

温度计套管形状对振动和受力的影响

孙吉人

中国石化工程建设有限公司, 北京 100101

摘要 温度计套管有多种形式,在工程应用中,比较常见的是锥形、直形和阶梯形。不同形状温度计套管的振动频率和受力情况各不相同,有各自的适用特点。以往,尽管设计人员渴望了解不同形状温度计套管在振动和受力方面的特性,但由于缺少不同形状温度计套管振动频率和受力情况的分析对比,因此,在工程应用设计中,对温度计套管形状的选择比较随意。近年来,随着对温度计套管振动问题讨论的增多和研究的深入,使得研究形状对振动和受力的影响成为可能。本文根据 ASME PTC19.3 TW-2010 提供的准则,通过对上述 3 种形状的温度计套管振动频率和受力强度的分析对比,提出不同形状温度计套管的适用特点,为工程应用中的选型设计提供参考依据。

关键词 温度计套管;温度计套管形状;共振;固有频率;漩涡脱落频率;动态应力

中图分类号 TB12

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.08.006

Impact of Shape of Thermowell on Its Vibration and the Force on It

SUN Jiren

SINOPEC Engineering Incorporation, Beijing 100101, China

Abstract Thermowell may take various forms in engineering applications, such as tapered, straight, and step-shank forms. The thermowells of different shapes have their own characteristics, including their natural vibration frequencies and the stress distributions. The selection of the thermowells shape should be based on the vibration characteristics and the stress distributions. In the past, the designer are eager to learn about the characteristics of different shapes thermowell, but due to lack of analysis of vibration frequency for different shapes thermowell, therefore, in the engineering design, selection of thermowells shape seemed more random. In recent years, with increased discussion and further research on the issue of thermowell vibration and stress makes possible to study shapes impact on vibration and stress of thermowell. Based on the ASME PTC19.3 TW-2010, this paper makes analysis and comparison of the natural vibration frequencies and the stress distributions of thermowells of three shapes and provides some guidelines for the selection in engineering applications.

Keywords thermowell; thermowell shapes; resonance; nature frequency; vortex shedding frequency; dynamic stress

0 引言

安装在工艺管道上供温度检测用的保护套管(通常称作温度计套管,简称套管)有多种形式,2010年2月颁布的 ASME PTC19.3 TW-2010^[1]推荐了锥形、直形和阶梯形 3 种形式。在工艺流体的作用下,浸没在流体中的套管由于漩涡脱落会产生振动,当振动频率接近套管的固有频率时,则可能发生共振,导致流体作用在套管上的应力超过套管的承受极限而使套管折断,产生泄漏,并使插在套管内的温度检测元件损坏,影响温度测量,甚至发生事故。文献[2]、[3]对套管共振的产生和怎样避免共振都有论述。不同形状的套管其振动

频率和受力情况各不相同,文献[4]对锥形、直形套管的振动频率、静态和动态应力进行了详细阐述,并提出了具体的工程应用设计方法,但缺少对 3 种形状套管振动频率和受力的分析对比,在工程应用中对套管形状的选择显得比较盲目。本文根据 ASME PTC19.3 TW-2010 提出的准则,对锥形、直形和阶梯形套管振动频率和受力进行分析,提出各自的适用特点,使工程应用设计中对套管形状的选择更趋合理。

1 套管的优化设计

套管的设计应考虑两方面因素:一是要有良好的机械特

收稿日期:2013-02-06;修回日期:2013-02-28

作者简介:孙吉人,高级工程师,研究方向为石油化工仪表和自动控制工程设计,电子信箱:sunjiren@sei.com.cn

性,能耐受流体的动态冲击、稳态冲击和静态压力;二是要有良好的热特性,使安装在其中的测温元件与过程流体尽快达到热平衡。在高速流体下,采用金属套管,尽量减小套管内孔直径和壁厚,保证足够的插入长度,则测温元件与过程流体会迅速达到热平衡。但在高速流体下,套管是否具有足够高的机械强度以抵御流体的冲击,需经严格计算和判断。对一个固定材质的套管,具有足够高的固有频率和产生足够低的弯曲应力,对避免共振、抵御流体冲击是有利的。选择合适的套管形状和恰当的结构尺寸,使套管免于共振,并在实际工况下可以安全使用,是设计者追求的目标。

