

## 数字铁饼的研制及实验研究\*

谢双伟<sup>1,2</sup>, 宋全军<sup>1,2</sup>, 葛运建<sup>1</sup>

(1 中国科学院合肥智能机械研究所 合肥 230031;

2 中国科学技术大学自动化系 合肥 230027)

**摘要:** 在体育科研领域中,尤其是对铁饼投掷而言,实时地获取运动员投掷过程中铁饼的运动学和动力学数据,对于定量分析运动员的技术动作具有十分重要的意义。本研究针对铁饼运动员投掷动作的特点,提出了一种新的基于惯性测量原理的铁饼运动员运动学和动力学数据采集方法,并据此研制了一种数字铁饼。详细介绍了数字铁饼的结构设计、测量原理及相关的实验情况。实验结果表明,数字铁饼能准确反映运动员的关键动作特征,满足科学化训练的要求。

**关键词:** 数字铁饼; 运动学; 动力学; 惯性测量单元

中图分类号: TP216 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.8040

### Research on the development and experiment of a digital discus

Xie Shuangwei<sup>1,2</sup>, Song Quanjun<sup>1,2</sup>, Ge Yunjian<sup>1</sup>

(1 Hefei Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2 Department of Automation, University of Technology and Science of China, Hefei 230031, China)

**Abstract:** It is important to acquire the kinematic and dynamic data in real time in the sports research area, especially for throwing discus. The data can be applied to analyse the actions of the athletes in quantity. Considering the characteristic of discus-throwing, a method to acquire kinematics and dynamic data, based on the principle of inertia measurement unit (IMU), is proposed, and a novel instrument for discus-throwing analysis is developed. The mechanical design, measuring principle and field experiment of the instrument are discussed in detail. Experiment results demonstrate the validity of the design.

**Key words:** digital discus; kinematics; dynamics; inertia measuring unit

## 1 引言

目前,随着竞技体育的不断发展,各国不断加大对体育的科研投入,新技术不断被引入体育训练领域,使得体育运动竞技水平不断提高,体育科研与科学训练的重要性日益突出。对于田径运动的铁饼投掷项目来说,准确获得投掷过程中铁饼的运动学和动力学数据,从而实现铁饼投掷中的运动学和动力学特性进行定量研究,具有重要意义。各级教练员和体育科研人员借助具体的数据分析不但可以直接用于指导教学,及时纠正错误技术

动作,而且还可以对高水平运动员进行技术分析诊断,提高训练的技术含量,摆脱以往完全经验主义的作法。但与现今国内外十分发达、先进的体育运动学影像采集技术与仪器相比,相应的动力学数据采集仪器和相关技术显得落后、不足,国内状况尤其明显<sup>[1]</sup>。不过这一状况正在逐步改善,国内已出现用于铅球运动员的专门仪器,这些仪器规格完全符合国际田联对比赛用铅球的要求,可以获取铅球运动员投掷中的投掷力信息<sup>[2-5]</sup>。若要直接采集投掷过程中铁饼的运动学和动力学数据用于指导运动员训练,目前还没有很理想的专用仪器设备,这严重制约了体育科研工作的深入开展。

为了解决针对铁饼投掷项目的运动学和动力学数据采集手段和设备的匮乏问题,本文提出了一种新的运动学和动力学数据采集方法,并依此研制了一种新型体育科研与训练仪器——数字铁饼。它的核心是一种由加速度传感器和角速度传感器组成的惯性测量单元,数字铁饼的规格符合国际田联对比赛中男子用铁饼的要求,能够在三维空间实时感知运动员投掷过程中铁饼的运动学和动力学信息,可以保证运动员在接近真实训练或比赛环境下进行实验测试。相对于传统的影象分析方法,本数字铁饼可以直接获得投掷中铁饼的运动学和动力学信息。教练员或体育科研人员可以用这种数字铁饼代替普通铁饼对运动员进行投掷训练和测试,利用得到的精确的运动学和动力学数据,更科学地指导铁饼运动员的训练,更深入地开展铁饼运动的研究。

## 2 数字铁饼的结构设计及工作原理

### 2.1 数字铁饼的整体结构

数字铁饼通过螺丝将上下壳联结,构成一个整体,功能电路与下壳固连在一起,上下壳之间在适当位置放置质量补偿块和弹性体材料,减小数字铁饼在触地时的冲击对内部结构的损伤。数字铁饼的整体结构造型如图1所示,其规格完全符合国际田联对男子用铁饼的要求。图2是一个标准的普通男子用铁饼,可以看到两者外形上无明显差别,因而在运动员看来,两者没有什么不同,这就保证了能够在真实的训练或比赛中获取投掷中铁饼的运动学和动力学信息。

