

真空管道！" # 磁浮系统中振动耗能法电磁制动分析

马家庆\$* 周大进\$ 赵立峰\$ 梁 纲\$ 张 勇\$ 赵 勇\$*

(西南交通大学超导与新能源研究开发中心(磁浮技术与磁浮列车教育部重点实验室) 成都 ' \$() \$;

%西南威尔士大学材料科学与工程学院 悉尼 %(\$*%)

Electromagnetic Braking of High Temperature Superconducting Maglev Train Traveling in Evacuated Tube Transport

+, -, / . 01 \$* , 2345 6 70 \$, 23 4 8901 \$, 8, 01 ; , 01 \$, 23 01 <401 \$, 23 4 <401 \$*

(Key Laboratory of Magnetic Levitation Technologies and Maglev Trans Ministry of Education of China ,
Superconductivity and New Energy R&D Center , Southwest Jiaotong University Chengdu , Sichuan ' \$() \$, China ;

% School of Materials Science and Engineering , University of New South Wales , Sydney %(\$*%) , Australia)

Abstract = 04: ?@A30/5 B CD > ?4E D@4FGH , O, 01040@A@J4D , @3 313@JEG@G C5
E G40D5@01 (! " #) J, T: >@G. OGG > ?01 . O: > , A5@D@EF: @G@E4@ (K " ") &O: ?A@4J, 10@AFG|
HO1 @3 . @GA@40F: @B: O@3 DDA@DA47C, @G@?? D, @@3 F4@4J 4@3 J, T: >@G. O, OD@3 J, 1|
O@A95M, 04034J 41: O 45@ND@G5@D, F4: @3 E GJ, O @15D | B NA3 01: C@3 ?401 @DQ?HO@A
: OGIN4@3 @G > ?01 @G. O @4@G@G: @G? > FG@40: OGIN, B3A3.C: 99A@ > ?N: M3 5@D. OD JE D > |
FG@40C& 3 DJE O1 A4 99A: @DE ODC40@3 O5JF: G4@P4C DA47C& 3 . JE, A@4@3 @4@?GOC@A
4@3 A47C, OD: M@G?GCC@4E40@3 : OGIN?4C4P, ! " # J, T: >@G. OGG > ?01 . OK " " B CJ4D? D
, ODA7A5, @D& 3 O BND > ?4E D: ?A@4J, 10@AFGH B C@@D. OK " " : ME GJ: @? E?, @4GJ , @
#45@B @-, 4" 401 OO > @N B @3 C@G A@4J NGC5@C&P: C511: @@3 @@3 O B: ?A@4J, 10@AFGH
J, NF: 4PJ5A3@A30441A?. @G@G&

Keywords K " " , +, T: > , 6 JE D > FG@40, KOGIN?4C, @GHO1

摘要 为了实现高温超导(! " #)磁浮车的无接触的制动,本文提出一种基于振动耗能的电磁制动方法。在永磁轨道与磁浮车的悬浮气隙中增加一层固定在车体上的电磁线圈,以线圈通电的方式改变磁场分布而得到在轨道上方的磁场分布不均衡的效果。磁浮车体的运动方向上的动能将转化到与其运行垂直方向上的阻尼振动耗掉而使车体减速,其阻尼系数通过闭合线圈的方式改变。以真空管道中运行的! " # 磁悬浮车为例,用理论分析得出所加电磁线圈的自阻值与外接电阻的阻值之和与耗能的关系,最后在西南交通大学真空管道! " # 磁浮系统实验平台上实验验证了该方法的合理性与有效性,为将来的真空管道磁浮交通系统的设计提供参考。

关键词 真空管道运输 磁悬浮列车 阻尼振动 能耗 制动

中图分类号: " @3 文献标识码: = doi: 10. 13922/j. cnki. cjevst. 2015. 02. 02

运行的轮轨列车在相接触的轮轨之间相对运动时会产生阻碍相对运动的摩擦力,制动就是有效地利用这种摩擦力而将车体运动的动能转化为热能(或电能)损耗。这种制动方法在磁悬浮系统中不再适用,因为车体悬浮在轨道上而与轨道没有直接接触^[31]。真空管道磁悬浮交通是利用了当空气达到一定的稀薄程度时空气与车体的摩擦大大减小的原理,其运行速度可以得到明显提升,很可能是将来最

