

# 基于 LTO 循环航空发动机排气污染物 $\text{NO}_x$ 排放适航审定计算方法

侯晓云<sup>1</sup>, 张天刚<sup>2</sup>

1. 中国民航大学机场学院, 天津 300300
2. 中国民航大学航空自动化学院, 天津 300300

**摘要** 航空器要获得商业营运许可, 必须取得适航证, 适航要求是航空器安全飞行的最低法规性的保障, 因此研究航空发动机排放适航审定方式是非常有必要的。为解决中国民用航空发动机测试数据处理方式中的技术难点, 使飞机发动机排气污染物符合适航审定标准, 参考国际民航组织 (ICAO) 颁布的“飞机发动机排放”条例的规定, 设计了民用航空发动机排气污染物测量系统。测量系统的精度按标准规定用燃气分析测出的油气比与发动机实测油气比进行比较, 小于 10%—15% 的属于合格。本研究的测量值与发动机所测的油气比的误差小于 7%, 证明测量系统和测量技术是切实可行的。基于 ICAO 标准的起飞着陆 (LTO) 循环概念, 采用 ICAO 计算方法得出航空发动机  $\text{NO}_x$  的排放指数。根据中国民航规章 34 部 (China Civil Aviation Regulations, CCAR—34), 验证得出航空发动机 JT3D—7 的  $\text{NO}_x$  排放符合现行的适航标准。根据 ICAO 计算方式, 利用 MFC 开发了  $\text{NO}_x$  适航审定系统, 可快速算出发动机  $\text{NO}_x$  排放指数, 并可对发动机进行  $\text{NO}_x$  排放适航审定。

**关键词**  $\text{NO}_x$  排放; 起降循环; 测量技术; 审定系统

**中图分类号** V239

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.21.009

## Airworthiness Certification Calculation Method of Gas Turbine Engine $\text{NO}_x$ Emissions Based on LTO Cycle

HOU Xiaoyun<sup>1</sup>, ZHANG Tiangang<sup>2</sup>

1. Airport College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China
2. Aeronautical Automation College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

**Abstract** The airworthiness certification is necessary before the aircraft enters into the commercial operation. The requirement of the airworthiness is the basic regulation guarantee for the safe flight of aircraft; therefore it is necessary to study the airworthiness certification method for gas turbine engine emissions. In order to solve the technical difficulty of the methods involving gas turbine engine emission test data and meet the requirement for engine emissions airworthiness certification standard, an emission measuring system is designed with reference to Aircraft Engine Emissions promulgated by the convention of ICAO. The accuracy of this system is no more than 7%, it is much better than 10%—15% based on the procedure for the analysis and evaluation of gaseous emissions from aircraft engines requirement, so that the sampling and measurement system is proved feasible. Calculation of  $\text{NO}_x$  emission index from aircraft is developed by using ICAO method based on the ICAO standard involving Landing and Take-Off (LTO) cycle. JT3D-7  $\text{NO}_x$  emission is compatible with the existing regulatory standards according to CCAR-34. According to the method of ICAO, a system for the airworthiness certification of gas turbine engine emissions is developed by MFC and  $\text{NO}_x$  emission index of the engine could be quickly computed.

**Keywords**  $\text{NO}_x$  emission; LTO cycle; measurement; airworthiness certification

收稿日期: 2012-04-01; 修回日期: 2012-06-05

作者简介: 侯晓云, 讲师, 研究方向为数字化设计与制造技术, 电子信箱: zhangsky\_777@163.com

## 0 引言

随着环保和健康意识的不断增强,人类对民航发动机污染排放,特别是氮氧化物(NO<sub>x</sub>)的排放要求越来越严格<sup>[1]</sup>。国际民航组织(ICAO)对民用航空发动机的排放污染物制定了排放标准,并要求在规定期限内执行。为了促进中国航空事业的发展 and 适应国际竞争的需要,1987年,中国开始研究航空燃气涡轮发动机排气污染问题,制订了《航空燃气涡轮排气冒烟测量规范》<sup>[2]</sup>和《航空燃气涡轮发动机气态污染物的连续取样及测量程序规范》<sup>[3]</sup>,编号为HB6116-57和HB6117-87。中国虽然制定了污染物的排放审定标准,具体的航空污染物排放适航审定计算方式并未实施。本研究的目的是解决中国民用航空发动机测试数据的处理方式中的技术难点,使之符合飞机发动机排气污染物的适航审定标准。

