

康复工程中的生物机械学研究*

金德闻¹ 张济川¹ 郝智秀¹

1 人机一体化系统与生物机械学

任何机械的工作过程中都离不开与人的关系。早期简单机械必须有人力介入才能完成特定的工作。在有其他动力驱动的系统,特别是蒸汽机、电动机等动力机械出现后,使简单机械与动力系统组成一个整体。因此在研究机械系统性能和设计问题时,必须考虑动力机械的性能。在有动力机械的条件下,人类则从动力源的提供者变成机械的操控者。20世纪后半叶,机械的发展是以自动化和智能化为特征的,自动化和智能化技术使人类从复杂的操作中解放出来,甚至免去不少繁琐的脑力劳动。在对21世纪机械科学发展问题的讨论中,人们探讨的问题之一便是人在机械系统中的地位。路甬祥等1994年提出了“人机一体化”理念^[1]——采用以人为主体的,人-机一体化的技术路线,人与机械共同组成一个系统,各自执行自己最擅长的工作,形成达到甚至超过人的能力乃至智力的“超智能”系统。这种理念在自动化技术领域,从一个新的角度来思考和研究人与机械的关系。

“人机一体化”的理念不仅适用于自动化领域,也可扩展到许多人体(或生物体)与机械组成的一体化系统中。有人体介入的机械系统称为人机系统,或者扩展称为生物机械系统。在所研究的问题中,当生物和机械相互影响、密不可分,便形成人(生物)机一体化系统。例如在汽车等现代交通工具中,人与车辆的关系除了人对机械进行操作(属于工效学范畴)以外,还包括机械对人体的反作用。近年来对汽车安全性研究,就需要对从人体的生物学特征、器官组织性能、碰撞时机械系统对人体的影响等问题进行深入系统的分析。这些分析和研究结果向产品设计和性能评估注入了新的因素。

在人机一体化系统的研究中,机械学与生物体相结合的生物机械学是机械学发展的一个新领域。生物机械学是现代机械学和生物力学、生理学相结合的产物,是以生物机械一体化系统为研究对象,包括用机械学原理与方法研究生物功能,以生物功能的工程化原理为基础的功能再现和人与系统的相互影响三个方面。

生物机械学研究的意义在于机械不仅代替人的体力或脑力劳动,而且密切为人服务,研究目标是致力于保护人体健康、充分发挥人的潜能、辅助和增强人体功能。此外,通过对人体(包括动物)自身功能的研究和理解,也会对机械科学

与技术的研究与发展提供有益的启示。

2 康复工程与生物机械学

在康复工程所涉及的人-机系统,特别是运动功能康复系统中,人与机械的关系非常密切。康复工程的基本理念是“替代”和“增强”。在这些系统中,机械可成为人体某部分的替代物。如因失去肢体而安装假肢者,人与假肢这个机械系统形成一个人机交互不可分割的人机一体化系统;在增强人体功能方面,机械系统与人体结合能大大增强人体已有的功能。例如,根据军事和人体功能康复的需要而开发的外动力助力装置,不仅可帮助瘫痪或肌无力者实现步行,而且可使军人或特殊工作者提高负重能力、长途跋涉能力和登高能力。2008年北京残疾人奥运会期间,令人瞩目的南非运动员“无腿飞人”奥斯卡·皮斯托留斯跑出了正常人都难以达到的成绩,其原因除了个人意志和能力以外,他所使用的用碳纤维制成储能式运动假肢起到了很关键的作用。在假肢与人体构成一个人机一体化系统,假肢的形状和参数设计,以及与人体的完美结合,使个人体能和假肢的力学性能都得到了充分发挥。在康复工程所研究的问题中,人与机械具有不可分割的联系。通过人与机械的交互或界面使机械和人成为不可分割的整体,所以康复工程所涉及的功能康复领域是人机一体化系统研究中的重要分支。

康复工程中的人机一体化系统主要有以下特征:①人是系统的主体,人与机械相互依存缺一不可。②人与机械之间存在交互界面,可以是接触式界面或非接触式界面。③人与机械相互作用,人可以通过各种方式操纵机械;而机械性能对人体组织和功能的恢复、重建与增强,有重要影响。④系统的设计与评价必须与人体的生物学功能相结合。

