

迷你椭圆机的结构优化设计与仿真分析

贺占亮

(新乡职业技术学院, 河南 新乡 453000)

摘 要: 为了减小椭圆机的尺寸, 方便其在各种场合使用, 基于人因工程学原理, 结合跑步时人体脚踝的运动轨迹, 对迷你椭圆机的结构进行优化设计。通过解析分析得到了各组件参数对脚踝轨迹的影响规律, 确定了各组件的最佳参数。并应用 Solidworks 2016 对迷你椭圆机进行了运动和静应力仿真分析。结果表明: 当 $r_1=110$ mm、 $r_2=412$ mm、 $r_3=140$ mm 时得到的椭圆轨迹最佳; 脚踝点的位移、速度、加速度的解析和仿真的结果高度一致, 验证了结构设计的合理性; 该机构中最大应力处于曲柄轴上, 最佳轴径为 22 mm, 选用的材料满足强度要求, 安全性能可靠。

关 键 词: 人因工程学; 椭圆机; 优化设计; 仿真分析

中图分类号: TH 12

DOI: 10.11996/JGj.2095-302X.2017030341

文献标识码: A

文章编号: 2095-302X(2017)03-0341-05

Optimization Design and Simulation of Mini Elliptical Trainer

HE Zhanliang

(XinXiang Vocational and Technical College, Xinxiang Henan 453000, China)

Abstract: In this paper, the track of the human ankle during running is considered based on human factor engineering in order to optimize the structure of the elliptical trainer. By analyzing the influence of each component parameters on the track of the human ankle, the optimum parameters of each component were determined. The Solidworks 2016 is used for the simulation of the elliptical trainer. The results show that: the best elliptical orbit is obtained when the $r_1=110$ mm, $r_2=412$ mm, $r_3=140$ mm. The theoretical calculation results of the displacement, velocity and acceleration of ankle point are in accordance with the simulation results which verify the rationality of the structure design. The maximum stress during working occurs on the crankshaft, the optimum diameter of crankshaft is 22 mm, and less than the yield strength of the material, so that the structure is safe and reliable.

Keywords: human factor engineering; elliptical trainer; optimization design; simulation analysis

随着生活质量的逐步提高, 全民健身热潮开始兴起。椭圆机作为健身运动的重要工具之一, 越来越受人们的欢迎。椭圆机是利用人体慢跑时, 脚踝运动轨迹近似于椭圆的原理, 通过特定的机构, 使脚踏板以椭圆形轨迹进行运动, 与人的自然跨步相吻合^[1]。采用椭圆机锻炼, 避免了跑步时

所产生的冲击力, 更好地保护了关节, 男女老少皆宜。

人因工程学是运用人体测量学、生理学和生物力学以及工程学等学科的研究方法和手段, 综合地进行人体结构、功能以及力学等问题研究的学科。人因工程学是把人的因素作为产品设计的

首要原则,研究人和机器的互相作用,以达到人-机-环境系统总体性能的最优化^[2]。然而,国内运用人因工程学对椭圆机进行设计的研究并不多。王晓光和武永强^[1]提出了椭圆机的人因工程学设计一般准则,对椭圆机设计理论进行了完善,但并没有进行深入研究。

常见的椭圆机大多针对商业健身房设计,体积和质量都较大,价格昂贵,不适于普通家庭使用。为此,本文提出设计一种基于人因工程学且符合我国人民生理特性、成本低、尺寸小的迷你椭圆机,使之成为普通家庭和写字楼白领的健身首选。

1 迷你椭圆机的优化设计

1.1 迷你椭圆机的优化设计要求

迷你椭圆机的优化设计要求:①体积小、移动方便;②踏板的运动轨迹应符合使用者运动时的脚踝轨迹,保证运动的连贯性^[3];③尺寸大小应满足不同使用者的需求;④结构参数合理,保证使用者的舒适度^[4]。

