

# 机械式骑马机运动学分析与仿真

余顺年<sup>1</sup>, 张秋华<sup>2</sup>, 姜涛<sup>1</sup>, 张巍<sup>1</sup>

(1. 集美大学机械与能源工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 厦门市景威运动器材有限公司, 福建 厦门 361000)

**[摘要]** 为了研究模拟骑马运动的机械式骑马装置, 介绍了该装置结构及工作原理, 同时, 对该装置进行运动学分析, 建立了鞍座的位置、速度及加速度方程, 依据此方程利用 MATLAB 软件绘制了鞍座的运动线图, 利用 ADAMS 软件对装置进行了仿真, 分析了各杆件长度对鞍座运动的影响。该研究结果为该骑马机的实际制造及使用提供理论依据。

**[关键词]** 骑马机; 运动学分析; 动态仿真

**[中图分类号]** TH112.1; TH113.2<sup>+</sup>2

## Kinematics Analysis and Simulation on a Mechanical Horse-riding Machine

YU Shunnian<sup>1</sup>, ZHANG Qiuhua<sup>2</sup>, JIANG Tao<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Energy Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Xiamen Jingwei Exercise Equipment Company Limited, Xiamen 361000, China)

**Abstract:** A mechanical horse-riding machine is studied. The working principle and kinematics analysis on the device are introduced. The position, velocity and acceleration equations of saddle were established. According to the equations, the graphs were drawn by using MATLAB software. The effects of rod length on saddle movement were studied by means of ADAMS simulation. The results provided theoretical basis for the actual manufacturing and application of the riding machine.

**Keywords:** horse-riding machine; kinematics analysis; simulation

## 0 引言

随着社会发展, 人们的生活水平越来越高, 但是生活压力的增大和工作节奏的加快, 使得亚健康群体逐年递增。医学研究发现骑马能够活动人的腰腹背臀, 在摆动中, 身体做出被动适应性调整, 从而达到运动锻炼的目的。实验证明骑马能显著缓解腰酸背痛、脖子发硬等症状<sup>[1-3]</sup>。

现实中真正的骑马运动受到场地、马匹和装备等许多条件的限制, 因此, 模拟骑马运动的骑马装置应运而生。目前, 骑马机(器)主要为电动式的<sup>[4]</sup>。为了加强人体腿部的运动, 笔者设计了一款机械式骑马机, 该机械式骑马机利用人脚踏板作为原动力, 通过多组杆件的相互传动达到模拟骑马运动的目的, 骑乘者不仅上肢得到锻炼, 下肢也得到锻炼。由于鞍座摆动幅度、速度及加速度等运动学

特征直接影响骑乘者的锻炼效果，本文对该款机械式骑马机进行机构学分析，建立鞍座的位置、速度及加速度方程，并进行动态仿真分析，以了解各构件的长度对鞍座运动学的影响。

## 1 机械式骑马机结构及原理分析

机械式骑马机结构如图 1 所示。锻炼者骑上骑马机后，手抓手把，脚踩脚蹬杆，用力蹬踏，鞍座带动人体上半身做前后及上下运动，类似于骑马运动。

根据骑马机的结构及工作原理<sup>[5]</sup>，该装置的机构运动简图如图 2 所示。其中： $O$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $F$  均为转动副； $G$  为脚踏杆； $r_i$  为杆件长度； $\theta_i$  为转动角度。鞍座 5 对应杆  $DE$ ，平衡杆 4 对应杆  $ABD$ ，活动杆 6 对应杆  $EF$ ，连杆 2 对应杆  $AOG$ ，经计算，该机构自由度为 1，采用脚踩脚蹬杆作为整个装置的运动输入。



注：1—基座；2—连杆；3—惯性机构；4—平衡杆；  
5—鞍座；6—活动杆；7—脚蹬杆  
Notes: 1—Base; 2—Rod; 3—Inertia mechanism; 4—Balance rod; 5—Saddle; 6—Active rod; 7—Pedal

图 1 机械式骑马机结构图  
Fig.1 Mechanical horse-riding machine

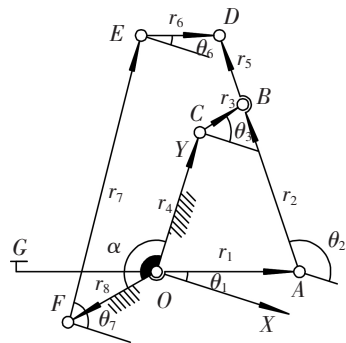


图 2 机械式骑马机机构运动简图  
Fig.2 Kinematic sketch of mechanical horse-riding machine kinematic sketch

