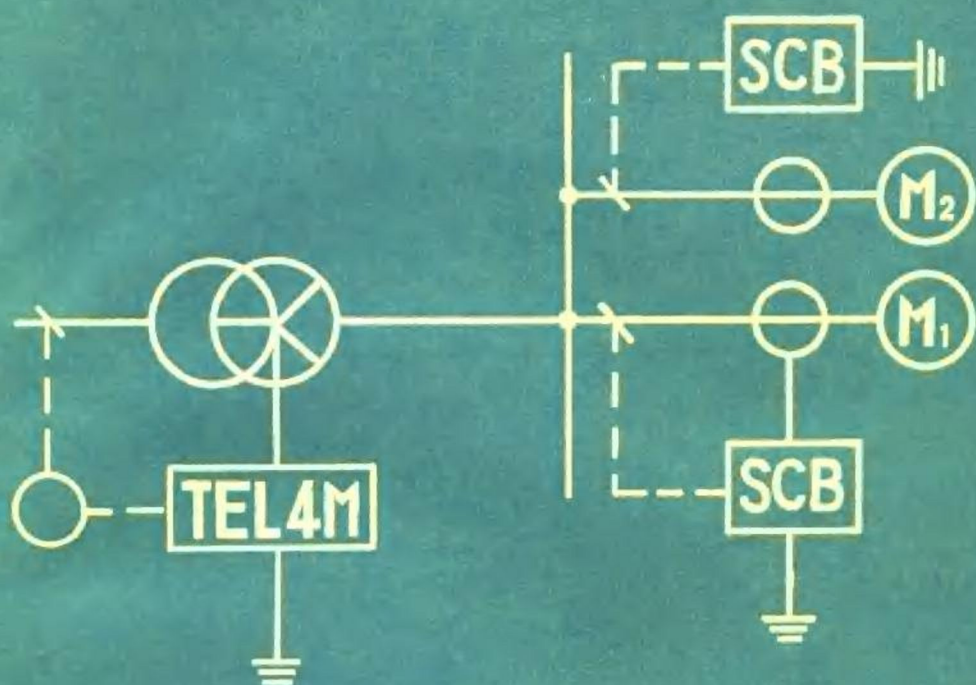




矿井电网的漏电保护

胡天禄 编著

煤炭工业出版社

矿井电网的漏电保护

胡天禄 编著

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书主要介绍矿井低压电网的漏电保护，也涉及高压电网的漏电保护问题。

全书共分九章，其中第一章至第四章主要介绍与漏电保护有关的安全参数以及漏电保护的基本原理。第五、六章介绍国内外的漏电保护装置。第七、八章介绍新型检漏继电器的设计与漏电保护系统的拟定。第九章介绍井下低压电网绝缘阻抗的测量方法与实测数据的分析。在每章的后面附有复习思考题，可供学习参考。

本书可作为研究生和大专学生的选修课教材，也可供现场工程技术人员参考。

责任编辑：陈 锦 忠

矿 井 电 网 的 漏 电 保 护

胡 天 禄 编 著

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ 印张11插页 6

字数288千字 印数1—2,270

1987年3月第1版 1987年3月第1次印刷

书号15035·2806 定价2.25元

前 言

矿井电网的漏电保护在我国的发展历史并不太长，但它已发挥了巨大的作用。据统计，井下低压电网因触电而造成死亡的事故已经很少了，这不能不说是漏电保护的功劳。50年代初我国刚从苏联引进PYB型漏电继电器时，许多矿井都不愿意使用，而现在确实是离不开了。这是各级领导对工人的安全非常重视，以及工程技术人员积极努力、推广使用的结果。

再从我国检漏继电器的研制情况来看，进展也很迅速，特别是在我国四化建设的宏伟目标指引下，参与漏电保护科研工作的工程技术人员越来越多，他们充分发挥聪明才智，使大批的新型检漏继电器不断地涌现出来。

我从事漏电保护科研工作已经二十多年，但总觉得还有许多问题需要研究，过去的经验也需要很好地加以总结、提高，特别是对国内外的一些漏电保护装置又很有必要予以分析比较，以资借鉴，因此，着手编写此书。本书对漏电保护的一些基本问题，特别是零序电压和零序电流的变化规律，进行了较为详细的论述，为设计漏电保护装置提供理论根据。

