

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205625

磁阻发生装置设计及其在功率车中的应用研究*

刘 威 徐方超 孙 凤 郭辉 王 硕

(沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110870)

摘要:针对现有功率车在测试训练过程中由于踩踏速度的变化无法维持功率恒定的问题,设计了一种新型磁阻发生装置。首先,基于永磁同步电机的原理对磁阻装置基本结构进行设计,通过功率车的整体结构确定装置的基本结构尺寸,结合测试时所需的最大功率确定电磁负荷,选择永磁体,再进行定转子的结构尺寸以及绕组连接形式设计,并确定径向气隙参数,最后,分析了系统恒功率控制原理,并通过模糊PID控制与迭代学习控制(ILC)对系统恒功率控制效果进行了仿真与实验。结果表明,新型磁阻式功率车在踩踏速度在 $60(\pm 10)$ r/min的范围内变化时,功率误差控制在 ± 5 W以内,可以接受。采用新型磁阻发生装置的功率车提高了恒功率控制效果,验证了其在维持恒功率方面的先进性。

关键词:磁阻发生装置;功率车;阻力调节;恒功率;模糊PID;迭代学习控制

中图分类号: TH122; TN02 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.20

Research on the design of magnetoresistance generation device and its application in a power vehicle

Liu Wei Xu Fangchao Sun Feng Guo Hui Wang Shuo

(School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existing power vehicle cannot maintain constant power due to the change of pedaling rate in the test and training process, a new magnetoresistance generation device is proposed. Firstly, the magnetoresistance generation device is designed based on the principle of permanent magnet synchronous motor. The basic structural dimensions of the device are determined through the overall structure of the power car. Considering the maximum power required for the test, the electromagnetic load and select permanent magnets are determined. Then the stator and rotor structure size and winding connection form are designed, and the radial air gap parameter is specified. Finally, the system constant power control principle is analyzed. The system constant power control effect is simulated and experimented by fuzzy PID control and iterative learning control (ILC). The results show that the power error of the new magnetoresistive power vehicle can be controlled within ± 5 W when the pedaling speed varies in the range of $60(\pm 10)$ r/min, which is acceptable. The power vehicle with the new magnetoresistance generation device improves the effect of constant power control and verifies its advancement in maintaining constant power.

Keywords: magnetoresistance generation device; power vehicle; resistance regulation; constant power; fuzzy PID; iterative learning control

0 引言

功率车作为室内有氧健身器材之一,也是心肺耐力测试的主要器材^[1-2],深受消费者的青睐。同时第5次国

民体质检测新增加了功率车二级负荷试验项目,在实际检测过程中,可以通过记录每级负荷下的摄氧量、心率变化状况,再构建二者与功率的数学模型,从而对测试人员心肺功能进行评价^[3-4]。但是,由于受试者受劳累程度、主观心态、周围环境等因素影响,难以保持车速恒定,这

收稿日期: 2022-06-27 Received Date: 2022-06-27

* 基金项目:国家重点研发计划(2020YFC2006701)、辽宁省教育厅项目(LFGD2020002)、中央引导地方科技发展专项资金(2020JH6/10500048)项目资助

会影响检测结果的准确性。另外,在试验的过程中伤员、患者等特殊人群,由于自身因素无法保证转速的恒定,这时功率车的恒功率调节非常关键^[5-6]。因此,实现功率车恒功率调节是保证功率车心肺耐力测试质量、制订科学的身体锻炼规划以及健身处方的必要条件,对进行全民健身健康指标监测精确化和体育卫生管理工作,具有重要的意义。而国内大部分功率车并没有恒功率控制功能,目前常用于进行恒功率测试的是由瑞典生产的 Monark 功率车,但其在进行恒功率控制时误差要大于 $\pm 10 \text{ W}$ ^[2],设备有待提高。

综上所述,通过设计一种新型磁阻发生装置,同时结合 PID 控制技术、模糊控制技术以及迭代学习控制技术,实现了在一定范围内不受踩踏速度影响的功率车,提高了恒功率测试结果的准确性。

1 心肺耐力测试系统

功率车心肺耐力测试系统主要由心率监测模块、速度采集模块、功率测量模块、阻力发生装置等部分组成。在评估及训练的过程中,主要因变量包括最大耗氧量 ($\text{VO}_{2\text{max}}$)、二氧化碳产生量、心率 (HR)、通气量 (VE) 等^[7]。通过心率传感器可测得最大心率,通过数学模型可以得到最大耗氧量、最大功率,以此作为评估心肺功能的依据,并根据测试结果制定针对个体的锻炼规划和运动处方^[8]。

