أسلوب للتنبؤ بالحياة النافعة المتبقية للأجهزة الهندسية

حسن أحمد عمر بجيلي

بحث مقدم لنيل درجة الدكتوراة في الفلسفة
[الهندسة الكهربائية وهندسة الحاسبات]

كلية الهندسة
جامعة الملك عبد العزيز - جدة
شوال ١٤٣٨ هـ / يوليو ٢٠١٧ م

أسلوب للتنبؤ بالحياة النافعة المتبقية للأجهزة الهندسية

حسن أحمد عمر بجيلي

بحث مقدم لنيل درجة الدكتوراه في الفلسفة
[الهندسة الكهربائية وهندسة الحاسبات]

إشراف

أ. د. علي محمد رشدي
د. محمد معين الدين

كلية الهندسة
جامعة الملك عبد العزيز
جدة – المملكة العربية السعودية
شوال ١٤٣٨ هـ / يوليو ٢٠١٧ م

أسلوب
للتنبؤ بالحياة النافعة المتبقية للأجهزة الهندسية

حسن أحمد عمر بجيلي

المستخلص

هذه الأطروحة تستعرض تقنيات التنبؤ بالحياة النافعة المتبقية وتصنفها إلى أربع فئات وهي: التقنيات القائمة على النماذج، والتقنيات القائمة على المعرفة، القائمة على الخبرة والتقنيات، والتقنيات القائمة على البيانات. التطوير المستمر في تحسين كفاءة بطارية أيون الليثيوم، وانخفاض تكلفة إنتاجها وزيادة كثافة الطاقة المخزونة فيها أدى إلى انتشار وتقدم العديد من النظم الكهربائية مثل السيارات التي تعمل بالطاقة الكهربائية والمعتمدة على البطارية في أداء عملها، والهواتف الذكية، والطائرات واتصالات الأقمار الصناعية. إن الأنظمة المذكورة أعلاه هي جزء أساسي من حياتنا وبالتالي، كان من الضروري تطوير وسيلة دقيقة للتنبؤ بحالة البطارية ووقت توقفها عن العمل. تصفية وترشيح الإشارات المتكيفة هو علم ينتمي الى علم معالجة الإشارات، وهو تقنية مفيدة لتقريب وتوقع قيم متغيرات حالة الأنظمة. وهذا العمل اكتسب اهتماما هائلا خلال العقود الخمسة الماضية. تم تطوير خوارزمية في هذه الرسالة من خلال الاستفادة من نظام معادلات خوارزمية الانتشار الخلفي.

أسلوب للتنبؤ بالحياة النافعة المتبقية للأجهزة الهندسية

حسن أحمد عمر بجيلي

الملخص

تدرس هذه الرسالة أسلوبا للتنبؤ بالحياة النافعة المتبقية للأجهزة الهندسية، وهي تنقسم إلى عدة موضوعات رئيسة تصنيفها كالتالي:

أ. منهجيات وطرق إيجاد والتنبؤ بالحياة النافعة المتبقية

تستخدم الصناعة علم التنبؤ لإدارة مخاطر الأعمال التي تنشأ من فشل الأجهزة بصورة غير متوقعة. ويعتبر تقدير الحياة النافعة المتبقية (ح ن ب) بواسطة نمذجة الاضمحلال واحداً من أهم عناصر التنبؤ ومراقبة الالتئام. يعتمد هذا التنبؤ على أربع مقاربات أو طرائق هي الطريقة المبنية على النماذج، والطريقة المرتكزة على المعارف، والطريقة القائمة على الخبرة، والطريقة المدفوعة بالبيانات .

وكل من هذه الطرائق يمكن تنفيذه بأساليب عديدة. سوف نقوم في هذه الرسالة بدراسة واستقصاء جميع هذه الطرائق فضلاً عن بعض الأساليب المندرجة تحتها. وسوف تقوم الرسالة بدراسة بعض النبائط الهندسية لتقدير الحياة النافعة المتبقية لها. وسوف يتحقق ذلك بنمذجة كل نبيطة باستخدام معادلات الحالات لعملية ماركوفية أحادية الرتبة ذات مخرج مستقل شرطيا. كذلك سوف يجري استكشاف تطبيقات عملية أخرى تتوفر لها بيانات حقيقية.

