是能试制成功的。

2. 激光准直观测方法：

根据一系列试验证实，影响激光束漂移的主要原因除了上述激光准直系统热变形影响以外，由于观测距离很长，在激光束所经路程中的气流、尘埃及气团等因素也是影响因素之一，作为现场使用的一种客观环境条件，往往是不能轻易改变的。尤其如发电厂工地等环境条件很差，温差变化大，尘埃、气团等较多，尽管可以采用一些诸如强迫吹风破坏气团或尽可能使环境安静等措施，但对于施工现场是很有限的。

技术测量中经常采用间接测量法来达到提高测量精度的目的，为此，设计了双靶测量法。它的工作原理如盒10所示：根据被测物的最大距离，在其终端设置一个基准接收靶，它必须安装在稳定可靠的位置上，在激光投照后，将接收靶调整，随后定时记录漂移量，作记录表，供修正参考用。此基准接收靶在整个测量过程中不再移动，作监视光束漂移用。取第二接收靶作为测量接收靶，它随着测量位置可以沿激光束方向移动，当被测物位置的接收靶调整到零位时，即表示该测量位置已初步对准激光束轴线。但由于激光束在实测过程中，由于前述的种种原因，是有微小漂移的，而它的漂移意味着作为基准轴线的变动，所以此时再观察第一接收靶，如果仍在零位，表示激光束十分稳定，如果有漂移，只要测出此时激光束相对原来零位的漂移量，根据盒表，按相似三角形原理予以修正，将第二接收靶按相应修正量作补偿调整，就能保证各测量位置相对基准的准确对中，这是一种对测量距离的“即时监督”修正的方法，简单可行。从多次试验数据进行分析，激光束相对中心的偏离量在一定时间间隔内阶跃都不大，而且突变的可能性更小，因此以某一时刻激光束相对初始位置两点联线作相似三角形计算修正量是完全可以的。

$$\text{修正量 } \Delta n = \frac{l_n}{L} \cdot \Delta_{\text{基准}}$$

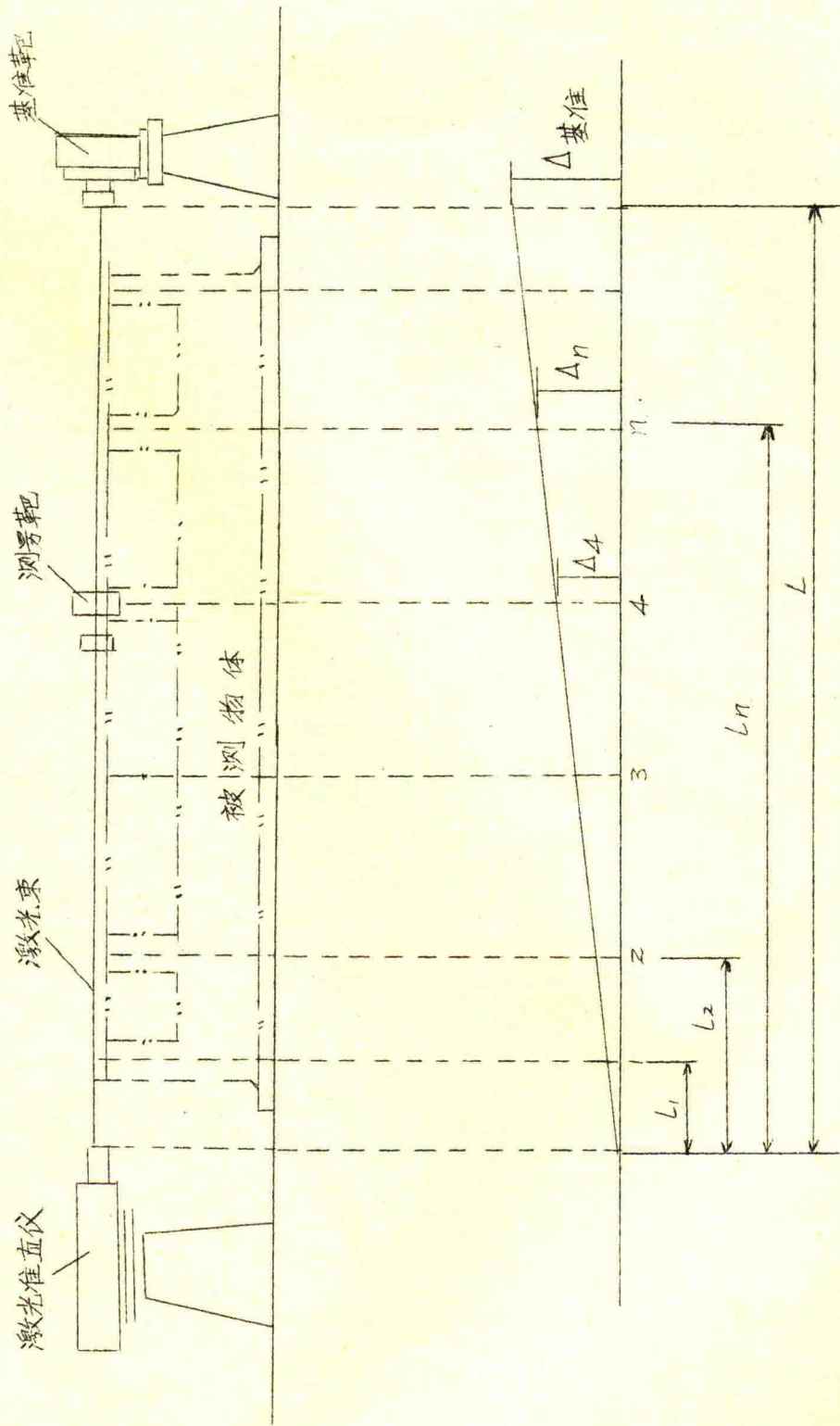
式中 L —— 激光准直系统到基准接收靶的距离；

$l_1, l_2, \dots, l_n$ —— 各被测位置到准直系统的距离；

Δn —— 各被测位置的修正量。

$\Delta_{\text{基准}}$ —— 某一时刻激光束相对初始位置的基准接收靶子的偏移量。

从上式可看出，激光束漂移的误差在各测量位置的影响，通过修正，误差是缩小的，对测量精度的提高是有利的。现场实测



< 图 10 >

试验，也证实该方法是切实可行的。

本课题与华东电力建设局，西北电力建设局协作，运用激光准直技术在电力系统汽轮机——发电机组轴线找正中，作为科研成果，已于1983年3月在上海正式鉴定通过，列为电力系统安装技术的一项新工艺推广应用。