

DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2017.11.008

## 工业机器人多目标拓扑优化设计

许辉煌, 褚旭阳

(厦门大学航空航天学院, 福建厦门 361005)

**摘要:** 为了综合提高工业机器人的结构刚度、振动频率, 降低结构质量, 从而提高机器人整体的静动态性能, 提出了一种基于多目标拓扑优化的机器人结构优化方法。该方法首先对机器人整机和部件进行分析, 寻找机器人薄弱的零部件; 然后对其进行多目标拓扑优化和模型重建, 从而获得最佳的结构。将该方法成功应用于一款 3 kg 装配、搬运等多功能机器人的分析优化中, 结果验证了该分析优化方法的可用性和有效性。

**关键词:** 工业机器人; 多目标优化; 拓扑优化; 有限元分析

**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3881 (2017) 11-032-6

### Multi-objective Topology Optimization and Design for Industrial Robot

XU Huihuang, CHU Xuyang

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China)

**Abstract:** In order to comprehensively improve the structure of industrial robots stiffness, vibration frequency, reduce the structure mass so as to improve the static and dynamic performance quality of the robot overall, a robot structure optimization method based on multi-objective topology optimization was presented. In this method, first, the overall and its parts were analyzed, so as to find out its weak parts and weak positions of its main parts. Then the weak parts and weak positions of its main parts were multi-objective topologically optimized and reconstructed, thus obtained an best structure. Finally, the method was applied to an multi-functional 3kg industrial robot used on assembly and handling, which verified that the method is available and effective.

**Keywords:** Industrial robot; Multi-objective optimization; Topology optimization; Finite element analysis

#### 0 前言

工业机器人的结构复杂、运动形式多变, 工作过程中承受载荷较大。在高速、高频率的运行过程中受到弯曲、扭转和惯性冲击等多种工况的作用, 其结构刚度、固有频率和本体质量对整体的稳定性、噪声、振动、工作精度、响应速度等具有重要的意义, 因此对工业机器人结构的设计与优化显得尤为重要。目前, 在机器人结构设计中, 采用的优化方法为尺寸优化<sup>[1-2]</sup>、形状优化<sup>[3-4]</sup>、拓扑优化<sup>[5-6]</sup>, 这些方法较好地完成了机器人结构优化, 提高了机器人的性能。但是工业机器人的结构刚度、机体质量和固有频率等指标相互矛盾, 需要综合提高各项指标是目前设计的重点和难点。

为了满足工业机器人结构具有高结构刚度、高振动频率与低质量等特性, 本文作者提出了一种工业机器人结构多目标拓扑优化方法, 并将该方法应用于一款 3 kg 装配、搬运的六轴串联机器人的多目标优化设计中, 得到了使静态刚度和低级振动频率最大同时使质量降到最低的机器人结构。

#### 1 多目标拓扑优化方法

为了满足工业机器人“快”、“精”、“稳”的指标, 文中将采用多目标拓扑优化的方法对机器人进行优化设计。该方法将静态刚度最大化、振动频率最大化和结构质量最小化的优化目标结合成综合目标函数, 再通过拓扑优化方法, 对综合目标函数求极值来得到最佳的机器人结构。

##### 1.1 拓扑优化

结构拓扑优化是以材料分布为研究对象, 在满足给定条件下寻求给定设计区域材料的最优分布形式<sup>[7]</sup>。目前结构拓扑优化主要集中在单目标优化问题上<sup>[8-9]</sup>, 有关机器人结构拓扑优化的研究也是单目标的拓扑优化设计<sup>[10-11]</sup>。而在实际工程结构中存在许多多目标拓扑优化问题需要解决, 依靠单目标拓扑优化很难获得工程所需的最佳结构。虽然多目标优化方法在结构形状和尺寸优化的应用已经很多<sup>[12-13]</sup>, 在机器人的设计中也有涉及<sup>[14-15]</sup>, 但它们都只能求得原结构的最佳尺寸, 而不能得到最优的结构布局。文中针对机器人结构多目标问题, 采用多目标拓扑优化方法对机器人结构进行了优化设计。

收稿日期: 2016-03-15

作者简介: 许辉煌 (1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为机器人结构设计、RV 减速器研究与设计、机器人故障诊断研究。E-mail: 853985703@qq.com。

