

《传递之歌》:从“三传一反”到“场流信息”的学科咏叹

郝晓刚

摘要: 本文以笔者创作的《传递之歌》为线索,探讨了以诗歌形式凝练与传播化工核心理论的教学尝试与学术思考。文章系统解读了该歌谣对“三传一反”哲学内涵、守恒定律核心地位及“场流协同”前沿视角的概括,分析了其作为《传递现象》课程“认知导航图”与“思维转换器”的教学价值。通过比较其与朱世平《化工之歌》在学科叙事上的承继与深化关系,文章阐述了从“单元操作”到“传递现象”,再向“场流信息”范式演进的内在逻辑。本文认为,“以歌咏学”不仅是一种有效的教学工具,更是一种连接知识传授、思维训练与学科文化建设的创新叙事,为理解化学工程学科的传统精髓与未来方向提供了富有启发的鲜活文本。

一 开篇引言:歌以咏志,学以传道

“诗言志,歌永言。”(《尚书·尧典》)自古以来,歌咏便是人类表达思想、传递智慧的重要方式。在严谨的学术殿堂中,以歌谣、诗赋的形式凝练学科精义、抒发学术情怀者,虽不常见,却往往能以最生动的方式触动心灵、启迪思考。朱世平先生于2019年发表于《化工学报》的《化工之歌》^[1],正是这样一次富有创见的尝试。该文以通俗灵动的语言,将化学工程学科的宏大体系与深邃内涵娓娓道来,在科技文明的语境中完成了一次成功的“学科咏叹”,印证了“我以我歌见真知”的独特魅力。其文不仅是对化工学科的一次科普巡礼,更在学界内外引发广泛共鸣,成为连接专业纵深与公众理解的一座雅俗共赏的桥梁。

受此启发,并结合本人多年从事《化工原理》《化学反应工程》《传递现象》等核心课程教学科研的体悟,笔者于数年前亦萌生以歌言志之念,遂有《传递之歌》(精简版)及其扩展版的即兴创作。教学数十载,深感“传递现象”之于化工,犹如筋骨之于躯体,虽不及“反应工程”之绚烂夺目,却是一切过程得以实现的物理基础与速率控制的灵魂所在。每每在课堂上阐释从牛顿黏性定律、傅里叶导热定律到菲克扩散定律的内在统一性,揭示“三传一反”背后深刻的守恒哲学与时空信息本质时,总有一种试图超越公式本身、直抵学科美学与方法论的冲动。《传递之歌》便是在这样的长期思考与某一瞬间的“灵光一现”中诞生。它并非严格意义上的诗词创作,而是数十年教学心血与学科理解的浓缩与升

华,是试图用最精炼的语言,勾勒出化工传递理论从现象描述、模型构建到工程应用的逻辑全景。

传递之歌(精简版)

三传一反,化工之魂;传递为纲,纲举目张。
速率通量,时空信息;现象本质,定律守恒。
场流协同,源汇交错;只此传递,造化为工。

化工传递之歌(扩展版)

化工学科基础,数理化生材料;热力平衡极限,动力三传一反;分子微观宏观,现象本质守恒。
标量矢量张量,梯度散度旋度;偏导全导随导,向量微分算符;数学物理模型,计算时空信息。
三传唯象理论,通量浓度梯度;等温变温混合,出入稳态积累;扩散对流源汇,场流协同交错。
实验理论模拟,工程数学结合;实时虚拟现实,数字信息化工;只此传递为纲,化工纲举目张。
工艺单元传递,计算化学工程;流体连续介质,多尺多维多相;精算过程速率,天地造化为工。

本文旨在以《传递之歌》为脉络,分享这一特殊形式的“学科笔记”背后的思考,探讨其与经典《化工之歌》的承启关系,并阐释其中蕴含的从“三传一反”经典范式向“场流信息”未来构想演进的内在逻辑。我们相信,这种“以歌咏学”的尝试,不仅有助于学生与同行以一种更具整体性和穿透力的视角理解传递现象的核心地位,亦能为化学工程学科在数字化、智能化时代的话语体系构建与传播,提供

一种富有温度与人文气息的叙事参考。是为开篇，亦为邀约，愿与诸位同道，共探化工之妙，同歌传递之道。

二 何谓“传递之歌”？——精简版与扩展版的创作心路

“传递之歌”的诞生，并非精密规划下的学术产物，而更像是一场源于教学现场、终于学科沉思的“顿悟”。它源于笔者在讲授《传递现象》课程中一个反复浮现的困惑：如何让学生超越纷繁的偏微分方程与复杂边界条件，直观把握这门课的**灵魂**？在一次关于“湍流中涡旋尺度与传质强化”的课堂讨论后，那句“**三传一反，化工之魂；传递为纲，纲举目张**”骤然浮现。这四句“精简版”并非刻意求工，实则是多年教学积累的**直觉性提纯**——它试图回答一个根本问题：化工学科的“统一场”在哪里？

(一)精简版：三句各十六字的核心凝练

精简版的结构，刻意模仿了中国古典诗歌“起承转合”的韵律，试图在极简形式中容纳最大信息密度。

1.起(定位)：“三传一反，化工之魂”

教学案例：在《化工原理》开场，学生常问“化工与化学何异？”答案始于“三传一反”。此句旨在奠定其**基石地位**。例如，讲解精馏塔时，不仅讲相平衡(热力学)，更须点明塔板效率实则由**气液两相传质速率(传质)与上升蒸汽的流体力学行为(传动力)共同决定**。将“三传一反”喻为“魂”，意在强调其是赋予化工过程**生命与动态**的源泉。

