2.2 人体行走运动机理分析

人体的行走运动是众多肌肉有节律地协同收缩，以驱动骨骼绕关节运动的结果，是控制系统（神经系统）与运动载体（人肢体）衍生出的最完美、最复杂的运动[74]。尽管生命科学、智能控制等领域在近几十年来已经取得了很大的进步，但是距离模拟人大脑对机械本体控制、实现与人体一致的肢体运动还非常遥远。因此，研究人体行走运动机理，无论是对外骨骼机构的仿生学设计，还是对其复杂的运动助力与协调控制来说，都具有非常重要的借鉴意义。例如，外骨骼与人体下肢外部并联，理论上应和人体下肢关节的活动相匹配。但如果对外骨骼所有关节的所有自由度都进行驱动，势必会消耗大量能源，并加大控制系统的复杂性和不稳定性[75]。另一方面，根据人体行走的运动机理，在步态的不同阶段，人体下肢各关节有做正功、负功的差别。若外骨骼采用储能元件实现在人体关节做负功的阶段进行能量储存，并在做正功的阶段进行能量释放，则可达到节能的目的[136]。所以，对人体行走的生物力学行为进行研究，可以认识行走过程中下肢关节的角度、力矩、功率、做功情况等，进而作为外骨骼驱动方式和助力策略选取的重要依据。

在解剖学中，人体可分为相互垂直的三个基本平面（矢状面、冠状面和水平面），分别对应三个轴（冠状轴、矢状轴和垂直轴），如图2.1(a)所示[1]。人体髋、膝、踝关节作为骨骼联接的枢纽，不管各关节结构如何复杂，他们的主要运动形式都是绕各个轴的转动（膝关节也包含一部分平动）。根据转动轴的不同，关节的运动形式可以分为前屈-后伸、外展-内收和外旋-内旋[137]，它们分别代表关节绕人体冠状轴、矢状轴和垂直轴的转动。图2.1(b)描述了人体髋部主要的肌肉骨骼结构，其中髂腰肌收缩辅助髋关节前屈，臀大肌收缩辅助髋关节后伸；臀中肌和臀小肌辅助髋关节外展，内收肌辅助髋关节内收[138]。髋关节外旋和内旋运动涉及的肌肉较多，在图中未予以画出。髋关节属于典型的三自由度杵臼关节，而人在步行时，髋关节以绕人体冠状轴的前屈-后伸旋转运动为主，此时髂腰肌和臀大肌的活动更受关注。此外，由于步行运动的复杂性以及肌群间的相互作用关系，横跨股骨的腘绳肌与股四头肌的活跃程度同样是步态分析和外骨骼助力性能评估的重要指标。

人体步行运动的节律性，使得研究者们得以聚焦于一个步态周期（gait cycle）对人体下肢的运动和动力学行为进行研究。步态周期指行走时同侧腿发生相邻两次步行事件的时间间隔，通常以脚跟着地事件作为划分依据[1]。步态周期中，足部接触地面并承受重力的阶段称为支撑相，离开地面向前摆动的阶段称为摆动相，二者在时间上分别约占步态周期的60%和40%[1]。Perry等人对一个步态周期内的下肢运动做出了进一步细分，如图2.1(c)所示：支撑相可细分为预承重期（loading response）、支撑中期（mid-stance）、支撑末期（terminal stance）、预摆动期（pre-swing）；摆动相可细分为摆动初期（initial swing）、摆动中期（mid-swing）和摆动末期（terminal swing），相邻的步态阶段通过标志性的步态事件实现切换[139]。

对正常人步态运动的研究表明[3]，人体髋关节在步态周期的0 ~ 35%期间（即预承重期和支撑中期）产生正功以承受身体重量、推动身体向前，此时臀大肌产生向后的力矩并做正功，促使大腿加速向后伸展；在随后的支撑末期，髂腰肌收缩发力引导大腿减速，髋关节处的肌腱肌膜拉伸以吸收和耗散能量，同时抵抗重力、提高身体重心，促使步态由支撑相转为摆动相[31]。摆动相开始后，髂腰肌与股四头肌共同收缩产生向前的力矩，带动大腿抬起，加速髋关节向前屈曲；最后，臀大肌、腘绳肌和股四头肌协同收缩，再次产生向后的力矩做负功，带动髋关节减速前屈，为下一次脚跟着地（下一个步态周期的开始）做准备。髋关节在冠状面的运动相对简单：支撑相内收，关节力矩向外；摆动相外展，关节力矩向内[138]。



图2.1 人体行走运动机理的相关示意图，(a) 人体的基本平面和基本轴，根据[1]重绘，(b) 人体髋部肌肉骨骼结构示意图，根据[138]重绘，(c) 人体行走时的步态周期划分，(d) 人体行走时髋关节绕冠状轴和矢状轴的角度和力矩