

编者按 目前我国55座城市共建有超1万千米城市轨道交通线路,其投运状态如何?未来城市轨道交通行业如何才能更好地可持续发展? 政策的制定、发展方向的把握都离不开决策,而科学决策离不开科学评价,评价服务于决策。本文提出了一种以相关性为主导的评价新思维——ESE(经济-社会-环境)评价理论与方法,是对城轨交通系统可持续发展状态进行评价的一种全新思考与全面尝试。期待业内更多有识之士参与讨论,共同探索。

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2024.03.001

一种评价新思维：ESE 评价 理论与方法 ——城市轨道交通可持续发展状态评价

于松伟, 刘 巍, 杨陶源, 陈明钿, 仲莹莹
(北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037)

摘要: 目前城市轨道交通可持续发展评价体系,采用简单的分层加权汇总方法,未考虑同层指标间的相互影响以及下层指标对上层指标的一对多影响,不能系统、全面、准确地反映实际可持续发展情况。针对这一问题,本文提出了一种评价新思维——ESE评价理论与方法,即通过数据具有ESE(经济-社会-环境)三性影响这一新认识,构建了一个ESE空间直角坐标系,并以此表征城市轨道交通所有业务场景。在此ESE三维立体空间中,城市轨道交通的可持续发展状态被分成“八种四类”,同时对可持续发展程度进行了量化计算,并实现了立体的可视化表达。

关键词: 城市轨道交通; 可持续发展状态; 评价; ESE(经济-社会-环境)空间; 专家知识向量化

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)03-0001-10

Charting the Path from Complexity to Simplicity in Urban Rail Transit Sustainability Assessment: The ESE Evaluation Framework and Methodology

YU Songwei, LIU Wei, YANG Taoyuan, CHEN Mingdian, ZHONG Yingying
(Beijing Urban Construction Design and Development Group Co., Ltd., Beijing 100037)

Abstract: The current evaluation system for the sustainable development of urban rail transit often employs a simple hierarchical weighted summation method. However, this method does not account for the interactions among indicators at the same level

收稿日期: 2024-05-07 修回日期: 2024-05-24

第一作者: 于松伟, 男, 硕士, 教授级高级工程师, 长期从事城市轨道交通设计咨询与总体管理工作, 主编国家标准《轻轨交通设计标准》, yusw@bjucd.com

基金项目: 北京城建设计发展集团股份有限公司(KY1202208)

引用格式: 于松伟, 刘巍, 杨陶源, 等. 一种评价新思维: ESE评价理论与方法: 城市轨道交通可持续发展状态评价[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(3): 1-10.

YU Songwei, LIU Wei, YANG Taoyuan, et al. Charting the path from complexity to simplicity in urban rail transit sustainability assessment: the ESE evaluation framework and methodology[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(3): 1-10.

or the multiple effects of lower-level indicators on upper-level indicators, thus failing to reflect the actual sustainable development status systematically, comprehensively, and accurately. To address this issue, this study introduces a new evaluation approach—the ESE (Economic-Social-Environmental) evaluation theory and method. This approach builds on the new understanding that data impacts the three dimensions of economy, society, and environment. An ESE spatial Cartesian coordinate system is constructed to represent all operational scenarios of urban rail transit. Within this three-dimensional ESE space, the sustainable development status of urban rail transit is classified into “eight types and four categories,” allowing for the quantification of sustainability levels and enabling a three-dimensional visual representation.

Keywords: urban rail transit; sustainable development; evaluation; ESE space; expert knowledge vectorization

0 引言

城市轨道交通可持续发展是业界面临的重要现实问题,评价则是推动城市轨道交通可持续发展的重要环节。目前经济社会领域已经有多种可持续发展评价体系。这些体系基于不同的认识与理解,各具特点,但由于缺乏统一的评价理论与标准,不同评价体系间常常存在不一致甚至矛盾的情况,一个评价指标被强化的同时可能会导致另一个评价指标被弱化。例如,某些评价体系可能过度强调经济效益,而忽略对环境保护和社会公平的考量。对于城市轨道交通(以下简称“城轨交通”)而言,将各项指标分层加权汇总的传统评价体系,是将某一低层级指标简单地归入某一高层级指标,而不考虑它对其他高层级指标的影响与作用,往往不能全面反映城市轨道交通的实际可持续发展情况。

为了解决这一问题,本文提出了一种新的评价思维——ESE评价理论与方法。该理论基于经济、社会、环境(ESE)三维立体的分析框架,旨在构建一个系统性、动态性的评价体系。本文按评价新思维的提出与阐述、ESE空间的创建与表征、ESE评价模型的构建与应用的顺序进行论述。

1 城市轨道交通可持续发展评价新思维

思维介于理论与实践之间,更侧重于理论,主要涉及抽象思考和概念形成。换言之,思维对于理论,是实践;思维对于实践,是理论。

本文提出的新评价思维,是以相关性思维为主导来描述系统的全貌,以动态系统思维为基础来评估系统的状态。

这种新评价思维源自于理论与实践的相互作用:相关性思维基于对数据的“新认识”,这是认识作为实践对理论的丰富和完善;动态系统思维则根植于系统论,这体现了理论对实践的指导作用。

1.1 以相关性思维为主导

传统的评价思维基于因果性,本文的评价新思维

基于相关性。

1.1.1 相关性思维

传统的评价思维以因果性为主导,重在利用要素之间的直接关系去描述系统,适用于高速增长阶段的需求。这种思维模式更多注重评估项目的规模、数量及是否达到预定目标等“量”的方面。在这种框架下,评价指标体系基本采用金字塔层级结构,几个低层级指标直接形成上层级指标,构成了一个清晰的因果链条与决策路径,这是对复杂系统进行简单化处理的一种方式。

相较之下,本文提出的新评价思维则以相关性为主导,并整合了因果关系,还考虑了系统要素的间接关系,同时涵盖了系统要素与外部环境的互动关系。这种相关性思维方式,坚持系统观念,纵览系统全貌,更适用于高质量发展阶段对工程项目“质”的综合性 and 系统性评价,包括定性判断项目可持续发展的整体性质,定量衡量项目可持续发展的具体程度,以及定向评估项目可持续发展的优劣。

