

机器人螺纹柔性装配中螺纹可装配性的几何分析

李绣峰 刘桂雄 谢存禧 李玩雪

(华南理工大学机电工程系 广州 510641)

摘要 从螺纹的主要几何参数及其配合公差入手,分析机器人螺纹柔性装配初始旋合状态的几何过程,推导出决定机器人夹持器转动中心位置偏差范围内、外螺纹配合零件间允许位置和角度偏差的数学表达式,它对夹持器柔顺度的设计和机器人主动位置调整和控制技术的研究起到重要的指导作用。

关键词 螺纹装配 装配机器人 几何分析

1 引言

目前的螺纹自动装配机的快速性、可靠性与内、外螺纹零件间的位置精度和完全结构化的工作环境密切相关,一般装配机不需要进行位置调整或需要进行很少量的调整,不能适应螺纹柔性装配的需要。这里所讲的柔性,主要包含以下两方面的内容:指工作环境并非一成不变,零件的位置允许有一定的偏差,抓持零件的夹持器具有一定的退让柔性,零件在夹持器中位置带有随机性,零件的移动方式允许有柔性且其移动装置的定位精度要求一般;装配任务具有柔性,即能适应多种不同螺纹装配的需要。为了实现机器人螺纹的柔性装配,对螺纹的可装配性进行分析非常重要,并引起有关专家学者的高度重视。配合零件(例如螺纹装配)的可装配性分析主要是配合零件间的间隙(注:间隙指的是两配合零件可自由移动的空间,它用以补偿误差直接影响到配合零件的可装配性)分析。为此,确定配合零件间的间隙可采用零件配合面几何形状特征抽取的碰撞试探法^[1]和基于尺寸公差、形位公差的计算方法^[2~4]等,但目前这些方法还未引起足够的重视,更未用于螺纹可装配性的分析中^[2]。

本文在基于尺寸公差计算方法的基础上,以工业生产中常用的普通螺纹为例,从螺纹的主要几何参数及其配合公差入手,分析螺纹装配初始旋合状态的几何过程,推导出内、外螺纹配

合零件间的允许位置和角度偏差的数学表达式, 并给出旋合过程中内、外螺纹间允许角度偏差的变化情况, 期望利用该角度偏差的结果来指导机器人夹持器柔顺度的设计和机器人螺纹柔性装置的位置调整和控制的研究中。

2 普通螺纹配合零件的旋合过程

在研究普通螺纹配合零件的旋合过程之前, 我们先了解一下普通螺纹的主要几何参数及内、外普通螺纹零件的结构特点。大家都知道, 普通螺纹的主要几何参数有: 螺纹大径 (d, D)、中径 (d_2, D_2)、小径 (d_1, D_1)、螺距 (p) 和螺纹升角 (Ψ) 等 (如图 1 所示), 它们之间的关系有, 设 $H = 0.5\sqrt{3}P$, 有: $d_1 = d - 1.25H, D_1 = D - 1.25H, d_2 = d - 0.75H, D_2 = D - 0.75H$, 螺纹升角 (Ψ) 与螺纹的头数有关, 为了简化起见, 这里只考虑单头普通螺纹的情况。

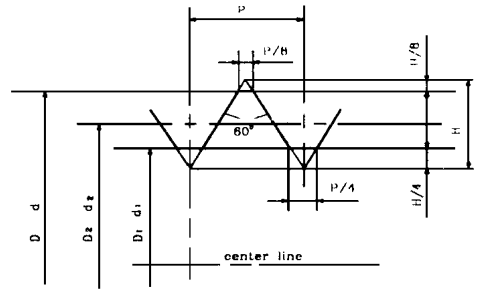


Fig 1 The basic yaw form of ordinary screws

内、外螺纹的初始旋合过程对螺纹的成功装配至关重要。螺纹初始旋合是从倒角部分开始的 (图2为内、外螺纹零件螺牙在到角位置的剖面图), 倒角结构要素是影响螺纹的初始面形成的主要因素。内螺纹顶端为 120° 倒角, 锥面形成线与螺牙形成线平行, 其形成过程是直接

