

高等学校试用教材

电磁铁优化设计

沈阳工业大学 任耀先 主编

机械工业出版社

前 言

本书是根据原机械工业部高等学校电工技术类教材编审委员会电器专业教材编审小组确定的电磁铁优化设计教学大纲而编写的。全书共分六章。第一章综述了电磁铁优化设计的基本知识及其发展概况；第二章和第三章分别介绍了直流电磁铁和交流电磁铁静态特性和动态特性的计算机辅助计算的方法；第四章重点介绍了适用于电磁铁优化设计的最基本、最常用的优化方法；第五章主要介绍电磁铁静态和动态指标下优化设计数学模型的建立和求解方法，并给出了优化设计的实例；第六章着重介绍电器 CAD 的基本概念和利用 Auto CAD 计算机绘图软件进行电器产品辅助绘图方法。为了理论联系实际和便于工程应用，每章均给出了具体计算程序和相应的思考题与习题。

本书是在总结多年教学实践和科研工作经验的基础上编写而成的，由沈阳工业大学任耀先教授主编，西安交通大学陈德桂教授主审。全书由任耀先教授拟定思路体系和编写大纲，并由任耀先、王清源、孙鹏三位同志共同对各章节具体内容进行研究讨论后，分别执笔形成初稿，其中第一章由任耀先同志执笔，第二、三、四、五章由王清源和孙鹏同志共同执笔，第六章由孙鹏同志执笔。全书经任耀先同志审阅后，又由孙鹏同志对全书初稿进行了统一修改和整理，经复审后定稿。

书稿经 1988 年 11 月在湘潭召开的《电磁铁优化设计》教材审稿会审查通过。参加审稿会的有福州大学张冠生教授、西安交通大学陈德桂教授、河北工学院孟庆龙教授、颜威利教授和上海铁道学院丁明道副教授等。

在本书的初稿和定稿审阅过程中，主审人西安交通大学陈德桂教授提出了许多宝贵的意见，在此表示深切的谢意。

本书可作为高等学校电器专业的选修课教材，也可供有关工程技术人员参考。

由于编者水平所限，书中难免存在不妥之处，敬请专业同行和广大读者批评指正。

目 录

第一章 电磁铁优化设计概述	7
§ 1-1 电磁铁设计中几个基本技术条件	1
§ 1-2 电磁铁优化设计过程	3
§ 1-3 电磁铁优化设计发展概况	6
§ 1-4 学习本教材的预备知识及有关说明	8
思考题	8
第二章 直流电磁铁特性的计算机辅助计算	9
§ 2-1 铁磁材料磁化曲线和铁耗曲线的计算机处理方法	9
§ 2-2 气隙磁导的计算	16
§ 2-3 磁路分布参数的计算	26
§ 2-4 直流电磁铁静态特性的计算	37
§ 2-5 直流电磁铁动态特性的计算机辅助计算	48
§ 2-6 考虑涡流影响的直流电磁铁动态特性计算方法	65
§ 2-7 直流电磁铁动态特性的简化计算方法	71
思考题与习题	79
第三章 交流电磁铁特性的计算机辅助计算	81
§ 3-1 交流电磁铁静态等效磁路图及磁路参数的求解	81
§ 3-2 交流电磁铁静态特性的计算	91
§ 3-3 交流电磁铁动态特性的计算机辅助计算	104
思考题与习题	128
第四章 优化设计的基本概念及其优化方法	129
§ 4-1 优化设计的基本概念	129
§ 4-2 常用的一维搜索法	134
§ 4-3 无约束优化设计问题的优化方法	143
§ 4-4 约束优化设计问题的优化方法	162
§ 4-5 优化方法的评价	181
§ 4-6 等式约束的处理	183
§ 4-7 多目标优化方法	186
思考题与习题	190
第五章 电磁铁的优化设计	191
§ 5-1 电磁铁优化设计的数学模型	191
§ 5-2 静态指标下的直流电磁铁优化设计	196
§ 5-3 静态指标下的交流电磁铁优化设计	208
§ 5-4 动态指标下的电磁铁优化设计	216
思考题与习题	224
第六章 计算机辅助设计及绘图	225
§ 6-1 计算机辅助设计的设计过程	225

IV

§ 6-2 计算机辅助绘图基础	228
§ 6-3 Auto LISP 语言简介	234
§ 6-4 Auto CAD 的“参数绘图”	242
思考题与习题	253
附录	254
附录一、计算程序中常用变量对照表	254
附录二、程序一览表	254
参考文献	256

第一章 电磁铁优化设计概述

在电器产品中，电磁铁是一种把电磁能转换为机械能的电磁元件。它可以作为组成开关电器的一部分，如继电器、接触器的电磁系统，低压断路器的电磁脱扣器等，也可以单独成为一类电器，例如牵引电磁铁、制动电磁铁、起重电磁铁、电磁离合器、电磁工作台等。由于电磁铁产量大、用途广，所以设计出既有良好的工作性能，又有较高的经济指标的电磁铁，具有很大的实际意义。

设计电磁铁就是在规定的技术条件的基础上，确定电磁铁的有关结构参数，其中包括磁系统的几何尺寸、线圈的尺寸、匝数和线径等。或者说，设计出的电磁铁必须满足所规定的技术条件，否则，根据此方案制造出的电磁铁将不能可靠地工作。除此之外，电磁铁设计通常还有其它要求。对于任何产品(包括电磁铁)，除了要求它能够可靠工作外，通常人们还希望寻求其它最好的经济指标，例如要求电磁铁的体积最小、重量最轻或所用的材料费用最低等。然而，由于电磁铁传统设计方法的局限性，使得这种愿望很难实现，或者为了达到这一目的需要耗费巨大的人力和物力。而采用优化设计，则可以很容易实现这一愿望。此外，由于电磁铁优化设计采用许多先进的数学方法，特别是应用电子计算机辅助电器产品的设计，可大大缩短设计周期。可见，电磁铁优化设计的应用前景十分广阔。

