第35卷第1期 河北科技大学学报 Vol. 35, No. 1
2014年2月 Journal of Hebei University of Science and Technology Feb. 2014

文章编号:1008-1542(2014)01-0006-05 doi:10.7535/hbkd.2014yx01002

人工关节材料复合运动磨损测试装置研究与开发

华子恺,范永威,张欢欢

(上海大学机械工程与自动化学院,上海 200072)

摘 要:根据人工关节材料的体外磨损性能测试,开发了一种新型复合运动销盘测试装置(MPOD)。借助公理化设计原则,分析了仪器中不同功能之间的关系。根据独立公理生成了相应的设计矩阵,并在非耦合设计矩阵的基础上进行模块化开发,包含运动合成模块、销导向模块及加载模块。通过销传导模块中的力传感器可对试验中的摩擦力进行测量。

关键词:人工关节;磨损;材料测试;销盘试验;复合运动

中图分类号:TH117.1 **文献标志码**:A

Research and development of multi-directional wear testing apparatus for artificial joint materials

HUA Zikai, FAN Yongwei, ZHANG Huanhuan

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: A new multidirectional motion pin-on-disk apparatus, MPOD, was designed, built and validated for the wear testing of artificial joint biomaterial. Following axiomatic design principle, the relationships of different functions of MPOD were analyzed. Then, MPOD, consisting of motion generation module, loading module and pin guiding module, were designed according to the uncoupled design matrix. On-line friction measurement can be realized by using the force sensors assembled in the pin guiding module.

Key words: artificial joint; wear; material test; pin on disk; multi-direction

人工关节在服役中的主要问题在于其磨损所引起的假体松动失效[1-3]。因此,对于人工关节的磨损预测逐步成为关节类产品上市前的强制检测项目。目前,这类测试主要依靠关节模拟器开展[4-6],对象为人工关节成品,测试过程复杂、成本高且影响因素众多,如加工工艺影响、装配误差影响等。然而,在关节类外科植入物材料的研发中,对材料磨损性能的测试而言,该类影响因素的存在并不科学。因此,有必要在人工关节制造的初始阶段及材料研发阶段,对材料的摩擦磨损性能进行独立测试与研究,主要优点在于排除人工关节后道制造加工的影响,得到关节类外科植入物材料层面的磨损性能,亦对人工关节的设计以及完善制造过程的质量认证体系有所帮助。

通用摩擦磨损试验机因其操作方便、低成本、样本量大、干扰因素少等优点被广泛应用于材料磨损性能

收稿日期:2013-07-27;修回日期:2013-11-22;责任编辑:张士莹

基金项目:国家自然科学基金(51205241);教育部博士点基金(20123108120008)

作者简介:华子恺(1983-),男,江苏江阴人,讲师,博士,主要从事生物摩擦学、生物医学制造方面的研究。

E-mail:zikai_hua@shu.edu.cn

华子恺,范永威,张欢欢.人工关节材料复合运动磨损测试装置研究与开发[J].河北科技大学学报,2014,35(1):6-10.

HUA Zikai, FAN Yongwei, ZHANG Huanhuan. Research and development of multi-directional wear testing apparatus for artificial joint materials[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2014, 35(1):6-10.

评价之中，以销/球盘试验为典型，且相关操作也已标准化[7]。该类测试装置亦曾被应用于关节类外科植入物材料的磨损研究中，但结果并不理想。后续研究发现人工关节在实际使用过程中承担多个方向的复合运动，该运动直接影响其磨损行为[8-10]，而通用装置无法实现该类运动。以聚乙烯类关节外科植入材料磨损测试为例，传统销盘测试易产生摩擦副材料分子定向纤维化现象，降低样品磨损量，其测试数据远低于临床磨损情况[11-13]。因此，在对人工关节材料摩擦磨损学装置和测试方法的研究探讨方面，应当对关节运动特点加以考虑，即考虑复合运动。

在复合运动销盘试验机的发展中，CHARNLEY 在 1976 年首次报道了多方向摩擦学试验仪器[14]，其后研究人员相继研究开发了大容量销盘型髋关节模拟试验机、随机运动型外科材料摩擦磨损试验装置[15-16]。但是，由于人工关节材料具有摩擦学测试特殊性，因而导致人工关节材料摩擦学测试而设计的专用销盘试验机依然较少。

本研究中，针对关节类外科植入物材料磨损测试，通过公理设计，研发一台复合运动销/球盘测试装置(MPOD)，其能在不同的润滑条件下进行实验，适用于各种实验材料，可实现摩擦副(销/球盘)间相对运动方向的改变，以及摩擦力在线测量和实时采集。

