



团体标准

T/CES XXX-XXXX

矢量磁路理论的量与单位

Quantities and Units for Vector Magnetic Circuit Theory

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国电工技术学会 发布

目 次

目 次 I

前 言 II

引 言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 磁电功率 2

5 矢量磁路理论的定理 2

6 矢量磁路理论的量与单位 3

附 录 A （资料性） 矢量磁路的基本组成 5

附 录 B （资料性） 磁电功率定律 7

参 考 文 献 9

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国电工技术学会提出。

本文件由中国电工技术学会标准工作委员会永磁电机工作组归口。

本文件起草单位：东南大学、国网江苏省电力有限公司电力科学研究院、江苏省计量科学研究院、江苏大学、河海大学、青海大学、南京师范大学、国网上海市电力公司电力科学研究院、华北电力大学、安徽大学、上海理工大学、中国科学院电工研究所、保定天威保变电气股份有限公司、南京南瑞继保电气有限公司。

本文件主要起草人：程明、秦伟、马钲洲、李群、赵品彰、王政、花为、王伟、张宁宇、朱孝勇、朱洒、赵文祥、闫晓鸣、魏新迟、朱新凯、丁石川、王景霞、徐伟、李程、丁峰峰。

本文件为首次发布。

引 言

本标准主要涉及矢量磁路理论中新定义的磁感、磁容两个磁路元件/参数以及由此衍生出的物理量，包括：磁阻抗、磁阻抗角、磁抗、磁导纳、磁纳、磁路复功率、磁路有功功率、磁路无功功率等。其他物理量遵循国家标准 GB/T 3102.5-1993《电学与磁学的量与单位》。本标准沿用现有标准规定的基本物理量、量纲和单位体系，仅对磁路参量的矢量化表达及相关新量进行拓展，因此与现有国家标准和国际标准完全兼容、不存在冲突。

量的表格列出了本标准领域中最重要量及其符号，并给出了量的定义。

量的相应单位连同其国际符号和定义一起列出。

矢量磁路理论的量与单位

1 范围

本文件规定了矢量磁路理论中磁感、磁容及其衍生物理量的术语和定义、符号、单位，以及矢量磁路理论的基本定理和相关物理量表达。本文件适用于以交变磁场为工作媒介的电磁装置和磁性材料的分析、设计与性能计算，包括电机、变压器、电感器等电磁设备及相关磁路的建模与分析。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件。不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 3102.5-1993 电学与磁学的量与单位

