

# 高温气冷堆氦气透平循环发电系统中的立式高速减速箱研究

盛选禹, 朱书堂, 张征明, 王捷, 于溯源

清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084

**[摘要]** 在高温气冷堆氦气透平和发电机之间布置减速箱, 作用是将氦气透平的高转速降低到发电机转子所需要的额定转速。本文介绍了由一对高速齿轮、低速齿轮啮合传动组成的一级圆柱齿轮减速方案。方案的优点是结构简单、制造方便、运行可靠性高; 缺点是设备体积大、输出和输入不同心。该减速箱方案避免了在能量转换单元中使用大功率变频器和高速电机, 节约了制造成本, 但同时在系统中引入了润滑油系统, 增加了一定的风险。

**[关键词]** 减速箱; 高速齿轮; 高温气冷堆

**[中图分类号]** TL362

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1000-7857(2007)08-0030-04

## Study on Vertical High Speed Gearbox in HTGR Helium Gas Turbine System

SHENG Xuanyu, ZHU Shutang, ZHANG Zhengming, WANG Jie, YU Suyuan

*Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

**Abstract:** In a High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) system, the gearbox is installed between Helium turbine and dynamotor, to reduce the high speed of gas turbine to a normal speed required by dynamotor rotor. Single reduction cylindrical gearbox is used with a pair of gears for high speed and normal speed regulations, respectively. The scheme is simple in structure, easy for manufacture and with high reliability. The disadvantage of such a scheme is the heaviness, and with the input and output centers being at different positions. In the gearbox, high speed electric generator and high power transducer can be avoided, to reduce the investment, instead by using a lubricant box, which increases the risk of HTGR Helium gas turbine system.

**Key Words:** gear box; high speed gear; high temperature gas cooled reactor

**CLC Number:** TL362

**Document Code:** A

**Article ID:** 1000-7857(2007)08-0030-04

### 0 引言

世界上已经建造的高温气冷堆原型研究堆及示范电站都采用朗肯循环(Rankine Cycle)蒸汽透平发电系统, 这样的系统由两个热力回路组成, 蒸汽发生器在两个回路之间传输热量。其工作原理如下: 一回路中, 氦气流经反应堆堆芯, 冷却反应堆的同时被加热; 高温氦气流经蒸汽发生器一侧, 把热量传输给另一侧的水/水蒸气; 被蒸汽发生器冷却后的氦气, 通过氦气鼓风机加压, 流入反应堆堆芯, 形成一回路循环; 二回路中, 蒸汽发生器产生的水蒸气进入蒸汽透平膨胀做功; 蒸汽透

平乏气被冷却器冷凝成水, 由高压水泵加压后, 送入蒸汽发生器, 形成二回路循环<sup>[1,2]</sup>。蒸汽透平发电降低了高温堆所提供能源的品质, 发电效率不高(低于40%), 系统复杂导致设备投资较高。

高温气冷堆的发展方向是采用布雷登循环(Brayton Cycle)的氦气透平直接循环发电, 理论效率接近50%。工作原理如下: 高压氦气流经反应堆堆芯被加热后进入透平膨胀做功, 将热能转化为透平旋转机械能, 带动发电机发电同时也带动压气机压缩氦气; 透平尾气流经回热器低压侧后将热量传输给高压侧冷氦气,

收稿日期: 2007-02-05

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2005A511010)

作者简介: 盛选禹, 男, 北京市海淀区清华大学核能与新能源技术研究院, 副教授, 研究方向为反应堆结构设计、摩擦学;

E-mail: xuanyu@tsinghua.edu.cn

然后进入预冷器被降温;低温低压氦气经过带有间冷器的压气机组后被压缩成高压氦气,流经回热器高压侧被预热,然后再进入反应堆堆芯被加热,完成整个氦气循环。透平发电机组中,透平压气机以优化转速运行保证其效率,发电机转速与电网频率保持一致,减速箱将输入端透平压气机转速降低到电网额定频率水平输出到电机转子,同时传输透平轴功。在高温气冷堆氦气透平与发电机之间布置了减速箱,其作用是将氦气透平的高转速降低到发电机转子所需要的额定转速。减速箱是能量转换单元中的一个关键部件<sup>[3]</sup>。本文介绍了一个一级圆柱齿轮减速方案。

