

飞机设计的动向

TRENDS OF AIRCRAFT DESIGN

吴健民

1. 绪 言

自古以来,人们便羡慕空中自由飞翔的鸟类。这也难怪,那时虽有三维空间,人类真正的活动范围却只局限在二维的空间上。人对着向上无限伸展出去的另一维只能望空兴叹。

1979年12月17日是航空界的大日子,是人类第一次飞翔于空中的75周年纪念日。在这75年间,航空工程学的发展,日新月异,并带动了很多其他科技的发展。

在明朗的月夜里散步,你会突然感到,那一轮明月与我们的距离是那样的近,近得好像可以一跃而上。一点不错,由于75年来的航空工程,我们的世界扩大了,同时也把我们的世界缩小了。

当航空史将要迈向一个世纪的今天,回顾过去的发展,展望将来的动向,是一件极有意义的事。本文将对飞机的设计作一回顾与展望。

2. 动力飞翔的头25年

赖特兄弟在1903年12月17日把轻型的内燃发动机(80公斤重),装在翼展12.3公尺的双翼飞机上(连引擎在内总重275公斤),成功地

做了历史上第一次的动力飞行。纪录是:飞翔时间12秒,飞行距离36公尺。在寒冷的12月天气里,为了减轻重量,赖特弟弟当时只穿一件单薄的汗衫趴在主机身杆上完成了那次划时代的飞行。

赖特兄弟的成功不是偶然的。他们符合科学的实验是成功的基本因素。飞机的机翼与结构都经过一次又一次的严密实验。他们吸收了当时最成功的滑翔机构造的经验加以改良。在1901年,他们还创造了一具很符合近代风洞设计原理的简便风洞来进行翼型(二维的)选择。分别用了升、阻力天平去测定空气的流动情形、着力与稳定的情况。以上每一步骤都是今日飞机设计绝对不可缺少的。赖特兄弟所用的引擎亦符合增加动力与重量比的需要。与赖特兄弟同时期的许多飞机设计家因为没有利用当时刚出现重量又轻、动力又大的内燃机引擎,因而失败了。这个经验在航空史上很有名,为后来的设计家引以为诫。飞机设计师们常常学习成功的与失败

的例子,叫个案研究(case study),作为将来设计的指导。附带在这里一提的是,直升飞机一直到二次大战后才大量出现,原因就是—直不能达到发动机动力与重量比的要

求。

在航空发展史的头25年里,飞机只是一项新奇的玩意儿,对人类的贡献还没法肯定,可以说是萌芽时期。那时候的飞机是用浆糊把木头与布糊起来的。随着第一次世界大战的扩大,人们逐渐认识到飞机在战争上的重要性。飞机成为国防工业的一部分。大批研究基金注入到航空工程的研究上去,飞机成为各国重视的工业。在另一方面,民用航空事业也兴起了。飞机被用来传递邮件与乘客,航空史进入了迅速发展的第二个25年。

3. 第二个25年

在第二个25年里(1928—53),航空工业打下了巩固的基础,并逐渐成了我们日常生活的一部分,飞机被认为是将来运输的主要工具、国防上不可缺少的一环。

这个时代里,飞机设计的主导因素只有一个:追求“高性能”,飞机要飞得快、高、远。代价在所不惜。

飞机的动力在这个时代里起了革命性的改变。从活塞发动机演变到喷气发动机。动力与重量的比率有了飞跃的改进,由蜻蜓式的小飞机到在空中划着一条长长白带云的

喷气机。这个变化是惊人的。

飞机的结构也在这个时代起了大变化。我还记得小时候,倾听螺旋桨的声音来辨别是日本的飞机还是美国的飞机。当时很多日本飞机为了轻便,螺旋桨是木造的,美国飞机的螺旋桨则已经是金属造的了。两者声音不同,很容易辨别。这个时代初期的飞机与末期的飞机,是不可同日而语的。在这25年内,航空发展的迅速,在工业史上是少见的。(今日微型电子工业的发展或可与其比美)。

