



Progettare sistemi di motion per applicazioni spaziali: guida all'affidabilità, alla scalabilità e al successo della missione

L'economia spaziale sta attraversando una profonda trasformazione. Dalla rapida commercializzazione dell'orbita terrestre bassa (LEO) alle ambiziose missioni dirette verso la Luna, Marte e oltre, il ritmo dell'innovazione non è mai stato così sostenuto.

Oggi i team di progettazione sono chiamati a sviluppare rapidamente prototipi, iterare i progetti e scalare la produzione in modo efficiente, realizzando al tempo stesso sistemi in grado di operare per anni in alcuni degli ambienti più estremi mai affrontati.

Anche quando la cinematica e i requisiti di coppia e velocità sono stati definiti, la vera sfida non consiste soltanto nel progettare per lo spazio. La vera sfida consiste nel capire quali decisioni prese sulla Terra potrebbero trasformarsi in problemi a più di 300 km di altezza o sulla superficie di un altro pianeta.

Nello spazio non esiste il raffreddamento convettivo. I sistemi di isolamento standard si degradano sotto l'effetto delle radiazioni. Materiali che in laboratorio offrono prestazioni impeccabili possono contaminare componenti ottici sensibili quando operano nel vuoto.

Questo documento analizza le scelte progettuali che distinguono un prototipo terrestre da un sistema qualificato per applicazioni spaziali, evidenziando perché è fondamentale prenderle fin dalle prime fasi dello sviluppo.



I principali ambiti delle applicazioni spaziali

Lo spazio non è un ambiente uniforme. Ogni missione espone i sistemi di motion a combinazioni molto diverse di vuoto, radiazioni, cicli termici, rischio di contaminazione e durata operativa. Progettare un motore universale per applicazioni spaziali è spesso una soluzione tecnicamente inefficiente ed economicamente poco sostenibile.

Kollmorgen suddivide le applicazioni spaziali in sei categorie distinte, definite in base ai principali fattori di stress ambientale. Questa classificazione consente di allineare la progettazione del sistema di motion alle reali esigenze della missione, evitando sia un sottodimensionamento potenzialmente critico sia un sovradimensionamento eccessivamente costoso.

Tabella 1: I sei ambiti applicativi dei sistemi di motion nello spazio

Ambito applicativo	Principali fattori di stress	Implicazioni progettuali	Livello dei requisiti per applicazioni spaziali
Stazioni di terra	Atmosfera standard, condizioni meteorologiche, funzionamento continuo 24 ore su 24, 7 giorni su 7	È sufficiente utilizzare componenti industriali commerciali (COTS, Commercial Off-The-Shelf). L'attenzione si concentra soprattutto sulla continuità operativa, sulla precisione dell'inseguimento e sulla protezione dagli agenti ambientali.	Basso - prodotto commerciale standard o leggermente modificato
Prototipazione terrestre	Carichi gravitazionali; assenza di condizioni ambientali estreme	Convalidare i profili di coppia e velocità e l'ingombro meccanico utilizzando servomotori frameless standard. Mantenere un'architettura facilmente scalabile verso applicazioni spaziali.	Nessuno - ma le scelte architetture effettuate in questa fase determinano la semplicità degli sviluppi futuri
Orbita terrestre bassa (LEO)	Vuoto spinto, rapidi cicli termici (da -150 °C a +120 °C), erosione da ossigeno atomico, esposizione moderata alle radiazioni	È richiesta la conformità ai requisiti di degassamento in condizioni di vuoto. Sono necessari rivestimenti resistenti all'ossigeno atomico. Il livello dei requisiti dipende dalla durata della missione.	Da basso a medio - la durata della missione (3-15 anni) determina il livello di requisiti richiesto
Spazio profondo	Temperature criogeniche estreme, intensa esposizione ai raggi cosmici, missioni di lunghissima durata (oltre 30 anni)	Conformità completa ai requisiti per il funzionamento nel vuoto, lubrificazione criogenica (MoS ₂), incapsulamento proprietario resistente alle radiazioni. Il motore deve essere dimensionato anche in funzione delle prestazioni termiche.	Elevato - massimi requisiti per applicazioni spaziali
Stazioni orbitali	Atmosfera respirabile, temperature moderate, presenza dell'equipaggio, vita operativa superiore a 30 anni	Il controllo del degassamento è fondamentale per preservare l'integrità dell'atmosfera interna. Spesso è possibile utilizzare motori commerciali opportunamente modificati, senza ricorrere necessariamente a una progettazione completamente qualificata per lo spazio.	Medio - modifiche specifiche in funzione dell'applicazione
Superfici extraterrestri	Regolite abrasiva, gravità variabile, forti escursioni termiche giornaliere, radiazioni estreme	Tenuta meccanica, protezione dalla polvere e massima resistenza alle condizioni termiche estreme. Il requisito più severo: progettazione orientata alla massima affidabilità, senza possibilità di manutenzione.	Massimo - progettazione completamente personalizzata in funzione della missione

