

一种新型 3-DOF 串并混联拟人机械臂的研制

李研彪^{①②*}, 金振林^①, 计时鸣^②

① 燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004

② 浙江工业大学机械制造及自动化教育部重点实验室, 杭州 310014;

* E-mail: lyb781003@yahoo.com.cn

收稿日期: 2008-11-12; 接受日期: 2009-05-17

国家自然科学基金项目(批准号: 50575208)、浙江工业大学机械电子工程重中之重学科开放基金项目(批准号: 2009EP004)和燕山大学科研平台基金项目资助

摘要 提出了一种新型 3-DOF 串并混联拟人机械臂及这种机械臂的基于性能图谱的概率参数设计方法, 对这种机械臂进行了运动学性能分析, 推导出这种混联机械臂的位置反解方程、速度传递平衡方程和静力传递平衡方程, 定义了速度传递性能评价指标、力传递性能评价指标及各全域性能评价指标, 绘制了各全域性能评价指标的性能图谱, 应用基于性能图谱的概率参数设计方法, 为这种机械臂选取了合理的结构参数, 同时, 考虑加工与装配工艺性, 设计了一种 3-DOF 串并混联拟人机械臂, 为这种机械臂的应用奠定了基础. 这种机械臂具有运动灵活、刚度大、惯性小和工艺性好等优点, 在精密抛光、航空、造船、汽车等现代工业领域有广阔的应用前景, 这种机械臂与球面三自由度并联机构串联在一起, 可构成 6-DOF 串并混联拟人机械臂.

关键词

3-DOF 混联拟人机械臂
运动学分析
性能评价指标
参数设计

机械臂的结构主要有串联结构、并联结构和串并混联结构等形式. 其中, 串联机械臂具有运动灵活、工作空间大等优点, 如清华大学研制的 TH1 型拟人手臂^[1], 日本早稻田大学研制的 Wendy 型拟人手臂^[2], 瑞典 ABB 公司研制的 IRB 系列机械臂^[3]等. 相对于串联机械臂, 并联机械臂具有结构简单、运动惯性小、承载能力强等优点^[4,5], 如瑞士 SIG 公司推出的 SIG XR22 高速并联操作器, 天津大学黄田教授等研制出可高速运转的两自由度并联机器人操作器^[6], 燕山大学金振林教授提出的四自由度并联机械臂^[7]等, 串并混联机械臂则兼备上述两种机械臂的优点, 如高峰教授提出的七自由度串并混联机械臂^[8]等.

机械臂结构参数设计是其研制的基础, 也是机

械设计的难点之一^[9~11]. 由于机械臂结构参数的取值具有不确定性, 很难直观地找到使各性能评价指标均好的结构参数. 因此, 对受多种因素影响的机械臂的结构参数进行设计时, 仅凭直觉和经验进行决策, 这必然会导致盲目性或无原则的效仿. 目前, 结构参数优化设计方法主要分为单目标参数设计方法和多目标参数设计方法. 单目标参数设计方法即选定一种性能进行最优结构设计. 如苏玉鑫以灵敏度作为 Stewart 平台的优化目标函数, 对 Stewart 平台进行参数选择^[12], 李波以工作空间作为目标函数, 对一台三腿虚拟机床进行参数优化^[13]等, 上述单目标参数设计方法没有综合考虑其它性能表现, 这种参数优化设计很片面. 多目标参数设计方法即选定多个性能

引用格式: 李研彪, 金振林, 计时鸣. 一种新型 3-DOF 串并混联拟人机械臂的研制. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(12): 1983—1991

Li Y B, Jin Z L, J S M. Design of a novel 3-DOF hybrid mechanical arm. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(12): 3592—3600, doi: 10.1007/s11431-009-0293-z

指标进行最优结构设计. Stoughton和Arai以工作空间和灵敏度的加权综合对改型Stewart平台的结构参数进行了优化, Merlet^[14]提出一种以工作空间为设计方向的优化方法, 即在保证工作空间的同时, 兼顾其它设计目标, 卢强^[15]应用遗传算法优化了Stewart平台的结构参数.

基于人体结构特点, 提出了一种新型 3-DOF 混联拟人机械臂及这种机械臂的基于性能图谱的概率参数设计方法, 分析了这种机械臂的运动学性能, 推导出位置反解方程、运动传递平衡方程和静力传递平衡方程, 定义了速度传递性能评价指标、力传递性能评价指标及各全域性能评价指标, 绘制了各性能评价指标的性能图谱, 应用基于性能图的概率参数设计方法, 选取了这种机械臂的合理结构参数, 同时, 考虑其加工与装配工艺性, 设计了一种 3-DOF 串并混联拟人机械臂, 为这种机械臂的应用奠定了基础. 相对于以往串联机械臂, 这种机械臂的上臂采用五杆两自由度并联机构, 两个电机均置于固定件上, 减少了可动构件的质量, 且由两个电机共同承载末端件的承载重量, 如图 1 所示. 因此, 这种机械臂具有承载能力强、运动惯性小等优点, 适用于拟人机器人领域, 同时, 也适用于精密抛光、航空、造船、汽车等现代工业领域.

1 新型 3-DOF 混联拟人机械臂的结构布局特点简介

新型 3-DOF 串并混联拟人机械臂的机构原型为一平面三自由度混联机构, 如图 1 所示, 这种机械臂的结构布局形式如下: (i) 两个直线移动副 P_1 和 P_2 相互平行, 其垂直距离为 a ; (ii) 直线移动副 P_3 平行放置于杆 O_1O_2 上, 与杆 O_1O_2 之间的距离为 m ; (iii) 当两个直线移动副 P_1 和 P_3 相互平行、定长杆 O_2G 垂直于

杆 O_1O_2 、且各输入均为零时, 这种机械臂处于初始装配位姿. 这种混联拟人机械臂与球面三自由度并联机器人(作为肩关节)串联在一起, 构成一种新型六自由度串并混联拟人机械臂^[16], 球面三自由度并联机器人的设计将另文分析.

