

Martin Felix Closs

Numerical Modelling and Optimisation  
of Radio-Frequency Ion Thrusters



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft  
München

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist  
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

Zugleich: Dissertation, München, Univ. der Bundeswehr, 2001

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2002

ISBN 3-8316-0140-2

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-01

## Abstract

An entirely self-consistent numerical model of radio-frequency ion thrusters was developed. It allows to calculate the behaviour of such devices over wide operating ranges, without prior knowledge of new designs in the form of test data.

The intention was to develop a method of calculating the behaviour of an RF ion thruster given its geometry, the type of propellant used and the electric potentials applied to the grid system. The data provided by this calculation should give valuable information for the control of the thruster, electronics design and for system engineering studies. It should also allow the optimisation of a design on a numerical basis in order to reduce the effort and cost required for the manufacturing and test of prototype models. As a difference to current plasma modelling, the development of this model of RF ion thrusters emphasised on trading detailed information with simplicity and computational efficiency in order to allow a fast calculation of entire performance maps—information which is crucial to the engineering process.

The model includes a calculation of the gas discharge kinetics inside the thruster for electrons, singly and doubly charged ions and neutral atoms. A Direct Monte Carlo simulation (DSMC) of the neutral gas efflux through the extraction grid system was performed in order to find a method of calculating the neutral gas density in the plasma. Based on these calculations, an estimation of the charge exchange process which causes ion impingement on the accelerator grid was performed in order to account for the loss of thrust caused by charge exchange. A novel approach was taken in calculating the coupling of RF power into the plasma by solving a nonlinear form of Maxwell's equations. The Finite Element Method was employed to find a solution to these partial differential equations. This approach allows to ascertain the influence of the RF coil geometry and the thruster housing on the overall performance of the ion thruster. Based on information obtained from the discharge calculation and the treatment of the charge exchange process in the grid system, a new more accurate way of calculating the ion engine's thrust was developed.

Due to the computational efficiency of the model, the numerical optimisation of the thruster's discharge vessel is rendered possible. The contour of the discharge vessel can be optimised on a theoretical basis, reducing the number of prototype tests. Results promise a reduction in RF power of 25 % and a reduction of the mass of the discharge vessel of 40 %, which would lead to a new, more lightweight thruster design.

## Zusammenfassung

Ein vollständig selbstkonsistentes Modell für Radiofrequenz-Ionentriebwerke wurde entwickelt. Es erlaubt die Berechnung des Verhaltens solcher Triebwerke über weite Betriebsbereiche, ohne die Notwendigkeit von Messdaten vorhandener Geräte.

Das Ziel war es, eine Berechnungsmethode zu entwickeln, mit der man das Verhalten der Triebwerke berechnen kann, wenn die Geometrie, die Treibstoffsorte und die Gitterpotentiale gegeben sind. Die berechneten Daten sollten wertvolle Information für die Regelung, Elektronikentwicklung und Systembetrachtungen liefern. Das Modell sollte auch zur theoretischen Optimierung des Triebwerks dienen, um den Aufwand und die Kosten für den Bau und Test von Prototypen zu reduzieren. Bei der Entwicklung dieses Modells wurde sorgfältig der Nutzen von detaillierten Berechnungen gegenüber der rechnerischen Einfachheit und Effizienz abgewägt um die Berechnung ganzer Kennlinienfelder zu erlauben - Information, die für den Ingenieur unerlässlich ist.

Das Modell enthält eine Berechnung der Gasentladungskinetik im Triebwerk für Elektronen, einfach und doppelt geladene Ionen und Neutralteilchen. Die Neutralgasströmung durch das Extraktionsgittersystem wurde mit der Direct Simulation Monte Carlo (DSMC)-Methode simuliert, um ein Berechnungsverfahren für den Neutralgasverlust und -druck zu entwickeln. Basierend auf diesen Berechnungen wurde ein Modell des Ladungsaustausches zwischen Neutralteilchen und Ionen im Gittersystem entwickelt, um den dadurch entstehenden Schubverlust zu berücksichtigen. Zur Bestimmung der HF-Leistungseinkoppelung in das Plasma wurde ein neuer Ansatz entwickelt, der eine nichtlineare Form der Maxwell'schen Gleichungen verwendet. Zur Lösung dieser Partiellen Differentialgleichungen wurde die Finite-Elemente-Methode herangezogen. Diese Methode erlaubt die Untersuchung beliebiger HF-Spulen geometrien und Triebwerksgehäuseformen, um deren Einfluss auf die Effizienz des Triebwerks zu studieren. Basierend auf der Berechnung der Gasentladungskinetik und des Ladungsaustausches im Gittersystem wurde eine neue und genauere Methode zur Abschätzung des Triebwerksschubes entwickelt.

