

第 16 篇 摩擦学设计

主 编 卜炎
编写人 卜炎

第 1 章 摩擦与摩擦因数

两个相互接触的物体在切向外力作用下发生相对运动(或具有相对运动趋势)时,在接触面间产生阻止切向运动的阻力,这种现象称为摩擦,该阻力即摩擦力。

可以从不同角度出发对摩擦分类,各种类型摩擦见表 16.1-1。

表 16.1-1 摩擦类型

分 类 方 法	摩 擦 类 型
按摩擦副运动形式	滑动摩擦;滚动摩擦
按摩擦副运动状态	静摩擦;动摩擦
按摩擦副表面润滑状况	干摩擦;边界摩擦;混合摩擦;流体摩擦

1 固体摩擦的摩擦力及其计算

1.1 摩擦力的性质

摩擦是两个接触固体在外载荷作用下所形成的真实接触区内作相对切向移动时发生的能量逸散过程,它是固体切向移动过程中在真实接触面上很薄的表面层中发生的各种物理过程的总和。摩擦力是无势的,其方向始终与移动方向相反。

根据切向移动的状态,摩擦力分为局部静摩擦力、静摩擦力和动摩擦力。一般静摩擦力大于动摩擦力。接触固体的切向移动可以分为宏观移动和微观移动,宏观移动称为滑动,微观移动称为滑移或预位移。预位移时的摩擦力与预位移量成正比,称为局部静摩擦力,而预位移量与切向外力成正比,故在微观移动期间局部静摩擦力与切向外力成正比。预位移增大到某一极限值,预位移转变为滑动,称该极限值为极限预位移。对应极限预位移的摩擦力称为静摩擦力,完全处于滑动状态时的摩擦力是动摩擦力。

1.2 摩擦因数

定义摩擦因数为摩擦力与法向载荷之比,即

$$\mu = \frac{F_f}{F_N} \quad (16.1-1)$$

由此,摩擦力的计算式为

$$F_f = \mu F_N \quad (16.1-2)$$

法向载荷是外载荷,因此,摩擦力的计算实际就是摩擦因数的计算。

2 固体摩擦定律

2.1 古典摩擦定律

古典摩擦定律称为阿蒙顿-库伦定律,综述如下:

- 1) 摩擦力与法向载荷成正比;
- 2) 摩擦因数与(表观)接触面积无关;
- 3) 摩擦因数与滑动速度无关;
- 4) 静摩擦因数大于动摩擦因数。

这一古典法则中的摩擦力实为局部静摩擦力,它不完全正确,必须作如下修正:

- 1) 当法向载荷较大时,摩擦力与法向压力呈非线性关系,法向载荷愈大,摩擦力增加得愈快;
- 2) 有一定屈服点的材料(如金属),其摩擦力才与(表观)接触面积无关。粘弹性材料的摩擦力与(表观)接触面积有关;
- 3) 精确测量,摩擦力与速度有关,金属与金属的摩擦力随速度的变化不大;
- 4) 粘弹性材料的静摩擦因数不大于动摩擦因数。

2.2 固体摩擦的现代理论

固体摩擦的现代理论认为摩擦具有二重性。摩擦力由两部分组成,即分子部分和机械(变形)部分,分子部分主要是切开粘附结点的剪切力,机械部分主要是一个表面的轮廓峰在另一表面上的犁削力。若忽略两部分的相互影响,则摩擦力可表述为

$$F_f = F_{f_n} + F_{f_j} \quad (16.1-3)$$

式中 F_{f_n} ——分子粘附部分的摩擦力;

F_{f_j} ——机械变形部分的摩擦力。

因而,摩擦因数

$$\mu = (F_{f_n} + F_{f_j})/F_N = \mu_n + \mu_l \quad (16.1-4)$$

2.2.1 粘附分量的摩擦因数计算

若真实接触面积为 A_r ,粘附结点的抗剪强度为 τ ,则摩擦力(切向阻力)的粘附分量为

$$F_{f_n} = \tau A_r \quad (16.1-5)$$

一般金属滑动摩擦副粘附结点的抗剪强度为

$$\tau = \tau_0 + \beta p \quad (16.1-6)$$

式中 τ_0 ——法向压力为零时的抗剪强度

β ——压力因子

p ——摩擦副中较弱金属的屈服压力。

各种金属的 τ_0 和 β 是常量(数),见表 16.1-2。

就一定的表面形貌, 真实接触面积 A_r 与法向载荷成正比, 而与物体尺寸无关, 故摩擦力的粘附分量与法向载荷大小成正比, 而与表观接触面积无关。

接触区呈塑性流动的金属, 有

$$A_r = F_N / p \quad (16.1-7)$$

于是粘附分量的摩擦因数为

$$\mu_a = \tau_0 / p + \beta \quad (16.1-8)$$

表 16.1-2 几种金属的 τ_0 和 β 值

材料	τ_0/MPa	β	材料	τ_0/MPa	β
钒	17.7	0.250	银	63.7	0.090
铬	49.0	0.240	铝	29.4	0.043
铍	4.4	0.250	锌	78.5	0.020
铂	93.2	0.100	锡	12.3	0.012
铜	107.9	0.110	铅	8.8	0.014

2.2.2 变形分量的摩擦因数计算

(1) 支承长度率曲线

表面粗糙度对摩擦有很大影响, 仅用表面粗糙度评定参数 R_a 、 R_z 、 R_y 这不能完全反映这一影响, 需要引入评定粗糙度的附加参数轮廓支承长度率 t_p 。沿粗糙表层的高度不同, 轮廓支承长度率也不同, 其表达式为

$$t_p = b(a/Ry)^{\zeta} \quad (16.1-9)$$

式中 b 和 ζ 称为支承长度率的曲线参数。

各种加工方法加工的表面粗糙度该曲线参数近似值见表 16.1-3~5。

表 16.1-3 各种加工方法加工的钢件表面粗糙度近似值

加工方法	R_a / μm	R_y / μm	r / μm	$t_p = b \left(\frac{a}{Ry} \right)^{\zeta}$	
				b	ζ
外圆磨削	1.25	9.37	8	0.6	2.00
	0.63	4.72	12	0.9	1.95
	0.32	2.4	20	1.27	1.90
	0.16	1.2	30	2.00	1.90
内圆磨削	2.5	18.75	5	0.65	2.0
	1.25	9.37	8	0.90	1.9
	0.63	4.72	13	1.10	1.85
	0.32	2.4	18.5	1.35	1.75
平面磨削	5.0	37.50	35	0.625	2.2
	2.5	18.75	100	0.90	2.2
	1.25	9.37	180	0.95	1.85
	0.63	4.72	370	1.60	1.80
	0.32	2.4	550	2.3	1.65
车 削	5.0	37.50	15	1.0	2.1
	2.5	18.75	20	1.40	1.95
	1.25	9.37	35	1.80	1.80
	0.63	4.72	55	2.00	1.60

(续)

