GNI 建成环境人工智能研讨会

慕尼黑工业大学，2026年5月18日至20日

BridgeNet：面向机器学习应用的基于图的桥梁结构模型数据集

Bleker, L.[12], Güneş, M.C.[12], 和 D'Acunto, P.[123]慕尼黑工业大学工程与设计学院结构设计教席，Arcisstraße 21，慕尼黑，80333，德国[2]慕尼黑工业大学慕尼黑数据科学研究所，Walther-von-Dyck-Straße 10，加兴，85748，德国[3]慕尼黑工业大学高等研究院，Lichtenbergstraße 2a，加兴，85748，德国 lazlo.bleker@tum.de

摘要： 机器学习（ML）正日益应用于结构工程与设计，但结构系统开放数据集的缺乏阻碍了其进一步普及。我们推出 BridgeNet，这是一个公开可用的基于图的数据集，包含 20,000 个形态生成的桥梁结构，旨在推动概念结构设计领域的图机器学习和多模态学习。每个数据点由以下部分组成：(i) 采用组合平衡建模（CEM）形态找形方法生成的铰接平衡线框模型；(ii) 通过力引导实体化获得的体积三维网格；以及 (iii) 从两个标准相机视角渲染的图像。该数据集模态丰富且应用无关，可支持多种任务，例如 CEM 特定的边分类和参数推断、找形代理建模、图、网格与图像之间的跨模态重建，以及生成式结构设计。BridgeNet 为结构工程与设计中的数据驱动应用提供数据集，助力开发针对平衡桥梁结构的新型机器学习方法，从而解决该领域的一项关键瓶颈。

1. 引言

机器学习（ML）正日益应用于建筑、工程与施工（AEC）行业，包括结构工程和结构设计。在所采用的各种数据表示中，图作为机器学习应用的一种特别灵活且强大的媒介脱颖而出，能够自然地编码离散线框结构，例如铰接框架、离散形态生成结构和结构框架。相应地，图机器学习（Graph ML）方法（如图神经网络（GNN））可以直接处理图结构数据，并且已经应用于结构工程与设计中的广泛问题。

桥梁结构是图机器学习应用中特别相关的用例：从结构设计的角度来看，由于可行设计在拓扑和几何形态上多种多样，桥梁是跨类型设计的理想案例研究对象。从结构工程的角度来看，桥梁系统中涉及的巨大力使其成为开展先进结构分析与优化的有力候选对象。此外，全球范围内现有桥梁基础设施日益老化，这凸显了开发高效、数据驱动的方法以对其进行评估、修复和新建设计的迫切性。

1.1. 问题陈述

尽管机器学习在结构工程与设计领域的应用潜力已得到广泛认可，但其应用尚未普及。阻碍机器学习在这些领域进一步发展的因素之一，是普遍可用的训练数据不足。与此同时，应用最广泛的机器学习范式——监督学习——高度依赖高质量训练数据，才能准确进行预测。建筑与工程公司不愿公开分享其设计作品集中的数据，这一点可以理解。另一方面，学术研究中开发和使用的数据也并非总是公开提供。一般而言，为了让他人能够使用数据而对其进行整理，需要额外投入时间和资源，而这些时间和资源可能并非总是可用，也未必会被优先考虑。因此，结构工程与设计领域的大多数机器学习模型，都是基于为特定应用专门开发的数据集进行训练。这导致重复劳动，阻碍可复现性，也使得不同方法之间难以进行有意义的比较。因此，该领域缺乏广受认可、开放获取且不针对特定下游应用的线框结构数据集，也缺乏足够丰富、能够支持多种数据驱动任务的数据集。

1.2. 目标与范围

本文介绍了*BridgeNet*，这是一个公开可用的桥梁结构图数据集，旨在用于结构工程与设计中的机器学习应用。我们重点关注仅通过轴力满足平衡的铰接杆结构，这符合概念结构设计阶段的典型抽象层级。结构通过参数化模型生成，该模型基于组合平衡建模（CEM）找形方法（Ohlbrock和D'Acunto，2020年）。此外，我们从基于线框图的结构中生成三维网格和二维图像表示，使BridgeNet中的每个数据点都以三种不同模态呈现。由此，BridgeNet旨在支持桥梁结构概念设计与分析中的广泛多模态机器学习应用。

