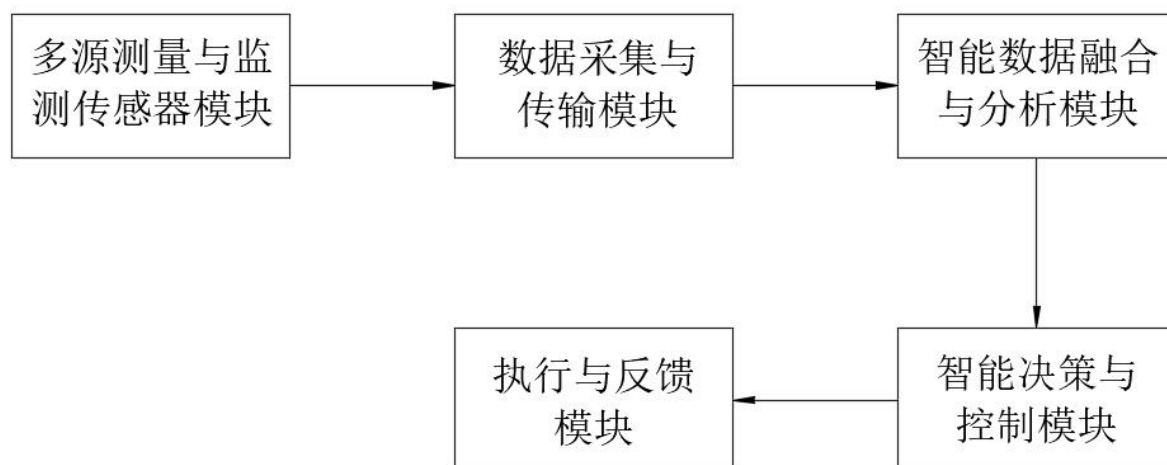


本发明涉及隧道工程施工技术领域，具体为隧道施工多源传感融合动态闭环控制系统及自适应纠偏方法，包括多源传感器模块、数据采集与传输模块、数据融合与分析模块、控制决策模块和执行机构与反馈模块；本发明通过多源传感融合技术，能够全面、准确地获取隧道施工的各种信息，实时监测施工偏差，将隧道施工的精度控制在更高水平，减少因施工偏差导致的后期整改成本，结合智能分析和预警功能，能够及时发现潜在的安全风险，提前采取措施进行处理，有效预防隧道坍塌等安全事故的发生，保障施工人员的生命安全。



1. 隧道施工多源传感融合动态闭环控制系统，其特征在于：包括多源测量与监测传感器模块、数据采集与传输模块、智能数据融合与分析模块、智能决策与控制模块和执行与反馈模块。

2. 根据权利要求 1 所述的隧道施工多源传感融合动态闭环控制系统，其特征在于：所述多源测量与监测传感器模块，包括激光测距传感器、陀螺仪、加速度计、压力传感器、位移传感器以及地质雷达等，激光测距传感器用于实时测量隧道掌子面与已施工段的距离，为施工进度监测提供数据，陀螺仪和加速度计安装在施工设备上，能够精确测量设备的姿态变化，包括角度、倾斜度等信息，压力传感器布置在隧道周边围岩和支护结构中，监测围岩压力和支护结构的受力情况，位移传感器则用于测量隧道衬砌和围岩的位移，及时发现潜在的变形风险，地质雷达可对前方一定范围内的地质情况进行探测，提前获取地质信息，地下水传感器监测地下水位、水压变化，此外，利用无人机搭载高清摄像设备对隧道洞口及周边环境进行定期监测，获取地形地貌变化信息，各类传感器协同工作，确保全面、准确地采集施工过程中的多源数据。

3. 根据权利要求 1 所述的隧道施工多源传感融合动态闭环控制系统，其特征在于：所述数据采集与传输模块，每个传感器采集到的数据经过初步的滤波和预处理后，包括去噪、滤波、数据补齐等操作，提高数据质量，通过有线或无线传输方式发送至中央控制单元，采用了冗余传输技术进行传输，同时，对传输的数据进行加密处理，防止数据在传输过程中被窃取或篡改。

