



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104477048 A

(43) 申请公布日 2015. 04. 01

(21) 申请号 201410708491. 5

(22) 申请日 2014. 11. 28

(71) 申请人 中国人民解放军国防科学技术大学  
地址 410073 湖南省长沙市砚瓦池正街 47  
号中国人民解放军国防科学技术大学  
机电工程与自动化学院

(72) 发明人 李杰 李金辉 周丹峰 张锟  
崔鹏 余佩倡 王连春

(74) 专利代理机构 湖南兆弘专利事务所 43008  
代理人 赵洪 谭武艺

(51) Int. Cl.  
B60L 13/04(2006. 01)  
B60L 13/06(2006. 01)

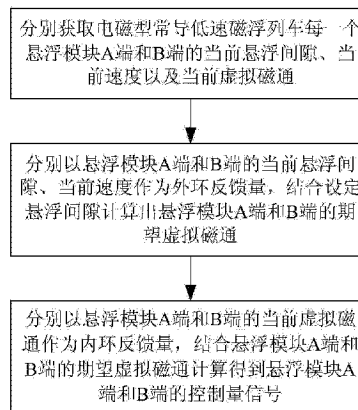
权利要求书3页 说明书11页 附图4页

(54) 发明名称

一种电磁型常导低速磁浮列车的悬浮控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种电磁型常导低速磁浮列车的悬浮控制方法,步骤包括:分别获取每一个悬浮模块A端和B端的当前悬浮间隙、当前速度以及当前虚拟磁通;分别以悬浮模块A端和B端的当前悬浮间隙、当前速度作为外环反馈量,结合设定悬浮间隙计算出悬浮模块A端和B端的期望虚拟磁通;分别以悬浮模块A端和B端的当前虚拟磁通作为内环反馈量,结合悬浮模块A端和B端的期望虚拟磁通计算得到悬浮模块A端和B端的控制量信号,实现悬浮模块A端和B端的稳定悬浮。本发明能够避开悬浮力、悬浮电流、悬浮间隙之间的非线性耦合关系,克服基于电流内环控制方法的固有缺陷,提高悬浮系统的跟踪性能和鲁棒性能,无需硬件传感器,实施成本低、可靠性高。



1. 一种电磁型常导低速磁浮列车的悬浮控制方法,其特征在于步骤包括:

1) 分别获取电磁型常导低速磁浮列车每一个悬浮模块 A 端和 B 端的当前悬浮间隙、当前速度以及当前虚拟磁通;

2) 分别以悬浮模块 A 端和 B 端的当前悬浮间隙、当前速度作为外环反馈量,结合设定悬浮间隙计算出悬浮模块 A 端和 B 端的期望虚拟磁通;分别以悬浮模块 A 端和 B 端的当前虚拟磁通作为内环反馈量,结合悬浮模块 A 端和 B 端的期望虚拟磁通计算得到悬浮模块 A 端和 B 端的控制量信号,通过所述悬浮模块 A 端和 B 端的控制量信号分别实现悬浮模块 A 端和 B 端的稳定悬浮。

2. 根据权利要求 1 所述的电磁型常导低速磁浮列车的悬浮控制方法,其特征在于,所述步骤 1) 的步骤包括:

1.1) 查询电磁型常导低速磁浮列车当前的悬浮/降落指令状态,如果当前的悬浮/降落指令状态为悬浮指令,则跳转执行步骤 1.2);否则跳转执行步骤 1.6);

1.2) 分别获取悬浮模块 A 端和 B 端的悬浮传感器组输出的悬浮间隙传感器信号、加速度传感器信号、悬浮电流传感器信号;

1.3) 分别将悬浮模块 A 端和 B 端的悬浮传感器组输出的悬浮间隙传感器信号、加速度传感器信号、悬浮电流传感器信号变换为悬浮模块 A 端和 B 端的悬浮间隙值、运动速度值、悬浮电流值;

1.4) 分别根据上一个周期悬浮模块 A 端和 B 端的控制量信号分别估计当前周期应当施加在悬浮模块 A 端和 B 端的控制电压;

1.5) 分别利用低通滤波器对悬浮模块 A 端和 B 端的控制电压进行滤波得到悬浮模块 A 端和 B 端的平均控制电压;

1.6) 分别利用低通滤波器对悬浮模块 A 端和 B 端的悬浮电流值进行滤波,得到流经悬浮模块 A 端和 B 端的平均悬浮电流;

1.7) 分别根据悬浮模块 A 端和 B 端的平均控制电压、悬浮模块 A 端和 B 端的平均悬浮电流,计算出悬浮模块 A 端和 B 端的直流电阻;

1.8) 分别根据悬浮模块 A 端和 B 端的控制电压、悬浮电流、直流电阻计算悬浮模块 A 端和悬浮模块 B 端的当前虚拟磁通。

3. 根据权利要求 2 所述的电磁型常导低速磁浮列车的悬浮控制方法,其特征在于:所述步骤 1.3) 具体是指根据式(1)将悬浮模块 A 端和 B 端的悬浮传感器组输出的悬浮间隙传感器信号、加速度传感器信号、悬浮电流传感器信号变换为悬浮模块 A 端和 B 端的悬浮间隙值、运动速度值、悬浮电流值;

$$\begin{cases} \text{Gap}_1 = -0.000048828125D_1 + 0.009 \\ \text{Gap}_2 = -0.000048828125D_2 + 0.009 \\ v_1 = 0.00006591796875V_1 \\ v_2 = 0.00006591796875V_2 \\ i_1 = 0.048828125I_1 \\ i_2 = 0.048828125I_2 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $D_1$ 表示悬浮模块 A 端的悬浮传感器组输出的悬浮间隙传感器信号, $D_2$ 表示

悬浮模块 B 端的悬浮传感器组输出的悬浮间隙传感器信号,  $Gap_1$  表示悬浮模块 A 端的悬浮间隙值,  $Gap_2$  表示悬浮模块 B 端的悬浮间隙值;  $v_1$  表示悬浮模块 A 端的运动速度值,  $v_2$  表示悬浮模块 B 端的运动速度值,  $V_1$  表示悬浮模块 A 端的悬浮传感器组输出的加速度传感器信号,  $V_2$  表示悬浮模块 B 端的悬浮传感器组输出的加速度传感器信号;  $i_1$  表示悬浮模块 A 端的悬浮电流值,  $i_2$  表示悬浮模块 B 端的悬浮电流值,  $I_1$  表示悬浮模块 A 端的悬浮传感器组输出的悬浮电流传感器信号,  $I_2$  表示悬浮模块 B 端的悬浮传感器组输出的悬浮电流传感器信号。

4. 根据权利要求 2 所述的电磁型常导低速磁浮列车的悬浮控制方法, 其特征在于: 所述步骤 1.4) 具体是指根据式 (2) 估计当前周期应当施加在悬浮模块 A 端和 B 端的控制电压;

$$\begin{cases} u_1 = 0.44 \cdot PWM\_A - 330 \\ u_2 = 0.44 \cdot PWM\_B - 330 \end{cases} \quad (2)$$

式 (2) 中,  $u_1$  表示当前周期应当施加在悬浮模块 A 端的控制电压,  $u_2$  表示当前周期应当施加在悬浮模块 B 端的控制电压, PWM\_A 表示上一个周期悬浮模块 A 端的控制量信号, PWM\_B 表示上一个周期悬浮模块 B 端的控制量信号。

5. 根据权利要求 2 所述的电磁型常导低速磁浮列车的悬浮控制方法, 其特征在于: 所述步骤 1.5) 中所使用的低通滤波器的表达式如式 (3) 所述;

$$\begin{cases} \bar{u}_1 = \frac{1}{t} \int_0^t u_1(\tau) d\tau \\ \bar{u}_2 = \frac{1}{t} \int_0^t u_2(\tau) d\tau \end{cases} \quad (3)$$

式 (3) 中,  $\bar{u}_1$  表示悬浮模块 A 端的平均控制电压,  $\bar{u}_2$  表示悬浮模块 B 端的平均控制电压,  $u_1(\tau)$  表示悬浮模块 A 端的控制电压,  $u_2(\tau)$  表示悬浮模块 B 端的控制电压。

6. 根据权利要求 2 所述的电磁型常导低速磁浮列车的悬浮控制方法, 其特征在于: 所述步骤 1.6) 中所使用的低通滤波器的表达式如式 (4) 所述;

$$\begin{cases} \bar{i}_1 = \frac{1}{t} \int_0^t i_1(\tau) d\tau \\ \bar{i}_2 = \frac{1}{t} \int_0^t i_2(\tau) d\tau \end{cases} \quad (4)$$

式 (4) 中,  $\bar{i}_1$  表示流经悬浮模块 A 端的平均悬浮电流,  $\bar{i}_2$  表示流经悬浮模块 B 端的平均悬浮电流,  $i_1(\tau)$  表示悬浮模块 A 端的悬浮电流值,  $i_2(\tau)$  表示悬浮模块 B 端的悬浮电流值。