3 康复工程中生物机械学研究

康复工程中的生物机械学研究涉及对生物体各种机体组织的性能和器官功能的工程化原理的研究,人与机械系统的交互原理与方法,人机结合界面,人与机械相互作用效果,人机系统设计与系统的性能评定等各种问题。其内容可概括为:①人体运动的生物机械学模型及应用;②人体运动行为结构与协调性研究;③人机交互原理与方法;④人机结合界

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(50875148,30170204); 1 清华大学精密仪器与机械学系,北京,100084

作者简介:金德闻,女,教授,博士生导师; 收稿日期:2009-11-04

面分析和设计;⑤人机系统中机械对生理功能的影响;⑥人机一体化系统设计与评估。

3.1 人体运动的生物机械学模型及应用

在研究康复工程中的人机一体化系统问题中,探索人体运动及其控制机制是所需解决的基本问题之一。建立人体生物机械学模型是探究生物运动奥秘的基础,同时它们又具有实际应用价值。

鉴于生物体的复杂性,根据不同需要可建立不同类型的生物机械学模型。模型所包含的范围可以是局部生物体的模型,例如对人体来说,可以是上肢、下肢、手或一个手指乃至一个关节,也可包括整个人体;模型包含的因素,有多刚体模型,含肌肉特性的肌骨模型,含神经控制信息的神经肌骨模型,含关节解剖结构的多体模型和人机接触界面模型等。

3.1.1 多刚体模型:此类模型在人体运动学和动力学分析与研究中有广泛用途^[2-3],可用于分析运动的轨迹、速度、加速度;在已知运动参数时计算关节力矩;为人体运动功能的描述提供依据;用于功能评定和功能障碍分析,为康复治疗提供参考等。这种模型的主要用途是对运动功能外在表现状态的研究。

3.1.2 含肌肉特性的肌骨模型:含肌肉特性的肌骨模型,用于分析运动中各肌肉的活动规律^[4]。在此类模型中,如何描述肌肉的特性是极为重要的。目前普遍采用的是 Hill 肌肉腱模型^[5],由 4 种元件组成——主动收缩元件(CE)、串联弹性元件(SE)、并联弹性元件(PE)及肌腱(TE)。由于该模型通过调整各元件的参数,能较好的反映肌肉受力变形后弹性收缩特性,可用于许多对涉及肌肉特性的研究中,包括分析不同肌肉对某一动作的贡献;肌肉增强或损伤对运动功能的影响;多关节协同运动时肌肉的协调性以及为提取人机交互的肌电信号提供依据等。由于关节活动是由多块肌肉协调驱动的,肌骨模型属于高冗余度系统,这就给系统的分析带来不少困难。求解时常需要借助其他工具,例如约束优化方法来求解。

3.1.3 含神经控制信息的神经肌骨模型:此类模型将神经信号输入肌肉模型,可用来研究从神经信号到运动终端的响应过程和对肌肉活动的协调控制机制等^[6]。

3.1.4 含关节解剖结构的多体模型:建立此类模型需要首先应用医学图像技术得到解剖结构模型和有限元模型,然后嵌入多刚体模型^[7]。此类模型可用于在人体运动过程中,骨关节内部各部分(关节面、软骨等)的受力状态,并可进一步研究关节损伤原因、不同治疗方法(如人工关节置换)的效果及与康复装置(如矫形器)设计有关的系统设计等。此外,在研究关节内部各部分摩擦关系时,还需要加入摩擦作用模型,进行摩擦性能分析。

3.1.5 人机接触界面模型:人机有直接接触界面的情况很多,例如座椅表面与臀部的接触、鼠标与人手的接触、截肢者残端与假肢接受腔的接触,等等。这些界面的力学性质和对