La tabella (Tabella 1) evidenzia anche l'impatto delle scelte progettuali sui costi. Ad esempio, un motore commerciale destinato alla prototipazione terrestre può costare solo una frazione di un motore criogenico completamente personalizzato e qualificato per applicazioni spaziali. Definire il corretto livello dei requisiti in funzione della missione è una delle decisioni più importanti che un team di progettazione possa prendere nelle prime fasi dello sviluppo.

Motori qualificati per applicazioni spaziali e motori predisposti per applicazioni spaziali

I motori qualificati per applicazioni spaziali esistono. Sono certificati, documentati e progettati per resistere a uno specifico insieme di condizioni ambientali. Tuttavia, il fatto che un motore sia qualificato per applicazioni spaziali non significa necessariamente che sia ottimizzato per una determinata missione.

Un motore qualificato per un satellite in orbita terrestre bassa (LEO) con una vita operativa di quattro anni ha requisiti profondamente diversi rispetto a uno destinato a un veicolo operante sul lato in ombra della Luna. Anche nell'ambito del programma Artemis della NASA, le condizioni operative possono variare sensibilmente in funzione della posizione della missione (lato illuminato o lato in ombra) e dell'esposizione termica. L'impiego di un motore qualificato per missioni LEO in una missione sulla superficie di un corpo extraterrestre può provocare

guasti prematuri; al contrario, sovradimensionare una missione LEO di breve durata adottando specifiche proprie delle missioni nello spazio profondo comporta un aumento dei costi di ingegnerizzazione non ricorrenti (NRE) e degli altri costi di progetto.

L'approccio di Kollmorgen parte da un'architettura idonea alle applicazioni spaziali, basata su una piattaforma meccanica ed elettromagnetica consolidata da oltre 60 anni di esperienza, maturata dai programmi Gemini alle cinque generazioni dei rover marziani, passando per numerose altre missioni. Su questa base collaboriamo con il cliente per sviluppare una soluzione progettuale specifica per la missione, calibrata sul tipo di applicazione, sulla durata della missione, sull'ambiente radiativo e sull'intervallo dei cicli termici previsti. Il risultato è un sistema di motion progettato in funzione della missione, supportato da un percorso chiaro e validato che conduce dal prototipo terrestre fino all'impiego in orbita.

Aspetti progettuali fondamentali

Una volta definito il dominio applicativo, i progettisti devono confrontarsi con i vincoli imposti dalla fisica e dalla scienza dei materiali nell'ambiente spaziale. I motori progettati per applicazioni terrestri si basano sul raffreddamento convettivo, su magneti permanenti in neodimio standard e su sistemi di isolamento a base polimerica. Nello spazio, nessuno di questi presupposti è più valido.

Degassamento e ambiente di alto vuoto

Nelle condizioni di alto vuoto dello spazio (ad esempio 10^{-7} Torr), molti materiali comunemente impiegati nella produzione possono sublimare o rilasciare gas. Questi contaminanti possono condensare su ottiche, pannelli solari e sensori sensibili, compromettendo gravemente le prestazioni della missione.

- **Standard di degassamento:** la normativa NASA-STD-6016A definisce i limiti accettabili per il degassamento dei materiali. I progettisti devono valutare due parametri fondamentali: la perdita totale di massa (TML), che deve essere inferiore all'1,0% (spesso limitata a meno dello 0,5% nelle applicazioni con ottiche sensibili), e la quantità di materiali volatili condensabili raccolti (CVCM), che deve essere inferiore allo 0,1%.
- **Rischio dei materiali:** poliestere, film in Mylar, vinile, nylon, gomme siliconiche e le comuni vernici isolanti degli avvolgimenti dei motori offrono prestazioni inadeguate in ambiente di vuoto. I polimeri reticolati impiegati in questi materiali si degradano, compromettendo progressivamente l'integrità dell'isolamento.

