

TỔNG HỢP LỰC TÁC DỤNG LÊN VẬT THỂ BAY

Người thực hiện: Nguyễn Minh Hiền
Đơn vị công tác: VHT

Ngày 19 tháng 9 năm 2025

Mục lục

1	Mô hình tổng hợp lực dựa trên mô hình DOF	2
1.1	Mô hình sử dụng: 5DOF	2
1.1.1	Định nghĩa tổng quát:	2
1.1.2	Chi tiết định nghĩa	3
1.1.3	Công thức toán học	3
2	Phần Toán học	4
2.1	Mở đầu	4
2.1.1	Phân tích lực thành phần	4
2.2	Chi tiết các lực thành phần	5
2.2.1	Lực cản khí động học - Drag Force	5
2.2.2	Lực nâng - Lift Force	6
2.2.3	Lực Magnus - Magnus Force	7
2.2.4	Lực giảm chấn góc	8
2.2.5	Magnus moment	11
2.2.6	Moment xoáy	12
2.2.7	Kết luận về hợp lực tác dụng lên vật thể	13

1 Mô hình tổng hợp lực dựa trên mô hình DOF

1.1 Mô hình sử dụng: 5DOF

1.1.1 Định nghĩa tổng quát:

Chuyển động tự do 6 bậc (6 Degrees of Freedom – 6DOF) là khái niệm dùng để mô tả khả năng chuyển động hoàn toàn tự do của một vật thể trong không gian ba chiều. Một vật rắn trong không gian 3D có tổng cộng sáu bậc tự do, bao gồm:

3 bậc tự do tịnh tiến:

- Di chuyển dọc theo trục X (trái/phải).
- Di chuyển dọc theo trục Y (lên/xuống).
- Di chuyển dọc theo trục Z (tiến/lùi).

3 bậc tự do quay:

- Quay quanh trục X (Roll - lăn).
- Quay quanh trục Y (Pitch - nghiêng).
- Quay quanh trục Z (Yaw - xoay, lắc).

Nhờ sáu bậc tự do này, một vật thể có thể dịch chuyển đến bất kỳ vị trí nào và ở bất kỳ tư thế nào trong giới hạn không gian của nó, điều này rất quan trọng trong lĩnh vực robot, mô phỏng động học, hàng không vũ trụ, mô phỏng chuyển động, kiểm tra độ rung động thực nghiệm, đào tạo và thiết kế mô hình điều khiển chuyển động. Trong báo cáo này chúng ta tập trung khai thác yếu tố vật thể thực sự bay như nào trong không gian, kế bên đó là phương trình chuyển động và so sánh các mô hình DOF có ít chiều hơn

1.1.2 Chi tiết định nghĩa

Mô hình này là phức tạp nhất và chính xác nhất trong tất cả các mô hình quỹ đạo (Nangsue, 2010). Tiêu chuẩn STANAG 4355 đề xuất sử dụng Mô hình Quỹ đạo Khối lượng Điểm Sửa đổi cho các đạn được ổn định bằng quay và mô hình Năm Bậc Tự Do cho mô phỏng quỹ đạo đạn đạo bên ngoài của các tên lửa ổn định cánh đuôi.

1.1.3 Công thức toán học

$$m\vec{a} = \vec{D}F + \vec{L}F + \vec{M}F + P\vec{D}F + m\vec{g} + m\vec{\Lambda}$$

$$\frac{\vec{D}F}{m} = -\frac{\pi\rho d^2}{8m} (C_{d_0} + C_{d_{a^*}}a_e^2) v\vec{v}$$

$$\frac{\vec{L}F}{m} = \frac{\pi\rho d^2}{8m} (C_{L_a} + C_{L_{a^*}}a_e^2) (v^2\vec{x} - (\vec{v} \cdot \vec{x})\vec{v})$$

$$\frac{\vec{M}F}{m} = -\frac{\pi d^3}{m8l_x} C_{mag-m}(\vec{H} \cdot \vec{x})(\vec{x} \times \vec{v})$$

$$\frac{P\vec{D}F}{m} = \left(\frac{\pi\rho d^3(C_{N_q} + C_{N_{\alpha t}})}{m8l_y} \right) v(\vec{H} \times \vec{x})$$

