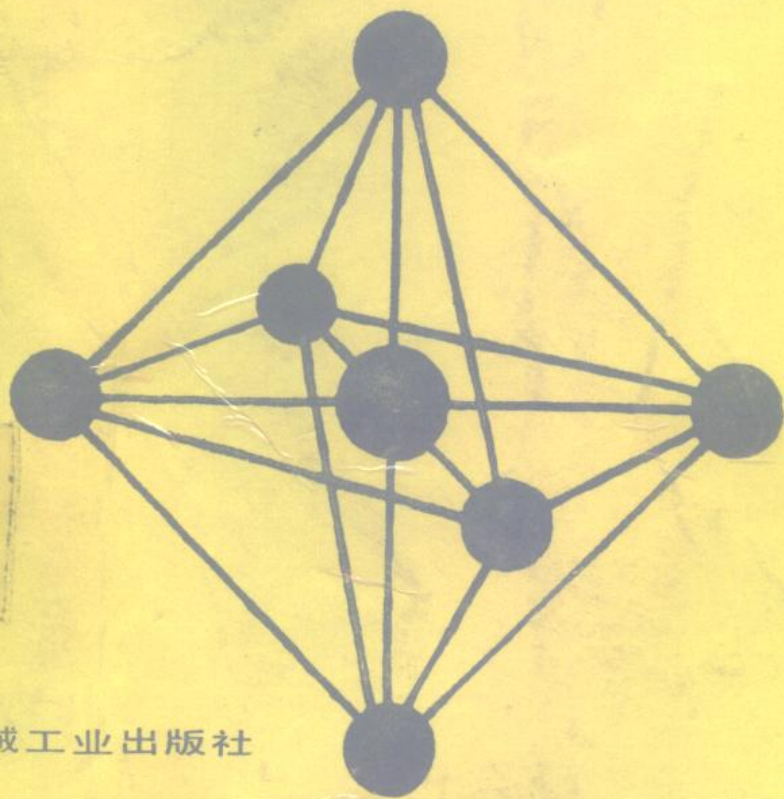


高压 SF₆ 开关设备的 设计与计算

[苏] A. H. 波尔捷夫 著



机械工业出版社

TM 561.3

329287

B78

高压 SF₆ 开关设备 的设计与计算

[苏]A.И.波尔捷夫 著
周峰会等 译

屈东海 校



机械工业出版社

DV9165

本书作者在汇集了欧美和苏联等国家许多电气公司和制造厂家多年的研究成果和设计经验以及大量文献的基础上，综述了SF₆气体特性及其在电气工业中的应用，专门论述了高压SF₆开关设备的结构和设计计算。第一章综述了SF₆气体的物理和化学特性及生产；第二章研究SF₆气体的电气强度和绝缘结构；第三章对SF₆和空气的灭弧能力做了比较；第四章研究SF₆断路器和负荷开关的设计原理；第五章研究封闭式配电装置的设计与计算问题。

本书可供从事高压配电装置设计、制造、安装和运行的工程技术人员使用，还可作为大专院校有关专业师生的参考书。

КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТ
ЭЛЕГАЗОВЫХ АППАРАТОВ
ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

А. И. ПОЛТЕВ

ЭНЕРГИЯ, ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

1979

高压 SF₆ 开关设备的设计与计算

[苏] А. И. 波尔捷夫 著

周峰会等 译

屈东海 校



责任编辑：李振标 责任校对：韩晶
封面设计：肖晴 版式设计：胡金瑛

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32 · 印张 9 1/8 · 字数 199 千字

1989年3月重庆第一版·1989年3月重庆第一次印刷

印数 0.001—1.970 · 定价：6.80元

ISBN 7-111-00755-7/TM·104

译 者 序

SF₆气体，作为绝缘介质，具有无毒、不易燃烧和绝缘强度远远超过一般绝缘介质的特点。它是一种负电性气体，可使开关设备中的电弧易于熄灭，既不产生截流过电压，也不产生重燃过电压。更重要的是，SF₆绝缘开关设备体积小，占地面积少，无火灾危险，能提高电力系统的可靠性。因此，SF₆绝缘电器在国际市场上颇受欢迎。目前，世界上几乎所有先进的电气公司都在竞相开发和研制SF₆断路器和SF₆封闭式组合电器。这些以SF₆为绝缘和灭弧介质的开关设备，不仅在高压和超高压领域中，而且在中压和特高压中得到了广泛的应用。