### 1.2 多目标拓扑优化模型

#### 1.2.1 静态位移目标函数

结构刚度最大化是机器人结构设计的主要目标之一，通常将结构刚度最大化转化为结构柔度最小化，而柔度的大小直接影响到结构受载变形大小，所以在结构分析中主要用结构受载变形的最小化替代结构刚度最大化。机器人在运行过程中要承受多种载荷工况的作用，机器人在每个工况下对应着一个变形最小的最优拓扑结构，而多个载荷工况具有多个最优拓扑结构。因此，多工况静态位移拓扑优化属于多目标优化范畴。

通常多目标优化问题处理方法是采用线性加权和把多目标转化成单目标问题进行求解，这种方法通常可以得到一个 Pareto 最优解，但不能保证非凸优化问题得到所有 Pareto 解<sup>[16]</sup>。所以文中采用折衷规划法来解决这个问题。

$$\min D(x) = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \alpha_i \frac{D_i(x) - D_i^{\min}}{D_i^{\max} - D_i^{\min}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中:  $D(x)$  为变形目标函数;  $n$  为总工况数;  $\alpha_i$  为各个工况权系数;  $D_i(x)$  为各工况的响应位移;  $D_i^{\max}$ ,  $D_i^{\min}$  分别为各工况的最大位移和最小位移。

#### 1.2.2 振动频率目标函数

机器人运行过程中振动源所产生的频率一般较低，为避免机器人发生共振、提高机器人的动态稳定和动态精度，设计中需提高机器人结构的固有频率。而通过对机器人结构的优化，可以有效提高其固有频率。在优化过程将几个低阶频率作为优化目标，为确保所有的阶次都能得到提高，采用平均频率公式来定义目标<sup>[17]</sup>，其数学模型如下：

$$\max F = F_0 + \left[ \alpha \sum_{i=1}^n w_i (\lambda_{u_i} - \lambda_0)^n \right]^{1/n} \quad (2)$$

式中:  $\lambda_{u_i}$  为给定值,  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $u_i$  为某一固有频率阶数;  $n$  为幂;  $\alpha$  为给定参数;  $F_0$  为任意常数, 用来调节目标函数。

#### 1.2.3 多目标优化的综合目标函数

多目标拓扑优化将构件多工况位移、振动频率及构件质量作为目标函数，因此可以得出如下综合目标函数：

$$\min U(x) = \left[ \alpha^2 D^2(x) + \beta^2 \left( \frac{F^{\max} - F(x)}{F^{\max} - F^{\min}} \right)^2 + \gamma^2 \left( \frac{M(x) - M^{\min}}{M^{\max} - M^{\min}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中:  $U(x)$  为综合目标函数;  $\alpha, \beta, \gamma$  为权系数,  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ;  $D(x)$  为位移目标函数;  $F(x), M(x)$  分别为响应频率和响应质量;  $F^{\max}, F^{\min}$  分别为频率目标函数的最大值和最小值, 同时来消除量纲;  $M^{\max}, M^{\min}$  分别为质量目标函数的最大值和最小值, 同时来消除量纲。

### 1.3 分析、优化流程

机器人结构分析与优化的流程如图 1 所示，主要有以下几个步骤：

- (1) 首先建立机器人三维模型;
- (2) 然后在最差工作条件下对机器人进行动力学分析求得个部件的最大载荷;
- (3) 再对整机进行静力学和模态分析并将最大载荷施加在部件上对其进行静力学分析和模态分析;
- (4) 通过分析寻找和发现有问题的部件并对其进行多目标拓扑优化和模型重建;
- (5) 最后对优化后的整机进行静力学分析和模态分析，判断其是否满足要求。