§ 1-1 电磁铁设计中几个基本技术条件

一、吸、反力特性配合

电磁铁的主要任务是带动负载作机械功，这就要求电磁铁所产生的电磁吸力能够克服负载反力而达到作功的目的。通常要求电磁铁的静态吸力特性 $F(\delta)$ 高于反力特性 $F_f(\delta)$ ，如图 1-1 所示，此技术要求可表示为

$$F(\delta) > F_f(\delta) \quad (1-1)$$

当然，也可以允许 $F(\delta)$ 在某些区域内低于 $F_f(\delta)$ ，但必须保证电磁铁衔铁(动铁心)具有足够的动能，以克服反力，达到作功的目的。

为了使设计容易实现，通常不是以式(1-1)作为设计的技术条件来要求，而是仅选取吸、反力特性中某一(些)点作为技术条件的判断点。例如，采用设计点 δ_0 (或 δ_a) 作为判断点，即要求

$$F(\delta_a) > F_f(\delta_a) \quad \text{或} \quad F(\delta_0) > F_f(\delta_0) \quad (1-2)$$

对于静态指标下的电磁铁设计(包括优化设计)，电磁铁在 a 点除了应满足

$$F(\delta_a) > F_f(\delta_a)$$

外，对于接触器中的电磁铁，由于 b 点的反力较大，故

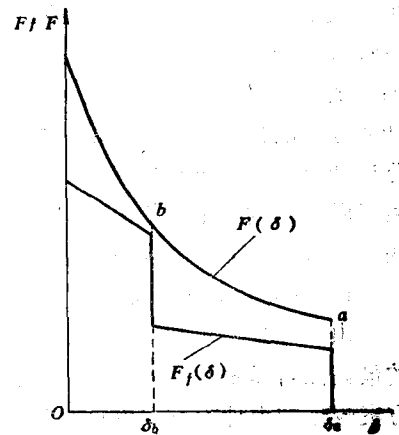


图1-1 电磁铁静态吸、反力特性

还需保证

$$F(\delta_s) > F_f(\delta_s)$$

而对于交流电磁铁, 还应保证铁心闭合时电磁铁所产生的最小吸力应大于对应的系统反力。一般情况下, 在设计电磁铁时, 应根据一定结构型式的电磁铁吸、反力特性的特点, 选择适当的吸、反力特性配合的判断点。

需要指出的是, 电磁铁的激磁线圈不仅在额定电压或电流下能够可靠工作, 而且在规定的电压或电流的波动范围内也能可靠工作。我国标准规定, 电压波动允许范围为 $0.85 \sim 1.05 U_N$ 。为了提高设计的可靠性, 通常在判断吸、反力特性配合是否满足设计要求时, 对于电压线圈的电磁铁, 应在线圈电压为 $0.85 U_N$ 、线圈处于发热状态下进行判断。

二、线圈允许发热温升

电磁铁带电工作时, 线圈将消耗一定电能而发热, 如果线圈的温升超过其最高允许温升, 则其绝缘性能将会降低, 严重时会造成匝间击穿、短路, 以至于电磁铁损坏。因此, 设计电磁铁时, 要求其最高温升 τ 不大于最高允许发热温升 τ_0 , 即

$$\tau \leq \tau_0 \quad (1-3)$$

线圈的最高允许发热温升与所选线圈的绝缘等级有关。例如, 选择 A 级绝缘时, 它的最高允许温度为 105°C , 将此温度减去周围介质温度, 即为线圈最高允许温升, 而标准规定的平均介质温度为 20°C , 因此, A 级绝缘的线圈最高允许温升为 85°C 。

为了使电磁铁在最恶劣条件下仍能正常工作, 通常是在 $1.05 U_N$ 电压下考核线圈的发热温升。

三、磁路中最高允许磁密

有时, 为了防止磁路不至于过饱和, 设计时将磁感应强度或磁通密度(简称磁密)限制在一定的范围内, 即规定磁路最高磁密 B 不大于最高允许磁密 B_0 。

$$B \leq B_0 \quad (1-4)$$

需要指出的是, 在电磁铁优化设计中, 式(1-4)不如式(1-1)、式(1-2)和式(1-3)具有较强的实际物理意义, 所以说, 以式(1-4)作为设计的技术条件来要求并不是十分严格的。

当磁路趋于饱和时, 磁路中铁磁阻增加, 从而使得激磁磁势增大, 用铜量增加。然而, 由于电磁铁优化设计往往寻求某一(些)最好的经济指标(例如材料费用最小), 因此, 在优化设计过程中, 优化方法本身最终将会自动找出最优(材料费用较小)的设计方案。当用铜量增加到足以使材料费用增大时, 优化方法会迫使其减小, 即约束磁路中磁密的增大。若优化设计所寻求的目标是电磁铁的外型尺寸最小, 则用铜量的增加不一定会使外型尺寸变大, 故优化设计可能得出这样的设计方案: 外型尺寸较小, 而磁路的磁密较高, 用铜量较大。这是由于所寻求的是电磁铁外型尺寸最小, 而不是用铜量最小, 因此, 理论上可以不考虑磁路中的磁密约束。然而, 在实际的电磁铁优化设计中, 通常考虑该约束, 其原因主要有以下两条:

1. 计算及寻优的需要

由定性分析可知, 任何最佳的电磁铁设计方案, 无论所寻求的是哪些经济指标, 其磁路的最高磁密 B 是有限的, 通常不会很高。但是, 在优化设计过程中, 可能会出现偏离最佳设计方案较远的设计方案, 例如得出一个磁密非常大的设计方案, 这有可能导致非线性磁路计算需要花费相当长的时间才能满足收敛条件, 有时甚至使计算不收敛, 优化设计无法继续进行下去。因此, 为了使寻优过程能够连续进行, 缩短寻优时间, 优化设计时通常规定磁路中磁密不

大于某一最高允许磁密。

2. 防止由于电磁铁剩磁过大而使衔铁(动铁心)无法释放

当磁路过饱和时,可能导致铁磁材料的剩磁过大,以至衔铁(动铁心)无法释放,电磁铁不能正常工作。因此,应该限制磁路的饱和程度,即在设计中依靠经验选取最高允许磁密 B_m 。

这里所讨论的磁路中最高磁密,通常是在衔铁(动铁心)闭合位置上出现,而衔铁(动铁心)能否释放则应该视其释放位置剩磁的大小。因此,磁路中最高磁密的大小与衔铁(动铁心)能否可靠释放不一定存在必然的因果关系。判断其能否可靠释放最好应以释放位置剩磁所产生的吸力为依据。这就需要进行电磁铁的动态特性计算,其中涉及导磁体涡流、磁滞等因素。目前,有关剩磁计算尚无理想的方法。

以上介绍了电磁铁优化设计最常用的几个技术条件,或称之为约束条件。在一个电磁铁优化设计中,可能还会出现其它约束条件,例如电磁铁的工作制、动作时间等。

§ 1-2 电磁铁优化设计过程

为了从总体上了解电磁铁优化设计,首先将优化设计过程与电磁铁的传统设计过程进行比较,以增进对电磁铁优化设计的认识。

一、电磁铁传统设计过程

确定了电磁铁设计任务后,其传统设计步骤如下:

1. 根据负载反力特性选择电磁铁的结构型式

电磁铁的结构型式很多,例如有拍合式、直动式和螺管式,它们又分直流电磁铁和交流电磁铁。

设计一个电磁铁,首先要选择合适的结构型式,这是保证电磁铁设计质量很重要的一步。一般情况下,除了通过电磁铁吸、反力特性配合和结构参数来选择电磁铁的结构型式外,在电磁铁有关零部件的具体选择上,往往依靠设计者的实践经验来确定。

2. 初步设计以确定电磁铁的结构参数

电磁铁的结构型式确定之后,即可进行电磁铁的初步设计,确定其有关的结构参数。所谓结构参数是指电磁铁工作气隙磁通密度、线圈和铁心等一些几何尺寸的比值参数。一旦这些参数确定后,电磁铁的几何尺寸以及线圈参数也就随之而定了。因此,这是电磁铁传统设计方法中很重要的一步。其中主要内容是根据吸、反力特性的配合要求,推出吸力与铁心半径的关系(其中吸力为设计点的吸力),由此可确定铁心半径。再利用磁势平衡方程式推出激磁磁势,然后由线圈发热方程式确定线圈参数。最后通过选择某些比值参数,初步确定电磁铁的结构参数。

由此可以看出,电磁铁传统设计方法是从某些技术条件(如吸、反力特性配合和线圈允许发热温升等)出发,通过将实际电磁铁复杂的物理模型加以理想化,推导出一些近似计算公式,并利用这些公式得出电磁铁的结构参数。正是由于这些简化处理,使得设计的精度较低,一般还必须进行验算和修正。

3. 验算规定的技术条件是否得到满足

实际上,该步就是在已知电磁铁结构尺寸的情况下,计算电磁铁的有关特性和参数(如静态吸力特性、线圈稳态温升等),以便判断该设计方案是否满足技术条件的要求。如果不满

足, 则还需要修改有关参数; 如果满足, 还要进行电磁铁经济技术指标的评定, 从而得出比较令人满意的设计方案。

4. 修正设计方案

由于电磁铁传统设计方法主要是基于一些简化公式来确定有关结构参数, 而且还有一些较重要的几何尺寸和参数是依据经验选取的, 因此, 其设计精度较差。为了得到一个较理想的设计方案通常需要经过反复多次设计修改才能完成。

二、电磁铁优化设计过程

电磁铁优化设计过程主要由两部分组成:

1. 建立数学模型

所谓建立数学模型就是将设计问题用一定的数学式子表示出来, 这些数学式子可以是解析形式, 也可以是非解析形式。有关数学模型的定义及其内容将在第四章和第五章详细介绍。

事实上, 电磁铁传统设计方法也包含建立数学模型这一过程。例如, 在初步设计中, 确定电磁铁结构参数时, 利用许多简化公式, 这些简化公式在某种意义上描述了原设计问题。以不带极靴的直流拍合式电磁铁为例, 其铁心半径 r_c 是依据下式确定的

$$r_c = \sqrt{\frac{2\mu_0 F_0}{\pi}} / B_\delta \quad (1-5)$$

式中 μ_0 ——真空中的磁导率;

F_0 ——设计点吸力;

B_δ ——工作气隙磁通。

其中

$$F_0 = K_f F_{f_0} \quad (1-6)$$

式中 K_f ——吸力裕度系数 $K_f > 1$;

F_{f_0} ——设计点反力。

由式(1-5)和式(1-6)可得

$$F_0 = \frac{B_\delta^2 \pi r_c^2}{2\mu_0} = K_f F_{f_0} > F_{f_0} \quad (1-7)$$

