

绕线工艺理论分析

陈希达

(精密机械工程系)

摘要 在磁与电转换器件生产中,都会有绕线工艺,绕线工艺已成为电器、电子、仪表生产中重要工序。本文对绕线工艺进行理论分析,建立绕线工艺参数的计算方法,为生产、技术和绕线工艺装备设计,提供理论依据。

关键词 开式绕线, 闭式绕线, 连续式绕线

0 前言

要达到磁电之间相互转换,必须把导线按一定规则绕在导磁体上,当磁量发生变化时电量跟着变化。反之也一样。构成各种各样的电磁、磁电器件,有变压器、电机电感器件等等。从绕线工艺角度看,可分为闭式、开式和连续式绕线*,因为导磁体形态决定了绕线工艺形式。导磁体为封闭环(如军用可回转360°的电位器),其骨架是封闭环,如自耦变压器即是封闭式导磁体。封闭环导磁体的绕线工艺必定是穿梭式绕制,称之为闭式绕线;导磁体是一般铁芯,其绕线方式称为开式绕线;导磁体为细长骨架(如多圈电位器)的多圈螺管,其绕线工艺称为连续式绕线。这三种绕线,以闭式绕线最为典型。分析了闭式绕线后,可把开式和连续式绕线看作闭式绕线的特例。

1 绕制运动分析

图1为闭式绕线示意图。图中, a 为被绕线框架,是一圆形截面封闭环; b 为贮线轮,绕制前把被绕框架装入,再把导线存于贮线轮上,以备绕制; c 为排线滚轮; d 为排线滚子。绕制时排线滚轮以恒定角速度回转,贮线轮在绕制时是作不均匀角速度运动,以保证绕制工艺进行。

现以闭式绕线为例,进行绕制运动分析。图2中 A 点为闭式框架上某起点, B 为导线与框架接触点, C 为小排线滚子与导线接触点, D 为来自贮线轮的导线与排线滚子相接触点。由图可知在绕制过程中将保持式(1)

$$\widehat{AB} + \widehat{BC} + \widehat{CD} + \widehat{DE} = K, \quad (1)$$

本文1990-05-09收到。

*系笔者按工艺自行分类。

其中， \widehat{AB} 为弧长，即从导线起点至绕制接触点B的长度； \overline{BC} 是弦长； \widehat{CD} 也弧长； \widehat{DE} 也是弧长。在绕制过程中总长 K 是一个常量。

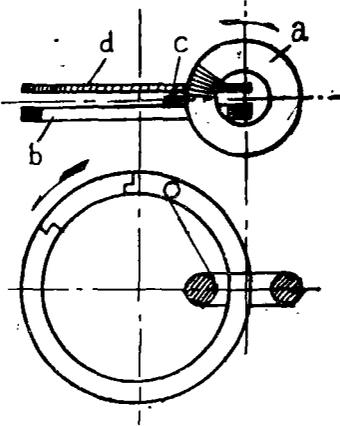


图 1 闭式绕线示意图

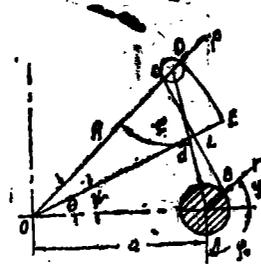


图 2 运动分析简图

由图 2 及式 (1) 可得式 (2)

$$r(\varphi + \varphi_0) + L + (\pi - \theta + \varphi)\rho + (R + \rho)(\theta - \psi) = K, \quad (2)$$

式中， r, ρ, R, φ_0, K 为常量，其代表意义见图 2；其余 L 即 BC ， φ, θ, ψ 为变量； θ 角代表绕制运动情况； ψ 角代表贮线轮运动情况。

对式 (2) ψ 和 θ 微分，得式 (3)

$$\frac{d\psi}{d\theta} = \frac{r + \rho}{R + \rho} \frac{d\varphi}{d\theta} + \frac{1}{R + \rho} \frac{dL}{d\theta} + 1 - \frac{\rho}{R + \rho}, \quad (3)$$

