

电机感应解算装置

[苏联] T. Я. 霍多罗夫著



国防工业出版社

电机感应解算装置

[苏联] T.Я. 霍多罗夫 著

王志云 译



国防工业出版社

1965

內 容 簡 介

本书研究了电机感应解算元件的结构、特性和用作求解各种数学关系的结构图。书中着重地阐述了解算装置结构的設計原理、各元件参数的选择，以及解算装置的調整方法。

本书可供設計、制造和使用解算装置及帶计算机的自动控制裝置的工程技术人員閱讀，也可供有关专业的大专院校师生参考。

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИНДУКЦИОННЫЕ СЧЕТНО-РЕШАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

〔苏联〕 Т. Я. Ходоров

СУДПРОМГИЗ 1960

电机感应解算装置

王志云譯

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 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

787×1092 1/32 印張 6⁵/₈ 141 千字

1965 年 12 月第一版 1965 年 12 月第一次印刷 印数：0,001—3,310 册

統一书号：15034·1044 定价：（科六）0.85 元

目 录

序言	4
第一章 解算装置的元件	5
§ 1 电机解算元件的傳遞特性	5
§ 2 旋转变压器	15
§ 3 异步测速发电机	37
§ 4 比例元件、位移补偿元件、对称元件、校正元件、 自整角机和执行电动机	47
§ 5 凸轮机构、非圆轮、圆锥机构、齿轮传动和差动装置	62
第二章 完成各种数学运算的解算装置线路	74
§ 6 装置的等值和比例尺	74
§ 7 数据的输入和输出	75
§ 8 加法和减法	84
§ 9 乘法、除法、乘方法和开方法	89
§ 10 三角变换	93
§ 11 函数变换	97
§ 12 矢量变换	104
§ 13 函数的微分、积分和展平	113
第三章 解算装置的设计和調整原理	120
§ 14 解算级联的构成、定对称、定比例尺和定相位的規則	120
§ 15 译码和积分随动系統	139
§ 16 设计解算装置的某些問題	174
§ 17 解算装置的調整和所需輔助設備	190
§ 18 电机感应解算装置的工作精确度	198
参考文献	210
附录 原书公式校正表	211

序 言

目前各种生产过程均在广泛实现自动化。便于控制机组和对象的记录式信息机和记录式计算机具有很大的意义。但在技术发展的现阶段，控制计算机是最完善的计算机。除了收集和整理信息之外，借助它们还能实现生产过程的连续自动调整。在它们的自动控制系统整体中，包括有获取信息的工具（发送器）、传递信息的工具（通讯线路）、处理信息的工具（计算装置），以及控制工具（随动系统）。

为了制造这种控制计算机，广泛应用包含上述所有部分的电机解算装置。它们的特点是：工作精确度高、制造简单、动作可靠。因此，它们很适于生产条件下应用。

制造电机解算装置的思想萌芽，早在本世纪的三十年代就已经产生了。在最近的10~15年中，电机感应解算装置获得了广泛的应用，并且几乎完全排挤掉机械式解算装置。高精度的电机感应解算装置在仪器制造业中得到了应用。

本书主要是阐述电机感应解算装置的设计和制造问题（第三章）。这些问题在技术文献中还阐明得不够。

在第一章中，研究了各个单独的解算元件，虽然仪器设计者通常并不设计这些元件，但为了正确地使用它们，也必须熟悉它们。第二章列举了用以完成某些数学运算的解算部件线路。因为只是在求解相当复杂的问题时使用解算装置才是合理的，所以不单独研究这些线路，而只将它们作为装置的组成部分中一个典型环节来研究。

