

2 磁件分析方法

磁件分析所采用的基本原理是磁路的基本定律及电磁感应定律。为了分析磁件对电路的影响，一般需要建立磁件的等效电路。这部分介绍了建立磁件等效电路及等效电路之间变换的方法。对电感与电感、电感与变压器集成和耦合集成也进行了简单介绍。

2.1 磁件等效电路的建立

2.1.1 磁件电路模型的建立方法

1. 磁路—电路对偶变换法

磁路—电路对偶变换法是根据磁件的磁路模型，通过对偶变换等方法导出磁件的电路模型^[3]。

建立磁件等效电路的过程大致分为四步：

第一步：根据磁路欧姆定律，得到磁件的等效磁路；

第二步：在等效磁路基础上，运用对偶原理，得到等效磁路的对偶图；

磁路对偶变换的方法与电路对偶变换的方法基本相同，即将磁动势 Ni 变为磁通，磁通 ϕ 变为磁动势，磁阻 \mathfrak{R} 变为磁导，串联与并联互换。对偶变换的目的是将磁动势包含的 i 与电路的电流 i 、磁通 ϕ 与电路中的电压 v ($v = N\dot{\phi}$) 建立联系。

第三步：对上一步得到的对偶图进行尺度变换，得到电流、磁链的关系图，以便于应用法拉第电磁感应定律得到等效电路；

第四步：根据法拉第电磁感应定律及变压器的阻抗变换原理，得到等效电路。

以图 2—1(a)所示的磁件为例，简要说明整个推导过程。图 2—1(a)中 N_1 、 N_2 、 N_3 、 i_1 、 i_2 、 i_3 分别为 ab 、 cd 、 ef 绕组的匝数及电流， \mathfrak{R}_1 、 \mathfrak{R}_2 、 \mathfrak{R}_3 分别为三个磁柱的磁阻， ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 为三个磁柱的磁通。与前面的叙述相对应，

将磁件的推导过程分为 4 步：

① 不考虑漏磁，根据图 2—1(a)所示的参考方向，由磁路欧姆定律得到磁件的等效磁路模型，如图 2—1(b)所示；

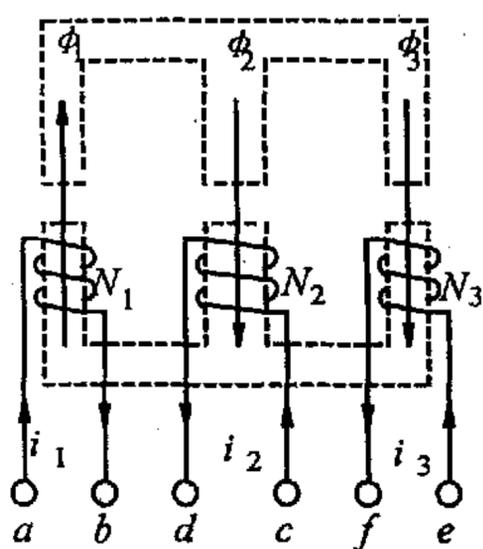
② 根据对偶变换的原则由图 2—1(b)所示的等效磁路可推得其对偶图 2—1(c)；

③ 不妨以 ab 绕组为参考，对图 2—1(c)进行尺度变换，得到电流、磁链的关系图，如图 2—2(d)所示；

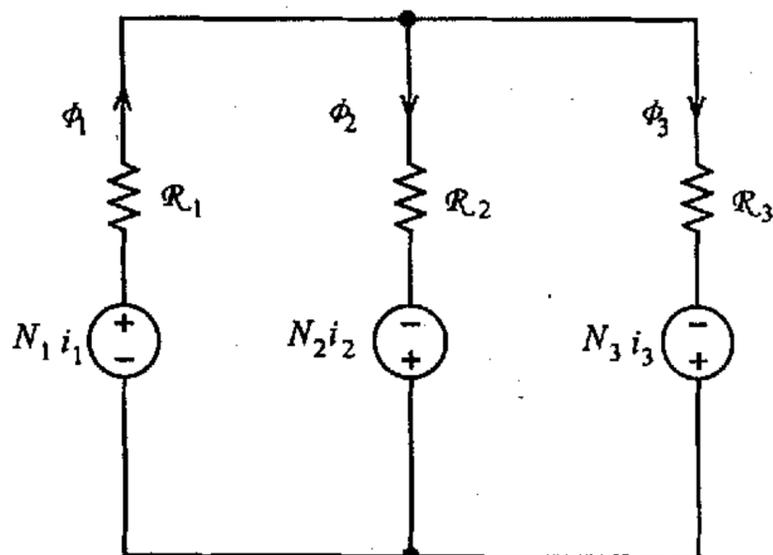
④ 根据图(d)所示的电流、磁链关系，结合电感与磁阻的关系式、法拉第电磁感应定律、理想变压器的电压电流关系，可变换得到磁件的等效电路模型，如图(e)所示。等效电路中用“*”表示各绕组的同名端。

