

Diss. ETH No. 18796

**MODEL-BASED OPTIMAL EMISSION
CONTROL OF DIESEL ENGINES**

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Science

presented by
Michael Benz

Dipl. Ing. ETH in Mechanical Engineering
born April 27, 1978
citizen of Marbach, St. Gallen

accepted on the recommendation of
Prof. Lino Guzzella, examiner
Prof. Konstantinos Boulouchos, co-examiner

2010

Abstract

This thesis presents a novel methodology for deriving control-oriented models of the raw emissions of diesel engines. An extended quasi-static approach is developed where some engine process variables, such as combustion or cylinder charge characteristics, are used as inputs. These inputs are chosen by a selection algorithm that is based on genetic programming techniques. Based on the inputs selected, a hybrid symbolic regression algorithm generates the adequate nonlinear structure of the emission model. With this approach the model identification efforts can be reduced significantly. Although this symbolic regression model requires only few parameters to be identified, it provides results comparable to those obtained with artificial neural networks that include five times more parameters. The symbolic regression model is capable of predicting the behavior of the engine in operating points not used for the model parametrization and it can be adapted easily to other engine classes.

The measurement data used to generate and test the raw emission model are obtained on two different engine test benches, one is a heavy-duty engine type and the other is a light-duty engine. Based on standard engine maps, various actuator input variations are tested. Approximately 300 static measurement points of the entire engine operating range are measured for both engine types. In addition, dynamic tests are performed

including load steps, accelerations, and driving cycles to be able to identify the transient behavior of the engine systems.

The model derived is then tested on two different application fields. First, the model is used as a virtual sensor to estimate the engine out emission during various operating conditions. Results from experiments under steady-state and transient operating conditions are used to show the accuracy of the modeling approach presented.

Second, the model is used to investigate optimal controls for the various actuators of a modern diesel engine system. A novel optimization method is proposed that allows a reduction of the pollutant emission of diesel engines during transient operation. The key idea is to synthesize optimal actuator commands using reliable models of the engine system and powerful numerical optimization methods. Therefore, the raw emission model is embedded into a mean-value engine model for the dynamics of the gas path including the turbocharger, the fuel injection, and the torque generation. The optimization substantially changes the input signals, such that the engine model is enabled to extrapolate all relevant outputs beyond the regular operating area. A feedforward controller for the injected fuel mass is used during the optimization to eliminate the nonlinear path constraints. A direct single-shooting method is found to be most effective for the numerical optimization. The simulation results show a significant potential for reducing the pollutant emissions while increasing the driveability of the vehicle.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt eine neue Methode zur Herleitung regelungstechnisch orientierter Modelle der Rohemissionen für Dieselmotoren. Ein erweiterter quasi-stationärer Ansatz wurde entwickelt, wobei charakteristische Prozessgrößen, wie zum Beispiel der Verbrennungsschwerpunkt oder Zylinderladungskenngrößen als Eingänge benutzt werden. Die Modelleingänge werden mittels eines mathematischen Verfahrens ausgewählt, das auf einem evolutionären Algorithmus beruht. Basierend auf den ausgewählten Eingängen wird mittels eines symbolischen Regressionsverfahrens eine nichtlineare Modellstruktur für das Emissionsmodell hergeleitet. Dank dieser Methodik kann der Modellierungsaufwand deutlich reduziert werden. Obwohl die gefundene Modellstruktur nur wenige Parameter hat, sind die Simulationsergebnisse vergleichbar mit künstlichen neuronalen Netzen, die mehr als fünf mal so viele Parameter aufweisen. Die gefundene Modellstruktur ist extrapolationsfähig und übertragbar auf andere Motortypen.

Für die Herleitung und die Überprüfung der Modellstruktur wurden Messungen auf zwei unterschiedlichen Motorprüfständen durchgeführt. Der Erste ist ein Lastkraftwagen-Motor, der Zweite ein Lieferwagenmotor. Ausgehend von den standard Motorenkennfeldern, wurden verschiedenste Aktuator Variationen durchgeführt. Für beide Motoren wurden ungefähr 300

statische Messpunkte im ganzen Betriebsbereich vermessen. Zusätzlich wurden noch dynamische Messungen von Lastsprüngen, Beschleunigungen und Fahrzyklen durchgeführt, um die Dynamik des Motorsystems zu identifizieren.

Das hergeleitete Modell wurde auf zwei möglichen Anwendungsfeldern getestet. Im Ersten stand die Verwendung als virtueller Sensor im Vordergrund. Das Modell wurde unter den verschiedensten Betriebsbedingungen getestet. Simulationsergebnisse von stationären sowie transienten Bedingungen zeigen die Genauigkeit des vorliegenden Modells.

Als Zweites werden optimale Betriebsstrategien des Dieselmotors untersucht. Eine neue Optimierungsmethode ist entwickelt worden, welche eine Verminderung der Rohemissionen während ausgewählten transienten Übergängen erreicht. Die Grundidee ist, optimale Aktuatorstellungen herzuweisen, basierend auf präzisen Modellen und mächtigen numerischen Methoden. Deswegen wurde das Rohemissionsmodell in ein Mittelwertmodell eingebettet, welches die dynamischen Prozesse des Gaspfades, des Turboladers, der Kraftstoffeinspritzanlage und der Drehmomententstehung abbildet. Der Optimierer verändert die Eingänge des Motorsystems wesentlich, daher muss das Gesamtmodell sehr gute Extrapolationsfähigkeiten besitzen.

Eine Kraftstoffsteuerung für die eingespritzte Dieselmenge wird verwendet, um die nichtlinearen Zustandsvorgaben einzuhalten. Das Optimierungsproblem wird mittels eines direkten Verfahrens gelöst. Simulationsergebnisse zeigen ein grosses Potential die Emissionen zu reduzieren und ebenso die Fahrbarkeit des Fahrzeuges zu steigern.