这恰好是电磁铁设计技术条件所要求的。因此, 式(1-5)和式(1-6)在电磁铁传统设计中, 可以看成是其数学模型的一部分, 并在某种程度上描述了原设计问题。

电磁铁优化设计的数学模型要比传统设计的数学模型复杂得多, 其中最显著的差异在于描述电磁铁物理现象时, 可以尽可能充分地考虑各种因素的影响。例如, 对于设计点吸、反力配合的考核, 其吸力 F_0 不是简单地通过选取某一工作气隙磁密 B_δ , 并根据式(1-7)求得, 而是经过较复杂的磁路计算求得, 其中考虑了铁磁材料中磁阻的非线性、漏磁以及磁势分布参数等因素的影响。因此, 尽管电磁铁优化设计与传统设计均需要建立数学模型, 但其实质内容将有很大差别。

为了便于理解, 下面给出一个简单的电磁铁优化设计数学模型。原设计问题要求设计一个体积最小的电磁铁, 并要求在设计点处, 电磁铁的静态吸力 F_0 大于反力 F_{f_0} , 线圈稳态温升 τ 不大于最高允许温升 τ_w 。该优化设计的数学模型可以表示成

$$\begin{aligned} \min V \\ \text{s.t. } F_0 > K_f F_{f_0} \\ \tau \leq \tau_w \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中 V ——电磁铁体积;

K_f ——吸力裕度系数。

其中 $\min V$ 表示寻求体积 V 的最小值,这正是优化设计的目标。 $s.t.$ 表示所设计的电磁铁应满足的技术条件。由此不难看出,式(1-8)的数学模型是利用数学语言来描述原设计问题的。其优化设计正是在这一数学模型的基础上,通过采用一定的数学方法求解这一数学模型,最后得出电磁铁体积 V 最小的设计方案。

2. 求解数学模型

在优化设计中,数学模型是利用所谓最优化方法(简称优化方法)求解的。有关优化方法将在第四章详细介绍。

利用最优化方法求解数学模型,实质上是按照某一规则确定电磁铁的几何尺寸以及线圈的有关参数,再利用数值计算方法分别计算出数学模型中各项函数式的数值,并将它们进行比较判断,再按照一定的规则确定另一设计方案,再进行上述计算和比较,直到找出最佳设计方案为止。

以式(1-8)的数学模型为例,其优化设计的寻优过程是这样的:首先确定一组电磁铁几何尺寸及线圈有关参数(或称为一个初始设计方案),然后分别计算出电磁吸力 F_0 、反力 F_{f0} 和线圈稳态温升 τ ,并判断它们是否满足所列技术条件要求。若满足,则称这一设计方案为可行方案;否则为不可行方案。再依据一定规则选取另一新的设计方案,重新进行上述计算和判断。在得到一个可行方案后,需要计算电磁铁体积 V 的数值,若得知 V 已经达到或接近最小值,则寻优过程结束;否则,重新开始新的寻优过程。

综上所述,在电磁铁优化设计过程中,大量的工作在于电磁铁有关特性的计算,例如电磁吸力特性的计算、线圈稳态温升的计算等。由于电磁铁优化设计的数学模型所考虑的因素较多,上述计算较复杂,即使采用了电子计算机也需要较长的计算时间。所以,对于电磁铁有关特性的计算,是电磁铁优化设计中较重要而又较难处理的任務,这也是我们今后所要研究的重要问题之一。可以说,电磁铁有关特性计算的难易程度及精度高低,将直接关系到电磁铁优化设计的成败。为此,我们将首先在第二章和第三章着重介绍直、交流电磁铁有关特性的数值计算方法。

从上述的电磁铁的传统设计与优化设计的过程可以发现,二者存在一定的相同之处,例如,都需要建立数学模型,都需要计算电磁铁的有关特性,以便判断出设计是否合理。然而从本质上讲,无论在数学模型的质量还是在求解数学模型的手段和方法上,后者较前者都有一个质的飞跃。

在电磁铁传统设计中,只有将许多复杂的特性计算简化处理,才能推得有关结构参数的计算公式,这也影响了设计精度的提高。电磁铁优化设计采用电子计算机进行各种复杂的特性计算和分析,并且运用了许多先进的数学方法,从而可以比较准确地计算电磁铁各有关特性,以获得较理想的数学模型。由于采用了优化方法设计,可以保证电磁铁的设计方案在某些技术条件的基础上,达到最优或较优的经济技术指标,这也是优化设计与传统设计本质上的差别之一。

§ 1-3 电磁铁优化设计发展概况

一、电磁铁优化设计发展概况

长期以来,人们一直在寻求电磁铁的最佳设计方案,希望制造出更加质优价廉的电磁铁。

在电磁铁传统的设计方法中,人们尽可能地利用各种数学和实验方法来寻找电磁铁各尺寸之间最合理的比例。但是,由于有关理论及数学方法和计算手段的限制,这些最优的比例关系只能是局部的,而且多以定性分析为主。

电磁铁优化设计真正得以在工程中应用,是从电子计算机问世以来逐步发展起来的。事实上,电子计算机是工程实际中进行电磁铁优化设计的重要工具。正是由于计算机具有高速运算和逻辑判断能力以及具有大量数据信息的存储能力,使得工程设计人员可以从多方面计算分析电磁铁各种特性,并作到定量且精确地计算这些特性,这也就为电磁铁优化设计打下了坚实的基础。

电磁理论及数学方法的不断完善又推动了电磁铁优化设计的发展,特别是最优化方法的应用,使得在满足一定设计要求的条件下,寻求某一(些)最佳经济技术指标成为可能。

国外是在60年代中期开始进行电磁铁优化设计方面的研究的,当时主要讨论单变量优化设计问题,计算机的应用多属于辅助计算。其后,逐渐开始利用数学规划讨论多变量的全局优化问题。其中苏联、联邦德国、法国、日本等国不仅在电磁铁优化设计方面开展了工作,而且已经开始将优化设计大量运用到电器产品的设计中。例如,日本东芝电器公司新ESPAR系列磁力起动机13个规格(10~600A)的电磁系统全部采用优化设计。

