

TESI DI LAUREA
IN
INGEGNERIA AEROSPAZIALE
INDIRIZZO SPAZIALE

**ANALISI DEL PROCESSO
ACCELERATIVO E TEORIE DI ONSET
NEI PROPULSORI MPD**

Tommaso Misuri

Anno Accademico 2004-2005





UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PISA

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

**ANALISI DEL PROCESSO
ACCELERATIVO E TEORIE DI ONSET
NEI PROPULSORI MPD**

Candidato

Tommaso Misuri

Relatori

Prof. Mariano Andrenucci

Prof. Fabrizio Paganucci

Anno Accademico 2004-2005

1

La propulsione spaziale

1.1 Generalità

1.1.1 Spinta ed impulso specifico

In campo aerospaziale la forza propulsiva agente su un veicolo viene ottenuta tramite l'espulsione di propellente ad elevate velocità. Il principio di base è quello della conservazione della quantità di moto; il propellente, inizialmente stivato all'interno del veicolo, viene "energizzato" e poi accelerato e scaricato all'esterno lungo un condotto: sul veicolo agirà una spinta agente in direzione opposta a quella in cui viene espulso il propellente. Tale spinta sarà tanto maggiore, quanto più elevati saranno la velocità di espulsione del propellente (u_s) ed il flusso di massa espulso (\dot{m}). Avremo:

$$F = \dot{m}u_s$$

La velocità di scarico non è ovviamente uniforme su tutta la sezione di uscita del condotto ed u_s è perciò un opportuno valore medio.

Se poi la pressione media del fluido nella sezione di uscita (p_s) non coincide con quella dell'ambiente esterno (p_∞), allora esiste anche un altro contributo alla spinta, dato da:

$$F_p = A_s(p_s - p_\infty) \quad , \text{ contributo dovuto alle forze di pressione;} \\ A_s : \text{ area della sezione di uscita del condotto.}$$

Nel complesso risulterà che:

$$F_{\text{tot}} = \dot{m}u_s + A_s(p_s - p_\infty) \quad (1.1)$$

è ovvio che il contributo delle forze di pressione può essere anche di segno negativo (cioè opporsi alla spinta) nel caso in cui la pressione dell'ambiente esterno sia più elevata di quella di scarico.

Definendo la velocità efficace di scarico, u_e , come:

$$u_e = u_s + \frac{A_s(p_s - p_\infty)}{\dot{m}} \quad (1.2)$$

possiamo infine scrivere:

$$F_{\text{tot}} = \dot{m}u_e \quad (1.3)$$

Introdotta la spinta agente sul veicolo, si definisce l'impulso totale, I_t , come:

$$I_t = \int_0^t F dt$$

, ove l'intervallo $[0,t]$ è l'intervallo durante il quale il motore produce spinta ("burning time").

L'impulso specifico è l'impulso totale per unità di peso di propellente consumato:

$$I_s = \frac{\int_0^t F dt}{g_0 \int_0^t \dot{m} dt} \quad , \text{ con } g_0 = 9.8066 \text{ m/s}^2$$

Nel caso in cui si abbiano una spinta costante ed un flusso di propellente costante, allora l'equazione precedente si riduce a:

$$I_s = \frac{F}{g_0 \dot{m}} = \frac{u_e}{g_0} \quad (1.4)$$

L'impulso specifico si misura in secondi e indica l'impulso che riusciamo a produrre consumando un Kg di propellente. Avere un impulso specifico di 400 s, significa essere in grado, con un Kg di propellente, di produrre una spinta di 1 N per 400 s, oppure una spinta di 400 N per la durata di 1 s. Sarebbe perciò desiderabile avere impulsi specifici estremamente elevati, ma vedremo che non è sempre possibile (nel caso di propulsori chimici) o vantaggioso (nel caso di propulsori elettrici) superare determinati valori dell'impulso specifico.

La spinta F e l'impulso specifico I_s sono due parametri fondamentali per tutta la trattazione dei propulsori aerospaziali.