式中，变量 L 及 φ 分别可由式 (4)，(5) 关系中求出，得

$$L^2 = d^2 - (r + \rho)^2 = a^2 + R^2 - 2aR\cos\theta - r^2 - 2r\rho - \rho^2, \quad (4)$$

$$\varphi = \text{ctg}^{-1}\left(\frac{R\sin\theta}{a - R\cos\theta}\right) + \text{ctg}^{-1}\frac{L}{r + \rho}, \quad (5)$$

最后解得式 (3) 为

$$\frac{d\psi}{d\theta} = \left(\frac{R}{R + \rho}\right) \left\{ \frac{(r + \rho)R + a[\sqrt{a^2 + R^2 - 2aR\cos\theta - r^2 - \rho^2 - 2r\rho}] \sin\theta - (r + \rho)\cos\theta}{a^2 + R^2 - 2aR\cos\theta} \right\} + \frac{R}{R + \rho}. \quad (6)$$

为了简化式 (6)，可引入参数角 ζ (图 2) 化简后得

$$\frac{d\psi}{d\theta} = \left(\frac{R}{R + \rho}\right) \sin\zeta + \frac{R}{R + \rho}, \quad (7)$$

式中 $d\psi/d\theta$ 的物理意义，表示贮线轮与排线轮 ψ 及 θ 的相对运动关系，谓之速度系数。如果用 R 表示 $d\theta/dt$ 之值，也就是绕制运动为一常数，取值为 R ，则 $d\psi/dt$ 将是

$$\frac{d\psi}{dt} = R \left(\frac{R}{R + \rho}\right) \sin\zeta + R \left(\frac{R}{R + \rho}\right). \quad (8)$$

为了更清楚地了解运动情况，再进一步简化，由于 ρ 相对于 R 将是一个较小的数，忽略 ρ 则可得

$$\frac{d\psi}{dt} \Big|_{\text{当 } \frac{d\theta}{dt} = R} = R \sin \zeta + R. \tag{9}$$

用式(9)和利用计算机辅助绘图作出图3。用图3可以看出把 $d\theta/dt$ 取作 R 时， $d\psi/dt$ 值将在 R 上加上 $R \sin \zeta$ 。图3可知 ζ 角在回转一周中有两处得零，即点 B, D 。有一个最大值一个最小值，即 A 点及 C 点。 ζ 值得零即表示在此处排线轮运动速度与贮线轮运动速度相等， ζ 值取最大值或最小值，即贮线轮运动速度大于或小于排线轮运动速度。图3中曲线1表示排线轮运动速度，曲线2表示贮线轮运动速度， B, D 两点相对角速度为零，而 A, C 两点相对角加速度最大。 B, D 两点角速度要变换方向， BOD 以上为正角速度， BOD 以下为负角速度，并且 BOD 以上面积将大于 BOD 以下面积，这正说明绕制一周后导线贮线轮要相对于排线轮多转一定角度，这意味着导线要输送到被绕制的骨架上去。由图可知 B, D 两点的速度变化率为最大，角加速度最大意味着导线要承受最大拉力，角减速度最大，则意味着导线要松下来，以至无法排线。为此设法寻找 A, C, B, D 各点情况，先将式(6)再一次微分并使其等于零，获得 $d\psi/d\theta$ 的极值。

