

PROGETTAZIONE DI ESPERIMENTI MHD IN FLUSSI IPERSONICI TRAMITE MODELLI NUMERICI

Andrea Cristofolini, Carlo A. Borghi e Chiara Latini

Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Università di Bologna
Viale Risorgimento, 2, 40135, Bologna, Italy

Nell'ultimo decennio, l'unità di ricerca di Elettrotecnica dell'Università di Bologna è stata coinvolta in diversi progetti di ricerca incentrati sugli effetti dell'interazione magnetoplasmadinamica in flussi ipersonici. Le ricerche sono state rivolte all'indagine delle principali fenomenologie di base che governano l'interazione MHD in gas atmosferici ionizzati allo studio di fattibilità di applicazioni aerospaziali. Un interesse particolare hanno le indagini sulle applicazioni per il controllo del regime fluidodinamico e dei flussi termici su veicoli spaziali in fase di rientro in atmosfera. Le ricerche sono state svolte nell'ambito dei progetti Ps-Just, HPF e AFC MHD, finanziati dalla Agenzia Spaziale Europea, ed il progetto Configurazioni Aerotermodinamiche Innovative (CAST), finanziato all'ASI. Nell'ambito delle ricerche descritte, sono state svolte attività di tipo sperimentale e indagini teorico numeriche volte allo sviluppo ed alla validazione di modelli e codici numerici per l'analisi dell'interazione MHD in flussi ipersonici.

L'attività sperimentale sono state condotte utilizzando argon come gas di lavoro presso i laboratori di Alta di Pisa [1]. In tale sede si è utilizzato la galleria del vento ipersonica ad alta entalpia (High-Enthalpy Arc-heated Tunnel HEAT). In tale impianto, il gas viene riscaldato tramite un arco elettrico ed espande quindi attraverso un ugello convergente divergente. All'uscita dell'ugello il getto ipersonico di argon incontra un provino magnetico. Il flusso è ancora sufficientemente ionizzato per sostenere l'interazione MHD nello strato d'urto prodotto attorno al provino. Sono in fase di realizzazione altre due campagne di prove nella galleria del vento Gibli e Scirocco, presso il Centro Italiano Ricerche Aerospaziali (CIRA) a Capua. Tali impianti forniscono un'entalpia specifica molto superiore a quella disponibile in HEAT, e rendono quindi possibile l'utilizzo di aria come gas di lavoro.

Nella progettazione degli esperimenti descritti, il codice di analisi MHD [2] sviluppato presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Bologna ha giocato un ruolo fondamentale, per analizzare gli effetti previsti dall'interazione MHD e per identificare la configurazione sperimentale più conveniente. Il codice numerico per l'analisi dell'interazione MHD si fonda sul modello fisico ottenuto assumendo la condizione di $Re_m \ll 1$ (regime magnetico diffusivo) ed è pertanto costituito da un solutore fluidodinamico accoppiato con un solutore elettrodinamico. La fluidodinamica del problema è descritta dalle equazioni di continuità della massa, della quantità di moto e dell'energia, oltre che dall'equazione di stato del gas. Per quanto riguarda l'elettrodinamica è invece descritta dalle equazioni di Maxwell e dalla legge di Ohm generalizzata.

Il problema fluidodinamico viene discretizzato tramite un approccio ai volumi finiti "cell centered". Sono state implementate varie metodologie (schemi di Roe, Oesher, HLL, AUSM) per valutare i flussi convettivi all'interfaccia tra le celle. L'operatore ellittico che descrive l'elettrodinamica viene discretizzato con un metodo agli elementi finiti. L'integrazione nel tempo viene eseguita tramite un metodo Runge-Kutta del quarto ordine. Al generico passo temporale n , il codice fluidodinamico utilizza, per valutare i termini di sorgente dovuti all'interazione MHD, i valori calcolati dal solutore dell'elettrodinamica al passo precedente. Le grandezze fluidodinamiche calcolate vengono fornite come dati in ingresso al codice elettrodinamico.

Vengono illustrati in questa memoria alcuni risultati ottenuti nel corso della progettazione della campagna sperimentale nella galleria del vento Scirocco. In provino è costituito da un cilindro di 30 cm di diametro "blunt body", che alloggia un elettromagnete. Il campo prodotto dall'elettromagnete è

mostrato in Fig. 1. In Fig. 2 viene mostrata la distribuzione di temperatura calcolata in caso di interazione MHD in prossimità del provino e la distribuzione delle linee di flusso del gas. È evidente la formazione di un ricircolo indotto dall'interazione MHD in prossimità del punto di ristagno con abbassamento della temperatura. Tale ricircolo è prodotto dalle correnti nel plasma (Fig. 3), che interagendo con il campo magnetico generano le forze MHD. In Fig. 3 viene mostrata la distribuzione del numero di Mach sul provino cilindrico che verrà utilizzato negli esperimenti in Scirocco al CIRA. La variazione percentuale di gradiente termico alla parete per effetto dell'interazione MHD è mostrata nel grafico in Fig. 4.

