文章编号：1000-8608(2019)01-0063-08

七自由度球头开孔机器人结构优化研究

徐 鹏[1]，富 威*[2]，陈艳龙[2]，肖凯元[2]，薛 睿[2]

（1.中国船舶重工集团公司第716研究所，江苏 连云港 222002；
2.哈尔滨工程大学 机电工程学院，黑龙江 哈尔滨 150001）

摘要： 为解决某装备球头开孔作业存在的问题，提出了一套七自由度串联开孔机器人设备方案，根据其D-H运动学模型进行运动学分析并检验了机器人的工作空间.根据机器人的静刚度、速度以及最大工作空间距离指标，构建了机器人的多目标尺寸优化模型；利用少控制参数的多目标粒子群优化算法对模型进行求解.最终结果表明，在取前臂尺寸为0.958 m，后臂尺寸为0.965 m时，相较于尺寸优化前，机器人的静刚度全域指标提升了60.05%，速度综合全域指标提高了3.1%，最大工作空间距离指标增加了6.4%.

关键词： 七自由度；开孔机器人；工作空间；尺寸优化；性能指标分析

中图分类号： TP242.3 **文献标识码：** A **doi：** 10.7511/dllgxb201901009

0 引 言

近年来，以美国、德国为首的当今制造业强国反复提出将智能化引入并主导工业生产活动.美国针对该领域的研究提出了互联网计划，德国也相应地提出了工业4.0计划.借此机会，我国提出中国制造2025，其目的是为了开启并引导新的工业革命，使我国的制造业向世界一流水平迈进，使世界进入工业智能化的新时代.智能化的基础是自动化，而目前我国在工业制造各个领域中自动化水平参差不齐[1].

国外研究人员从20世纪70年代初就开始对机器人性能指标展开了详细的研究工作：Vinogradov等[2]提出了机器人工作角的概念；Kumar等[3]提出了机器人灵巧度工作空间的概念；Salisbury等[4]提出了雅可比矩阵条件数的概念；Yoshikawa[5]提出了可操作性的概念；Gosselin等[6]提出了全局性能指标的概念.

我国学者也在性能指标分析方面做了大量研究，郭希娟等[7]在Gosselin提出的全局性能指标的基础上，根据Hessian矩阵提出了加速度性能指标，并优化了串联机器人的结构；丁渊明[8]根据机器人动力学方程提出了机器人能量消耗指标.二人理论研究的正确性均通过仿真试验得到了验证.

传统曲面开孔采用人工手动开孔，然后以打磨修饰的方式进行加工.由于对船舶性能要求的提高，船舶的结构布局和材料要求发生了变化，传统加工方式已经不能满足需求[9].随着国家对船舶需求的增加，适用于船舶复杂曲面切割的高性能、高效率切割装置仍是研究的重要方向.

本文在船舶制造领域，设计一套专门针对某装备球头的开孔机器人加工设备，并对开孔精度和开孔质量进行提升.以速度综合指标和静刚度指标为优化目标，前者保证开孔机器人在运行过程中速度平稳，从而提升开孔作业的加工质量，后者保证机器人结构刚度合格.同时以最大工作空间距离指标为优化约束条件，建立开孔机器人性能指标优化模型.然后确定使用少控制参数的多目标粒子群优化算法对模型进行求解.最后分析结果以检查结构性能的提升情况.

1 球头开孔方案描述

1.1 球头加工技术要求

本文所设计的开孔设备是针对某装备球头开

收稿日期： 2018-07-05； **修回日期：** 2018-12-05.
基金项目： 工信部智能制造专项(财建(2017)373号)；工信部高技术船舶专项(工信部联装函(2016)545号).
作者简介： 徐 鹏(1982-)，男，博士，高级工程师，E-mail：xupeng716@126.com；富 威*(1975-)，男，博士，副教授，E-mail：fuwei@hrbeu.edu.cn.

孔作业要求进行构想的，加工工件形状如图 1 所示，球头的具体生产工艺参数及技术要求如表 1 所示.

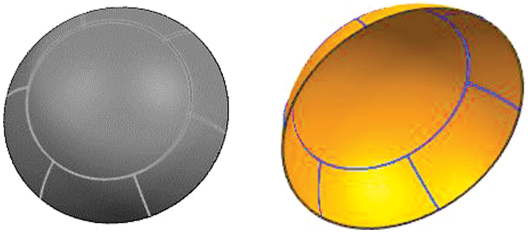


图 1 某装备球头工件

Fig. 1 Some equipment ball head workpiece

表 1 球头开孔技术要求

Tab. 1 Technical requirements for ball head hole opening

工件直径/m	工件厚度/mm	开孔直径/mm	切割精度/mm	坡口加工需求
4～6	30	160～240	＜0.2	内、外坡口

1.2 开孔设备方案对比

根据球头开孔作业生产技术要求，列举了 3 种可供参考的实施方案，具体如表 2 所示.

