

摘要

风电是新能源中的一个重要组成部分，而风电叶片是风力发电过程中的一个重要组件。受限于风电叶片尺寸大、表面形状复杂、涂料粘度大等条件制约，当前风电叶片涂装以人工辊涂为主，自动化设备尚未成熟应用。针对此问题，设计了风电叶片自动辊涂机，主要内容包括：

首先，通过调研当前风电叶片涂装工艺需求，在实践单位现有产品基础上，设计了风电叶片自动辊涂机。设计产品通过分淋方式，将涂料淋至由动力辊和涂敷辊组成的分淋辊涂装置的辊缝中，利用辊缝及涂料粘性将涂料均匀，进而由涂敷辊将涂料辊涂至叶片表面。通过仿真分析，得到涂装过程中涂敷辊对叶片的涂装压力应在 500 N 以下，转速在 10~60 r/min 之间。

其次，针对设计的涂料分流器和分淋辊涂装置，使用 Ansys 软件中的 Fluent 模块进行了流场模拟分析。依次对分流器各孔涂料流出量均匀程度、单孔涂料经过辊缝后均匀程度和多孔经辊缝后均匀程度进行了仿真分析，验证设计内容能实现涂料均匀分布在涂敷辊上，进而涂装至叶片表面。

再次，为保证涂装过程中涂装力稳定，采用液压伺服力闭环系统对其进行控制。利用 Matlab 软件中 Simulink 模块，对关键部件进行建模，分别使用 PID 控制器和 MPC 控制器进行了仿真分析，确定系统能实现涂装过程的恒力输出。MPC 控制器响应时间 0.42s，没有超调量，具有更好的控制稳定性。

最后，对设计内容进行了试验验证。受限于研发条件，对设计进行了部分调整，制作出试验样机，通过手持方式进行了涂装试验。分别从涂料稀释度、涂敷辊转速两个角度进行了试验，验证设计方案能将涂料均匀涂装至叶片表面。在试验场景下，当涂敷辊转速为 20 r/min，涂料稀释度为 5%时，涂装效果最好，可满足涂装工艺需求。

设计的风电叶片自动辊涂机，能完成风电叶片自动辊涂各项工艺需求，为涂装自动化过程的实现提供了技术支持。

关键词：风电叶片；涂装；辊涂；流场仿真；模型预测控制；涂层厚度

ABSTRACT

Wind power plays a vital role as a component of renewable energy, with wind turbine blades being crucial elements in the process of generating wind power. However, due to the large size of wind turbine blades, complex surface shapes, and high viscosity of coating materials, the current method of coating wind turbine blades relies mainly on manual roller application, and the use of automated equipment is not yet mature. To tackle this challenge, a design for an automatic roller coating machine specifically tailored for wind turbine blades has been developed, including the following main features:

Firstly, based on the research of current coating process requirements for wind turbine blades, an automatic roller coating machine for wind turbine blades was designed on the basis of existing products in practical units. The designed product utilizes a drip method to pour the coating into the roller gap of the drip roller section, which is composed of a power roller and a coating roller, and uses the roller gap and coating viscosity to evenly distribute the coating. Then, the coating roller applies the coating to the surface of the blades. The feasibility of the design was verified through the analysis of key components in the design structure. Through simulation analysis, it was found that the coating pressure of the coating roller on the blades during the coating process should be below 500 N, and the speed should be between 10-60 r/min.

Secondly, for the designed coating distributor and drip roller section, Fluent module in Ansys software was used to simulate and analyze the flow field. Simulation analysis was conducted on the uniformity of coating flow rates from each hole of the distributor, the uniformity of coating after passing through the roller gap of a single hole, and the uniformity of coating after passing through multiple holes and the roller gap. This verified that the design can achieve uniform distribution of coating on the coating roller and subsequently on the blade surface.

Thirdly, to ensure stable coating force during the coating process, a hydraulic servo force closed-loop system was used for control. Key components were modeled

using Simulink module in Matlab software, and simulation analysis was performed using both PID controllers and MPC controllers to determine the system's ability to achieve constant force output during the coating process. The MPC controller has a response time of 0.42 seconds, no overshoot, and offers better control stability.

