

QUALITROL®

2020年10月 · 发电

高压断路器在线监测应用中 永久测量行程的优势

Nicola Gariboldi, Qualitrol® LLC, 瑞士Nussbaumen
Phillip L. Corliss, PMC-Consulting LLC, 美国丹佛



摘要

长期以来，基于状态维护的优势已经获得广泛认可。近年，该领域的重点已转向实施方面。由于监测投资的资源有限，资产管理公司一开始主要关注变压器监测，这导致断路器的状态监测相对落后（CIGRE 2004-2007调查的具体细节印证了这一点）。现在，断路器终于获得了更多的监测关注。在决定应监测哪些参数来准确评估断路器状态时，行程测量是讨论最多的话题之一。测量开/关线圈电

流和辅助触头的换向是一种不可或缺且低成本的方法。

关键词

部件

断路器
行程测量
监测

基于状态的维护
编码器
DC/DC转换器

在已有的阈值气体继电器之外安装SF₆气体密度监测仪主要由环境气体泄漏法规驱动。行程曲线的测量需要永久性安装合适的传感器和额外的安装工作，从而直接影响监测系统的成本。

为了协助做出合理决

策，本文分析了监测评估方面的优势。首先，本文分析了触头行程对断路器性能的影响，并比较分析了行程测量获得的典型参数与断路器潜在问题的关系。然后，本文介绍了从何处测量位移以及如何重新调整输入信号的注意事项。最后，文本还就如何选择合适的行程传感器和DC/DC转换器电源，以及为提高可靠性和测量精度而应注意的电气和机械事项进行了说明。

引言

根据2004 - 2007年高压设备可靠性国际调查分析的最终报告[1]，直到十年前，基于状态评估的断路器维护仍然很少使用。除了动作时间和线圈电流之外，测量触点行程还可以提供大量信息。行程测量通常在例行测试期间进行，然后行程传感器将从被测断路器中移除[2]。触头行程连续记录装置可以提高监测质量。为实现准确可靠的行程监测，正确选择行程传感器非常重要。本文将论述行程曲线对断路器性能的影响，并提出一些注意事项，以使用户能够正确选择监测/控制断路器操作的行程传感器。

为什么要监测行程曲线?

断路器的闭合和分断性能在很大程度上取决于操作机构提供的正确行程曲线[3]。永久性安装的行程传感器能够记录每次断路器操作的触点位置随时间变化的曲线。一种简单直接的方法是“指纹”概念，也就是将某条记录的行程曲线作为基准，如果曲线超过给定的公差，则会发出警报。

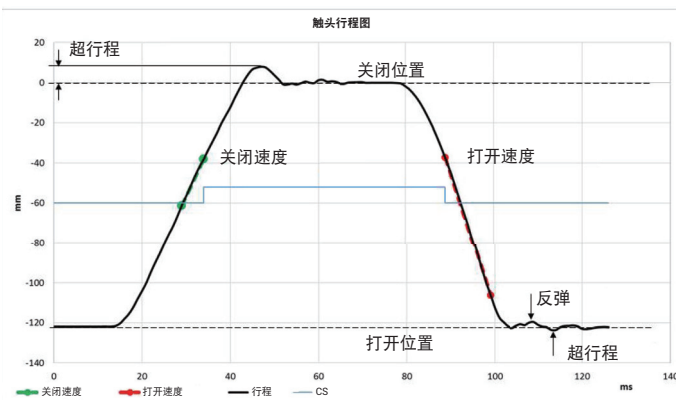


图1 - 合分操作的典型行程曲线。

计算的主要参数包括:

- > 打开速度
- > 关闭速度
- > 关闭操作的超行程和反弹
- > 打开操作的超行程和反弹

此外，还可以评估以下参数，如图1所示:

- > 打开速度
- > 关闭速度
- > 关闭操作的超行程和反弹
- > 打开操作的超行程和反弹

每个与正常值的偏差都会对断路器功能产生影响，如下文所述。

A. 打开速度

断路器的触头打开速度是保证其分断能力和机械寿命的关键参数。制造商会指定最小和最大公差。速度值过低会影响短路电流中断以及容性电流开合。

短路电流速断

图2显示了较慢的触头打开速度会使得压气灭弧室压力过小，直接影响电流过零时的灭弧效率。

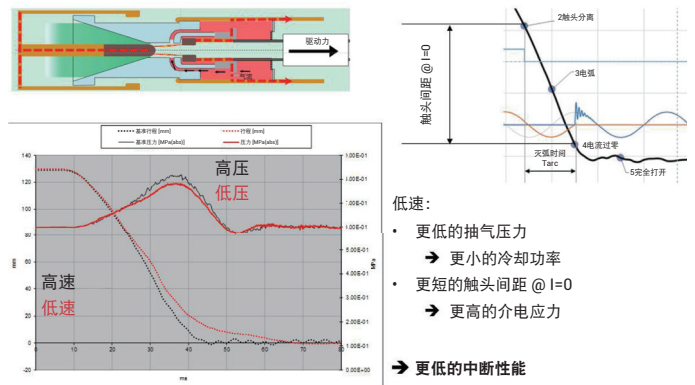


图2- 较低的速度对短路分断性能的影响。较低的速度会导致灭弧室中的机械压力较小，从而降低了电流过零时的灭弧压力，进而降低了热分断能力。此外，达到相同燃弧时间的触头开距更小，这增加了TRV峰值附近发生绝缘故障的可能性。

只有当灭弧室提供足够的冷却功率时，被电弧分解成等离子体形式的灭弧介质 (SF_6) 才能变回绝缘介质。如果冷却功率不足，则介质仍然以等离子体形式存在，导致触头之间的间隙仍然是导电的，因此电流会通过零线继续流动。这被称为“热故障”，常见于发生近区故障时。如果冷却功率足以将等离子体变回绝缘介质，则较慢的速度会导致相同电弧时间下较短的触头间距。瞬态恢复电压峰值附近发生介电击穿的概率会增大。如果发生这种情况，电流会在短暂中断后再次开始流动，这将导致电介质失效。

容性和感性电流开合

在关闭容性电流的同时，触头上会产生 $1-\cos$ 电压。为了承受该电压，断路器必须快速增大触头间距，以保持介电应力低于 SF_6 的介电强度。

较低的打开速度会使容性开合更加严重。

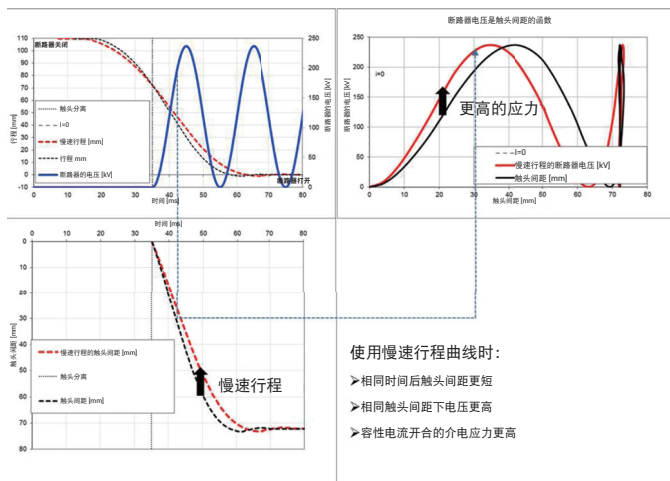


图3 - 容性开合。

在左上角图中，显示了从电流过零开始， $1-\cos$ 恢复电压（蓝色）、参考行程（黑色）和慢速行程（红色）随时间的变化曲线。在左下角图中，显示了触头间距随时间的变化曲线。在右上角图中，分别显示了给定行程曲线下，触头间隙上产生的电压随触头间距的变化曲线。从图中可以看出，使用慢速行程曲线时，同样的触头间距下产生的电压更高。