收稿日期: %(\$S(S)\$
基金项目: 国家磁约束核聚变能研究专项资助项目(%\$ \$ \$ @3@(\$-\$); @3@(((\$); 国际合作项目(%\$ \$ 6T=\$*(); 国家自然科学基金资助项目(*\$@3\$* *\$R\$)U); 中央高校基本科研业务费资助项目(#P" @3@2')\$%U(\$ W(\$S); 四川省科技计划资助项目(%\$ \$ <(\$)\$%\$ \$ <(\$)
* 联系人: " : ?(\$) W(\$) U%: KIJ, . ?) *R@RX %@// @4J

有前途的一种长距离交通运输方式^[15]。在真空管道磁悬浮系统中,将真空的空气阻力小的特点与无轮轨摩擦的特点结在一起^[16]。在优良的真空管道磁浮系统中,车体获得初速度后只需补偿很小的损耗动能就能维持这个速度。

对真空管道磁浮系统,近几年来国内有一定程度的相关研究,国外只是提出一些概念^[17],实际的系统及相关著述并不多见。文献[18]研究了真空管道内车辆运行时速度、压强、阻塞比等变化时的空气动力学问题,文献[19]主要研究了真空系统中列车的外形对车体运行时的阻力影响,文献[20]对真空系统中车体碰撞、管道失压等因素进行分析,阐述了真空管道运输(长距离)安全问题,文献[21]从救援应急的角度讨论了用气体增压模式对运行的车体进行拦截。而对于系统的制动,文献[22]分析了涡流制动并设计了用制动损耗板来实现应急制动的抽象方案。以上这些文献中有关于系统内阻力的研究,虽未提及制动,但是可以将此阻力用来制动,而这些阻力因其产生的原因而难以控制。本文讨论在真空管道高温超导(! " #)磁浮系统中运行的车体利用振动耗能的原理实现制动^[23]。从物理模型出发,分析由于永磁轨道的磁分布不平衡引起的振动能耗,建立简单的数学模型,通过改变固定在车体底部线圈的开闭来调节阻尼系数。最后在西南交通大学超导与新能源研究开发中心的真空管道! " # 磁悬浮实验系统(图 1)上实验验证了此方法的合理性与实用性。

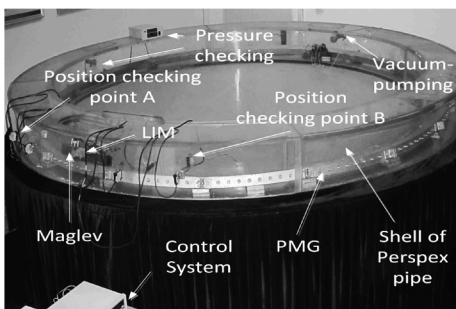


图 1 真空管道! " # 磁悬浮系统
T.188 ! " # K" " 005A00C

1 真空管道中 HTS 磁浮系统模型

! " # 磁悬浮技术是磁浮技术中的一种,因其独特的优点而受到越来越多重视,! " # 块在永磁轨道上场冷后因为磁通钉扎作用而悬浮在永磁轨道正上方^[24],如图 2 所示。

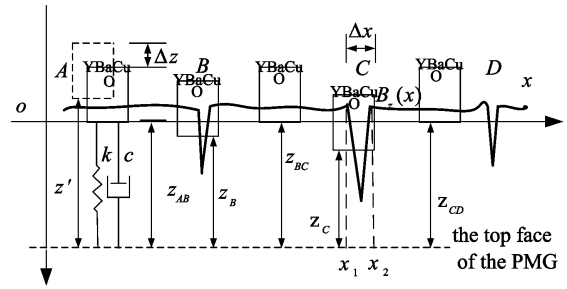


图 2 <QV5Z 超导块在轨道上各点的平衡位置
T.188 " 3 : /5?FG5J E400408 F5H <QVZ E G, I
000J, 10@ F4> +];

如图 2 所示,质量为 m 的高温超导体磁浮车在起点 A 处以场冷高度 $(z_{AB} + \Delta z_c)$ 悬浮,当去掉保持场冷高度所用的物体时,车体由于自重下降,变化为 Δz_c 时,产生的反作用力恰好与车体自重相等而保持平衡。当轨道上沿轨道延伸方向上的磁分布无变化时,车体将在轨道上方高为 z_{AB} 的高度上悬浮,虽然有 z 方向上的运行速度,但是不会影响其悬浮高度。根据相关理论研究^[25],悬浮在永磁轨道上的! " # 体受力悬浮可近似为有阻尼的弹簧系统,弹簧系统的数学模型为^[26]