ويمكن تصنيف تقنيات التنبؤ بالحياة النافعة إلى أربعة أقسام كالتالي:

١. التقنيات القائمة على نموذج رياض محاكٍ للجهاز الهندسي
٢. التقنيات القائمة على المعرفة.
٣. التقنيات القائمة على الخبرة.
٤. التقنيات القائمة على البيانات.

وفيما يلي نقدم تفصيلاً لكل من هذه الأقسام:

١. التقنيات القائمة على نموذج رياضي محاكٍ للجهاز الهندسي

ويشير مصطلح "التقنيات القائمة على نموذج رياضي محاكٍ للجهاز الهندسي" عادة إلى المناهج التي تستخدم النماذج المشتقة من المبادئ الأساسية (على سبيل المثال، القائم على الفيزياء). ببساطة يصور هذا المصطلح الأساليب التي تستخدم نماذج رياضية تحاكي سلوك النظام في جوهرها. يمكن استخلاص النموذج من أي من الطريقتين التاليتين:

- المعرفة (عند توفرها) عن المبادئ الأساسية، والقوانين الفيزيائية المعروفة وخبرة الخبراء وتحليل الأبعاد وغيرها.
- عندما يتوفر قدر كبير من البيانات لكل من السلوك الأصلي والمضمحل للجهاز الهندسي.

١. الإيجابيات:
   ١. تعتمد على فهم فيزياء النظام.
   ٢. يتطلب بيانات أقل من التقنيات القائمة على البيانات.
   ٣. يتطلب تكلفة أقل للتنفيذ.

٢. السلبيات:
   ١. يتطلب المزيد من المعرفة حول النظرية الأساسية المبني عليها النظام.
   ٢. يتطلب العديد من الافتراضات حول ظروف التشغيل العملية للنظام.
   ٣. يعاني من اعتماده على متانة ودقة التجربة التي وضعت لمحاكاة النظام.
   ٤. يتطلب تقديراً مختلف المعالم المادية للنظام.
   ٥. قد لا تنتج نتائج مرغوب فيها وعملية لأن نوع الخطأ يختلف من جهاز لآخر.

يمكن تصنيف التقنيات القائمة على نموذج رياضي محاكٍ للجهاز الهندسي الى تصنيفات فرعية كالتالي:

١. نماذج فيزياء الفشل.
٢. النماذج الإحصائية
٣. تصفية إشارة كالمان وتصفية إشارة الجسيمات.
٤. الديناميات الغير الخطية.

٢. التقنيات القائمة على المعرفة
عندما يكون من الصعب إجراء تحليل التنبؤ على الأجهزة الهندسية باستخدام التقنيات القائمة على نموذج رياضي محاكٍ للجهاز الهندسي قد تصبح التقنيات القائمة على المعرفة إحدى التقنيات المتاحة التنبؤ بالحياة النافعة خلال تقييم التشابه بين قاعد بيانات الفشل المعدة مسبقا والوضع الحالي للجهاز. وعادة ما يتم جمع بيانات الفشل من خبراء النظام أو طريق تفسير مجموعة من القواعد. المنطق الضبابي والنظم الخبيرة هي التقنيات الأكثر شيوعا المستخدمة للتنبؤ بالحياة النافعة المتبقية.

١. النظم الخبيرة
النظم الخبيرة هي أساسا برنامج كمبيوتر أو مجموعة من برامج الكمبيوتر تحاكي أداء وقدرة الإنسان على اتخاذ القرار. وتتألف النظم الخبيرة القائمة على المعرفة مما يلي:

- النظم الخبيرة القائمة على القواعد.
- النظم الخبيرة القائمة على نموذج رياضي محاكٍ للجهاز الهندسي.
- النظم الخبيرة القائمة على الحالة.

