

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.045

基于 Isight 的 3-UPS-S 并联机器人机构多目标优化*

崔国华¹ 周海栋¹ 王南² 张海强¹

(1. 河北工程大学装备制造学院, 邯郸 056038; 2. 河北工程大学研究生部, 邯郸 056038)

摘要: 综合考虑并联机器人机构工作空间、灵巧度、承载能力、刚度等多方面性能要求,以 3-UPS-S 型并联机构为例,基于 Isight 集成 Matlab、Pro/E、ANSYS 等软件,构建多目标优化设计基本流程,进行并联机构多目标尺度综合,建立一种并联机构多目标优化的方法。研究表明,该方法可以有效集成各领域工程软件进行组合试验设计与多目标优化,实现自动计算运动学和动力学性能指标、自动三维模型建立及有限元分析等步骤,得到 Pareto 图及 Pareto 前沿,决策者可根据优化信息选取合适的最优解。

关键词: 并联机器人 尺度综合 多目标优化 Isight 集成

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)09-0261-06

Multi-objective Optimization of 3-UPS-S Parallel Mechanism Based on Isight

Cui Guohua¹ Zhou Haidong¹ Wang Nan² Zhang Haiqiang¹

(1. College of Equipment Manufacture, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China

2. Graduate Faculty, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: With the overall consideration of the various performance of the parallel robot (e. g. workspace, dexterity, bearing capacity, stiffness, etc.), a basic procedure was carried out for the multi-objective optimization with the example of 3-UPS-S based on the integration of Matlab, Pro/E, ANSYS by Isight, and a multi-objective dimensional synthesis was carried out for the parallel mechanism. Thus, a method was proposed for the multi-objective optimization of parallel mechanism based on Isight. The result of the analysis indicated that the proposed method could automatically solve the kinematic and dynamic performance, achieve modeling and finish the finite element analysis for the design of experiments and multi-objective optimization with the integration of the engineering software. Through the Pareto graph and the Pareto front obtained, the designer could select the appropriate optimal solution for the parallel mechanism with more information.

Key words: Parallel robot Dimensional synthesis Multi-objective optimization Integration based on Isight

引言

并联机构具有刚度大、运动精度高、承载能力强等优点,在实际工程中被广泛应用。并联机构具有多种性能,对其进行尺度综合是一个多目标优化问

题,需根据机构特点与实际需要,充分考虑机构的工作空间、灵活度、刚度等性能。目前,很多学者对并联机构进行尺度综合研究,但这些研究均利用较为成熟的理论将并联机构各种性能解析为数学模型,再使用优化算法对其进行优化,理论性强,缺乏直观

收稿日期: 2013-04-09 修回日期: 2013-05-04

* 国家自然科学基金资助项目(51075118, 51175143)

作者简介: 崔国华,副教授,博士,主要从事并联构型装备及机器人技术研究, E-mail: ghcui@hebeu.edu.cn

通讯作者: 王南,教授,博士,主要从事并联机器人设计、机械系统动力学研究, E-mail: wangnan@hebeu.edu.cn

的可视化模型支撑,对于多目标优化问题计算复杂,工作量大。

目前,Isight 已被广泛应用于航空发动机涡轮等叶轮机械及汽车工业等的多学科多目标优化设计,并取得了较好的实用成果。本文以 3-UPS-S 型并联机构为例,将多学科多目标优化软件 Isight 应用于并联机构多目标优化中。Isight 软件封装有多种优化算法,能集成各种应用分析软件实现自动建模、自动有限元分析、自动计算等流程,并且能实时监控,可形成一个自动化、可视化的优化设计平台,为并联机构多目标优化设计提供一种新的思路与方法。

1 基于 Isight 的并联机构优化流程

3-UPS-S 机构为能够实现空间三维转动的少自由度并联机构,可应用于搬运机器人腰部与颈部机构、工装机器人微调机构等场合。根据使用要求,需充分考虑其工作空间、灵活度、承载能力、刚度等性能,并针对上述指标进行多目标优化。

利用 Isight 对并联机构进行多目标优化的基本步骤为:

