

# 电接点技术

〔日〕土屋金弥 著

01

机械工业出版社

本书主要介绍了电接点的发展过程, 电接点最常发生的问题, 其中包括电接点的损耗、转移、接触电阻、熔焊、粘附等现象。并从物理、化学、金属学等方面阐述了电接点材料以及上述现象的相互关系。书中还介绍了各种接点材料及其试验方法, 选择方法等内容。

本书可供电气、电子装置设计, 研究部门从事电接触材料、电接点研究和生产的技术人员阅读, 也可供有关大专院校师生参考。

## 電 氣 接 点 技 術

著者 土屋金弥

発行所 総合電子出版社

1980

\* \* \*

## 电 接 点 技 术

〔日〕土屋金弥 著

刘茂林 译

王凌芝 王玉砚 校

\*

责任编辑: 张沪光

\*

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)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行, 新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/32 · 印张 7 · 字数 150 千字

1987年12月重庆第一版 · 1987年12月重庆第一次印刷

印数 0.001—2.870 · 定价: 1.70 元

\*

统一书号: 15033 · 6915

## 译 者 的 话

原著为1980年版。作者土屋金弥(教授、工学博士),长期从事电气、电子装置的电接点技术研究。在本书中作者以40年间的研究成果为依据,对电接点技术的发展过程,电接点上发生的各种基本现象,电接点材料,电接点材料的选择及其试验方法作了较详细的论述,同时也阐述了电接点使用时的接触电流、损耗、转移、熔焊、粘附等问题与电接点材质以及电接点的电气、机械的使用条件之间的相互关系。本书收录的实验数据较多,对电气、电子工业使用电接点的领域以及电接点材料的制造和研究部门了解电接点技术及普及电接点知识将会有所帮助。

应该指出,虽然本书译自原著1980年版,但因它是以作者1969年发表在日本《电子材料》杂志上的10次连载讲义为基础资料编写的。文中讲到接点的“现状”部分,有的系指当时日本的情况,这些需请读者注意。

本书在翻译过程中对原文表达不够明确之处,根据译者的理解作了简明的注释,对于非法定计量单位,在书中第一次出现时加了换算注。由于译者专业水平所限,错误难免,敬请读者批评指正。

全书由王成芝同志负责校订,其中第一章~第四章由王玉祝同志初校。在翻译过程中得到了北京有色金属研究总院电接触材料研究小组孟树昆、林端文等同志的支持与帮助,在此谨致谢意。

## 序

接点现象必须从电学、物理、金属学、化学等广泛领域进行探索，即使不能将每种基础现象研究得十分透彻，但也必须从广泛的角度着手研究。

过去所发表的文献多数是关于各种个别问题的论述，且属于当时电气、电子装置的经验数据，往往前后不一致。所以根据这些知识很难考察实际问题，一般，研究人员、技术人员不得不以一种暧昧的态度对待这些问题。这是接点的研究难于进行的主要原因。因此当研究水平低，或者经济上不富裕时，或是象日本这样仿效外国科学技术的，且在经济上不很发达的国家在接点研究方面很难取得研究成果，所以接点技术发展比较缓慢。

因此，在日本长期存在这种倾向，即电气、电子装置制造及使用部门，哪怕是非常小的接点问题都要去请教接点专家。最近这种情况虽然在减少，但其不受重视的倾向仍比其他先进国家明显。

这是因为接点的外观极其简单。另外，作者认为即了解接点对电气、电子装置的意义与作用，但由于接点的科学技术中物理学的成分少，很难形成系统的理论。因而与日本的国民性不相适应（作者认为日本人受以狭隘的观点看待事物，且具有高水平的物理学才能、敏于灵、仿效能力强等特点）。而在电子学等领域，其现象单纯，且非常符合日本国民的要求，所以日本的电子学发展迅速，但接点在电气、电子装置中将与这些长寿命的集成电路、半导体元件等有源元

件长期并存。

日本人同事之间的协作关系较好，而社会集团间的协作观念淡薄，这一点也表现在接点技术方面。与接点有关的人员中从技术水平高的到水平低的之间很宽的范围内，接点知识的普及与情报交流尤为重要。如果忽视这一点就会产生居于接点工作之中而不了解接点的现象。