$$m\ddot{z} + c(\dot{z}) + k(z)z = F \quad (1)$$

式中, m 为超导块质量, c 为阻尼系数, k 为弹性系数,因为系统的非线性,这两个系数都为 z 的函数。 F 为超导块所受的 z 方向上的外力。运行的车体所受外力是由于磁场的变化而引起的变化合力。当磁场变弱(如 B 点)时,悬浮力降低,悬浮高度下降,但是它会自动地在一定时间内寻求一个新的悬浮高度,其质量没有变化,所以新高度上产生的悬浮力还是没有变化,但是它的悬浮高度变化是明显的。在运行的过程中,如果遇到磁场分布不平衡,悬浮高度就会发生变化,将悬浮力模拟成一个空气弹簧支撑时,就会在悬浮力方向上产生振动。式(1)知,悬浮高度沿运行方向 x 方向是变化的,这样简化后,就将轨道上磁场变化与悬浮高度的关系省去而是直接研究悬浮高度变化的振动耗能情况。

2 振动耗能分析

实验系统中的磁浮车是由 U 块相同的 <QV5Z 超导磁体构成的! " # 磁浮车,可看作是车体由 U 个并连的等效弹簧承重,得 $k(z_c) = Uk_s$ 。而轨道的表面磁场约 $0.8T$ 。当高度相同时衰减规律相同,整个车体重 $1000kg$,每块 <QV5Z 承重 $(8000 \times H)$,线圈重 $(8000 \times H)$ 。

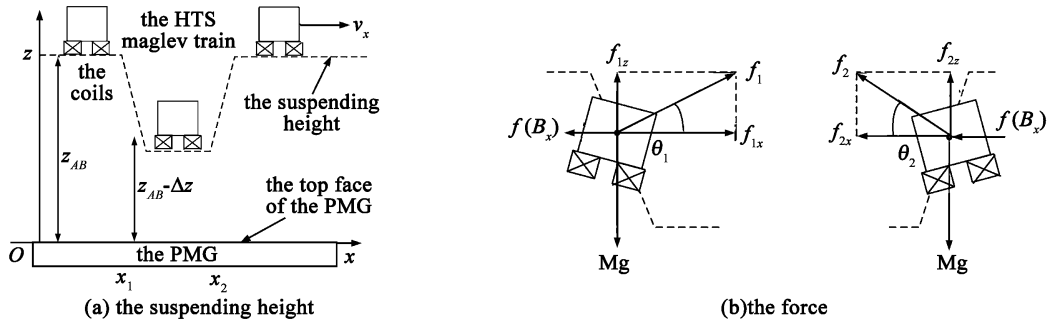
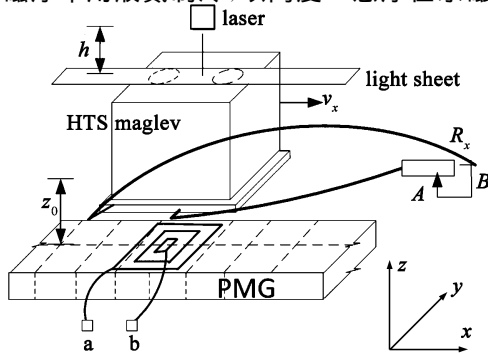


图) 永磁轨磁场分布不平衡引起悬浮高度变化及受力

T.18 " 3 . 095 OA 49@8 Q40509G?NDC@F5@DJ, 10@A9.7D, F4>] +; 40@8 33E 0D01 3.13@, 0@8 94A

图) () 所示为悬浮高度的变化情况,其高度变化是由于磁场的分布不平衡引起的,这里直接考虑其引起悬浮高度变化的效果。车体以悬浮高度 z_{AB} 在位置 $x_{\%}$ 处跌落 Δz , 然后在 $x_{\%}$ 处恢复悬浮高度。图) (F) 是悬浮高度变化时的受力分析,在 $x_{\%}$ 点时磁场强度下降,所以悬浮力下降, z 方向上的合力为竖直向下,产生竖直方向上的振动,调速悬浮高度和重力平衡; x 方向上的分力产生 x 方向上的加速度。在 $x_{\%}$ 点时磁场强度上升,所以悬浮力上升, z 方向上的合力为竖直向上,产生竖直方向上的振动,调速悬浮高度和重力平衡; x 方向上的分力产生 x 负方向上的加速度。由于车体是一个阻尼振动,所以在 $x_{\%}$ 及 $x_{\%}$ 两点的振动能量会损耗掉(图S 中耗能线圈及外接电阻发热)。根据楞次定理,磁场变化时存在阻碍其变化的反力,其在 $x_{\%}$, $x_{\%}$ 两点的 x 方向上的分力 $f(B_x)$ 方向都是沿负方向,其大小与磁场强度的变化率有关,变化率越大,此力越大。它与运动方向相反,所以使 x 方向的动能逐渐衰减,速度逐渐减小,实现制动效果。

