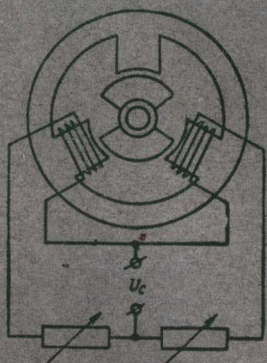


〔苏联〕A. A. 奥金佐夫著



陀螺装置中 电气元件的设计

国防工业出版社

陀螺装置中 电气元件的设计

[苏联] A.A. 奥金佐夫著

孙承恩、芦靖华 合译



国防工业出版社

1965

內 容 簡 介

本书主要是闡述陀螺装置中所用的各种电气轉換器(角度傳感器和力矩发生器)的性能和結構,及其計算方法和設計步驟。书中还列举出一些很有实际参考价值的产品数据。

本书可作为仪表专业院校师生的教学参考书,同时对于研制和生产航空陀螺仪表的工程技术人员也有所裨益。

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭЛЕМЕНТОВ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

[苏联] А. А. Олинов

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ВЫСШАЯ ШКОЛА»

*

陀螺装置中电气元件的設計

孙承恩、芦靖华 合譯

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业許可証出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印張 4 7/8 123 千字

1965年8月第一版 1965年8月第一次印刷 印数: 0,001—1,240册

統一书号: 15034·961 定价: (科七) 0.85元

目 录

前言	5
緒論	7
第一章 接触式角度傳感器	9
§ 1.1 一般特性. 结构特点	9
§ 1.2 接触式傳感器的計算	14
§ 1.3 关于接触式傳感器的寿命	21
§ 1.4 熄灭电火花綫路	23
第二章 电位計式与接点电位計式角度傳感器	27
§ 2.1 一般特性	27
§ 2.2 结构特点	29
§ 2.3 电位計式傳感器的联接綫路. 各种联接綫路下傳感器的 靜特性方程式. 特性曲綫的非綫性誤差	31
§ 2.4 带有負載的电位計式傳感器的特性非綫性的降低方法	40
§ 2.5 綫性电位計式傳感器的計算	42
§ 2.6 函数电位計式傳感器的构造方法	44
§ 2.7 利用带有負載的电位計式傳感器特性的非綫性来补偿 陀螺仪表的固有非綫性	45
第三章 变压器式角度傳感器的一般特点. 具有移动 銜鉄的变压器式傳感器	53
§ 3.1 关于術語的若干意見	53
§ 3.2 变压器式傳感器的一般特性	54
§ 3.3 具有移动銜鉄的傳感器的一般特点	57
§ 3.4 具有移动銜鉄的傳感器的结构型式	60
§ 3.5 傳感器的近似計算	66
§ 3.6 反作用力矩的計算	71
§ 3.7 导磁体和銜鉄間徑向吸力的計算	76
§ 3.8 减小傳感器反作用力矩的方法	77
§ 3.9 有关估計表面效应的意見	79

第四章 具有旋轉繞組的變壓器式角度傳感器	82
§ 4.1 一般特性	82
§ 4.2 考慮到傳感器內阻和次級迴路反作用時，有負載的 傳感器的靜特性方程式	91
§ 4.3 傳感器的近似計算	94
§ 4.4 傳感器的反作用力矩計算	97
§ 4.5 減小鉄磁性反作用力矩分量的方法	100
§ 4.6 減小電動反作用力矩分量的方法	103
第五章 具有移動繞組的變壓器式角度傳感器	111
§ 5.1 一般特性	111
§ 5.2 結構特點及結構型式	115
§ 5.3 傳感器的簡化計算	117
第六章 陀螺裝置中其它型式的角度傳感器	126
§ 6.1 電解式傳感器	126
§ 6.2 輻射熱測量傳感器	129
§ 6.3 電感式傳感器	130
§ 6.4 電容傳感器	132
第七章 陀螺裝置的力矩傳感器	135
§ 7.1 一般特性	135
§ 7.2 電磁式傳感器	139
§ 7.3 磁電式傳感器	140
§ 7.4 電動式傳感器	147
§ 7.5 感應式（兩相）傳感器	148
參考文獻	155

