

物理学在航空工业上的应用

汤文及

(西北工业大学)

近来报刊上偶尔出现科学工业这一个名词,这当然是反映现代的科学和技术日益带有极大的综合性并互相依赖的情况。如果把这名词所表达的内容大致分一下,就有物理工业、化学工业、生物工程、智能工业等。其中化学工业是大家所熟悉的,物理工业面最广,可是这名词以前不大用,生物工程可能包括遗传工程,发酵工程,细胞工程学,智能工业包括机器人,智能模拟机等的生产。笔者曾走访过某一航空工业权威人士,他说航空工业本来就是物理学的应用。因为航空工业上物理概念、物理定律的应用处处皆是,因此不得不在写这篇文章以前作一点限制。第一,着重写近代物理在此领域内的应用,而不把包括力学在内的经典物理的应用作为重点。第二,需要有物理学工作者同工程技术人员一起工作的某些项目中的某些物理内容。前者是由于现代物理内容日益增加并向工业(其中包括向某些传统工业)渗透,往往引起工业技术上重大的革新。后者是因为现代科学与技术,都向深广发展很快。一个人无论是科学家或是工程师,不大可能具备工作中所需要的全部理论和实际的知识。因此,物理工业中有物理工作者参加,物理研究课题中,有工程技术人员参加是很正常的。否则工作就搞不快也搞不好,或者根本上不去,更不用说赶上和超过世界先进水平。以美国而论,单讲博士一级的高级物理学家,在工业界工作的就有5000多人,这也就是我们常说的理论同实际的结合。把理论结合实际理解为每一个人的工作中必须遵循的准则,只是一个方面。需要用到某一项专门物理知识的工程师,同懂得这种知识并有广泛物理基础的物理学家结合起来,互相协作,取长补短,是工业界更为普遍的理论结合实际。当然

这不是说,每一个工业技术人员或工业部门都必须这样搭配。例如在国外,理、工科专业系,同设一校。某些工程系学生,他多选修几门物理课程,而这些知识正是他那个工科专业有用的,这样,他在工作时也可能毋须与物理人员协作。以上是我对于本文的两项限制的说明。下面就在这两个条件下,举例说明物理学科在航空工业上的应用。

如果把物理的重大研究成果导致新兴工业部门,从而对人类生活带来深刻影响的那种作用叫战略性的作用,那末物理学对航空业的作用,显然不属于这种。但现代物理学的理论和技术却已在航空工业中得到广泛的利用,使得某些技术和工艺有所改进,也产生了一些新技术和新工艺。某些工业理论,也感到要用新的物理概念来补充和发展。物理理论和物理方法的这种作用,是属于战术性的作用。航空机结构中的机壳、发动机、控制系统、仪表,每一大件都可以找到应用现代物理学的踪迹。但是我们不拟按照这种划分来叙述,而将分作航空材料、器件加工、检验和测量、仪表设计四个小题目来写。

一、物理学在航空材料上的应用

材料科学主要研究材料的物理性能,并从材料的微观结构,阐明它为什么有这些性能。在这里金属物理有其广阔的园地,因为航空工业用得最多的是轻合金材料。同一种合金材料,经过不同方法处理,有很不相同的性能。而材料的处理又大都用物理方法,有一些用到近代物理的方法。作为现代固体物理的一个分支的金属物理的研究,现已能对金属(包括合金)的强度大小、脆韧程度、硬度等物理性质,作出微

观机理上的说明。因而，人们能够有目的地用种种方法来改变金属的微观结构，以得到我们所需要的某种性能的结果。例如，喷气飞机发动机中，所需要的铸造涡轮叶片的耐高温合金是很关键的。据统计飞机事故的90%以上是由于涡轮叶片断裂所引起的。由金属物理可知，在常温下，金属的晶粒微小对增加材料强度有利，而在高温条件下，则晶粒大有利，并且要求晶体界面要与主应力方向平行，才能在这个方向上获得最大的强度。六十年代美国的普拉特和惠特尼公司研究出的“高温合金定向凝固”技术，用以铸造涡轮叶片后，涡轮叶片的寿命和工作温度都大大提高，这极大地减少了飞机事故。材料科学对金属表面所处的状态和性质与表面的成分和结构有关，也有理论的说明。对常用的改变表面硬度的淬火法的机理，也有明确的了解，而且在此基础上还发明了种种改变金属表面硬度和抗腐蚀性的新方法，如气体或液体扩散法、离子注入法，后者是粒子加速中的离子源结构在工业上的应用。

