

# 工业机器人专用薄壁密封轴承结构设计分析

蔡素然, 陈原, 叶军, 孙立明

(洛阳轴承研究所, 河南 洛阳 471039)

摘要: 介绍了工业机器人专用薄壁密封四点接触球轴承和薄壁密封交叉滚子轴承的结构形式、特点; 重点介绍了产品设计中主参数的优化、关键结构参数的设计及选取原则, 为国内工业机器人专用配套轴承的系列开发提供了有力的技术支撑和研究基础。

关键词: 滚动轴承; 薄壁轴承; 机器人; 设计; 分析

中图分类号: TH133.33 文献标志码: B 文章编号: 1000-3762(2007)12-0010-04

近年来, 随着先进制造业的发展, 对代表现代制造技术的各类机器人的需求日益增加。如大型工程机械、汽车、家电等自动化生产线, 以及提升国家高科技战略地位的深海载人潜水器、仿生机器人和喷漆、弧焊、点焊、装配、搬运工业机器人等。作为机器人的关键配套专用轴承, 对机器人的运转平稳性、重复定位精度、动作精确度以及工作的可靠性等关键性能指标具有重要影响。目前, 机器人用轴承种类较多, 如薄壁深沟球轴承、薄壁角接触球轴承、薄壁四点接触球轴承和薄壁交叉滚子轴承等。由于薄壁四点接触球轴承和薄壁交叉滚子轴承具有承受联合载荷能力强、精度高、摩擦力矩小、重量轻、运转平稳等特点, 因此大多被应用于工业机器人的腰部、肘部、腕部等部位。

自从 20 世纪 60 年代机器人进入工业领域以来, 无论是机器人的数量, 还是机器人的技术都有了迅猛的发展。作为机器人关键零配件的专用配套轴承, 国外一些轴承公司如日本的 KQ、THK、NSK 和美国 Koyo 等在 20 世纪 80 年代就已研制出用于机器人各部位的系列化专用配套轴承, 为机器人产业提供了 80% 左右能满足机器人需要的基础元器件, 为工业机器人的迅速发展奠定了坚实的配套技术基础。国内工业机器人配套轴承大部分依靠进口, 少数厂家虽然生产制造工业机器人配套轴承, 但批量小、品种规格少, 零部件通用化程度低, 供货周期长, 成本高, 而且质量不稳定, 这些因素严重制约了国内工业机器人产业的正常发展。为促进国内工业机器人专用轴承设计

和加工技术的提高, 本文主要对工业机器人专用薄壁密封四点接触球轴承和薄壁密封交叉滚子轴承结构形式、特点以及产品设计的关键技术予以介绍。

## 1 工业机器人专用轴承结构形式

工业机器人专用薄壁四点接触球轴承通常有带密封圈和不带密封圈的结构形式 (见图 1)。其主要由内圈、外圈、保持架、钢球或非接触式密封圈组成。内、外圈均为整体结构, 钢球与内、外圈沟道呈四点接触, 保持架为冠形插入式结构。适合安装在工业机器人的腕部、肘部等关节部位。薄壁交叉滚子轴承通常有满滚子结构和带冲压保持架或隔离件的结构形式 (见图 2)。为便于装配, 交叉滚子轴承外圈或内圈采用双半结构, 用螺钉连接, 内、外圈滚道与轴承轴线呈  $45^\circ$  角, 滚道之间交替放置互成  $90^\circ$  的圆柱滚子, 滚子直径一般应大于滚子长度, 可承受径向载荷及两个方向的轴向载荷以及倾覆力矩, 相当于两套接触角  $\alpha = 45^\circ$  的角接触轴承背靠背安装的组配。特别适合安装在工业机器人的腰部、肩部等关节部位。