新思维的评价指标体系呈现一个立体网络结构,每个层级的指标不仅与上下层级的指标相互关联,还与同层级的指标进行关联。这种评价体系从系统角度出发,对各要素相互关系进行了全面考虑,并整合因果关系,支持对项目的全面评估,可以提供更多维度的信息洞察和更精准的决策支持。

此外,随着大数据、人工智能等新技术的发展,这种新评价思维的实操性得到了显著增强,更能满足高质量发展的时代需求。

1.1.2 新认识:数据具有ESE三性影响

业内普遍认同,城轨交通系统对经济、社会和环境三方面产生影响^[1-3],即城轨交通系统具有ESE(经济-社会-环境)三性影响。

国际数据管理协会(DAMA)与美国质量学会(ASQ)均认为,数据可以表征事实;牛津大学的Luciano Floridi从信息哲学的角度提出数据体现了事物之间的关系^[4],

朱扬勇与熊赅著的《数据学》^[5]及石川等著的《数据科学导论》^[6]进一步指出,数据可以揭示实体之间的各种关系。

本文在上述基础上,进一步认识到数据(指大型基础设施全生命周期的工程项目数据),具有经济(economy)性影响、社会(society)性影响、环境(environment)性影响(简称“ESE 三性影响”),即“数据具有 ESE 三性影响”。这一新认识体现在以下 3 方面。

1) 工程项目数据与利益相关方之间存在一种影响关系,即经济性影响、社会性影响和环境性影响。数据具有 ESE 三性影响实际上是工程项目数据与利益相关方之间关系的一种体现,其可以通过实体关系模型^[7]加以说明。例如,城轨交通能耗数据的 ESE 三性影响,实际上表示了头实体(能耗数据)与尾实体(城市、城轨企业、乘客等利益相关方)之间的关系,就体现在经济性影响、社会性影响和环境性影响这三个方面上。经济方面,能耗数据直接影响到城市的经济活力与能源结构、城轨企业的运营成本和乘客的出行成本;社会方面,能耗数据则影响了城市的用能政策、城轨企业的社会责任与服务形象、乘客的绿色出行体验;环境方面,能耗数据直接影响了城市的环境治理、城轨企业的环保措施、乘客的环保意识,如图 1 所示。

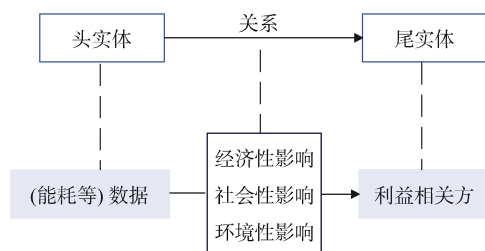


图 1 实体关系模型

Figure 1 Entity-relationship model

2) 不同层次的数据,与利益相关方关系的体现不同,即 ESE 三性影响显现程度不同。根据影响程度,可以将数据分为单个指标、专题指标和系统化指标,由于这些数据浓缩信息程度不同,这些指标显现的 ESE 三性影响程度也各有不同。

例如,作为单个指标(如城轨能耗总量指标),由于仅是某一具体、单一的数据,信息背景较为有限,ESE 影响的显现程度较低;专题指标(如车公里能耗指标)围绕一个主题集合了多个指标,信息背景较深入广泛,ESE 影响的显现程度就较高;系统化指标(如城轨交通效能指标)则综合了大量城轨交通效能的相关指标,ESE

影响的显现程度最高。

3) 对数据赋予 ESE 三性影响,也为数据、信息、知识的演变提供了一个进路。罗素·艾可夫(Russell Ackoff)提出的数据-信息-知识的三角形金字塔模型^[8],描述了数据由低到高逐步演变成信息和知识的过程。居于底层的数据(如单个指标),是对客观事实的初级描述。当通过理性思维对数据进一步处理分析时,数据就形成信息(如专题指标和系统化指标),事物之间的关系被揭示,最后经过反复的验证直到事物之间的正确关系被确证,从而形成知识,帮助解决不同情境的相关问题。

本文对数据(头实体)和利益相关方(尾实体)之间的“关系”赋予 ESE 三性影响,实际上也是由数据到信息的一种演变进路。当赋予单个指标 ESE 三性影响时,单个指标就走向信息;当赋予专题指标、系统化指标 ESE 三性影响时,这两个指标就走向知识。

以相关性为主导的新思维基于数据的本质,加深了对系统的整体理解,并促进了工程项目评估场景下的数据、信息和知识的演进转化,为数据驱动与知识驱动深度融合提供了途径,从而能够更全面系统地评估复杂工程项目。

1.2 以动态系统思维为基础

动态系统思维强调从系统的动态性和整体性出发,对系统状态和项目价值进行“深刻认识”。

1.2.1 动态系统思维

动态系统是指由众多相互作用的部分组成,并随着时间推移响应内部要素与外部环境的影响而持续演化的系统。例如,生态系统、经济系统或天气系统都可以被视为动态系统。动态系统理论则指通过研究系统的变化和相互作用,来理解和预测系统的整体行为^[9]。

动态系统思维认为,城轨交通是一个不断变化的动态系统,城轨交通的可持续发展是系统的一种状态,可持续评价是对系统静态节点的评价,其评价目标就是该节点处综合价值的相对最大化。

1.2.2 状态认识:城轨交通可持续发展是一种系统状态

可持续发展当前有 3 种理解:一是认为它是一种发展目标,如杨振山构建了国家—区域—城市多层次可持续发展目标综合评估技术^[10];二是认为它是可持续发展过程中的一种状态,深圳大学在《深圳市可持续发展评估报告(2016 至 2021 年)》^[11]中提出城市可持续发展状态是实现国家或地区可持续发展目标的基

石；三是认为它是一种发展方式，如可持续发展行动方案。

根据联合国《我们共同的未来》和《21世纪议程》中提出的可持续发展框架：协调平衡地满足经济、社会和环境三方面的需求，确保始终处于“可以永续或在特定时间内可以持续发展”的状态，本文将可持续发展理解为事物发展过程中的一种状态。

