以提高运输品质为目标的 JR 东日本 E235 系车辆（山手线）用车门系统

Passenger Door System for Series E235 Train of East Japan Railway Company (Yamanote Line) Designed to Improve Transportation Quality

辻村　勋 TSUJIMURA, Isao　　梅泽 幸太郎 UMEZAWA, Kotaro　　藤田　宪司 FUJITA, Kenji

铁路车辆用电动门系统是根据乘务员的开闭操作利用马达动力开闭车门的装置。富士电机向 JR 东日本投入运营的 E235 系车辆（山手线）提供了齿条小齿轮式车门系统。该车门系统与现有产品相比减少了永磁铁的用量，装置整体重量减轻了 14%。而且，通过削减调试部位和零件数量，成功减少了维护成本，降低了故障率。另外，通过改变锁定装置的方式兼顾了异物拔出特性和防撬性，并且通过改良控制程序提高了检测车门夹有异物时的灵敏度和检测拖拽异物的性能。

Electric door systems for rail cars are motor-powered devices for opening and closing passenger doors in accordance with the door operations of crew members. Fuji Electric has delivered rack-and-pinion type door systems to East Japan Railway Company for the Series E235 train (Yamanote Line), which started operation. The door system uses less permanent magnets than conventional products, thus reducing overall weight by 14%. Furthermore, by reducing the number of parts and adjustment points, the system reduces maintenance costs and failure rates. Moreover, by changing the type of locking device, the system achieves better obstruction pulling and anti-forced opening characteristics. Additionally, by improved control sequencing, the system is increased in sensitivity of obstruction detection and dragging detection.

1　引言

铁路车辆用电动门系统是根据乘务员的开闭操作利用马达动力开闭车门的装置。富士电机向 JR 东日本（东日本旅客铁路株式会社）2017 年 5 月 22 日投入运营的**图 1** 所示 E235 系车辆（山手线）提供了齿条小齿轮式车门系统。

该车门系统以实现轻量和低消耗功率的现有产品为基础，通过 2009 年 1 月设立的“改良型关门装置开发研讨会”对功能和性能进行改良而成。本研讨会的成员包括 JR 东日本的总公司部门、开发部门、车辆检修部门，另外还有车辆和车门系统制造商参加。研讨会上根据安全性、可靠性、维护性等相关要求事项，对新时代车辆用车门开展讨论，最后总结出开发理念[1]。该研讨会上讨论的部分要求事项和评估内容如下。

(a)　检测车门夹有异物时的灵敏度
　　检测灵敏度须超过现有设备
(b)　异物拔出特性
　　要能在停车时拔出障碍物
(c)　检测拖拽异物的性能
　　要能在发车时检测到拖拽所夹障碍物的状态
(d)　防撬性
　　要能在行驶时防止手动打开车门
(e)　维护性
　　要能降低维护频率，并简化维护

本文将对本车门系统为应对这些要求事项而实施的解决手段和采用的技术进行介绍。

2　装置概要

图 2 是车门系统的结构。本车门系统包含：马达，用作开闭门板的动力源；主体，用于存放将马达动力传递到门板上的齿条与小齿轮机构；锁定装置，用于在车门关闭状态下确保车门被锁死；控制装置，用于对马达和锁定装置进行控制；滑动式车门轨道，用于保持门板；以及车门悬吊件。