根据磁件的等效电路图可知当 cd 、 ef 绕组开路， ab 端的等效电感 L_{ab} 为：

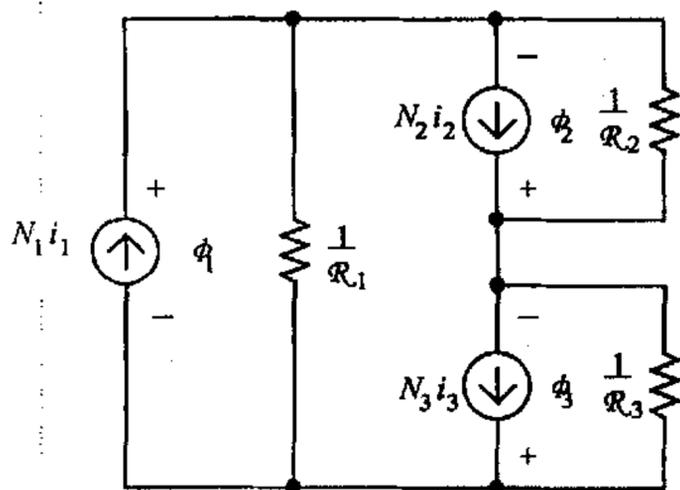
$$L_{ab} = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_1} // \left(\frac{N_1^2}{\mathcal{R}_2} + \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_3} \right) = N_1^2 \cdot \left[\frac{1}{\mathcal{R}_1} // \left(\frac{1}{\mathcal{R}_2} + \frac{1}{\mathcal{R}_3} \right) \right] \quad (2-1)$$