## 1 NO<sub>x</sub> 污染物的标准

### 1.1 ICAO 标准起降循环(LTO)模型

为了计算发动机排气污染物的排放限额,ICAO颁布的芝加哥公约附件16第二卷<sup>[4]</sup>中规定了标准起降循环(Landing and Take-off, LTO),它将起降循环划分为慢车、起飞、爬升和进近(不包括巡航阶段)4个阶段,它定义LTO上限为从地表到大气边界层顶部高度915m(3000英尺)的地方,如图1。

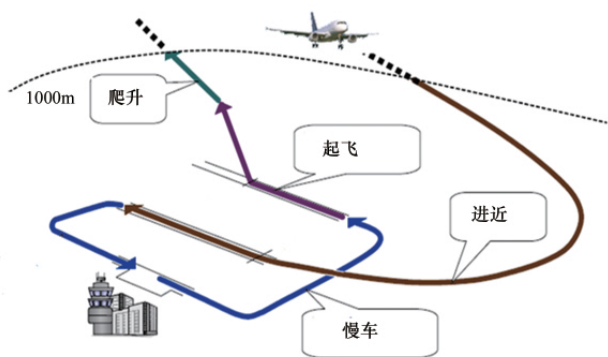


图1 ICAO 标准 LTO 循环模型

Fig. 1 LTO cycle

### 1.2 排放标准

为控制民用航空发动机对环境和气候变化造成的影响,ICAO 下属机构航空环境保护委员会(CEAP)于1981年颁布了《航空发动机的排放》标准<sup>[5]</sup>,该标准主要考虑发动机LTO循环(起飞、爬升、慢车和进场)阶段,其中涉及民用航空发动机的排放污染为冒烟、CO、NO<sub>x</sub>和碳氢化合物(HC)。排气污染参数定义为LTO循环期间排放污染物的量与发动机额定推力之比,用 $D_p/F_{\infty}$ 来表示,即

$$D_p/F_{\infty} = \sum W_{\beta} E I_{t_j} / F_{\infty}$$

式中, $D_p$ 为发动机在LTO循环某阶段排放污染物的总量(g); $W_{\beta}$ 为LTO循环某阶段的燃油流量(g/s); $E I_{t_j}$ 为LTO循环某阶

段某污染物的排放指数, $t_j$ 为LTO循环某阶段的运行时间(s),具体运行时间由ICAO规定; $F_{\infty}$ 为该发动机的额定推力(kN)。

作亚音速飞行的航空发动机在LTO循环中的功率和状态工作时间规定如表1。在表中 $F_{\infty}$ 为在海平面静止状态发动机不喷水以正常工作状态起飞时可用的最大功率或额定推力。

表1 航空发动机的LTO循环  
Table 1 LTO cycle of aircraft engine

工作状态	推力点	发动机测试时间/min
慢车	7% $F_{\infty}$	26
进近	30% $F_{\infty}$	4
爬升	85% $F_{\infty}$	2.2
起飞	100% $F_{\infty}$	0.7

中国民用航空局对作亚音速飞行的航空器上的所有涡扇和涡喷发动机排放NO<sub>x</sub>污染物的规定值为:2002年4月19日及其后制造的额定输出等于或大于26.7kN(6000磅)民用航空发动机NO<sub>x</sub>污染物排放值不得超过(32+1.6( $rPR$ ))g/kN,其中 $rPR$ 为发动机额定压力比<sup>[6]</sup>。

## 2 航空发动机气态污染物NO<sub>x</sub>审定

### 2.1 航空发动机排放审定实验分析

取样头设计成十字交叉性,混合式,取样点为12点,每个象限不少于3点,按等面积螺旋型分布,而且是均匀分布以减少排气周向分布不均匀对测量结果的影响。取样小孔的直径按小孔处压降占取样总压降的80%为准,小孔直径 $\phi_1=1\text{mm}$ ,取样管直径为 $\phi_2=10\text{mm}$ 。

取样头放置在距排气喷口0.5倍喷口直径处,取样系统如图2。取样头出口到碳氢分析仪前的管路采用自动控温保温装置,保温在(160±10)°C。管路在一氧化碳、二氧化碳和氮

