

Measurement System for Plantar Pressure of Biped Exoskeleton Robot*

CAO Heng*, MENG Xianwei, LING Zhengyang, QIN Yingqi, HE Chengkun

(School of Mechanical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: To identify the gait of exoskeleton robot in walking, the information of plantar pressure should be obtained with high precision and reliability. A miniature structure of spoke sensor with high sensitivity is presented, which can avoid being influenced by offset load. Considering the extremely weak sensor signal, A pre-amplification circuit based on chopper-stabilized technology is designed and produced. By the constant current power supplying, sensor's nonlinear error caused by temperature is maximally reduced. Measurement system is based on PC controller, and it allows multi-channel to be sampled simultaneously with high precision. It has been shown by experimentation that the noise of final signal output is less than 3 mV P-P, and Zero Drift is almost nonexistent. This design can be applied to instrument signal conditioning.

Key words: exoskeleton robot; plantar pressure; chopper-stabilized; pre-amplification; simultaneous sampling

EEACC: 7220;7320V

两足外骨骼机器人足底压力测量系统*

曹恒*, 孟宪伟, 凌正阳, 秦颖颀, 贺成坤

(华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237)

摘要:为实现两足外骨骼机器人行走过程中的步态识别,需精确、可靠地获取其足底压力载荷的分布情况。研制一种高灵敏度具有强抗偏载能力的小型轮辐式足底压力传感器,并针对该传感器输出电压只有几十微伏的微弱信号特点设计制作了具有斩波自稳零功能的多路前置信号放大调理电路板。为减小温度等因素产生的非线性误差,设计了传感器恒电流源供电模块。系统采用基于PC的控制器,多通道信号高精度同步采样,通过实际样机试验表明电路实现高增益放大的同时输出噪声峰峰值小于3 mV,且长时间样机试验,信号几乎不存在零漂,具有较好的稳定性。系统结构合理,可靠性高,可适用于仪表信号的处理。

关键词:外骨骼机器人;足底压力;斩波稳零;前置放大;同步采样

中图分类号: TP211.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)03-0326-05

目前世界上有十余家著名的实验室和科研结构从事外骨骼机器人的研究^[1-4]。近年来,国内有关高校加快了对人体下肢外骨骼的研究,中国科大、海军航空工程学院、哈尔滨工程大学等在外骨骼研究中都已经取得显著进展^[5-8]。在国家自然科学基金的资助下,华东理工大学智能传感测控研究室研制了如图1所示的下肢外骨骼机器人实验样机 ELEBOT-2008。下肢外骨骼机器人实质上是一种可穿戴机器人,设计的目的主要是扩展人类下肢的运动能力,减轻负重和行走时的体力消耗。本课题组研制的外骨骼机器人主要用于在户外恶劣路况条件下负重和长距离行走,对不同穿戴者有很强适应性,且穿脱方便。

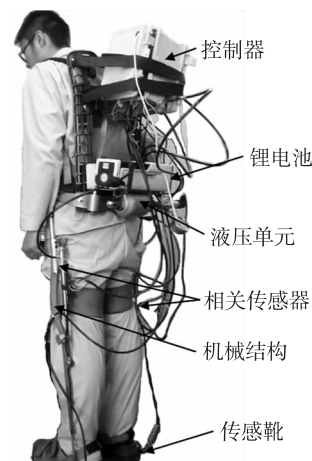


图1 华东理工大学外骨骼实验样机 ELEBOT

项目来源:国家自然科学基金资助(50775072)

收稿日期:2009-09-25

修改日期:2009-11-30

为控制步态平衡,实现两条机械腿的运动与人腿运动的良好协调性,须将步态周期划分为多个步态加以控制。对于步态的识别最关键基础环节之一就是快速、精确地获取足底压力载荷的分布情况。通过对目前最先进的各种测力鞋垫系统进行分析比较,创新地在传感靴底部的适当位置放置三个压力传感器,用于实现测量足底压力。为提高信号精度,研制了专用的具有抗偏载能力的小型轮辐式足底压力传感器;为提高工作稳定性,设计了具有斩波稳零功能的微弱信号前置放大电路。样机试验证明,这些措施增加了系统本身的可靠性,有效地提高了控制算法的试验效率。

