

高等院校教材

电机学习题与题解

(第二版)

孙旭东 冯大钧 编著



科学出版社
www.sciencep.com

高等院校教材

电机学习题与题解

(第二版)

孙旭东 冯大钧 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是根据李发海、朱东起编著的《电机学》(第四版)中的思考题和习题,结合编者多年的教学实践编写而成的。书中共收入精选题目 500 个,其中思考题 243 个,习题 257 个,并都作了解答。这些思考题和习题,对于读者理解和掌握电机学的基本理论、基本概念与基本分析方法,提高分析和解决电机实际问题的能力,都是很有帮助的。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化专业,以及其他强电类专业的补充教材或教学参考书,也可供报考电工类研究生的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机学习题与题解/孙旭东,冯大钧编著. —2 版. —北京:科学出版社, 2007

(高等院校教材)

ISBN 978-7-03-018992-9

I. 电… II. ①孙… ②冯… III. 电机学-高等学校-解题 IV. TM3-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 071247 号

责任编辑:余 江 / 责任校对:张怡君
责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2007 年 6 月第 二 版 印张: 17 1/4

2007 年 6 月第五次印刷 字数: 323 000

印数: 10 001—14 000

定价: 26.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<路通>)

第二版前言

本书是李发海、朱东起教授编著的《电机学》(第四版)(科学出版社, 2007)的配套教学用书. 为了便于教学和读者阅读, 各章次序和所用的名词、符号均与《电机学》(第四版)保持一致.

根据《电机学》(第四版)的内容变化情况, 本书在第一版的基础上, 对内容做了相应的调整. 主要变动是: 删去了关于直流电机换向、同步电机派克方程的题目以及个别比较简单或偏难的题目, 新增了第六篇(第二十四章至第二十七章)的思考题, 还做了一些文字上的修改. 与第一版相比, 思考题数量增至 243 个, 习题数量减至 257 个, 题目总数仍保持为 500 个. 书中仍然对所有思考题和习题都做了解答.

在第一版的前言中, 我们已对编写本书的指导思想做了说明, 并对如何使用本书提出了一些建议, 在此不再赘述. 希望读者在使用本书时, 注重对电机学基本理论、基本概念和基本分析方法的理解和掌握, 并在此基础上, 通过积极的思考和认真的练习, 来提高学习能力和分析解决问题的能力.

本书由孙旭东、冯大钧编著. 冯大钧撰写了第一、二、五篇, 孙旭东撰写了第三、四、六篇, 并负责全书内容调整、文稿整理以及名词术语、符号的统一工作. 全书由李发海、朱东起教授审阅. 虽然经过了再版修订, 但是由于我们学识水平有限, 书中难免还会有缺点和错误, 恳请广大读者批评指正和提出宝贵意见.

编著者

2007 年 3 月于清华园

第一版前言

本书是根据李发海、朱东起编著的《电机学》(第三版)(科学出版社, 2001)中的思考题和习题, 结合编者多年的教学实践编写而成的, 是《电机学》(第三版)的配套教学用书. 为了便于教学和读者阅读, 各章的编写次序和所用名词、符号均与《电机学》(第三版)保持一致.

电机学这门课程, 由于概念多, 理论性强, 与工程实际结合密切, 因此相对而言是比较难教难学的. 要学好这门课程, 除了认真学习, 勤思多问外, 还必须做一定数量的思考题和习题. 本书收入精心选择的题目共 500 个, 其中思考题 232 个、习题 268 个. 这些题目是清华大学电机教研组经过几代人的努力探索, 不断实践的结晶, 它反映了电机学教学的基本要求. 本书注重对基本功的考察, 对理解和掌握电机的基本原理与电机学的基本概念、基本分析方法有很大帮助.

当今正处于信息时代, 读者要学的知识显著增多, 要求读者对这些题目都能独立地解答出来是不现实的. 为了提高学习效率, 节约时间, 应广大读者的要求, 我们首次对这些思考题和习题做了全面的解答, 有的题目还给出了两种解法. 当然, 这只是我们向读者推荐的解题思路和方法. 如果读者在这些解答的帮助下, 能够学会运用电机学的基本理论和基本分析方法解决实际电机问题, 或者因受到启发而钻研、探索出更简明、快捷的解题思路和方法, 那么就实现了我们编写本书的最大愿望.

