

# 倾转方案技术调研——传感器

## 变更履历

- 类别：A-增加， M-修改， D-删除；

日期	版本号	修订类型	作者	描述
2025.3.1 0	V0.1	A-增加	王泽轩	<ul style="list-style-type: none"><li>初建版本；</li></ul>

## 1. 调研目的

- 了解不同传感器的原理、精度、控制方法
- 可行性技术方案汇总
- 归纳市面上常见对标杆件的传感器信息，匹配X5-POC最优技术方案
- 整理传感器主芯片类型，提前布局，把握市场先机

## 2. 调研相关文档：

- ④ 001 【预研验证专项管控】\_V0.1\_20250112
- ④ 倾转控制验证开发\_V0.1\_20250128（密）
- ④ X5S倾转系统作动器拆机报告
- ④ 倾转方案技术调研——LVDT（直线位置传感器）
- ④ 倾转方案技术调研——RVDT（旋转可变差动变压器）
- ④ 倾转方案技术调研——旋转变压器（Resolver）
- ④ 倾转方案技术调研——旋转编码器
- ④ LVDT/RVDT原理解析
- ④ 关于2025年3月18日相关问题的调研

## 3. 调研总体安排

本文档主要针对X5-POC LVDT、RVDT、温度传感器、旋转编码器、绝对值编码器、增量编码器进行调研；

## 4. 相关名词解释

### 4.1 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

正确名称/同义词：

- 线性差动变压器
- 线性位移传感器
- 线性位移变压器

可能的误解或混淆：

- 线性变压器（可能被误认为是电力系统中的普通变压器）
- 位移变送器（可能与其他类型的位移传感器混淆，如电位计）
- LVDT传感器（虽正确，但缩写可能被误读为其他技术术语，如LVDS）

### 4.2 RVDT (Rotary Variable Differential Transformer)

正确名称/同义词：

- 旋转差动变压器
- 角度位移传感器
- 旋转角位移传感器

可能的误解或混淆：

- 旋转变压器（可能误指旋转变压器Resolver，而非RVDT）
- 角度变送器（可能与其他角度传感器混淆，如光电编码器）
- RVDT编码器（错误用法，RVDT与编码器原理不同）

### 4.3 旋转编码器 (Rotary Encoder)

正确名称/同义词：

- 轴编码器
- 角度编码器
- 位置编码器

可能的误解或混淆：

- 脉冲编码器（仅描述输出信号类型，非所有编码器均为脉冲式）

- 绝对编码器 vs. 增量编码器 (两类不同原理的编码器, 易混淆)

## 光电编码器 (Optical Encoder)

近义词/同义词:

光学式编码器

光栅编码器

## 磁性编码器 (Magnetic Encoder)

近义词/同义词:

磁电编码器

霍尔编码器

磁阻编码器

## 电容式编码器 (Capacitive Encoder)

近义词/同义词:

容性编码器

## 4.4 旋转变压器 (Resolver)

正确名称/同义词:

- 分解器
- 旋转角度传感器
- 同步分解器
- 旋变

可能的误解或混淆:

- 同步器 (Synchro) (类似但结构不同的设备, 常被混用)
- 变压器 (Transformer) (可能误认为普通电力设备)
- 旋变传感器 (简称可能导致与RVDT混淆)

## 5. 调研结论

### 5.1 传感器技术参数汇总

- ESCC
- IEC 55022
- IEC 61000-4-2
- IEC 61000-4-3

- IEC 61000-4-4
- IEC 61000-4-5
- IEC 61000-4-6
- IEC 61000-4-9
- MIL-PRF-39023
- MIL-STD-810C
- NASA 311P

## 传感器技术参数汇总：

产品系列				
参数/传感器	LVDT	RVDT	旋转变压器	旋转编码器
输入信号	交流电压	交流电压	正弦信号	/
输出信号	交流电压	交流电压	正弦与余弦信号	数字信号
测量范围	10~600mm	±30°~±90°	360°	增量/单圈绝对/多圈 绝对
结构	<ul style="list-style-type: none"> <li>分离式铁芯</li> <li>装载弹簧芯</li> </ul>	一般为实心轴	<ul style="list-style-type: none"> <li>实心轴：安装在电机外部</li> <li>空心轴：安装在电机内部</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>实心轴：安装在电机外部</li> <li>空心轴：安装在电机内部</li> </ul>
线性误差（全量程）	±0.1%~±2%	±0.1%~±2%	±400"~±20'	±0.2°~30"
工作温度（°C）	最高可达300°	最高可达300°	最高可达150°左右	最高可达125°左右
IP等级	/	/	<ul style="list-style-type: none"> <li>外部：一般为IP65</li> <li>内部：开放式或IP40</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>外部：一般为IP65</li> <li>内部：开放式或IP40</li> </ul>
最高转速	/	/	可达20000	8000
分辨率	无限	无限	无限	<ul style="list-style-type: none"> <li>光学：可达24位</li> <li>磁性：可达14位</li> <li>容性：可达16位</li> </ul>

