# 摘 要

康复机器人技术是近年来发展起来的一门新兴技术，是康复医学和机器人技术相融合形成的，经过几十年的发展已经为人类生命的延续和肢体的康复做出了很大贡献。国外在康复机器人的研究领域比较发达，而我国则是刚刚起步，随着我国人口老龄化问题日趋严重，而危及老年人健康最常见的疾病是脑卒中，其后遗症为一侧肢体偏瘫，而传统的康复方法是由康复医师进行康复治疗，易受体力及情绪影响、成本高等因素已经不能满足患者的康复要求，因此本课题的研究具有重要的现实意义和应用价值。

本文基于临床康复理论和电机控制技术，设计了一款在软件控制下的电机驱动设备，能够针对不同损伤程度的肢体障碍患者提供被动主动自动三种模式的脚踏车式下肢康复训练器控制系统。

首先介绍了永磁同步电动机的性能以及详细分析了对电机的控制策略。涉及永磁同步电动机的速度调节和转矩控制，基本控制算法基于具有空间矢量脉冲宽度调制（SVPWM）技术的磁场定向控制（FOC），为了保证在负载变化时速度控制的鲁棒性，设计了一种新颖的变结构控制器。对常规比例积分微分（PID）控制系统和所提出的变结构控制系统都进行了仿真，结果验证了所提算法的有效性。

然后在Matlab/Simulink中搭建了永磁同步电机变结构控制系统的仿真模型。仿真结果表明改变切换时刻和调节方式能有效满足转速精度高和动态响应快的要求。

最后本文设计了永磁同步电机控制系统的硬件和软件系统。介绍了实现变结构控制系统所需要的硬件资源，包括控制芯片、检测电路、保护电路、功率驱动电路等，并在平台上对控制算法进行编程，在实物样机上调试，初步验证了下肢康复训练器的安全性和可靠性。

**关键词：**PMSM； FOC；下肢康复机器人控制系统；变结构控制；速度调节；转矩控制

# **第一章 绪论**

## 1.1 课题研究背景

根据国家统计局统计数据，2018年我国人口从年龄构成来看，16至59周岁的劳动年龄人口为89729万人，占总人口的比重为64.3%；60周岁及以上人口为24949万人，占总人口的比重为17.9%，其中65周岁及以上人口为16658万人，占总人口的比重为11.9%。从上述数据来看，我国目前的劳动人口占总人口的比重为64.3%，这部分人口是社会财富的主要创造者，他们还需要承担抚养少年儿童和赡养老人的责任。如果单从养老的角度来看，我国目前大约3.6个劳动力，需要赡养1个60岁以上老人，而且随着我国老年人口的继续增多，养老压力还将继续加大。随着时间的推移，我国老龄化的程度不断加重，我国老龄化的速度是快于世界平均水平的。同时，由于现代社会人们工作生活压力负担重，饮食结构和作息时间不合理以及各种意外灾害交通事故的发生，神经损伤和肢体损伤患者的数量呈现逐年上升趋势。对于上述患者除了必要的手术和药物治疗外，科学有效的康复训练对患者肢体功能的痊愈起着重要作用。

近年来，随着磁性材料，电力电子设备和控制理论的发展，永磁同步电动机驱动系统在许多工业应用中发挥着越来越重要的作用。永磁同步电动机已得到广泛认可，主要表现在其对可再生能源发电机或工业伺服应用的精确速度和位置控制的高性能中。这是由于其一些出色的功能，例如超大功率密度，高转矩电流比，快速响应和低噪音。方波驱动的永磁同步电机具有高效、功率密度大的优点，但是其转矩波动相对于正弦波永磁同步电机要大很多。

本文是在现有康复机器人研究成果的基础上，针对目前康复机器人系统中存在的人机融合性差的共性问题，从人的因素人机一体化设计智能控制等方面出发，对康复机器人进行研究。

## 1.2 国内外研究现状

随着近些年来机器人技术的蓬勃发展，科学家将康复医学与机器人技术进行结合，就诞生出了康复机器人。康复机器人是康复医学、机器人学、计算机学、控制科学等多个领域融合的产物，它能够更有效、更科学地代替康复医师对患者进行康复训练，完成一系列可重复的康复训练。与工业机器人不同，康复机器人针对的对象是人，所以它的设计必须考虑到康复对象以及临床康复医学的规律，安全性始终是第一位要求。与传统的康复手段相对比，康复机器人有以下优点：康复机器人不会因康复医师的个人原因造成患者康复训练的强度的不达标（过强或者过弱），人力消耗减少，并能持续康复训练患者；康复机器人可以通过互联网技术进行远程操作，患者可以在家中由康复医师远程操作来进行康复训练，不受时间地域限制；康复机器人可以通过传器等设备来记录康复数据，从来有效的来反馈康复效果，以实时地调整康复强度，达到最佳康复效果。中机器人技术与康复医学得以完美结合，当时的研制与临床康复研究主要是在美国与欧洲一些发达国家进行试验的，

### 1.2.1 国外研究现状

近年来国外康复机器人技术正在快速地发展进步。欧美等国家的许多研究机构都开展了相关的康复机器人研究工作，同时还得到了科研工作者和医疗机构的重视。美国研发了一种外骨骼机器人，它能够应用多种传感器实时地将人体的行动反馈出来，而且强大有力，但是耗能巨大。

### 1.2.2 国内研究现状

## 1.3 永磁同步电机的控制与调速

传统的基于PMSM线性化模型的PID控制算法由于实现简单而得到了广泛的应用。但是，其控制性能受不可预测的参数变化，外部负载干扰和非线性动力学的影响。仅使用线性控制算法很难获得令人满意的性能，特别是在复杂的工作条件下。为了提高PMSM的控制性能，已经提出了多种非线性控制算法，例如自适应控制，预测控制，滑模变结构控制和智能控制等。其中，滑模变结构控制被认为是 一种有效的解决方案，因为它具有几个显著的优点，例如对参数变化不敏感，快速的动态响应和外部干扰抑制。

### 1.2.1 矢量控制

无论是交流异步电机还是交流同步电机，其动态数学模型都是一个高阶、非线性、强耦合的多变量系统，通过坐标变换可使模型降阶并简化。矢量控制这一概念，最早是由一名德国学者提出用以解决交流电动机的转矩控制问题，为了平稳有效地控制PMSM，在实践中广泛采用了场定向控制（FOC）。在交流电动机中，产生磁通和转矩的电流具有耦合效应，因此无法独立控制。FOC的核心思想是对三相定子电流进行坐标变换，从而可以将交流电机的定子电流分解成磁通量产生部分和转矩产生部分，以便可以将其作为单独励磁的直流电动机进行控制，再经过相应的反变换，就能控制交流电机了。图1显示了磁场定向控制永磁同步电动机的框图。主要的控制策略有以下几种：

1、 直轴电枢电流为0的控制策略

永磁同步电动机使用转子磁极位置定向，并使，是最简单的电流矢量控制方法。，从电机端口看，永磁同步电动机等效为一台他励直流电动机，三相定子电流中只含有转矩电流部分，且定子磁链空间矢量与永磁体磁链空间矢量正交。时，电机的输出转矩仅与转矩电流相关，且成正比关系，即：