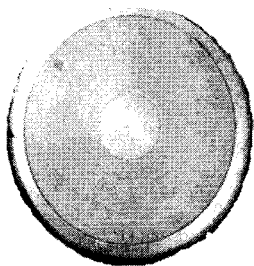


图1 数字铁饼  
Fig.1 Digital discus

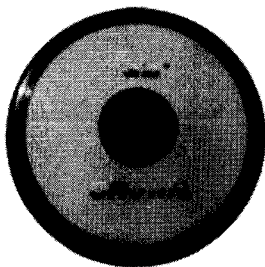


图2 标准铁饼  
Fig.2 Standard discus

### 2.2 数字铁饼的主功能电路

数字铁饼能够实时测量投掷中的三维加速度和角速度信息,这主要是由其内置的功能电路来实现。其主功能电路如图3所示,主要由传感器模块、模数转换器、微控制器、存储器和USB接口部分构成。传感器模块由加速度传感器和角速度传感器及相应调理电路构成,传感器按适当方位放置,实现对数字铁饼质心的三维加速度和数字铁饼整体的三维角速度的测量;模数转换器采用AD公司的ad7888,该模数转换器能够实现8路模拟信号的输入,可以将传感器模块的6维输出方便地转变为数字量并送至微控制器;微控制器在测量时,把模数转换器传来的数据按一定格式存储于存储器中,测试结束可从USB口接收上位机的指令,把存储器中数据按一定格式从USB口传给上位机;USB口负责指令和数据的传递,设计中采用了Cygna公司的C8051F320,该单片机内置了USB接口,简化了设计。

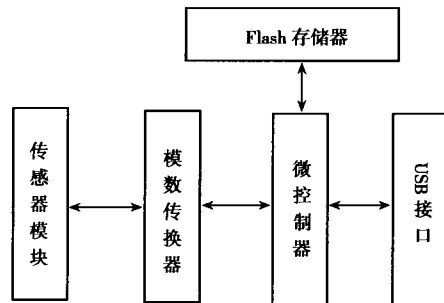


图3 数字铁饼功能电路单元  
Fig.3 Functional diagram of digital discus

### 2.3 数字铁饼的工作原理

数字铁饼的核心是其功能电路中的传感器模块,传感器模块的实质就是一个惯性测量单元,从功能上可以分为加速度模块和角速度模块,加速度模块敏感数字铁饼质心处的3维加速度,其3个敏感方向,沿图4中的 $X_b, Y_b, Z_b$ 轴向方向;角速度传感器模块测量数字铁饼整体的3维角速度,其3个敏感方向,沿图4中的 $X_b, Y_b, Z_b$ 轴向放置。加速度模块可直接测得数字铁饼质心处的加速度 $a_b$ , $b$ 为固连于投掷仪的空间直角坐标系,其各轴向如图4所示(图中圆面为数字铁饼的主平面),则有惯性导航原理<sup>[6]</sup>可得:

$$\vec{a}_a = C_a^b \vec{a}_b \tag{1}$$

式中:  $C_a^b$  满足  $\dot{C}_a^b = C_a^b \Omega$ ,  $\Omega = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{bz} & \omega_{by} \\ \omega_{bz} & 0 & -\omega_{bx} \\ -\omega_{by} & \omega_{bx} & 0 \end{bmatrix}$ 。这里 $\vec{a}_a$ 是数字铁饼相对于 $a$ 系的加速度, $a$ 系是相对地面固定的惯性参考系(其轴向如图4所示), $C_a^b$ 的初始值由 $b$ 系初始方向与 $a$ 系的方位

关系确定. 一般可取  $b$  系初始方向与  $a$  系重合, 这时,

$$C_a^b = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \omega_b = (\omega_{bx}, \omega_{by}, \omega_{bz})$$

