

研
究
开
发基于磁通 - 电流联合内环的
磁悬浮控制方法研究李云钢¹, 谈 瑛²(1. 国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073;
2. 墨尔本大学 工程学院, 澳大利亚 墨尔本 3010)

作者简介: 李云钢 (1969-), 男, 博士, 研究员, 主要从事磁悬浮技术研究。

摘要: 面向磁悬浮系统, 提出基于电流 - 磁通联合内环的新型悬浮控制方法。分析表明, 在内环中同时使用电流和磁通信号进行反馈时, 系统是线性、时不变及完整的, 可取得优于单独的电流环或磁通环的控制效果。研究磁通环的调试和标定方法, 设计自适应型电流环, 提出将磁通传感器线圈嵌入磁铁励磁线圈, 解决磁通环的工程化实现问题。

关键词: 磁悬浮控制; 磁通环; 电流环; 磁通传感器

中图分类号: U292.91+7

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2013)02-0046-03

Maglev Control Method Using Current-Flux Combined Inner Loop

LI Yun-gang¹, TAN Ying²

(1. School of Electromechanical Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;
2. Department of Electrical and Electronic Engineering, The University of Melbourne, VIC 3010, Australia)

Abstract: A novel suspension control was proposed for maglev systems. Instead of using traditional inner single current or flux feedback loop, both current and flux measurements were used in the feedback loop. It was shown that the system of interests became linear time-invariant, which made analysis much easier and leads to a better performance. Moreover, how to commission and calibrate the flux-loop with the help of some adaptive law was also discussed. In order to implement the designed controller in industry, the flux sensor coil was inserted into the magnetic exciting coil, solving the problems of how to set up and manufacture the flux sensors.

Key words: maglev control; flux loop; current loop; flux sensor

0 引言

对于磁悬浮控制系统来说, 降低调试难度和提高鲁棒性是研究重点。在磁悬浮列车研究中, 目前形成了以电流环为内环、间隙环为外环的主流方案。该方案调试较为方便, 且有较好的鲁棒性, 能解决钢梁及道岔上的轨道共振问题, 有效实现全线路条件下的稳定悬浮^[1-5]。电流环在磁悬浮列车上的应用存在4个优势: 电流传感器安装在磁悬浮系统的机械结构之外, 不影响机械结构的设计; 电流量易于测量, 内环调试方便; 电流传感器有成熟产品可供采用, 不必另外开发; 电流环电路与过流保护电路共用电流传感器, 不增加成本。对于悬浮系统的鲁棒性要求很高的应用场合, 则可采用磁通环作为内环。磁通环早在1976年就提出^[6], 并成功应用于英国伯明翰机场磁悬浮线。2000年R.Goodall进行试验之后指出^[7], 尽管采用磁

通传感器不很方便, 但悬浮易于调试, 鲁棒性好, 因此, 磁通环应是磁悬浮系统的不二选择。国内近年也在开展磁通环的理论和试验研究, 通常是通过和电流环比较, 得出磁通环优于电流环的结论^[9-13]。由于工程实现方面存在一定困难, 目前尚无实用系统。本文针对提高磁悬浮系统的鲁棒性开展研究, 旨在解决工程实用问题。在内环中同时使用磁通信号与电流信号进行反馈, 它将优于在内环中使用单个信号的反馈。

1 磁通 - 电流联合内环
的数学模型

考虑图1的单铁刚性模型, 假设忽略漏磁及铁心磁阻^[1], 则磁路磁势为 $U_m = NI$, 气隙磁阻为 $R_m = 2 \times \frac{\delta}{\mu_0 A}$, 从而

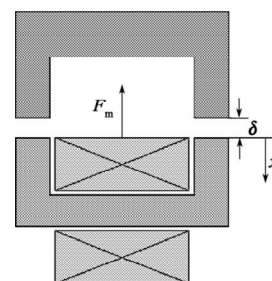


图1 单铁悬浮结构

收稿日期: 2012-08-28

得到气隙磁通为 $\Phi = \frac{U_m}{R_m} = \frac{\mu_0 ANI}{2\delta} = B \cdot A$, 磁密为

$B = \frac{\mu_0 NI}{2\delta}$, 吸力为 $F_m = \frac{B^2 A}{\mu_0}$ 。其中, N 为线圈匝数, I 为励磁电流, δ 为气隙, μ_0 为空气磁导率。对于给定电磁铁, A 为常数, 磁通与磁密等价, 磁通环也称为磁密环^[13]。

