



## 文本复制检测报告单(全文标明引文)

ADBD2015R\_2014042408514320151121142902502126665558

检测时间: 2015-11-21 14:29:02

检测文献: 201511162445\_石琼玉

作者: 石琼玉

检测范围: 中国学术期刊网络出版总库

中国博士学位论文全文数据库/中国优秀硕士学位论文全文数据库

中国重要会议论文全文数据库

中国重要报纸全文数据库

中国专利全文数据库

互联网资源

英文数据库(涵盖期刊、博硕、会议的英文数据以及德国Springer、英国Taylor&Francis 期刊数据库等)

港澳台学术文献库

优先出版文献库

互联网文档资源

图书资源

个人比对库

时间范围: 1900-01-01至2015-11-21

### 检测结果

总文字复制比: 9%

跨语言检测结果: 0%

去除引用文献复制比: 6.4%

去除本人已发表文献复制比: 9%

单篇最大文字复制比: 0.8% (大型场馆人员疏散仿真研究)

重复字数: [11616]

总字数: [129590]

单篇最大重复字数: [1067]

总段落数: [19]

前部重合字数: [2234]

疑似段落最大重合字数: [2396]

疑似段落数: [16]

后部重合字数: [9382]

疑似段落最小重合字数: [29]

指 标: ☒ 剽窃观点

☒ 剽窃文字表述

☐ 自我剽窃

☐ 一稿多投

☐ 过度引用

☐ 整体剽窃

☐ 重复发表

表格: 0

脚注与尾注: 0



剽窃观点 (1)

201511162445\_石琼玉\_第6部分

1. Mercer定理对于任意的对称函数，它一定是某个特征空间中的内积运算的必要条件，对于任意的且，会得到如下式所示的结论：，一般不难实现这一条件。

1. 201511162445_石琼玉_第1部分		总字数：4290
相似文献列表 文字复制比：3.3%(142) 剽窃观点：(0)		
1	风力发电机组状态监测与轴承故障诊断系统设计和实现 叶明星(导师：焦斌;禹华军)-《上海电机学院硕士论文》-2015-01-19	2.4% (102) 是否引证：否
2	基于LS-SVM的航空润滑油金属含量分析 黄永武;王伟平;韩孟涛;-《信息化纵横》-2009-05-25	0.9% (37) 是否引证：否

原文内容

摘要

风力发电机组结构的复杂性、运行条件的严酷性和相关因素的多样性导致其故障率不断增长，变桨距系统作为风力发电机组的核心控制技术之一，其故障已成为目前整个机组停机的首要原因。如何降低风力发电机组变桨距系统故障率和故障停机时间，降低运维成本，提高发电率和经济效益，已成为风力发电投资、建设、运营维护必须尽快解决的问题。

首先，本论文通过分析风电机基本结构和变桨距系统工作原理，从风速与桨距角、风速与电机转速、风速与功率输出三个角度分析了变桨距系统的故障机制，为故障诊断奠定了基础。

其次，由于风机运行状态由正常到故障的渐变过程中故障信息会在运行数据中有所体现，所以基于某风电场实际运行的1.5MW并网风电机组SCADA系统数据，采集风机正常状态下和三种发生频率最高的变桨距系统故障状态下的运行数据，利用所提出的数据预处理方法提取其特征信息，再利用所提出的变桨距系统故障诊断方法对变桨距系统进行故障诊断和故障分类。

再次，针对风机运行时操作情况不稳定、变桨距系统的故障发生原因复杂和参数间非线性强等特点，提出了基于粒子群优化的最小二乘支持向量机（Particle Swarm Optimization for Least Square Support Vector Machine, PSO-LSSVM）变桨距系统故障诊断方法。

LSSVM采用结构风险最小化原则代替传统统计学中的经验风险最小化原则，使其具有较强的学习能力和泛化能力，在解决

小样本、非线性、高维等问题上具有明显的优势，适用于风机变桨距系统故障诊断建模。针对选用径向基核函数的LSSVM，利用PSO对其相关参数惩罚因子和径向基核函数参数进行快速寻优，使故障诊断达到高精度要求。

最后，基于PSO-LSSVM建立桨距角故障诊断模型、电机转速故障诊断模型和功率输出故障诊断模型，并进行仿真测试。通过与LSSVM和BP神经网络从诊断正确率和均方根误差两方面进行比较，验证了PSO-LSSVM故障诊断模型的准确性和有效性。

关键词：变桨距系统故障诊断 SCADA系统最小二乘支持向量机粒子群

## ABSTRACT

The complexity structure, the harsh operating conditions and the diversity of related factors of the wind turbine cause the failure rate increases continually. The variable pitch system is one of the core control technology of wind turbine. How to reduce the failure rate of variable pitch system, the down time and the operation cost as well as improve the efficiency of the operation and maintenance of the wind turbine is a problem, which has to be solved as soon as possible for the investment, construction, operation and maintenance of wind power.

By analyzing the basic structure and working principle of wind turbine variable pitch system, the thesis analyzed the variable pitch system failure modes, which laid foundation for the fault diagnosis. Then, according to the fact that with the running state of the wind turbine changed from normal to fault, the running data changed gradually. Based on the Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems' data of 1.5MW running grid-connected wind turbines of some wind farm in Hebei Province, collect the operating data of the normal state and three common kinds of variable pitch fault state. By using the proposed method of data preprocessing and pitch fault diagnosis, not only the feature information of data can be excavated, but also the fault diagnosis and fault classification of the variable pitch system can be carried out.

In view of the instability of the operating condition, the complex failure reasons and strong nonlinear in parameters, Particle Swarm Optimization for Least Square Support Vector Machine (PSO-LSSVM) was proposed as a fault diagnosis method. LSSVM is very suitable for wind turbine variable pitch system fault diagnosis modeling, because it adopts the principle of minimized structural risk to replace the traditional principle of minimized empirical risk, which has strong learning ability, generalization ability and obvious advantages in solving small sample, nonlinear and high dimensional problems. In order to reach the highest accuracy requirements of fault diagnosis, the PSO algorithm is used to optimize the parameters of the radial basis kernel function LSSVM, namely: penalty factor and kernel width parameter.

The PSO-LSSVM was used to construct the pitch angle fault diagnosis model, the motor speed fault diagnosis model and the power output fault diagnosis model. The accuracy and effectiveness of the models had been demonstrated using the root mean square error and the diagnostic accuracy. The results of the simulation have demonstrated that the proposed approach has strong potential for wind turbine pitch system fault prognosis.

KEYWORDS: Variable pitch system, Fault diagnosis, SCADA system, LSSVM, PSO

## 目录

### 第一章绪论 - 1 -

#### 1.1 研究背景和意义 - 1 -

#### 1.2 国内外风电发展现状 - 3 -

#### 1.3 国内外故障诊断研究现状 - 6 -

#### 1.4 本文的主要研究内容 - 7 -

### 第二章变桨距系统基本理论和故障分析 - 9 -

2.1 风力发电机组基本结构及分类 - 9 -

2.1.1 风力发电机组基本结构 - 9 -

2.1.2 风力发电机组分类 - 10 -

2.2 变桨距系统工作原理及故障分析 - 11 -

2.2.1 变桨距系统工作原理 - 11 -

2.2.2 变桨距系统故障分析 - 12 -

第三章基于SCADA数据分析的变桨距故障诊断 - 15 -

3.1 故障诊断流程 - 15 -

3.2 故障数据采集 - 16 -

3.2.1 数据采集 - 16 -

3.2.2 数据预处理 - 19 -

3.3 诊断规则 - 20 -

3.4 综合诊断 - 22 -

3.4.1 桨距角综合诊断 - 22 -

3.4.2 电机转速综合诊断 - 24 -

3.4.3 功率输出综合诊断 - 26 -

3.4.4 诊断结论 - 27 -

第四章最小二乘支持向量机理论 - 29 -

4.1 支持向量机原理 - 29 -

4.1.1 最优超平面 - 29 -

4.1.2 核函数 - 32 -

4.2 最小二乘支持向量机 - 34 -

4.2.1 最小二乘支持向量机原理 - 34 -

4.2.2 核函数选取 - 35 -

4.3 粒子群优化算法 - 36 -

指 标	
剽窃文字表述	
1. 故障率和故障停机时间，降低运维成本，提高发电率 and 经济效益，已成为风力发电投资、建设、运营维护必须尽快解决的问题。 首先，本论文通过分析风电机	
2. 201511162445_石琼玉_第2部分	总字数： 510
相似文献列表	文字复制比： 0%(0) 剽窃观点： (0)
原文内容	
第五章基于粒子群优化的最小二乘支持向量机变桨距故障诊断 - 37 -	
5.1 桨距角故障诊断 - 37 -	
5.1.1 桨距角数据采集 - 37 -	
5.1.2 桨距角故障诊断模型构建 - 38 -	
5.1.3 桨距角故障诊断模型测试 - 39 -	
5.1.4 桨距角故障诊断结果分析 - 40 -	
5.2 电机转速故障诊断 - 41 -	
5.2.1 电机转速数据采集 - 41 -	
5.2.2 电机转速故障诊断模型构建 - 42 -	
5.2.3 电机转速故障诊断模型测试 - 43 -	
5.2.4 电机转速故障诊断结果分析 - 44 -	
5.3 功率输出故障诊断 - 46 -	
5.3.1 功率输出数据采集 - 46 -	
5.3.2 功率输出故障诊断模型构建 - 46 -	
5.3.3 功率输出故障诊断模型测试 - 47 -	
5.3.4 功率输出故障诊断结果分析 - 48 -	
第六章总结与展望 - 51 -	
6.1 本文总结 - 51 -	
6.2 工作展望 - 51 -	
参考文献.... - 53 -	
攻读学位期间所取得的相关科研成果 - 57 -	
致谢.... - 59 -	

3. 201511162445_石琼玉_第3部分		总字数：6081
相似文献列表      文字复制比：12%(732)      剽窃观点：(0)		
1	基于风力发电系统的风电机组变桨距故障诊断 李伟昌;张磊; - 《计算机仿真》 - 2015-09-15	6.5% (394) 是否引证：否
2	风力发电机组状态监测与轴承故障诊断系统设计和实现 叶明星(导师：焦斌;禹华军) - 《上海电机学院硕士论文》 - 2015-01-19	1.6% (98) 是否引证：否
3	中国风电产业发展问题及展望 - 《电器工业》 - 2014-11-05	1.1% (68) 是否引证：否
4	我国风电蝉联世界第一 2015将突破1亿千瓦 何桑;- 《广西电业》 - 2013-11-30	0.9% (54) 是否引证：否
5	2014年全球风电行业发展特征与趋势分析 - 《玻璃钢》 - 2014-09-15	0.6% (38) 是否引证：否
6	基于2.45GHz有源RFID室内定位算法的研究 贾若(导师：张磊) - 《河北工业大学硕士论文》 - 2014-03-01	0.6% (38) 是否引证：否
7	中国整机商直驱型风电机组市场概述 赵靓;- 《风能》 - 2014-12-06	0.6% (35) 是否引证：否
原文内容		
第一章绪论		

1.1 研究背景和意义

近些年来，能源匮乏与空气污染已成为当今全球各国亟待解决的重要问题，随着煤和石油等常用化石能源的逐渐减少，各个国家的能源消耗却逐步增加，同时环境污染问题也越来越严重，所以，世界各国也越来越看中新能源的开发和利用[1]。开拓清洁的新型能源已成为历史发展的趋势，风能看不到但感觉得到，其存在于自然界的每一角落，风能较其他新能源来说，无论从技术还是前景都是最具发展空间的，其已成为各个国家不容舍弃的一种可再生清洁能源[2,3]。初步统计显示，我国陆上可开发使用的风能资源大约为2.53亿千瓦，海上可开发使用的风能资源大约为7.5亿千瓦，总计10亿千瓦左右[4]。我国风电发展“十二五”规划明确指出，2015年目标并网装机总容量的为1亿千瓦，2020年目标装机总容量为2亿千瓦[5]。

据中国可再生能源学会风能专业委员会统计，2014年中国（除台湾地区）新增安装风力发电机组13121台，新增装机容量为23196MW，同比增长44.2%；累计安装风力发电机组76241台，累计装机容量114609MW，同比增长25.4%。2014年较2013年，仅东北地区装机容量降低，其他地区的新增装机容量都显示出增长趋势。图1.1是2004年至2014年中国累计风电装机容量，图1.2是2004年至2014年中国新增风电装机容量[6]。

图1.1 2004年-2014年中国风力发电机组累计装机容量

图1.2 2004年-2014年中国新增风力发电机组装机容量

为了降低风电场建设对优质土地占用率和视觉冲击等问题，风力发电机组正被越来越多地部署在风资源丰富但难以到达的偏远陆上和近海地区，例如：戈壁滩、海岛、高山等。那里自然条件恶劣，温度极端化，风速、风向和载荷极不稳定，对风电机组的冲击较大，导致风电机组故障时有发生，这将直接影响风电的安全性和经济性。由于运维成本占据每年风电场运营成本的很大比例，所以风电机组的运行性能对于能耗有着很苛刻的要求。为维持风电高昂稳步的发展，提高其与化石能源的竞争力，降低发电成本（包括制造安装成本和运行维护成本）是重中之重。

随着风电需求的快速增长以及海上风机的增加，良好的可靠性和更加经济的风机运行方式会带来巨大的商业利益，提高风机可靠性的本质是通过优化风机的设计和维护计划来减少停机时间，提高风机实用性。一般风机的使用周期为20年，厂家在前2年提供保修服务，而风机故障高频率爆发多在第3-5年，此时风机已不在保修期内，使得风机维护成本会出现迅速上升的趋势[7]。陆上风机和海上风机的运维成本在能源成本中分别占12%和23%[8]。风力发电机组结构的复杂性、运行条件的严酷性和相关因素的多样性导致其故障率不断增长，同时控制系统故障相较齿轮箱等机械部件故障已渐渐成为风机不能正常运行的重要因素[9,10]。控制系统是风电机组各组成部分中的重要部分，其作用为：监控风机运行状态、自动调节、兼容电网和获取风能的最大捕获率，保证风电机组稳定运行在适当的范围内，即设计域内，实现机组安全稳定高效地发电[11]。变桨距系统是风力发



电机组的核心控制技术之一[12]，其故障已成为目前整个机组停机的首要原因。严重的风机变桨距系统故障不但会产生巨大的经济损失还会导致负面的社会影响[13]，如何降低风力发电机组变桨距系统故障率和故障停机时间，降低运维成本，提高发电率 and 经济效益，成为风力发电投资、建设、运营维护必须尽快解决的问题[14]。

本文针对广泛应用的兆瓦级风力发电机组，以SCADA监控系统的风机运行数据为基础，展开风机变桨距系统故障诊断研究。通过分析风力发电机组运行过程中的各种参数信息建立故障诊断模型，对机组状态进行诊断，为风电场工作人员提供风机是否发生变桨距系统故障及故障类型等信息。同时也为制定科学的维护保养计划提供了理论依据，及时地对风机变桨距系统故障完成判断并实现主动维修，能有效减少风电机组的故障停机时间，提高维修的针对性，减少不必要的定期现场巡视，降低运维成本，进而促进风电产业更加稳定持久地发展。

## 1.2 国内外风电发展现状

风能较其他新能源是最成熟和最具商业应用价值的能源，最近几年，风电行业的发展趋势上涨，势头正猛。根据全球风能理事会发布的2014年全球风电发展统计数据，全球风电累计装机容量为369553MW，2004年以来全球风电新增装机容量如图1.3所示，累计装机容量如图1.4所示。

图1.3 2004-2014年全球新增风电装机容量

图1.4 2004-2014年全球累计风电装机容量

尽管经历全球经济衰退，但风电行业持续显示出强劲的增长趋势。最近的调查显示，2014年底全球风电装机容量369.553GW相对于2013年底的318.60GW有较快地增长。鉴于这个快速增长的速度，欧洲风能协会（EWEA）将其目标提升至2020年达到230 GW，2030年达到400GW，其中150GW将来自海上风机。目前，全球的风电行业市场主要聚集在欧洲、亚洲和北美洲，并以这三大地区为主导[14]，根据全球风能理事会的统计数据，截至2014年底，以上三个地区风电累计装机容量占全球中装机容量的95.80%。其中，欧洲累计装机总量达到133969MW，占世界装机总量的36.25%，亚洲风电累计装机总量达到142119MW，占世界装机总量的38.46%；北美累计装机总量达到77953MW，占世界装机总量的21.09%。除了欧洲、亚洲、北美洲，风电新兴市场发展同样迅速，非洲、拉丁美洲、太平洋地区也取得了快速的进步，开始重视开发风力发电的国家已有100多个[15]，全球装机地域分布图如图1.5所示。

近几年，欧洲的海上风电发展迅速，全球共有12个国家开发海上风电，除去我国和日本，另外10个国家都处于欧洲。2014年上半年，欧洲成功并网的海上风机共计224台，分布在英国、德国和比利时，装机容量为781MW。此外，还有282台风机未接入电网[16]。其中，德国是欧洲风电产业的核心区域，不但在海上风电发展的道路上遥遥领先，也在欧洲风电发展最快的国家中占据一席之地，研发的大型风电控制技术与风力发电优惠价格的支持为德国风电发展创造了十分强大的市场需求。由于德国政府的大力支持，其风电设备的制造量和出口量一直保持稳定增长的态势。并且德国采用循序渐进的发展策略，最早从风力资源丰富的州市开始发展，慢慢向山区延伸，直到陆上风电基本饱和时，开始发展海上风电，根据德国政府制定的风电发展战略，未来几年风电发展重点将在海上，2013年底，德国的风电装机总量接近34250MW，风力发电供应了德国电力总需求的10%，风能已成为德国最重要的可再生能源。

图1.5 全球装机地域分布图

2012年，中国超越美国，成为世界风电国家之首，2013年中国并网风电装机容量仍占据世界首位。在越来越大的市场需求力及竞争力的带动下，中国在风电设备方面的制造技术有了一定程度的提升。迄今为止，1.5 MW风机在风机市场上被广泛使用，3MW风机现也投入正常的运行中，5~6 MW风机已退出市场。中国现已成为全球发展速度最快的风电产业基地，2013年全国风电新增装机容量16089MW，较2012年增长了24.15%，2010年至今，风电装机容量第一次稳步回升。2014年全国累计风电装机容量114609MW，2013年西藏那曲超高海拔试验风场的建设完工和运营，标志着我国风电场建设已遍布全国各省（市、自治区）。同时，2014年全国新增风电并网装机容量20160MW，突破了20000MW大关，累计并网装机容量97320MW，全国风力发电量155TWh，是继火力发电、水力发电之后的第三大电源。2013年我国风力发电量约占全国需求电量的2.8%，与火电的78.5% 相较，所占发电比例十分渺小。中国风电的发展依然具有持续发展的后动力，风电市场预期发展势头高昂。截至2013年底，全国累计核准的风电项目容量共137.65 GW，其中2013年全国新增核准风电项目413个，新增核准容量为30.95GW。截至2013年底，全国共计有16个省（市、自治区）风电累计并网容量超过1GW，内蒙古以并网容量18.33GW成为全国第一，河北以并网容量7.75GW位列第二，甘肃以并网容量7.03GW位列第三。华北、东北、西北地区风电并网容量约占全国风电并网容量的83.6%。

经过前几年的飞速发展，从2010年开始，各种问题相继出现，中国风电开始放缓脚步，争取做到一步一个脚印，稳中求进，但仍然受到风电并网消纳能力等制约条件。2012 年全国弃风损失达20TWh，2013 降至16.2TWh，形势虽有所好转，但仍有些瓶颈问题亟待解决：弃风严重、限电严重、风电消纳并网能力差、科技创新后备力量不足和产能过剩等[17]。

从风力发电目前的发展情况能够大致看出，国家对风力发电的支持是方方面面的，且已取得一定的效果，这使得众多企业和业内人士都对风力发电未来的发展更加自信。风力发电行业的日益壮大对各地传统能源消费比重的逐步下降十分重要，同时对国家能源结构调整有深刻影响。如今，我国已有很多地区被雾霾笼罩，大力发展风力发电是根治雾霾的关键，随着风力发电在能源占比上的增加，雾霾将逐步驱散。风力发电、太阳能发电和燃气发电等清洁能源发电是清洁能源发电的主力军，是驱散雾霾的关键环节[18]。

### 1.3 国内外风电机组故障诊断研究现状

相对于国内，国外在故障诊断领域的理论研究起步较早，具备相对扎实的理论基础，其通过对风机的运行状态进行监测来实现对故障诊断问题的研究，同时将故障频率高发的部件列为重点研究对象，展开了较为深层次的研究，目前在基础数据和故障诊断算法上有较为深厚的积累，所以其不但在理论研究上达到高水平，而且在开发状态监测系统应用时也达到了高水准。目前其研究的侧重点主要为叶片、齿轮箱和发电机等部分[19]。

振动信号监测目前应用很广泛，主要包含有：时域分析、频域分析以及频谱分析等。文献[20]针对三种基于SCADA数据的状态监测方法进行了综述：信号趋势、人工神经网络和物理模型。文献[21]针对风机信号的非线性和非平稳性质，采用新的信号处理方法：固有时间尺度分解（ITD）和能量算子分离算法（EOSA）进行故障诊断。此外，针对定转子的输出功率、电流、电压分别进行信号分析，可以实现诊断电机故障[22]，轴承故障[23]，齿轮箱故障[24]以及气动不对称、叶片裂纹、不平衡等故障[25,26]。人工智能凭借其在非线性系统问题上的极大优势，发展迅速。文献[27]和[28]针对振动信号，利用BP神经网络和支持向量机（SVM）对其训练。文献[29]利用支持向量机来进行故障诊断，并通过对比人工神经网络（ANN）的诊断结果表明，线性核函数的SVM在精度、训练时间和调整时间上优于其他核函数和人工神经网络。此外，风电机组SCADA系统拥有综合的信号信息、历史警报、详细故障记录以及环境和操作条件记录，能够为最优维护方案提供资源。一台风机的系统级性能可以通过严格的信息分析进行监测，包括主要的风机装配部件。运用SCADA数据实现风机故障监测的研究在过去十年开展地十分广泛。一些常用的方法包括基于信号的风机变速箱故障检测方法，基于人工神经网络的面向变速箱故障监测的SIMAP系统，面向桨距角故障分析的概率曲线，风机变桨故障模式识别和面向变桨故障的贝叶斯网络分析。由此可知，SCADA数据具有丰富的信号，但很难解释故障监测，因此，要用恰当的方法对SCADA数据加以分析利用，以满足风机故障诊断的迫切需求。

国内在故障诊断研究方向起步虽晚但目前已进行了大量的研究。振动监测方法主要包含[30]：小波变换法、神经网络法、神经网络与模糊理论结合法及人工免疫法。文献[31]利用Relief方法，构建风力发电机组变桨距系统的特征参量挖掘模型，获取叶片桨距角、发电机转速等特征参数并进行变桨距系统故障诊断。文献[32]利用粒子群优化BP神经网络并实现风力发电机组齿轮箱故障诊断。文献[33]针对传动链系统振动信号的特点：非高斯和非平稳，提出了一种基于混合时频分析的风力发电机组故障诊断方法。文献[34]将小波包与倒频谱分析相结合，及时对齿轮箱中齿轮的裂纹实现诊断。文献[35]基于小波包分析法分析故障信号中的高频、低频，准确获得故障信号，实现故障诊断。文献[36]利用小波包分析和Elman神经网络共同实现电力电子元器件故障诊断和变频器故障诊断。文献[37]针对风力机主轴承裂纹故障，采用改进二阶统计量算法，实现对主轴裂纹的故障诊断。文献[38]根据SCADA系统塔架振动信号，建立风力发电机组正常工作状态下的塔架振动模型，实现风力发电机组振动信号的状态监测，并为早期故障诊断奠定基础。以上方法主要针对叶片、主轴承、发电机、风机塔架、齿轮箱以及变频器等部分进行故障诊断，对变桨距系统故障诊断的研究较少，相应的专家经验尚且不足[39]。

### 1.4 本文的主要研究内容

风电机组故障诊断研究工作从开展到现在主要集中在叶片、主轴承、发电机、风机塔架以及齿轮箱等机械部件，对变桨距系统的故障诊断研究较少，没有丰富的专家经验做支撑。本论文针对风电机组变桨距系统故障发生率日益上涨的现状，以某风电场实际运行的1.5MW并网风电机组SCADA系统数据为基础，对变桨距系统进行故障诊断研究。

第一章首先介绍了课题的研究背景与意义，然后介绍了国内外风电发展现状和风电机组故障诊断领域的研究现状，最后阐明对风电机组变桨距系统实现故障诊断的必要性。

第二章介绍了风电机组的基本结构，并进一步分析了变桨距系统的构成以及工作原理，阐述了变桨距系统的控制策略，明确了变桨距系统故障是目前引起风电机组停机的首要原因，并分析了变桨距系统的故障机制、故障现象以及数据层面的表现。



第三章以某风电场实际运行的1.5MW并网风力发电机组SCADA系统数据为基础，根据风机发生变桨距系统故障之前运行状态由正常到故障的渐变过程，从风速与桨距角、风速与电机转速、风速与功率输出三个角度对SCADA数据中的特征信息进行提取分析，实现风机变桨距系统的故障诊断和故障分类。

第四章对支持向量机（SVM）、最小二乘支持向量机（LSSVM）和对参数进行寻优的粒子群算法（PSO）进行了介绍，为下文奠定理论基础。

第五章以粒子群优化的最小二乘支持向量机（PSO-LSSVM）理论为基础，从风速与桨距角、风速与电机转速、风速与功率输出三个方面建立了变桨距系统故障诊断模型，并对模型进行仿真测试以及结果分析，证明故障诊断模型的准确性和实用性。

最后一章对本课题的研究工作进行总结，经过对已有成果的总结、探讨和分析，指出本课题后续较有价值的研究工作，并对未来工作进行了展望。

指 标
剽窃文字表述
1. 中国现已成为全球发展速度最快的风电产业基地，2013年全国风电新增装机容量16089MW，
2. 主要集中在叶片、主轴承、发电机、风机塔架以及齿轮箱等机械部件，对变桨距系统的故障诊断研究较少，没有丰富的专家经验做支撑。本论文针对风电机

4. 201511162445_石琼玉_第4部分		总字数：3896
相似文献列表 文字复制比：14.1%(549) 剽窃观点：(0)		
1	基于SCADA系统的大型风电机组在线状态评估及故障定位研究 梁颖(导师：方瑞明) - 《华侨大学硕士论文》 - 2013-03-28	4.2% (164) 是否引证：是
2	大型风力发电机组变桨系统的控制分析 陈波;- 《科技风》 - 2013-09-25	2.8% (110) 是否引证：否
3	大型风力发电机组的独立变桨距控制技术研究 马佳(导师：姚兴佳) - 《沈阳工业大学硕士论文》 - 2012-02-19	2.7% (107) 是否引证：是
4	风力发电系统的混杂控制技术研究 李华伟(导师：陈铁军) - 《郑州大学硕士论文》 - 2014-05-01	2.1% (83) 是否引证：否
5	大型风电机组变桨距系统设计及其智能控制方法研究 郭威(导师：徐玉秀) - 《天津工业大学硕士论文》 - 2007-01-01	1.2% (47) 是否引证：否
6	基于支持向量机的同步风电机组故障诊断系统的研究 段玲君(导师：廖力清) - 《中南大学硕士论文》 - 2012-06-30	1.0% (38) 是否引证：是
原文内容		

第二章变桨距系统基本理论和故障分析

风力发电通俗地讲就是利用风力带动风机叶片旋转，使风的动能转换为机械能，经由齿轮箱提升转速，拖动发电机发电。在工作期间，控制系统的作用至关重要。变桨距系统作为控制系统的核心子系统之一，不仅负责调节风机的桨距角以保证风能的转换效率，而且还担任在高速或紧急情况下的风机安全系统，对风力发电机组的正常运行起重要作用。

2.1 风力发电机组基本结构及分类

2.1.1 风力发电机组基本结构

风力发电机组将流动的风最终转化为电，主要依赖风机的两个部分：风轮，将流动的风捕获并将其转化成风轮旋转的机械能；发电机，风轮通过旋转带动发电机，实现机械能转化为电能。其具体转化过程如下：风通过推动风机叶片，将动能转化成叶片旋转的机械能，因叶片固定在转轴上，叶片和发电机是同轴，所以叶片通过旋转实现机械能向电能的转换[40]。自2014年起，风机单台大容量的走势日益上涨，其中1.5MW和2.5MW风机已稳居主流机型的地位,大型风力发电机组占据风机市场的主要份额。虽然装机容量和控制技术和以前相比进步很大，但对风机组成部件和机械结构影响却不大。目前，主流风机为水平轴式，其主要包括叶片、变桨距系统、偏航系统、传动系统等部件[41]，如图2.1所示。

图2.1 风力发电机组基本结构

在风能到电能的整个转换过程中，能量形式由风能转化为机械能，继而由机械能转化为电能，这个能量转化过程十分复杂，只有通过控制系统才能实现对其精密的控制[42]。风力发电机组的控制系统包含测风系统、变桨距系统和偏航系统等，首先利用传感器采集传递风速、风向、温度、风轮转速和压力等有效信息，再根据控制策略的综合分析，对该信息发出控制命令，通过执行机构，最终实现对风力发电机组的控制[43]，图2.2为风力发电机组的工作原理示意图。

图2.2 风力发电机组工作原理示意图

### 2.1.2 风力发电机组分类

风电的快速发展导致风电机组的设计受到了整个行业的重视，下面将介绍一些风电机组常见的分类方法[44]：

(1)有无齿轮箱：目前应用最广泛的并网型风机为双馈型风机和直驱型风机，直驱型风机与风轮直接连接的是多极电机，风能可以直接驱动多极电机，完成风向电的转变，整个过程为：首先风能转化为变幅变频的三相交流电，整流过后将交流电转化成直流电，最后利用逆变器将其转换为幅值频率恒定的三相交流电，最终并入电网。整个过程可以实现最大功率的跟踪，但同时它的缺点也十分显著，因为缺少齿轮箱的缓冲，所有的冲击载荷都作用在发电机系统之上，所以对发电机会更高的性能要求[45]。而双馈型风机就包含有齿轮箱，其处于风轮和发电机之间，缺点是噪声大，故障频发，且机械损耗居高不下，优点是通过对励磁电流的控制，不但能实现在不同转速情况下发电，而且能独立地实现对发电机有功功率和无功功率的调节，整体提升电力系统的性能。

(2)风轮形式：目前水平轴风机是市场的主流需求机型，此外还有一种垂直轴风机。垂直轴风机依据转矩的原理可细分为升力型和阻力型，但是升力型的气动效率要明显优于阻力型的。水平轴风机可细分为上风向型和下风向型，上风向型风机通过主动调向机构以满足风轮不断变化的对风需求。对比两种类型风机的优越性，水平轴风机更胜一筹，所以其应用最为广泛[46]。

(3)风速是否恒定：恒速型风电机组的优点是设计简单，电压运行范围广，可直接并网，但机组较为笨重，运行效率低，而且笨重的结构会形成较大的载荷，使电网不稳定；相比之下，变速型风电机组结构单一，重量相对较轻，运行效率高，迄今为止是应用在大型风电机组上最为广泛的机型。

(4)功率调节方式：依据功率调节方式可分两类，即：定桨距失速型风机和变桨距失速型风机。定桨距失速型风机突出的结构特点是：其桨叶和轮毂之间是固定的，不受风速的影响，桨距角保持为某个恒定值。优点为其所需的控制系统较为简单，生产成本较低，可靠性较高，同时叶片质量很大，缺点为其制造的难度系数较大，遇到风速猛增的情况时，其会承受很大的机械应力，这对安全系数的需求很大。变桨距失速型风机突出的结构特点是：叶片能够以叶片中心轴为中心旋转，使叶片桨距角可在 $0^{\circ}$ 到 $90^{\circ}$ 中间变化，以保证输出功率处于极限值之下。优点为机组质量较轻，对刹车需求不大，使其启动性能更优越。缺点为其相较另一类型多增加了变桨距控制，增加了机组的故障发生频率[47]。

(5)并网方式：依据并网方式可分两类：并网型风机和离网型风机。并网型风机没有储能装置，主要依附于电网。离网型风机，具有蓄电池等储能装置，此外还能和发电机、电池等并联运行，不用依附于电网，其在偏僻地区应用较为广泛，所以其具有较为广阔的市场潜力。

## 2.2 变桨距系统工作原理及故障分析

### 2.2.1 变桨距系统工作原理

变桨距系统是现代变桨距风机中不可或缺的一部分，其通过控制叶片围绕转轴旋转，并改变叶片的桨距角，进而改变风电机组的气动特性，最终改善桨叶和整个风力发电机组的受力状况，提高风能捕获率[48]，这将有效保证风力发电机组在额定风速以上安全、稳定、高效地运行[49]。此外，变桨距系统在超额定风速或紧急情况下也是保护风机安全的重要组成部分。例如，电网故障时，桨叶需在变桨距系统备用电源的驱动下完成自动顺桨，使风机停止运行，避免或降低风电机组受损害程度[50]。

图2.3是变桨距风电机组的功率控制框图，通常情况下风机的额定风速为 $12\text{m/s}$ ，当风速未达到额定风速前，风机三个桨叶以定桨距方式运行，风轮转速和风速变化密切相关；当风速达到或超过额定风速后（大约为 $12\text{m/s}$ — $25\text{m/s}$ ），为避免风机载荷超

标，变桨距系统启动以保证发电机额定功率输出。变桨距控制策略大致描述为：把风机的额定功率当作功率控制器的给定输入，并把发电机实际的输出功率进行反馈，与额定功率作比对，将所得偏差作为功率控制器的输入，功率控制器输出的电信号可以调整叶片的桨距角。输出功率高于额定功率时，功率控制器的输出调节叶片的桨距角减小，桨距角根据给定信号来实现叶片旋转，达到控制要求；输出功率低于额定功率时，通过控制叶片使桨距角变大；当风速大于25m/s时，超过风电机组运行许可的范围时，为保护风电机组，变桨距控制系统实现叶片顺桨，即桨距角达到90°，实现气动刹车，风轮转速为零。理论上，三个叶片中任一个叶片顺桨即可实现正常停机[51]。

图 2.3 变桨距风电机组的功率控制框图

## 2.2.2 变桨距系统故障分析

### (1) 桨距角故障分析

本论文将风电机组发生故障时的桨距角异常称为桨距角故障，桨距角故障分析如图2.4所示，实线为风机正常运行时桨距角的走势曲线，点划线为发生变桨距系统故障时桨距角的走势曲线。

图2.4 桨距角故障分析

由图2.4可以看出，一般情况下，当风速大于切入风速时，桨距角大约处于0°的位置，未启动变桨。风速达到额定风速后，桨距角会随着风速的改变而变化。图示桨距角故障情况为：桨距角故障性顺桨，这将导致风机停止发电，风速的改变也不能使变桨距系统产生实时响应；低于额定风速时桨距角过早启动故障，这将直接导致变桨距系统失效；高于额定风速时桨距角过度增加，这将导致风轮受风面积降低，发电质量下降。

### (2) 电机转速故障分析

本论文将风电机组发生故障时的电机转速异常称为电机转速故障，电机转速故障分析如图2.5所示，实线为风机正常运行时电机转速的走势曲线，点划线为发生变桨距系统故障时电机转速的走势曲线。

图2.5 电机转速故障分析

由图2.5可以看出，一般情况下，当风速大于切入风速时，风机开始运行，电机转速随着风速的增加而增加。风速达到额定风速后，电机转速稳定在额定值左右。图示电机转速故障情况为：电机故障性停转，这将导致风机被迫停机，停止发电；低于额定风速时电机转速响应较慢故障，这将导致风机不能在最短的时间内达到额定发电状态；高于额定风速时电机转速过低，这将导致风机发电不在额定状态，发电质量下降。

### (3) 功率输出故障分析

本论文将风电机组发生故障时的功率输出异常称为功率输出故障，功率输出故障分析如图2.6所示，实线为风机正常运行时功率输出的走势曲线，点划线为发生变桨距系统故障时功率输出的走势曲线。

图2.6 功率输出故障分析

由图2.6可以看出，一般情况下，当风速大于切入风速时，风机开始运行，功率输出随着风速的增加而增加。风速达到额定风速后，功率输出稳定在额定值左右。图示功率输出故障情况为：无功率输出故障，风机停机，停止发电；低于额定风速时功率输出响应较慢故障，这将导致风机不能在最短的时间内达到额定发电状态；高于额定风速时功率输出过低，这将导致风机发电不在额定状态，发电质量下降。

### (4) 故障分析结论

由上述故障分析可知，影响变桨距系统的相关参数有许多，且各参数之间均有耦合性，同时变桨距系统也有很强的非线性。桨距角发生故障时，会影响风能利用率，使电机不能达到相应的转速状态，发生电机转速故障，风机功率输出受影响导致功率输出故障。因此，桨距角、电机转速、功率输出和风速之间有密切的关系，这使风机变桨距系统故障诊断的实现难度增大。本文针对风力发电机组变桨系统故障问题，对风速、桨距角、电机转速以及功率输出四组参数进行深入分析。

本章介绍了风力发电机组的基本结构及工作原理，并进一步介绍了变桨距系统的物理结构和工作原理，从风速与桨距角、风速与电机转速、风速与功率输出三方面分析了变桨距系统的故障模式，为后面的故障诊断奠定基础。

指 标
剽窃文字表述
1. 2.1 风力发电机组基本结构及分类
2.1.1 风力发电机组基本结构
风力发电机组将

5. 201511162445_石琼玉_第5部分	总字数：8562
--------------------------	----------

相似文献列表	文字复制比：0%(0)	剽窃观点：(0)
--------	-------------	----------

原文内容
第三章基于SCADA数据分析的变桨距故障诊断

风机运行状态由正常到故障的渐变过程中，故障信息会在运行数据中有所体现，所以本章针对风力发电机组变桨距系统，以某风电场实际运行的1.5MW并网风力发电机组SCADA系统数据为基础，从风速（米/秒，m/s）和桨距角（度，°）、风速和电机转速（转/分，rpm）、风速和功率输出（千瓦，KW）三个角度对SCADA数据中的特征信息进行提取分析，实现风机变桨距系统的故障诊断和故障分类。

3.1 故障诊断流程

变桨距系统故障诊断方法由数据采集、诊断规则、综合诊断三部分组成，故障诊断流程如图3.1所示。

图3.1故障诊断流程图

本文所研究的SCADA系统是某风电场1.5MW风力发电机组配备的SCADA系统，其主要功能为定期采集并记录风力发电机组各部件或子系统的运行状态数据，当采样数据越限时，给出报警信息，该风场风力发电机组参数如表3.1所示。

表3.1 风电机组参数

风机部件风机参数

风轮直径 96.48m

发电机额定功率 1500kW

发电机额定转矩 8.74kNm

发电机最大转矩 16.91kNm

发电机额定转速 1750rpm

本章所用故障诊断方法虽然基于数据但与以往对瞬时响应的数据选择不同，此方法是基于一定操作条件下，对风机的一般运行状况进行综合评审，而运行状况将通过大量提取相关的SCADA数据之间的关联性表现出来。由于越接近故障发生时刻，故障信号特征越明显，所以首先应该提取风机SCADA系统数据中正常运行时和发生故障前0.5小时的风速、桨距角、电机转速、功率输出等参数，然后将采集到的参数数据进行预处理，最后将预处理后的数据按照诊断规则进行故障诊断，并对诊断结果进行分析。

3.2 故障数据采集



3.2.1数据采集

根据风场一年的运行状态跟踪表可知，该风场中的风电机组变桨距系统发生的故障有：变桨3°故障、变桨三桨叶不同步故障、变桨安全链故障、变桨90°故障、变桨处于紧急模式故障、变桨急停故障、变桨电机超速故障、变桨位置过小故障和变桨位置过大故障等，共计306次。其中发生频率最高的为前三种，即：变桨3°故障、变桨三桨叶不同步故障和变桨安全链故障，共计207次。

通常情况下，风机变桨距系统在某一时刻发生故障时，是由某种固定的故障原因导致的，所以为达到对占比最高的三种变桨距系统故障类型进行诊断，需从风机SCADA系统中提取正常状态下的运行数据和三种变桨距系统故障状态下的运行数据。由于越接近故障发生时刻，信号特征越明显，因此，为了使数据能准确的显示出状态变化趋势，以1s为单位，根据表3.2所示的风场运行状态跟踪表分别提取风机SCADA系统中5组正常运行0.5小时和5组发生每种变桨距系统故障时刻前0.5小时内的风速、桨距角、电机转速、功率输出数据。

表3.2 运行状态跟踪表

故障时间	故障名称	故障发生原因	故障处理方案	故障恢复时间
2013/11/20 22:01	变桨安全链故障	消缺引发现场复位		2013/11/20 22:03
2013/11/27 16:29	变桨3°故障	传感器故障	紧固传感器	2013/11/27 16:33
2013/12/11 12:04	变桨3°故障	传感器故障	更换传感器	2013/12/11 12:09
2013/12/12 12:32	变桨三桨叶不同步故障	轴1的95°限位故障	手动恢复桨叶	2013/12/12 12:36
2013/12/13 16:50	变桨三桨叶不同步故障	变桨PLC故障	更换PLC	2013/12/13 16:54
2013/12/15 13:34	变桨三桨叶不同步故障	轴1编码器自带线损坏	重做编码器自带线	2013/12/15 13:38
2013/12/16 7:36	变桨安全链故障	传感器松动	紧固传感器	2013/12/16 7:41
2013/12/18 12:05	变桨三桨叶不同步故障	变桨桨叶1撞95°限位	与轴3调换编码器接线	2013/12/18 12:10
2013/12/18 23:59	变桨三桨叶不同步故障	变桨桨叶1电机的W相接线松动	紧固电机W相接线	2013/12/20 14:30
2013/12/20 20:19	变桨安全链故障	传感器不灵敏	检查传感器	2013/12/20 20:23
2013/12/22 15:45	变桨3°故障	3°位置传感器不灵敏	更换3°位置传感器	2013/12/22 15:50
2013/12/25 12:26	变桨3°故障	3°位置传感器不灵敏	更换3°位置传感器	2013/12/25 12:31
2013/12/26 1:01	变桨安全链故障	传感器不灵敏	检查传感器	2013/12/26 1:05
2013/12/27 11:16	变桨3°故障	3°位置传感器不灵敏	更换3°位置传感器	2013/12/27 11:20
2013/12/31 16:02	变桨安全链故障	风速突变	主控复位	2013/12/31 16:06

根据表3.2所示的风场运行状态跟踪表对提取的数据进行标识，用0表示正常状态，1表示变桨3°故障，2表示变桨三桨叶不同步故障，3表示变桨安全链故障，采集到的SCADA系统数据如表3.3-3.6所示。

表3.3 风机正常运行数据



序号 风速

m/s 桨距角

° 电机转速

rpm 功率输出

KW 风力发电机组状态

1 9.435459 0 17.02727 1329 0

2 9.156809 0 17.03225 1321 0

3 10.33622 1.07 17.46517 1536 0

4 10.87633 0.27 17.31688 1519 0

5 9.619688 0 17.0621 1337 0

8998 6.116853 0 13.17178 334 0

8999 4.525891 0 12.60549 296 0

9000 4.799954 0 12.51592 286 0

表3.4 变桨3°故障数据

序号 风速

m/s 桨距角

° 电机转速

rpm 功率输出

KW 风力发电机组状态

1 8.12281 5.060002 15.31297 531.6 1

2 7.362843 5.060002 15.17624 517.8 1

3 7.06109 5.060002 14.95407 495.6 1

4 6.83757 5.060002 14.78316 476.4 1

5 6.211714 5.060002 14.62935 461.4 1

8998 14.26961 12.51608 17.46635 1462.8 1

8999 14.96252 11.01874 17.07327 1462.2 1

9000 13.24142 12.82712 17.09295 1465.8 1

表3.5 变桨三桨叶不同步故障数据

序号 风速

m/s 桨距角

° 电机转速

rpm 功率输出

KW 风力发电机组状态

1 2.59069 10.53642 0.05 30.6 2

2 3.20537 10.62799 0.05 31.2 2

3 3.20537 10.62799 0.05 31.2 2

4 2.613042 10.57894 0.05 45.6 2

5 2.110122 10.61903 0.05 57.6 2

8998 10.548 17.57962 5.285694 1477.8 2

8999 9.799211 17.34873 5.174159 1467.6 2

9000 9.553339 17.10788 3.965757 1473 2

表3.6 变桨安全链故障数据

序号 风速

m/s 桨距角

° 电机转速

rpm 功率输出

KW 风力发电机组状态

1 4.010042 13.17667 0.03 327.6 3

2 3.216546 12.7665 0.03 301.2 3

3 3.082434 12.54433 0.03 291 3

4 2.847738 12.33924 0.03 271.8 3

5 2.847738 12.33924 0.03 271.8 3

8998 11.41973 16.86819 6.198823 1459.2 3

8999 12.15735 16.8541 4.971952 1474.8 3

9000 12.80555 17.11286 5.074648 1485.6 3

### 3.2.2数据预处理

风机通过叶片捕获能量，然后通过传动链将能量转换成机械能进行传递，最后利用发电机将机械能转换为电能，然而，这种能量流可以被发生在风机上的故障扰乱。故障特征千变万化，例如，风机故障时的风速-功率曲线可能会偏离其正常位置。同时，风机SCADA数据不仅是受风机结构完整性的影响，还受许多其他因素的影响(例如风切变和湍流)，这显著增加了故障诊断的困难程度。针对这个问题，为了提取SCADA数据的特征信息，对数据进行预处理十分必要。

为了提取SCADA数据之间的关联性，下面是数据预处理算法。考虑到风能是被风机捕获，所以发电机功率与风速的立方成正比[52-53]，风速将作为相关数据分级的参考依据。

步骤1：定义相关的SCADA数据；

步骤2：将风速数据进行消噪滤波处理；

步骤3：从滤波后的风速数据中找到最小风速和最大风速；

步骤4：将划分成子范围。按照IEC标准[54]，可以估计为：

式中：是一个正整数。

步骤5：定义；

步骤6：找到位于范围的风速数据并将其用标记，在此：

步骤7：将分割成份，然后计算出风速在该范围内期望值，使用的方程为：

式中：代表了风速位于第份中的概率；

为位于第份中的风速数据数量；

为位于范围内风速数据的总数；

为位于第份中的风速。

本文中设置为4。

步骤8：利用同样的方法计算其他相关的被标记的SCADA参数的期望值。

步骤9：迭代步骤6-8，直到；

上述数据预处理方法，不同于IEC标准中所介绍的取平均值而是取期望值。这种改进的优点为：在SCADA数据中，采取期望

值会降低由于“异常值”造成的统计误差，而采取平均值未能考虑这些“异常值”的概率分布，所以通常结果并不准确。

3.3 诊断规则

对变桨距风电机组而言，在已知操作情况的前提下，风机SCADA数据就可以被预测，凡是与预测值产生任何偏差的实际运行数据都会预示着故障的发生。但是SCADA数据和风机操作状况息息相关，如何在操作状态下正确评估偏差仍然是个难题。其中的一个解决办法是将偏差和相应的操作条件关联起来并概括一下规律。为了保证这种故障诊断方法的可靠性，所用的SCADA数据需要进行严格筛选。

为了实现基于SCADA数据分析的变桨距系统故障诊断，将上述预处理过的风速-桨距角、风速-电机转速和风速-功率数据用下面的方程进行描述[55]：

(3.1)

式中：为模型系数；

为方程的阶；

为的估计值。

为了得到理想的，依照最小二乘法的原理，上式应满足以下条件：

(3.2)

式中：为总估计误差。

将(3.1)带入(3.2)可得：

(3.3)

这是一个范德蒙矩阵方程。因此，最小二乘法计算的矩阵可以写成：

(3.4)

此时令：

则式(3.4)可以表达为：

(3.5)

在式(3.5)的两侧增加的转置矩阵可得：

(3.6)

因此，可以通过计算得到系数矩阵：

(3.7)

得到系数矩阵后可以建立的相关模型。风电机组是否发生变桨距系统故障的运行状况可以通过下式的参数计算进行评估，即：

(3.8)

式中：为待检测数据模型系数；

为风机正常运行模型系数。

从式(3.8)可以推断，正常情况下，当时，风机正常运行，值越大，说明故障越严重。不过，值得注意的是，对于风机这样的机械设备受到的载荷条件会不断变化而且经常在不同操作条件下工作，所以风机的运行通常是依赖于实际载荷和运行条件。而在值的评估中，通过观测最大状态误差来判断风机是否发生变桨距系统故障降低这种依赖性。

3.4 综合诊断

为了检测3.3节所述故障诊断方法是否有效，基于已采集到的风机正常状态下的运行数据和三种常见变桨距系统故障（变桨3°故障、变桨三桨叶不同步故障、变桨安全链故障）的运行数据，从风速-桨距角、风速-电机转速和风速-功率输出三个方面对变桨距系统进行故障诊断和故障分类。

3.4.1 桨距角综合诊断

首先，将采集到的风速-桨距角数据按照3.2.2的方法进行预处理，为后续的故障诊断做好铺垫。图3.2为正常和三种变桨距系统故障情况下未处理的原始风速-桨距角数据，图3.3为预处理后的数据。其中，横轴表示风速，单位为m/s，纵轴表示桨距角，单位为°。图3.2中黑色圆形表示风力发电机组处于正常状态，红色十字表示变桨三桨叶不同步故障，绿色方块表示变桨3°故障，蓝色星号表示变桨安全链故障。

图3.2 风速-桨距角原始数据

从图3.2可以看出：原始风速-桨距角数据中的正常数据和故障数据部分混杂在一起，无法直观地表征出正常与故障的区别，无法为判别故障提供可靠的依据；在风机发生变桨距系统故障的前期，故障特征还不是十分明显，此时风机的原始数据不能表达出故障信息；故障发生时，很难评估故障的严重性。

由图3.2可知，风机在正常运行时，当风速低于额定风速，风机三个桨叶以定桨距方式运行，此时的桨距角不是变桨距系统实时控制，所以为了故障诊断的准确性，应将正常运行数据进行适当筛选。筛选后数据的预处理结果如下图所示：