在整个系统中,阻力发生装置是核心机构。该装置可以及时地根据速度的变化调整阻力的大小,实现恒功率。目前功率车常用的阻力调节方式有两种,一种是磁控式,通过改变飞轮与磁铁的距离实现阻力的变化,但这种方式不能保证功率车恒功率控制的准确性;另一种是电流磁控式,通过改变线圈通电电流实现阻力的变化,然而这种调节方式会产生大量的热量,影响功率车的寿命。因此,为弥补上述磁阻发生装置的不足,本文设计了一种新型磁阻发生装置。

2 新型磁阻发生装置

2.1 磁阻发生装置设计

本文提出的磁阻发生装置是根据永磁同步旋转电机的基本结构与数控伺服机床运动方式进行分析设计的^[9-10],将磁控式与电流磁控式两种阻力调节方式的优点进行结合,该装置主要由动子部分、定子部分和滑台组成,动子部分主要由永磁体和燕尾块组成,定子部分主要由铜制通电线圈和铁芯组成,滑台主要由直线导轨、挡板组成,3 部分共同组成了新型磁阻发生装置。在踩踏功率车时,会产生安培力,进而产生阻力。图 1 为该装置结构图。

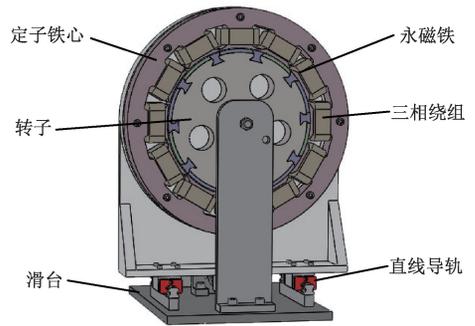


图 1 磁阻发生装置

Fig. 1 Magnetoresistance generation device

该装置基本结构参数如表 1 所示。

表 1 基本结构参数

Table 1 Basic structural parameters

结构名称	参数值
定子外径/mm	327
定子内径/mm	212
转子外径/mm	210
槽级数	12 槽、10 级

1) 电磁负荷选取

电磁负荷包括电负荷 A 与磁负荷 B , 表达式分别如式(1)和(2)所示。

$$A = \frac{mNI_s}{2p\tau_p} \quad (1)$$

$$B = (0.6 \sim 0.8)B_r \quad (2)$$

其中, m 为电机相数; N 为绕组匝数; I_s 为绕组电流; p 为永磁体极对数; τ_p 为永磁体极距; B_r 为永磁体剩磁。

由于在测试时功率车的负荷低于 300 W, 所以取 A 的范围为 30~100 A/cm^[11]。选择的永磁体材料为牌号 N95 钕铁硼, 充磁方式为径向充磁^[12], 确定 B_r 范围为 1.17~1.21 kGs, 计算得到磁负荷范围为 0.7~0.97 T。

2) 定子结构设计

定子槽采用半闭口式梨形槽, 其优点为利用率高, 损耗低^[13], 结构如图 2 所示, 结构尺寸如表 2 所示。

表 2 定子结构槽尺寸

Table 2 Structural dimensions of the stator slot

参数	参数值
Bs0	3.96
Bs1	22.5
Bs2	34.5
Hs0	2
Hs1	2.63
Hs2	22.49
Rs	2

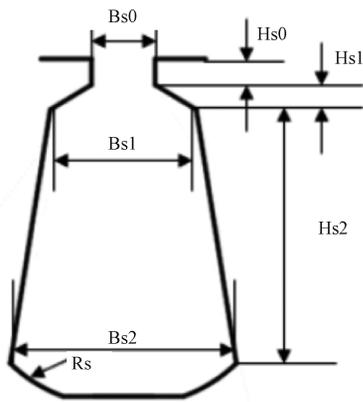


图 2 定子槽结构

Fig. 2 Stator slot structure

为避免发生磁饱和,还需对定子齿与定子轭的磁感应强度进行计算,如式(3)和(4)所示。

$$B_i = \frac{B_\delta b'_p}{(b+1)t_1} \quad (3)$$

$$B_j = \frac{B_\delta b'_p}{h_j} \quad (4)$$

其中, B_i 为定子齿磁感应强度; B_δ 为气隙磁感应强度; t_1 为齿宽; $b+1$ 为各级齿数; b'_p 为极弧长; B_j 为定子轭磁感应强度; h_j 为定子轭高。

