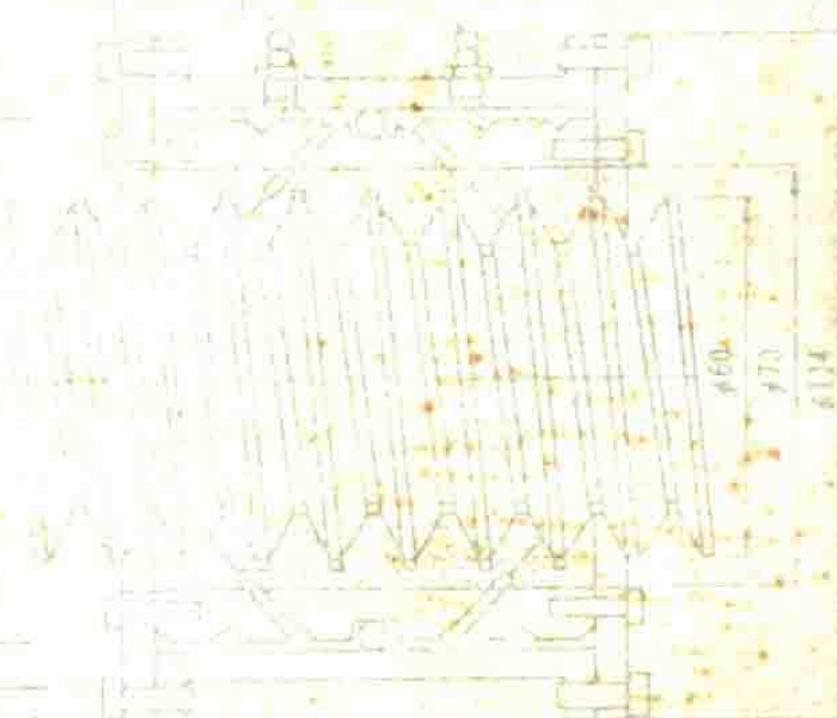
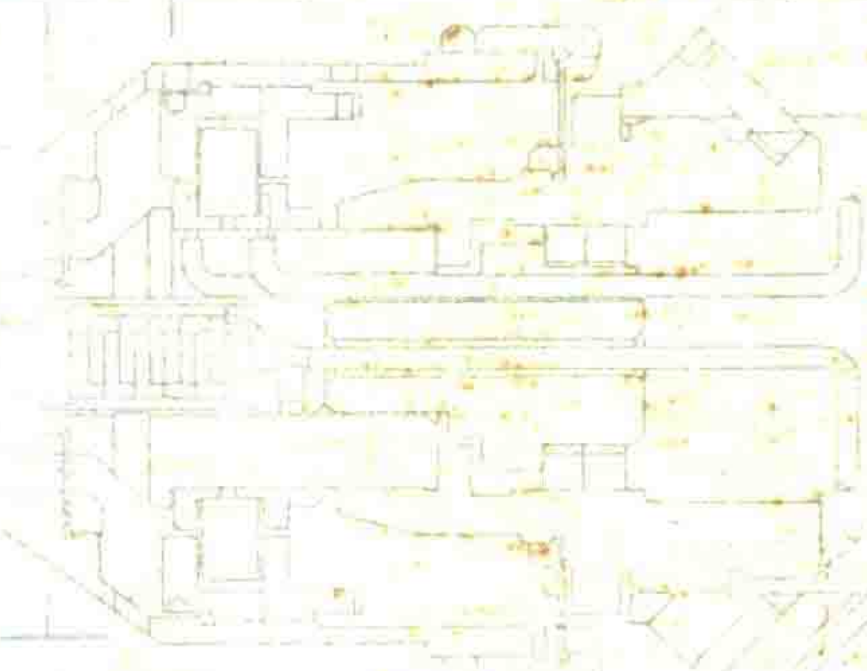
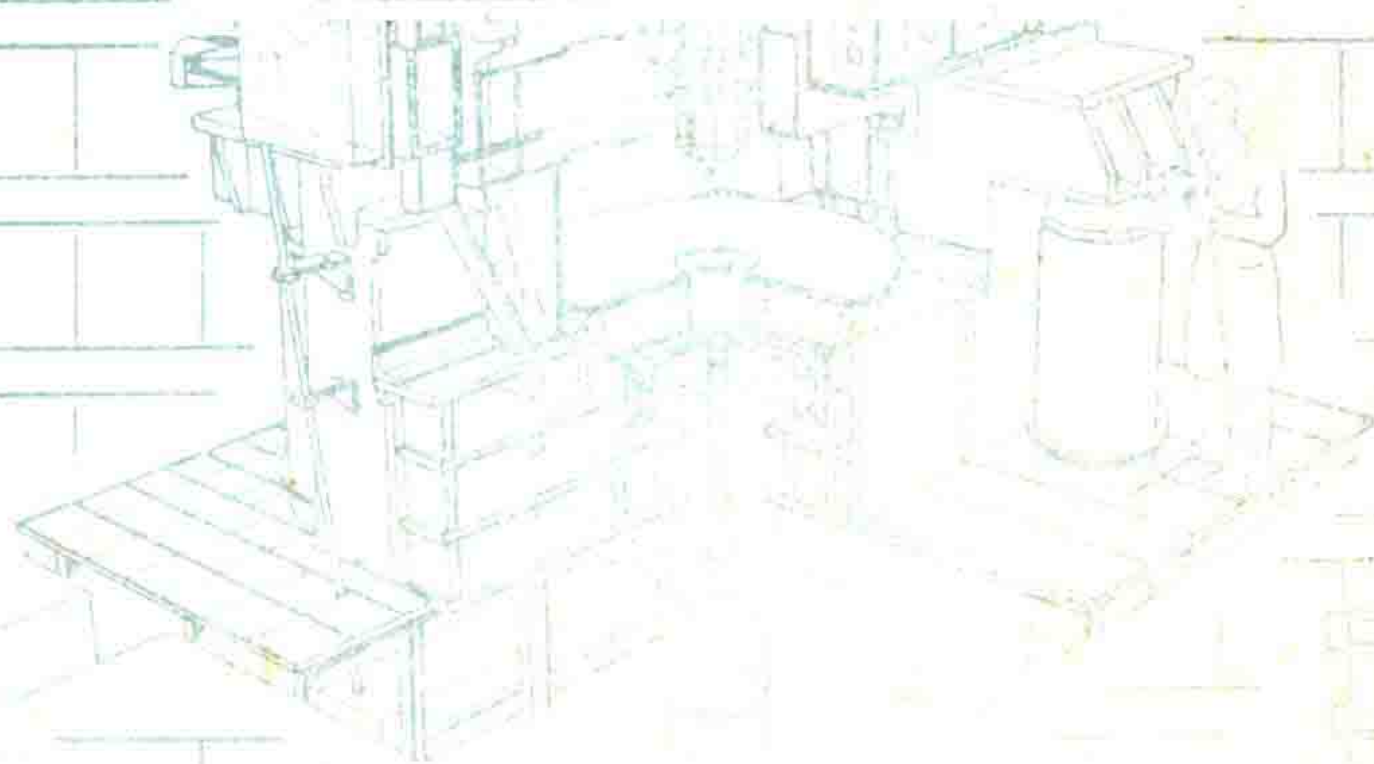
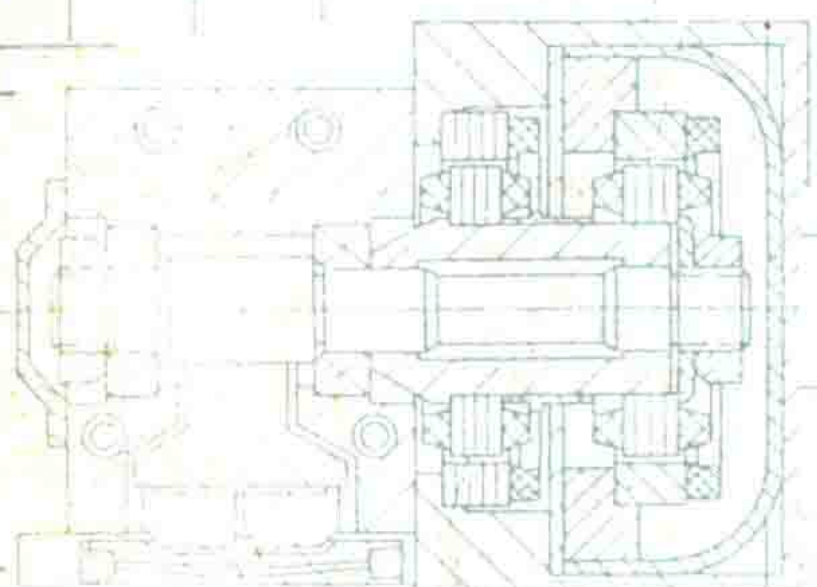