2 频率和应力计算

2.1 套管外形和材料特性

套管在操作压力 $P(\text{Pa})$ 、操作温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 、最大流速 $V(\text{m/s})$ 、流体密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$ 、动力黏度 $\mu(\text{Pa}\cdot\text{s})$ 或运动黏度 $\nu(\text{m}^2/\text{s})$ 下工作,其外形尺寸如图 1 所示。套管有多种过程接口形式,如果选为法兰,则可按遮蔽措施考虑,遮蔽长度 L_0 =法兰管嘴高度+管道壁厚(图 2)。

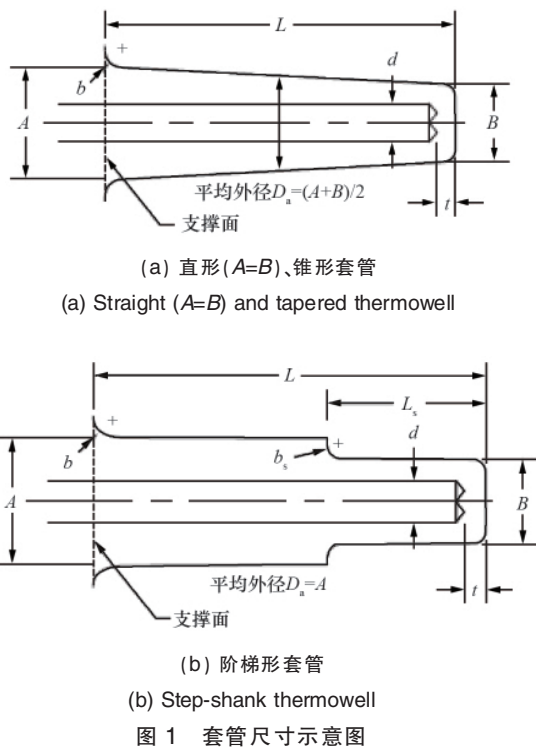


图 1 套管尺寸示意图

根据 ASME BPVC Section II Part D^[3],取套管的材料特性参数:室温(20 $^{\circ}\text{C}$)下弹性模量 $E_{rt}(\text{Pa})$ 、工作温度下弹性模量 $E(\text{Pa})$ 、最大允许工作应力 $S(\text{Pa})$ 和密度 $\rho_m(\text{kg/m}^3)$ 。根据 ASME PTC19.3 TW-2010,取测温元件的平均密度 $\rho_s=2700\text{kg/m}^3$ 、阻尼系数 $\zeta=0.0005$ 、套管材质的允许疲劳应力幅度极限 $S_f(\text{Pa})$,以及描述介质腐蚀和相关影响的环境系数 $F_E \leq 1$ 。对 $T \leq 427^{\circ}\text{C}$ 的碳氢化合物、蒸汽和水,取 $F_E=1$;对 $T > 427^{\circ}\text{C}$ 或其他介质,需减小 F_E ,以描述相关影响。

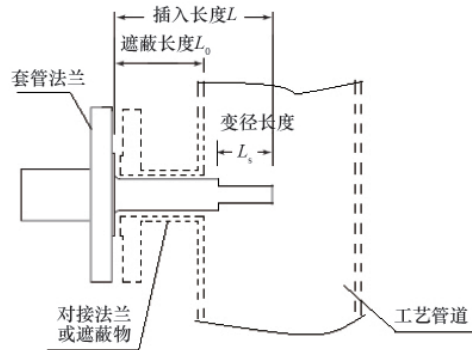


图 2 法兰连接套管安装结构示意图
Fig. 2 Connection of a flanged thermowell

2.2 漩涡脱落频率和套管固有频率计算

漩涡脱落频率

$$f_s = Sr \frac{V}{B} \quad (1)$$

式中, Sr 为 Strouhal 数,对于工程设计计算,可取 $Sr \approx 0.22$ 。

套管近似固有频率

$$f_a = \frac{1.875^2}{2\pi} \left(\frac{EI}{m} \right)^{1/2} \frac{1}{L^2} \quad (2)$$

其中,转动惯量 $I = \pi(D_a^4 - d_a^4)/64, \text{kg}\cdot\text{m}^4$; 单位长度套管的质量 $m = \rho_m \pi(D_a^2 - d^2)/4, \text{kg/m}$ 。