第一章 解算裝置的元件

§ 1 电机解算元件的传递特性

在电机解算裝置中，任一解算元件的作用，都在于将輸入电压 U_1 按照給定为元件輸入軸轉角的輸入量 α 的变化規律轉換成輸出电压 U_2 。这种解算元件的方块图如图 1 所示。輸出电压与輸入电压之間有如下关系：

$$U_2 = U_1 f(\alpha), \quad (1)$$

式中

$$f(\alpha) = \frac{U_2}{U_1} \quad (2)$$

是此元件的电机傳遞函数。

函数 $f(\alpha)$ 的形式决定于元件的用途。如果元件是一线性变换器，則

$$f(\alpha) = k\alpha. \quad (3)$$

对于正弦-余弦变换器

$$f(\alpha) = \sin \alpha \quad (4)$$

或

$$f(\alpha) = \cos \alpha.$$

函数也可写成下列形式：

$$f(\alpha) = k, \quad (5)$$

即元件的傳遞函数为一常量，与輸入量 α 的变化无关。因此，在这种情况下，解算元件可用作輸入恒量或改变訊号的比例。

最后，被研究的函数还可能具有如下形式：

$$f(\alpha) = kp, \quad (6)$$

式中 $p = \frac{d}{dt}$ 是微分符号。可以认为它是用于复現輸入量 α 的导函数的元件。以上所举，虽然没有包括解算元件电机傳遞函数的所有形式，然而却足以确定电机傳遞函数所应该滿足的基本要求。

因为被研究的各种解算元件，都是用于电机模拟各种数学运算，所以复現相应关系的精确度是对这类元件的基本要求。因此，真实的电机傳遞函数，应该以尽可能大的精确度与其理論值相符合。实现这个条件成为設計和制造解算元件的主要困难。

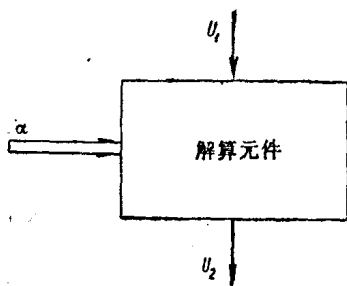


图1 解算元件的方块图

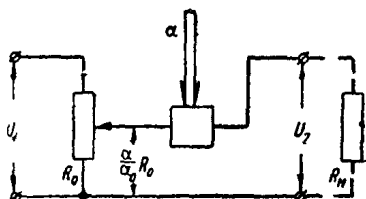


图2 电位計的电路

此外，用于求解所需数学关系的元件，它的电机傳遞函数在解算綫路中，应该保持精确的值。因此，就需加上一个附加条件，以使电机傳遞函数不仅在元件空载运行时，而且在負載运行时，都能保持較高的精确度。以此作为評价，来研究构成解算元件的某些共同原則。

除了測速元件之外，所有电机解算元件均是一些由电阻或电抗构成的无源四端网络。若此四端网络是由电阻构成，解算元件则为可动触点的电位计；如果四端网络由感抗构成，则解算元件是一个可平滑改变变压系数的变压器或自耦变压器。由容抗构成的解算元件，并没有获得推广。由各种不同性质的阻抗综合构成的元件，也没有获得应用，因为当改变这些阻抗值时，除了改变输出电压值外，可能同时改变此电压的相位，这在许多场合下是不容许的。总之，已有两类电机解算元件：即由电阻构成的元件（电位计）和由感抗构成的元件（旋转变压器）。

我们先研究由电阻构成的元件。图2所示，即是一变机械量为电量的电位计式变换器。若不计电阻 R_n ，变换器的输入电阻则等于电位计的电阻：

$$R_{nx} = R_0. \quad (7)$$

电阻 R_0 被可动触点分为 $\frac{\alpha}{\alpha_0} R_0$ 和 $\left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_0}\right) R_0$ 两个电阻，式中 α ——电位计转轴的可变迴转角，而 α_0 ——电位计转轴的最大迴转角。在空载运行（即 $R_n = \infty$ ）下，电位计的输出电压：

$$U_{2x,x} = \frac{\alpha}{\alpha_0} U_{10}. \quad (8)$$

因此，这个电位计在空载情况下的传递函数：

$$k_{x,x} = \frac{\alpha}{\alpha_0}. \quad (9)$$

当电位计接到负载电阻 R_n 上运行时，电阻 $\frac{\alpha}{\alpha_0} R_0$ 就为负载电阻所分路。在此情况下，电压 U_2 决定于下列公式：

$$\begin{aligned}
 U_2 &= U_1 \frac{\frac{\frac{\alpha}{\alpha_0} R_0 R_H}{\frac{\alpha}{\alpha_0} R_0 + R_H}}{\frac{\frac{\alpha}{\alpha_0} R_0 R_H}{\frac{\alpha}{\alpha_0} R_0 + R_H} + R_0 \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_0} \right)} \\
 &= U_1 \frac{\frac{\alpha}{\alpha_0}}{1 + \frac{\alpha}{\alpha_0} \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_0} \right) \frac{R_0}{R_H}} \quad (10)
 \end{aligned}$$

