

用霍尔效应传感器测量润滑剂的性能：污染和粘度的研究

樱井喜泽

日本

摘要：本研究提出了一种基于磁场法的工业机械污染测量方法。采用永磁铁产生0.17T磁场，采用霍尔效应传感器测量工业机器润滑剂在运行过程中金属颗粒的污染水平，并预测润滑剂条件不符合标准时的更换周期(NAS1638)。金属粒子的污染水平与霍尔效应传感器的输出电压直接相关。当金属粒子向永磁体有任何移动时，测量的结果就被转移到计算机上进行分析。该方法可用于实验用于润滑剂的条件，以评估污染和机器罐内或管道内残留的金属颗粒，以及工业过程中使用的汽车润滑油和其他润滑油的条件。

关键词：污染、霍尔效应、润滑剂、磁性、颗粒、粘度

Measurement of the Lubricant Properties Using Hall Effect Sensor: A Study on Contamination and Viscosity Witsarut Sriratana, Riichi Murayama

Sakurai Yoshinori

Japan

Abstract: This study proposes the development of contamination measurement for industrial machines based on magnetic field method. A permanent magnet was used to generate the 0.17 T magnetic fields and Hall Effect Sensor was applied to measure the contamination level of metal particles in industrial machine lubricant during operation time and to predict the replacement period if the lubricant condition does not meet the standard (NAS 1638). Contamination level of metal particles was directly related to the output voltage of Hall Effect Sensor. When there was any movement of metal particles to the permanent magnet, the measured result was then transferred to a computer for analysis. This methodology could be applied to experiment the conditions of used lubricant for assessing the contamination and the metal particle remaining in the tank or inside the pipe of the machine as well as the conditions of car lubricant and other lubricants used in industrial processes.

Keywords: Contamination; Hall Effect; Lubricant; Magnetic; Particles; Viscosity

1 引言

1. 润滑剂的条件对工业机器的效率至关重要，因为它们与润滑剂变质造成的机器损坏有关。从以往的研究^[1,2]中可以看出，机器故障会受到低质量的润滑剂的影响。理论上，每种机器的润滑剂应在特定的时间内使用。然而，由于机器磨损本身或外部污染造成的金属颗粒，润滑剂的状况会比预期的更早地逐渐恶化，而且维护期也不适合于给定的机器。从^[3,4]中可以观察到，即使润滑剂仍然处于良好的状态和可用的状态，也会进行50%以上的润滑剂更换，从而导致成本过高。目前，有几项研究提出了利用超声波测量液体粘度、光声测量液体粘度、NdFeB的磁粘度测量，一个带有磁悬浮转子的磁粘度和密度计，电容式传感器，红外吸收和光纤传感^[5-11]。本研究是一种采用磁场和霍尔效应传感器的替代测量方法，可用于基于NAS1638标准检测金属颗粒的润滑剂污染，具有较高的精度和可靠性。

2 基本方法

2.1 金属颗粒与粘度的关系

粘度是对工业润滑剂特性起重要作用的重要参数之一。通常，粘度与润滑剂的流量直接相关。如果在正常运行情况下，润滑剂的粘度低于规定值，机器的效率也会降低，从而导致机器故障。金属颗粒之间的关系是依赖于粘度的因素，可以通过公式（1）从动态和运动粘度情况下的牛顿粘度定律中确定。

$$\eta = t_{\text{moving}} \frac{F}{A} \rho \quad (1)$$

where η 是粘度(Pa . s)

ρ 是流体的密度 (kg/m³)

F 是力 (N) ;

A 是油容器的面积;

t_{moving} 是移动金属粒子的永磁体。

2.2 霍尔效应传感器

霍尔效应传感器是一种小型无源传感器,适用于几种用途。当通过半导体即霍尔发生器的恒电流转移^[12]时,产生输出电压。在本研究中,当改变公式(2)所示的相对角度时,可以通过磁场对电子的洛伦兹力来分析传感器模块产生的磁体密度。 v 是由电场引起的电子的速度。霍尔电压由磁场产生,如式(3)所示。

$$F = qvB \sin \theta \quad (2)$$

$$V_H = \frac{R_H}{d} IB \quad (3)$$

其中, V_H 为霍尔效应传感器的输出电压, (V); d 为霍尔发生器的厚度, (mm); R_H 为霍尔系数; I 为恒定电流(mA)。

3 系统组件

3.1 传感器模块

污染传感器模块由一个安装在永磁铁(0.17T)上,尺寸为12毫米,宽15毫米,厚度2毫米。霍尔效应传感器与永磁体之间的间隙为3mm。为了保护霍尔效应传感器的饱和输出电压。因此,霍尔效应传感器的输出电压是恒定的,用于与传感输出电压进行比较,这是当金属粒子移动到永磁铁^[6]时产生的,如图1所示。