图3.3 风速-桨距角预处理后数据

从图3.3可以看出：3.2.2所述的方法能有效地实现数据预处理，表明数据走势；通过对比正常和故障的风速-桨距角曲线，可以看出故障曲线偏离正常曲线即表示故障的发生，在风机发生变桨距系统故障前期有预警作用；故障发生时风速-桨距角运行曲线偏离正常曲线的距离越远，表示故障程度越严重。

风速-桨距角数据预处理完后按照3.3节所述诊断规则进行故障诊断，此处，方程的阶数选取4，诊断结果如表3.3所示。

表3.3 风速-桨距角诊断结果

故障名称值

变桨三桨叶不同步故障 1.0090

变桨3°故障 2.3077

变桨安全链故障 6.1538

从表3.3可以看出：

- （1）不同类型的变桨距系统故障的桨距角计算值均不为0，明确地显示出风机变桨距系统故障的发生；
- （2）预处理后的风速-桨距角数据经过计算能清楚地显示出风机变桨距系统发生故障，说明预处理方法能有效地提取其特征



信息；

(3) 由 << 可知变桨安全链故障最为严重，变桨3°故障次之，变桨三桨叶不同步故障相较最轻。

(4) 通过桨距角值所属范围能够判断出三种变桨距系统故障的类型。

3.4.2 电机转速综合诊断

首先，将采集到的风速-电机转速数据按照3.2.2的方法进行预处理，为后面故障这段做好铺垫。图3.4为正常和三种故障情况下未处理的原始风速-电机转速数据，图3.5为预处理后的数据。其中，横轴表示风速，单位为m/s，纵轴表示电机转速，单位为rpm。图3.4中黑色圆形表示风力发电机组处于正常状态，红色十字表示变桨三桨叶不同步故障，绿色方块表示变桨3°故障，蓝色星号表示变桨安全链故障。

图3.4风速-电机转速原始数据

从图3.4可以看出：原始风速-电机转速数据中的正常数据和故障数据部分混杂在一起，无法直观地表征出正常与故障的区别，无法为判别故障提供可靠的依据；在风机发生变桨距系统故障的前期，故障特征还不是十分明显，此时风机的原始数据不能表达出故障信息；故障发生时，很难评估故障的严重性。

图3.5 风速-电机转速预处理后数据

从图3.5可以看出：3.2.2所述的方法能有效地实现数据预处理，表明数据走势；通过对比正常和故障的风速-电机转速曲线，可以看出故障曲线偏离正常曲线即表示故障的发生，在风机发生变桨距系统故障前期有预警作用；故障发生时风速-电机转速运行曲线偏离正常曲线的距离越远，表示故障程度越严重。

风速-电机转速数据预处理完后按照3.3节所述诊断规则进行故障诊断，方程的阶数选取4，诊断结果如表3.4所示。

表3.4 风速-电机转速诊断结果

故障名称值

变桨三桨叶不同步故障 1.0742

变桨3°故障 2.0533

变桨安全链故障 4.1067

从表3.4可以看出：

(1) 不同类型的变桨距系统故障的电机转速计算值均不为0，明确地显示出风机变桨距系统故障的发生；

(2) 预处理后的风速-电机转速数据经过计算能清楚地显示出风机变桨距系统发生故障，说明预处理方法能有效地提取其特征信息；

(3) 由 << 可知变桨安全链故障最为严重，变桨3°故障次之，变桨三桨叶不同步故障相较最轻。

(4) 通过电机转速值所属范围能够判断出三种变桨距系统故障的类型。

3.4.3 功率输出综合诊断

首先，将采集到的风速-功率输出数据按照3.2.2的方法进行预处理，为后面故障这段做好铺垫。图3.6为正确和三种故障情况下未处理的原始风速-功率输出数据，图3.7为预处理后的数据。其中，横轴表示风速，单位为m/s，纵轴表示功率输出，单位为KW。图3.6中黑色圆形表示风力发电机组处于正常状态，红色十字表示变桨三桨叶不同步故障，绿色方块表示变桨3°故障，蓝色星号表示变桨安全链故障。

色星号表示变桨安全链故障。

图3.6风速-功率输出原始数据

从图3.6可以看出：原始风速-功率输出数据中的正常数据和故障数据部分混杂在一起，无法直观地表征出正常与故障的区别，无法为判别故障提供可靠的依据；在风机发生变桨距系统故障的前期，故障特征还不是十分明显，此时风机的原始数据不能表达出故障信息；故障发生时，很难评估故障的严重性。

图3.7 风速-功率输出预处理后数据

从图3.7可以看出：3.2.2所述的方法能有效地实现数据预处理，表明数据走势；通过对比正常和故障的风速-功率输出曲线，可以看出故障曲线偏离正常曲线即故障的发生，在风机发生变桨距系统故障前期有预警作用；故障发生时风速-功率输出运行曲线偏离正常曲线的距离越远，表示故障程度越严重。

风速-功率输出数据预处理完后按照3.3节所述诊断规则进行故障诊断，方程的阶数选取4，诊断结果如表3.5所示。

表3.5 风速-功率输出诊断结果

故障名称值

变桨三桨叶不同步故障 88.3573

变桨3°故障 143.9748

变桨安全链故障 327.2720

从表3.5可以看出：

- （1）不同类型的变桨距系统故障的功率输出计算值均不为0，明确地显示出风机变桨距系统故障的发生；
- （2）预处理后的风速-功率输出数据经过计算能清楚地显示出风机变桨距系统发生故障，说明预处理方法能有效地提取其特征信息；
- （3）由 << 可知变桨安全链故障最为严重，变桨3°故障次之，变桨三桨叶不同步故障相较最轻。
- （4）通过功率输出值所属范围能够判断出三种变桨距系统故障的类型。

3.4.4 诊断结论

- （1）在风电机组正常运行时，一个严重的故障会导致SCADA数据的变化，然而SCADA数据的变化并不一定表明故障的发生。所以说，SCADA数据的变化和故障是否发生有一定关联性，但也不是绝对的，利用3.2.2所提的数据预处理方法可以有效的提取出其关联性，为后续故障诊断工作奠定基础。
- （2）利用3.3所提的变桨距系统故障诊断方法能够有效地从桨距角、电机转速和功率三个方面判断变桨距系统故障是否发生和故障的严重程度，即：变桨三桨叶不同步故障、变桨3°故障、变桨安全链故障的严重程度为依次加深。
- （3）通过对比三种常见变桨距系统故障类型的值诊断结果，能够轻松地区分判断出三种故障类型。这将为风场运维人员明确故障指向，有效降低风场的停机时间，降低风力发电成本，减少经济损失。

本章基于SCADA数据分析对风电机组变桨距系统故障诊断进行研究，针对风机的一般运行状况进行综合评审，提取相关数据潜在的关联性，选取风速与桨距角、风速与电机转速和风速与功率输出等相关参数进行分析，先将数据进行预处理，然后利用所提出的方法进行故障诊断，实验结果表明本章所提出的方法能够有效地实现风机变桨距系统的故障诊断和分类。但是在实际情况中，风机运行时操作情况不稳定等因素会使得变桨距系统故障诊断无法准确、顺利地进行，具有一定的局限性。所以下

面将利用机器学习法最小二乘支持向量机在解决非线性和高维等问题上的优势对风机变桨距系统故障诊断展开进一步研究。

6. 201511162445_石琼玉_第6部分		总字数：4457
相似文献列表    文字复制比：30.3%(1349)    剽窃观点：(1)		
1	<u>基于双层模糊支持向量机的液压系统故障诊断</u> 王盈(导师：董增寿) - 《太原科技大学硕士论文》 - 2013-05-01	15.3% (684) 是否引证：否
2	<u>基于支持向量机的风电功率预测和变桨距控制研究</u> 王鹏(导师：肖燕彩) - 《北京交通大学硕士论文》 - 2012-06-01	6.8% (303) 是否引证：否
3	<u>基于寿命周期成本理论的水工结构优化</u> 董雯雯(导师：郗志红) - 《河北农业大学硕士论文》 - 2009-06-10	3.7% (165) 是否引证：否
4	<u>基于EMD近似熵和LS-SVM的机械故障智能诊断</u> 戴桂平; - 《机械强度》 - 2011-04-15	2.9% (128) 是否引证：否
5	<u>LS-SVM网络在LDF成形过程中的应用</u> 鲁中良;李涤尘;卢秉恒;张安峰; - 《焊接学报》 - 2010-12-25	2.8% (123) 是否引证：否
6	<u>基于改进最小二乘支持向量机的日用水量预测方法研究</u> 吴凌云(导师：陈磊) - 《浙江工业大学硕士论文》 - 2013-04-01	1.9% (83) 是否引证：否
7	<u>GA-LSSVM在GPS高程异常反演中的应用</u> 张祥;邓喀中;范洪冬; - 《金属矿山》 - 2012-06-15	1.7% (75) 是否引证：否
8	<u>基于支持向量机的中文文本分类模型研究</u> 马忠宝;刘冠蓉; - 《计算机技术与发展》 - 2006-11-10	1.6% (72) 是否引证：否
9	<u>电子商务环境下企业信息的智能统计分析方法研究</u> 林红华(导师：肖智) - 《重庆大学硕士论文》 - 2004-03-25	1.6% (71) 是否引证：否
10	<u>基于LapSVM的物流编号图像自动识别算法</u> 曹炯清; - 《物流技术》 - 2015-02-15	1.6% (71) 是否引证：否
11	<u>基于改进支持向量机的风电场短期出力预测研究</u> 李陆林(导师：武小梅) - 《广东工业大学硕士论文》 - 2014-05-01	1.3% (60) 是否引证：否
12	<u>最小二乘支持向量机在水平井产能预测中的应用</u> 刘科;张琥;贾纯柯;王英; - 《内蒙古石油化工》 - 2010-07-30	1.3% (60) 是否引证：否
13	<u>基于最小二乘支持向量机的交通流量预测模型</u> 赵亚萍;张和生;周卓楠北京交通大学电气工程学院;杨军;潘成;贾利民; - 《北京交通大学学报》 - 2011-04-15	1.3% (60) 是否引证：否
14	<u>基于SVM的预应力混凝土梁有效预应力识别</u> 李清富;辛保兵;李科; - 《郑州大学学报(工学版)》 - 2011-01-10	1.0% (46) 是否引证：否
15	<u>改进LSSVM在水平井产能预测中的应用</u> 肖京男;汪志明;魏建光;赵姗姗; - 《石油钻探技术》 - 2010-11-25	1.0% (45) 是否引证：否
16	<u>基于支持向量机的数据挖掘</u> 郑建华(导师：赵政) - 《天津大学硕士论文》 - 2004-06-01	0.9% (40) 是否引证：否
17	<u>基于支持向量机的中文娱乐新闻词语的识别</u> 曹建芳;王鸿斌; - 《计算机应用与软件》 - 2011-02-15	0.9% (39) 是否引证：否
原文内容		
第四章最小二乘支持向量机理论		

4.1 支持向量机原理

支持向量机(Support Vector Machine, SVM)是随着统计学的发展而被提出来的一种新型的机器学习方法，是由Boser, Guyon, Vapnik在COLT-92 (Computational Learning Theory) 上第一次提出[56-57]，其优势主要体现在能较好地解决小样本、非线性和高维度的机器学习问题，十分适合应用于非线性强、受环境影响大的风电机组变桨距系统故障诊断建模中。

4.1.1 最优超平面

SVM算法是基于在线性可分前提下的最优分类面引申发展而来的，最初被用来解决数据分类问题。算法的思想是寻找一个能够满足分类要求的线性函数，在一维空间里就是一个点，在二维空间里就是一条直线，三维空间里就是一个平面，依此类推

，在忽略空间维数情况下，将这些线性函数统一叫作超平面，并且要使训练数据集中的区域到超平面的距离达到最远，那么就是说去寻找一个超平面使得其两边的空白区域达到最大，上述线性可分前提下超平面分类示意图如4.1所示[58]。

图4.1 线性可分情况下的分类超平面

图4.1中的圆圈和方框分别代表两种不同类型的样本，每个类型都有许多样本点。H1、H2为算法最终寻找到的超平面，方向与法向量一致，H1、H2超平面均平行于H而且包含与H距离最近的样本点，将H1、H2之间的距离称作分类间隔[59]，被超平面H1、H2包含的训练样本就是支持向量(Support Vector, SV)。最优分类线的作用就是利用分类线在对两类样本进行正确分类，使训练错误率保持为0的前提下，还要将分类间隔取最大值。前者达到经验风险最小，后者实现真实风险最小。最优分类线类推到高维空间中就是最优分类面。

假设有两种类型样本集训练数据，其中是训练样本的总数，是样本所处空间的维数，是样本的分类标签[60]，两类样本利用超平面H进行分类：

(4.1)

在线性可分的情况下，对式(4.1)中的线性函数完成归一化处理，进而使所有的训练样本都满足，为输入所输出的结果，在分类结果无误时，与实际标签相同，则可用下式表达：

(4.2)

其中，超平面上的样本满足，分类间隔。此时取分类间隔最大化的问题就转变为求最小化的问题，即求最小值。那么同时满足式(4.2)和最小值的分类面即为最优分类面。

综上所述，两分类问题也被我们转化成了它的数学形式，在满足约束条件的情况下求解最小值的问题[61-63]：

(4.3)

为求解式(4.3)，引入拉格朗日函数：

(4.4)

其中拉格朗日乘子，求解式(4.4)的最小值，根据对偶的定义，应先求出和的极小值，即对和分别在求偏导为零的情况下得到两个优化条件：

(4.5)

(4.6)

由式(4.5)可得到拉格朗日函数：

(4.7)

由式(4.6)可得到拉格朗日函数：

(4.8)

将式(4.8)带入拉格朗日函数，可知给定训练样本，目标函数：

(4.9)

寻找最大化目标函数的拉格朗日乘子，应满足下面条件：

(1)

(2)

将上述问题转换成求极小值问题，可得凸二次规划的对偶问题：

(4.10)

其中为决策变量，最优解中只有少部分不为0，它们所对应的样本就是支持向量，继而求得最优的权值向量：

(4.11)

最优偏置由约束条件求得，最优分类超平面为，最优分类函数为：

(4.12)

上述方法保证了全部训练样本可以正确分类(经验风险等于0)，但要想达到推广能力最优需要通过分类间隔达到最大来实现[64]；但当最优分类面不能将两类样本实现完全正确地分类时，那么需要在分类正确率和分类间隔最大化两者之间取得最优结果，因此引入了松弛因子，其作用为在一定程度上允许有小部分的样本被错分以取得分类正确率和分类间隔最大化的折中，这时的最优分类面方程应满足：

(4.13)

当时，对样本点分类正确；当时，对样本点分类错误，此时为广义最优分类面。所以这里引入惩罚因子，将其加入到最小化中，可通过求解二次规划来实现：

(4.14)

在实际应用中原空间的多数样本是非线性不可分的，这种情况下通常采用非线性映射将原空间中的非线性训练样本映射到高维空间中，在映射后的高维空间中线性可分，进而求得最优分类面[65]。

将经过变换从空间映射到特征空间H中：

(4.15)

此时，用替代，可得最优分类函数：

(4.16)

线性学习算法的计算能力比较有限，因为实际应用中很少有绝对线性的映射和变换关系，所以需要更具表达力的空间来表示假设空间用以模仿并解决实际问题。换言之，学习的关系属性不能由给定的几个属性通过简单的线性变换表述出来，需要通过更高维更抽象的表现形式，SVM主要是通过引入核函数来实现。

#### 4.1.2 核函数

SVM算法想要完成非线性分类问题主要归功于核函数，因为SVM是通过将非线性问题映射为高维线性问题，并在高维空间中找到最优分类面来实现非线性分类。一般情况下，想实现上述过程十分困难，但核函数的引入不但能较好解决这个问题，而且也避免了维数灾难的问题。根据4.1.1节中推导过程可得，在高维空间中，利用定义原空间的函数可实现内积运算，不需要知道具体的变换形式。依据Hilbert-Schmidt原理，只需满足Mercer定理的运算就对应某一变换空间中的内积运算[66]。因此利用核函数代替最优分类面中的内积运算，便可以将非线性问题转化成了线性问题，避免了非线性映射过程，降低了问题计算的复杂度。

Mercer定理对于任意的对称函数，它一定是某个特征空间中的内积运算的必要条件，对于任意的且，会得到如下式所示的



结论：，一般不难实现这一条件。

根据Mercer定理最优分类面采用合适的核函数，能够实现非线性向线性的转变，则(4.16)带入核函数可得：

(4.17)

式(4.17)即为支持向量机，SVM 解决“维数灾难”问题时具有切实可行的方法，原因是 SVM 可以通过选取不同的核函数来构造差异较大的学习机器，因而在决策函数的选择和构建上，摒弃了原有的在输入空间进行非线性变换从而在特征空间中求解的方式，采用了先在输入空间对象量进行内积或某种距离的比较，然后对比较结果进行非线性变换的方式。这样，原来在输入空间内完成的复杂工作就转化为在高维空间内的简单操作。

SVM 通过使用多种核函数，来构建出不同的决策函数，将空间中不同类的样本进行非线性映射，从而产生不同决策型的学习机，对应着不同的支持向量算法。在解决实际问题时常用的核函数有以下几种：

(1) 多项式核函数

(4.18)

得到的多项式分类器：

(4.19)

(2) RBF函数

常用的决策函数为：

(4.20)

通常采用的核函数是高斯函数：

(4.21)

(3) Sigmoid核函数

(4.22)

核函数的选取和确定方法及其核函数中参数的确定，对于构造支持向量机起到十分重要的作用，也因此成为机器学习算法的前沿课题。一般实际应用中，通常是总结样本数据的分布特点与最优超平面之间的关系来确定核函数的形式，或者以先验知识和经验为依据确定核函数，也可以直接构造然后在训练的过程中将其不断优化。

4.2 最小二乘支持向量机

4.2.1 最小二乘支持向量机原理

最小二乘支持向量机（Least-Square Support Vector Machines, LSSVM）是在 SVM的基础上提出的，它是将标准支持向量机中的二次规划方法损失函数用最小二乘线性系统替代，进而将不等式约束条件改变为等式约束，训练集的经验损失通过误差平方和损失函数求得，这样就把解二次规划问题转化为求解线性方程组问题，简化了计算的复杂性，求解速度得到了快速提升[67-71]。

已给定训练样本集为，，为输入，为输出识别结果，为训练样本总数，利用非线性变换以及核函数，LSSVM的分类问题可以描述为：

(4.23)

其中，为松弛变量，为惩罚因子。

利用拉格朗日求解法可将式(4.23)表示为：

(4.24)

对各个参数求偏导令其为零：

(4.25)

式(4.25)可表达为下式：

(4.26)

式中：，，，，。消掉和，利用Mercer定理可得：

(4.27)

方程组(4.26)可转变为：

(4.28)

令，可求得式(4.28)解如下：

(4.29)

求得的系数后，最小二乘支持向量机可表示为[72]：

(4.30)

4.2.2 核函数选取

4.1.2中介绍了常用的核函数有三种，其中RBF核函数对应的特征空间是无穷维的，当样本数据有限时，那么在该特征空间中一定可以实现线性可分。在没有相关先验知识指导时，基于RBF核函数训练而成模型相较于基于其他核函数训练而成的模型总体性能更为优越[73]。因此，从综合分析来看，本文将采用式(4.21)所示的RBF核函数，也称高斯核函数，其中表示样本点，表示样本中心，为函数的宽度参数，表示函数径向作用的范围。图4.2为RBF核函数图形。

图4.2 RBF函数图形

采用RBF核函数的最小二乘支持向量机，需要确定的参数为宽度系数和惩罚因子，取值越大，学习样本的输入空间范围就越大，支持向量之间的影响就强，稀疏性大，取得越大，相应的惩罚程度就大，学习机器的训练误差就小，推广能力变差，所以需要对这两个参数进行优化，以达到最佳的诊断结果。

4.3 粒子群优化算法

粒子群优化（Particle Swarm Optimization, PSO）算法是一种迭代寻优的进化计算技术，通过一群随机粒子的迭代计算寻找全局最优解。在每一次迭代计算中，每个随机粒子自身的速度和在下一轮迭代中的位置通过个体极值和全局极值来决定[58]。其中个体极值表示粒子本身寻找到的最优解。全局极值表示当前整个种群寻找到的最优解。

如果在维空间中，一个种群由个随机粒子构成，其中第个粒子的位置表示为，该粒子的飞行速度表示为，该粒子的个体最优位置表示为，整个种群的最优位置表示为。粒子群中该粒子的速度和位置会根据下式更新：

(4.29)

(4.30)

式中：为惯性权重因子，非负数；

，为惯性权重因子，通常取值范围为（0,2）；

，为介于之间的随机数；

，为粒子在第次迭代中的速度和位置；

为粒子在第维中个体最优位置；

为粒子群全局最优位置在第维中的位置。

本章对最小二乘支持向量机理论和粒子群优化算法进行了简要介绍，首先分析了支持向量机的优势和不足，然后在[支持向量机基础上，介绍了最小二乘支持向量机理论以简化计算的复杂性](#)。最后介绍了粒子群优化算法来提升最小二乘支持向量机的准确性，为下文进行变桨距系统故障诊断奠定理论基础。

指 标
剽窃观点
1. Mercer定理对于任意的对称函数，它一定是某个特征空间中的内积运算的必要条件，对于任意的且，会得到如下式所示的结论：，一般不难实现这一条件。
剽窃文字表述
1. 线性可分情况下的分类超平面 图4.1中的圆圈和方框分别代表两种不同类型的样本， 2. 最优分类线的作用就是利用分类线在对两类样本进行正确分类，使训练错误率保持为0的前提下，还要将分类间隔取最大值。前者达到经验风险最小，后者实现真实风险最小。最优分类线类推到高维空间 3. 换言之，学习的关系属性不能由给定的几个属性通过简单的线性变换表述出来，需要通过更高维更抽象的表现形式， 4. 这样，原来在输入空间内完成的复杂工作就转化为在高维空间内的简单操作。 SVM 5. 一般实际应用中，通常是总结样本数据的分布特点与最优超平面之间的关系来确定核函数的形式，或者以先验知识和经验为依据确定核函数，也可以直接构造然后在训练的过程中将其不断优化。

7. 201511162445_石琼玉_第7部分	总字数：7653
相似文献列表	文字复制比：0%(0) 剽窃观点：(0)
原文内容	

第五章基于粒子群优化的最小二乘支持向量机变桨距系统故障诊断

本章针对风电机组变桨距系统，从风速与桨距角、风速与电机转速、风速与功率输出三个角度入手，以某风电场实际运行的1.5MW并网风电机组SCADA系统数据为基础，采用粒子群优化的最小二乘支持向量机(PSO-LSSVM)建立桨距角故障诊断模型、电机转速故障诊断模型和功率输出故障诊断模型，并对所建立的模型进行仿真测试与结果分析。

5.1 桨距角故障诊断

5.1.1 桨距角数据采集

第三章故障诊断方法所需数据为以每连续0.5小时采集的数据为一个整体，在带故障持续运行期间故障数据会与正常数据有部分重合，通过数据预处理提取特征值，这些数据仍能够表明风机发生变桨距系统故障状态变化的趋势，本章针对各个样本点

的故障情况进行训练和诊断，所以需从SCADA系统中提取以10s为单位，共48小时的风速和桨距角运行数据，17280组。根据运行状态跟踪表对风力发电机组的状态进行标识，用0表示正常状态，1表示故障状态，数据如表5.1所示。

表5.1 风速与桨距角数据

序号风速

m/s 桨距角

° 风电机组

状态

1 14.69985 89 1

2 10.66959 0.12 0

3 9.222582 1.13 0

4 8.10423 89 1

5 5.870748 0 0

17278 7.115524 0 0

17279 4.957149 40.01 1

17280 3.696015 0 0

5.1.2 桨距角故障诊断模型构建

构建PSO-LSSVM模型需要先构建式(4.23)，再通过问题求解得到式(4.30)，所以只要确定核函数和各项参数即可建立模型。PSO-LSSVM桨距角故障诊断模型建模过程可分为5个步骤[74-75]：

- (1) 产生训练数据和测试数据；
- (2) 选择RBF核函数，并设定初始值，形成初始结构；
- (3) 用粒子群算法根据目标函数优化核函数的宽度系数和惩罚因子，并通过求解式(4.28)得到和；
- (4) 将得到的参数和带入(4.30)，求取，即可得到桨距角故障诊断PSO-LSSVM模型；
- (5) 用测试数据检验所得到的PSO-LSSVM桨距角故障诊断模型。

根据表5.1所列的原始数据，首先准备PSO-LSSVM桨距角故障诊断模型所需的训练样本。从表5.1中提取风速、桨距角两组参数的数据作为输入量，分别记为数组、，提取相应的风电机组状态作为输出量（0表示正常状态，1表示故障状态），记为，并记，的维度为17280 3。从中筛选出较为典型的故障数据11520组，记为，的维度为11520 3。将从第一行开始，每隔一行取一行，得到5760 3的数组作为模型的训练数据集。将从第二行开始，每隔一行取一行，得到5760 3的数组作为模型的测试数据集。模型采用两输入一输出的结构，种群规模，，最大迭代次数为100，目标函数为诊断正确率。PSO-LSSVM桨距角故障诊断模型训练过程如图5.1所示。

图5.1 PSO-LSSVM桨距角故障诊断模型训练流程

由图5.1可知，训练期间，每一次迭代过程中，每个粒子的适应值都是根据目标函数计算得到的，并依据适应值确定该粒子当前的最优位置和种群的全局最优位置，最终更新该粒子的位置和速度，更新的粒子位置即为所要优化的参数和，最终训练终止的条件为搜索到满足预设的种群全局最优位置的最大适应值或达到最大迭代次数。经过以上过程，即可得到桨距角故障诊断模型。

5.1.3 桨距角故障诊断模型测试

经过反复训练，最终得到的优化参数为：，，为了检验已得到的桨距角故障诊断模型的准确性，采用5.1.2小节得到的测试数据集和最优参数对桨距角故障诊断模型进行测试，测试流程如图5.2所示。

图5.2 桨距角故障诊断模型测试流程

将测试数据的前两列数据：风速、桨距角作为桨距角故障诊断模型的输入，桨距角故障诊断模型的输出和分类结果分别如图5.3、5.4所示：

图5.3 桨距角故障诊断模型输出

图5.4 桨距角故障诊断模型分类结果

图5.3中红色星号代表正确的风机状态标签，蓝色圆圈代表桨距角故障诊断模型输出。由图5.3和图5.4可以直观地看出桨距角故障诊断模型能够准确地实现对正常点和故障点的分类，正常情况下，当风速没有达到启动风速时，风电机组未启动，桨距角为设计范围内的合理值；当风速高于启动风速低于额定风速时，风电机组启动，桨距角保持为0°；当风速达到额定风速时，变桨距系统开始控制桨距角随着风速的改变而变化，提高风能捕获率。图中同样反映出了桨距角的故障特征，通过分析发现，桨距角故障诊断结果与第二章对桨距角故障的分析保持一致。

5.1.4 桨距角故障诊断结果分析

为了检验PSO-LSSVM桨距角故障诊断模型的性能，将其分别与LSSVM模型和目前发展较为成熟，应用较为广泛的BP神经网络作比较，由于BP神经网络比较成熟，所以在此不再描述其模型建立过程。训练数据为5760组，测试数据为5760组，故障诊断结果正确率如表5.2所示：

表5.2 故障诊断结果正确率

算法数据集正确率（%）

PSO-LSSVM 训练集 99.69

测试集 99.37

LSSVM 训练集 98.90

测试集 98.62

BP 训练集 97.36

测试集 97.22

正确率是指将模型输出的诊断结果和已知状态标签进行对比，相同数据组数占总训练数据集或总测试数据集的百分比。由表5.2可知，BP神经网络、LSSVM和PSO-LSSVM各自的训练集正确率均高于测试集正确率，且PSO-LSSVM测试集正确率分别比LSSVM和BP神经网络高出0.25%和2.15%，训练集正确率分别比LSSVM、BP神经网络高出0.79%和2.33%。



为进一步对模型的性能进行检验，本文采用均方根误差（Root Mean Square Error，）对所得到的桨距角故障诊断模型进行评估，计算方法如式（5.1）所示，评估结果如表5.3所示。

(5.1)

式中：为第个实际输出值；

为第个真实值；

为总数据量。

表5.3 桨距角故障诊断模型评估结果

算法误差分类

PSO-LSSVM 训练误差 0.0559

测试误差 0.0791

LSSVM 训练误差 0.1047

测试误差 0.1174

BP 训练误差 0.1624

测试误差 0.1667

输入训练数据时，PSO-LSSVM、LSSVM和BP神经网络分别产生的误差称作训练误差，输入测试数据时候，PSO-LSSVM、LSSVM和BP神经网络分别产生的误差称作测试误差。

由表5.3可以看出，无论是BP神经网络还是LSSVM、PSO-LSSVM，测试误差都要高于训练误差。LSSVM的训练误差和测试误差分别比PSO-LSSVM的高87.30%、48.42%，BP神经网络的训练误差和测试误差分别比PSO-LSSVM的高190.52%、110.75%，这说明基于PSO-LSSVM的桨距角故障诊断模型的误差更小。由此验证，本论文所建立的桨距角故障诊断模型具有较强的实用性。

5.2 电机转速故障诊断

5.2.1 电机转速数据采集

从SCADA系统中提取以10s为单位，共48小时的风速和电机转速运行数据，17280组。根据运行状态跟踪表对风力发电机组的状态进行标识，用0表示正常状态，1表示故障状态，数据如表5.4所示。

表5.4 风速与电机转速数据

序号 风速

m/s 电机转速

rpm 风电机组

状态

1 14.69985 0.205016 1

2 10.66959 17.36664 0

3 9.222582 17.42337 0

4 8.10423 0.44435 1

5 5.870748 12.28105 0

17278 7.115524 16.23308 0

17279 4.957149 1.458997 1

17280 3.696015 10.47771 0

5.2.2 电机转速故障诊断模型构建

电机转速故障诊断模型建模过程详细内容已在桨距角故障诊断模型的建立过程中进行了介绍，此处不再赘述，接下来构建 PSO-LSSVM电机转速故障诊断模型。

根据表5.2所列的原始数据，首先准备PSO-LSSVM电机转速故障诊断模型所需的训练样本。从表5.2中提取风速、电机转速两组参数的数据作为输入量，分别记为数组  $X$ 、 $Y$ ，提取相应的风电机组状态作为输出量（0表示正常状态，1表示故障状态），记为  $Z$ ，并记  $X$  的维度为17280 3。从中筛选出较为典型的故障数据11520组，记为  $X_{train}$ ， $Y_{train}$  的维度为11520 3。将从第一行开始，每隔一行取一行，得到5760 3的数组作为模型的训练数据集。将从第二行开始，每隔一行取一行，得到5760 3的数组作为模型的测试数据集。

模型采用两输入一输出的结构，种群规模  $N=20$ ，最大迭代次数为100，目标函数为诊断正确率，PSO-LSSVM电机转速故障诊断模型训练过程如图5.5所示。

图5.5 PSO-LSSVM电机转速故障诊断模型训练流程

由图5.5可知，训练期间，每一次迭代过程中，每个粒子的适应值都是根据目标函数计算得到的，并依据适应值确定该粒子当前的最优位置和种群的全局最优位置，最终更新该粒子的位置和速度，更新的粒子位置即为所要优化的参数和，最终训练终止的条件为搜索到满足预设的种群全局最优位置的最大适应值或达到最大迭代次数。经过以上过程，即可得到电机转速故障诊断模型。

5.2.3 电机转速故障诊断模型测试

经过反复训练，最终得到的优化参数为： $\omega=0.5$ ， $\phi=0.5$ ，为了检验已得到的电机转速故障诊断模型的准确性，采用5.2.2小节得到的测试数据集和最优参数对电机转速故障诊断模型进行测试，测试流程如图5.6所示。

图5.6电机转速故障诊断模型测试流程

将测试数据的前两列数据：风速、电机转速作为电机转速故障诊断模型的输入，电机转速故障诊断模型的输出和分类结果分别如图5.7、5.8所示：

图5.7 电机转速故障诊断模型输出

图5.8 电机转速故障诊断模型分类结果

图5.7中红色星号代表正确的风机状态标签，蓝色圆圈代表电机转速故障诊断模型输出。由图5.7和图5.8可以直观地看出电机

转速故障诊断模型能够准确地实现对正常点和故障点的分类，正常情况下，当风速没有达到启动风速时，风电机组未启动，电机转速较低；当风速高于启动风速低于额定风速时，风电机组启动，电机转速逐渐增加；当风速达到额定风速时，电机转速达到额定值，即使风速不断增大，在变桨距系统的调节下其仍能保持恒定的转速。图中同样反映出了电机转速的故障特征，通过分析发现，电机转速故障诊断结果与第二章对电机转速故障的分析保持一致。

5.2.4 电机转速故障诊断结果分析

为了检验PSO-LSSVM电机转速故障诊断模型的性能，将其分别与LSSVM模型和目前发展较为成熟，应用较为广泛的BP神经网络作比较，由于BP神经网络比较成熟，所以在此不再描述其模型建立过程。训练数据为5760组，测试数据为5760组，故障诊断结果的正确率如表5.5所示：

表5.5诊断结果正确率

算法数据集正确率（%）

PSO-LSSVM 训练集 99.58

测试集 99.41

LSSVM 训练集 99.13

测试集 98.81

BP 训练集 97.23

测试集 97.08

由表5.5可知，BP神经网络、LSSVM和PSO-LSSVM各自的训练集正确率均高于测试集正确率，且PSO-LSSVM测试集正确率分别比LSSVM、BP神经网络高出0.60%和2.33%，训练集正确率分别比LSSVM、BP神经网络高出0.45%和2.35%。

为进一步对模型的性能进行检验，本文采用式（5.1）所示的均方根误差对所得到的电机转速故障诊断模型进行评估，评估结果如表5.6所示。

表5.6电机转速故障诊断模型评估结果

算法误差分类

PSO-LSSVM 训练误差 0.0649

测试误差 0.0770

LSSVM 训练误差 0.0933

测试误差 0.1091

BP 训练误差 0.1664

测试误差 0.1709

由表5.6可以看出，无论是BP神经网络还是LSSVM、PSO-LSSVM，测试误差都要高于训练误差。LSSVM的训练误差和测试误差分别比PSO-LSSVM的高43.76%、41.69%，BP神经网络的训练误差和测试误差分别比PSO-LSSVM的高156.39%、121.95%，这说明基于PSO-LSSVM的电机转速故障诊断模型的误差更小。由此验证，本论文所建立的电机转速故障诊断模型具有较强的实用性。

5.3 功率输出故障诊断

5.3.1 功率输出数据采集

从SCADA系统中提取以10s为单位，共48小时的风速和功率输出运行数据，17280组。根据运行状态跟踪表对风力发电机组的状态进行标识，用0表示正常状态，1表示故障状态，数据如表5.7所示。

表5.7风速与功率输出数据

序号	风速 m/s	功率输出 KW	风电机组 状态
1	14.69985	0	1
2	10.66959	1501	0
3	9.222582	1534	0
4	8.10423	0	1
5	5.870748	277	0
17278	7.115524	947	0
17279	4.957149	0	1
17280	3.696015	88	0

5.3.2 功率输出故障诊断模型构建

根据表5.7所列的原始数据，首先准备PSO-LSSVM功率输出故障诊断模型所需的训练样本。从表5.7中提取风速、功率输出两组参数的数据作为输入量，分别记为数组  $X$ 、 $Y$ ，提取相应的风电机组状态作为输出量（0表示正常状态，1表示故障状态），记为  $Z$ ，并记  $X$ 、 $Y$  的维度为17280 3。从中筛选出较为典型的故障数据11520组，记为  $X'$ 、 $Y'$ ，的维度为11520 3。将从第一行开始，每隔一行取一行，得到5760 3的数组作为模型的训练数据。将从第二行开始，每隔一行取一行，得到5760 3的数组作为模型的测试数据。

模型采用两输入一输出的结构，种群规模  $N=30$ ，最大迭代次数为100，目标函数为诊断正确率，PSO-LSSVM功率输出故障诊断模型训练过程如下图5.9所示。

图5.9 PSO-LSSVM功率输出故障诊断模型训练流程

由图5.9可知，训练期间，每一次迭代过程中，每个粒子的适应值都是根据目标函数计算得到的，并依据适应值确定该粒子当前的最优位置和种群的全局最优位置，最终更新该粒子的的位置和速度，更新的粒子位置即为所要优化的参数和，最终训练终止的条件为搜索到满足预设的种群全局最优位置的最大适应值或达到最大迭代次数。经过以上过程，即可得到功率输出故障诊断模型。

5.3.3 功率输出故障诊断模型测试

经过反复训练，最终得到的优化参数为： ， ， 为了检验已得到的功率输出故障诊断模型的准确性，采用5.3.2小节得到的测试数据集和最优参数对功率输出故障诊断模型进行测试，测试流程如图5.10所示。

图5.10功率输出故障诊断模型测试流程

将测试数据的前两列数据：风速、功率输出作为功率输出故障诊断模型的输入，功率输出故障诊断模型的输出分类结果分别如图5.11、5.12所示：

图5.11 功率输出故障诊断模型输出

图5.12 功率输出故障诊断模型分类结果

图5.11中红色星号代表正确的风机状态标签，蓝色圆圈代表功率输出故障诊断模型输出。由图5.11和图5.12可以直观地看出功率输出故障诊断模型能够准确地实现对正常点和故障点的分类，正常情况下，当风速没有达到启动风速时，风电机组未启动，功率输出保持为0；当风速高于启动风速低于额定风速时，风电机组启动，功率输出随着风速的增加而增加；当风速达到额定风速时，功率输出达到额定值，即使风速不断增大，在变桨距系统的调节下其仍能保持恒定的功率输出。图中同样反映出了功率输出的故障特征，通过分析发现，功率输出故障诊断结果与第二章对功率输出故障的分析保持一致。

5.3.4 功率输出故障诊断结果分析

为了检验基于PSO-LSSVM的功率输出故障诊断模型的性能，将其分别与LSSVM模型和目前发展较为成熟，应用较为广泛的BP神经网络作比较，由于BP神经网络比较成熟，所以在此不再描述其模型建立过程。训练数据为5760组，测试数据为5760组，故障诊断结果的正确率如表5.8所示：

表5.8诊断结果正确率

算法数据集正确率（%）

PSO-LSSVM 训练集 99.55

测试集 99.32

LSSVM 训练集 98.50

测试集 98.09

BP 训练集 97.13

测试集 96.88

由表5.8可知，BP神经网络、LSSVM和PSO-LSSVM各自的训练集正确率均高于测试集正确率，且PSO-LSSVM测试集正确率分别比LSSVM、BP神经网络高出1.23%和2.44%，训练集正确率分别比LSSVM、BP神经网络高出1.05%和2.42%。

为进一步对模型的性能进行检验，本文采用均方根误差对所得到的功率输出故障诊断模型进行评估，评估结果如表5.9所示。

表5.9功率输出故障诊断模型评估结果

算法误差分类

PSO-LSSVM 训练误差 0.0917

测试误差 0.1025

LSSVM 训练误差 0.1323

测试误差 0.1382

BP 训练误差 0.1694

测试误差 0.1766

无论是BP神经网络还是LSSVM、PSO-LSSVM，测试误差都要高于训练误差。LSSVM的训练误差和测试误差分别比PSO-LSSVM的高81.72%、67.52%，BP神经网络的训练误差和测试误差分别比PSO-LSSVM的高151.71%、114.06%，这说明基于PSO-LSSVM的功率输出故障诊断模型的误差更小。由此验证，本论文所建立的功率输出故障诊断模型具有较强的实用性。

本章以某风电场实际运行的1.5MW并网风电机组SCADA系统数据为基础，基于粒子群优化的最小二乘支持向量机对风电机组变桨距系统故障诊断进行研究，分别建立了桨距角故障诊断模型、电机转速故障诊断模型和功率输出故障诊断模型并对所建立的模型进行了仿真测试。从诊断正确率和均方根误差两方面与LSSVM和BP神经网络进行比较，结果表明，本章所建立的故障诊断模型性能更为优越，具有很强的实用性。

8. 201511162445_石琼玉_第8部分		总字数：3929
相似文献列表    文字复制比：2.3%(92)    剽窃观点：(0)		
1	风力发电机组状态监测与轴承故障诊断系统设计和实现 叶明星(导师：焦斌;禹华军) - 《上海电机学院硕士论文》 - 2015-01-19	1.4% (54) 是否引证：否
2	ATM网络拥塞控制的智能PID方法研究 赵雪(导师：方建安) - 《东华大学硕士论文》 - 2004-01-01	0.9% (34) 是否引证：否
原文内容		
第六章总结与展望		

风力发电机组结构的复杂性、运行条件的严酷性和相关因素的多样性导致其故障率不断增长，变桨距系统是风力发电机组的核心控制技术之一，其故障已成为目前整个机组停机的首要原因。如何降低风力发电机组变桨距系统故障率和故障停机时间，降低运维成本，提高发电率 and 经济效益，成为风力发电投资、建设、运营维护必须尽快解决的问题。

6.1 本文总结

本论文从工程实际出发，以某风电场实际运行的1.5MW并网风力发电机组SCADA系统数据为基础开展故障诊断研究，为风场运维人员明确故障指向，减少不必要的定期现场巡视，降低风场停机时间和风力发电成本，减少经济损失，使风电产业得以健康持续发展。主要研究内容和成果如下：

- (1) 基于风电机组基本结构和变桨距系统工作原理，从风速与桨距角、风速与电机转速、风速与功率输出三个角度分析了变桨距系统的故障原理，为故障诊断奠定了基础。
- (2) 以某风电场实际运行的1.5MW并网风电机组SCADA系统数据为基础开展风电机组变桨距系统故障诊断研究。提出基于SCADA数据分析的变桨距系统故障诊断方法，在一定操作条件下，分别对风速-桨距角、风速-电机转速和风速-功率输出数据进行预处理，提取其特征信息，再利用所提出的变桨距系统故障诊断方法从上述三个方面分别实现故障诊断和故障分类，最后依据故障严重程度和故障分类的诊断结果证明了该方法的正确性。
- (3) 针对变桨距系统故障发生原因复杂、非线性强的特点，提出了基于PSO-LSSVM的变桨距系统故障诊断方法，建立了桨距角故障诊断模型、电机转速故障诊断模型和功率输出故障诊断模型，并对模型进行仿真测试，从均方根误差和诊断正确率方

面证明了故障诊断模型的准确性和实用性。

## 6.2 工作展望

本论文以某在运1.5MW风电机组SCADA系统数据为基础进行研究,虽然对变桨距系统故障机制进行了分析,取得了一定的成果,受个人能力所限,论文还存在不足之处,需要在以后的学习工作中进一步展开。以下提出几点值得继续深入研究和提升的方面,主要包括:

(1) 本论文所提出的方法采用的是风电机组实际运行的数据,目前在其测试阶段做了仿真实验,下一步可在实际运行机组上进行验证,结合仿真结果进行进一步研究。

(2) 变桨距系统复杂,涉及参数众多,本论文仅从风速、桨距角、电机转速、功率输出等故障相关度较高的参数出发进行研究,未来可以在此基础上纳入新的参数进一步研究。

(3) 下一步可以基于故障诊断结果,建立风电机组日常维护保养的日程安排,最大程度地降低运行维护成本。

## 1 摘要

常规能源的过度使用,使得环境污染问题愈加严重,为解决环境污染问题,世界各国都在寻找可再生能源来替代常规能源,可在生能源在世界能源结构中占据越来越大的比重。风能作为一种开发方便、成本低、无污染的可在生能源,受到了各国的重视,风力发电技术随着风电市场的不断扩大也在不断趋于成熟。大型风力发电机组是复杂的多变量非线性动力学系统,具有不确定性和多干扰性,导致难以获取风电机组精确的数学模型,使得风电机组控制器设计成为难点;且在风电机组运行过程中可能会发生一些故障,导致风力发电机组系统轨线偏离稳定点,若超出稳定域,则会对风机造成损坏,给出系统的稳定域对判断风机的故障维修时间及保护风机显得极为重要。本文以变速变桨风力发电机组为研究对象,以最大风能捕获和输出功率平滑为优化目标,运用状态反馈设计了控制器,实现了变速变桨风力发电机组的控制,并估算出了系统运行的稳定域。

论文从空气动力学理论切入,基于动量理论分析了风力发电机组的气动特性,推导出在理想状态下的最大风能利用系数,并论述了变速变桨风力发电机组的基本控制策略。随后建立了风速模型、风力机模型、传动系统模型、发电机模型和变桨执行机构模型,并以此为基础搭建了风力发电机组控制系统仿真平台。

本文通过状态反馈将原控制问题转化成系统在原点稳定的问题,设计了一个转矩控制器和一个变桨控制器,并基于该控制器估算出了风电机组运行的稳定域。在风速低于额定风速时,通过转矩控制器调节转矩实现输出功率最大化;在风速高于额定风速时,通过调节桨距角限制风能捕获,实现输出功率稳定。最后利用风力发电机组控制系统仿真平台进行了数值仿真,结果表明该控制器取得了良好的控制效果,且在风机运行的稳定域内,系统能稳定运行,该方法具有一定的实用前景,稳定域的提出,为风机的正常运行和维护提供了一定依据。

关键字: 风力发电机状态反馈控制转矩控制器变桨控制器稳定域

## ABSTRACT

Excessive use of conventional energy sources, making the problem even more serious environmental pollution, Wind energy seems certain to play a major part in the world's energy future. With the continuous expansion of wind power technology wind power market is constantly mature. Large wind turbines are complex multi-variable nonlinear dynamical system, so that it is difficulty to design the controller; Some fault may cause damage to the wind turbine, the estimation of attraction region is important for the protection of the wind turbine and analyzing fault repair time. In this paper, variable speed pitch wind turbines is considered, with the greatest wind energy capture and output smoothing objective, a state feedback controller is designed to achieve a variable speed wind turbine control, and the region of attraction is estimated.

This paper based on the theoretical analysis of the aerodynamic characteristics of the momentum of wind turbines, wind energy utilization factor is derived maximum under ideal conditions and discusses the basic control strategy shift pitch wind turbines. Followed by the establishment of wind speed model, wind turbine model, transmission model, generator model and pitch actuators model as the basis to build a wind turbine control system simulation platform.



In this paper, a torque controller and a pitch controller are designed, based on controller, the region of attraction was estimated. When the wind speed is less than the rated speed, the torque is adjusted by the torque controller to achieve maximum power output; when wind speed is higher than the rated wind speed, the pitch angle is adjusted to limit wind capture and achieve the output power stability. Finally, the numerical simulation is achieved on the wind turbine platform, the result shows a good performance. The method has some practical possibility, and the region of attraction provides a basis for the maintenance of the wind turbine.

