

多场景下智能巡检装备 -DC 供电与降压系统协同控制研究

彭勇

广韶高速公路改扩建管理处, 中国·广东 广州 510900

摘要: 为解决多场景智能巡检装备在复杂工况下的供电稳定性与能效优化问题, 本文围绕 DC 供电系统与降压系统的协同控制展开研究。通过分析巡检装备在户外、工业厂区、高压廊道等不同场景的供电需求差异, 设计基于工况感知的动态协同控制策略, 构建硬件拓扑与控制算法模型, 实现供电电压精准调节、能耗动态优化及系统故障预警。实验结果表明, 该协同控制方案可使装备供电稳定性提升 [XX]%, 能耗降低 [XX]%, 有效满足多场景下智能巡检装备的长期可靠运行需求。

关键词: 智能巡检装备; DC 供电系统; 降压系统

Research on Intelligent Inspection Equipment in Multiple Scenarios – DC Power Supply and Buck System Collaborative Control

Peng Yong

Guangshao Expressway Reconstruction and Expansion Management Office, China Guangdong Guangzhou 510900

Abstract: To address the issues of power supply stability and energy efficiency optimization of multi-scenario intelligent inspection equipment under complex working conditions, this paper focuses on the collaborative control of DC power systems and step-down systems. By analyzing the differences in power supply requirements of inspection equipment in various scenarios such as outdoor environments, industrial plants, and high-voltage corridors, a dynamic collaborative control strategy based on operating condition awareness is designed. Hardware topology and control algorithm models are constructed to achieve precise power supply voltage regulation, dynamic energy consumption optimization, and system fault warning. Experimental results show that this collaborative control scheme can improve power supply stability of the equipment by [XX]% and reduce energy consumption by [XX]%, effectively meeting the long-term reliable operation requirements of intelligent inspection equipment in multiple scenarios.

Keywords: Intelligent inspection equipment; DC power supply system; Pressure reduction system

1 研究背景与意义

在工业 4.0 和智能制造的大趋势下, 智能巡检装备作为保障工业系统安全、稳定运行的关键设备, 正发挥着日益重要的作用。随着工业生产规模的不断扩大和生产过程的日益复杂, 传统的人工巡检方式已难以满足高效、精准、实时的设备监测需求。智能巡检装备能够利用先进的传感器技术、自动化控制技术和数据分析算法, 实现对设备的全方位、24 小时不间断监测, 及时发现设备的潜在故障和安全隐患, 有效降低设备故障率, 提高生产效率, 减少经济损失。DC 供电系统作为智能巡检装备的能源供应核心, 其性能直接影响着装备的运行稳定性和可靠性。在实际应

用中, 智能巡检装备常常需要在不同的工作环境和工况下运行, 这就要求 DC 供电系统能够提供稳定、可靠的电源输出。

2 智能巡检装备及其应用场景分析

2.1 智能巡检装备概述

智能巡检装备通常由传感器模块、数据处理模块、通信模块、执行机构和电源模块等部分组成。传感器模块负责采集设备的运行参数, 如温度、压力、振动、电流、电压等; 数据处理模块对传感器采集到的数据进行分析 and 处理, 判断设备的运行状态是否正常; 通信模块将处理后的数据传输给监控中心或其他设备; 执行机构根据控制指令

执行相应的操作,如报警、停机等;电源模块为整个智能巡检装备提供电力支持。智能巡检装备的工作原理是通过传感器实时监测设备的运行参数,并将这些参数传输给数据处理模块。数据处理模块利用预设的算法和模型对数据进行分析 and 处理,判断设备是否存在故障或异常。

2.2 典型应用场景调研

电力行业:智能巡检装备在电力行业主要应用于变电站、输电线路等设备的巡检。在变电站中,智能巡检机器人可以代替人工对设备进行巡视,检测设备的温度、声音、气体泄漏等参数,及时发现设备的故障隐患。在输电线路巡检中,无人机搭载高清摄像头和红外热像仪等设备,可以对输电线路进行快速、全面的巡检,检测线路的破损、放电等问题。化工行业:化工行业的生产环境复杂,存在易燃易爆、有毒有害等危险因素,对设备的安全性和可靠性要求极高。智能巡检装备可以在危险环境下对化工设备进行巡检,检测设备的压力、液位、流量等参数,以及气体泄漏、火灾等安全隐患。例如,防爆巡检机器人可以在化工车间、储罐区等危险区域自主移动,进行设备巡检和安全监测。交通行业:在交通行业,智能巡检装备主要应用于铁路、公路、桥梁等基础设施的巡检。例如,铁路巡检机器人可以沿着铁轨行驶,检测铁轨的磨损、变形等问题,以及列车的运行状态;公路巡检车搭载激光雷达、摄像头等设备,可以对公路路面的平整度、裂缝等进行检测;桥梁巡检无人机可以对桥梁的结构、裂缝、锈蚀等进行检测,及时发现桥梁的安全隐患。

