

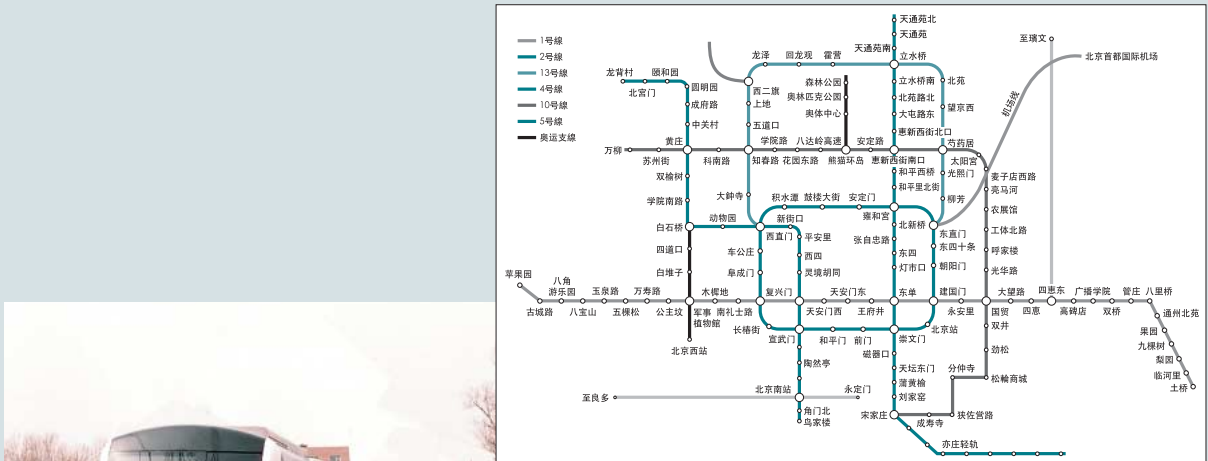
中国の地下鉄を支える 低環境負荷車両用電気品・空調装置

Environmentally-friendly On-board Electric System for Subway System in China

方少軒 Fang Shaoxuan
朱宝泉 Zhu Baoquan

大友芳夫 Yoshio Otomo
浅田豊樹 Toyoki Asada

君嶋寛久 Hirohisa Kimijima
藤井克彦 Katsuhiko Fujii



北京地下鉄建設計画路線図案



北京地下鉄5号線TP4000系電車

図1 北京地下鉄5号線車両の外観と北京地下鉄建設計画路線図案
日立製作所は、北京地下鉄5号線の車両に搭載する電気品を一括受注した。これは北京地下鉄13号線で納入した実績が評価された結果である。

中国の首都北京市は2008年の北京オリンピック開催に向けて、交通関連設備の拡充整備を進めている。その中核の一つが北京市内の都市内軌道交通網の整備である。

日立製作所は、この中で、中国政府と北京市がオリンピック開催に合わせて建設開業する最初の地下鉄である北京地下鉄5号線の車両電気品一式を受注・納入した。

日立製作所は、同13号線車内電気品の製作を担当しており、これはその実績が評価された結果である。

1.はじめに

中国では都市交通の渋滞解消と環境改善計画の一環として、都市軌道交通の充実を図るために各都市の地下鉄が計画されており、すでに北京、上海、天津に加え、他の都市で

も営業運転されている。

現在、北京市の都市軌道交通は、天安門を東西に貫く1号線、中心部環状線の2号線、1号線の東に続く八通線および北西部の学園地域や北部・北東部の住宅地域を結ぶ13号線の4路線の116.9 kmが営業している。日立製作所が一括受注した北京地下鉄5号線のほか、10号線、4号線、空港線の4路線が北京オリンピックの開催に合わせて建設中で、5号線は北京オリンピック開催に合わせて建設開業する最初の地下鉄である。なお、13号線車両電気品は日立製作所が製作を担当したもので、その実績が評価されて5号線車両電気品の一括受注に至った。

