

Comment un actionneur tient-il un moteur en poussée ?

Version PDF de travail - contenu du cours HTML canonique

Boussole du cours

Question directrice : Pourquoi un petit signal électrique peut-il commander le mouvement d'un moteur qui produit des centaines de tonnes de poussée ?

Repères : MESURÉ · CONVENTION · CALCULÉ · HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE · DONNÉE DE MISSION · DONNÉE CONSTRUCTEUR · APPROXIMATION

Objectifs :

- distinguer puissance de commande et puissance mécanique
- lire force/couple/bras de levier
- comprendre l'amplification hydraulique
- comprendre la charge de maintien
- voir pourquoi NASA utilise des modèles 3D de TVC

Réponse essentielle

Comment un actionneur tient-il un moteur en poussée ? La question à résoudre est la suivante : Pourquoi un petit signal électrique peut-il commander le mouvement d'un moteur qui produit des centaines de tonnes de poussée ?

Repères : MESURÉ · CONVENTION · CALCULÉ · HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE · DONNÉE DE MISSION ·

DONNÉE CONSTRUCTEUR · APPROXIMATION Objectifs : distinguer puissance de commande et puissance mécanique lire force/couple/bras de levier comprendre l'amplification hydraulique comprendre la charge de maintien voir pourquoi NASA utilise des modèles 3D de TVC ? Un calculateur peut produire un signal électrique de très faible puissance. Ce signal commande une valve ou un moteur d'actionneur qui libère une source d'énergie mécanique beaucoup plus importante. La suite du cours montre comment passer de cette idée à un raisonnement contrôlable : unités explicites, hypothèses annoncées, calculs reproductibles, ordre de grandeur et limites d'interprétation. Le résultat n'est utile que si l'on peut expliquer ce qu'il mesure, d'où viennent les nombres et quelle décision d'ingénierie il éclaire.

Synthèse de départ : les démonstrations, exemples, limites et sources sont développés dans le corps du cours.

Mots clés avant de commencer

poussée · gimbal · unité · ordre de grandeur · hypothèse

1 — Le signal n'apporte pas toute l'énergie

Un calculateur peut produire un signal électrique de très faible puissance. Ce signal commande une valve ou un moteur d'actionneur qui libère une source d'énergie mécanique beaucoup plus importante.

C'est le même principe qu'un petit mouvement de commande contrôlant une grande puissance hydraulique : l'information et l'énergie ne viennent pas du même endroit.

2 — Force, couple et bras de levier

Une force appliquée loin d'un axe crée un moment plus grand que la même force appliquée près de l'axe. Dans un modèle perpendiculaire simple : $\tau = F \times r$.

τ se lit "tau" et désigne ici un couple en newton-mètres. F est une force en newtons ; r une distance en mètres.

3 — Exemple pédagogique

HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE : un mécanisme doit fournir un couple de 120 000 N·m et la ligne d'action effective de l'actionneur possède un bras de 1,5 m. Force idéale $F = \tau / r = 120\,000 / 1,5 = 80\,000$ N.

Cette valeur n'est pas une charge Vulcain ou Falcon. La vraie géométrie inclut angles, deux axes, frottement, flexibilité, inertie, charges transitoires et facteurs de sécurité.

4 — Pourquoi l'hydraulique peut déplacer un gros moteur

Une pompe met un fluide sous pression. Une valve contrôle vers quelle chambre d'un vérin ce fluide est envoyé. La pression agit sur une surface de piston et crée une force : $F = p \times A$ dans le modèle idéal.

Ainsi, un petit moteur de valve peut contrôler un débit hydraulique qui produit une force bien plus grande. ESA décrit cette logique sur le TVC du Vulcain 2.1.

5 — Maintenir est aussi important que déplacer

L'actionneur doit résister aux efforts qui cherchent à ramener ou décaler le moteur. NASA publie des méthodes spécifiques pour calculer la réaction le long de la ligne d'action afin de maintenir la position sous charge.

Les frottements du cardan et la structure elle-même changent lorsque la poussée réelle est appliquée ; les essais à chaud peuvent donc révéler des écarts au modèle de laboratoire.

6 — Pourquoi le contrôle mécanique et le contrôle logiciel se rencontrent

Le logiciel doit connaître les limites de vitesse, déplacement et force de l'actionneur. Une commande impossible physiquement ne peut pas être exécutée, même si l'algorithme la réclame.

