

陀螺电气元件

南京航空学院《陀螺电气元件》编写组

5

国防工业出版社

陀螺电气元件

南京航空学院《陀螺电气元件》编写组

国防工业出版社

内 容 简 介

本书讨论了陀螺仪表和惯导系统中所采用的典型电气元件(如角度传感器、力矩发生器和同步传输电机)的构造、原理、性能、设计考虑和使用要求等问题。

本书可作为有关院校的仪表和惯性导航专业师生的教学参考书,同时对从事陀螺仪表和加速度计的研制和生产的工程技术人员也有所裨益。

陀 螺 电 气 元 件

南京航空学院《陀螺电气元件》编写组

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 8⁸/₄ 223 千字

1981年3月第一版 1981年3月第一次印刷 印数: 0,001—2,200册

统一书号: 15034·2129 定价: 1.10元

前 言

在宇宙飞船和导弹的制导系统中，在飞机和各种舰船的导航及控制系统中，在某些军用车辆和矿井内的定向装置中，以及在火炮的射击指挥系统中都已广泛地采用了各种陀螺仪。在这些陀螺仪中有许多电气元件，如驱动陀螺转子的陀螺电动机，敏感飞行器或陀螺稳定平台相对陀螺转子轴线角位置的各种角度传感器，使陀螺转子进动修正或保持力平衡的各种力矩发生器，为实现机械转角非同轴传递而作为同步传输系统主要元件的同步传输电机，以及伺服电机，测速发电机，各种继电器，电磁铁等。这些元件不仅面广量大，而且它们的工作性能对仪表乃至系统的工作性能有着重大的影响。随着科学技术的不断发展，对已有的电气元件尚需不断完善，如何设计和研制出精度高、工作稳定可靠、抗干扰能力强、寿命长、体积小的新型陀螺电气元件也是摆在陀螺和惯性导航专业的科技工作者面前的重要课题之一。

本书并没有面面俱到地讨论各种陀螺电气元件，而是着重讨论了与陀螺仪表或惯性导航系统的工作关系较紧密又具有代表性的电气元件，如角度传感器和力矩发生器，并适当介绍了同步传输电机。由于这些元件大多数是电磁元件，所以我们又把电磁元件的共同的基本问题——磁路和电磁吸力的计算列为第一章先作介绍。

书中介绍了各种元件的基本构造、工作原理、工作特性、性能指标，有些元件还适当介绍了设计考虑和使用要求，即如何从设计、结构和使用上来提高元件的工作性能。书中把微动同步器和永磁式力矩器分别作为角度传感器和力矩发生器的典型元件，因而对它们均作了较详细的分析。

本书是在汪叔华、江玉龙两同志先后编写的“陀螺电气元件”讲义的基础上进一步修改扩充而写成的。参加本书编写的除以上提到的两位同志外还有金文浩、沈寿清同志，并由沈寿清同志主要执笔。在编写过程中得到教研室其他同志的大力支持。

由于水平有限，时间仓促，书中一定存在不少缺点、错误和不妥之处，请读者帮助指正。

目 录

第一章 电磁元件的磁路和吸力	1
§ 1-1 磁场的基本性质	1
§ 1-2 电磁元件的磁路	3
§ 1-3 气隙磁阻或磁导的计算	5
§ 1-4 直流磁路的计算	19
§ 1-5 电磁元件的吸力	28
§ 1-6 交流磁路的特点和计算	39
第二章 角度传感器	44
§ 2-1 微动同步器	46
§ 2-2 动圈式传感器	83
§ 2-3 环形同位器	102
§ 2-4 电感传感器	116
§ 2-5 电容传感器	132
§ 2-6 电位器	145
第三章 力矩发生器	154
§ 3-1 扁环形感应力矩电机	156
§ 3-2 弧形力矩电机	169
§ 3-3 永磁式力矩器	180
§ 3-4 直流力矩电机	214
第四章 同步传输电机	224
§ 4-1 自整角机	226
§ 4-2 旋转变压器	247
§ 4-3 多极角度传感电机	262
附录	273
附录一 物理量单位制	273
表 1 力学物理量的单位制	273
表 2 电磁学物理量的单位制	274
附录二 典型软磁材料的磁化曲线	275