- (1) 选取合适的设计变量、优化目标及约束条件,建立多目标优化模型。
- (2) Isight 计算器组件计算后续流程所需参数。
- (3) 利用 Isight 集成 Matlab 软件,接收计算器组件的输出参数,计算并联机构运动学、动力学指标,提取并输出指标参数。
- (4) 集成 Pro/E 软件,根据计算器组件输出参数,实现自动建模,并将模型传递给 ANSYS 进行有限元分析,提取并输出动平台最大变形量。
- (5) Isight 提取步骤(3)、(4)中输出的参数完成试验设计(DOE)及多目标优化设计。

如图 1 所示,在并联机构优化设计中,首先进行试验设计(DOE),得到近似模型,再在近似模型基础上进行多目标优化设计。试验设计和多目标优化中的每一组不同设计参数都需进行性能指标求解、三维建模及有限元分析,过程复杂。为了省去反复操作,上述过程可由 Isight 集成不同软件,形成基本流程来完成。而对该流程的循环次数,DOE 可人为设定,以控制试验设计时间。因此试验设计可大大节省计算费用,降低人为错误,使效率显著增加^[1]。

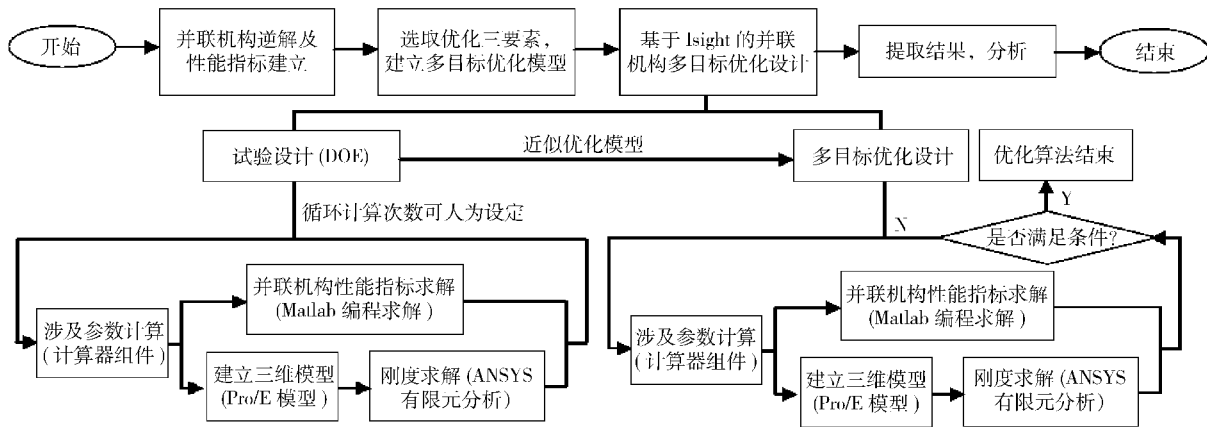


图 1 基于 Isight 的并联机构多目标优化设计流程图

Fig.1 Flow diagram of multi-objective optimization of parallel mechanism based on Isight

2 机构模型与性能指标的建立

2.1 3-UPS-S 并联机构模型

3-UPS-S 并联机构如图 2 所示。3 条主动支链以虎克铰(U 副)与定平台相连,铰点分别为 A_1 、 A_2 、 A_3 ,与动平台以球副(S 副)相连,铰点分别为 B_1 、 B_2 、 B_3 ,驱动加在支链移动副上。中间恰约束从动支链分别与定、动平台固结,中间以球副铰接。动、定平台半径分别为 R_B 、 R_A ,圆心分别为 O_B 、 O_A ,球铰中心到动、定平台的距离分别为 H_B 、 H_A 。以中间球铰为原点,建立如图 2 所示定、动坐标系。

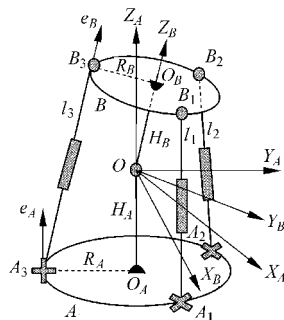


图 2 3-UPS-S 并联机构简图

Fig.2 Schematic diagram of 3-UPS-S parallel mechanism

2.2 运动学求解

该并联机构有 3 个转动自由度。根据 RPY 组合变换^[2], 坐标旋转矩阵为

$${}^A_B \mathbf{R} = \begin{bmatrix} c\phi c\theta & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi & c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi \\ s\phi c\theta & s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi \\ -s\theta & c\theta s\psi & c\theta c\psi \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 ϕ 、 θ 、 ψ 分别为横滚(绕 Z 轴)、俯仰(绕 Y 轴)、偏转(绕 X 轴)的角度。角度 ϕ 、 θ 、 ψ 前的 c 和 s 表示正弦函数和余弦函数。