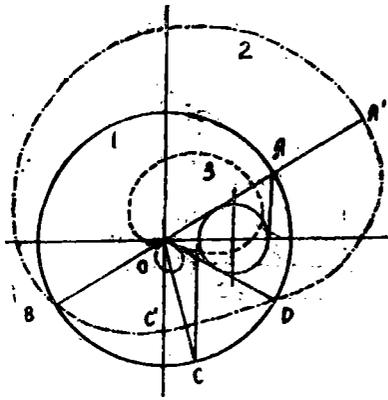


图3 速度图

由图可知 B, D 两点的速度变化率为最大，角加速度最大意味着导线要承受最大拉力，角减速度最大，则意味着导线要松下来，以至无法排线。为此设法寻找 A, C, B, D 各点情况，先将式(6)再一次微分并使其等于零，获得 $d\psi/d\theta$ 的极值。

$$\theta \Big|_{\frac{d^2\psi}{d\theta^2} = 0} = \cos^{-1}\left(\frac{\alpha+r+\rho}{R}\right) \text{ 或 } \cos^{-1}\left(\frac{\alpha-r-\rho}{R}\right), \tag{10}$$

式中 $\cos^{-1}[(\alpha+r+\rho)/R]$ 相当于 A 点情况， $\cos^{-1}[(\alpha-r-\rho)/R]$ 相当于 C 点情况，这两点 $d^2\psi/d\theta^2$ 为零，而速度系数 $d\psi/d\theta$ 为最大及最小极值。若再进一步分析可得知 B, D 两点 ζ 角为零，其 $d^2\psi/d\theta^2$ 值为最大， $d^2\psi/d\theta^2$ 反映贮线轮相对于排线轮角加速情况，称加速度系数。如果把 B, D, A, C 各点的速度加速度系数计算出来可获得表1。

表1. 速度及加速度系数

图3点别	$d\psi/d\theta$	$d^2\psi/d\theta^2$
A	$1 + (\alpha+r)/(R+\rho)$	0
C	$1 - (\alpha-r)/(R+\rho)$	0
B	$R/(R+\rho)$	$-[R/(R+\rho)]\{1/R(\sqrt{a^2-(r+\rho)^2})^{-1}+1\}$
D	$R/(R+\rho)$	$[R/(R+\rho)]\{1/R(\sqrt{a^2-(r+\rho)^2})^{-1}-1\}$

表1所列公式具有一般意义，如果是非圆截面骨架，只要把不同 α 值代入即可得相应速度及加速度系数。

2 绕线工艺参数

绕线工艺参数包括导线张力、绕线运动速度、速度变化率和绕制机动时间。

绕制过程中导线要保持一定张力，否则导线在框架上排线相对位置无法保证。因此可列出下列等式

$$\frac{M_B}{R} + \frac{d^2\psi}{dt^2} \Big|_{\min} - \frac{J}{R} = p_{\min}, \quad (11)$$

式中 M_B 为导线贮线轮上摩擦力矩； R 为导线拉曳半径； J 为导线贮线轮转动惯量； $\frac{d^2\psi}{dt^2} \Big|_{\min}$ 为最大减速度或称最小加速度。

另一方面导线张力在最大加速度情况下，不允许超过许用拉力，这时同样存在下列等式

$$\frac{M_B}{R} + \frac{d^2\psi}{dt^2} \Big|_{\max} - \frac{J}{R} = [p], \quad (12)$$

式中 $[p]$ 为导线许用拉力。

联立式(11)，(12)可求出 M_B 及 $d\theta/dt$ ，改写式(11)，(12)为式(13)，(14)

$$\frac{d^2\psi}{d\theta^2} \Big|_{\min} \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \frac{d^2\theta}{dt^2} \Big|_{\min} \left(\frac{d\psi}{d\theta} \right) = \left(\frac{p_{\min} - M_B/R}{J} \right) R, \quad (13)$$

$$\frac{d^2\psi}{d\theta^2} \Big|_{\max} \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \frac{d^2\theta}{dt^2} \Big|_{\max} \left(\frac{d\psi}{d\theta} \right) = \left(\frac{[p] - M_B/R}{J} \right) R, \quad (14)$$

