

摩擦、磨损与润滑手册

[苏]И.В.克拉盖尔斯基等主编

(第二册)

Трение
изнашивание
и смазка

2

本手册是苏联的许多著名学者的集体创作，分第一、二册。第二册的主要内容为：摩擦振动；选择性转移；弹性流体动力润滑；滚动轴承、滑动轴承、传动机构、导轨、汽缸与活塞、密封装置、摩擦装置、联接件、车轮、工具、挠性传动件、电触点等的摩擦、磨损与润滑问题。

本手册可供从事机械研究、设计、制造、使用、维修的人员参考。

Трение, изнашивание и смазка

Справочник • книга 2

И. В. Крагельский

В. В. Алисин

МОСКВА «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 1979

* * *

摩擦、磨损与润滑手册

第二册

【苏】И. В. 克拉盖尔斯基 等 主编

汪一麟 沈继飞 汤胜常 译

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₃₂·印张 15³/₄·字数 346 千字

1985年12月北京第一版·1985年12月北京第一次印刷

印数 0,001—8,170·定价 3.70 元

*

统一书号：15033·6001

基本符号

A_0 ——名义（表观）接触面积

A_c ——轮廓接触面积

A_r ——实际接触面积

N ——法向载荷

T ——摩擦力

W ——摩擦功

P_0, P_c, P_r ——分别为名义（表观）压力、轮廓压力和实际压力

M ——外力矩

M_f ——摩擦力矩

t ——时间

ω ——角速度

v ——线速度

τ ——切向（剪）应力

σ ——法向（正）应力

μ ——泊松比

E ——弹性模量

σ_s ——屈服极限

HB, HRC, HV——分别为布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度

H ——显微硬度

α_h ——滞后损失系数

σ_o ——摩擦疲劳参数

t_y ——弹性接触情况下的摩擦疲劳曲线指数

n ——造成变形体积破坏的循环数，转速

ρ ——密度

$\nu = \frac{1 - \mu^2}{E}$ ——材料的弹性常数（对于两个变形表面， $\theta_x = \theta_1 + \theta_2$ ）

d ——接触斑点直径

R_{max} ——轮廓不平度的最大高度

n_p ——轮廓的支承长度

t_p ——轮廓的相对支承长度

p ——轮廓截面标高

H_b ——波纹高度

R_b ——波峰曲率半径

S_b ——波纹节距(波长)

R_a ——轮廓的算术平均偏差

R_z ——轮廓不平度的十点高度

S_m ——轮廓不平度的平均间距

Δ_0 ——最大形状误差

r_{tr} ——微凸体的横向曲率半径

r_{in} ——微凸体的纵向曲率半径

$\frac{r_{tr}r_{in}}{r_{tr}+r_{in}}$ ——微凸体的折算曲率半径

b, v ——支承面积曲线的参数

ε ——相对接近(沉陷)量

$\Delta = \frac{R_{max}}{\sqrt{6}i/v}$ ——表面粗糙度的综合特性

f ——滑动摩擦系数(无量纲), 振动频率

f_{ml} ——摩擦系数的分子分量

f_{mo} ——摩擦系数的机械分量

l ——线磨损度

I_M ——以质量表示的磨损度

τ_0 ——把法向压力外推到零时的抗剪强度

β ——分子键强化系数(无量纲)