此外，材料成分分析方法，也是材料科学的一个重要方面，而且在工业上应用很多。除定量化学分析外，定性的快速的方法多是物理方法。光谱分析法由来已久，后来增添了许多近代物理方法。如特征X-射线分析法、能谱分析乃至电子探针等等。当然各不同分析方法的原理也不完全相同。金属热处理的一部分工作，也是以决定金属内杂质含量为目的的。它利用金属的磁性随温度变化的情况，对不同杂质含量的金属不相同的原理来工作的。利用金相显微镜乃至电子显微镜，则是一种更为直接的方法。

二、物理学在器件加工中的应用

前面一节里已提过的定向凝固、表面处理等也是对材料的加工，不过那种加工主要是改变材料的性质。器件加工是在各种机床上的加工以及焊、铸、锻、压等方法。这都是传统的加工的物理方法，更确切地说是属于经典力学的

和热学范围。不过仍然有不少的现代物理学的内容补充进去。例如铸造和焊接都涉及金属和合金由液相到固相的转变。五十年代，美国物理学家对于金属凝固过程中的固液分界面形态和溶质分布规律进行深入细致的研究后，提出了著名的“成分过冷理论”，成为研究和解释金属凝固现象的有力工具，并指导铸造和焊接工艺的实践。前面提到的定向凝固技术就是这个理论在工业上应用的突出例子。

自从六十年代激光器出现后，各种输出功率不同的激光器相继研制出来。其中功率为数十瓦到数百瓦的，迅速引进工业，用于切割、焊接、穿孔等工艺。激光加工与传统加工方法相比，具有质量好、效率高等优点。例如，激光焊接能做到焊口窄而平滑。近来还报道一种非常巧妙的激光加工方法：涡轮叶片组装后必须保证各叶片的端缘严格地在同一圆周上，不允许某一叶片突出，否则会影响涡轮运转的平衡，为此只要在涡轮试运转时，用一高强度细束激光，对准上述圆周上的一点，它就会“削去”个别叶片突出的端缘。这是其它方法所做不到的。

从大功率电子源射出的电子束，投射到物体上时能产生巨大的热量，以致能使局部金属熔化，现已在航空工业上采用的真空电子束焊接技术，就是这一物理现象的具体应用。

三、物理学用于航空工业上的检验和测量

航空工业上，用物理方法作为检验手段，有以下几个方面。共同的特点是检验时，使试件不受到损坏，因此通称无损检验。

1. 磁性检验法

这是一种比较老的方法，它只能检验露出试件表面的微裂痕（肉眼不一定能看出）。方法是先使试件磁化，然后在试件表面上涂一层铁磁质粉末，再轻轻刷掉，那末有裂痕的地方，仍然会有粉末依裂缝的形状附着在那里，从而可看出裂痕的有无或形状。

2. 辐射检验法

常用的是超声辐射和 γ 辐射。它们都能透过金属材料。但遇到试件内的裂缝或孔穴的表面,都会反射掉一部分,因此透过的辐射就没有缺陷(裂纹、孔穴)的地方弱。于是就在透平辐射比较强的背底上留下透过辐射比较弱的“阴影”。如果用的是 γ 辐射,这个反映缺陷所在处的“阴影”就会在感光片上显示出来。如果用的是超声波,透过声波的强弱分布就要借助于声电转换装置,用电流计或其它方式显示出来。

