

往复式开关磁阻直线电机的效率最大化控制

陈梁远, 李黎川

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了提高直线压缩机的效率,在对一台往复式开关磁阻直线电机驱动的直线压缩机进行运动特性分析、损耗(尤其是铁耗)分析以及驱动参数测试的基础上,提出了一种以黄金分割算法为重要组成的电机效率最大化综合控制策略.该控制策略具有不依赖系统的模型和参数、简单易于实现等优点,尤其适用对参数变化和模型复杂难以确定的非线性系统进行控制.该控制策略不仅能对电机的行程和平衡位置进行控制,而且能在线快速搜索最大效率工作点,进而提高电机的运行效率.实验结果表明了该控制策略是正确且有效的.

关键词: 效率;直线电机;直线压缩机;开关磁阻直线电机

中图分类号: TM352;TM359.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)10-0015-05

Maximum Efficiency Control for Reciprocating Linear Switched Reluctance Motor

CHEN Liangyuan, LI Lichuan

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The mechanical motion characteristics of a system, including a unidirectional-force reciprocating linear switched reluctance motor and a compressor, are analyzed, the loss of the motor affecting efficiency is evaluated, and the driving variables are measured, a maximum efficiency control strategy is proposed. The strategy with an important component of golden section search is endowed with the advantages of simplicity, independence upon the system parameters and models and easy on-line search, to control both the stroke and equilibrium position and improve the motor efficiency. The experimental results verify the correctness and effectiveness.

Keywords: efficiency; linear motor; linear compressor; linear switched reluctance motor

工业应用中经常需要用到直线驱动装置,常用的是采用旋转电机通过曲柄连杆、螺杆等中间转换机构,将旋转运动转换为直线运动.与此相比,采用直线电机能够直接产生直线运动,省略了中间转换环节,具有摩擦损耗小、结构简单紧凑、噪声低、响应速度快等优点.随着直线电机驱动、电力电子等技术的发展,直线电机已广泛应用于直线压缩机、电磁泵、振动筛等产品中^[1-2].直线压缩机是将直线电机应用于诸如冰箱等的压缩机中,直接驱动活塞做往复直线运动,不仅提高了机械效率,而且行程(或制

冷量)可调.

目前,国内外对应用于冰箱压缩机中的直线电机进行了广泛的研究,并且取得了很多研究成果^[3-7].这些研究成果表明,改变电机驱动电流的大小和频率,可以改变压缩机的活塞行程,并且当电机驱动电流的频率与压缩机系统的机械谐振频率相等时,直线压缩机的效率最大^[4-6].在直线压缩机中,直线电机和弹簧组成了单自由度的质量弹簧谐振系统,其机械谐振频率可表示为

$$f_r = (1/2\pi)(K_t/M)^{1/2} \tag{1}$$

式中: M 为总的运动质量, 包含动子、活塞、动框及弹簧等效运动部分等质量; K_t 为总的等效刚度, 包含机械弹簧的刚度及压缩腔内气体的等效刚度。

对于压缩机中的非线性气体力负载, 可以简单线性化等效为含弹性系数 (K_g) 和阻尼系数 (C_g)^[6-9] 的弹簧阻尼模型, 则 K_t 可以表示为

$$K_t = K_s + K_g \quad (2)$$

式中: K_s 为机械弹簧刚度系数。

在式(2)中, K_g 不仅受到活塞行程的影响, 而且还受到工作条件的影响^[5], 如温度、吸气压力、排气压力等, 因此 f_r 是随着行程和工作条件的变化而变化的。为使电机的运行效率最高, 必须使电机驱动电流的频率接近直线压缩机系统的谐振频率, 这就提出了对控制量的寻优以实现电机效率最大的问题。

