

А. И. 瓦日諾夫著

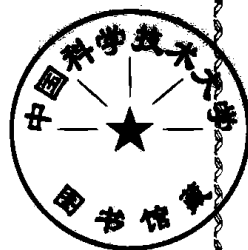
同步电机暂态过程 理论基础

科学出版社

同步电机暫态过程理論基礎

A. И. 瓦日諾夫著

馬 大 强 譯
許 大 中



科學出版社

1965

А. И. ВАЖНОВ
ОСНОВЫ ТЕОРИИ
ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Государственное энергетическое издательство

1960

內 容 簡 介

本书叙述了同步电机暂态过程的理论基础。书中描述了运用派克和戈烈夫形式进行运算的同步电机微分方程，并给出了某些实际问题的解。对电机的计算和电力系统的正常运行有重要意义。

本书可供从事电机和电力系统方面的研究人员、工程技术人员以及高等院校的师生参考。

同步电机暂态过程理论基础

[苏]А. И. 瓦日诺夫 著

馬大强 許大中 譯

科学出版社出版

北京朝阳門内大街 117 号

北京市书刊出版业营业许可证出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1965 年 8 月第 一 版 开本: 850×1168 $\frac{1}{32}$

1965 年 8 月第一次印刷 印张: 10 $\frac{1}{2}$

印数: 0001—3,600 字数: 270,000

统一书号: 15031·192

本社书号: 3232·15—3

定价: [科六]1.60 元

作 者 序

关于同步电机暂态过程的研究，苏联和国外已经出版了大量著作。所以如此，一方面是由于这些过程的复杂性，从而导致了研究工作的艰巨性和多样性，而另一方面，是由于同步电机在现代动力工程中起着重要的作用。

目前，同步电机暂态过程的理论已经有了相当深入的研究，并且运用了許多研究方法。对于研究这套理论的初学者来说，最有意义的是它的基础——派克-戈烈夫微分方程式，以及一些利用基本方程式求得許多重要课题近似解的概念和方法。

本书中所叙述的正是同步电机暂态过程的基本理论，熟悉这些理论有助于研读在这一领域里的大量专门著作。

因此，本书中同步电机的方程式既按照戈烈夫的形式表示（没有阻尼绕组的电机），也按照派克的形式用运算阻抗表示。出于同样的原因，书中采用的标么值也不是一种，而是两种：一种是迄今应用广泛、用来研究无阻尼绕组电机最为方便的派克系统；另一种系统则更适宜于用来研究转子上任何回路数的电机。

虽然本书中所引用的资料不是详尽无遗的，但是为了尽可能地说明现有的各种概念和方法，某些命题的求解中运用了不同的解题方法。

在编写本书时，作者引用了大量有关同步电机暂态过程方面的著作，其中主要的已列入参考文献目录中。

由于一系列的量没有一致公认的符号，在资料的叙述上产生了很大的困难。本书中基本上是采用电机学教科书中所用的符号。

在同步电机的理论中，线性变换，特别是变换为 d, q 坐标，具

有重要的意义。但是文献中在这些軸綫相互位置的安排上也是不一致的。作者认为更合乎邏輯的是由 A. A. 戈烈夫所提出的, d 軸导前于 q 軸的 d, q 坐标軸系統。但是在大多数理論著作、电机学教程和工厂設計程序中, 都采用 d 軸滯后的 d, q 坐标系統。因此, 在本书中还是采用了后一种坐标系。

本书系电机专业高年級学生的教材, 因之在內容叙述上不强求完整, 但是希望本书对工程技术人員也会有所裨益。

本书承 Н. Н. 謝德林 (Щедрин) 評閱原稿, 指出缺点, 并提出宝贵意見, 作者对此深致謝忱。本书原稿承蒙 М. П. 科斯琴科 (Костенко) 和 Е. А. 巴礼 (Паль) 审閱并提出不少重要意見, 作者深表感謝。

И. А. 戈尔頓 (Гордон), Е. В. 托尔文斯卡婭 (Толвинская) 在整理手稿中进行了大量的工作, М. Л. 列文什坦 (Левинштейн) 极为細致地进行了本书的校对工作, 作者对他們一併表示感謝。

