

# 电动汽车高压电系统状态参数在线监测

赵春明<sup>1,2</sup>, 吴志新<sup>1</sup>, 马 宁<sup>1,2</sup>, 李 君<sup>2</sup>

(1. 中国汽车技术研究中心 电动车研发中心, 天津 300162; 2. 吉林大学 汽车工程学院, 长春 130022)

**摘要:**针对电动汽车高压电系统中几种关键状态参数(绝缘状况、动力线路的连接状况以及高压触点状态等)进行了监测分析,对监测方法的数学模型做了理论探讨并进行了试验验证。为满足在基于微处理器的故障诊断及高压电安全管理系统中的应用要求,对其在线判断策略进行了研究。

**关键词:**车辆工程;电动汽车;绝缘状况;动力线路;高压触点

**中图分类号:**U469.72 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2007)01-0037-06

## On-line monitoring of high voltage system parameters in electric vehicle

Zhao Chun-ming<sup>1,2</sup>, Wu Zhi-xin<sup>1</sup>, Ma Ning<sup>1,2</sup>, Li Jun<sup>2</sup>

(1. *Electric Vehicle Research Center, China Automotive Technology and Research Center, Tianjin 300162, China;*

2. *College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China*)

**Abstract:** The monitoring of the key parameters in the high-voltage system, responsible for the safe operation of the electric vehicle, including those characterizing the insulation condition of the system, the connection of the power circuit, the performance of the high-voltage contacts, were discussed. The mathematical models for the monitoring method were explored theoretically and introduced to measure these parameters. They were also verified experimentally. Using these models an electronic unit, namely the diagnostic and high-voltage safety management unit was developed and its on-line judgement strategy was proposed.

**Key words:** vehicle engineering; electric vehicle; insulation condition; power circuit; high-voltage contact

电动汽车动力系统的一个重要特点就是具有高电压、大电流的动力回路。整车性能达到或接近传统汽车水平的电动汽车,其动力系统的电压一般均远远超过安全电压,而且电力传输回路的阻抗很小。高压系统的正常工作电流可能达到数十、甚至数百安培,瞬时短路放电电流更是成倍增加。因此,在设计和规划高压动力系统时应充分

考虑整车和人员的电气安全性,确保车辆运行安全、驾驶人员安全和车辆运行环境安全。出于对电动汽车的可靠性和安全性考虑,进行高电压动力系统的故障模式、自动诊断、失效策略以及安全控制策略等方面的研究具有极其重要的意义<sup>[1]</sup>。为此,作者针对电动汽车高压电安全控制及保护策略研究的难点之一<sup>[2]</sup>——绝缘状况、动力线路

**收稿日期:**2006-01-17.

**基金项目:**“863”国家高技术研究发展计划项目(2003AA501600).

**作者简介:**赵春明(1972-),男,高级工程师.研究方向:电动汽车控制及驱动技术,清洁能源汽车测试评价.

E-mail: qyev@sina.com

的连接状况以及高压触点状态等高压电系统关键状态参数的监测分析进行了研究。

## 1 高压电系统安全参数及监测方法

### 1.1 高压电系统对车身的绝缘电阻

高压电系统和车体之间的绝缘程度是评价电动汽车安全的一个重要指标。如果高压电系统某一处绝缘程度低下,将可能发生人员触电的情况。

目前,满足嵌入式系统测量分析动力电池高压直流系统的绝缘状况的成熟方法还未见报道。文献[3]提出了一种动力蓄电池绝缘电阻计算方法,并进行了推导。但它进行试验推导的假设条件有许多是不能成立的,比如假设动力电池组的绝缘薄弱发生在总“+”、总“-”两端,对于数百伏的高压系统显然是理想化的;又如一个根本的假设前提“ $V_1 + V_2 = V_b$ ”,由于实际没有形成有效回路,在绝缘状况良好的情况下,在试验中不可能得到验证,所以该标准在理论和实践上都存在着不完善的地方。