2 位置反解

建立三个坐标系: $\{P\}$ - Oxy , $\{Q\}$ - $O_1x_1y_1$, $\{R\}$ - $O_2x_2y_2$, 如图 1 所示, 其中, 坐标系 $\{P\}$ 与基座相连, 为静坐标系; 坐标系 $\{Q\}$ 为随动坐标系; 坐标系 $\{R\}$ 为动坐标系, y_2 轴与杆 O_2G 共线. 当已知输出构件的位置姿态时, 求解输入构件的位置姿态, 称为位置反解. 选择 O_2 为机械臂的参考点, 假设参考点 O_2 的位姿坐标为 $(x \ y \ \alpha)^T$. 由布局特点知, A, B 和 O_1 在静坐标系 $\{P\}$ 中的位置矢量为

$$\begin{cases} A_P = (0 \ -a)^T, \\ B_P = (L_{20} + \Delta l_2 \ -a)^T, \\ O_{1P} = (L_{10} + \Delta l_1 \ 0)^T, \end{cases} \quad (1)$$

式中, Δl_1 和 Δl_2 分别为直线移动副 P_1 和 P_2 的输入位移.

C, D, E, F 和 O_2 在坐标系 $\{Q\}$ 中的位置矢量为

$$\begin{cases} C_Q = (-c \sin \theta \ -c \cos \theta)^T, \\ D_Q = (d' \ 0)^T, \\ E_Q = (d' \ -m)^T, \\ F_Q = (d' + L_{30} + \Delta l_3 \ -m)^T, \\ O_{2Q} = (d \ 0)^T, \end{cases} \quad (2)$$

式中, Δl_3 为直线移动副 P_3 的输入位移, d' 为杆 O_1D 的长度.

G 在坐标系 $\{R\}$ 中的位置矢量为

$$G_R = (0 \ -e)^T. \quad (3)$$

由几何关系, 得出这种机械臂的位置反解方程

$$\begin{cases} (O_{2P} - O_{1P})^T (O_{2P} - O_{1P}) = d^2, \\ \theta_1 = a \tan(y / (x - L_{10} - \Delta l_1)), \\ c \sin(\theta - \theta_1) + b \cos \phi_1 = L_{10} - L_{20} - \Delta l_2 + \Delta l_1, \\ c \cos(\theta - \theta_1) + b \sin \phi_1 = a, \\ \theta_2 = \alpha - \theta_1 - \pi / 2, \\ e \cos(\theta_2) + h \sin \phi_2 = m, \\ -e \sin(\theta_2) + h \cos \phi_2 = d - d' - L_{30} - \Delta l_3, \end{cases} \quad (4)$$

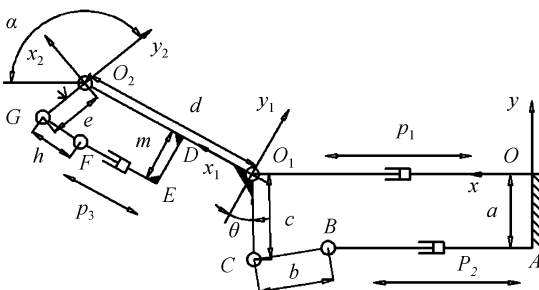


图 1 3-DOF 混联拟人机械臂机构简图

式中, θ_1 为坐标系 $\{Q\}$ 绕点 O_1 的转动角度, θ_2 为坐标系 $\{R\}$ 绕点 O_2 的转动角度, ϕ_1 为杆 BC 绕 B 点的转角, ϕ_2 为杆 FG 绕 F 点的转角, 如图 2 所示, 由(4)式, 可得这种机械臂的位置反解

$$\begin{cases} \Delta l_1 = x - \sqrt{d^2 - y^2} - L_{10}, \\ \Delta l_2 = \Delta l_1 - c \sin(\theta - \theta_1) - b \cos(U) + L_{10} - L_{20}, \\ \Delta l_3 = e \sin(\theta_2) - h \cos(V) + d - d' - L_{30}, \end{cases} \quad (5)$$

式中

$$\begin{cases} U = \pm \arcsin((a - c \cos(\theta - \theta_1))/b), \\ V = \pm \arcsin((m - e \cos(\theta_2))/h). \end{cases} \quad (6)$$

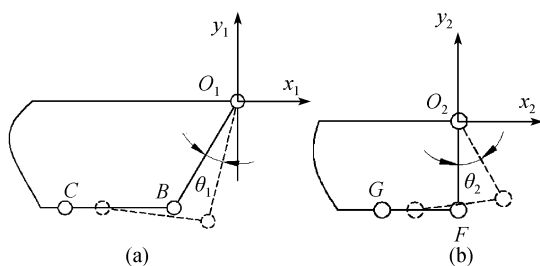


图 2 坐标系 $\{Q\}$ 和 $\{R\}$ 的转动角度示意图

2.1 转角结构约束

设 σ_1 , σ_2 , λ_1 和 λ_2 分别为沿定长杆 BC , FG , CO_1 和 GO_2 方向的单位矢量, β_1 和 β_2 分别为定长杆 BC 与杆 CO_1 , 定长杆 FG 与杆 GO_2 之间的夹角, 则

$$\begin{cases} \beta_1 = \arccos(\sigma_1 \cdot \lambda_1), \\ \beta_2 = \arccos(\sigma_2 \cdot \lambda_2), \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\sigma_1 = (C_P - B_P)/b$, $\sigma_2 = (G_P - F_P)/h$, $\lambda_1 = (O_{1P} - C_P)/c$, $\lambda_2 = (O_{2P} - G_P)/e$. 假设 β_1 和 β_2 的最小转角分别为 $\beta_{1\min}$ 和 $\beta_{2\min}$, 最大转角分别为 $\beta_{1\max}$ 和 $\beta_{2\max}$, 则这种机械臂的转角约束为

$$\begin{cases} \beta_{1\min} \leq \beta_1 \leq \beta_{1\max}, \\ \beta_{2\min} \leq \beta_2 \leq \beta_{2\max}. \end{cases} \quad (8)$$

