

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2021.06.008

基于 ADAMS 的 6PSS 并联机构多目标优化研究^{*}

郑江涛^{1,2}, 田大鹏^{1,2*}, 高志良¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了进一步提高 6PSS 并联机构的承载能力和扩大其运动范围, 提出了一种基于 ADAMS 的并联机构多目标优化方法。首先, 采用参数化关键点的方法建立了 6PSS 并联机构的参数化模型; 然后, 以并联机构的移动副驱动力最大值和动平台质心转角最小值为目标函数, 在满足约束的条件下, 研究了不同的设计变量与机构的目标函数之间的关系; 最后, 采用线性加权法和, 实现了对 6PSS 并联机构的承载能力和运动范围的多目标优化, 并且采用蒙特卡罗法对并联机构工作空间进行了量化分析。研究结果表明: 在优化后, 并联机构的工作空间增大 9.8%, 移动副驱动力最大值的均值比初始值减小 6.5%, 即 6PSS 并联机构承载能力得到了提升, 运动范围也得到了扩大, 从而证明所用的优化方法的有效性, 可为后续并联机构的设计和研究奠定基础。

关键词: 并联机构; ADAMS; 多目标优化; 蒙特卡罗法

中图分类号: TH112

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2021)06-0712-08

Multi-objective optimization of 6PSS parallel mechanism based on ADAMS

ZHENG Jiang-tao^{1,2}, TIAN Da-peng^{1,2}, GAO Zhi-liang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science,

Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to further improve the bearing capacity and motion range of 6PSS parallel mechanism, a multi-objective optimization method based on ADAMS was proposed. Firstly, the parametric model of 6PSS parallel mechanism was established by using the method of parametric key points. Then, taking the maximum driving force of the parallel mechanism and the minimum value of the center of mass angle of the moving platform as the objective functions, the relationship between the different design variables and the objective function of the mechanism was studied under the condition of satisfying the constraints. Finally, the linear weighted sum method was used to realize the multi-objective optimization of the bearing capacity and motion range of the 6PSS parallel mechanism, and its workspace was quantitatively analyzed by Monte Carlo method. The results show that the workspace of the optimized mechanism is increased by 9.8%, and the average value of the maximum driving force of the moving pair is reduced by 6.5% comparing with the initial value, which improves the bearing capacity and motion range of the 6PSS parallel mechanism, proves the effectiveness of the optimization method, and lays a foundation for the design and research of the subsequent parallel mechanism.

Key words: parallel mechanism; ADAMS; multi-objective optimization; Monte Carlo method

收稿日期: 2020-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61673365); 中国科学院青年创新促进会资助项目(2017257); 白求恩医学工程基金资助项目(BQEGCZX2019048)

作者简介: 郑江涛(1997-), 男, 山西忻州人, 硕士研究生, 主要从事并联机构的优化设计方面的研究。E-mail: 2603493553@qq.com

通信联系人: 田大鹏, 男, 研究员, 博士生导师。E-mail: d.tian@ciomp.ac.cn

0 引言

并联机构具有结构紧凑、刚度高、动态响应快等优点,在先进制造装备、生物医学装置、航空航天运动模拟等领域的应用已取得了巨大的成功^[1-3]。然而,并联机构的性能与它的结构参数密切相关,当其结构参数选择不合适时,并联机构的运动性能可能会很差。

因此,许多研究者一直致力于并联机构性能的优化研究。最常用的优化方法大致可以分为两类:(1)基于目标函数的优化方法;(2)基于性能图谱的优化方法。

目标函数法的原理是:首先,根据优化指标建立目标函数和约束条件;然后,使用算法搜索优化结果。文献[4]采用了穷尽搜索最小化算法,将并联机构可操作性和工作空间大小的度量结合起来,并通过运动学优化过程得出了可操作性与空间利用率之间的最佳折衷设计。文献[5]在考虑了关节限制和连杆干涉的约束条件下,采用随机搜索算法对Delta机器人和Gough-Stewart平台进行了优化,找到了使有效规则工作空间最大化的机械手几何结构。文献[6]以运动学雅可比矩阵的条件数和可操作性作为目标函数,采用了多目标进化算法NSGA-II对六自由度运动模拟平台进行了优化。文献[7]以雅可比矩阵的性能指标条件数、刚度、速度极值作为目标函数,采用了罚函数法处理约束条件,提出了性能分类的方式作为多目标优化的准则,最后利用遗传算法进行了参数优化。

该方法多用于参数变量较多,且目标函数过于复杂的情况。

基于性能图谱的优化设计方法的关键是:在一个有限的区域内表达出机构的性能与尺寸的关系,进而得到机构的性能图谱。文献[8]利用这种方法对3PRS机构和二自由度球面5R并联机构进行了优化,使其在工作空间内有较好的运动和力传递性能。文献[9]建立了3-RUU微动并联机构的尺寸型模型,并根据尺寸型模型及定义的性能指标绘制了反映机构性能与尺寸参数关系的性能图谱。文献[10]采用了综合性能图谱法结合主成分分析法,对5-PSS/UPU并联机构进行了多目标优化。