为数字铁饼的角速度矢量在  $b$  系的分量表示形式, 这可以通过数字铁饼的角速度传感器模块测得。

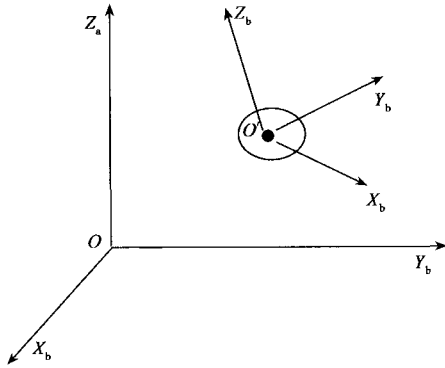


图4 坐标系

Fig. 4 Coordinate frames

本铁饼数字铁饼的主要技术指标为: 单次测量时间为 15 s, 每连续测量 13 次需上位机读取一次数据,  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  向加速度传感器测量范围为  $\pm 30$  g ( $g$  为重力加速度),  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  向角速度传感器测量范围  $\pm 300^\circ$ 。其中  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  的方向如图 4 中  $X_b$ 、 $Y_b$ 、 $Z_b$  所示。

### 3 初步实验测试

对研制的数字铁饼进行了现场初步实验, 实验中, 运动员采用现在比较常见的背向旋转投掷技术。数字铁饼把每次运动员投掷中铁饼的运动学数据都存储在饼体内的存储器中, 测试完毕后, 由上位机通过 USB 接口读取铁饼的运动学信息, 并按一定格式保存, 上位机可以通过专门软件对这些数据进行分析。图 5 是利用 MATLAB 绘制的一组投掷中铁饼质心加速度和铁饼角速度随时间的变化曲线截图, 其中横坐标都为时间, 单位是 10 ms,  $A_x$ 、 $A_y$ 、 $A_z$  为加速度, 单位为 g (重力加速度),  $J_x$ 、 $J_y$ 、 $J_z$  为角速度, 单位为度。

在铁饼投掷中, 沿投掷方向的速度对成绩影响很大, 而相关研究表明, 垂直地面方向的转动对出手时刻的水平速度具有很大影响<sup>[7-8]</sup>。垂直地面方向的角速度在图 5 中对应于  $J_z$ 。为便于叙述, 将  $J_z$  单独绘出, 并进行标注, 如图 6 所示。背向旋转投掷饼动作可分为如下阶段: 1) 预备动作; 2) 预摆; 3) 旋转; 4) 投掷。对应图中曲线, 0 时刻运动员开始持饼, 0 ~  $t_1$  时间段为运动员预备动作时间;  $t_1$  ~  $t_3$  时间和  $t_3$  ~  $t_4$  时间为运动员的两次预摆,  $t_1$  时

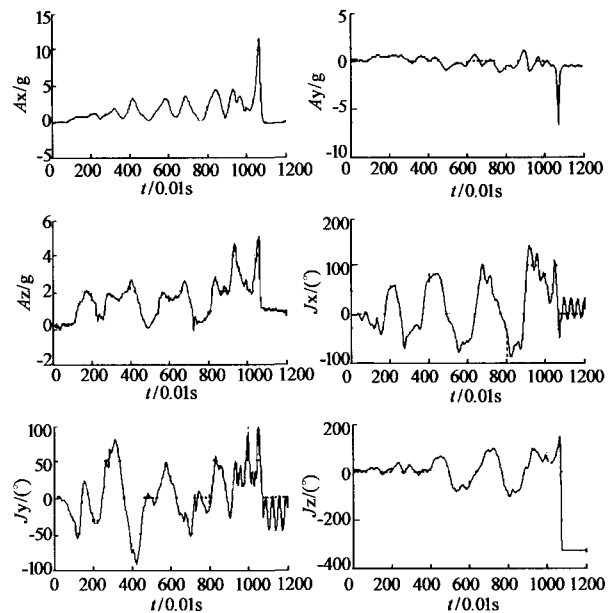


图5 加速度和角速度曲线

Fig. 5 The curves of accelerations and angular rates

刻角速度从 0 开始增加, 对应运动员从体前右下方开始预摆, 角速度开始增加到极大值, 然后减小到  $t_2$  时刻角速度为 0, 此时对应运动员预摆到体前左上方。在  $t_2$  ~  $t_3$  时间对应于从体前左上方摆动到体前右下方, 角速度方向变化 (由正变负) 至此一次完整的预摆完成; 在  $t_3$  ~  $t_4$  时间内完成另一次完整的预摆; 在  $t_4$  ~  $t_5$  时间为运动员旋转阶段, 角速度方向不变 (始终为正), 至  $t_5$  时刻铁饼出手, 角速度出现突变。

