

一种电动跑步机坡度调节机构的设计和仿真

杨文珍¹, 吴新丽¹, 朱 梁¹, 竺志超¹, 陆立青²

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 宁波奇胜运动器材有限公司, 浙江宁波 315336)

摘 要: 设计一种电动跑步机的滑块摆杆式坡度调节机构。建立机构的参数化三维模型, 推导滑块摆杆式坡度调节机构的位移方程, 以及坡度夹角与电动推杆伸出量的函数关系, 通过机构的运动分析进行了三维模拟仿真。仿真结果显示, 该滑块摆杆式坡度调节机构不仅能便捷地实现坡度的调节, 而且坡度变化与电动推杆伸出量之间呈现出线性关系, 更有利于坡度的精确控制。

关键词: 跑步机; 滑块摆杆机构; 坡度调节; 参数化设计; 模拟仿真; 机构设计

中图分类号: TH136 **文献标志码:** A

0 引 言

跑步运动是医学界高度推崇的有氧健身活动, 对增强肢体肌肉、提高心肺功能和减肥均有明显效果。由于受到气候、场地和环境等因素制约, 室外跑步的机会越来越少, 越来越多的人选择在室内的跑步机上进行跑步健身。电动跑步机由于占地面积小、操作简单、调速方便, 已经成为最常用的室内健身器材。

为提高跑步锻炼效果, 中高档电动跑步机均配有坡度调节机构, 用以调整跑步机底架与水平面之间的夹角, 使跑步带与水平面之间形成一定的坡度。跑步带的坡度值直接关系到膝关节健康和健身效率。张彦龙等^[1]的研究表明: 坡度在 $0\sim 2^\circ$ 时, 髌韧带张力增加、胫股平台力增加; 坡度在 $2\sim 5^\circ$ 时, 髌韧带张力增加、胫股平台力减小; 坡度在 $5\sim 8^\circ$ 时, 髌韧带张力减小、胫股平台力减小。坡度增加, 运动强度增加, 膝关节负荷随之加大, 对于中老年人而言, 坡度过高会增加膝关节的损伤。相反, 坡度小, 膝关节负荷小, 运动强度低, 健身效率也低^[2-3]。因此, 健身者在跑步之前需要调节跑步机的坡度, 选择适合自身状况的坡度后, 再进行跑步锻炼。

目前, 电动跑步机的坡度调节机构有移动导杆

式和滑块推杆式。移动导杆式的步进电机通过蜗轮蜗杆驱动梯形丝杠转动, 梯形丝杠转动带动固定在升降滑板上的梯形螺母移动, 使升降滑板沿设定轨道运动, 带动一端铰接在底座上的双升降杆转动, 实现坡度的调节^[4]。滑块推杆式机构^[5]通过电机驱动伸缩杆向前伸或向后缩, 以推动推杆向前或向后移动, 从而调节横杆的上下活动杆件之间的角度, 实现坡度的调节。移动导杆式调节机构运行平稳、安全, 承载能力大, 但结构复杂, 传动效率较低; 滑块推杆式调节机构根据连杆机构进行设计, 结构稳定性强, 但所需驱动力较大。

电动跑步机坡度调节机构的设计关键在于找出坡度变化与驱动件之间的关系。本文设计了一种滑块摆杆式坡度调节机构, 通过对机构的参数化设计, 构建位移方程, 数值求解, 找出影响坡度变化的因素, 并进行运动仿真模拟, 为坡度调节的精确控制提供理论依据。

1 坡度调节机构的参数化设计

1.1 坡度调节机构的工作原理

滑块摆杆式坡度调节机构由基座 A、摆杆 CD、收合杆 AB、导杆 EF、滑块 C 和滑轮 H 组成, 如图 1 所示。基座 A 固定在地面上, 收合杆 AB 的一端铰

收稿日期: 2013-11-12

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2013AA013703)

作者简介: 杨文珍(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要从事虚拟现实技术、机器人技术方面的研究。

