

# 一种基于磁场模型的阀芯位置检测方法

王龙飞

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2022年11月24日; 录用日期: 2023年1月11日; 发布日期: 2023年1月19日

## 摘要

面向集成电路制造领域对输送液体的超洁净要求, 超洁净节流阀通过将永磁体嵌入阀芯, 实现外部磁场非接触驱动阀芯。为了实现阀芯位移的高精度控制, 针对阀芯位置检测的需求, 提出了一种非接触式检测方法。结合永磁体几何形状和其激励空间磁场分布, 利用优化算法确定分布式多极(DMP)模型中的等效参数, 运用DMP模型和等效电流模型描述永磁体的磁场。通过将磁传感器测量值减去外部永磁体产生的磁场得到阀芯产生的磁通密度, 基于DMP模型中磁通密度与阀芯位置的映射关系, 利用Levenberg-Marquardt算法进行阀芯标记磁源磁逆问题求解, 实现阀芯位置检测。使用COMSOL对永磁体建模, 通过模型计算所得磁场与COMSOL仿真结果比较, 开展模型可行性验证。通过仿真验证所提出的阀芯定位方法的有效性和精度。

## 关键词

集成电路制造, 超洁净阀, 分布式多极, 位置检测, 磁逆问题

# A Spool Position Detection Method Based on Magnetic Field Model

Longfei Wang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Nov. 24<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jan. 11<sup>th</sup>, 2023; published: Jan. 19<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Facing the ultra-clean requirements for conveying liquids in the field of integrated circuit manufacturing, the ultra-clean throttle valve can be driven contactlessly by the external magnetic field with embedded permanent magnet (PM) in the valve core. In order to realize the high-precision spool control, a non-contact detection method is proposed to meet the requirements of spool position detection. Distributed multipole (DMP) model and equivalent current model are used to de-

scribe the magnetic field of the PM. Combined with the PM geometry and its excitation spatial magnetic field distribution, the equivalent parameters of DMP model can be determined by optimization algorithm. The magnetic flux density generated by the spool was obtained by subtracting the magnetic field generated by the external permanent magnet from the measured value of the magnetic sensor. Based on the mapping relationship between the magnetic flux density and the spool position of DMP model, and the Levenberg-Marquardt algorithm is used to solve the magnetic inverse problem of the spool marking magnetic source to realize the spool position detection. The magnetic field calculated by DMP model is compared with the actual PM magnetic flux density distribution, and the feasibility of the DMP model is verified. The effectiveness and accuracy of the proposed spool position detection method are verified by simulation.

## Keywords

**Integrated Circuit Manufacturing, Hydraulic Valve, Distributed Multipole, Position Detection, Inverse Magnetic Solution**

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在半导体、集成电路制造、化工等领域，为了保证转移液体的洁净度，超洁净流控有着极其广泛的应用[1] [2]。超洁净阀通过将永磁体嵌入由超洁净材料制成的阀芯中，并通过磁场非接触驱动阀芯，实现液体的超洁净流量控制[3]。然而，阀芯可能由于不稳定的流体冲击等原因面临振动问题。因此，为了实现超洁净阀的高精度控制，对阀芯位置的检测很有必要。

阀芯位置检测技术主要分为接触式和非接触式。接触式检测技术已应用十分广泛，如 MOOG [4]和 上海诺玛[5]等企业，均有电磁阀产品采用直线位移传感器作为阀芯位移测量元件。布朋生[6]选用 LVDT 位移传感器检测阀芯位移，基于反馈控制设计了电磁阀智能控制系统。盛世伟，李军伟[7]等人采用由伺服电机、丝杠和光栅传感器组成的位移伺服控制系统实现计量组件阀芯位移的精确控制。由于接触式检测技术中传感器探头与阀芯直连，改变了阀芯的动态特性，因此非接触式检测技术逐渐发展起来。田昊，赵禹任[8]提出了基于线圈电感 - 阀芯位移多项式模型的阀芯位移无传感器检测方法，利用该模型可以较好地估计阀芯开启过程的位置变化。龙聪、黄涛[9]采用数字电容检测方法，将测量电路插入传感器探头，研制了一种适用于狭窄环境的新型电容传感器测量系统来实现阀芯位置的检测。赵赛南，黄涛，吕莎[10]采用基于图像位移的位移检测方法，利用 PC 和微型摄像头构建检测系统，对阀芯位移进行实时检测。

本文提出了一种磁定位的方法来实现对阀芯位置的检测。在超洁净阀工作原理的基础上，介绍了该磁定位方法的原理。然后介绍了分布式多极模型和等效电流模型磁场理论，使用 COMSOL 有限元分析软件对永磁体建模，通过模型计算所得的磁场与 COMSOL 仿真结果比较，验证了模型的有效性。最后详细介绍了磁定位算法并通过一系列定点的仿真实验，验证了该定位方法的可行性。

## 2. 超洁净阀的工作原理及阀芯磁定位原理

### 2.1. 工作原理

超洁净阀的基本结构如图 1 所示，主要包括阀体、超洁净保护层、内嵌永磁体、弹簧、外部永磁体、

连接卡箍和调节轮，其中阀芯由内嵌永磁体和超洁净保护层构成。该阀工作原理是通过调节轮驱动外部永磁体作轴向运动，进而在磁力和弹簧力的作用下带动阀芯进行移动，从而控制阀门的开度。

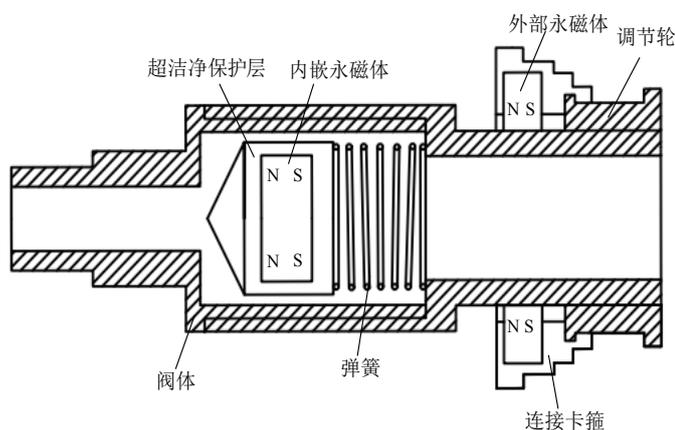


Figure 1. Schematic diagram of ultra-clean valve structure

图 1. 超洁净阀结构示意图

如图 2 所示，超洁净阀在工作时阀芯主要受到流体力、磁力和弹簧力。由于流体力存在不稳定因素，液压阀工作时会发生轴向振动。当用于高精度控制时，这种振动会导致较小的流量波动，从而影响控制精度，因此对阀芯的定位研究很有必要。