高压SF₆开关设备的设计与计算方面的专著在国内外很少见。本书的特点是，作者在汇集了欧美、苏联等国家许多电气公司和制造厂家多年来研究的成果和设计经验以及大量文献的基础上，综述了SF₆气体特性及其在电气工业中的应用，专门论述了高压SF₆开关设备的结构和设计计算，既全面又系统，很有参考价值。这是我们将它译出并奉献给国内读者的主要原因。

参加翻译工作的有艾克郑（第一章）、屈东海（第二章）、王璞（第三章）、梁文涛（第四章）、周峰会（第五章）。屈东海负责总校对，蔡明芝高级工程师审阅了全书。

由于译、校者水平有限，译文中难免会有错误，欢迎读者批评指正。

译 者

1987年10月

原 序

苏联幅员辽阔，条件不一，高压电器的研制务必考虑到这一情况。电气工业应为西伯利亚北极地带、亚热带、高山和大气严重污染地区提供设备；应为大城市、工业区和农业区较大容量的电网供电服务。

电网联网和统一的电力系统的建立，涉及高压电器设备技术参数的提高和对其要求的严格程度。如采用传统的灭弧方法、绝缘材料和灭弧介质，这些任务是难以完成的。

目前所广泛采用的油断路器和空气断路器有其优点和缺点。油有引起火灾和爆炸的危险。但采用空气断路器涉及到必须生产、调节和储存压缩空气。空气断路器和油断路器在低温下运行也有困难。因此，科研人员还在不断地寻求新的电路开断原理和新的灭弧介质。这些介质要保留传统介质的优点，而不具有其缺点。

在战后的年代里，对电器制造业拟定了三个新的方向。这就是将半导体技术用在开关上，将真空和 SF_6 用作灭弧和绝缘介质。然而，在高压开关设备中广泛地利用半导体装置涉及到要进一步发展这一技术。尽管真空开关和负荷开关在中压配电装置中得到应用，但在世界上用得最广泛的还是 SF_6 电器设备。

SF_6 器体将绝缘、灭弧和热传导特性成功地结合起来，使断路器的工作电压和电流的范围扩大，同时还不必采用极大的气体压力和大量的串联断口，这就有可能研制新的成套

电器设备——封闭式配电装置。为动力工程提供必需数量的这种设备，能极大地缩短动力工程投运期和减少运行人员的数量。

早在上个世纪末就已发现，门捷列夫元素周期表第Ⅵ和Ⅶ族元素中所包括的一些气体和蒸气具有比空气和氮气高的电气强度。

本世纪30年代，根据在核物理领域内所进行的研究，苏联和其它国家对这些气体的绝缘性能和一些物理特性进行了积极的研究。苏联的研究者Б.М.Гохберг（戈赫别尔格）及其同事们不仅在各种蒸气和气体的电气强度研究方面，而且在许多已知的化合物方面做了大量的工作。这些化合物极大地满足了一些必不可少的要求。

他们所进行的综合研究表明，在所研究的全部气体中，只有Муазон（穆阿宗）和Леб（列布）于1890年首次获得的 SF_6 是最满意的一种气体。这就为其在电工中，特别是在高压开关设备中的广泛应用提供了可能性。由于 SF_6 的电气、物理和化学特性非常好，Б.М.Гохберг将这种化合物称为电工气体，即 SF_6 。这一名称，当时在苏联通用，并已将其固定了下来。

30年代末和40年代初，苏联的研究者就推荐将 SF_6 用于电缆、电容器和断路器中。目前，世界上几乎所有的大型电气公司都在生产 SF_6 开关设备，并全面地开展了研究和设计工作。 SF_6 在电气工业中的广泛应用促进了新型成套动力设备——封闭式配电装置的出现和发展。封闭式配电装置在世界上用得愈来愈多。

本书系统地综述了有关 SF_6 气体特性及其在电气工业中应用的资料，研究了 SF_6 开关设备的计算和设计问题。第一

章研究了SF₆气体的物理和化学特性以及生产；第二章研究了SF₆气体的电气强度和SF₆绝缘结构；第三章对SF₆气体的灭弧能力和空气的灭弧能力进行了比较；第四章研究了SF₆断路器和负荷开关的设计原理；第五章研究了封闭式配电装置的设计和计算问题。