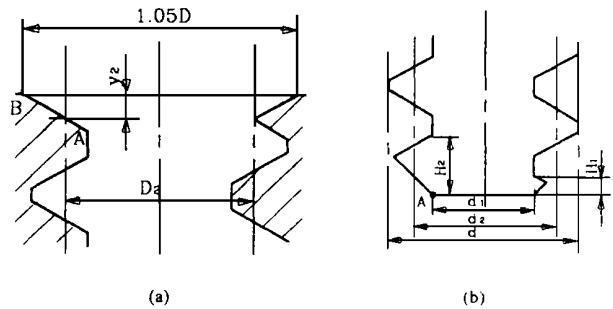


Fig 2 The structure of inside and outside screws

从倒角锥面形成线直线 AB 开始的 (如图2(a)所示); 对于外螺纹而言, 由于其头部倒角为 45° 比螺牙面形成线斜角 30° 要大, 因此该倒角将切除掉部分螺牙, 从而使外螺纹的形成是从点 A 开始 (如图2(b)所示)。由于外螺纹头部倒角尺寸 C 比牙高要大, 外螺纹小径以内的锥体只在初始寻孔时具有导向作用, 而在旋合过程中不参与啮合。

图2中, 有 $y_2 = 0.2887(D_2 - 1.05D), H_1 = 0.25P, H_2 = 0.75P$ 。当内螺纹不动, 外螺纹转过某一角度 (旋合角 α) 时, 可推得下列倒角部分的高度计算公式:

$$\begin{cases}
 H_1 = \begin{cases} \frac{P}{4} + \frac{\alpha}{360}P, & 0^\circ < \alpha < 270^\circ \\ \frac{\alpha - 270}{360}P, & 270^\circ < \alpha < 360^\circ \end{cases} \\
 H_2 = \begin{cases} \frac{3P}{4} + \frac{\alpha}{360}P, & 0^\circ < \alpha < 90^\circ \\ \frac{\alpha - 90}{360}P, & 90^\circ < \alpha < 360^\circ \end{cases}
 \end{cases} \quad (1)$$

下面我们来研究内、外普通螺纹配合零件的旋合过程。设图2(b)中的A点是外螺纹螺牙的起始点和内、外螺纹配合时的起始旋合点,那么随着旋合过程的进行,A点沿外螺纹螺牙逐渐上移,外螺纹头部的螺牙逐渐参与啮合(如图3,其中内螺纹零件的位置保持不变,且保留在内螺纹螺牙初始形成线所在剖面上,即剖面转角 $b=0^\circ$)。当旋合角 $\alpha=90^\circ$ 时,外螺纹左侧螺牙已完整,但右侧螺牙都是单面参与啮合,且右侧参与啮合部分的螺牙很少;当 $\alpha=180^\circ$ 时,外螺纹左右侧都有部分螺牙双面参与啮合,由于啮合部分的牙型不完整,此时仍属不稳定啮合状态;当 $\alpha=270^\circ$ 时,外螺纹左右侧参与啮合部分的牙型趋于完整,若内、外螺纹头部牙型无缺陷,此时基本上处于稳定啮合状态;当旋合角 α 更大时,其啮合状态更稳定。

从上面分析,我们可将内、外螺纹旋合一圈或一圈以上(即 $\alpha \geq 360^\circ$)作为稳定啮合状态,并分析和计算此时螺牙侧面的接触情况。

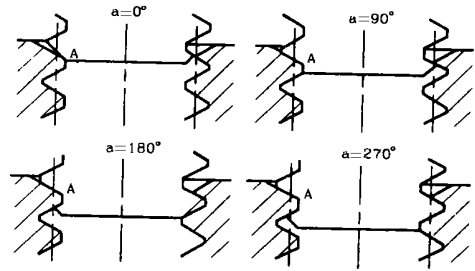


Fig. 3 The screwing process of screws

3 螺牙侧面接触的几何分析及偏差公式的推导

在研究螺纹装配所允许的最大角度偏差时,需确定内、外螺纹配合零件轴线间发生最大偏角的位置。当内、外普通螺纹配合零件轴线发生偏斜而产生螺牙间的接触,由于其最大倾斜夹角发生在该两零件轴线所组成的平面内,因此,我们可通过对螺纹轴线所在平面进行剖切的方法,在剖面上分析两轴线倾斜时内、外螺纹零件螺牙之间的接触情况,从而获得内、外普通螺纹配合零件所允许的最大角度偏差。

