doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202503005

工业机器人多柔性部件耦合作用的动态特性贡献度量化研究

黄 文[1],魏 平[1],开亚骏[1,2],高 峰[1]
(1.安徽机电职业技术学院 航空与材料学院,安徽 芜湖 241002;
2.埃夫特智能机器人股份有限公司,安徽 芜湖 241002)

摘要:针对工业机器人动态特性仿真模型复杂、计算成本高的问题,提出基于帕累托原理的贡献度分析方法。以ER20C六轴机器人为研究对象,建立包含13个柔性部件(7个杆件+6个关节)的刚柔耦合模型,设计17组对比试验量化部件柔性对整机轨迹精度的影响。结果表明:关节柔性贡献度显著高于杆件;二轴关节柔性对轨迹误差的贡献率达38.04%,大臂铸件达34.00%;通过关键部件(一二三轴关节+底座+转座+大臂)柔性化建模,可使仿真精度达到全柔性模型的97.79%。

关键词:工业机器人;刚柔耦合;贡献度分析;动态特性
中图分类号:TP242.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5322(2025)03-0026-05

随着工业机器人向高速化、高精度化方向发展,结构柔性引发的动态精度衰减问题日益凸显。研究表明,当机器人运行速度超过额定值的70%时,柔性变形导致的轨迹误差占比可达总误差的60%以上[1]。传统刚体动力学模型难以准确预测此类动态特性,建立考虑部件柔性的刚柔耦合模型已成为学术界共识[2]。然而,工业机器人通常包含4~6个关节和多个连杆铸件,多部件柔性耦合效应使建模复杂度呈指数级增长[3]。如何平衡模型精度与计算效率,成为制约动态特性仿真应用的关键瓶颈。当前研究主要聚焦于单一部件柔性建模,如在关节柔性方面:张一楠等[4]建立了谐波减速器的非线性刚度模型;Bridges等[5]提出的扭簧等效方法被广泛应用于关节动力学简化。在杆件柔性方面:许侃雯等[6]综合应用ABAQUS和ADAMS将机器人杆件进行柔性化提高了仿真精度,然而,多部件耦合贡献机理研究仍存在不足,其仅考虑了并联机器人杆件柔性对整机运动特性的影响,未在模型中引入关节柔性。Li等[7]提出了一种基于误差敏感性分析的柔性模型,进一步提高了刚柔磨合模型的有效性。贡献度分析法作为解决复杂系统关键因素辨识的有效工具,在汽车、航空等领域已有成功应用。Wolff等[8]通过板件声学贡献度分析,将卡车噪声降低6 dB;季枫[9]采用基于试验设计的贡献度分析方法,量化车身零部件对白车身碰撞性能的影响并进行优化,但该方法在机器人多柔性系统中的应用尚属空白。本文提出基于帕累托原理的机器人柔性部件贡献度分析方法,即以ER20C六轴机器人为研究对象,建立包含13个柔性部件(7个杆件+6个关节)的全柔性化模型,并设计17组对照试验组,通过轨迹准确度量化部件柔性对整机动态特性的贡献程度,基于分析记过建立了精度-效率均衡的简化模型。

1 机器人刚柔模型的建立

机器人刚柔模型的搭建包含多个环节,主要流程如图1所示。首先利用ADAMS软件导入机器人三维模型,然后通过模型清理、简化及创建连接关系完成刚体模型建立;其次通过有限元软件的联合使用完成选定杆件的柔性化处理,同时基于关节柔性理论完成6个关节的柔性化建模,

收稿日期:2025-08-20
基金项目:国家重点研发计划"智能机器人"重点专项(2024YFB4709403);安徽省科技攻坚计划项目(202423h0805002);2024年度安徽省高等学校省级质量工程项目(2024cyzyq005)。
作者简介:黄文(1991—),男,安徽芜湖人,工程师,硕士,主要研究方向为机器人结构及控制算法。

