

永磁机构磁路分段图示法求解

冯 英, 武建文, 秦 晨

(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘要: 考虑到磁性材料的非线性特点, 在计算磁路时往往比较复杂。目前求解磁路的主要方法有: 解析法、图解法、数值计算法。针对永磁机构设计中提出的问题, 建立了分段法分析铁心磁路的模型, 结合 Office Excel 中的曲线拟合功能, 利用图示法快速直观的求解磁路。得出了永磁机构铁心各部分的尺寸和磁场状态, 为永磁机构磁路设计提供了依据。实验结果表明, 利用此种方法不仅简化了求解过程, 大大的加快了求解速度, 而且可以直观的反应求解过程, 便于进一步分析和优化磁路。

关键词: 永磁机构; 分段法; 图示法

中图分类号: TM561

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)04-0024-05

Fractionation and Graphic Methods for Analyzing the Magnetic Circuit of Permanent Magnetic Actuator

FENG Ying, WU Jian-wen, QIN Chen

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: Analysing magnetic circuit is always very complex for the nonlinear feature of magnetic material. The existing methods for magnetic circuit analysis include analytic method, graphic method, and numerical method, etc. In this paper, a fractionation method model is established for magnetic circuit analysis, and a graphic method with the function of curve fitting tool in Excel is adopted to calculate the magnetic circuit. The sizes and magnetic fields of different parts of iron core are hence achieved, providing a basis for magnetic circuit design of permanent magnetic actuator. The experimental results show that the present method can simplify and accelerate the calculation, and visualize the solving process to facilitate further analyzing and optimizing of magnetic circuit.

Key words: permanent magnetic actuator; fractionation method; graphic method

0 引言

考虑到磁性材料的非线性特点, 在计算磁路时往往比较复杂^[1]。目前求解磁路的主要方法有: 解析法、图解法、数值计算法。其中数值计算方法中的有限元法近年来得到较为广泛的应用和发展, 主要是通过商用软件如 ANSOFT、ANSYS 等分析磁路^[2-5], 优点是求解精度比较高, 而求解过程复杂, 不能很好地反映每一段磁路是否饱和^[6,7]。笔者设计了一种直观方便的方法求解磁路中每一段的磁场状态。利用分段法分析磁路, 根据精度要求, 灵活选择分段段数, 并利用 Office Excel 的曲线拟合功能, 通过图示法反映求解磁路的过程及求解结果。实验验证了设计方法的正确性。

1 分段法设计铁心结构

1.1 分段法原理

考虑漏磁情况下简单磁路计算问题可归结为在给定的初始条件下求解磁路微分方程。取铁心端面为 $x=0$, x 的正方向向下, 则其一般形式为

$$\begin{cases} \frac{dx}{dx} = 1 \\ \frac{d\Phi_x}{dx} = u_x \cdot g \\ \frac{du_x}{dx} = -(f - H_{As} - H_{Bs}) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, u_x 为磁路中的磁位差; Φ_x 为磁路中的磁通; H 为磁路中的磁场强度, f 为单位长度磁势, $f = IW/l_c$; IW 为待求值。

初值条件为

收稿日期: 2008-12-18; 修回日期: 2009-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(50877002)。

作者简介: 冯 英(1983), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能电器。

$$\begin{cases} x=0 \\ \Phi_x=\phi_\delta \\ u_x=u_d \end{cases} \quad (2)$$

微分方程数值解的共同特点,就是利用有限的增量如 Δx 、 $\Delta \Phi_x$ 、 Δu_x 取代微分量 dx 、 $d\Phi_x$ 、 du_x ,并将磁系统沿坐标 x 分为若干段,得若干个截面,见图 1。

