直接线性化方法及其在液体火箭发动机管路装配中的应用

李　享　陈慕琪　张卫华　冯　超　李朝扬
首都航天机械有限公司　北京　100076

摘　要：液体火箭发动机管路具备柔性结构特征，装配过程受形变、约束耦合等因素影响，存在显著的非线性问题，极易产生装配偏差，制约精密装配作业开展。本文结合管路装配的非线性生成机理与作用特征，梳理直接线性化的数理理论与运行机制，完成适配管路装配场景的方法优化。将改良后的线性化技术融入建模、偏差校正、工序实施等工艺环节，有效化解非线性工况带来的装配难题，提升火箭管路装配的精度与工艺稳定性。

关键词：液体火箭发动机；管路装配；非线性特性；直接线性化；工艺优化

引言：液体火箭发动机管路是动力系统的核心组成构件，装配精度直接决定发动机运行可靠性与整体工作性能。管路薄壁异形的结构特点，让装配过程存在复杂的非线性变化，各类偏差累积会引发姿态偏移、对接失配等工艺问题。传统经验化装配模式难以适配高精度航天作业需求，亟需依托专业化数理方法改良装配工艺。引入直接线性化技术规整非线性参数，可有效改善管路装配工艺短板，适配精密航天装配作业标准。

1 液体火箭发动机管路装配非线性特性研究

1.1 管路结构形变的非线性产生机理

液体火箭发动机管路普遍采用薄壁异形结构，整体刚度分布并不均匀，自身具备较强的柔性特质。构件加工成型后，内部会留存细微残余应力，结构初始状态偏离标准设计数值。管路转运、摆放与装配就位阶段，外部夹持力、接触压力等多种外力会持续作用于构件表面。结构形变不会随外力增减呈现规整的比例变化，应力释放与形态重塑存在无序变化特征。载荷数值的细微浮动，都会引发不同程度的结构变形[1]。传统线性计算模式无法匹配这类不规则形变规律，结构产生的非线性形变会直接改变管路原始装配姿态，形成难以预判的初始装配偏差。

1.2 管路装配约束关系的非线性表现

液体火箭发动机管路装配作业包含空间坐标、对接角度、端面平整度、密封间隙等多重约束条件。各类约束条件相互交织制衡，构成复杂的装配约束体系。调整单一维度的装配参数，会间接牵动其余约束参数发生动态改变。参数之间不存在固定的比例对应关系，参数调整幅度无法通过固定公式推演预判。管路空间姿态微调过程中，端点位置偏移、弯曲角度变动、对接间隙波动，都会打破预设的标准化装配逻辑。复杂的约束耦合状态，让整体装配姿态的调整过程呈现显著的非线性变化特征。

1.3 管路装配全过程非线性影响因素

非线性变化问题贯穿火箭管路装配的全部作业流程，覆盖构件预处理、姿态校准、精准对接等多个核心环节。构件加工阶段产生的尺寸误差与形变缺陷，会改变管路初始结构状态，奠定非线性偏差的基础。工装夹持力度、人工对位角度的细微偏差，都会对柔性管路造成二次形变扰动。装配空间的微小环境波动、构件接触面的磨损差异，也会造成装配参数无序波动。各类影响因素相互交织叠加，不存在独立作用的单一变量，任意因素变动都会引发整体装配状态的复杂改变，持续放大非线性偏差的影响程度。

1.4 非线性特质对装配作业的作用规律

管路装配存在的非线性特质，会大幅干扰姿态匹配与精准对接的作业精度，让预设的标准化装配参数难以适配现场实际工况。常规线性求解思路无法适配柔性管路的复杂形变规律，传统人工调整方式难以彻底消除各类装配偏差。非线性产生的偏差会逐层传导至最终对接工序，引发端面错位、间隙失衡、姿态偏移等诸多装配问题。偏差的持续累积会降低管路装配的整体一致性，增加装配调试的作业次数与作业难度。明晰非线性特质的作用规律，可为直接线性化方法的落地应用、优化管路装配工艺提供扎实的理论依据。

2 直接线性化方法理论与实现机制

2.1 直接线性化方法基础理论

直接线性化方法是针对复杂变量求解形成的数值处理手段，多用于处理各类非线性工程问题的求解运算。该方法依托标准化数理逻辑搭建运算框架，摒弃复杂

迭代运算与冗余修正步骤，依托原始工况参数完成模型构建。运算逻辑围绕变量本身的变化规律展开，梳理参数偏差、形变扰动、约束干扰带来的数值波动。通过规整无序的变量变化状态，搭建可稳定运算的线性数理模型，实现复杂工程问题的简化求解[2]。整套理论框架具备较强的适用性，能够适配柔性构件形变、空间姿态偏差、多约束耦合等各类工程场景，为火箭管路装配的精度优化提供可靠理论支撑。

