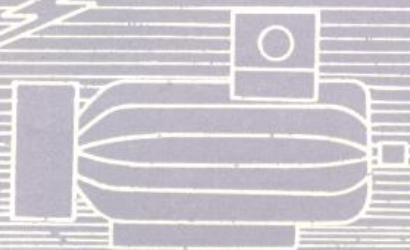
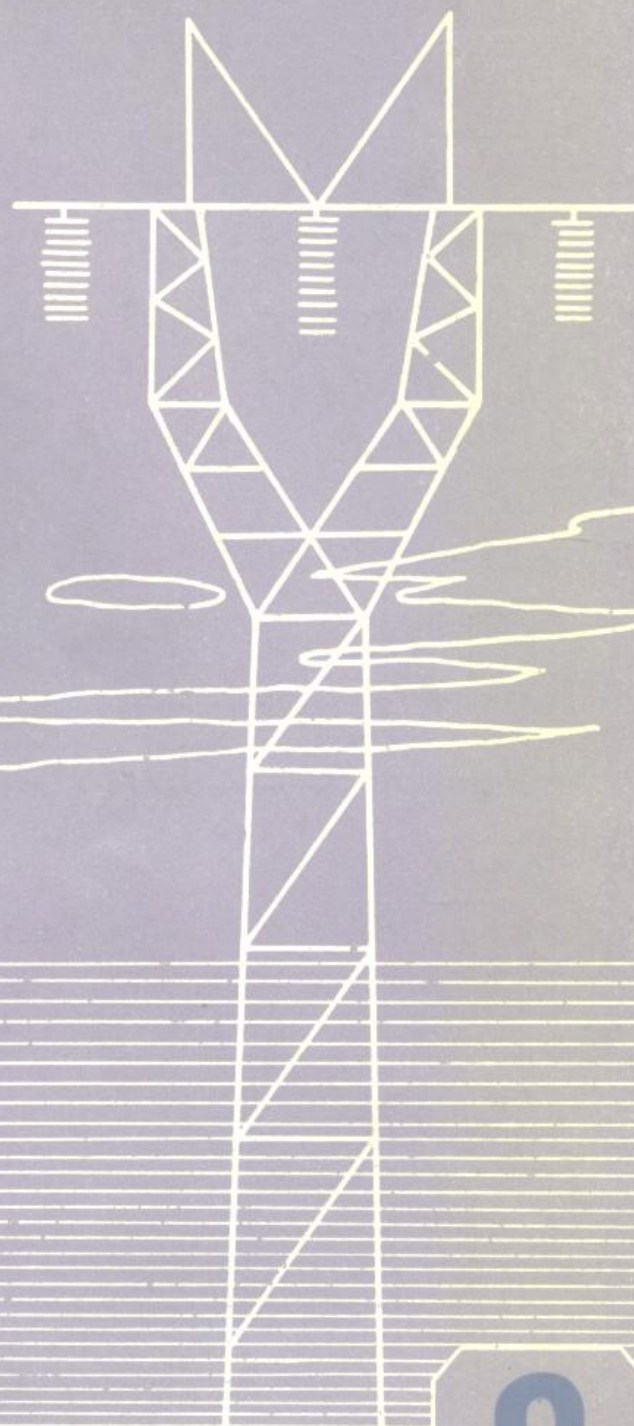


DIANGONG
JISHU

电工技术



8

科学技术文献出版社重庆分社

出版消息

可控硅变频调速〔续辑〕

这本专辑较全面地辑录了近年来日、俄、西文期刊及一些国际会议上发表的有关可控硅变频调速的论文37篇。内容涉及电流源、电压源逆变器及交-交变频器在异步电动机、同步电动机、无整流子电动机中的应用；主回路换流过程及参数的计算；计算机模拟方法；系统静态、动态特性的分析计算等。还介绍了一些新的控制方法，如矢量控制法、转差控制法、脉宽调制法及微计算机控制法等。

本专辑可供从事电力拖动及可控硅应用方面的技术人员、科研工作者、大专院校工业自动化和电工类专业师生的参考。

需要购书者可直接来函重庆科学技术文献出版社重庆分社发行组。

《电机技术》 1981年 征订启事

《电机技术》是一份传播以中小型电机应用技术为主的综合性学术刊物。它对从事电机制造、科研、教学和使用等单位和个人均有参考和实用意义。1981年出版四期，订价（包括邮资）共2.00元正，预收全年订费。欲订阅者，请速向《电机技术》编辑部联系，办理订阅手续。订费可由银行信汇或邮汇上海市电机技术研究所。开户银行为上海虹办武进分理处。帐号1389855。

电 工 技 术 (八)

中国科学技术情报研究所重庆分所	编 辑
科学技术文献出版社重庆分社	出 版
重庆市市中区胜利路91号	
四川省新华书店重庆发行所	发 行
科学技术文献出版社重庆分社印刷厂	印 刷
开本：787×1092毫米1/16	印张：6.25字数：22万
1981年7月第1版	1981年7月第1次印刷
科技新书目：5-258	印数：14000

书号：15176·504

定价：0.70元

5/258

目 录

水平、动向

电力半导体器件制造技术的发展…………… (1)

节能技术

电动机的节电检查…………… (8)

蒸汽透平的节能措施…………… (11)

小型工业炉的节能…………… (20)

厂矿电气设备

步进电动机的结构和工作原理…………… (26)

电动机的故障诊断…………… (32)

低压电动机的各种保护装置(种类和正确用法)…………… (36)

水电站换向器火花产生的原因…………… (42)

B3M-6型断路器的故障原因…………… (45)

新型双元熔体限流熔断器…………… (48)

变压器大修时绝缘的防潮装置…………… (50)

油浸式电力变压器制造中焊缝的气压试验…………… (51)

改进ГПШЭ型矿用屏蔽软电缆的方法…………… (53)

静止式变频器速度控制系统中负载变化量与电源电压的关系…………… (55)

电流型逆变器供电的鼠笼型异步电动机使用电流控制法时的脉动转矩消除法…………… (57)

裂纹的发生与修补…………… (58)

补焊的实践(二)…………… (63)

日用电器

电动工具变速装置…………… (68)

家用洗衣机洗涤效果的改进…………… (69)

日用电风扇马达寿命的提高…………… (70)

测试技术

发光式低压试电笔…………… (71)

旋转电机内部回路异常检测装置…………… (73)

旋转电机线圈绝缘老化的检测装置…………… (75)

感应电动机起动电阻的计算方法…………… (76)

确定导线张力的诺模图…………… (78)

锅炉水位信号器…………… (79)

农业电气设备

BKC-500-1型电焊整流器…………… (80)

畜牧场触电保护性能的测定…………… (81)

电动机绝缘的干燥和保护…………… (83)

基础知识讲座

第三讲 整流和滤波(下)…………… (85)

创造发明技术革新集锦

低损耗电绝缘纸…………… (90)

电磁铁的制造方法…………… (91)

直流电动机的控制装置…………… (92)

DB-1型电机断相保护器…………… (93)

防止电动机欠相运行…………… (93)

电动机欠相保护…………… (93)

交流插座检查器…………… (94)

稳压器的保护装置…………… (95)

汽车用电子式点火系统…………… (96)

定期接通汽车刮雨器的装置…………… (97)

磁场变阻器的节能线路图…………… (97)

电池充电器的保护…………… (98)

参考电压指示器…………… (98)

门栏开关…………… (99)

使用热敏可控硅的温度控制电路…………… (99)

使用热敏可控硅的温度表示电路…………… (99)

本刊紧急启事…………… (79)

电力半导体器件制造技术的发展

Adolf Herlet, Peter Voss

近年来, 电力半导体技术日趋成熟并正在稳步发展。晶闸管的发展主要在两个方面: 更大面积和更佳动态特性, 增大面积的目的在于提高电流容量或提高阻断电压。除快关断器件外, 整流器的发展情况与晶闸管的情况大致相似。

晶 闸 管

晶闸管用途十分广泛, 但从应用观点看, 仍有某些特性还不能令人满意。主要缺点是没有门极关断能力, 开通、关断的速度慢。要发展能够关断的晶闸管, 尚需努力。目前大部分工作是改善动态特性并使晶闸管其它参数尽可能达到工艺许可极限。

世界各地市场需要不一样, 故各地晶闸管的研制也有所不同。美国早期强调逆变型晶闸管, 目前则优先发展大面积器件——硅片直径65mm到102mm的器件。日本着重于超高压晶闸管的研究并首先应用于铁路运输, 同时也进行直径约50mm的高速高压反向导通晶闸管的研制。欧洲一些公司致力于发展类似尺寸的高压晶闸管, 主要用于电力控制和高压直流输电系统。

