

SF₆气体及SF₆ 气体绝缘变电站的运行

黎明 黄维枢

水利电力出版社

前 言

SF₆气体是一种优良的绝缘介质和灭弧介质，它具有无毒、不可燃、绝缘强度高和灭弧能力远远超过一般电介质的特点。因而，SF₆气体绝缘设备占地面积小、无火灾危险，极大地提高了电力系统的可靠性。SF₆气体绝缘设备不仅在高压和超高压领域中得到了广泛的应用，而且在中压和特高压领域也占有越来越重要的地位。特别值得注意的是，SF₆气体绝缘变电站（GIS）的出现和应用已经打破了传统变电站的概念，为紧凑型高电压、大容量新式变电站的发展开拓了道路。

本书是在丰硕的科研成果和丰富的运行经验的基础上，全面系统地阐述SF₆气体的基本特性和GIS的试验、运行和维修方法。全书内容分为两大部分。第一部分简述了SF₆气体的物理性质、化学性质、传热特性、击穿特性和SF₆气体中固体绝缘件的沿面闪络特性以及SF₆气体的灭弧性能。第二部分论述了SF₆气体绝缘变电站的特点、GIS的结构原理、GIS的现场试验、运行中SF₆气体的监督管理、GIS的常见故障、内部故障的定位及检修。作者力图将最新的基础研究成果和气体绝缘设备的运行实践有机地融为一体，奉献给读者。

本书的绪论、第一章～第三章、第四章（除第五节外）、第六章、第七章和附录由黎明编写，第二章及第三章的一部分、第四章的第五节和第五章由黄维枢编写，并由黄维枢统稿。本书由西安交通大学邱毓昌教授负责审阅。

在编写本书过程中，姚抚城、**林贤流**、邱毓昌、王焜明同志给予了很大的支持和帮助，在此一并表示谢意。

由于我们水平所限，书中难免会出现错误，欢迎读者批评指正。

黎明 黄维枢

1992年6月25日

目 录

前 言

绪 论	1
第一节 高压电介质的发展	1
第二节 SF ₆ 气体绝缘设备	3
参考文献	11
第一章 SF ₆ 气体的性质	12
第一节 SF ₆ 气体的物理性质	13
第二节 SF ₆ 的化学性质	20
第三节 SF ₆ 的传热特性	22
第四节 SF ₆ 气体的电气特性	25
参考文献	28
第二章 SF ₆ 气体的绝缘性能和GIS中绝缘子 的沿面闪络	29
第一节 SF ₆ 气体的击穿特点	29
第二节 SF ₆ 气体绝缘的冲击特性	44
第三节 影响SF ₆ 气体绝缘强度的因素	54
第四节 影响绝缘子闪络的因素	69
第五节 SF ₆ 混合气体的绝缘特性	77
参考文献	82
第三章 SF ₆ 气体的灭弧性能	85
第一节 SF ₆ 气体电弧的基本特性	85
第二节 SF ₆ 气体气吹电弧的开断	93
第三节 SF ₆ 气体的优良灭弧性能	98
第四节 SF ₆ 混合气体的灭弧特性	99

参考文献	102
第四章 SF ₆ 气体绝缘变电站 (GIS)	104
第一节 概述	104
第二节 对GIS的要求	107
第三节 GIS的设计特点	112
第四节 GIS主要元件的结构型式	129
第五节 GIS的过电压与接地	146
第六节 GIS的安装调试	154
参考文献	157
第五章 GIS的现场试验	159
第一节 GIS现场试验的必要性及试验项目	159
第二节 GIS的主回路耐压试验及局部放电测量	160
第三节 主回路电阻的测量	176
第四节 投运试验	177
参考文献	178
第六章 SF ₆ 气体的质量监督和管理	180
第一节 SF ₆ 气体的制备和新气的质量标准	180
第二节 运行中SF ₆ 气体纯度的管理	183
第三节 SF ₆ 气体分解产物及其毒性	185
第四节 SF ₆ 气体中痕量杂质的分析检测技术	201
第五节 运行中SF ₆ 气体含水量的测量和控制	212
第六节 SF ₆ 气体中分解产物和水分的吸附净化	232
第七节 SF ₆ 气体的回收净化处理	243
第八节 SF ₆ 气体密度的监测和检漏	245
参考文献	262
第七章 GIS的运行和维修	264
第一节 GIS的常见故障	264
第二节 GIS的日常巡视和检查	267
第三节 GIS内部故障定位技术	272