城市轨道交通可持续发展也适用这一框架：从其诞生之日起，城市轨道交通便致力于满足不断变化的经济、社会和环境三方面的需求，以实现长期持续的发展。

因此，本文将城市轨道交通可持续发展视为一种系统状态，它是系统动态发展过程中的节点。通过评价这些节点，可以了解城市轨道交通系统当前发展状况并推演动态发展过程。业界需要“回归发展初心和使命”，定期评估城市轨道交通系统的可持续发展程度，从而梳理、认识、分析问题，提出解决问题的思路和方案，不断提升城市轨道交通系统的可持续性。

1.2.3 价值认识：可持续发展状态追求经济、社会与环境综合价值的相对最大化

系统性(整体性)强调复杂系统的各个部分构成一个相互联系的整体，共同达成特定的、系统的部分无法完成的整体性目标^[12]。

轨道交通系统的价值体现在它如何有效响应并满足经济、社会和环境三方面需求的能力。经济价值体现为创造经济效益，社会价值体现为提升公平性和包容性，环境价值则在于在满足前两者需求的同时，尽可能减少对环境的负面影响。

因此，轨道交通系统的整体目标是在资源一定和三方面影响相互关联的条件下，追求ESE三性影响的协调和谐，从而实现综合价值的相对最大化。这种目标不是追求单方面的绝对最大化，而是追求整体上的最优效果。

作为系统节点的轨道交通可持续发展状态，其价值目标应与系统整体性目标保持一致，而定期评估城市轨道交通系统的ESE三性影响是实现综合价值相对最大化的核心手段。

2 城市轨道交通可持续发展，是一种可以用ESE空间去表征的系统状态

在评价新思维中，城市轨道交通可持续发展被认为是一种系统状态。本文基于ESE三性影响和业务场景构建了ESE空间，在这个空间中，系统可持续发展状态被直观地表征，并实现了城市轨道交通可持续发展程度的可视化。

2.1 ESE空间：通过业务场景的ESE三性影响全面表征城轨可持续发展状态

城市轨道交通系统是一个高维复杂空间，它通过“一心三轴四圈层”所涉及的要素及其特性，定时、定点、定人、定性地表征轨道交通的各种事件(如项目、业务、现象、问题等)^[8]。这些事件单独或集合地构成业务场景，例如列车延误、站点拥堵、线路能源管理和线网安全运营等。每个业务场景都涵盖事件或事件集合发生的具体空间层级、全生命周期中的特定时间段，以及所涉及的利益相关方。

每个业务场景都是城市轨道交通系统可持续发展状态某一方面的具体表现，如列车延误反映该时间段内系统运行的可靠性，站点拥堵反映该时间段内乘客服务的质量，线路能源管理则涉及资源利用的效率。将这些不同的业务场景汇总起来，可以形成一个全面的轨道交通可持续发展状态画像，即业务场景集合能够全面表征轨道交通可持续发展状态。

由于业务场景可以通过要素和数据进行表征，而要素和数据都具有ESE三性影响，即无论哪种业务场景都具有ESE三性影响这一共性。因此，围绕这个共性就可以构建一个表征业务场景集合的整体框架，本文将这个整体框架称之为“ESE空间”——以ESE三性影响为三条坐标轴的ESE空间直角坐标系。

在ESE空间中，既可以通过要素对业务场景进行定性表征，也可以通过数据对业务场景进行定量表征。在要素表征时，关注的是事件的性质、要素的关联等描述，例如用列车延误、准点率等要素定性表征列车延误这一场景；在数据表征时，关注的是事件的具体数值，例如可以用列车延误时间5 min等数据定量表征列车延误这一场景。

1) 用要素定性表征业务场景，如图2所示。Ec、So、En三条坐标轴分别表示经济性影响、社会性影响和环境性影响；空间中的每一个质点表示系统要素(定性表征某一业务场景下的某个事件)，质点P的坐标(Ec_1, So_1, En_1)表示该系统要素的ESE三性影响；

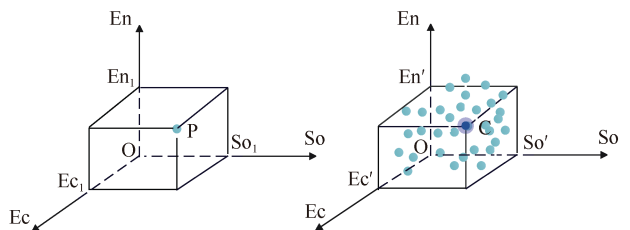


图2 ESE空间定性表征业务场景

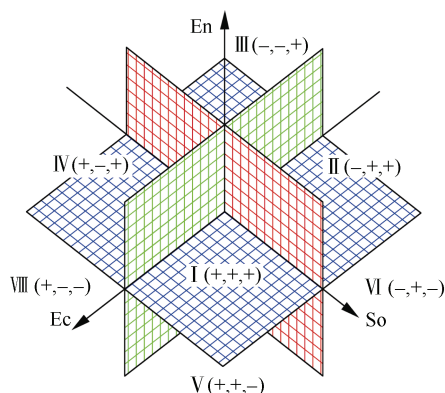
Figure 2 ESE space representing business scenarios

空间中的每一个质点系表示要素集(定性表征某一业务场景),每个质点系的质心 C 坐标(Ec' , So' , En')则表示了该业务场景的 ESE 三性影响。

2) 用数据定量表征业务场景。空间中的某一质点表示某一数据(定量表征相应场景下的某个事件的具体信息),该质点的坐标表示该事件的 ESE 三性影响;空间中的某一质点系表示某一数据集(定量表征整个业务场景的全部信息),该质点系的质心坐标表示该整个业务场景的 ESE 三性影响。

2.2 ESE 空间的卦限:通过质心位置可视化表征城轨交通可持续发展状态类别

在 ESE 空间中,三条坐标轴的两两相交形成了三个界面,三个界面又把空间分成了八个卦限,如图 3 所示。三轴,即 Ec 、 So 、 En 三条坐标轴;八个卦限指三条坐标轴的正半轴代表正面影响、负半轴代表负面影响,如此 ESE 空间就被分成了八个卦限,分别用罗马字母 I、II、...、VIII 表示。