La soluzione consiste nell'impiego di processi proprietari di incapsulamento e materiali resistenti alle radiazioni, selezionati in funzione dei requisiti della missione. In molti casi, l'analisi della distinta base (BOM) consente di prevedere i valori di TML e CVCM senza ricorrere a lunghi test fisici in camera a vuoto, accelerando così i tempi di sviluppo.

Resistenza alle radiazioni

Le radiazioni gamma e neutroniche bombardano costantemente i veicoli spaziali. Nel tempo, queste radiazioni ionizzanti degradano gli isolamenti elettrici e gli adesivi convenzionali.

- L'incapsulamento del motore deve quindi utilizzare materiali proprietari per l'incapsulamento, resistenti alle radiazioni.
- Sebbene i magneti permanenti standard in neodimio possano risultare adeguati per alcune missioni, altre richiedono materiali alternativi ottimizzati per garantire stabilità ambientale e mantenimento delle prestazioni nel lungo periodo.
- Queste scelte possono influire sull'approvvigionamento e sui tempi di consegna; coinvolgere un partner esperto nelle tecnologie di motion fin dalle prime fasi del progetto consente di valutare i compromessi progettuali prima che la configurazione meccanica venga finalizzata.



Un rischio spesso sottovalutato legato al degassamento è che, anche se il motore soddisfa i requisiti previsti, altri componenti del sistema potrebbero non risultare conformi. Kollmorgen collabora con i clienti per valutare il comportamento al degassamento dell'intero sistema, estendendo l'analisi anche agli incapsulamenti secondari e alle procedure di bake-out termico applicabili ai componenti di altri fornitori.

Gestione termica e criogenia

La gestione termica è probabilmente la sfida più sottovalutata nella progettazione dei sistemi di motion per applicazioni spaziali. In assenza di raffreddamento convettivo, tutto il calore generato dal motore (perdite nel rame e nel ferro), oltre a quello dovuto all'irraggiamento solare, deve essere dissipato esclusivamente per conduzione e irraggiamento.

- **Smaltimento del calore:** i veicoli spaziali utilizzano generalmente circuiti di raffreddamento a liquido per trasferire il calore condotto dal motore ai radiatori che lo dissipano nello spazio profondo. I motori devono quindi essere dimensionati con estrema precisione in funzione del loro comportamento termico reale, per evitare il degrado dei sistemi di isolamento.
- **Comportamento criogenico:** storicamente i sottosistemi venivano riscaldati artificialmente per mantenere temperature superiori a -145°C , poiché le tecnologie dei materiali non garantivano prestazioni affidabili al di sotto di tale soglia. Le missioni extraterrestri di nuova generazione, come quelle destinate all'esplorazione del lato in ombra della Luna, prevedono invece temperature ambiente comprese tra -185°C e -220°C .
- **Escursioni termiche:** l'escursione termica è tanto critica quanto la temperatura assoluta. I ripetuti passaggi da condizioni criogeniche all'esposizione diretta alla radiazione solare generano forti sollecitazioni termomeccaniche su carcasse in alluminio, pacchi lamellari in acciaio e avvolgimenti in rame. I sistemi di isolamento devono quindi essere altamente specializzati per resistere a questi continui cicli di contrazione ed espansione senza subire fenomeni di frattura.

Urti, vibrazioni e ottimizzazione di dimensioni e massa

I sistemi di motion destinati allo spazio devono sopportare le intense sollecitazioni del lancio e garantire un funzionamento affidabile per tutta la durata della missione, riducendo al minimo la massa del carico utile. Per raggiungere questo obiettivo è necessario trovare il giusto equilibrio tra robustezza strutturale, prestazioni e producibilità.

- **Resistenza al lancio:** gli urti e le vibrazioni generati durante il lancio possono compromettere l'integrità degli avvolgimenti, il fissaggio dei magneti e l'allineamento meccanico prima ancora che il veicolo raggiunga l'orbita.
- **Riduzione della massa:** ogni grammo aggiunto al carico utile aumenta i costi di lancio e il fabbisogno di propellente, rendendo fondamentali attuatori compatti e leggeri.
- **Compromessi nella densità di coppia:** la riduzione di massa e dimensioni non deve avvenire a scapito delle prestazioni o dell'affidabilità. I sistemi di motion devono comunque garantire la coppia, la rigidità e le prestazioni termiche richieste dalla missione.