对于由杆  $OA$ 、 $AB$ 、 $BC$ 、 $OC$  组成的曲柄摇杆机构，当曲柄  $BC$  与连杆  $AB$  拉直共线和重叠共线时，存在死点位置，所以该装置安装了惯性轮 3。

$\psi_1$  与  $\psi_2$  分别为曲柄  $BC$  与连杆  $AB$  重叠共线和拉直共线时杆  $OA$  与机架  $OC$  之间的夹角。当曲柄  $BC$  与连杆  $AB$  重叠共线时， $\cos\psi_1 = (r_1^2 + r_4^2 - (r_2 - r_3)^2) / (2r_1r_4)$ ；当曲柄  $BC$  与连杆  $AB$  拉直共线时， $\cos\psi_2 = (r_1^2 + r_4^2 - (r_2 + r_3)^2) / (2r_1r_4)$ 。式中： $r_1, r_2, r_3, r_4$  分别表示杆件  $OA, AB, BC, OC$  的长度。因此，在由杆  $OA$ 、 $AB$ 、 $BC$ 、 $OC$  组成的四杆机构中，摇杆  $GOA$  的摆动角为：

$$\psi = \psi_2 - \psi_1 \tag{1}$$

此角度决定脚蹬时摆动幅度，杆  $OG$  的长度决定骑乘者的腿部运动距离。

## 2 运动学分析

### 2.1 位置分析

以脚踏杆旋转中心  $O$  为坐标原点，以机架杆  $OC$  为  $Y$  轴，建立如图 2 所示坐标系。鞍座  $DE$  的中点  $P$  的坐标为  $(x_p, y_p)$ ，其转角为  $\theta_6$ ，机架杆  $OC$  与  $OF$  夹角为  $\alpha$ 。

由曲柄  $BC$ 、连杆  $AB$ 、摇杆  $OA$  及机架  $OC$  组成的曲柄摇杆机构中，有：

$$\begin{cases} r_1 \cos \theta_1 + r_2 \cos \theta_2 = r_3 \cos \theta_3, \\ r_1 \sin \theta_1 + r_2 \sin \theta_2 = r_4 + r_3 \sin \theta_3. \end{cases}$$

上式中消去  $\theta_3$ , 解得:

$$\theta_2 = 2 \arctan(b \pm \sqrt{a^2 + b^2 - c^2}) / (a - c). \quad (2)$$

式中:  $a = r_1 \cos \theta_1$ ;  $b = r_1 \sin \theta_1 - r_4$ ;  $c = (a^2 + b^2 - r_3^2 + r_2^2) / (2r_2)$ 。

在由构件  $OA$ 、 $ABD$ 、 $DE$ 、 $EF$ 、 $OF$  组成的机构中, 有:

$$\begin{cases} r_1 \cos \theta_1 + (r_2 + r_5) \cos \theta_2 = r_8 \cos(90^\circ + \alpha) + r_7 \cos \theta_7 + r_6 \cos \theta_6, \\ r_1 \sin \theta_1 + (r_2 + r_5) \sin \theta_2 = r_8 \sin(90^\circ + \alpha) + r_7 \sin \theta_7 + r_6 \sin \theta_6. \end{cases}$$

式中:  $r_5, r_6, r_7, r_8$  分别表示杆件  $BD$ ,  $DE$ ,  $EF$ ,  $DF$  的长度。

上式中消去  $\theta_7$ , 求解得鞍座转动角  $\theta_6$ :

$$\theta_6 = 2 \arctan(f \pm \sqrt{e^2 + f^2 - g^2}) / (e - g) \quad (3)$$

其中:  $e = r_1 \cos \theta_1 + (r_2 + r_5) \cos \theta_2 + r_8 \sin \alpha$ ;  $f = r_1 \sin \theta_1 + (r_2 + r_5) \sin \theta_2 - r_8 \cos \alpha$ ;  $g = (e^2 + f^2 + r_6^2 - r_7^2) / (-2r_6)$ 。

鞍座中点  $P$  位置为:

$$\begin{cases} x_P = r_1 \cos \theta_1 + (r_2 + r_5) \cos \theta_2 + 0.5 r_6 \cos \theta_6, \\ y_P = r_1 \sin \theta_1 + (r_2 + r_5) \sin \theta_2 + 0.5 r_6 \sin \theta_6. \end{cases} \quad (4)$$

