

金屬切削机床 的剛度

烈歇托夫等著



机械工业出版社

金屬切削机床的剛度

烈敬托夫等著

汪星桥等譯



机械工业出版社

1958

出版者的話

本書是苏联列宁格勒科学技术生产會議討論关于金屬切削机床剛度問題的文集。書中所載的文章都是苏联学者和工程师对机床剛度进行研究的实际經驗和結果。

本書可供工厂和科学研究机关的工程技术人員参考。

苏联 Д. Н. Решетов 等著 ‘Жесткость металлорежущих станков’ (Машгиз 1952 年第一版)

*

*

*

NO. 1731

1958 年 9 月第一版 1958 年 9 月第一版第一次印刷
787×1092¹/₃₂ 字数 96 千字 印張 4⁹/₁₆ 0,001— 4,500 册
机械工业出版社(北京东交民巷 27 号)出版
机械工业出版社印刷厂印刷 新华書店發行

北京市書刊出版业营业許可証出字第 008 号 定价(10) 0.70 元

目 次

机床的剛度.....	烈歇托夫 (Д. Н. Решетов) (5)
金屬切削設備的剛度及其測定方法	
.....	斯科拉岡 (В. А. Скраган) (38)
斯維尔德洛夫工厂中測定金屬切削机床剛度的工作經驗	
.....	札捷尔斯基 (Е. И. Зазерский) (98)
在机器制造中确定金屬切削机床剛度的工作經驗	
.....	波波夫 (П. И. Попов) (105)
机床剛度的动力特性.....	布尔施捷因 (И. Е. Бурштейн) (111)
牛头刨床剛度的研究	
.....	費克思-馬尔高林 (Г. Б. Фикс-Марголин) (116)
車床刀架的剛度.....	斯科拉岡 (В. А. Скраган) (130)
影响車床部件剛度的几个因素	
.....	斯米尔諾夫 (А. А. Смирнов) (139)
附录	(145)

本書所用机床代号表

机 床 代 号	制 造 厂 名	中 心 高 (公厘)
И	Lloyd	220
Г	V.D.F.	220
Е	Weipert	190
П	Diez mann	200
Д	ДМП-20	200
Н	Niles	200

机床的刚度

技术科学博士 烈歇托夫教授

刚度和强度是判断机器工作能力的最重要的标准。许多机器零件所受的应力远低于最大许可应力（例如，在金属切削机床的床身中，应力通常不超过每平方公分几十公斤），同时，零件的尺寸主要受着刚度条件的支配。

刚度问题的迫切性与日俱增，因为材料的改善主要是朝着提高强度性能的方向发展，而材料的弹性系数的提高则非常有限，甚至保持原样（例如钢的弹性系数）。

总的说来，在机器上刚度都有着重大的意义，然而，金属切削机床的刚度，由于对工件的精度有很高的要求，还具有特殊的意义。

判断机床刚度的标准应分成两类：1）有关于把机床看做工艺机械工作的标准；2）有关于机床机构工作的标准。

第一类标准

加工的精度 大家知道，在机床—夹具—工件—刀具的系统中（即在工艺系统中），由于弹性变形和压偏所引起的工件形状和尺寸的误差，可达到总误差的80%。

由于弹性变形的关系，在加工表面上模仿下了料坯的形状。例如，在车床上粗车带偏心的料坯（图1），由于加工余量的不均匀，引起了力的变动，结果是压偏量的变动，因而车削后的工件也一定是带偏心的。