٢. المنطق الضبابي
المنطق الضبابي هو امتداد المنطقي الكلاسيكي من أجل تخفيف القيود الصعبة له والتي كانت تلتزم مبدأ "الثالث المرفوع" ولا يعرف غير قيمتي "صح" او "خطأ" وقد صار المنطقي الضبابي يسمح بالحديث عن قيمة "صح" بنسبة ٧٥%.....

٣. التقنيات القائمة على الخبرة
ربما تقوم أبسط تقنية في علم تقدير الحياة النافعة المتبقية على توزيعات الاحتمالات المعروفة. هذه التقنية تستخدم بكثرة في تحليل المعولية. وتعتمد هذ التقنية الإحصاءات الرياضية والتي تصنف إلى توزيعات معلميه (بارامترية) وغير معلميه (بارامترية).
١. التوزيعات البارامترية
يمكن وصفها بشكل موجز مع عدد قليل من المعالم دون الاضطرار إلى دراسة المنحنى كاملاً. يوفر هذا النوع من التوزيعات على نحو سلس تقديرات توزيعات الفشل التي هي مثالية لإيجاد الحياة النافعة المتبقية. يمكن استخدام التوزيعات التالية لإيجاد الحياة النافعة المتبقية:

- توزيع الموقع القياسي وتوزيع الموقع القياسي اللوغاريثمي
- التوزيع الأسي
- التوزيع الطبيعي والتوزيع طبيعي اللوغاريتم.
- توزيع القيمتين المتطرفتين الصغرى والكبرى
- توزيع ويبل
- التوزيع اللوجستي واللوجستي اللوغاريثمي

٤. التقنيات القائمة على البيانات
تعتمد التقنيات القائمة على البيانات على مجموعات كبيرة من بيانات السلاسل الزمنية وتستخدم التقنيات الإحصائية وتقنيات الذكاء الاصطناعي على مجموعات كبيرة نسبيا من بيانات الأداء والاضمحلال المجموعة والموثوقة للتنبؤ بمعوليه وحالة الأنظمة. العديد من تقنيات التنبؤ بالحياة النافعة المتبقية والقائمة على البيانات تعتمد على الشبكات العصبونية في محاكاة الأنظمة المراد تقدير الحياة المتبقية النافعة. ويمكن تقسيم التقنيات القائمة على البيانات الى أربع فئات رئيسية هي: الإحصاء متعدد المتغيرات، الصندوق الأسود، تحليل الإشارات والرسوم البيانية.

١. الإحصاء متعدد المتغيرات
التحليل الإحصائي لتقنية الإحصاء متعدد المتغيرات يركز على تحليل عدة متغيرات ذات صلة في وقت واحد. ولكل من هذه المتغيرات نفس القدر من الأهمية. أهم هذا النوع من التقنيات هي:

- تحليل المكونات الرئيسية.
- تحليل التمايز الخطي والتربيعي.

- المربعات الاقل جزئية.
- تحليل المتغير الأساسي.

ب. تحليل ودراسة بطاريات أيون الليثيوم وإيجاد الحياة النافعة المتبقية

١. المقدمة

التطوير المستمر في تحسين كفاءة بطارية أيون الليثيوم، وانخفاض تكلفة إنتاجها وزيادة كثافة الطاقة المخزونة فيها أدى إلى انتشار وتقدم العديد من النظم الكهربائية مثل السيارات التي تعمل بالطاقة الكهربائية والمعتمدة على البطارية في أداء عملها، والهواتف الذكية، والطائرات واتصالات الأقمار الصناعية. إن الأنظمة المذكورة أعلاه هي جزء أساسي من حياتنا وبالتالي، كان من الضروري تطوير وسيلة دقيقة للتنبؤ بحالة البطارية ووقت توقفها عن العمل. لذلك فإن التنبؤ ومعرفة الحياة النافعة المتبقية في عمر البطارية يعتبر مصدر قلق كبير لمختلف الصناعات التي تعتمد على تلك البطاريات. وهذا دفع العديد من العلماء إلى تطوير دقيق لنموذج البطارية وقدراتها. لسنوات حافظت وسجلت بعض الصناعات معلومات دقيقة عن قدرات هذه البطاريات للتنبؤ بوقت نهاية التفريغ ووقت نهاية الحياة.