计算得到 B_i 为 1.56 T, B_j 为 0.91 T, 均小于 1.6 T, 满足要求。

3) 转子结构设计

为降低定子磨损,运行时避免产生新转矩,因此在该装置中,转子结构采用表贴式^[14],如图 3 所示,同时采用燕尾槽的形式对永磁铁进行保护,如图 4 所示。

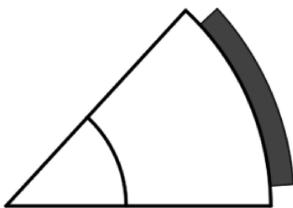


图 3 表贴式结构

Fig. 3 Surface type structure

4) 绕组连接形式设计

绕组连接形式是否合理会直接影响磁阻发生装置的总体性能,亦会间接影响恒功率实验结果,该装置绕组采用分布布置连接^[15],如图 5 所示。

2.2 磁阻发生装置阻力调控原理

磁阻的大小主要由磁场强度、电流大小、气隙的径向长度和轴向长度来决定。在此装置中,磁场强度、通电流以及气隙径向长度保持恒定,因此,阻力大小则主要是

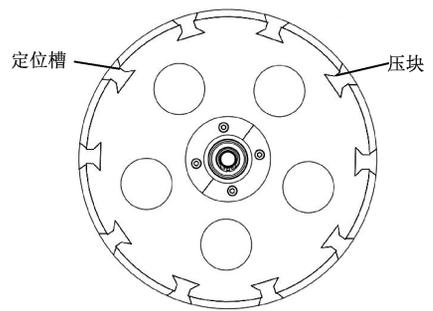


图 4 燕尾槽结构

Fig. 4 Dovetail structure

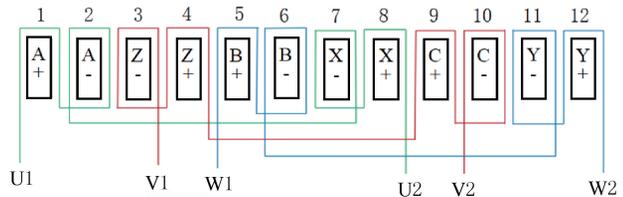


图 5 绕组连接形式

Fig. 5 Winding connection form

通过改变气隙轴向有效长度 L_{ef} (0~31 mm) 来调节的。图 6 为阻力调节原理图。

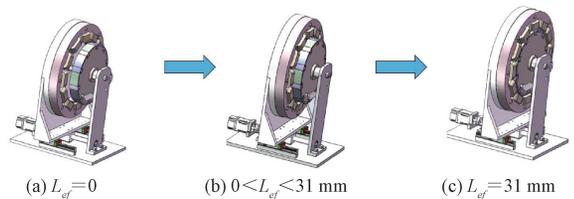


图 6 阻力调节原理

Fig. 6 Resistance regulation principle

2.3 径向气隙的确定

径向气隙大小对于功率车的性能影响较大。径向气隙越小,磁场的强度就会越大,但径向气隙过小,就会使定子发生相对滑动,导致磁阻发生装置无法正常运行,影响测试结果;但径向气隙过大,磁场强度就会过小,导致阻力不够,亦影响测试结果的准确性。因此,确定径向气隙的大小对于该装置的恒功率控制性能十分重要。

因径向气隙长度与永磁体的尺寸成正比,所以在确定径向气隙之前要合理的设计永磁体的尺寸,二者的关系如式(5)所示。

$$h_m = \frac{\mu_r}{B_r/B_\delta - 1} \delta \quad (5)$$

式中: μ_r 为永磁体磁导率; δ 为径向气隙; B_r 为永磁体剩磁; B_r/B_δ 一般取值为 1.1~1.35,取 h_m 为 3 mm,代入计

算得到径向气隙长度 δ 为 1 mm。

3 恒功率控制分析

3.1 恒功率控制原理

基于该新型磁阻发生装置,功率车的工作原理为:先确定一个目标输出功率,功率车将测得的实时输出功率通过功率反馈设备反馈给控制器与目标功率进行对比分析,得出功率误差。然后,控制系统根据功率误差控制伺服电机,调节气隙轴向有效长度改变阻力,消除误差。若没有误差,控制系统将不会发出调节指令,以维持功率恒定。图 7 为功率车恒功率控制结构图。