U ——线磨损量

U_M ——以质量表示的磨损量

U_V ——以体积表示的磨损量

h ——压入深度

V_s ——接触空间体积

h_m ——平均间隙

a_r ——切向接触位移

γ ——磨损率

θ_s ——平均表面温度

θ ——体积温度

η ——动力粘度

v ——运动粘度, 振动频率

N_c ——载荷循环数

K_{ov} ——重叠系数

目 录

基本符号

第十六章 摩擦和振动 (В. А. Кудинков,

Д. М. Толстой) 1

16.1 无润滑表面和边界润滑表面的摩擦所引起的
法向振动 1

16.2 强迫振动对摩擦力的影响 2

16.3 摩擦自振 7

16.4 切向摩擦自振的作用和保证均匀移动的措施 12

16.5 振动对摩擦表面磨损的影响 15

参考文献 18

第十七章 选择性转移 20

17.1 选择性转移的物理-化学机理(А. А. Поляков) 20

17.1.1 术语和定义 20

17.1.2 选择性转移的物理-化学准备过程 25

17.1.3 减小摩擦磨损反应链的物理-化学原理 28

17.2 选择性转移在摩擦接点上的应用 (Д. Н. Г аркунов) ... 37

17.2.1 重载铰链联接 38

17.2.2 汽车传动装置 40

17.2.3 螺栓-螺母副 43

17.2.4 工艺设备中的镀金属润滑剂 44

17.2.5 电钻密封用的耐磨材料 45

17.2.6 油泵密封用的耐磨材料 47

17.2.7 玻璃-金属摩擦副 48

17.2.8 在腐蚀性介质中工作的摩擦接点 50

17.2.9 水润滑的摩擦接点 51

17.2.10 刀具 53

17.2.11 在钢表面上摩擦镀黄铜、青铜和铜54

17.2.12 圆弧面蜗杆传动56

参考文献58

第十八章 弹性流体动力润滑理论

(М. А. Галахов)60

18.1 弹性流体动力接触区的物理现象60

18.2 润滑油膜厚度62

18.3 摩擦应力、热流量和温度65

18.4 滚子轴承的使用寿命67

18.5 球轴承的计算68

18.6 齿轮传动的计算71

参考文献72

第十九章 滚动轴承 (В. Н. Нарышкин, Р. К. Воросташев-

ский, Н. А. Спицын)73

19.1 滚动轴承概述73

19.1.1 轴承分类73

19.1.2 精度等级74

19.1.3 规定代号74

19.1.4 零件材料75

19.2 滚动轴承的选择和计算76

19.2.1 关于轴承选择的一般指示76

19.2.2 当量载荷77

19.2.3 向心推力轴承部件中的计算轴向载荷87

19.2.4 轴承寿命的计算87

19.2.5 变工况轴承的选择88

19.3 高速轴承和滚动轴承的摩擦损失89

19.3.1 关于使用高速轴承的建议89

19.3.2 高速轴承的结构特性91

19.3.3 轴承的摩擦损失92

IV

19.4 滚动轴承的配合和润滑	94
19.4.1 轴承的配合	94
19.4.2 轴承的润滑	96
19.4.3 自润滑轴承	98
参考文献	99
第二十章 滑动轴承	100
20.1 无润滑的滑动轴承 (М. Н. Добычин)	100
20.1.1 接触参数计算	100
20.1.2 磨损计算 (可逆摩擦副)	107
20.1.3 承载能力计算	112
20.1.4 温度状态计算	115
20.1.5 几何关系	121
20.2 流体动压轴承 (А. К. Дьячков)	122
20.2.1 分类、载荷形式和工作过程概述	122
20.2.2 止推 (轴向) 轴承按油膜最大承载能力的计算	128
20.2.3 径向轴承的计算	141
20.2.4 关于轴承结构设计的建议	149
参考文献	151
第二十一章 传动机构 (Ю. Н. Дроздов)	152
21.1 概述	152
21.2 润滑油膜厚度	154
21.3 滑动摩擦系数	161
21.4 固体润滑剂涂层的承载能力	169
21.5 磨损计算原理	173
21.6 接触表面的疲劳点蚀	183
21.7 胶合的温度准则	186
21.8 磁粉润滑法	193
21.9 压印润滑法	198
21.10 传动效率的计算	200

参考文献	202
第二十二章 机器导轨 (А. С. Лапидус)	204
22.1 滑动导轨	205
22.1.1 结构	205
22.1.2 材料	210
22.1.3 润滑剂的选择	214
22.1.4 导轨的摩擦	217
22.1.5 导轨的磨损	225
22.1.6 导轨的改善措施	230
22.2 滚动导轨	230
22.2.1 结构	231
22.2.2 材料	236
22.2.3 润滑剂的选择	237
22.2.4 导轨的摩擦	238
22.2.5 导轨的使用寿命	241
参考文献	242
第二十三章 汽缸活塞组零件 (Б. М. Асташкевич, Т. В. Ларин)	243
23.1 工作条件和磨损机理	243
23.2 汽缸套	246
23.2.1 汽缸套材料	246
23.2.2 提高耐磨性的方法	250
23.3 活塞环	262
23.3.1 活塞环材料	266
23.3.2 耐磨镀层	272
23.3.3 磨合镀层和减摩镀层	275
23.4 活塞	277
23.4.1 活塞材料	278
23.4.2 活塞强化方法	281

