

- 上海市“十五”重点图书
- 高等学校教材

肖登明 编著

# 电力设备

# 与 在线监测 故障诊断

DIANLI SHEBEI  
ZAI XIAN JIANCE  
YU GUZHANG  
ZHENDUAN

上海交通大学出版社



- 上海市“十五”重点图书
- 高等学校教材

# 电力设备在线监测与故障诊断

肖登明 编著

上海交通大学出版社

## 内 容 提 要

本书描述了电力设备在线监测和故障诊断的基本知识和原理,在理论和实际应用、离线和在线、电气和信息相结合的基础上分别叙述了在线监测系统、故障诊断方法,以及各种电力设备(包括电容型设备、避雷器、绝缘子、变压器、GIS、电力电缆、发电机和高压断路器等)的在线监测和故障诊断。

本书主要作为高等学校电气工程专业的本科生和研究生的选修课教材,也可供电力部门从事运行、维护和试验人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电力设备在线监测与故障诊断 / 肖登明编著. —上海:  
上海交通大学出版社, 2005  
(高压与绝缘技术丛书)  
ISBN 7-313-04263-9

I. 电... II. 肖... III. ①电气绝缘—故障监测  
②电气绝缘—维修 IV. TM711

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第115755号

### 电力设备在线监测与故障诊断

肖登明 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路877号 邮政编码200030)

电话: 64071208 出版人: 张天蔚

上海颀辉印刷厂印刷 全国新华书店经销

开本: 890mm×1240mm 1/32 印张: 6.5 字数: 185千字

2005年11月第1版 2005年11月第1次印刷

印数: 1-3050

ISBN7-313-04263-9/TM·125 定价: 16.00元

---

版权所有 侵权必究

# 前 言

为了维护电力设备的安全运行,几十年来我国沿用的定期进行绝缘预防性试验的方法与制度发挥了重要作用。但由于定期检测周期长、预防性试验缺乏真实性,且存在超量维修现象,大量浪费人力物力,以致引起不定期停电导致的电力设备可靠性降低,且会导致更大范围内的故障灾难,所以现在必须着手于把智能化监测和诊断系统应用于那些昂贵的电力设备上,以提高它们的运行寿命,即将在线监测和故障诊断技术应用在电厂、变电站、运行线路和分布式电力设备上,以发展形成先进的状态维修制度。利用传感器技术、计算机技术及信号处理技术进行电力设备的状态监测以及以此为基础进行电力设备的预知性维修是保证电力系统安全、可靠运行的根本途径,也是近二十年来信息技术向电力设备试验及维护领域渗透的重要成就。

近年来,新的传感技术、信号处理技术和计算机技术的进步,推动了电力设备在线监测技术的迅速发展。各类新式传感器,包括光纤传感器、电-光、磁-光和新型气敏传感器,广泛用于电力设备局部放电、微小电流和微量气体的在线监测。数字滤波、小波分析和各种模式识别技术成功地用于绝缘在线监测中的干扰抑制、故障识别和定位。采用计算机技术,不但可对单台电力设备的单个参量进行监测,还可以建立对电力系统的全部电力设备进行状态监测和诊断的监控中心。

本书在总结作者十几年来有关“电力设备在线监测与故障诊断”的教学和科研工作的基础上,结合国内外同行取得的相关的教学和科研成果,描述了在线监测和故障诊断方法的基本知识,介绍了各种电力设备的在线监测的原理和方法,力求做到理论和实际应用相结合,离线和在线相结合,强电和弱电相结合,简单与复杂相结合,使读者在以往学习电气工程的基础上做到思维持续性,使学到的计算机、电子等知识很快融合到本专业中,掌握较先进的电气绝缘在线监测的基本原理和实

际应用,为今后在电力系统绝缘监督工作中发展创新技术打下良好的基础,为我国电力部门尽快从“计划维修制”过渡到“状态维修制”起到积极作用。

本书由西安交通大学成永红教授主审。西安交通大学严璋教授、清华大学谈克雄教授、重庆大学孙才新院士、上海交通大学袁明辉教授和美国 Virginia polytechnic institute and state university 刘奕路教授在本书编写过程中提供了相关的参考资料或提出了许多有益的建议,在此致以深切的谢意。