如果打开速度过高，除了造成机械过应力之外，还会增大机械压气压力以及随后触头之间的气体吹弧压力。在感性电流开合的情况下，这可能导致电流斩波，以及随后较高的过电压。

B. 关闭速度

与额定关闭速度的偏差可能会损害断路器的“接通”能力。在“错误！找不到参考源”的情况下，关闭操作将显示为电流闭合，这会在断路器关闭故障时发生。

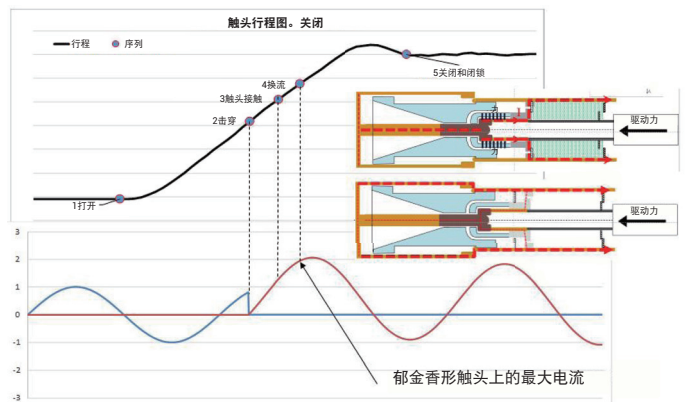


图4 - 关闭操作产生的电流。

图4显示了行程（黑色）、电压（蓝色）和电流（棕色）随时间变化的曲线。由图中可见较低的关闭速度将增加从击穿到触头接触，以及从触头接触到换流的时间。这会增加郁金香形触头和插头的热应力和机械应力。

电流在触头接触之前就开始流动。电流启动和触头接触之间的时间被称为弧前时间。

闭合操作的速度较低会延长弧前时间，从而导致燃弧触点的热应力更大。触头接触和电流转换到主触头之间的时间间隔也会增加，使郁金香触头承受更高的电流值和相应的电动力。郁金香触头和插头之间产生的更高摩擦力可能会阻止断路器完成预期的关闭操作，并可能导致闭锁失败，甚至在最坏的情况下，损坏弧触头系统，导致灾难性的内部故障。当关闭速度超过最大值时，根据断路器的具体设计，其后果可能从更高的机械应力，到喷嘴、插头和郁金香触头的不可修复损坏，导致对下一次打开操作造成致命后果。

C. 关闭时的超行程

在许多配备弹簧操作机构的断路器中，需要设置最小超行程，以在关闭时确保闭锁。制造商提供了这些参数的公差范围；超行程太低会阻止闭锁。此后，预期的关闭操作会变成关闭-打开（合-分）操作。

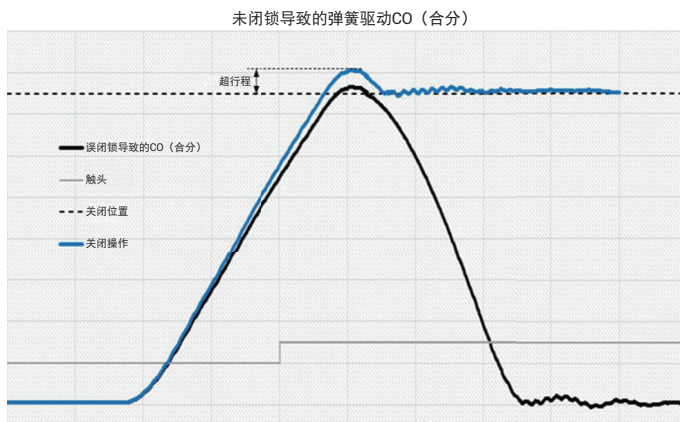


图5 - 带弹簧操作机构的断路器的行程曲线。

- 如果超行程低于最小值，则无法成功闭锁，触头会再次打开。关闭操作会变成关闭-打开序列。

D. 打开时的超行程和反弹

有时这两个参数也由制造商指定。打开时的反弹意味着触头在到达完全打开位置后可能会发生接触，这意味着有分断后重新触发的风险。打开时超行程过大的原因可能是打开速度过大，或操作机构的阻尼器存在问题。这种情况可能导致的后果包括从一般的高机械应力，到内部碰撞造成灭弧室损坏。如果打开速度正确，但打开时的超行程和反弹有增大的趋势，则说明操作机构中的阻尼器效率正逐渐降低。

如何测量行程曲线

最终目标是获得动触头的行程曲线。所有行程曲线参数都是参考触头的实际位置，而实际位置是无法测量的。行程传感器会在最便于操作的位置，测量操作机构与灭弧室之间连杆的运动。由于测量的并不是实际的触头位移，两个值之间的关系并不总是线性的。图6显示了将旋转行程传感器用于灭弧室双臂曲柄轴的典型案例。