Da dieses Modell einen verhältnismäßig geringen Rechenaufwand benötigt, wurde die numerische Optimierung des Entladungsgefäßes möglich. Die Form des Gefäßes kann auf einer theoretischen Basis optimiert werden, was die Anzahl nötiger Prototypen stark reduziert. Die Resultate weisen auf eine Mögliche Einsparung der HF-Leistung von 25 % und eine Gewichtsreduktion des Entladungsgefäßes von 40 % hin.

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	A Brief History of Ion Propulsion . . . . .	1
1.2	Ion Propulsion: an Overview . . . . .	2
1.2.1	Ground Based Applications of Ion Beam Sources . . . . .	4
1.3	The Principle of RF Ion Thrusters . . . . .	4
1.3.1	Ion Generation . . . . .	4
1.3.2	Ion Extraction and Acceleration . . . . .	7
1.3.3	Beam Neutralisation . . . . .	10
1.3.4	Power Dissipation . . . . .	13
1.4	Previous Work . . . . .	13
1.5	The Scope of this Thesis . . . . .	17
1.5.1	Novelties in the RF Ion Thruster Model . . . . .	18
1.6	Mission Aspects of Electric Propulsion . . . . .	20
1.6.1	Suitable Propellants . . . . .	25
1.6.2	GEO Station Keeping . . . . .	26
1.6.3	Orbit Transfer Manoeuvres . . . . .	27
1.6.4	Atmospheric Drag Compensation . . . . .	29
<b>2</b>	<b>Basis</b>	<b>33</b>
2.1	Plasma Physics . . . . .	33
2.1.1	Collisions in the Plasma of an RF Ion Thruster . . . . .	33
2.1.2	The Plasma Sheath . . . . .	37
2.1.3	Typical Values of Plasma Parameters in an RF Ion Thruster . . . . .	40
2.1.4	Plasma Conductivity . . . . .	40
2.2	Rarefied Gas Flow . . . . .	45
2.3	Electrodynamics . . . . .	47
2.3.1	Maxwell's Equations . . . . .	47
2.3.2	Skin Effect . . . . .	49
<b>3</b>	<b>RF Ion Thruster Model</b>	<b>51</b>
3.1	Discharge . . . . .	51
3.1.1	General Assumptions and Simplifications . . . . .	51
3.1.2	Definition of the System Domain . . . . .	53
3.1.3	Equations of Conservation . . . . .	53
3.1.4	Fluxes to and from the Systems . . . . .	56

3.1.5	Assembly of the Equations and Numerical Solution . . . . .	61
3.2	Accelerator Grid Impingement Current . . . . .	63
3.2.1	Estimating the Neutralisation Plane . . . . .	69
3.3	Thrust . . . . .	71
3.3.1	Charge Exchange Ions and Beam Divergence Neglected . . . . .	71
3.3.2	Momentum Loss Due to Charge Exchange and Beam Divergence . . . . .	72
3.4	RF Field Coupling and Coil Impedance . . . . .	74
3.4.1	Boundary Conditions . . . . .	74
3.4.2	Problem Solution . . . . .	76
3.4.3	Power Dissipated in Coil and Housing . . . . .	78
3.4.4	Capacitive Coupling . . . . .	81
3.5	Assembling the Parts of the Model . . . . .	84
3.6	Verification of the Model . . . . .	84
3.6.1	Coil Inductance without Plasma . . . . .	84
3.6.2	Absorbed RF Power $P_{RF}$ . . . . .	84
3.6.3	RFG Power Input $P_{RFG}$ . . . . .	89
3.6.4	Accelerator Impingement Current $I_{acc}$ . . . . .	92
3.6.5	RF Generator Current $I_{rfg}$ . . . . .	98
3.6.6	Discharge Vessel Temperature $T_{dv}$ . . . . .	103
<b>4</b>	<b>Optimising the Discharge Vessel</b> . . . . .	<b>107</b>
4.1	Operating Conditions Necessary for Optimisation . . . . .	107
4.2	Optimal Shape for the Discharge Vessel . . . . .	108
4.3	Expected Improvements Through Optimisation . . . . .	112
<b>5</b>	<b>Conclusions and Outlook</b> . . . . .	<b>123</b>
	<b>References</b> . . . . .	<b>130</b>
	<b>A: The Finite Element Method</b> . . . . .	<b>131</b>
	<b>B: The Direct Simulation Monte Carlo Method</b> . . . . .	<b>135</b>