该方法可以在一个有限的设计空间内直观地表达出设计指标和相关设计参数的关系,但存在的最大问题是:当需要优化的特征参数较多时,不能在一个有限的空间中完整地表示出其性能图谱。

以上两种优化方式,都存在比较繁琐、复杂的特点。为找到一种更容易、更快速的优化方法,研究人员

利用ADAMS、Isight等软件集成的先进优化算法。该方法实际上也是一种基于目标函数的优化方法,但其操作方便,更为便捷和直观。如文献[11]基于ADAMS对空间光学遥感器6自由度定位器的结构进行了单目标的优化设计。文献[12]采用了虚拟样机技术,对6SPS并联机构的驱动力进行了单目标的优化。

本文采用基于ADAMS的多目标优化设计方法,研究设计变量的变化对目标函数的影响,而且利用ADAMS集成的优化算法,对6PSS并联机构的承载能力和运动范围进行优化,为6PSS并联机构的结构设计和进一步的研究奠定基础。

1 参数化模型的建立

1.1 设计变量创建

6PSS并联机构的构型如图1所示。

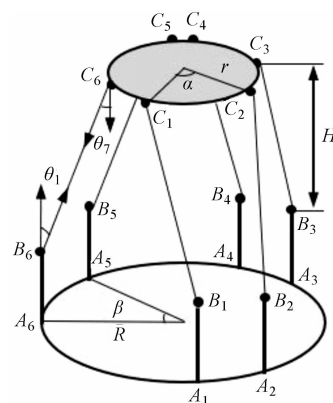


图1 6PSS并联机构示意图

由图1可知:就此机构而言,需要进行优化设计的结构参数有:动平台球铰几何中心分布的半径 r 、定平台球铰几何中心分布的半径 R 、动平台球铰长边对应的圆心角 α 、定平台球铰短边对应的圆心角 β 、初始高度 H (动平台球铰中心点所在的平面和定平台球铰中心点所在的平面之间的距离)。

因此,6PSS并联机构的设计变量写成矢量的形式为:

$$x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)^T = (r, R, \alpha, \beta, H)^T$$

其中,各设计变量之间相互独立,各分量的物理意义如表1所示。

表1 设计变量的物理意义及单位

变量	符号	物理意义	单位
x_1	r	动平台球铰几何中心分布的半径	mm
x_2	R	定平台球铰几何中心分布的半径	mm
x_3	α	动平台球铰长边对应的圆心角	°
x_4	β	定平台球铰短边对应的圆心角	°
x_5	H	初始高度	mm

根据 6PSS 并联机构的实际操作空间、机械结构的约束要求,以及避免发生奇异性的要求,定平台和动平台所对应的球铰分布不能相似,所以各个设计变量的取值范围为:

$$\begin{cases} 35 \leq r \leq 50 \\ 60 \leq R \leq 85 \\ 35^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ \\ 20^\circ \leq \beta \leq 35^\circ \\ 80 \leq H \leq 100 \end{cases}$$

1.2 参数化模型创建

本文采用参数化关键点坐标的方法,建立 6PSS 并联机构的参数化模型^[13]。参数化点的坐标如表 2 所示。

表 2 参数化点的坐标

参数化点	X 坐标 /mm	Y 坐标 /mm	Z 坐标 /mm
A1	$R^* \cos(\alpha/2)$	$-R^* \sin(\alpha/2)$	0
A2	$R^* \cos(\alpha/2)$	$R^* \sin(\alpha/2)$	0
A3	$R^* \cos(120^\circ - \alpha/2)$	$R^* \sin(120^\circ - \alpha/2)$	0
A4	$R^* \cos(120^\circ + \alpha/2)$	$R^* \sin(120^\circ + \alpha/2)$	0
A5	$R^* \cos(120^\circ + \alpha/2)$	$-R^* \sin(120^\circ + \alpha/2)$	0
A6	$R^* \cos(120^\circ - \alpha/2)$	$-R^* \sin(120^\circ - \alpha/2)$	0
B1	$R^* \cos(\alpha/2)$	$-R^* \sin(\alpha/2)$	65
B2	$R^* \cos(\alpha/2)$	$R^* \sin(\alpha/2)$	65
B3	$R^* \cos(120^\circ - \alpha/2)$	$R^* \sin(120^\circ - \alpha/2)$	65
B4	$R^* \cos(120^\circ + \alpha/2)$	$R^* \sin(120^\circ - \alpha/2)$	65
B5	$R^* \cos(120^\circ + \alpha/2)$	$-R^* \sin(120^\circ + \alpha/2)$	65
B6	$R^* \cos(120^\circ - \alpha/2)$	$-R^* \sin(120^\circ - \alpha/2)$	65
C1	$r^* \cos(\beta/2)$	$-r^* \sin(\beta/2)$	$H + 65$
C2	$r^* \cos(\beta/2)$	$r^* \sin(\beta/2)$	$H + 65$
C3	$r^* \cos(120^\circ - \beta/2)$	$r^* \sin(120^\circ - \beta/2)$	$H + 65$
C4	$r^* \cos(120^\circ + \beta/2)$	$r^* \sin(120^\circ + \beta/2)$	$H + 65$
C5	$r^* \cos(120^\circ + \beta/2)$	$-r^* \sin(120^\circ + \beta/2)$	$H + 65$
C6	$r^* \cos(120^\circ - \beta/2)$	$-r^* \sin(120^\circ - \beta/2)$	$H + 65$

