

序

当今时代，能源转型与电力系统变革的浪潮正以前所未有的速度席卷而来。电力系统作为现代社会的能源核心，其稳定、高效、可持续地运行对于社会经济的发展 and 人民生活质量的提升起着至关重要的作用。在这一背景下，新型配电与轨道交通供电系统态势感知技术应运而生，成为电力领域研究与实践的焦点。《新型配电与轨道交通供电系统态势感知》一书正是在这样的大背景下，对这一前沿技术进行深入探讨与阐述的一部极具价值的著作。

该书作者团队长期深耕于新型配电与轨道交通供电系统相关领域，凭借扎实的专业知识和敏锐的学术洞察力，致力于将这一领域的最新研究成果与实践经验融入该书，为电力系统领域的专业人士、科研人员以及相关从业者提供全面、深入且具有前瞻性的参考资料。

从内容上看，该书全面且系统地阐述新型配电与轨道交通供电系统态势感知的各个方面，涵盖从基础理论到实际应用的全链条知识体系。在态势觉察阶段，作者详细介绍了新型轨道交通供电系统建模、数据察觉等关键技术。这些技术的深入探讨为后续的态势理解和预测奠定了坚实的数据基础，体现了作者在数据获取层面的深入思考与创新实践。

在态势理解部分，该书聚焦于新型轨道交通供电系统运行状态解析、优化调度、优化控制等核心内容。通过对这些关键技术的深入剖析，使读者能够深入理解如何对系统运行状态进行全面分析，准确评估系统性能，进而为优化决策提供坚实的依据。

态势预测是该书的又一重要亮点，作者在这部分详细介绍了从“源-网-荷”三个方面进行预测的技术。这些预测技术不仅能够帮助电力系统提前规划，合理安排发电计划和储能调度，还能有效提高系统的运行效率和可靠性，充分体现了态势感知技术在电力系统运行管理中的前瞻性和指导性。

该书对于推动电力系统智能化发展具有重要的理论支撑与实践指导意义。当前，分布式能源的广泛接入、轨道交通的迅猛发展以及用户对电能质量要求的不断提高，给传统电力系统运行管理带来了严峻挑战：一是新能源发电的间歇性和波动性增加了配电网运行的复杂性；二是轨道交通对供电可靠性和供电质量的高要求，给系统运维带来压力；三是传统管理模式下监测能力不足，难以应对快速的变化，且故障的早期预警机制尚不完善。该书所提出的态势感知技术通过对系统运行状态的全面觉察、准确理解和精确预测，能够及时发现潜在风险，优化资源配置，提高供电质量，增强系统的稳定性和可靠性，为应对这些挑战提供了切实可行的解决方案。同时，该书对于促进相关领域的技术创新与发展、培养高层次专业人才、推动电力行业的可持续发展也将发挥积极的推动作用。

我深信，该书的出版将对电力系统领域的发展产生深远的影响，为实现电力系统的智能化、高效化和可持续发展注入新的活力。

清华大学教授 胡 炜

2025 年 12 月

前言

在全球积极推动能源转型、我国坚定迈向“双碳”目标的时代背景下，能源领域正经历着深刻的变革。国家能源战略聚焦于构建清洁低碳、安全高效的能源体系，电力系统作为能源转换与分配的关键环节，其创新发展至关重要。新型配电与轨道交通供电系统态势感知技术，恰是顺应这一战略需求而兴起的关键领域，对于推动能源结构优化、提升能源利用效率、增强电力系统安全性具有深远意义，本书将深入探讨这一前沿技术及其应用。

新型配电系统在国家能源战略中占据着举足轻重的地位。随着“十四五”规划的推进，分布式能源迎来了前所未有的发展机遇，其在配电网中的接入比例不断攀升。这一变革在为能源供应带来多元化的同时，也给传统配电系统带来了诸多挑战。传统模式难以有效应对分布式电源的间歇性和波动性，以及负荷需求的动态变化。在此背景下，新型配电系统需要借助先进的技术手段，实现智能化转型。本书所阐述的态势感知技术，犹如配电系统的“大脑”，通过对系统运行状态的全方位觉察、精准理解与前瞻性预测，为解决分布式能源接入问题提供了有效途径。例如，在分布式光伏大量接入配电网时，准确的态势感知能够实时监测光伏出力变化，优化配电网的调度策略，确保电能质量稳定，避免对电网造成冲击，从而提高分布式能源的消纳能力，促进清洁能源的高效利用。

