

运算放大器特性参数偏差对控制系统稳定性的影响分析

曹英健, 王岩, 曹巳甲, 郭翹楚

(北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076)

摘要: 对一种运算放大器 AD8692 (以下简称运放) 的特性参数偏差对整机控制稳定性的影响机理进行了研究, 运放在整机中用于处理器前级对位移闭环控制信号的处理, 实验证明, 运放特性参数偏差会引起位移信号自激振荡, 进而导致整机性能下降, 系统失稳; 对标 GJB 9147 进行运放各项参数的系统测试和分析, 找出了影响闭环控制稳定性的参数, 并对多批运放的性能参数进行了对比测试, 验证了参数分析的正确性和普适性; 经实验测试提出了运放性能参数的测试筛选控制措施, 对装机器件的性能控制提供了有效手段。

关键词: 运算放大器; AD8692; 参数偏差; 稳定性; 机理分析

Impact Analysis of Operational Amplifier Characteristic Parameters on System Stability

Cao Yingjian, Wang Yan, Cao Sijia, Guo Qiaochu

(Beijing Institute of Precise Mechatronics and Controls, Beijing 100076, China)

Abstract: The paper do research on the impact of the Amplifier AD8692 characteristic parameter of the stability whole control system. The Amplifier AD8692 is used in the system to deal with the feedback shifting signal. The experiment proved that, the Amplifier AD8692 characteristic parameter departure may cause self-oscillation, and then the performance of the complete device descended, meanwhile the system became unstable. Several batches of Amplifier were tested and contrasted, and confirmed that it is by the Amplifier open loop gain being too large. The devices should be selected by the parameters before they are fixed.

Keywords: operational amplifier; AD8692; parameter departure; stability

0 引言

基于永磁同步电机的机电伺服技术是融合了电、磁、机等多学科领域的一项前沿技术, 是涉及变量多、控制复杂、耦合性强的技术, 具有高灵敏度、高动态、非线性工作特点, 控制难度非常大。线位移作为系统的初级输入和最终输出量, 其采样信号要求非常平稳, 设计时要求硬件具有非常低的噪声, 任何超出一定阈值的信号噪声都可能经系统回路进一步放大, 最终影响伺服机构位移的稳定性, 这其中, 运算放大器作为模拟电路领域最常用的电子器件之一起到至关重要的作用。运算放大器的特点便是可以实现对信号的计算, 制成集成电路之后, 具有体积小、性能稳定、应用灵活等优点。

运算放大器是属于有源元件, 具有多个端钮, 可以实现对信号的加减乘除、比例运算、微分和积分等计算, 也可以用来处理电信号, 如比较和选择信号的幅度。AD8692 是 AD 公司一款双路、轨到轨输出单电源放大器, 具有低失调、低输入电压、低电流噪声及宽信号带宽等特性。在电

机控制驱动器应用运放 AD8692 将位移信号变换为中心处理器 DSP 的片内 A/D 转换器可以直接采集的信号。中心处理器将输入的位移、电压、电流等测试信号进行 SVPWM 处理产生交流永磁同步电机控制信号, 对电机进行精确的控制。

由于电机反馈参数中电流, 转速以及位置信号的采集过程中, 需要对以上参数进行信号调理进而实现高速电机信号准确采集, 因此以运算放大器为主要器件组成的调理电路作用十分明显, 当高速运算放大器局部参数不稳定时, 会出现电机驱动器采集信号波动, 容易产生自激振荡的现象。

1 伺服系统工作原理

机电伺服系统是以动力电源为初级能源, 将输入指令信号经伺服控制驱动器最终放大和变换为以电压、电流表征的电功率, 驱动伺服电机实现控制需求的机械功率, 并经机电动作执行机构 (以下简称“作动器”) 中传动机构输出做功, 实现负载对象位置控制的执行机构。

