



工程生命体：生命周期、生态支持与健康诊断

李开孟¹, 梁军^{2*}, 张恒力³, 高婧², 王庆军^{2,4}, 王镇中^{2,5}

1. 中国国际工程咨询有限公司, 北京 100048;

2. 西安交通大学 马克思主义学院, 西安 710049;

3. 北京航空航天大学 马克思主义学院, 北京 100191;

4. 西安建筑科技大学 建筑学院, 西安 710055;

5. 陕西省西咸新区空港新城管理委员会, 西安 712034

摘要: 在工程生态的语境下, 工程作为具有生命特征的实体, 表现出与生命体相似的特征, 工程生命体实质上是一种类生命体。它同样具有自身的生命周期, 包括孕育阶段、成长阶段、运营阶段和退役(转型)阶段。作为存在于特定自然生态、社会生态、数字媒介生态中的生命体, 工程生命体与所处的外部生态支持系统始终保持交互, 实现动态平衡, 保证工程活动的顺利展开。工程生命体的健康状况不仅受外部生态支持系统的影响, 更依赖于工程内部诸要素的相互协调。为此, 必须基于工程生态思维, 开展全生命周期的健康诊断, 及时发现并纠正问题, 确保工程生命体的健康成长。

关键词: 工程生命体; 工程生态; 生命周期; 生态支持系统; 健康诊断

中图分类号: N4

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2025)01-0007-12

引言

最终形成“人工实在”的过程^[1]。工程本体论认为工程是现实的、直接的生产力, 应当从工程自身产生、工程是通过在特定环境、条件下开展造物活动, 发展、演变过程的事实出发认识工程活动的本质^[2]。

收稿日期: 2025-01-15; 修回日期: 2025-01-22

基金项目: 中国工程院战略研究与咨询项目“工程生态论的理论体系和实践研究”(2024-XZ-69); 中煤科工开采研究院有限公司咨询项目“人工智能与煤矿建设的工程理论体系”

作者简介: 李开孟(1965—), 男, 博士, 研究员, 享受国务院政府特殊津贴专家, 研究方向为工程技术经济。E-mail: likm@ciecc.com.cn

*梁军(1971—), 男, 博士, 教授, 研究方向为工程哲学、科学技术哲学、跨学科的马克思主义研究等。E-mail: liangjunfx@mail.xjtu.edu.cn (通讯作者)

张恒力(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为工程伦理。E-mail: bjjszxt@126.com

高婧(2000—), 女, 博士研究生, 研究方向为工程哲学、跨学科的马克思主义研究。E-mail: 384155855@qq.com

王庆军(1989—), 男, 博士研究生, 研究方向为工程哲学、跨学科的马克思主义研究。

王镇中(1982—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为马克思主义基本原理、工程哲学与城乡规划研究。

引用格式: 李开孟, 梁军, 张恒力, 等. 工程生命体：生命周期、生态支持与健康诊断[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2025, 17(1): 7-18. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20250009. CSTR: 32282.14.JES.20250009

Li K M, Liang J, Zhang H L, et al. Engineering Life Bodies: Life Cycle, Ecological Support and Health Diagnosis[J]. Journal of Engineering Studies, 2025, 17(1): 7-18. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20250009. CSTR: 32282.14.JES.20250009

工程演化论认为, 工程作为一种基本的人类社会活动, 其存在的整个过程总是呈现出不断演化的各种形态^[3]。工程生态作为工程活动由以发生的各类生态关系交织而成的动态场域 (dynamic field), 则决定着工程的存在与发展状态^[4]。从工程生态角度看, 工程生命体是工程生态的基本组成单元, 而工程生态是工程生命体存续和不断演化的重要条件。一方面, 工程总是处于特定的生态环境中, 无法脱离这一现实的外部条件。另一方面, 工程活动本身具有结构性、规律性, 是一个动态的过程集合。从时间的微观尺度而言, 工程在每一个即时点都处于复杂的运动状态。从时间的宏观尺度而言, 工程的发展呈现出阶段性的特征。随着时间的推移, 工程历经项目规划、设计、施工、运行、退役等多个阶段, 表现出与“生命体”类似的特征, 同时在各个阶段需要对工程的健康状况进行各项诊断, 以判别工程生命体是否可以在现有生态下继续生存。基于工程生态理论的基本范式与一般设定, 工程生命体这一概念是从功能解释的角度衍生而出的, 它作为一种隐喻, 其实质上是一种类生命体的存在^[5]。所谓类生命体, 即指工程生命体不是以蛋白质的存在方式为主要载体的有机生命体。在此界定之下, 本文将深入探讨工程生命体所对应的生命周期及其生态支持系统, 并据此进一步分析工程生命体的健康诊断问题。旨在为工程生态理论的研究以及工程活动的健康发展提供有益的思考。

1 工程生命体的生命周期

工程可以看作生命体, 有着自己的全生命周期, 具体包括孕育、成长、运营、退役四个阶段, 而每个阶段又包括若干关键环节。当然, 这些阶段或环节之间并不是截然分开, 而是具有某种交叉和内在的连续性。

1.1 工程生命体及其生命周期的概念

恩格斯 (Friedrich Engels) 在《反杜林论》中指出: “生命是蛋白体的存在方式, 这种存在方式本质上就在于这些蛋白体的化学成分的不断自我更新。”^[6]这一认识把握住了生命的本质, 体现了唯物

辩证法思想。

包括工程生命体、工程健康等工程生态的概念和语境之所以日渐成为工程理论和工程实践领域的共识, 就是因为工程本身所表现出的与生命体相似的特征。在工程活动的全生命周期中, 具有与“生命体”相似的孕育、成长、成熟直到最终消亡的过程。工程生命体是人类有目的、有计划、有组织地运用各类知识、技能、要素和资源建造具有特定功能的人工系统或装置^[7]。工程本身虽然不具备自我调节、自适应、学习和进化的能力, 但由于作为工程主体的人的因素, 或者说工程的社会属性, 使得工程在外在表征上能够形成类生命体或实现自然生命体的关键特性, 如能量转换、信息处理、功能协调和环境响应, 因而是一种具有生命动态属性的复杂系统。