VI

23.5 活塞销	284
23.6 汽缸活塞组零件的微观几何形状	286
参考文献	288
第二十四章 密封装置	289
24.1 密封装置的一般原理 (Г. А. Голубев, А. В. Чичинадзе)	289
24.1.1 基本定义	289
24.1.2 密封装置的分类和特性	289
24.1.3 接触式动密封装置的设计及其工作性能的提高	300
24.1.4 接触式动密封装置的摩擦和磨损	303
24.2 密封装置用橡胶-金属摩擦副的摩擦性能 (С. Л. Рыбалов)	306
24.2.1 密封用橡胶的物理-机械性能	306
24.2.2 外部因素对密封装置工作性能的影响	307
24.2.3 表面质量对密封装置工作性能的影响	312
24.2.4 磨损计算	314
24.2.5 提高耐磨性的方法	318
参考文献	321
第二十五章 摩擦装置 (А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун)	323
25.1 分类	323
25.2 对摩擦材料的要求	329
25.3 摩擦装置的综合	339
25.4 计算举例	353
参考文献	360
第二十六章 静配合和静联接 (В. В. Алисин)	361
26.1 静配合中的相互摩擦作用	361
26.2 结构的抗滑移联接	373
26.3 过盈配合联接	377

26.4 螺纹联接	382
参考文献	388
第二十七章 车轮的摩擦和磨损 (Н. М. Михин, В. С. Ком- балов)	390
27.1 术语和定义	390
27.2 充气轮胎对路面的粘附	390
27.3 充气轮胎粘附系数的计算	391
27.4 汽车轮胎胎面的磨损	409
27.4.1 容许磨损量	410
27.4.2 胎面橡胶的磨损机理	410
27.4.3 与路面相互作用时橡胶表层的变化	411
参考文献	417
第二十八章 刀具与模具的摩擦和磨损 (А. Д. Макаров, Л. Ш. Шустер)	418
28.1 刀具 (模具) 材料	418
28.1.1 工具钢	420
28.1.2 金属陶瓷硬质合金	422
28.1.3 矿物陶瓷	427
28.1.4 天然金刚石和人造超硬材料	427
28.2 刀具的磨损	427
28.2.1 刀具工作表面的接触过程	427
28.2.2 刀具磨损的特点	433
28.2.3 刀具磨损度与分子键抗剪强度的关系	438
28.3 模具的磨损	441
28.4 润滑冷却液和润滑油及其对切削加工过程和压力加 工过程的影响	447
参考文献	453
第二十九章 挠性件传动零件 (В. В. Алисин, В. А. Моска- ленко)	454

VI

29.1 带传动	454
29.2 绳索	457
29.3 链传动	459
29.4 输送链和用滚动支承的输送机	462
29.5 输送带	468
参考文献	470

第三十章 电气触点的摩擦和磨损 (A. B. Ничинадзе,

Н. К. Мышкин)

30.1 基本定义·电气触点接触过程的物理本质	471
30.2 不可拆和可拆电气触点	475
30.3 滑动电气触点	476
参考文献	493

第十六章 摩擦和振动

摩擦和振动密切相关，摩擦能引起振动，而振动会影响摩擦。

为了简化摩擦接触点上出现的上述现象的分析，下面根据摩擦力主要是由摩擦表面上的法向载荷和相应的法向接触变形形成的这种概念（阿蒙顿定律）来进行讨论。

复杂弹性系统中即实际使用的摩擦接点结构中各种振动是相关的，这一概念〔10，12〕是很重要的。这意味着滑块的法向振动和切向（纵向和横向）振动不可能是独立地发生的。当一种振动出现时，其它振动通常也会发生。这种相关性取决于各有关振动的固有频率的接近程度和其相互关系的性质。

16.1 无润滑表面和边界润滑表面的摩擦所引起的法向振动

如果滑动体（以后简称滑块）高度略大于其横向尺寸，即该滑块不是以其端面为摩擦面的杆件，则滑块的法向弹性柔度将比接触层的弹性柔度低几个数量级，所谓接触层就是由两摩擦表面的微凸体和微间隙形成的一层。这时，滑块可近似地比拟为置于模拟微凸体的一组微弹簧上的理想刚体。其中有些微凸体相互接触，承受着全部法向载荷，而较小的微凸体则没有发生接触。偶然作用在滑块上的任何法向脉冲，都会引起整个滑块的法向自由振动。这些振动是非线性的，而且是不对称的，因为在滑块向下移动的过程中，愈来愈多

