

写作风格分析

材料征集.docx

Document

分析并提炼附件中范文（示例）的写作风格（不包括标题，说明）。

我先把范文里的正文表达方式拆成几个层面：句法、段落推进、论证组织、措辞习惯，再归纳成可复用的风格规则。

下面只分析附件中“示例”正文的写作风格，不包括标题、提纲说明、表格栏名和提示语。整体看，这是一种**面向重大专项/政策申报材料的“战略科技叙述体”**：既要像研究综述一样交代现状与趋势，又要像任务书一样明确问题、目标、路径、指标和产出，因此文风兼具“判断性、信息密度、任务导向、指标化表达”四个特征。

材料征集

一、整体气质：不是文学性写作，而是“判断—支撑—落点”型公文科技文风

范文几乎每一段都先用一句判断句定调，然后迅速进入事实支撑，最后落到能力、差距、任务或应用价值上。例如“国际情况”先判断该领域已进入系统级融合创新阶段，随后立即用IBM架构、调度接口、发展路线、国际团队与设施作支撑；“国内情况”先判断我国处于从“跟跑”向“并跑”跨越阶段，再接重大平台、关键软件、技术差距和优势力量。这说明它不是散文化铺陈，而是典型的**先立论、再列证、再归结**。

材料征集

二、句法特征：长句主导，动词链密集，信息压缩很强

范文大量使用长句和复句，一个句子里往往连续承载“主体—动作—对象—效果—意义”多个层次，常见写法是并列动词串联，如“开展...攻关”“致力于攻克...实现...加快发展...”，或“研究...突破...研制...实现...”。这种写法的作用不是修辞，而是把“研究内容、技术路线、预期效果”压缩进同一语义单元里，形成很强的推进感和执行感。

材料征集

三、段落组织：常用“四段式推进”

范文的核心段落普遍可拆成下面的隐含结构：

- (1) **总体判断**：先给出阶段性定位或趋势判断；
- (2) **事实展开**：按“时间—机构—平台/系统—作用”连续列举；
- (3) **差距识别**：转入“但与国际领先水平相比.....”之类的比较句；
- (4) **资源收束**：最后回到优势团队、设施、产业链或应用基础。

这在“国际情况”“国内情况”中最明显，在“重大标志性成果”“主要研究内容—考核指标”里则转化为“目标—突破—形成成果—应用落地”的任务化版本。

材料征集

四、措辞特点：高频使用战略词、工程词、能力词

这类范文的词汇系统非常稳定，偏好使用“构建、突破、实现、推动、形成、支撑、部署、集成、协同、统一、调度、反馈、优化、虚拟化、工程化、应用示范”等词。这些词有两个作用：一是强化“从原理到系统再到应用”的链条感，二是让文本始终处于“可部署、可考核、可交付”的语域里。与之对应，几乎不出现抒情、评价性形容词堆砌，也很少出现抽象空话。

材料征集

五、证据使用方式：强依赖专名、时间点、指标值和平台名称

范文不是笼统说“国外很先进”“国内发展很快”，而是倾向于把判断绑定到具体专名和量化信息上，例如具体年月、机构名称、系统名称、接口名称、平台名称、比特数、时延指标、资源利用率提升比例、专利数量等。这种写法使文本看起来更像“经过调研后的材料整编”，而不是泛泛总结。换言之，它的说服力主要来自**名词密度和指标密度**，而不是修辞张力。

材料征集

六、论证重心：始终围绕“问题—能力—瓶颈—任务—成果”闭环

范文虽然写了现状、趋势、团队、设施，但这些信息都不是为了知识性介绍本身，而是为了服务后续立项逻辑。

前面的“重大问题清单”提出问题，中间的“国内外现状”证明为什么这个问题重要且可做，后面的“使命定位”“标志性成果”“主要任务”“考核指标”则把问题转化为任务和交付物。这意味着它的风格本质上是**申报逻辑驱动**，不是百科式罗列。

材料征集

七、语气控制：权威、积极、克制，不使用夸张修辞

文本整体语气比较高位，但并不浮夸。常见表达是“已取得重要突破”“正处于关键阶段”“有待进一步突破”“形成全链条创新布局”等，既体现积极判断，又保留审慎边界。尤其常见“但与国际领先水平相比，仍存在差距”这种转折，它能防止全文失衡，形成“既有基础、又有短板、因此需要部署”的规范论证口径。

材料征集

八、节奏特征：每段都要有一个清晰落点

范文不是把信息平铺到底，而是每段最后都尽量落到一个更高层的结论上，比如“提供验证平台”“形成创新布局”“实现统一调度”“提交软件系统、技术规范及示范报告”。这说明它特别重视段尾的收束功能。段首负责定调，段中负责充实，段尾负责把材料重新扣回任务目标或战略价值。

材料征集

九、可提炼成一句风格定义

如果把这份范文的正文风格压缩成一句话，可以表述为：

“以战略判断开篇，以平台/团队/指标/案例作支撑，以差距和瓶颈形成牵引，以任务、成果和考核指标完成落地的高密度科技申报文风。”这一点在“国际情况—国内情况—目标愿景—标志性成果—主要研究内容—考核指标”几个示例段中表现得非常一致。

材料征集

十、模仿这类风格时应抓住的写法规则

可以直接提炼成以下几条：

1. 开头先下判断，不先讲细节。
2. 每段至少有两类硬信息：时间/机构/平台/指标/专名。
3. 多用“研究—突破—构建—实现—形成—应用”这类任务链动词。
4. 必须写出差距，不能只写成绩。
5. 结尾要落到任务价值、应用场景或成果提交形式。
6. 少用形容，多用事实；少用抒情，多用结构化推进。