1.2 基于人因工程学的优化设计

基于人因工程学的椭圆机优化设计,是要在满足椭圆机正常工作的基础上,使椭圆机踏板的运动轨迹最大程度上符合人体脚踝的运动轨迹,以此提高使用者的舒适性和安全性。

人在跑步时,脚踝的实际运动轨迹可以用椭圆来拟合,方法如下:计算脚踝实际运动轨迹中每两点间的距离,距离最大的两点连线即为长轴,与长轴垂直方向上距离最大的两点连线即为短轴,长轴与水平方向夹角即为椭圆倾角^[5]。不同情况下,脚踝运动轨迹是不同的。慢走时,椭圆的长短轴比值较快走时小。快走时,椭圆的长短轴比值较慢走时大。慢跑时,其脚踝轨迹较接近理想椭圆曲线,且步幅会变得较大,使长、短轴变长。此外,使用者的身体条件也影响脚踝轨迹。选取不同实验人员,在跑步机上进行慢跑,记录脚踝运动轨迹。实验者基本情况见表1,脚踝轨迹如图1所示^[6]。

表1 实验者基本情况

实验者	性别	身高(cm)
1	男	171
2	女	162
3	男	183
4	女	164
5	男	166

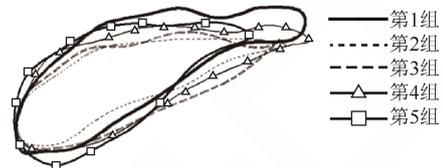


图1 脚踝轨迹图

通过分析计算图1中不同实验者脚踝轨迹,拟合出理想椭圆轨迹。椭圆长轴长度表示步幅大小,拟合过程中,首要保证的便是长轴长度满足大众使用要求,在此基础上对短轴进行拟合。最终确定理想椭圆长轴约为230mm,长短轴比值介于1.86到1.96之间,椭圆长轴倾角约为20°。

1.3 椭圆机结构的优化设计

根据设计要求和人因工程学设计,在保留椭圆机基本功能和运动稳定性基础上,缩小机器尺寸。迷你椭圆机的主要改进是去掉了占据空间的扶手结构^[7],与扶手末端相连接的踏板现在通过滚轮与滑道做滚动运动,此设计使椭圆机的尺寸大幅度减小。

在结构整体改进后,迷你椭圆机主要由机架、曲柄、踏板、滚轮、滚道组成,结构如图2所示。当使用者蹬踩脚踏板时,踏板带动曲柄作圆周运动,同时滚轮在滚道上往返滚动。此时踏板以椭圆轨迹进行运动,踏板形成的椭圆轨迹引导使用者脚部的运动,使椭圆机的健身动作与人的自然跨步相吻合。调节阻尼调节器^[8],可以获得不同大小的运动负载,达到不同锻炼效果。

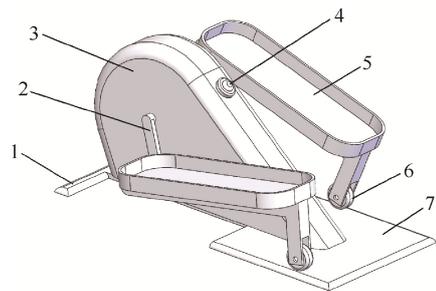


图2 椭圆机结构图

(1. 机架 2. 曲柄 3. 外壳 4. 阻尼调节器 5. 踏板 6. 滚轮 7. 滚道)

2 运动学分析

2.1 椭圆机运动规律的解析分析

基于人因工程学设计的椭圆机，应满足脚踏点的运动轨迹与拟合椭圆的轨迹高度一致，着重满足椭圆倾角和长轴尺寸要求。迷你椭圆机可简化为图3所示的偏置式曲柄滑块机构。其中AD为脚踏，M为模拟脚踝点，MN垂直于AD。以O点为坐标原点，X轴水平向右，Y轴竖直向上^[9]。