图S 所示为本文提出的电磁制动方法示意图, ! " # 磁浮车用液氮制冷,以高度 z 悬浮在永磁轨道



图S 实验系统图示

T.18S #A3 J, @AD, 1G J 49@8 : ME GJ: @?C@E

上,由于钉扎力作用,车体只在 x 方向上运动。如果永磁轨的沿 x 方向的磁场分布无变化,车体在运动过程中悬浮高度无变化。实验系统中有两个线圈,一个为模拟磁场变化线圈,固定在永磁轨表面的某个位置,用加电的方式来模拟沿 x 方向的磁场变化。另一个为耗能线圈固定在车体的底部,不加电,外接一个阻值可变化的电阻。车顶粘一轻质薄板用激光位移传感器检测悬浮高度 h ,用示波器测量车体上的线圈产生的电动势 V_R ,根据这两参数的变化来分析此方法的制动情况。式(5)中的 $Z(x)$ 项是由于磁场的变化引起的悬浮高度的改变,这个改变是产生后继振动的原因,这里只分析振动产生后的过程,将此项令为 ()。小振幅振动,将非线性的参数近似为线性参数,当悬浮高度 z_c 时式(5)为

$$m\ddot{Z} + c(z_c)\dot{Z} + k(z_c)Z = F \quad (6)$$

式中, $Z = z - z_c$, 令 $\beta = c(z_c)/mg$, $\omega_c = \sqrt{k/m}$, 由这两个参数确定式(6)的解有欠阻尼、临界阻尼与过阻尼解三种,其欠阻尼解为

$$z = A e^{-\beta \omega_c t} \sin(\omega_c t + \varphi) + z_c \quad (7)$$

式中, $\omega_c = \sqrt{\omega_c^2 - \beta^2}$, 振幅 A 与辐角 φ 由初始条件确定。由图S 的实验示意图及以上分析知,当车体在 x 方向上走过有磁场变化的永磁轨段()后,便在 z 轴上有如式(7)所表达的振动。) +; 上方的磁场强度是随悬浮高度而变化的。于是固定在车底的线圈所在面的磁通也是变化的。设) +; 上方的磁场强度变化为

$$B_z = f_{\%}(z) \quad (8)$$

这个函数是一个非线性函数,式(8)两个参数的非线性也是由这个分布函数引起的,悬浮高度小范围变化,采用在悬浮高度附近局部线性化的方法,将式(8)简化为

$$B_z = K(z - z_c) + B_c \quad (*)$$

根据麦克斯韦第二方程,某匝所围面积为 S_i 的线圈产生的电动势为^[9]

$$\epsilon_i = S_i \frac{\partial B_z}{\partial t} \quad (1)$$

将式(1)代入式(2)代入式(1),并且 K, z_c, B_c 为关于时间的常数,得

$$\epsilon_i = S_i K A \sqrt{\beta^2 + k^2} e^{-\beta z} \sin(\omega t + \varphi_i) \quad (2)$$

其中, $\varphi_i = \varphi_c + \arctan(\beta/k)$ 为第 i 匝线圈产生电动势的初始相位角。由前面的假设知穿过第任意匝线圈的磁通量变化规律相同,因此简化认为所有线圈产生感应电动势的初始相位角相等。于是,固定于车底的 n 匝线圈产生的总电动势为

$$\epsilon = \left(\sum_{i=1}^n S_i \right) K A \sqrt{\beta^2 + k^2} e^{-\beta z} \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

这 n 匝线圈的电感 L 及自阻 r 可以根据其绕制规律计算,本文中用仪器测量而得。当外接电阻 R 时,其中的电流 $i(t)$ 为

$$i(t) = I_m e^{-\beta z} \sin(\omega t + \theta) \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} I_m = \left(\sum_{i=1}^n S_i \right) K A \left[\frac{\sqrt{\beta^2 + k^2}}{\sqrt{(R+r)^2 + \omega^2 L^2}} \right] \\ \theta = \varphi - \arctan \frac{\omega L}{R+r} \end{cases} \quad (5)$$