本书在编写过程中，曾对国内外漏电保护装置进行了大量的性能试验，得到了开滦、大同、阳泉、徐州和兖州等矿务局的大力支持，以及中国矿业学院矿山电工教研室同志们的大力协助，此外，还收到了许多同志们提供的宝贵资料。在此，谨向他们表示衷心的感谢。

由于本人的水平所限，对问题的理解不深，甚至会有错误，望读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1
第一章 触电的危险及其预防方法	4
第一节 触电的危险因素	4
第二节 预防触电的方法	10
第二章 井下变压器中性点接地方式的分析	12
第一节 变压器中性点不接地方式	12
一、忽略电网对地电容时的人身触电电流和单相接地电流 计算	12
二、考虑电网对地电容时的人身触电电流和单相接地电流 计算	24
第二节 变压器中性点直接接地方式	47
一、人身触电电流计算	47
二、单相接地电流计算	49
第三节 变压器中性点经电阻接地方式	50
一、忽略电网对地电容时的人身触电电流和单相接地电流 计算	50
二、考虑电网对地电容时的人身触电电流和单相接地电流 计算	53
第四节 人为中性点经电阻接地方式	57
一、人身触电电流计算	57
二、单相接地电流计算	61
第五节 几种接地方式的分析比较	63
第三章 电容电流的补偿	67
第一节 在人为中性点与地之间接入电抗线圈的 补偿方法	67
一、人身触电时	69
二、单相接地时	79
三、电感电抗值的合理选择	81

四、人身触电电流值为最小的条件	84
第二节 在变压器中性点与地之间接入电抗线圈的补偿	
方法	84
一、人身触电时	85
二、单相接地时	87
第三节 串联谐振过电压	88
一、变压器中性点经电抗线圈接地方式	88
二、人为中性点经电抗线圈接地方式	109
第四节 电弧接地过电压	114
一、电弧接地过电压产生的基本原理	114
二、影响电弧接地过电压的因素	121
第五节 对电容电流补偿的几点看法	123
第四章 漏电保护原理	126
第一节 附加直流电源的保护原理	126
第二节 利用三个整流管的保护原理	132
第三节 零序电压的保护原理	136
第四节 零序电流的保护原理	142
第五节 零序电流方向保护原理	148
第五章 国产漏电保护装置	155
第一节 JY82型检漏继电器	155
第二节 JL80型检漏继电器	160
第三节 JL82型检漏继电器	162
第四节 JY-82J型检漏继电器	164
第五节 JY-80型检漏继电器	167
第六节 JJKB30 型 检 漏 继 电 器	168
一、工作原理	170
二、补偿回路	173
三、使用中的几个问题说明	174
第七节 JL83型傍路接地检漏继电器	174
一、漏电保护部分	175
二、傍路接地部分	176
第八节 漏电闭锁继电器	183
第九节 煤电钻综合保护装置	187

一、ZB81-127/20型煤电钻综合保护装置	187
二、BZ80-2.5型煤电钻综合保护装置	189
三、KSGZ-2.5/0.66A矿用隔爆型电钻变压器装置	193
第十节 BLD-2型高压漏电及监视保护装置	197
第六章 国外漏电保护装置	201
第一节 西德的漏电保护装置	201
一、非选择性漏电保护系统	201
二、选择性漏电保护系统	211
第二节 英国的漏电保护装置	227
一、选择性漏电保护系统	227
二、非选择性漏电保护系统	244
第三节 波兰的漏电保护装置	249
一、CZUW型检漏继电器	249
二、UKSIW型检漏继电器	254
第四节 苏联的漏电保护装置	256
第五节 日本的漏电保护装置	262
一、RENA-110B型检漏继电器	262
二、RP-141XB型检漏继电器	268
第六节 国外高压漏电保护装置	274
一、英国的高压漏电保护装置	276
二、西德的高压漏电保护装置	277
第七章 新型快速检漏继电器的设计	286
第一节 对新型检漏继电器的设计要求	287
第二节 工作原理	287
第三节 设计中的几个问题	292
第四节 与新型自动馈电开关配合使用方案	302
第八章 漏电保护系统	308
第一节 对漏电保护系统的要求	308
第二节 漏电保护系统的分析	310
一、非选择性漏电保护系统	310
二、选择性漏电保护系统	312
第三节 我国的漏电保护系统	315