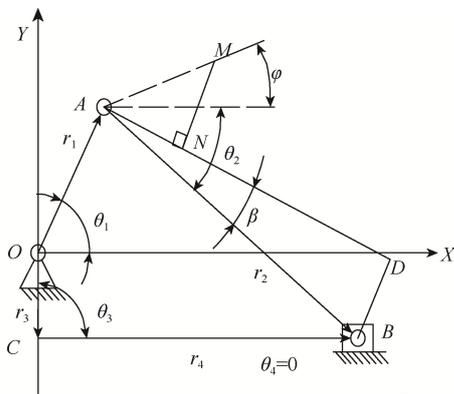


图3 椭圆机运动简图

机构矢量方程为

$$\vec{r}_1 + \vec{r}_2 = \vec{r}_3 + \vec{r}_4 \quad (1)$$

曲柄长度 r_1 、连杆长度 r_2 、偏距 r_3 均已知，踏板长度 $2b$ ， $\theta_3 = -90^\circ$ 、 $\theta_4 = 0^\circ$ ，初始变量为 $\theta_1 = \omega t$ ，分离 x 、 y 变量得

$$r_1 \cos \theta_1 + r_2 \cos \theta_2 = r_4 \quad (2)$$

$$r_1 \sin \theta_1 + r_2 \sin \theta_2 = -r_3 \quad (3)$$

联立求解，得

$$\begin{cases} \theta_2 = \arcsin\left(\frac{-r_3 - r_1 \sin \theta_1}{r_2}\right) \\ r_4 = r_1 \cos \theta_1 + r_2 \cos \theta_2 \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)对时间 t 求导，得

$$r_1 \omega_1 \sin \theta_1 + r_2 \omega_2 \sin \theta_2 = v_3 \quad (5)$$

$$r_1 \omega_1 \cos \theta_1 + r_2 \omega_2 \cos \theta_2 = 0 \quad (6)$$

由式(6)解得

$$\omega_2 = -\frac{r_1 \cos \theta_1}{r_2 \cos \theta_2} \omega_1 \quad (7)$$

$$\alpha_2 = \frac{r_1 \omega_1^2 \sin \theta_1 + r_2 \omega_2^2 \sin \theta_2}{r_2 \cos \theta_2} \quad (8)$$

根据 θ_2 、 ω_2 、 α_2 的解，可推导出模拟脚踝点M的运动轨迹、速度和加速度。

由几何关系可知，模拟脚踝点运动方程为

$$x_M = r_1 \cos \theta_1 + c \cos \varphi \quad (9)$$

$$y_M = r_1 \cos \theta_1 + c \sin \varphi \quad (10)$$

其中， $c^2 = \overline{AN}^2 + \overline{MN}^2$ ， $\varphi = \angle MAN - (\theta_2 - \beta)$ 。

将式(9)、(10)对时间 t 求一次导数，可得

$$v_{xM} = r_1 \omega_1 \sin \theta_1 - c \omega_2 \sin \varphi \quad (11)$$

$$v_{yM} = r_1 \omega_1 \cos \theta_1 - c \omega_2 \cos \varphi \quad (12)$$

$$v_M = \sqrt{v_{xM}^2 + v_{yM}^2} \quad (13)$$

将M运动方程对 t 求二次导数，得

$$a_{xM} = r_1 \omega_1^2 \cos \theta_1 - c \alpha_2 \sin \varphi - c \omega_2^2 \cos \varphi \quad (14)$$

$$a_{yM} = r_1 \omega_1^2 \sin \theta_1 + c \alpha_2 \cos \varphi - c \omega_2^2 \sin \varphi \quad (15)$$

$$a_M = \sqrt{a_{xM}^2 + a_{yM}^2} \quad (16)$$

从解析结果中可以看出，M点的运动轨迹与各构件的长度有关外，还受踏板夹角 β 的影响。为了确定各杆件参数对椭圆轨迹的影响，给定预设各杆件参数 $r_1=110$ mm、 $r_2=386.85$ mm、 $r_3=140$ mm，依次改变各杆件参数大小，固定其他杆件参数不变。把 $MN=100$ mm、 $ND=250$ mm代入以上公式，用excel计算上述表达式的值，并绘制出模拟脚踝点M的运动位移曲线，如图4所示。