第四节	GIS的检修.....	279
第五节	GIS运行维护中的安全防护.....	287
第六节	辅助设备和测试仪器.....	291
	参考文献.....	292
附录一	气体压力国际单位与旧单位换算表.....	294
附录二	SF ₆ 气体含水量的单位换算.....	295

绪 论

第一节 高压电介质的发展

随着社会经济的发展,电能的需求量日益增加,从而加速了大型火电站、水电站及核电站的发展和建设。由于一次能源的地理位置的限制以及环境保护方面的需要,这些大型电站的建设往往远离负荷中心,从而促使了电力系统向大容量、长距离、超高压方向发展。

1910年左右,交流输电系统的最高电压为100kV,大约从1920年起,全世界各地才陆续出现了更高电压的输电系统,输电容量为50MW左右,输电距离约为50km。1920~1950年间,许多大型水电站建成,200~300kV的输电系统可以将250MW的电能输到400km以外的负荷中心。1952年,瑞典投运了世界上第一条400kV输电线路。在六十年代,500kV、750kV的超高压输电系统相继出现,输电容量达到1000MW,输电距离超过了1000km。高于1000kV的电压等级是输电系统的下一个目标,预计输电容量可达10000MW。

超高压输电系统的迅速发展是以高压电气设备的不断发展和更新为基础的,而高压电气设备的发展则以新型绝缘介质和灭弧介质的发现及应用为前提。在众多的高压电介质中,空气、绝缘油和SF₆气体可以说是应用最为广泛的三大电介质。

一、空气

空气是应用最为广泛的气体介质,其相对的介电常数为

1，在均匀电场强度中绝缘强度大约为 3kV/mm 。压缩空气是良好的绝缘和灭弧介质，因而在断路器中得到了应用。这种介质是以其自然存在的形态提供使用的，而且不产生任何有害于健康的副产物。与其它介质相比，这种介质的补充、更新或再处理的费用很低。因而，可以采用在运行过程中允许其消耗的设计原理，同时，空气的流动性好，易于输送和使用。但是，压缩空气断路器结构复杂、价格昂贵，并且需要配置空压机和管路系统，维护工作量大。因此，除在大容量发电机机端断路器等部分领域略占优势外，压缩空气断路器一直未能取代油断路器。

二、绝缘油

绝缘油是高压电气设备传统的绝缘介质和灭弧介质。绝缘油的相对介电常数为2.2，在试油杯中绝缘强度大约为 30kV/mm ，电力变压器几乎都是以油为绝缘介质的，这不仅是因为绝缘油比空气的绝缘强度高，而且绝缘油的比热容也比空气大一倍，液态的绝缘油受热后具有对流特性。因而，绝缘油在变压器内除充当绝缘介质外还兼作冷却介质。在油断路器中，油既是绝缘介质又是灭弧介质。在开断电流时，绝缘油在电弧的作用下分解，形成以氢为主体的高温气体，积贮压力达到一定值后形成气吹。由于氢的热导率极高，对电弧具有良好的冷却去游离作用，使之在电流过零时熄灭，同时使断口间具有良好的绝缘恢复特性。正是由于绝缘油具有如此优良的绝缘性能和灭弧性能使得油断路器在高压断路器的发展史上长期占居支配地位。绝缘油亦广泛用作电力电缆的绝缘介质。但是，绝缘油的最大弱点就是其具有可燃性，在电力系统中由于绝缘油引燃形成的火灾事故不胜枚举。

三、SF₆气体

随着电力需求量的不断增长和环境保护日益受到人们的关注，迫切需要发展高电压、大容量和结构紧凑的高压电气设备，因而必须寻求不可燃、抗老化的优良绝缘材料。SF₆气体能出色地满足这一需求。SF₆气体具有优良的绝缘性能，在均匀电场中SF₆气体的绝缘强度为气压相同的空气的2.5倍左右，当气体压力为0.2MPa时，SF₆气体的绝缘强度相当于绝缘油。同时，SF₆气体具有优良的灭弧性能，其灭弧能力为空气的数十倍。