限于作者的能力和水平,本书若有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

**编者**

2005年7月

# 目 录

<b>1 概述</b> .....	1
1.1 电力设备绝缘的预防性试验 .....	1
1.2 电力设备在线监测及发展 .....	4
<b>2 在线监测系统</b> .....	7
2.1 传感器 .....	7
2.2 数据采集系统.....	22
2.3 信号传送与电磁干扰抑制.....	31
2.4 分级集成系统和远程监控系统.....	41
<b>3 故障诊断方法</b> .....	43
3.1 依据规则的诊断分类.....	43
3.2 依据样板的诊断分类.....	50
3.3 专家系统.....	57
3.4 基于 INTERNET 电力设备虚拟医院 .....	62
<b>4 电容型设备的在线监测</b> .....	70
4.1 测 $\tan\delta$ 用的西林电桥 .....	72
4.2 用电桥法进行 $\tan\delta$ 的在线监测 .....	75
4.3 $\tan\delta$ 及 $C$ 的在线监测 .....	77
<b>5 避雷器的在线监测</b> .....	81
5.1 避雷器的预防性试验.....	83
5.2 避雷器的在线监测.....	87

<b>6</b>	<b>绝缘子和套管的在线监测</b> .....	98
6.1	绝缘子和套管的预防性试验 .....	101
6.2	绝缘子和套管的在线监测 .....	107
<b>7</b>	<b>电力变压器的在线监测</b> .....	114
7.1	电力变压器的预防性试验 .....	115
7.2	电力变压器的在线监测 .....	128
<b>8</b>	<b>GIS 的在线监测</b> .....	145
8.1	GIS 的预防性试验 .....	147
8.2	GIS 的在线监测 .....	148
<b>9</b>	<b>电力电缆的在线监测</b> .....	157
9.1	电力电缆的预防性试验 .....	159
9.2	电力电缆的在线监测 .....	160
<b>10</b>	<b>发电机的在线监测</b> .....	169
10.1	发电机的预防性试验 .....	170
10.2	发电机的在线监测 .....	171
<b>11</b>	<b>高压断路器的在线监测</b> .....	187
11.1	高压断路器的预防性试验 .....	191
11.2	高压断路器的在线监测 .....	191
	<b>参考文献</b> .....	202

# 1 概 述

随着电力系统朝着高电压、大容量的方向发展,保证电力设备的安全运行越来越重要,停电事故给国民经济和人民生活带来的影响及损失越来越大。高压电力设备是组成电力系统的基本元件,是保证电力系统运行可靠性的基础,不论是大型关键电力设备(发电机、变压器、断路器等),还是小型电力设备(避雷器、绝缘子等),一旦发生故障必将引起局部甚至全部地区的停电。统计表明,电力设备运行中70%左右的故障是由绝缘故障引起的,不仅是由于电应力作用引起绝缘劣化而导致绝缘故障,而且机械力或热效应也会发展为绝缘性故障。

高压电力设备主要由金属材料和绝缘材料构成。金属材料包括导电材料(铜、铝等)、导磁材料(硅钢片等)和结构材料(铸铁、钢板等)。绝缘材料包括固体材料(云母、电瓷、聚氯乙烯等)、液体材料(变压器油等)和气体材料(SF<sub>6</sub>等),而绝缘材料往往较易劣化变质而使电气、机械强度显著降低。为了确保电力设备的安全运行,在其制造和运行过程中均需要进行严格的检测试验。即在制造过程中,要经过型式试验、例行试验和出厂试验,才能保证电力设备的质量;而在运行时,电力设备要进行交接试验和预防性试验。这样才能及时掌握电力设备绝缘状况,以便安排相应的维护和检修,保证电力设备的正常运行。

## 1.1 电力设备绝缘的预防性试验

电力设备在运行中进行预防性试验,可及时发现缺陷,减少事故的发生,它已成为我国电力生产中的一项重要制度。预防性试验可分为非破坏性试验和破坏性试验两大类:

(1) 非破坏性试验 又称绝缘特性试验,是指在较低的电压下或是用其他不会损伤绝缘的办法来测量绝缘的各种特性,从而判断绝缘



内部有无缺陷。常见的试验项目有绝缘电阻测量、泄漏电流测量、介质损耗角正切测量、油中气体含量检测等项目。由于这类试验施加的电压较低或不需要施加电压,故不会损伤设备的绝缘性能,其目的是判断绝缘状态,及时发现可能的劣化现象。实践证明这类方法是有效的,但目前还不能仅依据它们来可靠地判断设备的绝缘状态。