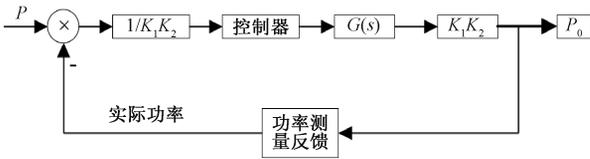


图 7 恒功率控制结构图

Fig. 7 Structure diagram of the constant power control

其中, $G(s)$ 为传递函数; K_1 为电磁转矩转换系数; K_2 为速度信号。通过式 (6) 和 (7) 计算得到 $K_1 = 16.66$ 。

$$T = T_e = K_1 L_{ef} \quad (6)$$

$$T = 9\,550P/n \quad (7)$$

其中, T 为输出转矩, T_e 为电磁转矩。

3.2 恒功率控制系统数学模型

结合该装置的阻力调节原理以及电机的主要参数,同时根据数控机床的进给伺服驱动器系统建模方式^[16-17],构建的功率车恒功率控制系统的数学模型如式(8)所示。

$$G(s) = \frac{K_p S + K_i}{J S^2 + (B + K_p) S + K_i} \quad (8)$$

式中: K_p 为比例系数; K_i 为积分系数; J 为转动惯量; B 为粘性摩擦。本文选择的具体参数值如表 3 所示。

表 3 磁阻发生装置参数表

Table 3 Parameter table of magnetoresistance generation device

参数名称及符号	参数值
比例系数 K_p	0.6
积分系数 K_i	15
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	1.3×10^{-4}
粘性摩擦 B	0.02

3.3 恒功率控制方法

由于受试者的踩踏速度具有一定的波动性,传统的

PID 控制并不适合本系统,而模糊控制具有适应性强、构造容易、响应快、易于被人接受、不依赖于精确建模等优点^[18],比较适合本系统,因此通过设计模糊自适应 PID 控制器。同时该装置在进行功率调节时的运动方式可以看成有限时间内的重复运动,满足迭代学习控制的基本要求,因此亦选择了迭代学习控制进行恒功率的实验。

1) 模糊 PID 控制器设计

模糊控制器通过线上对 PID 参数加以修正,再将经过校正的比例、积分、微分常数进行输出^[19],控制器结构图如图 8 所示。

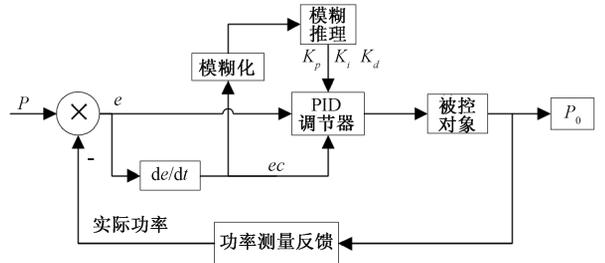


图 8 系统模糊 PID 控制器结构

Fig. 8 Structure diagram of the system fuzzy PID controller

将 e 和 ec 的模糊论域均设定为 $[-3, 3]$,划分为 7 个等级, $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 亦是如此设定划分,选择三角形隶属函数。模糊规则可以解释为:

(1) 若 $e < 0$, 则实际功率 $>$ 目标功率,需要增加 K_d 值使系统快速响应,使实际功率与目标功率相等,若 $ec < 0$, K_d 值应继续增大。