随着智能科技革命的不断推进, 智能化已经成为工程及工程活动的一个重要特征^[8]。智能工程是在工程领域中由人类设计和构建的, 具备自主感知、决策、执行与学习能力的人工系统。它通过集成智能算法、传感器、执行机构, 能够动态适应环境变化, 完成复杂任务, 优化资源配置, 并协同其他系统工作。智能工程可以看作工程生命体在智能化时代的一种新的表现形式, 是工程生命体进化链条上的一种新形态。

就像任何生命体一样, 工程生命体也有自己的生命周期。工程生命体的生命周期从工程的概念阶段开始, 经历设计、开发、实施、运营, 直至工程报废、结束或转型的整个过程。这一过程可分为孕育阶段、成长阶段、运营阶段和退役 (转型) 阶段。工程生命体的生命周期不仅反映了工程从概念到完成所经历的所有阶段, 而且强调了在这些阶段中形成连续、系统的管理组织责任体系的重要性, 以保证工程管理的连续性和系统性^[9], 从而提高工程管理的效率, 改善工程活动的运行状况。

1.2 工程生命体的孕育阶段

工程生命体的孕育阶段是整个工程生命周期的起点, 它奠定了项目从概念到现实转化的基础。此阶段不仅涉及项目设想的形成, 还包括对项目可行性、合理性及可持续性的全面分析与验证。工程生命体的孕

育过程是一个复杂而精细的系统工程, 涵盖了从初步构想到实施准备的多层次、多维度环节。它不仅关乎工程的技术和经济层面, 还涉及管理决策、社会影响、环境可持续性等多个领域。对工程生命体孕育阶段的深入研究, 有助于更好地理解和把控工程项目的前期流程, 从而为后续的成长与成熟奠定坚实基础。

工程生命体孕育阶段包括立项、论证、决策和设计四个关键环节, 这些环节相互衔接, 共同构成了工程生命体孕育的完整阶段。首先, 立项阶段是工程生命体孕育的起点。在这一阶段, 相关工程活动的主体根据需求或目标提出工程项目建议, 并开展初步调研。这一过程为工程生命体的概念奠定基础, 同时明确了工程项目的初步方向。接着, 工程项目进入论证阶段。这是工程项目生命周期的关键一环, 在此阶段, 通过可行性研究对项目的背景、目标、范围以及技术、市场、财务、法律等要素和社会、经济、环境等效益进行全面分析。论证结果决定了工程生命体是否具备继续孕育的条件。如果论证表明项目不可行, 工程生命体的孕育将中止; 若论证可行, 则会形成详细的可行性研究报告, 为后续阶段提供支撑。随后, 进入决策阶段, 这一环节是工程生命体孕育的重大转折点。在决策阶段, 依据可行性研究的成果, 对项目的风险和预期回报进行综合评估, 并最终做出立项决策。立项的通过标志着工程生命体孕育从设想迈向现实。最后, 设计阶段是工程生命体孕育过程中的核心环节, 旨在将前期论证和决策成果转化为具体的实施方案。该阶段围绕功能性、可行性和可持续性展开, 进行详细的技术和工程设计。通过立项、论证、决策和设计的有序推进, 工程生命体从最初的概念逐步转化为现实的人工系统, 奠定了其成功实施的基础。

在工程生命体的孕育阶段, 工程项目建议提出之后的论证阶段是关键起点, 涉及工程项目在社会、技术、环境和经济效益方面的可操作性和实际功能。该环节核心在于明确工程项目规模、功能、性能等需求, 评估资金可行性, 确保技术方案的可行性和市场的需求性。这一阶段, 立项决策环节基于前期的论证, 结合管理层的战略意志, 综合考虑技术可行性、经济回报、社会影响、风险管理、法律法规等关键因素, 最终决定工程项目是否正式立项。这一环节需要

高级管理层的批准, 涉及工程投资方、政府及相关工程主体的综合考量。最后, 设计规划环节是工程生命体进入成长阶段的基础。这个阶段需要明确工程项目目标、需求、技术和工程设计方案、预算、进度、供应链等要素。此阶段的设计规划质量直接关系到工程项目实施的成效和工程生命体的最终效果。整体而言, 工程生命体孕育阶段的每个环节都是相互关联且至关重要的, 它们共同确保工程项目从概念提出到落地实施的顺利进行, 为工程生命体的健康成长提供保障。

1.3 工程生命体的成长阶段

当一个工程生命体成功通过项目论证、立项决策、设计规划等环节, 完成孕育阶段, 正式进入工程生命体的下一阶段时, 它迎来的是一个充满挑战和机遇的关键时段——成长阶段。在工程生态的语境中, 工程生命体的成长也具有与生命体成长共同的特征。

工程生命周期的成长阶段主要指工程项目的实施阶段。该阶段自现场动工起, 直至工程项目所包含的计划目标实现。主要包括工程组织、工程建设、工程管理实施、竣工验收等。这些内容共同构成了工程生命周期的成长阶段, 是工程项目从概念到实施的关键时期。

如果从一般生命体的特征来看, 工程生命体所需的要素在其成长阶段中的流动规律凸显了生命体的特征。一是资金流动。包括投资、预算、成本管理等方面的资金流动可以被视为工程生命体的血液, 为工程项目提供生存和发展所需的驱动力。工程生命体必须保持资金的稳定流动, 以支持工程项目的各个方面, 如采购材料、支付工人工资、管理风险等。资金流动的合理规划和管理是确保工程生命体健康成长的关键。二是物料流动。物料和资源是工程生命体的营养, 类似于细胞需要营养来生长和繁殖。在成长阶段, 需要有效地管理物料的供应链, 确保原材料和设备按需到达工地, 以支持施工建设。此外, 合理的物料管理也有助于减少浪费和资源消耗, 促进可持续发展。三是人力流动。人力是工程生命体的主导动力, 类似于生物体中的细胞和组织。在工程生命体的成长阶段, 需要一定数量和质量的人力资源来执行各项任

