

假肢智能膝关节研究进展*

王人成¹ 沈 强¹ 金德闻¹

智能下肢假肢一般是指带有智能膝关节的假肢,其智能主要体现在可以随着步行速度、关节角度变化自动调整假肢膝关节控制力矩,使假肢步态在对称性和跟随性等方面更接近健康人步态,具有较高仿生性能^[1-4]。

智能下肢假肢按照关节驱动方式可以分为外动力和无动力两大类,外动力智能下肢假肢膝关节屈伸运动是由电机等外力驱动的,目前市场上只有 POWER KNEE 一种产品属于这种类型,而且还没有大范围推广应用;无动力智能下肢假肢膝关节屈伸运动是由大腿残端带动的,智能控制系统只是调整膝关节阻尼力矩的大小,市场上可以看到的产品都属于这种类型,通常所说的智能下肢假肢一般是指这种类型的假肢。

无动力假肢智能膝关节主要分为气压、液压、电流变、磁流变和摩擦式等类型,下面重点介绍其结构特点及工作原理。

1 气压智能膝关节

气压智能膝关节气压缸两端分别与大腿和小腿的假肢部件相铰接,当膝关节转动时,推动气压缸内的气体经过节流阀流出,形成阻尼。只要能自动调整节流阀截面积大小,就能实现对膝关节摆动期力矩的智能控制。气压智能膝关节是最早商品化的假肢智能膝关节。20 世纪 90 年代初,英国 Blatchford 和日本 NABCO 公司以日本中川昭夫等专利技术为基础,先后推出了系列气压智能膝关节产品。气压智能膝关节控制力矩比较小,一般只适于假肢摆动期的控制。NABCO 在此基础上推出了一种气液双压混合膝关节,在支撑期时用液压缸控制,摆动期气压缸控制,可以交替下楼梯。

日本兵庫康复中心中川昭夫等自 1975 年就开始研究气压控制的假肢膝关节,1981 年研制出由微型计算机控制的气压智能膝关节样机,后来用单片机代替微型计算机,逐步达到了临床应用的水平^[5-6]。中川昭夫等发明的气压智能膝关节工作原理是通过光电传感器测量步速,单片机根据步速自动选取预先存储的相应力矩模式,控制步进电机按要求转动。步进电机又通过滚珠丝杠组成的传动系统带动气缸阀门运动,改变气门开启的大小,使气缸的抵力或阻力发生变化。

市场上的气压智能膝关节除了 Blatchford 和 NABCO 公司产品外,还有台湾德林公司的产品。国外从事气压智能膝关节研究的机构很多,国内清华大学、中南大学也开展相关研究工作^[7-9],但是还没有推出产品。

2 液压智能膝关节

液压控制的智能膝关节与气压智能膝关节的工作原理基本相同^[9],主要区别在于缸内的介质是液体。由于同样截面积的液压缸比气压缸提供的力量要大,因此,液压智能膝关节不仅可以用于假肢摆动期的控制,而且还可以控制支撑期。市场上液压智能膝关节主要产品有 OTTO BOCK 公司的

C-LEG^[10-11],C-LEG 采用液压缸阻尼器能够下楼梯、下坡以及在凹凸路面上行走。

图 1 是 OTTO BOCK 公司申请的一种液压智能膝关节专利中的控制阀及其工作原理图^[12],图 1 a 和 b 是表示膝关节弯曲和伸展时阻尼器上下单向阀工作状态。图 1 c 是阻尼器图,在活塞中空的部分设计有控制流量的调节阀,电机与伸出气缸中空活塞杆的细长轴相连,电机根据角度传感器和力传感器检测到的数据控制调节阀的位置,使之输出需要的最佳力矩。图 1 d 给出了在行走时,不同位置对应的调节阀的位置。液压智能膝关节比气压智能膝关节维护要复杂一些,而且液压缸在加工工艺和密封等方面比气压缸的要求也要高^[12],这也是气压智能膝关节比液压智能膝关节制造厂商多的主要原因。