(2) 若 $e > 0, ec > 0$, 控制器变化与规则 1 变化趋势相反。

(3) 若 $e = 0$, 控制器无需变化。

基于上述规则建立控制规则表,其中 ΔK_p 模糊规则表如表 4 所示。

表 4 ΔK_p 模糊规则表

Table 4 Table of ΔK_p fuzzy rules

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

2) 迭代学习控制器设计

迭代学习控制适用于具有重复运动属性的受控对象,不依赖被控对象的高精度数学模型^[20]。在运动过程中,通过上一周期的控制信息和下一周期的误差信息建

立新的受控信息,并进行多次迭代,以获得所期望的效果^[21-22]。图 9 为其控制结构图。

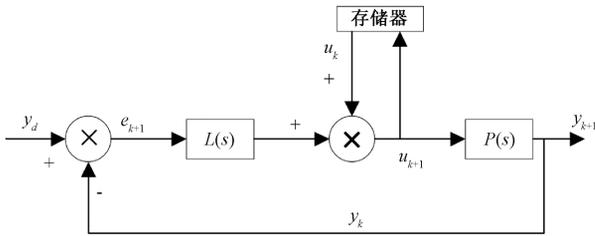


图 9 闭环迭代学习控制结构

Fig. 9 Structure diagram of the closed-loop iterative learning control

其中, $L(s)$ 为学习律函数, $P(s)$ 为被控对象, u_k 、 u_{k+1} 为第 k 次、 $k+1$ 次控制量, y_d 为给定信号, y_k 、 y_{k+1} 为第 k 次、 $k+1$ 的输出, e_{k+1} 为第 $k+1$ 次运行的误差。

为了确定迭代次数,需对迭代学习控制进行仿真,图 10 为在阶跃信号下,不同迭代次数的仿真曲线。结果表明,当迭代次数为 5 时,系统效果最好。因此,选择迭代次数为 5 来进行后续仿真与实验。

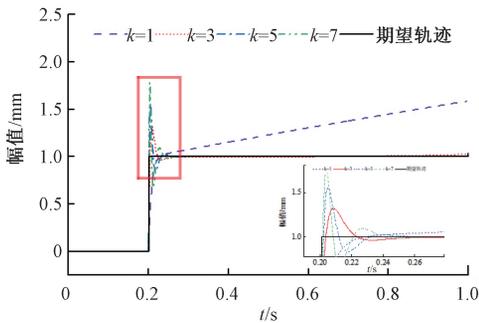


图 10 迭代控制阶跃响应曲线

Fig. 10 Iterative control step response curve

4 实验结果及其分析

根据实验要求,总测试时间为 8 min,但系统采样时间为 1 s,时间间隔较小,若仿真时间过长,模糊 PID 控制与迭代学习控制的控制效果无法清晰地仿真曲线中看出。因此,为了保证恒功率控制系统的仿真效果,选择仿真总时间为 20 s,从 0 s 开始,每隔 5 s 改变一次系统的期望功率,依次为 60、80、100、120 W,进行 MATLAB 仿真并观察系统功率的输出情况。仿真结果如图 11 所示,由仿真结果可以看出,两种控制方式均存在跟踪误差,且误差均在 5 W 左右,当给定的阶跃信号发生变化时,ILC 的响应时间要小于 0.2 s,模糊 PID 的响应时间约为 0.6 s。由此可以得出,对本系统而言,ILC 的控制效果要优于模糊 PID 的控制效果。图 12 为功率为 60W 时迭代学习控制

在不同迭代次数时的均方根误差曲线,可以看出,迭代次数在第 8 次之后有发散的趋势,这是由于踩踏速度变化所引起的误差积累。

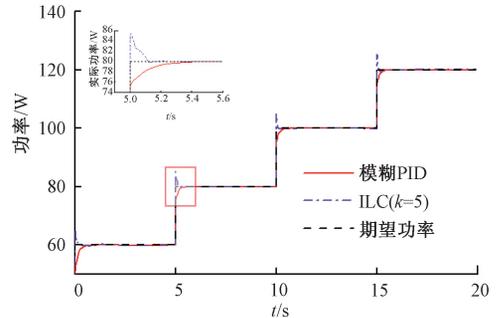


图 11 系统恒功率控制仿真

Fig. 11 System constant power control simulation

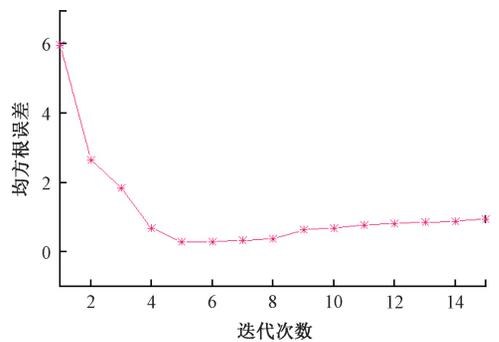


图 12 ILC 均方根误差曲线

Fig. 12 ILC root mean square error curve

为了验证新型磁阻发生装置在功率车恒功率中的控制效果,选择了 8 名测试对象进行了测试验证。测试对象根据最大运动负荷依次为 60、80、100、120 W 进行每级 2 min 共 8 min 的实验测试,在测试过程中,受试者的踩踏速度可以在 $60(\pm 10)$ r/min 的范围内变化,采样间隔为 1 s,分别记录在两种控制方式下输出功率的变动情况,并分析波动情况。