加工方法	R_a / μm	R_y / μm	r / μm	$t_p = b \left(\frac{a}{Ry} \right)^{\zeta}$	
				b	ζ
圆柱表面研磨	0.16	1.20	30	2.5	1.5
	0.08	0.60	40	2.55	1.4
	0.04	0.30	55	2.60	1.3
	0.02	0.15	75	3.3	1.2
平面研磨	0.15	1.20	300	2.4	1.6
	0.08	0.60	500	3.0	1.4
	0.04	0.30	1000	3.3	1.22
	0.02	0.15	3000	4.5	1.15
珩 磨	0.63	4.7	15	0.75	1.8
	0.32	2.4	20	1.0	1.75
	0.16	1.2	35	1.95	1.6
	0.08	0.6	70	2.5	1.5
端面铣削	5.0	37	420	0.40	2.2
	2.5	18	900	0.55	1.65
	1.25	9.37	1350	0.60	1.40
抛 光	0.63	4.72	230	2.0	1.7
	0.32	2.4	450	2.5	1.6
	0.16	1.2	670	3.5	1.5
内孔研磨	0.16	0.84	30	2.5	1.5
	0.125	0.66	33	2.5	1.5
	0.10	0.54	36	2.4	1.4
	0.08	0.43	40	2.5	1.4
	0.063	0.33	45	2.5	1.4
	0.05	0.27	50	2.6	1.4
	0.04	0.21	55	2.6	1.3
	0.032	0.16	62	2.6	1.4
	0.025	0.13	70	2.6	1.3
	0.02	0.10	75	3.3	1.2
	0.016	0.08	80	2.8	1.4
	0.012	0.06	85	2.9	1.5
金刚石光整加工	0.32	1.50	1228	0.9	1.0
	0.25	1.32	1300	2.1	1.2
	0.2	1.20	1320	0.9	1.2
	0.16	0.84	2200	1.0	1.4
	0.125	0.72	2300	1.0	1.4
	0.10	0.60	2400	1.1	1.5
	0.08	0.32	2400	1.6	1.5
	0.063	0.24	2600	2.0	1.0
	0.05	0.19	2800	2.0	1.2
	0.04	0.22	3100	2.5	1.5
	0.032	0.17	3150	2.0	1.2
	0.025	0.12	3200	3.5	1.8

① a 为到轮廓峰顶线的距离。

表 16.1-4 各种加工方法加工的铸铁件表面粗糙度近似值

加工方法	R_a / μm	R_y / μm	r / μm	$t_p = b(a/R_y)^{1/3}$		加工方法	R_a / μm	R_y / μm	r / μm	$t_p = b(a/R_y)^{1/3}$	
				b	ζ					b	ζ
外圆磨削	2.5	11.5	50	0.70	1.97	平面铣削	10	28.8	17	1.40	2.8
	1.25	7.2	85	1.20	1.95		5	23	20	1.60	2.6
	0.63	3.5	150	1.25	1.85		2.5	11.5	25	1.70	2.4
	0.32	1.8	190	1.55	1.75		1.25	7.2	50	2.10	2.15
内圆磨削	2.5	11.5	12	1.60	2.66	镗 削	5	23	12	0.72	2.25
	1.25	7.4	16	1.75	2.45		2.5	11.5	13	1.00	2.2
	0.63	3.6	25	1.95	2.35		1.25	6.9	15	1.15	2.1
	0.32	1.7	45	2.10	2.2		0.63	3.8	20	1.75	2.05
端面铣削	5	23	40	0.425	2.0	平面研磨	0.16	0.98	15	2.00	1.3
	2.5	11.5	60	0.70	1.95		0.08	0.42	20	2.30	1.2
	1.25	6.9	90	0.75	1.8		0.04	0.23	40	2.40	1.1
							0.02	0.18	55	3.10	1.05
车 削	10	48	25	1.10	1.9	刨 削	10	47.5	18	0.75	2.2
	5	21.5	37	1.20	1.8		5	22.1	25	0.90	2.0
	2.5	11.5	60	1.45	1.7		2.5	11.5	100	1.20	1.95
	1.25	7.4	130	1.50	1.65		1.25	6.9	150	1.65	1.9

① a 为到轮廓峰顶线的距离。

表 16.1-5 各种磨合表面的表面粗糙度近似值

部 件 名 称		R_a / μm	R_y / μm	r / μm	$t_p = b(a/R_y)^{1/3}$	
					b	ζ
与橡胶唇型密封圈接触的铜件表面		0.13	0.72	180	3.1	3.0
滑动轴承(轴颈材料为 2Cr13)		0.15	0.84	58	1.8	2.0
铸铁活塞环		0.03	0.15	85	1.8	2.3
滑动轴承(轴套材料为含 MoS_2 的金属陶瓷)		0.09	5.40	77	3.5	1.8
机床摩擦离合器	外摩擦片	0.10	0.60	46	1.4	2.1
	内摩擦片	0.32	1.8	60	2.8	2.2
蒸汽锤导向架		0.67	3.6	19	1.0	1.2
多联齿轮的环槽		1.27	7.3	35	1.6	1.4
飞机制动器的制动盘、制动瓦	合金铸铁	0.65	4	76	1.0	2.1
	30CrMnSiA	0.78	5	82	1.0	2.2
气缸套		0.04	1.2	1000	—	1.0
活塞环		0.02	0.48	270	—	0.4
曲轴(主轴颈和连杆轴颈)		0.05	1.6	500	—	1.2
曲轴主轴瓦		0.42	2.6	300	—	—
活塞销		0.11	6.7	300	—	—
连杆小头轴套		0.112	7.0	250	—	—
活塞销孔		0.18	1.1	220	—	—
柴油机喷嘴嘴		0.1	0.6	35	3.8	1.9

① a 为到轮廓峰顶线的距离。

(2) 摩擦因数

滞后损失和轮廓峰相对压入深度是判别变形分量的主要参数。以半球形模拟轮廓峰的形状, 变形分量的摩擦因数为

$$\mu_j = 0.55K_s(h/r)^{1/2} \quad (\text{塑性接触}) \quad (16.1-10)$$

$$\mu_j = 0.42\alpha K_t(h/r)^{1/2} \quad (\text{弹性接触}) \quad (16.1-11)$$

式中 α ——单向拉伸试验中材料滞后损失因子, 见表 16.1-6;

K_s, K_t ——塑性和弹性变形时依据支承长度率曲线参数 ζ 的两个因子, 见图 16.1-1;

h ——压入深度;

r ——轮廓峰半径;

表 16.1-6 材料单向拉伸滞后损失因子 α

材 料	α	材 料	α
钢、磷青铜	0.04	橡胶	0.09~0.13
硬铝	0.03	木材	0.20
淬硬钢	0.02	生皮革	0.06
塑料	0.08~0.12	去毛皮革	0.10

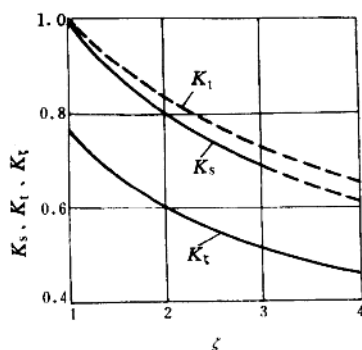


图 16.1-1 K_s, K_t, K_f 与 ζ 的关系曲线

3 摩擦角和摩擦锥

3.1 静摩擦角

要使受法向压力 F_N 的物体沿接触面滑动, 必须施加切向外力 F , 且 F 只有达到某临界值时, 物体才开始滑动, 此临界值就是静摩擦力 F_{Rst} 。静摩擦力与法向压力之比就是静摩擦因数 μ_{st} 。

