

光学跟踪、测量工程的发展与方向

史 济 成

一、发展概况

长春光机所于1958年研制成功大地测量经纬仪地形一号、TT26,当时在国内是首次研制,填补了空白。在此基础上,开始了电影经纬仪的研究工作。随着火箭等尖端技术发展的需要,1963年开始独立研制大型电影经纬仪,并在1965年取得成功,不仅为国家提供了急需的大型光学跟踪仪器,而且显著地提高了我所从事光机电综合的大型光学工程的能力。从那时到现在,我所研制了一系列大型光学工程,诸如大、中、小型电影经纬仪,跟踪望远镜,动态光电测角系统及光电瞄准系统等。

十几年来,由于研究应用新技术、新方法,使这类光学工程不断发展。以电影经纬仪为例,十几年内已经更新了三代,正在研制第四代。第一代经纬仪在高性能摄影光学系统(复合消二级光谱,分辨角达到系统衍射极限的两倍左右,有数挡焦距可供人工选择,有自动调焦、调光系统)、精密轴系(垂直轴、水平轴轴系误差及与照准轴之间的三轴不垂直度均为 $2''$ 左右)、摄影机及高低、方位跟踪系统等方面,均取得了重大的进展,为以后几代的经纬仪打下了良好的基础。但测角系统使用光学度盘,分划值为 $36''$,可估读到 $7''\sim 10''$,事后处理由人工判读度盘像,因而自动化程度不高,测角精度较低,中误差 $\sigma \leq 20''$ 。同时跟踪方式较少,跟踪误差较大($8'$),跟踪系统和摄影控制电路使用电子管电路。

第二代经纬仪的重大改进是以数字化的轴角编码器代替度盘,因而可实时输出仪器的转角数据,与外部大系统计算机接口,并以点阵形式记录在底片上,由半自动判读仪的光电装置自动读数,同时也可由计算机进行数字引导,提高了仪器自动化的程度和跟踪测角的性能。仪器的电路也晶体管化。

第三代经纬仪的特点是应用了现代光学的许多新技术,采用脉冲激光测距使经纬仪实现单站测量,否则至少需两台经纬仪进行交会测量。采用红外、电视跟踪增加了自动跟踪方式。同时跟踪系统由过去的伺服马达——齿轮传动改为力矩马达——测速机同轴式直接驱动,大大改善了传动刚度,机械谐振频率由10赫芝提高到50赫芝以上,系统的带宽也随之改善。在红外、电视跟踪方式中并采用带低通滤波器的速度正反馈,以补偿速度滞后误差。这些都提高了跟踪性能,在跟踪角速度为 $20^\circ/s$ 、角加速度为 $7^\circ/s^2$ 时,数字引导、红外、电视三种自动跟踪方式的跟踪误差均优于 $3'$ 。人工跟踪部分也由过去的两个瞄准员分别作高低、方位转动的手轮式半自动操作,改为一个瞄准员作单杆式半自动操作。此外,轴系采用预载的精密轴承及不锈钢材料,更适应于在恶劣环境下长期使用,保持稳定可靠,编码器也由过去的18位提高到19位,提高了测角精度,中误差 $\sigma < 10''$ 。相应的半自动判读仪也增加了十字丝原点的自动测量。

由于初次应用光学新技术,激光测距的精度还不高,中误差 $\sigma \approx 2$ 米并要事后修正。电

视测量系统虽可实时输出脱靶量，但由于摄像管畸变较大（5%），也没有解决在复杂背景下的目标识别以及跟踪大目标时能测量其投影质心，因而在技术上还没有成熟到足以代替事后人工判读底片的程度。电路普遍采用晶体管厚膜组件，可靠性较差。

正在研制的第四代经纬仪，其主要标志是采用微处理机作为信息处理的重要手段。由于用微处理机进行实时的计算控制、逻辑判断、数据处理和信息处理，将极大地改善仪器整机及各单元技术的性能，实现由一般硬线电路难以解决的指标。例如：经纬仪三轴不垂直度造成的测角误差，激光测距因气压、温度及俯仰角影响光速造成的误差，激光角跟踪采用四像限探测器造成的非线性误差，电视测量的畸变误差等系统误差，均可由微处理机进行实时修正；电视跟踪测量可用微处理机解决目标识别及求目标质心问题；跟踪系统用微处理机实时选择最佳的跟踪方式及校正；激光角跟踪用微处理机的运算代替合差比幅电路等。此外，第四代经纬仪还将采用激光跟踪测量的新技术、高于19位的编码器、高于40帧/秒的间隙式摄影机、普遍采用集成电路等。