2.承(方法论)：“传递为纲，纲举目张”

教学案例：在分析一个复杂的聚合反应器时，引导学生先识别其中的**传递子过程**——搅拌带来的**动量传递(混合效果)**、夹套冷却的**热量传递(温度控制)**、单体向增长链的**质量传递(反应速率)**。抓住“**传递**”这一主线(纲)，反应工程、过程控制、设备设计等环节(目)便自然贯通。此句体现了**系统思维**，**传递**是分析复杂化工系统的**核心脉络**。

3.转(科学内涵)：“速率通量，时空信息；现象本质，定律守恒”

教学案例：这是从宏观描述到定量科学的转折。讲解非稳态传热时，我们不仅关心温度随时间如何变化(速率)，更关心热量在设备空间内如何流动(通量)。一个生动的例子是：为何平板式催化剂

涂层设计需考虑厚度？因为反应物向内扩散的**通量(传质)**与反应放热向外传递的**通量(传热)**在空间每一点竞争，共同决定了反应速率与“热点”位置。此句前半部分将传递过程的核心归结为**时空四维坐标系中通量场的演化**，指向了其数学模型本质；而后半句“**现象本质，定律守恒**”则进一步揭示了本课程的哲学内核——一切传递“现象”之“本质”，皆可追溯并统一于**质量、动量、能量三大守恒定律**。这八个字，正是《传递现象》区别于经验性**单元操作**，上升为可预测、可设计之工程科学的**理论基石与认知飞跃**。

4.合(哲学升华)：“场流协同，源汇交错；只此传递，造化同工”

教学案例：以燃料电池为例，其性能取决于**质子场(电场)、反应物流场(浓度场/速度场)与温度场的协同**。阳极的氢氧化反应是质子和电子的“源”，阴极的氧还原反应是其“汇”。整个电池的优化，本质是调控这些“场”与“流”，使“源汇”在时空上高效匹配。最终，“**造化为工**”化用古典^[2]，阐明化工之伟力在于：通过驾驭传递这一自然法则(造化)，实现物质与能量的定向转化(为工)。

精简版的价值，在于其**高度浓缩的符号性**。它如同一把记忆的钥匙，帮助学生在面对复杂工程问题时，能迅速回归到这几个核心概念上，进行框架性思考。

(二)扩展版：从灵感到体系的自觉构建

精简版流传后，意犹未尽，亦感其有“筋骨”而“血肉”未丰。许多学生追问：“‘**场流协同**’具体如何用数学表达？”“‘**时空信息**’怎么计算？”这促使了扩展版的创作。扩展版不再是灵感的火花，而是基于精简版骨架，进行有意识的**学科知识体系填充与教学方法论阐述**。

1.从“魂”到“体”：夯实学科基础与工具

开篇“**化工学科基础**，数理化工材料；**热力平衡极限**，动力三传一反”，明确了传递研究的**边界(热力学)与动力(动力学+三传)**。随后“**标量矢量张量…向量微分算符**”一整句，几乎是一份《化工数学》的微型大纲。这是对教学现实的回应：学生传递学之困，常源于数理工具之弱。在讲授纳维-斯托克斯方程时，我们会专门拆解其中的随体导数、应力张量散度，让学生明白，诗中每一个数学术语，都对应着物理世界中的一个真实作用力或传递机制。

2.从“现象”到“模型”：揭示唯象理论与守恒

本质

“三传唯象理论…场流协同交错”一段,是对传递理论内核的直白陈述。例如,在讲解对流传质系数时,我们将其与“扩散对流源汇”联系:系数本身是一个将复杂的“**场流协同**”效应打包的唯象参数,而其值可通过包含对流项、扩散项和反应源汇项的守恒方程求解获得。这体现了从实验关联式(唯象)到机理模型(守恒)的认知深化。

3.从“理论”到“未来”:勾勒工程实践与学科前沿

“实验理论模拟,工程数学结合”指向现代研究方法论。“实时虚拟现实,数字信息化工”则直接呼应“智慧化工”浪潮。在课程中,我们会展示计算流体力学(CFD)模拟反应器内“场流协同”的动画,将诗中抽象概念**视觉化、动态化**。最后,“精算过程速率,天地造化化工”与精简版结尾呼应,但更突出了“**精算**”这一现代工程特征——基于模型的精准设计与调控。

(三)逻辑递进:从“心法”到“功法”的教学映射

两版《传递之歌》的关系,可比喻为“心法”与“功法”的递进。**精简版是“心法”**,言简意赅,直指核心,用于构建整体认知图景与思维范式,适用于课程导论与总结。**扩展版是“功法”**,系统全面,提供具体路径与工具,可作为学习各个章节的“概念地图”或复习总纲。

这种创作心路,本质上反映了一条深刻的**教学与认知规律**:学习一门厚重如传递现象的学科,需要先建立一个坚固而简洁的**核心概念框架**(精简版),避免在细节中迷失;而后,再以此框架为导航,系统地填充**知识细节与逻辑链条**(扩展版),实现从“知其然”到“知其所以然”的跨越。这也正是“传递之歌”希望赋予学生的双重礼物:一是俯瞰学科的高度,二是深耕专业的路径。

三 “传递之歌”的深层解读:化工传递的哲学与方法

《传递之歌》的价值,远不止于对知识点的诗意概括。其字句背后,蕴藏着理解化工学科本质的**哲学视角与方法论体系**。对它的深层解读,实则是梳理化学工程从“技艺”走向“科学”,并迈向“系统智能”的内在逻辑。

