

磁悬浮球控制系统的设计研究

王义进, 席文明

(厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 为了更好地研究磁悬浮技术, 根据电磁学理论, 对磁悬浮球控制系统的原理进行了分析, 建立了控制系统的数学模型, 进行了控制系统的稳定性分析; 针对磁悬浮球控制系统的滞后特性, 提出了 PD 超前补偿控制方法, 组成了闭环反馈控制系统, 并在 MATLAB 下进行了控制系统的软件仿真; 在此基础上, 根据电子学和自动控制理论, 设计了一个基于 PD 控制器的磁悬浮球控制系统, 实现了钢球的稳定悬浮; 控制系统的电路部分完全由模拟电子电路实现, 既简单又实用。

关键词: 磁悬浮; PD 控制器; 光电传感器; 硅光电池

Research on Designing a Maglev Ball Control System

Wang Yijin, Xi Wenming

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In order to research the maglev technique well, the principle of a maglev ball control system is analyzed, including deducing its math model and analyzing its stability. Aiming at the lag characteristic of the control system, a PD lead compensation control method is advanced to compose a closed loop feedback control system, which is simulated by using the MATLAB. Then on the basis of electronics and automation theories, a maglev ball control system based on PD controller is designed which can suspend a steel ball stably. The circuit of the control system is achieved by analog circuit completely, which is simple and practical.

Key words: maglev; PD controller; photoelectric sensor; photocell

0 引言

磁悬浮作为一种高新技术, 已广泛应用于交通、国防、工业等领域, 例如磁悬浮列车、磁悬浮天平、磁悬浮轴承、磁悬浮导轨和半导体工业中的芯片传送系统等^[1]。目前, 磁悬浮技术仍然是世界各国的研究热点。其基本原理就是利用电磁力来平衡被控对象的重力, 使被控对象稳定悬浮在固定的位置。磁悬浮系统具有控制精度高、非接触、消耗能量少等优点, 在能源紧张的今天, 研究磁悬浮系统具有重要的意义。本文根据电磁理论, 分析了磁悬浮球控制系统的原理, 建立了系统的数学模型, 并在 MATLAB 下进行仿真。在此基础上, 设计了一个基于 PD 控制器的磁悬浮球控制系统, 实现了大直径钢球的稳定悬浮, 为以后的迈克尔逊干涉仪动镜系统设计和微装配中的磁悬浮导轨设计建立理论基础和实验系统。

1 磁悬浮系统工作原理

磁悬浮球控制系统是由电磁铁、光源、光电传感器、钢球、控制电路和电流驱动电路等组成, 如图 1 所示。

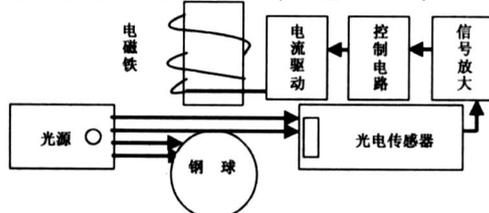


图 1 磁悬浮球控制系统示意图

系统工作原理是^[2]: 电磁铁线圈中通上电流会产生电磁场, 位于磁场中的钢球会受到电磁力吸引作用, 只要控制电磁铁线圈中的电流, 使之产生的电磁力与钢球的重力相平衡, 钢球就可以稳定悬浮在空中。具体控制过程如下: 由光源和光电传感器组成位置传感器, 检测钢球的位置, 将位置信号放大后, 送给控制电路处理, 处理结果用来控制电磁铁线圈中的电流大小, 从而控制钢球所受电磁力大小。当钢球位置低于设定的平衡位置时, 光电传感器接收到的光通量增多, 位置信号变大, 控制电路使电磁铁线圈中的电流增大, 从而增大对钢球的电磁吸引力, 使钢球上升回到平衡位置; 当钢球位置高于设定的平衡位置时, 光电传感器接收到的光通量减少, 位置信号变小, 控制电路使电磁铁线圈中的电流减小, 从而减小对钢球的电磁吸引力, 使钢球下降回到平衡位置。

2 磁悬浮系统数学模型

在磁悬浮球系统中, 线圈电感与钢球位置有关。在足够精确的情况下, 电感 L 与钢球位置 x 的关系可以用一指数函数表示^[3]:

$$L(x) = L_1 + L_0 e^{-x/a} \quad (1)$$

式中, L_1 为无钢球时的电感, L_0 为钢球紧贴着电磁铁时的电感增量, a 为常数。

系统的磁能是线圈电流 i 和钢球位置 x 的函数:

$$W(i, x) = \frac{1}{2} L(x) i^2 \quad (2)$$

由式 (1)、(2) 可以得到钢球所受的电磁力:

$$f = \frac{\partial W}{\partial x} = -\frac{L_0}{2a} i^2 e^{-x/a} \quad (3)$$

静态平衡时, 电磁力刚好等于钢球所受的重力。假设平衡时, $x = d$, $i = I$, 则:

收稿日期:2006-07-13; 修回日期:2006-08-26。

作者简介:王义进(1982-),男,福建莆田人,硕士研究生,主要从事磁悬浮控制方向的研究。

$$Mg = f = \frac{L_0}{2a} I^2 e^{-d/a} = \frac{N^2 L_d}{2a} I^2 \quad (4)$$

式中, N 为线圈匝数, L_d 为单匝线圈在 $x = d$ 时的电感增量。

由式 (4) 可得:

$$I = \sqrt{\frac{2Mg \frac{a}{N^2 L_d}}{L_d}} \quad (5)$$

由式 (5), 可以预估平衡时的线圈电流, 为系统的设计提供依据, 例如功率管容量、电磁铁散热等。

由式 (3) 知, 钢球所受的电磁力为线圈电流 i 和钢球位置 x 的函数, 而且是非线性的。将式 (3) 在平衡点 $x = d, i = I$ 处线性化, 即用泰勒公式展开, 并舍去高次项得到:

$$f(i, x) = f(I, d) + \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{(I, d)} x - \frac{\partial f}{\partial i} \Big|_{(I, d)} i \quad (6)$$

或

$$f = \frac{1}{2a^2} L_0 e^{-d/a} I^2 x - \frac{1}{a} L_0 e^{-d/a} I i \quad (7)$$

不考虑外界干扰力, 并注意到平衡时有 $f(I, d) = Mg$, 则钢球的受力方程为:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = f(i, x) - Mg = f = \frac{N^2 L_d I^2}{2a^2} x^2 - \frac{N^2 L_d I}{a} i \quad (8)$$

上式左右两边进行拉普拉斯变换, 并整理得:

$$\frac{X(s)}{I(s)} = - \frac{\frac{N^2 L_d I}{a}}{Ms^2 - \frac{N^2 L_d I^2}{2a^2}} \quad (9)$$

根据式 (5), 可将式 (9) 简化为:

$$\frac{X(s)}{I(s)} = \frac{-2g}{s^2 - \frac{g}{n}} \quad (10)$$

式中, $n = \sqrt{g/a}$ 。式 (10) 即为磁悬浮系统的传递函数。由于它是系统在平衡点处线性化得到的, 因此也称为系统的小信号模型, 是两个微小变化量 x, i 之间的传递函数。

由式 (10) 知, 该传递函数有一对关于 Y 轴对称的极点 $\pm n$ 。如果控制系统使用简单的闭环比例控制, 则无法使系统的闭环极点全都落在 Y 轴左侧, 即系统无法稳定; 如果在控制系统中加入一个具有超前传递函数形式的控制器, 如 PD 控制器, 则可以使系统的闭环极点全都落在 Y 轴左侧, 即系统可以稳定。

3 磁悬浮系统仿真

根据已建立的磁悬浮系统数学模型, 在 MATLAB 下进行仿真, 在 PD 控制下的仿真曲线如图 2 所示。图 2 中, 纵坐标为钢球悬浮距离, 单位为 m; 横坐标为时间, 单位为 s。由图 2 可以看出, 当设定悬浮距离为 0.01 m 时, 钢球可以稳定悬

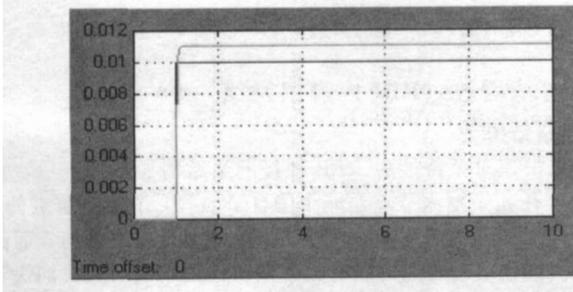


图 2 磁悬浮系统的仿真曲线

浮在 0.011 m 附近。

4 磁悬浮系统设计

磁悬浮球控制系统电路主要包括传感器检测部分、控制器部分和电流驱动部分等。

(1) 传感器检测部分: 完成钢球位置信号的检测, 具体电路如图 3 所示。图 3 中, 由于运放的“虚断”特性, 硅光电池产生的电流 i_s 全部流过 R_f 反馈电阻, 运放的正输入端是“虚地”, 与硅光电池的正极等电位, 又由于运放的“虚短”特性, 保证了硅光电池的正负极电位相等, 相当于工作在短路状态, 即 i_s 为硅光电池的短路电流。由于短路电流与硅光电池接收的光通量成线性关系, 而 $u_o = i_s R_f$, 因此输出电压 u_o 也与接收的光通量成线性关系, 从而与钢球的位置成线性关系。此外, 为了抑制高频噪声, 通常在反馈电阻 R_f 两端并联一个小电容 C 。

