

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.09.001

基于动力学的拟人肩关节动载 协调分配优化研究*

王 林^{1,2}, 李研彪^{1,2*}, 孙 鹏^{1,2}, 罗怡沁^{1,2}, 徐梦茹^{1,2}, 郑 航^{1,2}

(1. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310032; 2. 浙江工业大学 特种装备制造与
先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310032)

摘要: 针对并联机构动载分配优化存在的问题, 对一种拟人肩关节机构的运动学、动力学、机构性能等方面进行了研究, 提出了一种动载协调分配优化方法。首先结合拉格朗日方程和虚功原理建立了动力学模型, 并利用动力学仿真软件验证了动力学模型的正确性; 然后基于动力学模型, 建立了肩关节机构的动力学性能指标和力映射性能指标, 并应用加权求和法将其转换成综合性能指标; 最后采用 Dijkstra 算法得到了性能最优的轨迹, 并综合考虑时间、能耗和力矩波动, 采用遗传算法优化了该机构的广义时间, 从而确定了各个关节的力矩、角位移和角速度。研究表明: 该优化方法能够实现拟人肩关节在时间最短、能耗最小、性能最优的条件下完成运动, 且该优化方法也适用于其他并联机构。

关键词: 拟人肩关节; 动力学模型; 性能最优; 广义时间; 动载协调分配

中图分类号: TH112; TP24

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2018)09-0903-07

Optimized dynamic load distribution based on dynamics for humanoid shoulder joint

WANG Lin^{1,2}, LI Yan-biao^{1,2}, SUN Peng^{1,2}, LUO Yi-qin^{1,2}, XU Meng-ru^{1,2}, ZHENG Hang^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China;

2. Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology of
Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: Aiming at the optimized dynamic load distribution of parallel mechanism, the kinematics, dynamics and mechanism performance of a human shoulder joint mechanism were studied and an optimization method of dynamic load distribution was proposed. Firstly, the dynamic model was established based on the Lagrange equation and the virtual work principle, and the dynamics simulation software was utilized to verify the correctness of the dynamic model. Then, based on the dynamic model, the dynamic performance index and force mapping performance index of shoulder joint mechanism were established, and the weighted sum method was applied to transform them into a comprehensive performance index. Finally, Dijkstra algorithm was used to get the best performance trajectory, and genetic algorithm was used to optimize the generalized time of the mechanism by considering the time, energy consumption and torque fluctuations, so as to obtain the torque, angular displacement and angular velocity of each joint. The results show that the optimization method can make shoulder joint mechanism to achieve the movement under the condition of the shortest time, minimum energy consumption and the best performance. This optimization method is also suitable for other parallel mechanism.

Key words: humanoid shoulder joint; dynamic model; optimal performance; generalized time; dynamic load distribution

收稿日期: 2018-01-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475424)

作者简介: 王 林(1992-), 男, 浙江绍兴人, 硕士研究生, 主要从事机器人机构学方面的研究。E-mail: wang_lin166@163.com

通信联系人: 李研彪, 男, 教授。E-mail: lybrory@zjut.edu.cn

0 引 言

并联机构具有结构紧凑、承载能力强、运动惯性小等优点,故广泛应用于各种拟人关节^[1-6]。由于并联机构的动力学方程是非线性多输入多输出系统,存在多种分配组合来实现运动^[7-10]。在稳定外载荷作用下,合理地优化分配各驱动可以有效降低能耗、减少驱动力。

目前,主要从驱动力矩最优和能耗最优两个角度来进行动载协调分配,通过构建力矩分配模型和能量分配模型来实现优化^[11-15]。其中,分配方式有加权最小二乘法、规划载荷分配系数等。但上述优化方法均属于单目标优化,只考虑驱动力矩或者能耗,且均从瞬时状态考虑,未衡量机构的整个运动过程。因此,优化结果可能存在驱动力矩、速度等方面的波动或突变,这种波动、突变现象不利于机构的稳定运行。同时,只考虑力矩和能耗最小,也可能出现机构的运动时间较长,不利于提高机构的运动效率。

针对上述动载协调分配优化的不足,本文将考虑机构性能、时间、能耗和力矩波动 4 个因素,提出一种动载协调分配优化方法,并基于动力学模型,定义综合性能指标,采用 Dijkstra 算法优化求解性能最优轨迹,最后用遗传算法求解得到最优广义时间。