若法向压力 F_N 和切向外力 F 的合力与 F_N 构成的夹角 ρ 小于某临界角, 物体就不会滑动, 称该临界角为摩擦角。因此, 摩擦角

$$\rho_s = \arctan \mu_{st} \quad (16.1-12)$$

3.2 静摩擦锥

若接触面的状况是没有方向性的, 则式 (16.1-12) 对沿摩擦面的任意方向的外力都成立。所以, F_N 和 F_{Rst} 的合力形成一个以 $2\rho_{st}$ 为顶角的圆锥 (见图 16.1-2), 称为静摩擦锥。如果 F_N 和 F 的合力位于摩擦锥内, 物体就不会滑动。

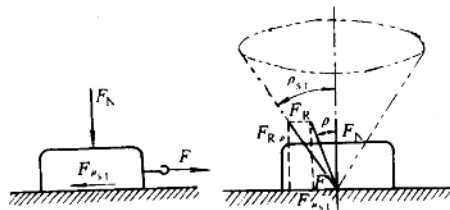


图 16.1-2 平面滑动摩擦与摩擦锥

3.3 动摩擦角与动摩擦锥

为使受法向压力的物体在平面上沿给定的方向作匀速运动必须克服的阻力称为动摩擦力 F_{Rsl} 。它与法向压力之比较为动摩擦因数 μ_{sl} 。

作用在物体上的法向压力和推动物体作匀速运动的切向外力之合力, 与法向压力构成的夹角称为动摩擦角 ρ_{sl} , 也可以得到以 $2\rho_{sl}$ 为顶角的动摩擦锥。

4 滑动摩擦因数

虽然式 (16.1-1) 给出了摩擦因数的计算式, 但目前尚无法用式 (16.1-8~11) 计算出工程上能用的摩擦因数数值。实用的滑动摩擦因数都靠试验得出。

在一般的压力和速度下, 对确定的摩擦副环境, 可以认为摩擦因数是常数。

摩擦因数受摩擦副材料、表面粗糙度、润滑状态、环境、压力与温度的影响很大。因此, 摩擦因数试验值受试验环境与试验状况的影响也很大。

4.1 室温及大气中的摩擦因数

4.1.1 无润滑表面的滑动摩擦因数

纯净金属表面的摩擦因数相当大, 而且, 同类纯金属间的摩擦因数比异类纯金属间和同类合金间的摩擦因数大得多。大气环境下的金属表面有污染膜, 它对摩擦因数数值有较大影响, 表 16.1-7 是污染极少时金属 (包括合金) 间的摩擦因数, 表 16.1-8 是一般情况下常用材料间的摩擦因数。

表 16.1-7 金属(包括合金)间的摩擦因数

摩擦副材料		μ
I	II	
铅、银、铝、锌、镍	未淬硬钢	0.4
锡锑、铅锑轴承合金		0.3~0.35
铜、磷、磷青铜		
淬硬钢	淬硬钢	0.35~0.40
未淬硬钢	未淬硬钢	
银	银	1.4
铜	铜	1.4
镍	镍	0.7
铂	铂	1.2~1.3

表 16.1-8 常用材料间的摩擦因数

摩擦副材料		摩擦因数	
I	II	μ_{st}	μ_{sl}
钢	钢	0.15	0.10
	未淬硬钢	0.2	
	T8 钢	0.18	
	铸铁	0.2~0.3	0.16~0.18
	黄铜	0.19	
	青铜	0.15~0.18	
	铝	0.17	
	锡锑、铅锑轴承合金	0.2	
	酚醛树脂层压材	0.22	
	冰	0.027	0.014
	粉末冶金材料	0.35~0.55	—
皮革	黑色金属	0.30~0.50	
硬木		0.20~0.35	
软木		0.30~0.50	
毛毡		0.22	
石棉基材料		0.25~0.40	
未淬硬钢	青铜	0.20	0.18
	铸铁		
铸铁	铸铁	0.15	
	青铜	0.28	0.15~0.21
	皮革	0.55	0.28
	橡胶	0.8	
铜	T8 钢	0.15	
	铜	0.20	

(续)

摩擦副材料		摩擦因数	
I	II	μ_{st}	μ_{sl}
铝硅合金	酚醛树脂层压材	0.34	
	塑料	0.28	
	硬橡胶	0.25	
	石板	0.26	
黄铜	T8 钢(未淬火)	0.19	
	T8 钢(淬火)	0.14	
	黄铜	0.17	
	钢	0.30	
	硬橡胶	0.25	
	石板		
青铜	T8 钢	0.16	
	黄铜		
	青铜	0.15~0.20	
	钢	0.16	
	酚醛树脂层压材	0.23	
	塑料	0.21	
	硬橡胶	0.36	
	石板	0.33	
	T8 钢(未淬火)	0.18	
	T8 钢(淬火)	0.17	
铝	黄铜	0.27	
	青铜	0.22	
	钢	0.30	
	酚醛树脂层压材	0.26	

通常,非金属材料不会形成表面氧化膜,只有吸附膜,它对摩擦因数的影响不如金属时大。

工程塑料是粘弹性体,它与钢相互摩擦时,摩擦因数随滑动速度和表面粗糙度变化的范围较宽。聚四氟乙烯的分子链较长,氟原子有效地遮蔽住碳原子,使分子间的内聚力降低,所以摩擦因数较低。

各种工程塑料间、工程塑料与钢间的摩擦因数见表 16.1-9。

表 16.1-9 各种工程塑料间、工程塑料与钢间的摩擦因数

摩擦副材料 I	摩 擦 副 材 料 II				摩擦副材料 I	摩 擦 副 材 料 II			
	钢		工程塑料			钢		工程塑料	
	μ_{s1}	μ_{s2}	μ_{s1}	μ_{s2}		μ_{s1}	μ_{s2}	μ_{s1}	μ_{s2}
聚四氟乙烯	0.10	0.05	0.04	0.04	聚己二酰己二胺	0.37	0.34	0.42	0.35
聚全氟乙丙烯	0.25	0.18	—	—	MoS ₂ 填充聚壬酰胺	—	0.57	—	—
聚偏二氯乙烯	0.33	0.25	—	—	玻璃纤维填充聚壬酰胺	—	0.48	—	—
聚三氟氯乙烯	0.45	0.33	0.43	0.32	玻璃纤维填充聚癸二酰癸二胺	—	0.39	—	—
低密度聚乙烯	0.27	0.26	0.33	0.33	聚甲醛	0.14	0.13	—	—
高密度聚乙烯	0.18	0.10	0.12	0.11	聚碳酸酯	0.60	0.53	—	—
聚氯乙烯	0.45	0.40	0.50	0.40	氯化聚醚	—	0.35	—	—
聚偏二氯乙烯	0.68	0.45	0.90	0.52	苯乙烯-丁二烯-丙烯腈共聚体	—	0.40	—	—
聚对苯二甲酸乙二醇酯	0.29	0.28	0.27	0.20					

