带 BSG 的 48 V 混动系统今后可能成为汽车节能减排的主流技术。本文通过对 BSG 系统工作特性的分析，设计出一种针对 BSG 混动系统的整机可靠性试验方法。采用该方法进行试验可以有效地验证混动系统的可靠性，同时可以缩短试验开发周期。

张大晴 李英涛 徐丽君

48 V 混合动力发动机耐久试验方法设计

概述

1.BSG 混动系统的应用

随着国家节能环保法规的推行，汽车降耗减排势在必行。多种汽车节能技术都在蓬勃发展，如纯电动技术、燃料电池技术以及各种混合动力技术等。其中，48 V 的 BSG（Belt Driven Starter Generator，传动带驱动起动电机）轻型混合动力系统在节能效果和技术先进性上并不突出，但由于其相对成本低、改动小的优点，行业内一致看好，有可能在未来相当长的时间占据节能减排主流的位置。

带 BSG 的 48 V 混动系统采用传动带驱动的方式将电机和传统汽油机、柴油机进行动力混合。其主要由发电机、变速器、BSG 电机、变频器、48 V 电池、DC/DC、12V 电池以及控制系统组成。随着技术的深入研发，现在 48 V 的 BSG 系统已参与到整车的各种行驶工况中，通过电控技术使电机达成自动起停、断油怠速、电子助力、断油能量回收、系统能量管理等多项功能，从而进一步使节能水平达到 12%。

2. 目前 BSG 系统可靠性验证现状

BSG 混合动力系统具有可观的发展前景，其可靠性品质也必将成为市场关注的焦点。那么就必然少不了可靠性试验的开发。目前对于 BSG 系统的可靠性开发主要有零部件可靠性试验和整车可靠性试验两大部分。前者主要针对零部件自身可靠性寿命的验证，缺少对整个混合动力系统功能可靠性的考核；后者虽然可以涉及系统和车机匹配的验证，但是试验不能自动运行，需要驾驶员驾驶。且考虑到安全因素，整车可靠性试验一般无法昼夜不停地连续进行，在试验的效率上存在局限性。同时，整车试验的花费也是相对昂贵的。因此，需要设计一种试验方法，既能对系统进行考核，同时可以在台架上自动执行工况，提高试验效率。本文通过一系列研究分析，设计出了一种在发动机台架上进行的整机可靠性试验工况，重点针对 BSG 混动系统的可靠性进行考核，如图 1 所示。

试验的针对性研究

1. 试验对象及目标

整机可靠性试验需要在发动机试验台架上进行，主要试验对象包括 BSG 混动系统中的发动机、BSG 电机、48 V 锂电池、DC/DC、变频器以及控制系统。试验台架布置示意图如图 2 所示。发动机前端和 BSG 通过传动带并联驱动，发动机飞轮端与电力测功机连接。通过测功机测量整个混动系统输出的转速和转矩。BSG 48 V 系统的运行情况（输出转速、转矩、电池 SOC、电流等）可以通过 CAN 通信，用控制单元进行监控。