永磁铁产生磁场,该磁场会影响润滑剂中的金属污染物,导致磁场随污染物的重量而变化。霍尔效应传感器可以检测磁场的变化并产生电压输出到12位模拟数字转换器,将数据发送到基于微控制器的数据采集,然后将数据存储在计算机上进行数据分析。

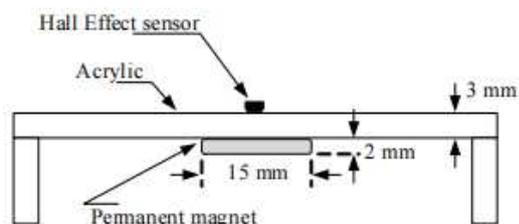


图1 安装霍尔效应传感器和永磁铁（俯视图）

3.2 参考金属颗粒

污染可能受到多种原因的影响,如机器磨损和腐蚀或暴露周围的外部污染。因此,磨损颗粒可能是有色金属和黑色金属,导致机器的效率降低和机械损坏。通常,粒子的大小会在 $1\mu\text{m}$ 到 $40\mu\text{m}$ 之间。 $20\mu\text{m}$ ~ $30\mu\text{m}$ 大小的颗粒会直接导致机器磨损,而小于 $1\mu\text{m}$ 大小的颗粒对^[12]的影响不显著。因此,本研究提出了机器润滑剂中亚铁金属污染的测量方法,它从本质上影响了不同金属污染水平的磁场变化。

图2显示了实验中使用的参考金属粒子通过扫描电镜(扫描电子显微镜)进行分析,扫描速度为=2,超高张力(EHT)=10 kV,工作距离(WD)=为12mm,放大倍数为(Mag)=2kX.金属颗粒的大小从 $1\mu\text{m}$ 到 $100\mu\text{m}$ 不等。

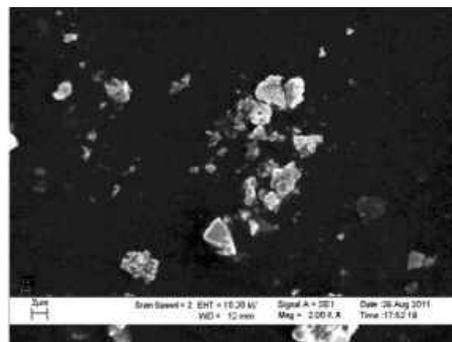


图2 在2kx的扫描电镜下,参考金属颗粒的尺寸

在本研究中测试了3种润滑剂。每个样品约25ml,填充10组50ml油容器,厚度为0.3mm,宽20mm,长40mm,高70mm。参考金属颗粒分别以0.1g、0.2g、0.3g、0.4g、0.5g、0.6g、0.7g、0.8g、0.9g和1g的增量添加,如图3和图4所示。

传感器模块和每个装满测试润滑油的油箱被放置在设计的位置,以获得准确和精确的结果。因此,参考金属颗粒的速度可以随润滑剂粘度的速度而变化,对于高粘度润滑剂速度低,另一方面,对于低粘度润滑剂速度高。因此,金属颗粒的速度是润滑剂粘度的函数。