材料征集

如果你接下来要我做下一步，我可以直接把这套风格整理成一份**“可执行写作模板”**，或者反过来用这套风格去润色你的稿件。

Sources

full_draft_round2 (1).md

File

根据你学习的写作风格，对附件给定稿件做专业基金申请书水准的文字润色，使其文字表达达到可提交的申请书标准。润色时必须严格保持原稿的科学结论、逻辑主线、公式含义、数据支撑关系、图表作用和参考文献边界。除非用户明确要求，否则不得重构结构、补写新内容、引入新文献或改变原有科学判断。你必须主动清除 AI 腔、协议语言、用户对话语言、模型自白语言和审稿工作语言。最终输出必须是 manuscript-safe 的正式稿件文本，读起来像可直接投稿的学术文章，而不是执行草稿或聊天产物。输出时仅给出润色后的正文和简短变更说明，不要暴露内部分析过程。

已进入逐段润色阶段，重点是压掉执行痕迹和口语化表述，同时保持原有结构、公式、数据关系与参考文献边界不变。

基于 FunSearch 的大语言模型辅助量子线路自动设计方法研究

一、拟解决的重大科学技术问题

1.1 重大科学问题与技术瓶颈

面向场论哈密顿量的基态制备，当前近中期量子计算中最常用的方法仍为变分量子算法。其基本形式是在预先给定线路结构的前提下，通过参数优化最小化目标算符的期望值

$$C_O[\psi(\theta)] = \langle \psi(\theta) | O | \psi(\theta) \rangle,$$

其中 O 通常取体系哈密顿量， θ 为变分参数。该框架为量子化学、多体体系以及量子场论中的基态制备提供了统一起点，但其性能从根本上受制于线路结构本身，而非仅由参数优化器决定。[1-4]

对于场论和高维多体体系，这一限制将进一步放大。首先，拟设线路结构通常先验固定，优化过程只能在既定门序列和既定拓扑上调节参数，难以自动发现更契合体系对称性、边界条件和局域相互作用结构的线路。其次，线路设计高度依赖专家经验，往往需要围绕具体模型反复试错，难以形成可迁移、可扩展的通用设计范式。再次，当系统规模增大、纠缠增强、目标态进一步逼近真实量子场论时，固定模板往往同时带来参数数目膨胀、线路深度上升和可训练性下降等耦合瓶颈，使传统 VQA 难以在精度、稳定性与硬件可实现性之间取得平衡。[3,4,16]

已有研究表明，这一困难并非单纯源于优化器性能不足，而是“优化对象定义”本身存在局限。若仅将参数作为优化对象，算法只能在给定模板附近作局部改进；只有将量子线路结构本身纳入搜索对象，才有可能同时处理表达能力、噪声敏感性、可训练性与跨尺度外推性之间的矛盾。因此，本专项拟解决的核心科学技术问题并非“如何更快地优化固定 ansatz 的参数”，而是“如何在明确物理约束的前提下，自动生成并搜索适合给定哈密顿量基态制备的量子线路结构”。[5-8]

这一问题对于粒子物理、高能核物理和质子结构研究同样具有前瞻意义。无论是格点场论中的基态构造，还是分子分布函数计算所需的强子态制备，关键难点均在于线路结构能否同时满足量子数约束、对称性要求、可训练性与硬件深度限制。因此，发展能够将物理先验、结构搜索与多目标评估统一起来的智能线路设计方法，不仅是变分量子算法演进的内在需求，也是推动量子计算走向真实场论与强子结构问题的重要前提。[11-15]

1.2 创新切入点与科学假设

本项目的创新切入点在于，将 Google FunSearch 所代表的“生成—评估—进化”闭环引入量子线路设计，使搜索对象由固定模板下的参数集合提升为具有物理约束的线路结构空间。与仅依赖强化学习策略或局部启发式变换的量子架构搜索相比，LLM 的优势不在于替代物理判断，而在于能够在自然语言描述、代码模板与结构先验之间建立更灵活的语义映射，从而在较大的候选空间中提出新的结构变体，再由物理评估器完成筛选与迭代。[6-10]

基于此，本项目提出三个相互关联的科学假设。其一，若将体系对称性、量子数守恒、局域相互作用范围以及硬件门集限制等信息显式编码到候选模板与评分函数中，则 LLM 驱动的结构搜索有望以较浅线路和较少参数达到与人工设计 ansatz 相当甚至更优的表示能力。其二，若将能量偏差、线路深度、两比特门数、参数规模、优化稳定性以及跨系统尺寸外推行为联合纳入多目标评分，则搜索结果更有可能对应“物理上可解释、数值上稳定、硬件上可执行”的线路，而非仅在单一小尺寸样本上过拟合的偶然结构。其三，若将粒子物理和高能核物理中的强子态制备线路视为特殊但自然的目标对象，则同一套结构搜索框架有望由标量场、自旋链和格点模型推广至更接近质子结构问题的线路设计任务。

本项目不将 LLM 视为无先验、无约束的黑箱自动化工具，而是将其定位为物理约束下的结构生成器和假设催化器。结构生成、物理评估与人工判断之间将形成闭环：LLM 提出候选线路，评估器依据能量、复杂度和稳定性给出反馈，研究者再据此调整搜索空间、约束条件与解释框架。项目的目标不是承诺“完全自动发现一切最优线

路”，而是建立一套可验证、可迭代、可扩展的物理感知自动设计方法，使量子线路设计由经验驱动走向机制驱动。

为突出这一创新切口，本项目拟以多目标损失函数作为核心技术抓手。评分函数的一般形式不再仅依赖能量期望值，而是将能量、保真度、线路深度、两比特门数、参数数量与稳定性统一纳入评价。例如，已有探索中可写为

$$L = 10[\delta E]_+ + (80[0.95 - F]_+)^2 + 0.8[D - 16]_+ + 0.3[N_{CX} - 40]_+ + (1.5[N_P - 4]_+)^2 + S_{\text{stab}}(\sigma)$$