4. 根据权利要求 1 所述的隧道施工多源传感融合动态闭环控制系统，其特征在于：所述智能数据融合与分析模块，中央控制单元接收到多源传感器数据后，首先进行数据格式转换和标准化处理，使不同类型的数据具有统一的格式，运用深度学习算法进行数据融合，利用卷积神经网络（CNN）对激光扫描数据、图像数据进行特征提取和融合，通过融合，能够更准确地反映隧道施工的实际状态，利用大数据分析技术对历史数据和实时数据进行深度挖掘，预测施工过程中可能出现的问题识别隧道衬砌表面的裂缝、缺陷等；通过长短期记忆网络（LSTM）对时间序列数据（如应变、压力随时间的变化）进行分析，预测数据趋势，结合大数据分析技术，建立隧道施工数据库，存储历史数据和实时数据，

为后续分析提供数据支持，同时，采用数据挖掘算法，从海量数据中挖掘出施工参数、地质条件与隧道变形、受力之间的潜在关系，为施工决策提供科学依据。

5. 根据权利要求 1 所述的隧道施工多源传感融合动态闭环控制系统，其特征在于：所述智能决策与控制模块，基于数据融合与分析结果，智能决策与控制模块运用专家系统和智能优化算法生成控制指令。当测量数据显示隧道出现偏差或监测数据预示存在安全风险时，系统自动启动决策程序，例如，若隧道掘进方向偏离设计路线，利用遗传算法结合地质条件和当前施工参数，计算出最优的纠偏方案，包括推进油缸的推力调整、刀盘转向角度等；若监测到围岩压力接近预警值，系统根据风险等级自动调整施工进度、加强支护措施，并给出具体的施工建议，如增加锚杆数量、喷射混凝土厚度等。

6. 根据权利要求 1 所述的隧道施工多源传感融合动态闭环控制系统，其特征在于：所述执行与反馈模块，控制指令通过执行机构作用于隧道施工设备和施工过程。执行机构包括盾构机的推进系统、刀盘驱动系统、支护设备等。执行操作后，相关数据再次通过传感器采集并反馈至数据采集与传输模块，形成动态闭环控制，例如，在纠偏过程中，实时监测盾构机的姿态和位置变化，根据反馈数据对纠偏参数进行动态调整，确保盾构机精确回到设计路线，同时，将施工过程中的各项数据记录下来，用于后续的施工分析和经验总结，不断优化系统决策模型。

7. 隧道施工多源传感融合动态的自适应纠偏方法，配套如权利要求 1-6 任意一项所述的隧道施工多源传感融合动态闭环控制系统，其特征在于：包括以下步骤：

S1、实时多源数据采集与偏差计算；

S2、偏差原因智能分析；

S3、精准纠偏策略制定；

S4、纠偏执行与动态调整。

8. 根据权利要求 7 所述的隧道施工多源传感融合动态的自适应纠偏方法，其特征在于：在所述 S1 中，在隧道施工过程中，多源传感器持续采集测量和监

测数据，将采集到的实时数据与设计标准进行比对，计算出隧道的位置偏差、姿态偏差、施工参数偏差等，例如，通过激光扫描测量仪获取的隧道断面数据与设计断面数据对比，计算出轮廓偏差；结合陀螺仪、加速度计和激光测距数据，确定盾构机的姿态偏差；对比实际掘进速度、推力等施工参数与设定参数，得出施工参数偏差。

9. 根据权利要求 7 所述的隧道施工多源传感融合动态的自适应纠偏方法，其特征在于：在所述 S2 中，一旦检测到偏差，系统立即启动智能分析程序。利用机器学习算法对多源数据进行深度挖掘，结合地质条件、施工工艺、设备运行状态等信息，分析偏差产生的原因，例如，若盾构机掘进方向偏差，系统分析地质数据判断是否遇到软硬不均地层，查看设备运行数据检查推进油缸压力是否均衡，追溯历史施工数据排查是否存在累计误差等。同时，参考专家知识库中的经验案例，对偏差原因进行综合判断，提高分析的准确性。