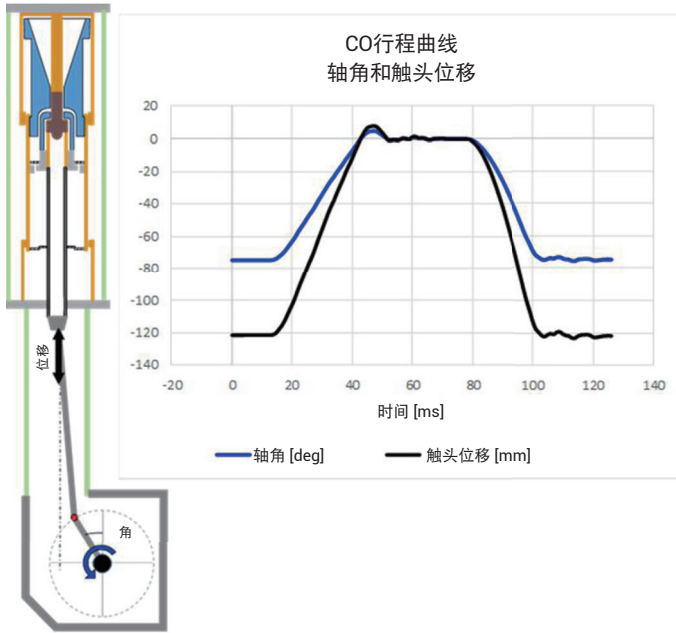


图6 - 双臂曲柄轴行程测量的示例。
角度与位移的关系是非线性的。

传感器测量的角度与实际触头位移间的关系由连杆几何结构定义。将输入信号重新线性缩放成实际触头行程的过程中会引入线性误差，并且该误差在连杆位置的末端以及范围更宽的角运动时更高。图7给出了实际触头位置与线性重新缩放的角度测量值之间的比较示例。

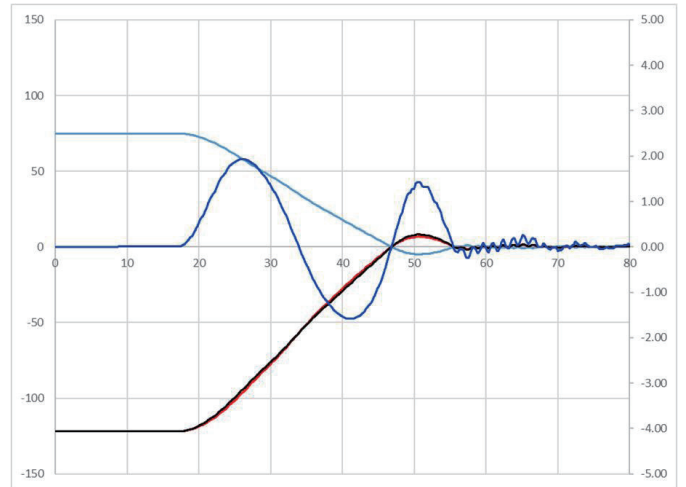


图7 - 关闭时的行程曲线。
将使用测量的角度进行线性重新缩放的测量值，与实际触头位置进行了对比。1.5 mm的差值可能会导致超行程评估的结果出现20%到30%的误差。

