

MODELACIÓN HÍBRIDA Y OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO DE PROCESOS DE MANUFACTURA MECÁNICA

Autor principal: Ramón Quiza Sardiñas

Otros autores: Marcelino Rivas Santana, J. Paulo Davim, Omar López Armas y Eleno Alfonso Brindis

Colaboradores: Eduardo Torres Alpízar, Orestes González Quintero y Gerardo Beruvides López

Entidad Ejecutora Principal: Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos. Autopista a Varadero. km 3½, Matanzas CP 44740, Cuba. Fax: +(53)(45)253101. Teléf. + (53) (45)261432.
E-mail: quiza@umcc.cu, quizadocal@gmail.com

Entidad participante: Universidad de Aveiro, Portugal

Dr.C. Ramón Quiza Sardiñas (30%). Propuso y desarrolló la metodología de optimización. Implementó el método de algoritmos genéticos. Concibió y ejecutó las aplicaciones a procesos de maquinado.

Dr.C. Marcelino Rivas Santana (20%). Contribuyó a la metodología de optimización. Concibió y ejecutó las aplicaciones a procesos de soldadura.

Dr. J. Paulo Davim (20%). Contribuyó a la metodología de optimización. Participó en las aplicaciones a procesos de maquinado.

M.Sc. Ormar López Armas (15%). Desarrolló aplicaciones para el uso de elementos finitos en los procesos de corte de metales.

Dr.C. Eleno Alfonso Brindis (15%). Contribuyó al desarrollo de la metodología de optimización y sus aplicaciones a procesos de maquinado.

RESUMEN

El uso de regímenes óptimos es de importancia capital para el desarrollo de procesos de manufactura mecánica eficientes, en un entorno industrial flexible y competitivo. El trabajo presenta los resultados de una metodología de optimización aplicada a procesos mecánicos de manufactura. La optimización se lleva a cabo desde un enfoque multiobjetivo, tomando criterios que reflejen los aspectos principales del proceso productivo (productividad, consumo herramental, calidad de la producción y otros). Al ser estos objetivos mutuamente conflictivos, se emplea un enfoque *a posteriori*, donde primero se obtiene un grupo de soluciones óptimas de Pareto, a través de la aplicación de algoritmos genéticos y a continuación se selecciona cuál de ellas es la más conveniente para las

condiciones concretas de producción. Para la modelación de los procesos involucrados en la optimización (ya sean como objetivos o como restricciones), se utiliza un enfoque híbrido que combina el método de elementos finitos con las herramientas de inteligencia artificial. Esto conduce tanto a una notable reducción del costo experimental como a una mayor flexibilidad y versatilidad de los modelos obtenidos. Los resultados del trabajo han sido publicados, entre otros, en un libro, cinco artículos en revistas de alto impacto (WoS o Scopus) y cuatro capítulos como contribuciones a libros. La metodología desarrollada permite su aplicación no sólo a aquellas condiciones de producción típicas de países económicamente desarrollados (que son las que usualmente aparecen en la literatura especializada), sino también aquellas condiciones típicas de países con economías en vías de desarrollo, como las que predominan en la industria mecánica cubana. Han sido aplicados en dos empresas de la provincia de Matanzas, teniendo un impacto positivo.

COMUNICACIÓN CORTA

Introducción

El uso de procesos de manufactura óptimos es un requisito indispensable en la industria contemporánea, insertada en ambientes productivos altamente cambiantes y competitivos. Sin embargo, la optimización de estos procesos está lejos de ser una tarea simple, lo que se debe, entre otros factores, a la alta complejidad de los fenómenos físicos que tienen lugar en estos procesos, lo que provoca una marcada no linealidad en los modelos que describen el comportamiento de las variables involucradas [Quiza et al., 2012].

Dicha complejidad no permite, en primer lugar, obtener modelos precisos y robustos de estos fenómenos con técnicas estadísticas convencionales como las regresiones. Adicionalmente, se requiere una apreciable cantidad de datos para ajustar estos modelos empíricos, lo que encarece sensiblemente su obtención.