10. 根据权利要求 7 所述的隧道施工多源传感融合动态的自适应纠偏方法，其特征在于：在所述 S3 中，根据偏差原因和实时施工情况，智能决策与控制模块制定精准的纠偏策略，对于因地质条件引起的偏差，如遇到软土地层导致盾构机下沉，采取增加底部推进油缸推力、调整刀盘切削参数、改变出土量等组合措施进行纠偏；对于设备故障导致的偏差，如传感器故障影响测量精度，及时更换或校准传感器，并根据历史数据和备用传感器数据估算当前状态，调整施工参数维持施工稳定，在制定纠偏策略时，综合考虑施工成本、进度、质量以及对周边环境的影响，运用优化算法寻找最优纠偏方案，在所述 S4 中，纠偏策略通过执行机构实施，在执行过程中，传感器实时监测纠偏效果，如果纠偏效果未达到预期，系统重新分析偏差原因，调整纠偏策略，再次进行纠偏操作，直到偏差被控制在允许范围内，例如，在盾构机纠偏过程中，每隔一定时间间隔采集盾构机的姿态和位置数据，根据实际调整情况对纠偏参数进行微调，确保盾构机能够准确、平稳地回到设计路线上，同时，将纠偏过程中的数据记录下来，用于后续的施工分析和经验总结，不断优化自适应纠偏方法。

## 隧道施工多源传感融合动态闭环控制系统及自适应纠偏方法

### 技术领域

本发明涉及隧道工程施工技术领域，具体为隧道施工多源传感融合动态闭环控制系统及自适应纠偏方法。

### 背景技术

在隧道施工过程中，精确的测量、有效的监测以及及时的纠偏对于保障工程质量、安全和进度至关重要。传统的隧道施工技术在这些方面存在诸多缺陷。

现有测量技术手段有限，主要依赖全站仪、水准仪等常规测量仪器，测量内容局限于隧道的几何尺寸、位置等基础信息，难以获取围岩内部应力应变、地下水压力等关键数据。而且这些仪器受环境因素影响大，在光线不佳、湿度高、有振动的环境下测量精度严重下降，无法满足复杂地质条件下的高精度测量需求；

监测方面，监测设备分散，数据采集不全面，缺乏系统性，各类监测数据（如位移、沉降、支护结构受力等）未能有效整合，导致施工人员难以从整体上把握隧道施工状态。此外，监测频率往往固定，不能根据施工情况动态调整，容易错过关键变化信息；

在数据处理与分析上，多采用人工处理或简单的算法，难以应对海量且复杂的数据。无法及时准确地从多源数据中挖掘出有价值的信息，致使施工决策缺乏科学依据，无法有效指导施工；

纠偏措施也较为滞后和粗糙，通常是在偏差明显后才进行调整，且纠偏方案缺乏针对性，未充分考虑地质条件、施工工艺等因素，不仅影响施工进度和质量，还可能造成资源浪费，为此，提出隧道施工多源传感融合动态闭环控制系统及自适应纠偏方法。

### 发明内容

有鉴于此，本发明提供隧道施工多源传感融合动态闭环控制系统及自适应纠偏方法，以解决或缓解现有技术中存在的技术问题，至少提供一种有益的选择。

本发明的技术方案是这样实现的：隧道施工多源传感融合动态闭环控制系统，包括多源测量与监测传感器模块、数据采集与传输模块、智能数据融合与分析模块、智能决策与控制模块和执行与反馈模块。

进一步优选的，所述多源测量与监测传感器模块，包括激光测距传感器、陀螺仪、加速度计、压力传感器、位移传感器以及地质雷达等，激光测距传感器用于实时测量隧道掌子面与已施工段的距离，为施工进度监测提供数据，陀螺仪和加速度计安装在施工设备上，能够精确测量设备的姿态变化，包括角度、倾斜度等信息，压力传感器布置在隧道周边围岩和支护结构中，监测围岩压力和支护结构的受力情况，位移传感器则用于测量隧道衬砌和围岩的位移，及时发现潜在的变形风险，地质雷达可对前方一定范围内的地质情况进行探测，提前获取地质信息，地下水传感器监测地下水位、水压变化，此外，利用无人机搭载高清摄像设备对隧道洞口及周边环境进行定期监测，获取地形地貌变化信息，各类传感器协同工作，确保全面、准确地采集施工过程中的多源数据。

进一步优选的，所述数据采集与传输模块，每个传感器采集到的数据经过初步的滤波和预处理后，包括去噪、滤波、数据补齐等操作，提高数据质量，通过有线或无线传输方式发送至中央控制单元，采用了冗余传输技术进行传输，同时，对传输的数据进行加密处理，防止数据在传输过程中被窃取或篡改。

