

永磁同步电机控制系统及其在电梯中的应用

缪学进¹ 李永东¹ 肖曦¹ 刘杭先² 刘天武²

¹⁾ 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084 ²⁾ 北京兰海公司, 北京 100084

¹⁾ Email: miuxj04@mails.tsinghua.edu.cn

摘要 本文以永磁同步电机在电梯中的应用为目标, 介绍了电梯控制系统的组成、矢量控制的基本原理、以 TMS320F2812 为控制核心的矢量控制系统的硬件实现和软件程序的设计, 给出的实验结果表明, 所设计的基于 $i_d = 0$ 控制策略的永磁同步电机矢量控制系统具有优良的速度跟踪性能。

关键词 永磁同步电机 (PMSM) 电梯 矢量控制 TMS320F2812

The application of the PMSM control system to the elevator

Abstract The basic principles of the vector control of PMSM, the hardware and software design of control system equipped with DSP TMS320F2812 as the kernel processor are described in order to apply the PMSM control system to the elevator. Experimental results show that the PMSM vector control system with has excellent performance of speed tracking.

Keywords permanent magnet synchronous motor (PMSM) elevator vector control TMS320F2812

1. 引言

早期的电梯中使用直流电机, 随着交流电机控制技术的发展和, 交流异步电机逐渐应用到电梯之中, 又随着永磁同步电机成本的降低、控制技术的进步, 使得永磁同步电机正在逐渐取代电梯中的直流电机和异步电机。电梯的驱动控制技术也随着所使用的电机的改善而改变, 先后经历了直流电机驱动控制, 交流单速电机驱动控制, 交流双速电机驱动控制, 直流有齿轮、无齿轮调速驱动控制, 交流调压调速驱动控制, 交流变压变频调速驱动控制, 交流永磁同步电机变频调速驱动控制等阶段。

交流永磁同步电机控制系统在电梯中的应用可以带来很多优点, 最突出的一点是永磁同步电机可以实现无齿轮曳引功能, 永磁同步无齿轮曳引机采用扁平、盘式外形, 直接带动曳引轮曳引电梯运行, 不需要机械减速机构, 使得无齿轮曳引机的机械结构变得非常简单, 曳引机安装在与曳引绳相同的平面内, 变频器则可以置于顶层的电梯门内, 彻底省去了机房, 降低了建筑成本; 其次, 可以使拖动系统结构简单、运行可靠, 效率高、节能, 调速范围宽、精度高、转矩特性优越, 低损耗、低振动、低噪声等等^{[1][2]}。

2. 电梯拖动系统

电梯是一种典型的机电一体化产品, 其控制可分为拖动系统的调速控制与选层系统的逻辑控制两大方面。调速控制是指对电梯从起动到平层整个过程中速度的变化规律进行控制, 从而减轻人在乘坐电梯时由于起、制动过程中加、减速产生的不舒适感(上浮、下沉感), 并保证平层停车准确可靠。与选层系统的逻辑控制相比, 调速控制更为复杂, 其控制性能的优劣在很大程度上决定着电梯产品的性能和质量。

图 1 是无齿轮曳引电梯的系统结构图。

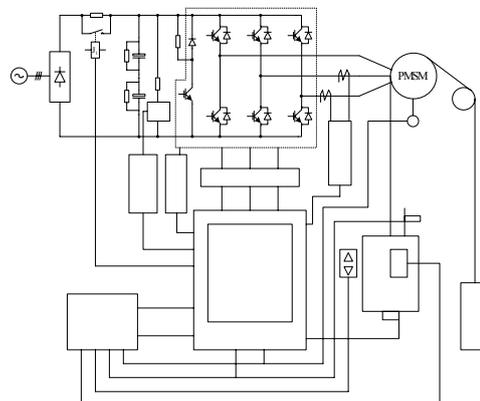


图1 无齿轮曳引电梯的系统结构图

主 CPU 实现选层系统的逻辑控制, 负责机房控制柜与轿厢之间的串行通信, 以取得轿厢的开关信号、呼叫信号; 与厅站进行串行通信, 以取得厅外召唤信号; 以及进行开关门控制、运行控制、故障检测和记录等。DSP 和外围信号调理电路等组成传动控制板, 负责故障处理、速度控制、电流控制、PWM 控制和各种信号的采集工作, 与逆变主回路实现电梯拖动系统的调速控制。

