

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2020026

基于 TPS2121 的井下自动供电装置设计

胡永建, 李显义, 黄衍福, 刘 瀛

(中国石油集团工程技术研究院北京石油机械有限公司, 北京 102206)

摘 要: 对于采用一次性高温锂电池供电的随钻测量仪器, 为了解决其供电中多路电源无缝切换的问题, 进行了井下自动供电装置设计。原有供电方式的分析发现, 其二极管电源复用方式的电池利用率低, 微控制器的供电技术无法应对电池的瞬间失压并占用微控制器资源, 为此, 经综合对比, 选用了 Texas Instruments 公司的优先级电源复用器芯片 TPS2121, 可以实现多路电源之间的无缝切换功能, 并使用 LM5166 同步型降压转换器设计了 DC/DC 转换器, 形成了井下自动供电装置。室内测试和现场试验表明, 井下自动供电装置能够完成多路电池组的自动切换, 按顺序使用每个电池组可以提高电池利用率, 配合 DC/DC 转换器可以实现随钻测量仪器的无缝供电, 具有较高的可靠性和经济性。

关键词: 随钻测量; 自动供电; 电源; 复用器; 转换器; 无缝切换

中图分类号: TE927

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2020)02-0076-06

Design of Downhole Automatic Power Supply Device based on TPS2121

HU Yongjian, LI Xianyi, HUANG Yanfu, LIU Ying

(Beijing Petroleum Machinery Co., Ltd., CNPC Engineering Technology R&D Co., Ltd., Beijing, 102206, China)

Abstract: Maintaining a consistent power supply for downhole drilling devices has proved to be very problematic. For that reason, a downhole automatic power supply device was designed. In the case of the MWD instrument powered by disposable high-temperature lithium battery, the problem of seamless switching of multiple power sources in power supply could only be addressed by selecting an appropriate power multiplexing method for a series-parallel battery pack, thus the downhole automatic power supply device was designed. After analyzing the shortcomings of the original power supply method, it was found that the battery utilization rate of the diode power multiplexing method was low. Further, the microcontroller-based power supply technology failed to cope with the instantaneous voltage loss of battery and occupied the microcontroller resources. Through comprehensive comparison, the priority power supply multiplexer chip TPS2121 was used to realize the seamless switching between multiple power sources, and the DC/DC converter was designed by using the LM5166 synchronous step-down converter to form an automatic downhole power supply device. The indoor test and field test demonstrated that this downhole automatic power supply device could achieve the automatic switching of multiple battery packs, improved the battery utilization rate by using each battery pack in sequence, and achieved the seamless power supply of MWD instrument by cooperating with the DC/DC converter. In addition, this device presented high reliability and economic benefits.

Key words: measurement while drilling; automatic power supply; power; multiplexer; converter; seamless switching

在为井下随钻测量仪器供电过程中, 供电设备会因电池失压而重新启动, 导致数据丢失或逻辑关系紊乱。无缝切换技术可以在电池失压时自动切换到备用电池, 使负载电压保持基本稳定^[1]。对于一次性高温锂电池供电的井下随钻测量仪器, 由于受输入电压限制, 单个串联方式的锂电池组容量往往不能满足仪器的供电需求。为扩大电池容量, 可将多个串联电池组并联起来延长供电时间, 同时, 为防止锂电池强制充电, 使用二极管隔开每组电池^[2], 以满足无缝切换的要求。但由于优先使用最高电压的电池, 所有串联电池组是同步均匀放电的, 每次起钻后每组电池的剩

余电量大致相同, 下次施工时, 为了保证供电容量, 需要更换全部电池组, 导致使用成本较高。

目前常用的供电管理控制方法是使用微控制器执行无缝切换操作^[3], 笔者使用该方法设计了随钻测量仪器的锂电池优化供电方法^[4]。微控制器采集

收稿日期: 2019-08-23; 改回日期: 2019-12-20。

作者简介: 胡永建 (1970—), 男, 河南商水人, 1992 年毕业于西安交通大学应用物理专业, 1995 年获北京大学凝聚态物理专业硕士学位, 高级工程师, 主要从事石油钻井井下仪器及通讯设备的研制工作。E-mail: huyongjian32788@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项课题“深井高速信息传输钻杆技术与配套装备研究”(编号: 2016ZX05020-005-001)部分研究内容。

