

6 轴承的预紧与轴向位移

6.1 定位预紧与定压预紧

在承受载荷时，为了尽量减小轴承位移，便对机床主轴，双曲面齿轮轴等的轴承施加预紧，从而提高轴承的刚度。

对轴承进行预紧，通常有以隔圈等定位的方法（定位预紧，见图 1）和以弹簧定压的方法（定压预紧，见图 2）。

定位预紧对提高刚度的效果已录入产品样本中，如图 3 所示，施加预紧量 F_{a0} ，则承受外力 F_a （轴向载荷）时产生的轴向位移为 δ_a 。定位预紧曲线图是按照相对的 2 套轴承 A、B 的位移曲线绘制而成的。

相反，定压预紧曲线图则是以预紧弹簧的位移曲线（变为直线）代替轴承 B 的位移曲线，相对于轴承 A 的位移曲线绘制而成的。

图 4 表示定压预紧曲线图。由于弹簧的刚度一般比轴承小得多，故而，弹簧的位移曲线是一条与横坐标基本平行的直线。因此，通过定压预紧提高刚度，基本上就等于对单套轴承预先施加载荷 F_{a0} 来提高刚度。

图 5 是对轴承 7212A 采用预紧法提高刚度进行对比的实例。

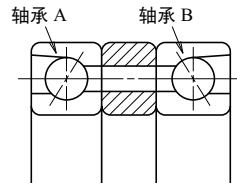


图 1 定位预紧

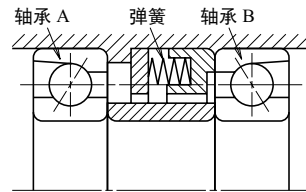


图 2 定压预紧

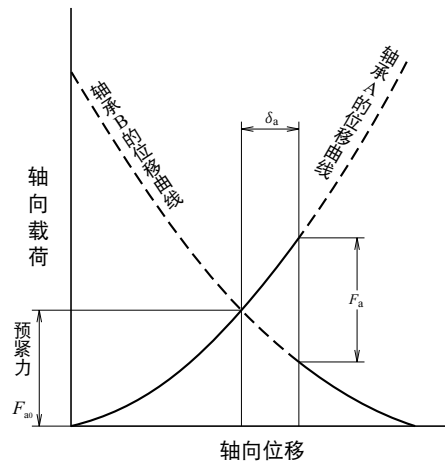


图 3 定位预紧曲线图

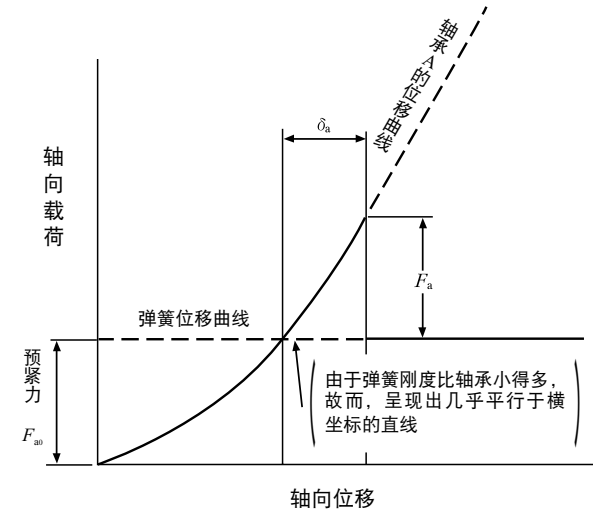


图 4 定压预紧曲线图

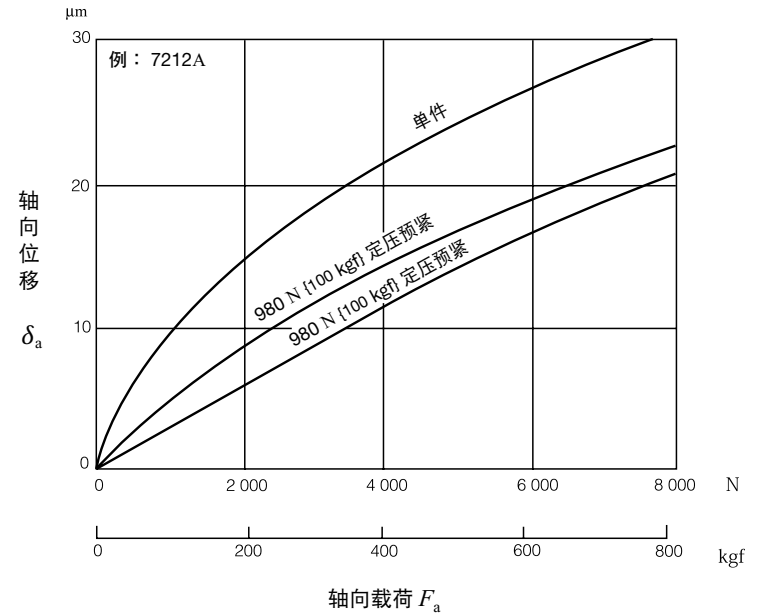


图 5 不同预紧方式的刚度比较

6.2 定位预紧后轴承的载荷与位移

将一组相同型号的球轴承或圆锥滚子轴承 2 套以上并为一组安装，发挥功能，叫组合轴承。组合轴承最常用的类型是单列角接触球轴承，主要用于机床主轴等场所要求承载并尽量减少轴承位移的情况。

双列组合分为背靠背、面对面及并列组合 3 种，其组合代号分别为 DB、DF、DT（见图 1）。

DB 及 DF 组合，可以承受双向轴向载荷。DB 组合比 DF 组合作用点距离更远，故而，广泛应用于承受力矩载荷的情况。

DT 组合虽然只能承受单向轴向载荷，但 2 套轴承能平分摊轴向载荷，故而，用于单向载荷较大的情况。

在 DB 及 DF 组合轴承中，通过预先加载和调整，对组合轴承的预紧水平进行优选，就能尽量将内、外圈的径向及轴向位移减少至所需范围之内。

再者，单凭 DT 组合并不能完成预紧。

预紧量的大小，可以利用图 3~图 5 改变轴承间隙 δ_{a0} 进行调整，按大小标准分段：微载 (EL)，轻载 (L)，中载 (M)，重载 (H)。故而，在需要严格控制轴的跳动与载荷引起的位移时，广泛采用 DB、DF 组合轴承。

