

分类号_____

密级_____

UDC _____

编号_____

中国科学院研究生院

硕士学位论文

波浪能独立稳定发电控制系统研究

张 峰

指导教师 吴必军 副研究员 博士 中国科学院广州能源研究所

郑永红 研究员 博士 中国科学院广州能源研究所

申请学位级别 硕士 学科专业名称 流体机械及工程

论文提交日期 2006.6 论文答辩日期 2006.6

培养单位 中国科学院广州能源研究所

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 _____

摘 要

采用蓄能稳压方式把不稳定波浪能变成稳定的能量输出是一种非常有创意性的设想，建立在蓄能稳压系统上的自动控制系统是实现能量平稳输出的关键。为了研究波浪能独立稳定发电系统的控制特性，本文根据蓄能稳压的特点，从实物仿真和计算机仿真两方面对自动控制系统进行了研究，并针对真实系统经常存在的安全性、有效性问题，设计了负载智能配置系统。

实物仿真方面，本文基于蓄能稳压系统建立了自动控制系统：设计了仿真系统的控制接口图，选用了合适的控制元件；采用 PID 控制算法，编写了 VB 控制软件；在不同输入方式下，对实物仿真系统做了实验研究。计算机仿真方面，本文根据硬件设备的物理特性，建立了实物仿真系统的数学模型和 SimuLink 模型，并采用单神经元 PID 控制算法对 SimuLink 模型做了计算机仿真。此外，负载智能配置系统方面，本文叙述了其设计思想和实现方法，并给出了实海况试验结果。

仿真系统的实验研究和 SimuLink 模型的计算机仿真都取得了满意的控制效果，其设计思想已应用于真实系统的设计。负载智能配置系统已应用于真实系统中，实海况试验结果表明，该系统能使用电设备避免起始峰值电压可能造成的破坏，并减少能量的无用损失，确保真实系统安全有效运行。

关键词：波浪能；仿真；蓄能稳压；单神经元 PID；负载控制

ABSTRACT

ZhangFeng (Fluid Machinery and Engineering)

Directed by Wu BiJun, Zheng YongHong

It is pretty creative to transform unstable wave energy to stable power for output by hydraulic accumulation method. In order to research the controlling properties of the system which generates independent-stable power based on wave energy, this paper emulates the real system according to the tentative plan of hydraulic accumulation in both software and hardware, moreover, the load system of intelligent configuration is designed for the real system.

As for the emulation of hardware, the paper sets up a control system based on hydraulic accumulation equipments. When it comes to the simulation of software, the paper sets up the math modules and the SimuLink modules of the systems above according to the properties of hardware, meanwhile, the paper adopts the single neural adaptive PID algorithm to simulate the SimuLink modules on the computer. As for the load system of intelligent configuration, an idea of design and the realization method is put forward in the paper.

The research of the simulation system and the computer-simulating of SimuLink module performs a satisfying result of controlling, and the idea about the controlling system has applied on the real system. Furthermore, the load system of intelligent configuration avoids the impact which peak voltage brings to the electro-equipments when the real system starts to work, and reduces useless power consuming, therefore, the load system could ensure the real system worked safely and effectively.

Key word: wave energy; simulation; hydraulic accumulation; single neural adaptive PID; load control

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 引 言	1
1.2 波浪能装置工作原理	1
1.3 波浪能装置发电输出技术研究现状	3
1.4 论文选题的背景和目的	4
1.5 本文主要工作	5
第 2 章 仿真系统自动控制原理与设计	7
2.1 仿真系统原理与组成	7
2.1.1 仿真系统原理	7
2.1.2 结构组成	7
2.1.3 变频调速原理	9
2.2 计算机控制子系统设计	10
2.2.1 设计目标	10
2.2.2 设计方案	10
2.2.3 工作原理	11
2.2.4 硬件组成	12
2.2.5 测量参数的处理	14
2.3 仿真系统的控制算法	16
2.3.1 反馈控制原理	16
2.3.2 PID 控制原理	16
2.3.3 数字 PID 控制算法	17
2.4 软件设计	20
2.5 本章小结	22
第 3 章 计算机仿真的模型	23
3.1 能量输入子系统	23
3.1.1 数学模型	23
3.1.2 SimuLink 模型	25
3.2 蓄能稳压子系统	26
3.2.1 数学模型	26
3.2.2 SimuLink 模型	28
3.3 发电输出子系统	28

3.3.1 数学模型.....	28
3.3.2 SimuLink 模型.....	30
3.4 系统的模型.....	30
3.4.1 数学模型.....	30
3.4.2 SimuLink 模型.....	31
3.5 计算机仿真的控制算法.....	31
3.5.1 单神经元模型.....	32
3.5.2 神经网络的学习规则.....	32
3.5.3 单神经元 PID 控制算法	33
3.5.4 单神经元比例系数 K 的修正	35
3.6 本章小结.....	36
第 4 章 SIMULINK 仿真与实验研究	37
4.1 SIMULINK 仿真	37
4.1.1 参数取值.....	37
4.1.2 仿真曲线.....	38
4.2 仿真系统的实验研究.....	42
4.3 本章小结.....	46
第 5 章 负载控制的设计和实现	47
5.1 负载控制设计思想.....	47
5.2 负载智能配置系统组成原理.....	48
5.3 试验结果.....	49
5.4 本章小结.....	51
第 6 章 总结与展望	53
6.1 总 结	53
6.2 问题与展望.....	53
参考文献	55
致 谢	59
硕士期间发表论文	60

第1章 绪论

1.1 引言

能源问题与人们日常生活、环境、经济发展和人类的未来密切相关。随着矿物燃料（如煤、石油、天然气等）的日趋枯竭及全球环境的日益恶化，可再生能源的开发利用不断受到世界各国的关注和重视。从经济技术的可行性和可持续发展的角度考虑，可再生能源的开发利用具有重要战略意义。

海洋波浪能是一种可再生能源，它具有资源分布广、能量密度大、无污染等优点^[1,2,3]，吸引着许多国家的科学家和工程人员去研究开发。经过科研人员多年的努力，有些小型波力装置已小规模化生产，有几座大型波力装置已开始商业化运行，现阶段发电是波浪能开发利用的主要形式。

1.2 波浪能装置工作原理

关于波浪能发电的设想极多，其装置千变万化，但波浪能装置一般包括两部分：能量吸收系统和能量转换系统，先由能量吸收系统吸收波浪能，再通过能量转换系统将波浪能转换成电能输出^[5-8]。下面介绍五种研究最多的波浪能装置的工作原理。

1. 振荡水柱式（OWC）

振荡水柱波浪能装置通常指采用气室俘获波浪能的装置。气室是一个下方开口的结构，当波浪作用在开口时，气室内的水柱就会上下运动（振荡水柱因此而得名），从而俘获波浪的能量。典型的振荡水柱技术由气室、空气叶轮、发电机构成，振荡水柱推动气室内空气往复运动，通过叶轮，驱动发电机发电。目前，世界上大部分波浪能装置采用的是振荡水柱技术^[2-9]。

2. 摆式（Pendulum）

摆式波浪能装置通过摆体来俘获波浪能。在波浪的作用下，摆体作前后或上下摆动，将波浪能转换成摆轴的动能。与摆轴相联的通常是液压装置，它将摆的动能转换成液力泵的动能，再带动发电机发电。摆体的运动很适合波浪大推力和低频的特性。因此，摆式装置的转换效率较高，但机械和液压机构的维护较为困难。摆式装置的另一优点是可以方便地与相位控制技术相结合。相位控制技术可

以使波能装置吸收到装置迎波宽度以外的波浪能，从而大大提高装置的效率^[2,7]。

3. 阀式(Raft)

阀式波浪能装置通过漂浮在水面的、类似木筏的、端部铰接的若干浮体俘获波浪能，再通过液压系统驱动发电机发电。阀式装置只能利用每节浮体之间的角位移吸收波浪能。因此，对于不能引起较大的角位移的波浪，该装置的效率就很低了。另外，液压系统的阻尼也是影响装置效率重要参数。当阻尼太大时，装置太硬，浮体间角位移太小，无法有效吸收波浪能；反之，当阻尼太小时，装置太软，浮体间角位移虽大，转换成的液压能却不多，也不能有效吸收波浪能。液压系统的最佳阻尼与波高有关。因此，阀式装置通常只在某一个设计波况附近有较高的转换效率。另外，阀式装置沿波浪传递方向放置，即便是在设计波况下，其单位体积下俘获波浪能的能力不强。其优点是具有较好的整体性，抗波浪冲击力较强；采用液压方式传递能量，具有较好的能量传递效率；采用了能量缓冲器，发电稳定性较好^[2]。

4. 聚波水库式(Tapchan)

聚波水库式（又称收缩坡道式）波浪能装置利用喇叭型的收缩坡道来俘获波浪能。坡道与海连通的一面开口宽，然后逐渐收缩通至贮水库。波浪在逐渐变窄的坡道中，波高不断地被放大，直至波峰溢过导浪墙，将波浪能转换成势能贮存在贮水库中。收缩波道具有聚波器和转能器的双重作用。水库与外海间的水头落差可达 3-8m，进入水库的水的势能通过水轮发电机转换成电能。聚波水库式波浪能装置的优点是一级转换没有活动部件，可靠性好，维护费用低，系统出力稳定。不足之处是电站建造对地形有要求，不易推广^[4-6]。

5. 振荡浮子式(Buoy)

振荡浮子式波浪能装置近年来发展最为活跃。该类装置采用浮子俘获波浪能，通过与浮子连接的液压装置或机械装置将波浪能转换成某种的机械能，再通过发电机转换成电能，或通过其它设备制造淡水或冰。振荡浮子技术发展迅速的原因是：相对于其它俘获波浪能的系统，振荡浮子制造最为简单；可以采用液压系统或机械系统传递能量，效率比振荡水柱装置高；采用液压系统，能量容易汇集，形成大规模发电系统；采用液压系统，可以发电，也可以输出非电力的动力，实现一机多用^[2,9]。

1.3 波浪能装置发电输出技术研究现状

波浪能装置的能量来源是不稳定的波浪能,这一特点导致现阶段波浪能利用技术未能使电能输出达到稳定的水平^[19-22]。为了应用这种不稳定的能量,往往采用发电上网的方式,世界上现已建成或在建的波能装置几乎都采用或计划采用这种方式,如表 1-1 中英国的Pelamis波能电站、LIMPET波能电站、澳大利亚的Energetech OWC波能装置、中国的 100KW岸式波能电站等等。

表 1-1 世界各国最新波浪能装置

装置	简介	类别
英国 LIMPET ^[10,11] 波浪能电站	装机容量 500kW, 2000 年建成, 并网供电	振荡水 柱式
澳大利亚 Energetech ^[12,13] 波浪能装置	2005 年 3 月安装机组, 预计年发电量为 500 MWh, 通过 11kV 的电缆同当地的电网相连	振荡水 柱式
苏格兰 Pelamis ^[14,15] 波浪能装置	装置由三个模块组成, 每个模块的装机容量为 250kW, 总装机容量为 750kW, 它是世界上第一座进行商业示范运行的飘浮式波浪能电站, 并网供电	振荡水 柱式
欧洲六国 Wave Dragon ^[16,17] 装置	预计 2006 年投入商业运行, 计划的装机容量为 4MW, 预计电价为 0.11 欧元/kWh, 并网供电	聚波水 库式
爱尔兰 WaveBob ^[10,12] 波浪能装置	2003 年 3 月 Wave-dragon 下水进行组装实验, 从 2003 年 4 月开始, Wave-dragon 进行了为期三年的试验, 预计把电送上岸的电价为 3-5 欧分/kWh	振荡浮 子式
美国 PowerBuoy ^[18] 波浪能装置	单个装置装机容量为 20~50 kW, 多个装置构成的群可满足兆瓦级用户的需求, 预计该装置发电运转成本对于 100MW 规模的电站为 3-4 美分/kWh, 1MW 规模的电站为 7~10 美分/kWh	振荡浮 子式
中国 100kw 岸式 波力电站 ^[23-33]	建于广东汕尾, 2001 年建成, 装置包括气室主体、透平发电机组和输配电控制系统等部分, 采用并网	振荡水 柱式

	供电方式	
中国 100kw 振荡浮子波浪能装置 ^[30,31]	国家“十五”863 项目，装置包括振荡浮子、蓄能稳压装置、发电机及控制系统等，将采用独立供电方式	振荡浮子式

波浪能电站一般建在边远海岸线或海岛上，远离国家电网或地方电网，其输电成本往往很高，对于波能资源贫乏的中国其输电成本更高，制约了波能电站的发展^[9,27]。如果能量能就地供应，形成一个独立的小型波浪发电系统，为小型用户如渔村、守岛部队提供电力，将会大大加快波浪能利用的发展。而电力系统的电压和频率的稳定是保证电能正常供应的两大指标，不同用户对供电的两大指标的要求不同，照明、电阻炉等只要求电压稳定，而电动机等动力设备对电压和频率都要求稳定。因此发展独立的适合用户可直接使用的波浪能稳定发电技术是波浪能走向使用的关键。关于独立运行的波浪能发电的发电系统，国内蒋念东等人进行了一些研究，实验表明，在采用恒负载条件下，负载电压和电流的波动都很大，电压变化范围大约在 55~100V^[25,28,33]之间，电流变化范围大约在 12~24A 之间，远未满足独立稳定运行的要求。到目前为止，世界上没有一座波浪能电站采用独立稳定运行方式，关于波浪能电站独立稳定运行技术有待进一步研究。

1.4 论文选题的背景和目的

近几十年来，世界各国以波浪能装置为对象开展了一系列针对性的研究，在这些研究中，提高效率、降低成本的课题占多数，而对提高波能装置稳定性的研究却反应甚少^[87]。在目前，波能装置工作时的不稳定性，已成为制约波能装置从实验研究向实际应用发展的瓶颈^[2,12]。

中国科学院广州能源研究所海洋能实验室在游亚戈首席科学家的带领下，认识到要加速海洋波浪能的应用进程，必须要研究波浪能装置的独立稳定发电技术，创造性地提出了采用蓄能稳压方式实现波浪稳定发电的设想。

基于这一设想的波浪能独立稳定发电系统的设计是一个全新的方案，未有相关文献提供参考。因此，作为系统在真实环境下进行全面测试的依据，在实物设计前进行相应的仿真研究是非常必要的，基于仿真系统的自动控制系统的的设计是仿真研究的关键问题之一。设计的自动控制系统必须具备保证蓄能稳压系统能量输出的稳定性和安全性、保证电力输出的安全性和有效性等重要功能。

1.5 本文主要工作

本文在国家“863”计划项目、中国科学院知识创新工程项目、广东省科技计划项目的资助下，进行了波浪能装置独立稳定发电控制技术研究，具体内容如下：

1. 波浪能独立稳定发电系统（即真实系统）的自动控制仿真研究：设计了仿真系统的控制接口图，选用了合适的控制元件；采用 PID 控制算法，编写了 VB 控制软件；在不同形式输入方式下，对实物仿真系统做了自动控制实验研究。自动控制实验研究中，根据仿真系统采集的数据，绘制了运行时的功率、电压、压力曲线。

2. 实物仿真系统的计算机仿真研究：根据流体力学、液压传动、电力拖动的基本原理，建立了仿真系统的时域模型和相应的 SimuLink 模型，并采用单神经元 PID 控制算法，在 MATLAB 环境下对仿真系统的 SimuLink 模型做了计算机仿真。

3. 真实系统中负载优化设计：针对独立稳定波浪能电站经常存在的发电间歇性和冲击性特点，在真实系统中引入了负载智能配置系统，该系统采用纯电阻方式作为发电机的基本负载来消除电压尖峰的影响，当电压尖峰过后，系统自动减少或除去基本负载，使电能尽最大可能用在可用负载上。

4. 对全文做出总结和展望。

第2章 仿真系统自动控制原理与设计

2.1 仿真系统原理与组成

2.1.1 仿真系统工作原理

波浪能独立稳定发电系统（真实系统）主要由能量输入子系统、蓄能稳压子系统、发电输出子系统和计算机控制子系统组成，其工作原理如图 2-1 所示。其中，能量输入子系统是通过波浪能吸收装置把波浪能转换为不稳定的液压能；蓄能稳压子系统起到蓄能和稳压的作用；发电输出子系统是把液压能转换为电能输出，它由发电机和负载等组成；计算机控制子系统主要负责系统的调控工作，实现把不稳定的能量输入变成稳定的能量输出。

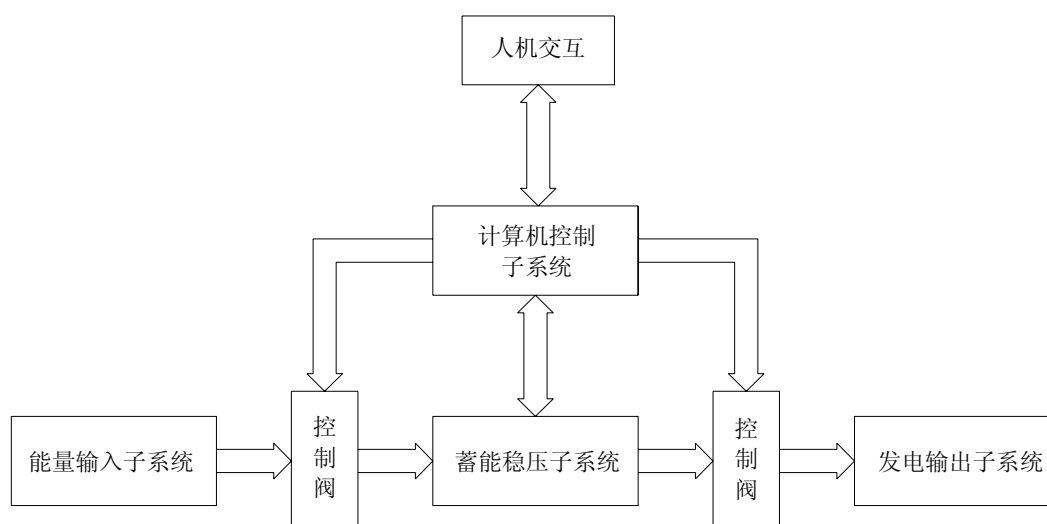


图 2-1 波浪能独立稳定发电系统工作原理图

显然，真实系统的能量来源是不稳定的波浪能。为了模拟不稳定的波浪能输入，能量输入子系统（见图 2-1）可由变频器、电动机及液压泵组成的子系统来代替，其原理为：电动机与液压泵同轴相连，采用变频方式改变电动机的转速，从而改变液压泵的转速，液压泵转速的改变使得泵内油液的压力也随之变化，因此可以得到不稳定的能量输入。此外，实物仿真系统的其它部分（计算机控制子系统、蓄能稳压子系统、发电输出子系统）与真实系统中工作原理几乎一样。

