

طراحی سنسور های مجازی دما برای یک خشک کن با استفاده از روش فیلتر کالمن

آرمان خالقی فر^{۱*}، مرتضی محمدظاهری^۲، هادی کارگر^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

* اهواز، ۶۱۵۵۹۷۵۷۴۶ Arman.khaleghi68@yahoo.com

چکیده

این مقاله با هدف معرفی و طراحی یک سنسور دمای مجازی برای یک خشک کن مادون قرمز ارائه شده است. سنسور مجازی یک الگوریتم به منظور تخمین توزیع دما در یک سطح از سیستم های گرمایی (به عنوان مثال خشک کن مادون قرمز) با استفاده از دمای اندازه گیری شده از تعداد محدودی از نقاط بر روی سطح می باشد. در پژوهش حاضر، می خواهیم سنسورهایی که عملکردشان گزارش دما در خشک کن ها می باشد، را به کمک نرم افزار متلب و با روش فیلتر کالمن با یک الگوریتم تخمین گر جایگزین کنیم. ابتدا دستگاه خشک کن با تجهیزات کامل در آزمایشگاه ساخته شد و تمام آزمایش هایی که برای بدست آوردن داده های مختلف لازم بود بر روی دستگاه انجام شد. مدل ریاضی سیستم در فضای حالت تعریف شد و سپس با الگوریتم حداقل مربعات خطا در نرم افزار متلب ضرایب ماتریس های معادله فضای حالت سیستم شناسایی شدند. در ادامه بصورت فرضی یک ترموکوپل را حذف نمودیم سپس مدل بدست آمده برای طراحی تخمین گر بهینه فیلتر کالمن مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله بعد دمای ترموکوپل حذف شده بوسیله فیلتر کالمن تخمین زده شد. مقایسه دمای تخمینی و دمای واقعی اندازه گیری به وسیله ترموکوپل دقت بسیار مطلوب الگوریتم اندازه گیری مجازی دما را بخوبی نشان داد.

کلیدواژگان

سنسور های مجازی دما، خشک کن، الگوریتم حداقل مربعات خطا، متلب، فیلتر کالمن

Virtual sensor design temperature for a dryer using a Kalman filter

Arman khaleghifar^{1*}, Morteza mohammadzaheri², Hadi kargar²

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

2- Strategic Center for Energy and Sustainable Development, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

* P.O.B. 6155975746 Ahvaz, Iran, Arman.khaleghi68@yahoo.com

Abstract

This paper aims at introduction, design and validation of a temperature virtual sensor for an infrared dryer. As proposed in this article, a virtual sensor is an algorithm to estimate the temperature at one or some points in a thermal system (e.g. an infrared dryer) based on the measured temperature at a number of other points. In this research, the designed algorithm estimates the temperature of a single point; however, the methodology can be evidently extended to multiple points. Inspired by direct and inverse heat transfer models, a mathematical model is presented for virtual sensing. In the present study, we sensors that report temperature drying are performed, with the help of MATLAB and using a Kalman filter with an alternative estimator algorithm. First dryer with equipment in the lab was built and all the various trials that it was necessary to obtain data on the device. Mathematical models in state-space system were defined and then the least-square algorithm in MATLAB matrix coefficients of the equation of state of the system was identified. Then we just supposed to remove a thermocouple. The obtained model was used for planning the optimal Kalman filter. Next, remove the thermocouple temperature was estimated by the Kalman filter. Compare the actual temperature measured by the temperature and time of desired precision thermocouple measurement algorithms as well as Virtual temperature indicated.

Keywords

Virtual sensor temperature, dryer, the least-square algorithm, MATLAB, Kalman filter

محدودی از نقاط بروی سطح می باشد. بطور کلی اگر شرایط اولیه، شرایط مرزی (شار حرارتی)، و ویژگی های هندسی و فیزیکی-حرارتی یک سیستم حرارتی معلوم باشند و هدف تخمین دما باشد مسئله در حیطه انتقال حرارت مستقیم است. اگر برخی از اطلاعات دمایی معلوم باشد و عوامل دیگر به عنوان مثال شرایط مرزی ناشناخته باشد، مسئله در حیطه انتقال حرارت معکوس است [۸].