超精密加工 基础技术



航空航天部第三〇三研究所

为了实现超精密加工，机床各元部件及环境条件也需要进行超精密化。我们选择有关超精密加工机床的元部件、刀具以及机床的温度控制和加工环境的设计等文章汇编成册，供从事精密加工，超精密加工人员参考。

由于我们水平有限，谬误之处在所难免。诚恳希望读者指正。

本文集承研究员级高工吴明根同志作了全面技术校对，特此表示感谢。

编 者

一九八八年十二月

目 录

1、超精密加工机床的结构.....	1
2、超精密加工机床的驱动方式.....	1 7
3、使用压电执行元件的微量定位.....	2 8
4、超精密加工用的静压轴承(主轴).....	4 8
5、超精密加工用的导轨机构.....	6 5
6、超精密切削加工的金刚石刀具.....	8 2
7、超精密加工机床的环境温度的控制.....	9 8
8、超精密加工环境的设计—基础部分.....	1 1 1
9、超精密加工环境的设计—应用部分.....	1 3 5

超精密加工机床的结构

1、前言

关于超精密一个时期曾不时兴了，最近又活跃起来。出现了应用、研究和开发热。这是非常喜人的现象。在这样背景下，好象不管是谁只要购入空气轴承，采用金刚石刀具进行加工，就能实现超精密的加工精度。其实不然，不作基础内容的研究，是没有意义的。

在这种情况下，对超精密加工仍然要从长期发展上着手研究，在极广泛地技术开发中，想稍许接触一下机床结构的设计。

2、超精密加工机床的结构

在机床结构的设计中，不用说必须克服多方面条件的限制，尤其是超精密加工机床结构受到的限制及要求是最严格的。其主要项目有如下几项。

- ① 由能高精度实现要求加工形状的元部件构成。
- ② 经得住切削力的刚性。
- ③ 温度的稳定性。
- ④ 振动稳定性（外部和内部的振动）。
- ⑤ 长期的尺寸稳定性。

实际上，为了满足上述各项要求，现时是以经验为主进行设计的。

为了实现超精密加工，最不能忘的项目是上述①项的元部件构成。例如，以车床为例，主轴的配置有立式和卧式，它们各有长、

短。在非球面加工时，存在着机床形状的生成和 NC 控制及其中间控制，采用哪一种方式，予测精度和实际精度都是有差异的。换言之，现时在日本成为主流的 T 型轴配置并非是唯一的答案。图 1 和图 2 示出其具体示例。图 1 是使用叫作 ω 轴的辅助回转轴的例子。是美国 70 年代后期开发的。

