

基于圆柱弹簧制动能量回收的车辆制动特性

马明旭, 霍晓佩, 刘公雨, 孔祥伟

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 以圆柱螺旋弹簧作为蓄能元件, 以普通自行车为实验对象设计并制作了刹车蓄能实验装置. 分析了普通自行车的传统摩擦制动和蓄能实验自行车的能量回收模式制动过程, 并建立了数学模型; 通过实验对比分析了二者的实际制动特性. 结果表明, 实验自行车蓄能模式制动时的实际特性曲线与普通自行车传统摩擦制动时的实际特性曲线非常接近且变化趋势相同, 说明实验自行车的制动特性可以满足驾驶者的传统习惯要求, 圆柱螺旋弹簧制动能量回收方法应用于车辆上的制动特性能较好地符合舒适度指标.

关 键 词: 圆柱螺旋弹簧; 刹车蓄能; 数学模型; 传统摩擦制动; 制动特性

中图分类号: TH 113; TH 132; TH 135 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2015)02-0259-05

Vehicle Braking Features in Braking Energy Recovery Method with Cylindrical Helical Spring

MA Ming-xu, HUO Xiao-pei, LIU Gong-yu, KONG Xiang-wei

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: MA Ming-xu, associate professor, E-mail: mxma@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The experimental equipment for braking energy recovery based on common bicycles was designed and produced, with a cylindrical helical spring as energy storage component. Traditional friction braking of common bicycle and energy recovery braking of experimental bicycle were analyzed in order to get their mathematical models. The actual braking features were experimentally measured and contrasted. The experimental results show that braking process feature of energy recovery bicycle is similar to the traditional friction braking bicycle, and their feature curves have the same development tendency. Conclusions are made that the experimental braking energy recovery bicycles can meet the braking requirements of riders, and vehicle braking with braking energy recovery method using cylindrical helical spring can conform to comfort condition.

Key words: cylindrical helical spring; braking energy recovery; mathematical model; traditional friction braking; braking feature

车辆的制动能量回收技术可大幅提高能源利用率, 早在 20 世纪 60 年代人们已经对该技术应用用于汽车进行了研究^[1-3]. 未来新生产的汽车中带有再生制动能量回收系统的比例将占到 40% 以上^[4]. 圆柱螺旋弹簧具有能量密度比大、设计简易、蓄能高等优点, 采用圆柱螺旋弹簧为蓄能元件对车辆制动能量进行回收, 将车辆的制动动能转化为弹性势能并存储起来, 具有重要的研究价值. 车辆制动过程具有多种工况, 在不同路况环境

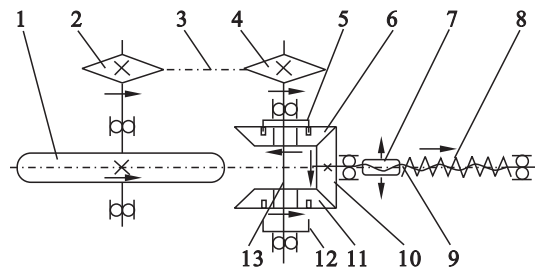
和人的主观舒适性要求下, 车辆的制动特性也不相同. 张银彩等^[5]对排量伺服和制动能量回收系统进行了数学建模, 并在 Matlab/Simulink 环境下对整车制动工况进行了动态仿真. 制动能量回收系统主要工作在车辆制动与起步加速状态, 为保证制动的可靠性, 系统要求驾驶员响应迅速、平稳^[6]. 耿平等^[7]设计并制造了电动自行车的制动性能测试平台, 提高了对制动性能的测试效率.

本文以圆柱螺旋弹簧作为蓄能元件, 以普通

自行车为实验对象设计并制作了刹车蓄能实验装置. 分析了平整路况下普通自行车的传统摩擦制动和蓄能实验自行车的能量回收模式制动过程, 并建立了数学模型, 通过实验对比分析了二者的实际制动特性. 为深入研究基于圆柱螺旋弹簧制动能量回收方法的车辆制动特性规律奠定基础.

1 刹车蓄能实验装置的设计

在不改变自行车空间结构布局、不影响驾驶者骑行等前提下, 将圆柱螺旋弹簧制动能量回收系统融合设计于自行车上. 蓄能系统的传动机构与自行车的脚踏驱动机构互不干涉, 在实现制动蓄能与便捷控制功能的同时传动级数应尽量少, 从而减少制动能量在传递过程中的耗散. 在强度条件约束下蓄能系统整体质量进一步优化, 从而降低附加蓄能系统的质量在自行车运动过程中产生的额外耗能. 蓄能实验装置中齿轮箱内的传动组件具有传输能量和变换传动方向两种功能, 齿轮箱体积小并固定安装在自行车架上. 圆柱螺旋弹簧刹车蓄能实验自行车的工作机构原理图如图 1 所示.