式中，由于，所以不会对d轴磁链产生增磁或去磁作用，此时d轴磁链即为永磁体产生的磁链。

2、 最大转矩/电流比控制

3、 弱磁控制

通常，在永磁同步电动机矢量控制系统使用的控制策略。本文所介绍的永磁同步电动机矢量控制系统都是以转子磁极位置定向，且的控制策略。

### 1.2.2 直接转矩控制

自从Depenbrock和Isao Takahashi在1980年代中期提出对感应电机进行直接转矩控制以来，DTC的主要思想是直接控制电机产生的转矩和磁通，而无需像FOC一样进行电流控制。DTC具有许多优点，例如相对于转子磁场定向控制而言，具有更少的机器参数依赖性，更简单的实现以及更快的动态转矩响应。DTC不需要电流控制器，因为它根据磁链和转矩的误差选择电压空间矢量。目前，许多新型控制方法正被广泛应用于矢量控制和直接转矩控制种，包括反推控制、自适应控制、变结构控制、神经网络、模糊控制等。

### 1.2.3 频率换向与位置换向控制

冠以宽调速范围、高精度要求、平滑无级调速的稀土永磁同步电机伺服系统存在着转速精度、转速稳定性、速度调节、电机失步之间的矛盾。为解决这个矛盾提出的一种较好的方法是永磁同步电机的变结构控制。这种控制方式兼顾稳态和动态性能，使两种控制结构的优点都能得到发挥。根据是否需要转子位置信号和变频器的换向方式，永磁同步电动机分为他控式变频调速和自控式变频调速。他控式变频调速系统采用独立的变频装置，其输出频率只与给定的速度指令有关，根据预定的压频曲线进行控制，不需要转子位置信号，只需要精确控制变频电源的频率就可以准确调节电机转速，使电机转速与电源基波频率保持严格同步关系。这种调速系统多采用开环控制，故只适用于动态响应不高的场合。

自控式变频系统中，变频器的输出频率由电机的转子位置信号所控制，形成电源频率自动跟踪转子位置的闭环系统，从而使定子旋转磁场转速和转子旋转磁场转速始终保持同步，因此不会发生失步，但其转速和转矩脉动相对较大。

变结构控制是将这两种调速方式都用在同一控制电路中，兼顾稳态和动态的性能。在启动或调整过程中，采用自控式调节方式，满足系统的动态性能。当转速稳定时，采用他控式调节方式，稳态精度高。这种控制方法实现的关键在于两种方式的可靠切换，若处理不当，将引起电机转速的剧烈震荡，甚至不能牵入同步。

## 1.3 本文主要研究内容

本文旨在基于dsp设计变结构控制策略的永磁同步电动机控制系统，对于控制系统中的变结构控制、PWM调制方法和PI调节器进行了理论分析和仿真建模。对变结构控制中存在转速转矩波动等问题提出了处理解决办法，并通过仿真对其进行分析验证。

为了验证仿真结果，这些算法在TMS320F28335开发板上进行了测试。设计的永磁同步电动机控制系统的硬件和软件系统，对硬件和软件系统中的主要部分进行说明。

# 第二章 永磁同步电动机的基本结构和数学模型

根据感应电动势的不同，永磁同步电动机分为梯形波/方波永磁同步电动机（无刷直流电机）和正弦波永磁同步电动机（简称永磁同步电动机）两类。这两种永磁同步电动机的区别为：无刷直流电机是用装有永磁体的转子来代替有刷直流电机的定子磁极，永磁体励磁磁场在定子相绕组中的感生反电动势为梯形波，它将原来的直流电动机的电枢变为定子，定子绕组多为集中绕组，需要加入三相对称方波电流以产生恒定电磁转矩；永磁同步电动机是以永磁体来代替直流激磁作为恒定励磁的一种电机，永磁体励磁磁场在定子相绕组感生的反电势为正弦波，定子绕组为正弦分布绕组，需要加入三相对称正弦电流以产生恒定电磁转矩。相对于方波电流驱动永磁无刷直流电机，正弦波永磁同步电动机避免了电流换向时产生的较大转矩脉动，具有更理想的伺服驱动性能。

## 2.1 永磁同步电动机的基本结构

按永磁体在转子上安装位置的不同，有表贴式、内插式和内埋式三种基本结构形式。表贴式转子结构中，永磁体通常呈瓦片形，位于转子铁心的外表面上，永磁体提供磁通的方向为径向，具有结构简单、制造成本较低、转动惯量小等优点。由于永磁材料的相对回复磁导率接近1，所以表贴式转子在电磁性能上属于隐极转子结构。内插式转子的相邻两永磁磁极间有磁导率很大的铁磁材料，转子磁路不对称，故在电磁性能上属于凸极转子结构，其制造工艺较简单，该结构可以充分利用转子磁路不对称所产生的磁阻转矩提高电动机的功率密度，所以经常被交流调速系统的永磁同步电动机采用，但漏磁系数和制造成本都较表贴式大。

## 2.2 永磁同步电动机的数学模型

在建立PMSM的数学模型之前，在不影响控制性能的情况下，为了简化分析的复杂性，结合所用电机的特点，我们通常进行如下假设：

1. 定子三相绕组对称、均匀分布，Y型连接；
2. 反电动势为正弦；
3. 铁磁部分磁路线性，不计饱和、剩磁、涡流磁滞损耗等影响；
4. 转子无阻尼绕组，永磁体无阻尼作用。

由此，在abc静止坐标系中获得了PMSM的电压、磁链和转矩方程。

1. 电压方程：

三相永磁同步电动机的定子绕组呈空间互差120度电角度分布，每相绕组电压与电阻压降和磁链变化相平衡。定子三相绕组电流产生的磁链与转子的位置角有关，转子永磁磁链在每相绕组中产生反电动势，得到的定子电压方程为：

1. 磁链方程：

定子每相绕组磁链不仅与三相绕组电流有关，而且与转子永磁磁极的励磁磁场和转子的位置角有关，因此磁链方程可表示为：

1. 转矩方程：

用上述公式建立模型虽然简单，但由于微分方程组中含有时变系数，分析过程中求解比较困难。因此，建立dq轴下的数学模型如下。

电压方程：

磁链方程：

转矩方程：

机械运动方程：



式(23)中：J为电机转动惯量，kg·m2；n为电机负载转矩，N·m；B为黏性摩擦系数；∞为电机角速度，rad／so

图为正弦波永磁同步电动机的空间矢量图。从图中可以看出定子磁链与永磁体产生的气隙磁场间的空间角度为δ，此为永磁同步电动机的运行功角。

## 2.3 基于线性自抗扰控制器的主动训练

在训练康复过程中，为保证患者下肢的舒适度，我们需要考虑调节永磁同步电机的转速来保证患肢肌张力处于设定的阈值范围。因此，将电机等效为一个积分串联对象，包括速度环和转矩环。速度环用于提高转速跟随性能，转矩环用于提高转矩稳定性，抑制转矩脉动。

### 2.3.1 速度环自抗扰控制器设计

根据上文永磁同步电动机的机械运动方程，速度控制环可以等效为



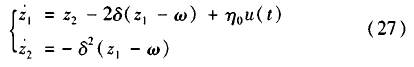
用n(t)代表系统的总扰动，且有：



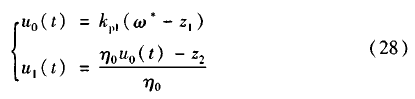
可以发现系统干扰主要来自负载转矩、转动惯量和摩擦等参数的变化。于是式(23)可重新表示为