70年代末,我国开始了有关电磁铁优化设计方面的研究工作,主要集中于有关的大专院校和科研院所。近年来,电磁铁优化设计逐步应用于工程设计中,并已取得了较好的经济效益和社会效益。

二、电磁铁优化设计的发展趋势

随着最优化方法、计算机技术以及电磁理论的不断发展和完善,电磁铁优化设计将更广泛地得以普及,特别是在实用性方面将会以更高的速度向前发展。目前,电磁铁优化设计的发展趋势有:

1. 特性分析计算方法的改进

在计算机普及应用前,人们多采用较简单的方法进行电磁铁各种特性的计算,其中多以电磁铁的静态特性作为设计与计算的主要依据,而且这些计算大多以“路”的方式实现。随着计算机的普及应用,特别是许多高速大容量计算机的应用,使得电磁铁有关特性的分析计算可以采用许多先进的计算方法。例如,采用有限元方法计算电磁铁的二维或三维场,从而直接从“场”的观点出发,较准确地分析计算电磁铁的有关特性;以电磁铁的动态特性取代其静态特性作为电磁铁设计与计算的主要依据,从而使电磁铁的设计与计算更加接近其实际工作状态,设计与计算的精度更高。

2. 优化方法的改进

迄今为止,还没有哪一种优化方法能够适用于任何型式电磁铁的优化设计。目前电磁铁优化设计主要是根据实际设计电磁铁的结构型式特点及其数学模型,选择相应的优化方法。如果优化方法选择不适当,则有可能导致所得优化设计结果偏离最优方案甚远。特别是对电磁

铁优化设计全局最优解的寻求,目前尚无理想的优化方法。

因此,采用适用性强、收敛性能好、可找到全局最优解的优化方法也是今后电磁铁优化设计所要研究的一项课题。由于采用了具有高速运算能力的计算机,人们越来越多地采用罚函数法进行电磁铁的优化设计。

3. 整机优化设计

电磁铁大多是作为各种电磁式继电器、接触器等自动电器的电磁系统,以完成带动触头接通和分断线路的任务。对于此类电磁铁的设计,仅进行电磁铁的优化设计还不够,应该扩展到对整个继电器、接触器进行优化设计,即所谓的整机优化设计。这样,优化设计所包含的内容更加广泛,不仅涉及电磁系统(电磁铁)、触头系统和灭弧系统等,还将涉及到各系统之间的最佳配合关系,这就使得整机优化设计比电磁铁优化设计更复杂,当然,它所带来的效益也更大。

电磁式继电器、接触器中的电磁系统、触头系统和灭弧系统作为电器的重要部件,分别执行不同的功能,它们的设计相互之间有一定的联系。例如,电磁系统的设计需要考虑系统反力,而系统反力又与触头系统密切相关,触头系统和电磁系统的设计在某种意义上还与灭弧系统有关。因此,要想设计出性能良好的继电器、接触器,应从电器的整体(整机)出发,进行优化设计,而不仅仅考虑电磁系统(电磁铁)的优化设计。

介绍电磁铁的优化设计并不是本课程的最终目的,我们的目的是想通过学习电磁铁优化设计的原理和方法,掌握使用计算机的技术,并运用优化设计方法进行电器和其它有关产品及其零部件的设计,最终实现整机的优化设计。当然,目前这方面的有关理论和设计方法还不很完善,特别是触头系统和灭弧系统还有许多理论与计算方法有待于进一步研究。但是,电器产品整机的优化设计将是今后电器设计的发展方向。

4. 设计结果输出方式的发展

电磁铁设计的最终目的是制造出高质量的电磁铁。为了便于制造,近年来电磁铁的设计不局限于采用优化方法以找出最优或较优的设计方案,而且还逐步扩展到利用计算机及有关的外围设备(如数字化仪、绘图机等),将设计方案直接以相应的加工图纸的形式输出。我们将电磁铁优化设计和计算机绘图作为一个设计过程,并称之为电磁铁计算机辅助设计(简称电磁铁CAD)。有时,还可以利用某些设计结果,通过编程,直接控制数控机床或其它智能加工设备来加工有关零部件,这种利用计算机进行设计与制造的过程被称之为计算机辅助制造(简称CAM)。

从更广义上讲,电器产品(包括电磁铁)的计算机辅助设计(CAD)要比优化设计内容更广泛,且工程实用性更强。我们知道,采用优化设计必须建立合适的数学模型,然而,迄今为止,能够十分准确地描述电磁铁,特别是电器产品整机的数学模型还很难建立。因此,要想完全通过优化设计来确定最终的设计方案并非易事。事实上,在实际设计过程中还有许多工作需要设计人员的参与,例如产品的选型、有关工艺的确定等。

通过计算机辅助设计,可以充分发挥设计人员的丰富知识和经验,进行数学模型的建立、评价、修改以及最终方案的确认等工作。而利用计算机的高速运算、逻辑判断能力和大量数据信息的储存能力,进行数学模型的求解以及各种图纸和有关技术文件的绘制等工作,而且使二者之间可以相互补充,并有机地结合在一起,从而形成一种由工程设计人员与计算机紧密配合、各尽所长、采用交互式工作方式的设计方法——计算机辅助设计。这种设计方法允

