



 TEXAS INSTRUMENTS

Technology for Innovators™

2008年

TI 高级嵌入式
控制器

©2000大奖赛 优秀论文汇编

大奖赛组委会 编



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

2008 TI高级嵌入式控制器 C2000 大奖赛优秀论文汇编

大奖赛组委会 编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本论文集是对“2008 年度 TI 高级嵌入式控制器 C2000 大奖赛”优秀设计作品的总结,包括自由命题和给定命题两部分。在所有获奖作品的论文中,它们基于 TI 的 C2000 控制器产品,结合实际应用,并融入了设计者创新的思想方法和设计理念,是 C2000 控制器产品在多个领域中应用的范例的集合。本论文集介绍了每个参赛作品的设计思路、实验方法、实现过程和结果分析,并论述了各选题的工程实用性、创新点和实现难点。

本书适合电子工程技术人员,电子、通信与控制等相关专业的在校师生阅读。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

2008 TI 高级嵌入式控制器 C2000 大奖赛优秀论文汇编 / 大奖赛组委会编. —北京:电子工业出版社, 2008.10
ISBN 978-7-121-07413-4

I. 2… II. 大… III. 微处理器—文集 IV. TP332.3-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 145962 号

责任编辑:竺南直 特约编辑:陈宁辉

印 刷: 北京牛山世兴印刷厂
装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 20 字数: 512 千字

印 次: 2008 年 10 月第 1 次印刷

印 数: 3000 册 定 价: 39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

德州仪器 (TI, Texas Instruments), 是世界 DSP 技术的领先者, 在积极与国内企业合作开发符合中国市场需求的产品的同时, 不断推进数字信号处理解决方案 (DSP) 的大学计划, 以配合中国工程院校教育和研究项目, 使中国的大学和研究机构掌握最先进的 DSP 与模拟器件技术, 促进产学研结合。

TI DSP 大奖赛是“德州仪器大学计划”的经典项目, 是国内历史最悠久、规模最大、影响也最大的 DSP 赛事, 每两年举办一次, 深受电子工程领域广大学生和教师的欢迎, 也越来越受到企业界的关注。

自从 1997 年 C2000 系列的第一颗芯片 TMS320F240 诞生以来, C2000 已经经过长足的发展, 发展成为一个产品系列齐全、应用范围广泛的数字信号控制器 (DSC), 并且在数字化马达控制、数字化电源、电力系统保护及自动化等应用领域取得了业界的极大认可和成功。在各届 DSP 设计大赛中, C2000 作为一个高性能控制器, 其参赛作品在设计创新和节能应用等方面, 为 DSP 的应用带来崭新的视角。

随着 C2000 数字信号控制技术在工业界的广泛深入和发展, 尤其是在能源等高效应用领域 (如电机控制, 数字化电源, 风能/太阳能发电等) 显现出来的突出优势, 让越来越多的在校学生和在职工程师了解 C2000 产品, 将 C2000 数字信号控制技术更好地应用到大学的教学和科研中, 运用到产业界的工业控制产品中, 成为大学的教育工作者和企业领导者的共识。为此, 在 TI DSP 大奖赛的基础上组织筹建了“TI 高级嵌入式控制器 C2000 大奖赛”。

2007-2008 年度 TI DSP C2000 大奖赛, 由合肥工业大学承办。大赛仍然采用自由组队、自由命题的形式。竞赛相应地分成自由和命题两个大组, 报名参赛的各队, 最终成果包括硬件和软件的完整演示系统。

本次大赛自 2007 年 8 月份开始酝酿, 2007 年 12 月正式公布, 有 25 支队伍参加自由命题组的比赛, 有 47 支队伍报名参加命题组比赛。这 72 只参赛队分别来自清华大学、上海交通大学、南京航空航天大学、合肥工业大学等 30 余所高校。经过专家评审, 有 12 支队伍进入自由命题组决赛, 有 6 支队伍进入命题组决赛。