由数学建模可知，永磁同步电动机速度还可看作一个一阶非线性数学模型，因此，速度环扩张状态观测器可设计为



式(27)中：，z1为速度观测值，w为速度实际值，u为iq。于是，线性控制律可表示为



### 2.3.2 转矩环自抗扰控制器设计

永磁同步电机状态方程为



式(29)中：p为极对数；ke为反电动势系数；us表示绕组端电压，V；e为绕组间感应电动势，V。

设n1(t)代表转矩环的总扰动，且有：



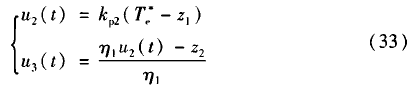
于是，式（26）可重新表示为



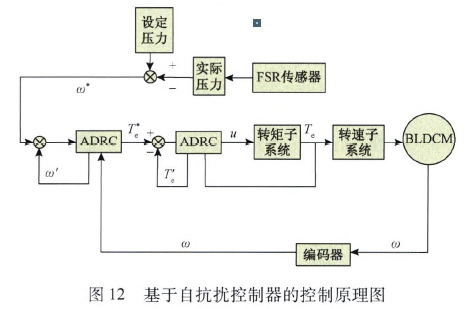
因此，转矩环扩张状态观测器可设计为



式子中，，线性控制律可表示为



设计自抗扰控制器的控制原理图。首先通过FSR压力传感器检测踏板力，与预设压力对比，差值信号作为速度控制参考信号输入到控制器。经控制器调节后输出转矩参考信号作为转矩环自抗扰控制器输入信号，最后经一系列坐标变换SVPWM调制后输出控制信号驱动永磁同步电机旋转。电机转速可通过编码器测量，测量的实际转速被送到系统输入端与参考速度信号进行对比然后送到自抗扰控制器。



### 2.3.3 仿真分析

通过SIMULINK进行仿真，验证速度环和转矩环自抗扰控制算法的效果，并与传统PID控制算法对比，研究了方波和随机信号下的控制效果。

与传统PID控制策略相比，采用自抗扰控制算法的康复控制系统转速跟踪响应速度更快，超调更小。

在相同设定条件下采用自抗扰控制算法的系统控制器的控制量更小。

# 第三章 下肢康复训练器总体方案设计

## 3.1 引言

帕金森氏病（PD）康复方面的最新研究表明，中风会导致偏瘫，从而严重降低人们进行日常生活活动的能力。由于医疗资源不足，迫切需要基于家庭的康复机器人。本章提出了一种脚踏车式康复训练装置，通过模仿人的踏车运动来实现对患者下肢进行全方位的康复训练。这类康复的价值在于能够提供高强度疗法，以协助帕金森氏症患者进行运动以改善运动功能，从而有助于运动并响应患者的表现。此外，基于机器人的康复可以在不增加治疗师负担和医疗费用的情况下提供积极的好处。并重点介绍为自行车开发的两种训练模式的控制算法：一种实现惯性负载（静态模式），另一种实现速度基准（动态模式）。

## 3.2 下肢康复训练器控制系统设计要求

康复机是一款在软件控制下的电机驱动设备，主要用于肢体障碍患者进行上肢和下肢的肌力和关节活动度的康复训练。适用于对恢复期和后遗症期患者进行上肢和下肢的被动性和主动性的康复训练。该康复机脚踏车可以评估个人的努力，性能，技能水平和治疗价值，以便动态地更改电动机的运行模式、速度和行驶时间。仪器化的脚踏车使用市售的健身车底盘构造而成，底盘上增加了高性能电机、传感器、控制和自动化设备，这些设备采用了开放式架构，先进的控制技术和高性能的电机驱动器带有嵌入式控件和伺服电动机驱动系统的智能康复机脚踏车。

### 3.2.1 脚踏车硬件架构

康复机主要由训练器、把手、绑带、手控盒等组成。

### 3.2.2 脚踏车运行规范

1. 速度：我们继续使用电动机上的减速器，减速比为13.2576。所用的伺服电机是罗克韦尔自动化TLY-A230P-BJ62AA，额定转速为5000 r / min。该电机可以超过300 r / min的速度操作踏板。在标称踏板速度为95 r / min时，电机速度将为1260 r / min。
2. 负载：所使用的伺服电动机是额定扭矩为1.3 N·m的230 V电动机。电机通过13.2576皮带轮比与踏板相连。该电动机提供了在没有骑手协助的情况下移动踏板并克服每条腿的重量所需的扭矩。大多数情况下，电动机会吸收踏板的负荷并提供断路作用，以增加骑车者感受到的踏板阻力。为了适应骑车人在踏板负载下长时间的自行车操作，在每辆自行车上增加了一个单独的制动电阻，以消散骑车人提供的能量。
3. 安全性：确保骑车人的安全性在下肢康复训练器的设计和开发中至关重要。康复机采用了痉挛控制系统，该系统可以持续感应使用者的肌肉张力，自动探测可能发生的各种痉挛并加以处理。当使用者发生痉挛时机器运转会停止，然后向反方向运动，缓解痉挛，放松肌肉，避免肌肉、关节的二次损伤。并提供紧急停止（E-stop）功能，可立即断开电动机和其他电源组件的电源。此外，每毫秒进行一次反馈检查，以确保正确的电动机反馈以及各种系统功能之间存在准确的通信。最后，在过电流情况下，例如由于踏板撞到障碍物，电源将立即从电动机上断开。

可靠性：自行车系统采用可靠的市售驱动器和控制组件，这些组件已在全球的关键应用中使用。自行车自动化系统的设计和实施采用了良好的工程实践，以进一步确保安全可靠的运行。过流和过压限制可保护电子设备，并且电子设备外壳上的冷却风扇可帮助我们防止过热。

## 3.3 下肢康复训练器主体部分方案的确定

为了实现下肢康复训练器被动、主动、抗阻多种训练模式的功能要求，并能够最大限度的满足不同患者的个性化特点，该康复训练器在进行机械设计的过程中必须首先达到以下技术指标要求：

1. 末端转速最高150r/min；
2. 末端承载能力达到10kg；
3. 转柄回转半径120mm；
4. 两脚踏板之间距离控制在160mm~200mm之间；
5. 康复训练主体部分质量控制在15kg以内；
6. 康复训练器主体部分的体积控制在600150200以内。

驱动电机以及减速器的选取结合康复机器人的性能要求、应用场合以及特殊的工作对象，分别做出了以下考虑。

1. 驱动电机的选取。驱动电机的选取实际上主要从速度和转矩两个方面入手，其中电机驱动力矩的计算需要考虑患者施加于机器人末端的作用力、患肢的重量、康复训练要求等因素。此外还需要兼顾考虑电机的外形尺寸、额定电压、额定电流、额定功率、工作效率、是否有合适的驱动器、价格等方面的因素。

根据上文提到的康复训练技术指标要求末端最高转速150r/min，末端承载能力10kg，转柄回转半径120mm，计算得到末端最大驱动力矩为12Nm。综合考虑上述条件，选区的驱动电机主要参数如表所示。

表 所选驱动电机组件主要参数

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 生产厂家 | 电机型号 | 额定电压 | 额定功率 | 额定转速 | 额定转矩 | 末端力矩 |
|  |  |  |  |  |  |  |

1. 减速器的选取。减速器的选取需要综合考虑减速器的连续输出扭矩、效率、空载回差、径向负载、外围减速比、尺寸、质量、价格等因素。本文选取的是与所选驱动电机配套的行星减速器。考虑行星减速器传递效率等因素的影响最终选取的行星减速器的减速比为16：1，减速器相关参数如表所示。

表 行星减速器相关参数

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 生产厂家 | 减速器型号 | 长度 | 输出扭矩 | | 工作效率 | | 空载回差 | 减速比 |
|  |  |  | |  | |  |  |  |

