

工程训练·工程实践

电机原理及其 运行与维护

张植保 主编



化学工业出版社
教材出版中心

工程训练·工程实践

电机原理及其运行与维护

张植保 主编



化学工业出版社
教材出版中心

·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

电机原理及其运行与维护/张植保主编. —北京:
化学工业出版社, 2004. 11
(工程训练·工程实践)
ISBN 7-5025-6294-X

I. 电… II. 张… III. 电机学 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 114882 号

工程训练·工程实践
电机原理及其运行与维护

张植保 主编

责任编辑: 刘俊之 陈 丽

文字编辑: 朱 磊 徐卿华

责任校对: 顾淑云 李 军

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
三河市海波装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 18½ 字数 341 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6294-X/TM·37

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

工程训练·工程实践

编委会主任 杨继昌

编委会副主任 袁银南 戈晓岚

编委会委员 杨继昌 袁银南

肖田元 梅 强

张永康 卢章平

陆一心 李金伴

戈晓岚 马汉武

序

人类进入 21 世纪前后,以信息技术为重要标志的高新技术的飞速发展,正在改变着人类的社会、经济和生活方式。“天翻地覆慨而慷”,世界范围内的激烈竞争,已越来越明显地表现为人才的竞争,特别是创新人才的竞争。1998 年 10 月,联合国教科文组织在巴黎召开了首届世界高等教育大会,会议达成了共识:高等教育的根本使命是促进社会的可持续发展与进步。目前,教育开始求新求变,要求坚持以人为本,更具有前瞻性。对学生的人文素质、科学素质、实践能力和创新能力的培养更显重要。

“问渠哪得清如许,为有源头活水来。”技术是工程的基础,科学是技术的源泉,科学技术相互支持,但直接作用于生产实际的是技术。因此,面向经济建设要高度重视工程人才的培养,高度重视工程教育,要努力加速建立科学、技术、经济和管理相结合的工程教育体系,强化工程意识,重组工程训练,提高工程素质,培养创新精神、创新人格和实践能力,以实现知识创新、技术创新、管理创新和市场开拓型的工程人才培养。

近年来,尽管各国的国情不同,面临的问题也不同,在工程教育的体制和运作上互有差异,但对工程教育的认识、做法和发展方向上都强调“综合、创造、实践”,强调“工程教育工程化”、“工程教育为工程实际服务”、强调人文关怀、创新精神、实践能力和工程师素质的培养。

另一方面,我国加入世界贸易组织后,对外开放更将进一步扩大,中国将更加深入地参与国际分工,越来越多的产品将打上“中国制造”,制造业是工业的主体,装配制造业是制造业的核心。没有装配制造业就没有制造,没有制造就没有获得物质财富的基本手段。制造首先要依靠直接从事制造的技能人才。从而,培养“中国制造”的技能人才就成为关键。我国已经成为了一个高级蓝领即银领制造业人才稀缺的国家。

我国“十五”计划提出,要在 5 年内将职工中的高级技能人才的比例提高到 20%。一个合格的银领人才应当具备比较深厚的理论基础与相当丰富的实际经验,并能够针对生产第一线的实际需要,具备很强的技术革新、开发攻关、项目改进的能力。这种人才应具有高度的责任感,不但关心产品,更加懂得团结人、关怀人;不仅是某些关键生产环节中的操作者,还是整个生产环节的组织者;同时还能高度关怀、有效带动和组织协调其他技术人员一起动手进行应有的技术攻关,把优秀的设计变成一个高质量的产品。

针对工程人才的需求，江苏大学工业中心组织编写了工程训练·工程实践系列图书，希望成为联接科学、教育与工程技术、生产实际的桥梁之一。在本系列图书规划过程中，作者针对“各种技能对工作的重要性”，对相关企业和历届毕业生进行了调查，证实在工业生产中，对技术交流、设计制造、工程经济、项目管理、质量控制、计算机等技能均有较高的要求。

