

基于力反馈可穿戴柔性外骨骼助力装置的研究

彭灵利

广东电网有限责任公司广州供电局 广东 广州 510000

摘要: 本文基于力反馈可穿戴柔性外骨骼助力装置的研究, 通过对人体动力学规律的研究与力反馈在可穿戴柔性外骨骼轮毂电机驱动的研究提出了一种力反馈可穿戴柔性外骨骼助力装置其主要包括: 动力电源系统; 轮毂电机; 采集、驱动、通信单元; 主控单。其中轮毂电机采集穿戴者运动状态的同时并为穿戴者提供精准动力。可穿戴柔性外骨骼助力设备, 是户外作业负重作业的助力系统, 有助于降低配电线路巡检人员在巡检、攀爬和负重时所需能量, 通过山西省电力公司太原供电公司的应用实践证明了本研究的适应性和可靠性。

关键词: 力反馈; 可穿戴; 外骨骼; 轮毂电机; 电子调速

引言

在现代配电巡检维护工作当中, 配电线路的巡检工作一直都是相当的重要。为了让配电线路和配电网保持稳定、安全运行, 必须对线路进行定期检测和维护。得益于现代科学技术的日新月异, 涌现了一大批关配电线路巡检的新手段和新技术。然而虽然自动化技术在电网日益普及, 但在配电线路的巡检过程中, 始终离不开人的参与, 线路巡检仍然存在着人工巡检的情况。工人每次外出巡检作业, 需要佩戴专业的设备到达每一基塔下, 完成巡检预定工作。碰上恶劣的天气, 依然要坚持在巡检一线, 而且配电巡检维护是一个需要负重的体力活, 携带设备长距离巡线也是不可避免的。

为了减轻巡线工人的负担, 我们急需研发一款可穿戴的助力设备, 即目前非常实用的可穿戴柔性外骨骼设备。该套设备完美融合了自动控制理论、液压传动技术、机械设计理念、信息识别处理、电磁感应等技术, 穿戴上外骨骼后, 它可以为穿戴者提供助力、助行、攀爬、托举等一系列功能, 同时可以大大提高工人携带重物的能力, 减轻工作负担。

1 研究现状

那么什么是可穿戴助力装备呢? 其本身就是一套可以穿在身上的人机交互系统, 是根据人体工学设计的外部骨骼, 这套系统完美结合了机械设计理念、电磁感应原理、信息识别处理、自动控制技术、液压传动等技术。在日常作业时, 它可以为穿戴者提供助力、助行、攀爬、负重, 抬举等方面的帮助, 极大的提高了作业人员负重的能力, 使穿戴者可以进行远距离的高负重行走。

以结构为依据外骨骼设备可分为刚性外骨骼和柔性外骨骼。一般刚性外骨骼由一系列多杆开链机构组成, 并于多个活动位置安装传感器, 再由各处的传感器采

集关节位置和应力信息, 中央控制处理器通过这些收集到的信息来精准调控外骨骼。刚性外骨骼是一种仿人体骨骼的动力装置, 其强大之处在于兼具负载和搬移托举功能, 能够增强人的骨骼和关节力量, 实现力的传递。柔性外骨骼的结构形状类似服装, 穿戴时贴附在身体表面, 所以又称为柔性助力服。

常用控制智能可穿戴助力设备的途径就是通过肌肉电信号和脑电波信号, 然而目前能够采集这些信号的传感器还不够先进, 例如肌肉电信号的数据噪音、建模和校准的难度不是一般的大, 而且想要在动态环境中维持传感器的精确度挑战很大, 同样在使用交互力来控制外骨骼也有类似的问题^[1]。目前主要是通过外骨骼硬件检测信号来估计人类意图, 而且设备有两个特点分别是人和机器之间有物理和认知的双重交互。物理之间的交互就是人和机器之间会有力和反作用力的交互, 从而使设备加强作业人员的力量, 通过认知之间的交互作业人员可以始终保持对设备的操控。

