

# 新型高精度V形滑动摩擦 导轨的研究\*

陆伯印 赵美蓉

(天津大学精仪系)

**摘要** 精密机械和仪器需要高精度的导轨, 滑动摩擦导轨与滚动或静压导轨相比, 结构简单、导向性好、导轨谐振频率高, 再加上新型减摩材料的应用, 在高精度导轨领域中, 滑动摩擦导轨有着广阔的发展前景。这里, 设计出一种新型的V形滑动导轨, 对导轨的选材、结构及性能作了研究, 特别是对导轨的摩擦、磨损与润滑进行了实验分析, 对选用的导轨副材料的摩擦系数进行了测定。从而对这一类型的滑动导轨有了深入的认识。本文阐述了导轨的结构设计、材料的选择、摩擦、磨损与润滑性能的实验分析。

## 一、导轨的结构设计

精密机床与仪器常选用摩擦导轨。摩擦导轨可分为内摩擦导轨和外摩擦导轨。内摩擦导轨图1(a)其精度很高, 灵敏而滞后小, 宜于作超微动工作台, 但行程难于加大, 一般小于10mm左右。外摩擦导轨图1(b)即为我们设计的V型外摩擦滑动导轨。这种形式的导轨加工工艺性好, 易于精密加工, 由于导轨设计符合动力学原理, 即在工作台上装有5个短销作支垫, 其受力稳定可靠。从运动学角度看, 其限制了五个自由度, 故定位精确合理。

导轨的几何参数的确定

(1) V形导轨的角度, V形角 $\alpha < 90^\circ$ , 导向精度高, 但接触点正压力大, 摩擦力加大, 并使磨损加剧。 $\alpha > 90^\circ$ , 导向性较差, 故一般选取 $\alpha = 90^\circ$ 。

(2) 导轨尺寸的确定 对于测量范围为50mm的导轨, 我们选取的导轨宽度为70mm, 高度为50mm, 长为200mm。取较长的导轨, 有利改善导向精度和运动的可靠性。

(3) 驱动力的位置如图2所示。当导轨存在间隙 $\Delta$ 时, 运动件倾斜角 $\alpha = \Delta/L$ , 故 $L$ 愈大, 同样的导轨间隙误差, 造成的 $\alpha$ 角愈小。

当驱动力 $T$ 与导轨摩擦合力 $F$ 相距 $X$ 时, 力矩 $M = T \cdot X$ , 将使导轨倾斜, 同时给导轨一侧向干扰力 $N$ , 而 $N = T \cdot X/L$ , 为了使导轨导向精度高, 必须减小 $X$ , 加长 $L$ 。在导轨运动变向时, 此项误差影响很大, 可以用计算调整法使 $X \approx 0$ 。