### 1 氦气透平循环方案简介

10 MW 高温气冷实验堆氦气透平发电系统的热力循环图如图 1 所示。高压氦气经反应堆堆芯被加热,然后高温高压氦气直接冲击透平膨胀做功,透平带动发电机发电,同时也带动压气机压缩氦气。

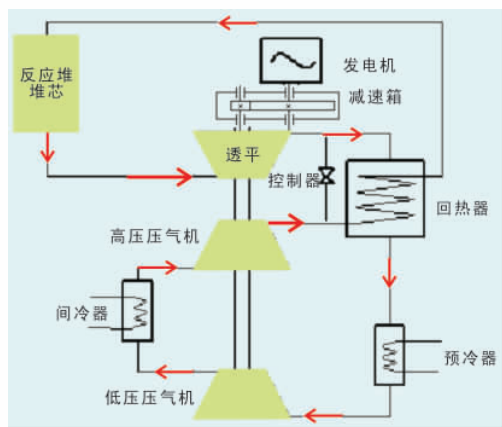


图 1 氦气透平发电系统热力循环示意图

Fig. 1 Thermal cycle of helium turbine power conversion unit

在能量转换单元中,透平和发电机装置采用立式一体化布置;各部件从下向上的顺序为低压压气机、高压压气机、透平、挠性联轴节、减速器(减速箱组件、挠性联轴节组件、推力轴承组件)和发电机。

在氦气透平与发电机之间的减速箱将氦气透平的高转速降低到发电机转子所需要的额定转速。具体为氦气透平转速 15 000 r/min、发电机转速 3 000 r/min。若不采用减速箱设备,则透平直接联接发电机,发电机必须是 15 000 r/min 的高速电机,并且是立式结构,市场上没有现成的产品,需要研制。同时,为了与电网运行频率匹配,需要将高速电机的发电频率经大功率变频器变频后才能进入电网。在氦气透平发电系统中采用减速箱后,避免了在系统中使用高速发电机,也避免了使用大功率变频器对设备进行变频调速,可以节约制造费用。其不足之处是在能量转换单元中引入了润滑油系统。

减速箱的传输功率为 2 500 kW;输入的额定转速为 15 000 r/min,输出额定转速为 3 000 r/min;最高输入转速为 18 000 r/min,最高输出转速为 3 600 r/min;机械效率为 98%;要求的润滑油泄漏率为 5 g/d;工作环境为氦气,环境压力为 0.7 MPa;环境温度为 65℃。

高温气冷堆采用肩并肩的布置方式,即压力壳和能量转换单元是并列布置的。采用这种肩并肩结构,氦气透平、减速箱和发电机之间都必须采用立式布置结构。对市场调研发现,目前所有高速齿轮减速箱都是卧式结构布置,未见立式结构。立式结构的主要困难是减速箱改为立式结构后,很难对箱体内部的润滑油进行密封,因为润滑油可以直接从轴端泄漏;而对于卧式结构,因为下部是箱体,密封比较容易保证。

本减速箱与普通工业上使用的标准减速箱相比,区别在于转速较高、传递功率较高,同时整个箱体为立式布置,即齿轮的中心轴线垂直于地面;传统的减速箱一般为水平布置,齿轮的中心轴线平行于地面。

### 2 一级圆柱齿轮减速箱方案

一级圆柱齿轮减速箱的主要零件是一对啮合的齿轮。高速齿轮的输入端与氦气透平的输出端由挠性联轴节联接在一起(见图 2)。高速齿轮直径小、转速高;低速齿轮转速低、直径大。两个齿轮立式并排布置。在设计时,考虑到齿轮传递功率较高,因此设计的齿轮较宽。为保证两个齿轮之间的啮合,齿轮中间部分没有齿,这样啮合的时候是上下两段啮合,啮合效果更好(见图 3)。

减速箱各部件在本文图中的代码如下:1 为前半箱体,2 为后半箱体,3 为下支撑板,4 为储油箱,5 为高速齿轮轴,6 为低速齿轮,7 为低速轴,8 为第一高速轴承,9 为第二高速轴承,10 为端盖,11 为第一推力轴承,12 为第二推力轴承,13 为密封通盖,14 为迷宫密封结构,15 为挡油环,16 为甩油盘,17 为喷油管,18 为进油管,19 为回油管,20 和 21 为供油槽。