حل کردن مسائل انتقال حرارت معکوس نسبتا دشوار می باشد [۹]. با روش های موجود و مبتنی بر فیزیک از قبیل قانون های انتقال حرارت و ترمودینامیک، سنجش دما مجازی یک نقطه از یک محفظه تابشی نیازمند محاسبه همزمان شار گرمایی منبع تابش و دمای سایر نقاط است. مشکلات جدی نظیر وابستگی ویژگی های فیزیکی-حرارتی به دما [۱۰، ۱۱] و تاخیر

۱- مقدمه

برای اولین بار در دهه ۱۹۸۰ الگوریتم هایی به منظور تخمین مقادیر اندازه گیری نشده، سنسورهای مجازی، معرفی شدند [۱] در آغاز از این الگوریتم ها به منظور تخمین جابجایی، سرعت و نیرو در ربات ها و وسایل نقلیه خودکار استفاده شد [۲، ۳]. پس از آن کاربرد این الگوریتم ها به تخمین فشار [۴]، گازهای آلوده کننده [۵]، سرعت باد [۶] و سیگنال های صوتی تعمیم داده شد [۷]. با این حال، سنسور مجازی تا به حال برای دما طراحی نشده است.

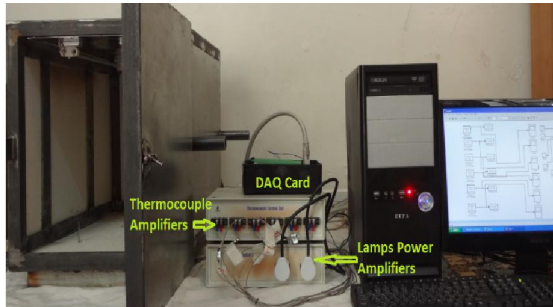
در این پژوهش، هدف ما ایجاد یک الگوریتم برای اندازه گیری مجازی دما در یک خشک کن مادون قرمز (یک محفظه گرم شده توسط پرتو) می باشد. این الگوریتم در بهترین حالت خود به تخمین توزیع دما بر روی یک سطح در زمان-واقعی با استفاده از دمای اندازه گیری شده از تعداد

با استفاده از تخمینگر بهینه فیلتر کالمن گسسته در نرم افزار متلب، تخمین می‌زیم آن ترموکوپل مجهول چه دمایی داشته است و میزان خطای تخمین دما را با دما واقعی آن ترموکوپل مقایسه می‌کنیم.

۲- مراحل ساخت مدل فضای حالت

۱-۱- نصب آزمایشی، جمع آوری و آماده سازی داده ها

خشک کن مورد مطالعه با ابعاد بیرونی $60\text{cm} \times 40\text{cm} \times 46\text{cm}$ می‌باشد. منبع گرمایی دو عدد لامپ هالوژن مادون قرمز از نوع 39n3 و متعلق به شرکت توشیبا می‌باشد. توان هر لامپ ۱۰۰۰ وات است. شش ترموکوپل از نوع k در کف دستگاه خشک کن به صورت نامتقارن قرار گرفته اند که برای اندازه گیری دما مورد استفاده قرار می‌گیرند. دستگاه تقویت کننده ترموکوپل که مجهز به آی سی AD595 می‌باشد سیگنال خروجی از ترموکوپل را تقویت می‌کند و آن را به سمت کامپیوتر ارسال می‌کند. دیوار داخلی خشک کن از تخته های عایق و نسوز با ضخامت ۲۵ میلیمتر ساخته شده که بر روی صفحات فولادی با ضخامت ۲ میلیمتر نصب شده اند. شکل ۲ راه اندازی آزمایشی دستگاه خشک کن را نشان می‌دهد.



