

AM-08.08 — Roues de réaction, propulseurs et saturation : faire tourner un vaisseau sans déplacer son centre

Comment un vaisseau peut-il changer d'orientation dans le vide, et pourquoi une roue de réaction finit-elle par saturer ?

AM-08.08 · SPACE ACADEMY

Échanger puis décharger le moment angulaire



Delta-Sierra · Space Academy

La roue échange du moment en interne ; un couple extérieur est nécessaire pour gérer l'accumulation à long terme.

1 - Comprendre la scène

Dans le vide, un satellite ne peut pas pousser sur l'air. Pourtant il doit orienter une caméra ou une antenne. Une solution consiste à accélérer une roue interne : lorsque la roue gagne du moment angulaire dans un sens, le satellite réagit dans l'autre. Aucune poussée extérieure n'est nécessaire pour cette rotation interne.

Mais une roue ne peut pas accélérer sans limite. Des perturbations extérieures lui font accumuler progressivement du moment. Arrivée près de sa vitesse maximale, elle est saturée. Il faut alors appliquer un couple extérieur — propulseurs ou, près de la Terre, parfois magnétocoupleurs — pour décharger le moment.

2 - Vocabulaire essentiel

Roue de réaction - Volant motorisé interne utilisé pour échanger du moment angulaire avec le vaisseau.

Couple - Action qui tend à faire tourner un objet ; unité SI : newton-mètre.

Moment angulaire - Grandeur décrivant la quantité de rotation d'un système.

Saturation - État où une roue approche sa limite de vitesse ou de moment stockable et ne peut plus absorber correctement davantage de moment.

Désaturation - Manœuvre qui utilise un couple extérieur pour réduire le moment stocké dans les roues.

Propulseur de contrôle d'attitude - Petit moteur fournissant un couple extérieur et, selon la géométrie, une force de translation.

3 - Mécanisme pas à pas

Action interne, réaction opposée

La roue est accélérée par un moteur électrique. Le couple appliqué à la roue s'accompagne d'un couple opposé sur le corps du satellite. Le moment angulaire total du système roue + satellite reste cohérent avec les couples extérieurs.

Trois axes, souvent quatre roues

Trois roues indépendantes peuvent contrôler trois axes. De nombreux systèmes utilisent une quatrième roue inclinée pour conserver une capacité dégradée après la panne d'une roue.

Décharger avec l'extérieur

Une roue saturée ne se « vide » pas toute seule sans conséquence. Le système applique un couple extérieur. Les propulseurs fonctionnent loin de la Terre ; les magnétocoupleurs dépendent d'un champ magnétique externe suffisant et ne sont donc pas une solution universelle interplanétaire.

4 - Formules et lecture

$$\tau = \Delta H / \Delta t$$

« tau égale delta H divisé par delta t ». τ , tau, est le couple ; H représente ici le moment angulaire.

Le couple est le taux de variation du moment angulaire. Changer rapidement H demande plus de couple que produire la même variation lentement.

$$H_{\text{roue}} + H_{\text{vaisseau}} \approx \text{constante}$$

« moment de la roue plus moment du vaisseau est approximativement constant », si les couples extérieurs sont négligeables.

C'est l'idée de conservation qui explique pourquoi accélérer la roue fait tourner le vaisseau en sens opposé.

5 - Unités et vérification

Le couple s'exprime en N·m. Le moment angulaire d'une roue s'exprime couramment en N·m·s. La vitesse de rotation de roue peut être donnée en tours par minute, mais le logiciel de contrôle travaille avec des modèles cohérents d'inertie, de couple et de moment stocké.

N·m pour un couple et N·m·s pour un moment stocké ne sont pas interchangeables : le facteur seconde raconte une accumulation au cours du temps.

6 - Trois démonstrations

Exemple 1 — Couple moyen

Une roue change son moment angulaire de 0,02 N·m·s en 2 s.

$$\begin{aligned}\tau &= 0.02 \div 2 \\ \tau &= 0.01 \text{ N}\cdot\text{m}\end{aligned}$$

Conclusion: Le corps du vaisseau reçoit un couple opposé d'ordre comparable, hors pertes et autres effets.