1—后车轮; 2—第一链轮; 3—链条; 4—第二链轮;
5—第一滑移套筒; 6—单向锥齿轮; 7—丝母;
8—圆柱螺旋弹簧; 9—滚珠丝杠; 10—小锥齿轮;
11—大锥齿轮; 12—第二滑移套筒; 13—花键轴

图 1 制动能量回收试验装置的机构原理图

Fig. 1 Mechanical schematic diagram of the experimental equipment for braking energy recovery

第一滑移套筒与单向锥齿轮处于啮合状态. 手动按下蓄能式制动闸后, 在闸线拉动下第二滑移套筒沿花键轴向里移动, 从而实现第二滑移套筒上的端面爪牙与大锥齿轮上的端面爪孔啮合; 此时, 正向转动的后车轮带动第一链轮转动, 通过链传动带动第二链轮和花键轴正向转动, 花键轴通过第二滑移套筒带动大锥齿轮正向转动, 并通过小锥齿轮将动力传递给滚珠丝杠和丝母, 丝母正向移动从而压紧圆柱螺旋弹簧, 使刹车动能转化为弹簧势能, 实现了刹车蓄能实验自行车能量

回收模式下的制动.

依据普通自行车的实际结构尺寸, 利用三维建模软件 Solidworks 绘制其三维模型. 为了保证能量回收模式下自行车制动的平稳性与安全性, 要求圆柱螺旋弹簧的最大蓄能大于自行车以普通车速制动时的动能. 确定弹簧的结构参数后, 以强度和尺寸为约束条件对传动机构中的各零部件包括标准件进行设计, 选取合适规格, 采用虚拟装配技术搭建实验装置模型.

骑行者对蓄能自行车进行制动试验, 按住蓄能式刹车闸后, 车的速度逐渐降低并最终停止. 观察蓄能器内的弹簧, 可见弹簧产生了明显的压缩, 由此可以看出, 在这个制动过程中弹簧被压紧, 弹性势能增加, 说明在这种制动方式下车的动能转化为了弹簧的弹性势能. 本实验自行车实现了对制动能量进行有效回收的目的.

2 理论模型搭建

2.1 普通自行车传统摩擦制动数学模型

自行车的传统制动方式是依靠摩擦钳夹紧转动中的车轮, 使轮毂与摩擦片之间产生滑动摩擦从而耗散车辆的动能, 实现其减速和制动. 在车轮与摩擦片的动摩擦因数保持不变条件下, 刹车过程中手闸按下的位移与制动钳产生的制动力矩呈正比例关系. 制动过程中的阻力还包括空气阻力、滚动阻力等.

普通路况下人们骑行自行车刹车时, 按照经验手按下刹车闸的过程可以分为两个阶段: 第一阶段是人手有刹车意图时手按刹车闸的反应过程, 该过程自行车的摩擦制动力由零逐渐增大. 本文以反应时间为变量设计普通路况下的自行车刹车实验, 骑行者为男性青年, 体重 70 kg, 身高 180 cm, 由个体反复试验认为反应时间取 1 s 较舒适. 第二阶段是手按住刹车闸在某一位置保持不动, 这个过程中摩擦钳产生的制动力矩保持在一恒定值不变.

由上所述, 本文对摩擦制动方式下自行车的制动过程作如下假设: 刹车反应阶段刹车闸驱动制动钳均匀加载制动力, 反应时间取定 1 s; 反应阶段结束后制动钳对车轮的制动力矩保持某一值恒定不变, 直到自行车完全停止. 由上述假设可对自行车的传统制动过程建立数学模型. 自行车制动阻力为

$$F = F_a + F_t + F_m.$$

其中 F_a 为无风条件下自行车前行受到的空

气阻力;自行车速度分别为 15,12 和 10 km/h 时,空气阻力 F_a 分别为 15,10 和 7 N^[8].

F_t 为自行车及蓄能系统各零部件相对运动时由于摩擦产生的等效阻力,此处忽略不计.

F_m 为制动钳摩擦阻力矩的等效阻力,根据上述假设, F_m 的数学表达式如下:

$$F_m = \begin{cases} F_1 \cdot t, & t < 1; \\ F_1, & t \geq 1. \end{cases}$$

F_1 为手闸按下某一特定位移时制动钳对车体产生的等效阻力,通过实验测试可以得出.