3. 激光全息摄影检测法

激光全息摄影是七十年代发展起来的一种多用途的检测手段,可用以测量试件的应力或应变,以及某些胶合体是否各层间有脱粘的情况。例如飞机蒙皮与其里面的蜂窝结构,火箭外壳与其里面的绝热层,包复层之间是不允许局部脱粘的。激光全息摄影的简单原理是这样的:激光是一种波长一定、位相一致的高强度光波。全息摄影是把一束激光,经过分光、反射、扩束(把光束的截面积扩大,使能照射整个试件)等步骤,使分出来两束光经过不同途径,一束照射到试件上,另一束直接照射感光片。于是从试件反射的光(各部分光的位相、强度都不一样)与直射光在感光片上形成干涉图象。可以在同一感光片上重复感光两次。如果试件的位置和形状完全没有变化,则两次形成的干涉图象完全重叠,好象一次成象一样。如果试件位置未变,但局部有了形变,那么相应图象的局部便和没有变形以前的图象有了差异,把感光片显影定形后,潜的图象便显现出来。量出图象上的差异,可以精确到微米的数量级,定出变形的数值。根据此原理发展起来的全息干涉技术,现已用于分析涡轮叶片的应变和相应的应力。怎样检验胶合体的脱粘或试件内有缺陷的情况呢?原则上要把胶合体放在密闭的容器中,然后对容器加压或抽空(形成负压),使试件受到均匀的附加外力,并在加压前后摄取全息象。试件受到附加外力的前后,脱粘处或内部有裂缝、孔穴处,引起的形变是与其它处不同的,如是前后的全息象有差异之处,就是脱粘或缺陷

所在处。

近来脉冲激光全息技术,经过实验证明是测量高速气流喷雾微粒特性最精确最可靠方法之一。喷气发动机和液体燃料火箭推进器,都使用雾化了的液体燃料,雾粒大小及其空间分布,直接影响着点火、火焰稳定、燃烧完全等性能,所以微粒测定非常重要。

四、物理学在航空仪表设计上的应用

这一节所涉及的技术和器件,虽不是飞机结构上所需要的,但它是作为保证飞行安全和利用飞机完成各种作业所必需的。所以,各项技术和设备的物理基础,仍属物理学在航空工业上的应用的一部分。我们在这里所涉及的内容,比一般叫航空仪表的面要宽一点,把遥测遥感的设备和技术也包括进去。在国外这一领域不但自成各个专业,而且每一专业的教学与研究,总或多或少有相应的物理学工作者参加,而开辟这些专业的老一辈专家,多半是物理学家出身。

作为航空耳目的雷达技术的物理基础就是电磁波与物质的相互作用和电子学。世界上第一代雷达原型,是四十年代美国由于空战需要,抽调一批加速器物理学家在短期内研制出来的。电子线路的电磁振荡,经由定向天线转化为电磁波发射出去,远处的目标物反射回来的电磁波,仍由天线接收,变成电运动,在荧光屏上成象。电像与荧光屏中心的距离即表示电磁波往返目标物间的时间,从而可标出目标的距离。所以,雷达是一种最早的遥测工具。如使天线不断转动,电磁波束在四周扫射,所有碰到它的周围目标,就都显现于荧光屏上,它们的距离和方位,就被检测出来。如果飞机上的雷达天线转向地面发射电磁波,则随时可以知道飞机对地面的高度,雷达就成为比气压式高度计更可靠的高度仪。美国有一套雷达丛书,已是二十多本的巨著。值得指出的,它的作者大部分是物理学工作者。我国老一辈的著名电子学家,也几乎都是物理学家。可见物理学仍然

在对雷达和其他电子技术作出贡献。这对我国很少有新的物理学家进入工业技术提出了一个值得研究的问题！近来又已出现激光雷达、激光测距仪、激光高度仪，其物理内容就更新更深入了。

遥感技术也一样，溯源于物理学上长期对光谱学研究的成果。自十九世纪后半期，理论上预见电磁波并断言光波是电磁波的一部分后，在实验上又发现了电磁波的存在。接着物理学家又发现了全部电磁波谱。但不同波段的电磁波对物质的作用也不相同。红外波段不穿透普通玻璃，也不使常用的乳胶底片感光。物理学家为研究这个波段，找到了一些能透过红外光的材料和对红外光敏感的物质，加上电子学的进步和光电、电光转换技术的完备，才有了现代的红外传感和红外成像技术。所以，物理学长期对光谱学的研究成果，是现代遥感技术基础之一，也就是物理学在此领域内的应用。