根据坐标变换理论,有

$${}^A \mathbf{p}_{B_i} = {}^A_B \mathbf{R} \cdot {}^B \mathbf{p}_{B_i} \quad (2)$$

$$\mathbf{l}_i = {}^A \mathbf{p}_{B_i} - {}^A \mathbf{p}_{A_i} \quad (3)$$

${}^A \mathbf{p}_{B_i}$ 、 ${}^B \mathbf{p}_{B_i}$ 、 ${}^A \mathbf{p}_{A_i}$ 分别为 B_i 在定坐标系 A 中的位置矢量、 B_i 在动坐标系 B 中的位置矢量、 A_i 在定坐标系 A 中的位置矢量。 ${}^B \mathbf{p}_{B_i}$ 、 ${}^A \mathbf{p}_{A_i}$ 均为已知, 从而可求得支链在坐标系 A 中的向量表示 \mathbf{l}_i 。则支链长度的平方为关于 ϕ 、 θ 、 ψ 的函数

$$l_i^2 = \|\mathbf{l}_i\|^2 = \|\mathbf{p}_{B_i} - \mathbf{p}_{A_i}\|^2 = \Theta_i(\phi, \theta, \psi) \quad (4)$$

对式(4)等号两边求导得

$$\mathbf{A} \dot{\mathbf{l}} = \mathbf{B} \boldsymbol{\omega} \quad (5)$$

则并联机构雅可比矩阵为

$$\mathbf{J} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \quad (6)$$

$$\text{其中 } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2l_1 & 0 & 0 \\ 0 & 2l_2 & 0 \\ 0 & 0 & 2l_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Theta_1(\phi, \theta, \psi)}{\partial \phi} & \frac{\partial \Theta_1(\phi, \theta, \psi)}{\partial \theta} & \frac{\partial \Theta_1(\phi, \theta, \psi)}{\partial \psi} \\ \frac{\partial \Theta_2(\phi, \theta, \psi)}{\partial \phi} & \frac{\partial \Theta_2(\phi, \theta, \psi)}{\partial \theta} & \frac{\partial \Theta_2(\phi, \theta, \psi)}{\partial \psi} \\ \frac{\partial \Theta_3(\phi, \theta, \psi)}{\partial \phi} & \frac{\partial \Theta_3(\phi, \theta, \psi)}{\partial \theta} & \frac{\partial \Theta_3(\phi, \theta, \psi)}{\partial \psi} \end{bmatrix}$$

$$\dot{\mathbf{l}} = [\dot{l}_1 \quad \dot{l}_2 \quad \dot{l}_3]^T$$

$$\boldsymbol{\omega} = [\dot{\phi} \quad \dot{\theta} \quad \dot{\psi}]^T$$

2.3 性能指标的建立

(1) 3-UPS-S 机构工作空间

并联机构工作空间求解时, 应考虑以下因素: 支链杆长限制; 虎克铰、球副转角限制; 支链干涉; 并联机构的奇异位形^[3]。根据机构应用场合对 ϕ 、 θ 、 ψ 取值, 经计算后两种因素可以排除。 ϕ 、 θ 、 ψ 均为 0 时为奇异位形, 应设法避免。对于支链与动、定平台铰接处转角限制, 可用向量内积定义铰链转角。

则主动支链与定平台的夹角

$$\beta_{A_i} = \arccos([\mathbf{e}_{A_i}, \mathbf{l}_i] / \|\mathbf{l}_i\|) \quad (7)$$

$[\mathbf{e}_{A_i}, \mathbf{l}_i]$ 为定平台单位法向量 \mathbf{e}_{A_i} 和 \mathbf{l}_i 的内积。

同理可求支链与动平台的夹角

$$\beta_{B_i} = \arccos([\mathbf{e}_{B_i}, \mathbf{l}_i] / \|\mathbf{l}_i\|) \quad (8)$$