1 肩关节机构的运动学分析

本文研究的肩关节机构以球面 5R 并联机构为原型,肩关节的模型图如图 1 所示。

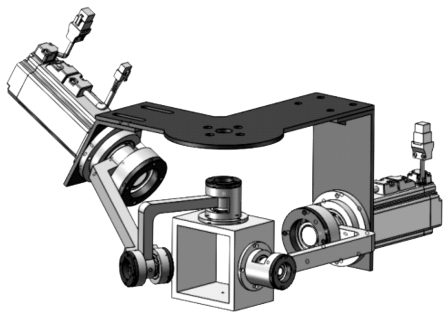


图 1 肩关节的模型图

该机构由定平台、动平台和连接两者的二条支链组成。运动副均为回转副,且各轴线汇交于 O 点。其中,轴线 OB_1 与轴线 OC_1 、轴线 OA_2 与轴线 OC_2 、轴线 OC_1 与轴线 OC_2 相互垂直。

肩关节的机构简图如图 2 所示。

本研究建立定坐标系 $\{O - XYZ\}$ 原点与机构中心 O 重合, Z 轴沿 OC_1 轴线方向, Y 轴沿 OA_2 轴线方向, X

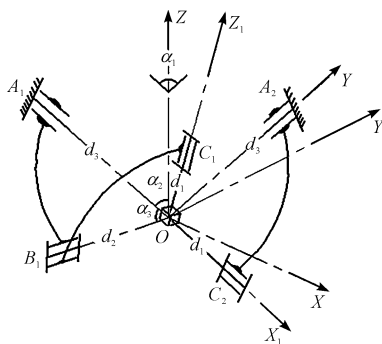


图 2 肩关节的机构简图

α_1 —平面 A_1OZ 和平面 A_2OZ 所在平面的夹角, $\alpha_1 = 90^\circ$;
 α_2 — Z 轴与轴线 OA_1 的夹角, $\alpha_2 = 60^\circ$; α_3 —轴线 OA_1 与轴线 OB_1 的夹角, $\alpha_3 = 70^\circ$; d_1 —回转副 $C_1、C_2$ 与机构中心 O 点的距离, $d_1 = 70 \text{ mm}$; d_2 —回转副 B_1 与机构中心 O 点的距离, $d_2 = 90 \text{ mm}$; d_3 —回转副 $A_1、A_2$ 与机构中心 O 点的距离, $d_3 = 185 \text{ mm}$

轴满足右手螺旋定则。建立动坐标系 $\{O - X_1Y_1Z_1\}$ 原点与机构中心 O 重合, Z_1 轴沿 OC_1 轴线方向, X_1 轴沿 OC_2 轴线方向, Y_1 轴满足右手螺旋定则。当定坐标系和动坐标系重合时,该机构处于初始位姿。

本研究采用 $Z - Y - X$ 型的欧拉角描述动平台的姿态,动平台绕 Z_1 轴旋转角度为 α ,绕 Y_1 轴旋转角度为 β ,绕 X_1 轴旋转角度为 γ ,其中 $\alpha = 0 \text{ rad}$ 。关节驱动器 1 输入角度为 θ_1 ,关节驱动器 2 输入角度为 θ_2 。

本研究根据肩关节机构的几何关系,建立矢量约束方程,化简可得位置反解:

$$\begin{cases} \theta_1 = 2 \arctan \left(\frac{A - \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{B + C} \right) \\ \theta_2 = \beta + \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$$\begin{cases} A = s_\gamma s_{\alpha_3} s_{\alpha_1} - c_\gamma s_\beta s_{\alpha_3} c_{\alpha_1}, \\ B = -c_\gamma s_\beta s_{\alpha_3} c_{\alpha_2} s_{\alpha_1} - s_\gamma s_{\alpha_3} c_{\alpha_2} c_{\alpha_1} - c_\beta c_\gamma s_{\alpha_3} s_{\alpha_2}, \\ C = c_\gamma s_\beta s_{\alpha_3} s_{\alpha_2} s_{\alpha_1} + s_\gamma c_{\alpha_4} s_{\alpha_2} c_{\alpha_1} - c_\beta c_\gamma c_{\alpha_3} c_{\alpha_2}. \end{cases}$$

其中, $c_{\alpha_i} = \cos \alpha_i, s_{\alpha_i} = \sin \alpha_i, (i = 1, 2, 3)$ 。