3.1 轴剖面的螺牙侧面接触情况分析 & 偏差公式的推导

由于实际的内、外螺纹的基本尺寸都有一定的误差,从而造成螺牙实际啮合位置发生变化。螺距、牙型半角和螺纹中径三个参数的误差直接影响着螺纹配合质量,它们既影响螺纹副的旋合性,也影响螺纹螺牙侧面配合的接触精度;外径和内径的误差对螺纹副的旋合性和螺纹螺牙侧面配合的接触精度有一定影响,但它们主要影响螺纹副初始接触的接触间隙和螺纹副的工作高度及接触强度等^[5]。由于螺纹初始接触为非稳定接触状态,这时所允许的内、外螺纹零件轴线的角度偏差很大,这样大角度偏差的初始接触不具备导向作用,因此不能作为螺纹装配初始旋合入角位置的设计依据。

为了使内、外螺纹能很好地相互啮合,国家标准中对内、外螺纹规定了螺纹基本尺寸的上、下偏差和位置的公差带的大小,从而使实际螺纹螺牙配合面间具有一定间隙,该间隙的大小取决于螺纹的基本尺寸(如 d 、 p 等)和螺纹配合公差的选择。在确定了螺纹的公差配合后,内、外普通螺纹配合零件螺牙配合面间的实际间隙具有一个取值范围,其最小间隙可按极限尺寸法或大数互换法^[6]进行计算。对多环节的装配而言,采用以概率论为理论根据的大数互换法来计算螺牙配合面间的间隙比较合理且具有实际价值。

按大数互换法,若各组成环(A_h, A_s)的尺寸按正态分布,则封闭环(A_c)的尺寸亦按正态分

布, 若 A_h 和 A_s 为相互独立的事件, 其相关系数 $r = 0$, 所以对于置信水平 $p = 99.73\%$ 的螺纹螺牙牙侧的径向间隙 c 的公差 $T_c = \sqrt{T_h^2 + T_s^2}$, 其中 T_h, T_s 分别为内、外螺纹中径的公差。

在计算内、外螺纹螺牙接触所产生的最大角度偏差时, 为了使计算过程简单易行, 我们采用外螺纹螺牙上极有可能与内螺纹螺牙相接触的边界点(如图4中的 k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 点等) 作为计算点^[7], 计算这些点与内螺纹螺牙接触时的偏角, 通过比较就可确定内、外螺纹实际接触时所允许的最大角度偏差。在确定边界点时, 由于螺牙侧面的间隙比内螺纹牙顶部和外螺纹根间的间隙要小, 而且在偏转时牙侧的倾斜使其比与螺纹轴线平行的牙顶和牙根处更易接触, 所以外螺纹牙根处的边界点可不考虑

在图4中设 l 为旋合深度, 利用上面提到的 $y_2 = 0.2887(D_2 - 1.05D)$, 可以推得:

$$l = y_2 + \frac{1}{8}P + \frac{\alpha}{360}P \tag{2}$$

边界点 k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 的坐标分别为 $k_1(\frac{d}{2}, y_2 - \frac{3}{16}P), k_2(\frac{d_1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{1 + \sqrt{3}}H_2, l - \frac{\sqrt{3}}{1 + \sqrt{3}}H_2), k_3(-\frac{d_1}{2}, y_2 + \frac{3}{16}P), k_4(-\frac{d_1}{2}, y_2 + \frac{5}{16}P), k_5(-\frac{d_1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{1 + \sqrt{3}}H_1, l - \frac{\sqrt{3}}{1 + \sqrt{3}}H_1)$ 。

图5是内、外螺纹零件装配的示意图, 其中 xoy 为过内螺纹中心线及顶面的坐标系, O_1 为外螺纹中心线与 x 轴的交点, O_0 为外螺纹夹持装置转动中心(机器人夹持器柔顺中心)。当内、外螺纹旋合深度为 l , 角度偏差为 q 时, 抓持中心 O_0 的坐标为:

$$\begin{cases} x_0 = (L_g - l) \sin q + OO_1 \\ y_0 = - (L_g - l) \cos q \end{cases} \tag{3}$$