SF₆气体于1900年问世，1940年开始用作绝缘介质，1952年首次用作灭弧介质。1965年，SF₆气体绝缘全封闭组合电器第一次公开展出。近三十年来，SF₆气体在高压电气设备中的应用取得了惊人的进展，SF₆气体绝缘设备已成为高压电气设备发展的方向，各种SF₆气体绝缘设备的技术参数已达到了很高的水平。目前，在我国63~500kV电力系统中，SF₆气体绝缘断路器和GIS的应用已经相当广泛^[1]。

第二节 SF₆气体绝缘设备

一、SF₆气体绝缘断路器（GCB）

由于SF₆气体具有优良的绝缘性能和灭弧性能，因而SF₆气体绝缘断路器（以下简称为SF₆断路器）具有尺寸小、重量轻、开断容量大、维修工作量小等优点，这是传统的油断路器和压缩空气断路器无法比拟的。世界上第一台SF₆断路器是在1955年由美国西屋电气公司制造的，其额定电压为115kV，断流容量仅为1000MVA。目前，SF₆断路器的最高工作电压已达765kV，开断电流可达80kA，额定电流可达

12000A。按照断路器总体布置的不同，SF₆断路器可分为落地罐式和支持瓷套式两种。

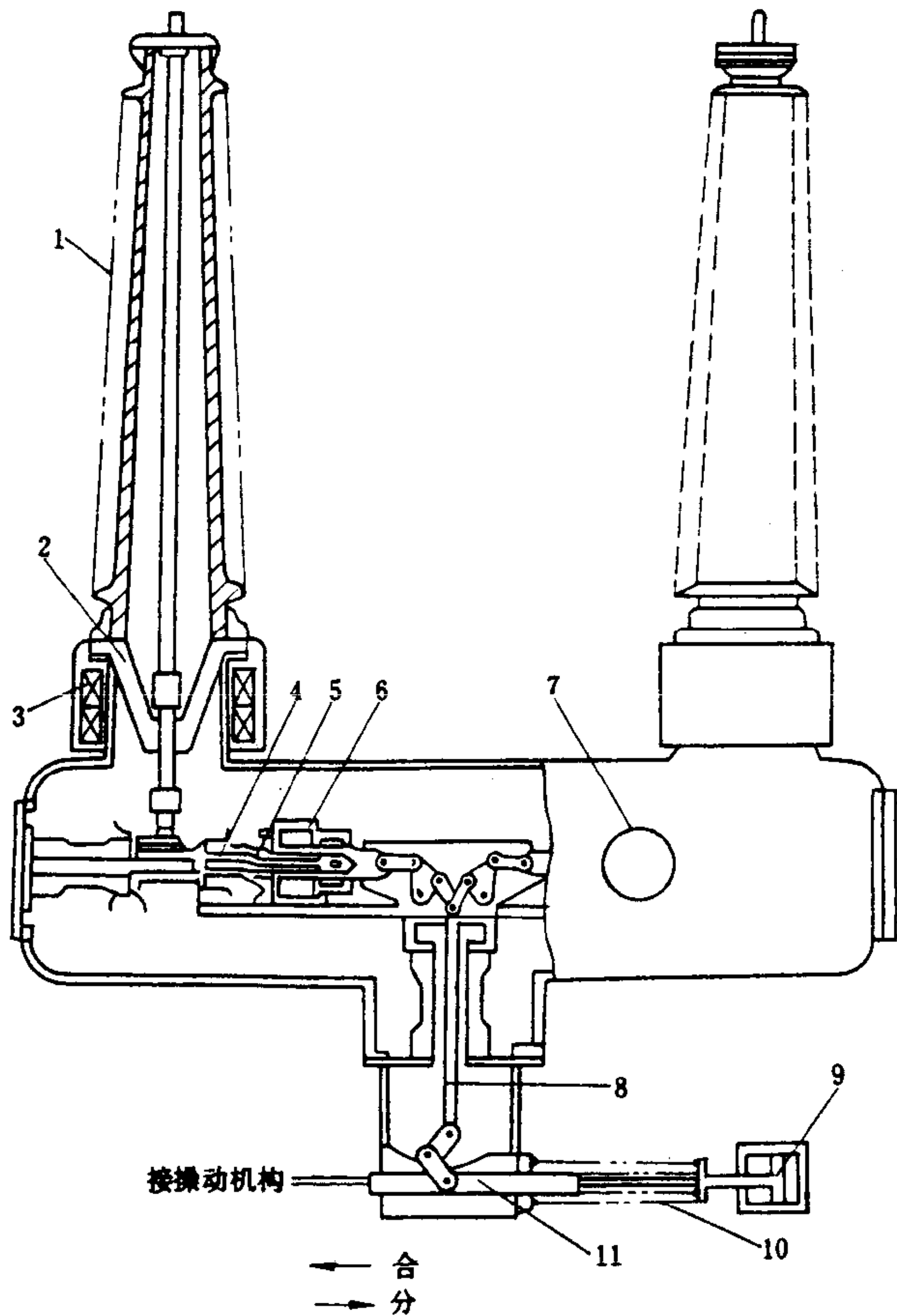


图 0-1 落地罐式SF₆断路器