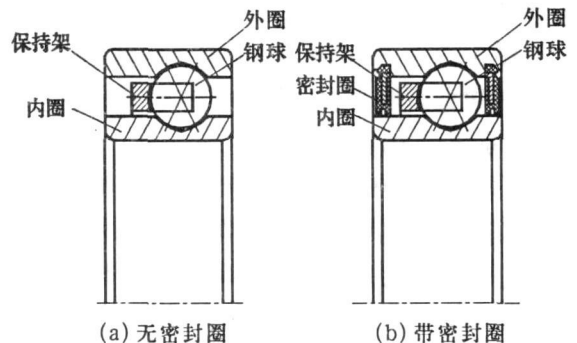


图 1 薄壁四点接触球轴承

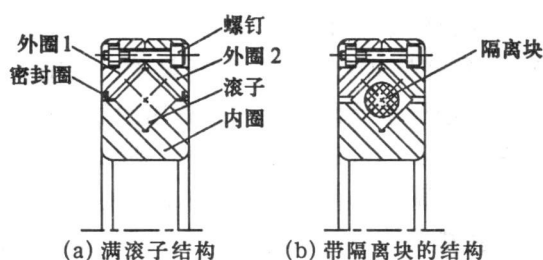


图2 薄壁交叉滚子轴承

## 2 工业机器人专用轴承特点

### 2.1 薄壁密封四点接触球轴承特点

(1) 外径与内径之比较小, 滚动体直径小, 数量多, 与相同内径的标准轴承相比, 其重量约为标准轴承的 5%, 横截面积约为标准轴承的 20%。

(2) 定截面轴承: 薄壁四点接触球轴承系列, 轴承横截面尺寸相同, 不随内、外径的变化而改变。

(3) 能承受径向载荷、双向推力载荷和倾覆力矩, 相当于两套背对背安装的角度接触球轴承, 但其宽度只相当于一套角度接触球轴承的宽度。

### 2.2 薄壁密封交叉滚子轴承特点

(1) 滚子与滚道的接触形式为线接触, 与球轴承相比, 其载荷容量较大, 一般是相同尺寸球轴承额定载荷的 5~15 倍, 因此承载能力强, 工作可靠性高, 寿命较长。

(2) 滚子直径相对较大、有效接触长度适当增加, 因此, 滚子在外载荷作用下, 轴承的轴向和径向刚性均较高。

(3) 采用大直径、小截面, 可以节省径向和轴向空间, 有利于主机结构的紧凑化, 能简化主机结构。

(4) 采用双半外圈结构, 通过修磨或研磨两个半外圈接合面, 即可达到预定的游隙, 调整游隙非常方便。

## 3 薄壁四点接触球轴承设计

### 3.1 主参数优化设计

轴承主参数的确定是设计过程中的重要环节, 薄壁四点接触球轴承主参数 (钢球直径  $D_w$ 、钢球数量  $Z$ 、球组节圆直径  $D_{pw}$ ) 的选取, 应在保证轴承使用性能如最大刚性、最小摩擦力矩等要求的前提下, 使轴承的寿命最长。工业机器人轴承主要失效形式是接触疲劳失效或精度丧失, 因此, 薄壁四点接触球轴承仍以最长接触疲劳寿命, 也就是最大额定动载荷为设计目标函数, 即

$$\begin{aligned} \max \{ C \} &= \max C_r \\ &= \max [ 1.3 f (i \cos \alpha)^{0.7} Z^{2/3} \cdot D_w^{1.8} ] \quad (1) \end{aligned}$$

式中:  $i$  为钢球列数, 四点接触球轴承钢球列数虽为 1, 但由于在承受径向载荷时, 钢球与内、外圈沟道四点接触, 在此取  $i=2$ ,  $\alpha=30^\circ$ 。

由于其沟曲率半径系数不符合 GB/T6391-2003 规定, 系数  $f$  按下式计算<sup>[1]</sup>

$$f = 4.07 \lambda \frac{\gamma^{0.3} (1-\gamma)^{1.39}}{(1+\gamma)^{1/3}} \left[ \frac{2f}{2f-1} \right]^{0.41} \cdot \left\{ 1 + [ 1.04 \left( \frac{1-\gamma}{1+\gamma} \right)^{1.72} \left( \frac{f(2f-1)}{f(2f-1)} \right)^{0.41} ]^{10/3} \right\}^{0.3} \quad (2)$$

式中:  $\lambda=0.95$ ,  $\gamma=D_w \cos \alpha / D_{pw}$ ,  $\alpha=30^\circ$ ;  $f$  为内圈沟曲率半径系数;  $f$  为外圈沟曲率半径系数。