将式(1)两边对于时间 t 求导,速度反解可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = J \dot{q} \quad (2)$$

式中: \dot{q} —动平台角速度, $\dot{q} = [\dot{\gamma} \ \dot{\beta}]^T$; J —雅克比矩阵。

2 肩关节机构的动力学分析

为了便于建立动力学模型,本研究将肩关节机构的各连杆和动平台均视为刚体,同时忽略各运动副之间的摩擦力和轴类零件的回转运动。考虑惯性力、外力

作用,建立肩关节机构的动力学模型。

2.1 惯性力分析

本研究采用拉格朗日方程计算肩关节机构的惯性力,将系统惯性力转换到广义欧拉坐标 $q = [\gamma \ \beta]^T$ 上。其计算过程如下:

肩关节机构的动能 E 包括 E_1 和 E_2 (其中: E_1 —平台的动能; E_2 —各连杆的动能)。

将欧拉坐标系上的角速度 \dot{q} 转换成定坐标系上的角速度 ω :

$$\omega = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 \\ 0 & 1 \\ -\sin\beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\gamma} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = G\dot{q} \quad (3)$$

I_p 表示过质心坐标系的转动惯量矩阵,即:

$$I_p = RI_H R^T \quad (4)$$

式中: R —动平台欧拉角所对应的旋转矩阵。

综合式(3,4),可得动能 E_1 :

$$E_1 = \frac{1}{2} \omega^T I_p \omega = \frac{1}{2} \dot{q}^T G^T R I_H R^T G \dot{q} \quad (5)$$

动能 E_2 的求解如下:

$$E_2 = \frac{1}{2} (I_1 + I_3) \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2 = \frac{1}{2} \dot{q}^T J^T \begin{bmatrix} I_1 + I_3 & 0 \\ 0 & I_2 \end{bmatrix} J \dot{q} \quad (6)$$

式中: I_1 —连杆 $A_1 B_1$ 的转动惯量; I_2 —连杆 $A_2 C_2$ 的转动惯量; I_3 —连杆 $B_1 C_1$ 的转动惯量。

则肩关节机构的动能为:

$$E = \frac{1}{2} \dot{q}^T I \dot{q} \quad (7)$$

式中: $I = J^T \begin{bmatrix} I_1 + I_3 & 0 \\ 0 & I_2 \end{bmatrix} J + G^T R I_H R^T G$ 。

设定坐标系中 OXY 面为重力零势能面,由于动平台的质心与机构中心 O 点重合,且动平台始终绕质心旋转,动平台势能变化为零。则机构的总势能 V 为:

$$V = g \sum_{i=1}^3 m_i z_i \quad (8)$$

式中: z_i —各连杆质心坐标的 Z 轴值; m_i —各连杆的质量。

建立拉格朗日方程可得:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = F_l \quad (9)$$

式中: $L = E - V$, F_l —惯性力。

将式(7,8)代入上式,化简可得:

$$F_l = D[\ddot{q}] + H[\dot{q}^2] + C\dot{\gamma}\dot{\beta} + N \quad (10)$$

式中: $D = \begin{bmatrix} I_{11} & \frac{I_{12} + I_{21}}{2} \\ \frac{I_{12} + I_{21}}{2} & I_{22} \end{bmatrix}$;

$$H = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} + I_{21} - I_{22} \\ I_{12} + I_{21} - I_{22} & I_{22} \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} I_{s11}^2 \\ I_{s22}^1 \end{bmatrix};$$

$$N = \sum_{i=1}^3 m_i g \frac{\partial z_i}{\partial q};$$

式中: $[\ddot{q}] = (\ddot{\gamma} \ \ddot{\beta})^T$, $[\dot{q}^2] = (\dot{\gamma}^2 \ \dot{\beta}^2)^T$; I_{ij} —矩阵 I 的第 i 行第 j 列元素; I_{ij}^1 — I_{ij} 关于 q_1 的偏导数; I_{ij}^2 — I_{ij} 关于 q_2 的偏导数。