非金属材料, 银基、铜基、铁基自润滑材料, 密封材料等的摩擦因数见表 16.1-10~14。

表 16.1-10 非金属材料间的摩擦因数

摩擦副材料		μ_{s1}	μ_{s2}	摩擦副材料		μ_{s1}	μ_{s2}	摩擦副材料		μ_{s1}	μ_{s2}
I	II			I	II			I	II		
砖	砖	0.6~0.7	—	棉织物	棉织物	—	0.44	黄铜	玻璃	—	0.25
石	金属	0.3~0.4	—	皮革	金属	0.4~0.6	—	淬硬钢	玻璃	—	0.7
石	土	0.3(0.5) ^①	—	尼龙	尼龙	0.15~0.25	—	淬硬钢	红宝石	—	0.25
土	土	0.25~0.10	—	皮革	木	0.4~0.5	0.03~0.05	淬硬钢	水晶	—	0.8
木	木	0.2(0.5) ^①	—	软木	松木	—	0.5	铁	冰	—	0.027
木	石	0.4	—	石墨	未淬硬钢	—	0.21	冰	冰	0.3~0.5	0.11 ^② , 0.025 ^③
木	金属	0.2(0.6) ^①	—	玻璃	玻璃	—	0.7	麻绳	木	0.5~0.8	—
橡胶	橡胶	0.5	—	水晶	水晶	—	0.9				
毛织物	毛织物	—	0.44	红宝石	红宝石	—	0.16				

① 括号内为干时的值, 括号外为湿时的值。

② 为 -40~-140℃ 下的值。

③ 为 0℃ 左右的值。

表 16.1-11 银基自润滑复合材料的摩擦因数

材料	配方 (质量分数) (%)	密度 /kg·m ⁻³		硬度 /HBS	抗压强度 /MPa	摩擦因数 μ			
		烧结前	烧结后			粘滑试验机		环块式试验机	
						LY12		LY12	渗碳钢
						μ_{sc}	μ_{sl}	μ_{sl}	
Ag		9800	9600	25	386	0.66	0.63	—	0.58~0.65
Ag+WSe ₂	90+10	9600	9500	25	185	0.18	0.17	0.12~0.15	0.25~0.37
	80+20	9500	9400	22	110	0.16	0.16	0.12~0.14	0.25~0.26
	70+30	9400	9300	20	72	0.16	0.15	0.14~0.17	0.19~0.25
	60+40	9200	9100	19	45	0.15	0.14	0.15~0.17	0.33~0.38
Ag+MoS ₂	95+5	8900	8800	25	304	0.19	0.13	0.12~0.16	0.23~0.34
	90+10	8600	8500	24	229	0.13	0.14	0.10~0.13	0.17~0.23
	80+20	7900	7800	22	105	0.14	0.14	0.13~0.14	0.25~0.31
	70+30	7300	7200	20	67	0.14	0.13	0.13~0.14	0.22~0.25
	60+40	7000	6700	20	46	0.12	0.11	0.14~0.16	0.18~0.22
Ag+Cu+Zn	62+29+9	8600	8500	58	>386	0.57	0.55	—	0.48~0.49
Ag+Cu+Zn +MoS ₂	58.9+27.6+8.5+5	8100	7800	50	287	0.38	0.33	0.15~0.20	0.21~0.34
	55.8+26.1+8.1+10	7900	7700	45	216	0.32	0.30	0.11~0.16	0.21~0.29
	52.7+24.6+7.7+15	7600	7400	42	194	0.27	0.24	0.14~0.16	0.13~0.20

注: 材料在 600℃ 下自由烧结; 试验载荷 4.8N; 速度 8m/min。

表 16.1-12 铜基自润滑复合材料的摩擦因数

材料	配方 (质量分数) (%)	密度 /kg·m ⁻³		硬度 /HBS	抗压强度 /MPa	摩擦因数 μ			
		烧结前	烧结后			粘滑试验机		环块试验机	
						LY12		LY12	渗碳钢
						μ_{st}	μ_{sl}	μ_{sl}	
Cu		6900	7000	44	266	0.46	0.44	—	0.72~0.77
Cu+WSe ₂	90+10	7400	7400	38	247	0.31	0.29	0.12~0.15	0.14~0.31
	80+20	7500	7500	35	196	0.28	0.26	0.11~0.13	0.10~0.31
	75+25	7700	7600	27	128	0.25	0.23	0.14~0.17	0.15~0.28
	65+35	7700	7700	25	107	0.24	0.21	0.12~0.15	0.26~0.29
	60+40	7700	7600	22	71	0.21	0.20	0.12~0.13	0.19~0.26
Cu+MoS ₂	90+10	6900	6900	38	157	0.37	0.33	0.11~0.14	0.19~0.21
	80+20	6500	6500	39	103	0.30	0.25	0.11~0.13	0.13~0.28
	70+30	6300	6300	26	77	0.19	0.17	0.13~0.15	0.15~0.22
Cu+石墨	90+10	6000	6000	21	119	0.15	0.15	—	0.22~0.23
	80+20	5100	5000	14	65	0.17	0.17	0.17~0.18	0.23~0.26
	70+30	4300	4300	12	43	0.17	0.17	0.19~0.21	0.23~0.26

注:材料在 600℃ 下自由烧结;试验载荷 4.8N;速度 8m/min。

表 16.1-13 铁基自润滑复合材料的摩擦因数

材料	配方 (质量分数) (%)	密度 /kg·m ⁻³		硬度 /HBS	抗压强度 /MPa	摩擦因数 μ		
		烧结前	烧结后			粘滑试验机		环块试验机
						LY12		LY12
						μ _{st}	μ _{sl}	μ _{sl}
Fe+石墨	90+10	5000	4700	39~40	187	0.18	0.17	0.14~0.15
	80+20	4400	4300	16~18	72	0.15	0.15	0.18~0.20
	70+30	3900	3900	15~17	52	0.13	0.13	0.20~0.21

注:材料在 600℃ 下自由烧结;试验载荷 4.8N;速度 8m/min。

表 16.1-14 密封材料的摩擦因数

密封材料		脍制皮革	脍制皮革	氯丁橡胶	特殊橡胶	脍制皮革	氯丁橡胶	特殊橡胶	氯丁橡胶
润滑剂	$\nu_{10}/\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	46				100			220
	添加剂	抗氧添加剂				—			加 10% 菜籽油(质量分数)
润滑剂 供给量	18℃	充分	0.09	0.13	0.02	0.03	0.06	0.01	0.02
		不足	0.06	0.06	0.07	0.06	0.06	—	—
	100℃	充分	0.16	—	0.12	0.16	—	—	0.15
		不足	0.08	—	—	0.17	—	—	—

碳-石墨容易吸附湿气,吸附湿气后摩擦因数明显降低,在干燥空气中摩擦因数较大,石墨甚至会因摩擦而燃烧。

宝石是各向异性材料,在不同方向上摩擦因数不

等。

橡胶比较软,弹性大,摩擦因数随滑动速度而改变。滑动速度很低时,静摩擦因数低于动摩擦因数。

木材的纤维素极易吸收油和水等,因而摩擦因数

较低,木材也是各向异性材料,在不同方向上的摩擦因数有较大差异。

4.1.2 润滑表面的摩擦因数

在摩擦表面上涂覆少量润滑剂,则呈边界摩擦状态,这时,摩擦因数遵循下述一般规律变化:

1) 润滑表面的摩擦因数低于无润滑表面的摩擦因数;

2) 润滑剂分子的极性越强、分子越长,则摩擦因数降低得越多。因此,通常脂油比矿物油更能降低摩擦因数;

3) 对同一种润滑剂来说,一般无润滑时摩擦因数大的金属摩擦副,润滑时其摩擦因数亦大。

润滑表面的摩擦因数见表 16.1-15、16。

表 16.1-15 不同润滑油下润滑表面的摩擦因数

润 滑 剂	静摩擦因数 μ_{st}		粘度 $\eta_{20}/\text{Pa} \cdot \text{s}$
	摩擦副材料		
	未淬硬钢-铸铁	未淬硬钢-铅青铜	
蓖麻子油	0.183	0.159	0.75
橄榄油	0.119	0.196	0.082
菜籽油	0.119	0.136	0.39
鲸油	0.127	0.180	0.033
猪油	0.123	0.152	0.089
全损耗油	0.211	0.294	0.028
汽缸油	0.193	0.236	1.95
主轴油	0.183	0.262	0.055