### 3.2 约束条件

(1) 球径约束

$$\frac{D_w}{(D-d)} = k_w \quad (3)$$

由于轴承横截面尺寸相同, 故  $k_w=0.25$ 。

(2) 球数约束

$$\frac{186^\circ}{2 \arcsin(\frac{D_w}{D_{pw}})} + 1 \leq Z \leq \frac{194^\circ}{2 \arcsin(\frac{D_w}{D_{pw}})} + 1 \quad (4)$$

由于轴承套圈壁较薄, 轴承填球角还可适当取大一点。

(3) 球组节圆直径约束

$$D_{pw} = 0.5 (D+d) \quad (5)$$

轴承属于薄壁轴承, 球组节圆直径取为轴承内径  $d$  和外径  $D$  的平均值, 不适宜外移。

根据轴承设计目标函数和约束条件, 采用网格法, 通过计算机优化程序, 完成轴承主参数: 钢球直径、球数和球组节圆直径的确定。

### 3.3 关键结构参数设计

根据薄壁密封四点接触球轴承在机器人中的使用状况和长寿命、高刚性、低摩擦的使用要求, 在设计中不仅要考虑尽可能大的额定动载荷, 同时针对薄壁轴承横截面较小的特点, 要精心选择每个结构参数的最佳值, 以改善轴承零件接触应力分布, 达到有利于润滑油膜形成的最佳接触状态, 提高轴承的使用寿命。

#### 3.3.1 内、外套圈沟道曲率半径系数的确定

内、外套圈沟道曲率半径系数的大小直接影响轴承的载荷容量、寿命、刚性以及摩擦力矩等性能参数。例如沟曲率半径系数增大, 摩擦力矩减小, 载荷容量减小, 寿命缩短; 沟曲率半径系数减小则相反。因此沟曲率半径系数选取应根据使用性能要求而定, 如低速重载时, 套圈取较低的曲率半径系数:  $f=0.505 \sim 0.51$ ,  $f=0.52 \sim 0.525$ ; 轴

承要求高速时,曲率半径系数内圈大、外圈小:  $f_1 = 0.53 \sim 0.57$ ,  $f_2 = 0.51 \sim 0.54$ 。对工业机器人用薄壁四点接触球轴承其主要要求摩擦力矩低,灵活性好,故内、外圈的沟曲率半径系数选取较大,取  $f_1 = f_2 = 0.55$ 。

### 3.3.2 套圈沟道位置

由于薄壁四点接触球轴承内、外圈采用整体结构,而且截面积只有相同内径标准轴承的 20%,所以保持架径向壁厚取值有限,如果按通用轴承那样,沟道位置设计在轴承宽度中心,轴承形成对称结构,保持架兜孔底部强度将受到影响,同时密封圈的安装位置也将受到限制,因此,为保证轴承保持架具有足够的强度和密封圈有足够的安装空间,沟位置采取对两侧端面不对称的设计。

### 3.3.3 挡边高度的确定

工业机器人用四点接触球轴承处于工作状态时,除承受一定的径向载荷外,还承受一定的轴向载荷。在承受轴向载荷时,钢球与滚道之间将形成接触椭圆,若轴向载荷过大,可能造成钢球与内、外圈挡边边缘接触或挡边与滚道之间的接触椭圆被截断,产生应力集中,使轴承套圈发生疲劳磨损,早期失效。因此,挡边高设计时,需根据轴承承受轴向载荷大小,利用 Hertz 接触应力理论推算出轴承套圈最小挡边高度<sup>[3]</sup>,从而计算出套圈挡边直径。实际设计时考虑到四点接触球轴承截面积较小,套圈壁较薄,在满足使用要求前提下,挡边高系数取值要比深沟球轴承小。

### 3.3.4 保持架设计

保持架的作用是等距离地分隔滚动体,引导滚动体的运动,减少摩擦,改善润滑等。设计时,应使其兜孔形状有利于轴承的润滑、降低摩擦力矩的同时又具有足够的强度以便于加工和装配。根据这些要求,工业机器人用四点接触球轴承保持架可以选用尼龙 66 加 25% 玻璃纤维的塑料冠形保持架或车制黄铜实体保持架。目前国内工业机器人用轴承批量较小,采用较多的还是车制黄铜实体保持架。由于轴承的内、外圈为整体结构,并且截面空间有限,为了增加保持架的强度,同时考虑到轴承球数较多,便于装配,保持架设计时,采取两个或三个球兜孔不带锁量,一个球兜孔留有锁量的特殊冠形保持架结构。