图 3 是对市场某款 A 级轿车 740 份车辆实际使用情况的调查结果。对数据处理分析，740 辆车日均行驶里程为 58.2km，折合年度平均行驶里程约

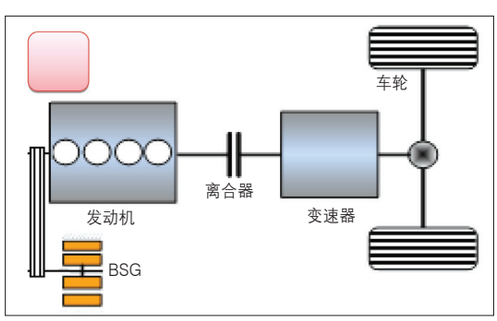

图 1 整车 BSG 混合动力系统示意图

24-38 新能源汽车制造.indd 28 2023/4/8 20:14:00

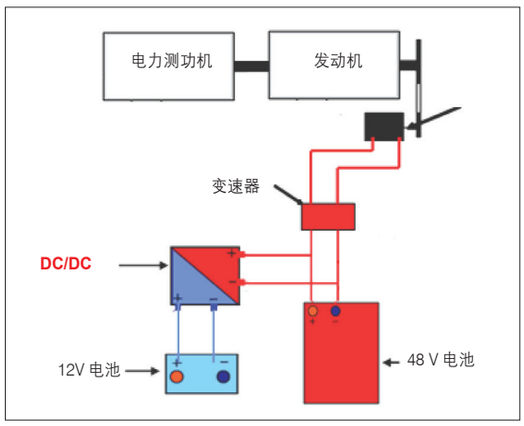

图 2 BSG 系统整机可靠性试验台架布置示意图

21227km。根据乘用车的使用寿命一般为 10~15 年，折算约 20 万 ~30 万 km 里程。目前市场上家用汽车的保修年限和里程，一般为 10 万 km 的里程。由以上数据，分析认为 BSG 混动系统的可靠性寿命需要至少满足 10 万 km 的整车里程，而最终的可靠性寿命目标是需要满足整车行驶 30 万 km。

2. 试验工况的针对性解析

BSG 混动系统的整机可靠性试验，重点要在常规使用的负荷条件下，对 BSG 混动系统起停、电机助力、能量回收以及正常发电等各项功能频繁运行的可靠性进行验证。同时，还要兼顾考核发动机自身的可靠性水平。所以可靠性试验工况的设计应首先要在发动机台架上模拟整车实现混动系统各项功能。

起停功能是 BSG 系统基本功能，它的功能主要体现在市区行驶、等待红灯或堵车时。在临时停车情况下，发动机由原来怠速变为停机，从而节省了因怠速而消耗的燃油。当驾驶员有继续行驶的意识时，通常为松开制动踏板，踩下离合器踏板并缓缓上抬的瞬间或者是缓缓踩动加速踏板的瞬间，BSG 根据信号反馈迅速拖动发动机至断油电子怠速工况。之后随着驾驶员逐渐上抬离合器踏板或踩下加速踏板，发动机就会正常点火运行，拖动车子继续行驶。所以，根据起停功能在临时停车时的使用特点，设计针对性的可靠性工况要包括有 BSG 系统和发动机频繁在热机时起动和停止的工况。

电机助力和能量回收是 BSG 混动系统的两项主要功能。其中，电机助力主要使用在整车起步、爬坡以及超车等车辆需要动力系统快速提升转矩输出的情况下。这些时候驾驶员通常会急速深踩加速踏板。BSG 电机和发动机会处于转速和负荷都急速上升的急加速状态。相反，混动系统的能量回收功能是在车辆急减速制动的时候，自动控制发动机断油，同时通过传动带拖动 BSG 电机将车辆滑行的动能转化为电能，储存在 48 V 锂电池内。BSG 能量回收效率根据车辆初始的速度以及踩下制动踏板的速度和深度决定，初始车速越高，制动踏板踩得越快越深，则回收效率相对越高。所以，为了验证上述两项功能的可靠性，台架可靠性试验中必须设计有混动系统的急加速和急减速工况。并且急加速工况需要 BSG 和发动机的转速和转矩同时快速上升；急减速工况，发动机需要断油，BSG 进行高效的发电，而此时需要由电力测功机反拖着整个混动系统运行，用以模拟整车的减速滑行。

发电是 BSG 的一项最基础功能。即车辆在正常行驶中，BSG 电机进行小功率的发电将发动机发出的小部分机械能转化为电能储存在 48 V 电池中，然后通过 DC/DC 将电压从 48 V 转化为 12V，用以给 12V 电池充电以及为整车的电气系统和发动机线束供电。混动系统可靠性试验中必然不能缺少对此基础项的考核，因此试验工况里应包含有发动机稳态运行的工况。

综上所述，为了对 BSG 系统可靠性进行综合性验证，设计的整机可靠性试验需要包括以下工况循环：发动机热机起动—急加速—稳定工况运行—急减速（断油测功机倒拖）—停机。