1　MPOD 公理化设计

公理化设计是系统化设计方法，其可将最初的需求(用户域 CAs)通过设计矩阵的方式转化为功能要求(功能域 FRs)、设计要素(物理域 DPs)及工艺参数。通过公理化的途径，将设计变为功能需求与设计要素之间的映射过程。

在 MPOD 开发中，主要功能如下：能在各种不同的润滑条件下实验；可以适用于不同的实验材料；可以实现摩擦副(销/球盘)之间相对运动实时改变；能够实现摩擦力在线测量和实时采集。根据对该功能的概括，得到用户需求信息(CAs)，包括 CA_1 摩擦副多方向运动方式；CA_2 参数测量；CA_3 加载方式的确定；CA_4 具有多种润滑方式；CA_6 模拟普通人的步行速度；CA_7 模拟人体温度。

对于功能需求(FRs)，每一个 FR 都应该与其他的 FR 相互独立，即在功能域中完全表征出对产品功能独立需求的一个最小集。鉴于此，在设计此试验机时，将 FR 对应的所有设计参数(DPs)都划分为模块化的设计单位。为了保证各个模块间的相对独立，分析归纳出 FRs 之间的潜在联系。此外，在之后的 DPs 设计过程中对遇到的问题进行反馈(见图 1)。

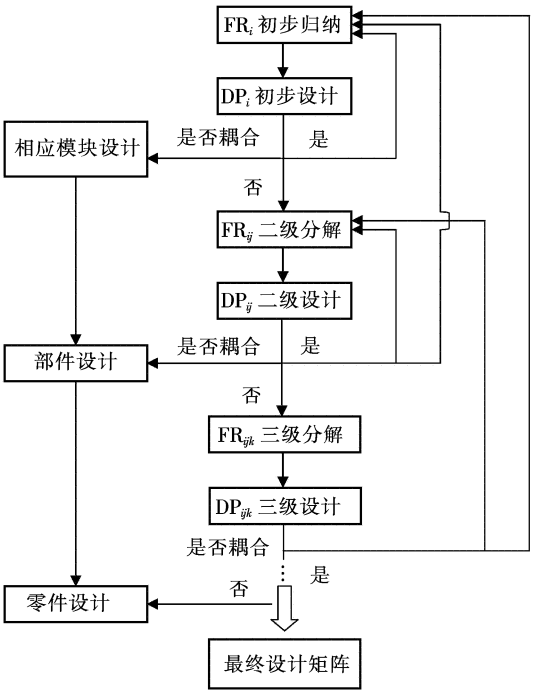


图 1　复合运动销盘试验机的设计流程图

Fig. 1　Design flow of composite motion pin on disc test machine

基本功能被归纳成3个部分:销与盘之间的复合运动、销的引导、可调节加载。在物理域中,MPOD分为3个模块:运动合成模块、销导向模块、加载模块。表1为各个层次的FRs与对应的DPs,在此基础上,其对应设计矩阵表示见式(1),该矩阵为解耦矩阵,因而符合独立公理。

表1 复合运动试验机功能需求以及相关设计要素

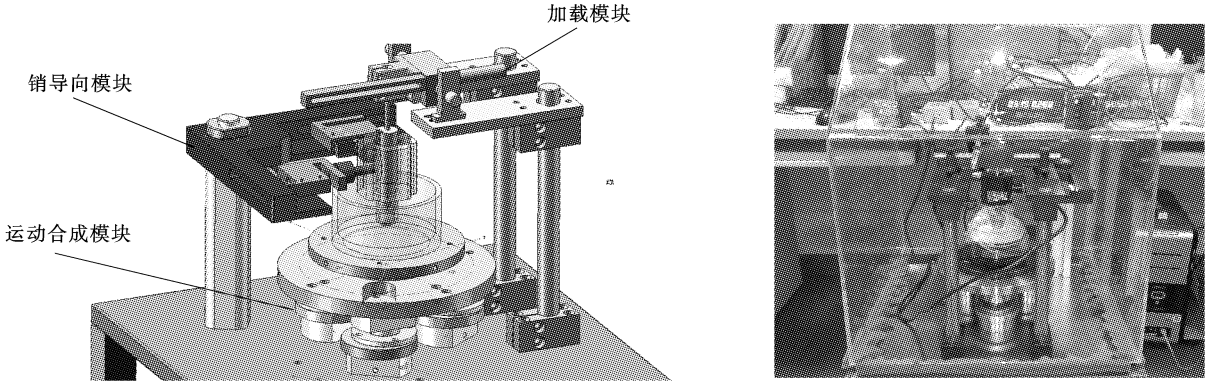
Tab.1 Composite motion testing machine functional FRs and related DPs