前些年我去参观一所航空博物馆时,看到一位中年男子摸着一架看来古老的飞机在慨叹。我问他为什么直摇头,他说:“你看它老得进了博物馆,你能相信我曾经驾驶过这种飞机吗?”这该是这一时期航空发展的最好写照。

4. 第三个25年

喷气机是在第二期开始萌芽的,先是在军事上,后来逐渐扩展到民用方面。在第三个25年(1953—78)的初期发展起来的火箭工程,终于在1957年的秋天,把第一枚人造卫星送上了天。值得一提的是,初期的火箭工程与飞机工程并没有多大的接触与配合,各走各的路。但是两者所用的工程理论却有很多相同之处。两者在设计上的相互引证、交流技术直到这个时代的后半期才出现。现在正在试飞的空间穿梭机(space shuttle)不过是拥有飞机外型的大型火箭。巡航飞弹(cruise missile)则是无人驾驶飞机与飞弹的结合。这个趋势在将来还会有更大的进展。

我念高中的时候,看到大学工学院的学生们一手扶着自行车车把,一手拿着木造的长长的丁字尺,感到羡慕万分。在这个时代初期的设计室里,用的是丁字尺与计算尺偶尔才用手摇计算机。后来有了电动计算机,深夜在设计室里发出哒哒的声音,能算出三位有效数字,便是精密计算了。课堂里学来的一大堆偏微分方程,不知如何应用到设计上去。随着时间的飞

逝,飞机从亚音速进步到超音速,飞机飞得快过太阳的起落。设计室里的哒哒响声逐渐消失,代替的是按键盘的轻微声音。计算尺看来可以送到博物馆去陈列了。不出十年,我们的孩子们会得意地说,我爷爷当年用的这根木头般的计算尺居然也可以设计出喷气机哪。

5. 第三个25年后期的巨大变化

要知道飞机设计将来的趋向,非得仔细检讨第三个25年后半期,亦即1960年代后期与1970年代的一段时间发生的变化不可。在这期间内,科学技术及社会环境都起了大变化。

外行的人或许以为飞机设计是用一大堆高深数学式子算出来的。说实话,飞机是“吹”出来的。(见53页)。说得具体一点,飞机设计师所依靠的数据是靠风洞里做模型实验“吹”出来的。那些好像豆芽菜的偏微分方程不是没用,而是不能够直接派上用场。偏微分方程的解答,只能作指导用,好比海上的灯塔,指明船只要走的方向。偏微分方程的另一个用途是——给“吹”出来的结果加以理论解释,帮助我们建立有关物理现象的模型。从数学的模型,我们可以解释同类的现象以及在同类情况下所预期的数值。只在很少数的情形下,我们才偶尔会计算出从来没有吹出来过的结果。即使是完全算出来的结果,若未经过风洞里吹一吹,也没有设计者胆敢直接变成设计图上的黑白线条。上述情形在1970年代后期开始有了转变。因为近代的高速电脑取代了那根好像师父用来打徒弟手心的计算尺,计算出相当准确的数据。准确到往往可以验证风洞里“吹”出来的结果。(因为有很多因素可以使得风洞吹出来的结果产生误差)。

在航空工程界里,做理论研究的人一般都相信风洞里吹出来的结果,而对自己算出来的理论数值存疑。做实验的人却又不相信自己量出来的结果,因为太多的因素可

以使实验数据产生误差。只有真正做过理论研究及亲手做过实验的人才能体会这种复杂的心理状况。好了,把话说回来,由于电脑的飞跃进步,以理论算出来的结果与风洞里量吹出来的数据,两者间的差异变得愈来愈小。因此,飞机设计者有越来越相信电脑的结果,不再完全依靠风洞了。起码是要做的风洞实验次数减少了,只需要在最后关头,再来吹一吹,以求保险。