La conception intégrée relie donc guidance, dynamique du véhicule, TVC, hydraulique/électromécanique, structure et capteurs.

7 — L'actionneur doit survivre à une charge qui change pendant le vol

Le couple appliqué au moteur ne dépend pas uniquement de sa poussée moyenne. La géométrie, les accélérations, les vibrations, la souplesse des structures et les frottements peuvent faire varier la charge. Une valeur unique d'effort est donc rarement suffisante : l'ingénieur construit des enveloppes de fonctionnement et cherche le cas dimensionnant.

Le document NASA sur les charges TVC illustre justement cette approche : on modélise le moteur gimbalé comme un système mécanique et l'on additionne plusieurs contributions pour estimer les efforts aux lignes d'action. Space Academy conserve le raisonnement, mais pas les paramètres propriétaires d'un véhicule opérationnel.

8 — Pourquoi la puissance hydraulique ou électrique doit elle aussi être budgétée

Déplacer un moteur demande de l'énergie. Cette énergie provient d'un système hydraulique, électromécanique ou d'une autre architecture, qui possède sa propre masse, son rendement, sa température et ses modes de panne. Un actionneur plus puissant n'est donc jamais gratuit : il faut aussi fournir, distribuer et refroidir cette puissance.

Cette chaîne permet de relier le TVC à l'ingénierie système. Une décision de guidage devient une exigence mécanique ; l'exigence mécanique devient une puissance ; la puissance devient une demande sur l'alimentation et le thermique. C'est ce genre de chaîne que l'on doit suivre lorsqu'on veut réellement comprendre une fusée.

8 — Trois exemples complets : couple, bras de levier et force

Exemple A — cas de référence

HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE : couple demandé $\tau = 120\,000$ N·m et bras de levier $r = 1,5$ m. Dans le modèle simple $\tau = F \times r$, nous isolons F : $F = \tau / r = 120\,000 \div 1,5 = 80\,000$ N. Pourquoi diviser ? Parce que nous cherchons la force qui, appliquée à 1,5 m de l'axe, produit ce couple.

HYPOTHÈSE PÉDAGOGIQUE : ces chiffres ne décrivent pas un actionneur de vol particulier.

Exemple B — bras de levier deux fois plus court

Gardons $\tau = 120\,000\text{ N}\cdot\text{m}$ mais réduisons r à $0,75\text{ m}$. $F = 120\,000 \div 0,75 = 160\,000\text{ N}$. Le bras de levier est deux fois plus court ; il faut donc deux fois plus de force pour obtenir le même couple dans ce modèle. Cette relation explique pourquoi la géométrie mécanique est aussi importante que la puissance de l'actionneur.

CALCULÉ : $160\,000\text{ N}$, soit deux fois le premier résultat.

Exemple C — couple deux fois plus grand

Avec $r = 1,5\text{ m}$ mais $\tau = 240\,000\text{ N}\cdot\text{m}$, $F = 240\,000 \div 1,5 = 160\,000\text{ N}$. Le couple demandé double, la force requise double. En réalité, l'actionneur doit aussi supporter vitesses, accélérations, frottements, jeux, flexibilité et charges transitoires.

APPROXIMATION : le couple statique n'est qu'une première brique du modèle.

Calcul inverse — quel bras de levier ?

Supposons $\tau = 120\,000\text{ N}\cdot\text{m}$ mais une force conceptuelle limitée à $F = 60\,000\text{ N}$. $r = \tau/F = 120\,000 \div 60\,000 = 2\text{ m}$. Cela ne signifie pas qu'il suffit de « déplacer l'actionneur à 2 m » : géométrie, course, articulation et structure limitent les positions possibles. Le calcul montre seulement le compromis entre force et bras de levier.

Le calcul inverse sert à explorer un compromis, pas à définir une architecture de vol.

Exercices et corrigés

Force

$\tau = 60\,000\text{ N}\cdot\text{m}$, $r = 2\text{ m}$. Force idéale ?

Hydraulique

$p = 20\text{ MPa}$ et $A = 0,002\text{ m}^2$, modèle idéal.

Limite

Pourquoi ne peut-on pas additionner ces deux exercices pour obtenir un vrai vérin ?

Sources primaires et techniques

- NASA NTRS — Considerations for TVC in-flight load predictions
- NASA NTRS — SLS core-stage thrust vector control performance
- ESA — Low Liquid Thrust Vector Actuation System for Ariane 6
- ESA — Ariane 5 Vulcain engine