表 2 球头开孔设备参考方案

Tab. 2 Equipment reference plan for ball head hole opening

设备	优点	缺点
串联机器人	结构简单，成本低廉	结构刚度和精度较差
并联机器人	结构刚度好，易于求反解	结构复杂，成本高昂
变位机构	操作简单，工作过程稳定	定位复杂，变位角度受限

结合实际生产需求，对比 3 种设备方案：由于被加工件厚度较大，故切割方式选择火焰切割，而火焰切割所需的加工精度并不是很高；考虑到加工件的尺寸参数较大，故需要较大的工作空间[10]；同时考虑成本和技术难度，最终选择串联机器人进行开孔切割作业.

1.3 开孔设备方案确定

传统六自由度串联机器人仍存在许多不足之处：

(1)球头上不同切割孔之间的位置精度要求较高，故在切割孔时应尽量避免机器人基座频繁的大范围移动，否则会造成大量的位置误差. 鉴于球头在船用胎架上的安装方式，如果机器人基座固定会在加工过程中产生路径障碍，六自由度机器人越障能力有待提高.

(2)六自由度机器人在其工作空间内会产生不能消除的奇异位形，这些奇异位形的产生会导致机器人的运动性能受到严重影响.

(3)由于六自由度是运动空间所要求的基础自由度，没有多余的自由度，故整体灵活性不高，其动态性能仍有较大提升空间.

本文在六自由度机器人的基础上添加一个冗余自由度形成七自由度机器人. 通过增加该冗余自由度，可在确保末端割炬开孔轨迹运行正确的同时，利用自身的自运动形式，使关节角度变化更多样，从而使机器人在作业时躲避障碍物、克服奇异位形、提高机构灵活性并获得更好的动态性能.

七自由度机器人与六自由度机器人相比，多了一个关节，对机器人本体的强度和刚度影响加大，不仅结构变复杂，而且正逆解更复杂，因此要在六自由度机器人研究现状的基础上进行七自由度机器人的拓展研究[11].

图 2 所示的七自由度机器人是在六自由度机器人第 2 关节和第 3 关节之间增加一个转动副(图中已标出)形成的构型. 这种七自由度机器人具有和人的手臂相似的结构，可以将机器人第 1 关节到第 3 关节合并看成一个球副，对应的是人手臂肩关节，将第 5 关节到第 7 关节也看成一个球副，对应的是人手臂腕关节，第 4 关节则对应的是人手臂肘关节. 这样不仅可以避开一些障碍物，而且消除了手腕和肩部的奇异.

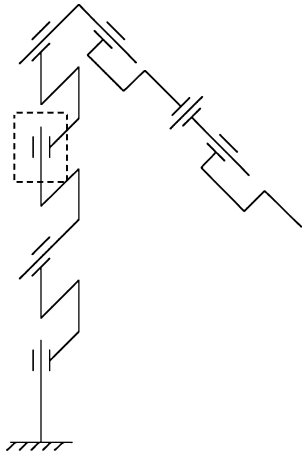


图 2 改良后的七自由度机器人构型

Fig. 2 Improved 7-DOF robot configuration

最终设计的球头开孔设备方案如下：将七自由度串联机器人以倒立的方式安装在一个可以在 3 个方向上做直线移动的龙门架上. 在进行开孔

作业时，机器人跟随龙门架在 3 个方向上分别对应需求进行移动，当移动到工件上方定位点时，龙门架停止移动，由七自由度串联机器人完成开孔切割作业. 球头开孔设备方案如图 3 所示.

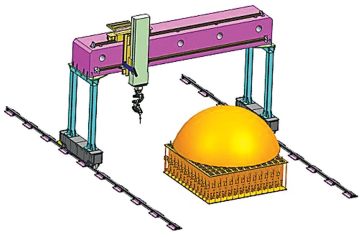


图 3　球头开孔设备方案

Fig. 3　Equipment plan for ball head hole opening

2　机器人运动学分析

2.1　D-H 运动学建模

根据经典 D-H 坐标法建系规则建立开孔机器人的 D-H 坐标系，如图 4 所示.