5号線の車両は6両3M3T編成であり、合計192両を製作した。車両(車体・台車・装)は、中国の長春軌道客車股份有

限公司以設計して126両を製造し、北京車両廠が66両を製造した。日立製作所は車両駆動用VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータ装置と主電動機、補助電源装置、空調装置、列車監視システム、駆動装置およびブレーキシステムを担当し提供した。

ここでは、省エネルギーや保守性、環境性の向上など低環境負荷対応を指向した、北京地下鉄5号線の車両電気品の技術的な特徴について述べる。

2. 北京地下鉄5号線の概要

北京地下鉄5号線は、北京市中央東部を南北に貫く路線で、南部の豊台区宋家荘から始まり、旧北京城の東側の商業と大使館地区を通り、北部の住宅地のある昌平区の太平荘北に至る全長27.6 km、23駅の路線である。地下線路は14.7 km(全線の53%)で16駅が設置され、地上および高架線は12.9 km(全線の47%)で7駅が設置される。太平荘に車両基地、宋家荘に留置線を設け、途中、南から2号線、1号線、2号線、10号線、13号線に5回接続する。図1(右)は、北京地下鉄建設設計画路線図案である。

表1 主要車両諸元表

給電電圧・集電方式、軌間、車両編成など主要車両の諸元を示す。

項番	項目	内容
1	給電電圧・集電方式	DC750 V, 第三軌条集電
2	軌間(mm)	1,435
3	車両編成	3M3T編成(Tc+M+T+M'+M'+Tc)
4	車両寸法(mm)	長さ:19,000, 幅:2,800, 高さ:3,800, 台車間距離:12,600
5	定員(人)	Tc車:22(座席36), M車・M'車・T車:24(座席42)
6	設計車両重量(t)	Tc車:30, T車:約29, M車・M'車:35
7	最高運転速度	80 km/h
8	台車・歯車	ボルスタレス式空気バネ台車, 駆動歯数比:7.69, 車輪径:840 mm(新製時)・770 mm(最大摩耗時), 軸軌:2,200 mm
9	主電動機	交流かご型発動機:180 kW
10	VVVFインバータ装置	PWM変調ベクトル制御三相出力IGBT・VVVFインバータ制御方式。電力回生制御付き(変電所電力吸収装置と協調制御)。制御容量:1,400 kVA, 主電動機2群接続(1-3, 2-4)
11	制動装置	電力回生・空気制動併用制御方式, 滑走制御機能付き。電動空気圧縮機:720 L/分間
12	補助電源装置	容量160 kVA, 出力:380 V 三相50 Hz, DC110 V, DC24 V
13	車両監視装置	情報収集・記録表示および補助制御機能, 乗務員支援機能, 保守員支援機能
14	空調装置	25,000 kcal/h × 2台/両
15	車載設備	ATO列車自動運転システム, ATP列車自動防護システム, 車載無線通信

注:略語説明 Tc(Trailer Car with Cab), M(Motor Car), T(Trailer Car)
 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)
 PWM(Pulse Width Modulation)
 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)
 ATQ(Automatic Train Operation), ATP(Automatic Train Protection)

表2 車両運転性能

最高運転速度、平均運転速度など車両の運転性能を示す。

項番	項目	内容
1	最高運転速度	80 km/h ~
2	平均運転速度	50 km/h ~ (典型的な区間, 駅停車時間含まず。)
3	表示速度	36 km/h ~ (駅停車時間30秒)
4	平均加速度	0 ~ 40 km/h, 0.83 m/s ² ~ 0 ~ 80 km/h, 0.5 m/s ² ~
5	平均減速度	80 ~ 0 km/h 常用最大ブレーキ 1.0 m/s ² ~ 快速ブレーキ 1.2 m/s ² ~ 緊急ブレーキ 1.2 m/s ² ~
6	ジャーク量	0.75 m/s ³ 以下(緊急ブレーキと主回路保護動作時を除く。)