务。这包括工程师、工人、项目经理等各种专业人员。人力资源的流动要求有效的团队协作和沟通,以确保工程项目按计划顺利进行。四是信息流动。信息流动是工程生命体的神经网络,类似于生物体中神经系统对信息的传递。在工程生命体的成长阶段,信息流动贯穿整个项目周期,是连接资金、物料和人力的重要纽带。高效的信息传递可以优化资源配置、实时监控进度,并快速响应问题,包括设计图纸、施工计划、进度反馈等各类信息的流转。信息流动的准确性和及时性直接影响项目的协同性和执行力。五是能量流动。能量是生命体存续的基本要素,在工程生命体的存续发展中,能量形式有两种表现形态,其一是供给工程共同体生物能的基本材料,在前工业革命时期,食物、水等是这种能量的主要形式;其二,是工业革命以后,以煤炭、石油、天然气以及电力等形态体现的能量形式,在现代工程活动中,驱动大型工程机械及工程系统运行的能量供给是工程顺利进展的重要条件。

1.4 工程生命体的运营阶段

随着工程生命体的成长阶段逐渐成熟,它也从最初概念的萌芽发展到实体的壮大,实现了对各种资源的有效整合。此时的工程生命体不仅在物理形态上日趋完善,更在功能上达到了预期的设计目标。在这一阶段,它将全面展开其功能,开始实现其预期价值,同时工程生命体也将接受实际运行中的各种检验,包括日常的维护、性能的优化以及对突发事件的响应。

工程生命体在运营阶段的核心任务是工程项目的运营与维护,旨在确保工程能够持续运作,保持其活力与功能。造物之本在于用物,因此,工程项目运营的好坏是评价工程生命体健康状况的主要标准。在运营阶段,健康运营是关键所在,而要实现健康的运营状态,则离不开定期且周到的维护与保养。建立完善的监督、监测预警和应急体系是保障工程健康运营的重要内容。判断运营阶段工程生命体是否健康有以下几个标准,即预期目标完成度、运行时间、效益(产出投入比)、稳定度。预期目标完成度是指工程生命体在运行期间是否满足了前期孕育阶段所设计的目标,是否达到了工程运营主体和服务客体的期望价

值。运行稳定性、安全性是判断运营阶段工程生命体健康状态的重要指标。工程生命体的产出效益即投入与产出之比则直观反映了工程生命体“活得好不好”。稳定度是判断工程生命体平稳运行、持续创造价值和提供服务的指标。

工程生命体作为人工物的类生命体,在工程系统中还呈现出工程生态位的特征。在运营阶段,工程生命体确立了其在工程生态系统中的关键角色,它们已经具备了完善的功能和组织结构,通过直接服务于社会和自然界,其展现出了显著的生产力或者功能价值,同时它们能够在不断变化的环境中体现自己的生态位,与其他工程生命体建立联系,增强整体系统的协同效应。当然,工程生命体也遵循生态位平衡原则,确保了工程生态系统的多样性。同时,工程生命体在运营阶段的体征数据呈现出数据稳定、变化幅度小、活动程度高的特点。稳定的数据是监测工程生命体成熟运行的重要标志。

1.5 工程生命体的退役(转型)阶段

虽然现实生活中,工程项目“非正常退役”(对应生命体“非正常死亡”)的情况也屡见不鲜,但这里主要讨论和分析接近其设计年限,或目标、功能、寿命即将完结的项目的“退役”阶段,这是工程生命体的最后一个阶段或者发生功能转型的阶段。

工程生命体在这个阶段的首要任务是对退役过程的全面评估和规划。工程退役的评估必须科学规范,考察技术、安全、环境及经济成本。在工程退役规划与决策阶段制定退役计划,确保政策法律许可和资源配置合理。工程退役阶段的另一个主要任务是工程职业共同体的安置,保障退役工程管理者、工程师、工人以及相关群体的生产、生活的顺利转型和可持续性。工程生命体的退役阶段要求综合考虑技术、经济、生态环境和社会、历史文化等多方面因素,要求在工程的孕育阶段就前瞻性地考虑到工程活动的全生命周期,以确保工程退役过程的顺利进行,并最大限度地减少对外部环境的负面影响。此外,工程退役还有另外一种结果,即工程功能的转型,例如社会进步过程中位于大都市的工厂区转为工业遗产展览馆,废弃的矿山转为工业遗址。例如北京的798艺术街区、

西安的大华 1935 纺纱厂艺术街区, 以及贵州铜仁的万山汞矿遗址等, 便是此类转型的生动例证。

退役(转型)不仅是工程生命体自身的结束, 更是对整个工程生态系统的一次重大调整, 会引发工程生态系统的结构性变化。技术结构上, 成熟的退役标准和可操作性是关键。经济结构上, 工程退役(转型)是一个资金密集型活动过程, 缺乏资金支持将导致工程退役工作难以进行。社会结构上, 需解决因工程退役带来的失业问题和社会秩序问题。

1.6 工程全生命周期各阶段之间的联系

工程生命体的生命周期不同阶段之间存在紧密的联系, 它们相互配合、相互补充、耦合互动, 形成一个结构复杂、功能多样的方法系统, 围绕一个共同目标即构建一个特定功能的人工物而展开^{[10]477}。

工程全生命周期的各种工程方法, 通过系统集成, 形成了一个完整的集合体。这些方法既相互区别又紧密联系, 具有深度相关性。在工程全生命周期中, 各种工程方法的选择、运用、集成与融合, 都不能只着眼于某一阶段、部分的优化, 而应自觉地从系统整体的视角出发, 运用协同化的方法, 构建并营造各阶段不同方法相互促进、相互补充、相得益彰的有机生态体, 以实现系统整体优化^{[6]477}。

工程全生命周期的孕育、成长、运营与退役(转型)不同阶段的划分也不是截然分开的, 很多时候不同阶段之间相互渗透、彼此交叉甚至互相影响。这些阶段不是单向和不可逆的线性活动, 而是双向、多向、复杂的非线性活动, 每一个阶段的综合信息都会影响并反馈到其他阶段。因此, 在工程生态理论范式下, 把握工程全生命周期需从系统性、整体性以及相互联系和协调的角度出发, 这是推进工程造物、工程管理、工程活动高质量发展的基本立场。