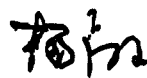
本系列图书以工程类本科生（尤其是高职学生）和制造业银领的培训为对象，包括机、电、管三个领域。在内容上注重实践性、启发性、科学性，强调诸如制造、环境影响、质量、商务和经济等工程实践的多重功能。从当前工程人才的素质需求和实际出发，努力做到理论与实践并重，理论与实际相结合，基本概念清晰，重点突出，简明扼要，深入浅出，通俗易懂，以现代工程训练为特色，重视能力的培养，面向生产实际，并考虑与国际教育交流，反映新技术、新工艺、新材料的应用和发展。

本套丛书的编写是适应我国制造业发展形势，在教育上的一个创新，值得鼓励。由于是一个创新，其中就不会没有问题，没有不足之处。我与编者的心情一样，希望读者能及时指出其中的问题与不足之处，有助于本系列图书不断改进，编者的水平不断提高。

谨以为序。

中国科学院院士
华中科技大学教授

2004年4月



前 言

本书首先介绍预备知识，预备知识介绍了为学习电机原理所必需的铁磁材料的性质及磁路和磁动势的基本概念。其余各章着重论述了变压器、直流电机、异步电机、同步电机这四种电机的运行原理、运行特性，介绍了其基本结构和常见故障的分析处理。本书还包含了电力拖动方面的基础知识，主要是各种电动机的启动、制动运行和调速以及电动机的选择。此外，本书还介绍了常用的微控电机的原理和运行特性。

本书具有简明实用的特点，在论述运行原理时，深入浅出，尽量避免繁琐的推导，旨在讲清基本概念和主要结论。本着掌握基本知识、强调应用能力的原则，本书具有较宽的知识覆盖面，包含了电机原理、电机的运行与维护、电力拖动基础、微控电机四个方面。为便于教学，每章均附有习题，部分习题还给出了参考答案。

本书较适用于应用型人才的培养，可供大专院校电气工程专业或其他相关专业选用，可作为电气工程类的高级技术工人的培训教材，也可供其他相关的工程技术人员选用。

本书由张植保副教授任主编，负责确定全书的内容与章节及统稿。书中各种电机常见故障及解决方法由谭延良副教授编写，其余部分由张植保副教授编写。董怀德教授任主审。

由于编者水平有限，不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2004 年 7 月

主要符号表

A ——散热系数	F_{aq} ——同步电机横轴电枢反应磁动势 (A/极)
α ——并联支路对数 (直流机), 并联支路数 (交流机)	$FS\%$ ——负载持续率 (暂载率)
B ——磁通密度 (Wb/m^2)	f ——频率 (Hz)
B_{av} ——平均磁通密度 (Wb/m^2)	f_1, f_2 ——异步电机定子、转子频率
B_m ——磁密最大值 (Wb/m^2)	GD^2 ——飞轮矩 ($\text{N} \cdot \text{m}^2$)
B_δ ——气隙磁密 (Wb/m^2)	H ——磁场强度 (A/m)
C ——电动机热容量 (J/K)	I ——电流 (A), 交流电机相电流 (A)
D ——直径 (m), 三角形接法	I_a ——直流机电枢电流 (A), 单相异步电机副绕组电流 (A)
E_a ——直流机电枢电动势 (V), 隐极同步电机枢反应电动势 (V)	I_N ——额定电流 (A)
E_0 ——同步机励磁电动势 (V)	I_0 ——空载电流 (A)
E_{0r} ——直流机剩磁电动势 (V)	I_m ——交流励磁电流 (A), 单相异步电机主绕组电流 (A)
E_{K1} ——交流机相电动势 (V)	I_t ——直流励磁电流 (A)
E_1 ——变压器原方、异步电机定子电动势 (V)	I_d ——同步电机定子电流直轴分量 (A)
E_2 ——变压器副方、异步电机转子 (静止) 电动势 (V)	I_q ——同步电机定子电流交轴分量 (A)
E_{2s} ——异步电机转子 (旋转) 电动势 (V)	I_1 ——变压器原方、异步电机定子电流 (A)
e ——电动势瞬时值 (V)	I_2 ——变压器副方、异步电机转子 (静止) 电流 (A)
e_s ——电抗电动势 (V)	I_{2s} ——异步电机转子 (旋转) 电流 (A)
e_k ——速度电动势 (V)	I_{st} ——启动电流 (A)
F ——磁动势 (A)	I_{1L} ——变压器原方、异步电机定子电流中的负载分量 (A)
F_i ——直流机励磁磁动势 (A)	J ——转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
F_1 ——变压器原方、异步电机定子磁动势 (A, A/极) 圆形旋转磁动势幅值 (A/极)	K ——换向片数, 电动机不变损耗与可变损耗之比
F_2 ——变压器副方、异步电机转子磁动势 (A, A/极)	K_T ——异步电动机启动转矩倍数
F_m ——变压器、异步电机励磁磁动势 (A, A/极)	k ——变压器变比
F_a ——同步电机电枢反应磁动势 (A/极)	k_e ——异步电机电动势变比
F_{ad} ——同步电机纵轴电枢反应磁动势 (A/极)	k_i ——异步电机电流变比
	k_{N1} ——绕组系数, 异步电机定子绕组系数
	k_{N2} ——异步电机转子绕组系数
	k_{y1} ——短距系数

