

自监督学习在建筑原材料智能化生产中的应用

仇龙*

北京科技大学, 北京科技大学资产经营公司, 北京 100083

摘要 : 建筑行业原材料生产作为重要的制造行业, 其传统非智能化的生产流程可能引发资源利用效率低下、能源消耗大等问题, 对原材料供应链与成本产生深远影响。建筑行业原材料生产流程智能化对供应链和施工效率具有关键影响。本文介绍了无需人工标注数据的自监督学习方法, 举例探讨了其在建筑用原材料生产中的具体应用, 包括数据系统管理、生产过程优化、故障诊断与维护和质量检测等方面。最后对自监督学习在建筑行业原材料生产智能化转型中的挑战和未来发展进行了展望。通过研究分析, 为建筑行业原材料生产智能化转型提供建筑原材料供应链的可持续发展参考和启示。

关键词 : 自监督学习; 建筑行业原材料生产; 工业智能化; 智能化应用

Application of Self supervised Learning in Intelligent Production of Building Raw Materials

Qiu Long*

Beijing University of Science and Technology, Beijing University of Science and Technology Asset Management Company, Beijing 100083

Abstract : As an important manufacturing industry, the traditional non intelligent production process of raw material production in the construction industry may lead to problems such as low resource utilization efficiency and high energy consumption, which have a profound impact on the raw material supply chain and costs. The intelligent production process of raw materials in the construction industry has a crucial impact on supply chain and construction efficiency. This article introduces a self supervised learning method that does not require manual annotation of data, and provides examples to explore its specific applications in the production of building raw materials, including data system management, production process optimization, fault diagnosis and maintenance, and quality inspection. Finally, the challenges and future development of self supervised learning in the intelligent transformation of raw material production in the construction industry were discussed. Through research and analysis, provide sustainable development references and inspirations for the intelligent transformation of raw material production in the construction industry.

Key words : self supervised learning; production of raw materials in the construction industry; industrial intelligence; intelligent applications

一、引言

建筑行业原材料生产包括各种用于建筑和施工的原材料的生产, 如水泥和混凝土、钢铁、木材、玻璃等的制造生产。这些原材料在建筑领域扮演着至关重要的角色, 它们共同构成了建筑项目的基础结构和装饰, 为人们的生活和工作环境提供了保障和便利。随着信息技术的快速发展, 建筑行业原材料生产正面临着智能化转型的挑战和机遇, 建筑原材料生产流程的智能化转型对建筑原材料供应链和建筑施工效率具有深远影响。

传统的建筑原材料生产流程可能导致资源利用效率低下和能源消耗过大, 进而影响原材料成本和可持续供应。此外, 缺乏智能化改进的生产流程很难满足对原材料质量、规格和交付时间等方面的高要求, 因而可能对建筑项目的进度和质量产生不利影响。因此, 引入智能化技术, 优化建筑原材料生产流程, 对于提

高原材料的稳定供应、降低生产成本以及提升建筑施工效率至关重要^[1]。在数据采集和管理阶段, 智能化生产可以利用无人机进行勘探, 通过自监督学习深度学习智能算法实现数据的自动提取和处理。这些算法可以分析无人机获取的图像和视频数据, 自动识别地质特征、资源分布等关键信息, 从而提高数据采集的效率和准确性。在生产过程中, 智能化生产可以借助传感器和自动控制实现精确操控和优化生产参数。通过自监督学习深度学习算法, 系统可以实时监测生产环境中的各种参数, 如温度、湿度、压力等, 并根据这些数据进行实时调整, 以实现生产过程的最优化和高效运行。在质检阶段, 智能化生产可以利用机器视觉和人工智能算法来进行快速、准确的检测和分类。自监督学习深度学习算法可以通过大量样本数据进行训练, 使其能够自动识别建筑原材料的质量问题, 并进行有效分类和处理。这样可以大大提高质检的效率和准确性, 从而保障建筑材料供应链的可持续发展,

* 作者简介: 仇龙 (1964-), 男, 汉族, 本科学历, 工程师 (中级职称), 主要研究方向为冶金节能减排工程技术研究, 冶金自动化智能化研究等。

提升建筑行业的竞争力和可持续性发展水平。这将有助于推动建筑原材料供应链的可持续发展，提升建筑行业的竞争力和可持续性发展水平。传统的监督学习依赖于大量标注数据，但在建筑行业原材料生产中，获取高质量的标注数据是一项昂贵且耗时的任务。为了提高建筑行业原材料生产的生产效率和质量稳定性，引入自监督学习成为一种重要的生产智能化解决方案。