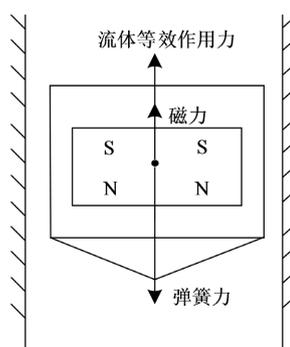


Figure 2. Diagram of spool force

图 2. 阀芯受力示意图

## 2.2. 阀芯磁定位原理

根据超洁净电磁阀的组成结构知，内嵌永磁体和阀芯是一体的，因此对阀芯位置的检测可以转化为对内嵌永磁体的定位。如图 3 所示，现有一个轴向磁化外部永磁体和一个轴向磁化的内嵌永磁体，它们的参数不同，产生的空间磁场分布也不同。它们产生的磁场在空间中相互叠加，并且可以被传感器所测得。阀芯磁定位原理如图 4 所示。

## 3. 磁场模型理论

根据上一节介绍的磁定位原理，为了实现阀芯的定位，首先需要进行磁场模型理论的介绍。目前国内外磁场分析技术主要有：拉普拉斯方程的解析解、数值方法和集总参数法等。对于结构比较复杂的物

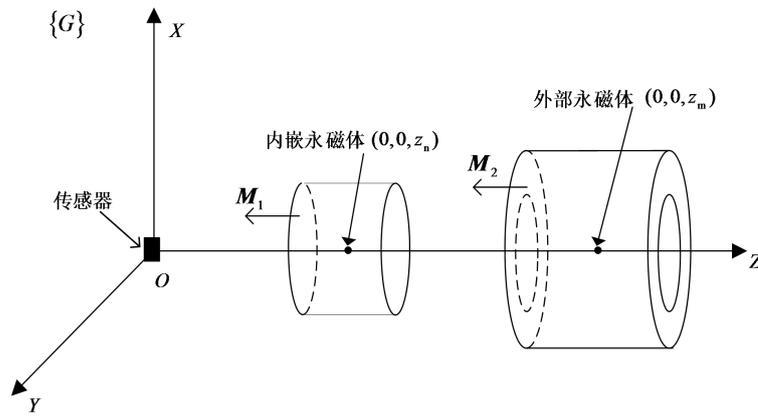


Figure 3. Structure of drive  
图 3. 驱动结构

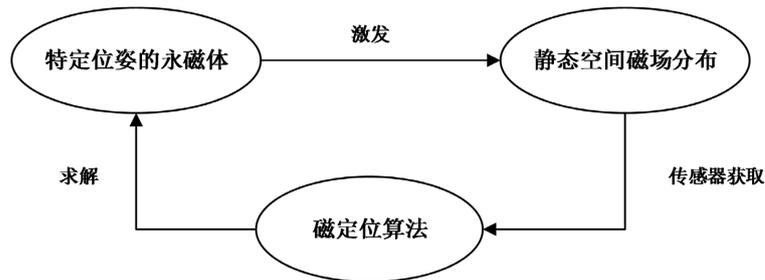


Figure 4. Schematic diagram of magnetic positioning  
图 4. 磁定位原理图

体，获得解析解的可能性较小。数值方法虽然可以提供精确的磁场计算，但是由于计算时间的原因，只能进行离线计算。目前在磁定位的研究中，大部分采用磁偶极子模型，永磁体可以看作是磁偶极子，通过计算这个磁偶极子磁场来计算永磁体的磁场。然而磁偶极子模型只有当研究对象到永磁体的距离远远大于永磁体的最大尺寸时，才可以获得精确解。在本文研究的场景下存在两个永磁体磁源，但是这两个永磁体体积较大不适合磁偶极子模型。因此，本文提出分布式多极(Distributed Multipole 以下简称为 DMP)模型和等效电流模型来描述永磁体空间磁场分布。

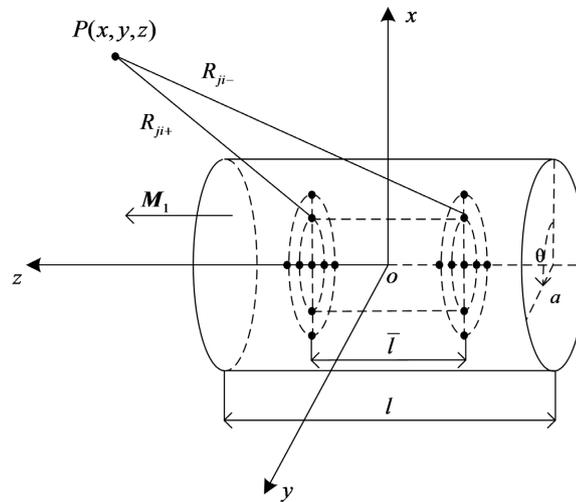
### 3.1. 圆柱永磁体的 DMP 磁场模型

DMP 模型是将圆柱永磁体等效为  $k$  个环(环半径为  $\bar{a}_j$ )，每个环有  $n$  个磁偶极子。通过等效模型根据场点到源点的距离求得空间任意一点的磁势  $\Phi$  和磁通密度  $\mathbf{B}$ 。图 5 为圆柱永磁体的 DMP 模型。

图 5 中圆柱永磁体半径为  $a$ ，厚度为 1，磁化强度为  $M_1$ ，磁偶极子之间的距离为  $\bar{l}$ 。由于拉普拉斯方程是线性的，所以空间任意一点  $P(x, y, z)$  的磁势  $\Phi$  可以由单个磁偶极子磁势叠加得到：

$$\Phi = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=0}^k m_j \sum_{i=1}^{n_k} \left( \frac{1}{R_{ji+}} - \frac{1}{R_{ji-}} \right) \quad (1)$$