进而, 励磁线圈的电压 - 电流方程为^[1,5,9]:

$$U = RI + \frac{d(N\Phi)}{dt} = R \cdot I + NA \cdot \dot{B} \quad (1)$$

磁通环的设计目标是使磁密 B 跟踪给定信号 V 。假设有电流和磁通信号可供反馈, 增益分别为 k_1 、 k_2 , 那么, 控制电压为

$$U = V + k_1 \cdot I + k_2 \cdot B \quad (2)$$

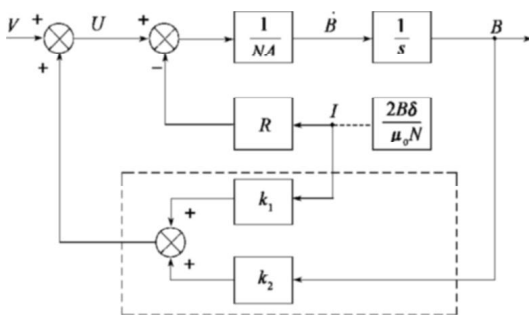


图2 电流 - 磁通联合内环控制框图

该反馈控制系统的方框图见图2, 其中 s 是拉普拉斯算子。将式(2)代入式(1)得到

$$\dot{B} = \frac{k_2}{NA} \cdot B + \frac{1}{NA} (k_1 - R) \cdot I + \frac{1}{NA} \cdot V \quad (3)$$

从式(3)可见, 如果没有电流反馈 ($k_1=0$), 则电流的动态调节会对磁通的调节过程产生不期望的干扰。若选取 $k_1=R$, 则方程(3)变为纯惯性环节:

$$\dot{B} = c_1 \cdot \dot{B} + c_2 \cdot V \quad (4)$$

其中 $c_1 = \frac{k_2}{NA}$, $c_2 = \frac{1}{NA}$ 。这是最简单的控制系统设计问题, 其稳定范围为 $k_2 < 0$, 适当选取 k_2 即可得到所需的跟踪频带, 当然也可选用PI调节器, 这里不再赘述。

2 电流 - 磁通联合内环的本质分析

从式(1)和式(3)可见, 同时使用磁通与电流信号进行反馈时, 内环模型是线性、时不变及完整的。如果仅采用电流反馈, 则不能涵盖间隙量的影响^[5], 间隙量又与磁通和电流相关(参见磁密表达式); 如果仅采用磁通反馈, 则不能涵盖电流量的影响。在这2种情况下, 不能涵盖的分量, 都将作为干扰引入到系统; 而如果把干扰折算成相应的反馈分量, 将引发时变、非线性等问题, 并总要受到间隙量的影响。由此可见, 电流 - 磁通联合反馈将优于任一单独反馈。

内环设计应如上单独研究, 不应和间隙环耦合在一起进行分析。试验时, 内环也应单独进行调试和评

估。内环调试完成之后, 再对外环进行闭合和调试。

磁通 - 电流联合内环系统, 虽有2个反馈量, 但仅磁通是输出量。若内环目标实现, 即磁通输出跟踪指令输入足够快, 则可得到 $B = c_3 \cdot V$ (其中, c_3 为常数, V 为磁通指令, 由间隙环生成)。此时, 间隙环的开环传递函数变为 c_4/s^2 , 其极点在虚轴上, 是临界稳定系统, 因此只需很小的阻尼就可稳定。这带来两大优点, 其一是容易调试, 其二是参数可选范围大, 因此鲁棒性很强。

关于磁通环优于电流环的原因, 文献[7,9,11]进行了分析。普遍说法有: 电磁铁的吸力由磁通的量值单独就可决定, 而若用电流来分析时, 则还与间隙值有关, 比较而言, 磁通反馈可在无视间隙信号的情况下, 就可克服磁路的不稳定性; 间隙环的不稳定因素在磁通环中可充分体现, 只要磁通环调试好, 就可克服这种不稳定性, 因此间隙环很易稳定。从本质上说, 磁通、电流和间隙这3个量, 是通过磁密公式关联起来的, 若知道其中2个量, 第3个量就随之而定, 因此, 基于电流和间隙信号, 完全可以构造磁通信号; 或者说, 只要电流反馈和间隙反馈的参数合适, 就可达到与磁通环相同的效果。然而实际不是这样。这是因为, 在构造磁通信号的过程中, 需要使用间隙微分信号, 它难以直接测量, 通常由微分运算得到, 信噪比低, 因此不能提供足够的反馈强度。为此, 微分信号提取方法成为悬浮控制研究的一个分支^[14-15]。采用磁通传感器直接测量磁通值, 是从另外途径巧妙地获取阻尼信号并加以应用, 不仅信噪比高, 而且不必等间隙改变后, 通过提取间隙变化率来进行反馈, 这样更直接更快速, 因此可取得其他手段达不到的控制效果。另外, 测量线圈所检测到的还是磁通变化率, 该信号积分之后使用^[7,9,11], 更能有效抑制噪声。

