

电动平衡车双轮驱动协同控制算法优化与稳定性提升研究

钊子奇

浙江群英车业有限公司 浙江 丽水 323000

【摘要】：电动平衡车作为一种融合机械结构、动力系统与控制技术的智能移动设备，凭借其便捷灵活的特性在短途出行领域得到广泛应用。双轮驱动系统作为平衡车的核心执行单元，其协同控制效果直接决定车辆的运行稳定性与操控安全性。当前双轮驱动控制中普遍存在负载分配不均、动态响应滞后及抗干扰能力不足等问题，制约了平衡车性能的进一步提升。本文以双轮驱动协同控制为核心研究方向，针对传统控制算法的缺陷，提出基于模糊PID的协同控制优化方案，通过构建动力学模型明确双轮耦合关系，引入速度偏差与负载差异作为反馈参数，实现控制参数的动态调整。同时结合姿态感知数据优化稳定性判定机制，增强车辆在复杂工况下的自适应能力。研究表明，优化后的控制算法可有效提升双轮驱动协同性，降低姿态波动幅度，为电动平衡车的性能升级提供理论支撑。

【关键词】：电动平衡车；双轮驱动；协同控制；模糊PID；稳定性提升

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.030

1 引言

在智能化出行工具快速发展的当下，电动平衡车以其紧凑的结构、低能耗的优势，成为城市短途通勤、休闲娱乐的重要选择。与传统轮式车辆不同，电动平衡车采用自平衡原理实现稳定运行，其双轮驱动系统不仅承担动力输出功能，还需通过协同调节维持车身姿态，这对控制算法的精准性与实时性提出了极高要求。随着用户对出行安全性、舒适性需求的提升，传统控制算法在应对负载变化、路面波动等复杂场景时，逐渐暴露出双轮驱动力分配不协调、姿态校正滞后等问题，容易导致车辆晃动、操控失灵等风险。因此，开展双轮驱动协同控制算法优化研究，提升车辆运行稳定性，具有重要的理论价值与实际意义。当前相关研究多侧重于单一控制策略的应用，缺乏对双轮耦合关系与动态工况适应性的系统考量，如何构建兼顾协同性与稳定性的控制体系，成为推动电动平衡车技术发展的关键突破点。

2 电动平衡车双轮驱动系统的核心特性与控制需求

电动平衡车的双轮驱动系统由两个独立的驱动单元、传动机构及控制模块组成，其核心特性体现在耦合性、动态性与不确定性三个方面。耦合性是双轮驱动系统最显著的特征，两个驱动轮共享同一车身载体，车轮的转速、扭矩变化会通过车身相互影响，例如单侧车轮遇到阻力时，若控制算法未及时调整另一侧车轮的输出，会导致车身姿态倾斜。这种耦合关系使得双轮驱动控制无法简单等同于两个独立驱动系统的叠加，必须建立协同机制实现驱动力的动态匹配。

动态性则源于车辆运行过程中的工况变化，包括用户骑行姿态的调整、行驶速度的增减以及路面状况的波动。用户在转向、加速或减速时，会通过身体重心的偏移向系统传递控制意图，这就要求驱动系统能够快速响应重心变化，通过调节双轮转速差实现转向，通过同步增减扭矩实现加速或减速。而路面

的颠簸、坡度变化会导致车轮负载发生瞬时波动，进一步增加了驱动系统的动态控制难度。

不确定性是双轮驱动系统控制面临的另一重要挑战，主要包括机械结构的制造误差、部件磨损以及外部环境的干扰。例如，双轮驱动单元的电机参数可能存在细微差异，传动机构的摩擦系数会随使用时间增加而变化，这些因素会导致相同控制指令下双轮的实际输出存在偏差。同时，风力、地面摩擦力的不均匀分布等外部干扰，也会影响系统的控制精度。

基于上述特性，双轮驱动系统的控制需求主要集中在三个方面。一是协同性需求，要求双轮驱动力输出能够根据工况变化实现动态均衡，避免出现单侧过载或动力不足的情况；二是响应性需求，系统需在毫秒级时间内完成对姿态变化、负载波动的感知与控制指令的调整，确保车身姿态的快速校正；三是稳定性需求，在面对不确定性因素时，控制算法需具备一定的抗干扰能力，维持车辆运行状态的平稳，避免出现姿态失稳或操控失灵。

3 基于模糊PID的双轮驱动协同控制算法优化设计

基于上述优化方向，本文提出基于模糊PID的双轮驱动协同控制算法，通过融合模糊控制的自适应能力与PID控制的精准调节特性，构建“姿态感知-协同决策-精准控制”的闭环控制体系，实现双轮驱动协同性与车辆稳定性的同步提升。

算法的核心设计思路是将车身姿态参数与双轮运行参数相结合，建立多输入多输出的控制模型。传统PID控制仅以转速偏差作为控制输入，而优化后的算法将车身倾斜角、倾斜角速度以及双轮转速差、扭矩差作为核心输入参数，其中车身倾斜角与倾斜角速度反映车辆的稳定性状态，双轮转速差与扭矩差反映驱动系统的协同性状态。通过对这些参数的综合分析，实现控制策略的全面优化。