Finally, the design underwent experimental validation. Due to constraints in research and development resources, certain modifications were made to the design, and a prototype was created for testing purposes. Manual coating experiments were conducted, taking into account coating dilution and coating roller speed, to verify the design's ability to achieve uniform coating application on the blade surface. In the experimental scenario, when the coating roller speed is 20 r/min and the paint dilution is 5%, the coating effect is the best and can meet the coating process requirements.

The designed automatic roller coating machine for wind turbine blades effectively meets the diverse process requirements of automated roller coating for wind turbine blades, offering valuable technical support for streamlining the coating process through automation.

Key words: wind turbine blades; spray; Flow field simulation; Model prediction control; film thickness

目录

摘要	I
ABSTRACT	II
第一章 绪论	1
1.1 研究背景及目的	1
1.2 研究现状	3
1.2.1 涂料发展历程	3
1.2.2 涂装机器人国内外研究现状	5
1.3 研究内容	9
第二章 风电叶片自动辊涂机结构设计	11
2.1 涂装工艺分析与平台简介	11
2.1.1 机组行走系统	13
2.1.2 仿形移动系统	13
2.2 涂装执行系统的设计	16
2.2.1 涂料输送装置设计	16
2.2.2 分淋辊涂装置设计	17
2.2.3 压力调整装置设计	20
2.3 涂装执行系统静力学分析	21
2.3.1 涂敷辊静力学分析	21
2.3.2 异形板静力学分析	25
2.4 涂装执行系统模态分析	26
2.4.1 涂敷辊模态分析	26
2.4.2 模态结果分析	27
2.5 本章小结	29
第三章 分淋辊涂装置涂层均匀性分析	30
3.1 分流器出口流场分析	30
3.1.1 分流器的设计	30
3.1.2 分流器模型简化	31

3.1.3	分流器仿真前处理	31
3.1.4	边界条件设置	32
3.1.5	仿真结果分析	33
3.2	单出口区域辊涂过程分析	33
3.2.1	辊缝区域选择与参数确定	34
3.2.2	辊涂过程模型建立	34
3.2.3	辊涂过程模型预处理	34
3.2.4	单出口区域辊涂过程仿真结果分析	36
3.3	多出口区域辊涂过程分析	37
3.3.1	多出口区域辊涂过程模型建立	37
3.3.2	多出口区域辊涂过程仿真结果分析	39
3.4	本章小结	40
第四章	分淋辊涂装置控制策略分析	41
4.1	恒力控制方案设计	41
4.1.1	伺服阀的选型设计	42
4.1.2	液压缸选型设计	43
4.1.3	传感器的选型设计	44
4.1.4	数学建模	44
4.2	基于 PID 控制器 Simulink 仿真分析	46
4.2.1	PID 控制器	46
4.2.2	基于 PID 控制器 Simulink 仿真分析	47
4.3	基于 MPC 控制器 Simulink 仿真分析	48
4.3.1	MPC 控制器	48
4.3.2	基于 MPC 控制器的 Simulink 仿真分析	52
4.3.3	对比分析	54
4.4	本章小结	55
第五章	风电叶片自动辊涂机试验研究	56
5.1	辊涂试验设计	56
5.1.1	涂装对象	56
5.1.2	涂料输送装置	57

5.1.3 辊涂试验装置	57
5.1.4 涂层测量区域与方法	57
5.2 辊涂试验装置	59
5.2.1 试验分流器设计	59
5.2.2 试验分流器仿真结果	59
5.2.3 辊涂试验装置制作	60
5.3 辊涂试验	62
5.3.1 涂装要求	63
5.3.2 不同转速下稀释度对涂层厚度的影响	63
5.4 本章小结	64
第六章 结论与展望	65
6.1 结论	65
6.2 展望	66
参考文献	67
致谢	70

第一章 绪论

在当今社会，能源的稳定供应是推动社会进步的重要基石。然而，随着化石燃料的广泛应用，其带来的安全隐患和环境破坏问题逐渐成为公众关注的焦点。因此，为缓解传统化石能源过度开采引起环境破坏的恶化，新能源和可再生能源的兴起，为全球各国实现可持续发展提供了新的路径。这些能源形式的推广不仅有助于环境保护，而且能够促进经济的繁荣。风能作为一种清洁且可再生的能源，在全球能源结构的转型中扮演着至关重要的角色。风力发电系统的各个组件，其制造技术和质量直接影响到风电的经济效益和运行稳定性。尽管如此，当前风电行业的制造设备在自动化方面仍有待提高，许多生产环节仍依赖于人工操作。因此，通过持续改进风力发电机的设计、提升制造工艺的先进性、实施有效的防腐蚀策略以及采用高标准材料，可以显著增强风力发电的质量、性能和效率，从而为实现清洁能源的未来贡献力量。

