

doi: 10.3969/j.issn.2095-0411.2023.03.009

外骨骼机器人膝部三铰点零件轻量化研究

祝海林^{1,2}, 周扬驰¹, 何宜玖¹, 徐玉凯¹

(1. 常州大学 机械与轨道交通学院, 江苏 常州 213164; 2. 江苏省绿色过程装备重点实验室(常州大学), 江苏 常州 213164)

摘要: 为了满足康复训练外骨骼机器人的结构轻量化要求, 提出了拓扑优化与响应面法相结合的结构优化方法, 通过对某康复训练外骨骼机器人膝部三铰点进行了轻量化研究与多目标优化设计, 利用拓扑优化工具对其零件进行初步优化, 然后以质量、最大位移及最大极限应力为目标, 以零件尺寸为设计变量, 进行多目标优化设计。结果表明, 在满足刚度和强度的前提下, 2 次优化后的三铰点零件质量减轻了 26.14%, 为康复训练外骨骼机器人的轻量化与实用性研究, 提供了新的途径。

关键词: 外骨骼; 三铰点; 拓扑优化; 响应面; 轻量化

中图分类号: TH 243

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2023)03-0071-07

Research on lightweight of three hinge parts of exoskeleton robot knee

ZHU Hailin^{1,2}, ZHOU Yangchi¹, HE Yijiu¹, XU Yukai¹

(1. School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Green Process Equipment, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: In order to meet the structural lightweight requirements of rehabilitation training exoskeleton robot, a structural optimization method combining topology optimization and response surface method was proposed. Through lightweight research and multi-objective optimization design of three hinge points on the knee of a rehabilitation training exoskeleton robot, topological optimization tools were used for preliminary optimization of its parts. Mass, maximum displacement and maximum ultimate stress are subsequently taken as objectives, and component size was taken as design variable to carry out multi-objective optimization design. The results showed that, on the premise of meeting the stiffness and strength, the mass of the three-hinge points was reduced by 26.14% after two optimiza-

收稿日期: 2022-12-26。

作者简介: 祝海林(1963—), 男, 浙江绍兴人, 博士, 教授。E-mail: 85183004@qq.com

引用本文: 祝海林, 周扬驰, 何宜玖, 等. 外骨骼机器人膝部三铰点零件轻量化研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2023, 35(3): 71-77.

tions, which provided a new way for the lightweight and practicability research of the rehabilitation training exoskeleton robot.

Key words: exoskeleton; three hinge points; topology optimization; response surface methodology; lightweight

康复训练外骨骼机器人是一种帮助行走困难老年人所设计的辅助训练设备^[1]。近年来,由于技术的不断发展,吸引了国内外各科研院所、机构对它进一步研究^[2-3],如中科院外骨骼机器人、尖叫科技外骨骼机器人、Rex 外骨骼机器人等。但大多数康复外骨骼机器人存在成本较高、设备相对笨重以及智能性和可靠性低等缺陷,因此距离大规模市场化差距较大^[4]。其中突出的问题是结构笨重、质量较大,故对外骨骼机器人的轻量化研究尤为重要。陈树洋^[5]对外骨骼膝关节的结构进行拓扑优化,对膝关节三铰点实心改为空心,让其质量下降了 15.8%,但其变形的程度以及应力值都增加了,承受能力增加。赵南等^[6]利用粒子群算法使外骨骼机器人膝部三铰点的质量下降了 13.16%,其通过粒子群算法的迭代优化改变零件尺寸,虽然减轻了质量,但其振动特性以及受力不明确,缺少说服力。总体可以看出针对康复外骨骼机器人轻量化设计,大多数是选择以质量减轻为目的,进而牺牲一些固有频率、振幅、强度、应力值以及应力变形等因素来进行优化设计,但是运用响应面法联合拓扑优化对外骨骼机器人的应力强度、质量、固有频率来进行综合优化的相关文献报道较少。文章以康复训练外骨骼机器人(图 1)为研究对象,将拓扑优化^[7-9]与响应面法有机结合,对其膝部三铰点零件(图 2)的质量、尺寸、变形、应力及固有频率进行了多目标优化^[10-12],为同类产品零件的轻量化研究提供了思路。

