

关于提高仪器总体设计水平的问题

唐 九 华

(中国科学院长春光学精密机械研究所)

提 要

光学仪器的总体设计是正在形成的一门课题。本文提出这方面的几个根本性问题: (1) 运用研究; (2) 指标分析; (3) 总体参数确定; (4) 各分系统任务的平衡和指标分配。在光学仪器中, 光学、机械、电学等各个环节在信息的传递和变换过程中的规律具有共同性, 可以用共同的数学方式来处理。采用系统工程和信息论的概念讨论这些带普遍性的问题, 有助于本课题的深入。本文还探讨了为将来用计算机进行总体设计所应准备的条件: 基础实验数据和数学模型问题。

现代光学仪器设计的理论指导依靠传统的应用光学已远远不够。这不仅是因为它往往牵涉到很多精密机械、电子学等技术, 而且日益复杂的系统使全局性问题显得更为突出。总体设计从整个设计工作中逐渐形成重要的一个分支已将近二十年, 但一直缺乏这方面专门的文章将大量的实际工作上升到理论。本文试图引入系统工程和信息论的概念把总体设计中若干带普遍性的问题提出来, 探讨再推进一步的可能性。

一、运用研究

运用研究是指研究仪器在整个大测量控制系统中所处的地位和所起的作用, 以及这个大系统对仪器的要求。因为这个大系统是由我们所要研制的仪器再加上其它的设备组成的, 所以往往把对它的研究叫做大总体, 以区别于一个仪器的总体。

使用单台仪器, 可对仪器的系统误差进行测定, 给予修正; 随机误差用多次数据平滑。用跟踪经纬仪测量弹道, 至少要有两台交会才能得到数据。这就有个布站位置和基线长度以及方向问题, 要使得交会角合适, 交会误差才能小。进一步的问题是如果由于电子元件的可靠性差, 整机的可靠性上不去, 或由于工艺水平的限制, 整机的精度上不去, 两台交会不能满足测量系统的要求, 那就可考虑用三台经纬仪交会, 这样在不提高仪器的可靠性指标的条件下可以提高系统的可靠性。同时由于三台交会得到的数据比需要的多了一倍, 可以用平差方法提高测量精度。可见通过运用研究不但可以使本来在技术上暂时达不到的变为比较现实, 还可以缩短研制周期, 并且在经济上也可能会更合理一些。当然, 仪器的台数增加到一定数量以后, 可靠性和精度再提高就很有有限, 于是经济上就不再合理了。像这样一类情况, 例如三台或四台交会时, 布站和基线问题比两台要复杂, 这样就给运用研究提出了新的课题。有时缺乏大总体概念, 只看到仪器和被测物体, 而没有把它们作为大系统中的环节来考虑。以千分表测量某物体的高度为例(图1), 在这种情况下, 千分表本身总是受注意的, 但从顶尖孔、顶尖座、平台到表架这一路则有时易被忽视。这里信息流程是一个闭合的回路, 在这

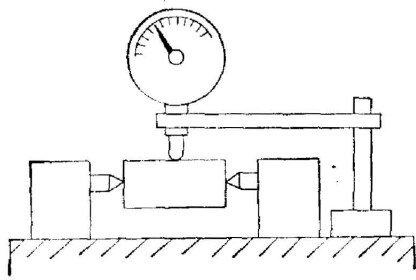


图 1

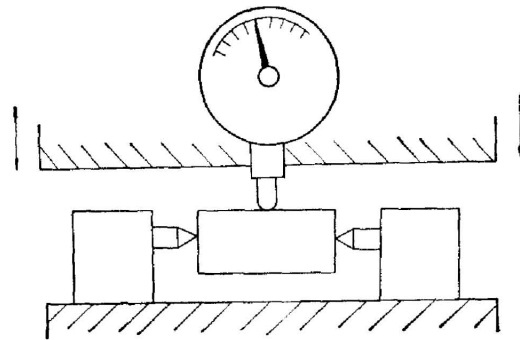


图 2

个回路中,任何一个环节的精度和稳定度都应不低于千分表的精度。

我们曾接受一项光学仪器的研制任务,提出任务单位未对大系统的总体做认真的运用研究,不认为整个大系统的信息流程是闭合的,于是把光学测控仪器从大系统中割裂开来,孤立地提出对仪器的要求,就好像千分表座与平台没有联系似的。实际上表座远离平台,工作时不免有相对位移(图 2),表读数的零位也跟着发生变化。为了解决这个问题,需要有基准位置传递的措施,并把相对位移测出或加以补偿。后来按照这个提议把大系统中有关的地方作了修改。应该承认,如果没有理论上的指导,不把信息流程回路中的各环节找出,使之相互联系,而单凭直观是很容易把那些相隔很远又无任何光线、电线或机构联系的环节之间的闭合工作忽略的。

