

无级变速山地自行车设计及力学仿真

刘慧玲¹ 王佳琪^{1,2} 鄯宇翔¹ 高昌晟¹

(1 晋中学院 机械学院, 山西 晋中 030619)

(2 北京印刷学院 机电工程学院, 北京 102600)

摘要 创新设计了一种无级变速山地自行车, 详细分析了无级变速器与助力器的工作原理与结构; 计算了无级变速山地自行车起步瞬间的驱动力。结果表明, 设计的自行车启动十分轻便, 无级变速器的结构合理。对车架以及车把在行走过程中的受力进行了有限元分析, 车架的位移云图与应力分布图、车把的位移变形图表明, 设计的车架、车把的应力和变形足够满足使用要求, 结构的安全系数较高。

关键词 无级变速 助力器 有限元分析

Design and Mechanical Simulation of CVT Mountain Bike

Liu Huiling¹ Wang Jiaqi^{1,2} Shan Yuxiang¹ Gao Changsheng¹

(1 School of Mechanical Engineering, Jinzhong University, Jinzhong 030619, China)

(2 School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

Abstract A kind of CVT mountain bike is designed innovatively, the working principle and structure of the continuously variable transmission (CVT) and booster are analyzed in detail. The driving force when CVT mountain bike started is calculated, all show that the bike started lightly with the reasonable transmission structure. The finite element analysis (FEA) of frame and handlebar is carried out, the displacement contour and stress distribution figures of the frame as well as the displacement maps of the handlebar indicate that the structure could meet the requirements with a higher safety factor.

Key words Continuously variable transmission (CVT) Booster Finite element analysis

0 引言

近年来, 很多城市出现了交通拥挤、环境恶化, 以及资源供给不足等问题, 自行车作为绿色能源出行工具和健身工具被人们喜爱, 尤其是山地自行车, 目前已成为人们户外出行、远游健身的重要工具^[1]。在结构设计方面, 山地自行车要求具有抗震性能好的轮胎, 牢固结实、不易变形的车架与把手, 以及能够平稳地实时变速的变速器等。在现有的自行车变速器中, 有级变速是最为普遍的变速方式, 虽然能够满足自行车在行驶过程中的传动需求, 但是其传动比固定、变速过渡不平滑、传动链易脱扣, 而且手动变速还会使驾驶者分散精力, 为骑车出行带来危险。

本次设计以全国三维数字化创新设计大赛为背景, 从现有的山地有级变速自行车中开始思考, 查阅国内外新型自行车设计结构, 从德国先进纽芬奇 NuVinci N360 无级变速器中得到启发, 选取了不同于

现有自行车链条传动而创新性地采用皮带传动, 设计出了能够根据骑行速度实时变速的无级变速山地自行车。本文主要对无级变速山地自行车的关键零部件的力学分析与仿真进行了详细的研究。

1 无级变速山地自行车设计

根据自行车设计原理^[2-3], 采用 SolidWorks 完成了整个无级变速山地自行车的设计与仿真, 见图 1。该自行车最大的特点是自主创新设计的无级变速器, 其主要由球体、皮带、变速轴、离心块、滑块等零件组成, 见图 2 与图 3。该无级变速器通过作用在离心块的离心力和离心块上的凸起的自重实现自动变速, 其中离心块的总质量比滑块的总质量小。当车速较慢, 后轮和曲柄转动的角速度较小时, 位于离心块端的皮带转动的半径较大, 位于滑块端的皮带转动的半径相对小, 自行车起步轻松; 当车速较快, 后轮和曲柄转速较大时, 产生的离心作用力作用在离心块上, 离心块向着球体的外端滑动, 离

心块带动皮带滑动,离心块端的皮带的转动半径变小,滑块端的皮带的转动半径相对较大,自行车的传动比增大。该变速器可以根据车速、轮子转速实现自动变速,使得骑行者感到更加安全舒适。