KEYWORDS: Wind turbine State feedback control Torque controller Pitch controller Region of attraction

指 标		
剽窃文字表述		
1. 故障率和故障停机时间，降低运维成本，提高发电率和经济效益，成为风力发电投资、建设、运营维护必须尽快解决的问题。		
9. 201511162445_石琼玉_第9部分		总字数：6011
相似文献列表 文字复制比：1.7%(103) 剽窃观点：(0)		
1	2014年中国风电装机容量统计 - 《风能》- 2015-02-06	0.6% (37) 是否引证：是
2	基于本体的数据模型自动映射技术的研究 史春波(导师：文必龙)- 《大庆石油学院硕士论文》- 2010-03-27	0.5% (32) 是否引证：否
3	风力发电机高性能偏航控制系统的研究 魏晓华(导师：张英)- 《河北工业大学硕士论文》- 2010-11-01	0.5% (31) 是否引证：否
原文内容		
第一章绪论		

作为国民经济的物质基础和人类赖以生存的基本条件，能源的匮乏严重影响着国民经济发展[1, 2]。随着中国经济的快速发展，能源短缺问题越来越严重[3, 4]。煤、石油、天然气等常规能源占据了人类生活的重要部分，但是常规能源是不可再生、存储有限且会严重污染环境，对人类健康造成了一定的危害，为实现可持续发展，是不能依赖常规能源的。由此可以看出，开发和利用可再生能源是极其重要的。可再生能源包括风能、水能、太阳能等，具有可再生和无污染的特点，由于各国发展新能源技术的需求[5]，很多国家都在寻找适合本国国情的可再生能源，风能作为取之不尽的新能源，凭借低廉的开发成本及风电行业成熟的技术和商业化的应用成为目前最具应用规模的可再生能源之一。在全球对环境保护日益重视的今天，大力发展风能已成为人类可持续发展战略下的重点。

1.1 背景研究

由于石油、煤、天然气等常规能源日益枯竭，并且常规能源的使用会产生一些有害物质，造成环境污染，因此迫切需要开发绿色的可再生能源。风能作为一种可再生能源，相比于常规能源，具有取之不尽、用之不竭和清洁无污染的优点。为了应对环境污染和能源危机，有必要加大风能利用力度，积极发展风电产业[6]。

风力发电可以产生很高的社会效益和经济效益，风电行业的发展能够减少能源匮乏国家对进口能源的依赖，有效缓解能源短缺问题，并能减少空气污染，可以用较低的成本解决能源问题和环境问题。全球具有十分丰富的风能资源，预计到2020年只需使用全球一半的风能资源便可供应世界的电力需求，我国的风能资源也相当丰富，在常规能源日益匮乏的今天，中国也在充分发挥丰富的风能资源优势，大力发展风电事业。近年来，风电技术取得了长足地进步，许多国家也都在研究风力发电技术，但由于风电技术本身的复杂性，导致在风电利用上还存在一些问题。所以，加大风力发电技术研究力度，对缓解能源危机及人类的可持续发展具有重要意义。

风电设备一般安装在人烟稀少的偏远地带，具有安装周期短、占地空间小、安装简单等特点，其运行过程中不会产生有害物质，且安装不受地形限制，给边区牧民、海岛驻军等这些难以进行电线架接的地方带来了极大的便利[7]。基于以上种种原因，风力发电产业正逐渐发展为一项全球性的业务。

随着全球风力发电产业的日益壮大，风电机组控制系统的设计受到了越来越多的重视。由于风电技术涉及领域相当广泛，包

括材料、机械、空气动力学、控制理论、电机学等多个领域[8]，是一个多学科交叉的复杂的系统工程，而控制系统目的是实现风电机组运行的稳定性，因此风电机组的控制系统设计成为当今风电技术研究的难点。随着风电技术的稳步提高，风力发电机组的发电量相较之前也产生了质的飞跃，机械方面机组重量大幅减小，运行期间也不会产生很大的噪声，形式也由之前的垂直轴风机发展为现在的水平轴风机。由于大型风力发电机组是个极其复杂的非线性系统，且存在很多干扰，为了解决这些问题，风电的研究领域主要集中在优化控制和高效控制，以此保证风力发电机组高效、稳定运行。

## 1.2 国内外风力发电发展现状

从2007年起，全球风电行业一直以超出其预期的速度不断壮大。据全球风能理事会统计，截止到2014年年底，全球风电累计装机容量达到370千兆瓦（如图1所示），同比增长15.9%。2014年，随着国家政策的调整，风电行业整体呈现回暖趋势，对比2013年风电累计装机容量增加了51GW。2014年全球风力发电容量增加最多的国家为中国，增加了23.2千兆瓦，其次为德国和美国，分别为5.3和4.9千兆瓦（如图2所示）。风在丹麦，尼加拉瓜，葡萄牙和西班牙这些国家产生超过20%的电力。

图1.1 2004-2014全球风力发电能力：千兆瓦

图1.2 2014风力发电容量增加前十的国家

### 1.2.1 国外风力发电发展现状

第一台风力发电机与1981年在丹麦诞生，风能的开发利用在国外发达国家已经相当普及，尤其在德国、荷兰、西班牙、丹麦等欧洲国家，截止到2014年年底，欧洲累计装机总量达到133969MW，占世界装机总量的36.25%，亚洲风电累计装机总量达到142119MW，占世界装机总量的38.46%；北美累计装机总量达到77953MW，占世界装机总量的21.09%。

图1.3 全球装机地域分布图

亚洲风电赶超欧洲，占世界装机总量的38.46%，其中中国风电一直保持强劲的增长势头，成为亚洲风电的主力军，此外还有印度，韩国和日本的风电产业均出现不同程度的增长。

由于德国政府的支持，德国的风电产业呈现稳定增长，成为欧洲风电发展最快的国家。从风力资源丰富的州市开始发展，逐渐向山区延伸，待陆上风电饱和，又开始在海上平铺，根据德国政府制定的风电发展战略，未来几年重点在海上扩展风电事业。2013年年底，德国的风电装机总量接近34250兆瓦，德国电力需求的10%都由风电行业供应，风能已成为德国最重要的可再生能源。

美国在北美的风电产业占主导地位。到2013年底，美国地区风电装机容量为61,091MW，占世界装机容量的19.2%。美国政府针对风电发布了一些优惠政策，促进了美国风电的发展。美国在风电项目运行之前便已开展的一些前期研究工作，也给美国风电产业发展带来了很有利的影响。

### 1.2.2 国内风力发电发展现状

据中国可再生能源学会风能专业委员会统计，2014年中国（除台湾地区）新增安装风力发电机组13121台，新增装机容量23196MW，同比增长44.2%；累计安装风力发电机组76241台，装机容量114609MW，同比增长25.4%。2014年较2013年，除东北地区装机容量所下降外，其他区域的新增装机容量均呈上升趋势。图1.4是2004年至2014年中国累计风电装机容量[9]。

图 1.4 2004年-2014年中国累计风电装机容量

2006年到2009年三年间，中国风电累计装机年增长率平均在100%以上，在2009年与2011年间，中国风电实现了每年超过16000MW吊装规模。2015年，中国风电新增装机容量达到23.2千兆瓦，同比增长24.1%，累计装机容量实现114609MW，同比增长25.3%，新增装机容量和累计装机容量均位于全球第一。

## 1.3 风力发电机组控制技术发展现状

目前世界风力发电市场的单机容量正持续增大，在这种情况下，保证风力发电机组的安全稳定运行，对大型风力发电机组的控制技术提出更高的要求。风力发电机组模型可分为若干相互关联的子系统，包括风、风轮、传动系统、发电机、变桨执行机

构、控制器等，具有高度复杂性和非线性。目前，风力发电机组主要有定桨距控制、变速恒频控制和变桨距控制三种方法，国内外很多学者基于这些方法做了深入的研究。

### 1.3.1 定桨距控制技术

定桨距风机结构的明显特点是，叶片和轮毂固定在一起，也就是说，任意时刻，所有的叶片只能变化相同的角度，无论风速变化与否。这就决定了，叶片必须具备自动失速的功能，即风速在风机的额定风速之上时，叶片能够把输出功率调节在额定功率左右。突甩负载时，运行的风机叶片只有依靠其自己的制动系统使机组在不稳风况下停止工作，以确保风机的安全。20世纪70年代研究出拥有优良失速功能叶片，满足了第一种情况，进而在20世纪80年代叶尖扰流器的出现，满足了第二种情况。这些都为统一变桨距失速型风机在过去的几十年中奠定了重要基础，使其成为当时的主流风机，现在，这项技术依旧应用广泛。定桨距风机的控制原理简单，而且便于生产，可靠性相对较高。但其缺点是当风速超过额定风速时，其电机输出功率可能会降低，这也在一定程度上制约了定桨距风力发电机组的发展。

### 1.3.2 变速控制技术

风速在低于额定风速时，需要调节转速使其能够跟随风速的变化而变化，从而保持最佳叶尖速比，获得最大风能捕获，这种控制技术为变速控制技术。常用的变速控制技术有基于功率控制和基于转矩控制[10]，无论哪种控制算法都需要设计适合的控制算法，国内外学者对此进行了深入的研究。叶杭冶提出了转矩控制对传动系统扭转震动的影响力和控制方案[11]。Boubekeur Boukhezzar基于现有的一些控制方法，提出了一个带有风速估计的非线性静态和动态状态反馈控制器，获得了比较好的控制性能[12]。Kyung-Hyun Kim提出了一种新的最大功率点跟踪（MPPT）算法用于变速变桨风力发电机组，该方法利用了转子惯性力的优势，通过添加一个比例控制到功率控制环节中，从而有效地降低了风机的转动惯量，进而提高了最大功率点追踪控制的性能[13]。Maria Letizia Corradini 提出了一个带有气动转矩的鲁棒观测器的控制策略，通过一种简单的方法获取转子的位置和速度，并提出一个基于定向场的滑模控制策略，该方法可以有效地获得最大化功率，且对机械系统的参数变化具有较高的鲁棒性[14]。Jovan Merida提出了两种方法用于最大风能捕获同时降低机械载荷，第一种方法是利用跟踪控制器，确保最佳转子角速度；第二种方法是利用拟连续高阶滑模控制器保证最大功率跟踪。两种方法都表现出较好地控制效果[15]。

为获得最大风能捕获，国内外学者提出了多种算法，包括功率反馈法、叶尖速比法和爬山搜索法等。功率反馈法需要通过最佳功率曲线根据功率与风速的关系来得到，且在应用中需要复杂的计算，不适合实际应用[16, 17]。最佳叶尖速比法需要通过查表获得需要的转矩，误差比较大。爬山搜索法捕获最大功率点需要时间比较长，对风机运行效果产生很大影响，不适用于实际工作中[18]。目前一些智能控制算法如模糊控制、神经网络和支持向量机等也应用到了风电机组控制中，并取得了一定的控制效果，但因其算法复杂，并不适用于实际应用中，但具有很高的理论研究价值和一定的应用前景[19]。

### 1.3.3 变桨控制技术

当风速超过额定风速后，变桨控制系统开始工作，调节桨距角增大使得风能利用系数变小，从而丢弃一部分风能，使得发电机输出功率可以稳定在额定功率附近，这种控制技术便是变桨控制技术。由于风电机组模型的复杂性使得变桨控制技术具有较高的难度。目前变桨控制系统的设计方法主要有三种：第一种为PID控制，该方法不需要得到精确的设计模型，且设计方法十分简单，是一种非常成熟的控制方法，目前已经广泛应用于各种工业控制中。但其控制参数的设计需要根据经验来获得，且需要大量实验来调整控制效果。随着一些智能算法的兴起，一些学者开始将PID与智能算法相结合形成了一些新的控制方法，如模糊PID、神经网络PID等，并将这些控制方法用于风电变桨控制系统中。文献[20-30]通过使用模糊PID控制桨距角，通过定义模糊规则，利用PID控制取得了不错的控制效果。文献[31-39]利用BP神经网络和RBF神经网络通过训练后获得较好地控制参数，使得系统具有较好地控制性能；第二种方法是简化非线性模型，这种方法通过一定的约束条件将风机模型简化，之后利用传统的控制器设计方法应用到简化后的模型上，该方法需要多次试验进行验证。Fernando Valenciaga将变结构技术与李雅普诺夫方法相结合，使得系统具有较高的鲁棒性[40]。第三种方法是首先通过反馈线性化将非线性模型转化成线性模型，之后再通过经典控制理论中的控制方法对系统进行控制。杨锡运通过使用反馈线性化方法，设计了基于自适应模糊控制策略的滑模控制器，该方法可有效抑制风速扰动，达到了较好地控制效果[41]。秦生升基于反馈线性化，采用将自适应方法和滑模控制方法相结合和策略设计了风机变桨控制器，该控制器在稳定风力发电机组系统方面取得了很好地成果[42]。杨俊华基于微分几何反馈线性化方法，对风机系统模型进行了精确反馈线性化，并在线性化后的模型上设计了变桨控制器，该方法能够较好地解决功率恒定问题[43]。

变桨控制系统在进行反馈线性化时一般采用在某个稳定的工作点进行线性化或者根据某个参数（如风轮转速等）进行线性化。王东风选择一个工作点对风力发电机组模型进行线性化，并建立了滑模控制器，取得了较好地控制效果[44]。Bakka Tore基于风电机组的非线性模型建立了线性模型，将控制问题转化为线性矩阵不等式问题，并根据线性模型设计了控制器，取

得了良好的控制效果[45]。

1.4 课题的研究意义和研究内容

由于煤、石油、天然气等常规能源遭到了过度使用，导致常规能源日益枯竭，且环境污染问题愈加严重。为解决这些问题，人们把注意力放在了开发和利用可再生能源上，风能作为一种可再生能源也受到了世界各国的青睐，风力发电技术也随之发展起来。

本论文通过阅读国内外风电控制系统相关文献，对风力发电技术原理和控制技术有了一定的认识和了解。由于大型风力发电机组具有高度非线性和不确定性，使得控制器设计至关重要。本文利用状态反馈对风电机组设计了控制器，并证明了其稳定性，之后估算出了在该控制器下风电机组运行的稳定域，这对风机正常运行范围和故障修复时间的估计提供了一定的理论依据。

本文主要研究内容如下：

第一章首先介绍了课题的研究背景，之后介绍了世界风力发电的发展现状，及现下风力发电机组的一些新型控制技术，包括智能变速控制技术、智能变桨控制技术以及工程中常用的PID控制技术，最后明确了本课题的控制方法。

第二章对首先对风力发电机组的结构和分类做了简单介绍，之后对风机的空气动力学原理进行了介绍，包括动量理论，风力机的特性系数。然后针对变速变桨风电机组运行，划分了其工作区间，并对最佳叶尖速比区、转速恒定区和功率恒定区三个运行区域工作状态分别进行了详细的描述。

第三章将风力发电机组模型分解为风速模型、风力机模型、传动系统模型、发电机模型和变桨执行机构模型，并对各个模型都进行了建模，最后根据各个模型搭建了风力发电机组控制系统仿真平台。之后介绍了常用的一些控制方法，包括状态反馈控制、PID控制和滑模控制等，设计控制器奠定了理论基础，最后介绍了风力发电机组运行稳定域的重要性及其估算方法。

第四章对风力发电机组设计控制器并估算其稳定域，利用状态转换将原控制问题转换为系统在原点稳定的问题，之后设计出状态反馈控制器并利用李雅普诺夫方法确定控制器参数，最终设计出转矩控制器和变桨控制器，并在所设计的控制器的基础上，估算出了其运行的稳定域。最后利用本文所建立的风力发电机组控制仿真平台，分别在多种风速下验证控制器的控制效果，结果得出，在控制器能够在低风速阶段达到输出最大功率的控制目标，在高风速阶段达到输出功率稳定的控制目标。

第五章总结了论文的主要研究内容和研究成果，并对论文下一步工作进行了展望。

10. 201511162445_石琮玉_第10部分		总字数：5626
相似文献列表      文字复制比：9%(509)      剽窃观点：(0)		
1	1.5MW双馈型风力机变桨距控制算法研究 倪焕山(导师：康戈文) - 《电子科技大学硕士论文》 - 2012-04-01	2.7% (154) 是否引证：是
2	基于PLC的风力发电变桨控制系统的设计与研究 蔡博(导师：蔡文皓;雷红卫) - 《西安科技大学硕士论文》 - 2014-06-30	2.0% (114) 是否引证：否
3	风电机组独立变桨距控制技术研究 郭百顺(导师：秦斌) - 《湖南工业大学硕士论文》 - 2014-06-04	1.7% (94) 是否引证：是
4	考虑风力发电影响的配电网可靠性评估 徐玉琴;吴颖超; - 《电网技术》 - 2011-04-05	1.0% (59) 是否引证：否
5	直驱永磁同步风力发电机系统研究 邓秋玲;谢秋月;黄守道;姚建刚; - 《微电机》 - 2008-06-28	0.6% (35) 是否引证：否
6	超导储能系统改善并网风电场出力的仿真研究 付聪;陈维;覃芸;王延纬; - 《南方电网技术》 - 2011-10-20	0.5% (30) 是否引证：否
7	风力发电电动变桨距伺服系统的研究 范烨(导师：张爱玲) - 《太原理工大学硕士论文》 - 2013-05-01	0.5% (29) 是否引证：否
原文内容		
第二章风力发电机组基本控制理论		



风力发电是将风能转化成机械能，再将机械能转化成电能的过程[46, 47]。风力发电机组包括风轮、机舱、塔架、风电机组的偏航装置、调速装置、传动装置、制动装置、发电机、控制器等部分。风轮用于捕获风能并将机械能提供给发电机作为原动力，发电机利用电磁感应现象把风轮输出的机械能转换成电能其中控制系统对风机的运行起到关键作用，最终控制目标为风力发电机组在整个运行区域内能够安全稳定运行，以便获取最大能量，提供安全可靠的电力质量。

2.1 风力发电机组基本结构和分类

目前主流风力发电机组基本结构主要包括叶片、变桨系统、传动系统、偏航系统等部件，如图2.1所示。各部分名称和用途如表2.1所示。

图2.1 风力发电机组结构

叶片是风力发电机组的重要部件，其外形设计直接影响到风机的功率捕获，故其外形设计至关重要，通常情况下其叶片叶尖翼型设计相对厚度较小，以保证风能最大捕获，而根部设计的厚度相对较大，以保证叶片能够承受较大的载荷。

变桨系统安装在轮毂上，通过控制桨距角控制风力发电机组的输出功率，并能够通过空气动力的方式使风力发电机组安全停机。传动系统主要包括风轮转子、低速轴、齿轮箱、联轴器和发电机转子等部件，是风电机组运行的重要部件。偏航系统与风力发电机组的控制系统配合发出指令要求风轮一直处于对风状态，以便充分利用风能，提高风能捕获率。

表2.1 风电机组各部件名称及用途

标号名称用途

- 1 叶轮将风能转化为机械能
- 2 轮毂安装和固定桨叶
- 3 机舱内框架放置设备
- 4 叶轮轴与主轴连接固定与支撑风轮
- 5 主轴将风轮扭矩传递至增速箱
- 6 增速齿轮箱转化扭矩
- 7 刹车盘系统制动
- 8 发电机连接连发电机与齿轮箱
- 9 发电机将机械能转化成电能
- 10 散热器散热，降低温度
- 11 冷却风扇保持空气流通
- 12 风测量系统测量风向风速
- 13 控制系统控制风电机组运行
- 14 液压系统转动轮毂和桨叶
- 15 偏航驱动转动风轮，改变其方向

16 偏航轴承转动机舱和轮毂

17 机舱盖保护设备

18 塔架支撑和固定机舱

19 变桨距系统控制和调节桨叶的桨距角

风力发电机组种类各式各样，结构多有不同，分类方法也多种多样。可以依据额定功率、风机旋转主轴方向，有无齿轮箱等方法分类。

按照额定功率一般可分为：微型机、小型机、中型机和大型机。其中微型机：10kw以下；小型机：10kw至100kw；中型机：100kw至1000kw；大型机：1000kw以上。

风力发电机组按照风机旋转主轴方向可以分为垂直轴和水平轴。其中水平轴风机转动轴与地面平行，运行时叶轮需要随风向调整。垂直轴风力发电机组转动轴与地面垂直，叶轮不必随风向改变而调整方向但垂直轴风力发电机组与水平轴风力发电机组相比优越性较差，所以市场上使用的几乎都是上风向水平轴机型。

风力发电机组按照有无齿轮箱可以分为直驱型和双馈型，直驱型风力发电机组的多极电机与风轮直接连接，由风力直接驱动发电机，使风能转换变幅变频的三相交流电，经过整流之后转变为直流，然后通过逆变器变换为幅值频率恒定的三相交流电后并入电网，实现最大功率跟踪。但它的缺点也很明显，由于没有齿轮箱，各种冲击载荷都由发电机系统承受，对发电机有很高的要求。双馈电机在风轮和发电机之间采用齿轮箱连接，噪音大，故障高，且机械损耗大。但是其利用励磁电流，既可以在不同转速下发电，又可以独立调节发电机有功功率和无功功率，提高电力系统的性能。

2.2 空气动力学

2.2.1 动量理论

在1900年之前 Rankine 和 Froude 建立了激励圆盘模型，用来考虑气流在风力机轴向的动量变化。本文通过能量转换方法展开空气动力学分析。风机的制动盘模型如图2.2所示。

图2.2 制动盘模型

本文以水平轴风力发电机组为研究对象，假设流经风力机的气流均匀稳定的且没有阻力，风机为一个具有无限个桨叶的制动盘，在空气流经制动盘时气流速度开始降低，动能减小，减少的这部分能量就转化成了风机的机械能。

风通过制动盘时，速度会减小，根据能量守恒，减少的动能转化成了机械能，因此可以采用伯努利方程和质量守恒定理进行分析。

作用在风轮上的推力如公式(2.1)(2.2)所示：

(2.1)

(2.2)

其中， $\dot{m}$  为单位时间内流通空气的质量， $v_1$  为上游空气流动速度， $v_2$  为下游空气流动速度， $\rho$  为空气密度， $v_3$  为制动盘处空气流动速度， $A$  为制动盘横截面积。

将(2.2)代入到公式(2.1)中得到：

(2.3)

推力也可以用上下游之间的压力差表示。在制动盘处采用推力公式和伯努利方程，解决来流方向风速问题。



(2.4)

其中， $p_1$  为制动盘前受到的压力， $p_2$  为制动盘后受到的压力。

已知伯努利方程

常数 (2.5)

上游处平衡方程

(2.6)

其中， $p_3$  为上游压力。

下游处平衡方程

(2.7)

其中， $p_4$  为下游压力。

由公式(2.4)~(2.7)可推出，推力可以表示为

(2.8)

(2.9)

当气流穿过风轮时，部分气流发生方向偏转，使得下游风速降低，引入轴向诱导因子，那么上游风速和下游风速的关系可表示为：

(2.10)

已知风轮的功率表达式为：

(2.11)

将公式(2.9)和诱导因子代入公式(2.11)得到：

(2.12)

求导后得：

(2.13)

计算得出：

(2.14)

由此得到风能利用系数

(2.15)

计算最大风能利用系数。 $C_{p,max}$  为贝兹极限值，是理想风机的最大理论效率值，实际应用中，风力机获取的能量不会超过贝兹极

限值。

### 2.2.2 叶素理论

力与叶各部分之间具有一定的关系，为了分析这种关系，叶素理论[48, 49]将叶片分成多个部分进行分析，其中每个部分叫作叶素，过各个叶素是相互独立的，之间的流动没有干涉，在风对叶素作用时，会产生力。详细的叶素几何分量图如图2.3所示。

图2.3 叶素几何图

图中为垂直于风速方向产生的升力，为平行于风速方向产生的阻力，为对叶片轴向方向和切线方向作用的矢量和，称为入流角，是相对风速与风轮旋转平面之间的角度，称为攻角，是与叶素弦线之间的夹角，为桨距角，是入流角与攻角之差。

考虑到风轮后尾流旋转时，速度三角公式如下所示：

(2.16)

其中，为来流风速，为叶素的相对轴向速度，为叶素的相对切向速度，为风轮半径，为风轮转速。

相对速度可表示为

(2.17)

其中，为轴向诱导因子，为周向诱导因子。

那么入流角有关系式：

(2.18)

在风轮旋转轴上的作用力包括与旋转轴平行的法向力和与旋转轴垂直的切向力。在旋转轴上，升力增量与阻力增量对法向力增量影响很大，法向力增量表示如下：

(2.19)

切向力增量表示：

(2.20)

其中，为叶素弦长，切向力系数，法向力系数。

由此可得到作用在叶素圆环上的推力和转矩为：

(2.21)

(2.22)

其中，为叶片数目。通常一个叶片分割为10-20个叶素。

### 2.2.3 风力机的特性系数

风机的特性可以用功率系数来描述，功率系数越大，则风机的风能利用率越高。一般风机的运行状态主要由风轮的叶尖速比和叶片的桨距角决定，因此，通常用叶尖速比来表示风机的功率系数。风机运行过程中，桨距角的变化会引起风机功率显著变化，故可以通过对叶片桨距角和叶尖速比的调节，使风机运行在最佳状态[50]。

## 1. 风能利用系数

当风通过风轮叶片时，会推动风轮叶片旋转，从而产生机械能，进而带动发电机发电，风力机捕获的能量为[51, 52]:

(2.23)

式中:  $\rho$  为空气密度,  $A$  为风轮扫掠截面面积,  $v$  为风速;  $C_p$  为风能利用系数。  $\beta$  为桨距角,  $\lambda$  为叶尖速比, 定义为叶片顶端的线速度与风速之比:

(2.24)

式中:  $\omega$  为风轮角速度, 单位为  $\text{rad/s}$ ;

$R$  为风轮半径, 单位为  $\text{m}$ 。

风能利用系数可表示为:

(2.25)

(2.26)

式中:  $\lambda_{opt}$ 。

从上式可以看出: 风能利用系数由叶尖速比和桨距角决定, 风力机的特性曲线如下图所示。

图2.4 变桨距风机特性曲线

从图中可以看出, 叶尖速比不变时, 桨距角增大, 风能利用系数减小; 桨距角不变, 随着叶尖速比增大, 风能利用系数会先增大后减小。故可通过改变桨距角来改变风能利用系数, 进而调节风轮捕获的风能, 从而达到控制风机的输出功率的目的。

## 2.3 变速变桨控制理论

### 2.3.1 变速控制理论

变速变桨风力发电机组在并网之后, 可根据风速来划分工作状态, 其运行区域可以分为: 低风速叶尖速比区、转矩恒定区和功率恒定区三部分[53]。在低风速控制区域可以通过调节发电机转矩得到最大风能利用系数, 从而实现发电机输出功率最大化的控制目标。在搞风速功率恒定区可以通过调节桨距角来改变风能利用系数, 进而实现发电机输出功率稳定在额定功率的控制目标。变速变桨风力发电机组运行区域划分如下所示:

区域一:  $v < v_{cut}$ , 最佳叶尖速比区;

区域二:  $v_{cut} \leq v < v_n$ , 转速恒定区;

区域三:  $v \geq v_n$ , 功率恒定区。

图2.5 风力发电机组运行区域划分

风力发电机组在变速阶段的目标是最大化风机输出功率, 当风速未达到额定风速时, 通过调节转矩实现风能利用最大化; 当风速达到额定风速时, 风力发电机组输出额定功率; 当风速高于额定风速时, 为避免风力发电机组受到破坏, 必须舍弃一部分风能以实现输出功率稳定在额定功率。由图2.4可看出, 在风速未达到额定风速之前属于变速运行区域, 分为三个运行阶段。

1) 启动阶段: 在该阶段, 风速小于切入风速, 此时发电机不工作, 只有风轮随风旋转。桨距角为 $90^\circ$ 顺桨状态, 这样风轮可

以得到一个比较大的启动力矩。

2) 最佳叶尖速比阶段（恒定区）：当风速达到切入风速时，风力发电机组开始工作，并切入电网，这时的发电机输出功率低于额定功率，捕获最大风能得到最大功率输出成为该阶段的主要控制目标。为实现该目标可通过调节发电机转速使得风能利用系数保持在最大值，从而实现最大能量捕获；

3) 转速恒定阶段：当风速达到中间风速时，发电机转速达到了额定转速，受机械性能影响，发电机转速不能再增加。此时便进入了转速恒定区，但功率仍小于额定值，需控制发电机转矩使其增加，使得当风速达到额定风速时可以输出额定功率。

在变速阶段，理想状态下桨距角为 $0^\circ$ ，此时变桨系统不工作，风力发电机组通过控制发电机转矩使发电机最大化捕获风能[54-57]。目前风电场通常采用成熟的PID控制器来控制风力发电机组，该控制器设计简单，具有快速响应和较低的稳态误差，故得到了广泛地应用。其缺点是PID参数设计基本是靠经验来设计，并需要进行多次试验才能获得较好地控制效果。

### 2.3.2 变桨控制理论

变桨距控制技术是通过控制桨距角从而改变风轮对风能的吸收程度进而调整输出功率，保证输出功率稳定在额定功率。变桨系统的主要作用为：在低风速时的启动作用和在高风速时的功率限制作用。

#### 1) 低风速下的启动作用

在风速未达到切入风速时，风力发电机组不工作，此时桨距角处于顺桨 $90^\circ$ 状态；当风速达到切入风速时，桨距角开始向 $0^\circ$ 方向偏转，使得风机获得较大地启动转矩从而克服驱动系统的空载阻力矩，使风轮启动。风机运行后，为达到输出功率最大，桨距角应该为 $0^\circ$ 。然而在实际运行中，由于叶片的形状及一些其他因素使得在桨距角为 $3^\circ$ 时，风轮可以捕获到最大风能。在功率输出未达到额定功率前，变桨执行机构不动作。

#### 2) 高风速下的功率限制作用

当风速高于额定风速时，如果桨距角继续保持在 $0^\circ$ ，则输出功率会高于额定功率，在这种情况下长期运行会对风力发电机组造成损坏。为保护风力发电机组，必须舍弃一部分风能，保持输出功率稳定在额定功率。这时就需要调节桨距角，使其向 $90^\circ$ 方向旋转，从而减小风能利用系数，维持输出功率稳定。

目前比较常用的变桨控制方式主要有统一变桨控制方式和独立变桨控制方式两种[58, 59]。统一变桨控制的方式是最早发展起来的，应用比较广泛，目前技术也比较成熟。独立变桨控制方式是近几年才发展起来的新方法，相对于统一变桨控制能够解决叶片和塔架等部件载荷不均匀的问题，并且可以很好地控制输出功率。故其受到了越来越多的重视，理论也越来越完善。

统一变桨控制是指不论风力机有多少个叶片，统一控制风力机所有叶片的桨距角，所有叶片桨距角的变化相同。变桨控制系统将参考转速与实际转速之差作为控制器的输入，控制器根据转速误差输出桨距控制指令，通过变桨控制器和执行机构改变桨距角。其控制流程如下图所示：

图2.6 统一变桨控制框图

独立变桨控制是对风力机的每个叶片都进行独立地驱动变桨，在不同的高度和不同的风速下，需要调节的桨距角也不同，故需要对三个也变进行独立控制，给每个叶片分配控制系数。与统一变桨控制相比，独立变桨控制有多个执行机构，在一个变桨执行机构发生故障的情况下，不影响其他叶片的桨距角控制，可靠性较高。

目前有两种独立变桨控制策略：基于桨叶加速度控制和基于桨叶方位角控制。前者需要在叶片上安装加速度传感器，后者是通过在叶片上安装方位角检测装置，相较于前者，基于桨叶方位角的策略更容易实现。独立变桨控制框图如下所示：

图2.7 独立变桨控制框图

本章首先介绍了风力发电机组的基本结构和分类，并对其主要结构和功能进行了描述。随后介绍了风力发电机组的空气动力学特性，包括动量理论和风力发电机组的一些特性系数，推导出了在理想状态下的风能利用系数。最后介绍了变桨变速风力发电机组的控制理论，对风力发电机组的三个运行区域进行了详细地描述，并介绍了两种控制理论的基本控制结构和所运行的区

域，为后续地研究奠定了基础。

指 标		
剽窃文字表述		
1. 风力发电机组的输出功率，并能够通过空气动力的方式使风力发电机组安全停机。传动系统主要包括风轮转子、低速轴、齿轮箱、		
2. 通过调节桨距角来改变风能利用系数，进而实现发电机输出功率稳定在额定功率的控制目标。变速变桨风力发电机		
11. 201511162445_石琼玉_第11部分		总字数：6173
相似文献列表 文字复制比：10.4%(645) 剽窃观点：(0)		
1	1.5MW双馈型风力机变桨距控制算法研究 倪焕山(导师：康戈文)-《电子科技大学硕士论文》-2012-04-01	3.4% (209) 是否引证：是
2	变速变桨距风电系统建模与智能控制技术研究 王佳雯(导师：龚华军)-《南京航空航天大学硕士论文》-2012-03-01	2.3% (139) 是否引证：是
3	风电机组独立变桨距控制技术研究 郭百顺(导师：秦斌)-《湖南工业大学硕士论文》-2014-06-04	1.6% (101) 是否引证：是
4	基于半张量理论的电力系统稳定域边界逼近 (二)应用 马进;程代展;梅生伟;卢强;-《电力系统自动化》-2006-06-10	1.4% (88) 是否引证：否
5	基于输出预测和LMI方法的电力系统广域阻尼控制研究 罗珂(导师：刘玉田)-《山东大学博士论文》-2010-10-08	0.6% (34) 是否引证：否
6	电网电压不平衡时双馈感应发电机控制策略研究 周前程(导师：赵国材)-《辽宁工程技术大学硕士论文》-2011-11-18	0.5% (31) 是否引证：否
7	智能控制在电厂主蒸汽温度控制系统中的应用研究 冯晓露(导师：岑可法;袁镇福)-《浙江大学博士论文》-2006-02-01	0.5% (30) 是否引证：否
原文内容		
第三章风力发电机组建模与控制方法研究		

风力机模型的搭建对整个风机系统的动态特性和控制规律的研究有着极为重要的意义，建立的风机模型应能够描述整个机组的所有基本特性，而且还要适合控制器的控制仿真。变桨距风力机模型的基本结构应包括风气动系统、机械系统、电气系统及控制系统等模型。其中气动系统建模主要包括风速模块，将风能转换为机械能，机械系统主要包括传动模块，电气系统主要包括发电机模块，主要任务为将传动轴的机械能转换为电能。最后需要控制系统调节桨距角或转矩进行控制策略调整，从而实现控制目标。

图3.1 风力发电机组基本构成

3.1 风力发电机组建模

3.1.1 风速模型

风力发电机组是利用风作为原动力，经过一系列的能量转化最终转化成电能，风电机组的模型与风的模型密切相关，只有建立精确的风的模型，才能进行后续地风电机组建模和验证控制策略的可行性。风速建模有多种方法，

文献[60]将自然风分成四个部分，每个部分都是矢量，具有大小和方向，这四个部分分别为基本风、渐变风、阵风和随机风。Vander Hoven将风能看成是一个稳态的随机过程，建立了 Vander Hoven 风速模型，这种模型能很好地反映风的中长期变化特性，但不能反映风在短时间内的变化。Von Karman将风速的紊流分量特性看作与某段时间内的平均风速有关，建立的Von Karman风速模型很好地模拟风在短时间内的变化特性。

本课题选用风速典型的四分量模型，即由基本风、阵风、渐变风和随机风叠加而成。

基本风是一直存在于自然界中的，用来反映风场中平均风速的变化，通过威布尔分布函数可以近似得到

(3.1)

其中， $\lambda$  为威布尔分布的尺度参数， $k$  为伽玛函数， $\alpha$  为威布尔分布的形状参数。在一般情况下基本风不会随着时间变化，一般可以用常值在仿真中来模拟。

阵风用来描述在某个时间段内风突然变化的现象，其数学公式可以表示为：

(3.2)

其中， $v_g$  为阵风风速， $t_g$  为阵风启动时间， $T_g$  为阵风周期， $v_{gmax}$  为阵风的最大风速。

渐变风可以随着时间发生缓慢的变化，其数学公式可以表示如下：

(3.3)

其中， $v_s$  为渐变风速， $t_s$  为渐变风起止时间， $T_s$  为渐变保持时间。

随机风的变化具有不确定性，它受到多种因素的影响，包括地表粗糙系数、相对高度的风速及各种外来扰动等，其数学公式可以表示如下：

(3.4)

其中， $N$  为频谱取样点数， $\Delta t$  为取样频率， $\alpha$  为地表粗糙系数， $\Delta v$  为扰动范围， $v_{avg}$  为相对高度的平均风速， $\theta$  为在0~ $2\pi$ 之间均匀分布的随机变量。

本文采用的风速模型为基于Matlab/Simulink的风力发电建模系统中的风速模块，与四分量风速模型效果相比，该风速模型考虑到了塔影效应，更加接近风场的实际风速。

使用该风速模块分别对平均风速为5m/s、10m/s和15m/s三种风况进行仿真，仿真时间为10分钟，即600秒。仿真结果如图3.2所示：

图3.2 风速曲线

从图中可以看出，风速在平均风速附近小范围震荡，误差不超过12%，变化速率有的部分比较平缓，有的部分会出现较大地变化，符合实际状况下风速的突变性。该模块比较准确地模拟了三种平均风速下的风况，表明该模块可以模拟多种风速，具有较广的适用性且可以较好地反映出风场中的实际风速。因此可以使用该风速模块模拟风速来验证之后设计的控制策略和风机模型。

### 3.1.2 传动链模型

风力发电机组的传动系统一般由风轮转子、高速轴、齿轮箱、低速轴和发电机转子等部分组成。在研究传动系统时，一般根据轴系的等效和建模方法的不同将传动系统分为单质量块模型、二质量块模型和三质量块模型三种[61]。考虑到模型的复杂度，在一般研究中通常使用二质量块模型或单质量块模型。

#### 1) 二质量块模型

二质量块模型可以通过三质量块模型折算过来，齿轮箱的转动惯量可以折算到风轮和发电机中，低速轴的转矩和转速可以折算到高速轴部分，齿轮箱以及高低速轴的弹性作用和转动阻尼作用可以等效成一个弹性和阻尼环节。二质量块模型如图3.3所示。

图3.3 风力发电传动系统二质量块模型



当风轮转速达到一定速度后，在启动转矩和低速轴转矩的相互作用下，风轮开始转动，其作用关系如(3.5)所示：

(3.5)

其中， $J_{\text{w}}$  为风轮转动惯量( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )； $B_{\text{w}}$  为风轮阻尼系数( $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ )； $T_{\text{sl}}$  为低速轴转矩( $\text{N}\cdot\text{m}$ )，在其中发挥制动作用，用公式表示如下所示：

(3.6)

其中， $B_{\text{ls}}$  为低速轴阻尼系数( $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ )； $\theta_{\text{w}}$  为风轮旋转位置角( $^\circ$ )； $\theta_{\text{ls}}$  为低速轴旋转位置角( $^\circ$ )； $K_{\text{ls}}$  为低速轴刚度系数( $\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ )； $\omega_{\text{w}}$  为风轮旋转角速度( $\text{rad/s}$ )； $\omega_{\text{ls}}$  为低速轴旋转角速度( $\text{rad/s}$ )。

低速轴转矩以齿轮箱转速比的倍率传输到高速轴。

(3.7)

其中， $T_{\text{hs}}$  为高速轴转矩( $\text{N}\cdot\text{m}$ )； $i_{\text{g}}$  为齿轮箱齿速比。

发电机的旋转位置角、转速与低速轴旋转位置角、转速关系如下：

(3.8)

(3.9)

其中， $\theta_{\text{g}}$  为发电机的旋转位置角( $^\circ$ )； $\omega_{\text{g}}$  为发电机转速( $\text{rad/s}$ )。

在风力发电机组的实际运行过程中，齿轮箱会造成一定的能量的损耗（约相当于0.5%的额定功率），考虑到齿轮箱造成的损耗，则输出的高速轴转矩的表达式应该在公式(3.7)的基础上乘以一个效率系数。

(3.10)

假设风力发电机组是在理想的工作条件下运行的，即运行过程中没有损耗，那么由公式(3.7)、(3.8)和(3.9)可知：

(3.11)

发电机在高速轴转矩和电磁转矩的相互作用工作，其表达式为：

(3.12)

其中， $J_{\text{g}}$  为发电机转动惯量( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )； $B_{\text{g}}$  为发电机阻尼系数( $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ )； $T_{\text{em}}$  为发电机电磁转矩( $\text{N}\cdot\text{m}$ )。

## 2) 单质量块模型

单质量块模型可由二质量块模型简化而来，其目标是降低传动系统模型复杂度，将研究侧重点放在风力发电机组的电气部分的动态特性上。单质量块模型如图3.4所示。

图3.4 风力发电传动系统单质量块模型

风轮的转动惯量和发电机的转动惯量反馈到输出轴上，假设轴为理想刚度，忽略转动系统的刚度和阻尼，那么：

(3.13)

(3.14)

综合公式(3.11)、(3.13)和(3.14)，可以得到

(3.15)

因此，公式(3.5)和(3.12)可描述为：

(3.16)

(3.17)

公式(3.17)与相乘后再与公式(3.6)求和可得到下式：

(3.18)

其中，为发电机转矩( $T_g$ )，且存在关系式： $T_g = T_m$ ； $T_m = T_e$ 。

3.1.3 变桨距机构模型

当风速超过额定风速时，为避免风电机组受到损坏，保证输出功率稳定在额定功率，需要启动变桨执行机构限制风力发电机组的风能捕获。根据风速大小得出桨距角，并输出桨距角控制指令，经控制系统调节，由执行机构驱动叶片变桨，数学模型如公式(3.19)，拉式变换如公式(3.30)：

(3.19)

其中，为桨距角的参考值( $^\circ$ )；为实际输出的桨距角值( $^\circ$ )；为时间常数。

(3.20)

由于控制系统和驱动系统会存在一定的计算延迟和条件延迟等情况，所以变桨执行机构会出现一定程度的延迟响应。

独立变桨控制中，每个叶片的桨距角是有控制系统独立控制的，控制机构会根据每个桨叶的受风情况，得到权系数，权系数表达式可由经验得到，可表示为为：

(3.21)

其中，为叶片长度；为叶片平均风速点的等效长度；为风力发电机组机舱处的位置与轮毂中心处的距离到地面的高度；为叶片的方位角。

经过权系数分配后，计算得到桨距角值

(3.22)

其中，为统一变桨的桨距角。

3.1.4 发电机模型

风力发电的过程是风能转化成机械能，再由机械能转化成电能。其中，风力机完成了风能到机械能的转化，发电机完成了机械能到电能的转化，在能量转化过程中，发电机扮演着极其重要的角色，它不仅关系到输出电能的质量，还影响了风力发电机组的效率。发电机选择时需要考虑其稳定可靠性和使用寿命以及是否能够适应风况的变化等。

目前在变桨控制中主要采用异步发电机，异步发电机通过改变定子电压来改变发电机力矩，本文对异步发电机的模型进行简化，其数学模型可表示为为：

(3.23)

(3.24)

其中， $\alpha$  为发电机极对数； $\beta$  为相对数； $V$  为电网电压(V)； $K$  为修正系数； $\omega_g$  为发电机转速( $^\circ/\text{s}$ )； $\omega_r$  为风轮转速( $^\circ/\text{s}$ )； $\omega_{gs}$  为发电机同步转速( $^\circ/\text{s}$ )； $R_s$  和  $X_s$  分别为定子绕组电阻和漏抗( $\Omega$ )； $R_r$  和  $X_r$  分别为转子绕组电阻和漏抗( $\Omega$ )。

3.2 风力发电机组控制方法

对风力发电控制系统模型的非线性主要体现在风轮所捕获的风能大小上，风力机实际捕获的机械功率与空气密度、风速、风轮扫掠面积、风能利用系数等因素相关。由此不难看出风速的随机性及风能利用系数的复杂性使得控制系统的非线性模型难于建立。因此需要根据被控对象的物理特征，以及相应的基础理论建立出能够反映被控对象特征的非线性模型。

3.2.1 状态反馈控制

状态反馈是现代控制理论中的一种基本控制方式，在经典控制理论中通常采用输出反馈，状态反馈相比于输出反馈，优点在于能够提供更丰富的状态信息和可供选择的自由度，可以使系统容易获得更好的性能，故得到了广泛地使用[62]。

状态反馈是将系统的状态变量乘以一个反馈系数，然后将结果反馈到输入端与参考输入公共作用作为输入，形成新的控制率。

考虑线性时不变系统：

(3.25)

为使系统稳定，设计状态反馈控制器，则控制器须满足开环系统保持线性，且闭环系统

(3.26)

的原点是渐进稳定的。故当矩阵是Hurwitz矩阵时便可满足闭环系统渐进稳定。因此，状态反馈稳定问题就转化成了设计一个矩阵，满足矩阵的特征值位于复平面的左半平面。由现代控制理论可知，若矩阵对是可控的，则可以任意设计的特征值。即使的某些特征值不可控，只要不可控的特征值具有负实部，系统仍然有可能达到稳定。

目前，在状态反馈方法应用中，由于卡尔曼滤波方法的出现以及状态观测器理论和状态估计方法的发展，使得状态变量的精确估计值越来越容易获得，进一步增加了状态反馈方法的实用性。

3.2.2 PID控制

PID控制，即比例积分微分控制，是由比例单元、积分单元和微分单元三部分组成。PID控制器由于结构简单、控制效果理想，在工业系统中得到了广泛地应用[63]。有些应用场景不需要使用所有的单元，因此PID控制器又可变化为PI控制器、PD控制器、P控制器或I控制器。PID算法可以表示为：

(3.27)

其中， $K_p$  为比例系数； $T_i$  为积分时间常数； $T_d$  为微分时间常数； $K_i$  为积分系数； $K_d$  为微分系数。

比例系数的作用是加快系统的响应速度，提高系统的调节精度；积分环节的作用是消除静差，使系统的误差减小到零。微分环节是起到提前预判的作用，是通过检测输出信号与给定之间的差值变化，来调节系统的控制量，使系统的动态性能得到改善。PID控制器的参数选择对系统的性能有很大的影响，通常由经验获得，三个参数对系统影响如下表所示：

表3.1 PID控制器参数对系统性能影响

上升时间超调量稳定时间稳态误差

Kp 变小变大变小变小

KI 变小变大不变不变

KD —— 趋于0 趋于无穷趋于无穷

PID控制器设计时通常先根据系统响应时间和稳态误差来设计参数和，之后再通过暂态响应来设计，最终完成PID控制器的设计。目前在大多数应用中，PI控制器就可以很好地完成控制指标，只有当PI控制器无法达到控制要求时，才加上微分控制参数。常用的PID控制器参数设计方法有：实验调整法、最小超调量调整法、Ziegler-Nichols调整法和根轨迹调整法等。

其中实验调整法为：1) 将和设置为0，仅调节参数。2) 调整，若无震荡产生，调到步骤3；若产生震荡，调下直至出现周期性震荡为止。3) 增加，调整上升时间。4) 增加，直至系统出现周期性震荡。

最小超调量调整法为：1) 将和设置为0，仅调节参数。2) 调整值使得系统出现周期性震荡，将此时记录为，并记录震荡时间的值。3) 利用经验公式设定参数值，经验公式为：

Ziegler-Nichols调整法为：1) 将和设置为0，仅调节参数。2) 调整值使得系统出现周期性震荡，将此时记录为，并记录震荡时间的值。3) 利用经验公式设定参数值，经验公式为：

### 3.2.3 滑模控制

上世纪50年代变结构控制被前苏联学者提出。滑模控制是变结构控制策略之一，它是一种非线性控制，它与常规控制的区别为控制的不连续性，这种不连续性可通过切换函数来实现，该切换函数可使系统结构随时间变化而变化，并根据系统状态偏离滑模的程度来切换控制率或控制器参数，从而使系统按照规定的状态进行运行，最终在平衡点实现渐进稳定[64]。目前滑模控制已形成一套完整的理论体系，由于其对非线性系统具有良好的控制性能使得其可以应用到各种工业对象中。

滑模控制一般可分为三种方式。分别为常值切换控制、函数切换控制和比例切换控制。其中常值切换控制可表示为：

(3.28)

其中，为常数，为符号函数。函数切换控制可表示为：

(3.29)

其中，为进入滑动模态后的等效控制。比例切换控制可以表示为：

(3.30)

其中，为常数。可以看出滑模控制是通过选择合适的切换函数来实现的，这个切换函数也叫作开关面。系统在开关面上的滑动只取决于开关面的系统特性，与外部参数的变化无关[65]。

### 3.3 风力发电机组运行稳定域

李雅普诺夫稳定性理论指出：非线性动力系统的稳定平衡点一定存在一个邻域，从该邻域内出发的轨线都收敛于该稳定平衡点，这个邻域就称为该稳定平衡点的吸引域，简称稳定域[66, 67]。风力发电机组的暂态稳定对风机的安全运行具有重大的影响，风力发电机组的暂态失稳会导致风机损坏进而发生故障，对风电场造成大量损失，故研究风力发电机组运行稳定域具有重要意义。

考虑非线性系统：

(3.31)

设原点为该系统的渐进稳定平衡点，其中是局部Lipschitz的， 且是包含原点在内的定义域。设是系统(3.31)在时刻初始状态的解。原点的吸引区记为， 定义为：

(3.32)

引理3.1 若是系统(3.31)的渐进稳定平衡点，则其吸引区是一个开连通不变集，而且的边界由系统轨线构成。

引理3.1提出一种确定吸引区的方法，该方法通过描述在的边界上的轨线的特征来确定其吸引区。在二阶系统中，通过运用相图来应用动力学系统的几何表示法可以确定吸引区。下面给出了通过几何法确定吸引区的情况。

考虑二阶系统：

系统在原点有一个平衡点和一个非稳定极限环，由图3.5可知原点是稳定的，因为始于极限环外面的轨线不能通过极限环到达原点，且不存在其他平衡点，故的边界一定为该极限环，通过相图可知，所有从极限环内开始的轨线都趋向原点。

图 3.5 二阶系统相图

应用Lyapunov方法可以求出或估算出吸引区，若是由的一个正不变紧子集估算时，即紧集使得每条始于的轨线在之后的所有时刻都会保持在内，估计值可以表示为集合：

其中，包含于内且有界。对于Lyapunov函数，选择

可以保证当时，有

若选取

则是的一个子集。

12. 201511162445_石琼玉_第12部分		总字数：8584
相似文献列表	文字复制比：0.3%(29)	剽窃观点：(0)
1	船舶燃气轮机—发电系统稳定性研究	0.3% (29)
张丛辉(导师：谢春玲) - 《哈尔滨工程大学硕士论文》 - 2009-12-01		是否引证：否
原文内容		
第四章风力发电机组控制器设计及稳定域分析		

风力发电的主要目的是最大化利用风能，但由于风的随机性和不可预测性使得风产生的能量也是时刻变化的，这就需要采用一些控制策略对风力发电机组进行控制，保证风力发电机组在安全运行的前提下，功率输出最大化。上世纪90年代，变桨距风力发电机组进入风力发电市场，采用变桨距控制使得风力发电机组的功率输出特性得到了显著地提高，然而风力发电机组在低风速段的风能转换效率仍然较低。目前，变速变桨风力发电机组已经成为并网型风力发电机组发展的主流机型，变速变桨风力发电机组能够根据风速的变化不断的调节风轮转速，保证在低风速阶段最大化风能利用率。将变速技术与变桨技术集于一体的变速变桨控制技术是目前最优化的控制技术，这种技术还能够减少阵风对风力发电机组造成的损坏，降低噪声，延长机组使用寿命，改善电能质量。本文从工程应用角度出发，基于状态反馈对风力发电机组分别设计了变速控制器和变桨控制器，并通过理论推导证明该系统的稳定性，最后通过仿真验证所设计的控制器能够达到功率输出最优的控制目标，并基于该控制器对风力发电机组的稳定域进行了分析。控制总框图如图4.1所示。

图4.1 风电机组控制总框图

4.1 转矩控制器设计

当风速小于额定风速时，变桨执行机构不工作，此时桨距角被设置为0°，可获得较大地力矩。风力发电机组的转矩控制机构

开始工作，根据风速的大小不同，调节发电机转矩进而调节发电机的转速，带动风轮达到期望的转速，最终获得最大的风能。

图4.2为变速变桨风力发电机组的转矩与转速关系图，从图中可以看出，在AB和CD区域内，发电机转速恒定，此时控制系统通过调节发电机转矩调节发电机转速。在BC区域，风力发电机组调节发电机转矩使得风机获得最佳叶尖速比。

图4.2转矩-转速运行曲线图

#### 4.1.1 状态反馈控制器设计

风力发电机组数学模型表达形式如(4.1)所示：

$$(4.1)$$

式中， $\theta$  为转子转动角度， $\omega$  为风轮转动角速度， $J$  是总的机械惯性， $B$  和  $K$  分别为粘滞摩擦系数和刚度系数， $T_a$  为气动转矩， $T_p$  为利用系数。为发电机电磁转矩， $T_e$ 。为简化计算，简化为：

$$(4.2)$$

其中， $\rho$  为空气密度， $R$  为风轮半径。原问题为控制风轮转速达到期望转速，从而最大限度的捕获风能。为设计状态反馈控制器，首先通过状态转换，将原问题转换成系统在原点稳定的问题。状态转换方程如(4.3)所示：

$$(4.3)$$

其中， $\omega_r$  为风轮期望转速与实际转速之差， $\omega_{r0}$  为风轮期望转速，且  $\omega_r = \omega_r - \omega_{r0}$ ， $\lambda_{opt}$  最佳叶尖速比， $\omega_r$  为风轮转速。为转矩偏差， $T_e$  为发电机电磁转矩， $T_e$  为转矩执行装置，则状态转换后方程为：

$$(4.4)$$

整理，得：

$$(4.5)$$

其中：

设计控制器：

$$(4.6)$$

其中， $K$  为控制器参数，将(4.6)代入(4.5)中，得：

$$(4.7)$$

令和，则：

选取李雅普诺夫函数，则：

$$(4.8)$$

为使系统稳定，只需满足。已知风轮半径为38.5m，额定转速为2rad/s，额定风速为12m/s，额定功率为1.5MW，切入风速为3m/s，切出风速为25m/s。选取，，，，。当时，满足，故设计控制器为：

$$(4.9)$$



稳定性证明：将(4.9)代入(4.5)，得：

(4.10)