供能模块设计。决定外骨骼能否进行大面积推广的关键因素是供能模块的设计, 目前能够用到外骨骼装备的工况, 基本都无法通过有线连接提供强劲的动能。所以从理论来讲, 需要配备最少能够支撑24小时运行的独立电池系统。就目前的储能模块发展趋势, 解决供能模块的最好方式是采用能量密度高、工作温度范围宽广, 充电速度快、重量轻、循环使用寿命长的锂电, 并且需要设计成便捷拆卸的模块化, 可以完美解决供能模块的问题。

信息传递模块。为了更先进的控制整个外骨骼系统, 需要将多种传感器信号融合传输的技术来获取所需的信息, 目前常用的是多维度力传感器及生物传感器。另外由于外骨骼装备结构空间十分有限, 需要对传感器

的外形进行适应设计，即将其设计成小巧紧凑的结构，适应整个外骨骼装备的狭小空间，提高整个装备的可操控行。

2 研究目标

目前基于理论实践研究基础的不断完善，动力外骨骼技术在国外已经趋于成熟，同时已经开始了具体的产业应用。反观国内的动力外骨骼还集中在医疗康复领域，鲜有消费与行业应用。国内市场已经出现的外骨骼高达30Kg，价格昂贵、质量沉重，难以大规模应用。而可穿戴柔性外骨骼助力装置产品除材料外主要的技术瓶颈在于电调力反馈逆解。

可穿戴外骨骼有个关键要素——舒适性，因此在外骨骼的设计中，结构设计是难点也是关键点。这个无论是康复外骨骼还是助力外骨骼都必须具有的，不能使穿戴者感觉到不适应，外骨骼的结构设计不仅仅影响到外骨骼的传动和穿戴行走的舒适性，还对外骨骼通过传感器采集外部信号有影响，从而影响到外骨骼的控制环节。机械结构的设计要充分结合人自身的特点，保证人体的各个关节的必要转动，不能阻碍人的自身运动，对于身高、体重在一定范围内的人要有一定的适应性，可以通过调节让每个穿戴者穿戴舒适，力求达到质量轻巧、穿戴简单、方便调节、穿戴舒适等^[5]。

由于外骨骼装备在穿戴时有诸多要求，所以在进行结构设计时要考虑诸多因素：

2.1 穿卸便捷

外骨骼的设计要满足穿戴紧凑，各配件装配上身时要便利，脱下外骨骼装备的时候也要迅速，特别是出现紧急情况的时候能够快速的将各配件组装、拆卸。同时由于外骨骼装备是自带电池供能模块的，虽然锂电池相比其他电池重量更轻便，但仍需要尽可能的减轻整个装备的重量，因此可以采用一些高强度、低密度的材料加工成配件，可以大大减轻外骨骼装备的质量，也能提高供能模块的使用时间。

2.2 结构安全

针对这种穿着在身上还能提供强大驱动力的装备，安全设计是它的重要关注点。当作业人员穿戴上外骨骼装备时，无论是正常使用还是遇到突发紧急情况，都必须保证作业人员的生命安全。因此，我们考虑在不影响结构正常运行的情况下，在装备结构上再加一些起到保护作用的防范性结构，例如在关节转动的位置加装一些

限位结构，这样在关节转动时旋转角度不会突破人体关节转动角度上限，防止穿戴者出现关节脱臼；另外在驱动模块上增加一些限制结构，限制驱动器的运行行程，保证驱动器的行程不会突破安全范围。最后在一些受力较大的位置，配件设计需要使用高强度小巧的材料，持续做功的地方需要进行力学仿真，保证结构的安全性^[4]。

2.3 关节可调

我国幅员辽阔，各地成年男性身高、胖瘦不尽相同，因此外骨骼装备在穿戴时需要考虑各个关节与人体的关节相互对应，这样才能保证外骨骼帮助人作业的时候更加舒适高效。鉴于此我们考虑通过将腰部，腿部的关节进行可调节设计，设置调节余量，用限制结构保证调节余量的安全，这样就可以大大提升外骨骼装备的通用性。

