

# 一种工业机器人柔性手腕的设计与分析

潘存云

(精密机械与仪器系)

**摘要** 本文提出了由双重系杆平面差动轮系机构组成的工业机器人柔性手腕。计算机运动轨迹的仿真结果以及实模型表明,该柔性手腕具有结构简单、紧凑和运动范围大等优点,可以装备于喷漆和焊接工业机器人上。

**关键词** 工业机器人; 柔性手腕

## 1. 前言

在工业机器人本体结构中,手腕是一个重要组成部分,其作用是调整和改变机器人手部在空间的姿态和位置以配合手臂运动来完成各种复杂的作业。柔性手腕是一种由多个运动传递元件串接而成、各元件之间可以相对转动、且能模仿人的手腕动作以使机器人手部在一定的空间区域内实现任意姿态和位置的空间定向机构。与其它类型的机器人手腕相比,它具有活动范围大、结构紧凑、自身重量轻和对作业环境的适应能力强(如可以绕过障碍进行作业)等许多优点,因而在机器人本体结构设计中得到了广泛地采用。从资料介绍的几种国外的柔性手腕来看,结构都比较复杂<sup>[1][2]</sup>,有些起关键作用的零件加工难度较大。本文提出了一种结构简单,制造容易而又能满足使用要求的柔性手腕机构。下面将叙述该手腕的机构综合,运动分析以及运动轨迹的计算机仿真等内容。

## 2. 柔性手腕的机构综合

为了适应各种复杂的作业(如焊接、喷漆等),一般要求机器人的手腕具备三个自由度,方能满足机器人手部在一定空间区域内任意方向上把握住所用工具的使用要求。由于手腕有三个自由度,因此当手腕运动时,机器人手部端点的轨迹将形成一空间域(腕部工作空间),构成手腕的机构类型不同,手部端点的运动形式将不同,其轨迹的形状也不同。一般常见的轨迹为球体和回转体两种。如图1(a)所示的轨迹为回转体,而(b)(c)所示的轨迹则为球体。

要实现上述任何一种轨迹,需采用空间机构。由运动合成原理可知:被限制在平面

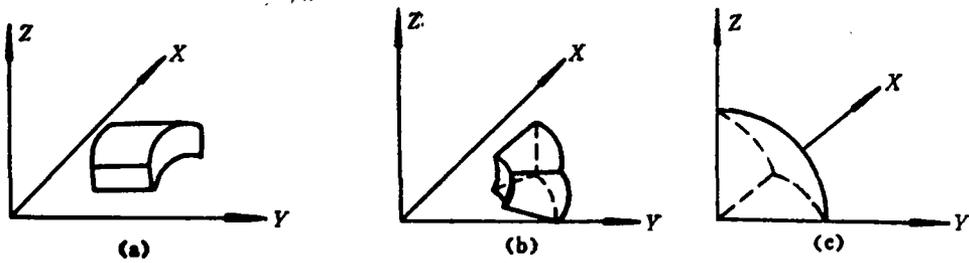


图 1

上某一区域内运动的质点具有 2 个自由度，如果该平面同时绕自身内某一轴线回转，那么该质点的运动轨迹将形成一回转体。由双重系杆平面差动轮系机构组成的柔性手腕的运动简图如图 2 所示。从运动形式来看，属于偏摆——回转型的柔性手腕，它共有 5 个活动构件，构件 1 为一支撑杆，通过回转副与机器人手臂相联，其余 4 个构件均为直齿圆柱齿轮（实际上是作为扇形齿轮使用的）。