注: \*自然科学基金资助项目

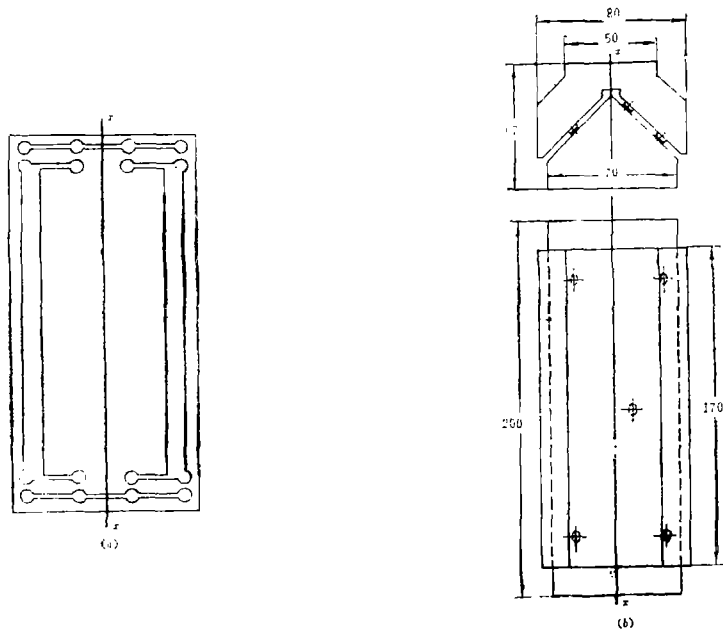


图1 导轨结构  
(a)内摩擦 (b)外摩擦

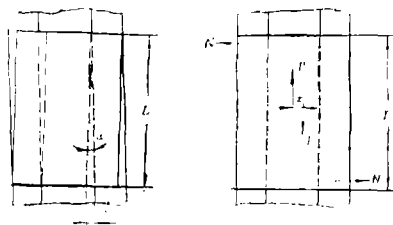


图2 导轨长度对导向精度的影响

## 二、导轨的性能要求

### 1. 导轨精度要求

为了确保导轨位移50mm内，直线度误差（ $x, z$ 向）不大于  $0.02\mu\text{m}$ ，直线度角秒值不大于  $0.03''$ 。则导轨在200mm全长直线性加工偏差小于  $0.03\mu\text{m}$ ，导轨表面的平面度误差应小于  $\lambda/20$ （约为  $0.03\mu\text{m}$ ），表面粗糙度  $R_a$  值  $0.01\mu\text{m}$ 。

### 2. 导轨材料

导轨可选用钢或石英、硅玻璃等制作。钢材经精密加工后淬火，再经精磨、研磨，为了消除内应力，应进行时效处理。玻璃加工，其平面度可达  $(0.27\sim 1.4)\text{nm}$  之内。

垫的材料可选用铜、铝、钢或聚四氟乙稀等。

### 3. 导轨刚性

为了达到机构的工作精度，应保证导轨的最大变形量不超过允许值(1nm)。我们设计的导轨，最大静态变形量  $\delta = 0.012\text{nm}$ 。

### 4. 导轨耐磨性

导轨磨损且不均匀会使导轨精度降低，从而影响了运动精度。为此，我们采取了以下的措施。

(1) 降低导轨的比压 导轨比压 ( $p$ ) 是指导轨单位面积上承受载荷的能力

$$p = \frac{W}{A} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

式中  $W$ —载荷(kg);  $A$ —承载面积( $\text{cm}^2$ )。

为了减少比压，滑架及其上支架等尽量选用铝合金。此外，也可采用磁性卸载的方案，如图 3 所示。在导轨上方装置一长条永磁铁，但滑架的中下方，也装上磁铁，利用其同性相斥，使导轨比压降低。

(2) 良好的防护和润滑 加装防护罩以防灰尘和污物进入。至于润滑，我们选用了多种润滑油进行试验，这将在后面详述。

### 5. 导轨运动的灵活与平稳性

为使导轨的运动灵活，应尽量选用摩擦系数小的运动副。

导轨运动的不平稳主要表现在低速运动时出现的速度不匀，即爬行现象。爬行现象不仅影响工作台运动的稳定性，也会影响工作台的定位精度。一般说，当导轨的运动速度大于临界速度时，工作台运动是平稳的。

导轨运动的临界速度  $v_c$  为，

$$v_c = \frac{p_N \cdot \Delta f}{\sqrt{4\pi k \xi} m} \quad (\text{m/s})$$

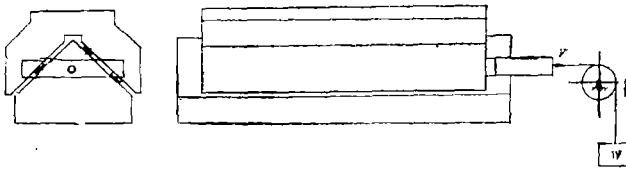


图 3 牵引法测摩擦系数

式中  $p_N$ —导轨上的正压力; (N)

$\Delta f$ —静、动摩擦系数之差  $\Delta f = f_{\text{静}} - f_{\text{动}}$

$\xi$ —接触面的阻尼比;

$m$ —工作台 (滑架) 部件质量(kg);

$k$ —传动件 (导轨) 的刚度 (N/m)。

我们设计的V形滑动摩擦导轨的参数是:  $p_N = 2\text{N}$ ,  $\Delta f = 0.002$ (见表 1),  $\xi = 0.025$ ,  $k = 2.275 \times 10^9$ (N/m),  $m = 1\text{kg}$ , 则临界速度  $v_c = 0.15(\mu\text{m/s})$ 。低于此速度, 将会产生爬行现象。