2.2 直线移动副的长度约束

设三个直线移动副 P_1 , P_2 和 P_3 的输入位移的最大值和最小值分别为 $L_{i\max}$ 和 $L_{i\min}$ ($i=1,2,3$). 则直线移动副的长度约束为

$$L_{i\min} \leq L_i \leq L_{i\max}. \quad (9)$$

3 速度传递平衡方程

设 $V = (V_X \ V_Y \ \omega_B)^T$ 为参考点 O_2 在静坐标系 $\{P\}$ 中的广义速度矢量, 输入速度矢量为 $v = (v_1 \ v_2 \ v_3)^T$, v_i 分别为 P_i ($i=1,2,3$) 的输入速度. 在直线移动副 P_1 和 P_2 的驱动下, 参考点 O_1 的线速度矢量为

$$V_1 = (v_1 \ 0)^T. \quad (10)$$

式(4)的第三式和第四式对时间求导并整理, 可得坐标系 $\{Q\}$ 绕 O_1 点的转动角速度为

$$\omega_1 = (v_2 - v_1)/(c \cos(\theta - \theta_1) - c \sin(\theta - \theta_1) \tan \phi_1). \quad (11)$$

则在直线移动副 P_1 和 P_2 的驱动下, 参考点 O_2 在操作空间中产生的速度矢量为

$$\begin{cases} V_{B1} = V_1 + \omega_1 \times (O_{2P} - O_{1P}), \\ \omega_{B1} = \omega_1, \end{cases} \quad (12)$$

其中, O_{1P} 和 O_{2P} 为点 O_1 和 O_2 在静坐标系 $\{P\}$ 中的位置矢量.

对(4)式的第 7 式和第 8 式关于时间求导并整理, 可得坐标系 $\{R\}$ 绕 O_2 点的转动角速度为

$$\omega_2 = v_3/(e \cos \theta_2 + e \sin \theta_2 \tan \phi_2). \quad (13)$$

则在直线移动副 P_3 的驱动下, 使参考点 O_2 仅产生角速度矢量, 即

$$\omega_{B2} = \omega_2. \quad (14)$$

综合(10)~(14)式, 可得如下方程:

$$\begin{cases} V_B = V_{B1}, \\ \omega_B = \omega_{B1} + \omega_{B2}, \end{cases} \quad (15)$$

其中, $V_B = (V_X \ V_Y)^T$. 综合(10)~(15)式, 可得输入速度与广义输出速度之间的传递关系如下:

$$V = J_B v, \quad (16)$$

其中

$$J_B = \begin{bmatrix} 1 & n_1(X - L_{10} - \Delta l_1) & 0 \\ 0 & n_1 Y & 0 \\ 0 & n_1 & n_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

其中, $n_1 = ((c \cos(\theta - \theta_1) - c \sin(\theta - \theta_1) \tan(\phi_1))^{-1})$, $n_2 = (e \cos(\theta_2) + e \sin(\theta_2) \tan(\phi_2))^{-1}$, $J_B \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 为这种机

械臂的速度雅可比矩阵.

4 力传递平衡方程

假设基座和各构件均为刚性构件, 且忽略摩擦力. 设 $\mathbf{F} = (F_X \ F_Y \ M_B)^T$ 为参考点 O_2 的广义输出力矢量, $\mathbf{f} = (f_1 \ f_2 \ f_3)^T$ 为驱动力, f_i ($i=1,2,3$) 分别为沿 P_i ($i=1,2,3$) 方向的驱动力. 利用虚功原理, 可以推导出 $\mathbf{f}$ 与 $\mathbf{F}$ 之间的关系. 设在外力 $\mathbf{F}$ 的作用下, 参考点 O_2 的广义虚位移为 $\delta \mathbf{t}_B$, 相应的输入端的虚位移为 $\delta \mathbf{p}_B$ (虚位移是满足机械系统的几何约束条件的无限小位移). 因此, 各关节驱动力 $\mathbf{f}$ 所作的虚功之和为

$$W_{B1} = \mathbf{f} \cdot \delta \mathbf{p}_B, \quad (17)$$

其中

$$\delta \mathbf{p}_B = (\delta p_{B1} \ \delta p_{B2} \ \delta p_{B3})^T. \quad (18)$$

外力 $\mathbf{F}$ 所作的虚功之和为

$$W_{B2} = \mathbf{F} \cdot \delta \mathbf{t}_B, \quad (19)$$

其中

$$\delta \mathbf{t}_B = (\delta t_{B1} \ \delta t_{B2} \ \delta \psi)^T. \quad (20)$$

由虚功原理知, 这种机械臂机构在平衡的情况下, 任意虚转角产生的虚功总和为零. 即, 各关节驱动力 $\mathbf{f}$ 所作的虚功之和加上外力 $\mathbf{F}$ 所作的虚功之和等于零:

$$W_{B1} + W_{B2} = 0. \quad (21)$$

虚位移 $\delta \mathbf{t}_B$ 和 $\delta \mathbf{p}_B$ 并非独立, 两者之间的几何约束由该机械臂的速度雅可比矩阵 $\mathbf{J}_B$ 所决定:

$$\delta \mathbf{t}_B = \mathbf{J}_B \delta \mathbf{p}_B. \quad (22)$$

综合(17)~(22)式, 整理得:

$$\mathbf{F} = \mathbf{G}_B \mathbf{f}, \quad (23)$$

其中

$$\mathbf{G}_B = (\mathbf{J}_B^{-1})^T, \quad (24)$$

其中, $\mathbf{G}_B$ 为这种机械臂的力雅可比矩阵.