1.1.2 L'equazione di Tsiolkowsky

L'equazione vettoriale che descrive il moto di un veicolo nello spazio è la seguente:

$$M \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = -\dot{m} \cdot \vec{u}_e + \vec{F}_{\text{ext}} \quad (1.5)$$

ove: M , massa del veicolo
 \dot{m} , portata in massa del propellente espulso
 \vec{v} , velocità del veicolo
 \vec{u}_e , velocità efficace di scarico del propellente
 \vec{F}_{ext} , risultante delle forze esterne agenti sul veicolo

Nota: “ $-\dot{m}\vec{u}_e$ ” è il vettore rappresentante la spinta del motore (ovviamente la direzione è quella di \vec{u}_e , ma il verso è opposto)

Scriviamo l'equazione (1.5) nella forma:

$$M d\vec{v} = -\vec{u}_e dm + \vec{F}_{\text{ext}} dt$$

Nel caso in cui le forze esterne siano assenti, oppure l'intervallo di “sparo” del motore sia estremamente piccolo (spinta impulsiva), allora l'ultimo termine a secondo membro scompare e l'equazione di moto si riduce a:

$$M d\vec{v} = -\vec{u}_e dm$$

Moltiplicando scalarmente per il versore $\vec{v}/\|\vec{v}\|$ e poi osservando che $dm = -dM$, otteniamo la seguente equazione scalare:

$$Mdv = -u_e dM$$

Integrando otteniamo l'equazione di Tsiolkowsky, che lega la variazione di velocità del veicolo ottenuta alla massa di propellente consumata ($\Delta m = M_0 - M_f$):

$$\Delta v = u_e \ln \frac{M_0}{M_f} \quad (1.6)$$

, ove: M_0 = massa iniziale del veicolo

M_f = massa finale del veicolo

(al termine dell'intervallo di "sparo" del propulsore)

Le diverse missioni spaziali sono tutte caratterizzate dal Δv complessivo necessario per il loro completamento (vedi tabella 1.1). Risulta evidente dall'equazione (1.6) il vantaggio di una velocità di scarico più elevata (e quindi di un impulso specifico più elevato): a parità di Δv richiesto una maggiore u_e implica una riduzione del rapporto M_0/M_f . Questo significa che è possibile imbarcare meno carburante e destinare una frazione maggiore della massa iniziale del veicolo al carico pagante.

Mission	m/s
Earth to LEO ^a	7,600
LEO to GEO ^b	4,200
LEO to earth escape	3,200
LEO to lunar orbit (7 days)	3,900
LEO to Mars orbit (0.7 yr)	5,700
LEO to Mars orbit (40 days)	85,000
LEO to Neptune orbit (29.9 yr)	13,400
LEO to Neptune orbit (50 yr)	70,000
LEO to solar escape	8,700
LEO to 1000 AU ^c (50 yr)	142,000
LEO to Alpha-Centauri (50 yr)	30×10^6

^a Low earth orbit (270 km)

^b Geosynchronous earth orbit (42,227 km radius)

^c Astronomical units (1 AU = 149,558,000 km)

Tabella 1.1: Δv caratteristici di alcune missioni spaziali

1.2 Classificazione dei propulsori

Due sono i criteri per classificare i propulsori utilizzati su veicoli spaziali:

1) i propulsori possono essere classificati in base al tipo di processo accelerativo con cui portano il propellente alla velocità di scarico u_e .

Tale processo può essere di tipo:

- 1.1) gasdinamico: il propellente ad elevata pressione e temperatura viene espanso ed accelerato in un ugello opportunamente sagomato;
- 1.2) elettrico: il gas propellente viene ionizzato e successivamente gli ioni vengono separati dagli elettroni ed accelerati tramite un campo elettrico;
- 1.3) elettromagnetico: il propellente, portato allo stato di plasma, viene accelerato sfruttando la forza derivante dall'interazione tra una corrente elettrica ed un campo magnetico (forza di Lorentz).