轨道交通供电系统是新型配电系统中的重要负荷，其可靠性和稳定性直接关系到铁路运输的安全与效率。在新型电力系统建设的浪潮中，轨道交通供电系统面临着新的使命与挑战。一方面，要适应新型能源接入带来的供电结构调整；另一方面，需满足日益增长的铁路客流量对供电质量的严苛要求。本书针对轨道交通供电系统的态势感知技术展开深入研究，从供电系统的建模到多源供电的优化整合，从运行状态的实时监测到故障隐患的提前预警，可为“十五五”时期铁路交通的高质量发展提供强有力的技术支撑。这不仅有助于确保轨道交通的安全稳

定运行,提升铁路运输服务质量,还能有效促进铁路行业的节能减排,推动绿色交通发展,为实现国家能源战略中的碳排放目标贡献力量。

在当今能源转型与电力系统变革的关键时期,新型配电与轨道交通供电系统态势感知技术的发展对于保障电力供应的可靠性、高效性与可持续性具有举足轻重的意义。随着分布式能源的广泛接入、轨道交通的迅猛发展以及用户对电能质量要求的不断提高,传统的电力系统运行管理模式面临巨大挑战。在此背景下,本书应运而生,本书旨在深入探讨新型配电与轨道交通供电系统态势感知的相关理论、技术与应用,为推动电力系统的智能化发展提供坚实的理论支撑与实践指导。

本书的撰写源于对电力系统发展需求的深刻洞察以及对相关领域技术创新的持续追求。近年来,我们的科研团队紧密围绕新型配电与轨道交通供电系统态势感知技术展开了一系列深入研究,取得了一系列具有重要理论价值和实践意义的成果。这些成果涵盖了从基础理论研究到实际工程应用的多个方面,为本书的撰写奠定了坚实基础。我们深知,电力系统的稳定运行关系到社会经济的正常运转和人民生活安定有序,因此致力于将最新的研究成果和实践经验融入本书,希望能为电力系统领域的专业人士、科研人员以及相关从业者提供有益的参考和借鉴。

本书共分为三篇。第一篇详细阐述态势觉察的相关内容,包括新型轨道交通供电系统建模、分布式光伏数据的虚拟采集、优化配置等技术。通过对各种系统的精确建模和数据采集方法的深入探讨,为后续的态势理解和预测提供了坚实的数据基础。例如,在新型轨道交通供电系统建模中,对刚性接触网-受电弓、柔性接触网-受电弓、供电网络、供电负荷等进行详细建模与分析,确保了对轨道交通供电系统运行状态的准确把握。

第二篇重点关注态势理解,涉及新型轨道交通供电系统态势理解、日前优化调度、复杂配电网相间故障定位等效解耦模型以及态势感知效果评估等方面。通过这些技术,能够对系统运行状态进行深入分析,评估系统性能,为优化决策提供依据。例如,在高比例光伏配电网集群电压控制中,提出的分布式牛顿电压控制方法有效解决了光伏接入带来的电压问题;态势感知效果评估部分建立的综合评估指标体系和评估方法,为准确评估系统态势感知效果提供了科学手段。

第三篇聚焦于态势预测,介绍分布式电源出力预测、典型配电网负荷预测以及区域综合能源系统负荷预测等技术。这些预测技术能够帮助电力系统提前规划,合理安排发电计划和储能调度,提高系统的运行效率和可靠性。例如,分布式电源出力预测中的主成分分析、灰狼优化和广义回归神经网络模型,显著提高了光伏出力预测的准确性;区域综合能源系统负荷预测中基于负荷相关峰谷的方法,充分考虑了能源系统负荷的变化规律,为系统优化调度提供了有力支持。

