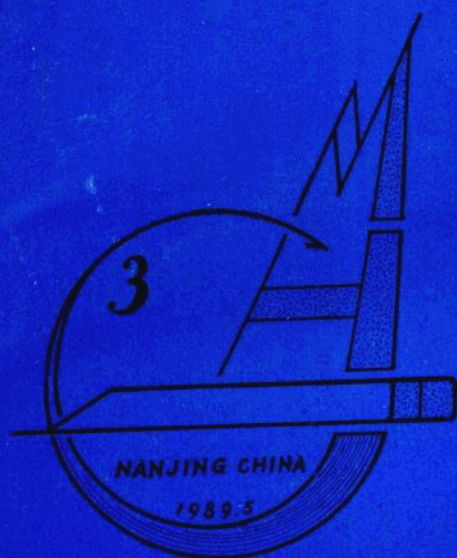




Third National Conference on MHD
Electrical Power Generation.

Nanjing China 1989.5

第三屆全國磁流体发电 学术会议论文集

(上)

中國 南京

目 录

A. 系统

- A. 1、万千瓦级燃煤磁流体发电中间试验电站概念设计研究的初步分析
沙次文、周适(中国科学院电工所)
金 铭(上海发电设备成套所)
慕宁生(东南大学热能所)
- A. 2、对万千瓦级燃煤磁流体/蒸汽联合循环中试电站的初步系统分析
慕宁生、徐益谦 (东南大学热能所)
- A. 3、燃煤磁流体—蒸汽联合循环试验装置首次热态调正试验
舒宗勋、刘承泽、蔡华澄、钟宝华、施健民、胡应格、吴加禾、李更新(上海发电设备成套设计研究所)
- A. 4、带盘式发电机的万千瓦级磁流体/蒸汽联合循环中试电站的方案计算与系统优化分析
程永元、李儒鹏(东南大学热能工程研究所)

B. 燃烧室

- B. 1、 JS-2型MHD燃煤燃烧室的试验研究
郑文德、魏启东、陈爱珠、陈祥荣(东南大学热能所)
- B. 2、联合进风燃煤磁流体发电燃烧室的冷模实验
申俊杰、蔡崧、刘浩、郑文德(东南大学热能工程研究所)
- B. 3、燃煤MHD旋流器冷态试验研究
吴国江、张占渔、郑文德(东南大学动力系、热能所)
- B. 4、煤粉密相挤压流动中下料装置的特性
王茂华、王文琦、于荣宪(东南大学)
- B. 5、计算燃气组分的新方法—几何规划法
陈冬青、张海明(东南大学热能所)
- B. 6、燃煤MHD燃烧室的研制与调试
胡应格、蔡华澄、任波、吴顺梯(上海发电设备成套所)
- B. 7、煤粉输送系统流阻的试验研究
施健民、张辉铭、吴加禾(上海发电设备成套所)
- B. 8、磁流体发电用柴油加煤灰燃料制备与输送系统的试验研究
施健民、李更新、舒培才(上海发电设备成套所)
- B. 9、煤粉输送系统的设计与试验研究
施健民、张辉铭、吴加禾、舒培才、王明义(上海发电设备成套设计研究所)
- B. 10、煤粉输送管道压降计算

任安祿、馬銀亮(浙江大學力學系)

鍾寶華、施健民(上海發電設備成套設計研究所)

C、通道

C、1、磁流体发电通道二维計算程序

居滋象、黃常綱、何慧英(中國科學院電工所)

C、2、千千瓦級磁流体發電機級KDD-2的研制

中國科學院電工所一室KDD-2研制組、居滋象執筆

C、3、(KDF2-7)千千瓦級磁流体發電通道的研制及其運行的計算與分析

周適、殷惠明(中國科學院電工研究所)

C、4、燃煤磁流体發電通道絕緣壁電絕緣強度問題及對策

王大倫(中國科學院電工研究所)

C、5、磁流体發電通道側壁速度分布的分析

顧伯忠(中國科學院電工研究所)