读者在使用本书时, 先不要急于去看解答, 最好是在对题目进行了独立思考与分析, 或者独立解题之后, 再与书中的解答相对照. 这样, 将更有助于加深读者对电机学概念和理论的理解, 提高运用所学知识的能力, 使本书更好地发挥其作用.

本书由孙旭东、冯大钧编写. 冯大钧编写第一、二、五篇, 孙旭东编写第三、四篇, 并负责全书名词术语、符号的统一和文稿的整理工作. 全书由李发海教授和朱东起教授审阅. 由于这是一件全新的工作, 加之时间仓促和编者水平有限, 书中难免还会存在一些错误和不妥之处, 希望读者批评指正. 读者对本书还有什么意见、建议和要求, 欢迎告诉我们, 以便再版时修改, 使其更臻完善.

来函请寄: 北京清华大学电机工程与应用电子技术系, 邮政编码 100084.

编著者

目 录

第二版前言

第一版前言

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的用途、分类与结构	1
思考题及其解答	1
习题及其解	2
第二章 变压器的运行分析	3
思考题及其解答	3
习题及其解	12
第三章 三相变压器	34
思考题及其解答	34
习题及其解	37
第四章 三绕组变压器和自耦变压器	43
思考题及其解答	43
习题及其解	44
第五章 变压器空载合闸时的冲击电流	54
思考题及其解答	54
习题及其解	55

第二篇 直 流 电 机

第六章 直流电机的用途、基本工作原理与结构	56
思考题及其解答	56
习题及其解	56
第七章 直流电机的磁路和电枢绕组	58
思考题及其解答	58
习题及其解	60
第八章 直流发电机	63
思考题及其解答	63
习题及其解	65

第九章 直流电动机	70
思考题及其解答	70
习题及其解	71

第三篇 交流电机的绕组电动势和磁动势

第十章 交流电机的绕组和电动势	88
思考题及其解答	88
习题及其解	91
第十一章 交流电枢绕组的磁动势	111
思考题及其解答	111
习题及其解	114

第四篇 同步电机

第十二章 同步电机的基本类型与结构	126
思考题及其解答	126
习题及其解	126
第十三章 同步电机的基本电磁关系	128
思考题及其解答	128
习题及其解	131
第十四章 同步发电机的运行特性	148
思考题及其解答	148
习题及其解	150
第十五章 同步发电机的并联运行	160
思考题及其解答	160
习题及其解	162
第十六章 同步电动机	177
思考题及其解答	177
习题及其解	180
第十七章 同步电机的非正常运行	193
思考题及其解答	193
习题及其解	196

第五篇 异步电机

第十八章 三相异步电动机的结构和基本工作原理	204
思考题及其解答	204

习题及其解	205
第十九章 三相异步电动机的运行原理	207
思考题及其解答	207
习题及其解	212
第二十章 异步电动机的功率、转矩与运行性能	222
思考题及其解答	222
习题及其解	226
第二十一章 三相异步电动机的启动	236
思考题及其解答	236
习题及其解	237
第二十二章 三相异步电动机的调速	243
思考题及其解答	243
习题及其解	243
第二十三章 三相异步电机的其他运行方式	251
思考题及其解答	251
习题及其解	251

第六篇 特种电机

第二十四章 自控式同步电动机	255
思考题及其解答	255
第二十五章 永磁电机	258
思考题及其解答	258
第二十六章 绕线型双馈异步电动机	260
思考题及其解答	260
第二十七章 开关磁阻电机调速系统	262
思考题及其解答	262
参考文献	264

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的用途、分类与结构

思考题及其解答

1-1 电力变压器的主要功能是什么？它是通过什么作用来实现其功能的？

答：电力变压器的主要功能是用来改变电压，即升压或降压。它是通过电磁感应作用来实现其功能的，电压与匝数成正比。

1-2 电力变压器的主要用途有哪些？为什么电力系统中变压器的安装容量比发电机的安装容量大？

答：电力变压器按它的用途分主要有：①升压变压器；②降压变压器；③配电变压器；④联络变压器；⑤厂用电变压器。因为发电机发出的电能要经过变压器升压、降压和配电后才传送到用户，所以变压器安装容量是发电机安装容量的几倍。