前 言

本书是供教学计划中规定学习陀螺仪表课程的高等院校仪器制造专业用的教学参考书，主要适用于高等院校仪器制造系的陀螺专业。

对这种书籍需求已久，因为陀螺装置电气元件方面的文献既非常之少，而讲述这一问题的教材更是几乎一本也没有。这些情况就鼓励了作者着手编写这本书。

作者是在以В. И. 烏里揚諾夫（列宁）命名的列宁格勒电工学院讲授陀螺装置电气元件课程时所编讲义的基础上写成本书的。

在编写本书时，首先提出的课题是如何合理的选择电气元件的型式、线路与结构，以便尽可能更加全面地满足各种陀螺装置的具体要求。为此，特别着重从物理方面来讨论各种真实电气元件的特性和参数与理想元件不同的原因。通过这一途径便可能找出减少这些差异的实际办法。

对所有三个主要设计步骤——选择型式与线路、计算和结构设计——的讨论，是从对陀螺装置中电气元件所要求的特点这一角度出发的。本书照例不再引述一般性的知识，这些可由自动化元件、电机以及其他各方面的手册和文献中查到。但本书并不排除利用这些一般性的参考文献。本书的有关章节中附有所引用的参考文献名称。

对于各种电气元件或它们的某些参数的计算问题，在本书中并不是一律详尽地加以阐述的。作者力图较详细地论述其他文献中研究得还不够的计算问题，而在另一些情况下，则仅限于一般地指出计算的方法。这样的叙述方法主要是由教学上的需要而决

定的：教学参考书不应限制学生在完成教学的设计和计算时利用各种文献和独立地、创造性地进行工作。同时在本书中，根据文献上的资料，收集了有关陀螺装置电气元件系列化产品的主要参数的知识。这些资料对于完成课程设计和毕业设计无疑是有益的。

本书包含有若干原始研究成果，因此对于在陀螺技术领域内工作的工业部门与设计研究机关的工程技术人员也有所裨益。

遗憾的是，按原订的计划，本书的篇幅极其有限，不允许作者再增加一章，来讨论消除角度传感器零位信号的方法和线路，以及有关角度传感器和力矩传感器的其他材料。作者希望在本书再版时能弥补这个不足。

(节译)

緒 論

陀螺仪表和装置主要用于运动对象的机载设备中。它們作为导航仪表得到了极其广泛的应用。在运动对象的大多数自动控制系统中，它們用来测量对象的各种运动参数，也用来作为运动对象所载的各种装置的几何空間稳定系統。

随着运动对象的高速发展和日益完善——速度、高度(深度)、距离的增加——对陀螺装置的工作精确度也提出了更严格的要求。由于运动对象上的陀螺装置是在极其不良的条件下工作(很大的动态过载，外部介质的物理参数：温度、压力、湿度等的变化范围很大)，这就使得满足这些要求更加困难。上述要求的提高同时再加上陀螺装置工作条件的恶化，就迫使設計工作者不得不寻求提高这些装置的工作可靠性与精确度的途径和方法。

值得注意的是，陀螺仪表不断改进的过程是与越来越提高电气元件的作用、扩大其应用范围以及电气元件本身的改进分不开的。随着运动对象的自动控制陀螺系統和测定对象的运动参数与位置参数的复杂导航系統的发展，电气元件的作用更加增大了。在这些系統中，采用了各种各样的現代自动化元件和計算技术元件。

本书不仅不全面討論陀螺仪表和系統中所有各种电气元件，甚至对一些主要的电气元件也未加討論，因为对于机载自动装置綫路來說，这些元件大多数是一般性的。它們与工业自动装置各种綫路中諸元件的差別仅在于其使用更加精确——体积小，重量轻，耗电量小，精确度高，可靠性大，具有在复杂的动态与大气条件下的工作能力等。对于陀螺装置中不具有代表性的电气元件，本书中不加論述，可參閱其他自动化及計算技术元件方面的文獻〔2, 3, 4, 7, 10, 15, 16, 29, 38, 39, 42〕。

在这本书里只討論最有代表性的陀螺装置电气元件。如果不包括陀螺轉子的驱动电动机，則属于这类元件的首先应该是陀螺仪进动角傳感器与力矩傳感器。对于陀螺仪表与装置來說，这两

种元件是最有代表性的，这不单是因为不管陀螺組合件的用途如何，几乎任何陀螺仪內都有这两种元件，主要的还是，这两种元件直接影响到陀螺仪本身的工作精确度，也就是影响到陀螺仪的动态性能。