创建完参数化点后,需要再根据图 1 创建相应的构件,然后添加相应的运动副。

为了不失一般性,笔者首先在动平台质心处加一点驱动,六自由度方向同时加载正弦位移/转角驱动函数,沿 x, y, z 方向的位移函数设置为 $2\sin(2\pi t)$,绕 x, y, z 轴旋转的驱动函数为 $2d\sin(2\pi t)$;利用 ADAMS 模型的运动学逆解仿真结果得到移动副 1~6 对应的样条函数,即 $SPLINE_1$ ~ $SPLINE_6$;然后去除 ADAMS 模型的动平台质心的点驱动,在每个移动副关节处加上平移驱动 $MOTION_1$ ~ $MOTION_6$,设定驱动函数为 $AKISPL(time, 0, SPLINE_1, 0), \dots, AKISPL(time, 0, SPLINE_6, 0)$;最后在动平台的质心处添加外部载荷,

力的大小 $F = 10 \text{ N}$,方向竖直向下,力矩大小 $T = 10 \text{ N} \cdot \text{m}$,方向竖直向下。

完成以上工作后,所创建的 6PSS 并联机构的参数化模型如图 2 所示。

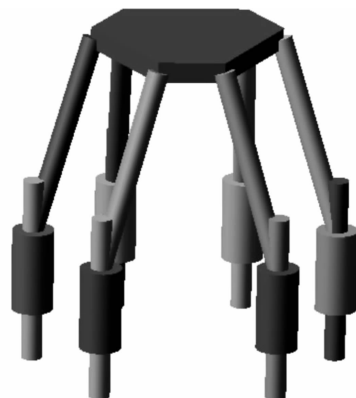


图 2 6PSS 并联机构的参数模型

1.3 目标函数创建

对于 6PSS 并联机构而言,其要有较高的承载能力和较大的运动范围,将其转化为数学模型,即是在动平台承受相同的负载,且 6 个驱动副的运动规律相同时,6 个驱动副受力的最大值最小,动平台质心的动坐标系相对于定坐标系 x, y, z 轴的 3 个转动角的最小投影角最大。

在 ADAMS 中创建两个测量函数:

$$\begin{aligned} Mea_1 = & \max(\max(\max(Force_1, Force_2), \\ & \max(Force_3, Force_4)), \max(Force_5, Force_6)) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Mea_2 = & \min(\min(ABS(Alpha), ABS(Beta)), \\ & ABS(Gamma)) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: Mea_1 —每一个运动周期内 6 个移动副驱动力的最大值; Mea_2 —每一个运动周期内动平台的质心绕定坐标系 x, y, z 轴的 3 个转动角的最小值; $Force_i$ ($i = 1, 2, \dots, 6$)—6 个移动副驱动力的测量函数; $Alpha, Beta, Gamma$ —动坐标系相对于定坐标系的 x, y, z 轴的 3 个转动角的测量函数。

在一个周期内,6 个移动副的驱动力和动平台质心的转角随时间成正的正弦规律运动,因此,分别取一个周期内的均值作为目标函数。因为要求并联机构有较高的承载能力和较大的运动范围,即并联机构驱动力最小和转动角最大,此处选择目标函数分别为: $\min(f_1(x))$ 和 $\max(f_2(x))$;其中, $f_1(x), f_2(x)$ 可以表示为:

$$\begin{aligned} f_1(x) = & Average\ of(Mea_1) = \\ & Average\ of(\max(\max(\max(Force_1, Force_2), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \max(Force_3, Force_4), \max(Force_5, Force_6)) \\ & f_2(x) = \text{Average of}(Mea_2) = \\ & \text{Average of}(\min(\min(ABS(\alpha), \\ & ABS(\beta)), ABS(\gamma))) \end{aligned} \quad (6)$$

1.4 约束函数创建

1.4.1 球面副转角的限制

6PSS 并联机构共有 12 个球面副,球面副的转角范围是有限制的。

球面副的转角约束条件可以表示为:

$$\theta_i = \arccos \frac{l_i \cdot (Rn_i)}{|l_i|} \leq \theta_{\max} \quad (7)$$

式中: θ_i —第 i 个球面副的基座固结的坐标系的 z 轴和球面副连接的杆向量 l_i 之间的夹角; n_i —第 i 个球面副的基座的 z 向向量; R —球面副相对于固定坐标系的姿态。

因此,笔者分别建立 12 个球面副转角的测量函数,并命名为 MEA_ANGLE_i , ($i = 1, 2 \cdots 12$); 然后,建立球面副的约束函数 $MEA_ANGLE_i - 30^\circ \leq 0$, ($i = 1, 2 \cdots 12$)。

