

选用了CDJ型电容器作为启动电容。选用CJ型电容器作为运行电容。采用铁心的非线性电感。经运行证明效果良好。

5 结束语

将三相电机投入单相电网运行,采用本文论证

的方法,经实用证明是可靠的,且完全有可能专门生产三相两用电机。在设计时,可以把电感铁心放在定子铁心上,改变现在定子形状,使启动电感铁心作为定子一部分。再加上启动电容机运行电容,可适用于投入单相电压下运行的新型电机。

关于同步发电机 ψ 角计算的研究

西北工业大学 季小尹 米春亭
西安航空电气公司 张万红

摘要: 本文利用计算机求解超越方程,迭代计算内功率因数角 ψ 。

关键词: 同步发电机 内功率因数角

1 前言

在同步发电机的磁势电势矢量图分析中,通常把电枢电流 I 与励磁电势 E_0 间的夹角 ψ 称为内功率因数角。这是一个抽象的角度,在负载运行时,实际上并不存在励磁电势 E_0 ,所以也就无法测出 ψ 角[4]。但是,大家知道,在同步发电机的具体分析中, ψ 角往往是很有用的,借助 ψ 角,可将凸极同步电机的电枢电流、磁势分为交轴和直轴来考虑,使问题的分析大为简化,对于 ψ 角的获得,一般都是通过作矢量图的方法得到[2,3]。而本文是在作矢量图分析的基础上得出一组超越方程,借助计算机直接计算 ψ 角。

下面针对凸极同步发电机的 ψ 角计算进行描述,而隐极电机作为凸极电机 $x_d=x_q$ 的一种特例,本方法仍然适用。

2 不考虑饱和时的 ψ 角计算

2.1 数学模型的建立

当不考虑发电机磁路的饱和时,可应用双反应理论和线性叠加原理,先分别计算励磁磁势,直轴和交轴电枢磁势所产生的感应电势,然后直接电势合成得矢量图,其矢量关系如图1所示,其中 $\triangle BCD$ 和 $\triangle OQB$ 均为直角三角形,BQ是过D点作垂直于电流 I 的辅助线。

从该电势矢量图可知其数学关系为

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \psi = \frac{I x_q + U \sin \varphi}{I r_a + U \cos \varphi} & (1) \\ E_0 = U \cos(\psi - \varphi) + I r_a \cos \psi + I x_d \sin \psi & (2) \end{cases}$$

不饱和同步电抗 x_d 和 x_q 是同步电机的基本参数,可根据电机的结构数据计算得到或通过试验具体测定,电枢内阻 r_a 也可很方便算出或测出,有了这些参数,根据式(1)和(2)分析可知:

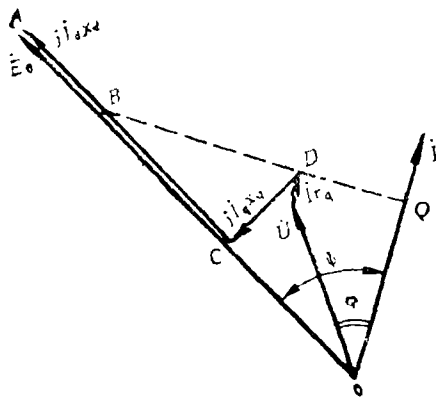


图1 电势矢量图

当已知负载情况(U 、 I 及 $\cos \varphi$)时,可方便地算得 ψ 角,进一步也可求出 E_0 [2,3]。

当已知励磁电势 E_0 ,并知道负载 I 及 $\cos \varphi$ 时,想求解 ψ 角和 U ,情况就不是那么简单了,此时式(1)和(2)已不是一般容易解的方程,这里未知数是 ψ 和 U ,式(1)和(2)可变形为

$$\begin{cases} \psi = \operatorname{tg} \frac{\psi_1^* I x_q + U \sin \varphi}{I r_a + U \cos \varphi} & (3) \\ U = \frac{E_0^* - I (r_a \cos \psi + x_d \sin \psi)}{\cos (\psi - \varphi)} & (4) \end{cases}$$

结合式(3)和(4)消去U得

$$(I r_a \operatorname{tg} \psi - I x_q) \cos (\psi - \varphi) + [E_0^* - I (r_a \cos \psi + x_d \sin \psi)] \cdot (\operatorname{tg} \psi \cos \varphi - \sin \psi) = 0 \quad (5)$$

