

Compensation simultanée les forces d'inertie et le couple moteur du mécanisme bielle-manivelle

L. MOUSSAFIR ^{a, b}, V. ARAKELIAN ^{a, b}

^{a, b} INSA-Rennes / Mecaproce

20 av. des Buttes de Coësmes, CS 70839,

F-35708 Rennes, France

^{a, b} LS2N-ECN UMR 6004, 1 rue de la Noë, BP 92101,

F-44321 Nantes, France

leo.moussafir@insa-rennes.fr

vigen.arakelyan@insa-rennes.fr

Résumé :

Cet article propose un concept qui permet d'équilibrer simultanément des forces d'inertie et le couple d'entrée dans les mécanismes à bielle-manivelle. Dans la précédente étude, la résultante des forces d'inertie avait été annulée via un mécanisme à came reliée à un contrepoids. Ensuite, le ressort conçu pour maintenir le contact dans ce mécanisme à came d'équilibrage a été utilisé pour la compensation du couple d'entrée. À cet effet, le ressort a été joint avec une deuxième came montée sur la manivelle d'entrée. De cette manière, un équilibrage complet a été réalisé. La présente étude propose de minimiser la résultante des forces d'inertie et le couple d'entrée par une seule came. Le concept proposé permet de n'utiliser qu'une seule came pour résoudre partiellement les deux problèmes mentionnés. La solution proposée est illustrée par un exemple numérique qui montre son efficacité.

Abstract :

This paper proposes a design concept which allows the simultaneous shaking force balancing and input torque compensation in slider-crank mechanisms. In the previous study, the shaking force has been cancelled via a cam mechanism carrying a counterweight. Then, the spring designed for maintaining contact in this balancing cam mechanism has been used for torque compensation. For this purpose, the spring has been jointed with a second cam mounted on the input crank. In this way, a complete balancing has been achieved. The present study proposes to minimize the shaking force and the input torque by a single cam. The proposed design concept allows the development of only one cam for solving partially the both mentioned problems. The suggested solution is illustrated by a numerical example, which shows its efficiency.

Mots clefs : équilibrage, forces d'inertie, couple moteur, mécanisme bielle-manivelle, optimisation multicritères, mécanisme à came, loi de mouvement

1 Introduction

Les machines rapides sont sujettes à des sources importantes des charges dynamiques variables. Ces charges dynamiques variables provoquent les problèmes de vibration et de fluctuation du couple moteur. Ces deux problèmes sont connus et de nombreuses méthodes ont été développées et documentées [1]. Cependant, ces thèmes sont examinés séparément, comme deux problèmes découplés [2]-[5]. Dans [6], il a été proposé de combiner ces deux problèmes et équilibrer simultanément des forces d'inertie et le couple d'entrée par deux cames distinctes liées avec un contrepoids et un ressort (Fig. 1). Le contrepoids (6) assure l'équilibrage des forces d'inertie du mécanisme et le ressort (8) assure les contacts permanents entre les galets et les cames, ainsi que l'équilibrage du couple d'entrée.

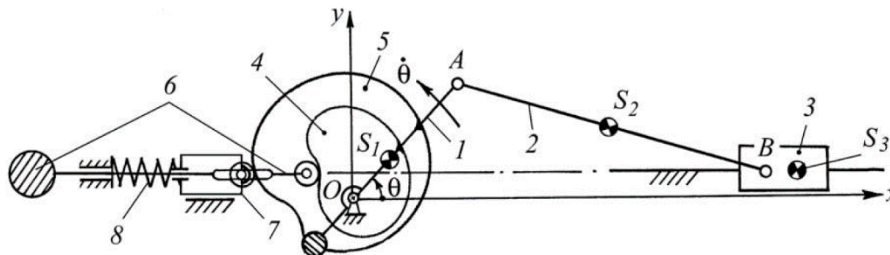


Fig.1. Mécanisme bielle-manivelle équilibré à l'aide de deux cames (4) et (5).

La présente étude propose une nouvelle solution pour compenser simultanément les forces d'inerties et le couple d'entrée dans un mécanisme bielle manivelle à l'aide d'une seule came combinée avec un contrepoids et un ressort. En d'autres termes, les cames (4) et (5) sont remplacées par une seule came qui assure aussi bien le déplacement du contrepoids (6) d'équilibrage des forces d'inertie que la compression du ressort (8) d'équilibrage du moment moteur.