其中， $n_k = \begin{cases} 1 & j=0 \\ n & j \neq 0 \end{cases}$ ， $m_j$  为磁偶极子强度， $R_{ji+}$  和  $R_{ji-}$  分别是第  $j$  个环中第  $i$  个磁偶极子到任意点  $P(x, y, z)$  的距离。



**Figure 5.** DMP model of cylindrical permanent magnet  
**图 5.** 圆柱永磁体的 DMP 模型

$$R_{ji\pm} = \sqrt{(x - \bar{a}_j \cos i\theta)^2 + (y - \bar{a}_j \sin i\theta)^2 + (z \pm \bar{l}/2)^2}$$

其中，磁偶极子半径  $\bar{a}_j = a \cdot j / (k + 1)$ ， $\theta = 2\pi / n$ ， $j = 0, 1, \dots, k$ ， $i = 0, 1, \dots, n$ 。

同理，在  $P(x, y, z)$  点的磁通密度  $\mathbf{B}$  为[11]：

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{j=0}^k m_j \sum_{i=1}^{n_k} \left( \frac{\mathbf{a}_{R_{ji+}}}{R_{ji+}^2} - \frac{\mathbf{a}_{R_{ji-}}}{R_{ji-}^2} \right) \quad (2)$$

其中， $\frac{\mathbf{a}_{R_{ji\pm}}}{R_{ji\pm}^2} = \nabla(1/R_{ji\pm}) = -\mathbf{a}_R (1/R_{ji\pm}^2)$ ， $\mathbf{a}_R = \mathbf{R}/R$ ，因此：

$$\frac{\mathbf{a}_{R_{ji\pm}}}{R_{ji\pm}^2} = - \frac{(x - \bar{a}_j \cos i\theta) \mathbf{a}_x + (y - \bar{a}_j \sin i\theta) \mathbf{a}_y + (z \pm \bar{l}/2) \mathbf{a}_z}{\left[ (x - \bar{a}_j \cos i\theta)^2 + (y - \bar{a}_j \sin i\theta)^2 + (z \pm \bar{l}/2)^2 \right]^{3/2}}$$

DMP 模型表达式磁势  $\Phi$  和磁通密度  $\mathbf{B}$  中的未知参数  $\bar{l}$  和  $m_j$  可以通过误差函数(3)来求解，该函数受永磁体几何形状和其激励空间磁场的约束：

$$E = \int_z [\Phi(z) - \Phi_A(z)]^2 dz \quad (3)$$

其中， $\Phi(z)$  是 DMP 模型  $z$  轴上磁势的计算结果， $\Phi_A(z)$  是沿磁化方向( $z$  轴)的解析解。对圆柱永磁体，沿  $z$  轴的磁势和磁通密度解析解可以表示为[12]：

$$\Phi_A(z) = \frac{1}{4} M_1 l [(A_- - |B_-|) - (A_+ - |B_+|)] \quad (4)$$

$$\mathbf{B}_A(z) = \frac{1}{2} \mu_0 M_1 \left[ \frac{|B_+|}{A_+} - \frac{|B_-|}{A_-} + c \right] \quad (5)$$

其中， $c = \begin{cases} 0 & |Z| \geq 1 \\ 2 & |Z| < 1 \end{cases}$ ， $Z = \frac{z}{l/2}$ ， $\gamma = \frac{a}{l/2}$ ， $A_{\pm} = \sqrt{\gamma^2 + B_{\pm}^2}$ ， $|B_{\pm}| = |Z \pm 1|$ 。

对于特殊点的磁通密度满足：

$$\mathbf{B}(z=l/2) = \mathbf{B}_A(z=l/2) = -\mu_0 \nabla \Phi_A|_{z=l/2} \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{B}$  是由式(2)计算出,  $\mathbf{B}_A$  是沿磁化方向上的解析解, 由式(5)可以得到。

因此, 以式(1)、式(2)和式(6)为条件, 求取满足误差函数(3)取得最小值时所对应的未知参数  $\bar{l}$  和  $m_j$ , 即得到圆柱永磁体 DMP 磁场模型。

### 3.2. 空心圆柱永磁体的等效电流模型

等效电流模型是基于电磁场理论中的安培分子环流定律建立的数学模型, 认为永磁体外部空间任意一点的磁通密度是由永磁体表面的电流环路对此点磁通密度的叠加。本文选取的空心圆柱永磁体被均匀磁化, 外径为  $r_1$ , 内径为  $r_2$ , 厚度为  $h$ , 磁化强度为  $\mathbf{M}_2$ , 磁化方向沿中心轴线方向, 建立如图 6 所示的坐标系。

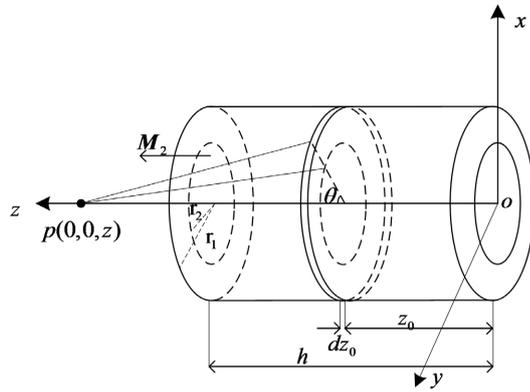


Figure 6. Equivalent current model of hollow cylindrical permanent magnet  
图 6. 空心圆柱永磁体等效电流模型

为了求空心圆柱永磁体轴线上任意一点  $p(0,0,z)$  的磁通密度, 在圆柱面上取一段微分长度  $dz_0$ , 根据毕奥 - 萨伐尔定律,  $p(0,0,z)$  点处产生的磁通密度  $d\mathbf{B}$  为:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 M}{2} \left( \frac{r_1^2}{[(z-z_0)^2 + r_1^2]^{3/2}} - \frac{r_2^2}{[(z-z_0)^2 + r_2^2]^{3/2}} \right) dz_0 \quad (7)$$

因为空心圆柱外表面和内表面为曲面, 所以空心圆柱永磁体中心轴线上任意一点  $p(0,0,z)$  处的磁通密度  $\mathbf{B}$  为:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 M}{2} \left( \frac{z}{\sqrt{z^2 + r_1^2}} - \frac{z-h}{\sqrt{(z-h)^2 + r_1^2}} - \frac{z}{\sqrt{z^2 + r_2^2}} + \frac{z-h}{\sqrt{(z-h)^2 + r_2^2}} \right) \quad (8)$$