El método de elementos finitos (MEF) permite resolver sistemas de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, definidas sobre dominios geoméricamente complejos. Esto hace que sea ideal para modelar procesos físicos regidos por este tipo de ecuaciones, tales como la mecánica de los sólidos (tanto elásticos como plásticos), la transferencia de calor o la difusión. Consecuentemente, ha sido ampliamente aplicado en la simulación de procesos de manufactura tales como empujado, la soldadura y la conformación. A pesar de ciertas limitaciones, debidas a las insuficiencias del conocimiento actual sobre ciertos fenómenos tales como la termoviscoplasticidad, la fractura o la fricción, el MEF ha probado ser capaz de proporcionar resultados con un grado de precisión satisfactorio para ser aplicados en la práctica industrial.

Por otro lado, las técnicas de inteligencia artificial (IA), especialmente aquellas conocidas como computación blanda, permiten obtener modelos matemáticos en forma de aproximadores funcionales, que relacionen datos complejos, con grandes no linealidades y ruidos. La combinación de ambas técnicas (MEF e IA) tiene el potencial de lograr modelos precisos y robustos, a un costo razonable.

Adicionalmente, tampoco se puede garantizar que las funciones objetivo de la optimización cumplan con las condiciones de continuidad, suavidad y unimodalidad necesarias para la aplicación de los métodos numéricos de optimización. En este sentido, las técnicas heurísticas, tales como los algoritmos genéticos, constituyen una alternativa viable, al no ser tan exigentes con respecto a las condiciones que deben cumplir las funciones objetivos. Más aún, estas técnicas permiten ser aplicadas a problemas de optimización multiobjetivo, desde un enfoque *a posteriori*, con lo que llega a un conjunto de soluciones óptimas, llamado frontera de Pareto, para luego seleccionar la más conveniente de ellas, según las condiciones concretas del problema.

En el trabajo se propone una combinación de modelación híbrida (MEF e IA) con optimización multiobjetivo basada en técnicas heurísticas, para diseñar procesos óptimos de manufactura mecánica.

Modelación híbrida

El modelo propuesto es un híbrido que combina la capacidad del método de los elementos finitos (MEF) para resolver modelos basados en ecuaciones diferenciales con la capacidad de generalización y la eficiencia computacional de las predicciones de las técnicas inteligentes de modelación (ver figura 1).

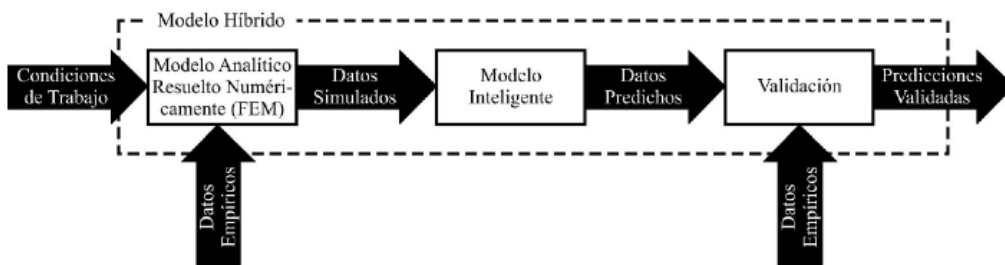


Figura 1 Modelo híbrido de procesos y sistemas mecánicos

El modelo híbrido utiliza el método de elementos finitos para obtener soluciones aproximadas a los sistemas de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que describen los fenómenos que tienen lugar en el proceso (plasticidad, transferencia de calor, difusión y otras). Además de las asunciones teóricas, tales como las ecuaciones de continuidad, de conservación de la masa y la energía, o las ecuaciones constitutivas de los materiales, el MEF también utiliza ciertos datos experimentales, pero en un volumen muy reducido y, principalmente, para describir el comportamiento de ciertos fenómenos para los cuales no se ha

obtenido una descripción fenomenológica cuantitativamente satisfactoria (fricción, fractura, y otros).