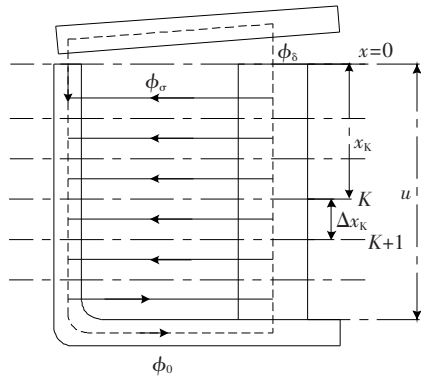


图 1 磁路微分方程的数值解法

每个(如第 $K+1$ 个)截面处的函数值 x_{K+1} 、 Φ_{K+1} 、 u_{K+1} 都是根据其前一截面的函数值 x_K 、 Φ_K 、 u_K 和两截面间的函数增量值 Δx_K 、 $\Delta \Phi_K$ 、 Δu_K 来计算的

$$\begin{cases} x_{K+1}=x_K+\Delta x_K \\ \Phi_{K+1}=\Phi_K+\Delta \Phi_K \\ u_{K+1}=u_K+\Delta u_K \end{cases} \quad (3)$$

函数增量可表示为函数增长率与坐标增量之积,式(3)可表示为

$$\begin{cases} x_{K+1}=x_K+\Delta x_K \\ \Phi_{K+1}=\Phi_K+K_\phi \cdot \Delta x_K \\ u_{K+1}=u_K+K_u \cdot \Delta x_K \end{cases} \quad (4)$$

微分方程组的数值解法有多种,其区别则在于计算式(4)两个相邻截面之间各函数的增长率 K_ϕ 和 K_u 的计算方法不同。有些资料中曾经介绍了欧拉法和龙格-库塔法^[8]。

为了分析方便,假设磁路中的铁磁阻很小,忽略铁磁阻,只考虑空气漏磁阻和缠绕在铁心上面的线圈磁势,简化的等值磁路图见图 2,假定磁通在铁心截面内分布均匀,线圈磁势为 IW , l 为漏磁阻长度, g 为单位漏磁导。

把线圈磁势以及缠绕线圈的铁心按照等分的方法进行分析,每一段线圈磁势即为整个线圈磁势的 $1/n$ 。具体推导过程如下

$$\begin{aligned} \phi_{1\sigma} &= \frac{IW}{n} \cdot n \cdot \frac{1}{n} \cdot g \cdot l, \phi_1 = \phi_{1\sigma} = \frac{IW}{n} \cdot n \cdot \frac{1}{n} \cdot g \cdot l \\ \phi_{2\sigma} &= \frac{IW}{n} \cdot (n-1) \cdot \frac{1}{n} \cdot g \cdot l \\ \phi_2 &= \phi_{1\sigma} + \phi_{2\sigma} = \frac{IW}{n} \cdot \frac{1}{n} \cdot g \cdot l \cdot (n+n-1) \end{aligned}$$

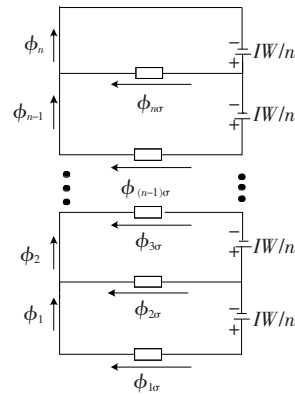


图 2 分段法推导漏磁阻模型

$$\phi_{3\sigma} = \frac{IW}{n} \cdot (n-2) \cdot \frac{1}{n} \cdot g \cdot l$$

$$\phi_3 = \phi_{1\sigma} + \phi_{2\sigma} + \phi_{3\sigma} = \frac{IW}{n} \cdot \frac{1}{n} \cdot g \cdot l \cdot (n+n-1+n-2)$$

...

$$\phi_{n\sigma} = \frac{IW}{n} \cdot 1 \cdot \frac{1}{n} \cdot g \cdot l$$

$$\phi_n = \phi_{1\sigma} + \phi_{2\sigma} + \dots + \phi_{n\sigma} =$$

$$\frac{IW}{n} \cdot \frac{1}{n} \cdot g \cdot l \cdot (n+n-1+\dots+1) = IW \cdot \frac{1}{2} \cdot g \cdot l \cdot \frac{n+1}{n}$$

令 $\phi_n = IW \cdot G$, 所以

$$G = \frac{1}{2} \cdot g \cdot l \cdot \frac{n+1}{n} = \frac{1}{2} \cdot g \cdot l \cdot (n \rightarrow \infty)$$