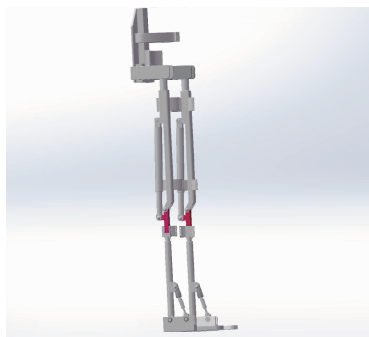


图 1 外骨骼机器人

Fig.1 Exoskeleton robot

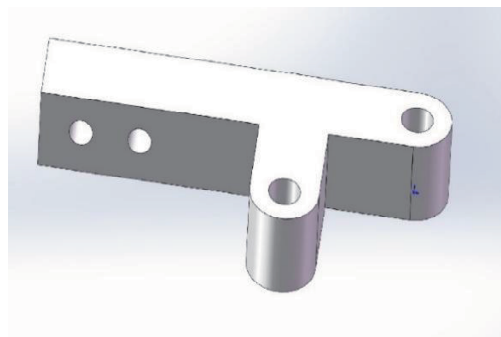


图 2 膝部三铰点零件

Fig.2 Knee three hinge parts

1 建模

康复训练外骨骼机器人整体上是一个比较复杂的结构,其中需要被优化分析的三铰点机构模型位于膝关节处。首先将其在 SolidWorks 里面建立模型,再将其与 ANSYS workbench 关联参数。建立有限元模型,所用单元的类型为 SOLID187,使用的材料选用铝合金。铝合金的弹性模量为 72 GPa,泊松比为 0.33,密度为 2 270 kg/m³。由于其结构相对较小,故使用自由网格(Automatic)划分,网格尺寸定位 3 mm,生成的网格节点数 9 543 个,单元 5 196 个。如图 3 所示,网格的最大偏度小于 0.95,并且绝大数网格偏度处于 0.45~0.8,用偏度(Skewness)衡量网格质量,偏度值为 0~1,1

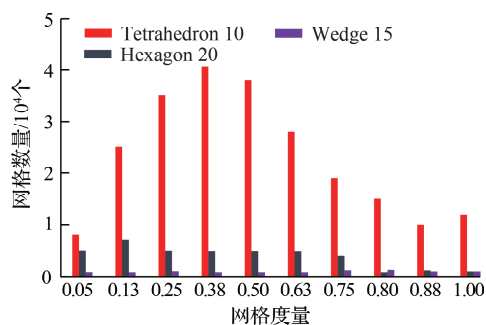


图 3 网格检查结果统计图

Fig.3 Statistical table of grid check results

最差,当最大偏度小于0.95时,说明网格质量符合要求。

2 有限元分析

2.1 静态分析

基于使用环境,对一些理想的状态(人在稳定竖直站立时),其竖直方向的力由其大腿传递给小腿,气压缸连接的圆孔不会承受竖直方向的力,三铰接点处承受来自大腿的力。现将康复训练外骨骼机器人的下肢移动到人体静止状态下,并且大腿呈笔直状态,此时三铰点处承受载荷,进行受力分析,根据受力情况,在三铰点的下部施加固定约束,其另外上部圆孔处施加750 N的竖直向下的力,如图4所示。零件受力分析如图5所示,在上部圆孔处有最大的位移,最大位移为0.004 974 mm,在下铰接孔处有最大的应力,最大值为3.454 7 MPa,但材料的屈服极限为195 MPa,远远大于最大应力值。由此可知,康复训练机器人的三铰点的最大位移和最大应力完全可以满足其工作状态。