力矩傳感器用来产生相对于陀螺仪的某一支架軸的机械力矩，以引起陀螺仪的进动。这种元件之所以在陀螺装置中广泛的采用，是因为对于三自由度陀螺仪來說，施加外力矩是改变其空間方位的唯一方法。实际上，無論为保証陀螺仪的修正或者在开始工作时把陀螺仪的軸引向某一預定的方向，通常都必須采用这种方法。

某些系統中，力矩傳感器的誤差可以直接影响到整个陀螺裝置的精确度。

陀螺裝置中的角度傳感器是用来将表征陀螺仪軸的几何位置的角度轉換为电信号。从功用来看，它与其他自动裝置的角度傳感器并无不同之处。但是陀螺裝置中的角度傳感器，通常对它加于陀螺仪的反作用力矩的容許值、傳感器的零位稳定性和它的参数的稳定性等方面提出了更加严格的要求。陀螺仪的质量愈高，对角度傳感器的要求便愈严格。在現代的高质量陀螺裝置中，特別注意降低角度傳感器对陀螺的机械作用。由于这个原因，近来显然可以看出以更复杂、更完善的变压器式傳感器代替以前曾广泛采用的、结构简单的电位計式傳感器的趋势。与此同时，并十分注意通过新的结构型式的设计与工艺的改进，使傳感器更臻于完善。

本书以大部分篇幅来討論电气角度傳感器，这是陀螺技术中最精巧的电气元件，设计时应予特别注意。

在叙述材料的过程中，沒有固定采用任何一种目前通用的单位制。用绝对单位制（厘米、克、秒制）还是用实用单位制（米、公斤、秒、安制），要看在每一种具体情况下，采用哪种单位制来測量計算值或者原始值更为方便，书写公式更为簡明，文献中常見的某些公式及方程哪种写法更为普遍等等。同时，文中給出了所用单位制的某些說明，并且在很多情况下也給出了单位換算的办法。

第一章 接触式角度傳感器

§ 1.1 一般特性。結構特点

接触式傳感器是傳感器的一种最简单的型式。这类傳感器的特征是结构简单，造价低廉，并能輸出大的电功率。接触式傳感器的主要缺点，在于其显著的非綫性（继电器型）特性，并具有失灵区，这在很大的程度上限制了它的应用范围。在陀螺装置中，接触式傳感器通常用于下列两种情况：

1) 作为随动系統的傳感器（例如，在“TY”型陀螺罗盘与自动舵机的“琥珀”航向陀螺仪中）；

2) 作为陀螺仪表修正系統的傳感器（在陀螺稳定器的摆式修正系統中，在航向陀螺仪及陀螺积分器等 的内框架修正系統中）。

在上述两种情况下，接触式傳感器能保証执行元件（随动电动机，力矩傳感器）的工作，而无需加入中間放大器。在这两种不同的使用情况下，接触式傳感器非綫性特性的影响也是不同的。

第一种情况下，傳感器的非綫性特性使随动系統的工作发生自振，然而在陀螺装置中，由于随动系統的“顫动”有助于减小陀螺支架軸上的摩擦力矩，因此不能认为这是缺点。第二种情况下，由于大多数陀螺仪修正系統本身所具有的特点——其修正运动的速度都选得极低，通常并不发生自振。但也有例外（例如在陀螺积分器中），当同样为了减小陀螺支架軸上的摩擦力矩时，也要利用修正裝置的自振特性。

用在陀螺装置中的接触式傳感器，有两种本质上彼此不同的結構型式。其中的一种，类似于接触式继电器，是相碰的接触体。

这种结构只容许敏感元件对其中間位置有一个很小的偏移，而传感器的活动部分是同这一敏感元件联在一起的，传感器的接触体闭合后，承载接触体的结构元件的弹性力将对敏感元件的支架軸产生一頗大的反作用力矩。

第二种结构型式是彼此相对滑动或滚动的接触体。这种结构的传感器容许敏感元件对其中間位置有相当大的偏移，所产生的反作用力矩是干摩擦或粘性摩擦（滑动摩擦或滚动摩擦）力矩，自然这种力矩要做到尽可能地小。