(一)“传递为纲”:一种认知范式的确立

“传递为纲,纲举目张”一句,确立了传递现象在化工学科认知中的**枢纽地位**。这不仅是教学逻辑,更是一种**工程认识论**。

哲学内涵:它回答了“如何理解复杂化工系统”这一根本问题。传统上,人们可能以“设备”(如反应釜、精馏塔)或“产品”(如汽油、聚合物)为视角去认知化工。而“传递为纲”则主张,应以**物理过程**(动量、热量、质量的迁移与转化)为最基础的认知单元。这种视角将千变万化的工艺,抽象为有限种类的传递机制的组合与耦合,实现了从特殊到普遍的理论升华。这正与“单元操作”思想一脉相承,但更进一步,深入到驱动“操作”的**共性物理机制**层面。

方法论体现:在解决一个全新的过程强化问题时(如微反应器中的快速混合与传热),工程师的首要任务便是进行“**传递解析**”——识别主导的传递机制、评估其速率并寻找强化路径。例如,在膜分离过程开发中,“纲”是跨膜的**传质过程**,围绕此纲,膜材料设计(影响扩散系数)、膜组件流体力学设计(影响对流边界层)以及操作压力与温度的优化(影响推动力),皆可“目张”式地系统展开。

(二)“速率、通量与时空信息”:化工的数学化与预测科学本质

“速率通量,时空信息”与“现象本质,定律守恒”的结合,精准揭示了化工作为一门现代定量工程的**科学基石**。

从定性到定量:“速率”与“通量”是**可测量、可计算**的核心物理量。它们将定性的“快慢”“强弱”转化为定量的数学模型输入与输出。例如,在干燥过程中,我们不仅关心“干燥快不快”,更需建立干燥速率与物料湿度、热风温度、流速之间的**数学关系**。

守恒定律的统帅作用:“现象本质,定律守恒”这八个字,是传递现象课程的**灵魂宣言**。它宣告:无论现象多么复杂(湍流、多相流、伴有化学反应的传递),其描述都必须严格服从**质量、动量、能量守恒定律**。这些守恒定律以微分方程的形式(连续性方程、运动方程、能量方程),构成了所有传递过程的“宪法”。教学中的核心挑战与魅力,正在于教会学生如何将复杂的实际工程问题,翻译成在这部“宪法”约束下的数学定解问题。

时空信息的完备性:传递理论要求提供完整的**时空信息**——不仅仅是某一点、某一时刻的状态,

而是整个域内物理量(速度、温度、浓度)随时间的演化历程。这正是化学工程能进行**精准设计**和**动态调控**的前提。计算流体力学(CFD)等现代工具,正是求解这些时空方程、可视化“场”信息的技术实现。

(三)“场流协同,源汇交错”:多物理场耦合的系统观

此句是《传递之歌》中最具现代感的部分,指向了当前化工过程强化与复杂系统设计的核心前沿。

“场”与“流”的辩证统一:“场”(如温度场、浓度场)描述了物理量的空间分布状态,是“流”(物质流、能量流)产生的**驱动力**;而“流”的形态与强度,反过来又通过**对流效应**重塑了“场”的分布。二者构成一个动态耦合、相互反馈的系统。以**催化固定床反应器**的热点问题为例:反应放热(源)形成局部高温场(温度场),高温加速反应,进一步强化放热;同时,反应物浓度场因消耗而演变,流速场(流)则影响着热量和反应物的输送速率。安全高效的设计,必须协同考虑这多个“场”与“流”的相互作用。

“源”与“汇”的普遍存在:“源汇交错”点明了化工系统普遍存在的**非平衡本质**。化学反应、相变、电化学反应等,在系统中扮演着物质与能量的“源”或“汇”。传递过程的任务,正是在“源”与“汇”之间构建高效、可控的“**输运网络**”。例如,在**锂离子电池**中,锂离子在电极材料中的扩散(传质)是连接负

极(脱锂源)与正极(嵌锂汇)的关键,而此过程又与电极内的电势场、温度场紧密耦合,决定了电池的功率与寿命。

(四)从“三传”到“五传”乃至“场流信息”:学科的演进开放性

《传递之歌》的精简版立足经典,但其思想已蕴含了拓展的可能。“三传”作为化工教育的核心公理,其范式是**普适而开放的**。

范式的延展性:“动量、热量、质量”三传之所以经典,是因为它们对应于牛顿力学与经典物理学的守恒量。随着化工向**材料、电子、生物**等领域深度渗透,新的“传递”维度自然浮现。例如,在电化工程中,**电荷的传递**(电流)与质量、热量传递同等重要;在**高分子加工**中,**分子链构象与应力的传递**决定了最终产品性能。所谓“五传”(增加容、电等)或更多传的提法,实质上是“三传”范式在新领域、新物理量上的**逻辑延伸与应用拓展**,其内核依然是**通量 = 推动力 × 传导系数**的唯象定律与相应的守恒方程。如表 1 所示,达西定律的本质是容量通量(渗流速度),而欧姆定律实质是电量通量(电流密度),与经典的“三传”现象方程的数学表达式完全一致,同样符合唯象理论。