接于基座 A 上,另一端铰接于摆杆 CD 上,导杆 EF 的一端铰接于 AB 杆上,另一端为自由端,摆杆 CD 的近 D 端有一滑轮 H,可以沿着地面滑动,另一端铰接一滑块 C,滑块 C 可以沿着导杆 EF 上下滑动。当滑块 C 主动沿着导杆 EF 上下滑动时,摆杆 CD 与水平面之间的夹角将随之发生变化。即采用此机构能实现电动跑步机的坡度调节。

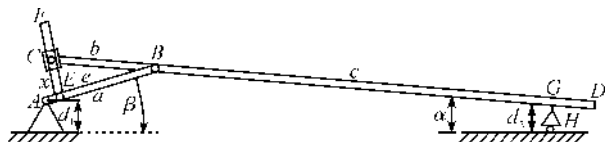
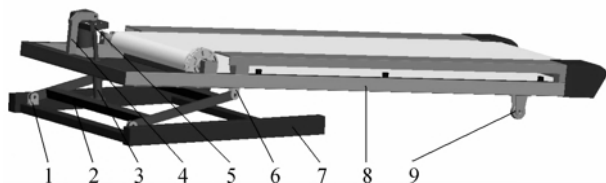


图1 滑块摆杆式坡度调节机构

1.2 坡度调节机构的三维模型

根据滑块摆杆式坡度调节机构的工作原理,构建了此机构的参数化三维模型,如图2所示,主要由跑步台、底座、升降电机、升降电机支撑架、收合连杆和若干个连接片等组成。



1-底座连接片;2-收合杆;3-升降电机推杆;4-支撑架;
5-升降电机驱动;6-底座连接片;7-底座;8-底座;9-脚轮

图2 电动跑步机坡度调节机构的三维立体模型

底座7安放在地面上,两个底座连接片1分别固定在底座横杆的两侧,收合杆2一端与两个底座连接片以铰接的方式相连,另一端与固定在底座8上的两个底座连接片6以铰接的方式相连。底座8的后端固定有一脚轮9,放置在地面上,可沿地面滚动。电动跑步机的坡度调节主要是通过升降电机来完成的。升降电机包括升降电机推杆和升降电机驱动,升降电机推杆3将升降电机驱动5的旋转运动转变为推杆的直线往复运动,同时配有电位计,可以通过反馈电阻的大小得到推杆所在的行程位置。在

三维设计过程中,升降电机推杆3和升降电机驱动5有确定的尺寸,占有一定的空间,不能按照坡度调节机构简图中直接连接在底架上,需要支撑架4来联接升降电机,支撑架4与底架7固联。

2 坡度调节机构的运动分析

在电动跑步机坡度调节过程中,电动推杆伸出量的变化引起坡度改变是未知的,因此,坡度调节机构运动分析的目的在于找出坡度变化与电动推杆伸出量的关系,为坡度调节的精确控制提供理论依据。

2.1 滑块摆杆式坡度调节机构的运动机理

如图2所示,升降电机5驱动升降电动推杆3作直线往复运动,升降电动推杆3带动收合杆组2的一端经两个底座连接片1铰接后,绕底座8往复摆动,使得收合杆组2的另一端经两个底座连接片6铰接后,抬升或下放底架7,实现电动跑步机的坡度调节。

2.2 坡度调节机构的位移方程

为得出坡度变化与电动推杆伸出量的关系,需要建立坡度调节机构的位移方程。如图1所示,设 $L_{AB}=a$, $L_{BC}=b$, $L_{BG}=c$, $L_{BE}=e$,CD杆与地面之间的坡度夹角为 α ,AB杆与地面之间的夹角为 β 。A点与水平面的高度为 d_1 ,G点与水平面的高度为 d_2 ,是滑轮H的高度, d_2 为常量。由于滑块C在EF上滑动,位置是变化的,假设 $L_{CE}=x$ 。由图1中的几何关系可以得到:

$$\angle ABC = \alpha + \beta \quad (1)$$

$$\cos(\alpha + \beta) = \frac{b^2 + e^2 - x^2}{2be} \quad (2)$$

$$a \cdot \sin\beta + d_1 = c \cdot \sin\alpha + d_2 \quad (3)$$

由式(3)可以得到 β 关于 α 的一个表达式:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{c \cdot \sin\alpha + d_2 - d_1}{a}\right)。$$