5 各性能评价指标的定义

这种机械臂机构不在奇异位形时, 考虑线速度和角速度为不同的量纲, (16)式可改写成:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_B = \mathbf{J}_V \mathbf{v}, \\ \boldsymbol{\omega}_B = \mathbf{J}_\omega \mathbf{v}, \end{cases} \quad (25)$$

其中, $\mathbf{J}_V$ 和 $\mathbf{J}_\omega$ 分别为速度雅可比矩阵 $\mathbf{J}_B$ 的前两行和后一行. 当机械臂不在奇异位形时, 由矩阵分析理论, 雅可比矩阵 $\mathbf{J}_V$ 有奇异值分解, 则存在正交阵 $\mathbf{A}_{BV} \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$, $\mathbf{B}_{BV} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 使

$$\mathbf{J}_V = \mathbf{A}_{BV} \mathbf{A}_V \mathbf{B}_{BV}^T, \quad (26)$$

其中, $\mathbf{A}_V = \begin{bmatrix} \sigma_{1V} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{2V} & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{A}_{BV} = \begin{bmatrix} a_{B11} & a_{B12} \\ a_{B21} & a_{B22} \end{bmatrix}$, 其中, σ_{1V} 和 σ_{2V} 分别为 $\mathbf{J}_V$ 的两个奇异值, 且 $\sigma_{1V} \geq \sigma_{2V}$. 当这种机械臂不在奇异位形时, 设输入向量为单位向量, 即

$$\mathbf{v}^T \mathbf{v} = 1. \quad (27)$$

综合(25)~(27)式, 可得以下方程

$$\frac{V_X'^2}{\sigma_{1V}^2} + \frac{V_Y'^2}{\sigma_{2V}^2} = 1, \quad (28)$$

其中, $V_X' = a_{B11}V_X + a_{B21}V_Y$, $V_Y' = a_{B12}V_X + a_{B22}V_Y$.

(28)式表示一个椭圆^[17], 其轴长分别为 σ_{1V} 和

σ_{2V} , 这个椭圆称为线速度传递椭圆, 当输入速度为单位向量时, 输出线速度 $\mathbf{V}_B$ 分布在这个椭圆上, 当 σ_{1V} 和 σ_{2V} 的值相等时, 输出速度分布在一个圆上. 由于速度雅可比矩阵 $\mathbf{J}_B$ 随动平台姿态的变化而变化, 则需要一个定量的指标来评价这种机械臂的速度传递性能. 因此, 本文定义线速度传递性能评价指标 K_V 和角速度传递性能评价指标 K_η :

$$\begin{cases} K_V = \sigma_{1V}, \\ K_\eta = \sigma_\omega, \end{cases} \quad (29)$$

其中, σ_{1V} 为 $\mathbf{J}_V$ 的最大奇异值, σ_ω 为 $\mathbf{J}_\omega$ 的奇异值. 由于 $\mathbf{J}_V$ 和 $\mathbf{J}_\omega$ 随动平台参考点的位姿变化而变化, 所以在机械臂的工作空间内, 各性能评价指标在不同的位姿, 其值也不同. 为此, 定义 K_V 和 K_η 在机械臂工作空间内的平均值, 为该机械臂的全域线速度传递性能评价指标 R_V 和全域角速度传递性能评价指标 R_η :

$$\begin{cases} R(V) = \frac{\int_{S'} K_V dS'}{\int_{S'} dS'}, \\ R(\eta) = \frac{\int_{S'} K_\eta dS'}{\int_{S'} dS'}, \end{cases} \quad (30)$$

其中, S' 为拟人机械臂臂部的工作空间.

同理, 考虑力和力矩为不同的量纲, (23)式可改写成:

$$\begin{cases} \mathbf{F}_B = \mathbf{G}_F \mathbf{f}, \\ \mathbf{M}_B = \mathbf{G}_M \mathbf{f}, \end{cases} \quad (31)$$

其中, $\mathbf{F}_B = (F_X \ F_Y)^T$, $\mathbf{G}_F$ 和 $\mathbf{G}_M$ 分别为力雅可比矩阵 $\mathbf{G}_B$ 的前两行和后一行. 设力输入向量为单位向量时, 定义了力传递性能评价指标 K_{FB} 和力矩传递性能评价指标 K_{MB} :

$$\begin{cases} K_{FB} = \sigma_1, \\ K_{MB} = \sigma_3, \end{cases} \quad (32)$$

其中, σ_1 为 $\mathbf{G}_F$ 的最大奇异值, σ_3 为 $\mathbf{G}_M$ 的奇异值. 考虑 $\mathbf{G}_F$ 和 $\mathbf{G}_M$ 随动平台参考点的位姿变化而变化, 定义 K_{FB} 和 K_{MB} 在机械臂工作空间内的平均值, 为该拟人机械臂臂部的全域力传递性能评价指标 R_{FB} 和全域力矩传递性能评价指标 R_{MB} :

$$\begin{cases} R(FB) = \frac{\int_{S'} K_{FB} dS'}{\int_{S'} dS'}, \\ R(MB) = \frac{\int_{S'} K_{MB} dS'}{\int_{S'} dS'}, \end{cases} \quad (33)$$

其中, S' 为拟人机械臂臂部的工作空间.

设这种机械臂的结构尺寸参数如下: $a = 110 \text{ mm}$, $b = 110 \text{ mm}$, $c = 125 \text{ mm}$, $d = 280 \text{ mm}$, $d' = 145 \text{ mm}$, $h = 80 \text{ mm}$, $e = 80 \text{ mm}$, $m = 80 \text{ mm}$, $L_{10} = 200 \text{ mm}$, $L_{20} = 25 \text{ mm}$, $L_{30} = 55 \text{ mm}$, $-200 \text{ mm} \leq \Delta l_1 \leq 200 \text{ mm}$, $-25 \text{ mm} \leq \Delta l_2 \leq 375 \text{ mm}$, $-55 \text{ mm} \leq \Delta l_3 \leq 55 \text{ mm}$, $\theta = 30^\circ$. 当机械臂不在奇异位姿, 综合 (1)~(29) 和 (32) 式, 借助 MATLAB 软件, 绘制了各性能评价指标在工作空间内的分布情况, 如图 3 和 4 所示.