进一步优选的，所述智能数据融合与分析模块，中央控制单元接收到多源传感器数据后，首先进行数据格式转换和标准化处理，使不同类型的数据具有统一的格式，运用深度学习算法进行数据融合，利用卷积神经网络（CNN）对激光扫描数据、图像数据进行特征提取和融合，通过融合，能够更准确地反映隧道施工的实际状态，利用大数据分析技术对历史数据和实时数据进行深度挖掘，预测施工过程中可能出现的问题识别隧道衬砌表面的裂缝、缺陷等；通过长短期记忆网络（LSTM）对时间序列数据（如应变、压力随时间的变化）进行分析，预测数据趋势，结合大数据分析技术，建立隧道施工数据库，存储历史数据和

实时数据，为后续分析提供数据支持，同时，采用数据挖掘算法，从海量数据中挖掘出施工参数、地质条件与隧道变形、受力之间的潜在关系，为施工决策提供科学依据。

进一步优选的，所述智能决策与控制模块，基于数据融合与分析结果，智能决策与控制模块运用专家系统和智能优化算法生成控制指令。当测量数据显示隧道出现偏差或监测数据预示存在安全风险时，系统自动启动决策程序，例如，若隧道掘进方向偏离设计路线，利用遗传算法结合地质条件和当前施工参数，计算出最优的纠偏方案，包括推进油缸的推力调整、刀盘转向角度等；若监测到围岩压力接近预警值，系统根据风险等级自动调整施工进度、加强支护措施，并给出具体的施工建议，如增加锚杆数量、喷射混凝土厚度等。

进一步优选的，所述执行与反馈模块，控制指令通过执行机构作用于隧道施工设备和施工过程。执行机构包括盾构机的推进系统、刀盘驱动系统、支护设备等。执行操作后，相关数据再次通过传感器采集并反馈至数据采集与传输模块，形成动态闭环控制，例如，在纠偏过程中，实时监测盾构机的姿态和位置变化，根据反馈数据对纠偏参数进行动态调整，确保盾构机精确回到设计路线，同时，将施工过程中的各项数据记录下来，用于后续的施工分析和经验总结，不断优化系统决策模型。

隧道施工多源传感融合动态的自适应纠偏方法，包括以下步骤：

- S1、实时多源数据采集与偏差计算；
- S2、偏差原因智能分析；
- S3、精准纠偏策略制定；
- S4、纠偏执行与动态调整。

8. 根据权利要求7所述的隧道施工多源传感融合动态的自适应纠偏方法，其特征在于：在所述S1中，在隧道施工过程中，多源传感器持续采集测量和监测数据。将采集到的实时数据与设计标准进行比对，计算出隧道的位置偏差、姿态偏差、施工参数偏差等，例如，通过激光扫描测量仪获取的隧道断面数据与设计断面数据对比，计算出轮廓偏差；结合陀螺仪、加速度计和激光测距数据，确定盾构机的姿态偏差；对比实际掘进速度、推力等施工参数与设定参数，



得出施工参数偏差。

进一步优选的，在所述 S2 中，一旦检测到偏差，系统立即启动智能分析程序，利用机器学习算法对多源数据进行深度挖掘，结合地质条件、施工工艺、设备运行状态等信息，分析偏差产生的原因，例如，若盾构机掘进方向偏差，系统分析地质数据判断是否遇到软硬不均地层，查看设备运行数据检查推进油缸压力是否均衡，追溯历史施工数据排查是否存在累计误差等。同时，参考专家知识库中的经验案例，对偏差原因进行综合判断，提高分析的准确性。

进一步优选的，在所述 S3 中，根据偏差原因和实时施工情况，智能决策与控制模块制定精准的纠偏策略，对于因地质条件引起的偏差，如遇到软土地层导致盾构机下沉，采取增加底部推进油缸推力、调整刀盘切削参数、改变出土量等组合措施进行纠偏；对于设备故障导致的偏差，如传感器故障影响测量精度，及时更换或校准传感器，并根据历史数据和备用传感器数据估算当前状态，调整施工参数维持施工稳定，在制定纠偏策略时，综合考虑施工成本、进度、质量以及对周边环境的影响，运用优化算法寻找最优纠偏方案，在所述 S4 中，纠偏策略通过执行机构实施，在执行过程中，传感器实时监测纠偏效果，如果纠偏效果未达到预期，系统重新分析偏差原因，调整纠偏策略，再次进行纠偏操作，直到偏差被控制在允许范围内，例如，在盾构机纠偏过程中，每隔一定时间间隔采集盾构机的姿态和位置数据，根据实际调整情况对纠偏参数进行微调，确保盾构机能够准确、平稳地回到设计路线上，同时，将纠偏过程中的数据记录下来，用于后续的施工分析和经验总结，不断优化自适应纠偏方法。