${}^A \mathbf{e}_{B_i}$ 为动平台单位法向量在定坐标系中坐标表示,

$${}^A \mathbf{e}_{B_i} = {}^A_B \mathbf{R} \cdot \mathbf{e}_{B_i}$$

恰约束从动支链夹角

$$\beta_o = \arccos([\mathbf{e}_{A_i}, {}^A \mathbf{e}_{B_i}]) \quad (9)$$

在 ϕ 、 θ 、 ψ 取值范围及步长相同的前提下, 可用可行点个数(ϕ 、 θ 、 ψ 以各自步长取值, 记录杆长及转角符合要求的点的个数)定量描述并联机构工作空间的大小, 从而使工作空间可直观比较, 方便优化。

(2) 3-UPS-S 机构灵巧度

采用 Gosselin 和 Angeles^[4] 提出的雅可比矩阵条件数全域均值为操作性能指标。在工作空间各可行点处求解雅可比矩阵条件数 κ_j , 将这些条件数倒数的均值作为灵巧度指标 η_j 。

雅可比矩阵条件数为

$$\kappa_j = \sqrt{\lambda_{\max}(\mathbf{J}^T \mathbf{J})} / \sqrt{\lambda_{\min}(\mathbf{J}^T \mathbf{J})} \quad (10)$$

其中, $\lambda_{\max}(\mathbf{J}^T \mathbf{J})$ 、 $\lambda_{\min}(\mathbf{J}^T \mathbf{J})$ 分别为 $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$ 最大和最小特征值。

(3) 3-UPS-S 机构承载能力

求取工作空间可行点处机构最大承载能力 $\sigma_{F_{\max}}(\mathbf{G})$ 和最小承载能力 $\sigma_{F_{\min}}(\mathbf{G})$, 并求取均值作为并联机构全域承载能力评价指标^[2]。

最大、最小承载能力为

$$\sigma_{F_{\max}}(\mathbf{G}) = \sqrt{\lambda_{F_{\max}}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})} \quad (11)$$

$$\sigma_{F_{\min}}(\mathbf{G}) = \sqrt{\lambda_{F_{\min}}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})} \quad (12)$$

其中, $\lambda_{F_{\max}}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})$ 、 $\lambda_{F_{\min}}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})$ 分别为 $\mathbf{G}^T \mathbf{G}$ 的最大、最小特征值, $\mathbf{G} = \mathbf{J}^T$ 。

(4) 并联机构刚度

本文利用有限元分析方式对并联机构进行刚度求解。考虑到计算费用问题, 仅考虑材料变形为柔性源。利用布尔操作将装配体转变为一个整体, 在动平台上加载相同大小的力, 经 ANSYS 分析后导出 Z 方向上的最大变形作为衡量并联机构的刚度的标准(在这里把变形值作为刚度评价指标), 并利用 Isight 集成。

图 3 为 3-UPS-S 并联机构有限元模型。

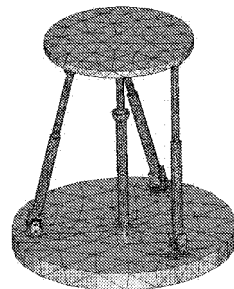


图 3 3-UPS-S 并联机构有限元模型

Fig. 3 Finite element model of 3-UPS-S parallel mechanism

3 基于 Isight 的机构多目标优化

本文定义 3-UPS-S 机构相关参数及初始值如下:支链可伸缩最小长度 $l_{\min} = 200$ mm,支链最大长度与最小长度之比 $r = 1.75$,定平台半径、动平台半径、中间支链球铰中心距离定平台高度分别为 $R_A = 120$ mm、 $R_B = 80$ mm、 $H_A = 150$ mm,动、定平台平行时两平台间距离为定值 240 mm,球铰中心与动平台距离为 $(240 - H_A)$ (mm)。

3.1 多目标优化模型的建立

综合 3-UPS-S 并联机构结构参数及实际应用需求,建立多目标优化模型

$$\begin{cases} \max f_1(\mathbf{X}) = m(l_{\min}, R_A, R_B, H_A, r) \\ \max f_2(\mathbf{X}) = \eta_J(l_{\min}, R_A, R_B, H_A, r) \\ \max f_3(\mathbf{X}) = \sigma_{F_{\max}}(l_{\min}, R_A, R_B, H_A, r) \\ \max f_4(\mathbf{X}) = \sigma_{F_{\min}}(l_{\min}, R_A, R_B, H_A, r) \\ \min f_5(\mathbf{X}) = D(l_{\min}, R_A, R_B, H_A, r) \\ \text{s. t. } 150 \text{ mm} \leq l_{\min} \leq 240 \text{ mm} \\ 100 \text{ mm} \leq R_A \leq 140 \text{ mm} \\ 60 \text{ mm} \leq R_B \leq 100 \text{ mm} \\ 30 \text{ mm} \leq H_A \leq 240 \text{ mm} \\ 1.6 \leq r \leq 1.9 \end{cases} \quad (13)$$