إن من الأهمية بمكان جدا مراقبة حالة البطاريات بدقة وخاصة للمركبات التي تعمل بالبطاريات لأنها يمكن أن تتسبب في الكثير من الأضرار إذا كانت سيئة التصنيع. فعلى سبيل المثال، طائرة بوينغ دريملاينر (B787) تم إيقافها عن العمل والطيران بسبب اشتعال النيران في وحدة الطاقة المساعدة بسبب حالة هروب حراري، وهي حالة تحدث عندما تتغير درجة الحرارة يغير الظروف المجاورة بطريقة تؤدي إلى زيادة غير محكومة في درجة الحرارة الكلية، وغالبا ما تؤدي إلى نتيجة مدمرة، لم يتم اكتشاف هذه الحالة من قبل نظام مراقبة البطارية. بالمثل حدث عام ٢٠٠٦ أن فقدت إدارة الطيران والفضاء الأمريكية (ناسا) قدرا كبيرا من أحد اقمارها الصناعية بسبب ارتفاع درجة حرارة البطارية. كان بالإمكان تفادي هذه الكوارث لو كان نظام مراقبة متقدماً.

٢. النموذج الرياضي لبطارية أيون الليثيوم

أصبحت بطاريات أيون الليثيوم أكثر شعبية وقد استحوذت على حصة كبيرة من سوق الأجهزة الإلكترونية. ويرجع ذلك إلى كثافة طاقتها العالية مما جعلها جذابة للأجهزة الإلكترونية لأن البطاريات ذات الأوزان والأحجام الصغيرة ضرورية لأداء عمل تلك الأجهزة الإلكترونية مثل الهواتف النقالة. العمر الافتراضي لبطاريات أيون الليثيوم هو أكثر من ٥٠٠ دورة شحن وتفريغ. معدل التفريغ الذاتي في بطاريات أيون الليثيوم منخفض جدا فهو أقل ١٠٪ شهريا. مثل أي نوع من أنواع البطاريات الأخرى، طاقة بطاريات أيون الليثيوم تتلاشى وتضمحل مع كل دورة شحن وتفريغ. وهذا التلاشي والاضمحلال يرجع إلى زيادة في مقاومة البطارية الداخلية. وهذه المقاومة الداخلية لبطاريات أيون الليثيوم سبب فقدان الطاقة. كما أن هذه المقاومة تتسبب في زيادة حرارة البطارية مما يؤدي إلى تسريع الشيخوخة في البطارية وفقدناها القدرة على الاحتفاظ بالطاقة.

يعمل العديد من العلماء على تطوير نماذج ومعادلات رياضية دقيقة وبسيطة حسابيا وفعالة لبطاريات أيون الليثيوم التي هي أساسا معادلات كهروكيميائية. وهذه النماذج الهندسية لديها ميزة كونها ذات كفاءة

حسابية عالية الا أنها تفتقر إلى المتانة والدقة المستحقة وأنها لا تقدر عمر البطارية بطريقة جيدة. وعدم الكفاءة هذا يرجع إلى التقريب في معادلات سلوك البطارية.

يستخدم بعض العلماء نماذج فيزيائية متعددة الخصائص وهذا النوع من النماذج ذو دقة عالية جدا؛ إلا أنه يعتمد على حل المعادلات التفاضلية المعقدة وبالتالي، هذا النوع من النمذجة غير مناسب للاستخدام اللحظي دون الحاجة الى كمبيوترات متطورة. وقد قام أحد العلماء بإيجاد نموذج أكثر قوة ودقة، وذو عمليات حسابية بسيطة وفعالة يحسب شيخوخة البطارية بطريقة دقيقة. وعلى الرغم من أن هذا النموذج يعتمد على المعادلات الكهروكيميائية أيضاً؛ إلا انه يحسب الحياة النافعة المتبقية بدقة معقولة.