的新的较小微凸体发生接触，而且接触刚度在变化，即滑块下移时，刚度提高；上升时，刚度降低。这时，这种振动振幅的增大，导致滑块在配对体上的平均水平面升高，从而使实际接触总面积减小。

滑块在滑动过程中，其表面微凸体受到来自配对体表面微凸体的微脉冲。这些微脉冲的法向分量不断引起整个滑块的法向振动。实验表明〔17〕，虽然这些微脉冲是无序的，但其组合仍能使滑块不断作不衰减的准周期法向振动，由于其振幅很小（几分之一 μm 或几个 μm ），所以其基本频率接近于线性振动的固有频率：

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (16.1)$$

式中 k ——接触刚度系数； m ——滑块质量。

上述振动是不对称的，它使滑块升高而降低了摩擦力〔19〕。

滑动速度愈高，则各微凸体间微脉冲的法向分量就愈强，上述振动的振幅就愈大，滑块滑动时的平均水平面就愈高，实际接触面积就愈小，摩擦力也就愈小。这些现象，可以说明下降的摩擦力—速度特性，即无液相润滑剂时，摩擦力随着滑动速度的增大而降低。上述振动（以后简称为接触振动）的波形图表明，接触振动的振幅随滑动速度作线性增长。

由此可见，由摩擦引起的接触振动总是使滑动摩擦力有所降低，而由微振引起的接触振动总是使静摩擦力有所降低，微振的振幅总是在十分之几到百分之几 μm 间〔18，19〕。

①

16.2 强迫振动对摩擦力的影响

法向强迫振动 为了降低摩擦，要用一般远离接触共振

频率的法向强迫振动。因此，为了显著降低摩擦力，这时要用大功率的振动器。

必须考虑到，在摩擦接点的结构中，严格地说，沿摩擦表面法向的振动特性，不仅取决于摩擦体界面的接触刚度（摩擦刚度），而且还取决于承载结构要素的刚度及其配置等〔10〕，所以，在某些情况下，会在其它频率下出现共振效应。

法向强迫振动的最佳频率理应接近于按公式(16.1)求得的值。由于接触振动的非线性，共振频率能偏离此值10%左右〔17〕。

公式(16.1)既可用于多点接触，也可用于单点接触，如光滑球和相当光滑的球座的接触。在前一种情况下，接触刚度必须通过实验来测定，而在后一种情况下，可按赫兹公式算出。

振动器应根据摩擦接点的结构和振动的摩擦元件质量来选择。对于小质量，宜用压电陶瓷振动器；对于大质量，要用电动振动器。关于振动器所需的功率与滑块质量及表面状态的关系问题，迄今尚未得到定量通解，但是可以断言，振动器的输入功率应随着其质量的增加而增加。

图16.1上示出了频率和摩擦力降低率之间的关系曲线，作为能用法向强迫振动来有效地降低摩擦力的例子。压电振

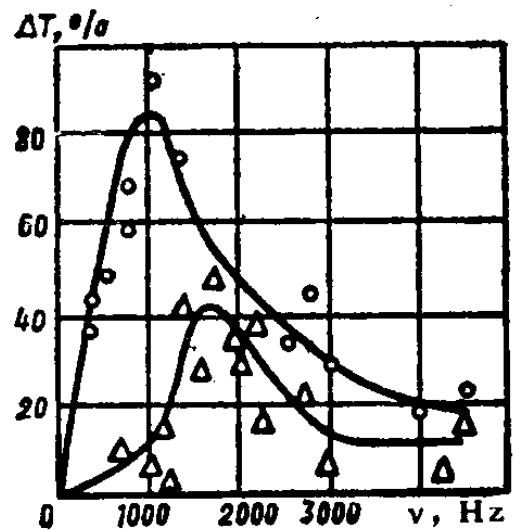


图16.1 当滑块质量不变而垂直作用弹簧所加的载荷不同时，法向强迫振动频率与摩擦力降低率的关系曲线
未淬硬钢，表面粗糙度 $R_a = 0.6\mu\text{m}$
滑块质量 $m = \text{常数}$
○— $N = 250\text{gf}$
△— $N = 1050\text{gf}$