7. 根据权利要求 2 所述的电磁型常导低速磁浮列车的悬浮控制方法, 其特征在于: 所述步骤 1.7) 中具体是指使用式 (5) 计算出悬浮模块 A 端和 B 端的直流电阻;

$$\begin{cases} \hat{R}_1 = \frac{\bar{u}_1}{\bar{i}_1} \\ \hat{R}_2 = \frac{\bar{u}_2}{\bar{i}_2} \end{cases} \quad (5)$$

式 (5) 中,  $\hat{R}_1$  表示悬浮模块 A 端的直流电阻,  $\hat{R}_2$  表示悬浮模块 B 端的直流电阻,  $\bar{u}_1$  表示悬浮模块 A 端的平均控制电压,  $\bar{u}_2$  表示悬浮模块 B 端的平均控制电压,  $\bar{i}_1$  表示流经悬浮模块 A 端的平均悬浮电流,  $\bar{i}_2$  表示流经悬浮模块 B 端的平均悬浮电流。

8. 根据权利要求 2 所述的电磁型常导低速磁浮列车的悬浮控制方法, 其特征在于: 所述步骤 1.7) 中具体是指使用式 (6) 计算悬浮模块 A 端和悬浮模块 B 端的当前虚拟磁通:

$$\begin{cases} B_1 = \int_0^t \frac{u_1(\tau) - 2\hat{R}_1 i_1(\tau)}{2NA} d\tau \\ B_2 = \int_0^t \frac{u_2(\tau) - 2\hat{R}_2 i_2(\tau)}{2NA} d\tau \end{cases} \quad (6)$$

式 (6) 中,  $B_1$  表示悬浮模块 A 端的当前虚拟磁通,  $B_2$  表示悬浮模块 B 端的当前虚拟磁通,  $N$  表示单电磁铁的线圈匝数,  $A$  表示磁环导磁截面积,  $u_1(\tau)$  表示悬浮模块 A 端在  $\tau$  时刻的控制电压,  $\hat{R}_1$  表示悬浮模块 A 端的直流电阻,  $i_1(\tau)$  表示悬浮模块 A 端在  $\tau$  时刻的悬浮电流值;  $u_2(\tau)$  表示悬浮模块 B 端在  $\tau$  时刻的控制电压,  $\hat{R}_2$  表示悬浮模块 B 端的直流电阻,  $i_2(\tau)$  表示悬浮模块 B 端在  $\tau$  时刻的悬浮电流值。

9. 根据权利要求 1 ~ 8 中任意一项所述的电磁型常导低速磁浮列车的悬浮控制方法, 其特征在于: 所述步骤 2) 中具体是根据式 (7) 计算出悬浮模块 A 端和 B 端的期望虚拟磁通:

$$\begin{cases} B_{\text{exp1}} = 2500(d_1 - y_{1r}) + 70.7v_1 \\ B_{\text{exp2}} = 2500(d_2 - y_{2r}) + 70.7v_2 \end{cases} \quad (7)$$

式 (7) 中,  $B_{\text{exp1}}$  表示悬浮模块 A 端的期望虚拟磁通,  $B_{\text{exp2}}$  表示悬浮模块 B 端的期望虚拟磁通,  $y_{1r}$ 、 $y_{2r}$  分别表示模块 A 端和 B 端的期望悬浮间隙,  $d_1$  表示悬浮模块 A 端的当前悬浮间隙,  $d_2$  表示悬浮模块 B 端的当前悬浮间隙,  $v_1$  表示悬浮模块 A 端的当前速度,  $v_2$  表示悬浮模块 B 端的当前速度。

10. 根据权利要求 9 所述的电磁型常导低速磁浮列车的悬浮控制方法, 其特征在于, 所述步骤 2) 中具体是指根据式 (8) 计算得到悬浮模块 A 端和 B 端的控制量信号:

$$\begin{cases} PWM\_A = 280 \left( 0.017 \sqrt{-73.5B_{\text{exp1}} - 44.1B_{\text{exp2}} + 288.2 - B_1} \right) + 795 \\ PWM\_B = 280 \left( 0.017 \sqrt{-73.5B_{\text{exp2}} - 44.1B_{\text{exp1}} + 288.2 - B_2} \right) + 795 \end{cases} \quad (8)$$

式 (8) 中,  $PWM\_A$  表示悬浮模块 A 端的控制量信号,  $PWM\_B$  表示悬浮模块 B 端的控制量信号,  $B_{\text{exp1}}$  表示悬浮模块 A 端的设定虚拟磁通,  $B_{\text{exp2}}$  表示悬浮模块 B 端的设定虚拟磁通,  $B_1$  表示悬浮模块 A 端的当前虚拟磁通,  $B_2$  表示悬浮模块 B 端的当前虚拟磁通。

## 一种电磁型常导低速磁浮列车的悬浮控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及磁浮列车悬浮控制技术,具体涉及一种基于虚拟磁通反馈的电磁型常导 (Electro Magnetic Suspension,简称 EMS) 低速磁浮列车的悬浮控制方法。

### 背景技术

[0002] 电磁型常导 (Electro Magnetic Suspension,简称 EMS) 低速磁浮列车是一种依靠安装在列车上的电磁铁与轨道之间的吸引力使列车悬浮在轨道上运行的新型交通工具,以其安全、舒适、高速、无污染等优点赢得越来越多的关注。EMS 型低速磁浮列车的电磁铁与轨道构成列车的悬浮系统,该系统是一个不稳定系统,必须通过反馈控制,才能实现列车的稳定悬浮。悬浮性能主要取决于悬浮控制方法。悬浮控制方法的关键在于设计一个悬浮控制系统,由悬浮控制系统根据当前悬浮系统的悬浮状态,通过控制 PWM 来控制电磁力的大小,进而保证电磁铁与轨道之间的间隙始终保持在设定的间隙值,从而实现磁浮列车的稳定悬浮。

[0003] 如图 1 和图 2 所示,目前 EMS 型低速磁浮列车采用模块化转向架结构,每节车有四个转向架 1,每个转向架 1 由左右两个悬浮模块 2 组成,悬浮模块 2 间通过防侧滚梁 3 相连。每个悬浮模块 2 安装有四个悬浮电磁铁 21,沿列车行进方向将四个悬浮电磁铁 21 分为两组,每组包含两个悬浮电磁铁 21,组内的两个悬浮电磁铁 21 串联等效为一个单电磁铁,通过两个单电磁铁和轨枕上呈 F 形的轨道 4 直线磁悬浮。悬浮模块 2 之间基本上实现了机械解耦,具有独立的运动自由度,因此悬浮模块是 EMS 型低速磁浮列车的基本悬浮单元。

[0004] 如图 3 所示,对于某一个悬浮模块而言,A 端和 B 端分别安装有悬浮传感器组 A 和悬浮传感器组 B,每组悬浮传感器均包括一个间隙传感器、一个加速度传感器和一个电流传感器,即悬浮传感器组 A 包括间隙传感器 A、加速度传感器 A 和电流传感器 A,悬浮传感器组 B 包括间隙传感器 B、加速度传感器 B 和电流传感器 B。间隙传感器 A 和间隙传感器 B 分别用于测量悬浮模块 A 端和悬浮模块 B 端的悬浮间隙,加速度传感器 A 和加速度传感器 B 分别用于测量单电磁铁 A 和单电磁铁 B 的运动加速度,电流传感器 A 和电流传感器 B 分别套在悬浮斩波器 A 和悬浮斩波器 B 的输出导线上,用于测量单电磁铁 A 和单电磁铁 B 的悬浮电流。悬浮传感器组 A 将测量得到的 A 端的悬浮状态(悬浮间隙、电磁铁运动加速度和悬浮电流)通过电缆送到悬浮控制板,悬浮传感器组 B 将测量得到的 B 端的悬浮状态(悬浮间隙、电磁铁运动加速度和悬浮电流)通过电缆送到悬浮控制板。悬浮控制板进行悬浮控制时,内环采用电流反馈,外环采用间隙、速度以及加速度反馈,结合来自车载监控系统的悬浮/降落命令,计算出控制量,并输出到悬浮斩波器中,分别控制两端电磁铁的电流大小,进而控制两端电磁力的大小,保证模块两端与轨道之间的间隙保持恒定。但是,由于在传统的悬浮系统设计中,悬浮控制板以快速电流环作为内环,以间隙环作为外环,难以克服悬浮力、悬浮间隙、电流三者之间的非线性耦合关系带来的影响,导致悬浮系统的参数范围较小,稳定欲度较差,跟踪性能和鲁棒性能难以有效兼顾。

## 发明内容

[0005] 本发明要解决的技术问题是提供一种能够避开悬浮力、悬浮电流、悬浮间隙之间的非线性耦合关系,克服基于电流内环控制方法的固有缺陷,提高悬浮系统的跟踪性能和鲁棒性能,无需硬件传感器,实施成本低、可靠性高的电磁型常导低速磁浮列车的悬浮控制方法。