表 16.1-16 各种材料润滑表面的摩擦因数

摩擦副材料		摩擦因数		摩擦副材料		摩擦因数		摩擦副材料		摩擦因数	
		μ_{st}	μ_{sl}			μ_{st}	μ_{sl}			μ_{st}	μ_{sl}
钢	钢	0.10~0.12	0.05~0.10	石棉基材料		0.08~0.012		T8 钢(不淬火)		0.03	
	未淬硬钢	0.1~0.2		皮革		0.12~0.15		黄铜	T8 钢(淬火)	0.02	
	T8 钢(不淬火)	0.03		硬木	黑色	0.12~0.16		黄铜		0.02	
	铸铁	0.05~0.15		软木	金属	0.15~0.25		青铜	青铜	0.04~0.10	
	黄铜	0.03		毛毡		0.18		铝	T8 钢(不淬火)	0.03	
	青铜	0.10~0.15	0.07	铜	T8 钢	0.18		铝	T8 钢(淬火)	0.02	
	铝	0.02		铸铁	铸铁	0.15~0.16	0.07~0.12		黄铜	0.02	
	轴承合金	0.04		铸铁	青铜	0.16	0.07~0.15		聚甲醛	0.016	
未淬硬钢	铸铁	0.05~0.15		皮革		0.15	0.12	淬火钢	聚碳酸酯	0.03	
	青铜	0.07~0.15		橡胶		0.5			聚酰胺	0.02	

4.2 高温下的摩擦因数

以摩擦因数通常随温度升高而增大。摩擦因数与温度的关系见表 16.1-17。

温度高时污染膜和吸附膜会松弛、蒸发或脱吸,所

表 16.1-17 摩擦因数与温度的关系

温 度 / °C		20	50	100	150	200	250	300	350
采用的润滑剂	L-EQC 15/40	0.28	0.32	0.35	0.40	0.45	0.55	0.60	0.50
	蓖麻籽油	0.18	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
无 润 滑		0.55~0.6				1.20~1.30			

注:摩擦副材料为未淬硬钢对未淬硬钢。

4.3 真空中的摩擦因数

在真空中,摩擦表面上氧化和吸附膜的生成速率低,粘结点散热缓慢,故摩擦因数大,真空度越高,摩擦因数越大。可以采用自润滑材料,固体润滑剂或软金属膜来改善真空中材料间的摩擦特性。

碳氢化合物在真空中会气化,影响摩擦因数。根据

有无碳氢化合物的残留气体,分为“油真空”和“无油真空”。“无油真空”中滑动摩擦因数较大、易咬粘,磨损严重。同种纯金属表面在真空中滑动,摩擦因数随它们的硬度增加而下降。

表 16.1-18~21 是各种材料在真空中的摩擦因数。

表 16.1-18 不锈钢对不锈钢试件在不同真空度中的摩擦因数

压力 / Pa	1.01×10^5	1.01×10^5	5.33×10^{-5}	1.87×10^{-6}	1.07×10^{-6}
摩擦因数	0.47 ^①	0.82 ^②	1.22	2.74	2.94

① 开始运转时的值;

② 运转 2h 后的值。

表 16.1-19 纯金属在真空中的摩擦因数

摩擦副材料		Cu-Ni	Ta-Ni	W-Ni	Cu-Fe	Ta-Cu	W-Cu
压力/Pa	1.01×10^5	0.45	0.23	0.21	0.51	0.44	0.34
	1.33×10^{-3}	1.50	0.90	1.36	0.75	0.43	0.41

表 16.1-20 非金属材料在真空(压力 1.33mPa)中的摩擦因数

摩擦副材料		温度 / $^{\circ}\text{C}$				
I	II	-80	-60	-40	-20	0
聚乙烯	聚乙烯	0.33	0.40	0.38	0.42	0.53
聚四氟乙烯	聚四氟乙烯	0.2	0.2	0.7	0.11	0.1
聚三氟氯乙烯	聚三氟氯乙烯	0.3	0.31	0.35	0.41	0.48
聚甲基丙	聚甲基丙	0.45	0.45	0.46	0.48	0.54
烯酸甲酯	烯酸甲酯	0.45	0.45	0.46	0.48	0.54

表 16.1-21 各种不同金属(合金)在空气和真空中摩擦因数的比较

摩擦副材料	载荷/N	摩擦因数					
		在空气中			在真空中(0.267mPa)		
		起动	10min后	60min后	起动	10min后	60min后
铝-铝	30	0.50	0.78	0.78	1.10	1.57	1.57
	62	0.57	0.59	0.59	0.61	0.75	0.59
铍青铜-铍青铜	32	0.46	0.57	0.58	0.71	0.87	1.10
	64	0.44	0.89	0.70	—	—	—
黄铜-黄铜	32	0.31	0.31	—	0.43	0.50	0.70
	64	0.37	0.39	—	0.40	0.55	0.60
纯铜-纯铜	32	0.26	1.04	1.04	0.32	1.22	2.0
不锈钢-不锈钢	64	0.29	0.47	0.51	0.32	0.62	0.93
不锈钢-铝	32	0.29	0.39	0.40	0.38	0.39	0.34
不锈钢-黄铜	64	0.21	0.32	0.39	0.32	0.67	0.84
GCr15-纯铜	64	0.13	0.66	0.70	0.25	0.41	0.45
铍青铜-黄铜	64	3.28	0.34	0.38	0.49	0.62	0.90
铜-铜	64	0.26	0.44	0.39	0.43	0.43	0.31
镍-镍	32	0.33	0.33	0.30	—	—	—
银-银	64	—	—	—	0.28	0.41	0.39

液氮具有保护作用,在液氮中摩擦磨损是稳定的,且摩擦因数略有下降。

4.4 低温下的摩擦因数

0~—150 $^{\circ}\text{C}$ 下的摩擦谓之低温摩擦。实际上低温摩擦多是在低温液体(如液氮、液氦、液氢等)中的摩擦。低温液体的特点是粘度低和有腐蚀性,虽然在摩擦面上可以保持氧化膜,但膜易破裂,所以,低温下摩擦面易咬粘、磨损严重。

立方晶体金属的低温摩擦因数大于六方晶体金属。

表 16.1 22~25 是金属与塑料在低温下的摩擦因数。

表 16.1-22 在液氮介质中的摩擦因数

摩擦副材料		摩擦因数	摩擦副材料		摩擦因数	摩擦副材料		摩擦因数
I	II	μ	I	II	μ	I	II	μ
Al	Al	0.718	Al	30CrMoAlA (渗氮处理)	0.853	30CrMoAlA	30CrMoAlA	0.897
Ti	Ti	0.692	Ti		0.734	聚苯乙烯	45钢(热处理)	0.33~0.35
Nb	Nb	0.990	Nb		1.016	聚氯乙稀		0.20~0.22
Mo	Mo	0.831	Mo		0.879	酚醛层压布材		0.31~0.34
W	W	1.006	W		1.068	聚四氟乙稀		0.09~0.10
Fe	Fe	0.841	Fe		1.023	山毛榉木		0.32~0.38
Co	Co	0.512	Co		0.537	硬橡胶		0.30~0.48
Ni	Ni	0.879	Ni		1.037	石墨		0.68~0.72