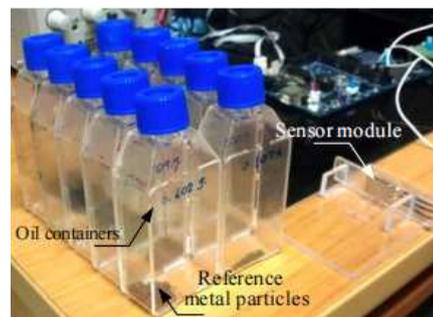


图3 用于润滑油测试的油类容器。油润滑金属颗粒参考

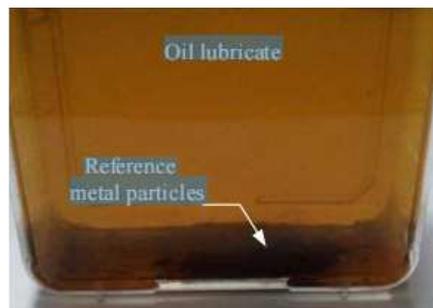


图4 润滑剂和参考金属颗粒

4 实验条件

本研究选择了实验条件下的润滑油,即SAE15W-40、SAE20W-50、ISOVG100进行实验。润滑油在运行期间可以逐渐改变其性能。因此,本研究将润滑油的测量分为两部分:金属颗粒的污染和润滑油的粘度。在这种方法中,通过将重量从0.1g改变到1g,将金属颗粒添加到25毫升的润滑油容器中,然后搅拌约3秒后再进行测试,如图5所示。霍尔效应传感器输出电压的平均值从3.736V开始,当金属粒子接近永磁铁时不断增加。

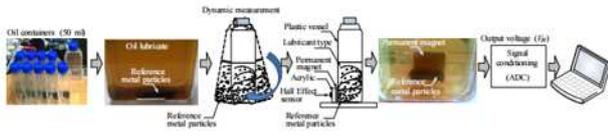


图5 所有湍流金属粒子的说明

在本实验中，我们还对一个金属颗粒重量值进行了10个重复测量结果，以估计传感器模块的精度和可重复性。测量结果以从霍尔效应传感器的输出中获得的电压的形式表示。这些输出值取决于金属粒子向永磁体移动的速度，如图6和图7所示。

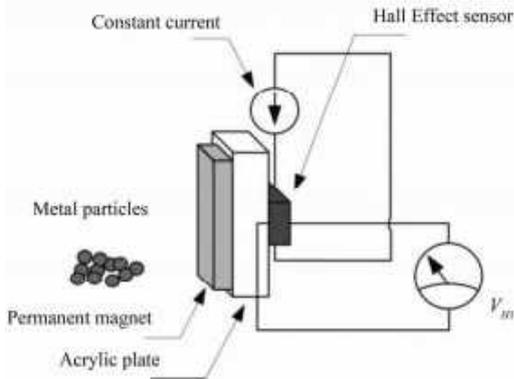


图6 测试前霍尔效应传感器输出电压为3.736V

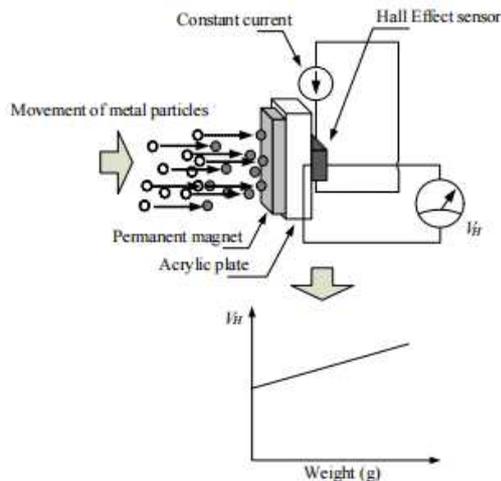


图7 当金属粒子向永磁体移动时，霍尔效应传感器的输出电压增加

4.1 污染测量

基于NAS1638标准的污染测量是通过计数颗粒数，并将污染水平从NAS00到NAS12划分为14度。每一步度的粒子数增量是两倍。超过12级的污染水平可以通过使用外推法^[11]来确定，如表1所示。然而，在本研究中提出了方法实验ISOVG100 润滑剂由于广泛使用的润滑剂在齿轮箱等行业也指金属颗粒污染的颗粒数量超过最大津贴L-CKC工业封闭齿轮油标准如表2所示。通常，更换润滑剂的最大值应为0.5%或等效NAS18标准，污染水平如图8所示。因此，本研究使用的传感器模块（霍尔效应传感器）是通过从NAS12开始使用污染的重量，直到金属颗粒的重量达到 $1g^{[13]}$ 。