(2) 破坏性试验 又称绝缘耐压试验,是指在高于工作电压下所进行的试验。试验时在设备绝缘上施加规定的试验电压,考验绝缘对此电压的耐受能力。它主要指交流耐压和直流耐压试验。由于这类试验所加电压较高,考验比较直接和严格,特别是可能会在耐压试验时给绝缘造成一定的损伤。绝缘耐压试验是在非破坏性试验之后才进行的,如果非破坏性试验已表明绝缘存在不正常情况,则必须在查明原因并加以消除后再进行耐压试验,以避免不应有的击穿。

我国 1996 年对《电力设备预防性试验规程》(简称《规程》)进行了修订,常见的电力设备预防性试验主要项目见表 1-1。

表 1-1 现行电力设备预防性试验主要项目

	发电机	电力 变压器	电力 电缆	高压 套管	断路器	
					充 SF <sub>6</sub>	充油
绝缘电阻测量	☆	☆	☆	☆	☆	☆
直流泄漏电流测量	☆	☆	☆	×	☆	☆
介质损耗角正切值测量	△	☆	☆	☆	△	☆
绝缘油试验	☆	☆	☆	○	×	☆
微量水分测定	×	☆	×	○	☆	×
油中溶解气体色谱分析	×	☆	×	○	×	×
局部放电试验	×	×	×	○	×	×
直流耐压试验	☆	×	☆	×	×	×
交流耐压试验	△	△	×	△	△	☆

注:“☆”表示正常试验项目,“×”表示不进行该项试验,“△”表示大修后进行,“○”表示必要时进行。

预防性试验是一种简便且较有效地评估电力设备绝缘状况的方法。根据过去长期的运行经验及试验研究中已逐步确立起来的这些预防性试验项目,为确保电气设备的安全运行发挥着很大作用。

现行的预防性试验方法是前人多年工作的结晶,它对电力设备的安全运行发挥着积极作用。但是近年来越来越多的电力工作者从实践中意识到,常规预防性试验存在着试验时需要停电、试验时间集中、工作量大、试验是否有效的问题,特别在电力设备运行过程中,人们关心的是绝缘结构的剩余电气强度,但至今还未找到它与绝缘电阻、泄漏电流及介电质损耗角正切等非破坏性试验参数之间的直接函数关系,所以仅凭这些试验项目难以准确、有效地判断电力设备绝缘的好坏,也不能确保下一运行周期的安全运行,有的试验项目甚至在试验后还会留有后遗症,这就暴露出常规的停电预防性试验本身存在着缺陷。

从经济角度来讲,定期试验和大修均需停电,不仅要损失电量,增加工作安排的难度,而且定期大修和更换部件还需投资,然而这种投资是否必要尚不好肯定,因为设备的实际状态可能完全不必作任何维修而仍能继续长时期运行,若维修水平不高,反而可能使设备越修越坏,从而产生新的经济损失。

从技术角度分析,离线的定期预防性试验有两方面的局限性:

1) 试验条件不同于设备运行条件,多数项目是在低电压下进行检查。例如介质损耗角正切  $\tan\delta$  是在 10kV 下测试的,而设备的运行电压特别是超高压设备远比 10kV 要高。另外运行时还有诸如热应力等其他因素的影响无法在离线试验时再现。这样就很可能发现不了绝缘缺陷和潜在的故障。

2) 绝缘的劣化、缺陷的发展虽然具有统计性,发展速度有快有慢,但总是有一定的潜伏和发展时间,在此期间会发出反映绝缘状态变化的各种信息。而预防性试验是定期进行的,常不能及时准确地发现故障。从而出现漏报,即预防性试验通过后仍有可能发生故障,甚至严重事故;或出现误报或早报,例如预防性试验结果虽超标,若故障不进一步发展,可不必马上停电检修而仍可继续运行,只需加强监视即可,但若按预防性试验结果作出诊断,就会损失停电检修的费用。