通道数量	支持多通道	支持多通道	1	1
备注	支持航空级	支持航空级	支持车规级	一般工业电机驱动 控制应用较多
参考调理电路（芯片）	PGA970	PGA970	AD2S1210	/
参考价格（RMB）	国产参考价格较少：进口件预估5000rmb左右	国产参考价格较少：进口件预估5000rmb左右-	1200 (来源：1688)	800 (来源：1688)

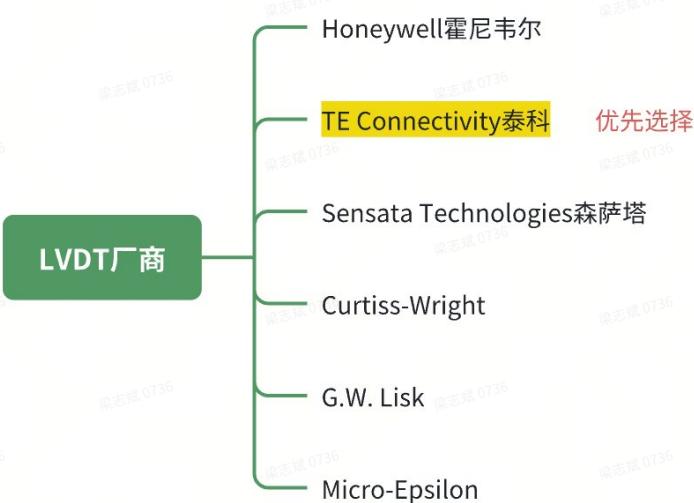
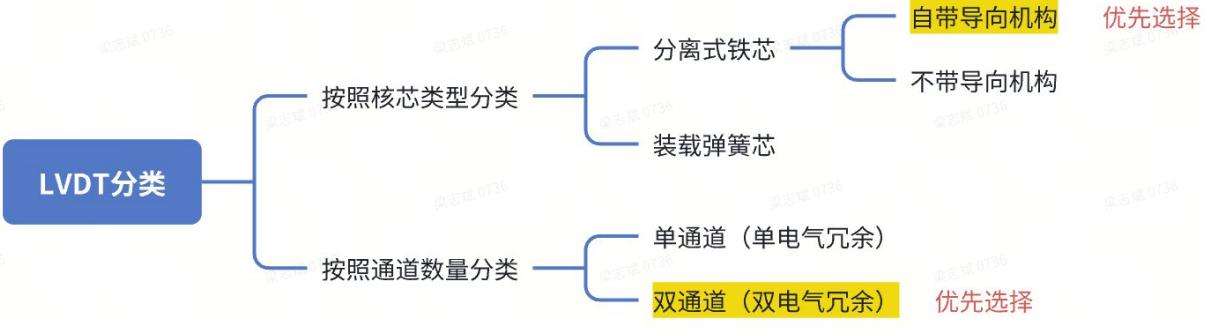
### 性能标杆产品参考汇总：

参数	产品系列				
	LVDT	RVDT	旋转变压器	旋转编码器	HEIDENHEIN ECI100
输入信号	交流电压	交流电压	正弦信号	/	/
输出信号	交流电压	交流电压	正弦与余弦信号	RS485	RS485
测量范围	10~600mm	±40 deg	360°	绝对；多圈	绝对；单圈
轴承结构	/	实心轴	实心轴	空心轴	空心轴
安装位置	/	/	内部	外部	内部
线性误差（全量程）	0.30 % (可选0.2%)	±0.50 deg. MAX ±0.35 deg. MAX (0 ±0.35 deg.)	±60 °	±0.1°	±90"
工作温度 (°C)	-40 ~ +120	-55 ~ +85	-40 to +150°C	-10 ~ + 105	~+100
IP等级	IP67/IP68	DO-160G	IP60	IP40	/
外壳材料	不锈钢	不锈钢	/	塑料	铝合金
最高转速	/	/	20000	6000	6000
振动	10 G	DO-160G	/	98m/s^2 (10G)	300 m/s^2 (55 ~ 2 000 Hz)

