

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.05.10

直升机旋翼锥体频闪灯校准技术研究

张建国, 侯秀波, 杜德森, 徐庆玉, 李田甜

(航空工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150066)

摘 要: 仿真模拟试验器校准频闪灯传统校准方法需要操作者目视判断, 试验结果的重复性较差, 且存在评定所得不确定度较大的问题。为此, 研究了航空专用测试设备直升机旋翼锥体频闪灯的一种实验室校准方法。该方法采用脉冲频率法以光电转换形式建立校准装置, 对频闪灯的闪烁频率等技术参数进行校准。实验结果表明: 在准确度大幅提高的同时, 不确定度更小。与传统方法相较而言, 本方法操作简单快捷, 通用的标准设备即可满足校准要求, 量值溯源更可靠、更容易, 同时也符合计量相关法规的要求, 具有一定的推广及应用价值。

关键词: 频闪灯; 旋翼锥体; 脉冲频率法; 专用测试设备(STE/SPTE); 光电转换

中图分类号: TB9; V249.122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795(2023)05-0069-07

Research on calibration technology of helicopter rotor track strobe

ZHANG Jianguo, HOU Xiubo, DU Desen, XU Qingyu, LI Tiantian

(AVIC Harbin Aircraft Industry Group Co.Ltd., Harbin 150066, China)

Abstract: The traditional method for calibrating strobe using simulation testers requires visual judgment by operators, resulting in poor repeatability of test results and large uncertainty in the evaluation results. A laboratory calibration method for helicopter rotor cone strobe, a specialized aviation testing equipment, was studied. This method uses the pulse frequency method to establish a calibration device in the form of photoelectric conversion to calibrate technical parameters such as the flashing frequency of the strobe. The experimental results show that while the accuracy has been significantly improved, and the uncertainty is smaller. Compared with the traditional method, this method is simple and fast to operate, and universal standard equipment can meet the calibration requirements. The traceability of measurement values is more reliable and easier, and it also meets the requirements of metrology regulations, and has certain popularization and application value.

Key words: strobe; rotor track; pulse-frequency method; specialized testing equipment (STE/SPTE); photoelectric conversion

0 引言

直升机旋翼桨叶的挥舞轨迹被形象地称为“旋翼锥体”, 是直升机旋翼系统的重要参数^[1], 它集中反映了直升机所有桨叶动态参数和气动参数的一致性, 是桨叶空气动力和飞行控制等综合作

用的最终体现^[2], 桨叶的不平衡是直升机振动的主要来源之一^[3]。直升机旋翼锥体频闪灯(本文简称频闪灯)是直升机相位动平衡测量系统(一般由转速和振动传感器、相位动平衡仪、频闪灯等三部分组成且相对独立工作)的主要组成部分^[4-5], 主要用于对单层直升机旋翼等多桨叶旋转时锥体平面

收稿日期: 2023-08-23; 修回日期: 2023-10-17

引用格式: 张建国, 侯秀波, 杜德森, 等. 直升机旋翼锥体频闪灯校准技术研究[J]. 计测技术, 2023, 43(5): 69-75.

Citation: ZHANG J G, HOU X B, DU D S, et al. Research on calibration technology of helicopter rotor track strobe[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(5): 69-75.



性的测试检查^[6],从而能初步判断是否由于桨叶的不平衡引起直升机令人不舒适的振动。此类频闪灯的工作原理是基于频闪效应,在外部信号(工作时信号由主轴的转速磁传感器通过相位动平衡仪间接提供)激励下,频闪灯以对应的旋翼转动频率闪动,此时,人眼观察到的旋翼(桨叶)将是静止不动的,可以籍此观察各桨叶的振动状态和运动轨迹等。直升机旋翼锥体频闪灯因其使用方便,环境适应性好,可视程度高等优点,多年来一直在生产试验和维护现场使用。