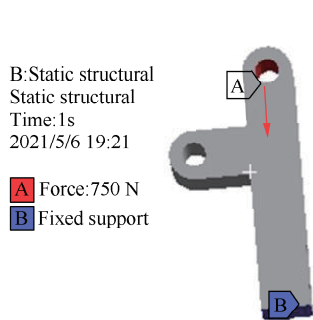


图4 约束和边界载荷

Fig.4 Constraints and boundary loads

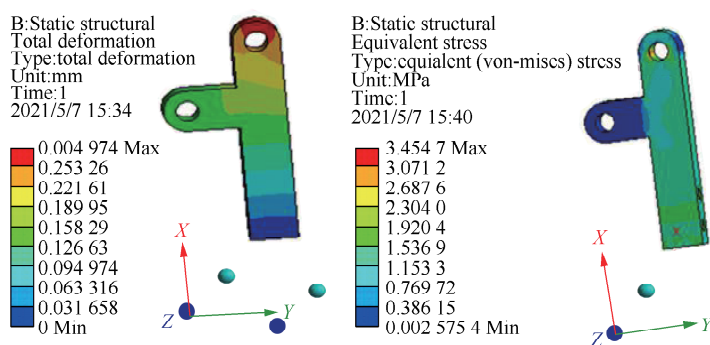


图5 静力状态下应力与应变云图

Fig.5 Stress and strain nephogram under static state

2.2 模态分析

对三铰点零件进行了前4阶固有频率和振型分析,主要由于低阶模态对零件的振动影响比较大。如图6所示,分别为1阶振动、2阶振动、3阶振动、4阶振动。第1阶段振型为以X轴为转轴的上下扭动,其振动频率为43.86 Hz;第2阶段振型为以X轴为轴的左右摆动,振动频率为105.52 Hz;第3阶段振型为沿Y轴方向的左右扭动,其振动频率为267.35 Hz;第4阶段振型为沿Y轴方向的上下摆动,其振动频率为493.93 Hz。

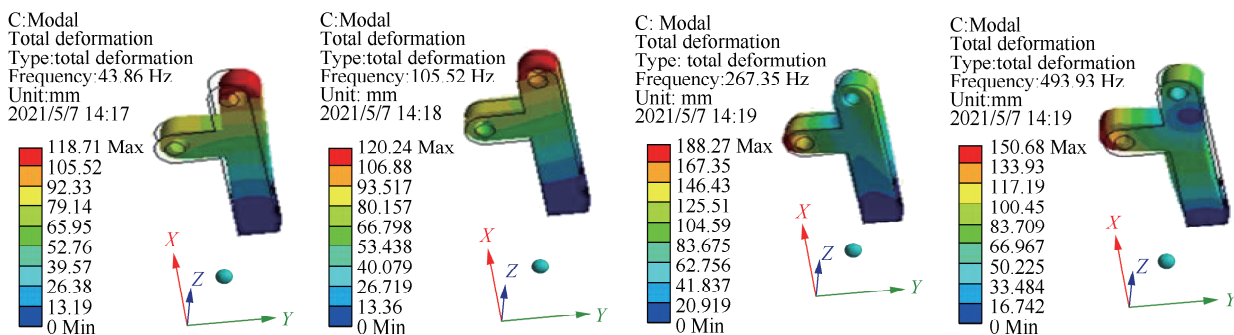


图6 前4阶固有频率下的振型图

Fig.6 Mode shapes of the first four natural frequencies

2.3 拓扑优化

利用拓扑分析（Shape optimization）拓扑优化模块对其外骨骼机器人的三铰点零件进行拓扑优化，首先将目标参数设定为减少其质量的 40%，同时在承受固定载荷下，减轻材料的质量作为其状态变量，这样既能够保证结构的刚度，又有最大的拓扑形状，得到的三铰点零件的拓扑优化模型如图 7 所示。由图 7 可以知道，红色区域为可以优化去除质量的范围，存在较大的优化空间。得到可以进行优化的区域后，接下来的工作就是进行结构改进，来得到更加优化的模型。为了加工方便，在三铰点零件的中间进行开槽处理，对拓扑优化并且改进后的零件进行分析，施加载荷以及约束后，得到新的应力以及应变云图，如图 8 所示。分析图 8 可以得知，在上部圆孔处有最大的位移，最大位移约为 0.004 1 mm，在上铰接孔处有最大的应力，为 4.656 6 MPa，但材料的屈服极限为 195 MPa，远远大于最大应力值，因此其最大位移和最大应力完全可以满足其工作状态。

接下来进行改进后零件的模态分析，如图 9 所示。由图 9 可以看出，三铰点零件的前 4 阶模态振

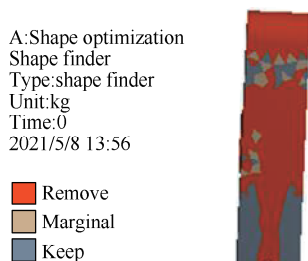
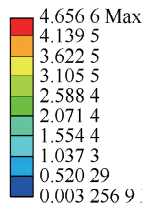