1—套管；2—支持绝缘子；3—电流互感器；4—静触头；5—动触头；6—喷口工作缸；7—检修窗；8—绝缘操作杆；9—油缓冲器；10—合闸弹簧；11—操作杆

落地罐式SF₆断路器沿用了箱式多油断路器的总体结构方案，灭弧室和触点均装在接地的钢筒内，如图0-1所示，根据断路器额定电压的不同，串联灭弧室的个数也随之改变。为了均压，每个灭弧室还接有均压电容器，电流经SF₆套管引出。套管式电流互感器安装在内部。落地罐式SF₆断路器结构稳定，抗震能力强。

支持瓷套式SF₆断路器在外形上与压缩空气断路器及少油断路器极为相似。我国生产的SF₆断路器大多为这种型式，如图0-2所示。灭弧室安装在顶部的瓷套内，支持瓷套的下部与操作机构相连，通过支持瓷套内的绝缘拉杆带动触头完成断路器的分合操作。

按照断路器电流开断原理的不同，高压SF₆断路器可分为双压式和压气式两种。

早期生产的SF₆断路器采用双压式结构，在断路器内部设置两种压力系统。低压区的压力一般为0.3~0.5MPa，主要用作内部绝缘；高压区的压力一般为1.6MPa，仅限于吹弧用。为了防止高压区SF₆气体液化，必须增设电热装置。

压气式SF₆断路器结构简单，工作压力一般为0.6MPa，液化温度约为-30℃，开断时由于触头系统的压气室的运动使其内部的气体受到压缩，迫使这些SF₆气体流过灭弧喷口形成气吹灭弧。