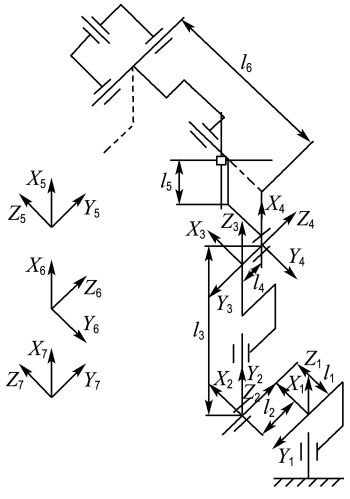


图 4　机器人的 D-H 坐标系

Fig. 4　D-H coordinate system of robot

根据表 1 工件的尺寸以及技术要求对机器人的各部分杆件长度预设如下：$l_1=560$ mm，$l_2=220$ mm，$l_3=280$ mm，$l_4=280$ mm，$l_5=160$ mm，$l_6=1\,000$ mm. 则球头开孔机器人的 D-H 参数可由表 3 给出.

表 3 中：θ_i 为关节转角，即 X_{i-1} 轴到 X_i 轴关于 Z_i 轴的转角，该参数为旋转关节的关节变量；d_i 为连杆长度，即 X_{i-1} 轴到 X_i 轴沿 Z_{i-1} 轴的距离；α_{i-1} 为关节扭转，即 Z_{i-1} 轴与 Z_i 轴关于 X_{i-1} 轴的转角；a_{i-1} 为关节偏移，即 Z_{i-1} 轴与 Z_i 轴沿 X_{i-1} 轴的距离.

表 3　机器人的 D-H 参数

Tab. 3　D-H parameters of the robot

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	90°	l_1	$-l_2$	θ_2
3	−90°	0	l_3	θ_3
4	90°	0	l_4	$\theta_4(90°)$
5	90°	l_5	l_6	θ_5
6	−90°	0	0	θ_6
7	90°	0	0	θ_7

2.2　正运动学分析

根据建立的机器人坐标系与相关参数，已知串联机器人相邻关节间的变换矩阵 ${}^{i-1}_{i}\boldsymbol{T}$ 的一般表达式为[12]

$$ {}^{i-1}_{i}\boldsymbol{T}=\begin{pmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i\cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i\cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1}d_i \\ \sin\theta_i\sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i\sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{1} $$

串联机器人的传递矩阵形式为

$$ {}^{0}_{N}\boldsymbol{T}={}^{0}_{1}\boldsymbol{T}\,{}^{1}_{2}\boldsymbol{T}\,{}^{2}_{3}\boldsymbol{T}\cdots{}^{N-1}_{N}\boldsymbol{T}=\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{2} $$

式中：r_{ij} 表示变换矩阵相乘后传递矩阵中的元素；$(p_x\quad p_y\quad p_z)^{\mathrm{T}}$ 表示开孔机器人的末端坐标系原点在基坐标系下表示的位置矢量，当 $N=7$ 时，其展开式如式(3)～(5)所示.

$$ \begin{aligned} p_x=&l_1\cos\theta_1-l_6[\sin\theta_4(\sin\theta_1\sin\theta_3-\\ &\cos\theta_1\cos\theta_2\cos\theta_3)-\sin\theta_2\cos\theta_1\cos\theta_4]-\\ &l_5[\cos\theta_4(\sin\theta_1\sin\theta_3-\cos\theta_1\cos\theta_2\cos\theta_3)+\\ &\sin\theta_2\sin\theta_4\cos\theta_1]-l_2\sin\theta_1+\\ &l_4(\sin\theta_1\cos\theta_3+\sin\theta_3\cos\theta_1\cos\theta_2)-\\ &l_3\sin\theta_2\cos\theta_1 \end{aligned} \tag{3} $$

$$ \begin{aligned} p_y=&l_5[\cos\theta_4(\sin\theta_3\cos\theta_1+\sin\theta_1\cos\theta_2\cos\theta_3)-\\ &\sin\theta_1\sin\theta_2\sin\theta_4]+l_6[\sin\theta_4(\sin\theta_3\cos\theta_1+\\ &\sin\theta_1\cos\theta_2\cos\theta_3)+\sin\theta_1\sin\theta_2\cos\theta_4]+\\ &l_2\cos\theta_1+l_1\sin\theta_1-l_4(\cos\theta_1\cos\theta_3-\\ &\sin\theta_1\sin\theta_3\cos\theta_2)-l_3\sin\theta_1\sin\theta_2 \end{aligned} \tag{4} $$

$$p_z = l_3\cos\theta_2 + l_5(\sin\theta_4\cos\theta_2 + \sin\theta_2\cos\theta_3\cos\theta_4) - l_6(\cos\theta_2\cos\theta_4 - \sin\theta_2\sin\theta_4\cos\theta_3) + l_4\sin\theta_2\sin\theta_3 \quad (5)$$