用自行车制动过程中的位移随时间变化的曲线来表述自行车的制动特性,根据运动学公式得到

$$x(t) = \int_0^t \left(v_0 - \int_0^t \frac{F}{M} dt \right) dt. \tag{1}$$

式中: v_0 为自行车刹车开始时的初速度; M 为车和骑行者的总质量.

以自行车前轮为对象测试制动钳的摩擦阻

力,使车轮悬空并保持车身及车把固定不动,按下刹车闸至最大位移处,此时制动钳将车轮紧紧抱住.使用电子拉力计拉住车轮边缘,拉力的方向与车轮外缘保持相切,匀速缓慢拉动车轮,这时电子拉力计显示的读数就是制动钳产生的摩擦阻力值.制动钳对车体产生的等效阻力即为上述方法测出的摩擦阻力值,其值为 $F_1 = 140\text{ N}$.

2.2 实验自行车蓄能模式的制动特性数学模型

实验自行车在蓄能模式下制动时,自行车车轮通过链传动、锥齿轮传动和丝杠螺母传动将整车的动能转化为弹簧的弹性势能,达到自行车减速与制动的目的.

已知蓄能系统传动比,分析蓄能实验自行车传动机构的传动效率并进行计算,由圆柱螺旋弹簧的结构参数求出其力学特性数学表达式,运用能量守恒定律,可以推导自行车的理论制动特性数学模型.查阅机械设计手册,蓄能实验自行车传动链中各机构的传动效率如表 1 所示.

表 1 蓄能实验自行车传动链各机构传动效率
Table 1 Transmission efficiencies of various driving components in the experimental bicycle

传动机构	地面摩擦	链条	滚珠轴承	滚针轴承	锥齿轮	滚珠丝杠	微型轴承
传动效率	0.98	0.90~0.93	0.99	0.95	0.94~0.95	0.95	0.95

圆柱螺旋弹簧刚度系数 K 和最大蓄能值 E_p 的推导如下:

$$\text{曲度系数 } K_1 = \frac{4D_2 - d}{4D_2 - 4d} + \frac{0.615d}{D_2};$$

$$\text{弹簧指数 } C = \frac{D_2}{d};$$

$$\text{弹簧钢丝最小直径 } d = \sqrt{\frac{8K_1FC}{\pi[\tau]}};$$

$$\text{弹簧刚度系数 } K = \frac{Gd}{8C^3z};$$

$$\text{圆柱螺旋弹簧的最大蓄能值 } E_p = \frac{Gdp^2z}{16C^3}.$$

式中: D_2 为弹簧中径; p 为弹簧节距; z 为弹簧的工作圈数; G 为弹簧材料的剪切弹性模量.

自行车理论制动特性数学模型:

设车轮转速为 n_1 ,滚珠丝杠转速为 n_2 ;汽车的位移时间函数为 $x(t)$,单位为 m;弹簧变形量时间函数设为 $s(t)$,单位为 mm.

$$s(t) = \frac{\lambda_1 \cdot i \cdot x(t)}{2\pi d_1}.$$

式中: λ_1 为丝杠导程; d_1 为自行车车轮直径;传动比 $i = n_2/n_1$.

自行车与弹簧蓄能装置传动机构的总效率为 η ,由能量守恒定律得出如下方程:

$$\left[\frac{1}{2}(M_1 + m)v_0^2 - \frac{1}{2}(M_1 + m)\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 \right] \cdot \eta = \frac{K \cdot s(t)}{2 \times 1\,000}.$$

式中 M_1 为骑行者质量, m 为蓄能实验自行车整体质量.

考察上述方程的形式,可采用待定参数法对其进行求解.设解为

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi).$$

代入式(2)后并整理,最后求得方程解为

$$x(t) = \frac{20\pi v_0 d_1}{\lambda_1 i} \sqrt{\frac{10(M_1 + m)\eta}{K}} \times \sin\left(\frac{\lambda_1 i}{20\pi d_1} \sqrt{\frac{K}{10(M_1 + m)\eta}} \cdot t\right). \tag{3}$$

3 实验结果与分析

3.1 实验原理及设计

改装后的蓄能实验自行车整体质量为 $m = 15\text{ kg}$;骑行者质量为普通人质量 $M_1 = 70\text{ kg}$.

蓄能元件圆柱螺旋弹簧的结构参数为:弹簧外径 $D = 56\text{ mm}$,簧丝直径 $d = 12\text{ mm}$,节距 $p = 20\text{ mm}$,弹簧自由长度 $L = 500\text{ mm}$,有效工作圈数 $z = 25$,弹簧材质取为 60Si2Mn.

分别对普通自行车的实际摩擦制动特性和蓄