## 3.4 下肢康复训练器训练模式

随着中枢神经研究的逐步深入和临床康复手段的不断进步，尤其是近四十年来经过大量的临床研究和实验证明中枢神经系统是具有可塑性的，如果在神经损伤的早期或后期对肢体进行主动或者被动训练可以加快中枢神经的功能重建。因此，特定的功能训练在人体运动功能损伤及恢复的过程中不可或缺，这为康复机器人技术的发展提供了重要的医学理论依据。

运动疗法是指借助外力对患者肢体进行牵引、按摩、关节活动等被动治疗，或者患者主动进行关节运动、肌肉力量训练等，从而促进运动组织的功能恢复。根据运动疗法的概念和原则，在借鉴了临床康复经验的基础上，本文针对不同损伤程度不同康复阶段的患者提出了被动、主动、自动三种训练模式。

⑴被动训练模式。当使用者完全丧失肌肉力量无法自己运动时，康复机可以通过电机带动使用者上肢或下肢的运动，从而避免或减轻缺乏运动带来的不良后果，如关节僵硬、肌肉萎缩、消化不良、骨质疏松、血液循环不畅等。

⑵主动训练模式。使用者完全依靠自身力量主动进行康复训练，默认阻力为5Nm，使用者可根据自身情况进行调节；主动训练前应先进行3~12分钟被动训练作为热身，主动训练结束后再进行3~12分钟被动训练。

⑶自动训练模式。在自动训练模式下，当训练者发力超过设定速度时，康复机自动切换到主动模式，主要用于增强肌肉力量。

# 第四章 下肢康复训练器控制系统设计与实验研究

## 4.1 引言

在以往，工业控制中主要是由单片机承担控制核心的任务。随着DSP技术的发展和控制要求的提高，越来越多的工业控制产品采用DSP芯片。TMS320F28335是美国TI公司推出的高性能32位数字信号处理器，属于美国德州仪器公司TMS320C2000TM数字信号控制器（DSC）平台，此器件专门为电机的数字化控制设计，特别适用于电机的高性能控制。

控制系统是整个下肢康复训练器系统的关键和核心，是上层的控制策略的“执行机关”。可以说，控制系统在结构和功能上的合理划分将直接影响机器人系统康复训练功能的实现以及系统整体的可靠性和实用性。本章首先对下肢康复训练器控制系统的构建和人机交互界面进行详细介绍，最后对所做相关实验数据进行分析。

## 4.2 下肢康复训练器控制系统的构建

机器人的控制结构主要包括集中式控制、主从式控制、分布式控制。该康复训练器的控制系统平台基于嵌入式分布体系结构，按照功能可以划分为上位机控制系统、运动控制系统以及传感反馈系统三个子系统。上位机控制系统主要包括DSP主控微机和人机交互界面。DSP主控微机负责对整个控制系统进行管理以及运行上层控制算法，人机交互界面主要用于设置训练模式设定相关训练参数以及显示康复训练效果；运动控制系统即永磁同步电动机控制器，负责接收并解释上位机控制系统指令，不仅要控制和驱动电机带动患肢实现平滑连续的轨迹运动，而且还要根据不同的上位机控制指令对驱动电机实时做出相应调整，进而带动患肢执行不同的模式、不同强度的运动训练；传感反馈系统包括各类传感器及相应的处理模块，主要用于检测并实时反馈传感器采集的转柄位置、速度以及患肢与康复训练器之间的相互作用力等运动参数。以上是对各个子系统的功能要求，是下肢康复训练器控制系统集成的指导性依据，最终设计的硬件控制系统如图所示。

### 4.2.1 下肢康复训练器上位机系统

### 4.2.2 永磁同步电动机控制器

为了适应被动主动自动等多种训练模式，并保证患者使用时的安全，要求电机控制器不仅能对驱动电机的位置和转速进行控制，而且在训练过程中要能实时监控机器人的运动状态，并实时反馈电机的速度位置及电流数据，系统出现故障时还应具有报警功能，以便DSP主控微机采取相应的措施进行处理。本文选用的电机控制器将控制板和驱动板独立分开设计，输出功率可达3kW，驱动220VAC高压永磁电机，控制电与动力电分开设计、强弱电隔离设计。

电机控制器的控制板以TMS320F28335单片机作为主控芯片，是控制器的核心，控制板上其他硬件主要包括时钟电路、复位电路、电源稳压电路、串行通信电平转换电路、逆变输出（驱动电机）接口、霍尔传感器输入接口、正交编码器信号输入口、AD转换接口和其他I/O接口等。

电机控制器的驱动板主要作用是放大DSP芯片输出的PWM控制信号来驱动电机，硬件上采用仙童公司IPM模块fsbb30ch，电机控制器的控制和驱动电路板实物如图所示。



电机控制器控制原理如图所示。当控制器接收到来自于上位机的指令后，通过PI算法及一系列的运算和平滑处理，将计算结果以PWM的形式输出到电机驱动板，在IPM模块里进行脉冲分配，然后经过信号转换电路和整流电路驱动交流伺服电机，同时实时测量的位置、速度和电流等电机运行状态信息能及时反馈至DSP芯片，形成下位机闭环伺服控制系统。上位机也可以通过相应的查询指令获取相应运行参数。

### 4.2.3 下肢康复训练器传感反馈系统

**4.2.3.1 增量式光电编码器**

编码器是将信号（如比特流）或数据进行编制、转换为可用以通讯、传输和存储的信号形式的设备。编码器把角位移或直线位移转换成电信号，前者称为码盘，后者称为码尺。按照读出方式编码器分为接触式和非接触式两种。接触式采用电刷输出，以电刷接触导电区或绝缘区来表示代码的状态是“1”还是“0”；非接触式的接受敏感元件是光敏元件或磁敏元件，采用光敏元件时以透光区和不透光区来表示代码的状态是“1”还是“0”，通过“1”和“0”的二进制编码将采集来的物理信号转换为机器码可读取的电信号用以通讯传输和储存。

光电编码器通过光电转换可以将输出轴的角位移角速度等机械量转换成相应的电脉冲以数字量输出。技术参数主要有每转脉冲数和供电电压等。电机运行过程中光电编码器输出两组A/B相位差90度的脉冲，通过这两组脉冲不仅可以测量转速，还可以判断旋转的方向。图5-5所示为增量式编码器输出信号时序图。编码器的信号处理是通过电机控制器的DSP芯片与驱动板相结合完成的，光电编码器的接口在驱动板上，其中ABZ三相输出信号均经过10K的上拉电阻连接至控制板DSP芯片的引脚上。上拉电阻主要作用是消除方波信号和毛刺，提高信号驱动能力。芯片内部通过中断对光电编码器输出的电平信号进行处理，利用脉冲信号A超前B或B超前A可以判断出电机旋转方向，对脉冲进行定时计数则可以计算出电机的转角，电机的转速由脉冲频率决定。

**4.2.3.2 数据采集模块**

# 第五章 永磁同步电机矢量控制系统的DSP解决方案

三相永磁同步电机（PMSM）具有体积小、重量轻、转子无发热等特点，在高性能交流伺服控制系统中得到了广泛的应用，如工业机器人、数控机床、柔性制造等领域。本章首先介绍转子磁场定向的矢量控制系统原理，接着给出具体的实现方案，对A/D采样、转速测量等模块给出具体的实现方法，最后给出完整的程序代码。

