中 文 摘 要

变电站是电力系统重要的组成部分，其能否安全稳定的工作对经济运行和人民生活有着极大的影响。为了保证用电的安全性和可靠性，需要对变电站的一些重要设备进行日常巡检，防止因重要设备损坏而造成大面积停电事故。随着科技的进步和发展，变电站巡检机器人逐渐取代了人工巡检，解决了很多问题，例如地势环境复杂、恶劣天气影响、危险系数高、检测数据易出错或漏检等。传统的巡检机器人大都采用电池供电方式来续航，虽说可以实现电量过低时自动返回并充电，但这样的方式在很大程度上降低了工作效率，电池的频繁维护与更换也增加了一定的成本。因此本文采用无接触供电（简称 CPT）的方式来为机器人续航。预先埋设的供电电缆不但满足了机器人的供电需求，同时解决了导航方面的问题，使机器人更加简单化、经济化。

本文首先对电力巡检机器人的结构及功能作了简单介绍，紧接着主要对两方面问题进行了深入研究，一是在无接触供电技术上尽可能提高系统的传输效率；二是在巡检机器人的导航功能方面，设计循迹纠偏方案使机器人尽可能以更高的精准度工作运行。

在改善能量传输效率方面，首先对搭建的分离变压器模型进行研究，通过增加补偿电路来改善 CPT 系统的输出特性，同时对 CPT 系统中常出现的频率分裂现象进行了研究，包括其产生的条件和对系统传输效率的影响，为频率分裂现象的抑制和利用提供了理论依据。

在机器人的导航功能方面，首先对纠偏功能实现的依据——供电电缆产生的交变磁场进行了分析，包括对磁场分布的分析和信号检测方案的设计等。在进行对巡检机器人的运动学分析之后，设计基于 LQR 线性二次型最优控制算法的纠偏控制器，通过仿真试验得出最优参数，完成最佳控制器的设计，并将该控制方法与传统 PID 控制方法的控制效果进行对比，分析结果表明基于 LQR 算法的纠偏控制模型具有较好的平稳性、快速性和精确性，在工程设计时有一定的实践意义。

关键词：无接触供电；补偿电路；分裂频率；循迹纠偏；LQR 算法

ABSTRACT

The substation is an important part of the power system and its ability to work safely and stably has a great impact on economic operation and people's lives. In order to ensure the safety and reliability of electricity consumption, daily inspections of some important equipment in substations are required to prevent large scale power outages caused by damage to important equipment. With the progress and development of technology, substation inspection robots have gradually replaced manual inspection and solved many problems, such as complex terrain environment, bad weather, high risk factor and easy error or omission of inspection data. Most of the traditional inspection robots use battery power to last, and although they can automatically return and recharge when the power is too low, this reduces the efficiency to a large extent, and the frequent maintenance and replacement of the battery also increases the cost to a certain extent. This paper therefore uses a contactless power supply (CPT for short) to power the robot. The pre-buried power supply cable not only meets the power requirements of the robot, but also solves the problem of navigation and makes the robot simpler and more economical.

The paper begins with a brief introduction to the structure and function of the power inspection robot, followed by an in-depth study of two main issues: firstly, improving the transmission efficiency of the system as much as possible in terms of contactless power supply technology; and secondly, designing a trajectory correction scheme to make the robot work and operate with as much accuracy as possible in terms of the navigation function of the inspection robot.

In terms of improving the energy transfer efficiency, firstly, the separation transformer model built is studied to improve the output characteristics of the CPT system by adding compensation circuits, while the frequency splitting phenomenon that often occurs in CPT systems is studied, including the conditions under which it occurs and its impact on the system's transfer efficiency, providing a theoretical basis for the suppression and exploitation of the frequency splitting phenomenon; in terms of the robot's navigation function.