模糊 PID 控制方式下的恒功率测试结果如图 13 所示,误差如图 14 所示,迭代学习控制方式下的恒功率测试结果如图 15 所示,误差如图 16 所示。由图 13~16 可以得出,踩踏速度在 $60(\pm 10)$ r/min 的范围变化时,系统在模糊 PID 控制方式下,各级的实时功率与期望功率的最大偏差均在 ± 10 W 以内;在 ILC 的方式下,各级的实时功率波动均在期望功率的 ± 5 W 以内。结果表明,该系统的两种控制方式均能满足在一定的速度范围内功率车恒功率控制的要求。

表 5 为该系统在两种控制方式下 8 名测试对象在实验过程中的平均结果统计表。由表 5 可知,踩踏速度在 $60(\pm 10)$ r/min 范围内波动时,该系统在测试的过程中,

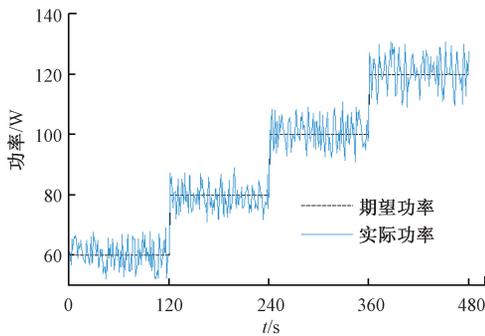


图 13 系统模糊 PID 恒功率控制测试

Fig. 13 System fuzzy PID constant power control test

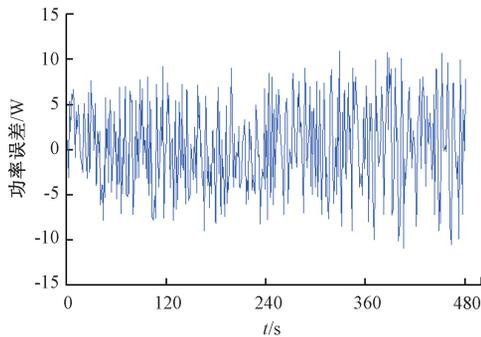


图 14 系统模糊 PID 恒功率控制误差

Fig. 14 System fuzzy PID constant power control error

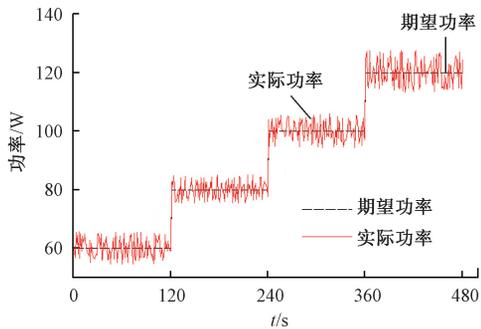


图 15 系统 ILC 恒功率控制测试

Fig. 15 System ILC constant power control test

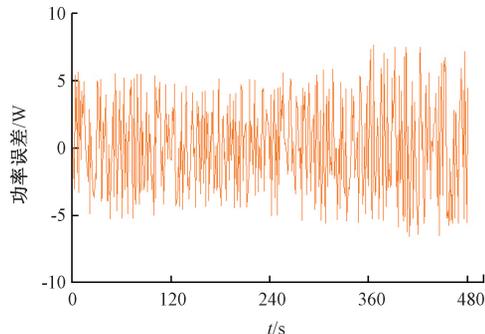


图 16 系统 ILC 恒功率控制误差

Fig. 16 System ILC constant power control error

前 2 min 的平均功率误差小于 2 W。其中,在 ILC 的控制方式下,平均误差小于 1 W,并且由方差(SD)大小可以得出,在 ILC 的控制方式下实时功率的波动情况要优于模糊 PID 控制。由于在进行功率车二级负荷实验与心肺耐力测试过程中,更注重的是在有限时间内平均运动负荷与期望运动负荷是否接近,因此,表 5 亦证明新型磁阻发生装置提高了功率车恒功率控制的性能。