直线压缩机常用的效率最大化控制方法可分为模型法^[8]和搜索法^[10-11], 其中模型法是通过复杂的数学推导建立数学建模, 进而确定效率最大时的控制量。该方法的优点是直接, 尤其对线性系统来说, 计算速度快, 缺点是依赖准确的电机及被驱动元件模型的参数, 对如开关磁阻电机和气体力负载这样非线性严重的对象, 准确建模比较困难。搜索法是通过有规律地改变控制量, 同时检测输出功率一定时的电机输入功率, 直到其达到最小为止, 此时电机运行效率最高。该方法的优点是算法本身与系统模型(包含电机模型、功放模型、压缩机模型等)无关, 不受温度、吸(排)气体压力及电机参数等的影响; 缺点是收敛速度的快慢决定于搜索算法, 而且对功率测量的准确性要求较高。对于直线压缩机效率的搜索, 文献[10]采用扰动和观测的搜索方法, 在输出功率一定时, 通过尝试性地逐步增大或减小驱动电流的频率, 比较前次与此次电机输入功率的大小, 往最小功率方向搜索, 最终找到效率最大时的电流频率。文献[11]采用模糊算法, 搜索一定行程下电流(或功率)最小时的驱动电流频率。

基于文献[3]的算法, 本文提出了在直线压缩机中采用黄金分割算法在线搜索电机稳态工作时的效率最优工作点的方法。与上述两种搜索方法不同, 黄金分割算法简单快速, 无需事先确定搜索步数及搜索步长, 并且搜索距离远, 搜索间距大, 避免了逐步搜索在波动区的失效。通过检测行程一定时的电机效率的变化, 调节驱动电流的控制量, 使电机的运行效率最大。该方法不依赖系统的模型和参数, 能够避免由于干扰引起的开关功放或电流传感器等波动的影响, 保证了较快的搜索速度和正确性。实验结果表

明, 采用本文提出的效率最大化的控制策略, 可以提高直线电机的运行效率。

1 系统运动特性、电机损耗及驱动特性分析

1.1 系统运动特性分析

图1为一台往复式开关磁阻直线电机驱动的直线压缩机的结构^[3]。当系统运行时, 运动质量在电磁力、弹簧力及负载气体力的作用下做往复直线运动, 其动力学特性可以描述为单自由、度单质量的阻尼受迫振动模型, 如图2所示, 其运动方程为

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + C_m \frac{dx}{dt} + K_s(x - x_0) = F_g - F_e \quad (3)$$

式中: x 为位移; C_m 为机械阻尼系数; F_g 为气体力; F_e 为电机电磁力; x_0 为直线电机未加电时动子的静平衡位置。

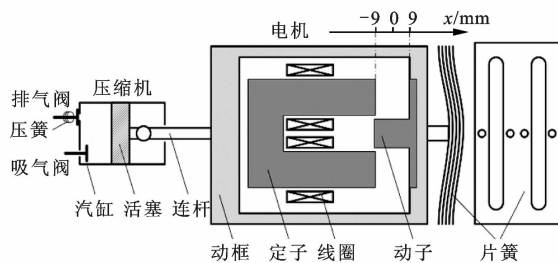


图1 直线电机及压缩机结构

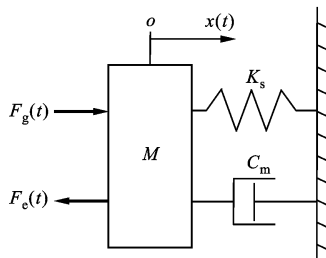


图2 直线电机的动力学模型

电机电磁力特性可参考文献[3], 是位置与电流的非线性函数。气体力可以用当量弹性系数 K_g 和当量阻尼系数 C_g 表示, 即 $F_g = -K_g x - C_g dx/dt$, 由此可得到

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + C_t \frac{dx}{dt} + K_t(x - x_0) = -F_e \quad (4)$$

式中: C_t 为总的等效阻尼系数, 且 $C_t = C_m + C_g$ 。

1.2 电机损耗分析

系统的损耗主要由机械损耗、电机的铁心损耗及绕组铜耗组成。机械损耗主要有活塞与汽缸间的滑动摩擦损耗及阻尼损耗。由于片簧的悬浮支撑作用及其在竖直面具有极大的刚度, 活塞连杆与片