k_{q1} ——分布系数	R_{st} ——启动电阻 (Ω)
l ——长度, 导体长度 (m)	R_a ——直流电机电枢回路电阻 (含电刷接触电阻) (Ω)
m ——相数	r_a ——直流电机电枢绕组电阻 (Ω)
N ——导体数 (直流电机), 每相串联匝数 (交流电机)	R_f ——直流电机励磁绕组电阻 (Ω)
N_1, N_2 ——变压器原方、副方匝数, 异步电机定子、转子一相串联匝数	S ——元件数, 视在功率 ($kV \cdot A, V \cdot A$)
N_c ——单个线圈的匝数	S_N ——变压器额定容量 ($kV \cdot A$)
n ——转速 (r/min)	s ——转差率
n_N ——额定转速 (r/min)	s_m ——发生最大电磁转矩时的转差率 (临界转差率)
n_1 ——同步转速 (r/min)	T ——电磁转矩 ($N \cdot m$)
n_0 ——直流电动机理想空载转速 (r/min)	T_N ——额定转矩 ($N \cdot m$)
Δn ——转速降 (r/min)	T_1 ——输入转矩 ($N \cdot m$)
Δn_N ——额定速降 (r/min)	T_2 ——输出转矩, 即不含空载转矩的负载转矩 ($N \cdot m$)
P ——功率 (kW, W)	T_0 ——空载转矩 ($N \cdot m$)
P_N ——额定功率 (kW)	T_L ——负载转矩 (包含空载转矩) ($N \cdot m$)
P_{em} ——电磁功率 (kW, W)	T_{max} ——最大电磁转矩 ($N \cdot m$)
P_{mec} ——异步机总机械功率 (kW, W)	T_{ef} ——等效转矩 ($N \cdot m$)
P_1 ——输入功率 (kW, W)	T_{st} ——启动转矩 ($N \cdot m$)
P_2 ——输出功率 (kW, W)	t ——时间 (s)
P_L ——负载功率 (kW, W)	t_w ——电动机工作时间 (s)
p_{Cu} ——铜损耗 (kW, W)	t_0 ——电动机停歇时间 (s)
p_{Fe} ——铁损耗 (kW, W)	t_X ——电动机实际工作时间 (s)
p_{mec} ——机械损耗 (kW, W)	U ——电压 (kV, V)
p_{ad} ——附加损耗 (kW, W)	U_N ——额定电压 (kV)
p_0 ——空载损耗 (kW, W)	U_f ——励磁电压 (V)
p_k ——短路损耗 (kW, W)	u_k ——变压器阻抗电压
p_{kN} ——变压器额定电流时的短路损耗	u_{kR} ——阻抗电压电阻分量
p ——极对数	u_{kx} ——阻抗电压电抗分量
Q ——单位时间内电动机发出的热量 (J/s), 无功功率 (kvar, var)	v ——导体线速度 (m/s)
q ——每极每相槽数	x ——电抗 (Ω)
R ——电阻 (Ω)	x_1 ——变压器原方、异步电机定子漏抗 (Ω)
R_1 ——变压器原方、异步电机定子电阻 (Ω)	x_2 ——变压器副方、异步电机转子 (静止) 漏抗 (Ω)
R_2 ——变压器副方、异步电机转子电阻 (Ω)	x_{2s} ——异步电机转子 (旋转) 漏抗 (Ω)
R_m ——励磁电阻 (Ω)	