应日本工业调查会之约，以这些读者为对象，作者从1969年1月至同年12月，分10次在《電子材料》杂志上将接点技术作了简明易懂的介绍。

此书是后来应日本综合电子出版社的请求，以上述资料为基础整理而成的。既要增添最新接点技术，又要使接点技术的论述简明易懂，就很难整理成小册子，为了满足这些要求，作者试图以自己40年间的研究成果为中心编写出此书，如对读者有所帮助，将不胜荣幸。

本书引用了许多文献和著作，这里谨向这些作者表示谢意。特别是要感谢R. 霍尔姆(R. Holm)、L. 琼斯(L. Jones)、A. 基尔(A. Keil)、凤等各位先辈的著作长期以来的帮助与教益。另外，随着各种电气、电子装置的发展，特殊的接点技术也象密封继电器、真空开关、插件一样正在发展之中，关于这方面的论述，请参看有关著作和资料。

土屋 金弥

1980年1月

# 目 录

译者的话

序

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第一章 接点的发展及其作用.....         | 1  |
| 1.1 接点的发展过程.....           | 2  |
| 1.2 接点的特性.....             | 6  |
| 1.3 接点的作用与分类.....          | 10 |
| 1.4 与接点有关部门、人员间的协作.....    | 11 |
| 第二章 接点最常发生的问题.....         | 14 |
| 2.1 接点制造时发生的问题.....        | 14 |
| 2.2 接点使用时发生的问题.....        | 16 |
| 第三章 损耗与转移.....             | 21 |
| 3.1 由电弧放电引起的损耗.....        | 21 |
| 3.1.1 短电弧(Short arc).....  | 25 |
| 3.1.2 长电弧(Normal arc)..... | 27 |
| 3.1.3 大功率电弧.....           | 28 |
| 3.2 由金属桥接引起的损耗.....        | 30 |
| 3.3 由辉光放电引起的损耗.....        | 32 |
| 3.4 结论.....                | 35 |
| 第四章 接触电阻及熔焊、粘附.....        | 38 |
| 4.1 接触电阻.....              | 38 |
| 4.1.1 束流电阻.....            | 40 |
| 4.1.2 表面膜电阻.....           | 45 |
| 4.1.3 电压、电流对接触电阻的影响.....   | 49 |
| 4.1.4 接触部位温度与接触电阻的关系.....  | 52 |
| 4.2 熔焊与粘附等.....            | 54 |
| 第五章 理想的接点材料.....           | 61 |