一、现有的漏电保护系统	315
二、两个漏电保护系统方案	316
第九章 煤矿井下低压电网绝缘阻抗的测量及其	
分析	320
第一节 绝缘阻抗测量方法	320
一、交流伏安法	320
二、中性点电压位移法	324
三、附加低频电源的测量方法	330
四、谐振测量法	333
五、分相测量绝缘阻抗方法	335
第二节 实测结果分析	338

绪 论

漏电保护是保证煤矿井下安全供电的三大保护（即过流保护、漏电保护和保护接地）之一，是防止人身触电的重要措施。

多年来，在党的安全生产方针指引下，由于煤矿职工的不懈努力，井下电气事故，特别是人身触电事故，已有显著减少。但是，不可否认，事故仍然时有发生，应当引起我们的充分注意。

我国的煤炭生产，现在主要还是在井下进行。煤矿井下的工作条件特殊，环境比较潮湿，相对湿度往往高达95%以上。为此，对其使用的电气设备和电缆的绝缘，必须提出较高的要求。尽管如此，运行中的电气设备及其供电电缆，仍然有发生漏电的危险。特别是工作面的电缆，被砸或被挤压的机会较多，绝缘更容易损坏，漏电的可能性更大。

漏电的后果，可能导致人身触电、瓦斯煤尘爆炸和电气雷管的先期爆发，此外，大量的漏电电流如果长期存在，还有可能使电气设备的绝缘进一步恶化，以致损坏，从而造成相间短路、电气火灾及其它危及矿井安全的严重事故。因此，必须采取切实可行的漏电保护措施，及时将漏电故障切除，方能使上述隐患得以防止，保证供电安全。

特别应当提出，防爆电气设备的内部如果发生短路，而过电流保护装置又拒绝动作时，强大短路电流形成的电弧，便有可能烧穿防爆外壳，使其失去防爆性能，引起瓦斯煤尘爆炸。此时，如果在该电网中装设有漏电保护装置，一旦电弧与外壳接触，便可使漏电保护装置动作，将其供电电流切断，自然就可避免上述事故的发生。由此可见，漏电保护在某种意义上讲，它又起着短路保护的后备保护作用，对于电气设备的防爆性能也有一定的保证。

总而言之，漏电保护对于煤矿井下供电至关重要，因此，我国的《煤矿安全规程》已有明文规定：“……必须装设自动切断漏电馈电线的检漏装置。”

再从漏电保护的发展历史来看，英国早在1930年就开始在磁力起动器里使用漏电保护装置。由于当时采用的是变压器中性点直接接地的供电系统，故应用了零序电流保护原理。随后其它国家也陆续使用。苏联自1949年开始制作中性点不接地系统中使用的漏电保护装置（PYB型防爆漏电继电器），它采用了附加直流电源的原理。该装置在50年代初引进我国，并在矿井中推广使用。同时，我国还进行了仿制，一直延用到现在，对我国煤矿井下的安全供电起了一定的作用。但是，该装置毕竟是40年代的产品，随着科学技术的不断发展，井下电网的供电电压也在逐步升高，显然，它不能适应生产的要求，因此，在60年以后，我国便自行设计和生产了多种型式的检漏继电器，如JL80型、JJKB30型和JL82型等，分别适用于660V和1140V供电电压。与此同时，随着综合机械化采煤技术的发展，我国还从波兰、英国、西德、苏联和日本等国引进了各种型式的漏电保护装置。它们各有所长，许多先进技术是值得我们学习和借鉴的。

漏电保护的历史虽然不长，但发展很快。由最初的简单电磁元件，发展到使用半导体分离元件和集成元件；由单一的漏电保护装置，发展成为整个的漏电保护系统；此外，漏电保护的安全性和可靠性，也都有了显著的提高。为了适应新形势的发展需要，煤炭工业部于1982年，在江苏省徐州市中国矿业学院召开了煤炭系统的第二次全国性漏电保护会议（注：第一次是1963年3月在北京矿业学院召开的），总结了前一段时间的漏电保护科研工作，并为今后继续开展漏电保护工作指出了方向。会议认为，应当开展低压电网选择性漏电保护装置的研究、超前切断供电电源装置的研究、漏电保护安全参量的研究、直流架线式电网漏电保护装置的研究以及矿井低压电网绝缘阻抗值的测定等工作。任务很重，有待大家共同努力。