这是一个超越方程,如果用一般解方程的方法是无法实现的,但可借助计算机采用迭代的方法求解。

2.2 迭代求解方法

本文采用较简单的两种迭代算法,既赛德尔迭代法和区间分半法[1],前者直接从式(3)和(4)出发求解 ψ 和U,后者则从式(5)出发求解 ψ 角。

2.2.1 赛德尔迭代法

该方法一般应用于解线性代数方程组,但本文将其应用于超越方程(3)和(4)的迭代求解,得到了满意的结果。

首先任意取一电压值 U_0 作为迭代初值,考虑到电机在正常运行情况下,端电压和励磁电势 E_0 相差不太大,所以可取励磁电势 E_0 作为方程迭代时的电压初值,赋给式(3),解得 ψ_0 ;然后将 ψ_0 代入式(4)得 U_1^* ;又重复将 U_1^* 代入式(3)得 ψ_1^* ,……,迭代过程如图2所示,其中曲线(3)和(4)分别对应式(3)和(4)。

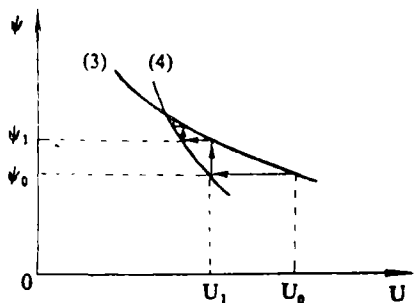


图2 迭代过程描述

每次迭代所得 U_1^* (或 ψ_1^*)与 U_0^* (或 ψ_0^*)进行比较,若 $|U_1^* - U_0^*| \leq \epsilon$ (其中 ϵ 为精度),认为已达到所要求的收敛精度,此时对应 ψ_1^* ,就是所求的内功率因素角 ψ , U_1^* 是对应该负载($I \cos \varphi$)情况下的电压U值。

应当指出,该迭代法应用于式(3)和(4),

随着已知参数的不同,有可能会遇到发散情况,如图3所示的迭代过程,这时,从理论上分析,只要反方向迭代即可收敛,但式(3)和(4)是 $\psi = f(U)$ 和 $U = F(\psi)$ 的函数形式,不容易变成 $U = f(\psi)$ 和 $\psi = F(U)$ 的函数形式,当遇到这种发散情况时,应采用别的迭代方法,下面再介绍另一种迭代方法——区间分半法。

2.2.2 区间分半法

用符号 $f(\psi)$ 来表示式(5)左端的函数,于是式(5)可写成

$$f(\psi) = 0$$

计算 ψ 角,就是求解函数 $f(\psi)$ 的零点。

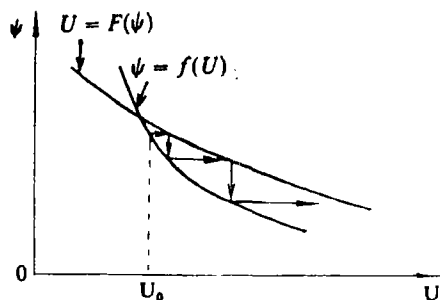


图3 迭代发散描述

区间分半法的特点是迭代方法简单,并且对函数 $f(\psi)$ 的要求比较低,它仅要求这个函数 $f(\psi)$ 是连续的,对于连续函数 $f(\psi)$,如果在 $\psi = a$ 和 $\psi = b$ 处的量值 $f(a)$ 和 $f(b)$ 有相异的符号(简称异号),那么据根 $f(\psi)$ 的连续性,在区间 $[a, b]$ 上至少存在 $f(\psi)$ 的一个零点,据此,可以采用下面的过程来定出解的精确位置。具体步骤为:

(1) 计算 $f(\psi)$ 在区间 $[a, b]$ (存在解的)端点处的值 $f(a)$ 、 $f(b)$,这里区间 $[a, b]$ 事先选定,如设 ψ 在 $[0, 90^\circ]$ 区间有实数解;

(2) 计算 $f(\psi)$ 在区间中点 $\frac{a+b}{2}$ 处的值 $f(\frac{a+b}{2})$;

(3) 判断,若 $f(\frac{a+b}{2}) = 0$,则 $\frac{a+b}{2}$ 即是解,否则检验;