人体组织、生理功能的影响(有些影响甚至是长期性的),是人机一体化系统需要研究的重要问题。建立这种模型不仅要考虑机械的表面性质,还包括生物组织的力学性质^[8]。

3.2 人体运动行为结构与协调性研究

人体运动系统是高冗余系统,其控制机制十分复杂。即使日常生活中司空见惯的动作,如上肢的指点运动(食指从自然位置运动到某一特定点的上肢运动),需要上肢各个关节的协同运动才能完成。如果简单地把系统看作一个机械系统,手指从起始点到目标点之间的轨迹,就有无数种可能的解,而对于上臂这个多自由度系统来说,实现手指端部一个特定的轨迹,各关节的运动也不是唯一的。但是不同人在做这个动作时,却都遵循着一定的规律^[9],人在执行动作时并不需要刻意控制每个关节的运动。协调性的研究就是,一方面定量描述这种规律,另一方面探索这种规律存在的机制。

协调性问题不仅是运动层面的协调,还包括肌肉的协调。因为某一个关节的运动是由多组肌肉协调动作驱动的,与一般机械系统一个原动机驱动一个运动大不相同。协调性研究,对于体育训练,康复治疗 and 机器人设计均有重要意义。解决这些问题需要将机械学的方法与人体生物学特征相结合,同时也给机械学的研究提出了新的课题。深入了解这些规律,不仅对人体自身功能有深入的认识,也可多为多自由度机械系统的运动控制方法带来新的启迪。

3.3 人与机械交互原理与方法

在传统机械中,人用肢体直接操作机器,是人机交互的主要方式。在人机一体化系统中,人体的任何生物信息都可用作为人机交互的信息源^[10]。常用的生物信息源有肌肉电信号^[11]、神经电信号、脑电信号^[12],乃至呼吸信息、眼球运动信息等。对于不同的信息源,需要用不同的传感器将它们转变成可以被机械系统接收的信号,通过采集和处理系统,识别人体的意图或状态,以便控制机械系统。

3.4 人机接触界面的性质分析与设计

在许多情况下,人体与机械有直接接触的界面,如前所述的座椅表面与臀部、鼠标与人手、行走或运动时足底与地面、截肢者残端与假肢接受腔等,都形成直接接触界面。这时界面的性质是保证安全、实现适应性和舒适性的重要因素。行走时足-地界面对于下肢关节的保健作用有重要影响,轮椅用的坐垫对保证使用者血液流通和避免压疮极其重要,训练器械与人体的接触部分,不仅要考虑接触压力分布合理,还要考虑其对人体随意动作的适应性。假肢接收腔与残端的接触界面直接影响残端软组织的压力分布,不仅影响使用者的舒适感,而且不合理的分布会造成二次伤害^[13]。

3.5 人机系统中机械系统对生理功能影响

机械对人体的反作用能引起人体功能和组织结构的变化。例如,机械生理学(mechnobiology)研究的机械力引起骨关节组织的变化^[14];矫形器对畸形骨骼的校正作用;在

运动员体能训练和各种康复训练中,把运动状态检测和质量分析的结果反馈给受训者,利用生物反馈原理增强受训者的主观意识^[15-16],以促进运动功能的提高和恢复等。对这些问题开展机制性探讨、理论分析和设备研发不仅具有理论意义,也有重要的实用价值。

3.6 人机一体化系统设计

在人机一体化系统设计中,与一般机械设计不同的是,在确定机械与人组成的人机一体化系统的功能(设计的核心目标)之后,要进行以下的设计和分析工作:

3.6.1 整体性能分析与设计:由于人体生物学参数与系统的最终性能密切相关,在分析设计系统的运动学、动力学性能时,必须结合人体的生物学参数,建立一体化模型。在以人力为动力源的情况下,需要把人力参数化后输入模型,以确定求解过程中的动力学特性。在有些情况下,甚至外界环境也是设计需要考虑的因素。例如,为膝上截肢者设计的下肢假肢系统,在使用者穿戴后,需要满足走路时的步态要求和站立时的稳定性要求。在设计时,除了对关节的运动学规律进行设计,使其能够模仿人体关节的运动规律外,还需将假肢与人作为一个整体处理,以髌关节力矩为动力源进行动力学分析^[17]。如果需要假肢具有对环境(路况)识别功能和适应性,还需要与外界环境一起进行系统分析,研究如何使假肢具有所需的这种能力^[18]。