由于瓦斯爆炸所需要的点燃能量很小（0.28mJ），而且点燃过程所需的时间很短，因此，提高漏电保护装置和自动馈电开关的动作速度，往往并不能解决瓦斯爆炸问题，只能使漏电故障电流存在的时间缩短，减少爆炸的可能性。根本的解决办法，是采用超前切断供电电源装置。然而，提高漏电保护装置和自动馈电开关的动作速度，可以减少人身触电的时间，保证人身安全。因此，在某种意义上讲，漏电保护主要是从人身安全的条件出发，以确定漏电保护装置的动作参数，达到防止人身触电的目的。

从人身安全来讲，保护接地也是防止人身触电的一项有效措施，为此，《煤矿安全规程》中也作了若干规定，要求在使用中贯彻执行。

总起来讲，漏电保护是重要的，而且还有许多问题有待解决，因此，在我们阅读这本书的时候，应当着重弄懂漏电保护的基本原理，掌握其主要性能和发展趋势，做到能够开创新的局面，寻求更加合理的漏电保护途径，将我国的漏电保护工作推向新的水平，为煤矿的安全生产作出应有的贡献。

第一章 触电的危险及其预防方法

人身接触带电导体或因接触绝缘损坏而带电的电气设备的金属外壳，都可能造成触电事故。煤矿井下的巷道窄小，接触电气设备的机会较多，因此，发生触电的可能性也较大。

触电对人体组织的破坏过程是很复杂的。一般讲，电流对人体的伤害，大致分为两种类型，即电击和电伤。电击，是指电流通过人体的内部，影响呼吸、心脏和神经系统，造成人体内部组织的损伤和破坏，导致残废或死亡，这又叫内伤。在触电死亡的事故统计中，多数是由电击造成的。所以，电击是最危险的一种。电伤，又叫外伤，主要是指电弧对人体表面的烧伤。当烧伤面积不大时，不致于有生命危险。在高压电的触电事故中，这两种情况都同时存在。对于低压来讲，主要是指电击。

第一节 触电的危险因素

电流对人体的伤害程度，与下面的一些因素有关：

1. 流过人身的电流

流过人身的电流又叫人身触电电流。它是直接影响人身安全的重要因素。流过人身的电流越大，对人体组织的破坏作用也就越大，因而也就越危险。多数试验证明，对于工频交流，1毫安左右的电流通过人身，便开始有麻刺和疼痛的感觉。当其达到25mA时，将会使人身感觉麻痹和剧痛，甚至呼吸困难，自己不能摆脱电源。如果电流再大些，而且不能及时切断电源，势必会有生命危险。对于煤矿井下的生产条件，常取25~30mA作为人身触电的长期极限安全电流值（注：根据某些资料也有人认为，此值应当取小一些，降为8~10mA）。各种不同电流值对人体的伤害情况可见表1-1。

表 1-1 电流对人体的影响

电流类别 电流mA	50 Hz 交 流	直 流
0.6~1.5	开始有感觉，手指有麻刺	没有感觉
2~3	手指有强烈麻刺，颤抖	没有感觉
5~7	手部痉挛	感觉痒、刺痛、灼热
8~10	手已难于摆脱带电体，但是还能摆脱，手指尖部到手腕有剧痛	热感觉增强
20~25	手迅速麻痹，不能摆脱带电体，剧痛，呼吸困难	热感觉增强较大，手部肌肉不强烈收缩
50~80	呼吸麻痹，心房开始震颤	有强烈热感觉，手部肌肉收缩，痉挛，呼吸困难
90~100	呼吸麻痹，持续 3 S 或更长时间则心脏麻痹，心室颤动	呼吸麻痹
300及以下	作用时间 0.1 S 以上，呼吸和心脏麻痹，肌体组织遭到电流的热破坏	

上表数据指的是一般情况，具体对于每个人来讲，可能有较大出入。有的人比较敏感，即使比上述电流小很多，也会有危险；有的人则相反，伤害较小。不仅如此，女人对电流的敏感性往往比男人强，危害也比较大。