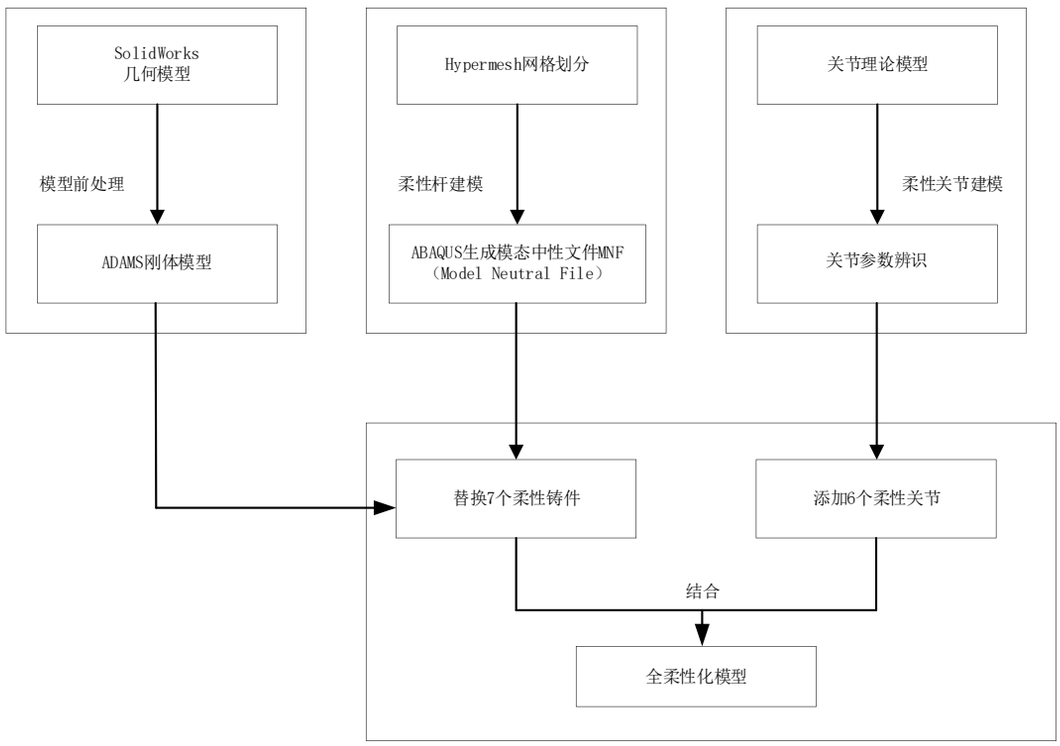


图 1　机器人建模流程

Fig. 1　Robot modeling process

实现整机柔性化;最后在 ADAMS 软件中创建 6 个电机轴的驱动,基于插值法分别创建各轴运动曲线,实现整机运动仿真。

1.1　机器人刚体模型的建立

本文选用机器人原始模型为 SolidWorks 格式,为建立刚性模型需先将原始模型另存为 x_t 格式,再导入至 ADAMS 软件;由于原装配体模型存在大量标准件,且这些部件结构对后续建模影响较小,因此在保留质量信息的前提下,对导入模型进行简化,简化后模型构件数量由 531 个减少为 75 个;在 ADAMS 软件中依次创建各轴运动副和电机,即可完成刚体运动学模型的建立,如图 2 所示。建立后的运动学模型中,6 个关节采用旋转副联接,其他构件均采用固定副联接,最终模型共设定 69 个固定副和 6 个旋转副。

1.2　刚体模型的柔性化

1.2.1　杆件柔性化

刚体模型建立完毕后,模型中所有部件均为刚体,在进行动力学仿真过程中不会产生变形,从而产生仿真结果与实机测试结果的误差。为让仿真模型更接近实际情况,需要联合有限元软件完成杆件柔性化处理。

在机器人刚体模型的 75 个部件中,主承力结构仅有 7 个,分别是底座、转座、大臂、电机座、小臂杆、小臂以及手腕体,如图 3 所示。因此针对机器人刚体模型的柔性化处理,只需要对其主承力结构进行杆件柔性化处理即可。



