

分 类 号_____

学号 M201270760

学校代码 10487

密 级 _____

华中科技大学

硕士学位论文

基于 Matlab 的伺服压力机建模
与控制参数求解研究

学位申请人： 俞伟洋

学 科 专 业： 材料加工工程

指导教师： 叶春生 副教授

答辩日期： 2015 年 5 月 14 号

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering**

**Research on Servo Press Modeling and Solving Control
Parameters Based on Matlab**

Candidate : Yu Weiyang

Major : Material Processing Engineering

Supervisor : Asso.Prof.Ye Chunsheng

Huazhong University of Science and Technology

Wuhan 430074, Hubei, P.R.China

May,2015

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。文中除已经标明引用的内容外，不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐ ，在____年解密后适用本授权书。

本论文属于

不保密 ☒ 。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

指导教师签名：

日期： 年 月 日

摘要

伺服压力机在具有传统机械式压力机的高刚度、高精度、高生产效率等优点的同时，更具有了柔性化、智能化、广泛适应性和节能效率高等特性，是锻压装备发展的一个重要趋势。当前，伺服压力机在实际应用中面临的主要问题之一是如何在给定的工艺条件下得到精确的电机运行参数，以使伺服压力机高效精确地加工出所需零件。基于此问题，本文以伺服压力机的深拉伸工艺为对象，建立了机构和电机的数学模型，采用 Matlab 对其求解，以获得电机的精确运行参数。本文的研究结果为伺服压力机的电机精确控制提供了参考依据，具有重要的实际应用价值。

(1) 对比研究了几种典型传动结构的机械压力机在滑块运动位移、运动速度和增力比三个方面的特点，确定四连杆式结构在各运动特征上均有良好的特性，具有较好的代表性，并根据矢量闭环原理建立四连杆式传动机构的数学模型。

(2) 以永磁同步电机作为压力机动力源，根据永磁同步电机的工作特性，建立了其理想运行状态下在 $d-q$ 旋转坐标系的数学模型，根据小功率同步电机调速需求，确定电机的控制方法为 $i_d=0$ 控制。

(3) 以深拉伸工艺为研究对象，分析了其在一个加工周期内的不同阶段对滑块运动特征的需求，藉此设计滑块运动位置的关键点，在 Matlab 上运用三次样条插值对其进行拟合，得到了满足深拉伸工艺的加工需求和周期加工的边界条件需求的拟合运动曲线。

(4) 根据已经建立好的机械模型和电机模型，在 Matlab 上进行编程，以拟合好的深拉伸工艺滑块运动曲线和负载转矩为输入参数，同时选取 $i_d=0$ 控制方法作为控制条件，计算出永磁同步电机的各项控制参数，包括响应的转速，电枢电流和电枢电压。

关键词：伺服压力机；四连杆；永磁同步电机；曲线拟合；数学模型

Abstract

Servo press has become an important direction of the development of the press. Servo press use AC servo motor as the power source. It has the advantages of traditional mechanical press, such as high stiffness, high precision, high production efficiency, at the same time, it has some characteristics which traditional mechanical press doesn't possess, like flexible, intelligent, wide adaptability and energy conservation.

One of the main problems in the practical application of the servo press is how to get the precise operating parameters of the motor under a given set of process conditions. Based on this issue, this paper take the servo press as object of study, establish mathematic model of mechanism and motor, using Matlab to solve it, and obtain accurate running parameters of servo motor under condition of deep drawing. Results of this study provide a reference to precisely control the servo motor presses, has important practical value.

Firstly, study and compare the slider displacement, velocity and torque of several typical structures of mechanical presses. From the comparative, four-bar structure shows good characteristics in each field. Mathematic model of four-bar structure is established.

Secondly, the character of PMSM is deeply analyzed, and its ideal mathematical model on d-q rotating coordinate system is constructed. Because of using low-power synchronous motor as power of press, select $i_d=0$ as motor's control methods.

Thirdly, depth study characteristics of slider motion in deep drawing process, then design a number of key point of slider motion position. Cubic spline interpolation is used to fit the slider displacement curve on Matlab, and the fitted curve should meet what deep drawing processing technology needs, what's more, meet the needs of the boundary conditions of periodic motion stamping.

At last, the paper use Matlab to solve the established mathematic model under the conditions given the path curve and the load torque curve, and use $i_d=0$ as added control condition. By calculate, the study get the servo motor speed curve and response parameters, including the armature current and armature voltage on d-q coordinate system.

Key words: Servo press, four-bar, PMSM, curve fitting, mathematic model

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
1 绪论	
1.1 选题背景及意义.....	1
1.2 伺服压力机装备国内外研究现状.....	2
1.3 伺服压力机控制的国内外研究现状.....	7
1.4 本文研究内容	8
2 伺服压力机机械模型研究	
2.1 伺服压力机传动机构对比研究	10
2.2 四连杆式压力机机械模型的构建.....	14
2.3 本章小结.....	15
3 伺服压力机电机模型研究	
3.1 永磁同步电机概述.....	16
3.2 永磁同步电机数学模型的构建	17
3.3 永磁同步电机控制方法比较研究.....	23
3.3 本章小结.....	25
4 伺服压力机冲压工艺轨迹研究	
4.1 冲压工艺轨迹设计.....	27
4.2 基于 Matlab 的冲压工艺曲线拟合	29
4.3 本章小结.....	38
5 伺服压力机模型求解研究	

5.1 伺服压力机数学模型整合.....	39
5.2 机械模型求解	39
5.3 电机模型求解	42
5.4 本章小结.....	45
6 总结与展望	
6.1 全文总结.....	46
6.2 研究展望.....	47
致谢.....	48
参考文献	49
附录 1 攻读硕士期间发表的论文	53

1 绪论

1.1 选题背景及意义

机械压力机在制造业中充当着主要的生产工具，因此压力机的发展水平一定程度上也代表了国家的制造水平。压力机的工作效率、制造精度、冲压吨位与行程对制造业的水平都有着极大的影响，因此对于压力机的研究一直以来都是一个很重要的课题^[1]。

随着现代工业的不断发展，航空航天、汽车、电子等行业都对产品的材料多样性、加工精度和特殊性能等方面提出了更高的要求^[3]，传统压力机受限于普通异步电机的缺陷难以在控制上达到更高的水平，不能对产品的加工做成更好的改进。而伴随着大容量的伺服电机发展的日新月异，与之相配套的计算机控制技术也发展迅速，以伺服电机为动力源的伺服压力机则凭借着其相较于传统压力机更优越的加工性能逐渐崭露头角，逐渐在一些生产线上取代了传统压力机的位置。

伺服压力机主要由交流伺服电机、主传动机构、执行机构和辅助机构组成，由交流伺服电机供给驱动，采用计算机控制实时控制滑块的运动规律，从而达到滑块运动规律和输出压力实时可调的控制目标。因此，伺服压力机在具有传统压力机精度高、刚度大以及生产效率高特征的同时，还具备了以下传统压力机所不具有的特征^[2-3]：

（1）柔性化与智能化

伺服压力机采用计算机控制，以交流伺服电机为动力，从而赋予压力机更多的智能性，能够依据不同的材料和工艺性能要求制定不同的滑块运动模式，实现更为复杂的滑块工艺轨迹运动，使压力机的普遍适用程度大大提高，能够满足不同原材料和不同加工方式的加工需求，并可以有效的提高成品的工作性能。

（2）制造精度更高

伺服压力机在滑块上安装有位置检测装置，通过位置检测装置可以实时的监测滑块的运行位置，由伺服电机灵活的控制模式进行调整，从而使滑块精确的运动到

既定加工点。

（3）节能环保

伺服压力机使用交流伺服电机来驱动，可以允许频繁的进行启停操作，因此机构中不需要离合器和制动器，也不需要安装飞轮，而这些机构都是传统压力机中的耗能部件，省略后在很大程度上简化机械传动结构的同时，可以极大的减少系统的能量损耗，同时也减免了离合器和制动器中磨损材料的更换维护费用，使整体的运行成本降低。

1.2 伺服压力机装备国内外研究现状

伺服电机由于其自由编程、由计算机进行控制的特性受到各种装备开发者的关注，然而以前伺服电机只能在功率要求相对较小的数控机床上进行使用，而在压力机上一直得不到应用。随着伺服电机在技术上和应用上不断得到突破，其容量上逐渐得到增长，压力机研究人员开始将目光放到了交流伺服电机上，并开始将其应用于新型压力机的研发中。目前在计算机技术与伺服控制技术相对发展比较早的日本、美国等国家，在伺服压力机的研发方面已经取得了丰硕的成果，并在实际生产中进行了广泛的应用，其中日本研发的比较靠前，取得丰硕成果的同时较好的将其应用于生产，大范围的推广了伺服压力机的商品化。伺服压力机在日本的压力机生产中更是占有着 80%左右的份额^[4]。

伺服压力机按传动方式不同有伺服机械压力机和伺服液压压力机，前者用伺服电机驱动传动机构，后者用伺服电机来驱动主油泵。常规上所说伺服压力机多指机械式压力机，按照传动机械结构的不同可以分为连杆式、直推式等，连杆式又可以有不同的连杆机构，组成具有不同传动特性的传动机构，如三角肘杆式、双肘杆式、四连杆式等。各种结构的伺服压力机由于其运动特性、简易程度、维护费用等特点应用场合各异。

日本会田主要有 NS1-D、NS2-D 和 NC1-D 等系列的伺服压力机，公称压力有 1500KN、3000KN 等。会田在研发压力机的同时研究开发了较大容量的伺服电机，并将其安装在其产品上，为伺服压力机开发了有效地驱动技术，使其生产的系列压

力机产品有着优良的运行性能，具有转矩高、震动小和噪声低的特点。图 1-1 为 1500KN 的 NS1-D 系列伺服压力机。



图 1-1 会田 NS1-D 系列 1500KN 伺服压力机

日本小松主要的产品有 H1F 和 H2F 等品种，其结构上采用伺服电机驱动，经由主传动机构传递到执行机构，其执行机构为六连杆式结构。其最新的产品为 H2W（110-400t）系列，采用了一体化的结构机身，独立驱动和控制左右连杆的运动，同时通过安装在滑块两端的独立线性光栅尺，实现对滑块运动位移的高精度控制，大幅度提高的产品的加工精度和成形性能。图 1-2 与图 1-3 分别为 H1F 系列和 H2F 系列伺服压力机，图 1-4 为 H2W 前后对称高刚性闭式压力机。

日本网野将研究的重点放在了大型的伺服压力机上，结构上多采用对称的多连杆的肘杆式结构，伺服电机与连杆之间通过自己研制的螺杆相连接，对称的连杆的下端。网野率先研发制造了 25000KN 的机械式伺服压力机，其结构上与其一直运用的结构相同，采用对称式的肘杆机构。在拥有大的公称压力的同时，其精度上也能达到较高的水平，现用与汽车零部件的冲压加工生产线上，运行状况良好，能够比较好的完成生产任务。其正面结构图如图 1-5 所示。



图 1-2 小松 H1F 系列伺服压力机



图 1-3 小松 H2F 系列伺服压力机



图 1-4 小松 H2W 对称高刚性闭式压力机



图 1-5 网野 25000KN 伺服压力机

日本的天田公司和山田公司也都有自己的研发生产的伺服压力机，前者有着数字电动两点伺服冲压 SDEW 系列、数字电动伺服冲压 SDE 系列和混合油压伺服压力机 SDH 等系列，可以达到 3000KN 的公称压力，冲压精度高，后者则有着 SVO 系列伺服压力机产品。

欧洲的伺服压力机生产企业有德国的舒勒（SCHULER）公司，其生产的 PSK 与 PSK PLUS 系列伺服压力机用于高精度的零件冲压与落料成型工艺，将刚性压力机设计理念与优化后的滑块运动特征相结合，使用高转矩电动机，可对不同的运动曲线进行轻松便捷的编程，使拉伸、弯曲、压花、开卷和校准操作在同一个冲压循环中完成，冲压零部件具有高直切比例以及良好的切边垂直度，零部件平整度更高、

切口定位精确、毛刺更少，最大程度减少了后处理、免除耗资较高的工艺步骤并降低了处理成本。另外舒勒公司还有肘杆式伺服压力机的系列产品，通过对肘杆运动机构进行运动学和动力学的参数分析，对伺服电机进行编程控制，从而使压力机以更高的灵活性来适应各种不同工艺和不同材料的要求。舒勒的伺服肘杆式压力机有较多的品种系列，公称压力范围大，公称压力范围为 2500KN~10000KN，工作台宽度范围 2000mm~3500mm。图 1-6 为舒勒 PSK 2-630 伺服压力机，图 1-7 为舒勒伺服肘杆式压力机。



图 1-6 舒勒 PSK 2-630 伺服压力机



图 1-7 舒勒伺服肘杆式压力机

我国由于工业发展的相对落后，伺服压力机的研究方面有所不足，但随着制造企业对于伺服压力机的需求的日益增长，国内对于伺服压力机的研究也呈现蓬勃发展之势，国家也对伺服压力机的研发给予了高度的重视，立有相关的国家基金项目^[5]。

广州锻压机床厂在国内对伺服压力机的研发工作开始的比较领先，开发制造了伺服压力机的多种规格的产品，包括 GP2S、GDKS 两个系列，加工精度高，运行稳定，GDKS 系列的公称压力最大值为 6300KN。

济南二机床厂是目前国内最大的重型数控锻压设备和大型数控金切机床生产制造基地，在伺服压力机的研究与开发上也很早就有所展开。通过对伺服压力机传动技术、伺服驱动技术、控制设计等方面难关的攻克，济南二机床厂研发制造了国内第一台公称压力达到 25000KN，与网野所制压力机公称压力相等的大型伺服压力机，并于 2014 年通过了运行性能等方面的鉴定与验收。实际生产中，该压力机完成了对多种汽车覆盖件的生产加工，体现出了优异的加工性能，并能够为不同的生产要求

通过对伺服电机的驱动控制实现良好的适应性。通过对伺服电机的编程驱动，实现了压力机运行过程中的运行速度和冲压压力的无级调节。图 1-8 为 2014 年 6 月济南二机床厂 25000KN 大型伺服压力机验收现场。



图 1-8 济南二机床 25000KN 大型伺服压力机

合肥合锻生产研制了 SHPH 系列的伺服液压压力机，以 SHPH27-200 为代表，公称压力在 2000KN，采用伺服电机作为液压系统主油泵的驱动力，在实现滑块平稳运动的同时，相较于普通的液压机减少了百分之二十到六十左右的能量消耗和百分之五十的液压油需求，此外，噪音上也成功的下降了 20 分贝以上。由于伺服电机的应用，液压系统的结构也得到了大幅度的简化，使压力机的运行维护成本得到了降低，也节省了由于复杂的保养所带来的时间损耗。图 1-9 为合锻 SHPH 系列伺服液压机。