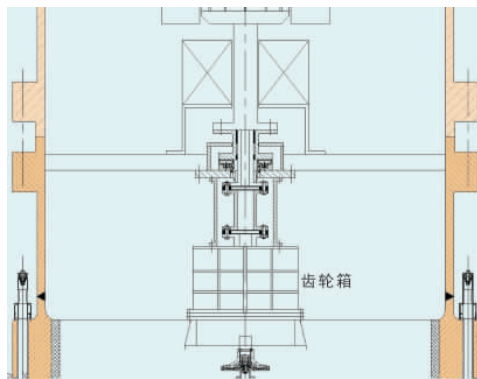


图 2 减速箱在能量转换单元中的布置

Fig. 2 Layout of gearbox device in power conversion unit

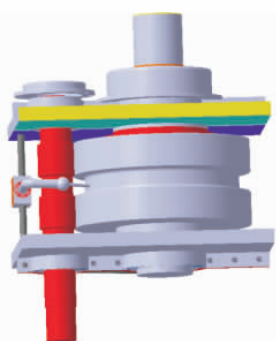


图3 一级圆柱齿轮减速箱齿轮啮合部分三维示意图

Fig. 3 3-dimensional sketch of gear part of single stage cylindrical gearbox

减速箱体结构分为3个部分:前半箱体1、后半箱体2、下支撑板3和高速齿轮轴5(见图4)。前半箱体1与后半箱体2之间通过螺栓连接,前半箱体1和后半箱体2都安装在下支撑板3上。下支撑板3上开有螺栓孔,可以将整个减速箱固定在安装位置。前半箱体1与后半箱体2本身自成一个封闭结构,即下支撑板3与箱体本身的下底面有一定距离,这个空间构成了储油箱4。

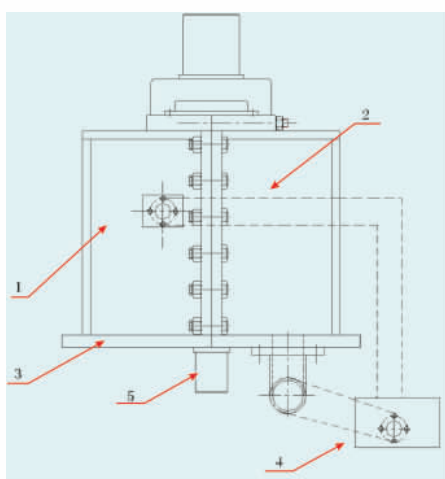


图4 减速箱外观图

Fig. 4 Design sketch of gearbox

减速箱的内部结构及减速箱润滑系统结构见图5和图6。图6为减速箱的俯视图。高速齿轮轴5是一个完整的轴,齿形在轴上加工,中间断开,以便高速传动过程中齿轮之间配合更紧密。高速齿轮轴5的方向为垂直于地面方向。高速轴5的下端伸出到箱体外,与其他高速输入相连接。低速轴7与低速齿轮6以过盈配合的型式装配在一起,与高速齿轮轴5平行布置,低速齿轮6与高速齿轮轴5啮合在一起,高速齿轮轴5带动低速齿轮6转动。由于高速齿轮轴5上的齿轮齿数少,低速轴7上低速齿轮6的齿数多,因此可以将高速转动速度降低。低速轴7随低速齿轮6一起转动,因此低速轴7输出的速度也降低。