[0006] 为解决上述技术问题,本发明采用的技术方案为:

[0007] 一种电磁型常导低速磁浮列车的悬浮控制方法,步骤包括:

[0008] 1) 分别获取电磁型常导低速磁浮列车每一个悬浮模块 A 端和 B 端的当前悬浮间隙、当前速度以及当前虚拟磁通;

[0009] 2) 分别以悬浮模块 A 端和 B 端的当前悬浮间隙、当前速度作为外环反馈量,结合设定悬浮间隙计算出悬浮模块 A 端和 B 端的期望虚拟磁通;分别以悬浮模块 A 端和 B 端的当前虚拟磁通作为内环反馈量,结合悬浮模块 A 端和 B 端的期望虚拟磁通计算得到悬浮模块 A 端和 B 端的控制量信号,通过所述悬浮模块 A 端和 B 端的控制量信号分别实现悬浮模块 A 端和 B 端的稳定悬浮。

[0010] 优选地,所述步骤 1) 的步骤包括:

[0011] 1.1) 查询电磁型常导低速磁浮列车当前的悬浮/降落指令状态,如果当前的悬浮/降落指令状态为悬浮指令,则跳转执行步骤 1.2);否则跳转执行步骤 1.6);

[0012] 1.2) 分别获取悬浮模块 A 端和 B 端的悬浮传感器组输出的悬浮间隙传感器信号、加速度传感器信号、悬浮电流传感器信号;

[0013] 1.3) 分别将悬浮模块 A 端和 B 端的悬浮传感器组输出的悬浮间隙传感器信号、加速度传感器信号、悬浮电流传感器信号变换为悬浮模块 A 端和 B 端的悬浮间隙值、运动速度值、悬浮电流值;

[0014] 1.4) 分别根据上一个周期悬浮模块 A 端和 B 端的控制量信号分别估计当前周期应当施加在悬浮模块 A 端和 B 端的控制电压;

[0015] 1.5) 分别利用低通滤波器对悬浮模块 A 端和 B 端的控制电压进行滤波得到悬浮模块 A 端和 B 端的平均控制电压;

[0016] 1.6) 分别利用低通滤波器对悬浮模块 A 端和 B 端的悬浮电流值进行滤波,得到流经悬浮模块 A 端和 B 端的平均悬浮电流;

[0017] 1.7) 分别根据悬浮模块 A 端和 B 端的平均控制电压、悬浮模块 A 端和 B 端的平均悬浮电流,计算出悬浮模块 A 端和 B 端的直流电阻;

[0018] 1.8) 分别根据悬浮模块 A 端和 B 端的控制电压、悬浮电流、直流电阻计算悬浮模块 A 端和悬浮模块 B 端的当前虚拟磁通。

[0019] 优选地,所述步骤 1.3) 具体是指根据式(1)将悬浮模块 A 端和 B 端的悬浮传感器组输出的悬浮间隙传感器信号、加速度传感器信号、悬浮电流传感器信号变换为悬浮模块 A 端和 B 端的悬浮间隙值、运动速度值、悬浮电流值;

$$[0020] \quad \begin{cases} \text{Gap}_1 = -0.000048828125D_1 + 0.009 \\ \text{Gap}_2 = -0.000048828125D_2 + 0.009 \\ v_1 = 0.00006591796875V_1 \\ v_2 = 0.00006591796875V_2 \\ i_1 = 0.048828125I_1 \\ i_2 = 0.048828125I_2 \end{cases} \quad (1)$$

[0021] 式 (1) 中,  $D_1$  表示悬浮模块 A 端的悬浮传感器组输出的悬浮间隙传感器信号,  $D_2$  表示悬浮模块 B 端的悬浮传感器组输出的悬浮间隙传感器信号,  $\text{Gap}_1$  表示悬浮模块 A 端的悬浮间隙值,  $\text{Gap}_2$  表示悬浮模块 B 端的悬浮间隙值;  $v_1$  表示悬浮模块 A 端的运动速度值,  $v_2$  表示悬浮模块 B 端的运动速度值,  $V_1$  表示悬浮模块 A 端的悬浮传感器组输出的加速度传感器信号,  $V_2$  表示悬浮模块 B 端的悬浮传感器组输出的加速度传感器信号;  $i_1$  表示悬浮模块 A 端的悬浮电流值,  $i_2$  表示悬浮模块 B 端的悬浮电流值,  $I_1$  表示悬浮模块 A 端的悬浮传感器组输出的悬浮电流传感器信号,  $I_2$  表示悬浮模块 B 端的悬浮传感器组输出的悬浮电流传感器信号。

[0022] 优选地, 所述步骤 1.4) 具体是指根据式 (2) 估计当前周期应当施加在悬浮模块 A 端和 B 端的控制电压;

$$[0023] \quad \begin{cases} u_1 = 0.44 \cdot PWM\_A - 330 \\ u_2 = 0.44 \cdot PWM\_B - 330 \end{cases} \quad (2)$$

[0024] 式 (2) 中,  $u_1$  表示当前周期应当施加在悬浮模块 A 端的控制电压,  $u_2$  表示当前周期应当施加在悬浮模块 B 端的控制电压,  $PWM\_A$  表示上一个周期悬浮模块 A 端的控制量信号,  $PWM\_B$  表示上一个周期悬浮模块 B 端的控制量信号。

[0025] 优选地, 所述步骤 1.5) 中所使用的低通滤波器的表达式如式 (3) 所述;

$$[0026] \quad \begin{cases} \bar{u}_1 = \frac{1}{t} \int_0^t u_1(\tau) d\tau \\ \bar{u}_2 = \frac{1}{t} \int_0^t u_2(\tau) d\tau \end{cases} \quad (3)$$

[0027] 式 (3) 中,  $\bar{u}_1$  表示悬浮模块 A 端的平均控制电压,  $\bar{u}_2$  表示悬浮模块 B 端的平均控制电压,  $u_1(\tau)$  表示悬浮模块 A 端的控制电压,  $u_2(\tau)$  表示悬浮模块 B 端的控制电压。

[0028] 优选地, 所述步骤 1.6) 中所使用的低通滤波器的表达式如式 (4) 所述;

$$[0029] \quad \begin{cases} \bar{i}_1 = \frac{1}{t} \int_0^t i_1(\tau) d\tau \\ \bar{i}_2 = \frac{1}{t} \int_0^t i_2(\tau) d\tau \end{cases} \quad (4)$$

[0030] 式 (4) 中,  $\bar{i}_1$  表示流经悬浮模块 A 端的平均悬浮电流,  $\bar{i}_2$  表示流经悬浮模块 B 端的平均悬浮电流,  $i_1(\tau)$  表示悬浮模块 A 端的悬浮电流值,  $i_2(\tau)$  表示悬浮模块 B 端的悬浮电流值。

[0031] 优选地, 所述步骤 1.7) 中具体是指使用式 (5) 计算出悬浮模块 A 端和 B 端的直流

电阻；

$$[0032] \quad \begin{cases} \hat{R}_1 = \frac{\bar{u}_1}{\bar{i}_1} \\ \hat{R}_2 = \frac{\bar{u}_2}{\bar{i}_2} \end{cases} \quad (5)$$

[0033] 式 (5) 中,  $\hat{R}_1$  表示悬浮模块 A 端的直流电阻,  $\hat{R}_2$  表示悬浮模块 B 端的直流电阻,  $\bar{u}_1$  表示悬浮模块 A 端的平均控制电压,  $\bar{u}_2$  表示悬浮模块 B 端的平均控制电压,  $\bar{i}_1$  表示流经悬浮模块 A 端的平均悬浮电流,  $\bar{i}_2$  表示流经悬浮模块 B 端的平均悬浮电流。

[0034] 优选地, 所述步骤 1.7) 中具体是指使用式 (6) 计算悬浮模块 A 端和悬浮模块 B 端的当前虚拟磁通；

$$[0035] \quad \begin{cases} B_1 = \int_0^t \frac{u_1(\tau) - 2\hat{R}_1 i_1(\tau)}{2NA} d\tau \\ B_2 = \int_0^t \frac{u_2(\tau) - 2\hat{R}_2 i_2(\tau)}{2NA} d\tau \end{cases} \quad (6)$$

[0036] 式 (6) 中,  $B_1$  表示悬浮模块 A 端的当前虚拟磁通,  $B_2$  表示悬浮模块 B 端的当前虚拟磁通,  $N$  表示单电磁铁的线圈匝数,  $A$  表示磁环导磁截面积,  $u_1(\tau)$  表示悬浮模块 A 端在  $\tau$  时刻的控制电压,  $\hat{R}_1$  表示悬浮模块 A 端的直流电阻,  $i_1(\tau)$  表示悬浮模块 A 端在  $\tau$  时刻的悬浮电流值;  $u_2(\tau)$  表示悬浮模块 B 端在  $\tau$  时刻的控制电压,  $\hat{R}_2$  表示悬浮模块 B 端的直流电阻,  $i_2(\tau)$  表示悬浮模块 B 端在  $\tau$  时刻的悬浮电流值。