## 2.2 速度分析

对式 (2) 求导数得杆件  $AD$  的转动角速度:

$$\dot{\theta}_2 = -((a - r_2 \cos \theta_2) \dot{a} + (b - r_2 \sin \theta_2) \dot{b}) / (r_2 d). \quad (5)$$

式中:  $\dot{a} = -r_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1$ ;  $\dot{b} = r_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1$ ;  $d = -a \sin \theta_2 + b \cos \theta_2$ 。

对式 (3) 求导数得鞍座  $DE$  的转动角速度:

$$\dot{\theta}_6 = -((e - r_6 \cos \theta_6) \dot{e} + (f - r_6 \sin \theta_6) \dot{f}) / (r_6 j). \quad (6)$$

式中:  $\dot{e} = -r_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 - (r_2 + r_5) \sin \theta_2 \dot{\theta}_2$ ;  $\dot{f} = r_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 + (r_2 + r_5) \cos \theta_2 \dot{\theta}_2$ ;  $j = -e \sin \theta_6 + f \cos \theta_6$ 。

对式 (4) 求导数得鞍座  $DE$  中点  $P$  移动线速度:

$$\begin{cases} \dot{x}_P = \dot{e} - 0.5 r_6 \sin \theta_6 \dot{\theta}_6, \\ \dot{y}_P = \dot{f} + 0.5 r_6 \cos \theta_6 \dot{\theta}_6. \end{cases} \quad (7)$$

## 2.3 加速度分析

对式 (5) 求导数得杆件  $AD$  的转动角加速度:

$$\ddot{\theta}_2 = -(\ddot{a} \cos \theta_2 - \dot{a} \sin \theta_2 \dot{\theta}_2 + \ddot{b} \sin \theta_2 + \dot{b} \cos \theta_2 \dot{\theta}_2 + \ddot{d} \dot{\theta}_2 + \ddot{c}) / d. \quad (8)$$

式中:  $\ddot{a} = -r_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1^2 - r_1 \sin \theta_1 \ddot{\theta}_1$ ;  $\ddot{b} = -r_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1^2 + r_1 \cos \theta_1 \ddot{\theta}_1$ ;  $\ddot{c} = (\dot{a}^2 + a \ddot{a} + \dot{b}^2 + b \ddot{b}) / r_2$ ;  $\ddot{d} = -\dot{a} \sin \theta_2 - a \cos \theta_2 \dot{\theta}_2 + \dot{b} \cos \theta_2 - b \sin \theta_2 \dot{\theta}_2$ 。

对式 (6) 求导数得鞍座  $DE$  的转动角加速度:

$$\ddot{\theta}_6 = -(\ddot{e} \cos \theta_6 - \dot{e} \sin \theta_6 \dot{\theta}_6 + \ddot{f} \sin \theta_6 + \dot{f} \cos \theta_6 \dot{\theta}_6 + \ddot{j} \dot{\theta}_6 + \ddot{g}) / j. \quad (9)$$

式中:  $\ddot{g} = (\dot{e}^2 + e \ddot{e} + \dot{f}^2 + f \ddot{f}) / r_6$ ;  $\ddot{e} = -r_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1^2 - r_1 \sin \theta_1 \ddot{\theta}_1 - (r_2 + r_5) \cos \theta_2 \dot{\theta}_2^2 - (r_2 + r_5) \sin \theta_2 \ddot{\theta}_2$ ;  $\ddot{f} = -r_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1^2 + r_1 \cos \theta_1 \ddot{\theta}_1 - (r_2 + r_5) \sin \theta_2 \dot{\theta}_2^2 + (r_2 + r_5) \cos \theta_2 \ddot{\theta}_2$ ;  $\ddot{j} = -\dot{e} \sin \theta_6 - e \cos \theta_6 \dot{\theta}_6 + \dot{f} \cos \theta_6 - f \sin \theta_6 \dot{\theta}_6$ 。

对式 (7) 求导数得鞍座中点  $P$  移动加速度:

$$\begin{cases} \ddot{x}_p = \ddot{e} - 0.5r_6(\cos\theta_6 \dot{\theta}_6^2 + \sin\theta_6 \ddot{\theta}_6), \\ \ddot{y}_p = \ddot{f} - 0.5r_6(\sin\theta_6 \dot{\theta}_6^2 - \cos\theta_6 \ddot{\theta}_6). \end{cases} \quad (10)$$