3 列组合也分为 3 种，其代号分别为 DBD、DFD、DTD（见图 2）。此外，还有采用四列组合或五列组合的。

组合轴承大都预紧以后使用，预紧量的大小，将会影响到因旋转引起的轴承温升、启动力矩、旋转力矩、噪声及轴承寿命等，预紧必须适度，切忌施加过大的预紧量。

单列角接触球轴承承受轴向载荷 F_a 时，其轴向位移量 δ_a 通常可用下式求得。

$$\delta_a = c F_a^{2/3} \dots\dots\dots(1)$$

式中， c ：取决于各种轴承外型尺寸常数。

图 3 是双列 DB 组合，图 4 及图 5 是 3 列 DBD 组合的预紧曲线图。

如图 3 所示，当轴向紧固组合轴承内圈时，A、B 轴承分别产生 δ_{a0A} 与 δ_{a0B} 位移，内圈之间的游隙就将失去，这是施加了预紧量 F_{a0} 的状态。当外加轴向载荷 F_a 作用于该预紧轴承 A 侧时，A 侧进一步朝轴向位移 δ_{a1} ，B 侧则减小等量的位移，A、B 两侧的位移分别为： $\delta_{aA} = \delta_{a0A} + \delta_{a1}$ ， $\delta_{aB} = \delta_{a0B} - \delta_{a1}$ 。即，考虑预紧在内加于 A 侧的外力是包含预紧量 $(F_{a0} + F_a - F_a')$ ，加于 B 侧的则是 $(F_{a0} - F_a')$ 。

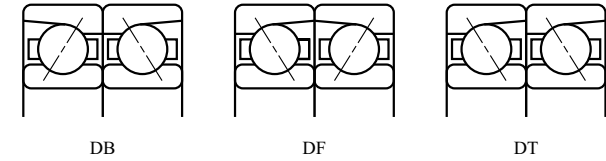


图 1 2 列双联

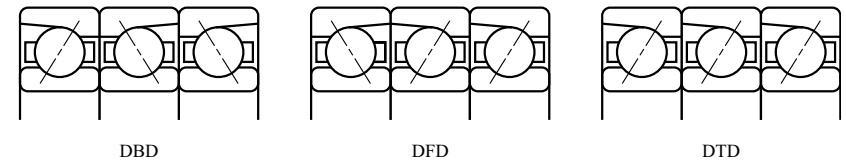


图 2 3 列组合轴承

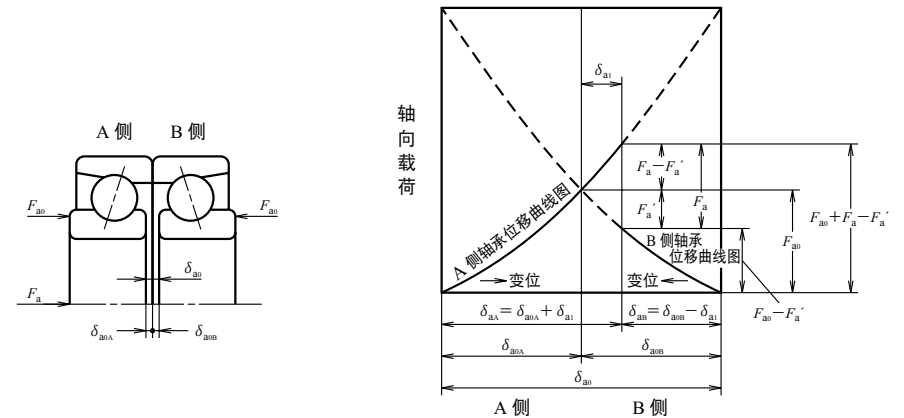


图 3 2 列 DB 组合轴承预紧曲线图

在预紧时，A 侧必须具备满足寿命要求及速度条件能够经受轴向载荷 $(F_{a0} + F_a - F_{a'})$ 的承载容量。
 δ_{a0} 见 6.3 节表 3~表 7。

在图 4 中，当轴向载荷 F_a 加于轴承 AA 侧时，AA 侧 B 侧轴承的位移及轴向载荷如表 1 所示。

在图 5 中，当轴向载荷 F_a 加于轴承 A 侧时，A 侧、BB 侧的轴承位移及轴向载荷如表 2 所示。

7018C, 7018A 双列 DB 组合及 3 列 DBD 组合型轴承与预紧量大小相关的轴向载荷和轴向位移的关系，如图 6~图 11 所示。

表 1

方向	位移	轴向载荷
AA 侧	$\delta_{a0A} + \delta_{a1}$	$F_{a0} + F_a - F_{a'}$
B 侧	$\delta_{a0B} - \delta_{a1}$	$F_{a0} - F_{a'}$

表 2

方向	位移	轴向载荷
A 侧	$\delta_{a0A} + \delta_{a1}$	$F_{a0} + F_a - F_{a'}$
BB 侧	$\delta_{a0B} - \delta_{a1}$	$F_{a0} - F_{a'}$

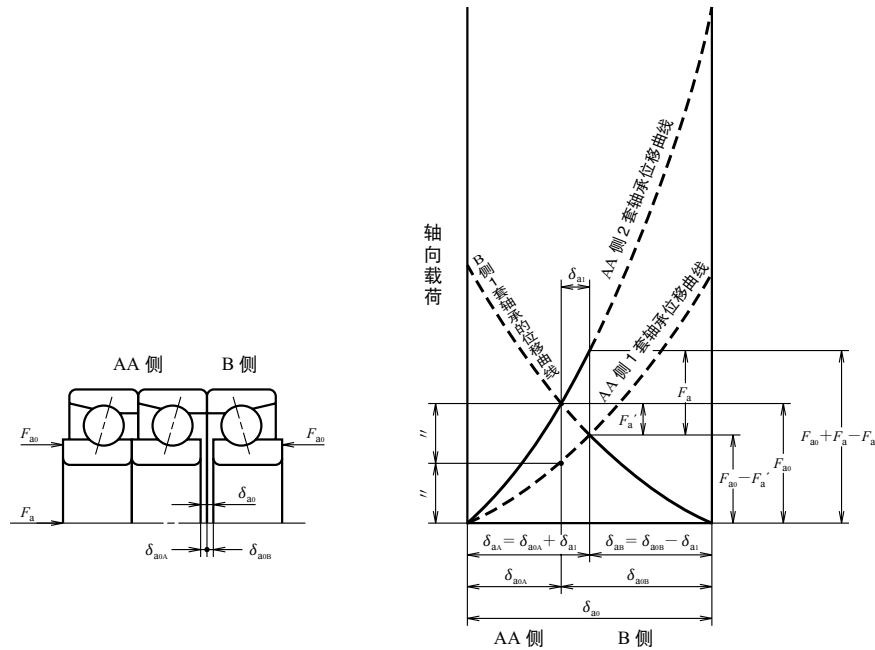


图 4 3 列 DBD 组合轴承预紧曲线图
 (轴向载荷加于 AA 侧时)