此外，淄博桑德机械设备有限公司与国内多家科研院所进行合作，研究开发了 SD10 系列、SD20 系列和 SD20A 系列耐火材料专用电动程控螺旋压力机^[1]。

台湾地区对压力机的研发也在有序的进行中，主要以金丰、协易两家压力机公司为领头，其中协易占有压力机市场上百分值三十的交易额，是在亚洲为生产制造

与销售量第一的压力机企业。

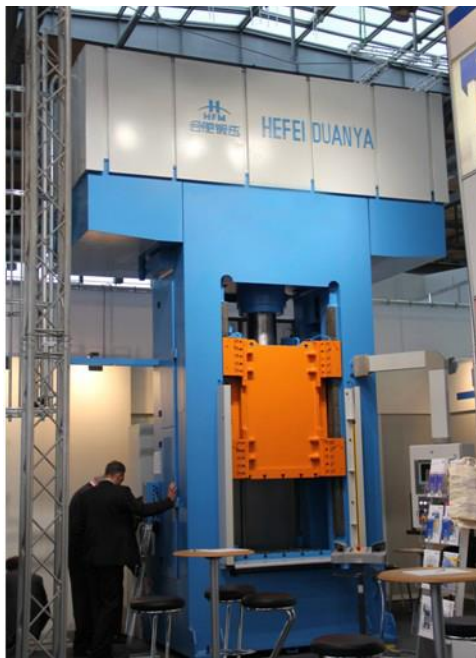


图 1-9 合锻 SHPH 系列伺服液压机

1.3 伺服压力机控制的国内外研究现状

国内外关于伺服压力机的控制研究一直是一个重要的课题，主要集中于压力机的机械传动结构部分和交流伺服电机控制两个方面。

邱瑛、乃瞬峰等^[6-7]对构成压力机的各机构的长度等参数进行研究，通过运动学分析和动力学分析得到机构的各项参数对伺服压力机的工作性能的影响，从而据此对压力机各机构进行优化，以达到更优的性能。

Thnik.E、Olyaei 等^[8-10]对压力机机械结构中的铰链的接触情况进行研究，分析铰链的不同接触状态对能量损耗、传力特性等方面的影响，为压力机加工装配提供指导。

苏敏、阮卫平等^[11-12]对各个伺服压力机传动结构方案进行了分析比较，通过仿真运行得出在相同的条件下各传动结构的滑块行程、速度和增力比等数据，分析了不同传动结构所适应的不同加工工艺。

朱新武、Osakada K 等^[13-16]分析了伺服压力机的运动过程，建立了压力机运动数

学模型来描述伺服压力机的运行状态，在 Adams 等平台上进行模拟仿真，分析压力机在一定输入条件下的输出转矩等参数。

Bosga 等^[17-19]设计伺服压力机的控制系统，基于不同的控制模式进行软硬件的设计，达到伺服压力机符合一定工艺要求的目的。

周洋、陈磊等^[20-24]通过在 Simulink 上建立伺服压力机的仿真模型，模拟了伺服压力机的工作状态，并通过仿真模型模拟计算了伺服电机输入参数与压力机输出参数的对应关系，为伺服压力机的模型建立和控制应用提供了参考。

苏健勇等^[25-26]分析研究了永磁同步电机的控制策略，通过采用磁链观测器来实现 PMSM 的无传感器控制，改进了传统的滑模观测器，比较深入的研究了观测器的建立和如何对其进行改进以消除或缓解实际应用过程中的抖振问题，并给出了各自具体的实现方法。

1.4 本文研究内容

伺服压力机是一个伺服电机与机械式压力机紧密结合的机电系统，而此前的精确的数学模型计算一直单独集中于运动机构的求解运算，或 PMSM 的控制策略研究，未能将二者联立起来，建立机电系统整体的数学模型并进行二者的求解运算。由此，本文以深拉伸工艺的伺服压力机为研究对象，建立伺服压力机的机械模型和交流永磁同步电机（PMSM）的电机模型，二者联立，借助 Matlab 计算出电机的运行参数。本文具体内容如下：

（1）在 Adams 上进行建模，对比研究几种典型结构的机械压力机的工作特性，包括滑块的运动位移、运动速度和机构的增力比。由于四连杆机构在三个压力机工作特征上均有着良好的表现，在各种机构中有一定的代表性，因此选择其作为研究对象，根据矢量闭环原理建立四连杆机构的机械运动模型。

（2）深入分析永磁同步电机的工作原理，在不影响其控制性能的前提下使其运转在理想状态，建立其两相旋转坐标系上的数学模型。比较研究永磁同步电机的控制方法，根据本文伺服压力机的小容量、高调速的特点选择 $i_d=0$ 控制方法作为电机的控制方案。

(3) 研究深拉伸工艺对压力机滑块在一个加工周期中不同运行阶段的运动特征需求，设计出滑块冲压过程中比较重要的位置点。比较研究了几种曲线拟合方案的使用特点和适用范围，由此选择符合冲压运动曲线需求的三次样条插值拟合，在 **Matlab** 上进行数学编程实现，得到符合深拉伸工艺需求和周期运动条件的运动曲线。

(4) 对伺服压力机数学模型进行求解。将已经建立的机械模型和电机模型联立，输入滑块运动曲线和负载转矩等参数，在 **Matlab** 上精确解出永磁同步电机的运行参数，包括响应转速和其在 $d-q$ 坐标系上的电枢电流、电枢电压。

全文内容具体安排如下：

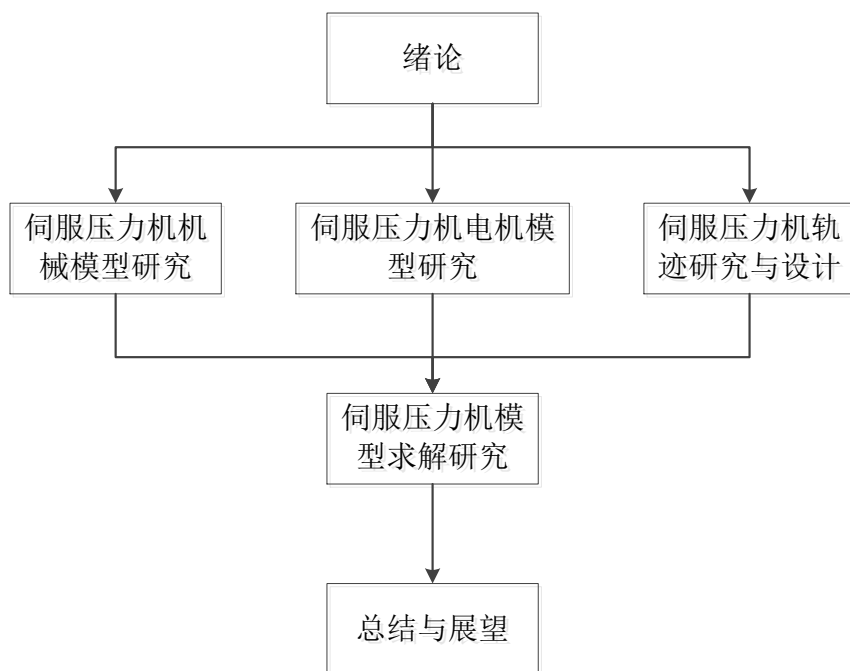


图 1-10 全文结构框图

2 伺服压力机机械模型研究

2.1 伺服压力机传动机构对比研究

伺服压力机按功能可分为交流伺服电机、主传动机构、执行机构和辅助机构^[3]。交流伺服电机为伺服压力机的动力源，也是伺服压力机与使用交流异步电机作为驱动的压力机的主要区别之处。交流伺服电机直接与主传动机构相连，主传动机构主要有齿轮传动、螺杆传动、带传动和液压传动等方式，其中螺杆传动应用较为广泛，在执行机构中不含运动转化机构时可用来直接驱动滑块。执行机构上端与主传动机构想接，末端与滑块直接相连，将主传动机构的运动转化为滑块按一定工艺轨迹所做的加工运动。其常用的转化机构有曲柄连杆、曲柄肘杆等结构类型。辅助机构的用途主要是扩大伺服压力机的工艺适应范围，保证其运行过程中的工艺性能、安全性和稳定性。

伺服压力机虽然传动形式各异，结构样式上也各有不同，然而在功能的实现上都是大同小异，都是将交流伺服电机输出的旋转运动与转矩转化为冲压滑块的上下往复运动，区别在于不同的传动结构可以导致不同的压力机输出特性，包括滑块运动位置与曲柄转角对应关系，增力比等。图 2.1 列举了几种型式的伺服压力机传动机构。

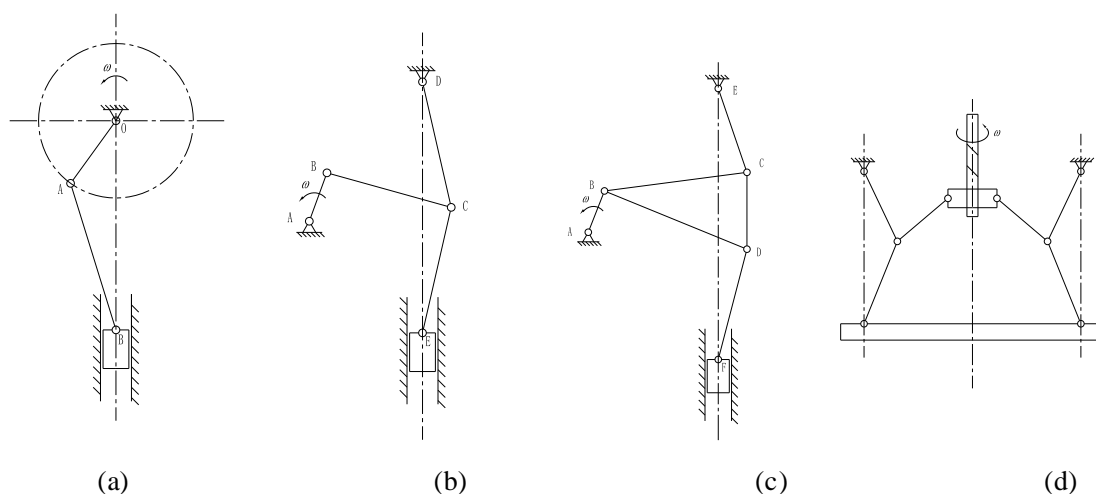


图 2-1. 四种传动型式伺服压力机

图 2.1a 为曲柄连杆式伺服压力机，其结构与传统机械是压力机类似，特点是传动机构简单，易于开发，但这个特点也导致其缺乏良好的增力特性以及运动特性；图 2.1b 为四连杆式伺服压力机，通过曲柄的旋转带动滑块的上下运行，结构相对也比较简单；图 2.1c 为三角肘杆式伺服压力机，与四连杆式伺服压力机的区别在于与曲柄连接的连杆变为一个三角形的肘杆，从而导致运动上的特性改变；图 2.1d 为丝杆直驱对称肘杆式伺服压力机，其结构为对称结构，解决了结构上的偏心导致的机架受力不均的问题。

为便于比较各传动结构运动特性和增力比，四种机构设置统一的工作参数，设定为周期 12s，行程 40mm，最大公称压力为 20KN，设置预加压力为 20KN 的弹簧力作为工作压力，至上死点时弹力为 0。在 ADAMS 上对四种结构型式的压力机进行模拟仿真，为方便建模，各压力机均从下死点开始进行一个冲压周期的运动。输入运行参数，经过仿真后得到如图（2-2）~（2-4）的滑块行程比较曲线、速度比较曲线以及扭矩比较曲线。

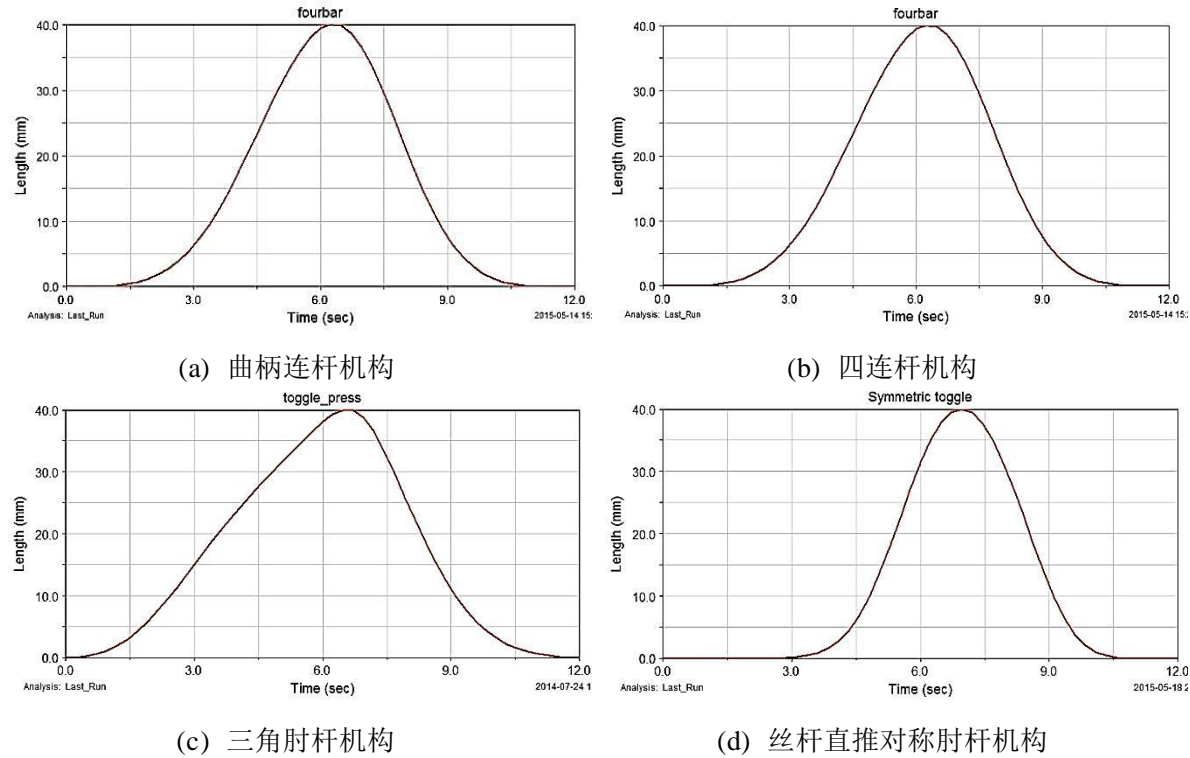


图 2-2 各运动机构滑块行程比较图

图 2-2 中，纵坐标为滑块的当前位移，横坐标为当前时间，从图中可以看出：①

三角肘杆机构在下死点附近具有良好的低速特性，四连杆机构和丝杆直推对称肘杆机构次之，曲柄连杆机构较差；②比较滑块下行所用时间与上行所用时间，可以看出三角肘杆机构具有一定的急回特性，四连杆机构稍次之，曲柄连杆机构和丝杆直推对称肘杆机构则不具备急回特性。