许设计人员直接在计算机上修改包括图纸在内的有关技术数据，而且操作十分方便。这种设计方法的优越性日趋明显，它代表了电器产品设计方法的发展趋势。

为了使读者能够了解电器产品的计算机辅助设计方面的内容，将在第六章较详细地介绍有关计算机辅助设计方面的知识，从而为读者开展这方面的工作打下一定的基础。

§ 1-4 学习本教材的预备知识及有关说明

一、预备知识

本教材除了要求读者掌握电器学有关基本理论知识外，还要求读者掌握一定的低压电器（特别是电磁铁）的设计理论和方法。

电磁铁优化设计离不开计算机，因此，为了更好地掌握有关知识，读者还应掌握一定的计算机算法语言。本书以 BASIC 语言为主。

二、几点说明

(1) 为了使读者能够加深理解电磁铁优化设计方法，本教材在每节中，对于每一种方法都给出了相应的计算框图和程序，而且大多数章都给出了计算实例。在使用这些程序时应注意以下几点：

1) 本教材大多数程序是用 IBM PC 微机的 BASIC 语言编写的，有关其语法规则请参阅有关资料；

2) 任何一种算法的计算程序都不是唯一的，因此，读者可以利用教材中给出的框图，自己编写有关程序，本教材所列程序仅供参考；

3) 为了节省篇幅，程序中较常用的变量及其意义分别列于书后附录一，故在有关程序中不再解释；

4) 附录二给出了各子程序名称、功能及所在的章节，供读者在阅读程序过程中需要涉及到其它子程序时参考。

(2) 本教材有关章节中所给出的电磁铁有关特性计算程序可以单独使用，以满足有关特性计算而无需进行优化设计时使用。

思 考 题

1-1 在考核电磁铁静态吸力特性时，为什么要在电源电压下限、线圈处于热态下进行？考核线圈温升时，为何又要在电源电压上限条件下进行？

1-2 电磁铁的传统设计与优化设计有何异同？二者之间的最大差异是什么？

第二章 直流电磁铁特性的计算机辅助计算

直流电磁铁特性包括静态特性和动态特性。直流电磁铁的静态特性是指直流电磁铁激磁电流保持在稳定状态下的电磁特性及其它有关特性,例如静态吸力特性、线圈稳态温升等。这些静态特性是考核直流电磁铁性能的常用指标。直流电磁铁的动态特性主要是指其随时间变化的电磁特性,例如衔铁(或动铁心)的位移和运动速度、电磁铁的动态吸力以及激磁线圈动态电流等。显然,直流电磁铁的动态特性就是其实际工作特性,因此,它越来越受到人们的关注。上述两种特性的计算,在某些方面具有相同之处,例如铁磁材料磁化曲线的计算机处理方法、气隙磁导的计算以及磁路计算等,二者之间的差别在于其激磁电流。前者的激磁电流恒定不变,而后者则随时间变化。因此,直流电磁铁动态特性的计算要比静态特性计算复杂。直流电磁铁动态特性计算又称为直流电磁铁的计算机仿真。

本章首先介绍直流电磁铁动、静态特性计算所共同涉及的内容:磁化曲线的计算机处理方法、气隙磁导计算以及磁路计算等,然后给出二者的计算方法。

§ 2-1 铁磁材料磁化曲线和铁耗曲线的 计算机处理方法

在磁路计算过程中,为了确定铁磁材料的磁阻 R_m ,常常需要根据已知的磁感应强度 B ,通过查询该材料的磁化曲线而得出对应的磁场强度 H 。在交流磁路计算过程中还需查材料的铁耗曲线,得出对应的铁耗 P_F 。二者的计算机处理方法完全一致,本节仅介绍磁化曲线的处理方法。

通常铁磁材料的磁化曲线是以连续和离散两种形式给出的,而磁化曲线的计算机处理要求磁化曲线以离散形式表示。常用的磁化曲线处理方法有两种:插值法和函数逼近法。

一、插值法

所谓插值法就是预先将铁磁材料的磁化曲线以离散点形式输入到计算机之中,当需要确定某一 B 值所对应的 H 值时,就利用这些离散点构成一定的插值函数,并利用该插值函数计算出所求的 H 值。插值法是最常用的磁化曲线计算机处理方法。

按插值函数分类,插值法又可分为线性插值法和非线性插值法。

(一) 线性插值法

设有离散点形式的磁化曲线如下

$$\begin{aligned} B_1 < B_2 < B_3 < \cdots < B_k < B_{k+1} < \cdots < B_n \\ H_1 < H_2 < H_3 < \cdots < H_k < H_{k+1} < \cdots < H_n \end{aligned} \quad (2-1)$$

其中离散点 (B_k, H_k) $k = 1, 2, 3, \dots, n$ 称为磁化曲线的节点值。线性插值法就是利用这些节点值构造一定的线性插值函数,从而确定给定 B 值下的 H 值。

设给定的磁感应强度 B 满足下列关系

$$B_k < B < B_{k+1}$$

其中 $1 \leq k \leq n-1$ 。此时，利用节点 (B_k, H_k) 和 (B_{k+1}, H_{k+1}) 构成线性插值函数

$$H = H_k + \frac{H_{k+1} - H_k}{B_{k+1} - B_k} (B - B_k) \quad (2-2)$$

利用式 (2-2) 即可以计算出给定 B 值下的 H 值。

线性插值法的几何意义如图 2-1 所示。所谓线性插值法就是过磁化曲线 $H = f(B)$ 的节点 (B_k, H_k) 和 (B_{k+1}, H_{k+1}) 作直线 $H = H_k + \frac{H_{k+1} - H_k}{B_{k+1} - B_k} (B - B_k)$ ，在区间 $[B_k, B_{k+1}]$

内，以该线性函数来代替磁化曲线。其中 ΔH 就是利用线性插值法计算 H 时的误差。显然，如果磁化曲线的节点足够多，则可以使得 ΔH 足够小，从而满足工程计算的需要。