表1 摩擦系数测试表

副别 摩擦 系数	铜—钢			铝—钢			铜—钢			聚四氟乙稀—钢		
	$f_{\text{静}}$	$f_{\text{动}}$	$\Delta f$	$f_{\text{静}}$	$f_{\text{动}}$	$\Delta f$	$f_{\text{静}}$	$f_{\text{动}}$	$\Delta f$	$f_{\text{静}}$	$f_{\text{动}}$	$\Delta f$
干摩擦	0.073	0.073	0	0.117	0.117	0	0.119	0.108	0.011	0.020	0.018	0.002
液体石蜡	0.093	0.093	0	0.146	0.141	0.005	0.118	0.114	0.004	0.020	0.017	0.003
	有油酸	0.072	0.072	0	0.093	0.093	0	0.110	0.106	0.004	0.020	0.017

续表

副别 摩擦 系数	铜—钢			铝—钢			钢—钢			聚四氟乙稀—钢		
	$f_{静}$	$f_{动}$	$\Delta f$	$f_{静}$	$f_{动}$	$\Delta f$	$f_{静}$	$f_{动}$	$\Delta f$	$f_{静}$	$f_{动}$	$\Delta f$
缝纫机油	0.110	0.110	0	0.151	0.148	0.003	0.123	0.122	0.001	0.022	0.020	0.002
有油酸	0.076	0.076	0	0.098	0.098	0	0.108	0.170	0.001	0.022	0.019	0.003
特3号精	0.117	0.107	0.010	0.141	0.137	0.004	0.139	0.127	0.012	0.025	0.020	0.005
密仪表油	0.072	0.072	0	0.099	0.099	0	0.123	0.110	0.013	0.022	0.018	0.004

注：油酸添加量1% 副别；摩擦系数；润滑条件

### 三、滑动导轨的摩擦与润滑

#### 1. 固体摩擦的原理

根据学者Крагедецкий等人的理论，摩擦力就是机械和分子作用阻力的总和，即

$$F = \tau_0 S_0 + \tau_m S_m$$

式中  $S_0$  和  $S_m$  分别为分子作用和机械作用的面积， $\tau_0$  和  $\tau_m$  分别为单位面积上分子作用产生的摩擦力。

而  $\tau_m = A_m + B_m P^a$ ，其中  $P$  为单位面积上的法向载荷； $A_m$  为机械作用的切向阻力； $B_m$  为法向载荷的影响系数， $a$  为指数，其值不大于 1 但趋近于 1。

另  $\tau_0 = A_0 + B_0 P^b$ ，其中  $A_0$  为分子作用的切向阻力；它与表面清洁度有关； $B_0$  为粗糙度影响系数； $b$  为趋近 1 的指数。

$$F = S_0 (A_0 + B_0 P^b) + S_m (A_m + B_m P^a)$$

若令  $S_m = \gamma S_0$ ， $\gamma$  为比例常数，已知实际接触面积  $A = S_0 + S_m$ 、法向载荷  $W = P \cdot A$ ，

则

$$F = \alpha A + \beta W = \beta \left( \frac{\alpha}{\beta} A + W \right)$$

$$\beta = \frac{\gamma B_m + B_0}{\gamma + 1} \quad \alpha = \frac{\gamma A_m + A_0}{\gamma + 1}$$

$$F = \alpha A + \beta W = \beta \left( \frac{\alpha}{\beta} A + W \right)$$

上式为摩擦二项式定律。 $\beta$  为实际摩擦系数，它是一个常量， $\alpha/\beta$  代表单位面积的分子力转化成法向载荷， $\alpha$  和  $\beta$  分别由摩擦表面的物理和机械性质决定的系数。