图 3 和 4 表示当输入速度向量和输入力向量分别

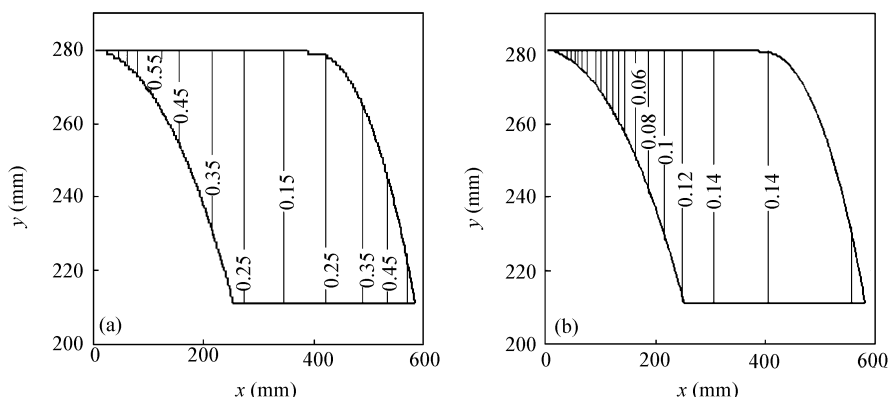


图 3 机械臂的速度传递性能评价指标 K_v 和 K_η 在工作空间内的分布情况

(a) $\alpha = 90^\circ$ 时, K_v (m/s) 的分布; (b) $\alpha = 90^\circ$ 时, K_η (rad/s) 的分布

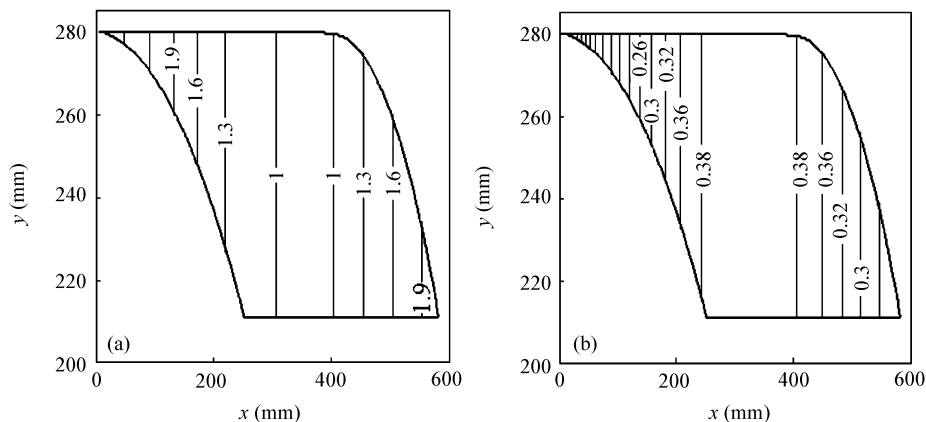


图 4 机械臂的力传递性能评价指标 K_{FB} 和 K_{MB} 在工作空间内的分布情况

(a) $\alpha = 90^\circ$ 时, K_{FB} (N) 的分布; (b) $\alpha = 90^\circ$ 时, K_{MB} (N.m) 的分布

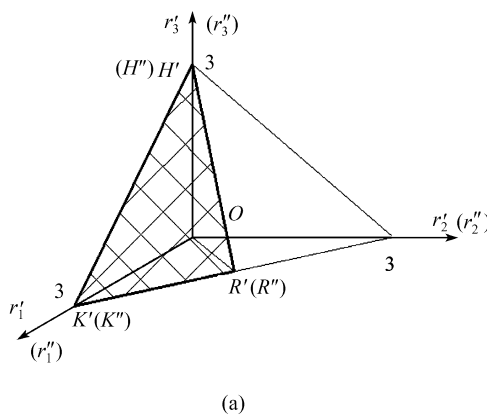
为单位向量时, 线速度传递性能评价指标、角速度传递性能评价指标、力传递性能评价指标和力矩传递性能评价指标分别在定姿态工作空间内的分布情况, 为这种机械臂的电机选择、控制及应用奠定理论基础. 由图 3 和 4 知, 当在机械臂接近工作空间的中间部位时, 线速度传递性能评价指标和力传递性能评价指标的值较小, 越靠近两边, 其值越大. 当在机械臂接近工作空间的中间部位时, 角速度传递性能评价指标和力矩传递性能评价指标的值较大, 越靠近两边, 其值越小.

6 结构参数的选取

6.1 各性能评价指标的性能图谱

空间模型技术把拟人机械臂结构参数无量纲化, 用有限的空间图形表示机构所有可能的尺寸组合, 并在有限的空间图形中研究结构尺寸与其性能之间的关系, 为实现结构尺寸的优化设计提供了新方法^[18]. 这种拟人机械臂臂部主要分为上臂和前臂, 上臂与前臂之间的长度比例关系约为 1.3. 臂部的主要有结构尺寸参数为 a, b, c, θ, d, h 和 e , 其中, a, b, c, θ 为上臂的主要结构尺寸参数, d, h 和 e 为前臂的主要结构尺寸参数, 由这种机械臂的结构尺寸关系知, 如图 1 所示, c 和 θ 之间的关系式为

$$b^2 = a^2 + (L_{10} - L_{20})^2 + c^2 - 2c\sqrt{a^2 + (L_{10} - L_{20})^2} \cdot \cos \left(\arctan \left(\frac{\sqrt{a^2 + (L_{10} - L_{20})^2}}{a} \right) - \theta \right). \quad (34)$$



则上臂的主要结构尺寸参数为 a, b, c . 同时, 上臂与前臂的主要结构尺寸参数为相互独立的两组结构尺寸参数, 为了便于分析, 分别对上臂的主要结构尺寸参数与前臂的主要结构尺寸参数建立空间模型. 为了建立上臂和前臂的空间模型, 分别对上臂和前臂的结构尺寸参数进行无量纲化, 令

$$\begin{cases} L' = \frac{a+b+c}{3}, \\ L'' = \frac{d'+h+k}{3}, \end{cases} \quad (35)$$

从而得到无量纲杆件尺寸: $r'_1 = a/L', r'_2 = c/L', r'_3 = b/L', r''_1 = e/L'', r''_2 = d/L'', r''_3 = h/L''$. 由(35)式可得

$$\begin{cases} r'_1 + r'_2 + r'_3 = 3, \\ r''_1 + r''_2 + r''_3 = 3. \end{cases} \quad (36)$$

