

六自由度工业机器人手腕分析与 优化综合

滕永昌

摘要: 本文分析了用于六自由度工业机器人的球型手腕, 这种手腕具有结构紧凑, 姿态范围大, 定位精度高等特点。在运动学分析的基础上, 研究了手腕定位精度与各关节参数精度误差之间的关系, 给出了完整的误差数学模型, 借助于此模型通过优化设计, 得到了各关节参数精度的合理分配, 为机器人机械结构及控制系统的精度设计提供了依据。文章阐述了使机器人实现快速响应, 提高定位精度的优化设计方法。

一、前言

在工业机器人中, 手腕是联接臂与手爪的部分, 其作用是改变和调整手爪在空间的姿态和位置。手腕灵活性的增强, 提高了机器人的作业性能。如何使手腕能最大限度的满足机器人工作空间的姿态要求, 而又使其结构紧凑, 重量轻, 定位精度高, 灵活性好, 能够适应特殊工作环境下对机器人的要求, 这是设计机器人手腕要解决的主要问题之一。本文所研究的手腕是具有上述特点的三自由度手腕, 这种机器人手腕在结构上综合了三轴斜面滚动式球型手腕的特点, 采用了三个回转运动可实现连续整周回转, 三个回转轴线交于一点的结构特点。

二、机械结构的优化设计

在机器人机械结构设计中, 传动系统的设计是主要部分, 从电机至手爪端要经过减速, 所以必然存在传动比的设计问题。三维手腕机构可变参数多, 传动系统繁多, 因此对其采用优化设计显得很重要。根据对机器人性能影响最大的几个方面: 动态响应速度快, 重复定位精度高, 作用于大臂的动载荷小建立目标函数, 求得最优的传动比取值。下面简述各目标函数的建立方法。

1) 对于工业机器人, 动态响应速度是个极为重要的因素, 系统的转动惯量小, 则响应速度快, 故我们求得整个系统在电机轴端的等效转动惯量, 把等效转动惯量最小作为第一目标函数, 令为 $F_1(x)$, 其中, x 为各级传动比, 下同。

2) 传动系统的误差, 影响了机器人的定位精度, 把机器人定位精度提高, 即各级传动副误差在手爪处之等效值最小作为第二目标函数, 令为 $F_2(x)$;

3) 机器人手腕及小臂是与大臂联接的, 手腕及小臂部分总动量矩直接作用于大臂上,

我们在传动系统设计中，采用合理的设计方法，可以使系统的总动量矩为零，或数值不大。所以，把系统的总动量矩最小作为第三目标函数，令为 $F_3(x)$ ，

4) 上面分别建立了三个目标函数， F_1 要求系统有小的转动惯量， F_2 要求系统传动误差小， F_3 要求系统总动量矩最小，要满足这三个要求，就必须有一个合理的传动比选取，我们用加权的办法使三个目标函数统一为一个总的目标函数：

$$F(x) = D_1F_1(x) + D_2F_2(x) + D_3F_3(x)$$

其中， D_1, D_2, D_3 为权因子。

用上述方法进行传动系统的传动比设计，可以得到较理想的结果，文献^[13]给出了详细的论述及结果讨论。以动量矩最小作为单目标函数时，优化结果可以使系统总动量矩减少98%^[13]。

三、精度优化综合数学模型的建立

运动精度是衡量机器人性能的主要技术指标之一。下面我们研究一下手腕各关节运动参数误差对于手腕定位精度的影响。

建立H—D坐标系^[11]，对手腕进行运动学分析，则可以得到手腕各关节运动参数与手爪处对于基础坐标之位姿矩阵 T_3 之间的关系。由于运动参数 $a_i, d_i, \alpha_i, \theta_i$ 存在误差，则关节 $i - 1$ 与 i 之间的坐标变换矩阵 A_i 变成为^[12]： $A_i + dA_i = A_i(I + \delta A_i)$ 这时在手爪处所产生的误差为： $dT_3 = T_3\delta T_3$ ，而：

$$\delta T_3 = \begin{pmatrix} 0 & -\delta_2^1 & \delta_3^1 & \lambda_1^1 \\ \delta_2^1 & 0 & -\delta_3^1 & \lambda_2^1 \\ -\delta_2^2 & \delta_3^2 & 0 & \lambda_2^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