$$\vec{g} = -g_0 \left(\frac{R^2}{r^3} \right) \vec{r}$$

$$\vec{\Lambda} = -2(\vec{\omega} \times \vec{u})$$

$$\vec{M} = O\vec{M} + P\vec{D}M + M\vec{M} + S\vec{D}M$$

$$O\vec{M} = \frac{\rho d^3 \pi}{8} (C_{M_\alpha} + C_{M_{\alpha^*}}a^2) v(\vec{v} \times \vec{x})$$

$$P\vec{D}M = \frac{\rho d^4 \pi}{8l_y} (C_{M_q} + C_{M_{\alpha t}}) v[\vec{H} - (\vec{H} \cdot \vec{x})\vec{x}]$$

$$M\vec{M} = \frac{\rho d^4 \pi}{8l_y} C_{mag-m}(\vec{H} \cdot \vec{x}) [(\vec{v} \cdot \vec{x})\vec{x} - \vec{v}]$$

$$S\vec{D}M = \frac{\rho d^3 \pi}{8l_x} C_{spin} v(\vec{H} \cdot \vec{x})\vec{x}$$

2 Phần Toán học

2.1 Mở đầu

2.1.1 Phân tích lực thành phần

Ta sẽ liệt kê lại hợp lực ảnh hưởng đến vật thể:

$$m\vec{a} = \vec{D}F + \vec{L}F + \vec{M}F + P\vec{D}F + m\vec{g} + m\vec{\Lambda}$$

Từng thành phần sẽ được phân tích sau đây:

2.2 Chi tiết các lực thành phần

2.2.1 Lực cản khí động học - Drag Force

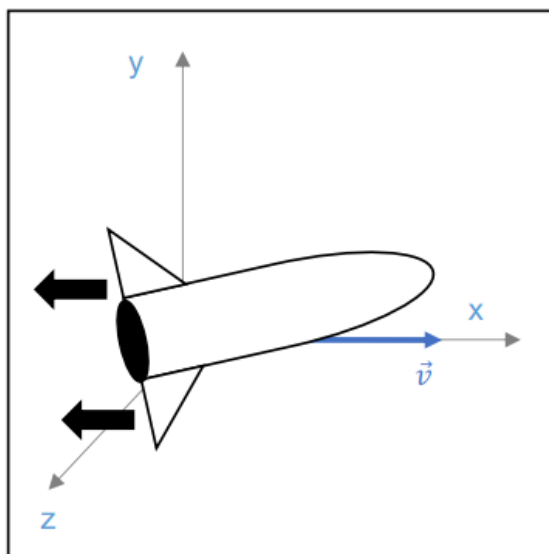
Lực cản khí động học là lực cản từ một vật khi di chuyển trong một môi trường chất lỏng như không khí, như thể hiện hình dưới đây. Trong ngoại khí động học, các lực và mô men khác nhau do luồng khí tạo ra đóng vai trò quan trọng trong việc xác định vị trí cuối cùng của đạn. Việc mô hình hóa lực cản là một thách thức lớn vì lực cản khí động học rất phức tạp, hoặc thường gần như không thể mô hình hóa phân tích được do hành vi phức tạp của luồng không khí quanh vật thể dựa trên hình dạng của nó.

Lực cản phụ thuộc vào nhiều yếu tố như hình dạng, vận tốc, mật độ không khí và các đặc tính khác của dòng khí. Trong mô hình đường đạn, lực cản ảnh hưởng mạnh đến quỹ đạo và là một trong các lực chính cần được quan tâm

Theo tài liệu, chúng ta biết rằng có thể biểu diễn gia tốc do lực cản của vật thể bằng phương trình dưới đây.

$$\frac{D\vec{F}}{m} = -\frac{S\rho}{2m}(C_{D0})v\vec{v}$$

Trong đó S là diện tích mặt cắt ngang của vật thể, đối với một vật phóng bay thẳng, đây thường là diện tích của một hình tròn có đường kính bằng cỡ nòng của vật và C_{D0} là hệ số cản khí động học, thay đổi theo dòng chảy xung quanh vật thể và thường được biểu diễn dưới dạng hàm số của số Mach.