同路線は、2007年10月7日全線開通し、192両が順調に営業運転を行っている。

3. 車両概要および車両運転性能

車両外観を図1(左)に示す。車両はTc車(Trailer Car with Cab), M車(Motor Car), T車(Trailer Car)の3車種で構成されている。主要車両諸元表は表1に、車両運転性能は表2にそれぞれ示すとおりである。

4. 車両概要および車両運転性能

北京地下鉄5号線電車は直流750 V第三軌条集電方式で、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)素子使用のVVVFインバータによる交流電動機駆動方式を採用した。駆動制御には速度センサーレスベクトルおよび全電気ブレーキ停止制御技術を採用した。このベクトル制御技術の採用により、応答速度が速くなることで回生率向上と粘着性能向上が実現した。交流誘導電動機駆動方式とVVVFインバータを採用したことにより、省エネルギーや保守性、環境性の向上などが実現した。当該システムの構成および特徴について以下に述べる。

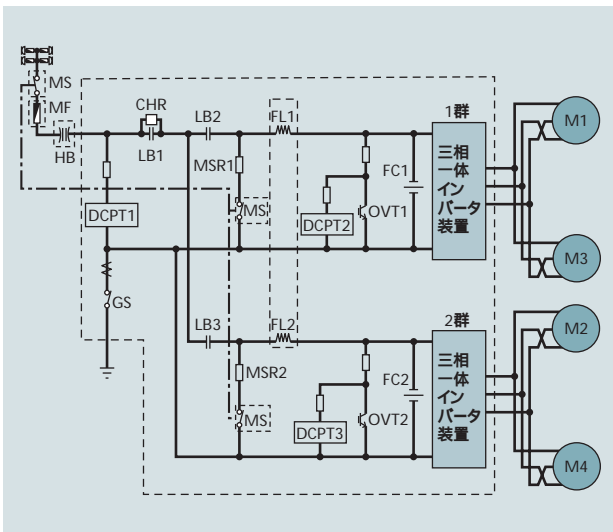
4.1 構成

- (1) VVVFインバータ装置の主回路システムは、2個モータ並列制御×2群方式とし、1~3位の駆動電動機および2~4位駆動電動機に独立して電力を並列供給する。
- (2) インバータ制御方式は、2レベルインバータ方式で、180 kWの誘導電動機2台の並列運転とした。VVVFインバータ装置の主回路ツナギを図2に、主要仕様を表3にそれぞれ示す。

4.2 特徴

- (1) 速度センサーレスベクトル制御

速度センサーレスベクトル制御は、電圧、電流から速度を推定制御するため、速度センサーが不要になる。このため、速度センサーの保守が不要となり、部品数が削減できること



注:略語説明 MS(Main Switch), MF(Main Filter)
 HB(High Speed Line Breaker), DCPT(DC Potential Transformer)
 GS(Ground Switch), CHR(Charge Resistor), LB(Line Breaker)
 MSR(Discharge Resistor), FL(Filter Reactor)
 OVT(Over Voltage Transistor), M(Motor)

図2 VVVFインバータ装置の主回路の概要
 主回路システムは、2個モータ並列制御×2群方式としている。

表3 VVVFインバータ装置の仕様
 仕様素子、制御方式などVVVFインバータ装置の主な仕様を示す。

項目	仕様
使用素子	IGBT素子
制御方式	三相電圧形2レベルPWM変調インバータ 全電気ブレーキ停止制御 速度センサーレスベクトル制御
主電動機	三相180 kW誘導電動機2台並列×2群接続 小型軽量フィルタレス・回転速度センサーレス
インバータ出力容量	1,400 kVA(最大724 kVA×2群)
運転指令信号	PWM変調信号
冷却方式	自然冷却(部品点数削減、保守低減・信頼性向上)

