

TESI DI LAUREA
IN
INGEGNERIA AEROSPAZIALE
INDIRIZZO SPAZIALE

**SUL PROGETTO
DEI
PROPULSORI PULSATI A SOLIDO**

Gianni Pellegrini

Anno Accademico 2005-2006





UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PISA

**Tesi di Laurea in Ingegneria Aerospaziale
Indirizzo Spaziale**

**SUL PROGETTO
DEI
PROPULSORI PULSATI A SOLIDO**

Candidato

Gianni Pellegrini

Relatori

Prof. Mariano Andrenucci

Prof. Fabrizio Paganucci

Anno Accademico 2005-2006

Sommario

Questa tesi ha riguardato lo studio di alcuni problemi relativi alla progettazione di propulsori pulsati a solido. In primo luogo il funzionamento di questi propulsori è stato analizzato mediante modelli euristici, ed in particolare del modello *slug* e del modello *snowplow*. Sono stati presi in esame vari tipi di circuiti con i quali è possibile immagazzinare l'energia necessaria per generare la scarica di corrente: banco di condensatori, linea di trasmissione e rete formatrice di impulso. Per ogni soluzione studiata il modello teorico è stato integrato con le equazioni descrittive del circuito. Mediante l'utilizzo di tecniche numeriche il sistema di equazioni è stato risolto per una varietà di possibili condizioni di funzionamento. Le soluzioni ottenute sono documentate attraverso un'ampia casistica riportata in Appendice. Per quanto riguarda l'analisi del processo ablativo e l'immagazzinamento del propellente sono stati studiati alcuni modelli semiempirici per la stima della massa ablata ad ogni scarica ed un modello per lo stivaggio del propellente in propulsori coassiali ad alimentazione radiale. Gli elementi forniti potranno risultare utili nel progetto di nuovi propulsori e nella valutazione delle loro prestazioni sperimentali.

Abstract

This thesis deals with various aspects of solid propellant pulsed plasma thruster design. The behavior of devices of this class was first analysed by means of heuristic models such as the slug model and the snowplow model. Different types of energy storage circuits needed to power the pulsed current discharge were considered: capacitor bank, transmission line and pulse-forming-network. For each energy storage solution the theoretical model was completed with the relevant circuit equations. The model equations were then integrated by means of numerical techniques and solutions were obtained for a variety of operating conditions. An ample selection of the solutions obtained is provided in the relevant Appendix. Regarding the study of the ablation process two semi-empirical models are described that can help estimate the rate of ablated mass per shot. A practical solution is finally suggested for the storing of the solid propellant in coaxial PPTs with radial feed. Results provided in this thesis should hopefully prove useful in the design of new PPTs and in the evaluation of their experimental performance.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Prof. Andrenucci ed il Prof. Paganucci per gli insegnamenti e la disponibilità dimostrata.

Ringrazio la mia famiglia per il sostegno e la fiducia che mi hanno dato in questi anni.

Ringrazio Vissia per essermi stata vicina anche nei momenti difficili.

Ringrazio infine Tommaso senza il quale probabilmente questa avventura non sarebbe cominciata.

Indice Generale

Indice delle figure	1
Indice delle tabelle	5
Capitolo 1 Missioni spaziali e tecnologie di propulsione	7
1.1 Generalità sulla propulsione spaziale	7
1.1.1 Ottimizzazione dell'impulso specifico per un propulsore elettrico	10
1.2 Classificazione dei propulsori	13
1.2.1 I propulsori chimici	14
1.2.2 I propulsori nucleari	15
1.2.3 I propulsori elettrici	16
1.2.3.1 Impieghi dei propulsori elettrici	16
1.2.3.2 I propulsori elettrici con processo accelerativo di tipo gasdinamico	17
1.2.3.3 I propulsori elettrici con processo accelerativo di tipo elettrostatico	18
1.2.3.4 I propulsori con processo accelerativo di tipo Elettromagnetico	20
1.3 Scopo della tesi e sua articolazione	22
Capitolo 2 Propulsori pulsati a solido	23
2.1 Introduzione	23
2.2 Modelli dinamici	26
2.2.1 <i>Slug model</i>	26
2.2.2 <i>Snowplow model</i>	26
2.2.3 <i>Gasdynamic model</i>	27
2.3 Analisi del circuito degli acceleratori pulsati	28
2.4 Dispositivi sperimentali	31
Capitolo 3 Analisi della scarica con banco di condensatori	35
3.1 Analisi della scarica su carico costante	35
3.2 Analisi della scarica su carico variabile	40
3.2.1 Equazioni adimensionali per lo <i>Slug model</i>	40
3.2.2 Equazioni adimensionali per lo <i>Snowplow model</i>	42
3.3 Applicazione del condensatore in acceleratori al plasma	44
3.3.1 Schematizzazione del problema	45
3.3.2 Modello dinamico	46
3.3.3 Equazioni risolutive adimensionali	47

3.3.4 Funzione di distribuzione della massa ablata	50
3.3.5 Soluzione numerica del problema	51
Capitolo 4 Analisi della scarica con linea di trasmissione	57
4.1 Teoria delle linee di trasmissione	57
4.2 Applicazione della Linea di trasmissione in acceleratori al plasma	64
4.2.1 Scarica su carico costante	64
4.2.2 Scarica su carico variabile	67
Capitolo 5 Analisi della scarica con rete formatrice di impulso	77
5.1 Network derivati da Linea di trasmissione	78
5.1.1 Reti basate sul principio di Rayleigh	78
5.1.2 Reti basate sul principio di Guillemin	79
5.1.3 Reti equivalenti	85
5.2 Applicazione della rete formatrici di impulso in acceleratori al plasma	88
5.2.1 Scarica su carico costante	89
5.2.1.1 Con resistenza	92
5.2.2 Scarica su carico variabile	95
5.2.2.1 Con resistenza	99
Capitolo 6 Analisi del processo ablativo	101
6.1 Caratteristiche del Teflon	101
6.2 Stima della massa ablata ad ogni scarica	104
6.2.1 Relazioni semi-empiriche	106
6.3 Considerazioni su Impulso e Impulso specifico	108
Capitolo 7 Aspetti di progetto	111
7.1 Sistemi di alimentazione del propellente	111
7.1.1 Configurazioni con elettrodi paralleli	111
7.1.2 – Configurazioni con elettrodi coassiali	112
7.2 Modello per lo stivaggio del propellente	115
7.3 Considerazioni sui condensatori	117
Capitolo 8 Conclusioni	119
Bibliografia	123
Appendice A - Collezione di grafici per scarica con banco di condensatori	125
Appendice B - Collezione di grafici per scarica con linea di trasmissione	217

Appendice C - Collezione di grafici per scarica con rete formatrice
d'impulso

231