## 5.1 控制系统结构

图给出了永磁同步电动机转子磁极定向矢量控制系统结构。

根据此图，可得永磁同步电动机矢量控制的过程为：永磁同步电机由伺服驱动器供电，电机转子轴上装有编码器，用于检测电机的磁极位置与A轴（α轴）之间的夹角θ和旋转速度。给定速度信号与检测到的速度信号相比较，经速度PI控制器的调节后，输出交轴分量作为电流PI调节器的给定信号，与坐标变换后得到的定子反馈交轴电流相比较，经过PI调节器后输出交轴电压；控制直轴给定电流，与坐标变换后得到的定子反馈直轴电流相比较，经过PI调节器后输出直轴电压，再经过Park逆变换得到α，β轴电压。最后通过SVPWM模块输出六路控制信号驱动逆变器工作，输出可变幅值和频率的三相正弦电流输入电动机定子。

图中的所有调节器都可使用软件实现，从而实现三相永磁同步电动机的全数字矢量控制系统。

## 5.2 电压空间矢量PWM技术的实现

SPWM追求输出频率和幅值可调、三相对称的正弦波供电电源，其控制原则是尽可能减少输出电压中的谐波含量，这种方法虽然具有数学模型简单容易实现等优点，但电压利用率较低。对线电压有效值为380V的交流三相电源进行不可控整流时，直流侧输出电压为：

当调制度M=1时，逆变器输出的相电压幅值为，则线电压的有效值为：

由此，得到输出线电压的有效值为

可见，逆变器的输出线电压的最大有效值不到380V，电压利用率只有86.5%，对此目前最流行效果最好的变压变频PWM技术当属电压空间矢量PWM（SVPWM）技术，这种方法从电机角度出发，以得到幅值稳定的圆形旋转磁场为目的进行控制。本节将对SVPWM技术进行详细介绍，并给出相关程序。

### 5.2.1 SVPWM技术基本原理

**1. 电压空间矢量与磁链空间矢量的关系**

电压空间矢量PWM将逆变器与交流电机看成一个整体，着眼于使电机得到圆形的旋转磁场，从而产生恒定的电磁转矩。它用三相逆变器的8个基本电压矢量来合成期望的参考电压矢量，建立逆变器功率器件的开关状态，从而实现对交流电机的恒磁通变压变频调速。由于该控制方法将逆变器与电机看作一个整体，所得到的模型便简单，便于微处理器实时控制，并具有转矩脉动小噪声低电压利用率高等优点，因此目前无论在开环调速系统还是闭环调速系统中均得到广泛应用。

假设三相交流永磁同步电动机由理想的三相交流电供电，则有：

式中，分别为加在电机ABC三相定子绕组上的电压；为电源线电压的有效值；为电源电压的角频率。

定义电压空间矢量为：

式中，为电压空间矢量；y=120°。

将式代入式，可得理想供电条件下的电压空间矢量：

式中，；可见，理想条件下，合成电压空间矢量为幅值不变的圆形旋转矢量。

用合成空间矢量表示的定子电压方程式为:

式中，为定子三相电压合成空间矢量；为定子三相电流合成空间矢量；为定子三相磁链合成空间矢量。

当电机的转速不是很低时，电子电阻压降在式中占的比例很小，可以忽略不计，则定子合成电压与合成磁链空间矢量的近似关系为：

进而得到：

式中，，为电机磁链的幅值。

上式表明，当供电电压的压频比保持不变时，磁链幅值也保持不变，且电压空间矢量的方向为磁链圆的切线方向，当磁链矢量旋转一周，电压矢量也旋转一周，其轨迹与磁链圆重合。这样，电机的旋转磁场轨迹问题就转化为电压空间矢量的运动轨迹问题。

**2. 三相逆变器输出的基本电压空间矢量**

采用三相桥式电压源型逆变电路，对于180°导电的工作方式来说，3个桥臂的6个开关器件共可以形成8种状态。用SA、SB、SC表示三个桥臂的状态，规定1表示上桥臂开关器件导通，0表示下桥臂开关器件导通。那么SA、SB、SC的取值可以为000、100、110、010、011、001、101、111，这样就可以构成8个基本的空间矢量。在111和000这两个工作状态时逆变器无电压输出，为无效的工作状态，称之为“零矢量”，于是u1~u6这6个有效的电压空间矢量将整个空间分为6个扇区，如图所示

**3. 基本矢量作用时间计算**

电机的磁链矢量可以表示为：

式中，为当前磁链矢量，为前一次磁链矢量，为磁链矢量的增量，为施加的参考电压矢量，为作用时间。

如果要使磁链矢量逼近圆形，可以增加切换次数，在常规六拍阶梯波的作用时间内，磁链的增量由多个小增量叠加组成，由于每段磁链增量都对应一个与其自身同相位的电压矢量，所以每段施加的参考电压空间矢量的相位各不相同，这时可以用基本电压矢量的线性组合方法获得。

三相电压给定所合成的电压向量旋转角速度为,旋转一周所需的时间为，若载波频率为,则频率比为R=。这样将电压旋转平面等分切割成R个小增量，即设定电压向量每次增量的角度为:

定义SVPWM调制系数， ，即调制比=调制波基波峰值/载波峰值。

以第一扇区为例，假设参考电压矢量落在第一扇区，那么可以由两个基本电压矢量来合成，如图所示，以α、β轴为基准，各矢量满足：

式中，分量，TS为调制周期，t1 t2分别为u1 u2两个基本矢量的作用时间，默认逆时针动作方向，即u1先动作，u2后动作，的大小为2Ud/3。

当逆变器输出零矢量u0和u7时，电机的定子磁链矢量是不受影响的。根据这个特点，在调制周期内插入零矢量作用时间t0，以满足：

通过插入零矢量作用时间t0，可以达到变频的目的。

通过研究电压参考矢量落在其他区间的特点，比较发现t1 、t2都是一些基本时间的组合。现在定义三个变量X、Y、Z如下所示：

为了实现算法对各种电压等级适应，一般会对电压进行标幺化处理，实际电压，为标幺值，在定点处理器中一般为Q12格式，即标幺值为1时，对应4096，假定电压基值为，为系统额定电压，一般为线电压，这里可以看出基值为相电压的峰值。

**4.扇区判别**

通过以上SVPWM的法则推导分析可知要实现SVPWM信号的实时调制，首先要知道参考电压矢量Uref所在的区间位置，然后利用所在扇区的相邻两电压矢量和适当的零矢量来合成参考电压矢量。电压矢量调制的控制指令是矢量控制系统给出的矢量信号Uref，它以某一角频率ω在空间逆时针旋转，当旋转到矢量图的某个60°扇区中时，系统计算该区间所需的基本电压空间矢量，并以此矢量所对应的状态去驱动功率开关元件动作。当控制矢量在空间旋转360°后，逆变器就能输出一个周期的正弦波电压。

合成矢量Uref所处扇区N的判断。空间矢量调制的第一步是判断由Uα和

Uβ所决定的空间电压矢量Uref所处的扇区。通常在矢量控制系统中，根据控制策略进行适当的坐标变换，可以给出两相静止坐标系，即αβ坐标系下参考电压矢量。假定合成的电压矢量落在第一扇区，可知其等价条件如下：。根据以上等价条件再结合矢量图几何关系分析，可以判断出合成电压矢量。

|  |  |
| --- | --- |
| 扇区 | 落在扇区的充要条件 |
| Ⅰ |  |
| Ⅱ |  |
| Ⅲ |  |
| Ⅳ |  |
| Ⅴ |  |
| Ⅵ |  |