で車両全体の信頼性向上につながる。同時に、ベクトル制御を採用して制御精度を高めることにより、電動機制御の応答速度が向上して車輪の粘着利用率を最大限に利用できる。

(2) 全電気ブレーキ停止制御

車両の減速停止時の乗り心地の向上、ブレーキ鳴き騒音低減を目的に、全電気ブレーキ停止制御を採用した。この制御は速度0 km/h付近の停止の間際まで電気ブレーキが可能なブレーキ制御方式であり、列車が停止する間際まで電気ブレーキを動作させることができる。もし、電気ブレーキ力が不足あるいは失効した場合は、空気ブレーキで補足あるいは切り替える。電気ブレーキと空気ブレーキはスムーズに自動的に切り替えられ、ジャークを最少にする。この制御により、ブレーキ制輪子の消耗が減少し、かつ電力エネルギー節約のための電力電気回生ブレーキの役割が向上した。

(3) 保守性

インバータ装置は車体片側から取り扱えるように、進行方向に長い「長手箱構造」とした。インバータ装置内には、断流器

も内蔵し、ぎ装配線を削減してさらに、TMS(Train Monitor System)装置の端末局を内蔵することにより、VVVFインバータ装置とTMS装置のぎ装配線削減、箱集約による小型化、および論理部とTMS端末装置の近接配置による保守性向上を図った。インバータ装置の外観を図3に示す。

(4) PWM運転指令信号

運転指令の信号にPWM(Pulse Width Modulation)信号方式を適用し、ぎ装指令線の削減と指令信号信頼性の向上を図っている。これは、主幹制御器からアナログ電圧信号を出力し、そのアナログ電圧信号をエンコーダ装置でPWM信号に変換し、各車両のVVVFインバータ装置、ブレーキ装置にPWM信号を送信する。さらに、エンコーダ装置はアナログ信号以外に、主幹制御装置、ATO(Automatic Train Operation)装置、ブレーキ装置からデジタル信号を受け、(1)主幹制御器による手動運転、(2)ATO運転、(3)機関車による車両回送率(けん)引運転の3種類の運転モードに切り替えることができる。

4.3 補助電源システム

補助電源システムは空調装置、暖房装置、照明、バッテリーの充電、各システムの制御電源、列車監視システム、車上用信号装置、通信装置の電源に用いる。構成および特徴は以下のとおりである。

(1) 構成

補助電源装置の主回路システムは、高速度遮断器にIGBT素子を適用し、DC(Direct Current)フィルタ回路、パワーユニット、AC(Alternating Current)フィルタ回路、トランスで構成した。2レベルインバータ制御方式で160 kVAの出力容



図3 VVVFインバータ装置の外観
 VVVFインバータ装置の外観を示す。車体片側から取り扱えるように「長手箱構造」としている。



図4 補助電源装置の外観
 補助電源装置の外観を示す。並列運転制御方式を採用し、三相出力線を常時接続しているため、1台の補助電源装置が停止した場合でもすべての車両が停電することはない。

表4 補助電源装置の仕様

出力電圧,インバータ出力容量など補助電源装置の主な仕様を示す。

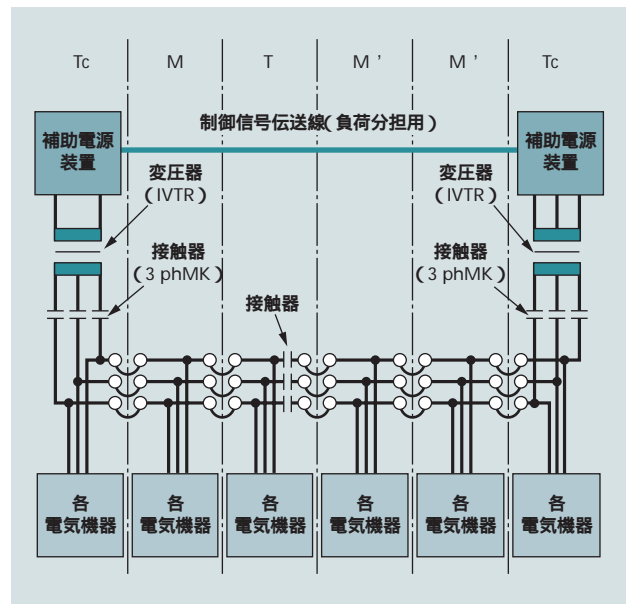
項目	仕様
出力電圧	AC380 V 三相50 Hz ,DC110 V ,DC24 V
インバータ出力容量	160 kVA
制御方式	三相電圧形2レベルPWMインバータ 並列運転方式
高速度遮断器	IGBT素子を使用
冷却方式	自然冷却(部品点数削減,保守低減・信頼性向上)