冲击	200 G/2 ms	/	1,960m/s <sup>2</sup> (during 11 ms)	1000 m/s <sup>2</sup> (during 6 ms)	
分类	带推杆导向的分离式铁芯	/	安装至电机内部	/	/
分辨率	无限	无限	无限	单圈：17~25位 多圈：16位	19位
通道数量	1	定制	1	1	1
重量	670g	180g	155g	/	/
备注		DO-160G航空标准	车规级	与转轴连接，内径较小	伺服电机专用
参考调理电路 (芯片)	PGA970	PGA970	AD2S1210	/	/
参考价格 (RMB)	暂无报价 (进口件预估 5000rmb左右)	暂无报价 (进口件预估 5000rmb左右)	1200 (来源：1688)	800 (来源：1688)	6000~8000 (来源：1688)

## 5.2 传感器单独选型推荐

对于LVDT选型：



## 对于RVDT选型：

## RVDT分类

按照通道数量分类

单通道（单电气冗余）

双通道（双电气冗余）

优先选择

## LVDT厂商

Honeywell霍尼韦尔

TE Connectivity泰科

优先选择

Sensata Technologies森萨塔

Curtiss-Wright

G.W. Lisk

Micro-Epsilon

对于旋转变压器选型：

## 旋转变压器分类

按照内部结构分类

- 有刷式
- 无刷式 **优先选择**
- 实心轴
- 空心轴 **根据结构设计而定**

## 旋转变压器厂商

TE Connectivity

Tamagawa Seiki

**国内有货源，车规级旋变**

MinebeaMitsumi

上海瀛双电机科技股份有限公司

Moog

**航空系列旋变尺寸较小，可能更符合需求**

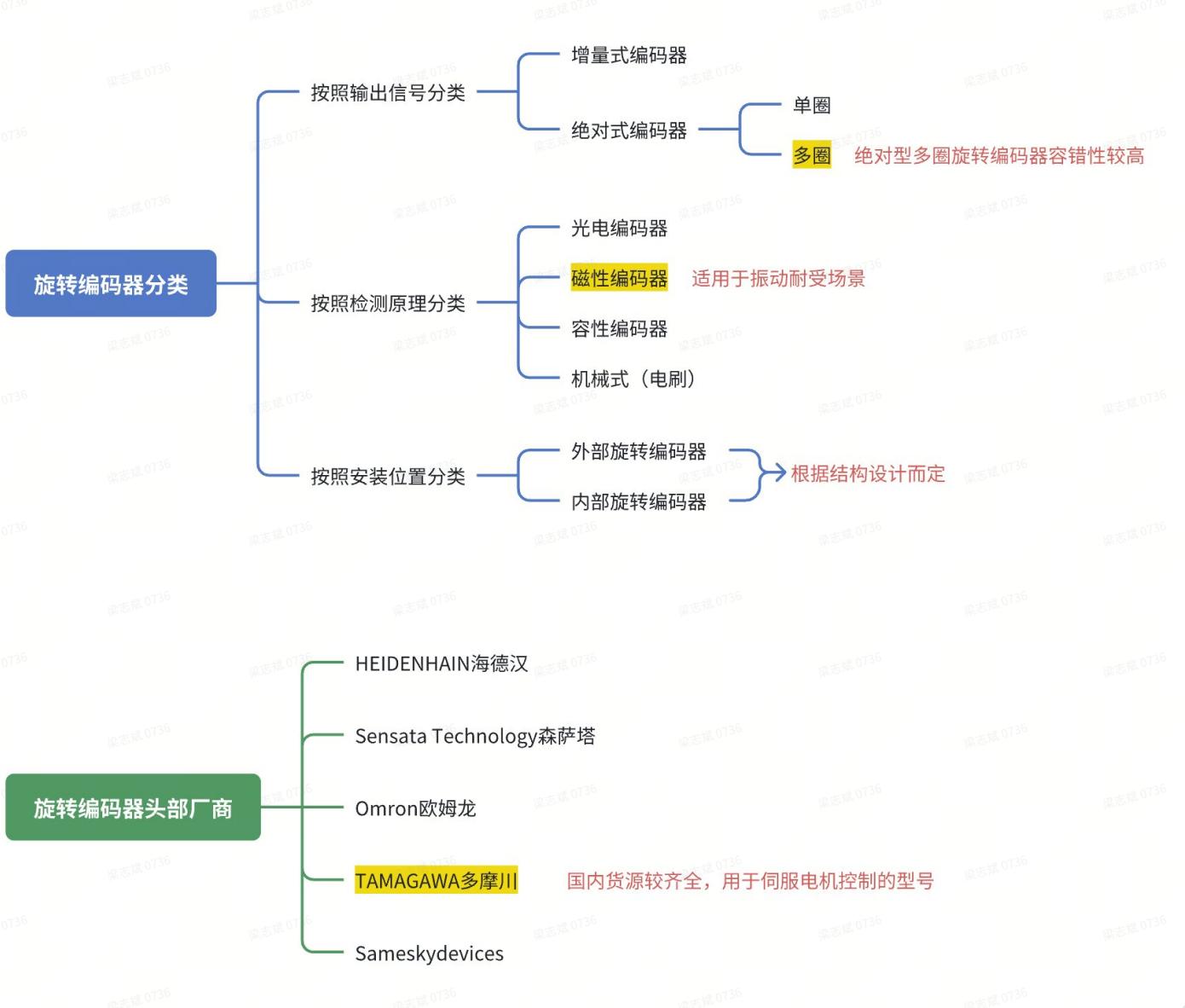
Ametek

LTN Servotechnik

Woodward

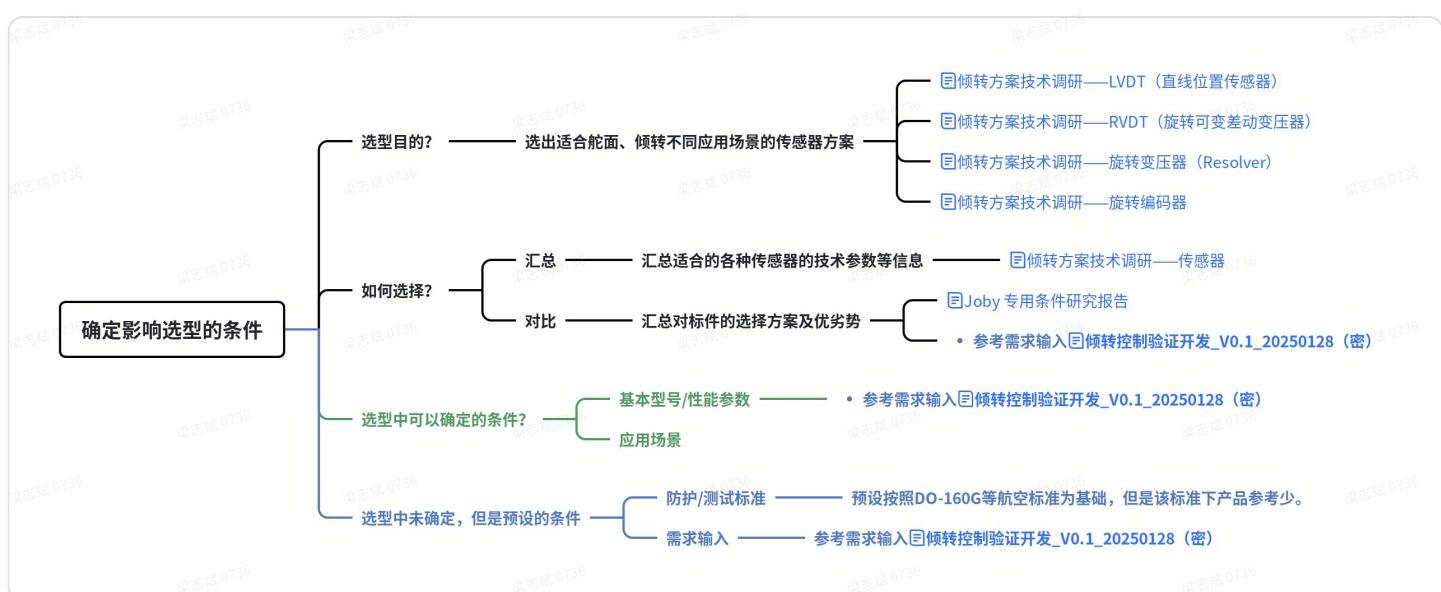
Honeywell

对于旋转编码器选型：



## 5.3 传感器选型收束及预选方案总结

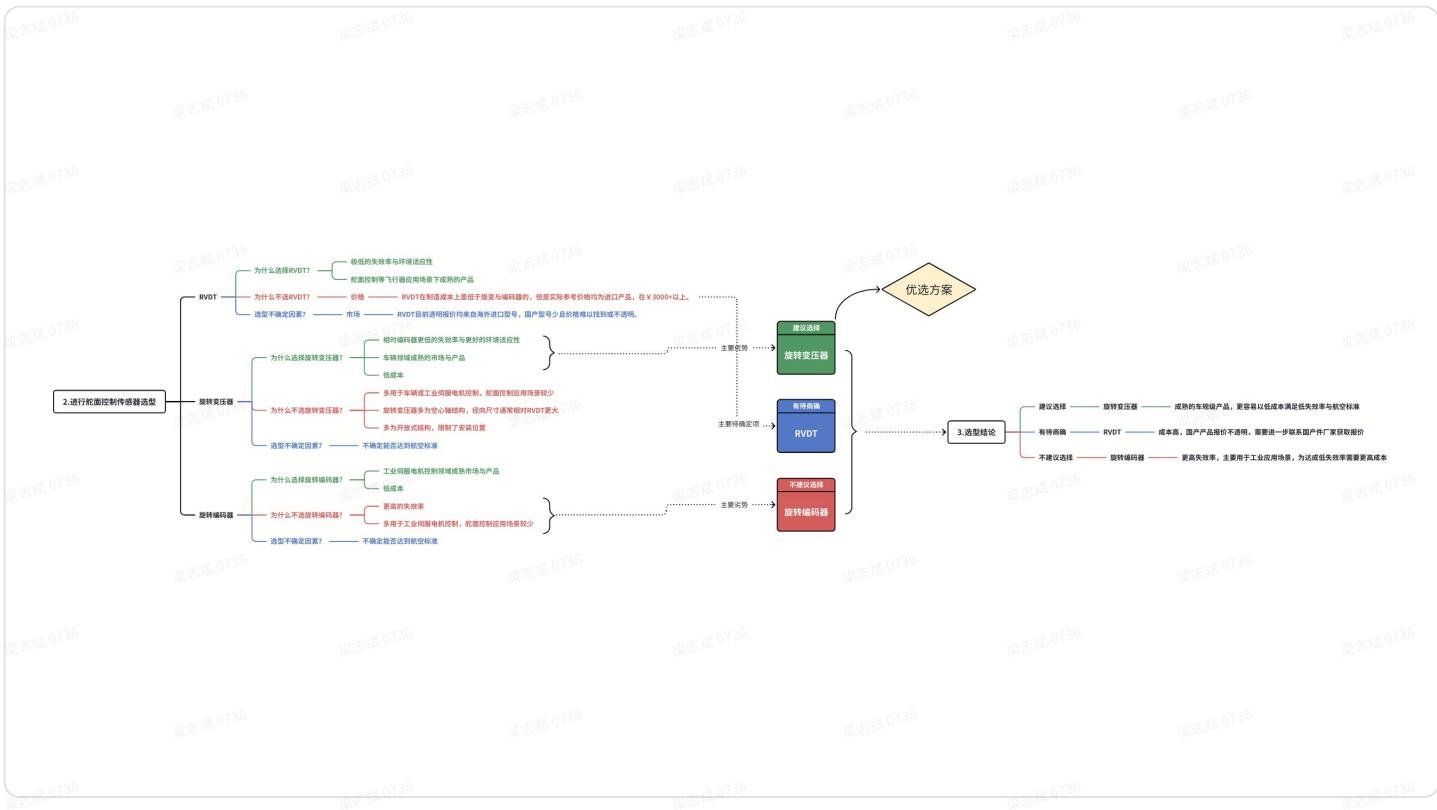
**选型背景：**



### 5.3.1 舵面作动控制传感器

# 舵面作动控制传感器主要参数总结

参数/传感器	RVDT	旋转变压器	旋转编码器	备注
测量范围	±30°~±90°	360°	增量/单圈绝对/多圈 绝对	/
线性误差 (全量程)	±0.1%~±2%	±400"~±20'	±0.2°~30"	
工作温度 (°C)	最高可达300°	最高可达150°左右	最高可达125°左右	
分辨率	无限	无限	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 光学：可达24位</li> <li>• 磁性：可达14位</li> <li>• 容性：可达16位</li> </ul>	
平均失效效率	50~200 FIT	100~300FIT	300~800FIT	
MBTF (平均故障间隔时间)	1*10^6 hr	1*10^6 hr	1*10^5 hr	
冗余数量	支持多通道	1	1	
可达标准	支持DO-160G航空标准	支持车规级	航空与车辆领域一般在电机端使用案例较少	
参考调理电路 (芯片)	PGA970	AD2S1210	/	
参考价格 (RMB)	国产参考价格较少：进口件预估5000rmb左右-	1200 (来源：1688)	800 (来源：1688)	