考虑到臂部结构与装配的工艺性, 设参数 r'_1, r'_2, r'_3 和 r''_1, r''_2, r''_3 的取值范围满足

$$\begin{cases} r'_1 \leq r'_2 \leq 3, \\ r'_3 \leq 3, \\ r''_1 \leq r''_2 \leq 3, \\ r''_3 \leq 3. \end{cases} \quad (37)$$

分别以 r'_1, r'_2, r'_3 和 r''_1, r''_2, r''_3 为直角坐标轴, 由(37)式分别建立上臂和前臂的几何空间模型 $\Delta H'K'R'$ 和 $\Delta H''K''R''$, 如图 5(a)所示为两个空间模型图, 阴影面积为所有可能的结构参数尺寸的组合, 为了方便起见, 用 $x-y$ 坐标来代替空间模型平面图的无

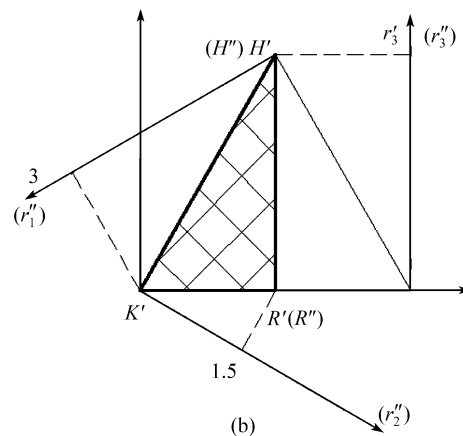


图 5 3-DOF 串并混联拟人机械臂上臂与前臂的几何空间模型

量纲坐标, 其转换关系分别为

$$\begin{cases} x = (2r'_2 + r'_3)/\sqrt{3}, \\ y = r'_3, \end{cases} \quad (38)$$

$$\begin{cases} x = (2r''_2 + r''_3)/\sqrt{3}, \\ y = r''_3, \end{cases} \quad (39)$$

则上臂和前臂的几何空间模型转化到 x - y 平面内, 如图 5(b) 所示. 由 (30), (33) 和 (34)~(39) 式, 借助 MATLAB 软件, 绘制了臂部的全域线速度传递性能评价指标、全域角速度传递性能评价指标、全域力传递性能评价指标、全域力矩传递性能评价指标在臂部几何空间模型内的性能图谱, 如图 6 和 7 所示.

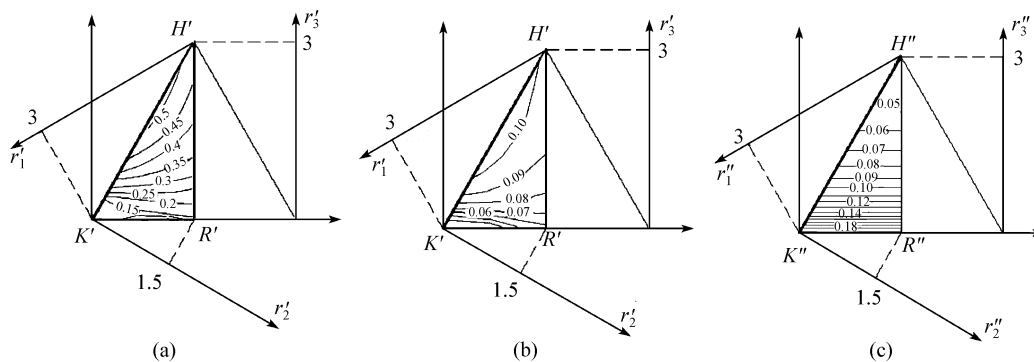


图 6 全域速度传递性能图谱

(a) 上臂全域线速度传递性能图谱(m/s); (b) 上臂全域角速度传递性能图谱(rad/s); (c) 前臂全域角速度传递性能图谱(rad/s)

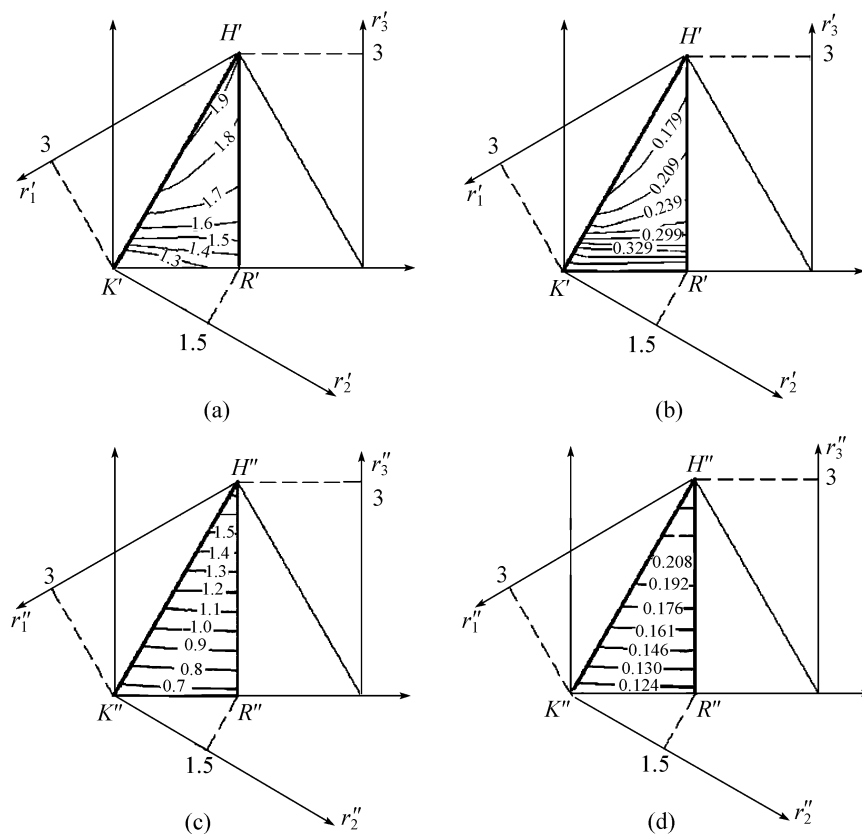


图 7 全域力传递性能图谱

(a) 上臂全域力传递性能图谱(N); (b) 上臂全域力矩传递性能图谱(N·m); (c) 前臂全域力传递性能图谱(N); (d) 前臂全域力矩传递性能图谱(N·m)