表 16.1-23 在氮气中金属的摩擦因数

摩 擦 副 材 料	温 度 / °C						摩 擦 副 材 料	温 度 / °C					
	27		-193		-253			27		-193		-253	
	μ_{st}	μ_{sl}	μ_{st}	μ_{sl}	μ_{st}	μ_{sl}		μ_{st}	μ_{sl}	μ_{st}	μ_{sl}	μ_{st}	μ_{sl}
Fe(99.9%)-Fe(99.99%)	1.09	0.92	1.04	0.90	—	—	Au(99.98%)-Al(99%)	1.42	1.22	1.50	1.16	—	—
Al(99%)-Al(99%)	1.62	1.43	1.60	1.41	—	—	Fe(99.9%)-Cu(99.95%)	1.99	1.80	2.03	1.80	—	—
Cu(99.95%)-Cu(99.95)	1.76	1.56	1.70	1.45	1.66	1.42	Ni(99.955%)-Cu(99.955)	2.34	2.13	2.35	2.12	—	—
Au(99.98%)-Au(99.98%)	1.88	1.60	1.77	1.60	2.03	1.79	Cu(99.95%) - Fe(99.9%)	0.43	0.43	0.40	0.40	—	—
Pt(99.98%)-Pt(99.98%)	1.92	1.70	1.93	1.68	—	—	Cu(99.955)-Ni(99.955)	0.85	0.85	0.85	0.85	—	—
Ni(99.95%)-Ni(99.95%)	2.11	1.78	2.00	1.68	2.02	1.68							

注:表中括号内的百分含量均为质量分数。

表 16.1-24 低温、真空中金属的摩擦因数

摩擦副材料		压力	温度	摩擦	摩擦副材料		压力	温度	摩擦
I	II	/Pa	/°C	因数	I	II	/Pa	/°C	因数
Al	Al	1.33×10^{-8}	-268	2.2~2.4	Fe	Fe	1.33×10^{-8}	-268	1.1~1.2
		1.33×10^{-6}	-196	2.5~2.8			1.33×10^{-6}	-196	1.1~1.3
Cu	Cu	1.33×10^{-8}	-268	≥ 5	Zn	Zn	27		1.5~1.8
电解铜	电解铜	1.33×10^{-6}	-196~27	≥ 5			1.33×10^{-8}	-268	0.25~0.36
		1.33×10^{-8}	-200	3			1.33×10^{-6}	-196	0.35~0.40
			0	4			27		0.50~0.55
Pb	Pb	1.33×10^{-8}	-268	≥ 6	40Cr(碳氮共渗)	40Cr(碳氮共渗)	6.67×10^{-5}	-190	0.4~0.5
		1.33×10^{-6}	-196~27	≥ 6	ZG110Mn13	40Cr	6.67×10^{-5}	20	0.6~0.7
							-190		0.95

表 16.1-25 几种材料在低温液体介质中与不锈钢的摩擦因数

摩擦副材料	液体介质	
	液氮	液氢
石墨+金属氟化物	0.18	0.22
石墨+酚醛树脂	0.04	0.06
石墨(15%)+聚四氟乙烯(85%)	0.09	0.16
石墨(5%)+尼龙(95%)	0.06	0.15

5 滚动摩擦

两接触物体成点接触或线接触,接触处的速度大小和方向均相同的摩擦为滚动摩擦。物体作无滑动的滚动时,其阻力矩称为滚动摩擦力矩。

因定义不同,有滚动摩擦因数和滚动摩擦系数之分,见表 16.1-26。滚动摩擦系数值和滚动摩擦因数值见表 16.1-27、28。

表 16.1-29 是滚动轴承的摩擦因数。

表 16.1-26 滚动摩擦因数和滚动摩擦系数

名称	定义	量纲	摩擦角	特点	图示
滚动摩擦因数	$\mu_g' = A / (F_N \Delta l)$, A —驱动力所作的功, $A = F r \Delta \varphi$, Δl —滚轮中心位移量	1	$\tan \rho_g = \mu_g'$	在一定载荷条件下可与滑动摩擦因数作比较	
滚动摩擦系数	$\mu_g = M / F_N$, M —阻力矩, $M = F r$	m	$\tan \rho_g = \mu_g / r$	摩擦系数定义与滑动摩擦因数相似; μ_g 值随滚轮大小而改变	

表 16.1-27 滚动摩擦系数的典型数值

滚轮	滚道	μ_g	滚轮	滚道	μ_g	滚轮	滚道	μ_g
铁梨木	作木	0.5	钢	碎石路	1.2~5.0	充气轮胎	泥土路	1.0~1.5
榆木	作木	0.8	钢	软土路	75~125	实心橡胶轮胎	优质路	1.0
钢	钢	0.2~0.4	充气轮胎	优质路	0.5~0.55	实心橡胶轮胎	泥土路	2.2~2.8
钢	木	1.5~2.5						

表 16.1-28 滚动摩擦因数的典型数值

滚动体	φ1.5875mm 钢球							
滚道材料	硬钢	软钢	黄铜	铜	铝	锡	铅	玻璃
μ	0.00002	0.00004~0.00010	0.000045	0.00012	0.001	0.0012	0.0014	0.000014

表 16.1-29 滚动轴承的摩擦因数

轴承类型	摩擦因数 μ	轴承类型	摩擦因数 μ
深沟球轴承	0.0015	滚针轴承	0.0025
调心球轴承	0.0010	调心滚子轴承	0.0018
角接触球轴承	单列	圆锥滚子轴承	0.0018
	双列	推力球轴承	0.0013
	四点接触	推力圆柱滚子轴承	0.0050
圆柱滚子轴承	有保持架	推力滚针轴承	0.0050
	满滚子	推力调心滚子轴承	0.0018

注：表中摩擦因数未计入密封件的摩擦；圆柱滚子和滚针轴承无轴向载荷。

6 机械零件的摩擦

机械零件构成的运动副，除轴承外，大多数处于干摩擦、边界摩擦或混合摩擦状态，其摩擦力均用式(16.1-2)计算。

摩擦力可以是机械零件的工作基础，如摩擦传动和摩擦制动。

摩擦力更经常的是有害阻力，造成机器的摩擦损失。

6.1 斜面的摩擦(见表 16.1-30)

表 16.1-30 斜面的摩擦

滑块类型	平面滑块		楔形滑块	
	等速上升	等速下降	等速上升	等速下降
力平衡图				
作用力	$F = F_Q \tan(\alpha + \rho)$	$F = F_Q \tan(\alpha - \rho)$	$F = F_Q \tan(\alpha + \rho')$	$F = F_Q \tan(\alpha - \rho')$
			$\tan \rho' = \mu / \sin \beta$	
效率	$\eta = \tan \alpha / \tan(\alpha + \rho)$ 当 $\alpha = 45^\circ - \rho/2$ 时效率最高 $\eta_{\max} = \tan(45^\circ - \rho/2)$	$\eta = \tan(\alpha - \rho) / \tan \alpha$	$\eta = \tan \alpha / \tan(\alpha + \rho')$ 当 $\alpha = 45^\circ - \rho'/2$ 时效率最高 $\eta_{\max} = \tan(45^\circ - \rho'/2)$	$\eta = \tan(\alpha - \rho') / \tan \alpha$
自锁条件	$\alpha \geq \pi/2 - \rho$	$\alpha \leq \rho$	$\alpha \geq \pi/2 - \rho'$	$\alpha \leq \rho'$

