

操作手机机构绝对运动精度的优化综合

卢晓春

刘平安

(广东交通学校)

(机械工程系)

摘要 在满足操作手机机构手部绝对运动精度的前提下,用优化设计方法分析并确定有关结构参数公差和运动参数精度的最佳分布,并使机构的制造成本最低^[1]。此法适用于一般开链机构的精度综合^[1]。

关键词 操作手;绝对运动精度;优化设计;位姿

分类号 TP 24

0 引言

一般操作手的运动精度包括重复性精度和绝对运动精度^[1]。重复性定位精度的优化综合目前研究较多^[1]。绝对运动精度是指操作手实际运动相对期望运动的准确程度,受确定性原始误差(如连杆参数误差等)影响^[1]。尽管操作手的绝对位姿误差能进行补偿和校正,但测量工作量大,且各运动付(关节)变量的反向解复杂,因此提高绝对运动精度的较好方法是在机构的设计阶段就将构件的结构参数误差控制在一定的公差范围内,使得其所产生的绝对位姿误差满足精度要求^[1]。为此本文采用最优化技术确定能满足操作手绝对运动精度要求,尽量降低公差制造成本,并希望操作手的机械误差在其运动轨迹上尽量减少的连杆参数误差的最优公差值^[1]。

1 确定精度优化综合的基准位姿

由误差分析^[1]知,对一个特定操作手机机构连杆参数误差所产生的绝对位姿误差,只是在某一位置和姿态上得到较大值,因此,通常取以下两种位姿作为精度综合的基准位姿^[1]。

1.1 最大位置误差所在的位姿

操作手的位姿误差中,位置误差是主要的因素^[1]。即操作手各结构参数原始误差给定的情况下,操作手在其工作空间内使其手部的位姿误差取得最大值时,操作手所处的位置为基准位姿^[1]。

1.2 出现概率最大的位姿

出现概率最大的位姿即在操作手整个运动过程中,出现概率最大的手臂位姿区域内,使手部位姿误差取得较大值的手部位姿^[1]。

2 建立精度优化综合的目标函数

2.1 以公差制造成本最低为目标的单目标函数

公差制造成本主要取决于连杆参数的公差值及该公差的制造工艺^[13]根据制造工艺理论, 单个连杆参数公差的相对制造成本为

$$C_l = k_l(\epsilon)^{-\alpha}. \quad (1)$$

其中 ϵ —— 连杆参数半公差带宽度;

k_l —— 工艺性系数; 同种工艺 k_l 相等^[13]一般连杆角度参数与长度参数的 k_l 不一样, 后者制造精度较高, 即要获得相同的制造精度连杆长度参数的制造成本低, k_l 值较小^[13]通常取长度参数的 k_l 值为 1, 角度参数的 k_l 值为 1.5;

α —— 公差特征指数^[13]同种生产工艺 α 不是唯一值, 通常取为 0.7^[13]

对整个操作手机构, 连杆参数公差的总相对制造成本为

$$G = \sum_{l=1}^{n+m} K_l(\epsilon)^{-\alpha}. \quad (2)$$

其中 n —— 连杆长度原始误差的个数;

m —— 连杆角度原始误差的个数;

公差制造成本最低化的单目标函数为

$$f_1(x) = \min \sum_{l=1}^{n+m} K_l(x_l)^{-\alpha}. \quad (3)$$

其中 $x = [x_1, x_2, \dots, x_{n+m}]^T$, 设计变量 x_l 为连杆参数半公差带宽度 ϵ ^[13]

2.2 以机械误差最小化为目标的单目标函数

操作手机部机械误差最小是指在典型工作轨迹上的误差最小^[13]由误差理论知, 误差的标准差对较大误差或较小误差较灵敏, 是描述误差的可能取值与均方值偏差的疏密程度^[13]故在该目标函数中以位姿误差的方差加权和表示为机械误差^[13]将典型轨迹离散为 k 个节点, 则以机械误差最小化为目标的单目标函数为

$$f_2(x) = \min \sum_{j=1}^k \sigma_{\theta j}^2. \quad (4)$$

其中 $\sigma_{\theta j}^2$ —— 第 j 个离散点位姿误差的方差;

$$\sigma_{\theta j}^2 = A_1 D(d_{xj}) + A_2 D(d_{yj}) + A_3 D(d_{zj}) + A_4 D(\delta_j) + A_5 D(\delta_j) + A_6 D(\delta_j).$$

式中 $A_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 是加权系数, 根据位姿误差在 $D-H$ 坐标系中对各个方向的影响程度确定^[13] $D(d_{xj})$ 、 $D(d_{yj})$ 、 $D(d_{zj})$ 、 $D(\delta_j)$ 、 $D(\delta_j)$ 、 $D(\delta_j)$ 是第 j 个离散点在六个方向上位姿误差的方差, 其大小计算详见文献^[2]^[13]