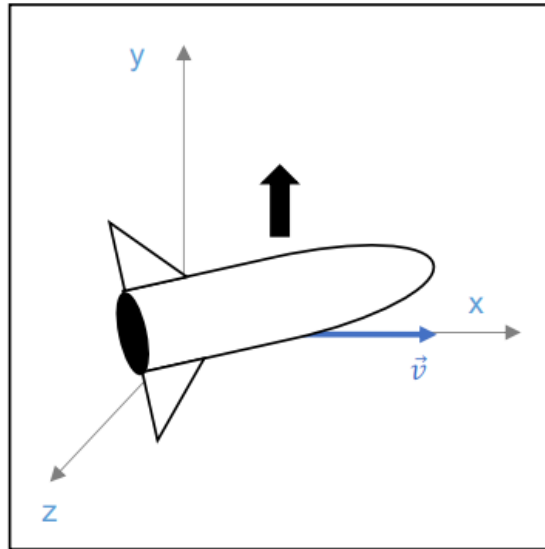


Hình 1: Drag force example

2.2.2 Lực nâng - Lift Force

Lực nâng tác động lên tâm áp suất của vật ném, và hướng vuông góc với luồng khí như thể hiện trong hình . Độ lớn của lực nâng bị ảnh hưởng bởi một số yếu tố, chủ yếu là thiết kế của vật ném:

Trong đó α là vectơ định hướng của vật ném và $C_l(\alpha)$ là hệ số lực nâng khí động học, biến đổi theo dòng chảy xung quanh vật thể, và thường được biểu diễn dưới dạng hàm số của số Mach.



Hình 2: Lift Force

2.2.3 Lực Magnus - Magnus Force

Lực Magnus thường liên quan đến vật phóng được ổn định bằng spin khi luồng không khí kéo nhanh hơn xung quanh một phía, tạo ra chênh lệch áp suất khiến vật phóng di chuyển theo hướng về phía có áp suất thấp hơn như thể hiện trong hình

Ta có miêu tả chi tiết công thức như sau:

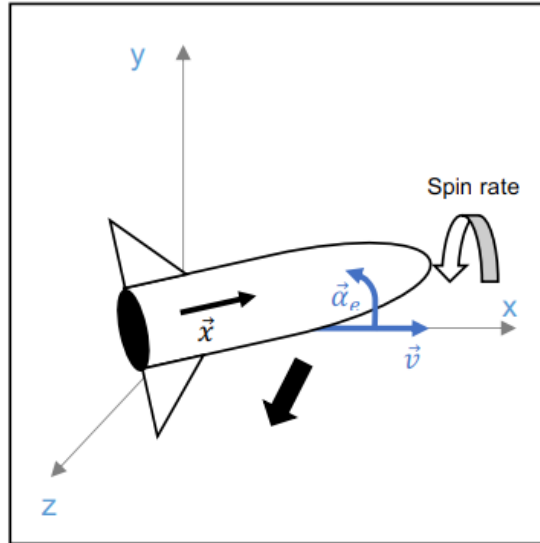
$$\frac{\overrightarrow{MF}}{1} = -\frac{\pi \rho d^3}{8 I_x} C_{mag-f} (\vec{H} \cdot \vec{x}) (\vec{x} \times \vec{v})$$

Trong đó d là cỡ nòng của vật phóng, H là tổng mô men động lượng của vật, I_x là mô men quán tính trục Axial và C_{magf} là hệ số lực Magnus khí động học , thường là một đại lượng âm nhỏ, p là tốc độ quay dọc trục và alpha e là góc lệch nghiêng. Góc lệch nghiêng là một cách thuận tiện để mô tả góc lắc dọc theo quỹ đạo, được minh họa bằng phương trình sau:

$$\vec{\alpha}_e = -8 \frac{I_x p (\vec{v} \times \vec{u})}{\pi \rho d^3 (C_{M_\alpha}) v^4}$$

Trong đó: C_{M_α} là hệ số mô men lật.

Một cách đơn giản hơn: Hướng của lực Magnus là vuông góc cả với vector vận tốc v và vector góc quay của nó. Ta có hình học hướng bằng tích chéo:



Hình 3: Magnus Force

2.2.4 Lực giảm chấn góc

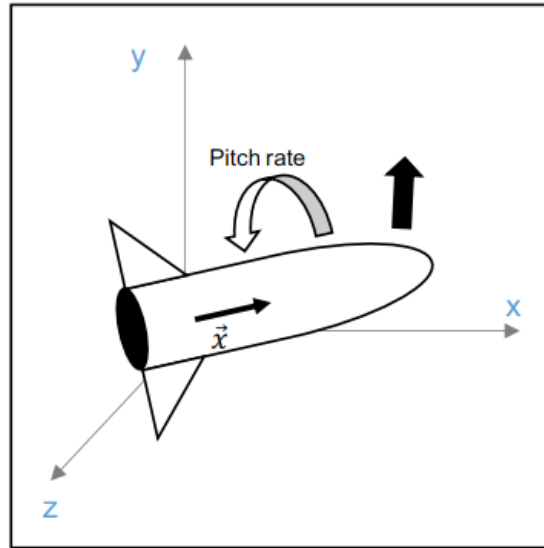
Lực giảm chấn góc tác dụng lên mặt phẳng vận tốc góc ngang, không nhất thiết phải giống với mặt phẳng lệch như thể hiện trong hình dưới đây.