因此，电位计的传递函数为：

$$k_H = \frac{\frac{\alpha}{\alpha_0}}{1 + \frac{\alpha}{\alpha_0} \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_0} \right) \frac{R_0}{R_H}} \quad (11)$$

为了找出能使电位计传递函数变化的因素，我们假定：把电位计看作是由一个具有不随负载变化的传递函数 $k_{x,x}$ 的四端网络和某一个附加电阻 $R_{\text{БЛХ}}$ 所构成（图3）。由于这个附加电阻的影响，这个系统的总传递函数值等于 k_H 。对所研究的线路来说，电压决定于下式：

$$U_2 = U_1 k_{x,x} \frac{R_H}{R_H + R_{\text{БЛХ}}} = U_1 \frac{\frac{\alpha}{\alpha_0}}{1 + \frac{R_{\text{БЛХ}}}{R_H}} \quad (12)$$

由此，可得到另一传递函数式：

$$k_H = \frac{\frac{\alpha}{\alpha_0}}{1 + \frac{R_{\text{БЛХ}}}{R_H}} \quad (13)$$

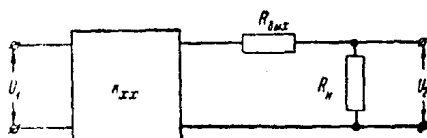
由比較 (11) 和 (13) 兩式得出:

$$\frac{\frac{\alpha}{\alpha_0}}{1 + \frac{\alpha}{\alpha_0} \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_0} \right) \frac{R_0}{R_{II}}} = \frac{\frac{\alpha}{\alpha_0}}{1 + \frac{R_{BIX}}{R_{II}}}, \quad (14)$$

于是

$$R_{BIX} = \frac{\alpha}{\alpha_0} \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_0} \right) R_{00} \quad (15)$$

图 3 所示电阻 R_{BIX} 的大小, 是我們根据电位計对負載电流所呈現的电阻等效作用的条件



求出来的。 R_{BIX} 值愈小, 負載对电位計傳遞函数的畸变作用就愈小。

图 3 电位計的等效四端网络

由研究 (15) 式得出, R_{BIX} 的最小值

$$R_{BIX, \text{МНН}} = 0 \quad (16)$$

是发生在以下两个轉角上:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = 0; \\ \alpha = \alpha_0. \end{array} \right\} \quad (17)$$

为了求取 R_{BIX} 的最大值, 令 (15) 式的导数等于零,

即

$$\frac{dR_{BIX}}{d\alpha} = R_0 \left(1 - 2 \frac{\alpha}{\alpha_0} \right) = 0. \quad (18)$$

因此, R_{BIX} 的最大值将在

$$\alpha = 0.5\alpha_0 \quad (19)$$

处发生。

将此 α 值代入 (15) 式, 即得 R_{BIX} 的最大值:

$$R_{\text{BHLX.MKRC}} = 0.25R_0. \quad (20)$$

我們再来研究电感解算元件的类似关系。图 4 所示，即是一可調节变压系数的变压器的结构示意图。公共的磁通 Φ_0 穿过变压器的两个繞組，同时，这两繞組又各自建立一不大的漏磁通 Φ_1 和 Φ_2 。繞組磁通的这样划分，可使得变压器电路图中（图 5 a）初級繞組和次級繞組的互感 $x_{0(1)}$ 和 $x_{0(2)}$ ，与这两繞組的漏感 x_1 和 x_2 区分开。此外，在图上还以集中电阻 R_1 和 R_2 表示变压器两个繞組的电阻。