٣. حالة الشحن

حالة الشحن للبطارية مقياس بدون وحدة معينة مثل مقياس الوقود في السيارات. فهي النسبة بين الطاقة المحفوظة أو المخزنة والطاقة المحددة أثناء التصنيع. يتم احتساب حالة الشحن بالنسبة المئوية حيث يشير الرقم ٠٪ إلى البطارية الفارغة والرقم ١٠٠٪ يشير إلى البطارية المشحونة بالكامل. لا يمكن قياس حالة شحن البطارية مباشرة؛ فقط يمكننا التنبؤ بها أو تقديرها استنادا إلى القياس المباشر لخصائص البطارية مثل الجهد أو التيار، وغيرها من المعالم. ويمكن إجراء هذا القياس بطريقة مباشرة أو متصلة أثناء عمل البطارية أو بطريقة غير مباشرة او متصلة. الطريقة غير المتصلة أكثر دقة لكنها ليست عملية حيث يجب اخراج البطارية وفحصها وهذا يستغرق وقتا طويلا، فضلا عن كونه مكلفاً.

٤. الحالة الصحية للبطارية

على غرار حالة شحن البطارية، كمية الحالة الصحية للبطارية هي كمية بدون وحدة. يتم قياس الحالة الصحية للبطارية عن طريق قياس المقاومة الداخلية لها. فإذا كانت مقاومة البطارية صغيرة وقريبة جداً من مقاومة بطارية جديدة حسب مواصفات الشركة المصنعة، يمكننا أن نقول إنها جديدة وصحية، ومن الأفضل أن نقول إن الحالة الصحية للبطارية تساوي ١٠٠٪.

٥. الحياة المتبقية النافعة

وتعتبر كمية الحياة المتبقية النافعة (ح ن ب) الوسيلة الرئيسية المستخدمة من قبل مهندسي هذا العلم. تستخدم هذه الكمية لمعرفة إذا كانت البطارية تتطلب صيانة أو يمكن لها الاستمرار في العمل لفترة أطول. يستخدم مصطلح (ح ن ب) على نطاق واسع من قبل المهندسين والإحصائيين ومع ذلك يستخدم العاملون في الكثير من التخصصات الأخرى مصطلحات غيره ولكنها تعني نفس المعنى. معرفة لحياة المتبقية النافعة له فوائد كثيرة منها التخطيط للصيانة الوقائية، وتوفير قطع الغيار اللازمة في وقتها، والربحية والأداء التشغيلي.

ج. خوارزمية شبكة عصبونية

حالة النظام تصف الجوانب الأساسية للنظام التي تسمح بالتنبؤ بسلوك النظام على مدى فترة معينة من الزمن. في بعض الأحيان يكون من المستحيل او الأصعب أو غير الاقتصادي قياس متغيرات نظام معينة بسبب عدم إمكانية الوصول إليها او بسبب الضوضاء أو تلويث القياسات.

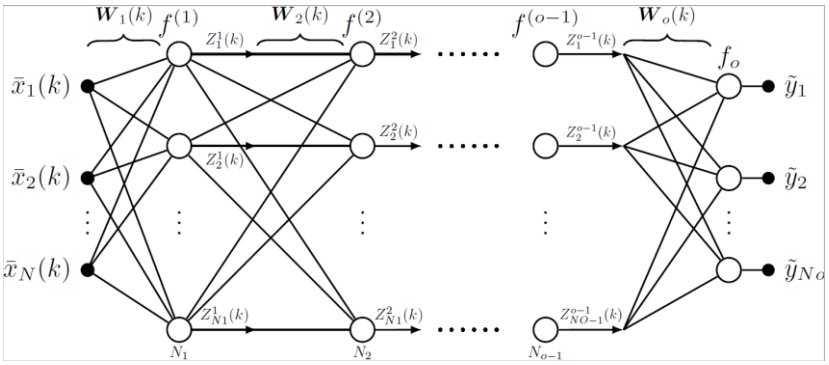
تصفية وترشيح الإشارات المتكيفة هو علم ينتمي الى علم معالجة الإشارات، وهو تقنية مفيدة لتقريب وتوقع قيم متغيرات حالة الأنظمة. وهذا العمل اكتسب اهتماما هائلا خلال العقود الخمسة

الماضية. والمرشح التكيفي، كما يوحي اسمه، هو في الأساس نظام يحاول ضبط معالمه حتى يتمكن من الاستجابة لظاهرة معينة تجري في المناطق المحيطة به أو لتلبية هدف محدد. يمكن استخدام مرشحات التكيف في العديد من المجالات والتطبيقات المتنوعة مثل تحديد النظام وإلغاء الصدى وإلغاء الضوضاء والمعادلة، والسيطرة وكشف التغيير والهوائيات الذكية وضغط البيانات والرادار والسونار والطب الحيوي وعلم الزلازل.