迈向“场流信息”:这一开放性,为理解“**场流信息**”这一潜在的新里程碑提供了桥梁。当我们把“信息”(如分子结构信息、过程状态信息、调控指令

表 1 传递现象方程的一致性与各项参数对比分析

传递类型	基本定律	驱动力	通量方程	通量单位	唯象系数	扩散系数	浓度
质量传递	菲克定律	质量浓度梯度 摩尔浓度梯度	$J_m = -D \cdot \frac{dp}{dx} = -D \cdot \frac{dc}{dx}$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$	扩散系数 $D [\text{m}^2/\text{s}]$	$[D] = \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$	$[\rho] = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ $[c] = \left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \right]$
热量传递	傅里叶定律	温度梯度 热量浓度梯度	$J_h = -k \cdot \frac{dT}{dx} = -\alpha \cdot \frac{d(\rho c_p T)}{dx}$	$\left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$	热导率 $k [\text{J}/(\text{s} \cdot \text{K} \cdot \text{m})]$	$[\alpha] = \left[\frac{k}{\rho c_p} \right] = \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$	$[\rho c_p T] = \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3} \right]$
动量传递	牛顿黏性定律	速度梯度 动量浓度梯度	$J_n = -\mu \cdot \frac{du}{dx} = -\nu \cdot \frac{d(\rho u)}{dx}$	$\left[\frac{\text{kg} \cdot (\text{m}/\text{s})}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$	动力黏度系数 $\mu [\text{Pa} \cdot \text{s}]$	$[\nu] = \left[\frac{\mu}{\rho} \right] = \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$	$[\rho u] = \left[\frac{\text{kg} \cdot (\text{m}/\text{s})}{\text{m}^3} \right]$
容量传递	达西定律	压力梯度 容量浓度梯度	$J_v = -L_p \cdot \frac{dP}{dx} = -D_v \cdot \frac{d(V_i/V)}{dx}$	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$	渗透系数 $L_p [\text{m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{s})]$	$[D_v] = [L_p \cdot P] = \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$	$\left[\frac{V_i}{V} \right] = \left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right]$
电量传递	欧姆定律	电势梯度 电量浓度梯度	$J_e = -\sigma \cdot \frac{dU}{dx} = -D_c \cdot \frac{d(UC_v)}{dx}$	$\left[\frac{\text{C}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$	电导率 $\sigma [\text{C}^2/(\text{s} \cdot \text{J} \cdot \text{m})]$	$[D_c] = \left[\frac{\sigma}{C_v} \right] = \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$	$[UC_v] = \left[\frac{\text{C}}{\text{m}^3} \right]$
∞量传递							
信息传递					万物皆传递,无处不信息		

注:比热容 $[c_p] = \left[\frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{kg}} \right]$; 容量浓度 $\left[\frac{V_i}{V} \right] = \left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right]$, 其中, V_i 和 V 分别为多相流体系中某一相的体积和总体积; 体积比电容 $[C_v] = \left[\frac{\text{F}}{\text{m}^3} \right] = \left[\frac{\text{C}}{\text{V} \cdot \text{m}^3} \right]$; 电功 $[W] = [P \cdot t] = [U \cdot I \cdot t] = [U \cdot Q] = [J] = [V \cdot C]$ 。

信息)也视为一种需要被识别、传递、处理和响应的关键要素时,“三传”的物理框架便与**信息论、控制论、数据科学**发生了深刻的融合。未来化工系统的设计,或许正是在**物理场、物质流、能量流、信息流**的协同框架下,实现更为自主的感知、决策与优化。《传递之歌》虽未明言,但其“场流协同”的思想,已为接纳“信息”这一新维度预留了接口。

综上所述,《传递之歌》的深层意涵,在于它以一种高度凝练的形式,勾勒出化工传递从**核心认知范式**,到**定量科学根基**,再到**系统耦合观念**,并最终指向**学科开放演进**的完整思想图谱。它不仅是一首歌诀,更是一份关于如何思考化学工程的“哲学纲要”。

四 从“化工之歌”到“传递之歌”:学科叙事的延续与创新

学科的发展既依赖于理论体系的突破,也离不开叙事方式的更新。朱世平先生的《化工之歌》与本文所述的《传递之歌》,正是化工学科在不同层次、不同维度上进行的两次重要的“叙事实践”。二者一脉相承,又各具特色,共同构成了理解化学工程学科的一体两面。

(一)叙事范式的同构:以歌为媒,化繁为雅

两者最显著的共性在于其“**以歌咏学**”的**范式创新**。面对化工学科知识体系庞大、数理基础艰深、公众乃至初入门者易生畏难与误解的现实,两位作者不约而同地选择了回归人类最古老、最直接的智慧传播形式——歌谣。

1.共同的初衷:破解认知壁垒,激发学科情感

《化工之歌》开宗明义,旨在回应“化学工程师是何方神圣”这一社会身份之问,以幽默通俗的笔触,勾勒化工在整个工程与科学谱系中的位置,其目标是**普及与正名**。

《传递之歌》则源于课堂,旨在回应学生“传递现象为何如此重要又如此难学”的专业认知之惑,以凝练诗化的语言,揭示课程内核与思想脉络,其目标是**深化与贯通**。

两者都超越了传统教材与论文的刻板形式,通过节奏、韵律与意象,将严谨的科学内容转化为易于记诵、引发共鸣的“知识载体”,实现了**科学性**与**艺术性、专业性**与**传播性的统一**。

2.共享的基石:对“三传一反”核心地位的共同

确认

朱世平先生的文章明确指出,“化工人会自豪地脱口而出‘三传一反’”,并将其置于定义化工的核心位置。

《传递之歌》则以“三传一反,化工之魂”起笔,并在扩展版中将其与“热力平衡极限”并列为学科动力之源。

这种共识绝非偶然,它标志着“三传一反”作为**化工学科区别于其他工程的“身份密码”**,已成为从教育到科研共同认可的元叙事。

(二)叙事视角的递进:从“全景概览”到“纵深聚焦”