2.1.2 仿真系统结构组成

根据 2.1.1 的仿真原理，实物仿真系统采用图 2-2 的结构。

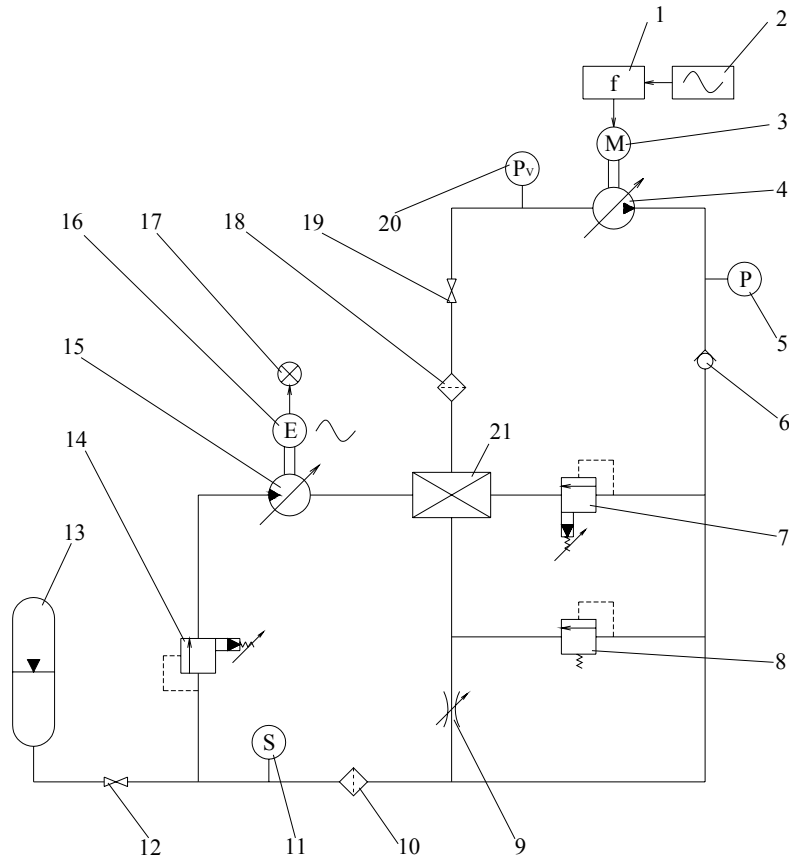


图 2-2 仿真系统结构图

图 2-2 中的数字代表的元器件如下：

1-变频器；	2-交流电源；	3-电动机；
3-液压泵；	5-压力表；	6-单向阀；
7-先导式溢流阀；	8-直动溢流阀；	9-节流阀；
10-精过滤器；	11-压力传感器；	12-截止阀；
13-蓄能器；	13-先导式溢流阀；	15-液压马达；
16-发电机；	17-负载；	18-粗过滤器；
19-截止阀；	20-真空压力表；	21-油箱

该仿真系统的工作流程是：电动机（3）运转时，通过变频器（1）改变供电电源（2）的频率，使得电动机（3）的转速改变，从而模拟系统输入的不稳定波浪能；液压泵（4）在电动机（3）的驱动下运行，抽取油箱（21）中的工质（液压油）经单向阀（6）、精过滤器（10）注入蓄能器（13）或经过先导式电磁溢流阀（14）流经液压马达（15），液压马达（15）带动发电机（16）发电。电动机

(3) 驱动液压泵(4)所输入的能量为输入能量,当输入能量的平均值和发电机负载(17)消耗的能量相当时,输入能量在蓄能器的调节下,使流经液压马达(15)的能量基本保持稳定,且在液压马达(15)正常工作输出的能量范围之内,系统实现连续稳定发电。当输入能量的平均值不能保证发电机负载(17)的额定输出能量时,先导式电磁溢流阀(14)关闭,液压马达(15)停止工作,液压泵(4)输入的能量全部进入蓄能器(13),这样使得蓄能器(13)中的能量连续增加。当能量增加到某一设定值时,先导式电磁溢流阀(14)又打开,液压马达(15)以设定的流量输出,带动发电机(16)发电,在液压马达(15)工作过程中,蓄能器(13)中的能量将减少,最后达到某一设定值,先导式电磁溢流阀(14)又关闭,液压泵(4)又对蓄能器(13)补充能量,往复对蓄能器(13)进行充放能量,系统实现 0-1 发电方式。当输入能量很大而负载(17)消耗的能量一定时,在液压泵(4)的作用下,进入蓄能器(13)的平均能量大于流出蓄能器的能量而使蓄能器的能量增加到某设定值,节流阀(9)打开,溢流部分能量。当蓄能器(13)中的能量因溢流而减少到某一设定值时,节流阀(9)关闭,此种状态下,系统连续稳定发电,输入的能量有一定损失。设计节流阀管路一方面对系统有保护作用,另一方面不至于损失过多的能量。

参考图 2-1、2-2,在仿真系统中,变频器(1)、交流电源(2)、电动机(3)构成能量输入子系统,液压马达(15)、发电机(16)、负载(17)构成发电输出子系统,而其余元件:液压泵(4)、压力表(5)、单向阀(6)...油箱(21)则构成蓄能稳压子系统。系统中的工质(液压油)是能量的载体,系统输入输出能量的大小与液压回路的工作压力和流量有关。在仿真系统中,为确保工作安全,设计了直动溢流阀(8)的管路,当节流阀不能有效保护系统时,直动溢流阀(8)自动打开,实现对仿真系统的最高级别的保护;另外设计了先导式电磁溢流阀(7)的管路,以便在不需要系统工作时,用来快速卸荷。压力表(5)、真空压力表(20)、压力传感器(11)用来监测各段管路的压力。

2.1.3 电动机变频调速的原理

电动机的转速公式:

$$n = n_1(1-s) = \frac{60f(1-s)}{p}$$

式中

n -电动机转速

n_1 -电动机旋转磁场的转速

从式(2-1)可以看出,要改变电动机的转速,可从下列三个方面着手:

- 1) 改变电动机所接电源的频率 f 以改变 n_1 , 称变频调速;
- 2) 改变电动机定子绕组的磁极对数 p , 以改变定子旋转磁场的转速 n_1 , 称变极调速;
- 3) 改变电动机的转差率 s 。

在上述三种调速方式中,变频调速特性基本保持了异步电动机固有特性转差率小的特点,具有效率高、范围宽、精度高、可实现无级调速(只要 f_1 是连续可调),是仿真系统中最理想的调速方式^[37-39]。

2.2 计算机控制子系统设计

2.2.1 设计目标

1) 能量不稳定输入。因为通过工质(液压油)输入的能量同蓄能稳压系统的压力、液压泵的排量、电动机的转速有关,所以拟采用手动/自动方式控制电动机的电力频率以改变电动机转速,实现不稳定能量输入的仿真;

2) 蓄能稳压子系统内的压力不是恒压,系统压力会随着输入能量的不同而变化,为了确保能量稳定输出必须对液压马达的排量进行控制;

3) 为了研究系统的控制特性,仿真系统不考虑随机负载对系统控制的影响;

4) 系统的保护和能量损失的最小化。要求实验装置储存的能量在超过设计的容量时必须快速释放能量,且释放能量不能对系统造成破坏性冲击;当系统能量通过溢流达到安全状态时,溢流工作自动结束;

5) 实现 0-1 发电方式。当来波能量小于液压马达最低稳定能量输出时,要实现时断时续的能量输出方式,以优化能量输出质量,减少能量的损失;

6) 蓄能量和工作压力的监视;

7) 具备多种辅助功能,比如声光报警、数据采集等;

2.2.2 设计方案

计算机控制子系统主要负责两方面的工作:一方面测量(采集)系统的压力、流量、输出电压、变频器频率等数据,另一方面根据测得的数据发出控制信号控制蓄能稳压子系统的运行。根据波浪能转换要求把不稳定的能量输入变成稳定的

能量输出和蓄能稳压的特点,本文设计的计算机控制子系统采用负反馈闭环控制方案,方框图如图 2-5 所示。在控制子系统中,发电机电压为控制量,液压马达的开度(变量)为操作量,整个波浪能独立稳定发电系统的协调工作由计算机控制子系统来完成。

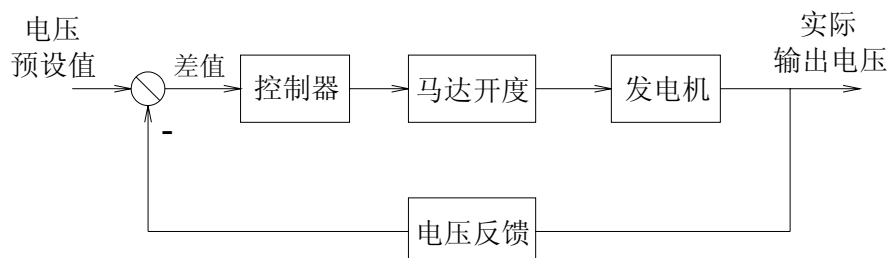


图 2-2 控制方案示意图

2.2.3 工作原理

根据 2.2.2 的方案,进一步设计得到计算机控制子系统工作原理图(见图 2-3)。为了模拟真实系统在各种条件下的反映,记录系统的运行状态,保护系统稳定运行,计算机控制子系统使用了三种信号,分别是模拟量采集信号、输出的数字信号、开关信号(分别对应于采集控制卡的 A/D、D/A、I/O 接口)。其中,模拟量采集信号是控制子系统采集的参数(经 A/D 接口采集进来),输出的数字信号是计算机发出的数字调节增量(从 D/A 接口发送出去),开关信号是计算机接受/发出的 0-1 指令(从 I/O 接口接受/发送)。

系统工作时,电动机的电源频率、液压管路的压力、流量等参数,通过传感器及相应的变送器变换成统一的模拟量采集信号,送到采集控制卡的 A/D 接口,计算机通过时钟时间控制,定时采集这些模拟量采集信号,然后对其进行换算、存储,并将发电机输出电压的模拟量采集信号与预设参数进行比较,通过控制算法(详见 2.3 节)运算得到液压马达阀门的开度(数字信号),将该数字信号送到 D/A 变换器变换成连续的模拟量,通过模拟量来控制液压马达的阀门开度,以达到稳定发电的目的;当蓄能稳压子系统内部压力高于系统预设压力时,计算机发送开关信号给节流阀,节流阀按预先设定的流量工作。

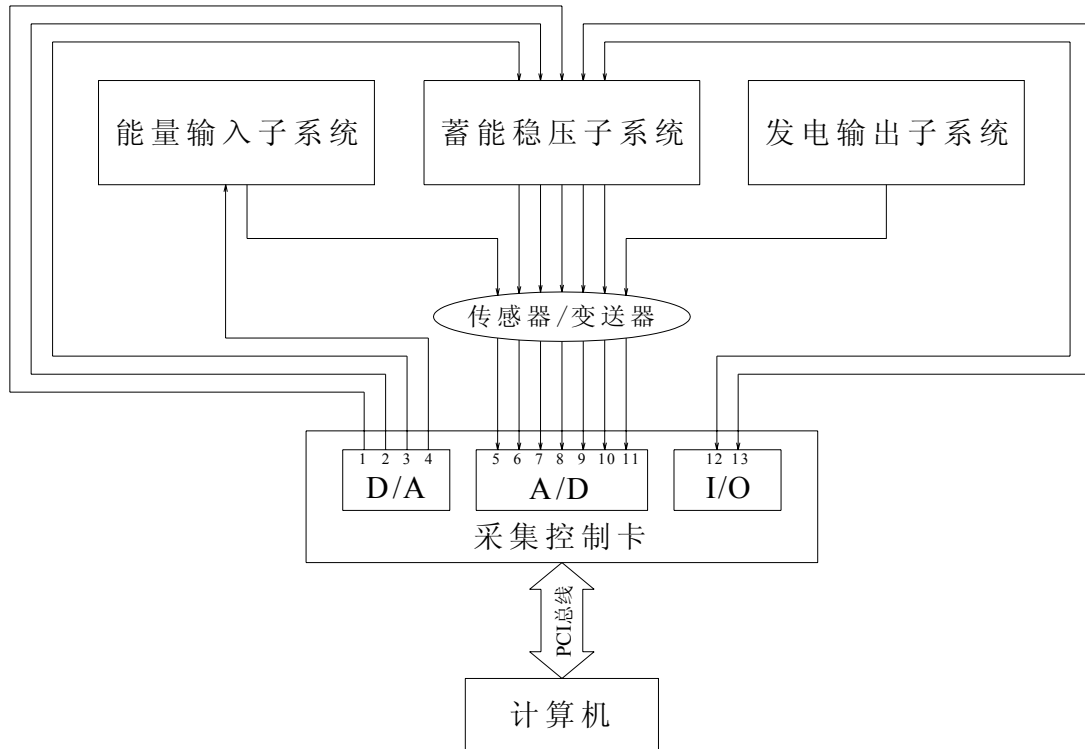


图 2-3 计算机控制子系统工作原理图

图 2-3 中各路电信号的含义如下：

- 1-液压泵数字信号
- 2-变频器数字信号
- 3-节流阀数字信号
- 3-液压马达数字信号
- 5-变频器频率模拟量采集信号
- 6-电动机转速模拟量采集信号
- 7-液压泵控制电压模拟量采集信号
- 8-压力传感器模拟量采集信号
- 9-蓄能器储油量模拟量采集信号
- 10-液压马达控制电压模拟量采集信号
- 11-发电机输出电压模拟量采集信号
- 12-液压泵开关信号
- 13-先导式溢流阀开关信号

2.2.4 硬件组成

计算机控制子系统采用计算机（通用 PC 机）与采集控制卡组成的主从式结

构，主要硬件包括计算机、控制采集卡、传感器/变送器等。

1. 计算机

计算机是控制核心，由它来协调、控制各元件的工作，主要完成如下工作：

- 1) 人机界面管理，实现人机对话，完成控制参数预设；
- 2) 对采集的数据进行分析处理；
- 3) 根据蓄能器的当前容量状态，及时调整控制量的大小和开关量的状态；
- 4) 与系统中的配套电子仪器进行通讯，如与智能电参数测试仪进行电通讯；
- 5) 数据记录。系统记录的参量中，有些可以直接记录，有些要通过换算得到；

基于主从式结构考虑，系统选用普通 IBM 兼容 PC 作控制计算机，它主要具有如下优点：

- 1) PC 机结构简单，容易扩充采集控制硬件；
- 2) PC 机为 VB/VC 等软件开发平台提供了良好的支撑环境，开发出的控制软件具有良好的可扩充性和通用性，控制算法实现方便；
- 4) 易于实现人机界面的设计、信息的动态显示和控制参数的设定；
- 5) 安装容易、运行可靠、成本低，

2. 采集控制卡

采集控制卡选用瑞博华AD7214 型板卡^[51]。该板卡参照IBM-PC机的PCI总线技术标准设计，在一块印刷电路板上集成了多路开关、程控放大器、采样保持器、A/D和D/A转换器等器件，使用时只需将板卡插入IBM-PC机主板上的PCI总线插槽即可；板卡还提供了完善的WIN98/2000/NT/XP驱动程序，采用动态链接库的方式，使用起来方便、快捷。AD7214 的性能指标如下：

1) A/D 的性能指标：

- ① A/D 通道数：单端方式 32 通道，双端方式 16 通道
- ② 采集实际贯通率：100K/S
- ③ A/D 输入电压范围：-5V 到+5V 或 0—10V
- ④ 输入阻抗：10 兆欧

2) D/A 性能指标：

- ① 通道数：4 路独立输出
- ② 输出方式：电压输出，-5V—+5V 或 0—10V

3) 开关量 (I/O) 指标：

① 24 路数字量输入

② 8 路数字量输出,复位清零功能

3. 传感器

各种传感器/变送器完成压力、流量、蓄能器工质重量等参数的测量工作并将其转化为模拟量电信号送到采集控制卡（AD7214）的 A/D 接口。选用的各传感器为：

- (1) 压力传感器^[52]（朝辉PT124B型）
- (2) 流量传感器^[53]（精信LWGY-DN25A型）
- (3) 称重传感器^[54]（威斯特CYB-602 型）
- (4) 电压变送器（自制）

2.2.5 测量参数的处理

1. 参数换算

对应于计算机控制子系统的模拟量采集信号，计算机记录的参数有：日期、运行时间、蓄能器内液压油的体积、电动机的转速、液压管路的工作压力、发电机的输出线电压、仿真系统的输入功率和输出功率等。在这些参数中，有些可以直接记录，有些要通过换算得到，下面对一些要换算的参数进行说明。

(1) 电动机转速

设电动机驱动电源的频率为 f ，电动机的磁极对数为 p ，那么电动机的正常运转转速 n_e 为：

$$n_e = (1-s) \frac{f}{p} \quad (2-1)$$

n_e 的单位为转/秒， s 为转差率，一般取 $0 \sim 0.03$ （通过测量比较，在仿真系统中， s 取 0 时计算值与测量值符合较好）。

(2) 输入功率

电动机与液压泵同轴相连，设液压泵的排量为 V_p ，泵前压力为 P_0 ，泵后压力为 P ，那么泵前后的压力差 $\Delta P = P - P_0$ ，因为 $P \gg P_0$ ，所以 $\Delta P \approx P$ ，那么由液压泵输入的功率^[56]

$$P_{in} = Q \cdot \Delta P = (1-s) \frac{f V_p P}{p} \quad (2-2)$$

(3) 输出功率

在仿真系统中采用电阻丝作为负载, 其消耗的功率为

$$P_{out} = \frac{U^2}{R} \quad (2-3)$$

其中:

U ——线电压

R ——每相负载阻值

2. 标度变换

要使得计算机控制子系统对整个发电系统运行进行安全监控, 首先要求计算机对运行过程中的各个测量参数进行定时测量和检查, 发现参数超过上下限时, 自动进行声光报警, 这就是巡回检测。控制子系统测量参数比如压力、流量、电压等的量纲和数值尽管各不相同, 但它们经模拟输入通道采集后得到的却是 000~FFFH (12 位 ADC) 的数字信号, 而控制子系统的检测、监控装置一般都要求按测量参量的工程单位进行显示、打印或记录、报警, 因此作为数据处理的最后一项任务。还必须把经过前述各步处理后的数字信号转换成带有不同工程单位的测量值, 这项工作一般称为标度变换。

线性仪表的标度变换公式为

$$A_x = A_0 + (A_m - A_0) \frac{N_x - N_0}{N_m - N_0} \quad (2-4)$$

式中:

A_x ——实际测量值;

A_0 ——一次测量仪表的下限;

A_m ——一次测量仪表的上限;

N_0 ——仪表下限所对应的数字量;

N_m ——仪表上限所对应的数字量;

N_x ——测量值所对应的数字量。

其中 A_0 、 A_m 、 N_0 、 N_m 对于某一确定的测量参数而言是常数。对不同的参数则有不同的值。为简化标度变换程序, 通常把测量参数的起点 A_0 (输入信号为 0)

所对应的 A/D 转换后的数字量定为 0，即 $N_0 = 0$ ，则上式可简化为

$$A_x = A_0 + (A_m - A_0) \frac{N_x}{N_m} \quad (2-5)$$

2.3 仿真系统的控制算法

仿真系统工作时，是由计算机发出数字信号来调节液压马达的阀门开度，从而使得发电输出子系统稳定发电。该数字信号即液压马达阀门开度（数字量），是通过一定的控制算法运算得出的。在本节中，将介绍仿真系统用到的控制算法。

2.3.1 反馈控制原理

在控制系统中，被控对象的输出量（即被控量）是要求严格加以控制的物理量，它可以要求保持为某一恒定值，例如压力、流量、重量等，也可以要求按照某个给定规律运行，例如飞行航迹、记录曲线等；而控制器则是对被控对象施加控制作用的机构的总体，它可以采用不同的原理和方式对被控对象进行控制，但最基本的一种是基于反馈控制原理组成的反馈控制系统。在反馈控制系统中，控制器对被控对象施加的控制作用，是取自被控对象的反馈信号，用来不断修正被控量的偏差，从而实现对被控对象进行控制的任务^[58,59]。

本系统采用的就是基于反馈的控制算法，其反馈原理为：计算机控制子系统测得发电机输出电压的反馈信号，把反馈信号与预设值相比较得出偏差值，在偏差值基础上通过控制算法计算出马达的开度（数字量），并把该数字量传送给马达，使得马达按照该数字量的开度运行。

2.3.2 PID 控制原理

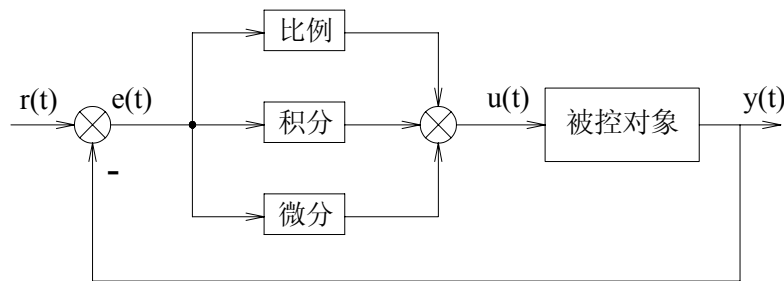


图 2-4 PID 控制原理图

PID 控制是按照偏差的比例 (Proportional)、积分 (Integral)、微分 (Derivative) 通过线性组合计算被控量，对被控对象进行控制。PID 控制算法的模拟表达式为：

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt}] \quad (2-6)$$

式中：

$u(t)$ -控制器的输出信号；

$e(t)$ -偏差信号；

K_p -比例系数；

T_I -积分时间常数；

T_D -微分时间常数；

PID控制器各校正环节的作用如下^[60]：

1. 比例环节：即时成比例地反映控制系统的偏差信号 $e(t)$ ，偏差一旦产生，控制器立即产生控制作用，以减小偏差。
2. 积分环节：主要用于消除静差，提高系统的无差度。积分作用的强弱取决于积分时间常数 T_I ， T_I 越大，积分作用越弱，反之则越强。
3. 微分环节：能反映偏差信号的变化趋势（变化速率），并能在偏差信号值变得太大之前，在系统中引入一个有效的早期修正信号，从而加快系统的动作速度，减少调节时间。

2.3.3 数字 PID 控制算法

计算机控制子系统是一种采样控制系统，它只能根据采样时刻的偏差值计算被控量，因此，式（2-6）中的积分项和微分项不能直接使用，需要进行离散化处理，就得到了数字PID控制算法^[60,61]。数字式PID控制算法通常分为位置式PID控制算法和增量式PID控制算法。

1. 位置式 PID 控制算法

为了使计算机控制子系统按照（2-6）式实现，必须将其离散化，即用离散的差分方程来代替连续系统的微分方程。

连续的时间离散化，得：

$$t = kT \quad (k = 0, 1, 2, \dots, n)$$

积分用累加求和近似得：

$$\int_0^t e(t) dt \approx T \sum_{j=0}^k e(jT) = T \sum_{j=0}^k e(j) \quad (2-7)$$

微分用一阶后向差分近似得：

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} = \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (2-8)$$

将式 (2-7) 和式 (2-8) 代入式 (2-6)，可得到离散的 PID 表达式：

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (2-9)$$

其中：

T —— 采样周期；

k —— 采样序号， $k = 0, 1, 2, \dots, n$ ；

$e(k)$ —— 第 k 次采样时刻的偏差值；

$e(k-1)$ —— 第 $k-1$ 次采样时刻的偏差值；

$u(k)$ —— 第 k 次采样时刻的计算机输出值。

令积分系数

$$K_I = \frac{K_p T}{T_I}$$

又令微分系数

$$K_D = \frac{K_p T_D}{T}$$

则得到

$$u(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (2-10)$$

在上述离散化过程中，如果采样周期 T 足够小，可以很好地逼近 PID 控制的模拟表达式。为了书写方便，将 $e(kT)$ 简写成 $e(k)$ 。采用计算机的输出值 $u(k)$ 直接去控制执行机构（如阀门）， $u(k)$ 与执行机构的位置（如阀门开度）是一一对应的，所以通常把式 (2-9) 或式 (2-10) 称为位置式 PID 控制算法，原理图参考图 3-2。

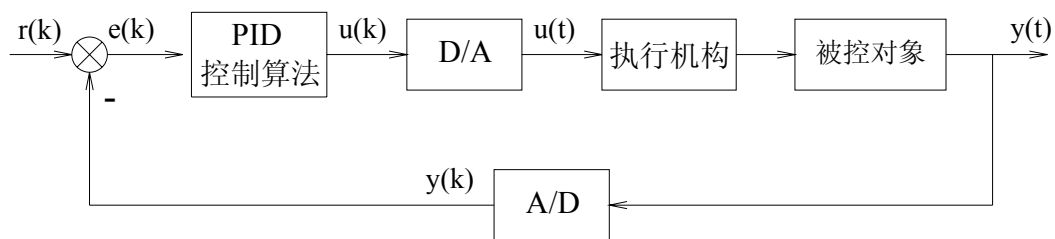


图 2-5 位置式 PID 控制系统原理图

2. 增量式 PID 控制算法

从式 (2-10) 可以看出，计算机每次的输出值 $u(k)$ 与过去的所有状态有关，要想计算 $u(k)$ ，不仅涉及 $e(k)$ 和 $e(k-1)$ ，而且要对 $e(j)$ 进行累加，计算机运算量大。此外，因为对应的是执行机构的实际位置，一旦计算机出现故障使得出现大幅度变化，会导致执行机构的位置的大幅度变化，这对系统稳定运行很不利，因而产生了增量式 PID 控制算法。

根据式 (2-9)，可得第 $k-1$ 次采样时刻的计算机输出值：

$$u(k-1) = K_p \left\{ e(k-1) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k-1) - e(k-2)] \right\} \quad (2-11)$$

用式 (2-9) 减式 (2-11)，整理得：

$$\Delta u = u(k) - u(k-1) = K_p \Delta e(k) + K_I e(k) + K_D \Delta^2 e(k) \quad (2-12)$$

式中

$$K_I = \frac{K_p T}{T_i};$$

$$K_D = \frac{K_p T_D}{T};$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1);$$

$$\Delta^2 e(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)$$

式 (2-12) 中， K_p 、 K_I 、 K_D 都可事先求出，因此，计算机控制时只须获得 $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 和 $e(k-2)$ 三个偏差值就可求出控制量的增量 Δu 。当执行机构需要用 Δu 来进行控制时（如本系统中的液压马达的开度）可按式 (2-12) 来计算。而 Δu 对应于执行机构的位置的增量，所以通常把式 (2-12) 称为增量式 PID 控制算法，仿真系统就采用此算法。

2.4 软件设计

计算机控制软件^[55]分为三部分：操作系统、底层接口程序、上层应用程序。其中，常用的操作系统有微软开发的DOS操作系统、Windows操作系统以及UNIX、Linux操作系统等，Windows操作系统以其丰富的图形用户界面、多任务管理方式等优点得到了广泛应用。本控制系统采用Windows2000 作为操作平台；底层接口程序主要是各种硬件的驱动程序；上层应用程序是采用Visual Basic编写的控制软件。采集控制卡AD7214 的厂商提供了Windows环境下的DLL函数库，可以方便地实现计算机与数据采集控制卡之间的通信和控制。

计算机控制子系统的软件流程图如图 2-6 所示。控制软件主要分为六个部分。

- (1) 初始化：主要包括电源频率输入方式和幅值选择，液压马达开度设置最小，节流阀和电磁阀关闭，控制算法参数选择等；
- (2) 数据采集：采集液压管路压力、流量、发电机输出电压等信号的参数；
- (3) 系统输入、输出功率计算；
- (4) 节流设定；
- (5) 根据控制量电压设定值与测量值的偏差，决定液压马达的开度；
- (6) 信息显示：主要包括实时的泵输入功率、泵转速、发电机输出电压、发电机输出功率等信息显示。

在图 2-6 中，各参数意义如下：

P_{pot} —— 液压管路工作压力，

U —— 发电机输出的线电压（由电参数测试仪测量得到）；

f —— 电动机电源频率；

V_{pot} —— 输入蓄能器内液压油的体积；

P_{in} —— 液压泵的输入功率（通过压力和流量传感器的测量值计算得到）；

P_{out} —— 发电机输出功率（由电参数测试仪测量得到）；

P_{potmax} —— 系统工作的最高压力，系统工作时压力超过这一值计算机控制子系统将启动节流阀节流工质；

α —— 比例系数，其值决定系统的工作压力为某设定值时关闭节流阀；

P_{pots} —— 设置的开启电磁阀的系统压力。

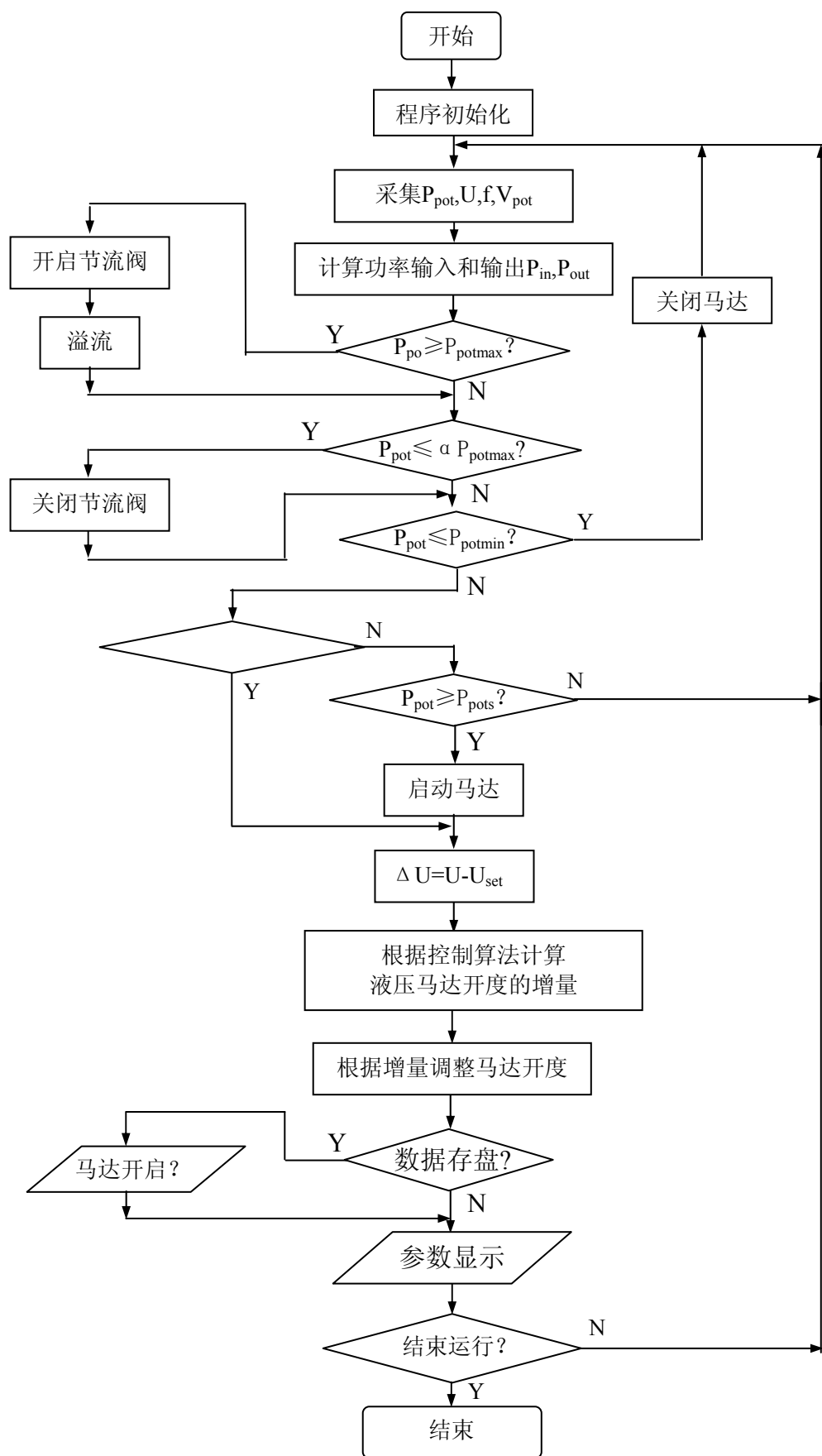


图 2-6 计算机控制软件流程

2.5 本章小结

本章介绍了波浪能独立稳定发电系统的工作原理，并基于蓄能稳压的思想和波浪能的不稳定特性，设计了计算机控制子系统，给出了仿真系统结构图和计算机控制子系统接口图。仿真系统的自动控制原理为：采用变频器控制电动机的转速，从而模拟波浪能的能量输入；采用蓄能稳压子系统把不稳定的能量转换成稳定的能量，确保发电输出子系统平稳运行；所有设备的动作均在计算机控制子系统的控制下完成。文中介绍了计算机控制子系统的测量参数处理方法和控制算法，最后根据设计要求编写了控制软件，给出了软件流程图。

第3章 计算机仿真的模型

建模和计算机仿真是研究系统控制特性的重要方法,而仿真系统的模型须建立在实物设备的物理理论基础之上。为此,本章以液压传动、流体力学、电力拖动的基本理论为基础,建立仿真系统的数学模型,并在此基础上,借助 MATLAB 软件的 SimuLink 工具箱建立仿真系统的 SimuLink 模型。另外,计算机仿真采用的控制器模型(控制算法),也将在本章中得到描述。

3.1 能量输入子系统(变频器——电动机环节)

3.1.1 数学模型

对不稳定能量输入的模拟,是通过对电源进行变频驱动电动机带动泵运转的方式来实现,实际上就是采用变频器对电动机进行变频调速。异步电动机变频调速的动态特性极其复杂,其电磁瞬变过程要比机电过程快得多,本章只研究其机电过程^[72-74]。

1. 变频器

异步电动机采用变频控制方式,变频器的输入电压与电动机的输入电流频率成如下线性关系:

$$f = k \cdot u \quad (3-1)$$

式中:

f ——电动机的输入电流频率

u ——变频器输入电源电压

k ——变频器增益系数

电动机的输入电压(即电动机的定子电压) U_1 与电流频率 f 也成线性关系:

$$U_1 = k_f \cdot f \quad (3-2)$$

式中:

k_f ——变频器到电动机的增益系数;

则电动机输入电压与变频器输入电压的关系为:

$$U_1 = k \cdot k_f \cdot u \quad (3-3)$$

2. 电动机

电动机驱动电源的频率 f 与电动机的同步转速 n_0 存在如下关系：

$$n_0 = \frac{60f}{p} \quad (3-4)$$

式中：

p ——电动机磁极对数

则变频器的增益系数和电动机同步转速的关系为：

$$n_0 = \frac{60k_f u}{p} \quad (3-5)$$

电动机的实际转速 n_1 满足：

$$n_1 = n_0(1-s) \quad (3-6)$$

式中：

s ——转差率

把式 (3-5) 代入式 (3-6)，得到电动机的实际转速方程：

$$n_1 = \frac{60k_f u}{p}(1-s) \quad (3-7)$$

异步电动机的转子电流与旋转磁场相互作用产生电磁力，电磁力驱动转轴转动，从而产生的转动力矩就是电磁转矩。根据异步电动机的工作原理可知，其电磁转矩 T_D 满足：

$$T_D = \frac{3pU_1^2 \frac{R_2'}{s}}{2\pi f [(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (L_1 + L_2')^2]} \quad (3-8)$$