3 磁通环的调试方法研究

磁通环调试是系统调试的第一步, 此时, 电流环与间隙环尚未调试, 但要对电流环和间隙环有所安置, 才能实施磁通环的调试。电流环设成开环, 即 $k_1=0$, 或为理论最佳值, 即 $k_1=R$, 两者都可以。电流环参数不合适会对调试结果有所影响, 但由于电流环参数的自适应过程依赖于磁通环的稳定, 起初只能如此。间隙环设置成开环状态。在结构方面, 采用机械装置将间隙固定, 且间隙大小可在整个工作范围内调整。间隙中安放检测调试效果的磁通传感器。

磁通环调试分3步进行。第一步为自检调试。利用磁通传感器信号构造磁通反馈, 在指令输入点加入慢方波, 频率可为0.5 Hz或更低, 以便观测。观测磁通传感器输出的磁通信号。调整反馈增益, 使实际输出能快速跟踪指令信号, 达到设计要求。第二步为独立磁通检查调试。磁通环构造如前, 但磁通观测信号来自

另外的标定用的磁通传感器,比如安装在悬浮气隙中的霍尔传感器或线圈传感器,以保证检测结果是独立于控制系统的。二者的误差可作为标定数据,用于修正控制指令信号。完成调试后,标定用的磁通传感器就从系统中撤除。第三步是吸力检查。对于任意给定的磁通指令,不管间隙如何,其输出吸力都应相等,据此,设置一组输入指令和一组间隙,通过测力传感器测量吸力,就可检查磁通环的调试效果。

4 自适应电流环的设计与调试研究

电流环参数应为 $k_1=R$ 。简单处理时,测量线圈电阻,代入控制程序即可实现。即使由于温度原因导致电阻改变,或不同线圈参数具有离散性,也易取得优于纯磁通环的控制效果,只要保证 k_1 满足 $|k_1-R|<R$ 。下面研究一种自适应方法。

构造正定的能量函数:

$$E = \frac{1}{2}(\tilde{B}^2 + k^2) \quad (5)$$

其中 $\tilde{B} = B - B_{eq}$, $k = k_1 - R$, B_{eq} 为方程(5)对于某给定 V 的平衡点,即

$$c_1 \cdot B_{eq} + c_2 \cdot k \cdot I_{eq} + c_2 \cdot V = 0 \quad (6)$$

$$\dot{B} = c_1 \cdot \dot{B} + c_2 \cdot V \quad (7)$$

那么有:

$$\dot{E} = \tilde{B} \cdot \dot{\tilde{B}} + k \cdot \dot{k} = c_1 \cdot \tilde{B}^2 + c_2 \cdot \tilde{B} \cdot k \cdot \dot{I} + k \cdot \dot{k}$$

注意到 $c_1 < 0$,保证 $\dot{E} < 0$ 的充分条件是:

$$\dot{k} = \dot{k} = -c_2 \cdot \tilde{B} \cdot \dot{I} \quad (8)$$

这就是所设计的自适应律,它能确保 $\lim_{t \rightarrow \infty} E(t) = 0$ 。

为了实现该适应律,需要得到 B_{eq} 和 I_{eq} 。 B_{eq} 可根据式(6),并假设 $k=0$ 得到:

$$B_{eq} = -V/k_2 \quad (9)$$

可知 I_{eq} 与 B_{eq} 不能对应,它与工作气隙有关。可基于衰减记忆平均法,采用近期一段时间的平均电流作为 I_{eq} 。

调试该电流环时,首先对线圈电阻值的离散范围进行实测,应在不同温度下测量多组线圈,得到最大和最小值,用于作为自适应器输出值的边界,并取中值作为积分初值。该电流环的调试需在磁通环闭环之后才能进行。在运行中,可观测积分器输出的增益 k_1 是否稳定与合理,如果波动太大则应减小积分增益。