1-3 变压器的铁心为什么要用涂有绝缘漆的薄硅钢片叠成？若在铁心磁回路中出现较大的间隙，对变压器会有何影响？

答：铁心中交变的磁通会在铁心中引起铁损耗。用涂绝缘漆的薄硅钢片叠成铁心，可以大大减小铁损耗。若在铁心磁回路中出现较大的间隙，则主磁通所经过的铁心磁回路的磁阻就比较大，产生同样的主磁通所需的励磁磁动势和励磁电流就大大增加，即变压器的空载电流会大大增加。

1-4 变压器的主要额定值有哪些？一台单相变压器的额定电压为 220/110V，额定频率为 50Hz，试说明其意义。若这台变压器的额定电流为 4.55/9.1A，问在什么情况下称其运行在额定状态？

答：变压器的主要额定值有：①额定视在功率或称额定容量 S_N (kVA)；②额定线电压 U_{1N}/U_{2N} (kV)；③额定线电流 I_{1N}/I_{2N} (A)；④额定频率 f_N (Hz)。

一台单相变压器的额定电压为 220/110V，额定频率为 50Hz，这说明：①该变压器高压绕组若接在 50Hz、220V 电源上，则低压绕组空载电压为 110V，是降压变压器；②若该变压器低压绕组接在 50Hz、110V 电源上，则高压绕组空载电压为 220V，是升压变压器。

当这台变压器加负载，使高压绕组电流为 4.55A、低压绕组电流为 9.1A 时，称其运行在额定状态。

习题及其解

1-1 一台三相变压器的额定容量为 $S_N = 3200\text{kVA}$ ，电压为 35/10.5kV，一、二次绕组分别为星形、三角形联结，求：

- (1) 这台变压器一、二次侧的额定线电压、相电压及额定线电流、相电流；
- (2) 若负载的功率因数为 0.85（滞后），则这台变压器额定运行时能带多少有功负载？输出的无功功率又是多少？

解：(1) 一次额定线电压

$$U_{1N} = 35\text{kV}$$

一次额定相电压

$$U_{1N\phi} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{35}{\sqrt{3}} = 20.2(\text{kV})$$

一次额定线电流

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{3200}{\sqrt{3} \times 35} = 52.8(\text{A})$$

一次额定相电流

$$I_{1N\phi} = I_{1N} = 52.8\text{A}$$

二次额定线电压

$$U_{2N} = 10.5\text{kV}$$

二次额定相电压

$$U_{2N\phi} = U_{2N} = 10.5\text{kV}$$

二次额定线电流

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{3200}{\sqrt{3} \times 10.5} = 176(\text{A})$$

二次额定相电流

$$I_{2N\phi} = \frac{I_{2N}}{\sqrt{3}} = 101.6\text{A}$$

(2) 能带有功负载为

$$P = S_N \cos\varphi = 3200 \times 0.85 = 2720(\text{kW})$$

输出无功功率为

$$Q = S_N \sin\varphi = 3200 \times 0.527 = 1686(\text{kvar})$$

第二章 变压器的运行分析

思考题及其解答

2-1 变压器的正方向和惯例的选择是不可改变的吗？规定不同的正方向对变压器各电磁量之间的实际关系有无影响？电机学教材中所述的一次绕组电路采用电动机惯例，是否意味着变压器的功率总是从一次侧流向二次侧的？应该如何判断其实际的功率流向？

答：(1) 正方向和惯例的选择是可以改变的，但改变惯例后，所得到的方程式也将作相应改变。

(2) 规定不同的正方向对变压器各电磁量之间的实际关系没有影响。

(3) 一次绕组电路采用电动机惯例，并不意味着变压器功率总是从一次侧流向二次侧。

(4) 应该根据 $P=UI\cos\varphi$ 的正或负来判断实际的有功功率的流向。采用电动机惯例时，若 $P>0$ ，则功率为输入，若 $P<0$ ，则功率为输出，即电压和电流的夹角 $\varphi<90^\circ$ 时为输入， $\varphi>90^\circ$ 时为输出。同理，实际的无功功率流向应根据 $Q=UI\sin\varphi$ 的正或负来判断。

2-2 变压器空载运行时的磁通是由什么电流产生的？主磁通和一次漏磁通在磁通路径、数量和与二次绕组的关系上有何不同？由此说明主磁通与漏磁通在变压器中的不同作用。

答：(1) 变压器空载运行时，其二次绕组电流为零，所以磁通是由一次绕组电流产生的。

(2) 磁通是无头无尾闭合的。既链一次绕组又链二次绕组的磁通称为主磁通，它在铁心中闭合，所经过的磁路的磁阻很小。只链一次绕组不链二次绕组的磁通称为一次漏磁通，它必定经过空气磁路闭合，因此磁路的磁阻很大。主磁通和一次漏磁通在数量上的比等于 E_1 和 E_{s1} 之比，在空载时就等于 $|Z_m|$ 和 X_1 之比，约等于几百。也就是说，主磁通是漏磁通的几百倍。