将上述得到的表达式代入式(2),可以得到 x 关于 α 的表达式:

$$x = \sqrt{b^2 + e^2 - 2be(\sqrt{a^2 - (c\sin\alpha + d_2 - d_1)^2} \cdot \sqrt{1 - \sin^2\alpha} - \sin\alpha \cdot (c\sin\alpha + d_2 - d_1))} / a \quad (4)$$

因此,式(4)是坡度角度 α 与电动推杆伸出量 x 的函数关系。如果AB杆长度、BC杆长度、BG杆长度、E点在AB上的位置、A点与水平面的距离和G点与水平面的距离确定,当健身者明确自身所需的坡度角度后,可由式(4)求出电动推杆伸出量 x 的值,进而控制升降电机运动,调节坡度大小,实现坡度的精确控制。

3 坡度调节机构的位移求解和分析

3.1 坡度夹角与电动推杆伸出量的关系曲线

在Visual Basic平台上,笔者编译了坡度调节机构的位移求解程序。图3为根据式(4)所设计的可视化窗口。在窗口中自行输入各个杆件长度,可以得到坡度夹角 α 与电动推杆伸出量(即CE长度) x 的曲线。

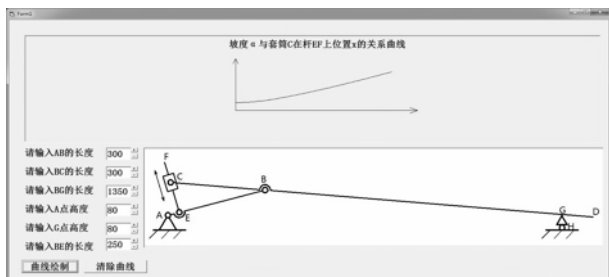
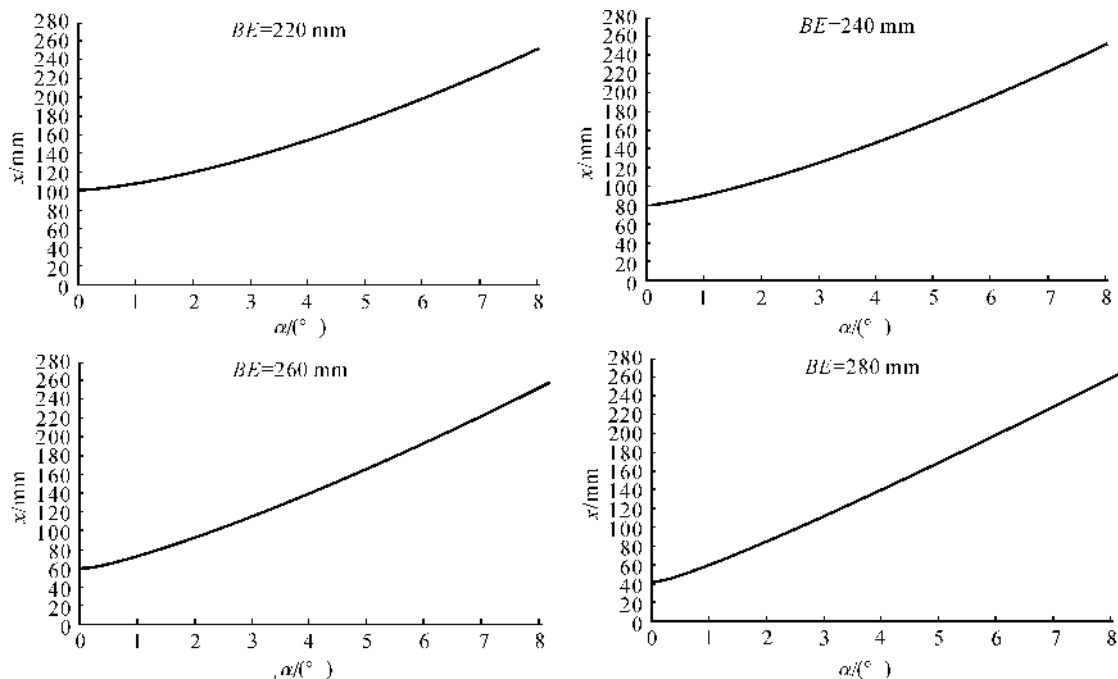