2 Présentation du problème

2.1 Design du mécanisme bielle manivelle désaxée

Afin de mieux comprendre le problème traité dans le présent article considérons d'abord la solution proposé dans [6]. Le mécanisme bielle manivelle examiné utilise donc deux cames pour pouvoir compenser de manière optimale les forces d'inertie et le couple d'entrée. En découplant ainsi les lois de mouvements à utiliser pour générer les mouvements d'équilibrage, on réussit à trouver de manière analytique la solution afin de compenser simultanément les forces d'inertie et le couple d'entrée.

La première came permettant de compenser les forces d'inertie alternatives à une loi de mouvement imposée par :

$$\ddot{x}_{s6} = -\frac{m_b + m_3}{m_6} \ddot{x}_B$$

où m_3 la masse de la glissière 3, m_b est la masse de la bielle 2 substituée à l'axe de la glissière, m_6 est la masse du suiveur 6 avec le contrepoids, \ddot{x}_{s6} est l'accélération du suiveur 6 et \ddot{x}_B l'accélération de la glissière.

La loi de mouvement de la seconde came permettant de compenser du couple d'entrée est paramétrée par la compensation du moment d'entrée dans le mécanisme :

$$\tau = (m_b + m_3) \left(1 + \frac{m_b + m_3}{m_6} \right) \left(\frac{\partial x_b}{\partial \theta} \right) \left(\frac{\partial^2 x_b}{\partial \theta^2} \right) \omega^2 + k \frac{\partial \delta}{\partial \theta}$$

où x_b est le déplacement de la glissière 3, θ est l'angle de rotation de la manivelle 1, $\omega = \dot{\theta}$ est la vitesse angulaire de la manivelle 1, k est le raideur du ressort 8, δ est le déplacement de l'extrémité du ressort par rapport à sa position d'équilibre.

Pour compenser le moment d'entrée du mécanisme, la loi de mouvement de δ doit donc être générée de telle manière que $\tau = 0$.

Dans le cas d'un mécanisme avec une seule came de compensation, nous avons deux équations dépendant de δ :

$$F = \ddot{x}_{s6} m_6 + (m_b + m_3) \frac{\partial^2 \delta}{\partial \theta^2} \omega^2 \quad (1)$$

$$\tau = (m_b + m_3) \left(1 + \frac{m_b + m_3}{m_6} \right) \left(\frac{\partial x_b}{\partial \theta} \right) \left(\frac{\partial^2 x_b}{\partial \theta^2} \right) \omega^2 + k \frac{\partial \delta}{\partial \theta} \quad (2)$$

On remarque donc que δ et ses première et seconde dérivées interviennent dans deux équations distinctes. Une résolution explicite de ces équations n'est pas considérée dans cette étude. Une méthode pour résoudre numériquement ce problème est présentée. Ainsi, le but de l'équilibrage par une seule came est de minimiser les forces d'inertie du mécanisme, ainsi que le couple d'entrée.

On introduit donc deux critères à minimiser :

$$C_1 = \sum_{\theta=0}^{2\pi} |\tau| \quad (3)$$

$$C_2 = \sum_{\theta=0}^{2\pi} |F| \quad (4)$$

Une contrainte importante est la garantie de contact entre la came et le suiveur ce qui sous entends que l'effort généré par le ressort doit toujours être supérieur ou égal à celui généré par l'accélération alternative.

$$k\delta \geq (m_b + m_3) \ddot{x}_b$$

Il est bien entendu que l'angle de pression doit rester dans les limites admissibles.

3 Détermination de la loi de mouvement

La loi de mouvement δ sera donc générée de manière procédurale. Cette loi sera déterminée sur l'intervalle $[0 ; 2\pi]$. On dispose, *à priori*, un nombre de points n dans cet intervalle avec m conditions limites sur ceux-ci. La méthode de création de loi reprend celle développée dans [7]. Ils font donc également définir une classe de raccord entre chaque spline générées. Les conditions limites permettent de modifier l'allure générale des splines créées par interpolation polynomiale. Les différentes splines sont ensuite raccordées avec la classe définit en amont pour former la loi de mouvement complète. La courbe obtenue est ensuite discrétisée en un nombre défini de valeurs. Les équations de la dynamique (1) et (2) peuvent être calculés ainsi que les critères (3) et (4).