该机构共有 5 个 V 级副（圆柱副），两个 II 级副（齿轮副），于是该机构的自由度为：

$$F' = 6n - 5P_V - 4P_{IV} - 3P_{II} - 2P_I - P_1 = 1$$

同时注意到  $O'$  和  $O''$  处两个圆柱副与两个齿轮副给机构带来的约束有两个是重复的，故存在两个虚约束，于是整个机构的实际自由度为：

$$F = F' - (-2) = 3$$

该机构的原动件分别是构件 1、2 和 3，原动件数目与机构自由度数相等，因此，它满足机构具有确定运动的条件。

由图 2 可以看出：该柔性手腕实际上是一复杂周转轮系，因此，它应该满足周转轮

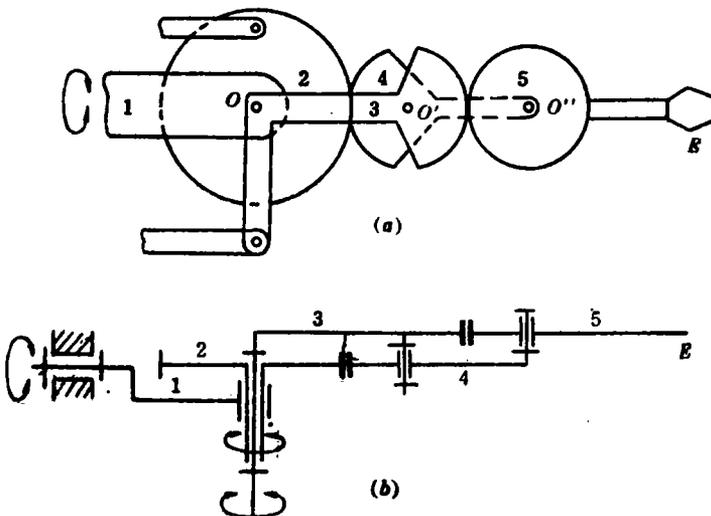


图 2

系的同心条件, 即齿轮 3、4 的几何中心必须重合, 此乃该柔性手腕正确安装的几何条件。由图 2 直接可得:

$$l_{o'o''} = r_3 + r_5$$

$$l_{oo'} = r_2 + r_4$$

其中  $r_2$  至  $r_5$  分别为齿轮 2 至齿轮 5 的节圆半径。

### 3. 手腕机构的运动分析

该手腕机构虽然是一空间机构, 但它实际上是由两个两个运动平面互相垂直的平面机构串接而成的, 故其运动分析可分为两个步骤进行:

1) 当构件 1 不运动时, 构件 1-2-3-4-5 为一双重系杆平面差动轮系 (其自由度为 2), 由轮系的传动比计算公式可知齿轮 2、4 相对于构件 3 的传动比为

$$i_{24}^3 = \frac{\theta_2 - \theta_3}{\theta_4 - \theta_3} = -\frac{r_4}{r_2}$$

解得:

$$\theta_4 = \left(1 + \frac{r_2}{r_4}\right) \cdot \theta_3 - \frac{r_2}{r_4} \cdot \theta_2 \quad (1)$$

齿轮 5、3 相对于构件 4 的传动比为

$$i_{53}^4 = \frac{\theta_5 - \theta_4}{\theta_3 - \theta_4} = -\frac{r_3}{r_5}$$

解得:

$$\theta_5 = \left[ \left(1 + \frac{r_3}{r_5}\right) \cdot \left(1 + \frac{r_2}{r_4}\right) - \frac{r_3}{r_5} \right] \cdot \theta_3 - \frac{r_2}{r_4} \left(1 + \frac{r_3}{r_5}\right) \cdot \theta_2 \quad (2)$$

式中  $\theta_2$  和  $\theta_3$  分别为原动件 2、3 相对于构件 1 的转角,  $\theta_4$  和  $\theta_5$  分别为构件 4、5 相对于构件 1 的转角。

设机器人手部端点  $E$  到  $o''$  点的距离为  $L$ , 则  $E$  点在任意位置时的平面坐标为:

$$\left. \begin{aligned} X &= (r_2 + r_4) \cdot \cos\theta_3 + (r_3 + r_5) \cdot \cos\theta_4 + L \cdot \cos\theta_5 \\ Y &= (r_2 + r_4) \cdot \sin\theta_3 + (r_3 + r_5) \cdot \sin\theta_4 + L \cdot \sin\theta_5 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2) 当构件 1 运动时, 整个机构将随构件 1 一起绕其轴线回转, 由图 3 求得  $E$  点在空间任意位置时的坐标为