目 录

緒論	1
第一章 同步电机的概述	6
§ 1. 磁路系統和繞組	6
§ 2. 磁場与电势	8
第二章 同步电机的方程式	17
§ 3. 概述	17
§ 4. 电机繞組的磁鏈	19
§ 5. 綫性变换	27
§ 6. 同步电机电压 方程式由 a, b, c 变换到 α, β 与 d, q 坐标軸 ...	39
§ 7. 同步电机在稳态对称运行方式时的矢量图	51
§ 8. 轉矩方程式与电磁轉矩	53
§ 9. 同步电机在相对运动中的方程式	56
§ 10. 标么制	59
§ 11. 无阻尼繞組电机的 标么 值方程式	70
§ 12. 系数 μ 的物理意义, 暫态电抗 x'_d	73
§ 13. 暫态电抗后的直軸电势 (E'_d)	75
§ 14. 具有一个轉子迴路同步电机方程式組的 一般 特性	78
第三章 无阻尼繞組同步电机的短路电流	79
§ 15. 概述	79
A. 三相短路	81
§ 16. 一般物理概念	81
§ 17. 三相短路时电机电流的确定	83
§ 18. 時間常数 T'_d 和 T_d 的确定	94
§ 19. 計及定子迴路电阻时电机三相短路电流的确定	99
B. 单相和二相短路	101
§ 20. 引言	101

§ 21. 一般物理概念	102
§ 22. 二相短路电流的确定	103
§ 23. 单相短路电流的确定	115
§ 24. 单相和二相短路电流的衰减时间常数	120
§ 25. 在突然不对称短路电流计算中对称分量法的适用性	122
§ 26. 无阻尼绕组的电机在三相、二相和单相短路时最大电流的 比较	125
§ 27. 二相短路时同步电机定子上的过电压	126
第四章 具有阻尼绕组同步电机的方程式及短路电流的确定	130
§ 28. 概述	130
§ 29. 具有阻尼回路的同步电机方程式	131
§ 30. 同步电机的运算方程式	135
§ 31. 暂态过程中电机直轴和交轴回路的等值电抗	139
§ 32. 次暂态电抗后的直轴电势和交轴电势	142
§ 33. 具有阻尼绕组同步电机的三相短路电流	143
§ 34. 电流衰减时间常数	156
§ 35. 具有阻尼绕组电机的二相和单相短路电流	159
第五章 电磁转矩	162
§ 36. 概述	162
§ 37. 稳态对称运行方式时的电磁转矩	163
§ 38. 三相短路时电磁转矩	164
§ 39. 二相短路时的电磁转矩	170
§ 40. 转子稳态小值谐波振荡时的电磁转矩	174
§ 41. 在已知滑差下异步旋转时的电磁转矩	188
§ 42. 当稳态运行方式突然遭到破坏时的电磁转矩	195
第六章 同步电机运行的稳定性	198
§ 43. 同步电机运行稳定性的概念	198
§ 44. 以小干扰为基础的静态稳定研究方法	200
§ 45. 静态稳定破坏的特性	205
§ 46. 研究静态稳定的近似方法	215
§ 47. 在调节励磁时同步电机的静态稳定	218
§ 48. 静态稳定研究方法的实际应用	229

§ 49. 动态稳定的研究方法	230
§ 50. 同步电机调节励磁对动态稳定的影响	238
第七章 同步电机的等值电路	241
§ 51. 概述	241
§ 52. 稳态运行方式下同步电机的等值电路	242
§ 53. 具有恒定滑差的异步运行方式中同步电机的等值电路	245
§ 54. 在异步运行中, 电机直轴和交轴阻抗的简化等值电路	250
§ 55. 在异步运行中, 同步电机直轴与交轴阻抗的准确等值电路	254
§ 56. 运行方式突然干扰时, 电机直轴和交轴阻抗等值电路	262
第八章 定子电路中有电容时同步电机的自励磁	264
§ 57. 概述	264
§ 58. 定子电路中有电容时电机的方程式	265
§ 59. 定子电路中有电容时, 同步电机自励磁的发生	269
§ 60. 自励磁的类型	270
§ 61. 转子对称的同步电机的自励磁	273
§ 62. 同步电机异步自励磁的复数分析法	278
§ 63. 按特征方程式决定同步电机自励磁条件的一般方法	281
§ 64. 无阻尼绕组同步电机的自励磁条件	282
§ 65. 有阻尼绕组同步电机的自励磁	288
第九章 基本方程式和计算公式归纳	291
附录	313
参考文献	314

緒 論

当电机各迴路的参数、外施电压以及加在轉子上的机械轉矩发生变化时,发生一种称之为“暫态”的过程。在这个过程中,表示电机运行特性的各种量——电流、电压、轉子的轉速等都随時間发生变化。作为电力系统的一个元件,电机中暫态过程进行的情况常常对整个电力系统的运行起着决定性的作用。