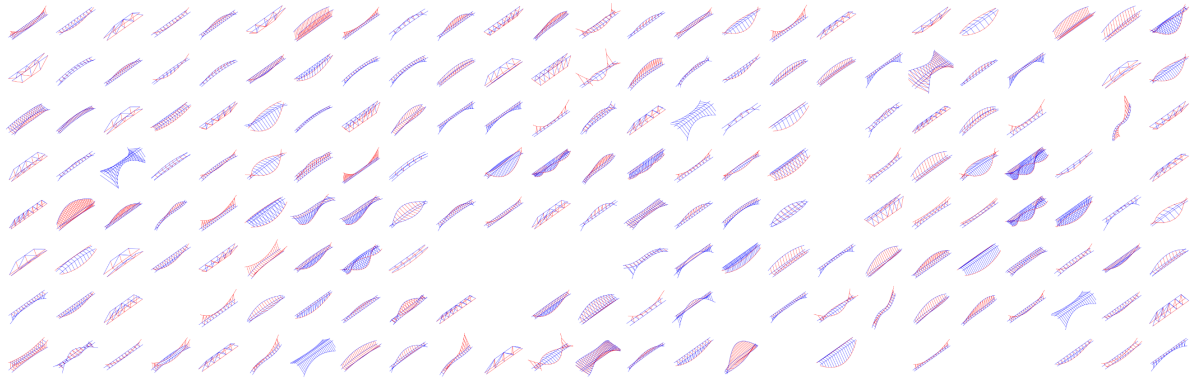

图1. 使用自组织映射（SOM）可视化的BridgeNet结构选例。

1.3. 贡献

本文主要有两项贡献：

1. 一个包含20,000座桥梁的桥梁结构基于图的数据集（BridgeNet）。对于每座桥梁，数据集包含：(i) 一个处于平衡状态的铰接结构线框模型，(ii) 一个基于内力大小的三维网格模型，以及 (iii) 从两个标准相机视角呈现该三维模型的二维渲染图像。BridgeNet托管于Hugging Face，可通过以下链接访问：https://huggingface.co/datasets/lazlo-bleker/bridge-net。

2. 一种基于找形、实体化和渲染的数据生成工作流程，通过该流程生成 BridgeNet；该流程也可作为生成其他结构类型数据的模板。

2. 背景与相关工作

2.1. 结构数据集

尽管用于结构设计和工程领域机器学习应用的数据总体上较为有限，但仍有少数公开可用的结构数据集。尤其是在拓扑优化领域，已有若干基于图像的数据集（Sosnovik 和 Oseledets，2019年；Mazé 和 Ahmed，2023；Bastos，2025；Li 等，2025）。这些数据集通常通过改变边界条件（如荷载和支座）以及优化过程的参数（包括目标体积分数）生成。虽然这些数据集大多包含二维结构，Dittmer 等人还发布了一个三维体素化拓扑优化结果数据集（Dittmer 等，2023）。

拓扑优化非常适合用于构建自动化数据生成流程，这也解释了为何与手工制作或基于参数化模型的数据集相比，此类数据集相对丰富。然而，这类数据集也从根本上受限于拓扑优化方法生成的最优结构类别，因此仅代表结构设计与工程领域所关注的所有结构中的一部分。手工制作数据集的一个例子是 SimJEB，其中包含通过开放式工程设计竞赛众包收集的喷气发动机支架三维 CAD 设计（Whalen et al., 2021）。此外，Liao et al. 发布了一个平面图数据集，其中标注了从建筑设计与研究机构收集的剪力墙位置（Liao et al., 2021）。

除体积结构外，也有少量线框结构数据集已公开发布。Chang 和 Cheng 发布了一个矩形建筑框架结构合成数据集（Chang and Cheng, 2020），Zheng et al. 则创建了一个用于超材料设计的随机桁架结构数据集，其中的结构占据一个单位立方体（Zheng et al., 2023）。与本研究最相关的是，Pastrana et al. 开发了一个桥梁结构 CEM 拓扑图数据集（Pastrana et al., 2021）。该数据集包含约 1600 个结构，这些结构经过生成，以匹配特定桥梁类型的几何形态，例如通过自动微分进行优化（Pastrana et al., 2022）。与 Pastrana et al. 的研究不同，本文提出的数据集包含 20,000 个形态寻优得到的结构，特别注重最大化其几何多样性；通过在 CEM 算法中嵌入额外约束并结合数据筛选策略，这一目标得以实现（第 3.1 节）。