自监督学习是一种无需人工标注数据的学习方法，通过利用数据本身的特征进行自我训练和学习。自监督学习的出现为建筑行业原材料生产智能化转型提供了新的思路和方法，能够充分利用大规模未标注数据，从而降低了数据采集和标注的成本。这为建筑行业原材料生产提供了更多的数据资源，为智能化转型提供了更多的可能性。本文将探讨自监督学习在建筑行业原材料生产智能化转型中的应用，并对其挑战和未来发展进行分析。

二、自监督学习的基本原理和方法

（一）自监督学习的基本原理

在深度学习领域，自监督学习是一种通过利用未标记数据进行特征学习和表示学习的方法。其主要特点是在无需人工标注标签的情况下，通过设计自动生成的任务或标签来引导模型学习数据的内在结构和特征表征。自监督学习的基本原理是将无监督学习问题转化为有监督问题，通过利用现有数据的某些属性来设置伪监督任务来替换真实标签，以此来训练模型。这些方法可以帮助模型学习到通用的特征表达，用于解决各种下游任务。

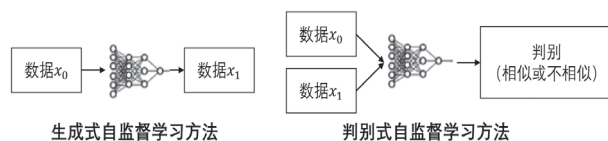
自监督学习的关键就在于如何设计有效的自监督学习任务，以及如何合理地利用未标记数据中的信息来指导特征学习和模型优化。常见的自监督学习任务包括学习预测输入数据的不同部分或相互关系，利用对比损失来学习数据表示、掩码加噪直接生成原始数据等。这些自监督学习任务通过不同的方式引入自动生成任务或标签来指导模型的学习过程，并已在图像、语音、自然语言处理等领域取得了显著的成果，为深度学习模型的特征学习和泛化能力带来了显著提升。

自监督学习的基本原理可以描述为以下几个步骤：首先，通过将未标记的数据输入到神经网络中，模型尝试通过多层非线性变换将数据映射到一个高维的特征空间中，以学习数据的内在表征。其次，设计一些自动生成的任务或标签，例如自编码、对比学习等，来引导模型学习有用的特征。这些任务或标签可以通过对数据应用不同的变换得到，然后利用模型预测变换之前的数据或者不同视图下的数据是否相似等方式来进行学习。然后，模型通过最小化预测与真实值之间的误差来调整参数，使得模型学到的特征对后续任务有用且具有较强的泛化能力。

（二）自监督学习的常见方法

自监督学习是一种无监督学习的扩展方法。如图1所示，有两种常见的自监督学习方法：生成式自监督学习和判别式自监督学习^[2]。生成式自监督学习方法关注细粒度级别的特征的重构，通过生成与真实样本相似的样本或重构样本来学习特征表示；而判别式自监督学习方法更加关注样本级别的特征，通过将数据样本与

正负例样本进行对比来学习特征表示。自监督学习方法在不依赖人工标注数据的情况下，通过利用数据本身的特征进行自我训练和学习，为解决实际问题提供了有力的工具和方法。这两类常见的自监督学习方法在深度学习中都有着广泛的应用，它们通过不同的方式引入自动生成任务或标签来指导模型的学习过程，从而提高模型对复杂数据分布的建模能力。



>图1 两种常见的自监督学习方法

生成式建模是深度学习中的一类自监督学习方法，其基本原理是通过学习数据的分布来实现特征学习。生成式建模方法包括自回归模型、生成对抗网络、变分自编码器等，它们通过最大化数据的似然概率来训练模型，使得模型能够生成与真实数据分布相似的样本，并学到数据的高效表示。生成对抗网络由生成器和判别器组成，通过对抗训练来逼近真实数据分布，从而提升生成器的生成能力。生成式自监督学习方法旨在对输入数据进行重构，使得输入数据与输出数据尽可能相似。具体而言，生成器通过生成与真实样本相似的样本来欺骗判别器，而判别器则努力区分真实样本和生成样本。而在变分自编码器中，模型通过将数据样本编码成潜在空间的特征表示，再解码重构样本。具体来说就是通过设计一个由编码器和解码器组成的神经网络结构，将输入数据编码成低维表示，然后再解码还原成输入数据。如果重构效果较好，则说明模型学到了较好的特征表达。在训练过程中，通过最小化输入数据与重构数据之间的差异来训练模型，以促使模型学习数据的有效表征。自编码器的目标是 minimized 重构误差，使得编码器学到具有区分性的特征表达。然而，值得注意的是，这些方法更加关注细粒度级别特征的重构，而对于样本整体的语义特征可能没有充分考虑，因此需要进一步研究细粒度级别特征与样本真实特征之间的关系。

