

仪表电感元件设计

[苏] И. С. 鲁欣 著
A. M. 切巴卢赫

机械工业出版社

仪表电感元件设计

〔苏〕 Ю. С. 鲁 欣 著
A. M. 切巴卢赫

萧 静 茜 译

肖 国 卫

曹 本 富 校



机械工业出版社

0427/06
本书主要论述用于各种仪表和自动化系统中的电感元件的设计。它以仪表制造业中广泛采用的元件为重点。这些元件都是铁磁导体做成的，它们工作在音频和超音频范围内。书中介绍了电感元件的基本参数、特性计算方法及其测量方法，并介绍这些元件的结构和它们的应用范围。

本书可供仪器仪表和自动化专业的工程技术人员阅读，也可供大专院校有关专业师生参考。

**Проектирование индуктивных
элементов приборов**

Ю. С. Русин, А. М. Чепарухин

Издательство «Машиностроение», 1981

仪表电感元件设计

〔苏〕 Ю. С. 鲁欣 著
А. М. 切巴卢赫

萧静茜 肖国卫 译

曹本富 校

责任编辑：秦起佑

封面设计：田淑文

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $6^{1/2}$ · 字数 140 千字

1987 年 12 月北京第一版·1987 年 12 月北京第一次印刷

印数 0,001—2,610 · 定价：1.60 元

统一书号：15033·7031

译 者 的 话

仪表电感元件是仪器仪表、自动控制设备和通信设备中的重要元件。这些设备工作的好坏，在很大程度上取决于仪表电感元件的工作情况及其参数的稳定性和精确度。因而合理地计算和设计仪表电感元件就显得特别重要。

本书内容丰富，系统地阐述了工作于音频和超音频范围的电感元件的设计和计算。从基本物理概念到设计计算都有较详尽的介绍。尤其是关于电感元件基本参数方面的讨论比较深入，对不同形式磁导体电感元件的电感、损耗、品质因数、热状态、温度稳定性等都给出了计算公式和具体实例。对电感元件屏蔽的论述与计算也是本书的特点之一。

本书的第一、二、三章由萧静茜翻译，第四、五、六、七章由肖国卫翻译。全书由曹本富校阅。由于时间仓促，加之水平有限，译文中欠妥和错误之处，希望读者给予批评指正。

前 言

电磁元件在各种不同类型自动化装置和仪表中应用得相当广泛，这些元件按照其功能、结构形式和使用条件可分为各种不同类型。应当指出，就整体来说，所有装置的质量取决于电磁元件工作的好坏及其参数的稳定性与精度。所以大家对电磁系统合理的设计方法和计算方法非常重视。

本书主要论述电磁系统在音频和超音频范围工作的电感元件设计方法和计算原理。

必须指出，本书的观点在工程技术参考资料中得到了一定的反映。其中有少数著作所谈到的电感元件设计方法和计算问题可以适用于不同功能的电感元件。最近几年，出现了B. 屋埃尔斯华、H. H. 邵尔兹、Л. C. 华西利耶娃、П. Л. 卡兰得洛夫、Л. A. 采耶特林、E. Ф. 巴耶夫、Л. A. 费面柯和其他人的著作。由于我们所研究的问题是相当广泛的，而所指出的著作只是阐明问题的一个方面，也就是在著作中研究一种确定类型的电感元件。这样，电感系统的某些类型没有得到应有的系统化的描述。П. Л. 卡兰得洛夫和Л. A. 采耶得林^[34]的有重大价值的著作中论述了电感元件材料的损耗（考虑空气，无磁导体）。E. Ф. 巴耶夫^[4]、H. H. 邵尔兹^[68]、Л. C. 华西利耶娃和其他作者们的著作是针对电子仪器的弱电电感元件设计范围的，这些电子仪器是由铁氧体和磁电介质铁芯构成的。

应当指出，尽管电感元件广泛地被用于仪表制造业和自

动化装置中,但系统地论述其设计的著作还没有。这些电感元件是由铁和坡莫合金的磁导体做成的并工作在音频和超音频范围内(由1 kHz到100kHz)。当然,这些电感元件有它自己设计方法上的特点。A. M. 巴莫巴斯和 IO. C. 萨维诺夫的著作中所研究的工业频率(到1000Hz)的电感元件设计问题不能列入更高的频率域内。

电感元件在所有工作情况下都是分开叙述的,即电磁的,热的,电的形式中不考虑元件的相互影响。事实上,在很多情况下这种影响不仅反映电感元件本身参数值和稳定性,而且反映整个仪表的工作性能和精度。