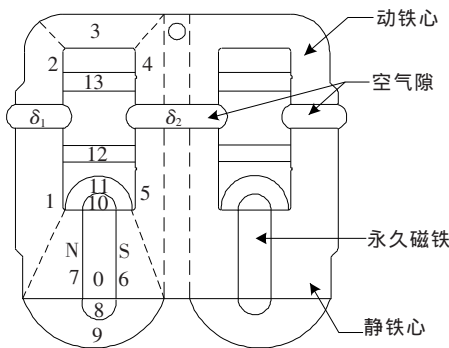
根据以上分析可知,当铁心按照分段法计算,段数越多,所得到的计算模型越精确,当把线圈以及铁心分成无穷段时候,铁心中的漏磁导近似等于 $\frac{1}{2} \cdot g \cdot l$,与利用解析法求解结果相同^[8]。在铁心磁路计算过程中,每一段空气漏磁导可以按照此公式计算。为了不使计算过程过于复杂,经过分析,当 $n=6$ 时,漏磁通的计算精度可以达到工程精度要求。由于漏磁通在中磁通中所占的比重不大,磁路总磁通计算误差很小。

1.2 分段图示法求解磁路

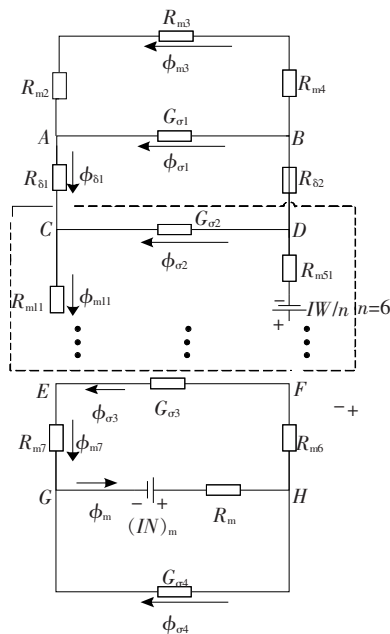
根据上述的分段法原理,分析了一种自行设计的双 E 型单稳态永磁操动机构,不仅减小了非工作气隙,减小了漏磁,而且优化了铁心体积,提高了铁心的磁通利用率。铁心结构见图 3(a)。

从等值磁路的观点来看,整个铁心构成了一个具有分布参数的磁路,而导磁体的磁阻又是非线性的,加上磁路的漏磁问题,使得整个铁心磁路的设计尤为复杂。笔者利用等值磁路图的方法,把整个铁心看成是由若干段铁磁阻构成,通过合理设计每段铁心的尺寸,使整个铁心的性能达到最优。其中把静铁心中柱铁心以及线圈磁势等分成 6 段,在分析时只需要重复虚线框内的磁路分析过程,具体的等值磁

路图见图 3(b)。这样可以把整个磁路中最重要的一段进行精确的分析,既避免了浩大的工作量,又精确地分析了铁心磁路。在动铁心部分没有线圈激磁磁势,磁压减小,所以没有必要去精确地分析动铁心中的漏磁阻,可以把整个动铁心中的漏磁阻按照 $g \cdot l$ 进行归算。由于铁心具有对称性的特点,在分析时选择其中具有对称性的一半来进行,把它看成 16 段组成。其中 $R_{m1}、R_{m2}、R_{m3}、R_{m4}、R_{m5}、R_{m6}、R_{m7}$ 为硅钢片对应的各段磁阻, $R_{\delta1}、R_{\delta2}$ 表示气隙 δ_1 和气隙 δ_2 的磁阻, $R_{\sigma1}、R_{\sigma2}、R_{\sigma3}、R_{\sigma4}$ 表示漏磁 σ_1 、漏磁 σ_2 、漏磁 σ_3 、漏磁 σ_4 的磁阻, R_{m0} 表示永久磁铁的磁阻, $(IN)_m$ 代表永久磁铁的磁势, IW 为线圈电流产生的磁势。



(a) 操动机构铁心截面图



(b) 操动机构等值磁路图

图 3 永磁操动机构计算示意图

漏磁分布在磁系统周围整个空间,从等值磁路的观点来看,其相当于一个具有分布参数的磁路,而导磁体的磁阻又是非线性的。这两个因素合在一起就构成了一个分布参数的非线性问题。其中 $R_{\sigma1}$ 由