簧垂直,加上精确的安装和润滑油的作用,因此活塞与气缸之间的摩擦损耗可以忽略不计,另外阻尼损耗一般也可以忽略^[6,9]。

开关磁阻电机铁心中的磁场变化比较复杂,磁密波形是非正弦的,而且受运动方式、控制策略、铁心饱和等方面的影响。目前,对铁心损耗的计算主要有实验测试和解析计算两种方法。利用传统损耗公式、傅里叶级数分解和经验修正系数结合起来计算开关磁阻电机铁心损耗是一种很有效的方法,其中比较普遍的方法是基于磁路方法或有限元方法,经处理得出平均磁通或平均磁密波形,再借助谐波分析和铁心损耗计算公式进行计算^[12]。

为了估算在最大电流下电机的铁心损耗,基于三维有限元分析,首先建立了磁通密度/位置/电流表^[3],通过查表,得到近似方波电流 i 的幅值 $I_m = 5.0$ A,导通宽度 $T_{on} = 0.016$ s 及活塞行程 $S_{ref} = 16$ mm,如图 3 所示。在此情况下,得到铁心中的平均磁通密度波形,再借助傅里叶分析方法得到此磁通密度波形的基波及各次谐波分量的幅值,如图 4 所示。然后,根据以下两种方法,采用叠加原理,估算铁心损耗^[13]。

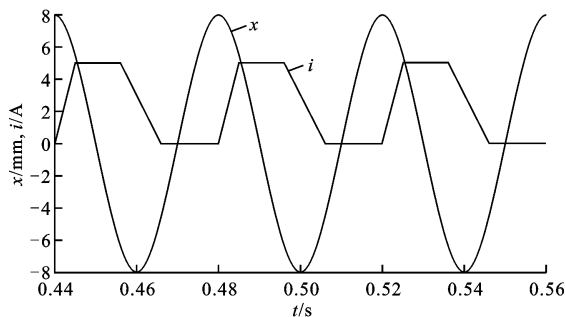


图 3 直线电机的位移与电流波形

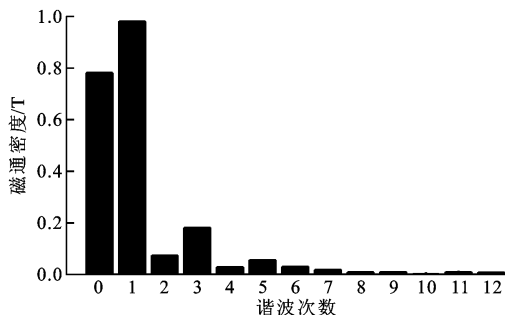


图 4 傅里叶变换后基波及各次谐波分量的幅值

第一种方法为采用工程经验公式估算^[14]

$$P_{Fe} = m_{Fe} P_{15/50} \left(\frac{B_m}{1.50} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1.3} \quad (5)$$

式中: P_{Fe} 为铁心损耗; m_{Fe} 为铁心质量; f 为磁通密

度的频率; B_m 为磁通密度的幅值; $P_{15/50}$ 为 $B_m = 1.5$ T、 $f = 50$ Hz 时单位质量的铁损耗,对于实验用的电机所采用的 50DW465 型号的硅钢片, $P_{15/50} = 4.65$ W/kg。

第二种方法按照 Bertotti 铁心损耗分立计算模型,不考虑集肤效应时的铁心损耗计算公式^[15]进行计算

$$P_{Fe} = m_{Fe} (P_{Fe,h} + P_{Fe,ec} + P_{Fe,exc}) = m_{Fe} (afB_m^d + bf^2B_m^2 + cf^{1.5}B_m^{1.5}) \quad (6)$$

式中: $P_{Fe,h}$ 为磁滞损耗; $P_{Fe,ec}$ 为经典涡流损耗; $P_{Fe,exc}$ 为附加损耗; a 、 b 、 c 和 d 为经验系数,对于 50DW465 型号的硅钢片, $a = 0.028$ 1, $b = 1.919 \times 10^{-4}$, $c = 7.470 \times 10^{-7}$, $d = 1.741$ ^[16]。

电机的铁心质量为 $m_{Fe} = 1.12$ kg,由第一种方法计算得 $P_{Fe} = 1.094$ 5 W,由第二种方法计算得 $P_{Fe} = 1.163$ 5 W。从这两种方法的计算结果可以看出,电机的铁心损耗比较小(电机的平均功率约为 40 W),因此电机效率计算时的损耗主要以绕组的铜耗为主。