电流环调试完成之后,还应再对磁通环进行一轮调试,以取得最佳效果。

5 磁通传感器的安装与工程化制造问题

上述研究表明,采用磁通-电流联合内环,磁悬浮控制系统容易调试,鲁棒性很好。电流信号在控制电

路中是现成的,如何检测磁通信号则是关键。文献[7]指出,尽管采用霍尔片来检测最为直接,但若安装在磁极表面,则会占用悬浮间隙,若在磁极上挖洞安装,则磁力线将绕行而检测不准。对于采用线圈检测,该文献给出了3种安装方式:绕在磁极顶端、绕在小铁心上装入磁极表面空洞、在磁极表面开槽安放线圈,而后两者效果较好,并建议尽可能检测磁极中部磁密最强点附近小区域内的磁通,但也认为区域小会导致灵敏度降低。对于工程系统,电磁铁是充分优化的,不会有单独的顶端区域可用于绕线。装在极面的洞或槽中,也有颇多缺陷:由于被检区域小,灵敏度较低;对于长定子系统,由于定子的齿槽影响,小区域内的磁场波动很大,不能反映电磁铁的实际吸力大小;如果铁心是叠片的,或磁极表面装有发电线圈等,这种方式难以安装。本文提出将传感器线圈嵌入到电磁铁的励磁线圈中,这样,在制造电磁铁时,可同步完成磁通传感器的制造,检测线圈的结构强度、防水防尘抗振等问题,这样可解决工程化制造与安装问题,且对其他机械结构没有影响。由于传感器线圈的导线很细,其所占空间小,对磁铁励磁线圈的影响很小。由于可检测到全部磁通,并可通过增多匝数来更加提高灵敏度,该传感器的信噪比很高。该结构适用于各类EMS磁悬浮列车,不管长定子短定子,铁心是否叠片,也适用于磁悬浮轴承等其他磁悬浮系统。其缺点是磁通信号中含有对吸力无贡献的漏磁分量。该分量可在磁通环调试阶段,通过标定来消除,目前悬浮控制器都是基于DSP的数控系统^[3],这点很容易实现。

6 结语

为了提高磁悬浮控制系统的鲁棒性,降低调试难度,提出了基于电流-磁通联合反馈的内环设计方法。分析表明,联合内环系统的数学模型是线性、时不变及完整的,可取得优于单独的磁通环或电流环的控制效果。研究了磁通环的调试方法,给出了调试步骤,设计了自适应电流环,提出了将磁通传感器线圈嵌入磁铁励磁线圈中的工程化实现方法。该方法可应用于多种磁悬浮系统。

参考文献:

- [1] 余龙华,卢晓慧,施晓红. 基于变量梯度法的磁悬浮控制系统的状态稳定性[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(4): 8.
- [2] 余龙华,柳贵东,施晓红. 悬浮系统的HOPF分岔自适应控制研究[J]. 动力学与控制学报, 2006, 4(1).
- [3] 余龙华,邹东升,李剑锋. 基于TMS320F2812的磁悬浮列车控制器设计[J]. 电力机车与城轨车辆, 2005(5).
- [4] 李云钢,柯朝雄,程虎. 磁悬浮列车悬浮控制器的电流环分析与优化设计[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(1).
- [5] 李云钢,常文森. 磁悬浮列车悬浮控制系统的串级控制[J]. 自动化学报, 1999, 25(2): 32-38.

(下转第52页)