式中：

p ——电动机的磁极对数

U_1 ——定子电压（即电动机的输入电压）

f ——定子电流频率（即电动机的输入电流频率）

s ——电动机转差率

R_1 ——定子绕组的电阻

R_2' ——折算到定子侧的转子电路电阻

L_1 ——定子绕组的漏感抗；

L_2' ——转子旋转时折算到定子侧的转子电路的漏感抗

在稳定运行时，电动机转差率 s 很小， $\frac{R_2'}{s} \gg R_1$ ， $\frac{R_2'}{s} \gg (L_1 + L_2')$ ，(3-8) 式

可简化为：

$$T_D \approx \frac{3pU_1^2 \frac{R_2'}{s}}{2\pi f (\frac{R_2'}{s})^2} = \frac{3pU_1^2 s}{2\pi f R_2'} \quad (3-9)$$

根据 (3-7)、(3-9) 式，可得：

$$T_D \approx \frac{3pU_1^2}{2\pi f R_2'} \left(1 - \frac{n_1}{60k_f u}\right) = \frac{3pU_1^2}{2\pi f R_2'} \left(1 - \frac{n_1 p}{60k_f u}\right) \quad (3-10)$$

再把 (3-1) 式代入上式，得到：

$$T_D \approx \frac{3pk_f^2 ku}{2\pi R_2'} \left(1 - \frac{n_1 p}{60k_f u}\right) = \frac{3pk_f^2 ku}{2\pi R_2'} - \frac{p^2 k_f k n_1}{40\pi R_2'} \quad (3-11)$$

电动机运动的力矩平衡方程为：

$$J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt} = T_D - T_z - T_f - B_t \omega_1 \quad (3-12)$$

式中：

J_1 ——电动机轴上的总转动惯量；

ω_1 ——电动机转子的机械角频率，且 $\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}$ ；

T_z ——电动机轴上的总负载转矩；

T_f ——电动机的非线性摩擦转矩；

B_t ——电动机轴的阻尼系数

3.1.2 SimuLink 模型

根据以上变频器和电动机的数学模型，建立能量输入子系统的 SimuLink 模型如下：

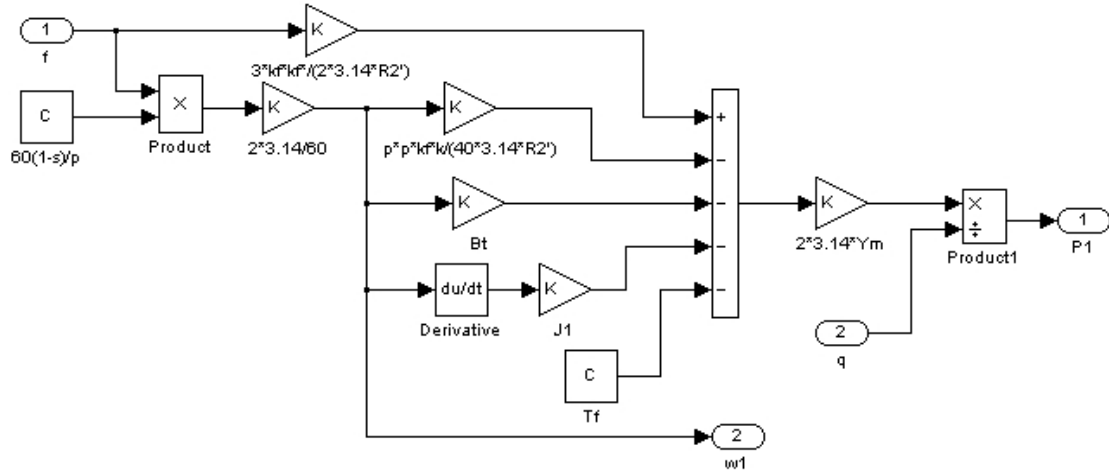


图 3-1 能量输入子系统的 SimuLink 模型

3.2 蓄能稳压子系统（液压泵——蓄能器环节）

3.2.1 数学模型

1. 液压泵

根据液压泵的工作原理，得到泵的流量连续性方程：

$$Q_p = Q_0 - Q_1 - Q_2 \quad (3-13)$$

式中：

Q_p ——泵的实际流量；

Q_0 ——泵的理论流量， $Q_0 = \frac{2\pi \cdot q \cdot n_1}{60}$ （其中 q 为泵的排量），

Q_1 ——泵泄漏的流量， $Q_1 = \frac{c_1 P_1 q}{\mu_1}$ （ c_1 为泵的层流泄漏系数、 P_1 为泵的出口

压力、 μ_1 为油液流动粘滞系数）

Q_2 ——泵内受油液压缩影响产生的流量， $Q_2 = \frac{V_p}{K} \frac{dP_1}{dt}$ （ V 为泵内压油腔的

工作容积、 K 为油液体积弹性模量）

把上述公式代入（8）式得到泵的实际流量连续性方程：

$$Q_p = \frac{2\pi \cdot q \cdot n_1}{60} - \frac{c_1 P_1 q}{\mu_1} - \frac{V_p}{K} \frac{dP_1}{dt} \quad (3-14)$$

泵工作产生的负载力矩为：

$$T_z = \frac{P_1 q}{2\pi \eta_m} \quad (3-15)$$

式中:

η_m ——泵的机械效率

2. 蓄能器

蓄能器是根据力的平衡原理,借助外力,使储存在蓄能器内的油液体积发生变化,从而达到贮存和释放液压能的一种装置。本系统中采用的是充气式蓄能器,蓄能时,在液压泵的作用下,液压油被压入蓄能器中,蓄能器中的气体被压缩,因此油液的压力能转变成蓄能器中气体的压力能;释放能量时,蓄能器中的高压气体体积膨胀,再把蓄能器中油液压入管道,气体的压缩能转变为油液的压力能。对蓄能器建模的理论依据是理想气体状态方程:

$$P_0 V_0^N = P_{\max} V_{\max}^N = P_{\min} V_{\min}^N = \text{常量}$$

其中:

P_0 ——蓄能器的初始压力

V_0 ——压力为 p_0 时,蓄能器内的气体体积

$P_{\max}$ ——蓄能器的最高工作压力

$V_{\max}$ ——最高工作压力下的气体体积

$P_{\min}$ ——使用蓄能器所需维持的最低工作压力

$V_{\min}$ ——最低工作压力下的气体体积

N ——蓄能器中所充气体的多变指数

在本系统建模中,把蓄能器内的气体视作理想气体,取 $N=1$,并假设蓄能器内油液的流动为层流,则蓄能器内气体的压力平衡方程为:

$$P_0 V_0 = P_2 (V_0 - \Delta V) \quad (3-16)$$

式中:

P_2 ——蓄能器的压力

ΔV ——注入蓄能器的液压油所占的体积

液压油质量守恒,因此 ΔV 满足:

$$\Delta V = \int_0^t Q_P dt - \int_0^t Q_M dt \quad (3-17)$$

式中:

Q_P ——液压泵的实际流量

Q_M ——流入液压马达的流量

根据式 (3-16)、式 (3-17)，可得：

$$P_2 = \frac{P_0 V_0}{V_0 - (\int_0^t Q_p dt - \int_0^t Q_M dt)} \quad (3-18)$$

3.2.2 SimuLink 模型

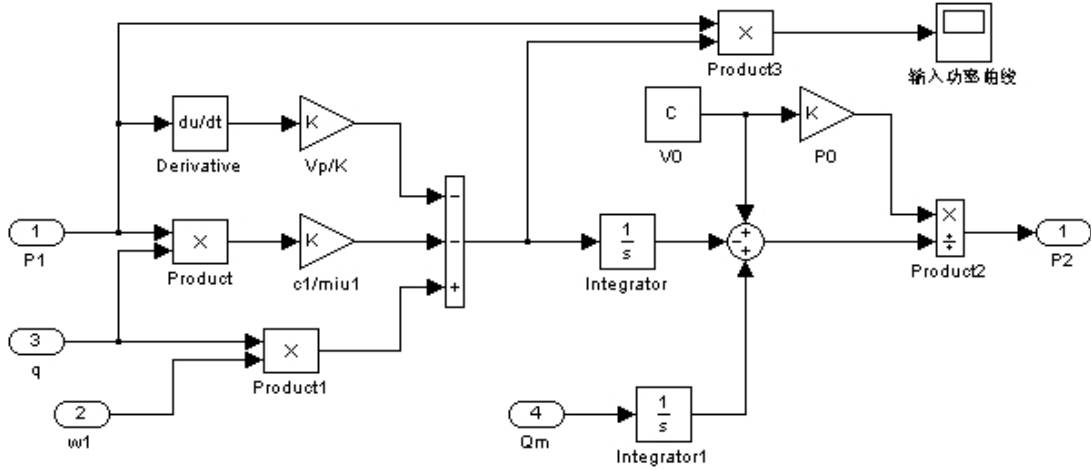


图 3-2 蓄能稳压子系统 SimuLink 模型

3.3 发电输出子系统（液压马达——发电机环节）

3.3.1 数学模型

1. 液压马达

根据液压马达的工作原理，可知其流量连续性方程：

$$Q_M = \frac{2\pi \cdot q_M \cdot n_2}{60} + \frac{c_2 P_2 q_M}{\mu_2} + \frac{V_M}{K} \frac{dP_2}{dt} \quad (3-19)$$

Q_M ——液压马达的流量；

q_M ——马达的排量；

n_2 ——马达的转速

c_2 ——马达的层流泄漏系数

μ_2 ——马达油腔油液流动粘滞系数

P_M ——马达进油口的压力

V_M ——马达油腔的工作容积

K ——油液体积弹性模量

$\frac{2\pi \cdot q_M \cdot n_2}{60}$ ——马达实际做工的流量

$\frac{c_2 P_2 q_M}{\mu_2}$ ——马达泄漏的流量

$\frac{V_M}{K} \frac{dP_2}{dt}$ ——马达内受油液压缩影响产生的流量

根据牛顿经典力学第二定律，可得马达和负载的力矩平衡方程为：

$$\frac{P_2 q_M}{2\pi} = J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt} + T_E + T_M + B_M \omega_2 \quad (3-20)$$

式中：

J_2 ——液压马达和负载折算到马达轴上的总转动惯量；

ω_2 ——马达轴转动的角频率，且 $\omega_2 = \frac{2\pi n_2}{60}$ ；

T_E ——发电机的电磁转矩；

T_M ——马达与发电机的非线性摩擦转矩；

B_M ——马达轴转动的阻尼系数；

$\frac{P_M q_M}{2\pi}$ ——马达轴的理论转矩；

2. 发电机

发电机发电可看作电动机工作的逆过程，根据发电机的原理，类似（4）式处理，可得发电机的电磁转矩方程：

$$T_E \approx \frac{3p'k_2^2 N_2^2 U^2 \frac{R}{s'}}{2\pi f'k_1^2 N_1^2 \left(\frac{R}{s'}\right)^2} = \frac{3p's'k_2^2 N_2^2 U^2}{2\pi f'k_1^2 N_1^2 R} \quad (3-21)$$

式中：

p' ——发电机的磁极对数；

s' ——发电机转差率；

k_1 ——定子绕组系数；

k_2 ——转子绕组系数；

N_1 ——定子绕组匝数；

N_2 ——转子绕组匝数；

f' ——定子绕组所感应的电动势频率；

U ——发电机定子绕组的感应电动势有效值；

R ——折算到发电机定子侧的转子电路电阻；

发电机定子绕组中感应电势的有效值为

$$U = 4.44k_1N_1f'\Phi \quad (3-22)$$

式中：

Φ ——发电机的工作磁通，且 f' 满足条件 $f' = \frac{p'n_2}{60}(1-s')$

3.3.2 SimuLink 模型

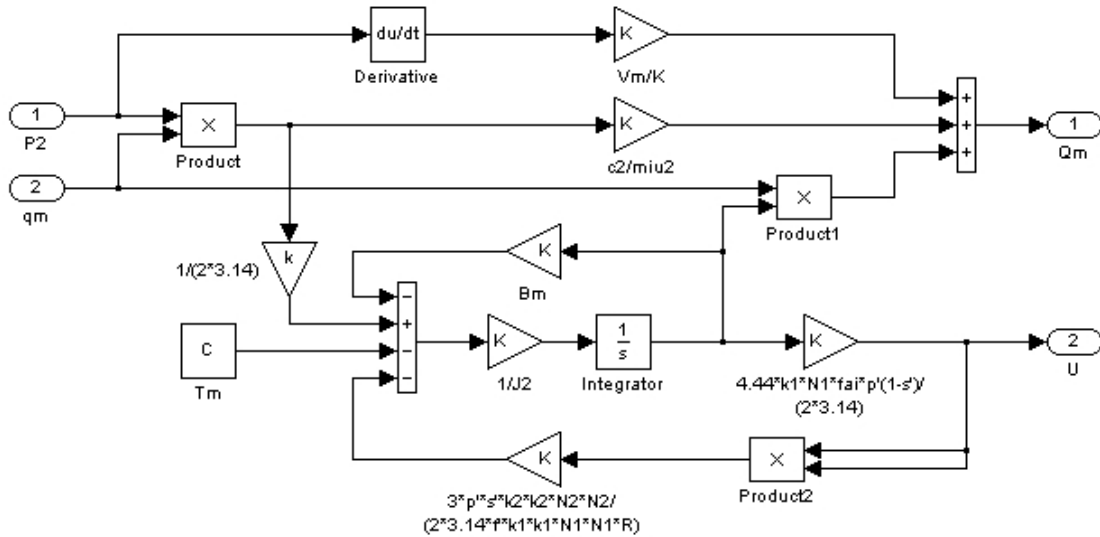


图 3-3 发电输出子系统 SimuLink 模型

3.4 系统的模型

3.4.1 数学模型

系统的时域模型汇总如下：

$$\left. \begin{aligned}
 n_1 &= \frac{60k_f u}{p}(1-s) \\
 T_D &= \frac{3pk_f^2 ku}{2\pi R_2'} - \frac{p^2 k_f k n_1}{40\pi R_2'} \\
 J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt} &= T_D - T_z - T_f - B_l \omega_1 \\
 T_z &= \frac{P_1 q}{2\pi \eta_m} \\
 Q_p &= \frac{2\pi \cdot q \cdot n_1}{60} - \frac{c_1 P_1 q}{\mu_1} - \frac{V_p}{K} \frac{dP_1}{dt} \\
 P_2 &= \frac{P_0 V_0}{V_0 - (\int_0^t Q_p dt - \int_0^t Q_M dt)} \\
 Q_M &= \frac{2\pi \cdot q_M \cdot n_2}{60} + \frac{c_2 P_2 q_M}{\mu_2} + \frac{V_M}{K} \frac{dP_2}{dt} \\
 \frac{P_2 q_M}{2\pi} &= J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt} + T_E + T_M + B_M \omega_2 \\
 T_E &= \frac{3p's'k_2^2 N_2^2 U^2}{2\pi f'k_1^2 N_1^2 R} \\
 U &= \frac{4.44k_1 N_1 \Phi p'n_2}{60}(1-s')
 \end{aligned} \right\} \quad (3-23)$$

3.4.2 SimuLink 模型

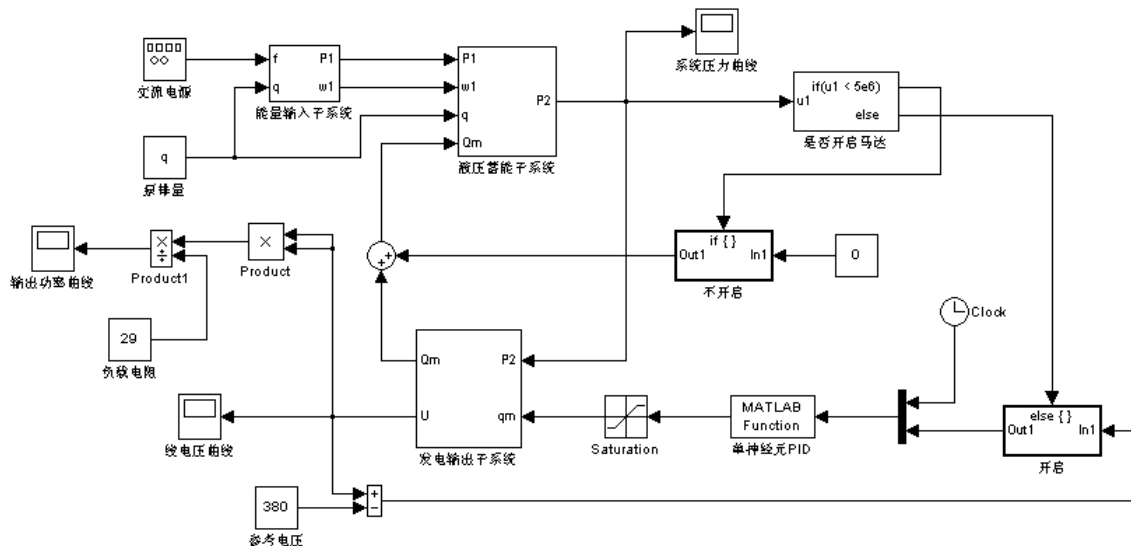


图 3-4 仿真系统的 SimuLink 模型

3.5 计算机仿真的控制算法

常规 PID 控制的参数整定必须建立在对象参数已知的基础上, PID 参数一旦

确定下来,就无法在线自调整,且当系统存在时滞时,难以获得理想的控制效果。近年来,神经网络的研究引起了控制界的高度重视,在控制中的应用研究也取得了较大进展。单神经元是神经网络控制中最基本的控制部件,基于单神经元的PID控制只有一个神经元,结构简单,既保持了常规PID控制的特点,又具有较强的自学习和自适应能力,表现出良好的鲁棒性。鉴于这些特点,本文在对系统的模型进行 SimuLink 仿真时,采用单神经元PID控制算法。