3. 参考 NEDC 循环分析可靠性试验强度

上节中已确认 BSG 系统的可靠性试验中应包含哪些工况，

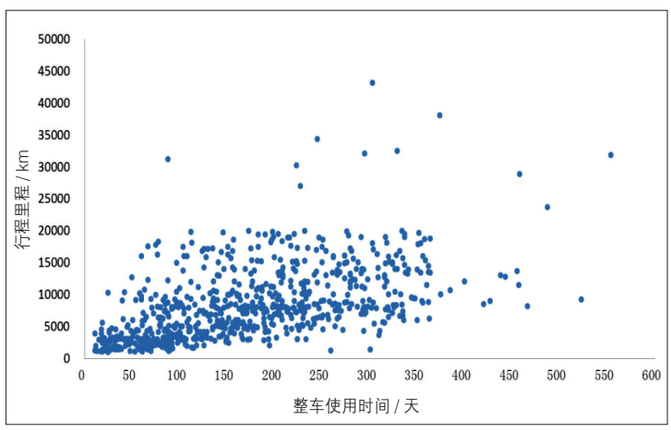

图 3 某 A 级轿车行驶里程分布图

24-38 新能源汽车制造.indd 29 2023/4/8 20:14:00

本节主要分析试验的强度（发动机与 BSG 具体的转速及负荷），以及可靠性试验的总时间。

如图 4 所示为整车 NEDC 循环，是测试车辆油耗和排放的试验方法。该工况主要分为两个部分：1 部为城市循环工况，2 部为城郊循环工况。其中，1 部代表了车辆在城市道路行驶的典型工况，其由 4 个工况相同的城市循环单元组成。每个单元都包括有起动、怠速、加速、匀速行驶、减速、停车等工况。可以看出，BSG 混动系统的基本工作模式主要在 NEDC 的城市循环体现，所以下面重点对 BSG 系统在 NEDC 城市循环中的实际的运行情况进行研究。

图 5 为某款搭载 BSG 系统的车辆在 NEDC 城市循环试验中，采集的发动机与 BSG 电机的转速和转矩输出情况。可以看出，在单个约 200s 的城市循环单元中，BSG 系统完成了 3 次自动起停，3 次能量回收以及 2 次电机助力。考虑到实际使用时，车辆在爬坡时也会使用 BSG 助力功能，所以试验工况中设计混动系统自动起停、助力和能量回收的频次比为 1:1:1。

在图 5 中对 BSG 电机输出和回收的转矩进行分析。BSG 在起动瞬间输出转矩高达 50 N·m，助力是平均转矩约 10 ~ 15 N·m，而能量回收时吸收的转矩为 25 N·m。在根据表 1 中 BSG 的相关参数可以算出，BSG 电机在起动、助力以及能量回收时的负荷分别约为 90%、40% 和 80%。因此，在相关可靠性试验工况中可以参考此标准设计 BSG 电机的加载负荷（表 1）。

继续参考 NEDC 循环来设计试验中发动机转速和负荷。通常在整个循环中发动机平均转速约 1500 ~ 2000 r/min，而最大负荷接近 50%。再考虑到 BSG 电机的工作特性，即在稳定功率的情况下输出或回收机械能。所以 BSG 在不同转速下，以相同大小功率运行时，其对驱动带和发动机造成的机械负载是不同的。因此，可靠性试验中需设计 3~4 个不同的稳定转速工况，并且转速范围要覆盖到发动机高、中、低速。用以全面考核系统的耐久性。