解式(13)，(14)得

$$\frac{d\theta}{dt} = \left(\frac{([p] - p_{\min}) R - \frac{d\psi}{d\theta} \left(\frac{d^2\theta}{dt^2} \Big|_{\max} - \frac{d^2\theta}{dt^2} \Big|_{\min} \right)}{\frac{d^2\psi}{d\theta^2} \Big|_{\max} - \frac{d^2\psi}{d\theta^2} \Big|_{\min}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (15)$$

$$M_B = R[p] - J \left[\frac{d^2\psi}{d\theta^2} \Big|_{\max} \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \frac{d^2\theta}{dt^2} \Big|_{\max} \left(\frac{d\psi}{d\theta} \right) \right]. \quad (16)$$

由式(15)，(16)可计算出绕线所允许用速度及摩擦力矩。由式(15)可知导线余力比较大，在较低角速度下，显然可使 $\left(\frac{d^2\theta}{dt^2} \Big|_{\max} - \frac{d^2\theta}{dt^2} \Big|_{\min} \right)$ 大一些，这样自然生产率可高一些。

为了确定 $d\theta/dt$ 与 t 之间关系，把式(15)中已定数，如 $[p]$ ， p_{\min} ， R ， J ， $d\psi/d\theta$ 及 $\frac{d^2\psi}{d\theta^2} \Big|_{\max} - \frac{d^2\psi}{d\theta^2} \Big|_{\min}$ 看作常量，同时设定绕线正向(起动)及负向(停止)加速度相等，式(15)可改写为

$$\left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 = A + B \frac{d^2\theta}{dt^2}, \quad (17)$$

式中 A ， B 为设定常量，它分别为

$$A = \left(\frac{[p] - p_{\min}}{J} \right) R / \frac{d^2\psi}{d\theta^2} \Big|_{\max} - \frac{d^2\psi}{d\theta^2} \Big|_{\min}, \quad (18)$$

$$B = 2 \frac{d\psi}{d\theta} \Big|_{\max} / \frac{d^2\psi}{d\theta^2} \Big|_{\max} - \frac{d^2\psi}{d\theta^2} \Big|_{\min} \quad (19)$$

经计算后得

$$\frac{d\theta}{dt} = \sqrt{A} \left(\frac{e^{\frac{\sqrt{A}}{B}t} - e^{-\frac{\sqrt{A}}{B}t}}{e^{\frac{\sqrt{A}}{B}t} + e^{-\frac{\sqrt{A}}{B}t}} \right) = \sqrt{A} \operatorname{th} \frac{\sqrt{A}}{B} t \quad (20)$$

由式(20)可知绕线速度按双曲线正切变化时生产率将是最高,且当 $t=0$, $d\theta/dt=0$, t 增大至无限大时, $d\theta/dt$ 接近 \sqrt{A} 。在 $t=0$ 、 $d\theta/dt=0$ 时 $d^2\theta/dt^2$ 为 A/B , 当 $t=\infty$, 则 $d\theta/dt \rightarrow \sqrt{A}$, $d^2\theta/dt^2 \rightarrow 0$ 。

由此可得知绕线机一开始可按 A/B 加速, 然后按式(20)规律增速, 当所绕圈数达到预计绕制圈数的一半时, 再按式(20)减速下降至零, 这样生产率为最高, 见图4。为了确定线制圈数, 推荐用公式

$$H = \frac{\pi(D_{\text{内}} - d)}{d} \cdot \frac{\alpha}{2\pi} \quad (21)$$

式中 H 为总绕线圈数; α 为闭式框架上绕线部分占有角度(以弧度计); $D_{\text{内}}$ 为闭式框架内径; d 为导线直径。知道了总

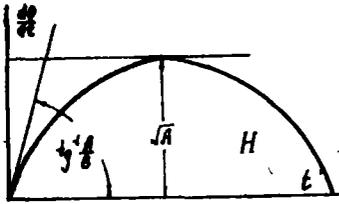


图4 速度随时间关系

圈数, 可以把式(20)对时间积分得

$$\theta = B \ln \left(e^{\frac{\sqrt{A}}{B}t} + e^{-\frac{\sqrt{A}}{B}t} \right) = B \ln \operatorname{ch} \frac{\sqrt{A}}{B} t \quad (22)$$