#### 1.1.1 动力电池组单点绝缘薄弱模型的建立

大多数高压电系统的绝缘薄弱都发生在高压回路的某一点,所以,如果能够推导出高压系统单点绝缘薄弱的数学模型就可以找到其判定方法。图 1 为单点绝缘薄弱的原理示意图。假设在电池组某处绝缘薄弱,该点对地绝缘电阻为  $R_i$ ,其电压比总“+”低  $U$ ,当在电池组总“+”接入内阻为  $R_0$  的电压传感器测量时,测得电压为  $V_1$ ,这时电压为  $U$  的部分电池、 $R_0$  和  $R_i$  组成回路 1;当在电池组总“-”接入内阻为  $R_0$  的电压传感器测量时,测得电压为  $V_2$ ,这时电压为  $(V_b - U)$  的部分

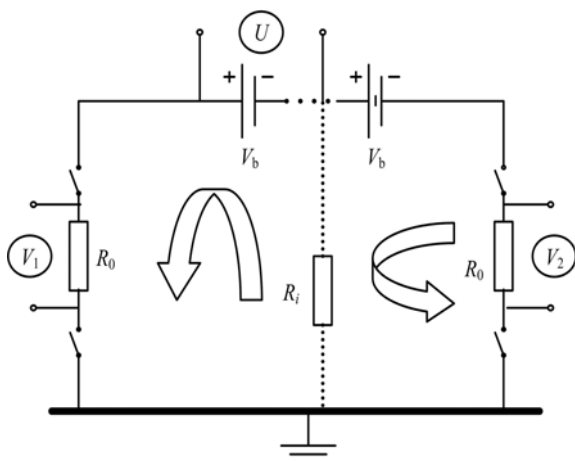


图 1 单点绝缘薄弱的原理图

Fig. 1 Principle map of single-point insulation weakness

电池、 $R_i$  和  $R_0$  组成回路 2。

从回路 1 和回路 2 可得:

$$\frac{U}{R_0 + R_i} = \frac{V_1}{R_0} \quad (1)$$

$$\frac{V_b - U}{R_0 + R_i} = \frac{V_2}{R_0} \quad (2)$$

可以推导出:

$$R_i = \frac{R_0}{V_1 + V_2} (V_b - V_1 - V_2) \quad (3a)$$

$$U = \frac{V_1}{V_1 + V_2} V_b \quad (3b)$$

根据上式,不但可以把高压回路的绝缘电阻推导出来,而且还可以得出绝缘薄弱的具体部位。

#### 1.1.2 动力电池组多点绝缘薄弱的判断方法

单点绝缘薄弱只是电动汽车绝缘不良的一种表现。如果高压电系统绝缘薄弱环节不止一处,那么前边所建立的单点模型不能反应高压电系统的实际绝缘状况。对于这种情况,建立准确的物理模型有一定困难,目前还未见相关文献涉及。

作者采用双回路双内阻浮地平衡法对电动汽车的绝缘状况进行判定,可以得出绝缘状况薄弱的严重程度。图 2 为绝缘状况分析流程。

### 1.2 动力线路的连接状况

有两种方法监测动力线路的连接状况:辅助低压回路和动态电参数推算法。前者需要在高压线路上附加低压回路,优点是对局部线路的接触电阻测试准确,缺点是可能对高压线路或者发生故障时对低压线路本身的安全性有不确定影响。

后者根据电压、电流等参数的变化实时判断所包括电路的接触电阻变化情况。按后一种方法简化后的高压电系统电路如图 3 所示。电池模型可以简化成一个总电压为  $E$  的恒压源和内阻为  $R_i$  的串联, $R$  是线路导体电阻和接触电阻的总和,则有  $R + R_i = (E - V) / I$ 。如果选某一时刻作为基准点,其对应的电流为  $I_1$ ,电压为  $V_1$ ,如果当前计算点的电流为  $I_2$ ,电压为  $V_2$ ,则可推导出当前的接触电阻计算公式:  $(R + R_i) = (V_2 - V_1) / (I_1 - I_2)$ 。该公式的优点是可以排除对原高压电路的影响,并且包括监测环节(线路连接点、电池内阻等)更加全面,但是由于在不同 SOC、环境温度和充放电电流下,电池的电化学极化内阻会有一些变化,所以用动态电参数法计算的接触电阻值会有偏差<sup>[4]</sup>。