开展运用研究,包括发现新的工作原理,可使测量精度逐步地甚至大幅度地提高。运用研究是一个重要而潜力又很大的领域,因而必须把它放在总体设计工作中一个应有的地位上,加强研究。这一点正像我国计算机行业中由于存在忽视软件的现象而必须加强软件研究的意思是一样的。

二、指标分析

这里指的是把仪器的使用指标转变为开展设计工作所需的技术指标。有些使用单位在提出设备的要求时常用战术-技术指标这个词,其实战术指标和技术指标并不是一回事。前者是仪器表现出来的使用性能,如野外光学仪器的作用距离,后者是仪器本身的主要构造参数,如口径和焦距。总体设计的一项工作就是要把前者转变为后者。

这项工作首先要建筑在大量实验数据的基础上。室内使用的计量仪器,它的总精度与仪器构造的主要参数之间的关系比较明显。指标转换包括一些几何学上的关系,也包括由实验提供的数据,如目视瞄准误差、光电瞄准误差、波长随气压温度的变化等等。光谱仪器的分辨率牵涉到多种物理变化过程和光电元件的特性等,这里面的关系就没有几何学那样直观。至于野外用仪器的作用距离问题就更复杂了。目标的光学特性有很大变化,照明光源也会发生变化,背景强弱和大气传输更是千差万别,而且包含瞬时起伏。探测器如果是光电器件,可以有信噪比的指标,如果是目视或照片,那末怎样算是看得见或看不见,需对很多

实验作统计分析。所以在国外为研究这类问题做过大量的实验,有的野外测试规模很大,成年累月积累数据;在实验室里对人眼、底片、光电探测器的特性也做了很多测定工作。

各种用途的仪器有各种不同性质的指标,对一种仪器也会有几项使用指标。指标分析工作有没有一些共同的规律性?开设实验课题按照什么样的设想?

第一方面,使用指标的限度:信息传递经各环节的损失降至可探测或有用的最低限度。

作用距离的限度:目标背景对比——大气(吸收、散射、抖动)——光学系统(衍射、像差)——底片(扩散)——人眼探测的对比度下限。

光谱仪器分辨率限度:谱线轮廓——色散元件(衍射)——光学系统(像差)——狭缝(光谱宽度)——记录器(惯性和扫描速度)——两条谱线之间对比度下限。

计量仪器各环节误差分布迭加时,分布宽度达到允许总误差范围的限度。

总之,光信息或坐标位置信息通过每一个环节(不论是天然的或人造的,还是光学、机械或电子的)都要受到损失,表现为空间(或频谱)位置不确定程度的增加和信号噪声(或背景)比的减弱。我们要研究其中的物理学机理,用实验方法测定它的分布形式,来检验为上述物理过程所建立的数学模型是否正确可用。各种分布的迭加可用数学卷积(convolution),只要这些过程都是不变线性的,所以传递函数概念的引进给处理指标分析问题提供了很有用的工具。

使用仪器就会不可避免地要损失一些信息量,但是我们之所以需要仪器是因为用了它比不用它可以取得更多的所需要的信息。这个更多的信息是怎样取得的,是第二方面的问题。

先以能量问题为例,一台发电机如直接供给一个阻抗很高的负载,那么电流就很小,发电机虽有大的功率也输送不到负载那里。因此就需要在发电机和负载之间插入一个变压器,把电压升高到与负载所需的电压相匹配,这样负载才能得到所需的功率。变压器设计需要三个起始数据:电源电压、负载电压和负载电流。这样就可以确定变压器的技术参数。

仪器总体设计遇到的课题与上述情况实质上是类似的。这里是:

信息源——仪器——接收器

信息源是要观察的目标,我们并不想去变动它(有时可做有意识的选择)。接收器一般是指人的眼睛,它的性能参数并不能随设计者的意志而改变;仪器中可包括一些过渡性的探测器如底片或光电器件等,但最后还是由人眼来观察的。设计者能做到的就是如何定出仪器的技术指标来满足使用指标,即取得所需信息量的要求。

例如需要从信息源即被观察目标中观察其细节张角小至 $5''$,就应调查了解接收器的参数,从人眼的分辨能力 $1'$ 定出仪器光学系统的放大倍率应为 $12\times$;从眼瞳尺寸定出光学系统的出瞳尺寸。这里必须注意到光学系统的设计也需要信息源和接收器的三个起始数据,与前面变压器的例子完全对应。所不同的是:电压 \times 电流=功率;光线张角(立体角) \times 瞳孔面积(以光波长为长度单位)=像元数。

在这里光学系统也起匹配作用。没有它则接收器的分辨率 $1'$ 太粗,把信息源中的 $5''$ 细节全部损失掉了。如果放大率过高,譬如用极高倍率的光学系统去看底片中的图象,那样并不能看到什么图象,看到的只是颗粒度,也就是我们所不需要的高频噪声。高倍率光学系统是通过高频分量的滤波器,低倍率光学系统是只通过低频分量的滤波器。我们需要什么样

频率的信号就应选用什么样的匹配滤波器。

所以指标分析工作——把使用指标变为技术指标，实质上是按照这样一个原则来进行的：在信息源与接收器之间插入一个正确的匹配器，使所需要的信息能最大量地通过。这是设计者可以发挥能动性的地方。

上面所述只是一个光学系统的匹配问题，并且只涉及量变和角度的放大。在一个复杂仪器中会有很多次的信号变换，例如光信号变为电信号，电信号通过各种处理，再由马达变为机械位移等等。这里负载信息的物理量还有质的变化。每次量的或质的变化都有个正确匹配的问题要解决，才能达到在最后的输出端有最大的信息量。

仪器作为一个匹配器，只是转换和传递信息，并不能改变接收器接收到信息的总量。放大率的提高可以提高角分辨能力，但是视场缩小了，像元的总数不变。仪器并不能使信息无中生有，这一概念有助于我们正确认识仪器与信息的关系、仪器与信息源以及接收器的关系。承认这种关系也就是应该把目标（信息源）和接收器的性能参数作为设计仪器的起始数据，再按使用指标和匹配原则来确定仪器的基本技术指标。这样就会促使我们去对目标和接收器的性能参数进行必要的实验测定、积累数据，使仪器设计建立在准确的客观基础上。

三、总体参数确定

一种仪器可以由几个使用性能指标变为好几个技术指标，从这些出发再去确定仪器构造中的各个主要参数。这里的问题是要寻找出各个主要构造参数之间的相互制约关系，以及它们与仪器总性能的关系，求得在一定工艺水平条件下仪器总性能为最良好。

如果只要求仪器的一个单项性能为最好，它牵涉到几个参数，这个关系是比较容易解决的。但是要求总性能最好就需要提出一个总的准则，或者用数学语言说，是要为仪器总性能与各主要构造参数的关系建立一个数学模型和一个最优化判据。

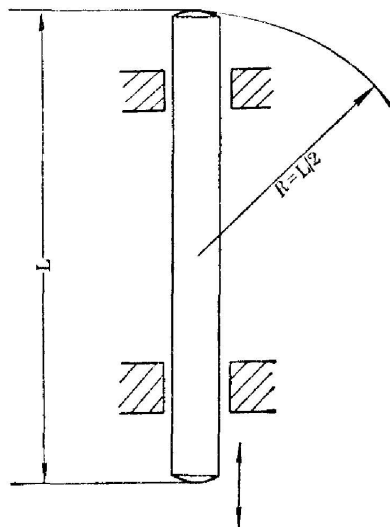


图 3

楚克尔曼在《精密机械》一书的前言里谈到当时的仪器制造业在发展新产品时主要依靠经验，需要建立精密仪器制造的理论，否则在改进仪器和培养设计人员等方面都很困难。作为建立这方面理论的努力，他在正文的开头下了定义：精密机械是用来以最小的误差变换和传递运动。