将从本次振动开始到下一次磁分布不平衡而产生振动之前这段时间视作一次振动过程,这个过程电阻上以热能形式耗掉的能量为

$$\begin{aligned} Q = (R+r) \int_{t_c}^{t_c'} i^2(t) dt \\ = (R+r) I_m^2 \int_{t_c}^{t_c'} \sin^2(\omega t + \theta) dt \\ = \frac{R+r}{\omega} \int_{\omega t_c}^{\omega t_c'} \sin^2(\omega t + \theta) d(\omega t) \\ = \frac{R+r}{\omega} \left[\frac{\omega t}{2} - \frac{\sin(2\omega t + 2\theta)}{4\omega} \right]_{\omega t_c}^{\omega t_c'} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\psi = \arctan(\omega L / (R+r))$ 。以上结论是在欠阻尼振动时的结果。由于在真空系统中,气压不会比大气压高,绕制线圈的内阻也不可能做得尽可能小,所以其阻尼系数远小于弹性系数,于是对振动的过阻尼与临界阻尼两种解不作讨论。

3 实验结果分析

本系统各参数如下所列: $R_x = 200 \Omega, L = 0.1 \text{ mH}, n = 10$ (匝,绕线最小圈半径 20 cm ,最大半

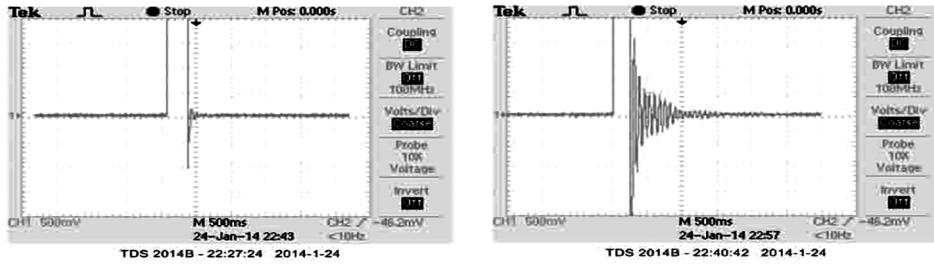
径 20 cm ,铜线直径 0.5 mm ,约绕 R 层,每层约 R 匝。] +; 中央表面磁感应度为:磁浮车场冷高度 10 cm (10 cm 处为) 0.1 T ,稳定悬浮高度 10 cm (10 cm 处为) 0.1 T 。振动是在 10 cm 处。高度为 10 cm , 10 cm , 10 cm 处的磁感应强度测量值分别为 0.1 T , 0.1 T , 0.1 T 。所以式(2)中 K 约为 0.1 T/m 。

实验设备所图5所示,] +; 道上固定的线圈模拟磁场分布的变化,这里是模拟减弱来得到悬浮高度的变化(调整励磁线圈中的电流使悬浮高度下降)]])。

当小车走过有线圈的位置时,遇到磁场减弱,悬浮高度下降,离开时,磁场强度恢复,悬浮高度上升,下降及上升的过程都会有振动产生。图*所示为当高度恢复时,固定在车底的线圈产生的感应电动势在外电阻 R_x 上的分压。图*(a),(b)分别为 $R_x = 100 \Omega, 1 \text{ k}\Omega, \infty$ 时,其上的电压降按时间的变化规律。可知,当外接阻值越大时,衰减时间越长,所以外接阻值越小时,转化到振动方向上的机械能损耗的越快。当 R_x 为 100Ω 时,效果最优。如果能将线圈的内阻做到很低,就可能进入临界阻尼及过阻尼状态(可以考虑用超导线材绕线圈外接可控阻值的电阻,但本文不讨论)。本文只讨论用常导铜线绕制的线圈。由图*(c)知,当外接无穷大电阻(即线圈不闭合)时,虽然 AB 端存在感应电动势,但是电流为 0 ,所以能量不是由此线圈损耗,而是系统中的其它因素,如空气摩擦、! "# 材料的交流损耗等所耗掉。从图*可以分析得出,用此种方法可以改变系统的阻尼系数而改变振动能量的损耗速度,也能达到减振的效果。