1.1 研究背景及目的

2005年，时任浙江省委书记的习近平提出了“绿水青山就是金山银山”的重要理念和科学论断，明确我国的绿色发展之路^[1]。2020年，第七十五届联合国大会上习主席提出，中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳的碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取到2060年前实现“碳中和”，即“30·60”目标。伴随着全世界对生态环境的关注，中国正在引领全世界进行新能源结构的调整，而能够担任能源结构调整的主力就是清洁能源，风电作为新能源中开发较为成熟的形式，不断高速发展。

风能是新能源中的一个重要组成部分，早在二十世纪初，人们就开始尝试使用风能进行发电并加以应用。中国拥有丰富的风力资源，自1986年我国首个风力发电厂建成并网，在近40年的发展中，中国风电相关行业技术水平不断发展与进步，部分企业技术已与国际最先进企业相当，中国已成为全球风电装机容量最大的国家^[2]。根据中国可再生能源学会风能专业委员会做出的统计分析^[3]，近年来我国新增装机容量稳步提升，23年风力发电总量比22年高75.9GW，同

比增长 20.7%，如图 1-1 所示。

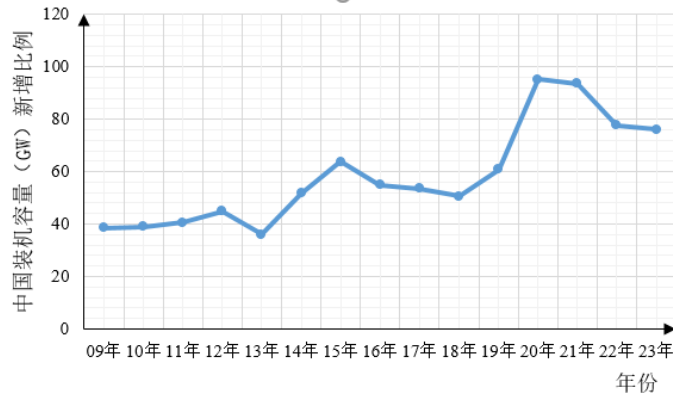


图 1-1 中国 2009~2023 年新增风电机组装机量

Fig. 1-1 New wind turbine assembly capacity in China from 2009 to 2023

风力发电是通过风力推动风机叶片旋转，由风能转换为机械能，最终经过发电机将机械能转化为电能，进而并网应用。当前风力发电技术^[4]，通过调整叶片的形状与工作角度，在 3 m/s 的风速下，即可运作并开始发电。随着风力发电功率的快速提升，风电叶片有着大型化发展的趋势，目前，海上风机叶片长度已超过 120 m，超大型叶片已达 131 m^[5]。



图 1-2 风电机组

Fig. 1-2 Wind turbines

我国的风资源丰富，主要分布沿海地区、三北地区和海上^[6]。这些地区气候较为苛刻，加之叶片的不断增大，叶片工作环境越来越为恶劣，对叶片表面的耐磨性、抗腐蚀性、强度等都有越来越严格的苛求，对叶片表面涂料及涂装工艺也有更为严格的要求。

涂装是风电叶片生产处理中最后一个主要环节，当前以人工辊涂或喷涂为

主，有些自动化设备仍处于初试阶段，尚未在行业广泛应用。风电叶片形状是复杂曲面，并且尺寸越来越大，人工进行涂装效率低、质量参差不齐，加之涂料溶剂中一般会含有部分甲醛或其他化合物，对长时间工作者的健康有危害，所以迫切需求相关的自动化设备。为此，开发能适用于多种叶片的涂装设备，能提升风电叶片生产的自动化程度，提高叶片涂装效率和质量，具有重要的应用价值和市场前景^[7]。