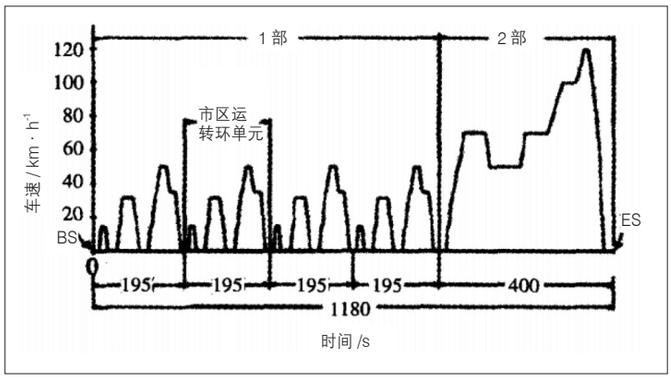

图 4 整车 NEDC 循环工况图

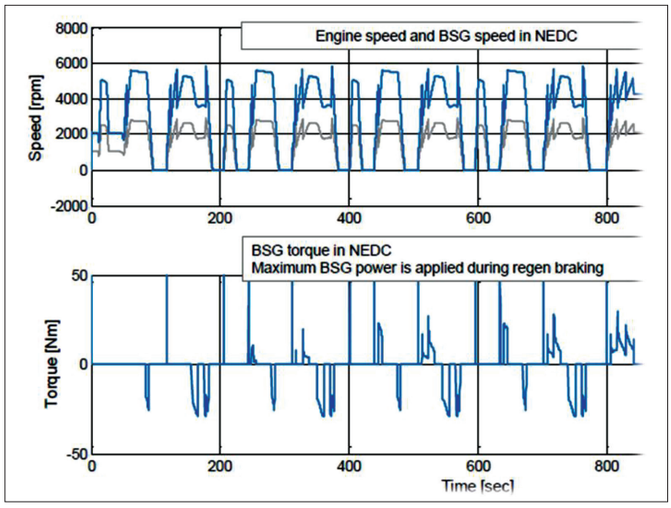

图 5 NEDC 城市循环中 BSG 混动系统运行情况

表 测试 BSG 的基本信息

序号	项目	参数值
1	BSG 最大功率	10 kW
2	瞬态最大转矩	55 Nm
3	持续最大转矩	30 Nm

试验工况的设定及测试

1. 试验工况设定

由上面分析的结果，总结出针对 BSG 系统的整机可靠性试验工况应具备以下特点：

（1）可靠性试验验证对象为整个 48 V 的 BSG 混动系统。验证目标分两个阶段，第一阶段可靠性考核度相当于整车 10 万 km 里程（保修期）；第二阶段可靠性考核度相当于整车 30 万 km 里程（寿命期）。

（2）试验工况循环包括：发动机热机起动—急加速—稳定工况运行—急减速（断油测功机倒

24-38 新能源汽车制造.indd 30 2023/4/8 20:14:01

拖）一停机。

（3）单个循环工况中，BSG 系统进行自动起停、电机助力和能力回收的频次比例为 1∶1∶1。

（4）根据整车 NEDC 城市循环工况 200 s 起停 3 次估算，混动系统完成一次起动至停机的过程约 60 s，即每 60 s BSG 系统完成起停、电机助力和能量回收各 1 次。

（5）试验中 BSG 电机起动时根据实际需求输出的功率（估算约为最大负荷的 90%）；助力时的输出功率约为最大负荷的 40%；能量回收时输入功率约为最大负荷的 80%。

（6）试验工况中，发动机平均转速约 1500 ~ 2000 r/min，负荷维持在 50% 左右。

（7）发动机需要有 3~4 个不同转速的稳定运行工况，并要涵盖发动机高、中、低的转速范围。

由于试验时是由 48 V 电池为混动系统提供电能或储存回收的能源。所以除了以上的要求外，为保障试验工况能反复不间断运行，必须保障每个试验循环后 48 V 电池的电量——即 SOC 保持平衡在正常水平内（不影响系统功能使用）。

另外，通过对现有城市道路调研，红绿灯之间间隔平均为 500 m。假使开车遇见红灯或绿灯的概率各为 50%——每通过两个红绿灯路口，就会停车一次。即车辆每行驶 1 km 起停 1 次。按照条件 1）车辆 30 万 km 里程寿命计算，试验需完成 30 万次起停。再按照 4）中的要求 60 s 起停 1 次，则整个试验需要进行 5000 h。台架试验每天进行 20 h 也至少需要 250 天的试验时间。因此，需要继续缩短系统起停循环的周期。

考虑到以上各种限值条件，通过减少发动机稳定运行和停机的时间，将发动机单次起停的周期缩短为 30 s。同时，为了便于系统散热在起动后增加怠速工况。设计的 BSG 系统整机可靠性试验工况，其中发动机的试验工况如图 6 所示，BSG 电机的试验工况如图 7 所示。

该试验工况一个大循环周期为 120 s，大循环内包括 4 个子循环，每个子循环周期为 30 s。每个子循环都完成从热机起动—怠速—急加速—稳定工况运行—急减速（断油测功机倒拖）—停机的过程，在此之间 BSG 系统完成 1 次起停、1 次助力和 1 次能量回收，电机加载的负荷均按照条件 5）中的要求。考虑到 48 V 电池 SOC 平衡问题，将 BSG 电机单次助力时间设为 5 s，而单次能量回收时间设为 10 s。最后，根据条件 7）的要求，4 个子循环中发动机的稳定运行的转速依次为低速（≤ 2000 r/min）、中高速（3000 ~ 4000 r/min）、中速（2000 ~ 3000 r/min）、高速（≥ 4000 r/min），发动机负荷维持 50% 左右。