表1 重量污染标准NAS 1638

Contamination degree	12	13	14	15	16
mg/25ml	1.25	2.5	5	10	20
Contamination degree	17	18	19	20	21
mg/25ml	40	80	160	320	640

表2 L-CKC工业闭式齿轮油交换标准（方法：SH/T0586）

Item	Exchanging oil Standard
Appearance	Abnormity
Movement viscosity (40°C) rate of change/% >	+15 or -20
Moisture/%	0.5
Mechanical impurities /% ≥	0.5
Copper corrosion (100°C), 3h/degree ≥	3b
Timken OK value /N ≤	133.4



图8 ISOVG100中的污染水平差异

4.2 粘度的测量

霍尔效应传感器的移动金属颗粒、润滑剂粘度与输出电压的关系已确定如图9所示。当关系为 $T_A > T_B > T_C$ TT时，则 $\eta_A > \eta_B > \eta_C$ ，其中 T_A 、 T_B 和 T_C 是从起点到传感器模块输出的稳定点的变化， η_A 、 η_B 和 η_C 是每个润滑剂^[14]的粘度。

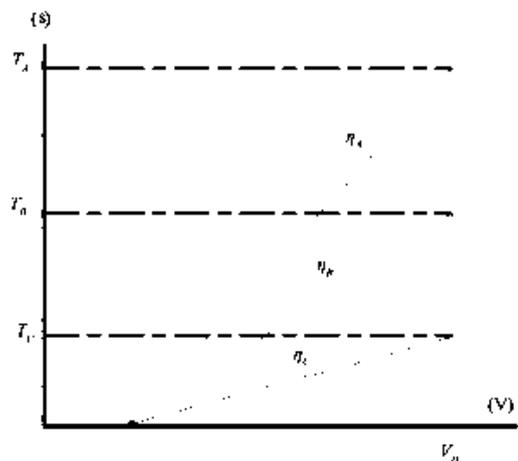


图9 霍尔效应传感器的粘度与输出电压的关系从实证研究中，它可以被确定为使用等式（4）

$$t_{\text{moving}} = m \times V_H + c \quad (4)$$

其中， m 是斜率作为金属颗粒质量和粘度的函数(s/V)； c 是常数。

改变金属颗粒重量以测量润滑剂粘度特性，对于油容器中的25毫升润滑油以确定适当的参考金属颗粒重量，并进一步用作参考重量。

5 实验结果

5.1 污染的结果

从ISOVG100润滑剂表3所示，可以注意到，变化的输出电压从霍尔效应传感器可以最初测量从0.01克的污染与±1 mV的最大误差，如图10所示。与NAS15相比，所开发的系统可以根据具体的标准有效地测量润滑油更换时的污染水平。然而，当NAS14向下时，霍尔效应传感器的输出电压变化不显著，或者该系统不能区分低于NAS14的金属颗粒的污染。实验结果的标准变化如图11所示，可以看出，金属粒子的数量越多，标准差就越大。正是由于磨损粒子的数量大于永磁体的面积，导致了饱和磁场。

表3 霍尔效应传感器的输出电压

Particles (g)	Output (V)	Particles (g)	Output (V)
0.001	3.737	0.3	3.788
0.002	3.737	0.4	3.799
0.005	3.737	0.5	3.809
0.01	3.739	0.6	3.818
0.02	3.741	0.7	3.825
0.04	3.745	0.8	3.831
0.08	3.752	0.9	3.836
0.1	3.758	1	3.842
0.2	3.774		