6.2 楔的摩擦与摩擦因数(见表 16.1-31、32)

表 16.1-31 楔的摩擦

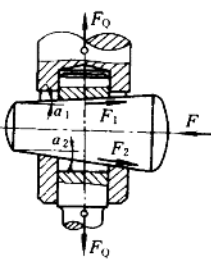
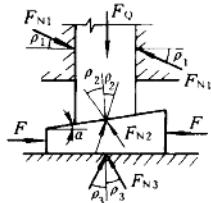
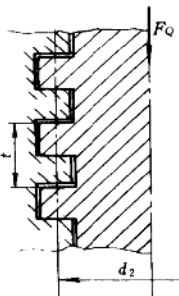
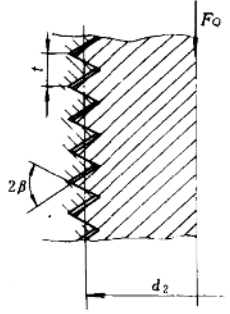
楔 的 类 型	楔 联 接	调 整 楔
力平衡图		
楔紧力	$F = F_Q [\tan(\alpha_1 + \rho_1) + F_Q \tan(\alpha_2 + \rho_2)]$	$F = F_Q [\sin(\rho_2 + \rho_3 + \alpha) \cos \rho_1] / [\cos(\rho_1 + \rho_2 + \alpha) \cos \rho_3]$ 若 $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho$ $F = F_Q \tan(\alpha + 2\rho)$
松脱力	$F = F_Q [\tan(\alpha_1 - \rho_1) + F_Q \tan(\alpha_2 - \rho_2)]$	$F = F_Q [\sin(\alpha - \rho_2 - \rho_3) \cos \rho_1] / [\cos(\alpha - \rho_1 - \rho_2) \cos \rho_3]$ 若 $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho$ $F = F_Q \tan(\alpha - 2\rho)$
自锁条件	$\alpha_1 + \alpha_2 \leq \rho_1 + \rho_2$	$\alpha \leq \rho_2 + \rho_3$

表 16.1-32 楔联接的摩擦因数

材料和表面状况	钢-钢、仔细加工、涂脂	钢-钢、刨削、涂脂	钢-钢、油润滑	钢-钢、无油或脂
摩擦因数 μ	0.04	0.07	0.15	0.20~0.22
摩擦角 ρ	$2^\circ 17'$	$4^\circ 0'$	$8^\circ 32'$	$11^\circ 19' \sim 12^\circ 24'$

6.3 螺纹的摩擦(见表 16.1-33)

表 16.1-33 螺纹的摩擦

螺 纹 类 型	矩 形 螺 纹	三 角 螺 纹
简 图		
旋紧力矩	$T = F_Q d_2 (t + \pi d_2 \mu) / [2(\pi d_2 - t \mu)]$	$T = F_Q d_2 (t \cos \beta + \pi d_2 \mu) / [2(\pi d_2 \cos \beta - t \mu)]$
旋松力矩	$T = F_Q d_2 (t - \pi d_2 \mu) / [2(\pi d_2 + t \mu)]$	$T = F_Q d_2 (t \cos \beta - \pi d_2 \mu) / [2(\pi d_2 \cos \beta + t \mu)]$
自锁条件	$t \leq \pi d_2 \mu$	$t \leq \pi d_2 \mu / \cos \beta$
效率	$\eta = (t / \pi d_2) [(\pi d_2 - t \mu) / (\pi d_2 \mu + t)]$ 当 $t = \pi d_2 \mu$ 时, $\eta = (1 - \mu^2) / 2$	$\eta = (t / \pi d_2) [(\pi d_2 \cos \beta - t \mu) / (\pi d_2 \mu + t \cos \beta)]$ 当 $t = \pi d_2 \mu / \cos \beta$ 时, $\eta = (1 - \mu^2 / \cos^2 \beta) / 2$

6.4 (非流体润滑)滑动轴承的摩擦

定: 间隙较大时理论上是线接触, 载荷为集中载荷; 间隙很小时是面接触, 载荷为均布载荷。

6.4.1 径向轴承的摩擦

表 16.1-34 给出径向轴承的摩擦转矩、功耗和摩擦圆半径。

轴瓦面上的载荷分布视轴颈与轴瓦接触情况而

表 16.1-34 径向滑动轴承中的摩擦

载荷类型	示意图	摩擦转矩	摩擦功耗	摩擦圆半径
集中载荷		$T = (F_Q d / 2) [\mu / (1 + \mu^2)^{1/2}]$	$P = F_Q \pi d n [\mu / (1 + \mu^2)^{1/2}]$	$r = (d / 2) \zeta \mu / (1 + \mu^2)^{1/2}$
均布载荷	非磨合轴颈 	$T = (F_Q d / 2) (\pi \mu / 2)$	$P = F_Q \pi^2 d n \mu / 2$	$r = \pi d \mu / 4$
	磨合轴颈 	$T = (F_Q d / 2) (4 \mu / \pi)$	$P = 4 F_Q d n \mu$	$r = 2 d \mu / \pi$

6.4.2 止推轴承的摩擦(见表 16.1-35)。

表 16.1-35 止推轴承的摩擦

类型	平面止推轴承	环形止推轴承	圆锥止推轴承	圆台止推轴承
示意图				
摩擦转矩	$T = \frac{d F_Q \mu}{3}$	$T = \frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2} \frac{F_Q \mu}{3}$	$T = \frac{(d / \sin \alpha) F_Q \mu}{3}$	$T = \frac{[(D^3 - d^3) / (D^2 - d^2)] (1 / \sin \alpha) F_Q \mu}{3}$
摩擦功耗	$P = \frac{d 2 \pi n F_Q}{3}$	$P = \frac{[(D^3 - d^3) / (D^2 - d^2)] 2 \pi n \mu F_Q}{3}$	$P = \frac{(d / \sin \alpha) 2 \pi n \mu F_Q}{3}$	$P = \frac{[(D^3 - d^3) / (D^2 - d^2)] (1 / \sin \alpha) 2 \pi n \mu F_Q}{3}$

6.5 滚动轴承的摩擦

滚动轴承中除滚动摩擦外,尚有滑动摩擦和润滑剂的流体动力损耗。

粗略计算时,若 $C/P=10$ 、润滑良好、工作状况正常,摩擦转矩可按下式估算

$$T = 0.5\mu Fd \quad (16.1-13)$$

式中 μ ——滚动轴承摩擦因数,见表 16.1.29;

F ——轴承载荷,对于向心轴承是径向载荷,对于推力轴承是轴向载荷;

d ——轴承内径。

摩擦转矩的精确计算如下:当轴承有良好的润滑油膜时,滚动轴承由流体动力损耗决定的摩擦转矩与载荷无关,与润滑剂的粘度、用量和轴承转速有关,其计算式为

$$T_0 = f_0(vn)^{2/3}d_m^3 \times 10^{-7}, vn \geq 2000$$

$$T_0 = 160f_0d_m^3 \times 10^{-7}, vn < 2000$$

(16.1-14)

式中 f_0 ——与轴承类型和润滑有关的系数,从表 16.1-36 中查取;