第 13 段构成,为长方体的空气漏磁; $R_{\sigma2}$ 由第 12 段构成,为长方体的空气漏磁; $R_{\sigma3}$ 由第 10、11 段构成,为一个半圆柱形漏磁和半圆环漏磁; $R_{\sigma4}$ 由第 8、9 段构成,为 3 个半圆柱形漏磁和半圆环漏磁,各个分段的磁导计算公式参考文[8]。

根据以上磁路模型,完成以下两项任务:①根据测量的 ZN28 断路器反力特性设计电磁吸力,根据所需要的电磁吸力设计和计算铁心各段尺寸;②求出机构在不同开距下的工作点,并计算不同开距下气隙中的静态吸力。把计算结果与实际静态力测量结果相比较,据此验证磁路计算方法的准确性。

考虑到磁性材料的非线性特点,在计算磁路时往往比较复杂,笔者设计了一种直观方便的方法求解磁路中每一段的磁场状态。因为永久磁铁中产生的磁通流经磁路中各段时候会产生不同的磁压降,将其他各部分磁路看成是永久磁铁外部的负载,根据外部负载的特性推出永久磁铁处的工作状态,如果此工作点恰好位于永久磁铁的退磁曲线上,那么所有过程中求出的磁场状态就是此时的铁心各部分工作状态。整个分析过程可以利用 Office Excel 中根据数据绘制曲线的功能来完成,调整磁路中的给定磁通,通过图示观察负载线与退磁曲线的关系,这样可以很方便地找到负载线和退磁曲线的交点。

根据磁路图可以把永久磁铁的两端看成是二端口网络,从外部看就是许多非线性的铁磁阻和空气磁阻以及线圈的磁势的组合,可以利用试探的方法。以合闸位置时候的负载线计算过程为例,如图 4 所示,设定 Φ_{m3} 的初始值为 Φ_{m3i} ,然后逐步计算磁路中每一部分的磁阻,包括出力气隙、磁轭以及空气漏磁,根据此时磁路中每一段计算出的工作状态可以得出永久磁铁两端从外部看的工作点,通过改变 Φ_{m3i} ,可以得出一系列的工作点并构成铁心的负载线。观察图示,找到距离退磁线圈最近的一点,如图 4 所示为第 11 点,通过调整此点所对应的 Φ_{m3i} ($i=11$),找到负载线与退磁曲线的交点。此点即为永久磁铁的工作点,此 Φ_{m3i} 所对应计算过程中每一部分的参数就是整个铁心的工作状态。如图 4 所示,在合闸位置工作点处,负载线出现弯曲,说明铁心已经处于饱和状态。由此可见,分段图示法求解磁路可以直观地分析磁路中每一部分的状态。

为了提高抗冲击能力,保证铁心可靠地保持在合闸位置,初步假定合闸位置保持力为反力的 2 倍,以此设计铁心各部分尺寸,各部分的尺寸要尽可能的小,同时注意每一个部分都不能过于饱和,防止铁心的利用率下降。

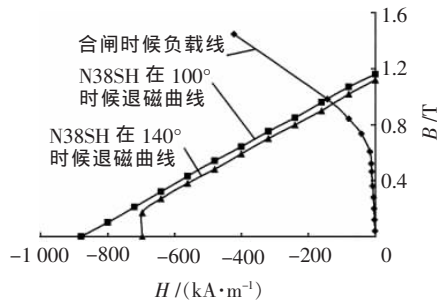


图4 合闸时候的负载线求解过程

分闸位置电磁吸力设计为机构反力 1/2 以下, 这样就不会由于意外原因而导致断路器合闸。

利用分段图示法求解线圈的分合闸磁势比较简单, 以分闸为例, 这里采用的方法是把分闸过程分成 3 段: 合闸位置加电负载线平移; 加电的情况下分闸负载线发生变化; 分闸断电。具体来说, 第 1 个阶段是在磁路中叠加一个与永久磁铁相反磁势的线圈磁势, 观察负载线的平移变化, 找到最新的工作点, 此过程需要注意工作点处的电磁吸力要远小于合闸位移的机构反力, 才可以发生分闸触动; 第 2 个阶段是在不断电的情况下分闸, 负载线角度发生变化, 变成分闸时候的负载线角度, 此过程分闸线圈 IN 的设计需要注意新的工作点不能超出永久磁铁退磁曲线的直线段; 第 3 阶段是在分闸状态下断电, 负载线平移回原点, 此时的工作点为分闸状态所对应的工作状态, 需要保证此时的电磁吸力要远小于机构反力。具体过程见图 5 分闸过程。