为了客观评价起见，我们假设有一台大型计算机能够阅读楚克尔曼写的那本书，然后叫计算机做一个自动设计课题：设计一种精密机械符合书里的规定。计算机算了一遍，回答说：“书中提供的那些齿轮、杠杆和弹簧等各种机构都算过了，它们在变换和传递运动时都有相当的误差，只有这么一个机构误差最小（图3）”。看来这种精密机械虽然最“理想”，但似乎找不到多大用处，而实际上应用的许多机构，误差却显著地大于此。

到六十年代初国外有一篇关于转镜式高速摄影机的文章，其中推导出一个公式：这种摄

影机单位时间内记录到底片上的像元数等于转镜的圆周速度(以光波长为长度单位)的四倍。众所周知,电子仪器和电讯设备的总性能一向是以单位时间内能通过或处理的信息量来衡量的。那篇文章也采用这个概念作为准则来衡量这种高速摄影机的性能,显然对我们是有启发性的。那么其它光学或机械仪器是否也可以采用这个准则?

以上述传递误差最小的机构作一对比,哪个准则更符合实际。按第2节中的匹配原则来考虑:人眼作为接收器发现机械位移的能力,要长期不致于疲劳,假定这个灵敏阈约为1毫米,在显示器上即以此为1格。如果放大机构的某一工艺水平为每级放大10倍,则误差为 $\pm 0.01\text{mm}$ (折合到输入端)。下面计算在不同匹配程度下得到的信息量 ΔI ,即人眼通过机构比不通过机构观察位移时不确定程度的减少量。

(1) 不用放大,就是图3中的一根推杆。杆下端触头行程为1mm时,上端显示行程相同,没有多得到任何一点信息 $\Delta I=0$ 。

(2) 用一级放大,触头行程1mm,显示数名义为10格;误差范围 $\pm 0.01\text{mm} \times 10$,为0.2格,远低于眼的灵敏阈。显示数10格有效, $\Delta I = \log 10 = 1$ 。

(3) 用二级放大,触头行程1mm,显示数名义为100格;误差范围 $\pm 0.011 \times 100$,为2.2格。 $\Delta I = \log 100 - \log 2.2 = 2 - 0.34 = 1.66$ 。

(4) 用三级放大,触头行程1mm,显示数名义为1000格;误差范围 $\pm 0.0111\text{mm} \times 1000$,为22.2格。 $\Delta I = \log 1000 - \log 22.2 = 3 - 1.35 = 1.65$ 。

上式中数字的含义是:

显示数名义位数(十进制)为 $\log 1000 = 3$ 位,就是通过匹配而增加的确定程度;

误差范围的位数为 $\log 22.2 = 1.35$ 位,是机构传递信息时带来的不确定程度;

有效位数为3位 $- 1.35$ 位 $= 1.65$ 位,就是通过机构而得到的信息量。

楚克尔曼给精密机械规定的最小误差,如只用于讨论机构带来的不确定程度问题,还是正确的,但用于指导仪器设计的全局就行不通了。当我们通过仪器要得到尽量多的信息时,必须兼顾“开源”与“节流”。

从上面四种匹配情况的比较中可以看到,在规定的工艺条件下选取二级放大是正确的匹配,可以得到最大的信息量。如用三级则经济上是浪费,技术上也无多得益。当然像这样简单的课题,靠人的直观也可以判断得出同样的结论,而不必去计算得到的信息量。我们希望的是能发展一种可以作定量计算又有切合实际的判据的方法,去应付那些越来越复杂的问题,在那里单靠人的直观就不够了。

再进一步考虑单位时间内能通过的信息量(即信息速率或信道容量),这意味着要用这个位移指示器来测量动态参数。测量动态参数的仪器必须有宽的频率响应范围。这里既有时间因素,即传动机构应有足够高的固有频率,否则跟不上外界信号的变化,进而要求整个传动链的惯量小并由足够大的弹簧力来封闭,触头压力也随之加大;还有空间因素,即触头半径不允许大,否则会把被测表面的高频起伏损失掉。这两个因素合在一起导致接触变形加大,也要损失信息。这样就反映出仪器各结构参数的相互制约关系,需要调整平衡这些参数去寻求总性能最优。所以这个例子说明采用信息速率的概念会促使对仪器总性能的考虑比静态更深入一步。