3.5.1 单神经元模型

神经元是组成生物神经系统的最基本子系统。神经元由细胞体及其发出的许多突起构成,突起的作用是传递信息。作为输入信息的若干个突起称为树突;作为输出端的突起只有一个,称为轴突。轴突与树突一一对接,从而把众多的神经元连成一个神经网络^[60]。对生物神经元进行数学化,得到人工神经元。人工神经元是一个多输入单输出的非线性信息处理子系统,模型如图 3-3^[62]。

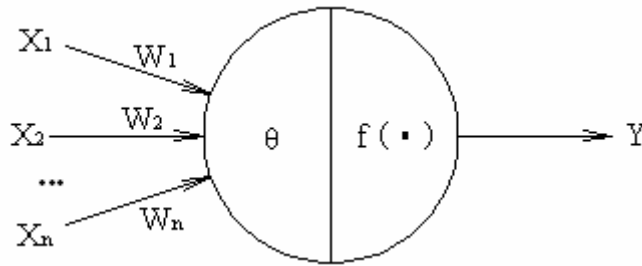


图 3-5 人工神经元模型

其中 $x_1 \sim x_n$ 为输入, Y 为输出, $w_1 \sim w_n$ 为突起权重值,即权系数。自学习功能是单神经元的重要特征,其学习功能通过改变权系数 w_i 来实现。 θ 为神经元的阈值, $f(\cdot)$ 为神经元的激活函数亦称响应函数。 n 为神经元输入的维数,一般取 $n=3$ 。上述模型的数学表达式为

$$u = \sum_{i=1}^n w_i x_i - \theta$$

$$Y = f(u)$$

3.5.2 神经网络的学习规则

神经网络的学习规则就是修正各神经元之间权系数的算法,使输入信息适应周围环境的变化。学习规则可以分为有监督学习和无监督学习两类。有监督学习是通过外部教师信号进行学习,既要求同时给出输入和正确的期望输出模式对,当实际输出结果与期望输出有误差时,神经元将通过自动机制调节相应的权系

数，使之向误差减小的方向改变，经过多次反复调整，最后与正确的结果相符。无监督学习，则不需要教师信号，其学习过程为给系统提供动态输入信号，使各个神经元以某种方式竞争，获胜的神经元本身或其相邻域得到增强，其他神经元进一步抑制，从而将信号空间分为有用的多个区域。常见的三种学习规则^[63,64]是：

1. 无监督的 Hebb 学习规则

Hebb 学习是一类相关学习，它的基本思想是，如果有两个神经元同时被激活，则它们权系数的增量与它们激励的乘积成正比，以 o_i 表示神经元 i 的激活值， o_j 表示神经元 j 的激活值， w_{ij} 表示神经元 i 和神经元 j 之间连接的权系数，则 Hebb 学习规则的数学表达式为：

$$\Delta w_{ij}(k) = w_{ij}(k+1) - w_{ij}(k) = \eta o_i(k) o_j(k) \quad (3-24)$$

其中 η 为学习速率。

2. 有监督的 Delta 学习规则

在 Hebb 学习规则中，引入教师信号，即将式 (3-24) 中的 o_j 换成希望输出 d_j 与实际输出 o_j 之差，就构成了有监督的 Delta 学习规则，即：

$$\Delta w_{ij}(k) = \eta o_i(k) [d_j(k) - o_j(k)] \quad (3-25)$$

3. 有监督的 Hebb 学习规则

将无监督的 Hebb 学习规则和有监督的 Delta 学习规则两者结合起来，就构成有监督的 Hebb 学习规则：

$$\Delta w_{ij}(k) = \eta o_i(k) o_j(k) [d_j(k) - o_j(k)] \quad (3-26)$$

3.5.3 单神经元 PID 控制算法

单神经元PID控制系统^[60-68]的结构如图 3-6 所示。

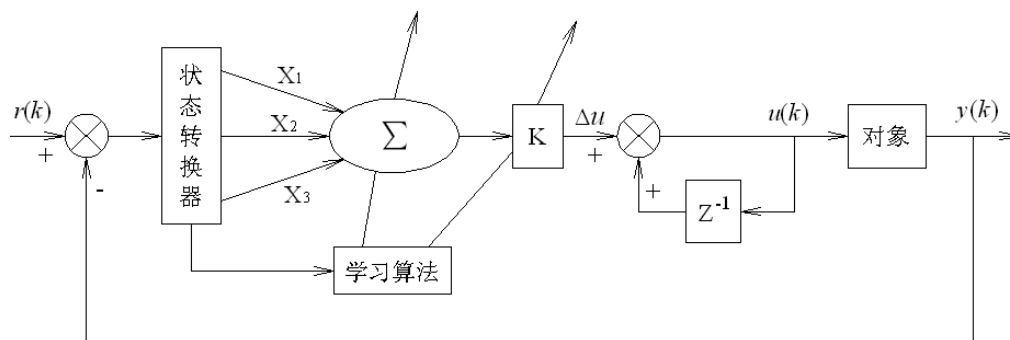


图 3-6 单神经元 PID 控制系统

图 3-6 中状态转换器的输入反映被控对象及控制设定的状态，转换器的输出为神经元学习控制所需的状态量 x_1 、 x_2 、 x_3 ，控制信号由神经元经过关联搜索和自学习产生。 $r(k)$ 为给定值（在本系统中为参考电压 380V）， $y(k)$ 为输出值，经状态转换器转换后成为神经元的输入信号。单神经元 PID 控制算法为：

$$u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 w_i(k) x_i(k)$$

即

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = K \sum_{i=1}^3 w_i(k) x_i(k) \quad (3-27)$$

式中

$\Delta u(k)$ —— k 时刻神经元的输出增量；

K ——神经元比例系数；

$w_i(k)$ —— k 时刻神经元对应的权值；

$x_i(k)$ —— k 时刻神经元的输入值即分别为 $x_1(k)$ 、 $x_2(k)$ 、 $x_3(k)$ ，且满足：

$$x_1(k) = e(k)$$

$$x_2(k) = e(k) - e(k-1)$$

$$x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)$$

比较式 (3-27) 与式 (2-12)，可得

$$Kw_1(k) = K_I ;$$

$$Kw_2(k) = K_P ;$$

$$Kw_3(k) = K_D ;$$

由此可见，神经元控制算法具有 PID 特性。单神经元 PID 控制通过对权系数的调整来实现自适应功能，本系统中对权系数的调整采用有监督的 Hebb 学习规则，控制算法为：

$$\Delta u(k) = K \sum_{i=1}^3 w_i(k) x_i(k) \quad (3-28)$$

且

$$w_i(k)' = \frac{w_i(k)}{\sum_{j=1}^3 |w_j(k)|}$$

$$w_1(k+1) = w_1(k) + \eta_p z(k) u(k) x_1(k)$$

$$w_2(k+1) = w_2(k) + \eta_p z(k) u(k) x_2(k)$$

$$w_3(k+1) = w_3(k) + \eta_D z(k) u(k) x_3(k)$$

式中

η_p ——比例学习率；

η_i ——积分学习率；

η_D ——微分学习率；

$z(k)$ ——输出误差信号， $r(k)$ 为系统的输入， $y(k)$ 为系统的输出，且满足：

$$z(k) = r(k) - y(k) = e(k)$$

对比例P、积分I、微分D分别采用了不同的学习率，一般来说，学习率越大，学习速度就越快，快速性就越好，但容易产生超调，甚至可能使系统不稳定，学习率偏小，系统的快速性变差^[61]。

3.5.4 神经元比例系数 K 的修正

通常的单神经元控制算法其神经元比例系数 K 为一固定常数，不能随误差的大小而变化，如果要求系统响应快速性好，超调势必较大，而如果要求超调较小时，响应必然非常缓慢。为此，提出动态响应的目标为：响应的初期，误差 $e(k)$ 较大， K 应取较大使系统响具有快速性；进入稳态后， K 应取较小直至逐渐趋近于稳定值^[67,68]，确保系统渐趋稳定。

因此，采用非线性变换的在线修正神经元比例系数 K

$$K(k) = K_0 + \xi[r(k) - y(k)]^3 / r(k)^2 \quad (3-29)$$

式中 $K(k)$ 为 k 时刻的神经元比例系数； K_0 为神经元比例系数的初始稳态值； ξ 为调整系数，一般取值 $0.1 K_0$ 。

改进后的控制算法保证了系统响应既有好的快速性又不会产生较大超调。在调试过程中,基本只需要整定一个参数即可达到控制要求,非常有利于系统调试。通常, K_0 值的整定应该从小开始逐渐增大(一般从百分位开始),直到达到控制效果才确定 K_0 的最终值。

3.6 本章小结

本章根据液压传动、流体力学、电力拖动的基本原理,建立了各子系统的数学模型并在此基础上建立了仿真系统的 SimuLink 模型。此外,文中还介绍了模型在计算机仿真时采用的单神经元 PID 控制算法,并对神经元比例系数 K 的确定做了改进。

第4章 SimuLink 仿真与实验研究

为检验实物仿真系统的控制效果,需要对仿真系统进行实验研究和计算机仿真研究,前文已建立了仿真系统的计算机控制平台和 SimuLink 模型,本章将对模型做计算机仿真,并对控制平台做实验研究。

4.1 SimuLink 仿真

4.1.1 参数取值

仿真系统的模型(式(3-23))中各参数取值如下:

$$k_f = 8$$

$$s = 0.03$$

$$R_2' = 0.1\Omega$$

$$J_1 = 0.5\text{Kgm}^2$$

$$T_f = 0$$

$$B_t = 0.005\text{Nms/rad}$$

$$q = 90\text{mL/rad}$$

$$\eta_m = 95\%$$

$$P_0 = 4\text{MPa}$$

$$V_0 = 250\text{L}$$

$$c_1 = 1.5 \times 10^{-12}\text{m}^3$$

$$\mu_1 = 0.035\text{Ns/m}^2$$

$$V_p = 1.7\text{L}$$

$$K = 1000\text{MPa}$$

$$c_2 = 1.8 \times 10^{-12}\text{m}^3$$

$$\mu_2 = 0.027\text{Ns/m}^2$$

$$V_M = 1.1\text{L}$$

$$J_2 = 0.7\text{kgm}^2$$

$$T_E = 40\text{kgm}^2$$

$$T_M = 0$$

$$B_M = 0.01 \text{ Nms/rad}$$

此外，发电输出子系统外接纯电阻负载，阻值为 29Ω 。

4.1.2 仿真曲线

根据上述各参数，对系统 SimuLink 模型进行计算机仿真，得到在三种频率工作方式下（恒定频率、周期频率、随机频率）的发电机输出功率、线电压和系统压力的仿真曲线，分别如图 4-1、图 4-2、图 4-3 所示。