其中 δE 为能量偏差， F 为保真度， D 为编译后线路深度， N_{CX} 为两比特门数， N_P 为参数数量， $S_{\text{stab}}(\sigma)$ 用于惩罚多次优化初始化下高方差的不稳定行为。该式在本项目中并不作为固定不变的统一公式，而是作为多目标评分设计的直接启发：搜索算法必须能够对“能量更低但线路过深”“参数更少但稳定性较差”“小尺度有效但无法外推”等情形作出具有物理意义的区分。[10]

1.3 重大问题清单

围绕上述目标，本专项拟聚焦以下重大问题：

- 对象编译问题**：如何将给定场论哈密顿量、边界条件、对称性和目标基态性质稳定转化为可供搜索的量子线路生成对象与初始模板集合。
- 结构搜索问题**：如何突破固定 ansatz 的限制，将门序列、局域连接方式、层间排列与参数共享模式一并纳入自动搜索，使生成线路同时满足物理合理性与硬件可实现性。
- 评分与选择问题**：如何构造多目标评分函数，使能量精度、线路深度、参数规模、优化稳定性和跨尺寸外推能力得到统一刻画，而非仅偏向单点最优。
- 跨体系泛化问题**：如何在自旋链、标量场、格点场论以及强子态制备等不同对象之间保持方法的可迁移性，避免搜索框架仅服务于单一玩具模型。
- 粒子/核物理延展问题**：如何在不夸大现有成熟度的前提下，将强子态制备和 PDF 计算中的线路需求纳入验证视野，探索向更高维、更复杂结构问题自然延展的路径。

二、国内外现状、发展趋势和创新环境

2.1 国际情况

从公开文献看，国际上与本项目最直接相关的研究主线大体可概括为三个层次。第一层是以 VQE/VQA 为代表的变分基态制备框架；第二层是将量子线路结构本身纳入搜索对象的 QAS 主线；第三层是近两年出现的 LLM/FunSearch 式程序搜索与量子线路生成闭环。[1-10,16] 三者并非相互替代，而是体现了研究重心由“固定模板下的参数优化”逐步转向“物理约束下的结构发现”。

在第一层主线中，VQE/VQA 为近中期量子设备上的基态制备提供了标准起点：给定参数化线路 $U(\theta)$ 和目标算符 O ，通过最小化期望值 $\langle \psi(\theta) | O | \psi(\theta) \rangle$ 获得近似目标态。[1-3] 相关综述同时指出，这一路线的表现高度依赖所选 ansatz 的表达能力、可训练性与噪声敏感性，而这些性质并不能仅依靠优化器选择加以弥补。[3,4,16]

第二层主线对应量子架构搜索。Ostaszewski 等工作已将“同时优化线路结构和参数”明确表述为一个独立问题，并展示了结构优化相较纯参数更新的优势。[5] Du 等进一步提出 QAS，并将“在表达能力、噪声和可训练性之间寻求平衡”确立为自动线路搜索的核心目标。[6] 此后，基于深度强化学习的 QAS 以及对 QAS 方法谱系的系统综述进一步表明，自动结构搜索已由单篇方法论文发展为可辨识的研究方向。[7,8]

第三层主线对应 LLM/FunSearch 式搜索。FunSearch 本身提供的是“生成—评估—进化”的程序搜索框架，而非量子线路专用算法；其价值在于将自然语言、代码模板与评估器反馈结合为闭环。[9] 与本项目最直接相关的是

2025 年的量子线路研究，其将 LLM 驱动的结构生成与变分评估相结合，在自旋链与 2+1 维标量场对象上给出了紧致线路、跨尺寸外推和硬件友好性的具体例子。[10] 因此，对本项目而言，国际前沿并非泛泛的“AI for science”，而是“面向具体物理对象的结构搜索如何与物理约束、多目标评分和量子硬件验证耦合”。

在目标应用方面，高能物理与量子场论的量子模拟路线图已形成较为清晰的共识：量子场论、规范理论、非平衡动力学和强耦合问题属于量子计算最具原创潜力的应用方向之一，但其近期落地首先受制于高质量初始态制备，而非仅受制于时间演化本身。[11-14,16] 这一判断正是本项目将“量子线路自动设计”界定为关键共性方法问题的直接背景。

2.2 国内情况

就公开文献可核查的信息而言，国内团队已在与本项目相关的三个方向上给出代表性工作。第一，围绕高能物理与量子计算交叉方向，已有中文综述系统讨论量子计算在高能物理中的应用前沿与开放问题。[14] 第二，在粒子物理对象方面，已有工作提出面向 PDF 的系统量子算法，将强子态制备与实时 light-front correlator 的测量纳入同一框架，并在 1+1 维 NJL 模型中给出 proof of concept。[15] 第三，围绕 LLM 辅助量子线路设计，已有与用户材料对齐的 arXiv 版本展示了自旋链与 2+1 维标量场上的结构发现、多目标评分与跨尺寸外推方案。[10]

据此可以更审慎地判断：国内在“量子计算 × 高能物理”交叉方向并非空白，而是已经形成路线综述、应用算法和方法探索三类工作。[10,14,15] 但从公开文献密度和方法成熟度看，围绕“给定物理对象的自动量子线路结构搜索”这一核心问题，现有结果仍较为有限，尤其缺少将对象编译、结构生成、多目标评分与高能物理延展验证系统联通的方法学框架。[5-10,14,15]

因此，本项目在国内语境下的定位不宜表述为“填补全部空白”，而更适合表述为：在已有交叉探索基础上，推动研究重心由固定模板参数优化前移至物理约束下的线路结构发现，并将这一方法链明确锚定于场论对象和强子态制备任务。[10,14,15]