第一种型式的例子是陀螺稳定器（图 1.1）修正摆上的和其他摆式修正系统中的传感器。第二种型式的例子是：ГV 型陀螺罗盘的接触式传感器，航向陀螺仪与陀螺积分器内框架的修正传感器，以及在按照继电器规律控制稳定电动机的情形下动力陀螺稳定器（图 1.2）进动軸上的传感器等。

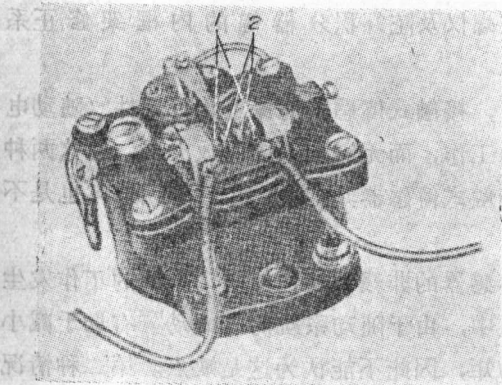


图1.1 陀螺稳定器修正摆的接触式传感器：

1—静止接点；2—活动接点。

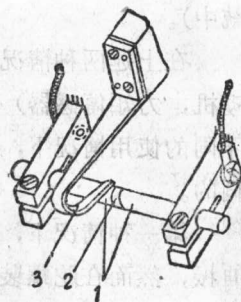


图1.2 滑动接触式传感器结构的例子：

1—静止接触体；2—绝缘隔片；
3—活动接点。

接触式传感器的工作可靠性与稳定性和接点（接触体）的材料有很大的关系。接点材料应满足下述要求：

- 1) 低氧化性或氧化层的导电性好;
- 2) 高硬度;
- 3) 高熔点;
- 4) 导电性及导热性好。

此外, 接点材料应易于加工且价格尽可能低。

自然界中并不存在能够满足上述所有要求的材料, 因此不可能做成一种通用的接触式传感器, 无论工作在大的或小的接触力下, 或是在大的与小的传感器容许电流下, 都有同样好的性能。实际上要用寻求折衷的解决办法来克服上述困难。首先是研制合金或者不可熔金属的粉末烧结混合物(所谓合金), 这些材料与纯金属相比有着更好的性能, 其次则是在大小不同的传感器电流和大小不同的接触力之下, 采用不同的材料与接点形状。

对于工作在小电流(小于燃弧电流●)下的接点, 可采用不易被腐蚀的金属: 银、金、铂、钯、铑、钌和以这些金属为基的合金。

对于工作在达到与超过燃弧电流的电流下的接点, 可采用硬质的难熔性材料: 钨、钼、钽-钼和其他合金, 以及聚合材料(银-钨、银-氧化钨●)。

陀螺装置中所用的接触式传感器, 与另外许多自动化元件中所常用的接触式传感器或其他接触式机构相比, 处于更不利的工作条件下。实际上, 陀螺装置的接触式传感器, 或者工作在几赫频率的连续转换状态(在随动系统中及自振修正系统中), 或者传感器的接点以极低的速度断开和闭合(在非周期性修正系统中)。传感器的后一个工作情况是更为不利的, 因为接点主要是在闭合而特别是在断开期间发生损坏[29]。增长闭合和断开的会使接点的损坏更加厉害。这种情况由于下述原因将更加复杂化: 在非周期性修正系统中, 接触体断开后的距离仍是极小的

● 燃弧电流值参看文献[29, 30]。

● 关于这些材料的更详细叙述参看文献[24, 37]。

(由于陀螺进动是无惯性的，接触式传感器所控制的陀螺修正运动，在接触体断开之后立刻停止)，这便为发生火花和电弧提供了非常有利的条件，因而有可能使接触体熔接或烧结。

此外，对于接触式传感器[碰合传感器(датчик соударения)除外]还要求敏感元件受到的反作用力矩最小。根据这个要求，应减小法向接触力(活动与静止接触体的挤压应力)，这同样使传感器的工作条件变坏。

对用于摆式修正系统中的碰合传感器，并不要求反作用力矩很小，但这种传感器中的接触力是由摆性力矩的大小决定的，因而在摆对其平衡位置的偏角不十分大的工作条件下，接触力也可能很小，这同样使传感器的工作条件复杂化。