Como resultado de la aplicación del MEF se obtiene una base de datos simulados que permite entrenar un modelo basado en herramientas de IA, la que brindará, a su vez, predicciones que serán utilizadas en la optimización. El uso directo en la optimización de de los modelos basados en el MEF, que parecería ser la solución más simple y natural al problema, no es conveniente, tomando en cuenta que estos modelos requieren un esfuerzo computacional alto para su solución, lo que, dada la cantidad de evaluaciones que requieren los métodos heurísticos de optimización, hace que su uso directo no sea computacionalmente factible. Por el contrario, un modelo basado en IA, entrenado a partir de datos simulados por el MEF, es capaz de ofrecer sus predicciones con un esfuerzo computacional muy bajo [Quiza et al., 2009].

Optimización multiobjetivo

La optimización de los procesos de manufactura mecánica considera, generalmente, varios objetivos conflictivos de forma simultánea. En el maquinado, por ejemplo, se desea disminuir el tiempo de elaboración y el gasto de herramienta; en la soldadura, se desea aumentar el ancho de la costura pero disminuir la cantidad de calor introducido [Quiza et al. 2010].

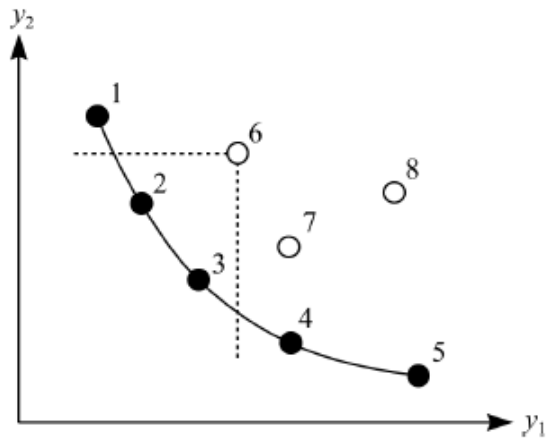


Figura 2 Criterio de dominación de Pareto

La solución usualmente aceptada es conjugar los diferentes objetivos en un único criterio, ya sea por combinación lineal, no lineal o por otro método. Esto se lleva a cabo, por lo común, siguiendo criterios económicos, los cuales distan mucho de ser realistas. La solución propuesta en este trabajo se basa en el enfoque *a posteriori*, aplicando el cual se lleva a cabo primero la optimización desde un enfoque paretiano, que da como resultado un conjunto de valores. Todos estos resultados son óptimos en el sentido de que en el espacio de las soluciones factibles no hay ninguno que mejore uno de los criterios de optimización sin empeorar, a la vez, otro de ellos. En la figura 2 se observa, por ejemplo, un

conjunto de soluciones factibles de un problema de optimización con dos objetivos, $\{y_1, y_2\}$. Como se puede ver, las soluciones 1, 2, 3, 4 y 5 son óptimas según el criterio de Pareto. La solución 6, sin embargo, no lo es, ya que las soluciones 2 y 3 son mejores que ella en ambos objetivos considerados.

El algoritmo genético utilizado para solucionar el problema es el propuesto por Quiza [2006], que, a su vez, es una modificación del microalgoritmo genético propuesto por Toscano [2001]. Éste es un algoritmo elitista que cuenta con una técnica para mantener la diversidad de la población.

Conclusiones

La optimización multiobjetivo desde un enfoque a posteriori permite llevar a cabo la selección de regímenes de trabajo óptimos para procesos de manufactura mecánica. La flexibilidad y versatilidad de este enfoque posibilita su aplicación en muy diversas condiciones industriales, incluidas aquellas típicas de los países en vías de desarrollo, que no suelen ser tenidas en cuenta en la literatura especializada.

Por otro lado, a través del uso de los modelos híbridos como base de la optimización, se logra combinar la potencia de cálculo del método de elementos finitos con la capacidad de generalización, robustez y eficiencia computacional de las técnicas de inteligencia artificial. Esto permite reflejar adecuadamente el comportamiento de las relaciones complejas y no lineales presentes en los procesos mecánicos, con un mínimo de datos experimentales.