本书有如下几个目的。

1. 综合和系统化将电感元件的加工和应用的各方面的经验加以综合与系统化,而这些电感元件是以不同方法设计的,它们是铁磁体制成的并工作在音频和超音频范围内。
2. 使读者熟悉所指出装置中的电磁过程和热过程特点。
3. 论述在不同类型的互相影响条件下电感元件的工程计算方法和设计方法的一般原则。

目 录

译者的话

前言

第一章 电感元件的分类	7
1.1 按动力技术参数分类的电感元件	7
1.2 按工作频率范围分类的电感元件	4
1.3 按导磁体结构分类的电感元件	5
1.4 印刷电路的电感元件	7
1.5 转换器	9
第二章 磁性材料	13
2.1 磁性材料的基本参数	13
2.2 金属软磁材料	26
2.3 磁电介质	45
2.4 氧化物磁性材料——铁氧体	53
第三章 电感元件的基本参数	61
3.1 电感	61
3.2 电感元件的损耗	84
3.3 品质因数	101
3.4 绕组电容	105
3.5 热状态	111
3.6 电感元件的温度稳定性	121
3.7 电感元件完整等效电路的分析	123
3.8 电感元件磁导体的选择	128
第四章 电感元件和其它元件的相互耦合	134
4.1 电容耦合	134
4.2 电感耦合	137

4.3 热的相互作用	142
第五章 电感元件的屏蔽	149
5.1 屏蔽原理	149
5.2 电屏蔽	151
5.3 磁屏蔽	154
5.4 网状屏蔽和屏蔽的一般说明	156
第六章 电感元件的参数测量	161
6.1 电感元件电气参数的测量方法	161
6.2 电感元件热参数的测量方法	175
6.3 电感元件稳定性的测量	182
第七章 电感元件的结构	185
7.1 空心元件	185
7.2 铁磁导体元件	185
7.3 铁氧体和磁电介质磁导体元件	190
附录	194
参考文献	197

第一章 电感元件的分类

1.1 按动力技术参数分类的电感元件

由于电感元件在无线电技术和通信技术中广泛的应用，因此不可能指出电感元件各种分类的明确动力参数界限，所以下面叙述的电感元件分类是有一定条件的。

电感元件所标明的范围从 μH 到几十 H ，甚至高于 11 次方。根据电感元件结构，有时可把它看作是一个巨大构件（如果所指的是一个重量约为数吨的电抗器），而有时则可把它看作是一只微型薄膜。

近年来，电感元件微型结构随着计算技术飞速发展而获得了普遍应用。它的特点是容易加工，并使混合集成电路更完善，在此线路中，应用了半导体器件，薄膜电阻器和薄膜电容器，同时还采用弯曲的微型电感元件结构。

如果采用电感元件的额定功率 P 作为它的原始动力技术参数，此功率为

$$P = UI \quad (1.1)$$

式中 U 和 I 分别为电感元件线圈中电压降有效值及电流有效值。对于品质因数不小于 10 的电感元件来讲，写出它的近似恒等式是不难的。这个恒等式就是额定功率 P 和能量 W 的关系式，即

$$P = \omega W = \omega LI^2 \quad (1.2)$$

式中 L 为电感元件的电感， ω 为角频率。

根据 CTCБ1052-78，额定功率用 W 表示，能量用 J

8810264

表示。对于电感元件在各种技术领域中的应用，其参数 P 的约定界限列于表 1.1 中。

表 1.1 电感元件应用范围 (根据额定功率定的)

U (V)	I (A)						
	≤10 ⁻²	10 ⁻² ~10 ⁻¹	10 ⁻¹ ~1	1~10	10~10 ²	10 ² ~10 ³	≥10 ³
10 ⁻⁴ ~10 ⁻³	混合集成电路的微型元件			—	—	—	—
10 ⁻³ ~10 ⁻²				—	—	—	—
10 ⁻² ~10 ⁻¹	滤波器线圈和延迟线		—	—	—	—	—
10 ⁻¹ ~1			—	—	感应线圈		
1~10	平滑滤波器扼流圈及继电器						
10~10 ⁺²							
10 ⁺² ~10 ⁺³	拒收器扼流圈		补偿线圈				
10 ⁺³ ~10 ⁺⁴ >10 ⁴	充电扼流圈						
			—				