---

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 5.1 接点材料所要求的物理特性 .....                 | 61  |
| 5.2 接点材料的物理常数之间的关系 .....               | 62  |
| 第六章 金属学性质(晶粒) .....                    | 66  |
| 6.1 接点放电最先发生在晶界的根层及其影响 .....           | 66  |
| 6.2 晶粒的大小与方向(硬度) .....                 | 69  |
| 6.3 杂质的影响 .....                        | 71  |
| 6.4 制造方法(熔化法、浇铸法)的影响 .....             | 72  |
| 6.5 理想的弱电流接点材料与强电流接点材料 .....           | 73  |
| 第七章 化学性质(表面膜) .....                    | 78  |
| 7.1 金属表面的接触电阻 .....                    | 78  |
| 7.2 贵金属表面的氧化膜 .....                    | 81  |
| 7.3 电压、电流对氧化程度的影响 .....                | 84  |
| 7.4 材料的电导率及耐氧化性对接点温升的影响 .....          | 85  |
| 7.5 接点材料的静态及动态熔焊特性 .....               | 86  |
| 第八章 粒状生成物及其影响 .....                    | 92  |
| 8.1 粒状生成物影响的测定 .....                   | 92  |
| 8.2 粒状生成物的特性和表面膜的机械性质 .....            | 93  |
| 8.2.1 粒状生成物的特性 .....                   | 93  |
| 8.2.2 表面膜的机械性质 .....                   | 95  |
| 8.3 关于接点粒状生成物的研究 .....                 | 97  |
| 第九章 接点材料概论 .....                       | 107 |
| 9.1 接点材料的分类 .....                      | 107 |
| 9.1.1 按接点材料的性质分类 .....                 | 107 |
| 9.1.2 按电弧特性分类 .....                    | 107 |
| 9.1.3 按氧化物、硫化物及其他表面膜的<br>性质与状态分类 ..... | 108 |
| 9.1.4 按用途分类 .....                      | 108 |
| 9.2 单金属、合金及烧结合金 .....                  | 109 |
| 9.2.1 单金属 .....                        | 109 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 9.2.2 合金 .....                   | 113 |
| 9.2.3 烧结合金 .....                 | 114 |
| 第十章 接点材料分论 .....                 | 119 |
| 10.1 单金属 .....                   | 119 |
| 10.1.1 熔点较高的金属 .....             | 119 |
| 10.1.2 熔点低的金属 .....              | 120 |
| 10.1.3 熔点高的金属 .....              | 126 |
| 10.1.4 其他特殊的单金属 .....            | 128 |
| 10.2 合金 .....                    | 129 |
| 10.2.1 用熔化法制成的合金 .....           | 129 |
| 10.2.2 用烧结法制成的合金 .....           | 134 |
| 10.2.3 用内氧化法制成的合金 .....          | 140 |
| 第十一章 关于接点材料的特殊问题 .....           | 145 |
| 11.1 镀层与润滑 .....                 | 145 |
| 11.1.1 镀层 .....                  | 145 |
| 11.1.2 润滑 .....                  | 149 |
| 11.2 异种金属组合的接点 .....             | 153 |
| 11.3 空载断续开闭所形成的表面膜 .....         | 158 |
| 第十二章 接点材料的试验、选择方法及加工与故障调查 .....  | 162 |
| 12.1 试验方法 .....                  | 162 |
| 12.1.1 接触电阻特性的试验 .....           | 164 |
| 12.1.2 损耗转移特性 .....              | 189 |
| 12.1.3 熔焊特性 .....                | 192 |
| 12.1.4 其他 .....                  | 196 |
| 12.2 选择方法与加工 .....               | 196 |
| 12.2.1 接点的形状、大小, 部件的种类与制造法 ..... | 196 |
| 12.2.2 接点的选择 .....               | 204 |
| 12.3 故障调查、对策及标准 .....            | 206 |



## 第一章 接点的发展及其作用

为了论述电接点的问题,首先必须叙述它的发展过程,其一是因日本和其他先进国家比较,其接点的发展过程极不相同。在日本人们把接点定义为机械地进行电路开闭或接触的电接触元件,虽然它早就是电力机械的重要元件,但由于其外观非常简单而容易被忽视,而且实际上在日本由于没有很好地了解接点的重要性,而可以见到忽视接点的倾向相当普遍。

随着科学技术的进步,对于接点的基本现象及应用必须从新的观点加以重新认识,特别是现在提出的高可靠性的要求以及微型化、新材料及环境气氛等问题。对接点专家来说,首要问题是接点的制造。但另一方面,普遍要求对基本现象、特别是对使用条件的影响进行研究,尤其电力机械制造者、使用者的这种要求更为强烈。

接点的研究之所以必要,主要是以下两点理由:

(1) 在不断增加的电气装置中,存在着非常多的接点或接触部分。

(2) 这些接点或接触部分必须满足的条件,其难度正在不断增加。

然而,接点或接触部分的数量要比普通电气、电子元件的数量大得多。就电子装置而言,随着集成电路发展和使用从而减少了接触部分,能在某种程度上缓和这一问题,但是一般来说,由于电子装置不断趋于复杂化,接点或接触部分在电子装置中不但大量存在,而且今后仍将继续存在,这是个非常重要的问题。电气装置也面临同样的问题。由于以无

接点化为目标会更加复杂, 因此要得到一定的可靠性则更加困难。而且由于随着对电气、电子装置的功能提出愈来愈高的要求, 因而对可靠性的要求也越来越严。由此可见, 只要存在电子、电子装置, 接点或接触部分就永远也不可能消失。换言之, 随着其装置的发展还会与日俱增, 接点既是电子、电气装置的关键性元件, 又是其致命点。

### (1) 接点的发展过程

由于接点现象非常复杂, 涉及范围很广, 所以当研究接点时, 必须从多方面予以周密的考虑, 而当它获得实际应用时往往不必去深入探讨每一个基础现象, 而应当不断地从各个方面进行重新评价, 以求获得进一步改善。