除了经纬仪之外，也研制了跟踪望远镜，采用转镜补偿式摄影机，摄影频率为800帧/秒，主要用于对飞行目标的姿态及飞行中发生的事件进行摄影测量。

也研制了动态光电测角系统，在该系统中发展了一种新的测角方法，即以光学自准直仪、准直仪为基型，通过匀速转动的光学四面体，将角度量转换为时间量，再以频率基准加以计量，以数字量实时输出，充分利用了频率基准相对精度高的优越性，使方案具有先进性，不仅在国内，而且在国外也还未见报道此种仪器。该系统测角分辨率为 $0.6''$ ，中误差 $\sigma < 3''$ ，采样频率为20次/秒（可达100次/秒）。

研制了光电瞄准系统，用于瞄准确定飞行体的初始方位。

总之，经过近二十年的工作，我所从事的光学跟踪、测量工程在性能上已接近或部分达到世界先进水平，有的工作具有我国自己的特色。

二、总体研究

光学跟踪、测量工程的发展，是建立在光机电各部分的基础之上，诸如光学设计、光学材料、光学镀膜、精密机械材料、精密齿轮及轴承、编码器、光电器件、精密光学及机械加工工艺、大型光学工程装校工艺及检测等，这方面的工作本文不分别介绍。这里侧重说明随着工程研制发展起来的总体研究工作。

现代化的光学工程总是构造复杂，涉及光机电许多领域，研制周期较长。工程总体研究就是要解决将光机电有机地结合（而不是机械地组合），以制成能达到使用指标并且具有先进水平的仪器。这包括两个方面的工作。

1. 总体方案

这是从总的技术途径上进行分析论证，包括首先要进行仪器运用研究，深刻了解仪器在使用中应发挥的作用和应具有的特色，以确保研制的工程基本上不走弯路，最终能取得一次性的成功，它是工程研制的关键。

我所在首次独立研制大型经纬仪中，虽然在提出使用指标一方及我所研制一方均缺乏经验，但由于充分进行了仪器运用分析及总体方案的论证，正确地综合并发展了当时我所各方面的技术基础，使该项工程从无到有很快突破，取得一次性的成功。

例如动态光电测角系统，除了要进行多组动态三自由度角的实时测量外，而且作为基准

传递环节要求仪器本身的测量基准不变，于是确定了以光学机械的可靠性与以频率基准测量的先进性相结合的总技术途径，确保了工程取得一次性的成功。

又如在大测量控制系统中多种精密测量设备的座标系对准工作，在考察了雷达、经纬仪、惯导平台等实质上均是以光学基准作为原始基准之后，确定了光学对准的方案，在实践中证明简便可行，对准精度高，取得了一次性的成功，与国外采用的复杂而误差较大的同类方法相比具有我国自己的特色。

相反，总体研究的不充分，常导致仪器的性能不理想，遗留较多的问题，有的甚至不能取得成功。

2. 指标分析

这是对使用指标进行分析论证，确定仪器的主要构造参数。

光学作用距离的分析是一个重要方面。光学摄影作用距离的极限，是在底片上目标像相对背景黑度（根据底片特性通常保持在0.6~0.7以最有利于发现目标点像）的对比度，下降到人眼观察底片时能感觉的灵敏阈，该值与目标像的大小有关。对比度下降受许多因素的影响，例如从远距离目标本身发射及反射的光能，由于大气吸收、散射、抖动造成下降及扩散，光学系统衍射、像差造成扩散，底片的扩散及曝光时仪器的相对角位移造成的扩散等，再结合考虑目标像的大小，由此便可确定摄影光学系统的孔径、焦距等主要结构参数及质量，光学材料质量，加工质量，摄影条件及跟踪平稳性等指标。