本书少量地利用了1971年出版的《SF₆开关设备》一书中的材料（主要是插图）。

作者对Е. В. Калинин(卡利宁)技术科学博士为本书提供资料、对В. В. Афанасьев(阿法纳西耶夫)教授和В. К. Тарасов(塔拉索夫)评论家为本书的修改而提供的宝贵意见，深表谢意。

目 录

译者序

原 序

第一章 SF ₆ 的基本特性	1
1-1 电工设备用的SF ₆ 介质	1
1-2 SF ₆ 的基本物理特性	2
1-3 SF ₆ 的分子结构和化学特性	11
1-4 SF ₆ 的热特性和热动力特性	14
1-5 SF ₆ 的导热能力	20
1-6 工业用SF ₆ 及检验方法	35
第二章 SF ₆ 的绝缘强度	44
2-1 概述	44
2-2 SF ₆ 的放电机理	44
2-3 均匀电场间隙的击穿	49
2-4 电场不均匀性的影响	51
2-5 不均匀电场间隙的击穿电压	61
2-6 各种不同因素对SF ₆ 气体间隙绝缘强度的影响	63
2-7 某些结构间隙的绝缘强度	69
2-8 压缩的SF ₆ 气体中沿介质表面的放电	81
2-9 SF ₆ 气体绝缘强度的补充资料	89
第三章 SF ₆ 开关设备中电弧的熄灭	95
3-1 交流电弧熄灭的一般概念	95
3-2 交流电弧熄灭时断路器触头上电压的恢复过程	101
3-3 介质对触头间间隙绝缘强度恢复过程的影响	108
3-4 气吹装置参数对电器开断能力的影响	119

3-5 SF ₆ 中的电磁灭弧	124
第四章 SF₆断路器和负荷开关	131
4-1 灭弧装置的结构	131
4-2 双压式断路器	142
4-3 活塞压气式断路器	163
4-4 负荷开关	177
4-5 传动系统和操作机构	192
4-6 气体系统	199
4-7 SF ₆ 断路器的运行特点及发展前景	202
第五章 封闭式配电装置	209
5-1 配电装置中设备的技术进展和完善化	209
5-2 小型配电装置的类型	214
5-3 封闭式配电装置的结构	219
5-4 封闭式配电装置元件的结构型式	239
5-5 封闭式配电装置参数和结构元件的计算	260
5-6 封闭式配电装置的运行问题	276
参考文献	282

第一章 SF₆的基本特性

1-1 电工设备用的SF₆介质

矿物油和空气是电工设备中用得最广泛的熄弧和冷却介质。气体同油和固体绝缘材料相比，具有一定的优越性，其中主要的是导电率极小，实际上没有介质损耗，在均匀电场中电气强度与频率无关，气体绝缘不发生明显的残留变化，而且在电弧和电晕作用下产生的污秽物很少。

在均匀或稍不均匀电场中，气体绝缘的电气强度随压力的升高而增加，在一定的条件下能超过变压器油、瓷和高真空的电气强度。

要简化气体绝缘的电气设备结构，最好要在不太大的剩余压力下能保证必需的电气强度。

然而，电工设备在采用气体时，除要求绝缘性能外，还要考虑其它的特性，即：气体本身及其分解物应是无毒的，对设备中应用的材料，在化学上呈中性，应具有较低的液化温度，要能在较高压力和运行条件所要求的温度下使用，应具有较好的导热能力，分解产物不多，应是无火灾和爆炸危险的气体，应当易于买到，价格便宜。

开关设备中所用的气体，除上述要求外，还应具有较好的灭弧能力。从易于得到的观点来看，空气优于其它所有气体，这是无可争辩的，但从全面要求来看，空气并不是经常都能采用的。有些气体蒸气的电气强度比空气高得多。但是其中有一些只能满足对电绝缘气体所提出的要求。许多物

质在一般条件下处于液态，例如 CCl_4 ，但在气体状态下其电气强度是空气的6.3倍。还有许多物质在放电条件下会发生不同程度的剧烈分解。有些物质在分解时会析出游离的碳，沉积在固体绝缘表面上，使表面导电。