二者最根本的差异,在于叙事视角与深度的不同,这恰好构成了学科叙事从“外部描绘”到“内部解剖”的有机衔接。

1.《化工之歌》:全景式、社会化的学科素描

视角:如同一位博学的向导,带领读者俯瞰化工学科的**全景图**。它纵横捭阖,从工程四大支柱的谱系渊源,讲到化工与化学的“理”“工”之别;从热力学、动力学的哲学趣味,延伸到能源、环境、材料等广阔的应用疆域;甚至深刻反思行业发展的历史教训与社会责任。

功能:其叙事是**外向型**和**整合型**的。它成功地将化工定义为一个**充满智慧、责任与机会的宏大社会技术系统**,旨在塑造学科的公众形象与学生的专业认同。其“一页纸”总结(反应与分离的“多远、多快、怎么搞”)是高度概括的**认知地图**。

2.《传递之歌》:焦点式、哲理化的理论透视

视角:如同一位深邃的哲人,将聚光灯对准化工全景图中最为核心的“传递现象”区域,进行**高倍率的显微解剖**。它不追求覆盖学科的广度,而是追求理解其中一门核心课程的深度。

功能:其叙事是**内向型**和**分析型**的。它旨在揭示化工之所以能成为一门**定量科学**的内在逻辑:即一切过程表象(现象)均可追溯至守恒定律(本质),并通过时空中的速率与通量(信息)进行数学描述与调控。其“一句话”概括(传递总纲:现象方程+守恒律)是直指核心的**思维纲领**。

(三)叙事内容的创新:从“知识罗列”到“思想架构”

《传递之歌》在继承《化工之歌》叙事精神的基础上,在内容组织上实现了关键创新,主要体现在从“知识点的生动罗列”转向“思想体系的主动

建构”。

1. 提出了层次化的概念框架

《化工之歌》以列举的方式生动介绍了热力学、动力学、单元操作等知识点。

《传递之歌》则通过“魂-纲-信息-守恒-场流”的递进结构,构建了一个理解传递现象的**逻辑闭环**。这个框架不仅告诉学生“有什么”,更清晰地指示了“何以重要”以及“如何关联”。

2. 凸显了数学语言的学科本体地位

朱世平先生的文章^[1]提及了数学之美,但重点在于哲理阐述。

《传递之歌》扩展版则大篇幅将**标量、矢量、张量、梯度、散度、偏导**等数学工具直接写入“歌词”,这并非炫耀艰深,而是郑重强调:这些数学概念就是化工传递的**工作语言**,是“计算时空信息”的必备工具。这使叙事更深地植根于学科的方法论内核。

3. 融入了前瞻性的学科演进视角

《化工之歌》立足于总结学科当下全貌。

《传递之歌》则通过对“场流协同”的强调,以及对“数字信息化工”的明确指向,将叙事脉络自然地延伸至**多物理场耦合、计算化学工程、智能化等前沿方向**,使其具备了动态演进的属性,并为“场流信息”等新范式的提出预留了接口。

(四)学科教育的互补:从“为何而学”到“如何思学”

在教育意义上,两首歌谣扮演了互补而衔接的角色。

《化工之歌》解决“动力”问题:它在学生专业生涯的起点或公众认知的界面,通过展现化工的博大、有趣与重要,激发学习兴趣与职业使命感,回答“为何要投身化工”。

《传递之歌》解决“方法”问题:它在学生深入专业核心课程时,通过提供一套浓缩的思维模型,帮助其驾驭最具挑战性的理论知识,掌握分析复杂工程问题的核心范式,回答“如何像化工专家一样思考”。

小结:共谱学科发展的“复调叙事”

综上所述,《化工之歌》与《传递之歌》并非替代关系,而是构成了一曲美妙和谐的学科“复调”。《化工之歌》是宏大、昂扬的主旋律,描绘了化工学科的疆域、价值与责任;《传递之歌》则是精深、内省的对位声部,剖析了支撑这片疆域的理论基石与思维方法。前者让我们看到森林的广阔与生机,后者让我

们看清支撑树木生长的根系、脉络与光合作用的原理。

这种叙事上的延续与创新,恰恰反映了化学工程学科自身的成熟与活力:它既需要一个面向社会、统揽全局的**形象宣言**,也需要面向内部、不断深化的**理论自觉**。从《化工之歌》到《传递之歌》,正是这种自觉的体现,它们共同为化工学科的知识传承、思想启迪与范式演进,提供了独具特色而富有生命力的文化载体。

五 “传递之歌”在教学中的价值:一门课的“灵魂之歌”

《传递之歌》的创作虽源于课堂的灵光一现,但其在教学实践中的持续应用与反馈,已使其价值超越了一首简单的“助记口诀”,真正成为一门课程的“灵魂之歌”。它不再仅仅是知识的附属品,而是转变为一种**主动的教学设计元素和深刻的认知建构工具**,为《传递现象》这门以艰深著称的核心课程注入了活力、结构与哲学深度。

(一)作为认知“导航图”:破解课程的结构性质难题

《传递现象》课程知识密度高、数理推导繁、物理概念抽象,学生极易陷入“只见树木,不见森林”的困境。《传递之歌》的首要价值,在于它提供了一张清晰、稳固的“**认知导航图**”。

1. 课前“全景预览”:在课程伊始便呈现《传递之歌》(精简版),相当于在展开复杂数学推演前,先为学生勾勒出整门课程的“思想山脉”全景。学生了解到,这门课的核心目标不是求解无数个孤立的方程,而是理解“**从三传一反的工程灵魂,到场流协同的调控艺术**”这一完整逻辑链。这预先建立了学习的意义感与整体框架,对抗了知识碎片化。