x_m ——励磁电抗	θ_m ——最高允许温度
x_s ——隐极机同步电抗 (Ω)	λ_T ——最大转矩倍数, 过载能力
x_d ——凸极机直轴同步电抗 (Ω)	μ ——磁导率 (H/m)
x_q ——凸极机交轴同步电抗 (Ω)	τ ——极距, 温升
Y——星形接法	τ_o ——电机初始温升
y_1 ——直流线圈第一节距, 交流线圈节距	τ_w ——电机稳态温升
Z——槽数	Φ ——磁通 (Wb)
Z_k ——短路阻抗 (Ω)	Φ_1 ——每极磁通 (Wb)
Z_m ——励磁阻抗 (Ω)	Φ_m ——主磁通最大值 (Wb)
Z_L ——负载阻抗 (Ω)	Φ_s ——漏磁通 (Wb)
α_1 ——槽距角	ϕ ——功率因数角, 平滑系数
β ——变压器负载系数	Ψ ——磁链 (Wb)
δ ——气隙长度, 功率角	Ω ——角速度 (rad/s)
η ——效率	Ω_1 ——同步速 (rad/s)
η_N ——额定效率	ω ——角频率
η_{max} ——最大效率	ρ ——占空比
θ ——温度	'——右上角加撇表示折算值
θ_b ——步进电动机步距角	

电学、磁学和力学单位符号

Wb——韦伯

Mx——麦克斯韦

Gs——高斯

H——亨利

Ω ——欧姆

Hz——赫兹

A——安培 (安)

V——伏特 (伏)

kV——千伏

W——瓦特 (瓦)

kW——千瓦

var——乏

kvar——千乏

kV · A——千伏安

rad/s——弧度/秒

r/min——转/分

m——米

N——牛顿

N · m——牛顿米

N · m²——牛米²

T——特斯拉

(1T=1Wb/m²)

内 容 提 要

本书共八章，论述了变压器、直流电机、异步电机和同步电机的结构、运行原理、运行特性和常见故障的处理。本书也包含了电力拖动方面的基础知识，即直流电动机和异步电动机的启动、制动和调速以及电动机的选择。此外，本书还介绍了各种常用的微控电机的原理和运行特性。本书每章均配有习题，部分习题还给出了参考答案。

本书具有简明实用的特点，可供大专院校电气工程类专业及其他相关专业选用，也可作为电气工程类的高级技术工人的培训教材或自学教材。

目 录

第一章 预备知识.....	1
第一节 电机中常用的材料.....	1
第二节 磁路计算.....	3
习题.....	6
第二章 变压器.....	8
第一节 变压器的结构和工作原理.....	8
第二节 三相变压器	23
第三节 变压器的运行性能	30
第四节 三绕组变压器及其他变压器	40
第五节 变压器运行常见故障及解决方法	46
习题	55
第三章 直流电机	59
第一节 直流电机的工作原理和结构	59
第二节 直流电机的基本理论	67
第三节 直流电动机的启动、调速和制动运行	81
第四节 直流电机运行常见故障及解决方法.....	108
习题.....	117
第四章 交流电机的共同问题.....	120
第一节 三相交流电机的绕组.....	120
第二节 相绕组电动势.....	128
第三节 三相对称绕组通电后的磁场和磁动势.....	130
习题.....	142
第五章 三相异步电动机.....	144
第一节 三相异步电动机的结构、型号和额定值.....	144
第二节 三相异步电动机的运行原理.....	148
第三节 三相异步电动机的功率、转矩、机械特性.....	155

第四节	三相异步电动机的参数测定和工作特性	160
第五节	三相异步电动机的启动	162
第六节	三相异步电动机的制动运行	168
第七节	三相异步电动机的调速	171
第八节	三相异步电动机的常见故障及解决方法	190
习题		203
第六章	同步电机	206
第一节	同步电机的结构和额定值	206
第二节	同步发电机的电动势方程式和矢量图	210
第三节	同步发电机的外特性和电压调整率	214
第四节	同步发电机的并联运行	215
第五节	同步电动机和同步调相机	223
第六节	同步电动机的常见故障原因分析及解决方法	233
习题		238
第七章	微控电机	241
第一节	单相异步电动机	241
第二节	微型同步电动机	246
第三节	步进电动机	248
第四节	伺服电动机	254
第五节	测速发电机	256
第六节	自整角机	258
第七节	旋转变压器	260
习题		262
第八章	电动机的选择	264
第一节	电动机种类、型式、电压和转速的选择	264
第二节	电动机的发热、冷却及工作方式	266
第三节	电动机额定功率的选择	269
第四节	选择电动机额定功率的实用方法	273
习题		276
参考文献		278