直形和锥形套管等截面实体梁修正系数

$$H_f = \frac{0.99[1 + (1-B/A) + (1-B/A)^2]}{1 + 1.1(D_a/L)^{3[1-0.8(d/d_a)]}} \quad (3)$$

阶梯形套管等截面实体梁修正系数

$$H_f = (y_1^{\beta} + y_2^{\beta})^{-1/\beta} \quad (4)$$

当端部直径 $B=0.022\text{m}$ 时

$$y_1 = (1.41A/B - 0.949)L_s/L - 0.091A/B + 1.132$$

$$y_2 = (0.865 - 1.714A/B)L_s/L + 0.861A/B + 1$$

$$\beta = 9.275A/B - 7.466$$

流体附加质量修正系数

$$H_{a,t} = 1 - \frac{\rho}{2\rho_m} \quad (5)$$

测温元件质量修正系数

$$H_{a,s} = 1 - \frac{\rho_s}{2\rho_m} \left[\frac{1}{(D_a/d)^2 - 1} \right] \quad (6)$$

焊接和法兰连接套管的安装柔性修正系数

$$H_c = 1 - 0.61 \frac{A/L}{[1 + 1.5(b/A)]^2} \quad (7)$$

螺纹连接套管的安装柔性修正系数

$$H_c = 1 - 0.9A/L \quad (8)$$

安装就位后的套管固有频率为

$$f_n^c = H_t H_{a,t} H_{a,s} H_c f_a \quad (9)$$

2.3 应力计算

ASME PTC19.3 TW-2010 给出了受力强度系数、峰值动态弯曲应力计算方法。

漩涡脱落在套管上产生的动态冲击力被分解成沿流体

流动方向的流向力和垂直于流体流动方向的横向力。

流向动态应力的分布如图 3 所示。引入最大应力放大系数来估算套管流向共振时的应力

$$F'_{M,max} = \frac{1}{2\zeta} = 1000 \quad (10)$$

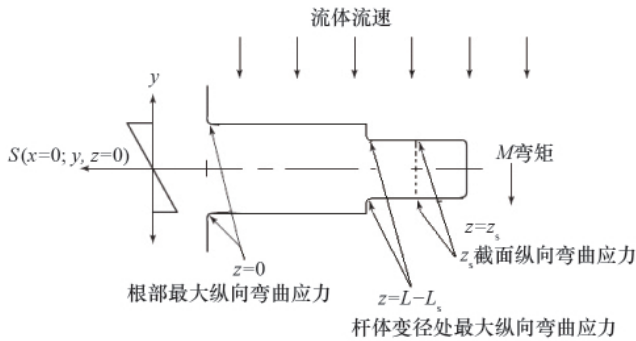


图 3 最大流向弯曲应力示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the maximum longitudinal bending stress

共振时流速为

$$V_{ir} = \frac{Bf_n^c}{2Sr} \quad (11)$$

定义受力强度系数 G_{sp} 和 G_{rd} , 用来描述套管根部和杆体变径处的弯曲应力, 数值越大, 表明所受弯曲应力的强度越大。 G_{sp} 和 G_{rd} 仅取决于套管的几何形状。

无遮蔽时, 对直形和锥形套管

$$G_{sp} = \frac{16L^2}{3\pi A^2 [1-(d/A)^4]} (1+2B/A) \quad (12)$$

阶梯形套管

$$G_{sp} = \frac{16L^2}{\pi A^2 [1-(d/A)^4]} \left[\frac{B}{A} + \left(1 - \frac{B}{A}\right) \left(1 - \frac{L_s}{L}\right)^2 \right] \quad (13)$$

$$G_{rd} = \frac{16L_s^2}{\pi B^2 [1-(d/B)^4]} \quad (14)$$

有遮蔽时, 直形和锥形套管

$$G_{sp} = \frac{16L^2}{3\pi A^2 [1-(d/A)^4]} \left\{ 3 \left[1 - \left(\frac{L_0}{L}\right)^2 \right] + 2 \left(\frac{B}{A} - 1\right) \left[1 - \left(\frac{L_0}{L}\right)^3 \right] \right\} \quad (15)$$

阶梯形套管

$$G_{sp} = \frac{16L^2}{\pi A^2 [1-(d/A)^4]} \left[\frac{B}{A} + \left(1 - \frac{B}{A}\right) \left(1 - \frac{L_s}{L}\right)^2 - \left(\frac{L_0}{L}\right)^2 \right] \quad (16)$$