其中：

$$\begin{aligned} \delta_2^1 &= M_{11} \Delta \theta + M_{21} \Delta \alpha, & \lambda_1^1 &= M_{11} \Delta d + M_{21} \Delta a + M_{31} \Delta \theta + M_{41} \Delta \alpha, \\ \delta_3^1 &= M_{12} \Delta \theta + M_{22} \Delta \alpha, & \lambda_2^1 &= M_{12} \Delta d + M_{22} \Delta a + M_{32} \Delta \theta + M_{42} \Delta \alpha, \\ \delta_2^2 &= M_{12} \Delta \theta + M_{22} \Delta \alpha, & \lambda_2^2 &= M_{12} \Delta d + M_{22} \Delta a; \end{aligned}$$

其中： M 为 1×3 矩阵，是与手爪在空间所处位姿有关的矩阵，如果 a_i, d_i, α_i 之值定后，则 M 为 θ_i 之函数。

a_i 为连杆长度， d_i 为偏距；
 α_i 为扣角， θ_i 为连杆 $i - 1$ 与 i 之间的角位移；
 $\Delta q = (\Delta q_1, \Delta q_2, \Delta q_3)^T$ ， q 代表四个参数 a, d, α, θ 。

四、精度优化综合

用 r_p 表示手腕重复定位误差，即手爪在空间某一位姿时其一系列再现位置之间的最大偏差。 r_p 不仅与手腕各关节参数之精度有关，而且也是手爪所在空间位姿的函数，不同的位姿产生不同的定位误差，在此，我们选取产生最大误差所在的位姿作一研究。

手腕重复定位精度为 r_p ，手爪在其工作空间区域内之最大重复定位误差，则：

$R_p = \max_{\Omega} r_p$, Ω 表示机器人整个工作区域。

1) 精度最低目标函数: 这一目标函数要求在满足手腕重复定位精度要求的前提下, 尽量降低各参数之精度, 这时机器人的设计和制造所需,

$$F_1 = \sum_{j=1}^3 \left(\frac{1}{\Delta\theta_j} + \frac{1}{\Delta\alpha_j} + \frac{1}{\Delta a_j} + \frac{1}{\Delta d_j} \right), \text{ 其中, } \Delta\theta_j, \Delta\alpha_j, \Delta a_j, \Delta d_j > 0$$

2) 误差波动最小目标函数: 这个目标函数要机器人运动过程中轨迹误差波动小,

$$F_2 = \sum_{j=1}^n (r_j - R_p)^2, r_j \text{ 为第 } z \text{ 个节点处重复定位误差}$$

约束条件: 各参数精度不得高于制造所能达到的精度, 重复定位误差 r_p 不得超过允许值, 即 $r_p \leq R_p$ 。当 $R_p = 0.2\text{mm}$ 时, 采用加权法优化可得到:

$$\Delta\theta_1 = 0.13374 \quad \Delta\alpha_1 = 0.22329 \quad \Delta a_1 = 0.2770 \quad \Delta d_1 = 0.04087$$

$$\Delta\theta_2 = 0.12356 \quad \Delta\alpha_2 = 0.32270 \quad \Delta a_2 = 0.1572 \quad \Delta d_2 = 0.06130$$

$$\Delta\theta_3 = 0.79670 \quad \Delta\alpha_3 = 0.3760 \quad \Delta a_3 = 0.0030 \quad \Delta d_3 = 0.04760$$

单位: 10^{-2}rad , mm

至此, 已经得到了手腕各运动参数之精度, 上述优化结果, 为我们进行机器人精度设计提供了一种方法。

参 考 文 献

- [1] Michael W. Walker, Kinematics and Dynamics, «Handbook of Industrial Robot».
- [2] Ted Stackhouse, A New Concept in Robot Wrist Flexibility, 9th ISTR, 1979. 3.
- [2] 靳桂华, 姚俊杰, 滕永昌, 工业机器人手腕优化设计, 全国第二届机械优化设计学术会议论文, 1987, 10.
- [4] Chi-haur Wu, A Kinematic CAD Tool for the Design and Control of a Robot Manipulator, The International Journal of Robotics Research, 3, No. 1, 1984
- [5] Paul, R. P., «Robot Manipulators, Mathematics, Programming, and Control» MIT Press, 1981

Analysis and Optimum Synthesis of a Wrist with Six Degrees of Freedom Industrial Robot

Teng Yongchang

Abstract

This paper describes a ball-shaped wrist with six degrees of freedom of industrial robot, the wrist is high in repeatability, large in orientation, and compact in size. Based on the kinematics analysis of the wrist, the author has studied the relationship between the repeatability and the kinematics parameter error of each joints of the wrist, from which a complete mathematical model of the wrist is produced. Using this error model, we can optimize the distributions of accuracy of the wrist, and design the mechanical construction and control system of the robot. The author introduced the optimizing method that makes the robot having properties such as quicker response, higher accuracy and so on.