3 术语和定义

GB/T 3102.5-1993 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

磁感 *magductance*

闭合线圈对穿过其中的磁通量变化的阻碍程度的磁路参数，其值定义为磁路中流经磁感元件的单位磁通在磁感元件上所产生的运动电荷。

3.2

磁容 *hysteretance*

交变磁通下磁性材料的磁滞效应对降落其上的磁通量变化的影响的磁路参数，其值定义为流过磁容元件的磁通对时间积分与磁容元件磁动势的比值。

3.3

磁阻抗 *magnetic impedance*

矢量磁路对磁通量的阻碍程度。

3.4

磁感抗 *magductance reactance*

磁感对磁通量的阻碍程度。

3.5

磁容抗 *hysteretance reactance*

磁容对交变磁通量的阻碍程度。

3.6

磁抗 *magnetic reactance*

磁阻抗的虚部，包括了磁感抗和磁容抗。

3.7

磁阻抗角 *magnetic impedance angle*

磁动势和磁通之间的相位角。

3.8

磁导纳 *magnetic admittance*

磁阻抗的倒数。

3.9

基尔霍夫磁动势定律 *Kirchhoff's magnetomotive force law*

规定任何时刻，沿矢量磁路拓扑中任何磁路环路，所有支路磁动势的相量和恒等于零。

3.10

基尔霍夫磁通定律 Kirchhoff's magnetic flux law

规定了任何时刻，在矢量磁路拓扑中的任何节点上，所有流出节点的支路磁通的相量和恒为零。

3.11

磁电功率定律 magnetoelectric power law

描述磁通通过矢量磁路元件时产生的磁功率大小。

4 磁电功率

4.1

磁路复功率 magnetic circuit complex power

磁通通过矢量磁路元件时产生的磁功率大小。

4.2

磁路有功功率 magnetic circuit active power

磁感、磁容元件上的功率，分别对应磁路中的涡流损耗、磁滞损耗。

4.3

磁路无功功率 magnetic circuit reactive power

磁阻元件上的功率。

5 矢量磁路理论的定理

5.1

矢量磁路的叠加定理 superposition theorem of vector magnetic circuit

矢量磁路在多个独立磁动势源作用下的响应，等于各个独立磁动势源单独作用时产生的响应之和。

5.2

矢量磁路的替代定理 substitution theorem of vector magnetic circuit

矢量磁路中替代支路的磁通和磁动势与原支路相同，磁路中的任何支路都可以被等效支路替代。

5.3

矢量磁路的戴维南定理 Thevenin theorem of vector magnetic circuit

一个包含独立磁动势源和线性磁阻抗的矢量磁路，外部磁路可以用一个磁动势源和磁阻抗串联支路等效替代。

5.4

矢量磁路的磁源变换定理 magnetic source transformation theorem of vector magnetic circuit

矢量磁路非理想的磁动势源与非理想磁通源之间可以相互转换。

5.5

矢量磁路的诺顿定理 Norton theorem of vector magnetic circuit

一个包含独立磁动势源和线性磁阻抗的矢量磁路，外部磁路可以用一个磁通源和磁导纳并联支路等效替代。

说明：上述矢量磁路的定理适用于磁路元件的磁动势与磁通之间的关系为线性、即理想磁路元件组成的矢量磁路，此时涉及相量和磁阻抗的关系适用于正弦稳态分析，对于含明显磁饱和、磁滞非线性或参数随工作状态显著变化的磁路，应在满足相应线性化或等效参数条件后使用相关定理。

6 矢量磁路理论的量与单位

本章规定矢量磁路理论涉及的量的名称、符号、定义和单位。

量的名称	符号	定义	单位
磁场强度 magnetic field strength	H	$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$ 式中 J 为传导电流密度, D 为位移电流密度	安[培]每米 A/m ampere per meter
磁动势 magnetomotive force	$\mathcal{F}$	$\mathcal{F} = \oint H \cdot dr$ 式中 r 为距离	安[培] A ampere
电流链 current linkage	Θ	穿过一闭合磁路的净传导 电流 N 匝相等电流 I 形成的电 流链 $\Theta = NI$	安[培] A ampere
电荷链 charge linkage	Γ	穿过一闭合磁路的净传导 电荷 $\Gamma = \int \Theta \cdot dA$ 式中 A 为面积	库[仑] C coulomb
磁通[量]密度 magnetic flux 磁感应强度 magnetic induction	B	$\nabla \cdot B = 0$ B 为一个矢量	特[斯拉] T tesla
磁通[量] magnetic flux	Φ	$\Phi = \int B \cdot dA$	韦[伯] Wb weber
磁导率 permeability	μ	$\mu = B/H$	亨[利]每米 H/m henry per meter
磁阻 reluctance	R 	$R = \mathcal{F}/\Phi$	负一次方亨[利] H^{-1} henry to the power minus one 1 $H^{-1} = 1 \text{ A/Wb}$
磁感* magductance	$\mathcal{L}$ 	$\mathcal{L} = \Gamma/\Phi$	负一次方欧[姆] Ω^{-1} ohm to the power mi nus one 1 $\Omega^{-1} = 1 \text{ C/Wb}$
磁容* hysteretance	C 	$C = -\int \Phi dt / \mathcal{F}$	韦[伯]秒每安[培] Wb·s/A weber second per ampere 1 Wb·s/A = 1 $\Omega^{-1} \cdot s^2$
磁阻抗*, (复[数]磁阻 抗) magnetic impedance complex magnetic impedance	Z 	$Z = \mathcal{F}/\Phi = Z e^{j\theta} = R + jX$ 式中 X 为磁抗	负一次方亨[利] H^{-1} henry to the power minus one 1 $H^{-1} = 1 \text{ A/Wb}$
磁阻抗模* modulus of magnetic impedance	$ Z $	$ Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	负一次方亨[利] H^{-1} henry to the power minus one 1 $H^{-1} = 1 \text{ A/Wb}$
磁阻抗角* magnetic impedance angle	θ	$\theta = \arctan \frac{X}{R}$	弧度 rad radian
磁感抗* magductance reactance	X_L	$X_L = \omega \mathcal{L}$	负一次方亨[利] H^{-1} henry to the power minus one