图 2　机器人刚体运动学模型

Fig. 2　Robot rigid body kinematics model

由于机器人 7 个主承力结构的柔性化方式基本相同,下面以大臂为例,说明机器人杆件的柔性化操作。

1) 有限元模型建立。将大臂三维模型导入

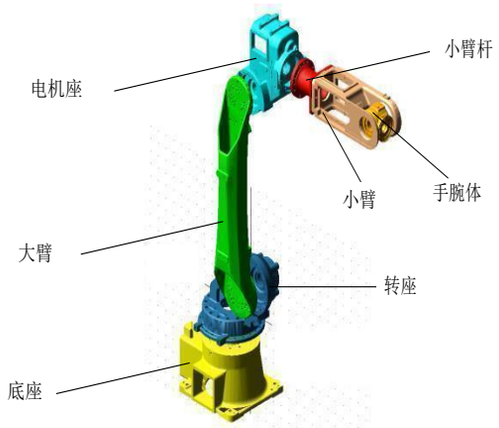


图 3　机器人主承力结构

Fig. 3　Robot main load-bearing structure

Hypermesh 中,采用二阶四面体网格对其进行网格划分,并赋予有限元网格相应材料属性,然后导入 ABAQUS 软件中备用,如图 4a 所示。

2) 设置外部接点。为方便后期柔性化构件替换原刚体构件模型且保持连接关系不变,需要给有限元模型创建相应的外部连接点。观察 ADAMS 中大臂刚体模型可以发现,大臂和周边部件共有 4 处连接,如图 4b 所示。因此只需在图 4a 所示的有限元模型相应位置创建对应参考连接点,并进行多点约束刚性连接(Multipoint Constraint,MPC),即可完成外部接点的设置。外部接点设置后的模型如图 4c 所示。

3) 分析步边界条件设置。为完成柔性体构件的生成,需要在 ABAQUS 仿真中设置两个分析步,一是选用 Lanczos 法对有限元模型提取 200 阶模态,二是创建子结构生成分析步(Substructure Generation)。两个分析步设置的边界条件如图 5 所示。

4) 模态中性文件(以下简称 MNF 文件)生成。由于 ABAQUS CAE 界面并不支持 MNF 文件的生成,因此需在 ABAQUS 软件 keyword 编辑器中添加如图 6a 所示的代码,并打开 ABAQUS Command,输入 MNF 生成代码,如图 6b 所示,即可完成有限元软件的计算分析和 MNF 文件生成。

5) 替换刚性体构件。在原有 ADAMS 刚体模型中点击大臂,右击选择 MakeFlexible,再从弹出的对话框中选择 Import,导入生成的 MNF 文件,即可完成杆件柔性化操作。

重复以上步骤,完成所有 7 个部件的柔性化,得到杆件柔性化模型。



a　有限元模型建立　　b　外部接点　　c　带外部接点有限元模型

图 4　大臂柔性化有限元模型建立

Fig. 4　Establishment of the flexible finite element model for the large arm

1.2.2　关节柔性化

工业机器人关节柔性化理论较为成熟,在 Bridges 等[5]提出的柔性关节理论中,可将整个关节传动结构等效为一个扭簧机构。扭簧结构最重要的两个参数,分别是刚度参数和阻尼参数。

由于机器人关节传动零件较为复杂,影响机器人关节刚度的因素较多,如电机轴刚度、减速器刚度、齿轮刚度等。在实际工程计算中,可将关节结构近似为串联结构,且由于减速器拥有较大的减速比,因此整个关节刚度可用减速器刚度近似替代。

根据纳博特斯克减谐波减速器选型手册[10],可查得减速器刚度是一条滞回曲线,如图 7a 所示。由于在 ADAMS 中无法设置对应的滞回曲线,在实际工程中可采用多线段近似拟合减速器刚度,如图 7b 所示。

关于机器人关节阻尼,可采用公司现有机器人阻尼试验结果,试验方法为关节冲击力矩实验

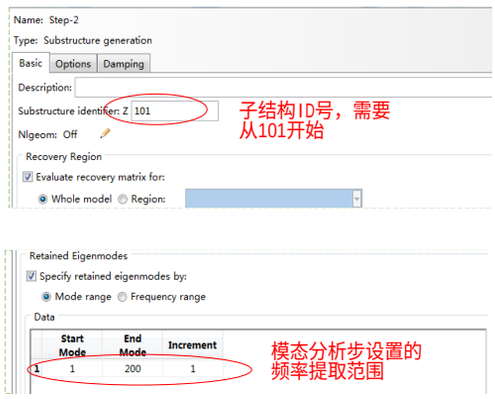


图 5　ABAQUS 软件分析步设置

Fig. 5　Analysis step setup in ABAQUS software

法。以机器人二轴为例,其关节阻尼试验结果如表 1 所示,表中 $M(q)$ 为试验中关节的转动惯量,α 为冲击力矩试验所测得的振荡衰减系数。

基于以上方法,分别计算出机器人 6 个关节轴的刚度和阻尼,再通过 ADAMS 软件在每个轴创建 Rotational Spring-Damper,并设置相关参数,即可完成机器人关节的柔性化。