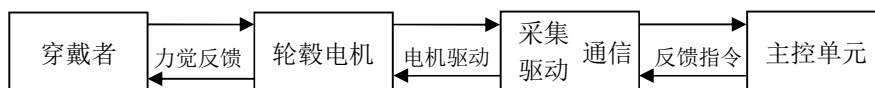
2.4 仿生设计

当外骨骼装备穿戴在作业人员身上时，不能让外骨骼对人的行动形成枷锁限制。因此在设计时要充分考虑人体和机械之间的相互配合，整套装备的各个关节在旋转角度和自由度上，尽可能满足人体关节转动拉伸的范围，这样可以在穿戴上外骨骼装备的时候对作业人员行动的干涉达到最小，更方便行动。

3 力反馈在可穿戴柔性外骨骼助力装置的应用研究

一般来讲，有两种途径可以使外骨骼助力装置穿戴者感受到力的作用，一种是通过力直接作用在人体身上，另外一种是通过眼睛看到穿戴运动的状态，后者不利于穿戴操作，第一种方法是将环境和穿戴产生的力信号通过电机反作用力传递人体肌肉，通过对细胞神经的刺激使之感受到力的存在，从而使外骨骼穿戴者感觉到适应。外骨骼同时具备感知力的作用同时能提供辅助力。第一种方法完全符合人们的行走习惯，穿戴作业效率和辅助度都要高于第二种。

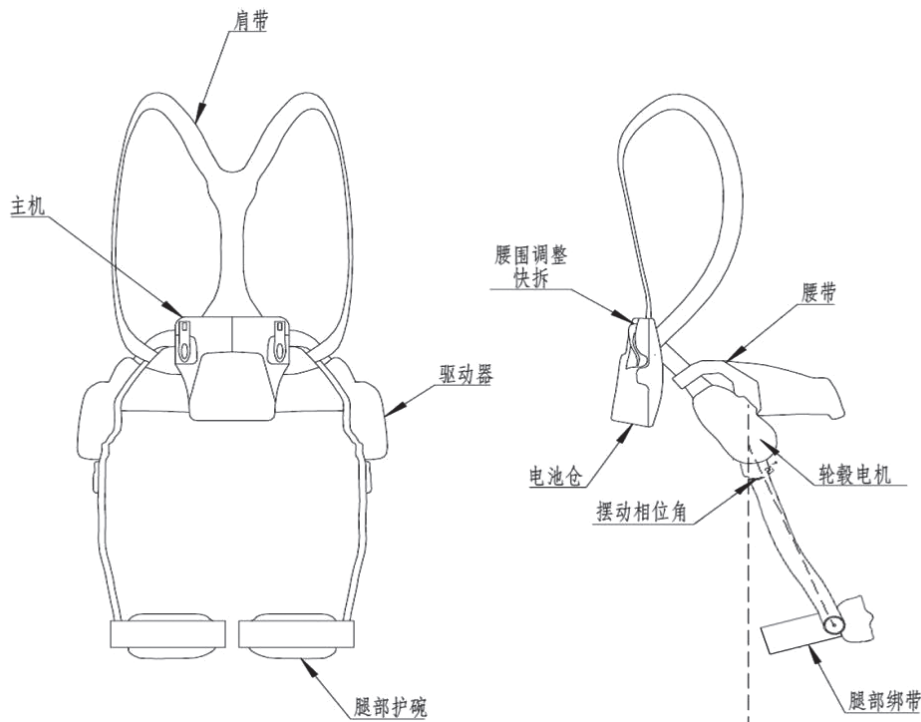
力反馈穿戴柔性外骨骼助力装置人机工作系统主要包括穿戴者人与柔性外骨骼助力装置，其中柔性外骨骼助力装置除机械结构外主要包括：动力电源系统；轮毂电机；采集、驱动、通信单元；主控单。其中动力电源系统为整机提供电源，轮毂电机采集电机相位信号与力反馈信号，由主控单元通过通信驱动单元对轮毂电机进行驱动，从而提供有效助力。反馈控制原理示意图如下：