图 1　E235 系车辆的外观

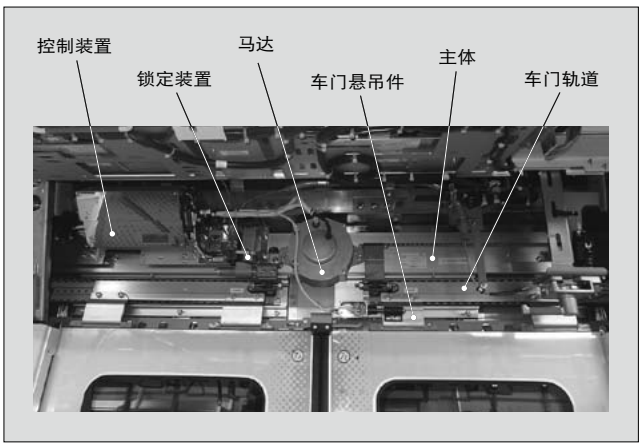

图 2　车门系统的结构

图 3　马达外观

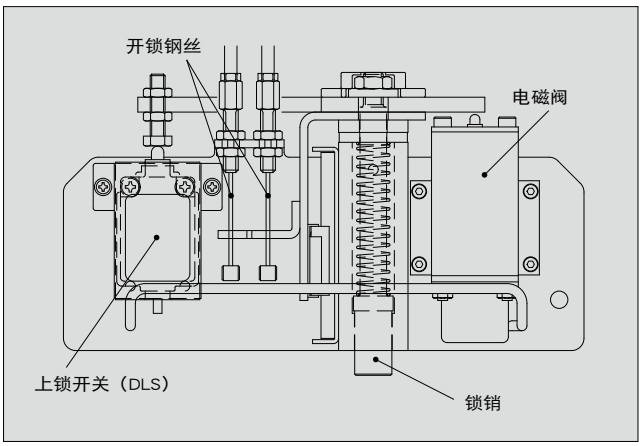

图 5　锁定装置的结构

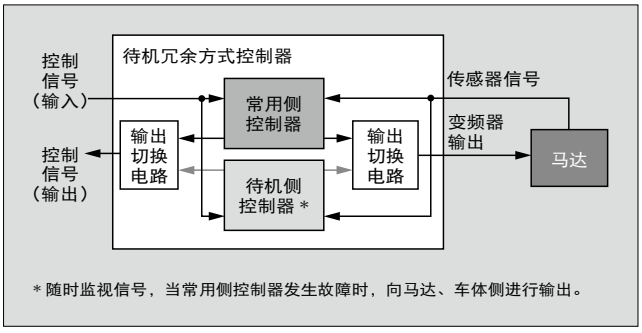

图 6　控制装置的基本结构

2.1　马达

针对本车门系统专门开发出了薄型永磁铁式马达（**图 3**）。该马达与现有线性马达相比可将永磁铁使用量减少到 1/10 以下。这样，车门系统整体重量便可减轻 14%。而且，位置分辨率、0 ～ 100% 推力响应、停止时挤压推力分别实现 0.01 mm、750 μs 和 500N。另外，通过内置密闭结构的高精度光学式编码器，提高了环境适应性和检测车门夹有异物时的灵敏度。

2.2　齿条小齿轮式车门系统

E231 系及 E233 系等车辆中采用了齿条与小齿轮。

如**图 4** 所示，齿条小齿轮式车门系统将小齿轮与马达轴直连，直接驱动上齿条与下齿条。这种没有变速齿轮的简单机构削减了零件数量，减少了机器故障，从而提高了可靠性，进而降低了维护成本。而且，可以最大限度地发挥马达控制性能，通过采用高精度编码器提高了检测性。存放该齿条与小齿轮机构的主体沿袭了已考虑到粉尘环境和振动环境的现有车辆用车门系统的结构。

2.3　锁定装置

图 5 是锁定装置的结构。在门板位于车门关闭位置的状态下降下锁销与锁孔插合，将门板维持在关闭状态。执行车门打开动作时，根据控制装置发出的指令用电磁阀将锁销升起，执行开锁动作。另外，在维护和紧急时，操作设置在车内与车外的开锁把手，经由开锁钢丝将锁销升起，进入开锁状态。这种没有多余结构的锁定装置可提高上锁及开锁时动作程序的自由度。而且，与内置在控制装置中的软件进行组合，可执行各种动作，提高检测性。

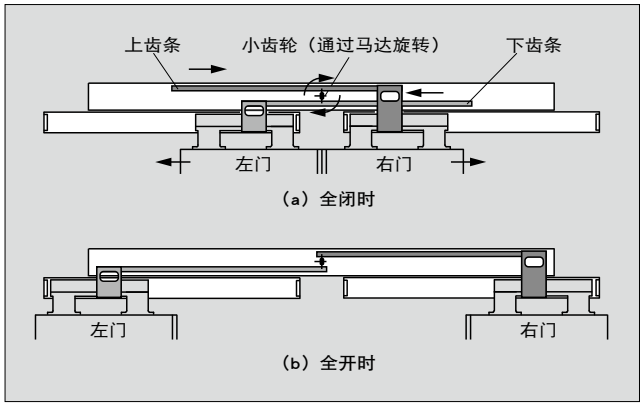

图 4　齿条小齿轮式车门系统的原理

2.4　控制装置

控制装置采用了待机冗余方式，万一发生故障也能继续执行开闭动作，而无需降低功能和性能（**图 6**）。而且，与上位装置的通信实现了高功能化和高容量化。

控制装置使用了最新的电子元件，增加各种功能后，仍然能够将体积减小到现有机型的一半以下。运用这种小型化技术可以将控制装置安装到关门装置主体上，实现一体化，减少了车体安装作业的人力，节省了配线。