2. 课中“定位锚点”:当讲授到具体章节时,反复回溯歌词。例如,在推导对流-扩散方程时,教师可以明确指出:“我们现在做的,正是在用数学语言‘精算’歌词中提到的‘**速率通量,时空信息**’,并且确保其严格符合‘**定律守恒**’。”这使得具体的数学推导有了明确的上位概念归属,枯燥的运算被赋予了明确的目的性。

3. 课后“反思框架”:在学完一章或一个复杂案例后,引导学生用《传递之歌》的框架进行复盘。例如,分析一个板式换热器的优化问题,可以引导学

生思考:其中涉及哪些“场”(温度场、速度场)的协同?冷热流体间的“源汇”(热量源与汇)是如何交错的?设计的核心是否在于调控某种“通量”?这种训练,促使学生从解题技巧上升到**工程思维建模**。

(二)作为思维“转换器”:促进从感性认知到理性建模的飞跃

《传递之歌》充当了连接工程现象直觉与数理科学本质之间的关键“转换器”。

1. 将“物理直觉”编码为“科学问题”:学生面对工程现象常有直观感受(如“这里混合不好”、“那里温度不均”)。《传递之歌》中的“速率通量”和“场流协同”等短语,为他们提供了一套将模糊直觉**精准转化为科学问题**的词汇。例如,从“混合不好”这一感觉,可以引导至“**动量传递(流场)不足导致质量传递(混合)速率低**”这一科学描述,进而自然导向对雷诺数、湍流强度等定量参数的讨论。

2. 将“数学公式”解码为“物理图像”:面对复杂的偏微分方程,学生容易迷失在数学符号中。《传递之歌》则提供了反向“解码”的钥匙。纳维-斯托克斯方程中晦涩的应力张量散度项,可以被解读为“**动量通量在空间上的变化率(散度)**”,这正是“**通量…散度**”一句的生动体现。这种“公式-图像”的反复映射,极大地深化了学生对数学模型物理意义的理解。

(三)作为哲学“启迪篇”:提升学科的格局与审美

《传递之歌》最独特的教学价值,在于它潜移默化地完成了课程的**哲学升华**,将一门技术课程提升至方法论与世界观培育的层面。

1. 揭示“简单与复杂”的统一之美:“现象本质,定律守恒”八个字,道出了科学研究的终极追求——在纷繁现象中寻找简洁统一的规律。通过课程学习,学生亲身体会到:无论多复杂的传递问题,最终都归结于几个简洁优美的守恒方程。这种“从复杂到简单”的认知旅程,带给学生的不仅是知识,更是一种深刻的**科学审美体验和理性自信**。

2. 培养“系统与演化”的思维范式:“场流协同,源汇交错”传递的是一种动态的、相互关联的**系统思维**。它教导学生,不能孤立地看待温度、浓度或流速,而必须关注它们之间的耦合与反馈。这种思维范式,正是应对气候变化、新能源系统、生物制造等当代复杂工程挑战所必需的核心素养。

3. 建立“造化与为工”的工程伦理观:“只此传递,造化为工”将技术活动置于天人关系的哲学高度。它提醒未来的工程师,化工过程的伟大力量源于对自然规律(造化)的深刻理解与巧妙运用,而非粗暴的征服。这为工程技术教育注入了宝贵的人文与**伦理维度**,引导学生思考可持续性与社会责任。

(四)教学实践反馈:从“学习工具”到“身份认同”

在实际教学中,《传递之歌》的引入收到了多层面的积极反馈。

记忆与沟通的“行话”:学生普遍反映,这首歌诀极大地减轻了概念记忆负担,并在小组讨论和问题求解时,成为高效沟通的“专业行话”。

应对挑战的“心法”:在面对复杂考题或项目时,学生会有意识地默念或回想歌词,以此作为分析问题的思维起点和信心来源,许多学生称之为“**解题心法**”。

专业认同的“暗号”:课程结束后,《传递之歌》成为了学生专业身份认同的一部分。它像一段共同的“文化密码”,当他们在后续课程或工作中提及“场流协同”时,会产生一种对传递学科深厚背景的归属感和自豪感。

小结:让课程的灵魂可咏可唱

综上所述,《传递之歌》在教学中的价值,在于它将《传递现象》这门课程的**知识体系、思维方法与哲学精神**,熔铸于一首可咏可唱的歌谣之中。它不仅是教学的辅助工具,更是课程灵魂的显性化表达。它让一门容易被简化为数学练习的艰深课程,变得有脉络、有思想、有温度,真正实现了“**授人以渔**”而非“**授人以鱼**”的教学目标。当一届届学生带着这首歌诀走向更广阔的专业领域时,他们所带走的,远不止于传递现象的具体知识,更是一种属于化工工程师的、独特的认知世界的方式。这正是“灵魂之歌”的深刻寓意所在。

六 迈向“场流信息”:传递之歌唱响的未来方向

《传递之歌》的意蕴并非封闭于既有的知识体系之内,其内在逻辑与开放结构,恰恰为理解化学工程学科正在发生的范式演进,提供了一处深邃的思想接口。当我们将目光从经典的“三传一反”移

向更广阔的过程工程前沿时，“场流信息”(Field-Flow-Information)作为一个凝结了当代挑战与未来愿景的核心概念，正逐渐清晰。而《传递之歌》，尤其是其中“场流协同”、“计算时空信息”等词句，宛如一支序曲，已然唱响了这一未来方向的基调。

(一)范式演进的内在驱动：从“描述与设计”到“感知与调控”