2. 人身电阻

对于低压电网来讲，人身电阻是决定人身触电电流大小、人对电流的反应程度和伤害的重要因素。一般讲，当电压一定时，人身电阻越大，通过人身的电流也就越小；反之，则越大。

所谓人身电阻，乃指电流所经过人身组织的电阻之和。它包括两个部分，即体内电阻和皮肤电阻。体内电阻是由肌肉组织、血液和神经等组成，其电阻较小，并且基本上不受外界的影响，一般不低于500 Ω。皮肤电阻是指皮肤表面角质层的电阻，它是人身电阻的重要组成部分。因为皮肤表面角质层是一层不完善的

电介质，厚度约为 $0.005\sim 0.2\text{mm}$ ，电阻较大，而且并不固定，常受外界条件的影响。如果皮肤表面角质层完好，而且皮肤干燥，并在低电压作用下，其电阻值可高达 $10\text{k}\Omega$ 以上。当条件变坏时，如角质层损伤，皮肤受潮、多汗或有导电性的粉尘等，其电阻值便会急剧降低。

一般情况下，人身电阻主要由皮肤电阻来决定。由于煤矿井下潮湿多尘，而且工人劳动繁重，流汗较多，所以，我们把在井下工作的人身电阻定为 $800\sim 1500\Omega$ ，通常取 1000Ω 进行计算。

3. 作用于人身的电压

流经人身的电流，与作用于人身的电压高低有着直接的关系。一般讲，电压越高，人身电流越大，但并非线性关系，如图1-1所示^[1]。这是因为人身电阻并不是固定不变的。随着电压的增高，人体皮肤表面的角质层有类似介质击穿作用，使人身电阻急剧下降，同时人身电流便迅速增大，形成严重的触电事故。值得注意，当电压增高到一定程度，角质层将被完全击穿，此时，皮肤就失去保护作用，人身电阻便只等于体内电阻，似乎与所加

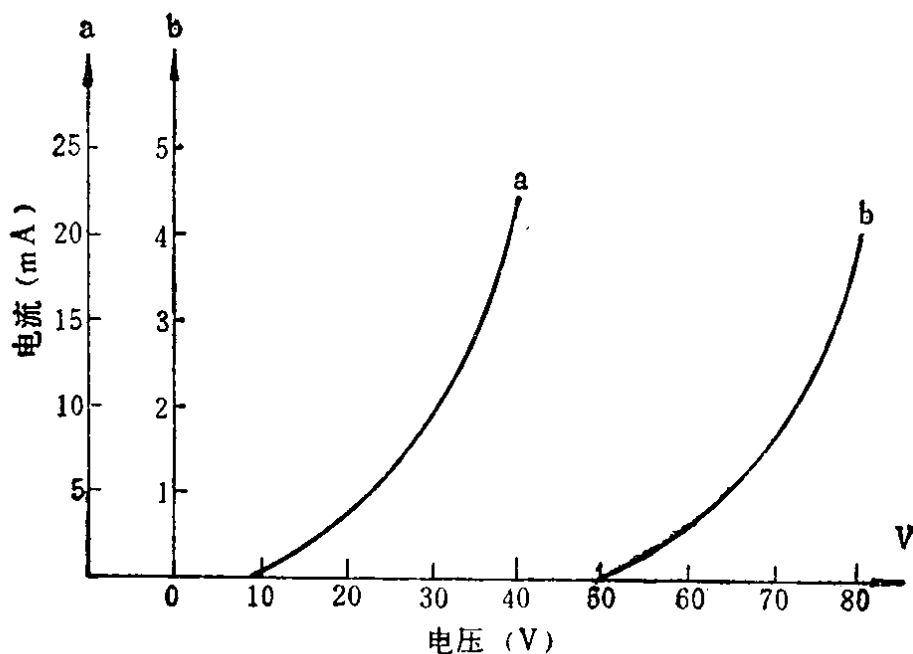


图 1-1 流经人身的电流和外加电压的关系

a—潮湿的手，b—干燥的手

电压无关。然而，在电流的强烈刺激下，人的机体对电流的反应，又可能引起血液循环系统的机能变化，使血管收缩，截面减小，体内电阻也有可能增加。因此，人身电流与外加电压很难成线性关系。

4. 触电的持续时间

电流对机体的作用，决定于许多相互关联的因素，其中主要是电流的强度和持续的时间。在短暂（注：指持续时间低于1～3 s）的电流作用下，一般讲，触电持续的时间越长，允许的人身电流值就越小。图1-2中列举了一些国家和研究者所提出的计算短暂极限安全电流公式〔2〕，并按这些公式绘制了时间 t 和电流 I_R 的关系曲线。