[0037] 优选地, 所述步骤 2) 中具体是根据式 (7) 计算出悬浮模块 A 端和 B 端的期望虚拟磁通；

$$[0038] \quad \begin{cases} B_{\text{exp1}} = 2500(d_1 - y_{1r}) + 70.7v_1 \\ B_{\text{exp2}} = 2500(d_2 - y_{2r}) + 70.7v_2 \end{cases} \quad (7)$$

[0039] 式 (7) 中,  $B_{\text{exp1}}$  表示悬浮模块 A 端的期望虚拟磁通,  $B_{\text{exp2}}$  表示悬浮模块 B 端的期望虚拟磁通,  $y_{1r}$ 、 $y_{2r}$  分别表示模块 A 端和 B 端的期望悬浮间隙,  $d_1$  表示悬浮模块 A 端的当前悬浮间隙,  $d_2$  表示悬浮模块 B 端的当前悬浮间隙,  $v_1$  表示悬浮模块 A 端的当前速度,  $v_2$  表示悬浮模块 B 端的当前速度。

[0040] 优选地, 所述步骤 2) 中具体是指根据式 (8) 计算得到悬浮模块 A 端和 B 端的控制量信号；

$$[0041] \quad \begin{cases} PWM\_A = 280 \left( 0.017 \sqrt{-73.5B_{\text{exp1}} - 44.1B_{\text{exp2}} + 288.2} - B_1 \right) + 795 \\ PWM\_B = 280 \left( 0.017 \sqrt{-73.5B_{\text{exp2}} - 44.1B_{\text{exp1}} + 288.2} - B_2 \right) + 795 \end{cases} \quad (8)$$

[0042] 式 (8) 中,  $PWM\_A$  表示悬浮模块 A 端的控制量信号,  $PWM\_B$  表示悬浮模块 B 端的控制量信号,  $B_{\text{exp1}}$  表示悬浮模块 A 端的设定虚拟磁通,  $B_{\text{exp2}}$  表示悬浮模块 B 端的设定虚拟磁通,  $B_1$  表示悬浮模块 A 端的当前虚拟磁通,  $B_2$  表示悬浮模块 B 端的当前虚拟磁通。



[0043] 本发明电磁型常导低速磁浮列车的悬浮控制方法具有下述优点：

[0044] 1、本发明为一种基于悬浮间隙、当前速度作为外环反馈量、磁通作为内环反馈量的双闭环悬浮控制板设计方法，分别获取电磁型常导低速磁浮列车每一个悬浮模块 A 端和 B 端的当前悬浮间隙、当前速度以及当前虚拟磁通，分别以悬浮模块 A 端和 B 端的当前悬浮间隙、当前速度作为外环反馈量，结合设定悬浮间隙计算出悬浮模块 A 端和 B 端的期望虚拟磁通；分别以悬浮模块 A 端和 B 端的当前虚拟磁通作为内环反馈量，结合悬浮模块 A 端和 B 端的期望虚拟磁通计算得到悬浮模块 A 端和 B 端的控制量信号，通过所述悬浮模块 A 端和 B 端的控制量信号分别实现悬浮模块 A 端和 B 端的稳定悬浮，利用上述方法得到的悬浮模块 A 端和 B 端的控制量信号，与在电磁铁上绕制感应线圈得到的磁通信号相比，在不同频率段、相位和幅值几乎完全一致，因此能够有效避开悬浮力、电流、悬浮间隙三者间的非线性耦合关系，克服了基于电流内环控制方法的固有缺陷，提高了悬浮系统的跟踪和鲁棒性能。

[0045] 2、本发明为一种无传感器（不需要额外安装传感器）的磁通信号测量方法，仅仅利用目前电磁型常导低速磁浮列车的悬浮传感器组（包括间隙传感器、加速度传感器和电流传感器）即可实现对悬浮模块的双闭环控制，降低了系统成本，而且提高了系统的可靠性。

## 附图说明

[0046] 图 1 为现有技术 EMS 型低速磁浮列车的模块化转向架的侧视结构示意图。

[0047] 图 2 为现有技术 EMS 型低速磁浮列车的模块化转向架的局部剖视结构示意图。

[0048] 图 3 为现有技术 EMS 型低速磁浮列车的悬浮控制系统框架结构示意图。

[0049] 图 4 为本发明实施例方法的基本流程示意图。

[0050] 图 5 为本发明实施例中针对悬浮模块 A 端和 B 端的方波跟踪实验曲线示意图。

[0051] 图 6 为本发明实施例中悬浮控制系统的框架结构示意图。

[0052] 图 7 为本发明实施例中悬浮控制板的电路原理结构示意图。

## 具体实施方式

[0053] 如图 4 所示，本实施例电磁型常导低速磁浮列车的悬浮控制方法的步骤包括：

[0054] 1) 分别获取电磁型常导低速磁浮列车每一个悬浮模块 A 端和 B 端的当前悬浮间隙、当前速度以及当前虚拟磁通；

[0055] 2) 分别以悬浮模块 A 端和 B 端的当前悬浮间隙、当前速度作为外环反馈量，结合设定悬浮间隙计算出悬浮模块 A 端和 B 端的期望虚拟磁通；分别以悬浮模块 A 端和 B 端的当前虚拟磁通作为内环反馈量，结合悬浮模块 A 端和 B 端的期望虚拟磁通计算得到悬浮模块 A 端和 B 端的控制量信号，通过悬浮模块 A 端和 B 端的控制量信号分别实现悬浮模块 A 端和 B 端的稳定悬浮。

[0056] 本实施例中，步骤 1) 的步骤包括：

[0057] 1.1) 查询电磁型常导低速磁浮列车当前的悬浮 / 降落指令状态，如果当前的悬浮 / 降落指令状态为悬浮指令，则跳转执行步骤 1.2)；否则跳转执行步骤 1.6)；

[0058] 1.2) 分别获取悬浮模块 A 端和 B 端的悬浮传感器组输出的悬浮间隙传感器信号、加速度传感器信号、悬浮电流传感器信号；

[0059] 1.3) 分别将悬浮模块 A 端和 B 端的悬浮传感器组输出的悬浮间隙传感器信号、加速度传感器信号、悬浮电流传感器信号变换为悬浮模块 A 端和 B 端的悬浮间隙值、运动速度值、悬浮电流值；

[0060] 1.4) 分别根据上一个周期悬浮模块 A 端和 B 端的控制量信号分别估计当前周期应当施加在悬浮模块 A 端和 B 端的控制电压；

[0061] 1.5) 分别利用低通滤波器对悬浮模块 A 端和 B 端的控制电压进行滤波得到悬浮模块 A 端和 B 端的平均控制电压；

[0062] 1.6) 分别利用低通滤波器对悬浮模块 A 端和 B 端的悬浮电流值进行滤波，得到流经悬浮模块 A 端和 B 端的平均悬浮电流；

[0063] 1.7) 分别根据悬浮模块 A 端和 B 端的平均控制电压、悬浮模块 A 端和 B 端的平均悬浮电流，计算出悬浮模块 A 端和 B 端的直流电阻；

[0064] 1.8) 分别根据悬浮模块 A 端和 B 端的控制电压、悬浮电流、直流电阻计算悬浮模块 A 端和悬浮模块 B 端的当前虚拟磁通。

[0065] 本实施例中，步骤 1.3) 具体是指根据式 (1) 将悬浮模块 A 端和 B 端的悬浮传感器组输出的悬浮间隙传感器信号、加速度传感器信号、悬浮电流传感器信号变换为悬浮模块 A 端和 B 端的悬浮间隙值、运动速度值、悬浮电流值；

$$[0066] \begin{cases} \text{Gap}_1 = -0.000048828125D_1 + 0.009 \\ \text{Gap}_2 = -0.000048828125D_2 + 0.009 \\ v_1 = 0.00006591796875V_1 \\ v_2 = 0.00006591796875V_2 \\ i_1 = 0.048828125I_1 \\ i_2 = 0.048828125I_2 \end{cases} \quad (1)$$

[0067] 式 (1) 中， $D_1$  表示悬浮模块 A 端的悬浮传感器组输出的悬浮间隙传感器信号， $D_2$  表示悬浮模块 B 端的悬浮传感器组输出的悬浮间隙传感器信号， $\text{Gap}_1$  表示悬浮模块 A 端的悬浮间隙值， $\text{Gap}_2$  表示悬浮模块 B 端的悬浮间隙值； $v_1$  表示悬浮模块 A 端的运动速度值， $v_2$  表示悬浮模块 B 端的运动速度值， $V_1$  表示悬浮模块 A 端的悬浮传感器组输出的加速度传感器信号， $V_2$  表示悬浮模块 B 端的悬浮传感器组输出的加速度传感器信号； $i_1$  表示悬浮模块 A 端的悬浮电流值， $i_2$  表示悬浮模块 B 端的悬浮电流值， $I_1$  表示悬浮模块 A 端的悬浮传感器组输出的悬浮电流传感器信号， $I_2$  表示悬浮模块 B 端的悬浮传感器组输出的悬浮电流传感器信号。