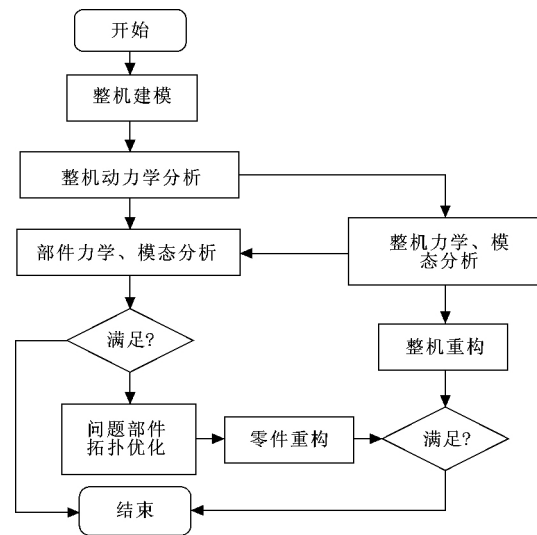


图 1 结构分析与优化流程图

## 2 机器人分析与优化

### 2.1 机器人模型

3 kg 机器人 CAD 模型如图 2 所示。

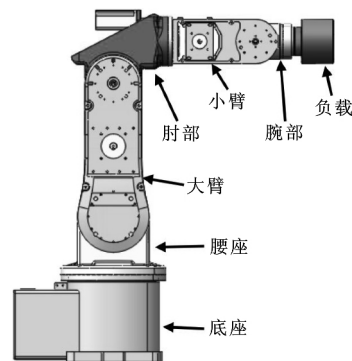


图 2 3 kg 机器人 CAD 模型

针对 3 kg 装配、搬运的六轴串联机器人进行优化。该机器人适用于电子、食品饮料、机械等快速搬运、装配领域，因此要求结构紧凑、敏捷性高和质量轻等特点。而目前的该机器人在工作中存在机体质量大、运行响应速度慢、精度和稳定性不足等问题，因

此需再次对其进行结构分析与优化来降低整机质量、提高整体的静、动态刚度。该机器人主要由底座、腰座、大臂、肘部、小臂和腕关节、末端夹持装置和负载组成，如图 2 所示。

### 2.2 机器人动力学分析

在机器人动力学分析中，通过模拟机器人末端携带 3 kg 负载的状态以最大的加速度和速度做各种运动，从而得出各个关节所受关节力和力矩的实时曲线图数据。根据实时曲线图可求得各个关节承受的最大的力和力矩，这些数据可用于校核和分析各个部件强度和验证机器人驱动电机选择的合理性等。其中图 3 是机器人带 3 kg 负载的一种运行过程，其中图 3 (b) 是最恶劣的一种姿态。

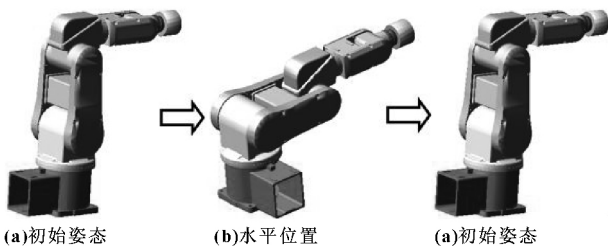


图 3 部分姿态的 ADAMS 仿真图

在工作过程中，每个部件都受到一个 6 维力 ( $F_x, F_y, F_z, T_x, T_y, T_z$ ) 的作用，其中  $F_x, F_y, F_z$  分别表示沿  $x, y, z$  轴方向的力； $T_x, T_y, T_z$  分别表示绕  $x, y, z$  轴向的力矩。其中部分部件的力矩  $T$  曲线如图 4 所示。

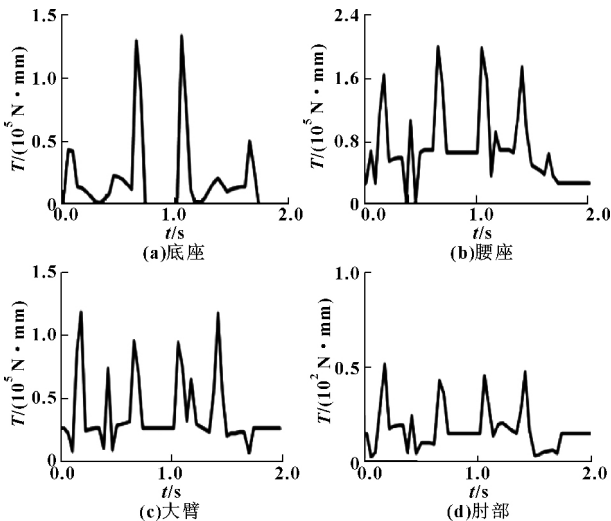


图 4 部件的力矩图

从图 4 可知：整个运动时间为 2.0 s，其中底座在 1.04 s 时最大扭矩为 13 400 N · mm，腰座在 1.09 s 时最大扭矩为 20 100 N · mm，大臂在 1.40 s 时最大扭矩为 11 800 N · mm，肘部在 0.16 s 时最大扭矩为 560 N · mm。