风洞与电脑在1970年代开始结合,将来更会走向合一的道路,那就是风洞与电脑联在一起,对设计者提供设计与改良的数据。有些偏激的提法说,在21世纪里,我们可以完全淘汰掉风洞而专用电脑来设计了。我不赞成这种论调。在1978年以后的25年里,风洞仍然会是一个主要的设计工具。只是风洞已不再是往日的风洞了,而是与电脑结合的新式风洞。那些好像一大篓豆芽菜的偏微分方程也陆续地真正被应用到飞机设计者的阴极射线管(cathode ray tube)上。

在最近几年里,已经明确的可以看出,将来的飞机设计者已不再是一大群爬在绘图板上用丁字尺拉线的人了。阴极射线管将会逐渐取代画图板。

第三个25年的后期,另一件事引起了社会上的极大关注,这便是不惜代价一味追求飞行性能的设计方向受到了批评。为了追求高性能,飞机的造价超过了社会及航空公司愿意负担的程度。(注一)转变的结果是,高性能的追求不再是设计工作中唯一的金科玉律,如何制造较低价的飞机才是第一要素。美国波音公司被迫放弃超音速民航(2.7倍音速)的设计,这不是因为技术达不到,而是由于经济上的考虑。这在第二个25年时期是无法想像的。1960年代后期当各先进国家还在设计二到三倍音速民航机的时候,一些先进大学航空工程系已经开始研究如何设计高超音速民航机(hypersonic aircraft)。在技术上说,设计10倍音速的飞机是完全可以做得到的。但是在1970年代,

由于社会及经济压力，航空界作了全线的大退却。设计一架三倍于音速的超音速机都遭遇到那么大的阻碍，还谈什么高超音速机呢？无论是军用机或是民用机，单追求高性能的设计方向不再受重视。如何设计出既经济，性能又比较好的飞机才是追求的目标。

与波音公司放弃超音速民航机设计的同时，另一项强大的社会压力是要求减低飞机的噪音。各国竞相立法，限制飞机噪音的最高限度。在近十几年里，航空工业在这方面投下了可观的资金。这也无形中限制了专门追求高速飞行的精力与资金。直到1970年代末期，超音速民航机的研究重新抬头的趋向，将来是肯定会走上超音速民航机的道路的。为了符合经济原则，将来的超音速民航机会是极大型的，要比现存的协和机（Concord）大得多才合算。

近几年的能源危机对飞机设计方向的改变与打击并不亚于对汽车工业的打击。油价的上涨与石油枯竭的威胁来得太突然，太猛烈。飞机设计的重点也因而起了大转变。今后要求的是耗油较少的飞机。换句话说，追求的是高效率（high efficiency）而不是高性能（high performance）的飞机。说来难以相信，人们有可能从喷射飞机走回到螺旋桨飞机去。当然螺旋桨飞机多半会用来载货，螺旋桨的设计也有了改变了。新型的螺旋桨呈菊花状，用超临界翼型（supercritical wing）做断面设计。回到螺旋桨去，为的只是省油。但是石油终究是会用完的，到了那个时候，飞机又怎么飞呢？

6. 未来25年的展望

如上文所述，追求快、高、远的高性能（快与高是联在一起的，要飞得快也就非飞得高不可。一定的速度必须在一定的高度上才能达到，这在航空学上叫飞行走廊）的飞机设计方针起了大转变。所追求的已不再是快与高。读者也许会问难道军用飞机也不再要求快与高

么？是的，的确如此。在第三个25年代的后半期，人们发现飞得太快太高的话，没有办法作战。若一架飞机在一瞬间便已消失得无影无踪，对地面或空中的目标都不能发挥攻击力。难道要花那么一大笔资金去造一种专为逃避用的飞机吗？民航机就更不必说了，低超音速机已足够应付日常的需要，地球毕竟太小了。在同一天里可以越洋来回难道还嫌不够快？飞机若要快、高、远，造价也就以指数上升。这种以指数上升的造价，是社会无法承担的。所以说，将来25年内，民航机设计的趋向是先从接近音速的跨音速民航机（transonic aircraft）的大量投产开始，逐渐走向而停留在低超音速民航机（大约音速的2.5倍左右）的范围内。军用飞机所要求的速度要高些，4到5倍音速的军用飞机一定会出现。大量超音速民航机飞越两大洋的情况将在今后25年内实现。我再三强调，这不是因为技术的缘故，而是经济与社会压力的结