第一章 电磁元件的磁路和吸力

有不少陀螺电气元件是电磁元件，例如陀螺电动机、电磁铁、继电器、电磁感应式和变电感式的角度传感器、感应式力矩器以及其它各种微电机等。它们基本上都由通电线圈、静止铁芯和可动铁芯（衔铁或转子）三部分组成。通电线圈建立磁场，铁磁物质在磁场中被磁化，静止铁芯和可动铁芯之间便存在电磁吸力或力矩，若可动铁芯在吸力或力矩的作用下产生移动或转动，便作了机械功。可以认为，由通电线圈所建立的磁场在空间的分布规律，磁路计算的方法以及电磁吸力和力矩的计算是不少电磁元件的共同的的基本的问题，也是学习、分析和设计各种电磁元件的基础。本章就以直流电磁铁为典型例子来说明这些基本的问题。

§ 1-1 磁场的基本性质

一块永久磁铁或者一个通电的铁芯线圈，都具有吸引铁磁物质和使磁针偏转的特性，这就证明了在它们周围是有能量、有物质存在的，不过仅仅是看不见摸不着而已。如若用细铁屑均匀地洒在磁铁或通电的铁芯线圈的周围，可清楚地看到，被磁铁吸引在周围的铁屑排列成如图 1-1 所示的许多根线条，这些线条被称

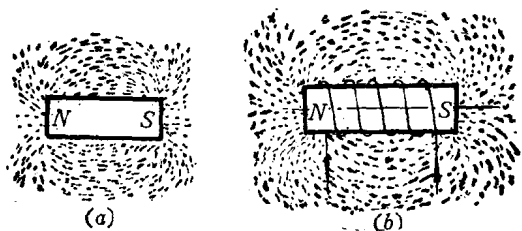


图1-1 永久磁铁和通电线圈周围的磁场

为磁力线。它形象地把存在于磁场周围的物质反映了出来，该物质就叫做磁场。磁力线的疏密表示了各处磁场的强弱，磁力线上各点的切线方向就表示各点处磁场的方向。

磁场的基本性质可以用磁力线的如下五个特性来加以描述：

(1) 磁力线是一族无头无尾、连续封闭的曲线，它们在磁铁（或通电螺管线圈）的外部总是从北极（ N ）出发，通过周围介质进入南极（ S ）；而在磁铁（或通电螺管线圈）的内部总是从南极走向北极（见图1-2）。

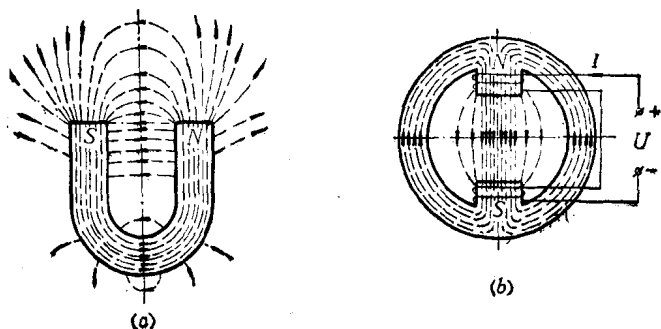


图1-2 磁力线的走向

(2) 磁力线就像拉紧的橡皮筋一样，具有尽量缩短的倾向。这就是异性极相吸的原因（见图1-3）。

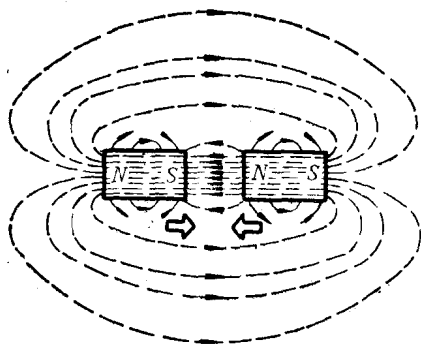


图1-3 磁力线有缩短的倾向

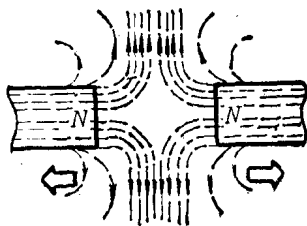


图1-4 磁力线永不相交

(3) 磁力线是一族永不相交的曲线。这就是同性极相斥的原因 (见图 1-2 和图 1-4)。

(4) 磁力线穿过任何物质时都会受到不同程度的阻力, 称这种阻力为物质的磁阻。磁力线总是要走磁阻较小的路径。磁阻的大小同物质的性质和几何形状尺寸有关。各种物质在几何形状尺寸均相同的情况下, 铁磁物质 (铁、镍、钴以及它们的合金) 的磁阻很小, 非铁磁物质 (空气、非金属材料以及除铁磁物质以外的其它金属材料) 的磁阻相对很大, 两者在数值上相差几百倍、几千倍、几万倍, 甚至更大。