1.4.2 连杆的干涉

连接上下平台的连杆是有一定的尺寸大小的; 因此,各杆之间可能发生干涉。这里假设各杆都是圆柱状的,其直径为 D ,若 D_i ($i = 1, 2 \cdots 6$) 为两相邻中心线之间的最短距离,则两杆不发生干涉的条件是 $D_i \geq D$ ^[14]。对于连杆之间的干涉约束,通过在连杆之间添加实体接触命令,使各个连杆之间不能相互穿透几何体,从而可以防止发生干涉。

所以,由参数化模型时各个设计变量的约束和球面副转角的约束,共同组成了 6PSS 并联机构的约束条件,即为:

$$\begin{cases} 35 \leq r \leq 50 \\ 60 \leq R \leq 85 \\ 35^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ \\ 20^\circ \leq \beta \leq 35^\circ \\ 80 \leq H \leq 100 \\ MEA_ANGLE_i - 30^\circ \leq 0 (i = 1, 2, \cdots 12) \end{cases} \quad (8)$$

2 设计变量对目标函数的影响

2.1 动平台球铰几何中心圆的半径对目标函数的影响

笔者在 ADAMS 中,研究动平台球铰几何中心圆的半径对目标函数的影响。目标函数随动平台球铰几何中心圆的半径变化曲线,如图 3 所示。

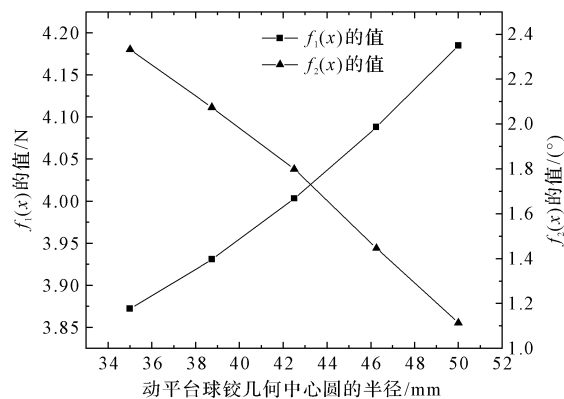


图3 目标函数随动平台球铰几何中心圆的半径变化曲线

从图 3 可以看出: 目标函数 $f_1(x)$ 的值与动平台球铰几何中心圆的半径成正相关的关系, 目标函数 $f_2(x)$ 的值与动平台球铰几何中心圆的半径成负相关的关系。

2.2 定平台球铰几何中心圆的半径对目标函数的影响

笔者在 ADAMS 中,研究定平台球铰几何中心圆的半径对目标函数的影响。目标函数随定平台球铰几何中心圆的半径变化曲线,如图 4 所示。

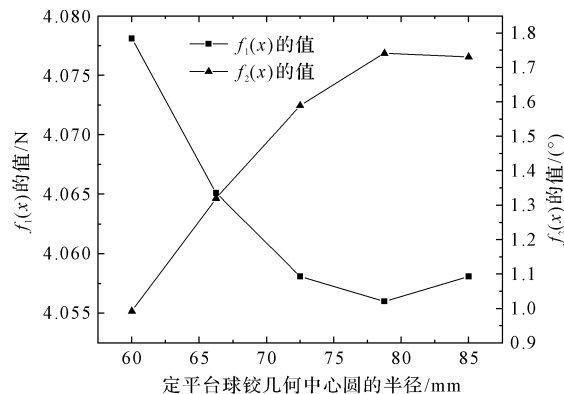


图4 目标函数随定平台球铰几何中心圆的半径变化曲线

从图 4 可以看出: 目标函数 $f_1(x)$ 的值与定平台球铰几何中心圆的半径,在一定范围内成负相关的关系; 目标函数 $f_2(x)$ 的值与动平台球铰几何中心圆的半径,一定范围内成正相关的关系。

2.3 动平台球铰长边对应的圆心角对目标函数的影响

在 ADAMS 中研究动平台球铰长边对应的圆心角对目标函数的影响。目标函数随动平台球铰长边对应的圆心角变化曲线,如图 5 所示。

从图 5 可以看出: 目标函数 $f_1(x)$ 的值与动平台球铰长边对应的圆心角成负相关的关系, 目标函数 $f_2(x)$ 的值与动平台球铰长边对应的圆心角成负相关的关系。

