引文格式：万芮彤. 地理信息场域引力场本体模型构建与空间耦合机理研究[J]. 地理空间信息, 2026, 24(5): 39-42. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.05.008

地理信息场域引力场本体模型构建与空间耦合机理研究

万芮彤
（武汉科技大学 资源与环境工程学院，湖北 武汉 430070）

摘　要：为适配地理信息科学（GIS）空间场分析与大地测量近地尺度应用，在梳理经典引力理论适用边界的基础上，采用刚性空间基准提出3条基础公理，构建引力场本体模型与场耦合作用机制。首先基于GIS空间认知与场分布规律，推导引力场本征分布公式；然后引入场耦合乘法机理，推导宏观引力表达式 $F=K^2\cdot M\cdot m/R^2$，明确耦合常数K与万有引力常数G满足 $K=\sqrt{G}$，并完成量纲与数值推导；最后从因果逻辑、场概念界定、耦合机制3个方面对比经典理论差异，结合引力常数离散、重力异常分布等实测数据验证模型的自洽性。研究表明，该模型逻辑自洽、与经典公式兼容，可支撑GIS引力场栅格建模、重力异常机理解译和大地测量精校正，为地理空间场分析提供补充性理论框架。

关键词：GIS；引力场本体模型；场耦合；先场后力；GIS空间场；大地测量
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）05-0039-04

Research on the Construction of Ontology Model for the Gravitational Field in the Geographical Information Field and Spatial Coupling Mechanism

WAN Ruitong
(School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: To adapt to the spatial field analysis of geographical information science (GIS) and the near-earth scale application of geodesy, based on the review of applicable boundaries of classical gravitational theory, we proposed three fundamental axioms using a rigid spatial reference, and constructed the gravitational field ontology model and field coupling mechanism. Firstly, based on GIS spatial cognition and field distribution rules, we derived the intrinsic distribution formula of gravitational field. Then, by introducing the multiplicative mechanism of field coupling, we derived the macroscopic gravitational expression $F=K^2\cdot M\cdot m/R^2$, indicating that the coupling constant K satisfying $K=\sqrt{G}$ with the gravitational constant G, and completed the dimensional and numerical derivation. Finally, the differences from classical theories were compared in terms of causal logic, field concept definition and coupling mechanism, and the self-consistency of model was verified with measured data such as gravitational constant dispersion and gravity anomaly distribution. The results show that the model is logically self-consistent and compatible with classical formulas, which can support GIS gravitational field grid modeling, gravity anomaly mechanism interpretation and geodesy precise correction, providing a supplementary theoretical framework for geospatial field analysis.

Key words: GIS, gravitational field ontology model, field coupling, field before force, GIS spatial field, geodesy

在地理信息科学（GIS）[1]与大地测量[2]领域，空间场分布模拟[3]、区域重力异常成因解析[4]、近地轨道拟合是核心研究方向。现有研究多以牛顿万有引力定律[5]为基础，经典理论在地表和近地宏观尺度下体系成熟、精度可靠，已在测绘工程、航天定轨、地理空间分析等领域得到长期验证与广泛应用。随着高精度大地测量与卫星重力观测技术的发展，NIST、BIPM等机构对万有引力常数[6]的多批次精密测量结果存在系统性离散；全球重力异常空间分布[4]、星系旋转曲线等观测数据反映经典理论在场本源机理、场概念界定、常数量纲内涵等基础层面仍有补充空间。经典理论侧重宏观力效应描述，对引力场独立本体属性以及场耦合内在过程的刻画相对简略。从GIS与大地测量视角来看，经典引力理论[5]的表述有两个地方需进行细化：①因果逻辑侧重不同，经典理论以宏观引力现象为起点，聚焦力与运动的响应关系，对引力场独立存在以及场耦合生力的内在过程阐述不足；②概念边界模糊，工程应用中常将引力场强度近似等效于运动响应效应，弱化了引力场作为独立物理量的本体属性，其概念层次与量纲归属需进一步明确。广义相对

作者简介：万芮彤（2004—），在读硕士研究生，主要研究方向为地理信息科学，E-mail：635581362@qq.com。

论从宇观尺度揭示引力的本质为时空弯曲，理论严谨、适用边界清晰；但其以弯曲时空为前提，与GIS、大地测量在近地尺度采用刚性平直空间基准的研究范式存在差异，且数学表达复杂，难以直接适配GIS三维栅格场建模、空间场叠加分析等工程化应用。鉴于此，本文从GIS与大地测量的交叉视角出发，采用补充性研究思路，在刚性空间基准下构建适用于近地尺度的引力场公理体系；推导引力场空间分布规律与场耦合作用机理，辨析耦合常数与万有引力常数的数理关联、量纲特征和数值关系；对比模型与经典理论的差异，并结合实测数据验证模型自洽性，旨在为GIS空间场模拟、重力异常机理解译和大地测量精校正提供补充性理论框架。