本书是科研团队全体成员共同努力的成果。在此，特别感谢团队中的各位专家和学者，他们在各自领域的深厚造诣和丰富经验为本书的撰写提供了宝贵的指导和建议。同时，也要感谢各位研究生在资料收集、数据分析和案例研究等方面所做的大量工作。他们的辛勤付出和积极参与为本书增添了丰富的实践内容和创新思路。本书的研究工作得到了多项科研基金的资助，在此表示衷心的感谢。具体包括：国家科技重大专项(科技创新 2030 重大项目)“开放环境下异质微电网的群智协同主动安全调控理论与方法”(新一代人工智能国家科技重大专项，2022ZD0116900)；国家自然科学基金面上项目“面向多类型电力用户特性的智能配电网状态感知和自适应控制技术”(52277118)；国家自然科学基金地区科学基金项目“西部大风区高铁弓网电接触演化机理及行车电气量依随波动研究”(51767013)、“兰新线长大坡道段牵引网压异常演变机理及多源接入治理研究”(52067013)；天津市自然科学基金联合基金(多元投入)项目“面向多类型电力用户群体特性的中低压配电网无模型自适应控制技术研究”(22JCZDJC00660)；甘肃省自然科学基金重点项目“甘肃省新型轨道交通集约供电的‘源-网-荷-光储’一体化多能互补与协调控制研究”(22JR5RA318)；兰州交通大学-西南交通大学联合创新基金项目“构网型分布式光伏发电集群稳定协调优化调控技术研究”(LH2024027)。这些资助为研究工作的顺利开展提供了重要的资金支持，推动了态势感知技术的不断创新和发展。

由于电力系统技术的不断发展和更新，加之我们的知识水平和实践经验有限，书中难免存在不足之处。我们真诚地希望广大读者能够提出宝贵的意见和建议，以便我们在后续的研究和修订中不断完善。

葛磊蛟

2025 年 10 月

目 录

序 前言

第一篇 新型配电与轨道交通供电态势觉察

第 1 章	新型配电与轨道交通供电态势觉察概述	3
第 2 章	轨道交通供电系统模型	8
2.1	轨道交通取流系统	8
2.2	轨道交通牵引供电系统	18
2.3	轨道交通多源供电系统	32
第 3 章	面向态势觉察的智能边缘终端优化配置技术	43
3.1	PVIET 优化配置模型	44
3.2	模型求解	48
3.3	算例分析	53
第 4 章	适用于态势觉察的储能系统容量优化配置技术	59
4.1	储能系统最优容量分配模型	59
4.2	优化模型求解	65
4.3	算例分析	66
第 5 章	面向新型配电与轨道交通供电的运行数据虚拟采集技术	74
5.1	相似日选取	74
5.2	分布式光伏运维数据的虚拟采集	77
5.3	算例分析	81

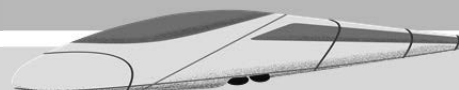
第 6 章 新型配电与轨道交通供电主要设备的运行数据增强技术	89
6.1 改进自动编码器	89
6.2 基于数据增强的变压器故障诊断	92
6.3 算例分析	97
第 7 章 本篇小结	103
参考文献	104

第二篇 新型配电与轨道交通供电态势理解

第 8 章 新型配电与轨道交通供电态势理解概述	107
第 9 章 特殊负荷轨道交通供电系统态势理解	111
9.1 取流系统的态势理解	111
9.2 牵引供电系统的态势理解	126
9.3 多源供电系统的态势理解	143
第 10 章 新型配电系统日前优化调度	183
10.1 综合能源系统模型	183
10.2 最优日前调度算法	187
10.3 算例分析	192
第 11 章 新型配电系统相间故障定位技术	199
11.1 复杂配电网的等效解耦	199
11.2 故障定位的改进矩阵算法	202
11.3 算例分析	204
第 12 章 高比例光伏配电网集群电压控制技术	211
12.1 潮流与电压优化模型	211
12.2 元强化学习调度	214
12.3 算法示例	215
第 13 章 新型配电与轨道交通供电态势感知效果评估	218
13.1 系统态势理解定量分析指标	218
13.2 系统态势理解定量分析方法	226
13.3 算例分析	232
第 14 章 本篇小结	237
参考文献	238