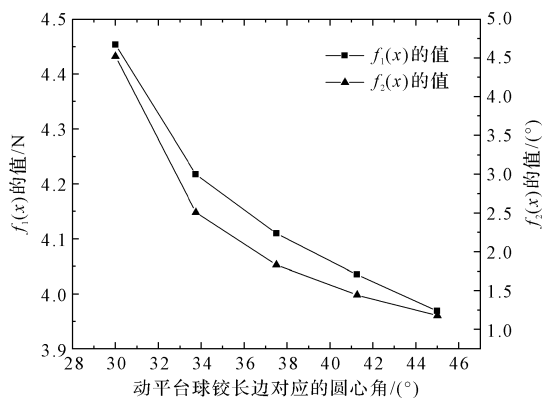


图 5 目标函数随动平台球铰长边对应的圆心角变化曲线

2.4 定平台球铰短边对应的圆心角对目标函数的影响

在 ADAMS 中研究定平台球铰短边对应的圆心角对目标函数的影响。目标函数随定平台球铰短边对应的圆心角变化曲线如图 6 所示。

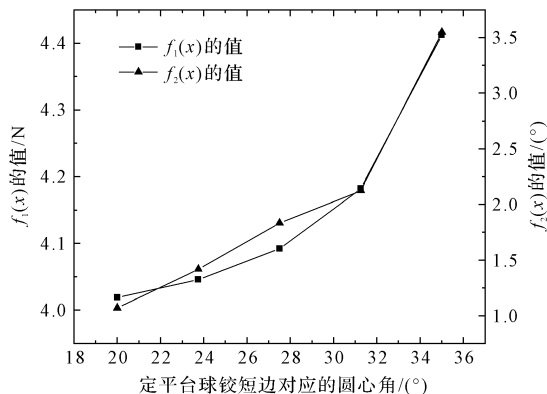


图 6 目标函数随定平台球铰短边对应的圆心角变化曲线

从图 6 可以看出: 目标函数 $f_1(x)$ 的值与定平台球铰短边对应的圆心角成正相关的关系, 目标函数 $f_2(x)$ 的值与定平台球铰短边对应的圆心角成正相关的关系。

2.5 初始高度对目标函数的影响

在 ADAMS 中研究初始高度对目标函数的影响。目标函数随初始高度变化曲线如图 7 所示。

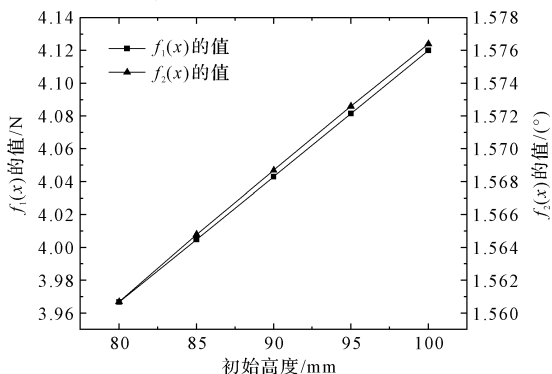


图 7 目标函数随初始高度变化曲线

从图 7 可以看出: 目标函数 $f_1(x)$ 的值与初始高度成正相关的关系, 目标函数 $f_2(x)$ 的值与初始高度成正相关的关系。

3 并联机构的优化

本文第 2 节研究了设计变量的变化对目标函数 $f_1(x)$ 和目标函数 $f_2(x)$ 的影响, 发现同一个设计变量的变化, 往往会使不同的目标函数产生不同的(甚至是截然相反的)变化趋势。因此, 为了使并联机构的性能最优, 需要对其进行多目标优化设计。

3.1 基于线性加权和法的多目标优化

本文采用线性加权和法将多目标优化问题重新构造一个新的评价函数, 从而将多目标优化问题转变为求评价函数的单目标优化问题^[15], 即:

$$F(x) = \lambda_1 f'_1 + \lambda_2 f'_2 \quad (9)$$

式中: f'_1, f'_2 —各子目标函数进行无量纲处理后的函数。

$$\text{其中: } \lambda_1 + \lambda_2 = 1; f'_i(x) = \frac{f_i(x)}{\min_{x \in D} f_i(x)} \quad (i = 1, 2).$$

在 ADAMS 中进行单目标的优化可得:

$$\min_{x \in D} f_1(x) = 4.22, \min_{x \in D} f_2(x) = 0.32.$$

因为目标函数 $f_1(x)$ 优化的目标是尽可能地小, 目标函数 $f_2(x)$ 优化的目标是尽可能地大, 它们的优化方向相反, 故对 $f_2(x)$ 取负值进行计算; 取 $\lambda_1 = 0.8$, $\lambda_2 = 0.2$ 。

综上所述, 其评价函数为:

$$F(x) = 0.8 \cdot \frac{f_1(x)}{4.22} - 0.2 \cdot \frac{f_2(x)}{0.32}, \text{ 所以, 6PSS 并}$$

联机构多目标的优化设计模型为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min F(x) = \min \left(0.8 \cdot \frac{f_1(x)}{4.22} - 0.2 \cdot \frac{f_2(x)}{0.32} \right) \\ \text{s. t. } \quad 35 \leq r \leq 50 \\ \quad 60 \leq R \leq 85 \\ \quad 35^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ \\ \quad 20^\circ \leq \beta \leq 35^\circ \\ \quad 80 \leq H \leq 100 \\ \quad MEA_ANGLE_i - 30^\circ \leq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, 12) \end{array} \right. \quad (10)$$

在 ADAMS 中进行多目标的优化, 其优化过程的设置如图 8 所示。

图 8 中, $\min(FUNCTION_MEA_19) = \min F(x)$, $DV_J1 = \alpha, DV_J2 = \beta, DV_L = H, DV_Ra = r, DV_RB = R, OPT_CONSTRAINT_1 = MEA_ANGLE_i - 30^\circ \leq 0$ 。