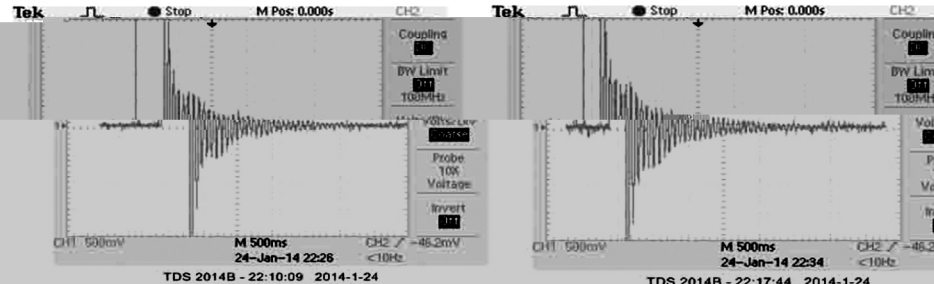
图5中的激光位移传感器测量悬浮的高度。上面5种情况的位移如图'所示。四种情况的稳定高度是相同的(为了便于观察分别将图像在纵轴上作了适当平移)。

图'中的位移图可观测出过程中的两个频率,一个是模拟空气弹簧的衰减振动,另一个是车体本身的固有频率,当然固有频率也有耗能的效果,但是其变化率较小,所以不讨论。与图*相对应,当振动发生后,耗能的过程,电流逐渐减小,振幅也减小,能量在逐步损耗。每当车体遇到磁场衰减处时,悬浮高度变化,车体都按相同的方式(初始值、 k, c 都相同)振动。如图)所示,磁场在 x_0 处衰减, x_0 处恢



(a) when $R_x = 2 \Omega$

(b) when $R_x = 50 \Omega$



(c) when $R_x = 1 \text{ k}\Omega$

(d) when $R_x = \infty$

图* R_x 上的电压降

T.1& \ 4@1: ,AGCC R_x .

复,在 x_s 处由重力势能转化为振动能量耗散掉(设
 两点间距离在一个合适值),在 x_0 处由动能转化为
 车体的重力势能,所以这是一个动能减少的过程。
 单簧系统的能耗散是由阻尼系数引成的,这里的阻
 尼系数有空气摩擦(真空管道中运行时其压强低于
 环境大气压,但不可能是绝对的真空)、电磁线圈、超
 导材料、金属容器等因素贡献。

虽然空气摩擦不是主要原因,但是当车体高速
 运行时,仍然是影响系统的一个不可忽略的因素。
 本实验的数据为在如图5所示的真空实验系统中
 所测得的。实验系统轨道长4.1m,采用1" # 体悬浮方
 式。可以将管内气压抽到最低约0.01Pa。在直线

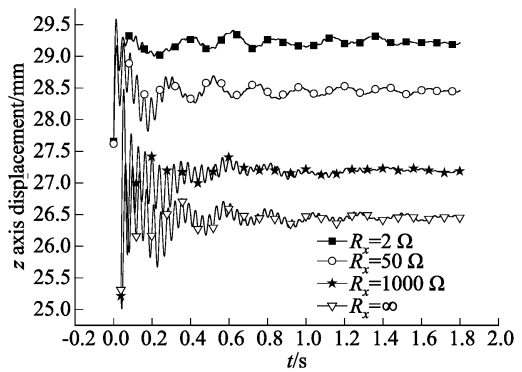
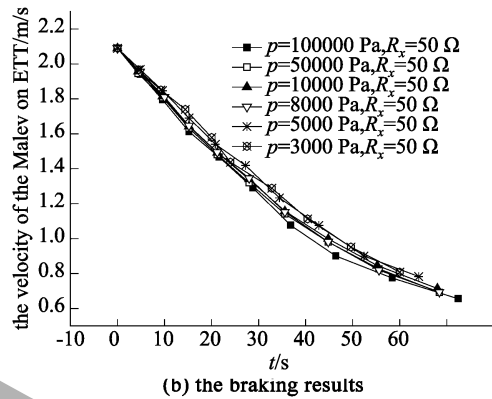
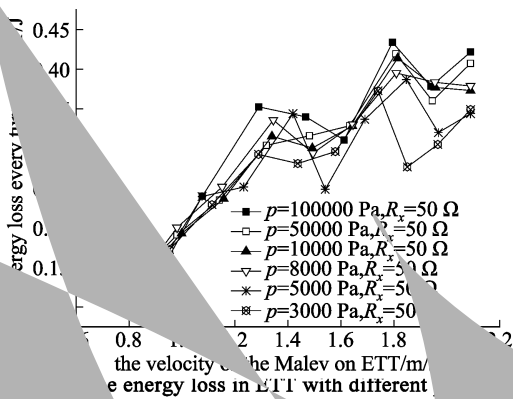


图7 不同 R_x 取值时的 z 轴上振动位移

T.1& 6 E O O A 4 Z I D E , A J : O O R x.