其中 $\mathbf{X} = (l_{\min}, R_A, R_B, H_A, r)$ (14)

根据优化需要,本文所涉及的约束条件为机构参数允许范围要求(式(13)所示)。

本文选取了 5 个设计目标: $f_1(\mathbf{X})$, $f_2(\mathbf{X})$, $f_3(\mathbf{X})$, $f_4(\mathbf{X})$, $f_5(\mathbf{X})$ 。分别为工作空间可行点数,全域灵巧度指标,全域最大、最小承载能力,以及加载相同作用力时动平台最大变形量。

因此,本文研究目的在于寻找最优尺寸参数向量 \mathbf{X} ,在满足约束条件前提下,使得工作空间最大化,全域灵巧度指标、最大和最小承载能力最大,以及动平台最大变形量达到最小。

3.2 基于 Isight 的机构多目标优化设计

Isight 能利用应用软件日志文件对不同领域的工程软件进行集成,完成重复的优化设计操作。本文采用 Isight 通用集成组件 Simcode 对软件进行集成。

(1) 如图 4 所示,根据图 1 中的步骤,在 Isight 中搭建的并联机构多目标优化流程图中,箭头为数据和过程传递路径。其中计算器组件用于计算优化过程所需输入输出参数(如压力,支链最大长度等);Matlab 用于计算工作空间可行点数 m 、全域灵巧度指标及最大最小承载能力指标;Pro/E 与 ANSYS 通过三维模型完成数据传递,后者自动对模

型有限元求解,并输出动平台最大变形量作为刚度评价指标。

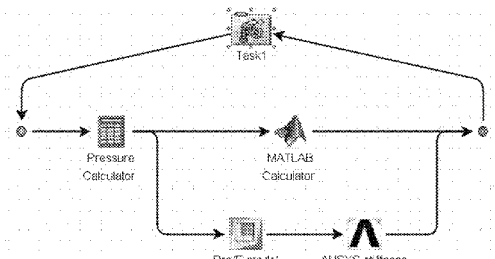


图 4 基于 Isight 的并联机构优化基本流程图
Fig. 4 Base procedure of parallel mechanism based on Isight

(2) 试验设计不仅能以给定的优化次数优化得到近似最优解,同时还能得出不同因子对响应的影响程度。利用 Task Plan 组件将 DOE 和优化设计组件进行组合,Isight 自动将试验设计得到的近似最优解作为优化设计的设计初始值。

综合考虑模型复杂程度及计算费用等因素,本文试验设计采用优超拉丁方设计,设置样本点数为 10,因子为优化设计的设计变量,响应为优化设计的设计目标。多目标优化设计采用 NSGA-II,设置种群大小为 4,遗传代数为 10。完成设置后优化设计流程如图 5 所示。

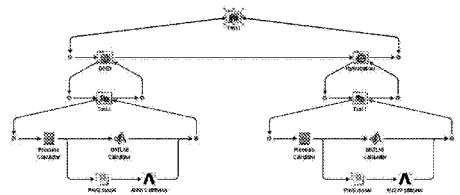


图 5 基于 Isight 的并联机构多目标优化设计流程图
Fig. 5 Multi-objective optimization of parallel mechanism based on Isight

4 多目标优化结果提取及分析

(1) 试验设计能够方便得出因子对响应的影响程度。图 6 为所有因子对最大承载能力的主效应图。由图可知,支链最大最小杆长之比对最大承载能力的影响最大,有很强的非线性关系,动平台半径对其影响次之,而定平台半径对最大承载能力影响最小,基本呈线性关系。该图对并联机构制造时对零件精度控制有一定的参考意义,对于影响响应较大的因子,应尽量控制其加工精度,以提高机构可靠性。Pareto 图反映因子对响应贡献程度百分比。图 7 所示为所有因子对响应最大承载能力的 Pareto 图。图中 r^2 表示 r 的二次项,从图中可以看出 r 对最大承载能力的贡献率最大,而定平台半径没有二次项,因此其影响程度最小,这与主效应图中得出的结论是一致的。