世界上最早关心接点的是英国约翰逊马赛公司(Johnson Matthey Co), 该公司的样本中有如下记载。

1850年间, 在电信用途方面使用继电器磁体的想法开始实际应用, 这样铂才开始用于电键和继电器, 金被用于电时钟。这样一来在电工学的初期时代只有铂才适宜作接点材料的想法广为流传, 然而随着旋转机械的出现, 要求提供可靠的控制装置、保护装置, 因而开始要求使用除铂以外的接点材料, 并且由于长期的使用经验和研究的结果, 使用条件的影响已经搞清楚, 这就形成了今天人们所见到的多种接点材料, 以及具有特殊构造的接点等实际应用。

现在向接点制造厂订购适用于某种特定的电力机械的接点时必须填写详细的定货说明书。如表1.1所示。

由表可知, 接点的性能取决于电力装置的各部分的结构和工作原理, 故接点乃是电力机械的关键, 又是其致命点。

如把这一发展过程与接点和电力机械对照起来考虑时就

表1.1 接点定货说明书

- 
1. 装置的性质与目的, 电压
  2. 是直流, 还是交流 (频率), 或者两者兼有
  3. 负载是电感性、电阻性、电容性或灯管
  4. 闭合、断开、过载及短路时的电压、电流、功率值
  5. 开闭次序 (一般、最大、最小)
  6. 动作周期的连续性与频率
  7. 接点所承受的电压范围
  8. 消火花电路的电容量、电阻值
  9. 消火花装置
  10. 闭合时、断开时接点的动作方法
  11. 接点开闭方法的图示
  12. 开闭时动作的类型 (锤打、滑动、旋转)
  13. 接点是否承受激烈的机械动作
  14. 断开、闭合时的速度
  15. 接点间隙
  16. 抖动、振动的程度
  17. 闭合时接点承受的力
  18. 断开所需要的力
  19. 接点的容许尺寸
  20. 接点组装方法
  21. 接点表面形状
  22. 组装接点时的部件材料及大小
  23. 损害接点的气氛
  24. 周围温度
  25. 容许温升
  26. 所要求的接点寿命
  27. 容许的接点价格
  28. 是否为初次使用
  29. 曾用过何种接点材料及详细的经历
  30. 其他参考事项
- 

很容易理解下述的事实。

即接点的研究始于约50年前的电力机械的初期时代, 当时电力机械的性能低, 依靠使用铂、金等接点材料就可以避

免故障，可以说，接点方面还有潜力。随着电工学的进步以及高性能，大容量电力机械的出现，接点和电力机械的性能逐渐相吻合，这时虽然对接点的材质、形状、大小等方面提出了很严格的要求，但由于注意正确地选择接点，从而满足了电力机械的要求。

表1.1就是电力机械以接点为中心，使接点性能得以发挥的一种形式。在电力机械方面，如果对接点的材质、形状、尺寸或结构等条件竭尽各种努力之后仍不能满足要求时，就必须使用代替接点作用的其它部件或者考虑无接点化的问题。

归纳以上的发展过程，如表1.2所示。即现在，当电力机械设计、制造、使用时必须根据各种具体情况，进行新接点材料的研究，按使用条件进行接点选择方法的研究，进行开闭机构的改良以及由接点以外的元件执行开闭的研究等工作。因此从某种意义上说，应该包括“电接点技术”一词所表达的内容。

表1.2 接点与电力机械的发展过程

- 
- |                                           |   |
|-------------------------------------------|---|
| (1) 接点的研究(材质、形状、大小、表面加工等)                 | ↓ |
| (2) (1)的研究以及根据使用条件选择接点的研究                 | ↓ |
| (3) 根据使用条件以选择接点为主的研究                      | ↓ |
| (4) (3)的研究以及与(3)相反，确定使用条件以延长接点寿命的研究       | ↓ |
| (5) (4)的研究以及进行电力机械设计以延长接点寿命的研究            | ↓ |
| (6) (5)的研究及用半导体元件、电子管、磁放大器代替接点，实现无接点方式的研究 |   |
- 