Perché scegliere motori frameless

Nelle applicazioni spaziali, ogni componente eliminabile rappresenta un vantaggio. I motori frameless semplificano l'architettura del sistema eliminando housing, alberi e giunti non necessari e consentendo l'integrazione diretta del motore nell'attuatore.

A differenza dei servomotori housed, i motori frameless sono costituiti esclusivamente da statore e rotore. Ciò offre ai progettisti maggiore libertà nell'ottimizzazione della struttura circostante in funzione dei requisiti termici, meccanici e ambientali della specifica missione.

Le architetture frameless a trasmissione diretta offrono numerosi vantaggi, tra cui:

- Riduzione di dimensioni e peso grazie all'eliminazione di componenti meccanici ridondanti e all'integrazione compatta dell'attuatore
- Miglioramento della gestione termica, poiché l'housing dell'attuatore può diventare parte integrante del percorso di conduzione del calore

- Maggiore adattabilità alle condizioni ambientali grazie a strategie specifiche di tenuta, alla selezione dei materiali e a tecniche di mitigazione della contaminazione
- Maggiore precisione e rigidità grazie alla riduzione del backlash e della compliance all'interno del sistema di motion.
- Percorsi di sviluppo scalabili che garantiscono continuità dal prototipo terrestre fino a sistemi idonei alle missioni spaziali

Kollmorgen offre diversi modelli di motori frameless in grado di supportare differenti priorità delle applicazioni spaziali. I motori TBM e KBM sono comunemente utilizzati in giunti robotici compatti, gimbal e sistemi di posizionamento di precisione, mentre i motori TBM2G sono ottimizzati per prestazioni termiche migliorate in applicazioni con severi vincoli di dissipazione. I motori RBE offrono un'ampia gamma di dimensioni e una comprovata affidabilità per applicazioni ad alta coppia e bassa velocità che richiedono lunga durata operativa.



Accelerare il percorso verso lo spazio

L'aspetto più importante per i team che si affacciano al settore spaziale è che l'ingombro meccanico validato a terra dovrebbe essere lo stesso utilizzato in orbita. Questo richiede la scelta della corretta architettura del motore fin dalle prime fasi del progetto.

1. Partire dal prototipo terrestre con una visione architetture

L'approccio più efficiente consiste nell'iniziare con motori frameless standard di livello commerciale (come le serie TBM o KBM di Kollmorgen) per realizzare prototipi fisici, caratterizzare i profili di coppia e velocità e definire l'ingombro meccanico nel giro di poche settimane e con costi significativamente inferiori rispetto a hardware spaziale personalizzato. Il punto chiave è selezionare una famiglia di motori che disponga di un percorso di upgrade già consolidato.



I tempi tipici di prototipazione sono di 2-3 settimane per motori frameless standard (50-115 mm) oppure 12-20 settimane per sistemi terrestri di maggiore dimensione.

2. Co-progettare la configurazione per applicazioni spaziali

Una volta validati forma e prestazioni elettromagnetiche a terra, gli esperti di controllo del motion collaborano con i team OEM per definire la configurazione più adatta all'impiego spaziale. Ciò può includere l'adozione di specifici tipi di magneti, sistemi di isolamento resistenti alle radiazioni e incapsulamenti a basso degassamento, mantenendo però invariata l'architettura di base del motore e l'ingombro meccanico. Mantenendo la geometria dell'attuatore e i punti di integrazione, è possibile ridurre gli sforzi di riprogettazione e accelerare la transizione dal prototipo terrestre a sistemi pronti per la missione.

3. Mitigazione a livello di sistema

Anche se non realizzano direttamente la piattaforma, i partner specializzati nei sistemi di motion possono fornire strategie di mitigazione a livello di sistema. Ad esempio, Kollmorgen fornisce supporto nella definizione di tecniche di incapsulamento secondario all'interno dell'attuatore o nell'implementazione di specifiche procedure di bake-out termico per favorire il degassamento sulla Terra prima che il sistema venga integrato su un veicolo di lancio. È proprio questo modello di collaborazione diretta tra ingegneri a generare il massimo valore. L'obiettivo è aiutare i team di sviluppo a ridurre i rischi progettuali prima che diventino problemi critici per la missione.