[0068] 本实施例中，步骤 1.4) 具体是指根据式 (2) 估计当前周期应当施加在悬浮模块 A 端和 B 端的控制电压；

$$[0069] \begin{cases} u_1 = 0.44 \cdot PWM\_A - 330 \\ u_2 = 0.44 \cdot PWM\_B - 330 \end{cases} \quad (2)$$

[0070] 式 (2) 中， $u_1$  表示当前周期应当施加在悬浮模块 A 端的控制电压， $u_2$  表示当前周期应当施加在悬浮模块 B 端的控制电压， $PWM\_A$  表示上一个周期悬浮模块 A 端的控制量信号， $PWM\_B$  表示上一个周期悬浮模块 B 端的控制量信号。

[0071] 本实施例中，步骤 1.5) 中所使用的低通滤波器的表达式如式 (3)；

$$[0072] \quad \begin{cases} \bar{u}_1 = \frac{1}{t} \int_0^t u_1(\tau) d\tau \\ \bar{u}_2 = \frac{1}{t} \int_0^t u_2(\tau) d\tau \end{cases} \quad (3)$$

[0073] 式(3)中,  $\bar{u}_1$ 表示悬浮模块A端的平均控制电压,  $\bar{u}_2$ 表示悬浮模块B端的平均控制电压,  $u_1(\tau)$ 表示悬浮模块A端的控制电压,  $u_2(\tau)$ 表示悬浮模块B端的控制电压。

[0074] 本实施例中,步骤1.6)中所使用的低通滤波器的表达式如式(4);

$$[0075] \quad \begin{cases} \bar{i}_1 = \frac{1}{t} \int_0^t i_1(\tau) d\tau \\ \bar{i}_2 = \frac{1}{t} \int_0^t i_2(\tau) d\tau \end{cases} \quad (4)$$

[0076] 式(4)中,  $\bar{i}_1$ 表示流经悬浮模块A端的平均悬浮电流,  $\bar{i}_2$ 表示流经悬浮模块B端的平均悬浮电流,  $i_1(\tau)$ 表示悬浮模块A端的悬浮电流值,  $i_2(\tau)$ 表示悬浮模块B端的悬浮电流值。

[0077] 优选地,步骤1.7)中具体是指使用式(5)计算出悬浮模块A端和B端的直流电阻;

$$[0078] \quad \begin{cases} \hat{R}_1 = \frac{\bar{u}_1}{\bar{i}_1} \\ \hat{R}_2 = \frac{\bar{u}_2}{\bar{i}_2} \end{cases} \quad (5)$$

[0079] 式(5)中,  $\hat{R}_1$ 表示悬浮模块A端的直流电阻,  $\hat{R}_2$ 表示悬浮模块B端的直流电阻,  $\bar{u}_1$ 表示悬浮模块A端的平均控制电压,  $\bar{u}_2$ 表示悬浮模块B端的平均控制电压,  $\bar{i}_1$ 表示流经悬浮模块A端的平均悬浮电流,  $\bar{i}_2$ 表示流经悬浮模块B端的平均悬浮电流。

[0080] 本实施例中,步骤1.7)中具体是指使用式(6)计算悬浮模块A端和悬浮模块B端的当前虚拟磁通;

$$[0081] \quad \begin{cases} B_1 = \int_0^t \frac{u_1(\tau) - 2\hat{R}_1 i_1(\tau)}{2NA} d\tau \\ B_2 = \int_0^t \frac{u_2(\tau) - 2\hat{R}_2 i_2(\tau)}{2NA} d\tau \end{cases} \quad (6)$$

[0082] 式(6)中,  $B_1$ 表示悬浮模块A端的当前虚拟磁通,  $B_2$ 表示悬浮模块B端的当前虚拟磁通,  $N$ 表示单电磁铁的线圈匝数,  $A$ 表示磁环导磁截面积,  $u_1(\tau)$ 表示悬浮模块A端在  $\tau$ 时刻的控制电压,  $\hat{R}_1$ 表示悬浮模块A端的直流电阻,  $i_1(\tau)$ 表示悬浮模块A端在  $\tau$ 时刻的悬浮电流值;  $u_2(\tau)$ 表示悬浮模块B端在  $\tau$ 时刻的控制电压,  $\hat{R}_2$ 表示悬浮模块B端的直流电阻,  $i_2(\tau)$ 表示悬浮模块B端在  $\tau$ 时刻的悬浮电流值。

[0083] 本实施例中,步骤2)中具体是根据式(7)计算出悬浮模块A端和B端的期望虚拟磁通;

$$[0084] \quad \begin{cases} B_{\text{exp1}} = 2500(d_1 - y_{1r}) + 70.7v_1 \\ B_{\text{exp2}} = 2500(d_2 - y_{2r}) + 70.7v_2 \end{cases} \quad (7)$$

[0085] 式(7)中,  $B_{\text{exp1}}$ 表示悬浮模块A端的期望虚拟磁通,  $B_{\text{exp2}}$ 表示悬浮模块B端的期望虚拟磁通,  $y_{1r}$ 、 $y_{2r}$ 分别表示模块A端和B端的期望悬浮间隙,  $d_1$ 表示悬浮模块A端的当前悬浮间隙,  $d_2$ 表示悬浮模块B端的当前悬浮间隙,  $v_1$ 表示悬浮模块A端的当前速度,  $v_2$ 表示悬浮模块B端的当前速度。

[0086] 本实施例中,步骤2)中具体是指根据式(8)计算得到悬浮模块A端和B端的控制量信号;

$$[0087] \quad \begin{cases} PWM\_A = 280(0.017\sqrt{-73.5B_{\text{exp1}} - 44.1B_{\text{exp2}} + 288.2 - B_1}) + 795 \\ PWM\_B = 280(0.017\sqrt{-73.5B_{\text{exp2}} - 44.1B_{\text{exp1}} + 288.2 - B_2}) + 795 \end{cases} \quad (8)$$

[0088] 式(8)中,  $PWM\_A$ 表示悬浮模块A端的控制量信号,  $PWM\_B$ 表示悬浮模块B端的控制量信号,  $B_{\text{exp1}}$ 表示悬浮模块A端的设定虚拟磁通,  $B_{\text{exp2}}$ 表示悬浮模块B端的设定虚拟磁通,  $B_1$ 表示悬浮模块A端的当前虚拟磁通,  $B_2$ 表示悬浮模块B端的当前虚拟磁通。

[0089] 本实施例的悬浮控制方法与现有技术的悬浮控制方法不同,本实施例利用PWM控制量计算出作用在电磁铁上的电压稳态值(平均控制电压),结合电流信息的稳态值(平均悬浮电流),估计出电磁铁的直流电阻。根据磁通变化率、电压、电流之间的关系,估计出悬浮间隙处磁场的大小。实施例的悬浮控制方法内环采用磁通反馈,外环采用间隙、速度以及加速度反馈,结合来自车载监控系统的悬浮/降落命令,计算出控制量,并输出到悬浮斩波器中,分别控制两端电磁铁的电流大小,进而控制两端电磁力的大小,保证模块两端与轨道之间的间隙保持恒定。本实施例为一种基于悬浮间隙、当前速度作为外环反馈量、磁通作为内环反馈量的双闭环悬浮控制板设计方法,分别以悬浮模块A端和B端的当前悬浮间隙、当前速度作为外环反馈量,以悬浮模块A端和B端的当前虚拟磁通作为内环反馈量,利用上述反馈量进行双闭环控制得到的悬浮模块A端和B端的控制量信号。如图5(a)、(b)所示,当A端设定的期望间隙  $y_{1r}$ (Gap1)以方波形式变化, B端设定的期望间隙  $y_{2r}$ (Gap2)保持不变的情况下, A端具有较快的跟踪速度、较小的超调, B端的悬浮间隙基本保持不变,没有因为A端的垂向调整而出现不该有的大幅波动。如图5(c)、(d)所示, A端和B端的悬浮电流  $I_1$ 和  $I_2$ 均在合理的波动范围。如图5(e)、(f)所示, A端和B端采用感应线圈得到的磁通信号和利用虚拟磁通算法估计出的磁通信号均高度吻合。因此,说明本实施例所采用的悬浮控制方法能够有效获取磁通信号,有效解决悬浮力、悬浮间隙、悬浮电流之间的非线性耦合关系,能够有效解决模块两端的动力学耦合情况。因此本实施例通过与在电磁铁上绕制感应线圈得到的磁通信号相比,在不同频率段、相位和幅值几乎完全一致,因此能够有效避开悬浮力、电流、悬浮间隙三者间的非线性耦合关系,克服了基于电流内环控制方法的固有缺陷,提高了悬浮系统的跟踪和鲁棒性能。