$L_0 < L - L_s$

$$G_{sp} = \frac{16BL^2}{\pi A^2 [1-(d/A)^4]} \left[1 - \left(\frac{L_0}{L}\right)^2 \right] \quad L_0 \geq L - L_s \quad (17)$$

$$G_{rd} = \frac{16L_s^2}{\pi B^2 [1-(d/B)^4]} \quad L_0 < L - L_s \quad (18)$$

$$G_{rd} = \frac{16L_s^2}{\pi B^2 [1-(d/B)^4]} \left(1 - \frac{L_0}{L}\right) \left(2\frac{L_s}{L} - 1 + \frac{L_0}{L}\right) \quad L_0 \geq L - L_s \quad (19)$$

在套管根部和杆体变径处的下游, 产生在套管上的流向

动态应力为

$$S_d = G_{\beta} F'_M P_d = \frac{G_{\beta} F'_M \rho C_d V_{ir}^2}{2} \quad (20)$$

式中, $P_d = \frac{\rho C_d V_{ir}^2}{2}$; G_{β} 分别代表 G_{sp} 和 G_{rd} 。以设计为目的时, 取

$$C_d = 0.1 \quad (21)$$

将式(10)~式(19)和式(21)代入式(20), 可估算出套管根部或杆体变径处无遮蔽或有遮蔽共振时的动态弯曲应力。

3 频率和应力的限制条件

ASME PTC19.3 TW-2010 给出了套管固有频率和应力的安全限制条件, 以及可能发生共振的判断条件。

质量阻尼系数

$$N_{sc} = \pi^2 \zeta (\rho_m / \rho) [1 - (d/B)^2] \quad (22)$$

当 $N_{sc} > 2.5$ 且 $Re < 10^5$ 时, 不会产生流向共振, 套管的固有频率需满足

$$f_s < 0.8 f_n^c \quad (23)$$

当 $N_{sc} \leq 2.5$ 或 $Re \geq 10^5$ 时, 流向共振和横向共振均可能发生, 套管的固有频率需满足下列条件。

如

$$K_t S_d < (E/E_{ref}) F_{ps} S_f \quad (24)$$

则应满足

$$0.6 f_n^c < f_s < 0.8 f_n^c \quad (25)$$

否则应满足

$$f_s < 0.4 f_n^c \quad (26)$$

其中, K_t 是丝扣连接的应力集中系数, 最小取 $K_t = 2.3$, 在缺少套管根部焊口详尽尺寸的情况下, 取 $K_t = 2.2$ 。

由于流向共振发生在横向共振流速的 1/2 处, 为此, 仅对流向共振应力极限进行评估。

4 套管形状对频率和受力的影响

由频率和应力计算可知, 套管的固有频率和弯曲应力与套管的几何尺寸相关。下面以表 1 中的具体应用数据分析相关影响。

虽然管道上温度计管嘴为法兰, 但不按遮蔽设施考虑。

选择锥形、直形和阶梯形 3 种形式的套管, 取相同的内孔直径 d 和根部圆角半径 b 进行分析比较。

4.1 A、B 和 L 对频率的影响

由频率限制条件可知, 漩涡脱落频率与套管固有频率之比越小, 对通过限制条件越有利。分别使根部直径 A 、端部直径 B 和插入长度 L 变化, 取得漩涡脱落频率与套管固有频率之比的变化曲线如图 4~图 6 所示。

由图 4 可见, 在 L 和 B 不变的情况下, 直形套管的频率比最小, 对通过频率限制最有利。 A 相同时, 阶梯形套管与锥形套管相比, 阶梯形套管的频率比相对较小, 对通过频率限制有利。

表 1 相关参数
Table 1 A group of parameters

管道材质	SS 347	E/MPa	177300	P/MPa	18
温度计管嘴高度/m	0.19	S/MPa	102	$T/^\circ\text{C}$	278
管道壁厚/m	0.029	S_t/MPa	62.8	$V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	15
套管接口	法兰	$\rho_m/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	8030	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	53.3
套管材质	SS 347	$\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2700	$\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	0.00002
E_{ref}/MPa	190000	ζ	0.0005	F_E	1