2.2. 数据驱动的结构应用

尽管公开可获取的结构数据集十分有限，但结构设计和工程领域中的数据驱动应用仍在不断发展。下面列出了一些依赖于离散线框状结构数据集的机器学习应用，这些数据集与本文介绍的数据集类似；这并非详尽无遗的列表。

该领域一个历史悠久的研究方向是代理建模，旨在利用机器学习模型取代各种计算成本高昂的结构分析和优化过程（Mueller，2014）。其中包括用于桁架有限元法（FEM）分析的代理模型（Whalen 和 Mueller，2022）、用于建筑框架截面优化的代理模型（Chang 和 Cheng，2020），以及用于摊销各种最佳拟合找形问题的代理模型（Tam 等人，2020；Tam 等人，2024；Pastrana 等人，2025；Bleker 等人，2025）。线框结构数据集也为特定方法的找形问题研究提供了支持。例如，Pastrana 等人构建的 CEM 拓扑图数据集被用于开发一种用于 CEM 边标注的图神经网络

（Bleker等，2022年），随后，本研究所介绍数据集的前身被用于训练逻辑指导的图神经网络，以完成同一任务（Bleker等，2024年）。最后，基于机器学习的生成模型能够生成与训练数据相似的结构，因此能从涵盖范围广泛的结构数据集中获益良多。这类模型为结构设计提供了新途径，例如通过变分自编码器（VAE）进行潜在空间探索（Danhaive等，2021年），或根据用户偏好或文本嵌入生成设计（Saldana等，2021年；Guo等，2022年）。

3. 数据集生成

用于创建 BridgeNet 的数据生成流程由一系列数据处理步骤组成（图2）。首先，使用基于组合平衡建模（CEM）找形方法的参数化模型，生成桥梁结构的平衡形状（Ohlbrock和D’Acunto，2020年）。接着，根据找形所得线框结构中各杆件的内力，生成实体化的三维体网格。最后，通过从两个标准相机视角渲染三维网格，创建桥梁的图像表示。

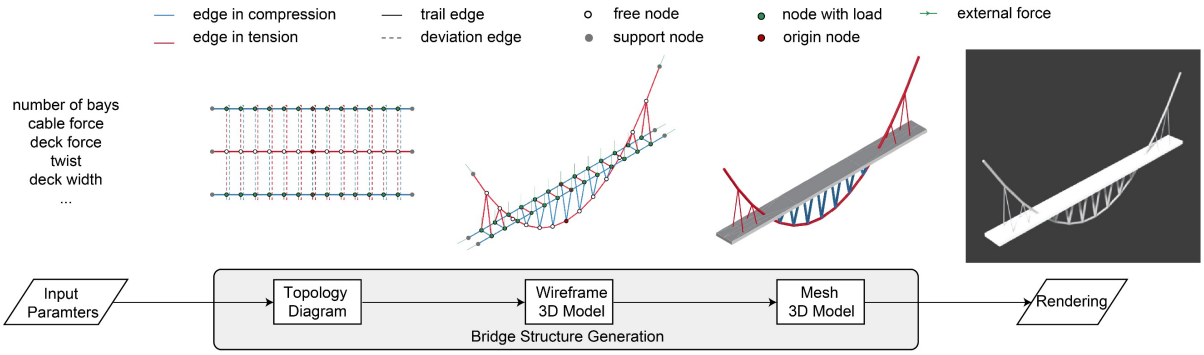

图2。用于生成 BridgeNet 的数据生成流程。桥梁采用组合平衡建模（CEM）生成，根据内力大小进行实体化，并从两个标准相机视角渲染。

3.1. 采用组合平衡建模进行找形

BridgeNet 数据生成流程的第一阶段包括使用组合平衡建模（CEM）形态找形方法（Ohlbrock和D’Acunto，2020年）创建平衡线框结构。CEM 将输入图（称为 拓扑图）转换为处于静力平衡状态的节点和杆件空间构型。拓扑图的边被分为路径边和偏差边。路径边构成连接起点节点与支承节点的有序链（路径）。对于 BridgeNet 中的桥梁结构，路径沿桥梁长度方向排列，从跨中附近的起点节点开始，终止于某个桥台处的支承点。偏差边构成连接两条路径上节点的其余边集合。CEM 允许分别为路径边和偏差边赋予有关基本杆件长度和力的度量信息。