2) i propulsori possono essere distinti a seconda della fonte di energia che li alimenta. In particolare si avranno:

- 2.1) propulsori chimici: l'energia necessaria viene ottenuta tramite una reazione chimica esotermica (combustione);
- 2.2) propulsori nucleari: l'energia viene ricavata tramite fissione nucleare e ceduta sotto forma di calore al gas propellente;
- 2.3) propulsori elettrici: un generatore fornisce energia elettrica che viene utilizzata per creare campi elettrici

e magnetici in grado di ionizzare ed accelerare il propellente.

Riportiamo nella seguente tabella i propulsori più utilizzati in campo aerospaziale, classificati in base alla fonte di energia sfruttata e al processo accelerativo impiegato. Per ogni propulsore è riportata anche una stima dell'impulso specifico ottenibile.

	Propulsori chimici	Propulsori Nucleari	Propulsori elettrici
Processo accelerativo gasdinamico	Propellente liquido $I_s=300-450s$ Propellente solido $I_s=180-250s$	Propulsore a fissione nucleare $I_s=800-1000s$	Resistogetti $I_s=280-350s$ Arcogetti $I_s=400-1000s$
Processo accelerativo elettrostatico	–	–	Motori a ioni $I_s=3000-5000s$ FEEP I_s fino a 8000s
Processo accelerativo elettromagnetico	–	–	MPD $I_s=1000-3000s$ Motori a effetto Hall $I_s=2000-3500s$

Tabella 1-2: Classificazione dei propulsori utilizzati per la propulsione aerospaziale

1.3 I propulsori chimici

In questo tipo di propulsori l'energia necessaria al funzionamento viene ottenuta tramite una reazione chimica esotermica. Le specie chimiche reagenti sono contenute nel propellente stesso. L'energia liberata dalla reazione serve a innalzare la temperatura dei prodotti di reazione, che poi vengono accelerati in un ugello con un processo di tipo gasdinamico.

La velocità di scarico (e quindi l'impulso specifico) in questi propulsori è legata alla temperatura raggiunta in camera di combustione e alla massa molecolare del propellente. Avremo infatti che:

$$u_e \propto \sqrt{\frac{T_c}{\mu}}$$

, “ μ ” massa molecolare media del propellente espanso nell'ugello

L'energia complessivamente disponibile è limitata, in quanto essa è contenuta nel propellente sotto forma di energia chimica. Passando da un tipo di propellente ad un altro si possono ottenere reazioni in grado di liberare una maggiore o una minor quantità di energia, ma il fatto che essa rimanga comunque limitata impone anche un limite sul massimo impulso specifico ottenibile.

I propulsori chimici si dividono in due grandi categorie:

A) propulsori chimici a propellente solido

B) propulsori chimici a propellente liquido

I primi sviluppano impulsi specifici compresi tra 180s e 250s, mentre i propulsori chimici a combustibile liquido riescono a sviluppare impulsi specifici anche superiori a 400s (fino a 450s usando idrogeno come combustibile ed ossigeno puro come comburente).

1.4 I propulsori nucleari

Anche nei propulsori nucleari, così come in quelli chimici, il processo accelerativo è di tipo gasdinamico ed avviene tramite espansione del gas propellente in un ugello. La differenza è che in questo caso l'energia necessaria a riscaldare il propellente prima di espanderlo viene ottenuta tramite una reazione nucleare; in particolare si sfrutta il calore liberato da una reazione di fissione nucleare tra isotopi di uranio.

Con questo metodo si possono raggiungere impulsi specifici di 800-1000s usando idrogeno (H_2) come propellente.

I problemi principali per l'utilizzo di questi propulsori riguardano la sicurezza (specialmente al lancio del veicolo dalla superficie terrestre, nel caso il lancio fallisse). In particolare se la missione prevede la presenza di un equipaggio si deve progettare una schermatura adeguata in modo che questo non risulti esposto a radiazioni; ciò aumenta ovviamente la complicazione e soprattutto il peso della struttura del veicolo.

1.5 I propulsori elettrici

Questi propulsori sfruttano l'energia elettrica prodotta da un generatore e la convertono in energia cinetica del propellente espulso. Tutti i processi accelerativi prima elencati (gasdinamico, elettrostatico ed elettromagnetico) possono essere utilizzati nel campo della propulsione elettrica e come conseguenza esistono molti tipi diversi di propulsori elettrici.