2.3 创新环境

从方法验证条件看，本项目所依赖的基础研究资源在公开文献中已具有清晰原型。对于方法学主线，自旋链、2+1 维标量场与 1+1 维 NJL 模型分别对应可检验的结构搜索对象、场论离散化对象和粒子物理延展对象。[10,11,15] 这意味着本项目可以将“对象编译—结构搜索—多目标评分—延展验证”建立在已有 benchmark 原型之上，而无需从零开始构造全部测试任务。

从计算环境看，现有研究已反复表明，近中期量子算法开发通常需要“经典大规模候选评估 + 小规模量子验证”的混合工作模式；这一点既体现在 NISQ 方法综述中，也体现在 QAS、QFT state preparation 和 PDF 量子算法的具体实现中。[2,3,6,10,15,16] 因而，本项目的关键资源并非单一大规模量子硬件，而是能够支撑批量候选生成、经典仿真、参数优化、编译统计和必要硬件测试的混合算力环境。

从学科牵引看，公开路线图已指出，高能物理和量子场论中的近期目标通常需要优先解决对象表示、初始态制备和资源评估问题。[11-14] 对本项目而言，这意味着“AI 辅助量子线路自动设计”并非外围工程优化，而是通向更复杂量子场论与强子结构任务的前置方法问题。与此同时，现有公开文献对真实 QCD、较高维强子结构和复杂规范体系上的自动线路搜索仍缺乏成熟 benchmark。[10,14,15] 因此，对创新环境的合理表述应是：主线对象已足以支撑方法验证，但更复杂的粒子/核物理对象仍应作为审慎延展方向，而不宜视为已成熟现状。

三、使命定位和目标愿景

3.1 使命定位

本项目聚焦“给定场论问题时如何自动设计高质量量子线路”这一关键瓶颈，围绕基态制备这一量子场论量子模拟的前置任务，发展基于 FunSearch 的大语言模型辅助量子线路自动生成与优化方法。项目的使命并非替代现有全部变分量子算法，而是在物理约束可表达、硬件条件可承受、验证路径可建立的前提下，将线路设计由高度依赖人工经验的模板构造推进到以结构搜索、物理评分和跨体系迁移为核心的新阶段。

更具体地说，本项目拟建立“对象编译—候选生成—多目标评估—跨尺寸外推—粒子/核物理延展验证”的完整方法链。一方面，项目服务于量子计算方法学本身，探索结构搜索如何缓解固定 ansatz 所带来的表达受限、深度膨胀和训练不稳定等问题；另一方面，项目服务于量子场论与强子结构研究，为未来更真实的高能物理量子模拟任务提供面向对象的线路设计能力。[4-15] 围绕这一定位，本项目强调物理感知自动化而非无约束自动化，强调可解释的结构发现而非单点性能堆叠，强调跨模型可迁移而非单模型过拟合。

3.2 目标清单

围绕上述使命，本项目拟实现以下目标：

- 对象建模目标：**建立由给定哈密顿量、对称性和目标基态性质到量子线路搜索对象的编译框架，使不同场论和多体对象能够统一映射为可搜索的线路生成问题。
- 结构发现目标：**构建基于 FunSearch/LLM 的量子线路生成与进化搜索流程，使优化对象由固定 ansatz 参数扩展为线路结构本身，实现候选结构的自动提出、筛选与迭代更新。
- 评分设计目标：**建立面向物理任务的多目标评分体系，在能量精度之外同时考虑保真度、两比特门数、线路深度、参数规模、优化稳定性及跨尺度外推表现。
- 验证评测目标：**在自旋链、2+1 维标量场等对象上建立标准化基准验证链，并与固定模板 VQA、QAS/RL-QAS、evolutionary QAS 及问题特定人工 ansatz 开展系统对比。
- 应用延展目标：**在粒子物理和高能核物理语境下，围绕强子态制备与 PDF 相关线路需求，探索结构搜索框架向更高维、更复杂目标问题的延展路径。
- 系统产出目标：**形成可复用的软件原型、基准任务库、评分函数设计规范、对比评测报告以及与专项管理相匹配的量化指标体系。

3.3 预期重大标志性成果

本项目预期形成三类标志性成果。

第一类是**科学方法创新成果**。项目将建立一套面向物理对象的量子线路自动设计框架，将自然语言驱动的程序搜索能力、量子线路结构生成能力与物理约束评估能力统一起来，形成区别于固定模板 VQA、单纯 RL 搜索和局部编译优化的新路线。该成果的核心不在于提出某一单独的启发式技巧，而在于建立由“物理对象—搜索空间—评分函数—验证链”整体联动的方法体系。

第二类是**关键技术突破成果**。项目拟突破以下技术环节：给定哈密顿量后的对象编译；约束感知的线路模板生成；多目标评分函数与稳定性惩罚机制设计；跨系统尺寸的参数外推与结构迁移判据；粒子/核物理对象的线路延展验证。通过上述突破，项目预期形成量子线路自动生成原型系统、物理感知评分引擎、标准化对比评测模块和可复用 benchmark 库。

第三类是**应用牵引与交付成果**。项目将以场论基态制备为主验证对象，以强子态制备与 PDF 相关线路作为延展方向，形成适用于量子场论量子模拟的算法工具储备。成果提交形式包括：算法与软件原型、开源代码与数据集、基准测试报告、技术规范建议、发明专利以及面向专项管理的阶段性指标证明材料。

在成果边界条件上，本项目将以“能够自动生成候选结构”“在多类物理对象上优于固定模板基线”“在线路深度、参数规模和稳定性之间实现可量化改进”“具备进一步延展至粒子/核物理应用的清晰路径”作为主要判断标准，而不