通常，度量参数（包括路径长度和偏差力）会预先指定。随后，CEM找形算法根据这些指定的度量参数，沿拓扑图中的路径依次计算平衡。为创建 BridgeNet，我们采用了经过修改的 CEM 算法，在找形过程中自动指定选定的偏差力，从而更好地控制找形几何。具体而言，为了控制桥面的曲率和宽度，代表吊杆的偏差边的力，以及代表桥面间 杆件的偏差边的力

（图 3）是根据构成桥梁桥面的节点的一组目标坐标分配的。这些力的数值经过设定，使桥面的曲率符合预定值，并且桥面的宽度沿桥梁跨径保持不变。

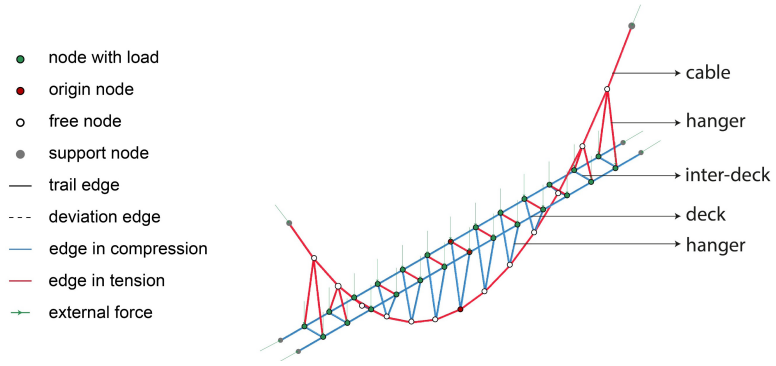

图 3. BridgeNet 中结构杆件组的语义标签。

我们基于 CEM 构建了一个参数化生成器，可根据输入参数列表生成拓扑图。这些参数包括决定桥梁拓扑的参数，例如跨数。其他参数用于定义桥梁的内力和几何，例如主缆和桥面的力，或桥面的扭转角度和宽度。为确保最终数据集仅包含比例和力分布合理的桥梁，我们采用后处理筛选步骤。具体而言，我们将生成的几何限制在一个包围盒内，其水平和垂直边界分别为跨径的 0.8 倍和 0.65 倍。此外，我们会舍弃相邻桥面构件之间的夹角大于 15° 或总荷载路径超过 0.9 × span2 的候选结构。我们持续生成候选结构，直到数据集中有 20,000 个结构满足所有筛选条件。

3.2. 实体化与渲染

由 CEM 生成的线框几何形态是后续实体化步骤的基础，借此可获得每座结构的体积网格表示。实体化及后续渲染步骤基于 Sun 等人提出的方法（Sun 等人，2024年）。具体而言，我们根据每根杆件的内部轴力确定其横截面尺寸。受拉构件采用直径介于 0.08 米至 0.8 米之间的圆形横截面，受压构件则采用直径介于 0.25 米至 1.5 米之间的圆形横截面。对于属于拱的受压杆件，我们改用方形管截面。最后，桥面杆件之间的跨越表面通过一块厚度固定为 0.4 米的板进行实体化。

实体化完成后，我们对生成的网格进行单色渲染，以获得每座桥梁结构的二维图像表示。为了实现中性的可视化效果，我们为场景中的所有表面赋予哑光白色材质，并以深灰色背景衬托。每座桥梁均从两个标准相机视角生成分辨率为 1200x900 的渲染图：一个方位角和仰角均为 45° 的等轴测视角，以及一个垂直角度为 30° 的侧立面视图。

4. BridgeNet

创建完成后，BridgeNet 包含 20,000 组数据点，每组都包含一个线框平衡结构、一个体积网格和两张渲染图像。每个数据点都关联一个模型 ID，并存储在一个与该 ID 同名的文件夹中（图 4）。每个数据点对应的文件夹中包含：(i) 一个子文件夹，其中以 .jpg 文件形式存放渲染图像；(ii) 一个子文件夹，其中以 .json 文件形式存放用于生成数据的参数化模型输入参数；(iii) 一个子文件夹，其中包含