为了检验运动学公式的正确性，使用 Adams 仿真进行验证，首先预设机器人的各关节转角为 $\theta_i = 30°(i=1,2,\cdots,7)$，由式(3)～(5)可得

$${}^0_7\boldsymbol{T}_{30°} = \begin{pmatrix} -0.6 & 0.8 & 0.1 & -75.4 \\ -0.6 & -0.5 & 0.6 & 453.6 \\ 0.5 & 0.2 & 0.8 & 1\,742.8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

由式(6)可知，此时机器人的末端笛卡儿坐标为(－75.4，453.6，1 742.8)．然后将开孔机器人的模型导入 Adams 中，设置各关节转速 $\omega_i = 30$ rad/s$(i=1,2,\cdots,7)$，仿真运行时间设为 $t=1$ s，利用 Adams 自带的测量函数在仿真时对机器人模型末端坐标系原点坐标值在 X 轴、Y 轴、Z 轴 3 个方向的变化进行实时测量记录，仿真完成得到测量结果如图 5 所示．

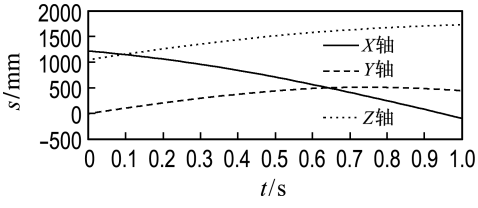


图 5 运动学验证结果

Fig. 5 Kinematic verification results

在图 5 中横坐标为仿真时间，纵坐标为位移．图中可反映末端标记点在各个方向上位移随时间的变化关系．各关节运动位移曲线是光滑平顺的，表明机器人各关节从初始位置到终止位置都是平稳运动的．从图中可看出，当仿真结束，即 $t=1$ s 所对应机器人模型末端坐标系原点的坐标值在 X 轴、Y 轴、Z 轴 3 个方向所对应的仿真数值分别与通过 Matlab 得到的理论计算值相同，故机器人的运动学模型是正确的．

2.3 工作空间分析

为保证开孔机器人的工作空间满足设计要求，需规定机器人的各个关节转动范围．在参考 ER50-C20 型通用机器人各个关节转角的转动范围后对开孔机器人的各个关节转角转动范围进行如下估计，详情如表 4 所示．

根据得到的末端坐标系原点的位置矢量表达式，通过蒙特卡罗法生成大量末端坐标系原点位置，以此近似绘制机器人的工作空间．预设采样数 $n=30\,000$，根据表 4 机器人各关节转动范围，在 Matlab 中所编辑程序运行完成生成的开孔机器人工作空间是三维空间图，如图 6 所示．

表 4 机器人关节转动范围

Tab. 4 Range of robot joint rotation

i	θ_i	i	θ_i
1	±180°	5	±180°
2	±90°	6	±120°
3	±180°	7	±180°
4	−45°/180°		

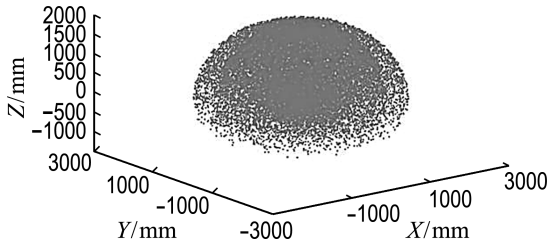


图 6 机器人工作空间

Fig. 6 Robot workspace

从图 6 可以看出，程序预设的采样点均匀地分布在工作空间内，空间内没有明显空腔，代表机器人末端可以到达任何位置，保证了工作空间的完整性，达到加工要求．这既体现了冗余自由度的灵活优势，也证明了机器人结构尺寸参数预设合理，满足作业要求．

3 性能指标分析与优化模型求解

3.1 设备性能指标选择

对开孔机器人提出的性能指标分别是最大工作空间距离指标、静刚度全域指标和速度综合全域指标．其中，最大工作空间距离指标是为了保证机器人在优化过程中工作空间覆盖工作区域；静刚度全域指标是为了反映开孔机器人在加工过程中各部件的变形量；而速度综合全域指标则是反映开孔机器人在加工过程中末端速度的波动情况[13-15]．

3.1.1 静刚度全域指标 当机器人在执行某项任务时，其末端执行器会对周围环境施加力(或力矩)．根据牛顿第三定律，这种作用也将反过来影响机器人本身，通过产生形变位移进而使末端执行器偏离预定位置，偏移量的大小决定了机器人

的定位精度，而这将受机器人的静力学刚度影响. 机器人定位精度的等级可以用静刚度全域指标表示. 外力和末端偏移量的关系为

$$\boldsymbol{F}=(\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\theta})^{\mathrm{T}})^{-1}\cdot\boldsymbol{K}\cdot\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\theta})^{-1}\cdot\Delta\boldsymbol{x} \tag{7}$$

定义 $\boldsymbol{K}_{\mathrm{c}}=(\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\theta})^{\mathrm{T}})^{-1}\cdot\boldsymbol{K}\cdot\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\theta})^{-1}$ 为机器人的静刚度矩阵，则 $\boldsymbol{K}_{\mathrm{c}}$ 是关于开孔机器人各个关节转角 $\boldsymbol{\theta}$ 的函数. 由于球头开孔机器人共包含 7 个自由度，故其雅可比矩阵非方阵，在此处取雅可比矩阵的广义逆进行计算.