航空仪表很多，但大部分已定型的常规仪表不存在着多少更新换代问题。作为惯性导航的陀螺仪表，它是保证飞机和导弹沿一定路线飞行的关键仪器。它随着飞机和导弹的航程不断延伸，精度在不断提高。这种仪器的精度愈高，飞机或导弹偏离预定的航线愈小。例如，装有自动驾驶陀螺仪表的飞机作“直线”（实为以地心为中心的大圆弧线）飞行，从起飞到达数千公里以外的终点机场，偏离不超过一海里。陀螺仪表的原理是高速转动的陀螺（转子），由于惯性保持其自转轴方向不变。用三轴框架支承的陀螺，任凭与支架相连接的载体（飞机或导弹）如何改变方向，陀螺自转轴仍指原来方向。这是一种理想的情况。由于支轴上有一定摩擦，框架对陀螺转动时，这个摩擦力矩就会使陀螺的自转轴发生进动，因而对它原来的方向发生漂移。然而，飞行器的航向是以陀螺自转轴的方向作为参考规定的，如飞行器偏离原航向，传感和执行机构就会自动地将航向纠正过来。但陀螺自转轴本身发生漂移时，航向也就跟着漂移了。因此减少陀螺支轴上的摩擦，是改进陀螺仪表的关键措施。如精心加工轴承，采用微

型电机的补偿，将装转子的内环作成球壳状或圆筒状，采取液浮或气浮的方法，以减小支轴承的压力，从而减小摩擦。通过这些改进，已将陀螺仪由三十年代第一代漂移每小时1度角以上，降低到0.01度/小时，这就是第二代陀螺仪。目前民用军用惯性导航系统中用的陀螺仪，多属于这一种。惯性导航系统是保障洲际导弹、远程轰炸机、核潜艇等战略武器导航精度和命中率的重要部分。

第三代陀螺仪是在第二代陀螺仪上通过精心的结构设计和工艺上精度的提高而实现的。其性能指标比第二代提高1—2数量级。例如，静电悬浮陀螺，转子改成空球壳，不用支轴，而把球壳置于由六个碗状电极合成的球腔之中，转子便在它和球腔之间的高强度静电场力作用下悬浮起来。工艺上要求转子外表面和腔的内表面光洁度要达到 $\nabla 14$ ，而且腔壁与球转子之间的间隙只10—70微米。腔内抽成 10^{-7} — 10^{-8} 毫米汞的高真空，在外线圈中旋转磁场作用下，转子的工作转速达6—16万转/分。这种陀螺仪的漂移率已经降到0.001度/时。这是由于既消除了支轴的摩擦，也消除了空气阻尼的缘故。

如果说第三代和以前的陀螺仪，也作为物理学的应用，那也只限于经典物理范围。而现在已开始研究的第四代陀螺仪，则几乎利用了近代物理研究成果中凡有可用的内容。现已报道的有如下几种。除其中第一种外，其它都是别开生面，和前述的转子陀螺仪，原理上和结构上，毫无共同之处。虽然还都保持陀螺仪这个名称，这只能反映它起着转子陀螺共有的导向作用。

超导陀螺仪：这是低温物理学在这一领域内的应用。和静电陀螺仪有某些相似之处，不过这里是利用超导体转子的完全抗磁性（迈斯纳效应），在磁场中实现对转子磁悬浮的自由转子陀螺仪。主要由超导转子、磁悬浮装置、启动力矩器、信号检测器以及真空室和致冷装置等构成。

离子陀螺仪：这是一种利用离子云在垂直磁场中沿圆形轨道运动的角动量以测量角位移

的陀螺仪。因为离子云的角动量矢量或角速度矢量在惯性空间方向不变，如用光敏检测器测得角动量矢量发生角位移，就知道飞行器偏离了原来的航向。此陀螺仪一般由离子源、离子加速器、磁场及光敏检测器等构成。