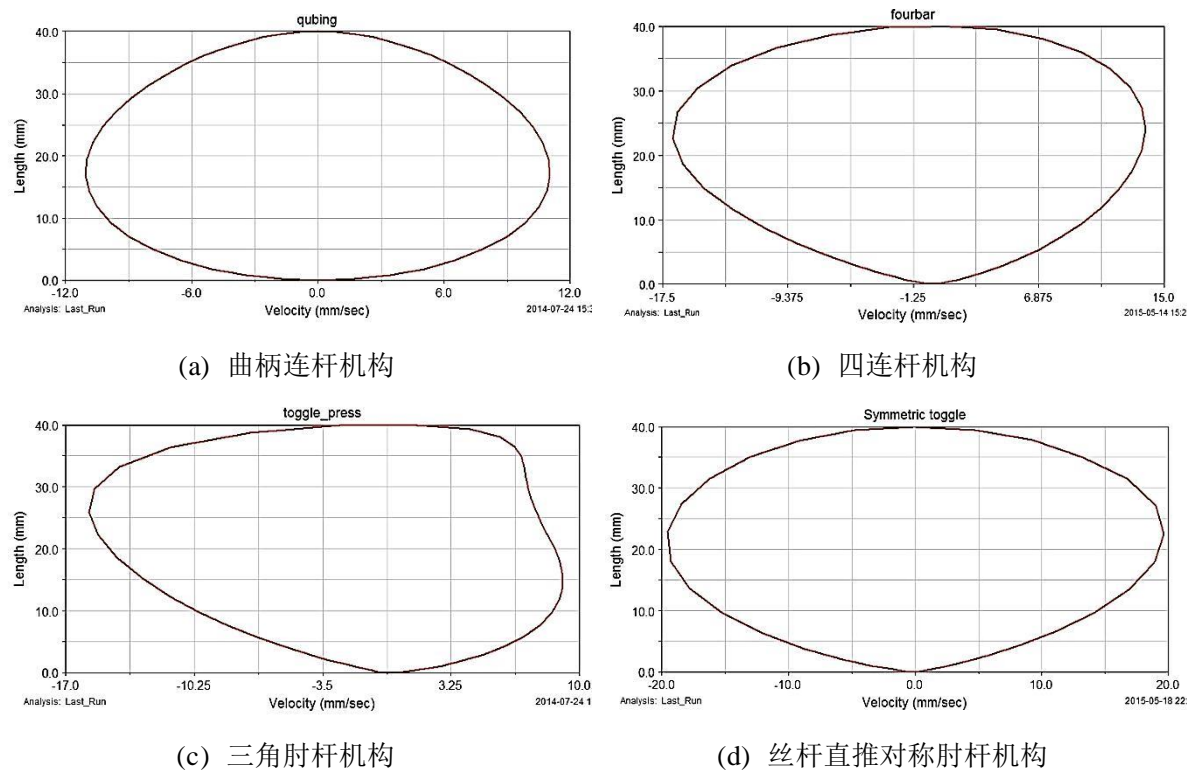


图 2-3 各运动机构速度比较图

图 2-3 中，纵坐标为滑块行程，横坐标为各行程点滑块的速度。①提取下行时行程为 5mm 时的速度值，四种机构分别为 7.86mm/s、6.53mm/s、6.27mm/s、8.8mm/s，丝杆直推对称肘杆机构在行程为 5mm 时最快，但通过其滑块行程图分析 5mm 时丝杆直推对称肘杆机构在设计尺寸下还未进入缓速压下过程，所以综合来看，曲柄连杆机构在接近加工范围时速度最快，而三角肘杆机构具有最低的速度。②空行程最大运行速度丝杆直推对称肘杆机构最大，三角肘杆式与四连杆式次之，曲柄连杆式速度最低。

图 2-4 中，纵坐标为滑块的行程，横坐标为各行程点所需要的输入扭矩，由于选择的工作压力为衰减的弹簧力，所以与实际工作时有所出入，但接近下死点时得冲

压工作范围内其扭矩图像比较接近实际情况,选取 5mm 处的输入扭矩作为比较对象,四种机构的输入扭矩分别为 $2.01 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 、 $2.35 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 、 $1.05 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 、 $1.31 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}$ (丝杆直推对称肘杆机构图中为单边所需力,经过换算为螺杆扭矩结果如上),经过比较可知三角肘杆机构所需输入扭矩最小,对称肘杆机构次之,

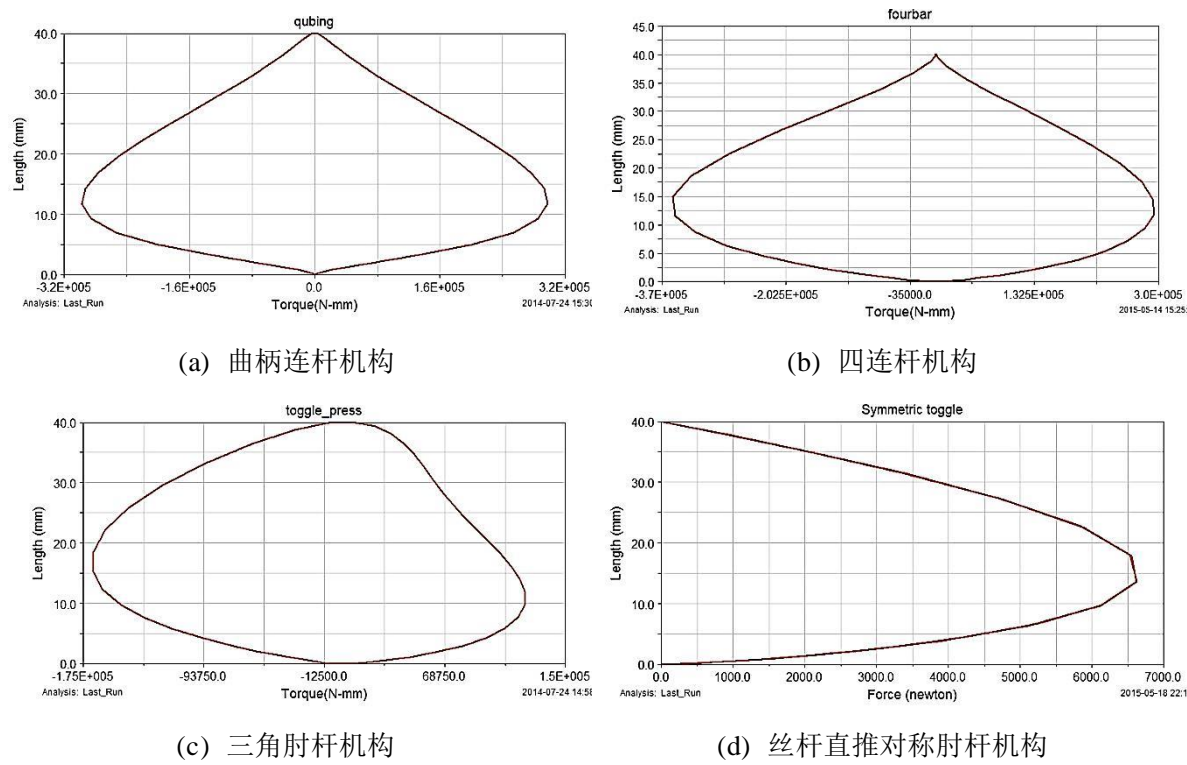


图 2-4 各运动机构扭矩比较图

曲柄连杆机构和四连杆机构所需输入扭矩较大。

从对以上几种传动机构的滑块运动位移、运行速度和增力比三个方面的比较可知,四连杆式传动机构在结构上相较于普通曲柄压力机复杂,又比三角肘杆式压力机和对称肘杆式压力机相对简单,但是其具有与肘杆式压力机相似的滑块运动特性和增力比。四连杆式运动机构在滑块运动在上死点与下死点中间区域时,能够给予滑块相较于上死点区域和下死点区域更快的运动速度,并且具有一定的急回特性;在下死点时有很好的低速特性,满足实际加工中的特性需要。因此,四连杆式运动机构在这些传动结构中是比较有代表性的一种运动机构,可以藉此来研究伺服压力机的控制参数求解过程。

2.2 四连杆式压力机机械模型的构建

建立四连杆式伺服压力机单独的机械结构运动简图，建立时省略四连杆式伺服压力机的主传动机构等零件，只涉及压力机与运动转化相关的执行机构。结构简图如图 2-5 所示。四连杆式伺服压力机由交流伺服电机驱动曲柄 AB 转动，进而带动连杆 BC，连杆 BC 末端连接着上连杆 CD 和下连杆 CE，上连杆 CD 的 D 端固定在机架上，下连杆 CE 的 E 端则连接着滑块，这样经过连杆 BC、CD、CE 的转化，曲柄的旋转运动变化为滑块的上下往复运动，上模具则安装在滑块上，随滑块运动，完成加工过程。

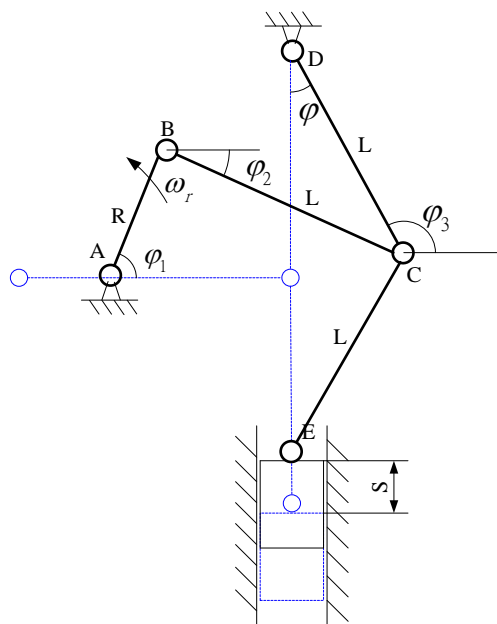


图 2-5 四连杆式伺服压力机的结构简图

为简化运算，本文在提取四连杆机构运动模型时做了以下假设：

- 1) 除曲柄长度相对较短以外，另外三个连杆长度相等；
- 2) 当滑块位于下死点时，上连杆 CD 与下连杆 CE 处于一条直线上，与水平方向垂直；
- 3) 机构设置合理，各杆长之间能够兼容，运转时相互之间不发生干涉，曲柄可进行整周旋转，完成一个行程。

根据以上假设建立机械模型，模型在运动时可以在滑块运动到最下方位置时达

到机构的死点，曲柄转角 φ_1 为 180° ，由此可以根据矢量原理建立以下状态方程：

$$\overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BC} + \overrightarrow{CD} = \overrightarrow{AD} \quad (2-1)$$

$$\overrightarrow{DC} + \overrightarrow{CE} + \vec{S} = 2\vec{L} \quad (2-2)$$

根据欧拉公式分解得：

$$R \cos \varphi_1 + L \cos \varphi_2 + L \cos \varphi_3 = L - R \quad (2-3)$$

$$R \sin \varphi_1 + L \sin \varphi_2 + L \sin \varphi_3 = S \quad (2-4)$$

$$s = 2l - 2l \sin \varphi_3 \quad (2-5)$$

式中，R 为曲柄长度(mm)，L 为各个连杆长度(mm)， φ_1 为曲柄角位移(rad)， φ_2 、 φ_3 分别为中间肘杆和上肘杆与水平线的夹角(rad)，S 为滑块位移(mm)。

2.3 本章小结

本章通过对几种典型的机械压力机传动机构进行结构上的分析，并在 Adams 上建立压力机的简化仿真模型，由此得到不同的传动机构在相同的输入条件下不同的输出结果，包括了滑块的位移、运动速度和增力比三个方面的工作特性。四连杆传动机构由于其在急回特性、低速特性和放大力矩上都有着良好的表现，较好的代表了各种传动结构的结构特点和工作特性。最后根据矢量闭环原理建立了四连杆机构的机械运动模型。

3 伺服压力机电机模型研究

3.1 永磁同步电机概述

永磁同步电机主要由三部分组成，包括电机主体部分、位置检测器和逆变器，其中电机的主体由定子与转子两部分组成^[27]。定子上放置有定子绕组，绕组有整距绕组和正弦绕组等绕组放置方式，以满足不同的永磁同步电机工作性。转子上放置有高质量的永磁体磁极，依据在转子上永磁体安放部位的不同，可以分成表贴式、内插式和内埋式几种类型。图 3-1 显示了三种结构的示意图，图中灰色部分为永磁体。

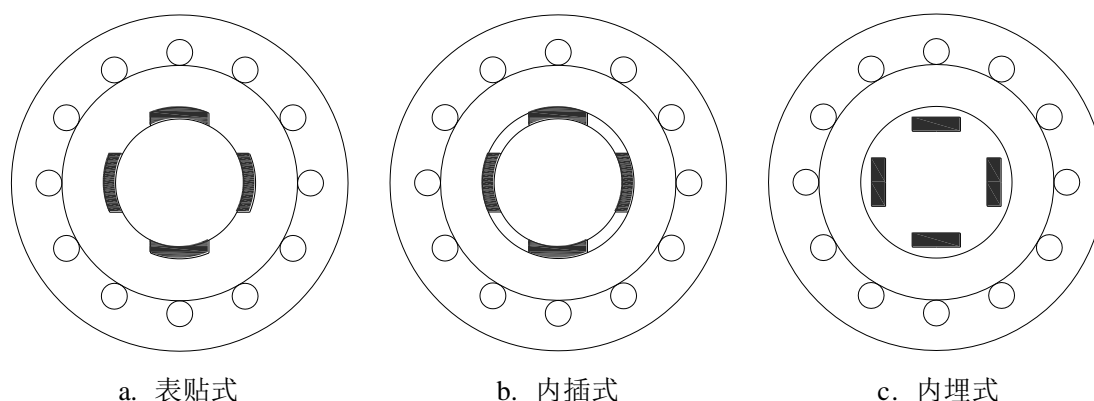


图 3-1 永磁同步电机结构

如图 3-1 所示，表贴式的转子将永磁体安装在转子表面，结构上比较简单。应用时，对电机转子永磁体进行合适的设计，能够获得接近于正弦分布的磁势波形，从而改善电机的运行状态。其成本较低，适宜应用在恒功率运行范围不大的永磁同步电机场合。内插式转子其特殊的结构设置生成了不对称的磁路，由此而产生的特性所导致的磁阻转矩可以提高永磁同步电机的功率密度，使得这种永磁体安装方式的动态性能得到了有效的提高。不过其成本上比表贴式要高，在交流调速中经常采用此结构。内埋式转子能够有效降低运行过程中对永磁体的退磁效应，其置于转子里面的永磁体受到了有效地保护。内埋式的电机可以同时动态运行和静态运行的场合表现出优异的性能，相比较其他两种结构，在动态运行区域则更加突出，因此在对系统的动态运行要求较高时多采用此种结构。

永磁同步电机的工作时，电机的定子绕组与电流相接通，从而在电动机的气隙

中生成旋转方向与电流相位变化一致的磁场，而安装了磁极固定的永磁体的转子则在旋转磁场的带动下开始旋转，并最终达到与定子旋转磁场旋转速度相等。

永磁同步电机与交流异步电机相比较有着明显的优势^[27]，具体如下：

1) 电机结构简单灵活，体积小。永磁同步电机采用永磁体作为转子部件，不需要交流异步电机的诸如转子绕组、电刷等部件，使得电机整体的复杂度降低，体积大幅度缩减。

2) 效率高。永磁同步电机使用永磁体来生成电机内部的磁场，消除了由励磁电流产生的损耗，提升了能源的利用率。此外，永磁同步电机本身在负载较小时能保持较高的工作效率。

3) 功率因数高。永磁同步电机可以得到很高的功率因数，设计合理的情况下，可以使其在数值上达到 1。提高电机的功率因数相应的可以降低电机运行过程中的电流，进而减小电机的电流损耗和散热。

4) 可靠性高。由于具有可以任意调速的优异性能，永磁同步电机可以简化系统中传动结构，进而减小由于结构复杂而导致的不稳定性。

5) 启动力矩高，噪音小，散热小。

3.2 永磁同步电机数学模型的构建

永磁同步电机各变量之间存在交叉的影响，耦合变化^[28-30]。单变量随时间变化也会同时发生幅值和相位的变化，在不对电机系统做一些处理的情况下构建 PMSM 的准确数学模型几乎不能实现。为了简化其数学模型，构建相对较为简单可用于控制计算的数学模型，对运行电机提出以下假设：