若 $f(\frac{a+b}{2})$ 与 $f(a)$ 异号,则知解位于区

间 $[a, \frac{a+b}{2}]$ 中, 以 $\frac{a+a}{2}$ 代替 b ;
 若 $f(\frac{a+b}{2})$ 与 $f(b)$ 异号, 则知解位于区间

$[\frac{a+b}{2}, b]$ 中, 以 $\frac{a+b}{2}$ 代替 a 。

反复执行步骤 (2) 和 (3), 直到区间长度缩小到允许误差范围之内, 当第 i 次迭代的 $|a - b| \leq \epsilon$ 时, 此区间的中点即可作为所要求的解 ψ 角。

3 考虑饱和时的 ψ 角计算

3.1 数学模型的建立

实际电机在正常工作状态时, 磁路是饱和的, 当考虑饱和后, 磁势仍可以线性叠加合成, 但电势与磁势却是非线性的关系。在具体分析前, 先作如下基本假定:

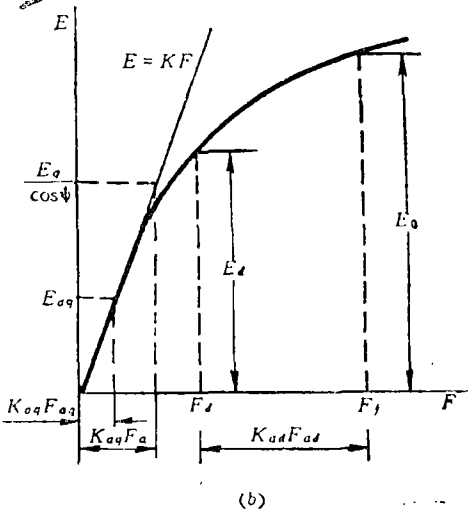
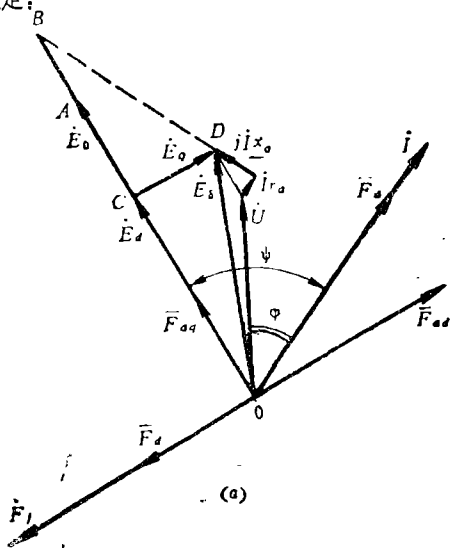


图4 磁势电势矢量图

- (1) 不计直、交轴磁路之间的相互影响;
- (2) 只指直轴主磁路的饱和, 认为漏磁路是不饱和的;

(3) 认为交轴磁路经较大气隙是不饱和的。

作了以上基本假定之后, 采用双反应理论分别由交轴和直轴上的合成磁势、结合空载特性曲线得交、直轴的感应电势, 作磁势电势矢量图如图4所示, 其中 $BD \perp I, CD \perp OA, \angle BDC = \psi$ 。结合矢量图有

$$\overline{CD} = E_q = E_{aq} = KK_{aq} F_{aq} = KK_{aq} F_a \cos \psi \quad (6)$$

式中

K ——空载特性的气隙斜率, K_{aq} ——交轴电枢磁势折算系数, K_{ad} ——交轴电枢反应磁势, F_a ——电枢磁势。

由式(6)可得

$$\overline{BD} = \frac{\overline{CD}}{\cos \psi} = KK_{aq} F_a \quad (7)$$

$$\text{则 } \operatorname{tg} \psi = \frac{KK_{aq} F_a + I_x \delta + U \sin \varphi}{U \cos \varphi + I r_a} \quad (8)$$

由 $\overline{OC} = E_d$ 得

$$E_d = U \cos(\psi - \varphi) + I r_a \cos \psi + I_x \delta \sin \psi \quad (9)$$

根据 E_d 查空载特性曲线得 F_d

$$\text{则 } F_j = F_d \pm K_{ad} F_a \sin \psi$$

式中 + 号指负载感性去磁, - 号指负载容性增磁, 一般实际发电机是带感性负载用 + 号; K_{ad} ——直轴电枢磁势折算系数。然后由 F_j 查空载特性曲线得 E_0 。