然后, 利用 ADAMS 集成的优化算法进行优化, 优化后的结构变量如表 3 所示。

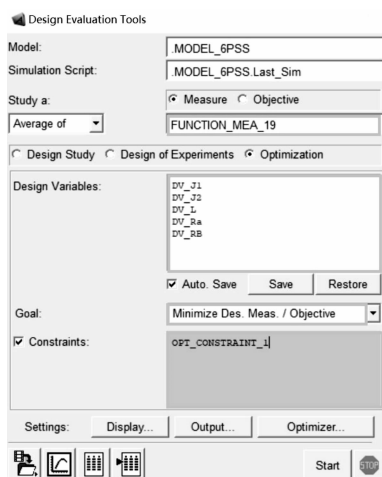


图8 并联机构的多目标优化

表3 并联机构优化前后的参数值

设计变量	初始值	优化后的值
动平台球铰几何中心圆的半径/mm	45	35
定平台球铰几何中心圆的半径/mm	72	60
动平台球铰长边对应的圆心角/ $^{\circ}$	40	37
定平台球铰短边对应的圆心角/ $^{\circ}$	25	20
初始高度/mm	92	83

在ADAMS中,笔者对6PSS并联机构优化前后的移动副驱动力的最大值和动平台的质心转角最小值进行测量。

移动副驱动力最大值变化曲线结果如图9所示。

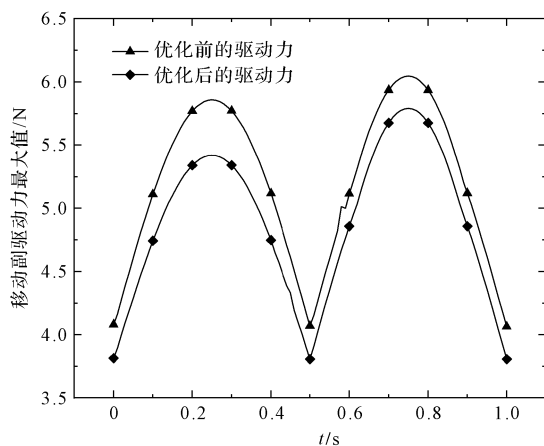


图9 优化前后移动副驱动力最大值变化曲线

动平台质心转角最小值变化曲线如图10所示。

由图(9,10)可知:优化后,移动副驱动力最大值的均值比初始值减小了6.5%,动平台质心转角最小值的均值比初始值增大了17.9%。

同时,笔者在并联机构的运动空间内选取了7组典型的静态的不同的位姿,测量6个移动副在优化前后最大的驱动力,如图11所示。

由图11可知:优化后在静态位姿下,移动副的最大驱动力减小了,从而提高了电机的重力补偿能力。

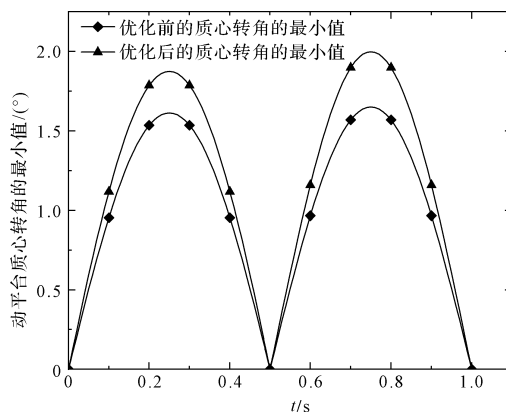


图10 优化前后动平台质心转角最小值变化曲线

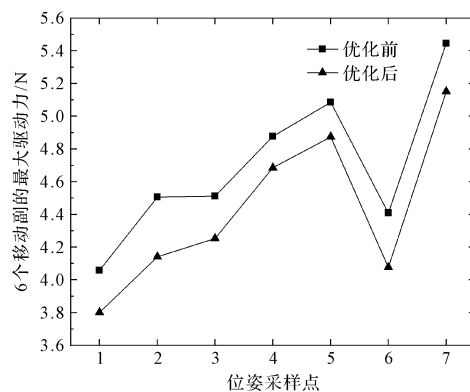


图11 静平衡下不同位姿6个移动副最大驱动力优化前后变化曲线

3.2 基于蒙特卡罗法的工作空间分析

蒙特卡罗法是一种通过随机抽样来解决数学问题的数值方法,该方法特别适用于计算由复杂曲面包围的体积^[16,17]。例如机械手工作空间的体积,因为它在计算工作空间体积时不需要边界曲面的分析表达式;相反,只需要确定机械手末端的参考点是否可以到达空间中随机选择的点。6PSS并联机构的工作空间是一个不规则的三维曲面所包围的区域,因此,本文采用蒙特卡罗法对6PSS并联机构的工作空间进行求解。

该方法是基于并联机构的运动学位置逆解而进行的一种搜索方法。其原理如下:首先给出一个包含并联机构工作空间的范围,在此范围内,产生大量随机的点;然后由机构的运动学逆解判断每一点是否满足约束条件,如果满足约束条件则是空间内的点,如果不满足,则剔除^[18,19]。所有满足约束条件的点组成了机构的工作空间。