化学工程的传统范式，无论“单元操作”还是“传递现象”，其核心目标在于对过程进行**准确的描述与基于模型的设计**。这对应了《传递之歌》中“精算过程速率”的理想。然而，随着工业系统复杂性剧增(如生物制药的个性化生产、能源系统的波动性接入)以及社会对过程柔性、智能性与可持续性的极限追求，静态的、离线的“设计”已显不足。未来的化工系统必须是**自适应、可预测、能决策**的。这一跃迁，要求我们在物理的“场”与“流”之外，必须正式引入并统领“**信息**”这一维度。

(二)“场流信息”框架的内涵：一个统一的三元耦合范式

“场流信息”并非对“三传一反”的替代，而是在数字智能时代的**范式拓展与维度升维**。它试图构建一个统一框架，用以诠释和驾驭更复杂的系统。

1.“场”(Field):多物理势的数字化映射

未来的“场”，超越了传统的温度场、浓度场、速度场、电场、磁场、引力场，将扩展到**微观分子力场、介观结构应力场乃至经济成本场、环境影响场**。其核心特征是**全域、实时、高保真的数字化**。通过遍布系统的传感器网络与物理模型融合，形成过程的“数字孪生体”，实现物理世界的动态镜像。这即是《传递之歌》扩展版中“实时虚拟现实，数字信息化工”所预示的场景。

2.“流”(Flow):物质、能量与信息的共输运

“流”仍是过程发生的载体，但被赋予了更丰富的内涵。它不仅是物质流与能量流，更是**信息流**的物理承载。例如，在智能催化剂中，反应物的“流”不仅传递物质，其与活性位点相互作用产生的局部电子结构、温度瞬变等**微观信息**，可通过嵌入的传感单元实时反馈，形成闭环调控。这体现了“流”作为信息生成与传递通道的新角色。

3.“信息”(Information):系统的“神经”与“智慧”

“信息”是这一新范式的**核心纽带与驱动要素**。它包含三个层次。

状态信息:从“场”与“流”中实时感知并提取的特征数据(即“时空信息”的深化)。

机制信息:蕴含在分子结构、反应路径、传递系数中的**知识**，通常由第一性原理模型、机器学习或海量数据挖掘获得。

决策信息:基于状态与机制信息，通过算法(如模型预测控制、强化学习)生成的优化调控指令。

“信息”贯穿始终。它揭示“场”与“流”耦合的内在机理(认知)，预测其演化(预测)，并主动施加干预以达成目标(控制)，从而实现从“被动响应”到“主动驾驭”的转变。

(三)《传递之歌》提供的“思想阶梯”

《传递之歌》虽未直言“场流信息”，但其构建的概念体系，为理解这一新范式铺设了不可或缺“思想阶梯”。

1.从“场流协同”到“场流信息协同”

“场流协同”强调了物理量间的耦合，这是基础。而“场流信息”则进一步追问：如何**量化**这种协同的优劣？如何**预测**其演变？答案正在于“信息”。通过对“场”与“流”的实时感知(信息获取)，基于模型理解其耦合规律(信息解析)，方能实现最优协同(信息驱动)。《传递之歌》中对“协同”的强调，自然导向了对实现协同所必需的“信息”工具的依赖。

2.从“计算时空信息”到“闭环信息流”

《传递之歌》扩展版中的“计算时空信息”，点明了现代化工的核心方法。在“场流信息”范式中，这演变为一个**动态闭环**：“感知时空信息”→“解析与预测”→“生成决策信息”→“执行调控”→“再次感知”……课程中学习的传递方程求解，成为这个智能闭环中“解析与预测”环节的核心模型。

3.从“造化之为工”到“信息赋能造化”

“造化为工”体现了顺应自然规律的工程智慧。在“场流信息”范式下，这种“顺应”升级为**精准的“赋能”与“引导”**。通过信息手段，我们可以更深刻地洞察“造化”(如分子尺度反应与传递的精确机制)，并更灵巧地设计“为工”的路径(如设计自适应催化剂、编排智能制造序列)。信息，成为连接自然规律与工程伟力之间更强大、更敏捷的桥梁。

(四)未来图景：“场流信息”范式下的化工新貌

在这一范式指引下，化学工程将呈现出新的面貌。

1. **产品工程的自演化**:材料或化学品生产不再仅是固定配方与流程的执行，而是根据实时“场-

流”信息(如原料波动、微观结构形成),动态调整工艺参数(信息反馈),实现产品性能的定向、自适应优化。

2. **过程安全的主动免疫**:基于对“场”(如应力分布、异常温升)的毫米级实时监测与信息预警,系统能在故障发生前进行自调节,变“事后补救”为“事前免疫”。

3. **能源与资源利用的全局协同**:在工业园区尺度,物质流、能量流与碳排放、经济成本等信息流协同建模,实现多工厂、多流程的动态调度与优化,逼近资源循环的理论极限。

小结:一曲未竟之歌与一个已来的时代

《传递之歌》的价值,不仅在于它总结了过去,更在于它那开放的结构和前瞻性的词汇,**无意中预言并呼应了化工学科正在奔赴的未来**。从“传递现象”到“场流信息”,是从以“守恒律”为根基的**经典决定论范式**,迈向以“守恒律+信息论+控制论”为支柱的**智能系统范式**的深刻演进。

因此,《传递之歌》并未过时,它是一曲**未竟之歌**。当新一代化工学子吟唱“场流协同”时,他们心中激荡的,或许已是如何利用人工智能解析湍流中的信息结构,或如何设计能感知自身化学环境的智能反应器。这首歌,将从一门课程的“灵魂之歌”,演进为整个学科在智能化时代探索未知、创造未来的**精神进行曲**。它提醒我们,化工之魂,在“传递”,更在基于传递的、永不停止的**认知、创造与进化**之中。