各电池组的供电电压, 自动判断并优先使用电压较低的电池组。起钻后只需要更换电量耗尽的电池组, 未用的或剩余电量较多的电池组可以在下次施工时继续使用。但该方法通过定时采集电池电压进行判断, 不适用于电池故障等导致的瞬间失压, 也占用了宝贵的微控制器资源。为此, 笔者基于美国 Texas Instruments (TI) 公司的具备无缝切换功能的优先级电源复用器芯片 TPS2121, 设计了不占用微控制器资源的井下自动供电装置, 可以依次使用高温锂电池组, 当前电池组的电量耗尽后可以自动顺序切换到下一电池组, 电池组失压时能自动无缝切换使用其他电池组。

1 TPS2121 电源复用器

电源复用方案有分立、半集成和全集成等方式, 使用二极管、理想二极管、eFuse(电子保险管, 内部开关管为场效应管)和负载开关等器件^[5]。其中, 全集成方式电源复用无需微控制器, 而是按优先级自动切换电源。TI 公司推出的 TPS212x 系列电源复用器芯片支持自动与手动切换, 其中 TSP2121 支持外部电压基准, 是井下自动供电装置的核心器件, 其功能模块如图 1 所示^[6](图 1 中: BFET1, BFET2, HFET1 和 HFET2 为 N 沟道场效应管; U_{REF} 为内部基准电压, V; U_{OFST} 为偏置电压, V; IN1 和 IN2 为 2 路电源输入引脚; PR1 为优先级使能引脚; CP2 为比较器使能引脚; OV1 和 OV2 为电源输入过电压保护使能引脚; ST 为电源选择状态指示引脚; SS 为输入延迟及输出软启动时间设定压引脚; ILM 为输出电流限制引脚; OUT 为电源输出引脚; GND 为接地引脚)。

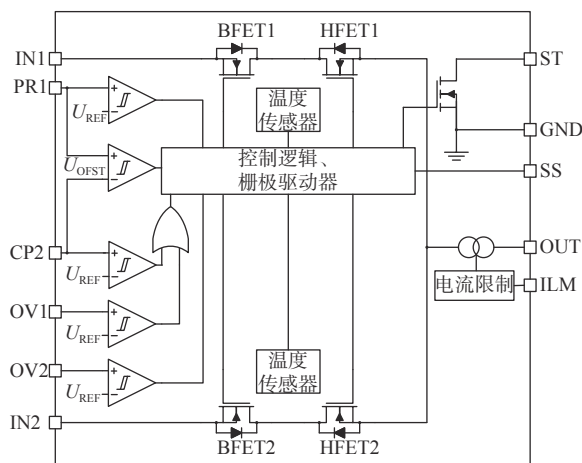


图 1 TPS2121 功能模块示意

Fig.1 Schematic of TPS2121 functional module

TPS2121 是一个双路输入(IN1 和 IN2 引脚)、单路输出(OUT 引脚)的电源复用器(MUX)。器件内部有 2 路电源开关, 每路开关由背靠背的 2 个 N 沟道场效应管(N-FET)组成, 具有防输出电流倒灌的反向电流阻塞功能, N-FET 由内部逻辑通过栅极驱动器来控制导通与截止。2 路电源开关不能同时导通, 其导通状态以开漏方式在 ST 引脚输出。

TPS2121 内部集成了多个具有迟滞电压比较功能的施密特触发器, 用于实现电源切换逻辑及 1、2 路电源的过压保护(OV1、OV2)。内置温度传感器用于超温保护(OTP), 并具有限流(ILM)和软启动(SS)保护功能。在供电输入侧实现过压、限流及软启动保护, 有利于下游负载的工作安全。