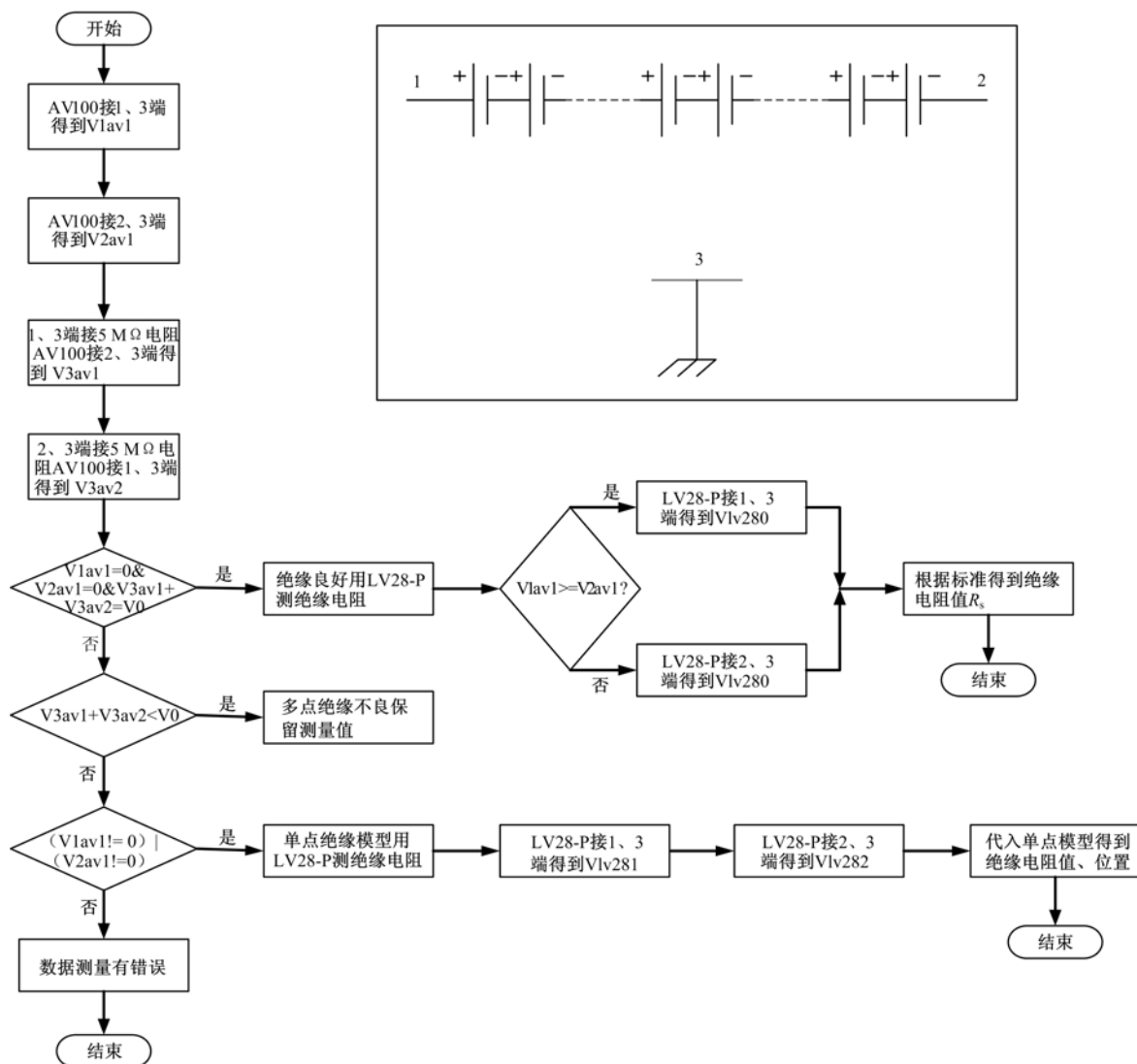


图 2 绝缘状况分析流程图

Fig. 2 Flow chart of insulation condition analysis

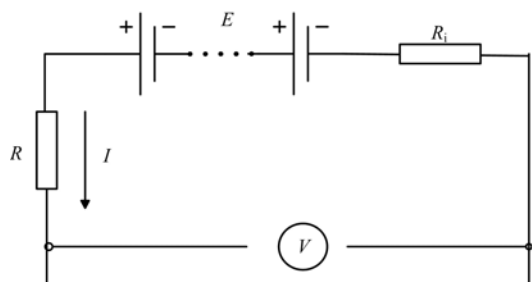


图 3 高压系统电路简化模型

Fig. 3 Simplified electrocircuit model of high-voltage system

### 1.3 高压电触点状态

为实现整车功能控制和高压电自动切断保护,在电动汽车的高压电系统中必须配置可自动切断主回路的接触器,根据整车设计需要,有些电

动车辆的主回路上甚至有 2 个以上的相关部件。如果高压接触器发生闭合或断开失效,且不能及时采取有效处理措施,轻者会发生不能实现正常控制的情况,重者可能产生重大安全事故。所以对高压接触器的执行状态进行有效、实时地监控,对电动汽车的安全、可靠运行具有十分重要的意义。

对于接触器或继电器的状态监测方法有两种,一种是监测其线圈的得电情况,另一种是对其触点本身进行监测。前一种方法简单,但对于监测对象来说,得电状态是间接反应,后一种方法直接,但实现有一定难度。图 4 所示为高压触点监测原理图。测量点电压  $V$  的数值可以直接反映高压触点的闭合状态。

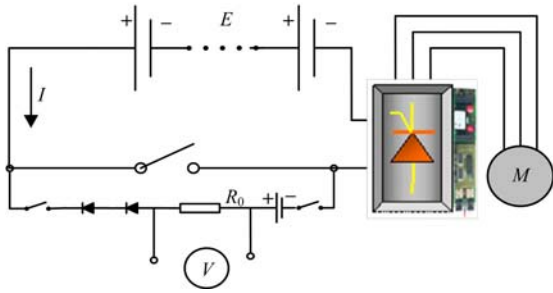


图 4 高压触点监测原理图  
Fig. 4 Principle map of high-voltage contact inspection

## 2 试验验证及分析

### 2.1 绝缘电阻

在一辆纯电动轿车上,用 50 kΩ 电阻把电池组的不同部位分别与车身电底盘连接,对单点绝缘薄弱监测方法的有效性进行了试验验证,试验结果如表 1 所示。