近年来，SF₆断路器向中压10~35kV级发展，除了采用压气式灭弧室外，还出现了采用旋弧式和自能吹弧式灭弧室的新型SF₆断路器。

二、SF₆气体绝缘变电站（GIS）

GIS是由断路器、隔离开关、接地开关、互感器、避雷

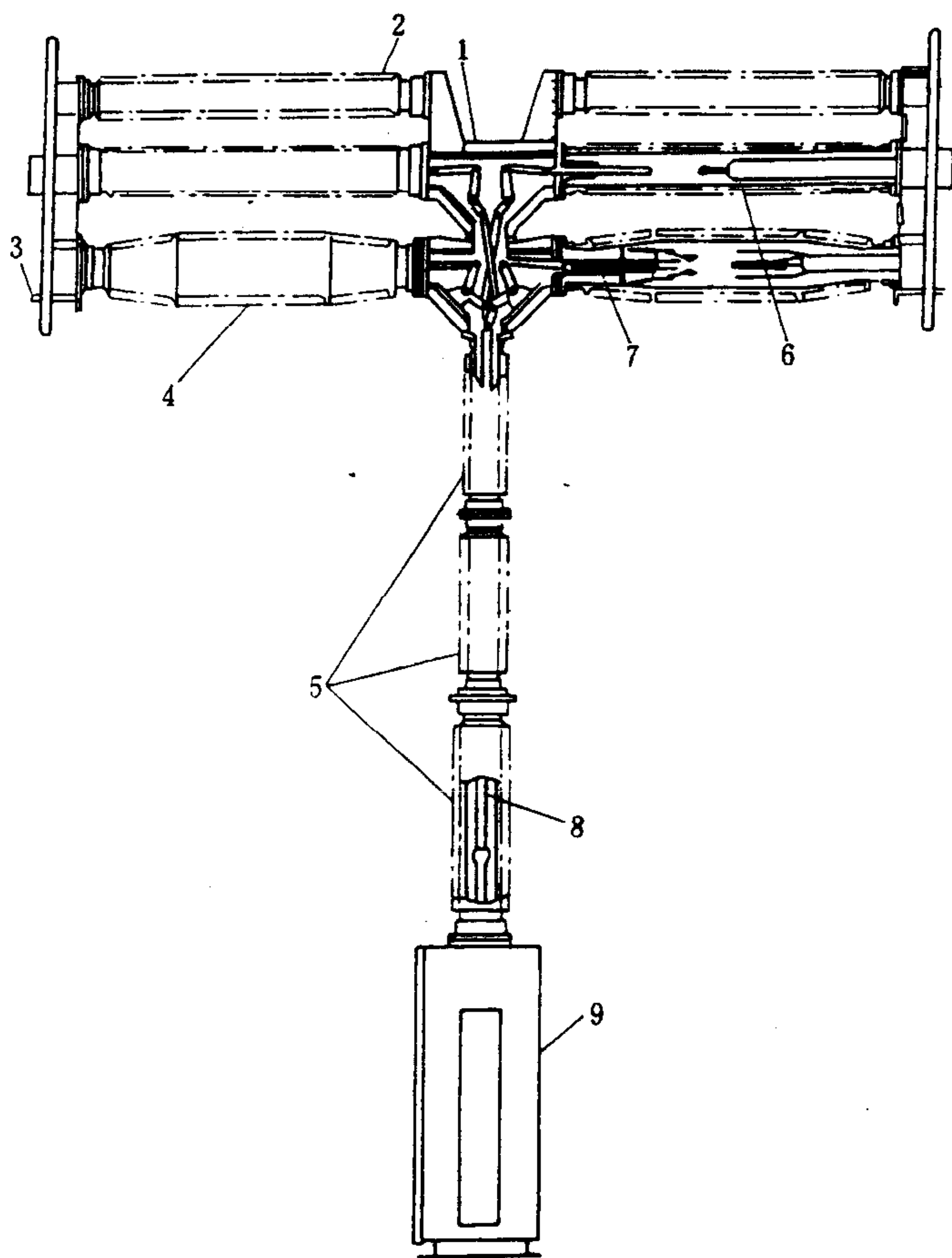


图 0-2 支持瓷套式SF₆断路器

1—上部箱体；2—并联电容；3—端子；4—灭弧室瓷套；5—支持瓷套；6—合闸电阻；7—灭弧室；8—绝缘拉杆；9—操作机构箱

器、母线、连接件和出线终端等元件组成的，全部封闭在金属接地外壳中。SF₆气体作为绝缘和灭弧介质，断路器以外各部分气压一般为0.3~0.45 MPa。

目前正式投入运行的GIS最高电压为800kV。第一台800kV GIS是由ABB公司制造的，于1988年1月在南非投入运行^[2]。该气体绝缘变电站包括变压器及电抗器等，占地30000m²。据报导，这个800kV GIS设计的关键问题是隔离开关的切换容量、瞬态过电压、绝缘配合、电磁干扰和电磁兼容等。

与常规变电站相比，GIS具有如下优点：

(1) 结构紧凑。220kV GIS占地面积仅为常规变电站的10%，500kV GIS占地面积仅为常规变电站的5%。这一点对于人口稠密区及山区水电站来说极为重要。