本发明实施例由于采用以上技术方案，其具有以下优点：

一、本发明通过多源传感融合技术，能够全面、准确地获取隧道施工的各种信息，实时监测施工偏差，将隧道施工的精度控制在更高水平，减少因施工偏差导致的后期整改成本，结合智能分析和预警功能，能够及时发现潜在的安全风险，提前采取措施进行处理，有效预防隧道坍塌等安全事故的发生，保障施工人员的生命安全。

二、本发明自适应纠偏方法能够快速响应施工偏差，及时调整施工参数，避免因偏差积累导致的施工停滞，同时，通过优化施工决策，合理安排施工进

度，提高施工设备的利用率，从而显著提升隧道施工的整体效率，缩短施工周期。

三、本发明智能数据融合与分析模块借助深度学习算法和大数据技术，对海量多源数据进行深度挖掘和分析，从中提炼出有价值的信息，为智能决策提供科学依据，智能决策与控制模块依据这些分析结果，迅速制定精准、高效的施工决策和控制指令，在面对施工偏差时，能够快速响应并生成最优纠偏方案，显著提升施工效率，减少施工时间和成本的不必要损耗，实现施工资源的优化配置，推动施工管理向智能化、高效化迈进。

上述概述仅仅是为了说明书的目的，并不意图以任何方式进行限制。除上述描述的示意性的方面、实施方式和特征之外，通过参考附图和以下的详细描述，本发明进一步的方面、实施方式和特征将会是容易明白的。

## 附图说明

为了更清楚地说明本申请实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本申请的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

图1为本发明的系统模块图；

图2为本发明的方法流程图。

## 具体实施方式

在下文中，仅简单地描述了某些示例性实施例。正如本领域技术人员可认识到的那样，在不脱离本发明的精神或范围的情况下，可通过各种不同方式修改所描述的实施例。因此，附图和描述被认为本质上是示例性的而非限制性的。

下面结合附图对本发明的实施例进行详细说明。

如图1-2所示，本发明实施例提供了隧道施工多源传感融合动态闭环控制系统，包括多源测量与监测传感器模块、数据采集与传输模块、智能数据融合与分析模块、智能决策与控制模块和执行与反馈模块。

在一个实施例中，多源测量与监测传感器模块，包括激光测距传感器、陀螺仪、加速度计、压力传感器、位移传感器以及地质雷达等，激光测距传感器用于实时测量隧道掌子面与已施工段的距离，为施工进度监测提供数据，陀螺仪和加速度计安装在施工设备上，能够精确测量设备的姿态变化，包括角度、倾斜度等信息，压力传感器布置在隧道周边围岩和支护结构中，监测围岩压力和支护结构的受力情况，位移传感器则用于测量隧道衬砌和围岩的位移，及时发现潜在的变形风险，地质雷达可对前方一定范围内的地质情况进行探测，提前获取地质信息，地下水传感器监测地下水位、水压变化，此外，利用无人机搭载高清摄像设备对隧道洞口及周边环境进行定期监测，获取地形地貌变化信息，各类传感器协同工作，确保全面、准确地采集施工过程中的多源数据。

在一个实施例中，数据采集与传输模块，每个传感器采集到的数据经过初步的滤波和预处理后，包括去噪、滤波、数据补齐等操作，提高数据质量，通过有线或无线传输方式发送至中央控制单元，采用了冗余传输技术进行传输，同时，对传输的数据进行加密处理，防止数据在传输过程中被窃取或篡改。