参数 r_a, x_δ 及 F_a 可根据电机的结构数据计算得到, K_{ad}, K_{aq} 是极弧宽度的函数, 同时与极靴形状、工作气隙大小有密切关系, 可以用解析法求得或查有关电机设计书籍中的曲线得到 [3], 有了这些电机参数后, 根据式(8)、(9)和(10)及空载特性曲线可知;

当已知发电机负载数据时 (U, I 及 $\cos \varphi$), 则由式(8)可方便地算得 ψ 角, 进一步结合式(9)和(10)还可求解励磁磁势 F_j 和励磁电势 E_0 [2, 3]。

当已知发电机励磁电势, 并知道负载 I 及 $\cos \varphi$ 时, 要求计算 ψ 角和 U , 情况就复杂了, 此时式(8)、(9)及(10)的方程是一组需要查空载特性曲线的超越方程, 无法使用一般求解方程的方法,

也只能借助计算机用迭代的方法求解。此时考虑直轴主磁路饱和时的 ψ 角计算数学模型可由式(8)、(9)及(10)变形得

$$\psi = \text{tg}^{-1} \frac{KK_{aq}F_a + I_x\delta + U\sin\varphi}{U\cos\varphi + I_r a} \quad (11)$$

$$F_d = F_j - K_{ad}K_a \sin\psi \quad (12)$$

$$U = \frac{E_d - I(r_a \cos\psi + x\delta \sin\psi)}{\cos(\psi - \varphi)} \quad (13)$$

3.2 迭代求解方法

3.2.1 用赛德尔迭代法求解

具体步骤如下:

(1) 先由 E_0 查空载特性曲线得 F_j ;

(2) 任意取一电压 U_0 作为电压迭代初值, 代入式(11), 得 ψ_0 ;

(3) 将 ψ_0 代入式(12), 得 F_{d0} ;

(4) 由 F_{d0} 查空载特性曲线得 E_{d0} , 代入式(13)得 U_1 ;

(5) 检验是否满足收敛准则, 若未满足, 则再代入式(11)得 ψ_1 , ……。

收敛准则: 每次迭代都将第 i 次所得 ψ_i 与第 $i-1$ 次迭代的 ψ_{i-1} 进行比较, 若 $|\psi_i - \psi_{i-1}| \leq \epsilon$ 时, 认为已达到收敛精度要求, 结束。

在迭代求解前, 空载特性曲线是以离散点的形式输入计算机, 在运行计算时, 以插值的形式查找。

3.2.2 用区间分半法求解

在应用区间分半法求解前, 先对式(11)、(12)、及(13)进行化简处理。

F_j 可由已知的 E_0 查空载特性曲线得到, 则式(12)可写成函数形式

$$F_d = F_d(\psi)$$

结合空载特性曲线, E_d 也可写成函数形式

$$E_d = E_d(F_d) = E_d[F_d(\psi)] \quad (14)$$

由式(11)、(13)及(14)消去 U 后整理得

$$\begin{aligned} & (\text{tg}\psi \cos\varphi - \sin\varphi) \{E_d[F_d(\psi)] - I(r_a \cos\psi \\ & \quad + x\delta \sin\psi)\} \\ & + [(r_a \text{tg}\psi - x\delta)I - KK_{aq}F_a] \cos(\psi - \varphi) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

然后用符号 $f(\psi)$ 表示式(15)左端的函数, 得 $f(\psi) = (\text{tg}\psi \cos\varphi - \sin\varphi) \{E_d[F_d(\psi)] - I(r_a \cos\psi + x\delta \sin\psi)\} + [(r_a \text{tg}\psi - x\delta)I - KK_{aq}F_a] \cos(\psi - \varphi)$ (16)

求解 ψ 角, 就是找函数 $f(\psi)$ 的零点, 采用区间分半法求解的具体步骤描述如下:

(1) 由 E_0 查空载特性曲线得 F_j , 选定 ψ 解存在的区间 $[a, b]$,

当 $\psi = a$ 时, 由式(12)计算 F_d , 查空载特性曲线得 E_d , 即函数值 $E_d[F_d(a)]$, 再由式(16)计算 $f(a)$;

当 $\psi = b$ 时, 同理计算 $f(b)$; 要求 $f(a)$ 与 $f(b)$ 异号, 则 ψ 在区间 $[a, b]$ 的解存在, 否则重新规定区间 $[a, b]$ 。