直升机旋翼锥体频闪灯属于专用测试设备,无法归类于转速表等通用计量器具进行校准,没有适用的国家检定规程或校准规范可以参照。实际工作中,会遇到频闪灯闪烁频率不随输入的激励频率闪动的状况(频闪灯自身故障),因此有必要对其定期校准。

本文通过研究脉冲频率法校准直升机旋翼锥体频闪灯的闪烁频率计量特性,给出了一种可以用通用计量标准设备对频闪灯进行准确校准的实用方法,使频闪灯的量值溯源更可靠,并且符合《国防科技工业专用测试设备计量管理办法》第十四条关于溯源性的要求。

1 直升机旋翼锥体频闪灯校准现状

因频闪灯的校准没有国家检定规程或校准规范可以参照,仅有少量相关校准方法研究。目前,一般基于自制的转速装置实现对频闪灯的校准^[7-8]。

图1为频闪灯主要生产厂家之一CHADWICK HELMUTH公司配套生产的一个测试用转台Model 11,此转台可以在900 r/min和1 800 r/min两个转速下,定性的观察频闪灯锁定状态^[8]。

检查直升机相位动平衡设备工作状态时按图2方式连接,转台通过相位动平衡仪与频闪灯连接,当转台开始转动时,相位动平衡仪得到转台的转动速度信号并以此驱动频闪灯闪亮,若可以观察到清晰稳定的单定像,且定像标志方向(代表相位角)符合说明书技术要求。这种方式可以检查整套直升机相位动平衡设备的工作状态,但不适用对频闪灯进行校准。

图3中的HBD型直升机动平衡仿真试验器是国内自主研发制造的相位动平衡设备校准装置。

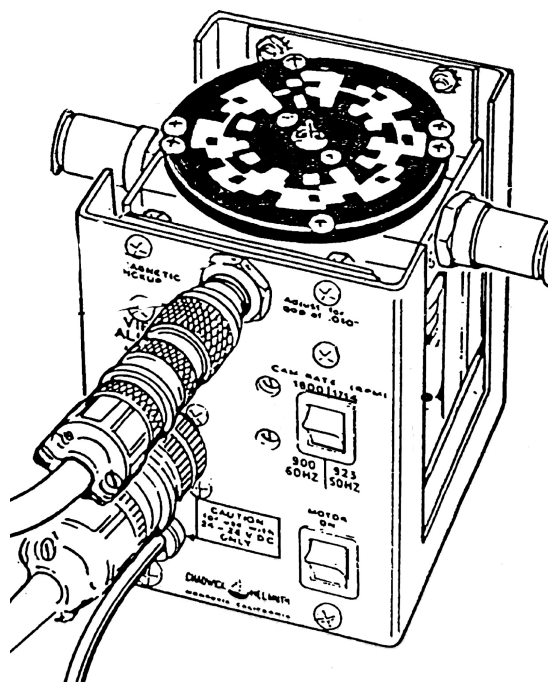


图1 测试转台 Model 11

Fig.1 Test turntable Model 11

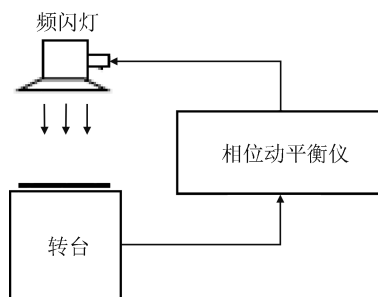


图2 Model 11转台测试直升机相位动平衡设备连接示意图

Fig.2 Connection diagram for testing helicopter phase dynamic balance equipment using turntable Model 11