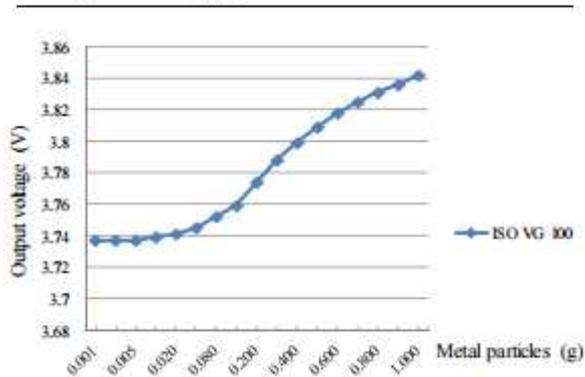


图10 霍尔效应传感器输出电压

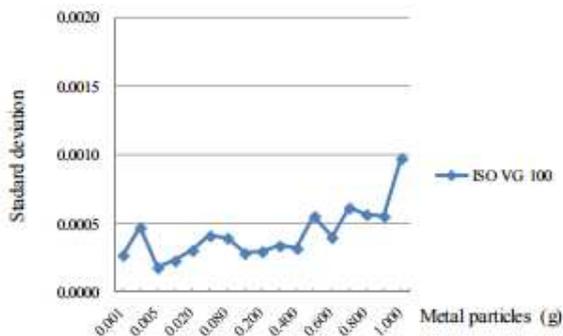


图11 ISOVG100中污染的标准偏差

根据SAE15W-40和SAE20W-50的标准，测试其他不同类型的润滑剂，如图12所示。实验结果表明，霍尔效应传感器可以在不限制润滑油类型的情况下测量金属颗粒污染的变化。

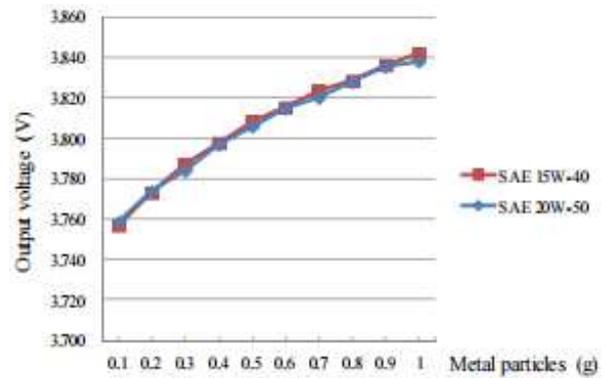


图12 金属颗粒在测量机油SAE15W-40和SAE20W-50时的污染标准试验中的影响

5.2 粘度实验结果

从实验中，我们考虑到每个实验重量下金属粒子移动到永磁体上所消耗的时间，观察到霍尔效应传感器的输出电压平滑且持续变化，如图13-15所示。还可以注意到，在达到一个稳定点之前，由于斜率尖锐，实验的适当权重范围在0.1g到1g之间。从详细的分析来看，适当的参考权重分别为0.6g和0.8g。因此，这两个重量值被进一步用作其他润滑剂类型的参考。

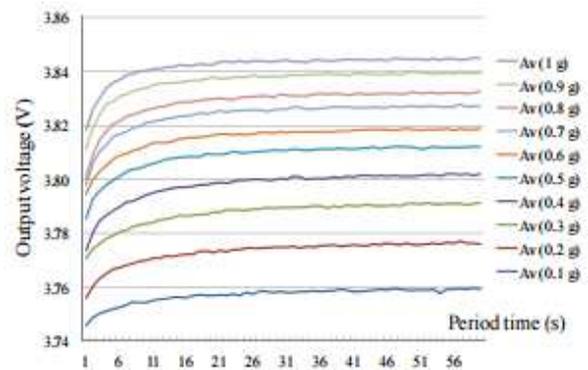


图13 输出电压变化和周期时间 (SAE15W-40)

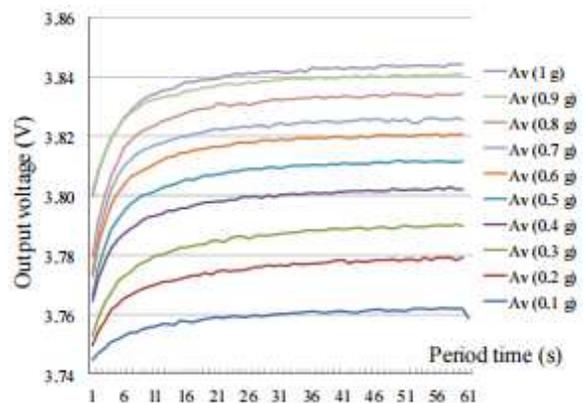


图14 输出电压变化和周期时间 (SAE20W-50)