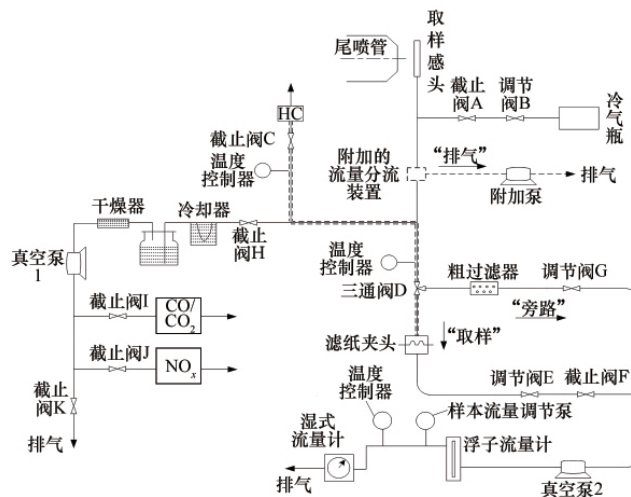


图2 取样系统简图

Fig. 2 Scheme of measurement system

氧化合物等分析前,样气经过冷却、半干燥、干燥后由真空泵抽取送入仪器分析,并保持温度大于 10℃。

HC 分析仪用美国贝克曼 402 型火焰离子检测碳氢分析仪,CO 和 CO<sub>2</sub> 的测量采用国产 QGS-08 型非分散型红外分析仪。NO<sub>x</sub> 的分析采用日本理研公司生产的 RS-325L 型发光检测氮氧化物分析仪,真空泵为国产无油薄膜式真空泵。在发动机启动过程中为了避免燃油污染,取样管路安装了倒吹气

系统<sup>[7]</sup>,用冷气瓶供气,电磁活门控制。到达取样状态时就切断倒吹气路,由真空泵抽取取样。在试验过程中严格按照 ICAO 附件 16 第二卷规定的功率和其对应的时间。

2.2 航空发动机排放数据分析

在北京维修基地,对机号为 670-786 的 JT3D-7 航空发动机进行排气污染测量<sup>[8]</sup>,所得的不同工况下污染物排放量如表 2 所示。在该实测中所用的航空煤油为 Jet-A,其分子式

表 2 发动机不同工况下的排放测量数据

Table 2 Measured emission data of engine with different operation conditions

状态	额定推力/%	燃油量 /(kg·h <sup>-1</sup> )	CO 体积分数 /10 <sup>-6</sup> m	NO <sub>x</sub> 体积分数 /10 <sup>-6</sup> m	NO 体积分数 /10 <sup>-6</sup> m	HC 体积分数 /10 <sup>-6</sup> m	CO <sub>2</sub> 体积分数 /%
慢车	7	551	641	5	3	1450	1.4
进近	30	1470	163	24	12.8	210	1.95
爬升	85	4001	30	75	70	150	2.8
起飞	100	4902	19	107	103	100	3.1

为 C<sub>11</sub>H<sub>22</sub>O<sub>0.00004</sub>N<sub>0.00012</sub>;发动机进口空气组成如表 3 所示。

表 3 发动机进口空气组成

Table 3 Inlet air constitution of engine

空气组成	数值
O <sub>2</sub> 在空气的摩尔分数 R(O <sub>2</sub> )	0.20948
N <sub>2</sub> 在空气的摩尔分数 S(N <sub>2</sub> )	0.79020
CO <sub>2</sub> 在空气的摩尔分数 T(CO <sub>2</sub> )	0.00032
CH <sub>4</sub> 在空气的摩尔分数 U(CH <sub>4</sub> )	0
H <sub>2</sub> O 在空气的摩尔分数 h(H <sub>2</sub> O)	0.00634

原始公式中使用的成分均为真实情况(含水蒸汽的容积浓度)称为“湿基”,实测中某些气体成分由于测试仪器的限

制必须除去水分称为“干基”。因此计算中必须将“干基”成分修正到“湿基”。本文测量采用的仪器测出的组分中 HC 为“湿基”,CO、CO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 均为“干基”。根据文献[9]给出。“湿基”浓度=K×“干基”浓度

$$K = \frac{4 + \frac{n}{m} T - \left(\frac{n}{m} T - 2h\right) \frac{2}{x} [\text{HC}]_w + (2+h) [\text{HC}]_w \left(\frac{y}{x} - \frac{n}{m}\right)}{(2+h) \left[ \frac{n}{m} [\text{CO}_2]_d + [\text{CO}]_d + 2 \right] - \left(\frac{n}{m} T - 2h\right) [1 + [\text{NO}_2]_d - [\text{CO}]_d]}$$