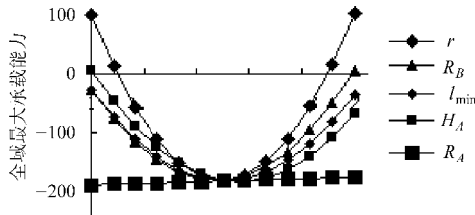


图6 因子对最大承载能力的主效应图

Fig. 6 Main effects plot for the max bearing capacity

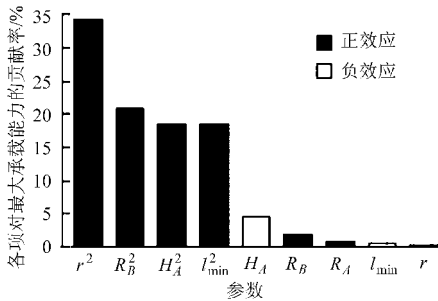


图7 因子对最大承载能力的 Pareto 图

Fig. 7 Effect on the max bearing capacity

(2) 多目标优化设计可以确定设计点可行性, 得到 Pareto 解集及 Pareto 前沿等。

Pareto 解集中的点之间为非占优关系, 即无法比较这些点间的优劣关系。因此需要根据实际应用场景选取合适的数值。设计可行性对结果的选择有很大参考价值。如图 8 为设计可行性的历史图, 图中推荐的设计点为软件所推荐的最优设计点, 在实际使用中, 最优设计点应根据实际情况进行选择。从图中可以看出该问题可行性设计主要集中在 7, 而对于设计点的选取应从 Pareto 解中选取, 即使劣解点有较高的可行性也为不可取点。这从一个侧面反映多目标优化应综合考虑多个目标的优劣。

(3) 利用多目标优化算法可以综合更多信息选择最优组合, 并且可以比较各种可行解的优劣得失。

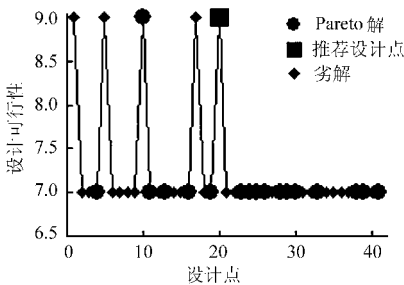


图8 设计可行性

Fig. 8 Design feasibility

Pareto 前沿图可直观表达目标的变化关系, 可为最优变量选取提供参考。

图 9 为工作空间和最大承载能力形成的 Pareto 前沿图。从图中可以看出工作空间与最大承载能力为一对相互矛盾的参数, 即扩大工作空间, 则最大承载能力将降低; 反之亦然。因此需要决策者的权衡选择。图 9 显示出 Pareto 前沿不够连续, 这是前述的多目标优化设置时种群大小和遗传代数过于宽松造成的。

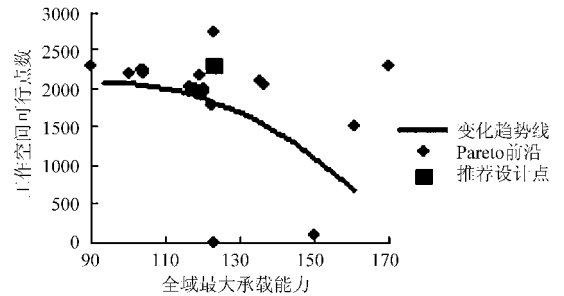


图9 工作空间与最大承载能力的 Pareto 前沿图

Fig. 9 Pareto front of workspace and the max bearing capacity

5 结论

(1) 将多学科多目标优化设计软件 Isight 应用到并联机构的优化设计中, 综合考虑并联机构工作空间、灵巧度、承载能力、刚度等多方面性能要求, 以 3-UPS-S 型并联机构为例, 基于 Isight 集成 Matlab、Pro/E、ANSYS 等软件, 构建多目标优化设计基本流程与实现平台, 建立一种并联机构多目标优化的新方法。

(2) 基于 Isight 多学科设计优化软件, 利用试验设计分析并联机构, 并绘制主效应图及 Pareto 图, 分析可得因子对响应的影响程度, 为并联机构制造精度的控制提供依据; 利用多目标优化对由 DOE 得出的近似模型进行优化, 得到 Pareto 解集以及 Pareto 前沿, 并绘制 Pareto 前沿图。决策者可以根据更多的信息选取合适的最优解。