像激光测距一类光电系统，其作用距离的极限，是光电探测放大电路的信噪比，下降到回波接收概率及规定的仪器误差所需的最小值，同时信号幅值应高于半最大值电路或计数器的触发阈。同样受大气传输中光能的下降与扩散，合作目标的几何形状误差及衍射造成的扩散，背景噪声，探测器及放大器尤其是前置放大器的噪声等影响，由此便可确定激光器发射功率、发射弧度、合作目标有效面积及质量、接收系统孔径、探测器类型、放大器增益及噪声等构造参数。

误差分析是仪器一个普遍性的重要问题。经纬仪主要用于测角，其测角总误差主要取决于轴系误差、三轴不垂直度及编码器的误差，也受摄影物镜系统的畸变差和焦距误差，人工判读误差等的影响。

光电动态测角系统的主要误差源是光学系统角放大率误差，畸变误差，带动光学四面体转动的电机转速误差，由于探测器灵敏度变化、光源亮度变化造成光电转换的时间误差，温度漂移引起的误差及测量基准安装对准误差等。

为了减少误差源的影响，在仪器结构与电路中尽量运用“等误差影响”的原则，使误差源对测量基准（或测量零位）与测量对象（或测量值）的影响相同而自行抵消。度盘或编码器用对径测量，以消除安装偏心、轴系晃动带来的误差，十字丝光路经过主摄影物镜系统，以消除在不同俯仰角及有加速度时主镜等角位移及镜筒变形带来的误差。在光电测角自准直仪中，使零位反射镜与被测反射镜反射的光线均经过同一光学系统，仅在非测角方向分开以分别为光电倍增管接收，这样光源亮度的变动、光学机械元件的角位移等由于对零位值及被测值的误差影响相等而自行抵消。电路中以晶体振荡器兼作驱动同步电机（带动光学多面体旋转）的信号源及测量时间间隔的频率基准，当晶振频率有漂移时，由于对电机转速及频率基准的误差影响相同而自行抵消。

各项误差的大小及影响均与构造参数有关。可以认为仪器的每个参数都是误差源，它们对仪器总误差的影响不同，可以从表达仪器工作物理过程的数学模式反映出来。这种数学模

式不仅反映仪器的主要工作原理，更需全面反映信息传递过程所有环节带来的误差。

从上面两种指标分析即可看出，仪器的主要构造参数，同时与多个使用指标有关，互相制约，关系复杂，必须用最优化设计方法，来确定作用距离为最远、误差为最小、跟踪性能为最好……的仪器构造参数。

三、今后的工作

尽管近二十年来我所的光学跟踪、测量工程发展很快，但也存在不少差距，需要在以下几点进一步努力，以满足国内更高的需求和赶上世界先进水平。

1. 实现全实时输出

迄今为止，经纬仪的精确测角，仍然是靠半自动判读仪对底片进行事后判读，处理的工作量很大。国外近几年发展起来的PATS激光雷达（以激光实时测距、测角及角跟踪）及全实时输出电视经纬仪已解决了这个问题，所以需进一步开展电视及激光跟踪测量的研究。

2. 应用微处理机

微处理机在光学工程中的应用是一个新的课题，国外在这方面发展很快，例如全实时电视经纬仪用了5个微处理机来改善仪器各方面的性能，我们在这方面起步较晚，急需迎头赶上。

3. 提高测角精度、作用距离和跟踪性能，考虑多用途

国外为了提高测角精度，已发展了21位、22位编码器及误差小于1"的精密轴系。作用距离近是光学跟踪仪器与雷达相比的一个明显弱点，美国的SUPER RADOT自动数字记录光学跟踪系统以大口径、长焦距的远摄物镜及硅增强靶摄像管，使作用距离在白天扩展到近千公里。国外用于卫星、月球激光测距的跟踪系统，跟踪误差小于几角秒（当然跟踪速度、加速度很小）。所以要根据具体情况，不断改进上述基本性能。

此外多用途的问题也需认真考虑，国外光学跟踪测量工程，往往既可用于测轨，也可测量目标的辐射特性等，以获取更多的信息，这是尖端武器发展日益复杂化的必然需要。另一方面，研制一项光学工程周期长达数年，成本昂贵，也要力求其主体或部分基本技术可作他用，使该项研究成果能作出更多的贡献。