

基于电力电子技术的 DSP 磁悬浮系统设计

罗妮娜, 王立德, 王亮

(北京交通大学, 电气工程学院 北京 100044)

摘要 : 本文主要讨论由 DSP 为核心构建的磁悬浮系统, 并详细分析控制系统的两个关键要素: 主控器和悬浮驱动器。在设计中, 这两部分我们分别采用数字处理芯片 TMS320LV5402 和两象限桥式悬浮斩波器。最后分析了具体数字实现中应注意的问题。
关键词: 悬浮系统, DSP, TMS320LV5402, 两相限桥式斩波器。

Design Suspension System Based on DSP and Electrical&Electron

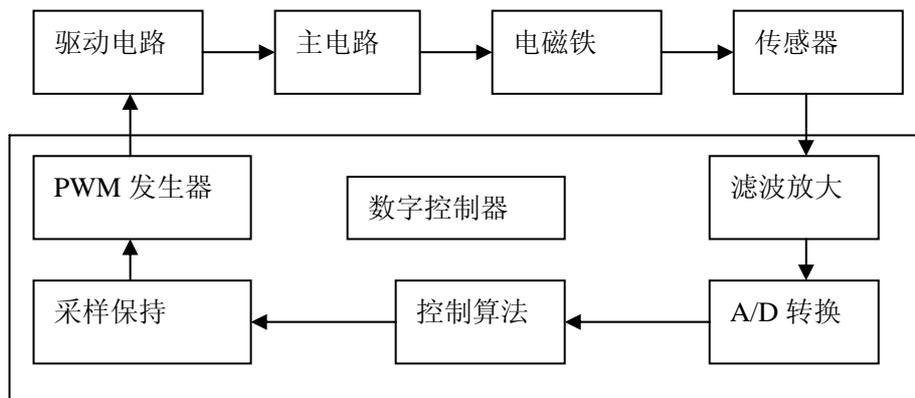
Luo Nina, Wang Lide, Wang Liang

(School of Electrical Engineering, Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Suspension System centered on DSP is discussed in this paper. It also analyzes two key factors of the control system-the main controller and the suspension drivers. Digital signal processor chip TMS320LV5402 and two-quadrant bridge suspension chopper are applied to this system, respectively. At last, the paper analyzes the problems worthy of consideration in digital implement.

Key Words: Suspension System, DSP, TMS320LV5402, two-quadrant bridge chopper

1. 控制系统的构建:



图一

图一为单电磁铁控制系统的结构图。电磁铁的可控量为其线圈的端电压, 通过改变线圈电流, 改变气隙磁密, 从而改变电磁吸力的大小。由于电磁铁的动力学模型是三阶不稳定系统, 故在开环情况下, 系统是不稳定的, 必须对电磁铁的气隙进行反馈控制, 才能保持气隙恒定。控制系统的工作原理为: 首先通过气隙传感器检测电磁铁的气隙变化, 模数转换后, 进行数字滤波并放大, 再与控制的给定值比较获得到偏移量, 采取一定的控制算法 (本试验中采用的是改进型 PID 控制), 获取控制量, 此控制量通过 PWM 发生器, 产生 PWM 波驱动主电路, 改变电磁铁两端的电压, 从而改变电磁

线圈的电磁吸力的大小, 以控制被悬浮物体的稳定悬浮。结构图中方块内部为整个数字控制器。从以上分析可知, 此系统中控制器和主电路的选取, 对整个电路的刚度、实时性和稳定性有着重要意义。下面就这两个方面进行分析。

2. 主控器的选取:

控制系统的实现可以全部采用模拟电路, 也可以采用以数字电子计算机为核心的数字电路。模拟电路的优点是运算速度快, 实时性好, 但控制精度低、电路受外界环境影响大, 且不易实现复杂的控制算法, 调试困难。对于复杂的控制理论来说, 用数字实现方式肯定比模拟