第三篇 新型配电系统态势预测

第 15 章	新型配电系统态势预测概述	241
第 16 章	分布式电源出力预测	244
16.1	气象特征降维	244
16.2	光伏出力预测	245
16.3	算例分析	248
第 17 章	典型配电网负荷预测	252
17.1	电力负荷输入特征	252
17.2	电力负荷预测	256
17.3	算例分析	261
第 18 章	区域综合能源系统负荷预测	269
18.1	区域综合能源系统负荷预测框架	269
18.2	基于集成学习的预处理模式	271
18.3	协作原子混沌搜索	273
18.4	多元两阶段自适应堆叠预测框架	277
18.5	算例分析	281
第 19 章	新型配电系统的综合能源系统负荷预测	285
19.1	综合能源系统概述及其建模	285
19.2	改进粒子群优化-小波神经网络模型原理	287
19.3	算例分析	293
第 20 章	基于负荷相关峰谷的综合能源系统负荷预测	296
20.1	峰谷相关性的概念与方法	296
20.2	相关峰谷概念在短期负荷预测中的应用	298
20.3	关联度阈值初始参数选取	302
20.4	算例分析	304
第 21 章	本篇小结	309
参考文献		310



第一篇

新型配电与轨道交通供电态势洞察

第 1 章

新型配电与轨道交通供电态势觉察概述

传统配电系统主要依靠火力发电、水力发电进行电能的生产和分配，电网结构相对固定和简单，电能从发电端单向流向用户端，用户主要作为电能的消费者，与电网的能源互动较少。此外，传统配电系统依赖较为简单的监测控制系统和数据采集系统，其供电可靠性及灵活性相对较低，对电网的动态响应较慢，且以传统储能方式(如抽水蓄能)为主，因此其调节能力有限。

然而，新型配电系统则以清洁低碳、安全高效、柔性灵活和智慧融合为主要特征，尤其以风力、光伏等新能源发电的接入为主，形成以电能为中心的能源供应和消费体系。其网络结构从单一大电网结构演变为大电网与微电网互补共存的形态，具有更复杂的拓扑结构和更高的拓扑扩展性能，从而具有更高的灵活性。从用户角色角度看，新型配电系统从单一的“消费者”转变为电能的“产消者”，即用户不仅可以消费电能，还可以通过分布式能源发电的方式向电网回馈多余的电能，实现电能的双向互补。此外，新型配电系统强调数字化、智能化和网络化，以便对海量、分散的设备进行更高效、更智能的协调控制。相比于传统供电系统，其具有更高的供电可靠性和运行灵活性，能够快速响应电网变化和需求。在储能技术方面，新型配电系统采用多种储能技术，如大规模电池储能、超级电容储能等，具有更高的电能存储能力。其中，轨道交通是新型配电系统中十分重要的特殊负荷，有必要将其与态势觉察技术紧密融合进行研究。

态势觉察是数据获取阶段，即觉察检测和获取环境中的重要线索或元素，该阶段获取新型配电网分析和调控所需的数据，从深度和广度两个层面实现对新型配电网的全面感知，其架构如图 1.1 所示。态势觉察技术的核心是根据不同的实际需求，兼顾电力系统实际运行情况，综合考虑状态估计精度、可观性、可靠性、经济性和信息安全等多种影响因素，实现量测和控制终端的优化配置和规划，通过多类设备的混合配置，实现量测的灵活配置和方便部署，建设强健有效