			1 H ⁻¹ =1 A/Wb
磁容抗* hysteretance reactance	$\mathcal{X}_c$	$\mathcal{X}_c = \frac{1}{\omega C}$	负一次方亨[利] H ⁻¹ henry to the power minus one 1 H ⁻¹ =1 A/Wb
磁抗* magnetic reactance	$\mathcal{X}$	$\mathcal{X} = \omega L + \frac{1}{\omega C}$	负一次方亨[利] H ⁻¹ henry to the power minus one 1 H ⁻¹ =1 A/Wb
磁导纳*, (复[数]磁导纳) magnetic admittance complex magnetic admittance	$\mathcal{Y}$	$\mathcal{Y}=1/Z$	亨[利] H henry
磁导纳模* modulus of magnetic admittance	$ \mathcal{Y} $	$ \mathcal{Y} =\sqrt{G^2+B^2}$	亨[利] H henry
磁导 permeance	$\mathcal{G}$	$\mathcal{G}=1/R$ 磁导纳的实部	亨[利] H henry
磁纳 magnetic susceptance	$\mathcal{B}$	$\mathcal{B}=1/X$ 磁导纳的虚部	亨[利] H henry
磁滞角 magnetic hysteretic angle	γ	磁滞效应所造成的相移	弧度 rad radian
磁路复功率* magnetic circuit complex power	S	$S = P + jQ$	伏[特]安[培] V·A volt ampere
磁路有功功率* magnetic circuit active power	P	$P = \omega \dot{\Phi} ^2 (\omega L + \frac{1}{\omega C})$	瓦[特] W Watt
磁路无功功率* magnetic circuit reactive power	Q	$Q = \omega R \dot{\Phi} ^2$	乏 var
磁路能量 magnetic circuit energy	$\mathcal{W}$	$\mathcal{W} = \frac{1}{2} R \dot{\Phi} ^2$	焦[耳] J Joule 1 kW·h =3.6 MJ

注：带*号的量是国家标准 GB3102.5-93 和国际标准 IEC 80000-6 中没有的、矢量磁路理论新引入的磁量。

附 录 A
(资料性)
矢量磁路的基本组成

矢量磁路的基本组成见图 A.1，包括了磁动势源、磁阻元件、磁感元件、磁容元件。该磁路模型使用了磁路的集总参数来对整个磁路进行建模，即假定整个磁路的全部磁阻参数都集中在 bc 一段代表的磁阻元件上，全部磁感参数集中在 cd 段的闭合线圈中，全部磁容参数集中在 da 段的磁容元件中，假定连接磁阻元件、磁感元件、磁容元件的线段 aa、bb、cc 和 dd 是磁阻抗为零的理想线段，磁动势源内的磁阻抗也为零。