注: VII (-,-,-)在左、下、后方

图 3 ESE 空间

Figure 3 ESE space

用数据表征业务场景时,还需要分析数据的正负影响,此时质点系的各个质点可能位于八个不同的卦限内,以反映不同数据的不同影响。由于一个质点系的质心具有唯一的且不为零的坐标(一个业务场景不可能缺失某种三性影响——尽管某种影响可能相对很小),它总会落在某一个卦限内,因此可以用质心来表示整个质点系的整体空间位置。

根据数据集质心所在的具体卦限,就可以识别出一定场景下城轨可持续发展状态所归属的“八种四类”。8 种形式,如表 1 所示,4 个类别(完全可持续类、基本可持续类、基本不可持续类与完全不可持续类),具体如表 2 所示。

表 1 城轨可持续发展状态的 8 种表现形式

Table 1 Eight manifestations of sustainability in urban rail

卦限	坐标正负	ESE 三性影响
第 I 卦限	(+Ec, +So, +En)	经济性、社会性和环境性均为正面影响。
第 II 卦限	(-Ec, +So, +En)	经济性为负面影响,社会性和环境性为正面影响。
第 III 卦限	(-Ec, -So, +En)	经济性和社会性为负面影响,环境性为正面影响。
第 IV 卦限	(+Ec, -So, +En)	经济性为正面影响,社会性为负面影响,环境性为正面影响。
第 V 卦限	(+Ec, +So, -En)	经济性和社会性为正面影响,环境性为负面影响。
第 VI 卦限	(-Ec, +So, -En)	经济性为负面影响,社会性为正面影响,环境性为负面影响。
第 VII 卦限	(-Ec, -So, -En)	经济性、社会性和环境性均为负面影响。
第 VIII 卦限	(+Ec, -So, -En)	经济性为正面影响,社会性和环境性为负面影响。

表 2 城轨可持续发展状态的 4 个类别

Table 2 Four types of sustainability in urban rail

质心位置	坐标正负	可持续状态类型	说明
第 I 卦限	3 正	完全可持续类	高质量发展阶段的运建时代的城轨交通,应追求全生命周期处于完全可持续状态
第 II 卦限 第 IV 卦限 第 V 卦限	2 正 1 负	基本可持续状态类	高速增长阶段的建运时代的城轨交通,总体上基本处于可持续状态
第 III 卦限 第 VI 卦限 第 VIII 卦限	2 负 1 正	基本不可持续类	目前少数线路状况
第 VII 卦限	3 负	完全不可持续类	目前个别拟拆除线路状况

2.3 ESE 空间的三棱锥:定量表征城轨交通系统可持续发展程度

通过将质心 C 在三条坐标轴上的投影点与原点相连,在 ESE 空间内构造出一个三棱锥,将一个无形的质心坐标转化为可测量的几何体,以定量表征城轨交通系统的可持续发展程度,如图 4 所示。

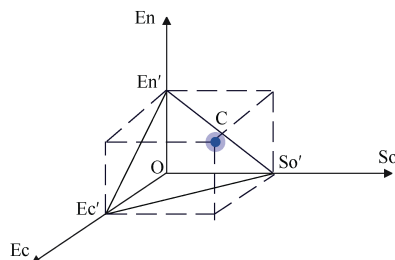


图 4 质心在 ESE 空间投影形成的三棱锥

Figure 4 Triangular pyramid formed by the projection of centroids in ESE space

三棱锥形体代表了城轨交通系统的ESE三性影响紧密关联、浑然一体，它的体积则量化表示了具体的可持续发展程度，具体如表3所示。

表3 三棱锥与可持续发展程度

Table 3 Tetrahedron and degree of sustainable development

质心位置	可持续发展状态类型	体积与可持续关系
第I卦限	完全可持续类	体积越大，越可持续
第II卦限 第IV卦限 第V卦限	基本可持续类	质心三个坐标之和为正或零时，体积越大，越走向基本可持续；质心三个坐标之和为负时，体积越大，越走向基本不可持续
第III卦限 第VI卦限 第VIII卦限	基本不可持续类	质心三个坐标之和为负时，体积越大，越走向基本不可持续；质心三个坐标之和为正或零时，体积越大，越走向基本可持续
第VII卦限	完全不可持续类	体积越大，越不可持续

3 城轨交通可持续发展，是一种可以由ESE模型去评价的系统状态

城轨交通可持续发展评价，是一种对系统状态的评价，即城轨交通系统可持续发展状态评价(简称“城轨可持续状态评价”)。

城轨可持续状态评价的评价目的是期望城轨系统持续地走在可持续发展的道路上，即评价主体在特定业务场景下对系统可持续发展程度有一个期望值(目标值)，这在ESE空间中体现为各种业务场景的理想质心。业务场景的各个要素(自变量 x)表征了其具体表现，而理想质心(因变量 y)则定义了评价主体希望达到的最佳状况。因此，当已知理想质心 y 、所有要素 x 的空间位置，就可通过反求质心公式，解出自变量 x 构成的质点系——评价指标体系。

本文基于上述，构建ESE模型实现了城轨可持续发展状态的全过程量化评价，可归纳为4项主要内容：通过专家赋值方式确定业务场景的理想质心 y 、要素 x 的ESE三性影响；通过业务模型计算要素集质心，以人机交互的方式选取最合适要素集——评价指标体系；通过数据模型计算确定各个评价对象所属的“八种四类”可持续发展状态；通过计算数据集质心投影形成的三棱锥体积及三个棱长，量化各个评价对象的可持续发展程度并进行纵向与横向分析。

3.1 城轨可持续状态评价的业务模型——要素集质心确立

业务模型分为三个步骤，一是确定业务场景及要素池(包含可表征业务场景的所有相关要素的集合)；二是确定业务场景的理想质心和系统要素的ESE三性

影响程度；三是代入业务模型，人机交互选取最合适的要素集(指标体系)。

3.1.1 确定业务场景及要素池

1) 确定业务场景。业务场景主要由评价主体根据评价目的确定。不同的评价主体，对同一层级、同一时间段的业务场景可能具有不同的评价目的，并涉及不同的利益相关方。同一场景，评价主体不同则评价目的也会不同。即使同一场景、同一主体，其评价目的也会与时俱进。例如，进行城轨交通项目后评价时，如果评价主体是城轨企业，其目标可能主要是增加客流、提高收入和降低成本；而政府作为评价主体时，还会注重资源利用效率和国民经济及社会效益的提升。