按照以上设计工况进行试验，完成 30 万次起停——即相

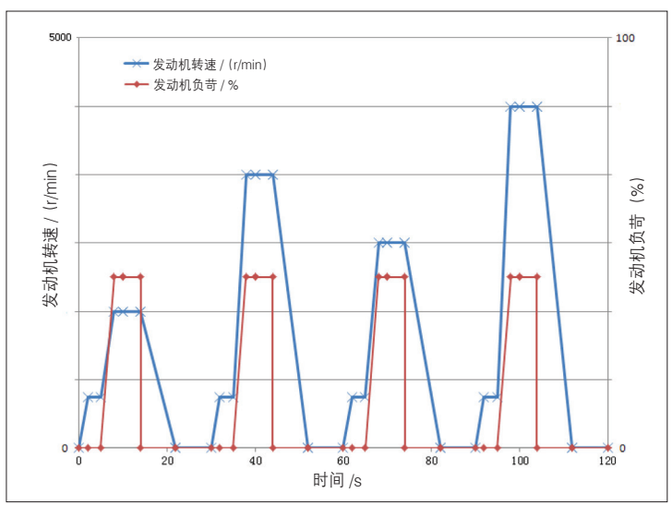

图 6 混动系统可靠性试验工况——发动机工况图

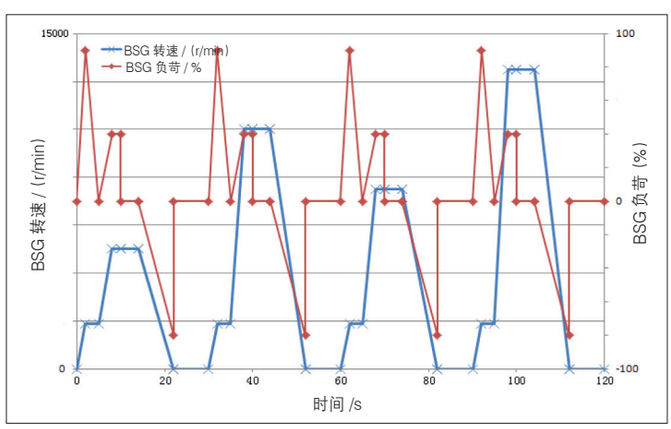

图 7 混动系统可靠性试验工况——BSG 电机工况图

24-38 新能源汽车制造.indd 31 2023/4/8 20:14:01

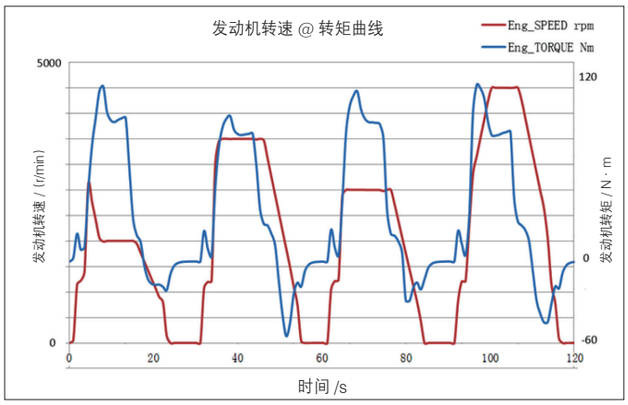

图 8 发动机在单个试验循环时间运行曲线

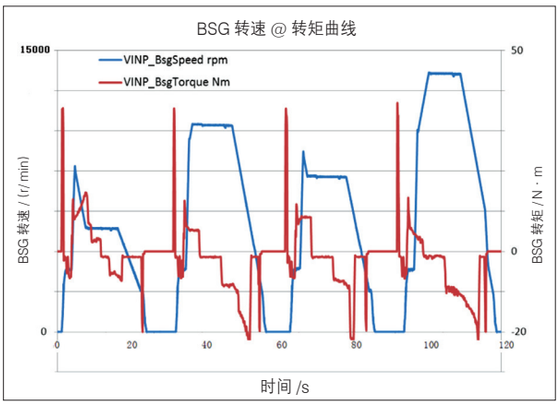

图 9 BSG 电机在单个试验循环时间运行曲线

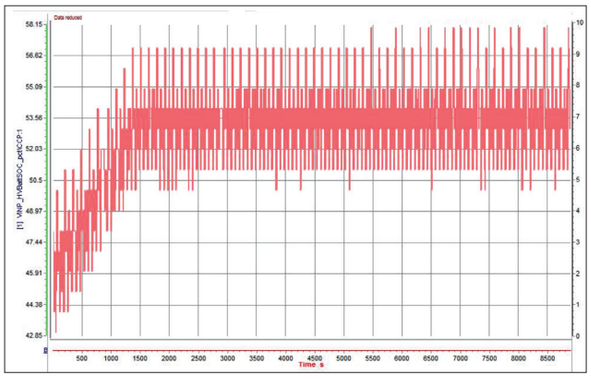

图 10 可靠性试验启动 3h 后 48 V 电池 SOC 变化曲线

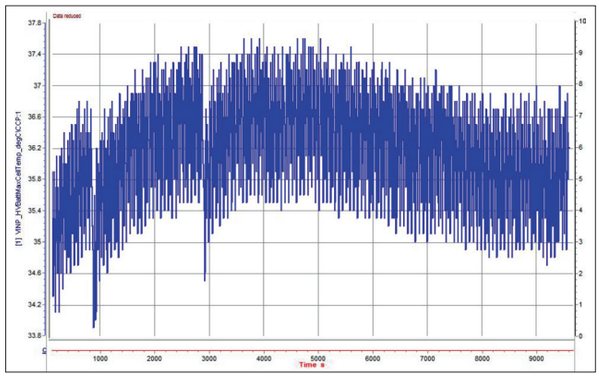

图 11 可靠性试验启动 3h 后 48 V 电池核心温度变化曲线

当于 30 万 km 整车里程，需要 2500 h，运行 7.5 万个试验循环。在发动机台架试验需要 125 天，约 18 周时间。而根据经验整车完成 30 万 km 的城市道路可靠性试验至少需要 3 年时间——156 周。可见，采用该可靠性试验方法，可以大大缩短产品的开发周期。同时，试验对 BSG 混动系统的考核工况以及试验强度均模拟整车在城市道路行驶时的工况，能够肯定试验验证的有效性。

（2）试验方法的测试