根据陀螺装置中接触式传感器的上述工作特点，可得到下列结论：

1) 在陀螺装置的接触式传感器中，用作接点的材料仅只是那些能保证在小接触力(从十分之几克到几克)下可靠工作的材料。

2) 非周期性陀螺仪修正系统的接触式传感器，在接点断开或闭合时足以形成电弧的电压与电流下，是不能工作的。

因此，在陀螺装置的接触式传感器中，不能采用钨、钼型材料及其合金，这些材料具有高熔点、高硬度，但要求很大的接触力(100 克或大于 100 克)以破坏在其表面形成的氧化层。在另一些情况下，即当传感器必须通过以安培计的很大的电流时，采用聚合材料银-氧化铜是合宜的。采用这种材料的传感器能够可靠地在 20~30 克范围的接触力下工作(在不存在电弧的条件下)。采用这种材料，由于高温下氧化铜强烈地分解而使被电离的气体从接点间的空隙内挤出，便不容易发生电弧而使接点熔接。同时，接点表面上的氧化层也有很好的导电性，这就保证了在比较小的接触力下能可靠地工作。

最近几年来得得到应用的接点材料中，应该指出的是铈，它具

有高硬度、防蝕性、难熔性、高溫下很低的揮发性、以及令人滿意的导电性与导热性。由于这种材料价格昂貴，质脆而硬、实际上不能进行机械加工，因此，通常仅用作电解鍍层。鍍层厚2~50微米。对于銅、鎳、黃銅、磷青銅与鉍青銅，鉍可以直接鍍上去，对于鋅、鋁、鋼則需借助于銀塗敷层。鉍接点的特点是接触电阻恒定和耐磨性好。但在形成电弧的条件下則不允許采用鉍接点。

碰合傳感器接点的合理的結構，与极化继电器接点裝置的結構相似。在設計制造这种接触式傳感器的时候，应尽量使接点的工作平面垂直放置，以减少尘土的污染。

为了提高傳感器工作的抗振性、可靠性和“柔韧性”，至少有一个接点應該彈性固結。为此通常利用片狀彈簧来固定活动接点。在接触体碰合之后，彈性固定元件变形，接点彼此之間发生相对滑动，因而促使氧化层与灰尘从接点上自动清除。由于接触体在彈性固定元件变形时有相对移动，可使两个閉合后的接触体的接触区域离开接触体在閉合时开始接触的位置以及在断开时接触体分离的位置，后一位置要經受最大的損伤，因而具有不好的表面。上述种种有助于提高傳感器的工作期限。

为了提高傳感器的可靠性，制作与接触体并联的副接触体是适宜的。这时活动接触体可以裝在有纵向裂口的一个片狀彈簧上。

具有水銀接点的傳感器——被称作“錠 (свинка)”，是接触式傳感器的一种特殊結構 (图 1.3)，其靜止接点是插在小玻璃泡內的电极1，而活动接点的作用由水銀滴2与电极3来实现。不难理解，这种傳感器同时也是一个摆，因此仅可以用来轉換敏感元件相对于水平支架軸的轉动。这种傳感器可以用在陀螺垂直器的修正系統中和航向陀螺仪的水平修正

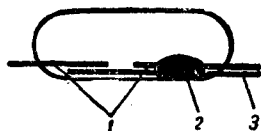


图1.3 具有水銀接点的傳感器(“錠”)。

系統中等等。这种傳感器最大的优点是反作用力矩极小。缺点是易受棧加速度的影响与振动时工作不可靠。

§ 1.2 接触式传感器的計算

接触式傳感器的計算包括：

- 1) 机械計算 (决定接触体受压时的最大应力)；
- 2) 热計算 (决定通过接点的最大容許电流，或决定接点的最大温升)；
- 3) 驗算是否发生稳定电弧。

机械計算 接点变形的大小可用彈性理論中求两个受压物体的接触区域变形的赫芝公式决定，这两个物体的表面可以是具有任意曲率的表面。对于一些具有規則几何形状的接触体的特殊情况，赫芝公式給出了某些简单的表达式。

对具有球形工作表面的接点，当它們受压以后，接触平面将是一个圓面，其半径为

$$a = 1.11 \sqrt{\frac{P}{E} \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}}, \quad (1.1)$$