线框结构以两个 .json 文件的形式存放，分别包含节点信息和边信息；以及 (iv) 一个子文件夹，其中以 .obj 文件形式存放体积网格。

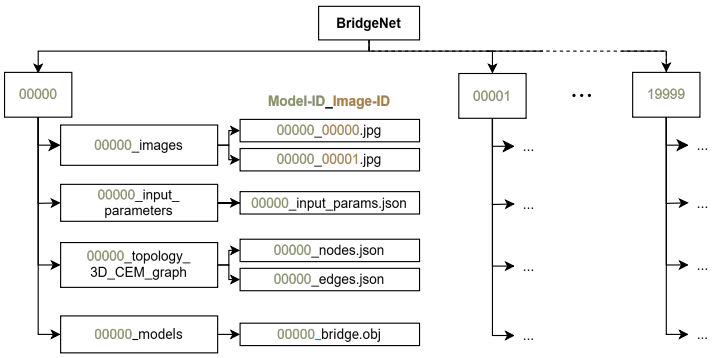

图 4. BridgeNet 的文件夹结构。每座桥梁的数据都存储在一个以相应模型 ID 命名的文件夹中。

4.1. 数据分布

我们报告了拓扑属性（边数、节点数、跨数）、几何属性（桥面宽度、高度、平均边长）和力相关属性（平均边力大小、受拉边比例、总荷载路径）的分布（图 5）。某些属性作为参数化模型的输入直接控制（例如桥面宽度），其分布接近均匀；而其他参数的分布则更为复杂，由找形和数据筛选过程决定。