即:

$$\begin{cases} \mathbf{B}_x = 0 \\ \mathbf{B}_y = 0 \\ \mathbf{B}_z = \frac{\mu_0 M}{2} \left( \frac{z}{\sqrt{z^2 + r_1^2}} - \frac{z-h}{\sqrt{(z-h)^2 + r_1^2}} - \frac{z}{\sqrt{z^2 + r_2^2}} + \frac{z-h}{\sqrt{(z-h)^2 + r_2^2}} \right) \end{cases} \quad (9)$$

## 4. 基于 COMSOL 对永磁体磁场模型的验证

永磁体空间磁场数学模型的数值计算较为复杂,为了快速准确的得到永磁体磁场分布情况,通过有限元分析软件 COMSOL Multiphysics (以下简称 COMSOL)来计算永磁体空间磁场分布。基于以上两种磁场模型,对本文研究对象外部永磁体和内嵌永磁体进行磁场建模,并进行有限元分析。将轴线方向上磁场模型计算的磁通密度与 COMSOL 仿真结果进行比较,来验证 DMP 模型和等效电流模型的有效性。

### 4.1. 内嵌永磁体 DMP 模型建模与验证

基于第二部分介绍的 DMP 模型理论,首先对内嵌永磁体进行磁场建模。根据超洁净阀的组成结构,内嵌永磁体选用钕铁硼材料,半径  $a = 15 \text{ mm}$ ,厚度  $l = 20 \text{ mm}$ 。内嵌永磁体的磁化强度  $M_1$  为剩余磁通密度  $B_{r1}$  与真空磁导率  $\mu_0$  之比,即  $M_1 = B_{r1}/\mu_0$ 。其中内嵌永磁体  $B_{r1} = 0.5804 \text{ T}$ ,则  $M_1 = 461840 \text{ A/m}$ 。根据对 DMP 模型的相关研究[11],当  $k = 1, n = 6$  时圆柱永磁体 DMP 模型磁场等效效果最好。根据公式(1)和(2)在  $x = y = 0$  时沿着  $z$  轴方向对内嵌永磁体进行 DMP 磁场建模可得:

$$\Phi(z) = \frac{3m_1}{\pi l} \left( \frac{1}{A_{j-}} - \frac{1}{A_{j+}} \right) + \frac{m_0}{4\pi l} \left( \frac{1}{|Z_-|} - \frac{1}{|Z_+|} \right) \quad (10)$$

$$\mathbf{B}(z) = \frac{6\mu_0 m_1}{\pi l^2} \left( \frac{\bar{Z}_-}{A_{j-}^3} - \frac{\bar{Z}_+}{A_{j+}^3} \right) + \frac{\mu_0 m_0}{\pi l^2} \left( \frac{1}{Z_-^2} - \frac{1}{Z_+^2} \right) \quad (11)$$

其中,  $A_{j\pm} = \sqrt{\gamma_j^2 + \bar{Z}_{\pm}^2}$ ,  $\bar{Z}_{\pm} = z \pm \zeta$ ,  $\bar{\gamma} = \frac{2a_j}{l}$ ,  $\zeta = \bar{l}/l$ ,  $Z = 2z/l$ 。

根据圆柱永磁体 DMP 模型建模过程,利用 matlab 优化工具箱调用 Levenberg-Marquardt 算法,在公式(1)、(2)和(6)条件下,使误差函数(3)的值达到最小得到 DMP 模型优化参数  $m_0$ 、 $m_1$ 、 $\bar{l}$ ,如表 1 所示。

**Table 1.** DMP model optimization parameters

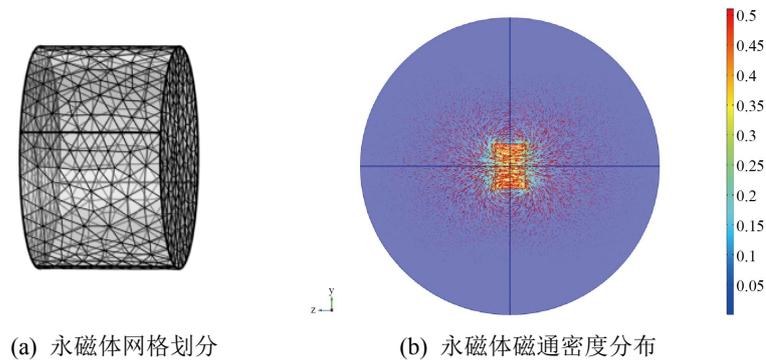
**表 1.** DMP 模型优化参数

| $l/(\text{mm})$ | $\bar{l}/(\text{mm})$ | $m_0/(\text{A} \cdot \text{m})$ | $m_1/(\text{A} \cdot \text{m})$ |
|-----------------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 20              | 8.4                   | -52.4142                        | 131.8096                        |