代替。在美国国内今天陆邮空邮同邮资，正说明了这个趋向。

将来的大型飞机在外型上会与现在的飞机差很多。但是外貌的大改变要到1990年代才会突出。1970年代后期以及1980年代初期研究出的大批结果，要到1990年代才会投产。我敢肯定的说，会出现没有机身，只有机翼的飞机（早期有人曾经有这个构想，但是流产了，因为那时的科技还没有到达这个水平）。机翼可产生大的上升力，机身本身的升力很小，我们还要那劳什子的机身干什么？这个道理说说简单，做起来很难（见图2）。但是将来的材料与微处理机的控制，将使得这些困难能够一一克服（见53页）。将来稳定的飞行已不再需要依靠飞行员的感官反应。微处理机的应用与气体动力学的结合要远胜过飞行员的感觉。在飞行员还未能感觉到时，反馈环路系统计算机（feedback loop system）已作出了反应，把偏差调节好了。除了上述的

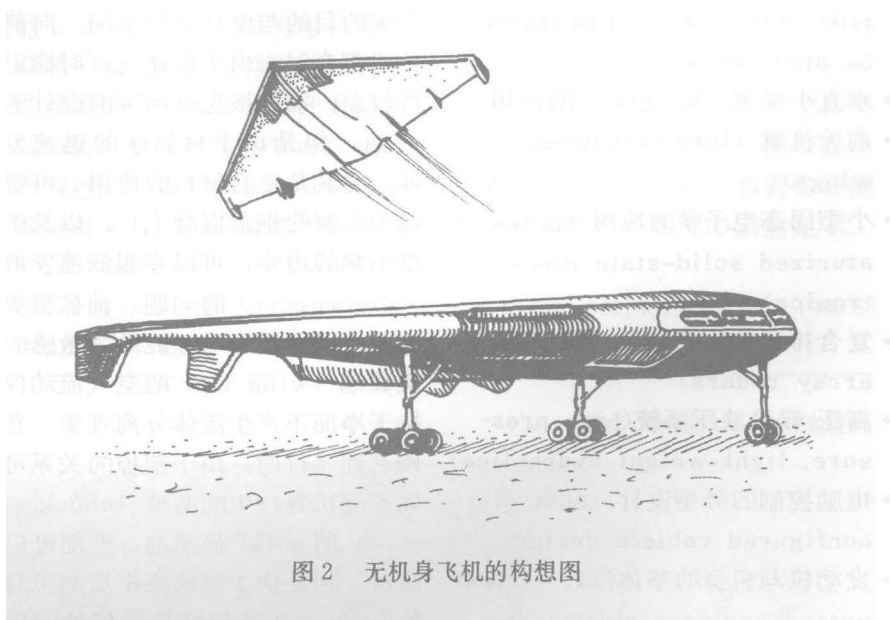


图2 无机身飞机的构想图

果。此外，飞机的大小将会从目前的中型逐渐走向大与小两个极端去。在小的一头的极端是无人驾驶飞机（军用与民用均可）。现在美国在试飞的巡航导弹便是这方面的开端。利用大型飞机的空运事业会几乎取代海运事业。不用说未来了，今天又有谁会乘船越洋旅行呢？远距离的陆上运输也会被空运