由上式可求得相当于单项式的摩擦系数为

$$f = \frac{\alpha A}{W} + \beta$$

由实验表明，对于塑性材料组成的摩擦副，表面处于塑性接触状态，实际接触面积  $A$  与法向载荷  $W$  成线性关系，因而式中的摩擦系数  $f$  与载荷大小无关。但对于弹性金属而言，由于表面接触处于弹性变形状态，实际接触面积与法向载荷的  $2/3$  成正比，因而摩擦系数随载荷的增大而减小。

## 2. 摩擦与润滑的实验分析

我们采用牵引法测定摩擦副的最大静摩擦系数( $f_0$ )及动摩擦系数( $f$ )。其实验装置如图4所示。

按  $f = F/p_N$  计算摩擦系数,  $p_N$  为正压力,  $F$  为牵引力, 滑轮阻力很小, 可忽略不计。

动摩擦系数的测定, 是先给滑架一个很小的初速度, 并同时附加的最小砝码质量能使其保持匀速连续运动, 此时砝码的重量即为其动摩擦力。

摩擦系数是摩擦副和其工作状况条件综合的特性。一般说, 摩擦表面粗糙度、材质、接触压力、滑动速度、工作温度、润滑条件等对摩擦系数有一定的影响。我们实验的具体条件是: 导轨表面粗糙度  $R_a = 0.05\mu\text{m}$ , 压力恒定, 每个垫的正压力经计算得出  $p_N = 2.009\text{N}$ , 滑动速度不大且匀速,  $v \approx (0.01 \sim 10)\text{mm/sec}$ 。温度恒定  $T = 20^\circ$ 。我们重点在于寻找摩擦副的材质及润滑条件对摩擦系数的影响。实验结果如表1所示。

### (1) 铜垫—钢导轨

其静、动摩擦系数相差甚小, 这是铜垫的一大特点。但铜垫的耐磨性不够好, 与钢导轨易发生粘着磨损, 但磨损量不大。

添加油酸后对摩擦性能有明显的改善。图5是在基础油中添加油酸后的摩擦系数变化情况。这是由于油酸改善了润滑油的油性, 容易形成坚固的吸附膜, 极性分子有使摩擦表面分离的斥力, 使摩擦副具有较小的摩擦阻力。

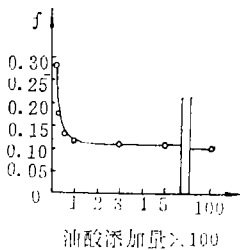


图4 油酸添加量对摩擦系数的影响

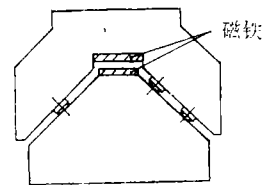


图5 磁浮导轨

### (2) 铝垫—钢导轨

铝的摩擦、耐磨性能都较差, 导轨开始运动缓慢, 摩擦力处于变化中且不稳定。由于铝垫材料较软, 在导轨上留下明显的痕迹, 这是铝与钢导轨表面发生粘着磨损所致。

铝垫磨损后, 由于在钢表面上形成一层铝表面膜, 使摩擦力减小, 如再移动, 原有膜被破坏, 同时铝继续磨损使摩擦力又增大, 这样反复致使摩擦力不稳定。

### (3) 钢垫—钢导轨

钢与钢的摩擦系数比铜与钢的大, 这是由于相同金属摩擦时易于发生粘着现象, 故摩擦系数较大, 因此导轨一般不易采用同类金属配对使用。

### (4) 聚四氟乙稀 (PTFE) 垫—钢导轨

聚四氟乙稀是良好的减摩材料。它的低摩擦性能在于其分子之间的内聚力很小, 而PTFE为链状结构, 没有分枝, 其C—C、C—F原子之间键合力很强, 而氟原子体积较大, 遮蔽了碳原子上的正电荷, 而相邻氟原子之间有相斥作用, 从而导致了极低的内聚力, 极易在分子之间相对滑动。当PTFE与钢匹配相对滑动时, PTFE在匹配面上形成一层转移膜, 约  $(0.02 \sim 0.3)\mu\text{m}$ , 能很快在接触表面形成强的化学键合。因此, 这是PTFE和转移膜之间