2008 年 4 月, 本届大奖赛的决赛在合肥工业大学举行, 决赛入围队进行了激烈的角逐。每个队向评委会作了项目报告, 进行了答辩, 并作了公开的现场演示。评委会根据各参赛队的论文、报告、答辩、以及演示的情况, 经过严格评审, 最终确定了各获奖队。

评委会的专家和参加观摩的专家一致认为: 这次大赛参赛面大; 参赛选题广泛, 涉及几乎所有当前研究和开发的热点; 完成项目的整体水平高, 具有很高的技术水准和很好的完整性; 选题与实际应用结合紧密。通过朝气蓬勃的参赛同学和他们展示的成果, 充分展

现了我国高校在 DSP 的工业控制技术领域的丰硕教育成果。

为了更好地总结和推广这次大奖赛的成果，大赛组委会和电子工业出版社合作，将参加决赛的项目报告结集出版。其目的，一是记录本次大赛的历程和成果；二是为以后参赛的同学们的选题提供参考；三是为有关的企业提供项目开发的线索。

大赛组委会再次对承办此次大赛的合肥工业大学表示诚挚的谢意，对参加比赛、决赛和获奖学校的同学们表示祝贺，对辛勤工作的评委会的专家们，电子工业出版社的编辑们，表示我们由衷地敬意和感谢。

大赛组委会
2008 年 5 月

目 录

第 I 部分 自由命题

基于 (TI) C2000 DSP 的无轴承薄片电机的数字控制系统	邓智泉 廖启新 解超 陈超 (3)
动态无功补偿和谐波治理 (有源滤波) 综合装置	周荔丹 韩杨 徐琳 王瑞琳 (13)
直驱永磁同步风力发电机变流器的设计	姜新建 陈守川 麻国政 (34)
基于 TMS320F2812 负荷管理终端的设计与实现	陶维青 毛建维 汪俊锋 王璟 (49)
基于 TMS320F2812 的配电自动化终端设计与实现	陶维青 任玮蒙 陈雄 周俭节 (65)
Z 源逆变器光伏并网发电系统	刘进军 李锦 刘增 (82)
基于 DSP 和 CAN 总线的分布式电源监控系统的设计和实现	周建江 丁林锋 卜锐 郑颀 (92)
基于 TMS320F2812 DSP 的电梯门机驱动控制系统	曾岳南 屈喆 卢小锦 郑杰然 (118)
基于 TMS320F2812 的经济型数控车床控制器设计	廖涌 甘辉军 盛杰 硕颖中 张筱 李哲 (132)
基于 TMS320F2812 的电气量测量分析装置	孙功伟 余志飞 张晓宇 (154)
全自动生化分析仪信号检测与控制系统的设计与实现	徐大专 祁斌川 吴杰 韦业龙 (167)

基于 TMS320F2812 的开关磁阻电机调速系统设计

.....宁改娣 何降彪 梁雨时 (180)

爬壁侦察机器人控制系统设计

.....王鲁单 许少强 熊旺辉 (196)

第 II 部分 给定命题

基于 TMS320F2812 的简易数字频率计

.....姜鹏 胡俊 王文静 (205)

三相正弦波变频电源

.....梅建伟 杨杰 曹春哲 沈国建 (222)

基于 TMS320F2812 的数字频率计

.....方敏 侯其立 李苗 张巧云 (247)

简易数字频率计 (I)

.....孙懋珩 焦乾乾 卡寅峰 顾尉迪 (275)

基于 TMS320F2812 的三相正弦波变频电源的设计

.....胡勤丰 杭义军 董飞虎 徐春芳 (285)

简易数字频率计 (II)

.....何苏勤 曾玲 徐占领 (302)

第 I 部分

自由命题

基于 (TI) C2000 DSP 的无轴承薄片电机的数字控制系统

邓智泉 廖启新 解超 陈超

(南京航空航天大学)