3 运动学仿真分析

由于影响骑乘者锻炼效果的主要因素是骑马机鞍座运动学特征，如鞍座的摆动幅度、速度及加速度等。因此，需要分析不同杆长对鞍座运动学方面的影响。

取骑马机各杆长度分别为： $r_1 = 200\text{ mm}$ ， $r_2 = 300\text{ mm}$ ， $r_3 = 40\text{ mm}$ ， $r_4 = 400\text{ mm}$ ， $r_5 = 400\text{ mm}$ ， $r_6 = 800\text{ mm}$ ， $r_7 = 1000\text{ mm}$ ， $r_8 = 80\text{ mm}$ ，机架杆  $OC$  与  $OF$  夹角为  $\alpha = 120^\circ$ 。利用公式（1）求得脚踏杆的转动角度为  $\psi = 51^\circ$ 。

3.1 位置仿真

利用 MATLAB 软件绘制方程（3）、（4）、（6）、（7）、（9）及（10）的运动线图<sup>[6-7]</sup>，获得各杆长度对鞍座转角、位置及转速、角加速度、移动速度及加速度影响。同时，利用 ADAMS 软件进行仿真<sup>[8-10]</sup>，结果如图 3，图 4 所示，图 3 和图 4 分别表示杆 3 长度对鞍座位移及转动角影响线图。

从图 3 发现：杆 3 长度对鞍座的摆动幅度影响明显，杆 3 越长鞍座摆动幅度越大。

从图 4 发现：杆 3 长度对鞍座的转动角度影响明显，杆 3 越长鞍座转动角度越大。

同样研究方法对其他杆不同长度分析发现，除杆 3 外，杆 1 对鞍座位移和转动角影响也较大，杆 1 越长，鞍座位移和转动角幅度越大，其余杆对鞍座位移和转动角幅度影响较小。

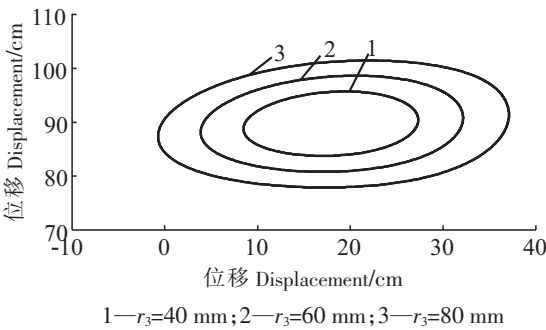


图 3 杆 3 长度对鞍座位移影响

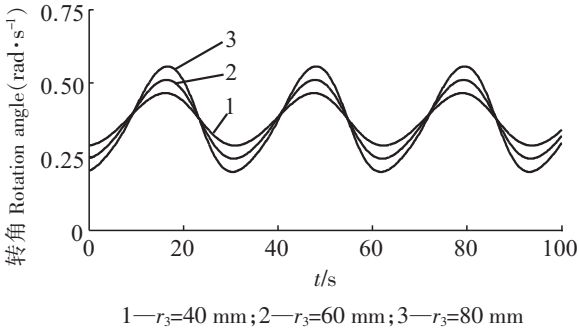


图 4 杆 3 长度对鞍座转动角度影响

Fig.3 Effect of rod 3 length on the saddle displacement Fig.4 Effect of rod 3 length on the saddle rotational angle

3.2 速度及加速度仿真

当杆 3 以  $0.2\text{ rad/s}$  的角速度匀速转动时，对装置进行仿真。图 5 和图 6 分别为杆 3 长度对鞍座  $Y$  方向线速度及线加速度影响曲线图，图 7 和图 8 分别为杆 3 长度对鞍座转动角速度及角加速度影响线图。

从图 5 发现：杆 3 长度对鞍座的移动线速度影响明显，杆 3 越长移动线速度越大。

从图 6 发现：杆 3 长度对鞍座的移动线加速度影响明显，杆 3 越长移动线加速度越大，此时，对骑乘者冲击也越大。

从图 7 发现：杆 3 长度对鞍座的转动角速度影响明显，杆 3 越长转动角速度越大。

从图 8 发现：杆 3 长度对鞍座的转动角加速度影响明显，杆 3 越长转动角加速度越大。

用同样的研究方法对其他杆不同长度分析发现：除杆 3 外，杆 1 对鞍座移动速度、加速度和转动角速度、角加速度影响也较大，杆 1 越长，鞍座移动速度、加速度和转动角速度、角加速度越大。其余各杆对鞍座移动速度与加速度和鞍座转动角速度与角加速度影响很小。