(2) 不受污染及雨、盐雾等周围环境因素的影响。因此，GIS特别适合于工业污染和盐雾严重的地区以及高海拔地区。

(3) 安装方便。GIS一般是以整体或若干单元组成，因此，可大大缩短现场安装工期。

三、SF₆气体绝缘电缆 (GIC)

到目前为止，最常见的电力传输方式仍然是架空线路。然而，由于某些局部条件的限制以及公众对环境日益增长的关注，使得地下输电系统成为另外一种重要的输电方式。传统的地下输电方式是采用油纸绝缘电缆。由于绝缘油和绝缘纸的介电常数大，充电电流也大，并且还随着线路长度的增加而成正比例地上升。因此，输电容量和临界长度受到限制。随着SF₆气体的广泛应用，SF₆气体绝缘电缆也于1969年问世，并于1971年投入运行。目前GIC的制造水平已达到800~1200kV。

GIC可分为刚性及挠性结构两大类，但在实际工程应用中大多数为刚性GIC。

刚性GIC有单芯和三芯两种结构。单芯GIC外壳一般均采用非磁性铝合金，而三芯GIC外壳可采用钢管，但为了降低外壳损耗，大多仍采用铝合金。GIC的工厂制造长度一般为12m或18m。GIC中导体采用铝管或铜管，导体的支撑绝缘采用环氧树脂绝缘子。绝缘子间距一般为3~6m，气体压力通常为0.25~0.45MPa。出线终端大多采用SF₆气体绝缘套管。在现场安装时，外壳的连接一般采用焊接法，焊接时应采取有效措施防止焊渣掉入GIC内部。为了避免由于热膨胀产生的过大应力，在适当部位应装设波纹管伸缩节。导体一般采用插接方式连接，这种连接方式可以补偿外壳与导体之间热膨胀的差异。刚性单芯GIC的典型结构图见图0-3。