功能需求(FRs)			设计要素(DRs)		
FR_1 销与盘间复合运动	FR_2 摩擦力测量与销的夹持	FR_3 可变载荷	DP_1 运动合成模块	DP_2 销导向模块	DP_3 加载模块
FR_{11} 生成相应复合运动	FR_{21} 测量摩擦力	FR_{31} 施加可变载荷	DP_{11} 等偏心距曲轴	DP_{21} 力学传感器	DP_{31} 扭矩的加载
FR_{12} 固定测试用盘	FR_{22} 引导和固定销/球		DP_{12} 三爪卡盘	DP_{22} 销/球夹持部件	
FR_{13} 支持多种润滑条件	FR_{23} 计算摩擦系数		DP_{13} 润滑液容器	DP_{23} 数据采集系统	
FR_{14} 可调的测试速度			DP_{14} 变速电机		
FR_{15} 可控的测试温度			DP_{15} 加热装置		

$$\begin{Bmatrix} FR_{11} \\ FR_{12} \\ FR_{13} \\ FR_{14} \\ FR_{15} \\ FR_{21} \\ FR_{22} \\ FR_{23} \\ FR_{31} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & 0 & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & X & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & X & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{11} \\ DP_{12} \\ DP_{13} \\ DP_{14} \\ DP_{15} \\ DP_{21} \\ DP_{22} \\ DP_{23} \\ DP_{31} \end{Bmatrix} 。 \quad (1)$$

2 MPOD模块设计

设计矩阵确立以后,根据不同的设计要素对试验机进行模块化设计,图2为试验机设计总体结构。



a) MPOD三维模型 b) MPOD实物图

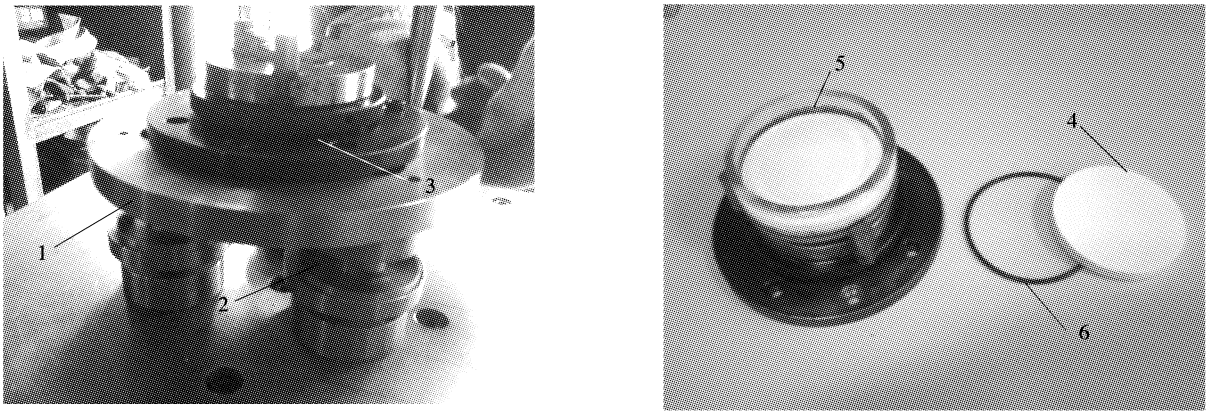
图2 MPOD试验机

Fig.2 MPOD testing machine

2.1 运动合成模块

运动合成模块由1个运动盘、卡盘以及3个偏心率为5 mm的曲柄组成(见图3)。运动合成模块的装配方式为将卡盘固定于运动盘上,测试盘由卡盘夹持。有机玻璃管与测试盘密封后作为润滑液容器。主动曲柄由变频电机驱动,从而形成轨迹滑动。