如图 1 所示, 上位机将控制信号通过 CAN 总线送至电机控制驱动器, 并经控制电缆向电机驱动器提供 +28V 直流电。电机驱动器通过 CAN 总线接收位置指令, 采集机电作动器线位移信号作为控制信号输入, 并采集电机旋转的

收稿日期: 2019-09-13; 修回日期: 2019-11-07。

作者简介: 曹英健(1982-), 男, 河北衡水人, 硕士, 高级工程师, 主要从事伺服控制系统、电力驱动技术方向的研究。

转角信号、电机相电流信号等永磁同步伺服电机状态数据，运行闭环控制算法，控制永磁同步伺服电机运转及起停，电机带动机电作动器驱动负载完成指令要求的动作。动力电源为控制驱动器提供高压直流电源作为一次能源为伺服机构提供电功率。

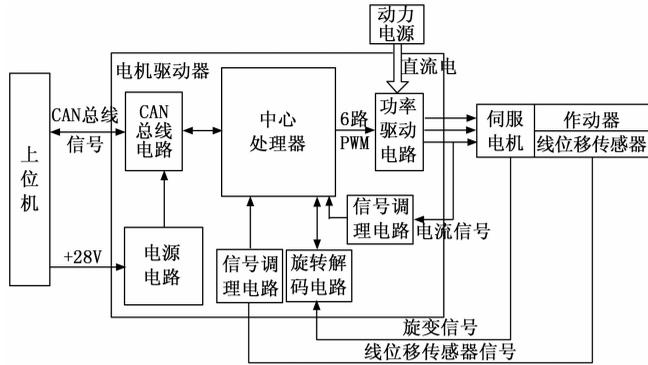


图 1 机电伺服系统工作原理

机电伺服系统采用内外环复合控制架构，由中心处理器运行伺服驱动程序，执行永磁同步伺服电机控制算法，经过控制算法控制三相全桥功率驱动电路的导通与关断，从而实现“位置、电流和转速”三环闭环控制，最终达到对负载进行伺服控制的目的。外环用于伺服机构位置、速度控制，决定了位置跟随精度和系统抗负载扰动能力；内环用于伺服电机电流控制，决定了机电伺服系统的响应能力和运行可靠性，采用电压空间矢量（SVPWM）磁链跟踪控制方法，通过采集电机相电流和电机转子位置信号等状态信息，并经过 CALRK 变换、PARK 变换和 PARK 逆变换，得到 d/q 轴参考电压信号，经过矢量扇区运算得到 6 路 PWM 控制信号，控制三相全桥功率驱动电路的导通与关断，从而实现位置、电流和转速闭环控制，最终达到对负载进行精确位置控制的目的。

2 电路设计原理

作动器的线位移信号为 0~10 V 电压信号，而采用中心处理器的片内 A/D 转换器进行线位移信号采集，由于中心处理器的片内 A/D 转换器只能接收 0~3 V 范围内的信号，因此线位移信号需要经过信号变换后才能进入中心处理器的片内 A/D 转换器进行采集。

为实现线位移信号与中心处理器的片内 A/D 转换器之间的信号协调匹配，在电机驱动器内线位移信号经过一级信号调理电路对信号进行线性变换，将线位移信号由 0~10 V 变换到 0~3 V 范围内。调理电路变换分两级设计^[1]，即第一级将信号进行分压，再经过第二级运放的有源放大电路对信号放大。运放 AD8692 的信号调理电路将线位移输出的 0~10 V 信号转换为可直接采集的 0~3 V 信号，原理如图 2 所示。