2.2 外力分析

设作用在动平台上的外力为 F , 均可简化为过旋转中心 O 点的力矩 M_s :

$$M_s = F \times r \quad (11)$$

式中: r —外力 F 作用点到旋转中心 O 点的矢量。

2.3 动力学模型建立

综合式(10,11),根据虚功原理,将惯性力 F_l 和外力 M_s 映射到相应关节上的驱动力矩:

$$\tau = J^T (D[\ddot{q}] + H[\dot{q}^2] + C[\dot{q} \ \dot{q}] + N + M_s) \quad (12)$$

式中: J^T —力雅克比矩阵。

根据式(12)建立的动力学模型可知,肩关节机构驱动力与惯性力和外力两者有关。其中,惯性力大小受速度、加速度和姿态影响,而外力仅与姿态有关。

2.4 动力学仿真验证

给出肩关节机构的结构参数如表1所示。

表1 肩关节机构结构参数

名称	符号	数值
质量/kg	m_1	0.609
	m_2	0.599
	m_3	0.302
转动惯量/($10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)	I_1	0.72
	I_2	0.513
	I_3	0.385
	I_H	diag[2.7 4 2.7]

外力 $F = [1 \ 1] \text{ N} \cdot \text{m}$, 并给出一组动平台的运动方程:

$$\begin{cases} \gamma(t) = 0.2t \\ \beta(t) = 0.2t \end{cases} \quad t \in [0 \ 3.5] \quad (13)$$

基于上述动力学模型,将肩关节机构的结构参数和运动方程代入式(12)中,并利用 Matlab 软件计算得到肩关节机构的关节驱动力矩。

为了验证动力学模型的正确性,本研究利用 ADAMS 动力学仿真软件对肩关节机构进行动力学仿

真,且添加各类约束条件和外力,使得仿真与理论计算的环境保持一致。笔者将仿真得到的驱动力矩与理论计算值进行比较,如图 3 所示。

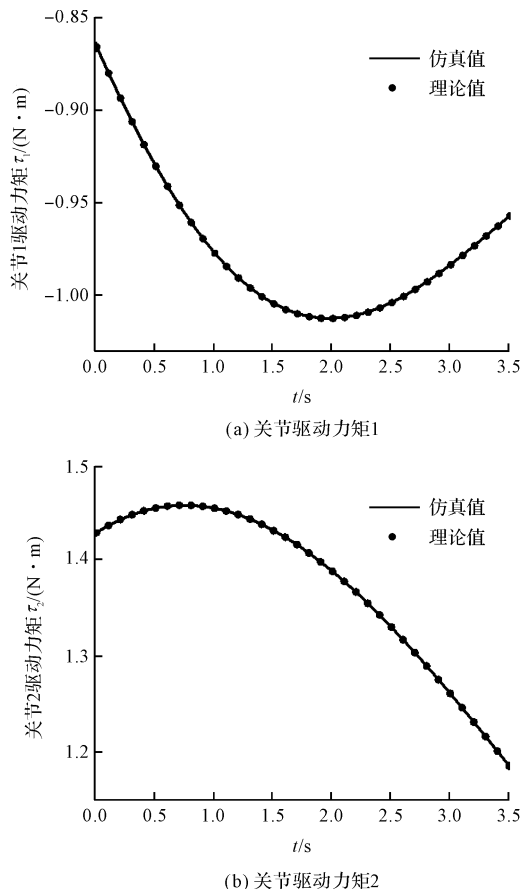


图 3 关节驱动力矩理论值与仿真值

通过对比可得:驱动力矩的理论值与仿真值两者基本相等,故验证了动力学模型的正确性。

3 肩关节机构的性能分析

3.1 动力学性能评价指标

肩关节机构不同的运动状态会影响驱动力的大小,其中,速度、加速度会直接影响机构惯性力的大小。而肩关节机构一般作低速运动,速度较小,故忽略速度对惯性力的影响,只考虑加速度对惯性力的影响,因此式(10)可简化为:

$$F_i = D\ddot{q} \quad (14)$$

设加速度 \ddot{q} 为单位向量,建立拉格朗日函数^[16]:

$$L = \ddot{q}^T D^T D \ddot{q} - \lambda(\ddot{q}^T \ddot{q} - 1) \quad (15)$$

将式(15)求导,化简可得:

$$D^T D \ddot{q} = \lambda \ddot{q} \quad (16)$$

式中: λ —矩阵 $D^T D$ 的特征值。

由式(16)可知:在工作空间 W 内, λ 随机构姿态变化而变化,且 λ 值越小表明由加速度引起的惯性力

越小,因此将 k_m 作为动力学传递性能评价指标:

$$k_m = \frac{1}{\sqrt{\lambda_{\max}}} \quad (17)$$

k_m 数值越大,表示肩关节机构的动力学传递性能越好,则 k_m 在工作空间 W 的全域值为:

$$k_1 = \frac{\int_W k_m dW}{\int_W dW} \quad (18)$$

且肩关节机构存在多个输入力矩,其差值越大则动力学传递性能越差,因此将 k_{mc} 作为动力学传递均衡性能评价指标:

$$k_{mc} = \sqrt{\frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}}} \quad (0 < k_{mc} < 1) \quad (19)$$

k_{mc} 数值越接近于 1,表示肩关节机构的输入力矩偏差越小,其动力学传递均衡性能越好,则 k_{mc} 在工作空间 W 的全域值为:

$$k_2 = \frac{\int_W k_{mc} dW}{\int_W dW} \quad (20)$$

3.2 力映射性能评价指标

由动力学模型可知,惯性力和外力通过虚功原理,将其映射为关节的驱动力矩。其中,力雅克比矩阵 J^T 代表该映射关系,其值受机构姿态影响,即:

$$\tau = J^T \tau_F \quad (21)$$

式中: $\tau_F = D[\ddot{q}] + H[\dot{q}^2] + C[\dot{q}, \dot{q}] + N + M_s$ 。

由于在工作空间 W 内, $rank(J) = 2$,力雅克比矩阵 J^T 可以奇异值分解,存在正交阵 $U \in R^{2 \times 2}$ 和 $V \in R^{2 \times 2}$,使:

$$J^T = U \Lambda V \quad (22)$$

式中: $\Lambda = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{bmatrix}$; σ_1, σ_2 —力雅克比矩阵 J^T 的两个奇异值,且 $\sigma_1 > \sigma_2$ 。

设欧拉坐标系上的广义力 τ_F 为单位向量可得:

$$\tau^T U (\Lambda \Lambda^T)^{-1} U^T \tau = 1 \quad (23)$$

当广义力 τ_F 为单位矩阵时,关节驱动力矩分布在椭圆上; σ_i 值越大,表明广义力转换到关节驱动力矩的效率越高,因此将 k_j 作为力传递性能评价指标^[17-20]:

$$k_j = \sigma_2 \quad (24)$$

k_j 数值越大,表示肩关节机构的力传递性能越好。则 k_j 在工作空间 W 的全域值为:

$$k_3 = \frac{\int_W k_j dW}{\int_W dW} \quad (25)$$

当 $\sigma_1 = \sigma_2$ 时,关节驱动力矩分布在圆上,关节驱动力矩之间的差值最小,因此将 k_{Jc} 作为力传递均衡性能评价指标:

$$k_{Jc} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (0 < k_{Jc} < 1) \quad (26)$$

k_{Jc} 数值越接近于 1,表示肩关节机构的力传递均衡性能越好,关节驱动力矩之间的偏差越小。则 k_{Jc} 在工作空间 W 的全域值为:

$$k_4 = \frac{\int_W k_{Jc} dW}{\int_W dW} \quad (27)$$

4 肩关节机构的动载协调分配优化

在稳定外载荷作用下,要求肩关节机构从起点运动到终点,但由于其运动轨迹和运动状况的不确定性,存在多组运动方式。本文先依据性能指标得到性能最优的轨迹,再通过遗传算法优化求解最优广义时间,使得肩关节机构在能耗最低、时间最快、性能最好的情况下完成运动。

4.1 性能最优路径规划

为综合考虑动力学性能和力映射性能因素,笔者采用加权求和法,将上述多性能指标转换成单性能指标。

通过式(18,20,25,27),分别求解出各性能指标在全域范围内最大值 k_{imax} 和最小值 k_{imin} ,则不同姿态下的各性能指标可表示为:

$$K_i = \frac{k_i - k_{imin}}{k_{imax} - k_{imin}} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (28)$$