第一章 预 备 知 识

第一节 电机中常用的材料

一、铁磁材料的导磁性和饱和现象

除永久磁铁外，磁场可在通电线圈中产生。但是，如果通电线圈是放在空气中或绕在非磁性材料上的，那么要产生一定的磁场往往需要很大的电流。因此，电机中都是把通电线圈绕在铁磁材料上，或者嵌放在铁磁材料表面所开的槽内，以产生较强的磁场来满足能量转换的需要。

铁磁材料为什么具有良好的导磁性能呢？这与铁磁材料内部的结构有关。铁磁材料内部存在着很多很小的自发的磁化区域，相当于一块块极小的磁铁，称为磁畴。在没有外施的励磁电流时，这些磁畴的排列是杂乱无章的，它们所呈现的磁场互相抵消，对外界不呈现磁性。一旦有了外界磁场的作用（例如在励磁线圈中通以励磁电流），这些磁畴沿着外界磁场的方向作有规则的排列，其结果是顺着外磁场方向的磁畴扩大了，而逆着外磁场方向的磁畴缩小了。磁畴本身产生的磁场不能互相抵消，从而形成了一个与外磁场方向一致的附加磁场叠加在外磁场上，使总的磁场大大地加强了。由于磁畴原来都是强烈磁化了的，所以它们定向排列后形成的附加磁场是很强的，因此铁磁材料的导磁性能要比非铁磁材料的好得多。

铁磁材料在磁化的过程中，一开始励磁电流增大，磁场几乎是线性地增强。但当磁场增强到一定程度后，再增加励磁电流，磁场的增强就变得非常缓慢了，这就是所谓的饱和现象。

铁磁材料为什么会有饱和现象呢？这是因为当磁场增强到一定程度时，大多数磁畴都已转到与外磁场一致的方向，这时，若再增大励磁电流，则附加磁场的增加会变得很缓慢，总磁场的增长也就变慢了。当励磁电流继续增加到某一值后，这时所有的磁畴都已转到与外磁场一致的方向上，或者说靠磁畴定向排列形成附加磁场的这种“潜力”已经用完，于是，总磁场的增长只能靠外磁场的增长来实现。这时，就说铁磁材料已经完全饱和了。

二、磁滞现象和磁滞损耗

当励磁电流是周期性变化的交流电流时，铁磁材料内部磁场的大小和方向也呈周期性变化，但磁场的变化总是落后于励磁电流的变化，这就是所谓的磁滞现

象。磁滞现象可用“磁畴”的概念来解释。在外磁场的大小、方向发生变化时，铁磁材料内部磁畴的定向排列的方向和程度也随着变化。这样，在磁畴发生移动和倒转时，彼此之间会产生摩擦。由于这种摩擦的存在，磁场的变化总是落后于励磁电流的变化，而且当外磁场停止作用后（励磁电流为零），磁畴与外磁场方向一致的排列被部分地保留了下来，不能恢复原状，因此形成了剩磁。即励磁电流为零时，铁磁材料中仍保留了一定的磁性。

铁磁材料在交变励磁电流的作用下反复磁化的过程中，磁畴之间不停地互相摩擦，消耗能量，引起损耗，这种损耗称为“磁滞损耗”。磁滞损耗正比于磁滞回线的面积，也正比于磁场交变的频率。

如果在电工钢中加入少量的硅，得到所谓的硅钢片，则其磁滞回线面积较小，相应的磁滞损耗也较小。因此，电机和变压器的铁心都采用硅钢片制造。

三、涡流损耗

如果通过铁心的磁通是随时间作周期变化的交变磁通，而铁心本身也是导体，那么，根据电磁感应定律，铁心中将产生感应电动势并有电流流过。这些电流在铁心内部围绕磁通呈旋涡状流动，称之为涡流。铁心本身有电阻，所以涡流必然要在铁心中引起相应的损耗，通常称这种损耗为涡流损耗。