- 1) 忽略磁路的饱和，以及由此带来的非线性变化；
- 2) 忽略磁滞损耗和涡流的影响；
- 3) 忽略高次谐波，气隙中的磁势以正弦波的形式存在；
- 4) 转子永磁体无阻尼，不含阻尼绕组。

在永磁同步电机的调速控制中，其数学模型根据电机中坐标系设置方式的不同而不同，复杂程度亦有变化，坐标系的不同会使得方程的变量有不同程度的转换，

例如将幅值与相位的双重变化变换为单纯幅值的变化，达到计算的简化目的。本文以此为出发点，推导构建 PMSM 在两相旋转坐标系上的电机模型。

三相坐标系以定子三相为坐标系的三个轴的轴向，一一对应，确定 A 相后即可依此得到另外两相的轴向方向，然后在坐标系中标出磁势与电流的方向，即可得到如图 3-2 所示的永磁同步电机三相坐标系模型图。图中， θ 为转子直轴方向与 as 轴线方向（A 相）的夹角， i_s 为电机的三相定子绕组 A、B、C 的电流合成矢量。

依据其物理关系，即可得到电压方程在该坐标系上的表达式：

$$u_s = ri_s + L \frac{di_s}{dt} + \frac{d\varphi_s}{dt} = ri_s + \frac{d\varphi}{dt} \quad (3-1)$$

磁链方程为：

$$\varphi = Li_s + \varphi_s \quad (3-2)$$

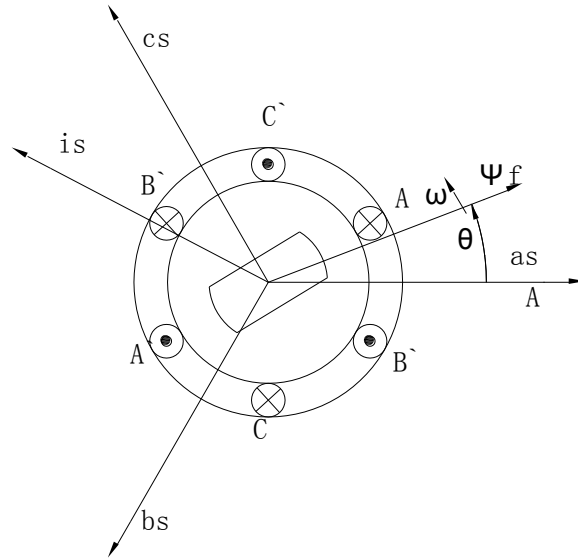


图 3-2 永磁同步电机三相 ABC 坐标系物理模型

向量展开后磁链方程如下：

$$\begin{cases} \varphi_A = L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + \varphi_f \cos \theta \\ \varphi_B = M_{BA} i_A + L_B i_B + M_{BC} i_C + \varphi_f \cos(\theta - 120^\circ) \\ \varphi_C = M_{CA} i_A + M_{CB} i_B + L_C i_C + \varphi_f \cos(\theta + 120^\circ) \end{cases} \quad (3-3)$$

上两式中， $u_s = [u_A \ u_B \ u_C]^T$ ， $i_s = [i_A \ i_B \ i_C]^T$ ， $\varphi_s = [\varphi_A \ \varphi_B \ \varphi_C]^T$ ，

$$r = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} L_A & M_{AB} & M_{AC} \\ M_{BA} & L_B & M_{BC} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_C \end{bmatrix}, \quad \varphi_s = \varphi_f \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \theta) \\ \sin(\omega t + \theta + 120^\circ) \\ \sin(\omega t + \theta + 240^\circ) \end{bmatrix}$$

i_A, i_B, i_C : 定子绕组的三相电流;

u_A, u_B, u_C : 定子绕组的三相电压;

L_A, L_B, L_C : 定子绕组的自感系数;

M_{XY}, M_{YX} : 定子绕组的互感系数, 两者数值相等;

θ : 转子的直轴领先水平轴的电角度;

φ_f : 转子上磁极的励磁磁势; r_s : 定子绕组电阻。

在三相 ABC 坐标系中, 磁链的数值与时间的变化相同步, 随着永磁同步电机的定子与转子相对位置的变化而变化, 因此要精确的列出与定子电流与转子磁链均相关的转矩方程相当困难, 难以在三相坐标系中做出表述。

由式 (3-1) (3-3) 可知, 永磁同步电机在三相 ABC 坐标系下的数学模型是非线性的、随时间变化的多变量方程, 与定子、转子的在某一时间下的相对位置关系高度相关, 根据这个方程对电机进行控制异常困难, 因此必须要寻求更为简单的数学模型以便控制。

将 A、B、C 坐标系的变量进行简单的坐标转化后即可将其各变量关系转化到 $\alpha-\beta$ 坐标系之上。 $\alpha-\beta$ 坐标系原点位于电机的定子之上, 两轴相互之间为垂直, $\alpha-\beta$ 坐标系与 A、B、C 坐标系相互的空间位置如图 (3-3) 所示。

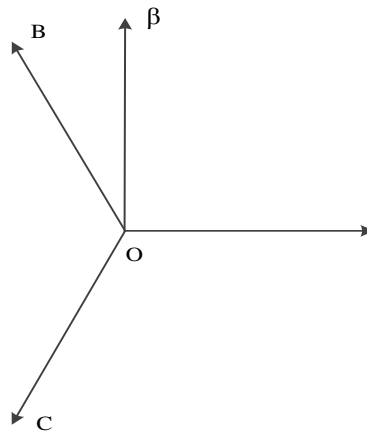


图 3-3 永磁同步电机 $\alpha-\beta$ 坐标系

Clark 变换即为变换坐标系的转换式。其具体的表达式随着变换的条件不同略有区别，在保持功率不变的条件下其表达式如下：

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

对式（3-1）进行 Clark 变换，得到如下所示电压方程：

$$\begin{cases} u_\alpha = \frac{d\varphi_\alpha}{dt} + r_s i_\alpha \\ u_\beta = \frac{d\varphi_\beta}{dt} + r_s i_\beta \end{cases} \quad (3-5)$$

同理可得磁链方程：

$$\begin{cases} \varphi_\alpha = i_\alpha (L_d \cos^2 \theta + L_q \sin^2 \theta) + i_\beta (L_d - L_q) \sin \theta \cos \theta + \varphi_a \cos \theta \\ \varphi_\beta = i_\alpha (L_d - L_q) \sin \theta \cos \theta + i_\beta (L_d \cos^2 \theta + L_q \sin^2 \theta) + \varphi_a \sin \theta \end{cases} \quad (3-6)$$

式中， L_d 、 L_q 分别为电机的直轴电枢电感和交轴电枢电感；

$\varphi_a = \sqrt{3/2} \varphi_f$ 为转子与定子绕组的磁链相交的磁链。

如式（3-5）（3-6）所示，在 $\alpha-\beta$ 坐标系下，数学模型经过变换已经得到了一定程度上的简化，然而，由于电机凸极效应的存在，电机的两个轴的电枢电感并不相等，有 $L_d \neq L_q$ 。观察式（3-6）可得，两轴电感不相等时存在 $\sin\theta\cos\theta$ 的乘积项，使得电机的磁链方程依然为一组非线性方程组，在进行计算时不利于得出精确的控制方案。同理，与之相关的电磁转矩方程也难以进行精确的解答。

基于以上两个坐标系下的数学模型都较为复杂，难以直接用于永磁同步电机的控制，需要进行更进一步的转换以得到所需的目标方程，因此更为简单的两相旋转坐标系得到比较广的应用，即 d-q 坐标系。

d-q 坐标系与上一个坐标系有很大的相似性，区别在于坐标系的放置方式有所不同，它将坐标系放置在电机的转子上，随转子的运动进行同步的转动，两轴同样相差九十度，其中 d 轴落后，其方向与转子的凸出向相同，即转子的磁势方向，因此 d-q 坐标系是一个随着电机的气隙磁场旋转做着同步旋转的正交坐标系。应用两相旋

转坐标系时，将电机复杂的交流矢量分解到旋转的两个轴上，实现对复杂变量的简单化，将交流变量拟合为直流变量来分别进行控制。图（3-4）显示了 d-q 坐标系。

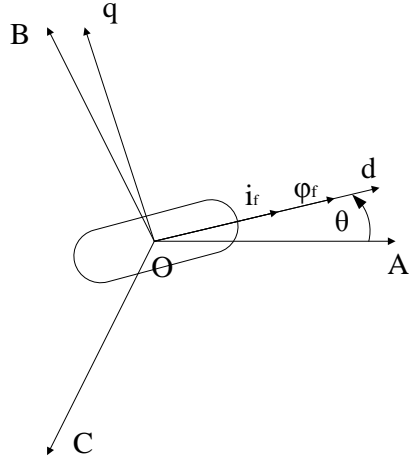


图 3-4 d-q 坐标系

将同样是两轴的坐标系完成从静止到旋转的转换过程的变换为 Park 变换，将其应用于定子电流，即：

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

将两个变换式相叠加，即将（3-4）与式（3-7）组合起来，就可以得到由三相 ABC 到 d-q 的转化式，将其应用于定子绕组电流，如式（3-8）所示。

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

将组合后的变换式应用于式（3-1），得到新的电机定子电压方程：

$$\begin{cases} u_d = \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega\varphi_q + r_s i_d \\ u_q = \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega\varphi_d + r_s i_q \end{cases} \quad (3-9)$$

磁链方程：

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (3-10)$$

转矩方程：

$$T_e = P_n(\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \quad (3-11)$$

机械运动方程：

$$T_e = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r + T_L \quad (3-12)$$

式 (3-9) ~ (3-12) 中， u_d 、 u_q 分别为电机在两个旋转轴上相应的电压分量； i_d 、 i_q 分别是电机相应的电流分量； φ_d 、 φ_q 为电机在 d-q 坐标系上直轴与交轴上的磁链， φ_f 为永磁体单独发出的恒定磁势； L_d 、 L_q 为电机在两个旋转轴上相应的等效电枢电感； ω_r 为转子的角速度； B 为摩擦系数； T_L 为负载转矩； P_n 为电机极对数。

将电机磁链方程式 (3-10) 代入电压方程 (3-9) 和转矩方程 (3-11) 中，然后与机械运动方程 (3-12) 联立，则可得永磁伺服电机完整的电机状态模型方程组：

$$\begin{aligned} u_d &= L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q + r_s i_d \\ u_q &= L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + r_s i_q + \omega \varphi_f \\ T_e &= P_n[\varphi_f i_q - (L_q - L_d) i_d i_q] \\ T_e &= J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r + T_L \end{aligned} \quad (3-13)$$

由永磁伺服电机的数学模型可得其在 d-q 坐标系的矢量图，如图 (3-5) 所示，图中 δ 为功角。

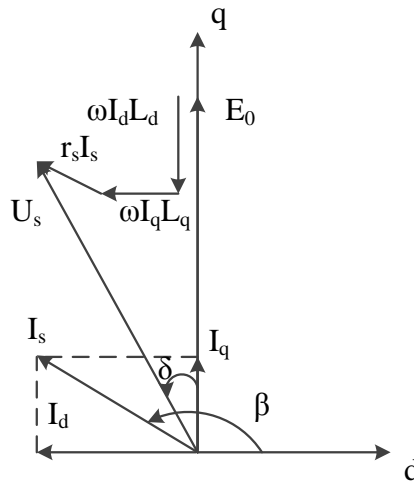


图 3-5 PMSM 两相旋转坐标系矢量图

由此，在一定假设的简化条件下的电机模型得以建立。从式（3-13）上我们可以看出，永磁同步电机的电机模型虽然经过坐标系的转换得到了一定程度的简化，但依然是一个比较复杂的非线性微分方程，我们在求解电机的控制参数时依然需要一些附加的条件供我们辅助求解。因此，我们需要选择一种有效的、适用的控制策略来对模型进行修正。

3.3 永磁同步电机控制方法比较研究

永磁同步电机（PMSM）普遍的控制策略按照控制对象的不同分为两种，一种为对电机电流进行控制的矢量控制策略，另一种为针对电机电磁转矩实行控制的直接转矩控制方法。两种控制方法有着不同特点和适用场合，需要根据实际控制对象的需求来选择^[31-36]。

矢量控制即是对电机的电流进行动态的控制，进而实时修改电机的各项运行参数达到控制的目的。在 PMSM 中，由 3.2 节的分析可知，交流分量被分解到直轴与交轴之上，简化为直流分量，矢量控制即是对分解的 d 轴分量和 q 轴分量分别进行控制，两个电流分量控制相互之间不产生干扰，继而完成对电机的磁通、输出转矩和输出转速等参数的控制。

直接转矩控制是针对电磁转矩来进行控制，使磁链的幅值为固定值，通过调节磁通角来完成控制。

采用矢量控制时，可以根据运行负载的需求对电机的电流进行控制，使电机的转矩输出实时跟踪负载的变化，这一点直接转矩控制也能够实现。然而，矢量控制时对电机的直轴电流分量和交轴电流分量进行的独立的控制，这使得其可以实现使直轴电流分量 $i_d=0$ ，将所有的电枢电流分配到交轴电流上，继而生成最大的输出转矩值。由于电机在启动与制动时对转矩的需求很大，相等的电流下更大的转矩输出可以提高启停的速度，同时减小电机的启停电流，进而减小由此带来的损耗。

压力机在加工过程中，需要完成周期性的运动，并且在一个周期内的各个阶段速度、转矩需求都不相同，需要频繁的进行启停操作，合模加工和脱模时负载也会有很大的变化。这样的加工需求对永磁同步电机的控制策略提出了很多的要求，满

足速度和转矩变化的高动态性能，高效的启动与制动操作，同时由于压力机的加工为长时间持续加工，控制策略也要能够保证永磁同步电机运行时的平稳性和安全性。结合压力机的控制需求和两种控制策略的控制特点，矢量控制能够更好的满足控制要求。

矢量控制策略下，虽然都是对电机的电枢电流进行控制，但控制的过程中也有着不同的目的需求。对于同一个给定的输出电磁转矩，改变直轴电流与交轴电流的数值分配都能够获得同样的转矩值，然而其他一些表征电机运行状态的参数则有所不同。因此矢量控制中对电流的控制方法也有着一些细分，按照对控制的目标参数的不同可分为以下几种：

（1） $i_d=0$ 控制

$i_d=0$ 控制即控制直轴电流恒等于 0，电枢电流均分配到交轴电流分量上，能够产生一定电枢电流条件下最大的电磁转矩。在需求的负载条件下，可以灵活的调整交轴电流使输出转矩值符合负载端的需求。启动速度与制动速度较快，电枢电流需求小，温升高。其缺点是在这种控制方法之下永磁同步电机的功率因数相对较低，负载较大时，效率有所下降。

（2） $\cos\varphi=1$ 控制

$\cos\varphi=1$ 是指在电机运行时合理的分配旋转坐标系的两轴电流值大小，使电机的功率因数恒等于 1。增大功率因数即增大电机的能量利用效率，减小能量消耗，节能环保。 $\cos\varphi=1$ 控制时，转矩对电流的曲线存在一个数值最大点，那么负载转矩确定时，对电流的选择则有两项，二者大小不一，一般选择二者中较小的电流值来获得相同的转矩值。其缺点是相比于其他的控制方法，相同的电流输出转矩的能力有所不足，不能最大化的发挥出永磁同步电机的负载能力。