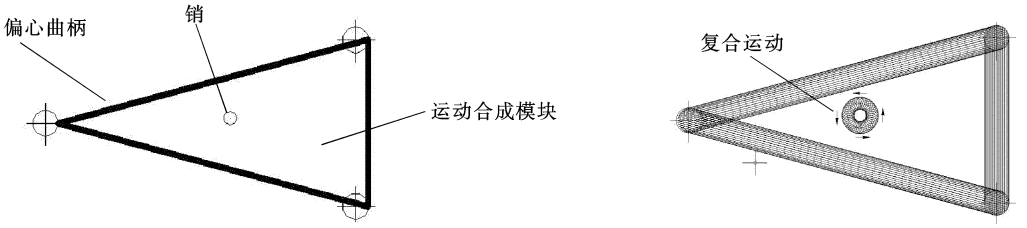
通过偏心曲柄与运动托盘的传动实现运动合成为圆周摆动运动,在1 Hz的运动频率下,该偏心距离能够模拟髋关节步态速度(约32 mm/s)。如图4所示,测试用盘相对于销的运动速度大小和方向随圆周摆动实时改变,而且其形成的相对运动为多方向,达到了FR_1的功能需求。



1—运动托盘；2—偏心曲柄；3—卡盘；4—实验用盘；5—PVC 管；6—O 型密封圈

图 3　运动合成模块实物图及润滑液容器

Fig. 3　Physical figure of motion synthesis module and lubricant container



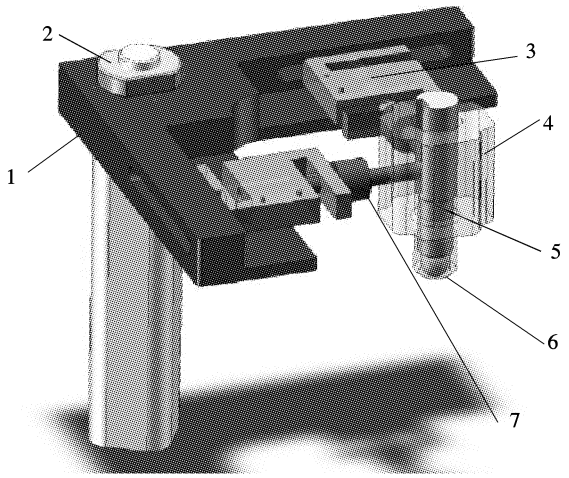
a) 测试前销盘相对位置　　b) 单圈运动轨迹

图 4　MPOD 运动合成模块示意图

Fig. 4　Schematics of motion synthesis module

2.2　销导向模块

销导向模块模型(见图 5)的 2 个功能包括对摩擦力(FR_{21})进行测量，以及对销夹持部件进行引导(FR_{22})。销导向模块的布局如下：塔式工作台把整个模块支撑固定于试验装置机架之上；拉压力传感器分别从 X，Y 两个方向与塔式工作台相连接；拉压传感器一端与对销产生导向作用的导向块通过传递杆进行固定。试验中用到的销/球装夹于夹持件中，与导向块之间间隙配合，两者之间通过内部键连接予以消除摩擦力影响，并保证其纵向的自由度。通过定位螺母，可以使整个工作台进行转动，提高样品利用率。



1—塔式工作台；2—定位螺母；3—拉压力传感器；4—导向块；5—销/球夹持件；6—测试球/销；7—传递杆

图 5　销导向模块模型

Fig. 5　Schematic of the pin guiding module

2.3　加载模块

加载模块的功能主要是实现测试销载荷的施加。在该模块的设计中采用了力矩的加载方法来实现载荷的可调。如图 6 所示，其主要通过对加载棒进行砝码加载，从而产生绕转动杆的扭矩并作用于转动块上。该力矩由固定夹传递给顶尖，并最终作用于销导向模块中的销/球夹持件上。

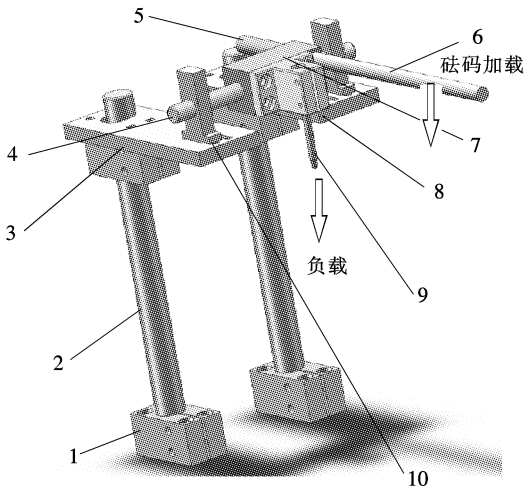
该机构的加载方式为力矩加载，方法如下：调节配重(砝码)在加载杆上的位置来改变加载杆旋转中心到顶尖的距离，从而起到改变加载力大小的效果。由此可见，转动块另一端配重的作用是平衡系统原有的固有重量。该机构的安装方法是通过支架固定于支撑板上，由支撑杆、固定块、支撑板构成的支座来对加载模块