(5) 磁力线穿入或穿出铁磁物质时总是垂直于铁磁物质的表面, 在铁磁物质的棱角、棱边处呈聚集状或发散状。这就是磁场的边界条件, 见图 1-1 和图 1-5。

有了上述对于磁场的基本认识, 就易于分析各种电磁元件内磁力线的走向和磁通的分布以及有助于理解各种电磁元件的工作原理和特性。

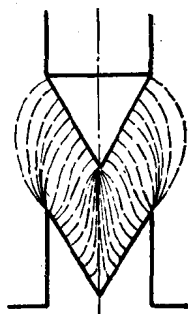


图1-5 磁力线垂直穿过铁磁物质的表面

§ 1-2 电磁元件的磁路

我们以在某些陀螺仪表中用作为锁紧机构动力源的螺管式直流电磁铁为例子来说明一般电磁元件的磁路, 亦即磁力线的走向或磁通的路径。直流电磁铁是一种通入直流电流以后便对可动衔铁产生电磁吸力从而带动某机构动作的电磁元件。图 1-6 表示了螺管式电磁铁的磁路。与电路中由电势产生电流相类似, 磁路中线圈磁势是产生磁通的磁能源。在直流电路中, 若电势已知, 则电流的分配规律和大小取决于各支路的电阻。同样, 在磁路中, 若磁势已知, 则磁通的分布规律和大小就取决于各磁路的磁阻。见图 1-6, 线圈磁势所产生的磁通的主要部分经铁芯、非工作气隙 Δ 、可动衔铁和工作气隙 δ 形成闭合回路。这条回路的磁阻小,

因此集中了大部分磁通。这股磁通经过工作气隙 δ ，它又是产生吸力的主要因素，故称它为主磁通或工作磁通 Φ_0 。磁势所产生的磁通的次要部分只经过部分铁芯磁路，穿过内腔气隙形成闭合回路。因为它不经过工作气隙 δ ，故称它为漏磁通 Φ_r 。

一般电磁元件的磁路包括铁芯和气隙两部分，而气隙磁路又分工作气隙、非工作气隙和漏磁气隙三种。磁路的磁阻包括铁芯磁阻和气隙磁阻。实践证明，磁路磁阻的大小与磁力线在物质内所经过的路线的长度 l 成正比，而与该物质垂直于磁力线方向的截面积 S 和磁导率 μ 成反比。这一关系如同电路的电阻取决于物质的几何形状尺寸和性质一样，可用公式表示为

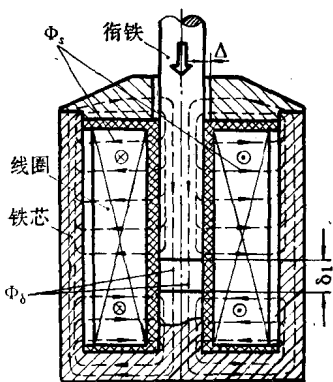


图1-6 螺管式电磁铁的磁路图

$$R_m = \frac{l}{\mu S} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r S} \quad (1-1)$$

式中 R_m ——磁路物质的磁阻 (1/亨利, 简称1/亨);

l ——物质中沿磁力线方向的平均磁路长度 (米);

S ——与磁力线相垂直的磁路物质的截面积 (米²);

μ ——磁路物质的磁导率, 它等于磁路物质中的磁感应强度 B 与磁场强度 H 的比值 (亨利/米, 简称亨/米);

μ_0 ——真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (亨/米);

μ_r ——磁路物质的相对磁导率, 即为真空磁导率的倍数,

$$\mu_r = \mu / \mu_0.$$

铁磁物质的磁导率 μ 不是常数, 它和铁芯中磁感应强度 B 的大小有关, 因此铁芯磁阻也不是常数, 计算比较复杂。关于这一点我们将在后面的磁路计算中借助于铁磁材料的磁化曲线 $B =$