摘要: 无轴承薄片电机是一种新型的集旋转与悬浮于一体的机构,集成度高。其系统可分为悬浮部分和旋转部分,各由一套三相全桥驱动。控制芯片需要完成位置控制与旋转控制。由于悬浮控制对实时性要求很高,控制算法复杂,所需的外设多,一般的控制芯片难以胜任。而 TI 公司的 2812 DSP 很好地满足了控制系统的需求。围绕 2812 DSP 设计了控制系统,实现了 4000rpm 下的稳定悬浮。

Abstract: The bearingless slice motors is a new high-integrated device which combines suspension function and rotation function. The system includes a suspension unit and a rotation unit which are driven by a 3-phase full bridge separately. The controller accomplishes position control and rotation control. Because of the high demand of real time, complex control algorithm and a lot of peripherals, normal micro-controller can't fulfill the task. However, the 2812 DSP of TI is capable. The control system is designed based on a 2812 DSP, and the stable suspension at 4000rpm is achieved.

1 引言

无轴承薄片电机是一种新型的集旋转、悬浮于一体的机构。普通电机中一般采用机械轴承支撑转子,在高速运转时,机械轴承磨损发热严重,为解决该问题,其中一种途径是采用磁悬浮技术将转子悬浮起来。无轴承技术即为磁悬浮技术之一,相比于普通的磁轴承,其利用了电机原有的磁场来实现悬浮,从而实现了电机与磁轴承的一体化,集成度更高。当电机轴向长度较短时,被称为薄片电机,无轴承薄片电机则在利用无轴承技术实现径向悬浮的基础上,依靠磁阻力实现其他三个自由度上的被动悬浮,其相比于普通的无轴承电机,只需要一套无轴承机构即可实现悬浮,转子轴向利用率大为提高,结构也更加简单。这种电机除具有磁悬浮技术的无磨损、无润滑、无机械噪声等特点外,还有轴向利用率高、体积小、结构简单、可靠性高、功耗低等特点。而且由于其转子可以与外界完全隔离,密封性好,在超纯净驱动领域极具应用优势,采用这种电机制造的泵,在生物化学、医疗、半导体制造等对纯净性要求较高的领域具有广泛的应用前景。无轴承薄片电机的概念自 20 世纪末提出以来,引起了工业界的广泛关注,瑞士、德国、日本、美国均在大力扶植这项高新技术的研究。