### 3.3.5 密封结构设计

工业机器人正在向小型化、轻量化、精密化发展,因此工业机器人用轴承的润滑最好采用带密封结构的润滑方式进行脂润滑。轴承的密封性能

是衡量密封轴承的重要指标之一,密封轴承的早期破坏,往往是轴承密封不好,污染物进入轴承使润滑脂逐渐失效所致。因此设计密封轴承时,密封配合副要安全可靠,同时要考虑轴承的具体工作要求和轴承的具体结构形式。针对工业机器人轴承壁薄的特点,外圈密封槽和密封圈唇部的配合,设计时采用轴向定位,侧向压缩的定位配合形式,这种方法可以避免由于外圈密封唇压缩量过大,使外圈变形过大,外圈椭圆度超差,而且具有装配压力小,装配容易等特点。轴承内圈与密封唇的配合方式一般有两种,内圈密封唇与内圈挡边接触的接触式密封和内圈密封唇与内圈挡边不接触的非接触式密封。接触式密封相对于非接触式密封防尘漏脂效果要好,但其摩擦力矩较大,温升较高,考虑到摩擦力矩较大,对机器人主机有不利影响,设计时一般采用非接触式密封结构。另外由于轴承套圈壁很薄,加工密封槽时,轴承内、外圈易变形,所以内圈挡边采用无槽结构,但要严格控制密封间隙。

## 4 薄壁交叉滚子轴承设计

### 4.1 主参数优化设计

薄壁交叉滚子轴承主参数优化设计同薄壁四点接触球轴承一样,也是以最大额定动载荷作为设计目标函数,即

$$\max\{C\} = \max C_r \\ = \max \{ 1.1 f (L_w \cos \alpha)^{7.9} \cdot D_w^{29/27} \} \quad (6)$$

式中:滚子列数  $i=1$ ; 接触角  $\alpha=45^\circ$ ;  $L_w$  为滚子有效长度,  $L_w = L - 2r_{\text{ro}}$ ;  $D_w$  为滚子有效直径,  $D_w = D_g$ 。

### 4.2 约束条件

$$(1) \text{ 滚子直径约束: } 0.312 \leq \frac{D_w}{B} \leq 0.515 \quad (7)$$

式中:  $B$  为轴承宽度;  $D_w$  应选取相近的标准滚子直径。

$$(2) \text{ 滚子长度约束: } L_w = D_w - \epsilon \quad (8)$$

由于交叉滚子轴承的圆柱滚子十字交叉排列在滚道内,其承受外力后,滚子圆柱表面与滚道之间产生支反力,而滚子端面与滚道之间不应产生支反力,因此滚子长度必须小于滚子直径,取  $\epsilon = 0.1 \sim 0.3$ 。

$$(3) \text{ 滚子组节圆直径 } D_m \text{ 约束: } [0.5(D+d) - 0.01(D-d)] \leq D_m \leq [0.5(D+d) + 0.002(D-d)] \quad (9)$$

$$(4) \text{ 滚子数 } Z \text{ 约束:}$$

$$Z \leq \frac{360^\circ}{2 \arctan \sqrt{D_{we}^2 / (D_{pw}^2 - 2D_{we}^2)}} \quad (10)$$

Z取舍去小数部分的整数。

$$(5) \text{ 圆周总间隙约束: } \beta_1 \leq \omega \leq \beta_2 \quad (11)$$

轴承截面不同,其圆周总间隙选取也不同,其中给定的最小、最大周向间隙:  $\beta_1 = 0.5$   $\beta_2 = 1.2$

根据轴承设计目标函数和约束条件,采用双降法,通过计算机优化程序(程序框略)完成轴承主参数:滚子直径、滚子数、滚子组中心圆直径和滚子长度的确定。

### 4.3 关键结构参数设计

#### 4.3.1 轴承游隙的确定

对于交叉滚子轴承而言,游隙尤其是径向游隙对轴承的载荷分布、摩擦力矩、使用寿命以及振动和噪声等具有较大影响。对机器人专用轴承而言,通常情况下是根据轴承在机器人中的不同安装部位、实际工况条件以及使用要求,对径向游隙进行正确选择。一般可以选择基本组游隙,对于刚度要求较高或重复定位精度要求严格的场合,可以采用零游隙或负游隙,即施加预载,以提高刚度和旋转精度。与其他类型轴承所不同的是,交叉滚子轴承内、外圈的四个滚道组成的容纳滚子的空间截面呈正方形,若有游隙,内、外圈的径向相对位移量与轴向相对位移量是 1:1 的关系,因此其径向游隙与轴向游隙也是 1:1 的关系,可以通过控制其轴向游隙,对径向游隙进行间接的控制。