TPS2121 具有输入电压比较器(VCOMP, 即自动选择高电压输入)、外部比较器控制方案(XCOMP)及外部电压基准控制方案(XREF)等 3 种工作模式。通过 IN1, IN2, PR1 及 CP2 引脚共同配合完成输出电源选择, 其逻辑真值见表 1(表 1 中: U_{IN1} , U_{IN2} , U_{OV1} , U_{OV2} , U_{PR1} 和 U_{CP2} 分别为 IN1, IN2, OV1, OV2, PR1 和 CP2 引脚电压, V; U_{UV} 为欠压保护电压, V)。

输入电源电压在高于欠压保护电压(2.55 V)低于过压保护电压(由外部设定)时被认为有效, 如果只有 1 路电源有效, 则输出自动选择该路电源, 如果 2 路电源均无效, 则器件输出为高阻状态。输出为高阻或 IN1 时, 状态指示引脚 ST 输出为高电平。

当 CP2 引脚输入电压小于 U_{REF} (1.06 V), 器件进入 VCOMP 模式, 此时器件自动选择电压较高的一路。当 CP2 引脚输入电压高于 U_{REF} 时, 如果 PR1 引脚的输入电压也高于 U_{REF} , 器件则进入 XCOMP 模式, 此时根据 PR1 与 CP2 引脚电压的高低(优先级)来选择输入电源。此时, 如果将 CP2 输入电压设定为外部基准电压($>U_{REF}$), PR1 的比较对象就成了精度更高的外部基准电压, 这样就能准确判断 PR1 的电压切换阈值, 同时启动切换时间短至 5 μ s 的快速切换模式, 实现电源的优先级无缝切换, 也就是 XREF 模式。

2 井下自动供电装置工作原理

与可充电式锂电池相比, 随钻测量仪器所用的一次性高温锂电池具有单体电池电压高、比能量高、存储寿命长和工作温度范围宽等优点^[7]。单个锂电池的标称电压为 3.6 V, 开路电压可达到 3.7 V, 而截止电压可低至 2.0 V。电池剩余电量与电池供电电压有关, 也与放电电流及使用温度有关, 仅通

表1 TPS2121 输出选择真值

Table 1 TPS2121 output true value selection

器件输入						器件输出	
$U_{IN1} \leq U_{UV}$ 或 $U_{OV1} \geq U_{REF}$	$U_{IN2} \leq U_{UV}$ 或 $U_{OV2} \geq U_{REF}$	$U_{CP2} \geq U_{REF}$	$U_{PR1} \geq U_{REF}$	VCOMP	XCOMP	OUT	ST
0	×	0	0	$U_{IN2} < U_{IN1}$	×	IN1	高
×	0	0	0	$U_{IN2} \geq U_{IN1}$	×	IN2	低
0	×	0	1	×	×	IN1	高
×	0	1	0	×	×	IN2	低
0	×	1	1	×	$U_{PR1} > U_{CP2}$	IN1	高
×	0	1	1	×	$U_{PR1} \leq U_{CP2}$	IN2	低
0	1	×	×	×	×	IN1	高
1	0	×	×	×	×	IN2	低
1	1	×	×	×	×	高阻	高