式中 P —— 挤压力；

E —— 彈性模数；

r_1 和 r_2 —— 接点工作表面的曲率半径。

在这一公式与以下諸公式中，为簡化起见，泊桑比都取为常量且等于 0.3，对于大多数金属与合金这个数值接近于实际值●。

这种情况下，最大机械应力将位于接触平面的中心，并可按下述公式决定：

$$\sigma_{\max} = 0.388 \sqrt[3]{PE^2 \left(\frac{r_1 + r_2}{r_1 r_2} \right)^2} = 1.5 \frac{P}{\pi a^2}. \quad (1.2)$$

● 参看“Машиностроение. Энциклопедический справочник”(百科全书，机械制造)，т. 4 Машгиз，1947。

对于接触体工作表面是球面与平面的情形,可从式(1.1)及(1.2)推得相似的公式,只要令其中的 $r_2=\infty$ 。

当两个圆柱形表面(具有平行的圆柱轴线)相压时,接触面将是一个矩形,其宽为

$$b = 3.04 \sqrt{\frac{P}{lE} \cdot \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}}, \quad (1.3)$$

式中 l ——接触体圆柱形表面的长度。最大应力将在接触平面的中心线上,并可用下式表示:

$$\sigma_{\max} = 0.418 \sqrt{\frac{PE}{l} \cdot \frac{r_1 + r_2}{r_1 r_2}}. \quad (1.4)$$

对于圆柱同平面相压的情形,从后面两个公式同样可推得相似的公式。

十分明显,接触力的大小与接点工作面的半径应该这样来选择,即使得最大应力不超过材料的弹性极限。然而必须指出,对于点状接点,弹性变形的应力不仅能超过接触体材料的弹性极限,而且甚至能超过其极限强度,而不发生损坏或塑性变形。这个有趣的现象是由于点状接触体的负荷条件接近于全面受压的条件。处于这类条件下的,例如,还有轴承的滚珠,如所周知,在轴承中容许应力可超过滚珠材料弹性极限的4~5倍●。

因此,采用材料的弹性极限作为点状接触体容许应力的判据时,接触体的弹性变形保留了相当大的安全储备量。但若要有根据地选用点状接点容许压应力的其他判据,则需要作进一步的研究。

应当指出,由于在陀螺装置的接触式传感器中所使用的力很小,接触体的机械负荷一般很小。

● 滚珠的容许应力达到500公斤/毫米²,然而轴承钢的弹性极限是50~120公斤/毫米²(Бейзельман Р. Д. Цыпкин Б. В., Подшипники качения. Справочник. Машгиз, 1954, гл. IV и V)(有中译本,“滚动轴承手册”,机械工业出版社,1956——译者注)。

当有惯性力作用在传感器的活动部分上时（在对象振动或加速时），为了避免破坏传感器的工作可靠性，接触力必须加上惯性力的最大可能值。在振动的条件下，这样大的力可能还显得不够。为保证传感器在振动条件下的工作可靠性，传感器活动部分的固有振动频率必须选在仪器基座振动频率范围之外。如果后一要求实际上难于实现，则必须使固有振动能够有效地衰减，以抑制共振现象。应当指出，引起传感器安装点振动的原因之一可能是陀螺仪未经充分精确的调定动平衡。

热计算 闭合的接触式传感器的接触电阻中放出的热量可使接触体材料的机械性能变坏：当温度高于 150°C 时，弹性与强度变坏，而当温度达到 400°C 时，大多数不氧化的接点材料开始显著地变软，这可能引起相当大的塑性变形，甚至使接点熔接。因此，接触体的容许温度取为 $100\sim 125^{\circ}\text{C}$ 。

根据下面的热平衡方程可以计算接点的发热量：

$$I^2 R_{\kappa} dt = C d\theta + \nu s \theta dt + Y \theta dt, \quad (1.5)$$

式中

I ——通过接点的电流强度（有效值），安；

R_{κ} ——接点的接触电阻，欧；

t ——时间，秒；

C ——接点的热容量，瓦·秒/度；

θ ——接点对周围介质的温升， $^{\circ}\text{C}$ ；

ν ——空气的导热系数，瓦/厘米²·度；

s ——接点空气冷却的面积，厘米²；

Y ——传感器结构元件的热导，瓦/度。

方程式（1.5）中左边是电流在接点的接触电阻中释放的能量，而右边诸项相应地表示这个能量分别转化为接点的发热量、空气（或其他周围介质）中的散热和传给其他结构元件的热量，这些元件的温度可以认为是恒定的。

方程式（1.5）可改写成如下形式：