Cominceremo con l'affrontare un problema generale che riguarda tutta la propulsione elettrica che è quello della ricerca dell'impulso specifico ottimale. Successivamente faremo una panoramica sui vari propulsori esistenti e sul loro funzionamento.

1.5.1 Ottimizzazione dell'impulso specifico per un propulsore elettrico

Poiché nei propulsori elettrici l'energia fornita al propellente non è contenuta nel propellente stesso come nel caso dei propulsori chimici, sembrerebbe auspicabile in questo caso cercare di lavorare con impulsi specifici estremamente elevati.

In effetti se prendiamo come esempio una missione in cui il motore funziona per un intervallo Δt con spinta e flusso di massa espulsa costanti, avremo che la massa di propellente consumata è:

$$\Delta m = \dot{m}\Delta t = \frac{F\Delta t}{u_e} = \frac{F\Delta t}{I_s g_0} \quad (1.7)$$

risulta perciò che maggiore è l'impulso specifico, minore è la massa di propellente consumata.

Il problema è che nei propulsori elettrici è necessario un generatore elettrico che fornisca la potenza necessaria. In prima approssimazione si può ipotizzare che la massa del sistema di generazione di potenza (m_p) sia proporzionale alla potenza generata (P):

$$m_p = kP$$

sia poi η il rendimento del propulsore, rapporto tra la potenza associata al flusso di massa espulso e la potenza impiegata per far funzionare il motore:

$$\eta = \frac{\frac{1}{2} \dot{m} u_e^2}{P} = \frac{I_s g_0 F}{2P} \Rightarrow P = \frac{I_s g_0 F}{2\eta}$$

ne consegue che:

$$m_p = k \frac{I_s g_0 F}{2\eta} \quad (1.8)$$

dunque ad un impulso specifico più elevato corrisponde una massa maggiore del generatore di potenza.

Osservando le espressioni (1.7) ed (1.8) si può subito capire come sia necessario trovare un valore di compromesso per l'impulso specifico. L'obiettivo è chiaramente quello di minimizzare la somma di " $\Delta m + m_p$ ", in modo da poter avere un maggior frazione della massa totale del veicolo destinata al carico utile.

Se rappresentiamo in un grafico l'andamento di " $\Delta m + m_p$ " al variare dell'impulso specifico, vedremo che la somma di queste due masse presenta un minimo in corrispondenza di un certo valore di I_s^* : questo valore dell'impulso specifico è quello ottimale per massimizzare la massa del carico utile imbarcabile per la missione.

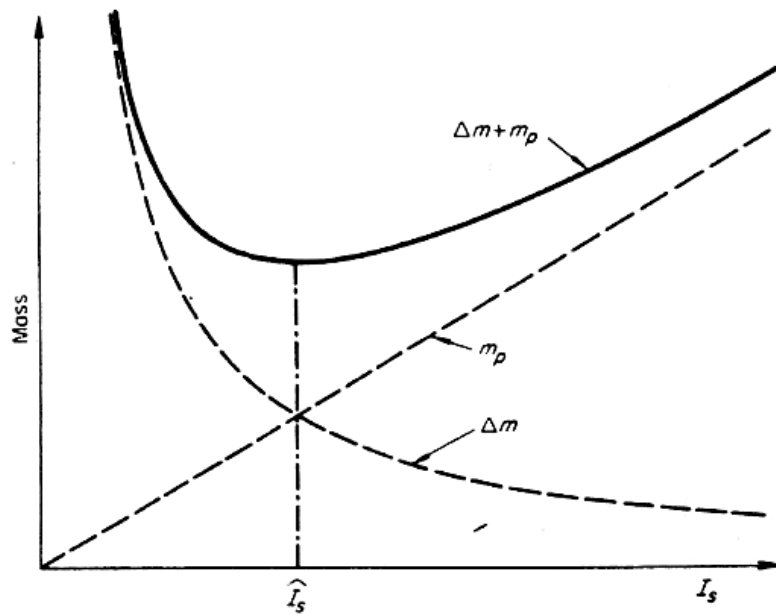


Figura 1.1

1.5.2 I propulsori elettrici con processo accelerativo di tipo gasdinamico

I propulsori elettrici appartenenti a questa categoria sfruttano l'energia elettrica per riscaldare il propellente. Questo viene poi accelerato in un ugello ed espulso all'esterno con una velocità $u_e \propto \sqrt{T_c/\mu}$. La relazione tra u_e , T_c e μ è la stessa già