图 7 三铰点优化云图

Fig.7 Three hinge point optimization cloud image

B:State structural
Equivalent stress
Type:equivalent (von-mises) stress
Unit:MPa
Timer:1
2021/5/11 18:37



B:Static structural
Total deformation
Type:total deformation
Unit:mm
Time:1
2021/5/11 18:36

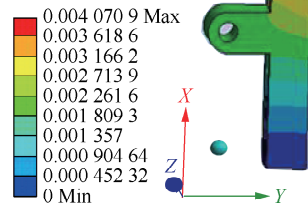
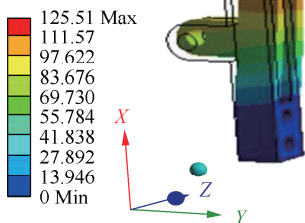


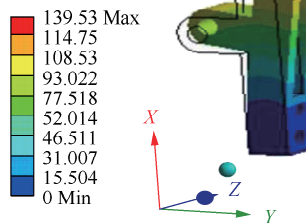
图 8 改进后应力与应变云图

Fig.8 Improved stress and strain nephogram

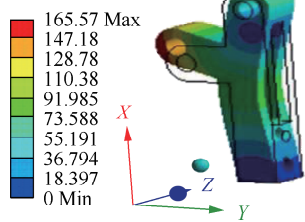
B:Modal
Total deformation
Type:total deformation
Frequency:36.794 Hz
Unit:mm
2021/5/8 11:05



B:Modal
Total deformation
Type:total deformation
Frequency:102.97 Hz
Unit:mm
2021/5/8 11:06



B:Modal
Total deformation
Type:total deformation
Frequency:237.18 Hz
Unit:mm
2021/5/8 11:06



B:Modal
Total deformation
Type:total deformation
Frequency:437.18 Hz
Unit:mm
2021/5/8 11:06

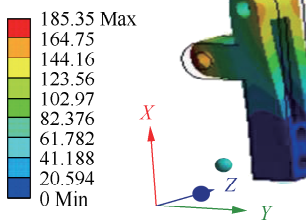


图 9 改进前后 4 阶固有频率

Fig.9 First four natural frequencies after improvement

动频率差异非常明显,故不会产生共振现象,能够满足所要求的工况,同时开槽后三铰点零件的质量由原来的 0.269 16 kg 减小到 0.206 84 kg,较之前质量减少了 23.15%,初步实现了轻量化设计。

3 多目标优化设计

3.1 优化依据

一般情况下,响应面的模型采用二阶模型,假如有 n 个变量,二次多项式响应的模型对应公式为

$$y(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j}^n a_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

式中: x 为设计变量, $x = x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$; a_0, a_i, a_{ii}, a_{ij} 为未知的参数,其个数为 $(n+1)(n+2)/2$ 。因此未知的参数 a 可以通过最小二乘法确定,所取试验点个数要大于 a 的个数。

3.2 数据参数化

经过拓扑优化以及结构改进设计,三铰点零件强度以及刚度都有所减小,而且经过模态分析,其零件的固有频率大于一般的工作响应频率以及电机的频率,是一个较为合理的结构。故为了从另一方面对三铰点零件进行进一步的优化设计,文章采用基于响应面法(Response surface optimization)的多目标优化设计,借助 ANSYS workbench 进行。优化目标为位移变形、应力、零件尺寸,以达到零件轻量化。

根据拓扑设计后的零件结构,针对其受力情况以及载荷方向,这里选取对三铰点零件影响比较大的数据参数化。上铰孔连接大腿板根部承受大腿传递压力,下端固定铰孔连接小腿上部来带动小腿联动,零件厚度和开槽宽度是为了承受中间应力挤压,如上设计变量在保证强度以及刚度合适前提下,数值越小,则材料使用少,质量更加轻。参数设定:将上铰孔直径(D_1)、零件厚度(H)、下端固定铰孔直径(D_2)、开槽宽度(L)作为设计变量;再将目标变量定为最大变形(δ_{\max})、最大应力值(σ_{\max})、前4阶固有频率(P_i ($i=1, 2, 3, 4$))以及质量(m)。