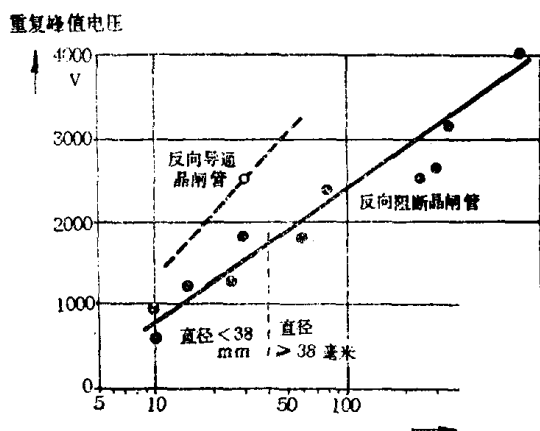


图1 商用晶闸管的最大阻断电压与直径关系

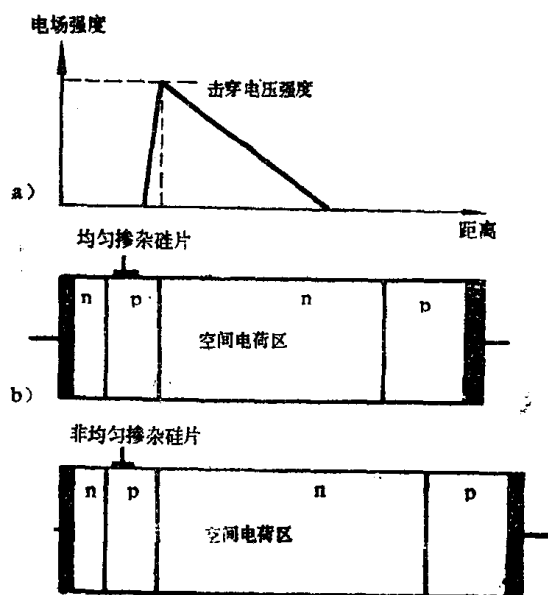
在过去二年内, 商用晶闸管重复峰值电压一般超过3000V, 并已制造出许多关断时间低于 $10\mu\text{s}$ 的低压快速晶闸管。

图1 给出了至今人们还在采用的最佳匹配方法。随更大面积硅片的出现, 图上的曲线可能向更高电压方面延伸。这两条曲线原则上是沿着关断的时间轴平行移动, 关断时间约为 $400\mu\text{s}$ 时, 采用辅助关断门极是可行的。

图1上的曲线不包括直径为60mm 到102mm 的大型与超大型相控电流型晶闸管。

阻 断 电 压

体内阻断特性 晶闸管阻断电压由体内和表面状态决定。体内阻断电压又受结击穿或穿通所限制。一般阻断电压的设计, 都稍低于结的击穿电压。这意味着由电压决定的空间电荷区必须在低掺杂的n区内自



区掺杂对空间电荷区的影响示意图

图b) 的电场强度分布; b) 均匀掺杂的n基区; 不均匀掺杂的n基区, 其宽度大于 (b)。

由展宽(见图2,b),但又必须与P型发射极有一定的有效基区,以减小电流增益 α_{pnp} 。由于正向导通特性和由等离子扩展决定的动态特性随基区宽度的增加会受到不利影响,有效基区只能尽量小些。

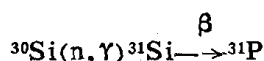
结击穿时的空间电荷区展宽以及击穿电压 V_B 本身都与n基区的掺杂有关,即与原始硅单晶的电阻率 ρ_n 有关。在扩散结,可用下式表达

$$V_B \approx C \rho_n^{0.7}$$

其中C为比例常数。

原始硅单晶的掺杂通常在拉单晶时进行,这使硅片截面上以及硅片与硅片之间的电阻率不均匀。器件内部空间电荷区的展宽也相应地不同(图2,C)。为弥补这一不足,需增大n基区宽度。

最近已开始采用新的掺杂技术,利用热中子对同位素 ^{30}Si 进行核反应,使硅嬗变为磷掺杂硅,从而解决了掺杂不均匀和精确问题,即:



利用这种方法能获得非常均匀和非常精确的掺杂。

第一批这样制造的晶闸管重复峰值电压高达3.5KV,用于高压直流系统和电动机控制。尽管以前也有过这种高水平器件,这仍然是新材料的起点并使这种器件大批量生产成为可能。

这种均匀掺杂的硅单晶也适用于其它器件,虽然其价格比普通掺杂硅单晶稍贵些,但发展方向是正确的,看来中子辐射硅单晶不仅能用于大部分大功率器件,也许还能适用许多小功率器件。

表面击穿 要提高电压,除要求精确控制扩散过程外,还需要解决表面击穿问题。正负角造型已成为大面积器件的标准边缘造型(图3,a),负角可以小到 2° 以下,计算表明这时电压升高就会受到限制。已讨论和研究了几种别的造型方法,如角槽法,燕尾法(双正角)和保护环排列等。最近还研究了类台面线槽法,实际上类台面正负角造型方法效果很好(图3,c)。在相同角度时,其正向阻断电压达到器件体内击穿电压

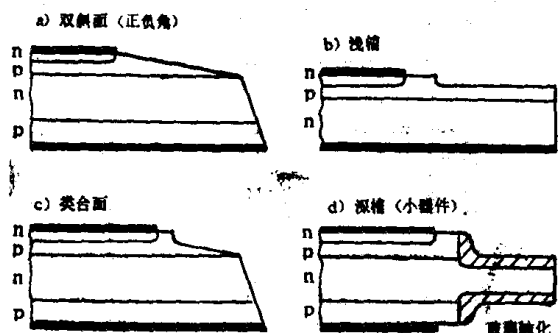


图3 表面造型

5KV以上的占90%还多。

结的涂料施用得当,对表面击穿特性影响很大,对小功率器件尤其如此。

对不允许有表面电荷的器件,研究出了一种新的表面钝化方法:氧化、高阻多晶硅、氧化硅和氮化硅再进行涂层密封。

n-p-i-n-p 晶闸管 阻断电压不是晶闸管唯一的参数。还需考虑正向压降、额定电流、浪涌电流和热稳定性等参数以及关断时间、等离子扩展、 di/dt 容量等动态要求。因此将来反向阻断型晶闸管的阻断能力大大突破现有水平的可能性是很小的。

为了超越这一限制,只好牺牲反向阻断能力。在斩波器回路中,反向阻断能力并不一定是必不可少的。这时用近似本征(i)区和高掺杂的n基区(图4)极为有利。这样,p-n区结构就变成p-i-n二极管结构了。

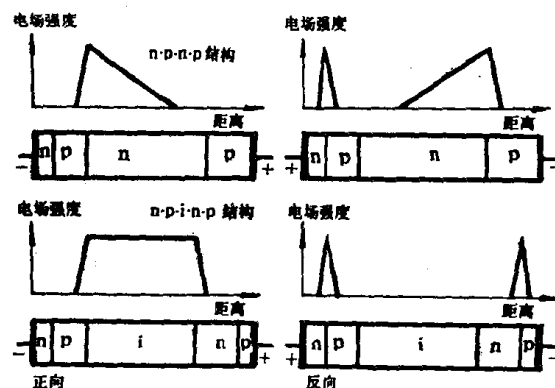


图4 无n短路发极的n-p-n-p结构的 空间电荷区,在n-p-n-p结构中,为了提高正向阻断能力,反向阻断能力几乎全部丧失

在图4的下部,分别给出了在正反向阻断条件下空间电荷区位置和相应的电场分布,在图4的上部给出了相应的n-p-n-p结构情况。

载流子寿命控制 在晶闸管生产中,决定性环节之一是调整载流子的寿命。为此需要引入一定数量的复合中心。要考虑的影响如下:

1.在大注入条件下,载流子寿命的减小会加速关断时存储电荷的衰减并减小关断时间。关断时间大的约为载流子寿命的十倍。

2.载流子寿命强烈影响通态压降,影响的程度决定于基区的厚度。图5表示以基区总厚度为参数、通态压降与载流子寿命的关系。少子寿命低、通态电降急剧上升。

3.在通态阻断条件下(见图2,b),n基区的中心区域少子寿命减少会使p-n-p晶体管部分的电流增益 α_{pnp} 下降。随寿命的下降,阻断电压原则上可达到结击穿电压的近似值。

4.特别在高温时,这种效果要比由空间电荷区内

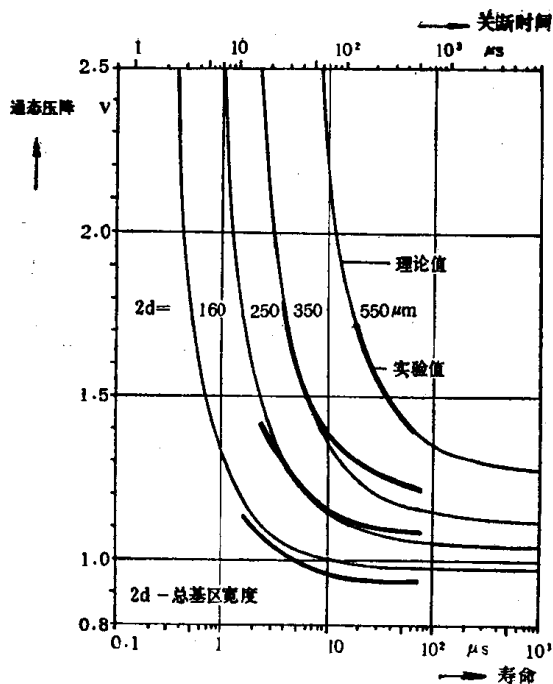


图5 电流密度为 $200\text{A}/\text{cm}^2$ 时，正向压降与载流子寿命的关系，关断时间取载流子寿命的七倍

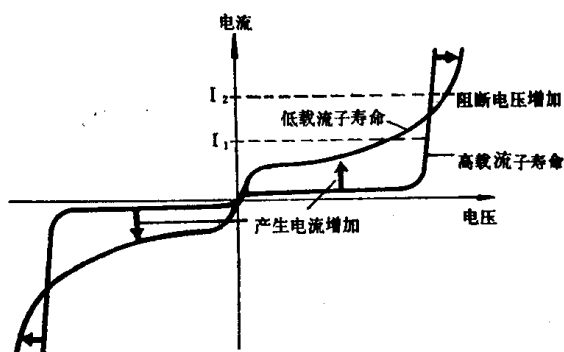


图6 载流子寿命对正向和反向阻断特性的影响

部激发电流所能得到的好处显著得多。

显然，第3或第4项中的容许电流的大小（图6中的 I_1 或 I_2 ）变得更加重要。

晶闸管和其它硅器件，广泛用于控制载流子寿命的方法是扩金。金作为复合中心能使晶闸管关断时间小于 $10\mu\text{s}$ ，并能得到一个满意的正向电压降。不过扩金也有缺点，会引起大的激发电流，它会被磷或被晶格位错大量地捕获，从而引起纵向和横向金分布不均匀，使重复生产更困难。