技术，新科技代表的是些什么呢？这可以分为两部分来说。一是直接促进飞机设计的科技，另一部分是设计工具与步骤的改进。

最近我的两位同行，认为某些项目直接影响到将来的飞机设计。我略加修改，引述如下：

- 复合材料（composite materials）的大量应用

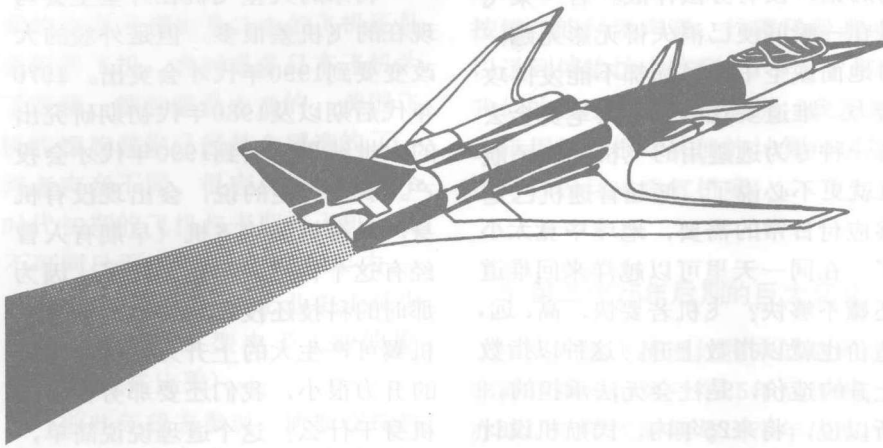


图3 前掠机翼飞机构想图

- 高级纤维加强钛 (fiber-reinforced titanium)
- 超塑性成型及扩散胶合 (superplastic forming/diffusion bonding)
- 超临界翼型的应用 (supercritical-wing sections)
- 乘激波气动力学干扰的运用 (wave-ride aerodynamic interference application)
- 垂直小端翼 (winglet) 的应用
- 前掠机翼 (forward-swept wings)
- 小型固态电子学的应用 (miniaturized solid-state electronics)
- 复合排列雷达的应用 (modular-array radars)
- 高压、轻量液压系统 (high pressure, light weight hydraulics)
- 电脑控制的外型设计 (control-configured vehicle design)
- 发动机与机身的整体设计 (integrated engine-airframe design)
- 整体飞机控制 (integrated aircraft controls)
- 低损耗发动机进气口与喷咀 (low-loss engine inlets and nozzles)
- 高压比扇叶的出现 (high pressure-ratio fan blades)
- 高温、高压之高级涡轮设计 (high-

temperature and pressures, advanced turbine design)

上述有些项目在目前还不是一清二楚，有的地方还值得讨论研究，譬如说，向前掠机翼的可能性，目前不能肯定，还在研究发展的阶段。德国曾经使用过向前掠机翼的设计，但是当时使用的目的与今天的目的与设计全然不同。向前掠机翼在过去由于低速飞行时稳定性较差，没有被先进国家的设计者采纳。但是由于材料学的迅速发展，尤其是复合材料的应用（可譬喻为金属的钢筋混凝土），以及微型电脑的进步，可以克服低速发散 (divergence) 的问题。前掠机翼的设计可以使影响性能最为敏感的机翼端 (wing tip) 的空气流动保持干净而不产生流体分离现象。在跨音速飞行时，由于前掠的关系可以不受机翼产生的激波 (shock wave) 的影响。显然地，性能可以改进。但是由于气流集中流向机身的关系，机翼与机身交接处的设计，较为困难。一般来说，有两个办法处理，一是大机翼，一是机身与机翼的整体设计。这两项都不简单。因此，前掠机翼是好是坏，还言之过早。垂直小翼端 (winglets) 的运用确实比没有小翼端的性能要好，但是需要与延伸机翼情况作一比较，才能分辨好坏。

设计步骤的改进，完全是由于

电脑技术突飞猛进带来的改革。到今天为止，飞机的设计与计算还是基于线性函数 (linear function) 的可递加性 (superposition)。譬如应用数值分析法 (numerical analysis) 的涡格方法 (vortex lattice method) 便是最为显著的一例。这种方法虽能计算非粘性流体，随着计算方法的改进及电脑的进步，将来非线性函数解析法 (non-linear numerical analysis) 亦会被直接应用到飞机的设计上，可以处理粘性流体。这种进步的成果是很可观的。最最主要的还是设计者可以直接应用复杂的计算结果。以前的情形是你算你的，他设计他的，各不相关。虽然现在还不是立刻可以突破的，但是已经可以看到曙光了。再说，实际操作阴极射线机的设计者不必知道这些非线性理论是如何被演成程序的，他只要会使用便行了。譬如，会开汽车的人不见得都要懂引擎的构造。