L'algorithme d'optimisation se chargera donc de modifier les conditions limites afin de minimiser les deux critères considérés tout en assurant le respect de la contrainte de contact et de l'angle de pression. Le problème étant multi-objectif, un grand nombre de solutions optimisées peuvent être trouvées. On

choisira donc l'outil du front de Pareto pour restreindre les choix, la solution finale étant à la discrétion du concepteur.

4 Exemple illustratif

4.1 Paramétrage

Les paramètres suivants seront utilisés pour la simulation: $L_{OA} = 0.292$ m, $L_{AB} = 0.427$ m, $r_1 = 0.5L_{OA}$; $r_2 = 0.5L_{AB}$, $y_B = 0.1$ m, $m_1 = 2$ kg, $m_2 = 3$ kg, $m_3 = 4$ kg, $I_{S1} = 0.03$ kg/m², $I_{S2} = 0.14$ kg/m², où L_{OA} est la distance entre des axes O et A, L_{AB} est la distance entre des axes A et B, r_1 est la disposition du centre de gravité de la manivelle 1, r_2 est la disposition du centre de gravité de la bielle 2, y_B est le désaxement de la glissière 3, m_1 est la masse de la manivelle 1, m_2 est la masse de la bielle 2, m_3 est la masse de la glissière 3, I_{S1} est l'inertie axiale de la manivelle 1, I_{S2} est l'inertie axiale de la bielle 2.

La période du mécanisme est fixée à 1 sec. En choisissant $r_{cp} = 0.2$ m, on obtient $m_{cp} = 3.25$ kg, où r_{cp} est la distance entre le centre de gravité du contrepoids et l'axe de rotation O de la manivelle 1, m_{cp} est la masse du contrepoids afin d'équilibrer la masse m_A due de la substitution de la masse m_2 de la bielle 2 par deux masses ponctuelle [1]. Ce contrepoids est monté sur la manivelle d'entrée 1.

On choisit que la loi de mouvement comporte 6 points distincts, du fait de la géométrie de la came, le premier et le dernier point auront les mêmes conditions limites.