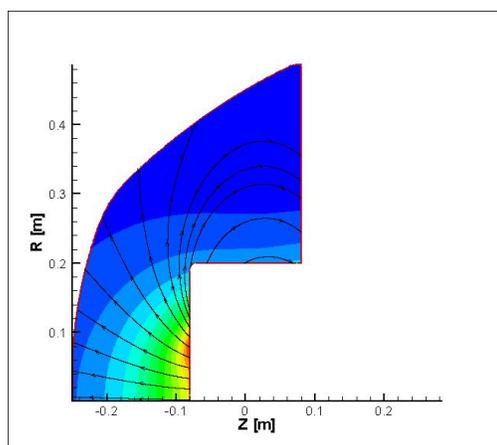


Fig. 1 Distribuzione delle linee di flusso del campo di induzione magnetica

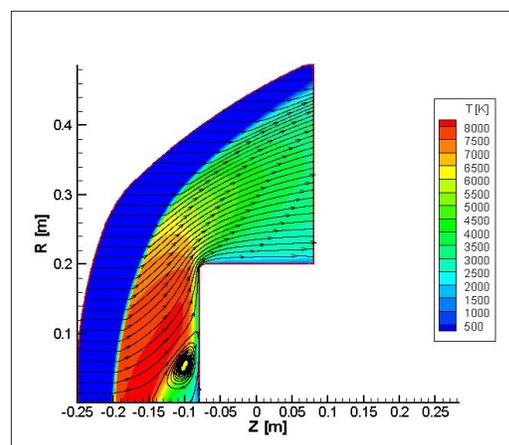


Fig. 2. Confronto qualitativo tra i risultati del calcolo e le immagini dell'esperimento.

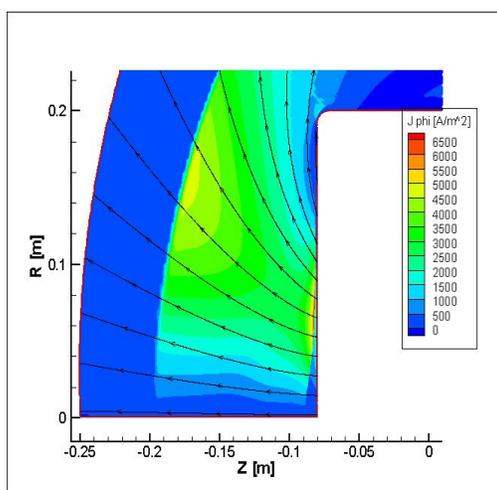


Fig. 3. Correnti azimutali nella regione di interazione MHD

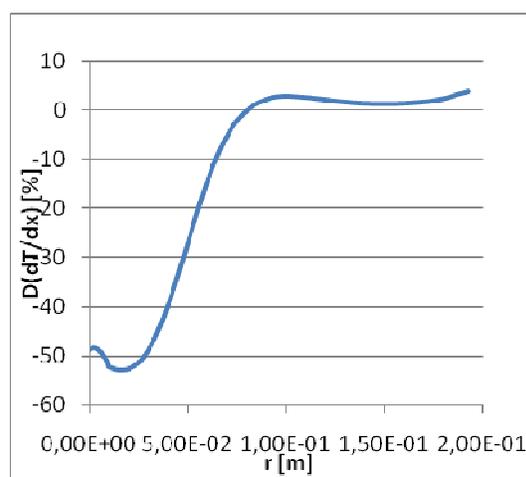


Fig. 4. Variazione percentuale dei flussi termici a parete prodotta dall'interazione MHD

- [1] A. Cristofolini, C. A. Borghi, M. R. Carraro, G. Neretti, A. Passaro, G. Fantoni, L. Biagioni, "Hypersonic MHD Interaction on a Conical Test Body With a Hall Electrical Connection", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 36, Issue 2, April 2008 pp:530 – 541
- [2] C.A. Borghi, M.R. Carraro, and A. Cristofolini, "Analysis of Magnetoplasmadynamic Interaction in the Boundary Layer of a Hypersonic Vehicle", *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 41, No. 4, 2004.