(2) 控制器部分: 完成信号处理工作, 这里采用常见的 PD 控制器, 电路如图 4 所示^[4]。

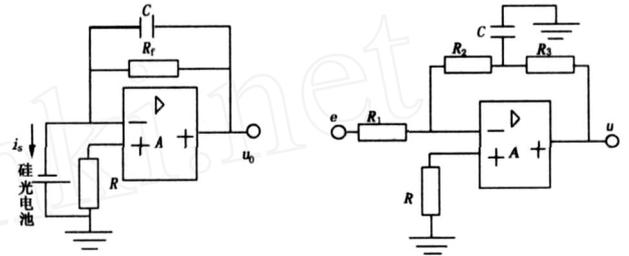


图 3 传感器信号处理电路

图 4 PD 控制器电路

图 4 中, 假设运放为理想运放, 则可以容易得到:

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K(Ts + 1), \text{ 式中, } K = - \frac{R_2 + R_3}{R_1}, T = \frac{R_2 R_3 C}{R_2 + R_3}$$

因此, 该电路是一个典型的 PD 控制器电路, 选用高精度的运算放大器, 控制效果良好。

(3) 电流驱动部分: 实现功率放大, 输出电磁铁线圈电流, 可以利用大功率场效应管的“电压控制电流”特性实现, 具体电路如图 5 所示^[3]。

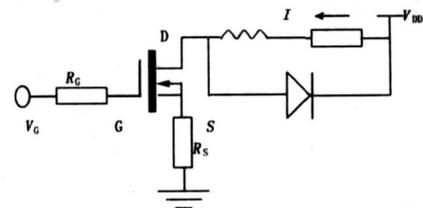


图 5 电流驱动电路

图 5 中, V_G 为控制电压, 用来控制电磁铁线圈中电流 I 的大小。整流二极管起到保护作用, 电阻 R_G 用来限制场效应管栅极电流, 电阻 R_S 是个反馈电阻, 起调节增益和抑制干扰的作用。电路增益为: $G_F = \frac{\partial i_D}{\partial v_G} = \frac{g_{fs}}{g_{fs} R_S + 1}$, 其中 g_{fs} 为功率场效应管工作点处的跨导。需要指出的是, 该增益 G_F 是场效应管工作点附近的偏差量的增益, 即场效应管 $I_D \sim V_G$ 曲线上工作点处的导数, 是随工作点改变的。

将以上各部分电路连接好, 适当调节参数, 就可以实现钢球的稳定悬浮, 如图 6 所示。

(下转第 634 页)

阵 P 的特征值。

(3) 图 4 中的 \bar{x}_1 , \bar{x}_2 分别是被控对象对应 τ_1 , τ_2 时的系统状态变量。

对于影响 NCS 稳定性的因素及解决方法的研究有很多, 可参考文献 [5]。我们在设计 AUV 制导系统 NCS 时可以根据系统的稳定性条件来设计控制器和选择合适的网络传输波特率。在图 2 中, 我们假设某型号航行器纵向攻角 α 的传递函数^[6]为:

$$G(s) = 0.72 \frac{0.07s + 1}{(1.22s + 1)(0.12s + 1)} \quad (6)$$

假设舵机伺服控制器采用 PI 控制器

$$G_p(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (7)$$

式中, $K_p = 0.1701$, $K_i = 0.378$ 。一般地, 控制器运算产生的时延 τ_c 很小可以忽略, 网络时延只需考虑传感器到控制器的时延 τ_{sc} 和控制器到执行器的时延 τ_{ca} , 不失一般性地在仿真计算时假设 $\tau_{sc} = \tau_{ca}$ 。图 5 给出了网络时延 τ 时系统 (5) 的闭环阶跃响应, 从图中可以清楚地看出网络时延对系统性能和稳定性的影响。我们可以根据工程要求和仿真结果, 选择一个合适的总线通信波特率。此外, 我们还可以根据该仿真结构和网络时延设计出理想的航行器 NCS 控制器。由于本文的目的仅