光耦隔离电路把 DSP 的 PWM 信号传递给逆变器主回路中的大功率开关管 IGBT。负荷检测装置检测轿厢负荷并输送负载信号给 DSP, 以进行起动力矩补偿, 使电梯运行平稳。另外, 还有与永磁同步电动机随动, 可发送脉冲信号到主 CPU 和 DSP 的光电编码器、传递楼层位置信号的位置检测器 FML、可接受指令信号和开关输入信号的轿内操纵箱 C.B 和厅外召唤箱 H.B、以及系统的各种保护装置。它们一起构成了整个电梯控制系统^[3]。

3. 调速系统的设计

无齿轮传动多应用于高速度、高楼层的电梯中, 须具有完善的控制功能和高可靠性, 这就对电梯的控制系统的硬件和软件设计提出了更高的要求。这也要求调速系统的设计尽量采用简单成熟可靠的原理和性能优异的软硬件方案。

3.1 控制原理

永磁同步电机控制系统, 无速度传感器虽然可以降低硬件的成本和复杂性, 但增加了软件的复杂性, 尤其是低速的控制性能还是研究的热点, 因此目前通常采用成熟的有速度传感器矢量控制。

从永磁同步电机 dq 坐标系下的电磁转矩方程

$$T_e = P(\psi_d i_q - \psi_q i_d) = P[\psi_r i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (1)$$

可以看出, 当永磁体的励磁磁链和直、交轴电感确定后, 电动机的转矩便取决于定子电流的空间矢量, 也就是说控制 i_d 和 i_q 即可控制电动机的转矩。

对于表面贴式永磁同步电机, 因为 $L_d = L_q$, 电磁转矩方程式 (1) 可变为:

$$T_e = P[\psi_r i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] = P\psi_r i_q \quad (2)$$

由式 (2) 可以看出, 保持 $i_d = 0$ 可以保证用最小的电流幅值得到最大的输出转矩值^[4]。图 2 给出了永磁同步电机采用令 $i_d = 0$ 控制策略的控制系统框图。

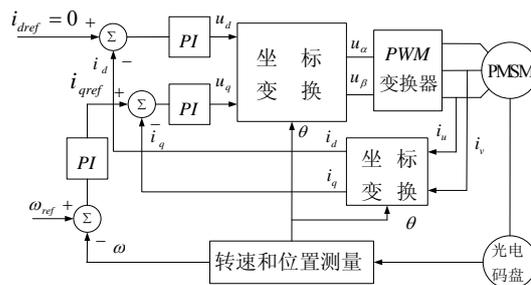


图2 永磁同步电机矢量控制系统框图

3.2 硬件系统设计

3.2.1 核心处理芯片 DSP TMS320F2812

设计任何控制系统, 核心处理芯片的选择是首要考虑的问题。从图 1 的电梯系统结构图可知核心处理芯片要能够实现 DSP 所负责的故障处理、速度控制、电流控制、PWM 控制和各种信号检测等功能, 这就要求核心处理芯片要有强大的数字计算功能、有足够的程序空间来存放用户的程序、足够的 IO 口资源和高速高精度的 AD 转换模块, 虽然这些功能可以通过外扩芯片来实现, 但为了简化系统的结构、提高可靠性, 可以用一块芯片完成这些功能。因此, 我们选取了能够胜任这些工作的 DSP (数字信号处理器) TMS320F2812 作为核心处理芯片。TMS320F2812 是 TI 公司推出的一款用于电机控制的高性能 DSP, 基于 2812 的虚拟浮点运算库解决了以往定点 DSP 编程的不便, 32 位的内核提高了运算的精度, 12 位的高速 ADC 单元提高了信号采样的速度和精度, 高达 150MHz 的时钟频率使其可以快速实现复杂的算法^[5]。

3.2.2 DSP2812 控制板

控制板除了能够完成矢量控制的核心算法外, 还应当具有一个调速系统所必须的其他功能。控制板的设计主要包括信号接口、通讯接口、DSP 基本外围电路等几部分。永磁同步电机矢量控制系统所需检测的用于电机控制的量有直流母线电压、两相线电流、转子的速度和位置、保护信号等等。

3.2.3 系统主回路

系统主回路包含整流器、逆变器、辅助电源、光耦隔离、基极驱动等。其拓扑结构如图 1 的上半部分所示。整流电路采用二极管三相桥式整流, 将三相交流电整流成脉动直流电, 并用大电解电容作滤波储能元件。图 1 中虚线框表示智能功率模块 (Intelligent Power Module-IPM), R4 为制动电阻, 形成放电回路;