同一场景中，不同的利益相关方也会有不同的关注点。例如，乘客可能更关心服务的可靠性、舒适性、准时性和票价合理性，而房地产开发商则可能更注重线路和站点布局及其对周边房价的影响。

2) 专家团确定业务场景要素池。基于数据可获得性，针对不同的业务场景，选择相应要素建立要素池。对新建立的评价业务场景，可由专家团分析所有可能的相关要素，但应优先考虑已获得或可获得数据的要素，排除无关以及难以或不便获取数据的要素；对已建立的评价业务场景，为了简化操作，往往将既有要素作为初始要素，然后酌情增减其他要素。根据业务场景需要，专家团也可以新设计建立新要素(新指标等)。

3.1.2 ESE三性赋值

所谓ESE三性赋值，实际上是专家团针对业务场景的理想质心 y 和要素 x 进行ESE三性影响度打分量化。虽然影响有正负之分，但要素表征事件时，主要考虑要素与影响的关联强度，即ESE三性影响程度。这是一种总体性影响，是正负影响的绝对值之和。

1) 三性赋值的量化。采用模糊综合评价方法建立一个评语论域，通过专家团打分以量化ESE三性影响程度，如表4所示。

表4 ESE影响程度评价论域

Table 4 Domain table for evaluating the influence degrees of ESE

序号	影响程度	取值范围
1	很大	0.9~1
2	较大	0.7~0.8
3	一般	0.5~0.6
4	较小	0.3~0.4
5	很小	0~0.2

2) 理想质心的三性赋值。业务场景的理想质心是专家团通过多轮研讨后形成的共识，也是对评价目的(发展目标)的量化。

3) 要素的三性赋值。参照图 1 的关系实体模型，围绕要素对利益相关方产生的 ESE 三性影响程度进行赋值，三性影响的内涵要点如表 5 所示。

表 5 三性影响的内涵要点

Table 5 Domain table for evaluating the influence degrees of ESE

三性影响	内涵要点
经济性影响	涉及到各种与“金”、“钱”、“款”、“财”、“资”、“币”等相关的事件。
社会性影响	涉及到人与人之间、人与组织之间各种关系的事件。
环境性影响	涉及到“大生态与小环境”的各种事件。
模糊影响	与“科技”、“安全”等相关事件，其三性影响是模糊的，需要对事件具体分析，以明确其在特定场景下的具体影响。

3.1.3 人机交互选取最合适的要素集(指标体系)

要素集的选取可分为两个步骤：一是计算最优解，二是选取最合理解。

1) 计算最优解。将业务场景的要素池作为备选库，以要素池中的各要素组成所有可能的要素集，并应用质心公式反向求解，将理想质心和各要素 ESE 三性影响程度作为输入，从而输出最接近理想质心的最优解要素集组合(指标体系)。

本文建立整数非线性规划算法模型，并采用遗传算法(genetic algorithm, GA)^[13]求解。模型构建的思路，是将备选要素集的质心与理想质心的匹配问题转化为计算所有质点与理想质点之间的空间距离，并选择距离最小的组合作为最优解。

理想质心的 ESE 三性影响程度 $S=[EC, SO, EN]$ ；对于要素池中的任意要素 i ，其 ESE 三性影响程度 $s_i=[ec_i, so_i, en_i]$ ；假设各要素质量均等(注意要素的质量不是权重，每个要素对三性的具体影响已经包含了权重的考量，如票价收入对经济的重大影响)，则由 n 个要素构成的备选要素集质心，其 ESE 三性影响程度 $S'=[EC', SO', EN']$ 。

目标函数定义为所选要素集质心 S' 与理想体系质心 S 两点之间的空间距离，以两点之间空间距离 D 值最小为目标，公式如下：

$$\min D(x) = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n ec_i \cdot x_i / \sum_{i=1}^n x_i - EC\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n so_i \cdot x_i / \sum_{i=1}^n x_i - SO\right)^2} + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n en_i \cdot x_i / \sum_{i=1}^n x_i - EN\right)^2} \quad (1)$$

需要说明的是，由于 ESE 三性影响程度的赋值主要依赖于专家的经验 and 知识，存在一定的主观性和不确定性，为了减少个人主观性导致的误差，可以依据实际业务需求灵活设置以下约束条件：一是最终选择的指标数量可设在一定范围内，例如不少于总要素数量的三分之一；二是最终所选指标必须包含某一类别指标，例如必须包含“运营安全”类指标；三是所选指标的三性影响程度不能过小，例如限定所选指标在 ESE 空间与原点的距离不小于 0.4，等等。上述约束条件的公式如下：

$$\text{所选指标数量约束: } \sum_{i=1}^n x_i \geq \frac{N}{3} \quad (2)$$

$$\text{必须包含运营安全类指标约束: } \sum_{i=1}^n x_i^{\text{safety}} \geq 1 \quad (3)$$

三性影响程度约束：

$$x_i \cdot \sqrt{ec_i^2 + so_i^2 + en_i^2} \geq 0.4 \text{ 或 } =0 \quad (4)$$

2) 选取最适解。在计算出的几种最优解方案组合的基础上，专家团利用集体智慧和丰富经验，研讨选出最适解。

3.2 城轨可持续状态评价的数据模型——数据集质心确立

数据模型可概括为三个主要步骤，一是确定数据集中各数据的 ESE 三性影响正负比例；二是将数据进行标准化处理；三是代入数据计算数据集质心。

3.2.1 专家团确定数据集中各数据正负影响比例

数据表征事实时，需要专家团深入讨论，共同确定每个数据的正负面影响比例。

3.2.2 数据标准化处理

针对各数据量纲不统一、数据范围差异较大、不具备可比性问题，需对数据进行标准化处理。数据标准化处理通过线性或非线性的变换方法，将不同尺度或范围的数据映射到一个相同的尺度或范围，以便进行比较和分析。常用的数据标准化处理方法有线性标准化、Z-score 标准化和指数标准化等。本研究采用线