量とした。DC110 V,DC24 Vは,信頼性を高めるために,AC380 Vから整流するAC/DC変換とした。補助電源装置の外観を図4に,補助電源装置の仕様を表4にそれぞれ示す。

(2) 特徴

(a) 補助電源装置を並列に接続して給電する並列運転制御方式を採用した。この並列運転制御では三相出力線を常時接続しているため,1台の補助電源装置が停止した場合でもすべての車両が停電することはない。すなわち,第三軌条レールのセクション通過時に片側の補助電源装置の直流入力が停電した場合でも,列車全体に安定して給電を続けることができる。補助電源装置のシステム構成図を図5に示す。

(b) 2台の静止型インバータが正常な場合,静止型インバータは2台の静止型インバータの間で負荷分担情報を通

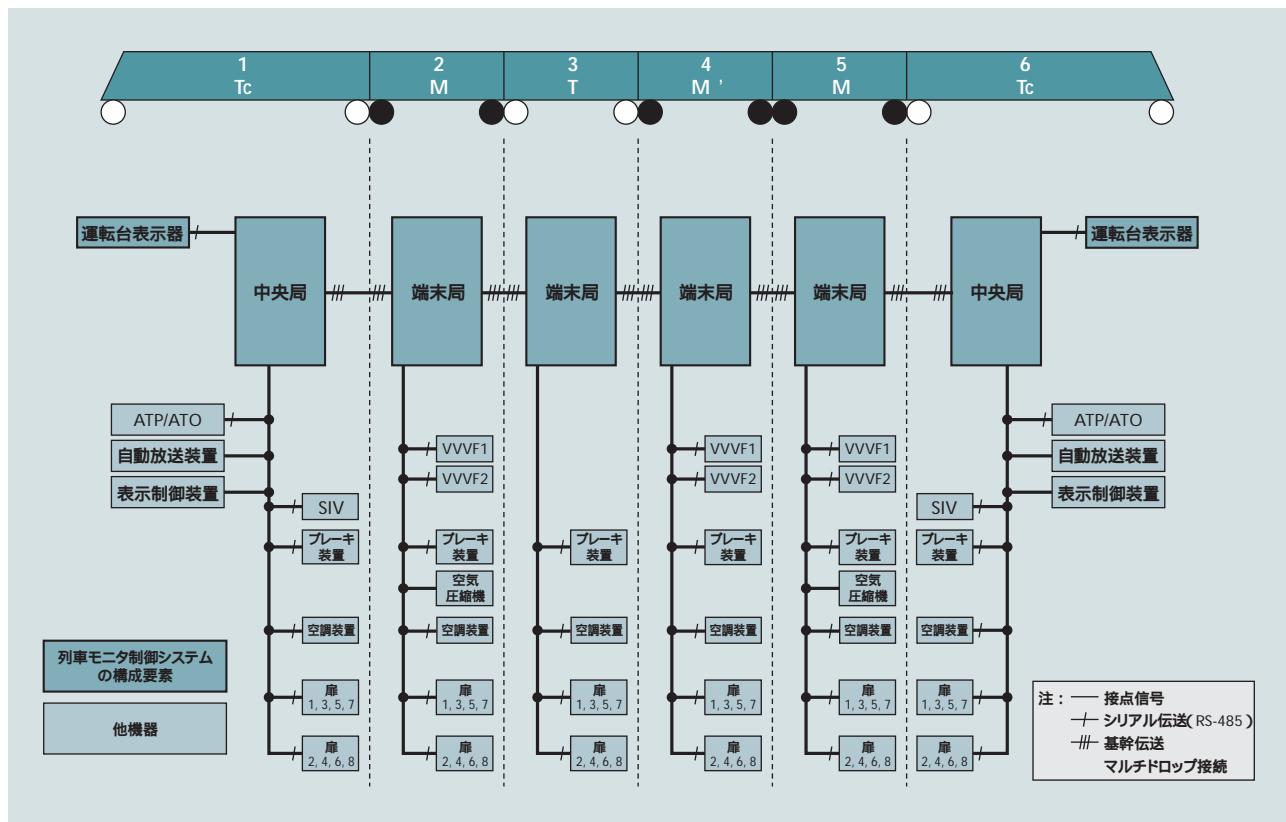


注:略語説明 IVTR(Inverter)

図5 補助電源装置のシステム構成

空調装置や,列車監視システム,車上用信号装置,通信装置の電源などに用いる補助電源装置のシステム構成を示す。

信し,負荷に最適な電源を供給する。静止型インバータ1台が故障した場合,もう1台の正常な静止型インバータが6両編成の負荷に給電する。そのとき,空調装置の負荷は半分に低減する。



注:略語説明 SIV(Static Inverter)

図6 車両監視システムの構成

車両監視システムは,運転台表示器,Tc車にある監視中央装置,およびM車とT車にあるVVFインバータ,受給電装置内に搭載している監視端末装置から構成される。



図7 TMS運転台表示の一例

仕業情報(a),異常表示(b),故障記録表示(c)の画面例をそれぞれ示す。

高速度遮断器(IVHB Inverter High Speed Breaker)にIGBT素子を適用し,補助電源装置内に高速度遮断器を内蔵することで,補助電源装置の小型,軽量化を実現した。

5 車両監視(TMS, モニタ)システム