1. 恒定频率

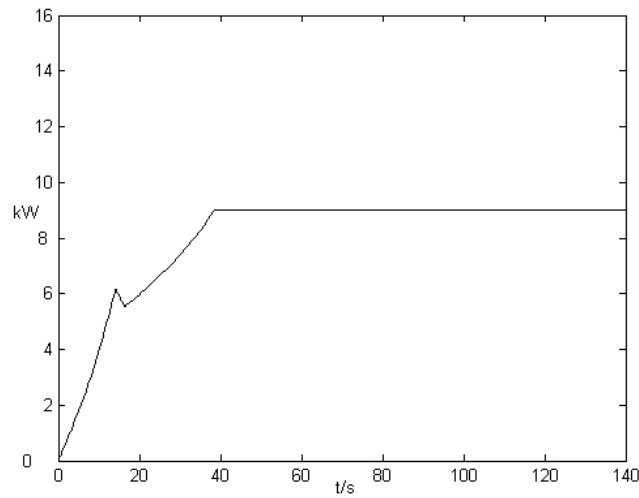


图 4-1a 系统输入功率（恒定频率）

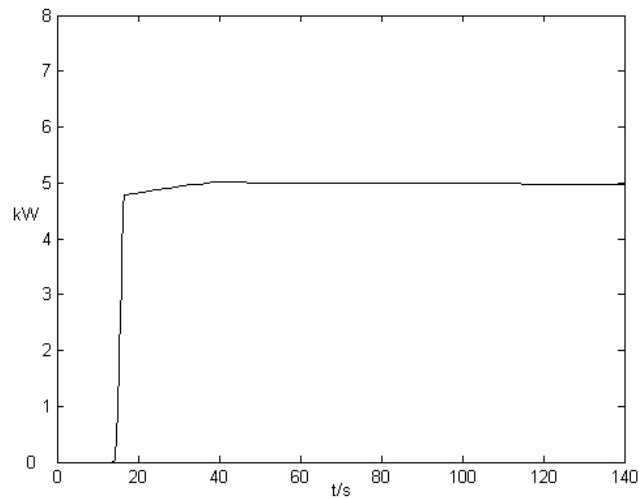


图 4-1b 发电机输出功率（恒定频率）

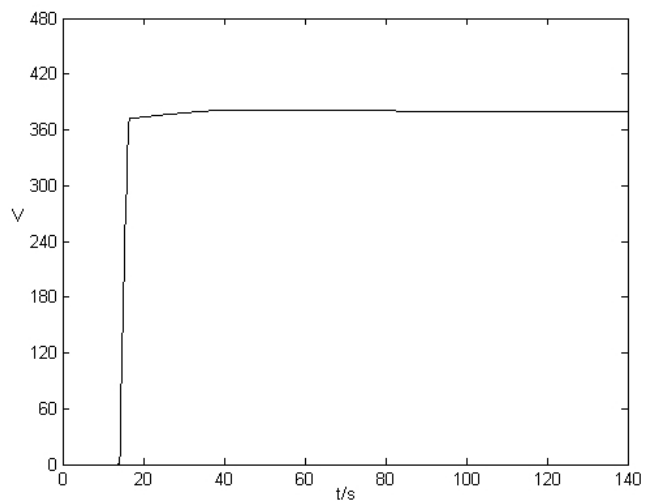


图 4-1c 输出线电压（恒定频率）

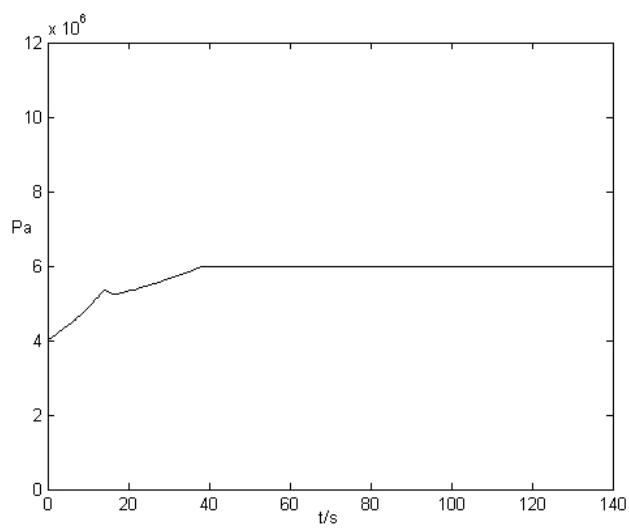


图 4-1d 系统压力（恒定频率）

2. 周期频率

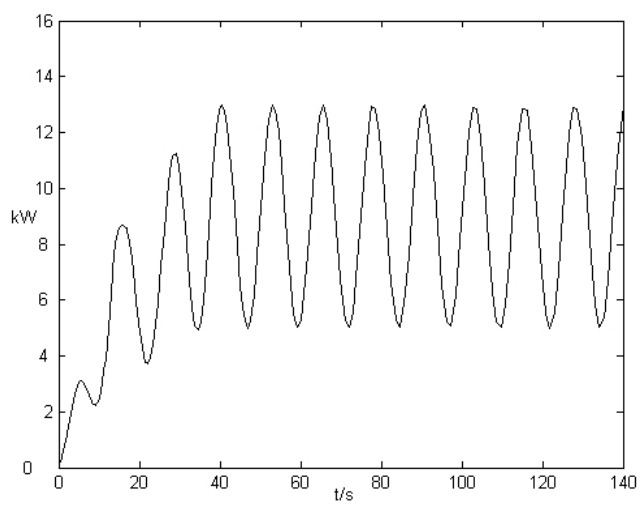


图 4-2a 系统输入功率（周期频率）

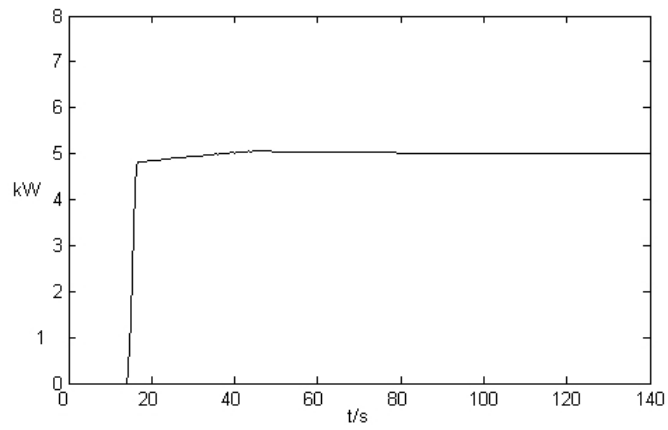


图 4-2b 发电机输出功率（周期频率）

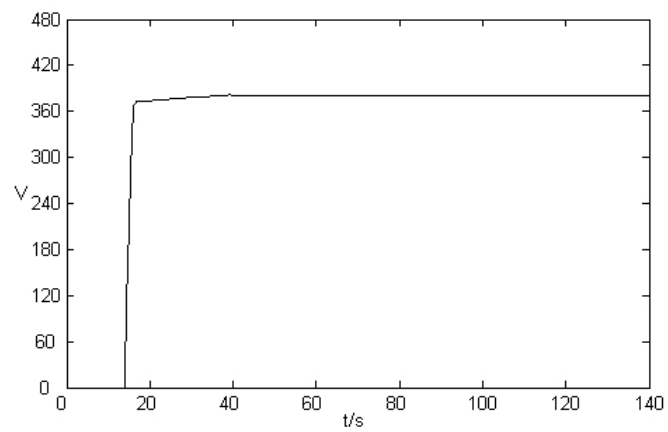


图 4-2c 输出线电压（周期频率）

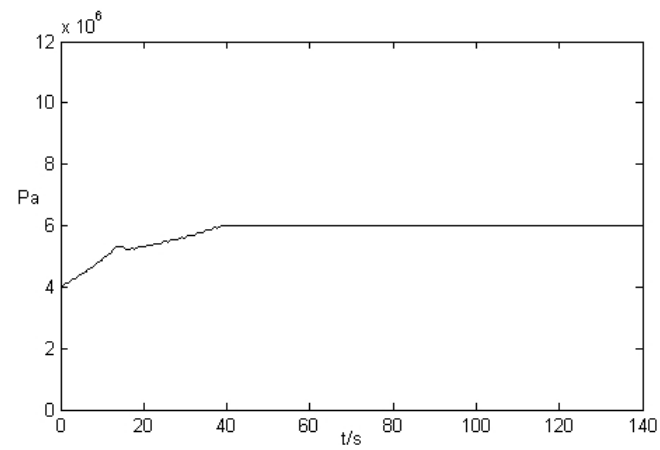


图 4-2d 系统压力（周期频率）

3. 随机频率

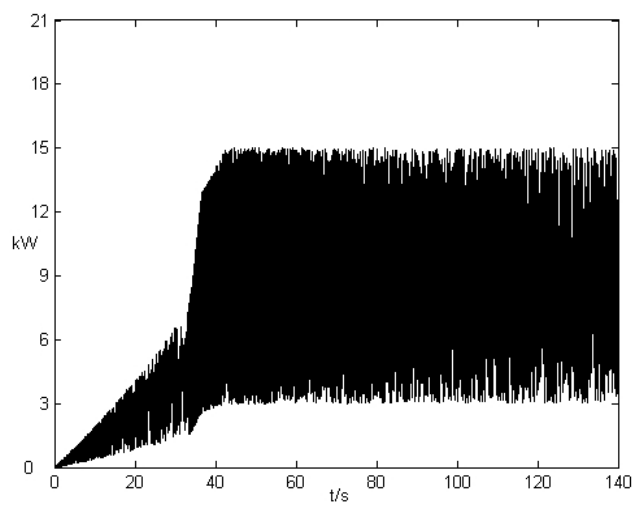


图 4-3a 输入功率（随机频率）

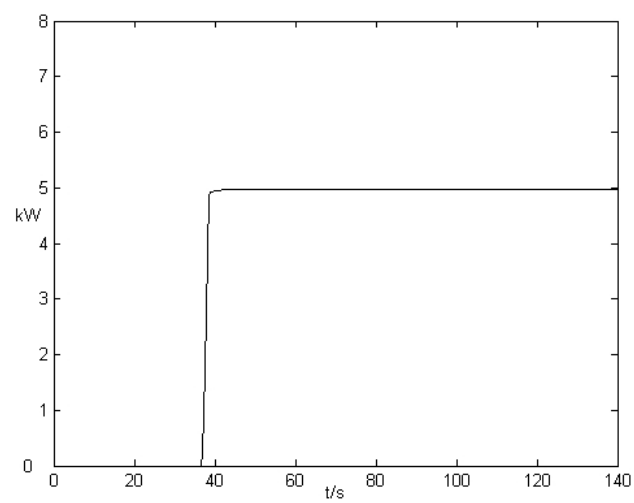


图 4-3b 发电机输出功率（随机频率）

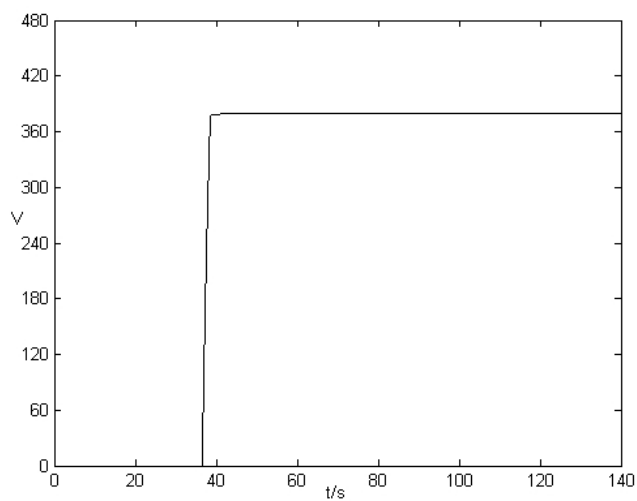


图 4-3c 输出线电压（随机频率）

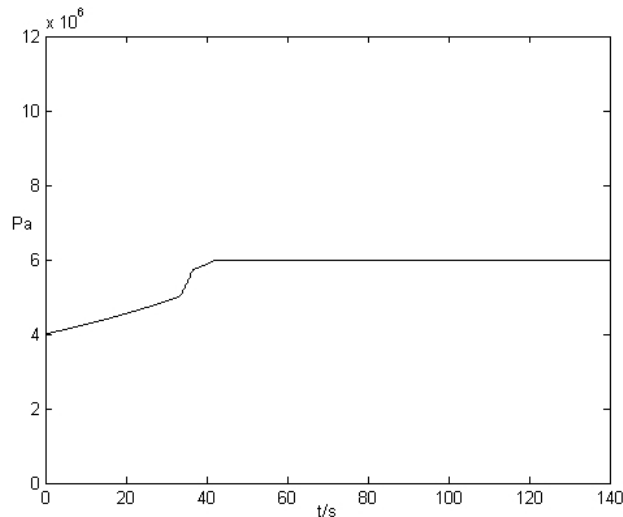


图 4-3d 系统压力（随机频率）

SimuLink 仿真的初始压力设为 4MPa，从上图的仿真曲线可看出，发电机在系统压力达到 5MPa 的时候开始发电，系统在恒定频率和周期频率条件下比在随机频率条件下响应迅速；系统在工作时段运行很平稳，发电机输出功率保持在 5kW，输出线电压保持在 380V、系统压力保持在 6MPa。仿真的结果说明系统模型精确，控制算法效果良好，可为进一步的实验研究做出启示。

4.2 实物仿真系统的实验研究

根据第 2 章所确定的系统控制方式和原则，实验室仿真系统采用 VB 编程语言实现了独立稳定发电控制的实验要求，程序主界面如图 4-4 所示。在主界面中，主要分为四部分：变频电源控制，蓄能稳压子系统信息采集、控制和显示，动力电机信息采集和显示，液流控制和数据记录。具体说明如下：

1. 变频电源控制：设计了三种频率工作方式，即恒频率、周期性频率和随机性频率；
2. 蓄能稳压子系统信息采集、控制和显示：包括液压系统工作压力、蓄能器工质体积信息采集和显示，液压马达开度的控制和显示；
3. 机电信息采集和显示：包括泵输入功率、电动机和发电机有关的信息的采集和显示，对于电动机有转速信息显示，对于发电机有输出电压和输出功率信息采集和显示，另外还包括泵输入功率显示；
4. 液流控制、数据记录：液流控制实现对系统的保护，数据记录便于事后分析整个系统的性能，包括液压系统性能和控制系统性能。

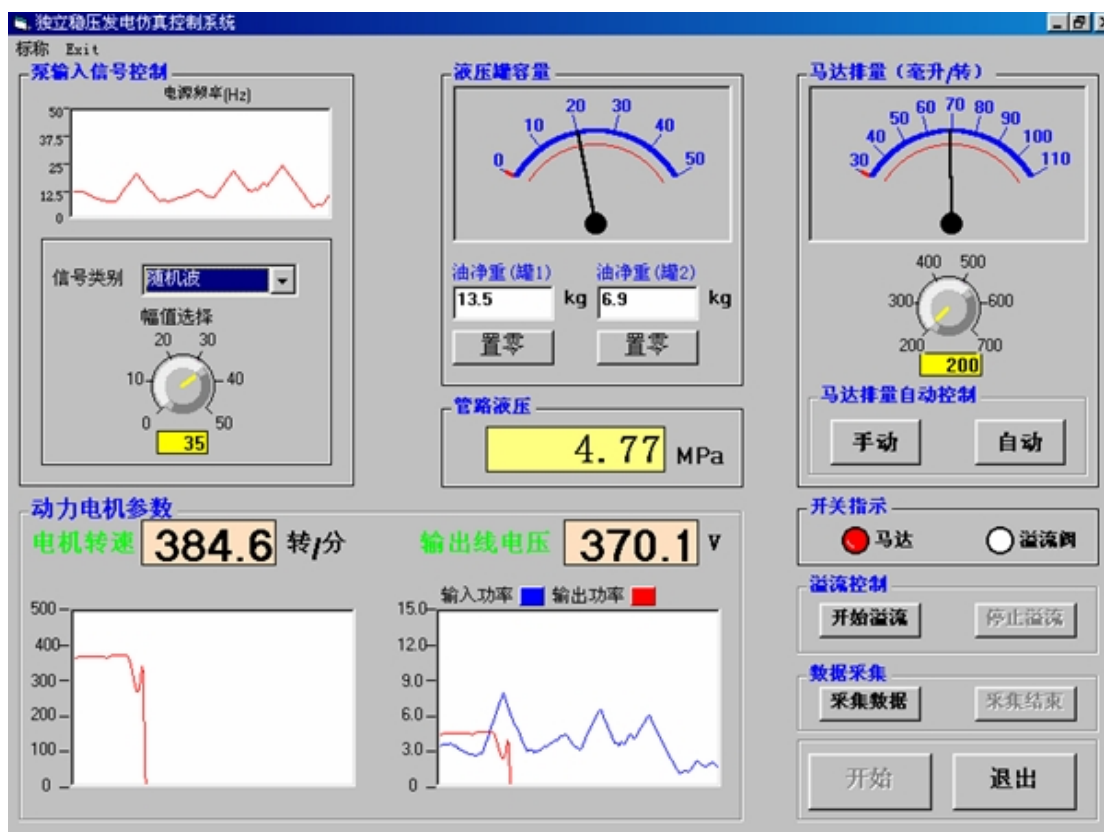


图 4-4 仿真系统控制界面

根据不同的电源频率控制方式，实验人员做了一定量的实验，下面列出了有代表性的三个实验结果，如图 4-5、图 4-6、图 4-7 所示。在实验中， $P_{\text{pots}} = 6.5 \text{ MPa}$ ， $P_{\text{potmax}} = 8.0 \text{ MPa}$ ， $\alpha = 7.5/8.0$ ， $U_{\text{set}} = 380 \text{ V}$ 。在图 5、6、7 中， P_{in} 是泵的输入功率，其计算公式是式 (2-2)， P_{out} 是发电机的输出功率，其计算公式是式 (2-3)，Pipe Press 是系统的工作压力。

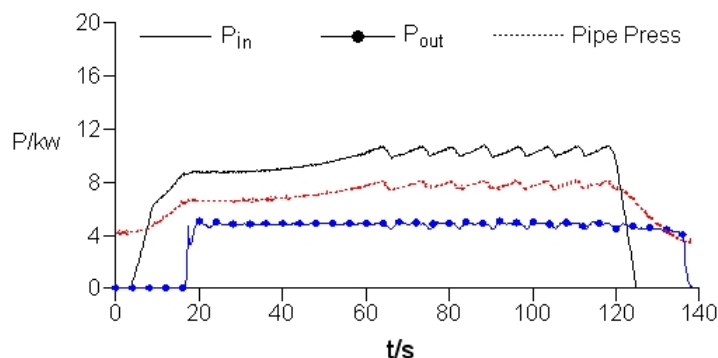


图 4-5a 压力、功率曲线（恒频）

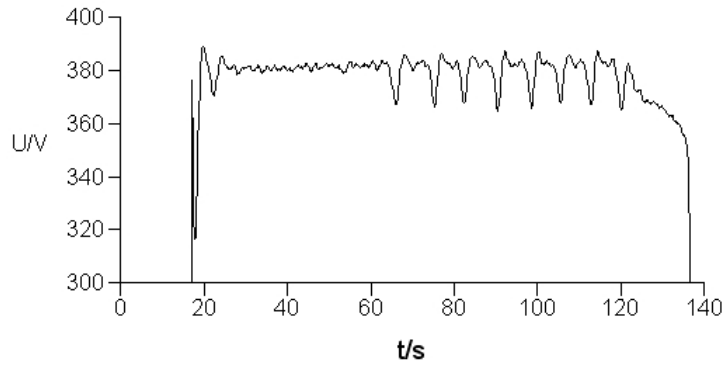


图 4-5b 发电机输出线电压曲线（恒频）

在图 4-5 中，液压泵输入功率采用恒频控制方式，也就是说电动机的转速基本不变；在图 4-5a 中，发电机输出功率曲线基本平稳，与横轴平行，但输入功率曲线是增加的，最后是周期性的振荡，液压系统的工作压力同输入功率曲线的表现形式一样，这些现象产生的原因为：尽管电动机的转速一定，但泵的平均输入功率大于发电机的额定输出功率，多余的能量输入到蓄能器，导致蓄能器压力增大，输入能量增大，当液压系统工作压力大于率 $P_{\text{potmax}} = 8.0\text{MPa}$ 时，节流阀打开，溢流能量，当工作压力小于 $\alpha P_{\text{potmax}} = 7.5\text{MPa}$ 时，节流阀关闭，这一节流阀开关动作，导致输入功率曲线和液压系统工作压力曲线产生振荡；图 4-5b 中电压曲线表现平稳，其范围基本控制在 360~400 伏内，在节流阀开关时变化较大（根据分析，应该是 $(1 - \alpha)P_{\text{potmax}}$ 值较大引起）。

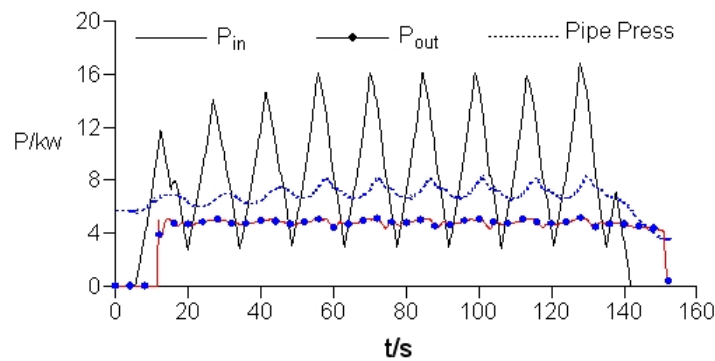


图 3-11a 压力、功率曲线（周期频率）

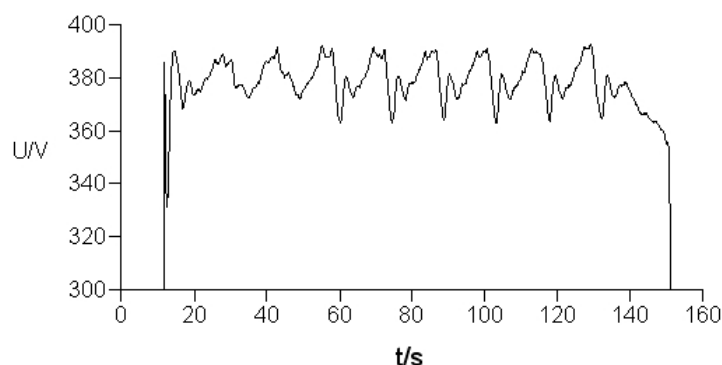


图 4-6b 发电机输出线电压曲线（周期频率）

在图 4-6 中，泵输入功率采用周期性频率控制方式：图 4-6a 中，泵输入功率曲线成周期性地变化而且变化幅度较大，发电机输出功率曲线变化比较平稳，系统工作压力也呈周期性地变化，能量也周期性地溢出；图 4-6b 电压曲线表现平稳，其范围也基本控制在本 360~400 伏内。

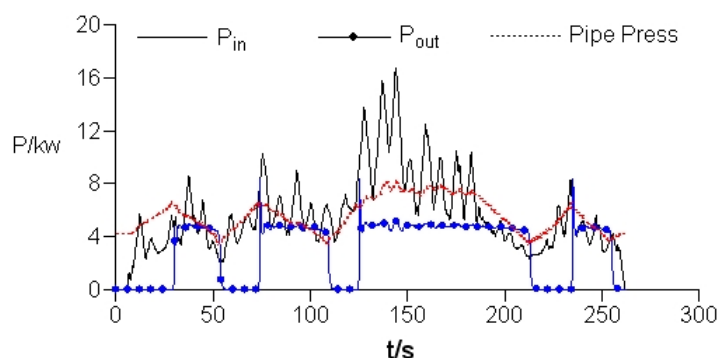


图 4-7a 压力、功率曲线（随机频率）

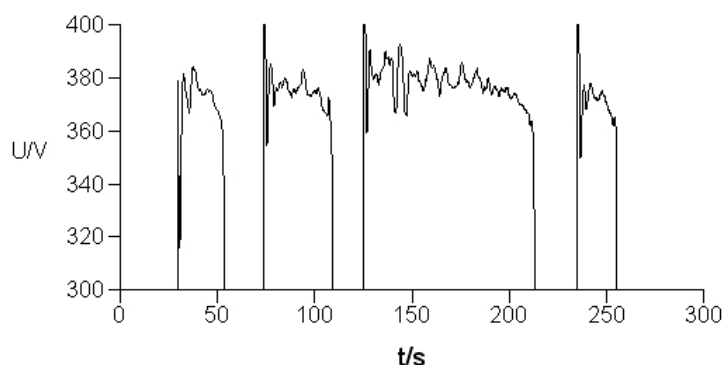


图 4-7b 发电机输出线电压曲线（随机频率）

在图 4-7 中，泵输入功率采用随性频率控制方式；在图 4-7a 中，泵输入功率曲线变化随机，但发电机输出功率曲线变化比较平稳，而且出现了断断续续发电的现象，这是因为负载额定的输出功率大于泵的平均输入功率所致；图 4-7b 在发电机工作过程中电压曲线表现也平稳，其范围也基本控制在本 360~400 伏内。

本系统在多种输入条件下，都能达到平稳的能量输出，根据泵输入能量的大

小，系统的能量输出方式有两种：连续方式和间断方式（0-1 方式）。当输入能量大时，系统以连续方式工作，当输入能量小时，系统以 0-1 方式工作。系统以两种方式输出能量既可充分利用现有设备的容量，又可在一定程度上提高系统的能量转换效率。然而当系统发电机开始工作一小段时间内，电压波动幅度大，不能直接加在负载上，可采用延迟供电的方法克服。