vista per i propulsori chimici, visto che il processo accelerativo è sempre di tipo gasdinamico.

Due sono i diversi tipi di propulsori elettrici che accelerano il propellente per via gasdinamica:

- 1) Resistogetti: qui il propellente viene riscaldato per convezione tramite una resistenza elettrica. L'impulso specifico è solitamente compreso tra 280 e 350s.

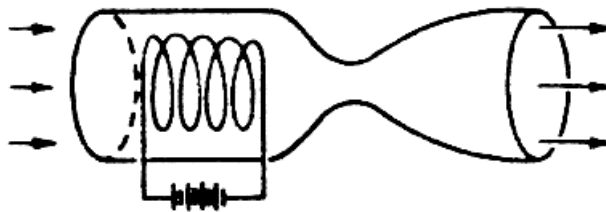


Figura 1.2: Schema di un resistogetto

- 2) Arcogetti: qui il propellente si riscalda attraversando direttamente una scarica elettrica. Le temperature in gioco sono molto più elevate che nel caso del resistogetto (il gas può arrivare anche a circa 20000K) e di conseguenza anche l'impulso specifico è maggiore (dell'ordine di 1000s usando H₂ come propellente).

La scarica scocca tra un catodo centrale e le pareti dell'anodo che sono sagomate in modo da svolgere anche la funzione di ugello.

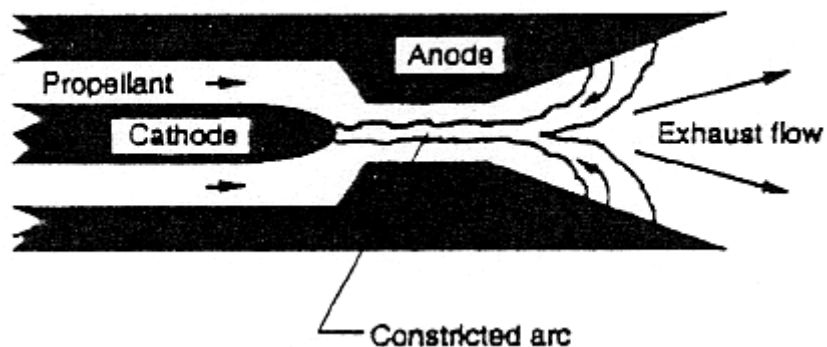


Figura 1.3: Schema di un arcogetto

1.5.3 I propulsori elettrici con processo accelerativo di tipo elettrostatico

In questi propulsori l'energia elettrica viene utilizzata per creare un campo elettrico col quale si accelerano le particelle di propellente elettricamente cariche. La velocità con cui le particelle escono dal propulsore ha un andamento del tipo:

$$u_e \propto \sqrt{2Ve/\mu}$$

,dove V è la differenza di potenziale attraverso la "camera" di accelerazione

Esistono due tipologie principali di propulsori che sfruttano questo particolare processo accelerativo:

- 1) Propulsore a bombardamento elettronico: il gas propellente (usualmente Xenon) viene ionizzato tramite bombardamento elettronico; una volta ionizzato gli ioni vengono separati dagli elettroni ed accelerati verso l'esterno attraverso una differenza di potenziale V . Il fascio di ioni che viene così espulso dal propulsore deve poi essere subito neutralizzato (investendolo con un fascio di elettroni) per evitare che il veicolo spaziale si carichi negativamente e che gli ioni siano attratti a tornare indietro.