图1 无级变速山地自行车

图2 无级变速器外观

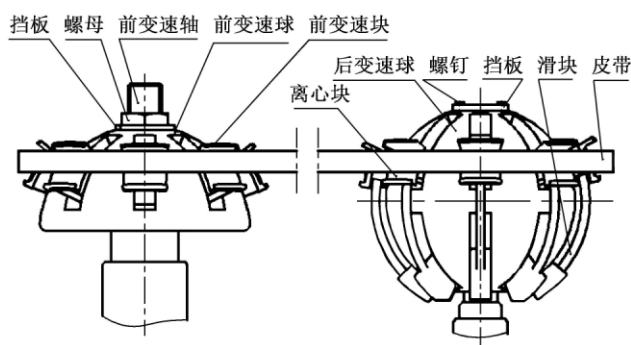


图3 无级变速器结构

自行车助力器是一种可以安装在自行车前轮的装置,可将自行车制动减速过程中的能量储存,并在加速或爬坡时将储存的能量释放做功。本文所设计的助力器运用了机械传动原理,主要



图4 自行车助力器外观

通过齿轮、发条、传动块、棘轮和棘爪之间的相互配合实现助力,见图4与图5。当自行车速度快时,弹性传动块在离心力的作用下开始沿着其轴向向外拉伸,弹簧传动块拉伸至转动轴上的相邻的两个固定传动块之间,并与固定传动块啮合,将棘轮内的发条上紧,将能量储存在发条内;当自行车速度慢下来时,作用在弹性传动块上的离心力小于弹性传动块的弹性力,弹性传动块复位,此时,发条通过反向啮合的棘轮棘爪发条储存的能量释放,通过中间轴换向后传递于传动轴上,传动轴再通过与内齿圈啮合的传动齿轮将动力传递至内齿圈上,从而实现助力。本设计中当发条的储能达到极限时,可以通过降低自行车的速度让发条先释放一部分能量,为下次储能做好准备。另外在助力器的发条储存能量的过程中,自行车的速度也将降低,间接的起到刹车的作用,避免骑行者在车速快时狠掰刹车,提高了自行车的安全性。

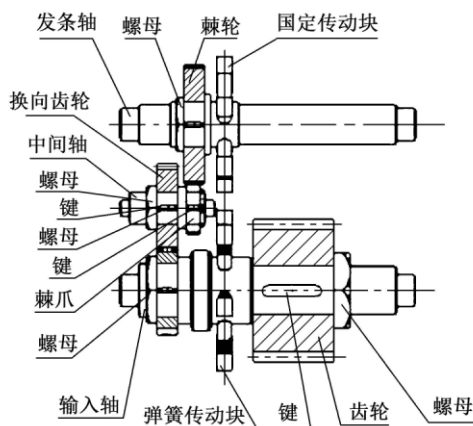


图5 自行车助力器原理简图

2 起步瞬间驱动力计算

对于行驶中的山地自行车而言,摩擦力一方面可以增加自行车的安全性,另一方面对于自行车的行驶速度和乘骑效率有着负面的影响。现在,就山地无级变速自行车在起步的瞬间进行分析,计算自行车启动所需的驱动力,计算公式及相关参数见机械设计手册^[4]。

通过在 SolidWorks 中分析,得知车体质量为 28 kg,成年人质量大约 60 kg,通过调查数据得知,山地自行车行驶的黄沙砂砾等地面与橡胶轮胎的摩擦因数 $\mu = 0.35$ ^[5],因此,自行车在启动瞬间克服的静摩擦力为

$$f = \mu mg = 0.35 \times 88 \times 9.8 = 301.84 \text{ N}$$

式中, m 为自行车与骑行者的总质量, kg; g 为重力加速度, 9.8 N/kg 。

已知该山地无级变速自行车的启动瞬间的速度 $v = 5 \text{ km/h} \approx 1.38 \text{ m/s}$,从自行车模型可以得知自行车后轮的半径 $r = 0.25 \text{ m}$,摩擦力在后轮部分产生的转矩 T 为