在这里我们可以看到新理论出现后经过几年的验证，便可以交到设计者的手上。当设计者坐在显像管的键盘前按钮时，已不自觉地修改着他们的设计图。在这以前，一篇文章在专业杂志上出现后，被应用到实际设计上的时间差距大约是十年到十五年。这个时距将来可以缩短到五年之内。这个发展将使得未来飞机的形状有飞跃的改变（但是，必须记住的是，每一代飞机之间的改变不会也不应该超过原来飞机的百分之十五，因此，所谓的飞跃改变是指新型飞机出现的间隔会缩短，旧型的淘汰会加速）。

电脑与电脑图示技术 (computer graphic technique) 的进步与普及，将会改变传统的飞机设计方法。改变飞机某一个部分的后果可以用电脑算出并显示出来。所以设计者的工作将是连续地改变显像器上的设计图样。立体的显影加上平面部分设计图，会使得将来的蓝图工程画改观。

电脑化的自御风洞 (computerized self-adjusting wind tunnel) 会使得实验数据更准确，提高

可靠性 (reliability), 使理论更健全。风洞实验仍然会占有很重要的一环。尽管计算机的发展日新月异, 某些流体物理的现象, 在将来25年里还是算不出来的, 非做实验不可。这些难题, 我会在下面提到。

在这一连串的改进当中, 最捉摸不定的因子是燃料问题。很明显的, 石油在下一个25年里将大成问题。我们所能找到最佳的石油代用品会是什么? 氢吗? 合成碳化物吗? 核子能吗? (直接应用太阳能的可能性几乎等于零)。燃料的困惑, 可能会使我们21世纪的飞机形态完全改观。目前, 还没有任何人能肯定, 石油能源一旦完全断绝后的飞机会是个什么样子。现在有些人在做这一方面的研究, 但是看着那些半卡通化, 科学幻想 (science fiction) 飞机设计图, 我不敢在这里向读者作介绍。总之, 21世纪里不用石油为燃料的飞机还只在构想中, 目前尚未定论。

7. 将来的航空工程学

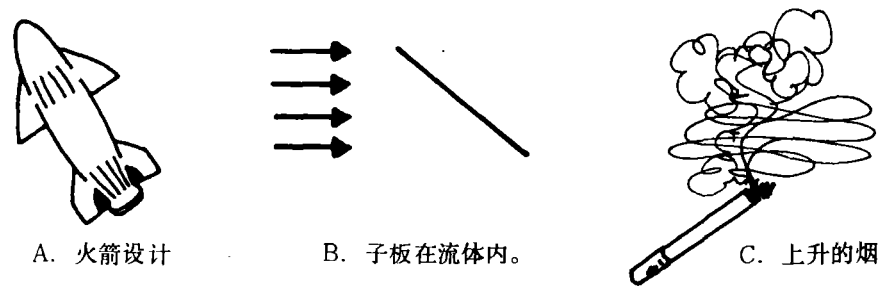
75年内, 从玩具似的飞机到今天的超音速喷气机, 航空工程真是有一个了不起的辉煌历史。遥看划着白线一闪而过的喷气机, 坐在舒适的现代机舱里, 望着窗外展现着朵朵的白云下, 大地与海洋, 我们不禁会想航空工业是不是已经达到顶峰了。到今天为止, 我们只是解

决了一些容易解决的问题, 在数学上, 多半是属于线性函数的问题, 用的多是理想气体的公式。事实上, 大自然的气体是粘性的, 所服从的是非线性函数的规律, 还有太多太多的问题留待我们去解决呢。