舵面作动传感器选型逻辑导图

## 推荐最佳选型：旋转变压器

原因：高环境抵抗性/低成本/成熟的车规级产品

收束条件：DO-160G等航空标准

收束中不明确的条件：价格/购买渠道/

### 5.3.2 倾转作动控制传感器

#### Types of Linear Actuators

### 倾转作动控制传感器主要参数总结

参数/传感器	LVDT	RVDT	旋转变压器	旋转编码器	备注
测量范围	10~600mm	±30°~±90°	360°	增量/单圈绝对/多圈绝对	/
线性误差 (全量程)	0.30 %(最低可0.2%)	±0.1%~±2%	±400"~±20'	±0.2°~30"	/
工作温度 (°C)	高达120°	最高可达300°	最高可达150°左右	最高可达125°左右	/
分辨率	无限	无限	无限	• 光学：可达24位	/

				• 磁性：可达 14位 • 容性：可达 16位	
平均失效效率	50~200 FIT	50~200 FIT	100~300FIT	300~800FIT	/
MBTF (平均故障间隔 时间)	$1*10^6$ hr	$1*10^6$ hr	$1*10^6$ hr	$1*10^5$ hr	/
冗余数量	支持多通道	支持多通道	1	1	/
可达标准	支持航空级	支持DO-160G航 空标准	支持车规级	航空与车辆领域 一般在电机端使 用案例较少	/
参考调理电路 (芯片)	PGA970	PGA970	AD2S1210	/	/
参考价格 (RMB)	进口件预估 5000rmb左右	国产参考价格较 少：进口件预估 5000rmb左右-	1200 (来源： 1688)	800 (来源： 1688)	/