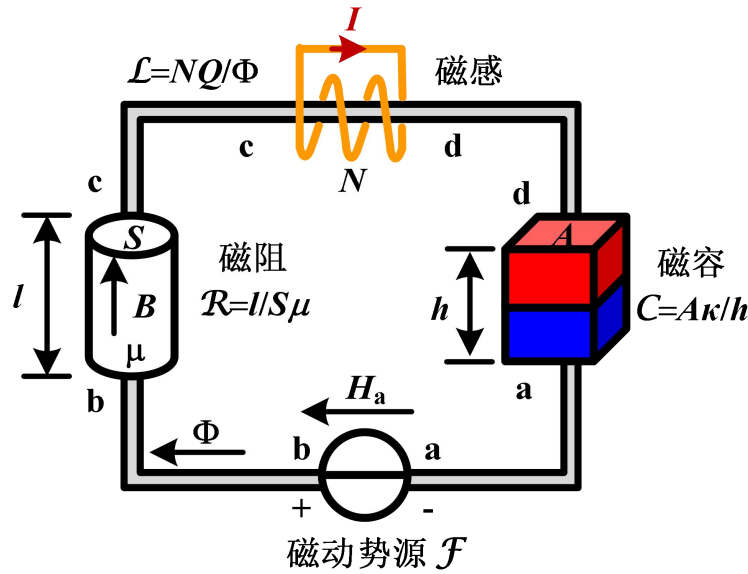


图 A.1 矢量磁路基本组成

其中，磁动势源为外部施加在磁路的磁激励。磁阻元件为一个二端口无源磁路元件，用于描述磁路中对磁通流通的阻碍程度。磁感元件为一个二端口无源磁路元件，用于描述磁路中闭合导体回路对变化磁通的阻碍程度，其对恒定磁通没有阻碍能力，仅对变化磁通有阻碍能力，用于阻碍磁通的变化。磁感的物理意义为磁路中流经磁感元件的单位磁通 Φ 在磁感元件上所产生的总的运动电荷 NQ （电荷链 Γ ），即：

$$\mathcal{L} = \frac{\Gamma}{\Phi} = \frac{NQ}{\Phi} \quad (\text{A.1})$$

式中， Γ 表示磁感元件与磁路所匝链的电荷链， Q 表示磁感元件中单匝线圈中的运动电荷。磁感元件的参考方向以流入磁通一侧为正，以流出磁通一侧为负。

磁容元件为一个二端口无源磁路元件，用于描述磁路中磁滞效应对变化磁通的阻碍程度，其仅对变化磁通具备阻碍能力，对恒定磁通无阻碍能力。磁容的物理意义为流过磁容元件的磁通对时间积分与磁容元件上的磁动势 $\mathcal{F}_C$ 的比值，即：

$$C = -\frac{\int \Phi dt}{\mathcal{F}_C} = -\frac{\int \int_A \mu \mathbf{H}_C \cdot d\mathbf{A} dt}{\int_h \mathbf{H}_C \cdot d\mathbf{h}} \quad (\text{A.2})$$

式中， $\mathbf{H}_C$ 表示磁容元件的磁场强度。磁容元件的参考方向以流入磁通一侧为正，以流出磁通一侧为负。当磁路由稳态正弦波磁动势激励时，利用相量法获得稳态情况下基尔霍夫磁动势定律的表达式：

$$\dot{\mathcal{F}} = \mathcal{R}\dot{\Phi} + j\omega\mathcal{L}\dot{\Phi} + j\frac{1}{\omega C}\dot{\Phi} \quad (\text{A.3})$$

式中，磁路变量上的符号“ $\cdot$ ”表示相量； ω 代表磁源的角频率。令：

$$\mathcal{X}_L = \omega \mathcal{L} \quad (\text{A.4})$$

$$\mathcal{X}_C = \frac{1}{\omega C} \quad (\text{A.5})$$

$$\mathcal{X} = \mathcal{X}_L + \mathcal{X}_C = \omega \mathcal{L} + \frac{1}{\omega C} \quad (\text{A.6})$$

$$Z = R + j\mathcal{X} \quad (\text{A.7})$$

式(A.4)–式(A.7)中， $\mathcal{X}_L$ 为磁感抗， $\mathcal{X}_C$ 为磁容抗， $\mathcal{X}$ 为磁抗， Z 为磁阻抗。式(A.3)可变为：

$$\dot{\mathcal{F}} = R\dot{\Phi} + j\mathcal{X}_L\dot{\Phi} + j\mathcal{X}_C\dot{\Phi} = R\dot{\Phi} + j\mathcal{X}\dot{\Phi} = Z\dot{\Phi} \quad (\text{A.8})$$

附 录 B
(资料性)
磁电功率定律

以图 B.1 所示的空载变压等效电路和等效磁路为例来推导电路功率与磁路功率的关系。图 B.1(a)中， U_1 为一次侧的激磁绕组的电压， I_1 为一次侧激磁绕组的电流， R_1 为激磁绕组的电阻， I_m 为变压器的激磁电流， L_m 为激磁电感， E_1 为一次侧激磁绕组反电势。