2 系统指标

悬浮系统性能：无负载下，转子径向振幅在 $\pm 250\mu\text{m}$ 以内。

旋转系统性能：无负载下，转子达到 4000r/min。

3 系统方案

无轴承永磁薄片电机的结构简图如图 1 所示。与普通电机类似，包括定子、永磁转子、线圈，但其线圈分两套，一套线圈负责悬浮，一套线圈负责旋转。

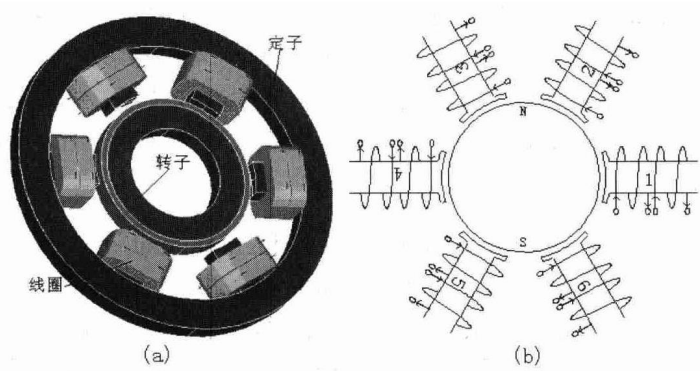


图 1 无轴承永磁薄片电机的结构简图

电机的旋转原理与普通永磁电机无异，其悬浮原理如图 2 所示。在电机定子中放入分别为 p_1 和 p_2 对极的驱动绕组和悬浮绕组，当满足 $p_2 = p_1 \pm 1$ 时，电机中就可以产生可控的径向悬浮力。如图 2 (b) 所示，内圈为驱动绕组，外圈为悬浮绕组，可分别接为 1 对极和 2 对极。在图 2 中可以看出两对极的悬浮绕组的引入打破了原有电机内的一对极磁场的对称分布，使气隙中一部分磁场增强，一部分磁场变弱，其产生的磁拉力（即麦克斯韦力）指向磁场增强的一方。图中一对极磁场为驱动磁场，两对极磁场为悬浮磁场。图 2 (a) 中，磁场叠加后，左侧磁场减弱，右侧磁场增强，产生向右的径向力；图 2 (b) 中，上部磁场增强，下部磁场减弱，产生向上的径向力。

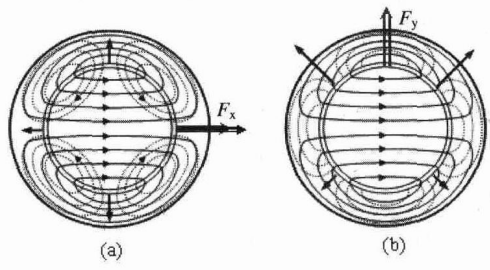


图 2 无轴承电机悬浮原理

在轴向和扭转方向上的被动悬浮利用了薄片电机的结构特点，当发生轴向偏移时，磁拉力总会将转子向磁阻最小的方向拉；而发生扭转时，同理也会产生磁拉力矩将转子拉回平衡位置，如图 3 所示。这几个自由度上的悬浮是不控的，故称为被动悬浮。

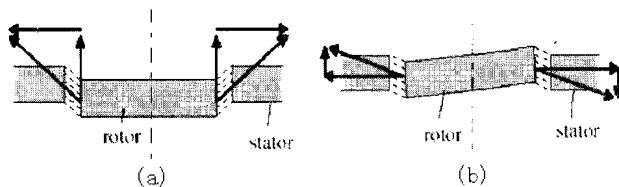


图3 被动悬浮原理

根据磁路原理可以推导出该电机的悬浮力表达式:

$$\begin{cases} F_x = k \cdot [(I_{md} I_{sd} + I_{mq} I_{sq}) + (I_{fd} I_{sd} + I_{fq} I_{sq})] \\ F_y = k \cdot [(I_{md} I_{sq} - I_{mq} I_{sd}) + (I_{fd} I_{sq} - I_{fq} I_{sd})] \end{cases} \quad (1)$$

式中, k 为悬浮力系数与电机各参数相关, I_{md} 、 I_{mq} 、 I_{sd} 、 I_{sq} 、 I_{fd} 、 I_{fq} 分别为驱动绕组电流、悬浮绕组电流和转子磁势的等效电流在 d 轴和 q 轴上的对应分量。

显然 $I_{fq} = 0$ 、 $I_{fd} = I_f$, 若电机采用 $i_d = 0$ 的转子磁场定向控制, 则 $I_{md} = 0$, 进一步简化得:

$$\begin{cases} F_x = k \cdot [I_{mq} I_{sq} + I_f I_{sd}] \\ F_y = k \cdot [-I_{mq} I_{sd} + I_f I_{sq}] \end{cases} \quad (2)$$

根据式 (2) 可得:

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{F_x I_f - F_y I_{mq}}{k(I_f^2 + I_{mq}^2)} \\ I_{sq} = \frac{F_x I_{mq} + F_y I_f}{k(I_f^2 + I_{mq}^2)} \end{cases} \quad (3)$$

据此可以设计无轴承薄片电机的控制系统如图 4 所示, 整个控制系统分旋转系统和悬浮系统两个子系统。旋转系统采用 $i_d = 0$ 的转子磁场矢量控制, 采用转速闭环。CRPWM 为电流控制型 PWM 逆变器。悬浮系统在取得转子位置反馈信号后经 PID 控制器调节后得到给定 F_x^* 和 F_y^* , 再经式 (3) 可得出悬浮绕组的电流, 经 $2/3$ 变换后送至逆变器驱动绕组。