表 1 的试验数据表明,动力电池组是否接通、容性负载及动力回路中是否有电流对绝缘状况的判断不会有影响。这就为基于微处理器的故障诊断及高压电安全管理系统在各种工况下进行在线

表 1 单点绝缘薄弱验证试验结果

Table 1 Validation test of single-point insulation weakness

整车状态	部 位	“+”对车身电压 V	“-”对车身电压 V	计算结果	
				R/kΩ	U/V
主接触器断	总“-”处	120.12	1.81	=52.3 , =281.3 V	
	总“+”处	0	123.24	51.3	0
	成组处	56.16	63.96	53.7	133.5
主接触器合	总“-”处	120.12	1.86	52.2	280.9
	总“+”处	0	123.56	51.4	0
	成组处	57.72	63.74	52.6	130.8
空载、30 km/h	总“-”处	基本同上	基本同上	—	
	总“+”处	基本同上	基本同上	—	
	成组处	基本同上	基本同上	—	

绝缘监测提供了试验依据。采用本文的单点绝缘薄弱判断方法可以准确得出绝缘电阻阻值,并且可以判断出绝缘薄弱的位置。

为深入研究多点绝缘薄弱的判定方法,搭建了实物在环的直流高压调试现场。针对 2、3、4 点绝缘薄弱展开试验研究,尝试了从 25 kΩ~5 MΩ 一系列不同源边电阻的电压传感器进行浮地平衡法测试,并对同一测试时刻的接入测试回路的个数对判定结果的影响进行了试验和理论分析,验证了多点绝缘判断方法的有效性。

### 2.2 动力线路的连接状况

动态电参数推算法实际的监测对象包括线路连接点和动力电池组,所以必须考虑电池组的电化学极化内阻的影响。在环境温度为一 20~35 ℃、SOC 为 10%~100%、放电条件为 C/3~3C 的极限条件下进行了试验室条件下的接触电阻推算,结果为 200~600 mΩ。在电池损坏或某一接触点松脱的情况下,电阻值要远远大于这一范围。

