

Rotation, couple et moment d'inertie — faire tourner sans confondre force et rotation

Version PDF de travail - contenu du cours HTML canonique

Boussole du cours

Question directrice : Pourquoi la même force peut-elle faire tourner fortement un objet ou presque pas du tout selon l'endroit où elle agit ?

Réponse essentielle

Rotation, couple et moment d'inertie — faire tourner sans confondre force et rotation. La question à résoudre est la suivante : Pourquoi la même force peut-elle faire tourner fortement un objet ou presque pas du tout selon l'endroit où elle agit ? Pourquoi la même force peut-elle faire tourner fortement un objet ou presque pas du tout selon l'endroit où elle agit ? 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

vitesse · accélération · force · masse · énergie

1 — La question physique

Pourquoi la même force peut-elle faire tourner fortement un objet ou presque pas du tout selon l'endroit où elle agit ?

2 — Symboles, lecture et unités

τ — couple ou moment de force, en $\text{N}\cdot\text{m}$; r — bras de levier perpendiculaire, en m ; F — force, en N .

3 — D'où vient la relation ?

Une force appliquée exactement au centre de rotation ne crée pas le même effet qu'une force appliquée loin de ce centre. Le couple mesure cette capacité à produire une rotation. Dans le cas simple où force et bras sont perpendiculaires, $\tau=rF$.

4 — A — Même force, bras de 1 m

100 N appliqués à 1 m donnent 100 $\text{N}\cdot\text{m}$.

5 — B — Bras deux fois plus long

100 N à 2 m donnent 200 $\text{N}\cdot\text{m}$. La force n'a pas changé ; l'effet de rotation a doublé.

6 — C — Force divisée par deux

50 N à 2 m donnent encore 100 $\text{N}\cdot\text{m}$. Plusieurs combinaisons force-bras peuvent produire le même couple.

7 — Comprendre plus loin

Le couple n'est pas une énergie

Le newton-mètre apparaît aussi dans l'unité du joule, mais couple et énergie ne sont pas la même grandeur. Le contexte et la définition physique comptent autant que les dimensions de l'unité.

Le moment d'inertie joue le rôle de “masse de rotation”

Deux objets de même masse peuvent être plus ou moins difficiles à accélérer en rotation selon la manière dont leur masse est répartie autour de l'axe. Une masse éloignée de l'axe augmente fortement le moment d'inertie.

Application au contrôle d'attitude

Réorienter un véhicule signifie créer un couple puis gérer l'accélération angulaire et l'arrêt du mouvement. Des moteurs orientables, roues de réaction ou propulseurs d'attitude produisent des couples, mais la réponse dépend de l'inertie du véhicule complet.

Le couple possède aussi un sens de rotation

Le couple ne se résume pas à $F \times r$. Sa direction est liée à l'axe autour duquel la rotation est produite. Dans un traitement vectoriel, on écrit $\tau = r \times F$: le symbole $\times$ représente ici un produit vectoriel, pas une simple multiplication ordinaire. Au niveau débutant, il suffit d'abord de retenir qu'une force parallèle au bras n'a pas le même effet qu'une force perpendiculaire.

Le moment d'inertie dépend de la répartition de masse

Deux objets de même masse peuvent être très différents à faire tourner. Si davantage de masse se trouve loin de l'axe, le moment d'inertie augmente. C'est pourquoi déplacer un réservoir, des batteries ou une charge utile peut modifier la dynamique d'attitude d'un véhicule même si sa masse totale ne change pas.

Couple et accélération angulaire

L'analogue rotationnel de $F=ma$ est $\tau=I\alpha$. Le couple τ produit une accélération angulaire α , mais l'effet dépend du moment d'inertie I . À couple égal, un véhicule avec un grand I change plus lentement sa vitesse de rotation. Les unités et le contexte doivent être expliqués avant d'utiliser cette relation comme une recette.

Une rotation possède de l'énergie

Un objet en rotation stocke de l'énergie cinétique. Accélérer une roue de réaction, une turbopompe ou un volant demande de l'énergie ; ralentir ou échanger ce mouvement modifie le bilan. Le simple fait qu'une commande puisse produire un couple ne dit donc rien, à lui seul, sur la puissance, la durée ou les limites thermiques.

Application au contrôle d'attitude

Un véhicule spatial peut créer un couple avec des propulseurs, des roues de réaction ou l'orientation d'une poussée principale. Le choix dépend de la phase de mission et des capacités disponibles. Le calcul du couple constitue seulement la première couche ; le GNC doit ensuite mesurer l'attitude, estimer le mouvement et fermer la boucle de contrôle.

8 — Exercices et corrigés

Défi 1

A — Même force, bras de 1 m : refaites le raisonnement avec les valeurs indiquées, puis expliquez le sens physique du résultat.

Défi 2

B — Bras deux fois plus long : refaites le raisonnement avec les valeurs indiquées, puis expliquez le sens physique du résultat.

Défi 3

C — Force divisée par deux : refaites le raisonnement avec les valeurs indiquées, puis expliquez le sens physique du résultat.

9 — Sources primaires et techniques

- NASA Glenn — Re-Living the Wright Way / Torque
- NASA Glenn — Beginner's Guide to Aeronautics
- NASA Glenn — Newton's Laws