Firstly, the alternating magnetic field generated by the power supply cable, which is the basis for the implementation of the deflection correction function, is analysed, including the analysis of the magnetic field distribution and the design of the signal detection scheme. The kinematic analysis of the inspection robot is followed by the design of a deflection controller based on the LQR linear-quadratic optimal control algorithm, and the design of the optimal controller is completed through simulation tests. The analysis results show that the LQR algorithm-based correction control model has better smoothness, speed and accuracy, and has certain practical significance in engineering design.

Key words: Contactless power supply; Compensation circuit; Split frequency; Traction correction; LQR algorithm

目 录

第一章 绪论 1
1.1 论文研究背景及意义 1
1.1.1 选题背景 1
1.1.2 研究意义 1
1.2 无接触供电传输技术的分类 2
1.2.1 磁感应耦合型无线电能传输 2
1.2.2 微波辐射式无线电能传输 3
1.2.3 磁耦合谐振式无线电能传输 4
1.3 国内外研究现状 5
1.3.1 国外研究现状 5
1.3.2 国内研究现状 7
1.4 本文主要研究内容 8
第二章 巡检机器人工作原理及选型设计 9
2.1 巡检机器人机械结构 9
2.1.1 轮系结构 10
2.1.2 检测设备选型 12
2.1.3 云台结构 13
2.2 巡检机器人功能 14
2.2.1 外观异常图像识别 14
2.2.2 温度异常图像识别 14
2.3 巡检机器人控制结构设计 15
2.3.1 驱动电机参数计算 15
2.3.2 避障方式选择 16
2.3.3 供电方式选择 16
2.3.4 导航方式选择 17
2.4 本章小结 17
第三章 CPT 工作模型原理及分析 19
3.1 磁感应式 CPT 工作模型原理 19
3.2 可分离变压器模型 20
3.2.1 可分离变压器的等效互感模型 20

3.2.2 补偿电路 21
3.2.3 LCL 谐振网络的输出特性分析 26
3.3 分裂频率及其补偿方法 28
3.3.1 频率分裂现象 28
3.3.2 负载对频率特性的影响 31
3.3.3 抑制频率分裂方法 33
3.4 本章小结 35
第四章 导航控制器的设计 37
4.1 电磁导引方式的原理 37
4.2 纠偏信号的检测 38
4.2.1 电缆周围的电磁场分布 38
4.2.2 磁场强度检测方法 39
4.2.3 磁场信号检测方案 39
4.2.4 信号检测模块的设计 42
4.3 纠偏控制方案的选择 42
4.3.1 巡检机器人运动学分析 42
4.3.2 LQR 控制器的设计与仿真分析 46
4.3.3 LQR 与 PID 控制仿真对比 49
4.4 本章小结 50
第五章 总结与展望 51
5.1 总结 51
5.2 展望 51
参 考 文 献 53
致 谢 57

第一章 绪论

1.1 论文研究背景及意义

1.1.1 选题背景

在电力系统中，变电站是很重要的一部分，它的安全性和稳定性直接关系到整个国家的经济发展和人民的日常生产。为确保用电的安全性和可靠性，变电站需要对重要设备进行日常巡检，以防止各种故障的发生。目前人工巡检方式居多，其主要分为普通巡检和特定时期巡检。普通巡检即根据变电站的工作情况，安排好每日的时间、地点来进行巡检，并明确每日巡检的频率；而特定时期巡检是在一些特定的环境和气候条件下，工作人员进行一些特定的巡视工作。巡检员需要凭借自己的工作经验来获取设备信息，然后手工记录仪器的数据资料，鉴别出仪器是否故障。对于高温装置，需要手动用红外热成像仪来进行测温。这样一来，每次巡检都会花费很长的时间，并且对员工的职业能力和工作的质量都有很高的要求。由于多数变电站地形复杂、气候多变，导致人工巡视的工作难度增加，风险也增大。同时，在巡检过程中，可能会出现判断错误或者是漏检的情况，再加上巡检工作中所记载的数据资料不能得到快速的上传处理，给整个电力系统的安全运营带来了巨大的威胁。