C、6、燃煤磁流体發電通道的特點及其工程分析模型

何學表(中國科學院電工研究所)

D、逆變器

D、1、燃煤磁流体發電的逆變系統

趙以鈺、呂友昌、周丕鈞、潘衛民(東南大學熱能所)

D、2、磁流体發電機逆變系統的諧波及無功電流補償

王耀德、趙以鈺(東南大學)

D、3、MHD合併電路的研究

呂友昌、趙以鈺(東南大學熱能所)

D、4、MHD電機SCR逆變器微機控制系統

張菁、徐以榮、王耀德、冷增祥(東南大學)

E、下游部件

E、1、燃煤MHD—蒸汽聯合循環余热鍋爐受熱面材料研究方案論證

任波(上海發電設備成套設計研究所)

E、2、燃煤磁流体發電特種余热鍋爐 NO_x 排放的初步探討和測定

吳順梯(上海發電設備成套所)

E、3、燃煤磁流体余热鍋爐輻射爐膛傳熱計算方法

袁永久(上海發電設備成套設計研究所)

E、4、燃煤磁流体發電中回收物成份全分析

呂鈺英(蘇州市第二化工研究所)

E、5、燃煤磁流体發電種子循環和煤還原再生種子的實驗研究

蓝计香、金保升、李大骥、唐楚明、杨明珍、徐跃年(东南大学热能所)

F、材料

F、1、评价电极材料的试验方法研究

卢亚轩、周波、孙家华、刘万生、李殿国(冶金部钢铁研究总院)

F、2、燃煤磁流体发电通道用绝缘材料高温静态腐蚀试验方法的研究

王征、李泉、钟勤、高立春(钢铁研究总院)

F、3、电极材料电化学试验方法的研究

周波、卢亚轩、李殿国(冶金部钢铁研究总部)

F、4、燃煤磁流体发电通道绝缘材料—Sialon陶瓷的初步研究试验

李文宏(山东工业陶瓷研究设计院)

F、5、熔渣对氧化铝陶瓷静态腐蚀的试验研究

郭献照、吴燕华(东南大学热能所)

F、6、MHD发电机通道用绝缘材料

刘传博、勇平、梅建平(东南大学材料系)

F、7、一种镍基合金静态煤渣腐蚀试验分析

勇平、刘传博、廖新军、梅建平(东南大学材料系)

F、8、MHD发电通道陶瓷绝缘材料抗煤渣/种子物侵蚀性的研究

毛仲佳、张淑颖、李威新(中国建材研究院耐火材料研究所)

G、测量

G、1、气力输送煤粉质量流量测试方法的研究

陈秀华、杜宪华(东南大学热能所)

G、2、一种适用于测量电磁流体发电机通道中气流速度激光多普勒测量速系统

赵友生(中国科学院电工所)

万千瓦级燃煤磁流体发电中间试验电站概念设计研究的初步分析

中国科学院电工所 沙次文 周 适

上海发电设备成套所 金 铭

东南大学 蔡宁生

一、前 言

磁流体(MHD)发电技术,作为一种先进的能量转换技术,以其能达到高效率、低污染等优势,得到了世界上主要工业国家(其中以美、苏两国为代表)有关方面的重视,在这些国家中进行了研究和开发。目前已认为其基础性研究工作已基本结束,正在进入半工业性和工业性的试验电站阶段。如苏联以天然气为燃料的电站已完成万千瓦级中间试验,正在建造总功率为58万千瓦的MHD—蒸汽联合工业电站,原计划1989年完成(目前蒸汽发电部分已投入运行)。以煤为燃料的MHD发电装置也在进行试验,并计划于九十年代建设大型燃煤MHD工业电站。美国对燃煤MHD发电的研究,在进行了大量的应用基础研究和部件研究的基础上,建造了一些较大的试验装置,包括部件研制综合装置(GDIF)、燃煤流动试验装置(CFFF)等。根据美国能源部1987年新制定的发展计划,目前美国的燃煤磁流体发电研究正从实验室的研究阶段过渡到半工业性的试验研究和开发以使燃煤MHD发电技术走向商用的阶段。在其它国家,如日本、印度、澳大利亚、意大利、南斯拉夫等国,对MHD发电也正在开展积极的研究。