位移信号采样变换公式：

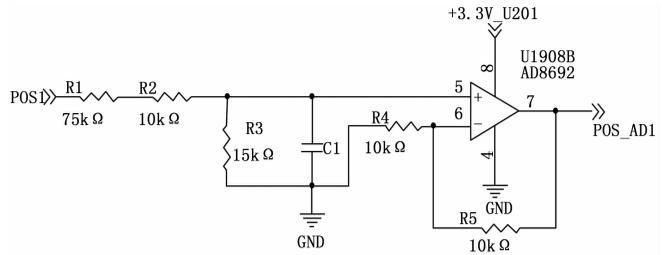


图 2 运放 AD8692 信号调理电路原理

$$U_{POS_AD1} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \times \frac{R_5 + R_1}{R_4} \times U_{POS1} = 0.3U_{POS1} \quad (1)$$

图中，电容 C_1 与电阻 R_1 、 R_2 构成一阶 RC 滤波电路，滤波电路截止频率如下：

$$f = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 85 \times 1 \times 10^{-6}} = 1873 \text{ Hz} \quad (2)$$

公式 (1) 是图 2 对应输入输出电压信号比值，由公式 (1) 可以明显得到输入电压和输出电压之间关系为输出电压是输入电压 0.3 倍，实现位置信号 0~10 V 的电压采集，公式 (2) 则主要计算了 RC 滤波电路的截止频率，该截止频率为 1 873 Hz，即对于信号调理电路前级的输入信号，大于 2 kHz 的信号噪声将被滤波电路明显抑制，由此可以得到，如果后级电路测到 2 kHz 以上的高频噪声，则应排查前级输入信号是否存在该噪声，如果前级信号不存在该噪声，则可定位该噪声为滤波后级电路产生。

3 整机现象分析

电机驱动器在带作动器测试时，发现当负载位移运动到 0~3 V 量程范围内实际电压量约 2.6 V 时，负载出现自激抖动并附有噪音，查看测试仪显示的线位移从波动范围在 8.15~8.23 V，波动量达到 80 mV，明显大于一般正常产品的 8.15~8.16 V 线位移 10 mV 的波动范围，故障产品位移信号跳变量约为正常产品的 8 倍以上，证明性能存在明显差异。

为进一步对比运放 AD8692 的特性输出信号，分别测试在 2.7 V 直流的相同输入信号情况下直接测量运放从输入到输出波形，测试结果如图 3、图 4 所示，图中通道 2 为信号调理电路的输入端线位移稳定信号，通道 1 为信号调理电路的输出的进中心处理器的变换调理后信号。

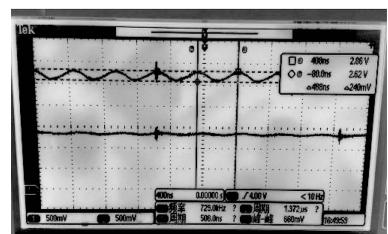


图 3 故障品运放输入输出波形

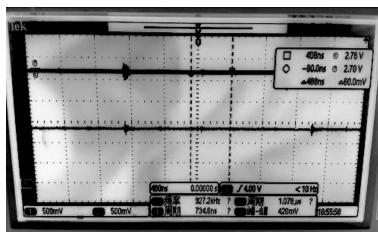


图 4 正常产品输入输出波形

由图 3、图 4 可见, 故障状态与正常状态输入端线位移信号均较稳定, 无明显差异, 但图 3 输出信号存在周期约 488 ns (频率约 2 MHz), 峰峰值约 0.2 V 的近似正弦振荡噪声, 图 4 正常状态的输出信号则稳定如直线, 二者输出信号差异明显。根据前面电路设计原理分析, 对于信号调理电路前级的输入信号, 2 kHz 以上的信号噪声将被滤波电路明显抑制。现测到频率约 2 MHz 的高频噪声, 而前级输入信号平稳, 故可定位该噪声为滤波后级运放电路 AD8692 产生。将故障运放电路 AD8692 更换为一只其它批器件后, 再进行同条件整机测试问题消除, 证明以上定位分析准确。

4 运算放大器差异分析

为对比故障件与正常运算放大器的差异性, 查阅运算放大器 AD8692 技术手册, 其电性能参数如表 1 所示^[2], 为了分析多种电性能参数对运算放大器影响, 取多只正常和故障器件依据相关元器件标准经专业测试机构进行测试及评估。