（3）力矩电流比最大控制

这种控制方法是使电机工作时电磁转矩的与电流的比值最大。这种控制方法可以获得在同样的输出力矩的条件下最小的定子电流，相应获得最小的损耗和最高的效率，对逆变器的容量也没有高的要求。这种控制方法下电压与输出转矩成正比，功率因数则与输出转矩成反比。

(4) 恒磁链控制

恒磁链控制可以得到相对比较高的功率因数，虽然在数值上不及 $\cos\varphi=1$ 控制，不过其可以获得比 $\cos\varphi=1$ 控制更高的输出转矩，是兼具较高的效率和高输出转矩的控制方案。不过其算法上比较复杂。

经过分析对比可得，在永磁同步电机的容量较大，耗能问题比较重要时，需要获得比较高的功率因数已达到节能目的，此时 $\cos\varphi=1$ 控制和恒磁链控制则比较适合。另一方面，在电机的容量比较小，耗能相对来说较小，要求电机能够输出较高的电磁转矩输出和优异的调速机制，则宜采取 $i_d=0$ 控制和力矩电流比最大控制。

本文的研究对象伺服压力机负载相对不大，在接近下死点时有比较突兀的加减速过程，与加工零件接触和脱离，即合模和脱模时负载也会发生很大的变化，因此要求控制上达到速度和负载的响应速度快，精度高，输出力矩尽可能大的目标，因此对本文的伺服压力机而言， $i_d=0$ 控制能够较好的吻合控制需求。 $i_d=0$ 控制条件下电机矢量图如图（3-6）所示。

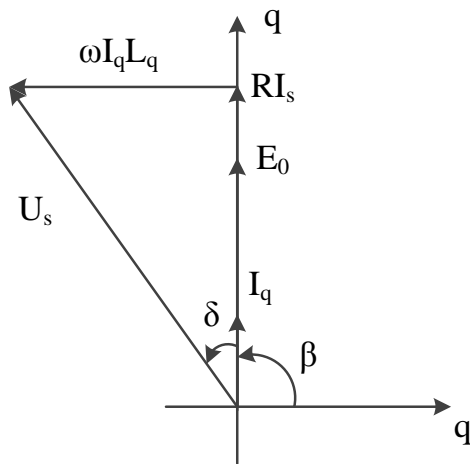


图 3-6 $i_d=0$ 控制永磁同步电机矢量图

3.3 本章小结

本章建立了作为伺服压力机驱动力的交流永磁同步电机在理想运行状态下的简化电机数学状态模型，并将电机状态模型转换到两相旋转的 d - q 坐标系上，获得具有

可计算性和易控制的电机状态模型。比较研究了电机的各不同控制方法，根据本文研究对象伺服压力机负载较小、调速性能要求较高、转矩输出较大的工作特点，确定 $i_d=0$ 控制作为电机的控制条件。

4 伺服压力机冲压工艺轨迹研究

4.1 冲压工艺轨迹设计

冲压是用伺服压力机等压力设备在特定的模具上把工件加工成特定的形状的工艺，这个加工过程中包括着材料的弹性变形、塑性变形，对于性能要求、形状要求不同的工件，所用的冲压工艺轨迹都是不同的^[37]。比如拉伸时，工作区域内滑块的下行速度降慢以保证拉伸的继续进行，如若速度过快则导致拉伸部位的金属得不到其他地方的补充，造成工件的裂纹，甚至是断裂。而在某些深拉伸时，一次下行的冲压往往不能完成冲压所需要的拉伸深度，强行一次拉伸的受限于材料本身的延展性，材料会发生裂纹或断裂事故，这时我们需要将拉伸分为几个步骤，一次拉伸一部分，然后将滑块上行一段距离后再向下继续拉伸，可以有效的提高材料的延展性能，或者采用小幅度高频率的震荡拉伸，在滑块与材料接触后的拉伸过程中使滑块不断的保持上下的小幅度高频振动，也能够使材料的延展性能获得较大的提升，同时工件的塑韧性、强度等性能都有所提升。

因此，在进行工件的加工之前，需要根据工件的材料、形状、成品性能要求等因素对冲压工艺轨迹进行规划。通常的做法是将整个冲压过程的其中一个冲压周期提取出来，因为冲压的过程是循环操作，因此只需要对一个周期的工艺轨迹进行规划即可。以深拉伸工艺为例，将一个冲压周期提取出来后，将一个周期分为四个部分，即空程快速进给区、缓慢接近工作负载区、快速脱模区和快速回程区，如图(4-1)所示。

如图所示，将深拉伸工艺划分为四部分后，区域之间的节点为初始曲线的关键点，决定了不同区域的曲线位置与延伸方向。在空程快速进给区，安装在滑块上的上模未与工件相接触，滑块快速下行至接近工作区域，缩短了整个冲压周期的时间，加快一定时间内的所能完成冲压周期的次数；在缓慢接近区，滑块与工件逐渐接近，能够减小压力机滑块与工件之间的冲击，从而减小对模具的震动和磨损，延长其寿命，同时也能够提高工件的表面质量。安装在滑块上的上模与工件接触后直至工件加工完成，这个过程中滑块的运行速度也同样比较缓慢，滑块的输出力矩增大，达

到整个运动周期的下死点位置；快速脱模区，工件成形完成，滑块迅速撤出，上下模具相分离，工件的加工完成，迅速脱模能够有效的降低脱模时引起的噪声和震动，并一定程度上改善工件的质量。最后，已经脱模的滑块快速上行，直至冲压行程的上死点，完成一个周期的冲压加工。

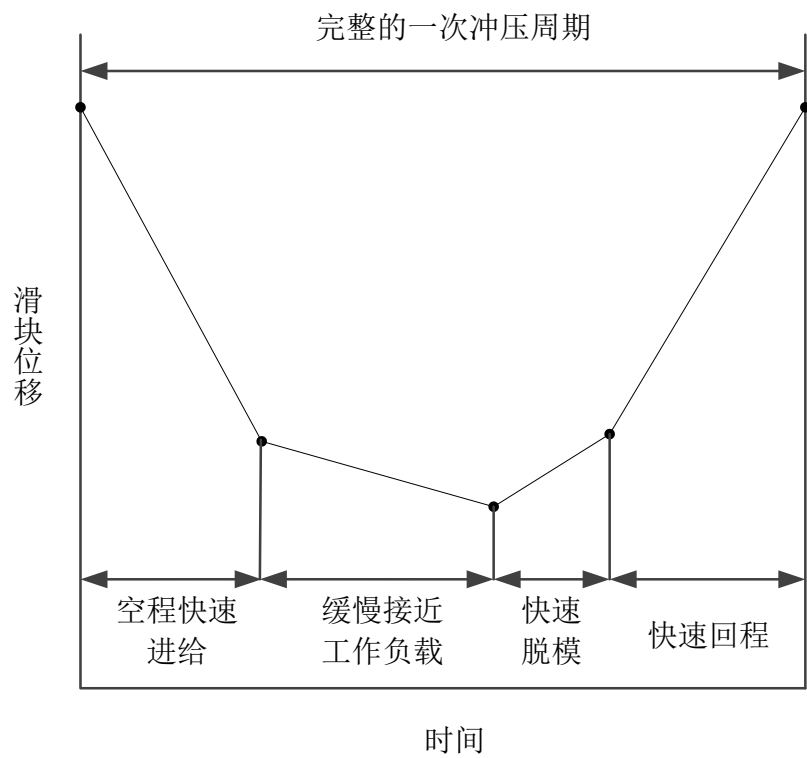


图 4-1 深拉伸工艺曲线分区

为了保证冲压过程中伺服压力机整体运行的平稳性与安全性，我们应尽量减小工艺曲线规划对系统造成的刚性冲击。总得来说，规划好的冲压工艺曲线应包含以下特性^[38-40]：

- (1) 在总体运动规律上符合既定规律，即在空程运行的下行阶段与回程阶段保持较高的运动速度，在接近工件时降低运动速度，加工时保持合适的运动速度，加工完成后快速脱模。
- (2) 为保证相邻两个周期间的连续，即满足周期函数的边界条件，在冲压周期的起始点与终止点，滑块的速度与加速度要求都等于 0，从工艺曲线上看，就是保证曲线的起点与终点的一阶导数为 0，二阶导数也为 0；

(3) 减小冲压周期内的冲击可能性，即尽量缓和滑块在运动时速度与加速度的突变，使速度与加速度连续，使对系统造成刚性冲击的点减缓为柔性冲击，有柔性冲击的点减缓为无冲击，在曲线上的表现就是使拟合后的工艺曲线光滑、连续，一阶导数光滑、连续，二阶导数连续无断点。

4.2 基于 Matlab 的冲压工艺曲线拟合

4.2.1 Matlab 概述^[42]

Matlab 是由 Mathworks 公司开发的用于数值分析、矩阵计算、数据可视化和非线性动态系统建模的计算平台。它使得研究工作者能够避免进行繁杂难以进行的数学计算过程，提供给用户完善高效的数值计算和符号计算功能，具备着高性能的图形处理功能，使计算结果和编程运行结果能够以直观的图表形式呈现出来。Matlab 提供了大量的应用工具箱，如动态仿真工具箱（Simulink Toolbox）、优化工具箱 (Optimization Toolbox) 等，用户可以很方便的调用这些已经编写好的函数，为建模计算提供了方便。Matlab 简单友好的交互式用户界面也方便了使用者的操作。

Matlab 是矩阵运算，对 C 语言繁杂的数学编程过程进行了大量的简化，在有效的减少从数学语言到编程语言的翻译时间的同时，也方便了使用者对其进行查看，提高了使用的便捷性。

Matlab 可以自编函数并存储，更加简单的进行调用。同时，用户也可以对系统自带源函数进行符合自己需求的修改，使其更加符合自己的使用情况。

4.2.2 曲线拟合方法对比分析

根据冲压加工的工艺特点确定了一定数量的位移与时间的数据点后，需要用光滑的、符合一定边界条件的拟合方法穿过数据点，得到符合要求的加工工艺曲线，以用于后续控制计算和加工应用。曲线拟合有多种不同的拟合算法^[43-48]，各拟合算法的计算难度和适用场合有所区别，下面简要介绍这几种方法：

(1) 拉格朗日插值法

设有一组含有 $n+1$ 个数据点的离散数组，求作 n 次代数多项式 $L_n(x)$ ，

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^n y_i l_i(x) \quad (4-1)$$

使之满足

$$L_n(x_i) = y_i = f(x_i), \quad i=0,1,2,\dots,n. \quad (4-2)$$

式中 $l_i(x) = \prod_{\substack{j=0 \\ i \neq j}}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j}$ ， $l_i(x)$ 为以 x_i 为节点的基函数。

拉格朗日插值法即基于此多项式进行计算拟合，获得结果曲线。

拉格朗日插值法所用的拟合计算式为具有多阶连续性的高阶多项式，适用于拟合曲线光滑、表达式单一的函数曲线，而对于复杂曲线拟合时误差较大。提升拟合的阶次可以更好的对复杂曲线进行拟合，这时拟合曲线将以更小的误差逼近原数据，然而此时容易出现另外一个问题，即龙格现象，如图（4-2）所示，随着插值阶数的升高，在曲线的两端点附近出现激烈的震荡，此时就需要将曲线分段进行拟合。

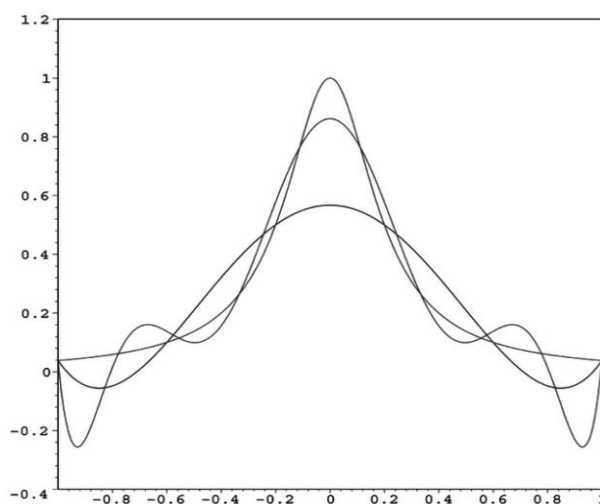


图 4-2 龙格现象

（2）分段插值法

分段插值法就是就整段数据点分段，将拟合的区间缩小，在每一个子区间上分别进行拟合，每一段相邻的子区间相互衔接，加入相应的连接边界条件，最后组合成整条曲线。分段插值时把每一个子区间的数据点用折线连接起来，此时所构造的每一个子区间的函数是线性的，这样构造而成的组合后的插值函数的导数是间断的，不能满足某些条件下对曲线光滑性的要求。若将其一阶导数构造为满足一定条件的

连续的分段函数，则可以不改变插值方法的同时在曲线的光顺性上有所改善，即分段 3 次 Hermite 插值。

由于分段差值时将总区间进行了细分，提升每一段函数的阶次所造成的龙格效应影响被削弱甚至消除，并且只要分段的区间足够小，曲线在一定程度上可以达到很高的精度要求。不过分段插值在曲线的光滑性上表现不佳，虽然分段 3 次 Hermite 插值相比较分段线性插值而言提高了拟合的精度，但是在曲线的光顺性上依然有所欠缺。

(3) 最小二乘法

给定一组离散的数据点 $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ ，设拟合的函数表达式为 $\varphi(x_i)$ ，我们要求 $\varphi(x_i)$ 与 y_i 的偏差 $[y_i - \varphi(x_i)]$ 的平方和 $\sum_{i=0}^n [y_i - \varphi(x_i)]^2$ 最小，以这种方式计算出拟合函数的方法即称为最小二乘法。

最小二乘法具体实施时可根据给定的误差精度进行拟合，使用简单，是应用比较广泛的一种曲线拟合方法。

(4) 样条拟合法

样条拟合与分段插值一样，将整个数据分割为许多子数据组，不过区别在于样条拟合时不是单独的对每一个子区间进行拟合，前后的区间相互联系，对当前区间的曲线进行修正。样条拟合按分段函数式的不同，主要有圆弧样条曲线、三次样条曲线和 B 样条曲线^[39-41]。其中，圆弧样条曲线以圆弧为基函数，相邻子区间曲线的曲率上不能达到连续的状态，使拟合曲线光顺性不能得到有效的保证，不能应用于对光顺要求较高的场合，应用比较普遍的为后两者。

(I) 三次样条曲线

给定一组离散的数据点 $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ ，设 $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$ ，构造出一个函数 $s(x)$ 并使其满足以下三个条件：

- (1) $s(x), s'(x), s''(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续；
- (2) $s(x)$ 的各个分段都为三阶多项式；
- (3) $s(x_i) = y_i$ ($i=0, 1, 2, \dots, n$)。

由上可知每个子区间 $[x_{i-1}, x_i]$ 上的是 $s(x)$ 为一个三次多项式，不妨记为

$$s(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 \quad (4-3)$$

将所有子区间的函数式组合即可得到整条曲线的函数表达式，只需要求解出待定的系数即可。

在每一个子区间 $[x_{i-1}, x_i]$ 上 $s''(x)$ 为一次多项式，设

$$s''(x_{i-1}) = M_{i-1}, \quad s''(x_i) = M_i \quad (4-4)$$

则由拉格朗日插值可得

$$s''(x_i) = M_{i-1} \frac{x - x_i}{x_{i-1} - x_i} + M_i \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}, \quad x \in [x_{i-1}, x_i] \quad (4-5)$$