根据实时曲线图，还可以求出其他部件所受的力

矩和关节力的最大值，为下阶段的分析提供载荷数据。

### 2.3 机器人力学、模态分析

为了保证在正常工况中机器人的形变量在合理范围之内，因此需要对机器人进行带负载静态变形分析。当携带 3 kg 负载的机器人做水平伸展姿势时，机器人处于最恶劣姿势，此时末端形变量最大。应用 Hyperworks 的 Radioss 求解器对整机进行静力学分析，其静态分析结果如图 5 所示。

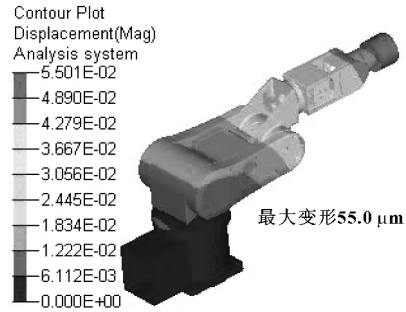


图 5 整体变形云图

同时，机器人在运动过程中应该尽量减小振动所引起的动态误差，以提高机器人的动态精度和稳定性。而机器人在运行过程中，振动源的振动频率较低，一般可通过提高机器人的固有频率来防止产生共振。对整机进行模态分析，其中初始位置的动态振型如图 6 所示。

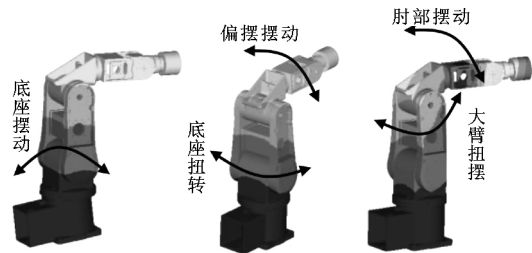


图 6 整体动态振动云图

从图 5 云图可以得出，整机、底座、腰座、大臂、肘部、小臂、腕关节的变形量分别为 55、8.9、5.1、15.5、7.5、11、2.3 μm，部件的变形从大到小排序为大臂、小臂、底座、肘部、腰座、腕关节。从图 6 可以看出容易发生共振的部件有底座、大臂和肘部。根据静态和动态的分析可知大臂、小臂、腰座和肘部的刚度较差，在下阶段工作将结合这些部件的分析进行优化设计。

### 2.4 部件分析与多目标拓扑优化

#### 2.4.1 大臂分析

大臂是机器人第二关节与第三关节的连接件，其所承受的静态和动态载荷较大，因此要求大臂具有较高的静态和动态刚度。3 kg 机器人的大臂主要由左大臂、连接方管 and 右大臂组成，其结构如图 7 所示。

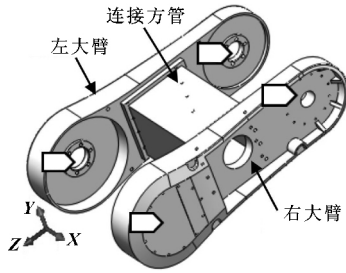


图 7 大臂结构图

通过机器人在 ADAMS 动力学仿真得到动力学载荷曲线图, 分别提取  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向的最差载荷工况, 然后对大臂进行受力分析。分析时, 将 A 端孔位固定, 在 B 端相应位置施加力和扭矩。大臂最大变形分析结果如图 8 所示, 振动云图如图 9 所示。