绕组,2台逆变器输出电压相位差 30° ,变压器输入后在磁路上合成,变压器二次侧绕组输出电压也是12阶

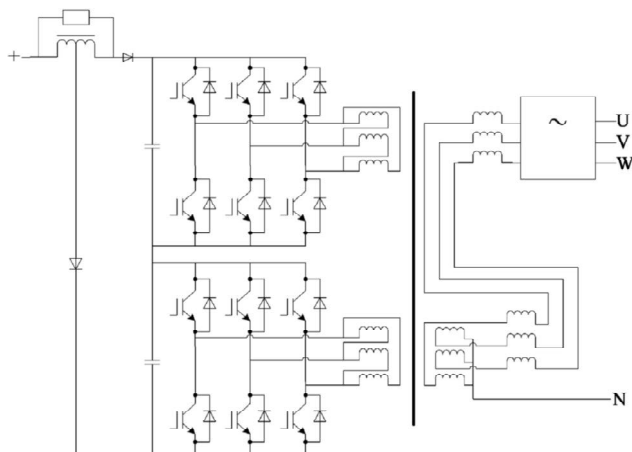


图5 双逆变器双输出变压器电路

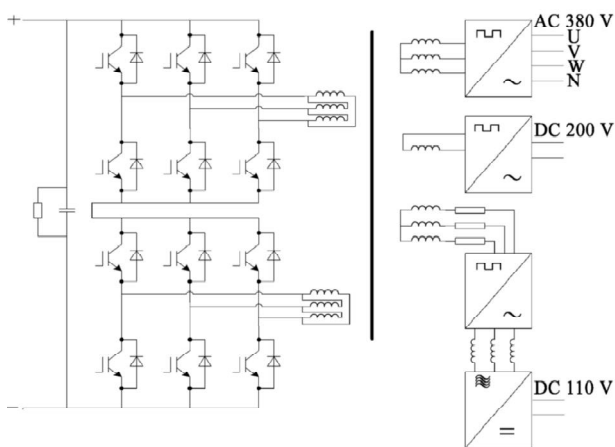


图6 双逆变器单输出变压器电路

梯波,然后经滤波器输出给负载供电,逆变器也可采用PWM调制。若用于DC 750 V系统供电,只需将逆变器输入并联。如杭州地铁1号线、上海地铁16号线等。

双逆变器电路的优点是:输出电压波形是12阶梯波,其中谐波含量小,因此对滤波要求低;可以使用低电压等级的IGBT。但这2种电路也存在相应的缺点:使用的电力电子器件多,比单逆变器多一倍,器件越多发生故障的概率越高;电路复杂、控制复杂;输出变压器结构特殊,给维修工作带来不便。

3 结语

本文对集中式供电和并网供电优缺点进行了综合分析,集中式并网供电尽管存在系统控制复杂、设备较多等不足,但系统的总体可靠性、故障冗余能力和抗负载电流冲击能力依然值得肯定。因此,建议采用集中式并网供电方式。为了实现辅助电源系统逆变器小型、轻量化,宜采用高频变换技术,软开关控制,高频变压器隔离。对于集中式供电的大功率辅助电源系统,辅助逆变器电路拓扑结构建议采用直接二电平逆变电路。

参考文献:

- [1] 刘宏. 一种集成式辅助电源模式介绍[J]. 电力机车与城轨车辆, 2007(6).
- [2] 李网生. 地铁车辆辅助电源设计[J]. 机车电传动, 2009(3).
- [3] 贺明智,刘宏亮,等. 串联负载谐振变换器的参数设计[J]. 大功率变流技术, 2009(3).
- [10] 孙秋明,李杰. 磁通反馈在磁悬浮列车悬浮控制中的应用[J]. 机车电传动, 2006(1).
- [11] 张文清. 基于磁通反馈的悬浮控制方法研究及实现[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2009.
- [12] 张文清,郑丽莉,李杰. 带干扰观测器的磁通反馈控制研究[J]. 福建电脑, 2009(12).
- [13] 刘恒坤,郝阿明,常文森. 磁通密度反馈在磁悬浮系统中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(6).
- [14] 谢云德,龙志强. 高精度快速非线性离散跟踪微分器[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(2): 127-132.
- [15] 刘恒坤,郝阿明,常文森. 悬浮间隙微分在磁悬浮列车系统中的应用[J]. 控制工程, 2008, 15(1).

(上接第48页)

- [6] Goodall R M. Suspension and guidance control system for a dc attraction maglev vehicle[C]//IEE Conf Publication No 142. 1976: 100-103.
- [7] Goodall R M. On the Robustness of Flux Feedback Control for Electro-Magnetic Maglev Controllers[C]//Proceedings of Maglev 2000. Rio de Janeiro, 2000:197-202.
- [8] Goodall R M. Dynamics and Control Requirements for EMS Maglev Suspensions[C]//Int Conf Maglev 2004. Shanghai, China, 2004:926-934.
- [9] 孙秋明. 基于磁通反馈的悬浮控制研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2005.

动态消息

《机车电传动》编辑部声明

为顺应网络环境下期刊出版的新要求,推进期刊网络出版传播,凡向本刊投稿并被本刊录用,在著作权法的框架内,该论文的复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权等权利在全世界范围内转让给本刊及本刊授权的相关数据库。凡被本刊录用的稿件将同时通过因特网、手机等进行网络出版或提供信息服务,根据本刊编辑部稿酬标准一次性支付作者著作权使用报酬(即稿费,包含印刷版、光盘版和网络版等各种使用方式的报酬)。

《机车电传动》编辑部