

用于抗洪打桩的四足机器人结构设计*

张 奔¹, 卞新高², 朱灯林²

(1. 三江学院 机械工程学院, 江苏 南京 210012; 2. 河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213000)

摘要:为解决抗洪抢险打桩中机构进入现场的问题,建立了一种四足机器人的结构设计方案。对四足机器人的结构进行了分析,建立了机架、腿、关节以及足的 4 部分组成结构,该机器人单腿采用三关节三自由度结构,机架与胯部、胯部与上臂、上臂与下臂分别采用 3 个转动副连接,并在结构设计的基础上对 JQRI00 四足机器人进行了驱动方式设计以及逆运动学分析,为步态规划和运动学分析打下了基础。研究表明,JQRI00 四足机器人足底能够达到一定范围空间内的任意位置,机器人能够满足抗洪抢险进入现场和进行自由运动的要求。

关键词:打桩;四足机器人;液压驱动;机构设计

中图分类号: TP242.3; TH122

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)11-1259-05

Structure design of a quadruped walking robot with mission of piling

ZHANG Ben¹, BIAN Xin-gao², ZHU Deng-lin²

(1. College of Mechanical Engineering, Sanjiang University, Nanjing 210012, China;

2. College of Mechanical Engineering, Hohai University, Changzhou 213000, China)

Abstract: In order to solve the problems of entering the site of piling, a kind of structure design was described for the quadruped robot. Structural analysis was described for the quadruped robot, which includes machine frame, legs, joints and feet. One leg has three degrees of freedom structure with three joints, rack and hip, hip and upper arm, upper arm and lower arm respectively use revolve connection. Drive design and inverse kinematics analysis of JQRI00 quadruped robot were described on the basis of structural design, which laid the foundation for the gait planning and kinematics analysis. The results show that, JQRI00 quadruped robot foot can be achieved within a certain range of space anywhere. The robot can meet the requirements of entering the site of piling and move freely.

Key words: piling; quadruped robot; hydraulic drive; structure design

0 引 言

现有的大坝打桩多是基于人力,风险大、效率低。通过将人力打桩改成机械打桩,不仅能够大大提高打桩效率,而且能有效防止在打桩过程中工作人员人身安全受到伤害。由于打桩环境的特殊性,工作人员使用机器打桩时,首先要解决的是打桩机的行走问题。通过选用行走机器人可以避免打桩机构在工作一线运输问题,并更为有效地适应打桩现场复杂的工作环境,节省了人力物力,降低了打桩风险。另外,工作人

员在打桩机器人行走机构设计的基础上,通过在行走机构上装载其他机构,可以使其应用于其他不同的工程领域。

现有的对于抗洪抢险打桩机器人行走机构的设计及构想主要分为:船式、履带、多足、轮式方式。其中,船式行走机构利用船体从河道进入打桩现场,履带式和轮式通过陆地进入打桩现场。

四足行走机器人以其对环境适应能力强、行走灵活、应用范围广等特点,在各个领域有着广阔的应用前景。而四足机器人的设计比其他形式的机器人要复杂

收稿日期: 2012-06-08

基金项目: 国家水利部公益性行业科研专项资助项目(200701033)

作者简介: 张 奔(1984-),男,安徽宿州人,主要从事机电一体化、微机测控方面的研究. E-mail: runebenny@gmail.com

的多,对于四足机器人结构的设计决定了行走机构以及整个打桩设备的稳定性。

本研究提出一种四足机器人的设计方法,试图解决抗洪抢险打桩机构的现场进入步行问题^[1]。

1 四足机器人结构

四足行走机器人是一个复杂的运动系统,其具有多关节、多驱动器、多传感器、多自由度的特点。四足行走机器人的机械结构设计是四足机器人的行走方式、数学建模、步态规划以及控制方案的基础。一个功能齐全的四足行走机器人必须具有一个结构紧凑、设计合理的机械本体。一般地,从机器人结构设计要求来看,腿机构不能过于复杂,杆件过多的腿机构形式会引起结构和传动的实现产生困难。因此,对四行走机器人腿机构的基本要求可以归纳为^[2]:

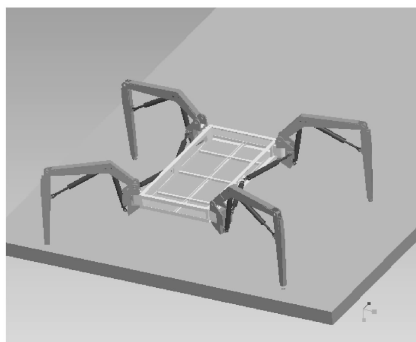
- (1)实现运动的要求;
- (2)承载能力的要求;
- (3)结构实现和方便控制的要求。

根据以上要求,本研究设计一种液压驱动的 JQRI00 型四足行走机器人。该机器人包括执行、检测和控制 3 个组成部分。其中执行机构包括机架、腿、关节以及足 4 个组成部分,如图 1 所示。机架主要负责承载电机、液压系统、电控柜、作业装置等;单腿采用三自由度结构,为胯部、上臂、下臂(包括足)3 部分,机架与胯部、胯部与上臂、上臂与下臂分别采用 3 个转动副连接,使足底能够达到一定范围空间内的任意位置;各关节的运动采用液压油缸驱动,每个油缸与另外两个运动臂构成稳定的三角形结构以适应重载运行;每个油缸的运动由电控伺服阀和油缸内同轴安装的位移传感器构成闭环位移和速度控制^[3];足底安装接触力传感器用于腿与地面的接触状态识别。

检测部分主要包括外界环境判断传感器和内部信息反馈传感器。外部环境判断传感器的主要功能是对外部地形、环境进行识别,包括足底安装的接触力传感器以及机体上方安装的全息摄像机。而内部信息反馈传感器的主要功能是对机器人运动过程进行伺服反馈的机构,JQRI00 中采用位移传感器测量油缸长度,力传感器用于测量油压,倾角传感器用于测量机器人姿态。

控制部分负责按照既定要求指挥机构运动。JQRI00 四足行走机器人是一个具有一定的负载能力和能适应复杂环境行走的机器人。整个控制系统采用多层分布式结构,由监控层、控制层、设备层 3 部分组

成。控制层中各控制器之间通过 CAN 总线网络交换数据,其中主控制器将规划好的行走路线、步态位姿信息分解到各子控制器,控制层通过标准 RS232 总线与监控 PC 机进行数据交换。设备层是控制系统的底层,执行具体动作。



(a) JQRI00 四足机器人三维造型



(b) JQRI00 四足机器人实体

图 1 JQRI00 四足行走机器人

2 机器人结构设计方案分析

JQRI00 型四足机器人机架主要负责承载电机、液压泵、油缸、电控柜、打桩头等一系列的驱动、执行以及控制结构。考虑到四足机器人本身的尺寸、各种机构的尺寸和质量、以及与腿结构的关节连接,本研究采用 50 号角钢焊接机架,机架结构图如图 2 所示,机架长为 1 900 mm,宽为 1 000 mm^[4]。

JQRI00 型四足机器人单腿必须拥有足够的自由度,才能实现其自动避障,从而使其能在较为复杂的大坝打桩环境下进行工作。因此,本研究采用单腿 3 个转动副、3 自由度的结构。单腿分为胯部、上臂、下臂(包括足)3 部分,机架与胯部、胯部与上臂、上臂与下臂分别采用 3 个转动副连接,使足底能够达到一定范围空间内的任意位置^[5]。

JQRI00 的胯部结构如图 3 所示(其中右侧为俯视图),胯部与机架之间通过圆锥滚子轴承构成转动副,

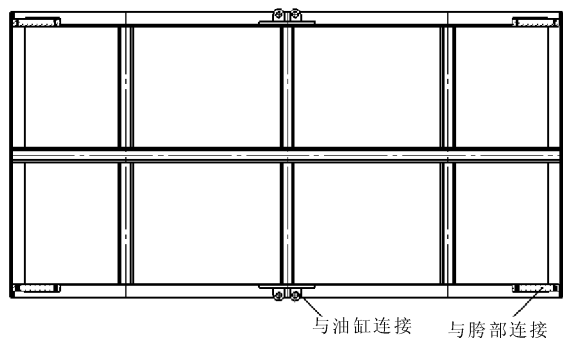


图 2 机架结构图

油缸 L 一段通过转动副连接在机体上,另一端与胯部连接,从而实现机器人腿部绕竖直轴的轴向转动。

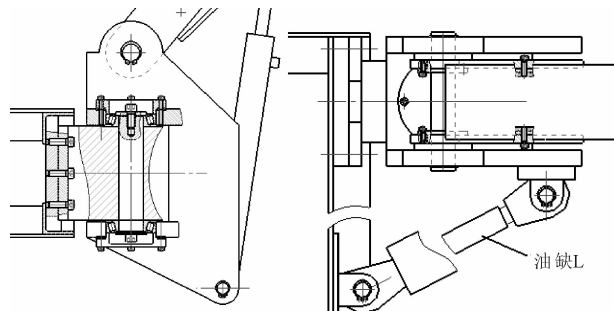


图 3 JQRI00 机器人胯部

JQRI00 机器人的上、下臂设计如图 4 所示:胯部与上臂、上臂与下臂之间分别使用直径 40 mm 的轴形成转动副,而油缸 Q 、油缸 P 分别为两个关节提供驱动。通过上述两个转动副,可以使机器人的足底到底平面内的上、下臂所在的竖直面内的任意位置(尺寸限制内)^[6]。

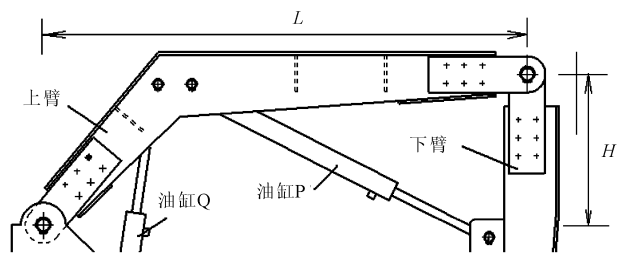


图 4 JQRI00 机器人上、下臂

机器人上、下臂的基本尺寸如表 1 所示。

表 1 JQRI00 机器人上、下臂尺寸

参数	数值
上臂(水平放置)总长 L /mm	1 074
上臂(水平放置)总高 H /mm	334
下臂(竖直放置)总高(包括足)/mm	1 155

关节的运动形式主要是围绕着关节轴的运动,生

物关节是受多种因素约束的,不能平动只能转动。每个关节都有一定的转动轴,所有关节的转动轴都不会超过 3 个基本轴:额状轴(Pitch)、矢状轴(Roll)和垂直轴(Yaw)。围绕这 3 个基本轴转动起来,关节的运动也分别发生在矢状面、额状面和水平面内。关节围绕轴在面内运动时,两关节的夹角减小称为屈,角度增大称为伸。四足机器人的各个关节的运动都是相互关联的,机架与胯部是并联结构;而胯部与上臂、上臂与下臂是串联结构,各关节的运动范围如表 2 所示^[7]。

表 2 四足机器人各关节的运动范围

关节	运动范围/(°)	结构特点
机架与胯部	-30 ~ 30	并联
胯部与上臂	33 ~ 70	串联
上臂与下臂	-24 ~ 2.8	串联

3 机器人动力系统设计

四足机器人的驱动需要将来自电、液压和气压等各种能源的能量转化为关节的直线运动或旋转运动的装置—驱动器。根据能量传动方式,研究者可以将驱动器划分为电气驱动、液压驱动等方式。

考虑到 JQRI00 四足机器人响应快、载荷大的特点,本研究选用液压驱动作为其驱动方式。液压伺服系统由液压源、驱动器、伺服阀、传感器和控制回路组成。液压泵通过电机拖动将压力油供到伺服阀,给定位置指令值与位移传感器的实测值之差经放大器放大后送到伺服阀。当信号输入到伺服阀时,压力油被供到驱动器并驱动载荷。当反馈信号与输入指令值相同,驱动器便停止^[8]。

本研究根据前面设计的四足机器人的尺寸,以及各个关节的运动范围设计油缸尺寸,JQRI00 机器人油缸长度如表 3 所示。

表 3 JQRI00 机器人油缸长度

油缸	关节运动范围/(°)	油缸长度范围/mm	油缸长度/mm
P	-24 ~ 2.8	673 ~ 841	175
Q	33 ~ 70	623 ~ 752	130
L	-30 ~ 30	663 ~ 832	175

4 机器人逆运动学分析

在机器人的设计过程中,首先要解决运动学的逆问题。本研究通过对 JQRI00 机器人的机械结构进行设计,可以确定本体的几何参数;通过对机器人的路径以及步态规划,可以确定机器人末端(足底)在地面坐

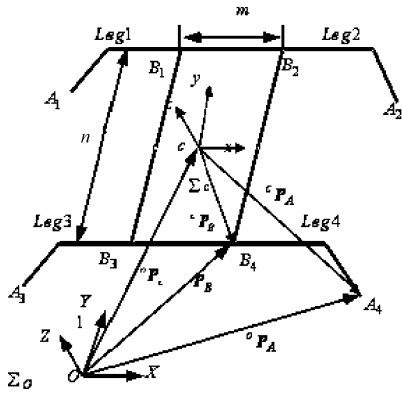
标系的实时位置,进而可以利用逆运动学分析得到各个关节的运动变量。

本研究建立的 JQRI00 型机器人机械结构简图如图 5(a)所示,其中:地面坐标系为 Σ_0 ;机身坐标系为 Σ_c ;坐标系原点在机器人几何中心。两坐标系 X 、 Y 、 Z 轴方向如图 5(a)所示。 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 分别为机器人四足的着地点; B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 分别为机器人机体和 4 条腿的结合关节。

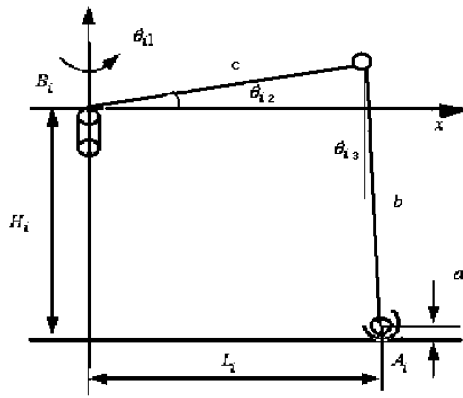
由简图知:

$${}^0P_{Ai} = {}^0P_c + R^c P_{Ai} \quad (1)$$

本研究建立机器人一条腿的空间坐标系,考虑髋关节是绕竖直方向转动,建立空间圆柱坐标系如图 5(b)所示。其中:髋关节绕 y 轴旋转 θ_{i1} ;在 xoy 平面内,上臂绕髋关节旋转 θ_{i2} ;下臂绕肘关节旋转 θ_{i3} ;下臂和足关节之间为球副。



(a)JQRI00型机器人机械结构简图



(b)机器人一条腿的空间坐标系

图 5 四足机器人结构简图

从图 5 的三角关系计算可得:

$$H_i = a + b \cos \theta_{i3} - c \sin \theta_{i2} \quad (2)$$

$$L_i = c \cos \theta_{i2} + b \sin \theta_{i3} \quad (3)$$

结合图 6,根据式(2,3)得:

$$\overline{A_i B_i} = L_i u_i + H_i v_i = {}^c P_{Bi} - {}^c P_{Ai} \quad (4)$$

而式(1)可转换为:

$${}^c P_{Ai} = R^{-1} ({}^0 P_c - {}^0 P_{Ai}) \quad (5)$$

最终可以得到:

$$L_i u_i + H_i v_i = {}^c P_{Bi} - R^{-1} ({}^0 P_c - {}^0 P_{Ai}) \quad (6)$$

因此本研究可以求得四足机器人各个关节的转动角度 θ_{i1} 、 θ_{i2} 、 θ_{i3} ,实现机器人逆运动学分析。

5 实验及分析

本研究通过对 JQRI00 四足机器人进行的结构设计,利用虚拟仿真技术,对 JQRI00 机器人进行了 ADAMS 运动学分析^[9-12],仿真情况如图 6 所示。由图 6 可知,JQRI00 模型能够按照规划执行前进。

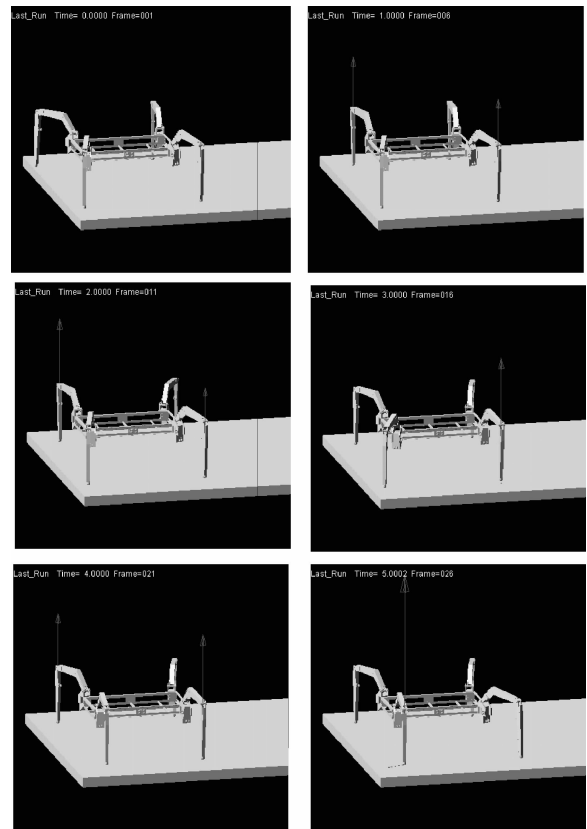


图 6 JQRI00 四足机器人运动学仿真

6 结束语

本研究对 JQRI00 四足机器人结构进行了设计分析,提出了一种行走机器人结构的设计方法。据该课题后期对 JQRI00 型四足行走机器人进行的虚拟样机分析以及模型研制实验证明,本研究论述的四足机器人设计方法正确、有效。JQRI00 型四足机器人机械本体通过和控制、检测机构的结合,可以实现已知环境下的负载行走动作。

参考文献 (References):

- [1] ARIKAWA K, HIROSE S. Development of Quadruped Walking Robot TITAN—VIII [C]//IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Osaka: [s. n.], 1996:208–214.
- [2] 陈德明. 四足仿生机器人运动控制系统的设计与实现 [D]. 西安:西北工业大学机电学院, 2007.
- [3] 刘 静, 赵晓光, 谭 民, 等. 腿式机器人的研究综述[J]. 机器人, 2006, 28(1): 81-88.
- [4] 张 奔. 四足机器人结构与运动控制算法研究 [D]. 常州:河海大学机电工程学院, 2010.
- [5] 李贻斌, 李 彬, 荣学文, 等. 液压驱动四足仿生机器人的结构设计和步态规划[J]. 山东大学学报:工学版, 2011, 41(5): 32-36, 45.
- [6] 段清娟, 张锦荣, 王润孝, 等. 基于虚拟样机技术的四足机器人结构设计[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(9): 1171-1174.
- [7] 杨东超, 赵明国, 陈 悬, 等. 拟人机器人自由度的分析[J]. 中国机械工程, 2003, 14(6): 453–456.
- [8] 王新杰, 黄 涛, 陈鹿民. 四足步行机器人爬行步态的计算机仿真[J]. 计算机仿真, 2007, 24(4): 172–175.
- [9] 董金秋, 蒋 蓁, 彭 为, 等. 四足滑冰机器人直线运动规律研究[J]. 机电工程, 2010, 27(11): 115-118.
- [10] 张建新. 自主机器人移动机构设计与研究[J]. 现代制造技术与装备, 2011(2): 8-9.
- [11] 何冬青, 马培荪. 四足机器人动态步行仿真及步行稳定性分析[J]. 计算机仿真, 2005, 22(2): 146-149.
- [12] 黄金梭, 陈开强. 基于 VB 的工业机器人 PLC 控制系统[J]. 轻工机械, 2010, 28(3): 65-68.

[编辑:张 翔]

(上接第 1246 页)

5 结束语

在风力发电机组齿轮箱变速过程中, 振动信号属于非平稳信号, 传统的傅里叶变换对于频率成分的分析显然存在不足。本研究采用阶次跟踪分析可以有效地分析出与转速有关的振动信号的特征频率成分。

仿真模拟结果表明, 阶次跟踪分析可以解决传统傅里叶变换在处理非平稳信号时的“频谱模糊”现象。同时, 通过齿轮点蚀故障试验结果, 验证了包络阶次谱能够有效地分析出点蚀故障齿轮的特强频率, 即验证了阶次分析的有效性。因此, 阶次跟踪分析方法在风力发电机组齿轮箱的故障诊断的实际应用中具有较广阔的应用前景。

参考文献 (References):

- [1] 周燕莉. 风力发电的现状与发展趋势[J]. 甘肃科技, 2008, 24(3): 9-11.
- [2] 王秀丽. 风力发电系统发展现状分析[J]. 华电技术, 2010, 32(8): 73-75.
- [3] 康海英, 栾军英, 田 燕, 等. 阶次跟踪在齿轮磨损中的应用[J]. 振动与冲击, 2006, 25(4): 112-114.
- [4] 绳晓玲, 钟勇超. 基于倒谱和包络解调的齿轮箱故障诊断[J]. 机械, 2011, 38(6): 70-73.
- [5] 丁 康, 朱小勇, 陈亚华. 齿轮箱典型故障振动特征与诊断策略[J]. 振动与冲击, 2001, 20(3): 7-12.
- [6] 高胜利, 赵小荣, 申 强. 风力发电机组齿轮箱故障诊断[J]. 电力电子技术, 2011, 45(10): 39-41.
- [7] FYFE K R, MUNCK E D S. Analysis of computed order tracking [J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 1997, 11(2): 187-205.
- [8] 栾军英, 康海英, 郑海起, 等. 基于阶次跟踪的旋转机械启动过程振动分析[J]. 军械工程学院学报, 2005, 17(2): 23-25.
- [9] 天 昊, 栾军英, 田 广, 等. 阶次跟踪分析在齿面磨损故障诊断中的应用[J]. 军械工程学院学报, 2005, 17(5): 57-60.
- [10] 康海英, 祁彦杰, 阎 文, 等. 阶次跟踪和奇异谱降噪在齿轮早期故障诊断中的应用[C]//全国高校机械工程测试技术研究会华北分会、中国振动工程学会动态测试专业委员会华北分会 2009 年学术年会论文集. 天津: 中国振动工程学会全国高校机械工程测试技术研究会, 2009.
- [11] 余碧琼. 基于 Duffing 方程的齿轮故障检测方法研究[J]. 现代制造技术与装备, 2011(1): 11-13.
- [12] 康海英, 栾军英, 郑海起, 等. 基于阶次跟踪和经验模式分解的齿轮故障诊断[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(9): 1529-1932.
- [13] 王洪超, 胡文兴, 邱红辉, 等. eRIO 远程数据采集装置及其应用[J]. 油气储运, 2011, 30(12): 951-952.

[编辑:罗向阳]