Lực giảm chấn góc tấn gồm hai phần; một phần tỷ lệ với vận tốc góc ngang, và phần thứ hai tỷ lệ với tốc độ thay đổi của tổng góc tấn.

Tiêu chuẩn STANAG 4355 mô tả cho hệ 5 bậc tự do (5-DOF) bằng phương trình sau:

$$\overrightarrow{PDF} = \left(\frac{\pi \rho d^3 (C_{N_q} + C_{N_{\dot{\alpha}}})}{8 I_y} \right) v (\vec{H} \times \vec{x}) \quad (3.13)$$

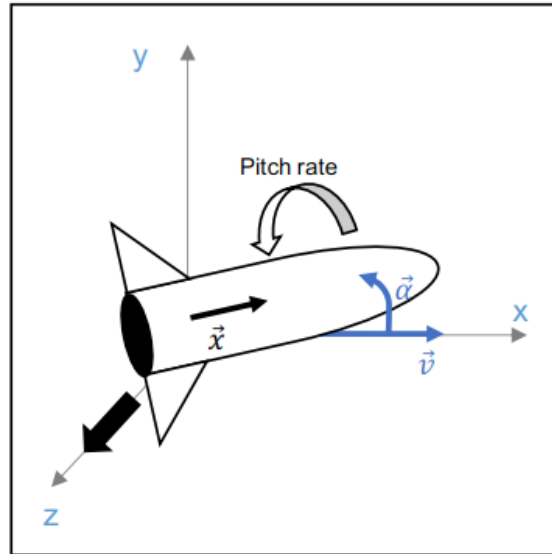
Trong đó I_y là mômen quán tính ngang trục và hệ số lực giảm chấn góc được xác định từ tổng của C_{N_q} và $C_{N_{\dot{\alpha}}}$. Lực giảm chấn góc tác động lên các viên đạn ổn định quay thường nhỏ hơn đáng kể so với lực bình thường, và rất ít phép đo trực tiếp được thực hiện trong các thí nghiệm ảnh cháy tia lửa sáng. Lực giảm chấn góc, tương tự như lực Magnus, cần được giữ lại để đảm bảo tính đầy đủ về mặt logic, nhưng thường bị bỏ qua trong thực tế.



Hình 4: Pitch damping force

Momen lật:

Momen lật là momen khí động liên quan tới lực pháp tuyến như minh họa trong Hình 5.



Hình 5: Momen lật trong đó mũi tên đậm thể hiện hướng tác động, và tốc độ góc pitch nằm dọc theo trục bên.

Momen lật dương làm tăng góc quay (yaw). Tiêu chuẩn STANAG 4355 mô tả momen lật cho hệ 5 bậc tự do bằng phương trình:

$$\overrightarrow{OM} = \frac{\rho d^3 \pi}{8} (C_{M_\alpha} + C_{M_{\alpha^2}} \alpha^2) v (\vec{v} \times \vec{x}) \quad (3.14)$$

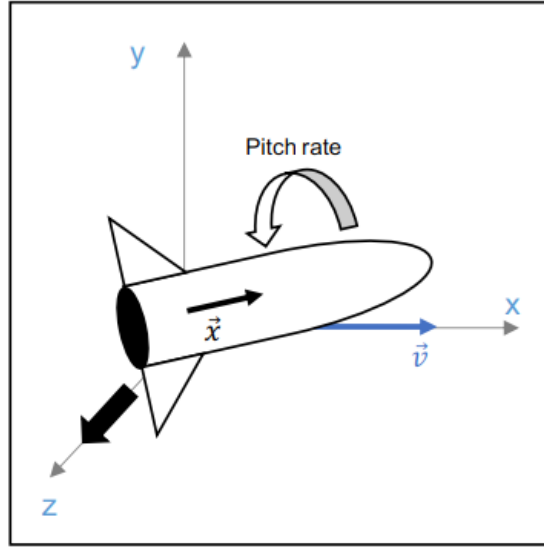
Một số tác giả gọi momen lật là “momen pitch” hoặc “momen tĩnh”. Momen lật thay đổi theo sin của tổng góc quay (yaw).