激光陀螺仪：用三根由零膨胀材料作成的细孔径管，围成一三角形，顶点各装一反射镜片，其中之一是半反射半透过的，作为输出窗口。这样就组成一个密闭的环形腔，腔中充稀薄的激光介质（通常是氩和氖）。用一单阴极双阳极的特殊结构，接通电源后，在腔内可激发沿正、反时针方向传播的两束激光，它们的频率严格一致。当随着飞行器偏航而环绕垂直于三角平面的轴发生转动时（顺时针方向或反时针方向），由于多普勒效应，正、反时针向的两束光的频率或波长都有改变，因而两束波在输出窗口处可以检测出干涉情况的变化，经光敏检测器送出的信号经过计算机处理，即可得出偏航的数字。在原则上此种仪器能检测的漂移率小到 10^{-6} 度/小时，大到2000度/小时。

还有核子陀螺仪、偏振波陀螺仪、放射性同位素陀螺仪、环形约瑟夫孙陀螺仪等，这里不一介绍了。

总之，以上各种陀螺仪的研制，离不开各种

近代物理的专门知识。这也说明了工科有些专业的教学和研究工作，需要有相应的物理专业人员参加。

后 记

以上介绍的主要是物理学在航空工业上起作用的几个方面。在国外，物理学用于航空和宇航科学技术，远不止以上几个方面。在我国，许多工业部门并没有把基础科学和基础研究放到应有的地位，这可能是某些工业部门，久久不能摆脱模仿阶段重要原因之一。在写完本文后，作者翻阅了1981年美国第19届宇航空间科学会议的论文集，在300多篇文章中，有现代物理内容的占1/6，文章作者中注明为各类物理工作者的有30多人，当然也有未注明的无法计算。值得一提的是，写有近代物理内容文章的作者，大多数还不是物理人员，而物理人员写的文章，也并不限于物理内容。这一情况反映了物理学家有不少从事技术研究，而工程人员不少也有深广的物理基础。这就对我国的科技教育，提出两方面的问题：第一，要加强工科教育的物理基础，特别是近代物理基础。目前工科院校学生，一般地只学一点以经典物理为主的普通物理是不够的。第二，要为工业技术发展的需要培养一批着重应用的物理人才（其中一部分可由工科院校自己培养），向工业部门输送，同时要解决物理专业学生不愿搞应用，不愿进入工业界的思想问题。

（上接第150页）

参 考 文 献

- [1] M. A. Henesian et al., *J. Appl Phys.*, 47(1976), 1515.
- [2] H. Itoh et al., *Opt. Commun.*, 18(1976), 217.
- [3] B. Wellegehausen et al., *Appl. Phys.*, 13(1977), 97.
- [4] S. I. Kanorskii et al., *Sov. J. Quantum Electron.*, 10(1980), 1275.
- [5] W. Müller et al., *Appl. Phys.*, 24(1981), 33.
- [6] Z. G. Wang et al., *Opt. Commun.*, 48(1984), 398.
- [7] Z. G. Wang et al., Paper Presented at 7th International Conference on Laser, (1984).
- [8] P. P. Sorokin et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-9 (1973), 227.
- [9] D. Cotter et al., *Opt. Quant. Electron.*, 9(1977), 509.
- [10] R. T. V. Kung et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-13(1977), 73.
- [11] 林远齐等, 华东师范大学学报(自然科学版), 3(1982), 59.
- [12] Q. H. F. Vrehan et al., *Opt. Commun.*, 18(1976), 115.
- [13] Yang Baocheng et al., *Proceedings of International Conference on Laser*, (1983), 495.
- [14] 王祖庚等, 应用激光, 3-5(1983), 12.
- [15] Y. C. Wang et al., 中国激光, 10(1983), 488.
- [16] P. L. Chang et al., *J. Opt. Soc. Am.*, 73(1983), 1945.
- [17] B. Nikolaus et al., *Phys. Rev. Lett.*, 47(1981), 171.
- [18] J. C. White et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-18(1981), 320.
- [19] D. J. Ehrlich et al., *Appl. Phys. Lett.*, 34(1979), 655.
- [20] Z. G. Wang et al., *Opt. Commun.*, 51(1984), 155.