$f(H)$ 予以解决。

气隙磁阻取决于气隙的几何形状和尺寸，而与气隙中磁感应强度 B 的大小无关，因为气隙的磁导率十分接近于真空磁导率 μ_0 ， μ_0 与 B 的大小是无关的。然而应当指出的是，在通常情况下，即使气隙长度较小，其磁阻也要比铁芯磁阻大得多。气隙磁阻成了磁路总磁阻的主要部分，而串联的铁芯磁阻是往往可以被忽略掉的。原因是铁芯磁导率要比空气磁导率大得很多（几千倍，甚至几万倍）。此外，气隙中磁力线的分布一般比较复杂，若简单地采用式 (1-1) 来计算气隙磁阻，往往误差较大。怎样才能比较准确地计算气隙磁阻，对于不同形状的气隙应分别采用不同的合适的方法。

§ 1-3 气隙磁阻或磁导的计算

磁阻的倒数就是磁导，用 G_m 表示。对于不同的气隙，是计算其磁阻还是计算其磁导，这要根据具体情况，看采用哪一种计算较方便来决定。多数场合计算磁导要比计算磁阻方便。

气隙磁导有工作气隙磁导 G_s ，非工作气隙磁导 G_Δ 和漏磁气隙磁导 G_r 。它们有共同的计算方法。

对于空气或其它非铁磁性物质而言，相对磁导率 $\mu_r = 1$ 。若气隙中各处磁感应强度的大小相等，方向相同，或者说气隙中各处的磁力线疏密一样，指向相同，这样的气隙磁场是一个均匀磁场。凡均匀磁场，气隙磁导就可以用如下的基本公式来计算：

$$G_m = \frac{\mu_0 S}{l} \quad (\text{亨利, 简称亨}) \quad (1-2)$$

但是，气隙的形状往往是各种各样的，气隙中磁通的分布比较复杂，尤其是铁芯同气隙交界的地方磁力线的分布更加复杂。一般气隙磁场并非是一个各处都均匀的磁场，这就不能直接运用基本公式来计算气隙磁导了，而是要根据不同的具体情况，采用不同的计算方法，如解析法、磁场分割法和经验公式等进行计算。

而这些计算方法的根本依据都是式 (1-2) 这个基本公式。

一、解析法

忽略气隙边缘磁通，用数学公式表达气隙中磁力线的分布规律，通过数学运算求出气隙磁导，这就是解析法。现举三例说明。

1. 两平行平面极间的气隙磁导 两平行平面极间的磁通分布见图 1-7。如果气隙长度 δ 较小，并满足

$$\frac{\delta}{a} \leq 0.2 \text{ 和 } \frac{\delta}{b} \leq 0.2$$

或

$$\frac{\delta}{d_c} \leq 0.2$$

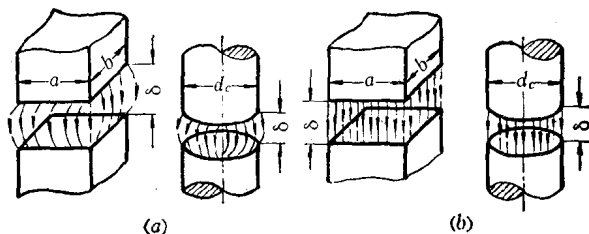


图1-7 平行平面极间气隙磁通的分布

(a) 有边缘磁通；(b) 忽略边缘磁通。

则向外凸出的边缘磁通就可以略去，便可认为两平行平面极间各处的磁感应强度大小相等，方向相同，因而是均匀磁场。其间气隙磁导即可按基本公式计算，即

矩形气隙的磁导为

$$G_{\delta} = \mu_0 \frac{S}{\delta} = \mu_0 \frac{ab}{\delta} \quad (\text{亨}) \quad (1-3)$$

圆形气隙的磁导为

$$G_{\delta} = \mu_0 \frac{\pi d_c^2}{4 \delta} \quad (\text{亨}) \quad (1-4)$$

式中长度 a 、 b 、 d_c 的单位均用米； $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (亨/米)。

若 $\frac{\delta}{a} > 0.2$, $\frac{\delta}{b} > 0.2$, 或 $\frac{\delta}{d_c} > 0.2$, 这时就要考虑