为求出 $\Delta\boldsymbol{x}$ 的取值范围，引入 $\boldsymbol{F}$ 的二范数，如式(8)所示.

$$\|\boldsymbol{F}\|_2=\Delta\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{K}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{K}_{\mathrm{c}}\cdot\Delta\boldsymbol{x} \tag{8}$$

若 $\boldsymbol{F}$ 为单位荷载力，则 $\Delta\boldsymbol{x}$ 的取值范围为

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{\max}}}\leqslant\|\Delta\boldsymbol{x}\|\leqslant\frac{1}{\sqrt{\lambda_{\min}}} \tag{9}$$

其中 $\lambda_{\max}$ 和 $\lambda_{\min}$ 分别表示矩阵 $\boldsymbol{K}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{K}_{\mathrm{c}}$ 的最大、最小特征值. 为保证开孔机器人的静刚度，$\lambda_{\min}$ 的取值应尽量大，这样机器人的静刚度就越好. 故开孔机器人的静刚度全域指标为

$$\max\lambda_{\min}(\boldsymbol{\theta})$$

3.1.2　速度综合全域指标　前人总结提出的速度综合全域指标 S_{v} 的具体表达式如下：

$$S_{\mathrm{v}}=\frac{\sigma_{\mathrm{v}}}{\eta_{\mathrm{v}}}=\int_{w}\left(\frac{1}{K_{\mathrm{v}}}-\eta_{\mathrm{v}}\right)^2\mathrm{d}w\Big/\int_{w}\frac{1}{K_{\mathrm{v}}}\mathrm{d}w \tag{10}$$

式中：K_{v} 为雅可比矩阵条件数，w 为机器人可达工作空间. 开孔机器人的速度全域指标 η_{v} 和速度波动全域指标 σ_{v} 的具体展开式如下：

$$\eta_{\mathrm{v}}=\int_{w}\frac{1}{K_{\mathrm{v}}}\mathrm{d}w\Big/\int_{w}\mathrm{d}w \tag{11}$$

$$\sigma_{\mathrm{v}}=\int_{w}\left(\frac{1}{K_{\mathrm{v}}}-\eta_{\mathrm{v}}\right)^2\mathrm{d}w\Big/\int_{w}\mathrm{d}w \tag{12}$$

3.1.3　最大工作空间距离指标　机器人的最大工作空间指的是机器人手腕处对应关节的中心点所对应的最大工作空间. 在 2.3 节建立的运动学模型中，设开孔机器人第 7 关节对应的坐标系原点到基坐标系原点的距离为 R，则根据运动学方程可得

$$R=\sqrt{p_x^2+p_y^2+p_z^2} \tag{13}$$

用 $R_{\max}$ 和 $R_{\min}$ 表示第 7 关节对应的坐标系原点距离基坐标系原点的最大和最小距离，根据机器人的关节结构特点，其基座处关节在 360°范围内的旋转运动不会对此数值带来实质性影响，故为简化计算，修改最大工作空间距离指标为

$$R_{\max}=\max\sqrt{p_x^2+p_z^2} \tag{14}$$

$$R_{\min}=\min\sqrt{p_x^2+p_z^2} \tag{15}$$

即取消了 Y 方向上的数值运算，则机器人的最大工作空间距离指标可定义为其末端可达位置的距离最远端与距离最近端的差值，即

$$L=R_{\max}-R_{\min} \tag{16}$$

3.2　尺寸优化模型

基于性能指标的尺寸参数优化方法主要有两类：一是性能图谱法，即通过分析得到尺寸参数对不同性能指标的影响规律，设计者根据机构面向的不同应用场合完成尺寸的确定；另一个是将参数优化归结为目标函数寻优问题，运用智能优化算法求最优解.

性能图谱法是优化机构尺寸综合有效可靠的方法，但由于其是用图谱描述尺寸参数对机构某单一性能的影响规律，无法处理多目标优化问题. 而且再多设计变量优化设计也难以给出直观的表述，只能作为设计时的参考，从而限制了其应用范围. 而用智能优化算法进行参数优化设计则没有上述限制，因此其更有通用性.