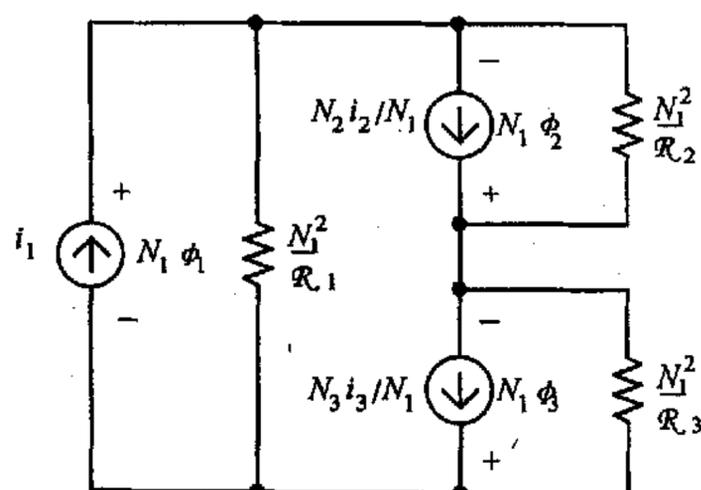
(a) 三绕组磁件示意图



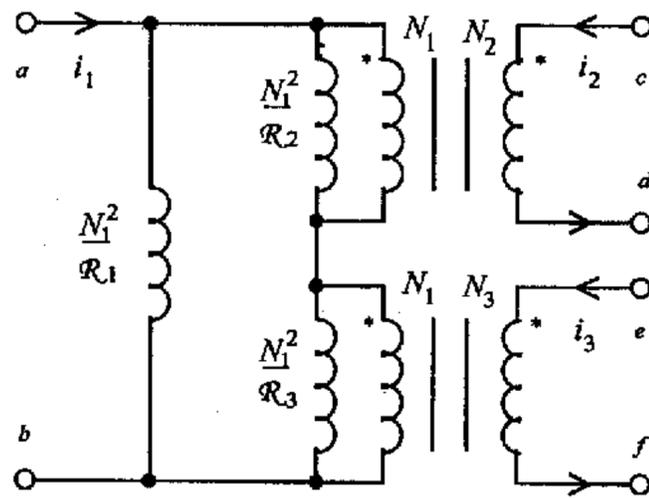
(b) 磁件等效磁路



(c) 等效磁路的对偶性



(d) 尺度变换后得到的磁链、电流关系图



(e) 磁件等效电路

图 2—1 用对偶变换法建立磁件等效电路的过程

用磁路—电路对偶变换法得到的磁件等效电路用电感和理想变压器来表征，与常用的电路描述方法相同，便于将 IM 电路与 DM 电路进行比较

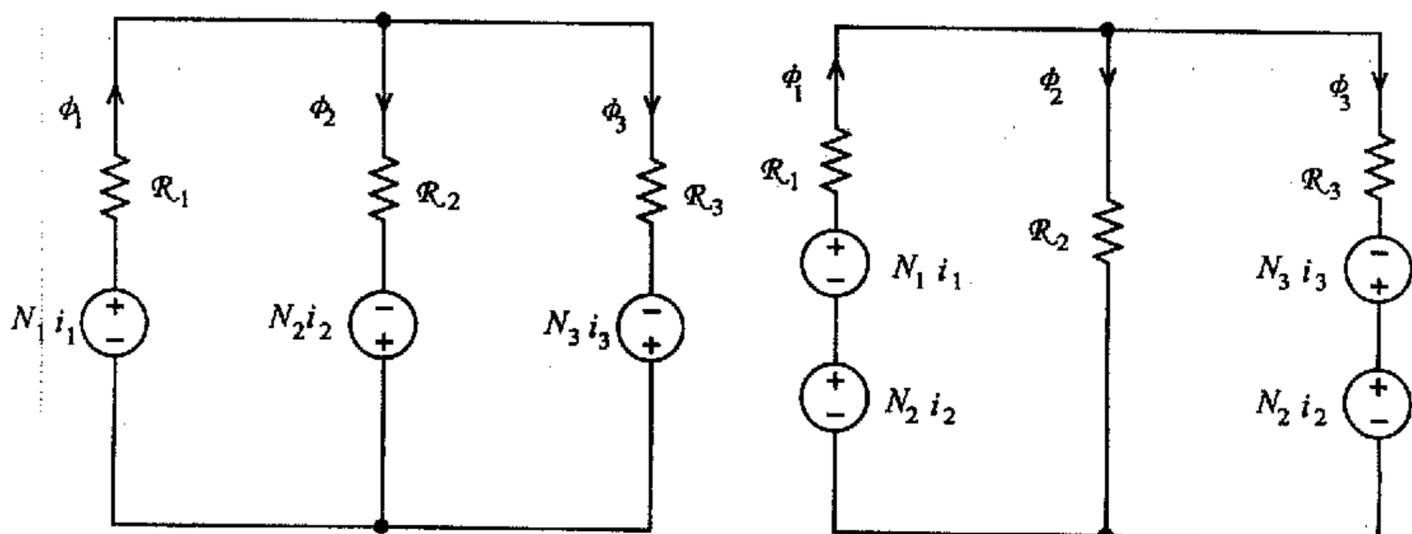
2.1.2 源转移(source shifting)等效变换法

源转移等效变换是磁件变换常用的方法，其基本原理实际是磁路的等效变换。仍以图 2—1 所示的三绕组磁件为例进行说明，根据其等效磁路（如图 2—2(a)所示）有：

$$N_1 \cdot i_1 - \mathfrak{R}_1 \cdot \phi_1 = \mathfrak{R}_2 \cdot \phi_2 - N_2 \cdot i_2 = \mathfrak{R}_3 \cdot \phi_3 - N_3 \cdot i_3 \quad (2-2)$$

将中间支路的激励源 $N_2 \cdot i_2$ 去掉，则上式等效变换为式(2—3)，与图 2—2(b)所示的磁路相对应。

$$N_1 \cdot i_1 - \mathfrak{R}_1 \cdot \phi_1 + N_2 \cdot i_2 = \mathfrak{R}_2 \cdot \phi_2 = \mathfrak{R}_3 \cdot \phi_3 - N_3 \cdot i_3 + N_2 \cdot i_2 \quad (2-3)$$



(a) 三绕组磁件等效磁路

(b) 源转移等效变换后的磁路