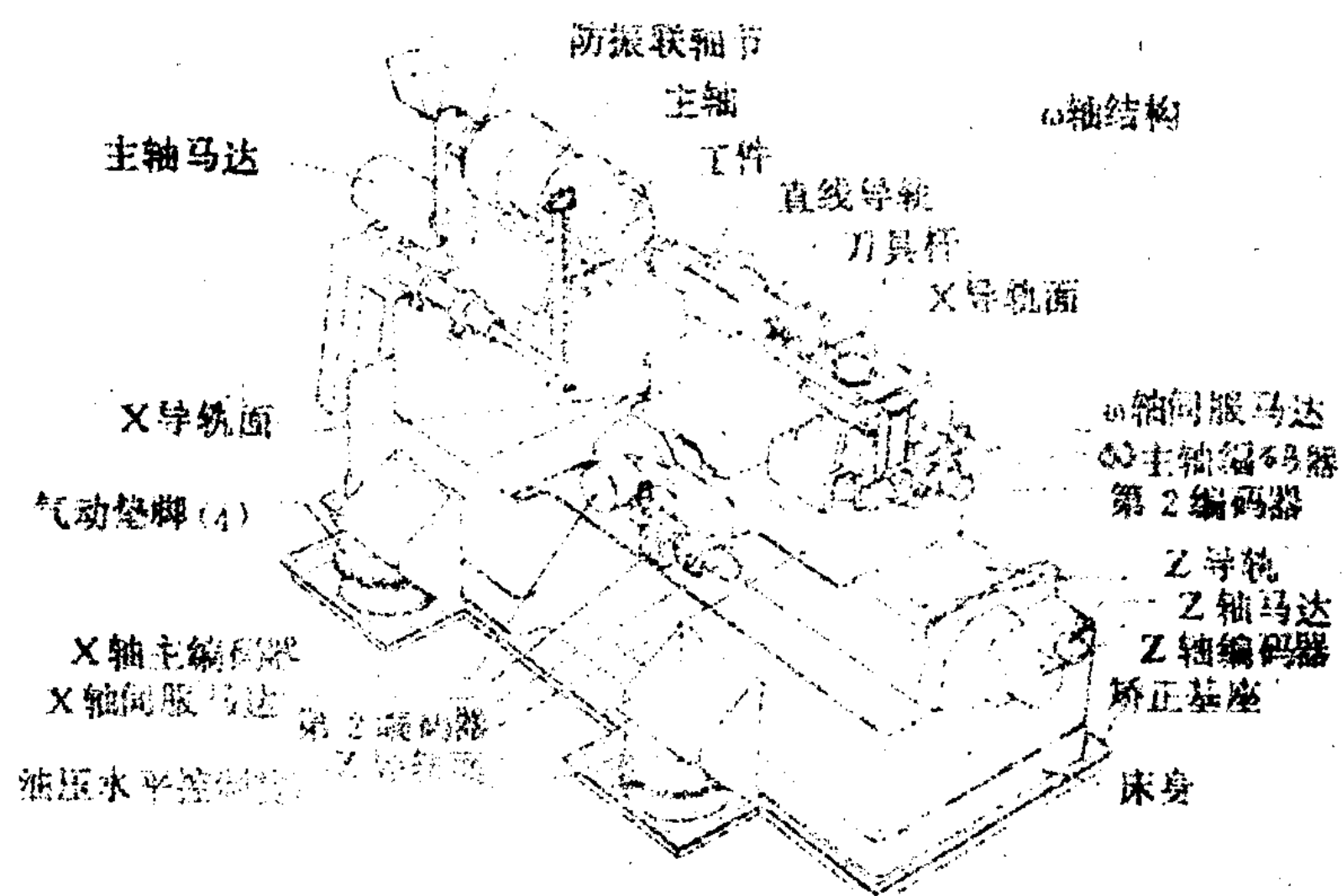


图 1 ω 超精密加工机床

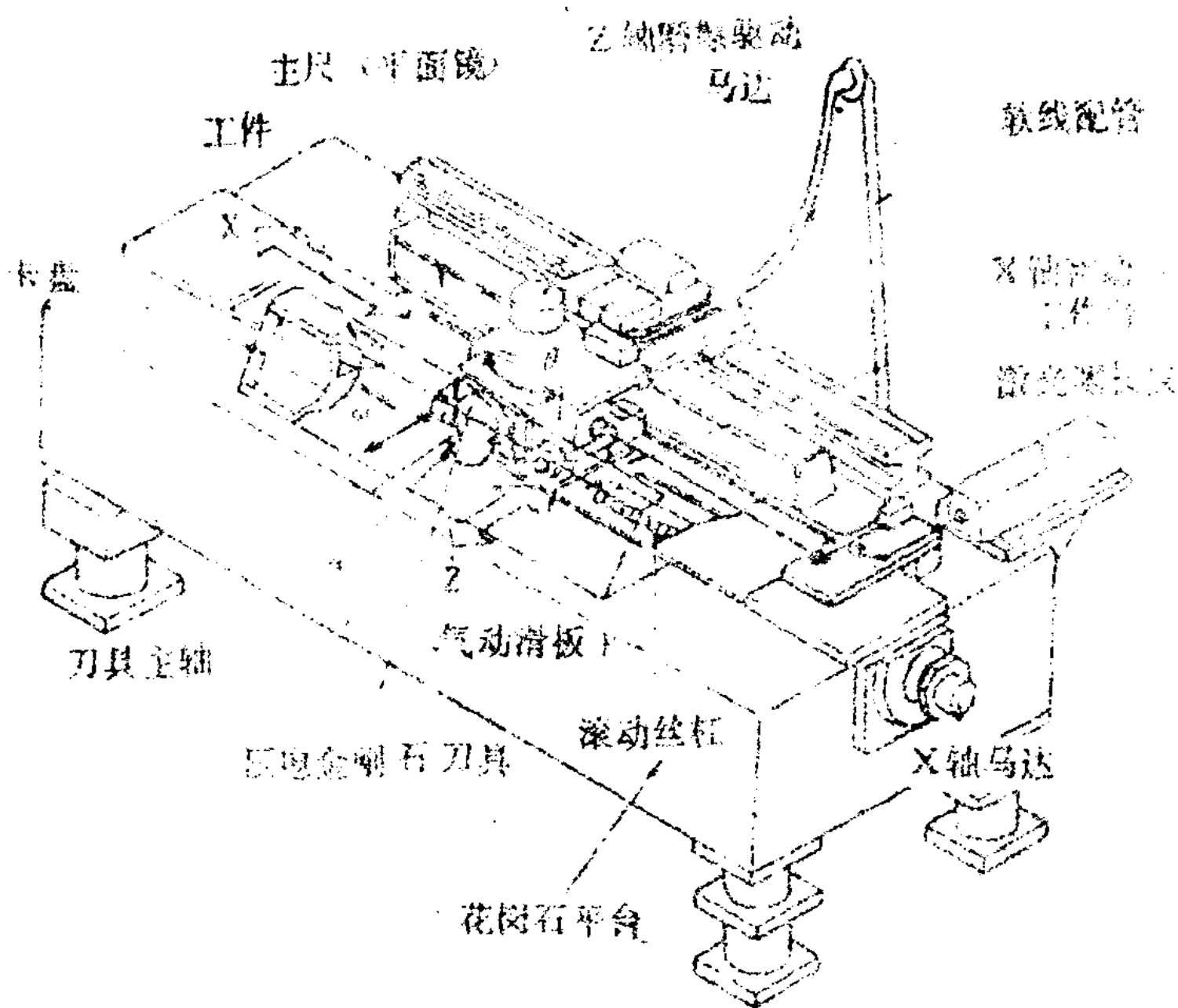


图 2 软X射线光学零件非球面加工机床
(日立制作所、中央研究所) (X:800, Z:30mm)