En resumen, la metodología propuesta permite diseñar procesos de manufactura más eficientes, lo que puede ser un aporte al logro de producciones más competitivas de la industria mecánica.

Referencias

- (1) Quiza, R., López-Armas, O. and Davim, J.P. (2012) Hybrid modeling and optimization of manufacturing: Combining artificial intelligence and finite element method, Springer Briefs in Applied Sciences and Technology, Heidelberg (Germany): Springer, ISBN 978-3-642-26084-9.
- (2) Quiza, R., Hecker, R. and Davim, J.P. (2010) 'Editorial: A brief overview of artificial intelligence applications in machining', International Journal of Machining and Machinability of Materials, Vol. 8, No.1-2, pp.1-5.
- (3) Quiza, R., Albelo, J.E. and Davim, J.P. (2009) 'Multi-objective optimisation of multipass turning by using a genetic algorithm', International Journal of Materials and Product Technology, Vol. 35, No.1-2, pp.134-144.
- (4) Quiza, R., Rivas, M., Alfonso, E. (2006) 'Genetic algorithm-based multi-objective optimization of cutting parameters in turning processes', Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 19, No.2, pp.127-133.

(5) Toscano, G. (2001) Optimización multiobjetivo usando un micro algoritmo genético [online], Veracruz (México): Universidad Veracruzana, [citado: 23-oct-2003], disponible en Internet en http://delta.cs.cinvestav.mx/~ccoello/tesis/tesis_toscano.ps.gz.

ANEXOS

Premios

- Quiza, R.; Rivas, M.; Alfonso, B., 2010. Artículo más citado de la Revista *Engineering Applications of Artificial Intelligence* en el quinquenio 2005-2010 (“Genetic algorithmbased multi-objective optimization of cutting parameters in turning processes” *Eng. Applic. Artif. Intell.* 19 (2), 2006, pp. 127-133).
- Quiza, R.; Rivas, M., 2008. *Modelación y optimización de los procesos de corte de metales*, Premio CITMA Territorial, Matanzas.
- Quiza, R.; Torres, E., 2007. *Herramienta informática para el diseño de tecnologías de soldadura manual por arco eléctrico*. Premio CITMA Territorial, Matanzas.
- Quiza, R. *Metodología para la optimización multiobjetivo del proceso de torneado*. Premio en la XII Exposición Provincial “Forjadores del Futuro”, Matanzas 2006.

Libros

- Quiza, R.; López-Armas, O.; Davim, J.P., 2012. Hybrid modeling and optimization of manufacturing: Combining artificial intelligence and finite element method. Berlin (Germany): Springer, ISBN 978-3-642-28084-9.

Contribuciones a libros

- Quiza, R.; Davim, J.P., 2011. “Combining the finite element method and artificial intelligence in manufacturing modeling and optimization” (Chapter 6). In: Davim, J.P. (ed.), *Finite element method in manufacturing processes*. London (UK): ISTE, ISBN 978-1-84821-282-4.
- Quiza, R.; Davim, J.P., 2011. “Computational methods and optimization” (Chapter 6). In: Davim, J.P. (ed.), *Machining of hard materials*. London (UK): Springer-Verlag, ISBN 978-1-84996-449-4, DOI 10.1007/978-1-84996-450-0.
- Quiza, R.; Davim, J.P., 2010. “Multi-objective optimisation of cutting parameters for drilling aluminium AA1050” (Chapter 6). In: Davim, J.P. (ed.), *Artificial intelligence in manufacturing research*. New York (USA): Nova Publishers, ISBN 978-1-60876-214-9, pp. 101-110.
- Quiza, R.; Davim, J.P., 2009. “Computational modeling of machining systems” (Chapter 4). In: Özel, T.; Davim, J.P. (eds.), *Intelligent machining: modeling and optimization of the machining processes and systems*. London (UK): ISTE, ISBN 978-1-84821-1-292, pp. 173-213.