变电站巡检机器人的投入运行，使传统的人工巡检中存在的问题得到了解决。机器人机身上装备了微控制器和许多先进的监测仪器，能够完成测量温度、读取屏幕示数、智能分析数据、开关状态识别等工作[1]。巡检机器人可以代替工作人员完成巡检任务，甚至其工作效率和工作准确度都是人工的几倍。巡检计划一般是通过巡检任务事先确定的，其中包含巡检时间、巡检项目、巡检路线等内容。机器人根据预先设定的任务进行工作，不仅能够完成基站操作人员的远程任务，还能够对各个设备的数据信息进行实时记载，并及时告知用户可能出现的问题。巡检机器人的到来使变电站的工作质量和效率都有了很大的提升，对问题及预警设备进行快速解决和处理，大大地减少了故障及断电的危险，同时也减轻了巡检人员的工作量和变电站的运营费用，从而提高了变电站的智能化程度[2]。

1.1.2 研究意义

由于变电站普遍面积较大，需要巡检的区域较多，传统的电池式巡检机器人，其电池电量限制了工作时间，同时电池的使用寿命较低，导致电池的频繁维护与更换增加了不少成本。本文提出采用无接触供电的方式来为巡检机器人供电，将供电电缆铺设于地下，机器人按照预设路线行进。

采用无接触供电方式的优势在于：

（1）不采用电池续航方式，省去了充电环节，提高了工作效率；

（2）机器人工作区域都会铺设供电线圈，工作时长不受限制；

（3）供电线圈不易损坏，基本不需维护，使用寿命大幅增加，降低了成本；

（4）供电线圈同时可用于机器人的路径纠偏，降低了机体结构的复杂度。

本文所述的无接触供电技术主要采用电磁感应原理，在能量传输过程中，对一二次线圈进行合理的谐振补偿以改善输出特性，同时需要对频率分裂现象进行深入分析，采取一定的措施以提高能量传输效率。在机器人的路径纠偏方面，需要不断完善算法来尽可能的提高其导航精度。因此，研究无接触供电技术对于巡检机器人的高效工作以及对于变电站的安全稳定运行起到至关重要的作用。

1.2 无接触供电传输技术的分类

科学家从 1880 年代开始对无接触供电技术进行了探索，第一次是由美国的科学家尼古拉·泰斯拉在 1899 年用 50kHz 的 AC 电流使一盏远程的白炽灯发光，从而实现了这一目标。大约在 1960 年之后，美国一家公司又开始了对无接触供电技术的深入研究，为该技术的发展打下了坚实的基础，从而将该理论变为了实际应用。

近年来，磁耦合谐振式无线电能传输技术的出现在无线电能传输领域受到了广泛关注。目前，无线电能传输技术按照其传输方式的异同可以大致划分为三种类型，即磁感应耦合型无线电能传输、磁耦合谐振式无线电能传输和微波辐射型无线电能传输[3]。除此之外，还可以利用激光或者超声波来实现无线电能传输技术。虽然不同的传输类型所采用的介质不同，但它们的基本原理是一致的，都是在一次侧通过特定装置将初始电能转换成某种形式的能量然后发射出去，经二次侧接收后再转变回电能形式，对电能质量进行一系列处理之后，供给用户使用。其中，激光的危险性更高，庞大的电流会对身体造成难以预料的损害，因此怎样才能更好地操控激光，使之更好地为人们所用，这一技术目前还处于研究阶段。下面将详细描述前三种主流传输方式的原理及优缺点。

1.2.1 磁感应耦合型无线电能传输

磁感应耦合型无线电能传输技术的工作原理和理想变压器相似，即主要利用了电磁感应原理。将初始电能整流、滤波、逆变之后传递给一次侧线圈，交流电流使一次侧线圈中产生交变磁通，其穿过相邻的二次侧线圈便会在二次侧线圈中感应出电动势[4]。与理想变压器不同的是，该装置两线圈之间没有使其紧密联系的铁芯，而是一种松耦合的结构，因此其传输效率较理想变压器差些。如何能够在松耦合结构的基础上进一步提高