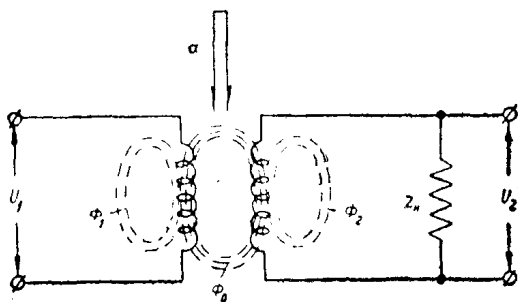


图 4 可調变压器的电路

尽管图 5 a 上的电路是与变压器的真实結構相符，但对研究这种元件的参数來說，采用图 5 6 上的等效电路将更为方便。为了构成等效电路，必須使电抗 $x_{0(1)}$ 和 $x_{0(2)}$ ，合并为 x_0 ，这一 x_0 在此情况下被取为等于 $x_{0(1)}$ 。此时，由次級繞組和初級繞組的匝数比所决定的变压器的变压系数 m 受到破坏，因而必須以 $\frac{1}{m}$ 倍来改变次級电路的电势和电流，同时又必須以 $\frac{1}{m^2}$ 倍来改变电路中傳遞的功率。显然，为了在从真实电路轉換到等效电路时不改变变压器中的能量关系，就

必須按以下关系改变次级电路的全部参数:

$$\left. \begin{aligned} U'_2 &= \frac{1}{m} U_2; \\ I'_2 &= m I_2; \\ x'_2 &= \frac{1}{m^2} x_2; \\ R'_2 &= \frac{1}{m^2} R_2; \\ z'_H &= \frac{1}{m^2} z_{H0} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

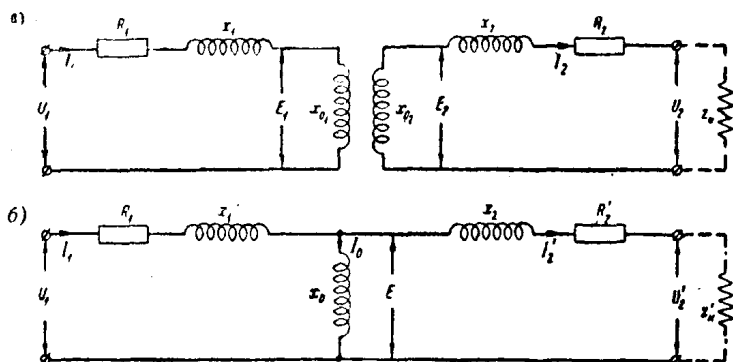


图5 变压器的真实电路 (a) 和等效电路 (b)

当变压器空载运行时, 即 $z_H = \infty$ 、并且 $I_2 = 0$, 变压器的输入阻抗

$$z_{BX} = R_1 + jx_1 + jx_0, \quad (22)$$

或者, 因为电抗 x_0 的绝对值远大于初级绕组的电阻及漏电抗, 所以实际上可以足够精确地认为:

$$z_{BX} \approx jx_0. \quad (23)$$

为了找出变压器在空载时的传递函数，让我们用符号式写出对应于图 5 6 电路的原始关系：

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= I_0; \\ U_1 &= I_1 R_1 + j I_1 x_1 + j I_0 x_0; \\ U'_2 &= j I_0 x_0. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

由联立求解方程式 (24)，并计及 (21) 式中 U'_2 的值，即得

$$U'_2 = U_1 \frac{m}{1 + \frac{R_1 + jx_1}{jx_0}}. \quad (25)$$

因而，变压器在空载时的传递函数：

$$k_{x,x} = \frac{m}{1 + \frac{R_1 + jx_1}{jx_0}}. \quad (26)$$

当变压器接到由电阻 R_n 和电抗 x_n 构成的负载阻抗 z_n 上运行时，将具有如下关系：

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= I_0 + I_2; \\ U_1 &= I_1 R_1 + j I_1 x_1 + j I_0 x_0; \\ U_1 &= I_1 R_1 + j I_1 x_1 + j I'_2 x'_2 + I'_2 R'_2 + I'_2 R'_n + j I'_2 x'_n; \\ U'_2 &= I'_2 R'_n + j I'_2 x'_n. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