性标准化方法, 将各指标数据线性变换映射到[0, 100]的区间, 公式如下:

$$z_{i,j} = 100 \cdot \frac{y_i^{\max} - y_{i,j}}{100 \cdot y_i^{\max}} \quad (5)$$

式中, $y_{i,j}$ 为要素 i 的第 j 个数据, y_i^{\max} 为要素 i 对应数据的最大值, $z_{i,j}$ 为要素 i 的第 j 个数据标准化处理后的值, 表示该数据在其可能范围内的相对位置或大小。

3.2.3 计算数据集质心并归于四类可持续发展状态

1) 数据 ESE 三性影响值的计算

$$\begin{cases} \text{正负面影响值} = \text{数据标准化值} \times \text{影响程度} \times \\ \text{正负面影响比例} \\ \text{最终影响值} = \text{正面影响值} - \text{负面影响值} \end{cases}$$

公式如下:

$$\text{数据正面影响 } s_i^+ = [ec_i^+, so_i^+, en_i^+] \quad (6)$$

$$\text{数据负面影响 } s_i^- = [ec_i^-, so_i^-, en_i^-] \quad (7)$$

$$\text{数据最终影响 } s_i' = [ec_i', so_i', en_i'] = [ec_i^+ - ec_i^-, so_i^+ - so_i^-, en_i^+ - en_i^-] \quad (8)$$

2) 计算数据集质心。将标准化处理后的数值作为数据的质量, 结合数据的 ESE 三性影响值, 计算出各个数据集(同一场景下的各个评价对象)质心 ESE 三性影响值, 公式如下:

$$\begin{cases} Ec_j = \frac{\sum_{i=1}^n z_{i,j} \cdot ec_i'}{\sum_{i=1}^n z_{i,j}} \\ So_j = \frac{\sum_{i=1}^n z_{i,j} \cdot so_i'}{\sum_{i=1}^n z_{i,j}} \\ En_j = \frac{\sum_{i=1}^n z_{i,j} \cdot en_i'}{\sum_{i=1}^n z_{i,j}} \end{cases} \quad (9)$$

3) 归于八种四类可持续发展状态。根据数据集质心的位置, 将其归于“八种四类”可持续发展状态中。

3.2.4 城市轨道交通系统可持续发展程度的计算

以三条棱长乘积的 1/6 计算三棱锥体积, 可以得出评价对象 j 的可持续发展程度值 Sus_j , 并对各对象(如各城市线网)进行纵向分析, 即:

$$Sus_j = Ec_j \cdot So_j \cdot En_j / 6 \quad (10)$$

另外, 以某场景下的各个评价对象(如各城市线网)的质心为质点, 可构建一个二次质点系, 其质心是评价中位数。将 ESE 空间的坐标原点移至此质心, 就可以对各对象(如各城市线网)的可持续发展状态进行横向对比分析。

3.3 城轨交通线网可持续状态评价的测试计算

以下各种数据及三性赋值仅用于 ESE 理论方法的测试计算, 不代表正式评价。计算分为以下 6 个步骤:

1) 确定业务场景。评价主体是政府, 空间层级为城市线网, 时间维度为运营阶段, 利益相关方主要是政府、城轨交通企业、乘客。

2) 确定要素池。经过筛选, 从城轨交通行业数据中, 选取基础设施规模、客运服务、客流规模、列车运行、运营安全、运营能耗、财务经济、运营企业管理等 8 个类别共计 60 种数据作为要素池。

3) 确定理想质心。通过专家团集智研讨, 初定理想质心 ESE 三性影响为(0.8, 0.6, 0.3)。

4) 模型计算最优解(要素集)。采用遗传算法求解, 经过 50 次迭代, 得到的最优解适应度为 0.0786, 如图 5 所示。

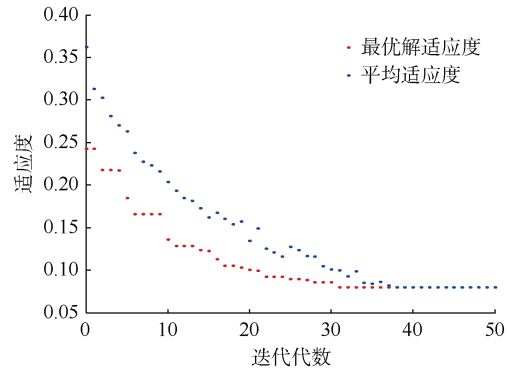


图 5 遗传算法求解示意

Figure 5 Illustration of genetic algorithm solution

5) 专家确定最合适解(指标体系)并赋值。经专家团讨论, 将该要素集定为最合适解, 进而对要素进行 ESE 三性赋值并确定数据正负影响比例, 如表 6 所示。

6) 全国部分城市线网可持续性示意。选取 2021 年全国线网运营里程 300 km 以上的 10 个城市(排名不分先后): 广州、成都、杭州、北京、上海、武汉、南京、深圳、青岛、重庆, 将线网数据代入指标体系后, 计算后的排名如表 7 所示。