在切削不稳定（刀具的进刀和退刀）的区域内，由于刀

具从工件压偏的力的变动，使工件的形状产生歪曲。这几乎在所有的机床上都可以观察到，在刨床（圖2）、磨床及某些其他机床上則尤为明显。

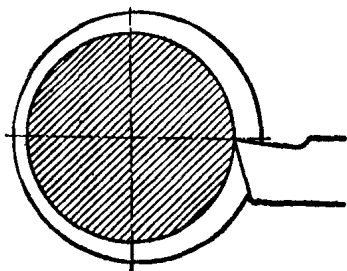


圖1 偏心料坯的加工示意图。

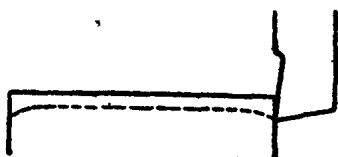


圖2 切削不稳定区域内工件形状的歪曲。

机床—夹具—工件—刀具系統剛度的变动（随切削区域的座标而变动）使工件的形状产生歪曲。例如在两頂針間粗車細直徑的軸件，在不用中心架的时候，由于車削中央部分

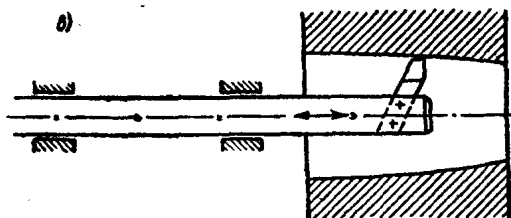
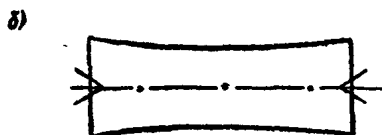
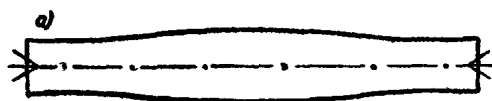


圖3 由于工艺系統剛度的变动而引起的工件形状的歪曲。

时产生的弯曲比两端大，結果使工件成为桶形（圖 3 a）；相反，車削粗而短的軸件时，会得到細腰的工件，因为在車削两端时，加在頂針上的力要比車削中央部分时大，因而彈性位移也比車削中央部分时要大；在車削中央部分时切削力多少是被平均地分配在两个頂針上的（圖 3 b）。

用悬伸鏜杆鏜孔时，得到的表面是一段拋物綫体（圖 3 c）。

无振动的加工 由于以下的原因，无振动的加工成为十分重要的标准。

对于很大一部分精加工机床，振动显著地影响加工表面的光潔度，因而即使是振幅非常小的振动也是不能容許的。

在十分广闊的加工条件范圍內，都有可能引起切削时的振动。

有周期性激动力存在的时候，系統的剛度应能保証系統不致于陷入共振。

从防止自激振动来看（这时由本身的振动引起周期性的力），剛度通常應該尽可能地大一些。也有可能采取相反的途徑，即竭力降低剛度，例如采用能自动調整的刀具。这时橫向彈性振动将不致于發生，因为变形沒有可能从动能轉变为位能，而这种轉变是产生机械彈性振动的必要条件。然而采用这种办法的可能性比較少。

第二类标准

所討論零件的工作能力 属于这方面的有：在压缩力作用下抵抗撓曲的稳定性（如螺旋彈簧，絲杠，推杆）；在靜不定系統的工作条件下，以及在变动和冲击載荷作用的条件下的强度（在这些情形下，剛度可能对載荷有很大的影响）。

相联接零件的工作能力 軸的剛度直接決定着軸承和傳動件（主要是剛體傳動件，如齒輪、蝸杆和摩擦傳動等）工作的合格性。

在傳动力的作用下，軸产生变形。这引起了軸承中的側压力；單支点滾動軸承間力分配的不平均；和齒輪牙齒上的側压力等。

各种机器的軸承所允許承受的压力極為悬殊，这大部分取决于部件上軸承不同的做法与布置，因之也是决定于所受側压力的不同。

我們知道，当齒輪裝在靠近支点时，因为那里軸的彈性曲綫的傾斜角大，齒輪工作的平稳性要比裝在兩支点中間时低得多。

采用减小傾斜和側压力影响的結構可以得到一定程度的效果：

1) 采用能自动調节的滾動軸承（其中一个滾柱圈滾道的形状为双曲綫体），和帶鼓形齿的齒輪；

2) 采用 $\frac{l}{d}$ 在 0.3 左右的短軸承，和 $\frac{b}{m} = 6 \sim 8$ 的窄齒輪（以代替具有高剛度短軸的減速器中所用的 $\frac{b}{m} = 20 \sim 30$ ）等。

箱體零件和床身的剛度決定着軸承和導軌工作的合格性。

有时碰到这样的情形，在重型和其他一些机床上，由于机床和基础的剛度不足，以致橫梁无法沿導軌移动。

在机床上以高生产率制造零件的可能性 对于有一些零件，特别是大量生产中制造的零件，往往工艺上对剛度的要求成为决定性的因素。例如，大量制造的机器上的軸的直径

往往是决定于用多刀进行高生产率加工和在軸上装齿輪的可能性。

伏京諾夫 (К. В. Вотинов) 是研究机床剛度的創始人，在接触剛度的領域中进行大規模的研究也是他發起的。不幸在衛國戰爭中他為國犧牲了。

目前在机床剛度的工艺方面、以及机器制造許多其他工艺理論的研究方面起主导作用的是屬於由索可罗夫斯基 (А. П. Соколовский) 教授領導进行工作的列宁格勒高等工業学校。