## 对标方案1：X5S倾转系统与X5S倾转系统作动器拆机报告



## 传感器测试/设计/防护/EMC标准：DO-160G

# 3月18日调研补充问题：

## 关于2025年3月18日相关问题的调研

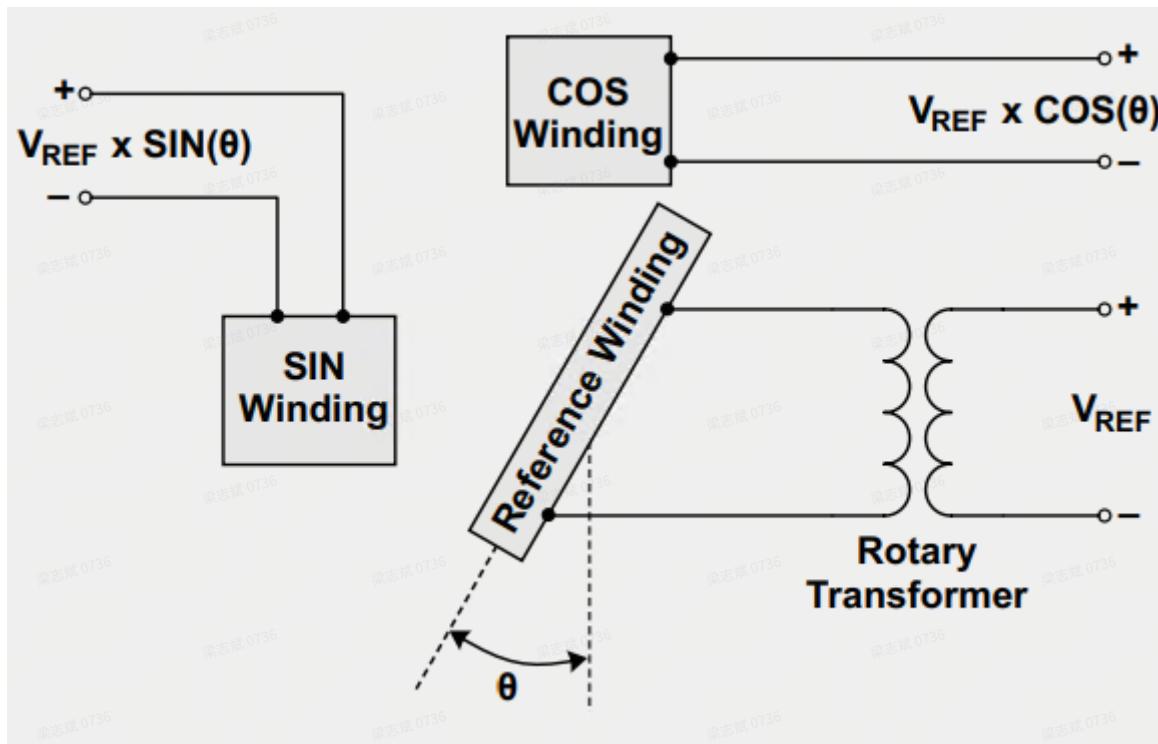
### 1. 旋转变压器与编码器区别？

- 编码器更精确,采用的是脉冲计数；旋转变压器是模拟量反馈信号；
- 编码器多是方波输出的，旋转变压器是正余弦的，通过芯片解算出相位差；
- 旋转变压器的转速比较高,可以达到上万转,编码器就没那么高了；
- 旋转变压器的应用环境温度是-55°C到+155°C,编码器是-10°C到+70°C；
- 旋转变压器一般是增量的；

### 2. 旋转变压器与RVDT区别？

	旋转变压器	RVDT
工作原理	电磁感应	
信号模式	输入正弦激励信号, 输出一组正弦信号与一组余弦信号	输入交流电压, 输出交流电压
测量原理	通过测量两组输出信号的相位来确定位置	通过测量输出交流电压的差值确定位置
精度	±400"~±20'	±0.1%~±2%
解调方式	专用的旋变解调器	RVDT/LVDT共用解调器

### 3. 旋转变压器怎么获得绝对角度？在断电再上电后能否保留所在位置信息？



可以，只要转子角度不变，对应的两个输出绕组的sin信号与cos信号相位也不变，最终信号所解析出的位置信息不变。类似于绝对值编码器。

#### 4. 编码器相对旋变在我们的应用场景下的优势？

##### Resolvers vs encoders for motion control

**结论：旋变只在温度耐受上有优势。**

编码器和旋转变压器本质上作用相同：测量旋转运动和速度，但方式不同。除了编码器是专门测量线性运动的另一种类型之外，它们如何集成到系统中以及反馈格式是关键区别所在。例如，虽然旋转变压器在外形上与电机相似，但它们必须经过精细调整，并且通常需要转换反馈格式才能与控制计算机匹配。编码器则更加灵活，能够提供清晰的数字信号，并轻松适应各种尺寸和未来的升级。

换句话说，只有当输入设备能够接收旋转变压器正弦/余弦信号且硬件匹配时，旋转变压器才能取代编码器。编码器几乎总是可以取代旋转变压器，尤其是在控制采用数字化的现代应用中。让我们深入了解一下编码器和旋转变压器之间的一些异同。

- 污染耐受度

编码器和解析器的封装方式基本相同，因此就污染耐受而言，两者并无优势。

- 操作环境

旋转变压器坚固耐用，可能更适合可能遇到极端持续温度或极高振动的恶劣环境应用。然而，编码器本身也非常坚固耐用，因此旋转变压器的唯一真正优势在于其能够承受更高的持续温度。如果您的应用要求反馈设备在超过 125 摄氏度的温度下运行，那么您应该选择旋转变压器。

- 复杂性

大多数运动控制系统都可以使用旋转变压器或编码器，因此在线路和互连方面并无太大区别。然而，旋转变压器是模拟设备，需要转换器来格式化测量数据，以便由数字计算机进行处

理。这种转换可以通过旋转变压器数字转换器 (RDC) 或 DSP 和合适的输入滤波电路完成。为了在任何特定应用中成功使用旋转变压器，应用必须仔细考虑一系列参数并选择合适的组件。

最小尺寸旋转变压器应用必须考虑参考频率、带宽、最大跟踪速率、转换结果的位数、输入滤波、参考电压的交流耦合、信号和参考电压的相位补偿以及失调调整。所有这些问题都会影响测量过程和控制环路的整体精度。例如，可以使用ADI公司的AD2S80A之类的产品。

此类转换器为跟踪转换器，采用二型伺服系统实现。二型伺服系统是一种闭环控制系统，其特点是恒速或静态输入时误差为零。相反，此类系统在所有其他情况下都会出现误差，这些误差的大小必须通过优化转换器的“调谐”来控制。转换器本身的动态特性是系统设计的重要组成部分。作为二型伺服系统，该转换器可能会给系统带来高达 180 度的相位滞后。