表 5 恒功率测试平均结果统计表

Table 5 Statistics of average results of constant power test

功率/W	模糊 PID 控制	ILC
60	61.47±4.35	60.28±3.21
80	79.02±4.08	80.17±2.83
100	101.70±4.75	100.36±3.31
120	121.21±5.37	120.12±4.34

5 结 论

针对现有功率车无法维持恒功率的问题,设计了一种新型磁阻发生装置。根据永磁同步电机原理以及恒功率测试时目标功率的最大值确定确定了该装置的基本结构及其相关参数,该装置通过实时调节气隙径向长度实现阻力变化,提高了磁阻发生装置的使用寿命,使其具有效率高、响应速度快、结构简单、调阻稳定、连续等特点。最后将其应用于功率车中进行恒功率控制实验。结果表明,若踩踏速度在 60(±10) r/min 的范围内变化时,在模糊 PID 控制方式下,系统实时功率与期望功率的偏差在 ±10 W 以内,在 ILC 控制方式下,误差则在 ±5 W 以内,提高了恒功率控制结果的精度,误差结果可接受。验证了采用新型磁阻发生装置的功率在维持恒功率方面的先进性,可为心肺耐力测试结果提供参考依据。

参考文献

[1] RAEMZI S, SOPHIE L, NAGEL S, et al. 4 - s power cycling training increases maximal anaerobic power, peak oxygen consumption and total blood volume [J]. The FASEB Journal, 2021, 35.

[2] 张茹斌,占礼葵,彭伟,等.心肺功能评估训练系统的恒功率控制 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(4):1184-1190.

ZHANG R B, ZHAN L K, PENG W, et al. Constant power control of cardiopulmonary function assessment training system [J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2018, 48(4): 1184-1190.

[3] ERIN E D, YASUKI S, COURTENEY L B, et al. Predictive modeling of maximal oxygen uptake (VO_{2max}) improvement after aerobic training in male endurance

- athletes: 165 [J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2021, 53(8S Suppl 1): 50.
- [4] CLAUDIA P, GIUSEPPE A, ANTONIO C. Mechanisms involved in cardio protection induced by physical exercise[J]. *Antioxidants & Redox Signaling*, 2020, 32 (15): 1115-1134.
- [5] CHARES G A, JASON F, FAN Y, et al. Relationships between objectively measured physical activity, exercise capacity, and quality of life in older patients with obese heart failure and preserved ejection fraction[J]. *Journal of Cardiac Failure*, 2021, 27(6) : 635-641.
- [6] PAUL S COLTHILDE V, ZEINAB H, et al. A randomized trial of physical activity in children and adolescents with cancer[J]. *Cancers*, 2021, 13(1) : 121-121.
- [7] NICHOLAS H J, SCHEADLER C M. Validity of the wattbike 3-minute aerobic test: Measurement and estimation of $\dot{V}O_{2max}$ [J]. *Journal of strength and conditioning research*, 2019.
- [8] HENNING W, BRAD J S. Personalized, evidence-informed training plans and exercise prescriptions for performance, fitness and health [J]. *Sports Medicine (Auckland, N. Z.)*, 2021, 51(9): 1-9.
- [9] 温嘉斌, 郭晗, 荆超, 等. 电动车用永磁同步电机转子结构对弱磁调速性能分析[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2019, 24(6) : 73-78.
WEN J B, GUO H, JING CH, et al. Analysis of rotor structure of permanent magnet synchronous motor for electric vehicles on weak magnetic speed regulation performance [J]. *Journal of Harbin University of Technology*, 2019, 24(6) : 73-78.
- [10] 黄金霖, 张国政, 周克良. 新型永磁调磁式磁齿轮的设计与优化[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(7) : 187-195.
HUANG J L, ZHANG G ZH, ZHOU K L. Design and optimization of a new permanent magnet regulating magnetic gear [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(7) : 187-195.
- [11] 潘承莹, 祖莉. 不同负载工况下双螺母滚珠丝杠副动态传动效率的试验研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(1) : 99-107.
PAN CH Y, ZU L. Experimental study on the dynamic transmission efficiency of double-nut ball screw subsets under different load conditions [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(1) : 99-107.
- [12] 孙英, 武泽航, 张耀松, 等. 永磁体对磁致伸缩位移传感器波导丝扭转应变的影响分析[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(4) : 10-23.
SUN Y, WU Z H, SUN Y S, et al. Analysis of the effect of permanent magnets on the torsional strain of waveguide filaments of magnetostrictive displacement sensors [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(4) : 10-23.
- [13] 李源, 曹国豪, 马武福, 等. 风力发电机定子振动测试及响应分析[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(6) : 183-190.
LI Y, CAO G H, MA W F, et al. Wind turbine stator vibration test and response analysis [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition)*, 2021, 43(6) : 183-190.
- [14] 倪有源, 崔征山, 王群京. 转子有辅助槽的表贴式永磁电机解析法建模与优化[J]. *电机与控制学报*, 2021, 25(2) : 65-71.
NI Y Y, CUI ZH SH, WANG Q J. Analytic modeling and optimization of a surface-mounted permanent magnet motor with an auxiliary slot in the rotor [J]. *Journal of Electrical Machines and Control*, 2021, 25(2) : 65-71.
- [15] 杜恽, 邹春花, 朱孝勇, 等. 初级永磁型游标直线电机绕组连接及其电磁特性比较[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(3) : 130-138.
DU Z, ZOU CH H, ZHU X Y, et al. Comparison of primary permanent magnet type vernier linear motor winding connection and its electromagnetic characteristics [J]. *Journal of Electrical Engineering Technology*, 2017, 32(3) : 130-138.
- [16] 王慧霞, 郭润兰, 赵强, 等. 基于交叉耦合与迭代学习的伺服系统运动控制研究 [J]. *机电工程*, 2021, 38(4) : 440-446.
WANG H X, GUO R L, ZHAO Q, et al. Research on servo system motion control based on cross-coupling and iterative learning [J]. *Mechatronics Engineering*, 2021, 38(4) : 440-446.
- [17] 谭峰, 萧红, 张毅, 等. 基于统一框架的数控机床热误差建模方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(10) : 95-103.
TAN F, XIAO H, ZHANG Y, et al. A unified framework-based thermal error modeling approach for CNC machine tools [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(10) : 95-103.
- [18] 徐文山. 模糊 PID 控制器设计及 MATLAB 仿真[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2014, 31(4) : 91-94.
XU W SH. Fuzzy PID controller design and MATLAB simulation [J]. *Road Construction Machinery and Construction Mechanization*, 2014, 31(4) : 91-94.
- [19] ZHIGANG W, MENG H. Temperature control based on fuzzy logic Two-degree-of-freedom Smith Internal Model[J].