在莫斯科和其他一些城市的高等技术学校中也在进行着机床剛度的研究工作。

在机床制造的系統中，金屬切削机床科学研究实验所 (ЭНИМС) 和一些机床制造厂的試驗室在进行着机床剛度的研究工作。金屬切削机床科学研究实验所 (伏京諾夫及其他一些人) 曾經做了第一个接触剛度的綜合实验研究，以及首先用模型的方法来研究机床的剛度 (叶尼凱夫——Х. М. Еникеев)，并拟定了計算剛度的方法。

接 触 剛 度

机器的剛度决定于：1) 零件本身的剛度，即把它作为具有理想支承的梁、板或壳体，按材料力学公式計算而得的剛度，和 2) 接触剛度。

許多机器零件的初接触 (加上載荷之前) 是点接触，像球軸承的鋼球与軸承圈，齿輪的鼓形齿等；或者是綫接触，像滚柱軸承的滚柱与軸承圈，齿輪的牙齿，凸輪与仿形板等。其余的零件則有着較大的名义接触面积 (像直綫和圓轉运动

的滑动导轨，床身与箱体的结合面等)。可是，正如鲍乌靳(Бюден)和克拉盖尔斯基(Крагельский)等的试验所指出，由于微观和宏观不平整性的关系，相接触的物体的实际接触面积，常常只是名义接触面积的很小一部分。

仅仅这一点已足表明有较大接触变形的可能性。

在床身上，由于以下的原因，接触变形起着格外显著的作用：

1) 通常机床上有着较多数量的直线和圆转运动的导轨，用以实现制成一定形状的运动。对于万能性机床和结构复杂的齿轮加工机床等尤其如此。例如，普通车床的刀架部分就有五个导轨。

导轨面上采用的单位压力比较低，这是由于导轨防止润滑油泄漏的隔绝不良、它需要逆行和运动速度低，以致在大部分导轨的结构中不可能保证液体摩擦，同时还由于必须长期保持导轨的高精度所致。

2) 为了零件制造工艺上的方便、部件装配的可能性等，机床上存在着数量相当多的固定(非运动)接触面。

对于表面光滑、初接触为点接触或线接触的同类物体的接触变形，可以按照赫芝-别辽也夫(Герц-Беляев)的理论进行计算，因之这类问题这里不再讨论。

在较大的名义接触面积下，观察到的接触变形基本上决定于表面微观凸起的变形，这种变形，由于表面波度(宏观不平整性)的原故，在机器上要比在小的模型上大好几倍。表面波度使作用力仅能由位于宏观波浪顶峰上很小一部分的微观凸起来承受。

除了微观凸起的变形之外，还有宏观波浪的某些变形，接

触面中潤滑油的挤出，以及相接触零件本身的某些变形。相接触零件本身的变形使宏观波浪，首先是大节距波浪变平，相繼而来的是沿长度上的磨損不均匀等。

在現時表面微观几何学的成就下，正如彼得罗塞維奇（А. И. Петрусеви́ч）的計算所指出的，起初的挤压能产生局部的塑性变形。这已經从实验得到証明。因此实际接触面积对名义接触面积的比值应该决定于名义应力对于表層材料屈服点的比值。

在无位移的情形下，由于材料微观凸起發生强化作用，重复載荷可以近于弹性地进行。

接触的密合度通常不按照直綫規律，因而刚度决定于載荷。在小压力范围内，随着載荷的增大，密合度的增長要比大压力范围内剧烈得多。这說明所謂預先过盈具有很大的效果。

預加載荷时的接触刚度与載荷大小和表面光洁度有着特別显明的关系。根据 А. П. 索可罗夫斯基教授领导的教研室对鋼圈和鑄鉄試样所作的試驗，得出接触变形与接触应力的 $0.3 \sim 0.5$ 次方成比例，平均是 0.4 次方。鮑布烈克（П. И. Бобрик）在直角平面試样上所作的試驗完全証實了上述数值的正确性。