3.6.2 人机交互方法与接触界面设计:人与机械交互方式的确定是系统设计的又一重要环节,包括采用哪种信息(语音、视觉、肌肉电、脑电等)及其采集和处理方法。在存在直接接触时,界面的形状、材质、接触时的应力分布以及长期效应等,都是需要考虑的问题。例如,假肢与残端之间的接受腔的设计和制作,对关节活动范围和使用的舒适性都有很大影响。

3.6.3 系统的个体适应性分析:因为康复工程中的人机系统需要适应不同的使用对象,系统对不同使用者之间差异的适应能力,也是设计要考虑的重要问题,最普遍的问题是对身高、体重的适应能力。比较复杂的问题是对功能障碍者的不同障碍程度和不同表现的适应性问题。如在康复训练机器人的设计中,机器人除要满足所需的特定运动模式以外,还要使驱动系统具有对偏瘫(或截瘫)患者的肌肉(有无强直或痉挛)和关节状态的适应性。美国麻省理工学院 Krebs 等^[19]研究设计的康复机器人,为了适应不同偏瘫患者上臂的不同情况,提出有可反向驱动(back drivable)的驱动系统,认为是该系统中的一项关键技术。

4 小结

随着生命科学、生物技术和医学的发展,在现代机械学的基础上,衍生了包括仿生机械学和人机一体化技术在内的生物机械学这一技术基础性学科。康复工程学是以康复医学为基础,研究用工程方法为人体功能康复服务的学科。由于

康复工程中所采用的机械系统与人体密切相关,从而构成完整的人机一体化系统。康复工程系统的研究与设计需要应用生物机械学的原理与方法,同时康复工程也给生物机械学研究注入了新的内容。

本文论述的康复工程中生物机械学研究主要集中在运动功能康复方面。由于人体功能的复杂性,康复工程的内容很多,所涉及学科也非常广泛。它不仅需要应用生物机械学的理论与方法,而且与生物-电子学、控制论、心理学、社会学等诸多学科有关。此外,近代新技术的发展,例如微纳米技术与康复医学的结合,将为人体的功能康复,特别是神经康复,创出一条崭新的途径,也为康复工程的研究提出了更新更深入的课题。我们期盼这些新技术发展和应用将突破目前功能康复中的难关,推动康复事业的发展。

参考文献

- [1] 路甬祥,陈鹰.人机一体化系统与技术——21世纪机械科学的重要发展方向[J]. 机械工程学报,1994, 23(5):10.
- [2] Dong Yuzheng, Jin Dewen, Zhang Jichuan, et al. A study on the multi-rigid-body model for human walking in swing phase [J]. Chinese J Biomedical Eng, 1995, 4(3): 152—153.
- [3] 张瑞红,金德闻,王人成,等. 不同路况下正常步态特征研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),2000,40(8): 77—80.
- [4] Jin Dewen, Zhang Ruihong, Zhang Jichuan, et al. A 3-DOF musculoskeletal model of lower extremity for swing phase analysis[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 1999, 8 (3): 7—8.
- [5] 郑秀媛,贾书惠,高云峰,等. 现代运动生物力学[M]. 国防工业出版社,2002. 10.
- [6] 杨义勇,王人成,王延利,等. 含神经控制的下肢肌骨系统正向动力学分析 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006,46(11): 1872—1875.
- [7] 郝智秀,金德闻,张济川,等. 含半月板的活体股膝关节接触特性有限元分析 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008,48(2): 176—179.
- [8] Lee Winson CC,Zhang Ming, Jia Xiaohong, et al. Finite element modeling of the contact interface between trans-tibial residual limb and prosthetic socket[J]. Medical Engineering and Physics, 2004, 26(8): 655—662.
- [9] Yang Nianfeng, Zhang Ming, Huang Changhua, et al. Synergic analysis of upper limb target-reaching movements [J]. J Biomechanics, 2002, 35(6):739—746.
- [10] 姜召友,石力君. 生物电技术在人机一体化系统中的应用[J]. 磨床与磨削, 2000(4):22—23.
- [11] Jin Dewen, Yang Jiankun, Zhang Ruihong, et al. terrain identification for prosthetic knees based on electromyographic signal features[J]. Tsinghua Science and Technology, 2006, 11 (1):74—79.
- [12] Wolpaw JR, Birbaumer N, Heetderks WJ,et al. Brain-computer interfaces for communication and control[J]. Clin Neurophysiol, 2002,113:767—791.
- [13] Jia Xiaohong, Zhang Ming, Lee Winson CC. Load transfer mechanics between trans-tibial prosthetic socket and residual limb—dynamic effects [J]. Journal of Biomechanics, 2004, 37:

- 1371—1377.
- [14] Dennis R. Carter. Mechanobiology in rehabilitation science[J]. Journal of Rehabilitation Research and Development, 2000, 37 (2): vii.
- [15] Riener R, Colombo G, Lunenburger L. Overview of robot-aided gait biofeedback and assessment [C]. Proceedings of the First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2006, BioRob 2006, 965—970.
- [16] Krebs HI, Volpe BT, Aisen ML, et al. Increasing productivity and quality of care: Robot-aided neuro-rehabilitation [J]. Journal of Rehabilitation Research and Development, 2000, 6 (37): 639—652.
- [17] Dewen Jin, Ruihong Zhang, Dimo HO, et al. Kinematic and dynamic performance of prosthetic knee joint using six-bar mechanism [J]. Journal of Rehabilitation Research and Development, 2003, 40(1): 39—48.
- [18] Jin Dewen, Zhang Ruihong, Zhang Jichuan et al. An Intelligent Above Knee Prosthesis with EMG-based Terrain Identification [C]. Proceedings of IEEE 2000 International Conference on SMC, Oct.8—11, Nashville, TN., USA. P1859—1864.
- [19] Krebs HI, Volpe BT, Aisen ML, et al. Increasing productivity and quality of care: Robot-aided neuro-rehabilitation [J]. Journal of Rehabilitation Research and Development, 2000, 37 (6): 639—652.

第七次全国康复医学工程和康复工程学术研讨会征稿通知

为了充分发挥科技对改善民生、服务民生的重要支撑作用,利用工程技术提升残障人士的生活质量及康复医学的诊疗手段,中国康复医学会康复医学工程专业委员会和中国残疾人康复协会康复工程专业委员会拟于2010年5月22—24日在北京召开第七次全国康复医学工程和康复工程学术研讨会。

会议内容:康复工程技术基础与临床、假肢与矫形器研究与应用、康复训练设备研究与应用、残疾人辅助器具研究与应用、人工假体研究与应用、神经与组织功能康复技术、人类功效学与康复、康复教育及康复服务、康复工程产品质量评定、康复工程新产品与新技术、远程康复、职业康复、社区康复、其它康复新技术、新工艺和新材料等,欢迎从事康复工程研究,康复工程产品研发、康复服务人员、推广及使用的各界人士踊跃投稿,也欢迎关心康复工程事业的社会各界人士参加会议,进行产品交流和提供赞助。

交稿截止日期:2010年3月10日;录用通知时间:2010年4月5日;录用论文将收录到康复医学工程和康复工程第七次全国学术研讨会论文集。请采用电子版稿件投稿。

投稿及赞助联系方式:清华大学精密仪器系3307房间,100084,北京;电子邮件:rehabe@163.com;电话:010-62794189;传真:010-62794189;联系人:王人成。

中国康复医学会康复医学工程专业委员会

中国康复医学会第六届老年康复学术年会通知

中国康复医学会第六届老年康复学术大会将于2010年6月11—13日在北京召开。本次论坛主题为“提高老年康复水平、关注老年生存质量”。欢迎国内外康复医学科、老年医学科及临床相关学科同仁参加会议并踊跃投稿。征稿范围:国内外老年病、老年康复发展趋势;老年康复综合评估;老年病康复经验;老年人营养;老年神经系统、骨关节病和内科疾病的康复治疗现状和进展;物理治疗、作业治疗、言语治疗的现状和进展;传统医学与老年康复;社区康复;老年康复经验技术交流;康复工程等。

来稿要求:未在国内外杂志上公开发表的康复医学领域最新研究成果等,具有较强的科学性、先进性、实用性。征文格式请按科技期刊要求[目的、方法、结果、结论、参考文献],文责自负。文章一律电子版,论文截止日期:2010年5月20日。会议专用E-mail:lnkf2010@163.com

中国康复医学会第六届老年康复学术大会筹委会