暫态过程的出現,可能是由于系統发生故障的結果(例如发生短路),也可能是由运行操作所引起(例如启动,各种类型的調节,电机的制动,負荷的迅速变化)。如果說前一种暫态过程是不希望有的,但又是不可避免的,而在理論上和电机制造实践中对它們早已有所認識;而后一种暫态过程的类型却正在不断地增加。这是因为随着新系統的制定和各种装置、設備工作的强化,以及某些生产工艺特点提出了各种各样的要求。在电机上装設連續动作的調节器(励磁調节器,轉子調速器)起着很大的作用。

暫态过程持續的时间一般不长。例如同步发电机突然短路时的暫态过程实际上只不过持續 0.1—0.3 秒。某些暫态过程可能維持稍久——达几十秒。但是也可能有这样的情况,例如在稳态小值振蕩下(帶压缩机运行的同步电动机),电机实质上是长期地在暫态过程中运行。

尽管一般暫态过程持續的时间有限,但是它对电机的运行却有着深远的影响。在很多情况下,正是暫态过程在电机設計中决定着参数的大小,同时它对电机結構的比例关系也有影响。例如在电力系統中运行的同步发电机,由于动态稳定的要求,必須保証有一定的飞輪轉矩,这也就决定了发电机的主要尺寸——长度与直径的比值。在这种发电机中,又由于有可能出現不对称运行和

异步运行时的暂态过程，所以在电机中必须装设完整的阻尼绕组。在许多情况下，暂态过程还对同步发电机的励磁机在快速动作和顶值电压方面提出相当严格的要求。

在暂态过程中，电机的迴路里可能出现很大的电流，这种情形首先发生在故障的情况下。例如，在同步发电机三相短路时，定子冲击电流可能超过额定电流 10—15 倍。而在单相短路时，冲击电流可能比这还要大 25—30%。在同步发电机整步不当、电机由于工作在电容负荷上而发生自励磁的结果以及在一些其他的情况下，也会出现很大的电流。由此电机的个别部件会受到很大的应力。其中大型同步发电机定子绕组端部可以受到数以吨计的应力。在发电机短路时，经定子传至基础的脉振转矩常较额定电磁转矩大 5—10 倍。特别是当原动机的飞轮转矩与发电机的飞轮转矩相比并不很小时，很大的转矩会把机轴扭歪。在不对称短路，又没有完整的阻尼绕组的情况下，在同步发电机定子的端接线上可能出现很高的过电压。最后，在那些持续时间较长的暂态过程中（例如脱出同步，启动等），还必须考虑到电流的发热效应。

这样的例子还可以举出很多，但是只从上面所提到的实例中已经很明显，只有明确地了解了电机在暂态过程中所发生的现象，并且能够对它们作定量的估计，才有可能进行电机的合理设计和电器设备的正确选择，并保证它们运行的可靠性。

暂态过程进行的特性首先与电机的类型（换向器式，无换向器式）有关。纯粹的机械过程（转速的变化）进行的速度和电磁过程（电流，电磁转矩）变化的快慢之间的关系也有很重要的意义。若就交流无换向器式电机而言，在大多数的情况下，异步电机的电磁暂态过程是进行得如此之快，以致在这些时间内，电机转子的转速一般还来不及发生显著的变化。因此在一系列的情况下，就可以不考虑异步电机中迅速衰减的复杂的电磁暂态过程，而按静态特性计算转速的变化。例如在大多数的情况下，可以根据静态的电磁转矩和转速的关系计算异步电动机的启动过程。

正是由于有这种简化的可能性，所以异步电机暂态过程的严

格研究比同步电机少，虽然现在对异步电机进行严格研究的必要性正在与日俱增。

同步电机的暂态过程已经研究得相当深入，因为同步电机作为动力系统最重要的元件之一，它在不同运行方式下工作的可靠性极为重要。但是它们的研究有着很多的困难，特别是在那些必须同时考虑机械过程和电磁过程，而它们的变化速度又是不相上下的问题中，困难就显得特别突出。这种困难甚至单是研究电磁暂态过程时也是存在的。因为在转子直轴和交轴上有着很多具有不同参数的回路，同时转子磁路不对称的影响（在凸极式电机中）也使问题变得复杂化。

