

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.10.020

基于人体动能收集的供电背包设计*

王俊龙^{1,2,3}

(1. 中国科学院 上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050;

2. 上海科技大学 信息科学与技术学院, 上海 201210; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对现有发电背包需要外框架结构、重负载、只收集竖直方向上的振动能量、影响人体运动姿态等问题,对人体行走时背包与后背之间竖直和水平晃动位移的大小、背包发电装置模型、背包能量输出的功率变化、发电背包对人体运动姿态的影响等方面进行了研究。对人体行走时背包与后背之间相对晃动位移的规律进行了归纳,提出了基于背包位移晃动规律,设计了无需外框架和重负载的拉绳驱动发电背包方案,利用 3D 打印机制作了发电背包装置模型,并通过跑步机、拉力和惯性传感器,对背包输出的能量和人体下肢关节的变化角度等数据进行了测量和理论验证。研究结果表明:该发电背包在人体行走速度为 1.11 m/s,自重为 1.5 kg 的情况下,可收集到大约 0.3 w 的能量,能量收集过程对人体行走姿态基本无影响。

关键词:能量收集背包;人体行走;发电模型;单向轴承,不阻碍人体运动

中图分类号:TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)10-1123-05

Power backpack design based on human kinetic energy harvesting

WANG Jun-long^{1,2,3}

(1. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 2. School of Information Science and Technology, Shanghai Tech University, Shanghai 201210, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aiming at the existing power backpacks need frame and heavy loads to collect energy, only focused on harvesting energy in the vertical vibration, affect the position of human movement, the research about horizontal and vertical displacement between back and backpack, model of backpacker generator, output power of backpack energy, and the effect of power backpack on human motion gait was presented. The law of relative displacement between the backpack and the back when the human walking was summarized, a power backpack solution based on the law of displacement between the backpack and the back without external frame and heavy load was proposed. The backpack generator model was made by 3D printer and the output energy of the backpack, the angle change of the joints of the human lower limbs were measured, theoretically of generator was verified, through the treadmill, tension and inertial sensors. The results indicate that when the walking speed is 1.11 m/s and the weight of the backpack is 1.5 kg, about 0.3 w energy can be harvested, no influence on the walking posture of the human.

Key words: energy harvesting backpack; human walking; generation model; one-way bearing; no obstruct human movement

0 引言

近年来,随着户外运动的兴起,各种各样的户外运动电子设备也在不断的涌现。目前,大部分户外运动电子设备用化学电池供电,但化学电池容量有限、寿命短、更换频繁。因此,有必要研究并寻找一些新的电源^[1]。

众所周知,人体具有充沛的能量,通过机械装置可以将这些能量转变为电能存储起来。但现在日常见到的户外人体发电装置如手摇电筒,有很多的缺陷,使用者要专注于发电,且发电过程不连续。户外运动能量收集设备需要能够在较长时间内都持续发电,并最好在日常行走中实现^[2]。但是,从行走中获得电能也不

收稿日期:2018-02-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(6140127)

作者简介:王俊龙(1991-),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事能量收集和机电一体化方面的研究。E-mail:wangjl@shanghaitech.edu.cn

容易,目前国外研究主要集中在两个方面:

(1)利用外力直接驱动发电的能量收集装置。如压电鞋利用人体行走时脚与鞋底压电片之间的撞击收集能量,可产生 200 UW ~ 800 UW 的能量^[3];膝关节俘能装置,利用人体行走时小腿和大腿之间的相对转动的位移收集能量,可收集 4.8 W 左右的能量,但是会对人体行走的姿态产生影响,并且装置较重^[4];下肢驱动发电背包,利用人体行走时腿部前后晃动的位移差收集能量,能产生 5 W 左右的能量,该方式也会阻碍人体的运动^[5];