过供电电压难以准确判断剩余电量。一种比较简便的方法是用截止电压作为判断电量耗尽的依据。

为延长供电时间,需要为随钻测量仪器配备多个电池组,一组电池的电量耗尽(输出电压低于截止电压)则自动切换到下一组,使电池利用率最大化。

图2所示为井下自动供电装置的工作原理。井下自动供电装置支持多路电池输入,图2中绘出了4路电源输入(BATT0—BATT3为4路输入的串联电池组)。

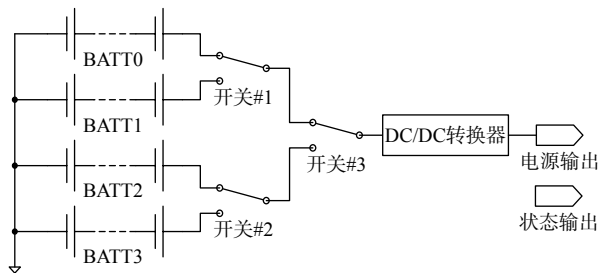


图2 井下自动供电装置工作原理示意

Fig.2 The working principle of downhole automatic power supply device

井下自动供电装置包含基于TPS2121的3个自动切换开关,每个自动切换开关输入端的上面一路是第一路,依次使用BATT0—BATT3等4组电池。每个自动切换开关都具有独立的保护及自动选择功能,可以按顺序自动选择输入电源。TPS2121的导通电阻低至56 mΩ,选用的一次性高温锂电池最大输出电流为1.5 A,即两级开关的器件耗散功率小于0.1 mW,有助于节能和降低器件工作温度。电池的不稳定供电经DC/DC转换器由电源输出端口为

下游负载供电。每个自动切换开关的开关状态由状态输出端口输出到外部,可用于判断当前电池组的使用情况,以便更换电池组。

自动切换开关需要从2路输入电源中顺序选择使用。TPS2121的VCOMP模式自动选择较高的电压,与二极管方式的电源复用类似,这里不适用。对于XCOMP和XREF模式,选用精度更高的XREF模式,与PR1优先级监视器的精度±5%相比,CP2外接电压基准的精度优于1%。

自动切换开关电路如图3所示(图3中: R_{PR1a} 和 R_{PR1b} 为优先级分压电阻,Ω; R_{OV1a} 和 R_{OV1b} 为IN1过压保护分压电阻,Ω; R_{OV2a} 和 R_{OV2b} 为IN2过压保护分压电阻,Ω; R_{ILM} 为输出电流限制电阻,Ω; C_{SS} 为软启动电容,F; U_{OUT} 为输出电压,V; U_{REF_EXT} 为外部基准电压,V; C_1 和 C_2 为滤波电容,F;U1和U2为集成电路的编号)。

由于供电需求及器件的耐压限制,TPS2121允许的输入电压范围是2.8~22.0 V,极限最高电压是24.0 V。由于采用电池供电,按照单个高温锂电池最高开路电压3.7 V计算,最多可以串联5节电池,此时截止电压约为10 V。

图3中CP2引脚接入外部电压基准TI REF5020,其输出即外部电压基准 U_{REF_EXT} 为2.048 V^[8]。

由电阻 R_{PR1a} 和 R_{PR1b} 组成的分压网络接入到第一路电池输入IN1,其分压输出到优先级判断引脚PR1。对于XREF模式的控制逻辑,当IN1输入满足供电需求,优先使用该路电池,仅当IN1输入电压低于设定阈值,TPS2121器件自动切换到IN2输入。

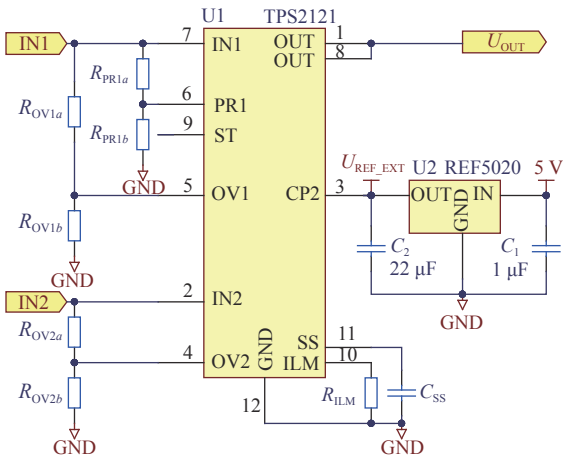


图 3 自动切换开关电路

Fig. 3 Automatic switch circuit

3 井下自动供电装置系统设计

3.1 优先级控制

优先级引脚 PR1 的电压确定了 IN1 与 IN2 电源切换的最小电压设定阈值。对于 XREF 模式, 电阻 R_{PR1a} 和 R_{PR1b} 串联组成分压网络, 电阻 R_{PR1b} 上的分压即为 PR1 引脚电压, 计算公式为:

$$U_{PR1} = U_{IN1} \frac{R_{PR1b}}{R_{PR1b} + R_{PR1a}} \quad (1)$$

U_{PR1} 为外部电压基准 U_{REF_EXT} 的最大值 (约为 2.05 V), U_{IN1} 为串联电池组的放电截止电压, 如果是 5 节电池串联, 则 U_{IN1} 为 10 V。分压电阻 R_{PR1b} 可选为 5 k Ω , 此时计算可得 R_{PR1a} 约为 19.39 k Ω , 选择 19.6 k Ω 标准电阻, 此时 U_{IN1} 约为 10.09 V。选用较大的 U_{REF_EXT} 与 R_{PR1a} , 可以提高供电的冗余度。

3.2 无缝切换

对于 XREF 模式, CP2 引脚的外部基准电压 U_{REF_EXT} 高于内部基准电压 U_{REF} , 此时 TPS2121 启动快速切换模式, 可以在 5 μ s 内完成电源无缝切换, 以防止下游负载复位。TPS2121 使用先断开老电源再连接新电源的切换方式, 其目的是防止新电源的电流倒灌进入老电源, 即反向电流阻塞 (RCB) 功能。TPS2121 控制内部开关管, 在断开失压的老电源后, 只有检测到负载电压降低到不高于备用新电源 25 mV (U_{RCB}) 时才完成切换。

为了说明先断开再连接电源复用方式的特点, 将 2 个 eFuse 器件通过半集成方式组成电源复用电路, 图 4 所示为该电路在切换过程中负载电压和电流的变化情况 (I_{IN1} 为 IN1 引脚的输入电流, A; I_{IN2} 为 IN2 引脚的输入电流, A; U_{OUT} 为 OUT 引脚的

输出电压, V; U_{PG} 为 TPS2121 电源正常状态引脚的输出电压 (低电平表示输出电压正常), V)。

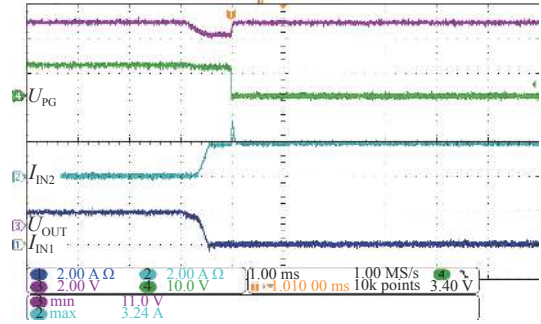


图 4 切换过程中负载电压和电流的变化

Fig. 4 Changes in load voltage and current during switching

从图 4 可以看出, IN1 失压后该路 eFuse 切断, 输出电流 I_{IN1} 下降至 0, 加到负载的输出电压 U_{OUT} 基本呈线性下降。 U_{OUT} 的最小值由下式确定:

$$U_{OUT,MIN} = U_{SW} - U_{DIP} = U_{SW} - t_{SW} \frac{I_{OUT}}{C_{OUT}} \quad (2)$$

式中: $U_{OUT,MIN}$ 为输出电压 U_{OUT} 的最小值, V; U_{SW} 为切断该路电源开关时的输出电压, V; U_{DIP} 为输出电压的跌落值, V; t_{SW} 为切断时长, s; I_{OUT} 为负载电流, A; C_{OUT} 为负载电容, F。