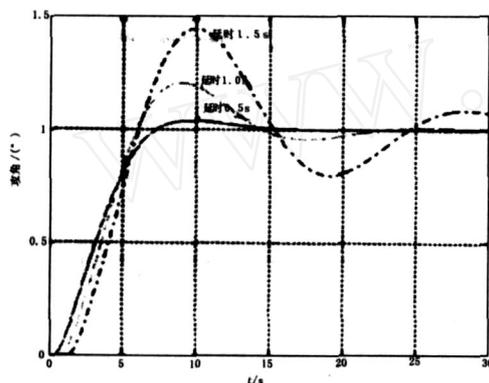


图 5 网络时延对系统的影响

在于研究航行器 NCS 的结构, 其稳定性和控制器设计在此就不作详细阐述。

3 结论

近年来, 以现场总线技术、嵌入式技术和控制理论为基础的 NCS 已经在汽车、飞机、工业机器人等领域中得到越来越广泛的应用。而针对 NCS 的进一步研究也在如火如荼地进行中, AUV 系统也不例外。NCS 技术和理论的引入, 必将能提高航行器的战术性能指标, 同时给航行器的维护、缩短设计周期、降低研制费用等方面带来益处。本文根据 NCS 技术, 提出设计 AUV 制导系统 NCS 结构, 并且分析了闭环 NCS 的稳定性问题, 其目的也在于引起同行专家的高度重视, 尽快将这些新技术应用于航行器设计, 加强我国海洋事业的建设。

鉴于 NCS 的诸多优点, NCS 将是下一代全数字 AUV 的重要技术基础和结构。对于 NCS 的进一步研究应着重在实时网络的通信协议和规范, 制定适合我国 AUV 使用的标准军标。其次是研究基于嵌入式技术的控制节点, 将真正的实时多任务技术引入到航行器, 研制标准控制模块和总线接口模块。另外, 建立适合研究 NCS 的仿真系统也是重要的方向, 它是进行 NCS 分析和设计的基础。

参考文献:

- [1] 吴旭光. 现场总线技术及其在鱼雷中的应用 [J]. 鱼雷技术, 2002, (3): 12 - 15.
- [2] 王 慧, 吴旭光. 基于嵌入式技术的鱼雷制导系统结构研究 [J]. 鱼雷技术, 2004, 25 - 28.
- [3] Leen G, Heffernan D. TTCAN: a new time - triggered control area network [J]. Microprocessors and Microsystems, 2002, 26: 77 - 94.
- [4] TTTech Computertechnik AG, Specification of the TTP/C Protocol [EB/OL]. <http://www.tttech.com>.
- [5] Tipsuwan Y, Chow M Y. Control methodologies in networked control systems [J]. Control Engineering Practice, 2003, 11: 1099 - 1111.
- [6] 徐德民, 吴旭光, 等. 鱼雷自动控制系统 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2001.

(上接第 609 页)

本系统中, 钢球重量约为 0.8 kg, 悬浮距离约为 1 cm, 悬浮时电磁铁线圈电流约为 2.65 A。

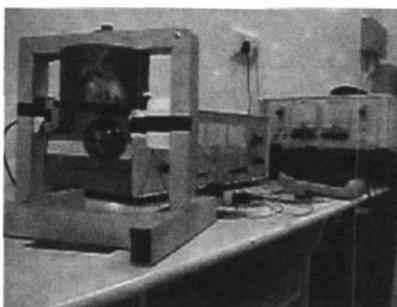


图 6 磁悬浮系统的运行照片

5 结论

单自由度的磁悬浮球控制系统, 是研究磁悬浮技术的基

础。本文分析了磁悬浮控制系统的原理, 建立了系统的数学模型, 并在 MATLAB 下进行仿真。在此基础上, 设计了一个磁悬浮球控制系统, 实现了钢球的稳定悬浮, 为以后的磁悬浮动镜和磁悬浮导轨的研究奠定了基础。由于本系统中, 悬浮的是大直径钢球, 重量比较大, 从而电磁铁线圈电流较大, 发热问题比较严重, 影响系统的长时间运行, 这是将来改进之处。

参考文献:

- [1] 解旭辉, 戴一帆, 等. 大间隙下的磁悬浮测控系统设计与研究 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25 (2).
- [2] 卢建华, 刘爱元. 基于 MCS-51 单片机的磁悬浮球数字控制系统设计 [J]. 微计算机信息, 2001, 17 (2).
- [3] Hurley W G, Woolfle W H. Electromagnetic Design of a Magnetic Suspension System [J]. IEEE Trans. Educ., 1997, 40 (2).
- [4] 罗转翼. 控制工程与信号处理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.