

机床动态试验

(技术报告)

美国空军材料实验室

美国辛辛那提大学

1970年4月

北京机床研究所译

1977·12

录

第I章 绪 言	1
第II章 确定机床/金属切削系统动态特性的试验方法	3
II.1. 建立机床动态规范的试验方法的评述	3
II.1.1. 切削试验	3
II.1.2. 激振试验	4
II.2. 确定机床动态特性所需的数据	7
II.3. 测定机床频率响应特性的方法	7
II.3.1. 用电液激振器的正弦力作相对激振	7
II.3.2. 用非接触激振器的正弦力作相对激振	10
II.3.3. 用切削时的随机力作相对激振	14
II.3.4. 获得机床频率响应特性方法的总结	15
第III章 动态试验的设备	17
III.1. 导 言	17
III.2. 系统的概念和范围	17
III.2.1. 频率响应和传递函数	18
III.2.2. 复合信号的频率分析	22
III.3. 动态试验室	22
III.3.1. 机械阻抗自动分析仪	22
III.3.2. 数字式数据的取得	27
III.3.3. 磁带记录器	30
III.3.4. 激振器	31
III.3.5. 传感器	31
III.3.5.1. 传递函数	31
III.3.5.2. 振动型式	36
III.3.5.3. 强迫振动	39
III.3.6. 通讯控制台	39
III.3.7. 动态试验车	39
第IV章 现场试验大纲的制订和试验方法	43
IV.1. 引 言	43

IV.2.	对重要类型的机床和生产者的评述	43
IV.2.1.	机 床	43
IV.2.2.	参与的生产厂	44
IV.3.	机床类型的说明	46
IV.4.	予试验场地的检查	47
IV.5.	试验现场的布置	47
IV.6.	保密措施	48
IV.7.	试验数据的取得	50
IV.7.1.	轮廓加工机床的试验夹具	50
IV.7.1.1.	轮廓加工机床的工件模拟	50
IV.7.1.2.	轮廓加工机床的刀具模拟	50
IV.7.2.	加工中心的试验夹具	54
IV.7.2.1.	加工中心的刀具模拟	54
IV.7.2.2.	加工中心的工作台夹具	55
IV.7.3.	传感器	57
IV.8.	试验数据的记录和处理	58
IV.9.	试验数据的分析和介绍	59
第V章	动态试验的汇总表	60
V.1.	引 言	60
V.1.1.	统计数据的表格式样——静特性	60
V.1.2.	统计数据的表格式样——动特性	67
V.1.2.1.	最大动柔度	67
V.1.2.2.	重要的共振数	70
V.1.2.3.	重要共振的平均阻尼系数	70
V.1.2.4.	重要共振阻尼系数的标准偏差	72
V.1.2.5.	主共振平均阻尼系数	73
V.1.2.6.	主共振阻尼系数的标准偏差	73
V.1.2.7.	主导共振的平均放大系数	74
V.1.2.8.	主导共振放大系数的上限	74
V.1.3.	列表数据的一般格式	74
V.1.4.	同一产品和型号机床的多次试验	75

V.2.	三主轴轮廓铣床的统计数据	75
V.2.1.	第一种型式的轮廓铣床	76
V.2.2.	第二种型式的轮廓铣床	76
V.3.	加工中心的统计数据	103
V.4.	结果和结论	117
V.4.1.	将所提供的机床和其他机床进行比较	117
V.4.2.	划分机床类别	117
V.4.3.	把工作成果推广到所列其他各类机床去	119
V.4.4.	总 结	120
第VI章	再生振颤的理论和机床动态性能的规范	121
VI.1.	绪 言	121
VI.2.	资料研究——铣削中的再生振颤	121
VI.2.1.	计算铣削稳定图的方法	122
VI.2.1.1.	铣削振颤的单等效齿分析法 (S.E.T.A)	122
VI.2.1.2.	铣削振颤的时间恒定分析法 (T.I.A)	123
VI.2.1.3.	铣削振颤的时间变化分析法 (T.V.A)	125
VI.2.1.4.	用模拟的方法计算稳定性图形	129
VI.3.	属于整个振颤研究计划的AMI工作结果	129
VI.3.1.	AMI在振颤研究中的研究结果—— 单等效齿的分析法	129
VI.3.2.	AMI在振颤研究中的研究结果—— 时间恒定分析法	130
VI.3.3.	AMI在振颤研究中的研究结果—— 时间变化的振颤分析法	130
VI.3.4.	结 论	139
第四章	机床的动态规范	141
VII.1.	绪 言	141
VII.2.	切削试验	141