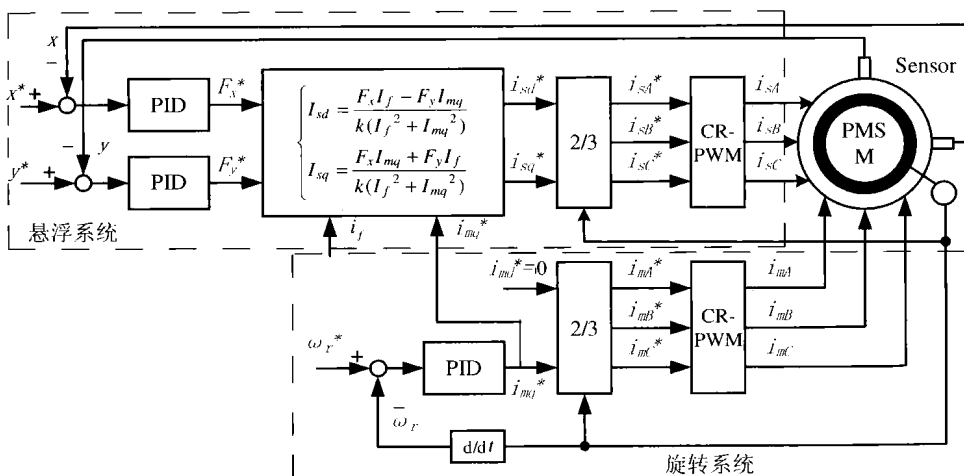


图4 无轴承薄片电机的控制系统

4 系统硬件设计

根据上述的控制系统框图设计系统的硬件系统，包括控制系统、功率系统、传感器、电机本体，如图 5 所示。为便于扩展将各模块设计为独立的 PCB 板，可根据需要随时增减功能模块。

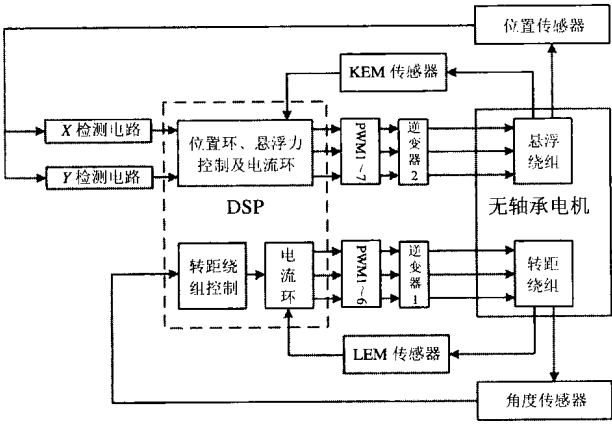


图 5 硬件系统构成

4.1 控制系统

控制系统是整个系统的核心部分，主控芯片选用 TI 的 TMS320C2812DSP 芯片。该芯片是 TI 公司新推出的一款专用于运动控制的数字信号处理器，功能强大，数据处理速度极快。