Momen giảm chấn pitch:

Tiêu chuẩn STANAG 4355 mô tả cho hệ 5 bậc tự do bằng phương trình:

$$\overrightarrow{PDM} = \frac{\rho d^4 \pi}{8 I_y} (C_{M_q} + C_{M_{\dot{\alpha}}}) v \left[\vec{H} - (\vec{H} \cdot \vec{x}) \vec{x} \right] \quad (3.15)$$

Momen giảm chấn pitch luôn ngược chiều với tốc độ pitch (do đó thường là âm) như minh họa trong Hình 6. Nó làm giảm tốc độ pitch như tên gọi của nó. Nói chung, momen giảm chấn pitch dương làm tăng tốc độ pitch và vì thế làm mất ổn định.



Hình 6: Momen giảm chấn pitch trong đó mũi tên đậm thể hiện hướng tác động, và tốc độ góc pitch nằm dọc theo trục bên.

Lực giảm chấn pitch gồm hai phần; một phần tỷ lệ với vận tốc góc ngang, phần thứ hai tỷ lệ với tốc độ thay đổi của tổng góc tấn.

Tiêu chuẩn STANAG 4355 mô tả cho hệ 5 bậc tự do bằng phương trình:

$$\overrightarrow{PDF} = \left(\frac{\pi \rho d^3 (C_{N_q} + C_{N_{\dot{\alpha}}})}{8 I_y} \right) v (\vec{H} \times \vec{x}) \quad (3.13)$$

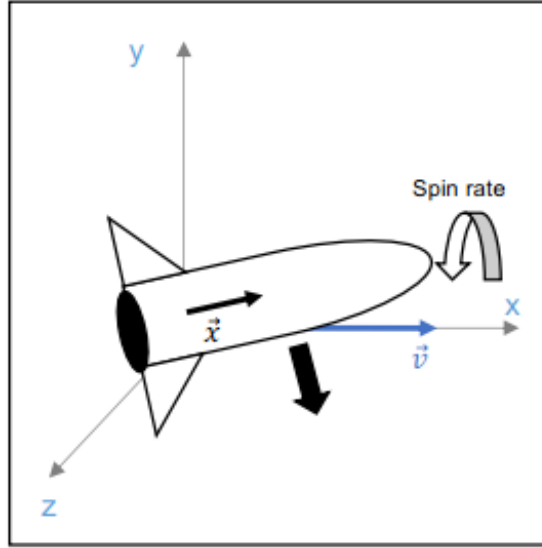
Trong đó I_y là mômen quán tính ngang trục và hệ số lực giảm chấn pitch được xác định từ tổng C_{N_q} và $C_{N_{\dot{\alpha}}}$. Lực giảm chấn pitch tác động lên các viên đạn quay ổn định thông thường nhỏ hơn nhiều so với lực pháp tuyến, và rất ít phép đo trực tiếp trong các thí nghiệm ảnh cháy tia lửa sáng. Lực giảm chấn pitch, giống như lực Magnus, cần được giữ lại vì tính đầy đủ về mặt logic, nhưng thường bị bỏ qua trong thực tế.

2.2.5 Magnus moment

STANAG 4355 miêu tả như sau dưới hệ 5DOF:

$$\overline{MM} = \frac{\rho d^4 \pi}{8 I_y} C_{\text{mag-m}} (\vec{H} \cdot \dot{\vec{x}}) \left[(\dot{\vec{v}} \cdot \dot{\vec{x}}) \dot{\vec{x}} - \dot{\vec{v}} \right] \quad (3.16)$$

Mặc dù moment này rất nhỏ, đủ nhỏ đến mức ta có thể lược bỏ luôn, Tuy nhiên ta vẫn cần cân nhắc đến nó, do giá trị lớn của hệ số mô men Magnus, dương hoặc âm, có thể gây ra tác động tai hại đến độ ổn định động in Figure 7.



Hình 7: Magnus moment.