U_{DIP} 反映了负载电容放电带来的压降, 与 t_{SW} 和 I_{OUT} 成正比。较大的负载电容使电压跌落更小, 更有利于无缝切换。

随后开启 IN2 的 eFuse, 输出电压回升。由于负载电容的存在, 当 IN2 电源投入运行时, 如果电源电压高于负载电压, 该路电流 (I_{IN2}) 会产生一个短时冲击电流:

$$I_{INRUSH} = C_{OUT} \frac{dU_{OUT}}{dt} \quad (3)$$

式中: I_{INRUSH} 为冲击电流, A。

冲击电流缘于负载电容放电, 与负载电容成正比, 输出电压变化越快, 冲击电流越大, 这是快速切换模式的“副作用”。如果 IN2 的引线较长, 引线的分布电感会抑制该冲击电流的产生, 使负载输出电压不能及时回升, 此时增大 IN2 的输入电容并减少引线长度, 有利于减少电压跌落。

在正常运行的高温锂电池组切换过程中, IN1 的电池组放电到截止电压时才切换到 IN2 的新电池, 切换期间负载电压不会降低, 切换时间更短。切换到 IN2 后, 由于供电电压高于负载电压, 会产生如图 4 所示的冲击电流。为了限制冲击电流, TPS2121 集成了限流保护, 可以防止冲击电流过大。

3.3 保护措施

TPS2121 具有限流、软启动、超温及过压保护功

能。其中, ILM 引脚外接的电阻可用来限制电流, 最大限制电流可由以下经验公式确定^[6]:

$$I_{ILM} = \frac{71.5}{R_{ILM}^{0.9}} \quad (4)$$

式中: I_{ILM} 为 ILM 引脚最大限制电流, A; R_{ILM} 为 ILM 引脚外接电阻, Ω 。

对于 TPS2121, R_{ILM} 为 17~80 k Ω 。当接入 IN1 或 IN2 电源时, 为了避免电压冲击, 由 SS 引脚外接电容 C_{SS} 确定软启动时间。查阅相关器件手册可知, 输入电压 12 V 时, 100 nF 电容的电压上升速率约为 800 V/s。

IN1 输入的电压由 OV1 引脚的电压确定, IN2 输入的电压由 OV2 引脚的电压确定, 并由此实现过压保护。与优先级控制的电阻分压网络类似, 输入电压由以下公式确定:

$$U_{REF} = U_{OV} \frac{R_{OVb}}{R_{OVb} + R_{OVa}} \quad (5)$$

式中: U_{OV} 为最大输入电压, V。

电阻 R_{OVa} 与 R_{OVb} 组成串联电阻分压网络, 电阻 R_{OVa} 上的分压 U_{REF} 为芯片内部参考电压(1.06 V)。当某一路输入电压产生过压时, 器件自动切断该路电源, 其对应的逻辑关系见表 1。

3.4 状态输出

井下自动供电装置的多路电池组通过 TPS2121 芯片自动切换供电, 无需微控制器控制。通过判断每个自动切换开关的开关位置, 就可以确定当前使用的是哪一组电池。对于如图 2 所示的 4 路电池组供电, 需要输出 3 个开关状态; 如果电池组数量扩展到 8 路, 需要输出 7 个开关状态。

可以通过外接 LED 人工判断开关状态, 也可以由微控制器检测开关状态, 实现电池使用情况的自动查询功能。

3.5 DC/DC 转换器

根据使用输入电压范围、最大输出电流和转换效率等参数, 有多种 DC/DC 转换器方案可供选择。井下自动供电装置选用了 TI LM5166, 该器件具有超低待机电流的同步型降压转换器, 其最大输入电压为 65 V, 可选 COT(恒定导通时间)或 PFM(脉冲频率调制)控制模式, 前者开关频率不变、转换效率高, 后者能够提高轻负载时的效率^[9]。可以利用 TI 公司的新版在线电源设计工具 WEBENCH Power Designer 快速完成选型、定制、仿真及输出等工作。

具体电路如图 5 所示(图 5 中: VIN 为电源输入引脚; EN 为芯片使能引脚; PGOOD 为电压输出正常状态指示引脚; HYS 为欠压保护引脚; RT 为模式