在高速齿轮轴5的两端,通过第一高速轴承8和

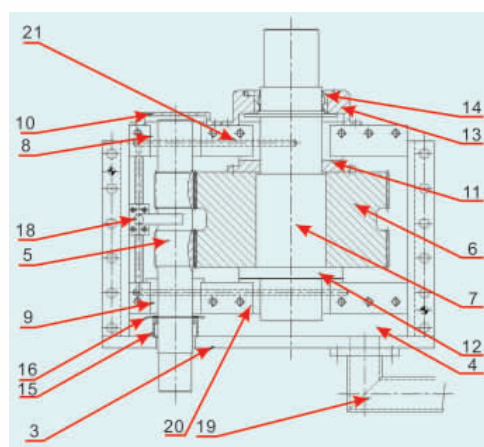


图5 减速箱内部结构纵剖面

Fig. 5 Vertical internal section of gearbox

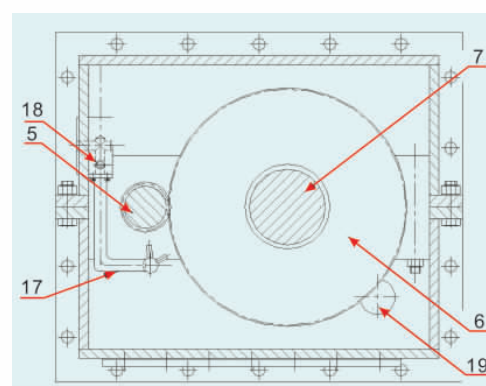


图6 减速箱内部结构横剖面

Fig. 6 Horizontal internal section of gearbox

第二高速轴承9固定在箱体上。高速轴承的外圈固定在箱体上,静止不动,内圈固定在高速齿轮轴5,与高速齿轮轴5一起转动。在高速齿轮轴5上末端安装有端盖10,其作用是封闭高速齿轮轴5上端,防止润滑油从此处泄漏。

在低速轴7的两端也安装有两个轴承——第一推力轴承11和第二推力轴承12。推力轴承转子与低速轴7固定在一起随轴转动,静子固定在箱体上。在低速轴7的上末端安装有密封通盖13,密封通盖内安装有通用的迷宫密封结构14,其作用是防止润滑油从该处泄漏到减速箱外。

高速齿轮轴下端密封的局部放大见图7。在高速齿轮轴5穿过下支撑板3的位置,安装有挡油环15,其作用是防止润滑油从下支撑板3的开孔处泄漏。由于挡油环15上端开有通孔以便高速齿轮轴5穿过,为防止润滑油从该开孔处泄漏,在开孔上端位置,在高速齿轮轴5安装了电油盘16。

由于齿轮的转速非常高,啮合部位需要强制润滑。在啮合部位安装有喷油管17,箱体上安装有进油管18,在箱体内部上下两端都开有供油槽20和21,分别



对上下两端的轴承进行润滑。在下支撑板 3 上安装有回油管 19, 将润滑油从减速箱引出。

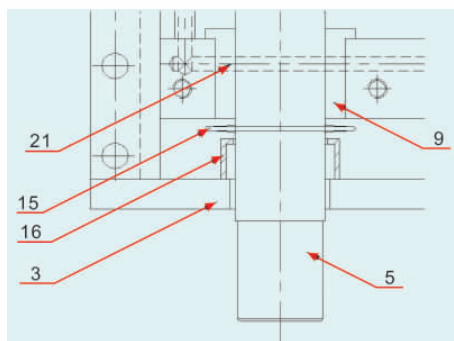


图 7 减速箱高速轴下端密封结构图

Fig. 7 Sealing part at the lower end of high speed axle

### 3 结论

立式一级圆柱齿轮减速箱方案, 由一对高速齿轮和低速齿轮啮合传动组成, 其优点是结构简单、制造方便; 设备中只有两个齿轮, 发生故障的概率低, 运行可靠性高。同时由于只有一对啮合齿轮传动, 由机械啮合所引起的机械损失小、设备机械效率高。由于减速比为 5, 因此两个齿轮的节圆半径相差较大, 低速齿轮的直

径大, 带来的缺点是设备体积大。另外, 由于低速齿轮的中心轴与高速齿轮的中心轴是平行排列的, 因此输入和输出轴不同心。

总之, 在氦气透平发电系统中采用减速箱, 避免了在系统中使用高速电机, 也避免了使用大功率变频器对设备进行变频调速, 可以节约制造费用, 其不足之处是在能量转换单元引入了润滑油系统。

### 参考文献 (References)

- [1] WU Zongxin, LIN Dengcai, ZHONG Daxin. The design features of the HTR-10 [J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 218 (1-3): 25-32.
- [2] ZHANG Zuoyi, WU Zongxin, SUN Yuliang, et al. Future HTGR developments in China after the criticality of the HTR-10 [J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 218: 249-257.
- [3] 孙玉良, 张占奎, 张银广. 10 MW 高温堆气体透平方案初探 [J]. 高技术通讯. 2001, 11: 99-102.  
SUN Yuliang, ZHANG Zhankui, ZHANG Yinguang. Preliminary study on the HTR-10 gas turbine cycle design [J]. High Technology Letters, 2001, 11: 99-102.