能量传输效率，是目前着重研究的方向。如图 1.1 所示为磁感应耦合型无线电能传输的基本工作原理，主要由初始电源、整流逆变等处理模块、一二次线圈耦合结构、二次侧电能质量优化和用电设备等构成。

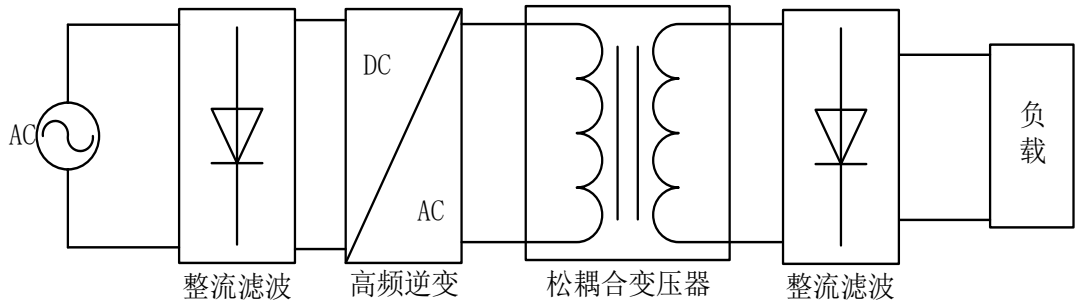


图 1.1 磁感应耦合型无线电能传输原理图

Fig1.1 Schematic diagram of magnetic induction coupled wireless energy transmission

在该传输方式中，一次侧线圈和二次侧线圈间耦合程度受其空间相对位置的影响极为明显。当两线圈在空间中相互垂直时耦合程度几乎为零，当两线圈平行时耦合度变高并达到最优。除此之外，两线圈间的空间距离对系统的传输效率也有很大的影响，也就是说，负载的空间位置在很大程度上会影响到电能的传输效果，因此目前磁感应耦合式无线电能传输技术只适合在短程（厘米级）范围内使用[5]。

1.2.2 微波辐射式无线电能传输

如图 1.2 所示为微波辐射式无线电能传输的基本原理，初始电能处理后经微波转换装置转变为微波信号，并由特定微波天线将该信号发送到天空，当另一侧的信号接收装置识别并接收微波信号以后，再将其通过微波转换装置转变为电信号，经一系列优化处理后便可用于负载[6]。微波辐射式的传输原理较为简单，前后基本是一个互逆过程，与大功率信号传输相似，相比于无线通讯，它有如下优势：

（1）能量传输方向并不固定，降低了技术难度；

（2）能量传输速度快，进一步提高了工作效率；

（3）能量利用率高，在太空中以及在大气层传输能量时几乎没有损耗。

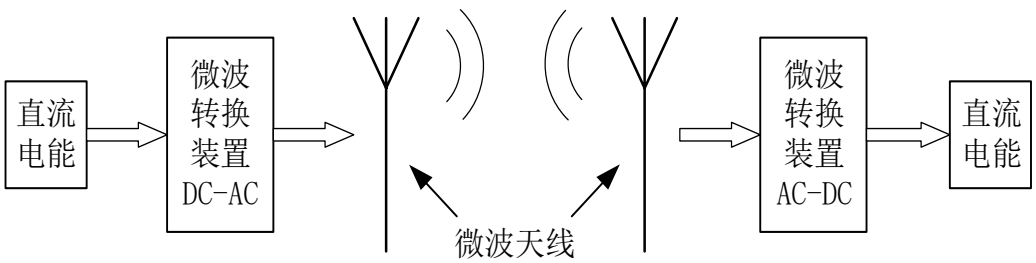


图 1.2 微波辐射式无线电能传输原理图

Fig1.2 Microwave radiation type radio energy transmission schematic

微波辐射式无线电能传输的距离范围约是千米级。由于微波无法穿透障碍物，在传输过程中对方向选择的要求很高[7]，同时微波场有害于生物健康，种种缺点导致该技术未被广泛使用，仅在军事领域有少部分应用。