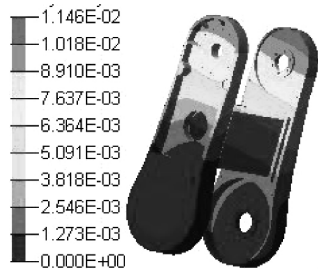


图 8 大臂变形云图

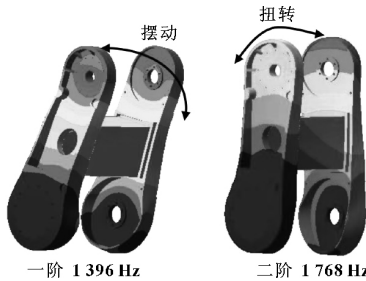


图 9 大臂动态振动云图

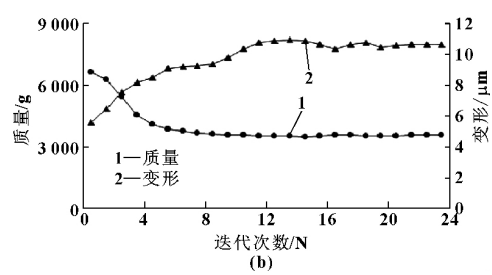
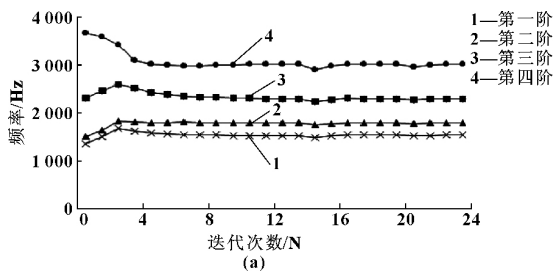


图 11 频率、变形与质量迭代收敛图

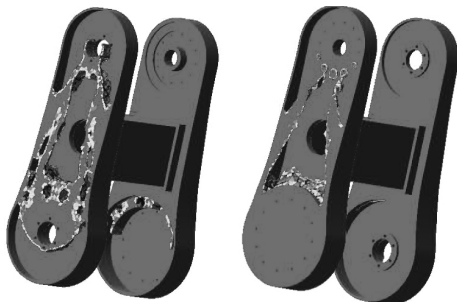


图 12 多目标拓扑优化后的大臂模型

由图 8 可知, 大臂在受最大载荷时最大变形为  $11.5 \mu\text{m}$ , 变形较大; 由图 9 知大臂的低阶振型是绕转轴摆动和沿转轴方向扭转。而大臂的总质量为  $4.6 \text{ kg}$ , 占各机械臂总质量的  $30.5\%$ , 总体质量偏大。结合大臂在整机中的分析可知, 大臂的变形偏大, 固有频率偏低, 整体质量偏大, 因此下阶段大臂优化目标为减小最大变形量, 提高固有频率和减小整体质量。

### 2.4.2 多目标拓扑优化

在考虑大臂与其他零件的装配等情况, 建立大臂的简易实体模型。在考虑与其他部件装配等因素下将其分成拓扑区域与非拓扑区域两大部分, 如图 10 所示。



图 10 大臂简化后的模型

在大臂多目标拓扑优化中, 根据优化目标重要性大小, 取变形目标权值  $0.2$ , 频率目标权值  $0.4$ , 质量目标权值  $0.4$ 。应用 Hyperworks 软件中 Optistruct 求解器提供的自定义函数来编写多目标函数并进行结构拓扑优化求解, 经过 23 次迭代目标函数收敛。变形、各阶模态值和质量收敛曲线如图 11, 拓扑优化后的模型如图 12。

大臂优化后的实体模型如图 13 所示。

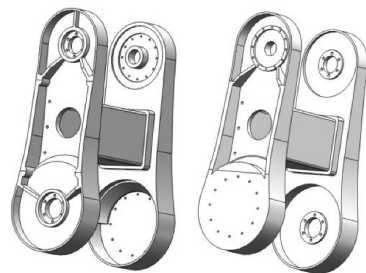


图 13 大臂优化后的实体模型

根据拓扑优化模型，在考虑加工工艺、装配、布线要求等情况下对大臂结构进行模型重建。重建后的大臂结构变化主要有连接方管中间部分厚度由 8 mm 改为 3 mm，改变左、右大臂两端肋板与加强筋的布局并加厚，将左、右大臂的主体结构厚度由 12 mm 改为 10 mm，重建后的结构如图 13 所示。

对优化设计后的大臂重新分析，其中优化前、优化后与模型重建后分析结果对比如表 1 所示。通过表 1 可看出，大臂经过多目标拓扑优化后，在大臂质量减小了 22.5% 情况下，变形减小 6.1%、应力减小了 31.6%，各阶模态值都有显著的提高。

表 1 优化前后大臂的性能对比

模型	质量/ g	变形/ μm	应力/ MPa	$f_1$ / Hz	$f_2$ / Hz	$f_3$ / Hz
原模型	4 602	11.5	15.8	1 396	1 768	2 321
拓扑后	3 576	10.9	14.8	1 500	1 815	2 577
对比	-22.3%	-5.2%	-6.3%	7.4%	2.7%	11.0%
模型重建	3 566	10.8	10.8	1 623	1 867	2 725
对比	-22.5%	-6.1%	-31.6%	16.3%	5.6%	17.4%