的量测系统和控制系统。态势觉察主要关键技术包括大数据技术、5G 通信技术、虚拟采集技术、高级量测体系构建技术、传感技术等。

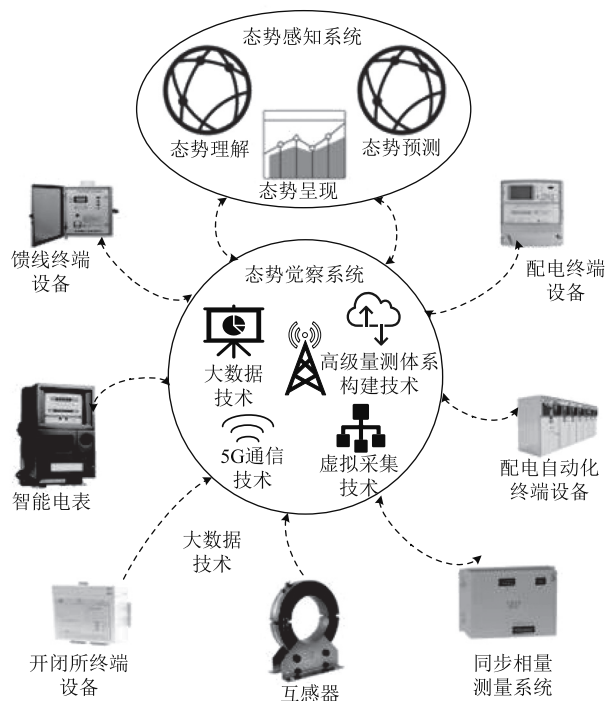


图 1.1 新型配电网态势觉察架构

目前，新型配电网进入数据密集时代，但数据类型复杂、变化迅速、规模和价值密度低，态势感知大数据技术应运而生，通过应用海量数据压缩存储方法、数据预处理技术、异构网络融合技术及多源数据融合技术等以适应新型配电网现状，为态势感知的实现提供数据基础；通信技术是影响新型配电网观测性的核心因素，当前先进的 5G 通信技术凭借其高数据传输率和低传输延时的优势，开始投入坚强新型配电网与电力物联网建设中，并逐步应用于智能仪表和状态监测系统，以满足态势感知对高容量、高带宽和低延时的需求。

为提升运维数据采集的全面性与准确性，新型配电网虚拟采集技术正成为一个研究热点，该技术并未通过实装的传感器、采集器和集中器等量测设备对配电网数据进行采集，而是对无法实时采集或采集难度较大的数据进行预测或数据外推以替代实际采集，其利用新型配电网大数据平台，将实时完整采集的配电网运维数据作为标准，根据部分配电网运维数据判断待采集配电网的相似区域，通过挖掘该配电网和与该配电网相似区域的实时采集数据的内在映射关系，结合相似

区域本身具有的部分实时采集数据,对相似区域剩余数据实现预测,实现智能配电网运维数据的全面采集。

新型配电网态势感知离不开完善的量测装置硬件基础,高级量测体系构建技术包含量测优化配置技术、同步相量测量装置(phasor measurement unit, PMU)配置优化和数据应用技术等,通过对智能电表、广域通信网络、量测数据管理系统和用户户内网络的整合,实现新型配电网量测的智能化,从而保障智能配电网的可观测性。

由于系统场景多样、数据量大、运行态势复杂,态势感知面临巨大挑战。随着高级量测体系、智能电表、PMU 等新型量测设备的快速部署,新型配电网态势感知采集的数据量同时激增,不可避免地增加了态势觉察的冗余数据处理压力;采集的电力数据大多只能反映配电网的良好运行状态,而缺乏反映系统故障或不良运行状态的信息,导致新型配电网态势感知系统的输入数据不对称,故障预判可靠性差。因此,如何快速觉察配电网状态是未来研究的焦点。

本书以复杂的电气化牵引供电轨道交通系统为例对考虑特殊负荷轨道交通的新型配电系统展开研究。图 1.2 所示为考虑特殊负荷轨道交通的新型配电系统示意图。图(a)表示“源-网-荷-储”多源一体化供电的网络场景图,整个网络中配置了电能质量设备、储能装置及综合能源装置等设备,并采用了潮流控制算法。图(b)是对图(a)场景工作原理的具体示意,主要描述了轨道交通作为新型配电系统中的特殊负荷与系统中的储能装置、综合能源装置(光伏、风电等设备)之间能源互动的过程和态势觉察系统如何获取新型配电系统中相关数据的一个过程。