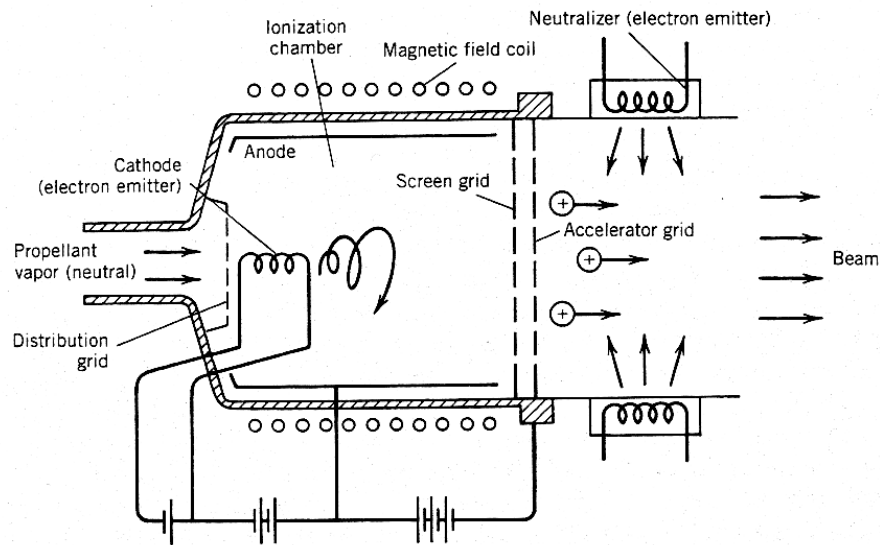


Figura 1.4: Schema del processo accelerativo elettrostatico

- 2) Propulsore ad emissione di campo (FEEP): in questi propulsori una certa quantità di propellente allo stato liquido (solitamente Cesio) viene portata per capillarità in una zona ove è presente un intenso campo elettrico. Sulla superficie libera del propellente, in presenza del campo elettrico, si creano dei coni (detti coni di Taylor) dalla cui sommità si staccano ioni che vengono immediatamente accelerati verso l'esterno. Questi propulsori forniscono spinte bassissime (dell'ordine dei microNewton o, al massimo, dei milliNewton), ma raggiungono impulsi specifici anche pari a 8000s, con efficienze che possono arrivare al 98%.

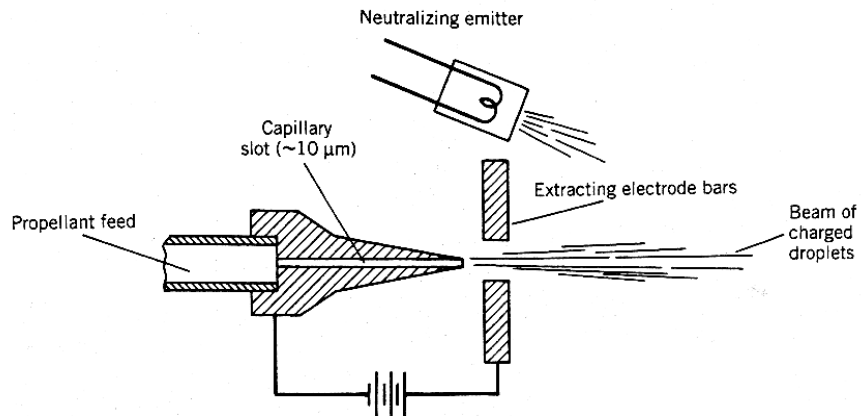


Figura 1.5: Schema di un propulsore ad emissione di campo (FEED)

1.5.4 I propulsori con processo accelerativo di tipo elettromagnetico

Questa categoria di propulsori accelera un propellente portato allo stato di plasma sfruttando la forza di Lorentz.