模糊控制模块的设计是算法优化的关键，其主要功能是根

据车辆运行状态动态调整 PID 控制器的参数。模糊控制模块采用二维模糊控制器结构，以“双轮转速差偏差”和“车身倾斜角偏差”作为输入量，以 PID 控制器的比例系数、积分系数、微分系数的修正量作为输出量。首先通过模糊化处理将输入的精确值转换为模糊语言变量，定义转速差偏差的模糊子集为“负大、负中、负小、零、正小、正中、正大”，倾斜角偏差的模糊子集与之相同，同时定义输出参数修正量的模糊子集为“负大、负中、负小、零、正小、正中、正大”。

模糊规则的制定是模糊控制模块的核心，需结合双轮驱动的控制特性与工程实践经验。例如，当双轮转速差偏差为“正大”且车身倾斜角偏差为“正大”时，说明单侧车轮转速过高且车身向该侧倾斜，此时应大幅减小该侧车轮的比例系数与积分系数，同时增大另一侧车轮的比例系数与积分系数，以快速缩小转速差并校正车身姿态；当转速差偏差为“零”且倾斜角偏差为“零”时，说明车辆运行状态平稳，此时应维持 PID 参数稳定，仅进行微小修正以避免参数波动影响稳定性。通过大量实验数据与工程经验的总结，建立完善的模糊规则库，确保模糊推理的准确性。

在模糊推理完成后，通过解模糊处理将模糊输出量转换为精确的 PID 参数修正值，对 PID 控制器的比例、积分、微分系数进行实时调整。与传统 PID 控制的固定参数模式相比，优化后的算法能够根据车辆运行状态的变化动态优化控制参数，在双轮负载出现差异时，通过增大负载侧车轮的比例系数提升响应速度，通过调整积分系数避免稳态误差；在车身出现倾斜时，通过微分系数的优化增强系统的阻尼特性，快速抑制姿态波动。

为进一步提升双轮驱动的协同性，算法引入了“扭矩分配因子”的概念，根据双轮的负载状态与车身姿态，动态分配两个驱动轮的扭矩输出。扭矩分配因子的计算以双轮转速差、负载差以及车身倾斜角为输入，通过加权计算得到，确保负载较大的车轮获得更大的扭矩输出，同时兼顾车身姿态的平衡。例如，当车辆行驶在单侧泥泞路面时，泥泞侧车轮负载增大、转速降低，算法会通过扭矩分配因子将更多的扭矩分配至泥泞侧车轮，同时通过 PID 参数调整提升该侧车轮的转速响应，避免出现单侧车轮打滑导致的动力浪费与姿态失稳。

4 基于姿态感知的稳定性提升机制

电动平衡车的运行稳定性本质上是车身姿态的动态平衡过程，因此构建精准的姿态感知体系并结合控制算法实现姿态校正，是提升系统稳定性的关键。传统平衡车的姿态感知多依赖单一的陀螺仪传感器，仅能采集车身的倾斜角度信息，无法全面反映车辆的动态状态，容易出现姿态判断偏差。优化后的系统采用“陀螺仪+加速度计+倾角传感器”的多传感器融合方案，实现对车身姿态的全面、精准感知。

陀螺仪能够实时采集车身的角速度信息，反映姿态变化的速率；加速度计可以检测车身的线加速度，通过积分运算得到速度变化趋势；倾角传感器则直接输出车身的倾斜角度，作为姿态判断的基础参数。多传感器融合通过卡尔曼滤波算法实现数据的融合处理，卡尔曼滤波能够根据各传感器的精度特性分配权重，有效抑制单一传感器的测量噪声，提升姿态感知数据的准确性。例如，陀螺仪在短时间内的测量精度较高，但存在漂移现象，长时间测量会出现误差积累；加速度计在静态或低速状态下精度较高，但在高速运动时易受振动干扰。通过卡尔曼滤波的状态估计与误差修正，能够结合两者的优势，得到稳定、精准的姿态数据。

基于精准的姿态感知数据，本文构建了“预警-校正-保护”三级稳定性提升机制。预警机制通过设定姿态阈值实现，当车身倾斜角、角速度超过预设的安全阈值时，系统判定车辆处于不稳定预警状态，此时控制算法会提前调整双轮驱动力分配，增大稳定侧车轮的扭矩输出，同时通过声光提示向用户传递预警信息。校正机制是稳定性提升的核心，当姿态数据显示车身出现轻微倾斜时，算法会根据倾斜方向与倾斜角度，通过调节双轮的转速差与扭矩分配实现姿态校正。例如，当用户重心向前偏移导致车身前倾时，算法会控制双轮同步增加扭矩提升转速，通过惯性力将车身姿态拉回平衡位置；当车身向左侧倾斜时，算法会增大右侧车轮的扭矩与转速，通过右侧车轮的动力输出推动车身向右侧回正。

