

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06552

研究課題名(和文) 伝熱プロセスのハイブリッドモニタリング技術

研究課題名(英文) Hybrid monitoring of a heat transfer process

研究代表者

山下 善之 (Yamashita, Yoshiyuki)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60200698

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：熱交換器においてスケールやスラッジなどの汚れがどの程度付着しているかを、オンラインでリアルタイムに推定するための指標を提示できる仕組みを開発した。具体的には、伝熱工学の知識に基づく物理モデルと実運転データに基づくブラックボックスモデルとのハイブリッド型のモニタリング技術を開発し、これまで困難であった汚れの程度の推定モデルを構築して、そのオンラインモニタリングを可能とした。開発した指標の有効性については、ダイナミック・シミュレーションと実プラントのデータの両者を用いて検証した。

研究成果の概要(英文)：Fouling is the deposition of undesired material on heat transfer surface. It significantly decreases the thermal performance of heat exchangers. In this work, a novel method to detect fouling in a heat exchanger is developed. The method combines physical model and data-driven model for the estimation of the heat transfer mechanism. Overall heat transfer coefficient and the heat flux are modeled by physical models. A methodology to estimate the fouling resistance is presented. The method was successfully applied to a simulation data sets and industry data sets.

研究分野：プロセスシステム工学

キーワード：Process Monitoring Fouling Heat Exchanger

1. 研究開始当初の背景

反応と分離精製は物質製造プラントにおける最も重要な単位操作である。化学プラントにおける分離精製には蒸留塔が最も多く用いられているが、蒸留塔は、エネルギーを多く消費する装置でもある。通常、そのエネルギーのほとんどは、リボイラにおける加熱に消費されている。リボイラは熱交換器であるが、長期間の連続運転では伝熱配管にスケールなどが比較的付着しやすい。そのため、熱伝達効率が運転開始当初よりも低下してしまい、さらにエネルギー消費量が多くなってしまったため、実プラントの運転においても省エネルギー上の大きな課題となっている。さらに程度がひどい場合には配管の閉塞を起こし、プラントの安定連続運転が阻害されてしまうこともある。最新の統計によれば、熱交換器内の配管への汚れの蓄積によって、世界のCO₂放出量が2.5%増加しているとの報告もある。また、同様の汚れに伴って発生する、余計な燃料消費や運転の停止、設計余裕、洗浄などによる損失コストを合計すると、先進国のGDP全体0.25~0.30%に達しているとの推算もある。

そこで、熱交換器内の配管への汚れの付着を適切に監視するためのモニタリング技術が強く望まれている。しかし、直接的な測定は熱交換器の構造的に困難であるため、何らかの方法で推定する必要がある。汚れの程度を温度や流量、圧力などから推定するためには、何らかのモデルが不可欠である。物理モデルだけにに基づくモデル化は、不可能では無いかもかもしれないが、その中に含まれる多くのパラメータが実施には未知であったり、また、あまりに煩雑であったりする。特に、蒸留塔のリボイラにおいては、循環させる塔底液は途中から気液混合流体となる複雑な現象を伴っており、正確にモデル化することはこれまで非常に困難であった。

一方、汚れの付着を防止するためには、非イオン系界面活性剤などの防止剤が開発されているが、汚れの付着の程度がモニタリングできないために、実際にどの程度の効果があるのかがはっきりしないというのが現状である。したがって、付着防止の技術を開発するという観点からも、汚れの程度をモニタリングできる技術は強く望まれている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、熱交換器においてスケールやスラッジなどの汚れがどの程度付着しているかを、オンラインでリアルタイムに推定するための指標を提示できる仕組み開発することである。機器・配管などの閉塞は製油所等における連続運転の長期化を阻害する最大要因となっているが、実際にどの程度の汚れが配管などの内部に付着しているかは、運転停止して配管内を見ない限り分から

ないのが現状である。

本研究では、伝熱工学の知識に基づく物理モデルと実運転データに基づくブラックボックスモデルとのハイブリッド型のモニタリング技術を開発し、これまで困難であった汚れの程度の推定モデルを構築して、そのオンラインモニタリングを可能とする。

3. 研究の方法

これまでに行われてきたアプローチは、物理モデルに基づいて伝熱機構を厳密にモデル化しようとしてきたが、実際には、未知パラメータが含まれているためにうまくいっていなかった。そこで、物理モデルとブラックボックスモデルとを組み合わせたハイブリッド手法のアプローチを取ることによって、汚れの付着の程度をモニタリングできるに違いないと考えるに至った。

まず、ある特定の蒸留塔におけるサーモサイホン型のリボイラを対象として、その伝熱量を表す詳細な物理モデルを、伝熱配管の内側および外側の境膜伝熱モデルと配管の伝熱との組み合わせとして作成する。次に、運転初期においてはリボイラ内の配管が清浄であると仮定して、その状態での運転データを元に、各時点での交換熱量を推定した上で、汚れが無い状態での境膜伝熱係数を推定するモデルを作成する。その際、構築したモデルの妥当性は、市販の定常シミュレータによる計算結果との比較によって検証する。最後に、汚れた状態での総括伝熱係数を見かけの伝熱係数と清浄な状態での伝熱係数との差として求められるようにし、作成した推定手法を長期的な運転データに適用して、汚れの程度に対応した指標を算出できるようにする。