图 1-3 手工辊涂及手工喷涂

Fig. 1-3 Hand roller coating and hand spraying

(a)手工辊涂；(b)手工喷涂

1.2 研究现状

1.2.1 涂料发展历程

风电叶片的涂层会受到阳光的暴晒，部分地区的昼夜温差较大，叶片在运转的过程中有可能会受到风沙雨雪的剧烈冲击。此外大量的沙石、蚊虫尸体、水滴的黏附也会对漆面造成破坏^[8]。针对风电叶片涂料耐磨性不佳导致维修成本居高不下这一问题，是当前阻碍风力发电行业发展的主要瓶颈之一。为了解决这一问题，需要研发能够提高涂层耐磨性的新型材料^[9]。在涂层材料的选择上，应该避免过于依赖单一材料，采用不同类型的树脂混合或改良，以完善涂料的性能表现。尝试聚酯、聚丙烯等高分子材料，可在涂料制备过程中引入不同的树脂组分，并通过合理的配比，获得更优异的风电叶片涂层性能。在选择风电叶片涂料时，需要充分考虑其耐磨性、耐候性、抗紫外线性能等基本性能指标。这使得叶片涂层对涂料有一个比较高的要求。现在市面上常见的水性漆材料主要有聚氨酯材料、

氟聚合物材料、聚丙烯酸酯材料及其他材料等。

国际上对风力发电叶片的防护涂层材料进行的历史悠久,包括日本、德国、美国等发达国家早在上个世纪 80 年代就已经展开相关探索。

日本旭硝子公司^[10]在 1982 年推出了 Lumiflon 产品,Lumiflon 产品是世界上首个可溶性常温固化型涂料氟树脂,在具备传统氟涂料优点的同时,还具有常温固化的独特特性,因此施工更加简便迅速。此外,Lumiflon 产品不仅可在小型器件上使用,还适用于直接喷涂于大型器件,为涂料行业带来了革新。

德国 Evonik Degussa 公司^[11]混合高、低分子量的多醇结合多异氰酸酯和光稳定的芳香族胺制备聚氨酯涂衣添加经过六甲基二硅氮烷疏水处理和球磨机修饰的热解硅石作为填料。环氧树脂具有良好的涂装性能,并成功实现涂层的优异附着性。

日本电工株式会社^[12]制备的叶片涂料总共三层。三层涂料的设计使叶片存在弯曲或表面不平坦的情况下仍然展现出较强的附着性能。

美国 PPG 公司^[13]在叶片涂料中引入相应比例的丙烯酸类聚合物,通过改性处理,新涂层继承了丙烯酸酯的基本特性,同时大幅增强了其耐候性和防污性能。等性能,为风电叶片表面保护提供了有效而可靠的解决方案。

虽然国内对风电叶片防护涂层材料的研究起步较晚,但是也取得了良好的进展。

西北永新化工股份有限公司^[14]研制出一种高性能风电涂料,该涂料以有机氟硅改性弹性聚氨酯脲树脂为基料。与传统涂料相比,该涂料的耐腐蚀性能明显增强。

中海油常州涂料化工研究院的狄志刚^[15]等制备了一种高耐候耐磨弹性聚氨酯固化剂,该固化剂与传统的固化剂相比较具有良好的耐候性与耐磨性。对底材的附着力有明显的优势。

沈剑平^[16]利用水性聚氨酯作为风电叶片涂料,通过试验比较后发现氨基磺酸盐改性的低黏度 HDI 固化剂综合性能最优,且可在不经稀释的情况下与含羟基的水分散体组分混合均匀,提高了叶片涂装的效率。