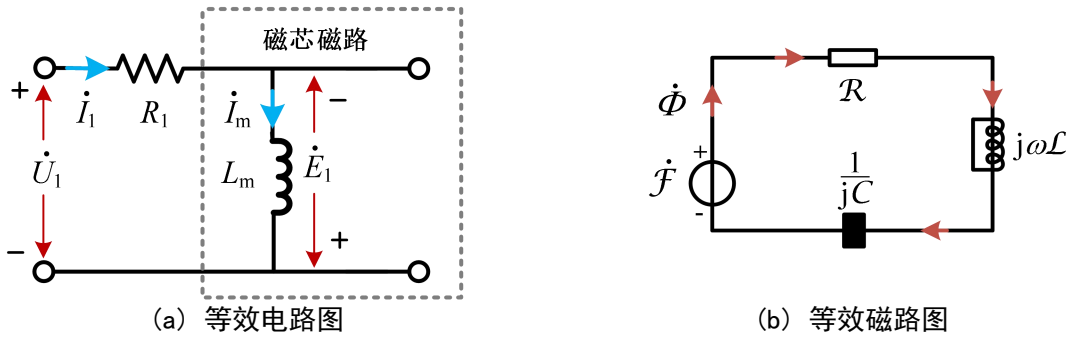


图 B.1 空载变压器的等效电路与等效磁路

根据电路理论中的复功率定义，一次侧绕组输入到铁芯磁路中的复功率为：

$$\dot{S}_e = -\dot{E}_1 \cdot \dot{I}_1^* \quad (\text{B.1})$$

$$\dot{E}_1 = -N_1 \frac{d\dot{\Phi}}{dt} = -jN_1 \omega \dot{\Phi} \quad (\text{B.2})$$

由图 B.1(b)的变压器等效磁路，有：

$$\dot{\mathcal{F}} = R\dot{\Phi} + jX_L\dot{\Phi} + jX_C\dot{\Phi} = R\dot{\Phi} + jX\dot{\Phi} = N_1 \dot{I}_1 \quad (\text{B.3})$$

由此可得：

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{\Phi}(R + jX)}{N_1} \quad (\text{B.4})$$

将式(B.2)和(B.4)代入式(B.1)，有：

$$\begin{aligned} \dot{S}_e &= j\omega N_1 \dot{\Phi} \cdot \left(\frac{\dot{\Phi}(R + jX)}{N_1} \right)^* \\ &= j\omega |\dot{\Phi}|^2 \cdot (R - jX) = j\omega R |\dot{\Phi}|^2 + \omega X |\dot{\Phi}|^2 \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

另外，依据磁通（磁链）与电压关联、磁动势与电流关联的原则，定义磁路虚拟功率 S_m 为：

$$\dot{S}_m = \dot{\Phi} \cdot \dot{\mathcal{F}}^* \quad (\text{B.6})$$

式中， $\dot{\mathcal{F}}^*$ 为磁动势 $\dot{\mathcal{F}}$ 的共轭复数。将图 B.1(b)所示的磁动势方程式代入式(B.6)，可得：

$$\begin{aligned} \dot{S}_m &= \dot{\Phi} \cdot \dot{\mathcal{F}}^* = R |\dot{\Phi}|^2 - j \left(\omega L + \frac{1}{\omega C} \right) |\dot{\Phi}|^2 \\ &= R |\dot{\Phi}|^2 - jX |\dot{\Phi}|^2 \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

这一方程虽然在形式上与电复功率对偶，但其量纲不是功率，在电机中，磁通与电流（磁动势）的乘积具有转矩的量纲，因此将 S_m 称为虚拟磁功率。对比式(B.5)与式(B.7)可见，电功率与虚拟磁功率之间相差 $j\omega$ ，即有下列关系：

$$\dot{S}_e = j\omega \dot{S}_m = j\omega R |\dot{\Phi}|^2 + \omega X |\dot{\Phi}|^2 = jQ + P \quad (\text{B.8})$$

式中， P 为磁路有功功率，其表达式为：

$$\mathcal{P} = \omega |\dot{\Phi}|^2 (\mathcal{X}_L + \mathcal{X}_C) = \omega |\dot{\Phi}|^2 \left(\omega L + \frac{1}{\omega C} \right) = \mathcal{P}_L + \mathcal{P}_C \quad (\text{B.9})$$

$$\mathcal{P}_L = \omega^2 L |\dot{\Phi}|^2 \quad (\text{B.10})$$

$$\mathcal{P}_C = \omega \frac{1}{\omega C} |\dot{\Phi}|^2 = \frac{1}{C} |\dot{\Phi}|^2 \quad (\text{B.11})$$