定子单相绕组中的铜耗为

$$P_{Cu} = I_{ms}^2 R \quad (7)$$

式中: I_{ms} 为绕组中的电流有效值,且 $I_{ms} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt \right)^{1/2}$, T 为电流周期, i 为绕组电流; R 为绕组的电阻。采用数值计算的方法,在第 k 个往复周期,系统的功率及效率分别为

$$P_1(k) = \frac{1}{N_k} \sum_{j=1}^{N_k} U_j(k) i_j(k) \quad (8)$$

$$P_{Cu}(k) = \frac{1}{N_k} \sum_{j=1}^{N_k} i_j^2(k) R \quad (9)$$

$$\eta(k) = 1 - P_{Cu}(k) / P_1(k) \quad (10)$$

式中: P_1 为电机侧输入功率; U 为绕组端电压; η 为电机的效率; N_k 为第 k 个往复时间周期 T_k 的总采样点数,当采样周期为 T_s 时, $N_k = T_k / T_s$ 。

1.3 电机驱动特性分析

当开关磁阻电机采用方波电流驱动时,可以通过改变电流的幅值 I_m 、直流偏置 I_{DC} 及导通宽度 T_{on} 来改变动子的运动特性。文献[3]证实了在 T_{on} 一定时,控制电流的幅值 I_m 和直流偏置 I_{DC} 能够调节动子的行程和平衡位置。实验电机如图 5 所示,其主要的参数:动子最大行程为 16 mm;动子质量为 0.7 kg;机械弹簧的刚度为 17 kN · m⁻¹;绕组电阻为 2.0 Ω,采样周期为 0.000 2 s;定子与动子铁心的硅钢片型号为 50DW465。

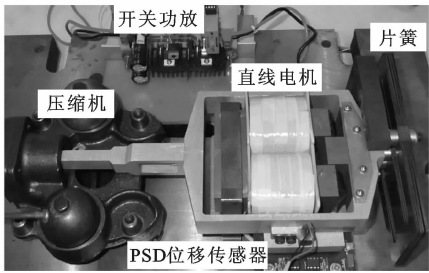


图 5 直线电机实验装置

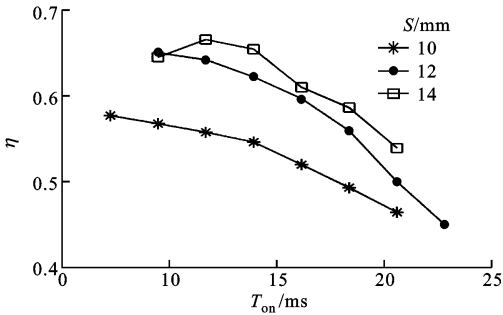


图 6 导通宽度 T_{on} 与效率 η 的关系

通过图 6 可以看出,电机的效率 η 随 T_{on} 的变化而变化,而且 T_{on} 在 $[8 \sim 22]$ ms 内有最大值,因此可以采用搜索最大值的方法跟踪电机的最大效率点。

2 控制策略

2.1 黄金分割算法

由于系统的谐振频率随行程及工作条件变化而变化,因此需要调整电机电流的频率,使之与谐振频率相等,使电机效率达到最大值。通过上面的分析, T_{on} 是对电机效率有重要影响的一个参数,而且电机效率最大值可以通过调节 T_{on} 来得到。

由于黄金分割方法计算次数少,过程简单,是一种常用的一维寻优方法^[17]。本文采用黄金分割法对电机效率进行寻优,其算法流程图如图 7 所示。搜索目标函数为 $\eta=f(T_{on})$,搜索变量为 T_{on} 。首先初始化搜索区间 $[T_{on,a}, T_{on,b}]$,并给定黄金分割系数 $\beta=0.618$ 及区间缩短精度 ϵ 。另设 $\alpha=1-\beta=0.382$ 。在初始区间内按黄金分割规则选定两个点 $T_{on,1}$ 和 $T_{on,2}$,且 $T_{on,1}=T_{on,a}+\alpha(T_{on,b}-T_{on,a})$, $T_{on,2}=T_{on,a}+\beta(T_{on,b}-T_{on,a})$,然后采用式(8)、式(9)和式(10)分别在线计算这两个控制量在同一行程下的效率 η 。若 $f(T_{on,1}) \leq f(T_{on,2})$,则缩短的搜索区间为 $[T_{on,1}, T_{on,b}]$,否则缩短的搜索区间为 $[T_{on,a}, T_{on,2}]$ 。重复上述过程,直到搜索区间缩短满足精度 ϵ 为止。