在满载时，情况就不同了。由于一次漏磁通和一次电流成正比，因此满载漏磁通和空载漏磁通之比为 I_{1N}/I_{10} 。而满载电流和空载电流之比约为几十倍，所以，代表一次绕组漏磁通的 E_{s1} 将增加几十倍。虽然如此， E_{s1} 仍比 E_1 小很多。代表主磁通的 E_1 ，只要外加电压 U_1 不变，则在从空载到额定负载时它也基本不变。实际上，若带纯电感负载，从空载到满载， E_1 和主磁通都将变小一点；若

带纯电容负载，从空载到满载 E_1 和主磁通都变大一点。主磁通的变化受漏磁通变化的影响。

(3) 主磁通起传递电能的媒介作用，它互链一、二次绕组，使 $E_1/E_2 = N_1/N_2 = k$ ，实现变电压的功能。漏磁通的作用为在绕组电路中产生电压降，负载时影响主磁通、 E_1 和二次电压 U_2 的变化，以及限制二次绕组短路时短路电流的大小。

2-3 变压器造好以后，其铁心中的主磁通与外加电压的大小、频率有何关系？与励磁电流有何关系？一台频率为 50Hz、额定电压为 220/110V 的变压器，如果把一次绕组接到 50Hz、380V 或 110V 电源上，主磁通和励磁电流会如何变化？如果把一次绕组接到 220V、60Hz 交流电源或直流电源上，主磁通和励磁电流又将如何变化？以上各种情况下的二次空载电压是多少？

答：(1) 主磁通 Φ_m 与外加相电压 U_1 、频率 f 的关系是 $U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$ ，
$$\Phi_m \approx \frac{U_1}{4.44fN_1}.$$

(2) 根据磁路欧姆定律，磁动势 = 磁通 \times 磁阻，可得励磁电流和磁通关系为 $\sqrt{2}N_1I_{10} = \Phi_m R_m$ ，其中， I_{10} 为一次绕组中励磁电流有效值， N_1 为一次绕组的匝数， Φ_m 为主磁通最大值， R_m 为主磁通所经磁路的磁阻，即闭合铁心的磁阻， $R_m = \frac{l}{\mu_{Fe}S}$ （其中 l 为铁心磁路长度， S 为铁心的截面积， μ_{Fe} 为铁心的磁导率）。表示 Φ_m 与 I_{10} 的关系的曲线，就是磁化特性曲线，它呈饱和特性。

(3) 如果将 220V 绕组接到 380V 电源上，主磁通也将增到原来的 380/220 倍；如接到 110V 电源上，则主磁通为原来的 1/2。如果磁阻不变，则励磁电流与主磁通成正比。但由于铁心磁路有饱和现象，接到 380V 电源上时，磁阻大幅度地增加，所以此时励磁电流与接到 220V 电源上的励磁电流的比值要比 380/220 大很多。此时铁损耗和铜损耗都很大，时间久了有可能烧毁变压器。一般变压器额定电压都设计在磁化特性曲线的拐弯处，绕组电压低于其额定电压时，磁路可近似看作是线性的，因此接到 110V 电源时的励磁电流约为接到 220V 电源上励磁电流的 1/2。

(4) 磁通与频率成反比，所以接到 220V、60Hz 电源上时，主磁通将为接至 50Hz 电源时的 5/6，磁路线性时，其励磁电流也为原来的 5/6。但接到直流电源上的情况与接到交流电源上的有本质的不同，此时绕组中不能产生感应电动势， $E_1 = 0$ ，一次电流将由欧姆定律决定，等于 U_1/R_1 ，其中 R_1 为一次绕组的电阻。由于 R_1 很小，因此电流将很大，足以烧毁变压器。

(5) 对于以上各种情况，除接到直流电源上的二次绕组空载电压为零外，其他的二次绕组的空载电压均为一次绕组电压的 1/2。

2-4 变压器二次绕组开路、一次绕组加额定电压时，虽然一次绕组电阻很

小，但一次电流并不大，为什么？ Z_m 代表什么物理意义？电力变压器不用铁心而用空气心行不行？

答：(1) 因为主磁通在一次绕组中产生的感应电动势基本上与一次绕组外加电压相平衡，用方程式表示，就是

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jI_0 X_1 + I_0 R_1 = I_0 Z_m + jI_0 X_1 + I_0 R_1$$