的高度进行调节，保证销导向模块与顶尖的良好接触。

为了使加载的精确性得以确保，需对加载模块进行标定，利用力传感器测量顶尖处所加的载荷，通过采集数显表直接读取结果。在标定中，通过对砝码在加载杆上不同点的位置进行调节来检验及确定加载力的放大系数。研究发现，所得结果与设计参数基本符合，能够实现1∶5的加载放大。

3 结 语

针对人工关节材料磨损性能测试问题，开发了一种新型的复合运动销盘型磨损测试装置(MPOD)。借助公理化设计的科学设计方法，根据独立公理设计相应的矩阵，分析了装置中不同模块组件之间的关系。根据非耦合矩阵，对试验装置进行运动合成模块、销导向模块及加载模块的设计。该装置基本能够实现装置的设计开发目标。进一步工作将对试验机进行标定及性能测试，探索基于该类装置的人工关节材料测试方法与标准。



1—固定块；2—支撑杆；3—支撑板；4—转动杆；5—配重；6—加载杆；7—转动块；8—固定夹；9—顶尖；10—支架

图6 加载模块三维模型

Fig. 6 Three-dimensional model of the loading module

致谢：

本研究得到国家自然科学基金资助；同时，责任作者华子恺博士特别感谢教育部博士点基金的部分资助、上海大学创新基金部分资助；对上海大学李荣先生在装置加工制造过程中的帮助表示感谢。

参考文献/References：

[1] JIN Z M, STONE M, INGHAM E, et al. Biotribology[J]. Current Orthopaedics, 2006, 20(1):32-40.

[2] HARRIS W H. The problem is osteolysis[J]. Clinical Orthopaedics and Related Research, 1995, 311:46-53.

[3] MCKELLOP H A, CAMPELL P, AMSTUTZ H C, et al. The origin of submicron polyethylene wear debris in total hip arthroplasty[J]. Clinical Orthopaedics and Related Research, 1995, 311:3-20.

[4] SAIKKO V. A 12-station, anatomic hip joint simulator[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers(Part H): Journal of Engineering in Medicine, 2005, 219(6):437-448.

[5] HUA Z K, ZHANG J H. A new simulator for bio-tribological study[J]. Journal of Bionic Engineering, 2008, 5(sup):143-147.

[6] ESSNER A, SCHMIDIG G, WANG A. The clinical relevance of hip joint simulator testing: In vitro and in vivio comparisons[J]. Wear, 2005, 259(7):882-886.

[7] F732-00, Standard Test Method for Wear Testing of Polymeric Materials Used in Total Joint Prostheses[S].

[8] HAMILTON M A, BANKS S A, SAWYER W G, et al. Quantifying multidirectional sliding motions in total knee replacements[J]. ASME Journal of Tribology, 2005, 127(2):280-286.

[9] KAWANABE K, CLARK I C, TAMURA J, et al. Effects of A-P translation and rotation on the wear of UHMWPE in a total knee joint simulator[J]. Journal of Biomedical Materials Research, 2001, 54(3):400-406.

[10] VILLARRAGA M L, KURTZ S M, HERR M P, et al. Multiaxial fatigue behavior of conventional and highly crosslinked UHMWPE during cyclic small punch testing[J]. Journal of Biomedical Materials Research, 2003, 66(2):298-309.

[11] WANG A, SUN D C, YAU S S, et al. Orientation softening in the deformation and wear of ultra high molecular weight polyethylene [J]. Wear, 1997, 203:230-241.

[12] KORDUBA L A, WANG A. The effect of cross-shear on the wear of virgin and highly-crosslinked polyethylene[J]. Wear, 2011, 271(11):1220-1223.

[13] SAIKKO V, CALONIUS O, KERÄNEN J. Wear of conventional and cross-linked ultra high molecular weight polyethylene accetabular cups against polished and roughened CoCr femoral heads in biaxial hip simulator[J]. Journal of Biomedical Materials Research, 2002, 63(6):848-853.

[14] CHARNLEY J. The wear of plastics materials in the hip-joint[J]. Plastics Rubber, 1976, 1:59-63.

[15] SAIKKO V. A hip wear simulator with 100 test stations[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers(Part H):Journal of Engineering in Medicine, 2005, 219(5):309-318.

[16] SAIKKO V. Performance analysis of the random POD wear test system[J]. Wear, 2013, 297(6):731-735.