我国以火力发电为主,鉴于我国的煤蕴藏量较高(据统计为7692亿吨),1987年燃煤电站占总装机容量的70%。预计到2000~2050年,既使通过发展核电等途径,燃煤电站所占总发电比例仍将为60~67%。因此,燃煤MHD

发电能够提高燃煤电站的效率并控制大气污染，具有很大的吸引力。我国对MHD发电技术的研究已有多年的历史，是世界上开展此项研究较早的国家之一。六十年代在北京、上海和南京等地开始进行研究，目前已有千千瓦级的短时间试验机组，十千瓦级的长时间燃煤试验机组和小型MHD—蒸汽联合循环试验装置，与燃煤MHD发电有关的各项基础研究正在积极进行。据此，我国在1987年制订了能源领域高技术发展计划，其中对燃煤MHD发电研究的发展确定了以建设大型燃煤MHD—蒸汽联合电站为最终目标，在“七五”期间以建设万千瓦级中间试验电站为目标进行概念设计、技术设计及关键技术试验研究。图1为我国燃煤磁流体—蒸汽联合发电技术开发计划方框图，从中可以体现中试电站在MHD总开发计划中的位置。

由图1可见，在建造大型商用MHD电站之前，建造一座具有相当规模的中间试验电站以获得实践经验是十分必要的。这也就确定了该中试电站的主要任务和设计原则应为：

- 1、在工业规模上演示和研究MHD—蒸汽联合循环电站建造和运行的技术可行性和现实性，为建造高性能、高效率的MHD商用电站打下基础。

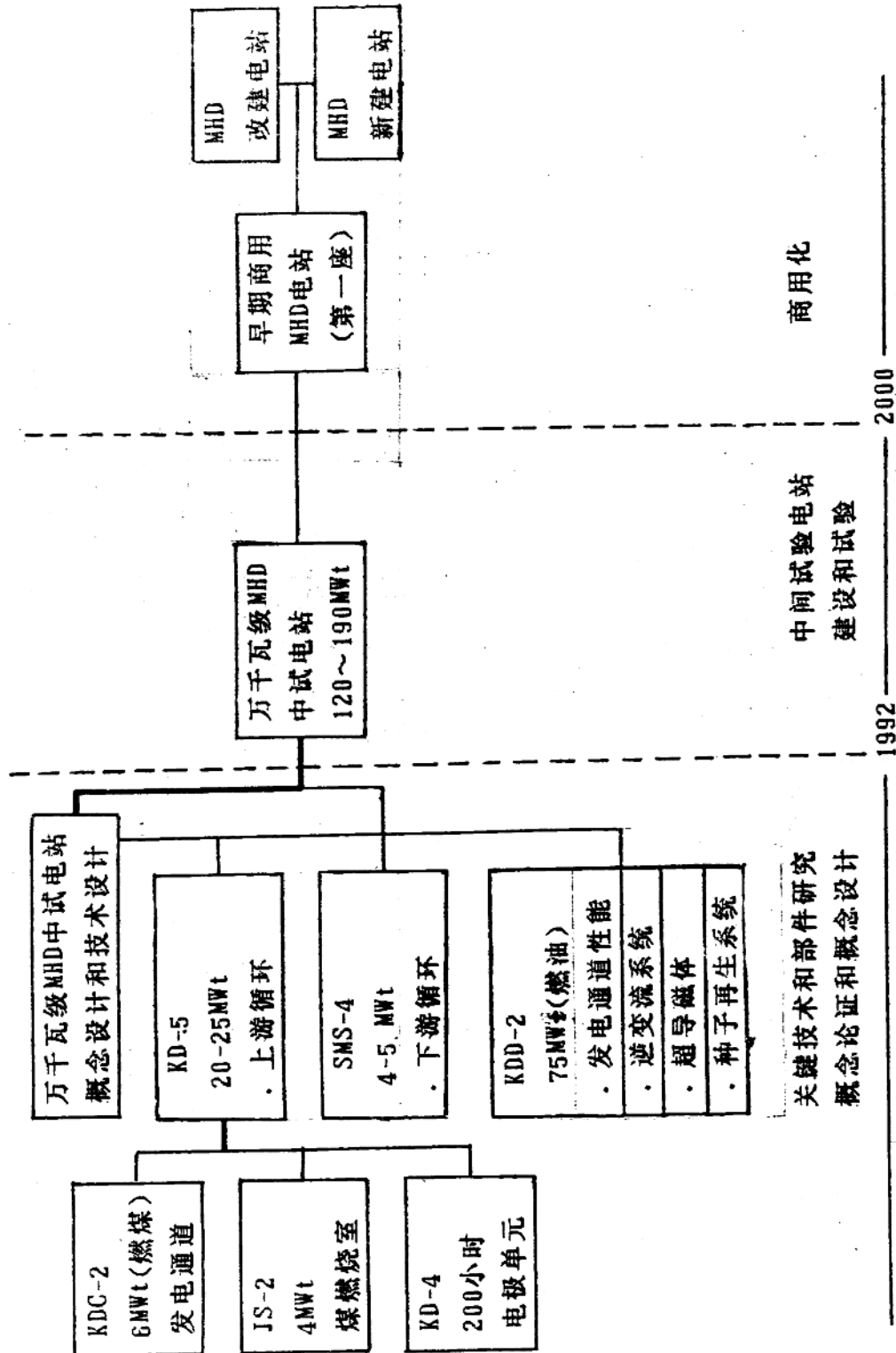
- 2、首先考虑的是可靠性、安全性、投资少、周期短，以便国家有能力支持中试电站的建设。