我们曾应用这个概念到红外分光光度计的性能设计工作中。把表达仪器外部性能的参

数与内部结构参数分别放在公式的左右两边:

$$\left(\frac{1}{s}\right)^2 \left(\frac{S}{N}\right) \left(\frac{1}{\tau}\right)^{\frac{1}{2}} = f\left(\varepsilon, T, \dots, \frac{d\varphi}{d\nu}\right),$$

其中, s 为狭缝的光谱宽度,

S/N 为信噪比,

τ 为记录系统时间常数,

右边括号内为光源、光学系统、探测器等的参数。

上式左边各括弧分别表示仪器的各项性能:

- (1) 波长坐标分辨能力, s 越小则分得越细, 即要求提高 $(1/s)$;
- (2) 透过率坐标分辨能力, N 越小则分得越细, 即要求提高 (S/N) ;
- (3) 波长范围记录速度, τ 越小则允许记录速度越大, 即要求提高 $(1/\tau)$ 。

分光光度计的信息速率以其记录纸单位时间内能输出的“象元”数来衡量(图 4)。这里可明显看出, 当我们从各方面来提高仪器的总体性能时, 恰好与提高单位时间内输出的像元数是一致的, 虽然这个表达式在最初被推导出来的时候完全没有采用信息速率这个概念。这又说明: 用信息速率来衡量仪器的总性能, 至少在光谱仪器领域中也是符合实际情况的。

以后我们再利用仪器的信息速率的概念, 来衡量跟踪摄影经纬仪的总性能是否也像在光谱仪器中那样, 起到提纲挈领的作用。要提高信息速率就要:

- (1) 提高角度编码器的位数, 轴系调整剩余误差随编码器误差的减低而减低;
- (2) 提高测量目标偏离视轴数据的有效位数, 必须提高摄影光学系统的成像质量, 包括镜头和底片的模量传递函数, 减少光学畸变差;

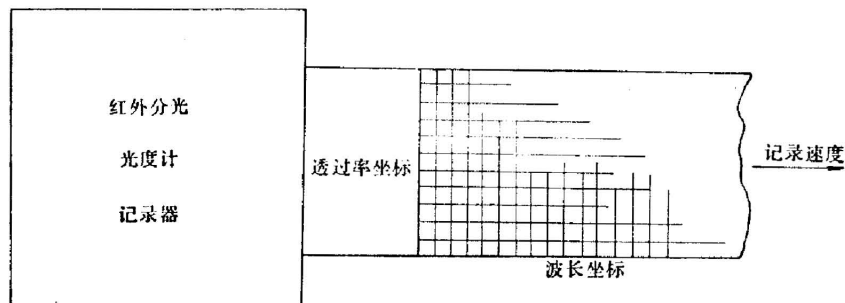


图 4

(3) 提高测量目标偏离视轴数据的有效位数, 必须提高跟踪系统的精度, 主要是加速度品质因数, 以及机械传动系统的固有频率;

(4) 提高仪器的采样(摄影)频率, 即角度编码器的采样频率, 摄影物镜的相对孔径, 光学系统的透过率, 底片的感光灵敏度, 以及摄影机构的工作频率。

显然这里包括了几乎所有的分系统的主要参数。

四、各分系统任务的平衡和指标分配

这项工作的前提是建立在第二和第三节的基础上的, 也就是已经相当彻底地弄清楚仪

器总使用性能与仪器内部各结构参数的关系,以及各结构参数之间的相互制约关系。这样才能比较有把握地协调平衡和分配各分系统的指标和参数而使总性能保持在所需的水平上。对新的复杂的课题,往往需要事先做总体的或主要部分的试验模型来验证这些关系。

此外,还应注意下列问题:

(1) 仪器总性能所能达到的水平应以充分发挥那些最受工艺水平限制也就是关键元件的作用为原则,其它部件参数的分配或结构的安排应服从此原则。例如在光谱仪器中应尽量发挥光栅的分辨本领,而较少受其它光学零件尺寸或象差的影响;信噪比应取决于探测器,而较少受电子元件的影响。跟踪摄影经纬仪的关键部件是主摄影物镜和角度编码器,所以应该配备调光、调焦系统来保障成象质量不致下降,十字丝系统应补偿主物镜系统的挠动;轴系精度应与编码器相适应。计量仪器中导轨误差应较少地影响长度基准的读数(阿贝原理);轴系误差应较少地影响角度基准的读数(对径读数原理)。只有这样整个仪器才能达到良好的技术-经济效益。