車両監視システムは,情報収集,記録と表示を行うシステムで,これに加えて空調などの補機制御機能などを有した高機能タイプである。従来の機能に加え,乗務員支援機能,保守員支援機能を強化することにより,車両の運用および保守の効率向上を図った。列車の主な設備の運行状態および故障に対し,自動的に情報を収集,記録と表示をする。読み出し器からデータを読み込み,結果をプリントアウトできる。

(1) 構成

このシステムは,運転台のタッチ式LCD(Liquid Crystal Display)カラー液晶パネル,Tc車にある整流装置内に搭載の監視中央装置,およびM車,T車にあるVVVFインバータ,受給電装置内に搭載の監視端末装置から構成される。それらは伝送速度2.5 Mビット/sの基幹伝送路によって接続される。基幹伝送には,汎用技術であるARCNET(Attached Resource Computer Network)を採用することで,回路を小型化し,かつ高信頼の伝送路を実現した。各中央局および端末局は,RS-485シリアル伝送インタフェースを有しており,インバータやブレーキ装置,空調装置などの各種搭載機器と双方向通信を行う。伝送プロトコルはHDLC(High-Level Data Link Control Procedure)準拠とすることで,国際的な各機器とのシリアル通信を実現した。また,車体の各ぎ装線信号取り込みは,パラレルI/Fを介して行う。その構成を図6に示す。

(2) 機能と特徴

- (a) 列車は車両基地を出るまで,扉の開閉試験,列車起動試験,制動試験などの出庫点検機能が実施できる。また,列車の主要状況を表示できる。
- (b) 自己診断機能があり,システムが起動するとき,自動的に診断し,その結果をモニタに表示する。
- (c) 乗務員業務支援機能があり,従来の運転士向けの車

両情報表示機能のほかに,列車の仕業情報(運転ダイヤ情報)を表示する「仕業票表示機能」を実装した。列車状態の表示,終着駅と現在駅の設定,故障情報や処理指令と運行図面情報の表示,空調装置温度および冷房の設定などといった乗務員業務支援機能がある。