3　装置特点

3.1　兼顾异物拔出特性与防撬性

表 1 是异物拔出特性与防撬性所要求功能的比较。车门系统被要求拥有两种相反的功能，停靠车站状态下要具有异物拔出特性，车辆行驶过程中要具有防撬性。

针对所要求的这些功能，现有电动门系统利用锁定装置在车门关闭状态下减小马达功率，降低消耗功率。另外，在没有接通电源或者对马达施加超过额定的外力时，可利用锁定装置维持车门关闭状态。这种传统电动门系统的异物拔出特性和检测拖拽异物的性能较差，一旦上锁就不能凭人力打

表 1　要求功能的比较

要求功能	有效条件	要求内容
提高异物拔出特性	停靠车站、从车站出发时	可拔出被夹障碍物，相应地可便于打开车门
提高防撬性	车辆行驶中	相对于车辆振动、人为破坏等外部因素要能稳固维持全闭状态

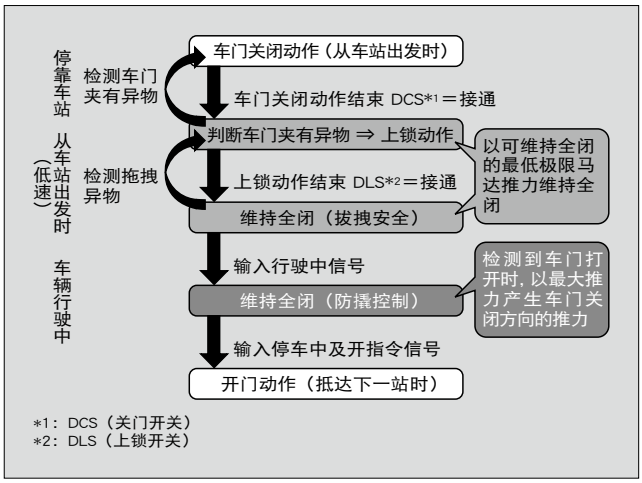

图 7　车门关闭及上锁动作的动作程序

开车门。过去为了提升异物拔出特性，而调节锁定装置将上锁位置扩大，但是车门全闭时门缝变大，防撬性降低。

为了解决该问题，我们对车门系统的要求功能进行彻底调查，将锁定装置的上锁位置扩大到能够确保充分拔出异物的尺寸。设计方针是将重点只放在上锁功能上，以此来对锁定装置进行简化，利用马达推力产生的随时挤压功能来维持全闭状态。**图 7** 是关门与上锁的动作程序。在车辆出发前的停靠车站状态下采用的马达推力要能维持全闭状态，并考虑到异物拔出特性和检测拖拽异物的性能。行驶过程中采用的马达推力要能维持全闭状态，并考虑到防撬性。

另外，为实现防撬性，而采用了推回控制[2]。当瞬间判断出有强行打开车门的外力时，通过稳固推回来阻止[3]。

3．2　车门夹有和拖拽异物的课题

检测车门夹有和拖拽异物（车辆在车门夹有异物下开动的状态）是关乎乘客安全的重要功能。这些功能导致的误检测和误动作会直接引起车辆运行延迟，因此要求其具有较高的可靠性。

电动门系统通常利用车辆内的上锁开关（DLS：Door Lock Switch）和关门开关（DCS：Door Close Switch）来检测车门是否全闭且没有夹入异物，而且已处于上锁状态。利用这些开关的串联电路与车辆行驶相关装置进行联锁，可以用于点亮车辆侧面通知车门打开的车侧灯和驾驶台上的车门关闭通知灯。