Artículos

- Quiza, R.; Hecker, R.; Davim, J.P., 2010. “Editorial: A brief overview of artificial intelligence applications in machining”. *International Journal of Machining and Machinability of Materials* 8 (1-2), pp. 1-5, DOI 10.1504/IJMMM.2010.034505

- Quiza, R.; Albelo, J.E.; Davim, J.P., 2009. “Multi-objective optimisation of multi-pass turning by using a genetic algorithm”. *International Journal of Materials and Product Technology* 35 (1-2), pp. 134-144, DOI 10.1504/IJMPT.2009.025223.
- Quiza, R.; Figuera, L.; Davim, J.P., 2008. “Comparing statistical models and artificial neural networks on predicting the tool wear in hard machining D2 AISI steel”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 37 (7-8), pp. 641-648, DOI 10.1007/s00170-007-0999-7.
- Quiza, R.; Reis, P.; Davim, J.P., 2006. “Multi-objective optimization of cutting parameters for drilling laminate composite materials by using genetic algorithms”. *Composites Science and Technology* 66 (15), pp. 3083-3088, DOI 10.1016/j.engappai.2005.06.007
- Quiza, R.; Rivas, M.; Alfonso, E., 2006. “Genetic algorithm-based multi-objective optimization of cutting parameters in turning processes”. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 19 (2), pp. 127-133, DOI: 10.1016/j.engappai.2005.06.007 (Artículo premiado como el más citado de la revista en el quinquenio 2006-2011).

Software desarrollado

- *Tecnobits Orthcut 1.0* (Programa para la simulación de corte ortogonal mediante la teoría predictiva de Oxley), Reg. CENDA pendiente.
- *LQFEM 1.0* (Paquete de MATLAB que implementa el método de elementos finitos para la solución de problemas de mecánica de materiales), Reg. CENDA No. 2397, Oct 06/2009.
- *Tecnobits Evol 1.0* (Programa para la optimización mediante algoritmos genéticos). Reg. No. 1683, May 30/2006.
- *Opticut 2.0* (Programa que permite la optimización multiobjetivos de regímenes de corte para el torneado considerando el tiempo de elaboración y el consumo de herramientas). Reg. No. 2403, Oct 28/2004.
- *NNKit 1.0* (Paquete de MATLAB para la exportación de modelos basados en el uso de redes neuronales artificiales), Reg. No. 2040, Oct 28/2004.
- *CRC 3.00* (Programa para el cálculo de regímenes de corte en operaciones de maquinado), Reg. No. 8660, Feb 06/2002.
- *Soldasoft 1.0* (Programa para el diseño de procesos de soldadura manual por arco eléctrico), Reg. No. 6251, Oct 05/2000.

Tesis de Doctorado y Maestría

- Quiza, R., 2004. *Optimización multiobjetivo de procesos de torneado*. Tesis de Doctorado en Ciencias Técnica (Ciencias de las Máquinas y Tecnología de su Construcción), Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.
- Medina, O., 2013. *Modelación del corte ortogonal utilizando la teoría predictiva de Oxley y el método de elementos finitos*. Tesis de Maestría en Ingeniería Asistida por Computadora, Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.
- Collazo, J.F., 2013. *Optimización de la geometría del cordón de soldadura de cilindros de gas utilizando el método Taguchi-Grey*. Tesis de Maestría en Ingeniería Asistida por Computadora Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.

- Riquenes, E., 2010. *Implementación de la optimización multiobjetivo del proceso de torneado utilizando algoritmos genéticos*. Tesis de Maestría en Ingeniería Asistida por Computadora, Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.
- López, O., 2009. *Librería de MATLAB para la solución de problemas de elasticidad lineal por el método de elementos finitos*. Tesis de Maestría en Ingeniería Asistida por Computadora, Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.

Avales de aplicación

- CONFORMAT. Empresa Conformadora de Materiales.

Avales científicos

- Dr. Rodolfo Haber Guerra.
- Dr. Patricia del Carmen Zambrano Robledo.