一种具有比金的激发电流更低的复合中心是铂。但铂会使正向压降显著增加。

比铂和金更有希望的方法是用电子辐射引入复合中心。由电子流 Φ_e 所引起的寿命减少可表示为

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + \kappa \Phi_e$$

式中 τ_0 为辐射前的寿命，

κ 为辐射损伤系数。

在1—2MV的典型加速电压下，复合中心分布几乎是均匀的，至少横向是如此。退火约从 250°C 开始。这种控制寿命的方法有一个显著优点，就是寿命调整可在制成的器件上进行，如需要也可以在单片上进行，有利于提高产量。这种器件的关断时间可降到 $10\mu\text{s}$ 。总的特性不比掺金器件差。

n型短路发射极

现在生产的晶闸管都有某种形式的局部n型短路发射极（见图7）。短路点提供了一条电流流经，使n发射极下面的横向电压降不致达到0.5V的初始开通值。

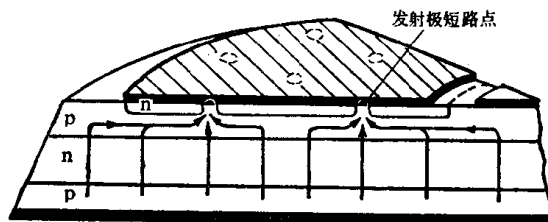


图7 n发射极短路点

最近，人们越来越重视对短路发射极的研究。显然，发射极短路点越多，越容易防止误导通。短路点面积一定时，密而小的短路点的作用要比大而稀更为有效。但是由于n发射极的扩散深度较大并且表面粗糙，减小短路点尺寸有一定困难。一般直径在 $100\mu\text{m}$ 范围内。与正方形和六角形排列相比，三角形排列短路点最为有效。

大电流密度时的正向压降受n发射极短路的影响较小，而对其它一些参数的影响则很大。这从等离子扩展性质得到证实。

横向等离子扩展 横向等离子扩展是一种要通过晶闸管其它参数（如静态和动态导通特性， di/dt ）

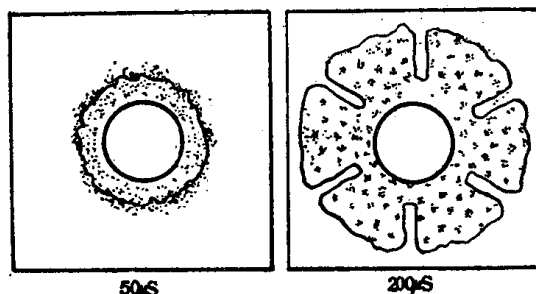


图8 通直流600安、有穿孔引入电极晶闸管（ $V_{\text{DRM}} = 1300\text{V}$ 、 $t_g = 25\mu\text{s}$ ）等离子扩展的红外观察。观察孔间距0.5mm、在 $200\mu\text{s}$ 看到的六条影印是电流引入端

才能显示出的特性。实验表明，等离子扩展速度随电流密度、载流子寿命和温度的增加而增加，随总基区宽度和短路点增加而减小。等离子扩展的理论相当复杂，到目前为止，仅对一些特殊情况进行过尝试。

一种广泛采用的等离子扩展检测方法是通过对穿孔电极观察载流子面积发出的红外复合射线。图8是所观察到的一种情况。观察时使用了触发红外变像装置。

有短路点的晶闸管，其等离子扩展速度在短路点之间的面积上作加速和减速振荡。图9给出了有圆形排列短路点的晶闸管等离子扩展速度与半径的关系。特别在第一、第二圈短路中，扩展速度明显降低。

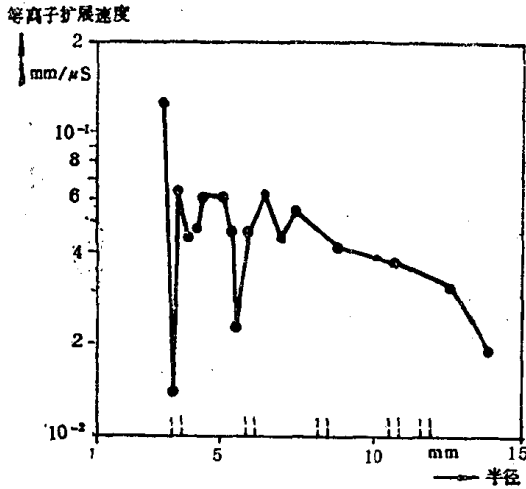


图9 n发射极短路点对等离子扩展的影响。双虚线表示圆形排列的短路点位置

图10给出了另一组受发射极短路点和掺杂寿命影响的测量值。标出了扩展速度与电流密度的对应关系。图10的曲线表明，在电流密度很大时，这些晶体管的扩展速度在0.11mm/μs左右。

图11示出了电流密度均为500A/cm²、总厚度不同、其阻断电压也不同的晶闸管扩展速度的测量结果。很明显，即使关断时间明显上升，扩展速度也随着阻断电压上升而急剧下降。

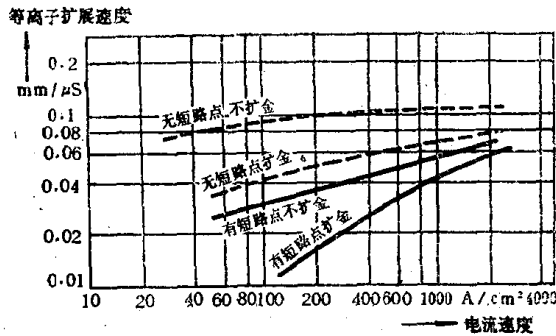


图10 发射极短路和扩金对等离子扩展的影响。除扩金外，晶闸管 ($V_{DRM} = 1650V$) 都是用相同工艺过程制作的。

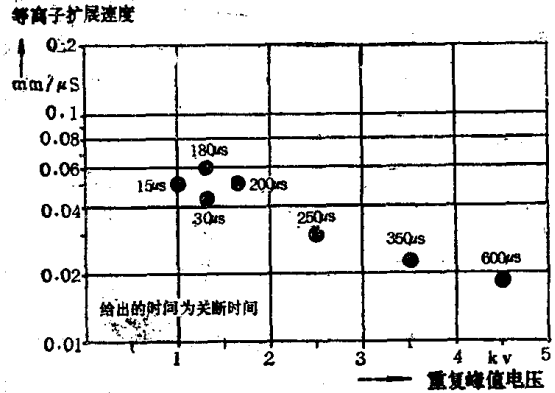


图11 电流密度为500A/cm²时不同阻断电压的晶闸管的等离子扩展速度 ($T \approx 23^\circ C$)

晶 闸 管 开 通

初始开通 目前多数大电流晶闸管都采用某种两级门极设计形式，如结型门极、场引进门极、再生门极或放大门极等。这些均可减少初始导通面积上的负载。这些设计直接或间接采用一个辅助晶闸管。其作用是：只要设计得当，能使主晶闸管均匀导通。此外，由于辅助晶闸管通常在1μs内就能承受大部分负载电流，所以初始导通面积迅速扩展。

在放大门极或其它两级门极晶闸管开通期间，往往有很高的负门极电流峰值出现。从使用角度看，这是不利的，因为从可关断晶闸管知道，负门极电流通常会妨碍正向导通状态。不过，电流的峰值只是反应了器件的固有特性，并不会造成任何损坏，因为门极电流通过辅助发射极时，主发射极在门极与阴极之间会产生压降（图12，a），当辅助晶闸管开始导通，此压降随负载电流而增加（图12，b），实际上，它可能大于门极电源电压，因而辅助晶闸管的部分负载电流就转到门极回路中去，一般来说，这并没有什么害处。另一方面，门极电流没有快速减少，可能说明主

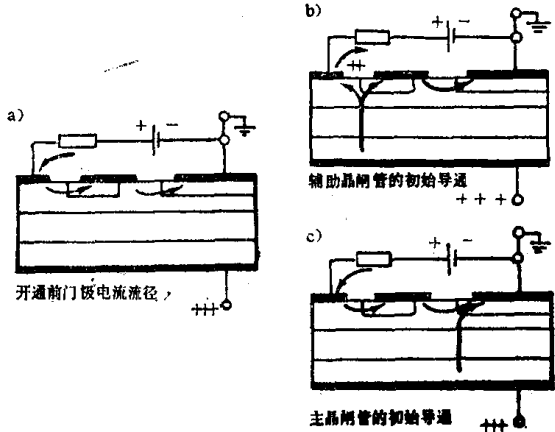


图12 放大门极晶闸管在开通时门极电流的转移
a) 开通前门极电流路径；b) 在辅助晶闸管初始开通时的情况；c) 在主晶闸管开始导通的情况，没有门极电流转移。

晶闸管导通先于辅助晶闸管（图12, c）。这时主晶闸管烧毁的危险性就增加，这种情况可用增加门极电流来消除。

叉指状排列 高压器件和关断时间较短的器件，等离子扩展速度较慢。由于后者可在高频下工作，对于大面积器件就需要一定形状的门极以充分利用面积和减少开通损耗。放大门极与叉指状排列相结合，已经证明特别有效。