则 $I_0 = \frac{\dot{U}_1}{Z_m + jX_1 + R_1}$ 。因 $|Z_m| \gg X_1 > R_1$ ，即 $|Z_m|$ 很大，所以一次电流并不大。

(2) Z_m 为励磁阻抗， $Z_m = \frac{-\dot{E}_1}{I_0}$ ，即单位励磁电流产生的电动势。为了进一步了解其物理意义，可进行如下推导：

$$|Z_m| = \frac{E_1}{I_0} = \frac{4.44fN_1\Phi_m}{I_0} = \frac{2\pi fN_1\Phi_m}{\sqrt{2}I_0} = \frac{2\pi fN_1^2\Phi_m}{\sqrt{2}N_1 I_0} = \frac{2\pi fN_1^2}{R_m}$$

其中 R_m 为主磁路磁阻， $R_m = \frac{\sqrt{2}N_1 I_0}{\Phi_m}$ 。所以励磁阻抗与三个因素有关：①与频率成正比；②与绕组匝数的平方成正比；③与铁心磁路的磁阻成反比。

(3) 由于电力变压器用了铁心，使主磁路的磁阻很小，也就使励磁阻抗 $|Z_m|$ 很大，这样电力变压器高压绕组虽然电压很高，但空载电流（励磁电流）仍然很小。若不用铁心而用空气心，则磁阻将大大增加，使 $|Z_m|$ 变小，空载电流也大大增加，以致达到满载电流，使电力变压器无法再增加负载。

2-5 在制造同一规格的变压器时，若误将其中一台变压器的铁心截面做小了（为正常铁心截面的一半），问：在做空载试验时，当这台变压器的外加电压与其他正常变压器的相同时，它的主磁通、励磁电流、励磁阻抗与其他正常变压器的有什么不同？又若误将其中一台变压器的一次绕组匝数少绕一半，做上述试验时，这台变压器的磁通、励磁电流、励磁阻抗和其他正常变压器的有什么不同（忽略漏阻抗、设磁路线性）？

答：(1) 因为

$$U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1\Phi_m; \quad \Phi_m = \frac{U_1}{4.44fN_1}$$

所以这台变压器的磁通 Φ_m 不变。因为 $\sqrt{2}N_1 I_0 = \Phi_m R_m$ ，其中磁阻 $R_m = \frac{l}{\mu_{Fe} S}$ ， S 为铁心截面积。由于铁心截面减小为 $S/2$ ，所以磁阻增加为 $2R_m$ ，励磁电流增加为 $2I_0$ 。因励磁阻抗 $|Z_m| = \frac{2\pi fN_1^2}{R_m}$ ，所以它减小为 $|Z_m|/2$ 。

(2) 若匝数由 N_1 减为 $\frac{1}{2}N_1$ ，则主磁通由 $\Phi_m = \frac{U_1}{4.44fN_1}$ 增至 $2\Phi_m$ 。设磁路线性， R_m 不变，因 $I_0 = \frac{\Phi_m R_m}{\sqrt{2}N_1}$ ，所以励磁电流将由 I_0 增至 $4I_0$ 。根据 $|Z_m| =$

$\frac{2\pi f N_1^2}{R_m}$, 可知励磁阻抗的大小将由 $|Z_m|$ 减至 $\frac{1}{4}|Z_m|$.

2-6 变压器的电抗参数 X_m 、 X_1 、 X_2 各与什么磁通相对应? 说明这些参数的物理意义以及它们的区别, 从而分析它们的数值在空载试验、短路试验和正常负载运行时是否相等.

答: 励磁电抗 X_m 对应于主磁通, 主磁通所走的磁路是闭合铁心, 其磁阻很小, 而电抗与磁阻成反比, 因此 X_m 的值很大. 此外, 铁心的磁导率不是一个常数, 它随磁通密度的增加而变小. 磁阻与磁导率成反比, 所以励磁电抗和铁心磁导率成正比. 由于短路试验时电压低、主磁通小, 而空载试验时加额定电压、主磁通大, 所以短路试验时励磁电抗比空载试验时的励磁电抗大. 正常负载运行时加额定电压, 所以主磁通和空载试验时基本相同, 即负载运行时的励磁电抗和空载试验时的基本相等.