2.2 综合控制策略

对行程、平衡位置及电流的控制,本文采用了文

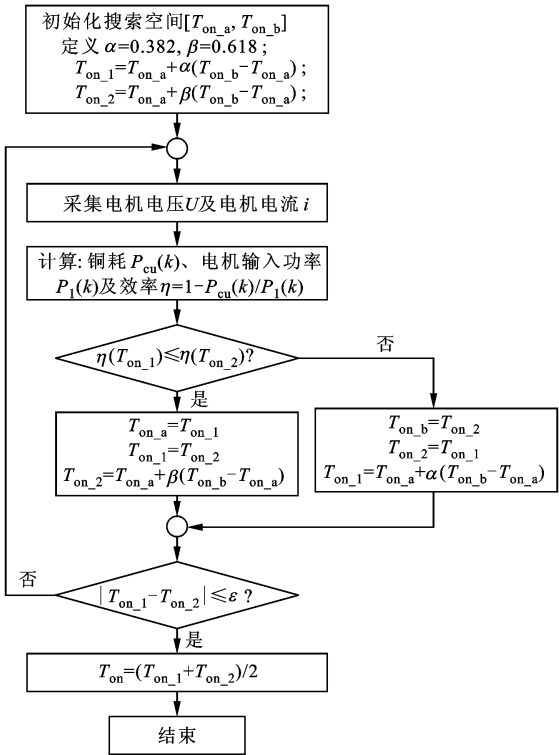


图 7 黄金分割算法流程图

献[3]中提出的控制策略,其有效性已经得到了证实。结合本文提出的以黄金分割算法为基础的效率最大化控制器,进一步构成了一种新的综合控制策略,如图 8 所示。该控制策略不仅能够实现电机电流、行程及平衡位置的准确控制,而且能够实现电机效率的最大化控制。

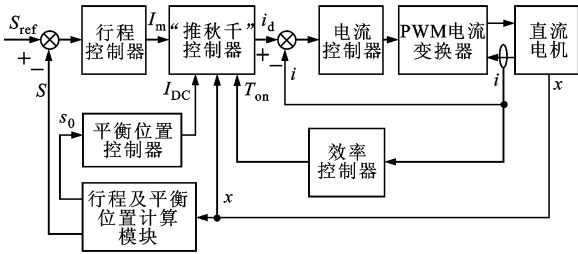


图 8 直线电机控制系统框图

3 实验结果

在一台往复式开关磁阻直线电机上进行对上述的综合控制策略的实验验证,负载为一台小型冰箱压缩机。考虑到直线电机的机械惯量,进行最大化效率控制时的搜索周期设为 0.5 s,并且要求行程及平衡位置满足稳定在参考值附近这一条件,以得到稳定的电机输入功率和效率。采用新型综合控制策略的实验结果如图 9 所示。开始时, $T_{on}=0.016$ s,电

机仅在行程及平衡位置控制器的作用下,行程从 0 稳定到给定值 14 mm;10 s 后,启动效率控制器的搜索算法,随着 T_{on} 的自动搜索,效率很快得到提高并且收敛,达到稳态时 $T_{on}=0.012\text{ s}$, $\eta_{\max}=0.64$ 。与图 6 比较,效率误差主要是由于环境温度、绕组温度、负载等条件不一引起的,但实验结果仍可证明控制算法能够搜索当前情况下的效率最大值。