由蒙特卡罗法得出的值并不是一个精确值,而是一个近似值,但是当投点的数量越来越大时,这个近似值也越接近真实值。文献[20]中首次基于蒙特卡罗法给出了计算机手工作空间的公式,即公式(11);并给出了几个实际的例子,从而证明了蒙特卡罗法是一种简单、易于实现、自然适用于计算机应用的方法,即:

$$V_1 = V_2 \cdot \frac{n}{N}$$

式中: V_1 —机构的工作空间体积; V_2 —总的给定空间体积; n —机构满足约束条件的位置点数; N —总的点数。

根据蒙特卡罗法求解工作空间的原理,笔者在 MATLAB 中进行编程和仿真,求得优化前后的 n/N 的数值,如表 4 所示($N=1000\ 000$)。

表 4 优化前后 n/N 的数值对比

次数 n/N	1	2	3	4	5
优化前	0.081 108	0.081 166	0.081 974	0.081 148	0.081 124
优化后	0.089 282	0.089 01	0.089 62	0.088 732	0.089 176

优化前的工作空间为: $40 \times 40 \times 20 \times 0.081 = 2\ 592\ \text{mm}^3$, 优化后的工作空间为 $40 \times 40 \times 20 \times 0.089 = 2\ 848\ \text{mm}^3$; 可见,其工作空间提高了 9.8%。

优化前的工作空间如图 12 所示。

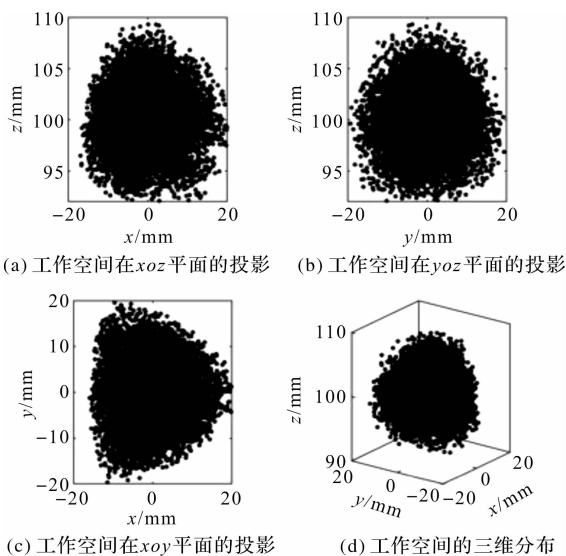
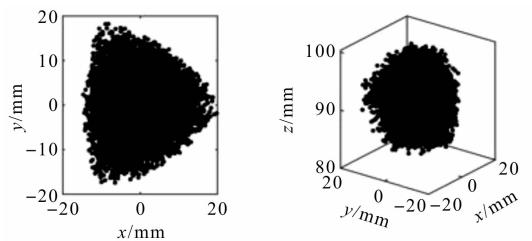
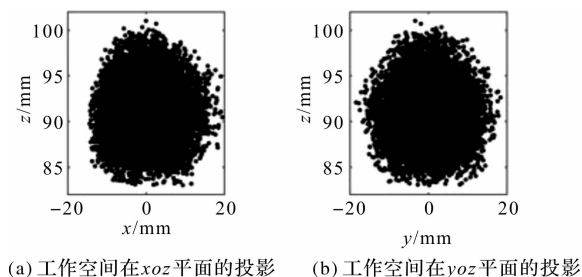


图 12 优化前机构的工作空间

优化后的工作空间如图 13 所示。



(c) 工作空间在 xoy 平面的投影 (d) 工作空间的三维分布

图 13 优化后机构的工作空间

4 结束语

本文基于 ADAMS 软件对 6PSS 并联机构进行了多目标的优化设计;首先建立了机构的参数化模型、约束条件和目标函数,然后研究了设计变量的变化对单目标函数的影响,最后采用线性加权法和法,进行了多目标优化,优化后移动副驱动力最大值的均值比初始值减小了 6.5%;利用蒙特卡罗法计算了机构的工作空间,优化后工作空间提高了 9.8%,提高了机构的承载能力,扩大了机构的运动范围。

与其他多目标优化方法相比,这种方法更为简单、直观,可以高效率地用于多参数的复杂并联机构的优化设计。

参考文献(References):

- [1] DASGUPTA B, MRUTHYUNJAYA T S. The Stewart platform manipulator: a review [J]. **Mechanism and Machine Theory**, 2000, 35(1): 15-40.
- [2] PATER Y D, GEORGE P M. Parallel manipulators applications—a survey [J]. **Modern Mechanical Engineering**, 2012, 2(3): 57-64.
- [3] QIAN S, ZI B, SHANG W W, et al. A review on cable-driven parallel robots [J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2018, 31(1): 1-11.
- [4] MILLER K. Optimal design and modeling of spatial parallel manipulators [J]. **The International Journal of Robotics Research**, 2004, 23(2): 127-140.
- [5] LOU Y, LIU G, LI Z. Randomized optimal design of parallel manipulators [J]. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, 2008, 5(2): 223-233.
- [6] LIU G, QU Z, HAN J, et al. Systematic optimal design procedures for the Gough-Stewart platform used as motion simulators [J]. **Industrial Robot: An International Journal**, 2013, 40(6): 550-558.