式(3)中 L_g 为外螺纹夹持装置转动中心到外螺纹头部(不包括外螺纹小径以内倒角部分)的轴向距离。

对于角度偏差 q 的位置偏差 OO_1 可计算如下:

在图6中, q_1 为外螺纹左侧螺牙的 k_1 点到内螺纹螺牙侧面接触时所产生的偏角, c_1 为 k_1 点到内螺纹螺牙侧面的径向间隙, r_1 为 k_1O_1 与 x 轴之间的夹角。由于 q_1 很小, 所经可近似认为 k_1k_1 与 k_1O_1 相垂直, 根据正弦定理: $k_1k_1 = \frac{c_1}{2 \sin(60^\circ - r_1)}$, 其中: $\tan(r_1) = \frac{|k_{1y}|}{|k_{1x}|}$, 所以

$$q_1 = \frac{k_1k_1}{O_1k_1} = \frac{c_1 \cos(r_1)}{2 |k_{1x}| \sin(60^\circ - r_1)} \tag{4}$$

同理, 对于 k_i 点有:

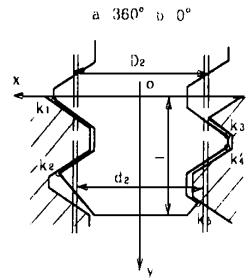


Fig 4 Contact analysis of screwing

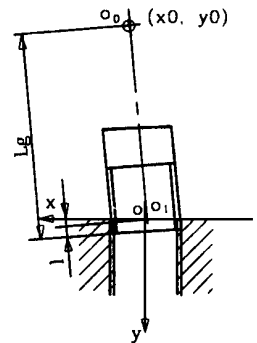


Fig 5 The drawing of screw assembly

$$q_i = \frac{k_i k_i}{o_1 k_i} = \frac{c_i \cos(r_i)}{2 |k_{ix}| \sin(60^\circ - r_i)} \quad (5)$$

这样,我们在计算出所有可能发生接触的边界点后,分别取外螺纹逆(或顺)时针偏转时螺牙左、右侧各点所得偏角最小的点进行左、右侧逆(或顺)时针转动偏角的平衡,即外螺纹逆(或顺)时针偏转时左、右侧所产生的偏角应相等,计算总偏角。设外螺纹逆时针偏转时左边发生最小偏角的点为 k_n 点,而右边的为 k_m 点,则 $q_n = q_m$ 。

由于 $c_n + c_m = c = D_2 - d_2$,通过公式计算得:

$$\begin{cases} oo_{1cc} = \frac{c_m - c_n}{2} \\ q_{cc} = q_n = q_m = \frac{c_n \cos(r_n)}{2 |k_{nx}| \sin(60^\circ - r_n)} \end{cases} \quad (6)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} c_m &= \frac{|k_{mx}| \sin(60^\circ - r_m) \cos(r_n)}{|k_{nx}| \sin(60^\circ - r_n) \cos(r_m) + |k_{mx}| \sin(60^\circ - r_m) \cos(r_n)} (D_2 - d_2) \\ c_n &= \frac{|k_{nx}| \sin(60^\circ - r_n) \cos(r_m)}{|k_{nx}| \sin(60^\circ - r_n) \cos(r_m) + |k_{mx}| \sin(60^\circ - r_m) \cos(r_n)} (D_2 - d_2) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

同理,可计算出外螺纹顺时针方向偏转时的允许角度偏差 q_c 和外螺纹中心的偏离位置 oo_{1c} (公式从略)。

下面来看一个例子:对于普通螺纹配合M 8- 6H/6g,则有 $D = d = 8\text{mm}$, $P = 1.25\text{mm}$, $D_2 = 7.188_0^{+180}$, $d_1 = 6.647\text{mm}$, $d_2 = 7.188_{-164}^{+32}\text{mm}$ 。若旋合角 $\alpha = 360^\circ$,剖面转角 $b = 0^\circ$;通过以上公式可计算得: $H = 1.0825\text{mm}$, $H_1 = 0.3125\text{mm}$, $H_2 = 0.9375\text{mm}$, $y_2 = 0.3498\text{mm}$, $l = 1.7561\text{mm}$, $c = 0.188_{-112}^{+112}\text{mm}$ 。边界点的坐标及边界点 k_i 和 O_1 的连线与 x 轴的夹角 r_i (包括计算出的单位间隙时的偏角 q_i) 分别如表1和表2所示。