判别式自监督学习方法旨在判断样本是否满足某些已知信号。这类方法更加关注样本级别的特征，并适用于图像和文本数据等领域。判别式自监督学习方法主要通过将数据样本与正例样本和负例样本在特征空间进行对比来学习样本的特征表示。模型的目标是将正例样本与负例样本区分开来。其基本流程是设计一个损失函数，使得模型能够将相似样本靠近，将不相似样本分开。对比学习常见的方法包括对比预测、对比学习和孪生网络等，通过利用大量未标记数据中的内在结构和信息，使得模型学到更具有区分性的特征表达。对比预测是一种常见的对比学习方法，它通过预测样本中的某些属性来学习特征表示。例如，可以将图像中的不同区域作为正负样本对，并训练模型来预测这些区域的关系。通过这种方式，模型能够学习到图像的局部特征，并捕捉到不同区域之间的关联性。对比学习是一种通过最大化正样本间距离和最小化负样本间距离来学习特征表示的方法。常见的对比学习方法包括对比损失、三元组损失等。这些方法通过构

建正负样本对或样本组，并通过损失函数来优化模型，使得正样本之间的距离尽可能小，负样本之间的距离尽可能大。通过这种方式，模型能够学习到样本的相似性和差异性，并学习到有用的特征表示。孪生网络是一种特殊的神经网络结构，用于比较两个输入之间的相似性。孪生网络通过共享参数的方式，将两个输入映射到同一个特征空间，并通过距离度量来衡量它们之间的相似度。通过训练孪生网络，可以学习到输入数据的特征表示，并在相似性比较任务中取得良好的性能。与其他自监督学习方法相比，对比学习具有更强的区分性能，可以被广泛应用于计算机视觉、自然语言处理等领域。

三、自监督学习在建筑行业原材料生产智能化转型中的应用

（一）数据系统管理

在数据系统管理阶段，利用基于自监督学习的智能化管理方式可以显著提高建筑原材料数据采集和处理效率，从而推动建筑行业的可持续发展和竞争力^[30]。

无人机技术在建筑行业中的应用日益广泛，其高空俯视的特点使其成为理想的数据采集工具。借助自监督学习深度学习智能算法，无人机可以对获取的图像和视频数据进行深入分析，并自动辨识关键的材料特征、分布情况等重要信息。这意味着无人机不仅可以提供广阔的视野，还能以高度智能的方式识别和记录建筑原材料的各种细微特征。在使用无人机进行勘探时，可以利用对比学习算法对获取的图像和视频数据进行特征学习。通过将同一张图片的不同部分作为正样本，不同图片之间的特征作为负样本，对比学习算法可以学习到建筑原材料的关键特征，如纹理、形状等，从而提高对建筑原材料的识别和分类能力。这种方法可以在无需人工标注大量数据的情况下，利用数据自身的结构进行学习，从而实现更高效的数据处理和特征提取。通过无人机的精准勘探，自监督学习算法能够迅速而精确地捕捉建筑原材料的各种细微特征，为后续生产环节提供可靠的基础数据。这样的智能化数据采集方式不仅提高了生产流程的智能性和灵活性，同时也为建筑原材料供应链的管理和优化奠定了坚实的基础。其次，可以利用生成式自监督学习模型生成额外的伪标签或目标^[5]，然后利用这些生成的目标来训练模型的自监督学习方法。在建筑原材料的数据采集和管理阶段，可以利用生成式自监督学习算法生成建筑材料的虚拟数据样本。通过对这些虚拟数据样本进行标签，然后利用标签来训练模型，可以帮助模型学习到更丰富的建筑材料特征，提高对建筑原材料的识别和分类准确性。此外，生成式自监督学习还可以帮助模型在数据稀缺或不平衡的情况下进行训练，从而提高模型的泛化能力和鲁棒性。