在彻底调查检测性所要求功能的过程中，发现现有车门系统在夹有宽度较窄的障碍物时，车门关闭通知灯会瞬间点亮，同时车侧灯会瞬间熄灭。门边橡胶因惯性被压变形或者门板歪斜，导致车门上部达到全闭位置后会立即上锁（DCS 与 DLS 都接通），惯性消失后只有 DCS 关断。我们发现夹有障碍物的位置越低，马达推力越大，该动作越明显，车门关闭通知灯越容易发生瞬间点亮（**图 8**）。这种瞬间动作可能引起乘务员的误认和误判断，因此在提高检测性能的同时一并采取了对策。

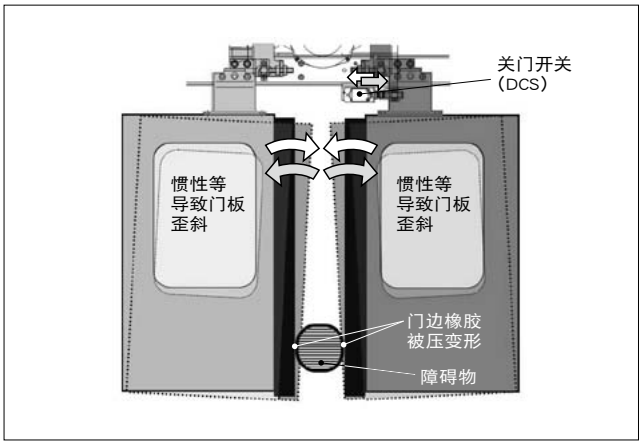

图 8　车门关闭通知灯瞬间点亮的原因

3．3　改良检测车门夹有异物的程序

考虑到以下情况，对抗外部干扰性能较强的检测动作程序进行了研究。

(a)　在惯性消失前维持开锁状态。

(b)　在判断车门是否夹有异物时，将马达推力降低到可保持车门关闭状态的最低极限。

(c)　上锁时施加可切实上锁的马达推力。

图 9 是过去的车门夹有异物检测动作程序，**图 10** 是新的车门夹有异物检测程序。过去的程序是继 DCS 接通之后，以机械方式执行上锁动作，DLS 变为接通，并通知车体侧全闭车门和上锁。无论控制装置识别到哪种车门夹有异物检测状态，都会执行上锁动作。因此，虽然会检测到不妨碍上锁的较薄障碍物，但检测信息不会传递到车体侧。

另一方面，新的检测动作程序，在从 DCS 接通到执行上锁动作之间设有一定的等待时间。这样，在确认没有因乘客拔出被夹异物而导致车门微开后，可以将锁定装置上锁，而且可以排除门板惯性等造成的外部影响。换句话说，只有在 DCS 持续接通的情况下，识别到没有障碍物后，锁定装