(3) 利用 Task Plan 组件组合试验设计 (DOE) 和多目标优化设计, 实现自动计算运动学和动力学性能指标、自动三维模型建立及自动有限元分析等步骤。经计算, 该方法可使优化设计得到可视化三维模型支持, 同时使过程自动化。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 于靖军,刘辛军,丁希仑,等. 机器人机构学的数学基础[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
- 3 Sun T, Song Y M, Dong G, et al. Optimal design of a parallel mechanism with three rotational degrees of freedom [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012, 28: 500 ~ 508.
- 4 Gosselin C M, Angeles J. A global performance index for the kinematic optimization of robotic manipulators [J]. ASME Journal of

- Mechanical Design, 1991, 113(3): 220 ~ 225.
- 5 李树平, 谢少荣, 程军, 等. 基于差分进化的球面并联机构仿生眼参数优化[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 189 ~ 194.
Li Shuping, Xie Shaorong, Cheng Jun, et al. Parameter optimization for spherical parallel mechanism bionic eye based on differential evolution [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 189 ~ 194. (in Chinese)
 - 6 Kelaiaia R, Company O, Zaatri A. Multiobjective optimization of a liner Delta parallel robot [J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 50: 159 ~ 178.
 - 7 Zhen G, Zhang D, Ge Y J. Design optimization of spatial six degree-offreedoms parallel manipulator based on artificial intelligence approach [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26(2): 180 ~ 189.
 - 8 陈静, 刘强. 基于遗传算法的新型 2-DOF 并联机构优化设计[J]. 机械设计, 2008, 25(2): 21 ~ 23.
Chen Jing, Liu Qiang. Optimization design of new typed 2-DOF parallel mechanism based on genetic algorithm [J]. Journal of Machine Design, 2008, 25(2): 21 ~ 23. (in Chinese)
 - 9 高秀兰, 鲁开讲, 王娟平. Delta 并联机构工作空间解析及尺度综合[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 146 ~ 149.
Gao Xiulan, Lu Kaijiang, Wang Juanping. Workspace resolution and dimensional synthesis on Delta parallel mechanism [J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 146 ~ 149. (in Chinese)
 - 10 王庚祥, 原大宁, 刘宏昭, 等. 空间 4-SPS/CU 并联机构运动学分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 207 ~ 212.
Wang Gengxiang, Yuan Daning, Liu Hongzhao, et al. Kinematics analysis of spatial 4-SPS/CU parallel mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 207 ~ 212. (in Chinese)
 - 11 Ridha Kelaiaia, Olivier Company, Abdelouahab Zaatri. Multiobjective optimization of a linear Delta parallel robot [J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 50: 159 ~ 178.
 - 12 孙立宁, 丁庆勇, 刘新宇. 2 自由度高速高精度并联机器人的运动学优化设计[J]. 机械工程学报, 2005, 41(7): 94 ~ 97.
Sun Lining, Ding Qingyong, Liu Xinyu. Optimal kinematic design of 2-DOF planar parallel robot with high speed and high precision [J]. China Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(7): 94 ~ 97. (in Chinese)
 - 13 齐明, 刘海涛, 梅江平, 等. 3-PUS/PU 3 自由度并联机构运动学优化设计[J]. 天津大学学报, 2007, 40(6): 649 ~ 654.
Qi Ming, Liu Haitao, Mei Jiangping, et al. Kinematics optimum design of a 3-DOF parallel mechanism with 3-PUS/PU architecture [J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(6): 649 ~ 654. (in Chinese)
 - 14 李明磊, 贾育秦, 张学良, 等. 基于多目标差异演化算法的并联机构结构优化[J]. 中国机械工程, 2010, 21(16): 1915 ~ 1920.
Li Minglei, Jia Yuqin, Zhang Xueliang, et al. Parallel mechanism structure optimization design based on multi-objective differential evolution algorithm [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(16): 1915 ~ 1920. (in Chinese)
 - 15 刘冰, 李剑锋, 费仁元. 基于遗传算法的并联微动机器人的机构优化设计[J]. 中国机械工程, 2007, 18(5): 554 ~ 559.
Liu Bing, Li Jianfeng, Fei Renyuan. Design optimization of parallel micromanipulator based on GA algorithm [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(5): 554 ~ 559. (in Chinese)