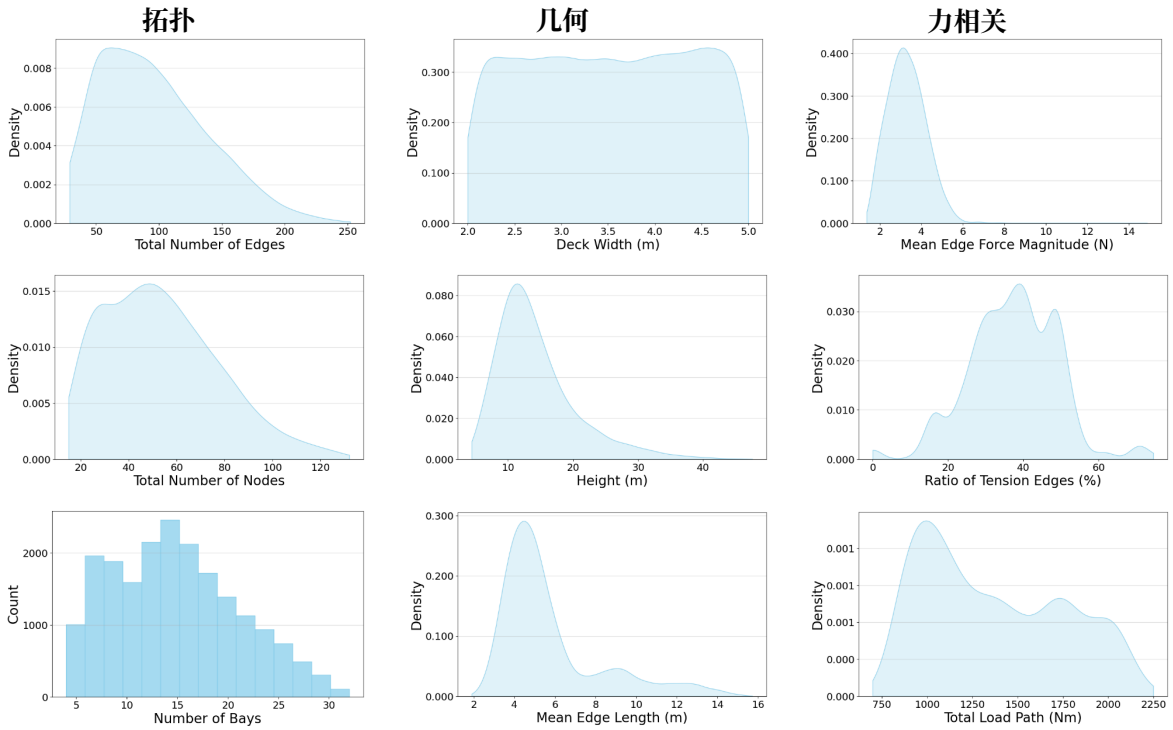

图 5：BridgeNet 中结构参数和属性的分布。

图6概述了 BridgeNet 中不同桥梁类型在所提供的三种数据表示中的样本。

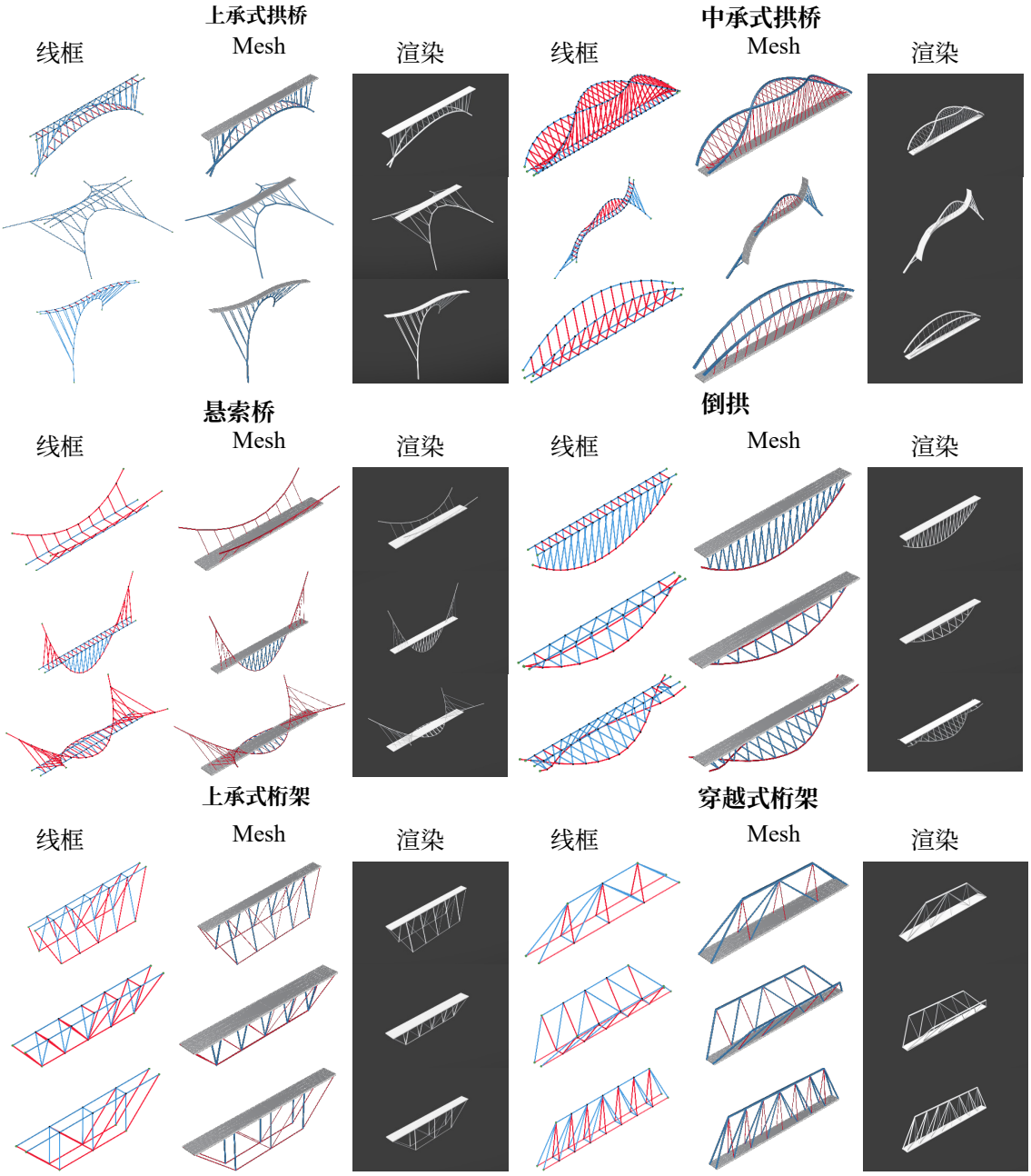

图6：BridgeNet 中表示的不同桥梁类型。

4.2. 任务

BridgeNet 是一个灵活、模态丰富的数据集，旨在支持与结构设计和工程相关的广泛机器学习任务。得益于基于图的线框数据、体网格和渲染图像的组合，它既支持单模态学习，也支持多模态学习场景。以下类别概述了 BridgeNet 旨在支持的关键任务：