3.3 响应面构建

在 Design of experiments type 中选择与之所对应的 Latin hyper sampling design,由于所涉及优化参数有4个,故设置 Number of samples 为20,一般一个参数对应5个样本数,使之计算精度高一些。而 Response surface type 中选用 Kriging 法,因为 Kriging 法在特定的随机过程中,如固有平稳过程, Kriging 法能够给出最优的线性无偏估计,是空间中最优的无偏估计器,能够在3D中较为稳定的预测,且在随机场内的每一个点测度都是一个较为可靠的随机变量,服从特定的概率分布。响应面的类型与算法选定以后,通过求解计算,得到的试验结果见表1。

3.4 优化求解

选择整个响应面类型与算法后,进行优化求解,这里 Method selection 选用 MOGA,最大允许迭代次数选择70,其他默认,之后进行 Update,得到收敛结果,同时得到3组优化结果方案,见表2。根据实际情况以及设计目标,选择优化结果比较好的第1组优化方案,尺寸优化后,其质量减轻,而且受力载荷都在材料的安全范围内,较为合理。

表 1 试验设计结果

Table 1 Experimental design results

试验次数	D_1/mm	H/mm	D_2/mm	L/mm	σ_{\max}/MPa	δ_{\max}/mm	m/kg	P_1/Hz	P_2/Hz	P_3/Hz	P_4/Hz
1	12.938	25.875	7.24	12.06	4.272 7	0.003 721	0.206 84	36.561	105.211	237.182	437.230
2	11.563	23.125	8.04	12.54	4.918 7	0.008 465	0.168 66	32.452	119.231	252.352	470.201
3	11.938	23.875	8.12	10.86	4.448 4	0.005 326	0.193 02	38.655	126.231	223.620	472.301
4	11.813	23.625	8.28	12.30	4.643 5	0.006 294	0.185 88	30.231	109.362	232.366	442.201
5	11.563	26.875	7.64	11.10	3.402 0	0.003 812	0.202 83	32.353	108.362	238.520	502.366
6	11.312	26.125	8.44	13.14	4.289 5	0.003 898	0.209 22	43.215	116.352	256.320	482.593
7	11.688	27.125	8.36	12.18	4.859 6	0.004 872	0.204 49	40.258	110.231	238.321	421.435
8	11.438	24.625	8.68	13.02	4.024 2	0.005 446	0.190 64	48.961	108.325	232.321	482.365
9	12.188	22.625	7.96	11.58	3.409 0	0.007 929	0.166 01	46.320	92.302	222.251	433.694
10	12.688	23.375	8.52	11.46	4.282 0	0.005 803	0.186 41	38.365	91.201	240.321	455.360
11	12.428	22.875	8.20	11.82	4.127 8	0.007 723	0.171 64	35.354	106.321	238.963	478.410
12	12.063	26.375	7.48	11.34	4.291 8	0.003 948	0.238 58	46.352	110.201	252.321	516.149
13	11.688	27.375	8.60	11.94	3.357 6	0.003 982	0.255 21	49.621	118.328	262.320	494.513
14	11.438	24.875	7.32	12.66	4.006 4	0.005 146	0.197 73	39.561	105.210	242.210	420.922
15	11.603	24.125	7.88	11.70	3.888 0	0.004 729	0.198 24	35.232	108.320	238.210	460.638
16	11.813	25.375	7.72	12.90	4.070 0	0.004 129	0.211 59	45.363	100.202	237.520	456.756
17	11.720	25.625	7.80	12.78	4.642 0	0.004 635	0.208 36	36.634	91.211	242.301	460.688
18	11.288	25.125	7.40	12.42	4.863 1	0.004 748	0.203 66	32.355	98.963	238.963	432.690
19	12.012	24.375	7.56	11.20	3.793 6	0.004 166	0.204 89	39.352	105.325	229.520	477.892
20	11.364	24.625	7.76	10.98	4.108 5	0.003 840	0.198 81	34.021	101.231	235.201	414.953

表 2 多目标优化方案

Table 2 Multi-objective optimization scheme

目标参数	第 1 组方案	第 2 组方案	第 3 组方案
m/kg	0.198 81	0.200 25	0.199 17
δ_{\max}/mm	0.003 840 4	0.002 787 4	0.002 941 2
σ_{\max}/MPa	4.108 5	4.358 6	4.732 9
P_1/Hz	35.794	36.804	35.852
P_2/Hz	101.56	102.87	101.88
P_3/Hz	232.18	235.44	231.58
P_4/Hz	412.52	428.560	415.36