[0090] 如图6所示,应用本实施例悬浮控制方法的悬浮控制系统与现有技术的悬浮控制系统基本相同,其主要区别点为增加了磁通估计器A和磁通估计器B,磁通估计器A根据悬浮模块A端的控制量  $PWM\_A$ 、电流传感器A输出的悬浮电流传感器信号计算得到悬浮模块A端的虚拟磁通,磁通估计器B根据悬浮模块BA端的控制量  $PWM\_B$ 、电流传感器B输出的悬

浮电流传感器信号计算得到悬浮模块 B 端的虚拟磁通, 悬浮控制板的主要作用是将来自传感器的弱信号, 转化为控制电磁铁的斩波信号, 悬浮控制板则根据磁通估计器 A 输出的悬浮模块 A 端的虚拟磁通、磁通估计器 B 输出的悬浮模块 B 端的虚拟磁通、悬浮传感器组 A 的输出信号、悬浮传感器组 B 的输出信号应用本实施例悬浮控制方法, 输出控制量 PWM\_A 至悬浮模块的悬浮斩波器 A, 输出控制量 PWM\_B 至悬浮模块的悬浮斩波器 B, 从而实现以悬浮模块为控制单位的稳定悬浮控制。本实施例的悬浮控制方法以整个模块为控制对象设计悬浮控制系统, 悬浮控制系统中只包括一套悬浮控制板, 悬浮控制板与悬浮斩波器 A 和悬浮斩波器 B 都相连, 且与悬浮传感器组 A 和悬浮传感器组 B 均相连。悬浮传感器组 A 测量得到 A 端悬浮状态 (悬浮间隙、电磁铁运动加速度、悬浮电流), 悬浮传感器组 B 测量得到 B 端悬浮状态 (悬浮间隙、电磁铁运动加速度、悬浮电流)。根据控制电压、磁场强度变化率、电流之间的关系, 估计出电磁铁的直流电阻。利用数值积分方法, 分别计算出 A 端和 B 端的磁场强度。考虑到悬浮力是磁场强度的单变量函数, 因此内环采用磁通反馈。结合来自车载监控系统的悬浮 / 降落命令, 以及悬浮状态, 设计间隙外环, 分别计算出 A 端和 B 端的控制量, 将 A 端控制量 PWM\_A 以 PWM (Pulse-Width Modulation, 即脉冲宽度调制) 波的形式输出到悬浮斩波器 A, 控制 A 端的磁场强度, 进而控制 A 端电磁力的大小, 保证模块 A 端与轨道之间的间隙保持恒定; 将 B 端的控制量 PWM\_B 也以 PWM 波的形式输出到悬浮斩波器 B, 控制 B 端的磁场强度, 进而控制 B 端电磁力的大小, 保证模块 B 端与轨道之间的间隙保持恒定。悬浮控制板通过 CAN 总线将故障状态和悬浮状态实时上传给车载监控系统。车载监控系统接收到故障状态和悬浮状态后, 在判断出现故障或者紧急情况时采取应急措施。另外, 车载监控系统还通过电缆与悬浮控制板连接, 用于向悬浮传感器发送悬浮 / 降落命令 (L/D) 和复位信号 (RESET)。

[0091] 如图 7 所示, 悬浮控制板包括信号调理模块、A/D 转换单元、PowerPC 控制单元、PWM 波发生单元 (PWM\_A 和 PWM\_B)。

[0092] 信号调理模块由模拟电路组成, 包括两个直流偏置电路、两个隔直电路、两个电流-电压转换电路、4 个放大电路、2 个积分电路和 6 个滤波器。信号调理模块接受传感器信号, 对间隙传感器 A 和间隙传感器 B 输出的间隙信号 A 和间隙信号 B 进行直流偏置、放大、滤波处理, 输出电压型间隙信号  $S_{d1}$  和  $S_{d2}$ ; 对加速度传感器 A 和加速度传感器 B 输出的加速度信号 A 和加速度信号 B 进行隔值、积分、滤波处理, 输出电压型速度信号  $S_{v1}$  和  $S_{v2}$ ; 将电流传感器 A 和电流传感器 B 输出的电流信号 A 和电流信号 B 转换成电压型信号, 并对其进行放大、滤波处理, 输出电压型模拟信号  $S_{i1}$  和  $S_{i2}$ 。 $S_{d1}$  和  $S_{d2}$ 、 $S_{v1}$  和  $S_{v2}$ 、 $S_{i1}$  和  $S_{i2}$  同时送到 A/D 转换单元。

[0093] A/D 转换单元采用同步采样的并行模数转换器, 它根据 PowerPC 单元发出的转换指令, 将由信号处理单元传来的三种悬浮传感器的电压型模拟信号即  $S_{d1}$  和  $S_{d2}$ 、 $S_{v1}$  和  $S_{v2}$ 、 $S_{i1}$  和  $S_{i2}$  分别转换成数字信号  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $V_1$ 、 $V_2$ 、 $I_1$ 、 $I_2$ 。A/D 转换单元在接收到主控 PowerPC 单元发出的读指令后, 将数字信号  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $V_1$ 、 $V_2$ 、 $I_1$ 、 $I_2$  送到主控 PowerPC 单元。本实施例中, 间隙传感器的量程为 0-0.02 米, 对应输出电压为 0-10 伏; 加速度传感器量程为 -5g 至 5g (g 为重力加速度, 取值 9.81 米 / 秒<sup>2</sup>), 对应输出为 0-5 伏; 电流传感器量程 0-200 安培, 对应输出电流为 0-0.1 安培。

[0094] PowerPC 控制单元采用浮点数字信号处理器设计, 内有程序控制器、定时器、寄存

器、数字 I/O 单元和运算单元。程序控制器与定时器、寄存器、数字 I/O 单元和运算单元均通过内部总线相连,程序控制器设计有悬浮控制程序,定时器根据悬浮控制程序的设置,对时钟信号发生单元产生的时钟信号计数,每  $T$  ( $T$  为定时器的中断周期) 秒产生一个中断信号,并送到程序控制器;寄存器根据悬浮控制程序的配置,保存 PowerPC 工作方式和内部状态;数字 I/O 单元在程序控制器的控制下,向 A/D 转换单元输出 A/D 转换指令和 A/D 转换结果读取指令,接收来自车载监控系统的 L/D 指令、RESET 信号、来自 A/D 转换单元的转换完毕状态信号并送到程序控制器;运算单元完成悬浮控制程序中涉及的所有算术 / 逻辑运算,最终得到模块 A 端和模块 B 端的控制量  $CV_1$  和  $CV_2$ ,并在程序控制器的控制下,将  $CV_1$  和  $CV_2$  通过总线送至 PWM 波发生单元,分别输出两路 PWM 信号给悬浮斩波器,从而实现悬浮模块的模块 A 端和模块 B 端的悬浮控制。

[0095] 悬浮控制程序是基于 PowerPC 内部的定时器中断机制运行的,定时器每产生一个中断,悬浮控制程序就计算一次控制量并输出,因此悬浮控制的周期就是定时器的中断周期  $T$ 。悬浮控制程序分为两个程序段,即主程序和中断服务程序。主程序的工作流程是:

[0096] 步骤 1、控制系统上电后,程序对 PowerPC 进行初始化,完成系统参数的初始配置,主要包括:设定 PowerPC 内部寄存器,设置 PowerPC 内部的定时器的工作方式和中断周期  $T$ 。

[0097] 步骤 2、等待 PowerPC 的定时器中断,如果没有发生定时器中断,返回步骤 2,否则跳出主程序,进入中断服务程序。

[0098] 步骤 3、中断服务程序执行完毕返回主程序后,转至步骤 2。

[0099] 中断服务程序根据悬浮 / 降落指令 (L/D) 和模块 A 端和模块 B 端的悬浮状态计算控制量,并将其送给 PWM 波发生单元。中断服务程序的工作流程是:

[0100] 步骤 1、进行中断现场保护;

[0101] 步骤 2、查询 L/D,如果是悬浮命令,则执行步骤 3,否则执行步骤 8;

[0102] 步骤 3、通过修改 PowerPC 的外部引脚电平的方式,向 A/D 转换单元发送控制指令,启动 A/D 转换;

[0103] 步骤 4、查询 A/D 转换完毕信号,如果转换完毕,则执行步骤 5,否则返回步骤 4;

[0104] 步骤 5、读取 A/D 转换结果  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $V_1$ 、 $V_2$ 、 $I_1$ 、 $I_2$ ,并依据式 (1) 将  $D_1$ 、 $D_2$  变换为 A 端和 B 端的悬浮间隙值  $Gap_1$ 、 $Gap_2$ ,将  $V_1$ 、 $V_2$  变换为 A 端和 B 端的运动速度值  $v_1$ 、 $v_2$ ,将  $I_1$ 、 $I_2$  变换为单电磁铁 A 和单电磁铁 B 的悬浮电流值  $i_1$ 、 $i_2$ ;

[0105] 步骤 6、根据上一个周期的 PWM\_A 和 PWM\_B 的大小,分别依据式 (2) 估计出施加在电磁铁 A 端和 B 端的控制电压  $u_1$  和  $u_2$ ;