动器的薄片应对称地粘贴在滑块的上表面，并从滑块表面上沿径向伸出一部分长度，以保证其弯曲振动固有频率和接触振动共振频率一致，同时也和振动器的频率一致。这样就增大了摩擦力的共振最小值，而不改变其频率。导致摩擦力极度降低的频率和按公式(16.1)算出的接触振动频率相一致，误差不大于10%。图16.2表示在振动试验台上测得的类似曲线。图16.3表示计算结果和实验数据的比较。图16.1和16.2表示滑块强迫振动在控制摩擦力方面的新应用，即通过频率的调节来改变摩擦力。如果改变强迫振动频率而使之接近于共振频率，则摩擦力对频率的敏感性将很大。如果要平衡地进行调节，则必须使它远离共振频率。

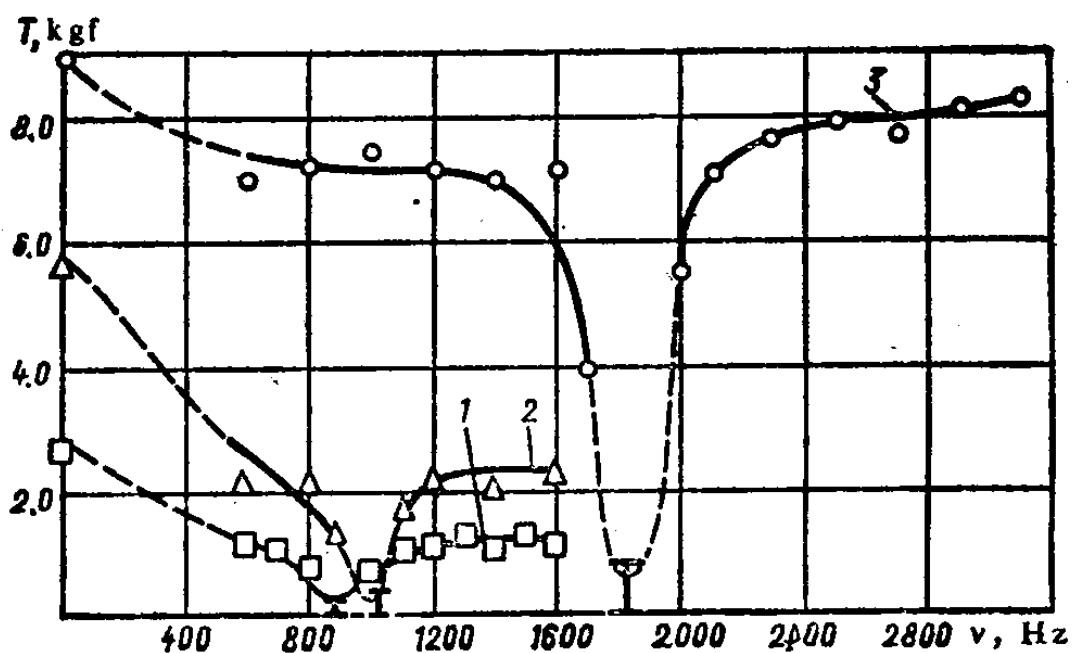


图16.2 滑块对配对体的强迫振动频率和摩擦力的关系曲线
 配对体装在振动试验台上，滑块质量不变，试验台振幅不变，载荷为：
 1—3 kgf 2—4 kgf 3—10 kgf