由求解方程组 (27) 的结果，并计及 (21) 式的关系，可得

$$U_2 = U_1 \frac{m}{1 + \frac{R_1 + jx_1}{jx_0} + \frac{R_2 + jx_2}{R_n + jx_n} + \frac{(R_1 + jx_1)(R_2 + jx_2)}{jx_0(R_n + jx_n)}} \rightarrow \frac{m}{1 + m^2 \frac{R_1 + jx_1}{R_n + jx_n}}. \quad (28)$$

由此，帶負載變壓器的傳遞函數為：

$$k_H = \frac{m}{1 + \frac{R_1 + jx_1}{jx_0} + \frac{R_2 + jx_2}{R_H + jx_H} + \frac{(R_1 + jx_1)(R_2 + jx_2)}{jx_0(R_H + jx_H)}} \rightarrow + m^2 \frac{R_1 + jx_1}{R_H + jx_H} \quad (29)$$

為了確定輸出阻
抗 $z_{\text{BЛX}}$ 的大小，我
們假設此變壓器是由
一具有傳遞特性 $k_{x,x}$
的四端網絡及一未知
附加阻抗所組成(圖 6)。

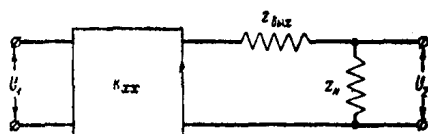


圖 6 變壓器的等效四端網絡

就所研究的電路而言，電壓 U_2 可由下式決定：

$$U_2 = U_1 k_{x,x} \frac{z_H}{z_H + z_{\text{BЛX}}} \quad (30)$$

考慮到 (26) 式中所列 $k_{x,x}$ 的值，被研究的公式將為以下形式：

$$U_2 = U_1 \frac{m}{1 + \frac{z_{\text{BЛX}}}{z_H} + 1 + \frac{R_1 + jx_1}{jx_0} \left(1 + \frac{z_{\text{BЛX}}}{z_H} \right)}, \quad (31)$$

於是，得到另一個傳遞函數式：

$$k_H = \frac{m}{1 + \frac{R_1 + jx_1}{jx_0} + \frac{z_{\text{BЛX}}}{z_H} \left(1 + \frac{R_1 + jx_1}{jx_0} \right)} \quad (32)$$

● 原書為內部阻抗 z_{BH} ，其意義與輸出阻抗相同，為與後文一致，故改譯為輸出阻抗 $z_{\text{BЛX}}$ 。——譯者

比較 (29) 和 (32) 兩式后得出:

$$1 + \frac{R_1 + jx_1}{jx_0} + \frac{R_2 + jx_2}{z_H} + \frac{m(R_1 + jx_1)(R_2 + jx_2)}{jx_0 z_H} + m^2 \frac{R_1 + jx_1}{z_H} = \frac{m}{1 + \frac{R_1 + jx_1}{jx_0} + \frac{z_{\text{БЛХ}}}{z_H} \left(1 + \frac{R_1 + jx_1}{jx_0} \right)}, \quad (33)$$

因此,

$$z_{\text{БЛХ}} = \frac{jx_0(R_2 + jx_2) + (R_1 + jx_1)(R_2 + jx_2) + jx_0 m^2(R_1 + jx_1)}{R_1 + jx_0 + jx_1}. \quad (34)$$

(34) 式表明: 變壓器的輸出阻抗是由變壓系數 m 的函數決定的。

為了便於研究 (34) 式, 我們寫出該式的近似值, 只要利用電抗 x_0 在絕對值上遠大於變壓器繞組的電阻和漏電抗的這一關係, 即可求得這個近似值。由此

$$z_{\text{БЛХ}} = R_2 + jx_2 + m^2(R_1 + jx_1). \quad (35)$$

當變壓系數在零到最大值 $m_{\text{макс}}$ 範圍內變化時, 變壓器的輸出阻抗將在以下界限內變化, 即

$$\left. \begin{aligned} z_{\text{БЛХ. мин}} &= R_2 + jx_2; \\ z_{\text{БЛХ. макс}} &= R_2 + jx_2 + m_{\text{макс}}^2(R_1 + jx_1). \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