2 工程生命体的生态支持系统

工程生命体的良性孕育、健康成长、高效运营及顺利退役或转型, 离不开工程生态中外部环境的支持。这一工程生命体的生态支持系统由自然生态支持系统、社会生态支持系统及数字媒介生态支持系统共

同构成, 形成支持合力为工程生命体的生存和发展提供稳定环境。同时, 工程生命体依靠自身的调节、适应与反馈机制, 不断与外部生态系统交互, 实现动态平衡。

2.1 工程生命体生态支持系统的内涵与特征

工程生命体的生态支持系统是一个综合性的外部支持架构, 囊括了自然生态、社会生态及数字媒介生态三个支持子系统, 这一系统贯穿于工程生命体的孕育、成长、运营及乃至退役(或转型)阶段的全过程。它通过协调资源的合理分配、优化环境条件、有效管控风险, 并加强信息的流通, 为工程生命体提供坚实的保障。工程生命体与生态支持系统之间相互作用、紧密联动, 共同维持着一种动态平衡, 确保工程项目能在复杂多变的环境中实现高效运作与可持续发展。该生态支持系统具有以下特征:

(1) 生态支持系统的整体性。工程生命体的生态支持系统并非各子系统及其要素的无序堆砌或功能的简单相加, 而是基于特定规律, 各子系统及组成要素间相互关联、作用、影响并协同运作, 构成了一个统一的整体^[11]。在这个整体中, 各子系统及其要素虽各自具备独立功能, 但彼此间紧密配合、综合集成, 共同为工程生命体的健康提供必要的外部支持。

(2) 生态支持系统的复杂性。工程生命体的生态支持系统由众多子系统和多样要素构成, 这些部分在结构和功能上各不相同, 相互交织成一个多层次、多功能且广泛连接的复杂网络。在这个网络中, 系统与要素间存在着错综复杂的相互作用, 这些相互作用对工程生命体自身产生多重影响。

(3) 生态支持系统的动态特性。自然生态支持系统、社会生态支持系统, 以及以数字化与信息化技术为基础的数字媒介生态支持系统, 均非静态存在, 而是随着社会变迁和内外环境的演变不断发生变化。此外, 工程生命体生态支持系统中各组成部分间的共存与互联特性, 以及它们所具备的适应、调节、干预和演进能力, 共同塑造了生态支持系统的动态属性。

2.2 工程生命体生态支持系统的组成

2.2.1 自然生态支持系统 工程活动是人类有目的、

有计划、有组织地改造自然物质世界的实践活动^{[12]3},并在顺应、依赖及适度改造自然的过程中不断进化与发展^{[7]233}。在这一过程中,由资源、能源、土地、地质、气候等因素构成的自然生态支持系统,既为工程生命体其提供了必要的物质支撑,也设定了发展界限。自然生态不仅孕育、支持并维护着工程生命体的生命周期,从初始的孕育、成长到运营阶段,提供了宝贵资源,还确保了工程生命体在退役、消亡时能得到环境的合理消纳。然而,自然生态支持系统同时也对工程生命体的健康状况施加着限制。自然资源的有限性、环境的稳定性、生态系统的自我修复力局限,以及自然灾害的广泛、突发和破坏性,要求工程活动必须在尊重自然生态系统承载能力、维护其自我维持与修复能力的框架内进行。这种自然生态的约束机制,一方面促进了工程生命体遵循自然规律健康成长,另一方面也促使工程生命体在维护自然生态平衡的前提下,不断探索适应与进化的道路。

2.2.2 社会生态支持系统 工程生命体在全生命周期中必然是在社会环境中存在和成长的,作为一项综合性活动,工程活动是在具体的社会时期由社会主体进行的社会实践活动^[13]。因此,社会生态支持系统在工程生命体全生命周期的各个阶段均扮演着至关重要的角色。这一系统由政治、经济、历史、文化等多方面因素交织而成,全面影响着工程生命体的健康状况。政治环境为其提供了稳定的政策导向和法律法规框架,是工程生命体得以稳健发展的基石与规范;经济环境则直接关系到工程生命体的资金获取与市场条件,对其成长与运营具有深远影响;历史文化则塑造了工程生命体的文化内涵与社会认同,助力其更好地融入社会、服务民众,并进一步影响人们的价值观与行为习惯,从而间接作用于工程生命体的设计与运营。这些层面相互交织、彼此影响,共同构建了一个复杂而多维的社会生态支持系统网络。

2.2.3 数字媒介生态支持系统 随着经济社会的全面数字化,数字生态支持系统已经成为工程生命体生存和发展的基础条件。数字生态支持系统是工程生命体在全生命周期内获得信息流动和数字技术支持的重要外部环境。系统以数字化手段为基础,建立起相应的工程数字生态体系,通过数字技术的应用和创新,促

进工程资源优化配置和生产力提升,推动工程活动高质量发展。

其一,数字技术的应用极大优化了工程资源的配置效率。借助大数据分析,工程项目能够实现对资源需求的精准预测和分配,通过云计算技术加快数据处理速度,确保资源配置的实时性与灵活性^[14]。同时,区块链技术在资源流转和交易中的应用,使得工程数据的全过程溯源公开透明,为工程生命体的健康成长提供了强有力的诊断基础。资源配置的数字化让工程项目更加高效地运转,提升了整体工程活动的可持续性。

其二,智能化管理通过物联网、人工智能和智能反馈系统,对工程生命体实现了全生命周期的动态监控与优化管理。在工程项目的实际运行中,这一系统能够实时收集和分析工程内部和外部环境的变化数据,发现潜在问题,从而最大程度地降低工程失败的风险。通过智能化管理,工程运行的连续性和稳定性得到了有效保障,大幅减少了工程活动中可能出现的不确定性,为工程生命体的成长提供了有力支持。

其三,数字技术加速了工程生态的迭代与升级。诸如数字孪生与增强现实等虚拟与现实的深度融合技术,不仅能够精准模拟工程项目的实际运行状态,还能预先预测潜在风险并提供优化方案。在工程设计、施工直至运营的各个阶段,数字技术的运用使得工程活动愈发精细化与智能化。这一工程生态的数字化迭代,不仅让工程生命体的成长更为灵活高效,还极大地促进了整个工程行业的技术革新。