Ⅶ.3.	基于频率响应技术的验收试验	143
Ⅶ.3.1.	采用频率响应试验的优点	143
Ⅶ.3.2.	频率响应试验的缺点	144
Ⅶ.4.	过渡计划——现场试验期	146
Ⅶ.4.1.	绪言	146
Ⅶ.4.2.	第一阶段	147
Ⅶ.4.3.	第二阶段	150
第Ⅷ章	结论和建议	151
Ⅷ.1.	绪言	151
Ⅷ.2.	频响技术的可能用途	151
Ⅷ.2.1.	机械讯号分析/预防性的维修	152
Ⅷ.2.1.1.	机器强迫振动信号的历史	152
Ⅷ.2.1.2.	机器机械阻抗的历史	152
Ⅷ.2.2.	诊断的应用/检测骚动性的机器振动	152
Ⅷ.2.3.	随机信号的福利衰分析	152
Ⅷ.2.4.	系统的统一化/插件法的结构分析	153
Ⅷ.2.5.	品质控制的应用	153
Ⅷ.2.6.	工业噪声和声学分析	154
Ⅷ.3.	机床动态试验流动站(车辆)	155
Ⅷ.4.	动态试验室系统的概念	155
Ⅷ.5.	专用机床类型的专门目的的验收试验	161
Ⅷ.6.	建议	161
	参考资料和书目	162

第I章 绪 言

机床动态试验课题是在美国空军制造工艺部材料研究室发起并于1967年9月1日开始的。本报告将在以后的章节里介绍近23个月工作中所得出的研究成果。

本课题总的目的是建立一个现场试验期，以便规范的方法得到评定和完成，并从一大批数据中选出那些可以作为标准规范的数值，另一方面可在机床广大的使用者、购买者和制造者的直接联系和参与下，取得机床动态性能的可靠的验收方法。