利用自监督深度学习算法，特别是对比学习和生成式自监督学习，在智能化生产中可以实现对建筑原材料数据的高效自动提取和处理。这些方法不仅可以提高数据处理的效率和准确性，还可以帮助建筑行业更好地管理和优化建筑原材料供应链，推动行业向智能化、数字化方向发展。

（二）生产过程优化

在现代智能化生产中，传感器和自动控制系统的应用已经成为优化生产过程的关键。这些系统利用传感器实时监测生产环境中的各种参数，如温度、湿度、压力等，并通过自动控制系统对这些参数进行精确控制和优化调整，以确保生产过程的高效运行和产品质量的稳定。在生产环境中，系统可以利用对比学习算法对传感器获取的数据进行特征提取和表示学习。通过比较不同时间点或不同位置的数据样本，系统可以学习到生产环境中参数的变化规律和趋势，从而更准确地预测未来的变化趋势，并及时调整生产参数以适应变化。其次，在生产过程中，系统可以利用生成式自监督学习算法生成模拟数据样本，模拟不同生产条件下的环境变化。通过与真实数据样本的对比，系统可以学习到生产环境中各种参数之间的复杂关系和相互影响，从而更好地指导生产过程中的参数调整和优化^{[6][7]}。

利用自监督学习深度学习算法对生产过程中的数据进行处理和分析，可以极大地提高系统对生产环境的感知能力和智能化水平。通过对比学习和生成式自监督学习等方法的应用，系统可以更准确地理解生产环境中的复杂数据，从而更精确地调整和优化生产参数，实现生产过程的最优化和高效运行^[8]。这不仅可以提高生产效率和产品质量，还可以降低能源消耗和资源浪费，推动建筑原材料供应链的可持续发展，提升建筑行业的竞争力和可持续性发展水平。

（三）故障诊断与维护

在建筑行业原材料生产中，故障诊断是一个关键问题，因为建筑原材料制造设备的故障可能会导致生产中断、能源浪费和质量问题^[9]。传统的故障诊断方法通常依赖于专家知识和手动规则，对于复杂的建筑原材料制造工艺和大规模的生产数据存在一定的局限性。然而，自监督学习方法为故障诊断提供了一种新的思路，能够从海量的生产数据中学习出设备故障的特征和模式，从而实现更智能、更高效的故障诊断^[10]。

一种利用自监督学习方法进行故障诊断的方式是通过构建自监督任务来预测设备的下一状态或重构损坏的传感器数据。这种方法的核心是让模型从未标注的数据中学习出设备正常运行和故障状态之间的差异。举例来说，可以使用对比学习的方法，让模型学习区分正常状态和故障状态之间的特征差异。通过训练模型来区分这些状态，模型可以学会识别故障并进行自动诊断。另一种方法是利用生成式自监督学习，通过训练模型来重构损坏的传感器数据。模型会学习如何从损坏的数据中还原出原始的正常状态，从而间接地学习到故障的特征。这种方法能够让模型在训练过程中逐渐理解设备正常运行的模式，并能够发现任何偏离这些模式的异常情况，进而进行故障诊断。通过对比学习和生成式自监督学习等技术，模型能够逐渐改进自身的诊断能力，提高准确性和鲁棒性。

利用自监督深度学习算法进行故障诊断与维护是建筑原材料生产中的一重要技术。通过充分利用未标注数据和自动学习特征表示，自监督学习方法能够实现更智能、更高效的故障诊断，可以让工人及时了解设备运行状况并及时加以维护，从而提