## 1.2 电力设备在线监测及发展

国际上在早期都曾采用的是事后维修(Breakdown Maintenance)。美国在 20 世纪 40 年代、日本在 20 世纪 50 年代曾经改用定期维修,即按事先制订的检修周期按期进行停机检修,因而也称“时间基准维修”(Time Based Maintenance)。它虽对提高设备可靠性起了一定作用,但由于未考虑设备的具体情况,而且制订的周期往往比较保守,以致出现了过多不必要的停机及维修,甚至因拆卸、组装等过多而出现过早损坏。

20 世纪 50 年代,美国通用电气公司等已提出要从以时间为基准的维修方式发展到以状态为基准的维修方式,即状态维修(Condition Based Maintenance),日本等在 20 世纪 70 年代左右也转向采用状态维修。

常规的预防性试验一般以一年为一周期,电力设备虽然都按规定、按时做了常规预防性试验,但事故仍然时有发生。主要原因之一是由于现有的试验项目和方法往往难以保证在这一个周期内不发生故障。由于绝大多数故障事前都有先兆,这就要求发展一种连续或定时的监测技术,在线监测就是在这种情况下产生的。电力设备在线监测技术是一种利用运行电压来对高压设备绝缘状况进行试验的方法,它可以大大提高试验的真实性与灵敏度,及时发现绝缘缺陷。采用在线监测的方法可以根据设备绝缘状况的好坏来选择不同的监测周期,使试验的有效程度明显提高。在线监测可以积累大量的数据,将被试设备的当前试验数据(包括停电及带电监测)和以往的监测数据相结合,用各种数值分析方法进行及时、全面的综合分析判断,就可以发现和捕捉早期缺陷,确保安全运行,从而减小由于预防性试验间隔长所带来的误差。

通常,一种电力设备的在线监测仪器或系统,由传感器系统、信号采集系统、分析诊断系统组成。传感器系统用于感知所需要的电气参量或非电气参量,目前常用的传感器有电磁传感器、力学量传感器、声

参数传感器、热参数传感器、化学量传感器等。信号采集系统是将传感器得到的模拟量转换成数字量进行传输,应用数字滤波技术对采集到的信号进行滤波处理,抑制和消除外界干扰和背景噪声,提取真实信号,并进行信号的还原,光电转换和光纤传输的引入有效地解决了高压隔离的问题。分析诊断系统利用小波分析技术、神经网络技术、模糊诊断技术、专家分析技术等方法对所采集信号进行分析、处理和诊断,得到所测电力设备绝缘的当前状况,并根据需要进行绝缘诊断和寿命评估。

在线监测的推广还有利于从定期维修制过渡到更合理的状态维修制。我国目前执行的大多是定期维修制,一般都要求“到期必修”,没有充分考虑设备实际状态如何,以致超量维修,造成了人力及物力的大量浪费。状态维修的基础就是在线监测和故障诊断技术,既要通过各种监测手段来正确诊断被试设备的目前状况,又要根据其本身特点及变化趋势等来确定能否继续运行或停电检修。