边缘磁通的影响, 采用解析法计算误差就大了。而考虑边缘磁通的气隙磁导的计算方法可用后面介绍的磁场分割法或经验公式。

2. 两不平行平面极间的气隙磁导 对于两个不平行的磁极(见图 1-8), 在忽略边缘磁通的情况下, 在两个互成 φ 角的平面间, 磁力线近似为一族垂直于极面的同心圆弧, 圆弧长的地方磁阻大, 磁力线稀; 圆弧短的地方磁阻小, 磁力线密, 所以对整个气隙不能再当作均匀磁场来处理。在这种情况下, 可用微积分的方法, 将不均匀磁场整体无限细分, 则从其中每个局部来看, 便可近似地认为是均匀磁场。再经积分求出两个不平行平面磁极间的气隙磁导。

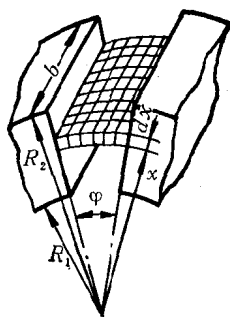


图1-8 不平行平面磁极

在半径为 x 处取 dx 厚的薄层气隙(见图 1-8), 这个薄层气隙称为单元磁通管, 在此单元磁通管内可认为是均匀磁场。因此, 单元磁通管的气隙磁导可用基本公式(1-2)来表示:

$$dG_{\delta} = \mu_0 \frac{dS}{\delta} = \mu_0 \frac{b dx}{\varphi x} \quad (1-5)$$

整个气隙是由许多的单元磁通管并排着叠成的, 所以气隙的总磁导等于无数个单元磁通管的气隙磁导之和, 也就是只要将式(1-5)在 $R_1 \sim R_2$ 区间内积分:

$$G_l = \int_{R_1}^{R_2} dG_\delta = \int_{R_1}^{R_2} \mu_0 \frac{b}{\varphi} \frac{dx}{x} = \mu_0 \frac{b}{\varphi} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (1-6)$$

式中 φ 应按弧度计算。

3. 两个同心圆柱表面间的气隙磁导 如果磁极是由圆柱体 A 与同心圆柱筒 B 所组成 (见图1-9), 当忽略边缘磁通影响时, 在两个同心圆柱表面间的磁力线沿径向分布。在以后要讲到的螺管式电磁铁的漏磁场便是这样的。在不同半径处磁通穿过的气隙截面积不同, 但磁通相同, 因而气隙各处的磁感应强度便不同, 整个气隙磁场是不均匀磁场。

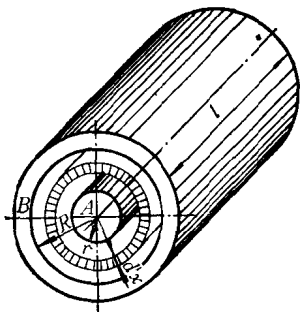


图1-9 同心圆柱面磁极

同样, 对于不均匀的气隙磁场, 首先要把它划分成许多可视均为均匀的单元薄层气隙的磁场, 以便可运用基本公式 (1-2) 写出单元磁通管的磁导, 然后用积分的方法得到总气隙磁导。

本例的情况, 只有在距离圆心 x 处取与磁力线垂直的、厚度为 dx 的圆筒形单元磁通管, 其中的磁场才可看作是均匀场。考虑到所有的圆筒形单元磁通管都被相同的磁通量穿过, 所以各单元磁通管的磁阻是串联的。在串联的情况下, 先用磁阻来计算较为方便。故写出圆筒形单元磁通管的磁阻为

$$dR_\delta = \frac{dx}{\mu_0 S} = \frac{dx}{\mu_0 2\pi x l}$$

总磁阻

$$R_b = \int_r^R \frac{dx}{\mu_0 2\pi l x} = \frac{1}{\mu_0 2\pi l} \ln \frac{R}{r} \quad (1-7)$$

因此总气隙磁导为

$$G_b = \frac{1}{R_b} = \frac{2\pi\mu_0 l}{\ln \frac{R}{r}} \quad (1-8)$$

式中 l ——同心圆柱的高度或长度 (米);

r ——内圆柱体的半径 (米);