SF_6 是唯一能最全面地满足上述要求的气体。纯净的气态 SF_6 完全无害，无化学侵蚀性，因而在通常的使用条件下对电器制造业中所使用的材料没有影响。它具有较高的导热能力，是很好的灭弧介质。在极高的电压恢复速率下能开断很大的电流。在均匀电场中， SF_6 的电气强度是空气的2.3~2.5倍。

SF_6 液化和升华的温度低，因而在通常的条件下， SF_6 电器在使用时无需专门进行预热。 SF_6 既不燃烧，又不助燃，所以 SF_6 电器没有爆炸和火灾的危险。

SF_6 的价格主要取决于其生产量。在国际市场上，每公斤 SF_6 售价是3.75美元[⊖]。 SF_6 的需要量大时，在单位体积 SF_6 所具有的密度达到的电气强度和油的相同时，则该单位体积 SF_6 的价格和单位体积油的价格相差不多。但在正确使用情况下， SF_6 不老化，因而不需要像油那样得仔细维护。

设计人员应熟悉 SF_6 的特性，使其优越性能被充分利用，而且使其不足方面的影响能减到最小程度。

1-2 SF_6 的基本物理特性

六氟化硫是化合物，其化学式为 SF_6 ，在标准条件下，无色、无味；在标准大气压下，温度 0°C 时，密度为 $6.52\text{kg}/\text{m}^3$ ，约为空气重量的5倍；分子量为146.06，其中含硫21.95%，

⊖ 根据1970年的资料。

含氟78.05%。

在大气压力下， SF_6 和 CO_2 一样，只处于气态或固态。在 $p_{as}=10^5\text{Pa}$ 下，由固体变为气体的温度（升华温度）等于 -63.8°C 。当压力大于 $p_{as}=2.28\times 10^5\text{Pa}$ 时， SF_6 随温度变化呈现所有三种物态。在这个压力下三态点温度为 -50.8°C 。图1-1所示为 SF_6 饱和蒸气的压力曲线。为便于比较，应当指出，不含空气的水的三态点温度为 $+0.01^\circ\text{C}$ ，压力为 611Pa 。

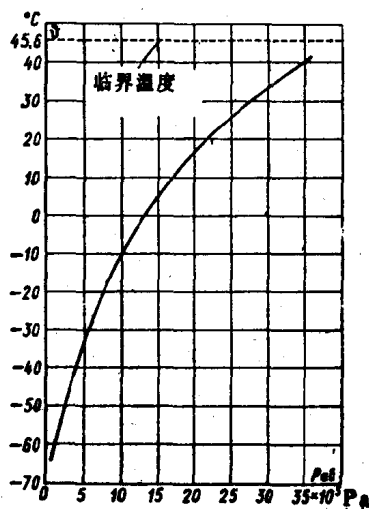


图1-1 SF_6 饱和蒸气的压力曲线

图1-1所示的曲线表明， SF_6 可用压力液化，通常将其装在罐中，液态运输。

当压力和温度变化时，气态 SF_6 的密度 ρ 按下式变化

$$\rho = \rho_0 \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T} \quad (1-1)$$

式中 p_0 ——标准（大气）压力；

T_0 ——273.2K,

ρ_0 ——在选定的压力和规定的温度下的表列密度值。

不同温度 θ 时液态 SF_6 的密度 ρ 值如下:

$\theta(^{\circ}\text{C})$	-50.8	-45	-39	-20	0	14.80	20.94
$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	1910	1819	1787	1670	1540	1432	1371

$\theta(^{\circ}\text{C})$	25.01	29.85	34.04	39.22	42.05	43.98	45.55
$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	1332	1270	1202	1111	1038	968	734

当 $\theta=21.10^{\circ}\text{C}$ 而压力 p 不同时, 气态 SF_6 的密度是:

$p(\text{Pa})$	10^5	2×10^5	3×10^5	5×10^5	10^6
$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	6.14	12.4	18.8	32.3	69.6

液态和气态 SF_6 密度和温度的关系曲线示于图1-2。

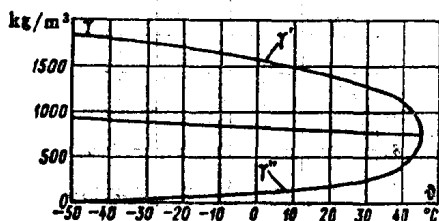


图1-2 液态和气态 SF_6 密度和温度的关系曲线

在液态和蒸气之间, SF_6 在物理特性方面没有差别的临界温度为 $+45.6^{\circ}\text{C}$ 。在此温度下, 饱和蒸气的密度和液态的密度相同, 它们之间的界线消失了, 气化热变为零。

