

基于磁感原理的结冰探测器参数计算方法*

王志敏, 郑 国

(上海航空测控技术研究所故障诊断与健康管理工作航空科技重点实验室 上海, 201601)

摘要 随着我国航空技术的迅速发展,防冰/除冰技术的研究越来越受到重视,系统中结冰探测器直接影响防冰/除冰的效果。文中对一种基于磁感原理的结冰探测器进行了分析,通过建模推导出相关参数的计算方法,并进行了仿真试验。笔者解决了结冰探测器基本设计参数计算的问题,为结冰探测器的设计提供了一种有效方法。

关键词 防冰/除冰; 结冰探测器; 建模; 结构分析; 参数计算

中图分类号 TH212

引 言

我国地域辽阔,气象条件复杂,广泛存在结冰气候条件。当飞机在结冰气象条件下飞行时,微细过冷水滴与飞机表面的短瞬碰撞即可在机翼、挡风玻璃以及发动机进气道等部件表面造成结冰^[1]。若不及时采取措施,将会严重影响飞机的飞行性能,甚至危及飞行安全^[2]。为解决此问题,采用防冰/除冰系统^[3-6]是最有效的方法,它由结冰探测器^[7-8]、指示器、控制器、加热器及告警提示等组成,而系统中结冰探测器直接影响防/除冰的效果。特别是结冰探测器的参数确定方法^[9]不明确是阻碍其发展的原因之一。随着我国航空事业的迅速发展,防冰除冰技术的研究越来越受到重视^[10]。文中通过对一种基于磁感原理的结冰探测器进行研究,为将来分析和设计相关产品提供初步计算方法和理论依据。

1 结冰探测器的工作原理

结冰探测器主要由振动筒、激振器、拾振器、加热器和壳体等组成,激振器为振动筒提供交变磁场,振动筒在磁场的作用下产生振动,同时拾振器通过拾取电路将机械振动信号转变为电信号反馈给激振电路,使振动筒在其固有频率上谐振。当振动筒上有冰结成时,附着冰增加的质量会导致振动筒谐振频率降低,当振动频率下降到与预先设置的结冰厚

度相对应的量时,结冰探测器将产生结冰信号。

该结冰探测器的结构如图 1。

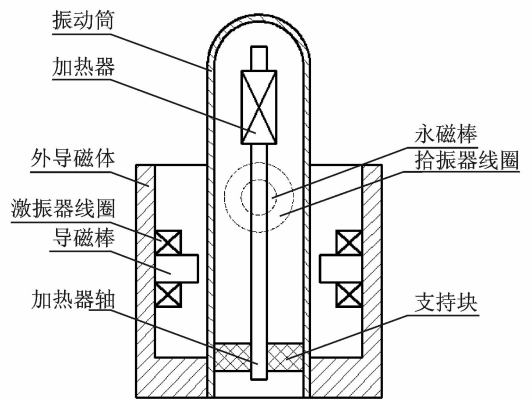


图 1 振动筒结构图

Fig. 1 Schematic diagram of vibration cylinder structure

图中振动筒是一个薄壁圆筒,收集结冰量,作为弹性敏感元件,形成振动系统,接收激振器的激振力作用而产生振动;振动筒是结冰探测器的核心器件,是探测结冰的敏感元件,在设计中其材料选择要考虑材料弹性的恒定性、温度稳定性及一定的强度、要满足桨叶除冰律及系统的灵敏度要求。固有频率不能过高、要不受机上振动的影响;固有频率不能太低、要使它冰收集尽量多。直径小的圆柱体比直径大的圆柱体容易结冰。

激振器由导磁棒和激振线圈组成,激振器通过激振线圈的交变电流产生交变磁场,使振动筒产生振动;拾振器由永磁棒和拾振线圈组成,当激振器的

激振作用使振动筒产生振动时,拾振器永磁棒和振动筒所组成的磁路的空气隙发生变化,使磁阻变化,因而使磁路中的磁通 Φ 发生变化,在拾振器拾振线圈中产生感应电势 e ;加热器用于当振动筒上结冰后加热去除结冰;外导磁体用以形成磁通路。

2 结冰探测器设计参数计算方法

开展结冰探测器的设计参数主要分析振动筒上的受力情况,适当分析确定各个部件的设计参数使振动筒上的力达到平衡状态,这时振动筒做等幅振动,其振动频率为当时情况的固有频率。