Instrumentation, 2020, 7(2): 1-8.

- [20] 汪鑫,许贤泽,徐逢秋. 磁悬浮球系统往复运动的迭代学习控制[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(4): 364-370.
- WANG X, XU X Z, XU F Q. Iterative learning control of reciprocating motion of magnetically levitated ball system[J]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2020, 53(4): 364-370.
- [21] 李辰龙,方勇. 基于神经网络的多智能体量化迭代学习控制[J]. 电子测量技术, 2020, 43(14): 39-44.
- LI CH L, FANG Y. Neural network-based quantized iterative learning control for multiple intelligences [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(14): 39-44.
- [22] 朱国昕,雷鸣凯,赵希梅. 永磁同步电机伺服系统自适应迭代学习控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2018, 40(1): 6-11.
- ZHU G X, LEI M K, ZHAO X M. Adaptive iterative learning control of permanent magnet synchronous motor servo system [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2018, 40(1): 6-11.

作者简介



刘威, 2016 年于吉林化工学院获得学士学位, 现为沈阳工业大学硕士研究生, 主要研究方向为体育装备与人因工程。

E-mail: 946425132@qq.com

Liu Wei received his B. Sc. degree from Jilin Institute of Chemical Technology in 2016.

Now he is a M. Sc. candidate in Shenyang University of Technology. His main research interests include sports equipment and human factors engineering.



徐方超(通信作者), 分别在 2001 年和 2004 年于中国农业大学获得学士学位和硕士学位, 2009 年于高知工科大学获得博士学位, 现为沈阳工业大学讲师, 主要研究方向为体育装备与人因工程。

E-mail: xufangchao@sut.edu.cn

Xu Fangchao (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from China Agricultural University in 2001 and 2004, Ph. D. degree from Kochi University of Technology, Japan, in 2009, respectively. Now he is a lecturer in Shenyang University of Technology. His main research interests include sports equipment and human factors engineering.