(责任编辑 王 芷)

### ·科技智力游戏·

## 轻松一刻——九宫填数

该游戏的填数规则为: ① 在 9×9 的大九宫格内, 出题者已给出若干数字, 其他宫位的数字空留, 需要读者根据逻辑推理填写剩下空格里的数字; ② 填满数字的大九宫里, 数字之间的关系必须满足: 每一行与每一列都有 1~9 的数字, 每个实线所标 3×3 的小九宫格里也有 1~9 的数字, 且每个数字在每行、每列及每个小九宫格里只能出现一次, 即既不能重复也不能缺少; ③ 在满足前 2 个条件的基础上, 还需要满足在 9×9 大九宫格的两条对角线上, 均有 1~9 的数字, 且只能出现一次。答案请见下期。

九宫1 难度系数 ◆◆◆◆◇◇

|   |   |   |   |   |  |   |   |   |
|---|---|---|---|---|--|---|---|---|
| 9 |   |   |   |   |  | 3 | 1 |   |
| 8 | 3 |   |   |   |  | 4 |   | 6 |
|   | 1 | 2 | 3 | 8 |  |   | 5 |   |
|   | 2 |   |   |   |  | 1 |   |   |
|   | 4 |   |   |   |  | 2 |   |   |
|   | 5 |   |   |   |  | 7 |   |   |
|   | 2 | 1 | 6 | 4 |  |   | 7 |   |
| 7 |   | 9 |   |   |  | 6 |   | 2 |
| 6 | 3 |   |   |   |  |   | 8 |   |

九宫2 难度系数 ◆◆◆◆◇◇

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 2 |   | 7 |   |   | 5 | 9 |   |
|   | 5 | 2 |   |   |   |   | 9 | 8 |
|   |   |   |   |   |   | 6 |   |   |
|   | 1 |   |   | 9 |   |   | 3 |   |
| 7 |   |   |   |   |   |   |   | 6 |
|   | 9 |   | 6 |   |   |   | 5 |   |
|   | 5 |   |   |   |   |   |   | 9 |
| 2 |   | 9 |   | 1 | 7 |   |   |   |
| 8 | 7 |   | 2 |   | 3 | 1 |   |   |

### 上期答案

九宫1 难度系数 ◆◆◆◆◇◇

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 6 | 4 | 8 | 2 | 3 | 1 | 9 | 5 |
| 1 | 2 | 9 | 4 | 5 | 7 | 8 | 3 | 6 |
| 3 | 5 | 8 | 1 | 6 | 9 | 4 | 2 | 7 |
| 9 | 7 | 6 | 3 | 8 | 1 | 2 | 5 | 4 |
| 8 | 4 | 1 | 2 | 9 | 5 | 6 | 7 | 3 |
| 5 | 3 | 2 | 6 | 7 | 4 | 9 | 1 | 8 |
| 6 | 1 | 7 | 9 | 3 | 8 | 5 | 4 | 2 |
| 4 | 8 | 3 | 5 | 1 | 2 | 7 | 6 | 9 |
| 2 | 9 | 5 | 7 | 4 | 6 | 3 | 8 | 1 |

九宫2 难度系数 ◆◆◆◆◇◇

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 9 | 7 | 5 | 1 | 8 | 6 | 2 | 3 | 4 |
| 2 | 4 | 6 | 5 | 7 | 3 | 8 | 1 | 9 |
| 3 | 8 | 1 | 2 | 4 | 9 | 7 | 5 | 6 |
| 1 | 9 | 4 | 6 | 5 | 8 | 3 | 2 | 7 |
| 8 | 2 | 7 | 4 | 3 | 1 | 9 | 6 | 5 |
| 5 | 6 | 3 | 9 | 2 | 7 | 1 | 4 | 8 |
| 7 | 3 | 2 | 8 | 6 | 4 | 5 | 9 | 1 |
| 4 | 5 | 9 | 7 | 1 | 2 | 6 | 8 | 3 |
| 6 | 1 | 8 | 3 | 9 | 5 | 4 | 7 | 2 |

(供稿 李建才 责任编辑 赵佳)