由式(21)求出 H , 然后取其一半代入式(22), 求出机动时间, 即

$$\frac{H}{2} = B \ln \left(\frac{e^{\frac{\sqrt{A}}{B}t_M} + e^{-\frac{\sqrt{A}}{B}t_M}}{2} \right) \quad (23)$$

式中 t_M 为机动时间, 一半, 机动时间

$$T_M = 2t_M.$$

3 计算实例

如在CHT-01型闭式绕线机上绕制闭式电位器, 导线直径为 $\phi 0.25\text{mm}$, 排线滚子半径为 5mm , 框架圆形截面半径为 10mm , 框架圆截面距排线滚子回转中心 70mm , 排线滚子回转中心 70mm , 排线滚子回转半径为 106mm , 导线贮存框架装满导线转动惯量为 $41.398 \times 10^{-4} \text{kgm}^2$, 机床起动的加速度为 5s^{-2} 。

由条件对铜质导线 $d=0.25\text{mm}$, 当其相对延伸量不超过10%时许用应力 294.3N/mm^2 。由此得 $[p]=294.3 \times 0.25^2 \times \pi/4 = 14.446\text{N}$, 用 $J=41.398 \times 10^{-4} \text{kgm}^2$, $\rho=5\text{mm}$, $\alpha=70\text{mm}$ $p_{\min}=0$, $R=106\text{mm}$, $r=10\text{mm}$ 代入表1:

$$\frac{d^2\psi}{d\theta^2} \Big|_{\max} = \frac{R}{R+\rho} \left(\frac{1}{R/\sqrt{a^2 - (r+\rho)^2} - 1} \right),$$

$$\frac{d\psi}{d\theta} \Big|_{\frac{d^2\psi}{d\theta^2} \Big|_{\max} \Big|_{\min}} = \frac{R}{R+\rho},$$

代入上述数据得

$$\begin{aligned}\left. \frac{d^2\psi}{d\theta^2} \right|_{\max} &= \frac{106}{111} \left(\frac{1}{106/\sqrt{70^2 - (10+5)^2} - 1} \right) = 1.7353, \\ \left. \frac{d\psi}{d\theta} \right|_{\min} &= -\frac{R}{R+\rho} \left(\frac{1}{R/\sqrt{a^2 - (r+\rho)^2} + 1} \right) \\ &= -\frac{106}{111} \left(\frac{1}{106/\sqrt{70^2 - (10+5)^2} + 1} \right) = -0.3744, \\ \frac{d\psi}{d\theta} &= \frac{R}{R+\rho} = \frac{106}{111} = 0.9549,\end{aligned}$$

将上述数据代入式 (15)

$$\frac{d\theta}{dt} = \left\{ \frac{14.446}{41.398 \times 10^{-4}} \times 106 \times 10^{-3} - 0.9549 \times 5 \right\}^{\frac{1}{2}} = 13.1527 \text{ s}^{-1},$$

换算成转速为

$$n = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{d\theta}{dt} = 13.1527 \times \frac{30}{\pi} = 125.6 \text{ r/min},$$

再将数据代入式 (16)

$$\begin{aligned}M_B &= R[p] - J \left[\left. \frac{d^2\psi}{d\theta^2} \right|_{\max} \left(\frac{d\theta}{dt} \right) + \left. \frac{d^2\theta}{dt^2} \right|_{\max} \frac{d\psi}{d\theta} \right] \\ &= 106 \times 10^{-3} \times 14.446 - 41.397 \times 10^{-4} [1.7353 \times 13.1527^2 + 5 \times 0.9549] \\ &= 0.26815 \text{ Nm},\end{aligned}$$