CEM 特定任务。BridgeNet 直接支持与组合平衡建模（CEM）相关的任务，包括：

- **边分类**，例如预测路径边和偏差边的边标签，正如在前驱数据集（Bleker等，2024年）上所示。
- **参数推断**，根据部分数据预测 CEM 度量输入（路径长度、偏差力、原点节点坐标）。
- **正向代理建模**，其中机器学习模型近似 CEM 正向找形过程，以减少计算时间。

多模态学习任务。 图、网格和图像等模态的引入，使模型能够学习跨模态关系：

- **图像到线框**工作流程，例如根据图像预测结构图。
- **网格到线框** 重建，用于数据补全或模型间转换。
- **跨模态对齐**，即将图、网格和图像的表征共同嵌入统一的潜在空间。这些任务支持将基于图的模型与计算机视觉或三维深度学习架构相结合。

生成式结构设计。 BridgeNet 的几何多样性使其非常适用于生成建模方法，例如：

- **基于图的生成模型**，可直接通过节点坐标或间接通过找形输入参数来合成新的平衡结构。
- **参数化生成模型**，其中机器学习模型提出新参数，作为基于CEM的参数化模型的输入。
- **图像条件结构生成**，使用户能够基于输入图像引导设计探索。

5. 结论

本文介绍了 BridgeNet，这是一个公开可用的数据集，包含 20,000 个形态生成桥梁结构，并以三种模态呈现：基于图的线框、体积网格和渲染图像。通过将 CEM找形与统一的实体化和可视化工作流程相结合，BridgeNet 为结构工程与设计领域的机器学习研究提供了一个可扩展、应用无关的数据集。由此，BridgeNet 有助于缓解该领域普遍存在的数据短缺问题，并可为不同机器学习方法的基准测试、比较和可复现性奠定基础。

尽管如此，仍存在若干局限。目前，该数据集仅关注处于平衡状态的铰接轴向受载结构，因此未纳入刚度效应、弯曲行为或材料非线性。其类型范围仍局限于所选参数化模型定义的部分桥梁形式。此外，所有数据均为合成生成，未包含真实世界的桥梁几何形态或现实的荷载情景。

因此，未来工作将围绕三个方向扩展 BridgeNet：（i）扩大生成桥梁的类型和几何多样性；（ii）纳入更多层次的结构信息，例如基于有限元法的分析；（iii）整合真实桥梁数据，以

支持合成与真实混合训练和验证。最后，所提出的工作流程还可扩展用于生成桥梁以外其他结构类型的数据集。

6. 致谢

本研究部分获得慕尼黑工业大学（TUM）国际科学与工程研究生院（IGSSE）的支持，部分获得慕尼黑工业大学格奥尔格·内梅切克研究所（GNI）的支持，项目名称为“利用人工智能自动创建桥梁基础设施数字档案”。

7. 参考文献

Bastos, R. A. O., 2025. 拓扑优化数据集。*Zenodo*，可通过以下网址获取：https://zenodo.org/records/15243092

Bleker, L., Pastrana, R., Ohlbrock, P. O. 和 D’Acunto, P., 2022. 图神经网络增强的结构形态寻找。载于：迈向彻底再生：*2022*年柏林设计建模研讨会，第 24–35 页。施普林格国际出版公司。

Bleker, L., Tam, K.-M. M. 和 D’Acunto, P., 2024年. 面向结构形态寻找的逻辑引导图神经网络。《先进工程信息学》，61，102510。

Bleker, L., D’Acunto, P. 和 Tam, K.-M. M., 2025. 使用 E(3) 等变物理图神经网络进行广义逆结构形态寻优。SSRN，网址：https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_标识=5208576

Chang, K.-H. 和 Cheng, C.-Y., 2020. 面向结构工程的模拟与设计学习。载于第*37*届国际机器学习会议论文集（PMLR 119），第 1426–1436 页。