1 足底压力传感器设计

1.1 足底压力载荷测量方案

足底压力分析是定量步态分析的重要参数,目前最先进的测量足底压力载荷分布的方法是采用专用的测力平台和测力鞋垫,但这些测力测量系统价格十分昂贵,本文创新地在传感靴底部放置三个压力传感器,如图2所示。其中压力传感器1、3分别用于测量脚尖和脚跟的受力分布,传感器2则用于测量外骨骼机器人负载和自重的地面反作用力情况。该方法对同步态足底压力变化的测量更为直接、准确且极大的降低了成本。

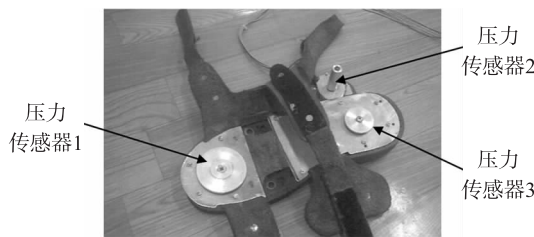


图2 传感靴足底压力传感器分布

1.2 轮辐式小型压力传感器

现有的压力传感器多用于工业,体积较大且质地坚硬,不适合安装在鞋子内部。考虑到传感器需要有较强的抗侧压、抗冲击能力且具备较好的线性度和灵敏度,根据电阻应变原理,设计并制作了如图3所示的小型轮辐式结构压力传感器。

传感器弹性体采用轮辐式结构,由轮毂、轮缘、轮辐条组成,采用轮辐式结构最突出的优点是可以极大地降低偏载压力对传感器信号输出的影响,由于轮辐条成对且对称连接到轮毂和轮缘上,四对应变片亦是成组粘贴在四根轮辐条侧面,连接成差动全桥电路,每个桥臂由特性相同的两个应变片串接组成,轮毂受外力作用时,轮辐条产生平行四边形变

形,形成与外力成正比的切应变,在贴片方向即轮辐条侧面 $\pm 45^\circ$ 的方向上分别受最大的拉/压力作用,因为分别将两个受拉/压力的应变片串成一个桥臂,对于加在轮辐条上的侧向力,使一根轮辐条受拉力,相对的另一根轮辐条则受压力,其应变片上的阻值变化幅度相等但方向相反,桥臂总阻值不变,对输出无影响,因此具有较好的稳定性和抗偏载能力。

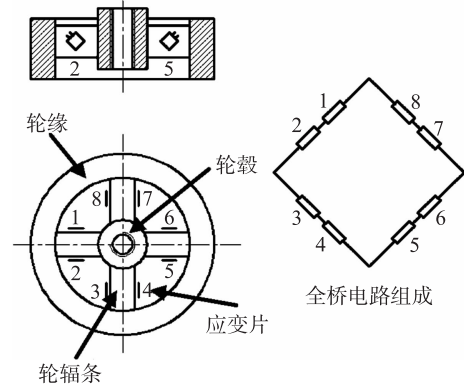


图3 轮辐式弹性体结构及贴片示意图

1.3 传感器的标定实验

工程测量中传感器的标定,应在与其使用条件相似的环境下进行。为获得高的标定精度,标定时将传感器及其配用的电缆、放大器等测试系统一起标定。将传感器测量范围分成若干等间距点,通过测力机产生的标准压力作为传感器的输入负载,根据量程分点情况分别记录输入量增大和减小过程中传感器的输出值,并对传感器进行正反行程多次重复测量,得到如图4所示的数据曲线。