高建筑行业原材料生产的可靠性和效率。

（四）质量检测

建筑行业原材料生产作为重要的制造行业，质量检测对于保证产品质量和生产效率至关重要。传统的质量检测方法通常需要大量的人力投入和标注数据，这不仅费时费力，而且在面对复杂的建筑原材料制造工艺和大规模的生产数据时存在着困难。然而，自监督学习为解决这一问题提供了新的途径^[11]。在建筑材料的质检中，对比学习可以用于训练模型，使其能够准确地区分正常材料和存在缺陷或异常的材料。通过对比学习，模型可以自动学习到建筑材料的关键特征，从而实现快速、准确的质量检测和分类。此外，可以利用自监督学习方法从生产过程中收集的数据中学习出产品的质量特征。通过构建适当的自监督任务，例如预测数据中的缺陷位置或形状，可以让模型学习到与产品质量相关的特征表示。最后，还可以利用生成式自监督学习算法训练模型，生成正常和异常建筑材料的图像。通过观察生成的图像，可以帮助模型学习建筑材料的特征和结构，从而提高质检的准确性和可靠性。通过自监督学习深度学习算法的应用，质检过程可以实现高度自动化和智能化。模型可以通过大量的建筑材料图像数据进行训练，从而具备准确识别建筑材料质量问题的能力。这样一来，质检过程不再依赖于人工的主观判断，而是借助于数据驱动算法，实现了快速、准确的质检和分类。

智能化质检不仅可以提高建筑材料供应链的可持续发展水平，还可以显著提升建筑行业的竞争力。通过减少人为错误和提高质检效率，建筑项目可以更加高效地进行，从而降低成本、缩短工期，提升客户满意度。同时，智能化质检还有助于减少资源浪费和环境污染，促进建筑行业朝着更加可持续的方向发展。

四、自监督学习在建筑行业原材料生产智能化转型中应用的挑战

自监督学习在建筑行业原材料生产中的应用面临一系列挑战，其中包括数据的质量和可用性问题以及模型的鲁棒性和泛化能力问题。这些挑战需要得到有效的解决，以确保自监督学习在建筑行业原材料生产智能化转型中的有效应用。首先，建筑行业原材料生产中的数据质量和可用性是一个重要问题。建筑原材料制造生产过程中产生的数据往往存在噪声、异常值和缺失值等问题。这些不完美的数据可能会对自监督学习的性能和准确性产生负面影响。因此，需要开展数据清洗和预处理工作，以减少噪声和异常值的影响，并采用合适的方法填补缺失值，以提高数据的质量和可用性。其次，建筑行业原材料生产中存在多样的建筑原材料制造场景和生产过程，每个场景都具有自己独特的特点和数据分布。因此，如何将自监督学习方法应用于不同的建筑原材料制造场景，并使其具有良好的适应性和泛化能力是一个挑战。需要进一步研究和开发针对不同场景的自监督学习算法和模型，使其能够充分利用特定场景的数据特征，并提供具有广泛适应性的表示能力。另一个挑战是模型的鲁棒性和泛化能力。建筑行业原材料生产是一个复杂的领域，涉及多种工艺和参数。自监督学习

的模型需要具备较强的鲁棒性，能够处理数据中的变化和噪声，以及能够适应新的生产条件和工艺变化^[12]。此外，模型的泛化能力也很关键，即在新的数据样本上能够保持较好的性能和准确性。为了提高模型的鲁棒性和泛化能力，可以采用数据增强和模型正则化等技术手段，并进行深入的模型评估和验证。

在解决上述挑战的过程中，还需要与领域专家和建筑行业原材料生产实践者进行密切合作。通过结合领域知识和专家经验，可以设计更加合理和可解释的自监督学习任务和方法，并提供更有针对性的解决方案。此外，开展跨学科的研究和交流也是必要的，以促进自监督学习与建筑行业原材料生产智能化转型的有机融合，从而实现建筑行业原材料生产的高效、智能和可持续发展。

总之，自监督学习在建筑行业原材料生产智能化转型中具有广阔的应用前景，但也面临着数据质量和可用性、模型鲁棒性和泛化能力等挑战。通过数据清洗和预处理、针对不同场景的算法和模型设计、模型的鲁棒性和泛化能力的提升以及与领域专家的合作，可以克服这些挑战，并推动自监督学习在建筑行业原材料生产中的成功应用。这将为建筑行业原材料生产的智能化转型提供强大的支持，促进其生产效率和质量的提升，实现可持续发展。