表 1 AD8692 产品手册电性能表

序号	参数符号	参数名称	单位	最小值	最大值
1	V_{OS}	失调电压	mV	-2	2
2	I_{IB+}	正输入偏置电流	pA	-1	1
3	I_{IB-}	负输入偏置电流	pA	-1	1
4	I_{IB}	输入偏置电流	pA	-1	1
5	I_{OS}	输入失调电流	pA	-0.5	0.5
6	A_{VO}	开环增益	V/mV	90	—
7	CMRR	共模抑制比	dB	75	—
8	PSRR	电源电压抑制比	dB	80	—
9	I_S	电源电流	mA	—	2.1

4.1 测试方法与结果分析

AD8692 型运算放大器依据 GJB 9147-2017、产品手册电性能表确定测试参数和判据, 测试参数包括: 输入失调电压 V_{OS} 、输入偏置电流 I_{IB} 、输入失调电流 I_{OS} 、共模抑制比 CMRR、开环增益 A_{VO} 、电源电压抑制比 PSRR、输出峰峰电压 (输出高电平 V_{OH} 和输出低电平 V_{OL})、电源静态电流 I_S 等信号^[3], 以下分别对正常器件和故障器件进行测试参数对比。

4.1.1 输入失调电压 V_{OS}

对于一个理想的运算放大器, 当两输入端都接地时,

其静态输出电压应为零。但由于集成运放输入级两晶体管参数及其负载电阻总不可能完全对称, 因此当输入信号为零时总存在着一定的零位输出电压, 或称为输出失调电压, 其大小主要反映了运算放大器输入级元件的不对称程度^[4]。因此, 我们可以用输出失调电压衡量集成运放内部电路的不对称程度。考虑到各器件的开环增益 A_{ui} 不同, 同样的输入级不对称程度, 在输出端所表现出的失调电压不同, 开环增益大的输出失调电压大。所以更合理地描述集成运放的不对称程度, 通常采用“输入失调电压” V_{OS} 这个指标, 它被定义为: 在室温 (25℃) 及标称电源电压下, 当输入电压为零时集成运放的输出电位 V_o , 折合到输入端的数值, 即 $V_{OS} = V_{CO} / 7A_{ui}$ (A_{ui} 是开环电压放大倍数)。这就意味着, 必须在输入端加上一个与其 V_{OS} 大小相应的差动输入电压, 才能补偿运放本身不对称因素的影响使输出电压为零^[5]。

本文所采用的输入失调电压 V_{OS} 测试原理如图 5 所示。测试使 DUT 直流输出电压为规定值 2.5 V 时, 使用示波器测量两输入端间所加的直流补偿电压。

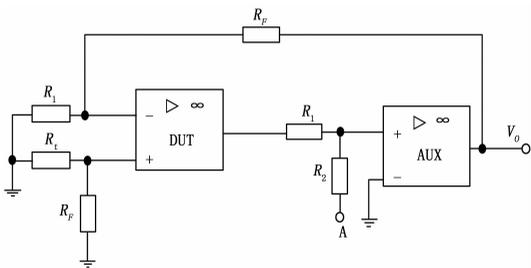


图 5 输入失调电压测试原理图

AD8692 为双通道运算放大器, 分别选取良品和故障件各两只试件进行测试结果对比, 可得到 4 组数据, 测试对比结果见表 2。

表 2 失调电压 V_{OS} 测试数据对比

通道号	参数	单位	最小值	最大值	正常 1#	正常 2#	故障 1#	故障 2#
1	V_{OS}	mV	-2	2	0.24	-0.590	0.199	0.020
2	V_{OS}	mV	-2	2	-0.190	-0.323	0.114	-0.143