(2)基于惯性的能量收集装置。如 ROME L 等人^[6]提出的悬挂负载背包,收集人体行走中背包与背包外框加之间的相对垂直振动所产生能量,可发出 7.4 W 的电功率,但是该背包需要额外的机械框架,重达 38 kg 的负载和较快的行走速度会影响人体的运动姿态,并且人是不可能长时间背负如此重的背包的;华南理工谢等人^[7]在 ROME L 的背包基础上,对背包结构进行了优化,通过调整弹簧系数,可进行背包控制,在 5.5 km/h 的速度下大约可获得 8 W 左右的能量,但依然有重负载、框架等缺点;王中林等人^[8]提出了摩擦发电能量收集背包,相比之前的 ROME L 和谢等人的电磁式能量收集方式,结构有所简化,但需要一定重负载和框架,在 2 kg 的负载下,获取的能量大约可供 40 个 led 灯。

以上装置中,背包是户外运动的必需品,但以上提到的几种发电背包,一种通过拉绳将脚与背包相连,容易与周围物体如树枝产生缠绕、碰撞,发电装置对人体运动的步长也有影响;另一种悬挂负载背包,都增加了框架,并且只有在重达负载的情况下,才有收集到较多能量,对人体的运动姿态有影响^[9-10]。

本文设计一种无外框架、无需重负载、对人体行走姿态影响较小、装置简洁、体积小、质量轻的利用背包与后背之间的相对晃动位移来收集能量的发电背包。

1 装置设计

1.1 发电机构

发电背包的三维设计模型如图 1 所示。

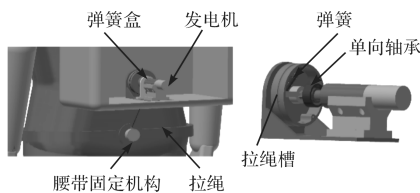


图 1 发电背包三维设计模型

该背包由 4 个部分组成:位移输入系统、加速齿轮组、拉绳恢复系统和发电机。

位移输入系统由钢丝拉绳、弹簧盒和腰带固定机构组成,通过拉绳将背包上下和左右的晃动相对位移,转变为弹簧盒的旋转运动。腰带固定机构可以调整腰带

与背包之间拉绳的长短,以适应不同人群的需求。考虑到背包与人体之间的晃动位移大约在 30 mm ~ 60 mm,腰带与背包之间的拉绳最多只能拉动弹簧盒转动一圈,弹簧盒的直径设计为 60 mm 这样可以保证,在 30 mm ~ 60 mm 的晃动范围内弹簧盒的旋转不会超过一圈。

加速齿轮组直接选用与电机匹配的现有齿轮箱,比速为 68: 1,既可以保证加速齿轮组机械效率,又可以进一步缩小装置的体积,减小其重量。

拉绳恢复系统由弹簧和单向轴承组成。单向轴承在一个方向上可以自由转动,而在另一个方向上锁死,可以保证拉绳恢复时候自由顺滑,不受发电机作用力的影响。电机选用冯哈勃电机,稳定输出功率 18 W,额定转速 5 600 r/min。

整个装置除电机、弹簧和单向轴承外,均采用 3D 材料打印,实物如图 2 所示。

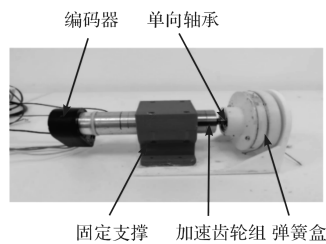


图 2 发电装置制作模型

整个装置的重量只有 500 g,远远低于其他背包能量收集装置的重量。

1.2 工作原理

能量收集背包的工作原理如图 3 所示。

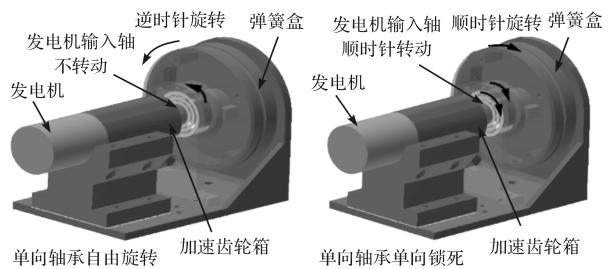


图 3 发电背包工作原理示意图

当背包晃动的时候,弹簧盒会顺时针转动,拉伸弹簧,单向轴承处于单向锁死状态,输入轴会跟随弹簧盒逆时针转动,位于输入轴和发电机之间的齿轮转动,并驱动发电机顺时针转动。当背包晃动位移到达它的极限的时候,或者弹簧盒输入速度小于电机的旋转速度时,单向轴承会处于自由状态,这样可以保证背包晃动位移返回时(弹簧盒逆时针转动),弹簧盒只在弹簧拉力作用下收紧拉绳。