$$\left. \begin{aligned} X_E &= (r_2 + r_4) \cdot \cos\theta_3 + (r_3 + r_5) \cdot \cos\theta_4 + L \cdot \cos\theta_5 \\ Y_E &= [(r_2 + r_4) \cdot \sin\theta_3 + (r_3 + r_5) \cdot \sin\theta_4 + L \cdot \sin\theta_5] \cdot \cos\theta_1 \\ Z_E &= [(r_2 + r_4) \cdot \sin\theta_3 + (r_3 + r_5) \cdot \sin\theta_4 + L \cdot \sin\theta_5] \cdot \sin\theta_1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

而手部夹持器的空间姿态完全由其轴线与各坐标轴之间的夹角来决定, 这些夹角可由下式求得:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \theta_5 \\ \beta &= \cos^{-1}(\sin\theta_5 \cdot \cos\theta_1) \\ \gamma &= \cos^{-1}(\sin\theta_5 \cdot \sin\theta_1) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中  $\theta_1$  为原动件 1 的转角。

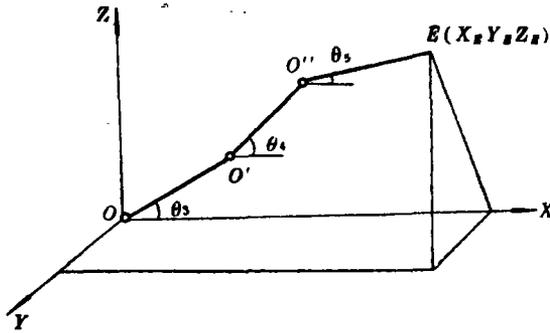


图 3

#### 4. 运动轨迹的计算机仿真

根据上一节对该柔性手腕进行运动分析所得的结果, 当已知原动件 1、2、3 的转角  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  时, 由(1)至(4)式可以很方便地求出构件 4、5 的转角和手部端点  $E$  的任意空间坐标位置。但是所得结果不能直观地反映该柔性手腕的运动情况。为了更加形象地描述该柔性手腕的运动, 在 NANHO PB-700 微型计算机上对其进行了运动轨迹的仿真。给定的机构参数为:  $r_2=30\text{mm}$ ,  $r_3=r_4=r_5=20\text{mm}$ ,  $L=55\text{mm}$ , 并设定  $\theta_1=\theta_2=\theta_3=0^\circ$  时为机构的初始位置 (如图 2(a) 所示)。

仿真结果表明, 当给定  $\theta_2=-30^\circ\sim 30^\circ$ 、 $\theta_3=-30^\circ\sim 30^\circ$  而  $\theta_1$  分别取值  $0^\circ$  和  $360^\circ$  时, 该柔性手腕的平面运动轨迹图形犹如一双瓣月牙状 (如图 4 所示)。其空间运动轨迹近似于一空心椭球状 (如图 5 所示)。