1 基础公理与引力场核心公式

1.1 3条基础公理构建

结合GIS空间认知规律、大地测量基准范式[3]与物理机理逻辑，本文提出了3条基础公理，仅作为建模推导与机理分析的逻辑前提，适用范围限定于地理空间和常规近地天体研究尺度，不拓展至宇观极端天体物理场景。

1）地理空间刚性基准公理。在地表和近地地理空间尺度（$\leqslant 10^4$ km）内，地理空间可视为均质、稳定、无几何形变的刚性三维参考框架。引力场的承载、分布与分析均基于该刚性空间基准，暂不引入时空弯曲假设。该公理仅适用于GIS与大地测量常规研究尺度，不否定广义相对论在宇观尺度的适用性。

2）引力场密度向心汇聚公理。具有静止质量 M 的物质，在周围刚性空间中诱导生成连续、无旋、向心汇聚的引力场；场强大小与场源质量 M 成正比、与径向距离 R 成一次反比衰减；地表重力、天体引力效应均为引力场密度梯度的外在表现。该公理为模型的核心假设前提，仅适用于近地尺度弱引力场。

3）先场后力、场耦合生力公理。引力作用遵循“物质生场—场独立分布—场耦合生力”的因果链条：①质量物质原生引力场；②引力场在空间独立传播、分布；③两个独立引力场相互耦合调制，次生生成宏观引力作用力，宏观引力为场耦合的次生效应，无法脱离引力场独立存在。该公理为模型因果分析框架，不排斥其他引力成因理论。

1.2 引力场核心公式推导

1）模型底层因果逻辑。经典力学以宏观引力现象为起点，聚焦力—运动响应关系，侧重工程应用。本文从因果完整性视角补充探索，遵循“物质生场→场分布→场耦合→生宏观力”路径，全程基于场本体推导，不引入力与加速度假设，旨在完善引力作用的本源机理描述。

2）引力场定性关系与本征公式推导。基于引力场密度向心汇聚公理，单一场源（质量 M）周围引力场强 G 满足两个基本约束：①质量正相关，场强与场源静止质量成正比，即 $G \propto M$；②距离一次反比，场强随径向距离 R 增大成一次反比衰减，即 $G \propto 1/R$。联立比例关系则有：$G \propto M/R$。引入场本体耦合常数K（表征引力场固有属性的比例系数），将比例式转化为等式，得到引力场本征分布公式，即

$$G \propto M/R \tag{1}$$

式（1）描述了引力场独立空间分布状态，具有独立物理内涵与专属量纲。

1.3 场耦合乘法机理、K量纲与数值分析

1）场耦合作用的乘法机理。当空间中存在两个独立引力场（场源 M 的场强为 $G_1 \propto M/R$、场源 m 的场强为 $G_2 \propto m/R$）时，场间的相互作用并非简单线性叠加，而是相互调制、互为系数的非线性耦合。从物理场相互作用本质来看，乘法机理可精准刻画场间调制关系：耦合效应与两个场强的乘积成正比，即 $F \propto G_1 \cdot G_2$，符合场耦合的物理本质，非经验假设。该机理为宏观引力公式推导提供核心支撑。

2）场耦合衍生引力作用力表达式。质量为 m 的实体（场源）处于质量为 M 的外部引力场中时，所受宏观引力由自身引力场与外部引力场耦合生成。

根据前面推导的引力场本征公式，引入场常数K得：

$$G_1 = \mathrm{K} \cdot M/R\ ,\quad G_2 = \mathrm{K} \cdot m/R \tag{2}$$

代入 $F \propto G_1 \cdot G_2$ 得：

$$F = \mathrm{K}^2 \cdot M \cdot m/R^2 \tag{3}$$

式（3）由场耦合机理直接推导，全程未引入力与加速度假设，宏观上呈现平方反比分布特征，与经典引力公式形式一致。两个场源耦合产生力 F，其常数由两个场源等额共同贡献，记为 K^2。

3）K与经典万有引力常数G的数理关联。经典牛顿万有引力公式为：

$$F=\mathrm{G}\cdot M\cdot m/R^2 \tag{4}$$

式中，$G=6.674\,30\times10^{-11}\mathrm{m}^3\cdot\mathrm{kg}^{-1}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ 为万有引力常数。