选取李雅普诺夫函数，由(4.8)可知，即该系统稳定。

4.1.2 系统稳定域分析

风力发电机组控制器设计完成之后，仅仅确定系统有一个渐进稳定点是远远不够的，能够求出平衡点的稳定域或给出稳定域边界更加重要。风力发电机组运行过程中可能会发生一些故障，包括变桨故障等，这些故障会改变系统的结构，可能会导致风力发电机组系统轨线偏离稳定点，假如故障恢复后，该系统运行在平衡点的稳定域内，则该系统可以回到稳定状态；若该系统运行在平衡点的稳定域外，则该系统不会回到稳定状态，这会进一步造成风电机组的损坏。

图4.3 系统稳定域

由此可见，设计风电机组控制器时给出其稳定域具有重要意义，根据其稳定域可以估算出故障恢复时间临界点，可用来指导维修人员需要在多长时间内修复故障，且设计的控制器稳定域边界越大，说明系统的抗干扰能力越强，可在系统故障的情况下安全运行更长时间，这给维修人员提供了更多时间用来修复故障。

在式(4.8)中，给定，，，，，，，为保证，则应满足一定条件，经验证在的条件下，。又，则：

(4.11)

故在该控制器下的风力发电机组运行的稳定域为，在此范围内，风力发电机组可正常运行。

4.1.3 系统仿真结果

在风力发电机组整体控制中，所测的发电机转速信号经过传感器传递给主控系统，主控系统输出桨距角指令及转矩指令分别给变桨执行机构和发电机实现调节桨距角和转矩的目的，达到相应工况的控制目标。系统仿真框图如下所示。

图4.4 系统仿真结构图

本文选择额定功率为1.5MW风力发电机组为研究对象，风力发电机组相关参数为：额定风速为11，风轮额定转速为1.97，风轮半径为38.5，风轮转动惯量为，风轮阻尼系数为270.36，齿轮箱齿速比为75.76，最大风能利用系数为0.436，最佳叶尖速比为6.3，仿真时间设置为300。其中转矩控制器和变桨控制器内部设置简单的逻辑切换装置，保证不同的风况下相应的控制环起作用。整体仿真平台如图4.4所示。

表4.1 1.5MW风电机组参数

参数值单位

风轮半径 38.5 m

空气密度 1.308 Kg/m3

风轮转动惯量 3.28×106 Kg m2

风轮额定转速 1.97 rad/s

风轮阻尼系数 270.36 N m/rad/s

齿轮箱齿速比 75.76 —

额定功率  $1.5 \times 10^6 \text{ W}$

在风速低于额定风速阶段，控制目标为输出功率最大化，此时控制系统会通过逻辑切换至转矩控制模块，通过设计的状态反馈控制器进行调节。本文分别在风速为5m/s、7m/s和9m/s三种风况下进行仿真，其仿真结果如下所示：

图4.5 风速曲线图

从图中可以看出，平均风速分别为5m/s、7m/s和9m/s，其中平均风速为5m/s的情况中，最大风速为5.87m/s，最小风速为4.73m/s；平均风速为7m/s的情况中，最大风速为8.31m/s，最小风速为6.44m/s；平均风速为9m/s的情况中，最大风速为10.23m/s，最小风速为8.39m/s；三种风速下误差都不超过12%，表明该风速仿真模块比较精确，可以作为仿真系统输入。

图4.6 风能利用系数曲线图

图中从上往下依次为5m/s、7m/s和9m/s下风能利用系数的仿真结果，从图中可以看出在三种风速下，风能利用系数都能稳定在0.436，即都能到达并稳定在最佳风能利用系数上。在系统稳定后，风能利用系数波动值在 $[-0.02, 0.02]$ 之间，波动幅度较小，表明控制器达到了追踪最大功率的目标。

图4.7 风轮转速曲线图

图中从上往下依次为5m/s、7m/s和9m/s下风轮转速的仿真结果，从图中可以看出在风速为5m/s下，风轮转速平均值为0.8rad/s；风速为7m/s下，风轮转速平均值为1.2rad/s；风速为9m/s下，风轮转速平均值为1.5rad/s。表明随着风速增大风轮转速也随着增大，

图4.8 发电机转矩曲线图

图中从上往下依次为5m/s、7m/s和9m/s下发电机输出转矩的仿真结果，从图中可以看出风速为5m/s下，发电机输出转矩平均值为200000N m；风速为7m/s下，发电机输出转矩平均值为500000Nm；风速为9m/s下，发电机输出转矩平均值为800000N m。随着风速增加，发电机输出转矩也随着增加，风力发电机组通过控制发电机转矩调整发电机的转速，使风轮转速达到期望转速，最大限度的捕获风能。

图4.9 风力发电机组输出功率曲线图

图中从上往下依次为5m/s、7m/s和9m/s下发电机输出功率的仿真结果，从图中可以看出风速为5m/s下，发电机输出功率平均值为200000W；风速为7m/s下，发电机输出功率平均值为700000W；风速为9m/s下，发电机输出功率平均值为1100000W。随着风速增加，发电机输出功率也随着增加，风力发电机组通过控制发电机转矩调整发电机的转速，进而调节发电机的输出功率，使输出功率最大化。

## 4.2 变桨控制器设计

当风速大于额定风速时，控制目标是使发电机输出功率稳定，此时变桨机构开始工作，调节桨距角使得风能利用系数减小，从而丢弃一部分风能，使得发电机输出功率可以稳定在额定功率附近。由于风电机组模型的复杂性使得变桨控制技术具有较高的难度。

本文通过状态反馈对风电机组模型进行了线性化，将控制问题转化为在期望转速下系统稳定的问题，之后利用线性系统的设计方法设计了控制器，使得输出功率稳定在额定功率。本文的控制流程如图4.10所示：

图4.10 风力发电机组变桨控制方案

### 4.2.1 状态反馈控制器设计

变桨控制的最终目标是输出稳定的功率，当风速超过额定风速时，通过非线性控制给定发电机转矩，利用状态反馈设计变桨

控制器提高发电质量。高风速控制框图如下所示：

图4.11 高风速变桨控制方案

当风速大于额定风速时，风力发电机组主要通过控制桨距角来调节输出功率，使得输出功率稳定在额定功率，故控制量为桨距角，为简化模型可将发电机的电磁转矩设置为定值。桨距角的执行机构一般采用一阶惯性环节：

(4.12)

其中，为时间常数。

风力发电机组模型可表示如(4.13)所示：

(4.13)

其中，为时间常数。由于具有高度非线性，为设计控制器，需将其进行线性化，将(4.13)改写为的形式，则可表示为：

(4.14)

(4.15)

(4.16)

选定输出函数为，其中为风电机组的额定转速，则进行坐标变换和状态反馈得：

(4.17)

令

(4.18)

则该系统转化为：

(4.19)

其中：，。可以看出，只需求出，便可以得到控制量。所以，原系统的控制问题转化为一个线性系统的控制器设计问题。

对于该系统，可设计控制量，其中为最优反馈增益矩阵，且有，R为权系数，为黎卡提矩阵方程：

(4.20)

选取，，则由式(4.20)可求出K的值为

(4.21)

故控制器可设计为：

(4.22)

稳定性证明：，的特征值为，特征值都在复平面的左半平面上，即满足Hurwitz矩阵，故系统在原点是渐进稳定的。

4.2.2 系统稳定域分析

由于是Hurwitz的，所以该系统的李雅普诺夫函数可以表示为：

(4.23)

其中，可解得正定矩阵

只需求出的范围，满足，则的范围即为该系统的稳定域。经验证在的条件下，。因为，，故。故在该控制器下的风力发电机组运行的稳定域为，在此范围内，风力发电机组可正常运行。

4.2.3 系统仿真结果

在风力发电机组整体控制中，所测的发电机转速信号经过传感器传递给主控系统，主控系统输出桨距角指令及转矩指令分别给变桨执行机构和发电机实现调节桨距角和转矩的目的，达到相应工况的控制目标。系统仿真框图如下所示。

图4.12 系统仿真结构图

本文选择额定功率为1.5MW风力发电机组为研究对象，风力发电机组相关参数为：额定风速为11，风轮额定转速为1.97，风轮半径为38.5，风轮转动惯量为，风轮阻尼系数为270.36，齿轮箱齿速比为75.76，最大风能利用系数为0.436，最佳叶尖速比为6.3，仿真时间设置为120。其中转矩控制器和变桨控制器内部设置简单的逻辑切换装置，保证不同的风况下相应的控制环起作用。整体仿真平台如图4.12所示。

表4.2 1.5MW风电机组参数

参数值单位

风轮半径 38.5 m

空气密度 1.308 Kg/m3

风轮转动惯量 3.28×106 Kg m2

风轮额定转速 1.97 rad/s

风轮阻尼系数 270.36 N m/rad/s

齿轮箱齿速比 75.76

最大风能利用系数 0.436

额定功率 1.5×106 W

在风速高于额定风速阶段，控制目标为输出功率稳定，此时控制系统会通过逻辑切换至变桨控制模块，通过设计的状态反馈控制器进行调节。本文分别在风速为14m/s、16m/s和18m/s三种风况下进行仿真，其仿真结果如下所示：

图4.13 风速曲线图

从图中可以看出，平均风速分别为14m/s、16m/s和18m/s，其中平均风速为14m/s的情况中，最大风速为15.87m/s，最小风速为12.83m/s；平均风速为16m/s的情况中，最大风速为19.31m/s，最小风速为14.44m/s；平均风速为18m/s的情况中，最大风速为21.23m/s，最小风速为16.39m/s；三种风速下误差都不超过14%，表明该风速仿真模块比较精确，可以作为仿真系统输入。

图4.14 风能利用系数图

图中，从上往下依次是风速为14m/s、16m/s和18m/s状况下风能利用系数仿真结果。从图中可以看出，风速为14m/s时，风能

利用系数平均值为0.2，最大值为0.28，最小值为0.17；风速为16m/s时，风能利用系数平均值为0.15，最大值为0.18，最小值为0.09；风速为18m/s时，风能利用系数平均值为0.1，最大值为0.12，最小值为0.07。随着风速增加，风能利用系数减小，说明风速越大，丢弃的风能越多。

图4.15 风电机组输出功率图

图中，从上往下依次是风速为14m/s、16m/s和18m/s状况下风电机组输出功率仿真结果。其中，三种风速下风电机组的输出功率都在额定功率范围内浮动，误差小于8%，表明该控制器控制效果良好，且在在较广的风速范围内正常工作。

图4.16 风轮转速图

图中，从上往下依次是风速为14m/s、16m/s和18m/s状况下风轮转速仿真结果。从图中可以看出，在三种风速下，风轮转速都稳定在1.97rad/s，且随着时间增加，风轮转速比较平稳，未出现较大抖动。风轮额定转速为2rad/s，在控制器作用下输出转速与额定转速偏差为0.015%，表明该控制器达到了较好地控制效果。

图4.17 桨距角图

图中，从上往下依次是风速为14m/s、16m/s和18m/s状况下桨距角的仿真结果。从图中可以看出，风速为14m/s时，桨距角平均值为12°；风速为16m/s时，桨距角平均值为20°；风速为18m/s时，桨距角平均值为25°。随着风速增加，桨距角也增大，桨距角增大将会导致风能利用率降低，进而使输出功率稳定，表明该控制器达到了预期的控制效果。

4.3 考虑损耗系数下仿真

风电机组长期运行会造成一定地损耗，导致风能利用率降低，此时风电机组模型会发生一定地变化，这对控制器的控制效果会造成一定程度的影响，严重地可能会导致控制系统无法工作。控制器能否在风机损耗状况下保持一定地控制效果，可作为风电机组控制器设计的一项重要指标。

为考虑风机损耗对控制器的影响，本文引入风机损耗系数，在风机出厂时，风电机组无损耗，即。随着风电机组运行时间增加，风机损耗系数也会逐渐减小，风能利用系数也会减小，风能利用系数与风机损耗系数的关系为：

(4.24)

风电机组模型变为：

(4.25)

其中，为转子转动角度，为风轮转动角速度，是总的机械惯性，为粘滞摩擦系数，为刚度系数，为气动转矩，为利用系数。为发电机电磁转矩，为时间常数。

本文在和这两个损耗系数下，分别对低风速下和高风速下风电机组进行仿真，其中低风速选择风速为5m/s、7m/s和9m/s；高风速选择风速为14m/s、16m/s和18m/s；风电机组使用1.5MW风机。仿真分组情况如下表所示：

表4.3 仿真分组

风机损耗系数低风速（m/s） 高风速（m/s）

0.8 5 14

7 16

9 18

0.6 5 14

#### 4.3.1 低风速仿真

在风速低于额定风速阶段，通过逻辑切换激活低风速控制环，通过风轮的实际转速与期望转速误差进行控制调节，输出相应的给定转矩，使输出功率最大化。仿真结果如下所示，分别对应风速曲线、风能利用系数曲线、风轮转速曲线、发电机转矩曲线和风力发电机组功率输出曲线。

损耗系数为0.8时：

图4.18 低风速下损耗系数为0.8时系统仿真

上图分别为在风速为5m/s、7m/s和9m/s状况下风能利用系数曲线、风轮转速曲线、发电机转矩曲线和风力发电机组功率输出曲线。从图中可以看出，在三种风速下风能利用系数稳定在0.35，当风机损耗系数为1时，最佳风能利用系数为0.436，在风机损耗系数为0.8时风能利用系数约为无损耗时的0.8倍；在风速为5m/s下，风轮转速平均值为0.8rad/s；风速为7m/s下，风轮转速平均值为1.2rad/s；风速为9m/s下，风轮转速平均值为1.5rad/s。相较于无损耗状态，在三种风速下损耗系数为0.8时风轮转速与无损耗状态下风轮转速相同，表明在损耗系数为0.8时，该控制器仍可控制风轮达到最佳转速。风速为5m/s下，发电机输出功率平均值为160000W；风速为7m/s下，发电机输出功率平均值为500000W；风速为9m/s下，发电机输出功率平均值为900000W。相较于无损耗状态，由于风能利用系数减小，风电机组输出功率也随之减小，约为无损耗状态的0.8倍，输出功率仍然达到了在损耗系数为0.8时的最大功率。风速为5m/s下，发电机输出转矩平均值为160000N·m；风速为7m/s下，发电机输出转矩平均值为400000N·m；风速为9m/s下，发电机输出转矩平均值为600000N·m。相较于无损耗状态，发电机输出转矩约为无损耗状态的0.8倍。

损耗系数为0.6时：

图4.19低风速下损耗系数为0.6时系统仿真

上图分别为在风速为5m/s、7m/s和9m/s状况下风能利用系数曲线、风轮转速曲线、发电机转矩曲线和风力发电机组功率输出曲线。从图中可以看出，在三种风速下风能利用系数稳定在0.26，当风机损耗系数为1时，最佳风能利用系数为0.436，在风机损耗系数为0.6时风能利用系数约为无损耗时的0.6倍；在风速为5m/s下，风轮转速平均值为0.8rad/s；风速为7m/s下，风轮转速平均值为1.2rad/s；风速为9m/s下，风轮转速平均值为1.5rad/s。相较于无损耗状态和损耗系数为0.8状态，在三种风速下损耗系数为0.6时风轮转速与其他两种状态风轮转速相同，表明在损耗系数为0.6时，该控制器仍可控制风轮达到最佳转速。风速为5m/s下，发电机输出功率平均值为120000W；风速为7m/s下，发电机输出功率平均值为350000W；风速为9m/s下，发电机输出功率平均值为700000W。相较于无损耗状态，由于风能利用系数减小，风电机组输出功率也随之减小，约为无损耗状态的0.6倍，输出功率仍然达到了在损耗系数为0.6时的最大功率。风速为5m/s下，发电机输出转矩平均值为120000N·m；风速为7m/s下，发电机输出转矩平均值为200000N·m；风速为9m/s下，发电机输出转矩平均值为400000N·m。相较于无损耗状态，发电机输出转矩约为无损耗状态的0.6倍。

#### 4.3.2 高风速仿真

损耗系数为0.8时：

图4.20 高风速下损耗系数为0.8时系统仿真

上图分别为在风速为14m/s、16m/s和18m/s状况下风能利用系数曲线、风轮转速曲线、风力发电机组功率输出曲线和桨距角曲线。从图中可以看出，风速为14m/s时，风能利用系数平均值为0.2，最大值为0.28，最小值为0.17；风速为16m/s时，风能利用系数平均值为0.15，最大值为0.18，最小值为0.09；风速为18m/s时，风能利用系数平均值为0.1，最大值为0.12，最小值为0.07。相较于无损耗状态，风能利用系数相同。在三种风速下，风轮转速都稳定在1.97rad/s，且随着时间增加，风轮转速比较平稳，未出现较大抖动。三种风速下风电机组的输出功率都在额定功率范围内浮动，误差小于8%，表明该控制器控制效果良好，且在在较广的风速范围内正常工作。桨距角相较于无损耗状态，略有减小。表明当风机损耗时，为保证功率输出为额定功

率，丢弃的风能相较于无损耗状态要少，使得桨距角比无损耗状态时要大，而风能利用系数、风轮转速和风电机组输出功率与无损耗状态时相同。

损耗系数为0.6时：

图4.21 高风速下损耗系数为0.6时系统仿真

由损耗系数为0.8时得出的结论可知，风能利用系数、风轮转速和风电机组输出功率与应该与无损耗状态时相同，桨距角应该比无损耗状态略小，从图中可以看出，在三种风速下，风能利用系数、风轮转速和风电机组输出功率和桨距角符合上述规律。

13. 201511162445_石琼玉_第13部分		总字数：8785
相似文献列表    文字复制比：4.5%(392)    剽窃观点：(0)		
1	计及载荷的风力发电机组变桨距控制策略研究 贺周耀(导师：段斌) - 《湘潭大学硕士论文》 - 2012-05-28	1.8% (162) 是否引证：否
2	立轴风力机控制策略研究及仿真 杨静(导师：刘占芳) - 《重庆大学硕士论文》 - 2009-04-01	1.1% (95) 是否引证：否
3	风电发展势头猛 消纳形势更严峻 贾常艳; - 《电器工业》 - 2015-04-05	0.7% (62) 是否引证：否
4	基于nRF905射频芯片的无线温度采集系统的研制 王昕(导师：厉鲁卫) - 《浙江工业大学硕士论文》 - 2010-04-10	0.4% (32) 是否引证：否
5	基于相机抖动的模糊图像的盲复原实现 周同同(导师：谷亚林) - 《南京理工大学硕士论文》 - 2013-03-01	0.4% (32) 是否引证：否
6	含风电场的电力系统充裕度评估 郭婧(导师：韩肖清) - 《太原理工大学硕士论文》 - 2011-05-01	0.3% (30) 是否引证：否
原文内容		
第五章结论和展望		

5.1 本文总结

由于煤、石油、天然气等常规能源过度使用，导致常规能源日益枯竭，且环境污染问题愈加严重。为解决这些问题，开发和利用可再生能源受到了越来越多的重视，风能作为一种可再生能源也受到了世界各国的青睐，风力发电技术也随之发展起来。本论文通过阅读国内外风电控制系统相关文献，对风力发电技术原理和控制技术有了一定的认识。大型风力发电机组具有高度非线性和不确定性，本文利用状态反馈对风电机组设计了控制器，并证明了其稳定性，之后给出了在该控制器下风电机组运行的稳定域，这对风机正常运行范围和故障修复时间的估计提供了一定的理论依据。

本文主要研究内容和成果如下：

1) 全面介绍了国内外变速变桨控制技术发展状况

首先介绍了变桨变速控制技术的原理和发展状况，并介绍了国内外学者的研究成果，之后对状态反馈控制、PID控制和滑模控制等常用控制方法做了基本介绍，然后介绍了估算风电机组运行稳定域的重要性和其估算方法。

2) 建立风电仿真平台

利用空气动力学相关知识，分析了风力发电机组的基本工作原理，之后将风力发电机组模型分解为风速模型、风力机模型、传动系统模型、发电机模型和变桨执行机构模型，并对各个模型都进行了建模，最后根据各个模型搭建了风力发电机组控制系统仿真平台。

3) 对风力发电机组设计控制器并估算其稳定域



利用状态转换将原控制问题转换为系统在原点稳定的问题，之后设计出状态反馈控制器并利用李雅普诺夫方法确定控制器参数，最终设计出转矩控制器和变桨控制器，并在所设计的控制器的基础上，估算出了其运行的稳定域。

#### 4) 采用Matlab/Simulink工具仿真验证课题提出的控制策略

利用本文所建立的风力发电机组控制仿真平台，分别在多种风速下验证控制器的控制效果，结果得出，在控制器能够在低风速阶段达到输出最大功率的控制目标，在高风速阶段达到输出功率稳定的控制目标。

## 5.2 本文展望

本论文虽然取得了一定地成果，但由于本文的相关研究和仿真工作都是建立在理想状态下的，而风力发电机组是一个非常复杂的系统，在实际运行过程中需考虑很多因素，如风速的突变等对系统的影响等。由于个人能力有限，本文还有一些不足之处，需要在今后的工作中进行研究和改善，在下一步工作中需要改善的地方如下：

- 1) 将一些智能算法与本文的控制方法相结合，如神经网络、遗传算法等优化控制参数，提升控制器的控制效果，并通过仿真，与之前进行对比，验证其控制效果。
- 2) 设计相关硬件和软件，将控制算法应用到实际的硬件中，并联系厂家将所设计的控制器应用到风电现场进行调试，根据运行结果进一步改进。

## 摘要

随着人口的增长和全球一体化的快速发展，全球出现了能源消费高速增长的现象，因此，使用可再生能源作为发电系统的需求也随之快速增长。同时为应对全球气候变化带来的严峻挑战，履行节能减排的义务，我国开始大力发展可再生能源发电。其中，风能凭借其取之不尽、用之不竭、不受地域限制，开发方便、成本低等优势在众多可再生能源中脱颖而出，风力发电控制技术重要性也更加突出。

风力发电机组是一个复杂的非线性系统，它含有不确定的对象参数、无法动态建模，并受外界未知干扰的影响，这使得实际的被控对象和用于控制器设计的数学模型总是存在差异。由于滑模控制对满足匹配条件的外界干扰、未建模动态部分和参数不确定性具有强鲁棒性，且控制律设计简单，动态响应快，近年来在风力发电控制领域受到了广泛的应用。但对传统滑模控制来说，强烈的转矩桨距变化容易引起机械压力增加，产生强烈的抖振，不利于系统稳定，并且其相对阶为1的限制，也阻碍了它更为长远的发展。针对这些问题，本文提出采用拟连续高阶滑模控制策略进行风电机组控制器设计，该方法能够在保证系统鲁棒性的同时，有效的减少转矩桨距变化带来的抖振，也打破了传统滑模控制相对阶的限制。

本文首先对风机系统各个模块，包括风速模块、风力机模块、传动系统模块、发电机模块和变桨执行机构模块进行了建模，然后分析了变速变桨风机系统在各个运行区域的具体控制策略，并以此为基础搭建了风电机组控制系统的仿真平台。

针对风机具体运行区域，以额定风速为划分点，分别对变速控制和变桨控制进行研究。本文变速和变桨控制都采用拟连续高阶滑模技术，同时为了尽可能的消除稳态误差，在滑模面中引入积分项，从而形成一种积分拟连续高阶滑模控制策略。在风速低于额定风速时，首次针对两质量块风机非线性模型设计了二阶转矩控制器，同时，为了进一步减小抖振，又在二阶控制的基础上升阶，设计三阶拟连续动态滑模转矩控制器。通过控制发电机转矩调节风轮转速，来追踪最大风能利用系数，实现功率的最大输出；当风速超过额定风速时，为了防止风机受到损坏，本文首次使用积分拟连续高阶滑模控制策略来调整叶片的桨距角，从而降低风能利用系数，限制风机对风能的捕获效率，达到保持输出功率稳定在额定值的控制目标。然后又通过理论推导分别对所设计的转矩和桨距控制器的稳定性进行了证明。最后分别在这两种风况下，通过仿真平台验证了方法的有效性，具有良好的鲁棒性，且能够有效抑制抖振。

关键字：风力发电机组拟连续高阶滑模控制器设计两质量块模型精确反馈线性化稳定性证明

## ABSTRACT

KEYWORDS: Wind turbine Quasi-continuous high order sliding mode Controller design Two-mass model Exact feedback linearization Stability proof

随着人口的增长和经济的快速发展,能源短缺和环境污染问题成为当今社会发展和人类生存所要解决的重大问题。日常生活中,我们比较多的使用煤、石油和天然气等,但这些常规能源是不可再生的,且它们的存储量相对有限。另外,常规能源的大量使用带来了气候的剧烈变化,环境污染问题也日益严重[1]。因此,开发清洁可再生能源就变得越来越紧迫。可再生能源包括风能、潮汐能、太阳能等,近年来他们在世界能源结构中占据的比重越来越大。其中,风能取之不尽、用之不竭,且不受地域限制,已经成为目前最有发展前景和竞争力的一种清洁可再生能源[2]。因此,研究风力发电技术以及占据着主导地位的控制技术就变得越来越重要。

### 课题研究的背景和意义

可持续发展是当今世界的主题,由于传统能源正在不断枯竭,人类保护环境意识也在不断提高,发展可再生、无污染的绿色能源成为未来发展的必然趋势。风力发电实质上是将风能转换成机械能,再将机械能转换成电能的过程,这其中不排除任何污染物,再加上风能储量丰富、不受地域限制,风电建设的周期短、见效快、后期维护简单等优势,使得世界各国纷纷开始重视对风能的开发利用。除此之外,发展风力发电也能够降低一个国家对能源的进口,这在一定程度上缓解了欠发达地区的经济压力[3]。所以,风力发电产业已经逐渐发展成为一项全球性的业务。

我国地域广阔,风能储量丰富,其中,可用于风能开发的地区面积占全国总面积的76%,拥有发展风力发电得天独厚的优势。并且我国正处于快速发展的时期,对资源的需求不断增加。例如每年夏天,我国东部地区都要适当采取限电措施,这不但影响了人们的日常生活,也阻碍了经济发展[4]。近年来,我国风力发电发展迅速,但起步较晚,相比西方发达国家还存在差距。针对这些问题,最有效的解决方法就是使用先进的控制策略来更好的利用风资源,所以,深入研究风力发电技术具有重要的现实意义和长远意义[5]。

随着全球风力发电产业的日益壮大,风力发电技术也在不断进步,但是,风能转换的过程实质上是一个由风速引起的随机过程,是不可控的。而且,风力发电机组是一个复杂的高阶非线性系统,含有不确定的对象参数,无法动态建模,且实际运行环境中还会遇到风速、风向和负载变化等,所以设计控制器使风力发电闭环系统能够在参数不确定和外界干扰影响下具有较强的鲁棒性和期望的动态性能是一个难点,同时也是一个有价值的研究课题[6]。为了保障风机高效稳定的运行,目前风电控制领域的研究方向主要集中在优化控制和高效控制两个方面。

### 国内外风力发电发展现状

2014年,风力发电在全球各个市场显著增长。今年2月份全球风能理事会(GWEC)发布了《全球风电统计数据2014》,从该数据报告中可以看出,2014年,非经济合作与发展组织(OECD)国家的风电装机总容量又一次超越了传统风力发电发展强势的欧洲和北美地区。在这些非OECD国家中,中国和巴西分别占据了排名的前两位,墨西哥紧随其后,南非则排在了第四位。值得一提的是,中国2014年新增装机量达到了23GW,创了新的纪录,累计装机量高达114GW。巴西在全球风电市场中排在了第四,首次进入前十之内。德国,智利,加拿大和土耳其的新增装机容量都创下了新的最高点,非洲风电的发展也首次实现了质的飞跃。截止到2014年年底,全球风电累计装机容量已经达到369553MW,同比增长15.99%,如图1.1所示。

图1.1 2001年-2014年全球风力发电机组累计装机容量

图1.2 2001年-2014年全球新增风力发电机组装机容量

由图1.2可以看出,2013年是风电发展最低迷的一年,其全球新增风电装机容量为35708MW,与2012年45161MW的增量相比,下降了9453MW[7]。由于国家政策调整,风电行业2014年开始回暖,风电累计装机容量有了显著的增长。

全球风能理事会预测,未来五年全球风电行业将继续保持快速增长的趋势。在中国的引领下,全球新增装机容量到2015年将再次达到50GW,到2018年将达到60GW。中国也有可能实现2020年200GW的目标。印度在未来几年内将会保持比较稳定的增长趋势。拉丁美洲市场在巴西和墨西哥的带领下将会快速壮大。欧洲市场近几年的发展越来越趋向于集中和稳定的趋势,其中以德国发展最为快速。而北美风电市场将相比较而言则更加不确定,走出了2013年低迷期的美国市场在2014年开始恢复增长,并将把快速增长的劲头保持到2016年,加拿大在2015和2016年也会保持持续增长的趋势。但2016年以后,美国和加拿大在政策方面都将出现缺失,这将极大地影响2016年以后的风电发展情况。

#### 5.4.1 1.2.1 国内风力发电发展现状

我国风能资源丰富，尤其是华北、西北和东北地区，平均风能功率密度达到 [5]。并且我国是一个发展中国家，正处于快速发展的阶段，要想保障经济快速发展必需拥有强大的能源后盾，而最切合中国国情的无疑是风电技术[2]。我国也相继颁布了相关政策法规大力支持风电事业，2005年《可再生能源法》颁布和实施后，我国风电装机容量以每年超过20%的增长速度高速发展。随后，又颁布了风电相关的法规、规章和技术规范等，为我国风力发电的发展提供了社会条件[8]。

本世纪初，在市场需求和竞争的驱动下，我国风电快速发展，风电机组装备制造技术得到了进一步的提升，装机容量也在不断提高。2006年至2009年，我国风电累计装机年平均增长率超过了100%；2009年至2011年，我国风电每年的吊装规模超过了16000MW；2012年，我国超越了美国，成为世界第一风电大国；2013年，我国并网风电装机量再次跃居世界第一；2014年，我国新增装机量和累计装机量均位于全球第一；未来几年仍将保持持续增长的势头。

我国风电一直保持着稳步上升的趋势，但实际上从2010年起，我国风电行业就开始有各种问题暴露出来。2012年，我国陆上风电装机容量同比降低了23%，这是由于我国风电事业起步较晚，风力发电机组设备进口的比例远大于国内制造的比例，自主生产能力较低。这说明当前我国风力发电的发展无论在开发规模、开发水平，还是在设备研发制造和技术创新等方面，都与世界发达国家存在一定差距。为了彻底解决这些问题，可以从以下几方面寻求突破[9]：

（一）提高自主研发制造能力。目前我国风电行业不管是制造还是控制方面，都主要依赖国外技术，研发新型风电机组的能力欠缺。同时，齿轮箱、发电机以及关键零部件等的可靠性有待提高。

（二）开发新材料。风电设备运行环境通常比较恶劣，风吹日晒，再加上风机桨叶受力极大，风轮自身存在极大惯性，这都对制造风机的材料提出了巨大的挑战。

（三）大力发展变速变桨控制技术。变速变桨技术是目前风电机组最先进的控制技术，但我国在这方面发展还比较迟缓，应加大研究力度。

#### 5.4.2 1.2.2 国外风力发电发展现状

从20世纪70年代中期开始，一些发达国家和发展中国家开始重视对风能的开发和利用，尤其是90年代初之后，风力发电迅速发展起来。目前，风电已经成为一个全球性的完整产业，世界各国都在大力发展风力发电，促进可持续发展。根据《2014全球风电装机统计数据》，2014年全球新增风电装机容量为51477MW，首次超过50000MW，累计装机容量达到369553MW。由图1.3和图1.4可以看出，截止2014年底，亚洲累计装机总量达到142119MW，同比增长22.6%，占世界装机总量的38.5%，年新增装机容量高达26161MW；欧洲累计装机总量为133969MW，同比增长10.2%，占世界装机总量的36.2%左右，年新增装机量达到12820MW；北美累计装机总量达到77953MW，同比增长了10.1%，占世界装机总量的21.12%左右，年新增装机量达到了7247MW。自2009年以来，亚洲风电一直保持强劲的增长势头，并且2014年，亚洲地区已经超越欧洲国家，成为全球装机容量第一的地区，北美地区紧随其后。

图1.3 全球装机地域分布图

目前，世界各风电大国发展风力发电的主要情况概括为以下几点：

##### （一）亚洲市场在中国引领下高速发展

中国稳稳地占据着全球风电第一的地位，引领亚洲乃至全球风电的高速发展。2014年，中国新增装机容量高达23351MW，涵盖了全球45.2%的比例，累计装机容量达到114763MW，也占到了全球的31.1%左右。在中国风电快速增长的驱动下，亚洲市场的装机量位列全球第一，年新增装机容量达到26161MW。印度地区2014年的新增装机容量也达到了2315MW，在亚洲位居第二，这一成绩也将引领其进入新一轮快速发展的阶段。

图1.4 区域年新增容量分布图

##### （二）美国风电市场有所回升但仍处困境

2013年，美国新增装机容量为1000MW，经历了一个相对低迷的时期，而2014年的4854MW（占全球总量的9.4%左右）相比较而言有所回升。其累计风电装机容量位列全球第二，达到了65879MW（占世界总量的17.8%左右）。2015年之后的两年内

，美国将继续保持增长势头，但2016年之后的发展形式将由美国的相关政策决定。

### （三）德国风电市场新增装机创新高

2014年，德国新增装机容量达到了5279MW，刷新了其自身的记录，并稳居欧洲第一，累计装机容量39165MW，位列全球第三。德国风电起步较早，所以每年都会有大量的风机设备被翻新或者直接退役，所以德国2014年实际新增装机量为4391MW。此外，德国还对部分风电场进行了翻新，规模达到1000MW以上。预计2015年德国净增装机容量将处于3500MW到4000MW之间，2016年将有所降低。

### （四）欧盟风电新增装机量超过燃煤和燃气总和

2014年，在德国和英国的带领下，欧盟28个成员国新增风电装机容量达到11791MW，大大超过了传统燃煤装机和燃气装机的总和，而且燃煤和燃气每年退役下来的装机远超过其新增装机。欧盟2014年累计风电装机容量达到128752MW，约占全球总量的34.8%，且风力发电量在整个欧盟电力消费总量中占到了10%，比2013年提高了两个百分点。

### 风力发电机组控制技术的发展

在风电技术的发展过程中，控制技术始终占据着主导地位。但目前，风力发电机组控制技术不论是在理论研究还是应用研究方面，我国都与西方发达国家存在着很大的差距，与火电控制技术相比，也存在着劣势。变速变桨控制技术是现在风电机组最先进的控制技术，目前国内变速变桨技术的发展还远未成熟，因此，深入研究变速变桨控制技术具有重要的意义[10]。

#### 5.4.3 1.3.1 变速控制技术

风力发电机组变速控制的主要目标是在风速低于额定风速时，保证输出功率最大化。按照控制方式，可分为转速、功率和转矩控制三种[11]：

（一）基于转速控制模式。文献[12]基于非线性状态反馈方法对风力发电机组进行速度控制，并结合牛顿迭代法和卡尔曼滤波两种方法设计风速估计器，跟踪参考转速；文献[13]提出通过调整发电机的输出转矩控制风轮转速，实现风电机组的最大能量转换，风轮转速达到额定值时，通过动态调整转矩使转速稳定在额定转速附近。

（二）基于功率控制模式。文献[14]提出了使用滑模控制技术对变速风机系统进行非线性控制，并采用最大功率点跟踪算法，以保证对最佳输出功率追踪；文献[15]使用滑模控制策略进行变速风机功率控制，实现了存在不确定性的条件下的理想反馈控制跟踪问题，保证了两个运行区域的稳定性。

（三）基于转矩控制模式。传统转矩控制方法是依据发电机转矩与风轮转速之间的比例关系来控制转矩的实际输出。改进的转矩控制方法是通过改变气动转矩或发电机转速加速度来快速响应风速变化，实现更为可靠的变速控制。

#### 5.4.4 1.3.2 变桨控制技术

风力发电机组变桨控制的主要目标是在风速超过额定风速时，维持输出功率在额定值附近。采用非线性模型进行变桨控制通常有以下两种方式：

（一）通过大量的实验和仿真对特定型号的风电机组建立带有约束条件的简化非线性模型。文献[16]针对无刷双馈风力发电机组采用变结构技术和Lyapunov理论设计变桨控制器，实现了对干扰的鲁棒控制，并将抖振最小化。文献[17]采用神经网络方法对风电机组模型进行变桨控制，其中神经网络的输入是平均风速、标准偏差和输出功率，神经网络不需要数学模型完全精确，有利于提高控制精度。

（二）对风力发电机组非线性模型进行反馈线性化。对模型进行线性化的方法又可以分为以下三种：第一种是选择稳定工作点如额定功率点等为基准，对风力发电机组的非线性模型进行泰勒展开，从而建立局部线性化模型。文献[18]选取恒功率运行时的一个平衡工作点进行泰勒展开，建立了涵盖电气连接、气动转换以及变桨执行机构的风电机组被控对象模型，并采用自抗扰策略设计桨距控制器实现系统的变桨调节；第二种是选择满足匹配条件的非线性模型，进行精确反馈线性化，实现非线性模型的全局线性化。文献[19]针对二阶风电机组非线性模型进行精确反馈线性化，并采用滑模控制与反演以及自适应方法相结合的方法进行变桨控制，实现了系统的全局渐进稳定控制；第三种是选择若干参数变量如风速、风轮转速等物理量，建立线性变



参数模型。文献[20]首先对风机模型在某些工作点附近进行线性化，并根据Lyapunov函数推导出参数和线性矩阵不等式实现对控制器模型的约束作用，减小风电机组抖振。

课题研究的主要内容

能源短缺和环境污染问题已经成为当今社会发展和人类生存所要解决的重大问题。风能取之不尽、用之不竭、且不受地域限制、开发方便、成本低，已经成为目前最有发展前景和竞争力的一种清洁可再生能源，风力发电机组控制技术也因此逐渐成为风电领域研究的热点。本课题的主要内容是针对复杂的风力发电机组进行变速变桨控制策略的研究设计。

由于风速具有随机性、不稳定性，风电机组控制系统又是一个复杂的非线性系统，同时，外界还存在着连续的扰动，这使得人们很难获取风电机组精确的数学模型。而滑模控制作为鲁棒控制的代表，对满足条件的外界干扰、未建模动态部分和参数不确定具有强鲁棒性，且控制律设计简单，响应快速，从而得到了广泛使用。但传统滑模控制容易产生剧烈的抖振，增加了机械压力，不利于系统稳定，且其只能用于相对阶为1的系统。针对这些问题，本文采用拟连续高阶滑模控制策略来对变速变桨风电机组进行控制，该方法能够很好的达到变速变桨的控制目标，且具有很强的鲁棒性，能够有效削弱转矩桨距变化引起的抖振，同时也打破了对相对阶的限制。

论文主要内容如下：

第一章首先介绍了课题研究的背景和意义，然后分析了国内外风电行业发展的现状，其次列举了目前国内外在变速变桨风机系统控制技术领域的研究成果，最后确定了课题研究所要采用的控制策略。

第二章首先介绍了变速和变桨控制理论，对其变速变桨原理和所要达到的控制目标进行了分析，然后具体介绍了传统滑控制、高阶滑模控制的相关理论，并重点分析了拟连续高阶滑模控制方法，为以后的研究工作提供理论基础。

第三章对风机系统各个模块，包括风速模型、风力机模型、传动系统模型、发电机模型和变桨执行机构模型进行了建模，为以后的仿真分析奠定了基础。

第四章详细的叙述了基于拟连续高阶滑模的变速控制，通过控制发电机输出转矩间接调节风轮转速，追踪最大风能利用系数，实现功率的最大输出。本文首次针对相对阶为2的两质量块风机非线性模型进行拟连续高阶滑模控制研究，同时为了尽可能的消除稳态误差，在滑模面中引入积分项，形成一种积分拟连续高阶滑模的控制策略。首先设计了二阶转矩控制器，然后为了进一步削弱抖振，在二阶控制的基础上，设计三阶动态控制器，并分别通过理论推导证明了稳定性，最后，在低风速工况下通过仿真平台验证了方法的有效性。

指 标	
剽窃文字表述	
1. 绪论	
随着人口的增长和经济的快速发展，能源短缺和环境污染问题成为当今社会发展和人类生存所要解决的重大问题。	
2. 4.4 1.3.2 变桨控制技术	
风力发电机组变桨控制的主要目标是在风速超过额定风速时，	
14. 201511162445_石琼玉_第14部分	
总字数：9090	
相似文献列表 文字复制比：17.2%(1559) 剽窃观点：(0)	
1	气动机械手关节的研究
安育红(导师：陶国良) - 《浙江大学硕士论文》 - 2007-06-01	
2	无刷直流电动机的滑模观测控制研究
王吉波(导师：么莉) - 《天津大学硕士论文》 - 2007-01-01	
3	基于变结构自适应控制方法的小卫星姿态控制研究
郑敏(导师：姜斌) - 《南京航空航天大学硕士论文》 - 2008-01-01	
4	离散系统滑模变结构控制研究
赵秀华(导师：韩莉) - 《东北电力大学硕士论文》 - 2008-03-01	
5	传统和高阶滑模控制研究及其应用
李鹏(导师：郑志强) - 《国防科学技术大学博士论文》 - 2011-04-01	

6	滑模变结构控制及其在电液位置伺服系统中的应用研究 胡永生(导师: 杨洁明) - 《太原理工大学硕士论文》 - 2008-05-01	是否引证: 否
7	软变结构控制与滑模变结构控制的组合控制策略 丁培培(导师: 高存臣) - 《中国海洋大学硕士论文》 - 2007-04-01	2.6% (234) 是否引证: 否
8	滑模预测控制研究 孔祥梅(导师: 李宏光) - 《北京化工大学硕士论文》 - 2007-06-08	2.5% (226) 是否引证: 否
9	基于滑模变结构的风力机变桨距控制研究 田勇;张宏立;玛依拉·赛依力; - 《华东电力》 - 2011-09-24	1.7% (154) 是否引证: 否
10	基于模糊滑模变结构的倒立摆控制方法研究 张志强(导师: 李战明) - 《兰州理工大学硕士论文》 - 2008-04-28	1.5% (133) 是否引证: 否
11	混合动力汽车电机驱动系统无速度传感器的研究 王健(导师: 丁惜瀛) - 《沈阳工业大学硕士论文》 - 2010-12-20	1.4% (129) 是否引证: 否
12	单轮机器人运动机理及其控制方法的研究 马传翔(导师: 杨名利) - 《哈尔滨工业大学硕士论文》 - 2010-06-01	1.4% (125) 是否引证: 否
13	基于滑模变结构的机器人关节控制系统研究 张庆丰(导师: 张立彬;杨庆华) - 《浙江工业大学硕士论文》 - 2010-05-01	1.3% (122) 是否引证: 否
14	船舶装卸作业时动力定位控制方法研究 刘扬(导师: 付明玉) - 《哈尔滨工程大学硕士论文》 - 2013-01-01	1.3% (121) 是否引证: 否
15	非线性机器人的智能反演滑模控制研究 徐传忠(导师: 王永初) - 《华侨大学博士论文》 - 2012-03-20	1.0% (92) 是否引证: 否
16	滑模变结构控制方法在机器人轨迹跟踪中的应用 姜寅令(导师: 李艳辉) - 《东北石油大学硕士论文》 - 2011-03-26	1.0% (91) 是否引证: 否
17	汽车线控制动系统安全控制技术研究 彭晓燕(导师: 章兢) - 《湖南大学博士论文》 - 2013-03-14	1.0% (91) 是否引证: 否
18	制球加工中心柔性机械臂建模及运动控制研究 刘中新(导师: 张庆) - 《南京理工大学硕士论文》 - 2008-05-01	0.9% (84) 是否引证: 否
19	基于某钢厂冷连轧机组的板厚控制 陈彦茹(导师: 李爱莲) - 《内蒙古科技大学硕士论文》 - 2010-06-12	0.8% (76) 是否引证: 否
20	离散时间系统滑模变结构控制理论若干问题研究 罗刘敏(导师: 郑艳) - 《东北大学硕士论文》 - 2009-06-01	0.8% (69) 是否引证: 否
21	深水机械手动力学特性及自主作业研究 肖治琥(导师: 徐国华) - 《华中科技大学博士论文》 - 2011-05-01	0.7% (62) 是否引证: 否
22	直驱式永磁同步风力发电系统控制研究 束成(导师: 杨伟) - 《南京理工大学硕士论文》 - 2014-02-01	0.7% (61) 是否引证: 否
23	新分数阶混沌系统的电路仿真与控制 辛方(导师: 黄丽莲) - 《哈尔滨工程大学硕士论文》 - 2011-03-02	0.6% (59) 是否引证: 否
24	船舶航向动态滑模变结构控制研究 邹剑(导师: 石为人) - 《重庆大学硕士论文》 - 2012-04-01	0.5% (47) 是否引证: 否
25	基于二阶滑模的着舰航迹角控制仿真研究 朱齐丹;孟雪;张智;马俊达; - 《计算机仿真》 - 2013-06-15	0.5% (43) 是否引证: 否
26	永磁同步风力发电机转速桨距综合功率控制策略研究 陈晓红;王一飞;尚鹏;蒋苗苗;金立军; - 《可再生能源》 - 2014-09-20	0.4% (40) 是否引证: 否
27	恒压网络静液传动系统的神经网络滑模控制 赵立军;李国军;姜继海; - 《中南大学学报(自然科学版)》 - 2012-01-26	0.4% (39) 是否引证: 否
28	基于滑模控制的网络拥塞控制主动队列管理算法的研究 王云(导师: 关守平) - 《东北大学硕士论文》 - 2010-06-01	0.4% (35) 是否引证: 否
29	变速变桨距风力发电机最佳运行点的获取方法 秦大同;周海波;杨军;龙威; - 《太阳能学报》 - 2013-11-28	0.4% (35) 是否引证: 否
原文内容		

第五章详细叙述了基于拟连续高阶滑模的变桨控制，通过调节桨距角降低风能利用系数，限制一部分风能的捕获，维持输出功率稳定在额定值。本文首次采用拟连续高阶滑模控制策略进行桨距控制器设计，在滑模面中引入积分项减少稳态误差。首先针对单质量块风机模型、变桨执行机构模型和转速执行机构模型组成的被控对象进行精确反馈线性化，对线性化后形成的新模型进行控制器推导，进而推出原模型相对应的控制器形式。然后通过理论推导证明所设计控制器的稳定性，最后在高风速风况



下通过仿真平台验证了方法的有效性。

第六章总结了论文的主要研究内容和研究成果，并对论文下一步工作进行了展望。

### 3 风电机组控制理论和控制方法研究

风力发电机大致可以分为两部分：风力机和发电机。风力机利用风力推动叶片旋转，将风能转换成机械能；传动机构如齿轮箱增速后驱动发电机旋转，将机械能转化为电能，再输送给电网供用户使用[21]。在风力发电技术的发展过程中，控制技术始终占据着主导地位，控制的最终目标是希望风力发电机组在整个过程中能够安全稳定运行，达到各运行区域具体的控制目标，提供安全可靠的电力。

风力发电领域目前研究的内容主要集中在提高能源效率和减少机械压力两个方面，由于风机是一个复杂的非线性系统，所以研究中也存在着巨大的挑战[22]。解决这些困难的最有效方法是使用先进的控制策略来更好的利用风能资源，增加机械和电子部件的寿命，同时也能获得更高的回报。

#### 2.1 变速变桨控制理论

风机系统主要有两种，即定速系统和变速系统。由于变速系统在能量获取上比定速系统高出20%-30%[23]，所以本文主要针对变速系统进行研究。变速变桨风力发电机组的优越性就是能够实现风电机组效率最大化。由空气动力学知识可知，风电机组并网后，以额定风速点划分工作状态，变速变桨风机可以运行在三个区域。空气密度为下的1.5MW风机功率曲线及运行区域划分见图2.1。

图2.1 1.5MW风机功率曲线及运行区域划分

区域一：启动阶段，风速未达到切入风速，因为在这个阶段风能的可利用率低于风机系统的损耗，发电机不动作，风轮做机械转动，系统为顺桨状态，桨距角，启动力矩比较大。

区域二：风速高于切入风速且低于额定风速，此阶段桨距角为定值，发电机转矩提供控制输入来调节风轮转速，以尽可能多的捕捉风能实现功率的最大输出；

区域三：风速达到额定风速以后，为了保证电气和机械负荷在安全范围内，必须限制一部分风能捕获，所以需要调节桨距角来降低风能利用系数，使风机输出功率稳定在额定功率附近[24, 25]。

#### 5.4.5 2.1.1 变速控制理论

在任何风速下风力发电机组都存在着一个最大功率输出点，对应着最大能量转换效率，当风速小于额定风速时，即风电机组处于变速阶段，机组的输出功率不能达到其额定功率，为了能够最大限度地实现能量转换，此时风电机组应保持固定的桨距角运行（理想状态下假设桨距角），通过控制发电机转矩调节风轮转速保持在最佳的叶尖速比状态，从而能最大限度地捕获风能，使风力发电机组输出功率最大化[26, 27]。风场中一般在风速为12 时达到额定功率输出，图2.2又将切入风速与切出风速之间划分为三个区域[15]，如下图所示。