图 2 是日立制作所和中央研究所的非球面加工机床。是进行限定目的机床设计的最好示例。

T 形配置是最简单的配置，其优点是可以使各控制轴的载荷一致，但对大型工件，则容易产生悬肩变形。若考虑到动态平衡问题，我们认为立轴式的为好。

从这一点考虑，我们可以从图 3 所示的 LLNL 的 LODT M 机床得到许多教益。

尺寸精度的界限取决于温度的管理。若测 $1\mu\text{m}$ 的精度加工，测量 1 米的钢质零件时。需要有能控制 0.1°C 温度的条件，实现这一

要求是相当不易的。当前采用的主要方法是将恒温的流体，往整个机床上喷淋。这种方法也与结构的形态和结构材料有关。

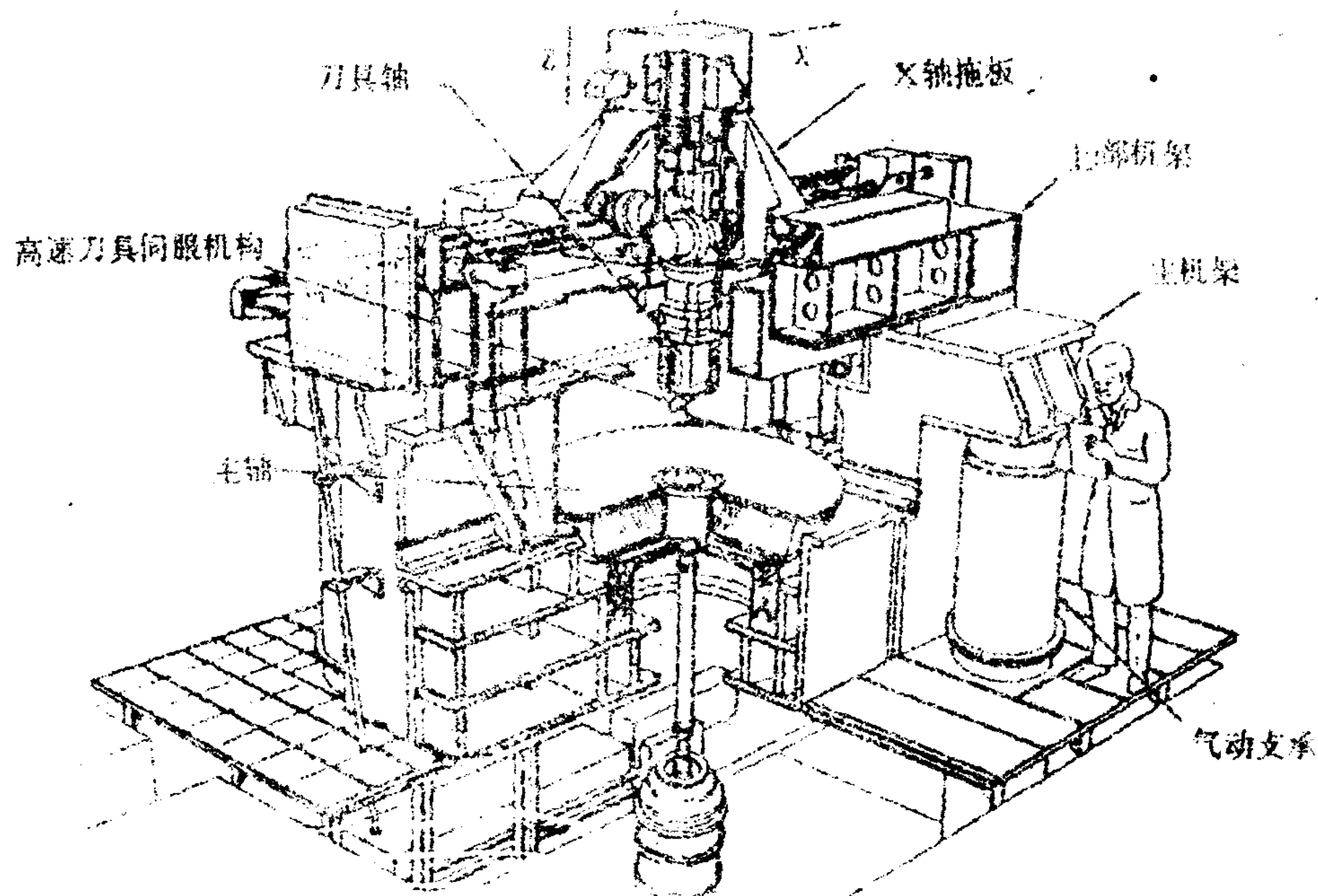


图 3 LLNL的立式大型超精密加工机床
(LODTM)

3、精密机床的温度设计

机床的温度控制不只限于对测量机和加工机床而对高精度机床来说，温度控制也是重要的。其设计方法大致可有如下三种。

①、选用与加工零件同样材料构成机床，采用对温度适应性好

的薄壁结构。

②、选择导热性差的材料作为结构材料，设计成大热容量，使之不受微小温度变化的影响。

③ 使用不受热影响的、线性膨胀系数极低的材料构成机床。

历来的设计主流是采用①项的方法。对测量机来说，SIP、Moore的测量机就是采用这种方式。而加工机床，Moore也是采用这种方式。这种设计方法的有效条件是环境的温度变化梯度非常小，对有短周期温度变化的环境，则不适宜。而对上述的油喷淋方式则是适宜的结构选择。

②项的设计是以花岗岩为代表。但不只限于用花岗岩，使用环氧混凝土和水泥混凝土是为了取得低热传导率和大热容量效果。但是，热容量大，意味着达到设定温度的时间长。仍然有优、缺点。

③的设计方法近年来突然受到重视。以往作为低线性膨胀系数材料代表的殷钢系材料在时效变化方面一直被认为有问题的，而最近开发的玻璃系材料就没有上述问题，而且易于微细加工，所以是有可能实用化的材料。

图4示出具有典型的极低线性膨胀系数材料的热膨胀特性。它们都比超级低膨胀合金优越。表1是其各种特性一览表。它比普通玻璃刚性高。可以说，如果除去成本，是适于作机床零件的。到目前为止，所公布的资料表明只应用于测量机的结构。