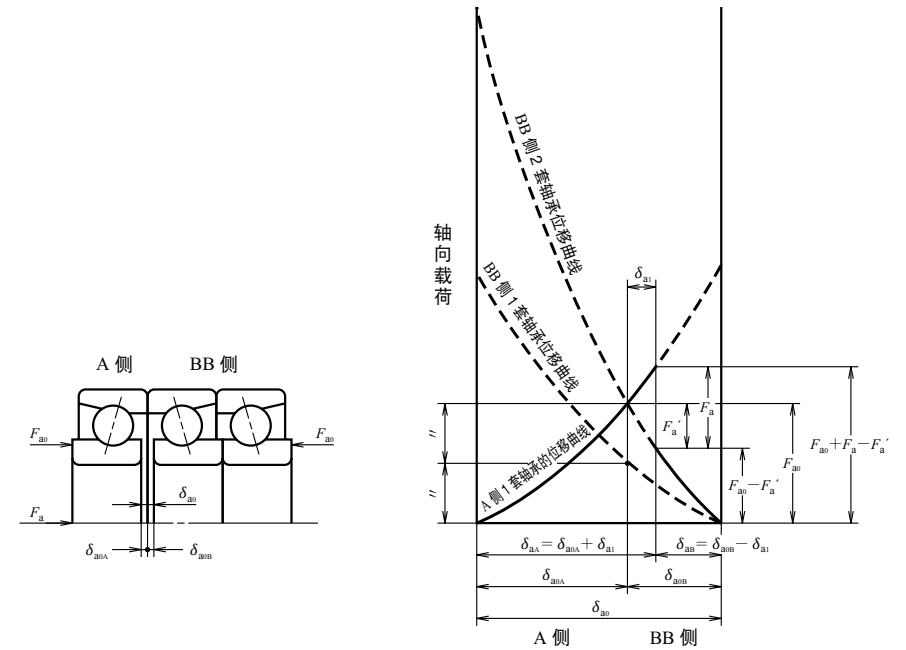


图 5 3 列 DBD 组合轴承预紧曲线图
 (轴向载荷加于 A 侧时)