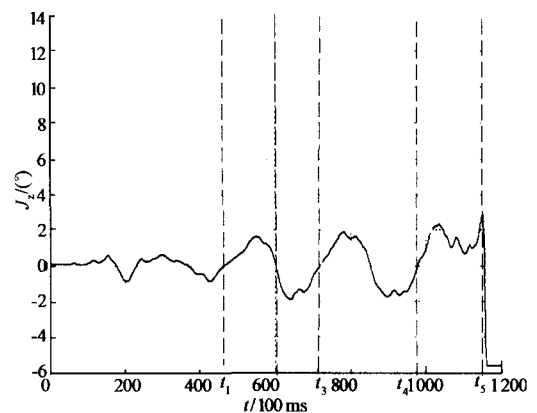


图6 Z轴方向角速度

Fig. 6 The angular rate in Z axis

### 4 结论

原理分析与初步实验表明, 数字铁饼结构设计合理, 由于本数字铁饼规格符合国际田联对男子用铁饼的标

准,因而可以作为运动员实际训练用饼,在正常训练的同时,采集运动员投掷中铁饼的加速度和角速度信息。数字铁饼能够提供铁饼投掷过程中的加速度和角速度信息,但是这些信息并不能直接对运动员的训练提供帮助,如何利用这些信息为运动员的实际训练提供指导则是下一步努力的方向。

### 参考文献

- [ 1 ] 葛运建,张建军,戈瑜,等. 无所不在的传感与机器人感知[J]. 自动化学报,2002,28(12增刊):125-133.  
GE Y J, ZHANG J J, GE Y, et al. Ubiquitous sensing and robot perception[J]. Acta Automatica Sinica, 2002, 28(12 Suppl. ):125-133.
- [ 2 ] SONG G M, YUAN H Y, TANG Y, et al. A novel three-axis force sensor for advanced training of shot-put athletes [ J ]. Sensors and actuators A, 2006, 128: 60-65.
- [ 3 ] YUAN H Y, TANG Y, SONG Q J, et al. A new sensor applied to measure shot put throwing force [ C ]. Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation, 2004(4):3775-3778.
- [ 4 ] 孙旺强,宋光明,邱联奎,等. 基于三维加速度计数字铅球的设计与实现[J]. 计算机工程与应用,2005,41(4):102-104.  
SUN W Q, SONG G M, QIU L K, et al. Design and implementation of digital-shot based on three-axis accelerometer [ J ]. Computer Engineering and Applications, 2005,41(4):102-104.
- [ 5 ] 马静华,葛运建,雷建和. 基于小波变换和模糊神经网络的运动员投掷力信息识别方法[J]. 电子测量与仪器学报,2006,20(5):44-49.  
MA J H, GE Y J, LEI J H. Recognition method of throwing force of athlete based on wavelet & FNN[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2006,20(5):44-49.

- [ 6 ] 邓正隆. 惯性导航原理[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1994.  
DENG Z L. Theory of inertial navigation [ M ]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1994.
- [ 7 ] KNICKER A. Kinematic characteristics of the discus throw [ J ]. Modern Athlete and Coach,1992,30:3-6.
- [ 8 ] DAPENA J. New insights on discus throwing [ J ]. Track Technique, 1993,125:3977-3983.

### 作者简介

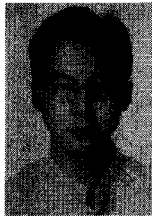


谢双伟,2005年于解放军信息工程大学获得学士学位,现为中国科学技术大学硕士研究生,主要研究方向为模式识别与智能系统。

E-mail:shuangwei@mail.ustc.edu.cn

Xie Shuangwei received B. S. degree from Information Engineering University of PLA. He is an undergraduate student for B. S. degree in University of Science and Technology of China. His research interests are pattern recognition and intelligence system.

E-mail:shuangwei@mail.ustc.edu.cn



宋全军,1994年于安徽大学获得学士学位。2004年于中国科学院智能机械研究所获得硕士学位,2007年于中国科学技术大学获得博士学位,现为中国科学院智能机械研究所副研究员,研究方向为人机交互和信息获取。

E-mail:qjsong@iim.ac.cn

Song Quanjun received B. S. degree from Anhui University in 1994, M. S. degree from Chinese Academy of Sciences in 2004 and PhD degree from University of Science and Technology of China in 2007. He is currently a vice-research scientist in Institute of Intelligent Machines, Chinese Accademy of Sciences. His research interests are human-robot interaction and information acquisition.

E-mail:qjsong@iim.ac.cn