在一个实施例中，智能数据融合与分析模块，中央控制单元接收到多源传感器数据后，首先进行数据格式转换和标准化处理，使不同类型的数据具有统一的格式，运用深度学习算法进行数据融合，利用卷积神经网络（CNN）对激光扫描数据、图像数据进行特征提取和融合，通过融合，能够更准确地反映隧道施工的实际状态，利用大数据分析技术对历史数据和实时数据进行深度挖掘，预测施工过程中可能出现的问题识别隧道衬砌表面的裂缝、缺陷等；通过长短期记忆网络（LSTM）对时间序列数据（如应变、压力随时间的变化）进行分析，预测数据趋势，结合大数据分析技术，建立隧道施工数据库，存储历史数据和实时数据，为后续分析提供数据支持，同时，采用数据挖掘算法，从海量数据中挖掘出施工参数、地质条件与隧道变形、受力之间的潜在关系，为施工决策提供科学依据。

在一个实施例中，智能决策与控制模块，基于数据融合与分析结果，智能决策与控制模块运用专家系统和智能优化算法生成控制指令。当测量数据显示隧道出现偏差或监测数据预示存在安全风险时，系统自动启动决策程序，例如，

若隧道掘进方向偏离设计路线，利用遗传算法结合地质条件和当前施工参数，计算出最优的纠偏方案，包括推进油缸的推力调整、刀盘转向角度等；若监测到围岩压力接近预警值，系统根据风险等级自动调整施工进度、加强支护措施，并给出具体的施工建议，如增加锚杆数量、喷射混凝土厚度等。

在一个实施例中，执行与反馈模块，控制指令通过执行机构作用于隧道施工设备和施工过程。执行机构包括盾构机的推进系统、刀盘驱动系统、支护设备等。执行操作后，相关数据再次通过传感器采集并反馈至数据采集与传输模块，形成动态闭环控制，例如，在纠偏过程中，实时监测盾构机的姿态和位置变化，根据反馈数据对纠偏参数进行动态调整，确保盾构机精确回到设计路线，同时，将施工过程中的各项数据记录下来，用于后续的施工分析和经验总结，不断优化系统决策模型。

隧道施工多源传感融合动态的自适应纠偏方法，包括以下步骤：

- S1、实时多源数据采集与偏差计算；
- S2、偏差原因智能分析；
- S3、精准纠偏策略制定；
- S4、纠偏执行与动态调整。

8. 根据权利要求7的隧道施工多源传感融合动态的自适应纠偏方法，其特征在于：在S1中，在隧道施工过程中，多源传感器持续采集测量和监测数据。将采集到的实时数据与设计标准进行比对，计算出隧道的位置偏差、姿态偏差、施工参数偏差等，例如，通过激光扫描测量仪获取的隧道断面数据与设计断面数据对比，计算出轮廓偏差；结合陀螺仪、加速度计和激光测距数据，确定盾构机的姿态偏差；对比实际掘进速度、推力等施工参数与设定参数，得出施工参数偏差。

在一个实施例中，在S2中，一旦检测到偏差，系统立即启动智能分析程序，利用机器学习算法对多源数据进行深度挖掘，结合地质条件、施工工艺、设备运行状态等信息，分析偏差产生的原因，例如，若盾构机掘进方向偏差，系统分析地质数据判断是否遇到软硬不均地层，查看设备运行数据检查推进油缸压力是否均衡，追溯历史施工数据排查是否存在累计误差等。同时，参考专家知

识库中的经验案例，对偏差原因进行综合判断，提高分析的准确性。

在一个实施例中，在 S3 中，根据偏差原因和实时施工情况，智能决策与控制模块制定精准的纠偏策略，对于因地质条件引起的偏差，如遇到软土地层导致盾构机下沉，采取增加底部推进油缸推力、调整刀盘切削参数、改变出土量等组合措施进行纠偏；对于设备故障导致的偏差，如传感器故障影响测量精度，及时更换或校准传感器，并根据历史数据和备用传感器数据估算当前状态，调整施工参数维持施工稳定，在制定纠偏策略时，综合考虑施工成本、进度、质量以及对周边环境的影响，运用优化算法寻找最优纠偏方案，在 S4 中，纠偏策略通过执行机构实施，在执行过程中，传感器实时监测纠偏效果，如果纠偏效果未达到预期，系统重新分析偏差原因，调整纠偏策略，再次进行纠偏操作，直到偏差被控制在允许范围内，例如，在盾构机纠偏过程中，每隔一定时间间隔采集盾构机的姿态和位置数据，根据实际调整情况对纠偏参数进行微调，确保盾构机能够准确、平稳地回到设计路线上，同时，将纠偏过程中的数据记录下来，用于后续的施工分析和经验总结，不断优化自适应纠偏方法。