العمليات الأساسية للمرشحات التكيفية تنطوي على عمليتين رئيسيتين: عملية الترشيح وعملية التكيف. وتنتج عملية الترشيح إشارة مخرجة استجابة إلى إشارة مدخلة معينة، في حين تهدف عملية التكيف إلى تحسين وضبط وظيفة نقل المرشح.

هناك العديد من الخوارزميات التي تعمل على تقدير نظام المرشح التكيفي مثل مرشح كالمان الشهير. يجد مرشح كالمان حلا مثاليا خطيا وذلك باستخدام نموذج حالات فضاء النظام والحد الأدنى لمتوسط مربع الخطأ وهو خوارزمية معاودة لا تحتاج إلى تخزين المعلومات السابقة.

تم تطوير خوارزمية في هذه الرسالة من خلال الاستفادة من نظام معادلات خوارزمية الانتشار الخلفي. وتستند على خوارزمية تغذية متعددة الطبقات في شبكة الانتشار العصبونية. يمكن تلخيص عملية التقدير في ثلاث خطوات: التهيئة، تحديث الوقت، والقياس. يمثل الرسم التالي بناء هذه الخوارزمية:



رسم بياني: ١ خوارزمية الانتشار الخلفي باستخدام الشبكات العصبونية

A Prognostics Approach for The Remaining Useful Life of Engineering Devices

Hasan A. Bjaili

A thesis submitted for the requirements of the degree of Doctor of Philosophy [Electrical and Computer Engineering]

Supervised By: Prof.
Ali M. Rushdi

Dr. Muhammad Moinuddin

FACULTY OF ENGINEERING KING
ABDULAZIZ UNIVERSITY JEDDAH -
SAUDI ARABIA

MUHARRAM 1439H - OCTOBER 2017G

A Prognostics Approach for The Remaining Useful Life of Engineering Devices

Hasan A. Bjaili

Abstract

Prognostics is a term that engineering borrowed from medicine to refer to the discipline concerned with the Remaining Useful Life (RUL) of an engineering device. This thesis surveys the RUL prediction techniques and classifies them into four categories of model-based techniques, knowledge-based techniques, experience-based techniques, and data-driven techniques. A comparative review is given for the main features, prominent advantages, potential shortcomings and main subcategories for each of these categories. The survey is supported by an extensive list for up-to-date references. This thesis also derives and implements a novel non-linear state-space estimation algorithm utilizing a feedforward backpropagation neural network. We developed a novel version of the backpropagation algorithm by incorporating the knowledge of state-space model, hence named the State Space Backpropagation (SSBP) algorithm. The algorithm is applied to a classical problem of non-linear dynamics and it shows superiority in accuracy and convergence speed in comparison with several existing algorithms for this particular problem and similar non-linear ones . The work is part of an ongoing activity to study problems of the discipline of prognostics which deals with the prediction of the Remaining Useful Life (RUL) of a component or a sys- tem. This prediction can be based on a plethora of models, including that of present state-space estimation. The thesis also studies one of the most prominent problems in industrial prognostics, namely the estimation of the Remaining Useful Life (RUL) of the most popular industrial battery, *viz.*, the lithium-ion battery. it presents a state- space model of the battery, and then estimates the dynamic behavior of seven of its

process variables and two of its sensor variables. The estimation is achieved *via* two well known estimators, the Unscented Kalman Filter (UKF) and the Particle Filter (PF) when noise of various levels and types is injected. Numerical and chart comparisons of these two computing estimators are reported and discussed.