- 3、该中试电站应有足够大的容量，使之能为建造实用的大型MHD商用电站的各系统和各主要装置提供足够准确的设计数据以及相对可靠的安装、调试和运行经验，并为MHD发电系统所能达到的经济指标提供实际数据。

本文给出了对我国万千瓦级燃煤MHD发电中间试验电站的概念设计研究的初步分析，包括概念设计的主要工作内容介绍，中试电站方案的选择以及适用于MHD改建电厂的磁流体发电机性能的初步计算分析等。

以下分别介绍上述初步分析。

图1 MHD—蒸汽联合发电技术开发计划方框图
(中试电站在MHD总开发计划中的位置)



二、概念设计的主要工作内容

在MHD发电技术的研究开发中，对MHD—蒸汽联合电站的概念设计是一个重要部分，其实质是对MHD—蒸汽联合循环发电这一先进发电系统进行系统工程分析，为实际建造提供参考依据。因此，上述提及各国都作过这样的概念设计研究(其中有的国家通过国际合作)。仅举美国为例，美国政府先后组织了对MHD工程试验装置(ETF)、大型早期商用MHD—蒸汽联合电站进行过概念设计，对在现有电厂蒸汽发电机组前加一级MHD发电机组的方案亦作过详细的概念设计和技术设计，并作过新建电站和改建旧电站的技术经济比较。从1987年末开始，由美国能源部组织进行两个工业实用性MHD—蒸汽联合电站的概念设计。人们普遍认为，第一批联合电站以现有旧电站加MHD发电前置级并对其蒸汽发电部分进行改建为宜，这样做可以大量节省基建投资。为此1987年第四季度开始，美国能源部拨款200万美元，以后每年投资100万美元直到1992年止作为用MHD发电技术改建现有火电厂的概念设计和技术设计经费。该任务由蒙大拿磁流体开发公司(MDC)和西屋公司两支队伍承担，分别针对蒙大拿电力公司的 Corette电厂和佛罗里达的 Scholz 电厂进行MHD改建的概念设计，计划约一年半完成，概念设计之后，将进行初步技术设计、技术设计和施工设计，计划1992年开始建造，其概念设计的依据或原则为：