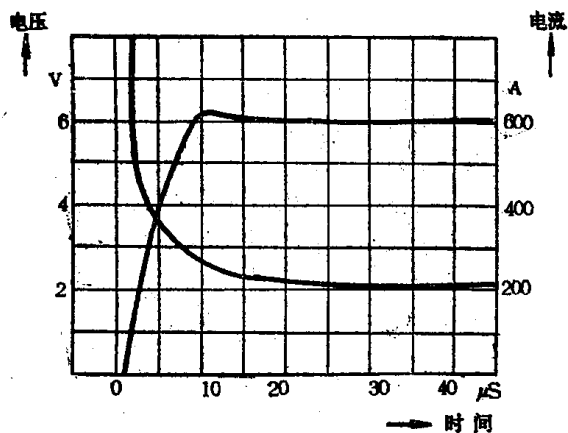


图13 叉指状晶闸管的电压、电流与时间关系的示波图，25 μ s以后电压很快达到2.05V的稳态值。

叉指状分布至今还广泛用于快速和工作频率约为10KC的次快速晶闸管。在这些场合下，开通和等离子扩展损耗非常重要。

光触发 近来人们对晶闸管的光触发又发生了兴趣。光触发有某些优点：初始导通的载流子是在器件内部产生，用玻璃纤维使门极回路与晶闸管在电气上完全隔离。在高压直流输电中几只晶闸管串联使用的场合，即门极回路有可能产生电容放电时，这种选择是很实用的。

由于铒（Nd）激光器的出现和半导体发光二极管以及光技术可靠性进一步的提高，已经可以得到比较理想的光源和传送器。

从目前情况来看，正在朝两个方面发展，一是利用器件体内载流子的产生，达到大面积的瞬时开通。二是各种变流器中晶闸管门极回路的电绝缘。光源造价便宜是很重要的。目前使用的是低光通量的GaAs—LEDs和标准光学纤维。这样，晶闸管必须具有很高的光敏特性，还须保证 dv/dt 、 di/dt 容量和开通延迟时间短等特性。基本光控结构如图14所示。

另一种光敏器件如图15所示。器件的正向阻断结是中断并弯曲到硅片的上表面，上表面的窗口部分做得非常小。

这种器件，其弯曲的p-n结引起弯曲区正向阻断

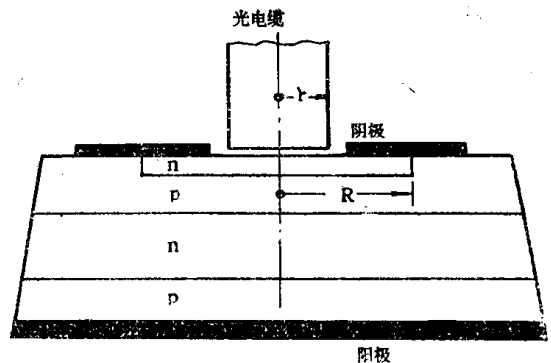


图14 新磁制的光控晶闸管的基本组合

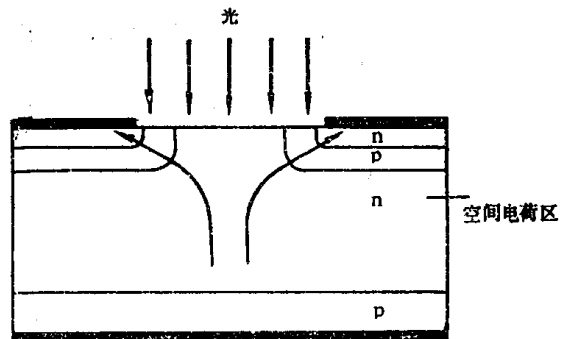


图15 空间电荷区扩展到上表面的光控晶闸管

电压降低，调整窗口部分的宽度则可控制电压下降。所以如果把它当作二极管结构中的辅助晶闸管，则当超过转折电压时，就可安全触发。

这种类型的晶闸管的阻断电压高达4.2KV，1000V的最小触发功率为5mw，300V，150℃时的 dv/dt 容量 $>3000V/\mu s$ 。

晶 闸 管 关 断

普通大面积晶闸管只能在施加的电压降到零或变为负值时，才能关断。晶闸管n发射区短路越多，关断时间越短，故关断时间也可由载流子寿命以及发射极短路来调整。但欲达到所要求的通态特性和良好的等离子扩展性质，必须仔细考虑寿命的控制和发射极短路。

辅助关断门极(GAT) 一种利用反向门极脉冲，在正向电压恢复期从P基区消除大电流而不损害其它特性的方法已试验成功。这种方法称为门极辅助关断(GAT)。关断时间可减少50%以上，800V的元件，可低于2.5 μs 。但要指出，只有施加反向阻断电压，负门极脉冲才能起消除电荷的作用。故在电压达到正值之前的瞬间，要施加负门极电压。可能施加的最大负电压受n发射极击穿电压的限制，此值通常为20V左右。

大面积GAT器件，叉指状排列是先决条件。据知市场上已有1100V、180A的GAT供应，反向门极脉

冲为2A时, 关断时间为12 μ s。

可关断门极(GTO)比 GAT 更进一步的结构是可关断门极。就工作原理来说, 两者差别仅在于GTO是把负门极电流提高到这样一个水平, 即使正向导通时, 晶闸管也能关断。实际上, GTO要求比GAT 具有更细致的平衡设计, 需要提高关断增益时, 尤其如此。

特殊结构

下面介绍在结构设计与普通晶闸管不同, 但在电特性上仍然是根据晶闸管或类似晶闸管结构直接设计的器件。

两端 p-n-p-n 结构 (反向开关整流器, 转折二极管) 两种不同设计的两端 p-n-p-n 功率器件已进入市场, 即反向开关整流器 (RSR) 和高压肖克莱转折二极管 (BOD)。RSR是用高 dv/dt 直接转入正向导通的器件, 关键在于很好掌握临界 dv/dt 。大电容电流的作用和分布门极电流的作用相同, 也能使大面积器件开通, 这在高 di/dt 的应用中特别有利。据报导, di/dt 容量从2500A/ μ s到5000A/ μ s的器件也研制成功。

高压转折二极管是用于大功率高压晶闸管过电压

保护的小功率器件, 只要超过其转折电压便导通。

垂直场控器件 在小功率组件中, 场控器件有了新的发展。这类器件取名为场锁二极管 (FTD) 和场控晶闸管 (FCT)。为了进行场控, 需要利用非常细的网状 p^+ 门极区。 p^+ 区既可用外延法生长在体内, 也可生长在表面。

垂直场效应晶体管 (V-FET) 在图16, a中给出了V-FET的截面 (还有附加器件)。其工作原理与水平结FET相同。和双极晶闸管相比, 它具有相当优越的开关特性。另外, 它不存在二次击穿, 热稳定性很好。

场锁二极管 (FTD) 只用一个 p^+ 区来代替V-FET中的 n^+ 漏极 (图21, b)。只要器件处于阻断状态, 两者没有多大区别。移去门极电压元件开通时, 作为p-i-n二极管的载流子大量注入外部 n^+ 和 P^+ 之间的整个区域。

场控晶闸管 (FCT) 这种称呼与其结构似乎有矛盾, 因为在结构上并不同于晶闸管而是和FTD的结构一样, 只是把 p^+ 门极移向表面。为了减小压降, 门极表面进行金属化处理 (图16, C), 使器件具有关断能力。另一方面, 这种方法把载流面积减小到 n^+ 区。

组合器件 (反向导通晶闸管)

几只电力半导体器组合在一块硅片上, 至今仅在少数场合下有效。使用辅助晶闸管的二级门极结构已经设计成功, 此外还有一种晶闸管与二极管的反并联组合, 即所谓反向导通晶闸管。由于不利用反向阻断能力, 晶闸管部分可采用p-n-i-n-p结构。它具有反向阻断晶闸管所没有的动态特性。重复峰值电压可达2500V, 关断时间为30 μ s。

功率组件 在不超过50A的电流范围内, 由许多单个器件装在同一外壳内、电气上相互绝缘的组合件已经普遍采用。一些厂家利用玻璃钝化片作为单个不封装元件。组件的电流额定值也在逐渐提高。在两只晶闸管一组的单元中, 单个管子的电流可达120A。如此下去, 功率组件在许多场合下将取代螺栓式晶闸管。

双向晶闸管 这种器件主要适用于小功率相控方面, 目前的进展情况与用普通方法制作的晶闸管相似。大功率双向晶闸管的应用仍受到一定限制。其换向 dv/dt 能力差。目前适用的大功率双向晶闸管典型最大值为1000V, 200A, 换向 dv/dt 为50v/ μ s。

光控双向晶闸管能解决换向问题, 器件中央有一漏斗状沟道 (图17) 能与来自LED的光能耦合。由于在两个截面部分都比用门极触发的双向晶闸管容易去耦, 所以在两个极性上有极相同的开关特性。