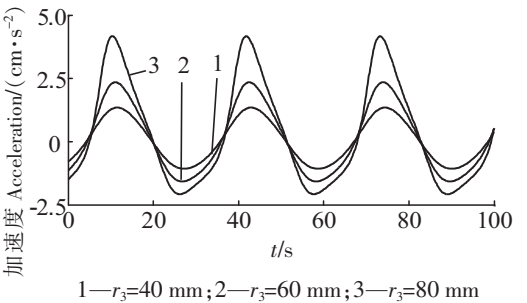
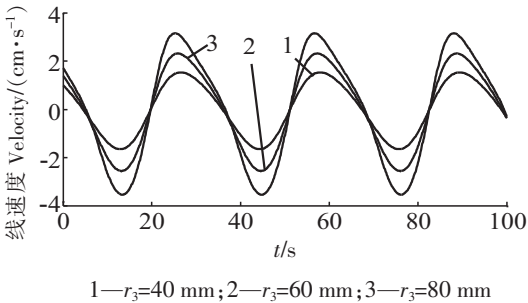


图 5 杆 3 长度对鞍座 Y 方向线速度影响

图 6 杆 3 长度对鞍座 Y 方向线加速度影响

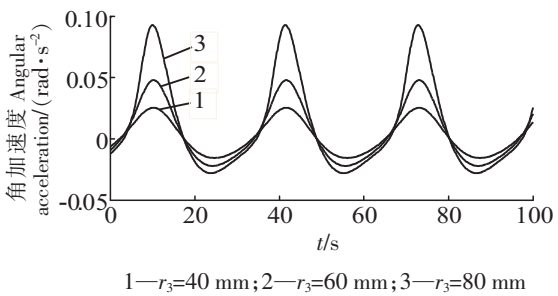
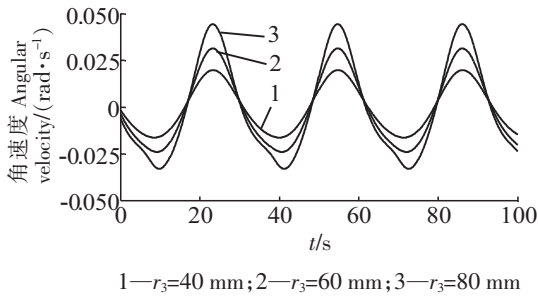


图 7 杆 3 长度对鞍座角速度影响

图 8 杆 3 长度对鞍座角加速度影响

Fig.7 Effect of rod 3 length on the angular velocity of the saddle

Fig.8 Effect of rod 3 length on the angular acceleration of the saddle

4 结论

对机械式骑马机进行了机构学分析, 建立了鞍座的位置、速度及加速度方程, 利用 MATLAB 软件绘制了鞍座的运动线图, 借助 ADAMS 软件进行了仿真, 仿真图与绘制图结果一致。

仿真结果表明: 杆 1 与杆 3 长度对鞍座的运动学影响最大, 长度越长鞍座的摆动幅度、速度及加速度越大, 对人的冲击也越大, 锻炼效果越佳。建议将杆 1 和杆 3 设计为可调节, 以适应不同锻炼者的需要。

[ 参考文献 ]

[1] 马艳彬, 王宏. 骑马治疗及其在康复医学领域的应用 [J]. 蚌埠医学院学报, 2008(3): 377-379.

[2] 季淑凤, 桑德春, 李欣, 等. 骑马机治疗对老年脑卒中患者日常生活活动能力的影响 [J]. 中国康复理论与实践, 2009(8): 761-763.

[3] 李欣, 桑德春. 骑马机治疗改善脑卒中偏瘫患者平衡功能的研究 [J]. 中国康复理论与实践, 2009(11): 1051-1053.

[4] 邱全锋. 健身马的设计与研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2009.

[5] 张秋华, 黄超. 骑马机: ZL201120046414 [P]. 2011-11-09.

[6] 管爱红, 张红梅, 杨铁军. MATLAB 基础及其应用教程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

[7] 王战中, 杨长建, 刘超颖, 等. MATLAB 环境下六自由度焊接机器人运动学逆解及优化 [J]. 机械设计与制造, 2013(7): 182-184.

[8] 牟世刚. 基于 Pro/E 的连杆设计系统 [J]. 机械工程及自动化, 2005(5): 84-88.

[9] 林清安. 完全精通 Pro/ENGINEER 野火 5.0 零件设计基础入门 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.

[10] 王国强, 张进平, 马若丁. 虚拟样机技术及其在 ADAMS 上的实践 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)