大约在一年前, 当我在设计桌上计算、绘图时, 来访的外甥问我: 大姨父你在设计什么? 我回答

斜, 前端与后端的流场还是一个大问题。至于上升的烟是一个湍流问题, 在本世纪内是没有希望可以获得解决的。真的, 我们可以上月亮, 但是上升烟的问题比上月亮还难。

在航空工程上, 未能解答的问题太多了。能不能使大型的喷射机直升直降呢? 真的需要那么长的跑道吗? 年青的朋友们, 将来的航空



A. 火箭设计 B. 平板在流体内。
图4 三个课题的比较到底哪一个问题的解答最难?

说, 正在设计一具轻型火箭。他瞪着眼睛, 说声了不起。真是那么了不起吗? 非也。我在纸上, 画了三个图: 火箭, 在流体内的一块平板, 冒烟的香烟 (见图四)。我问他, 在这三个题目里, 你认为哪一个比较难些? 他不解的看看我说, 当然是设计火箭了。其实, 设计火箭是最容易的。其次是解决平板在流体内的问题, 到今天为止, 我们还未解决得尽善尽美, 就算平板不倾

工程还等待着各位去发展呢!

8. 后记与期待

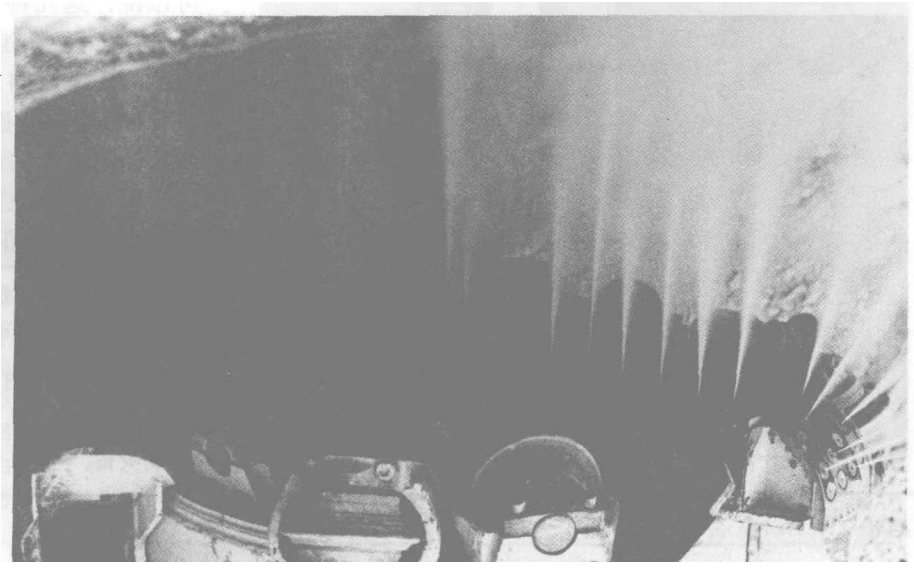
因篇幅所限, 本文未能把所有飞机设计的发展趋向包括进去, 譬如说直升飞机、小型民航机、农业用飞机、空间穿梭机 (space shuttle) 等等, 也没有提及航空工程另一大领域的火箭工程学, 而只是给读者一个概况的面貌。假若读者能从中得到收获, 我便心满意足了。