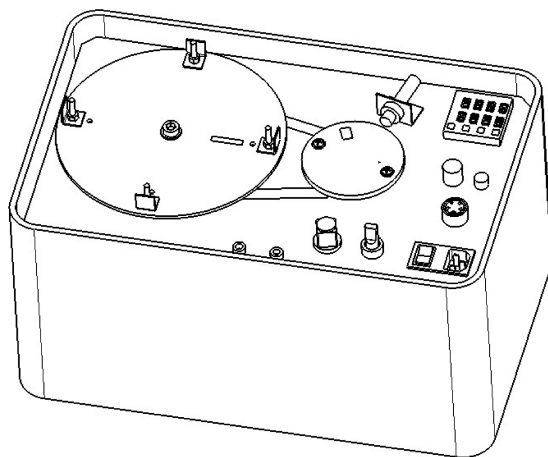


图3 HBD型直升机动平衡仿真试验器

Fig.3 HBD Helicopter dynamic balance simulation tester

仿真实验器由大小两个转盘组成,大小转盘通过皮带连接,转台驱动电机的转速可以在 $60 \sim 800 \text{ r/min}$ 调节,小转盘的转速是大转盘的5倍。对频闪灯可以在 $60 \sim 4\,000 \text{ r/min}$ 进行校准,其中, 800 r/min 以下用大转盘直接校准, $800 \sim 4\,000 \text{ r/min}$ 用小转盘校准,转速数据显示的是大转盘的实时数据。

图4是使用直升机动平衡仿真试验器校准频闪灯时的接线方式,由信号发生器为被校频闪灯提供驱动信号,调节直升机动平衡仿真试验器转盘的转动速度,直至通过被校频闪灯可以观察到反光贴清晰稳定的单定像,此时直升机动平衡仿真试验器显示的转速值即为频闪灯的实际转速。

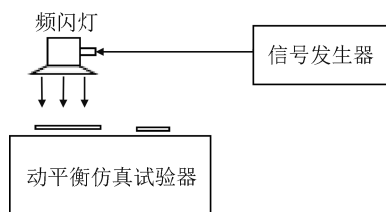


图4 动平衡仿真试验器校准连接示意图

Fig.4 Connection diagram of calibration using dynamic balance simulator

使用直升机动平衡仿真试验器校准频闪灯可以基本满足频闪灯使用单位的技术要求,存在的问题主要集中在两个方面:一是校准点无法覆盖被校设备的工作范围。频闪灯的实际工作范围可以达到 $120 \sim 12\,000 \text{ r/min}$ (即 $2 \sim 200 \text{ Hz}$),直升机动平衡仿真试验器受电机转速及人眼观察能力的限制只能实现 $300 \sim 4\,000 \text{ r/min}$ 范围内的转速校准。二是校准结果的不确定度较大。从校准过程来看,直升机动平衡仿真试验器校准频闪灯的不确定度来源主要有:直升机动平衡仿真试验器不准引入的不确定度;测量重复性引入的不确定度;测量分辨力引入的不确定度以及人眼视觉影响引入的不确定度等。其中,测量分辨力引入的不确定度因大小转盘分辨力不同,需要分别考虑,经过计算验证,直升机动平衡仿真试验器校准频闪灯的相对不确定度一般都在 10^{-3} 以上。

近年来,随着传感器技术的不断发展,将校准精度较低的特殊参数转化为校准精度较高的电学通用参数进行校准成为计量研究的一个热门方向。应用光电转换技术,实现脉冲频率法校准频

闪灯,可以大幅度提升频闪灯的校准精度,切实提高重要设备的校准保障能力。

2 校准方法

2.1 脉冲频率法原理^[9-11]

频闪灯的工作原理是通过频闪效应,利用人眼的视觉暂留,对转速直接测量。由此可知,频闪灯测量转速的准确度与闪烁频率的准确度直接相关。因此若校准时可以直接测量频闪灯的闪烁频率的准确度,将会大幅度提升测量精度,同时还可以有效减少频闪效应读数时引入的不确定度。

用脉冲频率法校准频闪灯,须引入光电转换元件——光电传感器。按照图5接线,通过信号发生器驱动,产生与驱动频率一致的频闪光,将其作为光源对准光电传感器,利用光电转换元件,将接收到的频闪光转换成电脉冲信号,输入到通用计数器进行脉冲频率的测量。校准过程无需利用频闪效应测量转速,直接读取通用计数器的测量值并计算频闪灯的示值误差。