对式 (4-5) 进行连续两次积分，同时将 $s(x_{i-1}) = y_{i-1}$ 和 $s(x_i) = y_i$ 代入到积分式中消除两个积分常数，得到由 M_i ($i=1, 2, \dots, n$) 表示的 $s(x)$ ，其表达式如下：

$$\begin{cases} s(x) = M_{i-1} \frac{(x_i - x)^3}{6h_i^2} + M_i \frac{(x - x_{i-1})^3}{6h_i^2} + (y_{i-1} - \frac{M_{i-1}}{6}h_i^2) \frac{x_i - x}{h_i} + (y_i - \frac{M_i}{6}h_i^2) \frac{x - x_{i-1}}{h_i} \\ x \in [x_{i-1}, x_i], h_i = x_i - x_{i-1}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (4-6)$$

由于 $s'(x)$ 在 x_i ($i=1, 2, \dots, n-1$) 上是连续函数，可得如下线性方程组

$$\mu_i M_{i-1} + 2M_i + \lambda_i M_{i+1} = g_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4-7)$$

$$\text{式中, } \mu_i = \frac{h_i}{h_i + h_{i+1}}, \quad \lambda_i = 1 - \mu_i = \frac{h_{i+1}}{h_i + h_{i+1}}$$

$$g_i = \frac{6}{h_i + h_{i+1}} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{h_{i+1}} - \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} \right)$$

方程组 (4-7) 中共有 $(n-1)$ 个方程， $(n+1)$ 个未知数 M_0, M_1, \dots, M_n ，如果要算出所有的 M_i ($i=0, 1, 2, \dots, n$)，则必须增加条件，这个条件我们可以从曲线的端点处得到，即加入边界条件。边界条件具体是根据实际问题来确定的，常见的边界条件有三种。

1) 给定曲线两端端点处的一阶导数，即

$$s'(x_0) = y'_0, \quad s'(x_n) = y'_n \quad (4-8)$$

由此可以导出

$$2M_0 + M_1 = \frac{6}{h_1} \left(\frac{y_1 - y_0}{h_1} - y'_0 \right) \quad (4-9)$$

$$M_{n-1} + 2M_n = \frac{6}{h_{n-1}} \left(y'_n - \frac{y_n - y_{n-1}}{h_n} \right) \quad (4-10)$$

2) 给定曲线两端端点的二阶导数，即

$$s''(x_0) = y''_0, \quad s''(x_n) = y''_n \quad (4-11)$$

此时，即可得到

$$M_0 = y''_0, \quad M_n = y''_n \quad (4-12)$$

3) 周期函数条件，此时

$$\begin{cases} s(x_0 + 0) = s(x_n - 0) \\ s'(x_0 + 0) = s'(x_n - 0) \\ s''(x_0 + 0) = s''(x_n - 0) \end{cases} \quad (4-13)$$

由此可得方程

$$M_0 = M_n \quad (4-14)$$

$$\mu_n M_{n-1} + 2M_n + \lambda_n M_1 = g_n \quad (4-15)$$

$$\text{式中, } \mu_n = \frac{h_n}{h_1 + h_n}, \quad \lambda_n = 1 - \mu_n = \frac{h_1}{h_1 + h_n}$$

$$g_n = \frac{6}{h_1 + h_n} \left(\frac{y_1 - y_0}{h_1} - \frac{y_n - y_{n-1}}{h_n} \right)$$

在各个边界条件下，将边界条件的方程与原方程相组合即可解出 $M_i (i=0,1,2,\dots,n)$ ，继而计算出 $s(x)$ ，得到整条曲线的拟合函数式。

(II) B 样条曲线

B 样条曲线是一种独特的样条曲线，以 B 样条基函数来进行组合得到。对 P 次 B 样条曲线有：

$$C(U) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) P_i, \quad a \leq u \leq b \quad (4-16)$$

式中， P_i 为控制点序列， $N_{i,p}(u)$ 为 p 次 B 样条基函数。

$$\begin{cases} N_{i,0} = \begin{cases} 1 & u \in [u_i, u_{i+1}) \\ 0 & u \notin [u_i, u_{i+1}) \end{cases} \\ N_{i,k} = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \\ \text{定义: } \frac{0}{0} = 0 \end{cases} \quad (4-17)$$

其中， k 为次数，代表其阶数为 $(k+1)$ 阶； $U = \{u_0, u_1, \dots, u_m\}$ 为节点矢量。

B 样条曲线拟合特性上有着优良的性质，在每一个子区间内有着光顺的曲线同时，在每一个子区间的交接处一样有着良好的光滑特性。

由以上分析可知，几种曲线拟合的方法有着不同的特性。拉格朗日插值法可以保证曲线的高阶连续性，但是在采用高阶插值时拟合曲线的两端会出现激烈的震荡现象，不能保证拟合精度；分段插值法可以得到很高的拟合精度，但是不能保证在分段之间的接口处的曲线光滑性，即使是分段 3 次 Hermite 插值也只能在接口处得到连续的一阶导数；最小二乘法适用范围较广，能够反映出拟合数据的总体走向，有选择的消除局部点特征对曲线的影响，对于一组杂乱的无序数据点有较好的拟合效果，然而在拟合数据点上有代表曲线关键特性的散点时，最小二乘法可能会忽略关键点的影响以保证总体拟合误差的减小，此时的拟合效果不能达到预期的拟合结果；样条拟合采用不同的拟合分段函数有着不同的拟合效果，圆弧样条的跳跃式曲率变化导致其总体的光顺性不甚理想；三次样条插值在使得拟合曲线具有二阶连续性的同时，也有着较好的保形功能，**B** 样条拟合能够表征出给定数组的总体特点，并保证拟合曲线的高阶连续性，不过由 **B** 样条拟合时曲线大部分情况下不直接穿过给定点，这样在给定的数值点含有关键的性质点时就无法保证拟合曲线通过该点。

在进行伺服压力机的工艺轨迹规划时，对拟合曲线有以下要求^[40-42]：

(1) 光滑性，为保证压力机运行过程中的速度、加速度的连续性，使压力机运行平稳安全，曲线要有二阶或三阶以上的连续性；

(2) 准确性：曲线运动规律符合拟合数据的运动趋势，保持数据点所具有的凹凸性，在压力机上即符合原数据的加减速过程；

(3) 高精度，拟合曲线需通过或极度接近给定数据点中的关键点位置，如压力机

滑块运行过程中的上死点与下死点位置，若拟合曲线无法达到上死点或超过上死点，滑块可能无法进行正常的运动或者曲柄不能完整的进行整圈的运动；若曲线不能达到下死点，则加工工件不能达到加工要求，超过下死点则可能导致工件的报废。

由于压力机运动轨迹对拟合曲线的特殊要求，根据各拟合方法的特点，本文采用三次样条插值法来拟合滑块运动曲线，既可以确保拟合结果曲线的二阶导数具有良好的连续性，又可以体现设计数据的细节特征，确保拟合曲线依次穿过给定的关键位置点。此外，三次样条插值灵活的分段表达形式也满足了拟合的精确度要求，也不会产生端点处的龙格现象。

4.2.3 冲压工艺曲线拟合

本文以深拉伸工艺曲线^[43]为例进行分析，给定关键位置的数据点作为拟合曲线的节点，其他工艺过程只需要根据具体的加工需要改变节点的坐标即可。定义一个完整冲压周期的时间为 1s，工作行程 40mm。

本文所取伺服压力机模型为四连杆式伺服压力机，滑块往复运动一个冲压周期的同时曲柄完成一圈 360° 的旋转。设计滑块运动数据点如表（4-1）所示，将各节点连接起来，构成原始节点的折线图，如图（4-3）所示。

表 4-1 拉伸工艺滑块位移节点坐标

数据点代号	时间 x/s	滑块位移 y/mm
0	0.000	40.000
1	0.021	39.191
2	0.059	35.659
3	0.205	15.387
4	0.368	10.269
5	0.532	1.977
6	0.649	0.588
7	0.701	2.864

8	0.801	10.717
9	0.901	17.344
10	0.961	33.743
11	0.988	39.455
12	0.996	39.900
13	1.000	40.000

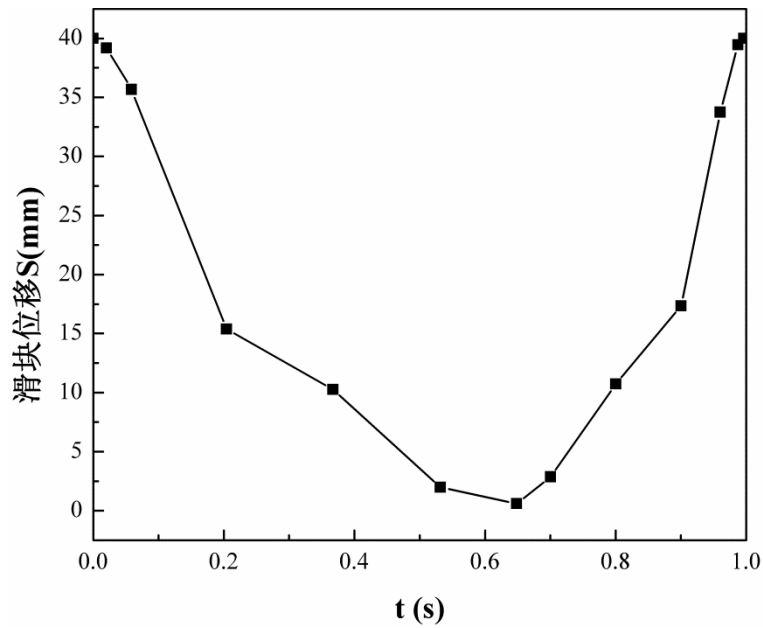


图 4-3 拉伸工艺滑块位移节点图

三次样条插值曲线的具体建模过程已经在 4.2.4 节中进行了详细的介绍，根据其建模过程，可得

$$\mu_i M_{i-1} + 2M_i + \lambda_i M_{i+1} = g_i, \quad i = 1, 2, \dots, 13 \quad (4-18)$$

方程组 (4-18) 中包含着 12 个方程，包含有 14 个未知数 $M_i (i=0, 1, 2, \dots, 13)$ ，需要再加入滑块运动曲线的边界条件。滑块运动曲线要求曲线的端点处的速度、线速度为 0，即曲线端点的一阶导数与二阶导数为 0

$$s'(x_0) = 0, \quad s'(x_{13}) = 0, \quad s''(x_0) = 0, \quad s''(x_{13}) = 0 \quad (4-19)$$

由此可以推出

$$M_1 = \frac{6(y_1 - y_0)}{h_1^2} \quad (4-20)$$

$$M_{n-1} = \frac{6(y_{13} - y_{12})}{h_{12}h_{13}} \quad (4-21)$$

将边界条件与方程组（4-18）组合后得到如下方程组：

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & & 0 \\ \mu_1 & 2 & \lambda_1 & \\ & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & & \mu_{12} & 2 & \lambda_{12} \\ & & & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_0 \\ M_1 \\ \vdots \\ M_{12} \\ M_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ \vdots \\ g_{12} \\ g_{13} \end{bmatrix} \quad (4-22)$$

求解式（4-22）即可得到 $M_i(i=0,1,2,\dots,13)$ ，将其代入下式中即可得到每一个子区间上的分段函数表达式。

$$\begin{cases} s(x) = M_{i-1} \frac{(x_i - x)^3}{6h_i^2} + M_i \frac{(x - x_{i-1})^3}{6h_i^2} + (y_{i-1} - \frac{M_{i-1}}{6} h_i^2) \frac{x_i - x}{h_i} + (y_i - \frac{M_i}{6} h_i^2) \frac{x - x_{i-1}}{h_i} \\ x \in [x_{i-1}, x_i], h_i = x_i - x_{i-1}, \quad i = 1, 2, \dots, 13. \end{cases} \quad (4-23)$$

基于以上计算过程，本文在 Matlab 平台上进行编程计算^[43-44]，得到冲压工艺拟合曲线如图（4-4）所示。

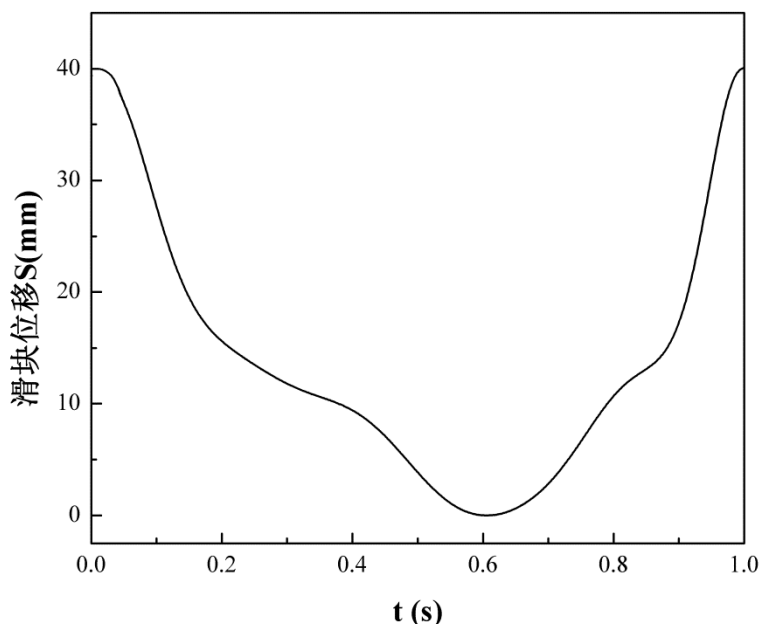


图 4-4 滑块位移拟合曲线

对滑块位移进行一次求导和二次求导分别得到滑块运动的速度-时间曲线和加速度-时间曲线，分别如图（4-5）和图（4-6）所示。

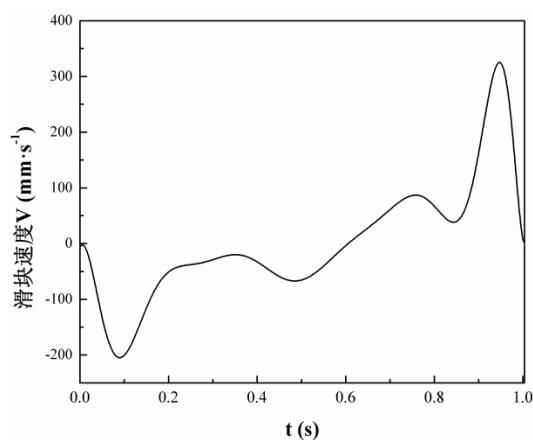


图 4-5 滑块速度曲线

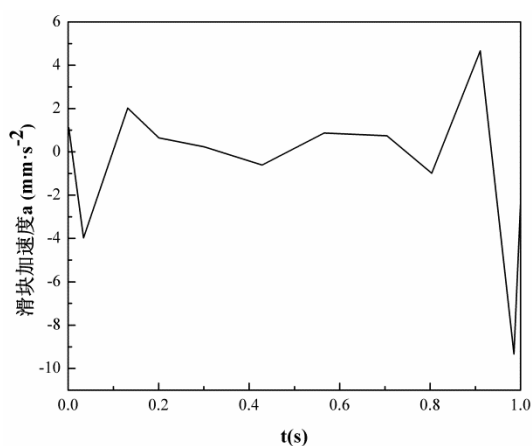


图 4-6 滑块加速度曲线

如图（4-4）~（4-6）所示，滑块运动拟合曲线在 0s 周期起始点和 1s 周期终止点的速度和加速度都等于 0，满足冲压曲线对边界条件的要求。拟合曲线准确的通过了所设定的上死点与下死点，保证了冲压周期运动的正确进行。滑块下行运动到接近下死点位置时时运动速度低，保证了冲头平滑的进入到冲压工作区。冲压工作时运动较为缓慢，加速度的变化也比较小，能够有效较低合模和加工时的振动与噪声，从而延长模具的使用寿命，一定程度上提高工件的成品性能。