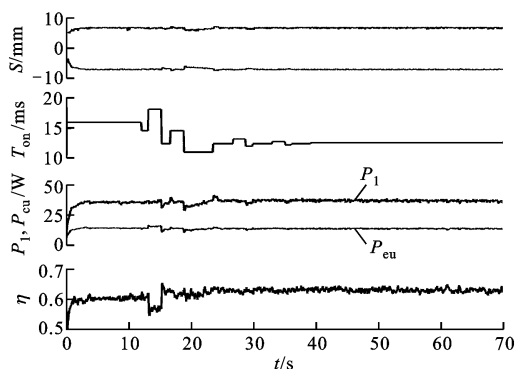


图 9 直线电机效率控制实验结果

4 结 论

本文在对往复开关磁阻直线电机驱动的压缩机系统进行运动特性、损耗及驱动特性分析的基础上,提出一种基于一维优化搜索原理的在线效率优化控制算法,并且与行程控制器等组成新型控制策略。该控制策略不仅能够控制行程和平衡位置,而且能够使电机运行于效率最大工作点。实验结果表明,效率优化控制算法不依赖系统模型和参数,收敛速度快,综合控制策略有效,能够提高电机的运行效率。

参考文献:

- [1] 叶云岳. 直线电机原理与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2000:1-24.
- [2] BOLDEA I, NASAR S A. Linear motion electromagnetic devices[M]. New York, USA: Taylor & Francis,2001:15-20.
- [3] 陈梁远,李黎川. 一种往复开关磁阻直线电机的设计与控制[J]. 中国电机工程学报,2012,32(3):130-136.
CHEN Liangyuan, LI Lichuan. Design and control of a reciprocating switched reluctance motor[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(3):130-136.
- [4] 谢洁飞,李新华,袁茂强. 新型双动子直线振荡电动机[J]. 中国电机工程学报,2009,29(36):67-72.
XIE Jiefei, LI Xinhua, YAN Maoqiang. A novel linear oscillatory motor with two divided moving body[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(36):67-72.
- [5] 张金权,畅云峰,邢子文. 直线冰箱压缩机的频率特性[J]. 西安交通大学学报,2008,42(3):277-280.
ZHANG Jinquan, CHANG Yunfeng, XING Ziwen. Study on frequency characteristics of linear refrigerator compressor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008,42(3):277-280.
- [6] CADMAN R V. A technique for the design of electrodynamic oscillating compressors[D]. Indianapolis, IN, USA: Purdue University,1967.
- [7] 叶利洪. 直线压缩机研究[D]. 杭州:浙江大学,2003.
- [8] 于明湖,卢琴芬,叶云岳,等. 双定子直线振荡电机工作特性分析[J]. 浙江大学学报:工学版,2010,44(11):2113-2117.
YU Minghu, LU Qinfen, YE Yunyue, et al. Operating characteristic analysis of linear oscillatory motor with two separated stators [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science,2010,44(11):2113-2117.
- [9] XIA Ming, CHEN Xiaoping. Analysis of resonant frequency of moving magnet linear compressor of stirling cryocooler[J]. International Journal of Refrigeration, 2010,33(4):739-744.
- [10] LIN Z Y, WANG J B, HOWE D. A resonant frequency tracking technique for linear vapor compressors[C]// Proceedings of IEEE International Electrical Machines and Drives Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007:370-375.
- [11] 于明湖,张玉秋,叶云岳,等. 直线振荡电机谐振频率跟踪策略研究[C]//第 29 届中国控制会议. 北京:中国自动化学会控制理论专业委员会,2010:3348-3352.
- [12] 吴建华. 开关磁阻电机设计与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2000:94-98.
- [13] MATERU P N, KRISHNAN R. Estimation of switched reluctance motor loss[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1992,28(3):668-679.
- [14] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京:机械工业出版社,1997:79.
- [15] BERTOTTI G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials[J]. IEEE Transactions on Magnetics,1988,24(1):621-630.
- [16] 崔杨,胡虔生,黄允凯. 任意频率正弦波条件下铁磁材料损耗计算[J]. 微电机,2007,40(8):1-3.
CUI Yang, HU Qiansheng, HUANG Yunkai. Iron loss prediction in ferromagnetic materials with sinusoidal supply[J]. Micromotors Servo Technique, 2007, 40(8):1-3.
- [17] PHILIP E G, WALTER M, MARGARET H W. Practical optimization[M]. London, UK: Academic Press, 1981:90-91.

(编辑 杜秀杰)