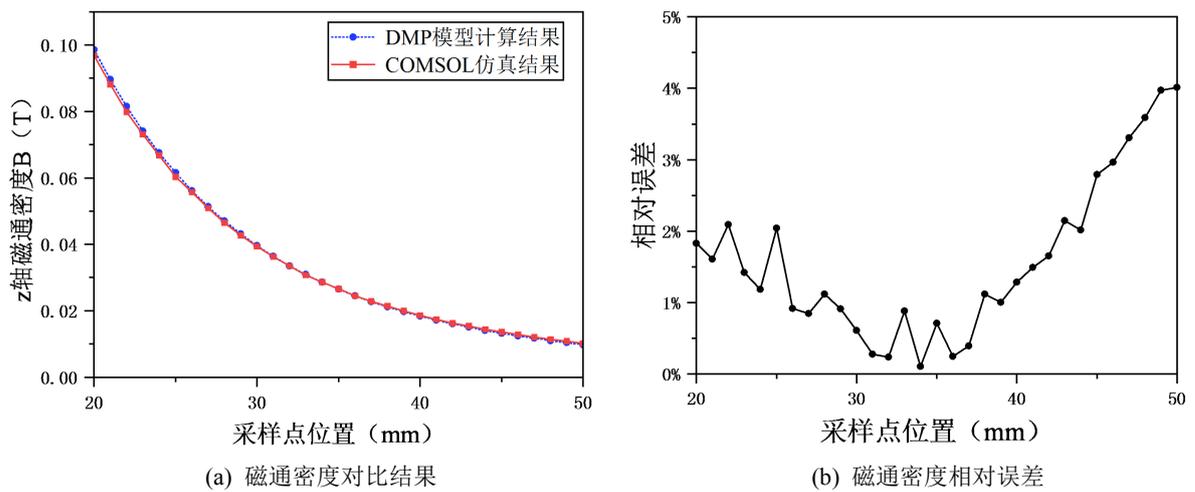
根据上述永磁体的参数,对内嵌永磁体进行有限元仿真。仿真的坐标系与第二部分中 DMP 模型的坐标系保持一致,坐标系的原点设置在永磁体的中心。理论上永磁体磁场外部空间是无限大的区域,但为了研究方便,取内嵌永磁体周围半径为  $100 \text{ mm}$  的球体作为空气模型。对此部分空气模型中的磁通密度进行计算,网格划分结果如图 7(a)所示,永磁体周围磁通密度仿真结果如图 7(b)所示。

利用 COMSOL 后处理功能,采集内嵌永磁体中心轴线( $z$  轴)上一段磁通密度数据。等间隔采集中心轴线上 30 个点的位置和其对应的磁通密度数据,将这些点的磁通密度仿真结果与 DMP 模型计算结果进行对比,如图 8 所示。

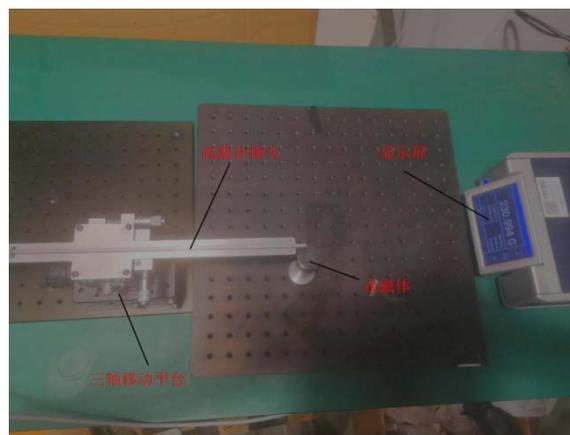
为了进一步验证 DMP 模型的有效性,利用高斯计测量仪(Lake Shore Cryotronics F71 探头)对内嵌永磁体进行磁场测量,如图 9 所示。在测量前将内嵌永磁体放置在固定的基座上,通过改变探头到内嵌永磁体的中心位置,沿轴向  $z$  方向从  $20 \text{ mm}$  到  $50 \text{ mm}$  对内嵌永磁体进行磁场测量并通过显示器显示测量结果,将模型计算计算结构与实验测试结果对比如图 10 所示。



**Figure 7.** Simulation results of embedded permanent magnet  
**图 7.** 内嵌永磁体仿真结果



**Figure 8.** Simulation and comparison of magnetic flux density of embedded permanent magnet  
**图 8.** 内嵌永磁体磁通密度仿真对比



**Figure 9.** Gauss meter measuring instrument  
**图 9.** 高斯计测量仪

由图 9 知，永磁体在相同参数条件下，DMP 模型计算的磁通密度与 COMSOL 仿真结果趋势相同，最大相对误差为 4% 左右，平均相对误差小于 2%。由图 9 知，永磁体在相同参数条件下，DMP 模型计算

的磁通密度与实验结果最大相对误差为 5% 左右，平均相对误差小于 3%，通过对比验证了 DMP 模型作为描述内嵌永磁体磁场的可行性与准确性。

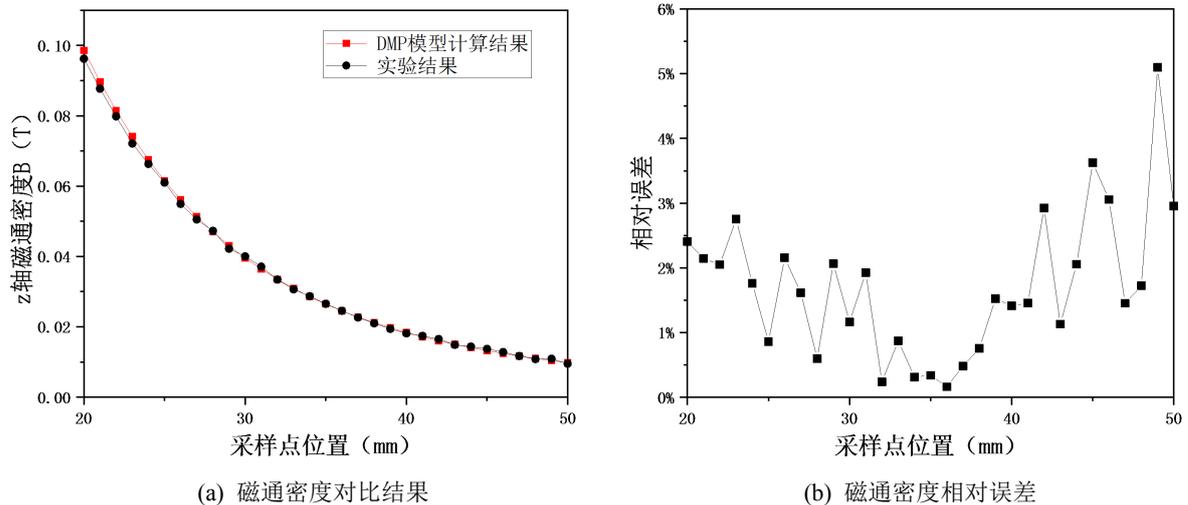


Figure 10. Experimental comparison of magnetic flux density of embedded permanent magnets  
图 10. 内嵌永磁体磁通密度实验对比