由于感应电动势与磁通交变的频率成正比，和磁通幅值成正比，而磁通幅值又与磁密幅值成正比，所以感应电动势与频率 f 和磁密幅值 B_m 成正比。涡流损耗应当与感应电动势的平方成正比，与涡流回路的电阻成反比。进一步的分析表明，涡流损耗与频率 f 的平方、与磁密幅值 B_m 的平方及钢片厚度 d 的平方成正比，而与钢片的电阻率 ρ 成反比。由此可见，为了减少涡流损耗，首先应当减小钢片的厚度 d ，所以，电工钢片的厚度做成 0.5mm 或 0.35mm；其次是增加涡流回路的电阻，因此电工钢片中加入适量的硅，制成硅钢片，用以提高电阻率。在制造电机和变压器时，硅钢片表面往往还涂以绝缘漆，以限制涡流通路，减少涡流损耗。

根据前面的分析可知，当电机铁心中的磁场是交变磁场时，铁心中就有所谓的磁滞损耗和涡流损耗。所谓铁心中存在交变磁场，是指铁心中各点的磁密随时间交变，交变磁场可以是脉振磁场（磁场不动，但各点的磁密随时间交变，变压器属于这种情况），也可以是旋转磁场（由 N 极、S 极形成的磁场与铁心有相对运动，导致铁心中各点的磁密随时间交变，旋转电机多属这种情形）。在电机和变压器中，通常把这两种损耗合在一起，称为铁心损耗，简称铁耗。

在计算铁耗时，为简便起见，通常并不把磁滞损耗和涡流损耗分开计算，而是把它们合在一起进行计算。单位质量的铁耗可用下式进行计算，即

$$p_{Fe} = p_{1/50} (f/50)^2 B_m^2$$

式中 $p_{1/50}$ ——铁耗系数，其值在 1.05~2.50 范围内；

β ——频率指数，其值在 1.2~1.6 范围内；

f ——频率，Hz；

B_m ——磁感应强度（磁通密度）最大值，T；

p_{Fe} ——单位质量的铁耗，W/kg。

上述单位中， $1T=1Wb/m^2$ 。

铁耗系数 $p_{1/50}$ 是 1kg 硅钢片在 $B_m=1T$ （特斯拉）、 $f=50Hz$ 时的铁耗，显然，它与所用硅钢片的品种、规格和厚度有关。而频率指数也随硅钢片的含硅量而异。

如果电机内的磁通就是以 $f=50Hz$ 的频率交变（例如国产异步电动机定子铁心中的磁通和变压器铁心中的磁通），那么，可以根据所用硅钢片的品牌和厚度，根据磁密最大值 B_m ，在电工手册或其他有关资料中直接查到单位质量的铁耗。

第二节 磁路计算

一、磁动势及安培环路定律

在磁路计算中，往往会涉及到两类问题：第一类是由磁通量 Φ 、磁场分布及其他已知条件求所需的励磁电流；第二类是由励磁电流求磁通量。在电机和变压器中，磁路计算大都属于第一类问题，所以通常着重考虑第一类磁路计算问题。

磁路计算的物理依据是安培环路定律，安培环路定律可表述如下。

设空间有若干根载流导体，导体中的电流分别为 $I_1, I_2, I_3 \dots$ 则沿任何闭合回路 l ，磁场强度的线积分等于该回路所包围的导体电流的代数和，即

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I$$

注意：求和时 I 可正可负，若导体电流方向和积分路径方向符合右手螺旋关系，则求和时该电流取正号；反之，取负号。

由于计算磁场强度沿闭合回路的线积分是一件很困难的事，实际工作中，往往用分段求和的方法来近似地代替积分计算。具体地说，就是把一个闭合的磁回路分成 n 段，每一段被称为一段磁路，一个闭合磁回路可看成是由 n 段磁路组成。就某段磁路而言，假设在该段磁路内部沿着积分路径上的各点的磁场强度都相同，于是

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{k=1}^n H_k L_k$$