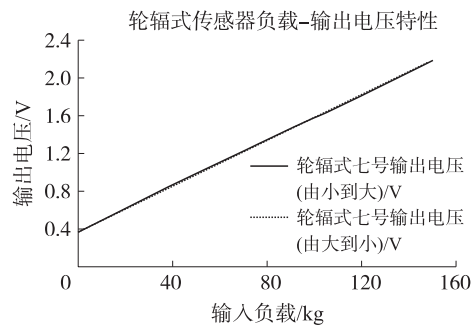


图4 传感器标定数据曲线

可以看出传感器在整个量程范围内具有很好的线性度,并且加载和卸载曲线基本一致,但由于传感器弹性变形很小,其从0到满量程的输出只有几百 μV 的变化范围,并且伴有较大的共模电压,对外界干扰极为敏感。对如此微弱的信号进行放大是十分困难的,存在的主要难题是零漂、噪声、稳定性的问题,为解上述问题,设计了为传感器供电的恒电流源电路和具有斩波自稳零功能的微弱信号放大电路。

2 传感器信号调理放大电路

2.1 主放大器选择

三运放结构仪表放大电路作为工业标准被用于要求高增益或高共模抑制比的精密应用场合。在最初设计电路时首先考虑了采用仪表放大器,但是通过对几种仪表放大器测试比较,都没有满足要求,电路输出噪声较大且存在零漂。最终选用具有斩波自稳零功能的高精密运放 ICL7650 作为主放大器,ICL7650 是 intersil 公司生产的第四代斩波放大器,其采用的斩波自稳零技术可以很好的消除零漂,性能极为稳定,在精密仪表、微弱信号的检测及过程控制系统中有广泛应用。其具有极低的输入失调电压 ($\pm 0.7 \mu\text{V}$),极低输入偏置电流 (5 pA),极低的温度漂移 ($0.02 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$,长期工

作稳定性: $100 \text{ nV}/\sqrt{\text{month}}$),高开环增益 (150 dB),极高的共模抑制比 (140 dB),输入级采用 MOSFET 器件,输入阻抗达 $10^{12} \Omega$,可以极大的降低对传感器输出信号的衰减。

2.2 实际电路设计

针对压力传感器原理和工作特点设计制作了多路传感器信号调理电路板,电路采用三级放大,由恒电流源输出电路、主放大电路、调零电路、有源低通滤波电路和相关抗干扰电路组成,由于第一级放大电路承担了主要的放大功能,决定了整个电路的精度和共模抑制能力,采用 ICL7650 作为主放大器,而第二级、第三级放大器以及调零运放则采用价格相对低廉而性能同样优秀的高性能运放 OP07,电路如图 5 所示。