(b) the braking results

真空管... 的实验结果

T.1& ...

...GJ

驱动电机的驱动下得到合适的初速度后,让其自由运行,根据每周过某一固定长度的平均速度来观察其制动效果。

等效串接电阻 R_x (Ω, 实验时, 给定) +; 上悬浮的车体的初速度为 %J /C, 然后让其自由运行, 每圈经过测速传感器 = 的两个检测头时(图 \$ 中), 得到其时间差, 从而算出本次经过 = 段时的平均速度, 根据车体质算出每圈的能耗。

由图 R() 知当速度越大时, 每周振动耗能越大, 也即是式(R)中磁通的变化率越大, 电阻中单位时间的耗能越多; 当速度相同时, 管道内气压值越小, 运行每圈的耗能越小, 因为空气越稀薄, 空气摩擦越小, 这部分摩擦耗能越少, 对整个弹簧系统的阻尼系数贡献越小。实际工程应该中管道内的气压值不可能做到尽可能小。具体数值由实际各因素确定, 当真管道这个参数确定后, 其驱动及制动的影响要从其它因素着手。图 R(F) 为制动效果, 可看出气压值对耗能贡献较少, 大部分为车底固定的电磁线圈与其它因素贡献的阻尼系数所损耗。从图* 的分析结果知道, 加上电磁线圈后, 振动能量耗散变快。图 R 为了说明不同真空度时的能耗情况, 其中实验结果都在外接电阻使线圈闭合的情况下所得。

以上分析及实验结果在系统中的车体低速运行条件下所得, 当真空管道高速运行时要考虑以下的问题: 第一个是, 每一次发生振动后, 振幅还没有衰减到零时, 下一个振动就出现, 所以每次振动能只能是部分耗掉。第二个问题是, 当车体走过图) 所示的 x_s, x_0 点时, 由于线圈闭合, 也会产生感应电动势, 在低速时, 变化率小, 所以文中忽略了这种情况。

4 结果与结论

由前面分析及实验数据, 得出以下结论: ①文中制动方法需要有与运行垂直方向上的振动以及耗能线圈两个基本条件。所以真空管道! "# 磁悬浮系统中的] +; 上表面磁场分布均匀时又忽略空气摩擦力时, 运行的车体速度无衰减, 需要加线圈以得到磁轨表面磁场变化的效果。②以振动耗能方法对真管道中运行的! "# 磁浮车制动时, 其效果与磁场强度在悬浮高度的变化率有关, 当这个变化率越大时, 制动效果越明显。③文中的耗能振动耗能法适合系统中的车体低速运行时的状态, 实验验证了可行性与合理性, 但是在高速运行时需加以修正。④线圈振动耗能法也有减振效果。

参 考 文 献

[\$] +. .CC-, +.??G8+, NGP- & 3 ! .13#E: D+, ?> "G0E4@40#N@J "G0CGED[-]&KKK "G0CA @40C40 +, 10@A.\$XU.%S(%):UUI U\$S

[%] 8: ! P, ' .J ' V: 8: - &[: >: B 4P +, ?> "G.O ": A30P41: C[-]&KKK "G0CA@40C 40 +, 10@AC. %(' .S% (R) :\$SRI \$S%\$

[)] 沈志云 & 高速磁浮列车对轨道的动力作用及其与轮轨高速铁路的比较[-]& 交通运输工程学报, %(\$, (\$) :\$ I ,

[S] 沈志云 & 关于我国发展真空管道高速交通的思考[-]& 西南交通大学学报, %(* .S(%) :\$) I \$) R

[*] [, 135@3 O#, ' .J ! 6, # @415A3 " &=: G0ND J.AC 4P! .13#E: D [, ?B N "G.O [-]&G4GGC.O =: G4 CE, A #A: 0AC%(%)U(') :S XI *\$S

[[] V. < ; , V3 O## &ND J.AV3 GA@G@AC4P +, 10@ .A?N8 >@D\ : 3A? #N@JC[-]&EE?: D +: AF, O .AC[: >: EC.\$XR,* ((\$\$) ' SRI ' R

[R] 6 QP Z@G-VN@? [. > GT?, &> A5@D" 5F: "G0E E4@40[-]&00@D#@@C.*X(*S%.\$XXI (XI \$S

[U] 周 晓, 张殿业, 张耀平 & 真空管道中阻塞比对列车空气阻力影响的数值研究[-]& 真空科学与技术学报, %%(U.%J(\$%) :*) *I *) U