6.2 新型 3-DOF 串并混联拟人机械臂的设计

提出了这种机械臂的多目标参数设计方法——基于性能图谱的概率参数设计方法, 该方法是对具有呈均匀分布特性的多个参数进行抽样, 以多个性能评价指标为目标, 按照数学模型计算和统计抽样值的分布规律, 再根据抽样值的分布规律, 选取合理的结构几何参数。

由图 6 和 7 知, 各性能指标 R_V , R_η , R_{FB} , R_{MB} 的最大值和最小值分别为 0.8115 m/s, 0.2135 rad/s, 2.1231 N, 0.4521 N·m 和 0.1052 m/s, 0.0412 rad/s, 0.4988 N, 0.1032 N·m。考虑臂部的结构特点, 设各结构参数的取值范围如下所示: a 的最小值取 80 mm, b 的最小值取 100 mm, c 的最小值取 80 mm, d 的最小值取 210 mm, h 的最小值取 80 mm, e 的最小值取 80 mm, a 的最大值取 200 mm, b 的最大值取 300 mm, c 的最大值取 150 mm, d 的最大值取 450 mm, h 的最大值取 200 mm, e 的最大值取 200 mm。由(34)~(39)式, 臂部各结构参数分别与空间模型无量纲尺寸之间的转化关系为: $26.67 \leq a' \leq 66.67$, $33.33 \leq b' \leq 300.00$, $26.67 \leq c' \leq 50.00$, $70.00 \leq d' \leq 150.00$,

$$26.67 \leq h' \leq 66.67, 26.67 \leq e' \leq 66.67.$$

考虑实际应用背景, 以各性能指标的中间值为设计目标, 即以 $R_V=0.3531$ m/s, $R_\eta=0.0861$ rad/s, $R_{FB}=0.8121$ N, $R_{MB}=0.1744$ N·m 为设计目标, 当 $R_V \geq 0.3531$ m/s, $R_\eta \geq 0.0861$ rad/s, $R_{FB} \geq 0.8121$ N, $R_{MB} \geq 0.1744$ N·m 时, 各性能评价指标较好, 在各设计参数的取值范围内按均匀分布进行抽样, 在各性能评价指标好于设计目标值的情况下, 统计各参数抽样值的分布规律, 绘制了频率直方图, 如图 8 所示, 横坐标分别表示各结构参数 a , b , c , d , h , e 的取值尺寸, 每当一个结构参数取定值时, 其它结构参数在其取值范围内不断的变化, 可得到多组结构参数下的性能评价指标值, 然后, 统计好于设计目标值的结构参数的组数与总结构参数的组数的比值, 即 $f(a)$, $f(b)$, $f(c)$, $f(d)$, $f(h)$ 和 $f(e)$ 分别表示好于设计目标值的概率。

由图 8 知, 臂部机构的主要结构参数分别取 $a=130$, $b=150$, $c=135$, $d=300$, $h=180$ 和 $e=90$ 时, $f(a)$, $f(b)$, $f(c)$, $f(d)$, $f(h)$ 和 $f(e)$ 值的概率较高。考虑其加工与装配工艺性, 给出了一种臂部设计方案。臂部基座将固

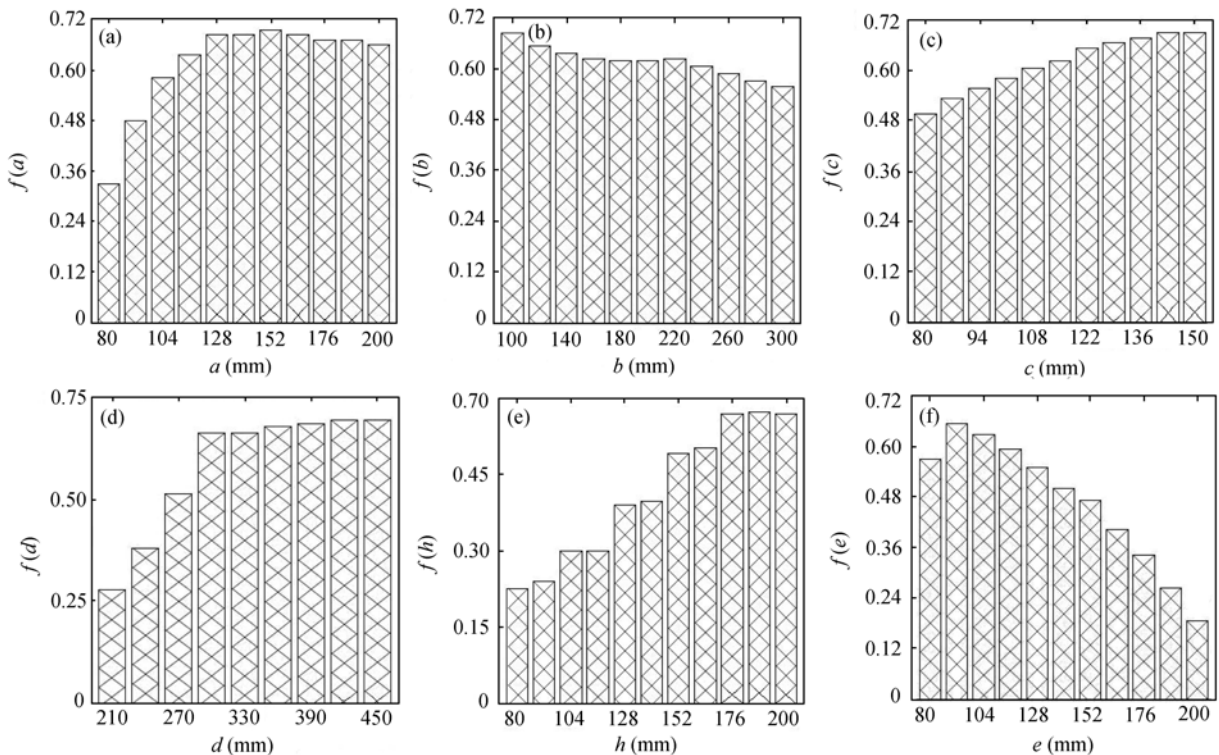


图 8 臂部结构参数设计直方图

连于肩关节动平台上, 前臂安装在上臂的侧面, 这就使抓取物体的重心与肩关节的转动中心处于同一个平面内. 图 9 为这种臂部的设计方案示意图, 依据臂部的设计方案图, 研制出臂部样机, 如图 10 所示.