Danhaive, R. 和 Mueller, C. T., 2021年。《设计子空间学习：利用性能条件生成建模进行结构设计空间探索》。《建筑自动化》，127，103664。

Dittmer, S., Erzmann, D., Harms, H., Falck, R. 和 Gosch, M., 2023。SELTO数据集：用于三维拓扑优化深度学习的基准数据集。*Zenodo*，可通过以下网址获取：https://zenodo.org/records/7781392

Guo, Z., Saldana Ochoa, K. 和 D’Acunto, P., 2022。将基于文本的人工智能引擎与计算图形静力学相结合，以改进结构形态寻找。*IASS*年度研讨会论文集，*IASS 2022*北京研讨会：创新、可持续性与传承。

Li, S., Xu, X., Hu, H. 和 Li, Y., 2025。基于改进型DoubleU-Net并使用四种边界条件数据集的拓扑优化。《工程优化》，57(4)，第1–19页。

Liao, W., Lu, X., Huang, Y., Zheng, Z. 和 Lin, Y., 2021年。利用生成对抗网络自动设计剪力墙住宅建筑。《建筑自动化》, 132, 103931。

Mazé, F., Ahmed, F., 2023。扩散模型在拓扑优化方面胜过 GAN。《AAAI人工智能会议论文集》, 37(8), 第 9108–9116 页。

Mueller, C. T., 2014。结构设计空间的计算探索。博士论文，麻省理工学院。

Ohlbrock, P.O. 和 D’Acunto, P., 2020。《基于图形静力学与组合变化的平衡设计计算机辅助方法》。《计算机辅助设计》，121，102802。

Pastrana, R., Skepasts, M. 和 Parascho, S., 2021年。《CEM框架桥梁数据集：桥梁拓扑、形态和力的数据集》。GitHub代码库，网址：https://github.com/arpastrana/cem_数据集。Pastrana, R., Ohlbrock, P. O., Oberbichler, T., D'Acunto, P. 和 Parascho, S., 2022。使用自动微分对拉压结构进行约束找形。《计算机辅助设计》，155，103435。

Pastrana, R., Medina, E., de Oliveira, I. M., Adriaenssens, S. 和 Adams, R. P., 2025年。利用可微力学和神经网络对建筑结构进行实时设计。第十三届国际表征学习会议（*ICLR 2025*）论文集。

Saldana Ochoa, K., Ohlbrock, P. O., D'Acunto, P. 和 Moosavi, V., 2021年。超越类型学，超越优化：在人类与机器智能的交界处探索新颖的结构形态。《国际建筑计算学报》，19(3)，第 466–490 页。

Sosnovik, I. 和 Oseledets, I., 2019年。用于拓扑优化的神经网络。《俄罗斯数值分析与数学建模杂志》，34(4)，第 215–223 页。

Sun, T., D'Acunto, P. 和 Petzold, F., 2024年。基于深度学习方法的结构具身统一工作流与工具包：用于找形、实体几何生成与可视化。*IASS*年度研讨会论文集，*IASS 2024*苏黎世。

Tam, K.-M. M., Moosavi, V., Van Mele, T. 和 Block, P., 2020。利用图卷积网络探索网格平衡壳结构的跨拓扑设计。*IASS*年度研讨会论文集，*IASS 2020/21*萨里研讨会：计算找形方法与形态学，第 1–13 页。

Tam, K.-M. M., Brown, N. C., Bronstein, M., Van Mele, T. 和 Block, P., 2024年。《约束静力平衡学习：利用CW复形和几何深度学习对推力网络进行最佳拟合逆向找形》。SSRN，网址：https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4930378

Whalen, E., Beyene, A. 和 Mueller, C., 2021年。SimJEB：喷气发动机支架仿真数据集。《计算机图形学论坛》，40(5)，第 9–17 页。

Whalen, E. 和 Mueller, C., 2022。《迈向可复用代理模型：桁架上的基于图的迁移学习》。机械设计学报，144(2)，021704。

Zheng, L., Karapiperis, K., Kumar, S. 和 Kochmann, D. M., 2023。通过生成建模统一线性与非线性桁架超材料的设计空间并进行优化。《自然·通讯》，14，7563。