另外，再来看看日本的情况。“电接点虽然是电力机械的关键元件，但由于外观极其简单，而很容易被忽视。”这一看法早就存在，而日本却没有很好地理解这一点，所以一

直存在忽视接点的倾向，以下事实就足以说明这一点。

(1) 在美国、联邦德国等先进国家都可以见到象英国的 J·马赛公司那样很早就对接点非常关心，并且现在仍然是继续从事接点研究、制造的公司，而在日本却看不到这类的制造厂家。因此，日本的接点制造厂同直接面临接点问题的电力机械制造厂及用户相比，所从事的研究和发表的文章少得多，另外和外国的接点制造厂相比较，这方面的工作也非常少。所以在电力机械制造厂、用户，特别是技术水平低的部门，其工作人员很少进行以接点制造厂为中心的接点的情报交流，以致使接点制造厂的工作非常被动，例如制定了其他先进国家所见不到的那种接点材料的国家标准<sup>①</sup>。

(2) 研究题目的选择比较自由，虽然与企业无直接联系的电工学的研究机关中从事接点研究和发表的文章较小，但电力机械制造厂、用户却遇到很多接点方面的问题，迫于需要所发表的文章较多。但是很少有人对接点进行系统地持久地研究，学会杂志等以论文发表的内容也较少。另外，日本物理学会对接点的关心也远不及其他先进国家。可以认为，象接点这样不受重视的现象乃是造成日本不容易看到接点研究成果的重要原因。因此对于接点研究人员也很容易受冷遇。

还可以认为，产生上述这种差异的最大原因在于日本国内普遍存在着不是为他人着想，从全面的客观的立场判断事物，而是以狭隘的观点观察事物，并且由于目光短浅，没有认真考虑接点或接触部分在电力机械中担负的使命，故对其重要性没有真正理解。但是在日本通过对电力、通信、铁路

---

① 作者认为日本关于接点的国家标准过于简单。——译者注

等各方面的现场进行大规模的接点故障调查, 已经看出故障以“积少成多”的方式积累, 巨大数量的故障构成了巨大的经济损失, 这才逐渐地认识到接点的重要性。

美国的材料试验协会(ASTM)为了对接点进行调查研究, 每年都发行接点的文献集(Bibliography and Abstracts on Electrical Contacts)。但1963年以后停止了发行。很可能是因为电力机械、零件的种类繁多, 数量庞大, 接点问题涉及的范围非常广, 更加倾向于必须按各种不同的电力机械、部件类别来论述接点的缘故。这一论文集把关于接点的各种论文分别整理为接点材料、静止接点、接触电阻、放电现象、摩擦及润滑油等24个项目。对于各个项目所发表的论文数目随着电力机械的发展变化情况作了调查, 其结果如图1.1所示。该图表明, 接点受电力机械的构造原理所支配, 以及为难度极大的接点物理学的建立所作的不断努力。

后来, 有关接点的论文由霍尔姆·塞米纳(Holm Seminar)和IEEE进行搜集, 这些论文每年在美国举办的电接点Holm讨论会的会报上根据ASTM制定的分类法按照顺序进行了介绍。

## 1.2 接点的特性<sup>[2]</sup>

接点性能主要由接触电阻、熔焊特性、损耗特性所决定。对纯金属来说, 从它的原子结构考虑这些特性均优的材料是不存在的, 例如导电性良好的材料(Ag、Cu、Au等), 其熔点、沸点比较低, 耐磨性差, 而熔点、沸点高的材料(W、Mo、Pt等)则导电性差。

为了改善这种互相矛盾的性质, 例如可用熔炼法或烧结法制成合金材料, 但是目前还未能得到能满足所有性能要求

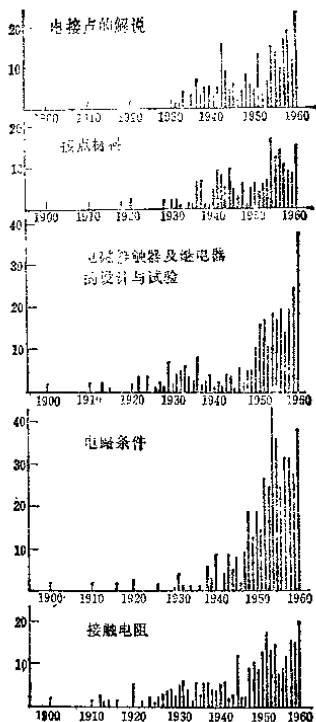


图1.1 接点的研究动向 (按不同科技领域的文献归类) (纵坐标: 论文数, 横坐标: 年代)