4.3 本章小结

本章选用了合适的参数对仿真系统做了 SimuLink 仿真，在恒定频率、周期频率、随机频率，这三种工作方式下，仿真都取得了良好的效果。此外，本章还对实物仿真系统做了实验研究，绘出了系统在运行时的功率、电压、压力曲线，实验曲线与仿真曲线吻合。结果表明，系统控制效果良好，能在多种输入条件下，输出稳定的电能。

第5章 负载控制的设计和实现

前文介绍的仿真系统，其控制思想已应用于波浪能独立稳定发电系统（即真实系统），而真实系统中经常存在发电的间歇性和冲击性问题，针对这些问题，本章设计了负载智能配置系统，确保真实系统稳定、安全和有效地运行。

5.1 负载控制设计思想

由于波浪能量输入的随机性及蓄能稳压子系统的本身特点，使得波浪能独立稳定发电系统经常会采取 0-1 发电方式，即不连续发电方式，在液压马达打开瞬间，液压系统会发生水锤现象，水锤现象的发生必然会影响到发电机的电压输出，在发电始端会呈现一个电压尖峰，如图 5-1 所示，这种尖峰将对许多用电设备造成不可估量的破坏。电压尖峰的产生不可避免，用电设备必需保护，为了解决这一矛盾，设计采用纯电阻方式作为发电机的部分负载，来消除电压尖峰的影响，当电压尖峰过后，设法减少或除去纯电阻负载，使电能全部用在可用负载上。其设计思想是：当发电机开始工作时，纯电阻负载工作，用电设备自动断开，当经过一段时间 Δt 后，发电机输出电压稳定，用电设备自动合上，纯电阻负载根据发电机负荷的多少自动减少所消耗的功率甚至不消耗功率，为了确保发电机不出现空载运转，还设计了一路保护性纯电阻发热负载，如图 5-2 所示，当发电机输出电压升高到一危险值时，此路发热负载自动加载。实现负载自动加载和断开的系统我们称为负载智能配置系统（图 5-2）。

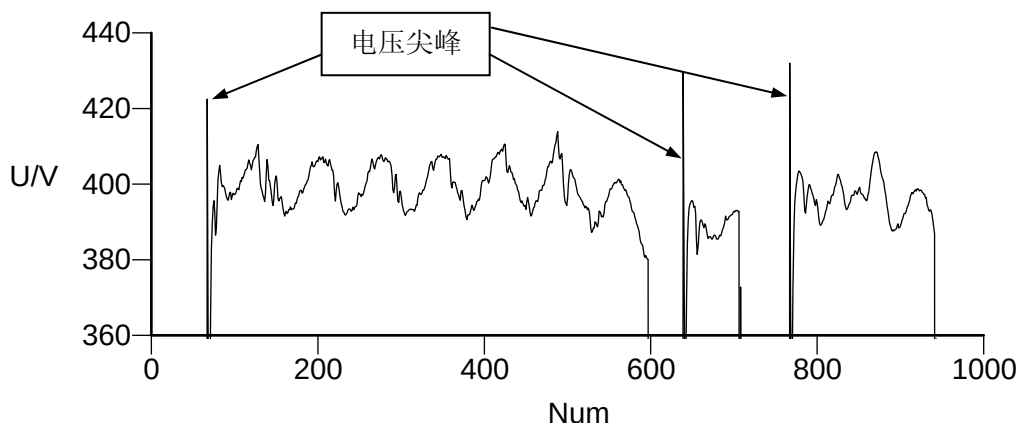


图 5-1 发电机输出电压波形图

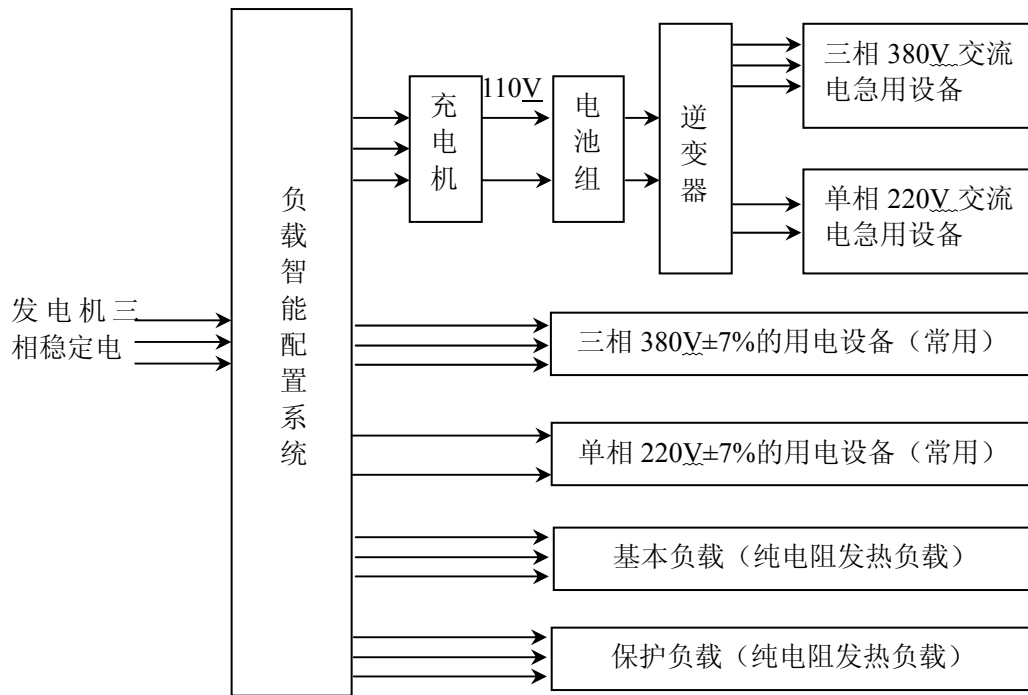


图 5-2 独立电网示意图

5.2 负载智能配置系统的组成和原理

负载智能配置系统主要由计算机、数据采集控制卡和调功设备等组成，其工

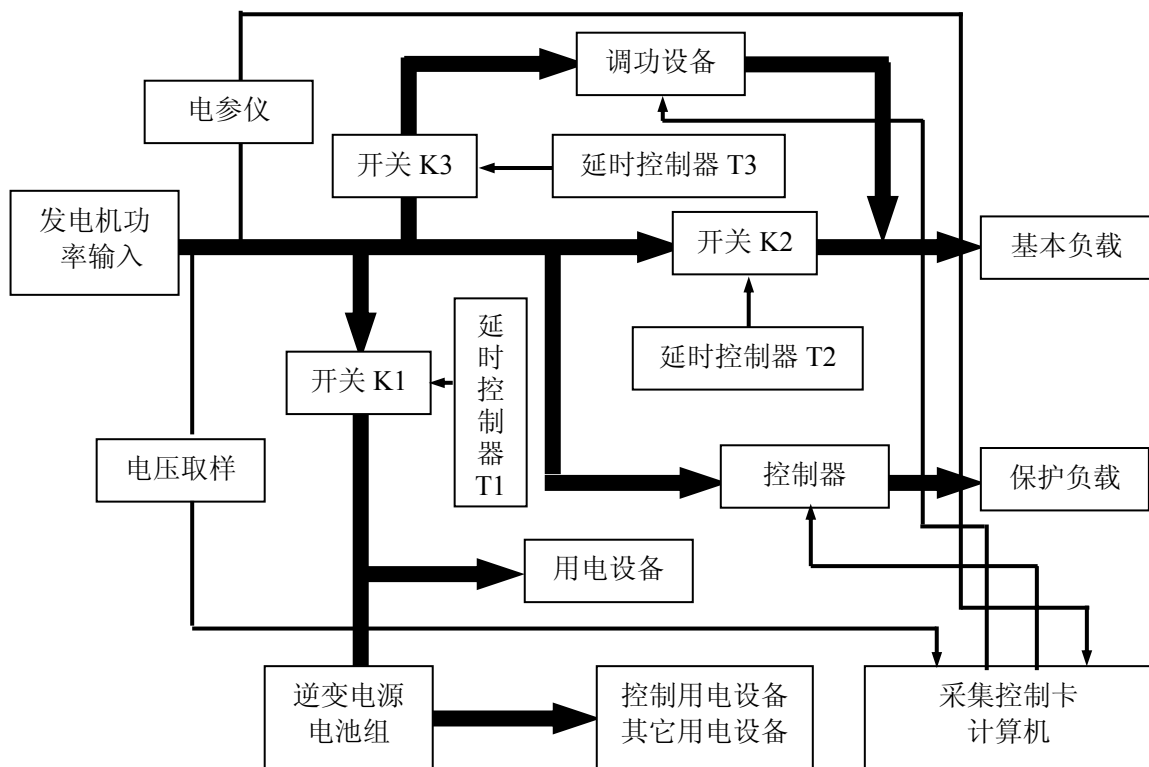


图 5-3 负载智能配置系统

作原理图如图 5-3 所示,发电机不工作时,“开关 K1”、“开关 K3”处在常开状态,“开关 K2”处在常闭状态,所有“延时控制器”不工作,当发电机开始工作时,电能通过“开关 K2”加载在“基本负载上”,所有“延时控制器”开始工作,经过一段时间 Δt_1 后,发电机电压尖峰值消失,“延时控制器 T1”控制“开关 K1”闭合,发电机给“逆变电源”等用电设备提供电能,再经过一段时间 Δt_2 后,“延时控制器 T3”控制“开关 K3”闭合,“调功设备”被激活,为控制负载功率做准备,再经过一段时间 Δt_3 后,“调功设备”准备完毕,“延时控制器 T2”控制“开关 K2”断开,“基本负载”的功率完全由“调功设备”控制,其调控能力为额定功率的 0%~100%。“延时控制器 T1”的延迟控制时间为 Δt_1 ,“延时控制器 T3”的延迟控制时间为 $\Delta t_1 + \Delta t_2$,“延时控制器 T2”的延迟控制时间为 $\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$ 。当发电机输出的电压高出一允许值时,计算机发出一指令,指挥“控制器”动作,把“保护负载”接入电网中,以保护整个独立电网不因高电压而受损坏。当发电机停止工作,所有的“延时控制器”和“开关”恢复到原始设置状态。

5.3 试验结果

按照图 5-3 的设计思想,我们研制了一套负载智能配置系统,并应用于实海况实验,图 5-4 是一段发电记录,包括了电压、输出功率、发电频率等参数,表 1 是开始发电后的一段实验数据。在本次实验中,设置 $\Delta t_1 = 3$ 秒, $\Delta t_1 + \Delta t_2 = 4$ 秒, $\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 = 10$ 秒,发电机只带了一套基本负载和一台逆变电源,负载电阻为“星”形接法,每相的负载阻值为 48.4 欧,在额定电压下,每相消耗的功率为 1 千瓦,基本负载是 3 个千瓦,保护负载为 6 千瓦(额定功率)。从图 5-4(a)分析可知电压曲线可分为四个阶段——高压峰值(A-B-C)、小平稳(C-D)、低压峰值(D-E-F)和平稳运行阶段(F-G),高压峰值(A-B-C)阶段发生在起始阶段,产生的机理来自于液压系统的水锤作用,在小平稳(C-D)阶段,“逆变电源”没有启动,发电机发出的能量只消耗在基本负载上,在低压峰值(D-E-F)阶段,“逆变电源”启动,发电机通过“逆变电源”向蓄电池充电,导致产生低压的原因是“逆变电源”瞬态接收功率较大而发电机输出此时来不及调整仍维持在一个比较恒定的值时,发电机输出的电压降低以减少基本负载对能量的消耗,减少的部分能量提供给“逆变电源”,经过低压,发电机输出能量调整增大,电压恢复

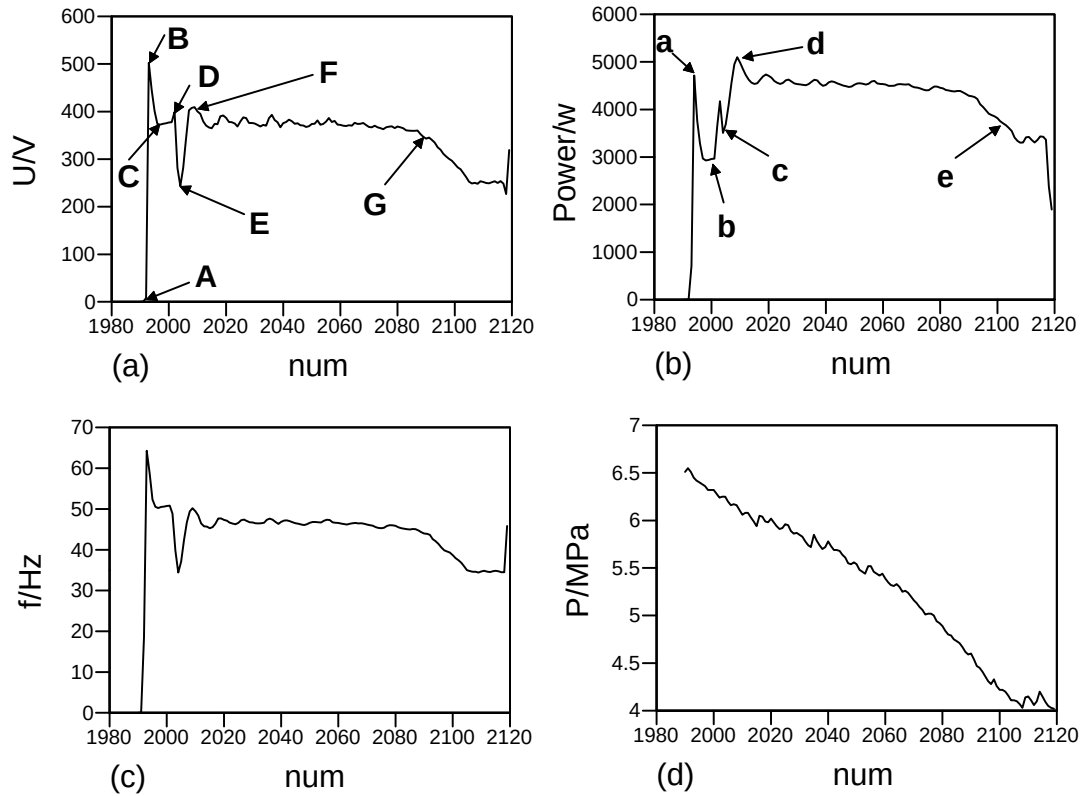


图 5-4 2006 年 4 月 28 日 2:34:48~2:37:06 波浪能独立稳定发电系统发电试验曲线

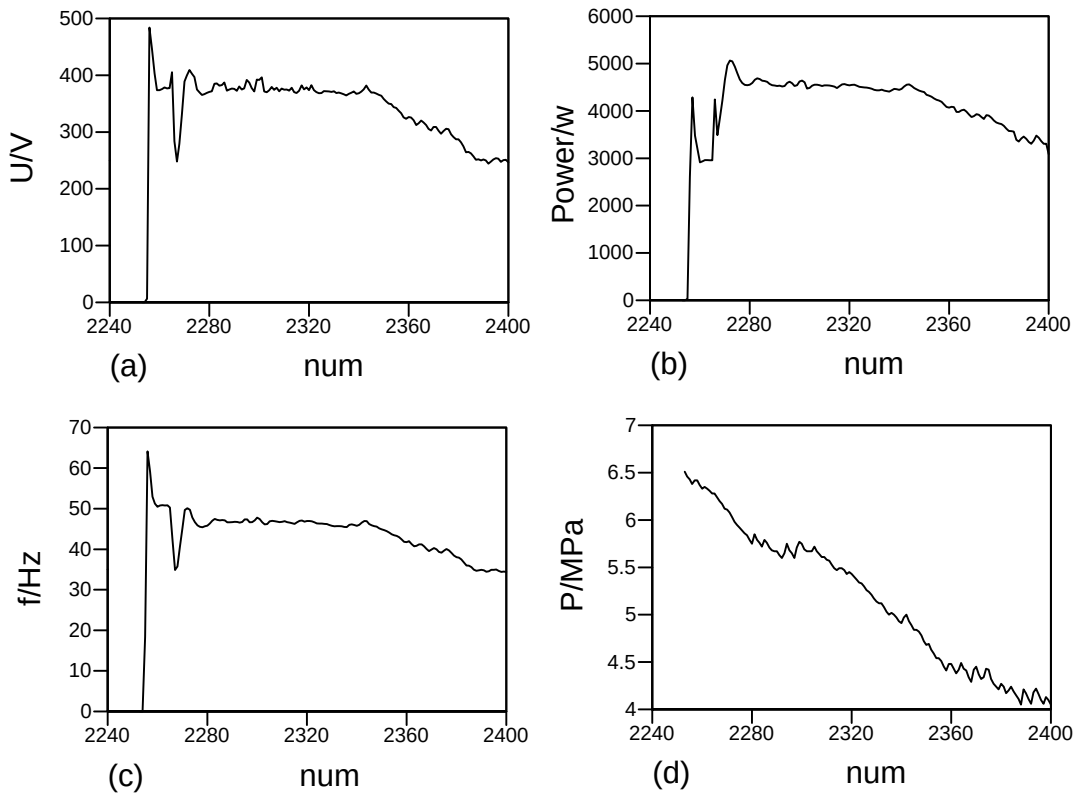


图 5-5 2006 年 4 月 28 日 2:45:42~2:48:22 波浪能独立稳定发电系统发电试验曲线

到正常范围,在平稳运行(F-G)阶段,电压在正常范围内波动,在G点后由于蓄能稳压子系统本身特性,导致输出能量不足,使得电压偏低。从图5-4(b)功率输出曲线分析可知,水锤作用产生一个尖峰功率,这点发生在图中的a点,过后是一平稳功率时期,基本负载消耗的功率大概为3000瓦(图5-4(b)中b附近),然后“逆变电源”启动,发电机通过“逆变电源”向蓄电池充电,导致发电机输出能量增大,在某一时刻由于电压急剧降低到一个最低值(图5-4(a)中的E点),基本负载由于电压的急剧降低,导致其消耗的功率急剧降低,因此负载总的消耗功率出现了一个底峰值,这点表现在图5-4(b)中的c点上,然后电压升高,总的消耗功率增大,到达峰值d,此时离发电机开始发电时间正好经过了大约10秒钟,“调功设备”开始工作,调低基本负载所消耗的能量,使得功率曲线从峰值d慢慢降低,然后到达一个平稳的过程。图5-4(c)是频率曲线,其变化趋势类似电压曲线,图5-4(d)是系统压力曲线,其变化趋势逐步降低。图5是另一个时段的发电记录,显然电压、功率和频率的变化趋势类似于图5-4相应物理量的变化趋势。