1.2.3 磁耦合谐振式无线电能传输

磁耦合谐振式无线电能传输是近些年较为流行的传输方式，它是利用近场强耦合技术来实现无接触能量传输的，本质也就是共振原理。当两个物体之间的谐振频率相同时，能量传输的效率会很高；反之，若谐振频率不同，能量传输的效率几乎为零。如图 1.3 所示为磁耦合谐振式无线电能传输的基本工作原理，一、二次侧线圈的频率始终保持一致，当一次侧线圈产生交变磁场时，二次侧线圈能够产生磁谐振并得到高频交流电，再将交流电整流处理后供用电设备使用，如此一来便完成了从一次侧到二次侧的无接触能量传输[8]。

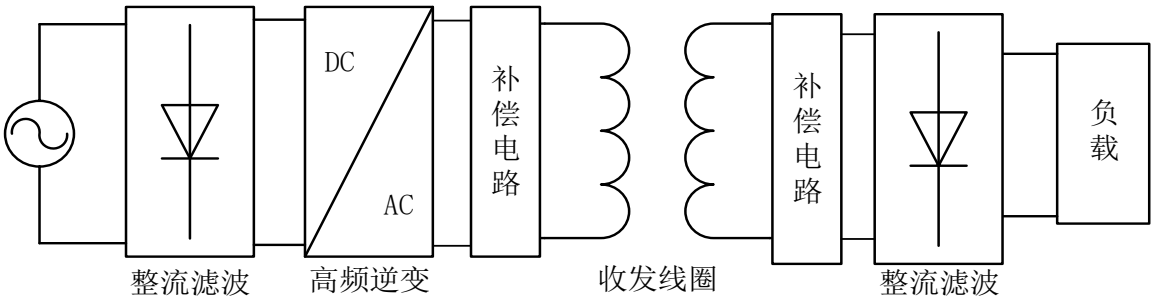


图 1.3 磁耦合谐振式无线电能传输原理图

Fig1.3 Schematic diagram of magnetically coupled resonant wireless energy transmission

磁耦合谐振式的无线电能传输距离范围处于前两者之间，一般是几十厘米到几十米，约为收发设备尺寸的数倍[9]。与其他能量传输技术相比，该方式有以下优点：

（1）强耦合磁共振技术使其有较高的传输效率和较大的功率；

（2）能量传输方向不受限制，实用性较高；

（3）穿透性较强，能量传输过程中不会被障碍物影响；

（4）所用的近场强耦合技术，不会对周边有机体造成放射性伤害。

表 1.1 不同类型的无接触供电技术性能对比

Table 1.1 Comparison of the performance of different types of contactless power supply technology

	磁感应耦合式	微波辐射式	磁耦合谐振式
工作频率	10kHz-50kHz	300MHz-300GHz	20kHz-500MHz
传输功率	数百瓦-数百千瓦	<100 毫瓦	数百千瓦
传输距离	数毫米-数厘米	数百米-数千米	数厘米-数米
适用场合	负载需移动	外太空	无线充电

不同原理的无线电能传输技术有着不同的特性，表 1.1 所示为上述三种典型传输技术的性能对比。基于对巡检机器人供电时传输距离较近、传输功率较大等特点[10]，本文选择采用磁感应耦合式供电技术。

1.3 国内外研究现状

随着无线输电技术的发展与使用，人们从电力线路中解放出来，节省了空间成本的同时也大大降低了线路维护成本。对于该技术的探索与研究，各国的发展程度不尽一致，欧美国家研究较早，依靠着先进的科学技术，将无接触供电应用到了很多领域；我国对该技术的研究虽然没有很久，但是经过众多学者的不懈努力，也取得了一定的成果。