在确定参考电压矢量所在扇区时，引入三个决策变量A、B、C，并做如下定义：

这里再引入一个决策变量N，且N=A+2B+4C，参考电压矢量所在的扇区Sector与变量N的对应关系如表所示。

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| N |  |  |  |  |  |  |
| Sector |  |  |  |  |  |  |

采用上述方法，只需经过简单的加减及逻辑运算即可确定所在的扇区，对于提高系统的响应速度和进行仿真都是很有意义的。

**5.脉冲波形选择**

在参考电压矢量的合成过程中，一个调制周期内除了基本矢量作用时间t1 、t2外，其余时间应由零矢量进行补充，不同的零矢量添加方式将产生不同的输出波形，但应遵循以下基本原则：使功率管的开关次数尽可能最少，即两个基本电压矢量之间的切换只能有一个桥臂的开关管动作。现在比较流行的有五段式与七段式PWM脉冲，五段式SVPWM具有开关损耗小算法简单等特点，但七段式SVPWM的谐波含量比五段式的低，在对电压波形的谐波含量要求比较严格的调速系统中应用更加广泛。所以本次设计采用七段式SVPWM调制方法。

七段式SVPWM通常以零矢量u0开始，并以其结束，以u7作为中间矢量，为了实现每次切换只有一个开关动作，就必须人为地改变基本矢量的作用顺序。以第一区间为例，u1对应的开关状态为100，而u2对应的开关状态为110，由于零矢量u0（000）先动作，为满足开关次数最少原则，接下来首先应当动作的基本电压矢量为u1（100），接着切换为u2（110），然后再切换到零矢量u7（111），半个周期内的动作顺序为u0，u1,u2,u7，而下半个周期矢量的切换顺序与前半个周期正好相反，这样就实现了整个调制周期中每次状态切换只有一个开关动作，且基本电压矢量的动作顺序为逆时针。表为七段式SVPWM基本矢量作用时间选择原则。

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 扇区 | Ⅰ | Ⅱ | Ⅲ | Ⅳ | Ⅴ | Ⅵ |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |

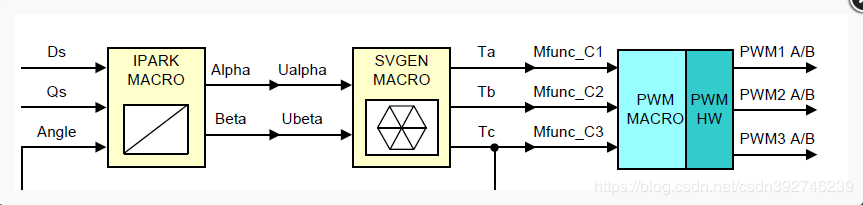
实际应用中当电压矢量给定值太大时会出现,此时要对上述计算出来的电压矢量的作用时间进行调整，具体方法如式所示。

由于每个调制周期内的PWM波被分为7段，零矢量的动作时间为。这里再引入三个时间变量TaTbTc，并做如下定义：

由于使用的基本矢量不同，PWM脉冲的翻转时刻也不同，每个扇区内PWM波形产生模块中比较器的翻转时刻也不同，列表如下：

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 扇区 | Ⅰ | Ⅱ | Ⅲ | Ⅳ | Ⅴ | Ⅵ |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |

### 5.2.2 基于DSP实现SVPWM的算法



## 5.3 数字PID调节器的实现

一个完整的控制系统，按偏差的比例积分微分进行控制的调节器称为PID调节器，PID调节器是连续系统中技术成熟，应用最为广泛的一种调节器。PID调节器结构简单参数易于调整，实际运行经验及理论分析证明，PID调节器在大多数工业控制系统中能取得较大满意的控制效果。本节介绍了PID调节器的基本原理及离散化方法和参数整定过程，并给出了数字PID调节器的相关程序。

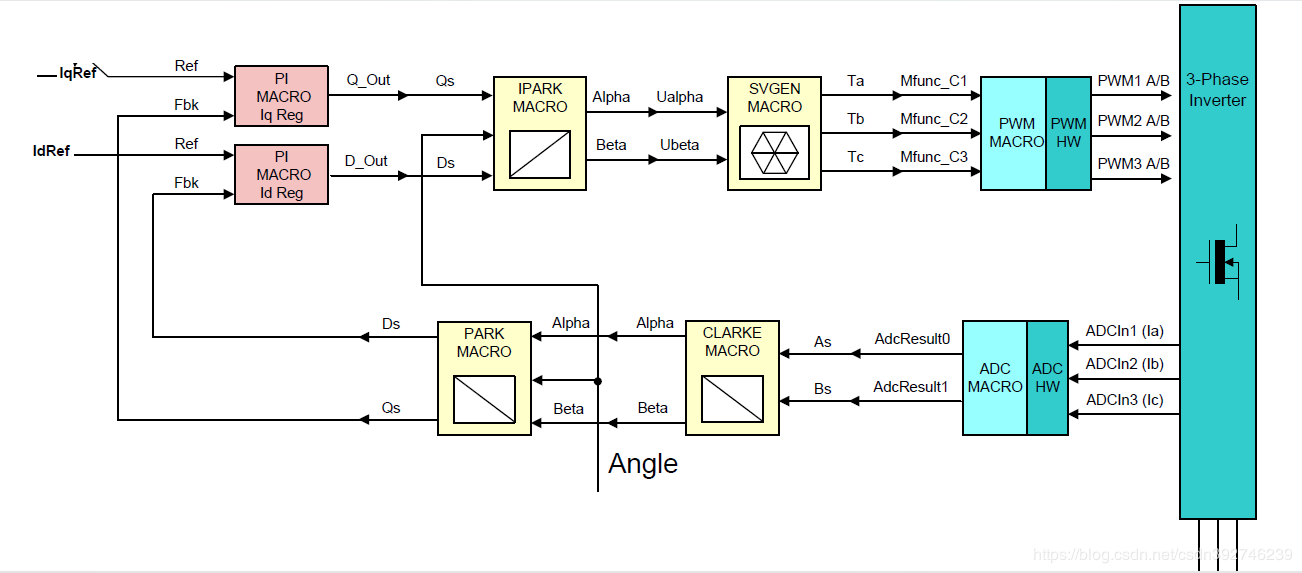
### 5.3.1 转速及转矩数字调节器的设计

运动伺服系统一般都是三闭环数字控制系统，即电流环、速度环、位置环。速度环与电流环调节器中均采用了PI调节器。考虑到实际情况，每个PI调节器的输出均加了限幅。

数字PID控制算法通常分为位置式和增量式两种。其中，位置式控制算法的每次输出均与过去的状态有关，需要对误差进行累加，处理器的工作量运算很大，而且，当计算出现故障时，输出会发生大幅度变化，这在生产实践中是不允许的。而增量式控制算法的输出只是输出量的增量。

**5.3.2.1 电流环**

电流环的输入是速度环PID调节后的那个输出，电流环的输入值和反馈值进行比较后的差值在电流环内做PID调节后输出给电机，电流环的输出就是电机的每相的相电流，电流环的反馈不是编码器的反馈而是再去驱动器内部安装在每相的霍尔元件（将磁场感应变为电流电压信号）反馈给电流环的。电流环就是控制电机转矩的，所以在转矩模式下驱动器的运算最小，动态响应最快。任何模式都必须使用电流环，电流环是控制的根本，在系统进行速度和位置控制的同时系统也在进行电流/转矩的控制以达到对速度和位置的相应控制。