[0106] 步骤 7、利用式 (3) 所示低通滤波器,对控制电压  $u_1$  和  $u_2$  进行滤波,得到作用在电磁铁 A 端和 B 端的平均电压  $\bar{u}_1$  和  $\bar{u}_2$ 。

[0107] 步骤 8、利用式 (4) 所示低通滤波器,对电流信号  $i_1$  和  $i_2$  进行滤波,得到流经电磁铁 A 端和 B 端的平均电流  $\bar{i}_1$  和  $\bar{i}_2$ 。

[0108] 步骤 9、根据作用在电磁铁 A 端和 B 端的平均电压  $\bar{u}_1$  和  $\bar{u}_2$ ,以及平均电流  $\bar{i}_1$  和  $\bar{i}_2$ ,依据式 (5) 估计出电磁铁 A 端和 B 端的直流电阻。

[0109] 步骤 10、根据  $\dot{B}_1(t) = \frac{u_1(t) - 2\hat{R}i_1(t)}{2NA}$  和  $\dot{B}_2(t) = \frac{u_2(t) - 2\hat{R}i_2(t)}{2NA}$ ，则可利用依据式 (6)

数值积分方法，得到 A 端和 B 端的磁场强度  $B_1$  和  $B_2$ 。

[0110] 步骤 11、结合设定悬浮间隙  $d_0$ ，依据式 (7) 和 (8) 计算控制量 PWM\_A 和 PWM\_B 并输出。

[0111] 步骤 12、中断现场恢复；

[0112] 步骤 13、退出中断服务程序，返回主程序。

[0113] 以上所述仅为本发明的优选实施方式，本发明的保护范围并不仅限于上述实施方式，凡是属于本发明原理的技术方案均属于本发明的保护范围。对于本领域的技术人员而言，在不脱离本发明的原理的前提下进行的若干改进和润饰，这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