为了提高实际触头位置的测量精度，可以使用变换函数将旋转测量转换成线性触头位移，如图8所示。

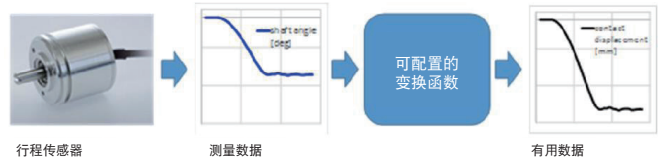


图8 - 获得实际触头位移的主要数据处理

为了与常规测试参考值进行比较，将计算关闭和打开操作时两个定义点之间的速度。点定义的基准点将独立于关闭和打开操作，并可根据以下标准进行配置：

- > 与辅助触头换流的时间差 (52 a/b)
- > 行程百分比
- > 基于行程曲线的基准点间距离

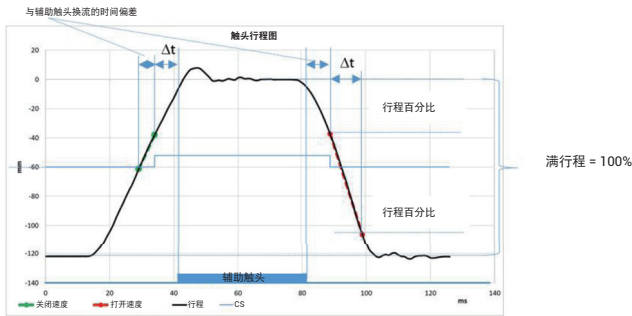


图9 - 行程曲线速度计算

对于打开和关闭操作，速度是独立定义的两点之间的平均值
 - 2个用于关闭
 - 2个用于打开
 这些点可以定义为总行程或时间的百分比。

速度测量间隔定义的典型示例如下：

打开操作

- > 第1点：触头分离时
- > 第2点：触头分离后~7.5-10ms

关闭操作

- > 第2点：触点接触时
- > 第1点：触头接触前约5ms

传感器特性

按照运动类型学，传感器可分为线性和旋转传感器。选择哪种传感器一般取决于要测量的运动类型。如果可以进行选择，旋转传感器通常由于其紧凑性而更加可靠。安装通常不太重要，并且机械合成动作更安全。



- 线性测量
- 轴进行直线运动
- 坚固性和紧凑性低于旋转传感器

图10 - 带连杆的线性传感器



- 旋转差分编码器
- 3000-10000 counts/s
- 24V RS422 TTL端口

图11 - 旋转传感器

A. 电阻式或编码器型

对于临时的常规断路器离线测试行程测量，常用的是电阻式传感器，因为它们会提供精确的模拟电压信号，可以用标准数据记录器或示波器轻松记录。

相反，对于在线连续监测，电阻式传感器显示出可靠性问题。大量的操作加上多变的天气条件经常会损坏内部滑动接触。因此，这种情况下应该首选基于非接触式编码器的传感器，因为它们不仅没有机械磨损，而且它们的差分正交RS-422数字输出使得测量的信号转换对于噪声不太敏感。图12所示为增量编码器的示例。

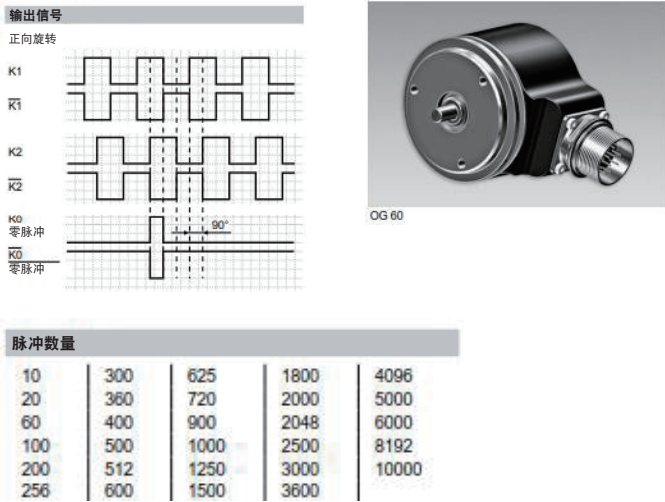


图12 - 增量式编码器的典型输出信号。
通过两组相互偏移90的脉冲，可以确定旋转方向。
另外还给出了每转的参考脉冲(K0)，但是未使用。
每转的脉冲数可根据上表选择。

增量编码器无需“记住”起始位置。通过计算脉冲数和已知的度/脉冲，可以测量从测量开始到结束的增量位置。也可以使用绝对编码器，但它们通常更昂贵、更精密且不适用于该应用。

每转脉冲数可以在购买时选择。对于图12中给出的情况，可以选择每转10到10,000个脉冲。

B. 脉冲数量

脉冲数是要测量的行程的函数。表1给出了断路器行程和操作时间的典型值。

参数		从	到	备注
典型角行程	度	60	150	取决于双臂曲柄设计
行程	mm	100	200	较高值对应较高的额定电压 (145kV --> 550 kV)
关闭速度	m/s	4	10	较高值对应较高的额定电压 (145kV --> 550 kV)
打开速度	m/s	4	13	较高值对应较高的额定电压 (145kV --> 550 kV)
加速度	m/s ²	500	2000	闭锁或反弹期间的加速度峰值可能更高

表1 - 断路器行程曲线的典型参数

分辨率

编码器是一种数字输出传感器，在其总行程的每个部分都发送一个脉冲。进行测量的分辨率是每单脉冲测量行程的百分比。在大多数情况下，0.2%的分辨率即可确保足够高的定位精度。对于200mm的触头行程，该分辨率为0.4mm/脉冲。