图3 坡度调节机构位移求解的可视化窗口

由式(2)可知, $\cos(\alpha+\beta)$ 的值介于 $0\sim 1$ 之间, CE 距离 x 由 BC 杆的长度和 E 点所在 AB 杆上的位置决定。由于 BC 杆是底架的一部分, 在实际情

图4 BE杆取不同值时坡度 α 与 x 的关系曲线

上述分析可知, 只要确定坡度调节机构的各杆长度及 E 点在 AB 杆上的位置, 就能得到坡度夹角与电动推杆伸出量之间确定的关系曲线, 此曲线是精确控制电动跑步机坡度的重要依据。

3.2 坡度调节机构的三维运动仿真验证

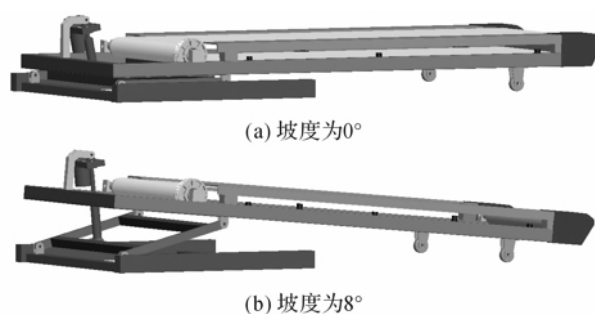
将坡度调节机构进行三维运动仿真, 验证其与位移方程理论分析是否相符。把坡度调节机构三维模型(见图2)导入 ADAMS 仿真软件, 对各个零部件进行运动约束, 添加升降电机推杆运动方式和运动速度, 各个杆的长度分别是: L_{AB} 取 300 mm, 即 $a=300$ mm, L_{BC} 取 320 mm, 即 $b=320$ mm, L_{BG} 取 1 350 mm, 即 $c=1\ 350$ mm, $d_1=65$ mm, $d_2=80$ mm, L_{BE} 取 220 mm, 即 $e=220$ mm, 进行三维运动仿真, 如图5所示, 其中图5(a)为坡度为 0° 的位置, 图5(b)为坡度为 8° 的位置。设升降电机推杆速度

况中这部分长度是固定的, 因此 CE 距离 x 主要由 E 点在 AB 杆上的位置决定。

设 L_{AB} 取 300 mm, 即 $a=300$ mm, L_{BC} 取 320 mm, 即 $b=320$ mm, L_{BG} 取 1 350 mm, 即 $c=1\ 350$ mm, $d_1=65$ mm, $d_2=80$ mm, L_{BE} 分别取 220、240、260、280 mm 时, 可以得到四组坡度 α 与 x 的关系曲线, α 取值范围 $[0^\circ, 8^\circ]$, 如图4所示。

从图4的4条曲线可以发现, 当 α 接近于 0° 时, CE 距离 x 由 E 点在 AB 杆上的位置所决定; 当坡度 α 接近 8° 时, CE 距离都在 260 mm 左右; BE 杆的取值越大, 即 E 点越接近 A 点时, 坡度 α 与 CE 距离 x 越接近线性关系。

定义为 0.001 m/s, 求出坡度与电动推杆伸出量之间的关系。可得到坡度 α 与电动推杆伸出量 x 的关系, 如图6所示。

图5 电动跑步机坡度分别为 0° 和 8° 时的位置

从图6中可以得出, 坡度与电动推杆伸出量之间呈现出线性关系。这是由于坡度调节机构三维模型中电动推杆联接在收合杆组的后部, 即 E 点很靠

近A点,坡度 α 与CE距离 x 就接近线性关系,这与位移方程理论分析结果相一致。

从ADAMS仿真测量可得,本文所设计的坡度调节机构,坡度与电动推杆伸出量成线性关系,斜率系数 $K=17.5\text{ mm}/(^{\circ})$ 。

升降电机是由小型直流电机驱动的,对坡度的调节控制可转化为对电动推杆供电时间以及供电极性的控制。坡度与电动推杆伸出量之间的线性关系就更有利于坡度的精确控制,若要改变一定的坡度 $\Delta\alpha$ 时,在电动推杆的两端加上相应的电压,通以 $t=K\cdot\Delta\alpha/v$ 的电流即可实现坡度的精确调节, v 为电动推杆推程速度(mm/s)。