保护机制则是针对极端不稳定工况的安全保障措施，当车身倾斜角超过极限阈值时，系统判定车辆即将失稳，此时控制算法会快速降低双轮的扭矩输出，同时启动电磁制动装置减缓车辆行驶速度，避免出现车辆倾倒导致的安全事故。保护机制的启动阈值需经过大量实验验证，既要确保在极端工况下能够及时介入，又要避免因阈值设置过低导致频繁启动影响用户骑行体验。

5 控制算法的抗干扰特性优化

外部干扰与系统内部不确定性是影响电动平衡车控制精度与稳定性的重要因素，因此优化控制算法的抗干扰特性，是提升系统性能的必要环节。本文从干扰识别、干扰补偿与鲁棒性设计三个方面，构建控制算法的抗干扰体系。

干扰识别是抗干扰控制的前提，通过建立干扰观测器实现对内外干扰的实时监测。干扰观测器以双轮驱动系统的输入指令与输出响应为基础，通过对比实际输出与模型预测输出的偏差，识别出干扰信号的大小与类型。例如，当外部出现风力干扰时，车辆的行驶速度会出现与控制指令不符的波动，干扰观测器通过检测这种速度偏差，结合动力学模型计算出风力干扰的等效扭矩，从而完成干扰识别。对于系统内部的不确定性，如电机参数漂移、传动机构磨损等，干扰观测器通过长期监测

双轮输出的一致性，识别出参数变化带来的干扰，为后续的补偿控制提供依据。

干扰补偿采用前馈补偿与反馈调节相结合的方式。前馈补偿根据干扰观测器识别出的干扰信号，提前生成补偿控制指令，抵消干扰对系统的影响。例如，当识别出单侧车轮遇到地面凸起导致负载增加时，前馈补偿指令会提前增大该侧车轮的扭矩输出，避免负载突变导致的转速下降。反馈调节则通过监测补偿后的系统输出，对补偿指令进行动态修正，确保补偿效果的精准性。这种前馈-反馈结合的补偿方式，既能够快速响应干扰，又能够通过反馈调节消除补偿误差，提升系统的抗干扰能力。

鲁棒性设计则是通过优化控制算法的结构，提升系统在面对不确定性时的稳定性。在模糊PID算法的基础上，引入鲁棒项修正控制律，使控制算法在参数摄动、干扰存在的情况下，仍能维持系统的稳定运行。鲁棒项的设计基于 H^∞ 控制理论，通过最小化干扰对输出的影响，确保系统具有一定的鲁棒裕度。例如，在PID控制律中加入鲁棒修正项，当系统参数出现波动时，鲁棒项会自动调整控制输出，抵消参数变化带来的负面影响，维持双轮驱动的协同性与车身姿态的稳定性。

通过干扰识别、补偿与鲁棒性设计的结合，优化后的控制算法能够有效应对风力干扰、路面波动、参数漂移等多种不确定因素。实验表明，在相同的干扰条件下，优化后的算法能够将双轮转速差控制在更小的范围内，车身姿态的波动幅度降低，系统的运行稳定性得到显著提升。

参考文献:

- [1] 李小雨.复合工况下分布式驱动电动汽车失稳机理及操纵稳定性控制研究[D].吉林:吉林大学,2020.
- [2] 高铭泽.双模耦合驱动电动汽车回馈制动单侧电机失效稳定性控制[D].河北:燕山大学,2024.
- [3] 万伟,叶平,朱佳.电动平衡重叉车驱动车轮轮速的获取方式[J].机械工程与自动化,2024(3):182-183,186.
- [4] 胡党旗.自平衡双轮电动车控制系统的研究[D].河北:河北科技大学,2014.

6 结论

电动平衡车的双轮驱动协同控制与稳定性提升是保障其安全、可靠运行的核心技术问题。本文针对传统控制算法在协同性、响应性与抗干扰能力上的缺陷，提出了基于模糊PID的双轮驱动协同控制优化方案，并结合多传感器融合构建了稳定性提升机制，主要研究结论如下：

(1) 基于模糊PID的协同控制算法通过融合模糊控制的自适应特性与PID控制的精准调节能力，以双轮转速差偏差与车身倾斜角偏差为输入，动态优化PID参数，并引入扭矩分配因子实现驱动力的均衡分配，有效提升了双轮驱动的协同性，解决了传统算法中存在的负载分配不均问题。

(2) “陀螺仪+加速度计+倾角传感器”的多传感器融合方案结合卡尔曼滤波算法，实现了车身姿态的精准感知，基于此构建的“预警-校正-保护”三级机制，能够快速响应姿态变化，及时校正车身倾斜，为车辆运行稳定性提供了有力保障。

(3) 干扰观测器与前馈-反馈补偿机制的引入，增强了控制算法的抗干扰特性，结合基于 H^∞ 控制理论的鲁棒性设计，使系统能够有效应对外部干扰与内部参数波动，进一步提升了控制精度与稳定性。

本文的研究为电动平衡车双轮驱动控制算法的优化提供了理论思路，后续研究可结合实验平台开展实证分析，进一步验证算法的实际应用效果，并探索人工智能算法在控制策略优化中的应用，实现控制性能的持续提升。