- 1、从商用角度充分详细地拟定一座现有火电厂伴有磁流体发电系统的联合电厂的设计参数、运行特性、安装布置和环保要求。
- 2、最大限度地利用现有火电厂的设备和条件。
- 3、选择接口参数以使作为前置循环的MHD发电系统和后置循环的蒸汽发电系统达到最佳匹配。
- 4、前置循环的MHD发电系统将不干扰作为后置循环的蒸汽发电部分的运行，一旦MHD发电系统停止工作，蒸汽发电部分仍可正常运行。
- 5、对MHD—蒸汽联合电站的管理、操作和运行作出初步打算。

6、评估可能遇到的风险和应采取的相应措施。

7、预估改造现有电厂为MHD—蒸汽联合电站的各项设计和建造时间表。

针对我国的万千瓦级燃煤MHD发电中间试验电站的概念设计和技术设计研究，主要任务为：

1、完成万千瓦级燃煤MHD发电中间试验电站的概念设计和初步技术设计，要求对技术可行性、总体性能、费用和建造计划提出明确意见，并为施工设计做好必要的准备。

2、提供50~100万千瓦级MHD—蒸汽联合循环系统分析报告。

其中概念设计的主要工作内容包括：

- 1、确定中试电站的技术路线、规模和厂址。
- 2、联合循环系统分析和研究、参数匹配优化选择。
- 3、确定主要部件参数范围和设计条件。
- 4、绘制系统流程图和平面布置图。
- 5、制定总的技术经济指标。
- 6、制定总的环保要求。
- 7、最后，提出概念设计报告。

三、中试电站方案的选择

建造MHD发电中间试验电站，意味着该项技术进入工业性试验阶段，即用工业规模的装置验证其可行性和现实性。为此，新建全套MHD—蒸汽联合电站可望实现电站的总体布置和参数匹配的优化，然而在现有火电站边上建造MHD部分，两部分组成联合循环，具有减少投资和电站人员的培训，缩短电站建设的周期、风险小等特点，因此后者被认为是现阶段最合适的技术途径。

用MHD发电技术改造现有火电站，蒸汽发电部分可通过两种方式同

MHD发电部分相联，即蒸汽连接或直接燃气连接，前者通过MHD发电部分增建锅炉产生蒸汽进入现有电厂的汽轮机发电，而后将燃气从MHD通道后直接排向现有电站锅炉。直接燃气连接方式，虽然形式简单，可减少装置投资，但要求MHD循环及渣/种子处理技术有很高的可靠性，这在目前尚不能达到，而蒸汽连接可在MHD部分出现故障时保证现有电站正常运行，为此被选作第一代MHD改建方案，图2为MHD改建电站连接示意图。

氧化剂预热方式有高温预热空气和中温预热富氧空气两种方案，前者需要建造热风炉或高温空气换热装置，占地面积大，材料要求高，对经济运行受益不大，为此选择后者较为适宜中试电站的要求。