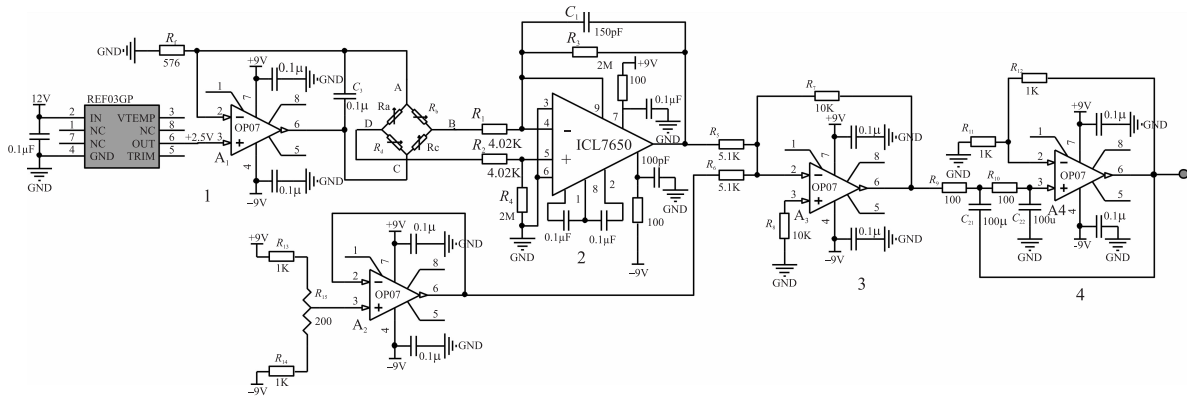


图5 微弱信号调理放大电路

2.2.1 恒电流源电路设计

采用恒电流供电的电桥输出与温度无关,和恒压源供电相比,采用恒流源供电可以减小传感器本身的线性误差,因此本文设计了为传感器供电的恒电流源电路。运算放大器 A_1 与反馈电阻 R_f 组成串联电流负反馈,运用负反馈原理稳定电流输出,恒定电流大小由 R_f 的阻值决定,REF03 为精密电压基准为多路电流源模块提供 2.5 V 基准电压。若运放工作在线性区,则由虚短原则可知: $U_+ = U_- = 2.5 \text{ V}$, 则通过传感器的电流为: $I = U_- / R_f$ 。

2.2.2 主放大电路设计

斩波放大器 ICL7650 构成的差分放大电路对传感器输出的差动电压进行第一级放大,双端输入单端输出。整个电路的精度和共模抑制决定于第一级,其承担主要的放大功能和全部的共模抑制。为降低电阻噪声,均选用高精度、低噪声的金属膜电阻,且不宜选取较大阻值的电阻。ICL7650 的斩波记忆电容直接决定斩波稳零精度因而选用漏电流小、高绝缘的钽电容。ICL7650 会产生可控硅效应,导致电路无法工作,严重时还会损毁芯片,因此在正

负电源输入端分别串联一只 100Ω 的电阻,避免可控硅效应的产生。由于电路的第一级增益较大,为了防止自激振荡。在运放输出端与反相端接 100 pF 的电容 C_1 ,从而改善系统响应函数的零极点位置,达到稳定系统的目的,同时运放的电源输入端均用电容滤除电源噪声,消除电源带进的干扰。为尽可能实现电路的对称,提高共模抑制,电阻经过严格配对挑选,取 $R_1 = R_2, R_3 = R_4$,第一级的电压输出:

$$v_{\text{OUT1}} = \frac{R_3}{R_1} (v_{\text{IN+}} - v_{\text{IN-}})$$

2.2.3 调零电路设计

调零放大模块由 A_2 、 A_3 两个集成运放 OP07 组成, A_3 为加法器, $\pm 9 \text{ V}$ 电源由电阻 R_{13} 、 R_{14} 、 R_{15} 分压得 $\pm 1 \text{ V}$ 之间可调电压由运放 A_3 与第一级运放 ICL7650 输出做加法运算实现调零。为提高电压调整精度, R_{15} 应选取精度较高的多圈电位计。运放 A_2 用于实现电位计分压的跟随,利用运放输出阻抗小的特点,便于实现阻抗匹配,准确的实现第二级放大增益。第二级的电压输出: $v_{\text{OUT2}} = \frac{R_7}{R_5} (v_1 + v_2)$ 。

2.2.4 滤波电路设计

由于 ICL7650 采用斩波自稳零技术,输出会产生如图 6 所示斩波尖峰,而且输出伴有较大噪声,后续电路必须加以滤波平滑处理。由于一般人体步态极限是 10~15 Hz,电路设计 15 Hz 以上为阻带的有源低通滤波,由运放 A_4 组成经典二阶巴特沃兹低通滤波器,为更好的吸收斩波尖峰, C_{21} 、 C_{22} 需选取较大容值的电容,同样选用漏电流小,阻抗高的钽电容。由于电路自身特性在增益为 3 附近会产生震荡,因此本电路增益取: $A_3 = 1 + R_{12}/R_{11} = 2$;其滤波截止频率: $f = 1/2\pi \sqrt{R_9 R_{10} C_{21} C_{22}} = 15.9 \text{ Hz}$ 。经二阶巴特沃兹低通滤波之后用示波器测得放大电路的最终输出波形如图 7 所示,可以看出,电路最终信号输出接近直线,噪声的峰峰值仅为 2.8 mV,具有很高的精度和稳定性,完全可以满足控制器 AD 转换的要求。