由这些公式或曲线可以看出，当触电的时间一定时，允许的人身电流值有较大的差别。原因在于他们所采用的试验标准不同，有的以人体原纤维性变的门限值作为试验标准；有的则认为绝对不允许将接近原纤维性变电流加于人体，并以此极限电流作为计算保护装置整定值的依据，因为这样做仍有死亡的危险。再有人认为，引起触电死亡的原因并不完全是原纤维性变，还可能是呼吸系统机能的破坏、休克或其它原因，也就是说，比原纤维性变电流小得多的电流也足以造成人身触电危险。从漏电保护装置的设计来看，允许的电流值也不能取得太小，否则，制作困难。我国现在设计漏电保护装置，是按30毫安·秒计算的，也就是说，只要人身触电电流和触电时间的乘积，不大于30毫安·秒，便可以认为是安全的。

随着电网电压的不断提高，人身触电电流值 I_R 必然会增大，在此情况下，允许的触电时间 $\left(t \leq \frac{30}{I_R}\right)$ 则必须缩短，也就是说，必须加快漏电保护装置和自动馈电开关的动作速度，才能保证人身安全。例如，660 V电网，若人身触电电流为300 mA，则允许的触电时间便不得超过0.1 s。若电网电压升高成1140 V，则人身触电电流可能增大成为500 mA，允许的触电时间也就不能