[X] 23 O1 < , 4E O1 &5J: GA? # J 5?, @40, 0D =O?NOC4P =: G0ND J.A 6G1 4D, #5FC0A "G.O.O K> A5@D @5F: "G0E4@40[-]&45G? 4P +4D@ "G0E4@ @40%\$%\$ (\$) :SSI *U

[\$] +, -, /, O1, 2345 6 7O1, 23 4 89O1 : @, ?& 3 =E EG4A3@4V, 7A5?, @ @B =: G0ND J.A 6G1 4P +, ?> "G.O.O @B K> A5@D" 5F: [-]&45GN4P +4D@ "G0E4@@40%(\$ %\$)) :%(1 %U

[\$\$] V3 OW5N4O1, 23 4 89O1, +, -, /, O1 @, ?&=: G0N O J.A # J 5?, @40 4P K> A5@D" 5F: +, ?> "G.O.C B@B 699G@ #@G, J?OD 6C10C[-]&45G? 4P +4D@ "G0E4@@40%\$%\$ (%) :\$\$* I \$%

[%\$] 张耀平, 于晓东 & 真空管道运输安全问题成因分析 [-]& 交通运输工程与信息学报, %%(' .S)) :*RI ')

[\$] 陈绪勇, 赵立峰, 马家庆, 等 & 真空管道磁浮列车救援动力学仿真分析[-]& 真空科学与技术学报, %(\$, %)) (\$\$)

[\$S] 于晓东 & 真空管道运输系统危险因素辨识及评价 [6]& 成都: 西南交通大学, %%(')

[\$*] G0O@K ! &TGA@40.O 8 >@D #5E G405A@G [-]&EE?] 3NC8@XU,* (\$) :\$**SI \$**

[\$] 马家庆, 周大进, 赵立峰, 等 & 真空管道中高温超导磁悬浮车运行时的振动能耗特性[-]& 真空科学与技术学报, %(\$S, S%) :\$\$XI \$S%

[\$R] 23 O1 -, 6 O1 2 ; , P, O1 8 8: : @, ?&@F?@N4P@B

+, 1? > \: 3A? +4D? 0001 05H!. 13 "A #5E G
 A0D5A@C, @84B #E: D[-] &KKK "G0C@A@4C 4D
 =EE?: D#5E G40D5A@>@N%(R:\$R(%):%\$() I %\$(
 [SU] =?C 3G! L15A3 +, K, @8J, = [Q4D, &40V40
 @A@#5E 0C4D, 0D] GE5C4D": A30P41N[-] &: 3I
 A? #N@J 6NDJ, .: C.\$U) .:\$%)): %*XI %UX
 [SX] 张亚莉, 赵 勇, 宋宏海 & 强钉扎高温超导体与永磁体
 系统的悬浮力数值模型[-] & 低温物理学报, %((' :%U
 (\$) : I \$%
 [%] V. < ; , V3O# #&400P 4P +, 1? > #5E 0C4D
 #N@JC[-] &450? 4P \.FG@4D, 0DA400P.\$XX ,
 (%): SXI)' U
 [%\$] 6 0 1 2; , 23 0 1 - , #40 1 ! ! : , @, ? & 8 G: \.FG@4D 4P
 @8 !. 13": JEG@8G #5E G40D5A@0 1 +, 1? > \: 3I

A? +4D?[-] &KKK "G0C@A@4C 4D =EE?: D#5E G
 A0D5A@>@N%(R:\$R(%):%\$R\$ I %\$R\$
 [%] =@D4] ; , -43D [V&V 84CC.O" NE ILL #5E G
 A0D5A@C.O], G?? +, 10@A T.: ?C[-] & 3CA?
 [: >: B.\$XU* , Q%(*): %*(XI %*S
 [%] 闻帮椿, 刘树英, 陈照波, 等 & 机械振动理论及应用
 [+] & 北京: 高等教育出版社, %(X:\$R I **
 [%\$] " 4C33H4 #51 5G , +, C N B H " , C3G4 , <4C3@H O I
 J, @5: @, ? & +: A3 0A? #@F?@N4P, !. 13 "A #5E G
 A0D5A@0 8 > @4D #N@J [-] &KKK "G0C@A@4C
 4D =EE?: D#5E G40D5A@>@N:\$XR.R(%): U I) UX
 [%*] 谢处方, 饶克谨 & 电磁场与电磁波 [+] & 北京: 高等教
 育出版社, %((' :R I R\$