2.3 工程生命体与外部生态系统的交互平衡

工程生命体在生长发育、运行直至退役(转型)的过程中所表现出的各种“生命特征”使生命体在受到外部生态系统的影响下可以与其形成平衡状态,在不断交互中对彼此产生影响,从物质、能量、信息交互视角来看,在物质交换方面,工程生命体在孕育阶段,从自然环境获取建筑材料、矿产资源等用于构建工程实体;在成长阶段消耗各类原材料进行生产活动,确保物质交换处于生态系统可承受的良性循环中。在能量方面,工程生命体依赖工程生态系统提供能源供给,如太阳能、电能、化石能源等,以维持其

运转。而工程活动在消耗能源过程中, 部分能量会以热能等形式散失到外部环境中, 这可能改变局部气候和生态环境。在信息传导上, 工程生命体根据完善的信息监测与反馈机制, 获知外部生态系统的变化, 使工程生命体可以进行相应调整, 以适应变化后的外部生态系统; 同时, 工程生命体将自身的运行数据、对环境的影响评估等信息高效反馈到外部生态系统, 实现信息的双向良性互动。从生态支持系统层面审视, 一方面, 工程生命体在自然生态、社会生态以及数字媒介生态支持系统的共同维系下, 得以健康孕育、茁壮成长并顺利运行。这一过程中, 工程生命体展现了其生长发育、新陈代谢、繁衍进化等一系列生命特征。另一方面, 工程生命体凭借自身的适应性和调节性等特点, 不仅能够适应生态支持系统的变化并进行自我调节, 还能迅速响应这些变化, 实施有效干预, 推动生态支持系统实现动态调整。如此一来, 工程生命体与其生态支持系统之间形成了相互影响、紧密联系的互动关系。

3 工程生命体的健康诊断

工程生命体作为一种类生命体, 其健康状况不仅受外部生态支持系统的影响, 更依赖于内部诸要素之间的相互协调。只有在生态支持系统的支撑下, 工程生命体保持健康、有序地运行状态, 才能长期、稳定地发挥其应有的效益与价值。为此, 就需要基于生态思维, 实时进行工程生命体的健康诊断, 发现问题, 及时纠偏, 确保工程生命体健康成长。

3.1 工程生命体孕育阶段的健康诊断

工程生命体孕育阶段的健康诊断, 一般从需求可靠性、工程可行性、运营有效性、财务合理性、影响持续性和风险可控性等六个维度进行审查^[15], 并根据诊断内容和项目特点确定诊断指标及其判断标准, 其核心目的就是为工程项目的前期论证和科学决策提供依据, 为工程生命体健康发育并顺利进入成长阶段奠定坚实基础, 具体表现为孕育过程的演进, 以及诊断方式和工程决策准则的采用。

需求可靠性诊断围绕工程项目建设必要性进行评

价, 从宏观战略、发展规划、社会需求、市场需求和企业发展战略等不同层面诊断工程项目建设的原因和依据^[16], 提出拟建工程项目的需求方案, 确定工程项目建设目标、功能定位、建设规模和产出方案, 为工程项目建设方案的可行性及风险管控措施诊断奠定基础。

工程可行性诊断是通过对工程项目场址、建设条件、工艺方案、设备方案的科学性、合理性、先进性、适用性、可靠性、安全性、经济性等进行分析评价, 论证工程技术方案是否可行; 通过对招标方案、平面和竖向布置、施工组织设计及工期等进行分析, 论证工程组织实施的可行性; 通过竣工验收和试运行方案的诊断, 确保投资项目将来能够按照预定标准建成, 并具备达到设计生产或运营服务能力^[17]。

运营有效性诊断是从拟建工程项目未来运营管理的角度, 诊断工程项目所采用的运营组织模式, 评价工程项目正常运营所需材料、能源、设备、人力资源等保障条件, 判断工程项目产出能否顺利交付并实现可持续运营。

财务合理性诊断强调从投资回报的视角, 统筹考虑工程项目全生命周期的投入和产出, 在投资估算和融资方案论证的基础上, 构建财务模型^[18], 判断工程项目财务可行性, 明确工程项目对各财务主体的价值贡献及财务可持续性。

影响持续性诊断是从工程项目外部性影响的角度, 在工程项目需求方案、建设方案、运营方案、财务方案等项目方案诊断的基础上, 分析评价拟建工程项目对资源及能源节约利用、生态环保、温室气体排放、经济、社会、就业等影响效果, 从多个维度诊断工程项目外部影响的可接受性, 评价拟建工程项目对经济、社会、资源、环境等的影响^[19], 判断工程项目产生的外部正面效果、负面代价及其可持续性, 为工程项目方案的整体可行性诊断提供依据, 并为进一步开展风险可控性诊断奠定基础。

风险可控性诊断是在工程项目建设必要性和方案可行性诊断的基础上, 对拟建工程项目的风险及其管控方案的可行性进行诊断。风险可控性方案应基于工程项目的需求分析、建设方案、运营方案、财务方案和影响效果评价, 通过采用合理的评价方法和技术,

对影响工程项目的总目标以及质量、进度、成本、声誉等子目标和可能造成的风险事故进行识别、分析和评价,为提出规避、转移、分担、减轻或自担等项目风险的应对方案及实施监控和动态管理计划,减少风险事故造成的损失和不利影响,保证工程项目预期目标的顺利实现提供依据。

3.2 工程生命体成长阶段的健康诊断

工程生命体成长阶段的诊断包括物理体征诊断、技术体征诊断、财务体征诊断、外部影响体征诊断等维度。

物理体征诊断聚焦于工程生命体实物工程量的形成过程及其状态,旨在监测与评价以下几个方面:项目选址方案的实施状况、土地利用效率、征地补偿与安置工作的进展、设备安装进度、建筑物及构筑物等工程方案的建设实施情况、项目的整体实施进度,以及项目招标与施工组织情况。这一过程实质上是对显性工程实施活动及其所生成的工程量实物在数量、质量和效率上进行的综合诊断。