一次绕组漏电抗 X_1 与二次绕组漏电抗 X_2 分别对应于一次绕组漏磁通和二次绕组漏磁通, 漏磁通要走空气磁路而闭合, 磁路的磁阻很大, 因此 X_1 和 X_2 就很小. 因为空气的磁导率为常数, 所以 X_1 和 X_2 为常数, 即在空载试验、短路试验及正常负载运行时, 它们的数值都相等.

2-7 在单相电力变压器中, 为了得到正弦的感应电动势, 若不考虑磁滞与涡流效应, 在铁心不饱和与饱和两种情况下空载励磁电流各呈何种波形? 该电流与主磁通在时间上同相吗? 若考虑磁滞和涡流, 情况又将如何?

答: (1) 不考虑磁滞与涡流效应, 在铁心不饱和时, 磁化特性 (励磁电流和主磁通的关系) 是线性关系, 所以当感应电动势为正弦形即主磁通为正弦形时, 励磁电流也为正弦形.

在铁心饱和时, 磁化特性为非线性, 主磁通增加时, 励磁电流增加更多. 当感应电动势为正弦形即主磁通为正弦形时, 励磁电流为非正弦形. 在主磁通大的区域, 励磁电流更大, 而呈尖顶波.

由于不考虑磁滞和涡流, 所以空载励磁电流与主磁通在时间上同相, 即与感应电动势相差 90° , 没有励磁功率损耗.

(2) 考虑磁滞和涡流时, 与 (1) 不同的是励磁电流将超前主磁通一个小角度, 这个角度的大小将由磁滞和涡流损耗的大小来决定, 损耗越大则角度越大.

2-8 电力变压器空载运行时功率因数高吗? 这时输入变压器的功率主要消耗在何处?

答: (1) 电力变压器的额定效率很高. 为提高效率, 要采取各种措施使磁滞和涡流损耗降至很小, 使空载励磁电流超前主磁通一个很小的角度, 即与感应电动势 (端电压) 的相位差很接近 90° , 所以空载运行时功率因数是最低的.

(2) 这时输入变压器的功率主要消耗在磁滞和涡流损耗即铁损耗上. 变压器除了铁损耗外还有铜损耗. 铜损耗和电流的平方成正比, 电力变压器空载励磁电

流约为额定电流的 5%，因此空载时铜损耗约为额定时铜损耗的 $(0.05)^2$ ，即 0.25%，完全可以忽略。

2-9 变压器二次侧带负载运行时，铁心中的主磁通还是仅由一次电流产生的吗？励磁所需的有功功率（铁损耗）是由一次侧还是二次侧提供的？

答：（1）负载运行时铁心中的主磁通不是仅由一次电流产生的，而是由一、二次电流共同产生的，即由合成磁动势 $N_1 I_1 + N_2 I_2$ 产生的。

（2）二次侧带的负载若是电阻、电感、电容以及它们的组合，则励磁所需的有功功率肯定是由一次侧提供的。若二次侧带的是有源负载，励磁所需的有功功率由哪一侧提供，则需要进行分析计算才能确定。

2-10 变压器一、二次绕组在电路上并没有联系，但在负载运行时，二次电流大则一次电流也变大，为什么？由此说明“磁动势平衡”的概念及其在定性分析变压器时的作用。

答：变压器一、二次绕组在电路上没有联系，但通过铁心磁路中的主磁通相互联系着。变压器负载运行时，一次电流 I_1 产生的磁动势 F_1 和二次电流 I_2 产生的磁动势 F_2 共同作用在磁路上，等于磁通乘磁阻，其方程式如下：

$$F_1 + F_2 = \Phi_m R_m \angle \alpha$$

其中 α 是考虑铁心的磁滞和涡流损耗时磁动势超前磁通的一个小角度。实际铁心的磁阻 R_m 很小，理想情况可看作零，即 $R_m = 0$ ，则 $F_1 + F_2 = 0$ ， $F_1 = -F_2$ 。这就叫磁动势平衡，即一、二次磁动势相量的大小相等、方向相反。二次电流增大时，一次电流就随之增大。