图2.2 变速阶段区域划分

：又称最佳叶尖速比阶段，此阶段机组输出功率未达到额定功率，所以风轮转速持续增加使得风能利用系数达到其最优值，表示允许风轮转速达到的最大值。

：又称转速恒定阶段，此阶段风轮转速已达到其最大转速，不能继续增加，此时需降低风能利用系数，使系统保持恒转速运行。但其输出功率还未达到额定值，需要继续增加。

：又称恒功率阶段，此阶段系统输出功率达到额定值，但风轮转速仍保持额定值运行，此时需要通过调节桨距角来继续降低风能利用系数，以保持输出功率维持在额定值。

#### 5.4.6 2.1.2 变桨控制理论

当风机所处环境的实际风速超过其额定风速时，由于发电机和各种器件的功率达到上限，为了保护风电机组，应该限制一部分风能获取，此时可以对桨距角进行调整，降低风能利用系数，避免超过发电机的转速和功率极限，使转速和功率维持在其额定值附近。

变桨风力发电机组是通过叶片沿其纵向轴转动，改变叶片攻角，从而改变发电机转矩和输出功率，变桨系统可以起到低风速的启动作用和高风速的功率限制作用，还可以使整机受力情况改善。

#### 1) 低风速下的启动作用

风电机组不工作时，桨叶角处于的顺桨状态。风速达到切入风速后，桨距角开始由向方向偏转直到能够克服驱动系统的空载阻力矩，获得较大的启动转矩，使风轮能够启动。风轮启动后，由于是低风速运行，为了使系统输出功率最大，设置桨距角为。实际的工程中，由于叶片自身参数及形状因素，桨距角通常为时，风轮捕获风能的效率最高[28]。在输出功率到达额定功率之前，变桨执行机构不动作。

#### 2) 高风速下的功率限制作用

当功率输出高于额定功率时，为了保护风力发电机组机械部件和电路系统，必须限制一部分风能捕获，这时便需要调节桨距角，使桨叶向方向旋转，使风能利用系数减小，反之，桨叶向方向旋转[29] [30] [31]。

### 2.2 滑模控制理论与方法研究

风力发电机组控制系统是一个复杂的高阶非线性系统，它含有不确定的对象参数、无法建模动态并受外界未知干扰的影响，人们难以获取风力发电机组精确的数学模型，这就使得实际的被控对象和用于控制器设计的数学模型总是存在差异。在这种情况下，设计控制器使闭环系统具有期望的性能就变得尤其困难[32-33]。近年来，诸多学者在研究鲁棒控制方面，如鲁棒自适应控制、Backstepping 控制、滑模控制、模型预测控制等，取得了一系列的成就[34]。其中，滑模控制作为鲁棒控制的代表，对满足匹配条件的外界干扰、未建模动态部分和参数不确定性具有很强的鲁棒性，且控制律设计简单，系统状态在进入滑动模态后就能快速收敛到控制目标，所以近年来在风力发电领域得到了广泛的应用[35]。

滑模控制（Sliding mode control, SMC）系统的“结构”可以根据系统当前的状态（如偏差及其各阶导数等）有目的地变化，从而使系统按照预定滑动模态运行，因此滑模控制也称变结构控制。这种控制的不连续性也称为开关特性。因为滑动模态可以进行设计且与对象参数及扰动无关，所以滑模控制具有快速响应、对参数变化及扰动不灵敏，无需系统在线辨识、物理实现简单等特点[36]。当系统状态轨迹到达滑模面后，并不能严格地沿着滑模面向着平衡点滑动，而是在滑模面两侧来回穿越，因此产生了抖振，这也是滑模控制存在的一个缺点[37]。滑模控制能够通过控制量的切换使系统状态沿着滑模面滑动，从而使得系统能够不受外界干扰和参数摄动影响，正是由于这种特性使滑模控制得到了广泛的研究和应用。

#### 5.4.7 2.2.1 滑模控制基本概念

以公式2.1所示的非线性系统为例进行研究

##### (2.1)

其中， $x$  为系统的状态向量， $u$  为控制输入。假设 $f$ 和 $g$ 均为已知有界函数，且存在 $g^{-1}$ 。定义系统的跟踪误差为式(2.2)，其中， $x_d$ 为系统的参考指令，也是期望指令。

##### (2.2)

控制的目的是希望输出函数能够实现对参考指令的稳定跟踪，即。

滑模面是在跟踪误差(2.2)的基础上设计的。滑模面也称切换面，它将状态空间分成两部分，如图2.3所示。从图中可以看出，系统的运动可分为滑动阶段和到达阶段。滑动阶段就是系统在控制律的作用下沿着滑模面滑动；到达阶段就是滑模控制中的趋近过程，在可达条件的保证下在有限时间内从任意位置趋近滑模面[38]。

图2.3 滑模面平面示意图

系统的状态轨迹在趋近滑模面时，有如下关系：

和 (2.3)

上述关系也可以简单表示式(2.4)，式(2.4)称为滑动模态可达条件，表示系统状态能够在有限时间内从任意位置趋近滑模面。

(2.4)

定义2.1：对于控制系统(2.1)，需要确定切换函数：

(2.5)

使控制量按照以下方式进行切换，并求解控制函数：

(2.6)

其中， $\sigma$ ，且符合以下条件：

- 1) 滑动模态存在，即式(2.4)成立；
- 2) 满足可达条件，在滑模面以外的运动点都将于有限时间内到达滑模面；
- 3) 保证滑模运动的稳定性；
- 4) 达到控制系统的动态品质要求。

其中，只有满足前三个基本条件的系统的控制才能称为滑模控制[39]。条件3)中提到的稳定性问题，在滑模控制中通常用Lyapunov稳定理论来判定。Lyapunov函数常选用式(2.7)的形式：

(2.7)

控制的目的是寻找一个合适的控制律使系统满足公式(2.8)：

(2.8)

满足上式也就是满足式(2.4)所示的可达条件，但如果想要保证系统能够在有限时间内到达，避免渐进趋近，还需要满足如下可达条件。

(2.9)

#### 5.4.8 2.2.2 滑模变结构匹配条件及不变性

正是由于这种特性使滑模控制得到了广泛的研究和应用。滑模控制系统的滑动模态可以不受外界干扰和参数摄动影响，这种性质称为滑动模态的不变性。但这种不变性的成立是需要满足滑动模态的匹配条件的，通常可以分为以下三种情况[40]。

（一）系统有外界干扰影响

(2.10)

其中 $d$ 为系统受到的干扰。

滑动模态不受干扰影响的充分必要条件为

(2.11)

满足这个条件后，系统可表示为

(2.12)

通过设计上式中的控制律可以达到对外界干扰的完全补偿的目的。(2.11)称为干扰和系统的完全匹配条件。

(二) 系统存在不确定性

(2.13)

其中，为系统存在的不确定性。

滑动模态与不确定性无关的充分必要条件为

(2.14)

满足这个条件后，系统可表示为

(2.15)

通过设计上式中的控制律可达到系统对不确定性的完全补偿。(2.14)称为不确定性和系统的完全匹配条件。

(三) 系统存在外界干扰和参数不确定

(2.16)

若系统满足条件(2.11) 和(2.14)，则可表示为

(2.17)

通过设计上式中的控制律，可实现对外界干扰和参数不确定性的完全补偿。

#### 5.4.9 2.2.3 传统滑模控制

定义2.2: 滑动阶(Sliding Order)，也称为相对阶。是指滑模变量的连续全导数(包含零阶)在滑模面上为0的数目。

根据上述定义可知：传统滑模，因为在滑模面上，而是不连续的，因此传统滑模又被称为一阶滑模。

#### 2.2.3.1 滑模控制器设计

传统滑模控制器的设计过程可以分为以下两步[41]:

(一) 设计滑模面，使得该滑模动态稳定并具有期望的动态特性。

滑模面的设计要根据不同的系统对象具体分析，来选择适当的滑模面。下面是几种常用的滑模面形式:

1) 线性滑模面

(2.18)

这是以跟踪误差(2.2)为基础设计的，是一种最简单的滑模面。使用线性滑模面只需设计常数即可达到一定的动态性能，设计和分析过程简单、方便。但使用线性滑模面的系统无法有限时间内收敛到滑动模态，只能实现渐进稳定。

## 2) 终端滑模面

(2.19)

其中， $n$  为正奇数。公式(2.19)是一种常用的快速终端滑模面，其中指数部分能够有效提高系统收敛的速度，且越靠近平衡状态收敛越快。但远离平衡点时收敛速度则要慢于线性滑模面。

(2.20)

式(2.20)称为全局快速终端滑模面，通过调试参数可以使系统快速收敛到滑模面，但是在求解控制律时存在奇异[42]。终端滑模面还有多种形式，由于本课题主要采用积分滑模面进行设计，所以这里不再详细叙述。

## 3) 积分滑模面

(2.21)

式中， $\alpha, \beta$  均为正常数。积分滑模面就是在线性滑模面的基础上又加入了一个积分项，这个积分项是关于跟踪误差的积分，用来减少稳态误差并削弱抖振。

(二) 设计控制律，使得即使存在不确定条件和干扰时，系统仍能在有限时间内到达滑模面，从而在滑模面上形成滑动模态区。

控制律有多种形式，可以根据到达条件的形式和分析方法进行构造。根据到达条件或基于Lyapunov稳定理论，设计Lyapunov函数，通过来选择设计滑模控制律。

### 1) 基于常值切换控制

(2.22)

其中， $\alpha, \beta$  且的值要适当选取，从而使系统能够实现对参数摄动和外界干扰的完全补偿。

### 2) 基于等效切换控制

(2.23)

其中， $u_{eq}$  为等效控制， $u_{sw}$  为切换控制。切换控制通常采用的形式，其中 $\alpha, \beta$ 。当系统存在不确定和外界干扰时，通常选取这种形式，且的值要足够大，使得可以抵消掉系统存在的不确定性和外界干扰的影响。

### 3) 基于趋近律

以下两种是常见的趋近律形式：

等效趋近律： $\dot{s} = -\eta \text{sgn}(s)$ 。

指数趋近律： $\dot{s} = -\lambda s$ 。

在这两种趋近律中，可以通过参数的选取实现系统在有限时间到达滑模面的目的。

#### 2.2.3.2 传统滑模控制的缺点

(一) 抖振问题：滑模运动使得系统的状态沿着预定的轨迹不断作小幅度、高频率的上下运动，但由于切换装置存在惯性与滞后性，这使得实际的滑动模态并不能严格地发生在滑模面上，这样就引发了控制量的高频切换，产生抖振[43]。这种抖振现象不但会降低系统控制的准确性，增加能量损耗，还容易激发系统高频未建模动态，破坏稳定性，甚至损坏装置。

(二) 相对阶的限制：传统滑模控制只能应用于相对阶为1的系统，即控制量必须显式的出现在滑模面中。

(三) 控制精度问题：对于离散的传统滑模控制系统，系统滑动误差正比于采样时间，也就是说，系统状态保持在滑动模态上的精度是的一阶无穷小。

#### 5.4.10 2.2.4 高阶滑模控制

针对传统滑模控制系统存在的抖振问题，学者们提出了边界层、趋近律、观测器等多种方法，能够有效解决抖振问题。但这些方法的使用通常会降低系统鲁棒性，破坏跟踪效果，或增加控制器设计的复杂度[44]。Levant 提出的高阶滑模，是在传统滑模的基础上发展起来的，它既保留了传统滑模的优点，又能有效削弱传统滑模的抖振现象，并且克服了相对阶的限制，提高了控制精度。

定义2.3：阶滑动集(2.24)非空，且假设它是Filippov意义下局部积分集，那么满足式(2.24)的相关运动称为关于滑模面的阶滑模。

(2.24)

当系统运动到状态空间中中和的交界处时，系统具有阶滑模动态。

高阶滑模控制又分为二阶滑模控制和任意阶滑模控制，其中二阶滑模控制的由于控制器结构简单，且所需的信息少，所以得到了广泛的应用。其中，螺旋(Twisting)、次优(Sub-Optimal)、给定收敛律和超螺旋(Super-Twisting)四种方法最常用[45]。但二阶滑模控制也有相对阶的限制，所以必须实现任意阶控制。

#### 5.4.11 2.2.5 拟连续高阶滑模控制

2003年Levant针对相对阶大于等于2的系统提出了一种有限时间内收敛的任意阶滑模控制方法及拟连续高阶滑模控制 (Quasi-continuous high order sliding mode)，其中拟连续高阶滑模控制是更为普遍的有限时间收敛控制器，用来控制任意相对阶的任意不确定系统，具有收敛时间短、鲁棒性强等优点。

##### 2.2.5.1 问题描述

对于形式为(2.1)单输入的系统，为滑模面，系统关于相对阶为，控制目标是使系统的状态在有限时间内到达滑模面，并具有阶滑动模态，也就是说，系统的状态在有限的时间到达滑模集(2.24)。

假设系统的相对阶已知，即控制量首次显式的出现在滑模面的阶导数中，

(2.25)

其中，，。且存在，，使得下式成立[46]：

(2.26)

当(2.24)成立时，对于，任意连续的控制输入满足等式。但是由于系统不确定因素的存在，控制输入至少在滑模集(2.24)上是不连续的，才能保证系统收敛到滑模集。由式(2.25)和(2.26)可以得到如下Filippov意义下的解：

(2.27)

综上所述，可以得到阶滑模控制的定义：设计滑模面，通过构建滑模集上的不连续控制，使得系统运动轨迹最终稳定到滑



模集上。

2.2.5.2 有限时间收敛任意阶滑模控制算法

2001年Levant首次提出了任意阶滑模控制算法，设为正常数， $\alpha$ ，形式如下所示[47]：

(2.28)

其中 $\alpha$ 为正数，且 $\alpha$ 的取值可以有无穷多种。

定理2.1：系统(2.1)关于的相对阶为 $r$ ，且满足式(2.26)，假设系统(2.1)轨迹对于任意阶Lebesgue可测有界控制可以在时间上无限扩展，当参数的正值，取适当值时，控制律：

(2.29)

能够保证有限时间收敛的阶滑模存在，收敛时间是初始条件的局部有界函数。

对于相对阶的系统，文献[47]给出了控制器的具体表达形式，其中是进过模拟测试获得的，表达式如下：

(2.30)

2.2.5.3 鲁棒微分器

高阶滑模可以在滑模面任意阶导数上构造控制算法，但控制算法的计算需要前阶系统变量导数的信息，如控制器(2.30)中需要滑模面及其对时间导数的实时准确计算值或直接测量值。但这些状态变量的高阶导数并不一定具有物理意义，而且对噪声的敏感性使得这些高阶导数并不能用传感器直接测量[48]。为解决这些问题，Levant根据高阶滑模理论设计了具有高精度且将噪声影响考虑其中的有限时间收敛鲁棒微分器。

所以在高阶滑模的实际应用中，可用Levant鲁棒微分器来实时估计滑模面及其各阶导数的值，Levant滑模微分器由式(2.31)中的一阶实时微分器组成[49]：

(2.31)

只有公式(2.29)中的和(2.31)中的是需要通过计算机仿真获得的，取值采用Levant经过模拟测试获得的值[49]： $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ 。

2.3 本章小结

本章首先总结了变速变桨风电机组的基本控制理论，分析了变速变桨原理和各个运行区域所要达到的控制目标，为后续变速变桨控制策略的进一步研究奠定了基础。

然后具体介绍了滑模控制的基本概念，滑模控制的不变性，以及传统滑、高阶滑模、任意阶滑模控制的相关知识，并重点分析了拟连续高阶滑模控制方法。指出了传统滑模控制的优缺点，高阶滑模控制相对于传统滑模控制的改进以及拟连续高阶滑模的优势。本章依据风电机组数学模型的复杂性和非线性，在存在模型参数不确定和外界干扰的情况下，确定将拟连续高阶滑模控制策略应用于风电机组控制技术研究中。

4 风力发电机组的动态建模

动态模型的建立对于变速变桨风力发电机组控制系统的设计以及动态特性的分析具有重要的作用。在进行研究分析和仿真建模时，通常将整个风力发电机组分为六个主要模块进行建模，即风速模块、风力机模块、传动系统模块、发电机模块、变桨执行机构模块以及控制器模块。本章主要对前五个模块进行建模，控制器将在第四章和第五章中进行设计建模[50]。变速变桨风力发电机组的基本构成可以表示为图3.1。

图3.1 风力发电机组基本构成

3.1 风速模型

风能是一种不稳定的能源，具有较强的随机性，包括风剪切、塔影效应等任意要素的组合，我们难以对它进行控制。风能的数学表达式如公式(3.1)所示：

(3.1)

其中， $\rho$  为气体质量( $\text{kg/m}^3$ )， $v$  为风速( $\text{m/s}$ )。

进一步得到：

(3.2)

其中， $\rho$  为空气密度( $\text{kg/m}^3$ )， $A$  为气流流过的截面积( $\text{m}^2$ )。

大量的风速数据表明，风速变化存在某些规律。而且风速是能量的源头，作为风力发电机组的输入及扰动，建立可靠的风速模型极其重要，它直接决定了风力机模拟的动态特性。

由于一般风力发电机组轮毂很高，所以所谓风电机组的输入风速指的是轮毂高度处的风速，表达式如公式(3.3)所示：

(3.3)

其中， $v_z$  为离地面高度的风速( $\text{m/s}$ )， $v_h$  为离地面高度的风速( $\text{m/s}$ )， $k$  为测风高度到轮毂高度的风速修正系数。

风速模型一般由四种基本风速叠加而成，即基本风、阵风、渐变风和随机风 [51]，这样更能精确的体现风速的随机性、时变性和间歇性。

基本风反映的是风场的平均风速变化，被认为是一直存在于自然界的，可以通过威布尔分布函数近似得到

(3.4)

其中， $\lambda$  为威布尔分布的尺度参数， $k$  为伽玛函数， $\alpha$  为威布尔分布的形状参数。基本风一般不会随着时间变化，在仿真中一般可以用常值来模拟。

阵风描述的是风在某个时间段突然变化的现象，数学公式如下：

(3.5)

其中， $v_g$  为阵风风速( $\text{m/s}$ )， $t_s$  为阵风启动时间( $\text{s}$ )， $T$  为阵风周期( $\text{s}$ )， $v_{gmax}$  为阵风的最大风速( $\text{m/s}$ )。

渐变风随着时间发生缓慢的变化，数学公式如下：

(3.6)

其中， $v_{tr}$  为渐变风速( $\text{m/s}$ )， $t_{tr}$  为渐变风起止时间( $\text{s}$ )， $T_{tr}$  为渐变保持时间( $\text{s}$ )。

随机风的变化是不确定的，它受地表粗糙系数、相对高度的风速及各种外来扰动影响，数学公式如下：

(3.7)

其中， $N$  为频谱取样点数， $\Delta t$  为取样频率， $\alpha$  为地表粗糙系数， $\Delta v$  为扰动范围， $v_{tr}$  为相对高度的平均风速， $v_{tr}$  为0~ $v_{tr}$ 之间均匀分布的随

机变量。

图3.2 风速模型

本课题所采用的风速模型是基于白噪声和Kaimal滤波的风速模块[59]，其MATLAB/SIMULINK模型如图3.2所示[52]。与四分量风速模型效果相比，该风速模型更接近风场的实际风速。

3.2 风力机模型

风力机是将风能转换为机械转矩的关键部件。由空气动力学可知，风力机从风能中捕获的机械功率可以表示为[53]：

(3.8)

其中， $\rho$ 为空气密度( $\text{kg/m}^3$ )； $R$ 为风轮半径( $\text{m}$ )； $v$ 为风速( $\text{m/s}$ )； $C_p$ 为风能利用系数（也称功率因数），是评价风力机将风能转换为机械能效率的重要参数，它与叶尖速比和桨距角有关，表达式为：

(3.9)

(3.10)

其中， $C_p$ 系数， $\lambda$ ， $\beta$ ， $\gamma$ ， $\delta$ 。系数 $C_p$ 至的取值与具体风机叶片的形状以及它所处的环境的空气动力性能有关。上式中叶尖速比的表达式为：

(3.11)

其中， $\omega$ 为风轮旋转角速度( $\text{rad/s}$ )，对于不同的桨距角值，都存在一个最佳叶尖速比 $\lambda_{opt}$ ，使其随风速的变化持续工作在最佳工作点，即风力机的转换效率最高。

根据叶素理论和查表法，可以画出风能利用系数曲线如图3.3所示。

图3.3 叶尖速比与风能利用系数的关系

从图3.3中可以看出：

(1)对于同一桨距角 $\beta$ ，随着叶尖速比 $\lambda$ 的增加，风能利用系数 $C_p$ 先增加后减小，且整个过程存在唯一最佳叶尖速比 $\lambda_{opt}$ 点对应最大风能利用系数值。

指 标		
剽窃文字表述		
<div>1. 实际风速超过其额定风速时，由于发电机和各种器件的功率达到上限，为了保护风电机组，应该限制</div> <div>2. 滑模控制能够通过控制量的切换使系统状态沿着滑模面滑动，从而使得系统能够不受外界干扰和参数摄动影响，正是由于这种特性使滑模控制得到了广泛的</div> <div>3. 抖振现象不但会降低系统控制的准确性，增加能量损耗，还容易激发系统高频未建模动态，</div>		
15. 201511162445_石琼玉_第15部分		总字数：9441
相似文献列表      文字复制比：3.3%(313)      剽窃观点：(0)		
1	变速变桨距风电系统建模与智能控制技术研究 王佳雯(导师：龚华军) - 《南京航空航天大学硕士论文》 - 2012-03-01	1.3% (127) 是否引证：是
2	基于滑模变结构的风力机变桨距控制研究 田勇;张宏立;玛依拉·赛依力; - 《华东电力》 - 2011-09-24	0.9% (82) 是否引证：否
3	直驱型风力发电系统机侧控制策略研究 庞博(导师：王生铁) - 《内蒙古工业大学硕士论文》 - 2013-04-01	0.4% (36) 是否引证：否

4	风电机组变桨系统的研究	0.3% (30)
	方涛;黄维学; - 《电器工业》 - 2013-04-05	是否引证: 否
5	风光互补智能控制系统的设计与实现	0.3% (30)
	程军(导师: 陈宗海;王智灵) - 《中国科学技术大学硕士论文》 - 2009-05-02	是否引证: 否
6	改进蜂群算法在风机变桨距控制中的应用	0.3% (29)
	任丽娜;吕明月;王振臣; - 《机械设计与制造》 - 2015-03-08	是否引证: 否
原文内容		

(2)当桨距角时，对应的最大风能利用系数相对较大，随着的值增大， 的值随之减小。

风速低于额定风速时，为了捕获最大风能，桨距角需维持在附近，然后控制转速随着风速的变化而变化使得叶尖速比维持在最佳叶尖速比。风速高于额定风速时，为了保证风力机不受破坏，变桨机构开始动作，当风速增大时，增大桨距角来降低风能利用系数，限制一部分风能的捕获，从而维持输出功率在额定功率[54]。图中对应的是最佳叶尖速比。

用气动转矩表示机械功率如公式(3.12)所示：

(3.12)

其中，为气动转矩()，具体表示如公式(3.13)所示：

(3.13)

### 3.3 传动系统模型

风力发电机组的传统系统一般由风轮转子、高速轴、齿轮箱、低速轴和发电机转子组成。其中，风轮与发电机是通过主轴和齿轮箱连接在一起的，主轴和齿轮箱起到能量传递的作用，将风能转化成机械能传递给发电机[55]。研究过程中，根据轴系不同的等效和建模方法可将传动系统分为三质量块、两质量块和单质量块模型三种。实际应用中，两质量块模型已经足以描述整个风力发电机组的传动系统，所以通常将三质量块模型折合成两质量模型。

#### 5.4.12 3.3.1 两质量块模型

将三质量块齿轮箱的转动惯量分别折算到风轮和发电机中，即将低速轴的转矩和转速折算到高速轴侧，并将齿轮箱、高低速轴的弹性作用和转动阻尼作用等效成一个弹性和阻尼环节[56]。如图3.5所示。

图3.5 风力发电传动系统两质量块模型

当风轮转速达到一定值后，气动转矩和低速轴转矩相互作用驱动风轮转动起来，其数学表达式如(3.14)所示：

(3.14)

其中，为风轮转动惯量()；为风轮外部阻尼()；为发挥制动作用的低速轴转矩()，表示为：

(3.15)

其中，为低速轴阻尼系数()；为低速轴刚度系数()；为转子侧角偏差(°)；为低速轴侧角偏差(°)；为低速轴旋转角速度( )。

低速轴转矩以齿轮箱转速比的倍率传输到高速轴。

(3.16)

其中，为高速轴转矩()；为齿轮箱齿速比。

发电机侧角偏差、转速与低速轴侧角偏差、转速关系如下：

(3.17)

(3.18)

其中， $\delta$  为发电机侧角偏差( $^{\circ}$ )； $\omega$  为发电机转速( $^{\circ}/s$ )。

假设齿轮箱是理想的，不存在损耗，那么由公式(2.16)、(2.17)和(2.18)可得到如下关系：

(2.19)

高速轴转矩和电磁转矩的相互作用驱动发电机转动，其表达式为：

(2.20)

其中， $J$  为发电机转动惯量( $kg \cdot m^2$ )； $B$  为发电机外部阻尼( $N \cdot m / (rad/s)$ )； $T_e$  为发电机电磁转矩( $N \cdot m$ )。

$\delta$  与  $\omega$  的关系可分别由(2.21)和(2.22)所示：

(2.21)

(2.22)

#### 5.4.13 3.3.2 单质量块模型

对两质量块模型进行理想化处理可简化为单质量块模型。实际上，风轮转速与发电机转速存在式(2.23)的关系[14]：

(2.23)

式中， $\theta$  表示驱动轴的挠度。假设风机处于理想状态下， $\theta$  始终保持在风机启动时的  $\theta_0$ ，则可推出  $\dot{\theta} = 0$ 。又因为式(2.19)的关系，可以得出  $\dot{\omega} = 0$ 。

因此，公式 (2.20)可重新表示为：

(2.24)

将(2.14)和(2.24)相加，得到单质量块风机模型如公式(2.25)所示：

(2.25)

其中， $J_t$  表示风机总惯量， $B_t$  表示风机外部总阻尼。风力机传动系统单质量块模型可由图3.6表示。

图3.6 风力发电传动系统单质量块模型

### 3.4 发电机模型

发电机的选择除了需考虑其可靠性和运行寿命外，还需考虑其是否能够适应风况的不同变化，提供稳定的电能[57]。由风能到机械能的能量流动过程，由风力机完成，实现的是能量获取的量变；由机械能到电能的实现过程，由发电机完成，实现的是能量获取的质变。两者互相作用，互相影响。

在变桨控制系统中，需要调节桨距角变化使发电机输出转矩与转速维持恒定状态，最常采用的是异步发电机，对异步发电机

的模型进行简化，得到发电机的表达式为[58]

(3.26)

(3.27)

其中， $p$  为发电机极对数； $\omega$  为相对数； $V$  为电网电压(V)； $k$  为修正系数； $\omega_g$  为发电机转速(rad/s)； $\omega_w$  为风轮转速(rad/s)； $\omega_{gs}$  为发电机同步转速(rad/s)； $R_s$  和  $X_s$  分别为定子绕组电阻和漏抗( $\Omega$ )； $R_r$  和  $X_r$  分别为转子绕组电阻和漏抗( $\Omega$ )。

### 3.5 变桨执行机构模型

当风速运行在额定风速以上时，考虑到风电机组的载荷承受能力和各部件性能指标的限制，需要启动变桨执行机构限制风电机组的风能捕获。桨距角大小由风速决定，经控制系统调节，由伺服驱动电机驱动叶片变桨，数学模型如公式(3.28)：

(3.28)

其中， $\theta_r$  为桨距角的参考值( $^\circ$ )； $\theta$  为实际输出的桨距角( $^\circ$ )； $T$  为时间常数。这实际上是一个一阶延迟环节，因为驱动系统本身存在一些计算延迟、条件延迟等情况，所以变桨执行机构不能做到即时响应[59]。则变桨执行机构模型也可以表示为如下拉式变换形式(3.29)：

(3.29)

### 3.6 本章小结

本章讨论了变速变桨风力发电机组的能量转换过程，针对风力发电机组的风速模块、风力机模块、传动系统模块、发电机模块以及变桨执行机构模块分别进行了建模，为后续风力发电机组仿真平台搭建奠定了基础。

## 5 基于拟连续高阶滑模的变速控制

拟连续高阶滑模控制技术能够在保证系统稳定性和鲁棒性的同时，有效的削弱抖振现象。本章采用两质量块风机非线性模型作为被控对象，其相对阶为2，而传统滑模控制只能针对相对阶为1的系统进行控制，采用拟连续高阶滑模控制策略打破了传统滑模控制相对阶为1的限制，实现了任意阶控制。

本章在系统存在模型参数不确定和外界干扰的情况下，将积分拟连续高阶滑模控制策略应用于风力发电机组的变速控制中。控制系统设计的总体流程按照以下几部分进行：控制系统策略分析、被控对象模型建立、滑模面设计、控制器设计、控制器推导、稳定性证明以及仿真实验。

### 4.1 变速控制分析

#### 5.4.14 4.1.1 控制目标

由2.1节可知变速变桨风机的运行区域可以分为三个部分，本章所研究的变速系统是在风速低于额定风速的工况下运行，此阶段应采用最大风能跟踪策略，使其保持在最佳叶尖速比附近运行[60]。变速阶段的控制目标为：随着风速的变化，通过控制发电机的输出转矩调节风轮转速，使风轮转速达到期望转速，追踪最大风能利用系数，实现发电机输出功率最大化的同时降低机械负载压力的控制目标，从而提高风机的性能。

#### 5.4.15 4.1.2 变速阶段控制策略分析

为了最大限度的捕获风能，需要根据风速变化调节风轮转速，使其随风速的变化持续工作在最佳工作点，即最优转速：

(4.1)

其中， $\omega_{ws}$  为最佳风轮转速(rad/s)， $\lambda_{opt}$  为最佳叶尖速比。

由于此阶段风速未达到额定风速，变桨机构不动作，假设理想状态下桨距角。此时风机的风能利用系数可表示为，其表达是可简化为[61]：

(4.2)

(4.3)

当时，风能利用系数与叶尖速比的关系曲线如图4.1所示。可以看出，当时，取得最优值0.48。

图4.1 风能利用系数与叶尖速比的关系

综上所述，得出变速阶段控制策略：在风速低于额定风速时，控制发电机转矩，使风轮转速跟随风速变化快速调整，寻找最佳功率输出点，最大限度提高风能转换效率。风力发电机组变速控制方案如图4.2所示。

图4.2 风力发电机组变速控制方案

4.2 被控对象模型分析

5.4.16 4.2.1 两质量块风机非线性模型

由第三章建立的模型可得到两质量块风机动态模型如下所示：

(4.4)

对求导，

简化两质量块模型为式(4.5)：

(4.5)

5.4.17 4.2.2 扰动和不确定条件干扰下的非线性模型

考虑到参数变化引起的不确定条件和外界干扰的存在，引入转子转动惯量的不确定部分、转子阻尼的不确定部分、发电机转动惯量的不确定部分、发电机阻尼的不确定部分、低速轴阻尼系数的不确定部分、低速轴刚度系数的不确定部分，以及连续的外部扰动，模型简化引起的不确定。模型表示如下：

(4.6)

将上式中的所有不确定项都移到等式右边，并进行简化：

因此，得到最终的两质量块风机非线性模型(4.7)：

(4.7)

其中，，，

，，，，。

被控对象模型(4.7)满足(4.8)的形式，所以可用拟连续高阶滑模方法设计控制器。

(4.8)



其中， $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5$ 。

#### 4.3 拟连续二阶滑模转矩控制器设计

风力发电机组的变速控制问题可以描述为设计发电机转矩，使得模型(4.7)在存在参数摄动和外界干扰的情况下，输出变量即风轮转速能够在有限时间内实现对参考转速的稳定跟踪。设跟踪误差为： $e$ 。

##### 5.4.18 4.3.1 二阶拟连续滑模控制器推导

以跟踪误差为基础，设计滑模面，并在滑模面中加入跟踪误差的积分项，来消除系统稳态误差，所设计积分滑模面表达式为[62]：

$$(4.9)$$

其中， $n$ 为系统的相对阶， $\alpha$ 为正常数。本系统相对阶为2，所以滑模面可以表示为：

$$(4.10)$$

对求导，可得

$$(4.11)$$

其中， $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5$ ，

。

对滑模面(4.10)求导，得 $\dot{\sigma}$ ，再次求导并将式(4.11)代入，整理得：

$$(4.12)$$

由上式可以验证系统相对阶为2。在有限时间内，令 $\sigma = 0$ ，即 $\dot{\sigma} = 0$ ，则 $\ddot{\sigma} = 0$ ，所以指数收敛。

设计二阶滑模面为：

$$(4.13)$$

其中， $\alpha, \beta$ 为常数且 $\alpha > 0, \beta > 0$ 。对滑模面(4.13)求导，然后将公式(4.12)加入得：

$$(4.14)$$

其中， $\sigma_1$ 为不确定部分。

为了有效解耦滑模面(4.14)，并削弱滑动模态产生的抖振，在此引入虚拟控制 $v$ ，使得 $\ddot{\sigma} = v$ 。由于本课题研究的风机系统被控对象中含有不确定条件和外界干扰，所以控制律采用公式(4.15)所示的等效控制加切换控制的形式：

$$(4.15)$$

在该控制律的作用下，滑模面(4.10)、(4.13)及其各阶导数能够在有限时间内，收敛于原点周围任意小的邻域内，且 $\sigma, \dot{\sigma}, \ddot{\sigma}$ 及其各阶导数、均指数收敛[63]。

式(4.15)中，等效控制的表达式为公式(4.16)，二阶拟连续滑模控制器为切换控制，实现对外加干扰和不确定性的鲁棒控制，其表达式见公式(4.17)。

(4.16)

(4.17)

其中， $\eta$  为需要设计的控制增益参数。当时，滑模集为  $S$ ，此时滑模控制器除滑模集外都连续[64]。

综上，可得到该风电机组的积分拟连续二阶滑模转矩控制器(Integral Quasi-Continuous Second-order Sliding-mode Torque Controller)为：

(4.18)

由于控制器(4.18)需要滑模面和对时间的导数，仿真时可用Levant滑模微分器来实时估计滑模面及其一阶导数值，根据2.2.5节中公式(2.31)得到Levant滑模微分器由式(4.19)中的一阶实时微分器组成：

(4.19)

控制器参数  $\eta$ ， $\lambda$ ， $\mu$  和微分器参数的值需通过仿真调试获得。

#### 5.4.19 4.3.2 稳定性证明

选择Lyapunov函数为： $V = \frac{1}{2} s^2$ 。求导得：

(4.20)

假设有界，且满足  $\dot{s} \leq -\lambda s$ ，其中  $\lambda > 0$ 。则式(4.20)可进一步推导出：

(4.21)

由文献[65]可知， $s \leq 0$ ，且  $\dot{s} \leq -\lambda s$ ，则式(4.21)可表示为：

(4.22)

即  $s \leq 0$ 。可以看出，要使控制系统稳定，只需  $\dot{s} \leq -\lambda s$ ，即  $s \leq 0$ 。若要保证系统有限时间稳定，避免渐进趋近，则需设计满足  $\dot{s} \leq -\lambda s - \mu \text{sign}(s)$ ，此时滑模面在有限时间可达。

#### 4.4 拟连续三阶滑模转矩控制器设计

4.3节中所描述的二阶滑模控制具有强鲁棒性，能够有效抵御外界连续扰动和不确定条件的干扰，但其仍然存在剧烈的抖振，强烈的转矩变化容易引起机械压力的增加，不利于系统的稳定，所以采取措施削减抖振是非常必要的。本节所述的三阶拟连续滑模控制是在4.3节所述控制的基础上再次升阶，能够实现更好的跟踪效果，满足控制目标，且能够明显减小抖振。

##### 5.4.20 4.4.1 三阶动态拟连续滑模控制器推导

对公式(4.11)求导，可得：

(4.23)

其中， $\dot{s}_1 = \dot{s}$ ， $\dot{s}_2 = \ddot{s}$ ， $\dot{s}_3 = \dddot{s}$ 。

对滑模面(4.12)求导，并将式(4.23)和式(4.11)代入整理：

(4.24)

设计三阶滑模面为：

(4.25)

其中， $\alpha, \beta, \gamma$ 均为常数且均大于0。对此三阶滑模面求导得：

(4.26)

其中不确定部分：

同样，引入虚拟控制实现控制量的升阶，来削弱滑动模态产生的抖振。系统控制律采用如下形式：

(4.27)

其中，等效控制和三阶拟连续滑模控制器分别由式(4.28)和(4.29)表示：

(4.28)

(4.29)

其中， $k_1, k_2, k_3$ 为需要设计的控制增益参数。当时，滑模集为 $S$ ，此时滑模控制器除滑模集外都连续。在控制律(4.27)的作用下的滑模面(4.10)、(4.25)及其各界导数能够在有限时间内，收敛于原点附近任意小的邻域内，且 [63-64]。

综上所述，可推导出该风电机组的积分拟连续三阶滑模转矩控制器(Integral Quasi-Continuous Third-order Sliding-mode Torque Controller)为：

(4.30)

控制器参数 $k_1, k_2, k_3, \lambda$ ，需通过仿真调试获得。同样，控制器(4.30)的表达式中含有滑模面及其对时间的导数，仿真时可用Levant滑模微分器实时估计滑模面及其各阶导数，根据2.2.5节中公式(2.31)可得到Levant滑模微分器如式(4.31)：

(4.31)

#### 5.4.2.1 4.4.2 稳定性证明

选择Lyapunov函数为： $V = \frac{1}{2} s^2$ ，求导得：

(4.32)

假设有界，即满足 $|s| \leq M$ ，其中 $M$ 为常数。则式(4.32)可进一步简化：

(4.33)

由文献[66]可知， $\lambda > 0$ ，又知 $s \dot{s} \leq -\lambda |s|^\lambda$ ，则式(4.33)可表示为：

(4.34)

即 $\dot{V} \leq -\lambda V^{\frac{\lambda+1}{\lambda}}$ 。所以，当时，即 $s=0$ ，控制系统稳定。若要使系统满足有限时间稳定条件，即滑模面在有限时间可达，则需设计满足 $\lambda > 1$ 。

### 4.5 低风速下仿真与鲁棒性分析

本节选择额定功率为1.5MW风力发电机组为仿真对象，采用MATLAB/SIMULINK对系统进行仿真。两质量块风机模型参数见表4.1。

表4.1 两质量块模型参数

符号数值单位

38.5  
1.308  
4456761  
123  
5440  
45.52  
0.4  
104

仿真测试中，风机模型的各个参数除标称部分外，还含有10%的不确定部分，即、 $\sigma$ 、 $\sigma$ 、 $\sigma$ 、 $\sigma$ 、 $\sigma$ 。外部干扰可用正弦函数表示，模型简化引起的不确定用模型中被省略的交叉耦合项代替。

控制器参数的取值可通过仿真获得， $\sigma$ 、 $\sigma$ 、 $\sigma$ 、 $\sigma$ 、 $\sigma$ 、 $\sigma$ 、 $\sigma$ 、 $\sigma$ 、 $\sigma$ 。

初始状态值， $\sigma$ 、 $\sigma$ 、 $\sigma$ 。

对该风力发电机组进行仿真，并选择在风速低于额定风速工况下对设计的积分拟连续二阶滑模转矩控制器(在图中用Second表示)和积分拟连续三阶滑模转矩控制器(在图中用Third表示)进行验证。并与非线性静态状态反馈控制器(Nonlinear Control with Static State Feedback, NSSFE)和非线性动态状态反馈控制器(Nonlinear Control with Dynamics State Feedback, NDSFE)对比分析。适当选用低通滤波器来平滑控制输入发电机转矩信号。

风速模型3.1节已经给出，图4.3所示为平均风速7.5m/s、湍流强度12%的风速曲线。

图4.3 风速曲线

图4.4为该工况下风轮转速的曲线。其中(a)表示该风力发电机组变速控制的参考转速，(b)为积分拟连续二阶和三阶动态转矩控制器作用下风轮转速输出曲线，(c)为NSSFE和NDSFE作用下风轮转速的曲线。图4.5更直观的给出了各自风轮与参考转速的误差曲线。从这些图中可以看出，二阶三阶控制器均能在较短时间内很好的实现对参考转速的跟踪，不受模型不确定和外界干扰的影响，且三阶控制器能够避免对短时湍流成分的跟踪。而NSSFE和NDSFE在这种情况下的跟踪效果并不理想，与参考转速相比存在很大误差。

- (a) 参考转速
- (c) 二阶和三阶控制器下风轮转速
- (c) NSSFE和NDSFE风轮转速

图4.4 风轮转速曲线

图4.5 转速误差曲线

图4.6为该工况下的风机输出功率曲线，从图中可以看出，所设计的二阶三阶滑模控制器能够随着风速的变化，最大限度的捕获风能，实现功率输出最大化的控制目标，相比而言，三阶控制器获取风能的效率更高。NSSFE和NDSFE获取风能的能力则稍差一些。

图4.6 功率输出曲线

图4.7为该工况下的风能利用系数曲线，从图中可以明显看出，所设计的二阶三阶滑模控制器能够跟随风速的变化，追踪最大风能利用系数，最大限度的捕获风能，实现功率输出最大化的控制目标，且三阶动态控制器的风能利用系数波动更小一些。而NSSFE和NDSFE在干扰和不确定条件下获取风能的能力明显差了很多，其中NDSFE的风能利用率要好于NSSFE。

图4.7 风能利用系数曲线

图4.8为该工况下的发电机转矩输出曲线，可以看出，二阶控制器和NSSFE的转矩输出存在剧烈的抖振，而三阶控制器和NDSFE两种控制器都能在各自二阶控制器的基础上减小抖振，降低系统的机械压力。

图4.8 发电机转矩曲线

图4.9给出了所设计的二阶滑模面和三阶滑模面曲线，从图中曲线可以看出，二阶三阶滑模面的值都维持在0附近，说明二阶和三阶滑模控制器都是稳定的。二阶三阶滑模虽然都有抖振存在，但抖振的幅度很小，且三阶滑模面抖振幅度小于二阶滑模面，显示出了所设计控制器的有效性。

图4.9 滑模面曲线

综合所有仿真结果分析得出，本章所设计的二阶和三阶滑模控制器在存在外界干扰和模型不确定的情况下，具有很好的鲁棒性，且其中三阶控制器能够在二阶控制器的基础上有效减少转矩变化带来的抖振，降低了系统的机械压力。性能远好于NSSFE和NDSFE两种控制器。

#### 4.6 本章小结

本章首先论述了本文所采用的变速控制策略，针对低风速控制阶段，根据风速和风轮转速情况寻找最大功率点，控制发电机转矩，追踪最佳风能利用系数，获得最大功率输出。

在存在模型参数不确定和外界干扰的影响下，将积分拟连续高阶滑模控制策略应用于风力发电机组变速系统中，本章分析了转矩控制器的设计过程，并对所设计的控制器进行了稳定性证明。最后通过仿真平台验证，在风速低于额定风速时，基于积分拟连续高阶滑模策略设计出的控制器具有很强的鲁棒性，且易于控制，对克服抖振有不错的效果。同时，风电机组能够最大限度的获取风能，满足风场对变速过程的要求，具有一定的实际工程意义。

本章在风速低于额定风速时，采用拟连续高阶滑模的控制方法，同时为了尽可能的消除稳态误差，在滑模面中引入积分项，形成一种积分拟连续高阶滑模的控制策略，来对风力发电机组的转矩进行控制，从而间接控制转速。首先设计二阶转矩控制器，确保达到传统控制目标，并能在有限时间内实现对参考转速的稳定跟踪。然后，又在二阶滑模控制的基础上，设计三阶动态转矩控制器，保证控制目标的同时，进一步减小系统抖振。并分别通过理论推导证明了控制器的稳定性，最后分别通过仿真验证设计的控制器不仅能够通过控制发电机转矩得到功率的最大输出，而且能够有效的抑制抖振，控制系统具有良好的鲁棒性。

#### 6 基于拟连续高阶滑模的变桨控制

当风速高于额定风速时，本章采用积分拟连续高阶滑模控制技术来控制风力发电机组的桨距角。首先，设计桨距角控制器，确保达到传统控制目标，并能在有限时间内实现对参考桨距角的稳定跟踪。然后通过理论推导证明该控制器的稳定性，最后通过仿真验证设计的控制器能够通过控制桨距角使系统输出功率维持在额定功率，而且能够有效抵御外界连续扰动和不确定条件的干扰，具有良好的鲁棒性。

#### 5.1 变桨控制分析

#### 5.4.22 5.1.1 控制目标

当风速达到额定风速时，风力发电机组输出功率为额定功率，当风速高于额定风速时，为了保护风电机组机械和电路系统，同时降低载荷，必须限制一部分风能捕获，需要发电机输出功率保持在额定功率附近。由图2.4知，随着桨距角的增大，风能利用系数逐渐减小。因此风力发电机变桨距系统可以通过调节桨距角来改变风能利用系数，从而调整风力发电机组的输出功率。此阶段的控制目标为：通过控制桨距角变化使风机输出功率稳定在额定功率[67]。

#### 5.4.23 5.1.2 变速阶段控制策略分析

当风机运行在区域三——恒转速阶段时，此阶段实际风速超过其额定风速时，由于发电机和各种器件的功率达到上限，应该限制一部分风能获取，此时风力发电机组通过将发电机转矩和风机转速维持在额定值附近以确保输出功率维持在额定功率，所以不能再依靠通过调节转矩来控制系统转速，此时便需要增加桨距角，改变风能利用系数，使桨叶向90°方向旋转，使风能利用系数减小，反之，桨叶向0°方向旋转[68]。通过这种策略来控制风力发电机的转速和功率维持在其额定值附近，避免超出其转速极限和功率极限。本章采用变桨控制来限制风能捕获，达到使发电机转速稳定在额定转速，发电机功率稳定在额定功率的控制目标，变桨控制方案如图5.1所示。

图5.1 风力发电机组变桨控制方案

由于此阶段变桨机构动作，桨距角随风速变化。此时风机的风能利用系数由3.2节的(3.9)和(3.10)表示。

### 5.2 被控对象模型分析

#### 5.4.24 5.2.1 风机非线性模型整理

风机运行在风速高于额定风速的风况下时，风机做变桨动作，所以需要考虑变桨执行机构的模型，由3.5节可知，变桨执行机构的模型为：

(5.1)

由3.3.3节可知，风机单质量块非线性模型为：

(5.2)

实际工程中，风轮转速都是通过测速装置获得的，相当于存在一个执行机构，执行机构存在滞后，可以用一个一阶惯性环节来表示：

(5.3)

其中， $\omega$ 为速度传感器测得的风力机的角速度， $T$ 为时间常数

综合式(5.1)、(5.2)和(5.3)，可得到变桨控制系统的被控对象模型为(5.4)：

(5.4)

其中。

#### 5.4.25 5.2.2 扰动和不确定条件干扰下的非线性模型

考虑到参数变化引起的不确定条件和外界干扰的存在，模型可用式(5.5)式表示：

(5.5)

其中， $J$ 和 $B$ 分别表示风机总转动惯量和外部总阻尼的不确定部分， $T_1$ 和 $T_2$ 分别为变桨执行机构时间常数和测速执行机构时间常数

的不确定部分， 和表示连续的外部扰动。 为模型简化引起的不确定。

将(5.5)中所有不确定项移到等式右边，并简化：

从而能得到变桨控制系统最终的风机非线性模型如下所示：

(5.6)

其中， ， ， 。上述模型也可以表示为(5.7)的形式

(5.7)

其中， ， ， ， ， 。

5.4.26 5.2.3 风力发电机组模型精确反馈线性化

已知5.2.2节中公式(5.7)所示的风电机组模型为3阶非线性模型，其中与的数学关系非常复杂，所以需要寻求一种方法对模型进行线性化处理。

16. 201511162445_石琼玉_第16部分		总字数：9918
相似文献列表      文字复制比：7.6%(758)      剽窃观点：(0)		
1	风电机组变桨距系统的反推滑模控制 廖茜, 邱晓燕, 江润洲, 王刚, 李卓艺 - 《电气传动（优先出版）》- 2015-02-15 09:35	2.2% (222) 是否引证：是
2	大型超市火灾数值模拟及人员疏散研究 孙敏(导师：石必明) - 《安徽理工大学硕士论文》- 2014-06-01	1.6% (163) 是否引证：是
3	人员疏散中个体和群体行为的实验和计算机模拟研究 刘少博(导师：杨立中) - 《中国科学技术大学硕士论文》- 2010-05-01	1.4% (141) 是否引证：否
4	基于元胞自动机模型的学生群体疏散研究 孙凯(导师：李兴莉) - 《太原科技大学硕士论文》- 2014-06-01	1.1% (105) 是否引证：是
5	基于多智能体的地铁站台乘客紧急疏散模型 李芳(导师：陈绍宽) - 《北京交通大学硕士论文》- 2015-03-01	0.7% (71) 是否引证：否
6	基于2.45GHz有源RFID室内定位算法的研究 贾若(导师：张磊) - 《河北工业大学硕士论文》- 2014-03-01	0.6% (55) 是否引证：否
7	研制风力发电设备 引领低碳环保发展 刘华; - 《中国科技产业》- 2015-08-15	0.3% (29) 是否引证：否

原文内容

由于风力发电系统的平衡点随着风速的变化而变化，基于某一工况点附近的传统局部线性化近似模型设计出的控制器并不能满足大范围扰动下的控制性能[69]。精确反馈线性化(Exact feedback linearization, EFBL)的基本原理是通过适当的非线性状态和坐标变换，将复杂的非线性问题转化为新坐标下简单的线性问题，经坐标变换后的线性系统是全局精确线性化的[70]。所以，经过EFBL处理的全局精确线性化模型既可以避免复杂的计算，又可以解决传统泰勒展开式进行局部线性化近似带来的不精确问题，满足大范围扰动下的控制性能。

本节基于EFBL的原理，将式(5.7)全局线性化处理，从而对系统各个运行点实行精确控制。首先，需要检验此模型是否能够满足精确线性化的条件[71-78]：

（一）检验可行性。

假设风机额定转速为，变桨控制系统的控制目标为，故选定输出函数为：，在处计算可得：

可以得出系统的关系度，符合的条件，所以该系统满足精确线性化的条件，可以[进行坐标变换](#)。

[（二）坐标变换。](#)



选取合适的坐标变换及状态反馈:

令局部微分同胚为:

(5.8)

非线性状态反馈:

(5.9)