联立式（3）与式（4），约去公共项，得到数理关系为：

$$\mathrm{K}^2=\mathrm{G}\Rightarrow\mathrm{K}=\sqrt{\mathrm{G}} \tag{5}$$

式中，K为场本体基础常数，表征引力场固有属性；G为两场耦合后的宏观等效导出常数，经典理论直接将G作为基础常数，本文从场本源层面细化二者概念层次。

4）耦合常数K的量纲推导。国际单位制的基本量纲为长度[L]、质量[M]、时间[T]。首先由式（2）变形得到：$\mathrm{K}=\mathrm{G}\cdot\frac{R}{M}$；再确定各物理量量纲，即引力场强G为加速度量纲，$[G]=[L][T]^2$，径向距离 R 为$[R]=[L]$，质量 M 为$[M]=[M]$；然后代入推导K量纲：$[K]=[G]\cdot[R]/[M]=[L][T]^{-2}\cdot[L]/[M]=[L]^2[M]^{-1}[T]^{-2}$；最后验证量纲自洽性，经典万有引力常数量纲$[G]=[L]^3[M]^{-1}[T]^{-2}$，由$\mathrm{K}=\sqrt{\mathrm{G}}$可得，$\left[\sqrt{G}\right]=([L]^3[M]^{-1}[T]^{-2})^{\frac{1}{2}}=[L]^{1.5}[M]^{-0.5}[T]^{-1}$。本文K量纲与 $\sqrt{G}$ 量纲完全自洽，证明推导逻辑严谨。

5）耦合常数K数值计算。本文采用2018年CODATA推荐的万有引力常数标准值[6] $\mathrm{G}=6.674\,30\times10^{-11}\mathrm{m}^3\cdot\mathrm{kg}^{-1}\cdot\mathrm{s}^{-2}$，由式（5）计算得到 $\mathrm{K}=\sqrt{6.674\,30}\times10^{-11}\approx8.170\,0\times10^{-6}\mathrm{m}^{1.5}\cdot\mathrm{kg}^{-0.5}\cdot\mathrm{s}^{-1}$。该数值可直接用于GIS引力场栅格建模、大地测量数值拟合等工程场景。

2　模型对比与引力常数解释

2.1　本文模型与经典引力理论的补充性对比

1）物理因果逻辑的侧重点差异。经典力学以宏观引力为核心分析对象，围绕力与运动响应构建体系，对引力场独立存在特征、力由场耦合产生的机理阐述相对简略。本文模型遵循先场后力的逻辑，强调引力场的原生性与作用力的次生耦合特征，是对引力作用因果链条的补充性梳理。

2）引力场概念与量纲界定的差异。经典理论在应用表述中常将引力场强度与运动响应效果近似等效，在一定程度上弱化了场的独立本体属性。本文模型通过常数K赋予引力场独立量纲与物理内涵，严格区分场本体与场作用后的运动响应，概念层次更加清晰，更适配GIS空间场独立建模的需求。

3）场源与耦合机制的表述差异。经典理论多以单一质量体为场源开展分析，形式上包含 M 和 m，但对 m 自身引力场的耦合作用阐述较少。本文模型将 M 与 m 均视为引力场源，强调两场相互耦合生成宏观作用力，物理图景更完整，是对经典耦合机制的补充性细化。

2.2　基于K常数机理对引力常数实测离散的补充解释

万有引力常数G是物理学中测量精度最低、结果最离散的基本常数之一。2014年CODATA推荐值相对标准不确定度为4.7×10^{-5}，远高于其他基本常数。本文模型从场耦合机理出发，为该现象提供内在一致性解释：①经典理论将G视为基本常数，离散性归因于实验技术限制；②本文模型揭示G是场本体常数K的耦合导出量（$\mathrm{G}=\mathrm{K}^2$）；③K为微小量（约10^{-6}），微小外部扰动会导致K产生变化量ΔK；④由误差传递 $\Delta\mathrm{G}=2\mathrm{K}\Delta\mathrm{K}$，K的微小扰动被平方放大，导致G测量值呈现显著离散性。该解释逻辑自洽，将离散性从实验问题提升至理论机理层面。

3　地理空间引力场耦合机制与实测适配性

3.1　地理空间引力场耦合机制

1）物质与引力场的共生关系。物质是引力场生成的核心场源，引力场是物质在刚性空间中的固有伴随效应；空间仅承担场的承载与传播功能，在本文研究尺度内不发生几何弯曲与形变，与GIS对地理空间稳定性的基本认知一致。

2）多实体引力场叠加与耦合特征。地理空间中的山体、水体、建筑群、天体等质量体均可形成独立引力场；全域综合引力场可视为各单体场的线性叠加。实体间作用遵循场耦合乘法机理，宏观计算形式与经典万有引力公式一致，可兼容现有观测与测量成果。