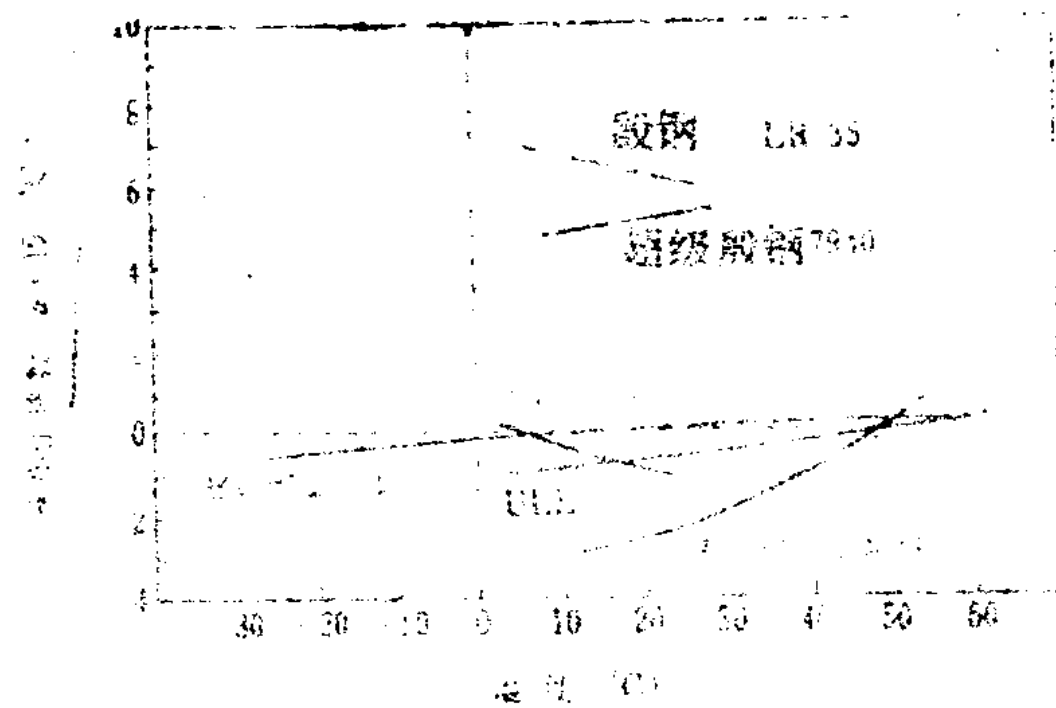


图 4 典型低线性膨胀系数材料的温度特性

表 1 七口テュール材料的特性

〔热性质〕	
热膨胀系数 ($\times 10^{-7}/K$)	
$-180 \sim 20^{\circ}C$	-1.6 ± 1.0
$20 \sim 300^{\circ}C$	0.5 ± 1.0
$20 \sim 600^{\circ}C$	2.0 ± 1.5
平均比热 ($J/g \cdot k$)	
$20 \sim 100^{\circ}C$	
热传导率 ($W/m \cdot k$)	0.821
$80 \sim 100^{\circ}C$	1.64
热扩散率 (sec^{-1}) $20^{\circ}C$	0.8×10^{-6}
〔机械性质〕	
拉伸弹性模量 (N/mm^2)	91×10^3
横向变形系数	0.24

克氏硬度、载荷1.961N(kg/mm^2)	630
比重	2.53
〔光学性质〕	
折射率	
435.8nm	1.5539
546.1	1.5442
587.6	1.5419
656.3	1.5389
雷利散射系数($R90cm^{-1}$)	
404.7nm	23×10^{-3}
435.8	16×10^{-3}
546.1	6×10^{-3}
578.0	5×10^{-3}
光弹性常数($546.1nm, mm^2/N$)	3.0×10^{-6}
〔电学性质〕	
体积电阻率(Ω, cm)	
20°C	2×10^{13}
250	4×10^6
350	1.8×10^5
700	4×10^2
电容率25°C 1MHz	7.4
电容损失25°C 1MHz	155×10^{-4}

〔化学性质〕	
耐水性 (DIN 1211)	1 (0.012mgNa ₂ O/g)
耐酸性 (DIN 12116)	4 (20—30mg/dm ²)
耐碱性 (DIN 52322)	2 (70—110mg/dm ²)

如果从控制温度的角度考虑，由导热率好的材料构成时，能迅速使整体变成均一的温度，使迅速控制温度成为可能。因热传导不好造成结构畸变，当前还没有修正的方法，因此到目前为止，只是尽力控制环境，使温度趋向均匀，从这种观点来看，可以把铝作为具有良好特性的材料。有与铝一样的导热性和殷钢一样的线性膨胀系数的材料，从导热方面来看，它是现在最理想的结构材料。

4、振动设计

超精密加工机床，最忌振动，这是不需赘述的，但本文想从另一角度谈一下加工机床结构的振动设计问题。

首先，是伴随切削的振动。通常进行的软金属微量切削，所需的切削力是几 N 以下，在整体结构设计时，可以不必太注意。相反，在刀具的周围和工件安装的局部范围，多半受到不能采用刚性设计的限制，这就是个问题。

机床内部的强制振动是一个非常大的问题。为了解决这个问题，运动部分需要彻底地轻量化和充分的动态平衡。光有满足刚性的床身设计是不够的，还必须有能吸收后述的不平衡振动的床身重量。

就消除外部振动的问题，有待抑制方式的进一步研究。普通的

抑制方式，是由床身的支承刚性、支承位置及床身的自重等三部分决定的。但作为振荡形态的大前提，往往是所有部分都是同一相位，而且都作为刚体进行振动的形态。若考虑 $0.01\mu\text{m}$ 级的振动而把整个构造体都看成刚体，这似乎不太合理。因此，床身的支承位置应像图5(b)那样，提高支承点而不是图5(a)那样，还必须考虑切削点正好是抑制的节点。进而还要考虑到惯性，使上部的构件轻量化。相反，为了增加惯性，必须增加床身的重量。