线性插值函数式 (2-2) 形式简单，使用方便，是磁路计算中常采用的磁化曲线处理方法。值得注意的是，在实际计算时还需将磁化曲线作延长处理。众所周知，磁路计算多为试探迭代法，因此，在磁路计算过程中，铁磁体中的 B 值变化范围可能很大，有时会超出给定的磁化曲线节点范围。为了使计算过程能够继续进行下去，应将磁化曲线延长。事实上，设计合理的电磁铁一般不会出现 B 值过低或过高现象，所以，磁化曲线的延长处理仅仅是使计算连续进行下去的需要。

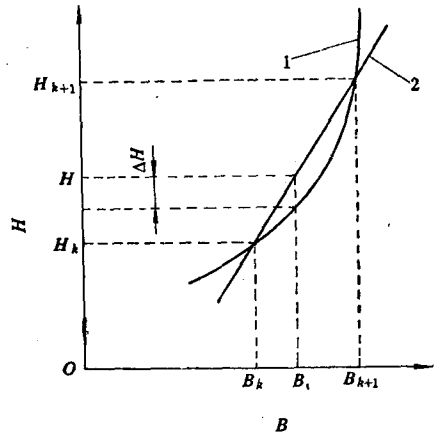


图2-1 线性插值法的几何意义

1—函数 $H = f(B)$

2—函数 $H = H_k + \frac{H_{k+1} - H_k}{B_{k+1} - B_k} (B - B_k)$

1. B 值过低

若给定 B 值过低，即 $B \leq B_1$ ，则直接利用节点 (B_1, H_1) 和 (B_2, H_2) 构成线性插值函数

$$H = H_1 + \frac{H_2 - H_1}{B_2 - B_1} (B - B_1) \quad (2-3)$$

2. B 值过高

若 $B \geq B_n$ ，则利用节点 (B_{n-1}, H_{n-1}) 和 (B_n, H_n) 构成线性插值函数

$$H = H_{n-1} + \frac{H_n - H_{n-1}}{B_n - B_{n-1}} (B - B_{n-1}) \quad (2-4)$$

在磁路计算过程中需要反复查询磁化曲线，因此，将上述磁化曲线的计算机处理方法编制成一个子程序，以供其它程序调用。线性插值法程序框图如图 2-2 所示。

线性插值法程序表

```

11700 REM SUBP 27
11710 IF BX <= B0(1) THEN 11770
11720 IF BX >= B0(N%) THEN 11790
11730 I% = 2
11740 IF BX <= B0(I%) THEN 11810

```

```

11750 I% = I% + 1
11760 GOTO 11740
11770 K = 1
11780 GOTO 11820
11790 K = N% - 1
11800 GOTO 11820
11810 K = I% - 1
11820 BB = (BX - B0(K)) / (B0(K + 1)
        - B0(K))
11830 HX = H0(K) + BB * (H0(K + 1)
        - H0(K))
11850 RETURN

```

程序说明

1. 主要变量

B0——数组变量，存放磁化曲线节点的磁感应强度

H0——数组变量，存放磁化曲线节点的磁场强度

N%——整型变量，磁化曲线节点数

BX——给定的磁感应强度

HX——待求的磁场强度

2. 有关语句说明

对于交流磁路计算，除了需要由给定的 BX 查询 HX 外，还要求确定铁磁材料的铁耗功率 PX，此时，仍可用子程序 SUBP 6，只不过需要加入下列语句

```
11840 PX = P0(K) + BB * (P0(K + 1) - P0(K))
```

其中 P0 为数组变量，存放节点处的铁损功率。

(二) 非线性插值法

线性插值法具有方法简单、容易实现的特点。但是，如果要求的计算精度较高，则所需的磁化曲线节点较多，从而需要占用很多的计算机内存。另外，计算机查询磁化曲线的速度也降低了。因此，在要求计算精度较高的情况下，常采用更高阶的非线性插值法。这里仅介绍拉格朗日三点插值法。

设有给定的离散形式磁化曲线式 (2-1)，对于给定的磁密 B 具有下列关系

$$B_k \leq B \leq B_{k+1} < B_{k+2} \quad 1 \leq k \leq n-2$$

则由节点 (B_k, H_k) 、 (B_{k+1}, H_{k+1}) 和 (B_{k+2}, H_{k+2}) 构成一二次插值函数

$$\begin{aligned}
 H = & \frac{(B - B_{k+1})(B - B_{k+2})}{(B_k - B_{k+1})(B_k - B_{k+2})} H_k + \frac{(B - B_k)(B - B_{k+2})}{(B_{k+1} - B_k)(B_{k+1} - B_{k+2})} H_{k+1} \\
 & + \frac{(B - B_k)(B - B_{k+1})}{(B_{k+2} - B_k)(B_{k+2} - B_{k+1})} H_{k+2}
 \end{aligned} \tag{2-5}$$

其缩写形式如下

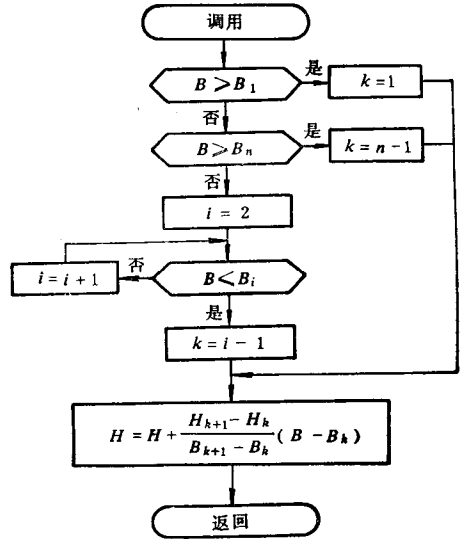


图2-2 线性插值法子程序框图

$$H = \sum_{j=k}^{k+2} \left[\prod_{\substack{i=k \\ i \neq j}}^{k+2} \left(\frac{B - B_j}{B_j - B_i} \right) \right] H_j \quad (2-6)$$