表 6 评价指标体系与 ESE 影响值

Table 6 Evaluation indicator system and numeric ESE impact values

最合理解(25 个指标)	指标三性赋值(Ec, So, En)	数据正负影响比例赋值		
		Ec	So	En
建成区线网密度	(0.8, 0.6, 0.3)	正 100%	正 100%	正 100%
万人线网拥有率	(0.8, 0.8, 0.2)	正 100%	正 100%	正 100%
万人车站拥有率	(0.8, 0.8, 0.2)	正 100%	正 100%	正 100%
日均服务人口率	(0.7, 0.8, 0.1)	正 100%	正 100%	正 100%
运营时间服务率	(0.6, 0.7, 0.3)	正 100%	正 100%	正 100%
月平均票价	(0.8, 0.6, 0.1)	正 100%	正 80%负 20%	正 100%
负荷强度	(0.8, 0.8, 0.4)	正 100%	正 100%	正 100%
运能利用率	(0.6, 0.7, 0.4)	正 100%	正 100%	正 100%
日均客运周转量	(0.6, 0.6, 0.3)	正 100%	正 100%	正 100%
平均运距	(0.7, 0.7, 0.3)	正 100%	正 80%负 20%	正 100%
超载线路占比	(0.8, 0.8, 0.4)	正 100%	正 70%负 30%	正 100%
车公里利用率	(0.6, 0.2, 0.4)	正 100%	正 100%	正 100%
行车责任事故伤亡人数	(0.7, 0.9, 0.1)	负 100%	负 100%	负 100%
线网每人公里牵引能耗	(0.7, 0.5, 0.9)	正 20%负 80%	正 20%负 80%	负 100%
线网每人公里牵引能耗	(0.7, 0.4, 0.8)	正 20%负 80%	正 20%负 80%	负 100%
线网每车公里牵引能耗	(0.7, 0.4, 0.8)	正 20%负 80%	正 20%负 80%	负 100%
单位运营成本	(0.9, 0.7, 0.5)	负 100%	负 100%	负 100%
收支比	(0.9, 0.5, 0.3)	正 100%	正 100%	正 100%
运营总收入	(0.6, 0.3, 0)	正 100%	正 100%	正 100%
单位运营收入	(0.8, 0.6, 0.1)	正 100%	正 100%	正 100%
单位票款收入	(0.8, 0.6, 0.1)	正 100%	正 80%负 20%	正 100%
资源经营收入	(0.6, 0.2, 0)	正 100%	正 100%	正 100%
人员成本	(0.6, 0.4, 0)	负 100%	负 30%正 70%	负 100%
电耗成本	(0.6, 0.4, 0.4)	负 100%	负 100%	负 100%
人次成本	(0.9, 0.7, 0.5)	负 100%	负 100%	负 100%

表 7 全国部分城市线网可持续性示意

Table 7 Illustration of sustainability in urban rail transit line networks across some cities

城市	总得分	可持续状态类型	经济影响性排名	社会影响性排名	环境影响性排名
城市 1	100	完全可持续类	3	2	1
城市 2	96		1	1	3
城市 3	88		2	3	4
城市 4	88		5	6	2
城市 5	75		8	7	5
城市 6	72		4	4	6
城市 7	70		6	5	7
城市 8	66	基本可持续类第 V 卦限(+, +, -)	7	8	8
城市 9	(75)		9	9	10
城市 10	(60)		10	10	9

从以上排名看出,有 8 个城市(城市 1 至 8)处于可持续状态类,有两个城市(城市 9 和 10)处于基本可持续状态类。其中,城市 9 的环境负面影响主要在于线网每人公里牵引能耗、车公里成本和单位运营成本最高;城市 10 的环境负面影响主要在于行车事故次数(最高)、车公里成本(第三高),以及线网较高的每人公里、每人公里和每车公里牵引能耗。可见,运营成本的大小,即财务可持续性,是城轨交通可持续与否的关键因素。

4 评价新思维的特点与意义

4.1 评价新思维的特点

1) 评价指标全景化。传统的评价思维只选择一些关键指标来构建评价指标体系,新的评价思维则采用全景数据指标(当然是可获得的且有效的数据与指标),包括全部原始数据、单个指标、专题指标和系

统化指标等。此外,传统评价思维对复杂问题只能做简单化处理,而新思维则利用系统性和全面性应对复杂性。

2) 社会因素被量化。在传统评价方法中,公平、公正、包容、和谐以及利益相关方的价值取向等概念往往难以量化,另外公众参与社会问题评价也缺乏可操作性,这种情况限制了对社会因素评价时的准确性和全面性。新思维利用专家经验知识,基于 ESE 三性影响,充分考虑利益相关方的多元价值观,模拟打分,人机互动,以此理解评价主体的目的,反映利益相关方的诉求,这样便对主体目的和价值观等主观性因素进行了量化,从而实现了社会因素被量化。

3) 业务场景共性化。新思维通过系统及其数据具有“ESE 三性影响”这一共性,将城市轨道交通系统各种评价业务场景统一纳入 ESE 空间中,构建了一个标准化的共性评价模型。

4) 可持续发展状态可视化。借助 ESE 空间直角坐标系,建立了一套极具空间感的量化评估工具,既可以通过质心位置区分出“八种四类”可持续发展状态的类别,又可以通过质心投影形成的三棱锥直观地显示可持续发展的程度。自此,城市轨道交通系统是否可持续,不再是一个抽象的概念。

5) 专家知识向量化。新思维通过各种赋值将专家的经验 and 知识转化成事件“质点”的三维坐标值以及数学模型,并且这些坐标值及数学模型,还可以与专家形成互动,不断优化与调整。如此专家知识将不断地积累沉淀在数据平台上,评价体系的数据赋值与数学模型也会日趋准确与日臻完善。

4.2 评价新思维的意义

1) 为可持续评价体系的快速生成提供了理论与方法。通过 ESE 模型算法,计算机能够快速从要素池和数据池中提取有用信息,自动向专家提供评价指标体系的备选方案。另外,随着业务场景和数据的丰富化,评价体系可内置多种预设模板,用户可选择合适的模板,快速启动和执行评价任务,避免每次均从零开始构建评价体系。

2) 为“知识驱动与数据驱动”的双驱评价提供了一种方式。知识驱动与数据驱动,深度融合,共同驱动,是未来利用人工智能进行可持续评价的方向。但目前双驱还没有深入,其原因在于评价知识还是符号表达,并没有被向量化。本文通过对数据赋以 ESE 三性影响,即赋语义于数据,这实际上是将可持续评价

知识进行向量化的一种方式。

3) 为城轨行业数据治理及其结构化提供了一种底层思考。目前我国城轨交通业界正在进行行业数据标准化工作,城市轨道交通系统及其数据,具有 ESE 三性影响,这应是城轨行业数据治理及其结构化的一种底层思考。

4) 为其他大型基础设施可持续评价提供了借鉴。其他大型基础设施同样具有 ESE 三性影响,故新思维提供的是一种多行业通用的评价方法,它不仅适用于能源、交通、水利等基础设施项目,也为经济社会领域的可持续发展评价(如区域与城市可持续发展评价)提供了一种尝试与借鉴。

5) 为城市轨道交通行业专业大模型的创建进行了基础性探索。城市轨道交通行业专业大模型的创建,除了算力与算法外,数据是一个主要问题。其中海量的文本知识与专家经验没有被向量化是关键。本文提出对系统要素与要素集、系统数据与数据集、事件与事件集、业务场景等进行 ESE 三性影响赋值,使之成为 ESE 立体空间中的“质点”与“质点系”,以此作为城市轨道交通行业知识向量化之路的一种探索。