物质在临界点的可压缩性是无穷大的, 也就是说 $(\partial V/\partial p)_{T_c} \rightarrow \infty$ 。因而, 用实验的方法测定临界体积比

是很困难的。所以采用《直线直径》法则来测定。根据这个法则， SF_6 饱和液体密度 γ' 和蒸气密度 γ'' 的等差数，在 γ, θ 坐标系里构成直线。这个直线和相应于临界温度的垂直线的交叉点之纵坐标等于物质在临界点的密度。此直线的方程

$$\frac{\gamma' + \gamma''}{2} = 1.34797 - 0.0019045T \quad (1-2)$$

在临界温度下， SF_6 饱和蒸气的压力称为临界压力。临界压力 $p_{cr} = 37.5 \times 10^5 \text{Pa}$ 。 SF_6 气体一个克分子所占的体积及临界温度和压力下的密度分别为 201cm^3 和 0.741g/cm^3 。

假如 SF_6 处在无限大的体积内，它的密度将随温度的变化而改变。温度增高，密度则减小。但在密闭的电器里充满 SF_6 的情况下，压力随温度而改变，此时，密度保持不变，与充气时的密度相等。理想的气体完全服从气体定律，它在密闭容器中的状态，可用状态方程来描述

$$pV = RT \quad (1-3)$$

这个方程对 SF_6 这种实用性强的气体，也是正确的，但在温度足够高而压力比较低的情况下、在高压电器和高电压设备的条件下， SF_6 的状态可用Битли-Бриджмена (毕特季-勃利支明) 方程来描述

$$p = \frac{RT(V_0 + B)}{V_0^2} - \frac{A}{V_0^2} \quad (1-4)$$

式中 p ——气体的绝对压力，Pa；

R —— $8314 \text{m}^3 \cdot \text{Pa} / (\text{mol} \cdot \text{K})$ ；

T ——温度，K；

V_0 ——在给定的温度和压力下的克分子体积， $\text{m}^3 / (\text{k} \cdot \text{mol})$ ；

$A = 15.78(1 - 0.1062/V_0)$ ；

$$B=0.366(1-0.1236/V,)$$

当 $V, > 0.3 \text{ m}^3 / (\text{k} \cdot \text{mol})$, 温度在 100°C 以下时, 方程(1-4)是正确的。

图1-3给出了容器内气体密度不同的情况下的 SF_6 气体压力随温度而变化的曲线。这些曲线可用于确定电器在一定体积 V 下需要的 SF_6 充气量。所需的 SF_6 气体质量

$$m = \rho V \quad (1-5)$$

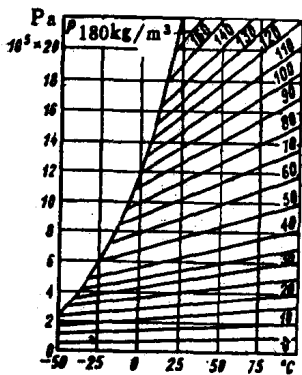


图1-3 在密闭的容器内气体密度不同时, SF_6 气体压力与温度的关系曲线

但是, 在一般的压力测量装置(压力计或真空计)下, 在运行过程中利用这些曲线是不方便的。在实际条件下, 往往测量的不是密度而是压力。为了单值表示出对电气强度、灭弧性能, 导热能力起决定作用的密度, 除规定出压力之外, 还要规定温度。

已发表的关于电气强度及灭弧性能的实验数据, 大都是在接近 20°C 的温度下获得的。因而就把这一温度看成原始值。当谈到压力而不提到温度时, 则一般认为该压力是在温度接近 20°C 时或换算到这个温度下测得的。不同的起始压力值下(即当温度为 20°C 时), SF_6 气体压力和温度的关系曲线见图1-4。

如果选用的压力是以保证必要的电气强度为条件, 则用这些关系曲线可以确定电器运行还能容许的零下极限温度。例如, 当电器中充有压力 $p = 4.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的 SF_6 时, 允许电器工作的温度可以在 $-41 \sim -42^\circ\text{C}$ 。在较小的压力下, 允许工作