شکل ۲ اجزای اصلی در راه اندازی آزمایشی

برای داده برداری از نرم افزار سیمولینک استفاده کردیم. این نرم افزار بخوبی از طریق کارت داده گیری (DAQ) PCI-1710U ارتباط کامپیوتر با ترموکوپل ها و لامپ ها را برقرار می‌کرد. در این آزمایش از یک دستگاه تقویت کننده لامپ ها (دیمر)، برای کنترل خاموش و روشن شدن لامپ در هر سیکل زمان و افزایش توان سیگنال ورودی از کامپیوتر به لامپ، استفاده شد. تابع توان با شکل موج مثلثی و با دامنه ۰،۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد از حداکثر توان لامپ، در دوره زمانی ۰،۱۰۰، ۰،۱۲۰، ۰،۱۴۰، ۰،۱۶۰، ۰،۱۸۰ و ۰،۲۰۰ ثانیه به خشک کن اعمال شد. مدت زمان انجام هر آزمایش ۳۰۰ ثانیه و زمان نمونه برداری ۰/۱ ثانیه تنظیم شد. ۱۸ سری داده خام برای مدل سازی و اعتبارسنجی مدل از انجام آزمایش بدست آمد.

۲-۲- شناسایی مدل فضای حالت و نتایج اعتبارسنجی

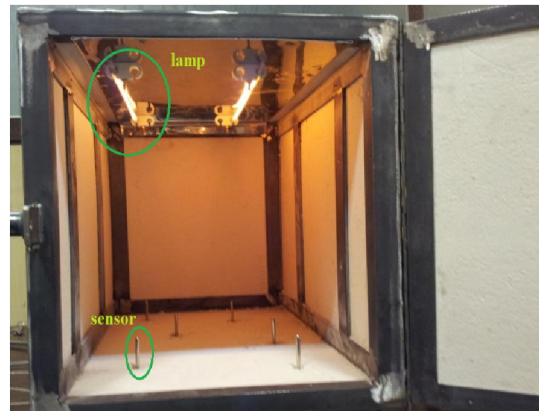
دستگاه خشک کن را به عنوان یک سیستم در نظر می‌گیریم. این سیستم دارای ۶ خروجی (دما) و ۱ ورودی (ولتاژ ورودی به لامپ) می‌باشد. از آن جایی که سیستم با مدل فرق می‌کند پس تعداد ورودی و خروجی که به مدل وارد می‌شود، متفاوت با سیستم می‌باشد. معادله فضای حالت نشان دهنده مدل دستگاه خشک کن است که به شکل زیر می‌باشد:

زمانی اجتناب ناپذیر و زیاد تخمین شار حرارتی باعث می‌شود استفاده از این روش ها عملاً برای سنجش دمای مجازی غیرممکن شود [۱۲].

در این پژوهش از روش دیگری استفاده شده است. بدین ترتیب سنسورهای مجازی دما برای سیستم های تابشی (مانند خشک کن) به عنوان یک الگوریتم ریاضی با استفاده از داده های تجربی از محیط آزمایشگاهی بدست آمده است. این الگوریتم می‌تواند همراه با محصول نهایی، یعنی یک خشک کن مادون قرمز به کاربران عرضه شود. از این پس کاربران می‌توانند به دمای چندین نقطه بدون اینکه به حسگرها بر روی دستگاه خشک کن نیاز داشته باشند دسترسی پیدا کنند.

۱-۱- بیان موضوع

یک دستگاه خشک کن مادون قرمز داریم. شش سنسور دما از جنس ترموکوپل داریم که بصورت نامتقارن در کف دستگاه خشک کن قرار گرفته اند. در سقف دستگاه دو عدد لامپ داریم که تولید گرما می‌کنند. سیستم (خشک کن) از نوع سیستم های دینامیکی می‌باشد. در این سیستم یک ورودی داریم (یک لامپ) و شش خروجی (ترموکوپل ها) که دما را به ما نشان می‌دهند. شکل شماره ۱ نحوه قرارگیری لامپ ها و ترموکوپل ها را نشان می‌دهد.