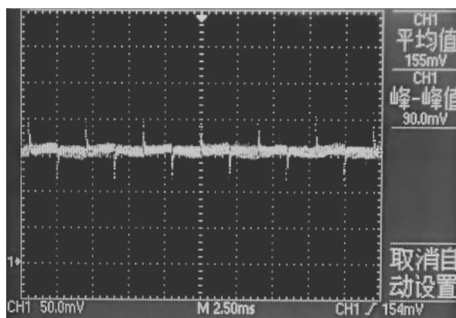


图 6 ICL7650 直接输出的斩波尖峰

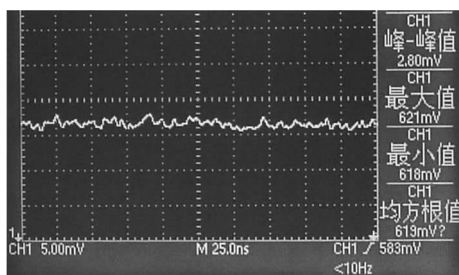


图 7 经二阶低通滤波平滑的信号输出波形

2.3 电路特点及可靠性措施

采用斩波放大器来设计应变桥放大部分,基本消除了温度漂移;为传感器设计专用的恒流源供电电路,有效防止连接线部分引入的干扰,减少了受温度等因素引起的传感器非线性误差。由于外接电桥调零电阻不仅影响电桥的差动性能,而且增加了电路噪声压力,因此传感器不接电桥调零电阻,而是采用后级外部调零电路实现信号的调零。考虑印刷电路板的绝缘性能,选用漏电流远小于 PA 级的高

绝缘电路板,用接地环将 ICL7650 的正相端和反相端包围起来,消除外部干扰和漏电流产生。电路板焊接完成后用无水酒精或溶剂清洗,并用高压空气吹干,然后用环氧树脂或硅胶涂覆,以防止残留杂质和沾污造成的微量漏电流。

3 样机试验测量平台

为测试足底压力传感器和信号放大电路性能,构建如图 8 所示的高速数据采集平台,选用 Data Translation 公司的袖珍型 USB 同步数据采集模块 (DT9816) 作为 AD 转化模块,由于模块每一路模拟输入都配有独立的采样保持器和 AD 转换器,支持对多传感器信号同步数据采集和数据处理,使信号采集和处理的速度、实时性大为提高。基于 C 语言编程平台设计一套友好的人机交互软件,不仅能直观的显示出实验过程中足底压力传感器的受力情况,而且可以保存实验过程的数据,便于离线分析用于算法的改进。

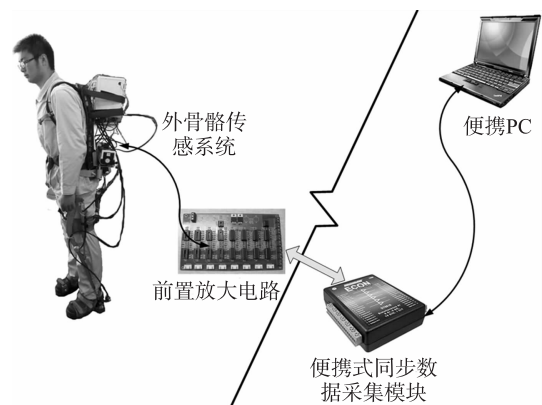


图 8 多通道同步数据采集平台

图 9 所示是样机空载试验过程中截取出的一个完整步态周期足底压力曲线。图中的细虚线为脚跟压力传感器所测得的受力曲线;粗虚线为脚尖传感器所测得的受力曲线;黑实线为人体脚底受力的总和;绿实线为骨骼服末端脚侧传感器的受力曲线。从图中可以看出,在脚跟触地后,脚跟传感器读数迅速上升并达到峰值,随着脚后跟压力降低而脚尖传感器压力上升,步态进入全脚掌着地状态,此时脚侧压力达到峰值,即骨骼服承重最大程度传递至地面,随着步态推移,脚尖受力达到峰值,进入脚尖支撑状态,随着脚尖的离地脚尖压力值迅速下降,表示一个步态周期结束。整个步态过程脚底受力曲线呈现双峰特性,试验表明系统能够准确快速获取人体行走过程中不同步态的足底压力载荷分布,很好满足了样机试验的要求。