其中, , 。变桨控制系统的非线性模型(5.7)可转化成完全可控的非线性系统(5.10):

(5.10)

其中, , , 称为Brunovsky标准型。

原系统控制量与精确化后系统控制量的关系由式(5.9)表示。如果控制量被确定, 那么控制量也随之被确定。

### 5.3 拟连续高阶滑模桨距控制器设计

#### 5.4.27 5.3.1 三阶拟连续滑模控制器推导

将式(5.10)分解表示成:

(5.11)

整个系统的控制问题由控制模型(5.7)转化为模型(5.11), 由于本身表示了跟踪误差, 所以以为基础设计一阶滑模面, 为了消除稳态误差, 在表达式中加入积分项, 滑模面表达式为:

(5.12)

对式(5.12)求导, 可得

(5.13)

对式(5.13)求导, 可得

(5.14)

对式(5.14)求导, 可得

(5.15)

中首次出现控制量, 所以此系统的滑动阶为3。在有限时间内, 令, 得到, 所以指数收敛。

设计三阶滑模面为:

(5.16)

其中, , 均为常数且均大于0。对上式求导, 并将(5.13)、(5.14)和(5.15)代入整理得:

(5.17)

其中，为总的不确定部分。

引入虚拟控制，控制律采用等效控制加切换控制的形式：。其中，为三阶拟连续滑模控制器。为需要设计的控制增益参数。当时，滑模集为，此时滑模控制器除滑模集外都连续。

在该控制律的作用下，滑模面(5.16)、(5.12)及其各阶导数在有限时间内，收敛于原点任意小的邻域内，且，、及其各阶导数均指数收敛。

综上所述，可得到三阶拟连续滑模控制器为：

(5.18)

由公式(5.9)的坐标变换，可得到风力发电机组变桨控制系统的三阶拟连续桨距控制器：

(5.19)

其中，，，，

，，

，

。

同样，控制器(5.19)的表达式中含有滑模面及其对时间的导数，用Levant滑模微分器来实时估计滑模面及其各阶导数、，Levant滑模微分器见公式(4.31)。

控制器参数，，，，需通过仿真调试获得。

5.4.28 5.3.2 稳定性证明

选择Lyapunov函数为：。求导得：

(5.20)

假设有界满足，其中。则式(5.20)可进一步得出(5.21)的形式：

(5.21)

由于 [65-66]，且，则：

(5.22)

由公式(5.22)知，。所以，当时，即，控制系统稳定。当时，满足可达条件，系统有限时间稳定[20]。

5.4 高风速下仿真与鲁棒性分析（独立变桨、桨叶3个，换数据，转速rpm，图与PID比较）

本节选择额定功率为1.5MW的风力发电机组为对象，采用MATLAB / SIMULINK对系统进行仿真。风机模型参数见表5.1。在风速高于额定风速的风况下，执行变桨控制方式，此时风轮转速、发电机转矩均维持在额定值。

表5.1风力发电机组参数

符号数值单位

额定功率

1.5 MW

额定风速

12 m/s

额定转速

17.23 rpm

额定转矩

风轮半径

38.5

空气密度

1.308

测速时间常数

0.02

仿真测试中，风机模型的各个参数除标称部分外，还含有10%的不确定部分，即、 $\rho$ 、 $\tau$ 、 $\tau_0$ 、 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 。外部干扰可用正弦函数、表示，模型简化引起的不确定用模型中被省略的交叉耦合项代替。

控制器参数的取值可通过仿真获得， $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 、 $K_f$ 、 $K_g$ 、 $K_h$ 。初始状态值， $\omega_r$ 、 $\omega_{r0}$ 。

对该风力发电机组进行仿真，在风速高于额定风速的工况下对设计的三阶滑模桨距控制器(在图中用Third表示)进行验证。

依据2.2.1节搭建的风速模型，可以得到平均风速19m/s、湍流强度12%的风速曲线，如图5.2所示。

图5.2 风速曲线

图5.3 风轮转速曲线

图5.3表示该工况下风轮转速的曲线，图5.4更直观的给出了各自风轮转速与参考转速的误差曲线。从图中可以看出本文所设计的三阶桨距控制器能够使风轮转速稳定在额定转速附近，具有很好的鲁棒性。

图5.4 转速误差曲线

图5.5为该工况下的发电机转矩输出曲线，可以看出，三阶桨距控制器能够使发电机转矩维持在额定转矩，且高阶滑模使得抖振也比较小。

图5.5 发电机转矩曲线

图5.6给出了桨距角变化曲线，从图中可以看出，本文所设计的三阶控制器能够根据风速的变化，调节桨距角来降低风能利用系数，并且抖振幅度很小，显示出了所设计控制器的有效性。

图5.6 桨距角曲线

图5.7为该工况下的风能利用系数曲线，从图中可以明显看出，随着风速的变化，三阶滑模控制器能够控制桨距角调节风能利用系数，减少部分风能捕获。

图5.7 风能利用系数曲线

图5.8为该工况下的风机输出功率曲线，从图中可以看出，所设计的三阶滑模控制器能够实现功率输出维持在额定值附近的目标。

图5.8 功率输出曲线

图5.9 滑模面曲线

图5.9为三阶控制系统滑模面的曲线，从图中可以看出，滑模面曲线基本稳定在0的附近，系统具有良好的稳定性，且抖振幅度较小。

综合所有仿真结果可以看出，本章所设计的三阶拟连续滑模控制器对外界干扰和模型不确定具有强鲁棒性，能够有效减少抖振，降低了系统的机械压力，具有一定的实际工程意义。

## 5.5 本章小结

本章首先论述了风速高于额定风速时，所采用的变桨控制策略，维持风轮转速和发电机转矩在额定值附近，随着风速的变化，调节桨距角，以降低风能利用系数，限制风能捕获，达到输出功率维持在额定功率的控制目标。

在有外界干扰和不确定条件存在时，将积分拟连续高阶滑模控制策略应用于风电机组变桨控制系统中，本章首先描述了桨距控制器的设计过程，并对所设计的控制器进行了稳定性证明。最后通过仿真验证，在风速高于额定风速时，基于积分拟连续高阶滑模策略设计出的控制器能够达到传统的控制目标，且具有很强的鲁棒性，易于控制，对克服抖振有不错的效果。

## 7 总结与展望

随着人口的增长和全球一体化的发展，全球出现了能源消费高速增长的现象，可再生能源发电系统的需求也随之增加。同时，为应对全球气候变化，履行节能减排义务，我国大力发展可再生能源，风力发电成为全球增长最快的电源。在风力发电技术的发展过程中，控制技术始终占据着主导地位，研究风力发电机组控制技术的重要性也更加突出。

## 6.1 本文总结

通过阅读大量国内外文献，对风力发电的发展现状和控制技术有了一定的认识。由于大型风力发电机组是复杂的非线性系统，具有诸多不确定性条件且多干扰存在，这使得建立被控对象精确的数学模型变得很困难。拟连续高阶滑模控制技术不仅具有传统滑模控制技术强鲁棒性、动态响应快、控制律设计简单等优点，还在传统滑模控制基础上做了改进，有效减少了传统滑模控制存在的强烈的抖振，也打破了其系统相对阶的限制。所以本文提出采用拟连续高阶滑模控制技术对风力发电机组转矩和桨距控制器进行设计，并给出了稳定性证明和仿真验证。

### 本文主要研究内容和成果如下：

#### （一）全面深入的叙述了变速变桨控制技术的相关研究工作和发展现状

本文详细介绍了国内外风力发电和风力发电机组变速变桨控制技术的发展现状，分析了变速变桨控制的原理和控制目标，然后具体介绍了传统滑模控制、高阶滑模控制以及拟连续高阶滑模控制的基本理论，并针对大型风力发电机组的特点，提出了基于拟连续高阶滑模控制方法设计变速变桨控制器的优越性。

#### （二）搭建风力发电机组仿真平台

针对风机系统的各个模块，分别建立了风速模型、风力机模型、传动系统模型、发电机模型和变桨执行机构模型，并分析了风力发电机组的气动特性，推导出在理想状态下的最大风能利用系数，并论述了变速变桨风力发电机组在各个运行区域的基本控制策略。并以此为基础搭建了风力发电机组控制系统仿真平台。

### （三）针对两质量块风机非线性模型设计拟连续高阶滑模转矩控制器

在风速低于额定风速时，首次针对两质量块风机非线性模型进行拟连续高阶滑模转矩控制器设计。首先，设计二阶转矩控制器，确保达到传统控制目标，并能在有限时间内实现对参考转速的稳定跟踪。然后在二阶控制的基础上升阶，设计三阶动态转矩控制器，进一步减小了抖振。最后分别通过理论推导证明了两种控制器的稳定性。

### （四）针对单质量块风机模型和变桨执行机构设计拟连续高阶滑模桨距控制器

在风速高于额定风速时，针对单质量块风机非线性模型以及变桨执行机构模型和转速执行机构模型组成的被控对象，首次采用拟连续高阶滑模控制策略进行桨距控制器设计。首先对模型进行精确反馈线性化，然后针对线性化后的新模型设计控制器，进而推导出原模型的控制器形式。最后通过理论推导证明控制器的稳定性。

### （五）通过MATLAB/SIMULINK仿真平台验证所提出的控制策略的有效性

将设计的转矩控制器和桨距控制器分别在低风速仿真平台和高风速仿真平台进行验证，并与其他控制方法进行对比，由仿真结果分析得出，低风速控制阶段能够达到跟踪最佳功率系数，获得最大功率输出的控制目标，高风速阶段能够达到将输出功率稳定在额定功率附近的控制目标。

## 6.2 工作展望

本论文基于拟连续高阶滑模控制技术对大型风力发电机组的变速变桨控制进行了研究，取得了一定的成果。但由于个人能力有限，论文还存在许多不足之处，需要在以后的学习工作中进一步展开。以下提出几点继续深入钻研和改进的方向：

（一）本文在进行变速变桨控制器设计时，有些参数是必须通过仿真调试才能获得的，且这几个参数之间存在相互制约的关系，在以后的研究工作中，可以结合优化算法来获得最优解，简化仿真调试的难度。

（二）滑模控制产生抖振的根源就是符号函数，抖振只能减小，不能根除。而且滑模控制通常需要假设存在的不确定条件有界。所以，以后可以对边界层进行研究，为了进一步减小抖振，也可以用带边界层的饱和函数等代替符号函数，或者将滑模控制方法与其他智能方法如自适应、模糊等结合起来。

（三）风力发电最终需要并网才能输送给用户，本文在进行控制器设计时，只直接在转矩的基础上进行分析，在以后的研究中，可以将转矩细分为电流、电压、磁链等进行分析控制。

（四）本文对设计的控制器只是在仿真平台上进行了验证，并未真正在机组上进行实际验证，未来可以在实际应用方向进一步研究。

## 摘要

近年来，国内外发生的一系列灾难性事件表明，人群聚集的公共场所风险类型多、且风险隐患大。人群聚集场所发生的灾难性事件一般都会造成严重的人员伤亡和财产损失，除此之外还会造成大范围的人心恐慌和社会政治局面的不稳定。因此，本文将应用计算机仿真技术研究疏散过程中人员心理特征和疏散行为，从而为人员疏散风险的预测、识别、防控等提供理论依据和科学建议，提升社会公共安全管理水平。

人员疏散是一个涉及多学科、复杂的系统课题。尤其是疏散中人群心理和行为决策，既受到外界环境的影响，又与各自的生理条件、性格特征有关，很难用数学公式概况总结疏散行为运动的规律。此外，基于实验的研究极其耗费人力、财力和物力，且大规模的人员疏散尤其是紧急条件下的疏散实验也存在一定的危险。因此，本文将采用计算机仿真技术对人员疏散行为进行模拟研究。

首先，本文在研究人员疏散行为及疏散模型的现状基础上，将元胞自动机的单一规则和离散性与Agent的智能性相结合，构

建了基于Agent与元胞自动机的疏散仿真框架。其次，本文分别分析拥挤、恐慌、有指挥疏散情况下Agent的行为特点，对各状态下的个体心理进行定量描述，构建个体拥挤疏散模型、个体恐慌疏散模型和个体指挥疏散模型，并将疏散个体分为4种类型，依据个体类型对疏散相关参数进行区别设置，最后利用计算机仿真技术进行模拟，观察疏散情形、对比仿真数据并得出相应的疏散规律。

仿真结果表明，本文提出的建模框架和建模方法具有可行性，模型应用于人员疏散仿真研究上也取得了较好的效果，能够再现和解释现实的疏散情形。

关键字：人员疏散 Agent 拥挤行为恐慌行为

## ABSTRACT

In recent years, a series of catastrophic events occur at home and abroad show that the risk type in crowded place is more and risk is higher. The catastrophic events that occur in the gathering place of the crowd can cause serious casualties and property damage. Besides this, it will also cause a wide range of people to panic and unstable social and political situation. Therefore, this paper will use the computer simulation technology to study the psychological characteristics and evacuation behavior in the evacuation process, so as to provide theoretical basis and scientific suggestions for the prediction, identification, prevention and control of the risk, to enhance public safety management.

Pedestrian evacuation is a systematic project involving many subjects and complicated. In particular, the decision making of the evacuation is influenced by the external environment, people's physiological conditions and characteristics, so it is difficult to use mathematical formulas to summarize the law of the evacuation behavior. In addition, based on experimental studies is extremely consumes the manpower, financial and material resources, and the emergency conditions of the evacuation experiments also exist danger. Therefore, this paper use computer simulation technology to research evacuation behavior.

Firstly, an evacuation simulation framework based on Agent and cellular automaton is constructed, which is on the work of the research of the status quo of the evacuation behavior and model, and considering of the single rules and discreteness of cellular automata and Agent's intelligent. Secondly, this paper analyzes the Agent evacuation behavior characteristics which under the congestion, panic, and command, then constructing the corresponding models. In the end, the simulation technology is used to simulate, observe the evacuation situation, compare the simulation data and draw the corresponding law of evacuation.

The simulation results show that the proposed modeling framework, ideas and methods are feasible, and the model has a very strong practical ability, which can reproduce and explain the reality of evacuation.

KEYWORDS: Pedestrian evacuation Agent Congestion behavior Panic behavior

## 8 第一章绪论

近年来，随着经济全球化的发展趋势以及经济、文化的迅速发展，各种事故呈不断上升趋势，给人民生命安全、国家财产构成重大威胁。重大事故时与突发事件时，对聚集人群进行快速、安全疏散是减少人员伤亡和财产损失的唯一途径，是城市公共安全的核心问题。

### 1.1 背景研究

公共安全不仅是国家安全和社会稳定的基石，同时也是经济社会发展的重要支柱，人民安居乐业的基本条件。但经济和社会的高速发展往往伴随着城市化、信息化的加速，城市人口和资源不断集中，自然灾害和重大突发性事件的威胁日益凸现。

一方面，在迈向全面建成小康社会的新征程中，人民群众对公共安全的期盼比以往更加强烈。面对人民群众日益增长的公共安全需求，国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006~2020年）也明确将“公共安全”定为“重点研究领域”之一，重视突发事件防范与应急处置，应用科技支撑各种公共安全问题的预防、分析和处理。

另一方面，城市化进程的加快，使越来越多的建筑内以及社会活动中人口的过分集中，导致了拥挤踩踏、火灾等群体灾难性事故的风险性与逐步增大。文献[1]通过检索新闻报道和学术文献数据库，搜集了2001—2014年国内外中英文报道的拥挤踩踏



事件，并对事件发生的地点、伤亡人数和事件发生的原因等进行了详细分析，整理出了事件发生频次图如图1.1所示，以及伤亡人数统计图如图1.2所示，并分析出拥挤踩踏事件发生的原因包括人群因素（如活动人群数量和密度巨大，或人群的精神处于紧张、恐惧、激动等状态）、活动场所因素（如场所缺乏安全通道或通道阻塞）、集会活动组织缺陷、学校管理缺陷和诱发因素（如火灾、设施垮塌等突发情况）。

图1.1 2001年-2014年国内外拥挤踩踏事件发生频次图

图1.2 2001年-2014年国内外拥挤踩踏事件伤亡人数统计

由图1.1与图1.2可知，拥挤踩踏事件常见的发生场所主要集中在校园（23.33%）、宗教场所（22.67%）、体育场所（15.33%）和公众集会（14.00%）等，其中宗教场所（50.14%）、体育场所（19.67%）和公众集会（12.26%）等场所的踩踏事件有较高的伤亡发生率。

综上所述，一旦人群聚集场所发生事故、突发事件或骚乱时，由于空间有限而人群又相对集中，人群的疏散流动被局限，人群中又普遍存在着从众心理及恐慌心理等因素，人群的疏散效率很容易因此而显著降低，往往促使事故后果进一步扩大，如导致人员伤亡、踩踏事故等。因此，对人员疏散时面临的特殊事故场景、心理行为及疏散规律特征进行研究分析，为公共场所疏散设计的优化、安全疏散应急管理对策的制定、突发重大事故的处置等提供理论支撑和指导。

我国已有大量研究人员针对不同的公共场所类型进行仿真工作，如地铁[2-11]、体育场馆[12-21]、商业建筑[22-31]、高层建筑[32-41]、校园[42-51]等。其中：

陈立林、罗恩民等人[52]将典型的地铁站火灾作为研究背景，利用FDS软件对地铁火车站各类场景下火灾情况下的烟气蔓延进行分析，再依此建立地铁站人员疏散模型，选取12中不同场景进行人员疏散行为的模拟和分析，同时对出现概率最大的危险场景进行进一步地优化分析；

曹爱春、杨晓艇等人[53]为了使疏散情形更接近现实，在对体育场馆人员疏散特点与规律进行分析研究的基础上，综合考虑个体各内在因素，进而提出了一种基于多Agent和元胞自动机相结合的大型体育场馆人员疏散模型；

史向鹏[54]以重庆某高层办公建筑为例，开展了人员疏散问卷调查了解对疏散行为具有影响的三个要素：建筑内人员特性、人员对建筑的熟悉程度以及人员疏散能力；同时对建筑楼层布局进行实地调研，最后采用数值模拟等方法，研究了不同火灾场景的疏散策略；

孙敏[55]以大型购物超市类建筑为研究对象，在所构建的模型中预设多种不同工况的火灾场景，并利用模拟软件FDS对火灾过程进行计算分析，模拟得出超市火灾蔓延的规律，重点分析探讨火灾对人产生致死或致伤的关键时刻在时间与空间的变化规律。

孙凯[56]在现有行人疏散模型的基础上，考虑学生实际的行为特征和太原科技大型典型学生聚集场所的建筑结构特点，设置学生运动规则，分别模拟了教室、教学楼、食堂三种不同情景的人员疏散过程，并探讨了影响行人疏散时间的有关因素。

体育赛事的多样性使得体育场馆需具备多功能特性，这也使得它与其他公共建筑相比具有复杂的空间结构特征，因此对场馆的安全疏散设计也提出了更高的要求。本课题将采用大型体育场馆作为仿真场景设计的参考原型，对可能发生的安全问题的预测与防范提供理论支持，以降低大型体育场馆中的疏散风险。

1.2 国内外研究现状

5.4.29 1.2.1 人员疏散行为研究现状

1. 疏散人员状态

紧急情况下的人员疏散过程是一个涉及众多因素交互作用的复杂过程。紧急状态下的人员行为不仅受到建筑结构特征和环境因素的影响，而且与人员自身状态特征也有很大关系。

1) 个体年龄

年龄是影响人员疏散行为的特征因素之一，不同年龄段的个体无论是在对环境的感知、经验上的决策或是行动能力等方面，都存在着不同程度的差异。青年人遇到强烈刺激或环境急剧变化时的应激能力较强，疏散较快且在疏散时可能会出现因急于疏散而拥挤、推搡他人的现象；老年人身体机能逐渐衰退，对各种环境适应性不断减弱，应急反应能力变慢，这都导致老年人疏散缓慢，同时疏散时较容易受到拥挤而出现伤亡事故。

指 标
剽窃文字表述
<ol style="list-style-type: none"> <li>一方面，城市化进程的加快，使越来越多的建筑内以及社会活动中人口的过分集中，导致了拥挤踩踏、火灾等群体灾难性事故的风险性与逐步增大。</li> <li>下的人员疏散过程是一个涉及众多因素交互作用的复杂过程。紧急状态下的人员行为不仅受到建筑结构特征和环境因素的影响，而且与人员自身状态特征也有很大关系。</li> </ol>

17. 201511162445_石琼玉_第17部分		总字数：8875
相似文献列表    文字复制比：27% (2396)    剽窃观点：(0)		
1	交通流模型的研究 付传技(导师：汪秉宏) - 《中国科学技术大学博士论文》 - 2007-04-01	4.8% (427) 是否引证：否
2	货运专线重载运输组织及运行图仿真 亢红霞(导师：钱勇生) - 《兰州交通大学硕士论文》 - 2008-11-01	4.6% (404) 是否引证：否
3	基于元胞自动机的行人和机动车相互干扰机理研究 孙泽(导师：贾斌) - 《北京交通大学硕士论文》 - 2012-12-01	4.5% (403) 是否引证：否
4	电阻点焊熔核腐蚀研究 董建涛(导师：罗震) - 《天津大学硕士论文》 - 2011-12-01	4.5% (399) 是否引证：否
5	基于元胞自动机仿真的高速公路移动瓶颈研究 李炎(导师：黄中祥) - 《长沙理工大学硕士论文》 - 2009-05-16	4.2% (375) 是否引证：否
6	基于元胞自动机的机场道面交通仿真模拟 孙晟(导师：衡红军) - 《中国民航大学硕士论文》 - 2009-03-29	4.2% (373) 是否引证：否
7	基于元胞自动机的行人流仿真模型研究 岳昊(导师：邵春福) - 《北京交通大学博士论文》 - 2009-01-01	4.1% (363) 是否引证：否
8	基于元胞自动机的股票市场投资策略演化研究 李雪岩(导师：孙有发) - 《广东工业大学硕士论文》 - 2012-04-18	4.0% (357) 是否引证：否
9	基于元胞自动机的交通流仿真及其与信号预测控制相结合的研究 王宏(导师：周永华) - 《北京交通大学硕士论文》 - 2009-05-01	4.0% (356) 是否引证：否
10	安全驾驶行为的交通流建模与仿真 郑亮(导师：马寿峰) - 《天津大学硕士论文》 - 2010-06-01	4.0% (351) 是否引证：否
11	面向资源约束的信号交叉口公交优先仿真建模 张丽莉(导师：魏丽英) - 《北京交通大学硕士论文》 - 2012-05-01	3.9% (343) 是否引证：否
12	基于遥感影像的城市建成区扩张与用地规模研究 李爱民(导师：李广云) - 《解放军信息工程大学博士论文》 - 2009-10-15	3.8% (333) 是否引证：否
13	突发事件下的群体行为模拟研究 蔡云(导师：汪蕾) - 《浙江大学硕士论文》 - 2011-12-01	3.7% (332) 是否引证：否
14	基于元胞自动机和模糊控制的微观交通仿真研究 赵磊(导师：唐慧佳) - 《西南交通大学硕士论文》 - 2010-05-01	3.6% (322) 是否引证：否
15	元胞自动机交通流模型的相变特性研究和交通实测分析 郭四玲(导师：薛郁) - 《广西大学硕士论文》 - 2006-05-01	3.5% (315) 是否引证：否
16	基于元胞自动机理论的双车道环岛交通流特性研究 刘芬芳(导师：史峰) - 《中南大学硕士论文》 - 2008-11-01	3.5% (312) 是否引证：否
17	元胞自动机交通流模型的数值模拟和相变特性分析 王兵(导师：朱昶胜) - 《兰州理工大学硕士论文》 - 2013-04-22	3.4% (300) 是否引证：否
18	面向网格计算的按需入侵检测模型及关键技术研究 陈荣(导师：高济) - 《浙江大学博士论文》 - 2005-06-01	3.3% (296) 是否引证：否
19	大型场馆人员疏散仿真研究 黄希发(导师：王科俊) - 《哈尔滨工程大学博士论文》 - 2009-11-01	3.3% (296) 是否引证：是
20	交通流复杂动态特性的元胞自动机方法研究	3.3% (294)

	张炜炜(导师: 姜锐;吴清松) - 《中国科学技术大学硕士论文》 - 2009-05-01	是否引证: 否
21	基于元胞自动机的体育场单向行人流仿真研究 朱丽(导师: 贾洪飞;王继领) - 《吉林大学硕士论文》 - 2012-05-01	3.2% (280) 是否引证: 否
22	基于元胞自动机的交通系统建模与模拟(精装)txt免费下载_读后感_在线阅读 - 《网络 ( <a href="http://www.reader8.c">http://www.reader8.c</a> )》 - 2010	3.0% (265) 是否引证: 否
23	城市交通系统动力学特性研究——带信号灯控制的一维元胞自动机模型研究 赵路敏,向宇 - 《广西工学院学报》 - 2005-12-30	2.9% (257) 是否引证: 否
24	基于元胞自动机模型的交通系统微观建模与特性研究 李新刚(导师: 高自友;贾斌) - 《北京交通大学博士论文》 - 2009-12-01	2.7% (237) 是否引证: 否
25	肿瘤生长过程形态模拟及相关技术研究 甘建红(导师: 陈锦雄) - 《西南交通大学博士论文》 - 2009-05-01	2.7% (237) 是否引证: 否
26	基于多智能体的地铁站台乘客紧急疏散模型 李芳(导师: 陈绍宽) - 《北京交通大学硕士论文》 - 2015-03-01	2.6% (235) 是否引证: 否
27	列车追踪运行与节能优化建模及模拟研究 付印平(导师: 高自友;李克平) - 《北京交通大学博士论文》 - 2009-03-01	2.6% (228) 是否引证: 否
28	基于CAS理论的区域性矿山复杂采选系统匹配研究及应用 陈俊智(导师: 庙延钢;侯克鹏) - 《昆明理工大学博士论文》 - 2008-10-01	2.2% (194) 是否引证: 否
29	制度下行为模拟的Agent与CA方法比较研究 刘春霞;孙绍荣; - 《数学的实践与认识》 - 2010-01-23	2.1% (185) 是否引证: 否
30	基于多Agent的群体行为混合仿真模型研究 张文静(导师: 马峻) - 《首都经济贸易大学硕士论文》 - 2014-03-01	2.0% (174) 是否引证: 否
31	体育场馆人员疏散仿真研究 尤艳艳(导师: 赵晓安) - 《河北工业大学硕士论文》 - 2010-11-01	1.8% (161) 是否引证: 否
32	复杂建筑结构下人员疏散时间控制研究 袁茜(导师: 胡汉华) - 《中南大学硕士论文》 - 2014-04-01	1.7% (148) 是否引证: 否
33	基于博弈论的人群疏散问题仿真 李宗泽(导师: 乔海燕) - 《中山大学硕士论文》 - 2014-06-30	1.6% (143) 是否引证: 是
34	基于网格智能体的地铁站行人流模拟研究 楼能(导师: 张健钦;杨伯钢) - 《北京建筑大学硕士论文》 - 2013-07-01	1.3% (118) 是否引证: 否
35	基于计算机模拟的突发事件下人群行为对比研究 孟博;邵理云;刘茂;王丽; - 《中国公共安全(学术版)》 - 2011-03-15	1.0% (90) 是否引证: 否
36	房地产仿真模拟的系统动力学与多智能体建模的比较研究 任思蓉;孙绍荣; - 《金融经济》 - 2013-05-25	1.0% (89) 是否引证: 否
37	基于行为心理的高层住宅建筑疏散空间环境研究 刘鑫(导师: 王亮;党杰) - 《吉林建筑大学硕士论文》 - 2014-06-01	1.0% (89) 是否引证: 否
38	森林生态系统生产力适应性管理模型 赵庆建;温作民;蔡志坚; - 《生态经济》 - 2010-04-01	0.7% (65) 是否引证: 否
39	火灾中人员的行为及其模拟计算方法的研究 田玉敏; - 《安全与环境学报》 - 2006-02-25	0.6% (57) 是否引证: 否
40	三体海峡客滚船总体设计研究 王云(导师: 韩端锋) - 《哈尔滨工程大学硕士论文》 - 2011-01-01	0.6% (57) 是否引证: 否
41	基于Agent模型的汽车车身多学科设计优化研究 孔凡国; - 《机械设计与研究》 - 2006-12-20	0.6% (53) 是否引证: 否
42	异构系统协同性及方法研究 孙兴中;陈阳;郑家民;邓宏斌; - 《信息安全与技术》 - 2011-09-10	0.6% (51) 是否引证: 否
43	基于多Agent和Web服务的企业异构集成系统的研究 付向东;王焕民; - 《微计算机信息》 - 2010-12-25	0.5% (45) 是否引证: 否
44	高层住宅建筑火灾时人的行为心理分析 刘鑫;王亮; - 《低温建筑技术》 - 2013-11-28	0.4% (34) 是否引证: 否
原文内容		

## 2) 个体性别

性别也是影响人员疏散行为的要素之一。个体性别的差异,使得个体的身体机能存在不同。男性个体一般身体素质较为强壮



，在紧急疏散时，更能承受较大的来自人群的拥挤力。而女性个体则相对较弱些，能承受的拥挤力与男性个体相比也较小。另外，有结果显示，当处于同一环境下，男性个体与女性个体在面对同样的问题时表现出不同的决策倾向。例如，紧急情况下，女性在人群中更容易产生不安全感，比男性有较强的紧张心理、恐惧心理和从众心理；男性更容易做到就近逃生。

### 3) 个体能力

人员疏散行为同时还受个体能力的影响。个体能力主要表现为拥挤其他个体或是承受其他个体拥挤的能力。当某个体的拥挤力比周围其他个体的拥挤力强时，该个体在疏散时则比其他个体更有优势，反之则处于劣势地位。在紧急情况下，人员的耐性普遍降低，而在这时，个体能力强的人竞争意识更为明显，更容易主动发生超越、甚至拥挤、推搡行为，而能力较弱的人在此种情况下疏散效率会受到影响，甚至出现伤亡。

## 2. 疏散状态下个体的行为规律

尽管疏散状态下每个行人都有其自身的偏好和目标，但是行人只有在密度很小的时候才能够进行自由的运动，否则他们的运动将会受到其他行人排斥行为的影响，导致一些自组织现象的产生。对行人自组织现象进行研究和观察，可以总结出[57]：

1) 即使行进方向很拥挤，但是人们一般不愿走弯路，行人认为弯路降低了他们到达目的地的努力。有证据表明，在拥挤的情况下，行人会选择到达目的地的最快路径，但不是最短路径，他们的路径类似于多边形。

2) 只要不是需要准时到达目的地，行人愿意以自己期望的速度行走（即最小能量消耗）。人群的期望速度呈高斯分布，近似平均值为1.34m/s，标准偏差为0.26m/s，但平均速度会受到行人性别、年龄、目的以及周围环境等的影响。

3) 行人之间以及行人与边界（如街道、墙和障碍物）之间会保持一定的距离，这个距离会随行人密度的增加以及行人行走的焦急程度的增加而减小。在某些有特殊吸引的区域（如舞厅），人群密度会增加。另外，人群密度会随着速度的增加而减小。

除了上述行人动力学自组织现象外，在发生突发事件后，将会产生一些特殊的心理反应，如恐惧、冲动、侥幸心理、从众心理等，从而在人员疏散时会出现一些特殊的现象：

### 1) 恐慌行为

当环境发生突发事件时，会给疏散人群带来一定的心理压力，如果心理调节能力过差或来不及心理调节，那么一些个体会出现不理智的行为控制，如恐慌踩踏事件这一悲惨的群体行为通常会造成人员的伤亡，以及趋向于盲目行动、瓶颈处人群混乱等其他典型的恐慌行为特征。图1.3为Helbing利用社会力模型对恐慌状态下人群疏散的模拟结果[58]。

图1.3 恐慌状态下人群通过一个狭隘出口的疏散模拟

### 2) 从众行为

在人群聚集的状态下，尤其是有火灾、突发事件发生等紧急情况下，人们由于不安和恐慌可能会不知不觉地采取与周围群体相同的态度和行为，即从众心理，具体表现为盲从、随从、遵从或顺从，其逃生行为与平时的运动习惯甚至疏散演习有较大差别。“从众”行为具有非理性，它通常会导致严重的后果，如过分拥挤、疏散速度降低等，最终导致死亡人数增加或损失剧增的严重后果。图1.4为Ruggiero Lovreglio等人对疏散人员在出口选择时从众行为的模拟结果[59]。

图1.4 出口选择时从众行为的模拟

### 3) 亲情行为

亲情行为也是一种常见的现象。通常表现为在准备疏散之前各家庭成员先聚集到一起，再共同开始疏散，或者靠近出口处的家庭成员滞留在原地直到亲人到达，有时候甚至会出现个体重返场所内帮助或寻找家庭成员现象等。图1.5为Fasheng Qiu等人对人员疏散过程中亲情行为的模拟结果[60]。

图1.5 疏散过程中的亲情行为模拟

#### 4) 小群体行为

在一个由很多人所组成的群体当中，又可以分为一些小的群体，如以家庭、同学或同事、恋人或朋友等关系为纽带的小群体。这些小群体有一个共同点，在人员疏散过程中，一个小群体往往会趋向一起移动，选择相同的紧急出口或相同的逃生路线。一般认为，处在同一个小群体中的各个成员在行动过程中会调节自己的移动速度，以保持该群体的整体运动速度。图1.6为Song Xu和Henry Been-Lirn Duh对多个小群体疏散的模拟结果[61]。

图1.6 恐慌状态下人群通过一个狭隘出口的疏散模拟

图1.6中，椭圆形代表单个个体，横线连接的是以两人为单位的小群体。

#### 5.4.30 1.2.2 人员疏散模型研究现状

人员疏散模型可以按照宏观模型和微观模型进行划分。在宏观模型中，忽略个体间的差异性，将模拟人群看成一个整体，人群可以类比为管道中的水流，系统的状态通常用人员密度、特定截面上的人流量来表示；在微观模型中，考虑群体的异质性，即每个行人个体被单独表示，这种方法可以引入个体特性从而将人群划分为不同类型。

##### 1. 宏观模型

该类模型基于这样的观点：人群的运动与流体和气体类似，因此不考虑人与人之间的相互作用，其优势是它们可用来做粗略的分析使用。其原理是[62]：

流动容积=平均速度×平均密度

此模型的基础是以关于密度和流动关系的数据作为补充的连续方程。

宏观模型关于“人群的运动与流体和气体类似”的前提是存在明显缺陷的。因为，流体和人群之间还是有本质区别的。人群动力学中包含这样的事实，即人群不完全遵守物理定律。因为人可以选择自己的方向，能够随意开始和停止，因此，人群的运动不完全遵守能量守恒定律。

##### 2. 微观模型

微观模型主要包括以下几种。

###### 1) 社会力模型（Social Force Model）

该模型于20世纪90世纪由Helbing等人提出，模型表明，每个人都作用着社会力，即人与人之间、人与障碍物之间及人与周围环境之间的相互作用，这些力的综合作用决定了一个人的速度和加速度等[63]。

该模型能够很好地模拟人员疏散行为特征和现象以及各因素对疏散行为影响。Helbing等随后又在此基础上进行了一系列模型改进和特定场景的仿真研究，再现了一些常见的人群自组织现象，包括人员的双向运动情况及在通过通道“瓶颈处”时通行方向上震荡的变化[63]、行人水平通过十字路口的时期与在中央形成暂时的环岛的时期交替发生等[64]；另外还模拟了人员在紧急情况下的一些行为现象：恐慌状态下出口处拥挤加剧导致的“越快越慢”现象[58]、大规模人群高度聚集下出现的“停-走”波动和“人流湍流”现象等[65]。

但由于该模型使用较复杂的微分方程求数值解方法，求值依赖于边界条件，当计算规模增大时所需的仿真时间呈幂级数增长，使得仿真效率降低。因此，该模型在工程上应用比较少。

###### 2) 元胞自动机模型（Cellular Automata Model）

元胞自动机是在均匀一致的网格上由有限状态的变量（即元胞）所构成的离散动力系统。模拟人员疏散时，每个非实体格点（实体格点是指被墙壁、障碍物所占据的格点）最多被一个行人占据，或为空。而且，行人在离散的时间步上（在元胞自动机模型中时间是离散的，将最小的一个时间单元称为一个时间步）按照局部规则更新其位置。在模拟过程中，所有的元胞将同时

发生变化。在时刻 $t+1$ 时，某个元胞的状态是由该元胞在时刻 $t$ 的状态以及与其相距不超过邻域半径 $r$ 的若干其他元胞的状态决定的。图1.7为Ren-Yong Guo基于元胞自动机建立的人员疏散模型仿真结果[66]，研究了空间离散程度与步行速度对出口附近人群分布形状的微妙影响。

图1.7 各参数条件下的出口附近人群分布形状

### 3) 自主体模型 (Agent Model)

自主体模型将疏散人员抽象为具有自适应能力和智能性的Agent个体，从环境与其他Agent获取信息进而采取一系列自主行动。例如，于洋[67]综合考虑人员性别、年龄等多种个体属性因素，以及船上特殊环境对人员疏散决策的影响，建立起基于Agent的舰船人员疏散模型；陈迎欣[68]提出三种Agent（包括领导者、普通者和惊慌者），构建了多Agent交互协作模型，并以某地铁站为仿真空间对象进行了疏散模拟。

由于自主体模型中的Agent是具有自治性、社会能力、响应性、能动性的智能实体，因此能够更好地体现人员疏散过程中的一些行为特征细节，体现人的智能性，自主体模型体现了人员疏散仿真领域朝向智能化的发展方向和趋势，其发展前景空间较为广阔。

### 1.3 课题的研究意义和研究内容

随着计算机技术的迅速发展，人员疏散的模拟研究也取得了众多进展。人员疏散的模拟研究之所以广泛应用，主要有两方面原因：一方面是在建筑的设计阶段，就需要对建筑结构的优劣做出评判，基于疏散模型的模拟分析，可以比较几种不同建筑设计方案，选取最佳方案，而若建成后再评估，一旦设计不合理而需改建时，会造成极大的浪费；另一方面是基于实验的研究极其耗费人力、财力和物力，且大规模的人员疏散尤其是紧急条件下的疏散实验也存在一定的危险，借助计算机模拟手段，可以系统地研究特定场景下的行人规律和人员疏散问题。

本文将建立基于Agent与元胞自动机的人员疏散仿真模型，有效结合两者的优点，着重描绘个体与周围个体、个体与周围环境的交互影响，并从社会学、心理学、行人动力学等方面研究分析疏散环境下个体行为的影响因素，然后利用数学方法将定性模型转化为定量模型，同时加入社会因素和心理因素（拥挤、恐慌等），建立突出个体异质性（年龄、性别、能力）的疏散模型，最后应用计算机技术开发仿真软件进行仿真实验。本文旨在以尽可能简单的规则来模拟再现真实情况下的疏散现象，总结分析特定场景下的疏散规律，为大型公共场所、建筑物的布局设计和应急疏散预案的制定提供参考。

基于以上所要研究内容，本文章节安排如下：

第一章首先介绍了课题的研究背景，人员疏散行为的研究现状，及现下用于模拟疏散行为的一些模型研究，包括宏观模型和微观模型，最后明确提出本课题的研究方法。

第二章对人员疏散模型的建模方法做了简单的介绍，包括Agent的建模方法和元胞自动机的建模方法，比较两者的特点和异同，然后研究并建立了两者相结合的建模方法与仿真框架，对个体Agent、环境空间和个体行为三部分建模分别进行了详细的描述。

第三章通过分析拥挤疏散情况下Agent的行为特点，将疏散场景中的疏散个体分为4种类型，并依据个体类型分别设置对拥挤疏散有重要影响的相关参数，构建个体拥挤疏散模型的框架，实现其各模块的建模方法并利用计算机仿真建立了个体拥挤疏散模型，观察疏散情形并得出相应的疏散规律。另外，该模型的建立也为后续模型的研究奠定了基础。

第四章考虑疏散中的个体恐慌行为，对恐慌状态下的个体心理进行定量描述，提出“恐慌因素”相关概念及计算方法，并引入至上章的拥挤疏散模型从而建立了个体恐慌疏散模型，通过仿真观察现象，分析恐慌疏散行为特性以及进一步深入理解和总结人员疏散的特点。

第五章在恐慌疏散模型的基础上加入指挥的思想，建立了个体指挥疏散模型，模拟出在恐慌疏散情况下，通过指挥解决个体视野局限性造成拥挤循环问题的疏散情形，并通过与第三、四章的疏散数据对比，论证该指挥思想可以引导个体进行安全合理疏散人员。

第六章总结了论文的主要研究内容和研究成果，并对论文下一步工作进行了展望。



由于构成疏散行为主体的人群是个典型的复杂系统，而基于Agent的模型能将建模对象抽象化，描述个体的行为及其与周围环境之间的交互关系；同时元胞自动机模型简单易操作的特性也十分值得借鉴，因此本文采用基于Agent与元胞自动机的模型对人员疏散进行建模。

## 2.1 人员疏散模型的建模方法

### 5.4.31 2.1.1 基于Agent的建模方法

基于Agent的建模方法是生成论的研究方法，它建立在归纳逻辑之上，所用模型是由计算机程序表示的，根据模型让系统在计算机上产生、演化，让宏观整体行为由下而上、自然而然的涌现出来，使研究者能够直观地看到系统的生成和演化过程，进而从观察到的现象中总结规律，提炼知识，形成洞见，最后完成理论的建立。基于Agent的建模方法适用于解决具有模块化、分散化、可变性、不良结构和复杂性特征的问题。

Agent是一个能够与外界自主交互，并拥有一定的知识和推理能力，能够独立完成一定任务的具有一定社会性的实体。从应用角度看，Agent可以分为移动Agent、界面Agent、合作Agent、信息Agent、控制Agent、路口Agent、区域Agent、协作Agent、反应Agent等。不同类型的Agent，基本结构相同，只是某些功能得到不同强化。

学者倪建军在参考多种Agent的结构模型后，提出了一种适用于复杂系统并且具备较强通用性的Agent结构，这一结构在目前诸多有关Agent的研究中，是比较全面而且清晰的，如图2.1所示[69]。

图 2.1 通用Agent结构

从图2.1可以看到，Agent结构中的重要部件包括：协调控制器、反应器、规划器、决策器、学习器、感知器及效应器等。通过提供一种形式化的定义，就能具体实现和用于系统中了。

在一个复杂系统中，系统整体通常可由许多的Agent按照一定的规则进行结合而成，因此，基于多Agent的复杂系统建模方法为复杂系统的研究提供了新方法。该方法是利用Agent之间的局部连接准则以及局部细节模型，构建出描述复杂系统整体的模型，并借助计算机技术对从小规模到大规模系统的过渡实现等方面的问题进行研究。在多Agent系统中，各Agent成员的活动是自治和独立的，其自身的目标和行为不受其他Agent成员的限制，当各成员Agent的目标和行为之间出现矛盾和冲突时，通过竞争或磋商等手段协调和解决问题。

### 5.4.32 2.1.2 基于元胞自动机的建模方法

元胞自动机 (cellular automata或cellular automaton，简称CA) 实质上是定义在一个由具有离散、有限状态的元胞组成的元胞空间上，按照一定的局部规则，在离散的时间维度上演化的动力学系统。在元胞自动机中，空间被一定形式的规则网格分割为许多单元。这些规则网格中的每一个单元都称为元胞 (cell)，并且它只能在有限的离散状态集中取值。所有的元胞遵循同样的作用规则，依据确定的局部规则进行更新。大量的元胞通过简单的相互作用而构成动态系统的演化。不同于一般的动力学模型，元胞自动机不是由严格定义的物理方程或函数确定，而是由一系列的演化规则构成。元胞自动机相当于传统物理学中近距离作用的“场”，是场的离散化模型。元胞自动机的基本思想是利用大量的简单元件，通过简单的连接和简单的运算规则，在时空中并行地持续运行，以模拟出复杂而丰富的现象[70]。

元胞、元胞空间、邻域以及规则是元胞自动机四个最基本的组成单位部分，另外还应包括元胞的状态。也就是说，元胞自动机可以视为由一个元胞空间和定义于该空间的变换函数所组成，如图2.2所示。

图 2.2 元胞自动机构成示意图

将元胞自动机用数学表达式进行表述，如式(2.1)所示，即

$$(2.1)$$

式中，为元胞自动机系统；代表元胞空间；为空间维数；代表元胞有限的离散的状态集合；表示中心元胞及其邻域内所有元胞的组合；代表状态转换函数，即元胞的演化规则。

#### 5.4.33 2.1.3 Agent与元胞自动机相结合的建模方法

在探讨Agent方法与元胞自动机方法的结合之前，现将两者的可结合点与不同点总结如下[71]。

Agent方法与元胞自动机方法的相同之处：

1. 建模方式相同。Agent与元胞自动机都是采用由下到上的建模方式，由个体到整体的视角，将系统的复杂性视为个体状态的涌现。

2. 开放性强。Agent与元胞自动机都具有良好的开放性，这使得它们可以灵活地应用于不同的领域，与其他技术相互结合，相互完善。

3. 并行运算。Agent与元胞自动机都是将工作分成离散的部分，有助于解决大型复杂的计算问题。

4. 都有规则驱动的特点。无论是Agent建模中的智能化行为，还是元胞自动机的运行，其实都可以看作是由某些规则驱动的。

Agent方法与元胞自动机方法的不同之处：

1. 系统结构不同。Agent个体构成的系统层次分明，而元胞自动机系统则是由同质的元胞构成的一个没有层次的群体。

2. 有无角色区分。Agent的个体可以分为许多角色，并且具有自治性；而元胞自动机就比较单一且具有同质性。

3. 演化规则不同。首先，元胞自动机的演化规则是统一的，而Agent由于有角色的区分继而不同的角色具有不同的演化规则；其次，对于Agent而言，可能在不同的空间位置上会执行不同的演化规则；第三，元胞自动机的演化规则是单层的，而Agent的行动规则则是多层次并且能够相互影响的。

4. 个体影响因素不同。在元胞自动机的演化过程中，个体元胞一般只受到局部元胞和自身状态的影响，而Agent的相互影响可以是不局限于某种邻域范围以内的，而且还要考虑个体与环境的相互作用。

5. 可移动性不同。元胞自动机的个体位置是不会更改的，而Agent个体在空间中是可以移动的。

基于以上对两者的异同分析，可以将 Agent 与元胞自动机相结合实现对人员疏散系统的建模：采用 Agent 技术着重对个体疏散行为进行刻画，利用对Agent规则的优化和智能程度的提升以改变仿真的运行效果；采用元胞自动机技术简化建模工作，降低计算机程序的实现和运算难度以提高仿真效率。

目前，结合 Agent 和元胞自动机进行人员疏散的仿真已经较为普遍，何招娟[72]分析了人员疏散复杂的特性，基于Agent的元胞自动机建模进行仿真，以某博览中心为例，运用了数学统计方法对其模拟结果进行分析；李宗泽[73]采用基于元胞自动机框架的Agent模型（Agent-Based Model），建立了以博弈论为基础的个体决策和行为建模模型，并使用Swarm仿真软件对模型进行了实现和验证，得到了与社会心理学相关理论相互支撑的结论。

### 2.2 人员疏散模型的仿真框架

根据Agent与元胞自动机相结合的建模方法，可以建立人员疏散模型仿真的总体流程框架，如图2.3所示。

图2.3人员疏散模型的仿真框架

由图2.3可知，仿真框架主要由4大部分组成：

1. 初始化模块

包括对 **环境空间和人员信息的初始化**。其中，**环境空间借鉴元胞自动机的思想**实现物理空间的离散化，对真实疏散场所进行网格划分；人员信息的初始化则是将疏散人员抽象为个体Agent，并对Agent的数量、种类以及每个Agent的属性信息进行初始设置。

2. 感知模块

感知模块是Agent与外部世界交互的接口，Agent通过该模块感知环境以及其他个体Agent，获取例如场所的出口位置，视野范围内障碍和Agent个数等信息，并将信息送至决策模块。

3. 决策模块

感知到的信息会影响到自身的状态，如可能会被行为能力比自身强的Agent拥挤以致暂时（或永久性）失去行动能力。每个Agent通过分析自身的状态属性，结合自己特有的疏散原则（知识经验），进而做出疏散决策，并交给相应的模块执行。

4. 行为响应

根据疏散策略做出行为响应，移动到预期的元胞目标，在所有Agent移动完毕后，更新全局信息。

2.3 基于Agent与元胞自动机的人员疏散系统建模

5.4.34 2.3.1 个体Agent建模

作为疏散的行为主体，个体Agent的研究是进行疏散研究的首要目标。基于对个体特征的研究，每个Agent的属性信息定义如下：

图2.4 个体Agent属性定义

其中，个体的标记符，即为个体的特征属性，如式(2.2)所示。

= ( , , , , ) (2.2)

主要由能力类型（个体的行为能力类型，依据年龄和性别划分），竞争能力（个体拥挤其他个体的能力），承受能力（个体被他人**拥挤时的最大承受能力**），**承受极限（个体可以承受的拥挤超过承受能力的最大次数）**，疏散原则（按照个体特征赋予Agent的知识经验）。

坐标 (X,Y) 是指个体的网格坐标；(x,y) 指个体所在网格中点的物理坐标，用于数值计算。和分别表示个体当前选择的**目标疏散出口**和**下一步移动方向**。

Agent的知识经验是按照个体特征赋予的，以参数形式表示，定义如下：

( , , )

表2.1 Agent知识经验的表示

参数说明

代表距离因素对个体决策的影响；

值越大，个体更换出口的可能性越小。

代表人员和障碍个数因素对个体决策的影响；

值越大，个体越优先考虑向视野内人员和障碍个数少的方向疏散。

代表人员和障碍密度因素对个体决策的影响；

值越大，个体越优先考虑向视野内人员和障碍密度小的方向疏散。

5.4.35 2.3.2 环境空间建模

本文借鉴元胞自动机模型中元胞空间几何划分的方法，将环境空间离散化成由许多元胞（cell）组成的网格空间。每个元胞可以容纳一个 Agent 或者障碍，元胞包含三种状态：空；被一个 Agent 占据；被一个障碍占据。按照一定的规则，网格中的每个元胞和其上 Agent 的状态不断发生变化，即每个 Agent 根据决策可以选择从当前元胞移动到其邻域内状态为空的元胞，或者停留在当前元胞。