以上所述，仅为本发明的具体实施方式，但本发明的保护范围并不局限于此，任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内，可轻易想到其各种变化或替换，这些都应涵盖在本发明的保护范围之内。因此，本发明的保护范围应以所述权利要求的保护范围为准。

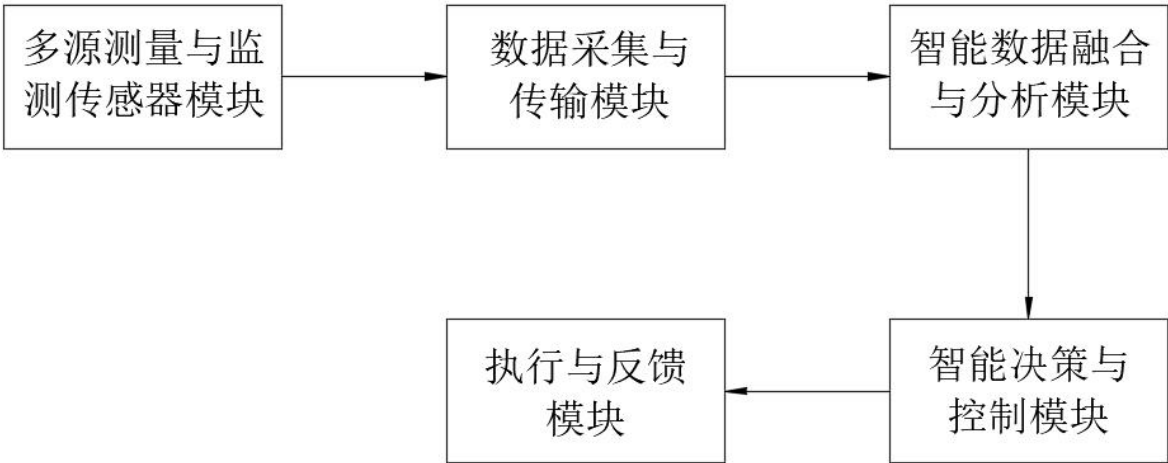


图 1

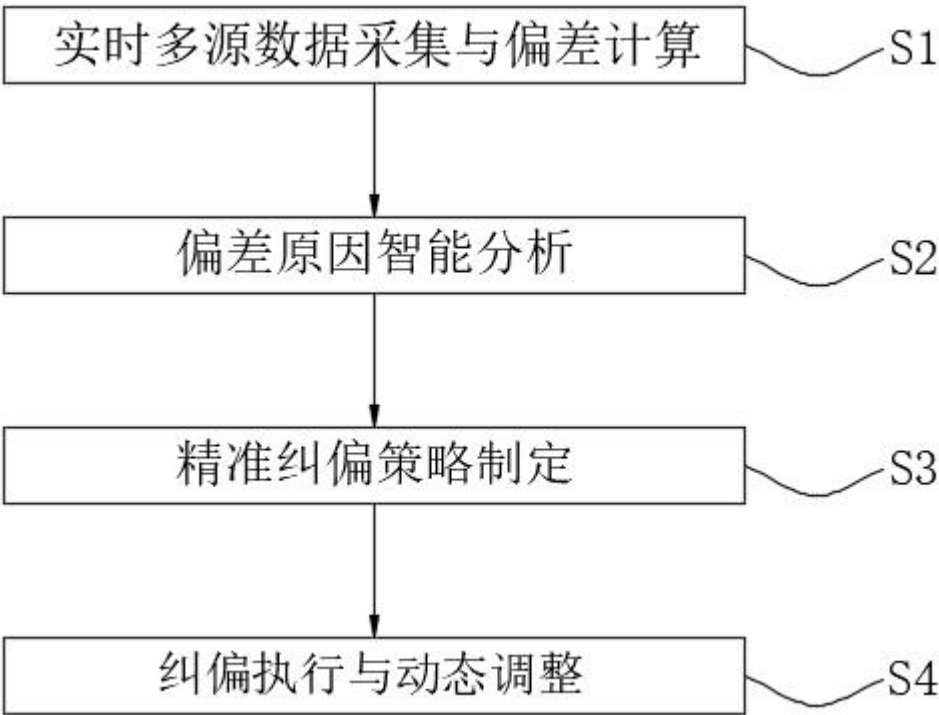


图 2