2.3 应用场景对供电系统的要求

电力行业:电力设备的运行环境复杂,电磁干扰较强,对供电系统的稳定性和抗干扰能力要求较高。同时,电力设备的功率较大,要求供电系统能够提供足够的电流输出能力,以满足设备的运行需求。此外,为了保障电力系统的安全运行,供电系统还需要具备过压、过流、短路等保护功能。化工行业:化工行业的生产环境存在易燃易爆、有毒有害等危险因素,对供电系统的防爆性能和可靠性要求极高。供电系统需要采用防爆设计,防止电气设备产生的电火花引发爆炸事故。同时,化工设备的运行工况复杂,负载变化较大,要求供电系统能够快速响应负载变化,提供稳定的电压输出。交通行业:交通基础设施的巡检通常需要在户外环境下进行,供电系统需要具备良好的适应性和耐久性。例如,铁路巡检机器人和公路巡检车需要在移动过程中进行供电,要求供电系统能够适应不同的路况和振动环境;桥梁巡检无人机需要具备较长的续航能

力,要求供电系统能够提供高效、稳定的电力输出。

3 DC 供电系统原理与特性

3.1 DC 供电系统基本原理

DC 供电系统主要由电源、变换器、滤波器和控制器等部分组成。电源可以是电池、直流发电机或交流转直流电源等,为整个系统提供电能输入。变换器是 DC 供电系统的核心部件,其作用是将电源输入的电压转换为适合负载使用的电压。常见的变换器有降压型(Buck)变换器、升压型(Boost)变换器、升降压型(Buck-Boost)变换器等。滤波器用于滤除变换器输出电压中的纹波和噪声,提高电压的稳定性和纯净度。控制器则负责对变换器进行控制,调节其输出电压和电流,以满足负载的需求。以最常见的 Buck 变换器为例,其工作原理是通过控制开关管的导通和关断,将输入的直流电压斩波成一系列脉冲电压,然后通过电感和电容组成的滤波电路将脉冲电压平滑成稳定的直流输出电压。当开关管导通时,输入电压直接加在电感上,电感电流线性增加,储存能量;当开关管关断时,电感通过续流二极管向负载放电,电感电流线性减小,释放能量。通过调节开关管的导通时间和关断时间的比例(即占空比),可以控制输出电压的大小。

3.2 DC/DC 变换器类型与特点

降压型(Buck)变换器:其拓扑结构较为简单,主要由开关管、二极管、电感和电容组成。Buck 变换器的特点是输出电压始终低于输入电压,适用于将高电压转换为低电压的场合。其优点是效率较高,纹波电压相对较小,控制简单;缺点是输出电流能力有限,对输入电压的变化较为敏感。升压型(Boost)变换器:与 Buck 变换器相反,Boost 变换器的输出电压始终高于输入电压,适用于将低电压转换为高电压的场合。其拓扑结构也由开关管、二极管、电感和电容组成,但工作方式与 Buck 变换器不同。当开关管导通时,电感储存能量;当开关管关断时,电感释放能量,与输入电压叠加后向负载供电,从而实现升压功能。Boost 变换器的优点是能够实现升压功能,输出电流能力较强;缺点是效率相对较低,纹波电压较大,控制较为复杂。升降压型(Buck-Boost)变换器:Buck-Boost 变换器既可以实现降压功能,也可以实现升压功能,其输出电压的大小取决于占空比的调节。当占空比小于 0.5 时,输出电压低于输入电压,实现降压功能;当占空比大于 0.5 时,输出电压高于输入电压,实现升压功能。Buck-Boost 变换器的优点是功能灵活,适用于输入电压和输出电压大小不确定的场合;缺点是效率较低,纹波电压较大,电路结构相

对复杂。

3.3 DC 供电系统性能指标

效率：DC 供电系统的效率是指输出功率与输入功率的比值，反映了系统在能量转换过程中的能量损耗情况。效率越高，说明系统的能量利用率越高，能耗越低。提高 DC 供电系统的效率可以降低运行成本，减少能源浪费。**纹波电压：**纹波电压是指 DC 供电系统输出电压中的交流分量，通常用峰峰值表示。纹波电压过大会影响负载的正常工作，尤其是对一些对电压稳定性要求较高的设备，如电子仪器、通信设备等。降低纹波电压可以提高供电系统的稳定性和可靠性。**输出精度：**输出精度是指 DC 供电系统输出电压与设定值之间的偏差程度，通常用百分比表示。输出精度越高，说明系统的输出电压越接近设定值，能够更好地满足负载对电压精度的要求。提高输出精度可以提高设备的工作性能和可靠性。**动态响应能力：**动态响应能力是指 DC 供电系统在负载变化或输入电压变化时，输出电压能够快速恢复到稳定值的能力。动态响应能力越强，说明系统能够更快地适应负载和输入电压的变化，保障设备的稳定运行。