通常地，二维元胞自动机最为常见，而二维元胞空间可按照三角、四方或六边形三种网格进行排列，如图2.5所示。

(a) 三角网格 (b) 四方网格 (c) 六边形网格

图2.5 二维元胞自动机的三种几何划分

以上三种元胞空间的几何划分，在模型构建时各有优缺点。

指 标
剽窃文字表述
<div>1. 2) 个体性别</div> <div>性别也是影响人员疏散行为的要素之一。个体性别的差异，使得个体的身体机能存在不同。男性个体一般身体素质较为强壮，在</div> <div>2. 某个体的拥挤力比周围外界其他个体的拥挤力强时，该个体在疏散时则比其他个体更有优势，反之则处于劣势地位。在紧急情况下，</div> <div>3. 分布，近似平均值为1.34m/s，标准偏差为0.26m/s，但平均速度会受到行人性别、年龄、目的以及周围环境等的影响。</div> <div>4. 环境发生突发事故时，会给疏散人群带来一定的心理压力，如果心理调节能力过差或来不及心理调节，那么一些个体会出现不理智的行为控制，如恐慌踩踏事件这一悲惨的群体行为通常会造成人员的伤亡，</div> <div>5. 从众”行为具有非理性，它通常会导致严重的后果，如过分拥挤、疏散速度降低等，最终导致死亡人数增加或损失剧增的严重后果。</div> <div>6. 往往会趋向一起移动，选择相同的紧急出口或相同的逃生路线。一般认为，处在同一个小群体中的各个成员在行动过程中会调节自己的移动速度，以保持该群体的整体运动速度。</div> <div>7. 人员疏散过程中的一些行为特征细节，体现人的智能性，自主体模型体现了人员疏散仿真领域朝向智能化的发展方向和趋势，</div> <div>8. 生成论的研究方法，它建立在归纳逻辑之上，所用模型是由计算机程序表示的，根据模型让系统在计算机上产生、演化，让宏观整体行为由下而上、自然而然的涌现出来，使研究者能够直观地看到系统的生成和演化过程，进而从观察到的现象中总结规律，提炼知识，形成洞见，最后完成理论的建立。</div> <div>9. Agent是一个能够与外界自主交互，并拥有一定的知识和推理能力，能够独立完成一定任务的具有一定社会性的实体。从应用角度看，Agen</div> <div>10. 方法。该方法是利用Agent之间的局部连接准则以及局部细节模型，构建出描述复杂系统整体的模型，并借助</div> <div>11. Agent系统中，各Agent成员的活动是自治和独立的，其自身的目标和行为不受其他Agent成员的限制，当各成员Agen</div> <div>12. 所有的元胞遵循同样的作用规则，依据确定的局部规则进行更新。大量的元胞通过简单的相互作用而构成动态系统的演化。不同于一般的动力学模型，元胞自动机不是由严格定义的物理方程或函数确定，而是由一系列的演化规则构成。元胞自动机相当于传统物理学中近距离作用的“场”，是场的离散化模型。</div> <div>13. 元胞、元胞空间、邻域以及规则是元胞自动机四个最基本的组成单位部分，另外还应包括元胞的状态。也就是说，元胞自动机可以视为由一个元胞空间和定义于该空间的变换函数所组成，如图2.2所示。</div> <div>14. 方式，由个体到整体的视角，将系统的复杂性视为个体状态的涌现。</div> <div>2. 开放性。Agent与元胞自动机都具有良好的开放性，这使得它们可以灵活地应用于不同的领域，与其他技术相互结合，相互完善。</div>



15. 系统结构不同。Agent个体构成的系统层次分明，而元胞自动机系统则是由同质的元胞构成的一个没有层次的群体。
16. 演化规则是统一的，而Agent由于有角色的区分继而不同的角色具有不同的演化规则；
17. 二维元胞自动机最为常见，而二维元胞空间可按照三角、四方或六边形三种网格进行排列，如图2.5所示。
- (a) 三角网格 (b) 四方网格 (c) 六边形网格
- 图2.5 二维元胞

18. 201511162445_石琼玉_第18部分		总字数：9134
相似文献列表    文字复制比：12.7%(1158)    剽窃观点：(0)		
1	大型场馆人员疏散仿真研究 黄希发(导师：王科俊)-《哈尔滨工程大学博士论文》-2009-11-01	5.8% (526) 是否引证：是
2	体育场馆人员疏散仿真研究 尤艳艳(导师：赵晓安)-《河北工业大学硕士论文》-2010-11-01	5.7% (522) 是否引证：否
3	基于个体能力差异的人员疏散微观模型研究 黄希发;王科俊;张磊;张莹;-《中国安全生产科学技术》-2009-10-15	1.9% (176) 是否引证：否
4	基于OCR的调查问卷自动识别统计分析系统的开发与与设计 董世超(导师：牛连强)-《沈阳工业大学硕士论文》-2012-01-14	0.4% (41) 是否引证：否
原文内容		

1. 三角形网格的优点是相邻元胞数目相对较少，适用于需要处理复杂边界的应用场景；但是在计算机上表达显示较为困难、复杂，需转换为四方形网格。
2. 与三角形网格不同，四方形网格因其直观简单的特点，在计算机的表达与显示方面存在明显优势；但在模拟各向同性的现象时略有欠缺，例如格子气自动机中HPP模型。
3. 同三角形网格一样，六边形网格在计算机的表达与显示方面存在缺陷；但其优点是易于模拟各向同性的现象，使模型能更加自然而真实。

综上，鉴于四方形网格直观简单、易于在计算机上表达显示的特点，本文采用四方网格的空间划分方法。其中，网格大小应相应于真实尺寸：0.5m×0.5m或0.4m×0.4m[74]，这是个体占据空间的典型尺寸，本文采用0.4m×0.4m的网格尺寸。

### 5.4.36 2.3.3 个体Agent行为建模

个体Agent行为的建模是仿真的关键，建模内容主要包括个体的行动方向、视野范围、疏散出口和方向的选择。

#### 1. 行动方向

个体的移动方向可以用元胞自动机模型中的邻域来表征，邻域即某一元胞状态更新所要搜索的空间域。在一维元胞自动机中，通常以半径来确定邻域，一个元胞半径范围内的所有元胞，均被认为是该元胞的邻域。二维元胞自动机的邻域定义与一维元胞自动机相比较为复杂，但通常有以下几种形式。

- (a) 冯·诺依曼型 (b) 摩尔型 (c) 扩展的摩尔型

图2.6元胞自动机的常用邻域类型

冯·诺依曼型中，一个元胞的邻域为与其上、下、左、右相邻的四个元胞，如图2.6(a)所示；摩尔型中，一个元胞的邻域为与其上、下、左、右、左上、右上、左下、右下相邻的八个元胞，如图2.6(b)所示；将摩尔型邻域的半径扩展为2或者N倍大，即得到所谓扩展的摩尔型邻域，如图2.6(c)所示。

在图2.6中，黑色网格代表中心元胞，灰色网格为其邻域内的元胞。

本文将采用摩尔模型来表征个体的下一步行动方向，每个个体以一定的概率向邻域内的八个网格移动，或原地静止，如图2.7所示。

图2.7 个体的行动方向

## 2. 视野范围

在以往的疏散模型中，通常定义所有疏散个体都具有获取完整的全局信息的能力，能够客观、理性的进行决策，这与个体在现实中的疏散情况是不太相符的：现实中，个体感知到的更多是疏散场所的局部特征信息。因此本文定义了个体的视野范围，反映个体能获取局部信息的区域。

首先，每个个体都预知场所的出口方向和位置，但无法感知到出口附近的完整信息，本文引入视野范围截止点（以下简称为point）的概念：个体当前位置到出口的直线方向上，第N个有个体占据的网格即为point；如果在个体到出口直线上的人员个数小于N，则将出口作为point，本文设定 $N=5$ 。

以个体当前位置 $(x,y)$ 与point分别为起点和终点作向量，再作两条与夹角为 $\theta$ 的直线，则满足网格中心在两条直线内的所有网格组成的区域，即为个体的视野范围，如图2.8所示，本文仿真时，取 $\theta=45^\circ$ 。

图2.8 个体的视野范围

在图2.8中，红色圆点表示当前个体所在网格，红色方格表示point，蓝色方格表示有其他个体占据的网格，黑色方格表示疏散目标（出口）所在网格，灰色区域则为该个体视野范围内的所有网格。

## 3. 疏散出口选择

由Agent的知识经验定义可知，个体在选择疏散出口的决策过程中，主要考虑个体周围的环境因素及其他个体状态因素，包括到出口的距离，视野范围内的人员和障碍个数，人员以及障碍密度。

假设在疏散场所中共有N个出口，每个出口的宽度为n，另设 $i=1,\dots,N$ ， $j=1,\dots,n$ ，表示第N个出口中的第n个网格。

由周围环境因素综合确定目标出口，表达式如下：

(2.3)

则目标出口为 $i^*$ ，在式(2.3)中， $d_i$ 、 $p_i$ 、 $o_i$ 分别代表个体到各个出口的距离，视野范围内的人员和障碍数、人员密度和障碍密度。

## 4. 疏散方向选择

在确定目标出口后，个体将根据此目标选择下一步行动方向，并根据式(2.4)进行位置更新。

(2.4)

式(2.4)中， $t \in \{0, 1, 2, \dots\}$ 表示离散时间索引， $(x_t, y_t)$ 表示个体i在t时刻的位置坐标且 $\theta_t$ 表示个体i由t至t+1时刻的行动方向。由于每一个体在每一时刻有9个可行方向（如图2.7所示），属于如式(2.5)所示的集合。

(2.5)

式(2.5)中， $\Delta x$ 为元胞的长度。可视为控制输入，且在任意t时刻都成立。

个体i在决策行动方向的过程中，除了周围环境因素及其他个体状态因素外，还将考虑个体上一步的行动方向，因此的定义如式(2.6)所示。

(2.6)

其中， $\text{sat}$ 为向量饱和函数，定义如式(2.7)所示， $\theta_{\max}$ 是饱和界限； $\theta_{t-1}$ 为个体i在上一步的行动方向，初始时设 $\theta_{-1} = \theta_0$ ； $\theta_t^*$ 为通过模型计算出的最优或次优行动方向，计算公式分别如(2.8)和(2.9)所示。



(2.7)

根据模型计算可以确定对个体最有效的行动方向，但在现实情况中，个体不一定都以100%的概率选择最优方向，也有一定概率选择次优方向。

最优方向的表达式如下：

(2.8)

次优方向的表达式如下：

(2.9)

## 10 第三章个体拥挤疏散模型

在人群聚集场所发生人群拥挤踩踏事件是非常危险的，特别是空间有限，人群又相对集中的场所，例如室内通道或楼梯、商场、狭窄的街道、商场、球场、影院等，都隐藏着危险，而且此类事故诱因多、危害严重。因此，研究疏散人员在拥挤疏散状态下的微观行为特点、疏散特性有着重要的意义。

### 3.1 模型描述

#### 5.4.37 3.1.1 模型假设

在人群聚集场所内造成人群过度拥挤的风险因素很多，其中主要是由于人群密度大，再加上某些意外的情况，这种过度拥挤的情况会更加严重。例如在沙特阿拉伯的麦加朝觐活动中，几乎每年都有多人被踩死或踩伤，其中主要原因就是由于人群密度过大而造成的人群过度拥挤。

除了人群密度过度这一诱因，在疏散过程中，存在部分个体会在接近出口时，为了抢先疏散而拥挤周围个体，造成拥堵现象，此现象在场所内发生紧急情况时更明显。本模型将对此种拥挤行为进行建模仿真，并假定拥挤行为对人员个体产生的影响主要取决于个体的竞争能力，承受能力和承受极限。拥挤对个体的影响具体体现为：有无造成个体临时性或永久性的停止疏散，即是否被超越或伤亡。

#### 5.4.38 3.1.2 模型框架

在所有个体都遵循上述拥挤疏散规则的基础上，可以建立个体拥挤疏散模型的框架如图3.1所示。

该框架的核心思想是，个体首先依据自身能力计算受到的拥挤并以此对自身状态进行判断；假设没有受到拥挤或者受到的拥挤是在个体可承受范围内时，个体将采取主动疏散方式以实现预期疏散目标，体现为按照正常方式行走，即依照相应公式对目标出口和方向进行计算选择；如受到的拥挤超过承受能力，表现为该个体停留在原地，有可能被其他个体超越；如多次受到的拥挤累计超过承受极限，则出现伤亡，本文定义的伤亡是指个体已丧失行动能力，表现为该个体停留在原地并结束疏散。

图3.1 拥挤疏散模型框架

### 3.2 建模方法

由图3.1的模型框架可知，个体拥挤疏散模型由个体受到的拥挤计算、拥挤超过个体自身承受能力次数的计算、拥挤后个体状态的判断、出口选择计算、方向选择计算和行动这6部分内容组成。而通过第一章的分析得出，人员特征对疏散行为具有不可忽视的影响，因此本文还将对疏散人员按照不同的个体特征进行分类。以下，将依次对各部分进行建模。

#### 1. 疏散人员能力分类

由于疏散人员复杂，个体的能力因性别、年龄及健康状况等不同而存在差异，个体疏散原则也不同，体现为参数  $\sim$  取值的

差异。本文根据个体性别和年龄差异，将个体能力简单的划分为以下4种情况：

2. 个体受到的拥挤计算

1) 根据个体的能力类型，赋予个体竞争能力值

假设个体的竞争能力为  $C_i$ ， $C_i$  的取值范围为  $[1,E]$  的整数集。其中，1代表最小竞争能力值，E代表最大竞争能力值。

根据不同个体的能力类型，以及实际生活的常识，本文根据表3.1对每个个体随机赋予竞争能力值。

表3.1 个体竞争能力赋值比例

竞争能力值

能力类型 1 2 3 4 5 6

青年男性 0 0.1 0.1 0.3 0.3 0.2

青年女性 0.1 0.1 0.2 0.3 0.2 0.1

老年男性 0.1 0.2 0.3 0.2 0.1 0.1

老年女性 0.2 0.3 0.3 0.1 0.1 0

2) 计算个体受到的拥挤

假设个体受到的拥挤为  $H_i$ ，个体受到的拥挤主要来自其周围，因此本文利用邻域来计算  $H_i$ 。假设网格能力为  $N$ ，当网格被个体占据时，此网格的能力为该个体的竞争能力，当网格没有被个体占据（障碍或空白）时，此网格的能力为0。

则个体受到的拥挤的计算公式如式(3.1)所示：

(3.1)

3. 拥挤超过个体自身承受能力次数的计算

设个体的承受能力为  $C_{lim}$ ，承受极限次数为  $L$ ，当个体收到的拥挤  $H_i$  大于个体的承受能力时，增加个体超过承受能力一次，总次数记为  $L$ 。

根据不同个体的能力类型，个体竞争能力值的设置和疏散场所大小，以及实际生活的常识，本文根据表3.2为对每个个体赋予和。

表3.2 承受能力和承受极限次数取值

个体类型

青年男性 20 30

青年女性 15 28

老年男性 18 25

老年女性 15 23

#### 4. 拥挤后个体状态的判断

拥挤后个体状态的判断条件包括：受到的拥挤 $H$ 是否超过自身承受能力，超过承受能力的总次数 $L$ 是否超过极限。

具体判断条件如下：

1)  $H <$

个体为正常状态，按照正常流程继续进行疏散。

2)  $H \geq$ ，且  $L <$

个体为被超越状态，停留在原地。

3)  $H \geq$ ，且  $L \geq$

个体为伤亡状态，失去行动能力，退出疏散仿真。

#### 5. 出口选择计算

##### 1) 到出口的距离

假设场所有  $N$  个出口，每个出口宽度为  $n$ ，分别为个体到每个出口小格的距离，计算公式如(3.2)所示：

(3.2)

式中， $(x,y)$  为个体当前位置坐标， $(i,j)$  为第  $i$  个出口第  $j$  个小格的位置坐标。

##### 2) 到出口的人数和障碍数

设个体到第  $i$  个出口第  $j$  个小格视野区域网格集为  $S_{ij}$ ，则在此集合中，人数及障碍数的总和的计算公式如(3.3)和(3.4)所示：

(3.3)

其中，

##### 3) 到出口的人员密度和障碍密度

同上，假设个体到第  $i$  个出口第  $j$  个小格的视野区域网格集的基数为  $|S_{ij}|$ ，则人员及障碍密度的计算公式如(3.4)所示：

(3.4)

#### 4) 综合确定出口

在实际疏散时，个体目标出口的确定是受到出口距离，及到出口方向上，视野范围内的人数、障碍物及其密度决定，由式(2.3)可确定目标出口。

#### 6. 方向选择计算

在完成目标出口的选择确定后，个体将会选择包含自身在内的 9 个可行方向  $j$  ( $j=1,2,\dots,9$ )，如图 2.7 所示。

##### 1) 到目标出口的距离

由式(2.3)确定出目标出口，坐标为（ $x$ ， $y$ ），则到目标出口的距离的计算公式如式(3.5)所示：

(3.5)

2) 到目标出口的人数和障碍数

设个体的9个可行方向到目标出口的视野区域网格集为，则视野内到目标出口的人数和障碍数总和计算如下所示：

(3.6)

其中，定义分别与式(3.3)中的定义一致。

3) 到目标出口的人员密度和障碍密度

同上，假设个体的9个可行方向到目标出口的视野区域网格集的基数为，则人员和障碍密度的计算公式如(3.7)所示：

(3.7)

4) 综合确定方向

个体将按照一定的概率大小选择最优或次优行动方向，据此作为下一步的行动方向，在本文中，设定个体选择最优行动方向的概率为95%，次优方向的选择概率为5%。

最优方向可由式(2.8)决定，次优方向由式(2.9)。

7. 行动

行动过程即个体移动到目标出口的过程，本模型中个体按照距离及个体能力强弱综合决定移动的次序，若个体到出口的距离和能力大小相同时，随机决定移动的次序。

3.3 疏散仿真

5.4.39 3.3.1 仿真场景

本文第1章中提出，将采用大型体育场馆作为仿真场景设计的参考原型，以期在较为真实的环境中对人员的疏散行为特征细节进行研究与仿真，体育场馆环境一般包括看台区、走廊、休息厅以及供人员进出的出口等，如图3.2所示。

图3.2某大型体育场馆结构图

但由于大型体育场馆结构复杂，人群密度大，不利于对疏散行为特征细节进行观察和研究，因此本文拟在复杂场景的基础上，抽取形象化的小场景如图3.3所示。通过研究局部区域内的人员疏散行为特征细节，并以期再现和解释现实的疏散情形，总结疏散规律。

图3.3小场景结构图

本文基于图3.3的结构图稍作调整，设计了以下两种仿真场景：无障碍且个体随机分布、有障碍且个体规律分布，如图3.4所示。

图3.4中，红色、绿色、蓝色、黑色和灰色的圆圈分别代表青年男性、青年女性、老年男性、老年女性以及伤亡人员。蓝色网格代表座椅（视为障碍），缺口处则代表疏散出口。

图3.4 两种仿真场景

在上述两种场景中，均有基本设置如下：

- 1) 场馆大小为33×33个网格（包括四周的边界），每个网格大小为0.4m×0.4m；
- 2) 在左、右、下三侧设置3个出口，每个出口的宽度为3个网格；
- 3) 初始待疏散人员数量为266人；
- 4) 青年男性、青年女性、老年男性和老年女性的比例为3:3:2:2；
- 5) 右侧出口处预设两名伤亡人员。

5.4.40 3.3.2 参数选定

由第2章的建模方法分析可知，Agent的知识经验是按照个体特征赋予的，以参数 ~ 的形式体现，分别表征在出口和行动方向选择计算时，距离因素、人员和障碍个数因素、以及人员和障碍密度因素对个体决策的影响。因此，参数 ~ 的选定对疏散仿真结果至关重要，疏散仿真参数的选定方法通常为基于问卷调查的收集提取和基于理论的反复试凑。

基于调查问卷的方法是，研究者根据特定的仿真场景和仿真中的不同情况，借鉴心理学和社会学中问卷调查的设计、流程和质量控制等方法，研究人群疏散心理与行为，对调查结果进行统计分析，获取人员的疏散习惯以及决策时的偏好，抽取对个体行为起重要作用的主要因素及其影响度，最后再转化成为疏散模型中的参数取值。

调查问卷可方便快速地了解调查对象的想法和意见，使疏散模型不仅符合理论，更能适应实际的需求，但需要依靠大量的调查数据以获得调查结果的准确性，特点是快速、成本低、信息量大、覆盖面广。但要问题准确地传达给被问者，并需要被问者乐于回答，而且后续的逻辑检查、纠错工作量大。

由于本文的仿真目的在于再现和解释真实的疏散情形，而非得到最优的疏散方法或数据，因此采用基于理论的反复试凑法进行疏散仿真参数的选定，过程如图3.5所示。由参数选定流程图不难看出，表征个体知识经验的参数需要经过多步的调整才能得到恰当的取值。文中后续新增的模型参数也按照此流程进行选定。

为提高参数选定的效率，还应注意或遵循以下原则：

- 1) 在分析仿真结果与理论常识间的主要差异时，应对参数较为敏感的主要差异作为首位关注的对象，据此对参数范围进行划定；
- 2) 在对导致该差异的主要参数（组）进行分析时，要综合考虑与之相关感知信息对应的参数，如果只单一调整某参数，效果可能不太理想（例如人员和障碍个数因素、人员和障碍密度因素通常一起进行调整）；
- 3) 在根据参数物理含义调整该参数（组）取值时，一般先通过粗调观察疏散情形的变化趋势，得到较满意的区间范围后，再进行细调确定具体的参数取值。

图3.5 参数选定方法流程图

5.4.41 3.3.3 疏散情形

在本文任一场景，各个能力类型人员的参数 ~ 取值情况均如表3.3所示：

表3.3 参数取值表

个体类型

青年男性 2.4 3.6 1.2

青年女性 4.0 4.0 1.6

老年男性 6.0 1.8 1.8

老年女性 6.0 1.5 1.2

1. 无障碍且个体随机分布

在不同时刻，该场景下人员疏散情形如图3.6所示：

(a)  $t=0s$  (b)  $t=5.4s$

(c)  $t=11.7s$  (d)  $t=20.7s$

图3.6 拥挤疏散过程图（无障碍且个体随机分布）

观察图3.6可得到：在 $t=5.4s$ 时，个体在三个出口都呈现了拱形或类半圆形现象；在 $t=5.4s$ 和 $t=11.7s$ 时，出现个体（黄色标注个体）更换疏散路径现象；在 $t=11.7s$ 时，开始出现人员伤亡现象，且该现象发生地点位于出口附近；在 $t=20.7s$ 时，即接近疏散结束时，由于左出口和下出口均保持出口通畅，因此上述两出口比右出口提前结束疏散。

2. 有障碍且个体规律分布

在不同时刻，该场景下人员疏散情形如图3.7所示：

(a)  $t=0s$  (b)  $t=6.3s$

(c)  $t=12.3s$  (d)  $t=23.7s$

图3.7 拥挤疏散过程图（有障碍且个体规律分布）

观察图3.7可得到：在 $t=6.3s$ 时，个体都往三个出口的方向聚集；在 $t=6.3s$ ， $t=12.3s$ 和 $t=23.7s$ 时，有个体（黄色标注个体）更换疏散路径，由被动等待前方队列疏散变为绕过座椅向左出口和下出口主动疏散；在 $t=23.7s$ 时，即接近疏散结束时，右出口出现人员伤亡现象，且该现象发生地点位于出口。

5.4.42 3.3.4 结果分析

1. 疏散规律

通过图3.6和图3.7，可得出拥挤疏散规律特点如下：

- 1) 拥挤行为对整个疏散进程影响较小时，在每个出口前大多呈现拱形或类半圆形；
- 2) 当个体发现目标出口疏散速度低于其他出口时，主动变更目标出口及疏散路径；
- 3) 在疏散过程的中后期发生伤亡现象，发生地点在出口附近；
- 4) 由于各出口拥堵情况的非一致性，不一定能实现同时结束疏散。

2. 疏散数据

在拥挤疏散模型中，疏散数据除了疏散时间和疏散步数，还包括疏散过程中出现的伤亡人数，两场景的疏散数据如表3.4所示：



表3.4 两场景疏散数据

场景平均疏散时间（s） 平均疏散步数平均伤亡人数

左出口右出口下出口总时间

无障碍

且个体随机分布 18.4 28.4 19.4 28.4 7562 1.5

有障碍

且个体规律分布 23.9 34.9 24.5 34.9 9274 2.0

由于仿真具有随机性，重复运行一个特定场景并不能得出完全相同的结果，但差别较小，因此需要在不改变参数值的条件下多运行几次以确保不会产生明显差别。以上数据均为同一场景仿真5次的平均结果。

由上表可知，两场景中出现伤亡的人数相差不大，但是有障碍场景下的疏散时间更长、疏散步数更多，说明座椅在一定程度上降低了人员的疏散效率；由于右出口附近出现伤亡现象，导致该出口的疏散效率低于其他两出口，且左、下两出口几乎同时结束疏散。

11 第四章个体恐慌疏散模型

恐慌心理是人群在紧急情况下的一种典型的共同心理，恐慌心理会直接影响人在紧急情况下的紧张程度以及所做决策的正确性，是导致疏散出现灾难性后果的重要原因。因此对在人员疏散中引入恐慌心理并进行建模仿真，对于有效减少事故发生以及降低事故灾难的后果具有重要意义。

4.1 模型描述

5.4.43 4.1.1 模型假设

突发事件条件下，个体受到危机环境刺激导致生理、情绪和认知功能失调，原有处理问题的方式难以应付危机状态，继而引起紧张、害怕等心理异常，产生恐慌心理。突发事件的产生改变了个体日常习惯，不能用原有方式解决现存问题，极易产生不适应感和威胁感；对于灾害事件的不确定消息将导致个体无法作出正确判断，引发情绪不稳定而造成恐慌心理；应急疏散中个体之间存在着相互作用，情绪易相互感染，其他个体的一些恐慌行为反应将引起个体的恐慌。

除了火灾、建筑物坍塌等意外事故，人群密度过大、过度拥挤也是恐慌心理的诱因之一。当人群过度拥挤时，有可能会造成疏散人员长时间内无法按照预期向目标出口疏散；而在大部分情况下，由于视野的局限性使得疏散人员对引起滞留的原因以及时间无法获知。因此，过度拥挤及拥挤带来的不确定性会引起疏散人员恐慌心理，恐慌的程度与个体周围的拥挤程度息息相关。在这种恐慌紧张的心理状态下，个体更容易受周围人的影响，更愿意跟随前面的人或大多数人，趋向于盲目从众。

5.4.44 4.1.2 模型框架

在所有个体都遵循上述恐慌疏散规则的基础上，可以建立个体恐慌疏散模型的框架如图4.1所示。

该框架是在个体拥挤疏散模型框架中加入恐慌程度的计算，依据个体周围拥挤程度、性别等对恐慌心理进行定量描述，考虑恐慌程度对个体决策因素（与目标出口的距离、视野范围内人数和障碍数、视野范围内人员密度和障碍密度）的影响，并确定各影响因素权重值，从而建立起个体恐慌疏散模型。

图4.1恐慌疏散模型框架

4.2 建模方法

由图4.1的模型框架可知，在根据拥挤情况判断个体状态后，将依据个体周围拥挤程度、性别等对恐慌心理进行定量描述，确定各影响因素权重值，并将恐慌程度作用到对出口和方向的选择计算上。以下，将依次对各部分进行建模。

1. 恐慌程度计算

本模型中，疏散个体在疏散开始时便处于恐慌状态且一直处于该状态，但恐慌的程度取决于个体周围拥挤程度，即个体邻域内的个体数，以及该个体的性别。

恐慌程度的计算公式如式(4.1)所示：

(4.1)

式中，为占据个体周围8个元胞单元的个体数目。显然，。

而由于男女性别差异所导致的行为差异在紧急情况下往往表现得更加明显，因此本模型对男女的恐慌程度也进行差异计算：

男性个体恐慌程度，女性个体恐慌程度。

即女性在人群中更容易产生不安全感，比男性有较强的紧张心理、恐惧心理和从众心理。

2. 各影响因素权重值计算

当个体处于恐慌状态时，个体往往更缺乏耐心，努力以最快速度向最近出口疏散逃生；同时，疏散个体容易产生盲目从众心理。

基于以上推测，恐慌程度对各影响因素权重值的计算公式如式(4.2)所示：

(4.2)

式中，、、分别为恐慌程度对距离因素、人员和障碍个数因素、人员和障碍密度因素的影响权重值。

显然，且。的值越大，个体更换出口的可能性越小；和则反应了人员和障碍个数因素、人员和障碍密度因素对个体决策的影响程度，和的值越小，个体越不介意向视野内人员和障碍个数多、密度大的方向疏散。

指 标		
剽窃文字表述		
1. 邻域即某一元胞状态更新所要搜索的空间域。在一维元胞自动机中，通常以半径来确定邻域，一个元胞半径范围内的所有元胞，		
2. 行动		
行动过程即个体移动到目标出口的过程，本模型中个体按照距离及个体能力强弱综合决定移动的次序，		
3. 因此本文拟在复杂场景的基础上，抽取出形象化的小场景如图3.3所示。通过研究局部区域内的人员疏散行为		
4. 依靠大量的调查数据以获得调查结果的准确性，特点是快速、成本低、信息量大、覆盖面广。		
19. 201511162445_石琼玉_第19部分		总字数：8575
相似文献列表 文字复制比：10.4%(890) 剽窃观点：(0)		
1	大型场馆人员疏散仿真研究 黄希发(导师：王科俊) - 《哈尔滨工程大学博士论文》 - 2009-11-01	2.9% (245) 是否引证：是
2	计算机软件在人群疏散模拟实践教学中的应用 田玉敏; - 《Proceedings of Conference on Creative Education(CCE2011)》 - 2011-04-08	1.9% (167) 是否引证：否
3	火灾中人员的行为及其模拟计算方法的研究 田玉敏; - 《安全与环境学报》 - 2006-02-25	1.6% (135) 是否引证：否
4	人群安全疏散管理对策的研究	1.6% (135)

田玉敏;王辉;-《消防技术与产品信息》-2007-02-15		是否引证: 是
5	城市公共场所人群聚集风险理论及应用研究 王振(导师: 刘茂)-《南开大学博士论文》-2007-04-20	1.5% (130) 是否引证: 否
6	火灾时地下商场人员紧急疏散的研究 何彩红(导师: 姚继涛)-《西安建筑科技大学硕士论文》-2007-05-01	1.3% (112) 是否引证: 否
7	恐慌情况下人群心理及行为规律的探讨 田玉敏;-《人类工效学》-2008-03-20	1.3% (109) 是否引证: 否
8	居民区人员应急疏散仿真研究 李爽(导师: 安实)-《哈尔滨工业大学硕士论文》-2007-06-01	1.1% (96) 是否引证: 否
9	世贸大楼的人群疏散案例给计算机模拟技术的启示 田玉敏;-《消防技术与产品信息》-2008-12-15	0.9% (80) 是否引证: 否
10	恐慌状态下人群疏散的微观仿真研究 王霞;谢智敏;关贤军;-《Proceedings of 2010 International Conference on Future Information Technology and Management Engineering (FITME 2010) Volume 3》-2010-10-09	0.8% (72) 是否引证: 否
11	建筑物火灾中人员行为EXODUS模拟的研究 王桂芬;张宪立;阎卫东;-《中国安全生产科学技术》-2011-08-15	0.7% (62) 是否引证: 否
12	基于个体能力差异的人员疏散微观模型研究 黄希发;王科俊;张磊;张莹;-《中国安全生产科学技术》-2009-10-15	0.7% (62) 是否引证: 否
13	人群疏散中“非适应性”行为的研究 田玉敏;-《灾害学》-2006-06-20	0.7% (60) 是否引证: 否
14	三体海峡客滚船总体设计研究 王云(导师: 韩端锋)-《哈尔滨工程大学硕士论文》-2011-01-01	0.7% (60) 是否引证: 否
15	紧急情况下客船人员撤离运动模型的研究 徐德江(导师: 付玉慧)-《大连海事大学硕士论文》-2008-06-01	0.7% (57) 是否引证: 否
16	火灾中人的行为研究综述 刘高文;-《自主创新与持续增长第十一届中国科协年会论文集(3)》-2009-09-08	0.7% (57) 是否引证: 否
17	面向舰船的人员疏散微观模型研究 谢谋标(导师: 祝海涛)-《哈尔滨工程大学硕士论文》-2010-01-01	0.6% (52) 是否引证: 否
18	高层建筑火灾情况下电梯疏散安全可靠研究 唐春雨(导师: 邓军;文虎)-《西安科技大学硕士论文》-2009-05-11	0.6% (49) 是否引证: 否
19	大型活动拥挤踩踏事故人群疏散研究分析 王起全;王敏;-《三峡大学学报(人文社会科学版)》-2008-12-15	0.3% (29) 是否引证: 否
原文内容		

3. 出口选择计算

恐慌程度对各影响因素的权重以指数形式体现，根据式(2.3)，出口选择的计算表达式如下：

(4.3)

式中，其他参数的计算与个体拥挤疏散模型相同。

4. 方向选择计算

同理，根据式(2.8)，最优方向的表达式如下：

(4.4)

根据式(2.9)，次优方向的表达式如下：

(4.5)

式(4.4) (4.5)中其他参数的计算与个体拥挤疏散模型相同。

### 4.3 疏散仿真

#### 5.4.45 4.3.1 仿真场景

沿用本文第3.3.1节的仿真场景设置。

如图4.2所示。红色、绿色、蓝色、黑色和灰色的圆圈分别代表青年男性、青年女性、老年男性、老年女性以及伤亡人员。蓝色网格代表座椅（视为障碍），缺口处则代表疏散出口。

图4.2 两种仿真场景

在上述两种场景中，均有基本设置如下：

- 1) 场馆大小为33×33个网格（包括四周的边界），每个网格大小为0.4m×0.4m；
- 2) 在左、右、下三侧设置3个出口，每个出口的宽度为3个网格；
- 3) 初始待疏散人员数量为266人；
- 4) 青年男性、青年女性、老年男性和老年女性的比例为3:3:2:2；
- 5) 右侧出口处预设两名伤亡人员。

#### 5.4.46 4.3.2 疏散情形

##### 1. 无障碍且个体随机分布

在不同时刻，该场景下人员疏散情形如图4.3所示：

- (a)  $t=0s$  (b)  $t=5.4s$   
(c)  $t=11.7s$  (d)  $t=22.5s$

图4.3 恐慌疏散过程图（无障碍且个体随机分布）

观察图4.3可得到：在 $t=5.4s$ 时，个体在三个出口都呈现了拱形或类半圆形现象；在 $t=11.7s$ 时，下出口已结束疏散，左出口也接近完成疏散，右出口开始出现人员伤亡现象，且该现象发生地点位于出口附近；在 $t=22.5s$ 时，即接近疏散结束时，右出口仍有人员滞留，且伤亡人数增多；整个疏散过程中无更换疏散路径现象。

##### 2. 有障碍且个体规律分布

在不同时刻，该场景下人员疏散情形如图4.4所示：

- (a)  $t=0s$  (b)  $t=6.3s$   
(c)  $t=13.2s$  (d)  $t=26.1s$

图4.4 恐慌疏散过程图（有障碍且个体规律分布）

观察图4.4可得到：在 $t=6.3s$ 时，个体都往三个出口的方向聚集；在 $t=13.2s$ 时，右出口出现人员伤亡现象，且该现象发生地点位于出口附近，左出口与下出口剩余人数较少；在 $t=26.1s$ 时，即接近疏散结束时，右出口仍有人员滞留；整个疏散过程中无更换疏散路径现象。

5.4.47 4.3.3 结果分析

1. 疏散规律

通过图4.3和图4.4，可得出恐慌疏散规律特点如下：

- 1) 恐慌心理和拥挤行为对整个疏散进程影响较小时，在每个出口前大多呈现拱形或类半圆形；
- 2) 在疏散过程的中后期发生伤亡现象，发生地点在出口附近，同时伤亡人员形成了障碍，使疏散的速度变得十分缓慢；
- 3) 人群趋于表现出“从众”的现象，更愿意跟随大多数人进行疏散，主动更换疏散路径现象较少；
- 4) 备用出口或其他较通畅出口被忽视。

2. 疏散数据

本模型及个体拥挤疏散模型的疏散数据如表4.1所示：

表4.1 恐慌模型及拥挤模型疏散数据

模型场景平均疏散时间（s） 平均

疏散步数平均

伤亡人数

左出口右出口下出口总时间

拥挤模型无障碍

且个体随机分布 18.4 28.4 19.4 28.4 7562 1.5

有障碍

且个体规律分布 23.9 34.9 24.5 34.9 9274 2.0

恐慌模型无障碍

且个体随机分布 13.8 35.3 9.1 35.3 8268 5.4

有障碍

且个体规律分布 15.9 35.1 14.9 35.1 9317 2.6

以上数据均为同一场景仿真5次的平均结果，由上表可知：

- 1) 恐慌模型中，个体在有障碍且个体规律分布的场景中的伤亡人数少于无障碍场景，而两场景的疏散时间相差不大，说明在恐慌情况下，座椅对疏散效率的影响降低，同时在一定程度上保证了人员疏散的安全性，减少疏散过程中的伤亡现象；
- 2) 在同一场景条件下，恐慌模型与拥挤模型相比，左、下出口的疏散时间明显减少，右出口及总体疏散时间增多，其中下出口疏散时间变化幅度较大，说明在恐慌情况下，右出口被动等待的人员不会主动更换疏散路径；

3) 在同一场景条件下，恐慌模型与拥挤模型相比，右出口的伤亡人数与其他两出口相比明显增加，说明在恐慌情况下，右出口处拥挤加剧，从而导致伤亡现象较严重。

结合疏散情形规律以及疏散数据，可得出以下结论推测：

恐慌心理产生了“越快——越慢效应”，即在紧急情况下，由于处于高度紧张和恐慌状态下，每个人都试图尽快疏散出去，在出口处人群之间的推挤概率和程度大大增加，使得整体疏散效率反而降低了。

同时，由恐慌心理衍生出的“从众”行为具有非理性，它通常会导致严重的后果，如过分拥挤、疏散速度降低等，最终导致死亡人数增加或损失剧增的严重后果。

另外，备用出口或其他较通畅出口被忽视的原因，除了是“从众”行为的结果，也有人员“最小努力”行为的影响，即人在疏散时总是力图通过最短的可能途径，用最小的努力逃生，这常常会造成或加剧拥挤等现象。

3. 数据对比

利用MATLAB分别对有/无障碍场景下，拥挤疏散模型与恐慌疏散模型的疏散时间百分比与疏散人数关系进行对比，数据对比图分别如图4.5和图4.6所示。

1) 无障碍场景对比

图4.5 两模型疏散数据对比图（无障碍且个体随机分布）

图中红色实线（无恐慌）、绿色虚线（恐慌）分别为无障碍场景下，拥挤疏散模型和恐慌疏散模型的疏散人数与疏散时间百分比的关系曲线。由图可知，在前半段疏散时间内，恐慌情况下由于个体都变得紧张，疏散效率与无恐慌情况相比较为高；在后半段时间内，恐慌引起拥挤加剧，发生与无恐慌相比较严重的伤亡现象，使疏散的速度变得缓慢。

2) 有障碍场景对比

图4.6两模型疏散数据对比图（有障碍且个体规律分布）

图中红色实线（无恐慌）、绿色虚线（恐慌）分别为有障碍场景下，拥挤疏散模型和恐慌疏散模型的疏散人数与疏散时间百分比的关系曲线。由图可知，在前30%疏散时间里，两模型的疏散效率接近一致；30%到50%的疏散时间段内，有恐慌情况下的疏散速度稍快但也差异较小；与无障碍场景情况相同，在后半段时间内，恐慌引起拥挤加剧，发生与无恐慌相比较严重的伤亡现象，使疏散的速度变得缓慢。

12 第五章个体指挥疏散模型

在重大事故和突发事件下，顺利开展安全疏散工作的必要条件之一是科学合理的疏散引导，帮助人员快速有序地被疏散到安全区域。大量经验证明，许多在人群聚集场所突发事件发生后无效的人员疏散都是由于缺乏有效的疏散管理与指挥而造成的。因此，对处置突发重大事故具有重要作用的疏散引导指挥进行研究显得尤为必要，对于提高公共安全应急管理水平具有十分重要的意义。

5.1 模型描述

5.4.48 5.1.1 模型假设

通过对大量人员疏散过程出现的严重事故进行分析，结果表明，在这些事件中，时间（人员聚集发生的时间）、空间（周围环境的面积或几何形状）、信息（可能会引起人们采取相应行动的观察力）和能力（由于人员聚集而产生的压力，有可能导致伤亡）都发挥着重要的作用。基于这些因素进行管理可以有效地提高疏散安全水平。

其中，信息因素的管理对时间、空间和能量几个要素起着调节的作用：由图4.2的恐慌疏散过程图可知，在疏散过程的中后期发生伤亡现象，发生地点在出口附近，同时伤亡人员形成了障碍，使疏散的速度变得十分缓慢。而人群趋于表现出“从众”的



现象，更愿意跟随大多数人进行疏散，主动更换疏散路径现象较少。并且，由于个体视野范围的局限性，当出口附近已经出现伤亡人员时，离出口还有一定距离的个体无法获知此信息，仍然按照预期路径前进，造成越拥越堵的恶性循环。

综上，疏散指挥作为信息管理的有效手段之一，对有引导指挥下的疏散行为进行仿真模拟和研究，对提高疏散安全的意义和作用之重大不言而喻。本章将学习、参考和模拟现实中的疏散指挥引导情况，以期在较为真实的环境中对人员的疏散行为特征细节进行研究与仿真。

当公共场所发生紧急情况时（如发生火灾、拥挤、爆炸等），该场所负责人和工作人员需立即组织引导人员疏散，通常有以下几种常见的疏散引导方法[75]：

1. 正确通报，防止混乱

当人流大、疏散条件不理想时，需要将位于出口附近区域或疏散条件最不利的人员列为首要通报的对象，帮助他们快速撤离，到达安全区域；然后再将情况公开通报其他人员，保证疏散先后有序，避免人员扎堆，一拥而上挤到一起，影响疏散效率。另外，通报时必须迅速简洁，力争能够及时充分地利用各疏散出口、通道，避免混乱场面发生。

2. 口头疏散引导

在恐慌情绪影响下，每个人都希望以最快速度疏散出去，这可能会出现人员同时向标志明显的出口移动，场面拥挤无序。工作人员或指挥人员需要安抚疏散人员情绪，稳定局面，指示人们按照安全线路有序地进行疏散。

3. 广播引导疏散

事故广播是指指挥引导疏散的有效工具之一。当发生紧急情况时，广播小组在接收信号后应尽快启动广播系统，通报指挥员命令、事故的情况以及各疏散出口或通道的疏散情况等，以快速引导疏散人员到达指定安全区域。广播内容应包含但不限于：说明安全区域的方位和标志，以及安全指示标志的位置及颜色；指示疏散的路线和方向，指明可利用的疏散通道和出口等。

4. 强行疏导疏散

当人们惊慌混乱时，容易出现疏散通道和出口被堵塞的情况，这时需要工作人员组织疏导，必要时向外拖拉。如有人跌倒，为防止被其他人员踩踏，应设法阻止人流，同时迅速将摔倒的人员扶起，必要时可进行强制疏导。疏散过程中要做到安全有序，注意避免人员相互挤压，帮助特殊人群（未成年人、老年人、行动不便、孕妇或产妇等）撤离。

据此，本章在恐慌疏散模型的基础上，参考上述几种常见的疏散引导方法，引入指挥的思想，根据全局信息来引导个体的疏散行为，从而验证引导指挥对疏散有效性和安全性的作用影响，观察在引导指挥下的疏散行为特征。

5.4.49 5.1.2 模型框架

在所有个体都遵循上述有指挥疏散规则的基础上，可以建立有指挥疏散模型的框架如图5.1所示。

该框架是在个体恐慌疏散模型框架中加入对各出口拥堵情况的判断，并依此对出口进行排序，在出口选择计算时引入相关参数，依据出口排序对相关参数进行赋值，从而减小个体选择最拥堵出口的可能性，达到引导个体疏散行为的效果，依此建立起个体指挥疏散模型。

图5.1有指挥疏散模型框架

5.2 建模方法

由图5.1的框架可知，有指挥疏散模型在恐慌疏散模型的基础上，增加了对各出口拥堵情况的判断以及排序，并根据排序情况对引导个体疏散。以下将针对新增的2部分内容进行建模。

1. 各出口拥堵情况判断

通过对拥挤模型和恐慌模型的仿真观察，在每个出口前大多呈现拱形或类半圆形，本文计算各出口的拱形或类半圆形的半径，并以此作为拥堵情况的指标和出口拥挤排序的依据。

的计算方法如下：

- 1) 将出口中心作为拱形或类半圆形的圆心；
- 2) 作一条以上述圆心为原点的直线（即中轴线），计算在该直线上的个体，且两相邻个体之间的距离不超过3个元胞格；
- 3) 按照上述方法计算出的个体数即为。

例如，当某出口中轴线上第3个个体与第4个个体间的距离为4个元胞格，则该出口的等于3，如图5.2所示。图中，黑色网格代表出口，红色网格代表出口中心，灰色网格代表有个体占据。

图5.2 值计算示意图

各出口将按照进行降序排序，越大代表该出口拥堵情况越严重。

## 2. 引导个体疏散行为

按照出口拥堵情况设置惩罚参数，并引入式(4.3)出口选择计算表达式，修改后的出口选择公式如下：

(5.1)

式中，其他参数的计算与个体恐慌疏散模型相同。

当个体选择最大的出口（即拥堵情况最严重的出口）时， $\alpha=4$ ，其他情况下 $\alpha=1$ ，从而减小个体选择最拥堵出口的可能性，体现引导指挥下平衡调节各出口拥堵情况的行为效果。

## 5.3 疏散仿真

### 5.4.50 5.3.1 仿真场景

从4.3.3节的结果分析中可看出，在无障碍场景下，有恐慌状态下的疏散时间变化幅度较大，伤亡现象也较为严重；在有障碍场景下，有无恐慌的疏散效率和疏散情况差别较小。因此，本模型仅对无障碍场景下的疏散行为进行仿真分析，该场景的各项设置与3.3.1节相同。

红色、绿色、蓝色、黑色和灰色的圆圈分别代表青年男性、青年女性、老年男性、老年女性以及伤亡人员。蓝色网格代表座椅（视为障碍），缺口处则代表疏散出口。

图5.3 无障碍仿真场景

在上述场景中，基本设置如下：

- 1) 场馆大小为33×33个网格（包括四周的边界），每个网格大小为0.4m×0.4m；
- 2) 在左、右、下三侧设置3个出口，每个出口的宽度为3个网格；
- 3) 初始待疏散人员数量为266人；
- 4) 青年男性、青年女性、老年男性和老年女性的比例为3:3:2:2；
- 5) 右侧出口处预设两名伤亡人员。

5.4.51 5.3.2 疏散情形

在不同时刻，该场景下人员疏散情形如图5.4所示：

- (a)  $t=0s$  (b)  $t=5.4s$
- (c)  $t=11.7s$  (d)  $t=17.1s$

图5.4 指挥疏散过程图（无障碍且个体随机分布）

由图5.4可知，在引用有指挥疏散模型情况下： $t=5.4s$ 时，由于指挥作用，各出口疏散人员密度相近；在 $t=5.4s$ 和 $t=11.7s$ 时，出现个体（黄色标注个体）更换疏散路径现象；在 $t=17.1s$ ，即接近疏散结束时，由于左、下出口处较右出口无伤亡个体阻碍，因此上述两出口比右出口提前结束疏散；疏散全过程中，各出口的畅通度较好。

5.4.52 5.3.3 结果分析

1. 疏散规律

通过图5.4，可得出有指挥疏散规律特点如下：

- 1) 在每个出口前大多呈现拱形或类半圆形；
- 2) 当个体发现目标出口疏散速度低于其他出口时，主动变更目标出口及疏散路径；
- 3) 在疏散过程中伤亡现象较少甚至没有，如有发生，地点则在出口附近；
- 4) 各疏散通道得到及时充分利用；
- 5) 在引导指挥下，各出口拥堵情况得到一定平衡调节，但仍不一定能实现同时结束疏散。

2. 疏散数据

本模型及个体拥挤疏散模型、个体恐慌疏散模型的疏散数据如表5.1所示：

表5.1 三个模型疏散数据

模型场景	平均疏散时间（s）	平均				
疏散步数	平均					
伤亡人数						
左出口	右出口	下出口	总时间			
拥挤模型	无障碍					
且个体随机分布	18.4	28.4	19.4	28.4	7562	1.5
恐慌模型	无障碍					
且个体随机分布	13.8	35.3	9.1	35.3	8268	5.4

且个体随机分布 13.9 23.9 14.9 23.9 6668 0.9

以上数据均为同一场景仿真5次的平均结果，由上表可知：

1) 指挥模型与恐慌模型相比，下出口的疏散时间明显增多，右出口及总体疏散时间减少，并且减少幅度较大，说明在有指挥情况下，右出口被动等待的人员主动更换了疏散路径；另外，有指挥情况下的人员伤亡人数明显下降，说明科学合理的疏散引导能够帮助人员快速有序地被疏散到安全区域；

2) 指挥模型与拥挤模型相比，三个出口疏散时间及总体疏散时间减少，人员伤亡人数也有所下降，再次验证说明引导指挥对疏散有效性和安全性的积极作用和影响。

结合疏散情形规律以及疏散数据，可得出以下结论推测：

人员在疏散过程中 不会又很宽的视野，除非有来自可靠的信息源的信息，否则人员极有可能按照周围人或大多数人的推断和决策来行动。而在发生人员拥挤事故和恐慌情绪蔓延时，通过指挥引导进行的可靠信息发布，能够降低时间、空间和能力几个要素对事故的不良影响：1)针对时间要素，指挥引导能够合理地调整人群密度分布，防止人员不停向前挤压，避免在出口处形成堵塞；2)；针对空间要素，通过对各出口拥堵情况的发布，使人员能在出口选择时进行更理性地决策，避免出现堵塞出口拥挤程度持续加重，而其他较畅通的出口或备用出口被忽视的现象，让疏散空间得到合理利用；3)针对能力的要素，指挥引导的分流作用可以避免出现大量人员相互拥挤的情况，从而减小人与人之间的拥挤力，保证疏散安全有序。

### 3. 数据对比

利用MATLAB对无障碍场景下，拥挤疏散模型、恐慌疏散模型与指挥疏散模型的疏散时间百分比与疏散人数关系进行对比，数据对比图如图5.5所示。

图5.5 三模型疏散数据对比图

图中红色实线（无恐慌）、绿色虚线（恐慌）和蓝色点线（有指挥）分别为，拥挤疏散模型、恐慌疏散模型和有指挥疏散模型的疏散人数与疏散时间百分比的关系曲线。由图可知，在前半段疏散时间内，恐慌情况下由于个体都变得紧张，疏散效率与无恐慌情况和有指挥情况相比较；在后半段时间内，由于在引导指挥下，各出口拥堵情况得到一定平衡调节，有指挥情况下的疏散效率开始提高，而恐慌引起拥挤加剧，发生较严重的伤亡现象，使疏散的速度变得缓慢。

## 13 第六章总结与展望

### 6.1 本文总结

重大事故灾难下的人员疏散问题是一个涉及多学科、复杂的系统课题。尤其是疏散中人员心理和行为模型的研究，是涉及生理学、心理学、社会学等学科的复杂问题。该问题复杂性的另外一个方面就是人员疏散模拟方法和结果的可靠性问题。传统方法如直接观察、照片、基于录像、动物实验、人员疏散演习等，都具有很大程度的随机性。例如疏散演习时，需要多次重复才能得到可靠结果，但是反复演练的可操作性是比较困难的，另外，紧急条件下的疏散实验也存在一定的危险。而计算仿真具有明显的优势，可以轻易改变不同情况下的参数，也可以系统地研究特定场景下的行人规律和人员疏散问题。目前，计算机仿真技术已成为研究人员疏散的有效技术手段，也是该领域目前的发展方向。

本文回顾了人员疏散研究的历史和现状，系统分析了疏散过程中个体的特点以及个体的行为特点，并利用基于Agent和元胞自动机技术进行人员疏散建模的实践，提出了个体Agent、疏散空间以及个体Agent行为建模的基本方法，然后将此模型框架具体化到三类模型的建立：

(1) 在建立个体拥挤疏散模型时，个体首先 依据自身能力计算受到的拥挤并以此对自身状态进行判断；假设没有受到拥挤或者受到的拥挤是在个体可承受范围内时，个体将采取主动疏散方式以实现预期疏散目标，体现为按照正常方式行走，即依照相应公式对目标出口和方向进行计算选择；如受到的拥挤超过承受能力，表现为该个体 停留在原地，有可能被其他个体超越；如多次受到的拥挤累计超过承受极限，则出现伤亡。

(2) 个体恐慌模型的建立，则是在个体拥挤疏散模型中加入恐慌程度的计算，依据个体周围拥挤程度、性别等对恐慌心理进行定量描述，考虑恐慌程度对个体决策因素（与目标出口的距离、视野范围内人数和障碍数、视野范围内人员密度和障碍密度）的影响，并确定各影响因素权重值。

(3) 个体指挥模型的建立，是通过在个体恐慌疏散模型中加入对各出口拥堵情况的判断，并依此对出口进行排序，在出口选择计算时引入相关参数，依据出口排序对参数进行赋值，达到引导个体疏散行为的效果，实现引导指挥下人员疏散行为的仿真模拟。

(4) 利用C#语言建立了人员疏散仿真平台，将现实大型室内场馆划分为两个仿真场景，对四类个体Agent按照一定比例组成的混合人群分别进行仿真，得到给定预设初始条件下的疏散过程图和各出口疏散时间、疏散步数等数据，并对三类模型的疏散数据进行对比分析。

仿真结果表明，本文提出的建模框架和建模方法具有可行性，模型的现实描述能力较强，仿真结果贴近现实疏散情形，并能够以此为依据，为公共场所疏散设计的优化、安全疏散应急管理对策的制定、突发重大事故的处置等提供理论支撑和指导。

## 6.2 工作展望

总体上，本文提出的疏散模型与以往的模型相比，在参数优化、仿真效率等多方面都有所改进，应用于人员疏散仿真研究上也取得了较好的效果，但是也存在着以下问题有待进一步优化和研究。

### (1) 特定场景下疏散个体行为的研究

人作为疏散的行为主体，对个体行为的研究是进行疏散研究的首要目标。个体行为来自于人的内在心理状态与过程，也是外界因素对人心理刺激后的一种反应。因此，对各种特定场景下，影响个体疏散行为的心理因素的探索和分析是研究人员疏散的重要工作。因此，在疏散仿真建模时应进一步考虑进行带有小团体、亲情行为、群聚心理等特定场景下的疏散行为研究。

### (2) 人员疏散资料与数据的积累

由于人员疏散问题不仅复杂且涉及面较广，其数据库、知识库和推理库等仍需补充和完善，为了使疏散模型与仿真结果更接近现实，应收集更多与个体心理因素特征、真实疏散现场或疏散演习等有关资料与数据，为研究人员疏散行为特征、疏散模型参数界定以及仿真结果的验证提供真实而可靠的帮助。

## 参考文献

- [1] 周进科，刘翠萍，靳凤彬，王晓妹，李金红，翟香香，王翠翠．拥挤踩踏事件伤亡情况和发生原因分析[J]．中华灾害救援医学，2015，3(2)：67-71．
- [2] 王春雪，索晓，吕淑然，杨凯．地铁应急疏散恐慌程度模型研究[J]．中国安全科学学报，2015，25(2)：171-176．
- [3] 许伟伟，郑江华，余丹林．地铁站火灾人员安全疏散研究综述[J]．工业安全与环保，2015，41(1)：65-69．
- [4] 张茜．多出口群体疏散模拟研究[D]．杭州：浙江大学，2014．
- [5] Siva Srikukenthiran, Amer Shalaby, Erin Morrow．Mixed Logit Model of Vertical Transport Choice in Toronto Subway Stations and Application within Pedestrian Simulation[J]．Transportation Research Procedia, 2014, 2: 624-629．
- [6] Weichen Liao, Xiaoping Zheng, Lisheng Cheng, Ying Zhao, Yuan Cheng, Yafei Wang．Layout effects of multi-exit ticket-inspectors on pedestrian evacuation[J]．Safety Science, 2014, 70: 1-8．
- [7] 赵雪．地铁车站人员应急疏散模型的研究[D]．成都：西南交通大学，2013．
- [8] Martin Stubenschrott, Christian Kogler, Thomas Matyus, Stefan Seer．A Dynamic Pedestrian Route Choice Model Validated

in a High Density Subway Station [J]. Transportation Research Procedia, 2014, 2: 376–384.