选择引脚; PAD 为芯片底部的散热板; SW 为开关节点输出引脚; FB 为输出电压反馈引脚; PowerOut 为转换器输出; U3 为集成电路编号; L1 为电感编号; C_{IN} 为输入端的电容, F; R_{RT} 为模式选择引脚所接电阻, Ω ; R_{FBt} 和 R_{FBb} 分别为分压电阻网络顶部、底部的电阻, Ω ; R_{esr} 为等效串联电阻, Ω)。

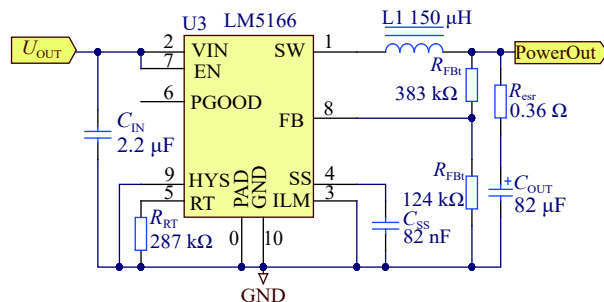


图 5 DC/DC 转换器电路

Fig.5 DC/DC converter circuit

RT 引脚直接接地, 选择 PFM 模式; 通过电阻 R_{RT} 接地, 选择 COT 模式。电阻 R_{FBt} 与 R_{FBb} 组成电压反馈分压网络。额定输出电压 5 V, 额定输出电流 0.3 A。输入电压为 10.0~18.5 V 时, 其转换效率可达 90% 以上。SS 引脚连接的电容 C_{SS} 为软启动控制电容, 软启动时间设定为 6 ms。电阻 R_{esr} 与电容 C_{OUT} 组成输出均衡电路。

4 室内测试与现场试验

4.1 室内测试

现场试验前, 首先对井下自动供电装置进行了实验室测试。图 6 所示为电源切换试验装置(图 6 中: N5771A 为 KeySight N5771A 直流电源; N3300A 为 KeySight N3300A 直流电子负载), 其工作原理与图 2 所示类似。2 台 N5771A 组成 2 路输入电源, 最高输出电压 300 V, 电流 5 A。N3300A 作为负载, 配备 N3303A 250 W 电子负载模块, 使用恒定电阻模式。负载电阻设定为 10 Ω (最大输出电流 0.5 A), 输出电压为 5 V。另外, 使用 KeySight 34411A6 1/2 位数字多用表辅助测量。

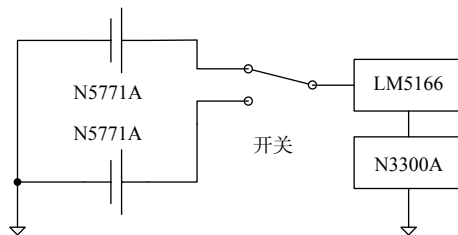


图 6 电源切换试验装置

Fig.6 Power switching test device

测试发现,在切换过程中,无论是切换哪个电源,输出到电子负载的输出电压均保持不变,实现了无缝供电的电源复用。这说明该井下自动供电装置工作原理可行,系统设计正确。

4.2 现场试验

按照工作原理,井下自动供电装置可用于各类随钻测量仪器。设计完成后,首先将其与高频磁耦合有缆钻杆(信息钻杆)中继器进行了配套试用。

信息钻杆是中国石油北京石油机械有限公司研制的高速井下网络通讯系统,配备了多个功率较大的井下中继器,用于通讯和参数测量。虽然采用涡轮发电机可以降低供电成本^[10],但其只能用于井底,而分布在井筒各处的信息钻杆中继器需要用高温锂电池供电^[11]。之前,在大庆油田、吉林油田也试验过使用微控制器执行无缝切换操作的锂电池优化供电方法,发现使用微控制器控制电源切换,虽然功能正常,但由于不能解决电池故障导致的瞬间失压问题,存在隐患。

为了验证基于TPS2121的井下自动供电装置的使用效果,在大庆油田进行了现场试验。试验同时使用12个中继器,中继器在出厂时即开启了自动供电功能,试验期间(试验2周,入井2d)供电正常。回厂测试发现,每个中继器仅前2组电池电压下降较大,其他电池组电压变化不大,说明井下自动供电装置工作正常,达到了设计要求。