由表 2 得到故障器件失调电压在 $-0.143 \sim 0.199$ mV, 正常器件失调电压在 $-0.59 \sim 0.24$ mV 之间, 故障器件与正常器件的失调电压 V_{OS} 无明显差别, 因此可排除输入失调电压 V_{OS} 参数的影响。

4.1.2 输入偏置电流 I_{IB}

由于集成运放各级直耦电路的工作点是由恒流源偏置电路确定的, 当如图 6 所示采用正、负电源供电时, 只要它的两个输入端经信号源或电阻接地, 即可通过地向输入晶体管注入基极偏置电流 I_{IB} , 它的大小由差分电路发射极恒流源电流 I_E 确定, 有 $I_{IB} = I_E / 2 (1 + \beta)$, 而与输入端外

接电阻的大小无关^[6]。因此，集成运放的输入偏置电流 I_{IB} 一般定义为：在标称电源电压及室温 25℃ 下，使运算放大器静态输出电压为零时流入（或流出）两输入端电流的平均值。

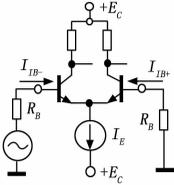


图 6 正、负电源供电

输入偏置电流对进行高阻信号放大、积分电路等对输入阻抗有要求的地方有重要影响^[7]。输入偏置电流 I_{IB} 测试原理如图 7 所示。电源端加规定的电压，测试使 DUT 直流输出电压为规定值 2.5 V 时，流入 DUT 两输入端的电流 I_{IB+} 、 I_{IB-} 和二者的均值 I_{IB} 。

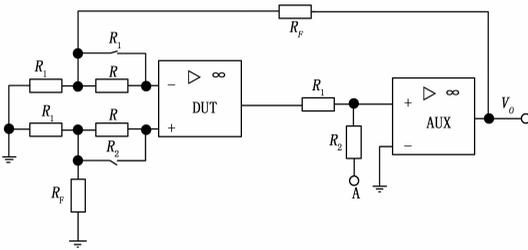


图 7 输入偏置电流测试原理图

在输入偏置电流测试所采用的方式与测试失调电压相同，分别采用良品与故障件各两只试件记性测试结果对比。故障件与正常件的输入偏置电流 I_{IB} 测试结果分析见表 3。

表 3 输入偏置电流 I_{IB} 测试数据对比

通道号	参数	单位	最小值	最大值	正常 1#	正常 2#	故障 1#	故障 2#
1	I_{IB+}	pA	-1	1	-0.41	-0.24	0.81	-0.76
1	I_{IB-}	pA	-1	1	-0.53	0.15	0.35	-0.54
1	I_{IB}	pA	-1	1	-0.47	-0.05	0.58	-0.65
2	I_{IB+}	pA	-1	1	0.32	-0.34	-0.58	-0.16
2	I_{IB-}	pA	-1	1	-0.17	-0.46	-0.25	-0.19
2	I_{IB}	pA	-1	1	0.08	-0.40	-0.41	-0.18

由表 3 可见，正常器件偏置电流范围在 -0.47~0.08 pA，故障器件偏置电流范围在 -0.65~0.58 pA，故障器件与正常器件的输入偏置电流 I_{IB} 无明显差别，因此可排除输入偏置电流 I_{IB} 参数的影响。

4.1.3 输入失调电流 I_{OS}

输入失调电流与输入失调电压一样，都是描述运放差分输入的对称性的，即当输出为 0 时两个输入端的输入电流差。输入失调电流 I_{OS} 测试原理如图 8 所示。测试使 DUT 直流输出电压为规定值 2.5 V 时，流入两输入端的电流