7 结论

提出了一种新型 3-DOF 混联拟人机械臂及这种机械臂的基于性能图谱的概率参数设计方法, 得出了这种机械臂的位置反解方程、运动学平衡方程和静力学平衡方程, 定义了速度传递性能评价指标、力传递性能评价指标及各全域性能评价指标, 给出了各性

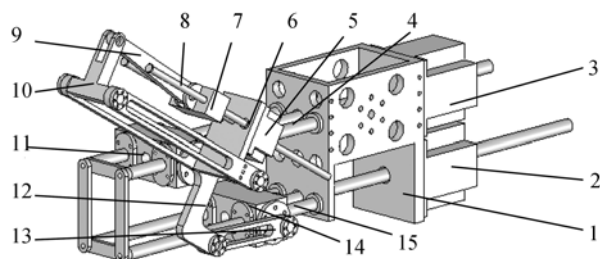


图 9 臂部设计方案

1, 上臂基座; 2, 3 和 5, 直线电机; 4 和 15, 上臂导轨; 11 和 14, 上臂移动滑块; 6, 前臂基座; 7, 移动滑块; 8, 导轨; 9, 腕部推动杆; 10, 腕部连接件; 12, 肘部连接件; 13, 肘部推动杆

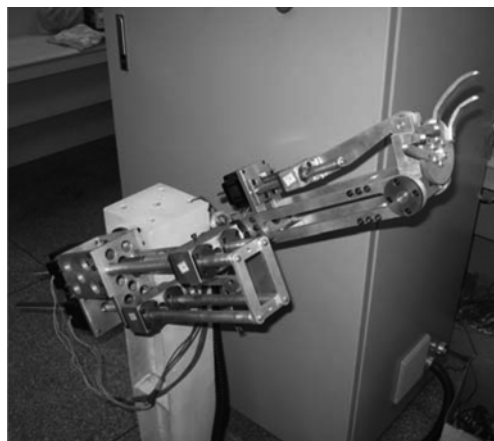


图 10 臂部样机

能评价指标在工作空间内的分布情况及各全域性能图谱, 应用基于性能图谱的概率参数设计方法, 选取了较合理的结构参数, 同时考虑其加工与装配工艺性, 设计了一种 3-DOF 混联拟人机械臂, 为这种机械臂的应用提供了理论基础. 这种机械臂具有运动灵活、承载能力强、惯性小和工艺性好等优点, 适用于拟人机器人领域, 同时, 在精密抛光、航空、造船、汽车等现代工业领域有广阔的应用前景.

参考文献

- 1 赵冬斌, 易建强, 张文增, 等. 拟人机器人 TH1 上肢运动学. 机器人, 2002, 24(6): 502—507
- 2 Morita T, Iwata H, Sugano S. Human symbiotic robot design based on division and unification of functional requirements. IEEE Inter Conference Robotics Automation. San Francisco: IEEE, 2000, 3: 2229—2234
- 3 Ostring M, Gunnarsson S, Norrlof M. Closed-loop identification of an industrial robot containing flexibilities. Control Eng Pract, 2003, 11(3): 291—300 [doi]
- 4 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学. 北京: 高等教育出版社, 2006. 326—385
- 5 Kim D, Chung W K. Kinematic condition analysis of three-DOF pure translational parallel manipulators. ASME J Mech Des, 2003, 125(7): 323—331 [doi]
- 6 赵永杰. 高速轻型并联机械手动态设计理论与方法. 博士学位论文. 天津: 天津大学, 2006. 1—10
- 7 金振林, 李研彪. 四自由度并联机械臂. 中国专利, CN200610012824.6
- 8 刘辛军, 汪劲松, 高峰, 等. 一种串并联结构拟人七自由度冗余手臂的设计. 中国机械工程, 2002, 13(2): 102—104
- 9 Rao N M, Rao K M. Dimensional synthesis of a spatial 3-RPS parallel manipulator for a prescribed range of motion of spherical joints. Mech Mach Theor, 2009, 44(2): 477—486 [doi]
- 10 黄田, 李亚, 李思维, 等. 一种三自由度并联机构几何误差建模、灵敏度分析及装配工艺设计. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2002, 32(5): 628—635
- 11 刘海涛, 梅江平, 赵学满, 等. 一种 2 自由度球面并联机构动力学建模与伺服电机参数预估. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2008, 38(1): 111—124
- 12 苏玉鑫, 段宝岩. 基于遗传算法的 Stewart 型平台结构参数优化设计. 机械设计, 2000, 17(9): 10—12
- 13 李波, 蔡光超. 基于工作空间和遗传算法的虚拟轴机床参数设计. 机械科学与技术, 2000, 19(2): 246—248
- 14 卢强. 基于 Stewart 平台机构的并联机床设计理论及方法研究. 博士学位论文. 南京: 南京理工大学, 2001. 35—52
- 15 Hao F, Merlet J P. Multi-criteria optimal design of parallel manipulators based on interval analysis. Mech Mach Theor, 2005, 40(2): 157—171 [doi]
- 16 金振林, 李研彪, 王跃灵. 一种六自由度串并混联结构机械臂. 中国专利, 200620025075.6
- 17 熊有伦. 机器人学. 北京: 机械工业出版社, 1993. 107—113
- 18 Gao F. The relationships between the shapes of the workspaces and the link lengths of 3-DOF symmetrical parallel manipulators. Mech Mach Theor, 2001, 36(2): 205—220 [doi]