整个拟合曲线的速度变化平滑，没有大幅度的速度突变，对运动机构的冲击小，噪声较低，在加速度曲线的转折点会对系统造成轻微的柔性冲击。由此可知，由三次样条插值拟合得到的滑块运动曲线具有良好的拉伸工艺特性，是符合加工实际需求的工艺曲线。

4.3 本章小结

分析深拉伸工艺对一个周期内不同运行阶段滑块运动特征的需求，设计了该工艺下滑块运动位置的关键点。对比研究了几种曲线拟合方法，依据冲压工艺对滑块运动曲线的特征需求，选取三次样条插值作为拟合方法。在 Matlab 上编程实现了三次样条插值拟合，拟合出符合深拉伸工艺需求和周期加工条件的滑块运动曲线，为伺服压力机模型求解给定了输入条件。

5 伺服压力机模型求解研究

5.1 伺服压力机数学模型整合

本文以四连杆式伺服压力机为例研究在给定冲压曲线的条件下计算伺服电机的响应控制参数，在第二章与第三章中已经分别介绍了四连杆式伺服压力机的机械数学模型和永磁同步电机数学模型，如式（5-1）~式（5-7）所示。

$$R \cos \varphi_1 + L \cos \varphi_2 + L \cos \varphi_3 = L - R \quad (5-1)$$

$$R \sin \varphi_1 + L \sin \varphi_2 + L \sin \varphi_3 = 0 \quad (5-2)$$

$$s = 2l - 2l \sin \varphi_3 \quad (5-3)$$

$$u_d = L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q + R_s i_d \quad (5-4)$$

$$u_q = L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + R_s i_q + \omega \psi_f \quad (5-5)$$

$$T_e = P_n [\varphi_f i_q - (L_q - L_d) i_d i_q] \quad (5-6)$$

$$T_e = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r + T_L \quad (5-7)$$

5.2 机械模型求解

如式（5-1）~（5-3）所示，四连杆式伺服压力机的数学模型为三元一次三角函数方程组，求解难度不大，重点在于求解时对求出的数值解的选取。三角函数由于其本身的周期特性，得到的解不具有唯一性，即使是在 2π 角度内，正弦函数与余弦函数依然可以得出两个解。但我们求解伺服压力机机械模型时将运动限制在一个周期以内，曲柄的转角 φ_1 与滑块的位移位置时一一对应的，即解是唯一的。Matlab 虽然有着强大的数值计算分析能力，不过其自身的函数运算库并不能识别工程实际中所需要的取值，因此，我们在 Matlab 计算出曲柄的转角后需要对结果根据实际情况进行角度的变换，使结果符合真实的转角需要。

式（5-1）~（5-3）中已知具体参数有：曲柄长度 R 为 30.8mm，三个等长连杆

长度 L 为 100mm。

由于我们以一个周期的冲压行程为例进行研究，因此需要首先计算出曲柄转动所对应的起始角度。根据第四章拟合的滑块运动曲线，起点时滑块位移 $S=40\text{mm}$ ，将曲柄长度 R 、各连杆长度 L 和滑块位移 S 代入到机械运动模型，即式(5-1)~(5-3)中，则可以计算出曲柄转角的两解， 7.2° 和 172.8° ，根据第二章中四连杆式压力机机构运行特点我们可以简单的推出曲柄的起始角度为 7.2° 。得出起始角度后，我们则可以结合四连杆式压力机的实际运行过程将一个冲压周期（ $7.2^\circ \sim 367.2^\circ$ ）分为三个解值区域。

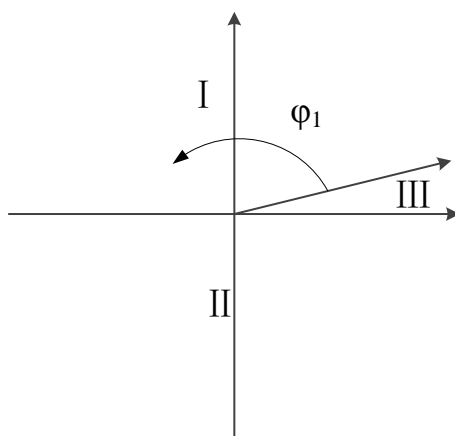


图 5-1 曲柄转角 φ_1

如图（5-1）所示，将一个冲压周期，根据滑块拟合运动曲线，将上死点作为冲压周期运动的起点，以此为始点将一个冲压周期分为三个区域，每个区域角度如下：

I： $0.126 \sim \pi$ ；

II： $\pi \sim 2\pi$ ；

III： $2\pi \sim 2\pi + 0.126$ ；

实际计算过程中，我们可以发现 Matlab 所计算出的角度可以是任意角度，只要其角度满足方程组，则可能是 Matlab 的取值，因此我们首先需要经过处理将其解换算到 $0 \sim 2\pi$ ，计算同步电机响应参数时我们仅需要曲柄转角 φ_1 ，因此我们只需要对曲柄转角的计算结果进行处理，第一步换算如下：

While $\varphi_1 \geq 0$

$$\varphi_1 = \|\varphi_1| - 2k\pi|;$$

$$k=k+1;$$

end;

经过换算后 φ_1 变换到 $0\sim 2\pi$ ，只需要再根据实际的冲压运行情况即可完成 φ_1 的换算，使其达到真实的曲柄转角。每个区域第二步的角度变换公式如下：

$$\text{I} : \varphi_1 = \varphi_1;$$

$$\text{II} : \varphi_1 = 360^\circ - \varphi_1;$$

$$\text{III} : \varphi_1 = 360^\circ + \varphi_1;$$

最后对曲柄转角 φ_1 求对时间的导数，得到曲柄转速 ω_r ，如图（5-2）所示。

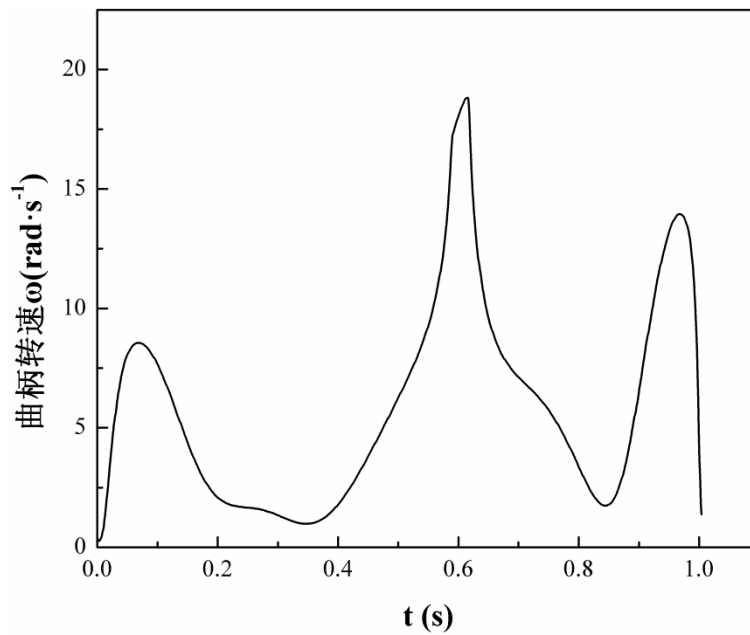


图 5-2 曲柄转速 ω_r 曲线

从图示的曲柄转速可以看出，在 $t=0s$ 和 $t=1s$ 时约等于零，滑块空程下行时曲柄转速随之上升，回程时也有着较高的曲柄转速。在滑块运动到下四点时曲柄转速有着较大幅度的上升，这是由于本文所采用的四连杆式运动机构自身的运动规律所导致。当四连杆式运动机构的曲柄保持匀速运动时，滑块在连杆的带动下运动到下死点时运动很缓慢，以 $1s$ 为冲压周期时，其在下死点位置约有 $0.1\sim 0.2s$ 的时间滑块的运动幅度很小，具有天然的保压作用。本文所拟合出的深拉伸工艺滑块运动曲线虽然在下死点位置运动较为缓慢，相较于其机构本身的保压时间来说依然很短，这就

造成了虽然滑块在下死点位置的运动速度降到了很低的数值，曲柄的转速依然呈现了较大幅度的上升。

从曲柄转速曲线上也验证了第四章中所拟合的滑块工艺曲线的可行性。曲柄由永磁同步电机驱动，若给定的曲柄转速变化过快，则可能超出了电机的调速能力，使得电机无法完成指定的工艺轨迹，导致加工过程出现问题，甚至对电机造成一定的损伤。

5.3 电机模型求解

永磁同步电机如前文所述，是一个内部电磁关系十分复杂的控制系统，在不影响其控制性能的前提下我们对其作出了一些假设，得到了可供控制计算的数学模型，进而通过 clark 变换与 park 变换将在三相 ABC 三相坐标系下依然复杂的数学模型转换到了将坐标放在了转子上的 d-q 旋转坐标系上，进一步的简化了控制模型，如式 (5-4) ~ (5-7) 所示。

尽管经过处理永磁同步电机的电机模型得到了大幅的简化，但是其数学模型依然是一个较为复杂的非线性微分方程组，并且方程组中含有 5 个未知量，即直轴等效电枢电流 i_d ，交轴等效电枢电流 i_q ，直轴等效电枢电压 u_d ，交轴等效电枢电压 u_q ，电机电磁转矩 T_e ，而方程只有四个，数学模型没有唯一解。因此，在求解的过程中需要加入额外的控制条件，使数学模型能够求出唯一解^[44]。

第三章中已经对电机通常使用的控制策略进行了介绍，并对各控制方法的特征和适用场合进行了对比。本文中使用的四连杆式伺服压力机模型为小型伺服压力机，采用的永磁同步电机为小容量同步电机，要求控制策略能够达到调速响应快、电机效率高的目标， $i_d=0$ 控制则可以较好的做到这一点。

以 $i_d=0$ 控制为控制策略为数学模型加入一组条件，使得方程组的未知数与方程数相等，可以求得在 $i_d=0$ 控制条件下的永磁同步电机响应参数。

本文中所用永磁同步电机与控制数学模型相关的具体参数有定子电阻 $R_s=0.2875\Omega$ ，极对数 P_n 为 4，d 轴电感 $L_d=0.02575H$ ，q 轴电感 $L_q=0.02075H$ ，磁链 $\psi_f=0.8627Wb$ ，折算到电机端的转动惯量 $J=0.015kg \cdot m^2$ ，折算到电机端的负载曲线

如图（5-3）所示，负载转矩在滑块运行到下死点附近进行工件的加工时急剧增大，加工完成后迅速减小，在周期的起始点与终止点为0。

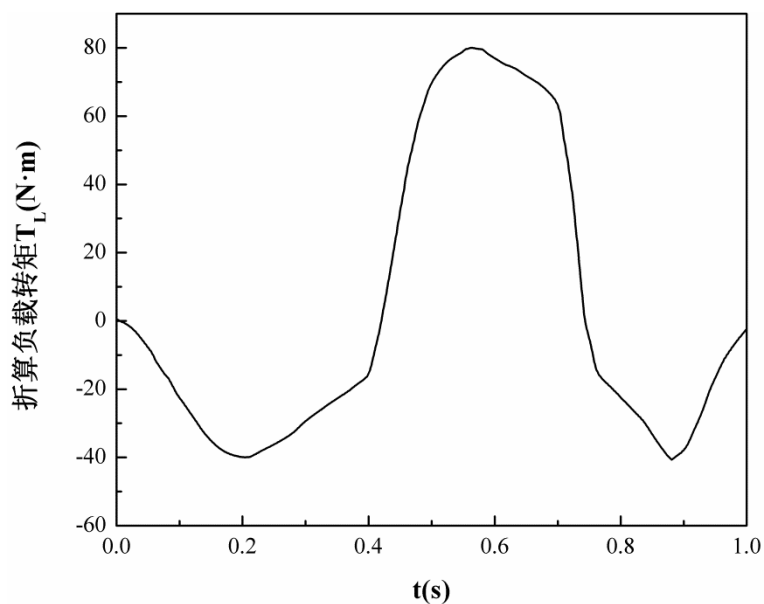


图 5-3 折算到电机端的负载转矩

在 Matlab 上进行编程计算，运行后得到电机的运行参数，交轴电枢电流 i_q 、直轴与交轴电枢电压 u_d 、 u_q ，结果如图（5-4）~（5-6）所示。