式中,[ ]<sub>w</sub>指排气中各组分的容积浓度,湿基;m 和 n 为燃油中分子常数,由燃油技术条件确定;x 和 y 为排气中碳氢化合物的分子常数,C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> 可以取 x=1,y=4,因为碳氢化合物通常折合为 CH<sub>4</sub> 计算<sup>[10]</sup>;[ ]<sub>d</sub>代表排气中各组分容积浓度,“干基”。表 4 为“干基”样本数据转化为“湿基”样本数据。

表 4 发动机不同工况下修正后的“湿基”排放数据

Table 4 Corrected wet data of engine with different operation conditions

状态	额定推力/%	燃油量/(kg·h <sup>-1</sup> )	CO 体积分数 /10 <sup>-6</sup> m	NO <sub>x</sub> 体积分数 /10 <sup>-6</sup> m	NO 体积分数 /10 <sup>-6</sup> m	HC 体积分数 /10 <sup>-6</sup> m	CO <sub>2</sub> 体积分数 /%
慢车	7	551	629.1	4.9	2.9	1450	1.37
进近	30	1470	159	23.4	12.5	210	1.9
爬升	85	4001	29	72.5	67.7	150	2.71
起飞	100	4902	18.3	103.2	99.3	100	2.99

以上所测量的数据精度必须按标准进行校验。根据美国环境保护局的标准 ARP-1256A<sup>[11]</sup>的规定,对计算得出的油气比(F/A)<sup>[12]</sup>与所测的发动机油气比,大功率(起飞状态)时两者

误差应在 10%以内,小功率时两者误差应在 15%以内。计算所得与实测的 F/A 数据列于下表 5,其中空气流量是指核心发动机的空气流量。

表 5 F/A 污染排放及发动机气量油量测量计算的比较

Table 5 ARP comparison between emission data and engine fuel flow rate data

状态	额定推力/%	燃油量/(kg·s <sup>-1</sup> )	空气量/(kg·s <sup>-1</sup> )	气油比	计算气油比	误差/%
	7	0.153	20.424	133.49	124.43	6.8
	100	1.3617	90.55	66.50	64.37	3.2

由表 5 可见测出燃气成分进而计算所得的油气比与实测油气比接近,误差不超过 7%,比标准规定的误差范围要小,这表明整个取样系统具有代表性,测量技术是可行的。

### 2.3 ICAO 的计算方法

根据 ICAO《航空发动机的排放》标准规定的  $C_xH_y$  中的  $x=1, y=4$ , 在慢车状态下

$$Z = \frac{2 - [\text{CO}]_w - (|2/x| - |y/2x|)[\text{HC}]_w + [\text{NO}_2]_w}{[\text{CO}_2]_w + [\text{CO}]_w + [\text{HC}]_w} = 126.71$$

$$P_0/m = \frac{2Z - n/m}{4(1+h - |TZ/2|)} = 60.26$$

$$EI_{\text{NO}_x(\text{idle})} = \frac{[\text{NO}_x]_w}{[\text{CO}_2]_w + [\text{CO}]_w + [\text{HC}]_w} \cdot \frac{10^3 M_{\text{NO}_x}}{M_C + (n/m)M_H} \cdot (1 + T(P_0/m)) = 1.038 \text{g/kg}$$

式中,  $M_{\text{NO}_2}$  为  $\text{NO}_2$  的分子量等于 46.008g;  $M_C$  为 C 的原子量等于 12.011g;  $M_H$  为 H 的原子量等于 1.008g。

同理,可得  $\text{NO}_x$  在进近、爬升和起飞状态下的  $\text{NO}_x$  排放指数  $EI$  分别为

$$EI_{\text{NO}_x(\text{approach})} = 4.025 \text{g/kg}, EI_{\text{NO}_x(\text{climb})} = 8.813 \text{g/kg}$$

$$EI_{\text{NO}_x(\text{takeoff})} = 11.389 \text{g/kg}$$

根据 ICAO 数据库查得 JT3D-7 的最大推力为 85.4kN,  $rPR=18.76$ 。得到

$$D_V/F_\infty = \sum W_f EI_{f_i} / F_\infty = 30.29 \text{g/kN}$$

中国民航局规定  $\text{NO}_x$  排放不得大于  $(32 + 1.6 \times 18.76) = 62.016 \text{g/kN}$ , 所以该发动机排放的  $\text{NO}_x$  符合适航审定要求。

### 3 航空发动机 $\text{NO}_x$ 排放审定系统设计与实现

系统的软件设计主要是数据处理设计,在 VC6.0 开发平台下,利用 MFC<sup>[13]</sup>进行系统开发设计和实现。航空发动机  $\text{NO}_x$  排放审定系统主要包括三部分:试验数据输入、数据处理、系统审定。审定结构如图 3 所示。