Exemple 2 — Même ΔH , plus vite

La même variation de 0,02 N·m·s doit être obtenue en 0,5 s.

$$\begin{aligned}\tau &= 0.02 \div 0.5 \\ \tau &= 0.04 \text{ N}\cdot\text{m}\end{aligned}$$

Conclusion: Quatre fois moins de temps demande quatre fois plus de couple moyen.

Exemple 3 — Saturation

Une perturbation solaire pousse toujours légèrement le satellite dans le même sens ; la roue compense jour après jour.

perturbation extérieure → moment accumulé
vitesse roue augmente
limite atteinte → désaturation

Conclusion: La saturation est une conséquence de l'accumulation, pas une panne instantanée du moteur de roue.

7 - Approfondissement

Microvibrations

Une roue réelle n'est jamais parfaitement équilibrée. Ses vibrations peuvent perturber une caméra ou un instrument très sensible ; le placement, l'équilibrage et l'isolation mécanique comptent.

Panne et géométrie quatre roues

Quatre roues montées sur des axes non coplanaires permettent souvent de reconstruire des couples tridimensionnels après la perte d'une roue, avec des performances réduites.

Propulseurs : couple mais aussi force

Deux propulseurs opposés peuvent former un couple presque pur. Une géométrie imparfaite ou un centre de masse mal connu peut toutefois produire une translation indésirable.

Pourquoi les magnétocoupleurs ne suffisent pas vers Mars

Ils produisent un couple en interagissant avec un champ magnétique ambiant. Leur efficacité dépend donc de l'environnement ; NASA souligne que leur usage au-delà de l'orbite terrestre doit être étudié avec prudence.

8 - Pourquoi cela compte pour Mars

Le pointage précis des antennes à grand gain et des instruments durant une mission martienne exige un contrôle d'attitude pendant des mois ou des années. La gestion de saturation est donc une fonction de maintien, pas un détail exceptionnel.

Un véhicule habité ou un gros cargo peut combiner roues, gyroscopes de contrôle de moment ou propulseurs selon sa taille et ses besoins. L'architecture doit prévoir les pannes, les consommables et les perturbations.

9 - Pièges fréquents

- Dire qu'une roue de réaction « pousse sur le vide ».
- Confondre roue de réaction et gyroscope capteur.
- Croire que la roue peut accélérer indéfiniment.
- Oublier que des propulseurs consomment un ergol.
- Supposer qu'un magnétocoupleur fonctionne partout comme près de la Terre.

10 - Exercices guidés

Question: $\Delta H = 0,03 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ en 3 s. Quel couple moyen ?

Réponse: $0,03 \div 3 = 0,01 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Question: Pourquoi une roue saturée pose-t-elle problème ?

Réponse: Parce qu'elle approche sa limite de moment/vitesse et ne peut plus fournir la plage de correction demandée dans le même sens.

Question: Pourquoi un propulseur peut-il désaturer une roue ?

Réponse: Il exerce un couple extérieur sur le système ; la roue peut alors changer son moment interne tout en maintenant l'attitude voulue.

11 - À savoir expliquer

- Expliquer le principe d'une roue de réaction par conservation du moment angulaire.
- Distinguer couple et moment angulaire par leurs unités.
- Calculer $\tau = \Delta H / \Delta t$ dans un cas simple.
- Définir saturation et désaturation.
- Expliquer pourquoi propulseurs et magnétocoupleurs n'ont pas les mêmes domaines d'emploi.

12 - Sources NASA / JPL

NASA - State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology, Guidance Navigation and Control
<https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/guidance-navigation-and-control/>

Ressource pédagogique libre : ce cours explique les principes pour un public débutant. Il ne remplace ni la conception de mission, ni les modèles de vol opérationnels, ni les procédures, essais et validations d'une agence spatiale.