(2) 仪器中各功能部分为实现其作用,可以采用不同的技术途径,例如或是机械方法的,或是光电的等等。在保证满足使用指标的前提下,主要考虑当地工艺条件的特点(包括元件是否容易得到),发挥专长,补偿短处。

同时也还要看到仪器技术的发展中有共同性之点,这就是提高信息量和使用效率(即信息速率)。已经很明显的技术途径变化包括:机械量度基准由光学量度基准来代替,分散的读数变为集中显示,人工读数逐渐变为光电的,机械传递信息由更灵活的电路来代替,用数字化以提高数据的有效位数,分立电路的功能由计算机的统一控制来代替等等。

德国开展了一门课题,研究如何根据规定的要求来选择合理的功能块,力图由经验性的、不太全面的判断改进成为有系统的分析比较判断方法。他们称之为系统方法学(Systematik),例如在期刊《Feingerätetechnik》1960年第99页上有这方面的文献七十多篇的目录汇编。

(3) 仪器中有些分系统的指标参数直接取决于外购件,这些部件的水平落后会给仪器带来很大的影响。例如某些跟踪摄影经纬仪的摄影物镜口径达五、六百毫米,而其作用距离并不超过操作员用的口径为一百多毫米的瞄准镜,显然这是摄影底片的性能大大低于人眼的缘故。如果把底片和仪器合在一起作为一个系统,那么它内部的指标分配是不合理的。比较合理的安排是增加底片研究工作的力量和投资,它完全可以在较小口径物镜的经纬仪生产中节省出来。美国目前在航空摄影中所选择的底片的分辨率高于镜头的分辨率,这种关系对于星载的照相设备,效果更大。仪器总体设计者并不能直接解决这类不合理的问题,但也只有从这种总体分析中才能反映出来,通过有关途径去促使问题的解决。

光电探测器的灵敏度和噪声指标,仪器用光源的亮度等也存在类似的问题。

小 结

在光学仪器行业中,光学系统设计使用计算机确实大大提高了水平,也促使设计方法进一步由经验变为科学。仪器的总体设计迟早也要向这个方向发展。

在仪器总体设计中,对仪器的使用指标应建立在科学分析的基础上。

把使用指标转变为技术指标不但需要弄清楚信息传递中的物理过程,也需要弄清楚信息源和接收器的性能数据。这首先是一个开展实验工作的问题,需要测定和积累作为客观依据的起始数据和变化过程中的参数。

要把仪器设计方法中的共同性的实质抽象出来,才能为仪器设计这样一个物理-工程问题建立起数学模型,还要提出最优化的判据。它们应该在实践中不断改进。

把各种不同类型仪器的主要参数相互之间的制约关系弄清楚,现在看来还是可以做到的,寻找出关键部分也是可以做到的,但是像选择各部分技术途径要考虑到工艺特点和发展趋势等很多具体情况则也许在相当长的时间内还要由设计人员来做。

应该承认,让计算机来做总体设计课题是一件很不容易的事,但不是不可想像的事。如果得到公认,并且有多方面共同努力,那么设计工作的水平提高到使用计算机的程度还是会实现的。

On problems towards the promotion of instrument layout design

TANG JIUHUA

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 17 March 1980)

Abstract

The layout design of optical instruments is a subject under development. In this paper some basic problems are put forward and discussed: 1. functional research of the instrument as a member of the global system; 2. analysis of performance-construction relationships; 3. optimizing the general constructional parameters; 4. engineering coordination among subsystems. It is noted that there is mathematical similarity in the losses and gains of information during transferring and transforming processes via optical, mechanical or electronic parts of the instrument, and therefore they can be treated with a common mathematical approach. The introduction of concepts of system engineering and information theory to the discussion of these general problems is found beneficial to the insight into the subject. In addition, a few remarks are made to the conditions, namely, the basic experimental data and the mathematical models, that should be provided for the prospective practice of computer-aided-layout design.