之差。

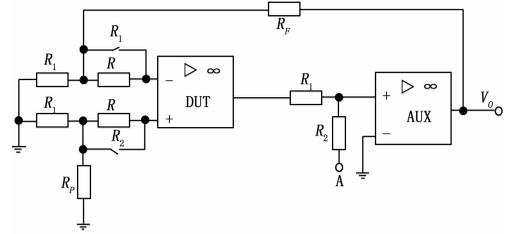


图 8 输入失调电流测试原理图

故障件与正常件的输入失调电流 I_{OS} 测试结果分析见表 4。

表 4 输入偏置电流 I_b 测试数据对比

通道号	参数	单位	最小值	最大值	正常 1#	正常 2#	故障 1#	故障 2#
1	I_{OS}	pA	-0.5	0.5	0.12	-0.39	0.26	-0.22
2	I_{OS}	pA	-0.5	0.5	0.49	0.12	-0.33	0.03

由表 4 可见，正常器件偏置电流范围在 -0.39~0.49 pA 之间，故障件范围在 -0.33~0.26 pA 之间，可以得到故障器件与正常器件的偏置电流 I_{OS} 无明显差别，可排除输入偏置电流 I_{OS} 参数的影响。

4.1.4 开环增益 A_{VO}

运放开环增益是集成运算放大器没有反馈电阻状态下的差模电压增益，是集成运算放大器的输出电压与差动输入电压之比，可理解为反馈回路和前向通路组成各环节中所有增益的乘积。开环增益 A_{VO} 测试原理如图 9 所示。测试条件为器件开环时，测试 DUT 输出电压变化与差模输入电压变化之比。

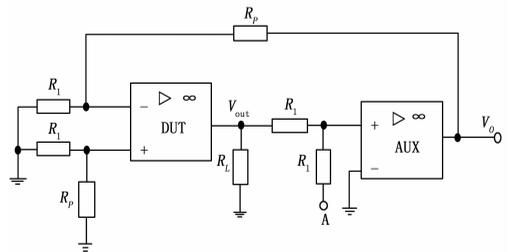


图 9 开环增益测试原理图

故障件与正常件的开环增益 A_{VO} 测试结果分析对比见表 5。

表 5 开环增益 A_{VO} 测试数据对比

通道号	参数	单位	最小值	最大值	正常 1#	正常 2#	故障 1#	故障 2#
1	A_{VO}	V/mV	90	—	266.1	321.8	964.1	4 466.7
2	A_{VO}	V/mV	90	—	267.9	261.7	9 248.9	4 559.2

由表 5 可见，正常器件开环增益在典型值的 250 到最大

值 321.8 V/mV 之间, 而对比故障器件得到最大开环增益远超过该值, 最小值也达到 964.1 V/mV, 对比可以发现故障器件相对正常器件的开环增益 A_{ol} 明显偏高, 且在测试中发现故障器件开环增益波动较大。通过以上一些列对比, 可以得到该参数的明显差异证明开环增益 A_{ol} 的差异性为故障起因。

4.2 其它参数测试

共模抑制比 $CMRR$ 定义为当运放工作于线性区时, 运放差模增益与共模增益的比值, 共模抑制比是表征运算放大器抑制差模输入中抑制共模干扰的性能指标, 从表 6 中可以得到正常运算放大器共模抑制比范围在 91.2~92.9 dB, 故障器件共模抑制比范围在 86.5~94 dB, 相差不大, 可以排除共模抑制比 $CMRR$ 的影响。电源电压抑制比 $PSRR$ 定义为当运放工作于线性区时, 运放输入失调电压随电源电压变化的比值, 反映了电源电压变化对运放输出的影响^[8], 从表 6 中可以得到正常件电源电压抑制比测试范围在 94.9~95.6 dB, 而故障件电源电压抑制比范围在 95.6~99.5 dB, 对比故障件和正常件电源电压共模抑制比差异并不明显, 可以排除电源电压抑制比 $PSRR$ 的影响。