选取前臂和后臂的尺寸作为优化变量. 引入离散化的全域性能指标 G[12]，具体的计算公式如下：

$$G=\frac{1}{n}\sum I \tag{17}$$

式中：n 为采样点数量，I 为各采样点的局域性能指标. 原则上采样点的数量越多，计算所得到的全域性能指标 G 就越接近理论值.

利用离散化的全域性能指标 G 近似计算速度全域指标 η_{v} 和速度波动全域指标 σ_{v}，设置前臂 l_1、后臂 l_2 为参考变量[16]，其中前臂 l_1 的取值范围为 900～1 100 mm，后臂 l_2 的取值范围为 800～1 000 mm，变化步长均取 20 mm. 针对每种位姿分别取 131 220 个采样点. 用 Matlab 进行编程并计算得出静刚度全域性能和速度综合全域性能仿真结果如图 7、8 所示.

分析可知，静刚度全域指标 $\lambda_{\min}$ 越大，速度综合全域指标 S_{v} 越小，开孔机器人在工作过程中结构变形越小，速度波动越小，则工作性能越好. 结合静刚度全域性能图谱可知，静刚度全域指标随前臂和后臂尺寸变化而呈现较复杂的变化，即在前臂尺寸设置在 0.95 m、后臂尺寸设置在 0.94 m 的点及其附近范围内，静刚度全域指标可达到最优数值；对于后臂尺寸变化则是当后臂尺寸控制在

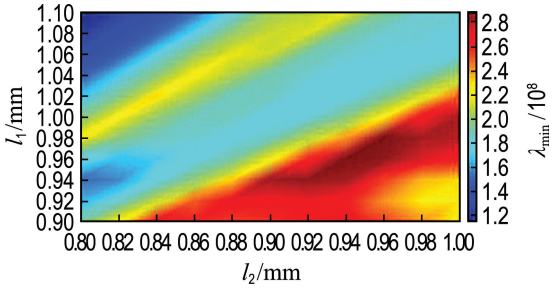


图 7 静刚度全域性能图谱

Fig. 7 Static stiffness global performance map

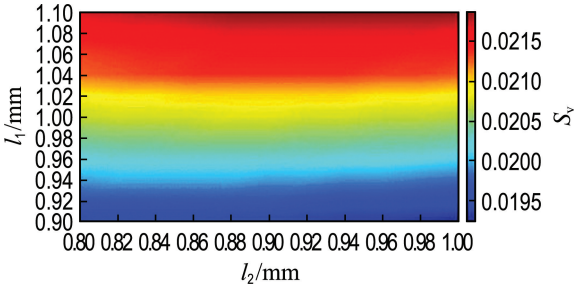


图 8 速度综合全域性能图谱

Fig. 8 Speed comprehensive global performance map

接近 1.0 m 时可达到较为理想的数据. 结合速度综合全域性能图谱可知,速度综合全域指标随前臂 l_1 的尺寸增大而变差,呈负相关趋势;而对于后臂 l_2 尺寸变化则是当后臂尺寸控制在接近 0.8 或 1.0 m 时达到最优.

综上所述,对于机器人的目标函数,前臂和后臂的尺寸在其对应的范围内变化时都无法保证两项指标能同时取到最优,故二者均造成了优化目标的耦合,有必要使用合适的多目标优化方法进行处理.

以静刚度全域指标和速度综合全域指标作为优化目标,以最大工作空间距离指标作为约束条件,机器人的前臂和后臂的尺寸作为优化变量建立尺寸优化模型如下:

$$\max \begin{cases} f_1 = \lambda_{\min}(\boldsymbol{\theta}) \\ f_2 = -S_v \end{cases} \qquad (18)$$

$$\text{s.t. } L \geqslant 1.62$$

3.3 粒子群优化算法求解

本文使用多目标粒子群优化算法对机器人的尺寸优化模型进行求解[17-18]. 经过几次仿真测试,同时考虑计算效率,采用的算法参数设置为种群规模 20、储备集容量 20、进化次数 100. 运行程序后得到 Pareto 前端如图 9 所示.

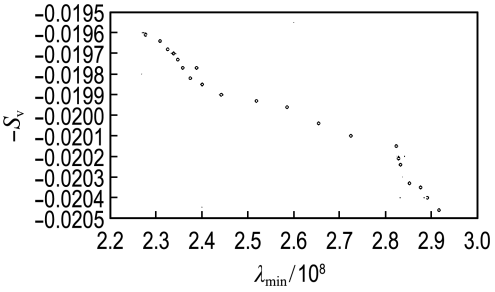


图 9 Pareto 前端

Fig. 9 Pareto front end

从表 5 中可看出静刚度全域指标和速度综合全域指标二者的计算值变化趋势,综合二者的变化程度,可发现随着前臂尺寸减小,后臂尺寸增加,在第 4 组之前的数据,静刚度全域指标降低的速率和速度综合全域指标提升的速率基本不变;而在第 4 组之后的数据中,速度综合全域指标提升的速率渐渐变小,而静刚度全域指标降低的速率则加快. 对于开孔机器人来说,静刚度全域指标相较于速度综合全域指标更为重要,故选取第 4 组数据中的前臂和后臂尺寸参数作为最终优化结果,圆整处理后得到前臂尺寸为 0.958 m,后臂尺寸为 0.965 m.