的材料。找不到万能的接点材料即意味着接点受使用条件的影响非常大。如表1.1所示, 接点性能在很大程度上决定于

它的使用条件（电气的、机械的、化学的）。因此，在不同的使用条件下发生的接点问题也是不同的。

例如，因接点材料的成分差异造成损耗不同以及转移方向发生变化的例子很多，表1.3为其中一例。从中可以系统地看出由于成分差别所造成的影响。而实际上，根据现场调查发现，使用条件的影响更大。

表1.3 直流电磁接触器的接点损耗

| 材 料   | 比 消 耗( $\mu\text{g}$ ) |      |      | 动作次数<br>( $\times 10^3$ 次) | 对铜的相对损耗 |
|-------|------------------------|------|------|----------------------------|---------|
|       | 负 极                    | 正 极  | 和    |                            |         |
| B-M-6 | 8.5                    | 12.5 | 21   | 100                        | 1.18    |
| B-M-5 | 7.5                    | 30.5 | 38   | 100                        | 2.14    |
| B-M-4 | 8.5                    | 4.6  | 13.1 | 200                        | 0.75    |
| B-M-3 | 8.6                    | 3.4  | 12   | 200                        | 0.69    |
| B-M-2 | 10.3                   | 3    | 13.3 | 150                        | 0.76    |
| B-M-1 | 10.5                   | 3.5  | 14   | 150                        | 0.81    |

注：1. B-M表示W-Cu合金，W含量按材料号的顺序增加。

2. 试验条件：使用电压为220V的直流电磁接触器试验，当电路电感为25mH时流经电流150A切断，闭合次数400次/h。

例如，根据电气学会接点材料专门委员会的接点故障调查，电气断路器(ABB)、磁断路器(MBB)、绝缘子式断路器(PCB)、油断路器(OCB)的接点故障发生的原因只有少数是因为自然劣化引起的，绝大多数属于接点调整不佳、工作不良的故障，而不是因为接点的材质差造成的。此外，还报道了保护继电器等继电器的故障中属于接触不良的占50%以上，其原因是接触压力不够及接触形状不适宜等造成的。

弱电流接点的情况也是如此，使用条件的影响甚至比强电流场合更大。1965年在日本电报公社（电信电话公司）的主持下，在容量比较大的纵横制方式的电话局进行了接点损



耗的实况调查。通过这一调查，弄清了负载电流、电缆长度、电阻电容消火花器的残留电荷等因素对损耗的影响。由此得知，电话局的接点活性相当大，容易起弧。另外，为了调查Ag/Pd合金的成分比、气氛等影响进行了试验，得到如下结果。

(1) 从气氛影响来看，不论 柠碱(limomin)类有机气体，还是硫化氢类无机气体都可使接点活化，而使损耗增大。这种气氛的影响比接点的材质、负载、电流等对损耗的影响都大得多。

(2) 消火花器的效果：当接点活化时变阻器和电阻电容消火花器比较，效果显著下降。

(3) 随着负载电流的增加，损耗也增加。

(4) 接点的材质比其他因素的影响小得多，在活化状态，Ag/Pd合金接点的损耗几乎不随合金成分而变化。

从以上调查结果可知，气氛对接点损耗起很大作用，而材质的影响却较小。反之，由于材料的成分有极小的差异而使损耗量和转移方向不同的例子却早就为人们所熟知。这样的情况不仅出现于不同的材质，也适合于表1.1所示的使用条件，例如接触压力、电流、接点的形状等不同也会引起上述差异，所以接点现象是相当复杂的。

然而，由于日本人习惯于以狭隘的眼光观察事物，且具有敏捷的分析头脑和实干能力，故长期倾向于通过接点的材质、形状及大小等接点自身的研究以求改善其性能。还由于种种缘由，和欧美人相比很少考虑到他人，因此在与接点有关的人员、部门之间很少进行接点情报的交流，所以一旦实际应用时就会出现很多不利之点，但现在已开始逐步认识到了这一点。不要忘记无论研制出多好的接点材料，其使用方