Table 1 The coordinate value of the boundary points (unit mm)

k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
(k_{1x}, k_{1y})	(k_{2x}, k_{2y})	(k_{3x}, k_{3y})	(k_{4x}, k_{4y})	(k_{5x}, k_{5y})
(4, 0.1154)	(3.9178, 1.1617)	(- 4, 0.5842)	(- 4, 0.7404)	(3.5216, 1.5580)

Table 2 The angle r_i between the line of k_i and O_1 (including the error angle q_i under the unit clearance)

r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5
1.653°	16.516°	8.309°	10.487°	23.865°	0.1468	0.1728	0.1576	0.1616	0.2202

我们讨论以下两种情况: 当外螺纹逆时针偏转时,左边取 k_1 点,右边取 k_3 点,得 $c_1 = 0.5178c$, $c_3 = 0.5178c$, $q_{cc} = 4.354c$, $oo_{1cc} = 0.0178c$,且 $q_{cmin} = 0.41^\circ$; $oo_{1cmin} = 1.35\mu\text{m}$; $q_{cmax} = 1.31^\circ$; $oo_{1cmax} = 5.34\mu\text{m}$ 。当外螺纹顺时针偏转时,左边取 k_2 点,右边取 k_4 点,得 $c_2 = 0.4761c$, $c_4 = 0.5239c$, $q_c = 4.8508c$, $oo_{1c} = - 0.0239c$,且 $q_{cmin} = 0.37^\circ$; $oo_{1cmin} = - 1.82\mu\text{m}$;

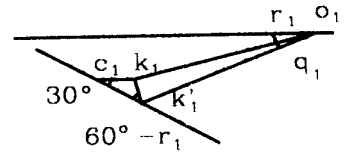


Fig 6 Angle error analysis of screw assembly

$$q_{\max} = 1.46^{\circ}, \delta_{\max} = -7.17 \mu\text{m}.$$

从上面的分析计算可以得到以下结论: 螺纹装配所允许的角度偏差较大(如 达到 1.31°), 而且在最大允许角度偏差时其位置偏差很小(如 为 $5.34 \mu\text{m}$), 因此在进行螺纹装配时, 当外螺纹倒角部分进入内螺纹孔后, 只要检验外螺纹的偏角是否落在允许的角度偏差范围内, 就可判定装配是否继续进行。

3.2 其它轴剖面的螺牙侧面接触情况分析

值得注意的是, 螺纹在某一旋合深度, 不同轴剖面所允许的角度偏差是不同的。为此, 我们除了对内螺纹螺牙初始位置轴剖面进行计算外, 还必须对其他轴剖面进行计算(图7给出了 $\alpha = 360^{\circ}, b = 90^{\circ}$ 时的情况)。通过以上同样的方法进行分析 and 计算, 可以得到: 当 α 不变时, (即旋合深度 l 不变), 开始时允许角度偏差 q 随 b 的增大而增加, 在 $b = 90^{\circ}$ 时达到最大, 其后逐渐减小并回复到 $b = 180^{\circ}$ 位置时的数值, 因此在设计机器人螺纹柔性装配系统时应以 $b = 0^{\circ}$ 时的位置所计算出的允许角度偏差 q 作为设计依据。

3.3 旋合深度对允许角度偏差的影响

一般来讲, 内、外螺纹零件在不同旋合深度具有不同的允许角度偏差, 这是由于螺距误差、螺距积累误差、牙型半角误差和中径误差等因素, 使内螺纹的当量中径减小和外螺纹的当量中径增大^[5], 从而使实际螺牙侧面间的配合间隙随旋合深度的增加而减小。因此, 尽管螺纹装配在初始几圈能很好地旋合, 但如果夹持螺纹零件的装置(如机械手夹持器)没有足够的退让性, 也会造成装配难于进行。所以, 在设计夹持器的柔顺度时应以计算出的最大允许角度偏差量作为其基本设计参数以供参考。同时, 当夹持器的柔顺度不足而出现装配力矩较大时, 可根据螺纹零件两轴线间的偏角作为主动调整夹持器位置的参考依据, 对夹持器进行主动调整以减少旋入过程的旋转力矩。