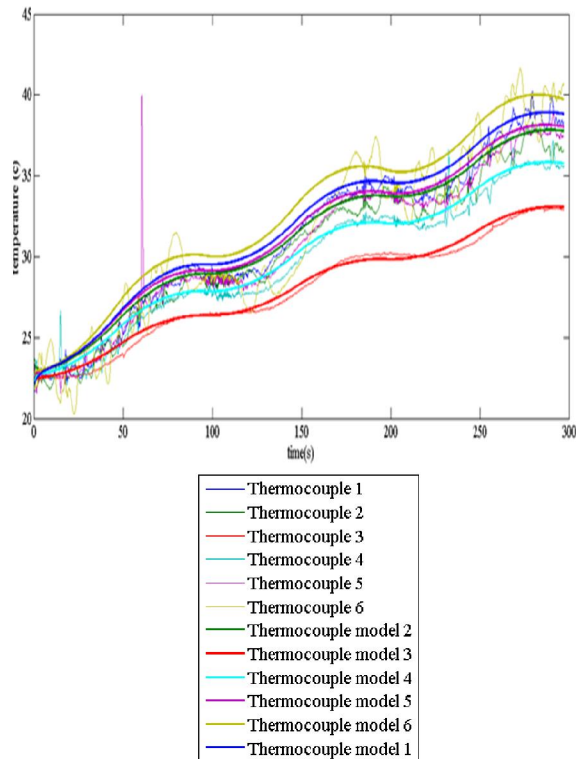


شکل ۱ خشک کن مادون قرمز

سیستم را خطی فرض می‌کنیم و با توجه به یک ورودی و چند خروجی بودن، مدل در فضای حالت تعریف می‌شود. خوشبختانه برای شناسایی و ساختن مدل خطی، حتی در صورتی که سیستم حالت غیرخطی داشته باشد، یک روش بهینه وجود دارد که به این روش، الگوریتم حداقل مربعات خطا می‌گویند. با استفاده از این روش به شناسایی ضرایب ماتریس های مساله می‌پردازیم.

با داده هایی که از آزمایش بدست می‌آوریم مقادیر ورودی و خروجی مدل را داریم و با استفاده از روش حداقل مربعات خطا، ضرایب ماتریس ها را طوری شناسایی و انتخاب می‌کنیم که مربع خطای مدل سازی حداقل شود. با این کار یک بار مساله بطور کامل حل می‌شود. یک مدل حرارتی از دستگاه خشک کن بر اساس روش حداقل کردن مربعات خطا ساخته شد. سپس بوسیله برنامه اعتبارسنجی که در متلب نوشته شد، از طریق نمودار، مشاهده خواهیم کرد که چقدر توانستیم تخمین (مدل) را به حالت واقعی سیستم نزدیک کنیم.

در مرحله بعد فرض می‌کنیم دمای یکی از ترموکوپل ها را نداریم (به عنوان مثال ترموکوپل شماره ۶ را حذف می‌کنیم). با داشتن مقادیر دمای ترموکوپل های شماره ۱،۲،۳،۴،۵ که در قسمت اول مساله بدست آورده ایم،



شکل ۳ نمودار تخمین خطا بین مدل طراحی شده و سیستم خشک کن با داده ۱۰۰-۴۰

۲-۳-۲- اعتبارسنجی با داده ۱۲۰-۴۰

مدلی که از فضای حالت خشک کن طراحی شده و با خطوط ضخیم تری ترسیم شده است بخوبی تغییرات دمای خشک کن را با خطای پایینی تخمین می زند. مقدار خطای حاصل شده بین مدل طراحی شده و سیستم خشک کن ۰/۶۸۰۲ درجه سانتیگراد می باشد. در شکل ۴ نمودار تخمین خطا بین مدل طراحی شده و سیستم خشک کن برحسب دما (سانتیگراد)-زمان (ثانیه)، نشان داده شده است.