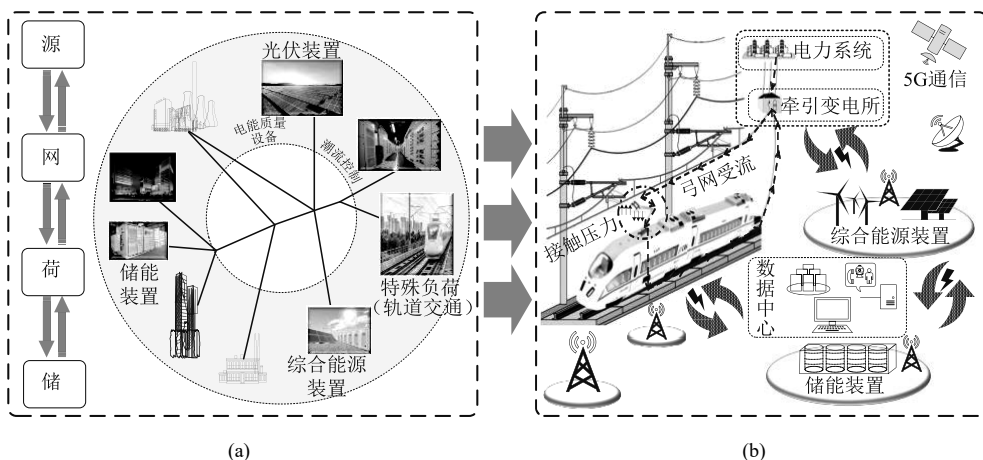


图 1.2 考虑特殊负荷轨道交通的新型配电系统

新型配电系统通过集成先进的传感器和通信技术,能够实时监控电网状态,即监控网络潮流中的电压、功率等关键参数。这些数据被传输到中央控制系统,

通过大数据分析和机器学习算法,系统能够预测和识别潜在的故障,从而提前采取措施减少停电事故并提高供电可靠性。它通过多种能源的综合利用和优化配置,显著提高能源利用效率。例如,光伏装置能够将太阳能转化为电能,减少对传统化石能源的依赖;储能装置是新型配电系统的关键部分,在轨道交通用电低谷时,储能系统充电,在用电高峰尤其是列车频繁启动和加速导致负荷骤增时,储能系统放电。通过储能控制策略,根据电网实时状态和轨道交通的运行情况,可精确地控制储能系统的充放电过程,起到“削峰填谷”的作用,减轻电网的供电压力,同时也能在电网出现短暂故障时提供备用电源,保障轨道交通的不间断供电。电能质量设备能够实时监测电网中的电压、频率和波形等参数,并通过采用先进的电力电子技术快速地补偿无功功率,消除谐波,确保电网电压的稳定,从而减少电网中的电能损耗,提高电能的传输效率。因此,在列车运行过程中由于列车频繁启动和制动而产生的电压波动和谐波就能够通过电能质量设备得到改善。综合能源装置具有多种能源间的转换和管理功能,能够根据电网的实时状态和轨道交通的实际需求,对电能进行整合和优化,使得新型配电系统在面对突发电力故障或高峰用电需求时,能够迅速做出反应。这种多源一体化供电的新型配电模式能够实现不同能源之间的无缝切换,确保供电的连续性。牵引变电所将来自电力系统的高压交流电通过变压器降压,并采用整流装置将交流电转换为直流电,为直流牵引列车供电,或者采用变频装置将交流电转换为适合交流牵引列车运行的频率和电压。弓网受流系统由受电弓和接触网组成,受电弓安装在列车顶部,通过与接触网的滑动接触,将电能转化为列车的机械能。

轨道交通是一种利用轨道进行运输的交通方式,主要包含以下几种类型:地铁是城市轨道交通线路制式的一种,具有快速、运输量大的优点,列车在全封闭的线路上运行,位于中心城区的线路一般设在地下隧道内,而中心城区以外的线路一般设在高架桥或地面上;轻轨比地铁规模小,运输量较小,可以在地面、高架桥或地下运行;有轨电车通常在城市街道上运行,与道路交通共享路权;城际铁路指连接相邻城市的客运铁路系统,一般在城市群或城市地带中建设,路线总里程较短,只提供客运服务,以运营多班次城际列车为主;高速铁路是新设计开行 250km/h(含预留)及以上动车组列车,初期运营速度不小于 200km/h 的客运专线铁路;磁悬浮列车是一种通过电磁力实现列车与轨道间无接触的悬浮和导向的轨道交通工具;通勤铁路也称为区间通勤铁路、区域铁路、市域铁路等,是连接市中心商业区与周边郊区的铁路运输系统,其主要功能在于满足乘客通勤需求;缆车是由驱动机带动钢丝绳牵引车厢沿着具有一定坡度的轨道运行并用来提升或下放人员和货物的一种运输机械,多用于工矿区、城市或风景游览区。

因此,轨道交通属于新型配电系统中的特殊负荷,具有功率大、负荷波动频繁等特点,其运行的可靠性和高效性至关重要,这对配电系统提出了很高的要

求。轨道交通列车在启动、加速过程中需要消耗巨大的电能。列车在运行过程中会重复启动、制动、加速和减速操作，每次操作都会导致电力负荷的急剧变化。这种频繁的负荷波动会引起电网电压波动、频率偏差等电能质量问题，通过态势觉察技术合理调配供电，能够保证供电的可靠性，避免影响到轨道交通自身以及同一电网内其他用户的正常用电。