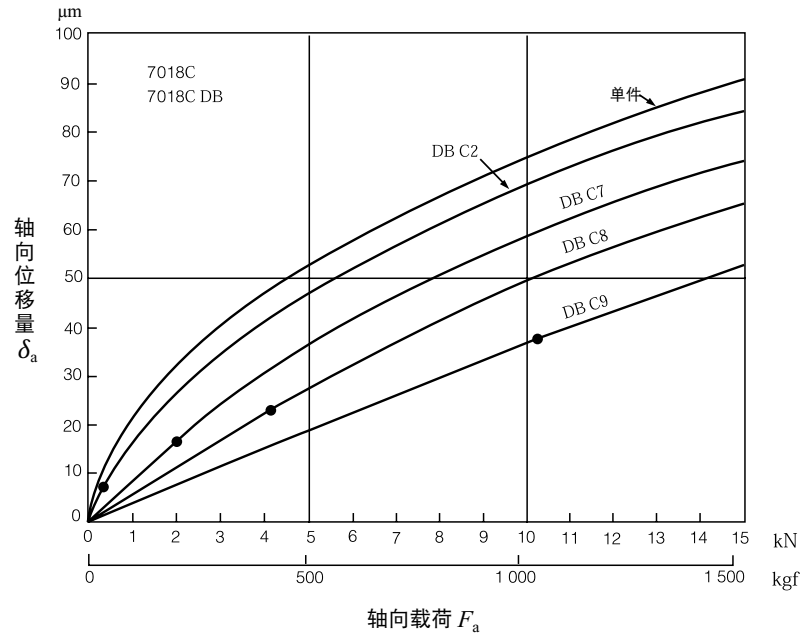


图 6

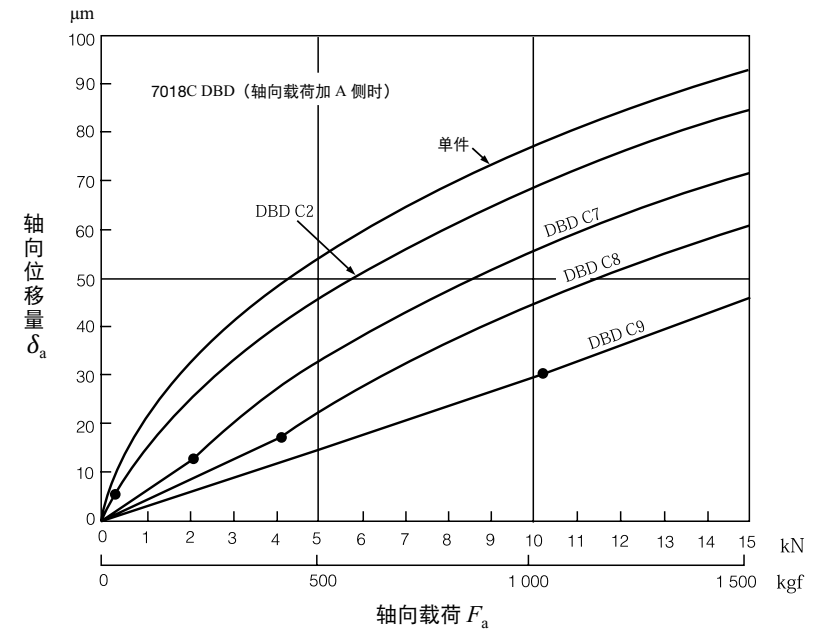


图 8

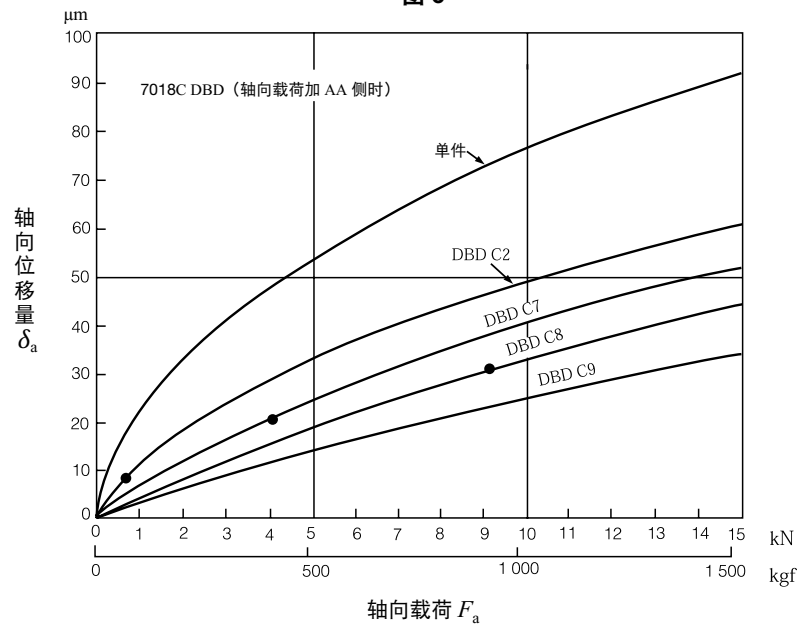


图 7

备注 图中载荷—位移曲线上所示的●表示预紧量消失的位置，
当轴向载荷比它更大时，反推力一侧的轴承将不承受载荷。

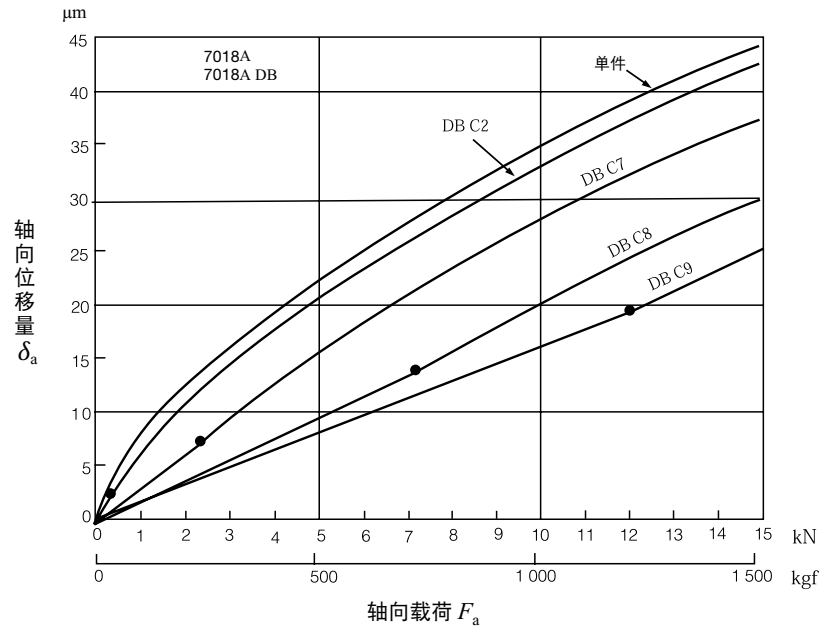


图 9

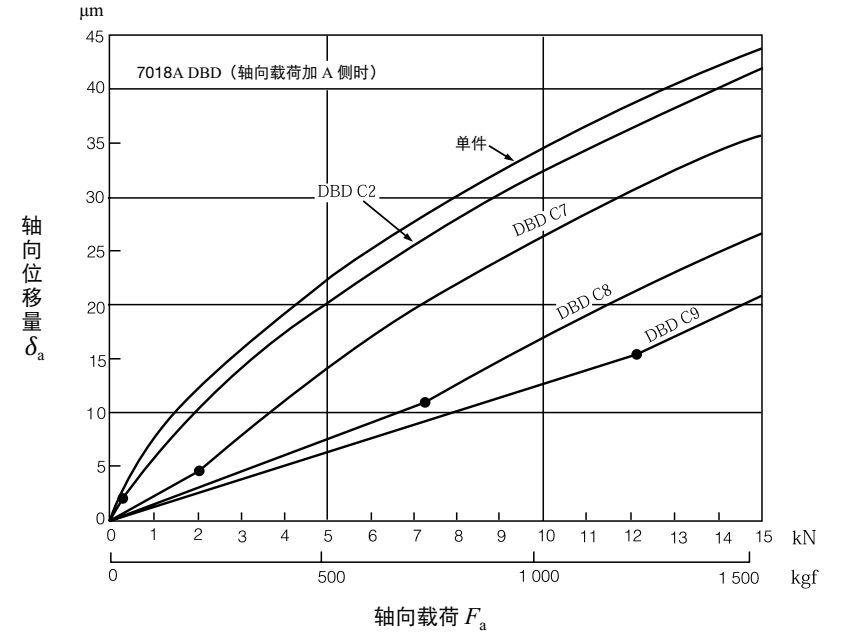


图 11

备注 图中载荷—位移曲线上所示的●表示预紧量消失的位置，
当轴向载荷比它更大时，反推力一侧的轴承将不承受载荷。

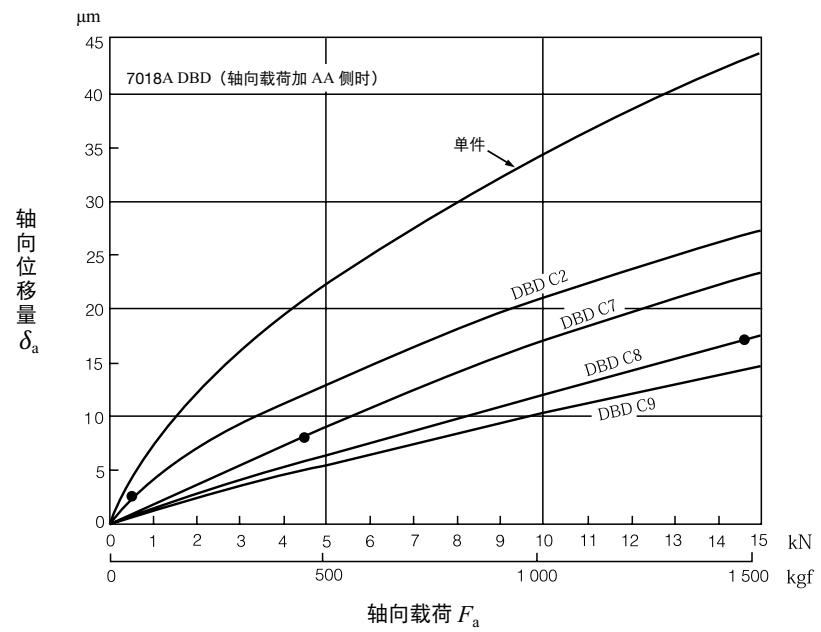


图 10

6.3 组合角接触球轴承的平均预紧量

角接触球轴承，广泛用于磨床、铣床、高速车床等的主轴之中。因不同用途随意选择合适的预紧量，NSK 特将其分为微预紧、轻预紧、中预紧、重预紧 4 档。这 4 档预紧量应用于 DB、DF 等组合轴承时，其轴向游隙分别用代号 EL、L、M、H 表示。