进一步测试运放的其它参数, 可以看出, 故障器件除开环增益参数 A_{ol} 明显偏高外, 对应电源电流 I_s 也偏大, 从表 6 中可以得到正常运算放大器电源电流为 1.724 mA 和 1.763 mA, 而故障件达到了 3.131 mA 和 3.307 mA, 接近正常运算放大器电源电流两倍, 这是由于开环增益偏高, 输出存在振荡信号不稳定, 使功耗加大, 该变化趋势与开环增益变化趋势一致。

表 6 运放 AD8692 性能参数测试结果

参数	单位	最小值	最大值	正常 1#	正常 2#	故障 1#	故障 2#
通道 1							
$CMRR$	dB	75	—	91.2	92.9	94.0	92.6
$PSRR$	dB	80	—	95.1	95.6	99.2	98.3
通道 2							
$CMRR$	dB	75	—	92.3	91.9	92.3	86.5
$PSRR$	dB	80	—	95.5	94.9	95.6	99.5
I_s	mA	—	2.1	1.724	1.763	3.131	3.307

5 器件参数对整机影响分析

通过对以上运算放大器主要参数进行分析, 可以得到结论如下: 系统线位移信号经过信号调理电路时, 由于故障件开环增益过高, 导致运算放大器输出端信号不稳定, 在运算放大器输出端产生高频噪声, 高频噪声经过 A/D 转换处理环节输入中心处理器, 进入到控制回路运算过程中,

使处理过程和 PWM 控制量叠加高频变化噪声, 最终导致伺服作动器位移抖动和噪音^[9]。

多批器件经过测试, 只有个别批次合格率较低, 其它批次则全数合格, 证明该参数差异性可能与批次相关。合格率较低批器件电性能参数与其它批次相比均存在开环增益过高且测试状态不稳定、电源电流过大等参数差异, 综合分析, 开环增益过高是导致运放输出抖动的主要原因。为提前发现器件性能差异, 建议对其进行预筛选, 要求该运算放大器装机前须进行全部性能参数测试, 测试合格方可使用。

6 结束语

电机闭环控制系统中对于反馈信号的采集准确性对于整个控制系统稳定性有着至关重要作用, 而运算放大器作为伺服系统中反馈回路上重要的元器件, 其设计参数大小不符合要求对整个系统有着不可预估的影响^[10], 要对各个参数进行关注。经过分析, 由于运放存在性能参数中开环增益参数过高的故障模式, 导致运放输出信号不稳定, 并导致功耗超标, 从而导致电机驱动器采集信号波动, 对负载控制时产生自激振荡的现象。因此, 装机前应对照器件技术手册增加运放各项性能参数测试筛选, 性能参数测试合格后使用。

参考文献:

- [1] 蒲林, 钟英俊, 等. 半导体集成电路运算放大器测试方法 [S]. GJB 9147-2017, 2017-09-12.
- [2] Analog Devices. Datasheet of AD8692 [Z]. Analog Devices Inc., 2004.
- [3] 王军, 周国平. 高速控制系统运放电路稳定性研究 [J]. 制造业自动化, 2012, 11: 91-93.
- [4] 周胜海, 郭淑红. 基于低噪声运放的传感器前置放大器设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2006, 9: 38-40.
- [5] 苏立, 仇玉林. 一种全差分增益提升运放的设计与建立特性优化 [J]. 电子器件, 2006, 29 (1): 162-165.
- [6] 童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础 [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [7] 向俐霞. 集成运算放大器应用详解 [J]. 科技创新导报, 2008 (23): 20.
- [8] 隋晓红, 石磊. 运算放大器容性负载驱动问题研究 [J]. 煤矿机械, 2003, 3: 37-39.
- [9] 张逸鹏, 卓力. 一种面向集成运算放大器的带宽补偿方法 [J]. 测控技术, 2009, 28 (9): 95-98.
- [10] 李兆斐, 刘平, 张克军. 开关电源 IC 中误差放大器的自激振荡及解决方法 [J]. 电子设计工程, 2011, 19 (8): 167-169.