۳- فیلتر کالمن

نام فیلتر کالمن مربوط به رادولف ای کالمن است. در سال ۱۹۶۰ مقاله معروف خود را در توصیف یک راه حل بازگشتی برای مسئله فیلترینگ خطی و داده برداری های گسسته ارائه نمود [۱۳]. در محاسبات دیجیتال فیلتر کالمن بصورت گسترده موضوع تحقیقات شد و مورد استفاده قرار گرفت [۱۴]. فیلتر کالمن مجموعه ای از معادلات ریاضی است که محاسباتی کارآمد را فراهم می کند. این فیلتر دربرگیرنده تخمینگر هایی از نوع پیش بینی-اصلاح می باشد. در وضعیت های مختلف از قبیل تخمین از گذشته، حال و حتی آینده بسیار قدرتمند می باشد [۱۵]. حتی زمانی که ماهیت دقیق سیستم مدلسازی شده ناشناخته است می توانیم از فیلتر کالمن استفاده کنیم. فیلتر کالمن یک تخمینگر بهینه می باشد [۱۶]. این فیلتر در برخی از زمان حالت سیستم را پیشگویی می کند و آن را تخمین می زند.

$$T(k+1) = A_d T(k) + b u(k) \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} T_1(k+1) \\ T_2(k+1) \\ T_3(k+1) \\ T_4(k+1) \\ T_5(k+1) \\ T_6(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1(k) \\ T_2(k) \\ T_3(k) \\ T_4(k) \\ T_5(k) \\ T_6(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix} u(k)$$

معلومات ما از داده های بدست آمده از آزمایش $T_{1,2,3,4,5,6}(k+1)$ به ترتیب دمای ترموکوپل شماره ۱،۲،۳،۴،۵،۶ در لحظه $k+1$ می باشد. $T_{1,2,3,4,5,6}(k)$ به ترتیب دمای ترموکوپل شماره ۱،۲،۳،۴،۵،۶ در لحظه k می باشد. u ولتاژ ورودی به لامپ است. ۳۶ ضریب ماتریس A_d discrete و ۶ ضریب ماتریس b ، مجهول می باشند. هدف شناسایی ماتریس های A و b است.

در این مرحله ۱۶ سری داده آماده سازی شده مرحله قبل را وارد الگوریتم حداقل مربعات خطا در نرم افزار متلب می کنیم و آسری داده را برای اعتبارسنجی کنار می گذاریم. این الگوریتم بهترین مدل خطی از یک سیستم می سازد. بدین ترتیب ضرایب مجهول ماتریس های فضای حالت شناسایی شدند که آن ها را بصورت زیر در رابطه ۱ جایگذاری کردیم:

$$\begin{bmatrix} T_1(k+1) \\ T_2(k+1) \\ T_3(k+1) \\ T_4(k+1) \\ T_5(k+1) \\ T_6(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9738 & 0.0219 & -0.0070 & 0.0088 & -0.0021 & 0.0046 \\ 0.0116 & 0.9835 & 0.0059 & -0.0066 & 0.0080 & -0.0024 \\ -0.0007 & -0.0001 & 0.9994 & 0.0020 & -0.0007 & 0.0001 \\ -0.0065 & 0.0249 & 0.0290 & 0.9388 & 0.0039 & 0.0099 \\ 0.0198 & 0.0010 & 0.0012 & 0.0186 & 0.9503 & 0.0094 \\ -0.0021 & 0.0030 & 0.0055 & -0.0155 & 0.0136 & 0.9955 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1(k) \\ T_2(k) \\ T_3(k) \\ T_4(k) \\ T_5(k) \\ T_6(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0029 \\ 0.0028 \\ 0.0019 \\ 0.0041 \\ 0.0026 \\ 0.0047 \end{bmatrix} u(k) \quad (2)$$

۲-۳-۲- اعتبارسنجی مدل فضای حالت

اعتبارسنجی آخرین مرحله می باشد که به ما نشان می دهد مدلی که از فضای حالت خشک کن با الگوریتم حداقل مربعات در قسمت قبل تخمین زده شد تا چه اندازه توانسته است به عملکرد واقعی سیستم نزدیک شده باشد. هر چه مدل با خطای کمتری سیستم را دنبال کند نشان می دهد که تخمین خوبی از سیستم بدست آمده است و به مدلسازی بهتری از فضای حالت خشک کن دست یافته ایم. این نتایج از بررسی دو سری داده خام با دامنه ۴۰ درصد حداکثر توان لامپ و دوره زمانی ۱۲۰، ۱۰۰ ثانیه بدست آمده است.