课题工作经过了三个研究阶段。在第一阶段，研制了自动流动试验车，包括夹具、激振器、传感器及为机床完整的动态试验所需的仪器设备。

在第二阶段，建立了现场试验期，以收集不同厂家制造的同类型机床的大量数据，这些数据可以用作评定试验方法、技术要求和动态特性选用值的评比指导。

在第三阶段，分析了试验数据，并用来评定试验方法和动态试验技术要求。

制订动态规范和评价机床的方法在第II章内叙述。第III章叙述为进行现场试验所研制的流动试验车装置以及设计这些装备时所应遵守的基本原则。

第IV章叙述试验方法和操作技巧。

第V章介绍现场试验的结果。第VI章讨论关于预测切削自振的现代理论。

第VII章叙述关于用频率响应试验作为机床验收试验的现实性和可能性的研究所得到的结论。

第四章介绍将来的试验方法和设备，以及用特征值对机床进行比较的结论和建议。

但是，由现场试验期所收集到的数据提示：切削自振予测算法研究中所作的某些传统假说应该重新审查。

在本课题所收集到的证据基础上，可以得出结论，在一定范围内，用频率响应分析技术来作验收试验对很好地区分机床的级别是可行的和理想的。

此外，为了作这种形式的验收试验和进行性能评价，可以研制经济的、紧凑的、专用的数据测试单元。

第Ⅱ章 确定机床/金属切削系统动态特性的 试验方法

Ⅱ.1 建立机床动态特性试验方法的评述

本研究的目的是制定科学地评价和验收机床的动态特性所需的试验方法。

试验方法必须具备下列功能：

1. 能对由不同厂家制造的同类型机床进行快速试验，以得出足够多的数据，用来评价每台机床的动态特性，并以此作为选择动态规范值的指导；

2. 能完成动态验收试验；

3. 能完成结构评价试验；

4. 能指导试验以帮助确定改进设计的影响和对动态性能的正确测试。

下述方法已被建议用于评比机床动态特性：

1. 切削试验：按Trusty 所提出的(1)；

2. 多路复合模拟：按德国慕尼黑工学院所创制的(2)；

3. 品质因素：按Tobias所提出的(3)；

4. 动刚度与马力之比：按辛辛那提铣床公司所提出的；

5. 在互相垂直的座标方向上的频率响应：按辛辛那提大学所提出的(5)。

上述几种方法，各有其优缺点。下面各节将简要地加以评述。

Ⅱ.1.1. 切削试验

因为机床最主要的目的是切削，因此振动规范最好建立在实际切削振动的基础上。其次，切削试验还有一个优点，那就是它不需要象各种激振试验中为激振机床所需的那些专用设备、技术和知识。最后，机床的自振特性是通过实际切削试验而直接评定的，而且，用这一方法已积累了一些经验。这些试验通常给出一个自振特性的全面估价。

虽然如此，而切削试验通常不能作出机床动态特性的定量测定。

它们不能指出机床实际上形成自振的薄弱环节。振动受刀具的几何形状和条件的影响很大。当刀具的条件改变时，振动情况也改变。同时，振动情况还随切削速度、刀具半径、进给量和材料性质等参数的变化而变化。

往往一台机床虽然动态特性很不好，却可以在极为局限而恶劣的切削条件下不出现切削振动，而同一机床在几乎所有的其他切削条件下都发生振动。因此，除非对每类机床非常小心地规定好些切削条件，每一条件都是为试验一个特殊的动态性能而设计的，否则通过切削试验来测量和规定机床动态性能将是不现实的。

Trusty 建议，为了有效而全面地评价一台机床的自振特性，需要进行 80 个切削试验(1)。

II.1.2 激振试验

由于一台机床的自振和振动特性可以直接由所测出的频响曲线来说明，故可在测量动态频响的基础上得出比切削试验更为可靠的动态规范。这一点并不忽视下述事实：切削是机床的最终目的。为使这种做法得到采纳，必须收集在实际切削条件下的比较数据。

当机床部件的位置变化时，机床结构的动态特性也能发生变化。但是一般说来，这些特性的改变，在部件位于规定的工作范围内是很小的。用激振法，在严重的情况下（五轴机床）需要在部件的几个位置评定机床的特性，以给出最大、最小和平均动态特性值。在这些情况下，动态特性作为部件位置的函数，必须反映具有允许误差的平均特性值。

通过试验发现，只有在机床的直线性和水平调整得和规定的数值相等或更好时，才能获得一定的加工精度。当制造厂制造出一台机床后，他提供给购买者以直接由装调、精度以及其他单独试验中得出的数据。这些数据，虽然直接与切削性能有关，但很难从实际切削结果的分析中精确地得出。因为各种影响因素混在一起。对于动态特性和验收试验也是这样。企图通过切削来获得机床的动态特性过于麻烦，并且至多也只能给出定性的数据。另一方面，通过建立标准动态试验和分析方法，包括设备和仪器，以得到机床的动态特性，就可能在全部的机床动态特性方面得到准确和重复性好的数

据。于是，可以通过试验和分析大量机床，来建立为把自振和振动切削性能与动态数据联系起来所需的经验。

为评定机床动态性能，已经提出了好几种激振试验的方法：

a) 多路复合模拟法

在文献中看来，这种方法可能是试验机床的动态特性的最典型和最完善的方法。而且它仍然可以有效地应用。它要求测量纯粹的非偶合的振动形态、有效阻尼和固有频率。

虽然固有频率可以准确地测出，但是要测出偶合系统中的有效阻尼是很困难的。同时，为测量单自由度的振动型式所提出的方法在最好的情况下也只是近似的。然而，最严重的缺点是在应用这一技术时所必须的纯振型的测量。假如两个频率很接近，那就很难得到只与一个单独频率相联系的纯振动形式，而且往往需要用几个激振器。