5 结语

为了更加丰富和完善 ESE 理论与方法,课题组期待更多研究者加入到这一领域,共同探索以下两个方向:一是形而上“哲学”方面的研究,即对数据的本质、数据与信息以及数据与事实的关系进行科学哲学、信息哲学、数据哲学方面的深入探讨。二是形而下“技术”方面的研究,即对城轨交通这一“开放的技术社会复杂巨系统”的系统作用机理与动态演进机理进行深入研究,并在 ESE 空间中开展高维动态计算方法的创新研究与评价应用。

此外,作者已充分认识到专家经验的重要性和其固有的主观性。但主观并不代表不科学、不实用,不管是传统评价思维,还是新评价思维,两者同样都离不开主观性。不同的是,本文评价体系中的主观性,目的在于将专家知识经验进行向量化,这是项目评价工作未来走向人工智能的必由之路。

致谢 在此特别感谢全体课题成员。同时,对左超同志的写作支持表示衷心感谢!

(下转第 63 页)

- induced airflow inside underground subway stations with simplified field test methods[J]. *Sustainable cities and society*, 2018, 37: 275-287.
- [5] GUAN Bowen, ZHANG Tao, LIU Xiaohua. Performance investigation of outdoor air supply and indoor environment related to energy consumption in two subway stations[J]. *Sustainable cities and society*, 2018, 41: 513-524.
- [6] 李超, 王春青, 齐洁, 等. 基于实测数据对地铁站环控系统能耗及其影响因素的分析[J]. *暖通空调*, 2021, 51(增刊 2): 311-316.
- [7] YANG Zhao, YU Zhuangzhuang, YU Longqing, et al. Research on frequency conversion technology of metro station's ventilation and air-conditioning system[J]. *Applied thermal engineering*, 2014, 69(1/2): 123-129.
- [8] PAN Song, PEI Fei, WEI Yixuan, et al. Design and experimental study of a novel air conditioning system using evaporative condenser at a subway station in Beijing, China[J]. *Sustainable cities and society*, 2018, 43: 550-562.
- [9] KIM M, BRAATZ R D, KIM J T, et al. Indoor air quality control for improving passenger health in subway platforms using an outdoor air quality dependent ventilation system[J]. *Building and environment*, 2015, 92: 407-417.
- [10] 苏子怡, 李晓锋. 中国各气候区屏蔽门地铁站环控系统节能潜力研究[J]. *都市轨道交通*, 2023, 36(3): 131-138.
SU Ziyi, LI Xiaofeng. Energy-saving potential of ventilation and air-conditioning systems of PSD subway stations in various climate regions in China[J]. *Urban rapid rail transit*, 2023, 36(3): 131-138.
- [11] 苏子怡, 李晓锋. 中国各气候区屏蔽门地铁站通风空调能耗指标[J]. *都市轨道交通*, 2023, 36(1): 148-155.
SU Ziyi, LI Xiaofeng. Energy use index of ventilation and air-conditioning system for subway stations in various climate regions in China[J]. *Urban rapid rail transit*, 2023, 36(1): 148-155.

(编辑: 王艳菊)

(上接第 10 页)

参考文献

- [1] 严作人, 杜豫川, 张戎. 运输经济学[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [2] 国家发展改革委. 投资项目可行性研究报告编写大纲及说明(发改投资规[2023]304号)[A/OL]. (2023-04-07) [2024-04-19]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/jd/jd/202304/t20230407_1353388.html.
- [3] 城市轨道交通建设项目后评价导则: 建标[2015]52号[S]. 北京: 中国计划出版社 2015
- [4] (英国)弗洛里迪. 信息哲学[M]. 牛津: 牛津大学出版社, 2011.
FLORIDI L. The Philosophy of Information[M]. Oxford: Oxford University Press, 2011.
- [5] 朱扬勇, 熊赞. 数据学[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2009.
ZHU Yangyong, XIONG Y. Dataology and data science[M]. Shanghai: Fudan Press, 2009.
- [6] 石川, 王啸, 胡琳梅. 数据科学导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2021.
SHI Chuan, WANG Xiao, HU Linmei. Introduction to data science[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2021.
- [7] Chen, P.P. 关系实体模型: 走向数据的统一视角[J]. 美国计算机协会数据库系统会报, 1976, 1(1): 9-36.
Chen, P.P. The Entity-Relationship Model-Toward a Unified View of Data. *ACM Transactions on Database Systems*, 1976, 1(1): 9-36.
- [8] 罗素·艾可夫. 从资料到智慧[J]. *应用系统分析*, 1989, 16: 3-9.
- [9] (美国)卡托克, 哈塞尔布拉特. 现代动力系统理论导论[M]. 金成桴, 译. 北京: 高等教育出版社, 2017.
- [10] 杨振山, 杨航, 杨林生, 等. 可持续发展目标的多尺度空间解构与评估[J]. *自然资源学报*, 2024, 39(3): 489-507.
YANG Zhenshan, YANG Hang, YANG Linsheng, et al. Multi-scale spatial deconstruction and evaluation of Sustainable Development Goals[J]. *Journal of natural resources*, 2024, 39(3): 489-507.
- [11] 深圳大学. 深圳市可持续发展评估报告(2016至2021年)[R]. 深圳, 2022.
- [12] 于松伟, 刘巍, 仲莹莹. 基于复杂巨系统理论的城市轨道交通可持续发展综合评价[J]. *都市轨道交通*, 2023, 36(5): 1-10.
YU Songwei, LIU Wei, ZHONG Yingying. Comprehensive evaluation of sustainable development of urban rail transit based on open complex giant system theory[J]. *Urban rapid rail transit*, 2023, 36(5): 1-10.
- [13] (荷兰)约翰·H. 遗传算法与试验的最优分配[J]. *SIAM 计算*, 1973, 2.2: 88-105.
John H. Genetic algorithms and the optimal allocation of trials[J]. *SIAM journal on computing*, 1973, 2.2: 88-105.

(编辑: 王艳菊)