式中: K_i —性能指标在全域变换范围内的比值, K_i 值越大,机构性能越好。

综合考虑上述 4 个性能指标的影响,构造综合性能指标函数:

$$K_{min} = \sum_{i=1}^4 \frac{\delta_i}{K_i} \quad (29)$$

式中: δ_i —目标比重系数。

δ_i 值越大表示该衡量指标越重要。本文 δ_i 均等于 1,将各性能指标视为相同比重,且 K_{min} 值越小,机构的综合性能越好。

给定机构起点 $q_0 = [0 \ 0]^T$, 终点 $q_t = [-1.5 \ 1]^T$, 在起点至终点区域,均匀采样 n 个控制点(每个控制点代表一种运动姿态,即动平台运动经过的点),且每个控制点对应一个综合性能指标值。从起点运动到终点,建立路径规则。从起点出发,可以到达相邻 3 个控制点(控制点 1、控制点 2 和控制点 4);之后,再从某一个控

制点出发,可以达到下一个相邻的 3 个控制点;以此类推,最终达到终点。

路径规则如图 4 所示。

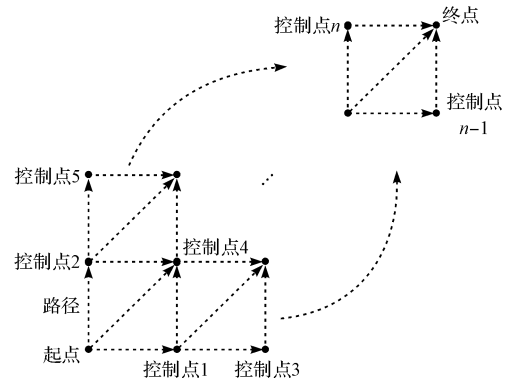


图 4 路径规则

采用上述方式,可以得到数个由控制点组成的路径。根据式(29),笔者将一条路径上所有控制点的综合性能指标值求和,代表该条路径的综合性能。采用 Dijkstra 算法优化求解出从起点到终点的最优路径,满足路径最短、综合性能最好。

性能最优路径如图 5 所示。

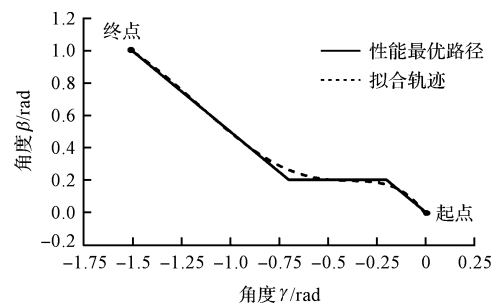


图 5 性能最优路径

由于规划出的路径为折线,无法实现光滑轨迹运动,基于上述性能最优路径的结果,本研究采用 B 样条曲线拟合方法构造动平台运动轨迹,并得到动平台运动方程:

$$\begin{cases} \gamma = -0.1u \\ \beta = 0.174u - 0.055u^2 + 0.007u^3 - 0.0004u^4 \end{cases} \quad (30)$$

式中: u —路径中第 u 个控制点, $u \in [0, 15]$ 。

4.2 广义时间优化

根据上述建立的性能最优轨迹可知,动平台的运动轨迹与参数 u 有关。通过建立参数 u 与时间 t 的函数,可以进一步确定机构的速度特性。因此,建立参数 u 关于时间 t 的函数:

$$u(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 \quad (31)$$

式中： a_i —时间函数的系数。

由于机构需要满足起点和终点的位置约束条件，且在起点和终点处速度为零，故建立时间约束方程：

$$\begin{cases} u(0) = u_0 \\ u(T) = u_1 \\ \dot{u}(0) = \dot{u}(T) = 0 \end{cases} \quad (32)$$

式中： $u_0 = 0, u_1 = 15; T$ —机构完成运动的时间。

同时，考虑肩关节机构的关节驱动器输出速度和力矩存在最大值，故建立关节输出约束方程：

$$\begin{cases} \dot{q}_i \leq \dot{q}_{i\max} \\ \tau_i \leq \tau_{i\max} \end{cases} \quad (i = 1, 2) \quad (33)$$

为实现肩关节机构在最短时间内完成运动，建立时间优化目标函数：

$$T = \int_0^T dt \quad (34)$$

机构在运动过程中，可能存在时间很短而能耗很大或者关节力矩变化很大的情况，属于不理想的工作状况。因此，需要考虑能耗和关节力矩因素，故建立能耗优化目标和力矩波动优化目标：

$$\bar{P} = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{1}{T} \int_0^T |\tau_i(t) \cdot v_i(t)| dt \right) \quad (35)$$