脉冲数量

设置所需的分辨率R%后，触头行程测量的脉冲数由下式给出：

$$N_{mp} = \frac{100}{R\%} \dots$$

如果分辨率为0.2%，触头行程可通过500个脉冲测量。每转脉冲数取决于实际测量的角度α。

$$N_{ppR} = N_{mp} \frac{360}{\alpha} \dots$$



如表2所示，将测量角度 α 减小到30度或更低，确保所需分辨率的每转脉冲数会增加到10,000。

分辨率 $R\%$	覆盖断路器行程的 测量脉冲数 N_{mp}	测量角度 α	每转脉冲数 N_{ppr}
	脉冲数	角度	脉冲数/转
0.20%	500	150	1200
0.20%	500	120	1500
0.20%	500	90	2000
0.20%	500	60	3000
0.20%	500	30	6000
0.20%	500	18	10000

表2- 每转脉冲数与分辨率和测量角度的关系

脉冲频率

如果选择能够覆盖所有可能测量角度的最高可用脉冲数，则它不一定是最佳选择。

对于快速断路器，这可能需要非常高的脉冲频率，而监测装置必须适应该频率。

脉冲频率是断路器的最大速度 V 、其行程、每转脉冲数和测量角度 α 的函数。

$$f_p = \frac{\alpha \cdot N_{ppr} \cdot V}{360 \cdot S} \quad \dots$$

为了检测与额定行程曲线的偏差，正常值两倍的速度应当是可测量的。这意味着选择能够以 $2 \times f_p$ 工作的编码器和监测装置。


测量角度	每转脉冲数	覆盖断路器行程的测量脉冲数	分辨率	假定速度	断路器行程	脉冲频率	频率要求
α	N_{ppr}	N_{mp}	$R\%$	V	S	f_p	$2 \times f_p$
角度	脉冲数/转	脉冲数		m/s	m/m	kHz	kHz
150	10000	4167	0.02%	10	200	208	417
120	10000	3333	0.03%	10	200	167	333
90	10000	2500	0.04%	10	200	125	250
60	10000	1667	0.06%	10	200	83	167
30	10000	833	0.12%	10	200	42	83
18	10000	500	0.20%	10w	200	25	50

表3 - 脉冲频率随测量角度 α 的变化（假设断路器行程为200mm，则每转脉冲数等于10,000）。

在表3中，评估了使用10,000脉冲/转的编码器时，测量角度 α 的不同值的频率要求。计算得到的脉冲频率可能非常高，并超出编码器制造商的最大保证值。例如，典型的编码器可以处理最大250 kHz的输出频率（图13）。

Incremental encoders
Solid shaft ø6 mm with synchro flange
100...512 pulses per revolution (OG 6), 10...10000 pulses OG 60

OG 6, OG 60



Features

- Robust aluminium housing
- Encoder with solid shaft ø6 mm
- Optical sensing method
- Synchro flange
- Output stage HTL or TTL
- Output stage TTL with regulator
- OG 6: UB 9...24 VDC, OG 60: UB 9...26 VDC

Optional

- OG 60: Angel flange connector

Technical data - electrical ratings

Consumption w/o load	≤100 mA
Reference signal	Zero pulse, width 90°
Sensing method	Optical
Output signals	K1, K2, K0 + inverted
Output stages	HTL
Interference immunity	EN 61010-4-2
Emitted interference	EN 61010-6-3
Approvals	CE, UL approval / E256710

Technical data - mechanical design

Size (flange)	ø58 mm
Shaft type	ø6 mm solid shaft
Admitted shaft load	≤50 N axial ≤50 N radial
Flange	Synchro flange
Operating speed	≤12000 rpm (mechanical)
Operating torque typ.	1 Nm
Materials	Housing: aluminium Shaft: stainless steel

OG 6

Voltage supply	9...26 VDC 9 VDC ±5% 9...24 VDC
Pulses per revolution	100...512
Phase shift	90° ±20°
Scan ratio	40...60 %
Output frequency	≤120 kHz

OG 60

Voltage supply	9...26 VDC 9 VDC ±5%
Pulses per revolution	10...10000
Phase shift	90° ±5°
Scan ratio	46...54 %
Output frequency	≤250 kHz