在全球积极推动能源转型、我国坚定朝着“双碳”目标前进的时代背景下，能源领域正经历深刻的变革。国家能源战略聚焦于构建清洁低碳、安全高效的能源体系，电力系统作为能源转换与分配的关键环节，其创新发展至关重要。因此，在推动能源结构优化、提升能源利用率和增强电力系统稳定方面，将态势觉察技术运用于新型配电与轨道交通供电系统中就显得格外重要。

第 2 章

轨道交通供电系统模型

本章首先通过介绍轨道交通取流系统、牵引供电系统和多源供电系统的结构和工作原理对新型轨道交通供电系统的模型进行详细阐述；其次，以 IEEE69 节点分布系统和 IEEE33 节点分布系统为例，分别建立光伏智能边缘终端优化配置模型和储能系统最优容量分配模型，并运用相应的算法对所建立模型的算法案例分析，以此来验证所建立模型和所选取算法的准确性和有效性。此外，对于运行数据的采集以选取相同区域内若干分布式发电站的策略来实现，而对于运行数据的处理则依靠实际的数据样本和相关的故障数据生成策略及故障诊断分类器来实现。因此，在“源-网-荷-储”多源一体化供电模式下，新型配电与轨道交通供电系统各环节相互协调与集成，实现各环节间信息的高效互通。

2.1 轨道交通取流系统

2.1.1 受电弓

随着新型轨道交通的快速发展，以高速铁路、地铁为代表的轨道交通中，受电弓是接触网系统和轨道车辆取能源的重要通道。受电弓经历了从单臂到双臂，逐步演化为能够跟随车体运动，到如今更轻、更紧凑结构的设计，进一步增强了受电弓在高速运行中的稳定性。单臂受电弓因具有气动性好、低噪声、低成本及故障时不拉扯接触网等优点，仍广泛应用于轨道交通供电系统车-网取流中。目前，对于受电弓的建模主要有受电弓二质量块和三质量块模型、多刚体运动模型、刚柔混合多体模型等，实验证明，进行弓网动力学仿真分析与计算时，为使计算更加简练并保持一定的可靠性，使用三质量块模型能很好地反映受电弓的实际运动状态，因此本书采用三质量块模型进行受电弓的等效建模。受电弓根据

其框架组成主要由滑板、上框架、下臂杆、底架、升弓弹簧、传动气缸、支持绝缘子等部件组成，图 2.1 为实际运营中的单臂受电弓和其等效的三质量块模型。

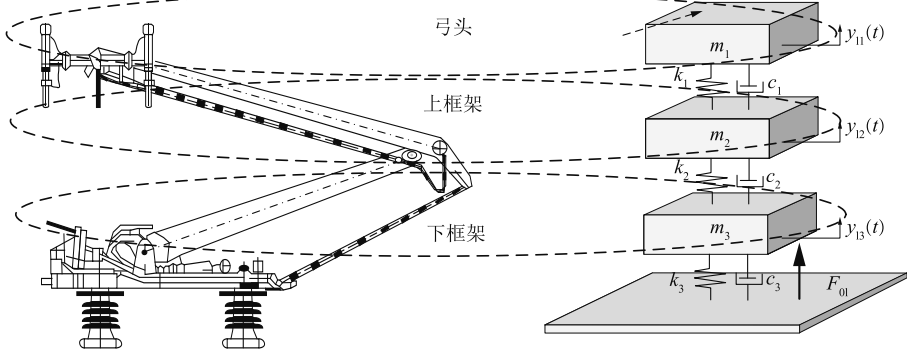


图 2.1 单臂受电弓和其等效的三质量块模型

如图 2.1 所示， m_i 、 k_i 、 c_i 分别为受电弓的等效质量、刚度、阻尼 ($i=1,2,3$ ，分别表示弓头、上框架、下框架)； F_{01} 为受电弓下框架所受车顶抬升力； $y_{11}(t)$ 为弓头位移； $y_{12}(t)$ 为上框架位移； $y_{13}(t)$ 为下框架位移。