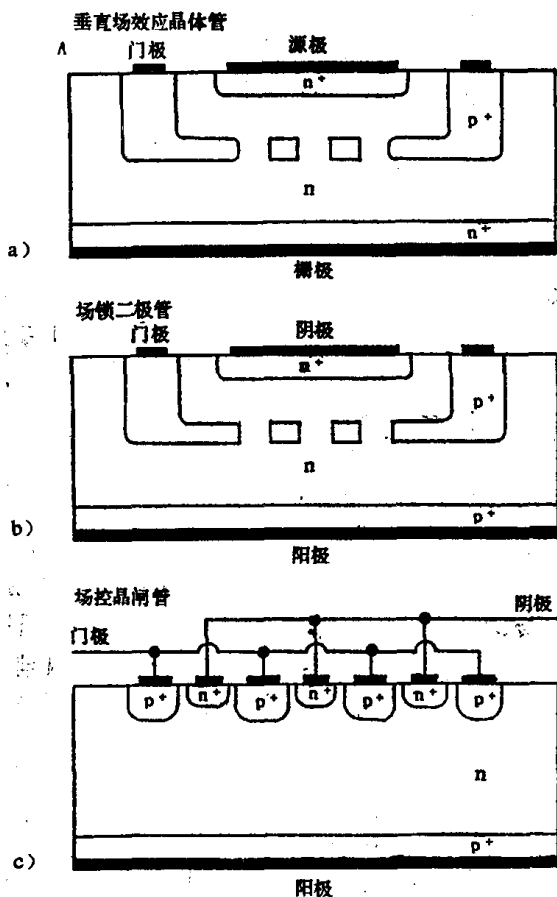


图16 垂直场控器件

a)垂直场效应晶体管; b)场锁二极管;
c)场控晶闸管。

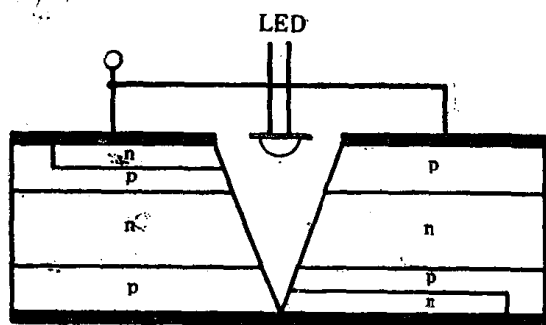


图17 光控双向晶闸管

电力整流器 电力整流器工艺与晶闸管非常相似，故整流器往往是作为晶闸管一个分支研究的。整流器的发展趋势也是高电压、大电流和快速关断。许多厂家已生产了额定电压5KV的整流器，雪崩容量还有富余。用于焊接和化工整流器，直径已提高到76mm。对不封装直接冷却的器件的研究，已使76mm整流器的平均额定电流由5.4KA提高到18KA。在低电压范围内，双极整流器与肖特基二极管不相上下。

功率晶体管 当晶闸管还在设想阶段，功率晶体管已经出现了。由于晶闸管的明显优点，很快成为电力电子工业的主要器件。与晶闸管相比，其优点是触发功率低，用门极电流脉冲就能触发，耐浪涌容量大，能很顺利地增大容量而且没有二次击穿。缺点是没有关断能力。要解决的主要问题仍是：使电流在整

个面积上分布均匀及提高热稳定性。在这方面的努力已取得了成绩。制成了各种商用复合晶体管(达林顿)，其额定值为300V(V_{CE})400A，增益 h_{FE} 为400A。采用密集叉指状结构，直径达40mm。发射极的电流分配采用整个面积压接和发射极稳流技术。某些器件采用双面冷却平板形外壳。

结 论

电力半导体器件仍处于发展中，晶闸管的硅片直径达102mm，阻断电压已达4KV，整流器直径达到76mm，电压达到6KV。进一步提高原则上是可能的，问题是能否有这样的装置提供这种器件所控制的全部功率。

采用直径为75mm的器件时，实际上已经引起了新问题，目前市场上对这种器件的需要量是有限的。仍应看到，不但要从研制费用大小，还要从市场的潜在需要来考虑问题。

目前许多研究重点都放在中频和高频的应用上，还将深入研究反向导通晶闸管和适用的门极辅助关断晶闸管。在中等功率和高频范围内，是发展门极关断晶闸管和关断场控器件，还是使用一般晶闸管，也是一个值得注意研究的问题。

[谢祥生编译自<1977 IEEE/IAS International Semiconductor Power Converter Conference, 1977, 3, 28—31>，潘宏祥校]

科技小史

电 与 琥 珀 同 名

宋 安 居

公元前600年左右，希腊学者特尔斯(Thales，公元前640~546年)发现用布与琥珀摩擦后能吸引轻的物体，并发现磁铁矿能吸引铁片，这种吸引力与琥珀上产生的力相同。其实，中国对磁铁矿的认识还要早400年，始于周代，以后最早用作指南车。但当时不能形成系统理论。英国的医生吉尔伯特(William Gilbert, 1540~1603)最早系统研究这类现象，1602年发表《磁铁》一书，用铁磁体来说明地球的磁现象，认识到磁极不能单独存在，必然成对出现。琥珀摩擦后吸引轻物体与地球磁性属同类现象，这种现象在硫黄、松脂、玻璃、水晶上亦有发现。他用琥珀的希腊文“electriciteit”给这种现象命名。所以，在希腊文里，电和琥珀是同一个词。现代英语中的电、电学、电子、通电、导电、电解等等，以及有关电的数以百计的复合词，都是由它演变而来的。吉尔伯特是伊丽莎白一世的御医，他在女王面前表演了电视象实验。德国的麦克德布尔克市长格里凯(Otto von Guericke, 1602~1686)做过许多实验，其中一个有名的实验是，用16匹马拉开组成抽空球器的两个半球，直接证明大气压的巨大压强。他于1663年制造起电机。这是现代静电发生器的鼻祖。这种装置系用木框支撑一个直径25厘米的硫黄球旋转，当用热手掌接触球时，则因摩擦而起电。

牛顿(Sir Isaac Newton, 1643~1727)在1675年用玻璃代替硫黄进行了同样的实验。1733年法国的蒂菲发现电有正、负电荷之分，同性相斥异性相吸。1752年美国的弗兰克林(Benjamin Franklin, 1706~1790)做了有名的风筝实验，证明了雷是电的运动，得到雷雨带电性质的实验证据。另外，法国的库仑(Charles Augustin de Coulomb, 1736~1806)做了电量的精密实验，1785年得出“两带电体之间的作用力或反作用力，与其电量成正比，与相互距离的平方成反比”的库仑定律。以上是在近两百年的岁月中，古代科学家们对于静电的早期认识过程。他们得出的结论却非常准确而精辟，为“动电”的发现奠定了坚实的基础。

资料来源<省エネルギー>1980, 11.13.

电动机的节电检查

1. 检查感应电动机是否高效率运行

工厂中大部分是动力负荷，其中速度固定的感应电动机占多数。因而，从节省电力的观点，电动机的高效率运行是个重要因素。但是，工厂里这种电动机为数众多，都进行检查是很困难的。又因为电动机比其他机械效率高得多，所以只研究装备在工厂中的大容量的主要电动机就可以了。

电动机是否高效率运行，要看：①生产机械设备在生产系统中必需完成最低限度的机能和工作，电动机是否能提供与此相应的输出功率。例如，机械运行所需功率概况如图1时，从必要的机能和工作考虑，生产机械应有适当的速度。要研究是否不必要地提高了运行速度；②这时将电动机效率和同一型号的其他电动机相比较是否处于良好状态；③将电动机作为电力设备系统的整体来看时，功率因数是否良好关系到整个系统的效率。

要按以上的观点进行研究。

(1) 负荷状态和最佳容量

电动机容量大者效率高，从图2可见 差异颇大。在三相感应电动机当中，有的容量相当大，效率可达97%，0.4千瓦以下者，有的可达75%。

电动机效率不只随容量不同而有差异，还随型式

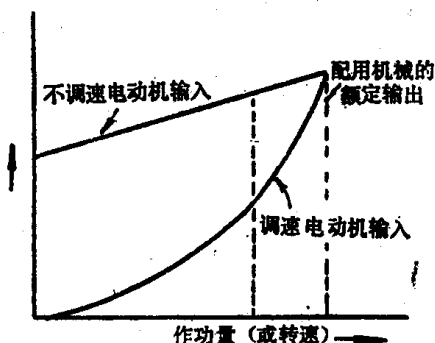


图1 电动机输出和作功量（以涡轮风扇为例）

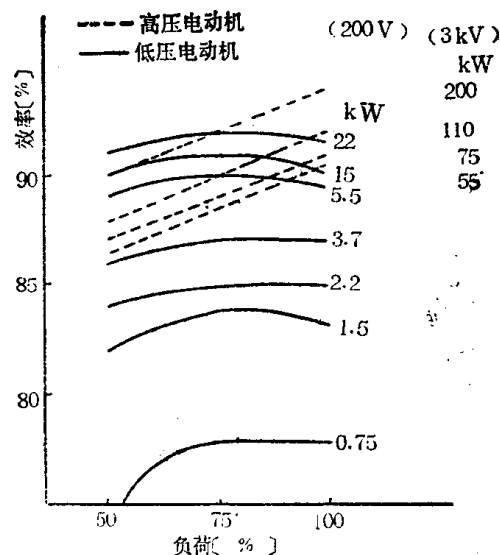


图2 电动机容量和效率一例（6级电动机）

而变。和变压器一样，空载损耗和负荷损耗相等时效率最高。但额定负荷时的负荷损耗和空载损耗比并不一定，不能一概地说在何种负荷百分比下效率最高。负荷损耗大的电动机在负荷较轻时效率显得高，而负荷损耗小的电动机大致上是满载时效率高。