2 能量收集背包模型

在人体行走的过程中,背包和后背之间会产生相对位移,把这个相对位移作为背包的机械能量输入,利

用拉绳将背包和腰带连接起来,那背包拉绳的输入速度就是对拉绳拉伸长度的求导:

$$V = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: V —拉绳的输入速度; Δs —拉绳拉伸的长度; Δt —拉伸时间。

因为单向轴承的存在,只有当拉绳拉伸时,输入位移才会由弹簧盒传递到加速齿轮组上,并把线性输入速度转变为旋转速度,通过加速齿轮组进行放大,所以电机旋转角速度为:

$$W_t = \left(\frac{V}{r} \right) \cdot r_t \quad (2)$$

式中: W_t —发电机的输入角速度; V —拉绳输入线性速度; r —弹簧盒的半径; r_t —整个齿轮组的加速比。

发电机的输出电压计算公式为:

$$E_g = W_t K_g \quad (3)$$

式中: K_g —反转电动势常数。

发电机的输出电流计算公式为:

$$I = \frac{E_g}{R_l + R_g} \quad (4)$$

式中: R_g —电机内阻; R_l —电机外接负载。

发电机中有电流通过会产生一个反转力矩,按下面公式计算:

$$\tau_e = k_t \cdot I \quad (5)$$

式中: k_t —力矩常数。

从电机的机械特性表格中可以查到,作用在弹簧盒上反转力矩为:

$$\tau_l = \tau_e \cdot r_t \quad (6)$$

除了电机反转力矩外,齿轮箱和电机加速减速也会产生力矩,所以总力矩为:

$$\tau_d = (\tau_e + \tau_a) \frac{1}{n} \quad (7)$$

式中: n —齿轮箱的机械效率; τ_d —电机和齿轮力矩。

在已知总的反转力矩的情况下,可以求出输入拉力:

$$F = \frac{\tau_d}{r} \quad (8)$$

式中: r —弹簧盒的半径; F —输入拉力。

系统输出功率为:

$$P_s = \frac{E_g^2}{R_l} \quad (9)$$

系统的机械输入功率为:

$$P_m = F \cdot V \quad (10)$$

3 实验及结果分析

3.1 实验装备和步骤

3 名健康成年男性参加实验(年龄 25 岁,身高 1.70 ± 0.06 m,腿长 8.84 ± 0.042 m,重量 65 ± 8 kg),

所有参与者身体各个部位都没有受到过损伤,没有物理上对身体运动的限制,实验中通过诺伊腾公司的人体惯性补捕捉传感器去获得背包晃动位移和人体各个关节的运动数据,背包实测实验图如图 4 所示。



图 4 背包实测实验图

拉力传感器(量程 0 ~ 5 kg,精度 0.01 g)安装在腰带上,连接拉绳和腰带,用来测量背包的输入拉力,系统的输出连接一个虚拟电阻^[11],拉绳的输入速度通过安装在电机的编码器来测量。Arduino 模块通过模拟口测量拉力传感器信号和编码器的信号,转化为数字信号发送到上位机,通过 Matlab 进行数据处理。

位移测量实验步骤:所有参与者依次背负重量为 1.5 kg,2.5 kg,3.5 kg 和 4.5 kg 的背包(1.5 kg 为背包和实验装置自身的重量),按照 0.6 m/s,0.77 m/s,0.94 m/s,1.11 m/s,1.28 m/s 速度为一组的实验,依次在跑步机上行走,每个速度行走时间为 20 s,每走完一个速度后休息 2 min,每做完一组实验休息 3 min 后,增加重量进行下一组实验。