۲-۳-۱- اعتبارسنجی با داده ۱۰۰-۴۰

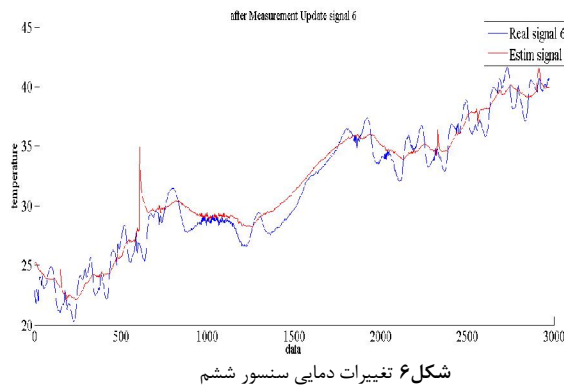
مدلی که از فضای حالت خشک کن طراحی شده و با خطوط ضخیم تری ترسیم شده است بخوبی تغییرات دمای خشک کن را با خطای پایینی تخمین می زند. مقدار خطای حاصل شده بین مدل طراحی شده و سیستم خشک کن ۰/۷۹۶ درجه سانتیگراد می باشد. در شکل ۳ نمودار تخمین خطا بین مدل طراحی شده و سیستم خشک کن برحسب دما (سانتیگراد)-زمان (ثانیه)، نشان داده شده است.

۱۰ داده گردآوری کرده ایم که در نهایت ۲۹۷۰ داده بدست آوردیم. برنامه طراحی شده با فیلتر کالمن با استفاده از داده های واقعی بدست آمده از پنج ترموکوپل باقی مانده به تخمین دمای سنسور ششم می پردازد.

۳-۱-۱- تخمین سنسور ششم

در این مرحله برنامه طراحی شده با فیلتر کالمن، تغییرات دمایی تخمین زده شده از سنسور ششم را با رنگ قرمز و مقدار واقعی آن را با رنگ آبی در شکل ۶ برحسب دما (سانتیگراد) - داده، نشان می دهد. مشاهده می شود که روند سنسور به خوبی دنبال شده است. خطاهای موجود نیز به دلیل نویزهای مختلف در سیستم و اندازه گیری هستند.

۳-۱-۲- نتایج بدست آمده از تخمین

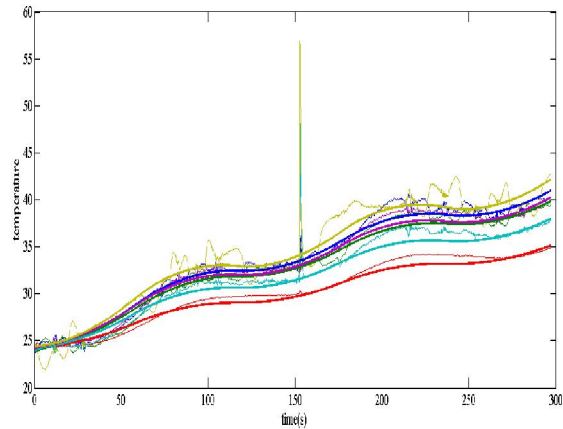


۴- نتیجه گیری

میانگین قدر مطلق خطا بین مقادیر دمای تخمین زده شده و واقعی از سنسور ششم، ۱/۳۵۲۹ درجه سانتیگراد می باشد. مقایسه دمای تخمینی و دمای واقعی اندازه گیری به وسیله ترموکوپل، دقت بسیار مطلوب الگوریتم اندازه گیری مجازی دما را بخوبی نشان داد.