这一技术的应用无疑将得到更广泛的采用。但为了证明这种方法的实用性需要进行大量的工作。此外，为了使这种方法能广泛应用，还需要研制专门的设备和自动化系统。而推广这种方法时，还要考虑一个问题，那就是工业部门是否能接受这种为了应用它而需要专用设备和专门知识的技术。

b) 品质因素法

Tobias曾经提出了一种最简单的激振试验方法⁽³⁾。而后Tlusty发展了这种方法。在切削厚度方向的运动与切削力之比的曲线图上的负实数部分在给定的切削规范内是与机床的无自振极限切削宽度直接有关的。将一些同类型机床的这些数值列表，就可以比较这些机床的实现指定切削规范的能力。

这是评价机床最简单的方法，需要最少数量的设备和知识的方法。然而，用上述方法所得出的品质因素在很大程度上取决于被选定的切削规范所控制的测量方位。比如，保证无振颤切削的值在一个方向上可以是100，在另一方向则为1，所以，一台具有很差的总动态特性的机床可能在一个特定方位上表现出很高的品质因素，但在差不多所有的其他方向上则是很低的。因而如不对每种机床规定大量的排列方式，这些排列是为了试验机床在一定方位的动

态特性的，那么品质因素法看来是过于简单化了。

c. 动态刚度与马力之比的方法：

这种方法与上述的品质因素法很相近，除了它企图将指定的数值应用推广到更多种类的机床之外。这种方法具有与上述方法相同的优缺点。然而，假如它能表明，对于给定的各种机床可用马力作为重要的公共的决定因素来表示，那么比较这些数值将是更有价值的。

d. 在座标方向上的频率响应法：

在机床/金属切削系统内部振动的有害影响决定于刀具和工件之间的相对运动。一般说来，这些有害影响对于任何预定的切削条件，都是可以确定的，假如机床动态响应在所有它的座标方向上为已知的动态力（包括力和扭矩两种情况）的函数的话。例如对于一台机床，通常可以规定纵向、横向和轴向（多轴机床不能明确规定方向，但对这种机床可以选定一组方向，并始终一贯地应用）。全部直线和扭转方向的特性曲线图可以用现代化设备很快地得出。于是，机床的总的动态特性在通常情况下可包括在下列响应矩阵内：

$$\begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \\ \Phi_x \\ \Phi_y \\ \Phi_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{16} \\ G_{21} & G_{22} & \dots & G_{26} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ G_{61} & G_{62} & \dots & G_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

式中 δ 和 Φ 相应地为工件和刀具在纵向、横向和轴向内的相对线位移和角位移，而 F 和 T 是加于这些方向的相对力和扭矩。 G 则简单地表示在一定方向由于力在该座标方向或其他座标方向作用时的动态特性。

响应矩阵的好处是，单独的响应函数（ G 因子）包含了所有的与机床动态性能有关的，并为评价一台机床的自振和振动所需的全部数据。如果能表明，对一台具体形式的机床的两、三个重要响应的性质规定是完全保证该机床在一般切削范围内加工不产生自振或

振动的话，那么，这将对机床动态规范问题的一个理想的解决办法。

因为用这种方法可以得出比前面说的其他方法较为简单的评定方法和数值。所以这种方法看来包含了全部可能的数据，这些数据只需用较简的技术便能获得。于是，一开始的试验程序和数据收集计划就是在这种较普通的水平上开始的。而且，从有秩序的方式中产生出简化的经验已被摸索到了。