Anche in questo caso esistono due differenti propulsori che sfruttano un processo accelerativo elettromagnetico:

- 1) Propulsori ad effetto Hall: facendo riferimento alla figura sottostante, si vede che in questi propulsori è presente un catodo esterno che emette elettroni; questi elettroni derivano verso l'anodo, ma si nota che essi, arrivati nella zona ove è presente il campo magnetico, iniziano a spiraleggiare, muovendosi azimutalmente intorno al corpo centrale del motore; questo rallenta molto il loro moto assiale verso l'anodo. Il propellente, iniettato nella zona anodica, viene ionizzato appena arriva a contatto con la corrente azimutale di elettroni; il campo elettrico, diretto assialmente, accelera gli ioni verso l'esterno del propulsore. Gli ioni, molto più massicci degli elettroni, non risentono del campo magnetico in ugual misura ed escono perciò dal propulsore in direzione assiale, invece di iniziare un moto a spirale.

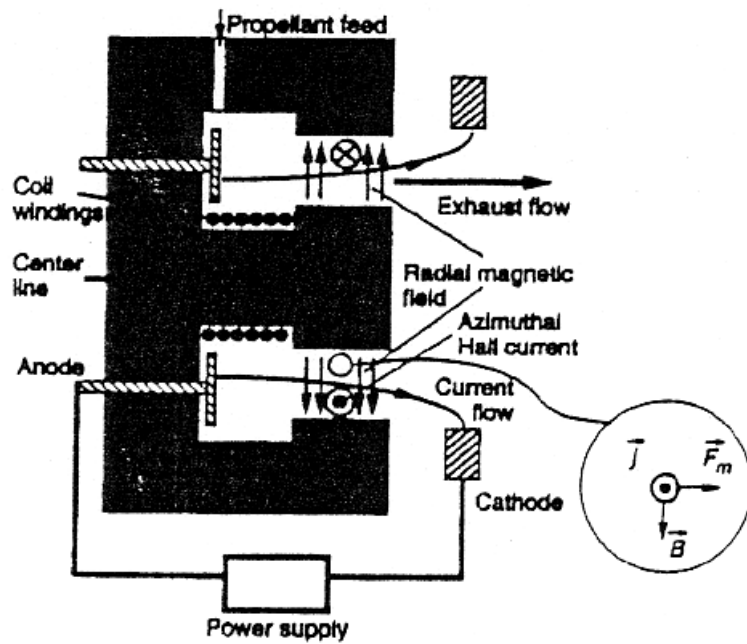


Figura 1.6: Schema di un motore ad effetto Hall

Nota: il processo accelerativo dei motori ad effetto Hall non sarebbe propriamente classificabile come un processo accelerativo elettromagnetico, visto che qui la forza di Lorentz non è utilizzata direttamente per accelerare gli ioni, ma piuttosto per conferire agli elettroni un moto prevalentemente azimutale.

- 2) Propulsori MPD: la struttura di un propulsore MPD è simile a quella di un arcogetto, ma la presenza di un intenso campo magnetico (applicato oppure autoindotto) fa sì che le particelle del propellente vengano accelerate maggiormente grazie alla forza di Lorentz piuttosto che per via gasdinamica. Avremo comunque modo di spiegare più in dettaglio il funzionamento dei motori MPD nel capitolo successivo.

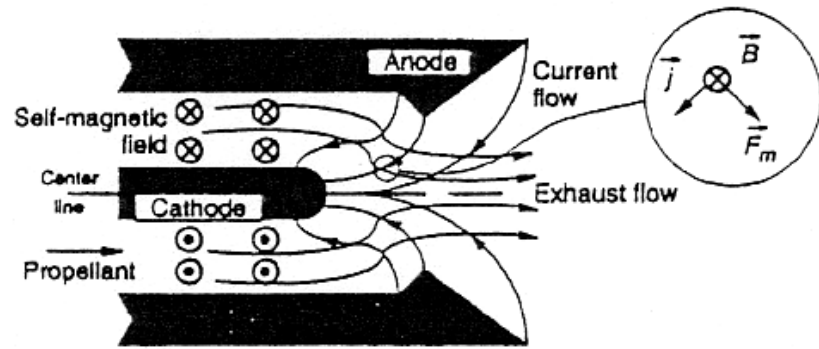


Figura 1.7: Schema di un propulsore MPD