#### 4.2. 外部永磁体等效电流模型建模与验证

基于第二部分介绍的等效电流模型理论，对外部永磁体进行磁场建模。根据超洁净阀的组成结构，外部永磁体同样选用钕铁硼材料，外径  $r_1 = 33$  mm，内径  $r_2 = 33$  mm，厚度  $l = 20$  mm。同理，外部永磁体磁化强度  $M_2$  为剩余磁通密度  $B_{r2}$  与真空磁导率  $\mu_0$  之比，即  $M_2 = B_{r2}/\mu_0$ 。其中内嵌永磁体  $B_{r2} = 1.1184$  T，则  $M_2 = 890000$  A/m。仿真的坐标系与第二部分中等效电流模型的坐标系保持一致，坐标系的原点设置在外部永磁体右表面的中心。根据上述外部永磁体的参数，取永磁体周围半径为 100 mm 的球体作为空气模型，对永磁体进行有限元磁场仿真。网格划分结果如图 11(a) 所示，永磁体周围磁通密度仿真结果如图 11(b) 所示。

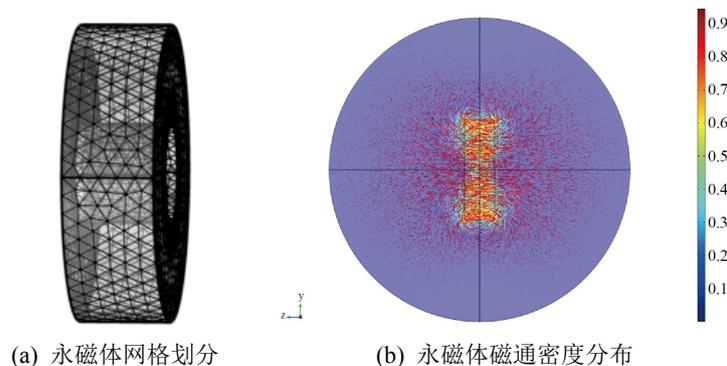


Figure 11. Simulation results of external permanent magnet  
图 11. 外部永磁体仿真结果

利用 COMSOL 后处理功能，等间隔采集此段中心轴线上 30 个点的位置和其对应的磁通密度数据，将这些点的磁通密度仿真结果与等效电流模型计算结果进行对比，如图 12 所示。

同理，为了进一步验证等效电流模型的有效性，利用高斯计测量仪对外部永磁体进行磁场测量示。在测量前将外部永磁体放置在固定的基座上，通过改变探头到外部永磁体的中心位置，沿轴向  $z$  方向从 10 mm 到 25 mm 对外部永磁体进行磁场测量并通过显示器显示测量结果，将模型计算计算结构与实验测试结果对比如图 13 所示。

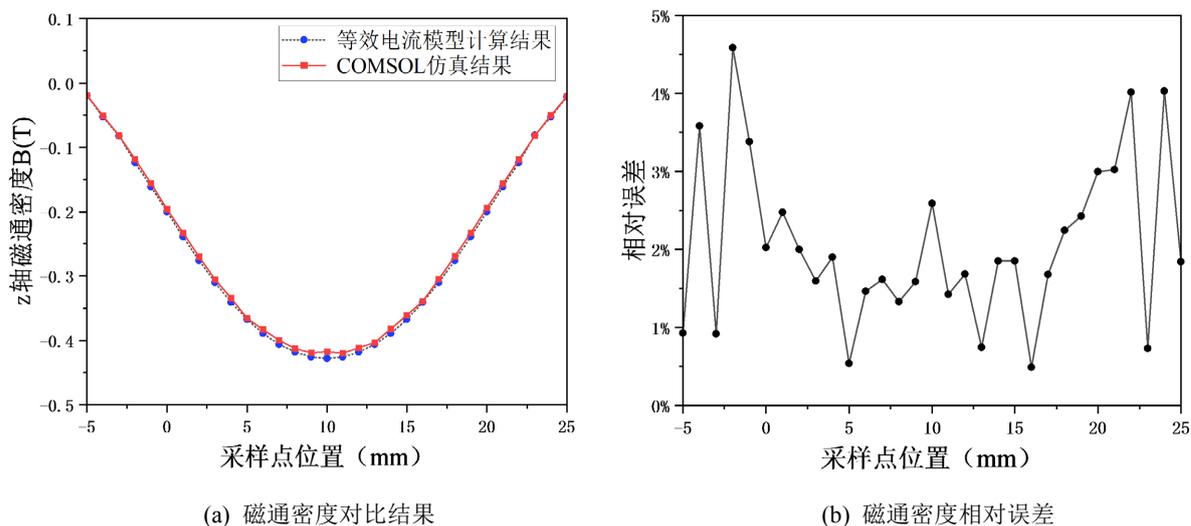


Figure 12. Simulation and comparison of flux density of external permanent magnet  
图 12. 外部永磁体磁通密度仿真对比

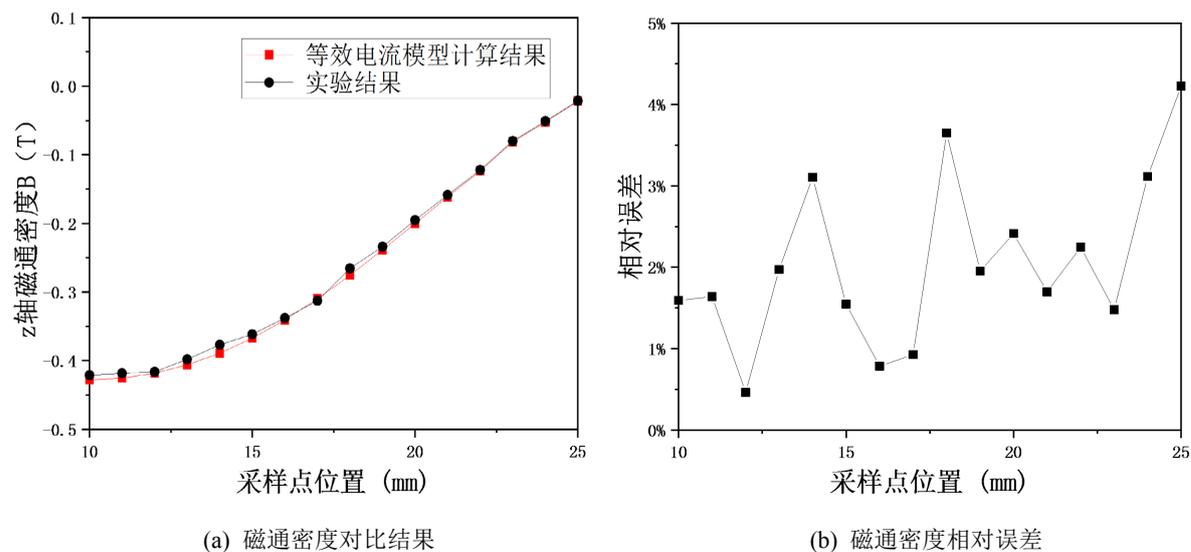


Figure 13. Experimental comparison of flux density of external permanent magnets  
图 13. 外部永磁体磁通密度实验对比