式中： \bar{P} —能耗优化目标，为机构关节运动的平均功率，衡量机构消耗的能量。

$$F_\tau = \sum_{i=1}^2 \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\tau_i(t) - \bar{\tau}_i)^2 dt} \quad (36)$$

式中： F_τ —力矩波动优化目标，为机构关节运动的力矩变化率，衡量关节力矩的波动情况。

综合考虑时间、能耗和力矩波动，建立广义时间优化目标函数：

$$\begin{aligned} f = T + \bar{P} + F_\tau = & \int_0^T dt + \sum_{i=1}^2 \left(\frac{1}{T} \int_0^T |\tau_i(t) \cdot v_i(t)| dt \right) + \\ & \sum_{i=1}^2 \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\tau_i(t) - \bar{\tau}_i)^2 dt} \end{aligned} \quad (37)$$

则优化过程如下：首先根据式(30,31)计算出动平台的角度和角速度；其次通过式(1,2)得到关节驱动角度和角速度；然后根据式(13)动力学模型计算出关节驱动力矩；通过式(37)得到广义时间优化目标函数；采用遗传算法对时间函数式(31)进行优化求解，得到最优的广义时间。设定种群个数为100，基因数为80，迭代代数为110，变异概率为0.1，交叉概率为0.5。

广义时间优化结果如图6所示。

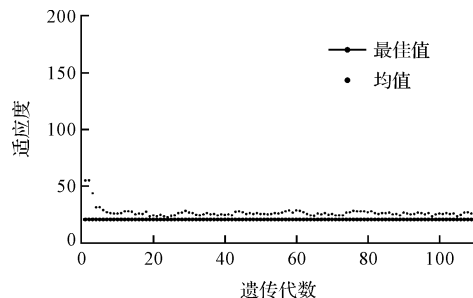


图6 广义时间优化结果

由图6可知：经过数代运算后收敛，得到优化结果为：时间 $T = 2.03 \text{ s}$ ；时间函数系数 $a_0 = 0, a_1 = 0, a_2 = 8.85, a_3 = -1.58, a_4 = -0.48$ 。将优化结果代入式(31)得到时间函数，并根据式(1,2,12,30)，通过Matlab软件计算，得到优化后关节驱动力矩、关节角速度。

关节驱动力矩如图7所示。

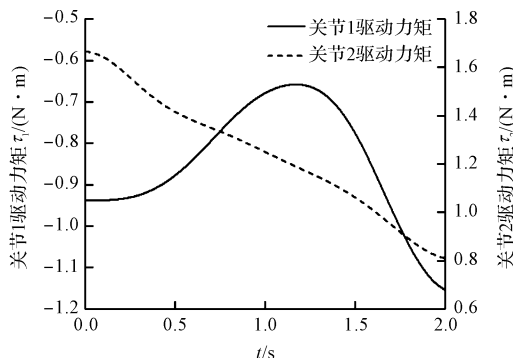


图7 关节驱动力矩

关节角速度如图8所示。

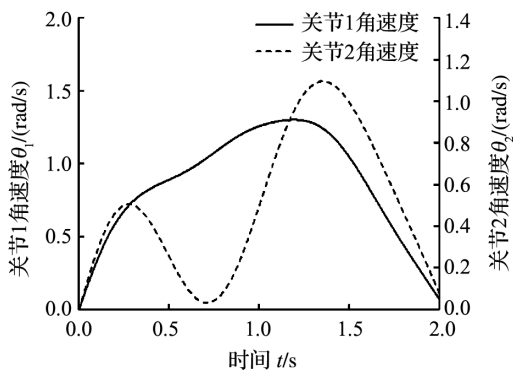


图8 关节角速度

由图7和图8可知：关节驱动力矩和关节角速度均为光滑曲线，不存在突变现象，说明优化后，关节驱动器能够实现平稳运行。在起点和终点时刻，关节输出角速度均接近于零，符合实际运动状况。两个关节的驱动力矩和角速度值均处于同一数量级，数值大小接近，说明该优化方法能够把机构惯性力和外力合理地分配到两个关节上，说明采用上述动载协调分配优化方法，肩关节机构能够在时间最短、能耗最低、性能