2.3 综合考虑机械误差和公差制造成本的多目标函数

制造成本最低化及机械误差最小化反映各自不同的要求, 为能综合反映两者的要求, 采用目标规划法建立统一的目标函数

$$f_3(x) = \min \left[\left(\frac{f_1 - f_1^*}{f} \right)^2 + \left(\frac{f_2 - f_2^*}{f} \right)^2 \right] \quad (5)$$

其中 f_1^* 、 f_2^* 分别为制造成本最低化及机械误差最小化的单目标函数的最优值^[13]

3 确定精度最优综合的约束条件

操作手精度优化综合的约束条件由手部的位姿精度及结构参数精度约束两部分组成,其中手部的位姿精度约束是主要约束^[13]其指在整个操作手工作空间内,连杆参数误差产生的绝对位姿误差小于设计期望值^[13]由手部位姿误差分析知:手部位姿误差服从正态分布规律^[13]根据概率理论可得到位置和姿态精度的约束条件分别是:

$$g_i(x) = \frac{\sigma \xi P_i}{R} - 1 \leq 0 \quad (t = i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

$$g_i(x) = \frac{\sigma \xi P_i}{T} - 1 \leq 0 \quad (t = i = 4, 5, 6) \quad (7)$$

其中 R —— 操作手手部的位姿精度;

T —— 操作手手部的姿态精度;

ξP_i —— 置信限,取决于概率 P_i 的大小;

σ —— 操作手手部的位姿误差和姿态误差在六个方向上的标准差,是连杆参数公差和机构位姿的函数,故为简化计算,根据基准选择准则,只在最大误差的手部位姿上进行计算^[13]

另外考虑到实际需要及工艺水平,对连杆参数公差有一定限制,即结构参数精度约束^[13]约束方程为:

$$g_l(x) = \frac{x_l}{t_l^h} - 1 \leq 0; \quad (8)$$

$$(l = 1, 2, 3, \dots, n + m; t = 7, 8, 9, \dots, n + m + 6)$$

$$g_l(x) = \frac{t_l^l}{x_l} - 1 \leq 0; \quad (9)$$

$$(l = 1, 2, \dots, n + m; t = n + m + 7, \dots, 2(n + m) + 6)$$

其中 t_l^h, t_l^l 分别为半公差带 ξ 的上、下限^[13]共有 $2(n + m) + 6$ 个约束条件^[13]

4 实例计算和结果分析

以 PUMA 560 型操作手^[3]为例进行优化设计^[13]采用内点惩罚函数法进行优化计算,按任意法选取各设计变量的初始值^[13]为突出精度优化设计中的主要约束,在构造惩罚函数时采取对主要约束加大惩罚的技巧,计算出不同位置精度下,不同姿态精度下,不同概率水平下及不同公差特征指数下,连杆参数精度在不同的目标函数下的最优值^[13]限于篇幅,具体求解过程及结果在此不作详述^[13]

由计算结果分析知:

(1) 位姿精度不同,连杆参数的最优公差值变化较大^[13]就相同位置精度而言,姿态精度的影响较小^[13]可见位置精度约束是主要约束^[13]

(2) 实际位姿精度小于给定精度值的概率 P 对最优公差值影响较大;对不同的概率水平 P ,连杆参数的最优公差值变化较大^[13]

(3) 公差特征指数 α 不影响机械误差最小化的单目标函数的最优设计^[13] 在其它两个目标函数的优化设计中, α 对最优公差影响较小, 总的趋势是随 α 的增大最优公差值稍有变小^[13]

(4) 对同一位姿度要求及同一概率水平及公差特征指数下, 由公差制造成本最低及机械误差最小两单目标函数所获得的最优连杆参数公差值相差很大^[13] 因此, 在设计中应根据实际要求确定加权因子来计算综合优化目标函数^[13]

(5) 在本文的优化设计中, 考虑到了孔轴的歪斜、关节间隙等对优化设计的影响, 但没有对关节间隙、孔轴歪斜引进的孔轴线的倾斜量进行最优设计^[13] 这有待于进一步的研究^[13]

参 考 文 献

- 1 Aolk Kumar, Sunil Prakash. Analysis of Mechanical Errors in Manipulator. T. M. M, 1983, 6. 53~77
- 2 卢晓春¹⁹ 机器人动态参数误差对精度的影响¹⁹ 全国青年第二届机器人学研讨会论文集¹⁹ 长沙: 国防科技大学出版社, 1988, 102~107
- 3 康兴¹⁹ PUMA-560 型机器人传动系统分析¹⁹ 机器人, 1987, 1(5): 210~218

Optimum Synthesis of Absolute Movement Precision in Manipulator

Lu Xiaochun

(Transportation School of Guangdong Province)

Liu Pingan

(Mechanical Engineering Department)

Abstract Meeting the handle's absolute movement precision of manipulator mechanism, the author analyses and determines the tolerance of the relative structural dimensions as well as the moving parameter precision's optimum distribution. Moreover, the manufacture cost is reduced to minimum. This method can be widely used in opening chain mechanism's precision synthesis.

Key words absolute movement precision; optimum design; standing position