(d) 保守支援機能があり,試運行測定と故障の記録が実施できる。従来の機器モニタ表示機能に加え,車体および機器の動作情報を周期的に記録する運転データ記録機能,VVVF装置の力行・回生電力や,SIV(Static Inverter)の消費電力,列車の走行距離などを記録する積算記録機能,加速度,減速度および制動距離が測定できる試運転機能などを有しており,保守管理の利便性を向上している。また,ドア開閉検査,SIVシステム検査,ブレーキ検査,空気圧縮機検査,自己診断などの車上検査機能もある(図7参照)。

6 空調装置

空調装置は屋根上に取り付け,車両限界内に収めるため,薄型ユニット式空調装置を採用した。空調装置は5万kcal/h/両の冷房能力を有し,車両ごとの冷房能力は2万5,000kcal/hの空調装置2台/車両を,それぞれ屋根上両端に取り付けている。空調装置外観を図8に示す。

空調装置ごとに冷凍サイクル3セットを含み,3セットで蒸発



図8 空調装置の外観

空調装置の外観を示す。車両限界内に取り付けるため,薄型ユニット式空調装置を採用した。

器1台を共用する。そのため冷房段数は強冷(100%)・中冷(66%)・弱冷(33%)・送風の4段階制御であり、従来より1段階多く、よりきめ細かい最適温度制御とエネルギー削減が期待できる。

7 おわりに

ここでは、省エネルギーや保守性、環境性の向上など、低環境負荷対応をめざした車両電気品の技術的な特徴について述べた。

北京地下鉄5号線TP4000系電車のプロト車2編成は2006年4月に完成し、同年4月から5月の間、中国長春軌道客車股份有限公司内試験線でのプロト2編成車両の走行試験を通じて列車の主要性能を確認した。また2007年3月から4月の間に本線で最終確認試験を実施して所定の性能を確認し、同年10月7日に営業運転を開始した。

執筆者紹介



方少軒
北京城市軌道建設有限公司, 車両部 副総工程師



朱宝泉
北京城市軌道建設有限公司, 車両部 高級工程師 5号線プロジェクトマネージャ



大友 芳夫
1979年日立産機エンジニアリング株式会社(現 株式会社日立プラントテクノロジー)入社, 日立製作所 電機グループ 交通システム事業部 中国プロジェクト室 所属
現在, 鉄道車両, 車両・電気システム事業化取りまとめに従事

日立製作所は、北京市に、北京地下鉄13号線に続き5号線の車両電気品を納入した。これらの電気品が2008年8月の北京オリンピック開催時の乗客輸送の成功と北京市軌道交通のさらなる発展に貢献できることを期待する。

終わりに、北京地下鉄5号線車両の実現にあたって、ご指導いただいた北京地下鉄建設公司、北京地下鉄運営公司および車両全体取りまとめの長春軌道客車股份有限公司の関係各位に厚く御礼・感謝する次第である。

参考文献

- 1) 方, 外: 北京地下鉄5号線TP4000系電車概要(上)(下), 鉄道車両と技術 N0124, 125(2007.1, 2)
- 2) 関沢, 外: 北京地下鉄5号線電気品システム, 鉄道サイバネティクス2006年度論文
- 3) 伊藤, 外: 北京地下鉄5号線TMSシステム, 鉄道サイバネティクス2006年度論文
- 4) 方, 外: 北京地下鉄13号線H4000系電車概要, 鉄道車両と技術(2004.1)



浅田 豊樹
1992年日立製作所入社, 電機グループ 交通システム事業部 水戸交通システム本部 所属
現在, 鉄道車両, 駆動電気システム設計取りまとめに従事



君嶋 寛久
2000年日立製作所入社, 電機グループ 交通システム事業部 水戸交通システム本部 所属
現在, 鉄道車両, 車上制御システム設計取りまとめに従事



藤井 克彦
1999年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所 電機プラントシステム部 技師
現在, 鉄道車両, 電動機設計取りまとめに従事