確定了可調電位計和變壓器的輸入阻抗和輸出阻抗的數值之後, 就可由該種元件在解算綫路中工作時復現給定關係的精確度來比較這些元件。

由上述得出, 元件輸出阻抗對負載阻抗的比值愈大, 傳遞函數的畸變也愈大。因為後一元件的輸入阻抗對於每個前一元件來說也就是負載阻抗, 所以, 為了在裝置電路中建立

較好的工作条件，所采用的解算元件必須具有尽可能小的輸出阻抗和尽可能大的輸入阻抗。

現在来研究，对于上述两类解算元件來說，这个条件如何保証。

对于电位計，可利用 (7) 和 (15) 两式得出：

$$\frac{R_{\text{BLIX}}}{R_{\text{BX}}} = \frac{\alpha}{\alpha_0} \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_0} \right). \quad (37)$$

考虑到 (17) 和 (19) 两式，上述比值可在下列範圍內变化：

$$\frac{R_{\text{BLIX}}}{R_{\text{BX}}} = 0 \sim 0.25. \quad (38)$$

利用 (23) 和 (35) 两式，可以写出变压器的輸出阻抗与輸入阻抗的近似关系：

$$\frac{z_{\text{BLIX}}}{z_{\text{BX}}} \approx \frac{R_2 + jx_2 + m^2(R_1 + jx_1)}{jx_0}. \quad (39)$$

考虑到 (36) 式[●]的关系，此比值可在下列範圍內变化：

$$\frac{z_{\text{BLIX}}}{z_{\text{BX}}} \approx \frac{R_2 + jx_2}{jx_0} \sim \frac{R_2 + jx_2 + m_{\text{max}}^2(R_1 + jx_1)}{jx_0}. \quad (40)$$

电感性解算元件的輸出阻抗与輸入阻抗的比值，比电位計的这种比值小得多；此外，如果选择变压系数 $m_{\text{max}} \leq 1$ ，則上述比值的变化也将比电位計的这种变化小得多。

上述情况表明：对电感性解算元件來說，当在解算綫路中帶負載运行时，仍能保持电机傳遞函数有相当精确的值。

§2 旋轉变压器

可以根据各种不同的原理来制造按給定規律調节变压器

● 原书誤为(35)式。——譯者

数的变压器。最简单的情况下,可采用带有分接头的变压器。但是,这种解算元件具有不平滑的性质,并且需要复杂的和运行可靠的转换开关。

具有可移动次级绕组、可移动屏蔽或可变磁路的变压器是较好的结构设计。这样的结构,可用改变绕组之间的互感来保证平滑地和无开关地调节变压器次级绕组上的电

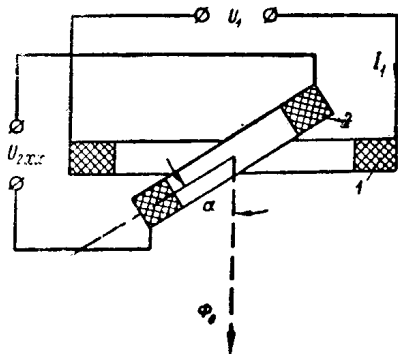


图7 在空载下运行的双绕组旋转变压器电路

压。这种结构中的一种个别情形,就是将变压器的次级绕组放在初级绕组的固定磁场内旋转。这种结构的优点是:元件结构简单、其可动部分的传动容易、不需要将旋转运动转换成直线位移,并且次级电压的调节范围较大。

利用图7,我们来研究旋转变压器(BT)的作用原理。在图上已示出了变压器的一个固定的初级绕组1,和一个在其内部旋转的次级绕组2。如将交流电压 U_1 供给初级绕组,则建立起磁通 Φ_0 ,它与旋转变压器的次级绕组相键键,结果在次级绕组中感应出电压 $U_{2x.x}$ 。此电压与次级绕组的迴转角 α 有关。当 $\alpha=0$ 时,磁通 Φ_0 顺着绕组线圈面通过,因而,旋转变压器的次级电压等于零。当两线圈的轴线重合时,即 $\alpha=90^\circ$,它们彼此间耦合最大,所以旋转变压器次级绕组的电压也将为最大。在理想情况下,可以认为旋转变压器初级绕组横截面中磁通是均匀分布的,空载时在旋转变