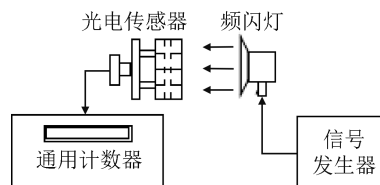


图5 脉冲频率法校准频闪灯连接示意图

Fig.5 Connection diagram for calibrating strobe using pulse frequency method

用脉冲频率法校准频闪灯的不确定度来源主要有:通用计数器频率测量不准引入的不确定度;通用计数器显示分辨力引入的不确定度以及测量重复性引入的不确定度。

2.2 校准实施

实施频闪灯的校准,首先应了解驱动其闪烁的信号特征。实际使用中,频闪灯与相位平衡仪配套使用,其驱动输入信号频率是相位平衡仪通过转速传感器得到的旋翼转速信号在跟踪状态下从频闪灯的驱动端口输出设置的桨叶数量的乘积。图6是当相位平衡仪的转速信号为 360 r/min (6 Hz),桨叶数量为1片时频闪灯的驱动信号。可以看到,频闪灯驱动信号是占空比为50%的方波,幅度在 $1 \text{ V}_{\text{p-p}}$ 以上,上升时间 $3 \sim 4 \text{ ms}$ 。

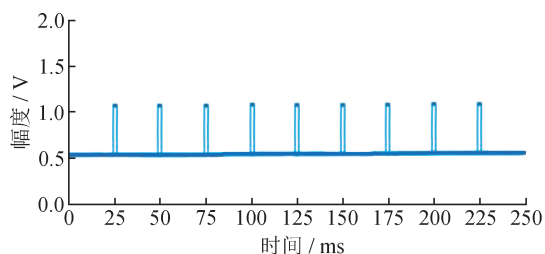


图6 频闪灯的驱动信号

Fig.6 Drive signal of strobe

以135M-12型频闪灯为例对脉冲频率法的校准进行说明。其说明书中给出的测量允许误差为 $\pm 2\%$ ，量程范围为120~12 000 r/min，由函数发生器提供驱动频率，驱动信号为方波，峰峰值幅度为1 V。光电传感器由直流稳压电源提供驱动，供电电压为5 V，信号输出端与示波器或通用计数器连接。当频闪灯闪烁并对准光电传感器时，由光电传感器转换频闪灯闪烁频率得到脉冲信号，与光电传感器连接的示波器显示连续的脉冲波形。图7为频闪灯驱动频率为40 Hz时，示波器显示的脉冲信号波形。

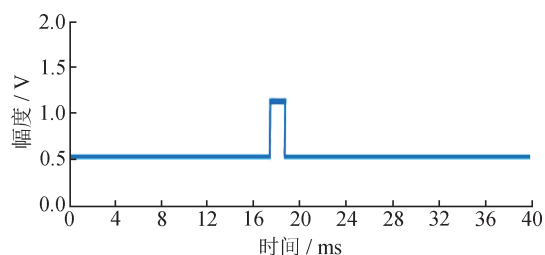


图7 频闪灯40 Hz闪烁频率时脉冲波形

Fig.7 Pulse waveform of strobe at 40 Hz flicker frequency

图7及图8中，光电传感器得到的频闪灯闪烁频率波形非常好，有很好的上升沿(4 μs 以下)和基线长度，脉冲幅值峰峰值可达500 mV左右，完全能够满足通用计数器测量的触发灵敏度要求，可