R2 和 R3 为电容 C1 和 C2 的均压电阻；电压霍尔与两个电流霍尔分别用来检测直流母线电压以及电机定子 U 相和 V 相电流。

由于 IPM 内置保护电路和相关外围电路，缩短了系统设计周期，还缩小了系统的体积，提高了可靠性。

3.3 软件系统设计

交流永磁同步电机矢量控制系统的控制部分是软件和硬件相结合的产物。其矢量控制算法的实现、整个系统的控制性能以及系统的可靠性在很大程度上依赖于良好的软件设计。

DSP2812 的软件开发和调试在集成开发环境 CCS 中进行，TI 提供了大量的基于这个编译器的例程和库函数，方便了用户编程和设计。CCS 还有一个突出优点是提供了方便的软件调试工具，在 real-time 模式下可以实时监控程序中的变量，能够对变量进行在线修改，利用其 graph 工具可以观看变量的变化曲线。

由于 TMS320F2812 是一款定点 DSP，利用标么值系统不仅可简化软件算法，提高运算精度，而且通过标么值使各种容量的电机物理量进行了规一化，因此各种不同容量的电机物理量以及控制系统中各个调节器的参数范围大致相同，对于不同的电机或系统参数，调节好的 PI 调节器的比例积分系数不需要大的更改，这就为控制软件的通用性和模块化带来了方便。

控制软件分为两大部分：初始化部分和执行部分。初始化的目的就是首先建立起一个适当的 DSP 应用环境；执行部分可分为主循环程序、随机中断服务程序、定时中断服务程序。

整个控制系统的程序流程图见图 3。

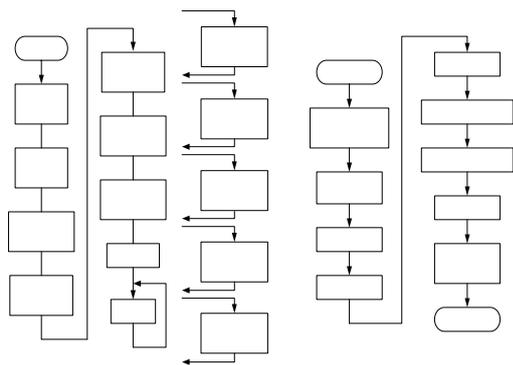


图 3 控制系统的程序流程图

主循环程序也被称为等待循环程序，它主要执行一些实时性要求不高的闲时功能模块。随机中断服务程序和定时中断服务程序，主要执行一些实时性要求较高的功能模块。随机中断服务程序中典型的如保护

中断，是在系统出现故障时执行的程序，要求能够快速准确地将故障隔离，封锁功率开关器件，防止系统硬件受到损坏。因此它具有最高的优先级。定时中断服务程序的响应是按照定时器的设置，严格地以一定时间周期来执行的程序模块。在定时中断服务程序中要进行控制算法的处理，将给定信号、反馈信号按照一定的控制策略和算法进行运算，最终得到逆变器的开关器件的驱动信号加以输出。码盘 Z 中断服务程序由 DSP2812 的 CAP3 捕获口的上升沿触发中断功能实现，对 QEP 电路的脉冲计数器清零。串行口中断服务程序是进行 SCI 串口的数据接收和发送中断服务处理。码盘 Z 中断服务程序和串行口中断服务程序执行的时刻无法提前精确知道，所以也属于随机中断服务程序，其它中断服务程序可以根据其他的实际要求进行扩展。

4. 实验结果

为了检验所设计的永磁同步电机控制系统的控制性能，对控制系统作了以下实验：电机带载时在零速、低速、高速运行时的速度 S 曲线跟踪实验。这些状态下的速度 S 曲线跟踪性能决定了实际电梯在使用本控制系统后的运行性能，电梯的可靠性、乘客的舒适性、平层的精确性与此密切相关。