对于使用 400 Hz 参考频率（第 11 和 12 页）的 12 位转换器，RDC 带宽 (-3db 点) 将小于 100Hz。使用相同的参考频率，14 位转换器的带宽为 66 Hz，16 位转换器的带宽为 53 Hz。100 Hz 的 -3db 带宽意味着在 40 Hz 频率下将出现约 3db 的峰值和 45° 的相移。由于许多伺服器试图在这些频率附近闭合位置环，因此增加 45° 的相移是不可取的。还应注意，虽然 RDC 的跟踪速率可能不会超过要求，但当引入 RDC 动态特性时，负载动态特性复杂的系统很可能会变得不稳定。当使用 14 位或 16 位转换器时，情况只会更加糟糕。RDC 的另一个特点是最大压摆率或跟踪速率受旋转变压器参考频率或载波频率的限制。例如，ADI公司的AD2S80A RDC 使用 400 Hz 参考频率，其跟踪限速为 1500 rpm。使用 5 kHz 参考频率，该值可提升至 18,750 rpm。相比之下，编码器可以简单得多。



当编码器用于控制系统时，只需考虑两个问题：所需的分辨率和编码器需要工作的最大转速。由于测量过程本质上是数字化的，因此无需处理编码器的动态特性。编码器在额定转速下提供具有保证信号分离度和对称性的数据。现在许多编码器的分辨率高达 25 位，有些编码器甚至能够允许电机以接近此分辨率的 10,000 rpm 运行。因此，基于编码器的应用通常具有更宽的动态范围。

#### ○ 数据格式

旋转变压器是“绝对”测量系统。它们在 360 度旋转的每个点上提供唯一的正弦/余弦电压。

编码器可以是绝对式或增量式，输出为数字量。绝对式编码器通常具有串行数据总线，驱动器必须能够与其通信才能读取位置测量值。这要求设计人员验证编码器和驱动器是否兼容。

增量式编码器随处可见，所有驱动器都可以与其接口。

- **准确性**

编码器比解析器及其相关的转换过程更精确。



- **灵活性**

如果未来某个时候需要更高的性能或定位精度，升级基于编码器的系统将更加容易。编码器应用只需更换反馈元件，并对驱动器进行软件更改，以便考虑新的线数。旋转变压器的更换需要重新考虑相关的转换器、电源电压和频率、滤波等，除非驱动器在开发时已考虑到这些因素，否则可能无法进行更改。

## 5. 传感器的相对各种失效模式？

### LVDT

- **线圈短路：** LVDT的线圈如果出现短路，可能导致信号输出失真，产生偏差，甚至完全失效。
- **磁场泄漏：** 次级线圈之间的磁场泄漏会导致信号失真或不稳定，从而影响传感器的精度和响应。
- **主电压波动：** LVDT的主电压如果发生波动，可能会导致次级线圈输出电压减少，影响测量结果，出现缩放误差。
- **温度变化：** 温度变化会导致LVDT的铁芯材料的磁特性变化，进而影响信号的线性度，造成偏差。
- **机械损伤：** 在飞行器的工作环境下，机械振动或冲击可能导致LVDT的传感核心移位或变形，影响位移传感精度。

### RVDT

- **线圈故障：** 与LVDT类似，RVDT的线圈可能会因短路、开路或损坏导致信号输出异常。
- **转子卡滞或磨损：** 转子与线圈的相对运动受限，可能导致输出信号无法正确反映旋转角度，从而产生偏差。
- **机械冲击或振动：** 飞行器的剧烈振动可能会影响RVDT的机械结构，导致其内部部件位移或磨损，进而影响测量精度。

- **温度变化：**温度波动可能会影响RVDT的材料特性（如转子和定子之间的磁耦合），从而导致读数漂移。

## 旋转变压器

- **线圈损坏：**旋转变压器的线圈可能会因为长期使用或外部环境因素（如高温、振动）而损坏，导致传感器无法正常工作。
- **转子卡滞或磨损：**转子与定子之间的机械连接受损可能导致旋转阻力增大或机械精度丧失，导致输出信号不准确。
- **温度变化：**温度变化可能影响旋转变压器的电磁性能，导致输出信号的变化，进而影响角度测量。

## 旋转编码器

- **光学或磁性元件损坏：**对于光学编码器，光源或光电探测器的损坏会导致无法读取编码信息。磁性编码器可能由于磁头损坏或磁性标记丢失导致读数错误。
- **编码盘磨损或污染：**编码盘上的编码条磨损或污染会导致信号不稳定或读取错误。
- **机械磨损：**旋转编码器的轴承和机械结构可能因长期使用或振动而磨损，影响旋转精度，进而导致输出信号的误差。
- **温度波动：**温度变化可能导致编码器内部电子元件的偏移，从而影响读数精度。