**5.3.2.2 速度环**

速度环的输入就是位置环PID调节后的输出以及位置设定的前馈值，速度环输入值和反馈值进行比较后的差值在速度环做PID调节，主要是比例增益和积分处理后输出到电流环。速度环的反馈来自于编码器反馈后的值经速度运算器得到的。速度环控制包含了速度环和电流环。

**5.3.2.3 位置环**

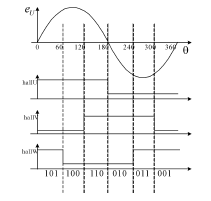
位置环的输入就是外部的脉冲，外部的脉冲作为位置环的设定，位置环输入值和来自编码器的反馈脉冲信号经过偏差计数器的计算后的数值再经过位置环的PID调节（比例增益调节，无积分微分调节）后输出和位置给定的前馈值的和构成速度环的给定。位置环的反馈也来自编码器。位置控制模式下系统进行了三个环的运算，编码器安装于电机尾部。

## 5.4基于霍尔信号的转子初始定位

在永磁同步电动机传动系统中，转子位置检测与初始位置定位是系统运行和矢量控制解耦的前提条件，只有准确知道转子位置，才可实现最大转矩启动。用于永磁同步电动机的转子位置检测的方法主要有脉冲电压注入法高频信号注入法高频电流注入法等，所采用的传感器包括旋转变压器光电编码器电机内置位置传感器法和无位置传感器检测等。针对现行永磁同步电动机初始位置定位方法的缺陷，提出一种基于电压空间矢量原理产生高分辨率的脉冲电压，并自动检测霍尔信号进行永磁同步电动机初始位置定位的智能方法。

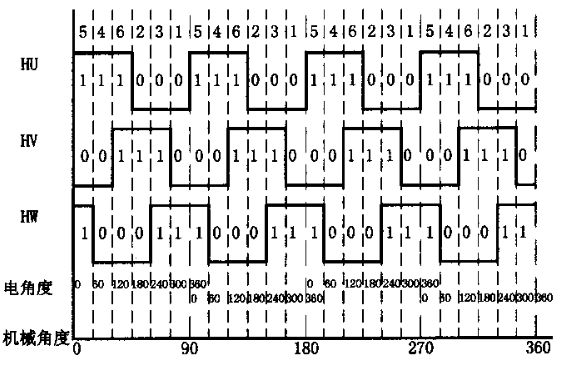
### 5.4.1 复合式光电编码器的工作原理

复合式光电编码器是一种带有初步磁极定位功能的增量式光电编码器，输出增量式光电编码器信号ABZ和三路彼此相差120°占空比为50%且每转脉冲个数与电动机极对数一致的霍尔信号UVW。传统检测磁极位置的方法，是根据UVW脉冲的高低电平关系就可以粗略地估计电动机磁极当前的位置，在每一个360°电角度空间，UVW状态信号101、100、110、010、011、001将空间分成6份，每一信号对应60°电角度。



### 5.4.2 霍尔信号自动检测原理

霍尔信号自动检测的原理是建立在传统脉冲电压法的基础上，运用电压空间矢量对电枢磁场的定向定位处理，即生成固定位置的定子电枢磁场，运用矢量控制的坐标变换机制：同步旋转dq坐标系变换到两相静止αβ坐标系，再由αβ坐标系变换到ABC的三相坐标系。在d轴坐标系下，基于坐标变换和SVPWM原理，通过软件设计生成0~360°的高分辨率电压矢量，由SVPWM主导转子的定位，同时检测UVW信号。在电机未知霍尔区间且空载情况下，将电机置于开环状态，使得为固定值，为0，PARK反变换角度给固定值，此时电机转子磁场方向和定子给定电压矢量方向一致，永磁体转到位置，霍尔信号自动检测架构如图所示。



基于SVPWM生成0~360°电角度及相对应的电压空间矢量，由于永磁体和定子电枢的磁场效应，永磁体会转到与给定电压矢量方向相一致的方向。当转子由一个霍尔扇区跨越到另外一个扇区时，霍尔值发生变化，待电机转子旋转一周后，霍尔值变化六次，记下每次变化时编码器的度数，这六个边界正是三个霍尔元件将空间分为六个扇区的分界线，取每个扇区的角平分线即为所求得的位置角。

利用霍尔元件只是粗略地检测转子的磁极位置，误差为30°，故在两个霍尔扇区分界线处，会出现霍尔检测值跳变 ，因此程序设计中只允许过界时跳变一次，需要判断此刻跳变时的转子位置和上一次霍尔区间对应的位置角差值，并在软件中校正相应位置角，从而在矢量控制运行之前能准确确定转子的初始位置。

## 5.5 基于DSP的实现

TI公司F2833x系列DSP是专门设计的电机控制类处理器，配有浮点处理单元，具有计算能力强外设功能强大等优点，本节将用其完成三相交流永磁同步电动机矢量控制系统的计算，对涉及的ADC采样模块ePWM等模块给出了具体的程序。本节所设计的程序是基于以下几个条件的：

1. 主电路使用两电平电压源型逆变器，共需6路控制脉冲。
2. 三相永磁同步电动机使用Y型接法，且不带中线。
3. 使用TMS320F2833xDSP作为主控制器。
4. 功率器件的开关频率为5kHz，即中断周期为200μs。

### 5.2.1 程序整体结构设计

一个完整的控制程序主要包括主程序与中断服务程序两个部分。通常在交流电机矢量控制系统中，主程序主要用来完成DSP外设的初始化以及调节器的初始化，而中断服务程序用来完成整个矢量控制系统的计算。中断可以由DSP内部定时器产生，也可使用ePWM周期中断。由于TMS320F2833xDSP的ePWM模块具有周期中断功能，为配合矢量控制系统中的pwm脉冲的产生以及其他模块的计算，通常选择在ePWM周期中段里完成整个矢量控制系统的计算，主要包括转矩环处理程序、定时采样中断程序、SVPWM处理程序，如图所示。

转矩环定时中断程序

主程序入口

清除定时中断标志

封锁PWM输出

主电路正常

计算转矩观测值

是否定位控制？

计算反馈脉冲数

与上位机通讯建立

位置调节器计算

屏蔽DSP中断

得到速度参考值

是否到速度

采样周期？

转子磁极位置初始化

计算速度反馈值

参数初始化

速度调节器计算

DSP寄存器初始化

得到转矩参考值

变量初始化

计算转矩观测值与参考值的误差

开DSP中断

### 5.2.2 ADC模块配置

为了便于理解下面给出的采样计算子程序，这里给出电压电流采样电路。直流母线电压与定子电流经过霍尔传感器，并配合适当的采样电阻，可转换成电压小信号，图给出了电压电流传感器的接线图。



由于电机定子电流为交流电性质，故以GND为参考点的Voi也将在正负范围内变化，此时可通过一个偏置电路，将Voi限定到0~3V，然后再连接到DSP的A/D输入引脚上。

由于直流母线电压为直流电压，故Vov也为直流电压信号，可直接将其连接到DSP的ADC采样引脚上。

由图可知，每次进入中断服务程序时，首先需要对电机定子三相电流及直流母线电压进行采样，为后续矢量控制算法提供本次计算的参考值，故可使用ePWM模块启动采样过程，通过对相关寄存器进行配置即可使用ePWM模块周期性地启动ADC转换序列。