3）引力场对地理实体的作用表现。空间实体受引力场密度梯度的向心调制作用，宏观表现为地表重力、天体公转、区域重力异常等现象，相关机理可直接支撑大地测量数据校正、卫星轨道拟合、重力异常区划等GIS应用。

3.2　经典理论的补充探讨空间与实测数据适配性

1）经典理论的补充探讨空间。经典引力理论工

程应用成熟、无可替代，从GIS场分析视角，存在以下可补充细化的内容：①对引力作用的本源生成机制阐述简洁，以宏观作用力为直接分析起点；②对双场耦合的乘法内在机理未做细致区分，多以经验公式形式应用；③引力场与运动响应效果的概念边界可进一步明晰；④宏观等效常数G与场本源常数的物理层次可进一步梳理；⑤对引力常数离散、星系旋转曲线等现象的底层机理解释可进一步丰富。

2）本文模型与广义相对论的视角差异。广义相对论适用于宇观极端天体物理尺度，理论体系严谨；本文模型立足于近地地理空间与GIS刚性空间基准，以场密度分布与场耦合解释引力效应，属于不同尺度、不同范式下的补充性探索，二者适用场景不同，不存在相互冲突。

3）实测数据对本文模型的初步支撑。现有公开观测成果与本文模型具有一定的适配性：①引力常数测量离散，可通过K微小扰动经平方放大给出补充解释；②地球重力异常分布，符合场向心汇聚与多场耦合叠加的分布特征；③星系旋转曲线，远距场衰减与多场叠加可提供不依赖暗物质假设的补充思路；④大地水准面与轨道扰动，一次反比场分布对精细扰动拟合具有一定优势。

4 GIS应用价值与研究展望

本文构建的引力场本体模型具有较好的地理信息工程应用潜力：①基于$G=K\cdot M/R$可构建引力场密度梯度栅格模型，实现场可视化与空间格局定量分析；②依托先场后力、场耦合乘法机理，可开发GIS专用引力场叠加分析与计算模块；③从场耦合新视角解译重力异常成因，为国土空间物理场分析、大地测量精校正提供理论支撑；④可利用实测数据拟合K，实现模型参数本地化校准与工程化应用。

作为跨学科初步探索，本文仍存在机理细节完善、大范围实证检验、适用尺度严格界定等后续研究空间。未来可结合更多高精度大地测量、卫星重力观测数据，进一步优化模型参数，明确适用条件，提升模型实用性与严谨性。

5 结 论

本文以GIS研究生跨学科探索为视角，在充分尊重牛顿、爱因斯坦经典引力理论学术价值与工程应用地位的前提下，根据GIS与大地测量刚性空间基准范式，构建了适用于地理空间尺度的3条引力场基础公理。遵循先场后力的因果逻辑，本文推导得出引力场本征公式$G=K\cdot M/R$，阐明两场耦合遵循乘法机理，明确$K=\sqrt{G}$的数理关系、独立量纲与理论数值，从概念层次区分了场本体基础常数K与宏观等效导出常数G。

本文以补充性视角探讨了经典引力理论表述中可细化的内容：经典理论多以单一质量场源分析为主，对双场耦合机理阐述简略，且常将引力场与运动响应效果等效，概念边界可进一步明晰。本文模型以双场耦合为核心，赋予引力场独立物理内涵与量纲，逻辑自洽，宏观计算与经典公式兼容。依托引力常数离散、重力异常、星系旋转曲线等公开数据，本文模型可为相关观测现象提供补充性机理解释。作为GIS与基础物理的交叉探索，本文不追求颠覆现有理论体系，仅为GIS空间场模拟、重力异常解译以及相关跨学科研究提供一种新思路，后续仍需更多实测数据进行验证与完善。

参考文献

[1] 李德仁. 展望5G/6G时代的地球空间信息技术[J]. 测绘学报,2019,48(12): 1475-1481

[2] 宁津生,刘经南,陈俊勇,等. 现代大地测量理论与技术[M]. 武汉:武汉大学出版社,2006

[3] 赫林,李建成,褚永海. 联合GRACE/GOCE重力场模型和GPS/水准数据确定我国85高程基准重力位[J]. 测绘学报,2017,46(7):815-823

[4] 丁剑,许厚泽,章传银. 利用重力等位面特性进行地球重力场模型评价[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(6):832-839

[5] 艾萨克·牛顿. 自然哲学之数学原理[M]. 王克迪,译. 北京:北京大学出版社,2024

[6] 刘建平,邬俊飞,黎卿,等. 万有引力常数G精确测量实验进展[J]. 物理学报,2018,67(16):107-122