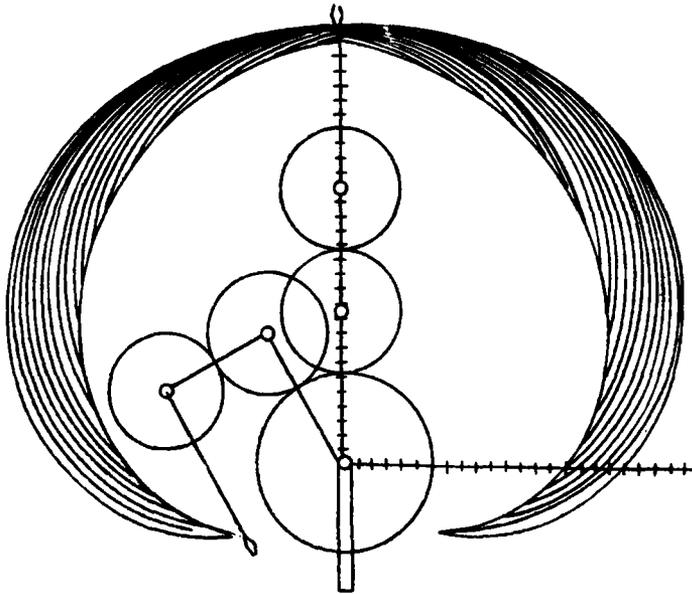


图 4 手部平面运动轨迹

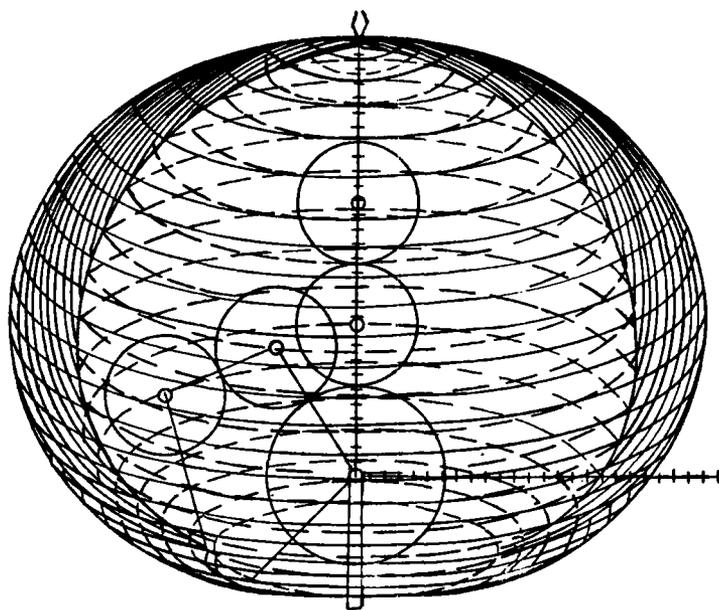
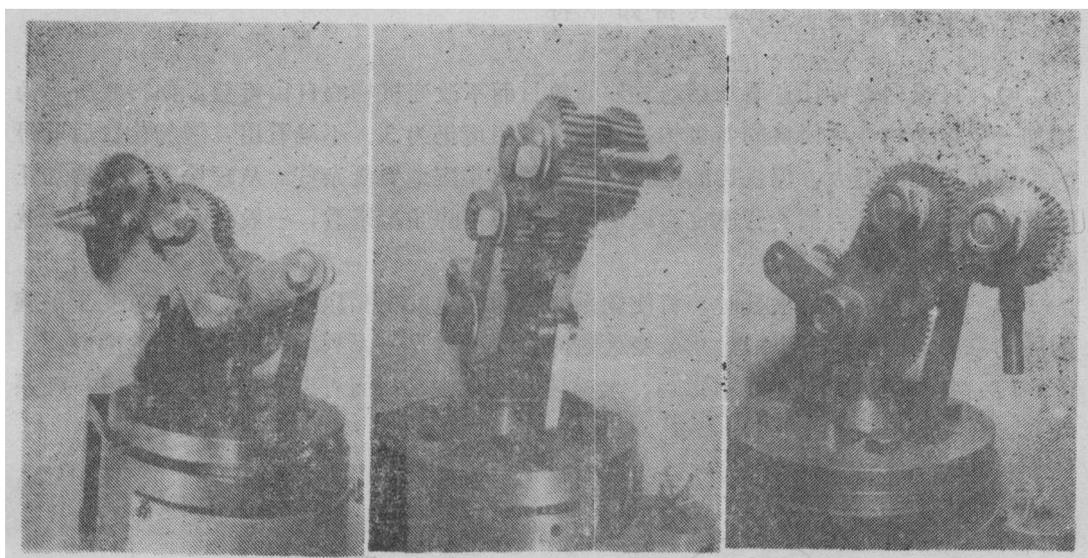