接触角为 15° 及 30° 的组合角接触球轴承广泛使用于机床主轴中，其平均预紧量及轴向游隙（测量值）的平均值如表 3~表 7 所示。

另外，测量轴向游隙时，采用的测量载荷如表 1 所示。

作为机床主轴及其它用途中广泛使用的 JIS5 级及以上级别的高精度组合轴承，对保证预紧量的轴向游隙作了规定。轴与内圈，轴承座孔与外圈的配合目标值，参见表 2。

再者，对于轴承座孔与外圈的配合，轴承装于固定端时取目标游隙的下限，装于自由端时取其上限。

选择预紧量指标时，磨床主轴或加工中心主轴轴承等通常采用轻、微预紧；要求刚度较高的车床主轴轴承，通常采用中预紧。

轴承的预紧量，采用过盈配合时，会大于表 3~表 7 所示数值。但如过大，则会使轴承温度过高、从而引起咬粘（俗称烧伤），故而，在配合时，此点应引起足够的重视。

表 1 轴向游隙的测量载荷

轴承公称外径 D (mm)		测量载荷 (N)
超过	到	
10*	50	24.5
50	120	49
120	200	98
200	—	196

* 包括 10mm

表 2 配合的目标值

单位 μm

内径 d 或外径 D (mm)		轴与内圈	轴承座孔与外圈
超过	到	目标过盈量	目标游隙
—	18	0 ~ 2	—
18	30	0 ~ 2.5	2 ~ 6
30	50	0 ~ 2.5	2 ~ 6
50	80	0 ~ 3	3 ~ 8
80	120	0 ~ 4	3 ~ 9
120	150	—	4 ~ 12
150	180	—	4 ~ 12
180	250	—	5 ~ 15

表 3 轴承 79C 系列的预紧量与轴向游隙的平均值

轴承 代号	微预紧 EL		轻预紧 L		中预紧 M		重预紧 H	
	预紧量 (N)	轴向游隙 (μm)	预紧量 (N)	轴向游隙 (μm)	预紧量 (N)	轴向游隙 (μm)	预紧量 (N)	轴向游隙 (μm)
7900C	7	5	15	2	29	-1	59	-6
7901C	8.6	4	15	2	39	-3	78	-8
7902C	12	3	25	0	49	-4	100	-11
7903C	12	3	25	0	59	-5	120	-12
7904C	19	1	39	-3	78	-8	150	-15
7905C	19	1	39	-2	100	-9	200	-17
7906C	24	0	49	-3	100	-8	200	-16
7907C	34	2	69	-2	150	-9	290	-18
7908C	39	1	78	-3	200	-12	390	-22
7909C	50	0	100	-5	200	-11	390	-21
7910C	50	0	100	-4	250	-13	490	-24
7911C	60	-1	120	-5	290	-15	590	-26
7912C	60	-1	120	-5	290	-15	590	-25
7913C	75	-2	150	-7	340	-16	690	-27
7914C	100	-4	200	-10	490	-22	980	-36
7915C	100	-4	200	-9	490	-21	980	-35
7916C	100	-4	200	-9	490	-21	980	-34
7917C	145	-6	290	-14	640	-25	1 270	-41
7918C	145	-3	290	-9	740	-23	1 470	-39
7919C	145	-3	290	-9	780	-24	1 570	-40
7920C	195	-5	390	-13	880	-28	1 770	-46

备注：轴向游隙栏内的数值为测量值。

表 4 轴承 70C 系列的预载荷与轴向游隙的平均值

轴承代 号	微预紧 EL		轻预紧 L		中预紧 M		重预紧 H	
	预紧量 (N)	轴向游隙 (μm)	预紧量 (N)	轴向游隙 (μm)	预紧量 (N)	轴向游隙 (μm)	预紧量 (N)	轴向游隙 (μm)
7000C	12	3	25	0	49	-5	100	-12
7001C	12	3	25	0	59	-6	120	-14
7002C	14	3	29	-1	69	-7	150	-16
7003C	14	2	29	-1	69	-7	150	-16
7004C	24	0	49	-4	120	-12	250	-22
7005C	29	-1	59	-5	150	-14	290	-24
7006C	39	1	78	-3	200	-13	390	-24
7007C	60	-1	120	-7	250	-16	490	-28
7008C	60	-1	120	-6	290	-17	590	-30
7009C	75	-3	150	-8	340	-19	690	-33
7010C	75	-2	150	-8	390	-20	780	-34
7011C	100	-4	200	-11	490	-24	980	-40
7012C	100	-4	200	-10	540	-25	1 080	-42
7013C	125	-6	250	-13	540	-24	1 080	-39
7014C	145	-7	290	-14	740	-30	1 470	-48
7015C	145	-7	290	-14	780	-31	1 570	-49
7016C	195	-6	390	-14	930	-31	1 860	-52
7017C	195	-6	390	-14	980	-32	1 960	-52
7018C	245	-8	490	-18	1 180	-37	2 350	-60
7019C	270	-9	540	-19	1 180	-36	2 350	-58
7020C	270	-9	540	-18	1 270	-37	2 550	-60

备注：轴向游隙栏内的数值为测量值。

表 5 轴承 72C 系列的预载荷与轴向游隙的平均值

轴承代 号	微预紧 EL		轻预紧 L		中预紧 M		重预紧 H	
	预紧量 (N)	轴向游隙 (μm)	预紧量 (N)	轴向游隙 (μm)	预紧量 (N)	轴向游隙 (μm)	预紧量 (N)	轴向游隙 (μm)
7200C	14	3	29	-1	69	-8	150	-18
7201C	19	1	39	-3	100	-12	200	-22
7202C	19	1	39	-3	100	-11	200	-21
7203C	24	0	49	-4	150	-16	290	-28
7204C	34	-2	69	-7	200	-20	390	-33
7205C	39	1	78	-4	200	-14	390	-27
7206C	60	-1	120	-7	290	-20	590	-35
7207C	75	-3	150	-10	390	-25	780	-43
7208C	100	-5	200	-13	490	-29	980	-47
7209C	125	-7	250	-16	540	-30	1 080	-49
7210C	125	-7	250	-15	590	-31	1 180	-50
7211C	145	-8	290	-17	780	-38	1 570	-60
7212C	195	-11	390	-22	930	-42	1 860	-67
7213C	220	-12	440	-23	1 080	-44	2 160	-70
7214C	245	-9	490	-20	1 180	-42	2 350	-69
7215C	270	-10	540	-21	1 230	-42	2 450	-68
7216C	295	-12	590	-24	1 370	-47	2 750	-76
7217C	345	-14	690	-27	1 670	-53	3 330	-85
7218C	390	-15	780	-29	1 860	-57	3 730	-90
7219C	440	-18	880	-33	2 060	-63	4 120	-99
7220C	490	-20	980	-36	2 350	-68	4 710	-107