Q 为磁路无功功率，其表达式为：

$$Q = \omega \mathcal{R} |\dot{\Phi}|^2 \quad (\text{B.12})$$

式(B.8)将电功率与虚拟磁功率联系起来，反映的是实际磁路功率，因此称为磁电功率定律。可见，磁路有功功率与磁抗相关，它们都与磁通的有效值 Φ 的平方成正比。由式(B.10)可知，磁感上的有功功率与角频率的平方成正比，在铁磁材料中，它反映的是涡流损耗。

磁容元件的损耗 $\mathcal{P}_C$ 对应磁路中由于磁场反复磁化导致的磁滞损耗，也可表示为：

$$\begin{aligned} P_C &= f V S_{\text{BH}} = f V \pi H_m B_m \sin \gamma \\ &= \omega \sin \gamma \frac{h}{\mu A} \left(\frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \right)^2 = \omega \sin \gamma \frac{h}{\mu A} \Phi^2 \end{aligned} \quad (\text{B.13})$$

式中， V 为磁滞材料的体积； S_{BH} 为磁滞回线的面积； γ 为磁滞角； h 为磁滞材料的长度； A 为磁滞材料的截面积。

联立式(B.11)和(B.13)，可得磁容的计算式为：

$$C = \frac{\mu}{\omega \sin \gamma} \frac{A}{h} = \kappa \frac{A}{h} \quad (\text{B.14})$$

式中， κ 为磁滞系数，其表达式为：

$$\kappa = \frac{\mu}{\omega \sin \gamma} \quad (\text{B.15})$$

当磁路的磁感和磁容已知，就可以由式(B.9)直接计算出有功功率，这与电路中电阻上的功率计算式 $I^2 R$ 对偶，磁通 Φ 对偶电流 I ，磁抗 $\mathcal{X}$ 对偶电阻 R 。

由上述空载变压器实例可见，矢量磁路理论可将磁阻、磁感和磁容等磁路参数统一纳入磁阻抗体系，通过磁动势与磁通的幅值和相位关系表征电磁装置中的磁路特性，并利用磁电功率定律建立磁路变量与功率之间的联系。该方法可用于变压器、电机等交变磁场电磁装置的磁路建模、损耗分析和性能计算。

参 考 文 献

- [1] 程明, 秦伟, 王政. 矢量磁路理论[M]. 北京: 科学出版社, 2024.
 - [2] 秦伟, 程明, 王政, 马钲洲, 朱洒, 顾珉睿, 朱新凯, 花为. 矢量磁路及应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7381–7394.
 - [3] Cheng Ming, Qin Wei, Zhu Xinkai, and Wang Zheng. Magnetic-inductance: concept, definition, and applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(10): 12406–12414.
 - [4] 秦伟. 基于磁感元件的矢量磁路理论及应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2024.
 - [5] 程明, 秦伟, 王政, 朱新凯. 一种磁感元件, 2021–12–28, 中国, ZL202011350276.4.
 - [6] 程明, 秦伟, 李成博, 王政, 花为, 朱新凯. 一种磁容元件及其应用方法, 2026–07–24, 中国, ZL202311372958.9.
 - [7] 程明, 王政, 朱新凯, 秦伟. 一种磁路功率的计算方法, 2021–10–08, 中国, ZL202011350267.5.
 - [8] 程明, 马钲洲, 王政, 秦伟, 花为. 基于磁感的变压器和感应电机等效矢量磁路分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(15): 4697–4707.
 - [9] Luo Zhejun, Cheng Ming, Qin Wei, Wang Zheng, and Hua Wei. Modeling and design method of composite magductance for magnetic impedance matching of electromagnetic devices by vector magnetic circuit theory[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2025, 61(6): 17141–17150.
 - [10] Li Chengbo, Cheng Ming, Qin Wei, Wang Zheng, Ma Xiang, and Wang Wei. Core loss model for nonsinusoidal excitations based on vector magnetic circuit theory[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(11): 16926–16936.
-