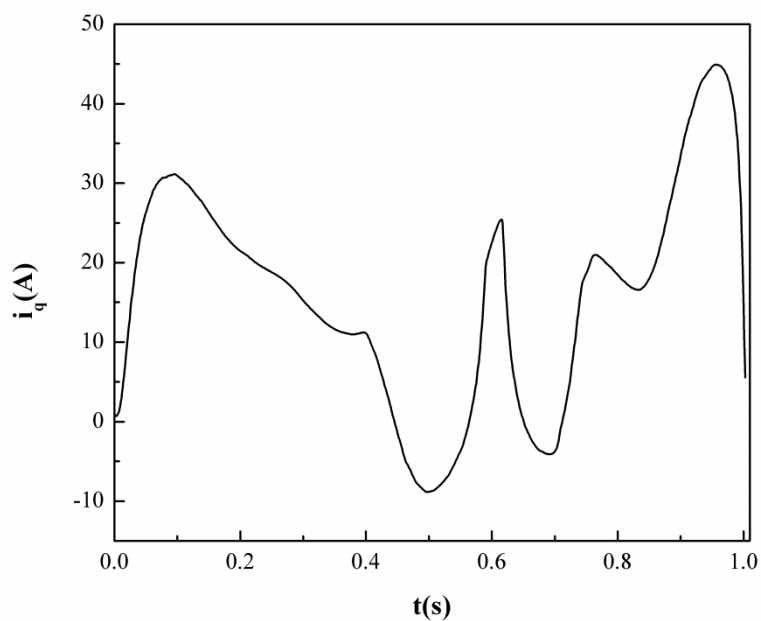


图 5-4 永磁同步电机交轴等效电枢电流 i_q

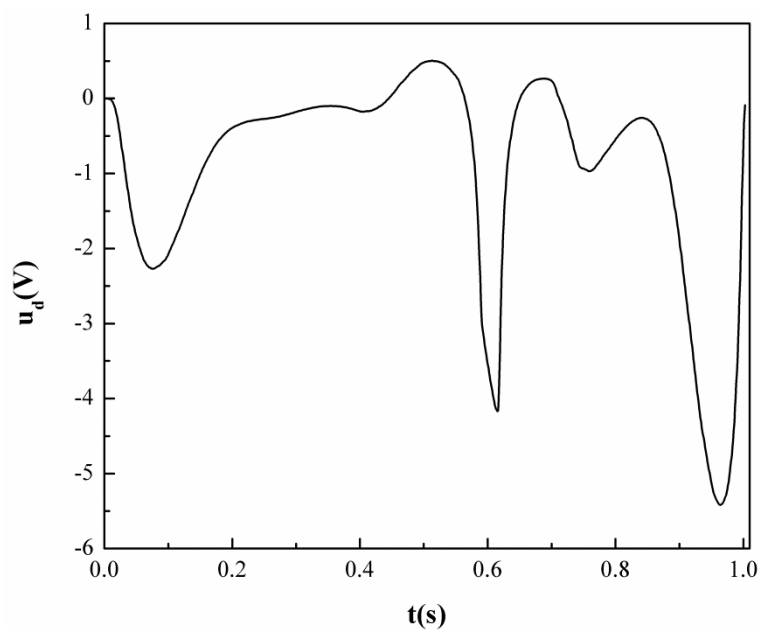


图 5-5 永磁同步电机直轴等效电枢电压 u_d

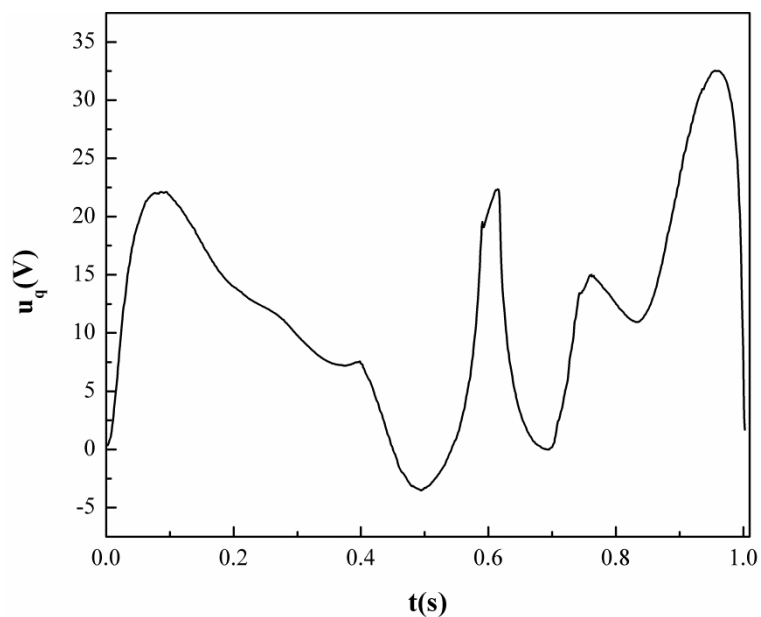


图 5-6 永磁同步电机交轴等效电枢电压 u_q

观察计算结果，可知：

(1) 电机交轴等效电流、交直轴等效电压响应迅速，随着冲压周期中各参数的变化而调整改变，能够满足电机的调速要求。

(2) $i_d=0$ 控制策略下，交轴电枢电流与负载转矩、电机转速保持了良好的跟随特性，交直轴电枢电压也有着良好的变化特性。在电机加速度增大和负载转矩增

大时，电枢电流 i_q 也随之增大，交直轴电枢电压也表现了跟随的特性。

(3) 交轴电枢电流与交直轴电枢电压均没有太过突兀的量值变化，变化较为平缓缓和，在滑块运动的下死点位置由于负载的力矩的迅速增大导致了电流电压的迅速变化，但变化程度依然在电机的可承受范围内，验证了冲压工艺曲线的合理性。

5.4 本章小结

本章通过 Matlab 对伺服压力机的数学模型进行了求解运算，得到了给定滑块输入位移、负载转矩等参数和控制方法的条件下，交流永磁同步电机的精确运行参数，即响应转速和电枢电压、电流。求解过程中对曲柄计算转角进行分析处理，得到与实际运行相吻合的转角位置。计算得到的电机运行参数与输入滑块运动曲线和负载转矩保持了良好的跟随特性，验证了数学模型的正确性；计算参数变化较为平滑，无较大的突变和无穷大值，验证了规划拟合的滑块运动曲线的合理性。

6 总结与展望

6.1 全文总结

本文以四连杆式伺服压力机为研究对象，对机械结构和电机进行了数学建模，并在 Matlab 上进行了精确的计算，得到在给定滑块运动曲线和负载时电机的控制参数，从而从数学意义上求出了在该模型下的精确解。本文主要研究成果如下：

1. 选取了四种具有代表性的常用机械压力机传动结构，以一个冲压周期为单位，在 Adams 上仿真研究了各个结构的滑块运动位移、运动速度和增力比，得出各个机构的运动特点，选择在运动特征上具有一定代表性的四连杆式结构作为伺服压力机的机械结构，并根据矢量原理建立伺服压力机机械部分的数学模型。

2. 由永磁同步电机的结构分析同步电机的工作原理，然后根据其工作原理在不影响控制性能的前提下提出若干能够简化其内部电磁关系的假设，在此基础上分析电机的数学模型，构建出简化可计算的电机数学模型。

3. 研究电机的控制策略，根据本文研究对象为小容量永磁同步电机的特点，选取 $i_d=0$ 控制策略为电机的数学模型附加额外的条件。

4. 以深拉伸工艺为例，拟合规划了该工艺的滑块运动曲线。拟合前，研究了深拉伸工艺的基本特点，由此确定了若干关键位置的坐标点，并以此为原型参数，在 Matlab 上编程实现了三次样条插值法对工艺轨迹的拟合，拟合结果曲线符合深拉伸工艺的总趋势，并准确的通过预设的关键点。

5. 在 Matlab 上进行编程计算，以拟合滑块位移曲线和负载为主要输入参数，加上机械结构和永磁同步电机本身的参数值，在 $i_d=0$ 的控制条件下精确计算出永磁同步电机的各项控制参数，包括响应转速，电枢电流和电枢电压。计算参数与输入位移、转矩间有着良好的对应关系，其数值变化符合电机运转规律，实际应用过程中可以通过控制方便的实现。

本文采用了 Matlab 编程计算的方法求解了伺服压力机整机的数学模型，得到了永磁同步电机在给定的运行情况和条件下的控制参数，与传统采取仿真来对数学模型进行模拟相比，给出了模型计算的精确解，更为直观的描述了电机输入参数与滑

块输出运动之间的数值关系，为实际伺服压力机的控制提供了更为精确的数学求解过程，对伺服压力机控制系统参数设置有着良好的参考价值。

6.2 研究展望

本文对伺服压力机的控制系统做了一些研究，然而由于本人自身知识储备有限，研究生在读时间又不足以在此领域进行深入透彻的研究，导致本文尚有一些不足，在以下方面有待继续研究发展：

1. 数学模型计算过程中做了简化处理，忽略了压力机实际运行过程中的摩擦，而省略摩擦必然使计算结果与实际运行结果有一定的差异，进一步的建模需要考虑进摩擦等因素，使结果更加符合实际情况。
2. 冲压拟合曲线根据理论确定，未能进行实际的加工验证，后续冲压曲线的确定可根据实际运行中对关键位置进行点取样采集，从而使拟合工艺曲线更贴合加工需要。
3. 本文的计算过程是建立在 $i_d=0$ 的控制条件下进行的，应继续进行在其他控制条件下控制模型的求解，使得在需求不同控制方法的场合应用不同的控制条件。

致谢

本论文行将完成，我首先要感谢我的导师叶春生老师。研究生期间一直在叶老师的帮助下学习前进，当我科研工作遇到困难时，叶老师总是深思熟虑，为我指明错误所在和需要努力的方向。叶老师在生活上和蔼可亲，关怀备至，在工作上治学严谨，一丝不苟，足以让我铭记一生。

其次，我要感谢实验室的赵火平博士、施雨农博士和已经毕业的李麟、孟强伟等众位师兄，师兄们都在生活上和工作上给予了我重要的帮助。

再次，我要感谢同届的实验室同学，巩方源、肖翔和陈卓，他们在科研上和生活上给了我很多的支持与鼓励。实验室的师弟们也给予了我很多帮助，在此也表示真诚的感谢。

最后，我要感谢我的父母和哥哥，感谢他们一直以来无私的支持和培养，同时还要感谢我的女朋友，她的支持也是我努力的动力。他们的陪伴也将支持我勇敢的走下去！

再次对所有陪伴过我，帮助过我的人表示最诚挚的感谢！

俞伟洋

2015 年 4 月于华科

参考文献

- [1] 赵升吨, 陈超, 崔敏超等.交流伺服压力机的研究现状与发展趋势[J].锻压技术, 2015,40(2):1~7.
- [2] 莫健华, 郑加坤, 古閑伸裕等.伺服压力机的发展现状及其应用[J].锻压装备与制造技术, 2007(5):19~22.
- [3] 阮卫平, 李建平, 李振石.伺服压力机的研究及其发展前景[C].2009 海峡两岸机械科技论坛论文集,2009,868~874.
- [4] 金风明, 窦志平, 韩新民.伺服压力机在我国的发展现状[J].机电产品开发与创新, 2012,1(1):19~21.
- [5] Miyoshi K. Current trends in free motion presses[A].Proceedings of 3rd JSTP International Seminar on Precision Forging[C].Japan:Nagoya,2004.
- [6] 邱瑛.三角肘杆伺服压力机机构优化设计及性能分析研究[D].河北工业大学, 2011.
- [7] 乃瞬峰, 章争荣, 程永奇等.构件设计对伺服压力机三角肘杆传动机构动力的影响[J].金属铸锻焊技术,2012,41(13):110~112.
- [8] Tank E. Transmission angle in compliant slider-crank mechanism[J]. Mechanism and Machine Theory. 2011, 46(11): 1623~1632.
- [9] Azimi Olyaei A, Ghazavi M R. Stabilizing slider-crank mechanism with clearance joints[J]. Mechanism and Machine Theory. 2012, 53(0): 17~29.
- [10] Zheng Enlai, Zhou Xinlong. Modeling and simulation of flexible slider-crank mechanism with clearance for a closed high speed press system[J]. Mechanism and Machine Theory. 2014, 74(0): 10~30.
- [11] 苏 敏, 王隆太.几种伺服压力机传动结构方案的分析与比较[J].锻压装备与制造技术,2008,43(5):35~38.
- [12] 阮卫平, 胡建国, 孙友松.伺服机械压力机传动方案分析[J].锻压技术, 2010.35(4) :68~71.
- [13] 朱新武, 闻开斌, 任东杰.肘杆式伺服压力机的运动分析[J].锻压装备与制造技术,2011,29(3).

- [14]Osakada K, Mori K, Altan T, et al. Mechanical servo press technology for metal forming [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011,60(2):651~672.
- [15]渠聚鑫, 夏琴香, 龙晓斌等.伺服压力机主传动及其控制技术的研究进展[J].锻压技术, 2014,39(10).
- [16]Endou J. Innovation of press working by servo press [J]. Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, 2008,49(565):100~104.
- [17]Bosga, S.G. and Segura, M. Design and tests of a hybrid servo drive system for a 1000 T mechanical press [C]. Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE, 424~429.
- [18]Wang Zhiyu, Wang Changsong, Qi Xin, et al. Study on Load Torque Identification On-line Based on Vector Control of Saliency PMSMs[J]. Procedia Engineering. 2011, 23(0): 89~94.
- [19]Hroncová D, Binda M, šarga P, et al. Kinematical Analysis of Crank Slider Mechanism Using MSC Adams/View[J]. Procedia Engineering. 2012, 48(0): 213~222.
- [20]周洋, 叶春生, 莫建华.肘杆式伺服压力机运动学仿真与工艺轨迹规划[J].锻压装备与制造技术, 2012,47(3).
- [21]陈磊, 叶春生. 伺服曲柄压力机机电系统仿真研究[J]锻压技术,2014,39(9).
- [22]孟强伟, 叶春生, 莫健华等.基于 Matlab/Simulink 的肘式伺服压力机动力学仿真 [J].锻压装备与制造技术,2012,22(4).
- [23]Song Qingyu, Guo Baofeng, Li Jian. Drawing motion profile planning and optimizing for heavy servo press[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, (69): 9~12.
- [24]叶春生, 莫健华, 樊自田等.曲柄连杆伺服压力机控制模型的研究与系统实现[J]. 锻压装备与制造技术, 2009,5:53~56.
- [25]苏健勇. 基于磁链观测器的永磁同步电动机无传感器控制技术研究[D].哈尔滨工业大学, 2009.

- [26]朱宏伟.表贴式永磁同步电动机电感和驱动控制策略的研究[D].哈尔滨工业大学.2008.
- [27]唐任远.现代永磁电机理论与设计[M].机械工业出版社, 1997.
- [28]许振伟.永磁交流伺服系统及其控制策略研究[D].浙江大学, 2003.
- [29]陈荣.永磁同步电机控制系统[M].中国水利水电出版社, 2009.
- [30]牛红海.永磁同步电动机控制系统及控制方法研究[J].浙江大学,2006(5):3~7.
- [31]Sergey Edward Lyshevskh. Nonlinear control of servo-systems actuated by permanent magnet synchronous motors[J]. Automation, 1998, 34(10): 1231~1238.
- [32]C. J. Khoh, K. K. Tan. Adaptive robust control for servo manipulators[J].Neural Comput&Applic, 2003, (12): 178184.
- [33]陈先锋.PMSM 位置伺服系统的分析设计及其应用研究[D].南京工业大学, 2005.
- [34]Sabanovic-Behlilovic, N.Sabanovic, A.Jezernik. Current control in three-phase switching converters and AC electrical machines. Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1994, 1(9): 581~586.
- [35]刘英培.PMSM 直接转矩控制方法及实验研究[D].天津大学, 2010.
- [36]孙友松, 周先辉, 黎勉等.交流伺服压力机及其关键技术 [J].锻压技术, 2008,33(4):1~8.
- [37]王昆. 伺服冲压工艺曲线优化建模及数值仿真研究[D].上海交通大学, 2011.
- [38]沙心勇, 殷文齐, 李建等.伺服压力机柔性加减速控制算法[J].设计与计算, 2014(2):30~32.
- [39]Wang Xingsong, Ma Qing, Zhu Zhidan. Low Noise of Servo Press[J]. Industrial Electronics Society,2007, 833~838.
- [40]鹿新建, 柯尊芒, 朱思洪等.多连杆高速压力机滑块运动曲线研究[J].锻压技术, 2010,35(4):90~94.
- [41]周晓阳.数学实验与 Matlab.[M],华中科技大学出版社, 2001.
- [42]李红.数值分析[M].华中科技大学出版社, 2010.
- [43]张玲.基于三次样条曲线拟合公路平面线性方法研究[J].武汉理工大学, 2007.

- [44]陈岳云,郭为忠,高峰.基于 NURBS 曲线的伺服压力机冲压过程建模与加工工艺轨迹规划[J].上海交通大学学报, 2009,43(1).
- [45]胡启旭.关于三次样条 I 型插值可拓边界问题求解[J].武汉工业大学学报, 2000 (2) :76~79.
- [46]Tokuz L.C., Serdar Uyan. Modeling, simulation and control of four- bar mechanism with a brushless servo motor[J] . Mechatronics, 1997, 7(4): 369~383.
- [47]许小勇, 钟太勇.三次样条插值函数的构造与 Matlab 实现[J].兵工自动化, 2006,25(11):76~78.
- [48]邢丽.三次样条插值端点约束条件的构造与 Matlab 实现[J].上海第二工业大学学报, 2012,29(4):319~323.

附录 1 攻读硕士期间发表的论文

- [1] 俞伟洋，叶春生. 基于 MATLAB 的四连杆伺服压力机控制求解[J].锻压技术（录用待发表）