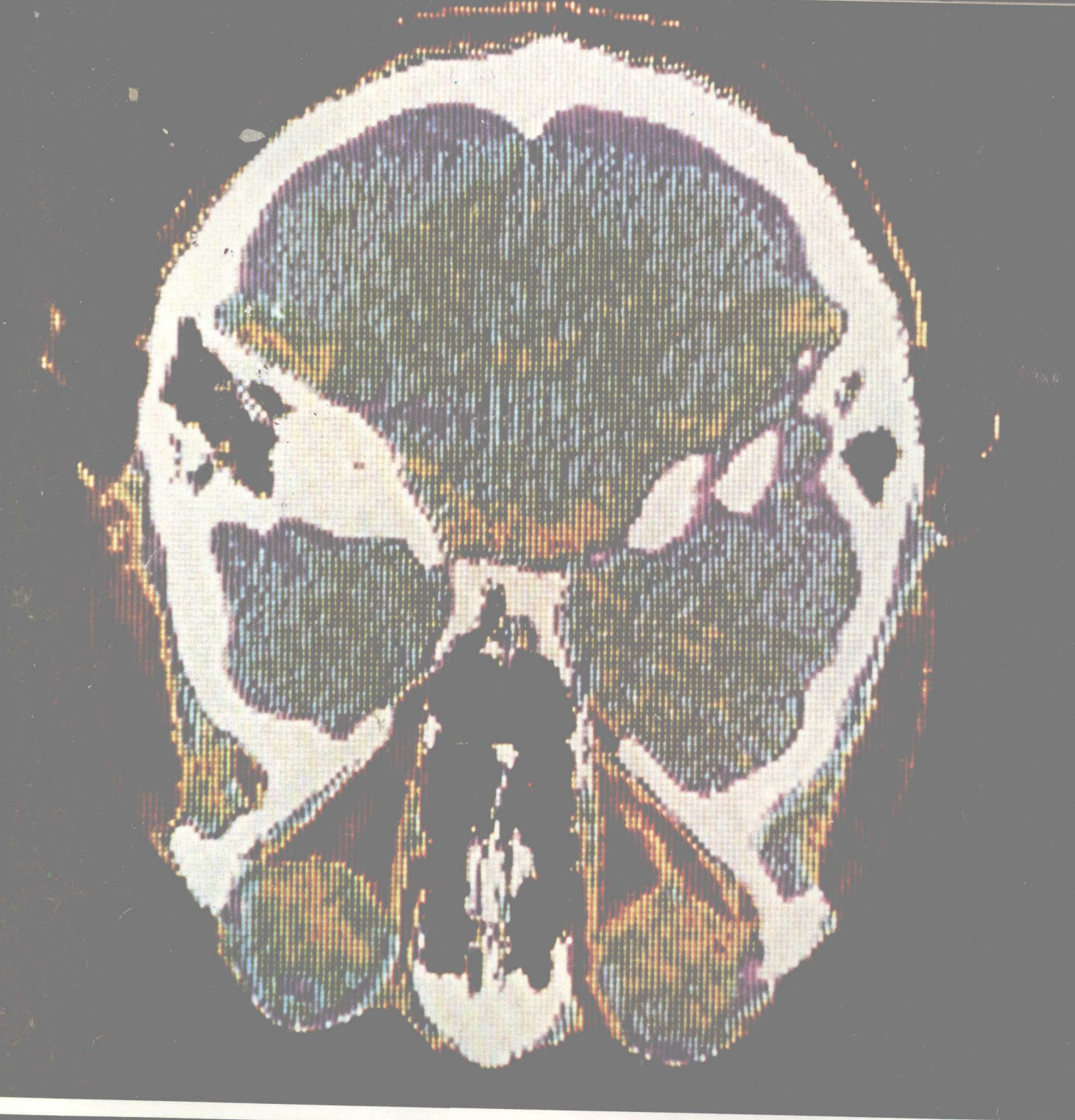
(注一) 波音747客运型66,000,000美元; 747运输机80,000,000美元; 747 (200B) 型72,000,000美元; 737运输机13,400,000美元。 ㊟

三为拨矿机 (shear), 此一类机械大多用于比较软性的矿床中的采矿分道drift的掘进及采矿。长臂采矿机多半用在巷道掘进; 滚筒采矿机多用在方柱 (room and pillar) 采煤; 拨矿机用在长壁 (long wall) 采煤。

高速机械掘进法尚在不断改进, 例如用高压水 (high pressure water jet) (图十二) 协助破岩的新方法等。可以展望, 随着高速机械掘进技术的进步, 掘进率当不断加快, 矿石产量将不断增加, 成本随之降低。 ㊟

图12 高压水协助的破岩机





上) 电脑层面X光照相术所拍摄的人类头颅照片

下) 在风洞中吹出来的气流形态——用高彩色
Schlieren摄影术在风洞中摄得 (见正文60页)