使用上述试验方法，在某款搭载 BSG 混动系统的小型增压汽油机上进行试验测试。经过 2500 个循环，即 1 万次起停测试确认。试验过程中运转稳定，由图 8 和图 9 可以确认，发动机与 BSG 在单个循环中发动机工况的过渡时间，稳定时间；BSG 电机起停时刻、助力转矩、能量回收转矩都按预定程序运行。说明试验在实际执行时，48 V 混动系统中的发电机和 BSG 电机可以准确按照设定的工况运行，达成可靠性试验考核的要求。

如图 10 所示为试验起动后 3 h 后，48 V 电池 SOC 的变化曲线。可以看到电池电量在试验起动后 30min 左右就趋于相对稳定状态，稳定在 50%~57%。同时，通过图 11 观察 48 V 电池温度同样也在试验启动 30 min 后趋于稳定状态，处于 35~38 ℃。说明从混动系统的能量控制上来看，试验具备长期稳定运行的条件。48 V 电池处于稳定的工作状态，可以确保混动系统的能量平衡。

通过对试验工况的测试，确认试验可以按照设定程序准确且持续地运行，试验过程数据也能够完整记录。认为该试验可以正常实现，能够用于 BSG 混动系统的可靠性试验开发。

结论

针对新技术，可以结合技术特点和特性，针对性地进行相关试验设计，有利于试验方法的拓展创新，有利于将技术从理念转变为产品。带 BSG 的 48 V 混动系统可能在今后一段时间成为节能减排的主流技术。本文通过对 BSG 系统特性及使用强度的分析，摸索一种针对 BSG 混动系统的发动机台架可靠性试验方法，能够大大缩短产品的可靠性开发的周期。并通过初步测试，确认了采用该试验方法的可行性。 AI

24-38 新能源汽车制造.indd 32 2023/4/8 20:14:02