在线试验和离线试验并非对立,而是相辅相成的。如在线监测中发现事故隐患后,必要时可在离线状态下进行更为彻底的全面检查。电气设备诊断过程流程图如图1-1所示。

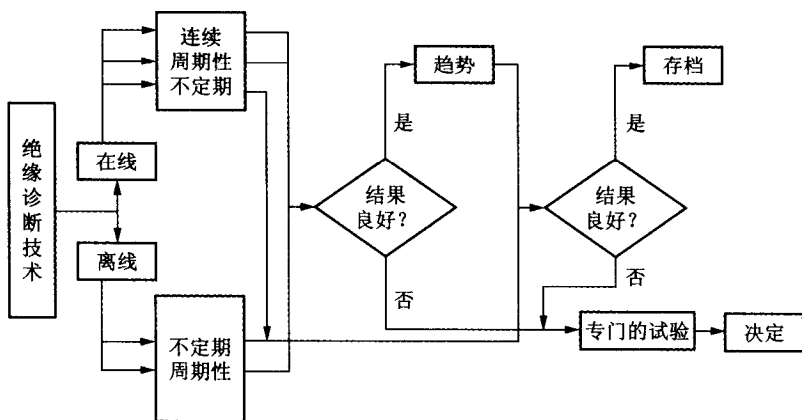


图 1-1 电气设备监测诊断过程流程图示意图

采取在线监测与故障诊断技术后,可以使预防性维修向预知性维

修即状态维修过渡,从“到期必修”过渡到“该修则修”。

绝缘在线诊断技术有很大的难度。绝缘潜伏性故障前期征兆的信号通常极为微弱,而运行条件下现场又存在强烈的电磁干扰。因此,抑制各种干扰,提高信噪比是在线监测中首先需要解决的难题。此外,监测的各种特征量和绝缘的状态通常也不是一一对应的,它们具有错综复杂的关系。如果说对离线的预防性试验结果的分析,已经积累了大量经验,据此可以制订出相应的规程推广施行,那么对于在线诊断,现在仍还处于研究、试运行、积累经验的阶段。发展绝缘在线监测和诊断技术,即需对绝缘结构及其老化机理有深入的了解,也需应用传感、微电子等高新技术。它是具有交叉学科性质的一门新兴技术,有较高的学术意义,也有显著的应用价值。

近年来,随着传感器技术、信号采集技术、数字分析技术与计算机技术的发展和运用,在线监测技术得到了飞速发展。在线监测将成为绝缘监测中的一个重要组成部分,它将在很多方面弥补仅靠定期停电预防性试验的不足,但目前还不能认为在线监测将全面替代停电预防性试验。这主要由于一方面在线监测理论和技术尚未完善,绝缘劣化的特征量是什么、在现场条件下如何准确监测、判断及其标准是什么等问题均没有很好的解决,还有待进一步的研究;另一方面,在线监测测量的是工频电压下电力设备的绝缘参数,而对电力系统内时常发生的过电压情况下的绝缘品质却无法进行测量。

但是,随着电力设备在线监测与故障诊断技术的研究进展,状态检修制必将逐步取代定期检修制,必将大大提高电力设备的运行可靠性。

## 2 在线监测系统

在线监测系统主要是对被测物理量(信号)进行监测、调理、变换、传输、处理、显示、记录等多个环节组成的完整的系统。电力设备在线监测系统原理框图如图2-1所示。

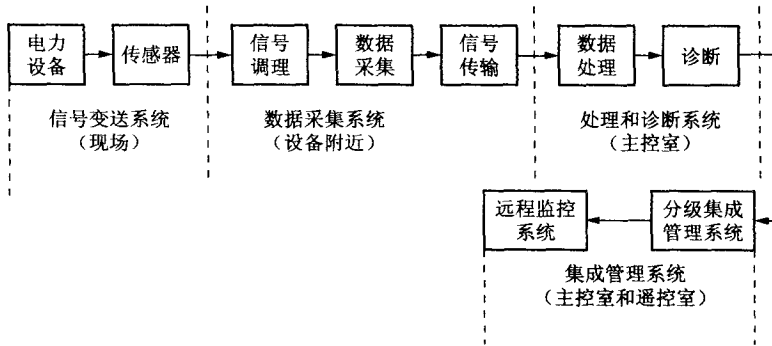


图 2-1 在线监测系统原理框图

信号变送系统是通过传感器从电力设备上监测出反映设备状态的物理量和化学量转化为电信号；数据采集系统是把电信号经过放大、A/D转换等功能，变换成标准信号以便传输；信号传输单元采用数字信号传输或光信号传输，使监测到的信号无畸变、有效地传输到主控室的数据处理单元；数据处理和诊断系统是把监测信号进行处理和分析，对设备的状态作出诊断和判定；集成管理系统就是把诊断数据接收到集成系统(如 Scada 系统)，或者通过专用电缆或互联网往几十千米、几百千米以外的远程监测系统发送诊断数据和接收指令。

### 2.1 传感器

传感器是一种装置，能完成检测任务，它的输出量是与某一被测量

有对应关系的量,且具有一定的精度,被测量包括物理量、光、电气、化学量、生物量等。

传感器按用途可分为位移、压力、温度、振动、电流、电压、气体等。

表征传感器输出与输入之间关系的特性,称之为传感器的一般特性。当输入量为常量或变化缓慢的信号时称为静特性。当输入量随时间变化较快时,称为动特性(频率响应特性)。

传感器的静态特性包括:

(1) 线性度 指传感器输出量和输入量间的实际关系与它们的拟合直线(可用最小二乘法确定)之间的最大偏差与满量程输出值之比。线性度低会产生系统误差。

(2) 迟滞 指传感器正向特性和反向特性不一致的程度。迟滞大会产生系统误差。

(3) 重复性 指当传感器的输入量按同一方向作全量程连续多次变动时,静态特性不一致的程度。重复性差会产生随机误差。

(4) 精度 表明传感器的准确度。一般来说,它主要由传感器的线性度、迟滞、重复性三种特性构成。

(5) 灵敏度 指传感器对输入量变化反应的能力,通常由传感器的输出变化量  $\Delta y$  与输入变化量  $\Delta x$  之比来表征,即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

灵敏度数值大,表示相同的输入改变量引起的输出变化量大,则传感器的灵敏度高。

(6) 分辨力 亦称灵敏度阈,表征传感器有效辨别输入量最小变化量的能力。当用满量程的百分数表示时称为分辨率。

(7) 稳定性 指在规定工作条件范围内,在规定时间内传感器性能保持不变的能力。一般分为温度稳定性、抗干扰稳定性和时间稳定性等。

以下着重介绍电气设备绝缘在线监测技术中常用的一些传感器。

### 2.1.1 电流传感器

广泛用于在线监测技术的多为电流互感器型的电流传感器。多数

这类传感器是原边为一匝的电流互感器,有些情况也有用多匝的。监测时将圆形磁芯穿过待测设备的接地线或其他导线上,如图2-2所示。

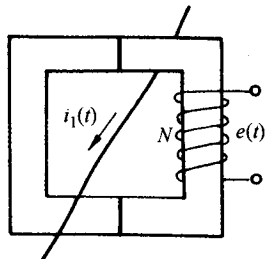


图 2-2 电流互感器结构原理图

电流信号  $i_1(t)$  和次级线圈两端的感应电压也即输出信号  $e(t)$  的关系为

$$e(t) = M \frac{di_1(t)}{dt} \quad (2-1)$$

式中互感  $M = \mu \frac{N \cdot S}{l}$  (2-2)

式中  $N$  为副边线圈匝数;  $S$  为磁芯截面;  $l$  为磁路长度。故输出信号  $e(t)$  的大小和被测电流  $i_1(t)$  的变化率成正比。

### A 宽带型电流传感器

又称自积分式,在线圈两端并接一积分电阻  $R$ ,如图2-3所示。可列出下列电路方程。

$$e(t) = L \frac{di_2(t)}{dt} + (R_L + R)i_2(t) \quad (2-3)$$

$$L = \mu \frac{N^2 S}{l} \quad (2-4)$$

式中  $L$  是线圈自感,  $R_L$  为线圈电阻。当满足条件

$$L \frac{di_2(t)}{dt} \gg (R_L + R)i_2(t) \quad (2-5)$$

则  $e(t) = L \frac{di_2(t)}{dt}$  (2-6)



由式(2-1),式(2-2),式(2-4),式(2-6)得

$$i_2(t) = \frac{1}{N}i_1(t) \quad (2-7)$$

则 
$$u(t) = Ri_2(t) = \left(\frac{R}{N}\right)i_1(t) = Ki_1(t) \quad (2-8)$$

故信号电压  $u(t)$  和所监测的电流  $i_1(t)$  成线性关系,  $K$  为灵敏度, 它与  $N$  成反比, 和自积分电阻  $R$  成正比。

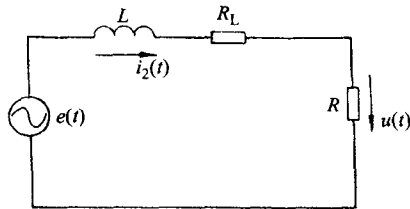


图 2-3 宽带型传感器等值电路

## B 窄带型电流传感器

又称外积分式或谐振型, 比之宽带型它具有较好的抗干扰性能。由积分电阻  $R$  和积分电容  $C$  构成的积分电路如图2-4所示, 可列出等值电路方程

$$e(t) = L \frac{di_2(t)}{dt} + (R_L + R)i_2(t) + \frac{1}{C} \int i_2(t) dt \quad (2-9)$$

当被测电流  $i_1(t)$  的频率为  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  时, 电路谐振, 则上式为

$$e(t) = (R_L + R)i_2(t) \quad (2-10)$$

由式(2-1), 式(2-10)可得

$$u(t) = \frac{M}{(R_L + R)C} i_1(t) \quad (2-11)$$

为提高监测灵敏度, 常取  $R=0$ , 故灵敏度为

$$K = \frac{M}{R_L C}$$