表 5 机器人 Pareto 前端中粒子

Tab. 5 Pareto front particles of robot

序号	前臂尺寸/m	后臂尺寸/m	静刚度全域指标/10^8	速度综合全域指标
1	0.979 5	0.960 9	2.917	0.020 46
2	0.971 9	0.962 3	2.877	0.020 35
3	0.963 8	0.963 8	2.833	0.020 24
4	0.957 8	0.964 6	2.824	0.020 15
5	0.950 3	0.967 2	2.655	0.020 04
6	0.943 4	0.968 8	2.519	0.019 93
7	0.938 1	0.971 4	2.401	0.019 85
8	0.931 2	0.974 5	2.359	0.019 77
9	0.929 2	0.976 0	2.339	0.019 70
10	0.924 9	0.978 3	2.309	0.019 64

3.4 优化结果分析

在工作空间变化情况方面,图 10 为优化前后工作空间的对比情况,图中蓝色点所覆盖的区域表示优化前工作空间,红色点所覆盖的区域表示优化后工作空间,图 10 中最外层边界由红色点覆盖,而且优化后所能达到的位置点集合平滑连续,故优化后工作空间范围得到了小幅提升.

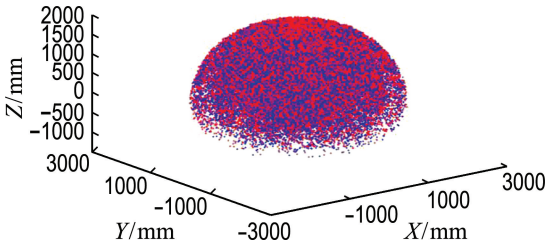


图 10　工作空间对比

Fig. 10　Comparison of workspace

开孔机器人的具体优化结果如表 6 所示. 可见机器人在经过性能指标分析以及优化算法的改进后，其静刚度全域指标的提升效果非常明显，相比于原尺寸参数提升了 60.05%. 而速度综合全域指标则较优化前变化不大，相对于原尺寸参数仅改进了 3.1%；在最大工作空间距离指标方面，相比于原尺寸参数扩大了 6.4%. 在机器人质量方面，随着优化后前臂和后臂尺寸变化，经整理分析重新建模之后测量得到前臂质量为 11.478 kg，较优化前下降了 4.2%；后臂质量为 22.998 kg，较优化前增加了 7.2%. 机器人的整机质量略有增加.

表 6　机器人前臂和后臂优化前后对比

Tab. 6　The comparison of robot′s forearm and rearm before and after optimization

状态	前臂尺寸/m	后臂尺寸/m	前臂质量/kg	后臂质量/kg	静刚度全域指标/10^8	速度综合全域指标	工作空间距离指标
优化前	1.000	0.900	11.981	21.449	1.764 4	0.020 80	1.800
优化后	0.958	0.965	11.478	22.998	2.824 0	0.020 15	1.916

4　结　论

(1)经过尺寸优化，机器人的静刚度全域指标提升了 60.05%；速度综合全域指标则较优化前变化不大，相对于原尺寸参数下的速度综合全域指标仅改进了 3.1%. 可见尺寸优化对机器人的设计过程十分重要.

(2)机器人的静刚度全域指标随前臂和后臂尺寸变化呈现较复杂的变化，即在前臂尺寸设置在 0.95 m，后臂尺寸设置在 0.94 m 的点及其附近范围内，静刚度全域指标可达到最优数值；而在前臂尺寸取最大值即 1.1 m，后臂尺寸取最小值即 0.8 m 所对应的点，静刚度全域指标达到最差数值，而不是单调变化.

(3)可以求出机器人的 D-H 运动学模型的反解，进而研究机器人在加工过程中各项性能指标的变化情况. 这在未来的研究中十分有必要.

参考文献：

[1] 蔡自兴，谢　斌. 机器人学 [M]. 3 版. 北京：清华大学出版社，2015.
CAI Zixing, XIE Bin. **Robotics** [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2015. (in Chinese)

[2] VINOGRADOV I B, KOBRINSKIY A Y, STEPANENKO Y A, *et al*. Features of the kinematics of manipulators and volumes methods [R]. Washington D C: NASA, 1973:535-564.