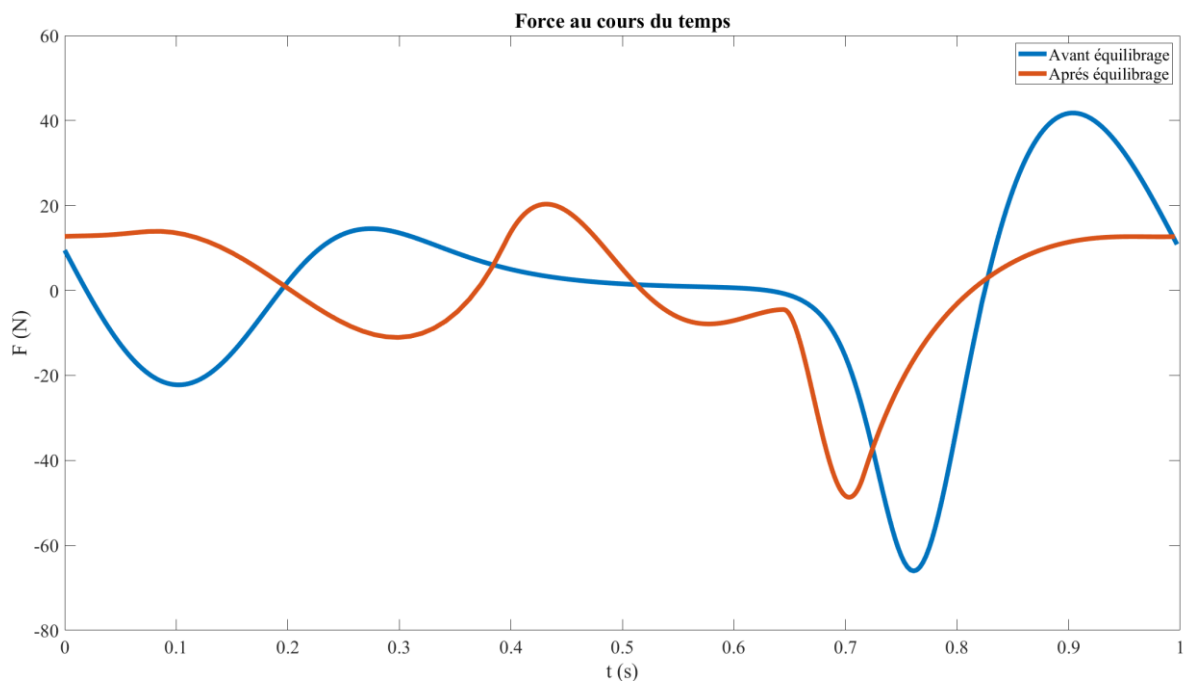


Fig.2. Forces d'inertie dans le mécanisme avant et après équilibrage.

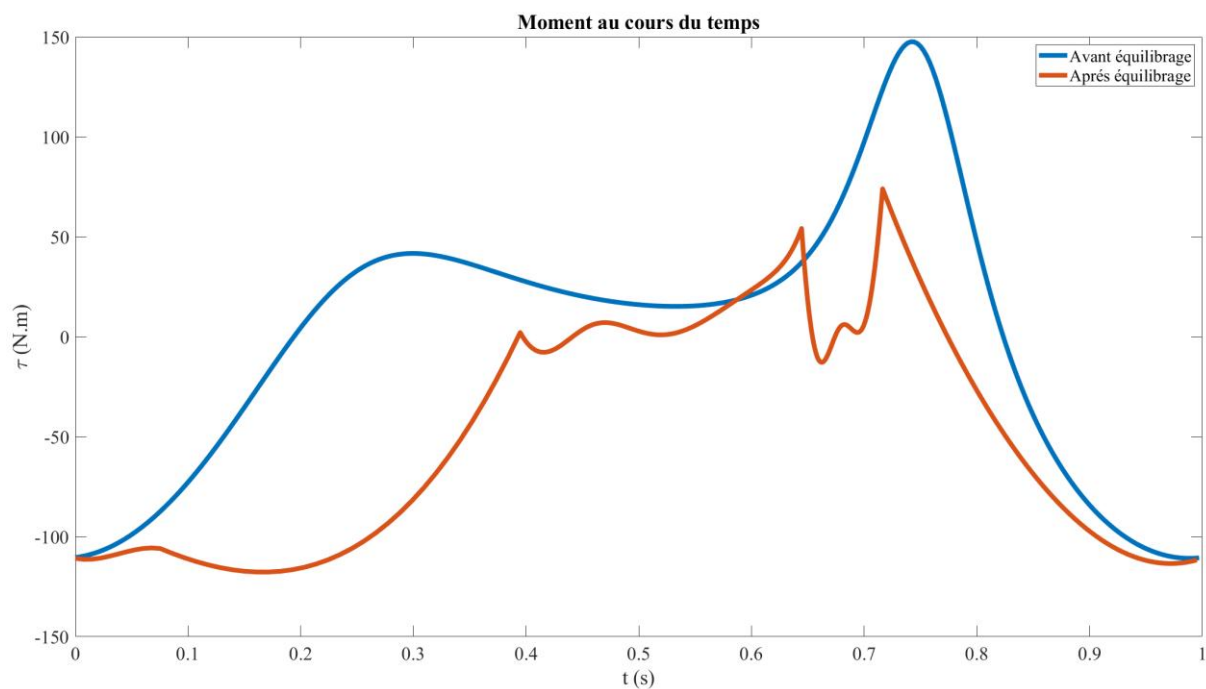


Fig.3. Couple d'entrée du mécanisme avant et après équilibrage.

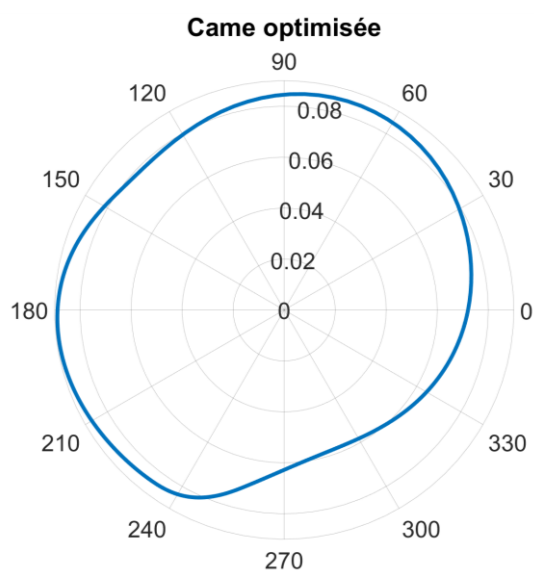


Fig.4. Profile de la came optimisée.