在重复載荷下（无位移），由于产生压陷，并且接触面积在很大程度上决定于材料的屈服性能，这时微观几何的影响較小，而且变形曲綫接近于直綫。

重复載荷下，变形曲綫应该趋近于初变形的曲綫和切綫；切点相当于初变形的最大載荷点。在預加載荷时，如果弹性变形与塑性变形相比較所起的作用愈小，則上述的漸近程度

應該愈大。

在可移动接触面的情况下，机器上的重复载荷占着模型上預加载荷和重复载荷的某种中間地位。在机床部件上，接触密合度的曲綫接近于直綫，同时剛度趋于常数。在許多情形下，以密合度(橫座标)——载荷为座标軸的綫圖上，曲綫呈下凹的形状，亦即剛度随着载荷增大而提高，这和模型試驗中所得到的曲綫形状相符合。

可是也有的曲綫呈上凸的形状，亦即随着载荷的增大而剛度下降；这和螺釘預紧的减弱以及摩擦力的存在有关。

按莫斯科斯大林机床与工具学院机器制造工艺教研室在三台車床上所作的試驗，得出主軸部件的接触变形在上述座标圖上的特性为上凸的曲綫，同时在以 $\delta = C \times p^m$ 表示接触变形的等式中，主軸部件可以用 $m = 1.75 \sim 0.9$ ；刀架用 $m = 1.6 \sim 1.8$ ；頂針滑套用 $m = 1.25 \sim 1.50$ 。

目前，实验数据的数量还完全不足于在机床的技术(工程)計算中(在重复载荷的情形下)，按非綫性的算式来考虑接触变形和应力之間的关系。

接触剛度的数值

用在鑄鉄試样的接触剛度的数值也是由伏京諾夫确定的。在变形曲綫近似于直綫的条件下(在机床可移动联界面所采用的压力范圍內)，伏京諾夫把他所得到的結果用下列的接触变形系数——接触变形与接触应力間比例的系数表示出来：

刮削表面..... $k = 0.2$ 公忽/公斤·公分²

刮削表面..... $k = 0.13 \sim 1.15$ 公忽/公斤·公分²

磨削表面..... $k = 0.06$ 公忽/公斤·公分²

研磨表面..... $k = 0.05$ 公忽/公斤·公分²

叶尼凱夫曾以实验方法证明表面宏观几何对接触刚度有着很大的影响，而且指出，只是因为表面的宏观几何与微观几何之間存在着一定的关系，我們才有可能把接触刚度作为微观几何的函数加以表示。

例如，对于名义接触面积为 90×150 公厘的刨削表面，在恒定的载荷下，叶尼凱夫得出如下的结果：当接触面积减小到为原来的 $\frac{1}{4}$ 时，甚至看到刚度有了提高；而当面积减小到为原来的数百分之一时，刚度只不过降低到为原来的 $\frac{1}{10}$ 。这种结果当然可以用初接触不良的理由来加以解释。初接触不良可能产生于表面加工的技术方面^①。

根据莫斯科机械学院古謝夫的試驗，認為接觸面間有油膜存在时，接縫刚度可以提高。油的粘度愈大和加工表面的光潔度愈高，接縫刚度的提高也愈大。

$H_{max} = 35$ 公忽的經過精刨加工的接縫，在导入錠子油时，在 $\sigma = 50$ 公斤/公分² 的压力下，变形减小 25%；而在导入 50% 压缩机油和 50% 油酸（乙烯类的單基酸——譯者）的混合剂时，变形减小 34%。

伏京諾夫并指出，实际机床的接触变形要比小模型的接触变形大得多。

曾对十种以上型式和尺寸的数十台机床（其中包括 162、162K、1D62M、1D63、1D64、68OM、68OY、682、682Г、6Б82、

① 接触刚度的極限效应的影响是十分复杂的。刚度的增加，比之名义接触面积的增大要慢得多。在沒有任何偏移的重复载荷下，由于实际接触面积决定于材料的屈服特性，所以刚度与名义接触面积的关系应该是很小的。

683、6E83 及其他机床)的刀架刚度作了試驗。試驗时假定所有可移动接縫具有同样的接触刚度,按标准将接縫調节好。根据試驗結果,可以推荐对于中、小型机床导轨的接触变形系数采用 $k = 1 \sim 1.2$ 公忽/公斤·公分² 的計算值。

压力很小的导轨 ($0.4 \sim 1$ 公斤/公分²), 如在磨床上所遇到的, 根据对371、372、373及其他型号机床的試驗, 可用 $k = 1.5 \sim 2.5$ 的計算值。

遇到頻率相当高的变动载荷时(車削余量不均匀的零件), 接触刚度可以提高1倍。这是由于迎着运动的方向出现了摩擦力, 而主要还是由于油膜的刚度提高(油抵抗挤压的能力提高)了。