(1) 试验参数包括发动机试验数据、环境参数、发动机型号及燃油类型。发动机数据包括:发动机型号、发动机额定推

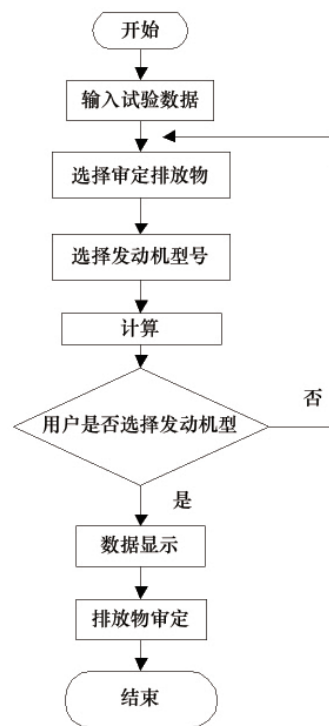


图 3 审定结构图

Fig. 3 Diagram of certification system

力;环境参数包括相对湿度、大气压力、环境温度;法规标准限制根据法规选定尾气成分  $\text{NO}_x$  的限值。

(2) 数据处理依据 ICAO 算法得到慢车、进近、爬升及起飞的排放指数。

(3) 根据排放法规对该发动机进行审定。

根据以上的设计步骤,设计实现了通用计算程序,便于进行自动计算,其输入与输出形式,如图 4—图 6 所示。从其中的数据,可以看到系统算出的各个工况下的发动机排放指数与计算的排放指数非常接近,同时得出发动机 JT3D-7 的  $\text{NO}_x$  排放符合现行的排放标准。

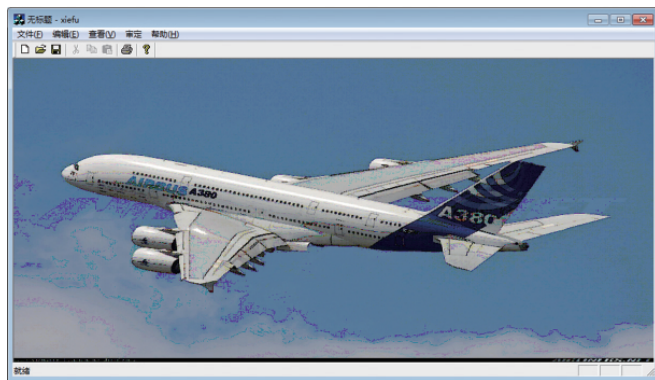


图 4 排放审定初始界面

Fig. 4 Initial interface of emission certification system



图 5 发动机 JT3D-7 计算结果

Fig. 5 Calculation result of engine JT3D-7

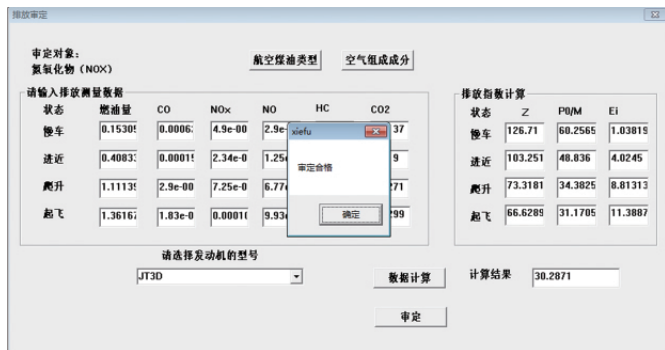


图 6 发动机 JT3D 审定结果

Fig. 6 Certification result of engine JT3D-7

### 4 结论

本文通过建立航空发动机排气污染物取样系统,分析了取样本数据,得出结论如下。

(1) 本文所建立的取样系统和取样技术切实可行,测量精度在 7%以内。

(2) 运用 ICAO 计算方式得出发动机 NO<sub>x</sub> 排放指数。根据 CCAR-34 验证得到发动机 JT3D-7 的 NO<sub>x</sub> 排放符合现行的排放标准。

(3) 利用 MFC 开发了 NO<sub>x</sub> 适航审定系统,该系统能快速地计算出标准 4 个状态下的排放指数并对发动机 NO<sub>x</sub> 排放进行排放审定。该系统对发动机排放数据处理具有一定的实际意义。

### 参考文献 (References)

[1] 赵坚行. 民用发动机污染排放及低污染燃烧技术发展趋势[J]. 航空动力学报, 2008, 23(6): 986-996.  
Zhao Jianxing. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(6): 986-996.