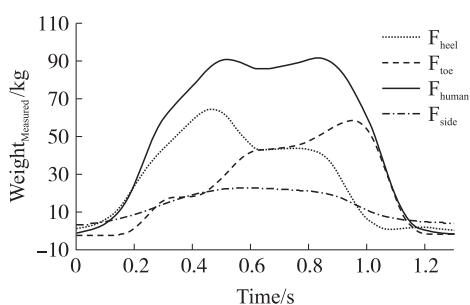


图9 一个步态周期的足底压力曲线

4 结论

研制一种用于两足外骨骼机器人足底压力测量的小型轮辐式足底压力传感器,具有高灵敏度和强抗偏载的特点;设计高精度、高稳定性的斩波稳零放大电路,通过同步信号采集样机试验中的数据表明信号精度高,稳定性好,可以清晰的识别不同步态足底压力载荷变化情况,提供了一种微弱信号放大调理的方法,对仪表信号的处理有很好的实用价值。

参考文献:

- [1] Kawamoto H, Sankai Y. Power Assist System HAL-3 for Gait Disorder Person [C]//Proc. the Eighth Int. Conf. on Computers Helping People with Special Needs, Berlin, Germany, 2002, vol. 2398.
- [2] Kazerooni H, Huang L, Steger R. On the Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton(BLEEX) [C]//In Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., Barcelona, Spain, April 2005: 3469 - 3476.
- [3] Skelly M M, Chizeck H J. Real-Time Gait Event Detection for Paraplegic FES Walking. IEEE Trans [J]. Neural Syst. Rehabil. Eng., March, 2001, 9(1).
- [4] Walsh C J, Paluska D, Pasch K, et al. Development of a Lightweight, Underactuated Exoskeleton for Load-Carrying Augmentation [C]//Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Aut., Orlando, Florida, May 2006: 3485 - 3491.
- [5] 孙建,余永,葛运建. 基于接触力信息的可穿戴型下肢助力机器人传感系统研究[J]. 中国科学技术大学学报,2008,38(12):1432 - 1438.
- [6] 赵彦峻,徐诚. 人体下肢外骨骼设计与仿真分析[J]. 系统仿真学报,2008,20(17):4756 - 4759,4766.
- [7] 陈占伏,杨秀霞,顾文锦. 下肢外骨骼机械结构的分析与设计[J]. 计算机仿真,2008,2(8):238 - 241,334.
- [8] 薛渊,吕广明,孙立宁. 下肢康复助力机构及其液压系统设计[J]. 液压与气动,2008,1:45 - 47.
- [9] 韦启航,陆文莲,傅祖芸,等. 人体步态分析系统—足底压力测量系统的研制[J]. 中国生物医学工程学报,2000,19(1):33.
- [10] 吴祖国. ICL7650 斩波稳零运算放大器的原理及应用[J]. 国外电子器件,2003(4):41 - 42.
- [11] 孟丽霞,于林丽,濮钰麒,等. 微小信号放大电路设计[J]. 仪器仪表学报,2006,7(27):1012 - 1013.
- [12] 朱晔,周伯伟,顾荣,等. 关于轮辐式剪切力传感器的研制与设计[J]. 机械设计与制造工程,2002,7(4):87 - 89.
- [13] 康华光. 电子技术基础—模拟部分(第四版)[M]. 北京:高等教育出版社,1999.



曹恒(1954 -),男,博士,华东理工大学机械与动力工程学院教授,博士生导师,机械电子工程硕士点负责人,主要从事智能传感测控理论与技术、流体传动与控制、控制系统仿真的研究工作,hengcao@163.com;



孟宪伟(1981 -),男,硕士研究生,华东理工大学机械与动力工程学院机械电子工程专业,主要研究方向为外骨骼机器人技术,xianwei-meng@163.com。