实现方式方便。而磁悬浮控制系统本身就是个复杂系统，这自然就对控制器提出了较高的要求。磁悬浮模拟控制器电路中的电阻、电容、运算放大器等器件的特性都会随着温度的改变而改变，这就意味着，一个模拟控制器的性能在 0℃ 时和 70℃ 时会大不一样，而数字控制器的电路在其保证的工作范围内受温度变化的影响几乎没有。此外，对于磁浮列车模拟控制器电路来说，还必须考虑到器件以及制造器件的材料的使用寿命，这将极大地影响整个悬浮控制系统的性能。

传统的数字控制器大多采用单片机来实现，但这种控制器的控制效果要受到采样频率的限制。当控制算法复杂，计算量较大时，采样频率就不可能很高。这势必会影响控制的效果。而我们采用数字信号处理器 DSP 来实现对系统的控制。DSP 器件是一种特别适用于数字信号处理运算的微处理器^[3]，由于它具有硬件上采用多总线哈佛 (Harvard) 结构、指令执行采用流水作业 (Pipeline)、采用独立的硬件乘法 / 加法器 (MAC) 等特性，使得以 DSP 器件为核心的控制系统具有非常快的数据处理能力和良好的扩展能力，克服了模拟控制器和以单片机为核心的数字控制器的缺陷。但对于用数字信号处理器 (DSP) 来实现数字控制器，它们所带来的影响要小得多。而且，DSP 电路还可以通过编程来检测和补偿模拟系统的变化，从而进一步减小温度对系统的影响，增强系统的抗干扰性，对悬浮控制的最基本要求是控制系统要具有快速响应、动态过程平稳、抗干扰好的性能特点，其中抗干扰性尤为重要。

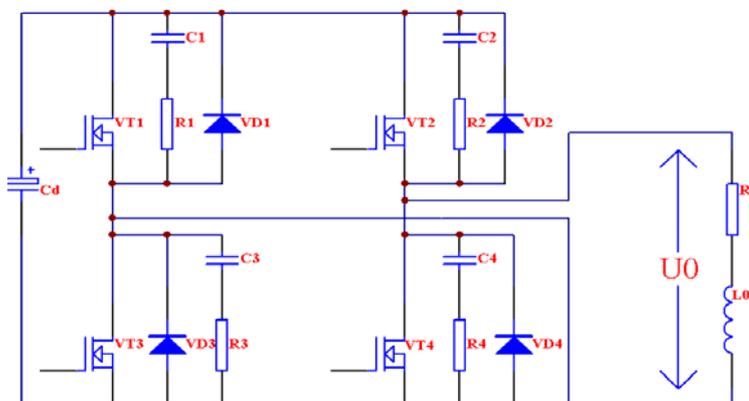
由此可见，用 DSP 实现的数字控制器在磁悬浮控制方面有着其特有的优势，笔者在此系统中选取此德州仪器公司的 320TMS5402DSP

作为本系统的控制器。它为 16 位定点运算 DSP，它可以达到 100MBPS 的工作速度，从而可以将工作频率大大提高。这也就要求系统的另一个关键点也要有相应的高速高效的选取，从而提高整个系统的性能。

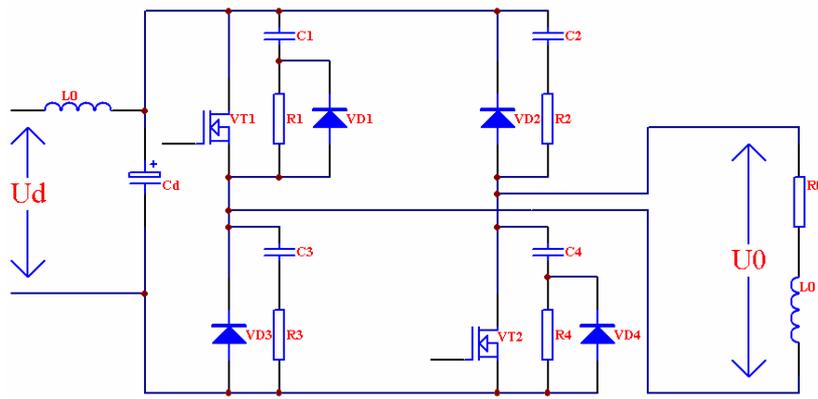
3. 主电路 (悬浮斩波器) 的选择:

电磁悬浮系统 (EMS) 是一个不稳定系统，当悬浮气隙发生变化时，要求电磁铁电流迅速做出相应的调整，从而改变电磁线圈的电磁场以改变电磁铁的电磁力的大小，以使悬浮系统气隙保持一个动态的稳定状态。悬浮斩波器是多点悬浮系统的功率驱动部分，也是关键的动力设备，斩波器的结构、供电电压、开关频率等因素将直接影响悬浮系统的稳定性和刚度，DC-DC 悬浮斩波器的种类很多，基本上可以分为类：

- A. 单片线性放大电路，他最大特点可以平滑的调节电流性能，且电路简单。但同时通过电阻调压，损耗较大，而且电阻自动调节调节较为困难。
- B. 普通单管直流斩波电路，还分为 BOOST (升压) 和 BUCK (降压) 型斩波器，功率管处于开关状态，损耗较小，负载电流是通过续流二极管达到电流连续调节的目的，但续流电流是通过负载自然衰减的，所以电流减小的速度无法控制且较慢，这难于满足悬浮系统电磁铁快速稳定的要求。
- C. 新型两象限 H 型桥式斩波器电路，当晶体管 VT1, VT2 截止时，电磁铁的磁能通过二极管 VD2, VD4 向供电电源反馈，因此该电路除了具有上述电路的优点外，还具有反应速度快，效率高 (能量可以反馈会电源端)，开关元件承受的反压小等特点。



图二

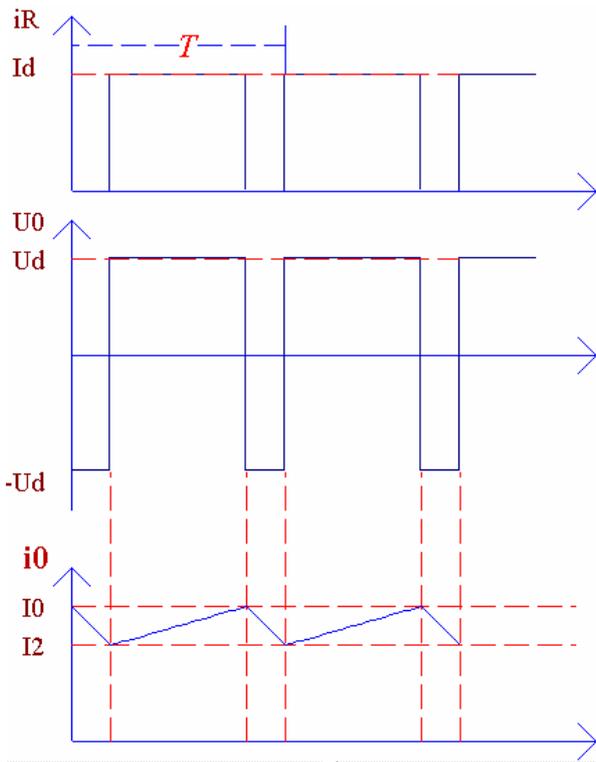


图三

D. 四象限斩波器

相当于两个两象限桥式斩波器并联。见图二。与单个两象限斩波器相比最大的特点是在负载端可以通过两个方向的电流，使电路控制更加灵活，但在悬浮系统中电流方向指定，不需要双向电流，而且从电路图中我们可以看出，四象限斩波器开关器件是两象限的二倍，性价比不高。跟据电磁悬浮系统要求响应快、耐冲击等特点，我们选取了 H 型 MOS 两象限斩波器，如图三。它既可向负载提供能量，工作在电动工况，也可迅速将负载电路反接入电源，向电网回馈能量，使磁场电流快速减小，用它来控制电磁铁电流非常有利。