的滑动, 具良好的润滑效应。

由于PTFE本身是一种极好的自润滑材料, 运动形式为弹性体对刚性体作相对滑动, 所以润滑剂不但没使其滑动摩擦系数减小, 反而稍有增加。实验结果与理论分析是一致的。

#### (5) 二硫化钼 ( $\text{MoS}_2$ ) 对摩擦副的影响

二硫化钼作为一种良好的固体润滑剂, 有着小的摩擦系数。 $\text{MoS}_2$  的硫原子与金属表面的附着力很强, 并能生成一层牢固的润滑膜, 这层膜能承受280mPa以上的接触压力, 具有很好的耐磨性。为此, 我们把 $\text{MoS}_2$ 利用真空镀膜方式在钢垫表面上沉积一层高硬度的 $\text{MoS}_2$ 膜, 然后在干摩擦条件下进行摩擦系数的测定。在钢垫—钢导轨的条件下, 测得  $f = 0.112$ 。而静、动摩擦系数几乎没有差异。所以摩擦系数改善的不显著, 这是由于沉积的 $\text{MoS}_2$ 膜均匀性较差, 及膜层较薄的原故。如改善此条件, 摩擦系数可降至  $0.03 \sim 0.10$  之内。

通过上述实验, 我们最终选定聚四氟乙稀垫与钢导轨的方案。由于在真空中工作, 故选用干摩擦的条件。我们同时也制作了石英导轨, 作为下一步的试验之用。

此外, 还可在精研后的钢(或玻璃等)导轨的表面上镀上 $20\mu\text{m}$ 的镍, 再用离子渗镀的方式沉积上 $20\text{nm}$ 的二硫化钼润滑层。在镍基上沉积 $\text{MoS}_2$ 而形成的镀层常作为减摩复合镀层, 它有着良好的减摩性。称之为“自润滑”复合镀层。有着良好的耐磨性能。

垫的材料亦可选用新型材料聚酰亚胺或聚对羟基甲酸酯, 其摩擦系数可小至 $0.005$ 。

## 四、结 论

1. 滑动摩擦导轨, 精度高、导向性好、摩擦力小、谐振频率高, 是精密与超精密导轨的最佳选择之一。
2. 采用钢导轨(或玻璃、石英、Zerodue)与铜、钢及聚四氟乙稀材料作垫的配合, 可实现最佳的配合。
3. 采用油酸添加剂的润滑油可明显的降低摩擦系数。
4. 在导轨面上镀镍与 $\text{MoS}_2$ 的复合膜可以减摩及耐磨损。
5. 由于滑动摩擦导轨便于制造, 成本低廉, 是精密机床和仪器导轨的一个发展方向。

## 参 考 文 献

- [1] 天津大学编;《量仪设计》(下册), 1980
- [2] 温诗铸;《摩擦学原理》, 清华大学出版社, 1990
- [3] 陈燕生主编;《摩擦学基础》, 北京航空航天大学出版社, 1991
- [4] 薛实福、李庆祥;《精密仪器设计》, 清华大学出版社, 1991
- [5] 李传乾主编;《机床摩擦、磨损与润滑》, 机械工业出版社, 1990
- [6] M.J. 尼尔主编, 王自新等译;《摩擦学手册》, 机械工业出版社, 1984
- [7] 日本摩擦学研究会, 汪一麟等译;《实用摩擦学》, 上海科学技术出版社, 1984
- [8] E. Clayton Teague; The National Institute of Standards and Technology Molecular Measuring Machine Project, Metrology and Precision Engineering Design, J. Vac. Sci. Technol. B7(6), Nov./Dec. 1989

## A Study of New-Style Frictional Slideway with High Accuracy

Lu Boyin, Zhao Meirong

### Abstract

A new-style slideway with "V" type has been built in our research work, and the specimen carriage is kinematically supported on the slideway with five pads. It obeys the theory of dynamics. The structure of the slideway is simple, and the accuracy is ultra-high.

The material, structure and characteristics of the slideway has been investigated. The experiments about friction, wear and lubrication of the slideway has been carried out. And the friction factors of the selected material has also been measured.

Presented in this paper are, structure design of the slideway, selection of material and experimental analysis about friction, wear and lubrication.