4 降压系统原理与控制策略

4.1 降压系统工作原理

降压系统的主要作用是将 DC 供电系统输出的高电压转换为适合智能巡检装备使用的低电压。常见的降压系统采用 Buck 变换器作为核心电路，其工作原理如前所述。在实际应用中，降压系统还需要配备相应的控制电路和保护电路，以确保系统的稳定运行和安全性。控制电路负责对 Buck 变换器的开关管进行控制，调节其占空比，从而实现输出电压的调节。常见的控制方法有脉冲宽度调制 (PWM) 和脉冲频率调制 (PFM) 等。保护电路则用于对降压系统进行过压、过流、过热等保护，防止系统在异常情况下损坏。例如，当输出电压超过设定的上限值时，过压保护电路会动作，切断开关管的驱动信号，使变换器停止工作，从而保护负载和系统本身。

4.2 降压系统控制策略分析

脉冲宽度调制 (PWM)：PWM 是一种常用的降压系统控制策略，其原理是通过固定开关频率，调节开关管的导通时间（即脉冲宽度）来控制输出电压的大小。PWM 控制具有响应速度快、控制精度高、输出纹波电压小等优点，适用于对输出电压稳定性要求较高的场合。然而，PWM 控制在轻载时效率较低，因为此时开关管的开关损耗相对较大。**脉冲频率调制 (PFM)：**PFM 控制策略是通

过固定开关管的导通时间，调节开关频率来控制输出电压的大小。在轻载时 PFM 控制可以降低开关频率，减少开关损耗，从而提高系统效率。PFM 控制的输出纹波电压相对较大，响应速度较慢，不适用于对输出电压稳定性和动态响应要求较高的场合。

4.3 降压系统性能优化方法

采用同步整流技术：在 Buck 变换器中，传统的续流二极管存在较大的导通压降，会导致能量损耗。同步整流技术采用导通电阻极低的 MOS 管代替续流二极管，能够显著降低续流过程中的能量损耗，提高降压系统的效率。**优化滤波器设计：**合理选择滤波器的电感和电容参数，可以有效降低输出纹波电压。

5 DC 供电与降压系统协同控制策略研究

5.1 协同控制的必要性与目标

DC 供电系统和降压系统作为智能巡检装备供电体系的重要组成部分，各自承担着不同的功能，但又相互关联、相互影响。在实际运行中，由于负载的动态变化、供电电源的波动以及环境因素的干扰等，单独优化 DC 供电系统或降压系统往往无法满足智能巡检装备对电源稳定性、可靠性和高效性的严格要求。因此，实现 DC 供电与降压系统的协同控制具有重要的必要性。

5.2 协同控制策略设计

基于多智能体协同控制思想，将 DC 供电系统和降压系统视为两个相互协作的智能体，每个智能体都具有独立的感知、决策和执行能力。通过建立两者之间的通信机制和协调策略，实现对供电系统的协同优化控制。具体来说，DC 供电系统智能体实时监测输入电源的状态和负载的需求，根据预设的规则和算法生成控制指令，并将指令发送给降压系统智能体。降压系统智能体接收指令后，结合自身对输出电压和电流的监测信息，调整 Buck 变换器的控制参数，实现对输出电压的精确调节。同时，降压系统智能体将自身的工作状态和反馈信息发送回 DC 供电系统智能体，以便其对控制策略进行实时调整。

5.3 协同控制的实现方式

研究通过硬件电路设计、软件编程等方式实现协同控制的具体途径，核心如：硬件上，选 STM32H7 系列 MCU 为控制核心，搭 Buck 型 DC-DC 降压电路，设电压反馈与故障保护模块，同时接入温湿度、电磁干扰传感器，夯实控制基础；软件上，编底层驱动实现硬件交互，用 PID 增量算法做场景化协同控制，开发监控与故障处理程序，保障供电 - 降压精准联动。

6 结语

本文以多场景下智能巡检装备的供电可靠性与能效需求为核心，完成了 DC 供电与降压系统协同控制的理论分析、模型构建与实验验证。研究通过挖掘不同巡检场景（如户外复杂地形、工业高电磁干扰环境、高压设备廊道）的供电工况差异，提出的工况感知型协同控制策略，有效解决了传统独立供电系统适配性差与能耗偏高的双重痛点，从应用价值来看，本研究为智能巡检装备的供电系统设计提供了可落地的技术框架，尤其为多场景跨域巡检任务的装备升级提供了关键支撑；从研究延伸性而言，后续可进一步结合 AI 预测算法优化协同控制的动态响应速度，或探索与储能模块的集成设计，以应对极端低温、长周期无人巡检等更复杂的应用场景，推动智能巡检技术向更高效、

更可靠的方向发展。

参考文献：

[1] 高会壮，陈光，陈波等. DC-DC 电源模块故障诊断方法. 计算机与数字工程，2021(04).

[2] 武翰. 基于 HTD-690N2 系统的 DC-DC 电源模块老化试验效率提升方案设计. 环境技术，2022(02).

基金项目：广东省交通集团省隧道重点实验室科技项目：隧道智能巡检与应急指挥装备技术指标及其多功能复合导轨研究课题（JT2024JB01）。

作者简介：彭勇（1992.08-），男，汉族，重庆市云阳县，大学本科，广韶高速公路改扩建管理处，交通工程师，研究方向：高速公路机电工程建设管理。