两象限桥使斩波器工作原理



图四

如图四所示。在悬浮试验中，采用了开关元件

VT1,VT2 同时通断的控制方式，因为这种方式 di/dt 最大，对电磁铁电流控制最有利^[1]。其负载电压和电流波形如图 1b 所示。

T---斩波周期， t_1 ---关断时间。

U_d ---输入电压， I_0 -----初始电流

U_0 ---负载两端电压， i_0 ---负载两端电流。

(1) $0 < t < t_1$ (关断时间)

$$t=0, i_0=I_0, U_0=-U_d。$$

此时开关管 VT1,VT3 关断，在反向电压的作用下， i_0 按指数迅速下降。电压方程为

$$R_0 i_0 + L di/dt = -U_d$$

由此可以获得关断时间（续流过程）的电流：

$$i_0 = \frac{U_d}{R} (e^{-(R/L)t} - 1) + I_0 e^{-(R/L)t} \quad (0 < t < t_0)$$

当 $t=t_1$ 时， $i_0=I_2$ 代入上式得

$$I_2 = \frac{U_d}{R} (e^{-(R/L)t_1} - 1) + I_0 e^{-(R/L)t_1}$$

(2) $t_1 < t < T$ (导通时间)

此时 VT1 和 VT3 导通，在电源电压作用下， i_0 按指数规律增长，电压方程为

$$R_0 i_0 + L di/dt = U_d$$

由此可以获得导通时间（充电过程）的电流：

$$i_0 = \frac{U_d}{R} (e^{-(R/L)(t-t_1)} - 1) + I_0 e^{-(R/L)(t-t_1)} \quad (t_1 < t < T)$$

当 $t=T$ 时， $i_0=I_0$ 又回到初始电流，代入上式得

$$I_0 = \frac{U_d}{R} (1 - e^{-(R/L)(T-t_1)}) + I_2 e^{-(R/L)(T-t_1)}$$

联立解得

$$I_0 = \frac{U_d}{R} \frac{e^{-(R/L)T} - 2 \times e^{-(R/L)(T-t_1)} + 1}{1 - e^{-(R/L)T}}$$

$$I_2 = \frac{U_d}{R} (e^{-(R/L)T} - 2 \times e^{-(R/L)t_1} + 1) / (1 - e^{-(R/L)T})$$

由此式可以看出，两相限桥式斩波器的续流过程要比单管斩波器的续流过程要快，而且续流过程是一个向电源反馈能量的过程。所以选取两象限桥式斩波器作为悬浮斩波器是合理的。

两象限桥式斩波器的具体电路如图所示。如果忽略斩波器的开关元件的通断损耗，电源电压加在电磁铁上的电流脉动，电流与负载之间的关系可按下列公式计算

$$U_m = U_d (2\alpha - 1)$$

$$i_d = i_m (2\alpha - 1)$$

上式中

$\alpha = t/T$ ----- 导通比（其中 t 为开关管导通时间， T 为周期）

U_m, i_m ----- 电磁铁平均电压和平均电流

U_d, i_d ----- 电源的平均电压和平均电流

图五是所示的试验波形是利用本论文设计的控制器和主电路，运用改进型的 PID 控制理论所得的实验结果。从以上的波形可以看出，无论是在外界随机干扰还是在外界阶跃干扰下，电磁铁电流有较

小的纹波，稳定起隙也只有很小的波动。而这也体现了 DSP 作为主控器的优势和两象限桥式斩波器作为执行器的优越性。这是由于 DSP 控制实现时，控制频率比一般数字控制器大大提高，同时 DSP 的高速乘法和除法运算使从传感器传来的信号可以得到很好的实时处理，并快速的将控制信号送入 PWM 产生器，从而将反馈控制量作用到对象电磁铁上，而此时电磁铁的状态变化不大，这就做到了控制系统可以很好的跟踪对象的变化，系统的性能得到了明显的提高。