#### 4.3.2 滚子圆周总间隙 $\omega$ 的确定

滚子圆周间隙  $\omega$  的大小对轴承的性能影响很大。圆周间隙过大,轴承在运转过程中容易发生滚子的歪斜,对轴承的承载均匀性及运转平稳性极为不利,甚至影响轴承的正常滚动;间隙过小时,运转灵活性差,会造成摩擦力矩增大,有时轴承甚至会卡死。因此,应合理选择圆周总间隙。对满装滚子结构,通常根据轴承的内径在 0.5 ~ 1.2 mm 范围内选取,对带隔离件结构,圆周总间隙还可以适当放大,以保持旋转灵活和运转平稳。

#### 4.3.3 内、外圈挡边直径的确定

内、外圈挡边直径的大小直接影响到滚子与滚道的有效接触长度,因此,在结构尺寸允许的情况下,应尽可能增大挡边尺寸。此外,由于外圈滚道和内圈滚道与滚子接触的载荷区相对滚子的中心线是非对称的,容易造成滚子的歪斜,而滚子的歪斜对轴承的正常运转是十分不利的,并且载荷越大,尤其是力矩载荷越大,滚子的歪斜越严重。

为了最大限度减小滚子的这种歪斜,应尽量增大挡边尺寸。通常情况下,外圈挡边直径  $D_2 = D_{pw} + \epsilon$ ; 内圈挡边直径  $d_2 = D_{pw} - \epsilon$  的  $\epsilon$  值根据轴承宽度的大小在 0.4 ~ 0.8 之间选择,可以保证有效接触长度,提高轴承的轴、径向承载能力和刚度,同时减小滚子的歪斜,提高轴承的运转性能。

#### 4.3.4 保持架的结构设计

交叉滚子轴承保持架主要有两种结构形式,一种是整体式冲压保持架,另一种就是所谓隔离件,如图 3 所示。工业机器人用交叉滚子轴承多采用尼龙 1010 材料制成的隔离件而很少采用整体式冲压保持架。隔离件的优点是可以有效防止滚子发生歪斜,提高轴承的运转平稳性。设计时,取隔离件与滚子相配的圆弧半径  $R_c = 0.53 D_s$  可以保证滚子与隔离件圆柱表面接触良好、运转灵活、可靠。隔离件两圆柱面之间的距离  $b_s$  影响轴承的圆周总间隙  $\omega$ , 因此应根据相邻滚子之间的圆周间隙  $\epsilon$  计算出  $b_s$  值,以确保获得适当的圆周总间隙。

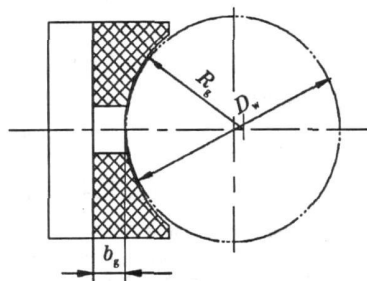


图 3 交叉滚子轴承用隔离件

## 5 结束语

工业机器人专用的薄壁密封四点接触球轴承和薄壁密封交叉滚子轴承,由于结构特殊、套圈壁厚薄等特点,对轴承的设计提出了很高要求。通过对工业机器人用两类轴承的设计关键技术的研究,为国内工业机器人专用配套轴承的系列开发提供了有力的技术支撑,也为工业机器人轴承产业化生产奠定了可靠的研究基础。

### 参考文献:

- [1] 冈本纯三. 球轴承的设计计算 [M]. 黄志强, 译. 北京: 机械工业出版社, 2003
- [2] Harris T A 滚动轴承分析 [M]. 罗继伟, 译. 洛阳: 洛阳轴承研究所, 1998
- [3] KO 滚动轴承样本 [Z]. 1997
- [4] 夏子华. 三点四点接触球轴承的几何关系 [J]. 轴承, 1989(3): 9-14

(编辑: 张旭)