技术体征诊断的对象是蕴含于工程实体之中的技术性能特征,体现为工程实体的创新活力和品质性能,包括项目技术方案指标、生产保障能力、运营服务能力、安全保障能力及运营绩效指标等。

财务体征诊断关注工程生命体的财务现金流量及其循环状况,包括投资、融资、经营等情况,如项目投资完成情况、项目融资安排、运营机构设置情况、商业模式选择、人力资源及运营管理团队情况、项目收入和成本支出情况、项目财务盈利能力、债务清偿能力、财务持续能力及财政承受能力等。财务现金流量是工程生命体中流淌的血液,是维持工程生命体持续健康成长的基本条件,是财务体征诊断的基础和主线。

外部影响体征的诊断,是评估工程生命体品质属性及其适应外部环境能力的重要方面。它主要聚焦于战略规划需求、区域发展需求及行业发展战略需求的满足程度,同时考察工程项目在资源节约利用、节能、环境生态保护、温室气体减排以及经济和社会影响等方面所取得的成效。

3.3 工程生命体运营阶段的健康诊断

工程生命体运营阶段的健康诊断包括适当性诊断、故障诊断、效率诊断、效果诊断、影响诊断和可持续性诊断。

适当性诊断主要从工程项目生命周期发育各环节相互关联的视角,通过回顾总结,进一步验证分析工程项目前期研究和决策的依据是否充分,是否符合相关政策、规划及准入标准的要求,工程项目实施的具体内容、工程方案、资金构成等是否合适,能否为工程生命体的健康运营提供充分的支撑条件。

故障诊断是指通过一系列的方法和技术,对系统、设备或部件的故障进行识别、定位和分析的过程。旨在确定故障的原因、影响范围以及提出相应的解决措施,以恢复系统的正常运行。故障诊断包括故障检测、故障定位、故障分析、故障修复等环节。随着技术的不断发展,故障诊断也在不断地引入新的方法和工具,如人工智能、机器学习、大数据分析等,以提高诊断的准确性和效率。

效率诊断主要从工程生命体投入和产出关系的角度,分析工程生命体从成长阶段转入运营期的投入产出效率,反映工程生命体从消耗资源到转化为现实生产力的实现程度,主要包括资金使用效率和项目实施管理效率。资金使用效率主要从形成有效投资、工程建成并形成有效资产、工程的投入产出比例等方面进行诊断;工程实施管理效率主要从工程管理团队能力水平,工程实施进度及运营绩效等角度进行诊断。

效果诊断是对工程生命体运营效果进行的诊断,是经营期健康诊断的核心内容,需要全面分析工程项目运营所带来的直接效果,主要包括:经营效果、管理效果、技术效果和其他效果四个方面。其中经营效果诊断指通过工程项目的实施,对扩大产能和规模、改进产品或服务 quality、提升市场占有率和竞争力、提高融资和偿债能力等方面的效果;管理效果诊断指对加强制度建设,引进先进管理理念,降低管理成本,培养国际化经营管理人才等方面产生的效果;技术效果诊断是对开发利用先进技术、推动科技创新等方面的效果进行诊断;其他效果诊断指人才培养、制度创新等方面的效果进行诊断。

影响诊断主要聚焦于工程生命体在运营阶段所产生的、超越其自身范畴的外部效应, 涵盖资源节约、环境保护、绿色低碳、政治外交以及经济和社会影响等方面。在工程生命体运营期的可持续性诊断过程中, 需基于工程投入的合理性及故障状况、工程活动的投入产出效率及效果的综合诊断, 进一步分析影响工程生命体运营绩效的外部环境因素与内部条件因素, 从而对项目持续运营的前景进行预测与评估。

3.4 工程生命体退役(转型)阶段的健康诊断

工程生命体退役(转型)阶段的健康诊断包括生态环境影响、经济影响、社会影响方面的诊断。

首先, 生态环境影响诊断。在工程生命体退役(转型)方案的实施过程中, 会衍生出新的生态环境风险及资源问题^[20]。例如, 大型煤矿、油田工程因资源枯竭而面临退役, 对此, 在退役方案的诊断评估阶段, 需全面考量资源环境状况与生态安全等因素, 对工程生命体展开生态环境健康诊断。

其次, 经济影响诊断。工程退役(转型)涉及原有生产力的终止, 区域经济布局和生产结构的变迁调整等问题, 工程退役(转型)方案的实施往往需要考虑接续产业的发展, 经济系统的调整优化等问题, 需要制定具有经济可行性的退役(转型)方案。

再次, 社会影响诊断。若工程退役(转型)方案中的资源处理不当, 将可能引发社会冲突, 进而构成社会稳定风险, 因此, 必须重视社会稳定风险的监测与评估工作, 并制定相应的风险管理行动方案。同时, 不当的工程退役(转型)处理还会损害政府形象, 导致公众对政府的信任度降低, 严重时甚至可能波及国与国之间的政治关系稳定。

总之, 工程生命体健康诊断是工程活动的内在组成部分。工程建设者需要基于工程生态思维, 将健康诊断纳入工程生命体的全生命周期, 根据诊断结果进行实时优化调控, 确保工程生命体保持内在协调并持续适应于工程生态系统的变化, 从而使工程生命体在自然环境和社会环境中健康成长。在信息化、网络化、智能化迅猛发展的今天, 在各类人工智能算法和智能体快速成长的支持下, 不仅工程生命体本身正在走向智能化, 而且其健康诊断也正在走向“精准化”

“实时化”“自动化”和“数智化”, 这对于工程生命体的健康成长和稳健运营, 无疑具有十分重要的意义。

4 结论

工程生态理论的构建根植于工程活动所展现的“生命”特性。工程生命体具备一个完整且连贯的生命周期, 包括孕育、成长、运营至退役(转型)的各个阶段。孕育阶段通过严谨的立项、论证、决策与设计流程, 为工程打下坚实基础; 成长阶段, 各类要素有序汇聚, 推动工程持续壮大; 运营阶段, 在创造价值的同时灵活适应环境变化; 而退役(转型)阶段, 则妥善处理后续事务或实现功能上的转型。这些阶段环环相扣、彼此影响, 共同勾勒出工程生命体的发展脉络, 揭示其规律有助于精确把握工程活动的进程与节奏。