Un modello di co-progettazione costruito per il mercato spaziale attuale

Nel mercato spaziale stanno emergendo due differenti filosofie ingegneristiche. Da un lato gli OEM tradizionali, con anni di esperienza, che adottano un approccio prudente e consapevole del costo di un eventuale fallimento della missione. Dall'altro team commerciali e startup che operano rapidamente, realizzano prototipi in modo iterativo e adottano una cultura orientata all'apprendimento attraverso l'errore. Kollmorgen offre un percorso rapido dal prototipo alla configurazione per applicazioni spaziali, supportato da oltre 60 anni di esperienza nella co-progettazione e da una validazione documentata dei materiali per entrambi gli approcci.



Sfide progettuali e compromessi

Ogni decisione influisce sulle successive nella progettazione di sistemi di motion per applicazioni spaziali. Di seguito alcune delle sfide più comuni e le strategie consigliate per ridurre i rischi e accelerare lo sviluppo.

Sfida	Strategia consigliata
Ricerca di un motore qualificato per applicazioni spaziali pronto all'uso	Scegliere architetture in grado di essere adattate tramite una configurazione specifica per la missione, poiché ogni applicazione presenta requisiti differenti in termini di gestione termica, radiazioni e funzionamento nel vuoto.
Sottovalutazione del freddo criogenico	Non dare per scontato che materiali standard possano resistere a cicli termici fino a -200 °C senza adeguata validazione. Il freddo criogenico estremo rappresenta una delle modalità di guasto più frequentemente sottovalutate nei sistemi di motion spaziali.
Sovra-ingegnerizzazione per LEO	L'applicazione degli standard completi di radiazione e degassamento per lo spazio profondo a un satellite LEO con vita operativa di 4 anni comporta un aumento significativo dei costi e dell'NRE." Allineare la configurazione ai requisiti di durata e al dominio della missione.
Trascurare la gestione termica nelle fasi avanzate della progettazione	In assenza di raffreddamento convettivo nello spazio, la dissipazione del calore deve essere considerata un requisito progettuale fondamentale fin dalle prime fasi. Dimensionare il motore per le prestazioni termiche fin dall'inizio e pianificare precocemente il circuito di raffreddamento a liquido.
Scegliere un motore per prototipazione terrestre privo di un percorso di upgrade.	Selezionare una famiglia di motori con un percorso di scalabilità già consolidato. L'ingombro meccanico validato a terra dovrebbe essere lo stesso utilizzato nello spazio.

Progettato per la missione

L'economia spaziale cresce più rapidamente della forza lavoro che la supporta. I programmi stanno passando da cicli di sviluppo decennali a iterazioni rapide. La pressione sui costi è reale. La finestra tra prototipazione e produzione si sta riducendo. Prendere fin dalle prime fasi le giuste decisioni sul sistema di motion apporta benefici all'intero programma, eliminando rilavorazioni, riducendo i costi di ingegneria non ricorrente (NRE) e accelerando il percorso verso lo spazio.

Kollmorgen mette a disposizione oltre 60 anni di esperienza nel settore e architetture di motori frameless collaudate, insieme a un portafoglio completo di soluzioni per generare, trasmettere e controllare il motion. Operiamo come estensione del tuo team di ingegneria, aiutandoti a gestire la complessità dell'innovazione rapida, della gestione termica di precisione e della produzione altamente scalabile. Sappiamo che nello spazio non esiste margine di errore e lavoriamo al tuo fianco per garantire la configurazione più adatta al successo della missione.

Pronto al lancio?

[Contatta Kollmorgen](#) per discutere le tue esigenze e i tuoi obiettivi con uno specialista di motori frameless.

Informazioni su Kollmorgen

Kollmorgen, un marchio Regal Rexnord, vanta oltre 100 anni di esperienza nel settore del motion, comprovata da motori, azionamenti, soluzioni di controllo AGV e piattaforme di automazione dalle prestazioni tra le più elevate e affidabili del settore. Forniamo soluzioni innovative che si distinguono in termini di prestazioni, affidabilità e facilità di utilizzo, garantendo ai costruttori di macchine un vantaggio competitivo innegabile.