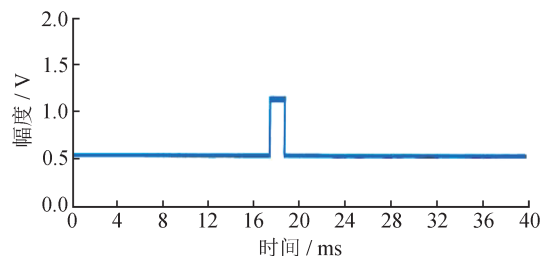


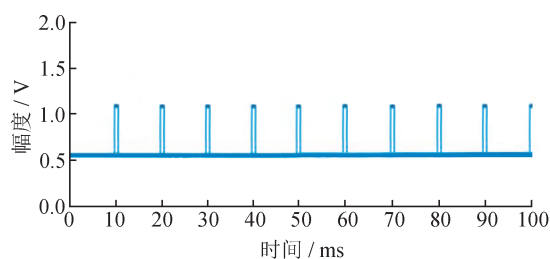
图8 频闪灯闪烁脉冲波形细节图

Fig.8 Details of strobe flicker pulse waveform

以保证通用计数器应该稳定的测量频率值。此外，因测量脉冲来自普通光源，光线较为分散，为保证频闪灯闪烁频率的测量，可将频闪灯尽量对正并靠近光电传感器，也可以尝试降低环境亮度，同时设置通用计数器100 kHz低通滤波开启。

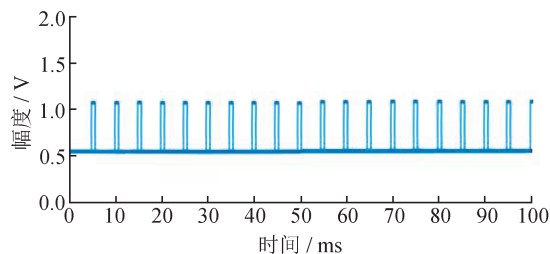
图8中的频率波形是在一个高电平上叠加的，经测量，该电平值约为0.5 V。因此在通用计数器上测量频闪灯闪烁频率时，需要将触发电平提升至0.5 V才能获得正确的频率测量数据。

当频闪灯的驱动频率增大时，如图9，当频闪灯的驱动频率分别为100、200 Hz时，示波器显示的频闪灯闪烁脉冲信号的波形状态。由图9可知，虽然频闪灯驱动频率在增大，但脉冲信号的上升时间依然保持在4 μs 以下，保持了一个陡峭的上升沿，同时幅值也保持在450 mV以上，通用计数器可以很好的测量得到信号的频率值。



(a) 100 Hz时的频闪脉冲信号

(a) Stroboscopic pulse signal at 100 Hz



(b) 200 Hz时的频闪脉冲信号

(b) Stroboscopic pulse signal at 200 Hz

图9 不同频率的频闪脉冲信号

Fig.9 Stroboscopic pulse signals of different frequencies

当驱动频率小于2 Hz时，由于频闪灯的闪烁频率过低，环境对脉冲信号的干扰明显增加，使通用计数器的测量显示误差显著增大，且易产生数据跳变；驱动频率大于200 Hz时，频闪灯的闪烁亮度急剧下降，脉冲信号的幅值也相应大幅度降低，这显著影响通用计数器的测量显示，经过试验并结合使用实际情况，确定该方法可以保证

结果准确性的频率(转速)校准范围为2~200 Hz (120~12 000 r/min)。

此外,对频闪灯的校准除闪烁速度的校准外还包括驱动灵敏度的校准、灯聚焦状态的校准及调整,其中灯聚焦状态的校准及调整是针对频闪灯的光学特性的有效校准项目(不在本文讨论)。

3 不同方法测量数据的对比

为验证脉冲频率法校准频闪灯的准确性和可靠性,采用直升机动平衡仿真试验器和通用计数器分别作为标准设备,对同一频闪灯进行校准,对比两种方法的测量结果。测量用到的被校设备和计量标准器具信息见表1。

表1 被校设备及计量标准器具信息^[4,7,12]

Tab.1 Information on calibrated equipment and measuring standards^[4,7,12]

设备名称	型号	测量范围	最大允许误差
频闪灯	135M-12	120~12 000 r/min	$\pm 2\%$
直升机动平衡仿真试验器	HBD	300~4 000 r/min	$\pm 0.1\%$
通用计数器	SP3386	0.14 mHz~1.5 GHz	$A < 1 \times 10^{-7}$