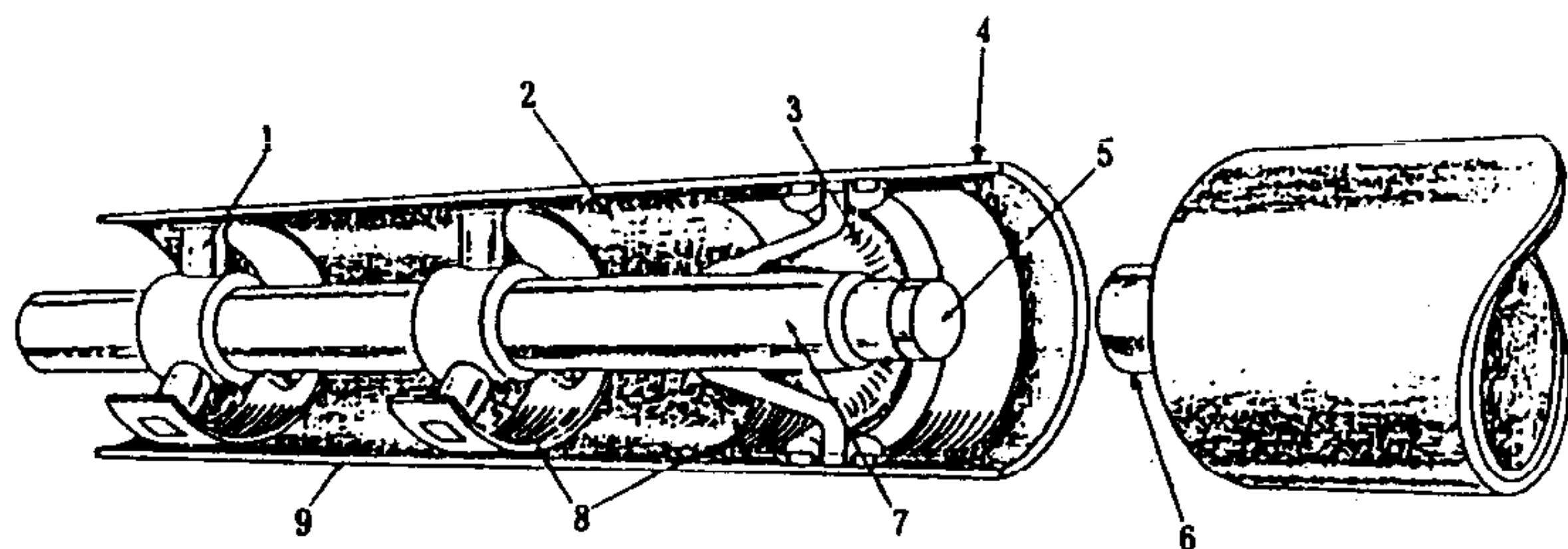


图 0-3 单芯GIC典型结构图

1—三柱式绝缘子；2—SF₆气体；3—锥形绝缘子；4—焊接处；5—镀银插头；6—触座；7—导体；8—杂质捕集器；9—外壳

挠性GIC的外壳及导体均采用波纹管状铝合金管，这就给GIC中电场分布的均匀性带来了不利的影响。支撑绝缘子采用很薄的盘形环氧树脂绝缘子，其间距约0.6m。挠性GIC的工厂制造长度可达80m，因此，现场安装工作量大为减少。

与常规电力电缆相比，GIC具有如下优点：

1) 由于 SF_6 气体的介电常数小 (≈ 1)，因而电容量小，充电电流小，临界长度大为增加。

2) GIC的介质损耗可忽略不计，同时由于导体较粗，电阻较小，从而可提高载流量和改善传热性能，其输电能力可与架空线路相媲美。

3) SF_6 气体绝缘套管结构简单，价格相对便宜。

4) GIC无火灾危险，安装时不受落差的限制。因此，GIC特别适合于场地狭窄、落差大的水电站使用。

四、 SF_6 气体绝缘变压器 (GIT)

随着城市建设的发展，高层建筑和地下建筑越来越多，用电需求量越来越大，对供电安全性的要求也越来越高。因此，迫切要求电力变压器具有防火防爆性能好、安装面积小、运行噪音低等性能。GIT正是为了满足这一要求而发展起来的。世界上第一台GIT是由美国GE公司于1956年研制成功的，其额定电压为69kV，额定容量2000kVA。目前，该公司已能生产345kV、50MVA的GIT。在我国，GIT已经研制成功并投入生产。图0-4所示为大型GIT的结构示意图。

按介质物态的不同，GIT可分为两大类：干式GIT和湿式GIT。

在干式GIT中， SF_6 既作为绝缘介质又作为冷却介质，气体压力一般为0.2MPa，也有采用更高气压的。GIT的冷却方式有自冷式、强迫气体循环自冷式和强迫气体循环风冷式。虽然 SF_6 气体的介电强度和导热性均远优于空气，但其导热性能却较变压器油差，其对流传热能力仅为变压器油的 $1/3 \sim 1/4$ 。因此，这类GIT的容量一般不超过40MVA。

