

# 隧道清理机器人机械臂被动柔顺性控制研究

刘欢

(中核凯利深圳核能服务股份有限公司武汉分公司 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 在机械臂作业过程中,柔顺性控制能够有效减小振动与冲击,提高机械臂的作业稳定性和环境适应性。对于接触力较大、精度要求不高的工况来说,主动柔顺控制的设计成本和制造成本均较高,因此有必要研究被动柔顺控制。针对核电站取水涵管的隧道清理机器人机械臂,本文对现有的伸缩式机械臂进行仿真分析,将液压缸等效为弹簧阻尼系统(被动柔顺控制),研究了在冲击载荷下的响应特性,通过改进机械臂的结构,获得了更好的柔顺性,并通过仿真进行验证。

**关键词:** 被动柔顺控制; 核电; 隧道清理机器人; 冲击

## 1 概述

核电是安全、经济、干净的新式能源,发展核电对节能减排、优化动力构架、应对环球天气改变等均具有重要影响。目前,国内所有建成的和在建的核电站均为滨海核电站,截至2020年底,中国大陆在运核电机组共49台,装机容量为5102.71万kW,核准及在建核电机组共19台,装机容量为2099.26万kW,位列全球第一。根据“十四五”规划,2035年核电运行装机容量将达到7000万kW,核电仍处于重要的国家发展战略地位。

滨海核电厂取排水工程是非常重要的安全因素,取水系统堵塞问题不但可能对机组的运行产生影响,导致机组被迫降功率或停堆停机,甚至会对核电厂最终热阱的可用性构成威胁。尽管取水涵管均配有过滤、拦截设施,但根据实际情况,藤壶等海生物仍会附着在涵管内壁,因此,核电厂必须定期停机清理取水涵管内壁。

目前常用的清理手段仍以人工为主,作业环境恶劣、工作强度大、作业效率低,且存在工业安全问题,无人化、智能化作业迫在眉睫。在第十六届中国国际核工业展览会上,徐工TCR7500隧道清理机器人崭露头角(图1)。对于作业中的振动与冲击问题,机械臂的柔顺性控制具有非常重要的研究意义,本文对现有的伸缩式机械臂的结构进行了仿真分析,研究了不同冲击载荷作用下的反作用力变化规律,同时提出了一种关节式机械臂并进行了对比分析,获得了较好的柔顺性。

## 2 柔顺性控制

机械臂作业过程中,由于接触表面的不规则、工况突变等因素,不可避免的会产生冲击和振动,柔顺性控制是处理接触冲击力,提升机械臂运动稳定性的

重要方法。按照对冲击力的吸收机理不同,柔顺性控制可以分为两类:一是采用由弹簧阻尼器等构成的机构实现被动柔性控制,另一类是通过控制执行器对冲击力的动态响应来实现主动柔顺。

### 2.1 被动柔顺

被动柔顺是通过能够提供柔顺度的特殊装置,来实现机械臂在操作过程中的柔顺度增强。对于机械臂来说通常可以通过在关节连接处或者是末端操作器上加入具有柔顺性的机械装置来增加自身的柔性,如弹簧、阻尼器、RCC手腕和柔顺性关节等。

### 2.2 主动柔顺

主动柔顺是通过安装在机械臂上的力传感器,或者通过检测关节电机的输出力矩,来对机械臂与环境间的相互作用力进行在线即时的测量,并通过实际作用力与理想作用力之间的误差对机械臂的运动轨迹做实时的修正从而达到对机械臂的运动路径的一个闭环控制。目前常见的两类主动柔顺控制为:力位混合控制和阻抗控制。

一种简单常用的力位混合控制方法为主动刚度控制



图1 徐工TCR7500隧道清理机器人

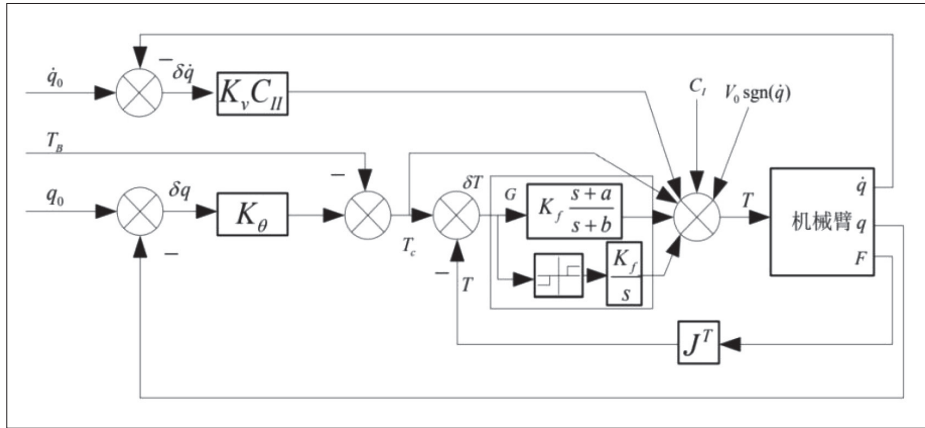


图2 主动刚度控制方案简图

(Active Stiffness Control)，其方案如图2所示。该方法因简单易实现而被广泛应用，但面临未知环境或环境变化时，则控制精度和鲁棒性将很难满足要求。

阻抗控制根据外环和内环控制量的不同，可以分为基于位置的阻抗控制和基于力的阻抗控制两种。基于力的阻抗控制策略利用的是内部力控制器来补偿机器人非线性动力学的影响，适用于期望刚度比较低的情况下使用。由于大部分工业机器人都是以位置控制为内部控制结构，也就是说需要向机器人的控制器输出位置信号，因此基于位置的阻抗控制策略在实际中获得了广泛的应用。基于位置的阻抗控制需要在高阻抗参数的场合中应用，对于小阻抗参数的场合容易引起不稳定的现象。

主动柔顺控制在控制精度、控制效率等方面具有较大的优势，也有很多学者研究了主/被动柔顺控制相结合的方法，并取得了较好的结果。但可以看出，主动柔顺控制需要配备传感器并根据工况来设计控制器和控制算法，其设计与制造成本较高。

本文的研究对象为隧道清理机器人机械臂，机械臂末端通过与隧道内壁接触进行清理工作，接触力要求能够有效清理海生物且不能损伤水泥内壁，因此对接触力的精度要求不高，没有必要采用主动柔顺控制。本文通过在机械臂运动方向上增加弹簧来实现被动柔顺控制，既能满足要求，又简单方便。

### 3 有限元模型

#### 3.1 伸缩式机械臂

目前已有的徐工隧道清理机器人采用的是伸缩式机械臂，其伸缩方向沿隧道径向，对机械臂进行抽象简化，得到有限元模型（图3）。模型中的各参数如表1所示。

#### 3.2 关节式机械臂

本文建立了关节式机械臂，机械臂通过一个旋转运动来实现作业距离的变化，对机械臂进行抽象简化，得到有限元模型（图4）。模型中的各参数如表2所示。

## 4 仿真分析与结果

针对两种机械臂结构，对机械臂末端施加相同的冲击载荷，载荷方向沿径向和切向，监测机械臂固定端的反作用力。

### 4.1 伸缩式机械臂

径向和切向的反作用力曲线如图5和图6所示，可以对比看出，该机械臂对径向冲击能够非常有效的吸收，在0.06s内基本将冲击

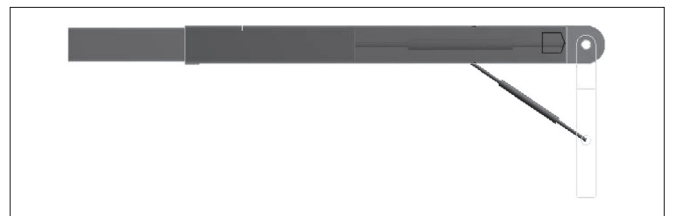


图3 伸缩式机械臂简化模型

表1 伸缩式机械臂参数

参数	数值	单位
弹性模量	2E11	Pa
泊松比	0.3	—
液压缸等效刚度	5E4	N/mm
液压缸等效阻尼	10	N·s/mm
初始冲击力	2E5	N
冲击时间	0.03	s

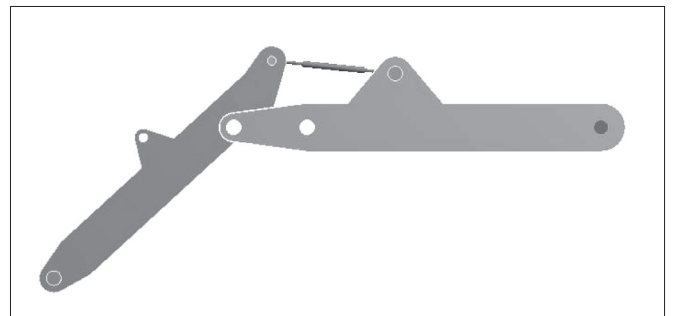


图4 关节式机械臂简化模型

表2 关节式机械臂参数

参数	数值	单位
弹性模量	2E11	Pa
泊松比	0.3	—
液压缸1等效刚度	5E4	N/mm
液压缸1等效阻尼	10	N·s/mm
液压缸2等效刚度	5E5	N/mm
液压缸2等效阻尼	10	N·s/mm
初始冲击力	2E5	N
冲击时间	0.03	s

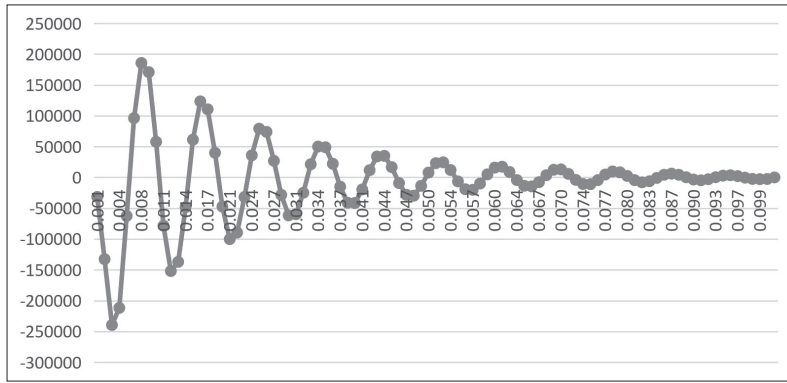


图5 伸缩式机械臂 - 径向冲击载荷

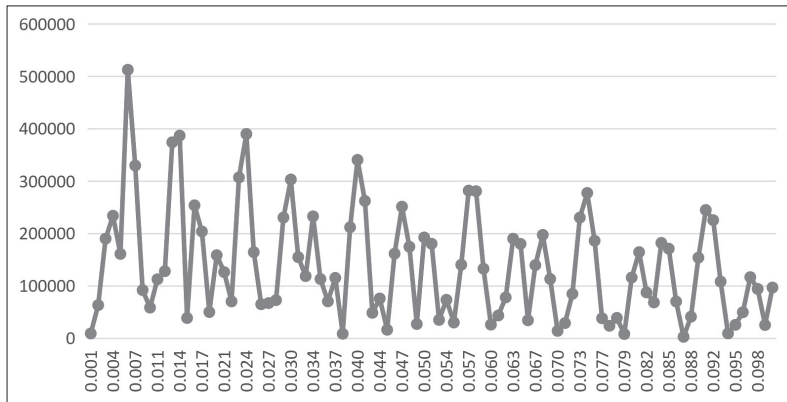


图6 伸缩式机械臂 - 切向冲击载荷

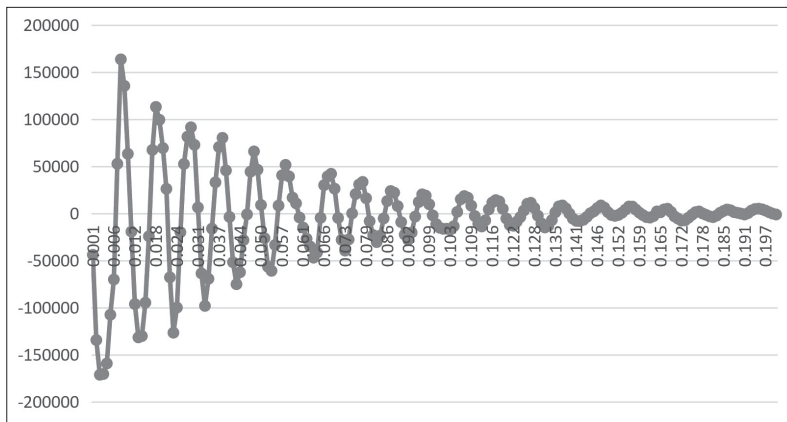


图7 关节式机械臂 - 径向冲击载荷

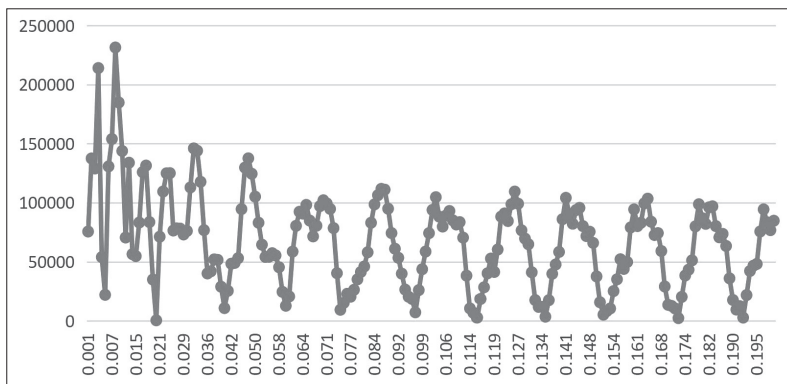


图8 关节式机械臂 - 切向冲击载荷

吸收,但对切向冲击载荷的吸收效果较差。

### 4.2 关节式机械臂

径向和切向的反作用力曲线如图7和图8所示,通过对比,我们可以看出关节式机械臂对径向冲击载荷的吸收效果比伸缩式稍差,在0.1s左右基本吸收冲击,但对切向冲击载荷也能起到较好的吸收效果,在0.05s能将反作用力减小到一半。

## 5 结语

通过两种不同机械臂结构的仿真分析,可以看到伸缩式机械臂对径向冲击载荷的吸收效果非常好,但对切向冲击载荷却无能为力,而关节式机械臂对径向冲击载荷的吸收效果一般,但能有效地吸收切向冲击载荷。根据隧道清理机器人的工况,机械臂沿切向运动清理海生物,因此切向的受力是常态,冲击发生的方向一般来说也是切向的,因此采用关节式机械臂能够更好地应对该工况,增加机械臂的柔顺性,从而提高机械臂的作业稳定性和使用寿命。

### 参考文献:

[1] 江桂红. 滨海核电建设项目取用水合理性及退水影响研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2018.

[2] 阮国萍. 核电厂取水口堵塞原因分析与应对策略[J]. 核动力工程, 2015, 36(S1): 151-154.

[3] 朱成军, 王海超. 核电厂取水明渠增设拦污网的必要性分析[J]. 机电信息, 2016(03): 93+95+97.

[4] Vukobratovic Mimir, Surdilovic Dragoljub, Ekalo Yury, Katic Dusko. Dynamics and Robust Control of Robot-Environment Interaction[M]. Singapore: World Scientific, 2009.

[5] 蔡世波, 鲍官军, 胥芳, 等. 机器人柔顺关节研究综述[J]. 高技术通讯, 2018, 28(03): 233-243.

[6] 柯贤锋, 王军政, 何玉东, 等. 基于力反馈的液压足式机器人主/被动柔顺性控制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(01): 13-20.

作者简介: 刘欢(1993.08-), 女, 汉族, 湖北石首人, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 特种机器人工程技术。