(2) 令 $\psi = \frac{a+b}{2}$, 由式(12)计算 F_d , 查

空载特性曲线得 E_d , 即函数值 $E_d[F_d(\frac{a+b}{2})]$,

再由式(16)计算 $f(\psi)$ 在区间中点 $\frac{a+b}{2}$ 的处

值 $f(\frac{a+b}{2})$;

(3) 判断, 若 $f(\frac{a+b}{2}) = 0$, 则 $\frac{a+b}{2}$

即是解, 否则检验:

若 $f(\frac{a+b}{2})$ 与 $f(a)$ 异号, 则知解位于区间

$[a, \frac{a+b}{2}]$ 中, 以 $\frac{a+b}{2}$ 代替 b ;

若 $f(\frac{a+b}{2})$ 与 $f(b)$ 异号, 则知解位于区间

$[\frac{a+b}{2}, b]$ 中, 以 $\frac{a+b}{2}$ 代替 a 。

反复执行步骤(2)和(3), 直到区间长度缩小到允许误差范围之内, 此时区间的中点即可作为所要求的解 ψ 角。

在采用区间分半法求解主磁路饱和时的 ψ 角, 每次执行步骤(2)时, 都必须查找空载特性曲线, 先计算相应的 E_d 值, 这里, 空载特性曲线也是以离散点的形式事先输入计算机, 在运行时以插值的形式寻找。

4 实例计算

4.1 不饱和凸极同步发电机的计算

YJF-30的交流励磁机是不饱和同步发电机, 已知参数: $X_q = 0.935$ (欧), $X_p = 0.523$ (欧), r_a

$=0.044$ (欧), 当它在额定(主发电机额定负荷)工作时, $I=16.9$ (安), $\varphi=29.0333^\circ$ (感性), 励磁电势 $E_0=27.65$ (伏), 求此时的 ψ 角。

4.1.1 用赛德尔迭代法求解

以 E_0 作为电压迭代初值 U_0 , 收敛精度取 $|\psi_i - \psi_{i-1}| < 0.001$, 其迭代计算结果见表1, 共迭代5次得 $\psi=48.227^\circ$ 。

4.1.2 用区间分半法求解

以 $a=0.0^\circ$, $b=90^\circ$ 作为函数 $f(\psi)$ 存在零点的初始区间 $[a, b]$, 收敛精度为 $|a_i - b_i| < 0.001$, 其迭代计算结果见表2, 共迭代17次得 $\psi=48.227^\circ$ 。

表 1

迭代次数	U(伏)	°(度)
0	27.65	41.78986
1	16.9645	47.64661
2	16.30278	48.18455
3	16.25526	48.22432
4	16.25184	48.2272
5	16.25159	48.22741

表 2

次数	a(度)	b(度)	f(a)	f(b)
0	0.0	90.0	-20.7992	1.4×10^8
1	45.0	90.0	-1.5995	1.4×10^8
2	45.0	67.5	-1.5995	15.185
...
16	48.2272	48.2285	-0.00009	0.00061
17	48.2272	48.2279	-0.00009	0.00025

表 3 IF-20的空载特性数据

E(伏)	0.0	104	108	110	112	114	116	118	120	122	124
F(安匝)	0.0	358	376	385	395	406	418	431	446	462	479
E(伏)	126	128	130	132	134	136	138	140	142	144	146
F(安匝)	497	516	536	557	583	615	648	682	717	755	802
E(伏)	148	150	152	154	156	158	160	162	164	166	168
F(安匝)	857	921	987	1078	1180	1289	1400	1517	1644	1784	2090

4.2 饱和凸极同步发电机的计算

已知IF-20的参数: $K_{ad}=0.835$, $K_{aq}=0.475$
 $F_a=875$ (安匝), $X_d=0.167$ (欧) $r_a=0.0866$
 (欧), 当它在额定负载时, $I=55.6$ (安), $\cos \varphi=0.75$ (感性), $E_0=154.6$ 伏及空载特性曲线数据见表3, 求此时的 ψ 角。

4.2.1 赛德尔迭代法求解

以 E_0 作为电压迭代初值 U_0 , 取收敛精度为 $|\psi_i - \psi_{i-1}| < 0.001$, 其迭代计算结果见表4, 共迭代3次得 $\psi=65.687^\circ$ 。