2.2 非线性问题线性转换原理

工程场景中的非线性问题多表现为变量无规律波动、参数比例失衡、约束关系无序变动等特征，难以通过常规数理方式精准求解。线性转换核心是对无序非线性参数进行规整与重构，拆分复杂耦合变量，剥离干扰性较强的偏差参数。对零散、无规则的工况数据进行有序梳理，重塑变量之间的对应关系。打破原有无序化的参数变动逻辑，建立稳定、可推演的线性运算关系。通过数理变换修正形变偏差与姿态扰动带来的数值偏移，将原本复杂的非线性装配问题转化为规范化线性求解模型，大幅降低管路装配偏差求解与校正的作业难度。

2.3 直接线性化方法实施流程

直接线性化方法的落地实施遵循严谨的分步作业逻辑，依托工况实际状态逐步完成模型构建与参数求解。首先完成现场装配参数的全面采集，收纳管路形变数据、空间姿态参数、约束边界条件等核心信息。对采集参数开展筛选梳理，剔除无效干扰数据，保留贴合装配实际的有效参数。依托梳理完成的数据搭建线性运算模型，完成非线性参数的线性转化。结合装配作业标准修正模型运算结果，输出精准的姿态调整与偏差校正参数。整套流程层层递进，可适配火箭管路装配的动态作业场景，保障运算结果的有效性与实用性。

2.4 直接线性化方法运行机理

直接线性化方法以参数规整、模型重构、精准求解为核心运行逻辑，针对性解决管路装配的非线性偏差问题。方法运行过程中，持续梳理装配变量的波动规律，弱化无序形变与多约束耦合带来的运算干扰。通过标准化数理变换修正参数偏移问题，重构稳定的参数运算体系。依托成型线性模型完成装配姿态、对接偏差、形变数值的快速求解，输出精准的工艺调整依据。该运行机理能够高效化解柔性管路装配的复杂非线性难题，为后续优化液体火箭发动机管路装配精度、简化调试流程提供可靠的技术支撑。

3 面向管路装配的直接线性化方法适配优化

3.1 管路装配非线性数学模型构建

液体火箭发动机管路属于柔性薄壁构件，装配过程涵盖空间位置、结构形变、边界约束等多重可变因素。标准线性数学模型无法完整覆盖这类复杂工况带来的参数波动。建模工作依托管路成型特性与装配工艺特点开展，结合柔性结构变形机理，搭建能够表征装配状态的非线性数学表达体系。梳理各类变量的耦合关联，厘清形变扰动、位置偏移、约束限制的数理表达形式。引入装配工况内部的可变扰动因子，真实还原管路在就位、对接、紧固全过程的参数变化状态[3]。完整精准的建模体系能够客观呈现装配变量的变化规律，为后续线性化处理与工艺优化提供可靠的数理支撑。

3.2 管路装配场景下的线性化适配规则

通用线性化处理方式针对常规工程场景设计，对火箭管路高精度装配场景适配度不足。专项适配规则可以填补通用算法与特种装配工况之间的适配差距。结合管路柔性形变特征与精密装配工艺要求，界定非线性参数转化的边界范围与筛选标准。针对姿态校正、端面匹配、形变修正等不同工艺环节，设定差异化的参数转化尺度。规范数据筛选、变量重构、数值修正的执行标准，规避无效扰动参数干扰运算进程。统一各类装配变量的转化逻辑，形成适配高精度管路装配的专属应用规范，保障线性化处理流程的规整性与有效性。

3.3 直接线性化方法运算逻辑优化

常规直接线性化运算框架存在流程繁琐、变量解析方式单一的短板，难以应对管路装配多变量耦合的复杂工况。运算优化工作聚焦参数处理路径与模型推演逻辑展开，删减低效重复的运算步骤，强化对耦合变量的拆分解析能力。微调参数修正逻辑，提升模型对细微形变误差、微小姿态偏移的识别精度。重置模型运算优先级，重点解析影响装配精度的核心变量，降低次要扰动参数对最终结果的干扰程度。优化后的运算框架具备更高的解析精度与运算效率，可满足火箭管路精细化装配的工艺执行标准。

3.4 线性化方法与管路装配场景的适配融合

线性化算法的技术优势需要结合实际工艺场景落地，才能转化为装配质量提升的技术动能。将优化后的线性化运算逻辑嵌入管路姿态调整、偏差修正、精准对接等核心工艺环节。用标准化数理解算方式替换传统依靠经验调试的作业模式，提升工艺调整的科学性。结合现场装配需求调整模型输出形式，让运算结果直接指导工艺调整工作。场景化融合模式能够有效消解非线性偏差带来的装配隐患，提升管路装配整体精度与工艺稳定性，推动液体火箭发动机管路装配工艺向精细化、标准