$$T = fr = 301.84 \times 0.25 = 75.46 \text{ N} \cdot \text{m}$$

式中, r 为后轮半径, m。

自行车后轮的角速度 ω 为

$$\omega = v/r = 1.38/0.25 = 5.56 \text{ rad/s}$$

式中, v 为速度, mm/s。

根据 $n = \frac{\omega}{2\pi}$, 得知后轮的转速 $n \approx 0.88 \text{ r/s} =$

53 r/min。根据公式 $T = \frac{9550P}{n}$, 得出后轮的功率 P 为

$$P = \frac{Tn}{9550} = \frac{75.46 \times 53}{9550} = 419.7 \text{ W}$$

通过查机械设计手册可以得知,自行车上的带传动效率为 0.98,因此自行车脚踏板处的功率 P' 为

$$P' = P/0.98 = 428.3 \text{ W} \approx 0.428 \text{ kW}$$

从自行车模型可以得出脚踏板连杆的长度 l 为 0.21 m, 根据本次设计预设的自行车启动时的传动比为 0.25, 可以得知自行车脚踏板处的转速 n' 为

$$n' = n / 0.25 = 212 \text{ r/min}$$

因此, 脚踏板处的转矩 T' 为

$$T' = \frac{9550P'}{n'} = \frac{9550 \times 0.428}{212} = 19.28 \text{ N} \cdot \text{m}$$

所以驱动力 F 为

$$F = T/l = \frac{19.28}{0.21} = 91.8 \text{ N}$$

由上述计算可知, 本文设计的山地自行车启动所需要的驱动力为 91.8 N, 对于一个成人而言, 该无级变速自行车启动十分轻便。

3 自行车车架结构与力学仿真

传统自行车车架多数为钢管焊接类, 虽然为了加强舒适性和刚度改变了管件之间的角度和长度, 但是其减震性较差。车架是自行车中的核心结构, 除了要连接、支撑其他部件外, 还承受着骑行者或地面传给它的各种力和力矩, 因此必须有足够的可靠性和寿命。随着骑行时间的增长, 车架不断地经历应力循环, 最终会引起关键部位变形较大, 从而导致应力集中处发生断裂失效^[6]。本文中自行车的车架结构采用流线型设计, 一方面减少了骑行过程中的风阻, 另一方面顾及了美观和人机工程方面, 可以大大减少关键部位的应力集中和变形。该车架的结构见图 6。



图6 自行车车架外观

3.1 车架受力分析

根据人在骑行过程中的姿势, 车架受到的外部载荷主要来源于车座和脚踏板处。车座主要承载了人的体重, 而脚踏板处则是人驱动自行车行驶时的主要外力施加处。为了简化受力状况, 将车架等效为一条直线, 做出外部载荷和约束施加于车架上的平行位置, 受力状况见图 7。其中, F_1 、 F_2 为骑行者施加给车架的压力, 以一个体质量为 60 kg 的成年人为例, $F_1 = mg = 60 \times 9.8 = 588 \text{ N}$, 若将自行车脚踏板处的轴、脚踏板和曲柄一起视为一个刚体, 根据上节中的计算结果, 自行车在起步时需给脚踏板施加的力约为 91.8 N, 自行车车轴的质量为