表 2 优化前后大臂的性能对比

模型	质量/g	变形/μm	应力/MPa	$f_1$ /Hz	$f_2$ /Hz	$f_3$ /Hz
底座原模型	4 287	21.3	19.7	1 283	2 011	2 481
优化模型	3 619	6.5	13.5	1 428	2 312	2 542
腰座原模型	2 731	3.3	12.5	9 457	9 692	9 840
优化模型	2 655	2.8	10.4	9 933	10 080	10 485
肘部原模型	2 026	24.3	4.5	4 600	4 818	8 598
优化模型	1 724	23.0	3.8	4 812	5 214	8 792
小臂原模型	1 025	25.8	17.4	961	1 104	3 157
优化模型	1 108	22.3	13.1	1 124	1 345	3 452

对优化后的所零部件重新装配成整机，并对新的整机重新进行静力学分析和模态分析，其中静力学分析结果如图 14 所示。从图中可以看出，优化后整机的最大变形量为 42.7 μm，相对优化前的 55.0 μm 有了明显的降低。

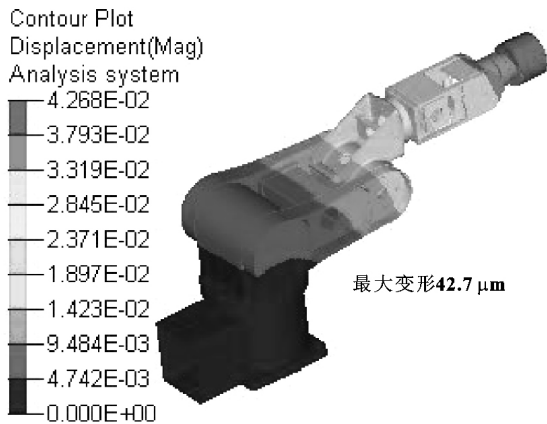


图 14 优化后整机变形云图

通过优化前后分析结果的对比表明，优化后整机在最大变形量减小、各阶固有频率提高的情况下整机质量有了一定的降低，整机的综合性能得到了显著提高，说明了文中所提分析与优化方法的有效性，详细对比如表 3 所示。

### 3 整机优化

仿照上文方法对其他部件进行结构优化和模型重建，优化前后对比如表 2 所示。

表 3 优化前后整机的性能对比

模型	质量/ kg	变形/ μm	应力/ MPa	$f_1$ / Hz	$f_2$ / Hz	$f_3$ / Hz
原模型	29.45	55.0	13.1	80.3	84.7	248.9
优化后	27.39	42.7	12.9	91.6	96.7	250.8
对比	-7.1%	-22.4%	-1.5%	14.1%	14.2%	0.8%

### 4 结束语

文中提出了一种工业机器人多目标拓扑优化的分析和研究方法，并将其应用于某型 3 kg 装配、搬运等多功能机器人的分析设计与优化中，优化结果为在机器人整机质量减小 7.1% 的情况下，其静态变形量减少 22.4%，一阶固有频率提高了 14.1%，二阶固有频率提高了 14.2%，充分证明了文中所提方法具有可用性和有效性。

### 参考文献:

- [1] 李瑞峰, 仝勋伟, 葛连正, 等. 基于弹性动力学仿真的码垛机器人动态优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版) 2015(S1): 23-26.
- [2] 仝勋伟. 码垛机器人动态特性分析及其优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [3] 马孝林. 高压带电作业机器人作业机械臂的设计及优化[D]. 济南: 山东建筑大学, 2014.