一般，敞开型的低压电动机在额定输出功率的70—80%时效率最高，超过此限直至100%，效率几乎

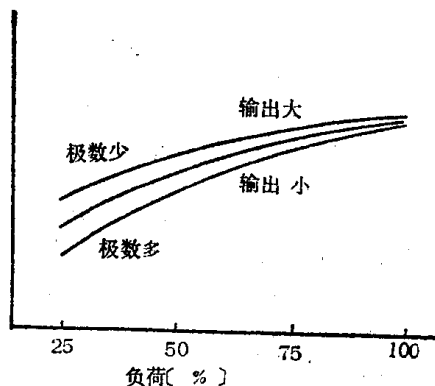


图3 电动机负荷和功率因数

表 1

电 压 变 化 和 电 动 机 (满 载) 特 性

特 性		起动和最大 制动转矩	同步 速度	滑 差	满 载 电 流	起 动 电 流	满载时 效 率	满载时 功率因数	最大输出	温 升
电压的 变化	额定电压的 110%时	+ 21%	不变	- 17%	- 12%	+ 12%	+ 0.5~1	- 3	+ 21%	- 3~4℃
	以额定电压值 作为1,电压变 为V倍	V ²	不变	1/V ²	—	V	不 定	不定	V ²	—
	额定电压的 90%时	- 19%	不变	+ 23%	+ 11%	- 11%	- 2	+ 1	- 19%	+ 6~7℃

不变,降至50%时效率有一点降低,50%以下则急剧恶化。所以必须注意不使电动机负荷在50%以下。

选择机械及电动机时,应选得略大,以使设备本身容量不过小而有一空余量,以后要求实际容量有所增加时亦能有余量满足。而且,通用电动机的容量,其容量等级间距,低压电动机为35%,高压电动机为25%,必要的轴功率和通用电动机的出力一致的场合,就选大一级容量。

因此,在工厂等处运行的电动机,其实际负荷多为从50%到70%的低负荷。

为使只有50%—60%的低负荷的电动机处于适当的负荷状态,只改换电动机,以小容量电动机代替。这种情况下,对低压电动机来说,一般50%负荷下的效率并不比最高效率低多少,反之,由于换了容量小的电动机,效率反而降低,从电动机本身来看,效率恶化了,这样的例子也很多。

但是,如图3所示,低负荷电动机的功率因数急剧降低,有必要考虑包括变压器、配电线路等在内的总损耗。对于高压电动机,因为通常在低负荷时效率有大幅度下降的倾向,所以随电动机容量的不同,效率上的差异也有扩大的趋势。另外,在负荷超过标准容量的80%时,功率因数高,所以改换为适应于负荷轴功率的电动机明显地有利。

最近的节能型电动机,是根据负荷率为80%时的效率为最高效率来设计的,并同时使用电容器,在低负荷时进行功率因数补偿等。一般的倾向是在负荷较低时采取不使效率下降的对策。

(2) 负荷状态和电压、功率因数

为了使电气设备在高效率下运行,最必要的条件是以符合设备额定值的标准电压供电。这个电压不是配电线路分支处和电动机开关上的电压,而是机器的端电压。不同供电电压下的特性变化,如表1所示,电压高时起动转矩大,转差率及负荷电流小,输出功率大和效率高,但是起动电流和功率因数有某些恶化的

倾向。从表可见,电压高是有利的,但是此表以满载为对象的,实际上并不直接适用于在工厂中运行的电动机。

工厂中实际运行的电动机的负荷率,大致在50%到近100%的范围内变化,而以70—75%居多。额定负荷以外的电压特性如表2所示。

电动机负荷低的情况下,电压低比电压高时,效率和功率因数更高。不利条件是起动转矩低,其他的特性因负荷低而被否定了。

可见,如对负荷低于额定值的电动机组以低一些的电压供电,效率可以提高。

比如某厂,改变配电变压器的抽头,配电电压比原来降低5%,而电能消耗减少了约2%就是一例,这是因为:

(a)因为电动机组的负荷率低,所以由于降低供电电压,使效率提高,功率因数改善,减少了配电线路的损耗。

(b)由于转差率增大,转速降低,减小了所作的功(节约了多余的功)。

(c)减少了与电压成比例增减的负荷(电阻发热、白炽灯等)所消耗的电能。其他。

(3) 电动机容量最佳化的得失

电动机挂上负荷,在某一定转速下,为机械设备提供所要求的轴功率,这个轴功率比电动机容量大时,要求电动机过载输出,最终会将它烧坏。相反,轴功率比电动机容量小时,电动机运行时有余量,电动机的输入功率也小。

电动机以低负荷运行时,本身的效率变坏,且功率因数降低,表3示出的情况就是一例。

设11千瓦电动机以50%负荷运行,效率为89%,功率因数为72%,电动机输入功率 P_{11} 为

$$P_{11}(\text{千瓦}) = \frac{11(\text{千瓦})/2}{0.89} = 6.18 \text{ 千瓦}$$

把它换成7.5千瓦的电动机时,负荷率为73%,效率为

表 2 电压变化和电动机负荷率

	负 荷	90%的电压	110%的电压
效率	100%	- 2 %	略有增加
	75%	不 变	不 变
	50%	+ 1 ~ + 2 %	- 1 ~ - 2 %
功率 因数	100%	+ 1 %	- 3 %
	75%	+ 2 ~ + 3 %	- 4 %
	50%	+ 4 ~ + 5 %	- 5 ~ - 6 %

90%，功率因数提高到77%。电动机输入功率 $P_{7.5}$ （千瓦）同样可得

$$P_{7.5}(\text{千瓦}) = \frac{5.5\text{千瓦}}{0.9} = 6.11\text{千瓦}$$

若又换成5.5千瓦的电动机，则负荷率为100%，效率89%，功率因数79%，电动机输入功率 $P_{5.5}$ （千瓦）为

$$P_{5.5}(\text{千瓦}) = \frac{5.5\text{千瓦}}{0.89} = 6.18\text{千瓦}$$

功率因数如何，与包括变压器在内的的配电线路损耗有关，损耗率与功率因数的平方成反比。

假定使用5.5千瓦电动机时配电线路损耗为

表 3

电动机特性举例(50赫4极鼠笼式防滴型)

功 率 负 荷	效 率			功 率 因 数		
	50%	75%	100%	50%	75%	100%
11 千 瓦	89	90	90	72	82	85
7.5千 瓦	89	90	90	68	78	83
5.5千 瓦	87	89	89	62	75	79

表 4 改换电动机消耗功率的比较

功率 (千瓦)	负荷率 %	电动机 效率 %	电动机 输入 千瓦	功率 因数	配线 损耗 千瓦	功率消耗 千 瓦
11	50	89	6.18	72	0.22	6.4
7.5	73	90	6.11	77	0.19	6.3
5.5	100	89	6.18	79	0.18	6.36

$$W_{7.5} = 6.18[\text{千瓦}] \times \frac{6.11}{6.18} \times 0.03 \times \frac{(0.79)^2}{(0.77)^2}$$

$$= 0.19[\text{千瓦}]$$

同样，11千瓦电动机的配电线路损耗为

$$W_{11} = 0.22[\text{千瓦}]$$

综合之如表4所示，换成7.5千瓦电动机时有利，损耗相差100瓦，效率提高1.6%。

2. 运行方法是否合适

以选择电动机的运行方法达到节省能量的目的，是将电动机运行方法和所拖动的负荷设备的工作或机能相协调，对此可分类如下：

①防止空转及轻载运行

②断续运行

A. 一台电动机断续运行；B. 多台电动机运行台

数的控制。

③调速运行

A. 有级调速运行；B. 无级调速运行。

电动机本身的效率问题并不是主要的，为使电动机拖动的设备高效率运行并减少无效运行以节省电能，主要应考虑实行电动机运行要领问题。

(1) 运行方法的选定

(a) 防止空转及轻载运行

电动机和机械的连接最好用离合器，一般的设备，电动机运行时负载设备也运行。因而在空转的情况下，也需要消耗特别大的功率。溶解纸浆或废纸的碎浆机，把纸浆或废纸置入水中，约5-6%溶解，在只装水运行时和投入纸浆后运行，前者的功率大，从这种机能可见，即使不工作，相反也要有大功率。空调设备的冷冻机即使长时间停止，而冷却水泵、鼓风机连续运行的场合等，从机能上看，同样地视作空转。

即使是连续运行，电动机所拖动的机械经常处于轻载状态，另外，如压缩机卸载时轻载时间较长的场合，作为负载的机械装置的效率是否降低，或因为担心机械装置效率低，还要调查机械装置的性能。还须调查必要的作功量(机能)，研究容量与此相适合的设备。

(b) 断续运转

负荷减轻时,如果能够停掉电动机,就减少这份的用电量。但是,如果断续频率过高,必须研究包括负载机械的容量。对达到每小时十次的频繁起动,因起动时温度上升的积累,固定绕组的交变应力,转子铜条,端环的温度上升,热应力等有引起疲劳破坏的危险,因此对原有的电动机必须加以注意。

对断续运行方式,由于不再装手动开关,而采用限位开关、电极棒等简单的自动电器及多种传感器,采用配置程序装置的程序控制及时序装置的时序运行方式。

(c) 调速运行

泵、鼓风设备,一般用感应电动机拖动,在负荷变动的场合,用阀及风门调节流量,这时控制损耗非常大,由图4可见,将阀或风门关小,流量减小,造成在功能上不必要的压力上升,这部分能量即属损失。我们在院子里洒水时,如果将用作水管的乙烯软管一端捏紧,水压上升射到远处,阀门关小时液体在关小之处流速升高,管道内阻力增加,最终调节了流量。