OG 6

Protection DIN EN 60529	IP 54
Rotor moment of inertia	18 gcm ²
Operating temperature	-20...+70 °C
Resistance	IEC 60068-2-6 Vibration 10 g, 10-2000 Hz Shock 100 g, 6 ms
Connection	Connecting terminal
Weight approx.	300 g

OG 60

Protection DIN EN 60529	IP 65
Rotor moment of inertia	22 gcm ²
Operating temperature	-30...+45 °C
Resistance	IEC 60068-2-6 Vibration 10 g, 10-2000 Hz IEC 60068-2-27 Shock 300 g, 6 ms
Connection	Flange connector M23, 12-pin Mating connector
Weight approx.	400 g

Baumer
www.baumer.com/motion

图13- 增量编码器的数据表 [4]



C. 机械应力

传感器与断路器的活动连杆连接，因此它必须承受来自连杆运动的机械应力。

运动加速度

在表1中，给出了500到2000 m/s²的典型加速度值。如果使用旋转传感器，则可以根据实际测量的旋转行程估算相应的角加速度：

- 角行程：75deg = 1.31rad
- 线性行程 = 120mm = 0.12m
- 线性加速度 = 2000 m/s²
- 对应的角加速度：

$$2000 \cdot \frac{1.31}{0.12} = 21,833 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \dots$$

典型的最大适用值为100,000 rad/s²

D. 环境温度和防护等级

在选择行程传感器时，必须明确所安装断路器的工作温度范围。所选的行程传感器必须能够在整个环境温度范围内运行，并且防护等级至少达到IP 54，以便行程传感器能承受安装位置的主要湿度和灰尘条件。

E. 行程传感器电源选择标准

为行程传感器选择合适的DC/DC转换器电源时，需要考虑环境温度、防护等级、承受断路器工作时内部机械振动的能力、以及完全符合行程传感器所需输入电压范围的电压输出。DC/DC转换器电源必须能够满足或超出所选增量式行程传感器编码器的规格要求。

行程传感器输入电压范围要求

如图13数据表所示可用于断路器行程在线分析的行程传感器具有5vdc的输入电压要求和±0.25vdc的严格操作公差。也可以购买9-24vdc或9-26vdc的更宽输入功率要求范围。

建议的行程传感器输入电压范围

建议尽可能选择具有更宽输入电压范围的增量式行程传感器。对于9-26vdc或9-30vdc输入功率要求（例如其他增量式行程传感器的输入功率要求），具有12vdc、15vdc或24vdc输出的DC/DC转换器是理想的选择，因为无需担心电源电缆的电压降或噪声。DC/DC转换器应当与行程传感器保持一定距离。只有两个设备安装得非常靠近时，具有严格操作公差的5vdc行程传感器才可能会由于电源电缆的大幅电压降或过大噪声而发生故障。



结论

监测行程曲线可以提高断路器的状态监测水平。尽管看起来很简单，但要实现断路器在线监测应用的可靠永久性行程测量却并非易事。

选择行程传感器时，必须注意机械应力。选择适当的脉冲数将允许用户在不达到传感器和监测设备输入板卡的频率上限的情况下，获得准确的行程曲线。

参考文献

- [1] Conseil international des grands réseaux électriques and Comité d'études A3, TB 510 Final report of the 2004-2007 international enquiry on reliability of high voltage equipment. Part 2, Part 2., Paris: CIGRÉ, 2012.
- [2] WG 13.09, TB 167 - USER GUIDE FOR THE APPLICATION OF MONITORING AND DIAGNOSTIC TECHNIQUES FOR SWITCHING EQUIPMENT FOR RATED VOLTAGES OF 72.5 kV AND ABOVE. Paris: CIGRÉ, 2000.
- [3] N. Gariboldi and P. Corliss, 'Modern on-line monitoring for high voltage circuit breakers', GCC Power 2017, p. 10, 2017.
- [4] 'OG 60 | Incremental encoders | Baumer'. [Online]. Available: <https://www.baumer.com/ch/en/product-overview/rotary-encoders-anglesensors/heavyduty-encoders-incremental/complete-portfolio-of-solid-shaftdesigns/og-60/p/29157>. [Accessed: 05-Dec-2017].



如需有关产品和解决方案的
更多信息

请联系我们: cs.china@qualitrolcorp.com