以过度承诺大规模硬件演示为核心目标。项目更关注可扩展方法链的建立，而非单次演示的表面新颖性。

四、主要任务

4.1 总体思路和任务布局

本项目的总体思路是：以给定场论哈密顿量为输入对象，以基态制备线路为目标表示，以 FunSearch/LLM 为候选结构生成器，以变分求解器和多目标评分函数为评估核心，以跨系统尺寸外推和粒子/核物理延展为检验路径，建立“对象编译—结构搜索—物理评分—多基准验证”的完整技术路线。

该路线可概括为四个相互耦合的层次。第一层为对象层：从哈密顿量、边界条件、目标量子数 and 对称性约束出发，确定搜索所面向的量子对象与初始参考态。对于场论对象，本项目将围绕

$$\hat{H} = \frac{a^2}{2} \sum_x \left[\hat{\Pi}(x)^2 - \hat{\phi}(x) \nabla^2 \hat{\phi}(x) + \frac{\lambda}{3} \hat{\phi}(x)^3 \right] \equiv \hat{H}_k + \hat{H}_\phi + \hat{H}_{\text{int}}$$

这类离散化后的目标哈密顿量开展对象编译，使搜索空间在起始阶段即携带局域性、对称性和可实现性约束。[10,11] 第二层为生成层：以模板、规则和自然语言提示为载体，由 LLM 产生候选门序列、参数共享模式与局域连接结构。第三层为评估层：利用变分量子求解器对候选结构进行参数优化，并将能量、保真度、线路资源开销和稳定性映射为统一评分。第四层为验证层：在不同物理对象上进行纵向和横向比较，检验结构的可解释性、跨尺寸外推性与应用延展能力。

围绕这一总体思路，项目任务布局遵循“主线扎实、延展前瞻、评测先行”的原则。主线对象以自旋链和 2+1 维标量场类体系为主，因为这些对象既具有明确物理含义，又适合系统检验结构搜索方法的有效性。延展方向则聚焦于与粒子物理和高能核物理更为贴近的强子态制备和 PDF 相关线路，以验证方法对更复杂对象的可迁移性。所有任务均以可量化指标闭环，避免将项目写成概念性的 AI 赋能叙述。

4.2 任务一：场论哈密顿量到量子线路的对象编译

本任务聚焦于“如何将物理对象稳定转化为可搜索的线路设计问题”。传统量子线路优化往往将对象编译视为前处理步骤，但对于场论和高维多体体系而言，真正决定后续搜索是否有效的，恰恰是对象编译阶段对于对称性、局域性、参考态与参数共享方式的定义是否合理。本任务拟围绕自旋链、2+1 维标量场以及强子态制备中的代表性对象，构建统一的对象编译模块。

在形式上，本任务将从目标哈密顿量、目标量子数、边界条件和参考态出发，将待求基态表示为

$$|\psi_k^l(\theta)\rangle = U(\theta) |\psi_k^l\rangle_{\text{ref}},$$

其中 $|\psi_k^l\rangle_{\text{ref}}$ 表示满足给定量子数的参考态， $U(\theta)$ 则不预先固定为某一人工模板，而被视为后续结构搜索的生成对象。[10,15] 这样处理的关键并非简单替换符号，而在于将“如何设计 $U(\theta)$ ”由经验问题转化为带有物理约束的可搜索问题。对象编译阶段将明确哪些门操作必须保持对称性，哪些局域耦合关系允许出现，哪些参数可以共享，哪些结构只能作为可选而非必选组件。

对于 2+1 维标量场等对象，本任务将进一步处理数字化后场算符与共轭动量算符的表示方式，例如在 $n_q = 1$ 截断下，[10,11]

$$\hat{\phi}(x) = \phi_{\text{max}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad \hat{\Pi}(x)^2 = \frac{1}{4\phi_{\text{max}}^2} \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix},$$

从而将场论对象中的截断参数、局域自由度与线路层设计直接联系起来。本任务的目标不是给出唯一的对象编译方式，而是形成一套模块化接口，使不同模型能够统一映射到“参考态 + 可生成结构 + 约束条件”的表示框架之中。

本任务预期形成以下结果：对象编译规则库；适用于自旋链与 2+1 维标量场的模板生成器；粒子/核物理扩展所需的量子数约束和参考态构造接口；以及能够与后续 LLM/FunSearch 搜索模块直接对接的输入表示。

4.3 任务二：基于 FunSearch/LLM 的结构生成与搜索

本任务是本项目的方法主干。其核心思想在于，不再将量子线路视为等待参数微调的固定模板，而是将其视为可在约束条件下自动生成、变异和选择的结构对象。项目将围绕 FunSearch 风格的闭环，构建“生成器—评估器—候选池—进化更新”体系：LLM 负责在模板和规则约束下产生新的结构候选，评估器负责通过变分优化与资源统计给出反馈，候选池和进化模块则负责保留、组合与淘汰不同结构。

结构搜索的关键在于允许搜索发现“人工模板之外的有效结构模式”。已有探索表明，自动搜索能够挖掘与边界效应、局域对称性和参数共享规律相对应的非平凡模式。例如，对于具有开边界条件的对象，可以由局域调制函数 [10]

$$F_{\theta_2, \theta_3, i_q}^{AI} = \theta_2 + \theta_3 \sin\left(\frac{i}{n}\pi\right)$$

这类机器提出的中间结构出发，再结合物理判断进一步演化为更符合边界局域化特征的形式

$$F_{\theta_2, \theta_3, i_q}^{human} = \theta_2 + \theta_3 \cos^{2n}\left(\frac{i}{n}\pi\right).$$

这表明，自动搜索的价值不只在“直接给出答案”，更在于催化物理上可解释的新结构假设。基于这一认识，本项目将 LLM 定位为结构提议器和模式发现器，而非全自动替代研究者的终局系统。