无论是外部环境还是内部因素, 均对工程生命体产生深远影响。外部环境方面, 工程生命体的生态支持系统由自然、社会及数字媒介生态支持系统有机融合而成。自然生态提供物质基础并框定发展边界, 社会生态从多维度给予支持与导向, 数字媒介生态则凭借技术优势推动工程进步。工程生命体与这一系统间的持续互动维持着动态平衡, 确保工程能在复杂环境中稳健前行, 这一关系的明确为优化工程环境提供了关键依据。这三个生态支持系统与工程生命体始终保持动态交互, 形成相互依存、彼此影响的紧密关系。

内部影响因素方面, 工程生命体全生命周期的健康诊断至关重要。健康诊断贯穿于整个生命周期, 依据各阶段特点展开多维度评估, 及时发现并解决潜在问题, 确保工程健康运行。随着科技进步, 其精准化、实时化的发展趋势显著提升了工程管理的效能与质量, 成为工程稳定发展的坚实保障。具体而言, 在孕育阶段需从需求可靠性、工程可行性等角度进行诊断; 成长阶段应关注物理体征、技术体征、财务体征及影响体征, 实施精准诊断; 运营阶段则需通过适当性、故障、效率等多维度进行综合评估诊断; 而退役(转型)阶段, 则需重点诊断生态环境影响、经济影响及社会影响, 确保工程活动平稳收尾。

在工程生态语境下, 对工程生命体的研究具有双重价值。一方面, 它以一种创新的思维范式审视工程活动的发展, 深入理解其发育演化规律, 为后续学术研究与探讨奠定坚实基础。另一方面, 无论是工程生

命体的外部生态环境构建, 还是其内部的健康诊断机制, 都旨在为未来工程实践提供有益指导, 提升工程活动的质量与效益, 推动工程行业整体向更科学、高效的方向发展。

致谢

本论文作为中国工程院战略研究与咨询项目“工程生态论的理论体系和实践研究”的研究成果, 在其形成过程中承蒙诸多关怀与帮助, 在此致以衷心感谢。特别感谢傅志寰院士、李伯聪教授以及王大洲教授, 凭借深厚的学术造诣对论文提出了宝贵的修改意见, 使论文在观点、论证及结构等多方面得以完善与升华。同时感谢西安交通大学马克思主义学院研究生张雯钰、刘鹤鸣、于洪泽、杜静远、吴劲鹏、孙尉博、薛子涵, 他们在资料收集、观点讨论及文字校对等方面付出诸多努力, 为本论文的顺利完成贡献了力量。值此论文完稿之际, 再次向所有关心和支持本研究的个人与团队表示感谢!

参考文献

- [1] 殷瑞钰. 关于工程方法论研究的初步构想[J]. 自然辩证法研究, 2014, 30(10): 35-40.
Yin R Y. The preliminary conceptions of engineering methodology[J]. Studies in Dialectics of Nature, 2014, 30(10): 35-40.
- [2] 殷瑞钰, 李伯聪. 关于工程本体论的认识[J]. 自然辩证法研究, 2013, 29(7): 43-48.
Yin R Y, Li B C. On engineering ontology[J]. Studies in Dialectics of Nature, 2013, 29(7): 43-48.
- [3] 李伯聪. 略谈工程演化论[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2010, 2(3): 233-24.
Li B C. On the theory of engineering evolution[J]. Journal of Engineering Studies, 2010, 2(3): 233-24.
- [4] 王大洲, 范春萍. 工程生态: 内涵分析与研究进路[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2023, 15(5): 378-389.
Wang D Z, Fan C P. Engineering ecology: Conceptual analysis and research approach[J]. Journal of Engineering Studies, 2023, 15(5): 378-389.
- [5] 傅志寰, 李伯聪. 工程生态论: 探索建构工程研究的新范式[J]. 人民论坛·学术前沿, 2024(10): 4-16.
Fu Z H, Li B C. The theory of engineering ecology: Constructing a new paradigm of engineering studies[J]. Frontiers, 2024(10): 4-16.
- [6] 马克思恩格斯选集-第三卷[M]. 3版. 中共中央马克思恩格斯列宁斯大林著作编译局, 编译. 北京: 人民出版社, 2012.
Selected Works of Marx and Engels: Volume III[M]. 3rd ed. Compiled by the Central Compilation and Translation Bureau for Marx, Engels, Lenin, and Stalin Works of the CPC Central Committee. Beijing: People's Publishing House, 2012.
- [7] 梁军, 王镇中. 工程生命体健康支持系统刍议[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2023, 15(5): 400-411.
Liang J, Wang Z Z. Discussion on the health support system for engineering life bodies[J]. Journal of Engineering Studies, 2023, 15(5): 400-411.
- [8] 林健, 杨冬. 工程教育智能化: 内涵、特征与挑战[J]. 清华大学教育研究, 2023, 44(6): 1-11.
Lin J, Yang D. Intelligentization of engineering education: Connotation, characteristics and challenges[J]. Tsinghua Journal of Education, 2023, 44(6): 1-11.
- [9] 李永胜. 全生命周期视域下的工程方法论[J]. 洛阳师范学院学报, 2019, 38(3): 1-7.
Li Y S. Engineering methodology in the perspective of whole life cycle[J]. Journal of Luoyang Normal University, 2019, 38(3): 1-7.
- [10] 汪应洛. 基于工程全生命周期的工程方法论[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2016, 8(5): 472-479.
Wang Y L. Engineering methodology based on engineering life period[J]. Journal of Engineering Studies, 2016, 8(5): 472-479.
- [11] 宁清同. 论环境资源法之遵守自然规律原则[J]. 兰州学刊, 2024(9): 109-125.
Ning Q T. On the principle of observing by natural law of environmental and resources law[J]. Lanzhou Academic Journal, 2024(9): 109-125.