۵- مراجع

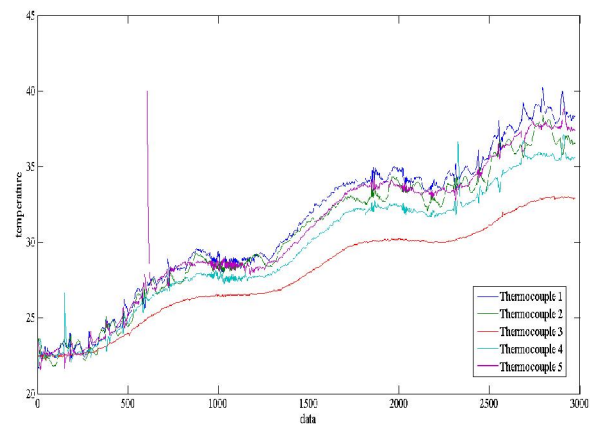
- [1] M. J. Daily, J. G. Harris, K. Reiser, An operational perception system for cross-country navigation, in *Proceeding of, IEEE*, pp. 794-802.
- [2] D. W. Payton, An architecture for reflexive autonomous vehicle control, in *Proceeding of, IEEE*, pp. 1838-1845.
- [3] H. Nicholls, J. Rowland, K. Sharp, Virtual devices and intelligent gripper control in robotics, *Robotica*, Vol. 7, No. 03, pp. 199-204, 1989.
- [4] G. E. Corcione, M. Lavorgna, G. Palma, O. Scognamiglio, Virtual pressure sensor for a common rail injection system, Google Patents, 2006.
- [5] C. Y. Liang, S. Srinivasan, E. E. Jacobson, NOx emission-control system using a virtual sensor, Google Patents, 2005.
- [6] S. Kabadayi, A. Pridgen, C. Julien, Virtual sensors: Abstracting data from physical sensors, in *Proceeding of, IEEE Computer Society*, pp. 587-592.
- [7] D. Halim, L. Cheng, Z. Su, Virtual sensors for active noise control in acoustic-structural coupled enclosures using structural sensing: robust virtual sensor design, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 129, No. 3, pp. 1390-1399, 2011.
- [8] M. N. Ozisik, *Inverse heat transfer: fundamentals and applications*: CRC Press, 2000.



شکل ۴ نمودار تخمین خطا بین مدل طراحی شده و سیستم خشک کن با داده ۱۲۰-۴۰

۳-۱- مراحل طراحی سنسور مجازی

در ادامه بصورت فرضی ترموکوپل ششم را حذف نمودیم. مدل بدست آمده از فضای حالت خشک کن، برای طراحی تخمین گر بهینه فیلتر کالمن در نرم افزار متلب مورد استفاده قرار گرفت. فیلتر کالمن دمای ترموکوپل ششم را تخمین می زند. ابتدا داده ۱۰۰-۴۰ را اجرا می کنیم. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می کنید در این قسمت از داده های اندازه گیری شده ترموکوپل ششم استفاده نمی شود. تغییرات دمای پنج ترموکوپل بدین شکل می باشد:



سیستم را به صورت گسسته و با زمان نمونه برداری ۰/۱ ثانیه و زمان نهایی شبیه سازی T=297 تعریف کردیم. به عبارت دیگر در هر ثانیه ما تعداد

- [9] T.-L. Chuah, Estimation of relaxation time distribution for NMR CPMG measurements, 1997.
- [10] M. Baghban, S. H. Mansouri, Z. Shams, Inverse radiation-conduction estimation of temperature-dependent emissivity using a combined method of genetic algorithm and conjugate gradient, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, No. 2, pp. 739-745, 2014.
- [11] R. Das, Estimation of parameters in a fin with temperature-dependent thermal conductivity and radiation, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, pp. 0954408915575386, 2015.
- [12] K. A. Woodbury, J. V. Beck, Estimation metrics and optimal regularization in a Tikhonov digital filter for the inverse heat conduction problem, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 62, pp. 31-39, 2013.
- [13] R. E. Kalman, A new approach to linear filtering and prediction problems, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 82, No. 1, pp. 35-45, 1960.
- [14] P. S. Maybeck, *Stochastic models, estimation, and control*: Academic press, 1982.
- [15] H. W. Sorenson, Least-squares estimation: from Gauss to Kalman, *Spectrum, IEEE*, Vol. 7, No. 7, pp. 63-68, 1970.
- [16] F. L. Lewis, F. Lewis, *Optimal estimation: with an introduction to stochastic control theory*: Wiley New York et al., 1986.