按作用于电感元件输出端上的工作电压，可分为低压电感元件 (工作电压不大于 1.5 kV) 和高压电感元件 (工作电压大于 1.5 kV)。这种分类方法决定了电感元件空间绕组圈与圈之间，层与层之间绝缘距离的选择以及为保证额定试验电压 $U'_{c.n}$ ， $U''_{c.n}$ 和 $U'''_{c.n}$ 的耐电强度的可靠性而选择的绕组与壳体之间的绝缘距离。所指出的第一个电压 $U'_{c.n}$ 是检验圈与圈之间耐电强度的试验电压。当频率不小于两倍的工作频率值时，通常选择 $U'_{c.n}$ 为工作电压值的两倍。

绕组之间和绕组与壳体之间的耐电强度用 6.1 节中指出的试验电压 $U'_{c.n}$ 或 $U''_{c.n}$ 检验。

按作用于电感元件上的工作电压值分为两类，其中称为

高电位的电感元件尤其重要。例如，用于电子管阳极电路的这组电感元件的特点是作用于它的绕组上的固定电位值超过 1000 V。因此，对于相对壳体的绝缘耐电强度的加强要特别加以注意。通常采用浇铸型的环氧绝缘混合物，所以这种电感元件称为浇铸型电感元件。

此外，在线路中为防止输出端电压飞弧和局部放电的破坏作用，高压电感元件和高电位电感元件本身的输出端做成相应的绝缘体形式，而且绝缘外表再涂上薄的防腐层。

低压电感元件的绝缘是借助于罩上环氧珐琅的办法实现的。这些问题在文献[6、7]中有详细的叙述。

电感元件绕组导线型号和截面积的选择是根据确保绕组允许的过热和已知电压降的条件来决定的。但有时也根据电感元件电品质因数数值来确定。

在解决具体问题时有两种计算方法：一是在电压降（或已知电品质因数）无要求情况下确定电感元件绕组的过热（与第 3.5 节所指出的方法一致），或者计算之后，满足电感元件绕组上已知电压降的条件（或已知电品质因数），随之对绕组过热量必须进行检验。如果过热量计算值大于由环境温度和所利用绝缘材料耐热等级所确定的过热量允许值时，则绕组中电流密度或电感元件铁芯中的电感量应当减小，而且所有的计算（包括绕组过热量）应重复进行。

从上述可看出，电感元件绕组中的电流不是一个定值，而是由基本参数（绕组的过热，绕组上的电压降，品质因数）确定的。然而，在保持原有专业名词同时，可把所有电感元件分为弱电流的和强电流的两种。

标准状态下，绕组中的电流负荷不超过 $100\mu\text{A}$ 的属于第一种；电流超过 $100\mu\text{A}$ 的属于第二种。这样分法是有条

件的，由于它的动力技术特性，此种分法只能确定电感元件的功用。

如果弱电流的电感元件通常是用作选频系统的元件，如高频和高品质因数电感线圈（振荡回路，滤波器，延迟线等）中的元件，那么强电流电感元件多半起充电线圈与限制扼流圈的作用，起感应器线圈，整流装置中平滑滤波器扼流圈以及匹配线圈与天线电感线圈的作用。

1.2 按工作频率范围分类的电感元件

现在所采用的各种不同特性和用途的电感元件的工作频率域是从直流到几百 MHz。

按应用目的来分类，在局部区间内电感元件可有如下几种。

1. 直流电路中的电感元件。这里包括各种不同结构的电磁铁，继电器起动器和磁化装置。

2. 工作在工业频率中的低频电感元件。这种元件中主要的是平滑滤波器扼流圈、阴极扼流圈和可控扼流圈。

3. 工作在音频和超音频范围内的电感元件。如大多数谐振回路、滤波线圈和延迟线性线圈都属于这一类。此外，强电流电感元件包括带有振荡器的复数负载匹配线圈以及感应器线圈等。

4. 工作频率大于 1MHz 的高频电感元件。这个频率区域的特点是感应元件（原则上）不能作为具有集中参数的元件。

电感元件工作过程中的电容现象（此现象与绕组中的分布电容有关）开始起主要作用。对这一过程的分析到目前为止还没有得到满意的解决，因为它与解决复杂的电动力学问

题有关。

此外, 对于铁氧体的和导磁电介质的导磁体电感元件来讲, 可能产生体谐振现象 (见 3.2 和 3.7 节), 此现象导致了附加的损耗并使元件参数变坏。

1.3 按导磁体结构分类的电感元件

根据技术要求和工件条件, 电感元件可设计成无导磁体的 (空心电感元件) 和有导磁体的两种。

导磁体的形式确定了电感元件的结构。现在可把导磁体分为三种结构形式: 环形的, 壳形和芯形的。对应于导磁体的这些结构特点, 可把它加工成电感元件的结构形式。在绝大多数的实际问题中, 制做线性电感元件, 其要求都是一样的 (不变的), 即元件参数与流经绕组中的电流值是无关系的。所设计的电感元件磁路的组成及其特性又增加了这样一项技术要求。如 2.1 节所指出的, 采取铁磁体作为电感元件的铁芯, 它与磁通 Φ 和磁场强度 H 的关系是非线性的。所以电感元件伏安特性线性化时磁路中经常有非磁性 (空气的) 间隙, 通常它的磁阻比铁磁性铁芯的磁阻大。为避免术语混乱, 以后我们把有铁磁性铁芯的和空气隙的 (沿着磁通 Φ 方向分布的) 磁路理解为磁导体。