根据計算, 因摩擦力引起的刀架位移的变化如下: 在 $f = 0.05$ 时, 与不考虑摩擦力时的計算位移相差 $\pm 5 \sim 10\%$; $f = 0.15$ 时, 相差 $\pm 15 \sim 25\%$ 。

力作用于导轨带鑲条的一边时, 由于导轨接触变形而起的移动, 比力作用于导轨不带鑲条的一边时大得多。大約大 $0.25 \sim 1$ 倍左右。实际大多少取决于所用鑲条或压板的形式、应力分布情形和导轨配研的質量。当力作用于带鑲条的一边时, 移动量平均大 0.5 倍, 因之刚度降低 30% 。

曾对支承在滚动轴承中的主轴的刚度作了試驗。整理試驗結果时, 除去了作为梁看待的主轴挠度及滚动体和轴承环之間的接触变形(按赫芝-別辽也夫定理計算)。根据所整理的試驗結果表明: 轴承环配合处的接触变形系数平均为 0.1 公忽/公斤·公分²。

对我国(指苏联, 下同。——譯者)基本型号的 1A62 型和 163 型車床的主轴作了靜刚度試驗。試驗的数据表明: 如

果包括軸承的間隙，那么得出的接触变形系数相当大，約在 $5 \text{公忽/公斤} \cdot \text{公分}^2$ 左右；如果除去徑向間隙（估計为 0.015公厘 ），那么接触变形系数的数值和刀架的系数一样，約在 $1 \text{公忽/公斤} \cdot \text{公分}^2$ 左右。

轉动时，由于液体承载动力的关系，軸承的剛度增大了，而且轉速愈高、載荷愈輕，剛度的增加也愈大。

在靜止和轉动的情形下，測量 1Д62 車床主軸末端移动量的結果表明：由于油膜的作用，主軸的移动量减少了（即剛度相对地提高了），并得到如下的由系数加以表示的数值：

載荷 100 公斤、轉速 40 轉/分时，移动量减少的系数为 0.77；轉速 150 轉/分时为 0.64；轉速 600 轉/分时为 0.35。

載荷 300 公斤及与上面相同的轉速时，得到的系数数值为 0.95~0.85。

正如古謝夫对升降台式銑床的試驗所示，机床部件在振动条件下（即在小振幅的变动位移下），接触剛度要比在名义載荷下的靜載接触剛度小。

对于臥式升降台銑床，剛度降低的系数等于 0.7。

决定死頂針的剛度，并把配合部位的接触变形（配合部位具有足够的精度）考虑在內时，可以采用 K. B. 伏京諾夫在对磨削試样試驗所得到的接触变形系数，同时把頂針作为在彈性基础上的无限長的梁进行計算。

正如試驗的結果所示，鍵及花鍵的联接、齒輪的齒、軸承及其他等等的接触变形对于傳动系統中总的角度（扭轉）位移起着重要的作用，接触变形能使总的扭轉位移加大 50% 或是更大一些。

接觸剛度問題的理論說明

為了能較好地理解接觸變形的過程，原則上我們有可能在測量的基礎上，或是作為表面微觀和宏觀幾何，以及表層機械物理性質的問題，用計算的方法來決定最簡單模型的接觸變形。

可是這樣的解決方法必然是極端複雜的，因為須要解決不同類型加工下典型微觀凸起受擠壓時的彈性-塑性問題，要有可能加以公式化的基礎，最後，還要考慮統計學的分配來一般地解決相接觸微觀凸起高度的問題等。

研究表層的接觸剛度，很明顯要和干摩擦和熱傳導的研究緊密地聯繫起來。

曾應用多種微觀不平度的表層模型來研究這些現象。所用的微觀不平度的類形有圓柱形和球面形，以及最後，用像天窗形狀的凸起（即在一个方向上——加工的橫方向上為正弦曲線的側形，而在另一方向上——垂直方向上為鋸齒形）。

鮑布烈克（А. И. Бобрик）曾對完全塑性變形、接觸應力為常數、微觀不平度的側形在一个方向上為正弦曲線而在垂直方向上為鋸齒形的模型進行探討並作出了解答。

古謝夫曾在最簡單的假設下，研究過圓柱形模型（微觀表層）的彈性接觸變形。由於計算用的模型經過了很大程度的簡化，以適合於計算的公式化，因之作出的解答中引進了相當多的修正系數。

索可羅夫斯基教授在研究具有微觀和宏觀不平度模型的接觸變形方面所得到的成就，對於了解接觸剛度的問題有着很重要的意義。