由椭圆轨迹的解析曲线图4(a)可以看出 r_1 对椭圆长短轴大小影响较大，当 r_1 增大时椭圆长短轴均增大，但椭圆倾角保持不变；由图4(b)可以看出 r_2 对椭圆倾角影响较大，随着 r_2 增大，椭圆倾角增大，长短轴之比也有缓慢增大；由图4(c)可以看出 r_3 主要影响椭圆的长短轴之比，随着 r_3 增大椭圆长短轴之比增大，椭圆越扁。

由人因工程学设计得到的椭圆参数为椭圆长轴约230 mm，长短轴比值介于1.86到1.96之间，椭圆长轴倾角约 20° 。经过综合分析计算，确定符合人因工程学的各杆件最佳参数为 $r_1=110$ mm、 $r_2=412$ mm、 $r_3=140$ mm。此时椭圆长轴倾角为 20° ，长轴长度为232 mm，短轴长度为123 mm，长短轴之比为1.89，踏板运动轨迹符合人因工程学确定的拟合椭圆轨迹；且速度周期性波动平稳，可通过飞轮装置实现匀速运动。

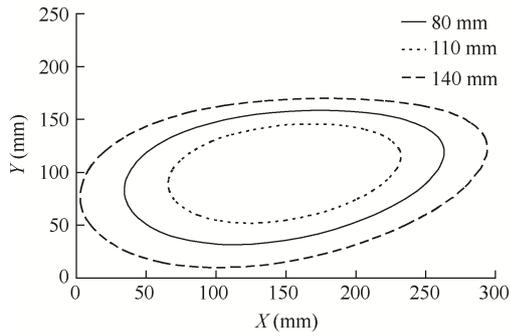
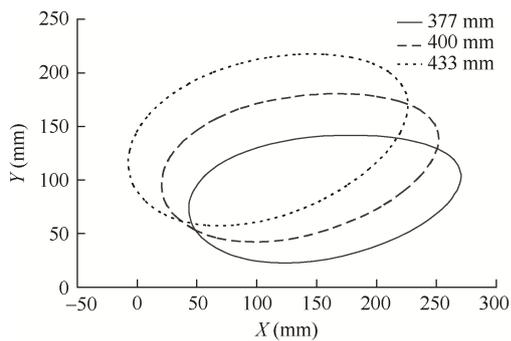
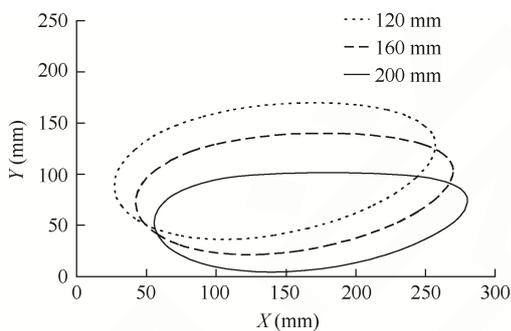
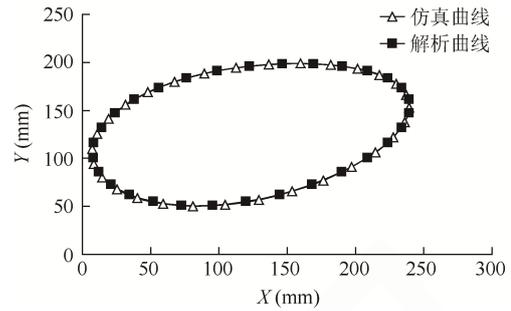
(a) 调整 r_1 时椭圆轨迹解析曲线(b) 调整 r_2 时椭圆轨迹解析曲线(c) 调整 r_3 时椭圆轨迹解析曲线