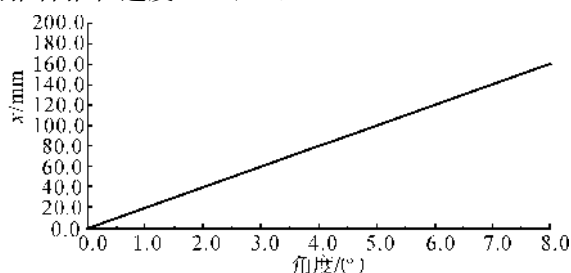


图6 坡度 α 与电动推杆伸出量 x 的三维仿真验证结果

4 结 语

电动跑步机是人们普遍喜爱的健身锻炼器材,是健身器材行业研发的热点。坡度调整机构是电动跑步机的重要装置,直接关系到运动者的膝关节健康和健身效率。对比前人研究成果,本文设计了一种滑块摆杆式坡度调节机构,主要优点是滑块摆杆机

构连接稳定、运动可靠、制造简单,且容易实现电动推杆的伸缩。

通过此机构的运动分析和三维仿真验证,滑块摆杆式坡度调节机构不仅更便捷地实现了坡度的调节,而且坡度与电动推杆伸出量之间呈现出线性关系,更有利于坡度的精确控制。

参考文献:

- [1] 张彦龙, 马志君, 于 潇. 跑步机坡度与运动时膝关节力学关系分析[J]. 牡丹江师范学院学报: 自然科学版, 2011(1): 52-54.
- [2] Novotny S C, Perusek G P, Rice A J, et al. A harness for enhanced comfort and loading during treadmill exercise in space[J]. Acta Astronautica, 2013, 89(9): 205-214.
- [3] Tirosh O, Cambell A, Begg R K. Biofeedback training effects on minimum toe clearance variability during treadmill walking[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2013, 41(8): 1661-1669.
- [4] 李 文, 杨先军, 周 旭, 等. 一种跑步机的升降机构: 中国, 201110315782. 4[P]. 2012-01-18.
- [5] 金煜龙. 跑步机: 中国, 201220100497. 0[P]. 2012-10-03.
- [6] 韩方恒. 跑步机的动力选择和传动设计[J]. 科技信息, 2010(31): 86-87.
- [7] 程军红. 连杆机构设计的CAD方法[J]. 郑州纺织工学院学报, 2000, 11(4): 61-63.
- [8] 高英敏, 李 莉, 高运芳. 平面连杆机构辅助设计与仿真[J]. 工程图学学报, 2009(4): 42-48.

Design and Simulation of a Slope Adjustment Mechanism of Electronic Treadmill

YANG Wen-zhen¹, WU Xin-li¹, ZHU Liang¹, ZHU Zhi-chao¹, LU Li-qing²

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Ningbo Qisheng Sport Equipment Co., Ltd., Ningbo 315336, China)

Abstract: This paper puts forward a slipper rocker type slope adjustment mechanism of electronic treadmill, establishes parametric three-dimensional model of the mechanism, infers the displacement equation of slipper rocker type slope adjustment mechanism and the functional relationship between slope angle and linear actuator spread and conducts three-dimensional analog simulation through analysis of motion of the mechanism. The simulation result shows that this slipper rocker type slope adjustment mechanism can not only realize slope adjustment conveniently; moreover, slope change and linear actuator spread present a linear relationship, which is conducive to accurate control of the slope.

Key words: treadmill; slipper rocker mechanism; slope adjustment; parametric design; analog simulation; mechanism design

(责任编辑: 康 锋)