七 结语:歌未止,学无涯

《传递之歌》的余韵,至此似乎已可暂歇。我们从其创作心路出发,解读了它凝练的辞句背后所承载的化工传递之魂;剖析了它作为一种认知范式与哲学纲要的深层意涵;并将其置于从《化工之歌》的宏大叙事到“场流信息”未来展望的学科演进脉络中,审视其承前启后的独特价值。然而,掩卷深思,我们更应认识到,这并非一次总结,而是一次再出发的序曲。

“歌未止”,因为学科的脉搏永远跳动。化学工程,这门源于人类对物质转化古老渴望的学科,其生命力正来自于它不懈的自我更新与边界拓展。《传递之歌》所锚定的“三传一反”经典内核,绝非静止的教条,而是一座蕴含着无限可能性的“富

矿”。当计算科学与人工智能赋予我们前所未有的**“精算”**能力,当纳米技术与生物技术揭示出前所未有的**“场流”**细节,当可持续发展目标要求我们重新定义**“为工”**的伦理维度时,传递理论的每一个古老定律都在新的语境下焕发出新的问题意识与研究活力。这首歌谣,因其抓住了学科最本质的思维语法,故而能够与时代共振,不断被填入新的音符。

“学无涯”,因为教育的根本在于启迪心灵、传承薪火。《传递之歌》在教学实践中的价值启示我们,真正的专业教育,远不止于知识的灌输,更在于**思维范式的塑造与学科文化的浸润**。将一门艰深的课程转化为一首可吟诵、可玩味、可深思的“歌”,正是将冰冷的公式还原为温热的智慧,将散落的知识点串联为有意义的图谱。它让学生看到的,不仅是需要征服的知识高峰,更是这片学术山脉的壮丽风景与攀登的内在乐趣。这种“以美启真、以文化人”的尝试,对于培养面对复杂挑战能够举一反三、心怀敬畏又敢于创新的新一代工程师,具有深远的意义。

从《化工之歌》到《传递之歌》,我们见证了一种独特的学术表达传统的生机。它告诉我们,在严谨的实验数据与抽象的数学方程之外,科学同样需要一种富于想象力与感染力的叙事——一种能够将学科的理性之美、结构之妙与应用之善,融汇为可传播、可共鸣的文化的叙事。这种叙事,是连接象牙塔与社会、贯通导师与学子的精神纽带。

最后,让我们再次回到那句**“天地为炉兮,造化为工;阴阳为炭兮,万物为铜”**^[2]。化工之伟力,固然在于以“天地”为尺度设计工业系统,其智慧之精髓,却始终在于深刻体察并顺应那至精至微的“造化”之功。《传递之歌》及其所代表的求索,正是对这一智慧的永恒追寻。愿这首从课堂中诞生的歌谣,能继续在更多的课堂中回响,激发更多的好奇心与创造力,陪伴一代代化工学子,在认识世界、改造世界并与世界和谐共处的无尽航程中,书写出属于这个时代的、新的篇章。

歌,永未止。学,亦无涯。

参考文献

- [1] 朱世平. 化工之歌[J]. 化工学报, 2019, 70(9): 3611-3615.
- [2] 贾谊. 鵬鸟赋[M]// 阎振益, 钟夏. 新书校注. 北京: 中华书局, 2000: 46-48.

后记：《传递之歌》的创作与解读，既是对化工传递理论核心的一次诗化凝练，亦是对学科教育方式与文化叙事的一种自觉探索。它源于课堂，归于思想，试图在“三传一反”的经典框架与“场流信息”的前沿视野之间，架起一座理解的桥梁。

这首歌谣的价值，不仅在于它以高度凝练的语言勾勒出“传递现象”的知识骨架与思维范式，更在于它展现了专业教育中人文情怀与科学理性交融的可能。它提醒我们，在传授公式与定律的同时，更应传递学科的哲学之美与系统思维之力。

从《化工之歌》的宏大叙事到《传递之歌》的纵深聚焦，再到“场流信息”所预示的智能未来，化学工程学科的演进之歌从未停歇。这曲《传递之歌》，既是对过往智慧的咏叹，更是对未知探索的呼唤。它启示我们：真正的学科传承，在于不断以新的语言与视角，重新发现并诠释那些永恒的核心原理，从而在变与不变之间，守护并光大学科之魂。

歌，是传承的载体；学，是无尽的征程。愿这首从方寸课堂中诞生的歌谣，能汇入化工学科奔腾不息的江河，流向更广阔的工程原野与创新未来。

** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** **

【作者简介】

郝晓刚，男，太原理工大学化工学院二级教授，工学博士，博士生导师。山西省化学学会理事长，中国化工学会理事、中国颗粒学会理事，山西省科协委员，中国化工学会工程热化学和ESG专委会委员、中国膜工业协会电驱动膜和新能源膜专委会委员。在太原理工大学工作期间，先后承担《化工设备机械基础》《化工容器设计》《化工原理》《化学反应工程》《化工传递过程基础》《化工数学模拟》等专业基础课的教学任务；负责《化学工程与工艺》国家特色专业及教育部“卓越工程师培养计划”首批试点专业建设和工程教育专业认证。国家重点研发计划国际合作专项、国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点项目负责人；山西省教学名师，山西省“师德标兵”，2023年获民进中央首届全国“叶圣陶教师奖”。