泵、鼓风机的特性称为平方降转矩负荷特性,有以下的关系:

$$Q \propto N^3, H \propto N^2, P \propto N^3$$

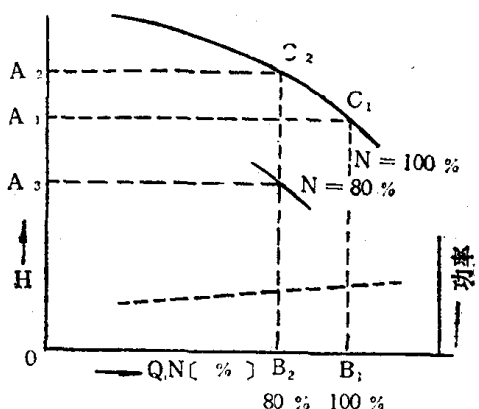


图4 泵和送风机特性

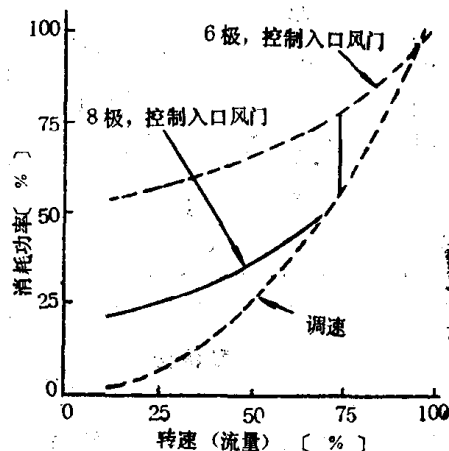


图5 改变送风机电动机极数消耗功率—转速(流量)特性

Q: 风量、水量; H: 风压、扬程; P: 轴功率; N: 旋转速度。

图上, 关阀使流量 B_2 为80%, 扬程从 C_1 上升到 C_2 , 这时功率比为 $\square OA_1C_1B_1$ 对 $\square OA_2C_2B_2$ 的面积比。

如果以改变转速来代替关进口阀或风门, 扬程降至 A_3 , 大大地节省了电力。但是, 期望静压处于 A_1 时, 进行压力、流量控制, 使转速降至适当的值, 调整阀门到使流量处于80%的位置, 则在节省电力方面不能期待有很大的效果。

调速控制有这样的方法, 改变电动机极对数的有级调速, 中间的控制则使用阀或风门。改变极对数的转速比如下:

4极/6极	100/67
6极/8极	100/75
4极/8极	100/50

改变极对数而得的消耗电力-转速特性示于图5。

[宋寿祥译自《电气と工事》, 1979年12月号, 别册付录; 潘宏祥校]

蒸汽透平的节能措施

岩井铁也 植西晃 青木逸郎

前言

为了节约能源和提高设备性能, 首先对仙台火力发电站的2号机组(17万5千千瓦)和新泻火力发电站的2号机组(12万5千千瓦)的蒸汽透平着手改造, 二台机组分别在1978年12月和1979年3月完成了改造工程, 性能试验结果, 证明已达到预期效果。本文主要叙述

提高蒸汽透平性能的具体措施及其实践效果。

一 蒸汽透平的级效率

火力发电装置中的能流图如图1所示

为了节能, 必须认真地减少这些能量损失。损失的绝大部分是从蒸汽透平出来, 放入冷凝器的放热损失。此外, 为了减少损失, 确有必要改进蒸汽透平的

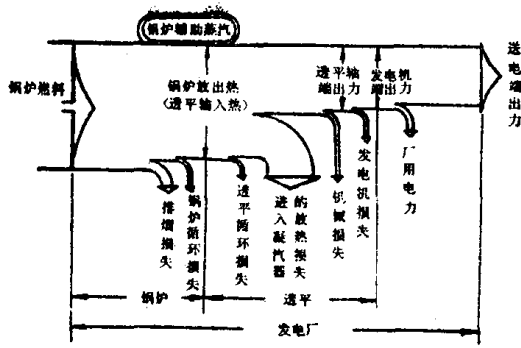


图1 能流图

内效率。

制造厂家近几年来，发展了可控涡静叶等新技术，对改进透平效率有很大好处。

蒸汽透平级内的损失大致可按如下分类(参看图2)：

- a. 流动损失 { 叶形损失 (动叶、静叶)。
冲角损失。
叶轮摩擦损失。
二次流损失。
- b. 漏汽损失 { 叶片顶部漏汽损失。
轴向漏汽损失。
- c. 排汽损失 { 余速损失 (速度能的损失)。
排汽缸损失。

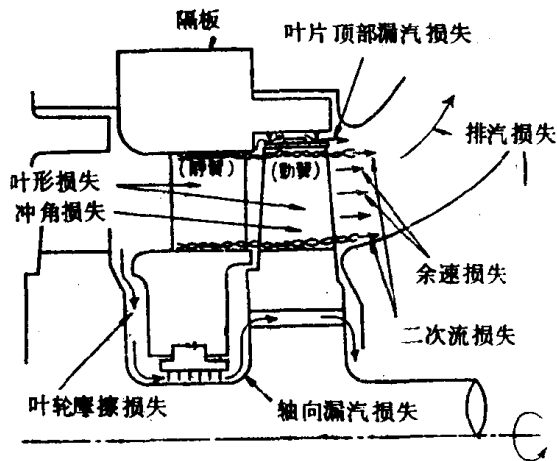


图2 级的内部损失原因

1.1 叶形损失

蒸汽透平的级效率主要是由该级理论热降而求得的蒸汽理想速度、动叶圆周速度以及与反动度有关的参数决定的，它们之间的参数关系如图3所示。

该图显示出理论效率的变化趋向，但轮周效率一般可用下式表示：

$$\eta_s = 2 \left(\frac{W}{V_0} \right) \left(\varphi \sqrt{\frac{r}{1+r}} \cos \alpha - \left(\frac{W}{V_0} \right) + \cos \beta \right) \\ \sqrt{\rho^2 \left\{ \frac{\varphi^2}{1+r} + \left(\frac{W}{V_0} \right)^2 - 2 \varphi \sqrt{\frac{1}{1+r}} \left(\frac{W}{V_0} \right) \cos \alpha \right\} + \frac{0.9r}{1+r}}$$

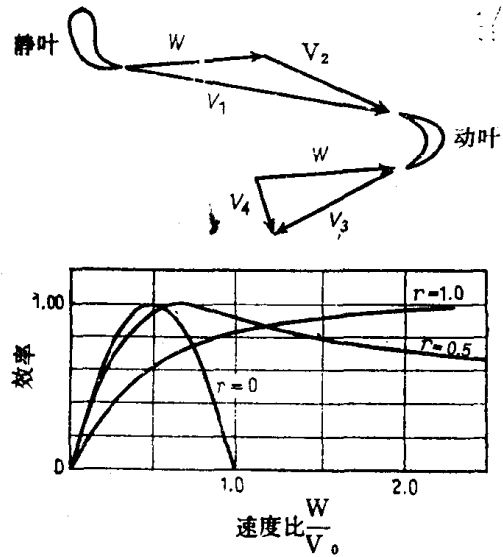
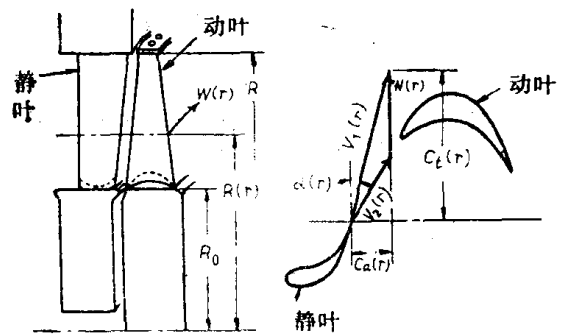


图3 级的轮周效率

式中：W：动叶圆周线速度 (米/秒)；V₀：理论蒸汽速度 (米/秒)；ψ：静叶速度系数；ρ：动叶速度系数；γ：反动度；β：动叶出口蒸汽流出角度 (度)。

轮周效率除了与速比 $\left(\frac{W}{V_0} \right)$ 、反动度 (γ) 有关外，还受静叶及动叶的速度系数 (ψ)、(ρ) 的影响，速度系数又与叶片表面状态有关，但基本上是取



设计理论

$$C_a(r) = \text{一定} \\ C_t(r) \times W(r) = \text{一定} \\ \text{则} \tan \alpha(r) = \frac{R(r)}{R_0} \cdot \tan \alpha_0$$

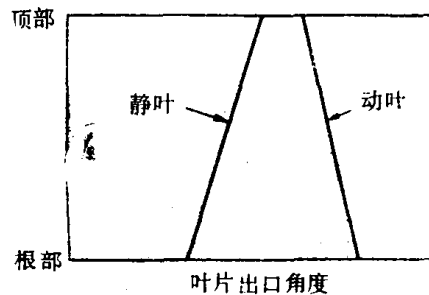


图4 自由涡理论

决于叶形的,所以就把它称为叶形损失。

1.2 冲角损失

冲角损失是因为蒸汽流出静叶时的流出角与动叶的几何入口角之间的偏差而引起的损失。动叶的圆周速度是沿根部到顶部逐渐增大的,而当蒸汽流出静叶的出口速度和角度一定时,流往动叶的蒸汽流入角沿叶片根部到顶部是不同的。

如果使用了几何入口角从根部到顶部是相同的叶片时,则蒸汽流入角与动叶片入口角之间的差异,就会引起气流冲击并产生损失,因此有必要探讨静叶出口角、动叶进出口角及其与反动度的关系。通常它们都是根据自由涡理论来确定的。图4示出了自由涡理论的概念。静叶出口角度沿叶高逐渐增大,而动叶出口角度必须与此相反,即沿叶高逐渐减小。