化方向升级。

4 直接线性化方法在管路装配中的工艺应用

4.1 管路装配建模中的线性化应用

液体火箭发动机管路装配建模是精密装配工作的前置核心环节，传统建模手段依托既定设计参数搭建模型，侧重理论结构还原，忽视柔性管路在装配过程中的形变扰动与边界约束变化。这类建模方式构建的理论模型，和现场实际装配状态存在明显偏差，无法精准反映管路空间形态与受力状态的动态变化。直接线性化方法可深度介入建模工作全过程，对装配场景中复杂的非线性形变参数与空间约束变量完成规整处理。通过规范的数理转换方式，拆解建模环节中相互耦合的多元变量，将无序波动的装配参数转化为规律可控的线性参数。建模环节融入线性化处理逻辑，能够修正传统模型自带的固有偏差，提升模型对结构形变、空间姿态、对接边界的还原精度[4]。可为后续工艺设计、偏差预判与精度调控提供可靠的模型支撑，筑牢管路精密装配的前期工作基础。

4.2 装配偏差校正中的线性化应用

液体火箭发动机管路属于高精密航天构件，装配作业中产生的细微结构形变、姿态偏移与对接间隙偏差，都会直接影响整体装配品质与设备运行安全性。传统偏差校正依托操作人员的行业经验完成调试修正，校正精度容易受人为因素干扰，缺少统一的数理支撑，频繁出现反复调试的情况。直接线性化方法可实现装配偏差的量化解算与精准校正，对管路装配产生的各类非线性偏差开展系统梳理与规整转化。精准区分结构形变、姿态定位、约束匹配等不同类型偏差的特征，梳理各类偏差的生成逻辑与影响权重。基于线性化运算结果制定针对性校正方案，替代传统经验化调试模式。量化的校正依据能够有效规避盲目调试引发的工艺波动，逐步消除各类装配精度缺陷，稳步提升管路对接匹配度与装配整体一致性。

4.3 装配工序实施中的线性化应用

液体火箭发动机管路装配工序繁杂，涵盖构件就位、姿态微调、端面对接、紧固定型等多个核心环节。不同工序的参数变化相互干扰，形成复杂的非线性作业状态。常规工序实施模式缺少科学的参数调控逻辑，工序衔接阶段容易累积参数偏移问题，拉低整体工艺质量。直接线性化方法可贯穿各项装配工序，为工序参数调控提供稳定的数理支撑。结合各工序的作业特点，对流程内波动参数开展线性规整，稳定各环节的参数运行状态。梳理工序推进过程中的参数变化规律，规避参数无序波动引发的工艺隐患。明确各工序的参数调整尺度与作业标准，削弱多工序叠加带来的偏差累积效应。规范的作业逻辑能够降低人为操作误差，让装配流程更加可控，保障各工序作业精度满足精密装配标准。

4.4 装配工艺落地中的线性化应用

管路装配工艺的落地质量，取决于参数调控的科学性与工艺执行的稳定性。传统工艺模式难以适配复杂多变的非线性装配工况，工艺执行稳定性较差，容易出现质量波动问题。直接线性化方法可以深度融入装配工艺体系，为现场工艺落地提供标准化技术支撑。将优化后的线性化运算逻辑嵌入工艺执行全流程，以规整后的线性参数指导现场作业，统一工艺调控的执行标准。打破传统工艺落地的经验化作业模式，让参数调整、精度管控、工艺优化均依托数理运算结果开展。持续完善工艺落地逻辑，提升装配工艺对复杂工况的适应能力，减少工艺执行阶段的质量波动。有效提升液体火箭发动机管路装配工艺的落地成效，全面优化装配精度与作业规范性，满足航天管路高精度装配的核心要求。

结束语

管路装配的非线性扰动是影响液体火箭发动机装配质量的关键因素，各类无序参数变化会持续干扰工艺实施效果。依托直接线性化技术完成非线性问题梳理、方法适配与工艺落地，能够有效规整装配参数、校正作业偏差，规范全流程装配工序。技术与工艺场景的深度融合，可持续改善传统装配模式的局限性，提升管路装配的精细化与标准化水平，为液体火箭发动机精密装配提供可靠的技术支撑。

参考文献

[1]穆朋刚,刘子俊,李斌潮,等.随机振动条件下液体火箭发动机管路焊缝寿命评估[J].火箭推进,2026,52(3):72-81.

[2]金辉,赵有磊,尚现伟,等.基于逾渗理论的液体火箭发动机管路接头密封性能研究[J].强度与环境,2022,49(6):1-10.

[3]张鹏,程云开,杨志松,等.液体火箭发动机供应系统水击特性仿真[J].现代机械,2023(3):6-10,38.

[4]董蒙,谭永华,邢理想,等.液体火箭发动机供应系统频率特性[J].航空动力学报,2023,38(1):230-239.