- [12] 殷瑞钰, 李伯聪, 汪应洛, 等. 工程哲学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2022.
Yin R Y, Li B C, Wang Y L, et al. Philosophy of Engineering[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2022.
- [13] 殷瑞钰, 汪应洛, 李伯聪, 等. 工程哲学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2018.
Yin R Y, Wang Y L, Li B C. Philosophy of Engineering[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2018.
- [14] 施骞, 黄遥, 陈进道, 等. 大数据技术下重大工程组织系统集成模式[J]. 系统管理学报, 2018, 27(1): 137-146, 156.
Shi Q, Huang Y, Chen J D, et al. Organization systems integration of megaprojects based on big data technologies[J]. Journal of Systems & Management, 2018, 27(1): 137-146, 156.
- [15] 白凌, 冯晓霞, 曹玉蓉, 等. 数字政府建设项目可行性研究报告编制问题及对策研究[J]. 中国工程咨询, 2024(1): 108-11.
Bai L, Feng X X, Cao Y R, et al. Research on the problems and countermeasures in the compilation of feasibility study report of digital government construction project[J]. China Engineering Consultants, 2024(1): 108-11.
- [16] 徐成彬. 重构可行性研究框架 创新高质量分析方法[J]. 中国投资(中英文), 2023(S4): 12-15.
Xu C B. Reconstruction of feasibility study framework and innovative quality analysis method[J]. China Investment, 2023(S4): 12-15.
- [17] 李开孟. PPP模式助推负责任的投资[J]. 项目管理评论, 2022(6): 44-47.
Li K M. PPP model promotes responsible investment[J]. Project Management Review, 2022(6): 44-47.
- [18] 许西, 张阔. 关于企业项目投融资决策中若干关键问题的注记[J]. 经济界, 2023(6): 83-91.
Xu X, Zhang K. Notes on some key issues in enterprise project investment and financing decision-making[J]. Economic Affairs, 2023(6): 83-91.
- [19] 潘华, 李永奎. 基于社会网络分析视角的大型复杂工程项目组织研究[J]. 科技管理研究, 2013, 33(20): 214-217.
Pan H, Li Y K. Study on large and complex engineering projects organization based on social network analysis perspective[J]. Science and Technology Management Research, 2013, 33(20): 214-217.
- [20] 范春萍. 工程退役问题[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2014, 6(4): 399-411.
Fan C P. On the engineering retirement[J]. Journal of Engineering Studies, 2014, 6(4): 399-411.

Engineering Life Bodies: Life Cycle, Ecological Support and Health Diagnosis

Li Kaimeng¹, Liang Jun^{2*}, Zhang Hengli³, Gao Jing², Wang Qingjun^{2,4}, Wang Zhenzhong^{2,5}

1. China International Engineering Consulting Co., Ltd., Beijing 100048, China;

2. School of Marxism, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. School of Marxism, Beihang University, Beijing 100191, China;

4. School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

5. Management Committee of Airport New City in Xixian New Area, Shaanxi Province, Xi'an 712034, China

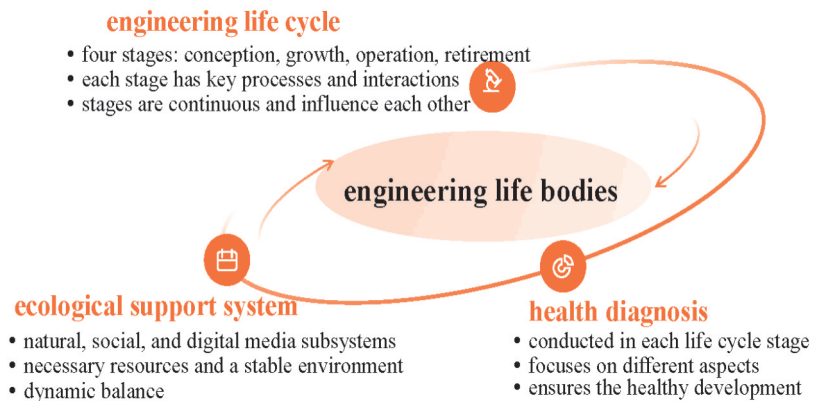
Highlights

Engineering life bodies undergo a life cycle comprising conception, growth, operation, and retirement stages, each of which is crucial and interconnected.

The ecological support system encompasses natural, social, and digital media subsystems, collaborating to sustain these engineering life bodies.

Throughout their life cycle, health diagnoses are conducted to evaluate and ensure the well-being of these bodies.

Graphical Abstract



Abstract: In the field of engineering ecology, engineering, as an entity exhibiting life-like traits, closely mirrors living organisms. An engineering entity possesses its own life cycle, beginning with the gestation stage where concepts are conceived, plans are meticulously designed, and resources are identified and marshaled. This is followed by the growth stage, marking the commencement of construction and the gradual materialization of the entity. It is a phase of rapid development, necessitating substantial energy and resources for the erection of physical structures and installation of systems. Upon completion of construction, the operation stage ensues, where the engineering entity fulfills its intended purpose, continually interacting with the environment, consuming resources, and producing outputs. Like living organisms, it must maintain a harmonious equilibrium with its surroundings. Eventually, the decommissioning (transformation) stage arrives, involving dismantling, repurposing materials, or adapting the facility to meet new needs, thereby playing a pivotal role in mitigating environmental impact and ensuring sustainable development. Existing within natural, social, and digital media ecologies, the engineering entity interacts continually with the external ecological support system. For instance, in the natural ecology, it relies on water, natural energy, and raw materials; in the social ecology, it engages with local communities, labor forces, and regulatory bodies; and in the digital media ecology, it is influenced by public opinion on digital platforms. This interaction strives to achieve a dynamic equilibrium for seamless engineering progress. The health of an engineering entity is complex, influenced by both the external ecological support system, such as environmental changes, social unrest, or digital disruptions, and the internal coordination of project elements. Integral to its overall well-being are seamless system integration, proper equipment functioning, and effective human resource management. Therefore, within the framework of engineering ecology, health diagnosis throughout the life cycle is crucial. Regular checks in the gestation stage can identify potential flaws, monitoring in the growth stage ensures construction proceeds as planned, and continuous assessment in the operation stage facilitates early detection of issues. By promptly recognizing and rectifying problems, we can guarantee the healthy growth of the engineering entity, maximizing its benefits while minimizing harm to the surrounding ecosystems.

Keywords: engineering life bodies; engineering ecology; life cycle; ecological support system; health diagnosis