对于脆磁性材料 (铁氧体, 碳化铁和其他磁电介质) 用超声刀, 对于金属的铁磁材料则用机械锯对铁芯进行径向切割 (所要求的宽度为 δ), 来获得环形铁芯结构中的非磁性间隙。

软磁材料铁芯的壳式结构现在有两种: III 型和 B 型或 CB 型 (见 7.2 和 7.3 节)。第一种情况下电介质薄膜 (必要的厚度为 δ) 置于两半铁芯的之间, 以形成集中的非磁性间隙。工业上所用的 B 型铁芯材料为 Ni-Zn 和 Mn-Zn 铁氧

体, 非磁性间隙 δ 靠研磨铁芯的中心来形成 (见图 3.9 和图 7.2, 6)。

用碳基铁材料做成的 CB 型铁芯在组合状态时可能是一个开环磁路, 也可能是一个闭环磁路 (见图 7.3)。当工作频率小于 25MHz 时, 其额定电感量由 $0.15\mu\text{H}$ 到 30mH , КИСБ 型系列线圈按 ГОСТ 16970-71 进行制作。

芯形铁芯结构同样可以有闭环磁路和开环磁路 (从磁极处断开)。一般情况下, 与闭环磁路的芯形导磁体相比, 开环磁路的芯形导磁体具有较大的伏安特性线性度、时间的稳定性和温度的稳定性。由于这种系统磁导率低, 磁性材料的效率低, 其结果导致带有开环磁路芯形铁芯电感元件的电品质因数低。由软磁材料构成的较好的芯形铁芯结构将在 7.2 和 7.3 节中叙述。

根据磁路的欧姆定律, 并考虑间隙内“凸出”的磁通效应, 上述任意一种导磁体结构的电感

$$L = \frac{\mu \mu_0 w^2}{l_c / s_c + \delta_{\dots} / s_a} \quad (1.3)$$

式中 μ ——铁芯材料的相对磁导率;

μ_0 ——真空的磁导率, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$;

w ——绕组匝数;

s_c 和 s_a ——铁芯有效截面积和非磁性间隙的有效截面积;

l_c ——铁芯磁力线平均长度;

$\delta_{\dots}$ ——空气隙的等效长度^[48]。

$$\delta_{\dots} = \frac{\delta'}{1 + h\delta'/60a^2(h/\delta' + 41) + (3\delta'/a)\lg 4h/\delta'} \quad (1.4)$$

式中 h 是磁导体窗口的高; $a = 0.5(b + d)$ 是铁芯截面

边的平均算术值(见图 3.2)。电感元件详细计算方法和顺序在第三章中研究。

1.4 印刷电路的电感元件

近期在半导体工艺和薄膜工艺方面所取得的成就,使无线电装置和仪表向小型化方面发展。自然,技术发展中所取得的这些进步不仅与有源元件和无源元件品质的完善,外形尺寸的缩小有关,同时还与所有能缩小体积的一定配置方法有关。如果采用 1 m^3 中的假定元件数量作为密度,那么对于通常的分立元件线路来讲,它就有 10^2 数量级元件,对于印刷电路板可以达到 $5 \cdot 10^3$ 数量级元件,对于微型电路可有 $5 \cdot 10^5$ 数量级元件,而对于集成电路则可达到 10^9 数量级这样多的元件。从以上所列举的情况来看,当然应当很好地研究元件尺寸缩小的有关问题。但是,这种情况基本上与无源元件的电阻器和电容器有关,实际上与电感元件无关。在加工集成电路时用单一的工艺过程来完成电感线圈目前还做不到。至今,电感元件都是用弯曲的印制线连接起来的分立元件。无线电装置电路设计中,在采用薄膜元件的同时,还采用膜块和分立元件,这种线路称为混合集成线路。

用印制线连接起来的电感元件可设计成螺旋形的、薄膜形的和容积形的(如带有绕组的铁氧体芯形或环形铁芯上的那样)。

西欧一些公司的广告中,介绍了电感值小于 10 mH 的单层螺旋薄膜线圈。靠多层结构增加电感量的试验导致附加的层与层之间的电介质损耗,并大大降低了所得出线圈的品质因数。