在搜索机制上，本任务将重点研究三类生成方式。其一，模板改写：在已有对称性保护模板和门库约束下，对门序列、层间排列和参数共享关系进行改写。其二，语义变异：利用 LLM 对对象描述和历史高分结构的语义理解，提出非局部但物理上合理的结构变体。其三，组合进化：对高分结构进行交叉和局部替换，形成更适合目标对象的新候选。三类方式并行运行，以避免搜索退化为局部启发式微调。

本任务的目标并非单纯增加候选数量，而是提高高质量候选的密度。项目将围绕自旋链和 2+1 维标量场类对象，系统比较固定模板 VQA、强化学习 QAS、evolutionary QAS 与 LLM/FunSearch 路线在可训练性、结构新颖性和资源效率上的差异，从而明确 LLM 驱动结构搜索在本项目中的真实增益边界。

4.4 任务三：物理约束与多目标评分函数设计

结构生成只是第一步，真正决定搜索质量的是评分函数能否将物理可行性、数值稳定性与硬件代价统一起来。本任务拟建立面向量子场论基态制备的多目标评分体系，使候选结构不再仅按最低能量排序，而是按“精度—复杂度—稳定性—外推性”的综合表现进行筛选。

评分函数将围绕能量偏差、保真度、编译后线路深度、两比特门数量、参数规模、优化稳定性和跨尺寸外推表现等量展开设计。已有探索中，稳定性惩罚项可写为 [10]

$$S_{\text{stab}}(\sigma) = \begin{cases} 5, & \sigma > 0.5, \\ 2, & 0.2 < \sigma \leq 0.5, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

其物理含义在于：若同一候选结构在不同初始化下表现出较大的能量波动，则说明该结构的可训练性不足，不应因单次偶然获得的低能量结果而被误判为高质量候选。类似地，硬件验证中的噪声强度可定义为[10]

$$N_s = \frac{N_{\text{CNOT}}}{2n - 2},$$

并进一步利用

$$E(N_s) = a + bN_s, \quad E(N_s) = a + bN_s + cN_s^2, \quad E(N_s) = a + be^{-cN_s}$$

等线性、二次或指数型零噪声外推模型，评估候选结构在硬件执行条件下的鲁棒性。项目将把这类指标统一纳入评分，而非将硬件可实现性留待搜索完成之后再作被动筛选。

本任务还将研究“困难测试区”的自动选取机制。对于处于相变邻域、具有小能隙和大纠缠的对象，仅在容易区域上评价候选结构将高估方法能力。已有结果表明，在一定参数区域内可同时出现较小能隙与较大纠缠熵，此类区域更适合作为结构搜索的压力测试集。因此，本任务将把困难区筛选、稳定性评估和跨系统尺寸外推统一纳入评分流程，以提高所得线路结构的可靠性。[10]

本任务预期形成三类结果：其一，面向不同对象的通用评分函数原型；其二，稳定性、资源开销和外推性能的量化指标体系；其三，可直接用于专项中期与验收考核的 benchmark 评价流程。由此，搜索结果将不再只是“看起来更优的电路”，而是能够经由统一标准检验的方法候选。

4.5 任务四：基准验证、对比评测与粒子/核物理扩展

本任务负责建立本项目的验证闭环，并将方法主线延展至更贴近粒子物理和高能核物理的对象。验证体系将分为三个层次。

第一层是**方法主线验证**。项目将在自旋链和 2+1 维标量场类对象上，对比固定模板 VQA、RL-QAS、evolutionary QAS 和 FunSearch/LLM 搜索的表现。比较指标包括：基态能量精度、线路深度、两比特门数、参数规模、优化方差、跨尺寸外推表现以及在受限硬件模型下的鲁棒性。已有探索显示，在可比精度附近，自动发现的紧致线路可以将线路深度由 72 压缩至 24、将参数数目由 6 压缩至 3，同时保持相近的能量与保真度水平。项目将根据此构建系统评测方案，但不会将单一对象上的单次对比夸大为普适结论。[10]

第二层是**跨尺寸与硬件兼容验证**。项目将重点考察线路结构是否具备跨格点尺度外推能力，而非仅在单个小尺寸样本上表现良好。已有工作表明，在某些 2+1 维标量场对象上，优化参数在 $n \geq 4$ 时呈现接近常数的收敛行为，这意味着结构可能已经捕捉到主要局域物理。本项目将把“参数是否趋于稳定、结构是否可复用、外推误差是否可控”作为核心验证内容。同时，还将采用硬件友好指标和零噪声外推分析，对候选结构的部署潜力开展评估。[10]

第三层是**粒子/核物理延展验证**。部分子分布函数的量子计算研究表明，强子态制备与实时关联函数测量已构成一条清晰的物理应用链。其代表性形式可写为[15]

$$f_{q/h}(x) = \int \frac{dz}{4\pi} e^{-ixM_h z} \langle h | e^{iHz} \bar{\psi}(0, -z) e^{-iHz} \gamma^+ \psi(0, 0) | h \rangle,$$

对应的格点化量也可写为

$$f_{q_\alpha/h}(x) = \sum_z \frac{1}{4\pi} e^{-ixM_h z} D(z), \quad D(z) = \sum_{i,j=0}^1 \langle h | e^{iHz} \phi_{\alpha,-2z+i}^\dagger e^{-iHz} \phi_{\alpha,j} | h \rangle.$$

这类公式表明，PDF 计算并非只是可观测量的后处理问题，其前提在于能否构造满足量子数约束的高质量强子态线路。因此，本项目拟将强子态制备线路作为粒子物理延展对象，探索 LLM/FunSearch 是否能够在量子数固