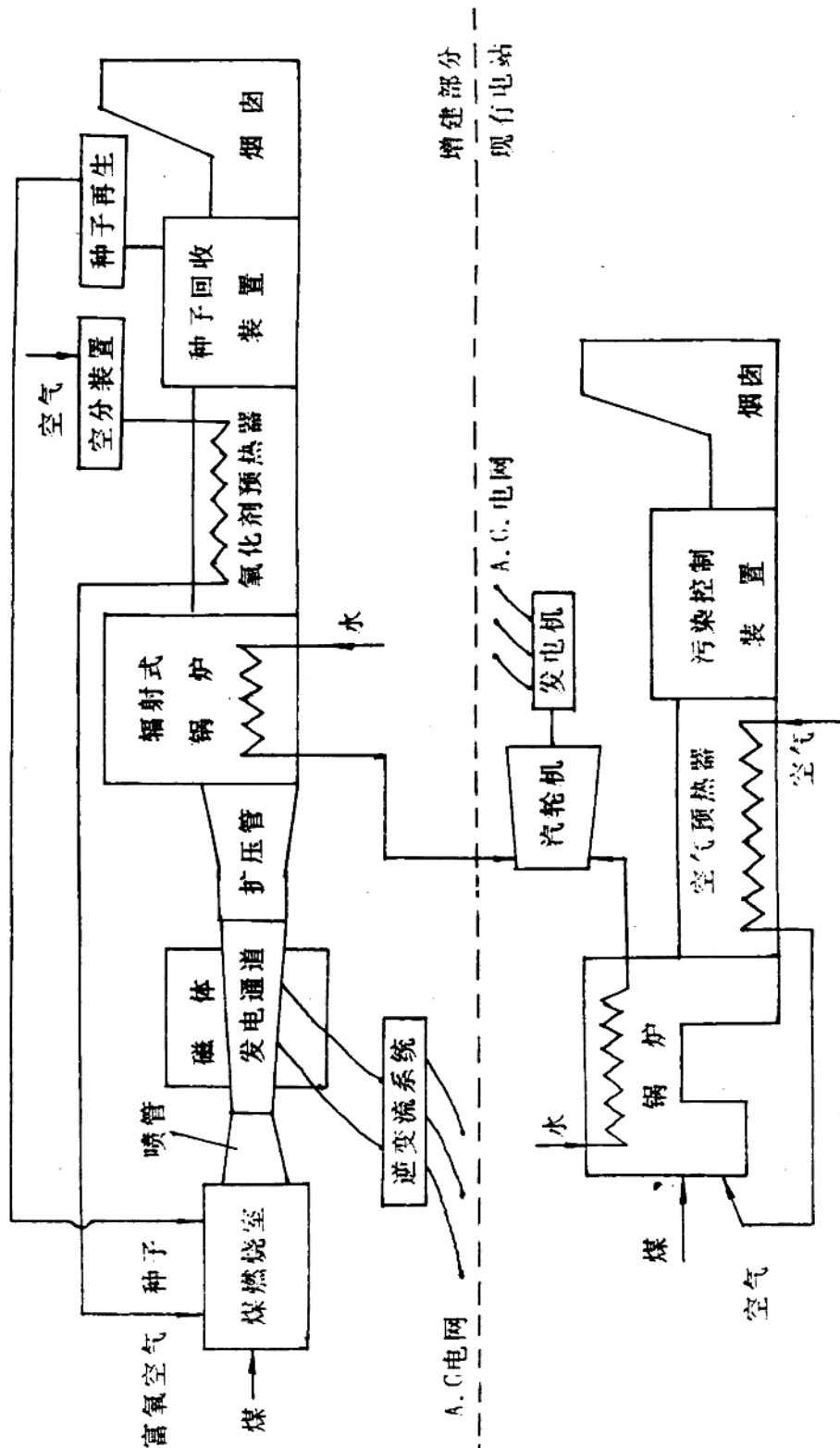
中试电站的规模的选择，以可实现的技术条件、国家财政能力和将来向商用电站发展为基本考虑，拟选择热输入120~190MW，相应的汽轮发电机25~50MW，MHD发电10~25MW为宜，其主要特征参数参见表1。

表1 MHD改建电站的主要特征参数

MHD 热输入	MWt	130	190
发电功率	MWe	10~12	22~26
蒸汽 发电功率	MWe	24	50
总发电功率	MWe	~35	~74
总质量流量	kg/s	~30	~45
磁体	Tesla	4.5	
通道长度	m	4~5	6~7
燃烧室压力	kg/cm ²	~4.5	
氧化剂富氧率	wt%	38	
预热温度	°C	650	
燃气中钾含量	wt%	1	

MHD改建电站的选址原则为：

图 2： MHD改建现有电站连接示意图



A.1.7

- 1、有相应的2.5~5.0万千瓦燃煤蒸汽发电机组与改建匹配。
- 2、厂址应靠近主要研究单位，交通方便。
- 3、该厂有足够的“空余”面积供改建使用。
- 4、使用煤种热值应在~6000kcal/kg，硫份较高，最好达3%高硫煤。
- 5、电站领导对“MHD改建”支持的程度。