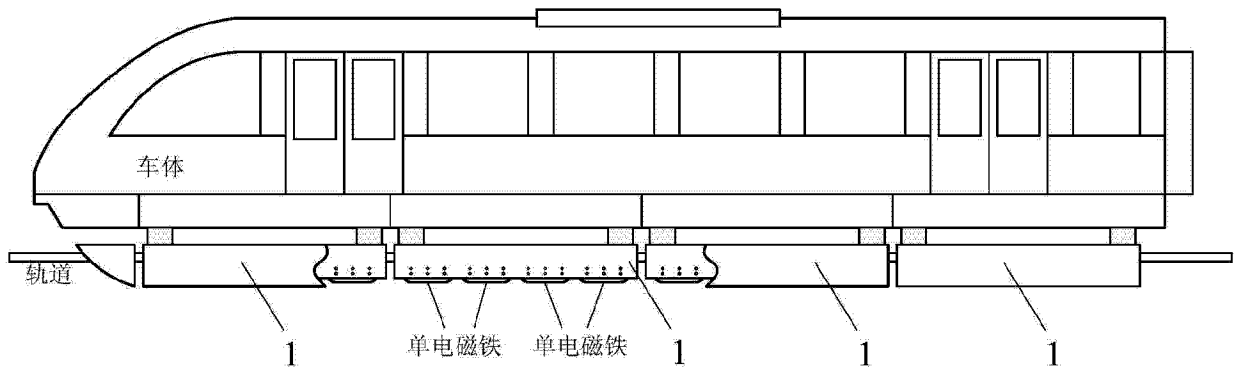


图 1

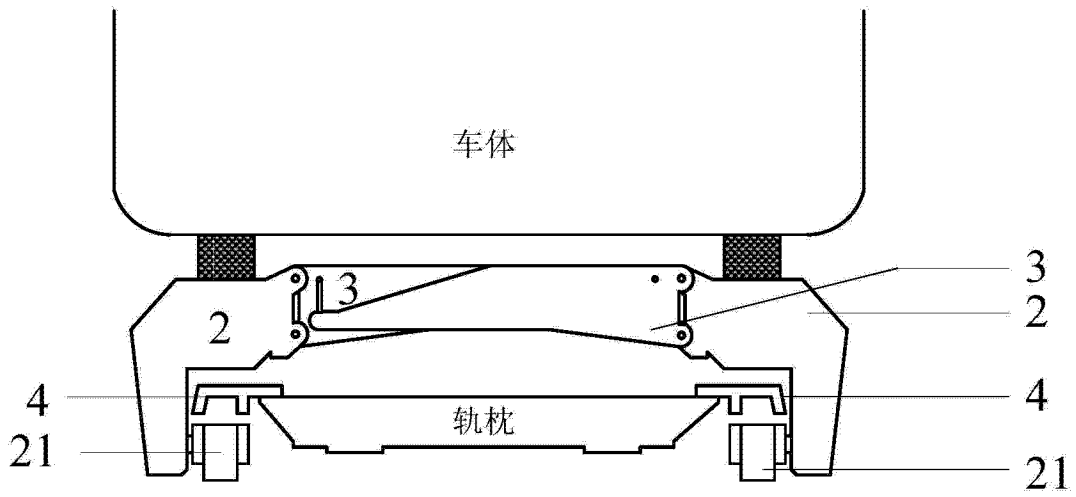


图 2



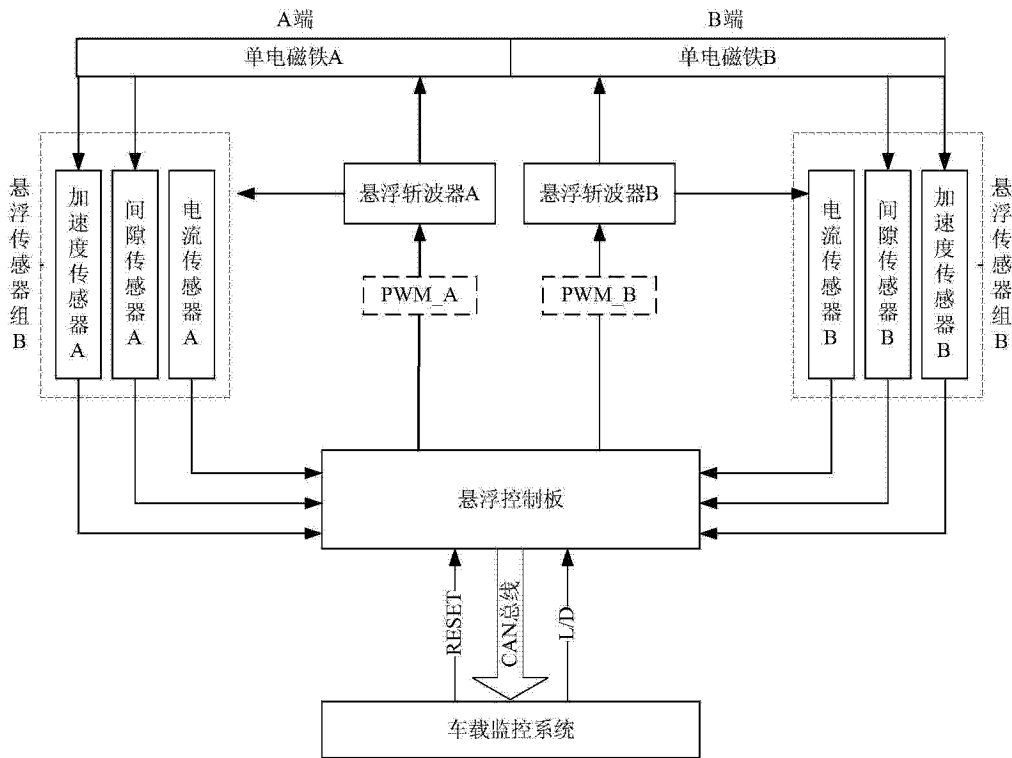


图 3

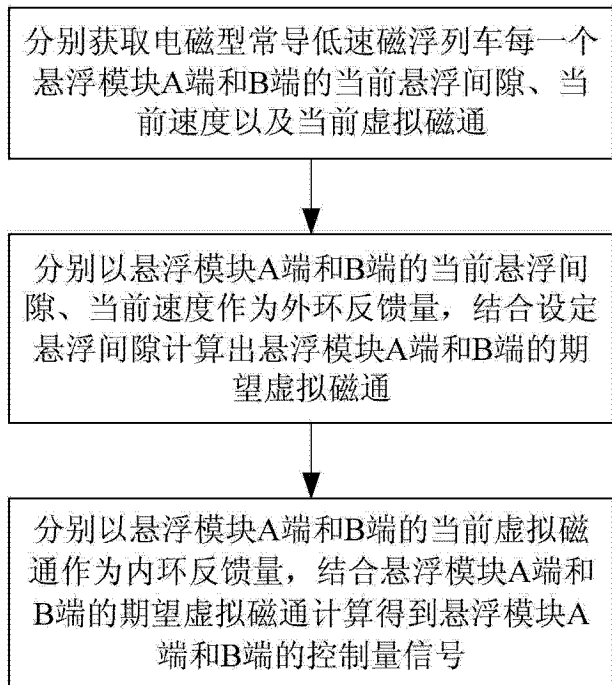


图 4

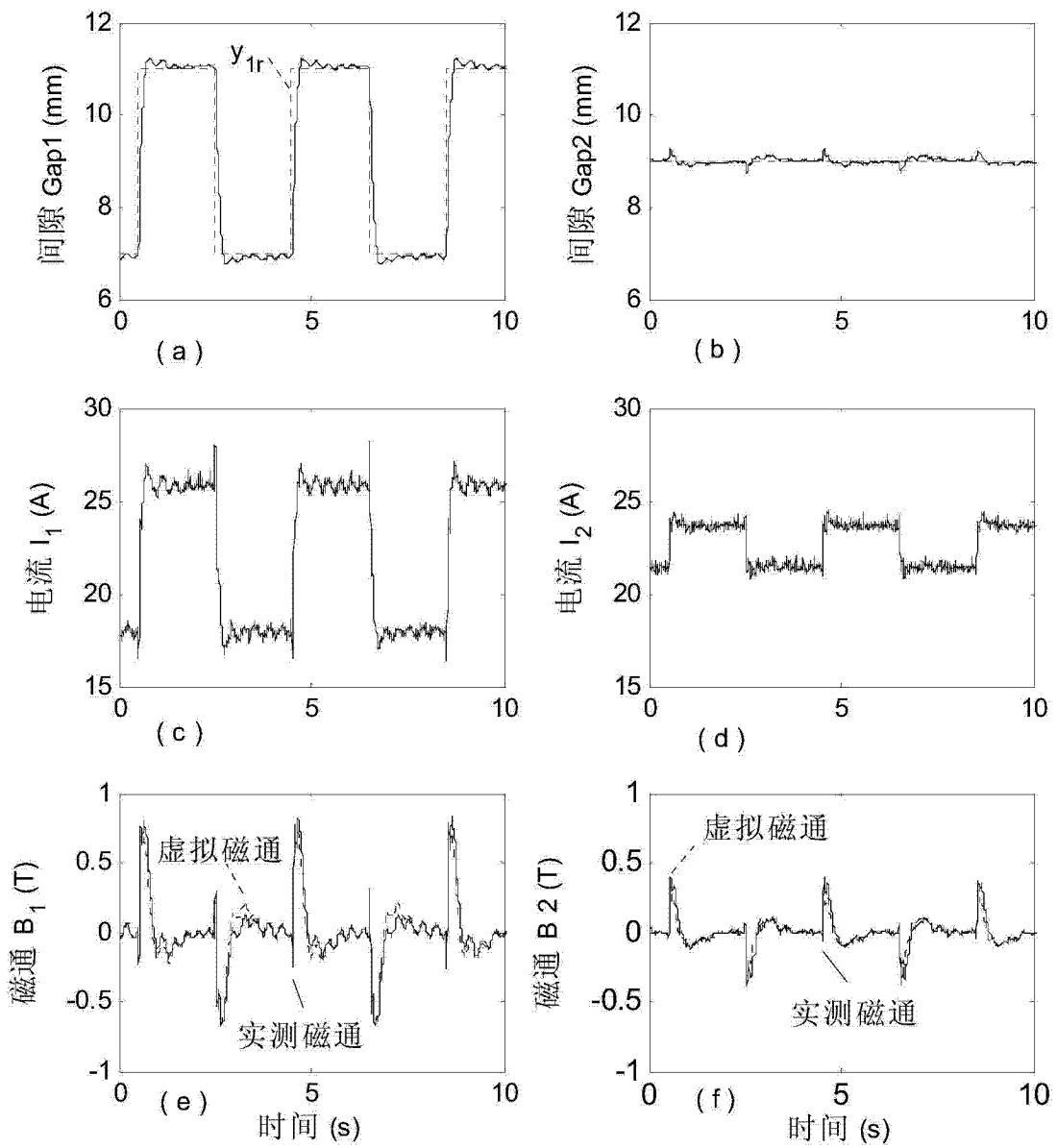


图 5

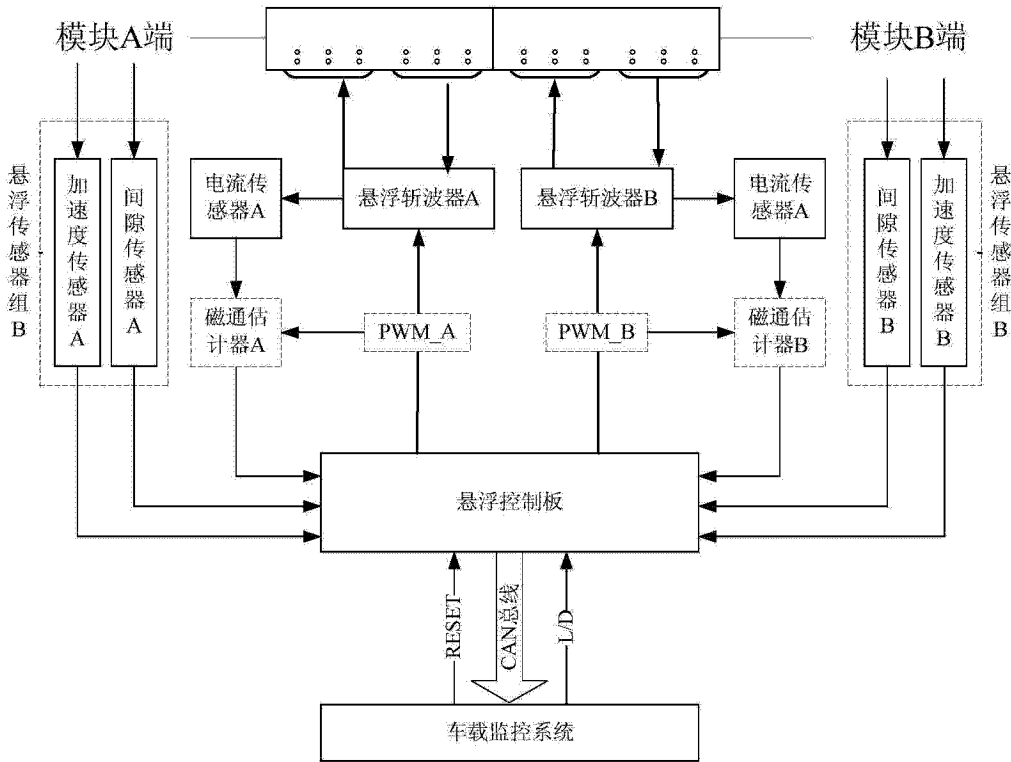


图 6

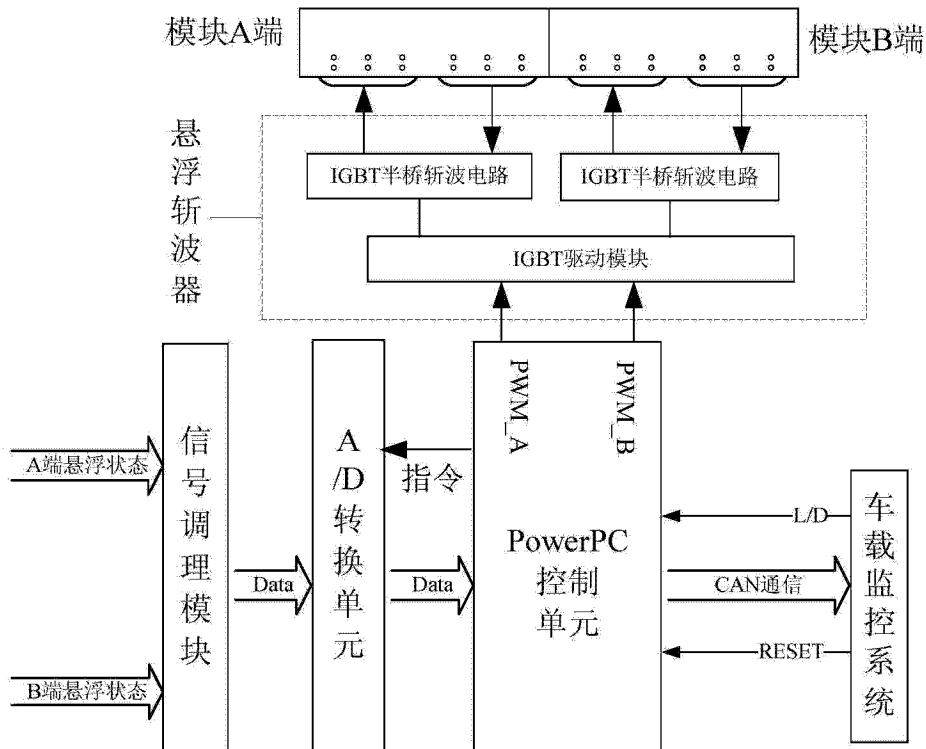


图 7