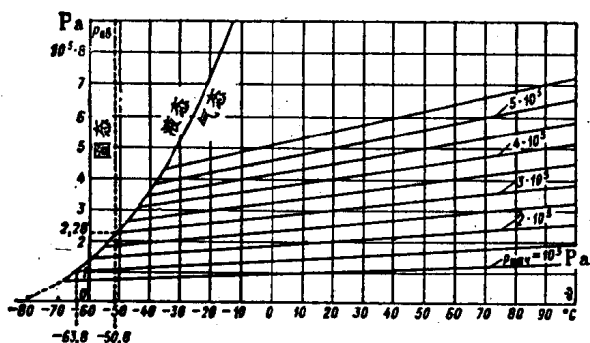


图1-4 在不同起始压力下，密闭容器中SF₆压力和温度的关系曲线。

温度有适当的降低。在研制电器时，如果决定性的条件是零下温度，则可按图1-4确定工作压力的极限值。在此压力下所必需的电气强度要由结构参数的适当选择来保证。

例1-1 试选择电器不加预热而能在 -60°C 下工作的最低允许压力。从图1-4上找出 -60°C 时SF₆气体在 $1.8 \times 10^5 \text{Pa}$ 气压（已换算到 20°C ）下开始液化。但应当指出：甚至在最可靠和密封有保证的情况下，也会发生SF₆的泄漏。因此，随着时间的变化，与固定温度相应的压力将会减小。但该压力不应小于电气强度、灭弧及导热能力还能得到保证的最小容许值。所以，电器的充气压力应比最大的容许值高 $(0.1 \sim 1) \times 10^5 \text{Pa}$ 。例如，严寒地带适用的电器应充气到压力为 $2.8 \times 10^5 \text{Pa}$ 左右。但即使在这个压力下，在 -52°C 的温度下SF₆也开始液化。可是这并不危险，因为并不是全部SF₆都转变为液态，而仅仅是压力按状态曲线变化的那些SF₆气体。这样，在极限温度 -60°C 下，电器中的气压将是 $1.8 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

粘度是计算充有SF₆气体的电器的一个极重要的量。在

不同的温度下, SF_6 的动力粘度值如下:

对于液态 SF_6 :

$\theta(^{\circ}C)$	-43.3	-34.6	-20.3	-17.9	-10.2	+0.60	+13.52
$\eta(MPa \cdot s)$	0.500	0.465	0.404	0.396	0.369	0.333	0.305

对于 $p=10^5 Pa$ 的气态 SF_6 :

$\theta(^{\circ}C)$	2.11	31.16	40.64	51.33	66.15
$\eta(MPa \cdot s)$	0.0145	0.0157	0.0165	0.0170	0.0179

$$\eta = \eta_0 \frac{1 + T_0/T}{1 + T_0/T} \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (1-6)$$

式中, 常数 $\eta_0 = 14.4 \times 10^{-6} kg/(m \cdot s)$ 和 $T_0 = 275K$ 时的确定方法如下:

按公式 (1-7) 算出的 SF_6 动力粘度值应非常接近于在工作温度范围内用实验方法得到的数据。压力在 $p=10^6 Pa$ 以下时, 动力粘度变化不大, 因而可忽略不计。

动力粘度 (以 m^2/s 计) 等于气体动力粘度与其密度之比。

$$\nu = \eta / \rho \quad (1-7)$$

式中 η 的单位为 $Pa \cdot s$, 而 ρ 为 kg/m^3 。

SF_6 气体在 $0^{\circ}C$ 及 $p_{0.6} = 10^6 Pa$ 下的折射系数为 0.0007625。在 $25^{\circ}C$ 及 $p_{0.6} = 10^6 Pa$ 下的相对介电常数为 1.0025, 且不随频率变化, 因为 SF_6 分子没有偶极子。在 $p_{0.6} = 10^6 Pa$ 及 $21 \times 10^6 Pa$ 下, 介质损耗角分别为 2×10^{-7} 和 4×10^{-7} 。

SF_6 分子质量大, 并且密度高的 SF_6 使声音的传播速度比在空气中小很多。在 $30^{\circ}C$ 及 750mmHg ($10^5 Pa$) 的气压下, $c = 138.5 m/s$, 即大约是空气中音速的 1/2.4。这就是说, 在