系统输出功率测量实验步骤:3 名实验者背包的重量都为 1.5 kg,按照 0.6 m/s,0.77 m/s,0.94 m/s,1.11 m/s,1.28 m/s 的速度为一组实验,依次在跑步机上行走,每个速度行走时间为 20 s,每走完一个速度后休息 2 min,做完实验后休息 3 min,再重复两次。

为了找到电机的输出功率和电阻负载之间的关系,还要进行阻抗匹配实验^[12],本研究按照不同外接负载(1 Ω ~ 10 Ω ,等差为 1)进行了 10 组实验,每组实验都按 1.11 m/s 速度行走,一组实验的时间为 30 s,每组实验时间休息 1 min。

电功率和机械功率:外接负载的电压通过 Arduino 的模拟口测量,工作频率为 1 000 Hz,瞬时功率通过公式(9)计算,能量收集背包的平均功率通过 10 s 内的瞬时功率的平均值计算。

瞬时机械输入功率通过拉绳上的输入拉力与背包与腰带之间的拉伸速度的乘积计算。拉力传感器安装在腰带上,连接腰带和拉绳,用来测量拉绳的拉力。电

机上编码器测出背包与后背之间的相对位移,再对相对位移求导可以得出输入速度。机械输入平均功率通过 10 s 内瞬时机械输入功率平均值计算。

3.2 实验和仿真结果

背包晃动位移实验测量结果的均值如图 5 所示。

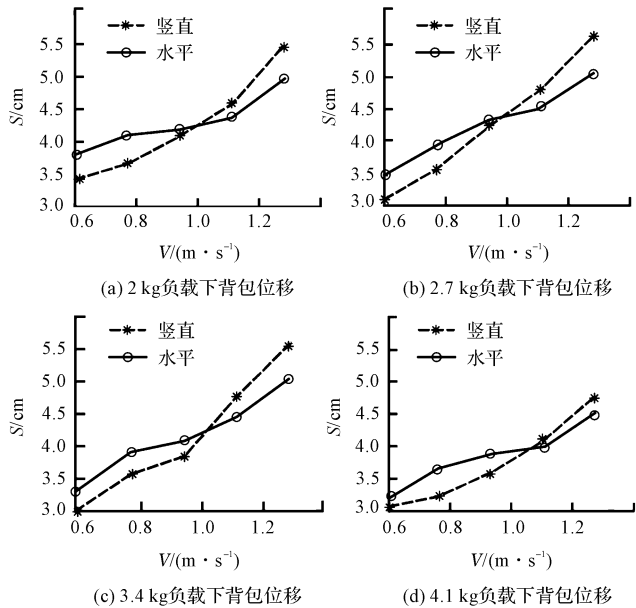


图 5 背包晃动位移与不同人体行走速度和负载重量之间的关系

当人体行走速度 V 小于 1 m/s 时,在不同负载下,背包上、下振动的位移都小于背包左右晃动的位移,并且随着背包负载的增加背包初始晃动位移 S (上、下和左、右) 都会有所下降;当人体行走速度大于 1 m/s 时,背包上下的振动位移都大于背包左右晃动位移。

实验结果表明:在人体低速行走的情况下,背包晃动的能量主要集中在水平方向上,而在高速状态下主要集中在竖直方向上,如果采用悬挂负载式的发电方式,在低速情况下式是没有优势的,而采用晃动位移驱动式在任何速度都可以进行上、下和左、右的能量收集。

在不同外接负载,以 1.11 m/s 行走的 10 组输出功率平均值实验如图 6 所示。

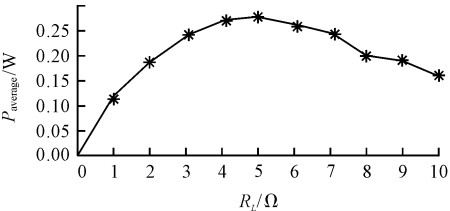


图 6 背包输出功率与不同电阻负载之间的关系

实验结果表明:当随着外接电阻增加时,输出功率先增加后减小,当外接负载大概在 5 Ω 时候,可以得到最大输出功率 $P_{average}$ 大约在 0.3 W 左右。