表 3 尺寸参数优化前后对比

Table 3 Comparison of size parameters before and after optimization

目标参数	原参数值	优化后参数值
D_1/mm	12	11.364
H/mm	25	24.625
D_2/mm	8	7.76
L/mm	12	10.98
σ_{\max}/MPa	4.656 6	4.108 5
δ_{\max}/mm	0.004 070 9	0.003 840 4
m/kg	0.206 84	0.198 81
P_1/Hz	36.794	35.794
P_2/Hz	102.97	101.56
P_3/Hz	237.18	232.18
P_4/Hz	437.18	412.52

3.5 优化结果对比

基于上述响应面法的优化求解，得到数据尺寸优化以及质量优化结果。目标参数优化前后对比见表 3。根据表 3 可知，零件的参数都相应的减小，其中最大的应力由 4.656 6 MPa 减小到 4.108 5 MPa，承载强度增强了 11.8%，同时最大的变形由 0.004 070 9 mm 减小到了 0.003 840 4 mm，前 4 阶固有频率经过优化之后都有降低，发生共振的概率降低。在保证强度和刚度的前提下，其零件的质量由 0.206 84 kg 减少到了 0.198 81 kg，在拓扑优化的基

础上又降低了 3.88%。

4 结 论

利用 SolidWorks 与 ANSYS workbench 建立三维模型并进行数据参数化,同时使用拓扑分析(Shape optimization)模块,实现了零件结构优化,初步实现零件总质量减少了 23.15%。通过建立二次响应面模型,将拓扑优化与多目标响应面优化结合,以轻量化和固有频率作为目标对膝部三铰点结构进行二次优化。经过 2 次优化设计使下肢外骨骼机器人膝部三铰点零件质量共减少了 26.14%,实现了外骨骼机器人零件设计参数的动态优化,为外骨骼机器人的轻量化以及结构优化设计提供了参考。

参考文献:

- [1] 刘恒,白泽杨,陈俊宇,等. 康复外骨骼机器人的研究现状及发展趋势探讨[J]. 机电信息, 2020(9): 106-107, 109.
- [2] 沈惠平,马小蒙,孟庆梅,等. 仿生机器人研究进展及仿生机构研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2015, 27(1): 1-10.
- [3] 嵇鹏程,沈惠平. 服务机器人的现状及其发展趋势[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2010, 22(2): 73-78.
- [4] 李龙飞,朱凌云,荀向锋. 可穿戴下肢外骨骼康复机器人研究现状与发展趋势[J]. 医疗卫生装备, 2019, 40(12): 89-97.
- [5] 陈树洋. 下肢外骨骼助力机器人结构与仿真分析[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
- [6] 赵南,程文明,邬钱涌. 穿戴式外骨骼膝关节三铰点机构优化设计[J]. 机械工程与自动化, 2012(1): 7-9, 12.
- [7] 时兆义,张彦斐,宫金良. 下肢外骨骼机器人大腿板模态分析与拓扑优化[J]. 机床与液压, 2020, 48(10): 18-21, 27.
- [8] ALKALLA M G, FANNI M A. Integrated structure/control design of high-speed flexible robot arms using topology optimization[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2021, 49(3): 381-402.
- [9] SHA L S, LIN A, ZHAO X Q. A topology optimization method of robot lightweight design based on the finite element model of assembly and its applications[J]. Science Progress, 2020, 103(3): 13-16.
- [10] 刘承杰,李倩,罗鹏,等. 基于响应面法的 V 带轮多目标优化设计[J]. 应用力学学报, 2018, 35(1): 147-153, 233.
- [11] LEE T W, HONG D, WOO B C. Optimized design of improved permanent magnet synchronous motor for articulated robot using the penalty function method and response surface methodology[J]. Journal of Magnetism, 2019, 24(1): 190-197.
- [12] QIN F, HU Q G, LIU T. Forearm of industrial robot reliability analysis based on response surface & stochastic finite element method[J]. International Journal of Civil Engineering and Machinery Manufacture, 2017, 2(2): 25-28.

(责任编辑:谭晓荷)