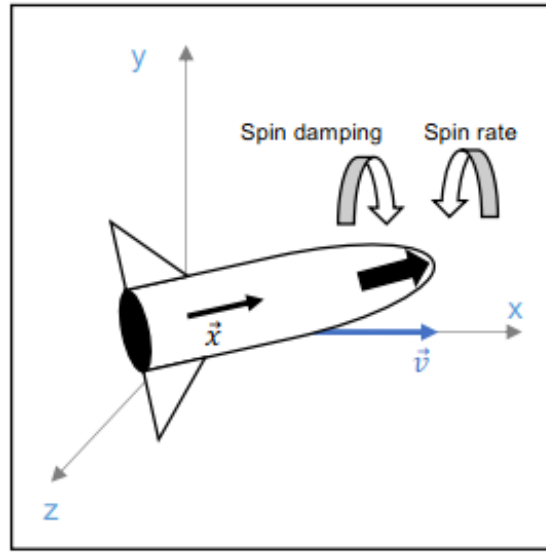
2.2.6 Moment xoáy

Mô men giảm chấn quay chống lại chuyển động quay của vật phóng; nó luôn làm giảm chuyển động quay dọc trục as shown in Figure 9.

Biểu đạt như sau:

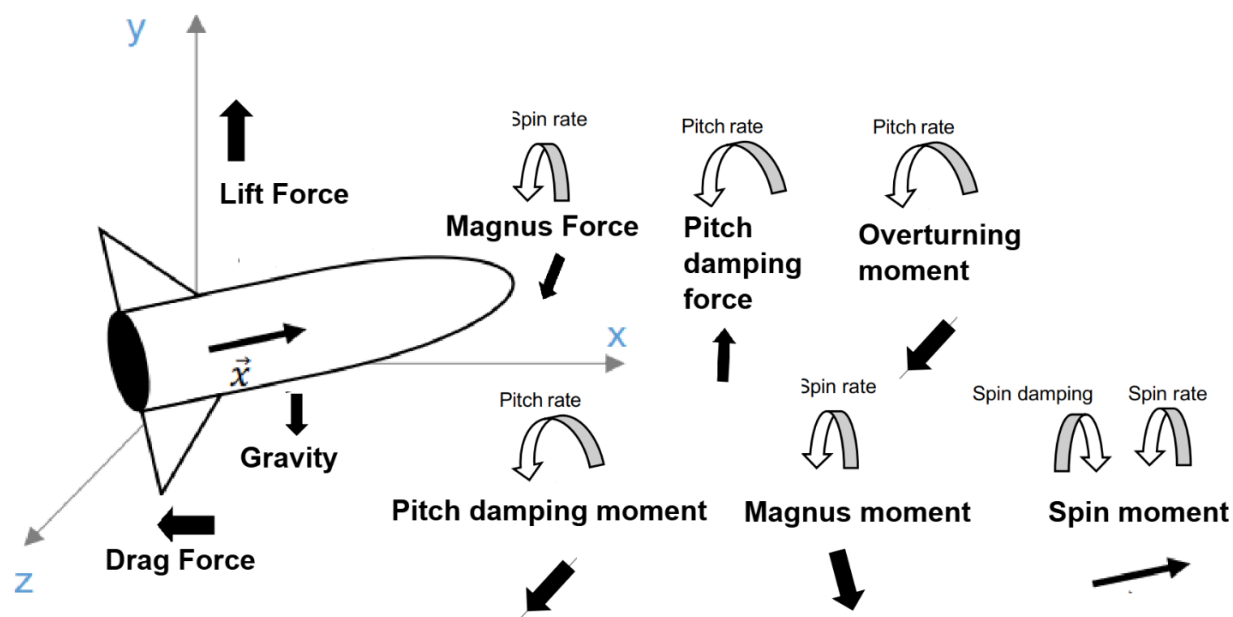
$$\overline{\overline{SDM}} = \frac{\rho d^3 \pi}{8 I_x} C_{\text{spin}} v (\vec{H} \cdot \dot{\vec{x}}) \dot{\vec{x}} \quad (3.17)$$

Hệ số mô men giảm chấn spin luôn âm. Do đó, cả spin dọc trục và vận tốc hướng về phía trước đều giảm dọc theo quỹ đạo, đối với các vật thể được ổn định bằng spin điển hình. Do spin giảm chậm hơn (do giảm chấn spin) so với tốc độ giảm vận tốc (do lực cản), độ ổn định con quay hồi chuyển thường tăng lên dọc theo quỹ đạo.



Hình 8: Mô men xoáy trong đó mũi tên đen đậm thể hiện hướng tác động, và tốc độ quay dọc theo trục dọc.

2.2.7 Kết luận về hợp lực tác dụng lên vật thể



Hình 9: Mô hình hóa tổng hợp lực