当仅考虑数量关系时，有 $N_1 I_1 = N_2 I_2$ ，即一次磁动势等于二次磁动势，即 $k I_1 = I_2$ 或 $I_1 = I_2 / k$ 。所以利用磁动势平衡的概念来定性分析变压器负载运行时，立即可得出结论：一、二次电流之比和它们的匝数成反比。

2-11 说明变压器折合算法的依据及具体方法。可以将一次侧的量折合到二次侧吗？折合后各电压、电流、电动势及阻抗、功率等量与折合前的量分别是何关系？

答：折合算法的依据是二次绕组通过其磁动势 F_2 对一次绕组起作用，只要保持 F_2 不变，就不会改变一次绕组的各个量。具体方法是将二次绕组的匝数折合到与一次绕组相同的匝数，即 $F_2 = N_2 I_2 = N_1 I_2'$ 。所以折合后电流 $I_2' = N_2 I_2 / N_1 = I_2 / k$ 。电动势和匝数成正比， $E_2' / E_2 = N_1 / N_2 = k$ ，所以折合后电动势 $E_2' = k E_2 = E_1$ 。因而折合后二次阻抗 $Z_2' + Z_L'$ 为 $Z_2' + Z_L' = E_2' / I_2' = k E_2 / (I_2 / k) = k^2 E_2 / I_2 = k^2 (Z_2 + Z_L)$ 。为了保证在折合后二次电流相位不变，所以必须使折合后电阻和电抗分别为折合前的 k^2 倍，即 $R_2' = k^2 R_2$ ， $X_2' = k^2 X_2$ ， $R_L' = k^2 R_L$ ， $X_L' = k^2 X_L$ 。折合后二次端电压 U_2' 的关系为 $U_2' = I_2' Z_L' = (I_2 / k) \times k^2 Z_L = k I_2 Z_L = k U_2$ 。这样经过折合，变压器的基本方程式中就不包含匝数了，为得到变压器的等效电路打下了基础。

当然也可以将一次侧的量折合到二次侧。依旧保持 F_1 不变, 有 $F_1 = N_1 I_1 = N_2 I'_1$, 由此可将一次绕组匝数折合到与二次绕组相同的匝数, 折合后电流 $I'_1 = N_1 I_1 / N_2 = k I_1$; 折合后电动势 E'_1 与绕组匝数成正比, 即 $E'_1 / E_1 = N_2 / N_1$, $E'_1 = E_1 / k$ 。所以, $U'_1 = U_1 / k$, $Z'_1 = Z_1 / k^2$, $R'_1 = R_1 / k^2$, $X'_1 = X_1 / k^2$, 且有功功率和无功功率折合前后都没有改变。

2-12 变压器一、二次侧间的功率传递是靠什么作用来实现的? 在等效电路上可用哪些电量的乘积来表示? 由此说明变压器能否直接传递直流电功率。

答: 变压器一、二次侧间的功率传递是靠电磁感应作用来实现的。一次侧传递给二次侧的有功功率可用 E_1 和 I'_2 的点积即标量积来表示。传递给二次侧的有功功率为 $P_M = E_1 \cdot I'_2 = E'_2 \cdot I_2 = E_2 \cdot I_2$ 。因为通直流电时感应电动势 E_1 和 E_2 都等于零, 所以不能传递直流电功率。

2-13 变压器的简化等效电路与 T 型等效电路相比, 忽略了什么量? 这两种等效电路各适用于什么场合?

答: 简化等效电路是在将 T 型等效电路中的励磁阻抗 $|Z_m|$ 视为无穷大时得到的, 也就是在励磁电流 $I_0 = -E / Z_m = 0$ ——即忽略了励磁电流 I_0 的情况下得到的。T 型等效电路适用于一次绕组加交流额定电压时的各种运行情况, 而简化等效电路只适用于变压器负载运行时计算一、二次电流和二次电压的场合, 例如计算电压调整率和并联运行时负载分配等。

2-14 变压器二次侧带电阻和电感性负载时, 从一次侧输入的无功功率是什么性质的?