图5表示了以自由涡理论设计的扭叶片的速度三角形。

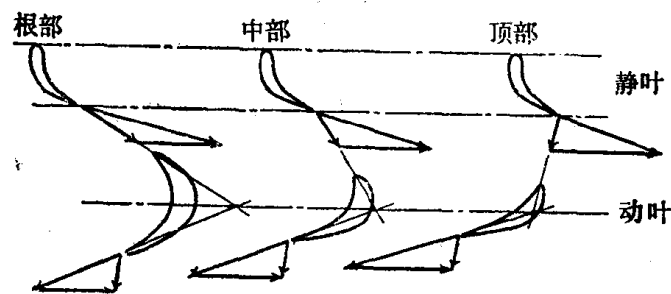


图5 扭叶片的速度三角形

动叶片的入口角也可被设计成与蒸汽流入角相一致的,但是当动叶片入口角与蒸汽流入角有偏差时,就会因流动冲击而形成损失,这种损失就叫做冲角损失。

1.3 叶轮的摩擦损失

乃是一种由叶轮侧面与蒸汽之间的摩擦所引起的损失,它与叶轮表面状态以及叶轮与隔板之间的间隙大小等因素有关,但这种损失本身较小。

1.4 二次流损失

作用于由叶片所围住的叶间通流部的压力分布,是随着通流部的横截面形状及其弯曲程度而有所差别的,但是,通常叶片背弧面的压力比内弧面低,因此,沿着外侧和内侧,产生了从叶片内弧面流向背弧面的气流。结果,在叶片根部和顶部分别产生了配成一对的二个涡,这就是所谓二次流。由于二次流对蒸汽主流的干扰,使叶片背弧面和内外侧面的接触部分附近产生了涡旋,成为级效率降低的一个重要原因。图6表示叶片通流部分中二次流的状况。

1.5 叶片顶部的漏汽损失

乃是由于蒸汽从围带外圆周与外壁面的径向汽封

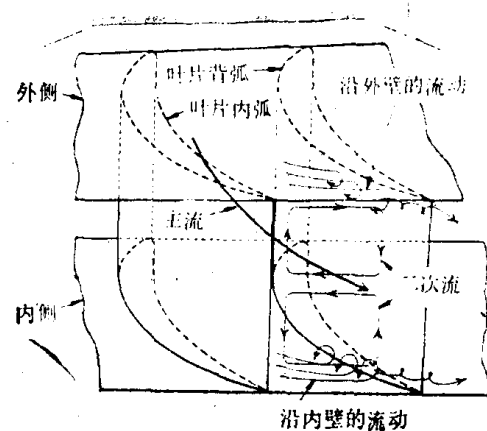


图6 叶片通流部分的二次流

齿间的间隙中泄漏出去而引起的损失。除了蒸汽本身泄漏量之外,它还由于泄漏的气流对主流流的干扰而引起的损失。

1.6 轴向漏汽损失

乃是由于主轴与迷宫式汽封齿间的间隙所引起的损失,由于长期运行,使汽封齿的间隙不断增大,容易形成性能降低的一个原因。

1.7 排汽损失

流出动叶的蒸汽所具有的能量,在下一级中可被有效地利用,但是,流出最后一级蒸汽能量照样会成为损失(余速损失)。另外,在排汽缸内,由于气流与侧壁之间的摩擦或扰动也会造成损失(排汽缸损失)。

二 透平内效率的改进

对原有蒸汽透平进行改造时,其改造的内容和范围必然受到限制,至于这次改造,乃是以投资效果最好的中压透平为中心而进行改造的。

2.1 叶形改进

(1) 叶片断面形状的改进

近代叶栅理论的发展及其在实践中的应用,在很大程度上都得依赖于电子计算机的大容量化以及叶片制造技术的发达。作为其成果之一,就是有了一种叫做“修利克特”叶形的叶片。它是根据斯伐尔茨(Schwarz)、克利斯多佛(christoffel)的变换理论,把蒸汽作为不可压缩流体来处理,并采用保角变换后所得到的一种层流叶形。

原有叶形是联结多圆弧的曲线作图而成的,与此相反,修利克特叶片则是把无数个其座标点均为已知的圆弧联结起来作图而成的。特别是对叶片出口形状的改进,防止了叶片出汽侧容易发生的蒸汽脱流现象。图7中已示出这二种叶形的对比。

(2) 叶片出口形状的改进

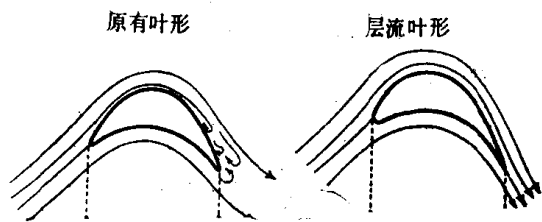


图7 层流叶形和原有叶形的比较

叶片出口的形狀，具体地说叶片出口角度的设计，是以沿叶片出口处的流速分布情况如何而定的。叶片的设计方法有许多种，一般都是按照前述所谓自由涡理论来决定叶片的出口形状。

以自由涡理论设计出的叶栅模型实验结果表明，在叶片顶部和根部处与理论计算有较大差别，图8中已示出这一状况，这就是二次流干扰主气流的原因。

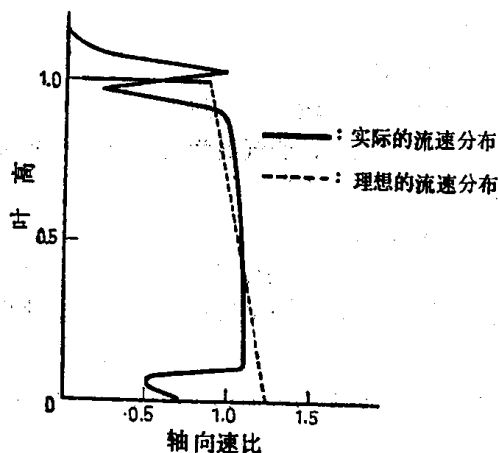


图8 动叶出口速度分布

正是为了要减少这些二次流损失和同时减少叶片顶部漏汽损失，人们就发展了可控涡静叶。

图9中示出原有直静叶片的出口角与以可控涡理论设计的扭曲静叶片出口角的比较。

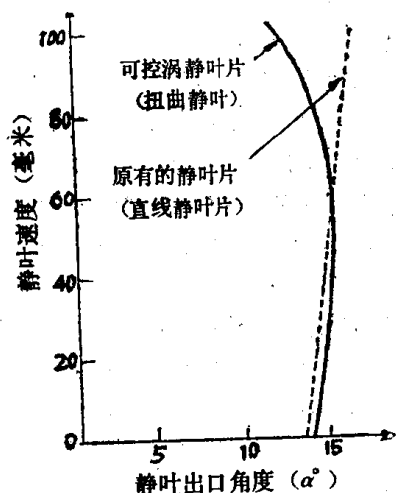


图9 静叶出口形状的比较

可控涡静叶片顶部扭曲，使出口角度变小，正因为这样，叶片根部出口角度就增大了。其效果是使静叶顶部处的反动度减少，顶部处的漏汽损失也可减小。另外，叶片根部处反动度相对增大，由内侧面附近的脱流现象所引起的损失就可减少。同时，叶片顶部进汽侧的冲角损失也减少了。图11示出叶片顶部速度三角形的比较。图10是17.5万千瓦中压透平用的可控涡静叶片（图略）。

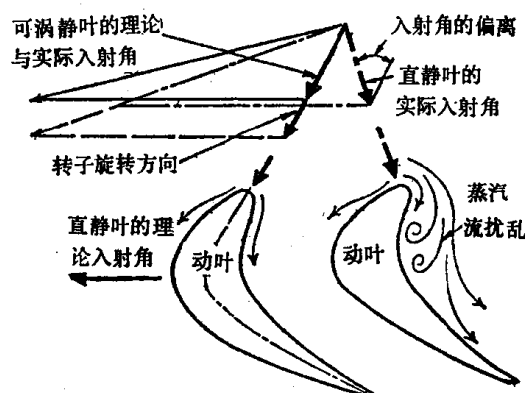


图11 动叶顶部进口蒸汽流的比较

在原有的直静叶片中，理论计算的蒸汽流向与实际流向之间存在差异，临近到叶片顶部附近的蒸汽流速甚至比理论流速还慢，这就会使蒸汽从动叶背弧面入射，对气流产生扰动。

在可控涡静叶片中，由于叶片顶部扭曲后，使蒸汽流出角减小，消除了与动叶入射角的差异问题，就不会发生气流的扰动。图12表示使用可控涡静叶片后，效率改进额的变化，该图是以中压透平的实例为代表，但变化趋势也会随同叶形而有所不同。

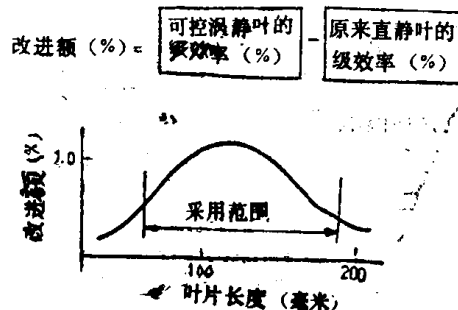


图12 使用可控涡静叶片后效率改进额的实例

2.2 叶片顶部汽封的改进

众所周知，作为转体和静体间的非接触密封方式，迷宫式汽封是有效的，它也被广泛地采用在蒸汽透平的汽缸与转子以及隔板与转子之间的密封。但是由于叶片顶部密封结构上的困难，原来只有一至二片汽封片，而成为效率下降的原因之一。作为其改进的措施，是把固定动叶围带的铆钉头埋进围带的凹坑