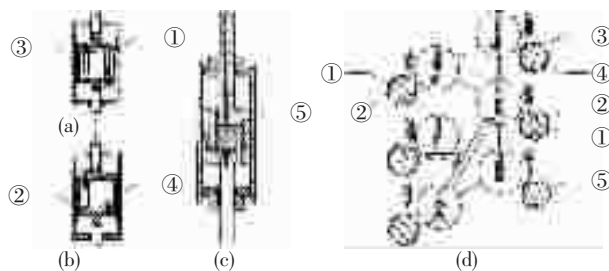


图 1 液压智能膝关节控制阀工作原理图

①屈膝节流孔;②伸膝节流孔;③伸膝单向阀;④屈膝膝单向阀;⑤电动调节阀

3 磁流变智能膝关节

图 2 是美国麻省理工学院申请的磁流变智能膝关节专利中的关节结构及其阻尼器原理图^[13]。磁流变阻尼器多采用如图 2b 所示的多片剪切结构,在剪切片之间充满磁流变液。

磁流变液是一种由高饱和磁化强度的铁磁性细微颗粒、载液及表面活性剂组成的稳定悬浮液体,在外部磁场作用下,其黏度等性能可发生显著、迅速、连续且基本完全可逆的

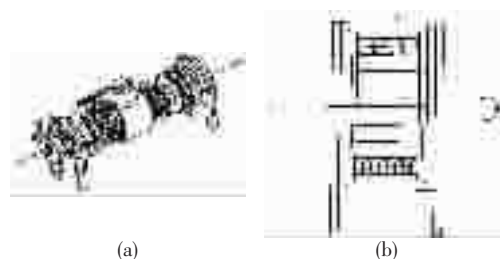


图 2 磁流变智能膝关节阻尼器及其工作原理图

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(50475017),国家科技支撑计划资助项目(2006BA122B07)

1 清华大学摩擦学国家重点实验室智能与生物机械分室,北京,100084

作者简介:王人成,男,博士,副研究员

收稿日期:2007-09-13

变化。这样膝关节的优点是不需要电机控制, 只要改变磁场强度, 就能调整假肢膝关节输出阻尼力矩的大小。与液压智能膝关节相比, 这种膝关节对加工工艺和密封等要求要低得多, 而且维护也简单方便, 但是电子控制系统比较复杂。

冰岛奥索公司利用美国麻省理工学院的技术^[14], 推出了 RHEO 磁流变智能膝关节。国内东北大学也开展相关研究工作^[15-16]。

4 电流变智能膝关节

电流变智能膝关节与磁流变智能膝关节的结构和原理类似, 主要区别在于其阻尼器中的介质是对电场强度比较敏感的材料, 其黏度等性能可以随着电场强度进行可逆变化。清华大学开展过电流变智能膝关节的研究工作^[17]。电流变和磁流变阻尼器对材料性能的依赖性比较大, 由于电流变液材料性能的原因, 目前市场上还没有电流变智能膝关节的产品。

近年来, 电流变液材料得到了很大发展, 而且电流变液阻尼器在其他领域已经得到了推广应用, 电流变智能膝关节也会逐步实用化, 推向市场。

5 摩擦式智能膝关节

很多假肢膝关节都采用摩擦方式来调整阻尼力矩, 应用比较广泛的是定摩擦式, 它一般在假肢装配时根据穿戴者情况一次性调定, 关节转动过程中阻尼力矩固定不变。由定摩擦式发展出了一种可变摩擦式阻尼器, 其原理是用电机等驱动装置控制摩擦阻尼机构, 使得关节阻尼力矩可以根据需要进行自动调整^[18-19]。

图 3 是清华大学申请的摩擦式智能膝关节专利的摩擦锥阻尼器结构图^[20]。摩擦式阻尼器与摩擦离合器原理相似, 它通过电机带动一个左右螺旋的螺杆压缩弹簧改变摩擦锥相接触面的正压力来实现力矩调整, 摩擦锥只能沿轴向滑动、不能转动, 当关节转动时, 摩擦锥产生阻尼力矩。