根据实际情况,在120~12 000 r/min(即2~200 Hz)内选取9个频率点,用同一个函数发生器为被校频闪灯提供驱动信号。分别用直升机动平衡仿真试验器和通用计数器进行校准。校准的示值误差结果见表2。

从表2的数据可以看出,脉冲频率法校准频闪灯相比于动平衡仿真实验器校准,其可测量的转速范围可以提升至120~12 000 r/min(即2~200 Hz),能够完全覆盖135M-12频闪灯的频闪工作范围。事实上,脉冲频率法校准频闪灯的校准范围取决于通用计数器的测量范围,这就为今后校准更大工作范围的频闪类设备提供有效的技术支撑。

此外,脉冲频率法校准的示值误差可以达到 10^{-6} 量级,远高于动平衡仿真实验器的校准结果。这是因为通用计数器进行频率测量时的分辨力很高,测量200 Hz频率时,也可以分辨到1 μ Hz,而

表2 不同方法校准频闪灯的测量误差

Tab.2 Measurement errors of strobe calibration by different methods

选取频率值/Hz	对应转速值/(r·min ⁻¹)	示值误差	
		通用计数器	动平衡仿真试验器
2	120	-2.34×10^{-6}	无法测出
5	300	-2.01×10^{-6}	-1.20%
6	360	-2.28×10^{-6}	-1.03%
10	600	-2.04×10^{-6}	-1.17%
20	1 200	-2.37×10^{-6}	-0.21%
40	2 400	-3.24×10^{-6}	-0.12%
60	3 600	-2.92×10^{-6}	-0.08%
100	6 000	-2.77×10^{-6}	无法测出
200	12 000	-3.99×10^{-6}	无法测出

动平衡仿真试验器的转速显示分辨力只有1 r/min,甚至在小转盘读数时转速的分辨力是5 r/min。

综上所述,脉冲频率法校准频闪灯不仅可以覆盖频闪灯工作范围,而且可以大幅度提高校准精度,另外因通用计数器可以溯源至时间频率的计量基准,所以脉冲频率法校准频闪灯可以保证频闪灯量值溯源的准确可靠。

4 不确定度评定示例^[13-14]

对脉冲频率法校准频闪灯的测量结果不确定度进行评定时,数学模型见公式(1)。

$$\Delta \bar{f} = \bar{f} - f_0 \quad (1)$$

式中: $\Delta \bar{f}$ 为被校频闪灯的示值误差; $\bar{f}$ 为频率实测平均值; f_0 为频闪灯标称值。

用脉冲频率法校准频闪灯的不确定度来源主要有:通用计数器频率测量不准引入的不确定度;通用计数器显示分辨力引入的不确定度以及测量重复性引入的不确定度。

当选取频闪仪6、60、200 Hz三个闪烁频率点进行测量时,对其测量结果分别进行不确定度计算。

4.1 测量重复性引入的不确定度

对频闪灯的三个闪烁频率点分别测量10次,得到的测量值见表3。

表3中的测量数据,按公式(2)计算得到重复

表3 频闪灯不同频率下重复性测量值

Tab.3 Repeatability of strobe at different frequencies

序号	测量频率值/Hz		
	6 Hz	60 Hz	200 Hz
1	5.999 970 24	59.999 772 8	199.999 888
2	5.999 947 12	59.999 852 2	199.999 762
3	5.999 952 24	59.999 984 8	199.999 233
4	5.999 877 88	59.999 880 0	199.999 297
5	5.999 948 12	59.999 507 2	199.999 516
6	5.999 899 12	59.999 501 2	199.999 874
7	5.999 844 17	59.999 778 4	199.999 125
8	5.999 900 60	59.999 700 8	199.999 948
9	5.999 879 97	59.999 823 2	199.999 892
10	5.999 888 82	59.999 876 4	199.999 676