II. 2. 确定机床动态特性所需要的数据

为确定机床在金属切削过程中动态特性的全部数据全都包含在一组表明机床和工件之间的力和运动关系的传递函数（频率响应图）之中。频率响应曲线是机床的静刚度值，共振频率，阻尼特性和最小动态刚度的直接测量和永久记录。从这组曲线可以估价机床在任意切削规范下的自振界限。机床的响应特性（切削能力）可用间断切削和强迫干扰力来获得。这些曲线同样给出改进设计对一台机床的动态性能影响的完整记录。

把机床在部件不同位置时沿着每一个座标方向，具有一个偏散范围的重要的静刚度和动刚度平均值列成表，就可比较各台机床的动态性能。也可以用确定一台机床与另一台机床的可变性来对相同的机床作比较，这样，这种方法也可用作在生产新机床时鉴定制造和装配的质量。这些表格化的数值可以作为维修工具，用它很快地判断一台机床的能力已否因长期使用造成磨损或因改变部件的调整而损坏了。

II. 3. 测定机床频率响应特性的方法

按目前水平，确定前述频率响应数据的试验方法有好几种，它们相互间有很大差别，也各有其自己的优缺点。但是，在这些方法中，实际上可用于工业生产的本质上说来只有三种。下文将简要地加以说明。

II. 3. 1. 用电液激振器的正弦力作相对激振 (4, 6, 7, 8,)

第一种试验方法也是最老的和在美国最广泛应用的试验方法。事实上，它是如此的被广泛采用，乃至于几乎是目前美国采用的唯一方法。这种方法就是辛辛那提铣床、磨床制造厂和辛辛那提大学合作报告中所叙述的。

这个试验方法包括使用电液装置的相对激振力。这种激振器，往往设计成紧凑的装置，安装在机床刀具夹具和用以代表工件的第二个夹具之间。通常在实践中工件夹具做得尽可能牢固并与试验的强迫（或抑制）相一致，这样一来，机床的动力特性就不受工件的任何动力特性所影响，试验就真正仅仅是关于机床本身的。

激振力波形往往是在一静态力波形上叠加上正弦力的波形，它的瞬时值用两种力传感器中的一种来测量：

1. 压电式压力计和

2. 固态电阻应变压力计

辛辛那提大学的试验中，采用液压激振器系统，和采用伺服装置来保持在整个试验频率范围（10~1000Hz）内力的恒定幅度。

构件的变形可以用几种方法测量。假如采用地震式仪器（加速度和速度传感器），则相对变形可用测量刀具和工件的各个运动部件位移，然后按一定方式联合这些信号，就可得出主轴对于工件的相对偏转。刀具和工件之间的相对运动也可以用相对运动传感器直接测量。

一旦得到了从力和运动传感器来的信号，这些信号就进一步被放大、滤波和记录，用人们熟悉的如传递函数分析仪（TEA）专用数据处理系统来得到机床的频率响应曲线。在TEA的新设计中有几种不同程度的改进。这些仪器单元已被日益现代化，到目前它们已包含磁带和穿孔纸带记录器，恒定力/运动伺服装置、求积单元等等。关于传递函数分析仪在本协议工作中的应用将在本报告中的第三章作完整的叙述。在第四章中将叙述为机床快速试验而专门设计的专用仪器装备。

在实际作机床试验时，主轴是不转的。除此之外，机床情况则尽可能地接近于实际切削条件。在作数控机床试验时，控制箱实际上处于“工作”状态，使移动部件（工作台、主轴滑鞍、横溜板等

等)都处于控制回路。

机床的频率响应曲线用下列三种图形中的一种来记录：

1. 波德 (Bode) 图

2. 极坐标图

3. 增益/相位图

实际上在美国波德图是表示和记录频率响应数据的标准方法。然而在欧洲,看来极坐标图是表示频率响应数据所普遍采用的。第三种方法,也是用得最少的,是增益/相位图。增益/相位图通常与品质图(4,9)联用,以计算自振区的边界线。