由图 12 知，等效电流模型计算的磁通密度与 COMSOL 仿真结果趋势相同最大相对误差不超过 5%，平均相对误差 2% 左右。由图 13 知，永磁体在相同参数条件下，等效电流模型计算的磁通密度与实验结果最大相对误差小于 5%，平均相对误差小于 3%，通过对比较验证了等效电流模型作为描述外部永磁体磁场的可行性与准确性。

## 5. 基于磁场模型的阀芯位置检测

在本文研究的应用场景下同时存在外部永磁体和内嵌永磁体, 为了实现阀芯内嵌永磁体的位置检测, 提出了一种磁定位方法。根据第一部分介绍的阀芯磁定位原理, 接下来详细介绍了磁定位算法并通过一系列定点仿真实验验证了该磁定位方法的可行性。

### 5.1. 磁定位算法

如图 3 所示, 现有两个轴向磁化的永磁体目标, 它们的参数不同, 产生的空间磁场分布也不同。外部永磁体和内嵌永磁体的位置分别为  $(0, 0, z_m)$  和  $(0, 0, z_n)$ , 它们产生的磁场在空间中相互叠加, 并且可以被位于轴线上( $z$  轴)的传感器所测得。假设传感器测得轴线上的总磁通密度为  $B_z$ , 即为外部永磁体和内嵌永磁体的叠加磁场。当外部永磁体沿  $z$  轴移动时, 内嵌永磁体也随之移动, 根据等效电流模型(9)可以计算出外部永磁体在传感器位置产生的磁通密度  $B_1$ 。 $B_2$  为内嵌永磁体在传感器位置产生的实际磁通密度, 三者的关系如下:

$$B_2 = B_z - B_1 \quad (12)$$

根据以上关系, 可以求出阀芯内嵌永磁体在传感器位置处产生的实际磁通密度  $B_2$ 。基于内嵌永磁体 DMP 模型(11)计算出内嵌永磁体在传感器位置产生的理论磁通密度  $B_c$ 。通过将这一实际值和理论值做差可以构建出目标误差函数:

$$E = \min(B_2 - B_c)^2 \quad (13)$$

这样问题就转化为: 已知外部永磁体的位置参数  $(0, 0, z_m)$  以及传感器测得的磁通密度值  $B_z$ , 通过式(9)和(12)求得阀芯内嵌永磁体在传感器位置处产生的实际磁通密度  $B_2$ 。基于 DMP 模型(11)中内嵌永磁体位置与磁通密度的映射关系, 利用最优化算法使目标误差函数(13)的值达到最小, 从而得到内嵌永磁体的位置。

这是一个非线性最小二乘问题, 一般使用非线性最优化算法求解。已知非线性最优化算法有: 牛顿法、高斯-牛顿法、共轭梯度法、Levenberg-Marquardt(LM)算法等。由于 LM 算法具有牛顿法与梯度下降法的优点, 能有效处理参数化问题, 使代价函数陷入局部极小值的机会大大减小, 因此本研究采用 LM 算法来求解内嵌永磁体的位置参数。

### 5.2. 磁定位仿真实验验证

最后通过静态仿真实验验证该定位方法的有效性。实验选用与之前相同参数的永磁体作为追踪目标, 仿真坐标系与图 3 磁定位坐标系保持一致, 外部永磁体和内嵌永磁体位置分别设为  $(0, 0, 150)$  和  $(0, 0, 60)$ 。根据永磁体参数, 对本文研究对象外部永磁体和内嵌永磁体组成的驱动结构进行 COMSOL 有限元仿真。取永磁体周围半径为 200 mm 的球体作为空气模型, 对此部分空气模型中的磁场进行仿真研究。网格划分结果如图 14(a)所示, 永磁体周围磁通密度仿真结果如图 14(b)所示。

由图 3 知传感器固定在坐标原点, 当外部永磁体从  $(0, 0, 150)$  到  $(0, 0, 120)$  沿  $z$  轴移动时, 根据上述仿真结果, 分别采集外部永磁体移动的位置  $(0, 0, z_m)$ 、内嵌永磁体的理论位置  $(0, 0, z_n)$  和传感器位置处的磁通密度  $B_z$  共 30 组采样点数据。根据上节磁定位算法, 利用采样数据, 通过 matlab 软件使用 LM 算法进行阀芯内嵌永磁体位置的求解。将内嵌永磁体位置的相对误差定义为:

$$E_p = |z_0 - z_n| / z_n$$

其中,  $z_n$  表示内嵌永磁体的理论位置,  $z_0$  表示磁定位方法求得的位置。

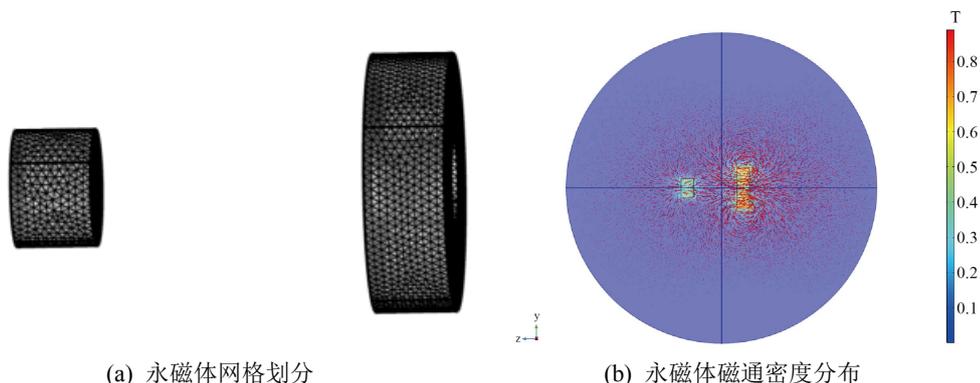


Figure 14. Permanent magnet drive structure simulation results  
图 14. 永磁驱动结构仿真结果

