

# Abstract

In the recent years, due to the improvements on electric motors and motor control technology, alternative vehicle power system layouts have been considered. One of the latest is known as distributed drive electric vehicles (DDEVs), which consist of four motors that integrated into each wheel and can be independently controllable. Such an innovative design provides a packaging advantages, including simple and compact chassis layout, short transmission chain, fast and accurate torque response, and so on. Based on these advantages and features, this dissertation takes stability and energy-saving as cut-in points, and conducts investigations in the following aspects.

Detailed vehicle dynamics model is typically of primary foundation for the vehicle stability and energy-saving control research. A closed-loop "human-vehicle-road" system is developed to reflect the human driver's behavior and vehicle dynamics characteristics.

Next, we propose a vehicle state and tire-road friction coefficient estimation algorithm. A hierarchical structure is adopted. An upper estimator is developed based on unscented Kalman filter to estimate vehicle state information, while a hybrid estimation method is applied as the lower estimator to identify the tire-road friction coefficient using general regression neural network (GRNN) and Bayes' theorem.

Subsequently, a direct yaw moment control algorithm is developed addressing the stability issue. The algorithm consists of a feedforward plus feedback component to calculate the desired external yaw moment to achieve the desired vehicle motion. The feedforward control aims at compensating the effect caused by the variation of tire linear cornering stiffness during the tire's life cycle. Adaptive sliding mode control (ASMC) is used as the feedback component to make the controller robust against systematic uncertainties.

In order to systematically allocate the desired traction and direct yaw moment among four motors, a global optimization algorithm based on a Karush-Kuhn-Tuckert (KKT) conditions is presented. An optimization term is introduced from the perspective of the tire grip margin to construct a stability objective function. According to KKT conditions, the nonlinear objective function is transformed into the eigenvalue problem, thereby making the solving process independent of the initial guess of the optimal solutions. Afterwards, to guarantee the global minima acquisition, two phases of optimization are designed.

DDEVs provide great possibilities not only for the improvement of the vehicle dynamics,

handling, safety but also energy-saving. An energy-efficient torque allocation (EETA) scheme is proposed for the improvement of traction efficiency and braking energy recovery. In traction conditions, the traction distribution is developed using an objective function of minimizing power loss of four electric motors. In braking conditions, aiming at guaranteeing the braking stability and recapturing the braking energy as much as possible, the changeable distribution of braking torque is obtained based on the ideal front-rear braking force distribution curve, while complying with braking regulations of Economic Commission for Europe (ECE). The proposed allocation scheme does not rely on the complex online computation. It is obtained via an offline optimization procedure and utilized for online allocation by simple interpolation.

At last, to verify the effectiveness of the aforementioned vehicle modeling, estimation algorithm, and control systems, simulative experiments based on different maneuvers are carried out. The results demonstrate that the proposed stability and energy-saving control strategy can enhance the vehicle stability and energy efficiency effectively.

# Kurzfassung

In den letzten Jahren wurden aufgrund der Verbesserungen bei Elektromotoren und Motorsteuerungstechnik alternative Antriebsstranglayouts berücksichtigt. Eines der neuesten ist bekannt als distributed drive electric vehicles (DDEVs), das aus vier Motoren, die in jedem Rad integriert und unabhängig kontrollierbar sind. Ein solches innovatives Design bietet ein Packagingvorteil: einfaches und kompaktes Chassislayout, kurze Übertragungskette, schnelle und genaue Drehmomentreaktion etc. Basierend auf diesen Vorteilen und Merkmalen nimmt diese Dissertation die Stabilität und die Energieeinsparung als Schnittpunkte und führt Untersuchungen zu den nachfolgenden Aspekten durch.

Das detaillierte Fahrdynamik-Modell ist die primäre Grundlage für den Forschungsbereich zur Fahrzeugstabilitäts- und Energieeinsparungssteuerung. Zusätzliches wird ein geschlossenes human-vehicle-road-System entwickelt, um das Verhalten des menschlichen Fahrers und die Fahrdynamik zu reflektieren.