代入式 (18)

$$\begin{aligned}A &= \left(\frac{[p] - p_{\min}}{J} \right) R \left/ \left. \frac{d^2\psi}{d\theta^2} \right|_{\max} - \left. \frac{d\psi^2}{d\theta^2} \right|_{\min} \right. \\ &= \left(\frac{14.446}{41.398 \times 10^{-4}} \right) 106 \times 10^{-3} / 1.7353 + 0.3744 = 175.259,\end{aligned}$$

代入式 (19)

$$B = 2 \frac{d\psi}{d\theta} \left/ \left. \frac{d^2\psi}{d\theta^2} \right|_{\max} - \left. \frac{d^2\psi}{d\theta^2} \right|_{\min} \right. = 2 \times 0.9549 / 2.0793 = 0.9184,$$

代入式 (20)

$$\frac{d\theta}{dt} = \sqrt{A} \operatorname{th} \frac{\sqrt{A}}{B} = 13.238 \operatorname{th} 14.414 t.$$

绕制框架内径 $D_{\text{内}} = 52 \text{ mm}$,

$$\alpha = 2\pi, \quad d = 0.25 \text{ mm},$$

$$H = \frac{\pi(52 - 0.25)}{0.25} = 650,$$

代入式 (22)

$$\frac{650}{2} \times 2\pi = 0.9184 \ln \operatorname{ch} \frac{\sqrt{175.259}}{0.9184} t_M,$$

$$650\pi = 0.9184 \ln \operatorname{ch} 14.414 t_M$$

$$\begin{aligned} \operatorname{ch} 14.414 t_M &= e^{2223.47} \\ 14.414 t_M &= \operatorname{ch}^{-1} e^{2223.47}, \\ t_M &= \frac{1}{14.414} \left(\ln 2 \cdot e^{2223.47} - \frac{1}{2} \frac{1}{2 e^{2223.47 \times 2}} - \dots \right) \\ &= \frac{1}{14.414} (2224.16 - 0) = 154.3 \text{ s}, \\ T_M &= 2t_M = 154.3 \times 2 = 308.6 \text{ s}, \\ T_M &= 5.14 \text{ min}. \end{aligned}$$

4 结论

以上推导及计算实例可以作为绕线机床设计基础。

对于非闭式绕线,可以把这种推导公式推广到开式或连续式绕线,只需把运动看作导线不动,框架作回转运动,即成为开式绕线,连续式绕线可以看作特殊情况下的闭式绕线。

应该指出对开式绕线圆形截面框架,绕线速度会很高,这时限止速度因素将是柔性导线绕制过程中的振动,这部分分析详见文[4]。

参 考 文 献

- [1] Цветков, Н. М., К Проектированию Процессов Изготовления Открытых Намоток, машгиз, (1953).
- [2] Скуратов, А. Е., Анализ Точности Изготовления Проволочных Кольцевых Потенциометров, Труды МВТУ, Машгиз, 30(1955).
- [3] Dummer, G. W. A., *Variable Resistor and Potentiometer*, London, (1956).
- [4] Григорьевич, П. М., Механизация и Автоматизация Изготовления Элементов Радиоаппаратуры, госэнергоиздат, (1963).
- [5] Майоров, С. А., Технология Приборостроения, часть, II, ХПИ, (1957).
- [6] Белевцев, А. Т., Технология Производства Потенциометров, оборонгиз, (1966).

Theoretical Analysis of Winding Technology

Chen Xida

(*Department of Precision Mechanical Engineering*)

Abstract Winding has become an important procedure in the manufacture of electrical and electronic instruments and equipments. Where there is electromagnetic component, there is winding operation. Based on the theoretical analysis of winding technology, the author formulates a method for calculating technological parameters of winding and provides the theoretical basis for winding operation.

Key words Winding with closed-skeleton, winding with open-skeleton, winding with continuous-skeleton