将采样数据点的位置与磁定位方法求出的位置进行对比，如图 15 所示。

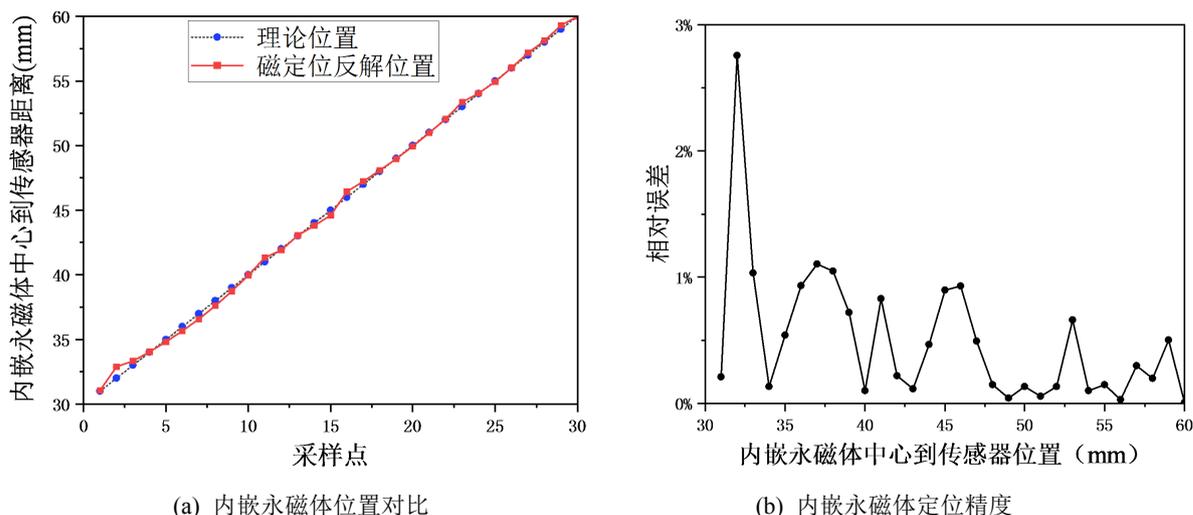


Figure 15. Magnetic positioning method validation  
图 15. 磁定位方法验证

图 15(a)显示了阀芯内嵌永磁体的磁定位方法反解结果。从图 15(b)可以看出磁定位方法反解的结果与内嵌永磁体理论位置最大相对误差不超过 3%，平均相对误差小于 1%。从结果可以看出，该定位方法精确度较高，可以用于近距离永磁体定位，能够有效实现阀芯位置的检测。

## 6. 总结

- 1) 为了实现超洁净阀阀芯位移的高精度控制，针对阀芯位置检测的需求，提出了一种非接触式磁定位方法来实现对超洁净阀阀芯位置的检测。详细地介绍了超洁净阀的工作原理及该磁定位方法原理。
- 2) 介绍了分布式多极(DMP)模型和等效电流模型磁场理论，通过 COMSOL 有限元分析软件验证了磁场模型作为描述永磁体磁场的有效性。
- 3) 最后详细介绍了磁定位算法并通过一系列定点的仿真实验，验证了该定位方法的有效性与精度，证明了提出的磁定位方法能够很好地实现超洁净阀阀芯位置的检测。

## 参考文献

- [1] Furukawa, T., Hieda, K., Wang, Y., *et al.* (2006) High Refractive Index Fluid for Next Generation ArF Immersion Lithography. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, **19**, 641-646. <https://doi.org/10.2494/photopolymer.19.641>
- [2] Lin, B.J. (2004) Immersion Lithography and Its Impact on Semiconductor Manufacturing. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, **3**, 377-500. <https://doi.org/10.1117/1.1756917>
- [3] 刘明潇, 胡亮, 傅新. 永磁体内嵌式超洁净阀及其优化设计方法[J]. 液压与气动, 2021, 45(3): 33-39.
- [4] Moog Inc. (2018) Moog Servo Valves D638\_D639 Catalog. Product Introduction of Moog Servo Valves. [https://www.moog.com.cn/content/dam/moog/literature/ICD/Moog-ServoValves-G761\\_761Series-Catalog-en.pdf](https://www.moog.com.cn/content/dam/moog/literature/ICD/Moog-ServoValves-G761_761Series-Catalog-en.pdf)
- [5] 上海诺玛液压系统有限公司. 上海诺玛伺服比例阀 RT661. 诺玛电液伺服阀系列产品介绍[EB/OL]. <http://www.radk-tech.com/product/6/>, 2018-12-15.
- [6] 布朋生. 基于位移流量双反馈的矿用电磁阀智能控制系统设计[J]. 煤炭工程, 2021, 53(7): 173-177.
- [7] 盛世伟, 李军伟, 朱汉银. 燃油计量组件试验液压控制系统研究[J]. 航空发动机, 2020, 46(1): 65-69.
- [8] 田昊, 赵禹任. 高速电磁阀开启特性的光学测量[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(1): 17-22.
- [9] Long, C. and Huang, T. (2017) Design and Realization of a Capacitive Sensor Measurement System. 2017 *IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, Chongqing, 25-26 March 2017, 2496-2499. <https://doi.org/10.1109/IAEAC.2017.8054472>
- [10] Zhao, S., Huang, T. and Lv, S. (2018) Design and Realization of Valve Core Micro-Displacement Detection System Based on Machine Vision for Solenoid Valve. 2018 *2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*, Xi'an, 25-27 May 2018, 967-970. <https://doi.org/10.1109/IMCEC.2018.8469455>
- [11] Son, H. and Lee, K.M. (2008) Distributed Multipole Models for Design and Control of PM Actuators and Sensors. *IEEE/Asme Transactions on Mechatronics*, **13**, 228-238. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2008.918544>
- [12] Lee, K.M. and Son, H. (2007) Distributed Multipole Model for Design of Permanent Magnet Based Actuators. *IEEE Transactions on Magnetics*, **43**, 3904-3913. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.904709>