用此方法获得机床频率响应的主要缺点是在试验中机床的主轴不转,对于那种主轴振动形式起主要作用的机床,试验指出,主轴的转动可能对机床的柔度发生显著的影响。在一些例子中观察到了这一点,主轴的转动增加了系统的阻尼,从而降低了受影响的振形的柔度。

关于这一点,Opitz(10,11,12)也曾发现在测量结构的柔度时,工作台的进给率具有重要意义。他的研究已揭露了当增加工作台进给率时,系统的有效流体阻尼可能改变。

简言之,用上述试验方法的缺点是在试验时机床情况与切削时的情况不完全符合,而机床部件情况的这一区别是产生误差的一个可能来源。

这一试验方法的优点有几方面。首先,它是一种总的综合的试验方法,用这种方法可以测量全部三十六个柔度,假如需要的话。这是这种试验方法比起其他方法来最大的优点。假如某些重要的传递函数无法测量,则这一试验方法的这一缺点将在基于频率响应数据而作的进一步分析中导致可能的误差。

其次,这一方法较其他方法的决定性优点是,它能够与一个完全自动化的试验程序结合起来使用,这就使得用这种方法进行验收试验在经济上是可行的。

不应忽视下述事实,即工业界的工程师和技术人员很易理解和使用上述的试验方法。

是否它的缺点超过优点,或者相反,这个问题尚待讨论,而且

必须根据应用时的具体情况来考虑。

II.3.2. 用非接触式激振器的正弦力作相对激振(13)

所讨论的第二种试验方法实际上与第一种方法是类似的,差别只在于激振器的设计。在采用电液激振器试验时,机床主轴实际上是静止的,有些研究人员曾试图加放一滚动轴承在力传感器和刀架之间(见图2.1)使主轴可转动,但没有成功。因为在这种情况下,