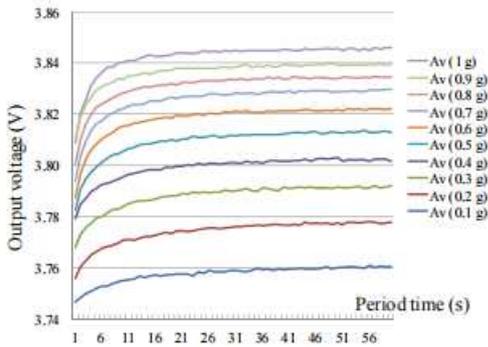


图15 输出电压的变化和周期时间(ISOVG100)

本文仅介绍了ISOVG100(0.6g和0.8g的重量)的一种情况。实验观察了输出电压与粘度的关系。根据金属粒子向永磁体移动的时间周期和到达稳定点的时间，实验可分为两个部分，如图16和图17所示。所开发的系统可以用方程式(5)表示的三次多项式和方程式(6)表示的第二次输出电压的变化多项式来表示。

$$y = 9E - 05x^3 - 0.0019x^2 + 0.0138x + 3.7755 \quad (5)$$

$$y = -0.0008x^2 + 0.0104x + 3.7916 \quad (6)$$

在Y轴上的霍尔效应传感器的输出电压与在X轴上的粘度测试随0.6g的磁场变化的线性关系如图18所示，而0.8g的情况如图19所示。三阶多项式电压与传感器模块(0.6g金属颗粒)产生的从起始点到稳定点的粘度的关系如图20所示，而0.8g金属颗粒的关系如图21所示。