切向强迫振动 现引用文献〔4〕中关于支承在工作表面经抛光的两个通孔淡兰宝石上的水平硬质合金轴颈的单点接触数据，作为用共振法降低摩擦力的另一个例子。该文的目

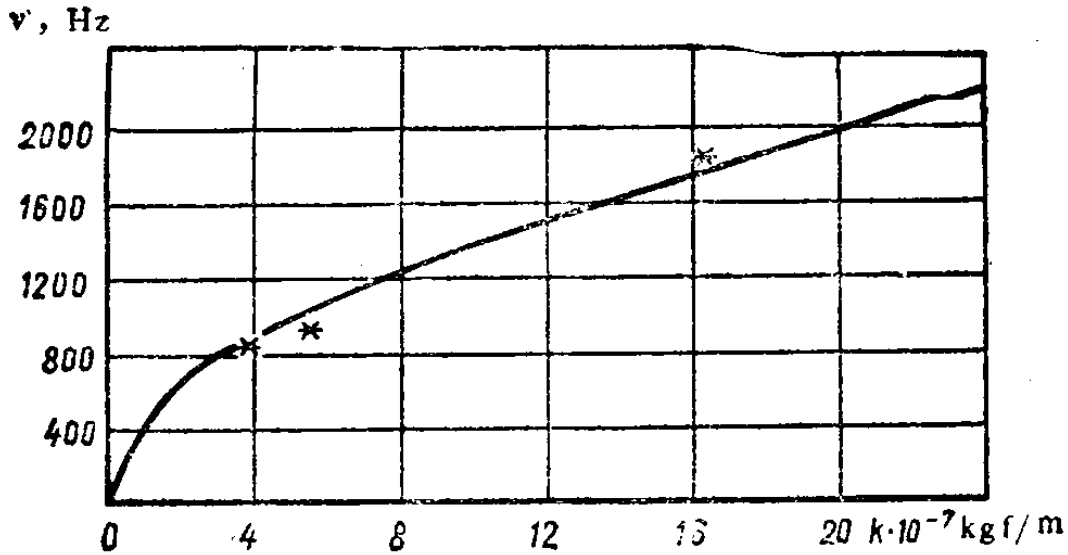


图16.3 按式(16.1)算出的共振频率和法向接触刚度的关系曲线

各点表示从图16.2得出的共振频率实验值

的是验证上述概念及其在降低精密仪器中摩擦方面的应用。该文中采用了轴颈的轴向强迫振动，这时除了上述有关接触振动的机理外，还可能作用有其它效应：在瞬时速度 v_t 下作横切向振动时，摩擦力向量的方向总是和瞬时合成滑动速度的方向相反，而后者和移动速度向量 v 的夹角为 $\alpha = \text{tg}^{-1} \frac{v_t}{v}$ 。因此，瞬时移动阻力 $T_{\text{inst}} = fN \cos \text{tg}^{-1} \frac{v_t}{v}$ ，从而得：

$$T_{\text{inst}} = fN \frac{v}{\sqrt{v^2 + v_t^2}}$$

或

$$T_{\text{inst}} = fN \frac{v}{\sqrt{v^2 + \omega^2 a^2 \cos^2 \omega t}} \quad (16.2)$$

$$T_{\text{inst min}} = fN \frac{v}{\sqrt{v^2 + \omega^2 a^2}} \quad (16.3)$$

从公式(16.2)和(16.3)可知，当 $a = \text{常数}$ 时，有效的滑动阻力理应随着横切向强迫振动频率的增大而作单调降低，即如果未加上上述法向接触振动的共振效应，就决不会得到

摩擦力的共振最小值。

现在来讨论切向振动（无论是横向振动还是纵向振动）引起法向接触振动的方式。法向微脉冲与滑动速度成正比。发生切向振动时，在每个切向振动周期内，法向微脉冲两次通过其最大值。因为法向振动有其固有频率，所以小一半的切向强迫振动频率起着引起最大振幅法向振动的共振频率作用。

这就是用切向强迫振动（不论是横向振动还是纵向振动）来降低摩擦力的机理。可见，二者都能用于降低摩擦力。如果考虑到结构上的原因，则用切向振动要比用法向振动更方便些，但是，这里的摩擦力达到最小的条件，将不同于条件(16.1)：

$$v_r = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (16.4)$$

顺便指出，当 $\omega^2 a > g$ 时，依靠滑块跳动来降低摩擦力的那种毫无价值的效应，也单调地取决于频率，而不会产生任何共振效应。

文献〔4〕指出，当轴向强迫振动频率非常接近于根据赫兹接触刚度公式算出的法向振动共振频率的一半时，出现了强烈共振使摩擦力降低到原来的 $\frac{1}{10}$ 以下的情况。典型结果见表16.1，表中 v 是按公式(16.1)算出的，而 v_{res} 是靠强烈共振产生摩擦力最小值的轴向强迫振动频率。

这里的 $(v \sqrt{m})$ 不是常量，因为式(16.1)中的接触刚度取决于载荷，即这时取决于质量。但是，根据赫兹公式， $K \sim N^n$ ，其中 $n < 1$ ，因此质量对频率的影响比刚度的影响大，而共振频率随着质量的增加而降低。