在外接负载 R_L 为 5 Ω 情况下,速度与输出功率之间得关系如图 7 所示。

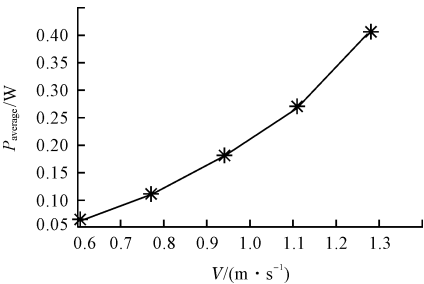


图 7 背包输出功率与不同速度之间的关系

由图 7 可以发现:输出功率随着行走速度得增加,功率在不断地上升,这和背包与后背之间晃动位移关系是符合,因为随着行走速度提高,背包与后背之间的晃动位移和速度也在不断上升,输出功率也会不断提高。悬挂负载式的背包,在 1.5 m/s 的行走速度下,负载为 20 kg 大约产生 0.5 W 左右的能量,但如果负载只有 1.5 kg,几乎没有能量产生;而晃动位移驱动背包,却可以在无外框架和几乎无负载条件下,正常跑步行走速度 V 只为 1.3 m/s 时,获得 0.4 W 的能量,相比之下晃动位移驱动背包的优势明显。

在发电装置中,单向轴承的运用,除了方便弹簧回收拉绳以外,也是为了收集更多的能量。随着输入的速度的增加,发电机因惯性存在,存储的能量不断上升,当存储的能量超过一定值时,拉绳输入速度减小阶段,会从某一时刻起电机旋转线速度时会大于拉绳的输入速度,单向轴承会处于自由旋转状态,发电机自由旋转,获得比输入功率大的能量。

发电背包对人体运动姿态的影响如图 8 所示。

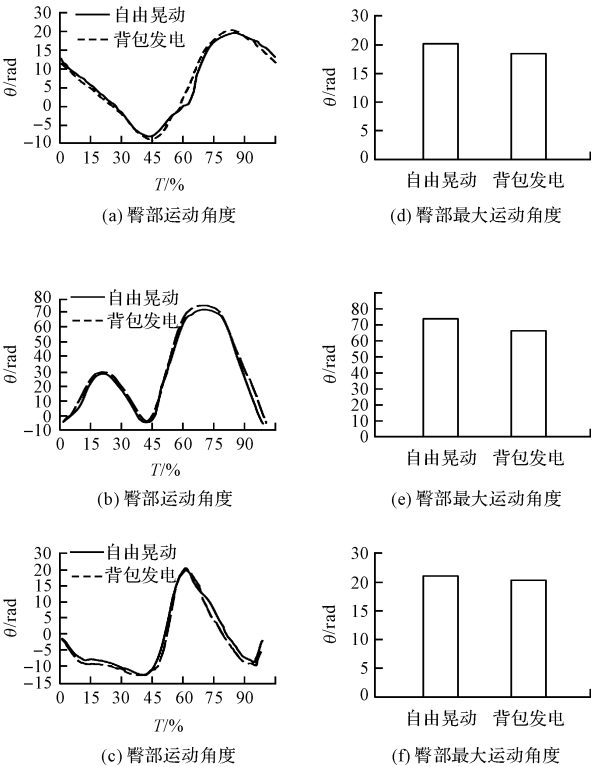
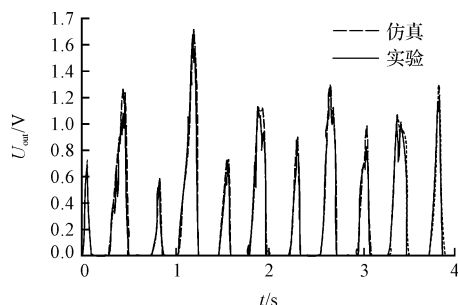