- [4] 吴焱明, 柯尊忠, 徐业宜, 等. 机器人操作器动力学形状优化设计[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1996(4): 54-59.
- [5] 李清伟. 焊接机器人手臂有限元分析及拓扑优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(11): 63-64, 74.  
LI Qingwei. The Finite Element Analysis and Topological Optimization Design for Welding Robot's Arm[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2014(11): 63-64, 74.
- [6] 席堃, 丁晓红, 汪兵兵, 等. 某型号搬运机器人倍速平移机构轻量化设计[J]. 机械工程与自动化, 2015(6): 38-40.  
XI Kun, DING Xiaohong, WANG Bingbing, et al. Light-weight Design of Double-speed-translational Mechanism for Transfer Robot[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2015(6): 38-40.
- [7] 潘锋, 朱平, 孟瑾. 微型货车车架的拓扑优化设计[J]. 机械设计与研究, 2008, 24(2): 87-90.  
PAN Feng, ZHU Ping, MENG Jin. Topology Optimization of Mini-truck Frame [J]. Machine Design and Research, 2008, 24(2): 87-90.
- [8] 刘庆, 侯献军. 基于 HyperMesh/OptiStruct 的汽车零部件结构拓扑优化设计[J]. 装备制造技术, 2008(10): 42-44.  
LIU Qing, HOU Xianjun. Structure Topology Optimization Design of Vehicle Parts Based on HyperMesh/OptiStruct [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2008(10): 42-44.
- [9] 隋允康, 杨德庆, 王备. 多工况应力和位移约束下连续体结构拓扑优化[J]. 力学学报, 2000, 32(2): 171-179.  
SUI Yunkang, YANG Deqing, WANG Bei. Topological Optimization of Continuum Structure with Stress and Displacement Constraints under Multiple Loading Cases [J]. Acta Mechanica Sinica, 2000, 32(2): 171-179.
- [10] 张传思. 硅片传输机器人手臂的拓扑优化设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [11] 张刚. 机器人机械臂的动力学分析及其拓扑优化设计[D]. 宁波: 宁波大学, 2012.
- [12] 李渤. SCARA 机器人多领域联合仿真与结构优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [13] 马国庆. 移动服务机器人机械臂结构设计及其优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [14] 罗蓬, 周锦进. 精密型腔模具成型尺寸的多目标优化[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2000, 29(2): 54-57.  
LUO Peng, ZHOU Jinjin. The Multi-Object Optimal Design for Cavity Dimensions of Precise Mould [J]. Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition), 2000, 29(2): 54-57.
- [15] 王豫鄂, 买买提明·艾尼, 郭艳朋, 等. 旋转对称支承板机座多目标驱动尺寸优化及动态分析[J]. 汽轮机技术, 2013, 55(4): 271-274.  
WANG Yue, Maimaitiming · Aini, GUO Yanpeng, et al. Dynamic Analysis and Multi-objective Drive Size Optimization of Rotational Symmetry Struts Support [J]. Turbine Technology, 2013, 55(4): 271-274.
- [16] MIN Seungjae, NISHIWAKI Shinji, KIKUCHI Noboru. Unified Topology Design of Static and Vibrating Structures Using Multiobjective Optimization [J]. Computers and Structures, 2000, 75(1): 93-116.
- [17] MA Zhengdong, KIKUCHI Noboru, CHENG Hsienchie. Topological Design for Vibrating Structures [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1995, 121(1/4): 259-280.
- (上接第 4 页)
- [3] WEN F, LIANG C G. Displacement Analysis of the 6-6 Stewart Platform Mechanism [J]. Mechanism and Machine Theory, 1994, 29(4): 547-557.
- [4] TSAI L W, MORGAN A P. Solving the Kinematics of the Most General Six-and Five-degree-of-freedom Manipulators by Continuation Methods [J]. Journal of Mechanical Design, 1985, 107(2): 189-200.
- [5] RAGHAVA M. The Stewart Platform of General Geometry has 40 Configurations [J]. ASME J. Mechanical Design, 1993, 115: 277-282.
- [6] 余顺年, 陈扼西, 马履中. 基于 2TIR 机构串并联机器人位置分析及仿真[J]. 机械设计与研究, 2006(5): 41-44.  
YU Shunnian, CHEN Exi, MA Lvzhong. Position Analysis and Simulation of Parallel Robot Based on 2TIR Mechanism [J]. Mechanical Design and Research, 2006(5): 41-44.
- [7] 刘宏伟. 一种 3-TPT 并联机构的位置分析与运动仿真[J]. 机械传动, 2009(6): 63-66, 122.  
LIU Hongwei. A Position Analysis and Motion Simulation of a 3-TPT Parallel Mechanism [J]. Mechanical Drive, 2009(6): 63-66, 122.
- [8] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [9] 郝云堂, 金焯, 季辉. 虚拟样机技术及其在 ADAMS 中的实践[J]. 机械设计与制造, 2003(3): 16-18.  
HAO Yuntang, JIN Ye, JI Hui. Virtual Prototyping Technology and its Application in ADAMS [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2003(3): 16-18.