双受电弓的振动方程可以表示为

$$M_p \ddot{y}_p + C_p \dot{y}_p + K_p y_p = F_p \quad (2.1)$$

式中， M_p 为前后受电弓的质量块矩阵； C_p 为阻尼矩阵； K_p 为刚度矩阵； y_p 为位移量矩阵； F_p 为受力矩阵。 $M_p = \text{diag}(M_{lp}, M_{tp})$ 、 $C_p = \text{diag}(C_{lp}, C_{tp})$ 、 $K_p = \text{diag}(K_{lp}, K_{tp})$ ； $y_p = [y_{lp}; y_{tp}]$ ； $F_p = [F_{lp}; F_{tp}]$ ；下标“lp”和“tp”分别表示前弓和后弓的参数。

$$\begin{cases} M_{lp} = M_{tp} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \\ C_{lp} = C_{tp} = \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 & 0 \\ -c_1 & c_1 + c_2 & -c_2 \\ 0 & -c_2 & c_2 + c_3 \end{bmatrix} \\ K_{lp} = K_{tp} = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2.2)$$

$$y_{lp} = \begin{bmatrix} y_{l1} \\ y_{l2} \\ y_{l3} \end{bmatrix}, y_{tp} = \begin{bmatrix} y_{t1} \\ y_{t2} \\ y_{t3} \end{bmatrix}, F_{lp} = \begin{bmatrix} -F_{cl} \\ 0 \\ F_{ol} \end{bmatrix}, F_{tp} = \begin{bmatrix} -F_{ct} \\ 0 \\ F_{ot} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

其中, y_{l1} 、 y_{l2} 、 y_{l3} 和 y_{t1} 、 y_{t2} 、 y_{t3} 分别为前弓和后弓弓头、上框架和下框架的位移; F_{cl} 、 F_{ct} 分别为前弓、后弓与刚性接触网的接触力; F_{ol} 、 F_{ot} 分别为作用于前弓、后弓下框架的升力。

2.1.2 刚性接触网和柔性接触网

在新型轨道交通供电系统中, 接触网是将发电和电力变换装置处的电能传输到电力机车的重要路径, 根据接触网的结构特点, 分为刚性接触网和柔性接触网两部分。刚性接触网更适合在高原山区的隧道内架设, 其结构稳定可靠、便于维护、不会发生断线事故、减少隧道开挖截面积、降低成本。柔性接触网适合用在平原、桥梁等空旷地形下, 其构造形式灵活、抗震性强、列车高速行驶下平稳性好。

刚性接触网主要由接触悬挂、支持定位装置、绝缘部件、架空地线等部分组成。接触悬挂包括汇流排、接触线、伸缩部件、中心锚结等, 汇流排整个悬挂布置呈正弦波的形状, 各汇流排之间有螺栓紧固连接, 各悬挂点与受电弓的中心的距离一般不大于 200mm^[1]。支持定位装置安装在隧道顶和隧道壁的规定位置上, 安装形式主要有腕臂结构和门形结构等形式, 如图 2.2 所示, 以中国兰新铁路乌鞘岭隧道内的刚性接触网系统为例, 其支持定位装置采用腕臂结构。

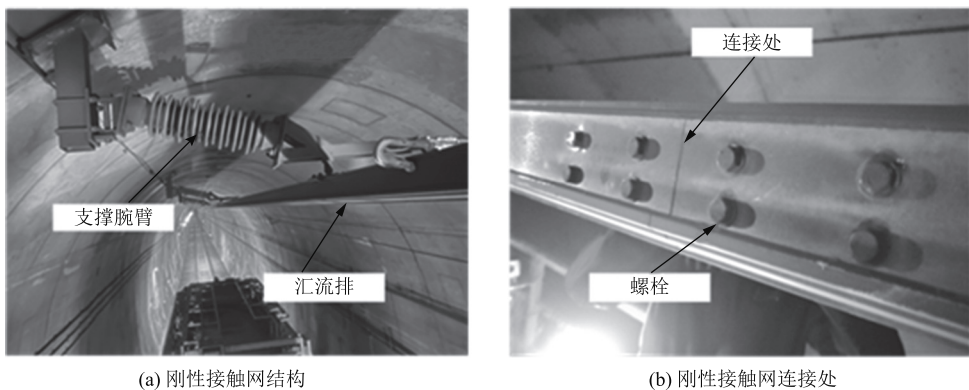


图 2.2 刚性接触网的组成结构

如图 2.3 所示, 采用悬臂梁式悬挂装置固定刚性接触网, 悬臂梁式悬挂装置由基座、绝缘子和定位线夹组成。根据力学理论, 可以将绝缘子简化为自由端质