R ——外圆柱筒的内半径 (米)。

此外, 分析计算中有时用到比磁导 (单位长度的磁导) g , 即

$$g = \frac{G_b}{l} \quad (1-9)$$

于是, 两同心圆柱表面间的气隙比磁导为

$$g = \frac{2\pi\mu_0}{\ln \frac{R}{r}} \quad (1-10)$$

应当指出, 用解析法得出的磁导公式没有考虑边缘磁通的磁导, 所以这种方法只能用于气隙长度较小、边缘磁通可以忽略的情况。

二、磁场分割法

当气隙长度比较大, 气隙几何形状比较复杂, 边缘磁通不能忽略时, 可以采用磁场分割法 (或经验公式) 来计算气隙磁导。所谓磁场分割法, 就是根据气隙几何形状和磁力线的分布规律, 将气隙顺着磁力线的方向分割成若干个形状尽量简单的磁通管, 然后分别求出各磁通管的磁导, 其方法可采用解析法或查经验公式。有时也可近似地直接求出磁通管的平均气隙长度和平均截面积, 代入磁导基本公式。最后根据各磁通管并联磁导相加, 而串联磁阻相加的原则, 求出总气隙磁导。

现以圆柱形气隙为例。见图1-10, 根据磁力线的分布规律,

顺着磁力线的方向可将气隙分割为三部分：没有边缘磁通的极间

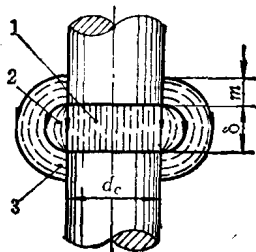


图1-10 磁场分割法图例

均匀磁场磁通管 1 和将边缘磁通分割成两个形状比较简单的环形磁通管 2、3。因为总磁通是这三个磁通管内磁通之和，因此总气隙磁导即为这三个磁通管的磁导的并联叠加，即

$$G_s = G_1 + G_2 + G_3$$

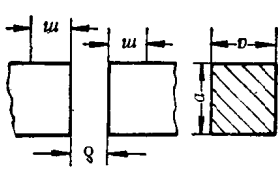
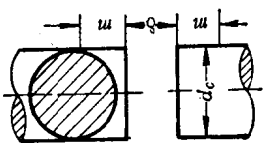
其中 G_1 为磁通管 1 的磁导，用解析法公式 (1-4) 计算；而 G_2 和 G_3 为磁通管 2 和 3 的磁导，可在气隙磁导公式表 1-1 编号 14 查得。至于边缘扩大部分 $m = k\delta$ ，通常 $k = 0.5 \sim 2$ 。若 $\frac{\delta}{d_c}$ 比较小， k 取较小值；若 $\frac{\delta}{d_c}$ 比较大， k 就取较大值。

三、采用经验公式和磁导公式

所谓经验公式，是人们通过生产实践和科学实验总结出来的，拿来就可应用。

下面我们将常用的气隙磁导公式列于表 1-1 中。其中有些是由解析法导出的，有些是经验公式；磁场分割法常用到的典型磁通管公式也列在表中。在使用这些公式时，需要注意它们的使用条件。

表1-1 气隙磁导公式

编号	气隙或磁通管的形状	磁导公式	注
1	 两平行的正方形端面间	$G_{\delta} = \mu_0 \frac{a^2}{\delta}$	$\frac{\delta}{a} \leq 0.2$
		$G_{\delta} = \mu_0 \left[\frac{a^2}{\delta} + 0.58a + \frac{0.14a}{\ln\left(1.05 + \frac{\delta}{a}\right)} \right]$	$\frac{\delta}{a} > 0.2$
	距端面为m的两侧表面间	$G_m = \mu_0 \frac{ma}{0.17\delta + 0.4m}$	$m = (0.5 \sim 2)\delta$
2	 两平行的圆形端面间	$G_{\delta} = \mu_0 \frac{\pi d_c^2}{4\delta}$	$\frac{\delta}{d_c} \leq 0.2$
		$G_{\delta} = \mu_0 \left(\frac{\pi d_c^2}{4\delta} + 0.58d_c \right)$	$\frac{\delta}{d_c} > 0.2$
	距端面为m的两侧表面间	$G_m = \mu_0 \frac{m d_c}{0.22\delta + 0.4m}$	$m = (0.5 \sim 2)\delta$