以下给出了ADC模块的相关配置及采样子程序，其中定子电流IaIb分别通过ADCINA0与ADCINA1引脚采样，直流母线电压Vdc通过ADCINB7引脚采样。

程序清单：ADC模块相关子程序

### 5.2.3 eQEP模块配置

eQEP包含的功能单元有：可编程量化输入引脚、正交编码单元、位置检测的位置计数和控制单元、低速测量的正交边沿捕捉单元、速度/频率测量的时间基准单元和看门狗单元等组成。它的输入信号包括两个正交编码脉冲(AB)一个位置索引脉冲（Z）和一个选择输入信号（S）。其中当eQEP单元工作在正交计数模式时，通过检测QEPA和QEPB信号的边沿为位置计数器提供计数时钟QCLK，因此eQEP逻辑产生的时钟频率是输入时钟频率的4倍。例如2500线的编码器旋转一周时，可产生10000个计数脉冲。同时正交编码单元还会判断两路输入信号的先后顺序，并根据相应的状态机给出计数方向QDIR，以决定位置计数控制单元进行增计数还是减计数。这样，与编码器相连的电机转子转动至圆任意位置时都将有一个特定的位置计数值与之对应，通过简单的比例关系即可得到电机位置状态。仍以2500线编码器为例，其定位精度可达360/10000即0.036个机械角度，使eQEP模式工作在位置事件复位位置计数模式下，若正向运动收到QEPI信号时，位置计数器复位为0；当反向运动时收到QEPI信号时，位置计数器复位为QPOSMAX寄存器内的值。设编码器分辨率线数为N，将QPOSMAX设为4N-1，则转子做360°转动时，QEPCNT中的计数值从0至4N-1线性变化，即从位置计数寄存器中可直接得到与转子位置成比例关系的位置计数值QPSCNT。

本例中所使用的增量编码器经DSP的编码信号处理电路对输入信号4倍频，可以使每转可产生10000个脉冲，提高了分辨率。输入的4倍频编码脉冲存入到位置计数器QPOSCNT中，根据转向进行增或减计数，在每个PWM周期都得增量式编码器采样一次，通过读QPOSCNT获取采样脉冲数，两次PWM周期的采样脉冲数之差就是本次PWM周期的脉冲增量，即转子机械角增量，通过对这些脉冲增量的累计就可以得到转子的绝对机械位置。

将转子的机械转角乘以磁极对数，就可以得到转子的电角度。

速度的采样是通过对速度采样周期（本程序10个PWM周期）期间的脉冲增量乘以Kspeed的计算得到的。本例中PWM周期100us，因此10个PWM周期所需时间为1ms。当速度基值为时，增量式编码器每秒发出的脉冲数为个脉冲，在这种情况下，一个速度采样周期（10个PWM周期）期间发出的脉冲数为个脉冲，因此一个速度采样周期的速度基值的脉冲形式为500。

令Kspeed=1/500，它的Q20格式为Kspeed==82FH。

在计算采样速度时，将一个速度采样周期（10个PWM周期）期间的脉冲增量RawThetaTmp乘以Kspeed就可以得到Q20格式的速度PU值，将其右移8位，转化成Q12格式的速度PU值n，而实际速度等于3000n/。

该模块的初始化及转速计算程序

### 5.2.4 ePWM模块配置

ePWM模块的主要功能如下：

1. 产生逆变器所需的6路控制脉冲。
2. 产生周期中断，在其中断服务程序里完成整个矢量控制系统的计算。
3. 启动ADC模块的转换序列。

ePWM模块相关子程序

### 5.2.5 PMSM转子磁极定向矢量控制系统源程序

程序针对的三相永磁同步电动机为表贴式结构，其参数如下：

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 额定功率/W | 额定转速/r/min | 极对数 | 定子相电阻Rs/Ω | 横轴同步电感/mH |
| 750 | 3000 | 4 | 0.901 | 6.552 |

为了既能满足高精度又能满足宽范围的要求，在定点运算中通常采用PU（per unit）模式，即使用一个数的PU值来代替其实际值。一个数的PU值等于它的实际值与其额定值或基值之比。例如电流的PU值。这样，当I在-~+范围内变化时，只是在-1~+1范围内变化，因此可以用最高精度的Q15格式表示，达到高精度表示I的目的。

对于电流和电压，更经常用到基值而不用额定值，在本例中的基值为：

由于电流和电压的实际值在过渡过程中有可能超出基值，因此它们的PU值选择用Q12格式。

以下将给出永磁同步电动机转子磁极定向矢量控制系统的主程序及中断服务程序，程序中.h文件所对应的.c文件必须添加到工程中来。在调试过程中，需要遵循如下步骤：

1. 全局变量Enable\_flag默认为0，在变量观察窗口将其置1可使程序继续向下执行；
2. Enable\_flag置1后，程序将会进入ePWM1周期中断，由于LockRotor\_flag默认为1，所以进入中断后，首先执行转子定位程序；
3. 转子定位结束后，通过将LockRotor\_flag清零，可启动矢量控制程序；
4. 通过CCS中的Graph观察Dlog的第三第四通道，可观察转速给定与转速反馈曲线；
5. 在调试过程中，通过将Enable\_flag清零，可立即封锁脉冲，并将各个调节器设置为默认值。

## 5.4 下肢康复训练器实验研究

基于上文中提出的下肢康复训练器平台和训练模式实现流程，本文针对康复机进行了一些验证性实验研究，其主要目的是检验该下肢康复训练器能否正确合理地实现预期的训练模式，以及将其应用于临床康复的可行性安全性有效性可靠性及舒适性，同时对系统运行的平稳性控制系统的可靠性是否满足设计要求等问题进行验证和评价，为下一步真正应用于临床的个性化康复训练奠定基础。

### 5.3.1 被动训练实验研究

被动训练的目的主要是使患者通过训练增强患肢的本体感觉、放松痉挛肌肉、恢复或者维持关节活动范围。本文所做的被动训练实验主要通过采集的扭矩传感器信号和编码器的位置信号来分析在不同踏车位置时扭矩的变化情况，另外对患者在训练过程中发生痉挛时下肢康复训练器能否及时停止训练，保护患者安全进行了验证。

扭矩传感器的安装位置在电机减速器，由于减速比，当转柄转动一个周期时，扭矩传感器转轴相应的转动两个周期。当康复训练器处于被动训练模式时，在不考虑其他外界因素的影响下，扭矩传感器的信号输出只与外加负载有关，当放置一个恒定的质量块在踏板上随转柄一起转动时，质量块的力臂与转柄长度之间为三角函数关系，相应的传感器输出信号与转柄角度之间的输出曲线也应为三角函数曲线。图示为转柄从初始位置开始，志愿者在下肢康复训练器两种不同转速（匀速）情况下进行踏车训练时采集的扭矩传感器信号和编码器采集的位置信号的关系曲线（截取一个转动周期）。图中直观的显示了转柄在不同角度时扭矩的变化情况：

### 5.3.1 主动训练实验研究

主动训练主要是指患者凭借自身肌张力主动克服下肢康复训练器所是假的刚性阻力完成训练动作，主要用于增强肌肉力量。目前主动训练只能实现给电机施加恒定电流，即只能给患者施加恒定阻力，因此本文所做的主动训练实验为对驱动电机施加不同大小的电流采集扭矩传感器信号，分析患者在踏车过程中扭矩的变化情况。

图示为电流值分别为 时采集的扭矩传感器信号。从图中可以看到，随着电流的增大，扭矩值也随之增大，从三条曲线的波动程度来看，实验者在踏车过程中施加的驱动力矩与转柄转矩基本保持一致，说明实验者能克服电机所施加的转矩，实现主动踏车训练。