根据上述原则，我们在南北方调研后拟选择北京第三热电厂为较合适的候选电厂。电站燃用煤取其现在和扩建后使用的煤种，即山西大同小窑煤和大同粉煤。煤质分析数据取混煤的数据。考虑在MHD发电应用，煤粉经干燥后，入炉时含水份为5%。表2为煤质分析数据。

表2 煤质分析数据

工业分析：

低位热值	Q_{DW}^Y	6152 kcal/kg
高位热值	Q_{GW}^Y	6604 kcal/kg
分析基挥发份	V^f	27.03%
全水份	W^Y	5.0%
固有水份	W^f	1.58%
灰份	A^Y	12.12%

元素分析：

碳	C^Y	67.65%
氢	H^Y	5.03%
氧	O^Y	8.18%
氮	N^Y	0.77%
硫	S^Y	1.25%
可磨性系数：	K_{KM}^{HGI}	67.79(哈氏)
灰熔点：	t_i	1200℃

t_2	1270℃
t_3	1340℃

粘结性：弱粘性

灰分析：

二氧化硅	SiO_2	60.39%
三氧化二铝	Al_2O_3	20.95%
三氧化二铁	Fe_2O_3	10.57%
氧化钙	CaO	3.68%
氧化镁	MgO	0.70%
氧化钠	Na_2O	0.38%
氧化钾	K_2O	0.96%
二氧化钛	TiO_2	1.11%
五氧化二磷	P_2O_5	0.49%
三氧化硫	SO_3	0.77%

改建电站将利用现有电站部分的煤输送和磨粉系统，蒸汽发电系统、变配电系统、给水系统和控制室。

表3给出了国外四座典型的MHD改建电站的概念设计的主要参数，可作为比较参考。

四、适用于改建电厂的MHD发电机性能的初步计算分析

对MHD--蒸汽联合电站进行概念设计，需要进行一系列的性能分析，参数的匹配和优化，需要进行有许多不确定因素的经济综合分析。为此，要建立较复杂的计算模型、编制程序，进行大量的数值计算和分析研究，这与通常的火电厂可行性研究有很大的区别，问题要复杂得多。这套系统工程分析软件，目前国内还没有，有的仅是某些部件的分析模

表3 国外典型的MHD改建电站概念设计主要参数

电 厂 名 称	Scholz(美)	Corette(美)	Frank Bird(美)	加加尼No.3(南
厂址	Florida (Tallahassee)	Montana (Billings)	Montana (Billings)	塞拉热窝
现电厂				
净功率	2×46	16.5	66	110
效率		34.0	29.2	37.9
燃料	Illinois#6高硫煤	Rosebud煤	Montana褐煤	南斯拉夫褐煤
汽机进口压力	60.6	133.2	60.6	133.7
温度	482	538	482	535
进气量	193	532	268	
MHD/蒸汽联合电厂				
总热输入(MHD/蒸汽)	195	520(250/270)	275	373.2
联合总功率(MHD/蒸汽)	75(29/46)	193.4(28.4/165)	100.7(34.7/66)	162.5(52.5/110)
净功率(MHD/蒸汽)	62(16/46)	177.8(14.8/165)	83.2(17.2/66)	140.4(30.4/110)
总效率		37.1	36.3	43.5
净效率	32	34.3	30.3	37.6

续表3 国外典型的MHD改建电站概念设计主要参数

电 厂 名 称	Scholz	Corette	Frank Bird	加加尼No.3
MHD				
质量流量	Kg/s	56.1	59.41	92.05
通道长度	m	10	7.5	
磁体	Tesla	4.5	4.5	
燃烧室压力	Kg/cm ²	5.0	5.2	4.5
氧化剂				
富氧率	mol%	36	35	35
预热温度	°C	627	649	727
ASU质量流量	kg/s	15.1		19.3
厂用电	MWe	15.2	18.8	22.1
磁体/变压器/泵/其它	MWe	1.67	0.6	
制氧厂(ASU)	MWe	6.52	7.4	11.1
氧化剂压缩机	MWe	7.01	10.8	11.0