4. 研究成果

(1) リボイラの伝熱配管における熱移動は、水蒸気などによるシェル側の伝熱、伝熱配管内の伝導伝熱、塔底液への管内壁での伝熱の3つに分けて考えることが出来る。スケールなどの付着による汚れは、主に管内壁に見られることから、塔底液への管内壁での伝熱について汚れによる影響を評価すれば良い。蒸留塔における縦型のサーモサイフォン型リボイラについて、加熱源が水蒸気である場合に特化して、その熱移動を詳細にモデル化した。その際、リボイラのシェル側境膜熱伝達係数と伝熱管内の熱伝達係数は物理モデルや既存の経験モデルを用い、モデル中のパラメータを推定する方法を検討した。モデル化においては、市販の汎用プロセスシミュレータによるモデルと、実プラントの運転データから構築した部分モデルの推算結果をその都度検証しながら確実なモデルを構築した。

(2) 実データを取り扱うに当たって、適切なモデルを構築するためには、さまざまな要因で混入する外れ値を適切に除去する必要がある。そこで、外れ値を適切に処理するための手法についても研究し、この方法を用いることによって、実データのようなさまざまな品質のデータを含んだデータを用いても、精度の高いモデルを構築することが可能となった。

(3) 水蒸気をリボイラーの熱源とする場合の蒸留塔まわりについて、汎用プロセスシミュレータを用いて対象の詳細なダイナミックモデルの開発を行い、蒸留塔やリボイラーの入口や出口における温度や圧力、流量などの経時変化を表す擬似的な運転データを作成した。その際、リボイラーの伝熱配管内の境膜伝熱係数を運転途中で何段階かに変化するように設定し、汚れを模擬できるようにした。そのようにして生成した時系列データを対象として、前年度に開発したハイブリッドモデルによる伝熱管内汚れの推定手法にもとづいて物理モデルを作成し、さらに、運転初期の清浄な状態のデータから清浄時の境膜伝熱係数を推定するデータ駆動型モデルを作成した。この2つのモデルのハイブリッドモデルによって、配管内に汚れがある場合についても、リボイラー内の熱的な挙動と汚れの程度とを正確に推定可能であることを実証することができ、このことによって、前年度に開発したハイブリッドモデルの有効性を検証することが出来た。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

Harakhun Tanatavikorn, Yoshiyuki Yamashita, 査読有, "Fuzzy treatment method for outlier process data," Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 49, pp. 864-873 (2016)
<https://doi.org/10.1252/jcej.16we042>
Harakhun Tanatavikorn, Yoshiyuki Yamashita, 査読有, "Improving data reliability for process monitoring with fuzzy outlier detection," Computer Aided Process Engineering, Vol. 37, pp. 1595-1600 (2015)
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63577-8.50111-X>

[学会発表](計 10 件)

山下善之, 「IoT とスマート・マニュファクチャリング」, ISPE 日本支部冬季大会, 大阪, 12 月 (2017)
山下善之, 「化学工場の将来展望」, INCHEM TOKYO, 東京, 11 月 (2017)
Yoshiyuki Yamashita, "Chemical

Engineering in the era of smart processing," 8th China-Japan Symposium on Chemical Engineering, (国際会議) Beijing, October (2017)
山下善之, 「化学プラントのスマート化」, 化学工学会秋季大会, 名古屋 9 月 (2017)
Yoshiyuki Yamashita, S. Iwahashi, T. Kuwahara, K. Kuwahara, Y. Yamane, "Fouling monitoring of a thermosiphon reboiler," Heat Exchanger Fouling and Cleaning (国際会議), Madrid, June (2017)

Yoshiyuki Yamashita, "Model based monitoring of fouling in a heat exchanger," International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (国際会議), Taipei, May (2017)

山下善之, 「製造業における IoT の利活用」, ISPE 日本支部冬季大会, 大阪, 12 月 (2016)

Yoshiyuki Yamashita, "Which approach is better for process monitoring: data-based or model-based?" 9th Regional Conference on Chemical Engineering (国際会議), Kuala Lumpur, November (2016)

山下善之, 「プロセス時系列のデータ解析」, ダイナミックプロセス応用分科会研究討論会, 浜松, 11 月 (2016)

Harakhun Tanatavikorn, Yoshiyuki Yamashita, 12th International Symposium on Process Systems Engineering, Copenhagen (国際会議), June (2015)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等
<http://web.tuat.ac.jp/~pselab/>

6．研究組織

(1)研究代表者

山下 善之 (YAMASHITA, Yoshiyuki)
東京農工大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：60200698

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

()