最好的条件下完成运动。

5 结束语

本研究结合拉格朗日方程和虚功原理,建立了肩关节机构的动力学模型,并用动力学仿真软件验证了上述动力学模型的正确性;然后基于动力学模型,构建了动力学性能指标和力映射性能指标,采用加权求和法将各性能指标转换为综合性能指标,并利用 Dijkstra 算法求解得到综合性能最优的轨迹;最后基于性能最优轨迹,考虑时间、能耗和力矩波动 3 个因素,建立广义时间优化目标函数,采用遗传算法优化时间函数,得到最优的广义时间。

通过上述动载协调分配优化,使得肩关节机构能够在时间最短、能耗最小、性能最好的条件下完成运动。

参考文献 (References):

- [1] LI Y B, JIN Z L, JI S M. Design of mechanical coxa joints based on three-degree-of-freedom spherical parallel manipulators[J]. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 2013,27(1):103-112.
- [2] 蔡鹤翱. 机器人将是 21 世纪技术发展的热点[J]. **中国机械工程**,2000,11(1):58-60.
- [3] HOU Y L, HU X Z, ZENG D X, et al. Biomimetic shoulder complex based on 3-PSS/S spherical parallel mechanism [J]. **Chinese Mechanical Engineering Society**, 2015,28(1):29-37.
- [4] 张金柱,金振林,张 哲. 六足机器人整机运动学分析及构型选择[J]. **光学精密工程**,2017,25(7):1832-1842.
- [5] 黄 真,赵永生,赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [6] 李研彪,金振林,计时鸣,等. 一种并联结构拟人肩关节的误差分析[J]. **应用基础与工程科学学报**,2009,17(3):446-451.
- [7] LU Y, YE N J, WANG P. Dynamics analysis of 3-leg 6-DOF parallel manipulator with multi different- DOF finger mechanisms [J]. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 2016,30(3):1333-1342.
- [8] WANG H B, SANG L F, HU X, et al. Kinematics and dynamics analysis of a quadruped walking robot with parallel leg mechanism[J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2013,26(5):881-891.
- [9] XIN G Y, DENG H, ZHONG G L. Closed-form dynamics of a 3-DOF spatial parallel manipulator by combining the Lagrangian formulation with the virtual work principle [J]. **Nonlinear Dynamics**, 2016,86(2):1329-1347.
- [10] HUANG T, LIU S, MEI J, et al. Optimal design of a 2-DOF pick-and-place parallel robot using dynamic performance indices and angular constraints[J]. **Mechanism and Machine Theory**, 2013,70(6):246-253.
- [11] 赵永生,任敬轶,赵铁石,等. 多机械手协同系统的动载协调数值仿真研究[J]. **光学精密工程**,1999,7(3):64-70.
- [12] 徐桂玲. 助老助残四足并联腿步行机器人机构设计与分析[D]. 秦皇岛:燕山大学机械工程学院,2010.
- [13] 刘迎春,余跃庆,张绪平. 冗余度柔性协调操作机器人的动力规划[J]. **中国机械工程**,2005,16(10):847-851.
- [14] 张成新,余跃庆. 柔性机器人臂协调操作的协调性[J]. **中国机械工程**,2003,14(2):57-60.
- [15] 王沫楠,孙立宁,孟庆鑫. 两栖仿生机器蟹动力学建模及能量最优分配[J]. **哈尔滨工业大学学报**,2006,38(2):173-176.
- [16] 赵星宇,赵铁石,云 轩,等. 3-P(4S)并联机构分析与多目标性能优化[J]. **农业机械学报**,2017,48(10):390-400.
- [17] 张 亮. 仿人机器人肩肘腕关节及臂的设计[D]. 秦皇岛:燕山大学机械工程学院,2016.
- [18] 司艳伟,陈洪立. 六自由度果蔬采摘机器人关节空间轨迹规划[J]. **轻工机械**,2017,35(4):8-12.
- [19] 阎思达,陈 雁,陈文卓,等. 六自由度加油机器人运动特征分析[J]. **液压气动与密封**,2017(1):26-29.
- [20] 李研彪,金振林. 球面三自由度机器人的力矩输入均衡性能分析与设计[J]. **光学精密工程**,2007,15(5):730-734.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

王 林,李研彪,孙 鹏,等. 基于动力学的拟人肩关节动载协调分配优化研究[J]. **机电工程**,2018,35(9):903-909.

WANG Lin, LI Yan-biao, SUN Peng, et al. Optimized dynamic load distribution based on dynamics for humanoid shoulder joint[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2018,35(9):903-909.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn