

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2017.07.023

# 大型 17R “加藤一郎”机器人仿人行走控制研究

杨 萍, 曹 强, 郑海霞, 申 涛, 龚林强

(兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 针对大型 17R “加藤一郎”结构双足机器人仿人行走控制问题, 从仿人机器人的机械结构、控制系统、步态仿真、动力学参数等方面对机器人的影响进行了研究, 采用仿生学原理, 参考了人体上、下半身比例特点, 对机器人的机械结构进行了设计; 对机器人控制系统进行了设计, 提出了一种基于 DSP + FPGA 的主控系统, 将多 CPU 协同工作、分布式远程控制技术应用到仿人机器人行走控制中; 利用人类行走过程中各关节的转动参数为输入的控制方法, 在 ADAMS 上进行了步态行走试验, 分析了动力学参数对机器人步态的影响。研究结果表明, 以人类行走方式控制机器人步态行走, 机器人行走步态稳定可行, 可应用于大型双足步行机器人步态行走控制。

**关键词:** 17R 仿人机器人; 结构设计; 仿人行走; 控制方案; ADAMS 仿真

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)07-0806-06

## Humanoid traveling control of large 17R “Kato Ichiro” robot

YANG Ping, CAO Qiang, ZHENG Hai-xia, SHEN Tao, GONG Lin-qiang

(College of Mechano-Electronic Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of humanoid walking control for biped robot with large 17R “Kato Ichiro” structure, the robot’s mechanical structure, control system, gait simulation, dynamics parameters and other aspects of all were studied. The mechanical structure of the robot was designed by using the bionics principle and referring to the upper and lower body proportions of the human body. The robot control system was designed, a kind of main control system based on DSP + FPGA was proposed. The multi-CPU cooperative work and the distributed remote control technology were applied to the humanoid robot walking control. The gait walking test was carried out on ADAMS by using the rotation parameters of each joint in the process of human walking and the influence of the dynamic parameters on the gait of the robot was analyzed. The results indicate that the way of human walking control robot gait walking is stable and feasible, can be applied to robot gait walking control.

**Key words:** 17R humanoid robot; structural design; humanoid walking; control planning; ADAMS simulation

## 0 引 言

国内外就双足机器人研制、行走模式规划、步行稳定控制等方面进行了诸多探索及研究<sup>[1]</sup>。由于仿人机器人控制系统的优劣直接决定本体最终运动表现, 仿人机器人控制系统研究一直是仿人机器人领域的一个重点难题<sup>[2]</sup>。

控制系统是机器人的核心。目前, 国内外机器人大多采用 51 系列的单片机来实现对电机的控制, 这种

控制方式限制了对机器人自由度以及功能的扩展。特别当驱动电路包含多路舵机时, 这种控制方式就显得力不从心。常见的“加藤一郎”结构的机器人高度为 300 mm ~ 350 mm, 行走稳定性高、操作简单, 采用 arduino 控制板来进行动作控制, 但随着机器人高度的增加, 其行走稳定性会急剧下降。由于所设计的 17R 仿人机器人高度为 1 256 mm, 关节多、重心高, 行走的控制及稳定是该机器人急待解决的问题。

本研究针对自主制作的大型 17R “加藤一郎”结

收稿日期: 2016-12-12

作者简介: 杨萍(1964-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 教授, 主要从事机器人开发等方面的研究. E-mail: 1059342855@qq.com

构仿人机器人行走控制问题, 进行控制系统设计, 实现仿人行走。

### 1 仿人机器人的本体设计

仿人机器人实体制作过程中基于仿生学原理, 参考人体上、下半身比例特点, 设计机器人具体结构尺寸。机器人具有 17 个自由度, 整体高度为 1 256 mm, 下半身长度为 812 mm, 电机的外形尺寸为: 95 mm × 60 mm × 110 mm。

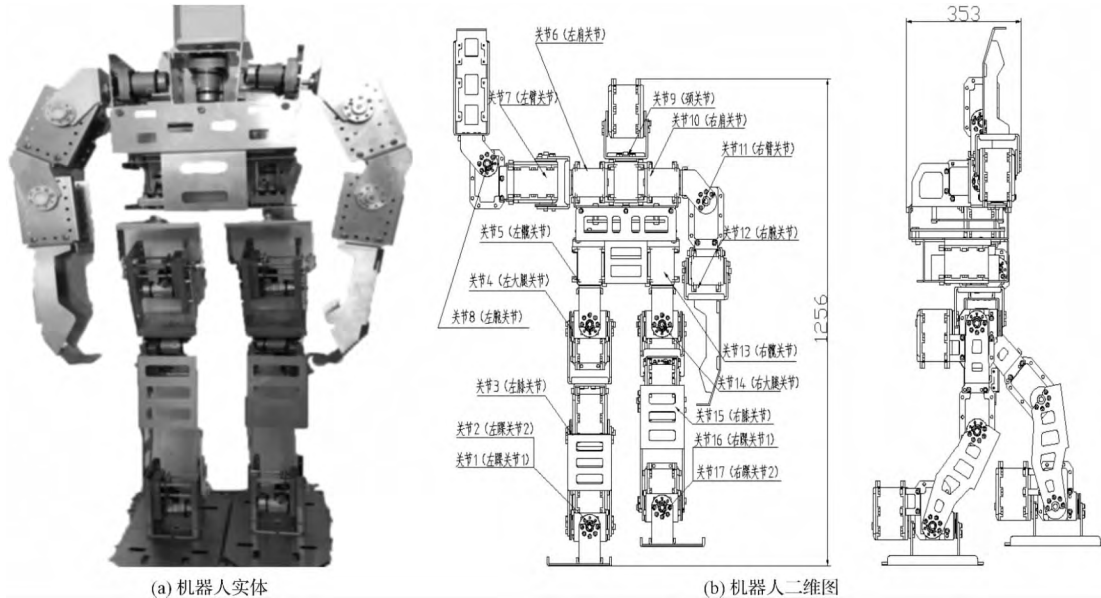


图 1 仿人机器人

### 2 机器人行走控制系统硬件设计

#### 2.1 控制系统总方案设计

机器人运动控制系统需满足以下要求: (1) 需要实现有限空间内多关节的协同控制; (2) 除保证机器人多个关节协调运动之外, 对仿人双足步行机器人控制系统中硬件的尺寸及其重量也有非常苛刻的要求。由于 arduino 控制板主要实现运动过程的存储复现, 算法单一且很难扩展其他的功能(如机器人脚掌压力的采集), 不能满足大型机器人的步态控制的稳定性。本研究选用 DSP + FPGA 组成的主控系统, 可以解决 arduino 控制板存在的不足, 利用算法提高机器人行走的稳定性。

控制系统方案如图 2 所示。

机器人控制系统设计选多 CPU 协同工作、分布式控制, 每个 CPU 控制一个独立功能, 并且每个 CPU 和主控系统之间通过无线路由形成紧耦合<sup>[3]</sup>, 达到提高控制器工作速度和控制性能的目的。

#### 1.1 驱动元件选择

机器人高度为 1 256 mm, 体重约为 32 kg, 在尺寸以及重量方面远超过常见“加藤一郎”型机器人, 故在关节处使用扭力为 180 kg/cm 的 ASMC-03 大功率电机。

#### 1.2 机器人材料

铝金属具有防辐射、易加工、重量轻等特点, 为了减轻整体机器人的重量, 机器人采用铝合金作为金属构架, 在保证机器人刚度的前提下, 对部分金属构架进行了镂空处理。

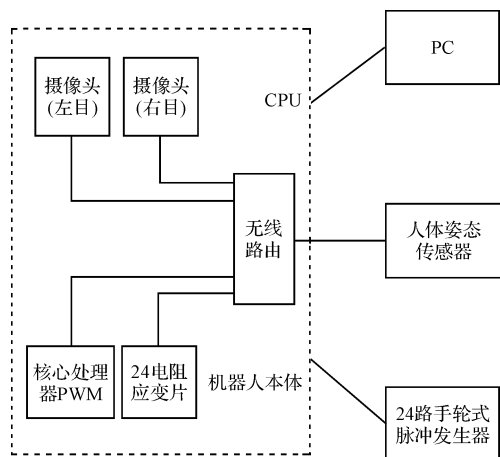


图 2 机器人控制系统方案

机器人控制系统采用开环控制, 包含主控/监控模块和本体控制模块两个模块。

#### 2.2 主控/监控模块

主控/监控模块是机器人控制系统中的核心部分, 由配置在机器人身体上的信息采集模块和 PC 端上位机两部分组成。

信息采集模块将采集到的机器人当前状况下各关节转动参数通过无线传输方式实时传输至 PC 端的上位机。操作人员通过上位机查看当前机器人关节转动参数,并使用上位机将运动指令通过 Wi-Fi 模块发送运动指令至控制器单元 DSP,通过 DSP 单元和 FPGA 模块共同实现机器人控制。

### 2.3 机器人本体控制系统

本体控制系统作为仿人机器人信息处理和控制的核心,决定着机器人的整体行为以及性能的好坏。本体控制系统如图 3 所示。

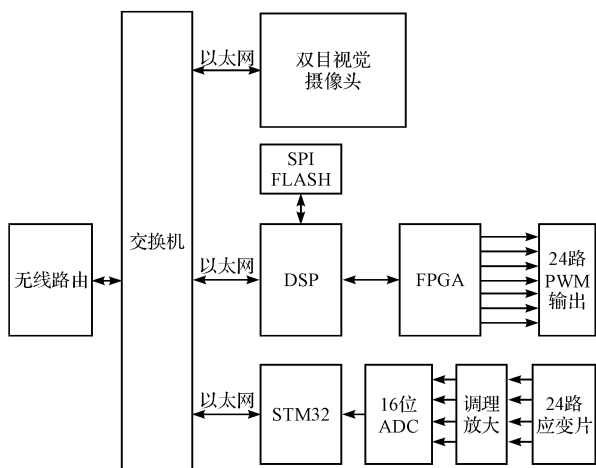


图 3 仿人机器人的本体控制系统

#### 2.3.1 DSP 选型

控制器直接关系到机器人行走的稳定性,选型尤为重要。由于 DSP 具有高速数字信号处理功能,控制系统选用 DSP 实现机器人运动控制。DSP 选用 TMS320F28335 芯片,这款浮点型 DSP 有 8 个外部中断,3 个定时器,12 个 A/D 转换接口。

#### 2.3.2 FPGA 选型

机器人控制主要针对关节处 17 个电机的转动控制,单独使用 DSP 不能完成全部工作。FPGA 具有功耗低、主频高的优点<sup>[4]</sup>,采用 FPGA 作为协处理器。FPGA 选用 EP1C3T144C8N 芯片,该芯片内有 24 624 个逻辑单元,104 个 I/O 接口,4 个锁相环电路和 20 个全局时钟网络。

#### 2.3.3 机器人总控制系统

基于以上分析,本研究采用无线路由来进行主控模块、本体控制模块之间的数据传输。该控制系统通过 4 路交换机进行本体控制系统数据传输:机器人双目摄像头采集得到的图像信息分别通过一路、二路交换机发送至 PC 端;三路交换机接口连接 DSP + FPGA 组成的主控制器,调用 SPI 模块存储的机器人步态规

划数据,输出 24 路 PWM 脉宽,实现电机转动控制;四路交换机用来传输传感器采集到的机器人脚掌与地面之间的接触力。

## 3 机器人行走控制系统软件设计

在双足机器人的运动控制系统中,除硬件资源外,还需在软件层面进行合理的任务规划、架构设计及程序编写,这是机器人实现稳定行走等功能的基础<sup>[5]</sup>。

软件总体结构分为 3 层:PC 层、DSP 层和 FPGA 层。软件总体结构设计如图 4 所示。

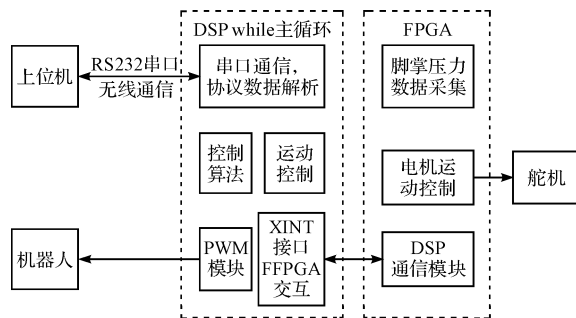


图 4 软件总体结构设计

### 3.1 PC 层软件设计

PC 层主要功能为提供人机交互界面、接收用户命令,完成机器人在行走过程中压力的数据采集与显示、路径规划、以及为 DSP 层提供路径点信息等功能。

### 3.2 DSP 层模块软件的设计

DSP 层负责完成机器人关节运动控制、轨迹规划,并将电机的控制参数发送到 FPGA 层。

DSP 开发环境采用 CCS3.3 界面如图 5 所示。

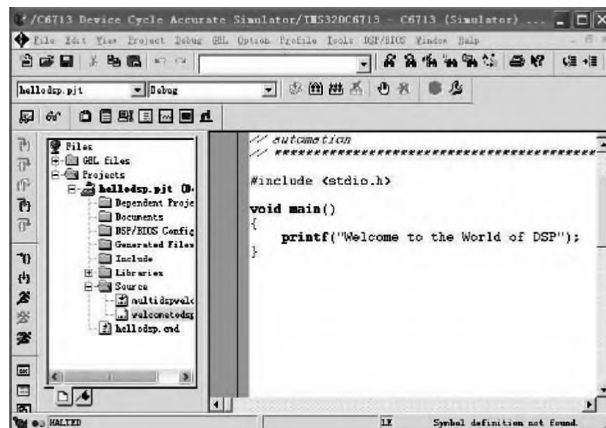


图 5 Code Composer Studio 3.3

DSP 层程序是一个系统周期为 2 ms 的主函数和一个中断函数,在初始化完成后进入 2 ms 循环运行;

DSP 层通过无线通讯与 PC 机交换数据,进行机器人行走姿态调整。中断程序由 FPGA 段触发,用来完成电机驱动,并将电机参数发送至 DSP 层<sup>[6]</sup>。

DSP 通过 XINTF 外部接口访问 FPGA,访问形式如下:

```
#definemotor_COMMAND1 motor_COMMAND1 =
x; //写数据到 FPGA
x = motor_COMMAND1; //从 FPGA 读数据
```

### 3.3 FPGA 层软件设计

FPGA 层负责接收 DSP 层控制参数数据,完成电机驱动,并发送电机参数信息至 DSP 层。

FPGA 的开发环境采用 Quartus II 13.1,界面如图 6 所示。

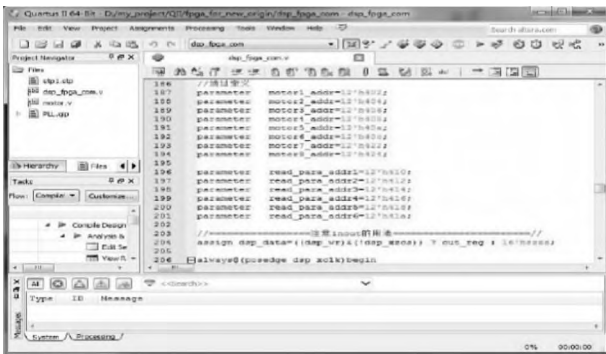


图 6 Quartus II 13.1 软件开发界面

FPGA 根据 DSP 控制信号判断 DSP 是否读写数据<sup>[7]</sup>。片选信号为低电平且读使能有效时,FPGA 按照地址总线上的地址把相应 FPGA 寄存器的内容送至 DSP 层;片选信号为低电平且写使能有效时,FPGA 按照地址总线上的地址把 DSP 层的数据写到相应 FPGA 寄存器内。

## 4 仿真实验

本研究基于 ADAMS 软件平台,对大型 17R “加藤一郎”建立虚拟样机,进行仿真实验。

### 4.1 机器人虚拟样机建模

本研究在 ADAMS 中建立双足机器人虚拟样机模型,如图 7 所示。

该模型为机器人的简化模型,主要零部件的物理参数与机器人组装套件实际物理参数完全一致。对虚拟样机模型添加约束条件、设置各运动副,并定义脚底与地面之间的摩擦力<sup>[8]</sup>。

STEP 函数常用于描述具有脉冲效应的函数,机器人步行模型被视为具有脉冲效应的冲击系统,故用 STEP 函数将人体行走过程中,踝关节、膝关节、髌关节

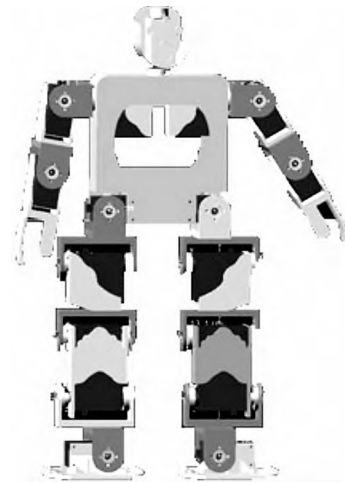


图 7 机器人虚拟样机的建模

处各变量导入 ADAMS 中作为步行控制依据。

由于每个关节处都要输入控制函数并且机器人整体关节自由度较多,此处以机器人左脚踝为例列举出生成其各个关节处时间与转角的具体函数: function = STEP( time ,0 ,0 ,1 ,0d) + STEP( time ,1 ,0 ,2 ,0d) + STEP( time ,2 ,0 ,3 ,5d) + STEP( time ,3 ,0 ,4 ,0d) + STEP( time ,4 ,0 ,5 ,25d) + STEP( time ,5 ,0 ,6 , -35d) + STEP( time ,6 ,0 ,7 ,15d) + STEP( time ,7 ,0 ,8 ,5d) + STEP( time ,8 ,0 ,9 ,10d) + STEP( time ,9 ,0 ,10 ,0d),进行机器人步行运动仿真实验。

### 4.2 机器人步行运动仿真以及仿真结果分析

本研究将各关节 STEP 函数赋予到相应关节处,且方向一致,设置机器人整体步行仿真参数,终止时间为 6 s,仿真步数为 400 步,进行步行仿真。

一个步行周期内,机器人步态行走仿真结果如图 8 所示。

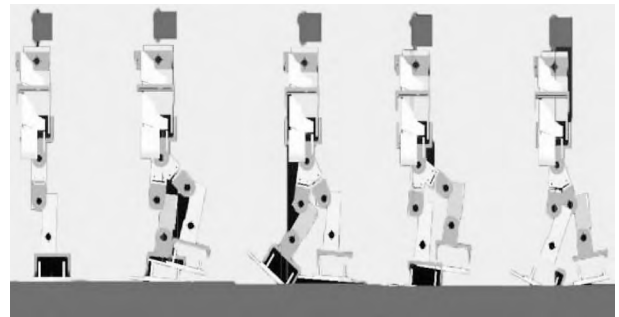


图 8 机器人步态行走仿真

根据动态步行仿真结果,得到机器人在步行过程中各关节参变量曲线变化,如图(9~11)所示。

由于机器人行走以人类步态行走为参考,一个周期内,机器人行走过程分为 3 个阶段:单腿支撑阶段、单腿摆动阶段、摆动腿发生碰撞阶段。从图 9 分析可

知各关节的速度变化范围有波动,最大值为 292 mm/s, 小腿在整个关节速度变化中最为明显。

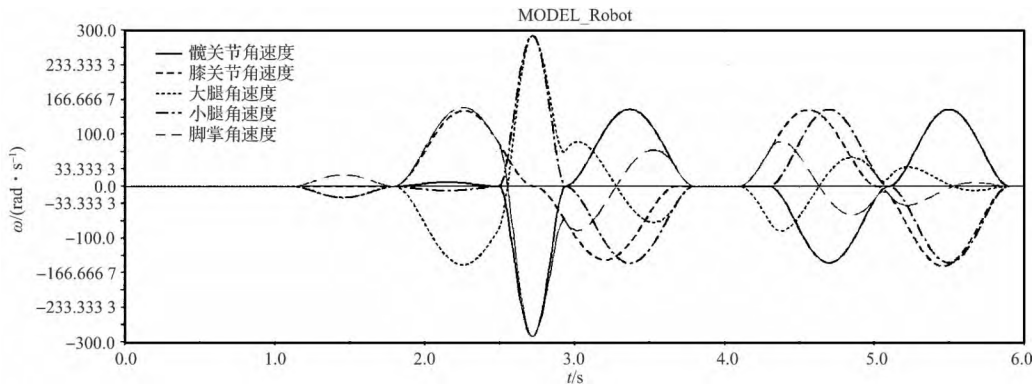


图 9 机器人各关节角速度

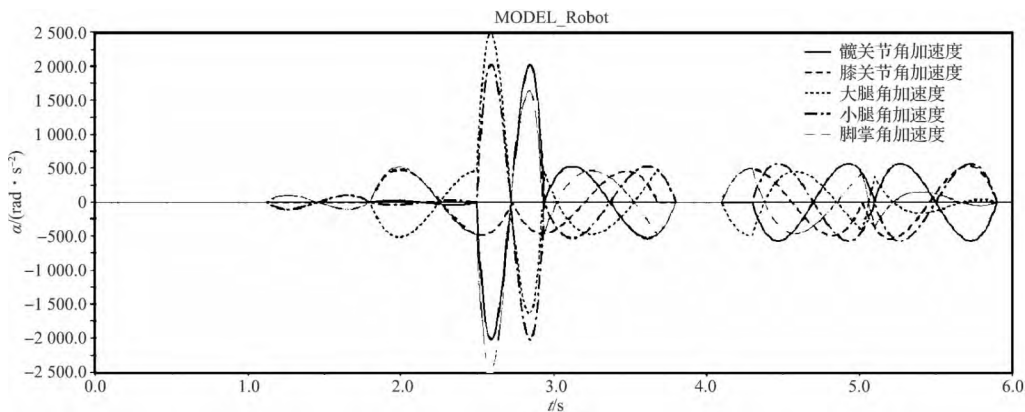


图 10 机器人各关节角加速度

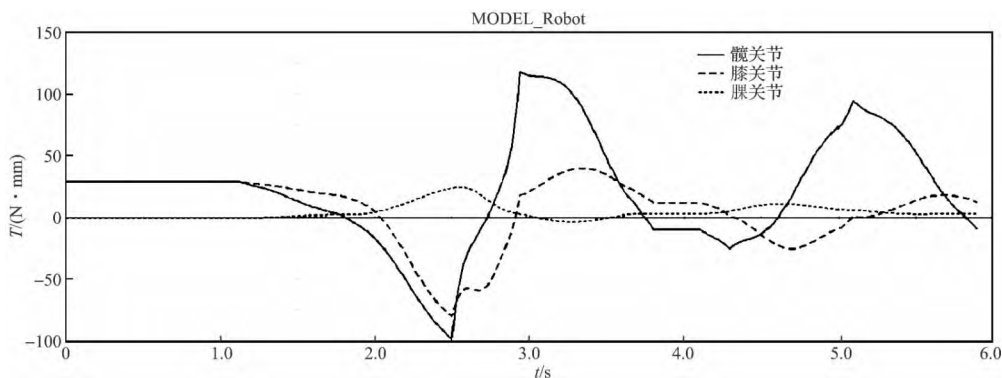


图 11 机器人各关节的转矩图

机器人行走过程中,过大的角加速度会引起机器人碰撞力的变大,影响机器人行走稳定性。从图 10 可知,机器人各关节角加速度仅在 2.6 s ~ 2.9 s 时刻内出现峰值瞬间增大的情况,但在其后时间内角加速度变化迅速趋于平稳,说明机器人行走过程基本稳定。

从图 11 可看出各关节曲线连续且没有突变,说明步行碰撞对各关节扭矩影响不大。机器人行走过程中,关节处最大扭矩为 120 N · mm,小于电机提供的最大扭矩,电机选型符合要求。

从图 9 ~ 11 可知,机器人在行走过程中,在第

2.9 s 发生了重大冲击,角速度和角加速度均发生了突变,发生突变的原因是机器人在步行中与地面产生的非线性碰撞,反映出系统的非线性特性。

### 5 结束语

本研究介绍了 17R 大型“加藤一郎”结构双足仿人机器人的行走控制,并制作了高度 1 256 mm、重量 32 kg 的“加藤一郎”仿人机器人。其次设计了机器人运动控制系统,将多 CPU 协同工作、分布式远程控制技术应用到主控系统设计中,提出 DSP + FPGA 作为

控制系统的核心处理器,分别阐述了 DSP 和 FPGA 传输数据的工作原理,并设计 DSP 层和 FPGA 层。最后以人类行走过程中的关节转动参数为输入,利用 STEP 函数在 ADMAS 仿真平台中,仿真以该种控制方式下双足步行机器人仿人行走过程。仿真结果表明,该控制方案的控制机器人步行稳定、可行。

#### 参考文献(References):

- [1] KANEKO K, KANEHIRO F, KAJITA S, et al. Design of prototype humanoid robotics platform for HRP[J]. *Robotics and Autonomous Systems* 2010, 48(4): 165-175.
- [2] CHENG F S, ZHAO Lin. The design of a control system tested for a 2-DOF Robot [C]. *IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design*, New Orleans: IEEE 2004.

- [3] 黄国强, 刘建群. 轮足复合侦察机器人控制系统的设计与实现[J]. *机床与液压* 2015, 43(21): 53-57.
- [4] 孙旋, 蒋文凯, 廖文琦, 等. 基于 CANopen 协议的伺服驱动器从站实现[J]. *制造业自动化* 2016, 38(5): 9-13.
- [5] 邹海鑫, 邹湘军. 基于 PC + DSP + FPGA 的机器人控制系统开发[J]. *深圳信息职业技术学院学报* 2015, 13(1): 79-82.
- [6] 周润景, 苏良碧. 基于 Quartus II 的数字系统 Verilog HDL 设计实例详解[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [7] 张颖. 基于 DSP 的仿人机器人步态控制系统的设计与研究[D]. 长春: 吉林大学机械科学与工程学院, 2016.
- [8] 孙逸超. 仿人机器人控制系统设计与姿态控制方法[D]. 杭州: 浙江大学机械工程学院, 2014.

[编辑: 李 辉]

#### 本文引用格式:

杨 萍, 曹 强, 郑海霞, 等. 大型 17R “加藤一郎” 机器人仿人行走控制研究[J]. *机电工程* 2017, 34(7): 806-811.

YANG Ping, CAO Qiang, ZHENG Hai-xia, et al. Humanoid traveling control of large 17R “Kato Ichiro” robot[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(7): 806-811.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 781 页)

全寿命周期中,使用钢筋混凝土电缆排管的成本高出使用玻璃纤维筋电缆排管约 7.65 万元。

因此,从全寿命周期来看,使用玻璃纤维筋电缆排管在成本上还是有优势的。

## 4 结束语

本研究通过对钢筋混凝土结构和 GFRP 筋混凝土结构的 110 kV 电缆排管的涡流-温度耦合场的分析和计算验证了在电缆排管敷设中使用 GFRP 材料代替钢筋材料以降低涡流损耗的方案可行性。同时还揭示了采用 GFRP 材料的电缆排管并不会对电缆散热带来负面影响。在此基础上,笔者对两种结构排管的技术、经济性能进行了详细的分析和计算。本研究提出的地下复杂环境涡流-温度场域的建模方法以及迭代求解算法为下一阶段研究提供了技术支持。

在下一阶段研究中将通过改变电缆的输入电流以模拟不同工况下钢筋混凝土结构和 GFRP 筋混凝土结构电缆排管的涡流场与温度场的分布规律,进一步得出钢筋混凝土结构电缆排管中涡流损耗量与电缆电流的定量关系,以便为工程优化设计提供计算工具和理论依据。

#### 参考文献(References):

- [1] 汪清海, 薛 禹. FRP 筋的研究现状综述[J]. *建筑工程技术与设计* 2014(19): 1354.
- [2] 黄诗雅, 吴 勇, 李 磊. 土壤直埋敷设单芯电力电缆温度场与载流量计算[J]. *武汉大学学报: 工学版* 2014, 47(4): 502-505.
- [3] 邱 超. 双回路单芯电力电缆不同敷设与排列方式下温度场与载流量计算[D]. 广州: 华南理工大学电力学院, 2013.
- [4] 梁永春, 王忠杰, 刘建业, 等. 排管敷设电缆群温度场和载流量数值计算[J]. *高电压技术* 2010, 36(3): 763-768.
- [5] 曹惠玲, 王增强, 李雯婧, 等. 坐标组合法对直埋电缆与土壤界面温度场的数值计算[J]. *电工技术学报* 2003, 18(3): 59-63.
- [6] 李 桃. 涡流、温度耦合场的建模及有限元的数值分析[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2006.
- [7] 梁永春, 闫彩虹, 赵 静, 等. 排管敷设电缆群暂态温度场和短时载流量数值计算[J]. *高电压技术* 2011, 37(4): 1002-1007.
- [8] 刘 军, 王 芳, 周 洪, 等. 圆形截面玻璃纤维筋混凝土桩体抗剪承载力研究[J]. *土木工程学报* 2016, 49(9): 103-109.

[编辑: 李 辉]