Le problème est défini avec ces paramètres:

Variables: $X = [x_a, x_b, x_c, x_d, x_e, y_a, y_b, y_c, y_d, y_e, \dot{y}_a, \dot{y}_b, \dot{y}_c, \dot{y}_d, \dot{y}_e, \ddot{y}_a, \ddot{y}_b, \ddot{y}_c, \ddot{y}_d, \ddot{y}_e, m_6, k]$;

Nombre de génération: 300 MOGA II, plan d'expérience: 20 SOBOL;

Nombre d'objectifs: 2

- Minimiser C_1
- Minimiser C_2

Nombre de contraintes : 2

- $k\delta \geq (m_b + m_3) \ddot{x}_b$
- $\alpha \leq \alpha_{adm}$

où α est l'angle de pression du mécanisme à came.

Les quantités C_1 et C_2 sont directement liées à l'échantillonnage appliqué. Ainsi pour comparer deux solutions il faudra prendre soin d'avoir le même nombre de données numériques.

4.2 Résultats

Après optimisation de la loi de mouvement à l'aide de l'algorithme MOGA II on obtient les résultats suivants, pour une solution parmi celles obtenues dans le front de Pareto de l'optimisation multi-objectifs (Fig. 2 et Fig. 3). Figure 4 montre le profil de la came optimisée.

On constate une diminution de 30% pour la valeur maximum des forces d'inertie, ainsi qu'une diminution de 50% pour la valeur maximum du couple d'entrée.

5 Conclusion

Les machines, de plus en plus rapides, doivent sans cesse être améliorées afin d'équilibrer au mieux les charges dynamiques variables qu'elles subissent. Un thème majeur de la dynamique et de la conception des machines rapides vise à minimiser les forces d'inertie que ces machines appliquent sur leur environnement via leur support. Un autre thème, qui est également très important dans la dynamique des machines, est la minimisation du couple d'entrée causée par les charges dynamiques variables. Ces deux problèmes sont connus et de nombreuses méthodes ont été développées et documentées. Cependant, ils sont considérés séparément, comme deux problèmes découplés. Dans une industrie où la recherche du coût minimal est primordiale, une méthode permettant d'équilibrer simultanément le couple d'entrée et les forces d'inerties d'un mécanisme à l'aide d'une seule came présente un avantage considérable. La méthode proposée dans l'article actuel permet de résoudre ce problème. Un exemple illustratif montre son efficacité.

Références

- [1] V. Arakelian, S. Briot. Balancing of linkages and robot manipulators. Advanced methods with illustrative examples. Springer (2015).
- [2] G. Spinnler, Conception des machines. Principes et applications. Vol.2: Dynamique. Ed.: Presses polytechniques et universitaires romandes (2001).
- [3] Angeles J., Wu C.-J., The optimum synthesis of an elastic torque-compensating cam mechanism, Mechanism and Machine Theory, 36, (2001) 245-259.
- [4] R.S. Berkof. The input torque in linkages. Mechanism and Machine Theory, 14, (1979) 61-73.
- [5] V. Arakelian, M. Smith, Shaking force and shaking moment balancing of mechanisms: an historical review with new examples. Transactions of the ASME. Journal of Mechanical Design, Vol. 127(2), (2005) 334-339.
- [6] V. Arakelian, S. Briot. Simultaneous inertia force/moment balancing and torque compensation of slider-crank mechanisms, Mechanics Research Communications Mechanics Research Communications. 37(2), (2010) 265-269.
- [7] L. Moussafir, V. Arakelian, Multi-criteria design optimization of cam mechanisms combining different splines given by checkpoints. Proceedings of the 15th World Congress in Mechanism and Machine Science, June 30 –July 4, Krakow, Poland (2019).