答: 从一次侧输入的无功功率为感性无功功率, 即电流滞后电压 90° 的无功功率。

2-15 画出当变压器二次侧带纯电容负载时的相量图, 并说明这时变压器的励磁无功功率实际上是由负载侧供给的。

答: 相量图(略)请参考电机学教材中变压器负载时的相量图。纯电容负载时 I'_2 超前 U'_2 的 φ_2 角等于 90° , 最后可得到 I_1 超前 U_1 一个 φ_1 角。按照教材中使用的正方向惯例, 可得一次侧输入的无功功率 $Q_1 = U_1 \times I_1 = U_1 I_1 \sin\varphi_1 < 0$, 为负; 二次侧输出的无功功率 $Q_2 = U'_2 \times I'_2 = U'_2 I'_2 \sin\varphi_2 < 0$, 为负。这说明此时无功功率实际上是从二次侧输入而从一次侧输出, 而且二次侧无功功率的绝对值大于一次侧无功功率的绝对值, 绝对值之差正好提供了励磁无功功率 $I_0^2 X_m$ 和一、二次绕组漏电抗所需的无功功率 $I_1^2 X_1$ 和 $I_2^2 X_2$ 。因此电容吸收负的滞后无功功率, 实际上可看作发出正的滞后无功功率。更形象地说, 电感是无功功率的负载, 电容是无功功率的发电机。无功功率像有功功率一样, 也需要平衡, 发出的应等于吸收的。

2-16 变压器做空载和短路试验时, 从电源输入的有功功率主要消耗在什么地方? 在一、二次侧分别做同一试验, 测得的输入功率相同吗? 为什么?

答：空载试验时，从电源输入的有功功率的消耗主要是铁损耗。短路试验时，从电源输入的有功功率的消耗主要是铜损耗。

在一、二次侧分别做空载试验，只要都加额定电压，由于 $U_{1N} = kU_{2N}$ ，这两种情况下铁心中主磁通是相等的：

$$\Phi_m = \frac{U_{1N}}{4.44fN_1} = \frac{kU_{2N}}{4.44fN_1} = \frac{N_1/N_2 U_{2N}}{4.44fN_1} = \frac{U_{2N}}{4.44fN_2}$$

所以铁损耗相等，即电源输入功率相同。

由于短路试验时所加电压很低，铁心中主磁通很小，铁损耗可忽略不计，因此，在一、二次侧分别做短路试验时，只要都加额定电流，这两种情况的铜损耗就相等，即电源输入功率相等。

2-17 试证明：当忽略铜损耗时，在高压侧和在低压侧做空载试验所测得的两条空载特性曲线，当用标么值表示时是重合的。

证明：设对任一给定的主磁通，在高压侧做空载试验时，测得相应的电压为 U_1 、电流为 I_{10} ；在低压边做空载试验时，测得相应的电压为 U_2 、电流为 I_{20} 。因为二者的磁通相同，所以电压之比等于匝数之比，即 $U_1 = kU_2$ 。因为磁通相同，所以要求磁动势相同，即 $N_1 I_{10} = N_2 I_{20}$ ， $I_{10} = I_{20}/k$ 。用标么值表示时，有

$$\underline{U}_1 = \frac{U_1}{U_{1N}} = \frac{kU_2}{kU_{2N}} = \underline{U}_2$$

$$\underline{I}_{10} = \frac{I_{10}}{I_{1N}} = \frac{I_{20}/k}{I_{2N}/k} = \underline{I}_{20}$$

即二者的纵坐标和横坐标分别相等。所以， $\underline{U}_1 = f(\underline{I}_{10})$ 和 $\underline{U}_2 = f(\underline{I}_{20})$ 这两条空载特性曲线是重合的。

2-18 变压器负载运行时引起二次电压变化的原因是什么？电压调整率的大小与这些因素有何关系？二次侧带什么性质负载时有可能使电压调整率为零？

答：引起二次端电压变化的内因是变压器本身的漏阻抗，外因是负载电流的大小和性质。二次电压调整率的大小和这些因素关系为

$$\Delta U = \beta(R_k \cos\varphi_2 + X_k \sin\varphi_2)$$

其中， R_k 和 X_k 分别为变压器短路电阻和短路电抗的标么值；

β 为负载电流标么值 ($\beta = I_2/I_{2N}$)；

φ_2 为负载电流滞后 \dot{U}_2 的角度。

只有二次侧带电容性负载，即 φ_2 为负数时， $\sin\varphi_2$ 也为负数， ΔU 才有可能为零。

2-19 变压器带额定负载时，其效率是否不变，即是否为常数？效率的高低与负载性质有关吗？

答：不是常数，而是随负载性质而变。效率高是与负载性质有关的。当 $\cos\varphi_2 = 1$ ，即为纯电阻负载时效率最高；当 $\cos\varphi_2 = 0$ ，即纯电感或纯电容负载时效率最低。