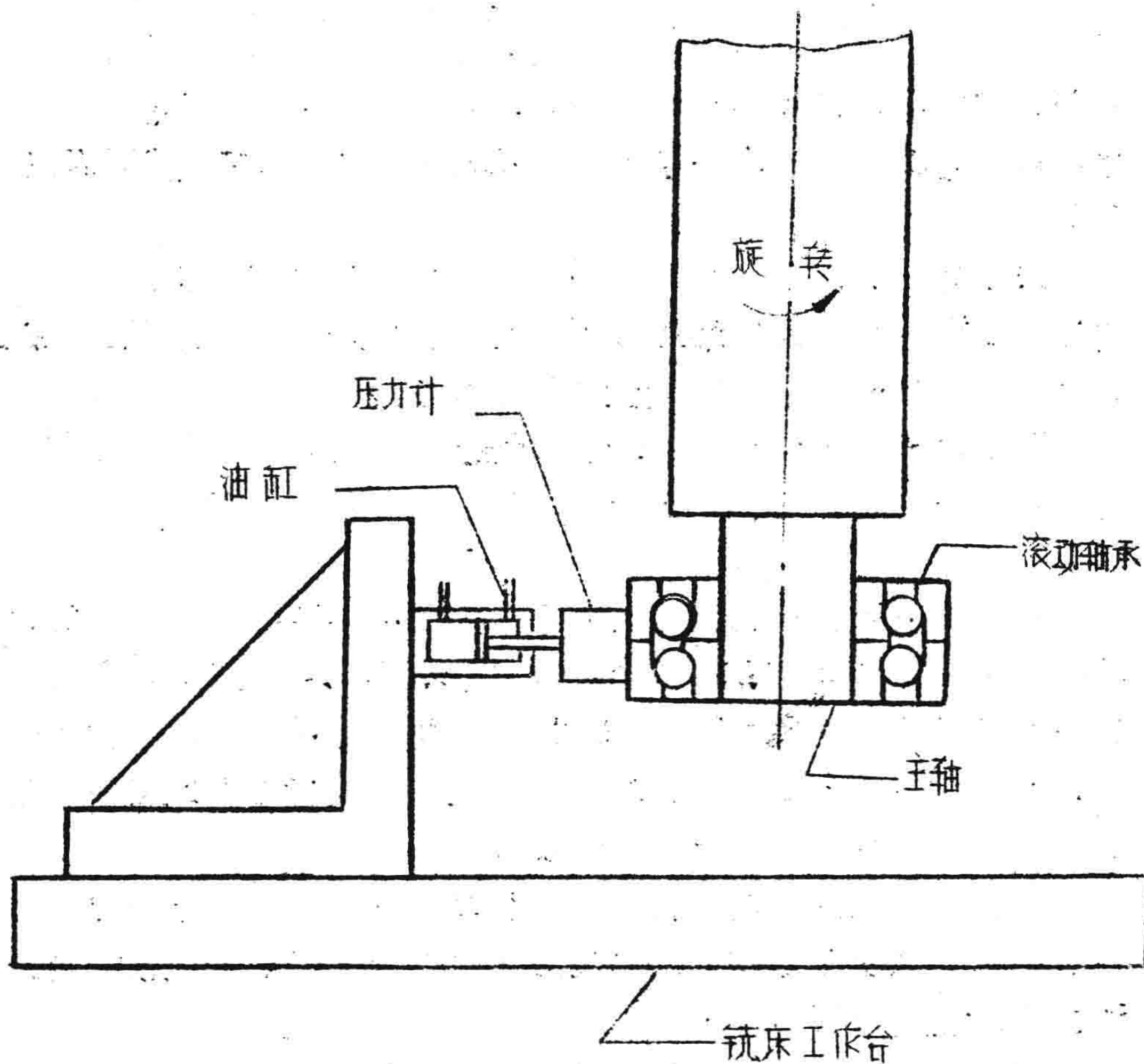


图2.1 用滚动轴承实现主轴旋转时的液压激振(未按比例)

当主轴旋转时，激振力实际上作用在轴承的外滚道上。此时，轴承的动态特性（几乎是不可忽略的）被引入试验装置而对试验加上了一个不希望有的复杂因素。用这个办法使试验时主轴可以旋转的所有努力都没有得到满意的结果。

对于在旋转主轴和固定的工件夹具之间相对激振这个问题的合理解决曾被认为必须研制出非接触式激振器。伯明翰大学的研究人员⁽¹³⁾研制了这种非接触式的电磁激振器用来获得卧铣频率响应数据。这个新激振器在空军文献中作了完整的介绍和解释。本文只概述该文献资料的要点。

伯明翰大学激振器（见图2.2）主要包括一个紧固于工作台的电磁铁，这个电磁铁通过空气间隙施加一个动态力于机床主轴，此力包含二个分量，一是代表平均切削力的静态分量，另一个是为作验收响应试验所需的正弦变化的分量。在电磁极和机床心轴上的软钢套筒之间保持一个均匀的空气间隙。磁通线按照磁心的U形回路透过空气间隙，经由心轴，再通过空气间隙而返回到磁心。

在心轴和激振器夹具之间的相对位移用电容式位移传感器来测量。搜索线圈装在铁心的悬臂上，用来监控瞬时磁通量，也就间接测量所施加力的交变分量。

当测出了力和位移讯号，机床的柔度就可象用通常的电—液接触式激振器的情况一样计算出来。据作者说，他们用逐点法而不是用辛辛那提大学所用的自动化方法⁽⁴⁾获得频率响应曲线。

因为心轴和激振器磁极之间存在有间隙，测试时心轴就可以转动。假如允许主轴转动，则搜索线圈的力定标系数应考虑到心轴的表面速度而进行修正。

象在电液激振器的情形中一样，为了采用电磁非接触式激振器，工作台必须固定。用来试验卧铣的激振器的配置（见图2.3）包括二个独立而相同的如前述的激振单元，它们以互相垂直的方向被安装在一个夹具上，夹具紧固在工作台上。这样一来，机床就可用一个夹具而测出机床在二个互相垂直方向的柔度。