为研究电量参数与连接电阻的对应关系模型

的有效性,在不同工况运行条件下进行了 CAN 总线数据监控,每隔 0.2 s 记录一次运行参数。图 5 是进行 30 min 最高车速试验时电流、接触电

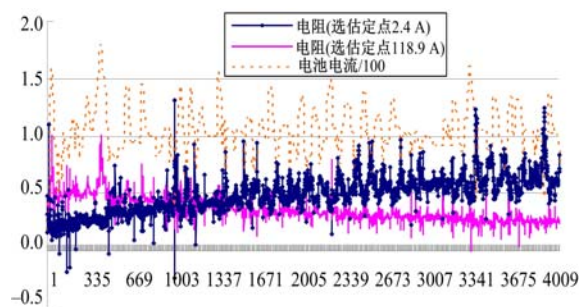


图 5 30 min 最高车速试验接触电阻计算

Fig. 5 Calculation of contact resistance in 30 min top speed test

阻的关系曲线。接触电阻的计算基准点分别选择 2.4 A 和 118.9 A 的两点。如果以小于 600 mΩ 作为整个动力线路实际物理对象没有发生变化的条件,在整个运行过程中,大部分工作点的两种接触电阻的数值在这个范围内,但是存在部分“异常

值”。

针对图 5 所示的采用一种基准点计算接触电阻产生的“异常点”,分析采用另一种基准点的计算数值是否在正常范围内来判断。3822~3871 点所对应的电流是 8.0~10.2 A,基准点小电流(2.4 A)对应的接触电阻为 2.93~4.28  $\Omega$ ,相对于 300 m $\Omega$  左右的目标电阻值,计算数值明显异常,而大电流(118.9 A)基准点此时计算的接触电阻值为 198~238 m $\Omega$ ,基本正常。出现这种情况主要是实际电流较小,基准点选用 2.4 A 时,由

于  $I_1$  和  $I_2$  数值接近,这时不能忽略传感器本身的误差对计算结果的影响,而选用与当前电流相差比较大的基准电流,同样可以对接触电阻作出正确分析。实际电流(130.2~128.8 A)和基准点电流(118.9 A)接近时,电流传感器的漂移和重复差异性对计算结果的影响被急剧放大,不能满足接触电阻的正确判断。

为进一步验证动态电参数推算法的有效性,对车辆在完全放电的过程中的接触电阻数值“异常点”进行了汇总及分析,结果如表 2 所示。

表 2 接触电阻数值“异常点”参数比较

Table 2 Parameter comparison of “abnormity value” of contact resistance

异常点	母线电流/A	2.4 A 基准点计算 接触电阻/m $\Omega$	118.9 A 基准点计算 接触电阻/m $\Omega$	简要分析
4949~4952	120.3	348~357	-4000~-3330	2.4 A 基准点计算正常
4953~4957	112.9	362~380	847~1695	2.4 A 基准点计算正常
4958~4961	120.3	383~393	476~544	2.4 A 基准点计算正常
4973	87.9	473	-54.7	2.4 A 基准点计算正常
5010	83.3	418	-84.5	2.4 A 基准点计算正常
6445~6449	17.2	2162~2297	127~148	118.9 A 基准点计算值正常 但稍偏小(受 SOC 变化的影响)
7027~7058	113.1	433~451	-175~-520	2.4 A 基准点计算正常
7791	118.5	508	-4000	2.4 A 基准点计算正常

接触电阻波动原因分析:电路模型不够完善,电量参数采集的实时性和同步性没有达到要求,基准点没有根据实时参数动态调整。另外,影响动力电池内阻的因素十分复杂,在不同温度、不同放电电流以及不同 SOC 时,其内阻有明显变化。在实际算法处理上,如果基准点的电量参数动态调节,可以进一步消除 SOC 和环境温度等稳态参数的影响。

分析以上试验数据可以看出,采用动态电参数推算法时,只要保证选用基准点电流与当前采集电流不要太接近(一般差值要超过 10 A),就可以保证计算得出的接触电阻在合理的范围内。