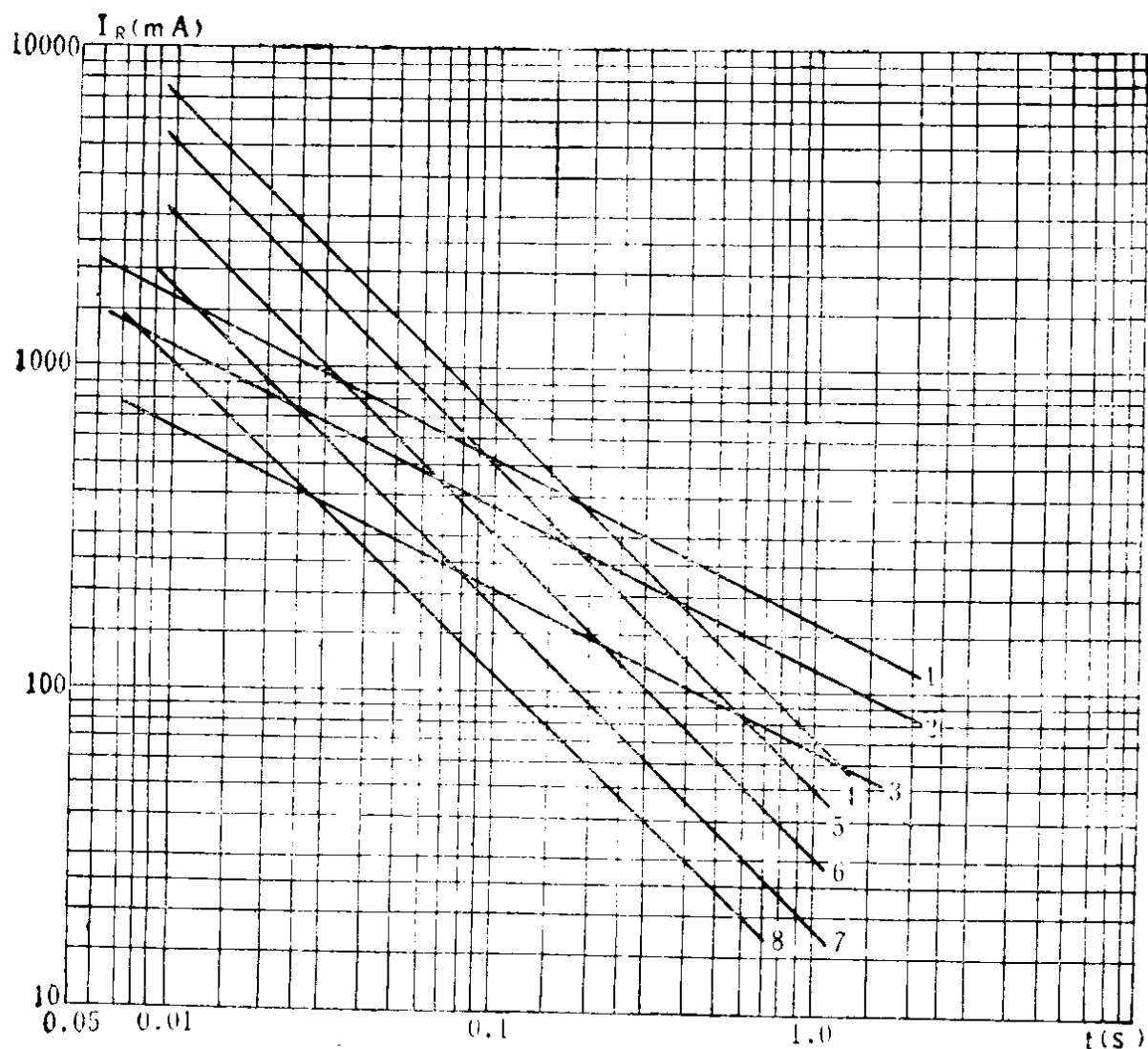


图 1-2 允许的人身触电时间 t 和电流 I_R 之间的关系曲线

1—按美国塔里采尔公式 $I_R = 165 / \sqrt{t}$ 绘制的曲线；2—按美国塔里采尔和李氏公式 $I_R = 116 / \sqrt{t}$ 绘制的曲线；3—按1962年日内瓦国际会议公式 $I_R = 65 / \sqrt{t}$ 绘制的曲线；4—按西德克和平奥西朴卡公式 $I_R = 70 / t$ 绘制的曲线；5—苏联基色列夫和契尔金公式 $I_R = 50 / t$ 绘制的曲线；6—按西德奥西朴卡公式 $I_R = 30 / t$ 绘制的曲线；7—按苏联基谢列夫公式 $I_R = 18 / t$ 绘制的曲线；8—按国际电工委员会公式 $I_R = 10 + 10 / t$ 绘制的曲线

(单位： I_R —mA； t —s)

超过60ms。因此，随着电网电压的升高，漏电保护装置和自动馈电开关的跳闸时间必须缩短，也就是说，此时应该对漏电保护装置和自动馈电开关提出更高的要求。

5. 电流类型及频率

尽管许多研究者对人身触电电流的类型和频率作过比较和评

定，但是，直到现在，对这个问题仍未取得一致意见。如在同样的电压下，用比较法研究交流和直流的危险性，就没有得出确定的倍数关系，说明还存在一些不明的原因。

一般讲，直流的危险性比交流小，这不仅是因为人身电气参数有交、直流之分，而且不同类型的电流，作用到活的机体上，所引起的生理反应也不同。

此外，不同频率的电流对人体的危害也不一样。根据用狗做的试验表明：在50Hz交流电流作用下，死亡率为100%；在100Hz时，死亡率为50%；125Hz时，死亡率为20%；而在150Hz时，死亡率几乎为零〔3〕。

对人来讲，也有类似现象，频率越高，危害越小。多数研究者认为，50~60Hz是对人体伤害最严重的频率（注：也有资料表明，200Hz时最危险）当电流的频率超过2000Hz时，对心肌的影响就很小了。因此，医生常用高频电流给病人治病。但是，也必须指出，在高频高压的电击过程中，也有可能发生人身触电死亡事故。

6. 人身电流的途径

一般认为，电流通过心脏、肺部和中枢神经系统，其危害程度较其它途径要大。实践也已证明，电流从一只手到另一只手或从手到脚流过，触电的危害最为严重，这主要是因为电流通过心脏，引起心室颤动，使心脏停止工作，直接威胁着人的生命安全。因此，应特别注意，勿让触电电流经过心脏。

当然，这并不等于说，电流从一只脚到另一只脚流过，就没有危险。因为，人体的任何部位触电，都可能形成肌肉收缩以及脉搏和呼吸神经中枢的急剧失调，从而丧失知觉，形成触电伤亡事故。

7. 身心健康状态

除上述一些因素外，触电的伤害程度与触电者本人的健康状况、精神状态等也有关系。一般来说，患有心脏病、结核病、精神病、内分泌器官等疾病或酒醉的人，触电后所引起的伤害程