0.124 kg, 所以, $F_2 = 91.8 + 0.124 \times 9.8 = 93.02 \text{ N}$ 。

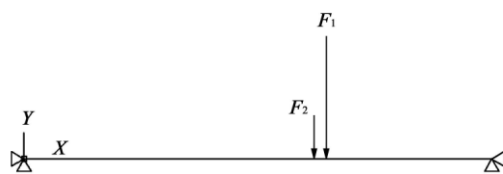


图7 自行车车架受力简图

3.2 车架有限元分析

在 SolidWorks 中建立车架三维模型, 然后直接导入 ANSYS 中, 车架所采用的铝合金材料为 5052 系列, 其弹性模量为 70 GPa, 泊松比为 0.38, 许用应力为 280 MPa。由于车架形状较为复杂, 划分网格时直接采用 10 节点 187 单元, 以确保分析结果的可靠性^[7]。对于车架与车把衔接的部位是螺纹连接, 采用全约束; 对自行车后叉架处 x 、 y 方向上的移动和转动、 z 方向的移动进行限制, 保留绕 z 轴转动的自由度。通过静力学分析可得到自行车车架的位移变形图与应力分布图, 分别见图 8 与图 9。由图 8 可以

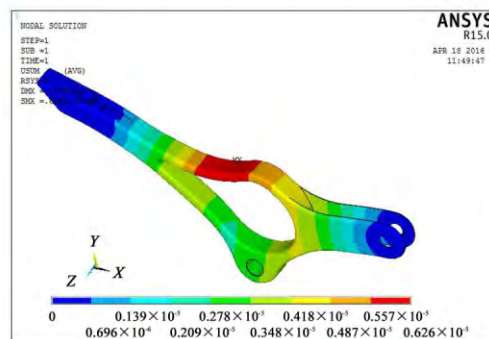


图8 车架位移云图

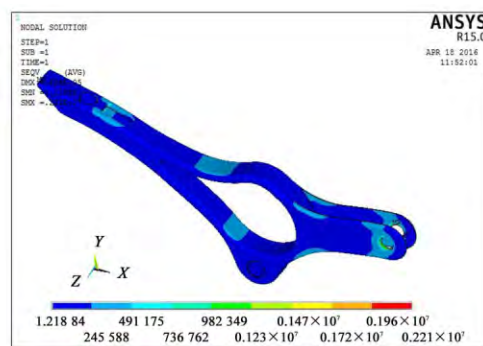


图9 车架内部应力分布

看出车座位处的变形是最大的, 最大位移为 0.006 26 mm, 而一般的山地自行车厂家规定前后叉架最大位移不超过 1.5 mm; 根据图 9, 应力最大的位置是在后叉架的圆孔内, 最大应力为 2 MPa, 远低于材料的许用应力, 因此本文中所设计的山地自行车车架刚度优于普通自行车。

4 车把受力分析

车把是自行车的关键零件,其在行驶过程中主要受到3个方面的力:人体质量分配到车把上的力,空气阻力,车杆的支撑力。本次按照正常骑行姿态进行分析,根据文献[8],一个体质量为60 kg左右的成年人在骑行过程中分配给自行车车把上的体质量为20 kg,手臂对车把施加的压力与车把的夹角为 35° 。车把所受到的风的阻力可以根据公式 $f = 0.5C_dA\rho v^2$ 计算,其中, C_d 为风阻系数,其值为0.5,车把在风向上的投影面积 $A = 2.1 \text{ m}^2$,空气密度 $\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3$,车速与风速的相对速度 $v = 5 \text{ m/s}$ 。由于车把受到的风阻不是集中力,在本文的有限元分析中按均布载荷处理。自行车车架对车把的支撑力在SolidWorks模型中测量,该支撑力与车把的夹角为 18° ,其大小可以根据空间平衡力方程计算出来。图10为车把在水平面内的受力示意图,其中, F_x 为骑行者施加给车把的水平分力, F_{Nx} 为车把中部受到的支持力水平分量;图11为车把在竖直面内的受力示意图,其中 F_y 为骑行者施加给车把的竖直分力, F_{Ny} 为车把中部受到的支持力竖直分量。