基于 2812 DSP 的数字控制系统的功能示意图如图 6 所示，整个系统主要包括供电电源、A/D 输入调理、D/A 输出显示、串行通信、PWM 输出等部分。

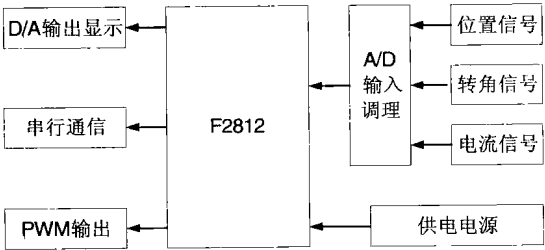


图 6 数字控制系统功能示意图

1. 供电电源

2812 的供电电压有两个，分别为 3.3V 和 1.8V。3.3V 给 I/O 口供电，1.8V 为核电源电压。由于 2812 对这两个电平的上电时序有要求，要求先给 I/O 上电，再给 CPU 核上电，因此电平转换采用了 TPS70351 芯片。该芯片是双通道的电压调节器，具有快速的暂态响应，电压损耗低等优点；能输出两路电压给需要分离供电的器件；两路调节器输出电流范围分别为 0~1A 和 0~2A；RESET 引脚功能可用来监视该芯片内部调节器的状态，当输出电压跌落到它调节值的 95% 时，该复位信号就被拉低，可直接驱动 DSP 的上电复位电路。此外，该芯片能提供可供选择的的上电顺序。上电顺序和芯片的 SEQ 脚电平有关：当芯片

使能引脚接低电平且 SEQ 接高或不接时，调节器 2 先开通，当调节器 2 的输出电压 EN 达到额定输出电压的 83% 时，调节器 1 才开通；当调节器 2 的输出电压低于其额定输出电压 83% 时，调节器 1 才关断。若 SEQ 输入信号接低，则上电时序与上述情况刚好相反。电路如图 7 所示。

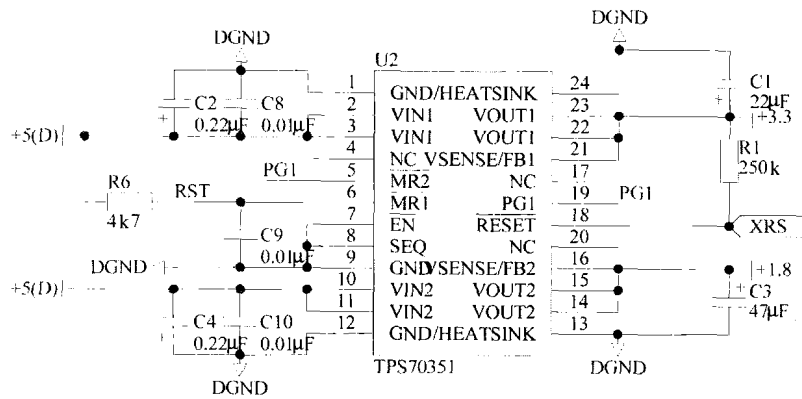


图 7 供电电源电路

2. A/D 转换

2812 片内自带 16 通道 12 位单极性 A/D 转换模块，最小转换时间为 200ns，对系统信号采样无须进行相位补偿。由于传感器输出的信号是双极性的，而在 DSP 内部只能为单极性的输入信号，为此对交流信号采样时要加电压偏置电路，使输入电压范围在 0~3V 之间。为了提高输出中点电压的精度，采用电压基准芯片给偏压电路供电，解决了以往用开关电源输出电压作为偏置电压基准时电压波动对 A/D 输入的影响。并在输出端设计了保护电路，以防止电压超出 DSP 输入电压范围。

3. D/A 输出显示

D/A 输出的作用是显示系统的各个变量，如电流信号、转速信号等，方便程序调试和外界直观的观察系统实验结果。采用 D/A 转换芯片具有显示精度高，不受外界干扰等优点。本系统采用了 MAX547 作为 D/A 转换芯片，该芯片是 13 位数/模转换芯片，采用并行方式接收数据，从数据接收到电压输出只有 5μs 延时，具有相应速度快、显示精度高的优点；片内有 8 路 D/A 模块，每个模块对应一路模拟电压输出，模块的选择由芯片的 A2~A0 引脚的电平来决定，其选择方式类似于三八译码器；每路 D/A 模块有一个输入锁存器和一个 D/A 锁存器，执行写操作时，数据被转载到输入锁存器中，当 LD 为低电平时，输入锁存器中的数据被传输到相应的 D/A 锁存器中，D/A 锁存器中的数据决定了输出电压的大小；当信号为低电平时，所有八路输出均复位成和 AGND 电平 CLR 一致；输出电压极性与芯片的 AGND 引脚所接电压有关；当 AGND 接 2.5V 时输出单极性电压；当 AGND 所接电压为 0 时输出双极性电压。为了使显示的波形能有效反映数据实际变化情况，试验中采用了双极性电压输出接法，即 AGND 引脚接零电压。