表 4

迭代次数	U(伏)	°(度)
0	154.6	62.52999
1	119.1503	65.72372
2	119.5133	65.68643
3	119.5064	65.68714

4.2.2 区间分半法求解

以 $a=0^\circ$, $b=90^\circ$ 作为函数 $f(\psi)$ 存在零点的初始区间 $[a, b]$, 收敛精度为 $|a_i - b_i| < 0.001$, 其迭代计算结果见表5, 共迭代17次得 $\psi=65.6869^\circ$ 。

表 5

次数	a(度)	b(度)	f(a)	F(b)
0	0.0	90.0	-196.6	1.0×10^8
1	45.0	90.0	-114.0	1.0×10^8
2	45.0	67.5	-114.0	17.51
...
16	65.6858	65.6872	-0.011	0.001
17	65.6865	65.6872	-0.005	0.001

(下转第41页)

同步电机静止频率响应试验三维变换函数法

赵旺初 译

摘要

用静止频率响应(SSFR)试验确定同步电机参数时,影响准确性的诸因素之一,是在纵轴(d-axis)模型拟合中变换函数的数目。本文提出在拟合中用三维变换函数代替一般所用的二维变换函数,在一台3KVA微型交流电机上的模拟和经验探讨证明“三维变换函数法”能增加SSFR试验确定同步电机参数的准确性。

1 前言

近年来,静止频率响应特性(SSFR)试验作为确定同步电机参数是一个有力的工具,特别是改进了的模型,它有不等的互感和更强的阻尼作用。然而,现行的SSFR试验仍存在一些缺点,以致影响测试的和推导出来的电机参数的准确性。在这方面,纵轴模型拟合中变换函数的数目有不可忽视的影响。虽然二维变换函数($L_d(s)$ 和 $G(s)$)比一维($L_d(s)$)的改善了推导模型对转子的代表性,并推荐到美国电气与电子工程师学会标准(IEEE std. 115A)。然而,“二维变换函数”法的充分性仍存在问题。

本文提出三维变换函数纵轴模拟法以代替二维变换函数法。三维法比二维法创造了使结果更完善

的条件。本文运用网络理论来说明三维法。通过在3KVA实验室微型发电机SSFR试验的模拟和应用,三维法的优越性得到验证。

2 纵轴同步电机模型

纵轴同步电机模型可用下列方程式表示:

$$u_d(s) = -Z_d(s)i_d(s) + \omega_o L_q(s)i_q(s) + SG(s)u_f(s) \quad (1)$$

$$i_f(s) = SG(s)i_d(s) + \frac{1}{Z_{fo}(s)}u_f(s) \quad (2)$$

式中 $Z_d(s)$ 为纵轴阻抗, $G(s)$ 为磁场—电枢变换函数, $Z_{fo}(s)$ 为磁场阻抗, $L_q(s)$ 为横轴电感。 $u_d(s)$ 、 $u_f(s)$ 、 $i_d(s)$ 、 $i_q(s)$ 和 $i_f(s)$ 为纵轴等效电路的电压和电流。

上式中 $Z_d(s)$ 、 $G(s)$ 、 $Z_{fo}(s)$ 称之为变换函数,他们是复合频率 s 诸电阻和诸电感的函数。通过频率响应试验测出这些函数后,同步电机所有电阻和电感等参数都可以确定。

在静止时($\omega_o = 0$)式(1)化简为

$$u_d(s) = -Z_d(s)i_d(s) + SG(s)u_f(s) \quad (3)$$

(上接第22页)

5 结论

5.1 用计算机迭代求解超越方程计算 ψ 角是一种很有效的 ψ 角计算方法,避免了作图法工作繁琐和精度差的问题。

5.2 编制的 ψ 角计算迭代程序具有较强的通用性,对饱和或不饱和同步发电机普通适用。

5.3 用赛德尔迭代法求解超越方程收敛速度较快,但存在不收敛的可能性;区间分半法是一种可靠的

迭代方法,只要求函数 $f(\psi)$ 在区间 $[a, b]$ 连续即可,但当初始区间大时收敛速度较慢。

参考文献

- [1] 冯康等 数值计算方法,国防工业出版社,1978.
- [2] 许实章,电机学(下册),机械工业出版社,1981.
- [3] 航空电机学编写组,航空电机学(下册),国防工业出版社,1980.
- [4] 李发海等,电机学(下册),科学出版社,1934.