ν ——工作温度下润滑油或润滑脂的基础油的运动粘度 (mm^2/s);

n ——转速 (r/min);

d_m ——滚动体中心圆直径 $d_m \approx (d + D)/2$ (mm)。

滚动和滑动摩擦决定的摩擦转矩随载荷变化,其计算式为

$$T_1 = f_1 F^a d_m^b \quad (16.1-15)$$

式中 f_1 ——与轴承类型和载荷有关的系数,从表 16.1-37 中查取;

F ——决定轴承摩擦转矩的载荷,从表 16.1-37 中查取;

a, b ——与轴承类型有关的指数,其值见表 16.1-38。

滚动轴承总的摩擦转矩为

$$T = T_0 + T_1 \quad (16.1-16)$$

表 16.1-36 系数 f_0

轴 承 类 型	f_0			
	脂润滑 ^①	油雾润滑	油浴润滑	立轴油浴润滑,喷油润滑
深沟球轴承 单列	0.75~2.0 ^②	1.0	2.0	4.0
双列	3	2.0	4.0	8.0
调心球轴承	1.5~2 ^②	0.7~1.0 ^②	1.5~2.0 ^②	3.0~4.0 ^②
角接触球轴承 单列	2	1.7	3.3	6.6
双列,成对安装	4	3.4	6.5	13.0
4点接触	6	2.0	6.0	9.0
圆柱滚子轴承 有保持架 系列 10,02,03,04	0.6	1.5	2.2	2.2 ^③
系列 22	0.8	2.1	3.0	3.0 ^③
系列 23	1.0	2.8	4.0	4.0 ^③
满滚子 单列	5.0 ^③	—	5.0	—
双列	10.0 ^④	—	10.0	—
滚针轴承	12.0	6.0	12.0	24.0
调心滚子轴承 系列 13	3.5	1.75	3.5	7.0
系列 22	4.0	2.0	4.0	8.0
系列 23,30	4.5	2.25	4.5	9.0
系列 31	5.5	2.75	5.5	11.0
系列 32	6.0	3.0	6.0	12.0
系列 40	6.5	3.25	6.5	13.0
系列 41	7.0	3.5	7.0	14.0
圆锥滚子轴承 单列	6.0	3.0	6.0	8.0~10.0 ^{④⑤}
成对安装	12.0	6.0	12.0	16.0~20.0 ^{④⑤}
推力球轴承	5.5	0.8	1.5	3.0
推力圆柱滚子轴承	9.0	—	3.5	7.0
推力滚针轴承	14	—	5.0	11.0
推力调心滚子轴承 系列 92E ^⑤	—	—	2.5	5.0
92	—	—	3.7	7.4
93E ^⑤	—	—	3.0	6.0
93	—	—	4.5	9.0
94 ^⑤	—	—	3.3	6.6
94	—	—	5.0	10.0

注:① 适用于稳定状态,新脂或添脂后应采用(2~4)× f_0 。

② 直径系列较轻的轴承取较小值,反之,取较大值。

③ 适用于喷油润滑,对于立轴油浴润滑加倍。

④ 适用于低速,高速时加倍。

⑤ 加强型设计,基本尺寸相同。

表 16.1-37 系数 f_1 和载荷 F

轴 承 类 型	f_1	$F^{(1)}$
深沟球轴承	$(0.0006 \sim 0.0009)(P_0/C_0)^{0.55 \sim 2}$	$3F_s - 0.1F_t$
调心球轴承	$0.0003(P_0/C_0)^{0.40}$	$1.4Y_2F_s - 0.1F_t$
角接触球轴承 单列	$0.001(P_0/C_0)^{0.33}$	$F_s - 0.1F_t$
双列, 成对安装	$0.001(P_0/C_0)^{0.33}$	$1.4F_s - 0.1F_t$
4点接触	$0.001(P_0/C_0)^{0.33}$	$1.5F_s - 3.6F_t$
圆柱滚子轴承 有保持架 系列 10	0.0002	$F_t^{(3)}$
系列 02	0.0003	$F_t^{(3)}$
系列 03	0.00035	$F_t^{(3)}$
系列 042223	0.0004	$F_t^{(3)}$
满滚子 单列	0.00055	$F_t^{(3)}$
滚针轴承	0.002	F_t
调心滚子轴承 系列 13	0.00022	$1.35Y_2F_s, F_t/F_s < Y_2$ $F_t[1 + 0.35(Y_2F_s/F_t)^3], F_t/F_s > Y_2$
系列 22	0.00015	
系列 23	0.00065	
系列 30, 41	0.001	
系列 31	0.00035	
系列 32	0.00045	
系列 40	0.0008	
圆锥滚子轴承 单列	0.0004	$2YF_s$
成对安装	0.0004	$1.2Y_2F_s$
推力球轴承	$0.0008(P_s/C_s)^{0.33}$	F_s
推力圆柱滚子轴承	0.0015	F_s
推力滚针轴承	0.0015	F_s
推力调心滚子轴承 系列 92E ⁽⁴⁾	0.00023	$F_s(F_{\max} \leq 0.55F_s)$
92	0.0003	$F_s(F_{\max} \leq 0.55F_s)$
93E ⁽⁴⁾	0.0003	$F_s(F_{\max} \leq 0.55F_s)$
93	0.0004	$F_s(F_{\max} \leq 0.55F_s)$
94E ⁽⁴⁾	0.00033	$F_s(F_{\max} \leq 0.55F_s)$
94	0.0005	$F_s(F_{\max} \leq 0.55F_s)$

注: ① 若 $F < F_t$ 则取 $F = F_t$ 。

② 直径系列较轻的轴承取较小值, 反之, 取较大值。

③ 不受轴向力时按此式计算。

④ 加强型设计, 基本材料相同。

表 16.1-38 指数 a 、 b

轴 承 类 型	指数	
	a	b
各类轴承(除调心滚子轴承)	1.00	1.0
调心滚子轴承 系列 13	1.35	0.2
22	1.35	0.3
23	1.35	0.1
30	1.50	-0.3
31, 32	1.50	-0.1
40, 41	1.50	-0.2

圆柱滚子轴承承受径向载荷的同时还承受轴向载荷时, 轴承的摩擦转矩将加大, 增加的量与内、外圈挡边和滚子端面接触处的设计和润滑条件有关。当轴向载荷与径向载荷之比 (F_a/F_r) , 对满滚子轴承不大于 0.5, 双列满滚子轴承不大于 0.25 时, 对带保持架的轴

承不大于 0.4 时, 摩擦转矩可按下式计算

$$T = T_0 + T_1 + T_2 \quad (16.1-17)$$

式中 T_2 是与轴向载荷有关的摩擦转矩分量, 且

$$T_2 = f_2 F_a d_m \quad (16.1-18)$$

式中 f_2 ——与轴承设计和润滑有关的系数, 见表 16.1-39。

表 16.1-39 圆柱滚子轴承的系数 f_2

轴 承 类 型	f_2	
	脂润滑	油润滑
带保持架轴承 改进设计	0.003	0.002
其它型式	0.009	0.006
满滚子轴承 单列	0.006	0.003
双列	0.015	0.009

接触式密封轴承中, 密封引起的摩擦损失可能比轴承本身的大。两面密封轴承, 密封引起的摩擦转矩可按下列经验公式计算

$$T_3 = [(d + D)/f_3]^2 + f_4 \quad (16.1-19)$$