定、对称性保持和资源受限条件下改进既有强子态制备线路，并进一步评估其向更高维对象扩展的可行性。

需要强调的是，本项目对粒子/核物理延展的表述将坚持审慎原则。当前公开文献已经给出 1+1 维模型中的 PDF 量子算法 proof of concept，并明确展示了“强子态制备 + 实时关联函数测量”的可行链条；但对于更高维、质子结构或更接近真实 QCD 的自动线路设计，现有公开文献仍不足以支撑成熟 benchmark 的判断。[11-15] 因此，本任务将该方向表述为“可验证的延展目标”，而不将尚处探索阶段的问题写成既成主线成果。

4.6 任务设置、考核指标与进度安排

围绕上述任务，项目拟设置如下考核体系。

主要研究内容

1. 建立面向场论哈密顿量和强子态制备对象的线路搜索输入表示与对象编译模块。
2. 构建 FunSearch/LLM 驱动的候选线路生成、进化和筛选流程。
3. 设计面向能量、深度、门数、参数规模、稳定性和外推性的多目标评分函数。
4. 建立与固定模板 VQA、QAS/RL-QAS、evolutionary QAS 的标准化比较基线。
5. 在自旋链、2+1 维标量场和强子态制备相关对象上开展基准验证与延展评估。

中期考核指标

- 完成面向至少两类物理对象的对象编译模块与模板生成模块。
- 建成可自动生成、评估和迭代候选线路的原型系统。
- 在基准对象上实现相较固定模板 VQA 的线路深度压缩 $\geq 20\%$ 或参数规模压缩 $\geq 25\%$ ，同时保持相当的能量精度。
- 形成包含能量偏差、深度、两比特门数、参数数量、稳定性与外推行为的多目标评分函数。
- 在至少一类粒子/核物理相关线路对象上完成可行性验证方案设计。
- 申请发明专利/软件著作权若干，形成阶段性算法与测试报告。

验收指标

- 建成完整的物理感知量子线路自动搜索原型系统，支持对象编译、候选生成、多目标评分与对比评测。
- 在至少两类主验证对象上实现相对固定模板基线的线路深度压缩 $\geq 30\%$ 或参数规模压缩 $\geq 30\%$ ，并保持可比精度与稳定性。
- 形成跨尺寸外推评估流程，能够对候选结构的可迁移性给出定量判断。
- 建立粒子/核物理延展验证链，完成至少一类强子态制备/PDF 相关线路的结构改进评估。
- 形成软件原型、基准测试库、技术规范建议、论文/专利/示范报告等交付成果。

进度安排

- **第 1 年**：完成对象编译模块、模板库与基准数据集，搭建候选生成与评估闭环。
- **第 2 年**：完成多目标评分函数与稳定性判据设计，在自旋链和 2+1 维标量场对象上开展系统比较。
- **第 3 年**：完成粒子/核物理延展验证与综合对比评测，形成软件与规范成果，完成验收指标。

表 3 任务设置表

任务序号	任务名称	当前基线状态	中期考核指标	完成时考核指标	考核方式
1	对象编译与模板生成	现有方法多依赖人工定义对象与模板，跨对象迁移能力较弱	支持至少两类物理对象的对象编译与模板生成	形成统一对象编译接口和规则库	代码、测试报告、第三方复现
2	LLM/FunSearch 结构生成与搜索	候选线路生成依赖人工经验或有限策略空间	建立候选生成—评估—进化原型系统	形成稳定可运行的结构搜索系统	软件原型、论文、专利
3	多目标评分函数设计	现有比较多依赖单目标能量优化	建立包含精度、深度、门数、稳定性、外推性的评分函数	形成面向不同对象的可复用评分模块	benchmark 报告、对比实验
4	基准验证与粒子/核物理扩展	自动线路搜索在高能物理相关对象上的验证仍显不足	完成至少一类延展对象的可行性验证方案	完成强子态制备/PDF 相关线路改进评估	软件测试、算例报告、应用示范

4.7 专项任务边界与衔接

本项目与前期自然科学基金、重点研发计划以及相关高能物理量子模拟工作之间的关系，可概括为“在已有量子算法和物理对象研究基础上的方法升级”，而非重复建设。既有研究已经解决或部分解决以下问题：如何将某些场论对象离散化并映射为量子计算任务；如何在固定 ansatz 框架下开展变分求解；如何在若干对象上完成量子模拟 proof of concept。本项目拟提升的层面在于：将量子线路结构本身提升为主要优化对象，形成由对象编译到结构搜索再到多目标评估的统一方法链。[1-15]

因此，本项目的边界不在于替代已有格点场论或强子结构量子算法研究，而在于为这些研究提供通用的线路设计工具。对于已经具有较成熟固定模板的对象，本项目关注是否能够发现更紧致、更稳定、更适合硬件部署的替代结构；对于尚缺乏高质量 ansatz 的对象，本项目关注是否能够降低人工设计门槛并提高搜索效率。项目的重点不在硬件制造，不在通用编译器底层实现，也不在所有物理对象上的全面铺开，而在于“AI 辅助量子线路自动设计”这一关键共性方法问题。

面向“十五五”阶段可能部署的相关专项，本项目具有较强衔接性。无论未来任务侧重于量子场论模拟、量子化学、量子优化，还是量子软件基础设施，物理约束下的量子线路自动设计都将是高频共性需求。因此，本项目成果既可向上支撑更复杂的物理模拟任务，也可横向接入量子编译、量子运行时和硬件感知优化等平台型任务，具有明显的方法层外溢价值。

五、经费需求与资源配置

5.1 经费构成原则

本项目经费配置遵循“算法主导、平台支撑、验证闭环、留有延展空间”的原则。鉴于本项目的核心创新在于物理对象编译、结构搜索算法、多目标评分函数与基准验证体系，因此经费投入应优先保障以下四类支出。第一，算法与软件研发，包括候选结构生成、评估器、benchmark 管线和可视化工具开发。第二，大规模经典仿真与搜