Als nächstes führen wir einen Schätzalgorithmus zur Bestimmung des Fahrzeugzustands und des Reifen-Straßen-Reibungskoeffizientens ein. Hierfür wird eine hierarchische Struktur angenommen. Ein oberer Schätzer (estimator) wird auf der Basis eines Unscented-Kalman-Filters entwickelt, um die Fahrzeugzustandsinformation abzuschätzen, während ein hybrides Schätzverfahren als unterer estimator angewendet wird, um den Reifen-Straßen-Reibungskoeffizienten unter Verwendung des allgemeinen Regressions-Neuronalen-Netzwerks (GRNN) und des Bayes-Theorems zu identifizieren.

Anschließend wird ein direktes Drehmomentkontrollalgorithmus entwickelt, der das Stabilitätsproblem anspricht. Der Algorithmus besteht aus einer Vorwärts- und Rückkopplungskomponente, um das gewünschte externe Drehmoment zu berechnen und die gewünschte Fahrzeugbewegung zu erreichen. Die Vorsteuerung kompensiert diesen Effekt, der durch die Veränderung der Reifen-Linear-Kurvensteifigkeit während des Lebenszyklus des Reifens verursacht wird. Als Rückkopplungskomponente wird eine adaptive Gleitregelung (ASMC) verwendet, um den Regler gegen systematische Unsicherheiten robust zu machen.

Um das gewünschte Traktions- und Drehmoment bei vier Motoren systematisch zuzuordnen, wird ein globaler Optimierungsalgorithmus auf Basis von Karush-Kuhn-Tuckert (KKT) Bedingungen vorgestellt. Aus der Perspektive der Reifenhaftreibung wird ein Optimierungsterm eingeführt, um eine Stabilitätszielfunktion zu entwickeln. Nach den KKT-Bedingungen wird die nichtlineare Zielfunktion in das Eigenwertproblem umgewandelt, wodurch der Lösungsprozess unabhängig von der anfänglichen

Vermutung der optimalen Lösung ist. Danach werden, um die globale Minima-Akquisition zu garantieren, zwei Optimierungsphasen entworfen.

DDEVs bieten große Möglichkeiten nicht nur zur Verbesserung der Fahrdynamik, Handhabung, Sicherheit, sondern auch bezüglich der Energieeinsparung. Zur Verbesserung der Traktionseffizienz und der Bremsenergieerückgewinnung wird ein energieeffizientes Drehmomentverteilungsschema (EETA) vorgeschlagen. Für die Traktionsbedingungen wird die Traktionsverteilung unter Verwendung einer Zielfunktion zur Minimierung der Verlustleistung von vier Elektromotoren entwickelt. Für die Bremsbedingungen, die die Bremsstabilität garantieren und die Bremsenergie so weit wie möglich wiederherstellen, wird die veränderbare Verteilung des Bremsmoments auf Basis der idealen Bremskraftverteilungskurve vorne und hinten unter Einhaltung der Bremsvorschriften der Wirtschaftskommission für Europa ermittelt (ECE). Das vorgeschlagene Zuteilungsschema beruht nicht auf einer komplexen Onboard-Fahrzeugberechnung. Es wird über ein Offboard-Optimierungsverfahren gewonnen und für die Onboard-Verteilung durch einfache Interpolation genutzt.

Um die Wirksamkeit der vorgenannten Fahrzeugmodellierung, des Schätzalgorithmus und der Kontrollsysteme zu überprüfen, werden endlich simulative Experimente durchgeführt, die auf unterschiedlichen Szenarien basieren. Die Ergebnisse zeigen, dass die vorgeschlagene Stabilitäts- und Energiespar-Steuerungsstrategie die Fahrzeugstabilität und Energieeffizienz effektiv verbessern kann.