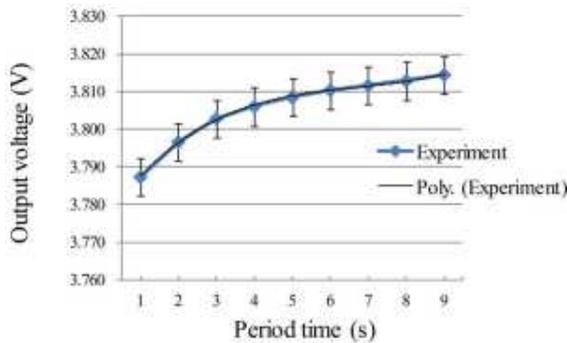


图16 在三度多项式(ISOVG100(0.6g))中测试的输出电压和粘度的关系

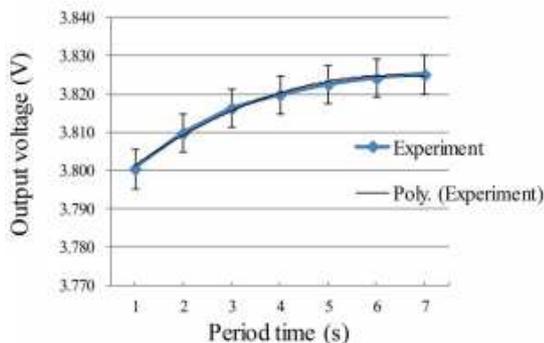


图17 在二次多项式(ISOVG100(0.8g))中测试的输出电压和粘度的关系

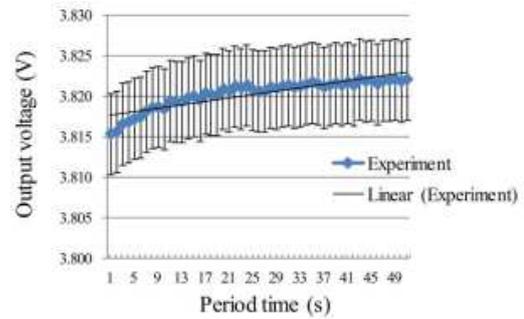


图18 在稳定点(0.6g金属颗粒)测试输出电压和粘度的线性关系

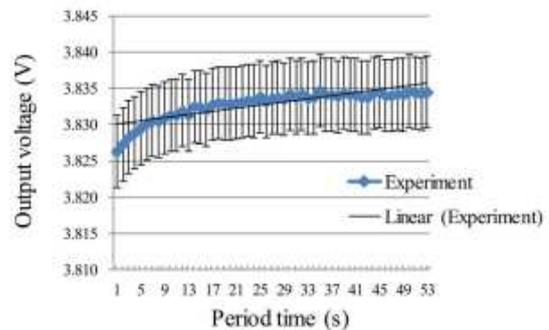


图19 在稳定点(0.8g金属颗粒)测试输出电压与粘度的线性关系

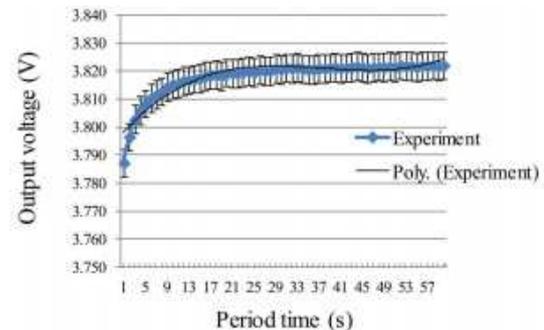


图20 在三度多项式(0.6g金属颗粒)中测试的电压和粘度的关系

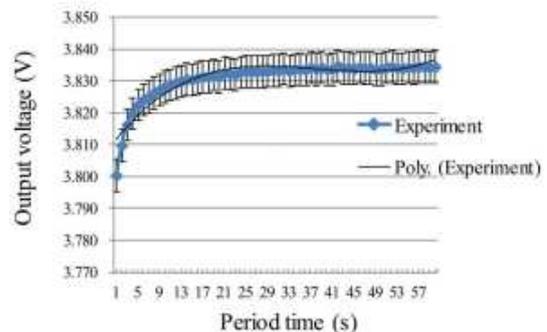


图21 在三度多项式(0.8g金属颗粒)中测试的电压和粘度的关系

表5 0.8g参考金属颗粒在稳定点处的平均值和标准偏差

Lubricates grade	Moving time (s)	Mean (V)	Standard deviation
ISO VG 100	7	3.817	0.009
SAE 15W-40	10	3.818	0.008
SAE 20W-50	13	3.813	0.014

5.3 粘度分析

表4和表5^[15]显示了使用0.6g和0.8g金属颗粒重量的3种润滑剂到稳定点的时间、平均值和标准偏差。但是,如果参考金属颗粒的重量比输出电压大于0.9g时,霍尔效应传感器的输出电压将不恒定。对润滑剂的最低粘度的显著影响如图22所示。结果表明,SAE15W-40到稳定点(5s)所消耗的时间最少,其次分别是ISOVG100(6s)和SAE20W-50(12s)。

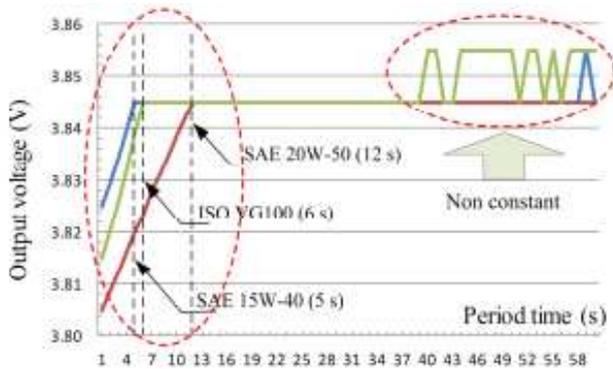


图22 为1g参考金属粒子消耗到稳定点的时间

6 结论

实验结果表明,该系统能提供准确、可靠的计算结果。传感器模块已经开发用于测量本文中已经提到的润滑剂的污染。利用霍尔效应传感器测量了磁场的原理。它可以用来测量润滑剂中金属(亚铁)的污染量。检测润滑油的参考标准为NAS1638。结果表明,该传感器可以测量金属的污染量,这与润滑剂中磁场的变化有关。该系统可以测量污染水平,因为NAS15可以定义机械的磨损,足以适当地指示排水。使用磁场测量原理的优点是能够减少由于每个品牌造成的润滑油浊度造成的误差,并对颜色的清晰度和强度进行分级,这在使用光学测量时需要小心。测量系统可以在较低水平的污染测量能力中得到改进,NAS15通过选择具有高灵敏度的传感器来测量磁场。此外,它可以更新安装在机器上,可以实时测量,防止机器损坏。