型和程序，而下游循环及联合循环经济评价的模型和程序可以说仍是个空白。我国目前电规院等单位使用的电厂热力计算程序、余热锅炉热力计算程序及电厂经济评价程序，仅是对已成熟的系统部件的设计计算程序，虽然在研究中可以参考，但仍然比较简单，与中试电站的概念设计研究的要求相差还远。因此有待于在进一步的研究中解决和开发这套系统分析软件。

这里我们给出与常规电站的2.5万千瓦汽轮发电机组相配的MHD发电机性能的初步计算方案。针对超导磁体磁场强度为中等峰值(4.5Tesla)及高峰值(6.0Tesla)，通道为亚音速($M=0.8$)及超音速($M=1.2$)，法拉第及斜联型等不同的情况作计算比较。此外，为方案比较，还进行了与5万千瓦汽轮发电机组相配的MHD发电机性能计算分析。

性能计算是在中科院电工所的VAX-11和计算中心的IBM 4341计算机系统上进行的。通道计算用改进的美国UTSI准一维流程序，热输入参数应用NASA SP273程序计算。总体设计参数如下(初选预定值)：

$$Q_{\lambda} \sim 135 \text{ MW}$$

$$\phi = 0.38 \text{ Wt\%}$$

$$T_p = 650^\circ \text{C}$$

$$\alpha \Sigma = 0.9$$

$$\Delta Q/Q = 7\% (\text{燃烧室及喷管})$$

$$P_k \leq 4.5 \text{ atm}$$

$$G_{\text{coal}} = 4.712 \text{ kg/s}$$

$$G_{\text{air}} = 19.613 \text{ kg/s}$$

$$G_{O_2} = 4.712 \text{ kg/s}$$

$$G_{\text{seed}} = 0.618 \text{ kg/s}$$

$$G_{\Sigma} = 29.715 \text{ kg/s}$$

$$K = 1\%$$

$$G_{\text{coal}} \text{ 固/气} \sim 50$$

我们首先进行了超音速($M=1.2$)通道在磁场强度峰值为4.5Tesla和亚音速($M=0.8$)在磁场强度峰值为6.0Tesla的情况下的计算。如表4所示,在磁场为4.5T的超音速通道的发电功率要比高磁场($B=6.0T$)下的亚音速通道的发电功率略低一些,在本设计中约15%。由于高磁场力提高了通道的相互作用,所以通道的有效长度也比低磁场时要短一些(前者通道有效长度4.3m,而后者为5.8m)。只从通道本体的投资来说会省一些,但是由于亚音速通道需要高磁场($B=6.0T$),大大增加了超导磁体的投资和技术难度,所以综合起来看,对于万千瓦级MHD发电改建电厂来说,希望投资少、技术难度小和运行风险小而又能满足基本要求的方案,所以选超音速通道在4.5T峰值磁场下的运行作为推荐方案。

由于斜联通道的负载系统简单和造价低,在万千瓦级以上MHD发电机的方案比较中与性能最佳的法拉第型发电机有很强的竞争能力。为此我们计算了斜连 45° 角单负载的斜联通道性能。在表5中列出了它们之间的性能比较。数据比较表明,在相同的热输入和通道入口条件下斜联通道与法拉第通道的性能接近,即使在单负载的情况下,斜联通道的发电功率仅比法拉第型低3%,而其负载系统比较简单和造价低,在负载运行变化时比法拉第型稳定。因此在万千瓦级以上MHD发电机方案中是应当重视的一个方案。当然从通道的电动特性来看,斜联通道要求通道内部有更高的绝缘水平。

表6列出了与常规电厂5万千瓦机组相配合的MHD发电机的计算结果。从表中数据看出当热输入增加一倍时,MHD发电功率增加134%,焓取出率也提高2%左右,由此也可看出MHD发电机规模愈大,效率愈高,几乎呈线性增大,这可为扩大规模的MHD改建电厂方案提供初步参考数据。

五、讨 论

本文介绍了对我国万千瓦级燃煤MHD发电中间试验电站的概念设计