2.1 振动筒受力分析

当激振线圈中有放大器输出的正反馈电流时,激振器像电磁铁一样,产生激振力 $F_Z(t)$ 供振动筒振动,激振器也会引起反抗力 $F_{D1}(t)$,拾振器磁路由于振动筒振动有空气隙 δ 的变化,引起磁通 Φ 变换,产生感应电势 e ,从而引起反抗力 $F_{D2}(t)$ 。因此,振动筒上的受力情况如图2所示。

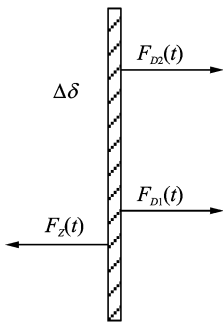


图2 振动筒上受力图

Fig. 2 Schematic diagram of force on vibration cylinder

由于调理电路的作用,振动筒上的力达到平衡时,即 $F_Z(t) = F_{D1}(t) + F_{D2}(t)$,振动筒做等幅振动。

1) 激振力 $F_Z(t)$ 的计算

当激振线圈输入电流,这时的激振器就像电磁铁一样,产生交变的电磁吸力 $F_Z(t)$,按麦克斯韦公式有

$$F_Z(t) = \frac{B^2 S_Z}{2\mu_0} \quad (1)$$

其中: B 为通过导磁棒与振动筒之间空气隙的磁感应强度; S_Z 为导磁棒的截面积,近似认为磁感应强

度通过的面积。

由磁路定律可得

$$B = \frac{N_Z I_Z \mu_0}{l} \quad (2)$$

因激振器激振线圈中的电流是由拾振器的感应电势 e 经过结冰速率指示器的放大器放大后正反馈一部分到激振线圈中,激振线圈中的电流近似为

$$I_Z = -\frac{eKK_f}{R_{LZ}} = -\frac{eKK_f}{\omega L_Z} \quad (3)$$

其中: K 为放大器的放大倍数; K_f 为反馈系数; ω 为拾振线圈电流频率; L_Z 为激振线圈的电感; e 为拾振器的感应电势。

此处为激振线圈中的电阻很小时的情况,仅改变激振线圈,如还有其它元件,也应改变。

根据电磁感应定律可得

$$e = -N_S B_S S_S \frac{1}{l_m} \cos \omega_n t \quad (4)$$

其中: N_S 为拾振器线圈匝数; B_S 为永磁棒的磁感应强度; S_S 为永磁棒截面积; l_m 为振动筒未振动时,永磁棒与振动筒的单边间隙; ω_n 为振动筒的频率。

由磁路定律可得

$$B = \frac{N_Z I_Z \mu_0}{l} = \frac{N_Z \mu_0}{l} \frac{KK_f}{\omega L_Z} N_S B_S S_S \frac{1}{l_m} \cos \omega_n t \quad (5)$$

$$F_Z(t) = \frac{B^2 S_Z}{2\mu_0} = \frac{S_Z}{2\mu_0} \left(\frac{N_Z \mu_0}{l} \frac{KK_f}{\omega L_Z} N_S B_S S_S \frac{1}{l_m} \right)^2 \times \cos^2 \omega_n t = K_Z \cos^2 \omega_n t \quad (6)$$

其中: N_Z 为激振线圈匝数。

2) 电磁阻力 $F_{D1}(t)$ 计算

由于振动筒振动, l 发生变化,磁路磁阻发生变化,磁通发生变化,因而在激振线圈中也会产生反抗的感应电势 e_z ,出现与原电流方向相反的电流,就有电磁阻力 $F_{D1}(t)$ 出现。

按照上述分析可得

$$F_{D1}(t) = \frac{1}{2} \frac{N_Z^2 \mu_0 S_Z}{X_m(l + X_m)} \left(\frac{KK_f}{\omega L_Z} \frac{1}{l_m} N_S B_S S_S \right)^2 \times \cos^2 \omega_n t = K_{D1} \cos^2 \omega_n t \quad (7)$$

3) 电磁阻力 $F_{D2}(t)$ 的计算

由于 e 的产生,当电路形成回路时,拾振线圈 N_s 中有电流通过,产生新的磁通 Φ_1 ,反抗 Φ 的变化,因而产生电磁阻力 $F_{D2}(t)$ 。

由能量守恒定律,磁场力所做的功等于磁能的增加,可得

$$F_{D2}(t) = \frac{1}{2} \frac{F^2}{X_m} \frac{\mu_0 S_S}{(l + X_m)} = \frac{(N_S I)^2 \mu_0 S_S}{2X_m(l + X_m)} \quad (8)$$