性引入的不确定度分量 u_1 。

$$u_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (f_i - \bar{f})^2}{90}} \quad (2)$$

4.2 通用计数器频率测量不准引入的不确定度

从通用计数器的说明书可知,通用计数器 SP3386 晶振准确度 $A = 1 \times 10^{-7}$,通用计数器各频率点最大允许误差引入的不确定度 u_2 按 B 类方法评定,均匀分布取包含因子 $k = \sqrt{3}$,按公式(3)计算。

$$u_2 = \frac{A \cdot f}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

4.3 通用计数器显示分辨力引入的不确定度

使用的通用计数器在各频率下的测量分辨力 f_s 分别为 10 nHz、100 nHz、1 μ Hz,通用计数器显示分辨力引入的不确定度分量 u_3 按公式(4)计算。

$$u_3 = 0.289 \times f_s \quad (4)$$

4.4 合成标准不确定度及扩展不确定度

经过计算,在选取的 3 个频率点上,被校频闪灯测量不确定度分量见表 4。

由于不确定度的各分量独立不相关,则合成标准不确定度可用方和根法计算。根据 JJF1033-2023《计量标准考核规范》^[15],当检定或校准结果的重复性引入的不确定度分量大于被检定或校准仪器的分辨力所引入的不确定度分量时,此时重复性中已经包含分辨力对检定或校准结果的影响,故不应当再考虑分辨力所引入的不确定度分

表4 被校频闪灯测量不确定度分量

Tab.4 Uncertainty components of calibrated strobe Hz

测量频率点	测量重复性引入的不确定度 u_1	通用计数器频率测量不准引入的不确定度 u_2	通用计数器显示分辨力引入的不确定度 u_3
6	1.298×10^{-5}	3.464×10^{-7}	2.890×10^{-9}
60	5.003×10^{-5}	3.464×10^{-6}	2.890×10^{-8}
200	9.725×10^{-5}	1.155×10^{-5}	2.890×10^{-7}

量。所以频闪灯校准结果的合成标准不确定度是由测量重复性引入的不确定度 u_1 和通用计数器频率测量不准引入的不确定度 u_2 构成的。得到合成标准不确定度后,取包含因子 $k = 2$,可以得到相对扩展不确定度。计算结果见表 5。

表5 测量不确定度的合成及扩展

Tab.5 Combination and expansion of measurement

测量频率点/Hz	uncertainty	
	合成标准不确定度 u_c /Hz	相对扩展不确定度 U_{rel} ($k=2$)
6	1.298×10^{-5}	4.4×10^{-6}
60	5.015×10^{-5}	1.7×10^{-6}
200	9.793×10^{-5}	9.8×10^{-7}

5 结论

从本文上述的数据对比和验证中可以看出,采用脉冲频率法校准频闪灯比采用仿真试验器进行校准可校准的频率(转速)范围更大,完全可以覆盖被校频闪灯的能力范围,而测量结果的准确度大幅度提高,示值误差达到 10^{-6} 量级,比原来小了 3 个数量级,不确定度也减小了,同时脉冲频率法用通用计数器作为测量标准,将频闪灯的溯源直接与时间频率基准连通,使频闪灯的量值传递和量值溯源更可靠和有效,同时具有一定推广价值。

此外,通过本文的研究也表明,利用传感器器件可将校准精度低且不易提升的特性参数转化成校准精度高的通用参数,其研究方向是一种可以有效提升计量能力的思路,值得计量同仁根据实际需要开展相关研究工作。