1.3.1 国外研究现状

关于无线能量传输的技术，其实很久以前就已经被美国的一位科学家 Nicola Tesla 所提出，并且在一八九三年的一次展示中，用无接触供电技术将一盏白炽灯点亮，惊艳了在场所有观众，后来又在一八九九年用 50kHz 的交流电将一盏未接触的日光灯点亮[11]。再后来由于科技水平有限，无线能量传输技术也就再无进展。一直到二十世纪六十年代初期，美国一家公司的科研工作者又重新展开了对该技术的探索，进一步充实了这一领域的理论。

1960 年—1975 年间，部分学者设想将微波辐射技术应用于无接触供电领域。美国科学家 Peter E.Glaser 于一九六八年首次提出用外太空的太阳能进行发电的设想，其基本思路是在太空中利用太阳能进行发电，再通过微波辐射式无线电能传输技术将所发电能输送到地面以供人们生产生活使用[12]。

1990 年后，新西兰一大学教授带队再次对无接触供电技术展开研究，首次提出了磁耦合感应式无线电能传输(CPT)技术[13]，并在大量的期刊文献中解释了其实现原理和存在的问题。后来一些技术尚未成熟的发达国家也相继投入人力、物力和财力，对 CPT 技术展开了更深层次的研究，并将其应用到了生产生活中。

二十一世纪初，欧洲一家公司发明了一种无线充电器，但是当时市面上的绝大多数电子设备仅支持有线充电方式，而且电能的传输效率并不理想，所以该类型的无线充电器未受消费者欢迎，逐渐在市场上销声匿迹。

2007 年左右，日本的一群研究者提出将无线电能传输技术应用于电动客车的充电领域，预估电能传输效率为 90%左右。但是在实践时发现，一旦客车充电时的停车位置与预设位置产生偏差，充电效率就会直线下降，导致充电时间变长。如若在传输过程中有障碍物阻挡，会有涡流现象出现，使温度大幅上升[14]。除此之外，电动客车的底盘设计

也带来了许多技术问题，种种难题导致电动汽车无线充电技术的发展止步不前。如图 1.4 所示为日本设计的磁感应耦合式无线充电客车。



图 1.4 日本研制的无线充电巴士

Fig1.4 Wireless charging bus developed in Japan

2010 年，欧洲某一公司继续展开了关于无线电能传输技术在实现无线充电领域的研究，并成功创造出无线充电汽车。之后该公司先后与多家企业合作，推动了无线充电技术的发展。

磁耦合谐振式无线电能传输是近些年新兴的能量传输方式，因此科研工作者对该方式的研究并未深入。2006 年底，美国高校一教授带领其团队首次对磁耦合谐振式无线电能传输技术的工作原理进行了深入分析[15]，并在不久后采用该技术将一盏日光灯成功点亮，该过程中电能的传输效率在百分之九十以上，很快学术界就对磁耦合谐振式无线电能传输技术产生了浓厚的兴趣。

2009 年前后，日本某研究团队尝试用可分离变压器模型来分析无接触供电系统，针对负载的不变性而引入阻抗匹配网络，从而对频率分裂现象起到了一定的抑制作用，同时改善了输出特性，提高了传输效率。之后该团队还发明了一种螺旋天线，主要用于汽车的无线充电。

2013 年左右，某科研团队推出了一款智能存储系统，采用的便是磁耦合谐振式无接触供电技术，能量利用率约为百分之四十五[16]。次年，韩国某院校的学者们设计了一种用于公交车充电的专用车道，当公交车在该车道行驶时，可以做到边行进边充电。

2015 年，美国高通公司针对于磁耦合谐振式无接触供电所实现的无线充电功能继续作了改进。同时，日本数名科研人员在磁耦合谐振式无线电能传输技术的传输功率方面作了深入研究[17]。经过一系列的实验验证和数据分析，认为采用两个有相位差的透射谐振器可以在很大程度上改善系统的输出特性。

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/946034124021010105