其中: N_s 为拾振器线圈匝数; S_s 为永磁棒截面积; l 为振动筒未振动时, 永磁棒与振动筒的单边间隙; I 为拾振线圈中的电流; X_m 为最大振幅。

$$I = \frac{l}{\mu_0 S} \frac{U}{\omega N_s^2} = \frac{B_s}{\mu_0 \omega N_s m} \cos \omega_n t \quad (9)$$

$$F_{D2} = \frac{1}{2} \frac{1}{X_m (l + X_m)} \frac{S_s B_s^2}{\mu_0 \omega^2 m^2} \times \cos^2 \omega_n t = K_{D2} \cos^2 \omega_n t \quad (10)$$

其中: ω 为拾振线圈电流频率; m 为振动筒的有效质量; B_s 为永磁棒的磁感应强度。

当振动筒在某结冰状态下, 其上有冰层质量 m_1 时, 在 $f_z(t) = f_{D1}(t) + f_{D2}(t)$ 时, 振动筒做等幅振动, 此时结冰速率指示器输出的频率信号对应于冰层质量 m_1 。

在另一结冰状态下, 输出的频率信号对应于冰层质量 m_2 。对激振器、拾振器、放大器的主要参数的设计按关系式 $F_z(t) = F_{D1}(t) + F_{D2}(t)$ 进行, 得到

$$K_z = K_{D1} + K_{D2} \quad (11)$$

由此选择各参数。

2.2 振动筒上的结冰量与其振动频率的关系分析

振动筒是一个质量连续分布的具有弹性的薄壁圆筒, 当它的物理尺寸, 材料和固定方式一定时可近似认为它是一个具有集中参数的一自由度二阶机械振动系统。设其有效质量为 m , 所受的阻尼为 D , 刚度为 K , 如果使振动筒受到激振力为与振动筒振动速度成比例的闭环激振时, 其运动微分方程为 $m\ddot{x} + D\dot{x} + Kx = B\dot{x} + \delta(t)$, 改写为

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} + \omega_n x = \frac{\delta(t)}{m} \quad (12)$$

其中: 振动系统相对阻尼比为 $\xi = \frac{D-B}{2\sqrt{mK}}$; 振动筒的固有频率为 $\omega_n = \sqrt{\frac{K}{m}}$ 。

对 \dot{x} 求解, 得到

$$\dot{x}(t) = \frac{1}{m\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_n t \sqrt{1-\xi^2} - \varphi) \quad (13)$$

$$\varphi = \arctan \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} = \arcsin \sqrt{1-\xi^2} \quad (14)$$

如果当 $D-B=0$, 即 $D=B$ 时, $\xi=0$, 此时

$$\dot{x}(t) = \frac{1}{m} \sin(\omega_n t - 90^\circ) = -\frac{1}{m} \cos \omega_n t \quad (15)$$

从式(15)可知, 振动筒做等幅振动, 即振动筒所受的激振力和振动时所受到的阻尼力相等。这时振动筒的振动频率为在该条件下的固有频率, $\omega_c = \omega_n$, 即相对于振动筒的某一有效质量 m 时的固有频率。

如图3所示, 当振动筒上结冰时, 其有效质量为

$$m = m_0 + \Delta m \quad (16)$$

其中: m_0 为振动筒无冰时的有效质量; Δm 为冰层的质量。

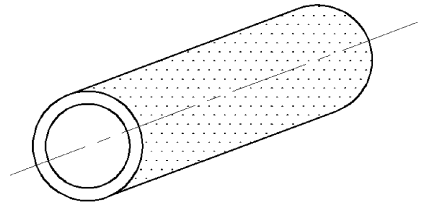


图3 振动筒结冰示意图

Fig. 3 Schematic diagram of vibration cylinder icing

振动筒在 $m_0 + \Delta m$ 条件下做等幅振动时, 固有频率为

$$\omega_c = \omega_n = \sqrt{\frac{K}{m_0 + \Delta m}} \quad (17)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m_0 + \Delta m}} \quad (18)$$

虽然增加了冰层, 仍可认为 K 不变。

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m_0 + \Delta m}} = f_0 \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\Delta m}{m_0}}} \quad (19)$$

其中: $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m_0}}$, 为振动筒没有结冰时的最低固有频率。

当测量出 f_c , 已知 f_0 , 则可测得结冰量。

根据以上分析开展了仿真试验, 当外部大气温度和结冰速率信号改变时, 测得的值如表1所示。通过比较表1中的理论值、实测值及其他数据看出, 该计算方法有效, 可以用来开展基于磁感原理的结冰探测器的参数计算。