图 5 手部空间运动轨迹

实验结果表明,以上理论分析及计算机运动轨迹仿真结果与实际情形完全相符。图 6 为该手腕实验模型的 3 幅照片。



## 5. 分析比较

为了全面分析和了解该柔性手腕的性能和特点,不仿把它与其它柔性手腕作一番比较。为此,笔者选择了装备在 Trallfa 机器人系列产品上的一种柔性手腕(以下简称

Trallfa 手腕) 作为比较对象。这种三自由度的柔性手腕是由挪威人在八十年代初发明的, 并在国际上获得了发明专利权。

一般来讲, 结构工艺性和运动范围(或柔性度)是衡量柔性手腕性能优劣的两个主要内容, 为此在以下两个方面对两种手腕作一比较:

1) **结构工艺性:** Trallfa 手腕为一空间连杆——齿轮组合机构, 主要构件多呈框架式结构, 整个机构的结构复杂, 其中的齿轮副是由分布在球冠上的凸齿和凹齿等特殊齿轮副所组成, 其制造难度较大, 就连美国机器人生产商 Devilbiss 公司因不能较好地解决其制造工艺中的关键技术问题而不得不从挪威进口这种手腕, 用来装备该公司生产的工业机器人。而本文提出的柔性手腕如前所述实际上是由两个简单的平面机构串接而成, 整个手腕的结构比较简单, 其主要零件均为普通直齿圆柱齿轮, 制造容易。

2) **运动范围:** 由于受结构上的限制 Trallfa 手腕沿  $360^\circ$  任意方向偏摆角度最大也只能达到  $88^\circ$ , 而本文提出的柔性手腕在任意方向上的偏摆角度可超过  $180^\circ$  (如图 4 所示), 可见其运动范围大大增加。因此, 当机器人装备上这种手腕之后, 可提高机器人对工作环境的适应能力, 使其工作空间中的“死角”大为减少, 从而使箱体零件的内部作业(如拐角焊接, 内表面喷漆等)成为可能。在某些场合下, 还可在工件不掉头的情况下完成对背离机器人的工件表面进行作业(如图 7 所示)。

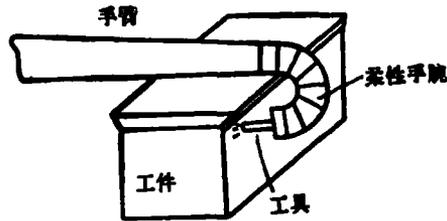


图 7

除此之外, 本柔性手腕还具备如下特点:

a) 可根据需要任意添加运动构件的数目而不改变机构的自由度。如图 8 所示为增加一个运动构件后所得的新机构, 易知其自由度仍为 3。不难看出: 增加构件后所得的手腕活动范围更大, 但机构的结构及受力情况相应地要复杂些。从理论上讲, 增加任意多个构件所得机构都具有确定的运动, 但从实用的角度来看, 一般有 5 个活动构件就足以满足使用要求。

b) 改变各齿轮的齿数时, 将使轮系的传动比也发生相应地变化, 从而改变了手腕的运动范围。因此, 可以通过用改变齿数的方法来获得一系列运动范围不同的手腕。

c) 各原动件的运动互不影响, 无诱导运动产生, 从而可以简化机器人的控制系统。

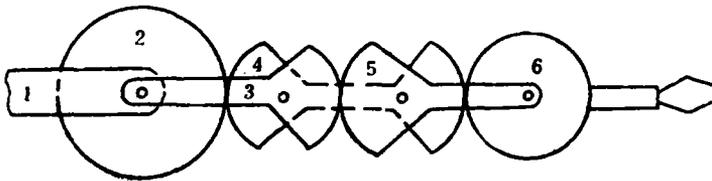


图 8

## 参 考 文 献

- [1] Mark Elling Rosheim, A New pitch-yaw-Roll Mechanical Robot Wrist Actuator, Robots 9 Conference Proceedings Volume 2 1985.
- [2] Devilbiss Company, TR-4500 Operator Manual.

## Designing and Analysing an Industrial Robot Wrist

Pan CunYun

### Abstract

This paper discusses an industrial robot wrist consisting of double-arm planar differential planetary gear train. The result of computer simulation and its experimental model show that the wrist has a large movement and is mechanically efficient, compact and simple. The wrist can be used in the industrial robot for spray painting and welding.

**Key words:** Industrial robot wrist