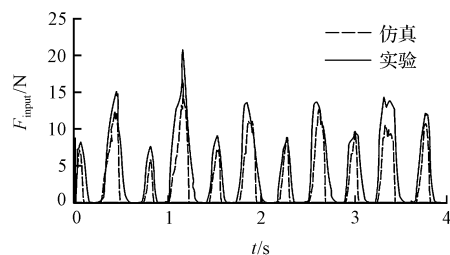
图 8 发电背包对人体运动姿态的影响

背包在发电状态下和不发电状态下,人体姿态的变化如图 8(a~c)所示。在一个运动周期内,两种状态下人体各个关节的运动角度 θ ,都没有任何明显的变化,关节最大运动角度如图 8(d~f)也基本相同,均值误差小 5%。这表明位移驱动发电背包对人体运动姿态是影响很小。

把 Matlab 仿真的结果与实际实验测量的数据进行对比,结果如图 9 所示。



(a) 输出电压实验和仿真对比图



(b) 输入拉力实验和仿真对比图

图 9 输出电压和输入作用力的仿真和实验对比图

当人体以 1.11 m/s 行走,外接电阻为 5 Ω 时,图 9(a)表明实测外接电阻输出电压 V_{OUT} 与模型预测几乎一样;图 9(b)中机械输入作用力 F_{input} 与仿真模型也基本符合。实际实验中,因为系统存在摩擦力,实测结果会大于仿真结果。

4 结束语

本文基于对人体行走时背包与后背之间相对晃动位移规律的研究,提出了后背拉绳驱动发电背包。相比现有的能量收集背包方案,后背拉绳驱动发电背包无外框架,无需重负载,对人体行走姿态影响较小。

实验结果显示:在 1.11 m/s 人体行走速度 1.5 kg 和负载条件下,后背拉绳驱动发电背包能够获得 0.3 W 的能量,高于同等条件下其他方案,人体关节角度的变化均值不超 4%,对人体运动姿态的影响较小,

同时实验结果与理论仿真数据基本吻合,证明本文提出基于单向轴承的理论发电模型的正确性。

参考文献 (References):

- [1] MITCHESON P D, YEATMAN E M, RAO G K, et al. Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices[J]. **Proceedings of the IEEE**, 2008, 96 (9): 1457-1486.
- [2] 姚 梦, 武庆东. 一种人体能量收集系统的研制[J]. 河南机电高等专科学校学报, 2011, 19(3): 8-11.
- [3] SHENCK N S, PARADISO J A. Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectric [J]. **Micro IEEE**, 2001, 21 (3): 30-42.
- [4] LI Q, NAING V, DONELAN J M. Development of a biomechanical energy harvester[J]. **Journal of Neuroengineering & Rehabilitation**, 2009, 6(1): 22-22.
- [5] SHEPERTYCKY M, ZHANG J T, LIU Y F, et al. Development of an energy harvesting backpack and performance evaluation[C]. IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, Washington: IEEE, 2013.
- [6] ROME L C, FLYNN L, GOLDMAN E M, et al. Generating electricity while walking with loads[J]. **Science**, 2005, 309 (5741): 1725-1728.
- [7] XIE L, LI J, CAI S, et al. Design and experiments of a self-charged power bank by harvesting sustainable human motion[J]. **Advances in Mechanical Engineering**, 2016, 8(5): 1-10.
- [8] YANG W, CHEN J, ZHU G, et al. Harvesting energy from the natural vibration of human walking [J]. **Acs Nano**, 2013, 7(12): 11317-11324.
- [9] LI Q, SHEPERTYCKY M, MARTIN J P. Lower-limb driven energy harvesting backpack: design, performance and energetics[C]. Control Conference, Hangzhou: IEEE, 2015.
- [10] XIE L, DU R. Harvest human kinetic energy to power portable electronics [J]. **Journal of Mechanical Science & Technology**, 2012, 26(7): 2005-2008.
- [11] WANG G, LUO C, HOFMANN H, et al. Power electronic circuitry for energy harvesting backpack [C]. Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose: IEEE, 2009.
- [12] ZUO L, SCULLY B, SHESTANI J, et al. Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions [J]. **Smart Material Structures**, 2010, 19(4): 1007-1016.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

王俊龙. 基于人体动能收集的供电背包设计[J]. 机电工程, 2018, 35(10): 1123-1127.

WANG Jun-long. Power backpack design based on human kinetic energy harvesting[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(10): 1123-1127.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>