### 2.3 高压触点状态

因为高压触点状态监测需要在高压回路附加低压监测线路,在实施过程中有可能发生一些未知的情况。因此,先在模拟试验现场上进行了验证试验。动力电池选用总电压为 64 V 的铅酸电池,负载选用充放电机,辅助电池电压 12 V,  $R_0$  为 200 k $\Omega$ 。试验结果见表 3。

表 3 触点监测验证试验结果

Table 3 Validation test result of contact inspection

放电机关机			
接触器	母线电 流/A	测量点 电压/V	现象及分析
切断	—	-0.001	电压为-0.001V,有零漂
接通	—	+11.70	已形成回路
切断	—	-0.002	没有形成局部回路
接通	0	+11.63	放电机恒流放电
接通	2.4	+11.69	放电机恒流放电,母线电流的变化没有引起接触器状态监测电路的异常,同时,监测电路的存在也没有影响动力系统的正常工作
接通	3	+11.69	
接通	4	+11.64	
接通	10	+11.59	
接通	15	+11.66	

## 3 在线监测判断策略

### 3.1 动力线路的连接状况判断策略

在判断策略上需要做的工作就是充分利用

ECU 的高速、实时、强大的数据处理功能,尽可能得出真实的高压线路完好性的数据信息。

在高压电管理系统的非易失性存储器中开辟一个动态调节的电流-电压数据表(见表 4)。根据当前电流数值,查表 4,优选与当前电流差值相差最大的 5 个基准点进行电阻计算。如果 5 个阻值有 4 个都在 200~600 mΩ 之间,则可判定连接状况正常,计算其加权平均值作为当前接触电阻。

如果当前电流数值在表 4 中有对应位置(满足±1 A),可以作为数据表中相应位置的替代数据。如果计算绝缘电阻值大于 600 mΩ 或者大于前一绝缘电阻的 2 倍,进入连接状况紧急监测程序,如果连续 3 次保持该现象存在,则可确认发生连接状况恶化。根据电阻数值确认故障等级(动力线路连接差、连接极差、连接松脱),并启动相应故障处理程序。

表 4 动态电流-电压数据  
Table 4 Data of dynamic I-U

电流/A	5	15	25	35	45	...	120	140
电压/V	304.8	301.4	299.2	297.8	269.9	...	281.2	276.8
更新时间	17	1	2	1	5	...	1161	312

### 3.2 高压触点状态判断策略

从图 4 所示的高压触点监测原理图可以看出,辅助回路中的二极管阻断的是动力电池放电流向,所以在有动力输出时,即使执行监测过程也不会引起动力线路和辅助回路的故障。

在电机处于电动或发电工况时,触点肯定是处于闭合的,不需接通监测电路,触点监测过程需在无动力输出时(母线电流为 0)执行。监测执行周期也不需太短,500 ms 即可,实时性和可靠性在整车运行试验中得到验证。

## 4 结束语

作者对电动汽车高压电系统中几种关键状态参数监测方法的数学模型做了理论探讨,并且进行了试验验证。为满足在基于微处理器的故障诊断及高压电安全管理系统的管理要求,对其在线判断策略进行了研究,并且在硬件在环台架和整车试验中验证了其有效性、实时性和可靠性。

### 参考文献:

[1] 赵春明,乔旭彤,马宁,等. 基于 CAN 总线的电动汽车分布式控制系统故障诊断[J]. 车辆与动力技术, 2005(2):41-45.  
Zhao Chun-ming, Qiao Xu-tong, Ma Ning, et al. Study on fault diagnosis of electrical system with CAN-bus in electric vehicle[J]. Vehicle and Power Technology, 2005(2):41-45.

[2] Misbahuddin Syed, Al-Holou Nizar. Fault tolerant distributed architectures for in-vehicular networks [C]// SAE Paper 2001-01-0673.

[3] ISO/DIS 6469. 1. Electric vehicles-safety specification-Part 1:on-board energy storage[S], 2000.

[4] 吴志新,赵春明,杨敬群,等. 新型纯电动轿车开发[J]. 车辆与动力技术, 2005(4):1-5.  
Wu Zhi-xin, Zhao Chun-ming, Yang Jin-qun, et al. Development of new type battery electric vehicles [J]. Vehicle and Power Technology, 2005(4):1-5.