摩擦式智能膝关节原理简单, 但是由于利用两个接触面上的摩擦力来改变关节力矩大小, 因此对摩擦副材料及其表

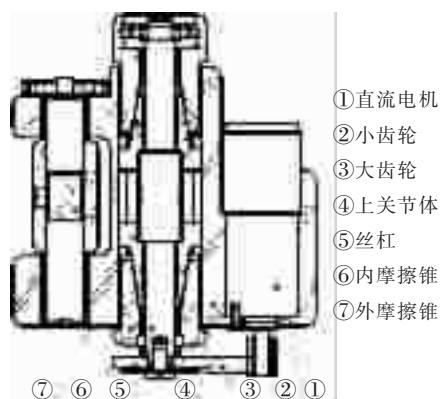


图 3 膝关节控制轴示意图

面加工和处理工艺依赖性比较强, 同时很难建立准确的摩擦界面数学模型, 使得实现准确稳定的力矩控制非常困难, 这也是摩擦式智能膝关节至今没有推出产品的主要原因。

参考文献

- [1] 金德闻, 王人成. 人工智能假肢 [J]. 中国临床康复, 2002, 6(20): 2994—2995.
- [2] 谭冠政, 吴立明. 国内外人工腿(假肢)研究的进展及发展趋势 [J]. 机器人, 2001, 23(1): 91—96.
- [3] 王人成. 假肢技术的研究热点及发展趋势 [J]. 中国康复医学杂志, 2005, 20(7): 483.
- [4] 金德闻, 张培玉, 王人成, 等. 膝上假肢使用者步态对称性分析 [J]. 中国康复医学杂志, 1997, 12(3): 112—115.
- [5] 中川昭夫, 北山一郎, 雨森邦夫. インテリジェント大腿义足のフイールドテスト [J]. 日本义肢装具学会誌, 1992, 8(1): 15—19.
- [6] 高桥一史. ブラッチフォードエンドライト义足の最近の动向について [J]. 日本义肢装具学会(誌), 1997, 13(1): 34—42.
- [7] 闫炳雷, 谭冠政, 曾庆冬, 等. 智能仿生人工腿 CIP - iLeg 性能仿真评估研究 [J]. 计算机仿真, 2006, 23(9): 231—236.
- [8] 谭冠政, 蔡光超, 曾庆冬, 等. CIP-I 智能仿生人工腿手持控制系统研究与设计 [J]. 计算机测量与控制, 2006, (1): 47—50.
- [9] Kautz TO, Seireg A. Feasibility study of a Computer Controlled Hydraulic above-knee Prosthetic Limb [C]. Int Conf on Med Devices and Sports Equip. San Francisco, 1980, 81—88.
- [10] Segal AD, Klute GK, McDowell ML, et al. Gait efficiency using the C-Leg [J]. Journal of Rehabilitation Research and Development, 2006, 43(2): 239—246.
- [11] Segal AD, Orendurff MS, Klute GK, et al. Kinematic and kinetic comparisons of transfemoral amputee gait using C-Leg [registered trademark] and Mauch SNS [registered trademark] prosthetic knees [J]. Journal of Rehabilitation Research and Development, 2006, 43(7): 857—870.
- [12] 凯尔文·B·詹姆斯. 在膝上假肢中控制人造膝关节动作的系统 [P]. 中国专利: 92112993.9, 1993—07—14.
- [13] 布鲁斯·W·德芬鲍, 休·M·埃尔, 吉尔·A·帕诺特, 等. 电子控制的假肢膝关节 [P]. 中国专利: 01805955.4, 2004—05—19.
- [14] Herr H, Wilkenfeld A. User-Adaptive Control of a magnetorheological prosthetic knee [J]. Industrial Robot, 2003, 30(1): 42—55.
- [15] 丛德宏, 徐心和. 磁流变液智能假腿的摆动相控制 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(S2): 916—918, 922.
- [16] 谢华龙, 丛德宏, 王斌锐, 等. 用磁流变阻尼器控制异构双腿机器人的仿真研究 [J]. 功能材料, 2006, 37(5): 799—801, 804.
- [17] 金德闻, 王人成, 白彩勤, 等. 电流变液智能下肢假肢摆动相控制原理与方法 [J]. 清华大学学报, 1998, 38(2): 40—43.
- [18] 杨建坤, 季林红, 王人成, 等. 四杆机构膝关节控制力矩分析 [J]. 中国康复理论与实践, 2004, 10(5): 264—265.
- [19] Jin Dewen, Zhang Ruihong, Dima 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.
- [20] 金德闻, 张瑞红, 张济川, 等. 带膝力矩控制装置的六杆机构膝关节 [P]. 中国专利: 01134865.8, 2002—05—15.