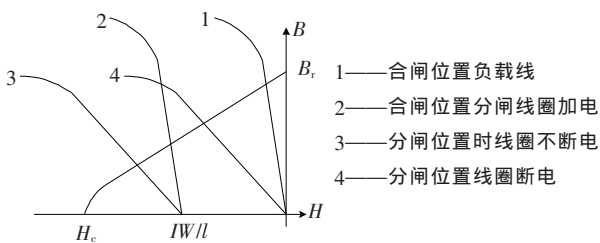


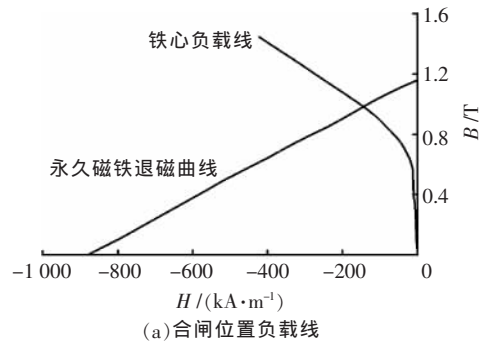
图5 静态法求解分闸 IN 过程

2 分段图示法求解结果

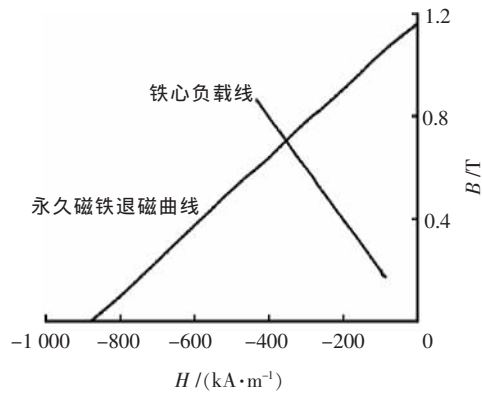
(1) 按照前面所述的分段法分析铁心磁路并利用负载特性求解出了静态工作点, 得出了分合闸位置的负载线, 见图 6。可以看到在合闸位置铁心出现饱和, 在分闸位置负载线处于线性状态, 这是由于铁心中磁通不大所致。

(2) 磁路每一部分状态求解结果: 分段图示法求解在不同气隙下永久磁铁的工作点见表 1, 第 3 段铁心的工作点见表 2, 分段图示法求解在不同气隙下气隙中的 B 见表 3。

(3) 静态法求解静力特性: 分段图示法求解在不



(a) 合闸位置负载线



(b) 分闸位置负载线

图6 负载线结果

表1 分段图示法求解在不同气隙下永久磁铁的工作点

气隙/mm	B_s/T	$H_s/(kA \cdot m^{-1})$
0.01	0.98	-143
4.00	0.85	-242
15.00	0.74	-326
37.00	0.70	-352

表2 分段图示法求解在不同气隙下第 3 段铁心的工作点

气隙/mm	B_3/T	$H_3/(kA \cdot m^{-1})$
0.01	1.88	97.38
4.00	1.10	3 844.00
15.00	0.42	4 560.00
37.00	0.20	2 335.00

表3 分段图示法求解在不同气隙下气隙中的 B

气隙/mm	B_g/T
0.01	1.45
4.00	0.81
15.00	0.31
37.00	0.15

同气隙下的电磁吸力见表 4, 静力特性曲线见图 7。

(4) 图示法求解分合闸 IN : 根据分段图示法求解出的分合闸 IN , 可以根据线圈漆包线的电流密度来选择通过线圈导线的电流大小, 尽量选择能够通过的最大电流, 然后根据电流确定线圈匝数, 见表 5。同时, 根据静态法求解分合闸线圈 IN 时, 可以根据

表 4 分段图示法求解在不同气隙下的电磁吸力

气隙/mm	F_N / T	气隙/mm	F_N / T
0.01	11 582	15.00	474
2.00	6 999	25.00	188
4.00	3 497	37.00	91
8.00	1 328		