2　机器人动态性能部件的贡献度分析

2.1　贡献度分析原理

贡献度分析旨在识别系统中对特定关注性能(如噪声、刚度、强度、效率等)影响最为显著的部件或因素。对于线性或可建模系统,常采用基于传递路径分析、模态贡献分析或灵敏度分析等方法,直接计算各部件/路径对目标点响应的物理贡献量(如声压贡献量、位移贡献量、应力贡献量等);对于包含强非线性、不确定性或难以建立精确解析模型的问题(如碰撞安全),则可采用基于试验设计(design of experiment, DOE)的贡献度分析方法,即通过系统性地改变输入参数(设计变量),统计分析其对输出目标影响的显著性,从而

```
**STEP:Step-2
**
*Step, name=Step-2,nlgeom=NO
*Substructure Generate,overwrite,type=Z101,
MASS MATRIX=YES,recovery matrix=YES
*FLEXIBLE BODY, TYPE=ADAMS
*ELEMENT RECOVERY MATRIX,POSITION=AVERAGED AT NODES
S,
E,
*Select Eigenmodes,generate
1,15,1
*Damping Controls,structural=COMBINES,viscous=COMBINES
*Retained Nodal Dofs
```

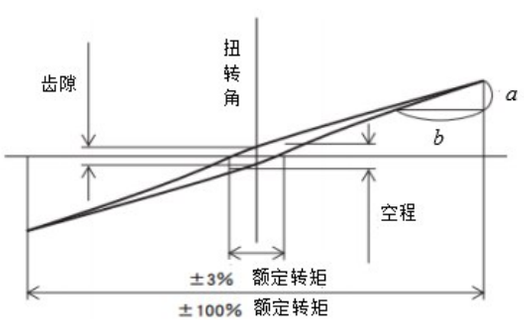
a　keyword 编辑代码

```
abaqus adams job=abaqus2adams_xiaobi
substructure_sim=abaqus2adams_xiaobi_Z105
model_odb=abaqus2adams_xiaobi
length=mm mass=tonne time=sec force=N
```

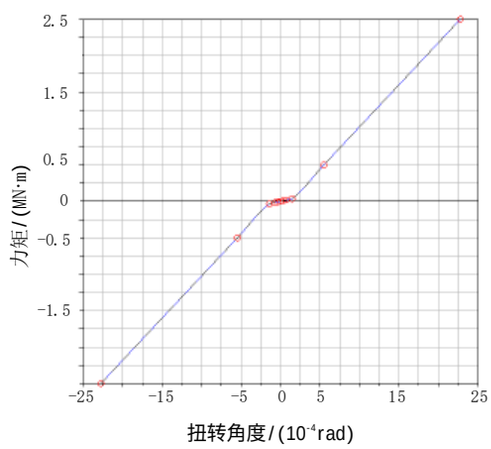
b　Abaqus Command 代码

图 6　MNF 文件生成代码

Fig. 6　MNF file generation code



a　减速器手册刚度曲线



b　二轴减速器刚度模拟曲线

图 7　关节刚度曲线

Fig. 7　Joint stiffness curve

表 1　关节阻尼试验结果(机器人二轴)
Table 1　Test results of joint damping (robot´s second axis)

序号	转动惯量 $M(q)$/(kg·m²)	衰减系数 α	阻尼 D/(Nm·s·rad⁻¹)
1	0.23	34.62	15.92
2		26.33	12.11
3		29.04	13.36
4		38.79	17.84
5		42.37	19.49
6		39.06	17.97
平均值			16.12

评估各参数的相对贡献度,这种方法能有效处理几何非线性、材料非线性等复杂因素带来的分析挑战。本文采用基于试验设计的分析方法,按照《工业机器人性能规范及其试验方法(GB/T 12642—2013)》[11]测试机器人的动态性能,计算机器人的轨迹精度指标,即轨迹准确度用于试验验证。

2.2　机器人动态性能测试原理

轨迹准确度指多次实际轨迹集群的中心线与指定轨迹的偏差。根据《工业机器人性能规范及其试验方法(GB/T 12642—2013)》[11]中相关要求,试验条件可选择如下工况:100%的额定负载,速度选择 100%、50%、10%;轨迹选择直线、大圆或小圆。轨迹准确度可用下式计算:

$$A_{\mathrm{Tp}} = \max \sqrt{(\overline{x_i} - x_{ci})^2 + (\overline{y_i} - y_{ci})^2 + (\overline{z_i} - z_{ci})^2} \quad (1)$$

其中, $\overline{x_i} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} x_{ij}$, $\overline{y_i} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} y_{ij}$, $\overline{z_i} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} z_{ij}$

式中:A_{Tp}为计算所得的位置准确度数值;(x_{ci}, y_{ci}, z_{ci})是指令轨迹上第 i 点的坐标;(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})是第 j 条实到轨迹与第 i 个正交平面交点的坐标;$(\overline{x_i}, \overline{y_i}, \overline{z_i})$为多条曲线与第 i 个正交平面交点的集群中心坐标。

3　试验验证

3.1　试验设计

为进一步验证多柔性耦合部件作用下各柔性部件对整机动态特性的贡献度,基于以上原理,按照从总体到局部思想,共设计 17 组对比实验。首先设计全刚性模型和全柔性模型,再依次考虑关节全刚性&杆件全柔性、杆件全刚性&关节全柔性 2 组模型,最后再分别逐一考虑铸件和关节的柔性,由此设计出图 8 所示的各分组模型。

基于以上分组,使用建立的柔性化模型按国标轨迹准确度测试方法在 ADAMS 软件中进行仿真。仿真前将机器人负载设定为满载、速度设定为 100%,轨迹选用为一条直线段,直线段两点分别定义为 P_2 和 P_4;仿真时按照 P_2—P_4—P_2 的轨迹循环 10 次,软件检测末端 TCP 点(工具中心点)的运行轨迹,如图 9 所示。

3.2　试验结果

仿真结束后,末端 TCP 点的位置数据在 XY 平面内投影如图 10 所示,将仿真结果导入公司轨迹准确度计算软件中,计算各分组试验结果,如表 2 所示。

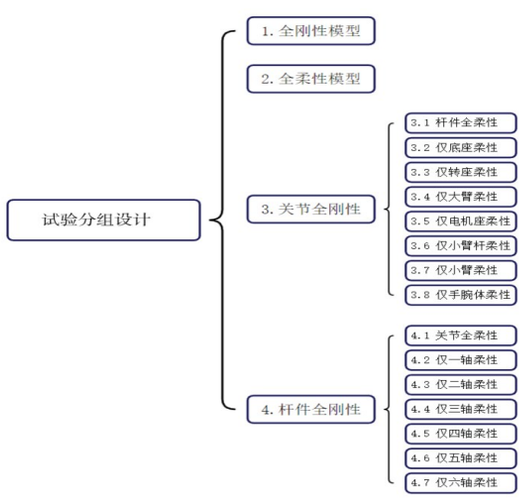


图 8　试验分组设计
Fig. 8　Experimental group design

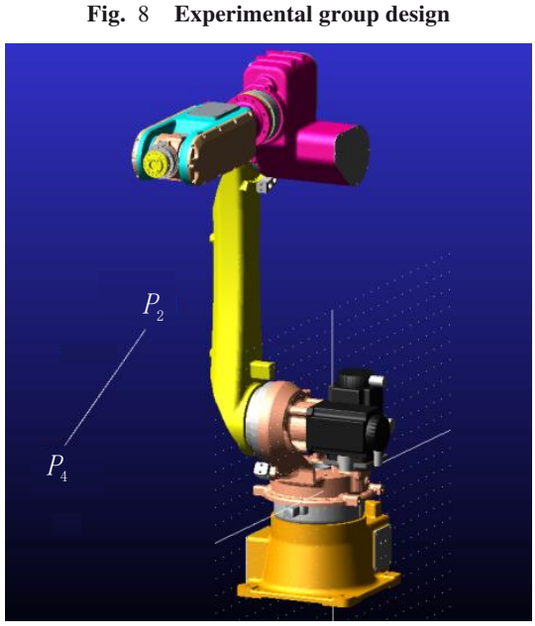


图 9　仿真直线轨迹
Fig. 9　Simulates of linear trajectory

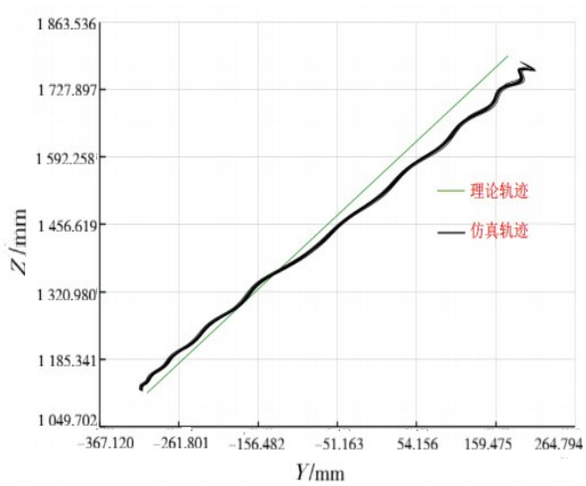


图 10　直线位置数据（放大 32 倍）

Fig. 10　Linear position data（magnified 32 times）

由表 2 可知，全刚性模型的轨迹准确度为 0.058 mm，但理论上该模型的轨迹准确度应为 0。这部分误差应是在 ADAMS 中仿真模型关节运动模式采用速度驱动导致的关节运动积分误差，因此需要做修正。

下面以全刚性模型和全柔性模型的轨迹准确度结果数据为基准，对表 2 试验结果进行修正，修正公式为

$$t_{i_after}=t_{i_before}-t_{rig_before} \tag{2}$$

式中：t_{i_after} 为第 i 组修正后的轨迹精确度；t_{i_before} 为第 i 组修正前的轨迹精确度；t_{rig_before} 为全刚性模型的轨迹精确度。

根据式（2），得到各组修正后的轨迹准确度，如表 2 所示。

表 2　分组仿真试验结果

Table 2　Results of group simulation experiment

分组序号	轨迹准确度/mm		贡献度/%	分组序号	轨迹准确度/mm		贡献度/%
	修正前	修正后			修正前	修正后	
1	0.058	0	0	3.8	0.064	0.006	0.35
2	1.764	1.706	100.00	4.1	1.138	1.080	63.31
3.1	0.597	0.539	31.59	4.2	0.332	0.274	16.06
3.2	0.197	0.139	8.15	4.3	0.707	0.649	38.04
3.3	0.190	0.132	7.74	4.4	0.330	0.272	15.94
3.4	0.638	0.580	34.00	4.5	0.058	0	0
3.5	0.092	0.034	1.99	4.6	0.039	−0.019	−1.11
3.6	0.088	0.030	1.76	4.7	0.058	0	0
3.7	0.058	0	0				

以全柔性轨迹结果贡献度为 100%，计算不同分组仿真结果与全柔性仿真结果的比值，结果为不同部件柔性化下的轨迹准确度的贡献度，计算公式为：

$$d_i=\frac{t_{i_after}}{t_{flex_after}}\times 100\% \tag{3}$$

式中：d_i 为第 i 组中柔性化部件对整机轨迹精确度的贡献度值；t_{flex_after} 为表 2 中修正后的全柔性模型轨迹准确度。

根据式（3），得到各组件的贡献度如表 2 所示。根据表 2 中各组件的贡献度，绘制各组件贡献度柱状图，如图 11 所示。

由表 2 可知，关节全刚杆件全柔模型的轨迹准确度为 0.597 mm、贡献度为 31.59%，杆件全刚关节全柔模型的轨迹准确度为 1.138 mm、贡献度为 63.31%。显然，关节相较于杆件对轨迹准确度的影响作用更加明显，约为杆件影响的 2 倍；在杆件中，大臂、底座、转座的轨迹贡献度分别为 34.00%、8.15%、7.74%，为影响较大的三个杆件；在关节中，二轴、一轴、三轴的轨迹贡献度分别为 38.04%、16.06%、15.94%，为影响较大的三个关节。

由分组仿真实验结果可知，在机器人模型中不同构件对整机动态特性的影响程度不同，因此可基于此分析结果进一步简化机器人柔性化模型，仅对影响较大的部分构件进行柔性化，降低模型复杂度和建模时间。

基于以上分析，补充一组仿真试验，只对一轴、二轴、三轴、底座、转座和大臂进行柔性化处理，其余仿真工况不变，补充试验的轨迹准确度

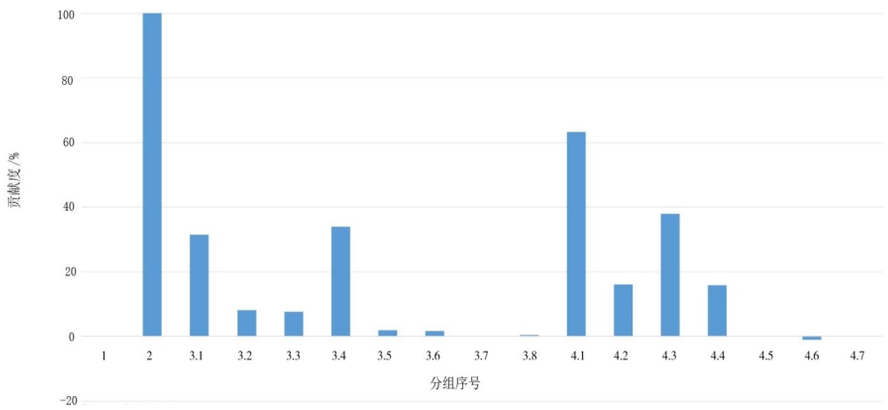


图 11　数据归一化结果

Fig. 11　Data normalization results

仿真结果为 1.725 mm，基本和全柔性模型一致，达到了全柔性化结果的 97.79%。

4　结论

基于帕累托原理的贡献度分析方法，通过建立机器人多部件耦合动态仿真模型，合理设计分组试验，对比了不同杆件和关节对整机动态特性的贡献度，结果表明：

1）在机器人 ER20 机型及同类机型的后期仿真中，可重点针对一轴、二轴、三轴、大臂、底座和转座进行柔性化处理，其余部件可采用刚性体，以简化模型并提高效率。

2）大臂、二轴关节对整机轨迹直线准确度的影响非常大，在大臂设计和二轴关节设计选型时需要进一步提升其刚度设计要求，以提升整机的动态刚度和直线准确度。

参考文献：

[1] WU J, WANG J S, YOU Z. An overview of dynamic parameter identification of robots[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26(5): 414-419.

[2] 葛鹏, 胡小春. 基于RecurDyn的串联机器人刚柔耦合分析[J]. 机械工程师, 2017(12): 40-42.

[3] POSA M, CANTU C, TEDRAKE R. A direct method for trajectory optimization of rigid bodies through contact[J]. The International Journal of Robotics Research, 2014, 33(1): 69-81.

[4] 张一楠, 丁建完. 具有谐波减速器的机器人关节建模与动力学参数辨识[J]. 信息与控制, 2023, 52(3): 292-301.

[5] BRIDGES M M, DAWSON D M. Redesign of robust controllers for rigid-link flexible-joint robotic manipulators actuated with harmonic drive gearing[J]. IEE Proceedings-Control Theory and Applications, 1995, 142(5): 508-514.

[6] 许侃雯, 胡星宇, 缪雨天, 等. 考虑柔性杆件的分拣机器人的建模与分析[J]. 机械研究与应用, 2024, 37(5): 26-29.

[7] LI Y J, GAO G B, NA J, et al. Error sensitivity flexibility compensation of joints for improving the positioning accuracy of industrial robots[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024, 22: 5335-5348.

[8] WOLFF O, SOTTEK R. Panel contribution analysis-an alternative window method[C]//SAE Technical Paper Series. SAE International, 2005.

[9] 季枫. 白车身参数化建模与多目标轻量化优化设计方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.

[10] NABETESCO. 精密减速机 RV 选型手册[EB/OL]. (2019-05-10)[2025-06-20]. https://www.dongmao-drive.com/news/715.html.

[11] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 工业机器人 性能规范及其试验方法: GB/T 12642—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.

（下转第 46 页）