旋合深度对允许角度偏差的影响的问题很复杂, 笔者将另文发表研究结果。

4 本文的主要结论

本文通过对普通螺纹装配过程的几何分析, 获得以下几个主要结论: 分析和计算螺牙侧面接触情况时, 应以内、外螺纹旋合一圈或一圈以上(即旋和角 $\alpha = 360^{\circ}$) 的稳定啮合状态进行; 在进行螺纹装配时, 当外螺纹倒角部分进入内螺纹孔后, 只要检验外螺纹的偏角是否落在螺纹允许角度偏差公式计算所得的角度偏差范围内, 就可指导和判定机器人螺纹装配是否继续进行; 在设计机器人螺纹柔性装配系统时, 应以剖面转角 $b = 0^{\circ}$ 时的位置所计算出的允许角度偏差作为设计依据; 在设计夹持器的柔顺度时, 应以计算出的最大允许角度偏差量作为其基本设计参数; 当夹持器的柔顺度不足而出现装配力矩较大时, 可根据螺纹零件两轴线间的偏角作为夹持器位置调整的参考依据, 对夹持器进行主动位置调整使装配顺利进行。

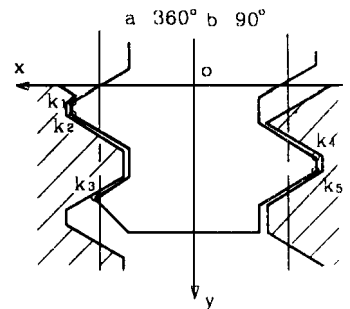


Fig. 7 The contact situation of another cutting plane

参 考 文 献

- 1 Manocha L in D, Ponamgi M. Fast algorithms for penetration and contact determination between non-convex polyhedral models IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995: 2707~ 2712
- 2 Lee C Yi Assemblyability evaluation based on tolerance propagation IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995: 1593~ 1598
- 3 Shaoh D, Gossard K, Fitzpatrick Ulrich D. Representing geometric variation in complex structure assemblies on CAD systems DE- Vol 44- 2, Advanced in Design Automation, ASME, 2, 1992: 121~ 132
- 4 Gilbert Whitney O L. Representation of geometric variations using matrix transforms for statistical tolerance analysis in assemblies, 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1993: 314~ 321
- 5 任嘉卉主编 公差与配合手册 北京: 机械工业出版社, 1997
- 6 蔡光起, 马正元, 孙凤臣 机械制造工艺学 沈阳: 东北大学出版社, 1994
- 7 Nicolson E, Fearing R. Dynamic simulation of part mating problem: Threaded fastener insertion, Proceedings-IEEE/R SJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1991: 30~ 37

The Assembly Ability Geometric Analysis of Flexible Assemblies of Screws with Robots

LI Xiu-Feng, LIU Gui-Xiong, XIE Cun-Xi, LI Wan-Xue

(Dept of Mechatronic Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641)

Abstract

Studying from the main geometric parameters and matching tolerance of screws, this paper analyses the geometric process of the early screwing state on flexible assemblies of screws with robots, obtains the mathematics expressions of allowable deviation of positions and angles between screw mating parts, which restrict the deviation area of the rotation center position of robot clip devices. The results of the paper play an important guiding role for the flexibility design of robot clip devices and the active position adjustment and control technology of robot.

Key words: Screw assembly, Assembly robots Geometric analysis

李绣峰 男, 1965年4月出生, 1985年毕业于上海交通大学机械制造工艺与设备专业, 1987年至1989年在英国 Glasgow 大学学习, 并获工学硕士学位。现为华南理工大学机电工程系机械制造专业博士生, 研究方向为机器人技术及制造自动化, 在国内外发表学术论文10篇。