在粘度测量中,还观察到,考虑到金属粒子向永磁体移动到达到稳定点的周期时间,霍尔效应传感器的输出电压是平稳且一致的。将25毫升的金属颗粒加入不同重量的润滑剂中,然后进行实验,以估计用于测试的适当重量。实验用金属颗粒的适当重量范围为0.1g~1g。如果参考金属颗粒重量大于1g,则霍尔效应传感器的输出电压将不恒定。然而,对润滑剂最低粘度的影响不显著,对-15℃(起动)时9500mPa的影响和-20℃(泵送)时60,000mPa的影响较低。因此,我们可以估算出参考金属颗粒的重量(0.8g)与润滑剂的体积之间的比值,为 \approx 为0.1019ml/25ml。

REFERENCES

[1] M. H. Jones, "Tribology—A Key Element in Condition Monitoring," *Proceedings of Condition Monitoring*, Oxford, 2001, pp. 20-29.

[2] Q. Meng, "Study on the Online Oil Monitor Based on Optical Fiber Sensor," *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, Vol. 5, 2006, pp. 34-37.

[3] B. W. Wilson and G. Silvernail, "Automated In-Line Machine Fluid Analysis for Marine Diesel and Gas Turbine Engines," *International Condition Monitoring Conference*, Mobile, 2002, pp. 129-135.

[4] R. Guojun, T. Derong and Q. Jinyu, "An On-Line Monitoring Technique for Contamination Degree of Diesel Engine Lubricating Oil," *Internal Combustion Engines*, Vol. 32, 2005, pp. 36-38.

[5] F. Buiocchi, R. T. Higuti, C. M. Furukawa and J. C. Adamowski, "Ultrasonic Measurement of Viscosity of Liquids," *IEEE Ultrasonics Symposium*, Vol. 1, San Juan, 22-25 October 2000, pp. 525-528. doi:10.1109/ULTSYM.2000.922604

[6] C. Lou and D. Xing, "Photoacoustic Measurement of Liquid Viscosity," *IEEE Applied Physics Letters*, Vol. 96, No. 21, 2010, Article ID: 211102. doi:10.1063/1.3435462

[7] D. C. Crew, P. G. McCormick and R. Street, "Measurement of Magnetic Viscosity in NdFeB," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 32, No. 5, 1996, pp. 4356-4358. doi:10.1109/20.538867

[8] M. Bano, I. Strharsky, and I. Hrmo, "A Viscosity and Density Meter with a Magnetically Suspended Rotor," *IEEE Scientific Instruments*, Vol. 74, No. 11, 2003, pp. 4788-4793. doi:10.1063/1.1614881

[9] D. Yang, X. Zhang, Z. Hu and Y. Yang, "Oil Contamination Monitoring Based on Dielectric Constant Measurement," *Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Zhangjiajie, 2009, pp. 249-252.

[10] A. Agoston, C. Otsch, J. Zhuravleva and B. Jakoby, "An IR-Absorption Sensor System for the Determination of Engine Oil Deterioration," *Proceedings of IEEE on Sensors*, Vol. 1, Austria, 24-27 October 2004, pp. 463-466. doi:10.1109/ICSENS.2004.1426200

[11] Z. Pang, N. Shi, G. Meng and W. Li, "Development of In-Line Oil Contamination Sensor for Lubricant of Scraper Conveyor Reducer," *9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMT09)*, Beijing, 16-19 August 2009, pp. 4808 - 4812.

[12] E. Ramsden, "Hall-Effect Sensor: Theory and Applications," Elsevier, Burlington, 2006.

[13] C. Chaiyachit, S. Sathamsakul, W. Sriratana and T. Suesut, "Hall Effect Sensor for Measuring Metal Particles in Lubricant," *International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists 2012 (IMECS 2012)*, Hong Kong, 14-16 March 2012, pp. 894-897.



[14] W. Sriratana and R. Murayama, "Lubricant Viscosity Measurement Using Hall Effect Sensor," *The Society of Instrument and Control Engineers (SICE Annual Conference 2012)*, Akita, 20-23 August 2012, pp. 23-26.

[15] International Organization for Standardization, "Guide for Expression of Uncertainty in Measurement," International Organization for Standardization, 2nd Edition, Switzerland, 1995.