即使是更高次的方式也是同样的，必须使切削点成为节点那样来设计床身的形状。

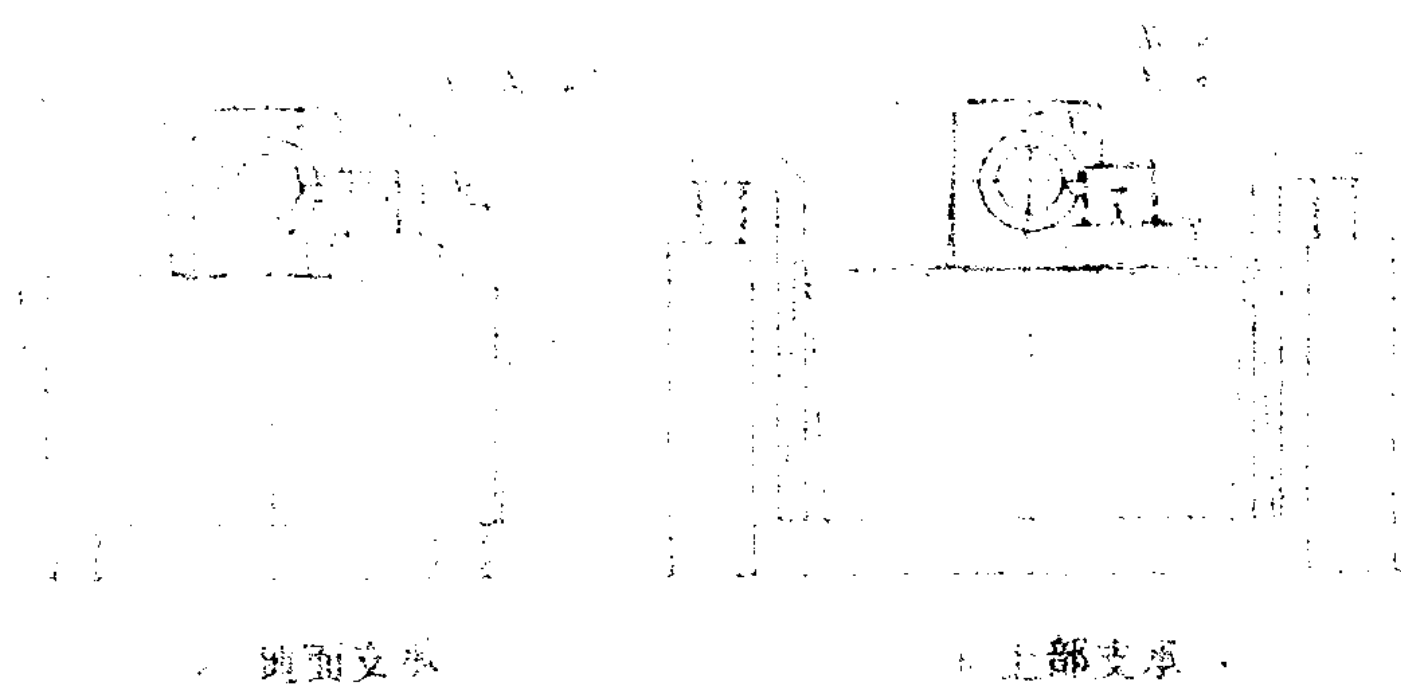


图 5 支承位置对制动方式的影响

5. 采用新材料制造的超精密加工机床

作为上面所述的内容的背景根据，现在叙述一下我们所开发的

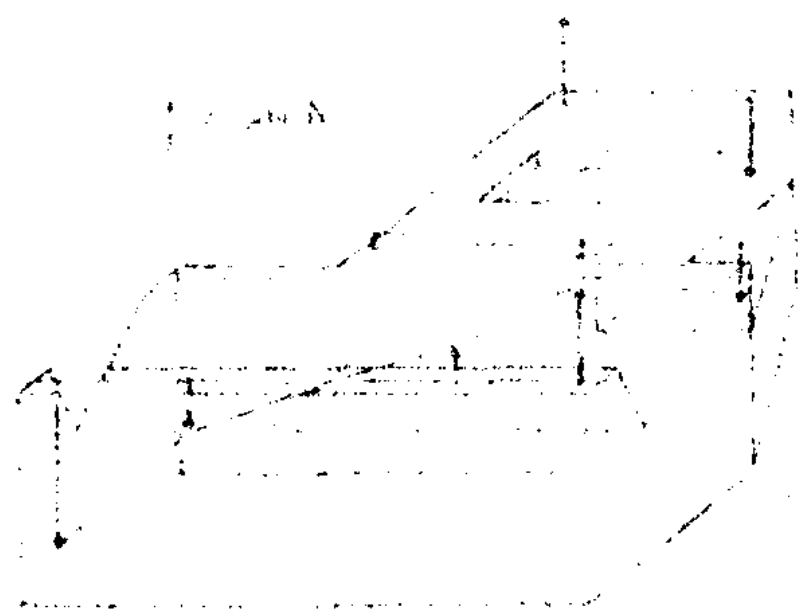
机床概况。

床身部分是氧化铝陶瓷成形的单壳床身。床身的尺寸是 $600W \times 630L \times 280H\text{mm}$ ，各部的厚度大约是 20mm 。作为整体除薄壁外，比重也轻（ 3.8 ），整个床身重量只有 71 公斤。而同样尺寸的铸造床身则重达 168 公斤，是其重量的 $2\frac{1}{4}$ 。另一方面，由于弹性系数高二成，所以比强度是有利的。

所用的氧化铝陶瓷的线性膨胀系数是 4.3 ，约是钢的 $1/3$ 。导热系数是 $0.04\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}$ 是钢的 $1/4$ 。因此，可以设计成适应环境温度变化，而且电机等发热体的热又不向周围扩散的结构。

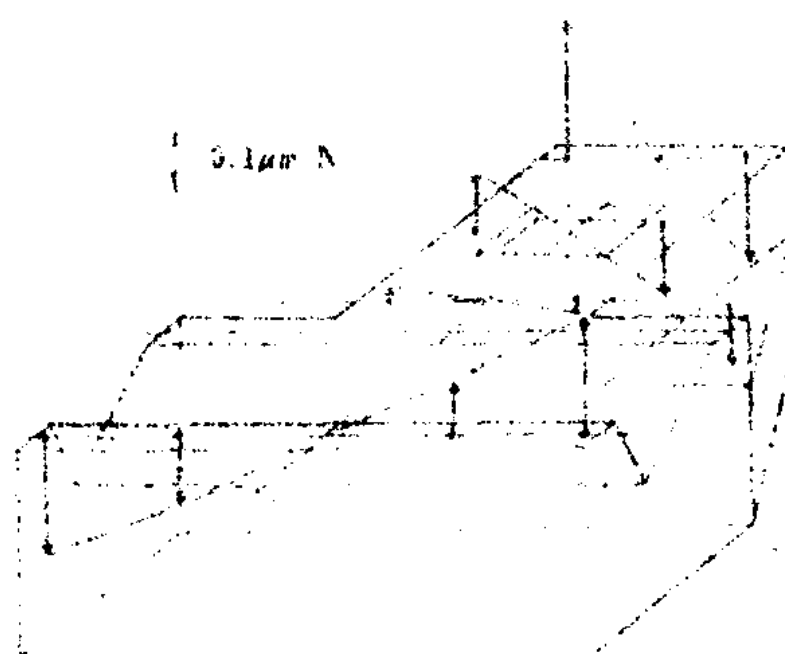
图 6 是床身单体振动模的测量结果。同时也示出铸造床身的振动模的测量结果。振动模的形态是同样的，这是由形状设计决定的而与材料无关。模的形状是螺旋形的，恰好切削点附近就是节点。两者之差就是固有振动频率，刚性高的陶瓷材料其固有频率高 1.7 倍。