同步电机的理论起初基本上是由美国和德国的学者——R.派克(Park), R.多赫太(Doherty), G.尼克尔(Nickle), L. 德烈夫斯(Dreyfus), F. 尼特哈默(Niethammer), I. 彼尔曼斯(Biermans)等所创立，而在进一步地发展和深化这些理论以及制订新的研究方法方面，苏联学者——A. A. 戈烈夫(Горев), Д. А. 格罗茨基(Городский), Л. Н. 格鲁佐夫(Грузов), Е. Я. 卡佐夫斯基(Казовский), М. П. 科斯琴科(Костенко), Л. А. 罗蒙诺索娃(Ломоносова), Р. А. 刘特尔(Лютер), Н. Н. 谢德林(Щедрин)等作了很多的贡献。

在分析研究同步电机暂态过程中采用的方法有：坐标变换、用复数表示变数的瞬时值，电机各种运行方式时的等值电路，微振荡法以及利用同步电机各回路磁链守恒原则等。此外还制订了一套暂态过程的图解分析法。近年来得到了很大发展的计算机，对分析研究有着很大的帮助。同时，还应该提到一种包含同步电机的电力系统中暂态过程的重要研究方法——动态模拟，即在旋转电机物理模型上复制暂态过程。将这种方法和分析研究法相配合，就能为解决复杂的问题提供新的可能性。

采用这种或那种研究方法的效果如何，与具体课题的条件有关。

上面已经指出，在实践中遇到的暂态过程种类繁多。虽然现

在还没有对它们进行严格而详尽无遗的分类，但是就同步电机而言，就所研究的过程中电机的转速与正常同步速度之间偏差的大小为标志，可以大致地把暂态过程分为两大类。

属于第一类同步电机暂态过程的，包括电机在接入电网时所发生的过程(电动机和补偿机的异步启动，自整步，发电机的重合闸)。电机在脱出同步后的异步运行过程也可以归属于这一类。因为所有上面列举的各种运行方式都是在转子多多少少以相当大的滑差作非同步运行的情况下进行的。

在所有这些运行方式中，重要的是决定：(1)电机牵入同步的条件；(2)定子和转子的电流；(3)电磁转矩。

需要指出，不仅从作用在绕组上机械应力的观点看来，而且为了在暂态过程持续时间较长的情况下能估计绕组的发热起见，求出电流的大小是很有意义的。

电磁转矩是(暂态)过程的重要特性，它一方面决定着过程的进程(例如电机异步启动时的加速过程，启动时间及电机牵入同步的可能性)，而另一方面，它又决定着电机轴上、基础和定子铁芯固定零件上的机械负荷。

上述这一类过程的严格研究是极为困难的，因此这一类命题一般是在假定滑差为一系列常数(伪稳态)的情况下进行研究。本书中所阐述的异步运行方式只适用于电机的异步启动。

在滑差相当小的情况下发生的过程属于第二类暂态过程。属于这一类的有突然加负荷与卸负荷，突然短路和接着而来的短路切除，交流电力系统中的倒闸操作等。这类过程的研究工作分两方面进行：(1)解决当稳态过程受到一定干扰时电机是否能与系统保持同步的问题(校核动态稳定)；(2)求电流，电磁转矩，有时还要求出绕组的电压，以决定电机本身各相应部件中的机械强度和电气强度。在上述第二个方面中，本书所讨论的短路问题，对电机来说，乃是最为严重的情况。

在研究动态稳定时，可以对稳态过程干扰的大小加以限制，其中包括研究干扰为无限小的情况。解决这样一个独立的命题具有

很大的实际意义，因为它能确定所提的稳态运行方式究竟是否可能存在（校核静态稳定）。这对估计同步电机的极限负荷，探索合理的调节系统，以及当电机定子上有电容存在时，决定可能的稳态运行方式等颇为重要。

在本书中，只叙述静态稳定和动态稳定问题的基础。

应该指出，本书内一般只考虑同步电机接到无穷大容量电网上的最简单情况，大量的实际问题是可归化到这种情况来研究的。

第 一 章

同步电机的概述

§ 1. 磁路系統和繞組

我們將要討論的是通常結構型式的同步电机，电枢繞組放置在电机的不动部分——定子上，主磁場系由裝在轉动部分——轉子上的励磁繞組产生。大家知道，同步电机的轉子有两种完全不同的結構形式：凸极式和隐极式。