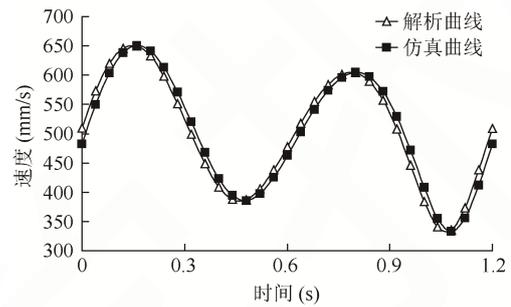
图4 不同参数下的椭圆轨迹

2.2 椭圆机运动规律的仿真分析

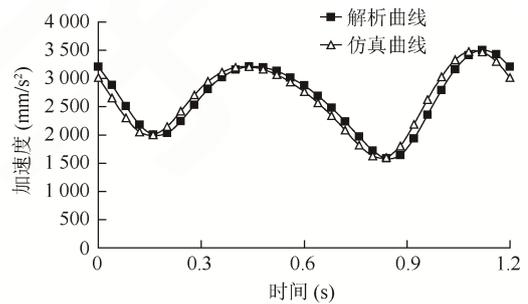
在 SolidWorks2016 中建立椭圆机的三维简化模型, 曲柄长度为 110 mm, 偏心距为 140 mm, 踏板长为 375 mm。在 Motion 模块中^[10], 设置曲柄转速为 50 r/min^[6], 仿真时间 1.2 s, 生成位移、速度、加速度运动特性曲线和解析求得的运动特性曲线对比如图 5 所示。利用 SolidWorks Motion 得到的仿真椭圆轨迹与解析得到的椭圆轨迹重合, 速度、加速度解析和仿真曲线高度吻合, 符合人因工程学设计, 验证了设计的合理性。速度与加速度曲线的波动, 可以通过安装飞轮装置来调节, 使椭圆机运动更加平稳, 提高使用者的舒适度。



(a) 椭圆轨迹



(b) 速度



(c) 加速度

图5 运动特性曲线

3 静应力仿真分析

在实际生活中, 使用者体重应小于 100 kg, 再加上着装修正量, 为了机构的安全性能, 单个脚踏应能够承受不小于 1 100 N 的力。为充分保证强度, 曲柄选材为 45#钢。45#钢是轴类零件的常用材料, 其屈服强度为 $3.53 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, 其抗拉强度为 $5.98 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 。为方便分析计算, 不计摩擦, 并做出以下假设: 立姿人体下肢的最大作用力等于自重; 重心完全落在较低的踏板一侧, 开始运动时, 运动无惯性可利用^[6]。

在 SolidWorks2016 Simulation 模块中对模型进行静应力仿真分析^[11]。分析类型为静态, 为机构添加夹具约束, 在较低脚踏板上端面添加 1 100 N 的均布载荷, 为机构添加引力(g 取 9.81 N/kg), 有限

元网格划分,最后运行算例。该过程尽量真实模拟迷你椭圆机的实际工作状态。为了便于观察,隐藏了机构的外壳。当曲柄轴直径为 20 mm,转过一定角度时,得其 Von Mises 应力分布如图 6 所示,最大应力处于曲柄轴上,约为 $2.90 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 。

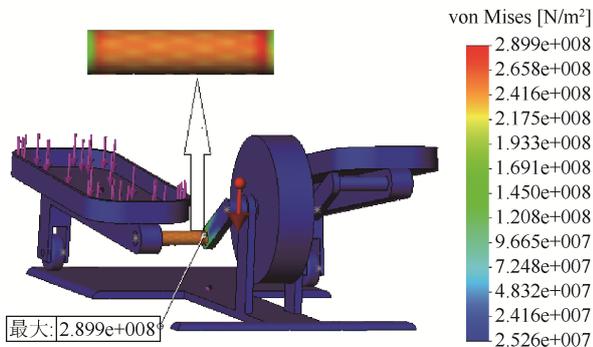


图 6 轴径为 20 mm 时机构应力分布

为了提高机构的安全性能,进一步确定出机构的最大应力值,调整曲柄轴相对于曲柄中心的角度位置(曲柄由水平位置顺时针转动 180°),得出不同角度位置时机构的最大应力值如图 7 所示。当转角为 90° 时,曲柄轴处于整个运动过程中最低处,机构等效到曲柄轴上的扭矩最大,产生最大值,约为 $3.11 \times 10^8 \text{ N/m}^2$,比较危险。因此,考虑增加曲柄轴直径尺寸。