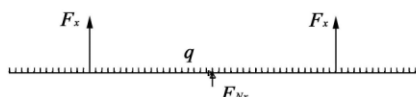


图10 车把在水平面内的受力

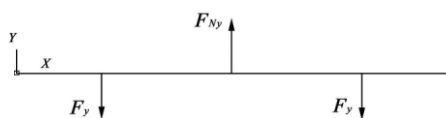


图11 车把在竖直面内的受力

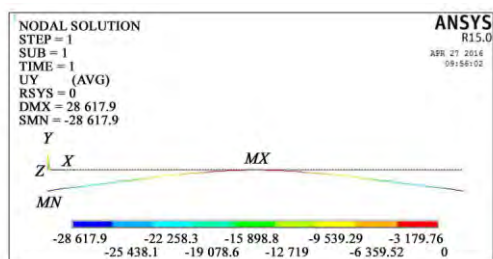


图12 车把在水平面内的位移

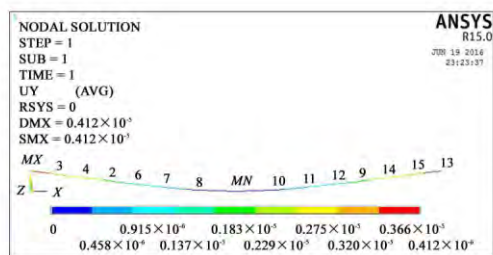


图13 车把在竖直面内的位移

同理,对车把进行有限元分析,将车把的单元

类型选择为梁单元,2节点188单元。车杆支撑处为全约束,水平面与竖直面内相应的位移变形见图12与图13。由图可知,无论是在水平面还是竖直面,变形最大的部位都在车把的两端,也就是骑行者施加力所在的位置,但是变形位移非常小,其变形度相较于山地自行车的规格要求而言甚微,因此车把刚度较好,能够满足使用要求。

5 总结

设计了一种无级变速山地自行车,详细分析了无级变速器与助力器的工作原理以及结构特点,它们通过机械原理中的方法实现了无级变速与助力,不需要额外的能量输入,与目前主流的绿色设计和制造技术概念相符合。计算了无级变速山地自行车起步瞬间的驱动力,结果表明,设计的自行车启动十分轻便,无级变速器的结构合理。为了对自行车的结构进行优化设计,分别对车架以及车把在行走过程中的受力进行了有限元分析,根据车架的位移云图与应力分布图、车把的位移变形图可知,本设计中的车架、车把的应力和变形足够满足使用要求,结构的安全系数较高。综上所述,通过对本文创新设计的无级变速山地自行车进行力学分析与仿真,有助于优化结构,验证结构设计的合理性与可行性,为批量化生产无级变速山地自行车奠定基础。另外无级变速器机构中包含了一条皮带,而本设计中目前没有考虑到皮带张力及打滑问题,在后续的自行车制作过程中需要加以改进。

参 考 文 献

- [1] 刘晗. 山地自行车骑行动态性能分析[D]. 天津: 天津大学, 2007: 2-45.
- [2] 林霜. 自行车设计中的人机因素分析与研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008: 28-78.
- [3] 孙立华, 郭少飞, 周诗金, 等. 自行车驱动增速装置的改进设计与分析[J]. 机械传动, 2015, 39(6): 128-130.
- [4] 闻邦椿. 机械设计手册[S]. 5版. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [5] 高飞, 项忠霞, 赵明, 等. 基于Anybody的自行车骑行运动仿真与试验分析[J]. 机械设计, 2016, 33(1): 105-110.
- [6] 姚志英. 镁合金自行车车架技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015: 9-37.
- [7] 赵军华, 李敏. 基于ANSYS的机车铸铝齿轮箱体结构强度有限元分析[J]. 机械传动, 2016, 40(3): 128-130.
- [8] 金丽颖. 自行车运动两人跟骑的空气阻力研究[J]. 中国体育科技, 1998(10): 41-45.

收稿日期: 2016-10-12 收修改稿日期: 2017-04-16

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目(201610121001)

晋中学院博士基金项目(bsjj2015205)

山西省青年科技研究基金项目(201701D221132)

作者简介: 刘慧玲(1981—), 女, 山西长治人, 博士, 副教授。