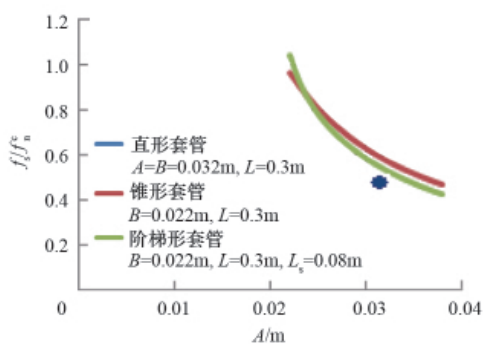


图 4 根部直径变化对频率的影响
Fig. 4 Impact of root diameter on frequency

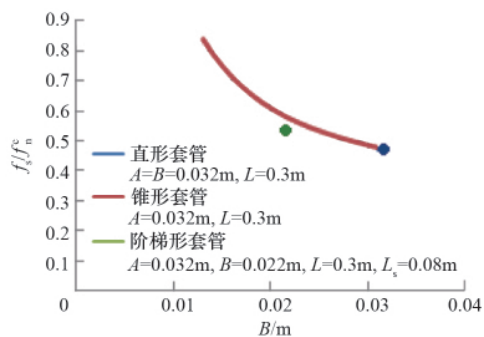


图 5 端部直径变化对频率的影响
Fig. 5 Impact of tip diameter on frequency

由图 5 可见,在 L 和 A 不变的情况下, $B=0.022\text{m}$ 时,阶梯形套管对通过频率限制最有利。锥形套管的 B 值越大,即锥度越小,则频率比越小,当 $B=0.032\text{m}$ 时,变成直形套管,此时,频率比最小,可见,直形套管与锥形套管相比,直形套管对通过频率限制有利。