4 力反馈在可穿戴柔性外骨骼轮毂电机驱动

力反馈在可穿戴柔性外骨骼动力的核心来源于轮毂电机，轮毂电机在工作时需要采集电机转动的相位与穿戴者对轮毂电机的作用力。

通过电机的转动相位获取人体的运动状态，通过状态的位置判断人体腿离开地面的摆动位置状态，主要包括3种摆动状态，第一状态，抬起一条腿到这条腿弯曲到



当相位角趋于摆动周期的最大角时，腿部所施加的力会大于轮毂电机输出转矩，也就是说电机工作在堵转状态，此时要求电机的输出力最小。当相位角趋于零时该状态为两腿合拢时，些时助力为最大输出状态，这要求电机通过测量相位角与力反馈值大小从而对电机进行驱动。驱动电机需要建立控制信号与反馈力的关系系统模型^[3]。

$$\text{电机转矩公式: } T = K_m \Phi I \quad (1)$$

式中， T —电机力矩 ($N \cdot m$)；

K_m —与电机结构有关的常数；

Φ —电机磁通量 (Wb)；

I —驱动电流 (A)

$$\text{直流电机转速公式: } n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{R}{K_e K_m \Phi^2} T \quad (2)$$

式中， n —电机转速 (r/min)；

U —电机端电压 (V)；

K_e, K_m —与电机结构有关的常数；

R —电机电阻 (Ω)

最大角度时，作用的时间为60%-75%的步态周期；第二状态，这条腿的膝关节从最大弯曲度调整到大小腿平行的阶段，这一阶段是单腿支撑阶段，作用的时间为75%-85%的步态周期；第三状态，一只腿已经抬起时，另一只腿向前运动当再次与地面触碰的这段时间，仍是处于单腿支撑状态，作用的时间为85%-100%的步态周期。

当相位角趋于最大时，摆动转速为零，此时 $n = 0$ ，因此由(1)，(2)得出：

$$\frac{U}{K_e \Phi} = \frac{R}{K_e K_m \Phi^2} T = \frac{R}{K_e \Phi} I \quad (3)$$

由公式(3)可知，电机堵转状态下，在电驱电阻 R 及磁通量 Φ 均不变的条件下，电机输出转矩与电机端电压成正比。因而电机驱动采用调节电机端电压的方式^[2]。

5 结论

本文通过对人体运动学规律的研究，对人体行走运动的分解，提出了基于力反馈可穿戴柔性外骨骼助力装置设计方法。其中锂电池作为动力电源，通过采集、驱动、通信单元驱动轮毂电机。其中轮毂电机为控制系统提供相位信号与力反馈信号，驱动单元通个人体运动状态精准控制轮毂电机工作电压，从而使外骨骼助力设备获得随心所欲的助力。可穿戴柔性外骨骼助力设备，有助于降低配电路巡检人员在巡检、攀爬和负重时所需能量，帮助人体在高负荷状态下作业，从而有效减轻人

体疲劳度,提升人体力量,有效增强人体在不同复杂环境下的运动表现,同时有效减少降低因时间或高强度工作导致的肌肉、关节劳损,降低职业病发生风险,达到降低工作强度,保护作业人员健康和提高工作效率。

参考文献

[1]谭建成,电机控制专用集成电路[M].北京:机械工业出版社,1997

[2]孙立军,孙累,张春喜等.无刷直流电机pwm调制方式研究[j].哈尔滨理工大学学报,2006,11(2):120-

123

[3]《无线电》杂志社《无线电》汇编丛书人民邮电出版社,2006 23-26

[4]编委会 电力工程施工安全作业规范与突发情况处理[M].机械工业出版社 2006

[5]徐扬生:《智能机器人的问题与思考》,2016年8月12日人工智能与机器人峰会,香港中文大学(深圳)校长、中国工程院院士;