备注：轴向游隙栏内的数值为测量值。

表 6 轴承 70A 系列的预载荷与轴向游隙的平均值

轴承代号	微预紧 EL		轻预紧 L		中预紧 M		重预紧 H	
	预紧量 (N)	轴向游隙 (μm)	预紧量 (N)	轴向游隙 (μm)	预紧量 (N)	轴向游隙 (μm)	预紧量 (N)	轴向游隙 (μm)
7000A	25	0	100	-5	210	-10	330	-15
7001A	25	0	110	-5	220	-10	360	-15
7002A	25	0	110	-5	240	-10	390	-15
7003A	25	0	120	-5	250	-10	420	-15
7004A	25	0	130	-5	280	-10	470	-15
7005A	25	0	140	-5	290	-10	510	-15
7006A	50	0	190	-5	390	-10	640	-15
7007A	50	0	210	-5	420	-10	700	-15
7008A	50	0	220	-5	460	-10	760	-15
7009A	50	0	230	-5	480	-10	1 180	-20
7010A	50	0	250	-5	530	-10	1 270	-20
7011A	50	0	250	-5	880	-15	1 270	-20
7012A	50	0	250	-5	930	-15	1 370	-20
7013A	50	0	270	-5	980	-15	1 470	-20
7014A	50	0	270	-5	1 080	-15	2 060	-25
7015A	50	0	280	-5	1 080	-15	2 160	-25
7016A	100	0	760	-10	1 770	-20	3 040	-30
7017A	100	0	780	-10	1 860	-20	3 240	-30
7018A	100	0	780	-10	2 450	-25	3 920	-35
7019A	100	0	810	-10	2 550	-25	4 120	-35
7020A	100	0	840	-10	2 750	-25	4 310	-35

备注：轴向游隙栏内的数值为测量值。

表 7 轴承 72A 系列的预载荷与轴向游隙的平均值

轴承代号	微预紧 EL		轻预紧 L		中预紧 M		重预紧 H	
	预紧量 (N)	轴向游隙 (μm)	预紧量 (N)	轴向游隙 (μm)	预紧量 (N)	轴向游隙 (μm)	预紧量 (N)	轴向游隙 (μm)
7200A	25	0	100	-5	210	-10	—	—
7201A	25	0	110	-5	220	-10	360	-15
7202A	25	0	110	-5	240	-10	390	-15
7203A	25	0	120	-5	250	-10	410	-15
7204A	25	0	260	-10	440	-15	650	-20
7205A	50	0	350	-10	580	-15	840	-20
7206A	50	0	380	-10	630	-15	910	-20
7207A	50	0	400	-10	660	-15	1 270	-25
7208A	50	0	440	-10	730	-15	1 470	-25
7209A	50	0	450	-10	1 080	-20	1 860	-30
7210A	50	0	480	-10	1 180	-20	2 060	-30
7211A	50	0	490	-10	1 670	-26	2 650	-35
7212A	50	0	510	-10	1 670	-25	2 750	-35
7213A	50	0	550	-10	1 860	-25	3 040	-35
7214A	100	0	1 080	-15	2 650	-30	3 920	-40
7215A	100	0	1 080	-15	2 750	-30	4 220	-40
7216A	100	0	1 080	-15	2 650	-30	4 020	-40
7217A	100	0	1 180	-15	3 430	-35	5 790	-50
7218A	100	0	1 670	-20	4 310	-40	5 980	-50
7219A	360	-5	1 670	-20	4 220	-40	6 670	-55
7220A	370	-5	1 670	-20	5 100	-45	7 650	-60

备注：轴向游隙栏内的数值为测量值。

6.4 单列向心球轴承的轴向位移

对接触角为 α_0 的向心球轴承施加轴向载荷 F_a 时，内圈沿轴向产生位移 δ_a ，如图 1 所示，内圈沟道曲率半径中心 O_i 也会移动 δ_a ，变为 O_i' ，此时接触角变为 α 。

设滚动体载荷 Q 方向的沟道及滚动体的弹性变形量为 δ_N ，则由图 1 可得：

$$(m_0 + \delta_N)^2 = (m_0 \cdot \sin \alpha_0 + \delta_a)^2 + (m_0 \cdot \cos \alpha_0)^2$$

$$\therefore \delta_N = m_0 \left\{ \sqrt{(\sin \alpha_0 + \frac{\delta_a}{m_0})^2 + \cos^2 \alpha_0} - 1 \right\}$$

.....(1)

滚动体载荷 Q 与弹性变形量 δ_N 之间的关系如下式所示。

$$Q = K_N \cdot \delta_N^{3/2}$$

.....(2)

式中， K_N ：由材料、尺寸、形状决定的常数

$$\therefore m_0 = (\frac{r_e}{D_w} + \frac{r_i}{D_w} - 1) D_w = B \cdot D_w$$

由式 (1)、(2) 可得：

$$Q = K_N (B \cdot D_w)^{3/2} \left\{ \sqrt{(\sin \alpha_0 + h)^2 + \cos^2 \alpha_0} - 1 \right\}^{3/2}$$

其中， $h = \frac{\delta_a}{m_0} = \frac{\delta_a}{B \cdot D_w}$

设 $K_N = K \cdot \frac{\sqrt{D_w}}{B^{3/2}}$ 则，

$$Q = K \cdot D_w^2 \left\{ \sqrt{(\sin \alpha_0 + h)^2 + \cos^2 \alpha_0} - 1 \right\}^{3/2}$$

(3)

另外，由图 2 可得施加于轴承的轴向载荷与滚动体载荷的关系为：

$$F_a = Z \cdot Q \cdot \sin \alpha$$

.....(4)

再由图 1 得：

$$(m_0 + \delta_N) \sin \alpha = m_0 \cdot \sin \alpha_0 + \delta_a$$

$$\therefore \sin \alpha = \frac{m_0 \cdot \sin \alpha_0 + \delta_a}{m_0 + \delta_N} = \frac{\sin \alpha_0 + h}{1 + \frac{\delta_N}{m_0}}$$

将式 1 代入，则

$$\sin \alpha = \frac{\sin \alpha_0 + h}{\sqrt{(\sin \alpha_0 + h)^2 + \cos^2 \alpha_0}}$$