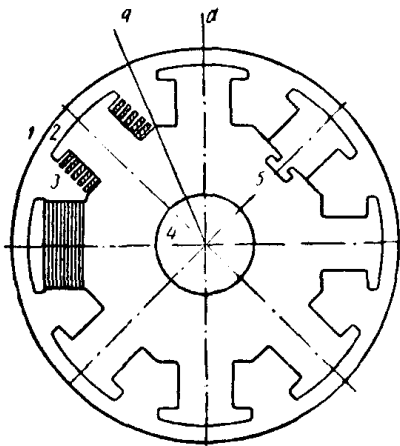


图 1 凸极式同步电机轉子（簡略截面图）：

1——定子；2——气隙；3——励磁繞組（只在两个极上繪出）；4——軸；5——磁极的固定

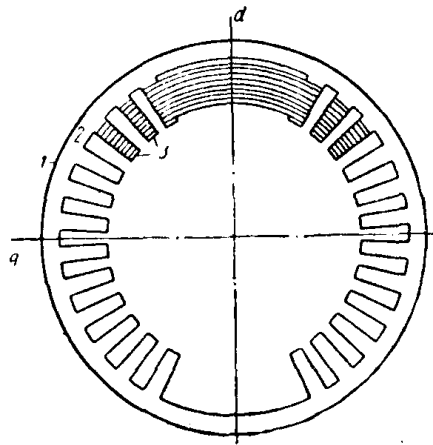


图 2 隐极式同步电机的轉子（簡略截面图）：

1——定子；2——气隙；3——励磁繞組（只画出了一部分）

凸极式轉子(图 1)作为一个导磁体，具有两个磁对称軸，称之为直軸(纵軸)的极軸与經過极間空隙中綫的所謂交軸(橫軸)；前者用字母 d 表示，后者用字母 q 表示之(两个軸綫繪出在图 1 上)。

隐极式轉子(图 2)同样也有两个磁对称軸——直軸 d 与交軸 q , 但是与凸极式轉子所不同的是, 这里由气隙所决定的直軸和交軸磁阻差不多是相同的(轉子部分圓周表面上齿槽的影响很小)。

隐极式轉子上的励磁繞組是分布在轉子的部分圓周上, 而凸极式与此不同, 它的励磁繞組是集中繞組。在凸极式轉子上除了励磁繞組以外, 常常还装設着阻尼繞組(有时称做阻尼籠)。它們是由嵌在极靴上槽中的銅条或黃銅条所构成, 这些銅条在电机的兩側相互接通(图 3)。嵌銅条的槽通常設在极靴上, 且靠近其外表面。

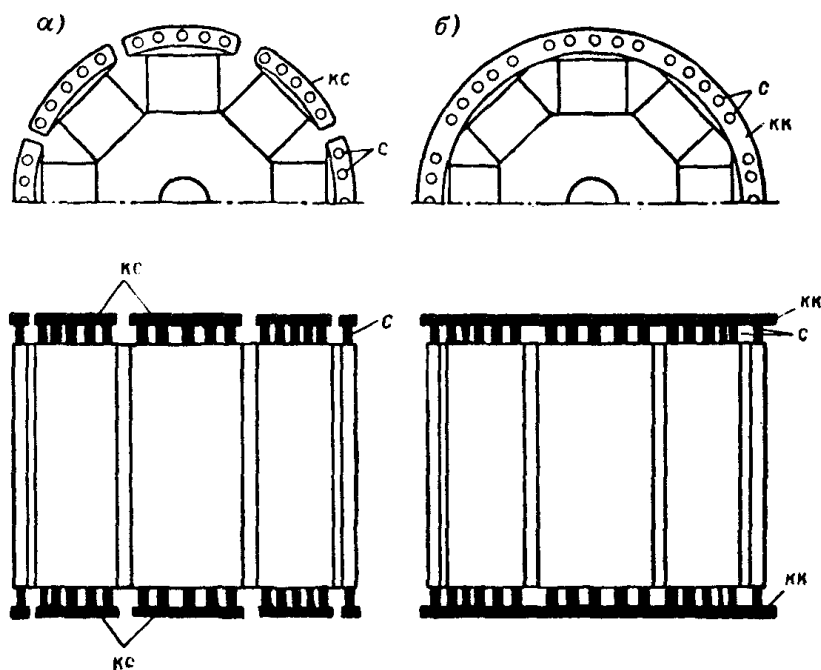


图 3 凸极同步电机中的阻尼繞組:
 a ——不完整的阻尼繞組; $б$ ——完整的阻尼繞組
 C ——銅条; KK ——短接环; KC ——短接片

如果只是装在每一个极靴范围内的銅条自相接通, 則这种阻尼繞組叫做部分的, 或不完整的阻尼繞組(图 3 a)。如果所有銅条在电机的兩側用短路环連接起来, 就构成一个完整的阻尼繞組(图