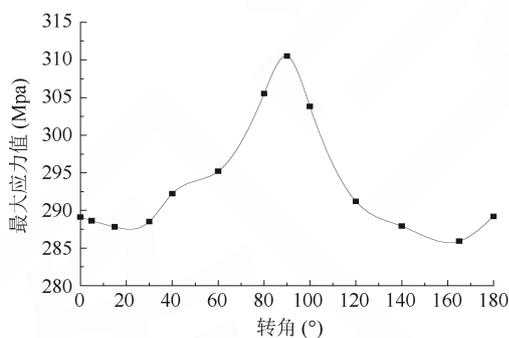


图 7 最大应力值随转角变化趋势图

轴径在 20 mm 基础上,调整增加,得出不同最大应力,找出最佳轴径。曲柄处最大应力值随轴径变化如图 8 所示。最大应力值随着轴径增加而减小,但在轴径增加到 22 mm,模型最大应力减小趋势明显减缓。即当轴径小于 22 mm 的时候,随轴径增加,最大应力值快速减小,但轴径超过 22 mm 时,应力减小变缓。并考虑到实际生产因素,把曲柄轴直径设置为 22 mm。此时,模型最大应力约为 $2.25 \times 10^8 \text{ N/m}^2$,满足强度要求,安全可靠且结构得到了优化。

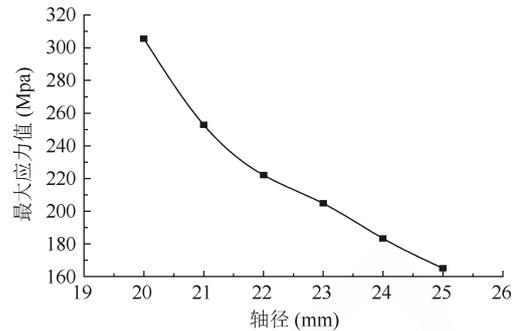


图 8 曲柄轴最大应力随轴径变化趋势图

4 结论

(1) 确定了该机构在 $r_1=110 \text{ mm}$ 、 $r_2=412 \text{ mm}$ 、 $r_3=140 \text{ mm}$ 时得到的椭圆轨迹最佳,且机构整体尺寸较小,方便使用、符合人因工程学原理。

(2) 模拟脚踝点的位移、速度、加速度的解析和仿真的结果高度一致,验证了优化设计的合理性,机器的使用舒适性得到了保证。

(3) 该机构中最大应力处于曲柄轴上,最佳轴径为 22 mm,选用的材料满足强度要求,安全性能可靠。

参考文献

- [1] 王晓光,武永强.考虑人因工程学的椭圆机设计[J].工程图学学报,2007,28(1):123-128.
- [2] 丁玉兰.人因工程学[M].上海:上海交通大学出版社,2004:1-2,24-31.
- [3] 蓝天.健身器材完全手册(之六)[J].文体用品与科技,2004(7):42-44.
- [4] 田海波,李爱民,尚万峰.基于人机工程学的健骑机参数优化设计[J].机械设计与制造,2015(3):192-195.
- [5] 徐华文,李文峰.电动跑步机的人机工程设计[J].机械,2004,31(S1):17-19.
- [6] 王晓光.基于人因工程学的双椭圆机设计方法研究[D].武汉:武汉理工大学,2006.
- [7] 张晓,黄强.便携式椭圆机的设计研究[J].图学学报,2012,33(3):61-64.
- [8] 蔡清华,王继成.磁控健身车设计中的人机工程学[J].工程图学学报,2003,24(2):132-136.
- [9] 孙恒,陈作模,葛文杰.机械原理[M].8版.北京:高等教育出版社,2013:30-37.
- [10] 李大磊,丁天涛.机构运动解析与仿真分析[M].北京:化学工业出版社,2013:81-83,115-123.
- [11] 吴应东.基于 SolidWorks simulation 的新型鱼雷支架优化设计[J].鱼雷技术,2014,22(4):249-253.