李沛欣^[17]等人通过对丙烯酸树脂进行聚酯改性,将丙烯酸和聚酯并用,发挥两种树脂的优点,可有效提升聚氨酯叶片涂料的干燥性、耐候、耐磨、柔韧性、附着力等性能。

罗彤彤^[18]等人利用 FEVE 氟碳树脂为主要材料的水性涂料,通过对不同复

合颗粒比例的试验对比,当 AIN 质量分数为 4%时该涂料表现出良好的抗冲蚀性能以及良好的疏水性、抗结冰性。

随着涂料的不断发展,涂料的强度越来越高,相应其粘度也越来越大。限于涂料粘度的增加,使得部分涂料涂装工艺要求使用辊涂的方式进行。

1.2.2 涂装机器人国内外研究现状

辊涂法是用辊子将涂料辊涂在被涂物表面的涂装方法^[19]。辊涂法按涂覆辊的旋转方向一般分为顺涂法和逆涂法^[20]。辊涂技术是一种涂装方法,它通过辊子蘸取涂料,然后在工件表面滚动进行涂装。这种技术通常可以分为手工辊含颗粒射涂和机械辊涂两种方式,适用于平面设备的涂装。辊涂施工方法适用于较大平面表面的涂装,虽然施工效率低于喷涂,但却比刷涂的施工效率高出 2 到 3 倍。辊涂的涂料浪费也较少,不形成涂料粉尘,对环境的污染较小^[21]。

辊涂机最早是用于涂布材料的设备,其发展历史可以追溯到 19 世纪。最早的辊涂机出现在工业革命时期,当时主要用于纺织品的印刷和涂布。这些早期的辊涂机通常由手工操作,使用木制或金属辊子进行涂布。随着工业化的发展,到了 20 世纪初期,辊涂机开始采用电动驱动,提高了生产效率和涂布质量。同时,辊涂机的应用范围也逐渐扩大,开始在造纸、塑料、橡胶等行业中得到广泛应用。随着科学技术不断的进步,20 世纪中期,辊涂机的设计和制造技术不断改进,出现了更加先进的辊涂机型号,如多辊涂布机、喷涂辊涂机等。这些新型辊涂机在涂布效率、涂布均匀性和自动化程度上都有了显著提高。21 世纪:随着数字化技术的应用,辊涂机的控制系统和操作界面也得到了升级,实现了更加智能化的生产过程。同时,辊涂机在环保方面也得到了改进,采用了更加环保的涂布材料和涂布工艺。辊涂机在不断发展和改进中,已经成为了现代工业生产中不可或缺的设备之一,为各种材料的涂布和加工提供了高效、精确的解决方案。

在涂装机器人领域,日本、美国等发达国家在上世纪 80 年代开始了专注的研究工作。以色列理工学院则在 90 年代初开展了名为“TAMIR”的项目^[22-24],该项目旨在研发一款室内墙体安装、墙面抹灰的机器人。实验结果显示,在当时的技术条件下,机器人的工作精度达到了 7 mm。

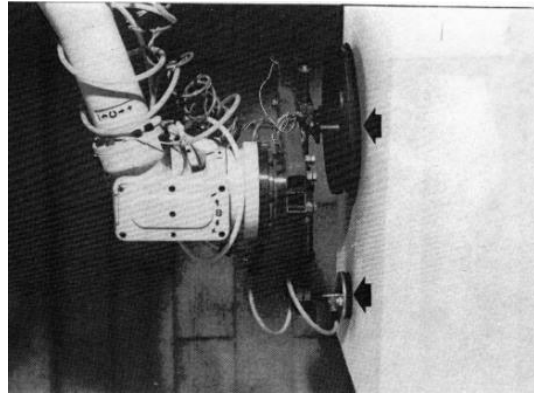


图 1-4 TAMIR 墙体安装机器人

Fig. 1-4 TAMIR Wall building robot

Abdullatif 等人^[25,26]完成了一款墙面滚涂机器人的设计,该机器人结构独特,包括一个具有两自由度的工作臂和一个拥有三自由度的移动底盘。工作臂利用连杆机构,并搭载丝杠驱动系统以确保准确运动,同时在末端执行器上使用弹簧实现柔性设计。该机器人已通过墙面滚涂测试,研究团队希望通过优化工作路径来提高机器人的工作效率。整体而言,该机器人系统设计简洁清晰,尽管工作臂的丝杠驱动方式对提升工作效率构成了限制。



图 1-5 墙面滚涂机器人

Fig. 1-5 Wall roll coating robot

研究人员 I-Ming C 团队^[27]最新研发的涂装机器人—ArtiSprayer,采用了创新的设计构架和强大的功能。ArtiSprayer 系统包括六轴机械臂、四轮底盘、升降装置以及涂装枪,设计紧凑、集成度高。该机器人最大涂装高度可达 7.2 m,能够满足工业建筑领域的涂装要求。实地实验表明,ArtiSprayer 每小时的涂装面积可达 250 平方米,效率接近于人工操作的两倍。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/448004013135006110>