使主轴加载並测量主轴—导轨工作台之间频率传递函数的结果，如图 7 所示。图中的 A 是使主轴加振，然后在工作台上的工件位置测得的响应的结果，B 是使导轨加振，同样在工作台上测得的结果。A 图在 230Hz 附近所见到的共振是主轴的固有值。主轴的刚性决定着切削点的刚性。床身—工作台间的刚性与主轴相比，高一个数量级，这是没有问题的。



(a)陶瓷导轨振动模的测量
结果 (510Hz)

(a) 陶瓷导轨振动模的测量结果



(b)同样尺寸的铸造导轨的
振动模的测量结果

(b) 同样尺寸的铸造导轨振动模的

图 6 导轨单体的振动模的测量结果 (陶瓷
导轨和铸造导轨的比较)

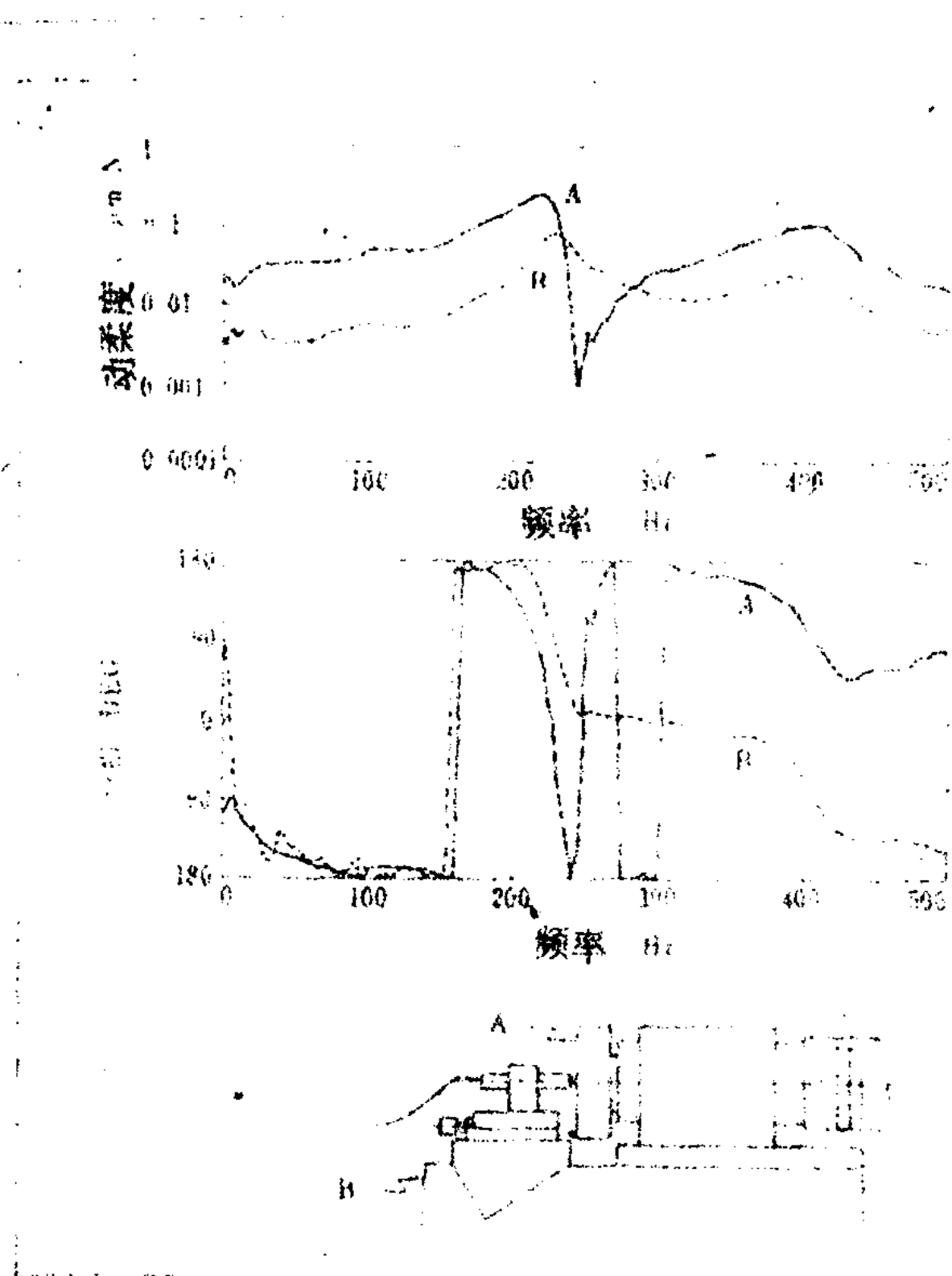


图 7 主轴工作台、床身工作台之间相互
传递函数的测量结果

下面给出热特性的测量结果。主轴转速保持在 2400 rpm ，测量各部的温度变化，其结果如图 8 所示。试验室的温度为 $20.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 。床身的温度几乎同室温一样，不受主轴发热影响。主轴的热在上升到 43°C 之前不向周围扩散，所以热位移控制比较容易。