5.4 本章小结

本章介绍了负载智能配置系统的设计思想和实现方法。该系统针对波浪能独立稳定发电系统经常存在发电的间歇性和冲击性问题,采用纯电阻方式作为发电机的基本负载,来消除电压尖峰的影响,当电压尖峰过后,自动减少或除去纯电阻负载,使电能尽可能用在可用负载上。

从目前试验结果来看,负载智能配置系统一方面使得用电设备能自动避开起始峰值电压可能造成的破坏,另一方面“调功设备”能正常工作,减少了能量的无用损失,达到了设计要求,能保证波浪能独立稳定发电系统安全有效地工作。

表 5-1 与图 5-4 对应的部分电参数据（起始部分）

时间 m:s	计数	系统压力	输出电压	输出功率	发电频率
34:48	1992	6.51	7.7	3.75	18.63
34:49	1993	6.45	<u>502.6</u>	708.75	64.27
34:50	1994	6.42	445.4	4713.75	58.88
34:51	1995	6.4	401.3	3757.5	52.32
34:52	1996	6.38	373.3	3288.75	50.54
34:54	1997	6.36	372.7	2966.25	50.24
34:55	1998	6.32	374.6	2925	50.53
34:56	1999	6.32	375.4	2936.25	50.6
34:57	2000	6.32	377.3	2958.75	50.73
34:58	2001	6.28	377.9	2962.5	50.8
34:59	2002	6.24	399.4	3652.5	48.88
35:00	2003	6.25	281.5	4173.75	39.83
35:01	2004	6.25	<u>243.2</u>	3506.25	34.41
35:02	2005	6.2	281.6	3686.25	37.09
35:03	2006	6.16	341.1	4091.25	42.38
35:04	2007	6.17	402.6	4560	46.76
35:05	2008	6.16	407.7	4950	49.43
35:07	2009	6.11	409.5	5100	50.2
35:08	2010	6.06	400.4	4983.75	49.43

第6章 总结与展望

6.1 总 结

本文根据蓄能稳压的特点,从实物仿真和计算机仿真两方面对真实系统做了自动控制研究,并针对真实系统经常存在的安全性、有效性问题,设计了负载智能配置系统。实物仿真方面,本文基于蓄能稳压系统建立了自动控制系统:设计了仿真系统的控制接口图,选用了合适的控制元件;采用PID控制算法,编写了VB控制软件;在不同形式输入方式下,对实物仿真系统做了实验研究。计算机仿真方面,本文根据硬件设备的物理特性,建立了实物仿真系统的数学模型和SimuLink模型,并采用单神经元PID控制算法对SimuLink模型做了计算机仿真。此外,负载智能配置系统方面,本文介绍了其设计思想和实现方法,并给出了实海况试验结果。

波浪能独立稳定发电控制系统的自动控制研究是建立在液压传动、机电一体化、控制算法、计算机仿真等成熟技术和理论基础之上的,目的是为了研究波浪能独立稳定发电系统能量稳定输出的自动控制规律,最终实现波浪能的有效利用。通过对计算机子控制系统的接口设计、控制方式、建模仿真和实验研究的分析,可看出:系统的数学模型描述精确,为进一步的实验研究提供了理论依据,在此基础上建立的Simulink模型及其仿真结果,能够良好地反映出系统控制特性,如运行稳定、闭环反馈的性能特点等;SimuLink仿真结果与实验结果吻合,表明仿真系统的控制效果良好,在不同输入条件下,都能达到平稳的能量输出。本文中的控制思想已应用于真实系统上。

此外,真实系统在运行时的安全性问题也非常重要,因此,在真实系统中引入了负载智能配置系统进行安全优化。从实海况试验结果来看,该系统一方面使得用电设备避免了真实系统起始峰值电压可能造成的破坏,另一方面减少了能量的无用损失,能确保真实系统安全有效运行。

6.2 问题与展望

由于时间、条件、个人水平及经验所限,对波浪能独立稳定发电系统的控制研究还有许多工作要补充和完善,可从以下几个方面做进一步的研究和实验:

1. 因无法知道发电机、电动机等设备内部的确切参数，仿真章节中的某些数据是根据经验估算的，与实际值可能存在偏差，建议仿真时采用多组参数，以求得到更准确的仿真结果。

2. 系统的 SimuLink 仿真采用的是单神经元 PID 控制算法，而实验时采用的仍是传统的增量式 PID 算法，单神经元的控制效果需要在实验中做进一步的验证。

3. 真实系统的实海况试验时间较短，负载智能配置系统长期工作可靠性、调功设备的调功能力大小、发电机空载安全保护等特性有待于未来实验的验证和改进。

参考文献

- [1] Salter, S. H. Wave power, Nature. 1974, 294(54): 59.
- [2] You Ya-ge, Zheng Yong-hong, Shen Yong-ming, Wu Bi-jun and Liu Rong. Wave energy study in china: advancements and perspectives. China ocean engineering, 2003,17(1):101-109.
- [3] 余志. 海洋能源利用技术进展与展望. 太阳能学报, 1999. 特刊.
- [4] Harrison. Renewable energy. <http://www.see.ed.ac.uk/~gph/publication/EChP%20Web.pdf>.
- [5] 陈恩鉴. 国外海洋能研究开发的现状及展望. 新能源, 1995, 17(1): 16-21.
- [6] Volkov E P, Darnell J R. 新的可再生能源. 北京: 海洋出版社. 1998. 421-422.
- [7] 张登霞. 双浮子海浪发电装置参数分析以及结构优化设计. 燕山大学硕士学位论文, 2004.
- [8] 余志. 海洋波浪能发电技术进展. 海洋工程, 1993. 11(1): 86-90 特刊.
- [9] YOU Ya-ge, Zheng Yong-hong, SHEN Yong-ming, WU Bi-jun, LIU Rong. Wave energy study in China: Advancements and perspectives. China Ocean Engineering, 2003, 17(1): 101-109.
- [10] <http://www.wavegen.co.uk/>.
- [11] <http://www.energetech.com.au/index.htm>.
- [12] <http://www.oceanpowertechnologies.com/technology/>.
- [13] <http://www.wave-energy.net/Projects/ProjDescriptions/IPS.htm>.
- [14] Henderson, R. Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter. Renewable energy, 2006,31(2): 271-283.
- [15] Carcass, M.C. The OPD Pelamis WEC: current status and onward programme. International journal of ambient energy, 2003,24(1):21-28.
- [16] Kofoed, JP., Frigaard, P., Friis-Madsen, E., et al. Prototype testing of the wave energy converter wave dragon. Renewable energy, 2006, 31(2):181-189.
- [17] Frigaard, P., Kofoed, JP., Rasmussen, MR. Overtopping measurements on the wave dragon Nissum Bredning prototype. Proceedings of the fourteenth(2004)international offshore and polar engineering conference, 2004,1:210-216.
- [18] Gerber JS., Taylor GW. Installation of a scaleable wave energy conversion system in Oahu, Hawaii. Proceedings of the thirteenth (2003) international offshore and polar engineering conference, 2003,1:361-367.
- [19] Koola Paul Mario, Ravindran M., Aswatha Narayana P.A., Model studies of oscillating water column wave-energy device. 1995, J Energy Eng, 121(1): 13-27,1995.
- [20] Polinder, H., Damen, M.E.C., Gardner, F. Design, modeling and test results of the AWS PM

- linear generator. European transactions on electrical power, 2005,15(3):245-256.
- [21] Sa da Costa, J., Pinto, P., Sarmiento, A., Gardner, F. Modeling of an ocean waves power device AWS. Proceedings of 2003 IEEE conference on control applications, 2003,1:618-623.
- [22] Weinstein A., Fredrikson G., Parks MJ., Nielsen K. AquaBuOY - The offshore wave energy converter numerical modeling and optimization. Oceans '04 MTS/IEEE Techno-Ocean '04 (IEEE Cat. No.04CH37600) : (Vol.4) 1853-9 Vol.4, 2004.
- [23] Yu Z., Ye J., You Y., Jiang N., Jie D., Gao X. Site test of a 20KW wave power station at Dawanshan island. In: Proceedings of the 16th international conference on offshore mechanics and arctic engineering, 1997, Vol., I, Part B.
- [24] 游亚戈, 余志. 后弯管式振荡水柱波能装置的水动力学分析. 95 全国水动力学研讨会, 1995.
- [25] You Yage, Yu Zhi. Wave loads and protective techniques of an on-shore wave power device. China ocean engineering, 1995,9(4):455-464.
- [26] 游亚戈, 余志. 岸式振荡水柱波能装置的波浪荷载保护措施探讨. 海洋工程, 1994, 12(4):87-94.
- [27] 游亚戈, 蒋念东, 余志. 100KW 岸式波力电站系统研究报告, 2000: 中国科学院广州能源研究所研究报告.
- [28] 蒋念东. 珠江口波力试验电站实海况性能测试与控制系统. 海洋技术, 1992,11(1):28-37.
- [29] You Ya-ge, Zheng Yong-hong, Ma Yu-jiu, Yu Zhi, Jiang Nian-dong. Structural design and protective methods for the 100KW shoreline wave power station. China ocean engineering, 2003,17(3):439-448.
- [30] 吴必军. 浮式圆柱波能装置水动力计算及能量稳定控制研究. 中国科学技术大学博士学位论文, 2005.
- [31] Su Yongling, You Yage, Zheng Yonghong. Investigation on the oscillating buoy wave power device. China ocean engineering, 2002,16(1):141-149.
- [32] Barthorpe Frances. Wave power plug into the grid. Prof Eng, 1995,8(14):25.
- [33] Yu Z., Jiang N., You Y. Power output of an onshore OWC wave power station an Dawanshan island. In: Proceedings of the European wave energy symposium, Edinburgh(England). 1993.
- [34] 邹慧君. 机械系统设计原理. 北京: 科学出版社, 2003.
- [35] 官忠范. 液压传动系统. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [36] 朱新才, 周秋沙. 液压与气动技术. 重庆: 重庆大学出版社, 2003.
- [37] 陆让之, 张声钺, 黄春兰. 船舶电机学. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- [38] 陈瑞藻. 风机水泵交流调速节能技术. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [39] 机电一体化技术手册编委会. 机电一体化手册(下册). 北京: 机械工业出版社, 1995.

- [40] 实用机械电气技术手册. 济南: 山东科学技术出版社, 1999
- [41] 田凤桐. 机电设备及其控制. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [42] FR-A500 使用手册. 三菱电机株式会社.
- [43] 耐仕蓄能稳压器说明书. 宁波耐仕液压件有限公司.
- [44] A7V 斜轴式轴向柱塞变量泵说明书. 贵州力源液压股份有限公司.
- [45] A6V 斜轴式轴向柱塞变量马达说明书. 贵州力源液压股份有限公司.
- [46] 液压元件样本. 上海东方液压件厂.
- [47] 马明建, 周长城. 数据采集与信息处理. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- [48] 钟约先, 林亨. 机械系统计算机控制. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [49] 王田苗, 丑武胜. 机电控制基础理论及应用. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [50] 刘军华. 智能传感器系统. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [51] AD7214 使用说明书. 北京瑞博华控制技术有限公司.
- [52] PT124B 型压力传感器使用说明书. 上海朝辉压力仪器有限公司.
- [53] 威斯特 CYB 压式称重传感器说明书. 北京威斯特中航机电技术有限公司.
- [54] LWGY 涡轮流量传感器使用说明书. 深圳顺诚科技有限公司.
- [55] 刘炳文. 精通 Visual Basic 6. 0. 北京: 电子工业出版社, 1999.
- [56] 余志, 蒋念东, 游亚戈. 大万山岸式振荡水柱波力电站的输出功率, 海洋工程, 1996, 14 (2): 77-82.
- [57] 庞国仲. 自动控制原理[M]. 合肥: 1998.
- [58] 胡寿松. 自动控制原理. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [59] 史维详, 唐建中, 周福章. 近代机电控制工程. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [60] 陶永华. 新型 PID 控制及应用. 北京, 机械工业出版社, 2005.
- [61] 刘金锟. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [62] 林瑞全. 增益自调整的神经元二自由度 PID 控制及其 MATLAB/SIMULINK 仿真研究 福州大学硕士学位论文, 2001.
- [63] 郭晶, 杨章玉. MATLAB6. 5 辅助神经网络分析与设计. 北京: 电子工业出版社, 2004
- [64] 万健如, 张海波, 曹才开. 单神经元 PID 控制器永磁同步电机调速系统. 电力电子技术, 2005, 39(1);75-77.
- [65] 肖松, 王印松, 杨光军. 一种基于专家调节增益的单神经元控制[J]. 自动化技术与应用, 2003, 22(4);13-16.
- [66] 蔡开龙, 谢寿生, 慎凌雷. 单神经元 PID 控制在气动压力伺服系统中的应用. 液压与气动, 2005 (12): 38-40.
- [67] 丁军, 徐用懋. 单神经元控制 PID 控制器及其应用[J]. 控制工程, 2004, 11 (1): 27-30, 42.

- [68] 曾军. 神经网络 PID 控制器的研究及仿真. 湖南大学硕士学位论文, 2004.
- [69] 李永堂, 雷步芳, 高雨茁. 液压系统建模与仿真. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
- [70] 蔡廷文. 液压系统现代建模方法. 中国标准出版社, 2002.
- [71] 陈宗海. 过程系统建模与仿真. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997.
- [72] 钱平. 伺服系统. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [73] 徐兵, 欧阳小平, 杨华勇. 配置蓄能器的变频液压电梯节能控制系统. 浙江大学学报工学版, 2002, 36 (5): 522-524.
- [74] 史志永, 詹永麒, 胡大邦. 基于交流变频技术的变量泵. 液压气动与密封, 2003 (1): 11-12.
- [75] 彭天好, 杨华勇, 徐兵. 变频回转液压系统的动态特性仿真. 机床与液压, 2001 (3): 7-8.
- [76] 王吉龙. 变频液压起货机动态特性的仿真研究. 液压气动与密封, 2005 (4): 3-5.
- [77] 张一丁, 徐兵, 杨华勇. 变转速泵控液压缸实验仿真分析. 液压与气动, 2003 (1): 18-19.
- [78] 张立海. 连续回转电液伺服马达自适应控制系统的研究. 哈尔滨理工大学工程硕士学位论文, 2003.
- [79] 熊美华. 电液比例阀控马达速度控制系统分析与仿真研究. 长安大学硕士学位论文, 2004.
- [80] 徐兵. 采用蓄能器的液压电梯变频节能控制系统研究. 浙江大学博士学位论文, 2001.
- [81] 刘贺. 带蓄能器的液压电梯节能控制系统的研究. 浙江大学硕士学位论文, 2004.
- [82] 薛定宇, 陈阳泉. 基于 MATLAB/SIMULINK 的系统仿真技术与应用. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [83] 赵文峰. 控制系统设计及仿真. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
- [84] 黄忠霖. 控制系统 MATLAB 计算及仿真. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [85] 赵文峰. 控制系统设计与仿真. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
- [86] 李丽, 王振领. MATLAB 工程计算及应用. 北京: 人民邮电出版社, 2001.
- [87] 游亚戈. 百千瓦级振荡浮子式独立发电与制淡系统, 国家高技术研究发展计划 (863) 计划课题申请书, 中国科学院广州能源研究所.

致 谢

感谢国家“863”计划、中国科学院知识创新工程、广东省科技计划对本课题的资助。

本文是在导师吴必军副研究员的悉心指导下完成的，导师渊博的学识、严谨的治学态度和求实的工作作风令我受益菲浅，并将一直影响着我。在能源所的两年里，无论是在学习、生活还是科研等方面，导师都给了我极大的关心、帮助和指导。借此论文完成之际，谨向吴老师的精心培养表示衷心的感谢！

感谢副导师郑永红研究员对本论文自始至终的悉心指导。郑老师扎实的专业基础、严密敏捷的思维、认真负责的工作态度使我收获良多，他在工作、生活中给予我的关怀与鼓励同样令我难以忘怀！

海洋能实验室首席科学家游亚戈研究员为本论文的顺利完成倾注了大量的心血。游老师是海洋波浪能领域的开拓者和引路人，他广阔的学科背景知识、深具前瞻性的眼光、敏捷活跃的思维，给我留下了深刻印象。在此对游老师的指导和帮助表示衷心的感谢！

本文还应感谢马玉久高级工程师丰富的工程经验，以及实验室苏琼清、李春林、李洪进在工作上给我的支持。

在本文的准备和写作过程中，邓赞高、胡城、盛松伟、刘鹏飞等同学给予了我很多帮助，在此表示感谢。

最后，要向远方关心我的亲人和朋友致以诚挚的谢意！是他们的支持和鼓励使我得以顺利完成学业！

硕士期间发表论文

第一作者文章：

1. 张 峰，吴必军，胡 城. 以 HIT6501 为核心的造波机控制系统研究. 机床与液压（中文核心，已录用）
2. 张 峰，游亚戈，郑永红，吴必军. 中国海洋能专利研究. 可再生能源（中文核心，已录用）
3. 张 峰，吴必军，游亚戈，邓赞高. 基于 PC 机的波高数据采集系统设计. 计算机应用研究（中文核心，已录用）

非第一作者文章：

4. 基于改进单神经元自适应 PID 的励磁控制器. 电力自动化设备（中文核心，已录用）
5. 新型极低速海流发电系统的动力装置研究. 可再生能源（中文核心，已录用）