(下转第 761 页)

本文引用格式:

郑江涛,田大鹏,高志良.基于 ADAMS 的 6PSS 并联机构多目标优化研究[J].机电工程,2021,38(6):712-718,761.

ZHENG Jiang-tao, TIAN Da-peng, GAO Zhi-liang. Multi-objective optimization of 6PSS parallel mechanism based on ADAMS [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2021, 38(6): 712-718, 761.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

- 2899.
- [5] MATHIA T G, PAWLUS P, WIECZOROWSKI M. Recent trends in surface metrology [J]. **Wear**, 2011, 271(3): 494-508.
- [6] AL-KINDI G A, SHIRINZADEH B. Feasibility assessment of vision-based surface roughness parameters acquisition for different types of machined specimens [J]. **Image and Vision Computing**, 2009, 27(4): 444-458.
- [7] HUYNH V M, KURADA S, NORTH W. Texture analysis of rough surfaces using optical Fourier transform [J]. **Measurement Science and Technology**, 1991, 2(9): 831-837.
- [8] GADELMAWLA E S. A vision system for surface roughness characterization using the gray level co-occurrence matrix [J]. **NDT & E International**, 2004, 37(7): 577-588.
- [9] YI Huai-an, LIU Jian, LU En-hui, et al. Measuring grinding surface roughness based on the sharpness evaluation of colour images [J]. **Measurement Science and Technology**, 2016, 27(2): 025404.
- [10] LU En-hui, LIU Jian, GAO Rong-yu, et al. Designing indices to measure surface roughness based on the color distribution statistical matrix (CDSM) [J]. **Tribology International**, 2018(122): 96-107.
- [11] BECKMANN P. Shadowing of random rough surfaces [J]. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, 1965, 13(3): 384-388.
- [12] NAYAR S K, IKEUCHI K. Surface reflection: physical and geometrical perspectives [J]. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, 1991, 13(7): 611-634.
- [13] HORN B K P, BROOKS M J. Shape from shading [M]. Cambridge: MIT Press, 1989.
- [14] LIU Jian, LU En-hui, YI Huai-an, et al. A new surface roughness measurement method based on a color distribution statistical matrix [J]. **Measurement**, 2017(103): 165-178.
- [15] SUN C C, MORENO L, LO Y C, et al. Collimating lamp with well color mixing of red/green/blue LEDs [J]. **Optics Express**, 2012, 20(1): 75-84.

[编辑: 雷敏]

本文引用格式:

杨晨,方红萍,邹凌云,等. 基于色彩均匀敏感度的磨削表面粗糙度测量[J]. 机电工程, 2021, 38(6): 755-761.

YANG Chen, FANG Hong-ping, ZOU Ling-yun, et al. Grinding surface roughness measurement based on color uniformity sensitivity [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2021, 38(6): 755-761.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第718页)

- [7] 丁锐,曹毅. 基于多目标优化算法的并联机构综合设计[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(5): 20-23.
- [8] LIU X J, WANG J. A new methodology for optimal kinematic design of parallel mechanisms [J]. **Mechanism and Machine Theory**, 2007, 42(9): 1210-1224.
- [9] 李剑锋,吴光中,费仁元,等. 3-RUU微动并联机构的尺寸型模型及性能图谱[J]. 机械工程学报, 2005, 41(5): 142-146.
- [10] 李研彪,郑航,徐梦茹,等. 5-PSS/UPU并联机构的多目标性能参数优化[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2019, 53(4): 654-663.
- [11] TAN S, LIANG F, FAN J, et al. Optimization design for structure parameters of six Degree-of-Freedom (DOF) positioner of secondary mirror in a space optical remote sensor based on ADAMS [C]. Proceedings of the 2019 Chinese Control Conference. Guangzhou [IEEE], 2019.
- [12] 唐红品. 基于虚拟样机技术的6-SPS并联机器人运动学和动力学研究及参数优化[D]. 南京: 南京理工大学机械工程学院, 2011.
- [13] 郭卫东. 虚拟样机技术与ADAMS应用实例教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [14] 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, 2014.
- [15] 孙靖民,梁迎春. 机械优化设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [16] 韩江义. 带力觉反馈的主从式遥微操作系统研制与实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学机电学院, 2010.
- [17] GUAN Y, YOKOI K. Reachable space generation of a humanoid robot using the Monte Carlo method [C]. Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing [IEEE], 2006.
- [18] CHAUDHURY A N, GHOSAL A. Optimum design of multi-degree-of-freedom closed-loop mechanisms and parallel manipulators for prescribed workspace using Monte Carlo method [J]. **Mechanism and Machine Theory**, 2017, 118(12): 115-138.
- [19] 赖宇阳. Isight参数优化理论与实例详解[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
- [20] RASTEGAR J, FARDANESH B. Manipulation workspace analysis using the Monte Carlo Method [J]. **Mechanism and Machine Theory**, 1990, 25(2): 233-239.

[编辑: 雷敏]