参考文献

- [1] 冯进良, 刘华军, 张尧禹, 等. 直升机旋翼共锥度测量技术的研究[J]. 光电子技术与信息, 2005, 18(1): 42-45.
- FENG J L, LIU H J, ZHANG Y Y, et al. Research on measurement technology of helicopter rotor conicity [J]. Optoelectronic Technology & Information, 2005, 18(1): 42-45. (in Chinese)
- [2] 梁廷伟, 张建国, 李惠彬, 等. 标准桨叶挥舞参数测量及定位参数校准技术研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2009, 23(2): 208-214.
- LIANG T W, ZHANG J G, LI H B, et al. Measurement of flapping-parameters and calibration of position-parameters for standard rotor blade[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science), 2009, 33(2): 208-214. (in Chinese)
- [3] 曹义华. 直升机飞行力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005: 47-70.
- CAO Y H. Helicopter flight mechanics[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005: 47-70. (in Chinese)
- [4] VIBREX TRACK AND BALANCE SYSTEM using BALANCER 177M-6A and STROBEX 135M-11 [Z]. USA: Chadwick-Helmuth Company. Inc. 1997: 14-16
- [5] Vibrex 2000 and Vibrex 2000 Plus User Guide[Z]. Chadwick-Helmuth Company. Inc., USA, 2002.
- [6] 冯进良, 刘华军, 张尧禹, 等. 直升机旋翼共锥度测量技术研究[J]. 光电子技术与信息, 2005, 18(1): 42-45.
- FENG J L, LIU H J, ZHANG Y Y, et al. Research on measurement technique of helicopter rotor taper [J]. Optoelectronic Technology and Information, 2005, 18(1): 42-45. (in Chinese)
- [7] 薛伟松, 邢士喜, 郑牧, 等. 直升机旋翼锥体及动平衡设备校验系统的研究[J]. 测控技术, 2006, 25(3): 4-7.
- XUE W S, XING S X, ZHENG M, et al. Research on the calibration system for helicopter rotor cone and dynamic balancing equipment [J]. Measurement & Control Technology, 2006, 25(3): 4-7. (in Chinese)
- [8] 张建国. 直升机旋翼锥体和动平衡测量仪校准方法研究[J]. 航空计测技术, 2003, 23(2): 19-21.
- ZHANG J G. Research of calibration method of helicopter rotor track and dynamic balance measuring system [J]. Aviation metrology & measurement technology, 2003, 23(2): 19-21. (in Chinese)
- [9] 余冰衷. 用频闪法测量转速的方法探讨[J]. 计量与测试技术, 2001(6): 17.
- YU B Z. Discussion on the method of measuring rotational speed using stroboscopic method [J]. Metrology & Measurement Technique, 2001(6): 17. (in Chinese)
- [10] 席勇辉. 高低转速下频闪式转速表的校准[J]. 工业仪表与自动化装置, 2020(3): 79-82.
- XI Y H. Calibration of stroboscopic tachometer at high and low rotational speeds [J]. Industrial instruments and automation devices, 2020(3): 79-82. (in Chinese)
- [11] 席勇辉, 杨冲. 频闪仪的脉冲频率法校准[J]. 计量测试与检定, 2020, 30(2): 12-17.
- XI Y H, YANG C. Calibration of stroboscopic instruments using pulse frequency method [J]. Metrological testing and verification, 2020, 30(2): 12-17. (in Chinese)
- [12] 通用计数器SP3386说明书[Z]. 2004: 3-8.
- General-purpose counter SP3386 specification [Z]. 2004: 3-8. (in Chinese)
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1-2012[S]. 北京: 中国质检出版社, 2013.
- State Administration for Market Regulation. Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement: JJF 1059.1-2012 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2013. (in Chinese)
- [14] 国防科工委科技与质量司. 时间频率计量[M]. 北京: 原子能出版社, 2002: 121-123.
- Division of Commission for Science, Technology and Industry for National Defense technology and quality. Time and frequency measurement [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2002: 121-123. (in Chinese)
- [15] 国家市场监督管理总局. 计量标准考核规范: JJF 1033-2023[S]. 北京: 中国质检出版社, 2023.
- State Administration for Market Regulation. Rule for the Examination of Measurement Standards: JJF 1033-2023 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2023. (in Chinese)

(本文编辑: 田艳玲)



第一作者: 张建国 (1968—), 男, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为专用测试设备及校准装置。