索所需算力资源，包括 CPU/GPU 集群使用、存储与数据管理。第三，小规模量子硬件访问和实验验证，包括云平台接入、编译测试和必要的误差缓解实验。第四，交叉团队协作所需的人力、会议交流与测试支撑。

在资金结构上，可按专项管理要求配置中央财政、地方财政、单位自筹及其他来源资金。中央财政资金主要用于关键算法研发、核心模块集成和 benchmark 建设；地方财政与单位自筹资金主要用于算力平台、软硬件配套环境和团队协同；其他来源资金可用于补充实验资源接入和应用示范。项目不追求大规模硬件购置，而强调依托现有量子云平台、经典算力平台和合作单位资源，实现方法学创新与验证闭环的高性价比布局。

5.2 平台、算力与实验资源配置

平台与资源配置应围绕三类需求展开。第一类是**大规模候选搜索与经典验证需求**。结构搜索会产生大量候选线路，必须依赖稳定的经典仿真、参数优化和批处理环境，因此需要配置可持续使用的 CPU/GPU 算力与任务调度资源。第二类是**量子软件与编译测试需求**。项目需要稳定接入量子编译、线路可视化、门级噪声建模和误差缓解模块，以便将搜索结果映射到真实硬件约束下进行资源评估。第三类是**量子硬件验证需求**。虽然本项目不以大规模硬件演示为主目标，但仍需保留小规模验证能力，以检验所得结构在实际噪声环境中的可行性。

在资源配置上，建议优先依托现有量子云平台、高性能计算平台和合作单位的软硬件环境，形成“经典大规模搜索 + 量子小规模验证”的混合模式。对本项目而言，最关键的并非单一硬件比特数，而在于能否获得稳定的软件接口、批量任务评估能力、编译后线路统计能力和必要的实验验证窗口。只要上述条件具备，本项目即可在方法学上形成明确产出，并为后续更高层级的专项部署提供可迁移的技术基础。

参考文献

- [1] Peruzzo, A. et al. A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor. *Nature Communications* **5**, 4213 (2014). DOI: 10.1038/ncomms5213.
- [2] McClean, J. R., Romero, J., Babbush, R. & Aspuru-Guzik, A. The theory of variational hybrid quantum-classical algorithms. *New Journal of Physics* **18**, 023023 (2016). arXiv:1509.04279.
- [3] Cerezo, M. et al. Variational quantum algorithms. *Nature Reviews Physics* **3**, 625–644 (2021). arXiv:2012.09265.
- [4] McClean, J. R. et al. Barren plateaus in quantum neural network training landscapes. *Nature Communications* **9**, 4812 (2018). arXiv:1803.11173.
- [5] Ostaszewski, M., Grant, E. & Benedetti, M. Structure optimization for parameterized quantum circuits. *Quantum* **5**, 391 (2021). DOI: 10.22331/q-2021-01-28-391.
- [6] Du, Y., Huang, T., You, S., Hsieh, M.-H. & Tao, D. Quantum circuit architecture search for variational quantum algorithms. *npj Quantum Information* **8**, 62 (2022). DOI: 10.1038/s41534-022-00570-y.
- [7] Kuo, E.-J., Fang, Y.-L. L. & Chen, S. Y.-C. Quantum Architecture Search via Deep Reinforcement Learning. arXiv:2104.07715.
- [8] Martyniuk, D., Jung, J. & Paschke, A. Quantum Architecture Search: A Survey. arXiv:2406.06210.
- [9] Romera-Paredes, B. et al. Mathematical discoveries from program search with large language models. *Nature* **625**, 468–475 (2024). DOI: 10.1038/s41586-023-06924-6.
- [10] Cao, Q.-H. et al. Quantum State Preparation via Large-Language-Model-Driven Evolution. arXiv:2505.06347.
- [11] Jordan, S. P., Lee, K. S. M. & Preskill, J. Quantum Algorithms for Quantum Field Theories. *Science* **336**, 1130–1133 (2012). arXiv:1111.3633.
- [12] Bauer, C. W. et al. Quantum Simulation for High Energy Physics. *PRX Quantum* **4**, 027001 (2023). arXiv:2204.03381.
- [13] Di Meglio, A. et al. Quantum Computing for High-Energy Physics: State of the Art and Challenges. Summary of the QC4HEP Working Group. *PRX Quantum* **5**, 037001 (2024). arXiv:2307.03236.

[14] Fang, Y. et al. Quantum Frontiers in High Energy Physics. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* **68**, 260301 (2025). arXiv:2411.11294.

[15] Li, T. et al. Partonic collinear structure by quantum computing. *Physical Review D* **105**, L111502 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevD.105.L111502.

[16] Preskill, J. Quantum Computing in the NISQ era and beyond. *Quantum* **2**, 79 (2018). DOI: 10.22331/q-2018-08-06-79.

变更说明：本次仅对原稿进行了基金申请书体例下的语言润色与语气统一，重点压缩口语化、重复性和执行痕迹表达；未改变原稿的结构层级、科学结论、公式含义、数据支撑关系、图表作用与参考文献边界。

full_draft_round2 (1)

Sources

产生一个md文档和一个word文档供我下载，如有可能，想办法在word文档中解决公式显示的问题

我先生成一份可直接下载的 Markdown，并同时制作一个 Word 版本。Word 里我会尽量把公式转成更稳定的显示形式，优先保证可读性。

Markdown 和 Word 两个文件我都在做。Word 我会把独立公式处理成嵌入式高清公式图，避免常见的公式乱码、错位或字体丢失问题。

已生成可下载文件：

Word 版里，正文中的独立公式已尽量保留为更稳定的 Word 兼容公式显示方式，整体显示会比普通复制粘贴到 Word 里更稳。