如前所说，非接触式激振器的主要优点是当测量机床的柔度时，可以把主轴转动的因素考虑在内。

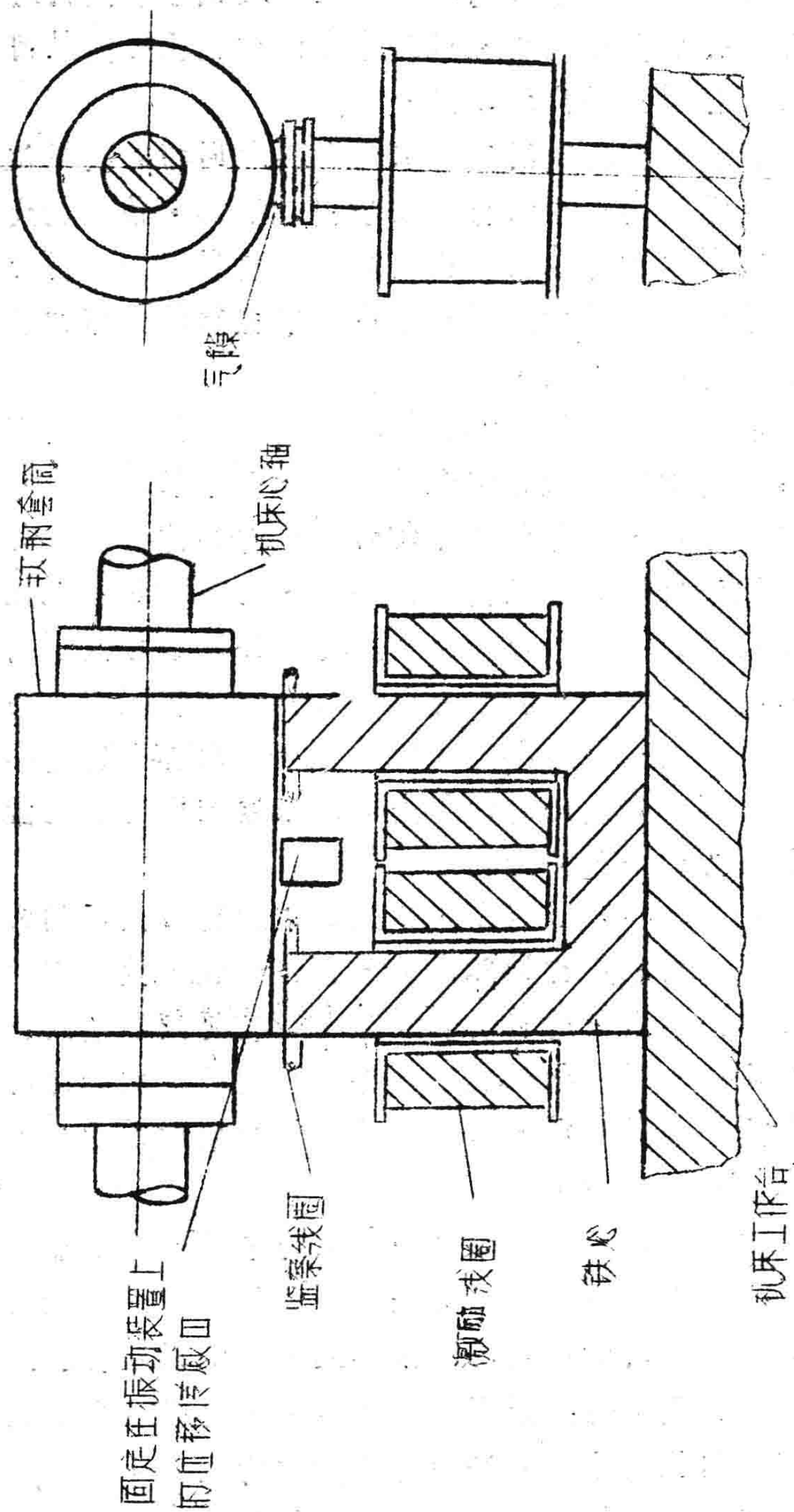


图 2.2.2. 非接触式微振器的结构