美国的一些公司,如“毕克尼可斯”,“捷列万”等,生产

了一批电感量不变的和可调的线圈，其芯形铁氧体铁芯上的电感量由 1nH 到 1mH 〔71〕。当 $d \approx 2.5\text{mm}$ ， $l = 8 \sim 10\text{mm}$ 时，这些线圈电感量的重叠系数为1.5到4.8，品质因数由十到数百个单位，频率域由几百、几十kHz到几十MHz。它们很大的一个特点是温度稳定性非常低： $\text{TKI} = \pm(1500 \sim 3000) \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$ 。

由上述公司生产的带有常值电感量的不同形式线圈中有一种薄膜结构线圈，它的外形尺寸为 $4.5 \times 4.9 \times 2.5\text{mm}$ ，标准电感量为 $10^{-2} \sim 10\mu\text{H}$ ，当频率（与额定频率有关）由 $70 \sim 150\text{MHz}$ 时，品质因数为60~70个单位。

苏联设计了一系列混合集成线路的变电感量和常值电感量的线圈。它们当中有环形结构的，芯形结构的和带有壳式Ч型，Б型铁芯结构的以及铁氧体H型铁芯结构的。不变电感量可按10的倍数标定，由 $10^{-1} \sim 10^2\mu\text{H}$ ， $\text{TKI} \approx (100 \sim 300)10^{-8} \text{C}^{-1}$ ，频率（与额定频率有关）由 $0.1 \sim 100\text{MHz}$ 频域内的品质因数为40~150个单位。

型号为700HM，1000HM3，20BЧ2，30BЧ2，50BЧ2的铁氧体和型号为MP100的羰基铁可作为铁芯材料。因此，对于固定电感线圈采用环形铁芯，对于可变电感线圈采用无磁性间隙的壳式铁芯。固定电感线圈加工精度（相对地）不太高，其平均值为 $\pm 5 \sim \pm 20\%$ ；线圈电感量可调的重叠系数由1.17~1.50。

应注意，电感元件微小型化工作在苏联才开始不久，并导致一系列专门企业的出现。微小模型设备中所用的常值MKI，变量MKIP和与电感线圈〔29〕型号有关的MKIS都是这些企业生产的。这些密封电感线圈是以铁氧体的壳式Ч型铁芯为基础而制成的（对于直流电路和交流电路，其最

大电压为 100 V, 电流不大于 5 mA)。直流电感线圈 МКИ, 交流电感线圈 МКИП 和 МКИС 都是按一定标准生产的, 而 МКИ-3, МКИП-3 和 МКИС-3 型号的线圈本身是独立微型模块。根据 $\kappa 10$ (ГОСТ 8032-56), 调整范围 $\Delta L/L = \pm 10\%$ 时, 直流的和交流的微型元件 (МКИ, МКИС) 和微模浇铸的电感线圈的组成, 其标准由 $1 \mu\text{H}$ 到 315 mH , 电感温度系数 $\text{TKI} = (-200 \sim +800) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 它与 $20 \sim 85^\circ\text{C}$ 的温度区间内的电感量的标准值有关。

线圈做成有壳式铁芯 Ч-9, 它具有无磁性间隙并采用 1000HM3 型的铁氧体。

电感线圈的微型元件外形尺寸 (mm) 不超过 $9.85 \times 9.85 \times H_1$ ($H_1 = 11 \sim 13$), 而微模形的则不超过 $11.2 \times 11.2 \times H_2$ ($H_2 = 22 \sim 28$)。

除工业用电感线圈以外, 还生产 13 种额定值的 ММТС 型微模匹配变压器。ММТС-1~ММТС-7 型号的变压器用于 $300 \sim 3000 \text{ Hz}$ 的频率范围之内, 频率特性的不均匀性不大于 $\pm 5 \text{ dB}$, 频率失真系数不大于 10%。ММТС-8~ММТС-13 型号变压器的工作频率范围为 200 Hz 到 10 kHz 。与此同时, 还有 12 种 ММТИ 型脉冲变压器。因为微型变压器的结构不是我们所要研究范围之内的, 所以我们列举了属于电磁系统的上述这些问题。

1.5 转换器

转换器是非独立的无源四端网。大家知道, 根据四端网理论, 它是非独立的或者是与电源有关的 (其中包括只有当输入端有信号时, 输出端才能出现信号^[33])。研究任意四端网时, 必须写出 A 参数或 Y 参数的输入端 (带有符号 1) 和