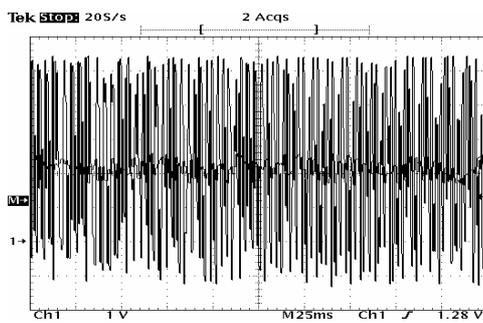
控制方式：磁控制系统采用的是改进型 PID 控制方式

采样频率：10KHZ 悬浮物质量：5kg 电磁铁匝数：800

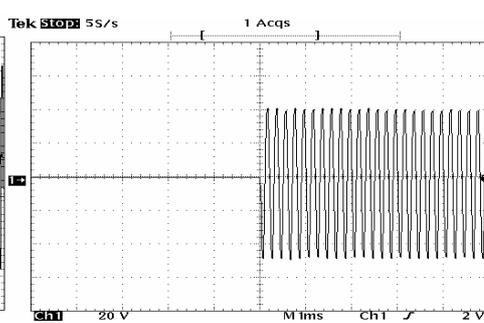
电磁铁截面积：25cm² 线圈电阻：1Ω 平衡气隙：10mm 平衡电流：2A

在实现过程中我们也感觉到又以下几个问题应当注意

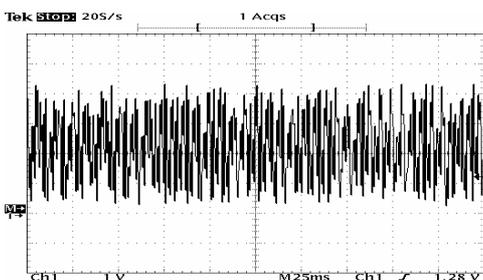
- 1 悬浮的控制系统稳定性分析不能局限于各点组件的稳定悬浮，而应该从多点系统的整体稳定性考虑，进行必要的参数调节和改造，以适合系统整体的稳定悬浮。
- 2 如果单点组件电磁铁悬浮的稳定区域与电磁铁组件多点同时悬浮的稳定区域相同。说明多点电磁铁悬浮各点



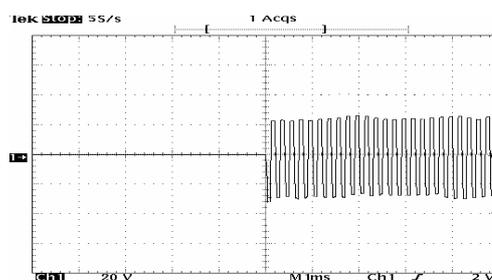
(1). 外界随机干扰电磁铁电流



(2). 外界阶跃干扰电磁铁电流



(3). 随机干扰下的悬浮气隙



(4). 阶跃输入下的悬浮气隙

图五

间具有独立性,有利于整车悬浮;如果各点悬浮稳定区域不同或整车悬浮稳定区域过小,说明需要从电气上和机械上重新改造解耦,以调整各点稳定区。

3 脉宽调节器。本悬浮试验中调制器可以生成三路相差 120° 的 20kHz 的 PWM 的载频控制信号,从而实现了一套控制器驱动三套悬浮斩波器的目的。斩波控制器脉冲相差 120° ,可以相对降低供电电源的容量,减小供电电源纹波。这是因为,采用相位相错 120° 的三路斩波器,当一路斩波器元件关断时,另外有一路斩波器元件正好开通,因此斩波器关断回路的反馈能量可以作为提供给另一路斩波器导通回路的电源电流的一部分,降低了因为负载增加而导致的电源电压纹波增大的缺点。

结论:

本文分析了磁悬浮控制系统的基本组成,并基于磁悬浮系统的基本特点和要求,给出了本系统关键部分主控器和驱动器的选取方法,选取了基于 DSP 为主控器, H 型两象限桥式斩波器为驱动器的悬浮

系统,本系统在随机干扰和阶跃干扰情况下,可在 0.1 秒内迅速恢复动平衡状态,验证了本系统具有较强的刚度和稳定性。

参考文献:

1. 邵丙衡. 直流斩波器 《电力电子技术》1997年8月
2. 李红、左鹏、刘伟志等 6t 单转向架磁浮试验车的研究 《铁道学报》1999.2
3. 吴建军、张昆仑 用 DSP 实现新一代磁浮列车悬浮控制器 《电子技术应用》2000.7

作者简介:

罗妮娜 (1981——),女,硕士研究生,研究方向为电力系统及其自动化。

王立德 (1960——),男,教授,博士生导师,从事机车在线监测及智能仪器的研究。

王亮 (1978——),男,硕士研究生,研究方向为电气系统及其自动。