在湿式GIT中， SF_6 主要用作绝缘介质，以保证变压器

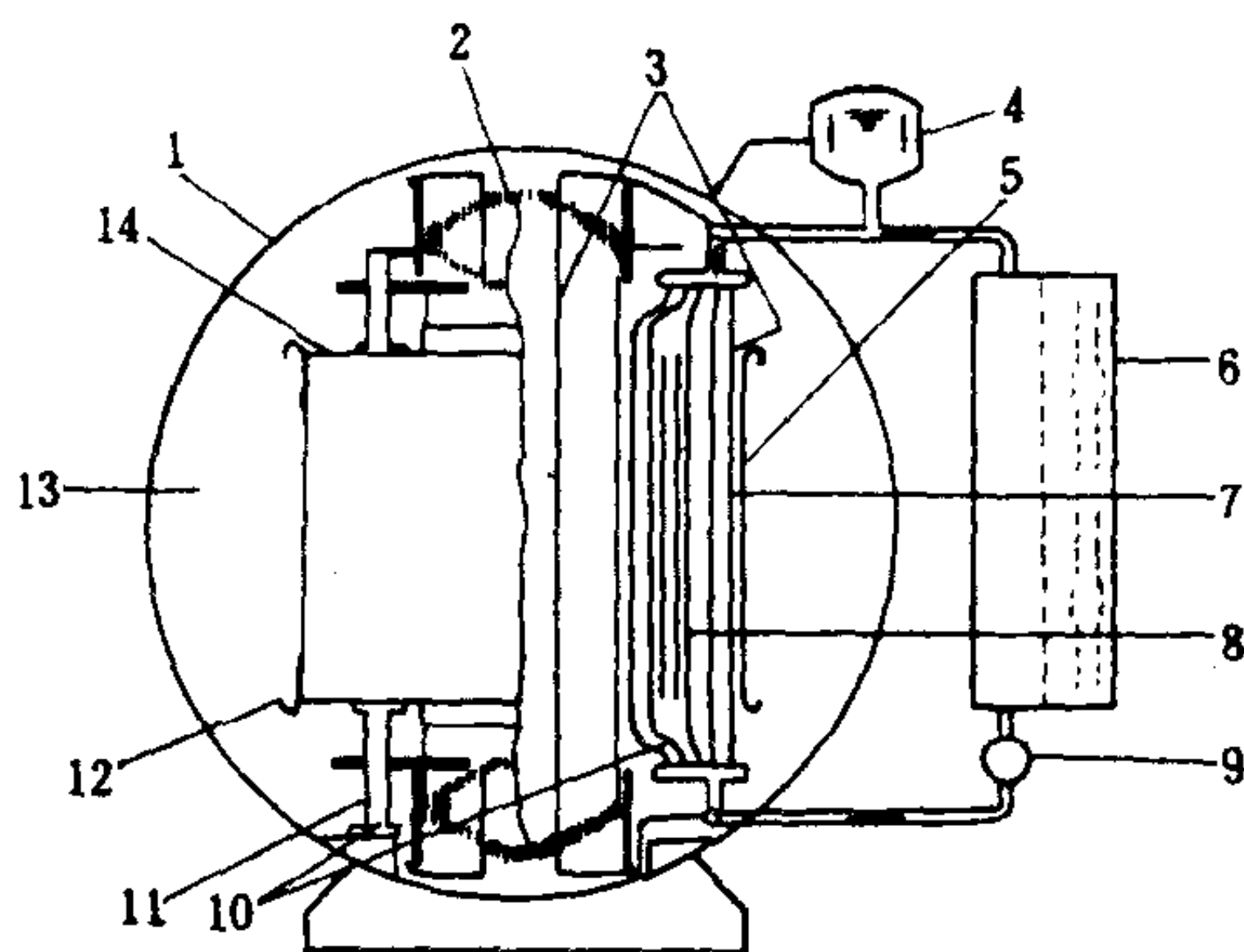


图 0-4 GIT的结构示意图

- 1—外壳； 2—铁芯； 3—冷却道； 4—压力均衡器；
 5—箔式绕组； 6—冷却器； 7—匝间绝缘； 8—主间
 隙绝缘； 9—泵； 10—外部绝缘； 11—绕组支撑； 12—高
 压屏蔽； 13— SF_6 气体； 14—线圈端部绝缘

在运行温度下及低温情况下均具有足够的绝缘强度，而GIT的散热主要靠碳氟化合物（例如 $\text{C}_8\text{F}_{16}\text{O}$ ）的物态变化， SF_6 气体的散热作用已降到无足轻重的程度。 SF_6 与碳氟化合物相容性好，它们混合后绝缘强度不但不会下降，还会有所提高。

变压器的绕组趋向于采用铝箔式绕组替代传统的饼式绕组和层式绕组。铝箔的宽度等于绕组的整体轴向高度，匝间绝缘采用两层厚度为 $25.4\mu\text{m}$ 的聚酯薄膜，它与 SF_6 气体代替了传统的油浸纸绝缘结构。

压缩 SF_6 气体隔音性能比绝缘油好，因此，运行时GIT的噪音水平低于油变压器。

参 考 文 献

- [1] 顾乐观等译, 高电压测试与设计, 重庆大学出版社, 1983。
- [2] Li Ming, Operational Experience With GIS in China, Sixth Int. Symp. on High Voltage Engineering, Paper 32.17, New Orleans, 1989.
- [3] V. W. Lohmann, R. Brinzer, World's First 800kV GIS Substation, Brown Boveri Rev., Vol. 74, No 10, pp. 554 ~ 564, 1987.