[2] 中华人民共和国航空工业部. HB-6117-87 航空燃气涡轮发动机气态污染物的连续取样及测量程序规范[S]. 北京: 航空工业部, 1987.  
Ministry of Aviation Industry of China. HB-6117-87 procedure for

analysis and evaluation of gaseous emission from aircraft turbine engines [S]. Beijing: Ministry of Aviation Industry, 1987.

[3] 吴寿生, 王华芳. 航空燃气涡轮发动机排气冒烟测量规范[S]. HB6116-1987. 北京: 航空工业部, 1987.

Wang Huafang, Wu Shousheng. Aircraft gas turbine engine exhaust smoke measurement [S]. HB6116-1987. Beijing: Ministry of Aviation Industry, 1987.

[4] Kristin R. Aircraft emissions [C]. AIAA-2003-0102, Proceedings of the 41st aerospace sciences meeting and exhibit, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reno, Nevada., 2003.

[5] International Civil Aviation Organization. Aircraft engine emission[S]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 1981.

[6] 中国民用航空局. 中国民用航空规章第 34 部[S]. 北京: 中国民用航空局, 2002.

Civil Aviation Administration of China. China civil aviation regulation-34[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2002.

[7] 王华芳, 林宇震, 刘高恩. 高压燃烧试验中气体污染物的测量[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2000, 13(2): 45-49.

Wang Huafang, Lin Yuzhen, Liu Gaoen. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2000, 13(2): 45-49.

[8] 刘高恩, 王华, 吕品, 等. 飞机发动机排气污染物的测量 [J]. 航空动力学报, 2003, 18(2): 348-352.

Liu Gaoen, Wang Hua, Lv Pin, et al. *Journal of Aerospace Power*, 2003, 18(2): 348-352.

[9] Society of Automotive Engineers. Procedure for the analysis and evaluation of gaseous emission from aircraft turbine engines [R]. Washington D C: Society of Automotive Engineers, 2004.

[10] International Civil Aviation Organization. Environmental protection annex 16 volume II aircraft engine emissions[R]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 1993.

[11] Society of Automotive Engineers. Procedure for the continuous sampling and measurement of gaseous emission from aircraft turbine engines[R]. Washington D C: Society of Automotive Engineers, 2006.

[12] 欧阳志宏, 董霖, 钟俊华. MFC 程序设计轻松入门 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009.

Ouyang Zhihong, Dong Lin, Zhong Junhua. MFC program design [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2009.

(责任编辑 胡少卿, 岳臣)

### · 科学共同体介绍 ·

## 中国电机工程学会

中国电机工程学会 (Chinese Society for Electrical Engineering) 成立于 1934 年。1882 年 7 月, 中国第一家发电公司——上海电气公司正式投入商业化运营, 拉开了中国电力工业发展的序幕。1933 年 2 月, 清华大学电机工程系主任**顾毓琇**在《电工》杂志上发表了“中国电工学会的发起”一文, 倡议组织电机工程界的学会。1934 年 7 月, 浙江大学工学院院长**李熙谋**、上海交通大学工学院院长**张廷金**等 45 人联署刊出了“中国电机工程师学会缘起”一文, 将发起组织的意旨陈述于全国电机

工程界。1934 年 10 月 14 日在上海成立了中国电机工程师学会 (中国电机工程学会前身)。1956 年学会经历重建。**刘澜波**、**程明陞**、**毛鹤年**、**张凤祥**等历任学会理事长。

中国电机工程学会是中国共产党领导下全国电机工程科学技术工作者自愿组成并依法登记成立的非营利性的学术性法人社会团体, 是我国电机工程科技事业的重要社会力量。学会工作总部设在北京, 挂靠国家电网公司, 接受中国科学技术协会和中华人民共和国民政部的业务指导和监督管理。

中国电机工程学会设立中国电力科学技术奖, 主办《动力与电气工程》、《中国电机工程学报》等刊物, 参加的国际组织或国际会议有电气电子工程师学会、国际大电网会议、国际供电会议委员会、电机工程国际会议等。国际大电网会议中国国家委员会秘书处设在中国电机工程学会。

2009 年 5 月, 中国电机工程学会第九次全国会员代表大会暨建会 75 周年纪念大会在北京召开, 选举**陆延昌**为理事长, **李若梅**为秘书长。

(责任编辑 秦政)