[3] KUMAR A, WALDRON K J. The workspaces of a mechanical manipulator [J]. **Journal of Mechanical Design**, 1981, **103**(3):665-672.

[4] SALISBURY J K, CRAIG J J. Articulated hands: force control and kinematic issues [J]. **International Journal of Robotics Research**, 1982, **1**(1):4-17.

[5] YOSHIKAWA T. Manipulability of robotic mechanisms [J]. **International Journal of Robotics Research**, 1985, **4**(2):3-9.

[6] GOSSELIN C, ANGELES J. A global performance index for the kinematic optimization of robotic manipulators [J]. **Journal of Mechanical Design**, 1991, **113**(3):220-226.

[7] 郭希娟，耿清甲. 串联机器人加速度性能指标分析 [J]. 机械工程学报，2008, **44**(9):56-60.
GUO Xijuan, GENG Qingjia. Analysis for acceleration performance indices of serial robots [J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2008, **44**(9):56-60. (in Chinese)

[8] 丁渊明. 6R 型串联弧焊机器人结构优化及其控制研究 [D]. 杭州：浙江大学，2009.
DING Yuanming. Research on structure optimization and control techniques of 6R serial arc welding manipulator [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese)

[9] 颜鑫鑫. 船用结构机器人曲面切割技术研究 [D]. 镇江：江苏科技大学，2014.

YAN Xinxin. The research on the robot saddle-shape cutting technology of marine structure [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)

[10] 李亚江. 切割技术及应用 [M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
LI Yajiang. **Cutting Technology and Application** [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. (in Chinese)

[11] 陈 勉. 前后大臂偏置式七自由度工业机器人本体设计与仿真优化 [D]. 杭州:浙江大学, 2016.
CHEN Mian. The main body design and simulation optimization of 7-DOF front back offset big arm industrial robot [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)

[12] 车宇飞. 圆管相贯线等离子切割机器人系统研究与设计 [D]. 济南:山东大学, 2017.
CHE Yufei. Research and design on robot system for pipe intersecting curve air plasma cutting [D]. Jinan: Shandong University, 2017. (in Chinese)

[13] 王 梦. 多自由度串联机器人运动学分析与仿真 [D]. 北京:北京理工大学, 2016.
WANG Meng. Kinematic analysis and simulation of multi-DOF serial robots [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)

[14] 燕培磊. 4-DOF 含闭链结构码垛机器人工作性能评价及参数优化 [D]. 合肥:合肥工业大学, 2016.
YAN Peilei. Evaluation on work performs and parameters optimization of 4-DOF palletizing robot with closed-chain [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016. (in Chinese)

[15] 石志新,罗玉峰,陈红亮,等. 机器人机构的全域性能指标研究 [J]. 机器人, 2005, **27**(5):420-422.
SHI Zhixin, LUO Yufeng, CHEN Hongliang, *et al*. Research on global performance index of robot mechanisms [J]. **Robotics**, 2005, **27**(5):420-422. (in Chinese)

[16] 程远超. 基于动力学的 HMD80 型码垛机器人结构优化设计 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.
CHENG Yuanchao. Structural optimization of HMD80 palletizing robot based on dynamics analysis [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)

[17] 张 勇,巩敦卫. 先进多目标粒子群优化理论及其应用 [M]. 北京:科学出版社, 2016.
ZHANG Yong, GONG Dunwei. **Advanced Multi-Objective Particle Swarm Optimization Theory and Its Application** [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)

[18] 雷开友. 粒子群算法及其应用研究 [D]. 重庆:西南大学, 2006.
LEI Kaiyou. Research on particle swarm optimization and its application [D]. Chongqing: Southwest University, 2006. (in Chinese)

Research on structural optimization of 7-DOF ball head opening robot

XU Peng[1], FU Wei[*2], CHEN Yanlong[2], XIAO Kaiyuan[2], XUE Rui[2]

(1. China Shipbuilding Industry Corporation No. 716 Research Institute, Lianyungang 222002, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to solve the problem of opening a hole on the ball head of certain equipment, a set of 7-DOF tandem opening robot equipment program is proposed. Based on its D-H kinematics model kinematic analysis and inspection of the robot's workspace are conducted. According to the static stiffness, speed and maximum workspace distance of the robot, the multi-objective size optimization model of the robot is constructed. The multi-objective particle swarm optimization algorithm with less control parameters is used to solve the model. The final results show that when the forearm size is 0.958 m and the rearm size is 0.965 m, compared to the size before optimization, the robot's static stiffness global index increases by 60.05%, the speed comprehensive global index increases by 3.1%, the maximum workspace distance index increases by 6.4%.

Key words: 7-DOF; opening robot; workspace; size optimization; performance index analysis