[9] 张程. 地铁人员行为特征与人员疏散仿真[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.

[10] 穆娜娜, 肖国清, 何理, 史聪灵, 胥旋. 地铁人员疏散心理行为调查及相关性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2013 (6): 85-90.

[11] 李宏伟. 某地铁换乘站火灾情况下人员疏散模拟分析[J]. 消防科学与技术, 2014(12): 1380-1383.

[12] 刘帅. 大型体育场馆有毒气体扩散下应急疏散的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.

[13] 何溪, 李伟, 宁利君, 张斌, 沈达. 体育场内场人员安全容量的测算方法研究[J]. 安全, 2014(02): 27-30.

[14] 黄希发. 大型场馆人员疏散仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.

[15] ZHANG Lei, WANG Jinhuan, SHI Qiongyu. Multi-agent based modeling and simulating for evacuation process in stadium[J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2014, 27 (3): 430-444.

[16] 魏震. 基于行为特征分析的行人疏散模式研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

[17] 聂文, 于海明, 刘贞刚, 王云, 张琦, 马骁. 体育馆中人员安全疏散的仿真分析[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(02): 32-38.

[18] 周令昌, 赵国敏, 郭春梅, 王彦龙. 多出口人员密集场所疏散模型及仿真分析[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(05): 584-587.

[19] Zhixiang Fang, Qingquan Li, Qiuping Li, Lee D. Han, Dan Wang. A proposed pedestrian waiting-time model for improving space-time use efficiency in stadium evacuation scenarios [J]. Building and Environment, 2011, 46 (9): 1774–1784.

[20] 张艳芳, 靳志同, 任晴晴. 场馆人员疏散的元胞自动机模拟[J]. 数学的实践与认识, 2013, 43 (11): 208-214.

[21] Xiaoxia Yang, Hairong Dong, Xiuming Yao, Xubin Sun, Qianling Wang, Min Zhou. Necessity of guides in pedestrian emergency evacuation [J]. Physica A, 2016, 442: 397–408.

[22] 刘全平, 梁加红, 李猛, 付跃文. 基于多智能体和元胞自动机人群疏散行为研究[J]. 计算机仿真, 2014, 31(01): 328-332.

[23] 张丽娟, 张艳芳, 赵宜宾, 曾文艺. 基于元胞自动机的智能疏散模型的仿真研究[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(01): 247-253.

[24] 徐楠楠. 大型商业综合体火灾安全疏散研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.

[25] 黄丽丽, 朱国庆, 张国维, 张娟. 地下商业建筑人员疏散时间理论计算与软件模拟分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(2): 69-73.

[26] Lin Li, Zhonghai Yu, Yang Chen. Evacuation dynamic and exit optimization of a supermarket based on particle swarm optimization [J]. Physica A, 2014, 416: 157–172.

[27] 邢志祥, 丁芙蓉, 唐亮, 欧红香, 郝永梅. 大型超市火灾人员疏散路径优化研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(02): 167-173.

[28] Wei Zhong, Rui Tu, Jian-peng Yang, Tian-shui Liang. Simulation of Evacuation Process in a Supermarket with Cellular Automata [J]. Procedia Engineering, 2013, 52: 687–692.



[29] 赵道亮, 叶宏, 倪哲. 基于FDS和CA模型的某超市火灾的人员疏散[J]. 消防科学与技术, 2013, 32(10): 1096-1099.

[30] 王力申. 商业综合体人流密度及行走规律研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.

[31] 李利敏, 朱国庆, 黄丽丽. 大型超市火灾人员疏散特性研究[J]. 消防科学与技术, 2013, 32(06): 609-612.

高层建筑

[32] Yuanchun Ding, Lizhong Yang, Falu Weng, Zhijian Fu, Ping Rao. Investigation of combined stairs elevators evacuation strategies for high rise buildings based on simulation[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2015, 53: 60-73.

[33] 胡玉玲, 王飞跃, 刘希未. 基于ACP方法的高层建筑火灾中人员疏散策略研究[J]. 自动化学报, 2014, 40(2): 185-196.

[34] 霍非舟. 建筑楼梯区域人员疏散行为的实验与模拟研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.

[35] 赵哲, 陈清光, 王海蓉, 袁智, 梁栋. 基于Pathfinder的公众聚集场所的应急诱导疏散[J]. 消防科学与技术, 2013, 32(12): 1327-1330.

[36] Lida Huang, Tao Chen, Hongyong Yuan. Simulation Study of Evacuation in High-rise Buildings [J]. Transportation Research Procedia, 2014, 2: 518-523.

[37] 王爱莎. 高层建筑火灾时的人员安全疏散研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.

[38] 王云龙. 基于多约束条件的高层建筑楼梯电梯协同人员疏散策略研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.

[39] 邢志祥, 唐永, 高文莉. 高层住宅建筑火灾人员疏散仿真研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(6): 29-33.

[40] Jeongin Koo, Yong Seog Kim, Byung-In Kim, Keith M. Christensen. A comparative study of evacuation strategies for people with disabilities in high-rise building evacuation [J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(2): 408-417.

[41] 袁启萌. 高层建筑火灾情景下人群疏散行为研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.

[42] Xiwei Guo, Jianqiao Chen, Suozhu You, Junhong Wei. Modeling of pedestrian evacuation under fire emergency based on an extended heterogeneous lattice gas model [J]. Physica A, 2013, 392(9): 1994-2006.

[43] 江辉仙, 林广发, 江立辉, 黄达沧. 校园楼宇火灾疏散路径分析和应用[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(9): 2171-2176.

[44] 何怡婧, 曾坚, 王子寒, 付明达, 张旭州. 高层学生宿舍火灾疏散模拟与逃生行为研究[J]. 消防科学与技术, 2013, 32(1): 15-18.

[45] 童爱玲. 基于Multi-Agent的教学楼疏散建模与路径优化[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.

[46] 李军, 吴茜蒙. 紧急疏散下的人员行为及建模仿真[J]. 安全, 2013(8): 13-16.

[47] Tie-Qiao Tang, Liang Chen, Ren-Yong Guo, Hua-Yan Shang. An evacuation model accounting for elementary students' individual properties [J]. Physica A, 2015, 440: 49-56.

[48] 刘平平. 火灾与化学灾害情形下人员疏散研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.

[49] 施家城, 谭露, 胡明远, 林琿. 顾及人员空间知识差异的建筑物应急疏散研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(01): 170-176.

- [50] 边飞飞. 基于元胞自动机模型的校园室内疏散建模与优化[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [51] Jun Hu, Lei You, Juan Wei, Musong Gu, Ying Liang. The effects of group and position vacancy on pedestrian evacuation flow model [J]. *Physics Letters A*, 2014, 378(28-29): 1913–1918.
- [52] 陈立林, 罗恩民, 刘冠华, 夏张琦, 刘晓云. 典型地铁站火灾人员疏散模拟与评估[J]. *安全与环境工程*, 2015, 22(04): 123-128.
- [53] 曹爱春, 杨晓艇, 侯旭东. Agent-CA的体育场馆人群疏散模型[J]. *计算机工程与应用*, 2013, 49(24): 229-232.
- [54] 史向鹏. 高层办公建筑人员疏散策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [55] 孙敏. 大型超市火灾数值模拟及人员疏散研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.
- [56] 孙凯. 基于元胞自动机模型的学生群体疏散研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2014.
- [57] 田玉敏, 张伟, 马宏伟, 贺小宇. 人群应急疏散[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [58] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic[J]. *Nature*, 2000, 407(6803): 487-490.
- [59] Ruggiero Lovreglio, Achille Fonzone, Luigi dell'Olio, Dino Borri. A study of herding behaviour in exit choice during emergencies based on random utility theory [J]. *Safety Science*, 2016, 82: 421–431.
- [60] Fasheng Qiu, Xiaolin Hu. Modeling group structures in pedestrian crowd simulation [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2010, 18(2): 190–205.
- [61] Song Xu, Henry Been-Lirn Duh. A Simulation of Bonding Effects and Their Impacts on Pedestrian Dynamics[J]. *Intelligent Transportation Systems*, 2010, 11(3):153-161.
- [62] 朱孔金. 建筑内典型区域人员疏散特性及疏散策略研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- [63] Helbing D, Molnar P. Social force model for pedestrian dynamics[J]. *Physical Review E*, 1995, 51(5): 4282-4286.
- [64] Helbing D, et al. Self-organized pedestrian crowd dynamics: experiments, simulations, and design solutions[J]. *Transportation Science*, 2005, 39(1): 1-24.
- [65] Helbing D, Johansson A, Al-Abideen H Z. Dynamics of crowd disasters: An empirical study[J]. *Physical Review E*, 2007, 75: 040109.
- [66] Ren-Yong Guo. New insights into discretization effects in cellular automata models for pedestrian evacuation [J]. *Physica A*, 2014, 400: 1-11.
- [67] 于洋. 基于的舰船人员疏散模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [68] 陈迎欣. 基于Multi-agent的地铁站内人群应急疏散交互研究[J]. *计算机应用与软件*, 2013, 30(10): 226-228.
- [69] 倪建军. 复杂系统多Agent建模与控制的理论及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [70] 贾斌, 高自友, 李克平, 等. 基于元胞自动机的交通系统建模与模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [71] 李学伟, 吴今培, 李雪岩. 实用元胞自动机导论[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2013.

- [72] 何招娟. 基于BIM的大型公共场馆安全疏散研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [73] 李宗泽. 基于博弈论的人群疏散问题仿真[D]. 广州: 中山大学, 2014.
- [74] Jinhuan Wang, Lei Zhang, Qiongyu Shi, Peng Yangb, Xiaoming Hu. Modeling and Simulating for Congestion Pedestrian Evacuation with Panic[J]. Physica A, 2015, 428: 396-409.
- [75] 田玉敏, 王辉. 人群安全疏散管理对策的研究[J]. 消防技术与产品信息, 2007(02): 13-17.
- [1] 应有, 许国东, 潘东浩, 等. 大型风电机组独立变桨控制技术研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(6): 891-896.
- [2] 金鑫, 熊海洋, 夏宗朝, 等. 大功率风力发电机在独立变桨控制下的振动研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45 (12): 4206-4211.
- [3] 郭军. 我国能源问题面临的现状及对策分析[J]. 资源节约与环保, 2012(6): 59-60.
- [4] 张彦创. 风力发电机组状态监测与故障诊断系统的设计与实现[D]. 吉林: 吉林大学, 2013.
- [5] <http://politics.people.com.cn/n/2013/0303/c70731-20659121.html> (2013/3/3)
- [6] CWEA. 2014年中国风电装机容量统计[J]. 风能, 2015(2): 36-49.
- [7] 李伟. 风电机组状态监测与故障诊断系统的设计与实现[D]. 广州: 华南理工, 2014.
- [8] Feng Y, Tavner P J, Long, H. Early experiences with UK Round 1 offshore wind farms[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Energy, 2010, 163(4): 167-181.
- [9] 王雅光. 风力发电机控制联合动态仿真技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.
- [10] Dinkhauser V, Fuchs F W. Detection of Rotor Tum-to-tum Faults in Doubly-Fed Induction Generators in Wind Energy Plants by means of Observers[C]. The 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Kiel, Germany, 2009.
- [11] 路阳. 风力发电系统的变桨距控制[D]. 辽宁: 东北大学, 2010.
- [12] 甘槐樟, 周鑫盛. 风电场风机变桨系统故障分析[J]. 湖南电力, 2012, 32(6): 35-37.
- [13] 胡麟涛. 风电机组故障预警方法研究[D]. 北京: 华北电力, 2012.
- [14] 单光坤. 兆瓦级风力发电机组状态监测及故障诊断研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.
- [15] 全球风能理事会. 2014年全球风电装机容量统计[J]. 风能, 2015(2): 50-53.
- [16] 欧洲风能协会. 2014上半年欧洲海上风电发展报告[J]. 风能, 2014(8): 40-44.
- [17] 王茜, 杨文娟. 中国风电发展历程及相关建议[J]. 风能, 2013(6): 42-48.
- [18] 李俊峰, 蔡丰波, 乔黎明, 等. 2014中国风电发展报告[R]. 北京: 中国循环经济协会可再生能源专业委员会, 2014.
- [19] Hameed Z, Hong Y S, Cho Y M, et al. Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(1): 1-39.
- [20] Michael Wilkinson, Brian Darnell, Thomas van Delft, et al. Comparison of methods for wind turbine condition monitoring with SCADA data[J]. IET Renewable Power Generation, 2014(8): 390-397.

- [21] Wenxian Yang, Christian Little, Peter J, et al. Data-driven technique for interpreting wind turbine condition monitoring signals[J]. IET Renewable Power Generation, 2014(8): 151-159.
- [22] 梁婷婷. 大型风力发电机的鲁邦自适应控制研究[D]. 北京:北京交通大学, 2012.
- [23] Simon J W, Beth J Xiang, Yang Wenxian, et al. Condition Monitoring of the Power Output of Wind Turbine Generators Using Wavelets[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(3): 715-721.
- [24] Mohanty A R, Chinmaya K. Fault detection in a multistage gearbox by demodulation of motor current waveform[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1285-1297.
- [25] 陈长征, 赵新光, 周勃. 风力发电机组叶片裂纹故障特征提取方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(2): 112-117.
- [26] Caselitz P, Giebhardt J, Kruger T, et al. Development of a fault detection system for wind energy converters[C]. Proceedings of the EUWEC'96. Goteborg, 1996: 1004-1007.
- [27] Jun-Hyun Shin, Yun-Seong Lee, Jin-O Kim. Fault prediction of wind turbine by using the SVM method[J]. Electronics and Electrical Engineering, 2014(3): 1923-1926.
- [28] An X L, Jiang D X, Li S H, et al. Fault diagnosis of direct-drive wind turbine based on support vector machine[C]. 9th International Conference on Damage Assessment of Structures. Oxford, United Kingdom, 2011: 12-30.
- [29] Pedro Santos, Luisa F. Villa, Aníbal Reñones, et al. An SVM-Based Solution for Fault Detection in Wind Turbines[J]. Sensors, 2015(15): 5627-5648.
- [30] 郭春明, 银海燕, 唐杰. 风电机组振动故障的检测方法[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2015, 27(1): 69-71.
- [31] 李辉, 杨超, 李学伟, 等. 风机电动变桨系统状态特征参量挖掘及异常识别[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1922-1930.
- [32] 龙泉, 刘永前, 杨永平. 基于粒子群优化BP神经网络的风电机组齿轮箱故障诊断方法[J]. 太阳能学报, 2012, 33(1): 120-125.
- [33] 刘文艺, 韩继光. 基于混合时频分析方法的风电机组故障诊断[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(1): 96-99.
- [34] 罗毅, 甄立敬. 基于小波包与倒频谱分析的风电机组齿轮箱齿轮裂纹诊断方法[J]. 振动与冲击, 2015, 34(3): 210-214.
- [35] 葛付存. 基于小波理论分析的风电机组故障诊断系统研究[J]. 鄂州大学学报, 2014, 21(11): 106-108.
- [36] 戴毅, 胡立锦, 张新燕. 小波包分析和神经网络在风电机组变频器故障诊断中的应用[J]. 电力与能源, 2012, 33(2): 155-158.
- [37] 周勃, 孟强, 刘欢, 等. 改进二阶统计量算法在风力机主轴承裂纹识别中的应用[J]. 振动工程学报, 2013, 26(5): 779-785.
- [38] 郭鹏, 徐明, 白楠, 等. 基于 SCADA 运行数据的风力发电机组塔架振动建模与监测[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(5): 128-136.
- [39] 王有荣, 王霄宏, 王媛, 等. 风力发电机组变桨系统故障分析处理及应用[J]. 内蒙古石油化工, 2014 (10): 31-33.
- [40] 董昱廷, 王海云, 唐新安. 风力发电机组状态监测系统现状研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(03): 85-89.
- [41] Fernando D B, Hernhn D B, Ricardo J M, Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design[J], Springer, 2007.
- [42] 井延伟. 双馈式风力发电机组控制系统与全功率试验分析[D]. 河北:华北电力大学, 2009.

- [43] 刘国祥. 多兆瓦风力发电机组独立变桨系统控制策略的研究与应用[D]. 新疆:新疆农业大学, 2013.
- [44] 段玲君. 基于支持向量机的同步风电机组故障诊断系统的研究[D]. 湖南:中南大学, 2012.
- [45] 胥良. 基于载荷谱的兆瓦级风电齿轮箱动态特性研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013.
- [46] 王哲. 大型风力发电机组变桨距控制策略研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2010.
- [47] Kabouris J, Kanellos F D. Impacts of large-scale wind penetration on designing and operation of electric power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2010, 1(2): 107-117.
- [48] 马佳. 大型风力发电机组的独立变桨距控制技术研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2010.
- [49] 袁旭宏. 大型风力发电机组变桨距控制系统研究与设计[D]. 成都:电子科技大学, 2013.
- [50] 王佳雯. 变速变桨距风电系统建模与智能控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.
- [51] 梁颖. 基于SCADA系统的大型风电机组在线状态评估及故障定位研究[D]. 福建:华侨大学, 2013.
- [52] IEC International Standard, IEC61400-1 Wind turbines part 1: design requirements. The International Electrotechnical Commission, 2005.
- [53] Burton T, Sharpe D, Jenkins N, Bossanyi E. Wind energy handbook. John Wiley & Sons Ltd, 2001.
- [54] IEC International Standard, IEC61400-11, wind turbine generator systems-acoustic noise measurement techniques, 2002.
- [55] Wenxian Yang, Richard Court, Jiesheng Jiang. Wind turbine condition monitoring by the approach of SCADA data analysis[J]. Renewable Energy, 2013(53): 365-376.
- [56] 刘迎. 基于SVM风电机组齿轮箱故障诊断系统研究[D]. 河北:华北电力, 2013.
- [57] Cortes C, Vapnik V. Support-vector networks[J]. Machine learning, 1995, 20(3): 273-297.
- [58] 谢飞. 基于EEMD和LSSVM的钢丝绳输送带早期故障诊断研究[D]. 太原:太原理工, 2015.
- [59] 哈明虎, 黄澍, 王超, 等. 直觉模糊支持向量机[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2011, 31(3): 225-229.
- [60] 礼野. 模糊支持向量机及其在故障诊断中的应用[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学, 2011.
- [61] 刘忠宝. 新型支持向量机在风速预测模型中的应用研究[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(5): 754-757.
- [62] 刘卫华. 最小二乘支持向量机在多分类中的应用研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2013.
- [63] 石运嘉. 基于SVM的风机减载控制和风场功率调度的研究[D]. 北京:北京交通大学, 2015.
- [64] 梁辉, 童朝南. 基于减法聚类的带钢厚度数据驱动建模[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(11): 1338-1345.
- [65] 阎纲. 基于最小二乘支持向量机的铝电解过程建模与控制研究[D]. 长沙:中南大学, 2012.
- [66] 张倩, 杨耀权. 基于支持向量机核函数的研究[J]. 电力科学与工程, 2012, 28(5): 42-45.
- [67] Gabriela Czubala, Istvan Gergely Czubala, Radu Dan Gaceanu. A support vector machine model for intelligent selection of data

representations[J]. Applied Soft Computing Journal, 2014(18): 70-81.

[68] Keng-Pei Lin, Ming-Syan Chen. On the Design and Analysis of the Privacy-Preserving SVM Classifier[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2011, 23(11): 1704-1797.

[69] 杨洪, 古世甫, 崔明东. 基于遗传优化的最小二乘支持向量机风电场风速短期预测[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 44-48.

[70] 朱永强, 田军. 最小二乘支持向量机在光伏功率预测中的应用[J]. 电网技术, 2011, 35(7):54-58.

[71] Zuriani Mustaffa, Yuhani Yusof, Siti Sakira Kamaruddin. Enhanced artificial bee colony for training least squares support vector machines in commodity price forecasting[J]. Journal of Computational Science, 2013: 196-205.

[72] 陈丽琴. 基于EEMD和模糊LS-SVM的人体动作识别研究[D]. 大连:大连理工, 2014.

[73] 崔杨, 李莉, 陈德荣. 基于最小二乘支持向量机的超短期风电负荷预测[J]. 新能源发电控制技术, 2014, 36(5): 35-37.

[74] 贾丙辉, 张小栋, 侯育军. 涡轮叶尖间隙动态建模的LS-SVM方法[J]. 计算机仿真, 2012, 29(4):95-100.

[1] 郭百顺. 风电机组独立变桨距控制技术研究 [D]. 湖南; 湖南工业大学, 2014.

[2] 刘细平, 林鹤云. 风力发电机及风力发电控制技术综述 [J]. 大电机技术, 2007,(3): 17-20.

[3] 舒畅. 关于我国清洁能源发展相关问题的探讨 [J]. 能源技术经济, 2011, 23(09): 20-23.

[4] 孔屹刚. 大型风力机功率控制与最大能量捕获策略研究 [D]. 上海; 上海交通大学, 2009.

[5] 韩芳. 我国可再生能源发展现状和前景展望 [J]. 可再生能源, 2010, 28(04): 137-140.

[6] 王浩. 大型风力发电机组变桨距控制技术的研究 [D]. 湖南; 中南大学, 2011.

[7] 何满. 中国风电产业政策研究 [D]. 武汉; 华中师范大学, 2013.

[8] 邱越. 并网型风力发电系统建模及其网络化控制方法研究 [D]. 沈阳; 东北大学, 2011.

[9] CWEA. 2014年中国风电装机容量统计 [J]. 风能, 2015(02): 36-49.

[10] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术 [M]. 机械工业出版社, 2002.

[11] 叶杭冶, 潘东浩. 风电机组变速与变桨距控制过程中的动力学问题研究 [J]. 太阳能学报, 2007, (12): 1321-1328.

[12] Boukhezzar B, Siguerdidjane H. Nonlinear Control of a Variable-Speed Wind Turbine Using a Two-Mass Model [J]. Ieee Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(1): 149-162.

[13] Kim K H, Van T L, Lee D C, et al. Maximum Output Power Tracking Control in Variable-Speed Wind Turbine Systems Considering Rotor Inertial Power [J]. Ieee Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3207-3217.

[14] Corradini M L, Ippoliti G, Orlando G. Fully sensorless robust control of variable-speed wind turbines for efficiency maximization [J]. Automatica, 2013, 49(10): 3023-3031.

[15] Mérida J, Aguilar L T, Dávila J. Analysis and synthesis of sliding mode control for large scale variable speed wind turbine for power optimization [J]. Renewable Energy, 2014, 71:715-728.



- [16] 李树江, 蔡海峰, 邓金鹏, 等. 自适应变步长最大风能捕获算法 [J]. 控制工程, 2012, (01): 69-72.
- [17] 曾志勇, 冯婧, 周宏范. 基于功率给定的双馈风力发电最大风能捕获策略 [J]. 电力自动化设备, 2010, 6(6): 25-30.
- [18] Tan K, Islam S. Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors [J]. Ieee Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(2): 392-399.
- [19] Nam Y S, Kim J G, Paek I S, et al. Feedforward Pitch Control Using Wind Speed Estimation [J]. Journal of Power Electronics, 2011, 11(2): 211-217.
- [20] Chen F, Yang J. Fuzzy PID controller used in yaw system of wind turbine[C]. Power Electronics Systems and Applications, 2009. PESA 2009. 3rd International Conference on. IEEE, 2009: 1-4.
- [21] Qi Y, Meng Q. The application of fuzzy PID control in pitch wind turbine[J]. Energy Procedia, 2012, 16: 1635-1641.
- [22] Sedda L, Morley D, Brown H E. Characteristics of Wind-Infective Farms of the 2006 Bluetongue Serotype 8 Epidemic in Northern Europe [J]. Ecohealth, 2015:1-7.
- [23] Wang Z J, Liu S, Liu T. Intelligent Controlling of Wind Turbine Based on Fuzzy Immunity PID Algorithmic[C]. Biomedical Engineering and Computer Science (ICBECS), 2010 International Conference on. IEEE, 2010: 1-4.
- [24] Zhang F, Shi Q, Wang Y, et al. Simulation research on wind solar hybrid power system based on fuzzy-PID control[C]. 2007 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2007: 338-342.
- [25] 赵辉, 李斌, 朱利强, 等. 基于模糊 PID 的风电系统转速控制仿真研究 [J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(5): 63-65.
- [26] 郭鹏. 风电机组非线性前馈与模糊PID结合变桨距控制研究 [J]. 动力工程学报, 2010, (11): 838-843.
- [27] 孙伟, 杨海群, 聂婷. 风力发电统一变桨距的双模糊控制策略研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(03): 794-796.
- [28] 肖成, 陈刚, 冯登超, 等. 基于最优模糊推理的风电机组变桨距二维模糊PID控制器设计 [J]. 国外电子测量技术, 2013, (10): 22-25.
- [29] 姚兴佳, 马佳, 郭庆鼎. 大型风电机组的动态加权模糊独立变桨距控制 [J]. 电气应用, 2011, (24): 38-41.
- [30] 于会群, 高扬, 张浩, 等. 变速恒频双馈风电系统风力机转矩模糊PID控制 [J]. 热力发电, 2014, (05): 49-53.
- [31] Jafarnejadsani H, Pieper J, Ehlers J. Adaptive control of a variable-speed variable-pitch wind turbine using RBF neural network[C]//Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2012 IEEE. IEEE, 2012: 216-222.
- [32] Xing Z X, Zheng Q T. BP Neural Network PID Control in Variable Speed Adjustable Pitch Wind Turbine Control System[C]. The International Conference on Sensing Computing and Automation, Chongqing, China. 2006: 1094-1098.
- [33] 宋新甫, 刘军, 黄戈. 基于 RBF 神经网络整定 PID 的风力发电变桨距控制 [J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(4): 49-53.
- [34] 邢作霞, 郑琼林, 姚兴佳, 等. 基于 BP 神经网络的 PID 变桨距风电机组控制 [J]. 沈阳工业大学学报, 2007, 28(6): 681-686.
- [35] 高文元, 祝振敏, 井明波, 等. 风电机组变桨距系统神经网络模糊自适应控制 [J]. 武汉理工大学学报, 2008, (04): 533-536.
- [36] 韩旭杉, 陈翡. 基于模糊RBF神经网络的风电机组变桨距控制 [J]. 电气传动, 2011, (02): 36-39.
- [37] 刘杰, 杨海群. 小波神经网络PID在风电系统最大功率点跟踪中的应用研究 [J]. 工矿自动化, 2013, (12): 73-76.

- [38] 童菲, 晁勤, 袁铁江, 等. 基于神经网络的双馈风电机组转速PID控制仿真 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, (19): 14-18.
- [39] 邢作霞, 郑琼林, 姚兴佳, 等. 基于BP神经网络的PID变桨距风电机组控制 [J]. 沈阳工业大学学报, 2006, (06): 681-686.
- [40] Valenciaga F, Puleston P F. Variable structure control of a wind energy conversion system based on a brushless doubly fed reluctance generator [J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2007, 22(2): 499-506.
- [41] 杨锡运, 刘欣然. 风力发电机组的桨距角滑模变结构控制[C]. 第二十九届中国控制会议论文集. 2010..
- [42] 秦生升, 顾春雷, 李杜. 基于自适应反演滑模的风电机组变桨距控制器的设计 [J]. 煤炭技术, 2011, 30(12): 226-228.
- [43] 杨俊华, 郑俭华, 杨梦丽, 等. 变桨距风力发电机组恒功率反馈线性化控制 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(10): 1365-1370.
- [44] 王东风, 贾增周, 孙剑, 等. 变桨距风力发电系统的滑模变结构控制 [J]. 华北电力大学学报, 2008, 35(1): 1-4.
- [45] Bakka T, Karimi H R. Wind turbine modeling using the bond graph[C]. Computer-Aided Control System Design (CACSD), 2011 IEEE International Symposium on. IEEE, 2011: 1208-1213.
- [46] 余梦. 变速恒频风力发电系统最大风能捕获控制研究 [D]. 湖北; 湖北工业大学, 2013.
- [47] 刘磊. 永磁直驱式风力发电并网系统中变流器的研究 [D]. 兰州; 兰州交通大学, 2011.
- [48] 毛华锋. 大型变桨距风力发电机叶片优化设计 [D]. 浙江; 浙江大学, 2013.
- [49] 张耀华. 水平轴风力机叶片气动性能数值模拟 [D]. 重庆; 重庆大学, 2013.
- [50] 蔺红, 晁勤. 直驱式风电机组建模及最大功率跟踪控制 [J]. 水力发电, 2010, (1): 86-88.
- [51] 赵微微, 张磊, 井延伟. 变桨风力发电机组控制器优化设计 [J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3436-3440.
- [52] 纪志成, 冯海英, 沈艳霞. 基于反馈线性化的风轮机变桨距控制研究 [J]. 微特电机, 2011, (11): 40-43.
- [53] 叶远茂, 吴捷, 张先亮, 等. 变桨距风力机分区段模拟方法及其控制策略 [J]. 电网技术, 2010, 34(1): 159-163.
- [54] 邓文浪, 段斌, 谢敏. 双级矩阵变换器直驱风力发电系统最大风能追踪 [J]. 电网技术, 2012, 36(5): 73-78.
- [55] 何玉林, 黄帅, 苏东旭, 等. 变速风力发电机组最大风能追踪与桨距控制[J]. 控制工程, 2012, 19(003): 523-526.
- [56] 梁立哲, 姚兴佳, 祝贺, 等. 风力发电系统最大风能追踪的非线性控制策略 [J]. 华东电力, 2013, 41(2): 353-358.
- [57] 王印松, 海日, 王妹媛. 带有速度观测器的风力发电系统风能捕获控制 [J]. 电子技术应用, 2015, 41(1): 135-138.
- [58] 叶杭冶, 李伟, 林勇刚, 等. 基于半物理仿真的变速恒频独立变桨距控制 [J]. 机床与液压, 2009, (01): 90-93.
- [59] 邢作霞, 陈雷, 孙宏利, 等. 独立变桨距控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, (26): 131-138.
- [60] 倪焕山. 1.5MW双馈型风力机变桨距控制算法研究 [D]; 电子科技大学, 2012.
- [61] 陈虎, 马建光. 基于 MATLAB 的风力发电机组建模和仿真研究 [J]. 节能技术, 2012, 30(1): 24-28.
- [62] 刘豹, 唐万生. 现代控制理论 [M]. 机械工业出版社, 1983.
- [63] 吴宏鑫, 沈少萍. PID 控制的应用与理论依据 [J]. 控制工程, 2003, 10(1): 37-42.

- [64] 王佳雯. 变速变桨距风电系统建模与智能控制技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [65] 王立军, 贺俊, 焦斌. 变速变桨距风力发电机的模糊滑模变结构控制 [J]. 电气自动化, 2009, (5): 18-20.
- [66] 马进, 程代展, 梅生伟, 等. 基于半张量理论的电力系统稳定域边界逼近 (二)应用 [J]. 电力系统自动化, 2006, (11): 7-12.
- [67] 马进, 程代展, 梅生伟, 等. 基于半张量理论的电力系统稳定域边界逼近 (一)理论基础 [J]. 电力系统自动化, 2006, (10): 1-5.
- [75] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [76] 徐琴, 楼俊尚. 风电并网现状及产业前景分析[J]. 华东电力, 2012, 40(12): 2145-2147.
- [77] 何满. 中国风电产业政策研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2013.
- [78] 郭军. 我国能源问题面临的现状及对策分析[J]. 资源节约与环保, 2012(6): 59-60.
- [79] 高艳红. 变桨系统模糊滑模控制技术研究[D]. 兰州交通大学, 2012.
- [80] 梁婷婷. 大型风力发电机的鲁棒自适应控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [81] 龚宇琴. 风电机组独立变桨控制策略的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [82] 王玫, 赵晓丽. 中国风电发展经济政策回顾与分析[J]. 中国能源, 2011, 33(10): 10-14.
- [83] 王立军. 变速变桨距风力发电机组的滑模变结构控制技术研究. 华东理工大学, 2010.
- [84] 王秀丽. 风电控制技术研究与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [85] Chae, Wook Lim. Torque control methods for wind turbines and their responses[C]. 2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Republic of Korea, Jeju, 2012: 1788-1790.
- [86] Boubekeur Boukhezzar, Houria Siguerdidjane. Nonlinear control of a variable-speed wind turbines using a two-mass model [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(1): 149-162.
- [87] 叶杭冶, 潘东浩. 风电机组变速与变桨距控制过程中的动力学问题研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(12): 1321-1328.
- [88] Jovan M, Luis T A, Jorge D. Analysis and synthesis of sliding mode control for large scale variable speed wind turbine for power optimization [J]. Renewable Energy, 2014, 71: 715-728.
- [89] Brice Beltran, Tarek Ahmed-Ali, Mohamed Hachemi Benbouzid. Sliding mode power control of variable-speed wind energy conversion systems [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2008, 23(2): 551-588.
- [90] Fernando Valenciaga, Paul Puleston. Variable structure control of a wind energy conversion system based on a brushless doubly fed reluctance generator [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2007, 22(2): 499-506.
- [91] Sousso Kelouwani, Kodjo Agbossou. Nonlinear model identification of wind turbine with a neural network. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2004, 19(3): 607-612.
- [92] 夏长亮, 宋战锋. 变速恒频风力发电机系统变桨距自抗扰控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(14): 91-95.
- [93] 秦生升, 顾春雷, 李杜. 基于自适应反演滑模的风电机组变桨距控制器的设计[J]. 煤炭技术, 2011, 30(12): 226-228.

- [94] Bakka Tore, Karimi Hamid Reza. A linear parameter-varying approach to  $H_\infty$  control of an offshore wind turbine[C]. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, United states, Anchorage, 2013: 434-439.
- [95] Cai G W, Li C, Yang D Y. Rotor current control for a doubly-fed induction generator using a novel nonlinear robust control approach based on extended state observer-backstepping [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2015, 37: 494-504.
- [96] Jena Debashisha, Rajendran Saravanakurnar. A review of estimation of effective wind speed based control of wind turbines [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 43: 1046-1062.
- [97] Jovan Merida, Luis T. Aguilara. Maximizing the performance of variable speed wind turbine with nonlinear output feedback control [J]. Procedia Engineering, 2012, 35: 31-40.
- [98] 赵微微, 张磊, 井延伟. 变桨风力发电机组控制器优化设计[J]. 电网技术, 2014, 12: 3436-3440.
- [99] 王立鹏, 巫发明. 减小变速变桨型风电机组载荷的控制策略研究[J]. 西华大学学报, 2011, 30(2): 70-74.
- [100] S. Abdeddaim, A. Betka. Optimal tracking and robust power control of the DFIG wind turbine[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2013, 49: 234-242.
- [101] Oscar B. Sliding mode control strategy for wind turbine power maximization [J]. Energies, 2012, 5: 2310-2330.
- [102] Ahmet Yilmaza, Zafer Ozer. Pitch angle control in wind turbines above the rated wind speed by multi-layer perceptron and radial basis function neural networks [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36: 9767-9775.
- [103] Xiuxing Yin, Yong-gang Lin, Wei Li, et al. Adaptive sliding mode back-stepping pitch angle control of a variable-displacement pump controlled pitch system for wind turbines[J]. ISA Transactions, 2015, 58: 629-634.
- [104] Evangelista C, Puleston P, Valenciaga F, et al. Lyapunov-designed super-twisting sliding mode control for wind energy conversion optimization [J]. IEEE Trans Ind Electron, 2013, 60(2): 538-545.
- [105] Jafarnejadsani H, Pieper J, Ehlers J. Adaptive control of a variable-speed variable-pitch wind turbine using radial-basis function neural network [J]. IEEE Trans Control Syst Technol, 2013, 21(6): 2264-72.
- [106] Mohamed Benbouzid, Brice Beltran, Yassine Amirat, et al. Second-order sliding mode control for DFIG-based wind turbines fault ride-through capability enhancement[J]. ISA Transactions, 2014, 53: 827-833.
- [107] Carolina Evangelista, Fernando Valenciaga, Paul Puleston. Active and reactive power control for wind turbine based on a MIMO 2-sliding mode algorithm with variable gains [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2013, 28: 682-689.
- [108] 张珍珍. 不确定条件下风电场有功功率控制方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [109] Borhen Torchani, Anis Sellami, Germain Garcia. Saturated sliding mode control for variable speed wind turbine [J]. The fifth International Renewable Energy Congress IREC, 2014, 1-5.
- [110] Lei Zhang, Chunliang E, Haidong Li, Honghua Xu. A new pitch control strategy for wind turbines base on quasi-sliding mode control [J]. Sustainable Power Generation and Supply International Conference, 2009, 1-4.
- [111] Saravanakumar R, Jena Debashisha. A novel fuzzy integral sliding mode current control strategy for maximizing wind power extraction and eliminating voltage harmonics [J]. Energy, 2015, 85: 677-686.
- [112] Jovan M, Jorge D, Luis T A. Robust quasi-continuous sliding-mode control of a variable-speed wind turbine [J]. 2012 9th International conference on electrical engineering, computing science and automatic control (CCE), 2012: 1-6.

- [113] 王婕. 弹性高超声速飞行器跟踪问题控制方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [114] 刘金琨. 滑模变结构控制Matlab仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [115] 李鹏. 传统和高阶滑模控制研究及其应用[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [116] Yong Feng, Bing Chen, Xinghuo Yu, et al. Terminal sliding mode control of induction generator for wind energy conversion systems [J]. IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012, 4741-4746.
- [117] 肖帅, 杨耕, 耿华. 抑制载荷的大型风电机组滑模变桨距控制[J]. 电工技术学报, 2013, 07: 145-150.
- [118] 潘庭龙, 沈艳霞. 风电系统滑模极值搜索MPPT控制方法研究[J]. 太阳能学报, 2012, 12: 2193-2197.
- [119] 秦斌, 姜学想, 周浩. 基于SVM的永磁直驱风电系统滑模变桨距控制[J]. 仪器仪表学报, 2014, 07: 1525-1531.
- [120] Levant A. High-order sliding modes, differentiation and output- feedback control [J]. Int J Control, 2003, 76: 924-941.
- [121] Levant A. Quasi-continuous high-order sliding-mode controllers [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(11): 1812-1815.
- [122] 胡杨. 准连续高阶滑模控制器在高超声速飞行器控制器设计中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [123] Levant A. Homogeneity approach to high-order sliding mode design[J]. Automatica, 2005, 41(5): 823-830.
- [124] 王佳雯. 变速变桨距风电系统建模与智能控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [125] 谢建平. 风力发电系统最大风能捕获及其并网研究[D]. 燕山大学, 2013.
- [126] Florin Iov, Anca Daniela Hansen, Poul Sorensen. Wind turbine blockset in matlab/ simulink [D]. Aalborg University, 2004.
- [127] 艾超, 陈文婷, 孔祥东, 叶壮壮. 基于反馈线性化的液压型风力发电机组最佳功率追踪控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(6): 778-786.
- [128] 汶占武, 郭文. Terminal滑模直驱风力发电变桨控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 19: 75-80.
- [129] S. Tarafta, D. Rekiouaa, D. Aouzellagb, et al. A proposed strategy for power optimization of a wind energy conversion system connected to the grid [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 101: 489-502.
- [130] B. Boukhezzar, H. Siguerdidjane. Comparison between linear and nonlinear control strategies for variable speed wind turbines [J]. Control Engineering Practice, 2010, 18: 1357-1368.
- [131] Taraft S, Rekioua D, Aouzellag D. A proposed strategy for power optimization of a wind energy conversion system connected to the grid [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 101: 489-502.
- [132] 肖成. 双馈风力发电系统的建模与控制研究[D]. 天津: 河北工业大学.
- [133] 吕翔宙. 兆瓦级风力发电机组变桨距控制研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2011.
- [134] Yun Yang, Kwan-Tat Mok, Siew-Chong Tan. Nonlinear dynamic power tracking of low-power wind energy conversion system [J]. IEEE Transaction on power electronics, 2015, 9(30): 5223-5236.
- [135] Maria L C, Gianluca I, Giuseppe O. Fully sensorless robust control of variable-speed wind turbines for efficiency maximization

[J]. Automatica, 2013, 49: 3023-3031.

[136] R. Saravanakumar, Debashisha Jena. Validation of an integral sliding mode control for optimal control of a three blade variable speed variable pitch wind turbine [J]. Electrical Power and Energy Systems. 2015, 69:421- 429.

[137] Zong Q, Wang J, Tian B L, Tao Y. Quasi-continuous high-order sliding mode controller and observer design for flexible hypersonic vehicle [J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 27: 127-137.

[138] 王婕, 宗群, 田栢苓, 范文茹. 基于拟连续高阶滑模的高超声速飞行器再入姿态控制 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31(9): 1166-1173.

[139] 范金锁, 张合新, 周鑫, 吕永佳. 再入飞行器姿控系统的准连续高阶滑模设计 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(7): 841-846.

[140] 林壮, 段广仁, 宋申民. 刚体航天器姿态跟踪的高阶滑模控制器设计[J]. 控制与决策, 2009, 24(11): 1753-1756.

[141] 秦斌, 周浩, 杜康, 王欣. 基于RBF网络的风电机组变桨距滑模控制 [J]. 电工技术学报, 2013, 05: 37-41.

[142] 王伟. 基于滑模控制的风力发电系统研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.

[143] 宋杰, 王宪锐, 董晓斐, 张丹. 基于RBFNN的风电机组变桨距反推滑模控制 [J]. 计算机仿真, 2015, 01: 122-126.

[144] 廖茜, 邱晓燕, 江润洲, 王刚, 李卓艺. 风电机组变桨距系统的反推滑模控制 [J]. 电气传动, 2015, 02: 45-49.

[145] 秦生升. 风力发电系统的变桨距控制策略研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.

[146] 罗敏. 大型风力发电机组变速变桨距控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.

[147] 史宏宇. 无速度传感器感应电机高阶滑模控制方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

[148] 王佳雯, 龚华军, 陈永. 大型风力发电机组变桨距控制系统设计与仿真[J]. 电气自动化, 2011, 5: 18-20+36.

[149] 王秀丽. 双馈型风力发电系统励磁电源控制策略的研究[D]. 太原理工大学, 2006.

[150] 全球风能理事会GWEC. 2014年全球风电装机容量统计[J]. 风能, 2015, 2: 50-53.

[151] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用, 2007, 3: 407-418.

[152] 穆效江. 多关节机器人的智能滑模变结构控制方法研究[J]. 北京: 北京工业大学, 2008.

[153]

指 标
剽窃文字表述
1. 从众”行为具有非理性，它通常会导致严重的后果，如过分拥挤、疏散速度降低等，最终导致死亡人数增加或损失加剧的严重后果。
2. 重大事故灾难下的人员疏散问题是一个涉及多学科、复杂的系统课题。尤其是疏散中人员心理和行为模型的研究，是涉及生理学、心理学、社会学等学科的复杂问题。该问题复杂性的另外一个方面就是人员疏散模拟方法和结果的可靠性问题。
3. 目前，计算机仿真技术已成为研究人员疏散的有效技术手段，也是该领域目前的发展方向。 本文回顾了人员疏散研究的



4. 刺激后的一种反应。因此，对各种特定场景下，影响个体疏散行为的心理因素的探索和分析是研究人员疏散的重要工作。


说明：1. 指标是由系统根据《学术论文不端行为的界定标准》自动生成的。

2. 红色文字表示文字复制部分；黄色文字表示引用部分。

3. 本报告单仅对您所选择比对资源范围内检测结果负责。

4. Email: [amlc@cnki.net](mailto:amlc@cnki.net)

 <http://e.weibo.com/u/3194559873>

 [http://t.qq.com/CNKI\\_kycx](http://t.qq.com/CNKI_kycx)

CNKI科研诚信管理系统研究中心