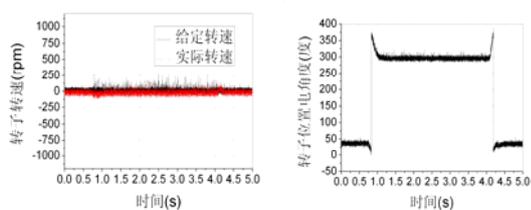
实验用交流永磁同步电机参数如表 1 所示。

表 1 永磁同步电机参数

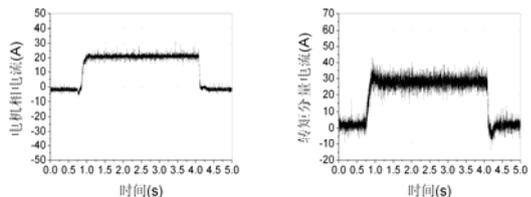
电机参数	参数值
额定功率 P_N/kW	15
额定电压 U_N/V	380
额定电流 I_N/A	25
额定频率 f_N/Hz	50
额定转速 $n/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	1000
额定转矩 $T/\text{N}\cdot\text{m}$	96
定子电阻 r/Ω	0.3
d 轴电感 L_d/H	0.005
q 轴电感 L_q/H	0.005
极对数 P	3

实验结果如下：

1) 电机给定转速为 0Hz 突加 80%负载时的转子速度、转子位置、定子相电流、定子电流转矩分量 i_q 波形图如图 4 所示：



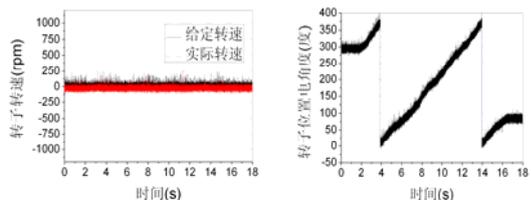
(a) 速度给定和响应波形 (b) 转子位置电角度波形



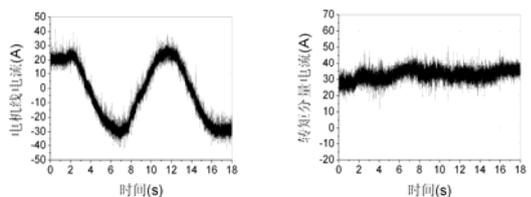
(c) 电机一相线电流波形 (d) 电流转矩分量(iq)波形

图4 给定转速为 0Hz 突加 80%负载时实验波形图

2) 电机带 80%负载起动至 0.1Hz 后停止过程中的转子速度、位置和定子相电流、电流转矩分量 i_q 波形图如图 5 所示:



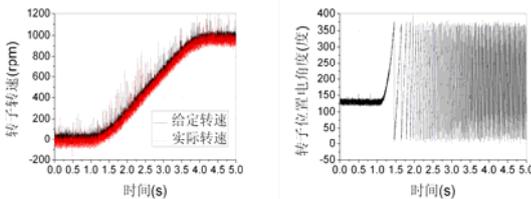
(a) 速度给定和响应波形 (b) 转子位置电角度波形



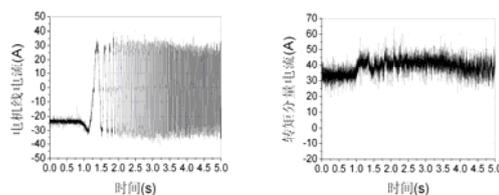
(c) 电机一相线电流波形 (d) 电流转矩分量(iq)波形

图5 带 80%负载起动至 0.1Hz 后停止过程中的实验波形图

3) 电机带 80%负载起动至 50Hz 时的实验波形图如图 6 所示:



(a) 速度给定和响应波形 (b) 转子位置波形



(c) 电机一相线电流波形 (d) 电流转矩分量(iq)波形

图6 带 80%负载起动至 50Hz 时的实验波形图

从以上实验结果可知, 本永磁同步电机矢量控制系统在零速、低速和高速状态下都有良好的速度曲线跟踪性能。

5. 结论

本文对电梯系统的组成、在电梯中应用的永磁同步电机矢量控制系统的原理、硬件系统和软件系统的设计作了说明。给出了实验结果, 验证了本系统具有优良的速度曲线跟踪性能, 为最终整个电梯控制系统的实现奠定了坚实的基础。

参考文献

- [1] 石正铎, 路子明. 交流永磁同步调速电梯电机之特性. http://www.7613.com/wen/read.asp?d=1131&wen_no=9, 2004
- [2] 翁立. 电梯用永磁同步电机变频器的设计: [硕士学位论文]. 浙江: 浙江大学电气工程学院, 2003
- [3] 三菱 VFCL 电梯培训教程. <http://www.likelift.com/01/09/index103.htm>, 2005
- [4] 李永东. 交流电机数字控制系统. 北京: 机械工业出版社, 2002
- [5] 郑泽东. 异步电机自适应磁链观测和速度辨识的研究: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学电机系, 2005