4. PWM 输出

TMS320C2812 的 EV 模块有 6 个全比较单元和 4 个简单比较单元，每个全比较单元有两个互补的 PWM 输出，每个简单比较单元有一个相应的 PWM 输出。全比较单元利用可编

程的死区控制电路产生 12 路 PWM 波输出，因此 TMS320C2812 能产生 16 个 PWM 输出，其中 12 个是独立的，而无轴承系统需要控制 2 套绕组，至少需要 12 路 PWM，从而在硬件上保证了单 DSP 实现的可能性，同时由于 2812 的单指令周期为 6.67ns，比 2407A 快四倍，完全能满足两套绕组共同控制的要求。试验证明，采用 2812 单 DSP 控制无轴承永磁薄片电机两套绕组，相对于原来的采用 LF2407A 的双 DSP 控制而言，程序的控制周期可以做到更短。无轴承永磁薄片电机系统采用周期为 16kHz 的 PWM 信号，满足了电机控制的需求。

PWM 口直接驱动光耦，驱动能力不够，通过 TI 的 ABT541 总线驱动芯片提高其驱动能力。

4.2 功率系统

功率系统是整個无轴承永磁薄片电机系统中的执行机构，负责完成控制器发出的指令。无轴承薄片电机系统需要两套三相电流（一套提供给转矩绕组，一套提供给悬浮绕组）。采用电流控制型 PWM 逆变器（CRPWM），可以方便地控制三相电流。三相逆变器的常见拓扑结构为三相全桥结构。本系统采用三菱公司的智能功率模块（IPM）PS21563。电流环的调制方式为 SPWM。

4.3 传感器

无轴承永磁薄片电机的控制系统需要检测三种信号，分别为电流信号、转子径向偏移信号、转子转角信号，这就意味着需要三种传感器：电流传感器、位移传感器、转角传感器。

1. 电涡流位移传感器

这种传感器的原理是，在探头的线圈中通入高频电流，从而在探头附近产生高频磁场，当有金属导体靠近探头时，金属导体的表面就会形成电涡流，而电涡流又形成一个涡流磁场影响原高频磁场，从而引起探头线圈中的电流的幅值和相位的变化，再推算出距离远近。无轴承永磁薄片电机系统利用电涡流传感器实时检测转子的位置坐标，并经过调理电路将信号输出给 DSP。上海瑞视仪表电子有限公司生产的 PD9000XL 系列传感器满足系统需要。

2. 转角传感器

无轴承永磁薄片电机系统采用霍尔传感器来测量转子的磁通密度，经过计算得到转子的瞬时角度。

3. 电流传感器

采用南京茶花电子有限公司的 CSM050NP 霍尔电流传感器。用来检测电机的转矩绕组和悬浮绕组的三相电流。

4.4 电机本体

经有限元计算设计电机本体，一台装配好的电机如图 8 所示。

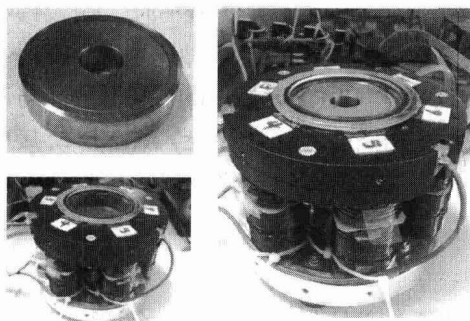


图 8 电机本体

5 系统软件设计

5.1 概述

开发语言： C 语言
PWM 频率： 16kHz
PWM 模式： 带死区时间的对称 PWM 波
中断： 定时器 T1 下溢产生中断，执行中断服务程序频率为 16kHz；
A/D 完成转换产生中断，执行中断服务程序频率为 97.8kHz；
使用外设： Timer T1/T3， PWM1~12， ADCIN 0~6