由图 6 可见, A 和 B 不变的情况下, L 越小,频率比越小。相同 L 下,直形套管最有利于通过频率限制。

4.2 A 、 B 和 L 对根部受力的影响

由应力限制条件可知,套管的受力越小,对通过限制条件越有利。分别使 A 、 B 和 L 变化,取得套管根部受力变化曲线如图 7~图 9 所示。

由图 7 可见,在 L 和 B 不变的情况下, A 相同时,阶梯形

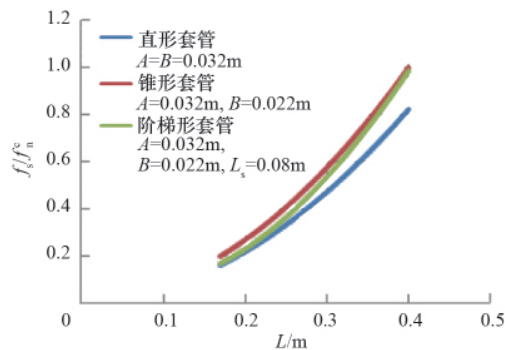


图 6 插入长度变化对频率的影响
Fig. 6 Impact of insert length on frequency

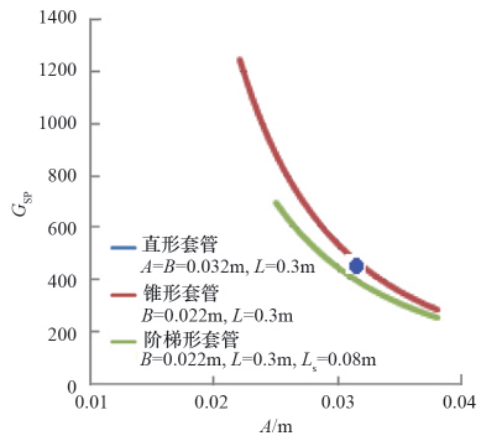


图 7 根部直径变化对受力强度的影响
Fig. 7 Impact of root diameter on stress intensity

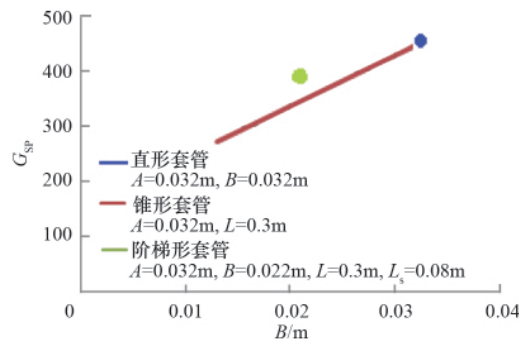


图 8 端部直径变化对受力强度的影响
Fig. 8 Impact of tip diameter on stress intensity

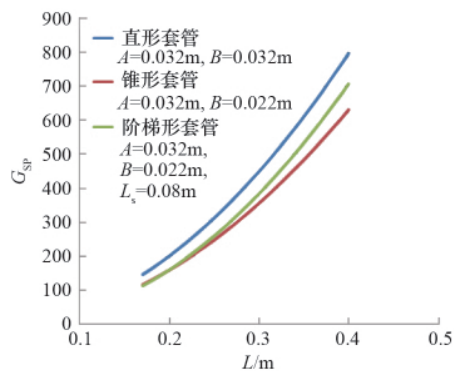


图9 插入长度变化对受力强度的影响

Fig. 9 Impact of insert length on stress intensity

套管的受力最小,对通过应力限制条件有利。直形套管次之。

由图8可见, L 和 A 不变的情况下,在 B 较小时,锥形套管受力相对小,对通过应力限制条件有利。 $B=0.022\text{m}$ 时,阶梯形套管的受力大于锥形套管。锥形套管的 $B=0.032\text{m}$ 时,变成直形套管,此时受力最大,可见,直形套管与锥形套管相比,直形套管的受力较大。

由图9可见,在 A 和 B 不变的情况下, L 相同时,锥形套管的受力较小,对通过应力限制条件有利。直形套管的受力最大。

5 其他尺寸参数对频率和受力的影响

由式(2)、式(3)、式(6)和式(7)知, d 和 b 对 f_n^c 有影响,经演算知, d 和 b 越大,固有频率 f_n^c 越大。 d 的变化对 f_n^c 影响很小。 b 从0变化到0.001m时,对 f_n^c 影响非常明显,但从0.001m以后再增大, f_n^c 的变化甚微。

由式(12)~式(14)知, d 越小,则受力强度 G_{sp} 越小。

6 结论

通过上述比较发现,综合根部直径 A 、端部直径 B 和插入长度 L 对频率和受力的影响,阶梯形套管与锥形套管相比,容易通过限制条件,但由于ASME PTC19.3 TW-2010仅给出端部直径为0.022m和0.017m两个规格,在复杂的工程应用中有时会受到限制。直形套管与锥形套管相比,有利于通过限制条件。虽然直形套管的受力强度高于锥形套管,但在通过频率限制上远优于锥形套管,对于一个确定了材质的套管,具有足够小的频率比对通过限制条件是首要的。

参考文献 (References)

- [1] The American Society of Mechanical Engineers. ASME PTC19.3 TW-2010, Thermowells Performance Test Codes[S]. New York: ASME, 2010.
- [2] 刘汉杰,王发兵,胡同印,等.有限单元法在温度计套管振动核算中的应用[J].石油化工自动化,2009(5):64-67.
Liu Hanjie, Wang Fabing, Hu Tongyin, et al. Automation in Petro-Chemical Industry, 2009(5): 64-67.
- [3] 汉建德,华霄峰.温度计保护套管的性能研究[J].石油化工自动化,2012(4):21-29.
Han Jiande, Hua Xiaofeng. Automation in Petro-Chemical Industry, 2012(4): 21-29.
- [4] 孙吉人.温度计套管的工程应用设计方法[J].科技导报,2013,31(1):57-61.
Sun Jiren. Sciences & Technology Review, 2013, 31(1): 57-61.
- [5] The American Society of Mechanical Engineers. ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part D Properties (Metric)-2010, Materials[S]. New York: ASME, 2010.

(责任编辑 齐志红)

· 学术动态 ·

中国科学技术协会全国委员会简介

中国科学技术协会全国代表大会和它选举产生的全国委员会是中国科学技术协会全国领导机构。全国代表大会每五年举行一次,由全国委员会召集。特殊情况下,可以提前或延期举行。全国代表大会的代表名额和选举办法由常务委员会决定,其代表经全国学会和省、自治区、直辖市科学技术协会及有关方面民主协商、选举产生。代表大会代表实行任期制。

全国代表大会行使的职权:决定中国科学技术协会的工作方针和任务;审议和批准全国委员会的工作报告;制定和修改中国科学技术协会章程;选举产生全国委员会;决定其他重大事项。

全国委员会会议每年举行一次,由常务委员会召集。

全国委员会行使的职权:执行全国代表大会的决议;选举主席、副主席和常务委员;审议中国科学技术协会年度工作报告;决定授予荣誉职务;决定其他重大事项。