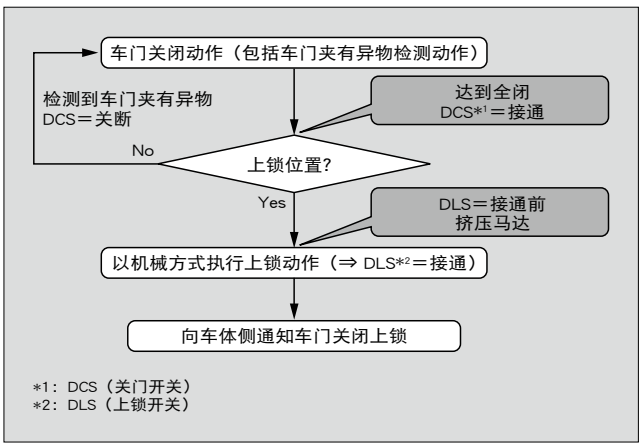

图 9　过去的车门夹有异物检测程序

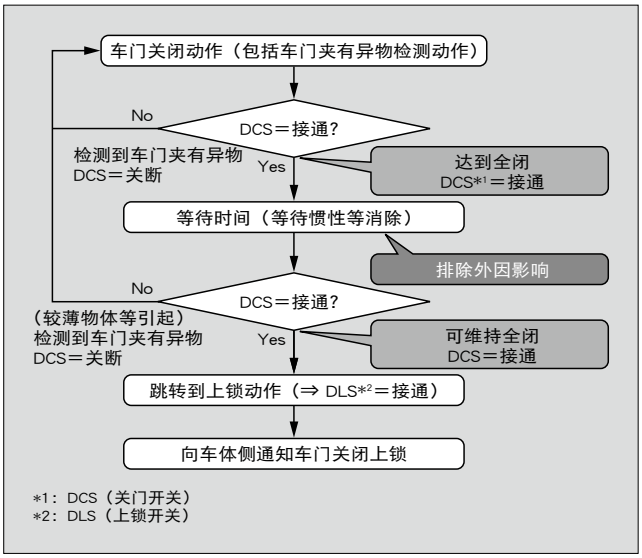

图 10　新车门夹有异物检测程序

置才会上锁。与车辆行驶相关装置的联锁电路可直接接收 DCS 与 DLS 的信号，检测是否处于车门全闭且上锁的状态。控制装置检测到车门夹有异物时，确认车门没有全闭，并再次返回车门关闭动作，因此可通知联锁电路已处于车门夹有异物检测状态。

4　评估试验结果

本次开发的车门系统使用 JR 东日本的车辆实际尺寸模型和实际车辆开展评估试验。

在车辆实际尺寸模型中以模拟车辆正在行驶的信号条件开展撬开门板的评估试验。为防止车门打开，应确认稳固维持车门关闭状态，通过有意执行方式 DCS 没有关断。在检测撬开时马达推力的上升动作中，也可根据动作时的位置、速度、推力的控制信号，确认到良好的响应性。

我们对实装新车门夹有异物检测程序和新型锁定装置的试制机开展了评估试验。**表 2** 是评估试验结果的比较。从评估结果可见，夹有较薄障碍物时瞬间点亮的情况得到抑制，而且与富士电机现有装置相比，检测车门夹有异物的灵敏度和检测拖拽异物的性能都很高，安全性得到提升。

表 2　评估试验结果的比较

	全闭位置附近检测车门夹有异物的灵敏度	检测拖拽异物性能（检测时的拔拽力）
现有产品的实绩	15 mm 检测、10 mm 上锁有瞬间点亮动作	用 DCS 无法检测
新方式的测定结果	8 mm 检测、7 mm 上锁没有瞬间点亮动作	用 DCS 可检测（拔拽力：100 N）

5　后记

着手开发该车门系统 8 年半，期间积累了大量规格研究和试制验证方面的经验，对功能和性能进行了彻底修整，从而得以提供改良后的车门系统。实装该车门系统的 E235 系山手线量产车辆于 2017 年 5 月 22 日开始运营，计划在 2020 年春季前将共 49 列（539 辆、共计 4312 台）车辆依次投入运营。

我们为本技术建立平台，在此基础上，根据各地区、各事业者的要求推展系列产品，进一步提高安全性和可靠性，继续不断改良车门系统。

今后，富士电机将继续为环保铁路系统的安全、稳定运输、舒适运行输送可提供支持的产品，不断为提高社会生产力做出贡献。

最后，谨向在该车门系统规格研究、开发、试验等各项工作中给以我们指导和帮助的 JR 东日本（东日本旅客铁路株式会社）等各位相关单位表示诚挚的感谢。

参考文献

⑴　前田賢二ほか. 戸閉装置の変革（改良型戸閉装置の開発）. JR East Technical Review. 2015, no.53, p.23-28.
⑵　稲玉繁樹ほか. 電気式戸閉装置のロック機構簡素化を目指した押し返し制御. 第 20 回鉄道技術・政策連合シンポジウム. J-RAIL2013 S5-1-1, (2013).
⑶　稲玉繁樹ほか. 外力抑制制御によりラッシュ時の戸閉遅れを解消する電車用ドアシステム. 第 18 回鉄道技術・政策連合シンポジウム. J-RAIL2011 S5-2-4, (2011).

辻村　勛
通过旋转机 / 发电机、线性马达的设计工作，从事铁路车辆用车门装置的设计。现为富士电机株式会社电力电子系统事业本部生产统括部铃鹿工厂车辆及产业可变速部主查。

梅泽 幸太郎
通过设施设备相关工程工作，从事铁路车辆用电机产品工程工作。现为富士电机株式会社电力电子系统事业本部生产统括部铃鹿工厂车辆及产业可变速部经理。

藤田　宪司
通过电力电子设备相关的开发工作，从事铁路车辆用车门的工程工作。现为富士电机株式会社电力电子系统事业本部运输系统事业部运输机器部主任。电气学会会员。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。