.....(5)

将式 (3)、(5) 代入式 (4)，即可求出轴承轴向载荷 F_a 与轴向位移 δ_a 的关系：

$$F_a = K \cdot Z \cdot D_w^2 \cdot \left\{ \sqrt{(\sin \alpha_0 + h)^2 + \cos^2 \alpha_0} - 1 \right\}^{3/2} \times (\sin \alpha_0 + h)$$

$$\frac{F_a}{\sqrt{(\sin \alpha_0 + h)^2 + \cos^2 \alpha_0}}$$

.....(6)

式中， K ：由轴承材料·设计决定的常数

D_w ：钢球直径

Z ：钢球个数

α_0 ：初期接触角（单列深沟球轴承）

可由 4.6 项 (96 页) 式 (5) 求出。

但是，实际轴向位移会因轴、轴承座的壁厚材质及与轴的配合而不相同。因此，有关此类装配条件下的轴向位移，请向 NSK 咨询。

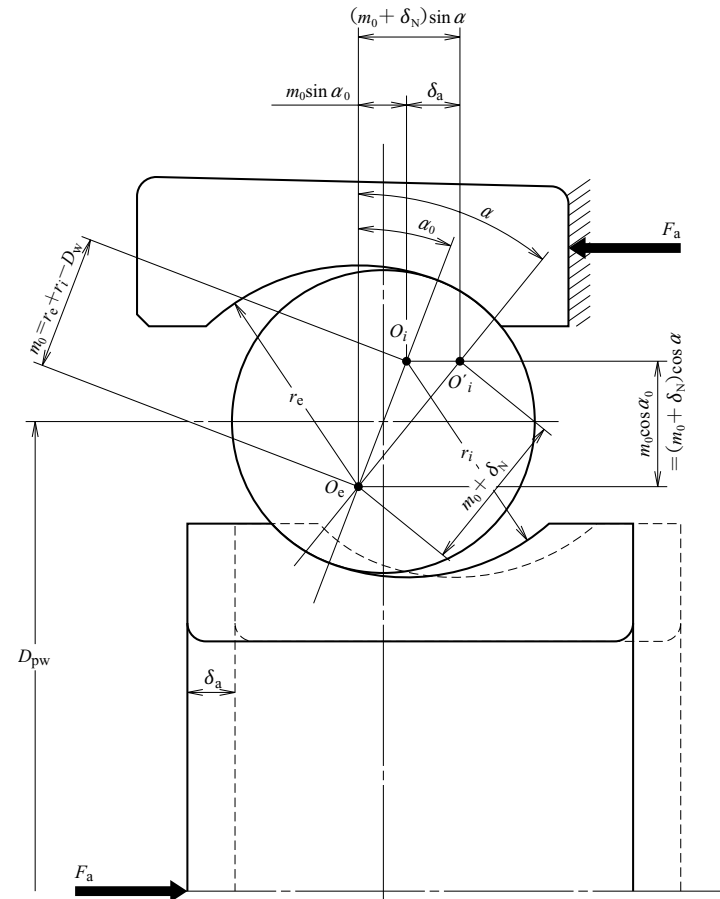


图 1

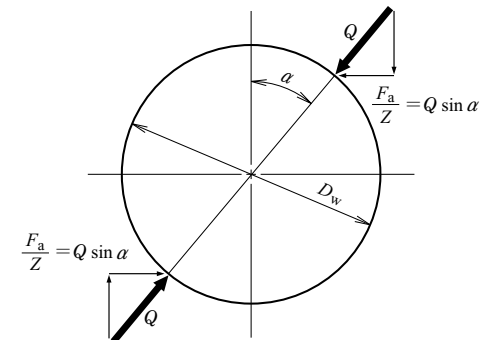


图 2

图3表示单列深沟球轴承6210及6310原始接触角分别为 $\alpha_0 = 0^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ 时, 轴向载荷与轴向位移的关系。原始接触角越大, 轴承的轴向刚度越高, 6210与6310承受相等轴向载荷时的轴向位移量的差也越小。另外, α_0 取决于轴承沟道曲率半径与径向游隙。

图4表示72系列轴承在原始接触角分别为 15° (C), 30° (A), 40° (B)时, 轴向载荷与轴向位移的关系。

由于角接触球轴承的原始接触角较大, 如果70系列, 73系列轴承也采用同一接触角和内径代号, 就基本与72系列数值相同。

对于角接触球轴承, 为了控制旋转精度并减小承受外加载荷时的弹性变形量, 大都采用组合轴承的形式, 并对其施加预紧。

为了将承受外加载荷时的弹性变形量控制在必要限度以内, 在确定预紧量时就应了解变形量随承载变化的关系特性。承载与变形量的关系由式(6)可知 $F_a \propto \delta_a^{3/2}$ 或 $\delta_a \propto F_a^{2/3}$, 即轴向变形量 δ_a 与轴向载荷 F_a 的 $2/3$ 次方成正比。该轴向载荷的指数小于1, 就意味着随着轴向载荷的增加, 轴向位移的幅度变小(见图4), 这就成为施加预紧、控制位移的根据。