5.2 总体框架

无轴承永磁薄片电机软件框架可用图 9 描述。绕组电流、径向悬浮位置、转角信号等模拟信号通过调理电路送至 TMS320C2812 的 A/D 转换单元。悬浮绕组的驱动和旋转系统的驱动执行单元都是传统的三相全桥逆变器。TMS320C2812 产生两组六路互补 PWM 分别作为两套逆变器的开关信号。

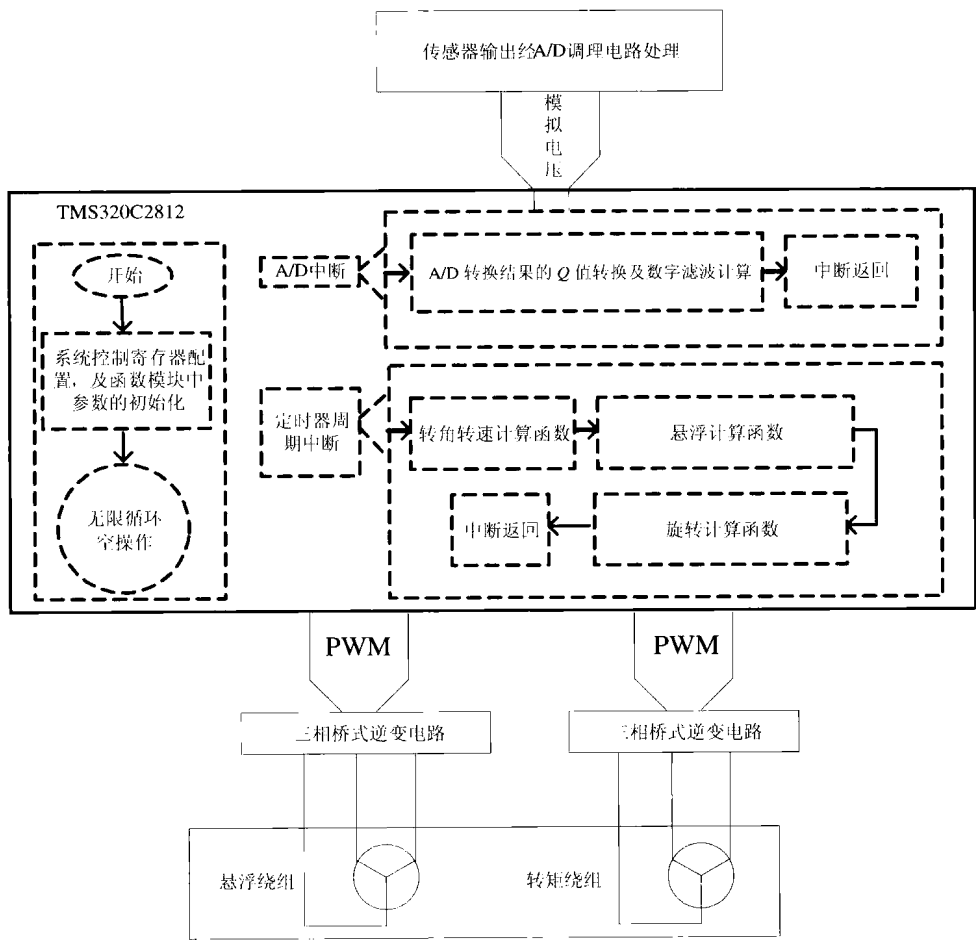


图 9 电机软件系统总体框架

DSP 主要运行两项任务，一个为模拟信号的处理、一个为控制运算，分别用 A/D 中断与定时器周期中断进行调度，前者运算量小，优先级高，可嵌套中断。

5.3 各模块流程

为提高代码的可移植性，大部分的算法都采用了模块化的设计方法。为提高系统处理速度使用了 TI 提供的 IQmath 来处理所有数据。而一些电机控制采用的算法如 park 转换、3/2 转换等也采用了 TI 提供的库函数。各模块流程如图 10 所示。