5 结 论

1)随钻测量时,在无法使用涡轮发电机的条件下,一次性高温锂电池成为了最佳供电方式。为了延长耗电量较大的随钻测量仪器及设备的工作时间,往往需要多组串联的电池组并联供电。为了防止锂电池因强制充电而损坏,需要进行无缝切换设计。

2)现有二极管及微控制器等的自动切换设计不能满足依次使用电池及无缝切换的要求,TI公司的TPS2121优先级复用器芯片以全集成方式实现了多路电源的无缝切换。

3)以TPS2121优先级复用器芯片为核心,设计了井下自动供电装置。该装置根据供电电池电压设定了优先级控制阈值,选择XREF无缝切换模式,发挥了芯片的限流、软启动、超温及过压保护功能;外部微控制器可以监测开关状态,同时配合DC/DC转换器实现稳定供电。

4)室内测试和现场试验表明,井下自动供电装

置可以实现无缝电源切换,满足井下随钻测量仪器的供电需求。而且,由于该井下自动供电装置按顺序依次使用外部电池组,可以根据电池使用情况更换电池,节省了高温锂电池的使用费用,具有较高的经济性。

参 考 文 献

References

- [1] 陈勇,乐登. 纯电动汽车直流双电源无缝切换技术[J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(6): 884-889.
CHEN Yong, YUE Deng. Seamless switching technology for pure electric vehicles based on DC dual powers[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2013, 42(6): 884-889.
- [2] 惠州亿纬锂能股份有限公司. ER321250MR-145 产品技术规格书(PM_EN-ER321250MR-145-S-01-LF)[Z]. 2018.
Huizhou EVE Energy. ER321250MR-145 Product technical specifications(PM_EN-ER321250MR-145-S-01-LF)[Z]. 2018.
- [3] 王爱国,赵鹏,杨东林. 基于太阳能的双电源供电与自动切换系统[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2013, 33(1): 96-101.
WANG Aiguo, ZHAO Peng, YANG Donglin. Double power supply and automatic switch system based on solar panels[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2013, 33(1): 96-101.
- [4] 黄衍福,胡永建,潘兴明,等. 一种供电装置和方法: CN201510541575.9[P]. 2018-06-01.
HUANG Yanfu, HU Yongjian, PAN Xingming, et al. A power supply device and method: CN201510541575.9[P]. 2018-06-01.
- [5] Texas Instruments. Basics of power MUX (SLVAE51)[Z]. 2018.
- [6] Texas Instruments. TPS212x 2.8-V to 22-V priority power MUX with seamless switchover (SLVSEA3B)[Z]. 2018.
- [7] 鲍忠利,冯永仁,于会媛. 浅谈井下高温锂电池的安全应用[J]. 化工管理, 2013(1): 105-106.
BAO Zhongli, FENG Yongren, YU Huiyuan. Security application of high temperature lithium battery in drilling tools[J]. Chemical Enterprise Management, 2013(1): 105-106.
- [8] Texas Instruments. REF50xx low-noise, very low drift, precision voltage reference (SBOS410H)[Z]. 2016.
- [9] Texas Instruments. LM51663-V to 65-V input, 500-mA synchronous buck converter with ultra-low IQ (SNVSA67B)[Z]. 2017.
- [10] 陈威. 井下外磁转子式涡轮发电机设计与试验研究[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(6): 114-119.
CHEN Wei. Design and experimental research on the downhole turbine generator with an outer magnetic rotor[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(6): 114-119.
- [11] 朱祖扬,吴海燕,张林,等. 井筒微芯片示踪器电源技术及现场试验[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(1): 122-127.
ZHU Zuyang, WU Haiyan, ZHANG Lin, et al. Microchip tracer power supply technology and downhole testing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(1): 122-127.

[编辑 令文学]