作为内部振动源主轴的不平衡振动状况，如图 9(a)、(b)所示。图中所示是在主轴转速为 3500 rpm 轴向得到平衡时，测得的各种

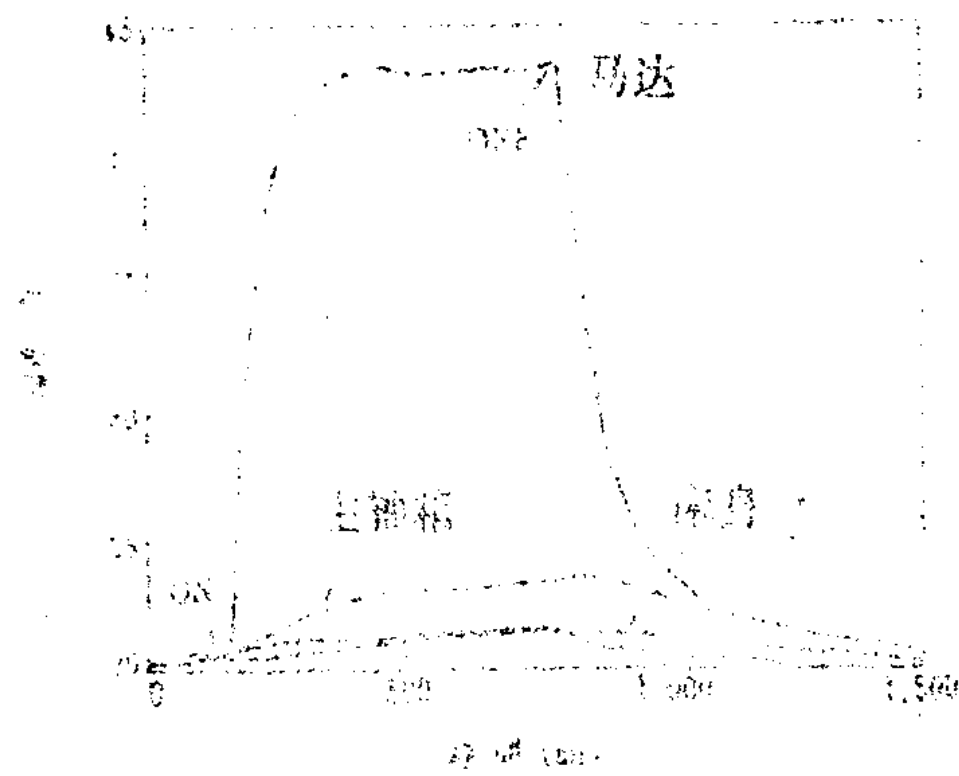


图 8 主轴回转时各部的温度上升量
(主轴转速 $2,400 \text{ rpm}$)

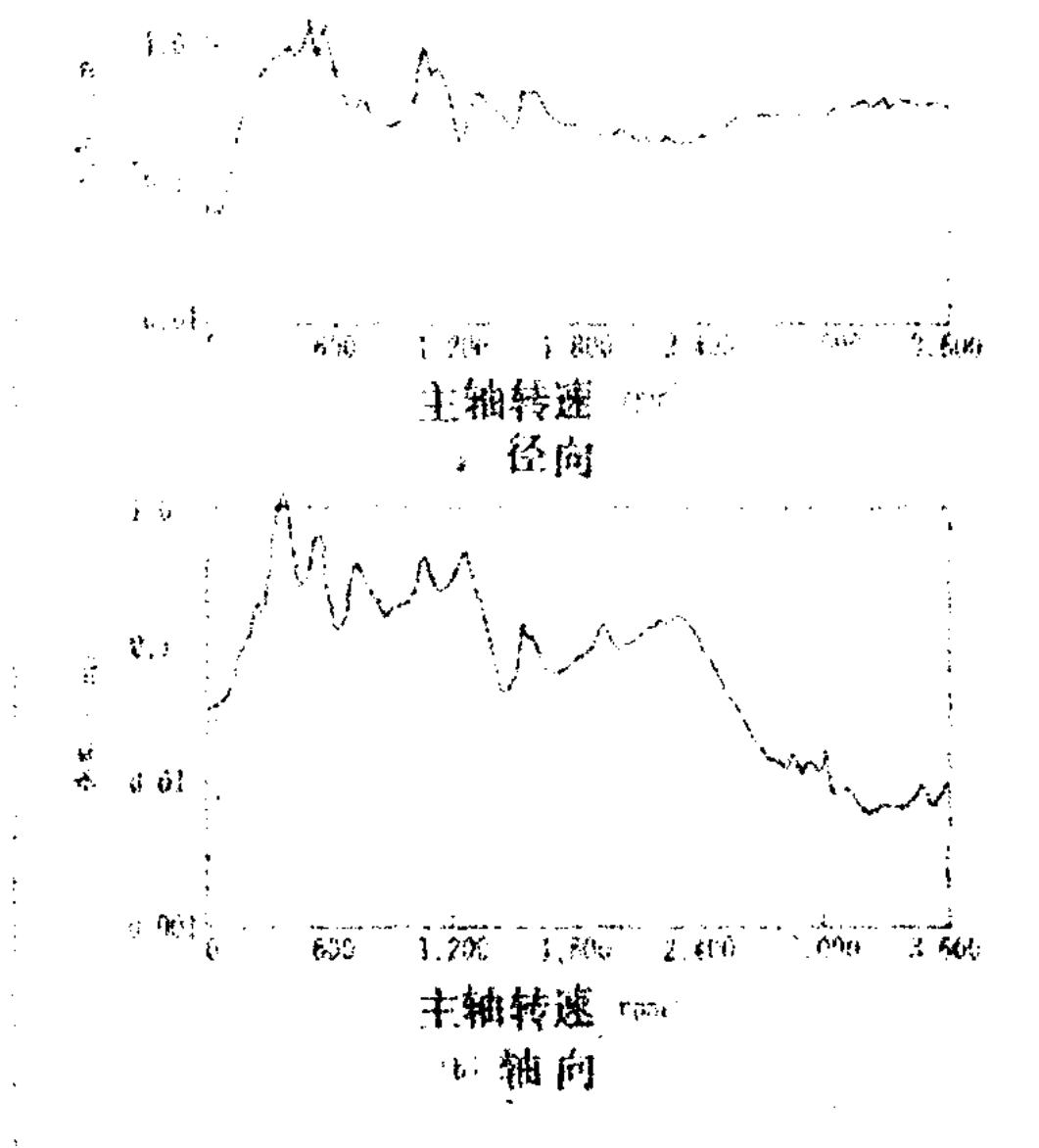


图 9 基于不平衡的振动特性 (在 3500 rpm 时, 取得平衡, 改变主轴转速的情况下的工作台的振动)

转速和工作台位置的振动振幅的结果。(a)是径向结果,(b)是轴向结果。

这次进行的平衡是为了单方面修正,只在单向一个频率的条件下取得平衡。振幅值比较大是因为床身的质量比主轴转动体的惯性质量小,为了缩小不平衡的振动影响,床身必须有一定的重量。

下面示出由试制的机床进行切削的结果。加工方法是刀具回转式的飞刀切削。加工条件如下。

刀具:天然金刚石。刀尖半径为5 mm。

工件:含镁的铝合金。

刀具转速: 3450rpm

工作台进给速度: 0.02mm/rev

切深: $2/\mu\text{m}$

切削液: 白灯油

切削后的加工面,用三维粗糙度测量仪(小坂研究所制ET-10K)进行了测量,其结果如图10所示。整体可以见到 $0.05\mu\text{m}$ 左右的波纹,而粗糙度是 $0.02\mu\text{m}$,是良好的镜面。

图11是提高工作台的进给速度进行切削时的截面曲线。结果看不见波纹,其原因可认为是在于工作台导轨和进给机构。改变润滑油的种类和用量,波纹度则发生变化。显现出滑动导轨的微妙性。相反,有利的是不受外部振动的影响。

6、向未来的超精密加工进一言

超精密加工的范围与当今实用化有着极大的矛盾,在期待着新的发展。对于加工零件趋向大型化和微型化两个方向的进展的机床,结构设计