五、自监督学习在建筑行业原材料生产智能化转型的未来发展

未来，自监督学习在建筑行业原材料生产智能化转型中具有广阔的发展前景。尽管自监督学习已经取得了一些令人鼓舞的成果，但还有许多方面需要进一步研究和改进，以实现更好的效果和应用范围。一方面，多任务学习是自监督学习在建筑行业原材料生产中值得探索的方向之一。通过将多个相关任务结合在一起进行训练，可以使模型更加全面地学习建筑行业原材料生产中的多个方面，从而提高模型的综合能力。例如，可以将质量检测、故障诊断和预测维护等任务进行联合学习，使模型能够同时具备多个方面的智能化能力。另一方面，迁移学习也是自监督学习在建筑行业原材料生产中的重要应用方向。由于建筑行业原材料生产的特殊性，数据的采集和标注成本较高，很难获得大规模标注数据。在这种情况下，可以通过自监督学习在其他相关领域获得的知识，迁移到建筑行业原材料生产中进行应用。例如，可以利用在其他制造领域或相关工业中训练得到的模型和特征表示，通过迁移学习来提升建筑行业原材料生产的智能化水平。此外，结合领域知识和专家经验，构建更加强大和可解释的自监督学习模型也是未来发展的重要方向。建筑行业原材料生产具有复杂的生产过程和领域知识，这些知识对于建筑原材料制造生产的控制和优化至关重要。因此，将领域知识和专家经验融入自监督学习模型中，可以提高模型的可解释性和实用性，更好地满足建筑行业原材料生产的实际需求。

随着技术的不断进步和理论的完善，自监督学习在建筑行业原材料生产智能化转型中的应用将不断拓展。未来的研究可以探

索更加高级和复杂的自监督学习方法，以进一步提升特征学习的效果和性能。此外，还可以探索如何结合强化学习等技术，实现对建筑行业原材料生产过程的智能控制和优化。

六、结论

本文强调了在建筑原材料供应链中，利用自监督学习深度学习算法的智能化转型对于建筑行业的竞争力和可持续发展的重要性。指出了在数据系统管理、生产过程优化、故障诊断与维护和质量检测等阶段，自监督学习算法的应用可以提高生产效率、质量和可持续性。通过利用自动化控制系统、数据分析及智能监测

设备等手段，在建筑原材料生产制造流程中引入自监督学习技术，可以充分利用建筑行业原材料生产中的海量数据，实现生产过程的精准监控和调控，进而提升生产效率、降低能源消耗，并确保产品质量的稳定性。然而，自监督学习在建筑行业原材料生产中仍面临一些挑战，需要进一步研究和探索。未来，随着技术的发展和理论的完善，自监督学习将在建筑行业原材料生产智能化转型中发挥更大的作用，并推动建筑行业原材料生产向智能化、高效化方向迈进。

参考文献

- [1] 李国建, 汪丛军, 邹胜等. 智慧工地助力建筑企业复工生产的技术研发与实践 [J]. 建筑施工, 2020.42(06).1063-1065.
- [2] Chen.Xinle.an.Kaimin.He. "Explorin.Simpl.Siames.Representatio.Learning..202.IEEE/CV.Conferenc.o.Compute.Visio.an.Patter.Recognitio.(CVPR.(2020).15745-15753.
- [3] 王菁川, 吴建彬. 基于信息化技术的建筑消防设施智能维保管理系统的设计与应用 [J]. 消防技术与产品信息, 2018.31(04).64-66.
- [4] 周冲, 李宇, 郑义等. 智慧生产信息管理系统在装配式建筑中的应用 [J]. 施工技术, 2020.49(05).64-67+103.
- [5] 周楚昊, 林培群, 闫明月. 基于自监督学习的交通数据补全算法 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版).2023.51(04).101-114.
- [6] 孙栓柱, 陈广, 高阳等. 基于相似度的半监督学习工业数据分类算法 [J]. 南京航空航天大学学报, 2021.53(05).677-683.
- [7] 方毅, 何新初, 冯新红. 预拌混凝土智慧化生产系统建设 [J]. 建设机械技术与管理, 2023.36(01).24-26+34.
- [8] 吕森, 安雪晖, 李鹏飞等. 自密实混凝土全过程智能生产研究进展 [J]. 清华大学学报 (自然科学版).2022.62(08).1270-1280.
- [9] 朱平, 张峰, 殷鹏等. 建筑机电设备运维管理云架构体系 [J]. 智能建筑, 2016(03).12-16.
- [10] 张娅. 基于无监督学习的工业物联网攻击聚类分析研究 [J]. 数字通信世界, 2022(06).160-162.
- [11] 朱兴林, 罗明华, 张海峰等. 基于自监督学习方法 SwAV 实现煤矿场景目标检测 [J]. 自动化与仪器仪表, 2023(04).39-42+48.
- [12] 陈燕友. 智能结构在建筑工程中应用研究 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2019.(03).21-23.