3 结束语

笔者详细论述了一种基于磁感原理的结冰探测器结构和工作原理, 通过分析主要元件振动筒上的受力情况, 建立了受力模型, 依次推导出各部分参数

表1 加热通断时间对应表
Tab.1 Heating on-off time table

大气温度/ $^{\circ}\text{C}$	t_{on}/s		结冰速率/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	t_{off}/s	
	理论值	实测值		理论值	实测值
-55	34	34	0	∞	∞
-48.5	30.1	30	0.1	600	600
-42	26.2	26	0.2	300	300
-35.5	22.3	22	0.3	200	200
-29	18.4	18	0.4	150	150
-22.5	14.5	14	0.5	120	120
-16	10.6	10.5	0.6	100	100
-9.5	6.7	6.5	0.7	85.7	85
-3	2.8	3	0.8	75	75
3.5	-1.1		0.9	66.7	66
10	-5		1.0	60	60
16.5	-8.9		1.1	54.5	54
23	-12.8		1.2	50	50
29.5	-16.7		1.3	46	45
36	-20.6		1.4	43	43
42.5	-24.5		1.5	40	40
49	-28.4		1.6	37.5	38
55.5	-32.3		1.7	35.3	35
62	-36.2		1.8	33.3	33
68.5	-40.1		1.9	31.6	32
75	-44		2.0	30	30

的计算方法,开展了仿真试验。试验表明,各部分参数的计算方法为我国进行结冰探测器研究提供了一种有效手段。

参 考 文 献

- [1] 傅见平. 直升机防冰技术研究[J]. 飞行力学,1999,17(4):71-74.
Fu Jianping. Research of Helicopter Icing Protection [J]. Flight Dynamics, 1999, 17(4): 71-74. (in Chinese)
- [2] 杜亮,洪冠星. 结冰对飞机飞行包线影响分析及控制[J]. 飞行力学,2008,26(2):9-12.
Du Liang, Hong Guanxing. Analysis and control of icing effects on aircraft flight envelope[J]. Flight Dynamics, 2008, 26(2): 9-12. (in Chinese)
- [3] 张杰,周磊,张洪,等. 飞机结冰探测技术[J]. 仪器仪表学报,2006,27(12):1578-1586.

Zhang Jie, Zhou Lei, Zhang Hong, et al. Aircraft icing detection technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(12): 1578-1586. (in Chinese)

- [4] 杨蓉,张杰,郑英,等. 结冰探测技术研究[J]. 电子测量与仪器学报,2010,24(增刊):199-206.
Yang Rong, Zhang Jie, Zheng Ying, et al. Novel technology of icing measurement and instrument[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(S): 199-206. (in Chinese)
- [5] 洪海华,刘伟光,艾剑波,等. 直升机的防除冰系统[J]. 直升机技术,2010(1):52-56.
Hong Haihua, Liu Weiguang, Ai Jianbo, et al. The anti icing system of helicopter[J]. Helicopter Technique, 2010(1): 52-56. (in Chinese)
- [6] Roy S, Iazd A, Russell G, et al. Smart ice detection systems based on resonant piezoelectric transducers [J]. Sensors and Actuators A:Physical, 1998, 63(3): 243-250.
- [7] 王华,王以伦,张滨华. 基于磁致伸缩原理的结冰传感器设计理论[J]. 电工技术学报,2003,18(6):77-79.
Wang Hua, Wang Yilun, Zhang Binhua. Theory of designing Ice detector based on magnetostriction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(6): 77-79. (in Chinese)
- [8] 张滨华,王华,王经松,等. 一种基于振动原理的结冰探测方法[J]. 仪器仪表学报,2003,24(3):384-386.
Zhang Binhua, Wang Hua, Wang Jisong, et al. A method for ice detecting based on the principle of vibration[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(3): 384-386. (in Chinese)
- [9] Thomas S K, Robert P, Cassoni D. Aircraft anti-icing and deicing techniques and modeling [R]. [S. l.]: AIAA paper 96-0390, 1996.
- [10] 郭龙,沈宏良,施永毅. 飞机容冰技术的研究进展[J]. 飞行力学,2005,23(1):75-78.
Guo Long, Shen Hongliang, Shi Yongyi. Research progress of the aircraft icing avoidance technique [J]. Flight Dynamics, 2005, 23(1): 75-78. (in Chinese)



第一作者简介:王志敏,男,1964年3月生,高级工程师。主要研究方向为故障诊断和测控技术。

E-mail: wang218502@hotmail.com