36)。在同步电动机中总是装着阻尼繞組，它就是电动机异步启动时用的启动繞組。在同步发电机中，通常在大型电机中，有时也在中等容量的电机中装設阻尼繞組。它主要用来抑制轉子的振蕩，使电机在小滑差异步运行和自整步时便于牵入同步，以及消除不对称短路时定子繞組中的过电压。在隱极式电机中現在一般不装特殊阻尼繞組，但是由于当磁場与轉子非同步旋轉时，在整块的轉子鋼体中感应的涡流能够暢通，故轉子本身就起着一个足够强大的阻尼繞組的作用。

电枢繞組的数目由交流的相数 m 决定。以后我們要研究的只是三相电机，它們在定子上有三个相繞組，在大多数情况下，这些繞組相互联結成星形。定子相繞組是一些沿定子圆周分布的繞圈的总和，它們对称地布置在轉子的磁場中，即相互間有 120° 电度的位移。虽然凸极式和隱极式电机的定子繞組在結構上可能有某些差別（例如每极每相的槽数 q 为整数和分数），但是从基本的电磁过程的观点看来，它們是完全一样的。

§ 2. 磁場与电势

a) 概論 为了对在拟定同步电机微分方程式时所作的簡化能作一个总的評价，以及为了决定繞組电感，必須对电机各个繞組中电流所产生的磁場以及由这些磁場所感应起的电势的特性有一个概念。其中最有意义的是使繞組相互耦合的磁場。这个主要地就是穿过定子和轉子間气隙的磁場。

定子和轉子間气隙中的磁場是一个三度空間磁場。这就是說，磁密不仅沿着定子內圓的圆周方向变化，而且还在垂直的方向——沿着机軸的方向发生变化。图 4 中的实綫表明了电机纵截面上气隙磁場大致的分布曲綫。由于电枢中任何导体的电势以及作用在导体上的电磁力只决定于磁場沿电机軸綫的积分值，故在电机的纵截面上磁場的实际分布情况用一个計算值来代替（图 4 中的虛綫）。这样气隙中三度空間的磁場就归結为一个平行平面磁場，于是电机任一橫截面上（在計算长度 l' 的范围内）的磁場图

形就变得完全一样。如是电机磁场的研究，就可归结为仅仅是一个与电机轴相垂直的平面磁场问题。

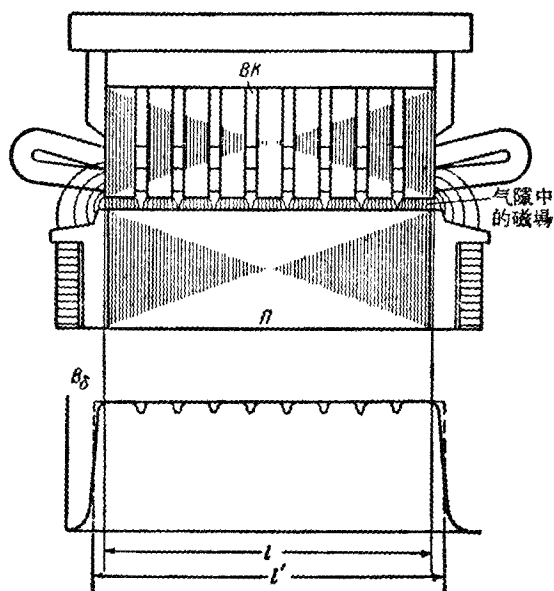


图 4 电机纵截面上气隙磁场的分布：
 B_{δ} ——气隙磁密； l ——电机有效长度； l' ——电机计算长度； BK ——幅向风道； Π ——磁极

我们将讨论在电磁方面最为复杂的凸极式电机。通常各个绕组在电机横截面上所处的位置用这些绕组的磁轴表征之。所谓绕组的磁轴，指的是该绕组中电流，在对称的磁介质中所产生磁场的纵对称轴。气隙中的磁场曲线沿定子内圆每隔两个极距重复一次*。既然一切必要的关系式均可在一对极距的范围内定下来，所以为了方便计，一个有 $2p$ 个磁极的现实电机定子的 $1/p$ 部分，在剖面图上就用一个二极电机来代替。

6) 励磁绕组电流的磁场 在图 5 中绘出了由励磁绕组电

* 这里不考虑例如由分数槽绕组所引起的低谐波 (субгармонический) 磁场。