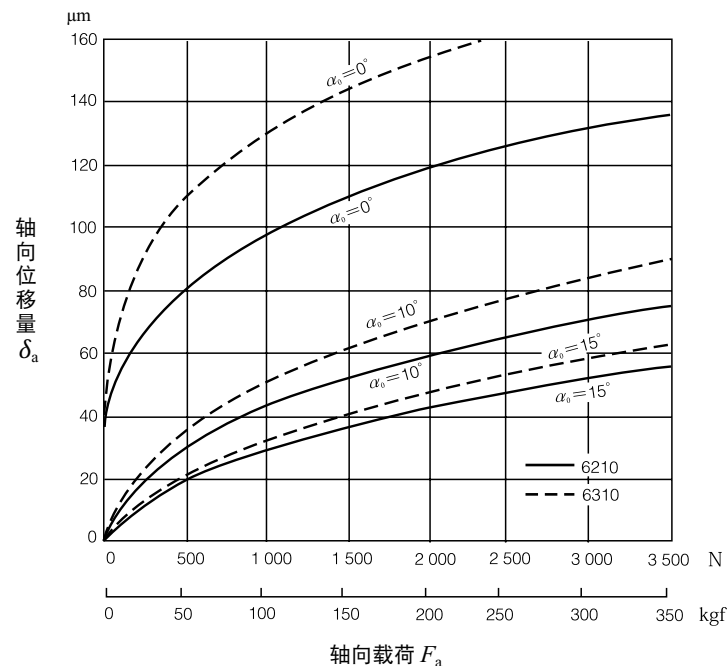


图3 深沟球轴承的轴向载荷与轴向位移

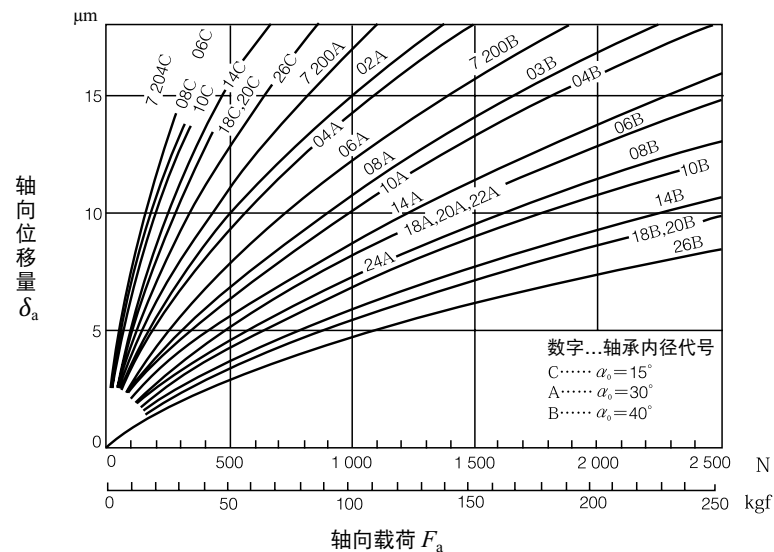


图4 角接触球轴承的轴向载荷与轴向位移

6.5 圆锥滚子轴承的轴向位移

圆锥滚子轴承与角接触球轴承一样，也采用2套一组安装，其使用与角接触球轴承相同。

例如，机床主轴轴承及汽车减速器齿轮轴承等，为了提高轴的刚度，也都施加预紧。

了解轴向载荷与轴向位移的关系对施加预紧安装轴承非常重要。

圆锥滚子轴承本身的轴向位移，Palmgren的实验公式(1)与实测值基本吻合。

但是，实际轴向位移会因轴、轴承座壁厚、材质以及与轴承的配合情况而不同。故而，有关此类装配条件下的轴向位移，请向NSK咨询。

$$\delta_a = \frac{0.000077}{\sin \alpha} \cdot \frac{Q^{0.9}}{L_{we}^{0.8}} \quad (N) \quad \dots\dots(1)$$

$$= \frac{0.0006}{\sin \alpha} \cdot \frac{Q^{0.9}}{L_{we}^{0.8}} \quad \{kgf\}$$

式中， δ_a ：内、外圈轴向位移量 (mm)

α ：接触角 = 外圈锥角的 1/2(°)，
(见 165 页图 1)

Q ：滚动体载荷 (N), {kgf}

$$Q = \frac{F_a}{Z \sin \alpha}$$

L_{we} ：滚子有效长度 (mm)

F_a ：轴向载荷 (N), {kgf}

Z ：滚子个数

式(1)可由式(2)表示：

$$\delta_a = K_a \cdot F_a^{0.9} \quad \dots\dots(2)$$

其中，

$$K_a = \frac{0.000077}{(\sin \alpha)^{1.9} Z^{0.9} L_{we}^{0.8}} \quad \dots\dots(N)$$

$$= \frac{0.0006}{(\sin \alpha)^{1.9} Z^{0.9} L_{we}^{0.8}} \quad \dots\dots\{kgf\}$$

K_a 是由轴承内部结构设计形式决定的常数，圆锥滚子轴承的轴向载荷与轴向位移见图 1。

圆锥滚子轴承的位移量与轴向载荷的 0.9 次方成正比，而球轴承则与其 2/3 次方成正比，故而，施加预紧控制位移的效果，则是球轴承较大。

圆锥滚子轴承如果盲目地加大预紧，会造成发热、咬粘（俗称烧伤）、缩短寿命等，应特别注意。

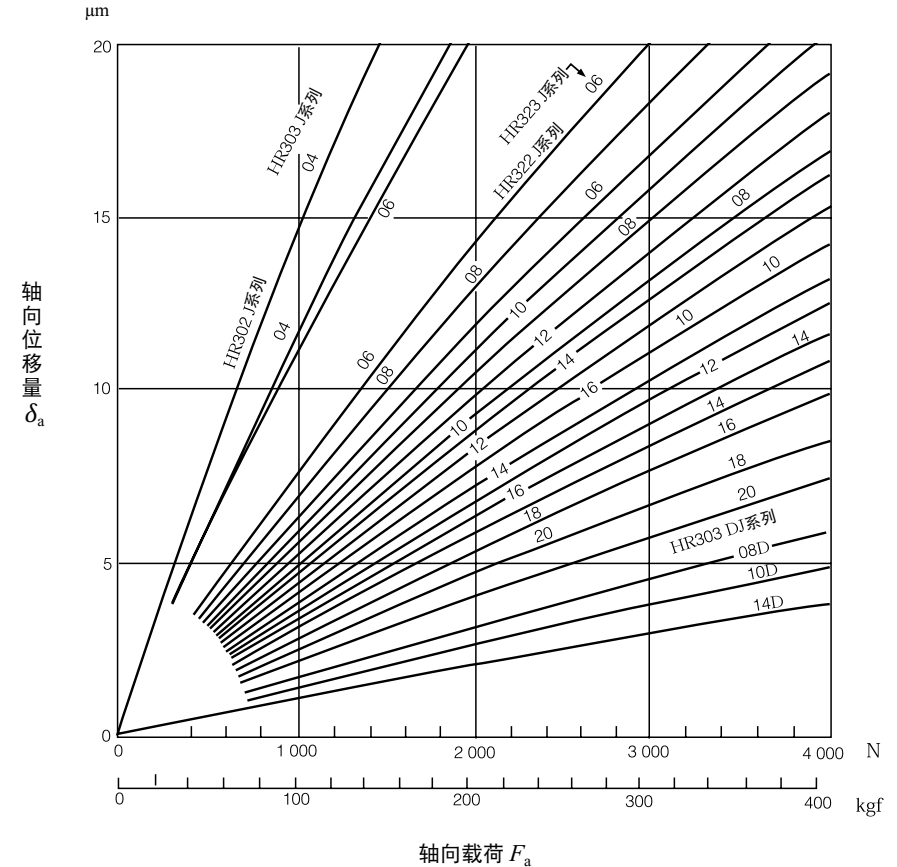


图 1 圆锥滚子轴承的轴向载荷与轴向位移