函数式 (2-5) 和式 (2-6) 即称为拉格朗日三点插值函数。

事实上, 拉格朗日三点插值法就是在区间 $[B_k, B_{k+2}]$ 上, 用一个二次函数来代替已知的磁化曲线, 因此, 其计算精度要比线性插值法高。拉格朗日三点插值法程序框图如图 2-3 所示。

注意程序框图 2-3 中虚线框内的作用。在实际使用拉格朗日三点插值法时, 通常并不总是按上述方式选择3个插值点 B_k, B_{k+1} 和 B_{k+2} , 而是根据 B 接近 B_{k+1} 的程度来确定插值点, 即当 $B_{k+1} - B \leq B - B_k$ 时, 取 B_k, B_{k+1} 和 B_{k+2} 作为插值点; 否则, 取 B_{k-1}, B_k 和 B_{k+1} 作为插值点。由此处理可以提高插值精度。

拉格朗日三点插值法程序表

```

11870 REM SUBP 28
11880 IF BX <= B0(2) THEN
11940
11890 IF BX >= B0(N%) THEN
11960
11900 I% = 3
11910 IF BX <= B0(I%) THEN
11980
11920 I% = I% + 1
11930 GOTO 11910
11940 K = 1
11950 GOTO 12020
11960 K = N% - 2
11970 GOTO 12020
11980 IF B0(I%) - BX <= BX -
B0(I% - 1) THEN 12010
11990 K = I% - 1
12000 GOTO 12020
12010 K = I% - 2
12020 HX = 0
12040 FOR J% = K TO K + 2
12050 WH = 1
12060 FOR I% = K TO K + 2
12070 IF I% = J% THEN 12090
12080 WH = WH * (BX - B0(I%)) / (B0(J%) - B0(I%))
12090 NEXT I%

```

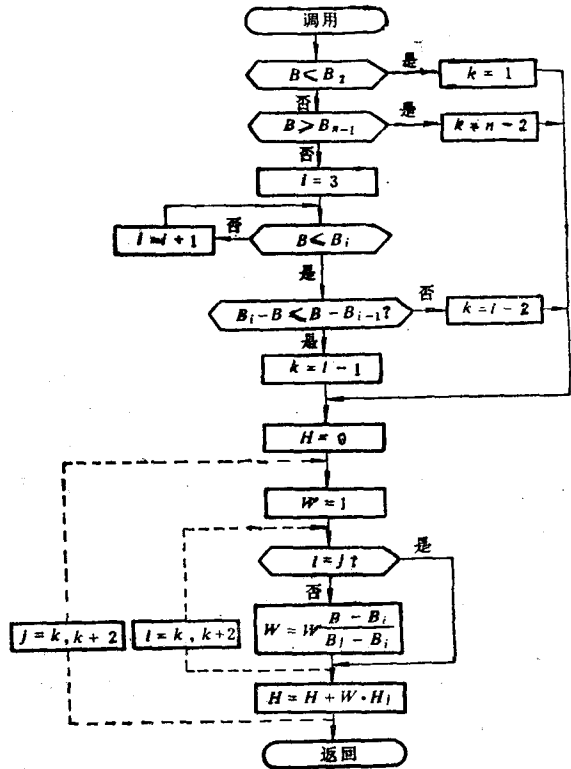


图2-3 拉格朗日三点插值法子程序框图

12100 $HX = HX + WH * H0(J\%)$

12120 NEXT J%

12130 RETURN

当需要查询铁损功率时，还需输入下列语句

12030 $PX = 0$

12110 $PX = PX + WH * P0(J\%)$

上述磁化曲线查询程序是作为子程序段出现的，在使用过程中还需要有调用它们的程序段。而且，在调用它们之前，必须将磁化曲线的节点数N%、节点值以及待查询的磁密BX输入到计算机之中。下面就是一个调用磁化曲线查询子程序的例子。

例2-1 对于表2-1所示的磁化曲线，分别利用线性插值法和拉格朗日三点插值法计算下列磁密所对应的磁场强度。

$B = 0.01T, 0.2T, 0.44T, 0.68T, 1.5T$

表2-1 磁化曲线节点值

B/T	0.2	0.3	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9
$H/(A \cdot m^{-1})$	38	50	65	74	85	92	98	108	116	125	135	145	156
B/T	0.95	1.0	1.05	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3	1.35	1.4	1.45		
$H/(A \cdot m^{-1})$	168	185	208	244	292	355	405	620	850	1200	1620		

依题意编写下列主程序：

110 REM PROGRAM

120 PRINT "N% = ?"

130 INPUT N%

140 DIM B0(N%), H0(N%)

150 FOR I = 1 TO N%

160 READ B0(I), H0(I)

170 NEXT I

180 DATA 0.2, 38, 0.3, 50, 0.4, 65, 0.45, 74, 0.5, 85, 0.55, 92

190 DATA 0.6, 98, 0.65, 108, 0.7, 116, 0.75, 125, 0.8, 135, 0.85, 145

200 DATA 0.9, 156, 0.95, 168, 1.0, 185, 1.05, 208, 1.1, 244, 1.15, 292

210 DATA 1.2, 355, 1.25, 405, 1.3, 620, 1.35, 850, 1.4, 1200, 1.45, 1620

220 PRINT "KB% = ?"

230 INPUT KB%

240 IF KB% < 0 THEN 300

250 PRINT "BX = ?"

260 INPUT BX

270 IF KB% = 0 THEN GOSUB 11700 ELSE GOSUB 11870

280 LPRINT "KB% = ", KB%, "BX = ", BX, "HX = ", HX

290 GOTO 220

300 END