表 7 电磁吸力实测值与理论计算值对比

气隙/mm	$F_N(\text{实测值})/N$	$F_N(\text{理论值})/N$
1.6	7 771	8 021
3.2	5 725	4 509
12.8	621	618
16.0	533	428

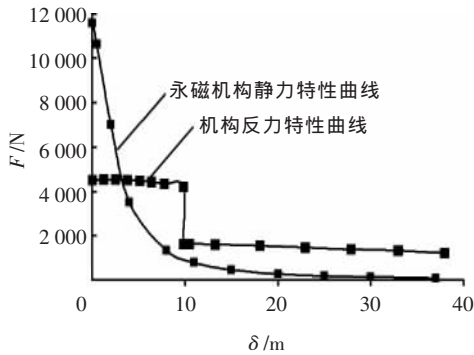


图 7 静力特性曲线

图 5 中的曲线 3 (在分闸位置电流最大情况下的负载线)来调节线圈 IN 的大小,防止永久磁铁退磁,保证永久磁铁在永磁机构动作过程中处在退磁曲线的线性段。

表 5 分段图示法求解分合闸线圈 IN

	合闸过程	分闸过程
$IN/\text{安匝}$	26 000	10 000

3 实验结果及分析

通过一台自行研制的 12 kV 永磁操动机构连接在 ZN28 开关本体上面进行了验证性实验,机构参数如下:额定输入电压 12 kV、额定电流 1 250 kA、额定短路开断电流 31.5 kA。

计算时采用的励磁回路各元件的电参数,见表 6。

表 6 分合闸线圈参数

	d/mm	$N/\text{匝}$	R/Ω	U/V
分闸线圈	2.2	109	0.52	84
合闸线圈	2.2	164	0.60	94

(1)通过杠杆测量了永磁机构的电磁吸力,测试结果与分段图示法计算结果对比见表 7。

通过对比分析可知,测量电磁吸力误差与利用分段图示法求得的理论计算值平均误差为 10%左右,基本满足了精度要求,对永磁机构的分合闸保持不会产生影

(2)通过实验得到的线圈电流波形可以得到合闸触发电流和分闸触发电流,将电流代入求解过程中可以求得在相应 IN 下,气隙中的磁感应强度,并得到合闸触发电流时的电磁吸力为 1 086 N(实测的分闸位置机构反力为 1 074 N),分闸触发电流时的电磁吸力为 4 300 N(实测的合闸位置机构反力为 4 514 N)。通过比较可知,误差在 5%以内,满足精度要求,验证了此方法的可行性。

4 结论

(1)建立了分段法分析铁心磁路的模型,并结合 Office Excel 中的曲线拟合功能,通过图示法求解了铁心各部分的尺寸和磁场状态。

(2)通过求解过程可以发现,利用分段图示法求解磁路不仅简化了求解过程,大大加快了求解速度,而且可以直观的反应求解过程,便于进一步分析和优化磁路。

(3)通过一台自行设计的 12 kV 单稳态永磁操动机构连接在 ZN28 开关本体上进行实验,测试了机构的电磁吸力,误差为 10%,满足了工程精度要求。

参考文献:

- [1] 林 莘.永磁机构与真空断路器[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [2] 马少华,王季梅.72.5 kV 高压真空断路器永磁操动机构的研究与设计[J].中国电机工程学报,2001,21(12):109-114.
- [3] 周丽丽,方春恩,李 伟,等.27.5 kV 永磁机构真空断路器动作特性仿真与试验研究[J].高压电器,2008,44(3):214-224.
- [4] 谭东现,李 岩,牟 坚,等.动态式双稳态永磁机构的研究[J].高压电器,2007,43(3):229-231.
- [5] 白保东,郭志楠,谢德馨.强磁场下永磁机构的优化设计及磁力分析[J].沈阳工业大学学报,2008,30(1):20-23.
- [6] 林 莘,张 浩,那 娜.真空断路器永磁机构计算与分析[J].沈阳工业大学学报,2005,27(3):266-269.
- [7] 刘向东,林 莘,徐建源.12 kV/31 15 kA 真空断路器灭弧室电场的数值计算[J].沈阳工业大学学报,2003,25(4):591-792.
- [8] 王宝龄.电磁电器设计基础[M].北京:国防工业出版社,1989.

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!